

第106研究部会

船舶の高度集中制御方式の研究 報 告 書

(その1 航 法 シ ス テ ム)

昭 和 44 年 3 月

社 団 法 人
日 本 造 船 研 究 协 会

本報告書に記載されている研究成果は、第106研究部会による「船舶の高度集中制御方式の研究の実施に伴い完成された発明等およびノウ・ハウの取扱いに関する取決め」に基づき取扱われることになりますので、本報告書の内容の一部または全部の外部発表・転載等については、本会事務局にご連絡の上、本会の事前の承認が必要です。

はしがき

本報告書は日本船舶振興会の昭和43年度補助事業「船舶の高度集中制御方式の研究」として日本造船研究協会が第106研究部会においてとりまとめたものである。

本研究は航法、ぎ装、タービンプラント、ディーゼルプラント、コンピュータと5つのシステムについて、それぞれ分科会を設置して検討しており、これらを一冊の報告書としてまとめるほどう大なものとなるので、本年度はとりあえず各システムごとに報告書をまとめることとし、本書はそのうち航法システムについてとりまとめたものである。

第106研究部会委員名簿（敬称略、順不同）

部会長	山下 勇（三井造船）	芥川輝孝（日本船舶振興会）
委員	青山三郎（日本船主協会）	甘利易一（日本舶用機器開発協会）
	安積健次郎（電子航法研究所）	大江卓二（船舶技術研究所）
	三嶋虎一（大阪商船三井船舶）	黒川正典（日本郵船）
	岡田正三（大阪商船三井船舶）	真田 良（日本船主協会）
	佐藤美津雄（運輸省）	高橋百千（日本船舶機関士協会）
	高田正夫（日本船長協会）	千葉宗雄（航海訓練所）
	土井正三（浦賀重工業）	土屋正雄（電子機械工業会）
	中村常雄（佐世保重工業）	土井由之（日本船主協会）
	埴田清勝（日本鋼管）	長谷川鍵二（川崎重工業）
	矢野鎮雄（旧藤井義六 石川島播磨重工業）	原三郎（日本海事協会）
	福田英夫（日立造船）	丸尾卓志（日本郵船）
	元良誠三（東京大学）	山口宗夫（三菱重工業）
	山田一（日本造船工業会）	横田利雄（東京商船大学）
	吉識雅夫（日本学術振興会）	宇田川達（旧吉沢清志 日本航海士会）

第106研究部会幹事会委員名簿（敬称略、順不同）

委員	荒瀬晃二（三井造船）	大川喜伴（浦賀重工業）
	唐沢康人（石川島播磨重工業）	神原民之助（日立造船）
	久津間裕良（運輸省）	児島英彦（佐世保重工業）
	宗田啓一（三井造船）	高柳武男（三井造船）
	樋口道之助（日本钢管）	平田胤幸（日本钢管）
	平野美木（川崎重工業）	丸尾卓志（日本郵船）
	米原令敏（三菱重工業）	並川善一（大阪商船三井船舶）

第106研究部会航法システム分科会委員名簿（敬称略、順不同）

分科会長	丸尾卓志（日本郵船）	
サブリーダー	唐沢康人（石川島播磨重工業）	
委員	岩沼脩（浦賀重工業）	柴田清（石川島播磨重工業）
	塙中勝（日立造船）	原昌三（三菱重工業）

北野竜一(川崎重工業)
山崎芳嗣(佐世保重工業)
野々瀬茂(三井造船)
香川秀光(三井造船)
向井尚志(旧栗原俊三日本鋼管)
金丸順治(川崎汽船)
毛利武弘(大阪商船三井船舶)
平塚司郎(日本郵船)
村上博弥(旧長谷川正二昭和海運)
池野孝(旧中沢常全山下新日本汽船)
白居歎(日本船主協会)
町田運八(光電製作所)
池沢慎一(日立製作所)
岡田高(沖電気工業)
乾喬(旧山崎晃市富士通)
山中恒夫(東京芝浦電気)
藤原潤一(古野電気)
中嶋碧(三菱電機)
鶴ヶ谷武雄(日本電気)
田古里哲夫(東京大学)
庄司和民(東京商船大学)
小山健夫(東京大学)
久津間裕良(運輸省)
栗村康彦(船舶技術研究所)
折原洋(航海訓練所)
今村宏(運輸省)
近藤清(日本郵船)
綾日天彦(三井造船)
井上篤次郎(神戸商船大学)
松本次男(氣象庁)
寺本俊二(北辰電機製作所)
佐藤健三(昭和海運)
森田俊雄(沖電気工業)
堀田富夫(光電製作所)
箕原喜代美(古野電気)
海老名正一(東京芝浦電気)
上田一郎(日本郵船)
長谷川敬(三菱重工業)
坂本昭弘(佐世保重工業)
渡辺安男(東京芝浦電気)
渡辺四郎(川崎重工業)
山田昭二郎(三井造船)
杉村泰(三井造船)
坂野希(石川島播磨重工業)
入見重美(大阪商船三井船舶)
川原一隆(日本郵船)
今西武奈太郎(太平洋海運)
菅一志(東京計器製造所)
柴田幸二郎(安立電波工業)
小林実(北辰電機製作所)
土川義朗(富士電機製造)
西岳重樹(神戸工業)
温品秀雄(日本無線)
家入精二(日本電気)
飛河子老(協立電波)
元良誠三(東京大学)
野本謙作(大阪大学)
松本吉春(神戸商船大学)
山内保文(船舶技術研究所)
木村小一(電子航法研究所)
茂在寅男(東京商船大学)
佐々木博通(運輸省)
松本敦雄(石川島播磨重工業)
上野伊三郎(安立電波工業)
河村四郎(氣象庁)
笠原協之(三菱重工業)
村田隆(山下新日本汽船)
北里賢二(沖電気工業)
飯塚康雄(沖電気工業)
古谷俊雄(光電製作所)
磯辺義孝(神戸工業)
塩沢武芳(北辰電機製作所)
三井敏弘(大阪商船三井船舶)
鬼頭博明(日本钢管)
青木崇(東京計器製造所)
服部寛雄(北辰電機製作所)

委員以外
の討議
参加者

中島和重(日立製作所) 筒井勇次郎(日立製作所)
関口義清(日立製作所) 赤堀信一(日本無線)
松田秀彦(富士通) 花田忠(協立電波)
鶴田末一(協立電波) 千原義男(航海訓練所)
栗原靖司(三菱重工業) 加藤増夫(古野電氣)
二宮鎮男(日本無線) 小島正(日本無線)
中島清之(富士通)

目 次

(1. 航 法 シ ス テ ム)

1. 航法システムの概要	1
1.1 自動航法システムの開発	8
1.1.1 システムの調査	8
(1) 自動航法に関する文献の収集、調査	8
(1-1) 自動航法全般に関するもの	8
(1-2) ロランに関するもの	8
(1-3) デッカに関するもの	1 0
(1-4) オメガに関するもの	1 0
(1-5) 航海衛星に関するもの	1 1
(1-6) 対水速力測定による船位推定に関するもの	1 2
(1-7) 対地速力測定による船位推定に関するもの	1 3
(1-8) 慣性航法に関するもの	1 3
(2) システム要目の調査、検出器の精度に関する調査	1 5
(2-1) 概 要	1 5
(2-2) ロラン受信機について	1 5
(2-3) デッカ受信機について	1 9
(2-4) オメガ受信機について	2 1
(2-5) N N S S 受信機について	2 2
(2-6) 対水速力および針路測定のセンサーについて	2 3
(2-7) ドップラーセンサについて	2 8
(2-8) 慣性航法装置のセンサについて	3 8
(3) 衝突および座礁予防システムとの関連についての検討	4 3
(4) システムのシミュレーション（実測船位計算方法）	4 3
(4-1) ロランによる実測船位計算方法（その1）	4 4
(4-2) ロランによる実測船位計算方法（その2）	4 6
(4-3) デッカによる実測船位計算方法	4 9
(4-4) オメガによる実測船位計算方法	5 3
(4-5) N N S S による実測船位計算方法	5 5
(4-6) 天測による実測船位計算方法	5 6
1.1.2 船位決定方法の調査	6 3
(1) 航海衛星、天測、電波等による船位決定方式の比較検討	6 3
(2) 航海衛星による船位決定について	6 5
(3) 電波援助航法についての検討	6 9
(3-1) ロランA／Cシステムについて	6 9
(3-2) デッカシステムについて	7 2
(3-3) オメガシステムについて	7 4
(4) 船位決定システムとしての仕様決定	8 1
(4-1) 概 要	8 1

(4 - 2) 船位測定システムの仕様	8 5
(4 - 3) 船位推定システムの仕様	9 1
1. 1. 3 航法の調査	9 5
(1) 航法に関する文献の収集	9 5
(2) 推定船位計算方法の調査、検討	9 5
(2 - 1) 対水速力と針路による推定船位計算方法	9 5
(2 - 2) ドップラセンサによる推定船位計算方法	9 8
(2 - 3) 慣性航法による推定船位計算方法	9 8
(3) 大圏航法に関する調査、最適操舵方法の研究、プログラムの決定 (航法計算の自動化システムについて)	1 0 1
(4) 最適航路設定システム	1 0 4
1. 2 座礁予防システムの開発	1 3 8
1. 2. 1 システムの調査	1 3 8
(1) まえがき	1 3 8
(2) 報告内容の要約	1 3 8
(3) 座礁予防に関する文献の収集・調査解析	1 3 9
(3 - 1) 超音波探知能力の検討	1 3 9
(3 - 2) 同歩装置の能力の調査	1 4 3
(3 - 3) 海底地勢と航路の調査	1 4 4
(3 - 4) 座礁事故例の調査	1 4 7
(3 - 5) センサの装備位置の検討	1 5 2
(3 - 6) 船体の縦動揺の検討	1 5 3
(3 - 7) 海底と漁群などを識別するための漁探データの解析	1 5 5
(4) 暗礁予測計算のプログラム作成および計算	1 5 8
(5) 海上模擬試験	1 6 6
(6) まとめ	1 7 4
1. 3 衝突予防システムの開発	1 7 5
1. 3. 1 システムの調査	1 7 5
(1) 衝突予防に関する文献の収集、調査	1 7 5
(1 - 1) 衝突予防システム全般に関するもの	1 7 5
(1 - 2) 衝突予防用レーダに関するもの	1 7 5
(1 - 3) 雑音除去方法に関するもの	1 7 7
(1 - 4) 海面反射除去方法に関するもの	1 7 8
(1 - 5) 目標判別追尾方法に関するもの	1 7 9
(1 - 6) 衝突予防用ディスプレイに関するもの	1 8 2
(1 - 7) VTR を使用するシステムに関するもの	1 8 2
(2) システムの要目の調査	1 8 3
(3) 開発を要する機器の要目仕様の決定	1 8 6
(3 - 1) アンテナシステムの仕様	1 8 6
(3 - 2) 雑音除去装置の仕様	1 9 0

(3 - 3) 海面反射除去装置の仕様	194
(3 - 4) 目標判別追尾装置の仕様	198
(3 - 5) デイスプレイ装置の仕様	201
(4) システムのシミュレーション	207
(4 - 1) 概要	207
(4 - 2) シミュレーションの方法	207
(4 - 3) シミュレーション例	209
1.3.2 航路の実情調査	213
(1) 緒言	213
(2) 本研究と海上衝突予防法との関係	213
(3) 衝突事故例の調査	214
(4) 主要航路における船舶の行き、見合い関係避航動作に関する実態調査	217
(5) 乗船調査	226
(6) 結言	228
1.3.3 航法システムに適応した船体運動の解析的表現の検討	229
(1) 緒言	229
(2) 舵～船体運動系	229
(3) 操縦運動方程式と載貨状態の関係	231
(4) 船の操縦運動の数学的表現	231
(5) 理論計算と実船計測との関連	235
(6) オートパイロット系の取扱い	238
(7) 変針軌跡の計算	241
(8) 計算例	242
(9) 結言	246
1.3.4 衝突回避統合の研究	247
(1) 緒言	247
(2) 一般論	247
(2 - 1) 必要な機能	247
(2 - 2) 主要な問題点	247
(2 - 3) 海上衝突予防法との関連	248
(2 - 4) 航路の制限	249
(2 - 5) 結論	249
(3) 基本構想	249
(3 - 1) 全体のシステム構成	249
(3 - 2) 本システムのマン・マシンコミュニケーション	250
(3 - 3) タイムシーケンス	254
(4) 各論	260
(4 - 1) 危険船判定論理	260
(4 - 2) 衝突状況判定論理	263
(4 - 3) 危険船の優先順序決定論理	268
(4 - 4) 安全運航法の適用論理	271

(4 - 5) 操船方向判定論理	277
(4 - 6) 回避操船後の船尾通過判定論理	277
(4 - 7) 操船法の選択論理	279
(4 - 8) 原針路復帰試行操船論理	279
(4 - 9) 操船後における危険船の推定判定論理	279
(4 - 10) 決定すべき常数	285
(5) 結 論	286
(5 - 1) 問題点	286
(5 - 2) 本研究の意義	286
1.3.5 信号変換システムの研究	287
(1) 信号変換の必要性	287
(1 - 1) 序論	287
(1 - 2) 信号対雑音電力比(S/N 比)の概念	287
(2) 信号変換方式	290
(2 - 1) 主要方式の概要	290
(2 - 2) 各方式の特徴	294
(2 - 3) 残留効果のある零次ホールド回路の基礎理論	294
(3) 実験および結果	304
(3 - 1) 実験計画	304
(3 - 2) 実験装置	305
(3 - 3) 実験結果	308

1 航法システムの概要

航法のシステムを定めるのに、まずどんな形の航行形態をとるかその方針が決定されなければならない。

航行の形態といふのは、図1.1にそのブロック図が示されるように自動航行、誘導航行、指令航行に分けて考えられる。これらは航行システムは定っているものであるが、その分割のしかたが違つていると解釈される。

自動航行とは航路設定システムで立てられた航行プログラムに沿つて船位がコントロールされる全システムを船にもつてゐる形態で、人工頭脳を備えた海上運送用ロボットということができる。しかしこの形で航行が行なわれても陸上基地での船が現在どこを航行中か監視したり、台風情報その他緊急の場合に臨時に行先または針路を変更することの指令が必要になるであろう。このために位置の報告装置と指令通信装置がいることになる。

誘導航行とは、以上の位置報告に応じてきめ細かく航行指令を与えて航行させることにし、船位も陸上で計算するし、航行プログラムも陸上で計算して持つている。その航行のループは図1.1の点線で分割された形となり、右側部分だけが船に残され、左側部分が陸上に移される。この結果相対部分の計算システムの削減が得られることになろう。

指令航行とは、さらに船位報告システムも船からとりさつて、船には命じられた針路と速力で航行する能力だけを備えるシステムである。この形態は船団航行でその中心に司令船を置く方法や、航行衛星を用いて大型タンカをコントロールする場合にとらわれることになる。

しかしいづれにしても海上を航行するということから、立体交差という方法は不可能であり、最終的に衝突予防システムは不可欠と判断される。そしてまた、このシステムが一番複雑で計算機の規模を決定するものといえることは注目に値する。

そこで、指令航行、誘導航行はいつでも移行できると考え、自動航行システム全体を機能としてもたせ、最低限の人員で、安全かつ短時間に船を目的地まで航行させるシステムを考えることが必要と考えた。

この自動航行システムは、図1.2に示すように、航路設定システム、自動操船システム、船位決定システム、非常制御システムから成つており、それぞれのシステムはまたつぎのように細分される。

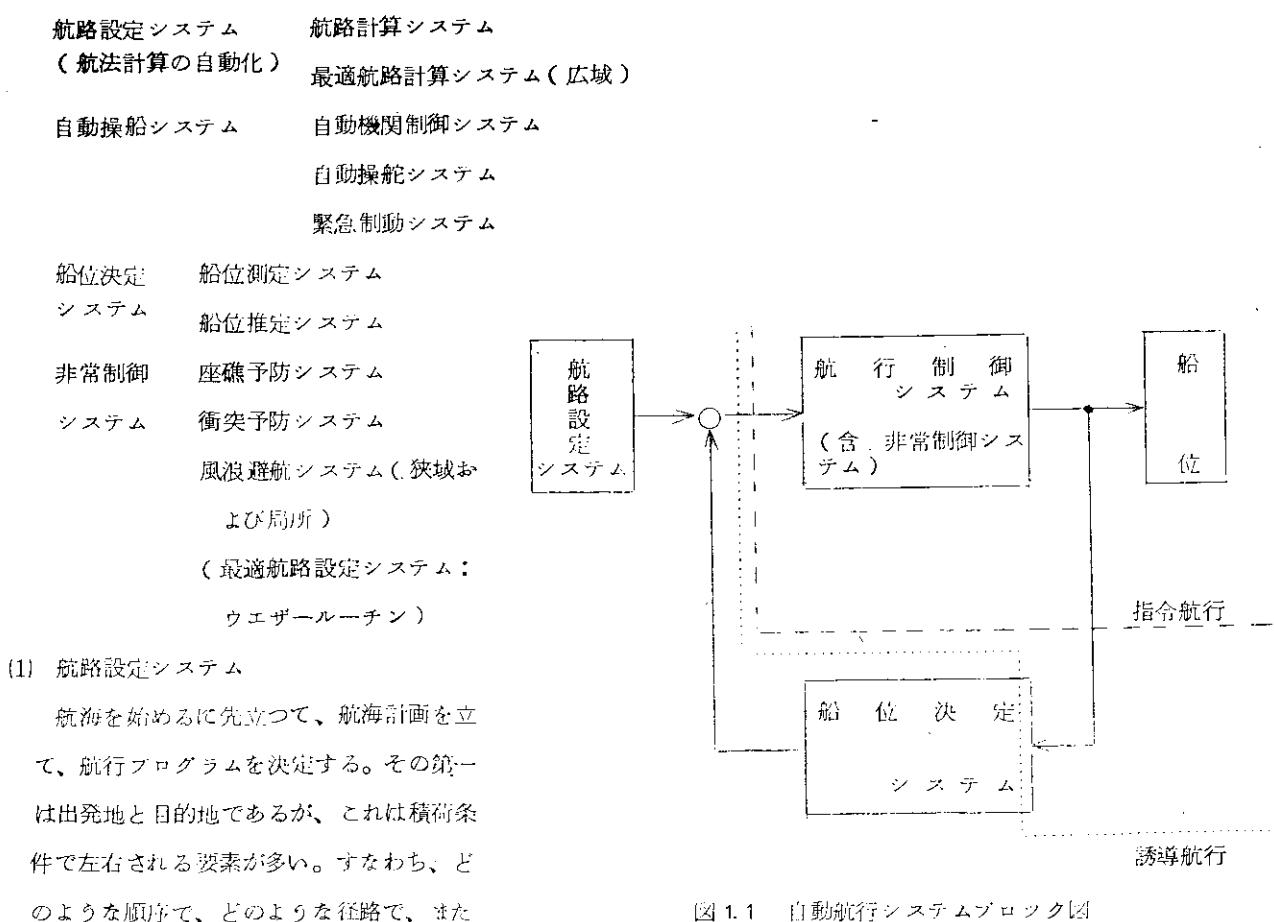


図1.1 自動航行システムブロック図

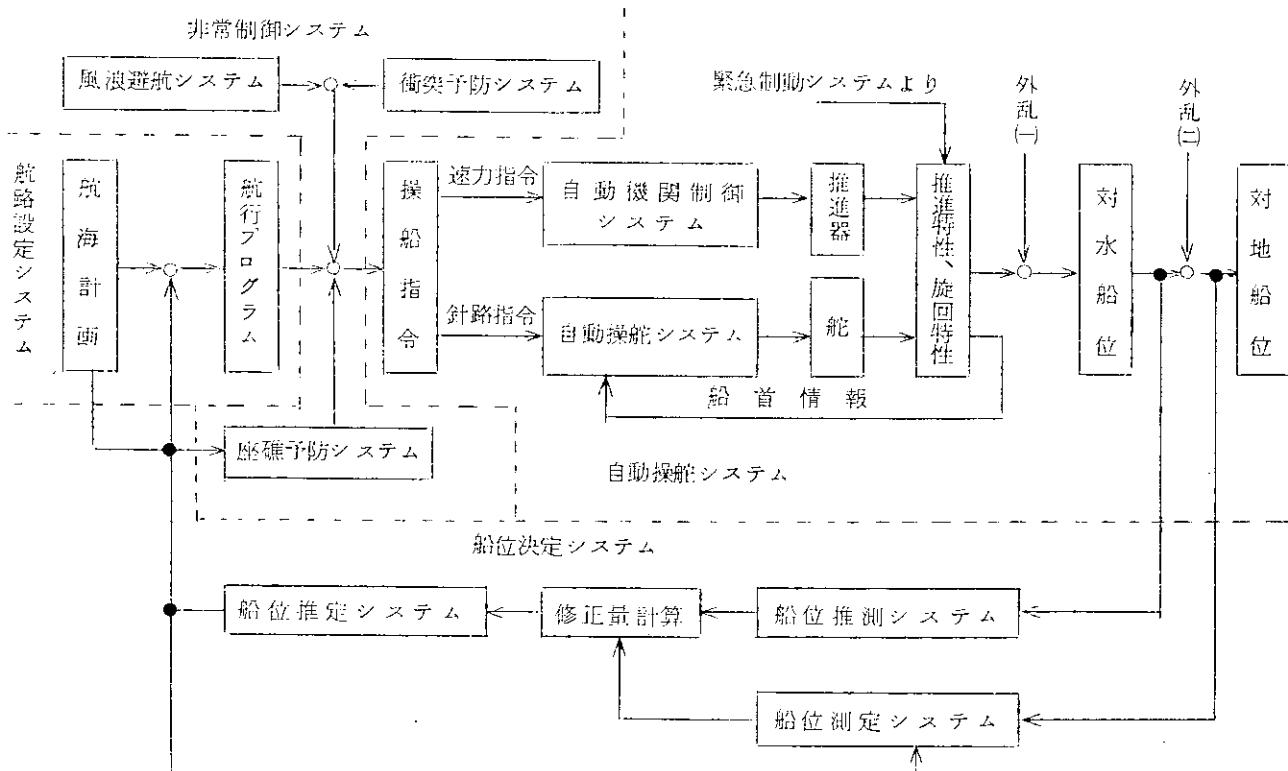


図 1.2 航法システムブロック図

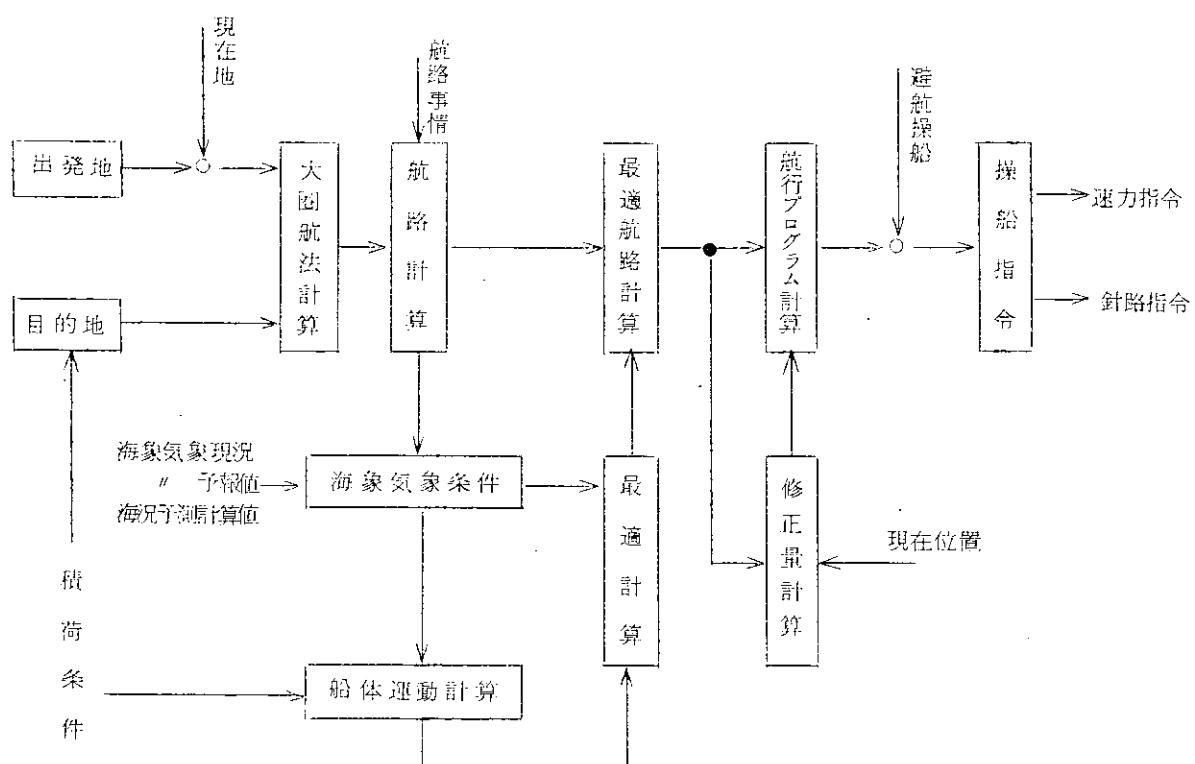


図 1.3 航路設定システムブロック図

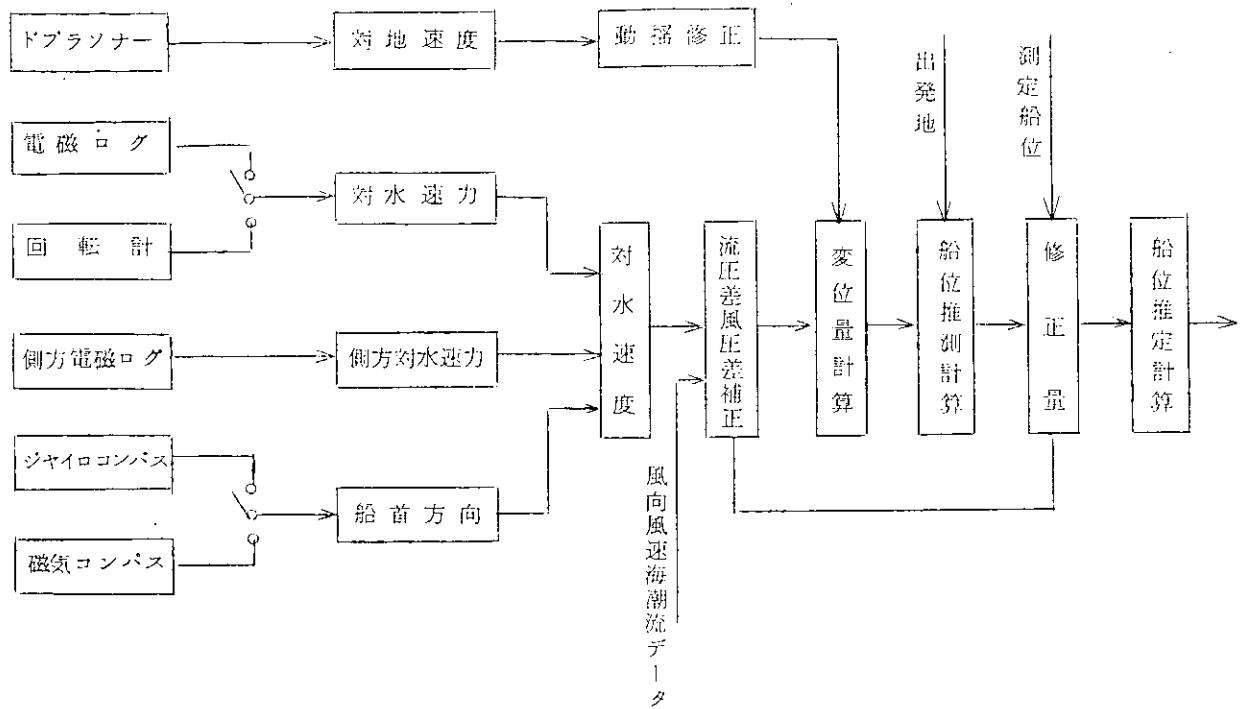


図 1.4 船位推定システムブロック図

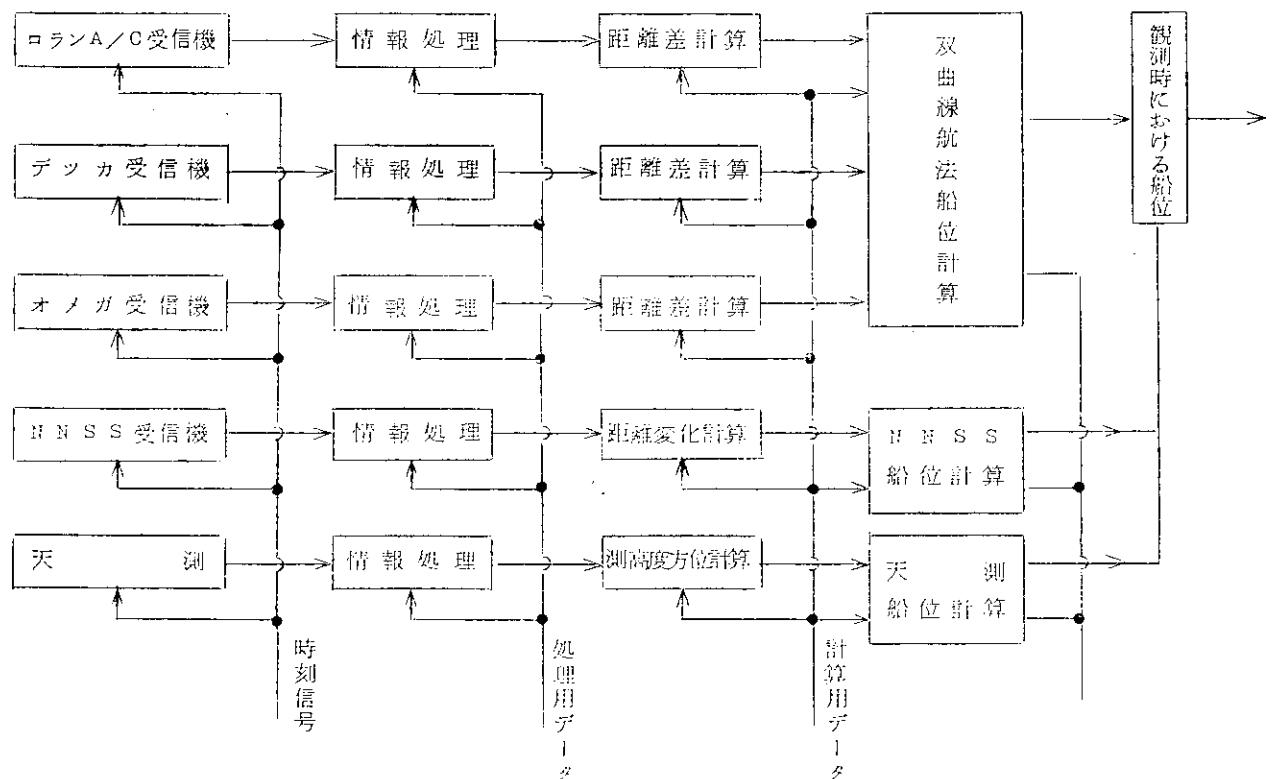


図 1.5 船位測定システムブロック図

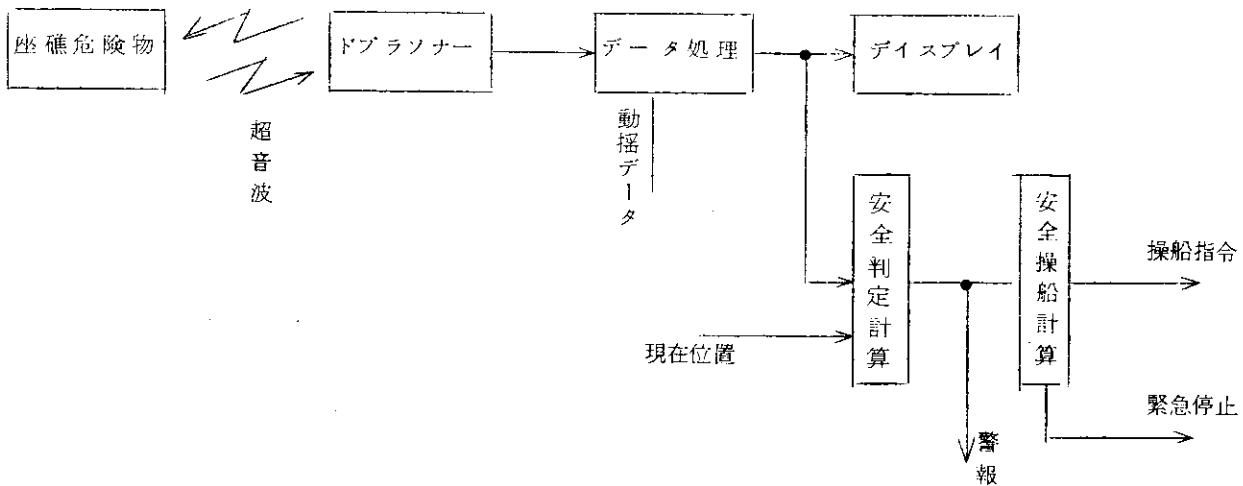


図1.6 座礁予防システムブロック図

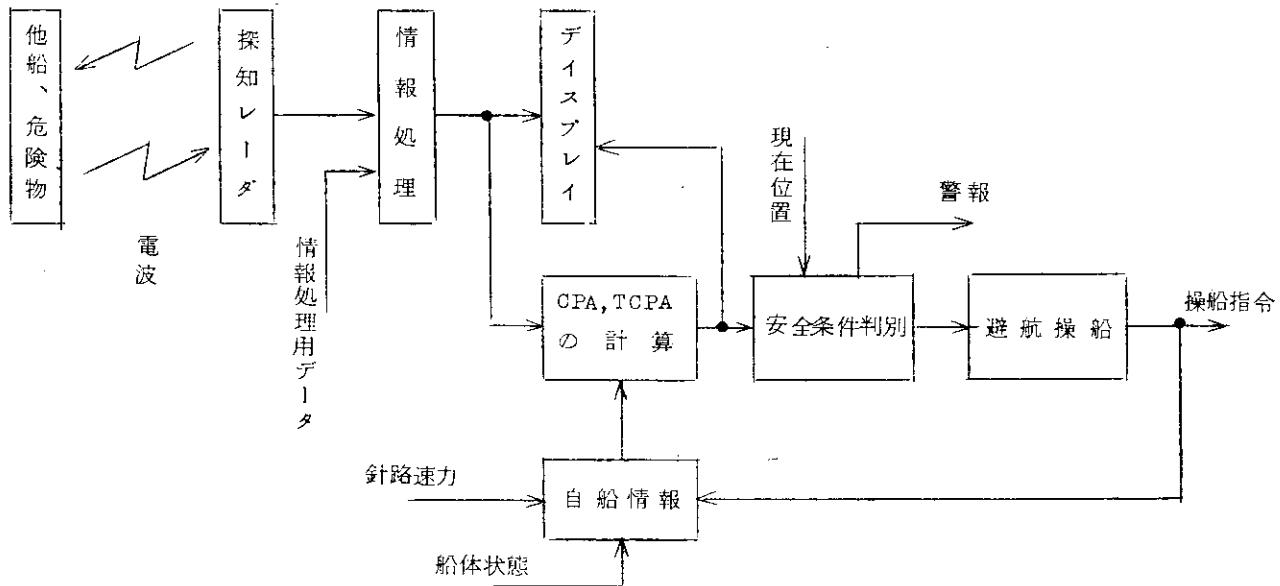


図1.7 衝突予防システムブロック図

その間積荷がどのような量の変化があり、質の変化があるか等は航路の大綱を定める要件である。

図1.3は航路設定システムを説明するブロック図である。

出発地および目的地の緯度、経度が与えられると、まず大圈航法計算(狭い範囲の場合漸長緯度計算)によつてグリッドの航行ポイントが定められる。この航行ポイント間は漸長緯度航法計算によつて航路が定められるが、これに航路事情が与えられて多少の修正がなされる。

航路が定まればそれに沿つた地域の海象気象条件を予測計算して最適航行を行なわれるように最適航路計算が行なわれ、最終的に航行のプログラムが決定記憶される。これにもとづいて時々刻々の速力命令と針路命令が自動操船システムへ送られる。

しかし、計画どおり航行しているかどうか常に現在位置がフィードバックされて、修正量が計算されるが、この修正量が大きければ、将来の航行プログラムまで変更されなければならない、一番もとの位置に出発地のかわりに現在位置が入れられて最適航路計算を行ない、航行プログラムの更新を行なつて記憶を入れかえる必要があり、修正量が小さければ、単に次の変針点までの小変針で解決される。

(2) 自動操船システム

自動操船システムは、自動機関制御システムと、自動操舵システムに分けられるが、このいづれも独立した他の研究に委ねられるので、航法システムでは取扱わない。

しかし、他の部門で研究される場合でも、航法システムの一環としての立場を見失うことなく、その合目的性はもちろん入出力の航法システムとの適合に留意されなければならない。

自動操船システムでは命令された針路と速力の信号に対し、プロペラの回転数と、舵角が出力として得られ、この値が船体の特性に作用して速力と針路が得られる。

自動操舵システムでは、さらにこの針路すなわち船首情報がフィードバックされて、自動的に針路を保つシステムが完成されているが、自動機関制御システムでは、このより速力のフィードバックループは完成されていない。

その理由は速力だけを制御の対象とすることの不合理性もあるので、今後さらに研究をすすめる必要があると思われる。また自動操舵システムにしても、船首方向を制御するのに、舵のみでは困難な場合もあり、前進力のない場合のバウ(あるいはスターク)スラスターとの組合せ、後進中の船首方向の制御等解決されなければならない問題も多い。

一般的にいつて、船といふマスの大きいことに起因して、だ性の強いことは、しばしば緊急時の操船に制御の困難を生じさせている。これを助ける一つの方法が緊急制動システムの研究開発である。小さい船においては停止距離の不足を補うために回頭によつて避ける場合が普通であつたが、船が大型化して、旋回半径が大きくなるとトランスペアスも大きくなつて、回頭によつて危険を回避することができなくなつたのである。

(3) 船位決定システム

船位決定システムは、船位推定システムと船位測定システムに分けられるが、図1.2に見られるように画然と分けられるものではなく、互いに連係しあつたシステムである。

船の速力情報と針路情報だけから得られるものは対水船位である。これも同じ回転数を推進器に与え、同じ舵角を舵に与えても結果は同じにはならない。この原因の外乱(一)の内容は船底の状態、喫水、トリム、横荷の状態、海面状態等からなつてゐる。結果として得られた速力と船首方向から算出される船位が推測船位である。実際の位置は外乱(二)すなわち潮流、潮流、風圧等によつて大きく違ひるので、実測を行なつて決定する必要がある。また推測船位に予想される修正を加えた船位を推定船位といつてゐるが、この推定値を決める修正量の算定には実測船位と推測船位との差を用いることが行われる。

さらに実測船位といつても、常にある誤測時刻における船位であつて、時々刻々過去のものとなつてゐる。数本の位置の線を測定する場合、その一本一本が時間の関数として処理される必要があり、計算して得た船位も時間の関数としての価値しかないわけである。それを現在位置とするには常に船位推定計算を経ていなければ算出し得ないものである。こゝに船位測定システムといえども、船位推定システムがなければ独立しては存在し得ない理由があるのである。

このため、船位推定システムは、セントラルコンピュータの計算に入れないので、独立したサブコンピュータとして、リアルタイムで時々刻々処理しつづけているものが望まれたのである。

船位推定システムの概略ブロック図は図1.4に示されるが、電磁ローブは、前進方向のみならず、後進方向の速力も測定し得るし、さらに横方向の速力も測定できるので、これを採用されることになつた。また針路はジャイロコンパスを原則として利用して測定し、磁気コンパスは非常用に切替可能に研究することにされた。同様に非常用として回転計が速力検出の補助として用いられる。

ドップラソナーはごく微少な速度も検出を必要とする巨大船の港内操船に利用するため、動揺または傾斜(トリム)等の修正をして対地速度を測定する有効なセンサとして認められた。

船位測定システムの概要ブロック図を図1.5に示しているが、最も望まれるのは单一の測定装置で全海域において船位が決定し得ることであるが、この面では航海衛星システムやオメガシステムは注目に値する。しかし、現段階ではこれらのシステムは完全に実用化されているとはいえないため、近海地域ではロランA／Cを、沿岸地域ではチカを利用する

ことが有効と考えられる。

また非常の際には天測による計算システムを利用することは不可欠であり、大洋航海において未だにその精度が他を圧していることは皮肉である。図1.5中N N S SとはNavy Navigation Satellite Systemの略語で、現在直ちに利用できる航海衛星システムは米海軍の開発したトランジット衛星システムであることから、一応この利用を考えたものである。

他の船位測定装置中、レーダによる沿岸での船位決定は、当然加えられるべきシステムであるが、衝突予防システムが完全にでき上るならば、他船の代りに陸上目標を探知し、相対距離等の算出するC P A、T C P Aの計算がそのまま利用できるので、研究開発の重複をさける意味で除外してある。ただし、システムブロックの構成としては加えておくべきであるというそしりは免れ得ないかもしれない。

また慣性航法装置はより精度のよい船位推定システムであることは認められていながらも、ハードウェアの面で期待される時期までに製作することは困難なことが分つたのでシステムから除かれた。しかしながら、この研究と開発の必要であることは十分に認識されたので、調査研究は続けることにした。

(4) 非常制御システム

座礁予防システムと衝突予防システムと風浪避航システムとがこの中に含まれるが、風浪避航システムは、ある意味で小規模な最適航路解であるため、局所的な計算をこの最適航路決定システムに含めることにして、独立して開発することをさけた。

座礁予防システムは原則的には船位測定が正確に行ない得るならばある程度その目的が達成されることは当然であるが、海図の精測が行なわれていない海域、常に発達し変化しつゝある珊瑚礁地域や河川口附近等の航海、また座礁だけにとらわれず水牛障害物の探知に期待したいのでとりあげられている。

このシステムのブロック図は概略図1.6のように考えられている。現在探知距離は約1,500m程度であるので、これを4,000m位にすることが望まれている。

衝突予防システムの概要ブロック図は図1.7に示されているが、探知レーダによるなまの情報では雑音が多く不可能であるので、情報処理を行なつたのちこれをコンピュータに入れて、信号としてとりあげ、安全判定の計算にうつることが考えられている。

また船長が判断している避航操船の計算も、非常に多くの情報を組み込んで、多方面の制約の中で複雑なものであるのでその面のソフトウェアの開発が重要である。

以上の基本的な考え方をもとにして、航法システム全体のブロック図を作成した。これを図1.8に示す。具体的な調査研究はこのブロック図を中心にして進められた。

6. 目擊監視システム

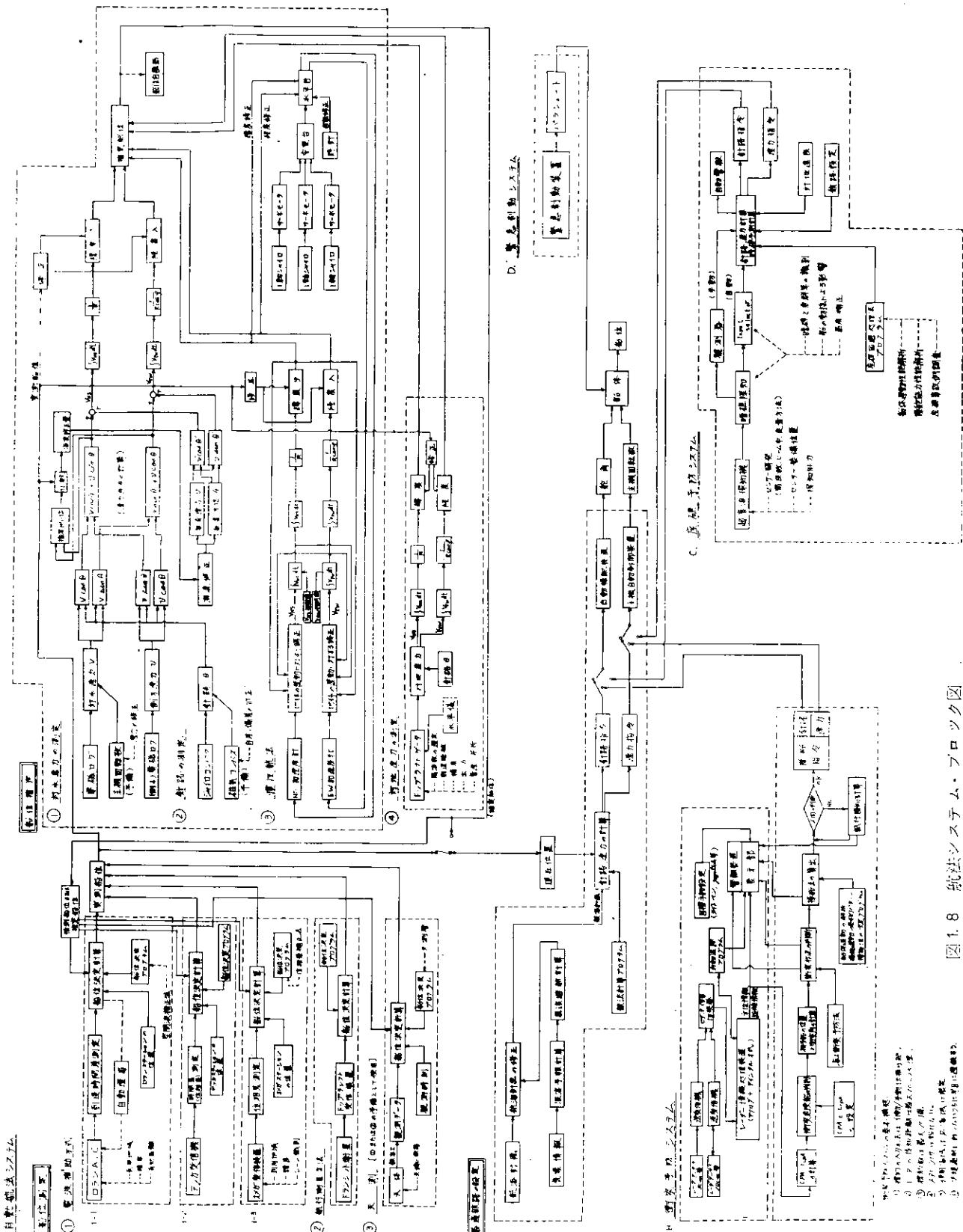


図 1.8 航法システム・ブロック図

- ① 航空機の位置情報を監視する。
- ② 航空機の状況を監視する。
- ③ フリーカーの操作情報を監視する。
- ④ 空域内の飛行機情報を監視する。
- ⑤ 地上飛行機情報を監視する。
- ⑥ 乗客情報を監視する。
- ⑦ 駐機場車両情報を監視する。
- ⑧ フリーカー操作情報を監視する。
- ⑨ 乗客操作情報を監視する。
- ⑩ 地上操作情報を監視する。

● 直接監視
○ 付帯監視
△ 付帯操作
× 付帯操作監視

1.1 自動航法システムの開発

1.1.1 システムの調査

(1) 自動航法に関する文献の収集、調査

自動航法システムの研究に際し、内外の多数の文献を収集し調査した。以下にその主なものを列挙し、かつその要點について述べる。

(1-1) 自動航法全般に関するもの

- (a) Final Report, Contract MA-2228 to Maritime Administration, Merchant Ship Automation Study. (262R0012~0013)

U.S. Maritime Administrationとの契約によつて、United Aircraft Co.のNorden Divisionが行なつた船舶の自動化に関する研究の報告書である。本文献は幾分古いが(1961年発行)、内容は船舶の航法の自動化全般にわたり、非常に詳細に検討されており、航法システムの研究に際し、最も参考になつた文献である。

- (b) A Systems Engineering Basis for Ship Automation Naval Engineers Journal, May 1962, p. 293~308

(c) 商船における航法の自動化

造船関連工業技術資料 第79号

Control Eng.誌(1962)の論文中の航法の自動化に関する部分を中心に、Shipping World 誌(1962)およびMarine Eng./Log 誌(1962)の文中の関連事項を補足編集したものである。

(d) 船舶の航法装置の自動化

造船協会誌第416号(昭39年4月)

- (e) The Automation of Ships' Navigation Systems

The Journal of the Institute of Navigation Vol. 16, No. 2, 1963 (d)の文献は(e)の文献の訳である。英國の航海学会で講演、発表したものである。

(f) 庄司和民：船舶航行の自動化

計測と制御 Vol. 5, No. 8, p. 579~590

船舶の航行の自動化の現状と将来について解説してある。

(g) 千原義男：新型式航法装置の実験構想

航海、26号、p. 92~100

運輸省が計画した練習船兼実験船の航法装置の試設計の概要を紹介するとともに、その基本となる自動航法システム開発に対する考え方も述べられている。

- (h) A Marine Automatic Navigation System (M.A.N.S.)

International Marine Design and Equipment 1965, p. 56~58

(i) 船舶自動航海システム (M.A.N.S.)

造船関連工業技術資料 No. 109

(i)の文献は(h)の文献の訳である。

(j) 庄司和民：航法自動化についての外国事情の紹介

航海、21号、p. 20~24

航法の自動化についての外国文献が列挙されている。

(1-2) ロランに関するもの

ロラン A/C を用いた自動船位測定装置に関しては、わが国はもとより諸外国においても民間用としてあまり開

発されていないので文献は少ないが、可能な範囲で文献を収集し調査を行なつた。

なお、自動受信システムプロバーのハードウェアについては、半自動方式の範囲においてすでに基礎開発を終つているので、今回特に実施したものは少ないが、参考のためその代表的なものを記載することとする。

主として文献調査を行なつたのはロランデータ（時間差データ）の座標変換方式に関するもので、一部ハードウェアを含むが大部分はソフトウェアに関するものである。

文献調査を行なつた主なポイントは次のとおりである。

- i) 自動選局を行なう方法のデザイン
- ii) 座標変換のソフトウェア・ハードウェア（双曲線 LOP → 緯度）
- iii) インターフェーザのハードウェア

以下これらに関連する文献のダイジェストを報告する。

(a) Sperry Rand Co. Operating Instructions for Continuous Indicating Loran OPR-117

1960年頃 Sperry Rand Co. により試作し若干量納入された半自動ロランであつて、同社 Mark II、Model II Marine Loran RCVR をベースとし、これにアダプタを付することにより一度選局すればその電波が受信できる間自動受信を続ける。このシステム自身あまり成功しなかつたようであるが、サンプリングコントロールの基本的考え方はその後のオートロラン・ロラン C RCVR の基礎となつている。

(b) Lear Siegler Inc.; Instructions for APN-152 Receiver.

マイクロエレクトロニクスを大幅に採用し、航空用としてサーチ方式半自動（連続測定はしない。）のものであつて、小型インターフェーザと CPU の組合せで限定された（プリセットされた）区域の自動経緯度計算およびプログラムされたコースからの L—R ディスプレイを行なうものである。領域を限定するためメモリ容量 800 語平均演算速度 8 秒というものである。

(c) Naval Res. Rep. Oct#1925-117; Loran C Hyperbolic Coordinate Converter Set. (Lear Siegler Inc.)

主として座標変換のソフトウェアをフローチャートの詳細より数式解析、プログラム方法の一部までを記述したもので、これを Loran C 全自動受信機と併用した方式につき記述している。

座標変換の方式は過去われわれが高船大庄司教授の指導を受け実験試算した方法と大略同様であつて、ロラン局までの推定位置からの大圏距離を計算し、これを時間差ベースで実測値と比較、一致するまで収斂させ、緯度を算定するものである。

(d) Naval Res. Rep. Oct#1837-11; Loran Hyperbolic Navigator.

ロラン A を用い自動船位測定を行なうもので、不完全ではあるが、サンプリング制御方式の自動選局を行なつている。ただし統計処理を行なわず、サンプルの時定数を状態に応じ手動選択し最適の伝達関数とするもので、試作報告であり、製品化されたか否かは不明である。

なおこの外古曲的文献であるが、MIT Radiation Lab. Ser. "LORAN" も一部参考とした。

以上の調査により判明した事柄の大要は次のとおりである。

- (a) ロランの自動選局特にロラン A の自動選局を確実に行なうためには従来の方法（サンプリングゲート掃引法）のみでは困難で統計処理を導入することが必要である。
- (b) 球面双曲線座標 → LAT, LONG の座標変換はその方法として予め推定位置を導入、ロラン局よりの大圏距離を計算、時間差を介して実測時間差と比較、これを収斂させ、これから LAT, LONG を計算する方法に收約されるようである。
- (c) システムハードウェアの大略の様子をまとめることができた。

(1-3) デッカに関するもの

- (a) 貝野暢 "デッカシステムと日本の計画"
電波航法 第7号(1965)
- (b) 清野浩 "北海道チェーン測定試験結果"
電波航法 第9号(1968)
- (c) 神戸工業技報 デッカ特集号
第34号(昭42年)
- (d) "The Decca System Operating Instructions and Marine Data Sheets"
Decca Navigator Limited Co. London, England.
- (e) J.A. Fejer "The Effect of Night Sky Wave on The Decca Navigator System in South Africa"
South Africa CSIR Report ETR-10 July 1950
- (f) W.J. O'BRIEN "無線航行方式"
特許 No. 昭29-5465(昭29.8.31)
- (g) D.E. BRIDGES "位相比較無線航行方式"
特許 No. 昭42-226(昭42.1.10)
- (h) その他 Decca Navigator News (季刊)

(1-4) オメガに関するもの

- (a) A.D. 603764: Omega - A World - Wide Navigation System. J.A. Pierce, W. Palmer, A.D. Watt, R.H. Woodward June, 1964 p233
オメガ航法の原理、問題点、送信機および受信機の構成、VLFの伝搬特性等について詳述されているが、初期の発行なので、送信ホーマット等については現在のものとやや異っている。この改訂版がAD630900; may, 1966, p364として出版されているようである。
- (b) オメガ航法編集委員会編: オメガ航法、オーム社、1968, p194
上記のADレポートの内容を主体にしているが、up-to-dateな資料も加えられている。
- (c) J.A. Pierce: Omega, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Volume AES-1, Number 3, December 1965. p.206-215
オメガ航法の提案者による初期の解説論文である。オメガ電波を利用して行なえる航法システムの多様性、送信局間の位相合せの方法、精度、レーン識別法を簡潔に説明している。
- (d) C.D.R. Cortland, G.Pohle: The Omega System of Global Navigation, Electronics Engineering, July - August - September 1966, p.26-33
オメガ航法の名称の由来、動作原理、レーン識別法、送信アンテナの実際等について述べている。
- (e) 田口一夫著: オメガ航法システム、大洋漁業社内誌、p10
- (f) 田口一夫著: オメガ航法システム、航海、昭43年9月号、p41-50
(e)ではオメガの原理、受信装置の概要、VLFの伝搬特性、レーン識別法:(f)では空間波補正法について、具体的に説明している。
- (g) Joseph F. Enright: The Contribution of The Omega Navigation System to Safe and Economical Ship Operation. Jan. 1968. 電波航法研究会資料 p14
オメガ受信機を使ってオメガ航法を行う具体的手順を多数の図表を使って説明している。著者は Northrop Nortronics 所属。

- (h) Navigation by Omega. Long - Range VLF System. Mariner. p335-336
September — October 1968.
- Ships' Gear International 1968のShow に Marconi Marine から出展した Northrop Nortronics社製Omega Receiverの紹介
- (i) H.Horiuchi, G.Hilton: Results of OPLE Experiments for The Period February 15, 1968 Through April 22, 1968, June 19, 1968. p.19
ATS-III衛星を使って行なわれたOPLE “Omega Position Location & Communication Equipment” の実験報告。
- (j) F.Malvin Williams: The Application of The Omega Navigation System to Aircraft. 1964. P. 24
航空機航法への応用を詳述している。
- (k) A.D. 605197: Omega Navigation Capability Based on Previous Monitoring and Present Prediction Ability June. 1964, P. 30
オメガテスト電波についての位相差測定値の時間変化に関する広範な実測データ。
- (l) A.D. 438941: New Techniques For Computing Loran maps.
A.V. Hershey, E.J. Hershey. Jan. 1964, p.35
地球上の2点間の大圈距離の表示式が緯度、経度の計算に役立つ。
- (m) 桜沢晃著: VLF の遠距離伝搬について電波伝搬研究会資料. Oct. 1962. p.28
- (n) 桜沢晃著: 最近における VLF の現状. エレクトロニクス. 昭40年7月号. p.6
- (o) M.F., L.F., and V.L.F. Radio Propagation. 8th — 10th November, 1967.
IEEE Conference Publication. No.36, p.345
VLF の遠距離伝搬、位相の日時変化の理論的考察(導波管モデル理論、Wave HOT伝搬理論等)や、各種の実測データ、日時変化の自動補正法等に関する記事が集められている。
- (p) 時研究会編: 時の科学. コロナ社. 1966, p.342
電波航法と周波数比較の関係を通して電波航法の基本的事項が考察されている。
- (1—5) 航海衛星に関するもの
- (a) R.R. Newton “The Navy Navigational Satellite System.”
Space Research VII North - Holland Publishing Company,
Amsterdam.
- (b) W.H. Guier, G.C. Weiffenbach “A satellite Doppler navigation system”
Proc. IRE 1960, April
- (c) G.C. Weiffenbach “Measurement of the Doppler shift of radio transmissions from satellites.” Proc. IRE 48(1960)750
- (d) R.R. Newton “Everyman's Doppler satellite navigation system”
IEEE Trans. on Aerospace and Electronic systems”
Vol. AES-3 No.3 May 1967
- (e) R.B. Kershner, R.R. Newton “The Transit System”
Jour. of Inst. of Navigation. Vol. 15 April 1962
- (f) R.B. Kershner “Status of the Navy Navigation Satellite System”
Practical Space Applications Vol. 21 1967
- (g) R.B. Kershner “Present state and further developments of navigation by Doppler measurements from near earth satellites”

paper presented at the International Navigation Congress,
Munich, August 1965

- (h) N.S. Potter "Accuracy and simplification in doppler navigation satellite system" Navigation, Vol. 11 1966

(a), (e), (g)はNNSSについてその原理、および誤差について平易に記述。

(b)は航海衛星の送信周波数のドップラ周波数偏移による位置決定に対する一般的な精度の検討を記述。

(c)はドップラ周波数偏移より位置決定を行なうシステムを最小自乗法および積分法によるものについて論議しその得失を記述。

(d)は表と計算尺とで500mの精度で位置決定を行なう方式を記述。

(f)はトランシット衛星の最初の打上げ以来、衛星のデータを蓄積し地図が明らかになり、したがつて位置精度が向上したことを記述。

(h)はドップラ周波数偏移を利用し、NNSS以外のより簡単な位置決定についての試案を記述。

(1-6) 対水速力測定による船位推定に関するもの

船位推定システムは商船用としての利用が考え始められたのは次の文献の年月でもわかるように、1950年(昭和25年)頃より後である。しかしDead Reckoning systemの装置が米国の艦船に装備されたのは1945年(昭和20年)以前であり、この現物と説明書をわれわれが見たのは1953年(昭和28年)からである。

商船用船位推定に関する文献は次のとおりである。

- (a) Naval Engineers Journal, 1962年5月 Vol. 74 No. 2

[A system Engineering Basis for ship Automation]
(C.T. clayton)

- (b) The Journal of The Instifute of Navigation 1963年4月 Vol. 16 No. 2

[The Automation of Ship's Navigation System]
(C.T. Claytion and Charles G Kurz)

- (c) Navigation 1965年 spring Vol. 12 No. 1

[Marine Course Computer Sea Evaluation]
(Karl Burfeindt — Norden Div of United Aircraft co.)

- (d) Navigation 1964~1965年 winter

[Automated Marine Navigation]
(Charles W. Benfield)

- (e) 計測と制御 昭和41年8月

「船舶航行の自動化」中のBendix社ASN-19推定位置計算機
(庄司 和民)

側方電磁ログに関する文献は次のとおり

- (f) Nature 1968年3月 Vol. 217

[Two - component Electromagnetic ship's Log]
(M.J. Tucker, N.D. Smith, E.P. collins)

(a)は1960年以来の自動化の問題を紹介したもので、この中に船位推定用のコンソールの例が出ている。

(b)はcomputerを利用して自動化船について述べてあり、船位推定における許容誤差として、20 knotにて距離誤差が1%以下、到達時間として7日間に5時間以下を挙げている。

(c) は computer を使用した結果の評価について述べてあり、船位推定の誤差は $1.3\sqrt{t}$ にて表わされるとしている。t を時間として海里が表われる。たとえば 12 時間後には 4.5 海里、36 時間後には 7.8 海里の誤差となるという。

(d) は航海システムの構成図が書かれている。

(e) は自動化全般の紹介であるがその中に ASN-19 の船位推定の Analog 演算機構が紹介されている。

(f) は側方 Log の測定部の励磁電源に直流を用いる方法について述べている。

(1-7) 対地速力測定による船位推定に関するもの

(a) TECHNICAL PROPOSAL of DOPPLER VELOCITY SENSOR.

LOCKHEED MISSILES and SPACE COMPANY, June 4, 1965

船用ドップラセンサ (C.W. 方式) の技術的な検討を行なつている。

(b) Application of Large Time Bandwidth Product Signals To Oceanographic Instrumentation. by G.M. Walsh

Raytheon Technical Report.

深海の海底構造(泥の堆積)を調査するための時間一常域巾積の長い信号を用いた実験報告書。

(c) PROBABILITY AND INFORMATION THEORY. WITH APPLICATIONS TO RADAR
by. P.M. WOODWARD. LONDON PERGAMON PRESS LTD

情報理論の立場からレーダ情報の検討を行ない、その限界を論じたもの

(d) DIGITAL COMMUNICATIONS WITH SPACE APPLICATIONS

by Solomon W. Golomb. Prentice Hall, INC Eig. CLIFFS NEWJERSY

宇宙通信に応用されるデジタル通信の技法、種々の信号形式についての論文

(e) PSEUDORANDOM SIGNAL - CORRELATION METHODS OF UNDERWATER ACOUSTIC RESEARCH. I. PRINCIPLE, II. INSTRUMENTATION

by James L. Stwart, W.B. Allen, R.M. Zarnowity, M.K. Brandon

JASA Volume 37 No. 6 1965.

水中音響の研究に PRN 信号と相關検出を用いた場合の理論的研究とその実験報告

(f) 相関関数およびスペクトル — その測定と応用 — 岩部孝編 東大出版会

相関技術の解説書、その種々の応用例を細かくあげて説明するとともに、理論的にも取り扱っている。

(g) 超音波便覧 実吉純一、菊地喜充、能本乙彦監修(日刊工業)

超音波応用関係一般の集大成

(1-8) 慣性航法に関するもの

(a) 慣性航法特集、船舶 1960. VOL. 33

慣性航法装置について一般的な記述、ノーチラス号の北極潜航と慣性航法装置、航空航海用の慣性航法等について述べられている。

著者は東京計器納富、航海訓練所、桜木、東船大巻島、電気通信大鎌木の諸氏である。

(b) Inertial Navigation. C.F. O'DONNELL Journal of the Franklin Institute Vol. 266, 1958

Inertial Guidance と Schuler tuning, Navigation と Battistic trajectories の比較、構造、問題点、Component と Computer, error, 等を取扱っている。

(c) Aiding the Inertial Navigation System FREDERICK STEVENS
Navigation 1958, VOL. 6 NO. 3

航空用慣性航法装置について LOSANGELES と WASHINGTON 間の飛行を例にとつて Inertial System 用の Computer, Inertial Position Error 速度による補正—Doppler radar との関係・天体観測による補正その他の補助装置、将来の問題点等について述べられている。

(d) System Aspects of Inertial Navigator Design.

DAVID F. SARETT Control Engineering August 1960. Inertial System の Basic Problem, Fundamental Requirement Inertial Instrumentation, System Mechanization (Geometric, Semianalytic, Analytic, Strapdown 各 System の characteristic の説明) Long, Short Term のエラー、実用上の問題点および将来の傾向等について述べられている。

(e) Inertial Navigation Engineering 8 July 1966

Inertial Navigation についての Outline が述べられている。Key wordsとして Gyroscope, Accelerometer, Computer, Gravity Earth's rate, Schuler, Coriolis, Centrifugal, Gyrocompass 等をあげている。

(f) What an Inertial Navigator Consist of. Frank Coffman Bell

(g) The Schuler Pendulum and Inertial Navigation. Professor A. Stratton

(f), (g) The Journal of The Institute of navigation VOL. 21 NO. 4 1960 例れも Schuler Pendulum を Inertial Navigation の基本と考える理論を批判したものである。

Schuler と Inertial Navigation とは直接関係はないという考え方を Schuler の Paper (1923) を対比して述べている。

(h) Inertial System Come of Age 外、Sperry Engineering Review VOL. 20 NO. 1 1967

Strapdown Inertial Navigation System, Inertial system のセンサである Fluid Sphere Gyro, その他のタイプの Gyroscope 等について Sperry の技術者数氏が記述している。

(i) SGN-10 First Commercial Inertial Navigator JOSEPH F. CALIGIURI Journal of The Institute of Navigation. VOL. 14 NO. 1 1967

最初の商用航空機用 Inertial Navigator の Outline を説明している。精度、信頼度、Gyroscope, Computer, Display Unit Control Unit について具体的な記述がある。

(j) SGN-4 Low Cost Marine Inertial Navigator JOSEPH F. CALIGIURI Journal of The Institute of Navigation. VOL. 12 NO. 2 1965

Marine Inertial System, SGN-4 について具体的な記述である。

(k) Commercial inertial is ready for take-off.

Electronic Design 2, January 18 1967

(l) BOAC to Flight Test Carousel 4 Navaid

Aviation Week & Space Technology November 6, 1967

(m) 747 To Set Inertial Pattern for Airlines.

Aviation Week & Space Technology November 20 1967

(n) Inertial Navigation approved for Airline use Intervia 9/1968

(k), (l), (m) は商船航空機に使用され始めた Inertial Navigation System について、精度、MTBF、価格等を記述している。

(n)は Litton 社の LTN-51 を American Airline に使用した実績について詳説し合せて LTN-51 について具体的に説明している。

(o) Honeywell 社資料

Accelerometer, Gyro Accelerometer, Integrating Gyro 等についての具体的な資料である。

(p) ジャイロ機構とその応用(1)～(11) 三浦 宏文

機械の研究、第18巻2号～第19巻第3号

ジャイロスコープの歴史から最新の理論、応用面が詳しく述べられている。

(2) システム要目の調査、検出器の精度に関する調査

(2-1) 概 要

自動航法システムは船位測定システム、船位推定システムおよび最適航路設定システムの3つのシステムに分けるが、ここでは、船位測定システムと船位推定システムを構成するサブシステムすなわち、

- (a) ロラン A/C システム
- (b) デツカシステム
- (c) オメガシステム
- (d) NNSS
- (e) 対水速力と針路測定による船位推定システム
- (f) 対地速力と " "
- (g) 慣性航法

の検出端（検出器）の精度に重点をおき説明する。

各サブシステムに対し、次の事項を主に検討した。

- (a) ロラン A/C : 発信局側の精度、有効範囲、受信機の精度
- (b) デツカ : システム誤差、空間波による誤差、双曲線の交角による誤差、電波伝播速度の違いによる誤差
- (c) オメガ : 空間波の補正
- (d) NNSS : 受信機が固定されているとき、および移動するときの誤差
- (e) 対水速力と針路測定のセンサ：電磁ログ、ジャイロコンパス、側方電磁ログの精度および演算精度
- (f) 対地速力のセンサ：ドップラーセンサ精度
- (g) 慣性航法：加速度計、ジャイロの精度

(2-2) ロラン受信機について

(a) ロランシステム

ロランの根本原理は電波伝搬の定速性を利用して、二つの局が発射する電波の伝搬所要時間の差を求め、あらかじめ印刷されたロランチャートまたはロランテーブルにより自分の位置する双曲線を求め、他の一組の双曲線との交点から船位を決定するものである。

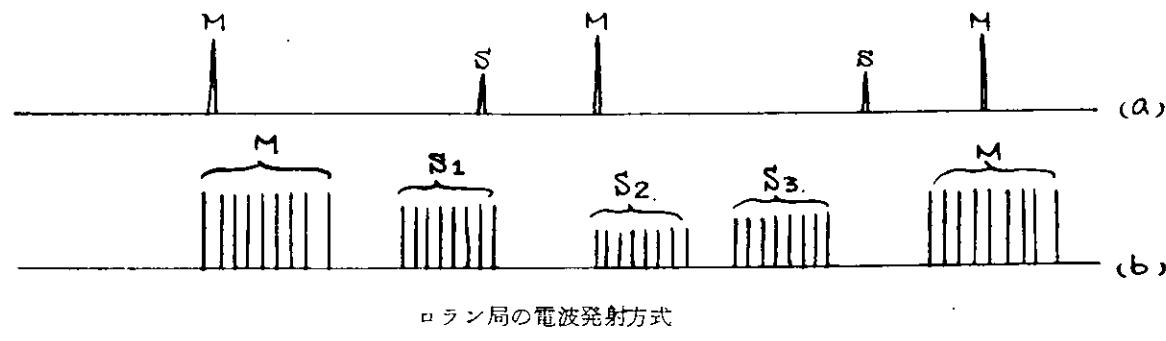
(i) ロラン電波の発射方式

現在ロランAシステムとロランCシステムが世界的に利用されている。ロランAにおいては主局と従局が一対となり主局がパルスを発射し、従局はその主局パルスを受信してから一定時間遅らせてパルスを発射する。このようにすることにより主局、従局の識別が行なわれる。

一方ロランCでは送信局は 1 m sec 間隔をもつ 8 ケのパルスで 1 グループを作つて送信する。主局信号グループには別に余分のパルスをつけて 9 本のグループとすることにより主局、従局の識別が行なえるようになっている。

各グループの個々の個々のパルスは主局、従局それぞれのコードにしたがつて位相が反転しており測定の自動化と精度向上、S/N の改善が行なえるように考慮されている。

また従局は主局に対して 2 ~ 4 局の従局で 1 つのチェーンを構成している。



(ii) ロラン電波の周波数とパルス繰返し周波数

ロラン電波の周波数および、パルス繰返し周波数はつきのとおりである。

ロラン電波周波数

	チャンネル	搬送波周波数
ロラン A	1	1,950 KHz
	2	1,850 "
	3	1,900 "
	4	1,750 "
ロラン B		100 "

ロラン電波繰返し周波数

	基本繰返し	繰返し周波数
ロラン C	S S	33 1/3 Hz
	S L	25 "
	S H	20 "
ロラン A C	S	16 2/3 "
	L	12 1/2 "
	H	10 "

この他に“特降繰返し”がある。特殊繰返しは基本繰返しの各々に對して 8 種類 (0 ~ 7) がありその数値が 1 増すごとに 100 μsec づつ繰返しが短くなる。たとえば、S S - 0 の場合、100,000 μsec であり、S S - 3 の場合は 100,000 μsec - 300 μsec = 99,700 μsec となり、S - 3 の場合は、50,000 μsec - 300 μsec = 49,700 μsec となる。

すなわち基本繰返し 6 種類、特殊繰返し 8 種類の組合せにより $6 \times 8 = 48$ 種類の繰返しの組合せが可能である。

(iii) ロラン送信局の発射電力

送信機の型式、アンテナの形状、パルスの発射方式等により異なるが普通 80 KW ~ 1,000 KW の尖頭電力を放射している。

(iv) ロラン電波のバンド巾

ロラン A とロラン C で異なるが要求される精度を持ち、かつ最小のバンド巾となるごとく選ばれたもので、波形は大体において $\cos 2$ 乗波形である。このバンド巾はパルス期間の逆数程度、または 50 % 振巾の逆数の 2 倍程度のバンド巾であり、この程度のバンド巾を持つ受信機ならば受信波形のはんの僅かしか変形を受けないことが知られている。

ロランパルス巾

	ロラン A	ロラン C
基礎のパルス巾	80 μsec	300 μsec
10 % の振巾の巾	60 "	196 "
50 % "	40 "	70 "
10 % ~ 90 % 振巾立上り	21 "	42 "
90 % ~ 10 % 振巾立下り	21 "	50 "

(v) 送信周波数の偏差

ロラン電波の搬送波はタイマーの発信器から合成したものであるため長期安定度が非常によく、その偏差はロラン A で 10^{-18} 、ロラン C で 10^{-10} 程度である。

特にロランCでは受信に際しその搬送波の位相重合を行なうので、その安定度は非常に高く保たれるようになつてゐる。

(vi) ロランの有効範囲

ロランの利用範囲は受信点の雑音状態により大きく左右されるが、一般的には次のような。

(vii) 有効範囲の限界

ロランの有効範囲は信号が観測できればよいというのではない。最低レベルの信号があつても、基線延長上附近では精度が低下する。一組のロラン有効範囲はつぎのように推定される。

- a) 地表波の測定値 $1 \mu\text{V}/\text{m}$ が距離にして 2 カイリの変化を伴うようなロラン位置の線の範囲を考える。
 - b) 空間波ならば測定値の確率誤差が 3.2 カイリ以下の地域である。
 - c) ロラン A、C ともに地上波の第 1 回 E 層反射波以外は信頼度の点で使用不可能である。
- 二組のロラン局により位置を求める場合にはさらに有効範囲が限定される。これはそれぞれの位置の線の交角が鈍角に交わる場合で、このような場所が多くなるような局配置がなされている場合には有効範囲がさらに狭くなる。

(b) ロラン受信機

(i) ロラン受信機と有効範囲

一般に用いられるロラン受信機は約 $5 \mu\text{V}/\text{m}$ の最小感度に設計されている。したがつて雑音のない場合は有効範囲の限界として実効高 5 m のアンテナを用いると $1 \mu\text{V}/\text{m}$ の電界強度が限界となるが、実際には諸々の雑音の影響でこれより有効範囲が狭くなるのが普通である。

(ii) 雜 音

雑音は大別して大気雑音と局部雑音に分けられる。

大気雑音は世界の何処かで起る種々の空電によるものであるから、大雷雨の多い地方は当然高いレベルである。

局部雑音は船舶、航空機上の局部または都市近郊の工業地帯での人工雑音であり条件により著しく差がある。一般的にはロラン周波数帯における大気雑音は次に示すごとくである。

(iii) ロラン精度に対する S/N の影響

帯域巾 10 kHz における雑音電界強度

	昼 間	夜 間
100 KHz	$40 \mu\text{V}/\text{m}$	$250 \mu\text{V}/\text{m}$
2 KHz	$0.03 \mu\text{V}/\text{m}$	$30 \mu\text{V}/\text{m}$

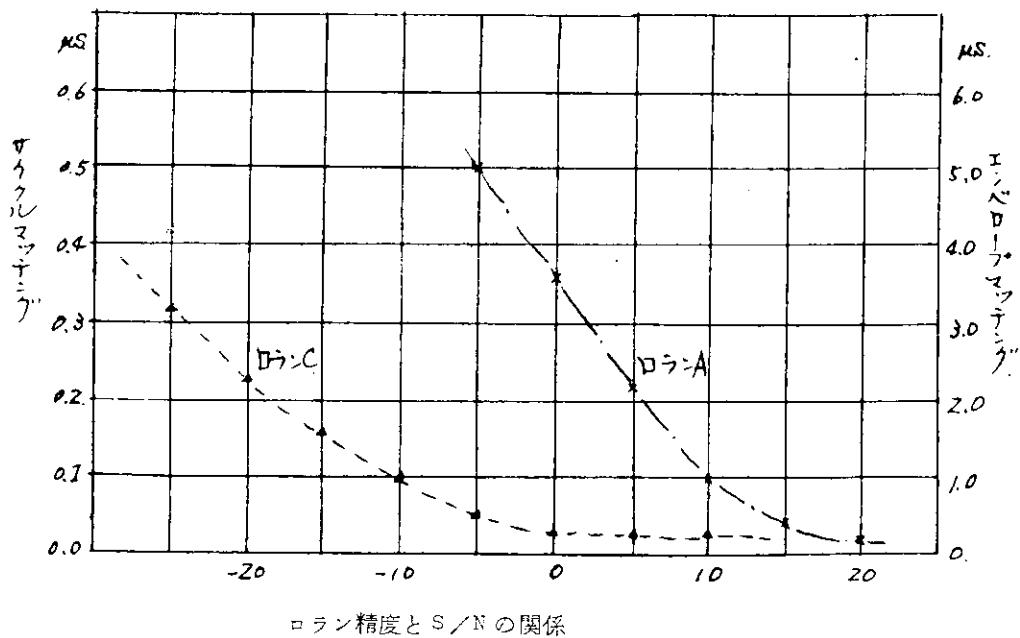
次図にロラン精度と S/N の関係を示す。これは多くの観測結果に基づいて S/N とそれぞれのパルス整合の場合の精度についての概略を示したものである。ロラン A の場合には手動による方法でロラン C の場合は自動による方法である。また S/N が低い時にはサイクルマッチングの所定精度は 2 ~ 3 分間の時間差を平均することによつて保つことができる。これはもちろん測定に許容される最大誤差に関するし、測定者の技術や傾向にも関係がある。

(iv) その他の誤差に関する事項

その他の妨害として空間波と地上波の見違ひによる問題と、他の同じような繰返しの周波数による妨害、さらに他の繰返し周波数の電波がちょうど信号であるかのように同期する現象(ゴーストレート)を見違えて測定をしたときは正確な測定が行なえない。

ゴーストレートとしては $\begin{cases} 1H0, 1S0, 1L0 \\ 1H3, 1S5, 1L4 \end{cases}$ 等が考えられる。

つぎに位置線の交角(LOP)に関する問題があるが、短い基線の時は交角がよくても有効面積が小さいこ



とがある。LOP の小さい所では電波伝搬速度などすべての誤差は増大する傾向にある。局間距離を β とするとき、 $n\beta$ を半径とする円上での精度は $n/3$ カイリ/ μ sec となる。

長い基線の場合は短い基線の場合より広範囲にわたり LOP を密に分布させることになる。位置の決定を最もよくするためには LOP が 90° に交わるようにすることである。少なくとも 30° の交角をとることが望ましいが、できない場合は最小角 15° まで利用できる。理想的には基線の角度が 180° より小さい角度で希望する範囲をその内に納めることである。また基線上で精度は最も高く、基線延長線上で最も低い。

6 β	2 カイリ/ μ sec
3 β	1 カイリ/ μ sec
$1\frac{1}{2}\beta$	0.5 カイリ/ μ sec

(V) ロラン受信機の機能

ロラン受信機において測定が容易に行なえるように種々の自動回路が備えられている。たとえば信号を所定の位置に停止させる自動信号停止回路(ASC)、信号振巾を制御する自動信号振巾制御回路(AGC)、常に送信信号に安定に同期をかける自動周波数制御回路(AFC)などがある。

a) 自動信号停止回路(ASC)

測定に際しては主局信号、従局信号を所定のペデスタル上に停止させる必要がある。自動信号停止回路はこの操作を行なう。

この回路の働きにより主局信号は主局ペデスタル上の所定の位置(左端)に、従局信号は従局ペデスタル上の所定の位置に停止する。

b) 自動振巾制御回路(AGC)

測定はロラン信号($\cos 2$ 乗波)の立上り部分を重合して行なうのであるが、信号振巾が異ると立上りの傾斜が異り測定がし難く、また、誤差を招く原因となる。信号の強弱にかかわらず振巾を常に一定に保つように働くのがこの回路である。

c) 自動周波数制御回路(AFC)

信号が所定の位置に停止したのち、この回路により常に安定に送信信号に同期をとる。この回路の動作の状態によりロラン受信機の精度が決定されるものと考えられる。

ロランCにおいては二つの方法があり、その1つはロラン信号の検波波形のゆるやかな傾斜により AFC をかけるエンバロープマッチングとロラン信号の搬送波(100 KHz)の急激な傾斜を用いて AFC をかけ

るサイクルマッチングである。

前者はスロープがゆるやかであるため安定度はあまり良くないが、後者は急激なスロープを用いているため、安定度がよい。

また後者においては二つの方式が考えられる。

第1として、ロラン信号の8本のすべての信号から同期信号をとり出す方法であり、第2はロラン信号グループの最初の1本目の信号から同期信号をとり出す方式である。前者の方が安定度の点で優れていることはもちろんあるがその手段が複雑であるため、簡易型ロラン受信機ではあまり用いられない。

d) 自動追尾回路(ATC)

以上に加えて自動追尾回路(ATC)がある。この回路の働きはある位置で測定を行ない、ロラン受信機をロラン信号に同期させてしまうとその後、位置が移動しても時々刻々、その位置を表示しつづけるものである。この回路を有する受信機であればその都度測定する不便さがないため、非常に有利な方法である。

(2-3) デツカ受信機について

デツカ方式による位置測定は非常に精度の高いものであるが、他の双曲線航法方式におけると同様に、次の誤差を考慮する必要がある。

(a) システム誤差

(b) 空間波による誤差

(c) 双曲線の交角による誤差

(d) 電波伝播速度の違いによる誤差

(e) システムの誤差

各従局は主局信号を受信し、これによつて自己送信信号を主局信号に同期させている。

したがつて、各従局が受信している主局信号に空間波が混入した場合は、主従局間の伝播上の距離が変化することになり、これによつて誤差を生ずる。

システム誤差では空間波による誤差が最も問題となる。このほか装置上に起因する誤差も含まれるが、全体としては問題にならない量に抑えられている。

(b) 空間波による誤差

送信局から遠ざかるにつれて空間波の比率が高くなり、これによつて受信信号の位相干渉を引起すとともに位置誤差となる。誤差量は次図により求めることができる。

ただし G : 地表波の電界強度

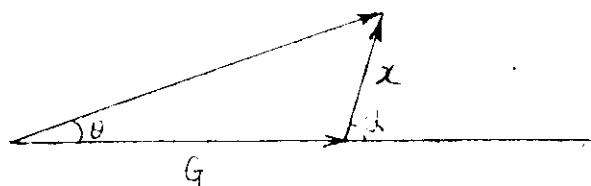
S : 空間波の $\mu \mu$

X : S の瞬時値

θ : 地表波の合成波との角度

θ_1 : θ の瞬時値

α : 地表波と空間波との角度



$\theta \gg X$ が成立する範囲では、 θ_1 は次式で表わすことができる。

$$\theta_1 = \frac{X \sin \alpha}{2\pi G} \text{ (rad)}$$

次に、空間波の位相は任意に変化し、その位相角はすべて同様の確率で生ずると考えられるので、 θ_1 の RMS 値 α は、次のようにして求めることができる。

$$\alpha^2 = \frac{\sum \theta_1^2}{n} = \frac{1}{(2\pi)^2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{G^2}{S^2}$$

$$\therefore \sigma = \frac{1}{2\pi\sqrt{2}} \cdot \frac{s}{g} \approx \frac{1}{9} \cdot \frac{s}{g}$$

この σ が、空間波による位相誤差の R.M.S. 値である。次に、デツカ受信機を使用した場合の空間波による誤差を求めてみる。

主局および従局の電波は、電信された後各々比較周波数に倍増されたのち比較される。

地表波と空間波との合成信号は、地表波信号成分との位相角が θ_1 、 θ_2 である二つの信号を、それぞれ a 、 b で倍増して比較すると合成位相差 θ_x は

$$\theta_x = a\theta_1 - b\theta_2$$

となる。したがつて空間波による位相誤差 σ_x は

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \frac{1}{n} \sum \theta_x^2 \\ &= \frac{1}{n} \sum (a\theta_1^2 - b\theta_2^2)^2 \\ &= \frac{1}{n} \{ \sum a^2 \theta_1^2 + \sum b^2 \theta_2^2 - \sum 2ab\theta_1\theta_2 \}\end{aligned}$$

となる。ここで θ_1 、 θ_2 は任意に変化し、その値は同じ確率で生ずると考えられるので、

$$\sum a\theta_1 + b\theta_2 = 0$$

となる。

$$\therefore \sigma_x^2 = a^2 \sigma_1^2 + b^2 \sigma_2^2$$

ここで、 σ_1 、 σ_2 はそれぞれ θ_1 、 θ_2 の R.M.S. 値である。

以上のようにし緑局より 450 Km の地点で、緑レーンの誤差は 0.21 レーンであつた。

この式を用いて、実際に数値を代入しレーン誤差を求めてみると、北海道チーンでは、主局より 600 Km の地点、緑局より 450 Km の地点で緑レーンの誤差は 0.21 レーンであつた。

なお、大地の導電率を 1×10^{-13} (e.m.u) とした。

(c) 双曲線の交角による誤差

双曲線航法では、位置の線の密度が高いほど偏位誤差は少なく、基線を離れるに従つて双曲線間の間隔が広がり偏位誤差も大きくなる。

基線を離れた任意の地点における、位置の線の偏位誤差 ϵ は一般に次式で示される。

$$\epsilon = \Delta \ell \cdot W \cos \phi / 2$$

ただし ϵ ; 位置の線の誤差 (m)

$\Delta \ell$; デコメータの指示誤差 (レーン)

W ; レーンの巾 (m/レーン)

ϕ ; 測定点における主局と従局間の夾角

したがつて、デツカを用いて 2 本の位置の線の交点として求めた位置についての誤差は、各々の位置の線の誤差によつて変化する。

すなわち、二つのデコメータの指示に誤差が含まれる場合は、測定値は真の位置の付近に一つの広がりをもつことになる。

いま赤と緑デコメータによつて位置を測定したとして、 δ_R 、 δ_G をそれぞれ赤および緑のレーン誤差の標準偏差とし、 W_R 、 W_G を赤および緑のベースライン上の広さ、また ϕ_R 、 ϕ_G をそれぞれ赤局および緑局と主局間の測定点での角度とすると、位置の標準誤差 σ_R および σ_G は次式のようになる。

$$\left. \begin{aligned}\sigma_R &= \delta_R \cdot W_R \cdot \operatorname{cosec} \frac{\phi_R}{2} \\ \sigma_G &= \delta_G \cdot W_G \cdot \operatorname{cosec} \frac{\phi_G}{2}\end{aligned}\right\}$$

次に、デッカによる測定位の誤差のR.M.S.値 $\sigma_{(R.M.S.)}$ は

$$\sigma_{(R.M.S.)} = \cosec \beta \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_G^2 + 2r\sigma_R\sigma_G}$$

となる。

ここで β は位置の線間の角度、または r は赤および緑の平均値からの偏移の相関係数である。

R.M.S.誤差は次図に示すように、一つの円の半径として示され、位置の測定値は約65%の確率で円に含まれることを示す。

この円は、デッカの誤差を評価するのに通常使用される方法である。

相関係数 r は実際には小さな量であるので無視できる。実際には、誤差の分布は橢円であり、チェーンからの距離によつて長軸と短軸との比が変化する。

このため、誤差はある方向については、その点のR.M.S.誤差よりいくぶん少なくなる。

(d) 電波伝播速度の違いによる誤差

デッカチャートは通常電波伝播速度を仮定して算出している。

しかし、伝播経路は多くの場合陸上と海上の双方にまたがり、しかも大地導電率が異なることなどのため、地域によつては固定した誤差が現われてくる。

誤差の量としては、数十分の1ないしは数分の1レーン程度であるが、これを補正するため、デッカでは多くのデッカチャートについて補正表が用意されている。

場所によつては、チャートそのものが補正されている場合もある。

(2-4) オメガ受信機について

オメガ航法は1947年にハーバード大学のJ.A.Pierce教授の提案に基いてアメリカ海軍が開発を始めた、VLF(10.2~13.6kHz)の連続波の位相比較によつて位相測定を行なう航法方式である。1972年までに8つの送信局が地球上の適所に設置されることになつてゐるが、その時には世界中どこでも1~2浬の精度で位置決定が可能となるため、近い将来には遠隔離電波航法の主流となるものと予想される。

8つの送信局の内の4局(内3局は最終設置場所に一致している)は、すでに1966年頃までに実験局として設置されており、それらの実験局からのテスト電波等を対象にして、過去10年間以上にわたつて行なわれたVLF電波の位相安定度等についての広範囲な実験の測定結果から、この周波数帯の電波は、位相安定度が良く減衰が少ないという利点が確認された。

対局当たりの安定なカバーレンジが7000浬以上にもなるため、わずか8局で良好な精度と高い信頼度での汎世界的な位置決定が可能であり、さらにこのように低い周波数帯の電波は水深15m位までは海水中にも伝播するため、海上および海中の船舶や航空機で利用することができる。

現在設置されている4つの実験局からのオメガ電波によつても、北大西洋全域とハワイよりアメリカ側の太平洋海域では実用可能であり、そのためのオメガチャートも提供されている。

汎世界的な長距離航行援助方式としては、オメガ航法の外に種々の衛星航法が併行して研究開発されているようであるが、両者は互に他方の弱点を補う特徴を持つており、またいずれが実用上より有利かは対象とする船舶の種類によつても異なるので、両者は共存する航法方式となるものと予想される。

オメガ航法におけるオメガ受信機は次のよう動作をする。

地球上に分布した8局から一定の時間順序で時分割的に送られてくる10.2kHzのオメガ電波の内から、2つ

以上の対局について、それらの間の位相差を測定し、またそれらの位相差を連続的に測定することにより位相差が変化しながら零点を通過する回数、すなわちレーン番号の変化量をも計数し、これらの動作によつて得たレーン番号と位相差に基づいてオメガ・チャートまたはオメガ・テーブルから、2本以上の双曲線の位置線(LOP)を求め、それらの位置線の交点から船位を決定しようとするものである。

レーンの初期値には、既知の港から出発する時は、チャートの値をセットすればよく、そうでない時は、13.6 kHz および 11.33 kHz のオメガ電波についても対局の位相差を測定し、それらの測定値を 10.2 kHz での位相差測定値と比較することにより、レーン番号を知ることができる。

したがつてオメガ受信機は少なくとも次の機能を持たねばなりません。

(a) 一定順序で8つの局から送られてくる送信波を識別するためのパターン識別機能。

(b) 受信信号の中から特定局の信号だけを選別する機能。

(c) 選別した対局の相対位相を所要の精度で測定する機能。

それらの機能を果すためには次にあげる基本動作を満足していかなければならない。

(a) オメガ信号と入り混つている複雑な雜音や干渉波の中から必要なオメガ信号のみを渾波する動作。

(b) 所要の局からの信号のみを選出するための時間選出動作

(c) 各信号成分を受信した時、その位相を比較するための安定なタイムベース(受信機内標準時計)。

(d) タイムベースに対する各信号成分の位相を所要の精度で測定できる回路。

オメガ受信の構成は、上記の機能をどの程度まで手動操作を加えずに行えるか、また得られた位相差測定値の処理をどのようにするか等の付帯的な要素によって、信号増幅器とオシロスコープだけからなる簡単な構成のものから測定のシーケンス制御、測定データを取捨選択しての緯度・経度算定までを全自動式に行なわすデータ処理方式のものまで、各種の段階のものに分けられるが、精度そのものは自動化の程度にはあまり依存しない。

したがつて、対象とする利用者の要求にマッチした規模のオメガ受信機を開発することが可能である。

(2-5) NNSS受信機について

衛星を使用した航法に関する誤差は大きく2つに分けて、受信機を固定した場合および船に搭載した場合すなわち受信機が移動している場合とに分けられる。あるいはまた受信機自体に起因する誤差およびシステム全体に関連する誤差がある。

(a) 船上搭載した場合の誤差

(i) 反射波による誤差

受信空中線が衛星から放射される信号の直接波ではなく、反射波を受信した場合、衛星と受信機までの電波の伝播距離が変化し、見かけの直線距離が実際とは異なり、計算結果が狂つてくる。また直接波と反射波との相互干渉により、時間とともに高周波の位相が変化し衛星の信号が消失するおそれがある。受信機が反射波を受信する可能性は、空中線附近に建造物がある場合および衛星が水平線附近にある場合である。したがつて反射波の影響を減らすためには空中線の近くに建造物がないことが望ましく、また空中線の放射特性を水平面内は零にするかあるいは受信信号の始まりと終りの部分を使用しないことによつて反射波による影響を除去できる。

(ii) 空中線が船舶の重心に搭載されないかぎり空中線は船舶の動きとともに振動する。空中線の振動により衛星のデータが多少とも変化する可能性がある。振動の周期が短い場合、振動はデータの雜音を増加させることになる。また振動の周期がデータのタイムスパンよりかなり長い時、空中線の運動は直線運動に近似できるが、振動周期がデータのタイムスパンと同程度の長さであるとき、データに生ずる誤差は大きくなると予想され、さらに検討される必要がある。

(iii) 空中線の横方向の運動

空中線の横方向の運動すなわち船舶の速度は船位決定計算に関し1つのパラメータであるため速度測定における誤差は当然船位の精度に関係する。一般に衛星が低高度（俯仰角が小）の場合より高高度の場合の誤差が大になるが、概略速度測定において1ノットの誤差があれば位置誤差は0.2浬程度、また速度測定誤差が2ノットの場合、位置誤差は $\frac{1}{4} \sim \frac{1}{3}$ 浬程度である。

(b) 受信機を固定した位置に設置した場合の誤差

受信機の位置を固定した場合でも衛星の位置によって精度が変化する。今衛星の進行方向に沿つての衛星の速度誤差を“along-track”誤差、直角方向の速度誤差を“cross-track”誤差と規定すれば、これらの誤差は水平角Kに関係する。“along-track”誤差による位置誤差を δR_A 、“cross-track”誤差によるものを δR_C とおく。Kが $15^\circ \sim 75^\circ$ のとき精度に及ぼす影響は一定であるが、 $K < 15^\circ$ 、 $K > 75^\circ$ のとき誤差は大きくなる。 $K > 75^\circ$ になる確率は衛星の全通過に対しわずかに数パーセントとあり、Kの実効値は約 30° である。受信機自身に原因する誤差として水晶発振器の周波数変動によるものがある。周波数偏差が一定でかつ変動がない場合、船位決定計算に誤差は生じないが衛星の通過中に周波数変動を生じた場合、ドップラ周波数の積分値が変動し、衛星の位置が衛星の進行方向で変化したことと等価であり、 δR_C は次のように表わされる。

$$\delta R_C \approx 2 \times 10^8 (f'/f) m$$

ここで f'/f は発振周波数の1日における変化の割合である。いま発振器の周波数変動が $10^{-10}/day$ であるとき、 $\delta R_C \approx 2cm$ または $10^{-8}/hour$ の場合、 $\delta R_C \approx 0.5$ 浬程度である。この程度の周波数安定度を維持することは容易である。

その他誤差については電離層による電波の屈折、地整による影響等があるが、結局誤差の分散としてジョンホブキンス大学で行なった実験の結果として緯度・経度での標準偏差は経度で $70.1m$ 、緯度で $70.2m$ 、また誤差の平均値は経度 $3.0m$ 、緯度 $0.6m$ である。この実験1966年1月に行なわれたもので衛星の通過回数は40回、また $15^\circ \leq K \leq 75^\circ$ であつた。

(c) 結論

現状ではNNSSに関して $10m$ を超す誤差の原因として重力場の不完全なる知識と速度測定の誤差がある。 $10m$ 程度の誤差は15分間隔の推測航法と同程度である。

また重力の加速度の偏差に対する知識が増加すれば当然位置精度は向上する筈である。現在、Magnavox、ITTその他の受信機による位置決定精度は約300フィート($100m$)と称せられている。

(2-6) 対水速力および針路測定のセンサーについて

(a) システム要目

船位推定システムのワーキンググループは昭和43年9月までに研究討議を行なつた結果を9月11日第106研究部会航法システム分科会(第1回)において報告し承認を得た。その内容は次のとおりである。

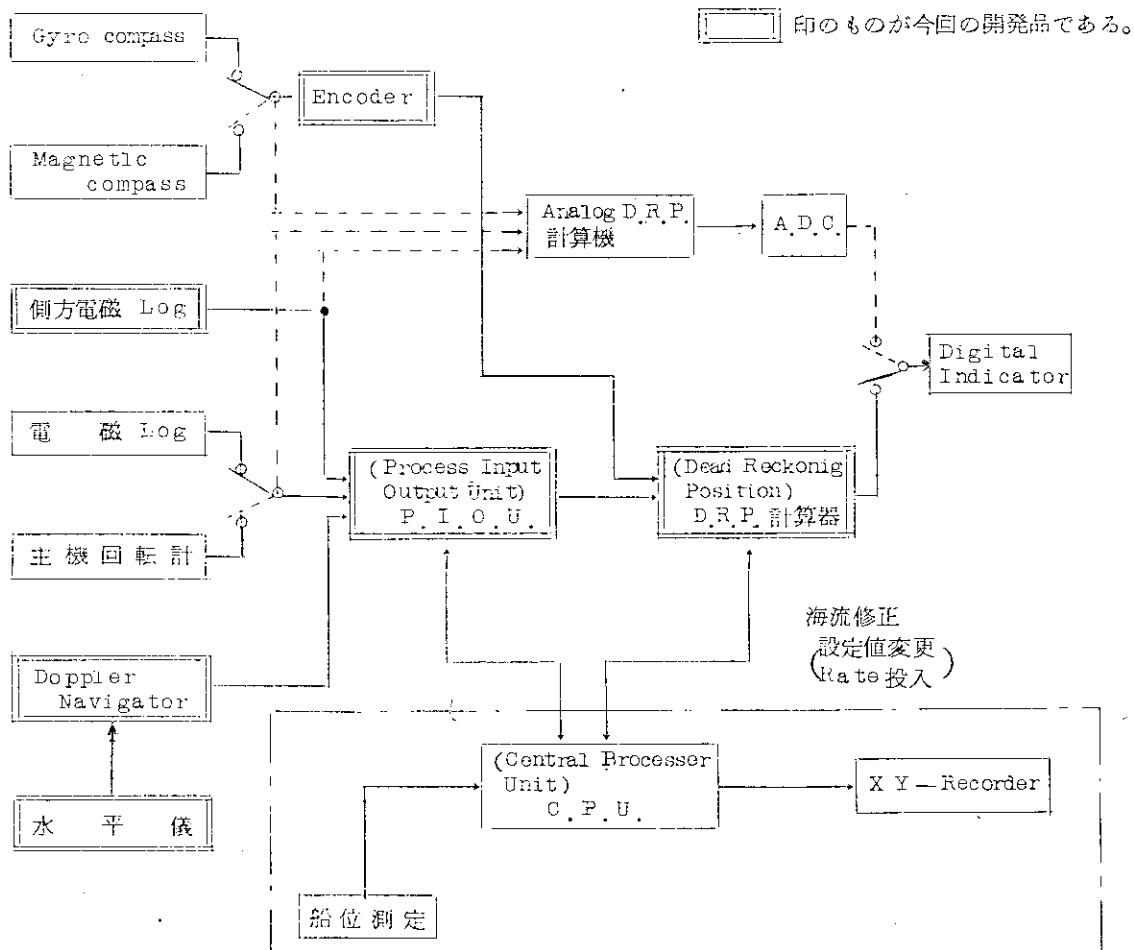
(i) 船位推定システムの装置は、安全を考慮しDigital方式のものとAnalog方式のものとの並列系統とし、Digitalを主としAnalogを補助として切換え使用するものとする。ただしAnalog方式のものは今回は採り上げない。緯度と経度の表示と発信までを行なう。なお今回Analog方式のものを採り上げない理由は、Analog方式のものは従事製作されており、この一部の改良程度は特別の研究を行なわずにできるものと考えるからである。

(ii) 開発するものは次のとおりであり、それらの総合精度は±1%を目標とする。ただし海流による誤差を含まない。

(1) Gyro Compass の方位のDigital変換器(Encoder)。(potentiometerによらないもの)

- (e) 側方 Log (仮称)。これは風の影響の修正に有利であるから研究を進める。もし1台のもので前後方向の速力と側方の速力とが同時に測定できれば1台にまとめる。
- (f) Doppler Navigator。この有効深度は $1.5\text{ m} \sim 1,500\text{ m}$ 、計測範囲は $0.1\text{ kt} \sim 30\text{ kt}$ 、精度は 0.1 kt を目標とする。
- (g) Doppler Navigator用水平儀。これは Rolling と Pitching における出力の修正のため必要なもので、精度は1度程度のものとする。
- (h) Dead Reckoning Position Calculator。これは船位推定の専用の計算器であり、別にある Computer とは分離している。ただし海流に対する補正など、D.R.P.C. でできない計算は Central Computer で行うこととし、D.R.P.C. はできるだけ簡単な Digital 型計算器とする。
- (i) Process Input Output Unit。これは Gyro 方位や速力などを計算器に入れるための Analog → Digital 変換器を含む装置である。この装置については Central computer との関係があるので、今後 computer 分科会と討議する必要がある。
- (j) 船位推定システムの総合系は次のとおりである。

船位推定システム総合系ブロックダイヤグラム



- (iii) すでに開発されたもの(A)、あるいは容易に開発される見込のもの(B)および今回は開発が間に合わないもの(C)などは今回の開発項目から除外する。これに該当するものは次のとおりである。
- (i) Gyro compass (A)
- (ii) 電磁 Log (A)

- (e) Analog式 Dead Reckoning Analyser (DRA) (船位推定の演算部) (B)
 - (f) 磁気Compassと角度発信装置 (A)
 - (g) 主機回転計と発信装置 (A)
 - (h) Inertial Navigation System(慣性航法装置) (C)
- (b) 検出器の精度

船位推定システムの総合精度は海流による誤差を除き±1%を目標とすることを条件としたときの各検出器の精度は次のとおりである。

(i) 電磁ログ

前後方向の積算距離の精度が1%あるためには速力測定の誤差は1%以下でなければならぬ。巡航速力が20 knotであれば0.2 knot以下の誤差であることが必要である。現在商船用の電磁ログ(北辰製)の性能は次のとおりである。

測定範囲	0 ~ 25 knot (前進)
	0 ~ 5 knot (後進)
速力感度	0.05 knot以内
速力精度	±0.2 knot
向指精度	±0.15 knot
航程精度	±1% (ただし全目盛の1%以上において)
周囲温度条件	0 ~ 45°C
電源変動	電圧±10%以内、周波数±5%以内において、速力指示において0.1 knot以下、航程指示において±1%以下

したがつてこのままの製品をもつて船位推定に使用できるものと考える。

(ii) Gyro Compass

速力測定に誤差がなく針路測定に $\frac{1}{100}$ Radian ($\pm 0.6^\circ$) の誤差があれば船位推定による位置誤差は左右方向に1%となる。これに対し現在の商船用のGyro Compassの性能はおおむね次のとおりである。

(1) 速度と加速度とがない状態における精度は±0.2度以内である。

(2) 加速度がなく速度(南北方向の成分)があるときの精度は速度誤差の修正方法によつて異なる。

速度誤差 δ は次の式にて表わされる。

$$\delta = \frac{V \cos \theta}{R \omega \cos \varphi} \quad \begin{array}{l} \text{ここに } V \text{ は速力, } \theta \text{ は針路角, } R \text{ は地球半径, } \omega \text{ は地球自転の角速度,} \\ \varphi \text{ は所在緯度である。} \end{array}$$

速度誤差はこのように計算により求めることができるので、商船用のGyro Compassは一般に所在緯度と速力とを設定することによりあとは自動的に誤差を算出して Compass 針路に修正を加えている。修正の精度は約0.1度である。

(3) 動搖や振動を受けるときにはそれらの大きさや周期によつて異なる誤差が発生する。通常の場合この誤差は±0.5度以内である。Gyro Compassが供給したり装置の一部に破損が生ずるような異常な外力が働く場合には誤差は大きいが、これは例外事故として処理しなければならない。

(4) 南北方向に加減速を受けると、いわゆるBallistic Deflection Errorが生ずる。これは船が南北方向に増減速しても、または一定速力であつても針路を大きく變える場合にも生ずる。東西方向の増減速では誤差は発生しない。一般にGyro Compassの固有振盪周期は3~4.4分位近い値に選ばれ、いわゆるSchmidt'sの理論により加速度誤差を0または少なくするような構造になつてゐる。しかし加速度誤差を0にするためには、増減速の時間中のGyroの指向運動のDecoupling作用を中心とする特別の装置を

付属させなければならない。(軍艦用のGyro Compassには付属されている)商船用のGyro Compassにはあまり必要はなく、また複雑で高価であるために以上の装置は付いていない。したがつて加速度誤差を0にすることはできない。船が北または南の針路から東または西の針路へ変針するとき、あるいはこれと逆方向へ変針するときの加速度誤差が最大であり、その大きさはそのときの速力の大きさに比例するから、速力が20 knotの場合には、この誤差は1度前後となる。これは変針、变速が終了してから約20～30分後に最大の値となり、以後時間を経て削減する。

実際の航海において20 knotでの90度変針や、20 knotの増減速の機会は多くはないと考えられるから、平均すれば0.6度位多ければ1度位と考えられるため、船位推定に現在の商船用Gyro Compassがこのまゝ使用できると考える。

(iii) 側方電磁ログ

前後進用の電磁ログの精度と併せ考え、この精度は±0.2 knot以内である必要がある。開発目標の性能は次のとおりである。

測定範囲 0～7 kt(左右方向)

速力精度 ±0.2 knot以内

その他は電磁ログの性能に準ずる

(iv) 針路と速力の測定と演算の間隔

出発点からある時間経過した後の現在位置の推定は速力Vと針路θとから東西移動距離と南北移動距離とを計算して行なわれる。

すなわち東西移動距離は $\int V \sin \theta dt$ であり南北移動距離は、 $\int V \cos \theta dt$ で求められる。もし速力と針路とが一定値であれば、速力と針路との測定と演算は一度行なえば十分であり、あとは時間による積分計算だけを進めればよい。

速力と針路とが頻繁に変化するならば、両方の測定と演算回数を多くしなければならない。こういう見地から測定演算の間隔はどの程度がよいかを検討した結果は次のとおりである。

速力と針路の変化は大洋航海のように目的地に向けて一定の針路と速力を計画して走る場合と、港や狭水路の航行のように針路と速力を頻繁に変える必要のある場合とでは大きな違いがあるので、この2つの場合に分けて考える。

(1) 針路点Aから目的点Bに向けて一定速力Vで針路を一定VCに計画して進む場合に速力Vは一定であるが、針路は計画針路を中心にして周期T秒の正弦波状の yawing をしており、その振幅はθ₀。 $\sin \frac{2\pi}{T} t$ で表わされるものとする。

時間Tの間にA→B方向へ進む距離は $\int_0^T V \cos(\theta_0 \sin \frac{2\pi}{T} t) dt$ で表わされるから、この値を計算すると、

$$\begin{aligned} \int_0^T V \cos(\theta_0 \sin \frac{2\pi}{T} t) dt &= \int_0^T V \{ 1 - \frac{1}{2} (\theta_0 \sin \frac{2\pi}{T} t)^2 \} dt = VT - \frac{VT\theta_0^2}{4} \\ &= VT \left(1 - \frac{\theta_0^2}{4} \right) \end{aligned}$$

yawing をしないときの距離は VT であるから、それとの差は $\frac{VT\theta_0^2}{4}$ となる。

これが VT の 1%に相当するときすれば $\frac{\theta_0^2}{4} = 0.01$ であるから $\theta_0 = 11$ 度となる。すなわち yawing 幅が±11度以内であれば、無限に細かく移動距離を計算しても平均針路で1回計算してもその差は 1%以下であるということになる。また最大振幅の時に $V \cos \theta_0$ が V に対して 1% の差であるとすれば、 $\cos \theta_0 = 0.99$ すなわち振幅θ₀は約8度となる。yawingが正弦波でなくとも最大振幅が±8度以下であれば測

定と演算がいつであつても誤差は1%以下となる。

進行方向に直角な方向のそれは yawing が正弦波であるときには回数多く測定演算することによつて0となるが、yawing 周期に等しい間隔かその倍数で測定するときには大きな誤差となる場合がある。yawing 周期に等しい間隔がその倍数で測定するときには大きな誤差となる場合がある。yawing 振幅が±0.6度以内であればいつ測定演算しても誤差は1%である。

(iv) 針路と速力とが頻繁に変わる場合

この場合には回数多く測定演算しなければ誤差は多くなる。しかしこのような場合には対岸物標等による位置の測定が容易に行なわれると考えられるから、この場合の船位推定の誤差は許されるとすべきである。

以上により船位推定は大洋航海時の精度を中心に考え、前進方向の位置誤差のためには測定、演算の間隔は±8度以下の yawing においては数分程度でも差支えないが、横方向の位置誤差のためには測定演算間隔を短くした方がよいと考えられる。その他荒天の場合も考え、最適な測定演算間隔の決定にはさらに検討と実験とが必要である。

IV 緯度経度の算出における地球半径の修正

航行距離の南北成分から緯度変化を計算し、東西成分から経度変化を計算するに当り、地球半径の値を一定とするが修正を加うべきかについては次のように考える。

地球が完全な球である場合には緯度、経度は次式により求められる。

$$\text{緯度の変化} = \frac{\text{南北移動距離}}{\text{地球の半径}}$$

$$\text{経度の変化} = \frac{\text{東西移動距離}}{(\text{地球の半径}) \times \cos \text{緯度}}$$

一方実際の各緯度1秒に対する弧の長さは次のとおりである。

以上において緯度0度の弧の長さと緯度70度の弧の長さとの差は0度の値に対し0.9%である。したがつて緯度70度の使用を考えたとき平均値に近い緯度、たとえば緯度42度(308546m)を基準にとると、緯度0度において0.45%減、70度において0.44%増となり、±0.5%の範囲内となる。

したがつて総合精度を±1%とする条件においては地球半径を一定として差支ない。また実際の各緯度における経度1秒に対する弧の長さは次のとおりである。

緯 度	緯度1秒に対する弧の長さ	緯 度	緯度1秒に対する弧の長さ
0	307154 m	45	308709 m
5	307178	50	308981
10	307248	55	309244
15	307362	60	309492
20	304517	65	309716
25	307708	70	309910
30	307930	7.5	310067
35	308176		
40	308438		

緯 度	経度1秒に対する弧の長さ	緯 度	経度1秒に対する弧の長さ
0	309233 m	40	237216 m
5	308064	45	219629
10	304566	50	199164
15	298763	55	177770
20	290698	60	155008
25	280429	65	131050
30	268029	70	106079
35	253590	7.5	80288

経度に対する弧の長さを $\cos(\text{緯度})$ で割算した値は次のとおりである。

(この値は各緯度における半径に比例する値である。)

緯度 70 度における上の値と緯度 0 度の値との差は 0.3 % である。したがつて経度の計算においても地球半径を一定として差支えない。

(vi) 水平儀 (Doppler Navigator 用)

緯度	経度 1 度の弧 $\div \cos \text{緯度}$	緯度	経度 1 度の弧 $\div \cos \text{緯度}$
0	30.9233 m	40	30.9663 m
5	30.9241	45	30.9753
10	30.9264	50	30.9844
15	30.9302	55	30.9933
20	30.9355	60	31.0018
25	30.9419	65	31.0090
30	30.9493	70	31.0154
35	30.9576	75	31.0209

Doppler Navigator の入出力の修正用であるため精度は 1 度程度のものでよい。

(vii) 方位信号用エンコーダ

ジャイロコンパスの方位信号は上記の検討結果でわかるように $\pm 0.5^\circ$ の精度でコンピュータの中に入れる必要がある。したがつて方位信号用エンコーダは $\pm 0.5^\circ$ の分解能のものとなる。シャフトエンコーダは全方位 360° を 0.5° の刻みでデジタル信号に変換可能であるものすなわち 1 周を 720 bits とし、分解能は 1 bit として計画する必要がある。

(viii) D.R.P 計算器

演算に用いる位置信号は経度の場合に角度として 0.5 分までの計算をするとすれば、 $179^\circ 59.5'$ 必要となる。したがつて 2 進法すべての計算を行なう計算器の場合 1 語長が 16 bits のものが必要となる。

(2-7) ドップラセンサについて

(a) 概要

船舶より海底に向てある角度で音波ビームを発射し、海底よりの反射波をとらえれば、当然反射音波は船舶の当該海底に対する移動速度により、周波数変化をうけることとなる。これをドップラ偏移と呼ぶ。したがつてドップラ偏移を正確に測定すれば、自船の対地速度を測定することができ、積分することにより移動距離 一 位置を知ることができる。

現実にこのドップラ速度計はすでに開発され、商品化されている。しかるに、これら市販のドップラセンサは技術的な理由から対地速度計としての有効水深はたかだか 200 m まであり、沿岸航海用の船、湖用の船等であればいざ知らず、少なくとも大洋航行の船に対しては航行計器とはいひえず、接岸時または入渠時の補助航海計器としての価値しか認められなかつた。(水中船にあつては事情は異つてくるが、今は水上船舶のみを考えることとする。)

そこで、この有効範囲を 1,500 m ~ 3,000 m と大巾に延長して、大洋航行用の船舶に對し有効な航行計器となし得るや否やという見地より本実験を開始した。

本文では紙上での検討結果と、本質的な問題点、実験法についての計画等を報告する。

(b) 市販のドップラ計器の情勢

現在市販されているドップラセンサをリストアップすれば、下表のようになる。

メー カ	型 名	速 度 計 測 範 囲	測 定 精 度	対 地 有 効 深 度	音 波 形 式	備 考
THE MARQUARDT CORPORATION	MRQ-1030		0.1ノットにつき 0.01ノット	45 m	C.W	トッキング用
	MRQ-1050		0.1ノットにつき 0.01ノット 15ノットにつき 0.5%	75 m	C.W	トッキングおよび航法
	MRQ-2010		5ノットにつき 1%	180 m	PULSE	航 法
	MRQ-2015		15ノットにつき 0.5%	180 m	"	"
	MRQ-2040		0.1ノットにつき 0.01ノット 15ノットにつき 0.5%	100 m	"	トッキングおよび航法
WESTERN CORPORATION	482 NAVTRAK	0~10ノット 0~100 フィート/sec	1 %	75 m		トッキングおよび航法
RAYTHEON CO.		0~6ノット	0.5 %	54 m	C.W	トッキングおよび航法

(c) 技術的背景

現市販されているこれらドップラナビゲータの主として最大深度を定めている技術的要因を考察してみる。

まつ第1に情報理論によれば、時間計測の不確定性は

$$\sigma_T = \frac{1}{\sqrt{\frac{2E_0}{N_0}}}$$

σ_T = 時間計測の標準偏差

E_0 = 信号エネルギー

N_0 = 雑音のスペクトラム密度

W = 信号のバンド幅

また周波数計測の不確定性は

$$\sigma_F = \frac{1}{\sqrt{\frac{2E_0}{N_0}}}$$

σ_F = 周波数計測の標準偏差

T = 信号の duty time

上式を考えれば、時間計測すなわち距離計測の不確定さは信号のバンド幅すなわちパルス巾(パルス方式にあつては)に比例して増す。そのため距離測定精度をあげるためにには、パルス巾をできるだけ狭くしなければならない。しかしドップラ速度分解能からいえば、duty timeが長いほど、周波数測定の不確定さが減少する。このため、測深機においては周波数分解能を犠牲としてパルス法を用い、ドップラ速度計にあつては測深分解能を犠牲にしてC.W.方式を用いている。

ここでC.W.を用いるとすれば必然的に距離分解能は0となってしまうため、このドップラセンサにとつて対地速度を検出するためには、海底からの反射エコーが途中海中からの反射レベルよりも大きくなくてはならない。

今海底までの片道の伝播距離をRとすれば拡散損失は $20 \log 2R$ で与えられ、減衰損は $-2\alpha R$ 海底における散乱音場の損失は

$$S = 20 \log R + \alpha R + 10 \log \frac{2\pi\phi^2}{\sin\delta} + S_0$$

ただし S : 海底における散乱音場比(送信音場に対する)

S_0 : 海底の散乱損失 $\approx 30 \text{ dB}$

ϕ : ビーム巾

δ : デブレッショング角度

よつて全伝播損失は N とすれば

$$N = 20 \log 2R + 2\alpha R + 10 \log \frac{2\pi\phi^2}{\sin\delta} + S_0$$

さらに、変調トランジスタを 24 dB とすればさらに -30 dB の損失が加算され、

今、 $\alpha = 0.3 \text{ dB/m}$

$\phi = 6^\circ$

$\delta = 60^\circ$

と仮定すると

$$N = 20 \log 2R + 0.2R + 61.34$$

今リバーベーションレベルを -110 dB とすれば、往復の損失がこのレベルに等しくなつた時が海底の最大検出深度であることから R は 55 m となる。すなわち、今の数値は f として 500 kc 程度を仮定したのである

るが、(α の値として) リバーベレーションレベルが海域、海水の質等によつて変化しても、高々 100 m 程度しか期待し得ぬことがわかつり、また送信 Power を増加する問題は、ことリバーベレーションレベルに関するかぎり全く意味をもたない。

(d) JRC の方式

(e) 検討したように、周波数計測の不確定性を最小にし、しかもレバーベレーションレベルによる測定の限界をのりこえるためには、目標深度を音波が往復する時間よりも長いシークエンスの PN 信号 (濃似ランダム信号) を用い、これの反射波と送信波との相互相関をとるならば、距離不確定性は、この PN 信号のクロック発振周期の 1 サイクル以内にとることができ、こゝでのドプラ周波数偏移も相互相関をとる基準 PN 信号のクロックを周波数をずらして相互相間最大値となるところを検出し、この時のクロック周波数のずれを計測すれば、これがすなわちドプラ周波数偏移も示すこととなる。そしてこれには海底以外の反射はもはや全く問題とならない。

この方法によれば、相互相間をとることにより積分時間を長くすれば、雑音の中に埋もれた信号も検出できる。 $(S/N = 30 \text{ dB})$ ので、深いレンジでのドプラナビゲータが実現できることとなるので、この方式で開発を進めるこことし、一応、次のような目標仕様とした。

- (i) 深 度 $1 \text{ m} \sim 3,000 \text{ m}$
- (ii) 速 度 $0 \sim 30 \text{ kt}$
- (iii) 計測精度 $\pm 0.5 \text{ kt} \pm 0.1\%$

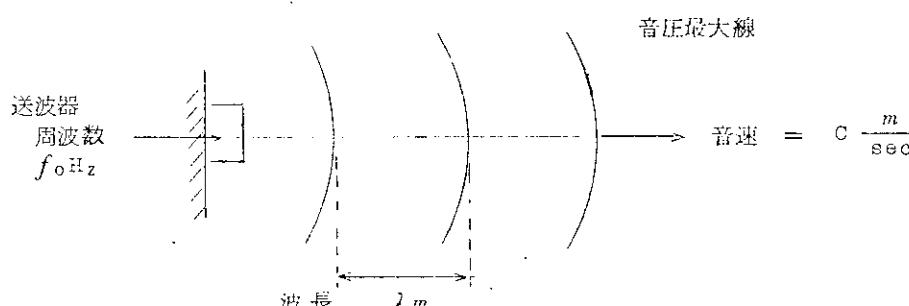
ただし、水中での音波の伝播は、塩分、温度により影響をうけ、斜め下に放射した音波がその経路が直線でなく曲る場合も考えられ、その場合の誤差がいかほどになるか等今後の基礎的研究を必要とすることが多い。

(e) ドプラ効果

波源が運動している場合の波の波長は、静止している場合とはちがう、また波源が運動している場合や観測者が運動している場合は、観測される波の振動数は静止している場合とはちがつてくる。このような現象をドプラ現象といつ。

船舶に波源を積みこの船舶が移動するときの関係を数量的に考察してみると、次のようになる。

(i) 波源および観測点の両者が静止している場合



この場合には上図に示すような形となり、周波数 f_0 (Hz) 、音速 C (m / sec) 、波長 λ (m) の 3 者の間には

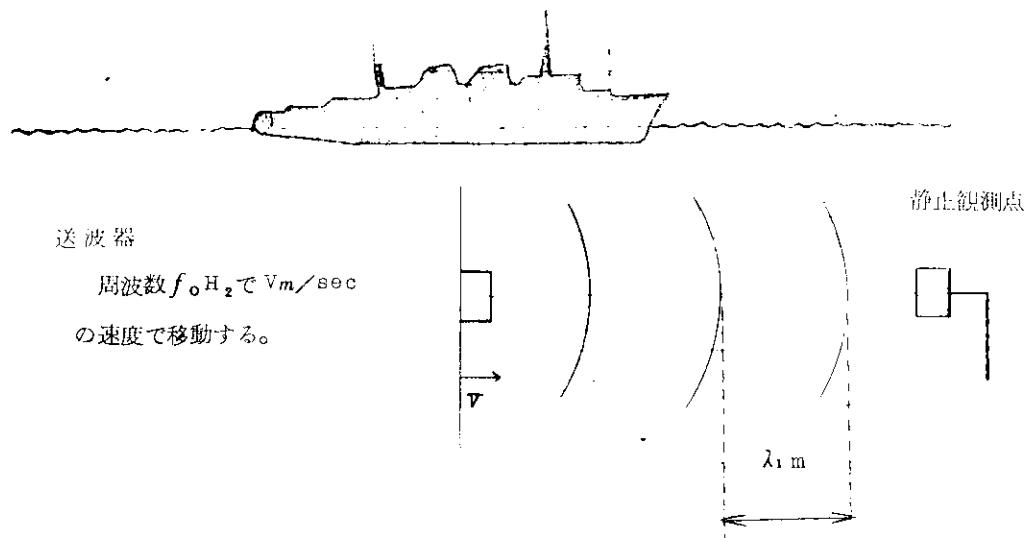
$$\lambda = \frac{C}{f_0}$$

なる関係がある。

(ii) 波源が移動し観測点は静止している場合

この場合には次図のような関係となり、波長 λ_1 は

$$\lambda_1 = \frac{C}{f_0} - \frac{v}{f_0} = \frac{1}{f_0} (C - v)$$



となる。この波動を静止観測点で観測すれば

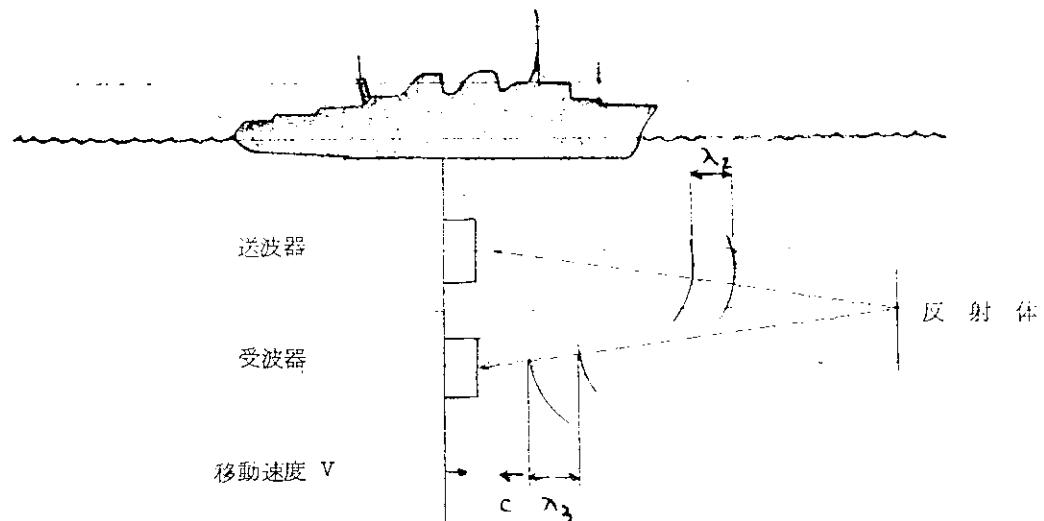
$$f_1 = \frac{c}{\lambda_1} = f_0 \left(1 - \frac{v}{c} \right)$$

で表わされる周波数 f_1 (Hz) の波が観測される。

すなわちドップラシフトは Δf_1 とすれば

$$\Delta f_1 = f_1 - f_0 = f_0 \left\{ \frac{1}{1 - \frac{v}{c}} - 1 \right\} = f_0 \left(1 + \frac{v}{c} - 1 \right) = f_0 \frac{v}{c}$$

(iii) 波源と観測点が同じ速度で移動し、その針路上に反射体がある場合



この場合は上図のようであり、(ii)と同じく、水中での波長 λ_2 、 λ_3 は

$$\lambda_3 = \lambda_2 = \frac{1}{f_0} (c - v)$$

で与えられ、受波器に1秒間に入つてくる音圧の山の個数(=周波数)は f_2 とすれば

$$f_2 = \frac{c+v}{\lambda_2} = f_0 \frac{c+v}{c-v} = f_0 \left(1 + \frac{2v}{c} \right)$$

ドプラシフトは

$$\Delta f_2 \doteq f_0 - \frac{2v}{c}$$

またここで、音波の媒体すなわち海水が v なる速度で v と同じ方向に動いていたとすれば

$$\lambda_2 = \frac{1}{f_0} (c - v + v)$$

よつて反射体で反射させる音波の周波数 f_2 は

$$f_2 = \frac{c+v}{\lambda_2} = f_0 \frac{c+v}{c+v-v} \doteq f_0 \left(1 + \frac{v}{c+v}\right)$$

これによつて受波器の方向へ進行する波の波長は

$$\lambda_3 = \frac{c-v}{f_2} = \frac{1}{f_0} \frac{c-v}{\left(1 + \frac{v}{c+v}\right)}$$

よつて受波器で観測される周波数は f_3 とすれば

$$\begin{aligned} f_3 &= \frac{c-v+v}{\lambda_3} = f_0 \left(\frac{c-v+v}{c-v}\right) \left(1 + \frac{v}{c+v}\right) \\ &\doteq f_0 \left(1 + \frac{v}{c-v}\right) \left(1 + \frac{v}{c+v}\right) \\ &= f_0 \left(1 + \frac{v}{c-v} + \frac{v}{c+v}\right) \\ &\doteq f_0 \left\{1 + \frac{v}{c} \left(1 + \frac{v}{c}\right) + \frac{v}{c} \left(1 - \frac{v}{c}\right)\right\} \\ &= f_0 \left(1 + \frac{2v}{c}\right) \end{aligned}$$

となつて、流れの影響は第1次近似の結果は全く入つてこないこととなる。そしてドプラシフトは Δf_3 として

$$\Delta f_3 \doteq f_0 \frac{2v}{c} = \Delta f_2$$

上式が得られる。この式の誤差としては、 $\frac{v}{c}$ 、 $\frac{v}{c}$ の2次の項を省略して得られたものであるから、 v または v の値が 30 ノット $= 15 m/sec$ であれば、音速 $c = 1,500 m/sec$ であるから、含む誤差の大きさは 10^{-4} のオーダであることがわかり、本式を根本的な式として使用してもドプラセンサの精度に重大な影響を与えることはない。

(iv) 船底に装置した送受波器より斜めに海底に音波を発射し、この反射波のドプラシフトを検出する場合、

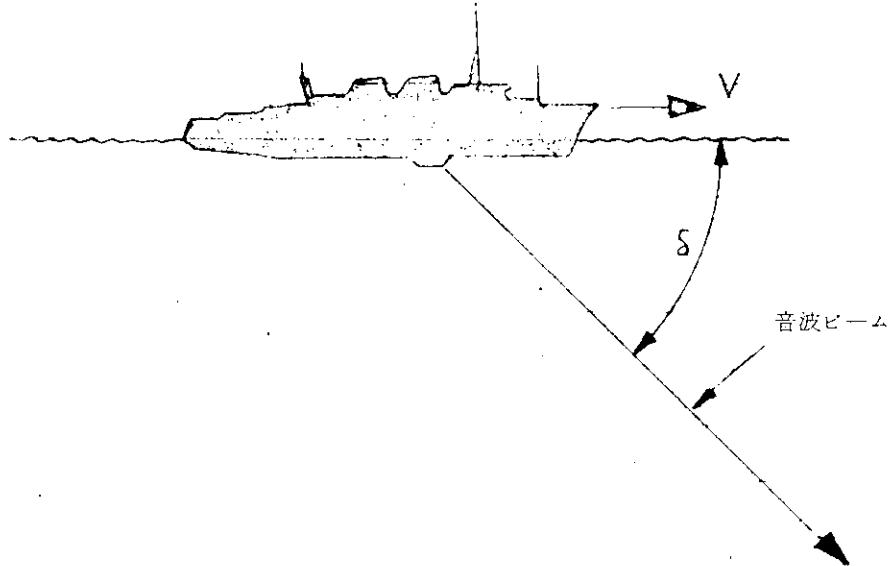
実際の場合に、船の進行方向に固定反射体があるというようなことは特別の場合以外は考えられないから航行計器として考えると、この固定反射体は海底にとらざるを得ない。そしてそのため斜めに音波を発射することとなる。

この場合水平面に対する音波ビームの角度を δ とすると、(iii)で扱つた v のかわりに v の音波ビーム方向の成分をとればよいことは明らかであり、ドプラシフト Δf_4 は次のようになる。

$$\Delta f_4 = \frac{2f_0 v \cos \delta}{c}$$

(f) 音波ビーム配列

船舶にとって、平面運動のみが重要であるので、この平面内の運動を完全に知るためにには最小2本の音波ビームが必要ということとなる。しかし船舶は垂直方向の動きもうねり等の影響でないわけではなく、また海底の起伏に基く垂直コンポーネントもドプラセンサには表われてくることになり、これの補正を行なわないと誤差とし



て入つてしまふ。

この補正の方法としてセンサの出力を計算器に入れ、これで補正を行なうことも可能であり、船全体のシステムを設計する上で、このようにした方がより有利である場合もあるであろうし、また逆にドブラセンサ自体でこれらの補正を行なわせた方が有利な場合もあるであろう。

前者の場合は別にして、このドブラセンサでこの補正を行なわせるには、音波ビームの配列で行なえるものもある。これを考察して見る

(i) 対称配列

右図のように垂直線に沿し対称に配列するならば、垂直方向の速度成分 u を計算に入れ、ビーム 1 より得られるドブラシフトは、 Δf_1 として

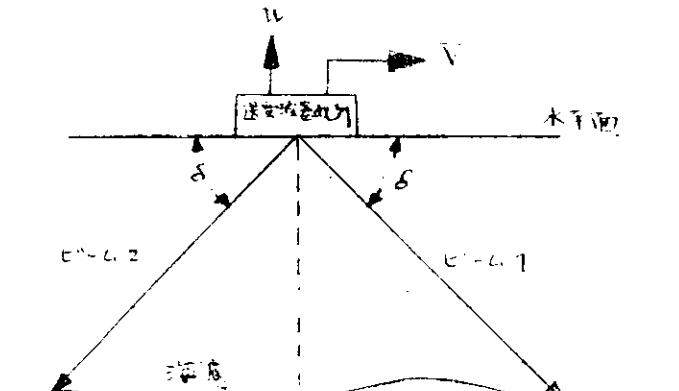
$$\Delta f_1 = (V \cos \delta - u \sin \delta) \frac{2f}{c}$$

またビーム 2 より得られるドブラシフトは、 Δf_2 として

$$\Delta f_2 = (-V \cos \delta - u \sin \delta) \frac{2f}{c}$$

よつて検出出力として $\Delta f = \Delta f_1 - \Delta f_2$ を使用することとすれば

$$\Delta f = \Delta f_1 - \Delta f_2 = \frac{4f}{c} V f \cos \delta$$



すなわちこれから対象配列より得られるドブラ偏移は垂直成分は全くキャンセル・アウトされ、单一ビームより得られる偏移の 2 倍となることがわかる。

(ii) 調整に対する配列の問題

船のトリムおよびヒール、ピッチング、ローリング等の影響がドブラシフトに与える影響もまた音波ビームの配列により異つたものとなる。これを以下考察してみる。こゝで、

(名) 速度の垂直成分はないものとする。

(回) まず静的な場合についてのみ考える。

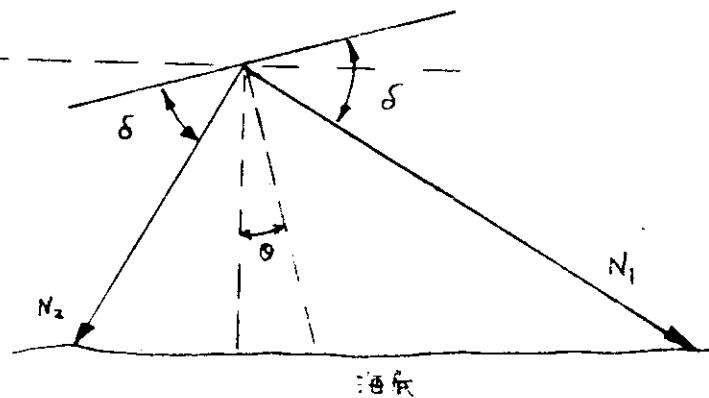
この2つの条件の下では、下図のように垂直線から角度 θ だけビームがぶれている場合には
ビーム N_1 に関して

$$\Delta f_1 = \frac{2Vf}{c} \cos(\delta + \theta) \\ = \frac{2Vf}{c} \cos \delta$$

$$(\cos \theta - \tan \delta \sin \theta)$$

ビーム N_2 に関して

$$\Delta f_2 = -\frac{2Vf}{c} \cos(\delta + \theta) \\ = -\frac{2Vf}{c} \cos \delta (\cos \theta + \tan \delta \sin \theta)$$



よつてパーセント誤差にすれば

$$N_1 \text{ IC関し } E_1 = 100 (\cos \theta - \tan \delta \sin \theta - 1) \%$$

$$N_2 \text{ IC関し } E_2 = 100 (\cos \theta + \tan \delta \sin \theta - 1) \%$$

$$\text{対称配列相方では } E_{12} = 100 (\cos \theta - 1) \%$$

となる。すなわち対称配列では誤差はデブレッショング角度によらず、そしてその誤差は常に負となることに注意する必要がある。

ここで $\delta = 45^\circ$, $\theta = \pm 3^\circ$ としてみると

E_1 の値はそれぞれ $+5.09\%$ および -5.37% となるのに対して

E_{12} の値は常に -0.137% となる。

ピッチングおよびローリングの場合に対してもこれが正弦運動であると仮定して、

$\delta = 45^\circ$, $\theta = \theta(t) = \theta_m \sin \omega t$ とすれば、 N_1 に関して

$$\Delta f_1 = \frac{\sqrt{2} Vf}{2c} [\cos(\theta_m \sin \omega t) - \sin(\theta_m \sin \omega t)]$$

$$\therefore \overline{\Delta f_1} = \frac{\sqrt{2} Vf}{2c} \frac{\omega}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{\omega}}^{\frac{\pi}{\omega}} [\cos(\theta_m \sin \omega t) - \sin(\theta_m \sin \omega t)] dt$$

$$= \frac{\sqrt{2} Vf}{2c} J_0(\theta_m)$$

よつて、パーセント誤差は

$$E_1 \text{ dynamic } = -100 [1 - J_0(\theta_m)] \%$$

対称配列の場合にも上式と同じ形で与えられることは容易に証明できる。すなわち、はじめにいつたように、ドプラセンサの出力を計算器に入れ、別のセンサ（たとえば、ジャイロの出力）から、 θ 、 θ_m 等を検出して補正を行ない得る場合には問題はないが、それ以外の場合には対称配列にした方が有利であることがわかる。

(g) PN 信号と相関検出

(1-7)においても記したとおり時間計測、周波数計測の場合の標準偏差は次式で表わされる。

$$\sigma_T = \frac{1}{W \sqrt{\frac{2E_o}{N_o}}}$$

$$\sigma_F = \frac{1}{T \sqrt{\frac{2E_o}{N_o}}}$$

ただし σ_T : 時間計測の標準偏差

σ_F : 周波数計測の " "

E_0 : 信号のエネルギー

N_0 : 雑音のスペクトラム

W : 信号のバンド幅

T : 信号の duty time

上式で表わされる σ_F を最小にし、周波数計測の誤差を最小にするためには、 T は $1 E_0 / N_0$ をできるだけ大きくしなければならない。またその場合海中の音波ビームの進行途中の微小反射体からの反射によるリバーベレーションの問題を逃げるためには、距離分解能(すなわち時間計測)も犠牲にすることはできない。 W を大きくとらなければならない。この 2 つの要求から、PN 信号を用いた相関検出法を採用することとした。

PN 信号とは Pseudo Noise 信号の略で文字どおり、Random Noise のときとき性質をもち、簡単にシフトレジスタと論理帰還回路で構成できるという特長がある。

この信号系列は次の性質をもつている。

- (i) [1] の数と [-1] の数との差が常に 1 である
- (ii) 1 シークエンス数内に含まれる数系列において [1][-1] が 1 つづしか続かないものが [1, 1][-1, -1] のごとく 2 つづくもの (run の数 2 という) が [1, 1, 1][-1, -1, -1] のごとく 3 つづくもの (run の数 3) が q というようになつている。
- (iii) 自己相関函数は $\tau = 0$ に鋭いピークをもち $\tau = j \Delta \tau$ ($j \neq 0$) の部分では $-1/q$ の大きさをもつしたがつて系列長が長くなれば (i) の性質から [1] と [-1] はほど等しい生起確率をもち、(ii) の性質から run についても平衡状態にあり、(iii) の性質から自己相関函数が理想インパルスに近づくから、この系列はランダム信号に十分近いと考えることができる。またこの (iii) の性質から、時間分解能(距離分解能)はシークエンスの 1 ビット巾以内にあることもわかり、ドップラセンサとして非常に適していることがわかる。

(b) PN 信号と相関検出器を用いたドップラセンサ

それではこの PN 信号と相関検出器を用いたドップラセンサについて具体的に述べて見よう。

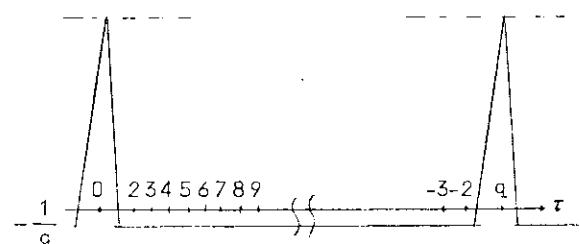
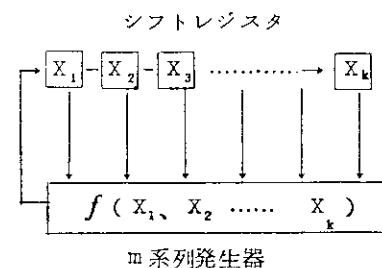
このシステムにあつては、目標すなわち海底からの反射波勢力と機械内にある基準 PN 信号との間の相互相関をとり、速度情報および距離情報を得るものであるが、この際に反射波信号に含まれた振巾情報を一切使用しないで、位相情報をのみを使用する。これは信号の処理がかくのごとくしてデジタル化して行つた方が非常に簡便になるのみならず、振巾情報を無視することによつて生ずる S/N の悪化の程度は僅か 1 dB 程度と非常に微々たるものであるからである。

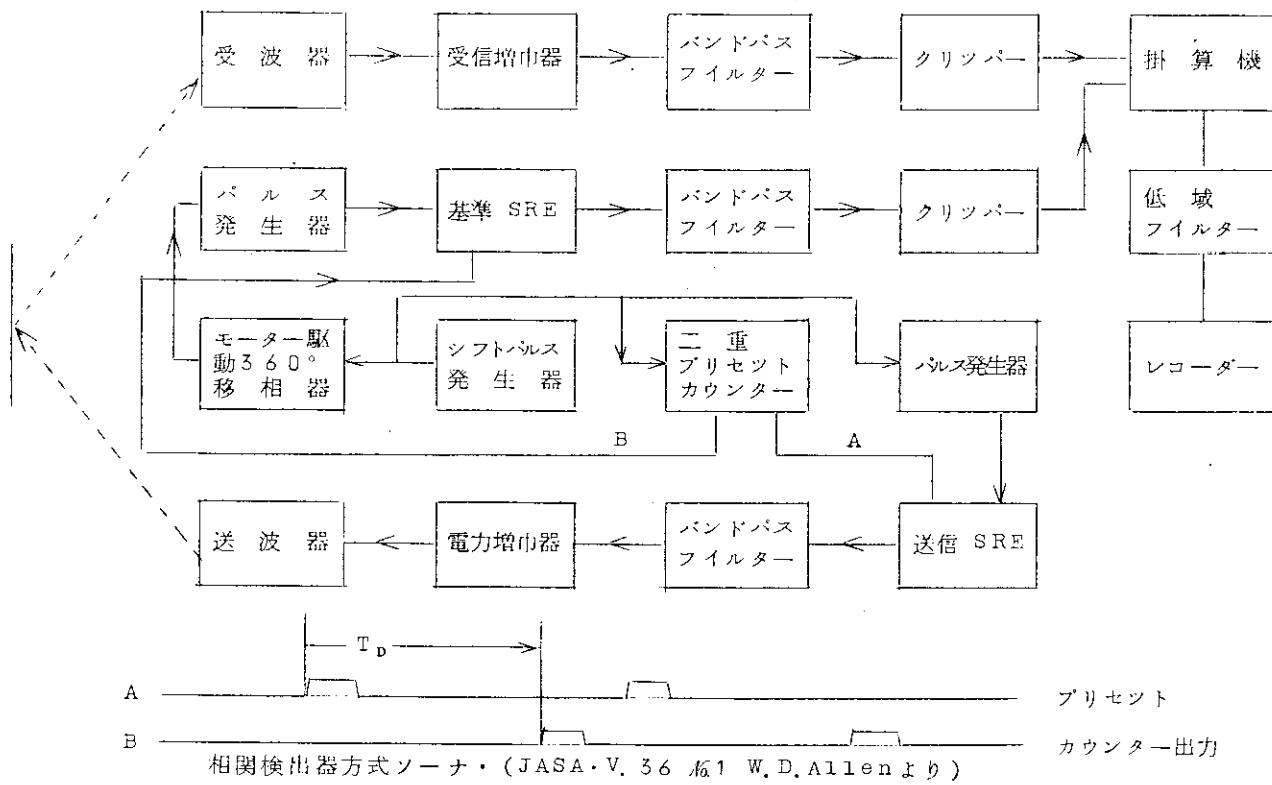
次図にこのようなシステムの基本形を示す。

まずシフトパルス発生器で送信信号および受信信号の相互相関をとる基準信号を発生させるシフトレジスタエンコーダ(図中 SRE と示した)のクロックパルスを発生する。

このパルスは一方は二重プリセットカウンタに入りこゝで各個の SRE のシークエンスのはじまりの時期を定めるパルスを発生し、SRE の 0 位置を定める。

送信 SRE ではこのプリセットカウンタで 0 時点を定められた後シフトパルス発生器により定められた時間ごとにパルスを発生して(パルス発生器)シフトレジスタを次々とシフトし SRE 信号を発生する。この信号は適当





相関検出器方式ソーナ・(JASA.V.36版1 W.D.Allenより)
なバンドパスフィルタを通された後電力増幅器で増幅され送波器より水中に送り出される。

反射された信号は受波器より入り受信増幅器、バンドパスフィルタを経てクリッパーに導かれ、ここで中に含む振幅情報を経てすべて[1][−1]の2レベル信号に変換され掛算器の一方の入力となる。

基準 SRE はさきのソフトパルス発生器からのパルスを位相器を通して後もらい PN 信号を発生するが、その 0 時点は送信 SRE と同様プリセットカウンタにより定められる。そしてこの関係は図のように任意の T_D だけ遅らし得るようになっている。この基準 SRE の出力もバンドパスフィルタ、クリッパーを経て、受信信号と同様な形にされた後掛算器の他の一方の入力となる。

これら 2 つの信号が掛け合わされ（相関をとられ）、低域フィルタで平均させて出力としてレコーダーにあたえられる。

送信信号はその水中伝播の時間だけ遅れて受波器に到達するので、この遅れ時間に 2 台の SRE の 0 時点の差 T_D を合せれば、基準 SRE の出力と受信信号の相互相関が最大となり、それ以外は相関出力はほとんど 0 となる。

上に述べたのはドブラシフト 0 の場合であるが、ドブラシフトのある場合には、受信された信号のクロック周期が変化を受けていることとなるから、積分時間が長ければもはや相互相関値は低いものとなってしまう。

この時 360° 位相器を motor である一定回転速度で回転してやると、基準 SRE のクロック周波数が変調をうけたこととなるため、Correlatron の最大を求めることが出来るようになり、この時の motor の回転数がすなわちドブラシフトそのものを表わしていることとなる。

(1) サーチレートの問題

correlation をとるための平均時間は PN 信号の性質からも最小 1 シークエンスだけは必要となる。今遅延時間に関して、correlation の最大を求めるためのみでも、 $T_D = 0$ から 1 シフトパルス巾づつらしいしかも、1 シークエンスづつ平均して行くと、シークエンスの長さは $3,000 \text{ m}$ の距離を往復する時間は 4 秒かかることから、4 秒以上の長さが必要となり、1 mごとの距離分解能をもつために $3,000$ ビット必要であるから $3,000 \times 4 = 12,000$ 秒 = 200 分が必要となり、とても real time でこの data を処理することはできない。

ただし σ_T ; 時間計測の標準偏差

σ_F ; 周波数計測の “ ”

E_0 ; 信号のエネルギー

N_0 ; 雑音のスペクトラム

W ; 信号のバンド幅

T ; 信号の duty time

上式で表わされる σ_F を最小にし、周波数計測の誤差を最小にするためには、 T は $1 E_0 / N_0$ をできるだけ大きくしなければならない。またその場合海中の音波ビームの進行途中の微小反射体からの反射によるリバーベレーションの問題を逃げるためには、距離分解能（すなわち時間計測）も犠牲にすることはできない。 W を大きくとらなければならない。この 2 つの要求から、PN 信号を用いた相關検出法を採用することとした。

PN 信号とは Pseudo Noise 信号の略で文字どおり、Random Noise のときき性質をもち、簡単にシフトレジスタと論理帰還回路で構成できるという特長がある。

この信号系列は次の性質をもつている。

- (i) [1] の数と [-1] の数との差が常に 1 である
- (ii) 1 シークエンス数内に含まれる数系列において [1] [-1] が 1 つづしか続かないものが $\frac{1}{2}$ [1, 1] [-1, -1] のごとく 2 つづくもの (run の数 2 という) が $\frac{1}{3}$ [1, 1, 1] [-1, -1, -1] のごとく 3 つづくもの (run の数 3) が $\frac{1}{8}$ というようになつている。

- (iii) 自己相関函数は $\tau = 0$ に鋭いピークをもち $\tau = j \tau_0$ ($j \neq 0$) の部分では $-1/q$ の大きさをもつしたがつて系列長が長くなれば (i) の性質から [1] と [-1] はほど等しい生起確率をもち、(ii) の性質から run についても平衡状態にあり、(iii) の性質から自己相関函数が理想インパルスに近づくから、この系列はランダム信号に十分近いと考えることができる。またこの (iii) の性質から、時間分解能（距離分解能）はシークエンスの 1 ビット巾以内にあることもわかり、ドップラセンサとして非常に適していることがわかる。

(b) PN 信号と相關検出器を用いたドップラセンサ

それではこの PN 信号と相關検出器を用いたドップラセンサについて具体的に述べて見よう。

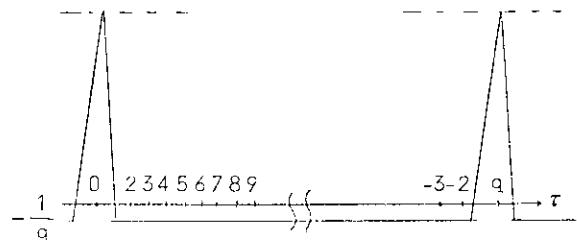
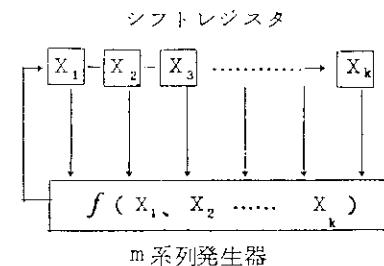
このシステムにあつては、目標すなわち海底からの反射波勢力と機械内にある基準 PN 信号との間の相互相関をとり、速度情報および距離情報を得るものであるが、この際に反射波信号に含まれた振巾情報を一切使用しないで、位相情報をのみを使用する。これは信号の処理がかくのごとくしてデジタル化して行つた方が非常に簡便になるのみならず、振巾情報を無視することによつて生ずる S/N の悪化の程度は僅か 1 dB 程度と非常に微々たるものであるからである。

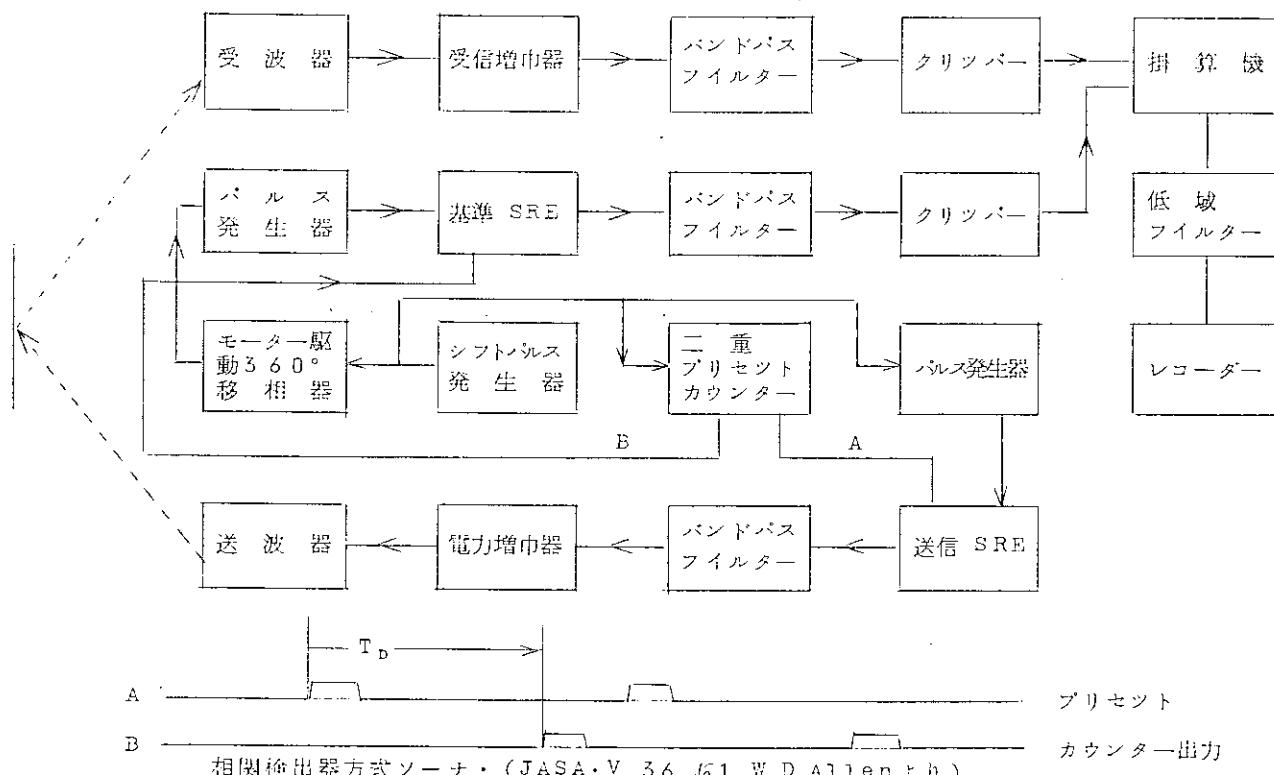
次図にこのようなシステムの基本形を示す。

まずシフトパルス発生器で送信信号および受信信号の相互相関をとる基準信号を発生させるシフトレジスタエンコーダ（図中 SRE と示した）のクロックパルスを発生する。

このパルスは 1 方は二重ブリセントカウンタに入りこゝで各個の SRE のシークエンスのはじまりの時期を定めるパルスを発生し、SRE の 0 位置を定める。

送信 SRE ではこのブリセントカウンタで 0 時点を定められた後シフトパルス発生器により定められた時間ごとにパルスを発生して（パルス発生器）シフトレジスタを次々とシフトし PN 信号を発生する。この信号は適當





相関検出器方式ソーナ・(JASA・V. 36 No. 1 W. D. Allen より)
なバンドパスフィルタを通された後電力増幅器で増幅され送波器より水中に送り出される。

反射された信号は受波器より入り受信増幅器、バンドパスフィルタを経てクリッパーに導かれ、ここで中に含む振幅情報を経てた[1][−1]の2レベル信号に変換され掛算器の一方の入力となる。

基準 SRE はさきのシフトパルス発生器からのパルスを位相器を通して後もらい PN 信号を発生するが、その 0 時点は送信 SRE と同様プリセットカウンタにより定められる。そしてこの関係は図のように任意の T_D だけ遅らし得るようになつている。この基準 SRE の出力もバンドパスフィルタ、クリッパーを経て、受信信号と同様な形にされた後掛算器の他の一方の入力となる。

これら 2 つの信号が掛け合わされ（相関をとられ）、低域フィルタで平均させて出力としてレコーダーにあたえられる。

送信信号はその水中伝播の時間だけ遅れて受波器に到達するので、この遅れ時間に 2 台の SRE の 0 時点の差 T_D を合せれば、基準 SRE の出力と受信信号の相互相関が最大となり、それ以外は相関出力はほとんど 0 となる。

上に述べたのはドプラシフト 0 の場合であるが、ドプラシフトのある場合には、受信された信号のクロック周期が変化を受けていることとなるから、積分時間が長ければもはや相互相関値は低いものとなつてしまつ。

この時 360° 位相器を motor である一定回転速度で回転してやると、基準 SRE のクロック周波数が変調をうけたこととなるため、Correlator の最大を求めることが出来るようになり、この時の motor の回転数がすなわちドプラシフトそのものを表わしていることとなる。

(1) サーチレートの問題

correlation をとるための平均時間は PN 信号の性質からも最小 1 シークエンスだけは必要となる。今遅延時間に関して、correlation の最大を求めるためのみでも、 $T_D = 0$ から 1 シフトパルス巾づつにしてしかも、1 シークエンスづつ平均して行くと、シークエンスの長さは $3,000 \text{ m}$ の距離を往復する時間は 4 秒かかることから、4 秒以上の長さが必要となり、1 m ごとの距離分解能をもつために $3,000$ ビット必要であるから $3,000 \times 4 = 12,000$ 秒 = 200 分が必要となり、とても real time でこの data を処理することはできない。

このサーチ時間を短縮するためにサンプリング技術を用いた DELAY LINE TIME COMPRESSOR → DELTIC といふ方法がある。

紙面の都合でこれを詳しく述べることは省くが、次図にこのブロック線図を示す。要は一定時間 → 1 回の例では 1 m sec ごとにサンプリングし、Delay line にこのデーターを書き込み、Delay line の出力としては、 $1 \mu\text{sec}$ ごとの data が出てくるようにし、結局 1,000 倍の時間短縮を行なうものである。

(j) 基本的研究計画

これまでに、非常に多く IC ではあるが、ドプラセンサとしての根本について記してきたので、現在われわれが計画している研究計画を記すこととする。

(i) 性能

最大動作深度 : $2,000 \sim 3,000 \text{ m}$

速度範囲 :

$0 \sim 30 \text{ kt}$

最小識別速度 : 0.1 kt

精度 : 0.5%

(ii) 方式

搬送周波数 : 50 KHz

搬送周波数に関しては低いほど海水中の減衰は少なくてよいが、ビーム幅と送受波器寸法との関係もあり、(k) で述べる基本的実験が終了するまでは一応 50 KHz を使用することとした。

ビーム配列 : 3 ビーム方式、前、横、垂直

すでに考察したようにドプラセンサそのものとしては対称配列による 4 ビーム方式がより良いが、今われわれが考えているものは、DELTIC、CORRELATION とかなり装置は複雑となるので、ビーム数を増やすことは有利でないし、本計画では計算機の利用は前提であるから、角度およびピッキング、ローリングの影響は計算機で補正することとし、 45° のデブレッショングループで前、横と 2 本のビームを出して速度を計測し……… CORRELATION 方式、他の 1 本は通常の測深機として、SEASCH 範囲をさらに縮少するために使用することとする。

送信形式 : 送受分離位相変調方式

変調形式 : PN 信号による位相変調

受信形式 : 信号圧縮器を含む相関検出方式、信号圧縮比 $1 / 2,500$

送受波器 : PHASED ARRAY による平面形トランシーバー

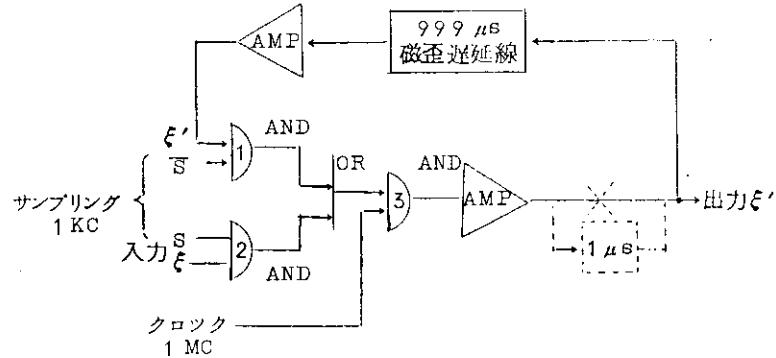
送受波器間の leakag e の問題等もあり、直ちに実現できるとはいいがたいが、船舶への装備の難易も考慮し、一応この方式で進む。

ブロックダイヤグラム : 次頁に示す。

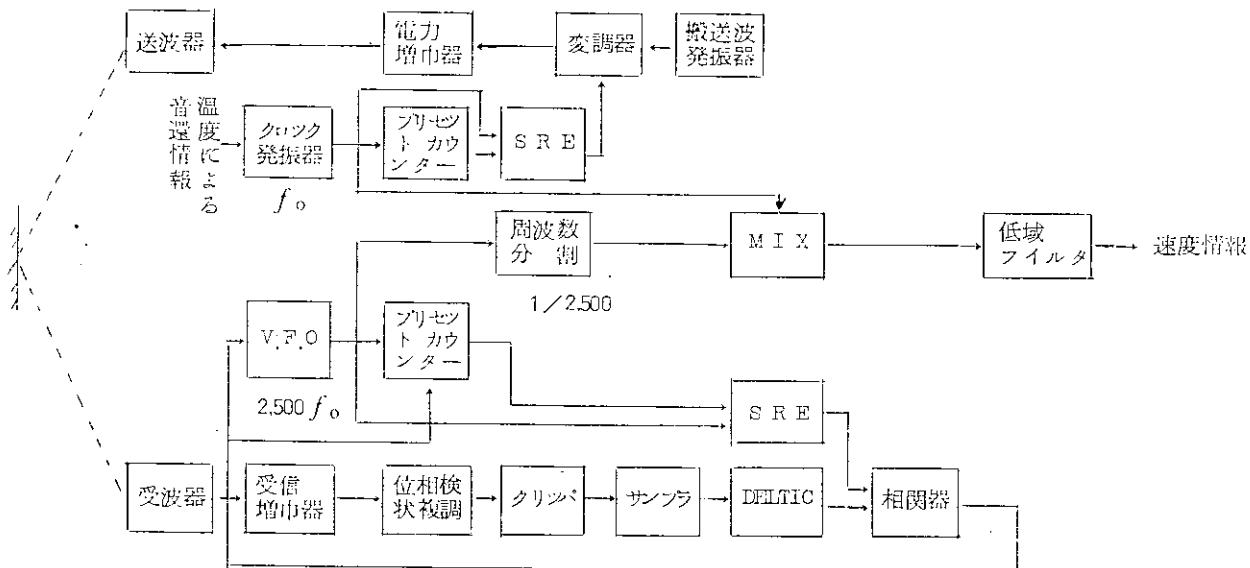
(k) 現在不明にして基本実験を要する問題点

海水中の音波の伝播性は、海水温度、海流、塩分、浮遊物、プランクトン、海底の状況等に著しく影響され、これらの問題は現在解明されていない。

ここまで議論において、海水中において音波の速度は一定、すなわちその音波の進路は直線であると仮定して進めてきたが、事実は温度は各深度により異なるため、音波の通路は複雑に曲げられることとなる。



磁歪遅延線による時間軸圧縮



相関器出力 max になるように VFO 周波数およびプリセットをかえる
フィードバックループ

デプレシジョン角度と、この温度分布の関係から、誤差がどの程度に収め得るか、というのは現在その程度も不明であり、地域により異なる data でもあるため、ドプラセンサの根本的原理にまでさかのほる重大な影響を与えるにもかくわらず全く予想がつかない。

これらの基本的 data を折にふれ、機会のあるごとに集めて行かねばならない。この音速分布 — 屈折の問題一つにしてもまだ未解決の根本問題であり、われわれの深海用ドプラセンサははじめから不可能という結論も出るかも知れない。

かくのごとくわれわれとしては、実験器具の準備とともにまづ海中状況の資料を得ることを心がけ進めて行かねばならない。

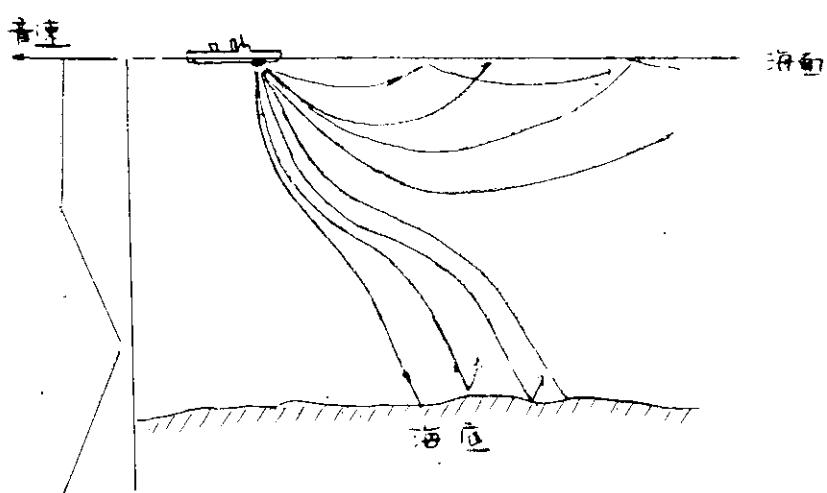
(2-8) 慣性航法装置のセンサについて

(a) 慣性航法装置の概要

慣性航法装置についてはわが国で製造され、商船用に実用される時が近い将来にくるとは思われないので、今回の自動航法システムの討議においては本装置は製作しないという結論になつたが、審議の過程で討議された点を主として記述する。

(i) 慣性航法装置の原理

ある物体が静止の状態から動き出した時には必ず加速度を生ずる。ある速度に到達したとすれば、その速度はそれまで生じた各瞬間の加速度が全部累積されたものである。速度は加速度を時間積分した量であり、動いた距離は各瞬間の速度が全部累積されたものであるから、加速度を 2 回積分したものが動いた距離になる。この原理を航法に応用するには加速度計を一定の座標系に基づいて測定する必要があり、そのためには安定プラットフォームと呼ばれる装置を使う。安定プラットフォームを安定させるためにはジャイロを使用する。すな



温度による音響ビームの屈折

わちジャイロを基準にして加速度計の方向を定めることになる。この場合加速度計とジャイロとの組合せにより慣性航法装置は次の4つの方法に区分される。

(a) 慣性空間に固定されたジャイロを基準にして加速度計も空間座標に平行させ、真の加速度は計算によつて得る。この方法はAnalytic Inertial Systemと呼ばれ、動成分はその点における動成分を計算し、加速度計の出力から引いて積分するものである。この方法では修正はすべて計算によるため加速度計のドリフト等が影響し積分はきわめて厳密でなければならない。しかしプラットフォームは小型でよいとされ、短時間飛行のミサイル等に適しているといわれる。

(b) 加速度計とジャイロを同一プラットフォームにのせ、ジャイロは空間に不動とせず台を常に水平に保つようブレセツションを与える。すなわち地球の自転に対しては時計装置からの指令でブレセツションを与える、航行体の運動については加速度計の出力によつてブレセツションを与える。装置は簡単であるがブレセツションを与えるところからジャイロ誤差を生じてくる。Semianalytic Inertial Systemといわれる。

(c) ジャイロは空間に對し固定するが、加速度計は地表と平行にするような機構とし、加速度計とジャイロはそれぞれ異なるプラットフォームを作る。Geometric Inertial Systemと呼ばれ、機械的には複雑であるが、計算は簡単である。長時間飛行の航空機や艦船に用いられる。

(d) Strap Down Inertial System

加速度計とジャイロは、運動体に直接取付けられ、ジャイロは運動体のレイト、信号を出す。シンバルも安定プラットフォームもなくすべて計算機で計算処理する。最も小型であるが優秀な加速度計と高機能の計算機を要する。

以上の区分のうち、(a)および(c)にはSchuler Tuningと呼ばれる手法が使われている。加速度計を地表に平行にさせる場合シューラ振子の理論によつて84.4分の周期を持つ振子を（地球の半径に等しい振子長）電気機械的にシミュレートすることができれば、加速計は何処へ動かされても水平であり、その出力は地球表面に沿つて真の加速度を示し、この出力の2回積分値は地球表面に沿つての移動距離となる。このようにして実現したプラットフォームをSchuler プラットフォームと呼び、慣性航法装置の重要な手段となつている。また誤差の項で述べるが、Schuler tuningされた加速度計は誤差が時間により発散せず周期的なものとなる。

(ii) 慣性航法装置の構成

以上のどの方法でも本質的に加速度を2回積分して位置を求めるのであり、主要な構成要素として

(i) 加速度計および積分装置

(ii) ジャイロと安定用サーべ装置

(iii) 時計装置

(iv) 計算機

があげられる。これらのうち(i)、(ii)については本質的な問題は少なく、重要なのは加速度計とジャイロである。

(b) 慣性航法装置のセンサ

(i) 加速度計

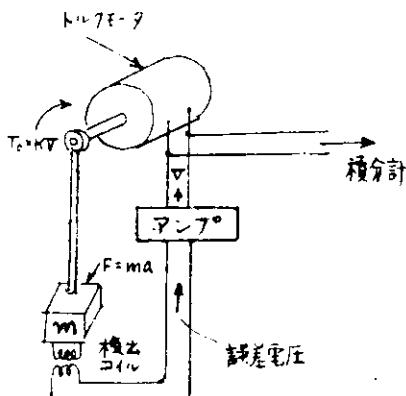
加速度計は大別して「ばね一おもり加速度計」、「振子加速度計」および「ジャイロ加速度計」に分けられる。

(i) 「ばね一おもり加速度計」はおもりの両端をばねで支え、おもりの移動量によつて加速度を検出するものであるが、感度も悪く固有振動をもつので、振動する加速度が与えられる場合などには使用できない。事実このタイプは慣性航法には使用されていない。

(ii) 「振子式加速度計」は振子を加速度で振れさせないよう力を加え、加速力にバランスさせる方式が多い。図 1.9 に原理を示す。

この装置が振子の腕 r に直角で、紙面内に加速度 a で走行していると、振子のおもりには $F = ma$ の慣性力が生じ、振子には $T_i = rma$ のトルクが与えられ垂直位置から振れようにする。検出コイルはおもりが垂直位置からずれると比例電圧 V を発生する。したがつて振子はトルク発生モータで V に比例したトルク T_o を与えられ、 T_i と T_o が等しくなつた所で釣合う、すなわち

$$T_i = rma, T_o = K_1 V, V = \frac{r^m}{K_1} a$$



$$T_i = rma$$

$$T_o = KV$$

$$V = \frac{r^m}{K} a$$

ゆえに電圧 V が加速度に比例する。 K_1 はトルク発生モータの電気一機械変換常数であるが、温度その他の影響を押え直線性を保持するのが難しいとされているが、感度 (Threshold) は $10^{-5} G$ 、精度は 0.03% に達するといわれる。

(iv) ジャイロ加速度計は積分加速度計の 1 種で加速度を検出して同時に 1 度積分を行なうものであり、出力は速度を示す。図 1.10 はその原理図である。検出部は一軸自由度ジャイロで、ロータを支えるジンバルにアンバランス重量 (m) がとりつけられている。この装置に加速度 a が支えられるとき、ジンバルには出力軸周りに $T_i = mar$ のトルクが支えられる。このためジンバルが出力軸周りに回転し、ピックアップが回転角に比例する電圧を検出してアンプを経てモータの回転速度を $\alpha\theta$ とすれば、これはジャイロモーメントを出力軸まわりに発生させる。このモーメントは $T_o = H \cdot \frac{d\theta}{dt}$ である。（ H はジャイロの角運動量） T_o が前記 T_i に等しくなつたときピックアップ電圧は零となりモータは停止する。

すなわち $mar = H \cdot \frac{d\theta}{dt}$ 、 $d\theta = \frac{r^m}{H} adt = \frac{r^m}{H} dv$ ($adt = dv$)
 $\theta = \frac{r^m}{H} (v - v_0)$ となり、モータの回転角は速度を示すことになる。

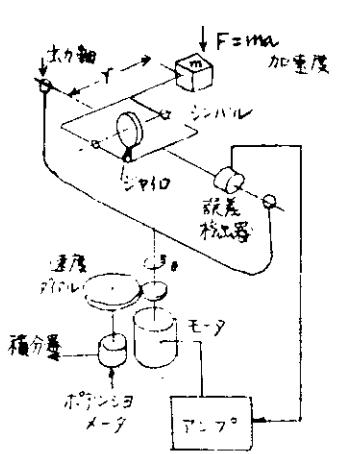
この型式のジャイロ加速度計は最もよく慣性航法装置に利用され開発されている。実際の構造はロータをケースとともに比重の等しい液体の中に浮かせて摩擦を小さくするとかペアリングをガスペアリングにする等の改善をしている。

(ii) ジャイロ

ジャイロは安定プラットフォーム制御に使用される。しかしジャイロ自体の力で安定させるのではなく、ただ空間における角運動のピックアップとして使つており、力はサーボ装置が出るものである。安全プラットフォームのためには 1 軸自由度ジャイロによる方法と 2 軸自由度ジャイロによる方法がある。立体座標について 1 軸自由度ジャイロならば 3 個、2 軸自由度ジャイロならば 2 個が必要である。

(1) 1 軸自由度ジャイロ

図 1.11 は 1 軸自由度ジャイロの原理図である。ジャイロの角運動量を H 、ダンパの抵抗係数を D （抵抗力は角速度に比例するとして）、モータの回転角を θ_M 、 Z 軸周りのジャイロの変位角を θ 。すると、 Z 軸周りの回転でジャイロはプレセッションするが、同時にダンパによる抵抗力が作用するので、定常状態ではジャイロの力が抵抗力と釣合う。すなわち定常状態では、



$$T_i = rma$$

$$T_o = H \frac{d\theta}{dt}$$

図 1.10 ジャイロ加速度計

$$H \frac{d}{dt} (\theta_z - \theta_m) = D \frac{d\theta_o}{dt} \quad t=0 \text{ で } \theta_o = 0 \text{ である}$$

$$\theta_z - \theta_m = \frac{D}{H} \theta_o$$

すなわち θ_o を極力小さくするよう設計しておけば、

H は通常大きい値なので、左辺は実際的には零であり、 $\theta_z = \theta_m$ となつて Z 軸の周りに不動となる。すなわち全体が Z 軸の周りに廻つただけサーボモータが廻し戻したことになり、 Z 軸の周りに不動に保たれる訳である。

また、 X 軸に外からある力 T を加えれば上記と同様

$$H \frac{d\theta_m}{dt} = T \text{ となり } T \text{ によって所望の速さで } Z \text{ 軸の周りを廻すことができる。}$$

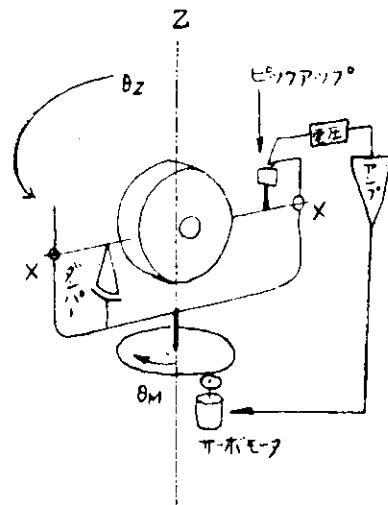


図 1.1.1 1軸自由度ジャイロ

この形式のジャイロは M.I.T. の Draper 教授のもとで開発されたもので、実際の構造はジャイロを円筒状のケースに収め、これを高粘度の液に浮かし重量を浮力をさへている。円筒ケースを支える支軸 (X 軸) には宝石とビボットを使い、円筒ケースの両側に一方には電磁型ピックアップ、他方には同じ形状のトルクジェネレータ（前述の力 T を与える）が取付けられている。この型のジャイロは積分ジャイロと呼ばれている。

このジャイロの動搖に対する安定の精度は秒の桁であるというが、摩擦やバランスの不等がジャイロのドリフトを生じる。航海用ジャイロのドリフトは毎時 $1 \sim 2^\circ$ 程度であるが、このジャイロでは $0.01 \sim 0.02^\circ$ 程度であるといわれる。特に軸受が問題でガスペアリングやマグネチックサスペーション等の研究、さらには回転体を使用しない、レートジャイロ、たとえば振動ジャイロ、浮体ジャイロ、レーザジャイロ等の研究が行なわれている。レートジャイロはある軸周りの角速度を検出するから、これらのレートジャイロを X 、 Y 、 Z 軸の方向の角速度を検出するように安定プラットフォームにつけて、レートジャイロの出力でサーボ機構によりプラットフォームを制御すればよい。

(b) Z 軸自由度ジャイロ

図 1.1.2 に Z 軸自由度ジャイロの構成を示す。この図に示すように Z 軸すなわちジンバルの Y 軸と、これを直交する Z 軸の周りに自由度をもたせたもので、 Y 軸まわりの偏移検知用ピックオフと Y 軸まわりにジャイロにトルクを与えるトルカが示されている。この図にはないが Z 軸周りのピックアップトルカもついている。1対のサーボシステムによりジャイロケースを取付けたプラットフォームをジャイロフロートの姿勢と一致させることが可能である。この形式の

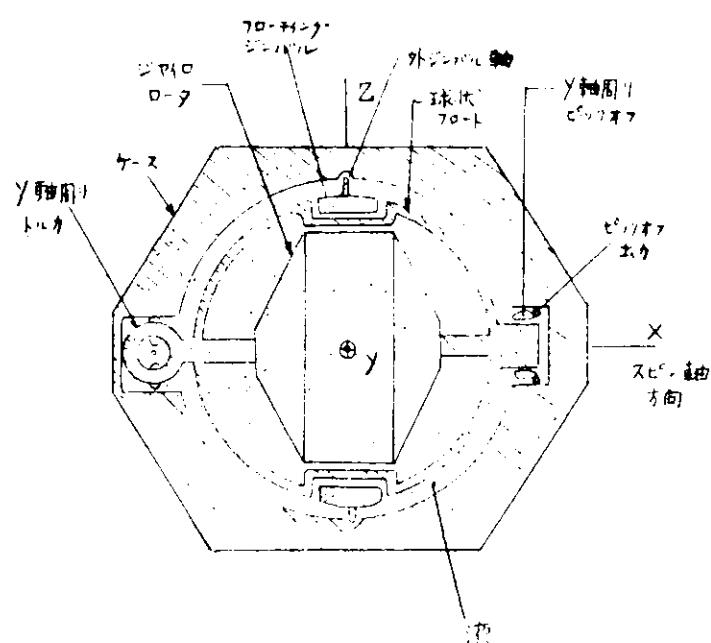


図 1.1.2 Z 軸自由度ジャイロ

ジャイロは Semianalytic System に使用される。

(c) 検討結果

商船用の慣性航法装置（以下M.SINSと仮称する）について検討した結果次の結論に達した。

(i) M.SINSは次の理由によつて今回の自動航法システムにおいては製作しない。

(1) 商船用における船位の測定は潜水艦と異なり、天体観測、物標測定ラン、デッカ等の電波による測定等を利用したり、近い将来には航海衛星による位置測定も可能となるなど比較的容易である。それらが全然使用できない場合の位置の推定の誤差は1日に最大30海里、一般には10海里、少ないと5海里以下である。M.SINSは少なくともこの程度以上の精度で位置の推定ができるものでなければならない。また同時に商船に装備できる程度の価格のものでなければならない。

(2) SINSの精度はGyroのDriftと加速度計の精度とその他の精度とによって決まる。その中Gyro以外の原因による誤差はいわゆるSchulerの理論により8.4.4分を周期として振幅的に変化し、時間の経過とともに増大することはないが、GyroのDriftに基づく誤差は時間の経過とともに増大する。

参考 $\Delta S = R \varepsilon (t - \sqrt{\frac{R}{g}} \sin \frac{2\pi}{T} \times t)$

ただし ΔS は距離誤差、Rは地球の半径、 ε はGyroのDrift Rate、gは重力加速度、Tは8.4.4分である。

M.SINSは飛行体用のSINSに比べると速度がおそく、使用時間が長いため、GyroのDrift Rateが一番重要な問題となる。

(e) SINSの位置誤差とGyroのDrift（計算値）

Rateとの例をあげると次のとおりである。

(=) sperry社の潜水艦用のSGN-4の位置誤差は3海里／10時間以下

位置誤差(海里／日)	GyroのDrift Rate(度／時)
28	0.02
14	0.01
7	0.005

(すなわち7.2海里／日以下に相当)のことであり、この価格は50万ドル(1億8,000万円)という。なお米国においてもM.SINSは発表されていない。

(f) 現状の設備と技術で0.01度／時のGyroを使用するM.SINSを作ることはきわめて困難であり、かつまたその精度のものの価格は何千万円程度(設備費は除き)となろう。

(g) かりに実験品として0.1度／時のGyroのものを作つたとしても、その位置誤差は140海里／日となり、これは約5ktに相当するDrift Rateであつて、海流の速さの数倍であり、これでは役に立たない。

(h) 以上の理由によりM.SINSは位置誤差が少なくとも7海里／日できれば5海里／日以下のものでなければならない。

7海里／日のGyro Drift Rateは0.005度／時、5海里／日のものは0.0035度／時である。

参考 速力20ktの場合の1%の誤差は約5海里／日である。

(i) SINSは他に類のない優れた特長を持つ装置であるから、今後も引続いて開発のための調査、研究、検討を進める必要があると考える。開発に当つての当面の目標と問題点は次のとおりである。

(i) 開発目標

(A) Drift Rateが0.003度／時～0.005度／時のGyroの開発
(Gas Bearingの材料、工作技術、組立技術等を含む)

(B) $10^{-2} g \sim 10^{-6} g$ を計測するための加速度計の開発

(C) 位置誤差が7海里／日～5海里／日であるM.SINSの構造、制御機構、計算機等の開発

(j) 問題点

- (A) 商船用としての価格と必要性
- (B) 企業としての採算性
- (C) 開発の方法（自己開発と技術導入）
- (D) 自己開発の場合の研究グループの編成と資金

(3) 衝突および座礁予防システムとの関連についての検討

自動航法システムでは、船位測定システムまたは船位推定システムにより決定される現在船位と航海計画により計画針路と計画速力が計算され、それらが自動操舵装置および主機自動制御装置に伝えられるわけであるが、航海中、強い風浪に遭遇したり、他船との衝突あるいは座礁の危険のある場合には、一時的に針路、速力を変更して、これらの危険を避けることが必要である。

強い風浪に対しては、最適航路設定システムにより最適航路が定まる。他船との衝突の危険に対しては、衝突予防システムにより衝突を回避する。また座礁の危険に対しては座礁予防システムにより座礁を回避する。

上記の風浪に対する危険、衝突の危険、座礁の危険のうち、衝突および座礁の危険が最も重視されるべきものである。衝突の危険と座礁の危険に対しては次の3種類の場合が考えられる。

- (a) 衝突の危険はあるが、座礁の危険はない。
- (b) 衝突の危険はないが、座礁の危険がある。
- (c) 衝突および座礁の危険がある。

(a) 衝突の危険はあるが、座礁の危険はないとき

この場合の状態としては、たとえば右図のような場合が考えられる。すなわち、自船が現在の針路と速力で進んだ場合、他船と衝突の危険がある。しかし座礁の危険はない場合である。

この場合には、まず、衝突予防システムにより、衝突を回避するための操船法が算出されるが、この場合にその操船法を行なつた場合、座礁の危険がないかどうかをチェックする必要がある。この図では衝突を回避するために右変針をすると座礁の危険になる。このチェックをするためには、暗礁の探知を自船の前方だけでなく、左右広範囲の角度を走査できるセンサが必要である。

(b) 衝突の危険はないが、座礁の危険があるとき

右図のような状態は、自船が現在の針路と速力で進んだ場合、他船との衝突の恐れはないが、座礁の危険のある場合である。

この場合には、暗礁も船と考えて衝突回避をすればよいと考えられる。

(c) 衝突および座礁の危険があるとき

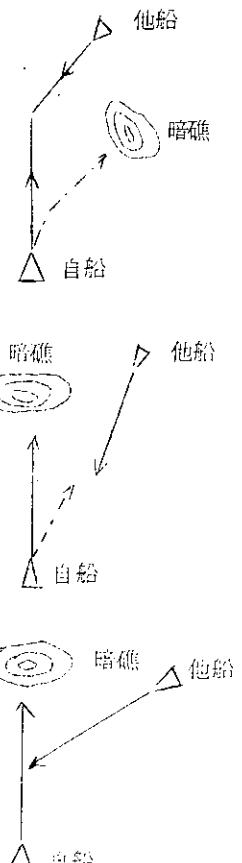
右図のような状態は、自船が現在の針路と速力で進んだ場合、衝突の危険も座礁の危険もある場合である。

この場合にも、(b)と同様に、暗礁を船と考えて、衝突回避をすればよいと考えられる。

(b)、(c)両者についても、(a)で述べたように、回避操船を行なう場合、座礁の危険の有無をチェックする必要がある。

したがつて、自船の前方遠距離の暗礁を探知するばかりでなく、自船の左右広範囲の角度を走査できる。センサを開発しなければ、衝突予防システムと座礁予防システムとを組みつけてコンピュータで処理するシステムを構成することは困難であると考えられる。

(4) システムのシミュレーション（実測船位計算方法）



(4-1) ロランによる実測船位計算方法(その1)

(a) 基本的考え方

実測船位を計算する方法として基本的に次の方法が考えられる。

(i) 必要領域内のすべての周一コランテーブルをすべてメモリに収容しておき、測位を行なうときはその全域をスキヤンニングし一致点を見出し、直接緯度経度の実測を行なう方法。

(ii) 実測ごとに何等かの方法で直接測位計算を行なう方法

この二者の方法を比較した際、(i)の方法は一見きわめて簡易な方法であり、文献によれば航路の限定された航空機において I - R デイスプレイとして一部使われた形跡があるが、船舶用として広海域を対象とする際は必ずしも有利ではない。概算値でも太平洋、大西洋の主要海域のみで 20 E のオーダのメモリを必要とし、原則として全海域をスキヤンニングしなければならない。

したがつてこの方法は高度集中制御方式自動化船の目的には不利であると思われる。

(ii)の方法は計算自体はかなり複雑であるが、実測ごとに演算を行なうので、メモリに収容すべき基本的データはかなり少なくて良いので検討する余地がある。基本的データが少ないわけなので、この外演算要素およびワーキングエリアに要するメモリ量を減少する方法を考えればよいわけである。

この見方は特に高度集中制御方式自動化船においては他目的の演算に相当量のメモリを必要とする点、および集積回路その他で演算速度がきわめて早くなっている点、この 2 点から計算プロセスは若干複雑となつても所要メモリの少ない方を探るべきと考える。

しかも概略の船位を DRP より導入すればスキヤンニング時間が大幅に節約できるので、この方法が最適と考える。

(b) 船位計算法の実際

船位計算法の手順は次のとおりである。

(i) 船位の推定

(ii) 推定位置から送信局までの大圈距離計算

(iii) 地球の橢円と伝播不整に対する補整

(iv) 推定位置における時間差の計算

(v) 計算時間差と測定時間差の比較

(vi) (v)の差により、よりよい船位の推定

(vii) (vi)の差が一定の値(たとえば $0.1 \mu s$)以下になるまで(ii)~(vi)の手順の繰返し

ダブルマスタ局を M、スレーブ局を X、Y としそれぞれの経緯度を λ_X 、 λ_Y 、 λ_M 、 ϕ_X 、 ϕ_Y 、 ϕ_M 、主従局間の時間差 B_X 、 B_Y 、各従局のコーディングディレイ d_X 、 d_Y を知りプログラムに従つて次の値を計算機に入れる。

$$\sin \phi_X, \cos \phi_X, \sin \phi_Y, \cos \phi_Y, \sin \phi_M, \cos \phi_M,$$

$$\lambda_X, \lambda_Y, \lambda_M$$

$$D_X = B_X + d_X \quad X \text{に対する時間遅延}$$

$$D_Y = B_Y + d_X \quad Y \quad "$$

$$f \quad \text{地球面のフラットネス}$$

$$E \quad \text{地球半径}$$

$$C \quad \text{光速}$$

$$A, B, C, a, b, \quad \text{曲線決定定数}$$

最初の仮定した推定位置 (ϕ_s 、 λ_s) から 3 局迄の大圈距離 r_X 、 r_Y 、 r_M を求める。

$$r_i = \cos^{-1} [\sin \phi_s \cdot \sin \phi_i + \cos \phi_s \cdot \cos \phi_i \cdot \cos(\lambda_i - \lambda_s)]$$

上式は地球々面についてのみ正しいので次の補正が必要である。

$$\delta r_i = \frac{c}{\gamma g} \left[(\sin \gamma_i + r_i) \left(\frac{\sin \phi_i + \sin \phi_s}{\cos \gamma_i / 2} \right)^2 - (\sin \gamma_i + r_i) \left(\frac{\sin \phi_i - \sin \phi_s}{\sin \gamma_i / 2} \right)^2 \right]$$

$$r_i' = r_i + \delta r_i$$

この距離には次式により決定される伝播変動のための付加補正が必要である。

$$\delta r_i' = A(r_i' + a)^2 + B(r_i' + b) + c$$

$$r_{ri}' = r_i' + \delta r_i'$$

ここで A、B、c、a、b、は伝播変動の経験的事実に基いて画かれた曲線から求められる係数である。この角距離を次式により伝播時間 t_{ri} に変換する。

$$t_{ri} = (E/C) r_{ri}'$$

主局パルス送信周期を L、従局のパルス発振周期を L'、主局のパルス送信時刻を t_0 とするとき、推定位置へのパルス到達時刻は次式で与えられる。

$$t_m = t_0 + t_{rm} \quad , \quad t_0 + t_{rm} = L \quad , \quad t_0 + t_{rm} = nL$$

$$n = 0, 1, 2, \dots$$

$$t_x = t_0 + s_x + d_x + t_{rx} + nL$$

$$t_y = t_0' + s_y + d_y + t_{ry} + nL$$

時間差 $T_{x'}$ 、 $T_{y'}$ は次式で与えられる。

$$T_{x'} = t_x - t_m = D_x T_{rx} - T_{rm}$$

$$T_{y'} = D_y T_{ry} - T_{rm}$$

時間差 $T_{x'}$ 、 $T_{y'}$ と測定値 T_x 、 T_y を比較し $\Delta X = T_x - T_{x'}$ 、 $\Delta Y = T_y - T_{y'}$ が規定値たとえば $0.1 \mu s$ より小さいかどうか調べる。

差が小さければ計算はそれで終り、そうでなければよりよい位置の近似計算が次の計算によつて得られる。

$$\phi_{new} = \phi_{old} + \frac{\partial \phi}{\partial K_y} (\Delta K_y) + \frac{\partial \phi}{\partial K_x} (\Delta K_x)$$

$$\lambda_{new} = \lambda_{old} + \frac{\partial \lambda}{\partial K_y} (\Delta K_y) + \frac{\partial \lambda}{\partial K_x} (\Delta K_x)$$

ここで ΔK_x 、 ΔK_y は時間差 ΔX 、 ΔY を radian で表わしたもので、

$$\frac{\partial \phi}{\partial K_y} = (\sin \alpha_m - \sin \alpha_x) \frac{\cos \phi_s}{J}$$

$$\frac{\partial \lambda}{\partial K_y} = (\cos \alpha_x - \cos \alpha_m) / J$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial K_x} = (\sin \alpha_y - \sin \alpha_{m'}) \frac{\cos \phi_s}{J}$$

$$\frac{\partial \lambda}{\partial K_x} = (\cos \alpha_{m'} - \cos \alpha_y) / J$$

$$J = \cos \phi_s [(\cos \alpha_m' - \cos \alpha_y)(\sin \alpha_m - \sin \alpha_x)]$$

$$- (\sin \alpha_m' - \sin \alpha_y)(\cos \alpha_m - \cos \alpha_x)]$$

$$\sin \alpha_i = \frac{\cos \phi_i \sin(\lambda_i - \lambda_s)}{\sin \lambda_{ri}}$$

$$\cos \alpha_i = \frac{\sin \phi_i + \sin \phi_s \cdot \cos \gamma_{ri}}{\cos \phi_s \cdot \sin \gamma_{ri}}$$

今まで最初の推定位置が 30 N.M. 以内で行なわれると 5 回以下の繰返し計算で 0.1 μs 以内に達する筈である。

このための計算速度は OKITAC - 5090D において数秒のオーダである。

以上の方の計算プログラムの大要は次のとおりである。

今日本周辺ということで考えると次のとくになる。

(i) 既知のデータ

ロラン局の経緯度(度、分、秒)	8ヶ
電波伝播上の補整係数	5
椭円補整のための係数	1
地球の半径(m)	1
光速度(m/s)	1
主従局間の時間遅延(s)	2
測定時間差(s)	2
推定位置の経度、緯度(度、分、秒)	2

(ii) プログラムの語数

Main Program	240語(上記データを含む)
degree to radian	20
sin X	23
cos X	56
cos ⁻¹ X	81
radian to degree	42
計	462

たゞし 1 語 2 命令のため 1 語 1 命令換算約 800 語となる。

(4-2-2) ロランによる実測船位計算方法(その2)

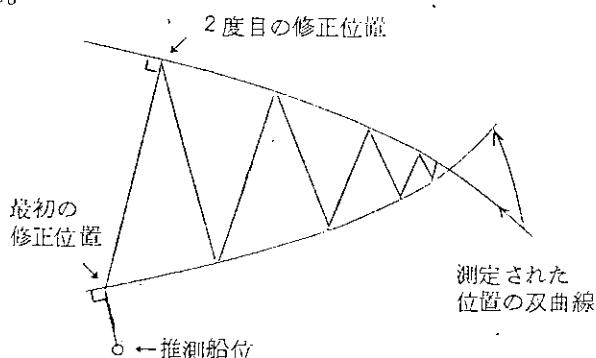
(a) 方式の概要

ここで述べる方式は、ロランの地表波により測定した時間差とともに、推測船位を反復修正することによつて、かなり高い精度で船位決定するものである。別紙に方式の概略をフローチャートにより示す。以下は、その簡単な説明である。

- (i) 予備処理は、地理的表示されている局の位置を球の上で座標に変換する。これは次に続く距離差算出のための必要性から要求される。変換されたデータは、以後の計算に都合のよいように定数として記憶する。
- (ii) 何らかの方法で推測された船位は、予備処理の場合と同様に座標変換され、変数として記憶する。一度船位を推測すれば、局選択を変えるまで、前の計算結果がこの変数となり、データ入力は必要なくなる。
- (iii) 位置を求める方程式は、地球を完全な球と仮定して、展開されている。ただし、球の半径は局ごとにそのサービスエリアの平均緯度から決定される。このことは、地球の幾何学的形状(偏平率)を補正するものである。この仮定によつて起る誤差についてはあとで述べる。

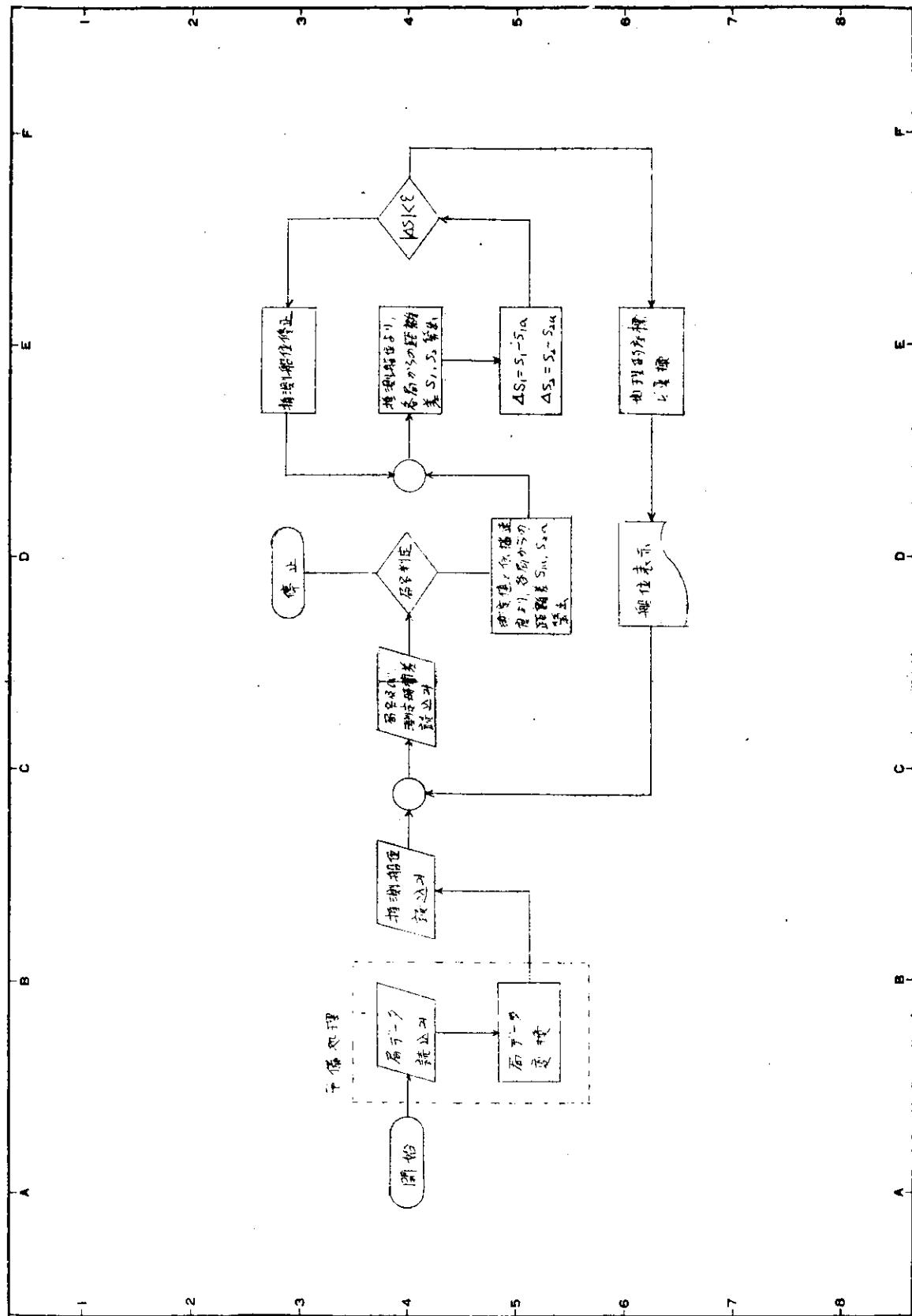
- (iv) 推測船位の修正は、測定された位置の双曲線と垂直に交わる線にそつて推測船位を動かすことによつて行なわれる。この過程は、もし双曲線と円とが共通の焦点を持つならば、これらは直交するということから、数学的に実行しうる。収束のようすを右図に示す。

- (v) 右図における収束条件は、推測船位が測定されたそれぞれの位置の双曲線から、ともに定められた値 ε 以内に入ることである。



図のようによつて、2つの双曲線の間を反復することにより、推測船位は速やかに、測定された位置に接近する。

船位決定のための計算フローチャート



(VII) 計算においては、地球の偏平率のほかに、電波伝搬速度と対しても補正を行なつてゐる。

(b) 入力データ

予備処理および、位置の決定に必要なデータは(d)の例題で示したとおりである。

(c) 出力データ

球の上で計算された船位は地理的座標に変換されて、その緯度、経度がアウトプットされる。

(d) 計算例

「ランサム受信機によつて 2 S 1 — 2,400, 2 S 2 — 3,400 を得た。推測船位を北緯 39°、東経 145°

として船位を求めよ。」

予備処理および座標変換のプログラムは FORTRAN によつてプログラミングされている。

予備処理における所要時間は、1 複合局当たり 1 秒以内である。座標変換の計算所要時間は 2 ~ 3 秒である。

サービスエリアの平均緯度は主局および二つの従局の緯度の算術平均をとつた。

電波の伝搬速度は海水の導電率に対して補正した。

収束条件として $\epsilon = 5 \times 10^{-6}$ (rad) を取つた。これは約 1" の誤差に対応する。

DATAS FOR PRE-PROCESSING

LAT. OF MASTER STATION	= 39° 24' 57.3"
LONG.	= 142° 2' 2.3"
LAT. OF 1ST SLAVE STATION	= 43° 11' 11.4"
LONG.	= 145° 31' 22.9"
LAT. OF 2ND SLAVE STATION	= 35° 48' 30.3"
LONG.	= 140° 47' 6.2"
MEAN LAT. OF SERVICE AREA	= 39° 28' 12.7"
MAJOR RADIUS OF EARTH	= 6378206.6 (meters)
MINOR	= 6356583.8 (")

DATAS FOR COORDINATE CONVERSION

LAT. OF MASTER STATION	= 0.68460821 (rad)
LONG.	= 2.47896044 (")
LAT. OF 1ST SLAVE STATION	= 0.75035833 (")
LONG.	= 2.53985595 (")
ANGLE DISTANCE BETWEEN M AND S ₁	= 0.08015928 (rad)
M AND S ₂	= 0.06519067 (")

ANGLES BETWEEN MS₁ EXTENT AND MS₂ = 0.31403090 (rad)

DIRECTION OF MS₁ WITH RESPECT TO POLE = 3.73105788 (")

PROPAGATION VELOCITY = 0.4705115 × 10⁻⁴ (rad)

= 0.4702155 10⁻⁴ (")

(SEA WATER CORRECTION)

MAJOR RADIUS OF EARTH = 6378206.4 (meters)

MINOR = 6356583.8 (")

CODING DELAY + STATION DISTANCE BR₁ = 2700.0 (-sec)

BR₂ = 2385.5 (")

CONVERGENCE CONDITION = 5.0 × 10⁻⁶ (rad)

ESTIMATED SHIP POSITION (LAT.) = $39^{\circ} 00' 00''$
 (LONG.) = $145^{\circ} 00' 00''$
 OBSERVED TIME DIFFERENCE $TD_1 = 2400.0$ (-sec)
 $TD_2 = 3400.0$ ("")

RESULT

SHIP POSITION (LAT.) = $146^{\circ} 55' 58.81''$
 (LONG) = $40^{\circ} 18' 22.79''$

(e) 検討

(i) 必要な記憶容量

計算プログラムは FORTRAN を用いてプログラミングされているから、直接プログラムを記憶するのに必要な記憶容量を求めるることはできないが、座標変換プログラムは機械語で約 1,200 ステップの命令よりなる。定数として記憶されるのは 1 複合局当たり 12 個のデータである。1 つのデータに 40 ビット必要（精度により異なる）であるとすれば、1 複合局当たり

$$40 \times 12 = 480 \text{ (ビット)}$$

となる。

(ii) 誤差の解析

計算された船位には誤差が存在するが、その原因は地球を完全な球と仮定したこと、伝搬速度の近似、船位決定の際の幾何学的誤差および地理的座標への変換における近似である。

地球を完全な球であると仮定し、その半径を一定とすれば、位置により 2 浬以上の誤差が生ずる。ここで用いたように、その半径を局のサービスエリアの平均緯度から決定すれば（可変半径）、伝搬距離が 1,200 浬以内であれば、誤差は 0.5 浬以内になる。前掲の例の場合、半径が 6,369,513.2 m の球の上で解かれている。

電波伝搬速度は、海面上を伝播する場合、自由空間を伝搬する場合と比べて、測定時間差に約 0.06% の誤差を生ずる。ここでは簡単のため第 1 次近似をとることにより、誤差を 0.004% 以内にしている。

幾何学的誤差は、 ϵ の値と局からの距離および基線と船位との間の角度により異なる。 $\epsilon = 5 \times 10^{-6}$ の時、幾何学的誤差は最大 1 浬と見ておけば、実用上問題はない。

地理的座標に変換する際に生ずる誤差は 10^{-9} 浬のオーダであり無視し得る。

(iii) 空間波による場合

空間波を用いて船位を計算するには、測定時間差を地表波測定時間差に補正する予備処理プログラムをつければよい。ただしこの補正是 ϵ の値によつてはきわめて厳密に行なわなければならない。また入力が複雑となるのは避けられない。

(4-3) ディジタルによる実測船位計算方法

(a) データの内容

(i) コンピュータに与えられるデータ

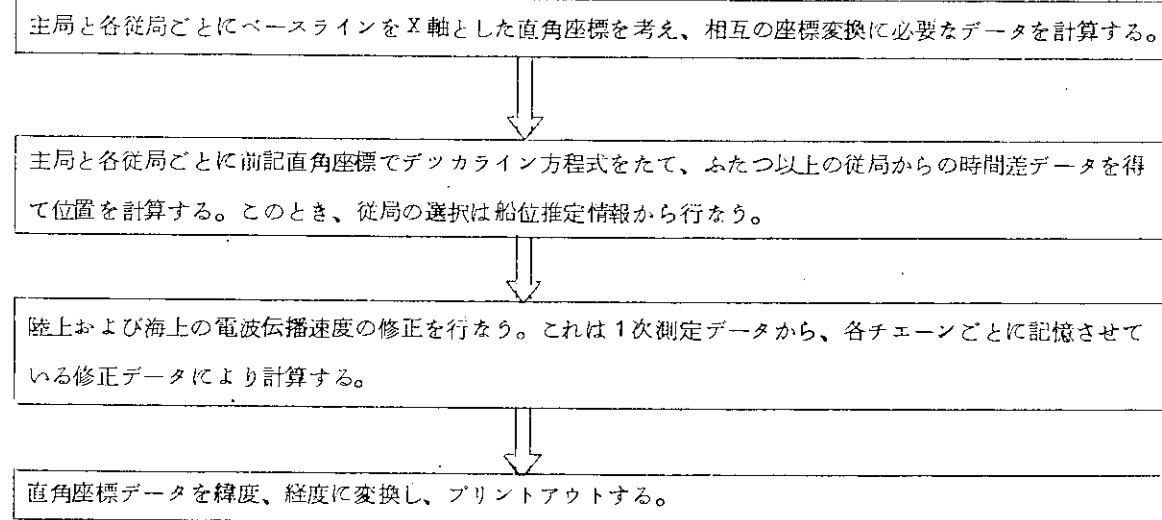
- (1) チェーン名
- (2) 主局、および従局の位置（緯度、経度）
- (3) 主局と各従局間の距離
- (4) 電波伝搬速度（陸上、海上およびその修正値）

(ii) コンピュータであらかじめ計算し、チェーンごとに記憶しておくデータ

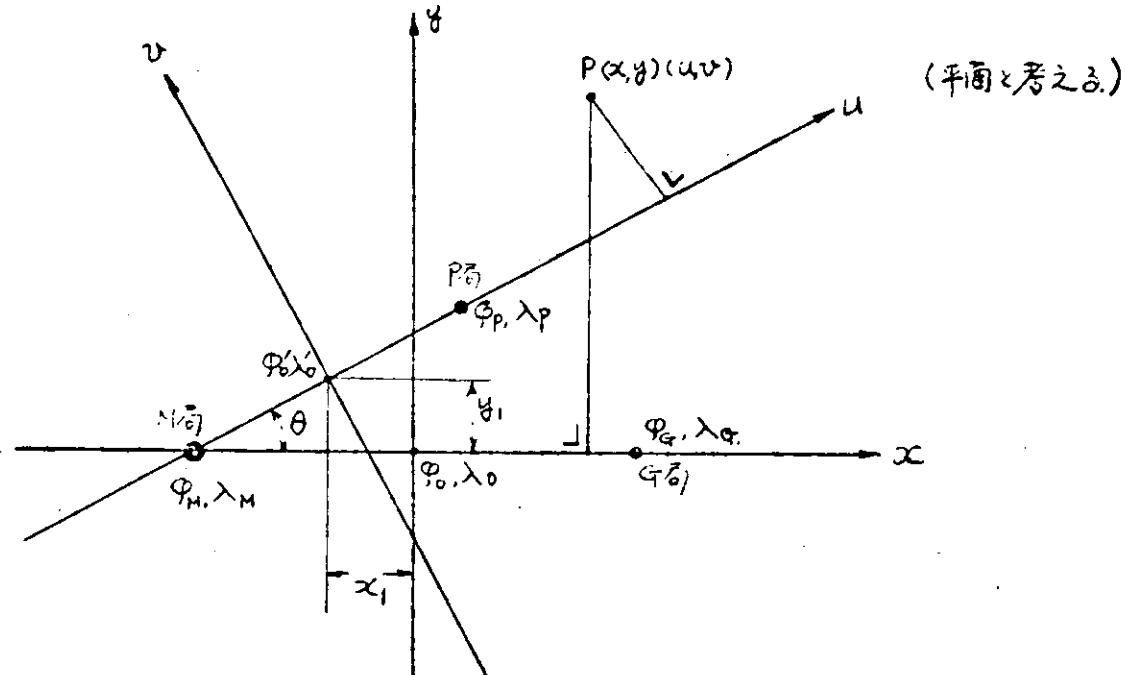
- (1) 主局および各従局間の中心位置（緯度、経度）
- (2) 各従局とのベースラインを X 軸とした直角座標の関係

(iii) 位置算出指令ごとに与えられるデータ

- (1) 主局と各従局間の電波伝播の時間差
 - (2) 時刻
 - (3) 船位推定による位置(緯度、経度)
- (b) 計算内容の概要



(c) 各従局のベースラインを横軸とした直角座標の変換



$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda_0 = \frac{\lambda_M + \lambda_G}{2} \\ \lambda_0' = \frac{\lambda_M + \lambda_G}{2} \end{array} , \quad \begin{array}{l} \varphi_0 = \frac{\varphi_M + \varphi_G}{2} \\ \varphi_0' = \frac{\varphi_M + \varphi_P}{2} \end{array} \right.$$

$$Y_1 = R(\varphi_0' - \varphi_0)$$

$$X_1 = R(\lambda_0 - \lambda_0') \cos \varphi_0'$$

$$\sin \theta = \frac{R(\varphi_P - \varphi_M)}{2C_P}$$

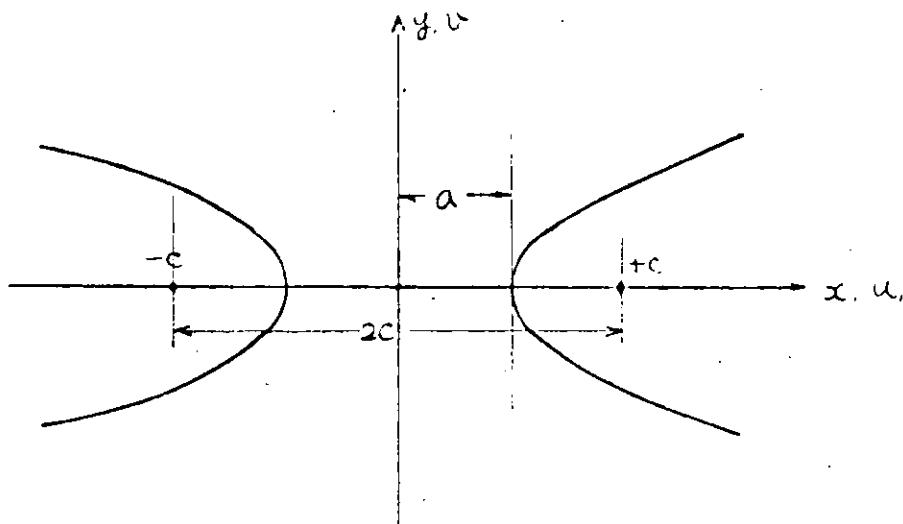
ここで R : 地球の半径(完全な球と仮定)

$2C_p$: 主局とP局間の距離

また $2C_p$ が地球の半径に比し小さいので、平面と考えている。

$$\left. \begin{array}{l} x \mp x_1 = u \cos \theta - v \cos \theta \\ y \mp y_1 = u \sin \theta + v \sin \theta \end{array} \right\}$$

(d) デッカライン方程式



$$x = \pm \sqrt{\frac{a_g^2 y^2}{C_p^2 - a_g^2} + a_g^2}$$

$$u = \pm \sqrt{\frac{a_p^2 u^2}{C_p^2 + a_p^2} + a_p^2}$$

$$a = \frac{\delta \times v_o}{2}$$

ここで δ : 時間差 (sec)

v_o : 標準電波伝播速度 (m/sec)

δ の土によって、上式の土をきめる。

(e) 船位の計算

船位推定データあるいはデッカ用プロツタから推定位置を得て、船位測定用いる従局を選ぶ。

たとえば、P局とG局が選ばれたとすると

$$\left. \begin{array}{l} x \mp x_1 = u \cos \theta - v \sin \theta \\ y \mp y_1 = u \sin \theta + v \cos \theta \\ x = \pm \sqrt{\frac{a_p^2 v^2}{C_p^2 - a_p^2} + a_p^2} \\ u = \pm \sqrt{\frac{a_g^2 v^2}{C_g^2 - a_g^2} + a_g^2} \end{array} \right\}$$

なる連立方程式が得られ、これから P (x, y) を計算する。

計算の結果、 P_1 、 P_2 点を得るとときは推定データから選択してきめる。

(f) 電波伝播速度の修正

陸上、海上あるいは季節などによつて、電波伝播速度が変るので、必要ならばその修正を行なう。

一案としてチェーンごとに主局を中心に関方位を數十等分し、方位と距離をパラメータとした係数を記憶させておき、

$$a = \frac{\delta \times V_0}{2}$$

の修正を行なう。

(g) 直角座標から緯度、経度に換算

ここではM局とG局に換算したものとして進める。

$$\left. \begin{aligned} \sin \varphi &= \sin X \cdot \sin x + \sin Y \cdot \sin y + \sin \varphi_0 \sqrt{1 - \sin^2 x - \sin^2 y} \\ \sin(\lambda - \lambda_0) &= \frac{\sin A_0 \sin x - \cos A_0 \sin y}{\cos \varphi} \\ \sin A_0 &= \pm \sin(\lambda_G - \lambda_M) \frac{\cos \varphi_G}{\sin 2 C_G} \\ &\quad (\text{東經: } +, \text{ 西經: } -) \\ \cos 2 C_G &= \sin \varphi_G \sin \varphi_M + \cos \varphi_G \cos \varphi_M \cos(\lambda_M - \lambda_G) \\ \sin A_0 &= \cos \varphi_M \frac{\sin A}{\cos \varphi_0} \\ \sin X &= \cos A_0 \cdot \cos \varphi_0 \\ \sin Y &= \sin A_0 \cdot \cos \varphi_0 \end{aligned} \right\}$$

(h) メモリの内容

(i) 1チェーン当りのメモリデータ

(1) チェーン名	5 W
(2) 主局、従局の位置(緯度、経度)	1 5 × 4 = 6 0 W
(3) 主局、従局間の距離	5 × 3 = 1 5 W
(4) 電波伝播速度	5 × 2 = 1 0 W
(5) 主局、従局間の中心位置	1 5 × 3 = 4 5 W
(6) 直角座標変換係数	1 5 × 3 = 4 5 W
(7) 電波伝播速度修正係数(方位60等分として)	5 × 6 0 = 3 0 0 W
(8) その他	2 0 W
	5 0 0 W

全 世 界 3 4 局 (予定 10 局含む) 1 7,000 W

(ii) 測定ごとに記入されるデータ

(1) チェーン名	5 W
(2) 使用局名	3 × 2 = 6 W
(3) 時間差	5 × 2 = 1 0 W
(4) 船位推定位置	1 5 × 2 = 3 0 W
(5) 時 刻	6 W
	5 7 W

(iii) 演算の命令語

(1) サブルーチン	cos, sin, √	約 1,000 W
(2) 演算プログラム		約 1,500 W

(3) 演算時のデータ

約 1,000 W
計 2,500 W

(i) 誤差 σ の計算

(i) 直角座標データから主局と従局間の夾角を計算する。

$$\begin{aligned} l_1^2 &= (x - c)^2 + y^2 \\ l_2^2 &= (x + c)^2 + y^2 \\ (2c)^2 &= l_1^2 + l_2^2 \\ \rightarrow 2l_1 l_2 \cos \varphi \end{aligned}$$

(ii) 各局の時間差誤差(レーン誤差)の標準偏差

σ_H を実測その他から推定する。

(iii) ベースライン上のレーンの広さを求める。

$$W = \frac{2c}{\text{レーン数}} \quad (\text{局によつてきまる})$$

以上から、距離単位の標準偏差を求める。

$$\sigma = \sigma_H \cdot W \cdot \cosec \frac{\varphi}{2}$$

(4-4) オメガによる実測船位計算方法

ロラン航法もオメガ航法も双曲線航法であるから、両者の実測船位計算法は基本的には全く同じでよいわけであるが、後者の基線長は前者の数倍以上長いため、オメガ航法のカバー・レンジ内では、局所的には隣接する位置線(LOP)が任意方向についてほぼ等間隔に並んだ直線になつていると考えてよいほどなので、かなりラフな補間式によつても正しい位置決定を行なえる。オメガ航法による船位決定計算には、この特徴を生かした方法によつて行なうのが有利と思われる。

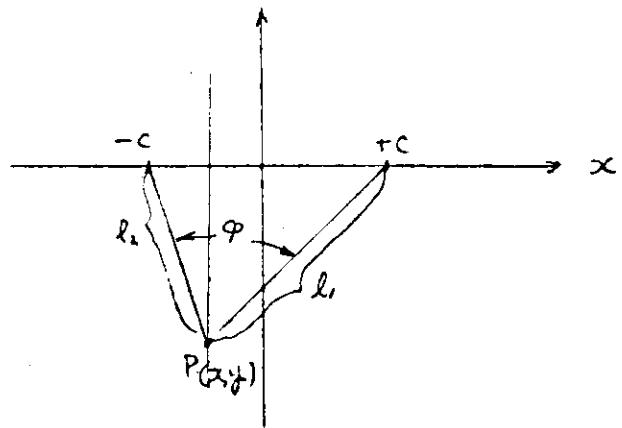
一方、オメガ航法での船位決定計算の際には、測定対局ごとに場所と時間の関数である空間波補正の実施法が問題になる。

空間波補正法としては2つの方法が考えられる。

その一つは、オメガチャートまたはオメガテーブルを用いて船位決定を行なう場合と同じ方法によるものである。すなわち船位決定計算にはいる前に、市販の空間波補正表から、推定位置における測定時刻の補正值を読みとつて(実際にはカード・リーダ等で予め読み込ませておいた補正表データ・ファイルから必要部分をピック・アップさせる)、位相差の実測値に補正を施し、これによつて得た位相差に対してLOPの交点を逐次近似的に算出する方法であり、他の一つは、VLF電波の位相速度が伝搬路の昼の部分と夜の部分とでは異なる一定値をとることを考慮して、測定時刻に推定位置から局まで電波が伝搬するのに要する時間を算出し、それによつて測定している対局の空間波補正を加味したLOPを求め、それらの交点が位相差の実測値に収斂するような位置を逐次近似的に算出する方法である。

計算時間が短くてすむ。日時変化ばかりでなく季節変化まで補正できる。補正精度が高い。等の理由で、始めにあげた補正表を用いる方法の方が一般的に見て有利のようであるが、補正データ・ファイルを必要とするため、データ処理装置に大容量のメモリが必要になる。しかし航路が決つているような場合には必要となる補正表は少数にとどまるので、ある程度人手を使つてよいことにはすれば(たとえば、航路をいくつかの区間に分けておき、各区間にごとに補正表カードを差しかえる等の操作を加えてよいならば)、補正表のために必要なメモリは非常に小容量のものでよいことになる。

LOPの実測値すなわち、位相差の実測値から船位の緯度、経度を計算する際の最も基本となる関係式は、緯度、経度の既知な地球上の2点間の距離を表わす表示式であるが、地球が完全球体ではなく、地軸方向にやや偏平な四



転椭円体に近いものなので、球体上の2点としての表示式に補正項を加えた形のものとなる。

近似の方法によつて補正項が異なるため、一般的なものとはならないので、いくつかの表示式が発表されている。その内の一つに以下に示すような Andoyer - Lambert の表示式がある。

緯度: φ_1 、経度: θ_1 の S 地点 (φ_1, θ_1)

と

緯度: φ_2 、経度: θ_2 の R 地点 (φ_2, θ_2)

の2点 (S - R) 間の距離 (d_{S-R}) は、次の表示式によつて演繹的に求められる。

$$d_{S-R} = a\sigma + \delta_s$$

ここで、

$$a = \text{地球赤道上の半径} = 6,378,206.4 \text{ Km}$$

σ = 角距離 (ラジアン)

δ_s = 補正值

δ は球面三角の公式により次のように三角関数で表わされる。

$$\cos \sigma = \sin \varphi_1 \sin \varphi_2 + \cos \varphi_1 \cos \varphi_2 \cos (\theta_1 - \theta_2)$$

δ_s は次式で与えられる。

$$\delta_s = \frac{af}{4} \left[\frac{(3 \sin \sigma - \sigma)(1 + s_o + c_o)(1 + s_o - c_o)}{1 + \cos \sigma} - \frac{(3 \sin \sigma + \sigma)(1 - s_o + c_o)(1 - s_o - c_o)}{1 - \cos \sigma} \right]$$

ここで

$$f = \text{回転椭円体の偏平率} = 1/295$$

$$s_o = \sin \varphi_1 \sin \varphi_2$$

$$c_o = \cos \varphi_1 \cos \varphi_2$$

上記の距離の表示式から、以下のようにレーン値が求められる。

$$\text{光速} : c = 2,997,08 \times 10^5 \text{ Km}$$

オメガ実験局についての測定によつて得られた VLF 電波の位相速度 (v_p) は:

v_p :		陸	上	海	上	反射高	理論値
	日中	1.00270	1.00320		70 Km	1.00280	
	夜間	0.99920	0.99920		90 Km	0.99930	

既知の地点 S_1 (φ_1, θ_1) と S_2 (φ_2, θ_2) にある対局に対する推定位置 R (φ, θ) のレーン値、すなわち、位相差 $\delta_{S_1-S_2}$ (φ, θ) は、上記の d, v_p を使つて次のように求められる。

$$\delta_{S_1-S_2} (\varphi, \theta) = \left(\frac{d_{S_1-R}}{v_{p_1}} - \frac{d_{S_2-R}}{v_{p_2}} \right) \times 10,200 \text{ レーン}$$

なお、オメガ・チャートのレーン値は、上記の値が負数になるのを避けるため、+90.000 を加算した値になつているようである。

前記のレーン表示式を基にして、以下のシーケンスで位置決定を行なえる。

(i) 推定位置 (φ_0, θ_0) の近傍の定点 3 箇所 (0, 1, 2) について、それぞれ 2 対局に対するレーン値、

ℓ_i, m_i ($i = 0, 1, 2$) を計算する。

(ii) (i)で計算した ℓ_i, m_i ($i = 0, 1, 2$) と R 点 (φ, θ) で測定した ℓ, m (レーン値) によつて、 φ, θ を計算する。

この φ, θ は推定位置の近傍では φ, θ が ℓ, m の一次関数で表わされるものと仮定すれば、容易に求められる。

(ii) (i)で計算した ℓ_i 、 m_i ($i = 0, 1, 2$) と、R点(φ, θ)で、測定した ℓ, m (レーン値)によつて、 φ, θ を計算する。

この φ, θ は推定位置の近傍では φ, θ が ℓ, m の一次関数で表わされるものと仮定すれば、容易に求められる。

(iii) 3個の定点については、その一つ[0]点を真前の測定点に選び、他の2点[1]および[2]はそれぞれ[0]点より一定値 φ_k および θ_k だけ離れた点に選ぶ。

(iv) 上記の計算によつて得られた φ, θ の値に対するレーン値を前頁の最終式によつて算出し、それと実測値(ℓ, m)との差が許容値以上離れていたら、この(φ, θ)地点を[0]点に選んで、(i)のステップに戻つて計算をやり直す。

以上の計算は0、1、2、Rの4点を含む近傍では、レーン値と φ, θ が一次関数で表わされる関係になつてゐるものとして行なうが、推定位置に対するレーン値は正確な演繹式によつて毎回計算するから、誤差はその都度矯正されることとなり、補間誤差が積算されてゆくおそれはない。

またオメガ航法では、基線長が非常に長いため、 φ, θ の変化に対するレーン値の変化はゆるやかなので、局所的な範囲では両者はほぼ一次関数関係にあると考えられるから、上記のステップ4を省いて、ステップ2で得た値で計算を打切つても十分正確な位置が得られる。

オメガ航法の対局当りのカバー・レンジは7,000浬以上にもなるといわれているが、遠距離航行中の船舶の場合は一つ以上のカバー・レンジを航行することもしばしば起る。

その場合には、当然測定する対局の種類を切換えなければならない。そういう切換えを行なう必要の生ずる間隔は非常に長いので、この局切換操作を手動で行なつても実用上全く支障はないが、この操作までを自動化しようとする場合は次に述べるような点を考慮する必要がある。

(i) 位置決定には LOP が2本あれば十分であるが、カバー・レンジが移行する領域での信頼性低下を防止するため、冗長度を持たせて、4本以上の LOP をオート・トラッキングさせておく方が望ましい。

(ii) このように多数の LOP を常時オート・トラッキングする場合には、それに応じて、必要となるメモリ容量が大きくなるので、その一部に、センサ自体ではないデータ処理装置内のメモリをあてるようにする方が有利である。

(iii) 空間補正表データ・ファイルは、すべての操作を完全自動にしようとする場合は、非常に大容量のものとなる。

(iv) ここまで完全自動化する場合には、レーン識別操作まで自動化すべきである。

このような理想化された完全自動化は、望ましいものには違ひないが、実用上ほとんど支障にならない程度に手動操作を残すことにより、各層の船舶にマッチした価格のオメガ受信機を開発することが当面の急務だと思われる。

(4-5) NNS Sによる実測船位計算方法

NNS Sによって実測船位を求める原理は1.1.2(2)に述べられているので、ここではその計算の概略フローチャートおよびその簡単な説明を記すにとどめる。

なお、NNS Sによる実測船位決定のためのプログラムの詳細は次年度に研究する予定である。

(A) 衛星の時刻データおよび時計の時刻から正しい時刻を求める。衛星の近地点通過時刻と現在の時刻との時間差を計算する。

(B) (A)で求めた時間差及び軌道データから衛星の位置を計算する。座標系は地球の中心を原点とした慣性座標系。

(C) 船舶の概略の位置における空中線の高さを求める。

(D) ドプラカウントから衛星と船舶との直距離の2分間における変化分(S_{KO})を求める。

(E) 衛星の位置と直距離のデータから船舶の位置を計算する。

(F) 衛星と船舶の位置から逆に直距離(S_K)を求め且つ $\frac{\partial S_K}{\partial \varphi}, \frac{\partial S_K}{\partial \lambda}$ を求めめる。

(G) ドプラカウントより求めた \hat{S}_{k_0} と計算で求めた S_k および $\frac{\partial S_k}{\partial \varphi}$, $\frac{\partial S_k}{\partial \lambda}$ より [C] を求める。

$$C_{k_0} = \hat{S}_{k_0} - (S_k - S_{k-1})$$

$$C_{k_1} = -2.0 L_0$$

$$C_{k_2} = \frac{\partial S_{k-1}}{\partial \varphi} - \frac{\partial S_k}{\partial \varphi}$$

$$C_{k_3} = \frac{\partial S_{k-1}}{\partial \lambda} - \frac{\partial S_k}{\partial \lambda}$$

(H) [C] から [B] を構成

(I) [B] から [A] を計算

$$\begin{pmatrix} a_{10} & a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{20} & a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{30} & a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ \Delta f \\ \Delta \varphi \\ \Delta \lambda \end{pmatrix} = 0$$

(J) クラーメルの法により Δf , $\Delta \varphi$, $\Delta \lambda$ について解く

$$\varphi_{i+1} = \varphi_i + \Delta \varphi_i$$

$$\lambda_{i+1} = \lambda_i + \Delta \lambda_i$$

φ = 緯度

λ = 経度

i : 繰返し数

(L) $\Delta \varphi$, $\Delta \lambda$, Δf がプリセットした値より小であれば φ , λ が求められたこととする。

(4-6) 天測による実測船位計算方法

(a) プログラムの方針

天体観測によって位置の線を得たり、あるいは位置の線を処理して位置を求めたりしているときの実状を考慮して、つぎのような方針により、プログラムを作成した。すなわち、

(i) 天測による位置決定に必要な各センサからのデータはすべてマニユアル・インプットとする。

(ii) 天体曆もマニユアル・インプットとする。

(iii) 各観測ごとに推測位置を更新し、つねに新しい推測位置に対しての位置の線を与えるようにしている。推測位置を更新する方法はつぎの3種類を用いることができる。

(1) 基準位置における航程と観測時における航程との比較より航走距離を算出し、これと針路とを組合せて観測時における推測位置を求める。

(2) 基準位置の設定時を基準時刻とし、この時刻と観測時刻との差を求め、速力を乗じて航走距離を算出し、これと針路とを組合せて観測時における推測位置を求める。

(3) 第1観測時における推測位置は(1)の方法により、以後の観測時については(2)の方法により求める。

(iv) 推測位置の算出はすべて漸長緯度航法計算による。

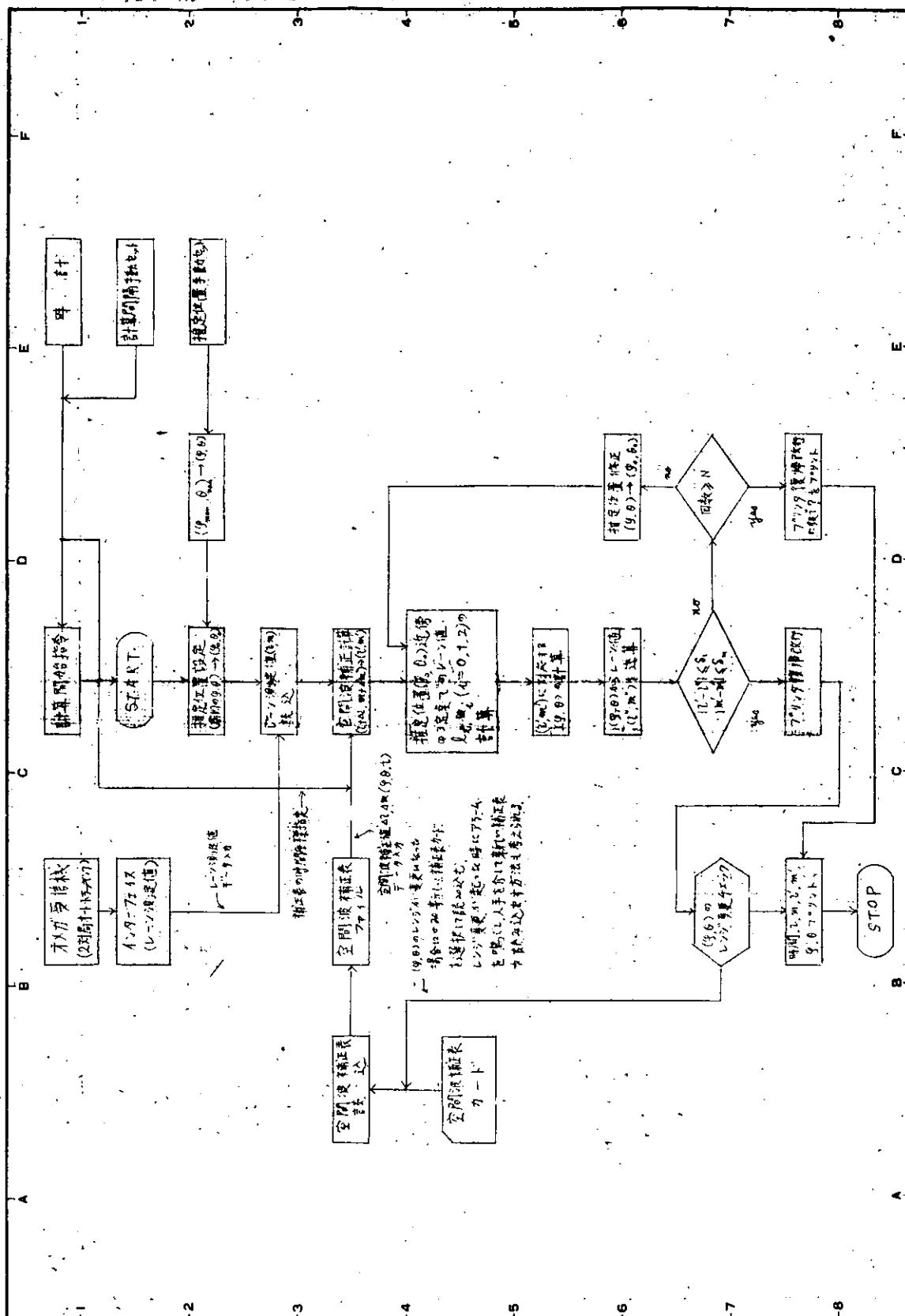
(v) 高度改正はすべて計算による。このなかには、気圧および温度差（気温－水温）によるものも、指定することによって計算され、指定なきときは標準状態の値で計算される。

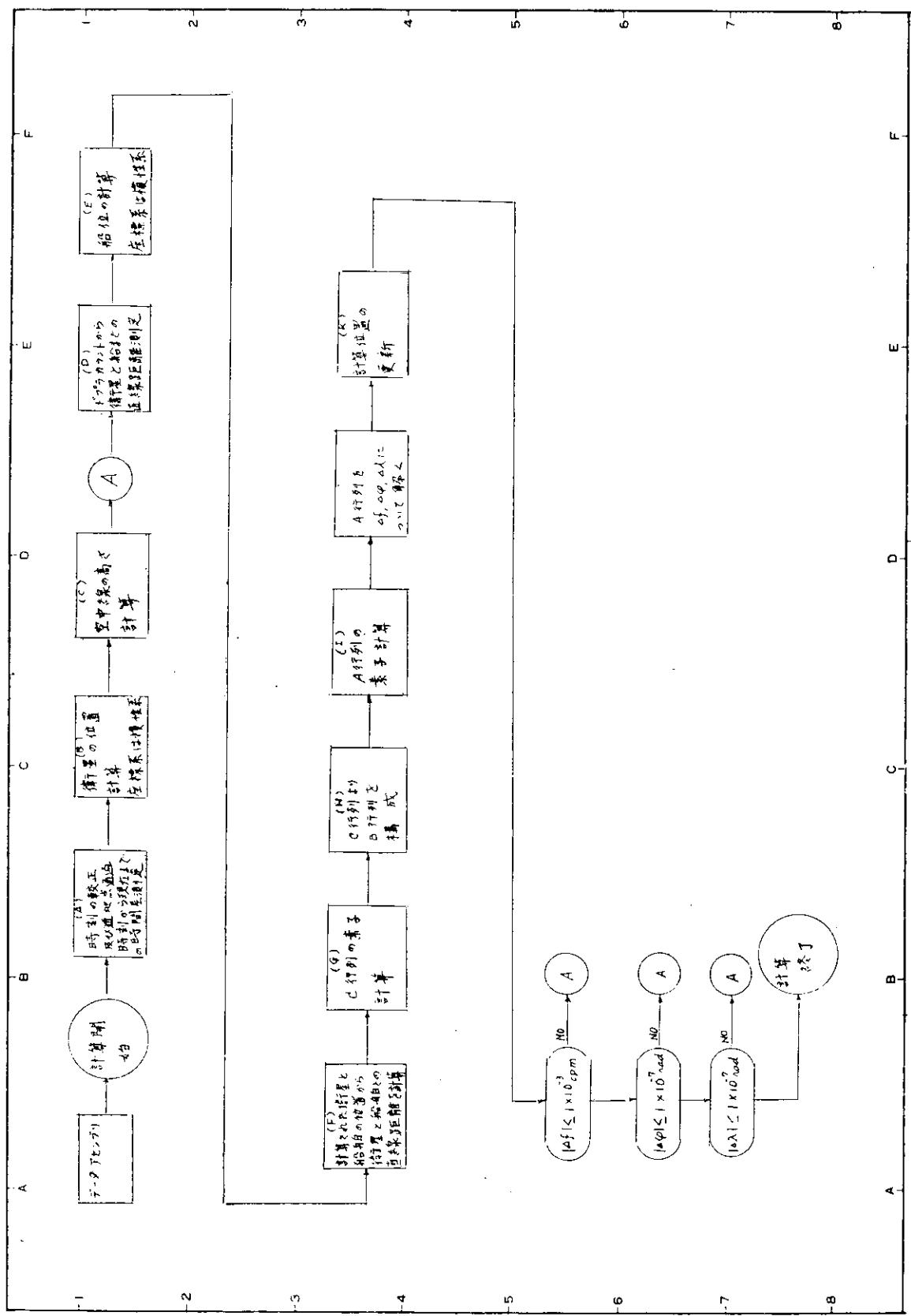
(vi) 位置の線は修正差法による。

(vii) 位置は2回以上の観測が行なわれたときに求められることは当然であるが、3回以上のときは最小自乗法によつて位置が決められ、そのときの残差が計算される。

(viii) 位置の表示は緯度および経度による。緯度は+が北緯を、-が南緯を表わし、経度は+が東経を、-が西経

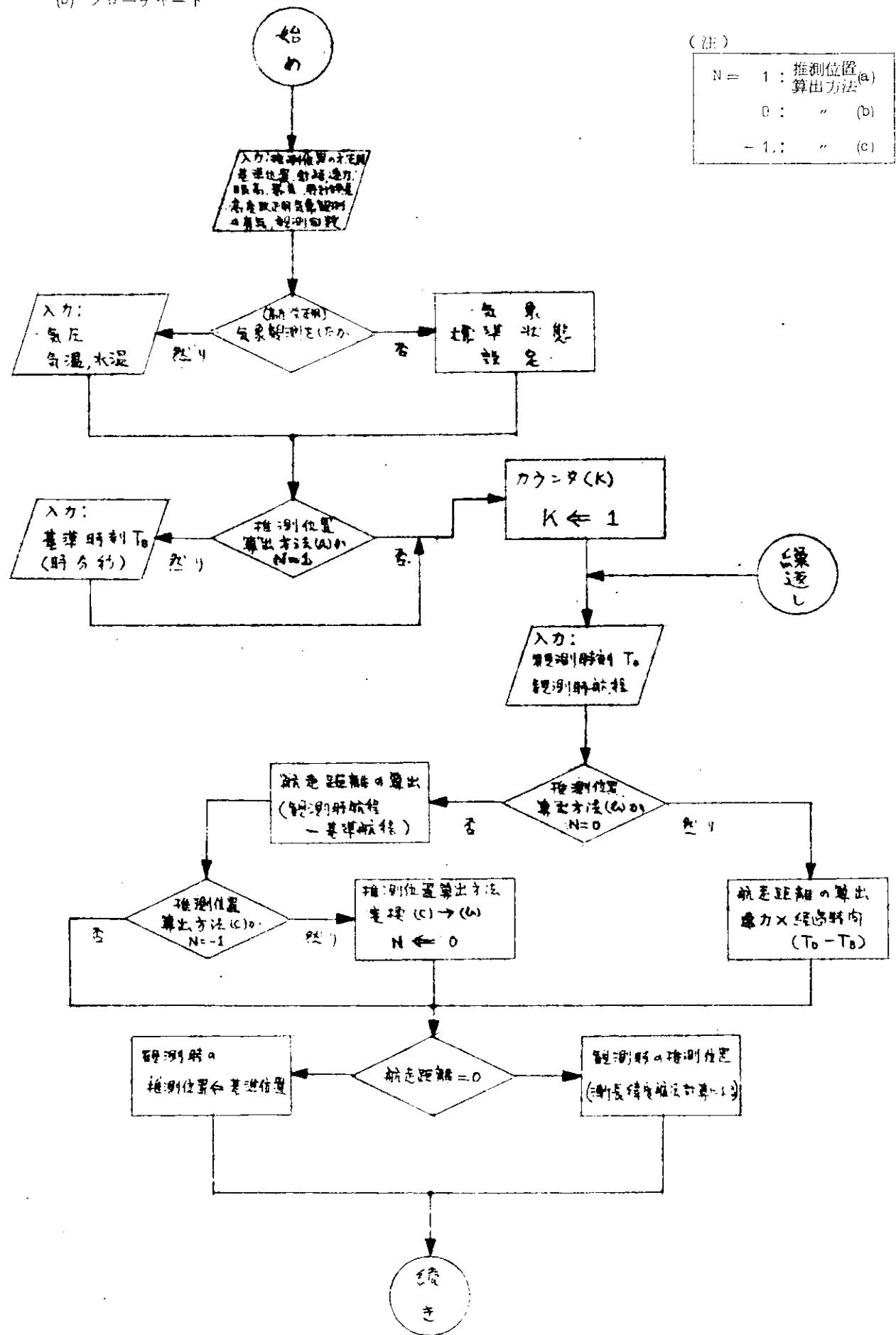
オメガ航法による船位自動測定フローチャート

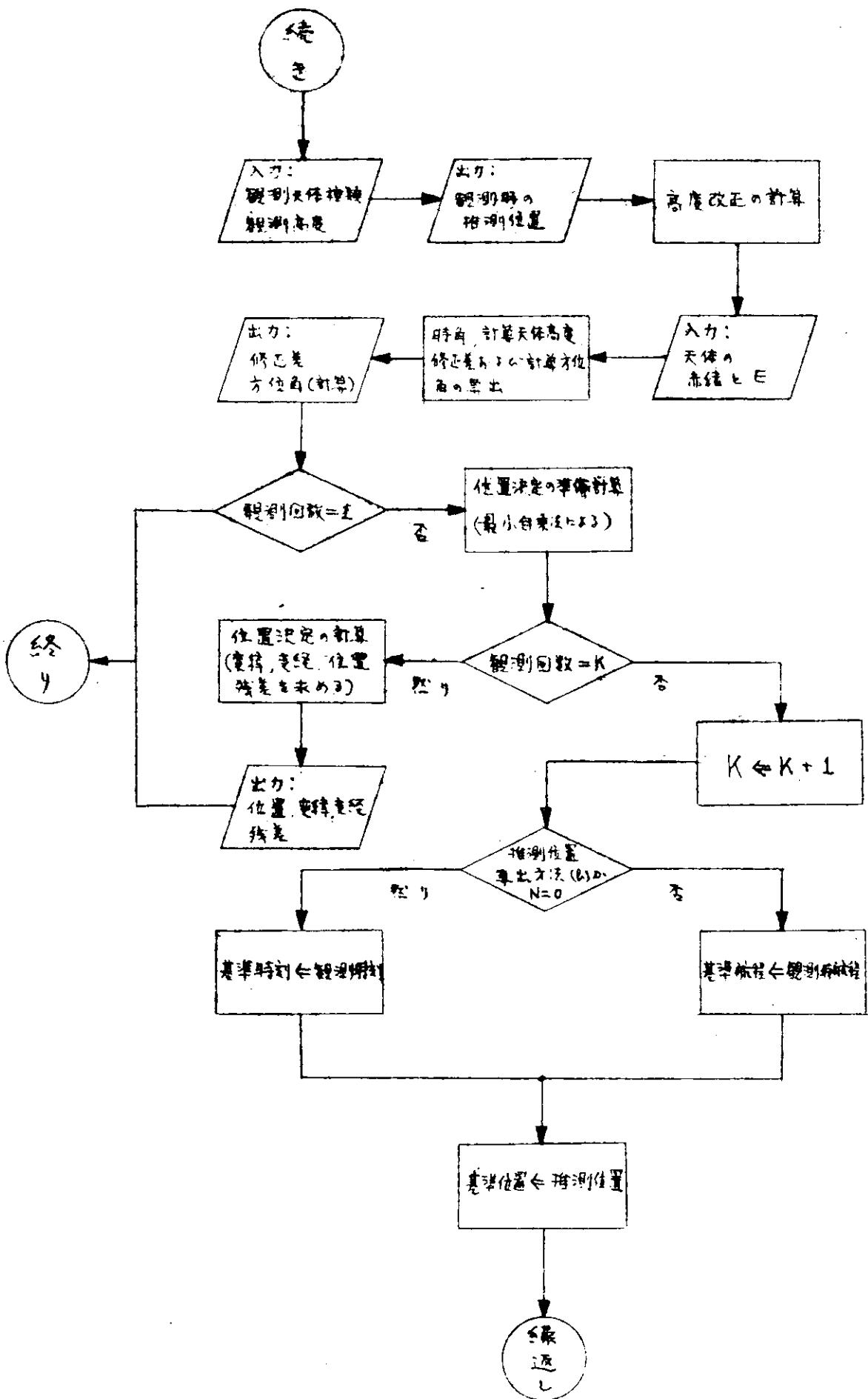




NSSIによる船位計算

(D) フローチャート





を表わしている。また方位や針路の表示は北が0度の時計まわり360度方式によつている。

(x) 計算精度は10⁻⁶以上を保つようとする。たゞし出力として表示するのは角度の秒の1/100までである。

(x) 記憶場所をできるだけ少なくてすむようにする。などが主なものとしてあげることができる。

(c) 原式

プログラムで用いている原式はつきのとおりである。

(i) 計算高度と計算方位角

推測位置の緯度 ℓ 、天体の赤緯および時角を d および h としたとき、計算高度 a_c および計算方位角 Z は

$$\cos\left(\frac{\pi}{2} - a_c\right) = \cos\left(\frac{\pi}{2} - \ell\right) \cos\left(\frac{\pi}{2} - d\right) - \sin\left(\frac{\pi}{2} - \ell\right) \sin\left(\frac{\pi}{2} - d\right) \cosh$$

$$\cos Z = \{ \cos\left(\frac{\pi}{2} - d\right) - \cos\left(\frac{\pi}{2} - \ell\right) \cos a_c \} / \{ \sin\left(\frac{\pi}{2} - \ell\right) \sin a_c \}$$

によつている。

(ii) 高度改正と修正差

高度改正は天体の種類(太陽、月、惑星および恒星)により異なり、改正の内容はそれにつきのようになる。ここで用いる記号は気差にはRef、眼高差にはDip、天体の視半径にはS.D.、視差にはPar、惑星地平視差にはH.P.、気圧にはP、水温にはt_w、気温にはt_a、器差を修正した測定高度にはa_o、眼高にはH_eをそして高度改正値にはCorrをあてている。

$$Dip = 1.776 \sqrt{H_e}$$

気象観測をしたときは上式で求められたものをDip_iとすれば

$$Dip = Dip_i - 0.111(t_a - t_w)$$

を用いる。たゞし t_a 、 t_w は華氏単位とするが入力は摂氏単位。

$$Ref = 0.9715 \tan\left(\frac{\pi}{2} - a_o\right) - 0.001167 \tan^3\left(\frac{\pi}{2} - a_o\right)$$

気象観測をしたときは上式で求められたものをRef_iとすれば

$$Ref = Ref_i \frac{17P}{460 + t_a}$$

を用いる。ただし t_a は華氏単位、Pはインチ単位とするが、入力はそれぞれ摂氏単位、ミリメートル単位。

(i) 太 阳

$$Corr = -Dip - Ref + Par + S.D$$

$$Par = 0.150 \cos\left(\frac{\pi}{2} - a_o\right)$$

フローチャートにはないが、高度改正の計算のなかに視半径の読み込みが含まれている。

(ii) 月

$$Corr = -Dip - Ref + Par + S.D$$

$$Par = 3.670 S.D \cos\left(\frac{\pi}{2} - a_o\right)$$

視半径については太陽と同じ。

(iii) 惑 星

$$Corr = -Dip - Ref + Par$$

$$Par = H.P \cos\left(\frac{\pi}{2} - a_o\right)$$

惑星地平視差は太陽および月の視半径と同じ。

(iv) 恒 星

$$Corr = -Dip - Ref$$

なお太陽および月の下辺を観測した場合は前述の式を用いるが、上辺を観測したときは、それを示すバラ

メータをフローチャートの高度改正の計算のところで読み込み、高度改正を求めたあとで 2 S. D. だけパラメータに基づき感ずる。

修正差 I については(i)で得た a_c を用いて

$$I = a_0 + \text{Corr} - a_c$$

で求める。なお $a_0 + \text{Corr}$ は真高度 a という。

(iii) 時 角

天測曆にてている E 値は赤経に代るものとして各天体についてつきのように定義されている。

(i) 太陽の E (= E₀)

$$E_0 = -12^h + E.T + (24^h)$$

(ii) 月の E (= E₀)

$$E_0 = R - R.A(+ (24^h))$$

(iv) 行星の E (= E_p)

$$E_p = R - R.A.P + (24^h)$$

(v) 恒星の E (= E_{*})

$$E_* = R - R.A.* + (24^h)$$

ここで E.T. は均時差を、 R.A.()、 R.A.P および R.A.* は月、 行星および恒星の赤経を、 R は R.A.M.S. を平均太陽の赤経とすれば

$$R = -12^h + R.A.M.S$$

で表わされる量とする。このとき時角は

$$h = E + U.T + L$$

で求められる。ここで U.T. は観測時の世界時を、 L は推測位置の経度（東経のときは+、 西経のときは-となる）を表わしている。

(vi) 減長緯度航法計算

出発点の緯度を φ_1 、 経度を λ_1 、 到達点の緯度を φ_2 、 経度を λ_2 、 変緯および変經を $d\varphi$, $d\lambda$ および $D.L.$ 上、 鋏路を C_0 、 航走距離を dist. とする。このうちで未知のものは λ_2 , L_2 であるが、これをつきのようにして求める。

$$d\lambda = \text{dist} \cos C_0$$

$$\lambda_2 = \lambda_1 + d\lambda$$

$$Dmp = [7915704 \log_{10} \tan(\frac{\pi}{4} + \frac{1}{2}) - 22.945 \sin \lambda_1 - 0.05 \sin^3 \lambda_1] \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1}$$

$$D.L. = Dmp \tan C_0$$

$$L_2 = L_1 + D.L.$$

ただし Dmp は漸長緯度差とする。

(vii) 最小自乗法による位置決定とその残差

各観測によつてえられた修正差および方位角の i 番目のものを I_i および Z_i とし、求められる変緯、変經および東西距離を $d\varphi$ 、 $D.L.$ および dep . とすれば、 $d\lambda$ および dep は

$$\begin{cases} dep \sum \sin^2 Z_i + d\lambda \sum \sin Z_i \cos Z_i = \sum I_i \sin Z_i \\ dep \sum \sin Z_i \cos Z_i + d\lambda \sum \cos^2 Z_i = \sum I_i \cos Z_i \end{cases}$$

の連立方程式を解くことによつて得られる。また $D.L.$ は

$$D.L. = dep \sec I$$

で得られる。ここで I は緯度を表わしている。

残差 r は $r = \sum (\text{dep} \sin Z_i + d\lambda \cos Z_i - I_i)^2$

で与えている。

1.1.2 船位決定方法の調査

- (1) 航海衛星、天測、電波等による船位決定方式の比較検討。

船位決定すなわち船位実測を行なうためには、船舶自体の Self Contained System の外に何等かの航行援助施設を利用する必要がある。

各部の詳細に入る前のまえがきとして船舶が海上で船位を決定するための方法を列挙して見よう。

名 称	方 法	援 助 施 設
クロススペアリング傾角測定	光学的方位測定 " 仰角 "	既知の物標 " 構造物 山岳、灯台
電 波 方 向 探 知	既知の送信局、放送局の方探(ビーコン、ロータリビーコンを含む)	既知の放送局 " 送信局
航 法 レ ー ダ	方位、距離測定	陸地構造物、レーダビーコン トランスポンダ
天 体 傾 角 測 定	天体の傾角測定	恒星、惑星
航 行 衛 星	ドップラ周波数測定方位、傾角測定	人工衛星
ロ ラ ン A / C	電波の受信時間差測定	ロランA/C局
デ ツ カ (デクトラ)	電波の受信位相差測定	デツカ局チーン
オ メ ガ ガ	電波の受信位相差の測定	オメガ局

以上の各種の方法があるが、この中から高度集中制御方式自動化船の船位決定方式のセンサとして、どの範囲が適合するかを検討するわけである。

検討を行なうための判定条件を考えると次のとき項目が考えられる。

- (i) 人的エネルギーをできるだけ要さず、計算機制御による自動化ができること。
- (ii) 天候、時刻等に関係なく希望の時、必要な精度の測位情報が得られること。
- (iii) できるだけ広域にわたり 1 つのシステムでカバーされていること。
- (iv) 環境条件、電離層、大気、陸地、海面その他により発生するシステム誤差の状況がすべて知られていること。
- (v) ユーザ機器のコストが不合理なものでないこと。

この判定条件に従つて上記各種のシステムの解説を兼ねその特徴を記述することとする。

(i) 光学的方法(クロスパアリング、傾角測定)

沿岸航法において古くより使用されている方法であるが、対象となるものが既知の物標、構造物、山岳、灯台等であり、その設置条件、形状も千差万別なので、光学系に高度のパターン認識技術を導入するとしてもきわめてシステムが複雑となり、また沿岸以外使用できないので効果が薄い。

高度集中制御方式自動化船のセンサとしては不適であり、従来どおりの使用法に止まるものと考える。

(ii) 電波方向探知(方探NDB、ロータリービーコン)

電波の方向探知による方法は歴史の古い方法で法的規制もあり、多くの語彙が使用しているが、現在の長波、中短波の方探では方位精度の点から近距離沿岸航法に限定され、また方式的に夜間誤差が避けられず、種々の方法で方式改良されたコンソル、コースビーコン、トーキングビーコン等これも局地的用途に限定されている。

(iii) レーダ航法

レーダは本来障害物探知の目的より発達したものであるが、その高い方位精度、測距精度から有効な沿岸航法のための機器として使用されている。

さらに近年レーダ情報のデータ処理が、航空交通管制、防衛機器等で発達したので、データ処理システムとの組合せにより有効な近距離航法として利用できる可能性がある。

本研究のプロジェクトにおいては本方式の自動測定レーダを衝突防止の目的にて開発することを予定しているの

で、これがそのまま航法レーダとしても応用可能である。

また近い将来パルス圧縮、P/Nコード相関、位相ロック等の技術を用い、散乱波またはダクト効果による超遠距離(100~200N.M.)レーダの開発の可能性もあるので採り上げるべき問題と考える。

(IV) 天測

天測は磁気コンパスとログ(丸太)とともに古くから基幹航法として使用されてきたものである。

測定方法さえ確実に実施すれば、測位精度は高く、世界中どのような領域でも測定可能なので現状では世界中どこでも利用でき、その各種条件による誤差も十分知られており、今日まだグローバルに適用できる唯一のシステムである。

しかし一方致命的欠点としては、天候と時間の制約を受ける欠点がある。

すなわち測定できる条件としては仰角を測定するため希望の天体と水平線とが同時に観測でき、しかもその測定を動搖の多い船上で測定しなければならないことである。

以上のような利害得失があるが、最近人工衛星の航法用として使用され、新技術が開発されたので再び見直されつつある。その大要は次のとおりである。

・簡易な人工安定台(水平線)の開発

・スタートラッカ、ソーラーセンサ、恒星パターンレコグナイザの開発による自動天測の発達

・電波星の電波六分儀による測定方法の開発

(V) 航行衛星、ロランA/C、デツカ、オメガ

この4種のものはいわゆる電波航法と称するものであつて、使用する電波、測定方法、局の設置位置が地球上であるか地球周辺の宇宙軌道であるか等の相違はあるが、共通の原理要素があるのでとりまとめ検討することとする。

各方式の特徴または比較は次表のとおりである。

項目	ロランA/C	デツカ	オメガ	航行衛星
使用周波数	LF, MF	LF	VLF	VHF, UHF
測定方法	時間差位相差	位相差	位相差	ドップラ周波数
サービスエリア	太平洋大西洋	日本、インド洋 北欧、北米	世界中	世界中
システムコスト	1チエーン当たり円 500M	1チエーン当たり円 600M	1チエーン当たり円 3000M	1衛星当たり円 3000M
ユーザコスト	300K~3M	レンタル年間250K	3M~30M	2~5M
自動化のための条件	i) 自動追尾方法の開発 ii) 双曲線→LAT, LONGの座標変換方式の開発	i) ゾーンレーン位相差よりLAT, LONG座標変換方式の開発 ii) 自動ロッタ方式の開発	i) 位相差よりLAT, LONG座標変換方式の開発 ii) 伝播補整方式の開発	i) ドップラ測位方式の開発 ii) 伝播補整方式の開発
システムの使用経験	ロランA 25年 ロランC 10年	20年	開発中	現用中
測位精度およびそのために要するデータ	ロランA 1N.M ロランC 0.1N.M ロランテーブルまたは局位置より計算	0.05N.M デツカチャートまたは局位置より計算	一部テスト電波発射中 伝播補整表 " 予報表 測位テーブルまたは局位置より計算	8年 0.1N.M 軌道6要素 オフセット値 伝播補整
測位頻度	連続	連続	連続	現在90分ごと
測定期間	手動約5分 自動約10秒	自動約10秒	自動約10秒	約4.5分
システム運用者	日本海上保安庁 米、コーストガード	日本海上保安庁 英、政府(デツカ社)	米、海軍	米、海軍

注) コスト M(百万円単位) K(千円単位)

(2) 航海衛星による船位決定について

航海衛星（最近は航行衛星という場合が多い。）方式は、船位決定を行なう場合に、まず衛星の地球に対する位置を求め、ついで衛星に対する利用者（船）の位置を求めるという2段の測定が行なわれる。もちろん、船側では衛星対船の関係のみを測定すればよいが、現在の宇宙技術では衛星の位置を長期間地球に対して固定することが、ほとんど不可能であるので、測定後これらの位置関係の計算を個々の測定ごとにあらためて行なう必要があり、表または図を利用することがまず不可能である。

しかし、衛星の利用はつきのような利点がある。

(i) 方式の有効範囲は衛星から直視範囲にある地球上ということになる。したがつて同期衛星のような高々度にある衛星では、大きな有効範囲をもつ、また低高度の移動衛星では衛星の移動によつて世界中を有効範囲とすることが容易である。

(ii) 使用電波としてUHFまたはVHFの使用が考えられているので、各種の変調方式の採用が可能となる。また電離層の影響を受けることはあるが、陸上に基地をもつ電子航法方式よりはその誤差は一般に少ない。

したがつて在米の電波式の航行援助方式に比し、多くの特長をもつた航行援助方式を完成させる可能性がある。電波式の航行援助方式に、中波式の無線標識、ロランA、ロランC、デツカなど各種の方式があるのと同様に航海衛星方式にも種々の方式が考えられている。そしてそれぞれの特色をもつている。一般的に航行衛星（航空機への利用をも含めて）の要求する環境条件としてはつきのようなものが考えられている。

(i) 軍用

(ii) 航空用で大洋上の交通管制に利用し、限られた航空路上に数多くの航空機の航行を可能にし、運航の経済性を確保するとともに、運航の安全性を確立しようとするもの。

(iii) 商船の運航の経済性の向上と運航の安全性の向上

(イ) 船位測定の全世界性、全天候性、全時間性の確保

(ロ) 航海の自動化の促進

(ハ) 商船の航行管制によつて(i)項を達成する。

(iv) 漁船の操業能率の向上と安全性の確保

(v) 測量船、海洋調査船などの精密船位決定用

以上のうち(ii)あるいは(iii)～(v)、さらに(vi)項をも含めた民間用航行衛星計画が、多くの国で考えられ、あるいは国際的に話題となつてゐる。その航行衛星が考えている機能については、昭和42年7月国際連合の宇宙空間平和利用委員会の中に設けられた航行衛星ワーキンググループはその第一回会議の報告書中でつきのように述べている。

航行衛星システムの利用方法についての現在の考え方

(a) つきのような位置決定業務

(i) 移動体（船舶、航空機など）上での自分自身による位置決定

(ii) 交通管制の目的（安全な分離を保証するため）のために与えられた種々（船舶航空機など）の移動体に対し、それらとは無関係に行なわれる位置決定

(iii) 捜索および救難活動に役立つことのできる全移動体のそれらとは無関係か遠隔的に行なわれる位置決定

(b) つきのようないくつかの通信業務

(i) 交通管制および運航制御

(ii) 移動体または他の陸上交通管制センタへの移動体と無関係に決定した位置の中継

(iii) 捜索および救難指示の中継

(iv) 移動体へおよび移動体からの環境データならびにその予報の中継

気象（晴天乱流を含む）

水 山

海 象

太陽輻射

妨害物(浮遊気球、浮遊浮標など)

(c) つぎのようなテレメータ業務

(i) 保守あるいは事故解析用に性能を移動体に無関係に警告し、そして陸上記録するために、自動的にデータを与える、ある種の移動体のサブシステムの監視

(ii) 環境測定および予報を行なう組織に自動的に情報を与えるための、航路上の移動体が遭遇する環境状態の自動監視と報告

これを要するに航行衛星システムとは、航行援助、交通管制、捜索救難、気象情報の収集と提供など、広く航行全般に役立たせるため、従来の航行援助施設と例示すれば地上で船の位置を求める港湾用レーダを広く大洋全般に拡大するような捜索機能、そして通信とテレメータの中継というような多目的なものに考えられつつあり、各國の研究開発の向きもこの中で、交通管制機能と通信中継機能を重点とするように進められている。そしてその実用の時期は 1970 年代後半であるという見通しが強い。

このような情勢を考え、かつ本研究の目的である数年先に実用可能である船舶の航法の自動化という点とをあわせてみると、将来の問題は別として、これから開発されるシステムをこの研究と結びつけることは不可能であるという結論になる。

しかしながら、アメリカ海軍が Johns Hopkins 大学の Applied Physics 研究所に委託して開発してきたアメリカ海軍の航行衛星システム (Navy Navigation Satellite System, NNSS と略称する) が 1964 年以来運用され、好都合なことに 1967 年に民間用として、その技術 (受信技術) を開放することが公表されている。したがつて、このシステムの利用を本研究の一環として検討することが適切であろうと考えられた。

ここで NNSS の概要について簡単に展望する。

このシステムは高度約 1,000 Km の円形極軌道をまわる 3 個 (4 個に増加することが期待されている) の航行衛星とその衛星を追跡して衛星の軌道を測定する追跡局 4 局、その追跡データから軌道とその予報値を計算する計算センタ、および軌道予報値を衛星上の記憶装置に送信する送信局 2 局から構成されており、地上施設はすべてアメリカ国内に設けられている。衛星は $10^{-10} \sim 11$ オーダの安定度をもつ水晶発振器を原振とした 2 つの周波数 14.9988 MHz と 39.968 MHz を送信し、この搬送波を特殊な変調波形によつて位相変調し、つぎの内容の情報を送信している。

(i) 水晶発振器を原振とした 2 分ごとのタイミング信号、この信号は海軍の天文台で常時監視され、絶対時間精度 $\pm 200 \mu\text{s}$ 、時間間隔精度約 $10 \mu\text{s}$ 以内に保たれている。

(ii) 衛星の軌道情報、地上の送信局から半日分以上を衛星上のコアメモリに記憶するよう送信された情報を順次読み出るもので、軌道要素と 2 分ごとのその修正値から構成されている。

(iii) 衛星の状態を示すテレメータ信号

船上の受信装置は衛星からのこれらの信号のうち(i)を除くものを受信し、つぎのような情報をうる。

(i) 衫星からの電波の搬送周波数は衛星と船との相対的な動きによつてドプラ偏移を受ける、したがつて、このドプラ周波数を測定すれば、衛星と利用者の間の距離の変化が求まる、衛星からの放送によつて衛星軌道すなわち衛星の動きがわかるので、これから地球上の利用者位置が求まるのが基本原理である。

(ii) 実際には、衛星からの 2 分ごとのタイミング信号の間ドプラ偏移をうけている受信周波数と受信機の局発周波数(一定とする)の間のビート周波数を積算カウントする。こうするとその 2 分のタイミング信号を出した衛星の 2 位置を焦点とする回転双曲面が求まることになる。これを 3 回以上繰返し測定して船位を求める。

(e) 船上の受信機は以上の測定をするほか、衛星から送信される軌道情報を復調し記録するかあるいは直接計算機に入力する。

これで衛星から船位決定に必要な情報は得られたのであるが、これから船位を求めるには、かなり複雑な計算を必要とし、機械式計算機を使用して1時間以上を要する由である。したがつて手計算は適当でなく、どうしても電子計算機を必要とする。

つぎにこのシステムの性能について二三の数値をあげておこう。

(i) 現在運用されている衛星は3個の由で、その周期はおおむね105分である。衛星は極軌道をまわるので、地球の回転につれてその軌道は順次西に移動するが一つの衛星軌道が視界外になるとつぎの衛星軌道が視界内にくるので1日におおむね赤道上で少なくとも12回平均2時間に1回の位置測定ができる。この値は緯度が高くなると衛星が視界内を通過する頻度が増加するので、より小さくなる。また、伝えられるところによると衛星の個数が3個から4個に増加することが期待されている。

(ii) 位置決定の精度については一二の評価試験の結果が報告されている。この種の報告は大洋中では標準の船位となる値のほうにより大きな誤差が入っていると考えられるので0.8海里と大きな値がでることもあるが、港内など固定地点での精度は0.2海里以内、大きくとも0.3海里である。アメリカの開発責任者は最近はより精度が向上し0.1海里以内になつたと述べている。ただ、評価試験の結果では測位の成功率が衛星の上空通過に対し、70%程度とやゝ低いが、これは使用した受信装置がプロトタイプのものであり、その原因の大部分は受信機の不動作や計算機のプログラミングの失敗などであるので改善は可能である。

(iii) 商用受信装置の市販価格は計算機なしで3万ドル、専用計算機付で5万5千ドルと伝えられている。

以上の値を本研究で要望されている船位決定装置としての要件と比較して見ると、精度の点ではまず十分であり、船位計算は中央電子計算機にて行なうことが可能であるので専用計算機は不要となり、受信機の価格のみでよい。上記の値ではまだ高価であるが、桁外れた価格ではなく、より安価になる見込みも、受信機の構成要素から考えて、全くないわけではないので否定的要素ではない。船位決定の機会が任意のときになく平均2時間おきという値は実用上やや不便であるが、船位推定計算がよく行なわれると仮定すれば、沿岸航海の場合（他の航法方式の利用が可能である）を別として大洋航行の場合には十分すぎる値である。

以上3点を考えると本研究による船位決定システムとしてNNSを利用するための受信機と計算プログラムの開発を行なうことは妥当であると考えられる。

つぎに、このシステムの採用による計算機への要件について考える必要があるが、現在の段階でこれを明示することは不可能であるので、行なう必要のある計算の概要について述べておく。

計算は2つに分けられる、その一是衛星から放送される軌道情報から規定の時間における衛星位置の計算で、第二は船位計算である。

衛星から送られてくる軌道情報は2つの部分にわかれており、その第一は、軌道の平均橿円を与える軌道要素でつぎの11の固定語からなり、衛星上のメモリの情報が更新されるまでは変らない。

記号	定義	単位
t_p	メモリ更新後最初の近地点通過時（日は与えない）	min UT
\dot{M}	平均近点離角の変化率	deg/min
ϕ	t_p における近地点引数	deg
$|\dot{\phi}|$	近地点引数の変化率（絶対値）	deg/min
e	軌道の離心率	—
A_0	橿円の長半径	Km
ϱ_N	t_p における昇降点赤経	deg

ϱ	ϱ_N の変化率	deg/min
$\cos\psi$	軌道傾斜の cosine	—
ϱ_c	t_p におけるグリニッヂの赤経	deg
$\sin\psi$	軌道傾斜の sine	—

普通は 6 つの要素で計算できるが、上記のとおり情報に冗長性をもたせており、計算を簡易化していると伝えられている。

第 2 の情報は上記の平滑な軌道の 2 分ごとの修正項で、この情報が送られるときのタイミング信号の 6 分前から 8 分後までの 8 個の 2 分ごとの情報が送られてくる。

これら 2 つの情報を使つて 2 分ごとの衛星位置の計算が行なわれるが、その計算は全計算の約 $1/2$ であるといわれる。つぎに船位計算であるが、これは前述したように 2 分間のドップラ周波数の偏移値の積算カウントによる方法が使われる。その原理はつぎのとおりである。

いま、衛星が出したタイミング信号 t_1 と t_2 の間のカウント値 N_{12} を考えると受信周波数 f_R (ドップラ偏移を受ける) 受信機の局発の周波数を f_G (一定) とすると

$$N_{12} = \int_{t_1 + \Delta t_1}^{t_2 + \Delta t_2} (f_G - f_R) dt = \int_{t_1 + \Delta t_1}^{t_2 + \Delta t_2} f_G dt - \int_{t_1 + \Delta t_1}^{t_2 + \Delta t_2} f_R dt$$

Δt_1 と Δt_2 はタイミング信号が受信されるまでの電波伝搬時間で、したがつて $t_1 + \Delta t_1$ と $t_2 + \Delta t_2$ はタイミング信号の受信時間になる。タイミング信号の送信時間間隔内における送信搬送波の波の数とタイミング受信時間間隔内の受信搬送波の波の数は等しいから

$$\int_{t_1 + \Delta t_1}^{t_2 + \Delta t_2} f_R dt = \int_{t_1}^{t_2} f_T dt$$

f_T は送信周波数 (一定) である。したがつて

$$\begin{aligned} N_{12} &= \int_{t_1 + \Delta t_1}^{t_2 + \Delta t_2} f_G dt - \int_{t_1}^{t_2} f_T dt \\ &= f_G ((t_2 - t_1) + (\Delta t_2 - \Delta t_1)) - f_T (t_2 - t_1) \\ &= (f_G - f_T) (t_2 - t_1) + f_G (\Delta t_2 - \Delta t_1) \end{aligned}$$

ここで $\Delta F = f_G - f_T = \text{一定}$ 、 $\Delta t = t_2 - t_1 = 120 \text{ sec}$ (一定) と考え、衛星と船との距離を t_i のとき s_1 、 t_2 のとき s_2 とすると

$$\Delta t_i = s_i / c = s_i / f_G \lambda_G$$

ただし c は光速度、周波数 f_G と波長 λ_G の間には、 $f_G \lambda_G = c$ の関係がある。

したがつて

$$N_{12} = \Delta F \Delta T + (1/\lambda_G) (s_2 - s_1)$$

したがつて t_1 と t_2 の衛星位置と船との距離の差 Δs_{12} は

$$\Delta s_{12} = (s_2 - s_1) = \lambda_G N_{12} - \lambda_G \Delta F \Delta T$$

となり双曲線航法システムと同じ考え方導入できる。しかし、実際には地球の回転を考慮し、さらに航走による船の移動を考える必要がある。普通衛星の一回の上空通過では数回の 2 分間の 2 分間カウントが得られるので、上式を数個の連立方程式として解くこともできるが、計算機への入力とし推定船位の緯度経度 (度程度までわかれればよい) ΔF の推定値針路と速力、アンテナ高を入れ、推定値に対する距離差からドップラカウント値を求め、これを測定カウント値と比較し、解が収斂するまで数回繰返す。この計算は小型の汎用計算機 (一例として HP 2115A をとるとメモリは 16 ビット 4096 語オプションで 8192 語サイクルタイム 2.0 μ s) で 1 分以内で可能である。したがつて計算機にはあまり負担がかからないと考えられる。

最後に受信機とシステムの開発の際の問題点について一言する。

受信機は当初比較的高価になることが予想されるが、これをいかに安価にするかという点である。考えられる簡単化の一つは、 150 MHz 帯と 400 MHz 帯の両波を使つて電離層誤差を補正する方式を思い切つて止め、 400 MHz 帯の受信のみにすることである。これにともなう誤差の増大は今後の評価実験によるほかないが、文献調査によれば2波の際の精度を0.1海里とすれば夜間は0.1海里、昼間0.25海里に増大するとのことでまた衛星の軌道によつては0.5海里位の誤差の生ずることもあるようである。

つぎに衛星電波受信中の船の移動のデータ（針路と速力）が測位精度に影響を与えるので、できるだけ正しい値をそう入する必要があることである。これらはもちろん他の航法装置に頼る必要があるが、それを総合的なシステムとして何を使うかである。もちろん潮流による偏移も考えることが重要であり、ドブラソナーとの組合せを推しようしている例もある。

最後にアンテナ高さが計算に必要であるが、これは計算の際に地球半径+アンテナ高さを使用するためと考えられる。したがつてゼオイドによる地球の半径の相違も考えることになる、この値の入力の方法については検討をしておく必要があるものと思考される。

NNSSの利用は現在のところ何れも文献調査の域を出でていないので、その可否を判定するためには、実験的な評価をすることが必要であり、今後の研究をその方向に進めて行かなければならないであろう。

(3) 電波援助航法についての検討

(3-1) ロランA/Cシステムについて

ロランA/Cシステムは米国コーストカードにより開発されたもので約10～25年の歴史を有する電波航行援助システムである。

LORANとはLong Range Navigation aidの略称であつて、広いサービスエリアを有する長距離航行援助システムである。

基本的原理としては複数個の既知の点よりの距離の差を測定し、これを用いて高精度の位置測定を行なうものである。

(a) 基本原理

この方式の基本原理は第一次大戦後期、第二次大戦初期に研究実用化された鉄砲発射点検定システムに基いている。

この方法は図に示すとおりであり、標定すべき目標をTとすると、これが発射のための爆発音を発生したとすると、この音は遠隔点に置かれたA、B、C3ヶのマイクロフォンに到達する。

この付近の温度、気圧等が一定とすれば音波はあらゆる方向に等速度で伝播するので、A、B、Cの各マイクロフォンに到達する。

ところが今音源TとA、B各マイクロフォンまでの距離に差があると、この差の分だけA、Bマイクロフォンが捕獲する音の時刻が異なるわけである。

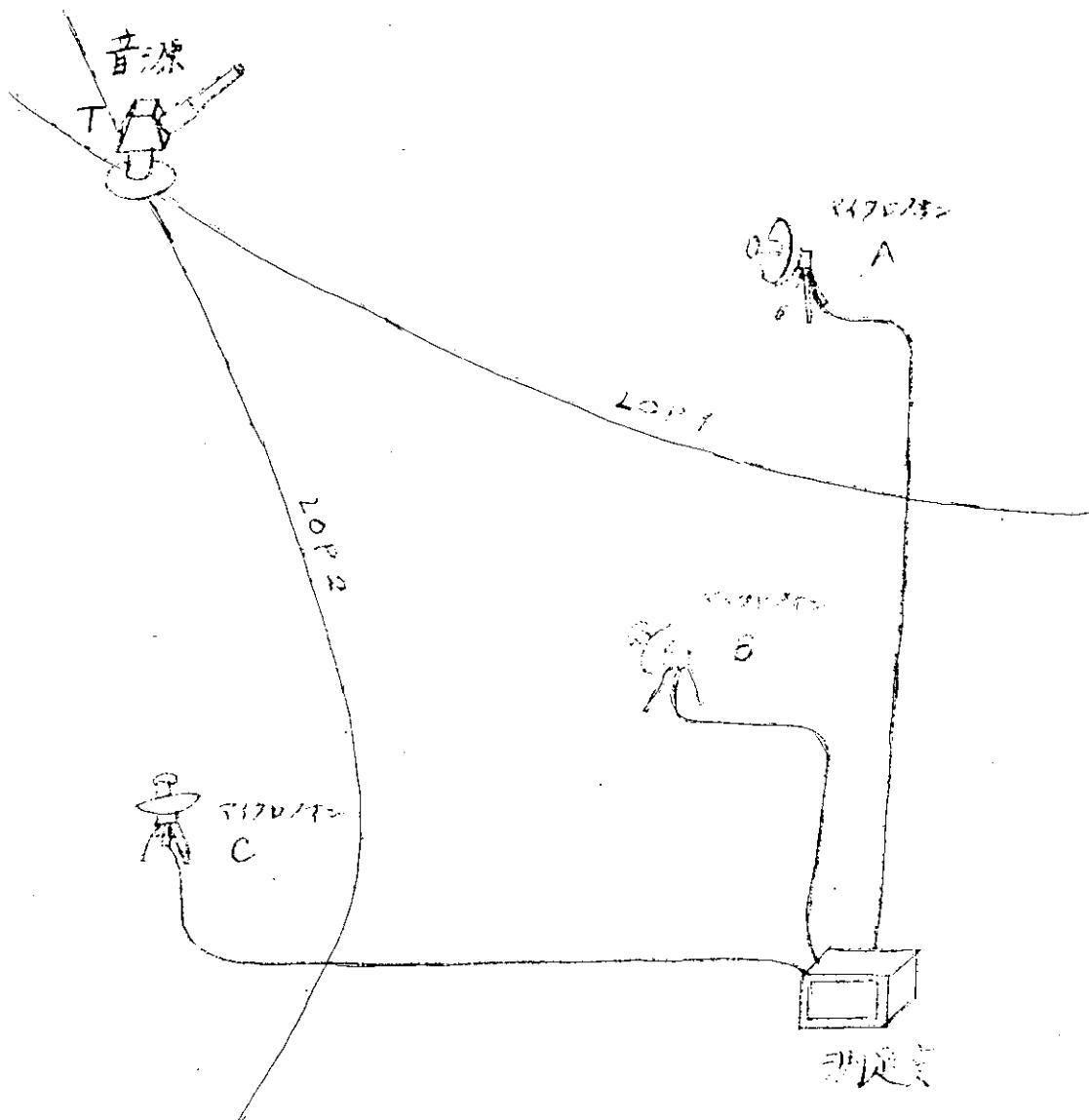
この到達時間差が判明すると音源TはこのA、Bを焦点とする双曲線LOP1の上のどこかにいるということがわかる。

次に同じことをB、Cについて行なえばLOP2が決まり目標がLOP1とLOP2の交点にいることが判明するわけである。

この方法によれば従来方位測定のみに頼つていた方式に比べ距離とともに誤差が増大することなく、広い範囲で高い位置決定精度分布が得られる点が特長である。

(b) ロランAの原理

ロランA方式は25年以上の歴史を有するもので、当初航空機を目的として開発され、その後船舶用としても



使用され現在両用されている。

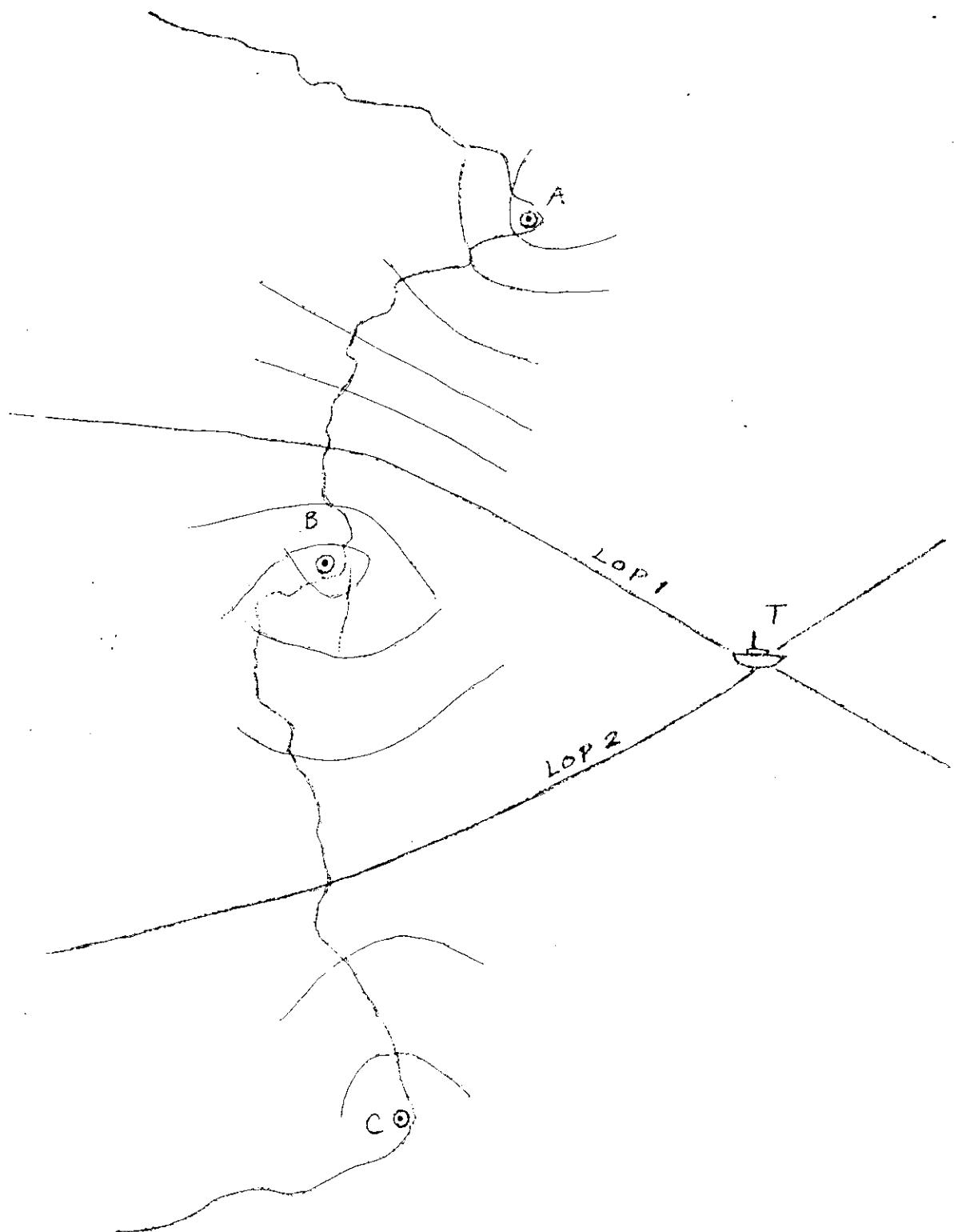
この方式はユーザのコスト負担の軽減、ユーザ逆探知の防止、ユーザ数限定の排除等の目的から前項の音源標定方式とは逆に、ユーザは Passive で音波、電波等を発射せず、単に受信するのみで目的を達するようになつている。

距離差測定の方法としては経済性を考えて、最も効率良く伝播条件の良い 2 MHz 帯の電波を利用している。

この方式は 2 MHz 帯の電波をパルス変調し、このパルスの到達時間差により時間差測定を行なうもので、中短波帯の伝送帯域をできるだけ少なくし、しかも高精度の時間差測定を行なうため $40 \mu\text{s}$ の半値幅の cosine square 波形を使用している。

方式の原理は図に示すとおりであつて、前の図に示すものとは逆に、陸上の定点 A、B、C（ロラン送信局）より同期した電波を発射し、ユーザ側の船舶または航空機 T において測定器（ロラン受信機）により各局からの電波の到達時間差を測定するもので、全く前述の同様の LOP 1、LOP 2 が画け、ユーザは単に電波の到達時間差を測定するのみで位置を決定することができる。

この時間差が測定されると各時間差に対応する LOP（位置の線）は米コーストガードおよび海上保安庁よりロランチャートまたはロランテーブルの形で発刊されており時間差のみを測定すれば、位置決定が可能である。ロラン A 方式の主な規格を以下に示しておく。



使用周波数 2MHz帯 4チャンネル

帯域幅 ±50kHz

送信出力 160kW_{p-p}

特別の局 1MW_{p-p}

サービスエリア 北半球太平洋および大西洋

局より昼間700浬夜間1,400浬

パルス繰返し 周期3.0~5.0ms

パルス幅 半値幅4.0μs

コサイン2乗波形

システム運用者 日本 海上保安庁
米国 コーストガード

測位精度 約1浬

なお、ロランA方式を利用する際、送られてきた電波がどの局のものであるかを知り、その局に対応する電波がどの局のものであるかを知り、その局に対応するロランチャート、ロランテーブルを索引する必要があるが、局の判別のため電波のチャンネル、パルスの繰返し周期をそれぞれの局に固有のものとし、ユーザがこの2点から判別するようになつていて。

また局の位置は明示されているので、この座標から位置を演算システムで計算することも可能である。

(c) ロランCの原理

ロランCはロランA方式の使用経験からこれを改良し、さらに用途を広げるよう意図して開発されたもので、やはり米コーストガードの手になるものである。

ロランAとの大きな相違はまず使用周波数を2MHzから100KHzに変更したこと、このためにシステムコストは若干上昇するが、地上波の伝播が遠距離まで可能なことで、そのためサービスエリアが格段に拡張されている。

もう一つの特徴はロランAと同じパルス測定ばかりでなく100KHz搬送波の位相差測定も併用し、精密な到達時間差を測定することにより測位精度を約1桁向上したことである。

さらに各局の発射電波がシングルパルスではなく8~9個のパルストレーンとなつており、これをすべて使用することにより雑音、混信の減少、空間波妨害の減少等高度の技術が応用可能となつていて。

位置測定のためにはロランAと同じようなロランチャート、ロランテーブルが用意されているが、局の座標から直接計算することも可能である。

主な規格は次のとおりである。

使用周波数 100KHz

帯域幅 ±25KHz

送信出力 1MW_{P-P}

サービスエリア 北太平洋、北太西洋、中部太平洋、中部太西洋

パルス繰返し 100ms

パルス波形 8~9パルストレーン

パルス幅 約120μs

システム運用者 米 コーストガード

測位精度 約±0.1浬

測定方法 パルスエンベロープおよび搬送波、位相差

(d) ロランA/C方式の現状

ロランA/C方式は現存するシステム中最も広いサービスエリアを有するものであり、広く世界中で使用されている。

主なユーザは漁船、商船、防衛用船舶等の各種船舶から国際線航空機に至るまで広い範囲にわたつていて。

わが国の船舶のみをとつても推定約10,000隻が使用中といわれている。

(3-2) デッカシステムについて

(a) 概要

デッカ方式は、第2次大戦中に英國デッカ社によつて開発された長波の持続波(約70KHz~130KHzの

C.W.) を用ひる中距離用の双曲線航行方式である。

送信局は、陸地に通常三角形をなして主従4局を一組として配置される。

主局は、三角形の中心に位置し、三つの従局はそれぞれ三角形の頂点に配置され、これら一組をもつて1送信チェーンと呼んでいる。

主従局の周波数関係は、主局は f (f は約 1.4 KHz である)。従局はそれぞれ $8f$ (赤局)、 $9f$ (緑局) $5f$ (紫局) の関係を保つている。

受信機(移動体に装備)は上記おのの異なる 4 つの信号を受信し、それらを最小公倍数値まで通倍して、同じ周波数の信号としたのち位相の比較を行なう。

たとえば、主局と赤局間では、主局および赤局信号をそれぞれ 4 倍と 3 倍に通倍して、 $24f$ としたのち位相比較を行なっている。

このようにして、主従局間に描かれる 3 本の等位相の双曲線の交点を求ることによつて、自己の位置の決定を行なう。

送信チェーンは、現在国内では北海道チェーンが実用化されている他、北九州チェーンが 44 年 4 月より実用に入る予定である。

また国外では、すでに多數のチェーンが稼働しており、特に欧洲海域では、ほとんど全面的に用いられている。

その他カナダおよびアメリカの東岸、インドあるいは中近東の諸地域で用いられている。

(b) 受信装置

現在国内では、MS-1A 形受信機を実用に供している。

この受信機は、チェーン容量以外はデツカ社製 MK-12 受信機と同等の性能を有しているが、一部半導体化されているため、消費電力が少なく、かつ小形化されている。

この形の受信機を自動化船に搭載する場合は、受信機と電子計算機とを結ぶために、受信機出力をデジタル化するとともに、受信機の操作ができるだけ自動化する必要があると考えられる。

このため、現在の受信機に対し次の機能を付加することを検討した。

(i) 自動ロッキング

ロッキングとは、受信機内部の発振器を主局送信信号に対して位同期させることをいい、電源投入時、あるいは受信チェーン切替時に必要である。これを自動的に行なうため、自動ロッキング回路を設け、これを電源スイッチとチェーン切替スイッチに連動させる。さらにロッキング回路の位相検出器出力を利用して一定時間以上同期が外れると自動的にロッキングを行なうようにする。

(ii) 校正動作の簡易化

受信機の校正是、各デコメータの読みを利用して受信機内の主従各チャンネルの位相をそろえている。この校正動作を短時間に、一举に行なうことができるよう、各デコメータに誤差検出回路を設けるとともに、この出力を受けて移相回路を駆動するサーボを付加する。

誤差検出回路が、校正スイッチと連動して各デコメータに接続されるようにし、この誤差出力で各チャンネルのサーボが自動的に零調を行なうようとする。

(iii) 受信機出力のデジタル変換

主局と各従局の時間差(位相差)はデコメータに連結された A/D 変換器によって、自動的にレシスタにセットされる。

A-D 変換器の精度は、1.0 進 4 ケタとし、小形化をかるため 1.0 進 2 ケタの変換器を 2 個用いる。(各パターンにおけるレーン数は、赤局 2.4、緑局 1.8、紫局 3.0 であり、1 レーン当り 1.00 等分されているので、精度は約 $2 \sim 3 \times 10^{-3}$ である) A/D 変換器の出力は、計算機とのコードを介せるためのコード変換を

行なつた後レジスタにセットされる。

レジスタへのセットパルスは LI ランプを制御するパルスを利用し、レジスタセットパルス発生回路から20秒に1回レジスタへ時間差データをセットする。

レジスタから計算機への読み出しあは、計算機側から読み出し、指令パルスを受取つてレジスタ読み出しパルス制御回路を動作させ、赤局から順次時間差データを直列信号に変えて計算機に送る。

局名コード(チエーン番号)は、あらかじめ外部から設定する。

レジスタから読み出しを行なつている期間は、セットパルスを抑圧し、レジスタ入力を抑えている。時間差データは、主局と従局の中心を零とし、±の表示を行なう。

以上により一部自動化された受信機の操作はつきのようになる。

(イ) 電源投入

(ロ) 受信チエーンの設定(航海士の判断による)

(ハ) デコメータの零調(ボタンを押すだけでよい)

(ニ) LI メータの零調

(ホ) LI メータでレーン番号を読み、さらにゾーン番号と合わせてデコメータへ設定する。

以上の操作は電源投入時か、チエーン変更時に1回行なえばよい。

(ヘ) デコメータの出力は、デジタル化された時間差として自動的に20秒ごとにレジスタに設定される。

(ト) 計算機から読み出し指令(時計による自動指令か、あるいは航海士の強制指令)によつて、各従局の時間差信号は直列信号として計算機に送られる。

以上による自動化デソカ受信機の系統図を次図に示す。

(3-3) オメガシステムについて

オメガ航法は VLF 電波の位相測定によつて行なわれる航法である。航法として有効であるためには送信局からの輻射電力による電界強度が広いレンジにわたつて雑音より十分高いレベルにあり、距離と位相の関係が時間に対して安定で、さらに等位相線の間隔(レーン巾)が十分大きくとれることが必要である。オメガに使われている 1.0 ~ 1.4 KHz の電波がこの条件をどのように満足しているかを実測データによつて示してみる。

VLF の波長は 2.0 ~ 3.0 Km にもなるので、長い距離を伝搬する際のエネルギーは、その大部分が地表面と電離層の間を管内波として伝搬すると考えることができる。地表面と電離層間の電磁界を観測した結果、図 1.1.3 に示す

ようなモデルによく近似しており、地

表面は導電率が高く反射係数 +1 であ

り、電離層の反射係数は -1 であると

見なされることがわかる。このように

仮定すると、1 次の TM 波 TM_1 は同図

の左側に示すような電界線となり、電

界の垂直成分 E_z と水平成分 E_y は、同

図の左下に示すように高度 Z によつて

変化する。同図の右側には TM_2 波の電

界線が示されており、垂直および水平

の電界成分の高度 Z に対する変化がそ

の下に示してある。送信アンテナの近

傍効果を無視できる位の距離すなわち

1 Mm (1,000 Km) 以上離れた距離

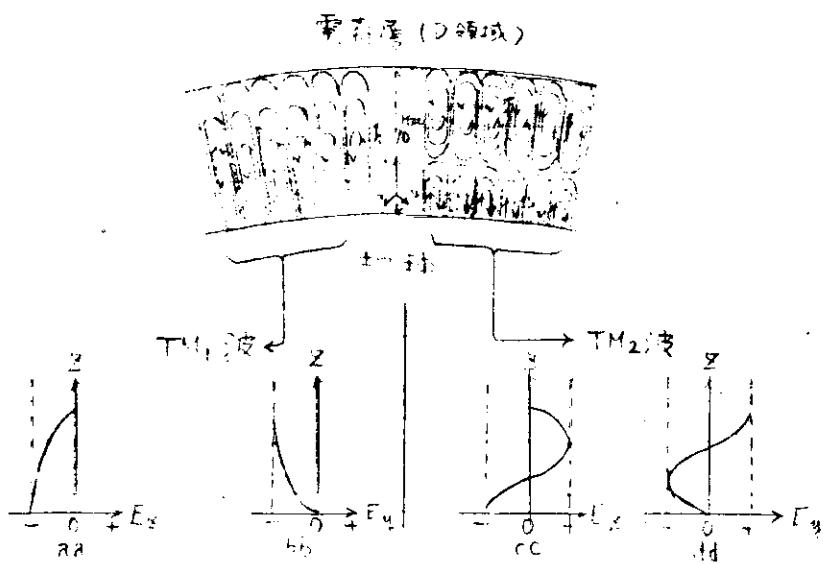
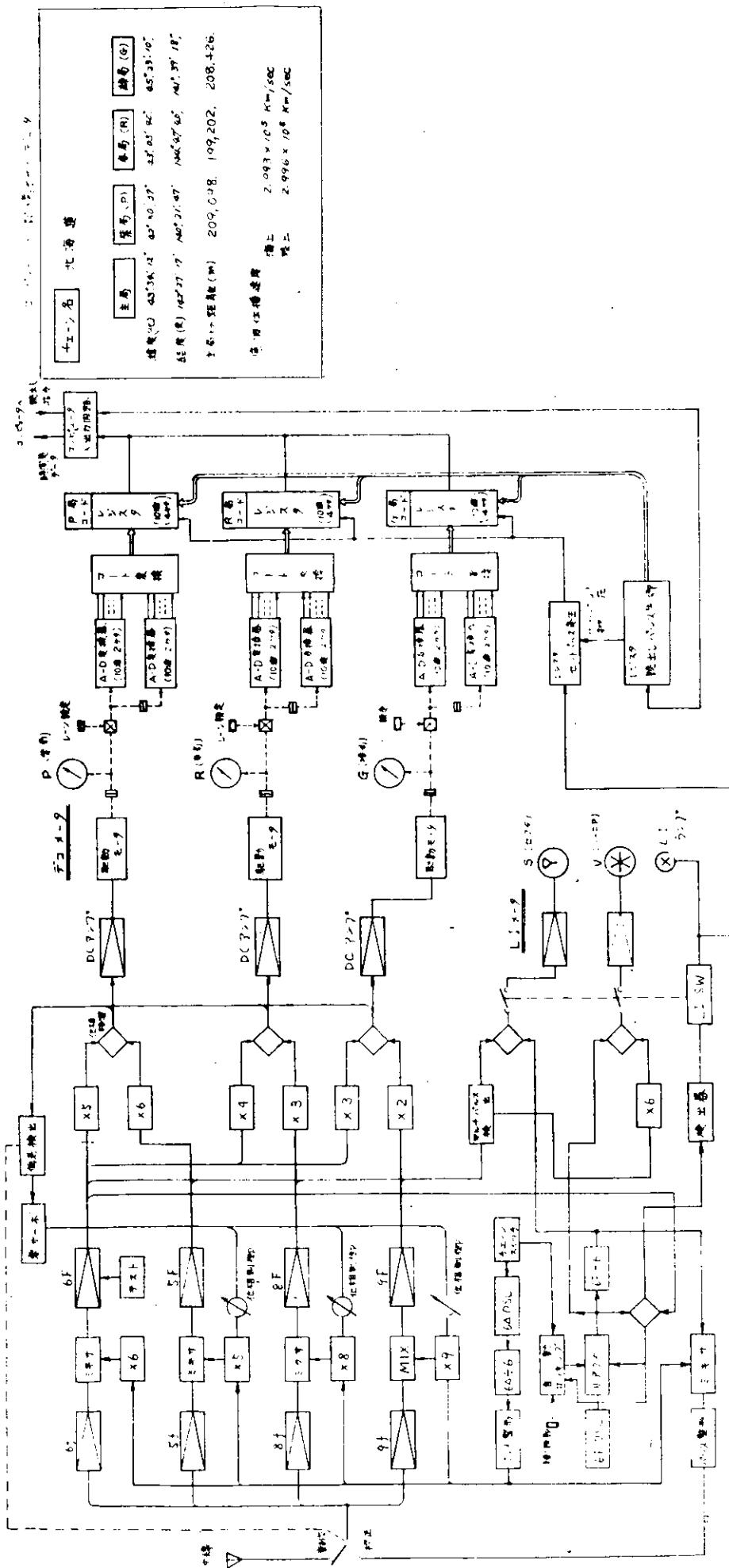


図 1.1.3 導波管モードの電界

船位測定用デッカ受信機ブロック・ダイヤグラム



での垂直電界は上述したような比較的低次の導波管モードの励起波成分の和で表わされるが、Mm当りの減衰率と周波数の関係は、図1.14のようになる。これによると東方向伝搬西方向伝搬北または南方向伝搬の順に減衰が小さいことがわかる。

オメガシステムの送信局間隔は約10Mmであり、局から1Mm以内では高次モードが含まれるため、各局の信頼できるカバーレンジは10ないし12Mmとすることが望ましいが、非対称的な減衰率のためにこの要求は修正の必要がある。

北または南方向の伝搬では、図1.15に示すように、

短径路信号が長径路信号より少なくとも10dB高くなる地点は昼間だと約8.000浬(15Mm)であり、その地点での1KW当りの信号レベルは約15dBである。図1.16によれば、東方向の伝搬では干渉が生ずる地点は対照40Mm: 地球一周距離

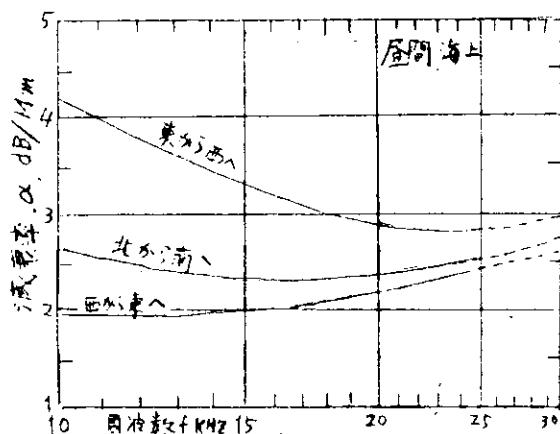


図1.14 周波数に対する減衰率

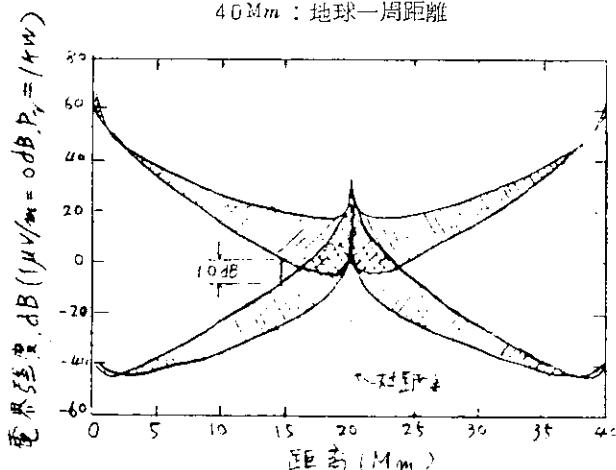


図1.15 10.2KHZの北から南へ、または南から北への伝搬

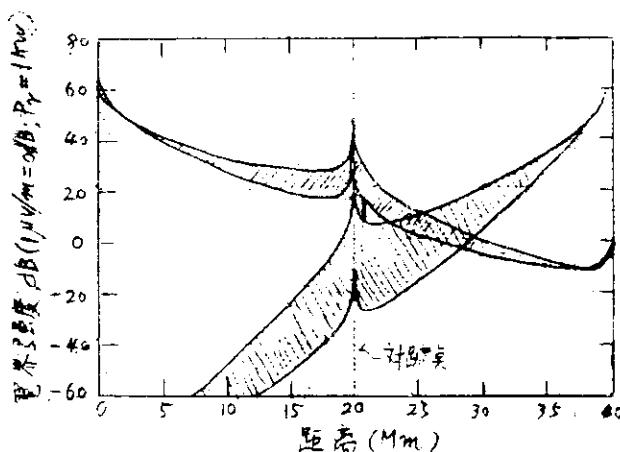


図1.16 10.2KHZの赤道付近で西から東への伝搬

点(20Mm)を越えており、その地点での電界は約25dBである。昼間の西方向の伝搬は約4,000浬(7.5Mm)で長径路干渉が起り、その時の信号レベルは約20dBである。昼間の減衰率は夜間よりもかなり高く、その上午後遅くには雑音レベルが高くなるので、送信所の所要電力の計算は昼間の伝搬と午後の雑音状態を基準にして行われる。

送信所の所要輻射電力は次式で求まる。

$$P_r (\text{dB}) = -E_z (\text{dB}) + E_{nm} (\text{dB}) + C/N_1 + T_x$$

ここで P_r = 所要輻射電力(1KW=0dB)

E_z = 受信点で誘起する垂直電界強度($1\mu\text{V}/\text{m}=0\text{dB}$)

E_{nm} = 1Hzバンド当りのrms雑音電界強度($1\mu\text{V}/\text{m}=0\text{dB}$)

C/N_1 = 実効バンド巾1Hz当りのrms雑音に対する所要のrms搬送波比

T_x = 伝搬効果による搬送波強度の変動と雑音の時間的変動があつても全時間の $x\%$ の利用を保證する係数

VLF帯の雑音強度は、図1.17に示すように10KHz近傍では1Hzのバンド巾当り約35dBであるが、この値は空電等の多発する典型的な高雑音地帯の中央値であるから、システムのカバーレンジの大半ではそれより相当低い雑音レベルとなり、より高い信頼性を期待できる。

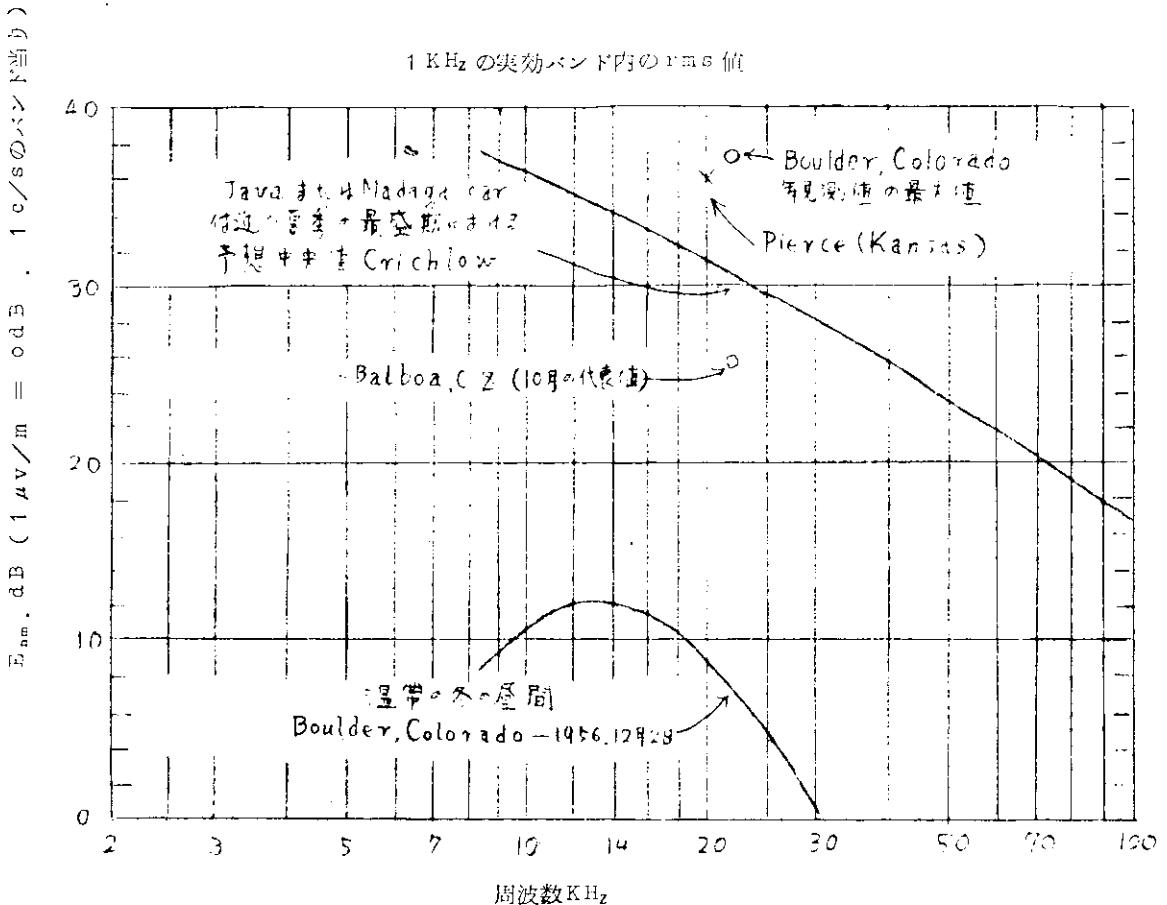


図 1.17 大気雑音強度の代表値

オメガ受信機の入力に要求される搬送波対雑音比はつぎの 2 つの方法で求まる。

- (a) RBN グループの運用経験から 6.0 秒の時定数を持つた受信機では、100 Hz バンド巾で測られたホワイトノイズに対して満足な動作を行なわすには -2.0 dB 以上の搬送波対雑音比を必要とする。したがつてバンド巾規制のないホワイトノイズに対しては $C/N_1 = 0 \text{ dB}$ となる。この値はリニヤ受信機についてのものであるが、VLF の大気雑音の中でクリッピング受信機を用いて行なった位相測定の実験では、リニヤ受信機より約 15 dB の改善が得られることが示された。したがつて $C/N_1 = -15 \text{ dB}$ となる。
- (b) 約 1.0 秒の時定数の実効バンド巾は 0.01 Hz であると仮定すると、受信機バンド巾で 2.0 dB の搬送波対雑音比を必要とする場合には、ソニア受信機での 1 Hz バンド当りの所要搬送波対雑音比は 0 dB となり、クリッピング受信機では $C/N_1 = -1.5 \text{ dB}$ となる。

T_x は、図 1.18 に示すように、全時間の 9.0 % は満足なサービスを行なえるためのフェージングマージンで約 1.6 dB となる。

東または西方向に對して 1 kW 送信で $P_r = 2.0 \text{ dB}$ となるところ ($\approx 7 \text{ km}$) までカバーするためには、

$$P_r = -2.0 + 3.5 - 1.5 + 1.0 = 1.0 \text{ dB}$$

北または北方向で $P_r = 1.5 \text{ dB}$ となるところ ($\approx 6 \text{ km}$) までカバーするためには、雑音レベルを同じと仮定すれば

$$P_r = -1.5 + 3.5 - 1.5 + 1.0 = 1.5 \text{ dB}$$

となるが、北または南方向では、 E_{nm} が 2.5 dB 以下の低雑音地域となるので、送信アンテナの所要電力は 1.0 dB ずつながら 1.0 kW となる。

図 1.19 は、同図の右側に定義した伝播路の海上部分と陸上部分の比によつて決まる値 L/T の関数として、各観測点での位相速度をプロットしたものである。昼間と夜間では位相速度がつきりと異なること、昼間の位相速度は陸上で著しく低下するが夜間の位相速度は陸路が海上か海上のみに無關係には一定値となることが、同図から

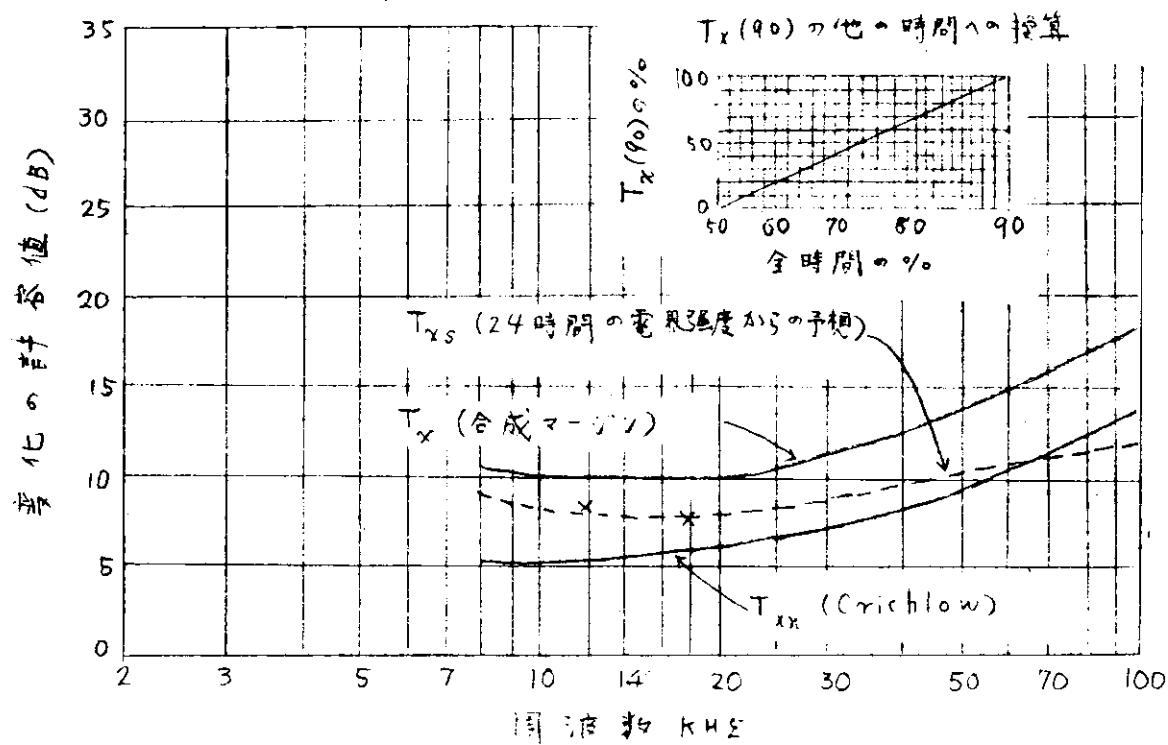


図 1.1.8 全時間の 90 %に対する信号フェーディングと雑音変化のマージン

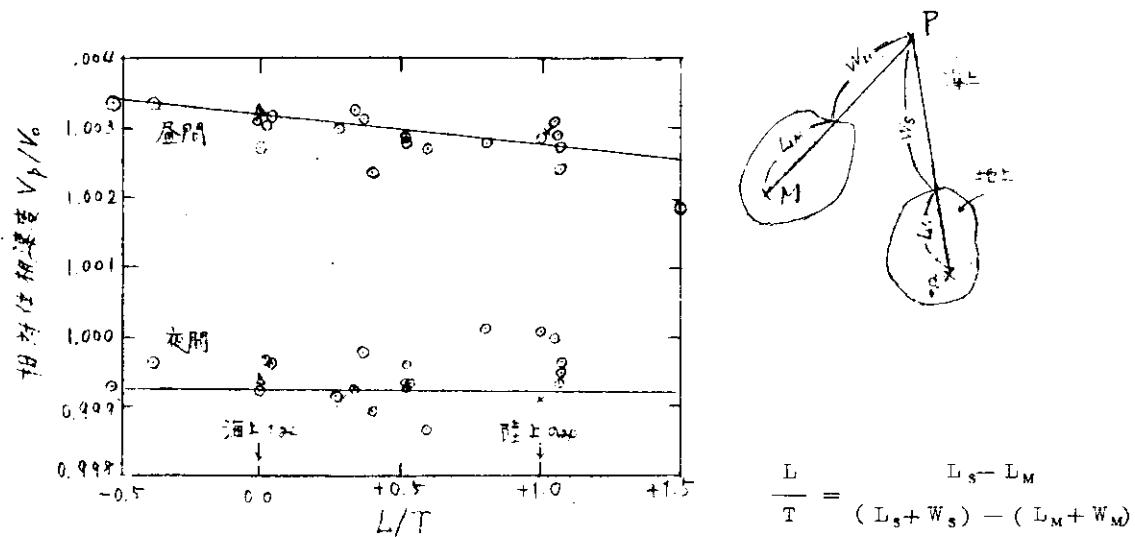


図 1.1.9 伝搬径路中の陸上部分の増加に対する相対位相速度の変化
(伝搬方向の補正はしていない)

わかる。

径路長が長くなれば実効伝搬路の巾 n も大きくなり、平行した多くの伝搬径路が加わつたのと同じ状態となる。この等価的な平行および独立の経路が加わる場合の合成位相変動は $1/\sqrt{n}$ に比例したものとなる。この種のランダム位相変動 $\sigma(T_p)$ は、受信した位相を安定な発振器と比較する方法によつて観測できる。

図 1.2.0 は、10 ~ 20 kHz 帯での $\sigma(T_p)$ を径路長に対してプロットしたものですが、10 ~ 30 kHz の範囲では次式がよく近似する。

$$\sigma(T_p) \approx d^{1/4} 10^4 f^{-1} \quad (\text{昼間})$$

$$\sigma(T_p) \approx 2.4 d^{1/4} 10^4 f^{-1} \quad (\text{夜間})$$

ここで $\sigma(T_p)$ は $\mu \text{ sec}$ 、 d は M_m で表わす。

図1.2.1は、前述した高次励振波モードによる送信アンテナの近傍効果に基づく位相変動状況を示すもので、同図からも1Mm以内は位相変動が大きくて安定した位相測定を行ないにくいことがわかる。

オメガシステムではある送信局からの電波を他の局で受けて、それに合せた位相の電波をその局から発射するのではなく、原子時計によつて正確に

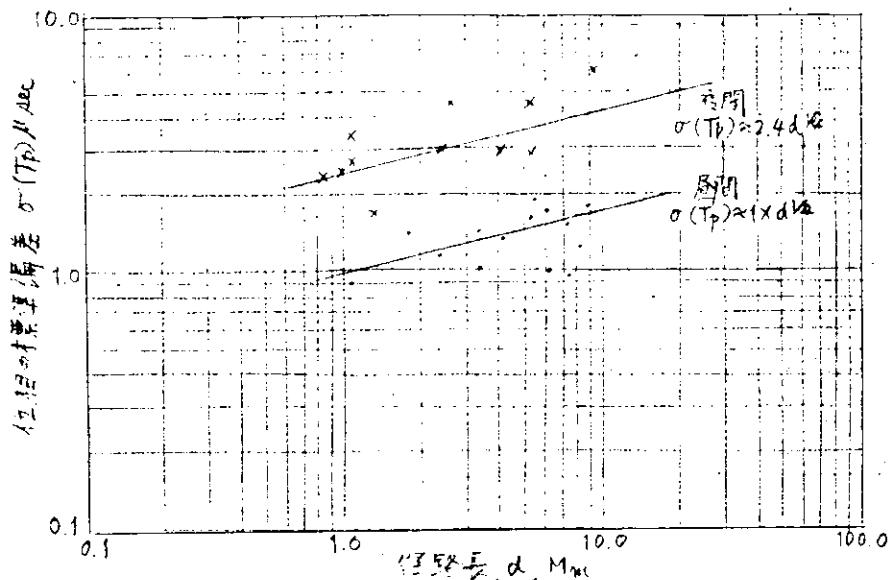


図1.2.0 経路長と位相安定度(短時間のランダム変動)観測は1.0~2.0KHzで行ない $\phi = 10 / f$ として10KHzに正規化してある。

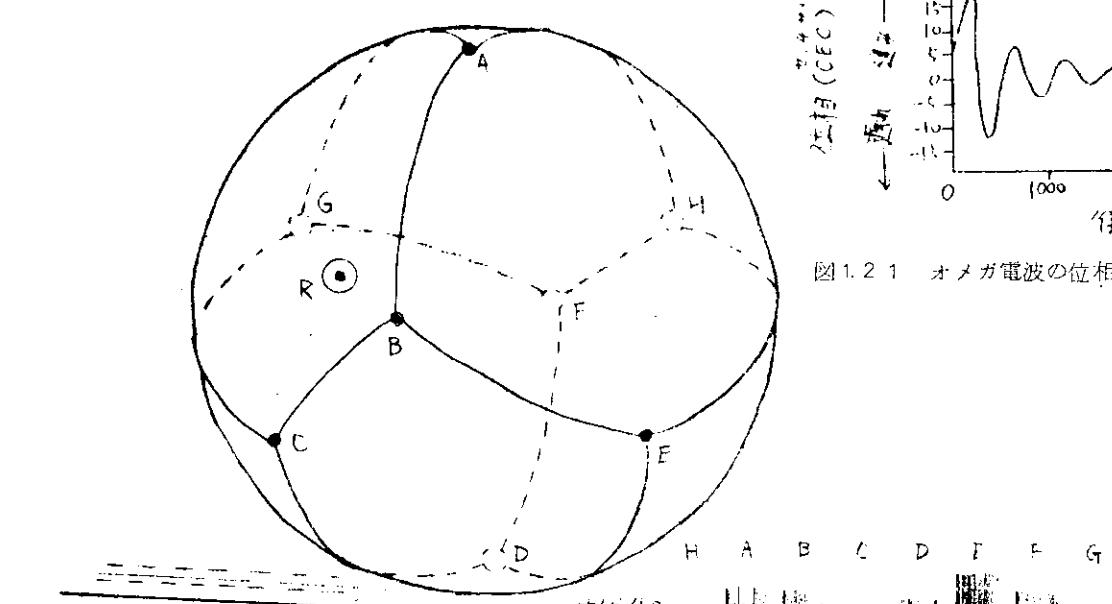


図1.2.1 オメガ電波の位相変動と距離との相関

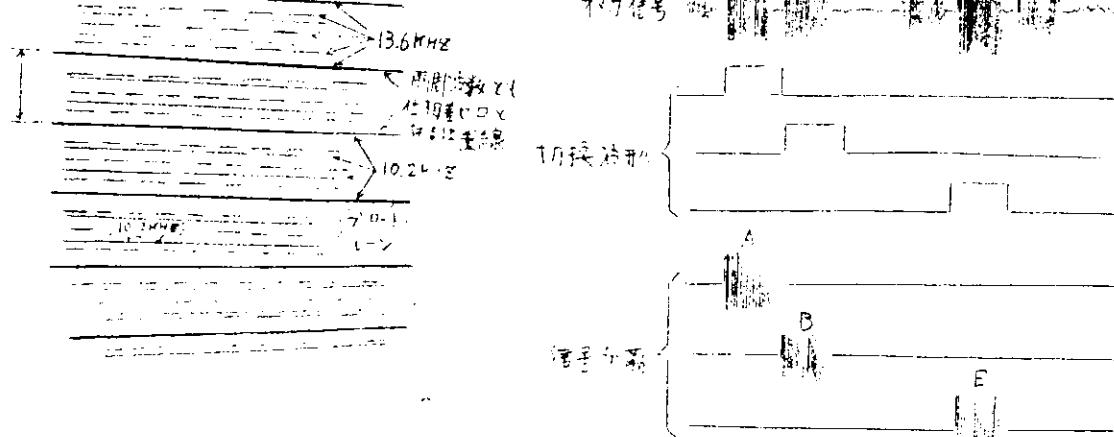


図1.2.2 レーン読別の原理

図1.2.2 代表的な信号パターンと信号分離

周波数源が、G. M. T. のある一定時刻に位相零点を同時に通過するように規制されており、そのように同期させた共通な周波数の電波が、各局から一定の時間順序で発射される。

したがつて、ロランやデツカでのよな意味での主局、従局の関係はオメガにはない。しいていえば、絶対時間 자체が主局の代りをしていることになる。しかし、チャートに記入するレーン値を一意的にするための便宜上、対局の位相差を測定する場合に、アルファベット順で上位の局を主局、下位の局を従局と呼び、従局の位相を主局の位相を基準にして測定した位相差をレーン値とすることになつているようである。

オメガシステムの電波は、図1.2.2の上部に示すよな望ましい分布に近い8つの地点に設置した各局から図1.2.3に示すよな送信形式で発射される。それらの内の10.2KHz電波について対に選んだ局からの電波相互間の位相差を測定して一本の位置線を求め、同じよにして違う対局に対する位置線を得て、それらの交点から船位決定を行なう。

各周波数のオメガ電波に着目すると、8局からの電波が全部同じレベルで受信できないと仮定すれば、図1.2.4のような受信波形になる。10.2KHz波のみに注目すると、各局は0.2秒づゝの休止期間を置いて順次に0.9から

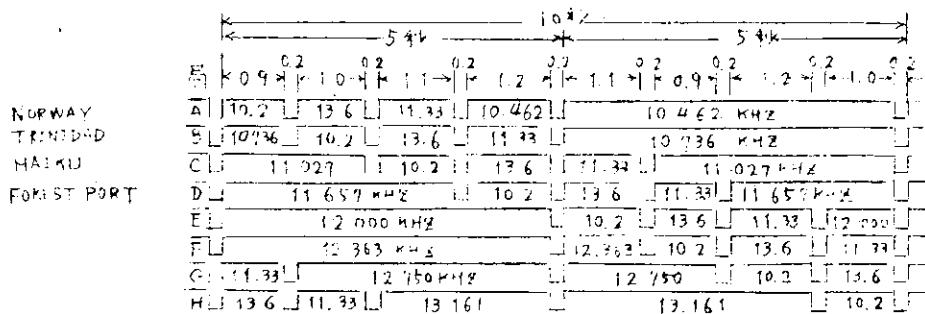


図1.2.3 オメガ送信信号形式

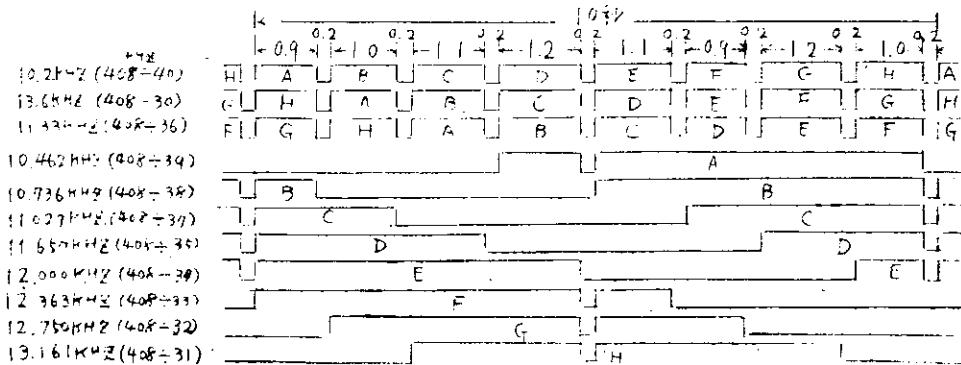


図1.2.4 オメガ受信信号形式

1.2秒の間の各局固有の持続時間ずつ送信し、ある瞬間に一つの局からの信号しか出でていないから、受信機側では送信側の局切換のシーケンスと同期して動作する時分割信号サンプル用切換波によつて、それらの信号中から測定に必要な局からの信号を分離する。図1.2.2は上記の時間切換波による信号分離動作の説明図である。

無線信号の位相は、距離が1波長変るごとに一定位相を繰返すよな周期的量である。したがつて、各対局からの信号波相互間の位相差が一定値となる点の軌跡は、基線上で半波長の間隔（10.2KHzでは約1.5km）で並ぶ複数本の位置線となる。既知の地点から出発した後連続的に位相差測定を行なつてゆく場合には、位相差零点を何回正方向または負方向に越えたかを記録することにより、現在の位置線が複数本の位置線の内のいずれの一本の上にあるかを知ることができるが、未知の地点に置かれた場合には10.2KHzの位相差を測つただけでは複数本ある位置線の内のどれに属するかを知ることができない。

その場合に、もしも測定している周波数が $\frac{1}{3}$ の 3.4 KHz だつたら、位相差一定の軌跡の間隔は基線上で約 45 Km となり、さらに $\frac{1}{3}$ の 1.133 KHz だつたら軌跡の間隔は約 135 Km にもなるので、大抵の場合に自分の船が 135 Km 以上離れた隣りの位置線上にあるのかどうかがわからないということは起らないものと考えられる。

実際には、 3.4 KHz や 1.133 KHz のようなあまりにも低い電波の伝送が技術的にむづかしいため、それと同じ効果を次のように方法によつて行なう。

オメガ電波中に含まれる 13.6 KHz と 11.33 KHz はそれぞれ 10.2 KHz との差が 3.4 KHz と、 1.133 KHz になつてゐる。したがつて 10.2 KHz との周波数比はそれぞれ $3:4$ と $8:9$ になる。しかもこれら3つの周波数は、元になる一つの周波数から異なる分周比によつて得たコヒーレントな信号であるから、 10.2 KHz と 13.6 KHz での位相差零の位置線は 10.2 KHz の位置線3本ごとに一致し、 10.2 KHz と 11.33 KHz での位相差零の位置線は 10.2 KHz の位置線9本ごとに一致する。 10.2 KHz と 13.6 KHz での位置線の関係を図1.25に示した。同図からもわかるごとく、両者の位置線が一致していない場所でも、 10.2 KHz での位相差と 13.6 KHz での位相差の関係が同一になる点の軌跡は、 10.2 KHz の位置線間隔の3本分の間隔で現われるので、両者の位相差を比較することにより、 10.2 KHz での位置線間隔(レーン巾)の3倍のブロード・レーン内にある一本の位置線(LOP)を確定することができる。

位相速度が昼間と夜間とでは異なる値をとることを前に述べたが、その結果、ある地点での位相差測定値は、その地点と対象にしている送信局との伝播路の途中が夜から昼または逆に移り変る途中が夜から昼または逆に移り変る途中で当然変化する。図1.26に日変化の一例を示したが、昼と夜の位相速度の値が正確にわかつてゐるためある地点の近傍での日変化的状況は相当正確に予想することが可能である。この日変化は季節による日中時間の変化によつても影響を受けるが、それらの変化は、地域ごとに(3/4)月、時間の関数として補正值を表にした空間波補正表(一部はすでに供給されているようである)によって手軽に補正できる。

空間波補正表は 10.2 KHz に対するもの外に 3.4 KHz および 1.133 KHz に対するものも出版される予定である。

10.2 KHz の空間波補正表の一例を図1.27に示した。この補正表を用いて、オメガ受信機のレーン表示値に補正を加え、それによつてLOPを求める際のメモ用に便利なオメガ・ワーク・シートの記載例を図1.28に示す。

図1.29はオメガ・チャート上に書き込まれたオメガ航法による航路トラックの実例であるが、オメガシステムのLOPが局所的には非常に平行性のよいこと、したがつて補間が正確に行なえることがわかる。

オメガ受信機は位相追跡回路を中心にして構成されるが、その基本回路をアナログ形のものを図1.30にデジタル形のものを図1.31と図1.32に示した。

アナログ形では位相検波器の出力部分に大きな時定数を持たすことによつて、デジタル形では位相サンプルの効果を多段回の集積値によつて与えることによつて、ノイズによる位相のランダム変動の影響を除去するようになつてゐる。

(4) 位相決定システムとしての仕様決定

(4-1) 概要

船位決定システムは船位測定システムと船位補定システムとから構成される。近い将来、実現が予想されるシステムはおもに

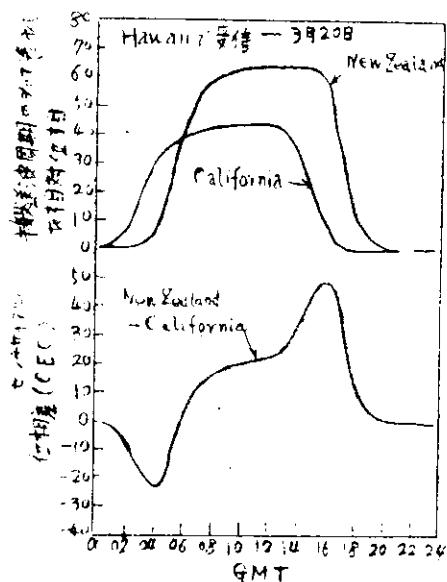


図1.26 位相差の日変化の一例

OMEGA SKYWAVE CORRECTIONS 10.2KHz

to the nearest 40lat. and 70long
36.0 N Lat 76.0 W Long
LOP: B-C TRINIDAD-HAWAII

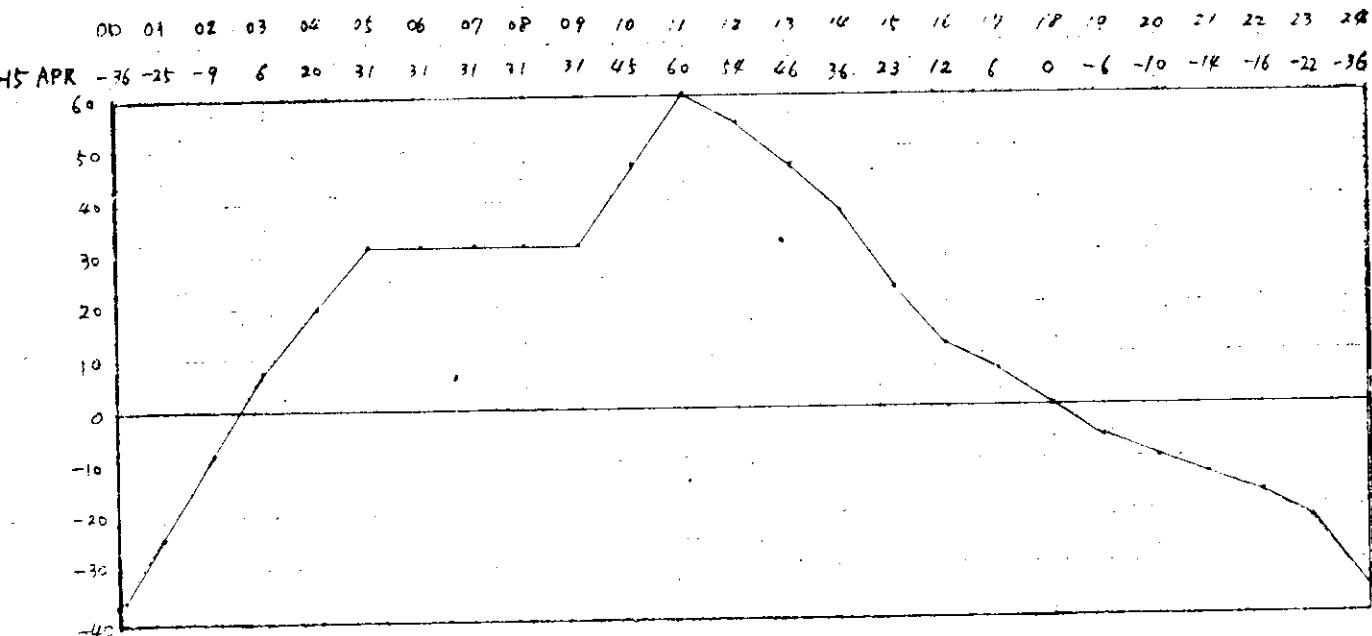
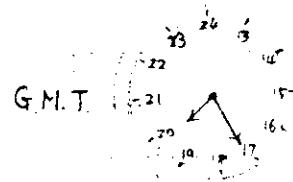


図1.27 10.2KHz空間波補正值の一例

受信機のレン表示値: B-C

7	4	1	4	9
---	---	---	---	---

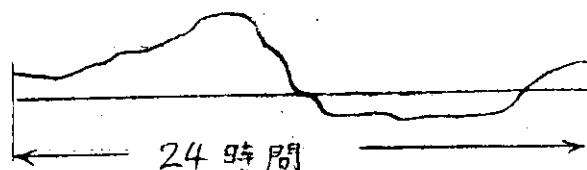
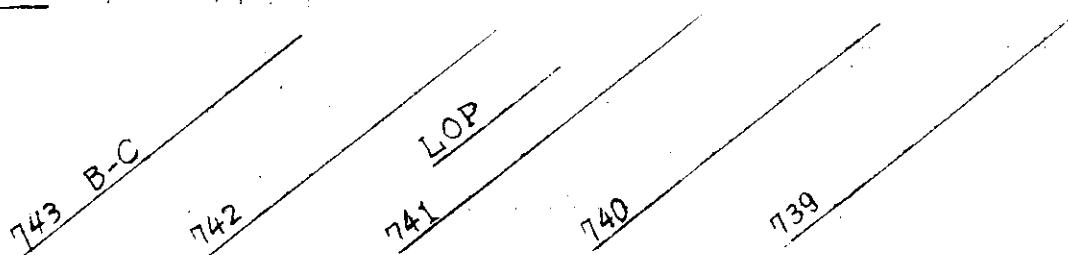


A局 Norway
B局 Trinidad
C局 Hawaii
D局 New York

補正值 - 補正表(又は補正曲線)を使う。

1-15 Apr.

最近接局距離 240浬

7°ロット - オメガ・チャートによる

OMEGA WORK SHEET

Greenwich Mean Time		Date: 12 Apr 1966 Time: 1925		
Receiver	B-D	A-D	A-C	B-C 741.49
Correction			-	- .8
Line of Position				741.41

図1.28 オメガ・ワーク・シート

(e) その他の仕様

定格：連続、電源：115V 60%，耐水圧：5kg/cm²、調整：0点調整±1kt以上、Full Scale

調整、±1.5%以上、追従感度0.1kt

測定範囲：左右0～7kt、第2目標の場合には、そのほか前進0～2.5kt、後進0～5kt

測力精度：±0.2kt以内

(f) 水平儀(Doppler Navigator用)

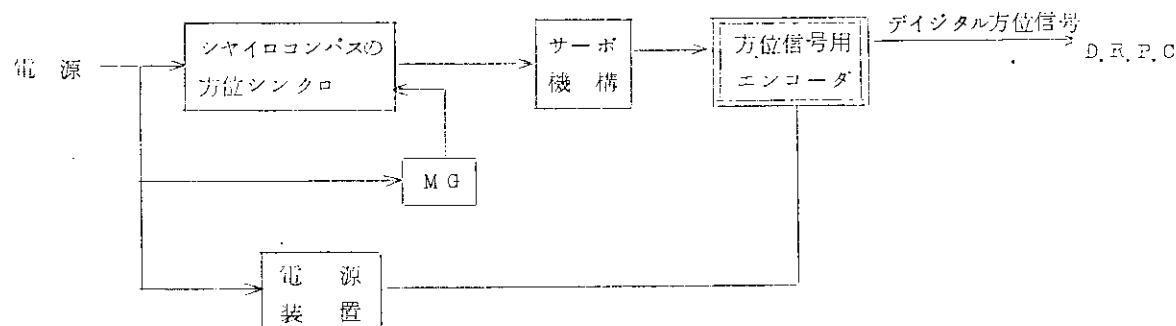
第1目標のものは振子式水平儀とする。これは北辰シンクロの軸を水平におき、この軸に剛体を取り付け、その重心を軸より、数cmの距離におく。全体をシリコンオイルあるいは弗素樹脂系オイル中に密閉し、振子に対するdamperとする。

シンクロ(角度誤差10分以下)はControl Transmitter型のものを使用し、2.6V、40.0%にて励磁して、その出力を回転角1度あたり200～300mVの40.0%の電圧とするか、あるいはServo機構を用いて実角の回転角とするかについては今後のDoppler Navigatorの研究の進展に合わせて決定することとする。

萬一第1目標の方法にて解決されない条件が出た場合には一般公知のGyro水平儀を利用する。ただし価格と取扱上からなるべく第1目標の方法を採用すべく研究を進めることとする。

(IV) 方位信号用エンコーダ

光電式シャフトエンコーダであつて大略下記のようなシステム構成をもつ



このエンコーダに要求される機能のうち特に重要なものは次のとおりであると考える。

- (1) 0～360度の全方位を無絶間で0.5度以上の精度の信号とすること。
- (2) オートパイロットで船舶を直進させたときでも、波浪等によりある周期で船首方向が振揺する。これをそのまま計算器の入力信号とすることは不適当であるので平均化処理をする。
- (3) 機器は長寿命で、かつ信頼度の高い部品で構成する。

これらの条件を満たすために以下の構造が必要である。

(1) 平均化処理

船首方位が、波浪等の影響で水平方向に振揺するとシャイロコンパスの発信する方位信号は、その周周期で振揺する。

もし、計算器のサンプリング周期が非常に短かい場合には問題はないが、普通かなり長いサンプリング周期をとるので、かなりのサンプリング誤差がでてくる。

これを防ぐために平均化処理が必要である。しかしまた、もし針路をえたときにも、つねに平均化処理を行つていようと、かなりの遅れがでてくるため不都合がかかる。

したがつて今回の検討ではシャイロコンパスとシャフトエンコーダとの間に信号の伝達を行なうサーボメカニズムに特殊な方法を探り、高速サーボと低速サーボとの2つをつくり、ある程度以上にシャイロコンパスの方位信号が出ていた場合には、高速サーボに切り換えて速い連続を行なうようにすべきであると考える。

これらサーボ機構の仕様は下記のとおりである。

高速サーボ	追従速度	max. 360 deg / 60 sec
	静的精度	< 0.1 deg
	追従誤差	< 0.5 deg
低速サーボ	追従速度	max. 360 deg / 60 × 70 sec
	静的精度	< 0.1 deg
	追従誤差	< 0.5 deg

高速、低速サーボ切換スラップ

OFF 1. 2. 4. 6. 8. deg

(a) A - D 交換

サーボモータ軸にエンコーダの軸を直結してデジタル信号を出す機構について研究する。この場合高信頼度、長寿命という点を考慮すると光電式エンコーダ方式のものが適当と考える。

(b) 角度デジタル信号およびその精度

全周 720 bits ± 1 bits (全周を 0.5° に分割し、それぞれ 1 bit のデジタル信号とする)

(V) D R P 計算器 C P U

(1) 演 算 純 2 進直列方式 (2's Complement Arithmetic)

(2) 語 長 16 bits/word

(3) 記憶素子 Linear Transformerによる固定記憶装置

(4) 記憶容量 2.048 語 (最大)

(5) 命令数 基本 16 種

(6) 1 加算時間 60 μs

(7) 書込み／読み出し記憶装置 IC Register 15 wordまで

(8) 外部の計算器または入出力機器との接続 System Busによる

このような仕様のもとに小型のユニットを構成することが望ましく、特に船舶用として次の点に特長を持たせるべきであると考える。

(1) linear transformer 等を使用した記憶装置の採用によつて一度入れた Program の内容が、外部的にも内部的にも破壊されることがないように構成する。このことは特に機械に不慣れな乗組員が取扱う場合に有効である。

(2) 全体を専用 I/O 化し外形を小型化することにより船の建造の最終段階すなわち内装の完成後に搬入できるようにし、初期不良の一掃、デバックの完全化のための期間が十分とれるようにすることが必要である。

1.1.3 航法の調査

(1) 航法に関する文献の収集、調査

(1-1) 航法計算に関するもの

航法計算については、その理論はすでに確立されており、あまり文献は見出せなかつた。以下はそのうちコンピュータに関連あるものである。

(a) 広田 実：航海術における電子計算機の応用

神戸商船大学紀要 第二類、第15号、p39～48

大掛かりな航法計画のコンピュータプログラムが報告されている。

(1-2) 最適操舵法に関するもの

最適操舵法については数多くの文献を収集した。そのうち主なものを見紹介する。

(a) 小山 健夫：外洋航行中の船の最適自動操舵系に関する研究

造船協会論文集 第122号、P18～35

外洋航行中の船のオートパイロットの良さを評価するにあたっては針路の偏差に注目するだけでなく、「広い意味での抵抗増加」がいかに少ないかによつて評価すべきであると述べている。

(b) 元良 誠三：荒天中の自動操舵とYawingについて

造船協会論文集 第94号、P61～68

大角度の操舵と、そのときの海象状態の関連と、そのために生ずる馬力損失について調査し、またその原因についても検討してある。

(c) 前畑 幸弥、米沢 弓雄：自動操舵の調整に関する理論について 日本航海学会誌

周波数応答波により自動操舵系の安定度を判別している。

(2) 推定船位計算方法の調査、検討

(2-1) 対水速力と針路による推定船位計算方法

(a) 記号

電磁logによる現対水前進速力	V_{an}
側方電磁logによる現対水側方速力	V_{sn}
Gyrocompassによる現針路	γ_{an}
設定流向	γ_s
設定流速	T_r
時間と時刻(投入時刻)	$t, T_n, (T_0)$
緯度	ℓ
経度	L
前回の推定緯度	ℓ_{en-1}
前回の推定経度	L_{en-1}
投入実測位置の緯度	ℓ_o
投入実測位置の経度	L_o
移動距離(対水)	s
移動距離(対地)	S
速力、距離の東西方向成分	v_x, ω_x, s_x
速力、距離の南北方向成分	v_y, ω_y, s_y

(b) 計算方法

時刻 T_0 における所在緯度が ℓ_0 、緯度が L_0 であるとし船の前進速力が V_{an} 、側方速力が V_{sn} で針路 C_{an} で進むときの時刻 T_1 における対水移動距離 s の成分は、

$$sx = \int_0^{T_1 - T_0} (V_{an} \sin C_{an} + V_{sn} \cos C_{an}) dt \quad \text{となる。}$$

海流 (流向 T_s 、流速 T_r) の修正を加えれば対地移動距離 S の成分は、

$$Sx = \int_0^{T_1 - T_0} (V_{an} \sin C_{an} + V_{sn} \cos C_{an} + T_r \sin T_s) dt$$

$$Sy = \int_0^{T_1 - T_0} (V_{an} \cos C_{an} - V_{sn} \sin C_{an} + T_r \cos T_s) dt \quad \text{となる。}$$

時刻 T_1 のときの緯度 ℓ_1 と経度 L_1 とは次式で表わすことができる。

$$\ell_{en} = \ell_0 + \frac{1}{R} \int_0^{T_1 - T_0} (V_{an} \cos C_{an} - V_{sn} \sin C_{an} + T_r \cos T_s) dt$$

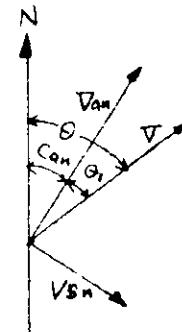
$$L_{en} = L_0 + \frac{1}{R} \int_0^{T_1 - T_0} (V_{an} \sin C_{an} + V_{sn} \cos C_{an} + T_r \cos T_s) \frac{dt}{\cos \ell_0}$$

ここは ℓ は ℓ_0 から ℓ_{en} までの値とする。

実際の D R P 計算器による計算式および計算プログラムのフローチャートは下記のようになる。

計算式

$$\left\{ \begin{array}{l} v = \sqrt{V_{an}^2 + V_{sn}^2} \\ \theta_1 = \tan^{-1} \frac{V_{sn}}{V_{an}} \\ \theta = \theta_1 + C_{an} \end{array} \right.$$

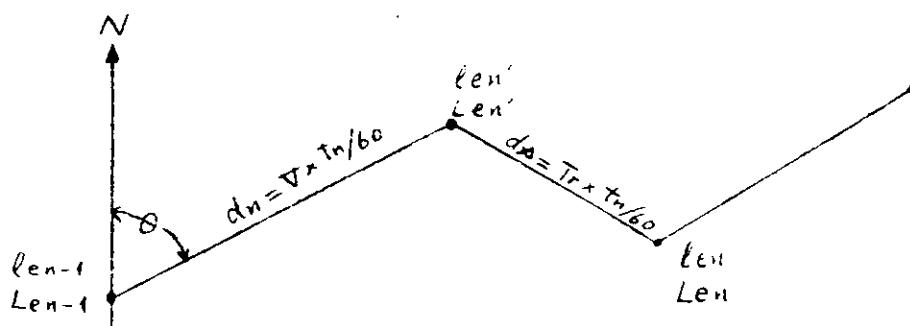


符号変換

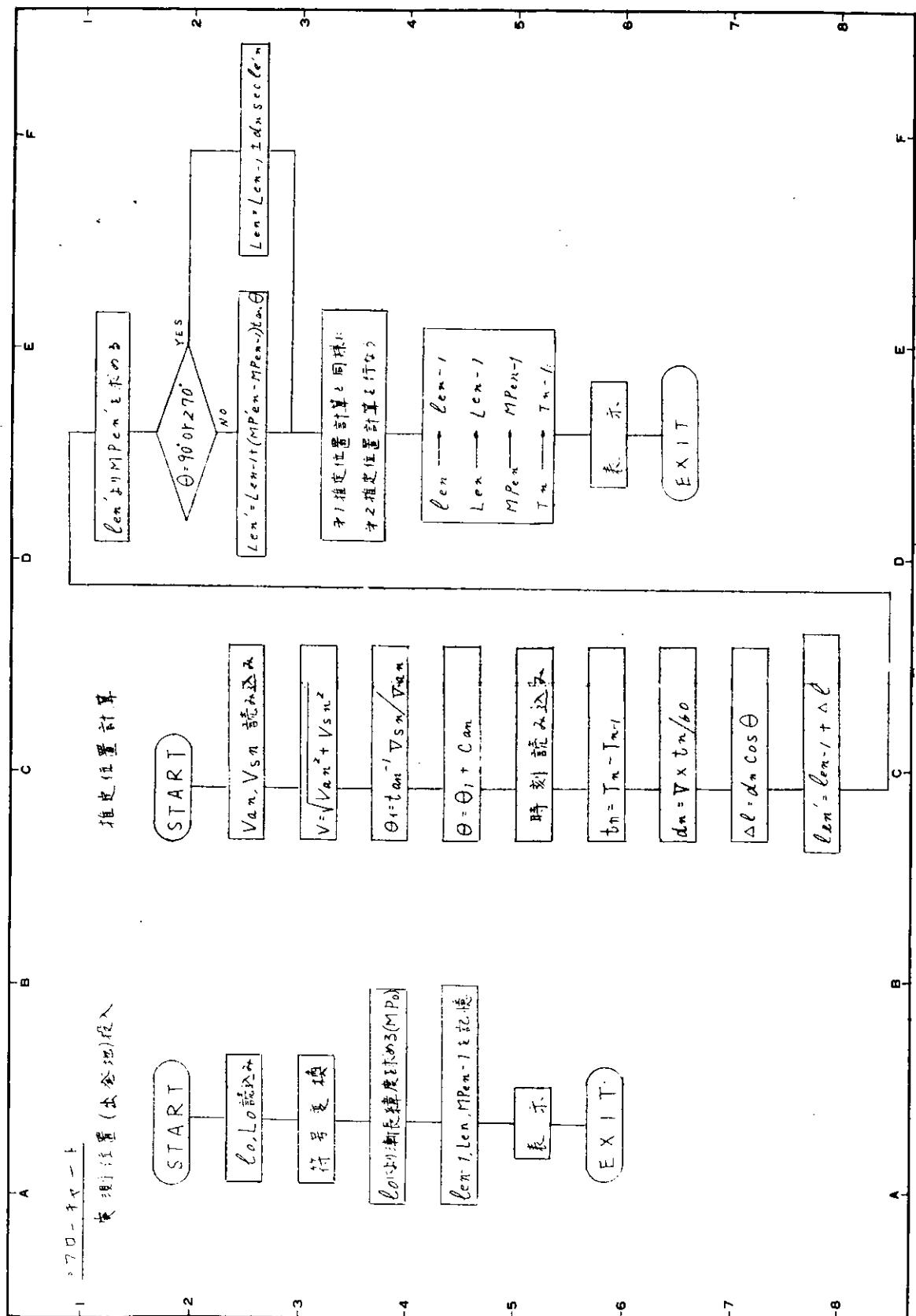
緯 度	$0 \sim 90^\circ$	N \oplus	S \ominus
経 度	$0 \sim 180^\circ$	E \oplus	W \ominus

② 針 路

	cos sec	tan	(sin)
$0^\circ \leq \theta < 90^\circ$	\oplus	\oplus	\oplus
$90^\circ \leq \theta < 180^\circ$	\ominus	\ominus	\oplus
$180^\circ \leq \theta < 270^\circ$	\ominus	\oplus	\ominus
$270^\circ \leq \theta < 360^\circ$	\oplus	\ominus	\ominus



第 1 推定位置 $\left\{ \begin{array}{l} \ell_{en'} = \ell_{en-1} + d_n \cos \theta \\ L_{en'} = L_{en-1} + m d \ell_1 \tan \theta \text{ 又は } L_{en-1} \pm d_n \operatorname{secd} \sec \ell_{en'} \end{array} \right.$



$$\begin{aligned} \text{第2推定位置 } & \left\{ \begin{array}{l} \ell_{en} = \ell_{en'} + ds \cos T_s \\ L_{en} = L_{en'} + md \ell_2 \tan T_s \text{ 又は } L_{en'} \pm ds \sec \ell_{en} \end{array} \right. \end{aligned}$$

ここに

$$\left\{ \begin{array}{l} md \ell_1 = M_{pen'} - M_{pen-1} \quad M_p : \text{漸長緯度} \\ md \ell_2 = M_{pen} - M_{pen} \end{array} \right.$$

(2-2) ドプラセンサによる推定船位計算方法

ドプラセンサについては 1.1.1 (1-7) および (2-7) で述べたごとく、今後、開発研究する要素が多く、現在、確立したシステムでない。実験段階で、その出力形式等かなり変る可能性がある。したがつて、ここで計算方法を詳述しても意味がない。しかし、その性質から考えて、大要は (2-3) 慣性航法による推定船位計算方法と同じになろう。

ただし、ドプラセンサの情報としては左右ビーム方向速度成分および垂直ビーム方向速度成分として現われるので、計算機で次の計算を行なわせなければならない。

- (i) Pitching, Rolling の影響の修正。
- (ii) Heading 信号を使用して、三ビーム方向速度成分を東西南北の大地座標への変換。
- (iii) 現在位置の算出。
- (iv) 目的地までのコースおよび距離の算出と自動操舵信号の作成。

ドプラセンサとして、船の進路方向成分、横方向成分が上の補正 (i) により求まるわけであるから、(ii) 以下の項は慣性航法のそれと本質的に同じであると考えられる。

上に述べたようにまだ未解決分野の多い機種であり、このデータが得られたならばという仮定に立つて、航法を述べてもあまり価値はないので、本質的には慣性航法と同じになるであろうということでそれを参照していただきたい。

(2-3) 慣性航法による推定船位計算法

(a) 慣性航法装置には前述のとおり 4 形式があるが船舶に使用している GEOMETRIC または SEMIANALYTIC SYSTEM (加速度計は水平面に固定されかつ Schuler tuning されたプラットフォームをもつ) において位置を決定する式は次のとおりである。

$$\phi - \phi_0 = \iint \frac{1}{a \cos \theta} (Ax - Fx) dt dt \quad (\text{経度})$$

$$\theta - \theta_0 = \iint \frac{1}{a} (Ay - Fy) dt dt \quad (\text{緯度})$$

$$Fx = h \cos \theta \dot{\phi} + 2h \cos \theta (\dot{\phi} + \omega_e) - 2(a+h) \ddot{\theta} \sin \theta (\dot{\phi} + \omega_e)$$

$$Fy = h \ddot{\theta} + 2h \dot{\theta} + (a+h) \cos \theta \sin \theta (\dot{\phi} + \omega_e)^2$$

ϕ 経度

θ 緯度

h 地球上の高さ

ω_e 地球の加速度

a $r + h$ r 地球の半径

地球の半径 r は一定でない、地球の自転軸も一定でなく角速度も一定ではないので、これらのパラメータを入れて上式を計算機により計算すれば推定船位を求めることができる。

(b) 慣性航法の誤差

Schuler tuning の行なわれている場合、誤差の発生源は加速度計の誤差、加速度計のバイアス誤差、

ジャイロのドリフト、加速度計とプラットフォームとの角度誤差等であり、それぞれ次式で表わされる。

- (I) 加速度計の誤差 $\frac{\delta}{\omega} \sin \omega t$ $\omega^2 = \frac{g}{R}$
- (II) 加速度計のバイアス $\frac{\Delta A}{\omega^2} (1 - \cos \omega t)$
- (III) ジャイロのドリフト $G R (t - \frac{1}{\omega} \sin \omega t)$
- (IV) 加速度計とプラットフォームとの角度誤差 $R \epsilon_0 (1 - \cos \omega t)$

ただし、 g ……動力速度、 R ……地球半径、 δ ……加速度計のスケールエラーに加速度を乗じたもの

(加速度計のスケールエラーが 0.01% 、速度変化が ΔV であれば $\delta = \Delta V \times 10^{-4}$)

G ……ジャイロドリフトレート、 ΔA ……加速度計バイアス誤差、 ϵ_0 ……プラットフォームと加速度計のなす角、本来零であるべきで据付誤差である。)

これらの式で計算すると各誤差の概略値は次のとおりである。

- (I) 加速度計のリニアリティを 0.1% とすると、速度が 20 knot 変化してもピーク誤差は 0.0005 浬である。
- (II) 加速度計のバイアス誤差が $1.45 \times 10^{-4} G$ またはプラットフォームと加速度計のなす角が 30 秒あれば、約 4.2 分後に独立に 1 浬のピーク誤差を生ずる。
- (III) ジャイロドリフトによるものは時間とともに平均誤差は増大する。もしジャイロに 0.0167 度/時の一一定的ドリフトが存在するときには、1時間当たり 1 浬の平均誤差率を発生する。

これらの関係を図 1.3.6 に示す。

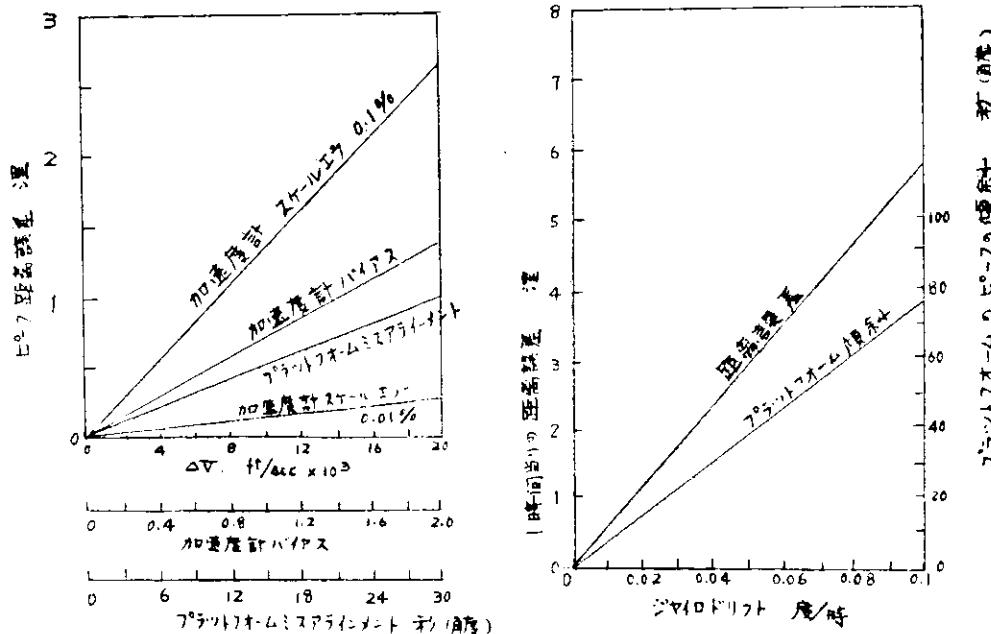


図 1.3.6 慣性航法の誤差

以上の式および図示で明らかのように長期間の位置精度はほとんどジャイロによって決まる。

船舶の慣性航法計器は長期間使用を使命とするものであるから、ジャイロと加速度計が特に重要であり、ジャイロはドリフトが $0.0001 \sim 0.005$ 度/時、加速度計は感度 (threshold) が $10^{-6} \sim 10^{-7}$ g 程度のものが要求される。航空機用の慣性航法装置は、公表された文献によれば、誤差は 8 時間で $5 \sim 15$ 浬程度であり、MTBF も 1,000 時間を超えてるので充分実用になつてあり、航空機の速度が増大した現在では不可欠の装置になりつつある。

艦船用の慣性航法装置の成績で公表されたものはさわめて少ないが、スペリ社の SON-4 が 10 時間で 3 浬

(r.m.s)の誤差であるといわれる。

(c) 慣性航法の補助手段

慣性航法装置のみで推定船位を得ると、前述のように誤差は時間とともに増大するので長期航法は不可能である。したがつて他の航法と組合せて欠点を補うことが考えられる。

(i) ロラン・デツカ等の位置測定との比較

ロラン、デツカ等の使用できる海面では位置の修正に使用できる。これらの装置から得た位置を慣性航法から得た位置と比較して適当な伝達関数をかけてフィードバックすれば位置誤差は、 $\Delta K \frac{1}{K+1}$ となる。

ΔK ……ロラン等の誤差、 K_f ……伝達関数

(ii) ドップラーレーダまたはドップラソナーとの組合せ

速度をドップラ装置を用いて測定すれば加速度計を水平に保つジャイロは比較的精度が悪くてもよくなる。慣性航法装置としては製作が非常に楽になる。

(iii) 天測航法との組合せ

慣性航法は正確な安定プラットフォームをもつてるので天体観測には都合がよい。二つの天体を同時に測れば天体位置を決定でき、その位置誤差は安定プラットフォームの誤差に応じたものになり、ジャイロのドリフト誤差を大幅に改善できる。

(iv) 人工衛星による位置との比較

人工衛星は常に自己の軌道を報知しながら飛んでいるので、受信電波のドップラシフトを測定することで船位を決定できる。

以上慣性航法装置を概観したが、これを船舶に応用することは自立航法が要求される軍艦や潜水艦はともかく、商船では当面必要のないものであつて到底ペイするとは思われないし、特に商船用のジャイロの開発は技術的経済的に当分話題の坂を出ないものと思われる。

表 1 慣性航法装置の方式

システム	ジャイロ	加速度計	摘要
GEOMETRIC シンバル 5個	2 TDF or 3 SDF ジャイロは慣性空間に固定される。	2 個 加速度計は Schuler プラットフォームに装備される。	容積大、計算機は簡単、長期航行の航空機 艦船等に使用
SEMIANALYTIC シンバル3(又は4)個	2 TDF or 3 SDF ジャイロは鉛直線について固定される。	2 個 加速度計は Schuler プラットフォームに装備される。	容積小、計算機簡単短期航行の航空機 潜水艦等に使用
ANALYTIC シンバル3(又は4)個	2 TDF or 3 SDF ジャイロは慣性空間に固定される。	3 個 加速度計の読みは動分を修正しなければならない。 レンジの広い直線性の高い加速度計が必要。	容積小、計算機は複雑となる。 ミサイル等に使用
STRAPDOWN プラットフォーム無し シンバルなし	3 SDF 最初の軸からのレイトのみ計算機に発信	3 個 加速度計の読みから動分、コリオリの力による分を修正しなければならない。 レンジの広い直線性の高い加速度計が必要	容積小、計算機は最も複雑 ミサイル等に使用

TDF 2軸自由度、ジャイロ

SDF 1軸自由度、ジャイロ

(3) 大圓航法に関する調査、最適操舵方法の研究、プログラムの決定

(航法計算の自動化システムについて)

(3-1) 概 要

自船の位置は船位測定システムまたは船位推定システムによつて知ることができるが、今後の航海計画を立て、針路、速力を決定したり、今までどのような航海をしてきたかを知るために、簡単な計算ではあるが、航法計算をする必要がある。現在、航海士はこれらの計算を手計算で行なつているが、高度集中御御方式を採用した船舶では、このような計算もコンピュータで行なうことが望ましい。具体的には次のような計算が行なえればよいと考えられる。

(a) 現在位置から目的地までの残航距離

(b) 目的地までの予定期間

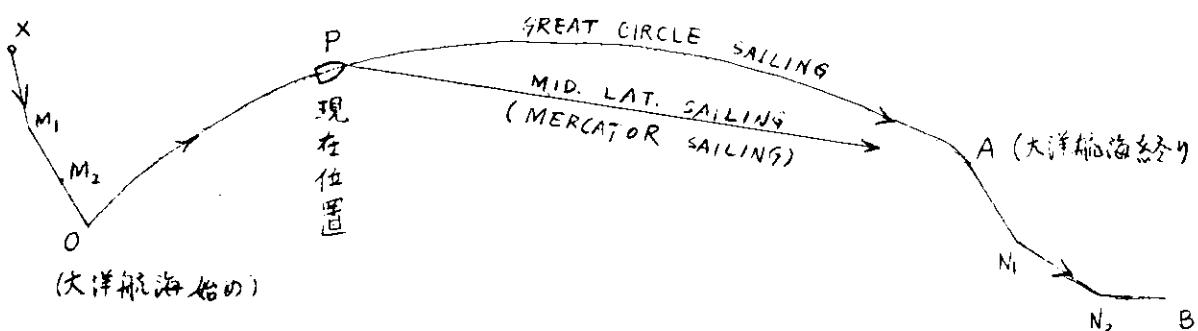
(c) 前日正午からの航走距離

(d) 風および潮流による偏流量の計算

(e) 大圓航法、漸長緯度航法等の計算

(e)～(d)の計算はいずれも(e)の計算、つまり一般の地文航法の理論を基礎にして行なうことができる。

(3-2) 航 海



船の航海を具体的に考えると次のようになる。図に例をとり説明する。

(a) X点を出発する。(X : 出港地)

(b) M₁, M₂, …, M_nで変針しながらCoastingする。

(この間の計算は中分緯度航法または漸長緯度航法による)

(c) O点から大洋航海に入る。(O : 大洋航海の出発点)

(d) P点は現在位置であつて、OからPまでは大圓航海してきた。(計算は大圓航法による)

(e) これからA点までは大圓航法または線航法(Rhumb Line Sailing)でゆきたい。(計算は大圓航法または漸長緯度航法による。)

(f) A点からB点までは(f)と同様にCoastingする。(A : 大洋航海の終了点、B : (最終の) 目的地)

以上のようにして航海を行なわれるが、実際にいかなるデータが必要であるかを調べてみると

。航海計画では

(a) 各点間の距離

(b) A点からB点までの距離

(c) 予想 Speedに対する所要時間

。航海中および日誌計算では

(a) 航走距離

(b) 海流の方向(流向)、速さ(流速)

(c) 残航距離

などの情報が得られればよいと考えられる。

これらをまとめると(3-1)概要の項で述べた(a)~(e)の計算を行なうことにより帰着する。

(3-3) 計算方法

(a) 現在位置から目的地までの残航距離

現在位置Pの緯度 λ_1 、経度 L_1

A点 の λ_2 、 L_2

PからAまでの距離 X_1

AからB λ_2 X_2 (他の計算(e)すでに決定されているとする。)

(i) 大円航法のとき

$$\text{Dist. (rad.)} = \cos^{-1} \{ \pm \sin \lambda_1 \sin \lambda_2 \pm \cos \lambda_1 \cos \lambda_2 \cos (L_1 - L_2) \}$$

Dist. から X_1 が求まる。

(ii) 減長緯度航法のとき

P点とA点の漸長緯度をd.m.p、経差をD.L. とする。

$$\text{Co.} = \tan^{-1} \{ D.L. / d.m.p \}$$

$$\text{Dist.} = (\lambda_1 - \lambda_2) \sec \text{Co.}$$

これにより X_1 が求まる。

(iii) 中分緯度航法のとき

$$\text{Co.} = \tan^{-1} \left\{ \frac{L_1 - L_2}{\lambda_1 - \lambda_2} \cos \frac{1}{2} (\lambda_1 + \lambda_2) \right\}$$

$$\text{Dist.} = (\lambda_1 - \lambda_2) \sec \text{Co.}$$

これにより X_1 が求まる。

したがつて、残航距離を Miles to Go とすると

$$\text{Miles to Go} = X_1 + X_2$$

となる。

(b) 目的地までの予定所要時間

(a)項で求めた残航距離 Miles to Go を、予定の(計画の)速力 v でわることにより、目的地までの予定所要時間 t を求めることができる。すなわち、

$$t = \text{Miles to Go} / v$$

(c) 前日またはその日の正午からの航走距離

前日正午を起点として、その後航走した距離 (Log Day's Run) は、単に速力 v を時間について積分したものであるから。

$$\text{Log Day's Run} = \int v dt$$

で表わせる。この式は対水速力計(たとえば電磁ログ)の出力をもとに算出したものであるので、対水航走距離を表わしている。

一方、対地航走距離を知ることも必要であり、これは実測位置が求まつた時点ごとに、積算をしてゆけばよい。

λ_{n-1} , L_{n-1} : 前回実測した緯度、経度

λ_n , L_n : 今回 λ L

T CO_n : (λ_{n-1} , L_{n-1}) から (λ_n , L_n) をみた針路

$$T CO_n = \tan^{-1} \left\{ \frac{L_n - L_{n-1}}{\lambda_n - \lambda_{n-1}} \cos \frac{1}{2} (\lambda_n + L_n) \right\}$$

$$(\text{OG Day's Run}) = \sum (\lambda_n - \lambda_{n-1}) \sec T CO_n$$

なお、 λ_0 , L_0 を正午の緯度、経度とすると、(λ_0 , L_0) から (λ_n , L_n) をみた針路 (T.CO.) やびその間の平均速力 (Actual Speed) は、次式で表わされ、これらも重要な情報である。

$$T.C.O. = \tan^{-1} \left\{ \frac{L_o - L_e}{\lambda_o - \lambda_e} \cos \frac{1}{2} (\lambda_o + \lambda_e) \right\}$$

$$\text{Actual Speed} = \frac{\text{OG Day's Run}}{\text{Time}}$$

ただし、Time：正午から現在までの経過時間

(d) 風および潮流による偏流量の計算

対水速力と針路の測定により指定船位を決定する場合には、風および潮流による影響を補正する必要がある。

補正の方法は、実測位置が決定したとき、推定位置との偏差から偏流量を算定する。

T_1 ：前回実測時刻

T_2 ：今回 "

(λ_o, L_o) : T_2 における実測位置の緯度、経度

(λ_e, L_e) : T_2 " 推定 " "

md λ : λ_o と λ_e の漸長緯差

DL : L_o と L_e の経差

とすると

$$\text{流} \begin{array}{l} \text{向} \\ \text{(方向)} \end{array} \theta_e = \tan^{-1} DL / md\lambda \quad (\text{漸長緯度航法})$$

$$= \tan^{-1} \left\{ \frac{L_e - L_o}{\lambda_e - \lambda_o} \cos \frac{1}{2} (\lambda_o + \lambda_e) \right\} \quad (\text{中分緯度航法})$$

$$\text{流} \begin{array}{l} \text{速} \\ \text{(速力)} \end{array} = \frac{1}{T_2 - T_1} |(\lambda_o - \lambda_e) \sec \theta_e|$$

で表わされる。

ここで注意すべきことは、このようにして求めた流向、流速は海流の真の方向、速力を、意味するものではないということである。推定船位は風および潮流による影響を補正したものであるから、実測位置と推定位置との差は風および潮流の補正量が正しくなかつたために生じた誤差を意味する。したがつて、この補正量が正しければ推定位置は実測位置と一致するから、上記の計算結果において流速は零になるはずである。

海流の真の方向、速力を知りたい場合には、推定位置と実測位置とを比較しなければならないが、一般にはこの必要はない。

なお、この計算の結果として得られる流向、流速は船位推定計算器(DRPG)に入力され、速力の修正が行なわれる。

(e) 大圓航法、漸長緯度航法等の計算

2点の位置 $(\lambda_1, L_1), (\lambda_2, L_2)$ を与えて、針路およびその間の距離を求める計算を行なう。

λ_1, L_1 : 起程地の緯度、経度

λ_2, L_2 : 着達地の " "

$LP = L_2 - L_1$: 両地の経度差

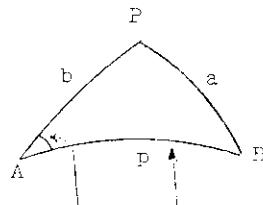
$= DL$

$a = 90^\circ - \lambda_1$: 起程地の余緯度

$b = 90^\circ - \lambda_2$: 着達地 "

A : 起程地

B : 着達地



(i) 大圓航法

$$\tan \frac{1}{2} (A + B) = \cos \frac{1}{2} (a - b) \sec \frac{1}{2} (a + b) \cot \frac{1}{2} P$$

$$\tan \frac{1}{2} (A - B) = \sin \frac{1}{2} (a - b) \cosec \frac{1}{2} (a + b) \cot \frac{1}{2} P$$

$$A = \frac{1}{2} (A + B) + \frac{1}{2} (A - B)$$

A の角がすなわち(起程)針路である。

$$\text{また, } \cos \frac{1}{2} P = \cos \frac{1}{2} (a + b) \sec \frac{1}{2} (A + B) \sin \frac{1}{2} P$$

より P すなわち $A B$ 間の大圓距離が求められる。

(ii) 漸長緯度航法

ℓ_1 と ℓ_2 の漸長緯差を $d.m.p$ とすると、

$$d.m.p = \log \tan \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\ell_2}{2} \right) - \log \tan \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\ell_1}{2} \right)$$

針路 C_o は

$$C_o = \tan^{-1} \frac{D L}{d.m.p}$$

距離 Dist は

$$Dist = (\ell_1 - \ell_2) \sec C_o$$

で表わされる。

(4) 最適航路設定システム

(4-1) 緒言

(a) 目的

従来の船舶は大洋を航行する際に大圓航法または季節別による経験的最適航法によつてゐるといつても過言ではないが、船舶の安全性および運航経済性を一層向上させるためには、大洋中の波浪等の海象、気象を考慮した最適航路を設定する必要があり、このためには、海象、気象等の情報の収集解析および最適航路計算を含む最適航路設定システムを開発する必要がある。

上記の目的のためのシステムとしては、

(i) 陸上において情報収集、解析および最適航路計算を行なつて船舶に通報する場合(図 1.3.7)

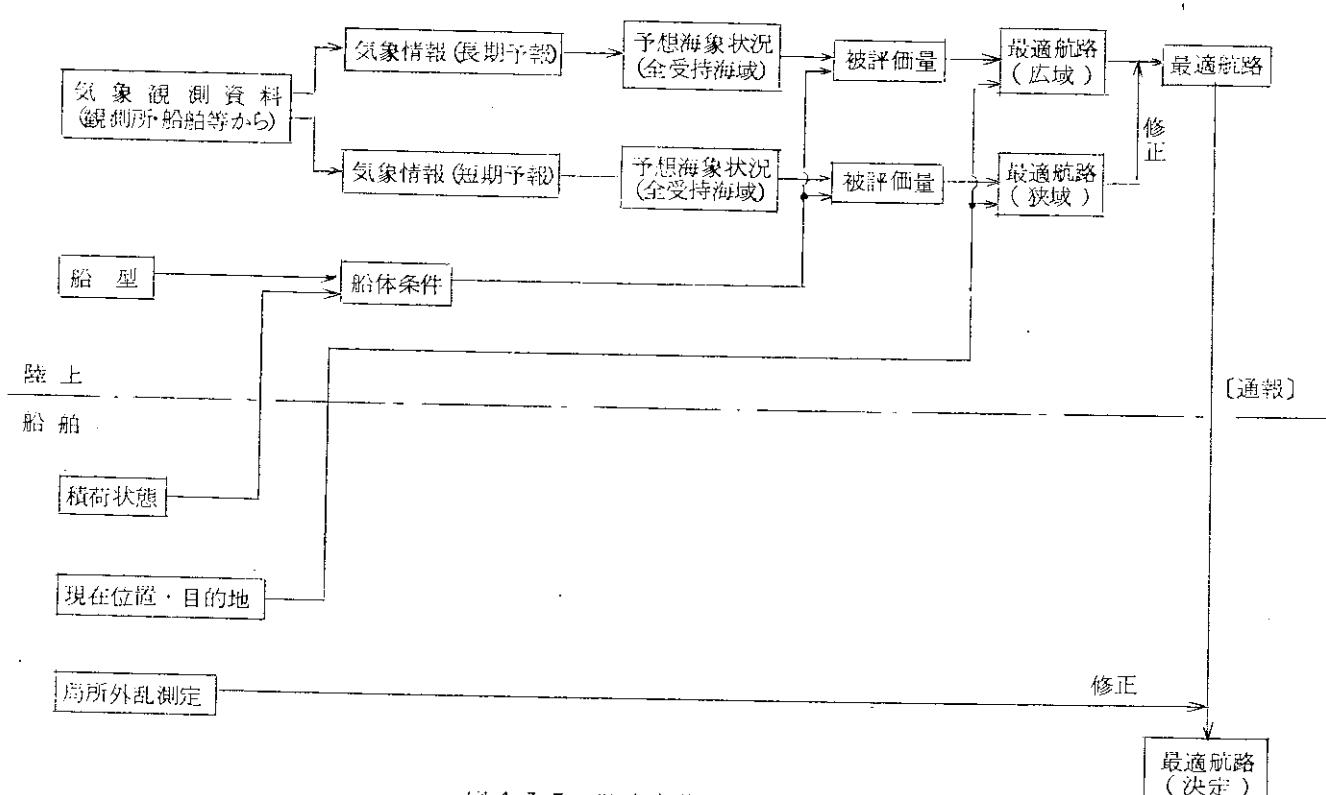


図 1.3.7 陸上主体システム

- (ii) 船舶において収集された情報、および陸上において収集され船舶に通報された情報を船舶において解析し、最適航路計算を行なう場合(図1.3.8)

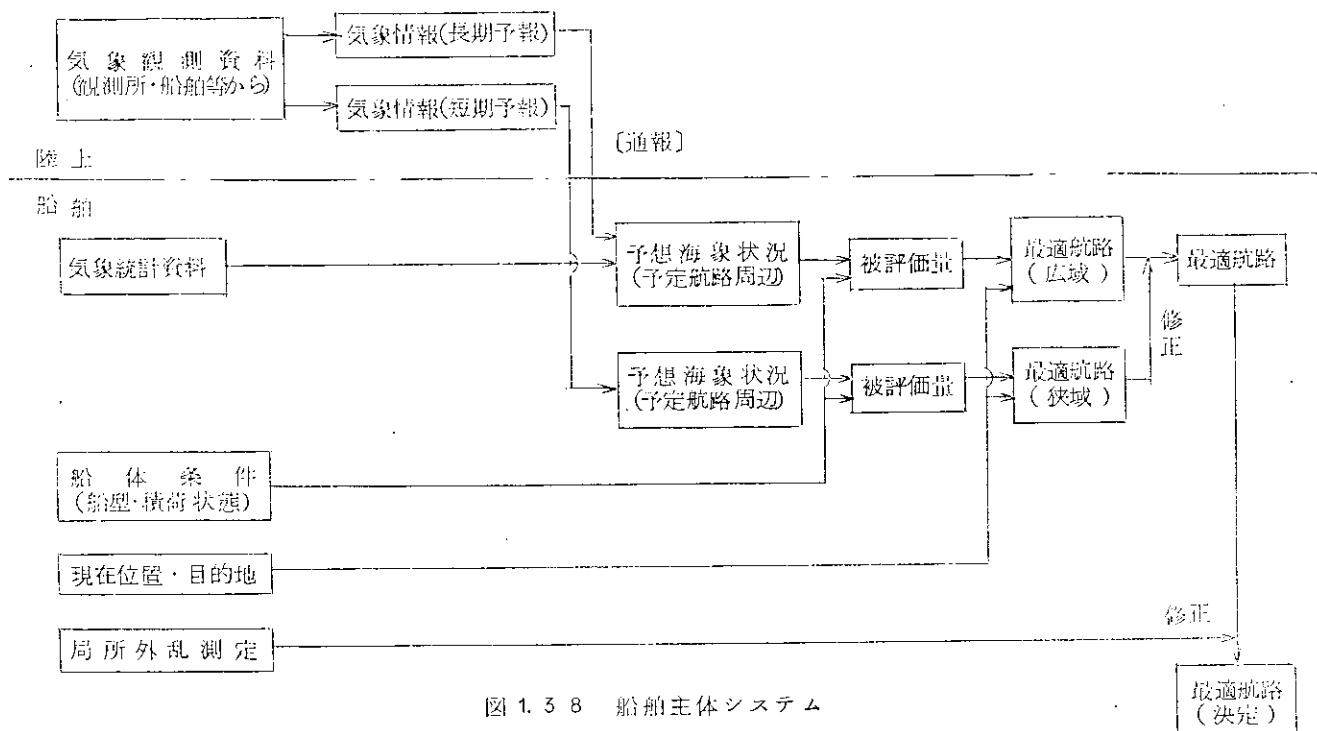


図1.3.8 船舶主体システム

とが考えられる。

元来、これらの作業を実施するためには高性能の計算機を必要とするので、米国などで実施されているのは図1.3.7のシステムである。日本においても当然陸上方式によるサービスが行なわれるようになることが予想されるが、船舶の高度集中制御方式の開発研究においては船舶に計算機を搭載することが考えられていて、船舶の計算機を使用した最適航路設定の可能性について調査することを目的とした。

(b) 基本方針

本研究開発を進めるに当つて基本方針を次のとおり定めた。

(i) 最適化の目標

最適航路設定の目的は気象、海象等の環境条件に対して船舶の安全性および運航経済性について船の運航者に適切な参考資料を提供することにある。そのような点から見ると従来の最適航法の考え方とは運航経済性のみを対象としているが、vollining, pitching等の船の運動に関し航路決定の資料を提供することは運航経済性と同様に重要である。殊にコンテナ輸送の拡大される今日においては特にしかりである。

以上の観点から本調査の中心を運動、すなわち船舶の安全性におくこととした。

(ii) 情報の確度と設定方式との関係

本システムによる航路設定はフローチャートに示すごとく

- a) 広域最適航路設定、すなわち気象海象の長期予測に基く全体の航路設定
- b) 狹域最適航路設定、すなわち短期間のより精度の高い予測に基く航路修正
- c) 局所的異状外力に対する回避航法、すなわち実際に遭遇した局所的異状外力に基づく衝撃等に対する回避よりなつている。ところがこれらの各々において環境条件としての気象、海象に関する情報の確度は大きく相違する。しかしして不確かな情報をもとにして徒らに複雑な計算を実行しても、努力の割に効果は期待し得ない。一方、運動を評価するためには以下の章に述べる如く相当の準備作業を必要とするとともに海象情報としてもかなり詳細な資料が必要である。したがつて広域最適航路設定において運動を評価対象とすることは理想であるが、現時点では狭域最適航路設定を目標にして作業を進める方が実際的であると考えられる。しかして広

域最適航路設定を行なう。このようにすれば運航経済性によつて定められた航路周辺において安全度の高い航路を選定することができる。

局所的異常外力に対する回避航法は実際の衝撃等を直接測定するのであるから以上二者とは別個に取扱う。

(iii) 情報源および船内処理の可能性

最適航路設定システムの中には気象、海象等の情報を測定、伝達、収集、解析の過程が含まれる。これらの過程の一部は当然陸上の設備、機関に依存しなければならない。一方船内のコンピュータの規模は無制限に大きいことは許されない。したがつて上記の過程において陸上と船内での処理範囲をどのように定めるのが船内での処理能力、経済性、効果の面で最適かを定める必要がある。この問題は本システム実現のための最も基本的な問題であるが、気象、海象計算のための種々の方法の検討をした上でないと方針を定めることは困難であるので、それらの方法を比較検討の上今後の研究過程の上で解決して行くこととした。

以上から本年度の調査の中心を船体運動による航路評価の可能性におくこととした。

(c) 船体運動を評価対象とする場合の問題点

以上のごとく rolling pitching 等の船体運動を評価の対象とすることを基本方針としたが、その場合の問題点は次のとおりである。

従来の運航経済性を目的とした最適航路設定においては以下の章に説明するごとく波浪中の船の応答は船速低下が使われる。しかしてこのような船速低下は海況に対する船速低下の経験曲線で代表される。また海況は波高によって代表される。このような波浪中の船速低下は解析的に取扱うにはあまりに現象が複雑すぎるので、むしろ上述の経験曲線を使用する方が実際的であろう。しかしながら船の rolling pitching 等の船の運動を問題にする場合には、これらの量が外力の周波数に依存するところが大きいので、外力としての波の周波数を無視しては評価ができない。

しかし外力としての波はきわめて不規則であつて、種々の波高、波長の波の合成されたものである。すなわち外力としての波の周波数を考慮する以上は、不規則波として把握する必要があり、換言すれば対象海面のパワースペクトルを情報として覚える必要がある。

一方船の応答の方も外力の周波数に対する応答の程度を知る必要がある。殊に航路決定の参考とするためには、さらに波の方向に関する応答の変化、換言すれば斜波中の船体運動についての情報を得る必要がある。しかるにこの問題は船舶工学の基本的な問題の一つであつて、現状においては十分に解明されているとはいえない。そこで本調査としては現状で利用し得る技術を駆使し、適当に近似化することによって現在の目的に適合させることが目標となる。

以上の問題について調査した結果を次章以下に示す。

(4-2) 最適航路設定について

最適航路設定の問題は最適性の評価の対象、および最適化の範囲によつて次のとおり分類される。

すなわち、最適性の評価対象の面から見ると、

- (a) 安全性能、船の動搖に対する船舶、乗員、積荷の安全性、すなわち（運動学的安全性）、および船体に加わる衝撃等に対する安全性、（強度的安全性）
- (b) 運航性能、目的地までの到達時間、燃料消費量、あるいは速力低下等で示される経済性に分類することができる。

また、最適化の範囲の面から見ると、

- (a) 広域最適航路、長期の気象、海象予報にもとづいた航路全体の最適化、（新しい予報にもとづく航行中の航路の全体の修正も含む）
- (b) 狹域最適航路、上記に対し、短期の精度の高い予報にもとづく、部分的な航路修正。

(c) 局所的異状海象にもとづく衝撃等に対する回避航法、実際の航行海面で遭遇する異状海象にもとづく衝撃等に対する回避運動に分類される。

従来の最適航路設定の手法は、このような観点から見ると以下にその概要を説明するごとく、主として運航性能を対象とした広域最適航路設定を目的としたものである。

ところでこのような広域最適航路設定においては長期の気象、海象予報が必要である。したがつて、このような予報が手軽に得難い現状においては船舶のコンピュータを利用したシステムとするよりも、陸上で処理するに適した課題である。もとより将来このような情報が船舶においても容易に入手し得ることになれば船舶のコンピュータの利用も十分に考え得るところである。

一方、運航者の立場から見れば上記の運航性能を対象とした広域最適航路設定の問題も重要であるが、日々の気象予報にもとづく航路周辺の海域での動搖の予測あるいは実際に遭遇している海面に対してどのように対処すべきか、すなわち前記の分類に従えば最適性の評価対象の面では(i)、最適化の範囲の面では(ii)、(iv)に属する問題も同様に重要な課題であり、この方面では陸上のサービスに依存するよりは船舶自身が自己のコンピュータを駆使して解決すべき問題であろう。

以上のように考えられるので本研究開発では上記の課題を取り上げ、昭和43年度の研究対象としては運動学的安全性を対象にした狭域最適航法を選んだわけである。

このような形に問題を限定すると狭域最適航路設定の方法はどのような方法がよいかということになる。特に安全性を対象とする場合には問題は必ずしも明確ではない。そこで前提条件として全体の航路予定は広域最適航路によつて与えられているとする。ところが前述のとおりこのような航路設定は運航性能（すなわち経済性）を目標として定められたものであり、安全性の面では十分の配慮はなされていない。そこでこのような航路周辺に適当な巾を取り、この巾の中で考え得る航路について安全性を評価するのである。

このような場合、この巾の中で考えた航路は経済性の面で最適ではない航路もあるが、安全性のより高い航路が存在するであろう。そして経済性を重視するか、安全性を重視するかは運航者の判断によることとなる。また安全性を重視したために航路を変更した場合にはその後の広域最適航路を新たに設定し直す必要がある。

以上の考え方においては全体の航路予定を広域最適航路によつて与えられるとしているが、たとえば大巡回航路を全体の航路予定としても同様である。

さて、このような比較的短期間の航路における安全性、特に運動学的安全性の評価の仕方であるが、各航路における平均動搖角、または最大動搖角等によつて表現することができるであろうが、むしろこのような短期間の航路についてでは船舶が航行することの予想される各海域について、どの方向に進めば船の動搖がどの程度になるかを示すにとどめ、どの航路がより安全かという判断は運航者の判断にまかせた方がよいようと思われる。これらの問題については今後なお検討する予定であるが、当面は以上の方針で進むこととした。

ところで、従来の運航性を対象とした広域最適航路設定がどのようになされているか、また最適化の方法についてどのような研究がなされているかは末尾の文献等に記載されているが、従来の最適航路設定の基本的な考え方を紹介するために重複を避けて、James等のReportに基き、U.S.Navy Hydrographic Officeによつて開発された手作業による方法を以下に略述する。また統計的最適航法ともいべき方法が本会、第91研究部会、第2分科会において提案されているのであわせて紹介しておく。

さて、U.S.Hydrographic Officeによつて開発された手法は等時間曲線を使用した最小時間航法である。等時間曲線とは一定時間内に船が到達できる最大距離の軌跡である。

この等時間曲線は次のようにして作られる。すなわち船の現在地点を中心にして放射線状の針路を想定する。次にこのような想定針路上で一定時間内に航走する距離を等距離図および船の性能曲線より求め、これを直線する。

この操作をすべての想定針路に対して行ない、得られた点を結ぶと等時間曲線が得られる。

時間の単位として一日を選べば必要な予想波浪図は上記においては第1日目の予想波浪図である。次に第一日目の等時間曲線上の各点において同様の操作を第二日目以降について行ない、各点に対する等時間曲線を作つて行けばよいが、このようにすると日数とともに作図の量が幾何級数的に増大するので、第二日目以降については近似的にその前日の等時間曲線に法線を立て、この法線上に航走距離を取る。以上の作業を航路の全航路について行ない、これらより到達時間最小の航路を選び出せばよいわけであるが、現在の気象予報の精度からいつて長期予報の信頼度は低いので、以上の作業を第三日目まで行ない、それらの航路の内残航程が最小のものを最適航路とするのである。

ここに述べた手法を図表的に示すと図1.39のとおりである。

この方法で必要なものは以上の説明でもわかるとおり、予想波浪図と船の性能曲線である。しかして船の性能曲線はその一例を図1.40に示すとき船速と波高との経験的関係を波（または風）の方向に対する船の針路をパラメータとして表わしたものを使用する。この経験曲線は多段の船の運航の実績を整理したものが使われる。

このような方法は手作業によるため、手数がかかる。そこでコンピュータを使用した最適化の問題が検討されている。たとえば、上述の手作業をそのままコンピュータにおきかえたもの、あるいはより数学的な最適化問題とし取扱つたものがある。

ところで、これらの広域最適航路設定の問題においては特に長期気象予報の精度が問題になる。予報精度が十分高くないと、季節別の気象統計をもとにした統計的な最適航路設定を考えるのも一つの方法である。このような方法は従来運航者が経験的に定めていた季節別の経験的最適航路をより合理的に示すものといえる。本会、第9.1研究研究部会、第2分科会の報告「海象、気象と船舶の速度低下との関係に関する統計調査」に示唆されている方法はこのような意味で有效な方法である。

すなわち、本会の第8.0研究部会では船舶からの気象通報に基いて北太平洋の風と波に関する統計的調査を、1954～1963について行ない、その結果を図1.4.1に示すとき各月別の風配図としてまとめている。一方第9.1研究部会では同様の資料に基いて船速と海象、気象との関係を調査している。図1.4.2はその一例である。

本例はShip Group 19のデータである。Ship Groupは船種、船の長さ、船速によつて分類され、全部で34のGroupに分けられている。そして海象、気象を風速によつて代表させ、これに対する船速の平均値を船に対する風の相対的方向をパラメータとして示している。

この2種のデータを使えば次に示す方法によつて統計的最適航路を定めることができるわけである。すなわち、図1.4.1によれば月別的小海区ごとの風向別風速頻度分布がわかる。これは図1.4.3に示すとく12方位の各方位（たとえば方向 i ）について各風力階級（たとえば階級 j ）の風速の発生頻度 f_{ij} が、その海区のその月の全方向、全風速の発現数を100%としたときの%として示してある。したがつてこの海区を航行する船舶の針路を与えると、ある特定の方向 i からの風がHeadか、Bowか、Beamか、Quarterか、Followかが定まると、その方向からくるそれぞれの階級（たとえば階級 j ）の風に対しては図1.4.2の速度低下曲線より平均速度 v_{ij} がわかる。ゆえにこの海区を k とすると、この船の船速の期待値は次のようになる。

$$E[v_k] = \sum f_{ij} v_{ij}$$

ただし、 f_{ij} は i の方向から j の強さで吹く風の発生頻度の%

v_{ij} は i の方向から j の強さで吹く風を受ける時の船の平均速度

このようにして各海区における船速の期待値が船の針路に対する関数として定まる。結局船速は位置と針路の関数として定まるから適当な最適化の手法によつて航路設定を行ない得るわけである。

以上述べたごとく本開発研究では安全性を対象とした狭域最適航路設定を目標としたので、広域最適航路設定の場

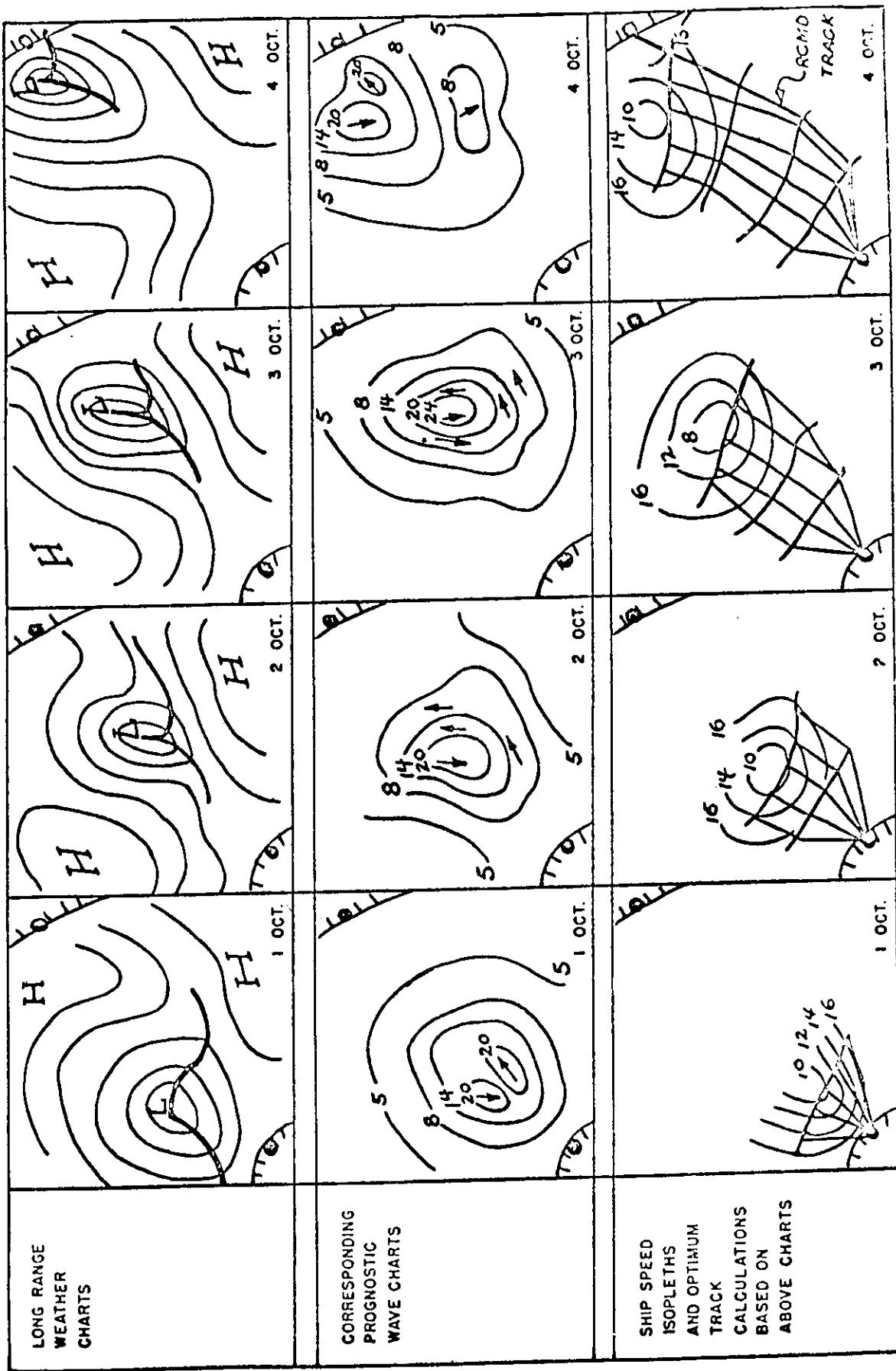


FIG. 1.39 EXAMPLE OF OPTIMUM TRACK CALCULATION

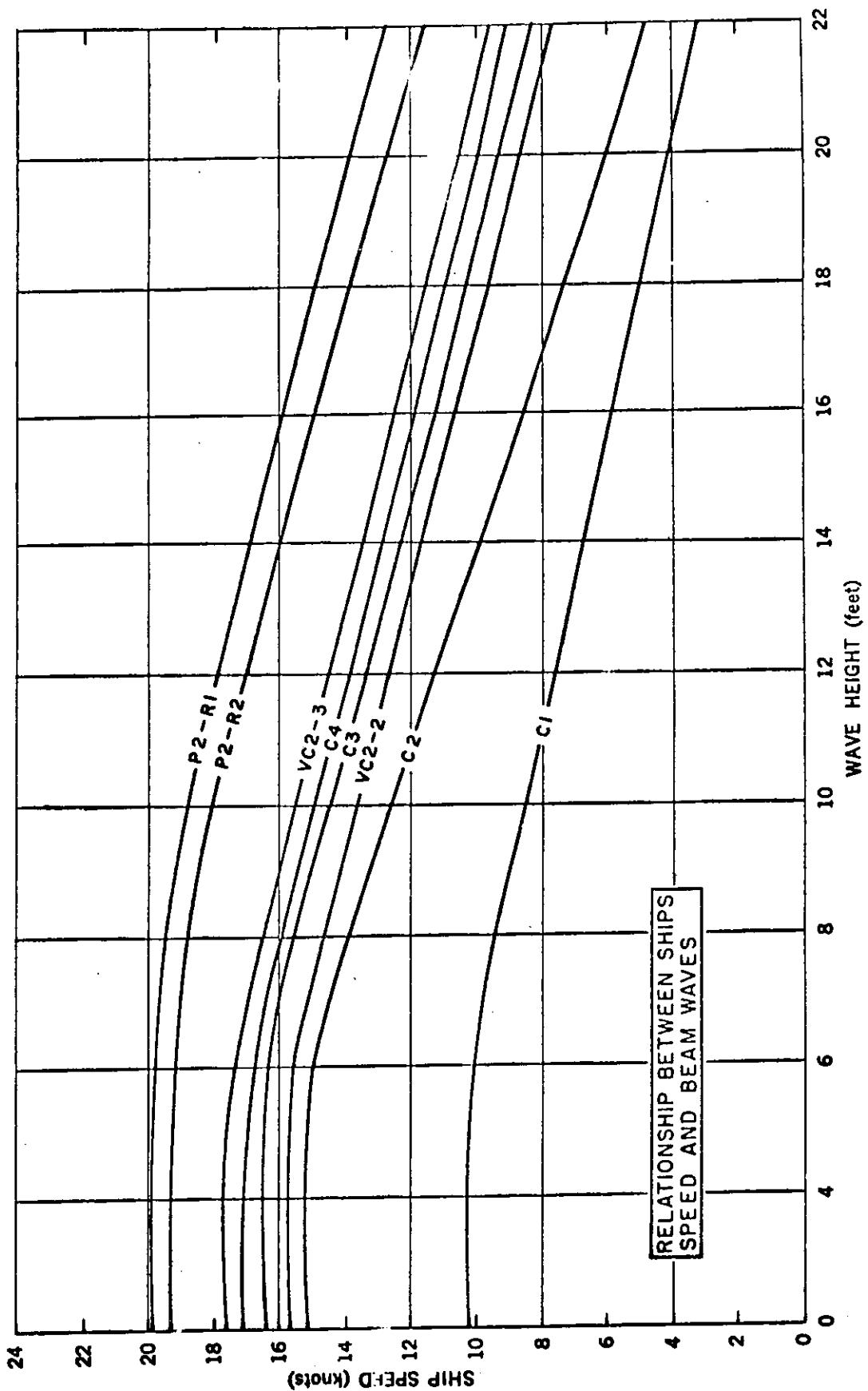
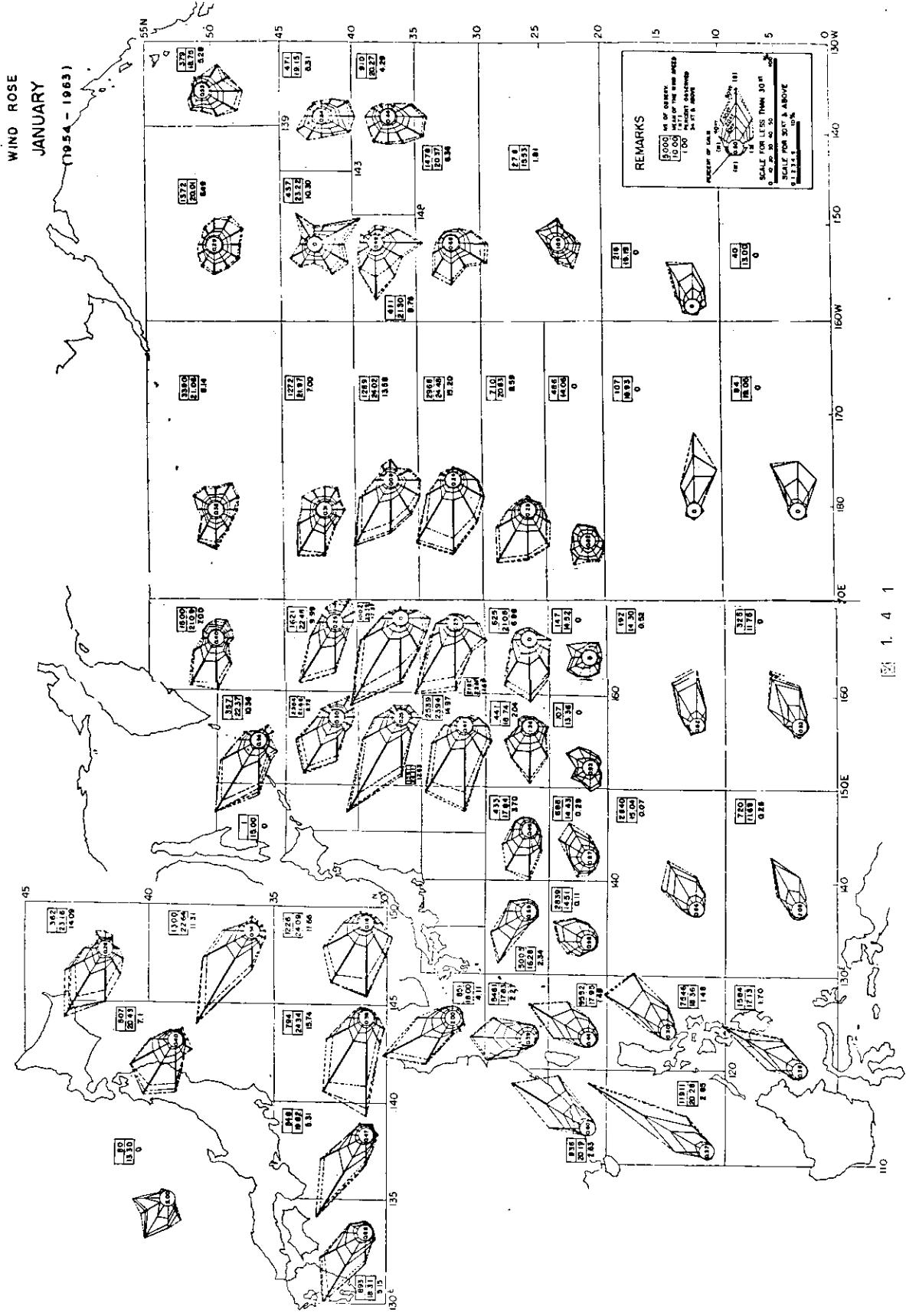


图 1.4.0

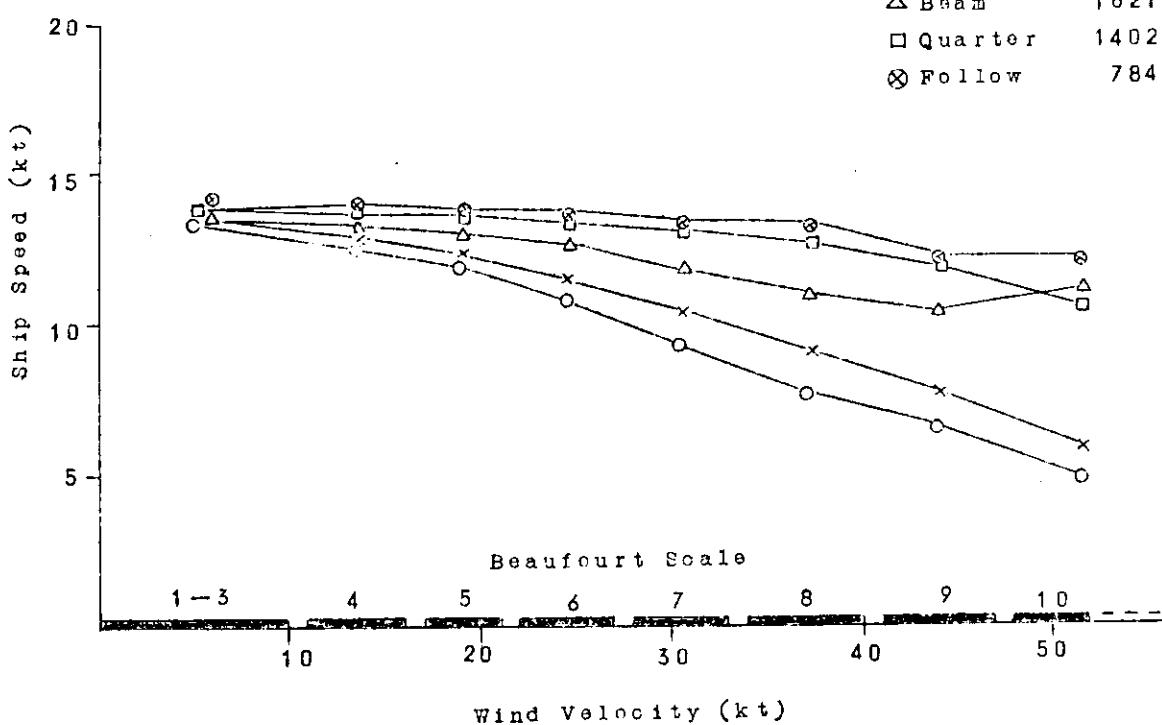


[Fig. 1. 4 1]

Ship Group 19

Pacific
All Course

Wind Dir.	No. of Obs.
○ Head	8872
× Bow	15272
△ Beam	16218
□ Quarter	14026
⊗ Follow	7849



South Course
East Bound

Wind Dir.	No. of Obs.
○ Head	2986
× Bow	3625
△ Beam	1839
□ Quarter	1908
⊗ Follow	849

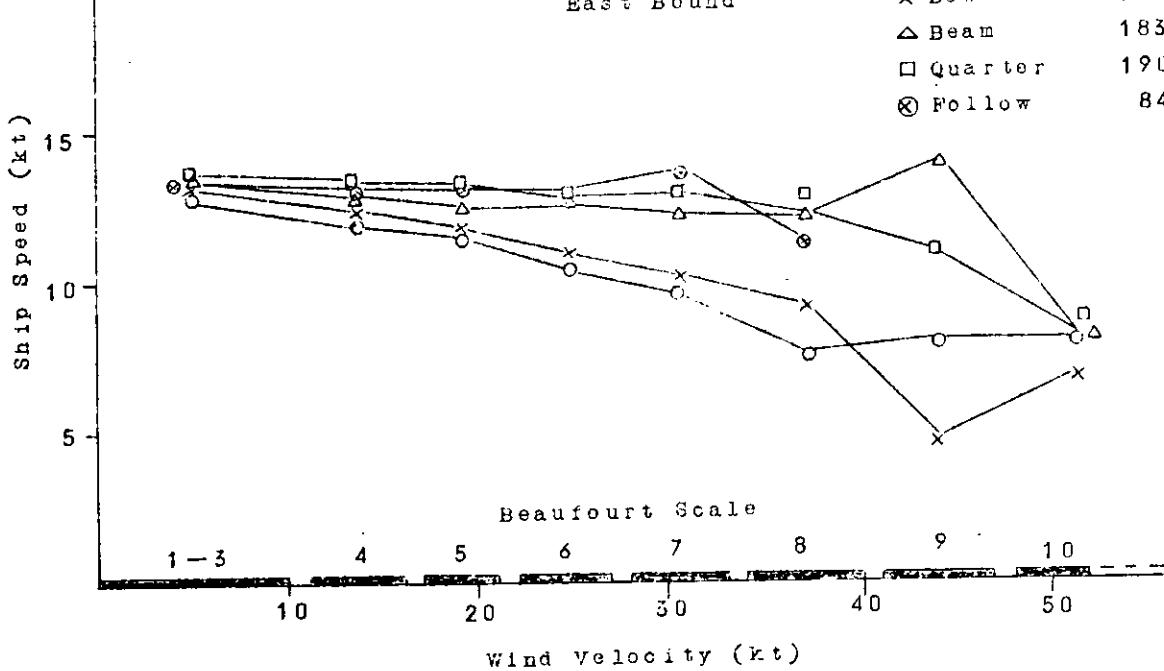


Fig. 1.4.2 Wind Speed vs Ship Mean Speed

Small Sea Zone k

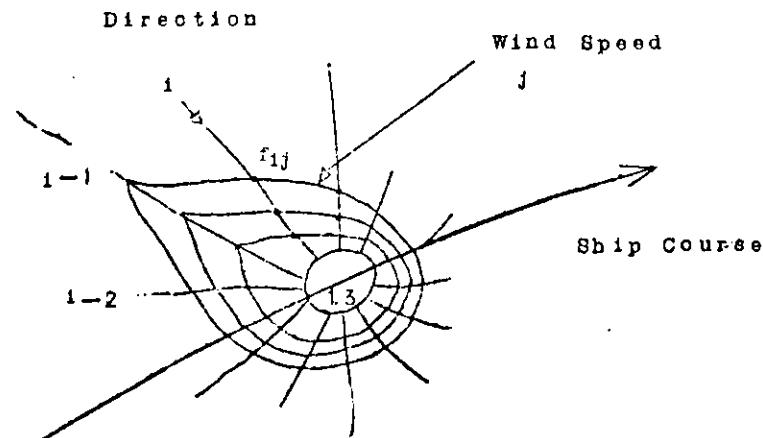


図 1.4.3. Wind Rose at Small Sea Zone

合に必要な最適化の手法、特に数学的なプログラム化をいう問題は今後の検討課題とし、当面は安全性のうち運動学的安全性評価の基本となる波のパワースペクトル推定、および船の運動に関する周波数応答特性について検討を行なつた。

また安全性のうち強度的安全性についても今後の検討課題である。

参考文献

- 1) Transoceanic Routing of ships Based upon Meteorological Forecast. by Thomas A.King SNAME T.R.B. NO4-1.
- 2) Application of wave Forecasts of Marine Navigation by R.W.James. Hydrodynamic office Special Report No.1. July 1957.
- 3) Evaluation of U.S. Hydrographic Office Ship Routing Program. by R.W. James, & G.L. Hanssen. U.S. Navy Hydrographic Office T.R-No. 53 July 1958(1966 Reprint)
- 4) General Notes on Ship Routing. by R.W.James. [Ship Behavior at Sea] Summer Seminar 1958.
- 5) Wave Climatology as an aid to Ship Routing part II Indian Ocean and Indonesian Waters by Patterson B.Land & Robert Valitski. U.S.N.Oceanographic Office T.R. No. 192 Jan. 1967.
- 6) Numerical methods for determining Optimum Ship Routes. by F.D.Faulkner. J. of Inst. Navigation Vol 10. No. 4 Winter 1963~1964
- 7) Minimum-Time Ship Routing. by W.H.Bleick. & F.D.Faulkner J. of Applied Meteorology Vol 4. April 1965.
- 8) A Method for the Exact Calculation of Sea and Air Minimum Time Tracks by Means of a Digital Electronic Programmed Computer. by Edger Rosser, Gerhard Ranike.

9) 海図作業による最短時間航路の設定について

長谷川健二、笠原包道、福地章、堺忠彦

海技大学研究報告 A6.1.1 1968

10) 変分法応用による最短時間航路の設定について

長谷川健二、笠原包道、福地章、堺忠彦

海技大学研究報告 A6.1.1 1968

11) 最適航法について

杉崎昭生、航海第20号 1964

12) 最適航法の基礎研究 杉崎昭生

日本航海学会誌、第34号、35号、36号

13) 北太平洋の風と波（1954～1963）

日本造船研究協会、昭和41年3月1日

14) 海象、気象と船体性能との関連に関する調査

研究報告書〔海象気象と船舶の速度低下との関係に関する統計調査〕

日本造船研究協会、第9.1部会第2分科会報告 研究資料A5.7-2 昭和42年3月

15) An Automated System for Optimum Ship Routing.

by W.Marks T.R.Goodman, W.J.Pierson L.J.Tick L.A.Vassilopoulos.

SNAME Advance Copy 1968.

(4-3) 波浪予報

(a) 波浪予報法

最適航路の選定には波浪を除いて考へることはできない。自然が船に加える試験としては風圧以上に波浪による力は影響が大きい。古くは帆船時代に風、海流の利用に遅れか、汽船の出現により機械力に頼り、自然の力を帆船ほどには感じなくなつた。その後機関出力の増大化、船舶の大型化、経済性の向上追求と時代の進展とともに、自然の猛威を避け、あるいは自然の力を利用しようとする方向に向いてきた。他方、海洋学の研究の進歩に伴い波浪を予測し、その結果を利用して、より安全に、より能率のよい船舶運航を考えるようになつた。

波の現象は非常に複雑であり、精確に記述することは長い間未解決であつたが、第二次大戦を契機として、波浪の研究は飛躍的に進み、実用的にも利用しうるようになつた。その嚆矢としては Sverdrup-Munk による¹⁾無次元量を利用した予報法²⁾がある。これは吹送距離、波高などを組み合わせて無次元化し、それらの量の間に非常に強い相関関係を見出だし、風速、吹送距離などがわかれば波高や周期が推測できるようにしたもので、一時は各方面で研究された。その図表をさらに使いやすいうように改良して Sverdrup, Munk, Bretschneider 略して SMB 法として知られている方法である。

波の現象は単に一つの波高、周期などで表わしうるほど簡単なものではなく、種々な周波数、振幅、位相、進行方向の波が重なつてできたものであり、ランダムな量としてパワー・スペクトルでもつて表示しようとする考えが起り、スペクトルを推定して、波の諸性質を解明する研究が行なわれ、予報法としてもスペクトルから波を予測しようとする Pierson, Voumaun, James 路して P N J 法²⁾が世に出た。波の諸性質を細かく表わすには、スペクトルによる方法が優れているが、予報する手順としてはどうしても複雑になつてくるきらいがある。

波を予報するということは、与えられた気象条件、すなわち主として風向、風速の分布よりどのように成長し、また減衰するかを知ることである。しかし、発達消滅の過程よりも、定常状態の波を知ることが先決であり、效

多くの成熟波のスペクトルが発表された。Phillipsによれば波のスペクトルの平衡領域の型は ω^{-5} に比例する。³⁾ Pierson-Moskowitz の提案せる成熟波のスペクトルは次の形で表わされる。

$$S_{\infty}(\omega) = \frac{8.10 \times 10^{-3} g^2}{\omega^5} \exp \left\{ -0.74 \left(\frac{g}{u\omega} \right)^4 \right\} \quad \dots \dots \dots \quad (1.1)$$

ただし、 g ……重力の加速

ω …… $2\pi f$

u ……水面上 $19.5 m$ の高さで測つた風速

成長しきつた波ということは、大気から海へ入るエネルギーと波が碎けたり、分子間の摩擦などで失なわれるエネルギーとが平衡を保つ状態と考えられるが、そのような状態が本当に海上に存在するか、どうかはまだ意見が統一されていない。しかし経験的にはある風速のもとでは、ほぼ成長しきつたと考えうる海面ができるが、それを成熟波と考える。そのスペクトルは式(1.1)で表わされるように、風速 u が与えられると、角周波数 ω のみの関数となつて直ちに決つてくる。

この状態になつた時の有義波高 H は、

$$H = 2.12 \times 10^{-2} u^2 \quad \dots \dots \dots \quad (1.2)$$

ただし、 H ……有義波高(m)

u ……風速(m/sec)

で表わすことができる。よつて波が相当成長していると考えられる状態では、波高としては一応の目安として式(1.2)の値でもつて置きかえることができる。実際の海上ではどのくらいの距離、あるいは時間、風が吹き続けると、成熟波と考えられる状態になるかは人によつて意見を異にするが、海上観測の結果より Darbyshire は距離で 200 漉、時間で 15 時間程度吹けば成熟波になると発表している。PNJ 法によればこの状態になるまでには 500 漉、 36 時間くらいかかることになるが、その差はその地点で風が吹き始めた時の海面の初期条件によつて異なるものと考えることができる。

式(1.1)で表わされる成熟波のスペクトルの形を図 1.4.4 に示す。図中のパラメータは風速が増大するにつれてスペクトルのピークは周波数の低い方へ移動し、波長の大きな波が増加していくことがある。

成熟波の状態がわかつても、その経過がわからぬ場合は波浪の予報はできない。波がどのように成長して行くかについては多くの説があつたが、波浪の発生・成長過程を十分説明するような理論がなかつたために、不明確な点が多かつた。Phillips の大気と海との共振による発生理論、および Miles の波の位相速度に等しい風速の高さ、すなわち整合層の状態によつて波の成長を考える不安定機構理論の発表によつて、波浪の成長はよく説明されるようになつた。

上の二つの説が両方相補つて波が発生し、成長すると考えるのが妥当である。今一つだけの周波数を考えて、波のスペクトルの全体の中で、その周波数成分がどのように成長して行くかを考える。共振理論によつてエネルギーが入る項を $A(f)$ 、不安定機構による項を $B(f)$ で表わすと、ある周波数成分のスペクトルの成長率、

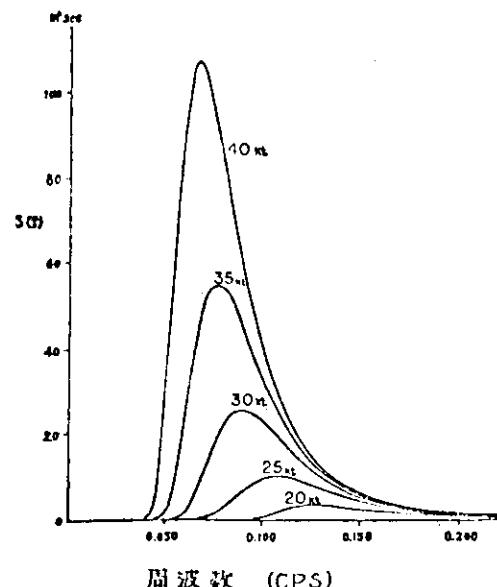


図 1.4.4 成熟波のスペクトル

$$\frac{ds(f)}{dt} = A(f) + B(f) s(f) \quad \dots \dots \dots \quad (1.3)$$

で近似することができる。今その周波数 f のエネルギーが零であつたとすると、右辺の第二項は零である、⁴⁾

$$\frac{ds(f)}{dt} = A(f) \quad \dots \dots \dots \quad (1.4)$$

となつて、その成分波は時間とともに一次的に成長していくことになる。このことは実際の観測ともよく合致する。一度その成分波 $s(f)$ がある値をもつと、式(1.3)右辺の第二項が効いてきて $s(f)$ は指数関数的に成長することになつて、波は急速に発達する。これはエネルギーの供給面のみを考えたものであつて、波のエネルギーは分子間の摩擦、碎け波による消散などのエネルギーの支出がある。この大きさを

$$[A(f) + B(f) s(f)] \left[\frac{s(f)}{s_\infty(f)} \right]^2 \quad \dots \dots \dots \quad (1.5)$$

で近似すると、その周波数成分波としては式(1.3)より式(1.5)を減じたもの。

$$\frac{ds(f)}{dt} = [A(f) + B(f) s(f)] \left[1 - \left\{ \frac{s(f)}{s_\infty(f)} \right\}^2 \right] \quad \dots \dots \dots \quad (1.6)$$

で近似することができる。ここで $s_\infty(f)$ は式(1.1)で表わされる成熟波のスペクトルの値である。こうしてある周波数の成分は最初時間について一次的に成長し、その後指数関数的に発達、その後エネルギーの消散が増加していくので成長の速度はゆるくなり、最後にはその風力における成熟波スペクトルの値に漸々に近づいて定常状態、すなわち成長しきる過程が説明しうる。

式(1.6)において $A(f)$ および $B(f)$ が既知であつた場合は、式(1.6)を解くことにより、各周波数成分波がどのように成長していくかを知る式を得る。すなわち波のスペクトルがある風力のもとに、どのように変化していくかがわかる。式(1.1)で表わされる成熟波のスペクトルの形がわかつても、その途中においてどのように波のスペクトルが変つて行くのかを知ることはできなかつた。PNJ法における一つの問題点もそこにある。スペクトル全体の量としてエネルギーが推定できても、その周波数についてのエネルギー分布がはつきりしないから、波の状況が正確に表現できたとはいえない。

式(1.6)を解くと

$$s(f, t) = \frac{A \{ e \times p \{ B(t + t_0) \} - 1 \}}{B} \left[1 + \left\{ \frac{A \{ e \times p \{ B(t + t_0) \} - 1 \}}{B s_\infty} \right\}^{z-\frac{1}{2}} \right] \quad \dots \dots \dots \quad (1.7)$$

を得る。ただし、

$$t_0 = \frac{1}{B} \ln \left[1 + \frac{B s_0}{A \{ 1 + (\frac{s_0}{s_\infty})^2 \}^{\frac{1}{2}}} \right] \quad \dots \dots \dots \quad (1.8)$$

s_0 スペクトルの初期値

A および B については大気の乱流等多くの実験値、観測値より決定する。 A および B は風速 (B については摩擦速度) の関数であるから、風速と時間が与えられると波のスペクトルの成長状態を得ることができる。

式(1.7)を用いて、風速 1.5 m/sec の風が吹いた時に全く波のない海が、時間とともにどのようなスペクトルを持つ、成長して行つたかを示すのが図1.4.5である。波のない海に風が吹くと小さな波が発生し成長する。3時間後には図1.4.5の右端のようなスペクトルを示す。ただし、周波数の高い方はすでに成長しきつており、さして重要でないので省略してある。さらに風が吹きつけ除々に周波数の低い波、すなわち波長の長い波が成長してきて、 0.14 sec のあたりに頂をもつスペクトルになり、以下順に時間とともに低周波域の波が増加して、ほぼ1.8時間を経過して成熟波のスペクトルのピークの位置に達し、さらに大きな波が増し、ほぼ一日半

を経て 15 m/sec の風についても成長しきることになる。

同じ風力の風が吹きつづけて定常状態に達した時、風上側から風下側に行くと、風上側よりも風下側は大きな波がたつている。図 1.4.5 における時間の代りに吹送距離をとつて距離とともに風下に行くとどのように波が成長するかを示したのが図 1.4.6 である。段桿 300 里で成熟波スペクトルのピークを越え、700 里以上の吹送距離をもつて、 15 m/sec の成熟波のスペクトルになる。

波高は与えられたスペクトルからもちろん推定しうる。数多くの風速について、時間および距離についてスペクトルの成長を計算し、それより有義波高を得たものが図 1.4.7、図 1.4.8 である。

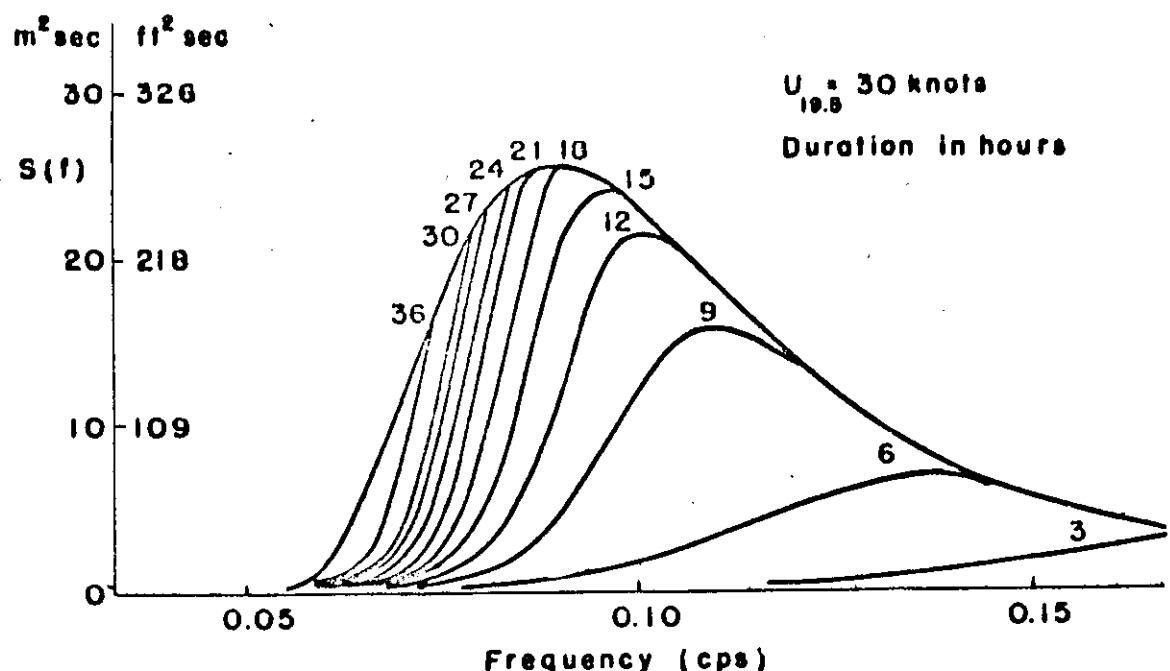


図 1.4.5 風速 30 ノットの風力での吹続時間によるスペクトル成長

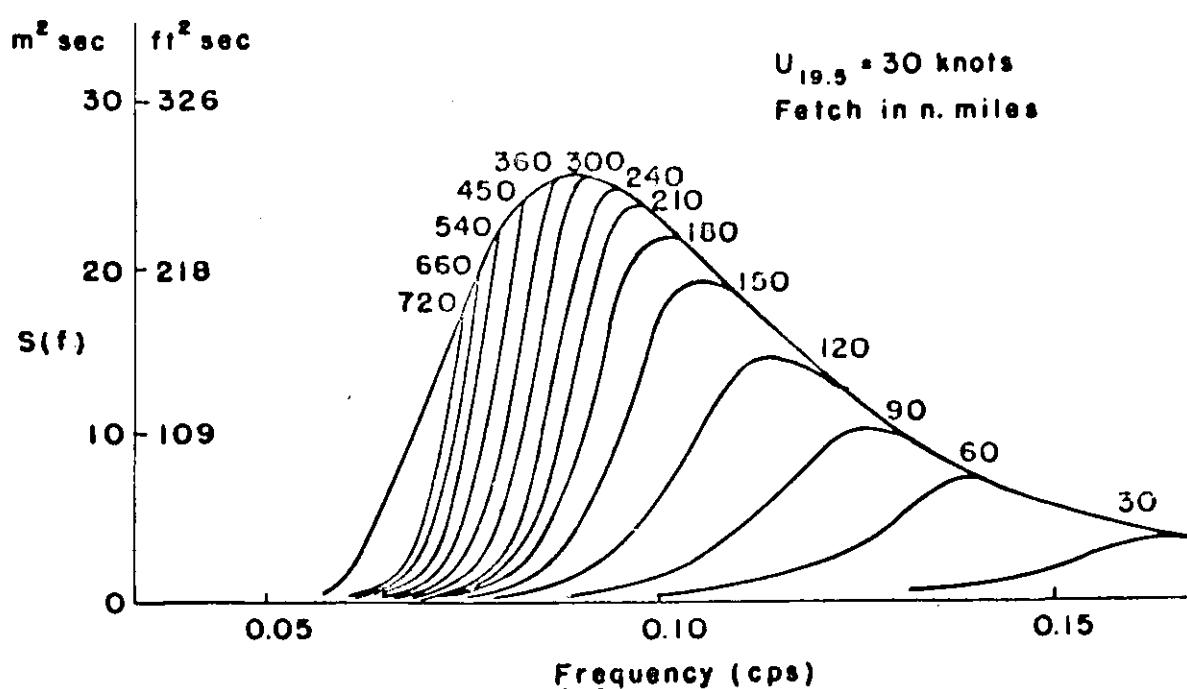


図 1.4.6 風速 30 ノットの風力での吹送距離によるスペクトル成長

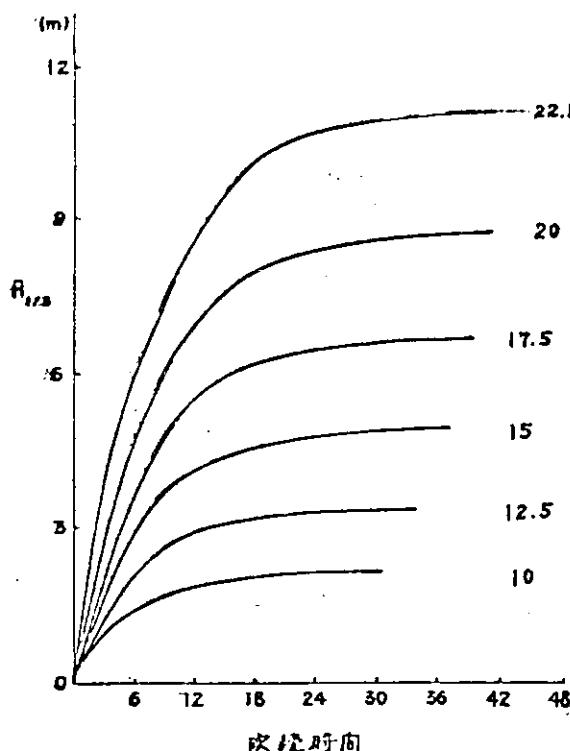


図 1.47 吹送時間による有義波高の成長
数字は風速(m/sec)

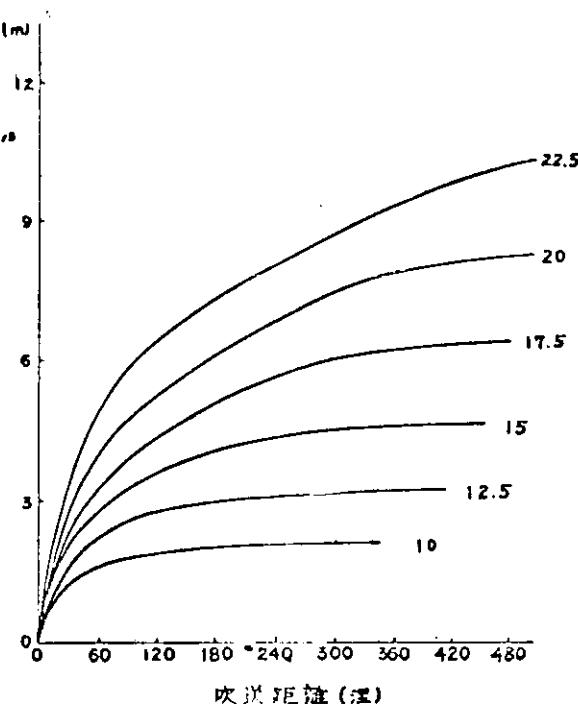


図 1.48 吹送距離による有義波高の成長
数字は風速(m/sec)

図 1.45 および図 1.46 では、成熟しきるまでには相当の時間および風場内の吹送距離を要しているが、波高を考えるだけの図 1.47、図 1.48 ではかなり早く成長曲線は横になる。この点のみ考えると波はもう成長しきつたと観測する距離および時間は小さくなる。海上に浮ぶ船に影響を及ぼす波浪を考えるには、船に大きな影響を与えるのはどんな波かを知るべきである。波高が同じ程度であつてもスペクトルの内容において差があり、その差が船に大きな力の差となつて現われてくる時には同一視するべきではない。

最適航法の評価の対象としては航海時間最小、船体動揺最小、燃料消費最小等いろいろなものが考えられるが、その何れをとつても波と船との相互関係が重要であつて、船に影響を及ぼす波を考えるには、そのスペクトル内容こそが大切である。時には波高が高い時よりも、波高が低くなつても、船に大きな影響力を及ぼす成分波が卓越している時に、海難事故が発生していることに注意すべきである。図 1.47 において波高から見れば成熟波に近い状態であつても、図 1.45 において明らかなように、スペクトル的には必ずしも成長しきつたとはいひ得ず、しかも実際問題としては、その満たされていない部分のエネルギーが船に関係が深い時が多い。

先にも述べたように Darby shire は 200 哩の吹送距離、吹送時間だと 15 時間程度で海面は成長しきつた状態になると発表しているし、経験上からも前述の吹送時間、吹送距離よりも小さな値で成熟しきつた状態になるようである。これは全く波のない状態から共振現象で除々に成長して小さな値のスペクトルができる時間が、実際の海面では省略されるからであると考えられる。べた凧ぎの海面であつても、それは人間の感覚であつて、海は決して静止することはない。この初期状態が図 1.45 あるいは図 1.46 では全くの無であり、その状態から実際の凧ぎといわれる海面状態になるまでの時間の差が成長が遅いという感じになる。種のようによく小さな波はたしかに凧の時には存在しない。しかしそのように周波数の高い領域の波は零の状態からでも低周波領域に比し、速い成長を示すので、全体のスペクトル成長を考える時にはそれほど影響を及ぼさない。

この零でない初期値として図 1.49 のようなホワイトを考え、このような状態からではどのように波のスペクトルが成長するかを計算したのが図 1.49 の形で、風速は図 1.45 と同じ $15 m/sec$ である。この両図を比較すれば明らかのように、たとえ僅かな値であつても初期に波が存在していると成熟しきるまでの時間は非常に少なくなる。図 1.49 では 15 時間も経過すると、ほぼ成長しきつたと考えてもよい。

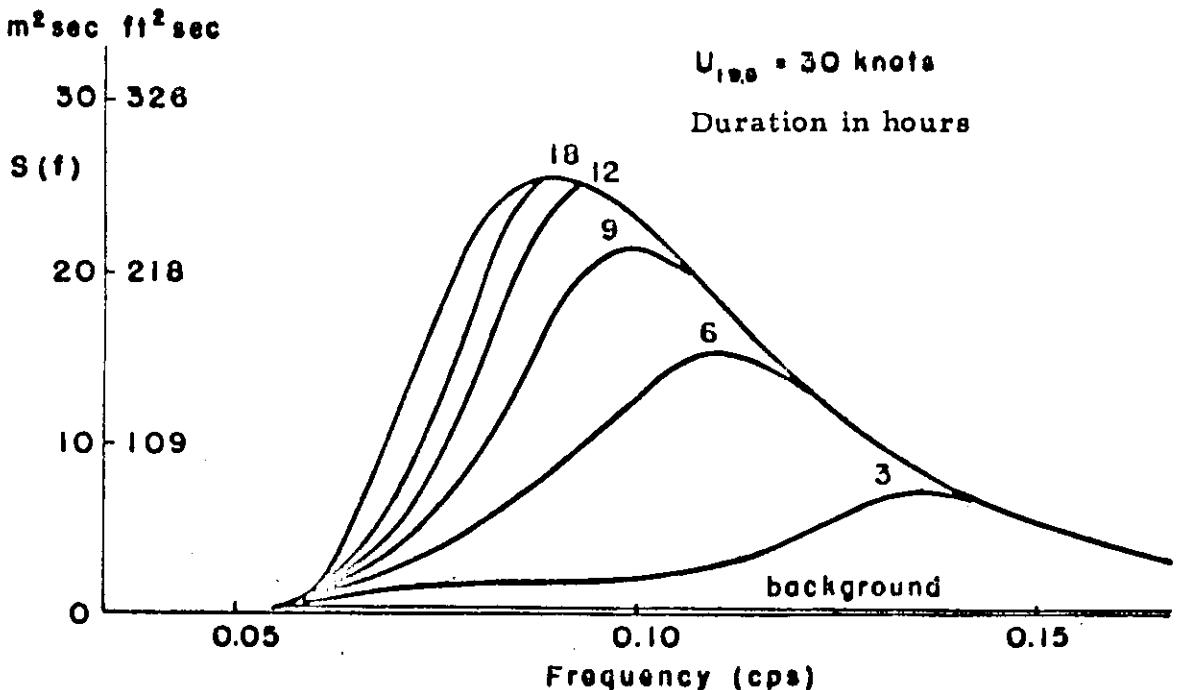


図 1.4.9 バックグラウンドを考慮した時の吹続時間によるスペクトル成長

実際の海では常になんらかのエネルギーが存在していて全く波がないという想像上の海面は意味をなさないと思われる。この初期に存在する波、あるいは海口の狭い湾内でできる波ではその海口から侵入する波は、ちょうど“核”のような役割をなしてその後の波の成長を左右する。

(b) 予報計算

良い海面にわたつて風場、すなわち数多くの点の風向、風速が時間的に連続して与えられたならば、予報地點について前に述べた方法でスペクトルの成長を計算すれば、波高等の量が予報できる。波は連続した周波数領域のスペクトルで表わすべきであるが、予報する際には、いくつかの周波数帯に分けて、その帯域の代表値をもつて表わすのが実際的である。波のスペクトルは周波数の高い方は早く成長しきるので、そのような帯域では成熟波のスペクトルをもつて表わしても大きな差はないので实用上は計算が簡略になる。0.15 cps 以上の周波数帯域では、そのように扱つても問題はない。それ以外の周波数についても同じ帯域幅をとる必要はなく、低周波領域が重要でもあり、また勾配もきついので細かくする。このようにして周波数の関数としての一元スペクトルが得られる。

波は風下の方へのみ進んで行くものではない。その伝播方向は風下側を主方向として、それより士 90° 方向まで伝わつて行くものであつて、スペクトルは方向の関数でもある。式(1.7)においても $A(f)$ および $B(f)$ が方向の関数で表わされるべきものであるが、その場合は計算が非常にわざらわしくなるので、一般的には、一次元、周波数のみの関数として扱い、一次元のスペクトルを得た後に、方向性の関数をかけて二次元に開く方法がとられる。

すなわち、

$$S(\omega, \theta) = S(\omega) F(\theta) \dots \dots \dots \dots \dots \dots \quad (1.9)$$

でもつて表わされ、方向性関係 $F(\theta)$ として

$$(I) \frac{2}{\pi} \cos^2 \theta, \quad -\frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$$

$$(II) \frac{8}{3\pi} \cos^4 \theta, \quad -\frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$$

などがある。また航空機よりの立体写真を使って得た結果としては Cote' 等式、

$$(III) \frac{1}{\pi} \left[1 + \left(0.50 + 0.82 e^{-\frac{1}{2}(\frac{\omega u^4}{g})} \right) \cos 2\theta \right. \\ \left. + 0.32 e^{-\frac{1}{2}(\frac{\omega u^4}{g})} \cos 4\theta \right], \quad -\frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$$

を得ている。ここで θ は風向と波が伝播して行く方向とのなす角である。また $|\theta| > \frac{\pi}{2}$ では $F(\theta) = 0$ である。

二次元スペクトルが得られると、各方向に沿つて波はその周波数の群速度で伝播して行く。群速度は位相速度の半分であるから、その周波数がわかっているので容易に求まる。こうして風浪として発生した波はうねりとなつて他の地点に伝播して行くことになる。

電子計算機を使用して波浪予報をするには、図表を使つて行なう予報法と異なり、広い海域を対象により細かな計算をすることが可能になる。予報しようとする海域に数多くの格子点を設け、その格子点について計算する。格子点は適当な間隔で、気象情報の入力、すなわち風向、風速もこの格子点について与えられるものとする。

図 1.5 にこのスペクトルによる波浪計算のフロー・チャートを示す。このフロー・チャートは上記の格子点毎の風向、風速はすでに予報されているものとしてその入力の読み取りから出発する。

最初は予報海域には全く波がない。もしこのままであると、現実の波に近づくまで長い計算時間を必要とするので $T = 0$ のとき、すなわち第一回目はその風力で成長しきつた波があるとして計算して、それを初期状態としてもよいだろう。その計算を全格子点について行ない、それから実際の計算に入る。まず一つ格子点を選び、その時の風向、風速よりみて、前に計算した初期状態の波が成長しうるかどうか検討する。もしその時にその格子点に存在すると考えられる波が、その時の風に対する成熟波よりも大きければ成長の余地はないのであつて、計算する必要はない。風が強くてその場所の波がまだ成長しうる可能性がある時はスペクトルの成長を各周波数について計算する。この際気象要素が 3 時間なり、6 時間ごとしか入らないであろうから、その間は同じ風が吹くものとして扱うことになり、したがつてその時間の成長ということになる。スペクトルが計算できると有義波高も計算できるし、有義周期も知ることができる。このようにしてできたスペクトルは一次元のものであつて、これを二次元のものに分ける必要がある。二次元スペクトルを得ると、各々の方向に向つてスペクトルを構成する各成分波が個別の伝播速度でエネルギーを移動させる。他の格子点に伝播した波は次の計算のときの、その他の初期値として使われることになる。

この伝播の途中において、風向と直角以上の角度で、波と風が交わる時は、波は減衰するものとして考え、同じ方向に進む時は減衰はないものと考える。こうして各方向、各周波数について伝播させて一つの格子点の計算を終了する。この計算を繰り返して設定した全格子点の波浪を計算し、一回分の予報は終る。この時、各格子点において、うねりとして他の格子点より伝播してきたエネルギーの大きさ、方向を記憶させておき、次の初期値として使うことは前に述べた。

次回の計算は、同様の手順で各格子点ごとに繰り返して行く。

この予報法において、他の予報法と大きく異なる一つの点は吹送距離とか、吹続時間を使わない点である。吹続時間としては与えられる気象条件の入力時間間隔を単位としたものの積み重ねとなり、吹送距離としては波が伝播して行く長さというように表わされる。またうねりといふものは、他の予報法と異なり、真の姿で表現することができる。船の運動を考える場合には、このいわゆるうねりが重要であるが、その意味からすればこの予報法が長も優れているといえる。

こうして大容量の計算機を使って計算した結果のスペクトルの例を図 1.5 に示す。⁵⁾ 斜線が実測値であつて、ヒストグラム状のものが計算値である。周波数の高い領域では計算値が記入されていないが、この部分は前述のようにほぼ成長しきつたスペクトルの値を示すので、成熟波として扱つても大差はないので記入しなかつた。な

フロー・チャート

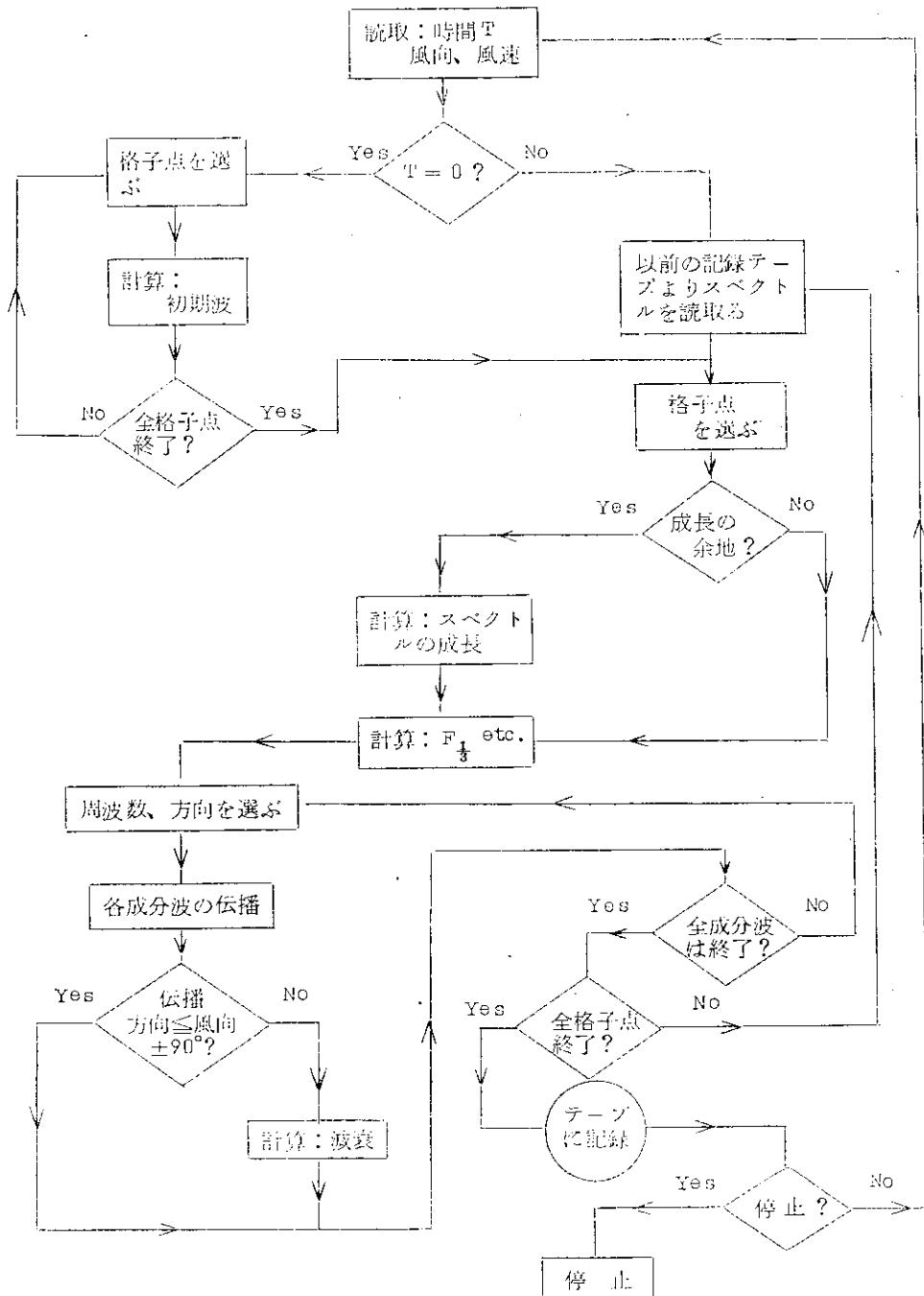


図 1.5.0 スペクトルによる波浪予報のフロー・チャート

か、有義波高の計算にはこの部分も当然含まれている。これは一次元スペクトルの例であるが、二次元スペクトルの例として、他の格子点における値を図 1.5.2 に示す。

図 1.5.2 は風向が 096° 、風速 30 ノットの地点であるが、南方よりのうねりが大きく入つてきていることがわかる。その他の方向よりもかなりのエネルギーが伝播してきており、この海面は複雑な波を示している。

しかしこの複雑な海面を表示できることがこの方法の特長であり、また船の運動を考える際には、二次元のスペクトルまで示せる方法であることが望ましい。

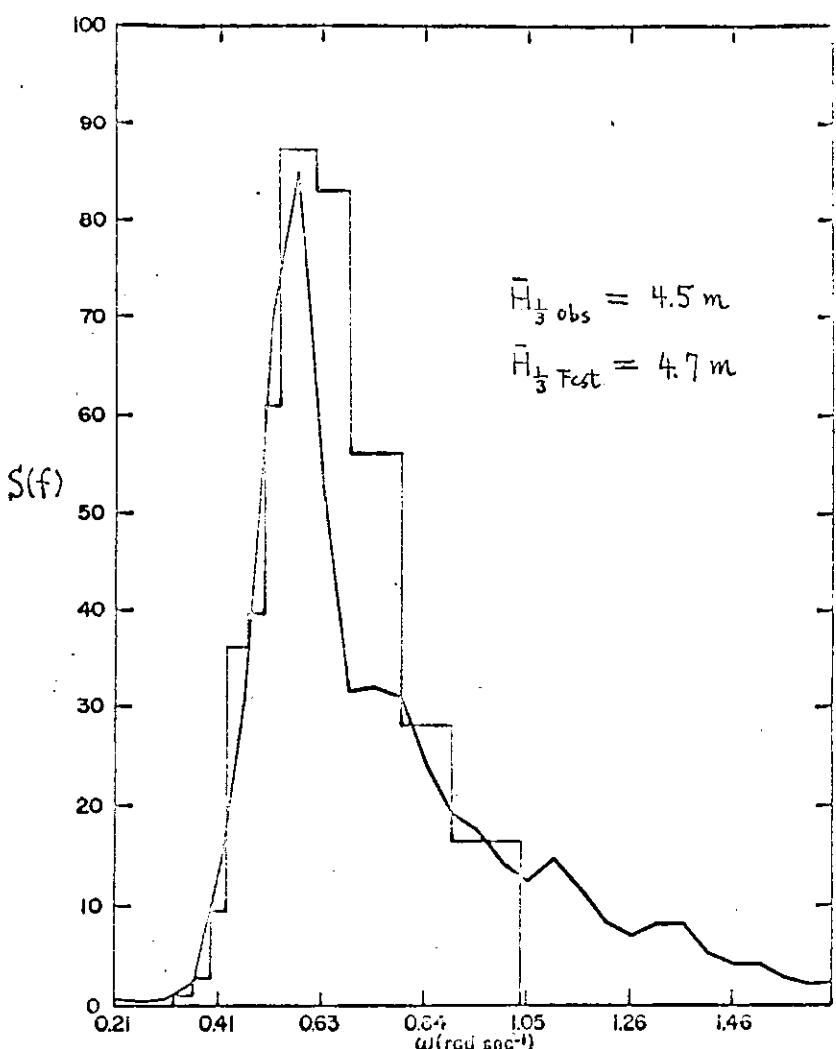


図 1.5.1 一次元スペクトルの予報例

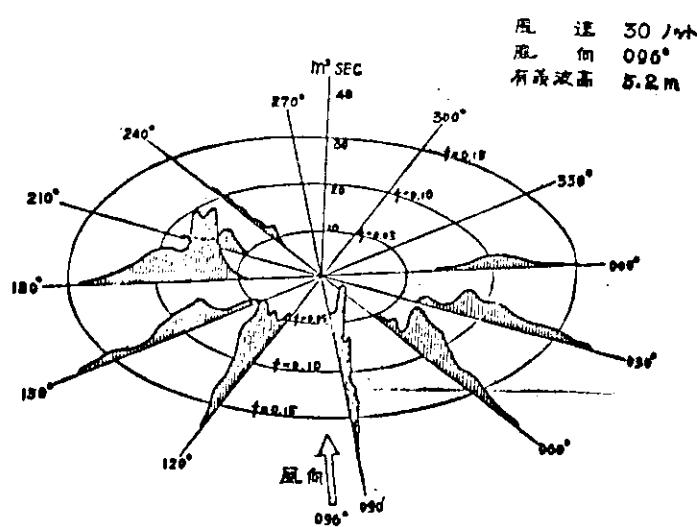


図 1.5.2 二次元スペクトルの予報例

(c) 高度集中制御方式船の波浪予報

電子計算機を船上に積み、航海、機関その他の制御を電子計算機をもつてやろうとする際に、航海安全の基礎となる波浪を知り、またそれを積極的に予報して最適航法に利用しようとする計画がたてられた。

最適航法とは何か、またどのように行なつて行くかは航法上的一大問題であり、航海の安全性および経済性を考える際にどうしても解決しなければならない課題である。採用した航路が最適であつたということは、何も航海時間が最小であつたということばかりではない。予定どおりの航海時間もあるうし、少々時間がかかるつても積荷の都合上、静穏な海面を走るよう計画し、そしてそのとおり静かな航海をなしとげ、安全に目的地に入港したというようなことも、その船にとつては最適航路であつたといふべきであろう。船体に最も大きを影響を及ぼすものは波浪であつて、波浪を無視して航海することは考えられない。船速の低下、船体の運動、波による船体の曲げモーメント等を最適航法あるいは航海の安全とともに考える場合には波浪予報も、それらの量を計算する資料となるような型で与えられることが望ましい。それには前節で述べたような直接スペクトルを計算する方法をとるべきである。

しかしながら、上記の計算法をとると大容量の計算機を必要とするし、その他にも気象情報、すなわち風向、風速の入力データの精度もあまり期待できない状況では、それに代わる方法を採用すべきである。

スペクトルによる方法と他の方法による方法と両者試み、スペクトルを直接求めない方法で、スペクトル法と同じような精度、内容を盛りこみ、高度集中制御船の最適航路選定の資料とする波浪予報を行なうのが目的である。

計算の簡素化をねらつて、予報法としては Wilson-Walden⁶⁾によら三場図を使用する方法⁶⁾を試みた。三場図は吹送距離、吹送時間、風速の値より有義波高、周期等が得られるようになつてゐる。船上で波浪予報を行なおうとする際に、最も問題となるのは風の予報値をいかにして入手するかという点である。このデータ通信の問題が一番先に起り、また最も重要なものの一つである。今船上で利用しうる気象データとしては、模写電送受信による予想天気図である。その他の気象データを将来入手しうるものとしても、12時間以上の時間間隔はあるものと予想される。このような間隔でしか気象データが入つてこないとした場合には、15時間程度で完全に成熟しきる実際の波浪を考える際には、吹送時間というものはあまり意味をもたなくなつてくる。そこで三場図を利用する際に吹送時間よりも吹送距離のみで波浪の成長は決つてくるものとして、三場図を次のように近似した。

$$H^{4761} = F(0.0374 u)^{0.943} \quad \dots \dots \dots \quad (4.10) \\ T = 3.813 H^{0.485}$$

ただし、Fは吹送距離（浬） u は風速（ノット）
Hは有義波高 T は周期（秒）である。

予報範囲としては一边を約1,500浬とする正方形の海域を考えた。2.0ノットの船が一日に進む航程の約3倍の範囲となるわけで、船舶の移動に伴つて、波浪予報海域も移動するものとする。気象庁数値予報に使用している格子点の主要点が約170浬間隔であるので、その点の値がそのまま使用しうる場合を考えて、予報海域の格子点は、その半分の間隔、すなわち約85浬とし、一边を19の格子点全体としては一边が1,530浬となり、格子点の総数は361である。日本近海における格子点の例を図1.5.4に示す。

風向、風速が与えられると、式(4.10)を使って計算するには、吹送距離の推定が必要である。その距離は図1.5.5のフローチャートに示すように、その格子点の風上の格子点の風向、風力を比較して風力が予報地点の方が1.0ノット以上大きければ、その距離を吹送距離とし、もしそれ以下、あるいは小さければ風向を比較し、風向もあまり変わなければ、さらに風上側の格子点の風を比較して、格子点間隔を重ねて、予報格子点の風力より1.0ノット以上小か、風向が90°以上異なる点までの距離を求める。

(a) 計算例

この方法でもつて、1968年11月1日00Zにおける日本近海の波浪を計算した結果を一例として図1.5.6に示す。この波浪計算の格子点間隔は85浬でなく、100浬として計算したものであるが、方法は前述のも

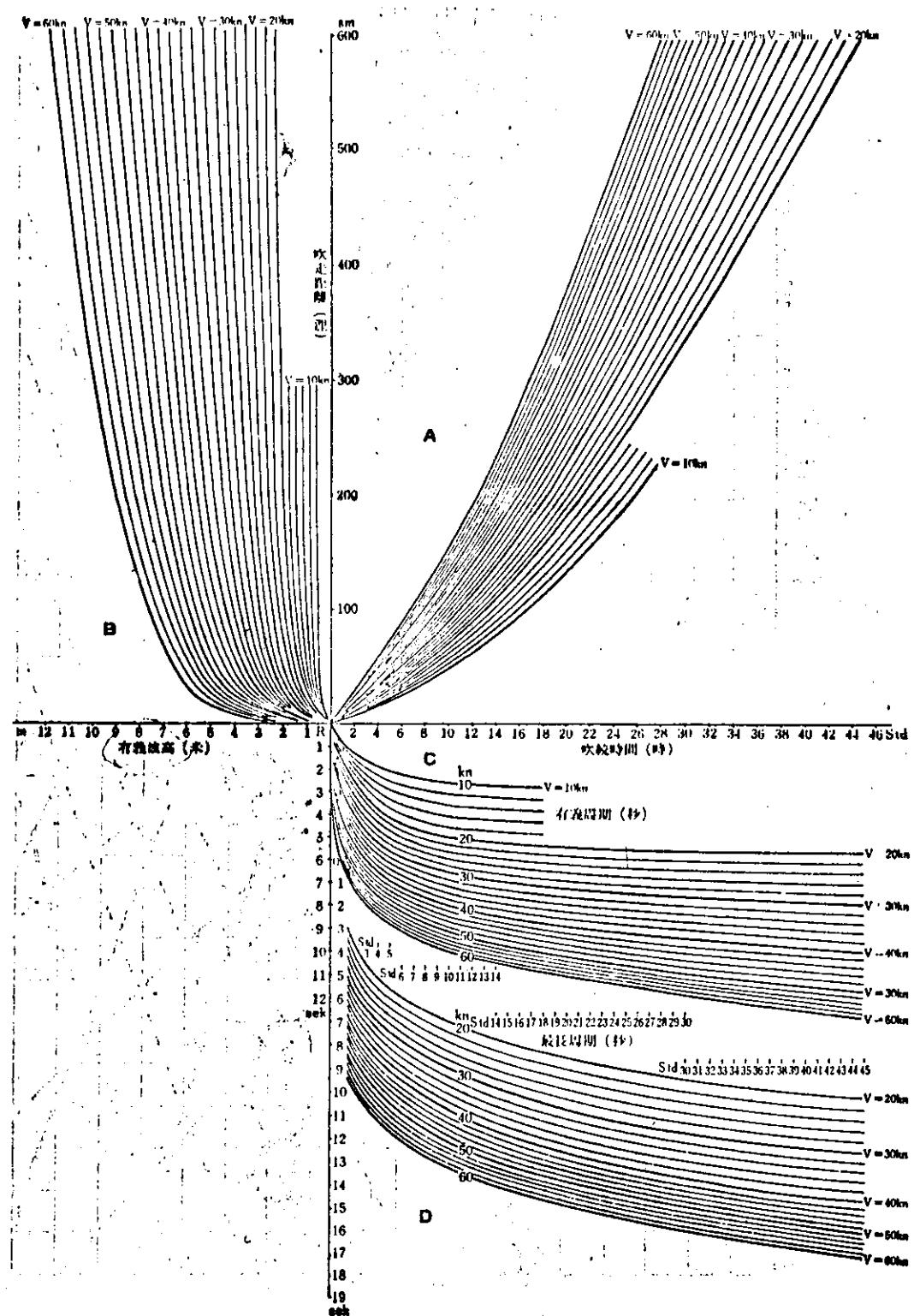


図 1.5.3 ウイルソンの三場図

例：風速 30 ノット、吹送時間 24 時間、吹送距離 150 漉とする。吹送時間より入ると、24 時間の吹送時間では吹送距離 300 漉には等しくなり、有義波高は 3.8 m になる。しかし吹送距離は 150 漉であつて距離の方で制限を受けた有義波高は 3.3 m となる。また逆に吹送時間が 12 時間に減れば 3.0 m の波高となる。

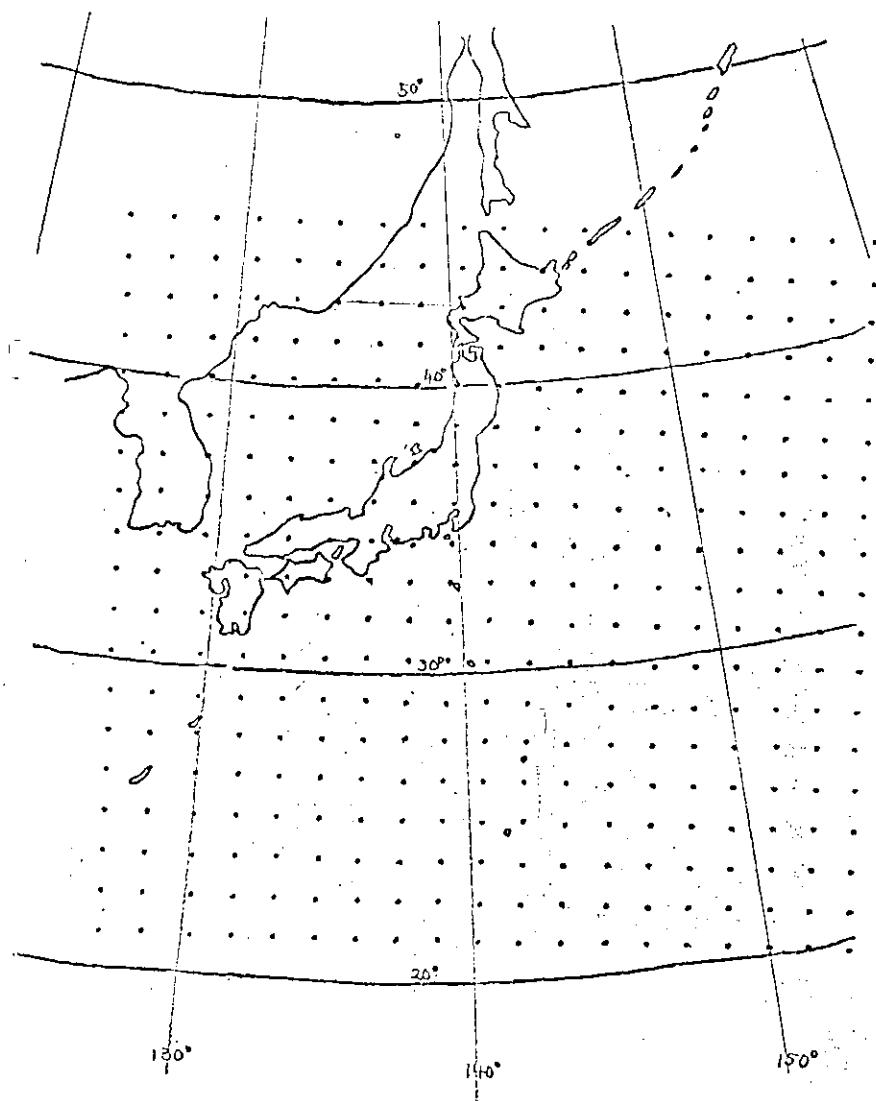


図 1.5.4 予報海域 グリッド例

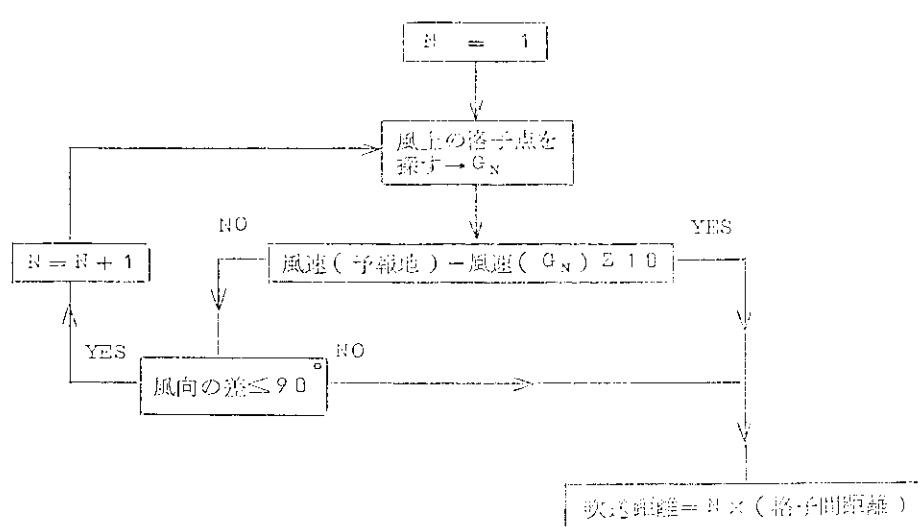


図 1.5.5 吹送距離推定フロー・チャート

1.5.7に示す。周波数の高い領域は計算を省略した。

このスペクトルを計算する際にとつた周波数帯としては0.05より0.01ごとの幅で0.19 cps まで合計15の帯域に分けた。前述したようにすべての周波数域について同じ帶で予報する必要はないので、周波数の高い方はもつと数を減じて計算時間を短縮すべきであらう。この一次元スペクトルより $\frac{2}{\pi} \cos^2 \theta$ なる方向性関数をかけて風向に対して左右対称の二次元スペクトルを作つたのが表1.1である。一番左の列は $0.00^{\circ} \pm 1.5^{\circ}$ 、二列目は $0.30^{\circ} \pm 1.5^{\circ}$ ……という方向帯域であつて、 30° ごとの12方向とつてある。上下方向は上より0.05 cps 周波数帯、下へ0.01 cps ずつ周波数が増して最下段が0.19 cps の帯域である。12方向×15周波数帯域、計180のスペクトルの値でもつて一つの格子点の二次元スペクトルを表わしている。

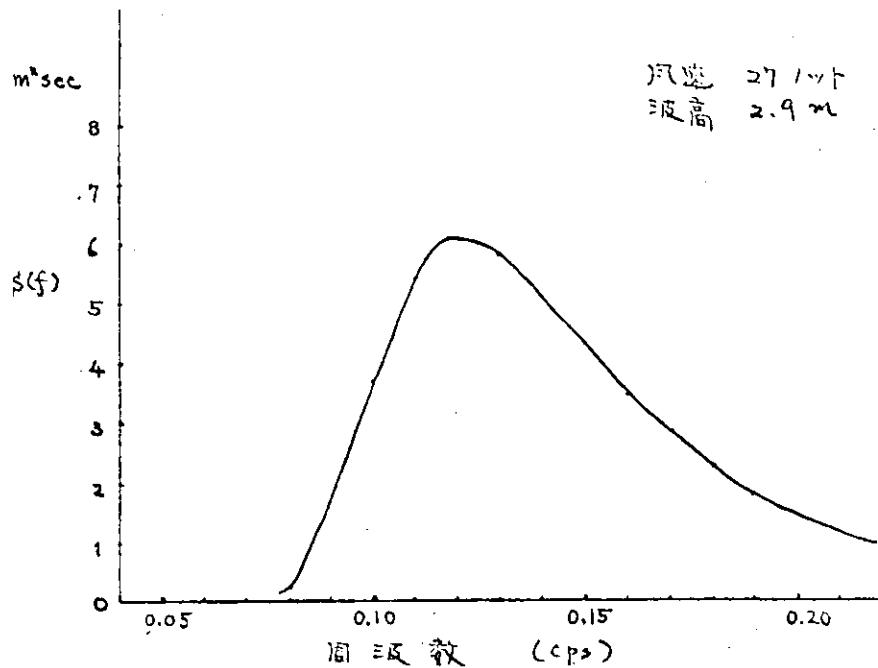


図1.5.7 図1.5.6中の仮定船位の計算スペクトル

198 WIND DR 55 WIND SP 27												
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.020	0.055	0.078	0.055	0.020	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001
0.130	0.366	0.519	0.366	0.130	0.008	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.008
0.316	0.891	1.263	0.891	0.316	0.019	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.019
0.462	1.304	1.847	1.304	0.462	0.027	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.027
0.514	1.452	2.057	1.452	0.514	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.030
0.493	1.391	1.970	1.391	0.493	0.029	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.029
0.433	1.224	1.734	1.224	0.433	0.025	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.025
0.364	1.027	1.455	1.027	0.364	0.021	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.021
0.297	0.840	1.190	0.840	0.297	0.017	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.017
0.240	0.678	0.960	0.678	0.240	0.014	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.014
0.193	0.544	0.771	0.544	0.193	0.011	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.011
0.155	0.437	0.619	0.437	0.155	0.009	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.009

表1.1 図1.5.6中の仮定船位の二次元スペクトル

(a) 過去のデータとの比較

太平洋中において波浪を連続して観測した例は非常に少なく、わが国ではスペクトルを実測したものはほとんどない。近年観測機器も多種開発されつつあるが、長期にわたって太平洋中で信頼するに足る観測がまだ行なわれていない。したがつて過去のデータと計算結果を詳細に比較検討することは困難である。

さらに前面で少し述べたように、この研究にはもう一つ打開しなければならない大きな問題がある。それは気象データの問題である。無線によるデータ通信が完全に行なわれ、受信したデータは直接あるいは一度紙テープなり磁気テープに入れ、その後計算機に入れて波浪計算を行なうのが理想的である。しかし現在の状態ではその

ような入力手段は非常に実現性に乏しく、この入力が円滑に行かない場合は、波浪予報も実施不可能となるので船上においてできるだけ実施可能な方法を試みる必要がある。

波浪計算および最適航路の計算のみ船上の計算機で行ない、風場については陸上で豊富な資料を使ひうる専門家が予報し、その結果を送信してもらうのが望ましい。もしそれが困難である場合は船上で予想天気図をもとに航海士が広い範囲にわたる風場予測を行なうが、予想天気図の気圧配置のみ計算機に入れ、自動的に風場を計算させるからである。予想天気図より風向、風速を得ることだけでも非常な労力を伴なうものである上に、その値を計算機に入れるなどを航海士に期待することはできない。最も容易だと思われる方法は格子点上の気圧だけを入力としてそのまま計算機に入れることがある。模写電送装置によつて受けた予測天気図をもとにして考えると、それ以上に簡単な方法はないように思われる。気圧の値のみであれば、等圧線は受画できるので風向、風速を計算して入れるよりも簡単であろう。

風場の予測に、170浬間隔の気圧を使って次のようにして推定した。

風速の計算には各種あるが最も一般的な地衡風近似を採用した。したがつて風速 u は

$$u = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial X} \quad \dots \dots \dots \quad (1.12)$$

で表わされる。ただし ρ はコリオリの力のパラメータ、 ρ は空気の密度、 $\partial p / \partial X$ は気圧傾度である。実際の風速は摩擦の影響等のため式(1.12)で与えられる値よりも少ない。この補正係数として次のような値を使用した。

$$0.2 \times (\text{他の緯度のラジアン}) + 0.6 \quad \dots \dots \dots \quad (1.13)$$

補正係数としては、気温-水温の差等も影響するが、この計算では温度差はないものとして扱つた。

入力としては170浬間隔の格子点の気圧をとり、その中央85浬の格子点の気圧を平均値として求め、その値でもつて周囲の気圧と比較して気圧傾度を求めた。気圧傾度としては気圧の差が最も多い格子点間のものとし、等圧線はその二つの格子点を結ぶ方向に直角であるとし、風向は低圧部を左に見て、等圧線に対し30°の角度で低圧部の方に吹くとした。

この際一番問題になるのは等圧線が平行と考えられないような範囲である。台風のような場合がその例で、このような場合は傾度風として扱わねばならない。85浬ごとの格子点上の気圧の値だけでは曲率および曲率中心を求めるにしてもあまりに粗すぎ、データの入れ方を変えなければならない。

170浬ごとの格子点の気圧の値のみを入力として風場を計算し、波高を予報するプログラムを昭和39年9月について動かせた。9月20日頃本州南方海上にあつた台風が図1.5.8のように進行し、9月25日午前本州を横断、多大の被害をもたらした6420台風が日本近海にいた頃の予報である。この6420台風は大阪湾に停泊あるいは避泊していた船舶に大型、小型問わず甚大な損害を与えた、瞬間風速は湾の周辺の観測によれば、所によつては50m/secを越え、最大風速でも湾口の友ヶ島付近は35m/secを越した。また湾内の波高でさえも目視ではあるが6~7mと観測されている。この大型台風の際、その風場でできた波浪を計算したものである。この例は予報というよりも後報ともいいうべきであるが、予報と同じプログラムに過去のデータを入れただけであるので、あえて以下予報と呼ぶことにする。

気象データとしては、昭和39年9月の印刷天気図を使用した。印刷天気図では等圧線は4mbごとにひかれしており、正確な気圧の値がわからぬが、模写電送天気図についても同様のことといえる。台風のない季節では、前述のような地衡風近似を採用して、風場を予測した場合と、実況図とはかなりよく合致して、それほど波浪計算に支障をもたらすとは思われなかつた。しかるに6420台風では台風周辺の風速が非常に大きく計算され、等圧線の曲率の大きい場所では不適當と思われたので、風場の推定は別に手で行ない、この風場図を入力とした。

波浪観測データとしては太平洋中では上記期間には29°N, 135°Wの南方定点観測船の目視観測しかなく、精

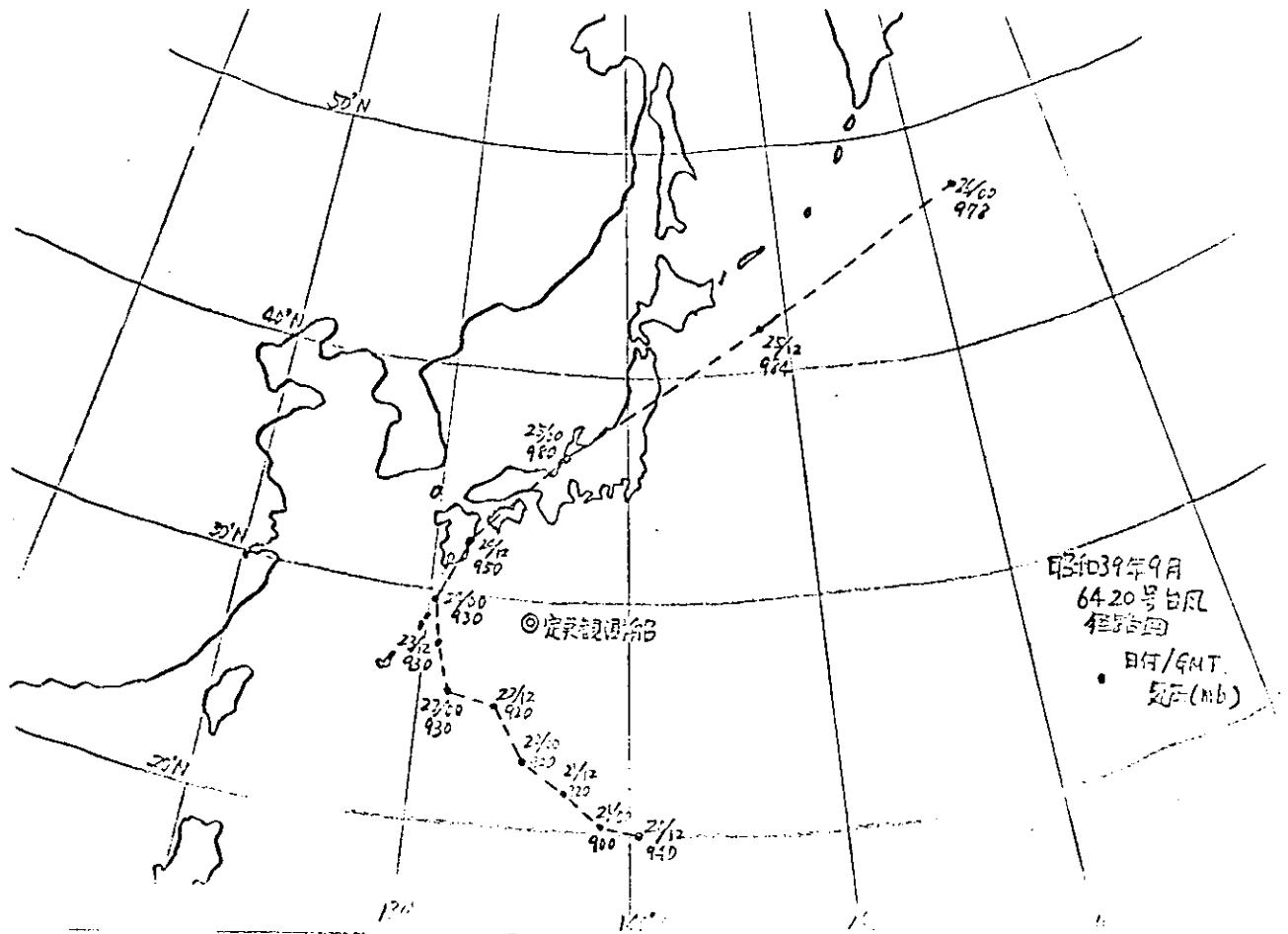


図1.5.8 1964年9月6420号台風径路図

確なスペクトルはもちろん、波高についても量的に細かなところまではわからない。

観測船の資料は、海象観測のための階級番号で発表されており、その一階級は 0.5 m 単位の差になつてゐる。

設定した格子点と南方定点が合致しないので、南方定点に最も近い格子点の波高を定点における目視観測値と比較したのが図1.5.8である。この風浪の高さの比較図で計算波高の方が早く成長し、また早く減衰してゐるが、

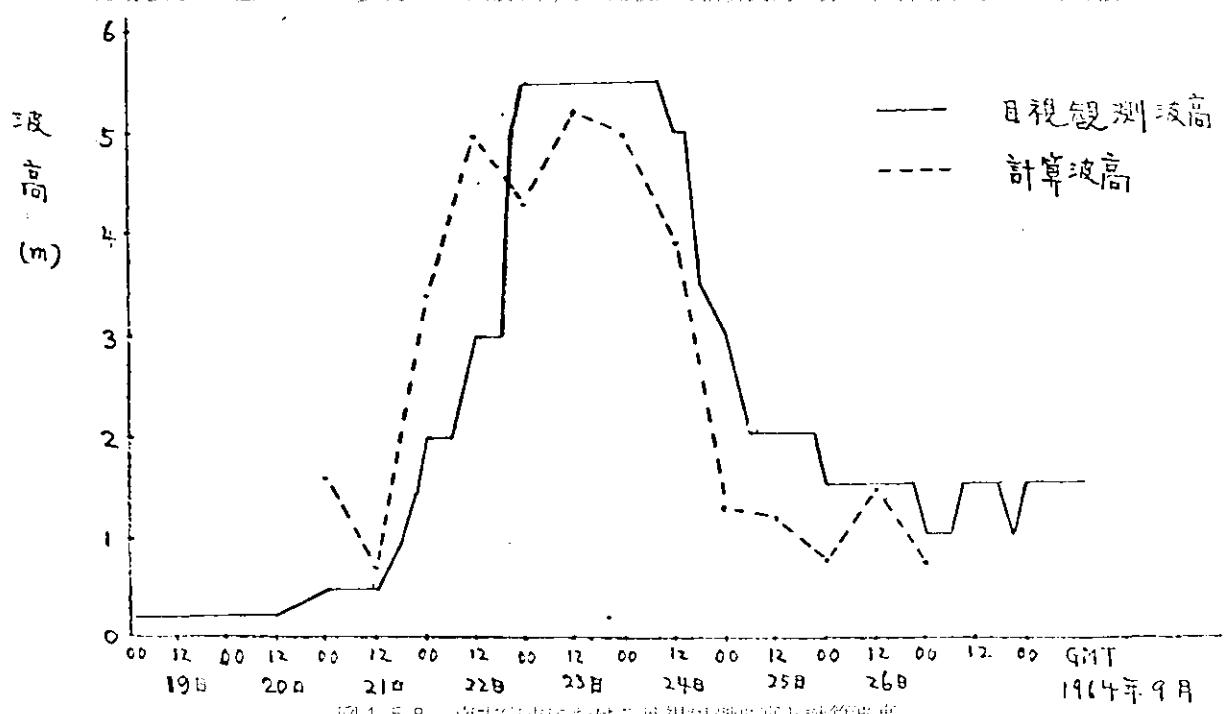


図1.5.8 南方定点における目視観測波高と計算波高

その理由は下検討中である。この計算の入力を手による天気図解析でなく、170浬ごとの気圧値のみを入れた風場予測を基にすると、前述のように風速が台風周辺できわめて大となつたので、波高値も10mを越し、風場予測において改善すべき点が多いことがわかつた。

(e) 今後の問題点

前節の波高値からもわかるように、台風の周辺のような場所でよい精度で風向、風力を予報できれば波浪予報の精度もよくなることは当然である。現在のプログラムは風場の予測においても、波浪の計算においても簡単なものであるが、高度集中制御方式船に計画される計算機に入る程度で、もつと細かな計算内容を包むプログラムを現在作製中であるが、数種類の方法で比較検討し、集中制御船の最適航路を選定するための波浪予報に最も適したものを見出。

それを評価するのに正確にスペクトルまでもわかつているような波浪観測値が望まれ、スペクトルの比較を行なつて、どのプログラムにするか決定されるだろう。

繰返し述べるが、どのような気象データを、どのように入力として入れるかが当面の一番重要な問題である。前節で述べた方法は現在船上で行なう中で最も容易と思われる方法であるが、風場予測の精度にかけるきらいがあり、例のように台風付近では過大に計算する。できるなら風向、風力は陸上で計算したものをデータ通信で船上に運び、それを入力として波浪、最適航路を選定する計算へと移るのがよいかと思われる。しかし一方船上で風場予測を行ない得れば船上とのコミュニケーションのわずらわしさを省くことができるので船上における風場予測の方法についてなお検討する必要がある。

参 考 文 献

- 1) Sverdrup, R.V. and W.H.Munk (1947) : Wind, Sea and swell : U.S.N.O., H.O.Pub. 601, 44pp.
- 2) Pierson, Neumann and James (1955), Practical methods for observing and forecasting ocean waves by means of wave spectra and statistics. H.O.Pub. 603.
- 3) Pierson, W.J. and L.Moskowitz (1964) : A proposed spectral form for fully developed wind sea based on the similarity theory of S.A.Kitaigorodskii J.Geophys. Res., 69(24), pp. 5181-5190.
- 4) Inoue, T. (1967) : On the growth of the spectrum of a wind generated sea according to a modified Miles-Phillips mechanism and its application to wave forecasting : New York Univ. Geophysical Sciences Lab. TR-67-5, pp. 74.
- 5) 井上篤次郎 (1968) : 波浪予報と航海 : 日本航海学会誌, pp.1-21.
- 6) 松本次男 (1967) : 波浪予報について : 気象庁, pp.23.
- 7) International Ship Structures Congress (1964) : Environmental Conditions : Proceedings vol.1. Ship Structures Lab, Netherlands.

(4-4) 周波数応答関数

船体運動でもつて最適航法の評価を行なうことを前提として、波を入力とし船体運動を出力とした場合のシステムの特性すなわち入出力の関係について検討する。この場合船体運動の高精度の予測が理想であるが、船上電算機の利用上の制限および波浪予報の精度との兼合いを考えて実用上差支えない程度に簡単な計算方法を採用することを考える。

さしあたり船体運動を横揺と縦揺に限定する。

(a) 周波数応答関数の意味

実際の計算方法を説明する前に周波数応答関数の意味を吟味しておく。

入力として波傾斜角 θ_w 、出力として横揺角 θ_x と縦揺角 θ_y (θ で θ_x, θ_y を代表させる) を用いると、入出力の関係は次の形で表現できらる ($\theta_w(t)$ 、 $\theta(t)$ は時間の関数を意味する)。

$$\theta(t) = L\{\theta_w(t)\} \quad \dots \quad (1.14)$$

このオペレータ L はイ) 線型性 ロ) 不変性 ハ) 因果性 ニ) 安定性を満たすものとする。

そしてインパルス応答を $h(t)$ とすると、

$$h(t) = L\{\delta(t)\} \quad \dots \quad (1.15)$$

($\delta(t)$ はデルタ関数) であり、このインパルス応答のフーリエ変換 $H(\Omega)$ は、

$$H(\Omega) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) e^{-i\Omega t} dt \quad \dots \quad (1.16)$$

で与えられ周波数応答関数またはシステム関数と呼ばれている。

これは周期運動に対する出力と入力との比になつてゐる。すなわち $\theta_r = \theta_w e^{i\Omega t}$ 、 $\theta = \theta_0 e^{i\Omega t}$ とした場合 $\bar{\theta}/\bar{\theta}_w$ である

この $h(t)$ または $H(\Omega)$ でもつてシステムは完全に決定される。なぜなら出力 θ はインパルス応答 $h(t)$ と入力 θ_w で、

$$\theta(t) = \int_0^{\infty} h(\tau) \theta_w(t-\tau) d\tau \quad \dots \quad (1.17)$$

により決定でき、また $H(\Omega)$ はフーリエ逆変換により $h(t)$ に変換できるからである。

(b) 周波数応答関数のゲイン

入力として不規則波が予想されるので周波数応答のゲイン

$$G(\Omega) = |H(\Omega)| \quad \dots \quad (1.18)$$

でシステムを代表させる。なぜなら入出力の位相関係は無視されるからである。具体的には入力として波のパワー・スペクトル密度 Φ_{θ_w} が与えられ、出力として船体運動のパワー・スペクトル密度 Φ_{θ} が次式により求められる。

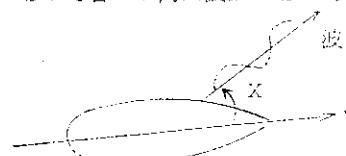
$$\Phi_{\theta}(\Omega) = G^2(\Omega) \cdot \Phi_{\theta_w}(\Omega) \quad \dots \quad (1.19)$$

この $\Phi_{\theta_w}(\Omega)$ と $G^2(\Omega)$ は比較的狭帯域に分布しているので各々の角周波数ごとの考察が必要である。

(c) ドップラ効果

さて $G(\Omega)$ を求めればよいことになるが、

$G(\Omega)$ を求める前にドップラ効果について説明する。



ω を波の角周波数 (K : 波数、 λ : 波長)、 X を波の入射角、 V を船速とすると出射角周波数 ω_e は、

$$\omega_e = \omega - KV \cos X \quad \dots \quad (1.20)$$

となる。

ここで入力 θ_w と出力 θ との間に中間変数として波による強制モーメント f を導入し、次のようておく。

$$\begin{aligned} f(t) &= L_1 \{ \theta_w(t) \} \\ \theta(t) &= L_2 \{ f(t) \} \end{aligned} \quad \dots \quad (1.21)$$

そしてインパルス応答をそれぞれ $h_1(t, X)$ 、 $h_2(t)$ とすると、

$$\begin{aligned} h_1(t, X) &= L_1 \{ \delta(t, X) \} \\ h_2(t) &= L_2 \{ \delta(t) \} \end{aligned} \quad \dots \quad (1.22)$$

となり、このインパルス応答のフーリエ変換はそれぞれ、

$$\left. \begin{aligned} H_1(\omega, X) &= \int_{-\infty}^{\infty} h_1(t, X) e^{-i\omega t} dt \\ H_2(\omega_e) &= \int_{-\infty}^{\infty} h_2(t) e^{-i\omega_e t} dt \end{aligned} \right\} \quad \dots \quad (1.23)$$

となる。したがつて、

$$\left. \begin{aligned} G_1(\omega, X) &= |H_1(\omega, X)| \\ G_2(\omega_e) &= |H_2(\omega_e)| \end{aligned} \right\} \quad \dots \quad (1.24)$$

とおくと、

$$G(\omega, X) = G_1(\omega, X) \cdot G_2(\omega_e) \quad \dots \quad (1.25)$$

である。

ここで船の状態(船型・積荷状態等)を含めずパラメータを α とすると、

$$\left. \begin{aligned} G_1(\omega, X) &= G_1(\omega, X; V, \alpha) \\ G_2(\omega_e) &= G_2(\omega_e; V, \alpha) \\ G(\omega, X) &= G(\omega, X, \omega_e; V, \alpha) \\ &= G(\omega, X; V, \alpha) \end{aligned} \right\} \quad \dots \quad (1.26)$$

と書くことができる。

そして(V, α)が与えられると、求めるべき周波数応答関数のゲインは $G(\omega, X)$ の形となる。したがつて ω と X との関数としての周波数応答関数のゲインを求めればよい。

(d) 運動方程式

以下、運動方程式に照らして横揺・縦揺に対する周波数応答関数のゲイン $G_x(\omega, X; V, \alpha)$, $G_p(\omega, X; V, \alpha)$ を求める方法について述べる。

座標系および記号は次のように定める。

座標系：

(x, y, z) ：船体中心面・中央断面・水線面の交点を原点とする船体に固定した座標系。

(x', y', z') ：重心を原点とする船体に固定した座標系。

記号：

L ：船の長さ

B ：船の幅

T ：船の吃水

μ ：半幅吃水比 $B/2T$

δ ：方形係数

$B(x)$ ： x 断面における幅

$T(x)$ ： x 断面における吃水

$\mu(x)$ ： x 断面における半幅吃水比 $B(x)/2T(x)$

$S(x)$ ： x 断面における断面積

$\sigma(x)$ ： x 断面における断面係数 $S(x)/B(x) \cdot T(x)$

ρ ：流体の密度

g ：重力の加速度

ξ_B ： $\omega_e^2 B / 2g$

ξ_L ： $\omega_e^2 L / 2g$

横揺・縦揺に対する運動方程式は非連成と考え、重心まわりのモーメントの釣合から求める。

周期運動のみを考えればよいから $\theta_w = \bar{\theta}_w e^{i\omega_e t}$, $\theta_r = \bar{\theta}_r e^{i\omega_e t}$, $\theta_p = \bar{\theta}_p e^{i\omega_e t}$ とすると運動方程式は次のようになる。

$$\left. \begin{array}{l} \{ (\dot{i}\omega_e)^2 M_r + (i\omega_e) N_r + B_r \} \bar{\theta}_r = F_r \bar{\theta}_w \\ \{ (\dot{i}\omega_e)^2 M_p + (i\omega_e) N_p + B_p \} \bar{\theta}_p = F_p \bar{\theta}_w \end{array} \right\} \quad (1.27)$$

各係数は、

$$\left. \begin{array}{l} M_r = M_r (\omega_e; V, \alpha) \\ N_r = N_r (\omega_e; V, \alpha) \\ B_r = B_r (\alpha) \\ F_r = F_r (\omega, \alpha; V, \alpha) \end{array} \right\} \quad (1.28)$$

である。もちろん縦揺に対する各係数についても同様である。

次に各係数を与えられた (V, α) に対して決定することが問題となる。

各係数の計算の方針としては、

式 (1.27) の左辺の各係数は二次元体に対する計算値¹⁾⁽²⁾を利用してストリップ法により計算し、さらに三次元影響(主として速度影響)の修正を施すことにより求める。この二次元体に対する計算値はルイス・フォーム断面に対するもので ($\mu(x), \sigma(x)$) で断面形状を代表させている。

そして式 (1.27) の右辺の各係数はフルード・クリロフの手法により計算し、それに船体影響および三次元影響の修正を施すことにより求める。³⁾

以下の各係数の計算では、船を長さ方向に n 等分 (n : 偶数) レンブソンの法則を用いる。

(e) 横揺の周波数応答関数のゲイン

式 (1.27) の各項を無次元化したものは次の式で計算できる。

$$(i) \frac{\omega_e^2 M_r}{\rho g L_0 B_0^2 T_0} = (\xi \kappa_r^2 + m_r) \cdot 2 \xi_B$$

たゞただし、 $\kappa_r = \lambda_r / B_0$

λ_r : x' 軸まわりの振動半径

$$m_r = \frac{H \mu_n}{12.8} + \frac{1}{3} \sum_{i=1}^n S_i C_i (\omega_e; x) \cdot \left(\frac{B(x)}{B_0} \right)^4$$

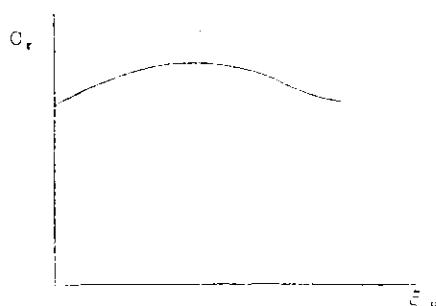
S_i : レンブソン係数

$$C_r (\omega_e; x) = C_r (\xi_B; \mu(x), \sigma(x))$$

この $C_r (\xi_B; \mu(x), \sigma(x))$ は図表²⁾ から読み取る。しかし m_r は ξB^2 に比して小さく、また横揺に対しては ω_e の小さい範囲のみ重要であるから、

$$C_r (\xi_B; \mu(x), \sigma(x)) \approx C_r (0; \mu(x), \sigma(x))$$

としても差支えない。



同様に、

$$(ii) \frac{\omega_r N_a}{\rho g L_o B_o^2 T_o} = n_r + \sqrt{2 \xi_B}$$

$$\text{ただし、 } n_{r1} = \frac{1}{\sqrt{2 \xi_B}} + \frac{u_o}{4 \xi_B} + \frac{1}{3n} \sum_{i=1}^n S_i A_i^2(\omega_r; x) \cdot \left(\frac{B(x)}{B_o} \right)^2$$

$$A_i(\omega_r; x) = A_i(\xi_B; \mu(x), \sigma(x))$$

この $A_i(\xi_B; \mu(x), \sigma(x))$ も図表²⁾ から読み取る。

$$n_{r2} = C_{nr1} n_{r1}$$

C_{nr1} : 三次元修正係数³⁾

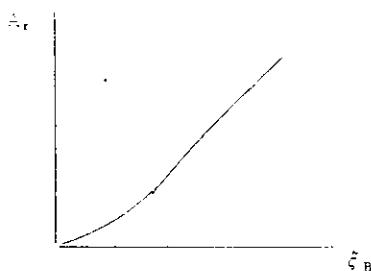
$$n_{r3} = C_{nr2} \frac{\ell_k}{L_o} \cdot |T_r (\text{sec})|$$

C_{nr2} : 係数³⁾

ℓ_k : ピルジ・キールの長さ

T_r : 横搖固調周期

$$n_r = n_{r2} + n_{r3}$$



同様に、

$$(iii) \frac{B_r}{\rho g L_o B_o^2 T_o} = b_r$$

$$\text{ただし、 } b_r = \frac{\overline{GM}}{B_o}$$

\overline{GM} : 横メタセンタ高さ

同様に、

$$(iv) \frac{F_r}{\rho g L_o B_o^2 T_o} = f_r$$

$$\text{ただし、 } f_{r1} = 2 \sin X \cdot \frac{1}{3n} \sum_{i=1}^n S_i \cos(Kx \cos X) \cdot \left(\frac{B(x)}{B_o} \right)^3$$

$$f_{r2} = \sin X \cdot \frac{1}{3n} \sum_{i=1}^n S_i \cos(Kx \cos X) \cdot \left(\frac{B(x)}{B_o} \right)$$

$$f_r = \left(1 - C_{fr} \frac{B_o}{MO} \cdot \frac{T_o}{\lambda} \right) \cdot \left(\frac{\mu_o}{12} f_{r1} - \frac{\overline{FG}}{B_o} f_{r2} \right)$$

C_{fr} : 船体影響の修正係数³⁾

\overline{MO} : 横メタセンタから水線面までの垂直距離

\overline{FG} : 左右動強制力の着力点から重心までの鉛直距離

以上(i)~(iv)の計算結果から横搖の周波数応答関数のゲインは、

$$G_r(\omega, X; V, a) = \frac{|f_r|}{\sqrt{\{ b_r - (\zeta K_r^2 + m_r) \cdot 2 \xi_B \}^2 + (n_r \sqrt{2 \xi_B})^2}} \quad \dots \quad (1.29)$$

として求められる。

(f) 振幅の周波数応答関数のゲイン

縦振の場合も、横振の場合と同様に以下の諸式により計算する。

$$(i) \frac{\omega_e^2 M_p}{\rho g L_o^2 B_o T_o} = (\zeta K_p^2 + m_p) \cdot 2 \xi_t$$

ただし、 $\xi_p = \ell_p / L_o$

ℓ_p : y' 軸まわりの慣性半径。

$$m_p = \frac{\pi \mu_0}{16} \cdot \frac{1}{3n} \sum_{i=1}^n S_i C_h(\omega_e; x) \cdot \left(\frac{2(x-x_G)}{L_o} \right)^2 \cdot \left(\frac{B(x)}{B_o} \right)^2$$

$$C_h(\omega_e; x) = C_h(\xi_B; \mu(x), \sigma(x))$$

この $C_h(\xi_B; \mu(x))$ は図表¹⁾ から読み取る。

x_G : 重心の x 座標

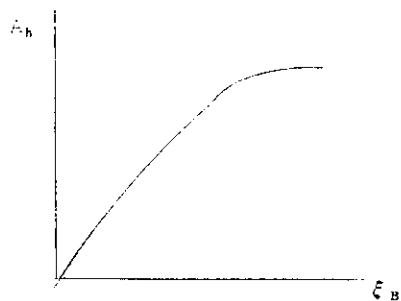


$$(ii) \frac{\omega_e N_p}{\rho g L_o^2 B_o T_o} = n_p \sqrt{2 \xi_L}$$

$$\text{ただし: } n_p = \frac{\mu_0}{\sqrt{2 \xi_L} 4 \xi_B} \cdot \frac{L_o}{B_o} \cdot \frac{1}{3n} \sum_{i=1}^n S_i A_h^2(\omega_e; x) \cdot \left(\frac{2(x-x_G)}{L_o} \right)^2$$

$$A_h(\omega_e; x) = A_h(\xi_B; \mu(x), \sigma(x))$$

この $A_h(\xi_B; \mu(x), \sigma(x))$ も図表¹⁾ から読み取る。



$$n_p = C_{np} n_{p1}$$

C_{np} : 三次元修正係数³⁾

$$(iii) \frac{B_p}{\rho g L_o^2 B_o T_o} = b_p$$

$$\text{ただし: } b_p = \frac{\overline{GM}_e}{L_o}$$

\overline{GM}_e : 縦メタセントラル

$$(iv) \frac{F_p}{\rho g L_o^2 B_o T_o} = f_p$$

$$\text{ただし: } f_{p1} = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{\lambda}{T_o} \cdot \frac{1}{3n} \sum_{i=1}^n S_i \sin(Kx \cos X) \cdot \left(\frac{2(x-x_G)}{L_o} \right) \cdot \left(\frac{B(x)}{B_o} \right)$$

$$f_p = C_{fp} f_{p1}$$

C_{fp} : 三次元修正係数³⁾

以上(i)～(iv)の計算結果から縦揺の周波数応答関数のゲインは、

$$G_p(\omega, X; v, \alpha) = \frac{|f_p|}{\sqrt{\{v_p - (\zeta \kappa_p^2 + m_p) \cdot 2\xi_L\}^2 + (n_p \sqrt{2}\xi_L)^2}} \quad \dots \dots \dots \quad (1.50)$$

として求められる。

(e) 計算例

以上の諸式を用いて、

深江丸（300総トン）の横揺・縦揺に対する周波数応答のゲインの計算例を示す。

主要目：

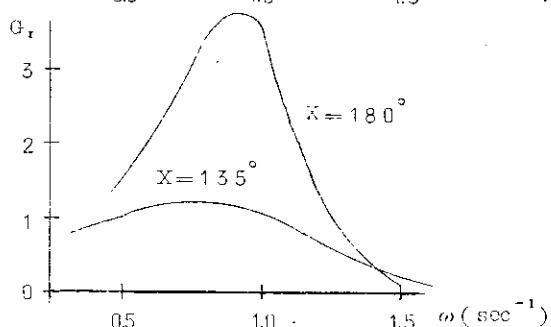
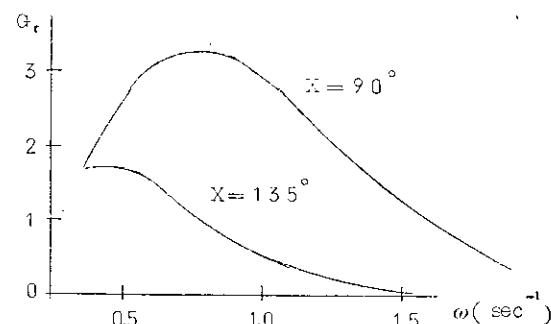
$$L_o = 37 \text{ M}$$

$$B_o = 7.8 \text{ M}$$

$$T_o = 2.7 \text{ M}$$

$$S = 0.59 \text{ M}$$

$$\text{フルード数} = 0.3$$



註) この計算例では一部ハスキントの近似公式³⁾を用いた。

(h) 今後の問題

- (i) C_r, A_r, C_h, A_h の計算に際して過去の計算値^{1), 2)}の内挿では求められない場合がある。この場合をも補うる計算プログラムはすでに作成した。そこで、その表示方法を解決すること。
- (ii) 三次元修正の方法が種々提案されているが本計画に最も適した方法を決定すること。
- (iii) 船の状態の微少変化(トリム等)に対するものを簡単に求める方法を解決すること。

(4-5) 結び

以上本年度の研究結果の概要を取まとめると次のとおりである。

- (a) 基本方針として船舶のコンピュータを活用して船の安全性に対する狭域または局所的最適航路設定目標とする。
- (b) 運動学的安全性を評価するための手段として波浪のパワースペクトルの推定が必要であり、その方法を検討したが風場の予測に問題があり、今後検討を要するが、風場から波の予測については計算をかなり単純化しても実

用に耐えそりである。

(c) また船の運動に関する応答関数の計算方法については、本目的に適する程度の簡単な基本的プログラムの作成が終つたが、実際の船の船型の多様な変化、およびトリム、吃水等の状態の変化に即応し得るようにする問題を検討する必要がある。

次年度は上記の検討課題を解決するとともに、波浪計による実測波浪のスペクトルと予測スペクトルとの対比を行ない、波浪予測を船上のコンピュータで行なうための必要条件を決定するとともに船の応答関数の計算結果を実船の計測結果と比較し、その精度を検討する。

参 考 文 献

- 1) 田才福造：船の上下動揺並びに縦動揺に於ける減衰力及び附加質量について
造船協会論文集 105号(1959)
- 2) Kinya Tamura: The Calculation of Hydrodynamical Forces and Moments acting on the two Dimensional Body.
西部造船会々報 26号(1963)
- 3) Iw. G. Voreers: Fundamentals of the behaviour of ships in waves part 2.
Int. Shipbuilding Progress vol 6~7 (1959~1960)

1.2 座礁予防システムの開発

1.2.1 システムの調査

(1) まえがき

現在航行中の船舶より、海面下の障害物を直接探知する装置は一般化されているものではなく、座礁事故防止のため何らかの探知装置の出現が強く要望されている。

座礁予防上、重要なことは急停船航距離以遠の前方暗礁または海底深度を知ることであるが、転舵時には自船直下より前方に至る海底地勢を即時に知る必要がある。また、従来の座礁事故例では浅瀬での突起的な暗礁に乗上げたものよりも、航路誤認によるなだらかな浅瀬乗上げ事故例の方が多く、海底の立上りとか瀬棚位置の誤認によると考えられるものである。したがつて、自船下より前方に至る正面左右の地勢を知り、航路誤認を未然に防止する手段の方がさらに重要であるとも考えられる。

このように、自船下より前方に至る海底地勢より未来地勢を予想して座礁回避を行なう手段を「予測による座礁予防方式」といい、暗礁そのものを探知する直接探知方式に対して「間接探知方式」とも称している。

また、水中距離探知手段としては、現在、超音波探知以外にはなく、この水平方向探知能力は垂直方向に比べて50m以浅では気泡、魚群、他船航跡などによる探知妨害および水温による音道屈曲があり、直接探知の場合の問題として考えられる。こうした面からも間接探知方式の開発は有意義とも考えられ、また、その利点および問題などの検討も急務の一つであると考えられるので、この間接探知方式に關し種々の面から調査検討を行なつた。

昭和43年度日本船舶振興会助成金による日本船用機器開発協会事業として株式会社光電製作所が開発する船舶の高度集中制御に伴なう座礁予防装置用探知部の試作研究が、この調査検討に関連づけられている。

(2) 報告内容の要約

(a) 超音波探知能力の検討

ソナー方程式による一般的検討を主とし、気泡、雜音、音道屈曲などの不明確要因について一般的傾向を調査した。

遠距離探知のため周波数を当初計画の50～30KHzから20KHz程度に下げる方が好ましいと判断された。

(b) 同様装置の能力の調査

座礁予防装置として参考になると思われる数種類の装置につき能力の調査を行なつた。

40KHz以下で8kW以上の出力が望ましいと判断された。

(c) 海底地勢と航路の調査

船舶座礁約200例より見た世界における航路の危険区域について調査した。これにより世界における座礁多発地を知ることができ、あわせて航路における危険な海底地勢の存在を知ることができた。

(d) 座礁事故例の調査

主として日本近海および日本船の事故例44件の船の大きさ、座礁場所、事故原因等について調査した。なお座礁前における水深の変化をグラフに示した。

身近にかなりの隻数の座礁事故が発生していること、また事故発生時の水深変化の様相を把握することができた。

(e) センサーの装備位置の検討

バルバスハウを持つている船を対象にしてバルブとセンサの大きさの関係について概略調査した。

本研究に基づいた設定値を条件としたセンサは一般に約7万トン以上の大型船には装備可能と判断された。

(f) 船体の縦動揺の検討

第90研究部会で取上げている船を対象とし波長・波高・上下動の振巾・ピッキング角および波の最大傾斜角の関係を求めた。

ソナーの精度向上のため動揺角修正用検出器は約5°の計測巾があれば十分であると考えられた。

(b) 海底と漁群などを識別するための漁探のデーター解析

漁群、雑音その他の妨害信号を含め、種々の信号の現われ方と在来の識別手段を調査し、底信号だけを抽出する手段について検討した。

開発すべき新手段として整数倍処理および統計処理などが考えられた。

(b) 暗礁予測計算のプログラム作成および計算

暗礁の危険表示を行なう一手段として最遠地形の3つの信号をとり、最遠点と他の2点との傾斜のうち急な組合せをとり、その延長と海面との交点を以遠の見掛け上の暗礁地点として予測する手段についてプログラム演算を行なつた。

この方法は場合により不確かではあるが、直接探知不能な場合には有用であると判断された。

(1) 海上模擬試験

手動上下全方向旋回型および垂直固定型送受波器を小型実験船に舷側装備し、漁探により湾港航路附近の海底探知記録を収集した。

探知記録を漁底識別および予測計算などの検討用資料とした。また予測システムの成立度の検討については(b)で行なつた。

(3) 座礁予防に関する文献の収集、調査解析

(3-1) 超音波探知能力の検討

ソーナーの探知能力について、送信装置の出力、媒質中の伝播、目標の反射損失、雑音レベル等と最大探知距離との関係を表わす式は一般にソーナー方程式と呼ばれ、種々発表されているが、ここでは基本的な一つを用いて検討した。

(a) アクティブソーナー方程式

まず音道の屈折を考慮しないとすれば、アクティブソーナー方程式はつきのようになる。

$$2N_w = (L_p + G_t) + T_s - (L'n + 10 \log \Delta f - G_r) - (\Delta R S/N) \dots \dots \dots \quad (2.1)$$

ここに N_w : 許容伝播損失 dB $L'n$: 雜音スペクトラムレベル dB ($0 \text{dB} = 1 \mu\text{b}/\text{Hz}$)

L_p : 指標送波レベル dB ($0 \text{dB} = 1 \mu\text{b} - y \text{dB}$) Δf : 等価受振帯域帯 Hz

G_t : 送波指向性利得 dB

G_r : 受波指向性利得 dB

T_s : ターゲットストレンジス dB

$\Delta R S/N$: 認識ディファレンシャル dB

(b) 伝播損失

ソーナーの送波器と反射目標の大きさが伝播距離に比して微少なる場合は、送波器から目標および目標から受波器までの伝播は球面伝播と見なされ、音の強度は吸収減衰がないものとすれば距離の2乗に逆比例（音圧は距離に逆比例）し、拡散減衰または拡散損失と呼ばれている。しかし音源の近傍における強度分布は複雑なため仮想の音源中心を求め、その中心から単位距離の点を指標点とし、その点における強度 I_1 によって、その音源の強さを表現している。

遠方の点（仮想中心から R の距離）における強度を I_R とすれば、

$$I_R = \left(\frac{R_1}{R} \right)^2 I_1 e^{-2\alpha(f)(R-R_1)} = \left(\frac{R_1}{R} \right)^2 I_1 e^{-2\alpha(f)R} \dots \dots \dots \quad (2.2)$$

ここに R_1 : 指標点までの単位距離 $e^{-2\alpha(f)R}$: 吸収減衰 $\alpha(f)$: 吸収係数

伝播損失 N_w (dB) の形で表わせば、

$$N_w = 20 \log R + \alpha(z)R + 60 \dots \dots \dots \quad (2.3)$$

ここに R : 距離 (km) f : 周波数 (kHz)

海水中の吸収係数 $\alpha(z)$ の値は理論的に求め難く、実海面で求められた実験式が用いられている。現在よく使用

されている実験式は次のとおりである。

$$a(f)_1 = 0.2 f + 0.00015 f^2 \quad (dB/Kyd) \text{ 数 } 10 \text{ kHz の領域} \quad (2.4)$$

$$a(f)_2 = 0.033 f^{5/2} \quad (dB/Kyd) \text{ 数 } kHz \text{ の領域} \quad (2.5)$$

$$a(f)_3 = 0.01 f^2 \quad (dB/Kyd) \text{ 上記以外の領域} \quad (2.6)$$

他にも実験式が求められているが、実際のソーナーでは水温分布による屈折や海面海底の反射波との干渉等によるフェーリングによる変動が甚だしく、式(2.4)でも十分ともいわれている。可能探知距離を大にするには、使用周波数は指向角、船舶構造による取付寸法の制限等、他の条件の許すかぎり低い周波数を選ぶ必要がある。なお、浅海においては波浪および日射による藻の同化作用等により生じた気泡のため減衰を受けるので、使用周波数の選定に注意しなければならない。水槽試験にて 30 kHz における藻の同化作用による気泡発生と減衰との関係を図2.1 また減衰の周波数特性を図2.2 に示す。

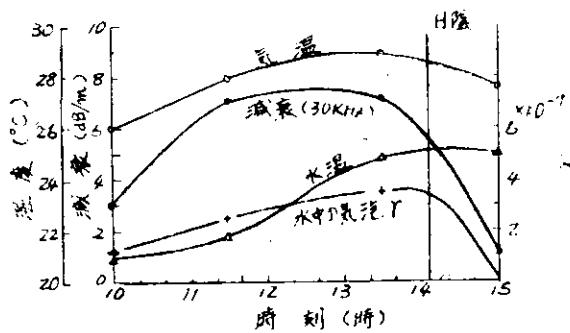


図2.1 水中の藻の同化作用による気泡発生と減衰

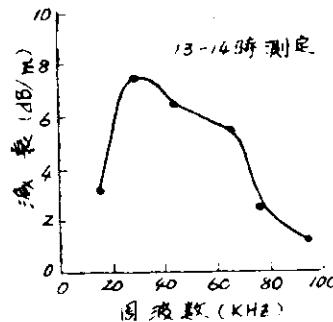


図2.2 藻の同化作用による減衰の周波数特性

(c) 指標送波レベル

送信装置の出力と送波指標点における強度との比は送波器の性能を示すが、送波器の電気音響変換能率 η_s と指向利得 G_t とで表わす。送波指標点は米国では単位距離として 1 yd 、わが国では 1 m が使用されるが、こではかりに単位距離として R_o とすると、送波指標点における送信波強度 I_{s1} は、

$$I_{s1} = P_{se} \eta_s G_t R_o^2 / 4 \pi R_o^2 \quad (2.7)$$

ここに P_{se} : 送波器の電気入力 R_o : 送波器目標方向の指向性関数

送波レベルは高いほど許容伝播損失は大となるが、つぎに述べるごとく媒質のキャビテーションによる送波電力の限界がある。

(d) 送波電力の制限

送波器の入力は、送波器表面における空洞現象のために単位面積当たりの音響出力に制限を受ける。表面の音压波高値がその場所における静水圧 P_o に等しくなる条件を目安として、単位面積の臨界出力とすれば、

$$I_c = P_o^2 / 2 \rho_o \quad (2.8) \quad \rho_o : \text{海水の音響インピーダンス } 1.5 \times 10^5 \mu_0 / \text{cm/s}$$

$$\text{したがつて } P_o = (1 + 0.1 h) \times 10^6 \mu_0 \quad (2.9) \quad I_c = \frac{(1 + 0.1 h)^2}{3} (\text{W/cm}^2) \quad (2.10)$$

ここに h : 送波器の水深 (m) 式(2.10)は連続波の場合であつて、パルスの場合には数倍まで飽和しないといわれている。

(e) ターゲットストレングス T_s

吸収係数 $a(f)$ の媒質中の球面波伝播では指標点から R にある目標の位置における入射強度 I_{sR} は

$$I_{sR} = \left(\frac{R_o}{R} \right)^2 10^{-0.1 a(f) R} I_{s1} \quad (2.11)$$

目標が平坦な海底の場合を除けば、反射波は目標を中心とする球面波と見なされるからターゲットストレンジス T_s は、

$$T_S = \frac{I_{R_1}}{I_{R_R}} \quad \dots \dots \dots \quad (2.12)$$

ここに I_{R_1} : 反射波指標点における反射波強度

帰路の伝播は往路と同様であり、受波器位置の音場強度 I_{R_R} は

$$I_{R_R} = \left(\frac{R_0}{R} \right)^2 10^{-0.1 \alpha(f)} I_{R_1} \quad \dots \dots \dots \quad (2.13)$$

測深機のように、海底が広く平坦な平面である場合には、反射波は海底の下の2倍の距離にある送波器のイメージを中心とする球面波となるので、つぎに述べる海底反射損失が用いられる。この場合帰路の伝播については、

$$I_{R_R} = \left(\frac{R}{2R} \right)^2 I_{R_2} 10^{-0.1 \alpha(f)R} = \frac{1}{4} 10^{-0.1 \alpha(f)R} I_{R_2} \quad \dots \dots \dots \quad (2.14)$$

ここに I_{R_2} : 海底表面における反射波強度

(f) 海底の反射損失及び散乱係数

垂直入射の場合、海底の反射損失は海底表面における入射音圧と海底表面における反射音圧の比で求められる。

したがつて dB で示せば、 $20 \log 10 \left(\frac{\text{海底表面における入射音圧}}{\text{海底表面における反射音圧}} \right)$

実測された例を図 2.3 に示す。

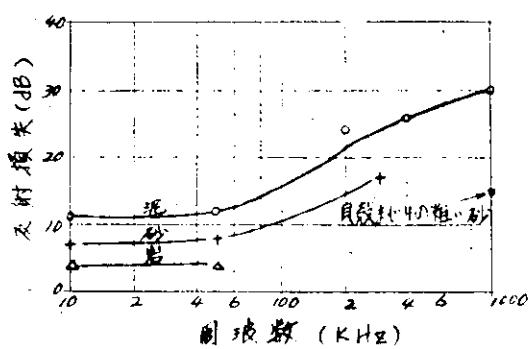


図 2.3 海底の反射損失

また斜入射の場合、散乱強度 S_S は次のとく定義される。

$$S_S = \frac{I_{R_1}}{I_0} = \sum_{i=1}^n T_{Si} \quad \dots \dots \dots \quad (2.15)$$

ここに I_0 : 海底単位面積への入射音強度

n : 単位面積に含まれる散乱因子の数

I_{R_1} : 単位面積からの送受波器に向つて単位距離に離れた反射波強度

T_{Si} : 各散乱因子のターゲットストレングス

各種の底質について送受波器の俯角を変えてモノスタティックの散乱強度を測定したものを図 2.4、2.5 に示す。

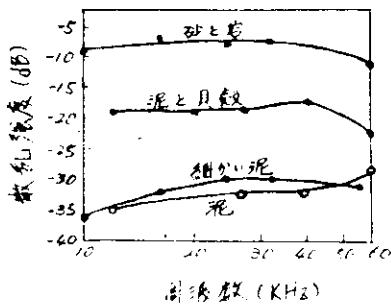


図 2.4 海底の散乱強度の周波数特性（入射角 60°）

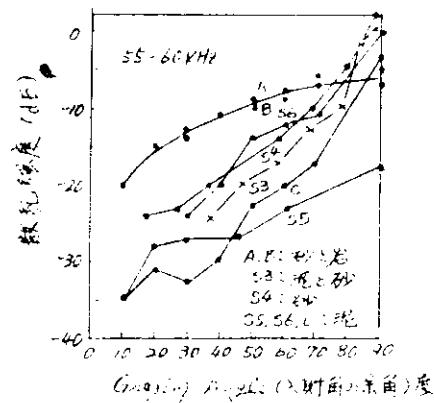


図 2.5 海底の散乱強度の角度特性

(g) 雜音レベル

(i) 海中騒音

海中騒音の音源としては波浪、潮流、降雨等の天然現象によるものと、海中生物、船舶などによるものがあるが、これらの周波数分布レベル等の研究は比較的少ないようである。海水中の自然騒音の中、波浪、潮流などによつて生ずるものは天候、海況によつて変り、沿岸と沖でも異なる。

海況による騒音レベルの変化を図2.6に示す。

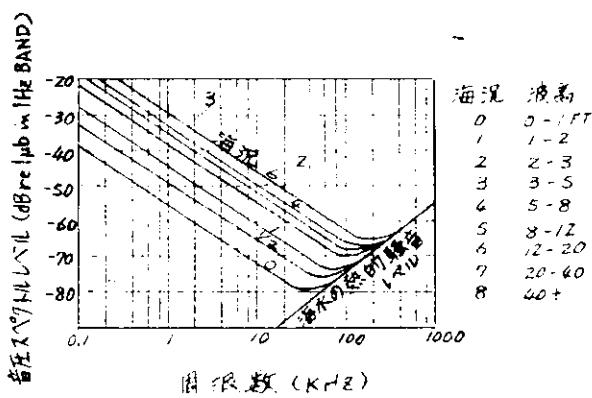


図2.6 海中騒音の海況による変化

海水中の人工騒音の中、船舶の航走時発生する騒音は船舶の種類、大きさ、主機、補機類の型式、速力等により異なるが、これらについて定量的に十分明らかにされているとはいひ難く、今後の調査研究にまつところが多いようである。

(ii) 受波器の指向性と雑音電圧

すべての方向から一様にくる雑音を指向性利得 G 、受信帯域中 Δf なる受波器で受ければ、無指向性受波器で受けた場合に比して、雑音レベルは $1/\sqrt{G}$ となる。したがつて次の関係が成り立つ。

$$L_N = LN' \sqrt{\Delta f / G} \quad \dots \dots \dots \quad (2.16)$$

$$LN = LN' + 10 \log \Delta f - 10 \log G \quad \dots \dots \dots \quad (2.17)$$

Δf は通常、目標および目標のドプラシフトの幅まで必要とされる。

(h) 認識デイフアレンシアル

認識デイフアレンシアルは、反響信号の最終指示方式の種類により異なり、反響信号、雑音レベルもかなり変動するので正確な値は定め難いが、雑音の中から何とか信号を識別できるには 0 ~ 10 dB 程度とされているが、熟練によつてかなり小さい値まで可能といわれている。最近では相関の技術により認識デイフアレンシアルを改善して探知距離を伸ばすことが試みられている。

(i) 探知可能距離

ここでは、周波数 20 kHz、送波ビーム巾半値角垂直 60°、水平 20°、受信ビーム巾半値角垂直 3°、水平 20° 送信出力 10 kW、送波器の能率 0.3、等価受信帯域巾 2.5 kHz、認識デイフアレンシアル 10 dB のソーナー系について、かりに 1.5 Kyd の探知距離におけるマージンを求めるとき次のようになる。20 kHz の吸収係数 $a(f)$ は、式(2.4)を用いるとして 4 dB/Kyd、入射角 0° より 60° までの海底（砂と岩）を検知するとして、散乱強度は -8 dB、また雑音レベルを海況 3、航走時 10 dB 上昇するとすれば、図2.6より -47 dB、また送波指向性利得 15 dB、受波指向性利得 20 dB、送信出力 40 dB、送波器能率 -5.7 dB であるから許容伝播損失 N_w は式(2.1)より

$$2N_w = 71.6 + 40 - 5.7 + 15 - 8 - (-47 + 34 - 28) - 10 = 143.9$$

1.5 Kyd における伝播損失 N_w は、式(2.2)により

$$N_w = 3.5 + 6 + 60 = 69.5 \quad \text{したがつて約 } 5 \text{ dB のマージンがあることになる。}$$

(j) そ の 他

前方の海底傾斜状態を超音波ビームで走査探知するソーナーの探知能力について述べたが、走査ビームの上限が水平に近い俯角になると、音道屈曲の補正、船舶の縦動揺に対する修正も考慮する必要がある。

以上各項によれば当初周波数を 50 ~ 30 KHz に計画していたが、遠距離探知のため 20 KHz 程度に下げる方が好ましいと判断される。

(3-2) 同様装置の能力の調査

座礁予防装置として参考になると思われる 3 装置の主要目を次に掲げる。

(a) モデル 408 NAV-SAFE システム (Edo Westean Corp 製)

本装置は比較的浅く狭い水路を航行する船の 4 個所に各々下方と側方用送受波器を取付け、30 秒ごとに連続走査される。

垂直 目盛	..... 0.5 ~ 100 (ft)	水平 目盛	..... 0.5 ~ 100 (ft)
指 示 数	..... 8	精 度	..... ± 5% or 0.5 (ft)
指 示 時 間	..... 連 続	DISPLAY UPDATING	..... Every 30 sec
垂直警報目盛	..... 5 ~ 100 (ft)	水平警報目盛	..... 5 ~ 100 (ft)
周 波 数	..... 150 KHz (垂直、水平用共)		
出 力	..... 10 W (垂直、水平用共)		

(b) モデル 325 スキヤニング、ソナーシステム (Edo Westean Corp 製)

本装置は、送受波器の傾斜とスキヤニングを機械的に行ない、比較的長距離で広い範囲の海底地形を探知できる。

指 示 形 式	..... PPI 方式	目 盛 範 囲	..... 0 ~ 100, 500, 1000, 2000 yard
精 度	..... 5 (%)	Scan Rate	..... 78, 39, 13, 6.5 deg/sec または手動
Scan Sector	..... ± 45° ± 90° ± 135°		
送受波器傾斜角	..... + 20° ~ -90° (10° step 12 point)		
Range Resolution	..... 1 (ft) on short pulse, 12 (ft) on medium pulse 75 (ft) on Long pulse		
Azimuth Resolution	..... 15° on Wide 10° on Narrow		
Vertical Resolution	..... 15° on Wide 7° on Narrow		
周 波 数	..... 40 (KHz)	パ ル ス 長	..... 0.2, 0.5, 30 (ms)
出 力	..... 50 ~ 500 (W)		

(c) SR-670 A型 シンクロソナー (株光電製作所製)

本装置は魚群探知を主目的としているが、送受波器の機械的機能は(b)のものと同一である。

指 示 形 式	..... 湿式記録 (毎探査区間表示)
目 盛 範 囲	..... 0 ~ 200 ~ 400 m, 0 ~ 400 ~ 800 m, 0 ~ 800 ~ 1600 m, 0 ~ 1600 ~ 3200 m
精 度	..... 5 % 探査速度 21 ~ 6 ~ 3 ~ 2 ~ 1 度/秒
探 査 範 囲	..... 30° 60° 120°
送受波器傾斜角	..... 0 ~ 90° 連続 (1.8 度/秒)
距 離 分 解 能	..... 2 m (最小パルス巾時・分離動作)
水 平 方 向 分 解 能	..... 12°
垂 直 リング	..... 11° 25°
周 波 数	..... 26.5 KHz パルス長 0.5 ~ 10 ms
出 力	..... 4 KW, 8 KW

以上各項の目盛範囲の最大値は、垂直探知（俯角 90° ）の場合の探知距離と考えられるので、前方探知を中心とする座礁予防目的の場合には(b)および(c)以上の能力が必要であり、40 KHz 以下で8dB以上の出力が望ましいと判断される。

(3-3) 海底地勢と航路の調査

船舶座礁より見た世界における航路の危険区域について下記の調査を行なつた。

(a) 小型船を含む一般船舶の座礁地点

(b) 3,000 GT 以上の大型船の座礁地点

(a)については、船名、座礁、場所および座礁発生年月日につき調査した。発生年月日による区分は表2.1のとおりである。

表2.1 調査対象船隻数(発生年月別)

小型船を含む一般船舶

Lloyds Weekly Casual Report (1968年)

発生年月日	1965年	1966年	1967年	1968年	不明	(隻数計)
隻 数	1	2	4	149	11	167

(b)については、船名、総トン数、場所および座礁発生年月につき調査した。発生年月は主として1964年および1965年である。総トン数による区分は表2.2のとおりである。

表2.2 調査対象船隻数(総トン数別)

3,000 トン以上の大型船

Nautical Magazine Vol 193~4 (1965年)

総 ト ン 数	3,000 t ~ 7,000 t	7,000 t ~ 15,000 t	15,000 t 以上	(隻数計)
隻 数	17	40	2	59

上記調査事項につき、乗揚場所を各項目ごとに世界地図上に再現した。これにより世界における座礁多発地を知ることができる。(a)および(b)の図2.7および図2.8はそれぞれの乗揚地を示す。

なお、上記調査とは別途に紅海方面における港および航路における座礁発生につき調査を行なつた。下記の港附近および航路上に多数の座礁船がある。

Port Suddan 附近

Djibouti Massawa 間

Port Suddan Jiddah 間

以上の調査により世界における座礁多発地を知ることができ、あわせて航路におよぼす危険な海底地勢の存在を推測することができる。

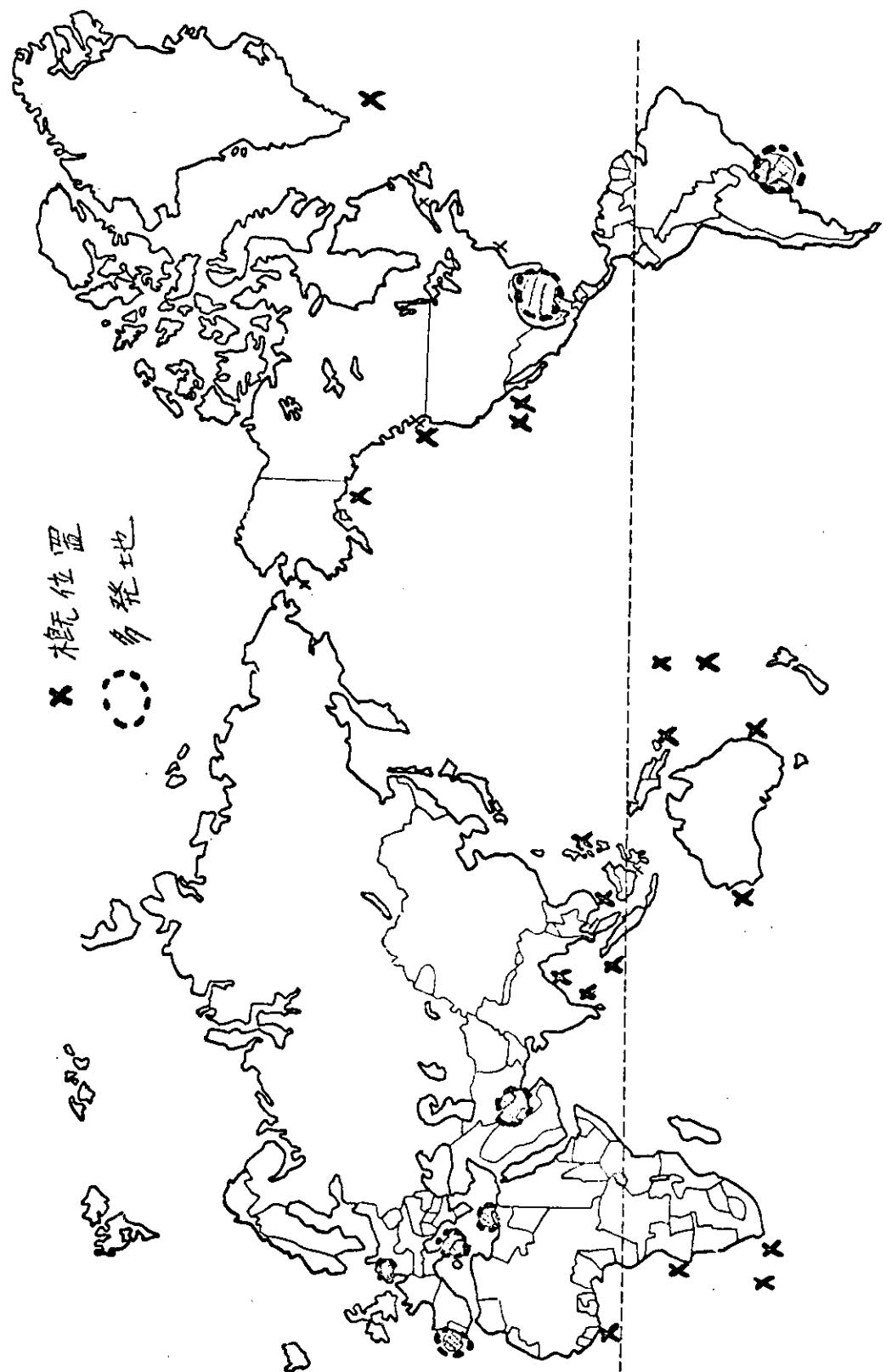


図2.7 小型船を含む一般船類 乗揚港図（1968年を主とするもの）（ロイリストによる）

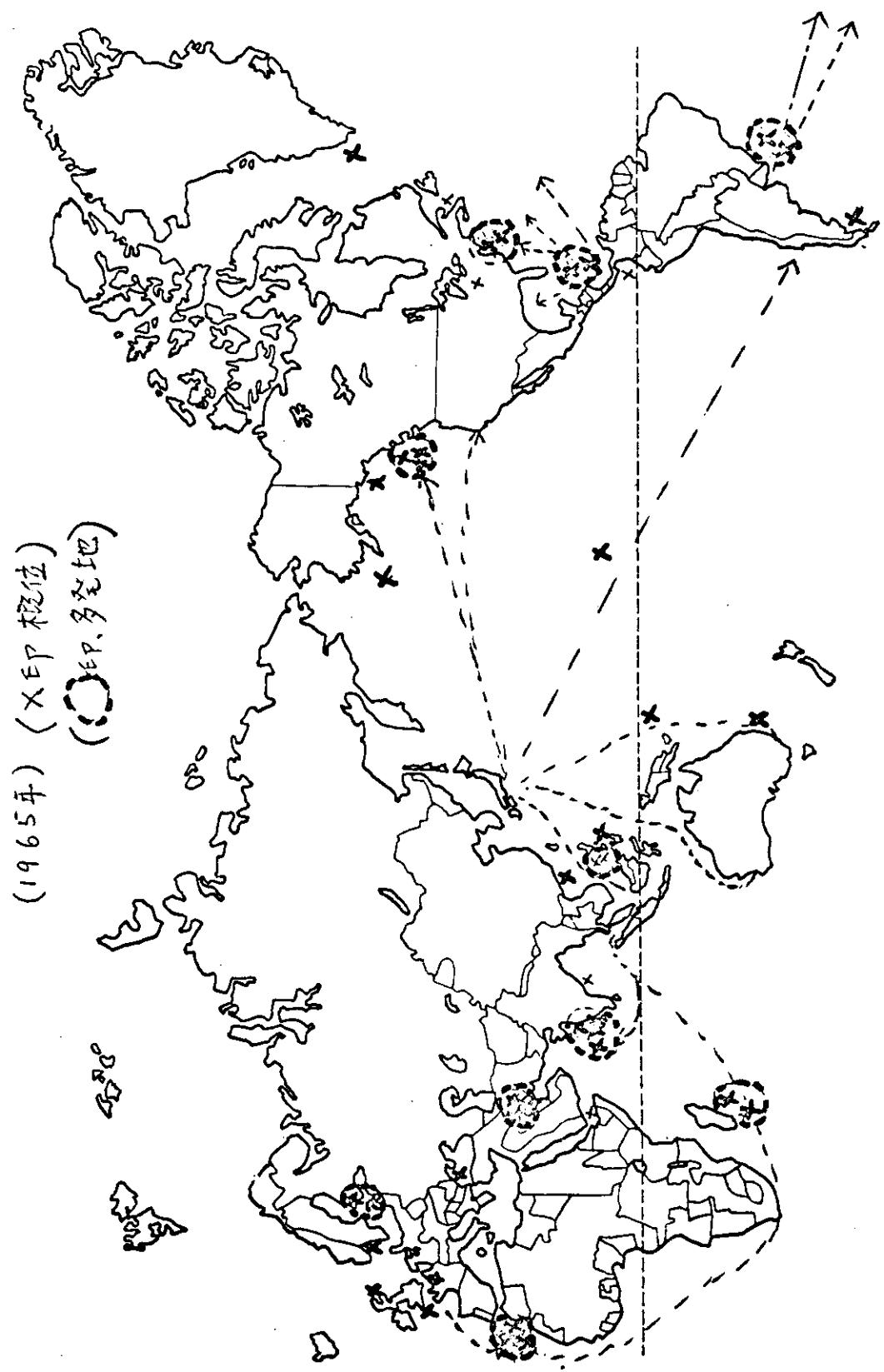


図2.8 3,000 Gt以上の大型炉、発電網

(3-4) 座礁事故例の調査

主として日本近海および日本船の昭和41年より過去10年間の座礁海難の調査をGT2000以上44例につき調査検討を行なつた。

各例につき下記項目を調査した。

1. 船主名、2. 船名、3. 船籍、4. 船の種類、5. 船の大きさ、6. 座礁場所(緯度、経度および具体的な位置)
7. 座礁時の条件(進路、速度、積荷、気象状況、海流状況およびその他)、8. 事故原因
9. 事故時の航海計器の装備およびその使用状況)、10. その他(発生日時等)

この調査に基き、上記中約30例について下記の検討を行なつた。

座礁場所にいたる航路を図面上に再現し、近傍の海の深さを記入した。次に座礁前における水深の変化を「座礁地点までの距離」に対する「船底から海底までの clearance」の関係のグラフで表わした。

表2.2は、調査項目のうちの船の大きさ、座礁場所、座礁時の速度、事故の原因および発生日時を示す。

図2.9は、グラフ状に座礁前における水深の変化を示し、船の大きさにより3段階にわけている。

以上により身近にかなりの隻数の座礁事故が発生していることがわかる。また事故発生時にいかなる水深の変化が現われるかもあわせて知ることができる。

表2.2 座礁海難事故例(調査項目より抜粋)

No.	船の大きさ	座 瀕 場 所	座礁時の速力(KT)	事 故 原 因	発 生 日 時 年月日および時刻
1	D.W.T 7,607	下関海峡東口 浅所	KT 10	運航上の過失	26. 10. 23 日 21. 40
2	D.W.T 6,769	伊勢湾揖斐川口	半速	灯標誤認	27. 12. 17 日 06. 20
3	D.W.T 2,805	金華山島南岸	9	霧中陸岸に接近	29. 6. 30 日 19. 37
4	D.W.T 7,352	内海クダコ水道	11	運航上の過失	26. 3. 9 日 21. 43
5	D.W.T 3,690	備讃瀬戸	10.6	船位確認	31. 10. 22 日 18. 25
6	D.W.T 2,042	鋪 路 港	5.5	霧中船位確認	30. 2. 10 日 06. 20
7	D.W.T 3,552	来 島 海 峡	8.5	操舵機整備不良	31. 2. 15 日 00. 52
8	D.W.T 2,557	来 島 海 峡	8.5	不注意運航	32. 6. 27 日 01. 10
9	D.W.T 7,140	来 島 海 峡	14	不注意運航	35. 9. 17 日 00. 23
10	D.W.T 3,876	来 島 海 峡	15	風潮流に対する不注意	29. 3. 31 日 05. 19
11	D.W.T 8,627	来 島 北 西 部	15	船位不確認	39. 11. 29 日 00. 46
12	G.T 21,286	塩飽瀬戸	14.5	不注意運航 (操舵手が操舵指令を聞き誤る)	39. 2. 24 日 08. 11
13	D.W.T 2,177	室蘭港外	3	不注意運航	31. 3. 24 日 22. 28
14	D.W.T 2,487	塩釜港	5.5	無理運航	31. 6. 8 日 05. 42
15	G.T 3,761	伊豆諸島飯糸	8.5	風潮流に対する不注意 見張り不十分	29. 5. 4 日 03. 46
16	G.T 3,087	宇 部 港	6	運航上の過失	27. 1. 25 日 19. 53
17	G.T 2,035	三 原 瀬 戸	4	灯台誤認	31. 3. 月 21. 57
18	D.W.T 2,574	岡門港、沈没船	Full Ahead	船位不確認 風潮流に対する不注意	34. 3. 10 日 16. 00

No.	船の大きさ	座礁場所	座礁時の速力(KT)	事故原因	発生日時 年月日および時刻
19	G.T 7,085	伊良湖水道	13	船位不確認	29. 12. 31 日 05. 15
20	G.T 6,362	米島海峡	9	潮流に対する不注意	38. 6. 7 日 20. 20
21	G.T 5,210	米島海峡	11.0	船位不確認	37. 1. 28 日 21. 50
22	D.W.T 6,890	米島海峡	11.5	運航上の過失	28. 2. 10 日 23. 14
23	G.T 7,757	米島海峡	Dead Slow	船位不確認	33. 6. 24 日 23. 38
24	G.T 10,461	京浜港横浜区	1.5	水先人の過失	25. 10. 28 日
25	G.T 2,028	備讃瀬戸	6	展望不良中船位憶断	28. 3. 15 日
26	G.T 4,996	韓国南西岸、楸子群島	4	霧中潮流に対する不注意	31. 4. 10 日
27	G.T 7,563	米島海峡	16	船位不確認	33. 3. 17 日
28	G.T 3,074	宇部港内	2	狭水道中不注意運航	34. 2. 20 日
29	G.T 7,613	台湾南端東方	全速力	船位憶断	33. 7. 27 日
30	G.T 8,129	尻矢崎沖	14	風潮流に対する不注意運航	36. 3. 4 日
31	G.T 2,668	塩釜港高島根	0.5	船位不確認	40. 8. 5 日
32	G.T 2,165	三陸沿岸	7.5	船位不確認	30. 1. 1 日 12. 05
33	G.T 2,335	津軽海峡大間瀬	9	船位不確認	29. 3. 28 日
34	G.T 2,855	中之作沖	5	船位憶断	30. 6. 8 日
35	G.T 6,589	西カロリン諸島ヘレン礁	10	船位憶断	34. 12. 5 日
36	G.T 5,148	フーダリ河	回頭中	水先案内過失機関取扱過失	27. 8. 21 日 13. 50
37	G.T 7,611	フィリツビン諸島マスパア島	15.5	不可抗力(未知の浅瀬)	30. 9. 15 日 06. 42
38	G.T 3,715	フィリツビン諸島ミンダナオ島	微速力	風潮流に対する不注意 潮の満干に対する不注意	36. 8. 28 日 06. 08
39	G.T 5,148	フーダリ河	Slow Ahead 回頭中	水先人の過失 機関取扱上の過失	27. 8. 21 日 01. 50
40	G.T 9,322	メキシコトドスサントス湾	13 $\frac{3}{4}$	不注意運航	33. 10. 31 日 17. 10
41	D.W.T 2,123	北海道西岸小島	9.5	船位不確認 風潮流に対する不注意	35. 8. 4 日 03. 14
42	D.W.T 5,490	コラル海	12.6	海流に対する不注意 見張り不十分	32. 10. 11 日 00. 59
43	D.W.T 5,895	ルソン海峡	8.5	船位憶断 運航上の過失	33. 6. 19 日 19. 45
44	D.W.T 4,649	フィリツビン諸島ネグロス島	12	灯台誤認	39. 1. 8 日 04. 42

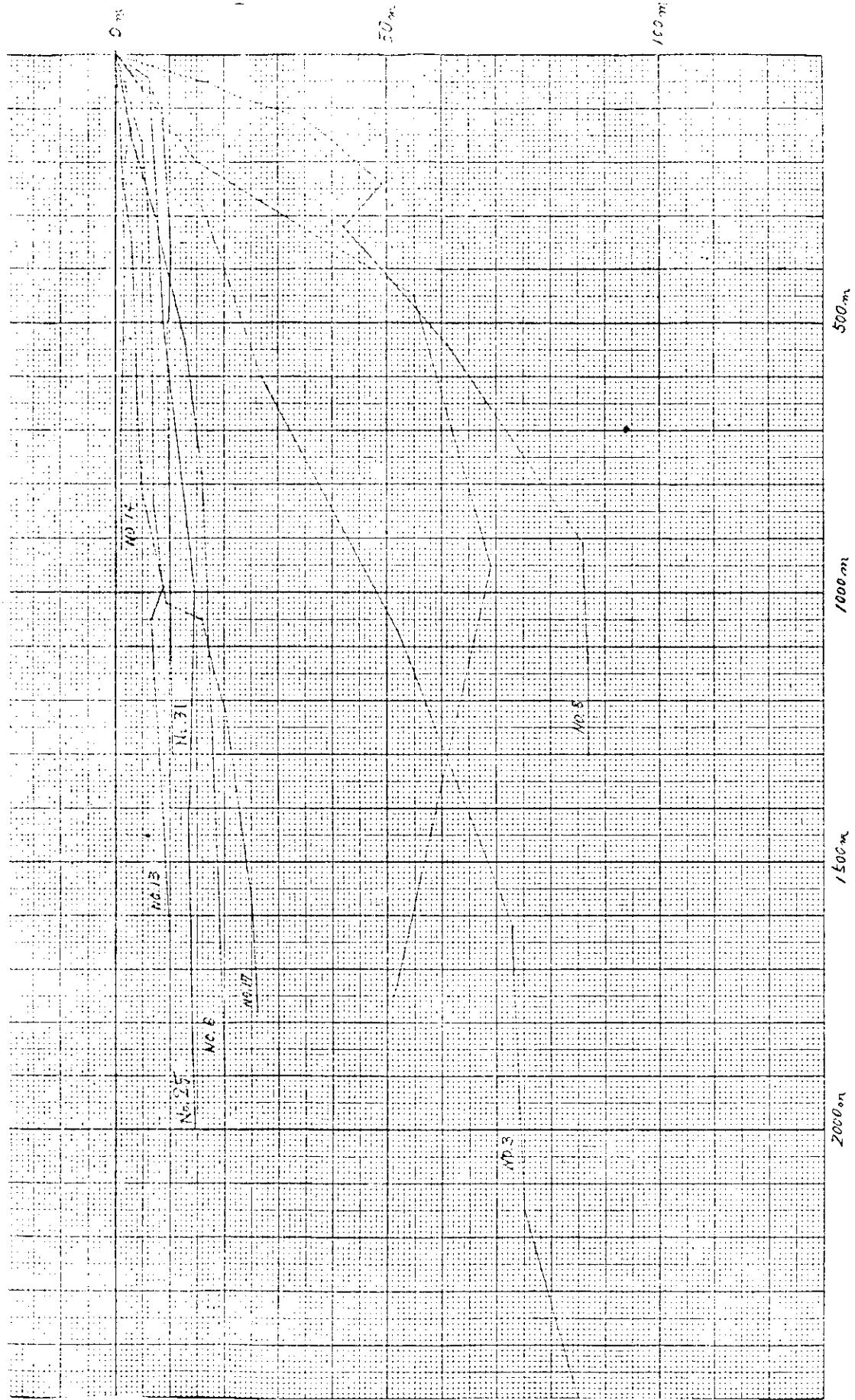


図 2.9 厚礁前ににおける水深の変化
I (2,000 ~ 3,000 G.T.)

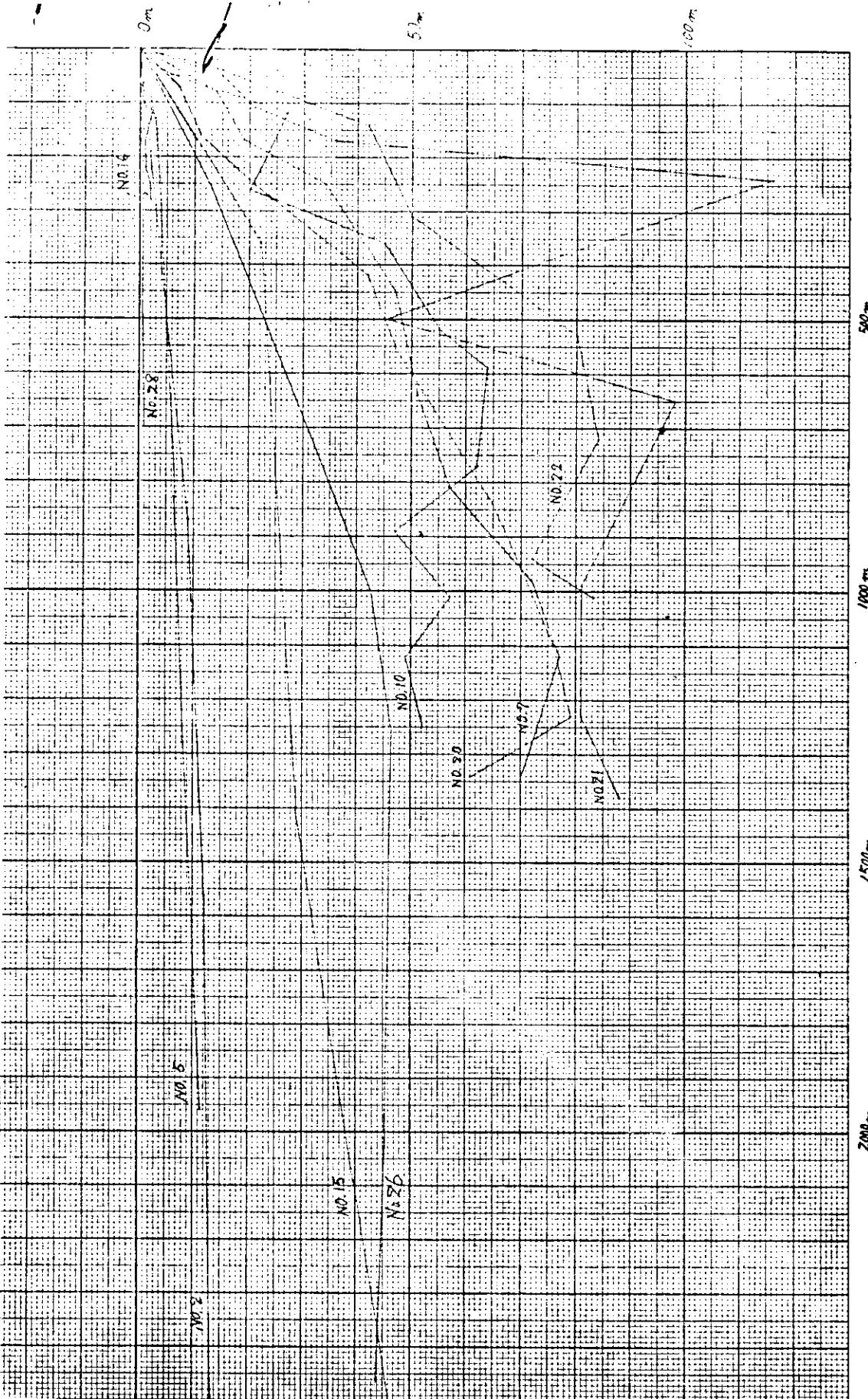


図 2.9 座礁前ににおける水深の変化
】 (3,000 ~ 7,000 G.T.)

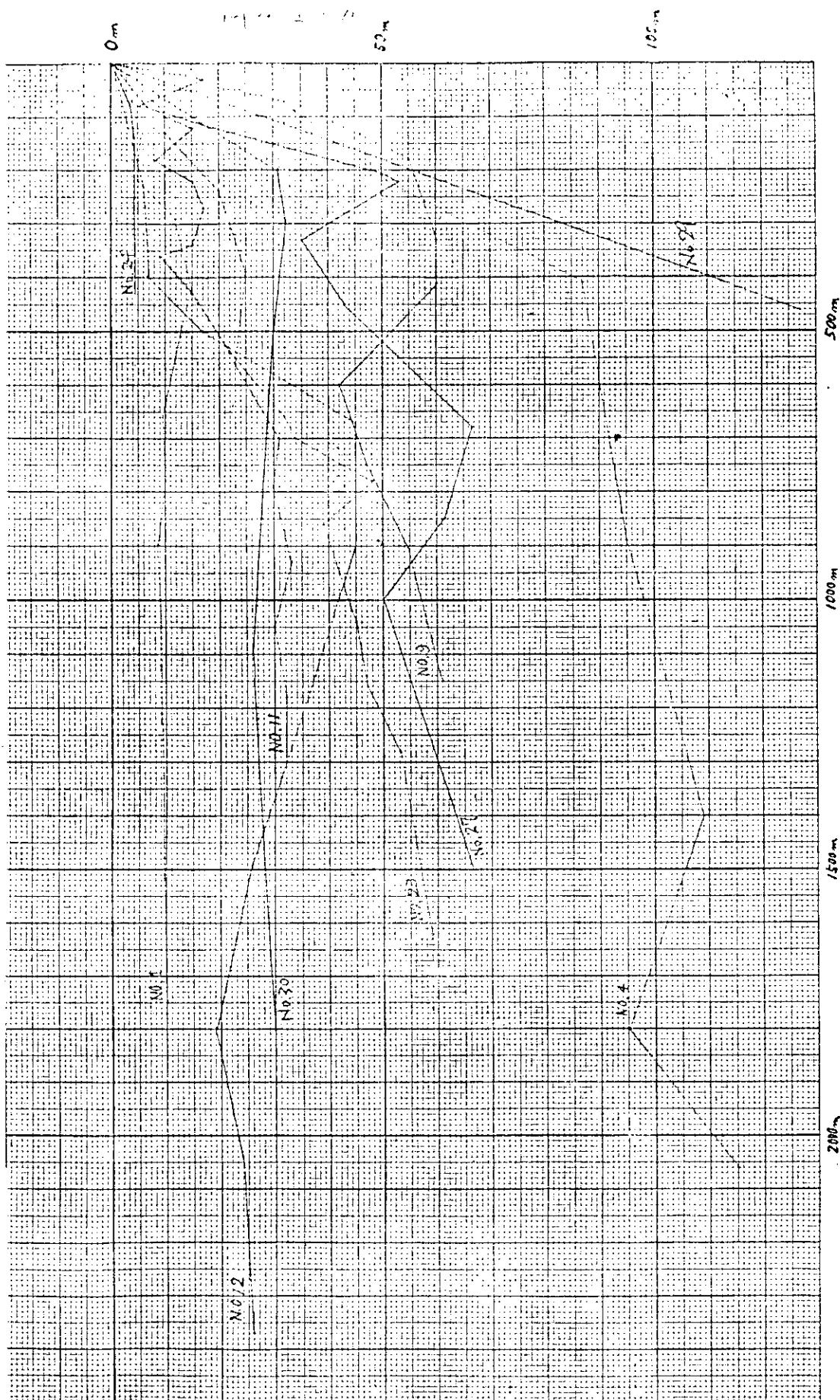


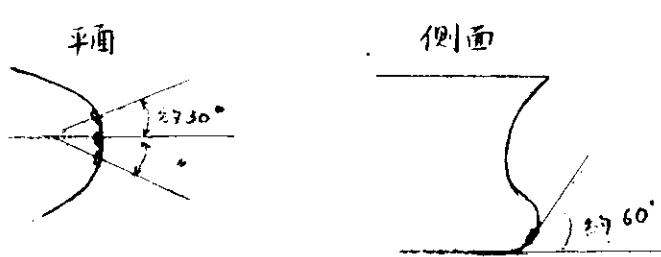
図 2.9 坐礁前ににおける水深の変化
II (Z. 000 G.T.以上)

(3-5) センサ装備位置の検討

座礁予防装置のセンサの位置として船体の前部バルバスバウかまたは特設ソーナードームが一応考えられるが、最近の大型船はバルバスバウを持つているものが多く、バルブ附近では気泡の発生および走航ノイズも少ないと考えられる。一方突出ソーナードームを特別に設けることは船のスピード等の性能上の問題、吃水の問題及びコストの増加等を考えるとあまり好ましくないので、バルブを持つている船を対象に検討した。

センサはバルブの前部3方向（中央、左、右）に各1個計3個を水平からある俯角を持つて装備される場合につき調査した。

(a) センサの位置と大きさ



左記概略位置をベースにして、
バルブの構造上の大きな変更を行
なわずに装備可能なセンサの大き
さについてカーゴライナ、バルク
キャリア、タンカー各1例につき検
討した結果は次のとおり。

船種	船体の要目 L × B × D	センサの制限寸法 (mm)
12.5型カーゴ	160.02 × 24.232 × 13.97	H 500 W 300
60型バルク	218 × 32.2 × 17.7	1300 400
88型タンカー	246.888 × 37.186 × 17.628	1600 550

(b) (3-1)(1)の設定値を条件としたセンサの装備可能な船

センサの外形寸法を図2.10とし、95型タンカーに適用した場合の1例を図2.11に示す。この場合超大型以下約7万トンまでの船のバルバスバウには装備可能である。

船体の空間的スペースと取付状態での船体外形との関連からケースバイケースに検討を要するが、5万トン位のもので装備不可能ではないと考えられる。

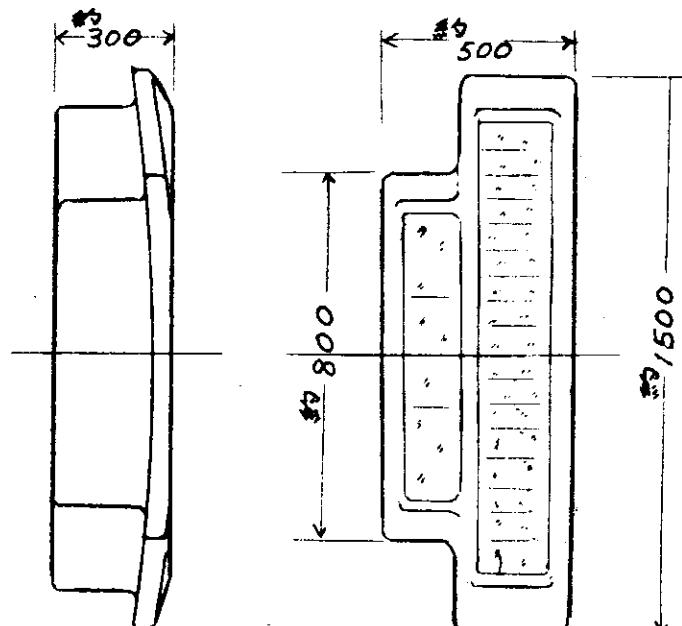


図2.10 センサ外形図

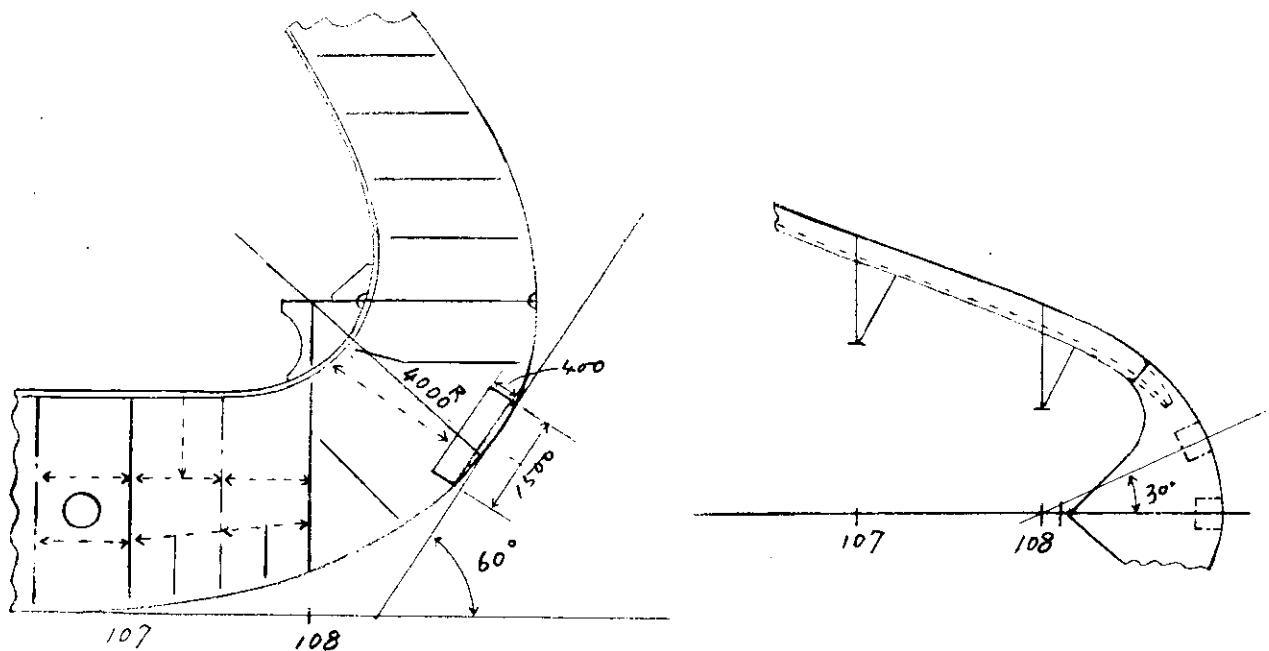


図 2.11 センサ取付位置図

(3-6) 船体の縦動揺の検討

暗礁探知ソナーに対する主要な外乱の内、船体の縦動揺は非常に大きい。しかしこの運動は船上で計測し修正することは可能である。そこでそのオーダがどの程度かを概略推定する。

(a) 対象船

対象船は、タンカとし、第90研究部会で取上げられたものとする。主要寸法は次のとおり。

L_{pp}	250.0 m	L/B	6.00
B	41.67 m	C_b	0.80
d	13.89 m	B/a	3.00
排水量			118,940 ton
Natural period		上下揺	10.15 sec
ピッチング			9.08 sec

本船は現在ではやや小型であるが、船体運動を支配する船型パラメータは現行の大型タンカと大差ないものである。

(b) 船体の縦動揺

図2.12にピッチングとヒーピングの合成による船首の上下動の振幅と波高の比 (Z_B/nA) とピッチング角と波の最大傾斜との比 (θ_0/θ_A) を示す。これは向波の場合である。

波高が一定とすれば波長が船の長さの約1.3倍 ($\sqrt{L}/\lambda = 0.87$) で船首の上下動は波高の約2.3倍に達する。

ただし、本計算は線型化理論によつてるので波高が大きい場合は正しくない。

(c) 動揺の大きさの推定

暗礁探知ソナーの精度を強く要望されるような水域は元来水深も浅く、また航行時は海面は比較的平穏であるはずである。そこで図2.12において $\sqrt{L}/\lambda = 0.87$ の波長約330 mのうねりにあり、その波高が1 m～5 mの範囲にあるとして計算してみる。

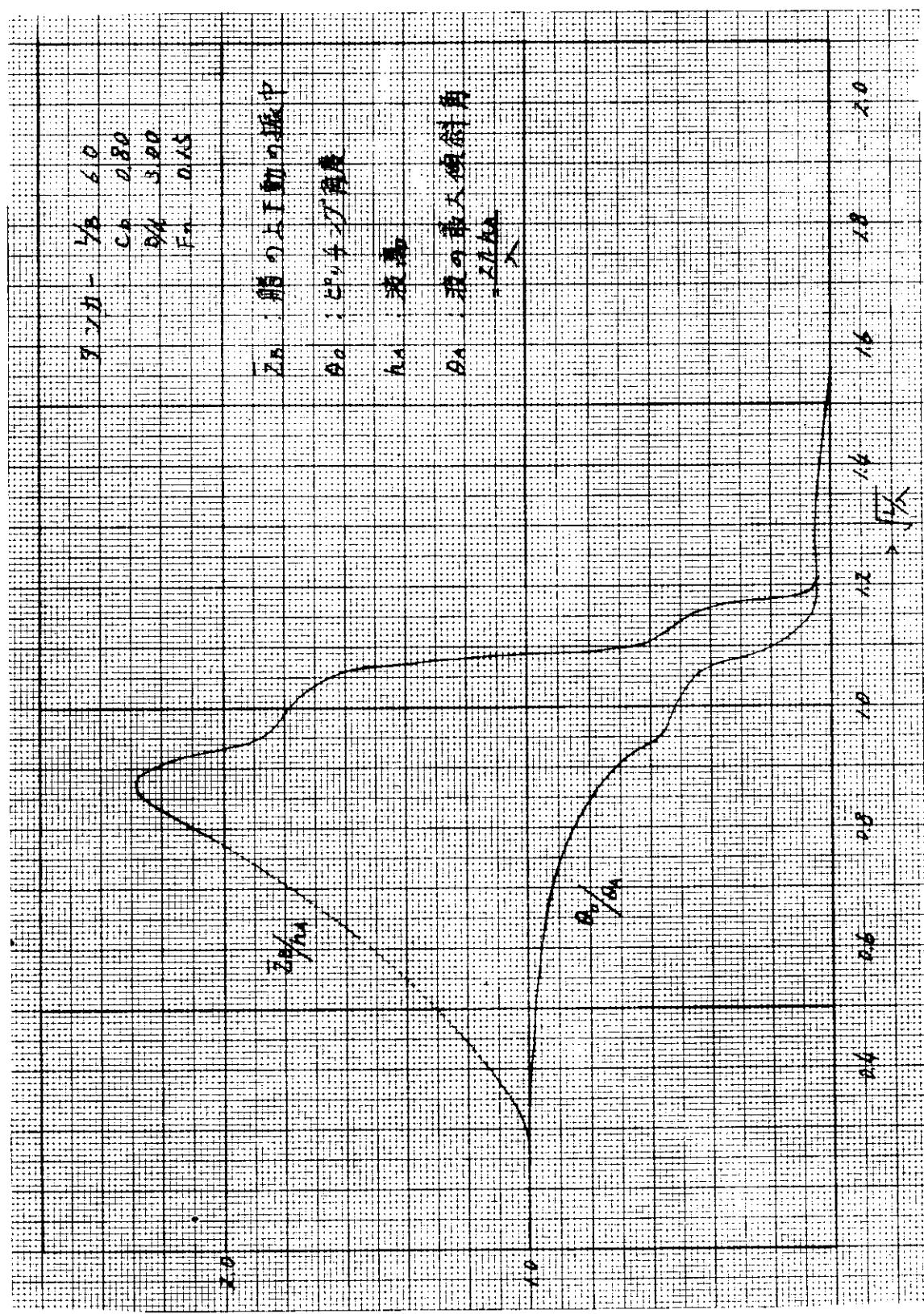


図 2.12 船体の継動揺

計算してみると次のとおりである。

波高	船首の上下動	ピッティング角
1 m	2.3 m	1.1°
3 m	6.9 m	3.3°
5 m	11.5 m	5.5°

波高5mのうねりは相当大きく、実際には非線型影響で左記のような大きな運動にはならないものと考えられる。

動揺とは別に積荷の状態によって船の縦傾斜(トリム)が変化する。この

値は船型の大小、船種によつて異なるが、大略1~1.5°までである。

以上暗礁探知ソーナーの立場から船体の縦動揺を簡単に検討したが、ソーナーの精度向上のための動揺角修正用検出器は約5°の計測単位があれば十分と考えられる。

しかし、その中点をどこにおくかは船の大小、船種によつて異なる点に注意しなければならない。

(3-7) 海底と魚群などを識別するための魚探データの解析

略称などの説明

魚群信号：魚群などから反射して戻つてくる超音波信号

底信号：海底から反射して戻つてくる超音波信号

魚底識別：魚群信号と底信号との識別

多重信号：魚信号や底信号が海面または船底で反射して再び水中に向けられ、魚群や海底に当り、反射して戻つてくる信号

魚探：魚群探知機(測深機と同一)

入射余角：海底に対する探知ビームの入射角の余角、すなわち俯角と同じ。

海面残響：発信残響ともいい、海面附近のゴミ、プランクトン類により発信信号が長く尾をひくようになる現象音波が水中を通つて海底に到達するまでの間には種々の障害物に遭遇し、これらの中間障害物からも音波は反射して戻つてくる。中間障害物中最も多いのは魚群・プランクトンであり、音波が海底に対して斜めに入射する場合には魚群信号の方が底信号より強くなり、場合によつては魚群信号だけしか現われない。したがつて、座礁予防装置用センサにおいて魚群信号は最大の妨害信号となり、魚底識別は不可欠の重大問題となる。この問題を解決するために魚探を用いて得た記録データにより、魚群信号と底信号の現われ方と魚底識別の可能性について次の検討を行なつた。

(a) 魚群信号と底信号の現われ方

(i) 魚探記録(録音信号直視を含む)による検討

(イ) 現われる間隔：多重反射の場合底信号は各次信号とも等間隔に整数倍距離的関係で現われるが、(ただし海表反射の場合には第1次信号に吃水差を加える必要がある。)魚群信号は第1次信号に対して第2次以後の信号間隔が長く、非整数倍距離的関係で表われる。(図2.13)

(ロ) 周波数との関係：プランクトン(DSL)信号は周波数を低くすれば弱くなる。(図2.14)

(ハ) 入射余角との関係：入射余角が小さくなるにしたがつて底信号が弱くなり、魚群信号は強くなる。(図2.15、2.16、2.17)また、最遠信号が魚群信号になつたり、底信号がなく魚群信号だけになる場合もある。(2.18、2.19)

(ii) 文献等のデータによる検討

(イ) 入射余角との関係：底信号は入射余角が小さくなるにつれて信号強度が弱くなり、2~3.5dB/10°で減衰するものと見られる。(図2.20)

また、魚群信号は垂直(背)の場合よりも、水平(側面)の場合の方が6dB程度強くなるが、探知ビーム

ムに対して平行直進（頭または尾）している場合には、逆に 20 db 程度弱くなる。（図 2.21、表 2.3）

(b) 周波数の関係：底信号は、砂岩などの硬底では 20 ~ 40 kHz で強く、ヘドロなどの軟底では周波数が高いほど強くなる（図 2.22
図 2.4 と同じ）。また、魚群信号は周波数が高いほど強くなる（図 2.21）。

(c) その他の妨害信号の現われ方

- (i) 海面残響：探知ビームが水平に近いほど長くなるが、吃水量を 10 ~ 20 m にすれば相当減少するものと考えられる。また当然のことながら必ずしも後続する。
- (ii) 走航雜音：現われる時点も強さも不定である。またバルバスバウのような突出ドーム箇所に装備すれば、発生率も減り弱くなる（表 2.4）。

(d) 魚底識別手段

- (i) 在来の手段：海底消去法：常に底信号の方が強いことを条件とし、クリップまたは微分回路によって取出した底信号で信号増幅回路を閉止させ、底像直下にいわゆるホワイトライン、グレイラインなどの白帯状の記録を行なわせ、底着魚群の検出と、白帯の巾の変化により底質の判別を行なつている。（図 2.23）

- (ii) 在来手段の活用の可否：入射余角が大きく、魚群が底に接近している場合にのみ利用できる。

(e) 開発すべき新手段

上記(i), (ii)を吟味すると、概略、次のような識別手段が有効と考えられる。

(イ) 距離と深度による併行的時間感度制御処理：距離と探知ビームの俯角との相乗によって定まるレベル補正手段、たとえば大鋸歯状波と小鋸歯状波とを重複させた時間感度制御手段により信号強度の補正後、比較的強い信号を選出する。

(ロ) 整数倍処理：①各俯角方向ごとに整数倍距離点との信号を抽出し、抽出数の多い方の信号の第 1 次信号を底信号として選出する。② 2 信号のみで整数倍関係が成立しないときは遠方側を海底信号とする。③ 2 信号のみで整数倍関係が成立するときは両信号とも海底信号と仮定する。④ 1 信号のみならそのまま海底信号とする。

(ハ) パターン処理：底立上り延長より極度に外れる列外信号を除外する。（隣接する大俯角側信号に対する小俯角側信号の水平距離が(一)になつた場合小俯角の信号を除外する。)

(ニ) 多数決処理：数回分の探知情報の統計処理し、一定点に多出する信号を底信号として選出する。

注) これらの統計判識手段は中層魚群、移動性魚群からの信号の除去以外に不定雜音信号の除去手段としても有効と考えられる。

なお、将来各信号内における周波数相關手段により S/N が改善され、探知能力が向上されたとしても、当然魚群信号も同時に強まるので、この魚底識別手段は不可決なものと考えられる。また、ドップラ効果を利用した魚群識別手段の開発についても一考の余地がある。



図2.13 多重反射の現われ方

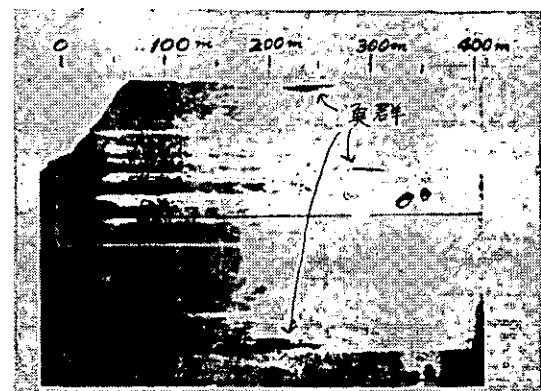


図2.19 入斜余角 0° のときの魚群像



図2.14 プランクトンDSLと周波数の関係

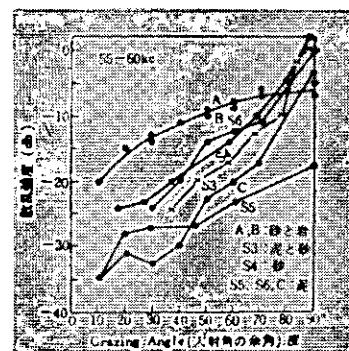


図2.20 海底の散乱強度の角度特性

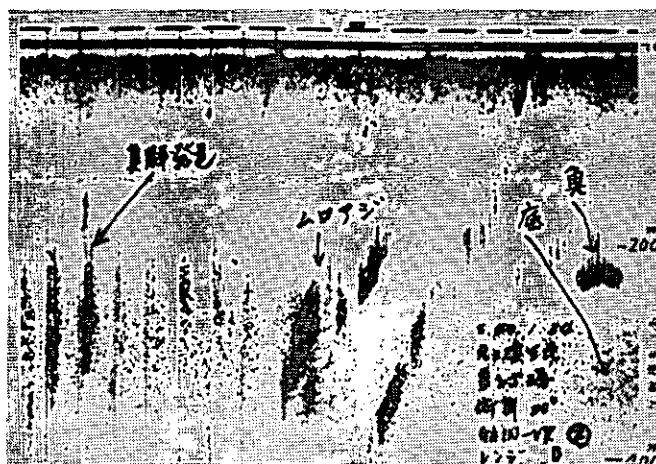


図2.15 魚群と海底の現われ方(俯角 20°)

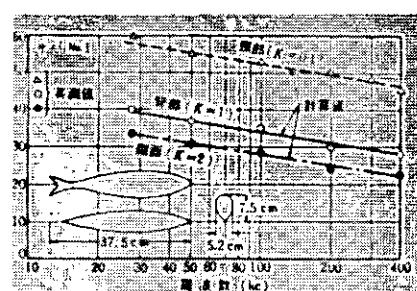


図2.21 サバ6.1の反斜損失

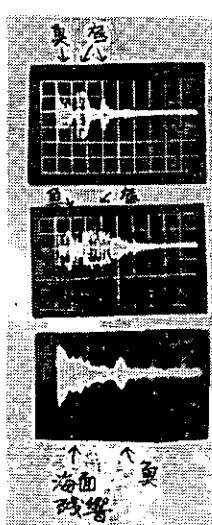


図2.16
入射余角 60°

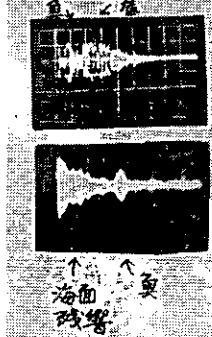


図2.17
入射余角 40°

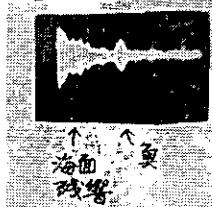


図2.18
入斜余角 5°

魚群信号と底信号
の現われ方
(入射余角との関係)

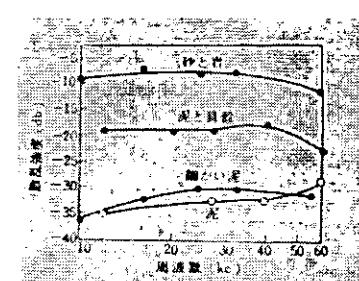


図2.22 海底の散乱強度の周波数
特性(入射角 60°)

表2.3 形状係数Kの値

試 料	超音波の入射方向		
	背 部	側 面	頭 部
テ パ	1	2	0.13
ソーダガツオ	1	2	0.5
ア ジ	0.8~1.2	1.4~2.2	0.4~0.6
キンメダイ	0.9	3	0.45
カ レ イ		2	
平 均	1	2	0.4

表2.4 送受波器の船底からの突出量と反響強度

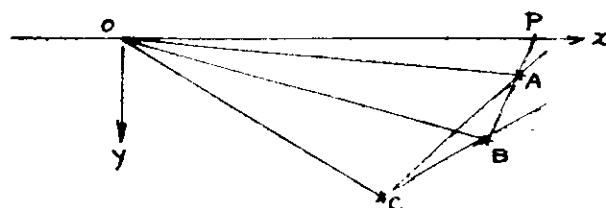
突 出 量 (cm)		反 韶 相 対 強 度 db
受 波 器	予 波 器	
0	0	20
0	10	30
10	10	50
20	0	35
20	10	60
20	20	50

(4) 暗礁予測計算のプログラム作成および計算

船舶の航行中に前方の海底傾斜状態を超音波ビームにより探知し、この信号をもとにそれ以遠の海底深度を電算予測し、暗礁の存在による危険表示をさせる計画の一端としてそのためのプログラムの一案を検討し計算した。

(4-1) 反射点の位置の把握

計算機に対しては、適当な発射角のビームに対するレスポンスが、反射点までの直線距離として（実は音波の往復所要時間であるが）3点与えられるものとする。 $(\theta_i, d_i, i = 1 \sim 3)$



船の位置をO、反射点を最も遠いものからA、B、Cとする。点Oを原点と考え、図のように座標軸を決めればたとえばA点の座標は、

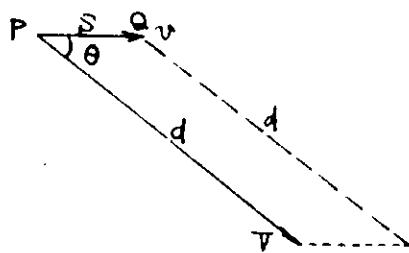
$$x_1 = d_1 \cos \theta_1$$

$$y_1 = d_1 \sin \theta_1$$

等と計算される。海底の形状の推定はともかく、ここではX方向への航行に対して最も安全側の値として、距離OPをとる。PはAと他の二点を結ぶ勾配の中、最も急な組合せを延長して海面と交る点である。

ところで、dは一般にかなり長いので水中とはいえ、音波が往復するのに結構時間を要する場合も考えられる。この点については次のような補正を施す。

図2.25 在來の魚底判別手段例
(ホワイトライン)



点Pで、発射角 θ で発射した音波が戻ってきて受信されるまでに、

$$t = 2d / (v / v) \quad (\text{秒})$$

が経過する。この間に船は

$$s = vt \quad (m)$$

だけ前方に進んでいる。したがつて水平距離Xに関しては補正を行ない、

$$X = d \cos \theta - 2s / (v / v)$$

とする必要がある。

(4-2) 暗礁位置の推定と欠測に対するバックアップ

暗礁位置のめやすとしてのP点の計算法は(4-1)に述べたとおりである。ただし、実際には毎回の測定で得られる値のみを使うことはせず、最近の5回の値をプールしておいてこれらの平均値をとるか、または平均値±E×(標準偏差)とする。

この方法をとることによつて、誤差の危険をかなり救うことができる他、何らかの原因で単発性の欠測が生じても最近のデータが残っているから代用することができる。

ただし、そのためには距離OPを5箇、記憶させておくだけでなく、船の進行に伴つてこれらの値を次々に修正しておかなくてはならない。

計算機の中でのデータの動きを図解すれば次のようになる。

2000	2100	1900	1800	2200
------	------	------	------	------

進行距離100 mを引く

1900	2000	1800	1700	2100
------	------	------	------	------

左に1つ移動し、左端の1箇は捨てる

(3100) ←	2000	1800	1700	2100	
----------	------	------	------	------	--

右端のあいた所に新しく測つたOPの値を入れる

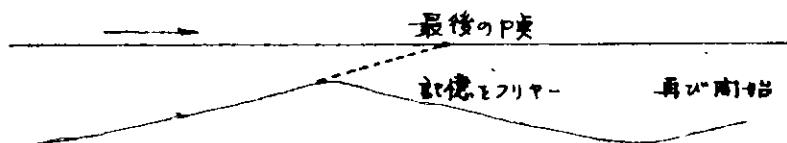
2000	1800	1700	2100	2200	←
------	------	------	------	------	---

これは、完全に反射点が把握された時の話であるが、かりに1点しか確認できず、OPを求め得ないとか、あるいは全く反射がなくなつてしまつたときは、最初の1回位は上記の更新手続を省けば、もとのデータがそのまま残つていて後に立つ。

ただし、OPが無限遠になる場合は、また別途の考慮を要する。すなわち、海底が水平かまたは下り坂の時はたゞ反射がすべて確認されても、(4-1)に述べた計算で点Pを求めるることはできない。

海底の勾配が正でない状態が続いていると認められたなら、直ちに記憶してあるデータをクリヤしておかなければならない。

このために、このような状況が何回続けて起きたかを数えておき、2回続けて起きたら記憶をクリヤするようにしておく。さもなければ再び上り勾配のデータが入ってきた時、前の（関係のない）データと混同してしまうおそれがある。



(4-3) 平均値と標準偏差のとり方

周知のように正規分布をする統計量からのサンプル値は、

$$\text{平均値} \pm 3 \times (\text{標準偏差})$$

の範囲にほとんど入ってしまうといわれている。

ここでは、5回のOP値の平均値をとることが必ずしも目的にあつてはいるとはいひ難い。もし、5回のサンプル値から不偏推定値を得ようとするならば、誤差としては平均値の標準偏差すなわち

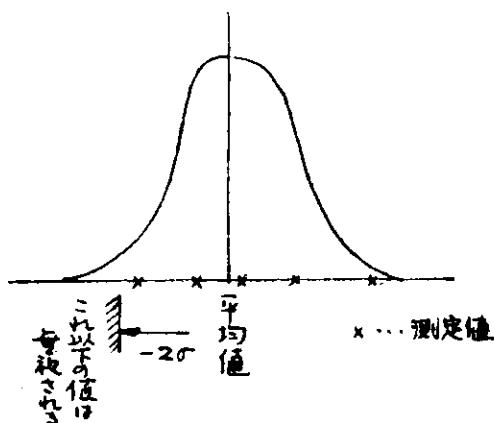
$$\sigma / \sqrt{5}$$

をとるべきであろうが、この場合は安全第一を考え、本来ならば5つの値の最低値をとりたいところであるが、何らかの理由で極端に低い値が入ってくるおそれもあるので、そのような極端に外れた値を除外する目的で標準偏差を用いる。すなわち、サンプル値自身の分布を問題とするのである。

したがつて、標準偏差として σ を用い、

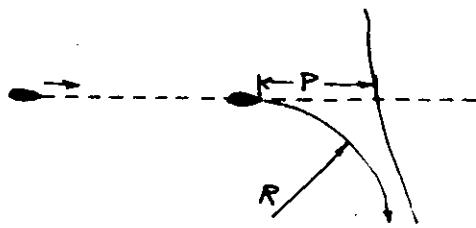
$$\text{平均値} - 2\sigma$$

を最安全側の下限値として採用する。



(4-4) 危険度の表示

船の旋回可能直径を2Rとする。暗礁の危険度を表わすのに、暗礁までの距離をPとして、このP/Rの値により次のように危険度を定め、それぞれ次に示すようなアクションをとる。



危険度	アクション
$1.8 < P/R$	1 左右のSCAN中止
$1.6 < P/R \leq 1.8$	2
$1.4 < P/R \leq 1.6$	3 左右のSCAN開始
$1.2 < P/R \leq 1.4$	4
$P/R \leq 1.2$	5 左右旋回の指示を出す。

左右のSCANは、危険度3になつた時自動的に開始し、危険度が1になつた時、自動的に停止する。

(4-5) 記録形式およびフローチャート

以上の計算結果は、次のようにプリントされる。また、計算の手続きを別紙のフローチャートに示す。

SCANNER REPORT								1969 / 2 / 21
TIME	SPEED	DETECTED	LEV	LEFT	CENTR	RIGHT	COMMENT	
xx xx xx xx.x	xxxx/xxxx	xxxx/xxxx	x	xxxx	xxxx	xxxx	xxxx	
xx xx xx xx.x	xxxx/xxx	xxxx/xxx	x	xxxx	xxxx	xxxx	INVS	
xx xx xx xx.x	INVISIBLE	INVISIBLE	x	xxxx	xxxx	xxxx	INVS	
xx xx xx xx.x	xxxx/xxxx	INVISIBLE	x	xxxx	xxxx	xxxx	INVS	

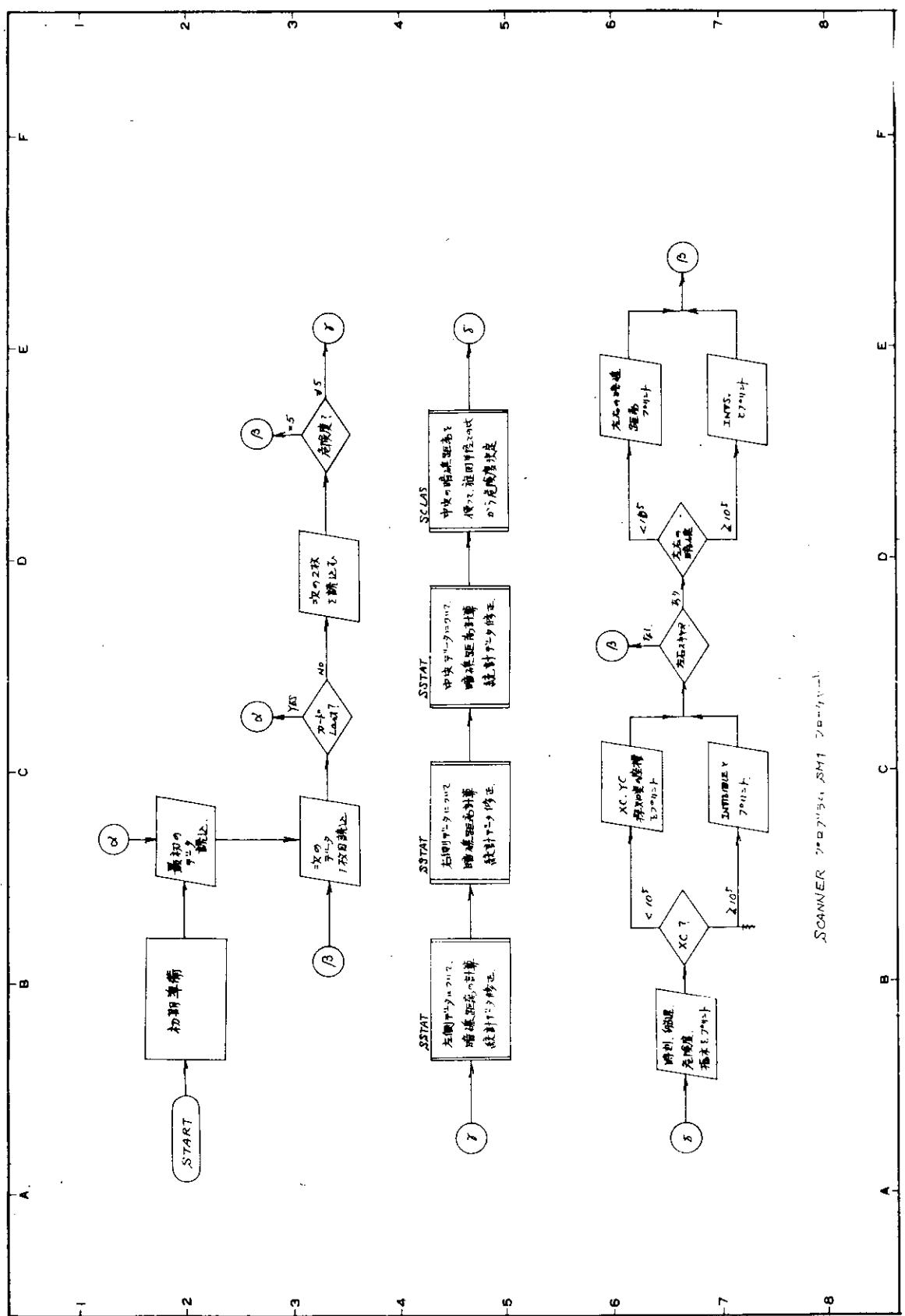
予測は探知不能な点に対し現在わかつている情報から確からしい情報を得ようとするところに予測という手段が起るわけである。しかし事故予防という観点からいつて不確とはいはながらある程度安全側に出るように処理することは十分とはいえないまでも研究を前進させるステップとして考えられる。

また装置の探知能力、精度の向上さらに種々の手法を組合せて改善することも重要である。

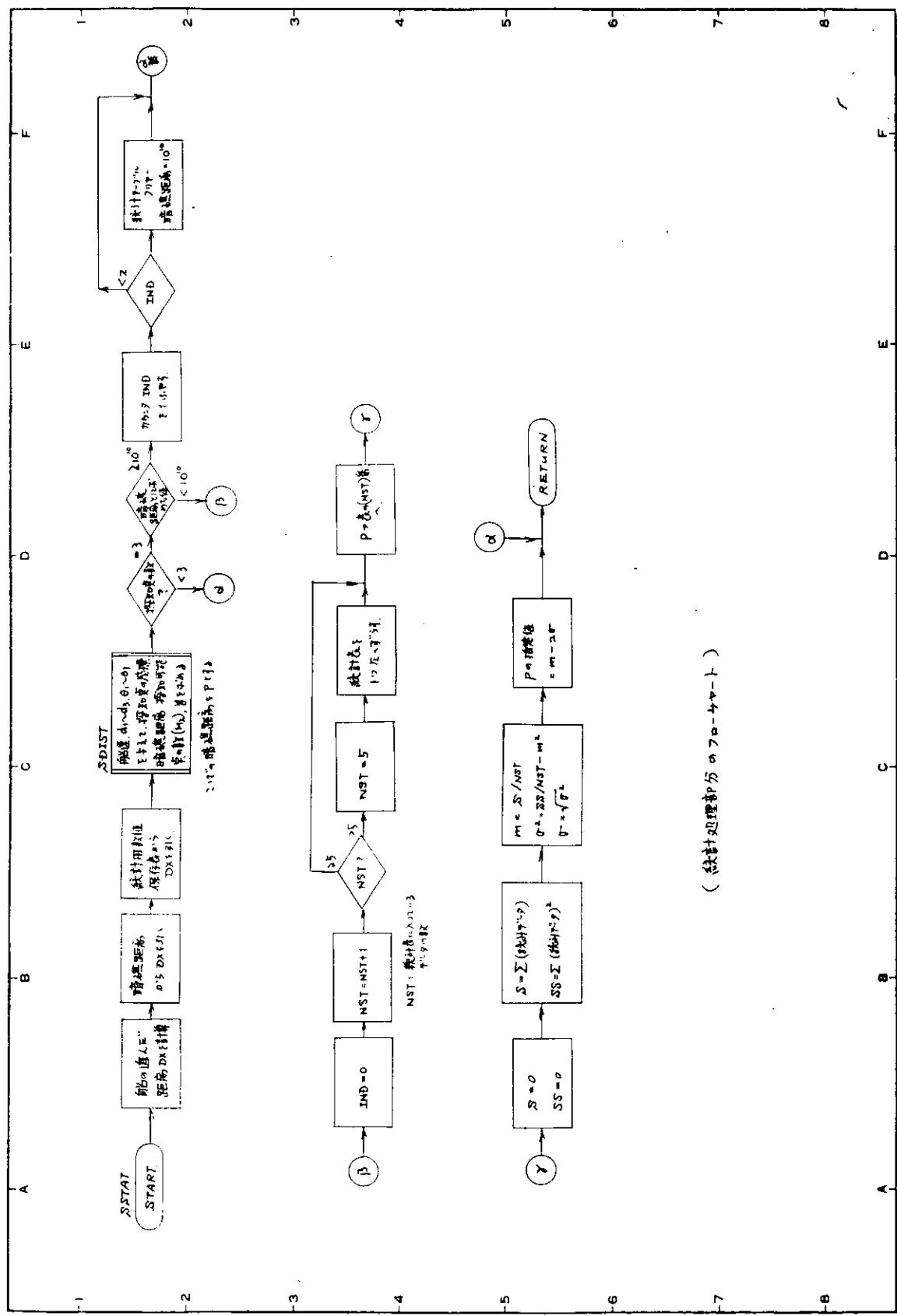
得られる信勢から以遠の海底深度を予測する手段として次の方法があげられる。

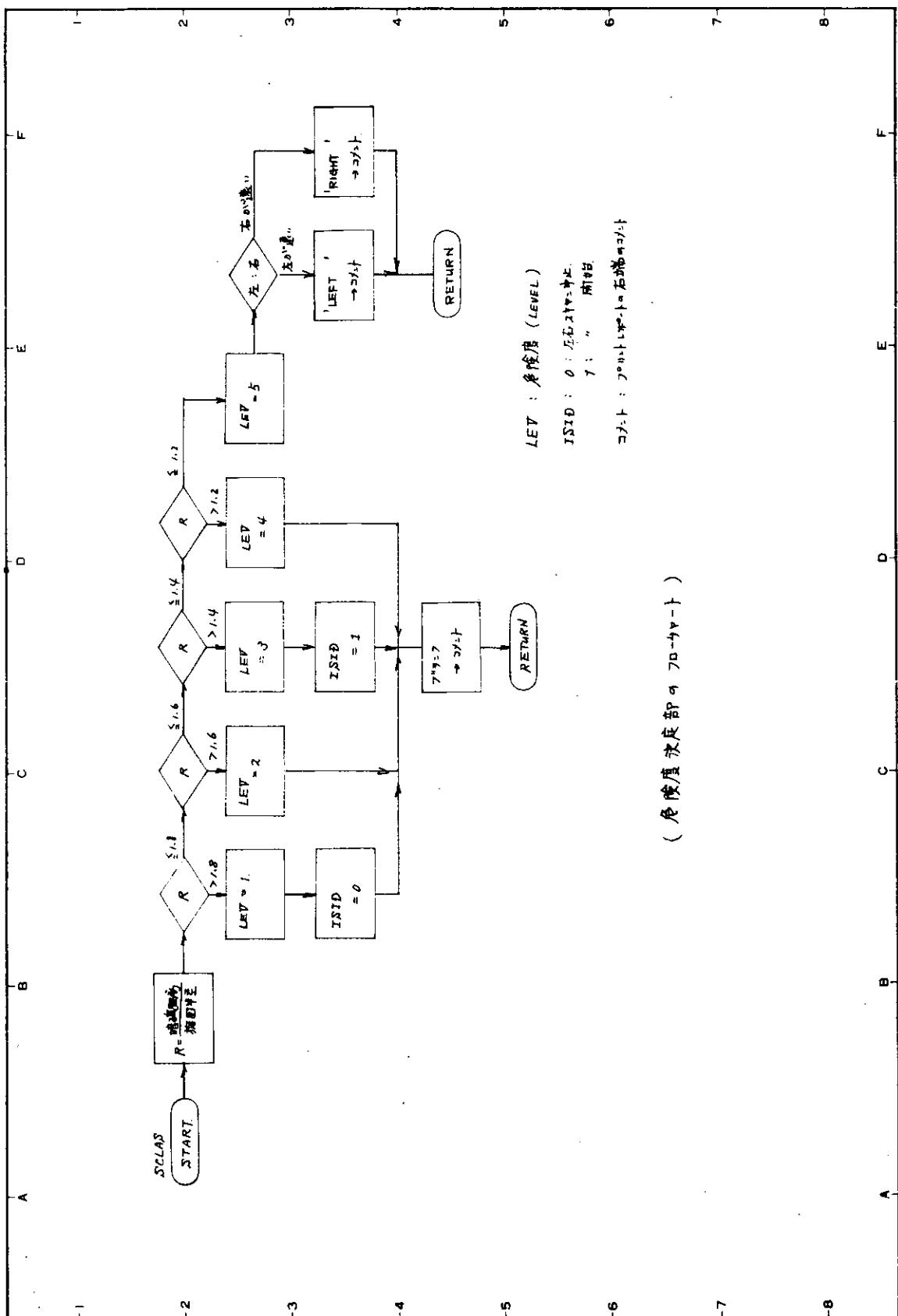
- (a) 最遠地形の平均的形勢の延長をもつて未来を仮定する。
- (b) 総体地形の平均的形勢の延長をもつて未来を仮定する。
- (c) 経験地形と現地形との比較から未来を仮定する。

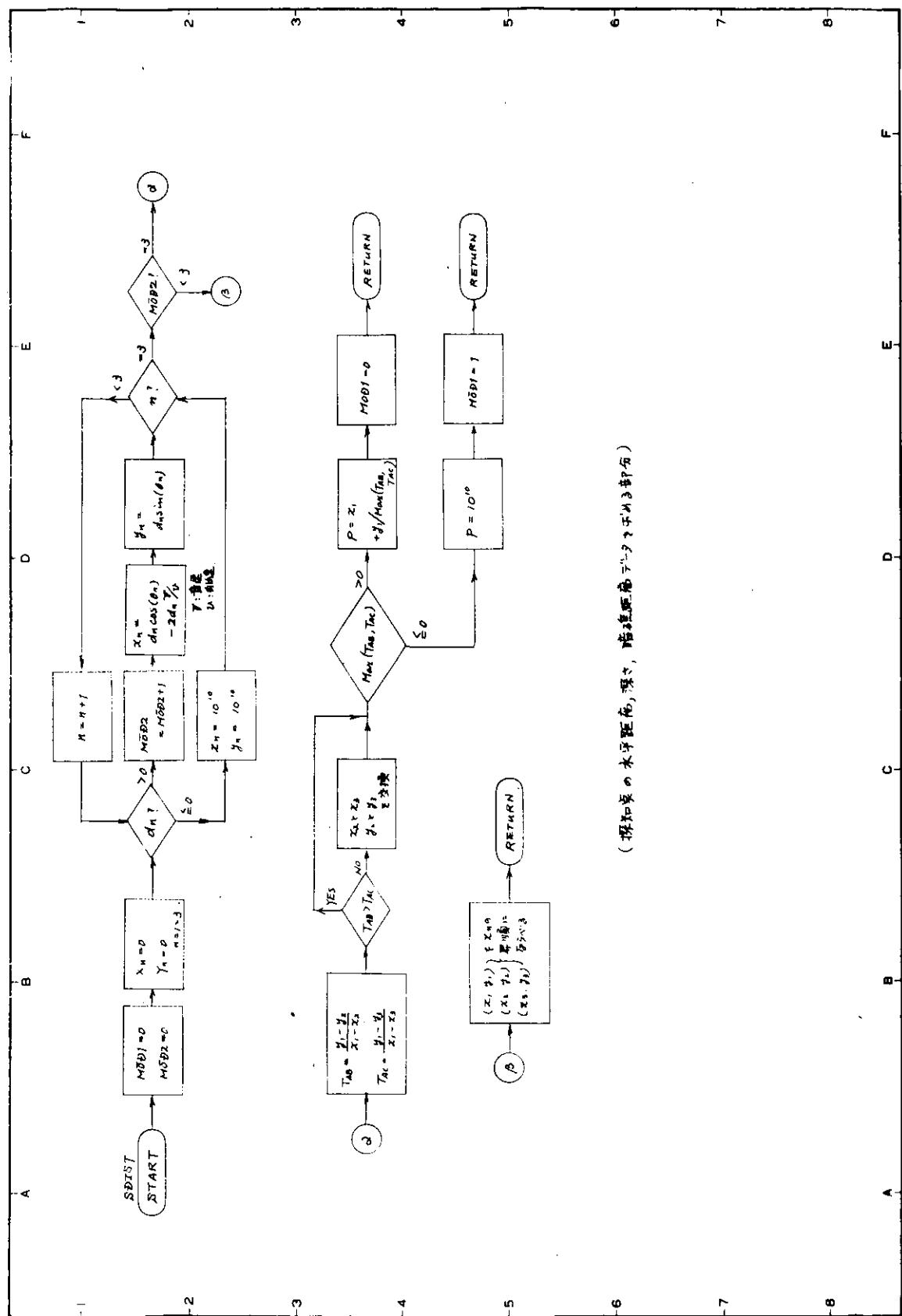
ここでは(a)についての一手段についてプログラム演算を行なつたものである。場合により不確かではあるが直接探知不能な場合には有用な手段であると判断される。



SCANNER 2D Processor SM1 プログラムフロー







(5) 海上模擬試験

魚探用手動上下全方向旋回装置付送受波器および垂直開定型送受波器を実験用小型船に舷側装備して魚探により海上模擬試験を行ない、魚底識別手段および予測計算などの検討に必要な類似の検討用資料を得るとともに、湾港航路付近の海底の様相と予測による座礁予防システムの成立などについて若干の検討を行なつた。

(5-1) 海上模擬試験

(a) 実施経過 表2.5参照

なお、この海上模擬試験だけでは十分な探知データを得ることができなかつたので表2.6による探知データを補足援用した。

(b) 使用機器 表2.7、2.8および図2.24、2.33参照

(5-2) 探知データによる湾港航路付近の海底様相

(a) 探知記録と海図による考察

(i) 清水港航路付近

500～600m深より急坂状に陸棚に上り約100m深の凸凹地帯を経て再度急坂状に上り、約20mの浅地に至る。この第2の急坂付近で航路を陸地寄りに取違えると10m以浅の緩坂状の瀬に至る。この付近に魚群が多い。（図2.34、2.35、2.36）

図2.35の海底が小さな波形になつているのは実験船の縦動揺によるものである。

(ii) 三津泊地赤崎付近

ここは超音波探知実験にしばしば利用される淡島より赤崎側瀬棚に至るコースである。

70～80mの平坦な広い陸棚より急坂状に6～7mの瀬棚に至るが、途中20～30m深付近に小さな瀬棚が2ヶ所ほどあり、比較的に瀬付魚群が多い。（図2.37）

(iii) 浦賀水道海獣島沖付近

300m以深より急坂状に陸棚に上り、10～20mの浅地に至る岬角付近に瀬付魚群が多い。途中40m深付近に小さな瀬棚がある。（図2.38、2.39）

(b) 実縮尺図による考察

実縮尺図は海図または走航速度から水平距離を算出し、探知記録から実縮尺図を作製した。

実縮尺図によるといづれの場合も意外に緩かな立上りであることに気付く（測深機では記録紙送り量が少ない）ので魚探記録よりも見掛上さらに急峻状に記録される。）

(i) 清水港付近および浦賀水道海獣島付近

総体的になぜ肩状の立上りで、大型船吃水深度付近では緩坂状というよりもほとんど平坦に近いので、探知ビームが水平に近い俯角の場合には適確深度の底信号が得難いので十分注意を要する。また、手前の立上り傾斜の平均延長による予測を行なつた場合には座礁点を実際より手前に判断する場合が多いと考えられる。（図2.40、2.41、2.42）

(ii) 三津泊地赤崎付近

大型船吃水深度付近の小さな瀬棚はなぜ肩状の立上りで、その後しやくり型の立上りになつてるので探知ビームが水平に近い場合でも十分適確な底信号が得られる。また、手前の立上り傾斜より予測を行なつた場合には、座礁点を実際より遠方に判断する場合があると考えられる。（図2.43）

(c) 予測による座礁予防システムの成立の検討

前項の要領で作製した実縮尺海底縦断面図から想定される底信号入力表を作り、(4)の予測計算中の一案による電算手段に、この入力値を与えて算出した見掛けの座礁危険点までの距離と実際の距離との差異量の大小によつてシステムの成立度を検討した。

(i) 底信号入力値表(表2.9、2.10、2.11)

実縮尺図より次の条件で底信号を想定摘出した。

距離	入射余角	
1.5 Km	30°	以上の条件の場合に底信号が得られる。
1.0 Km	20°	
0.5 Km	10°	

注) 各信号までの距離は図中に示す各点より測つたので、プログラム中の船速補正は0として算出した。

(ii) 予測の成立度(表2.12)

表 2. 5

回	期日	場所	使用船	使用魚探	調査内容	備考
第1回	43. 9. 29	駿河湾清水港 興津川沖、三 保沖付近	静岡観光汽船 第3しろがね 丸 39トン	SR-396A型 2周波魚探 SR-656型	大型船停泊港航路付 近の海底様相、魚群信 号と底信号の現われ方、 入射余角との関係	10月1日朝より強風 荒波のため、同日午後 以後調査できず、待機 したが波浪治らず、や むなく中断した。
	43. 10. 2			1周波魚探		
第2回	43. 12.	駿河湾静浦 三津泊地 苏崎淡島	静岡観光汽船 第3竜宮丸 32トン	同 上	小型船停泊地航路付 近の海底様相、魚群信 号と底信号の現われ方、 入射余角との関係	

表 2. 6

場所	船	使用魚探	探知記録	備考
浦賀水道久里浜 海嶺島沖付近	黒川釣船 黒川丸16トン	SR-655型 1周波魚探	大型船航路付近の海底様 相	使用魚探の性能試験時の 記録
東支那海	第二漁業 漁生丸97トン	SR-670A型 シンクロソナー	魚群信号と海底信号の現 われ方、入射余角との関 係	漁場探索時の記録

表 2.7 使用魚探一覧表

機種	探知周波数	出力	パルス巾	表示方式	外観
S R - 396 A型 2周波魚探	200 KHz 切換式 50 KHz	1.5 kW	1~6 ms	湿式記録および プラウン管直視式	図 2.24 図 2.25
S R - 656 型 1周波魚探	50 KHz	0.6 kW	2~4 ms	湿式記録	図 2.26
S R - 655 型 1周波魚探	200 KHz	0.15 kW	1~3 ms	乾式記録	図 2.27
S R - 670 A型 シンクロソナー	28 KHz	4 kW	3~10 ms	湿式記録	図 2.28

表 2.8 使用送受波器一覧表

送受波器	周波数	指向角 (半減半角)	指向可変度	外観
手動上下全方位 旋回式 (S R - 396 A型魚探 と組合せ使用)	200 KHz	3.5 °	仰角 5 ° ~ 傾角 90 °	図 2.29
垂直固定式低周波型 (S R - 396 A型および S R - 656 型魚探 と組合せ使用)	50 KHz	7.5 °		図 2.30
垂直固定式高周波型 (S R - 655 専用)	200 KHz	6 °		図 2.31
自動上下全方位 旋回式 (S R - 670 A専用)	28 KHz	9.5 °	仰角 5 ° ~ 傾角 90 °	図 2.32

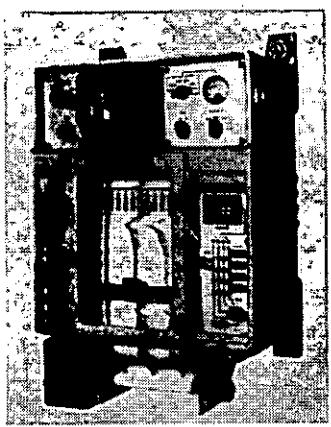


図2.24 SR-396A型魚探本体

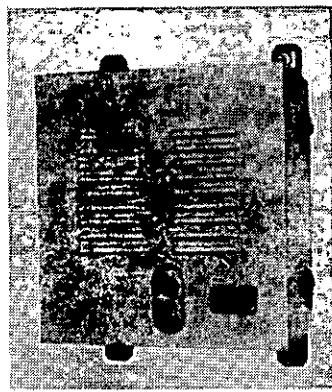


図2.25 SR-396型魚探送信部

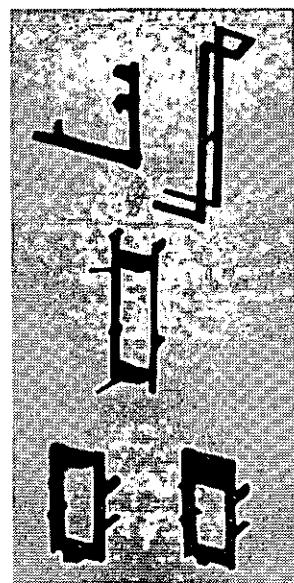


図2.33
実験に使用した舷側装備金具類

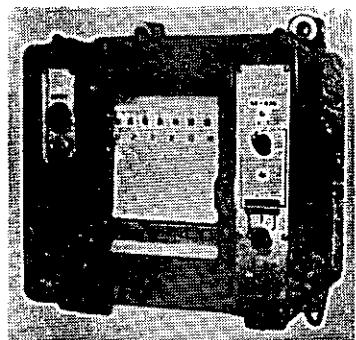


図2.26 SR-656型魚探

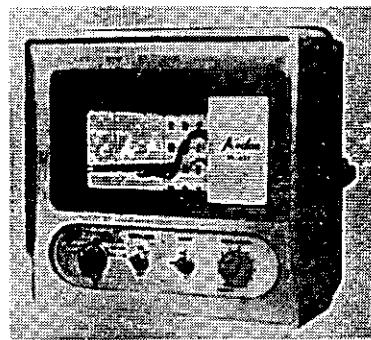


図2.27 SR-655型魚探

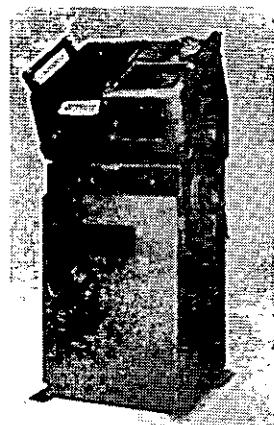


図2.28

SR-670A型
シンクロソナー



図2.31

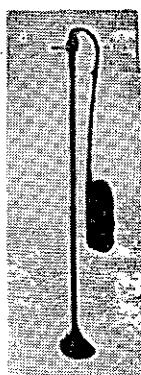


図2.30

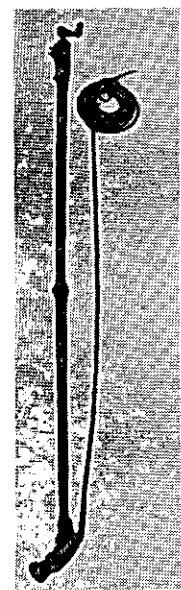
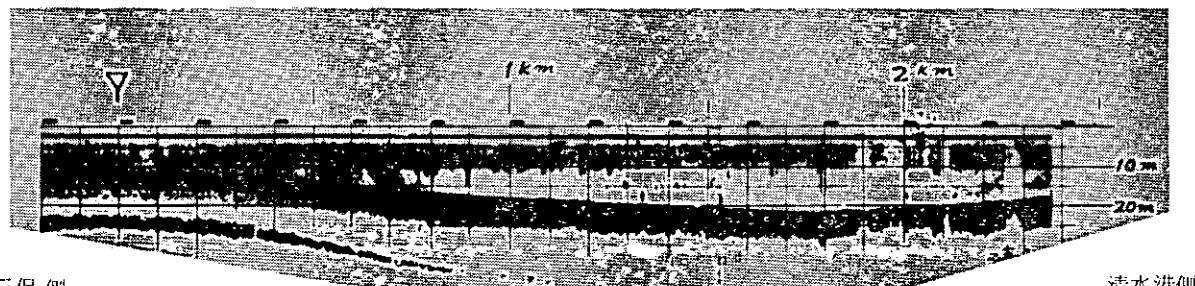
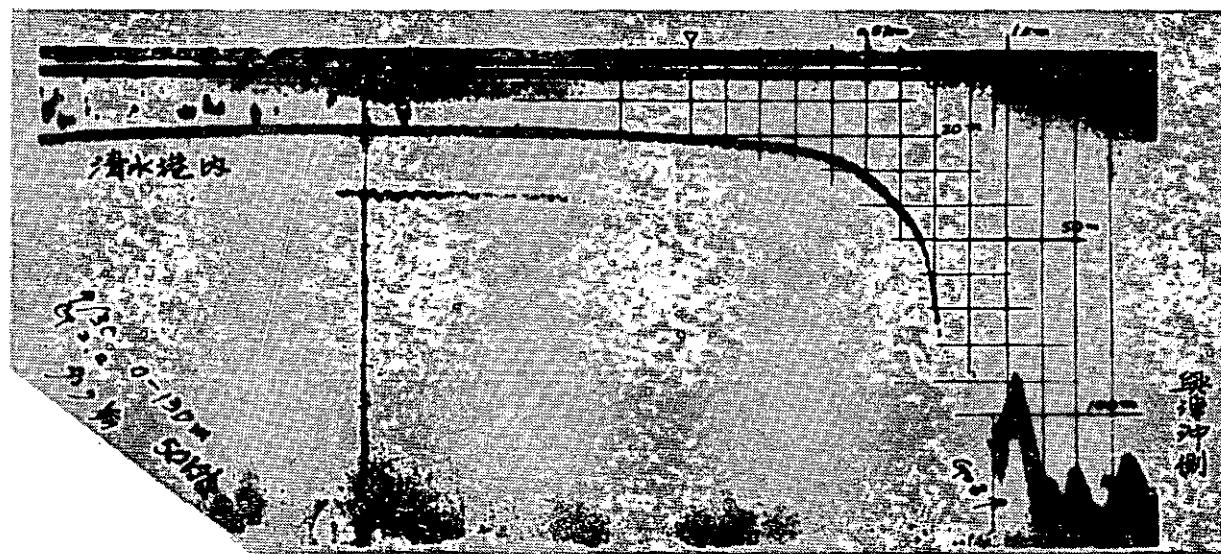
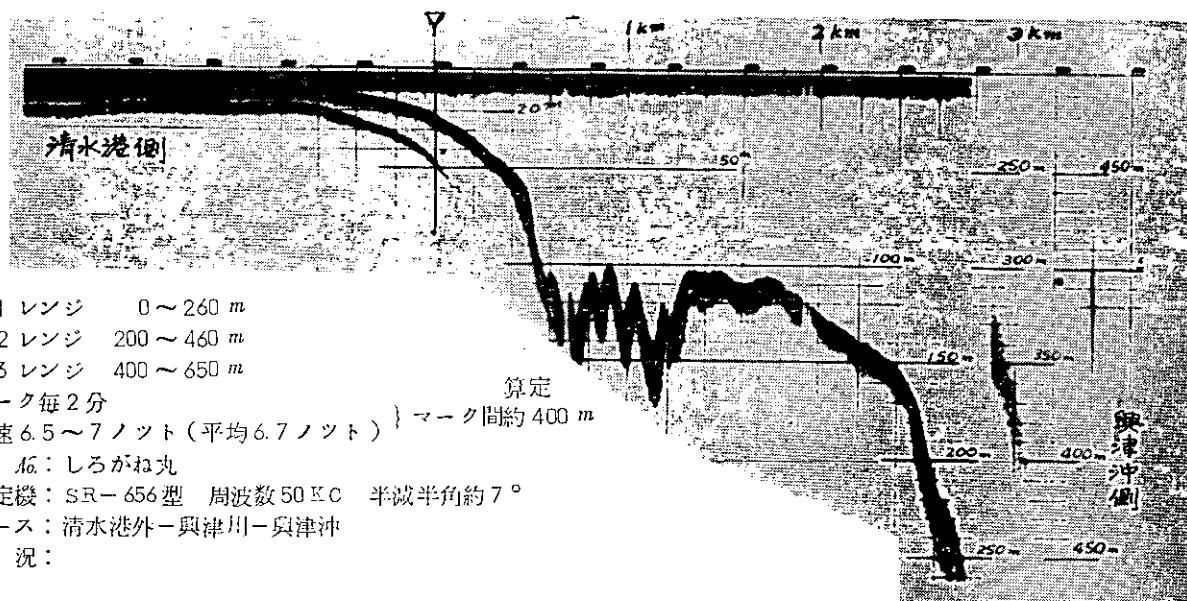


図2.29

各種送受波器類



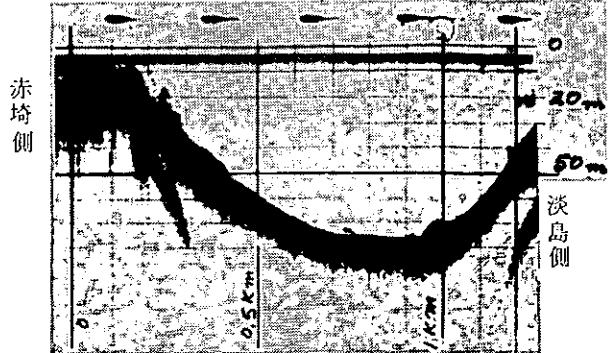


図 2.37 三津泊地付近探知記録

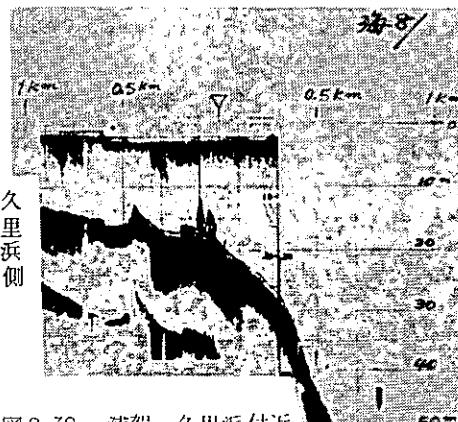


図 2.38 浦賀、久里浜付近
探知記録 その 1

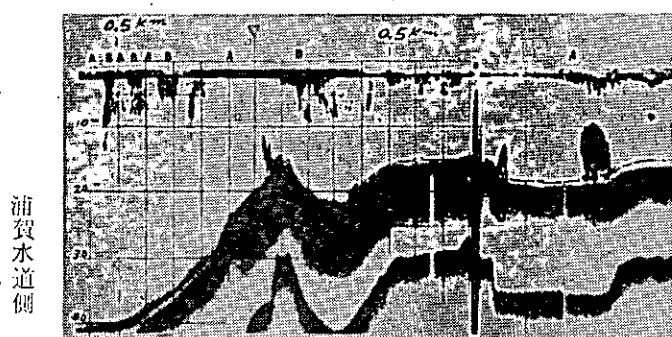


図 2.39 浦賀・久里浜付近探知記録 その 2

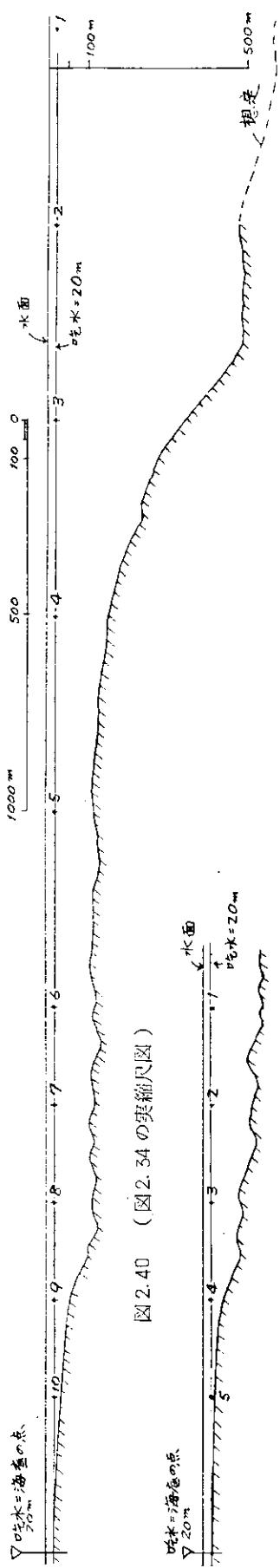


図 2.40 (図 2.34 の実縮尺図)

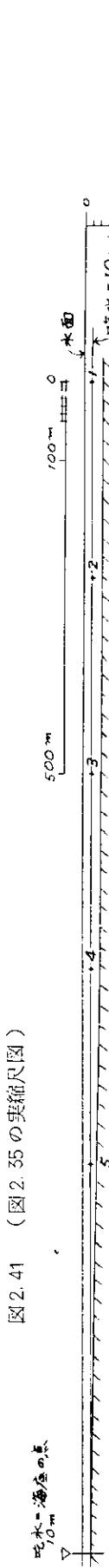


図 2.41 (図 2.35 の実縮尺図)



図 2.42 (図 2.36 の実縮尺図)

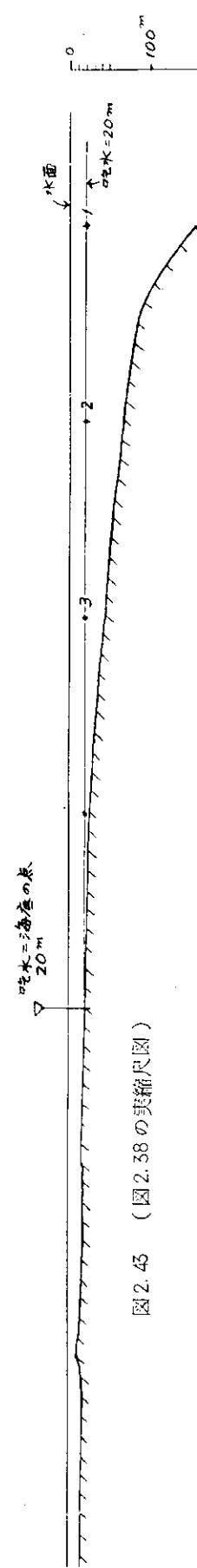


図 2.43 (図 2.38 の実縮尺図)

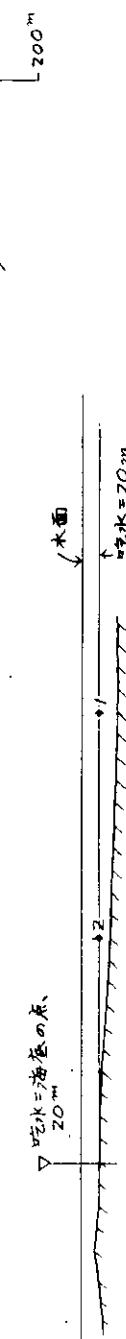


図 2.44 (図 2.39 の実縮尺図)

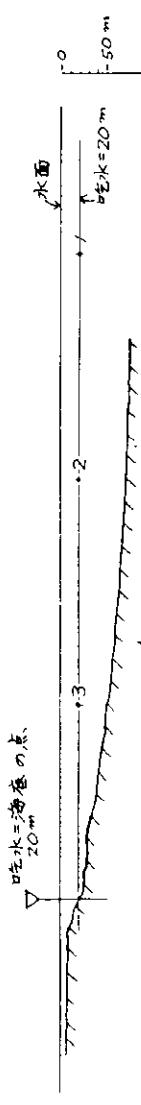


図 2.45 (図 2.37 の実縮尺図)

表 2.9 底信号入力値表 (1)

俯角	地点	距離										備考	
		清水港付近(図9.17)											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
5.0°		1500	1070	1150	1130	1100	700	500	—	215	140		
7.5		1350	1000	800	780	790	650	460	300	180	110		
10.0		1260	910	760	650	650	600	430	260	150	100		
12.5		1150	840	600	450	430	590	410	240	130	90		
15.0		1100	820	510	400	380	380	370	230	110	80		
17.5		1060	740	470	350	340	310	360	210	100	70		
20.0		1030	700	450	320	290	280	350	200	90	60		
22.5		1010	660	410	280	270	—	260	195	85	55		
25.0		980	640	400	260	230	—	250	185	80	50		
27.5		960	630	380	240	210	—	240	180	78	48		
30.0		930	610	370	230	200	—	230	175	76	45		
32.5		850	600	360	220	190	—	—	170	73	43		
35.0		810	590	350	210	190	190	160	—	70	40		
37.5		770	590	340	200	180	180	160	150	67	39		
40.0		720	580	330	200	170	170	150	145	62	37		
42.5		680	580	320	190	165	165	150	140	58	35		
45.0		660	570	310	180	160	165	145	140	56	33		
47.5		650	570	300	170	150	165	130	140	54	31		
50.0		630	570	290	160	145	160	120	140	53	29		
52.5		620	560	290	160	140	150	115	140	52	27		
55.0		610	560	280	160	130	140	110	135	51	26		

表 2.10 底信号入力値表 (2)

俯角	地点	距離					備考	
		浦賀水道海嶺島付近(図9.20)			三津泊地赤崎付近(図9.22)			
		1	2	3	2	3		
5.0°		385	265	150	300	135		
7.5		320	210	110	245	120		
10.0		270	180	95	210	110		
12.5		235	155	80	185	100		
15.0		215	135	70	160	85		
17.5		190	125	65	140	78		
20.0		175	110	58	125	73		
22.5		165	100	53	115	68		
25.0		155	95	50	105	63		
27.5		145	90	45	100	58		
30.0		135	80	40	93	53		
32.5		130	78	39	87	50		
35.0		125	75	38	80	48		
37.5		120	70	37	78	46		
40.0		115	65	35	75	45		
42.5		113	63	34	70	43		
45.0		112	60	33	68	41		
47.5		110	58	32	65	39		
50.0		110	57	32	63	37		
52.5		108	56	31	61	36		
55.0		107	55	30	60	35		

表 2.11 予測計算距離値表 (1)

俯角 地点	距 離										備 考
	清水港付近 (図 9.17)										
	1 (3900m)	2 (3400m)	3 (2900m)	4 (2400m)	5 (1900m)	6 (1400m)	7 (1150m)	8 (900m)	9 (650m)	10 (400m)	
5.0°	1260	1252	2399	4450	3665	847	602	—	354	236	
10.0	1832	1199	1356684	— 2425	— 1482	656	546	562	406	185	
15.0	1461	1840	912	1884	11506	— 1001	465	451	299	710	
20.0	1325	1257	1036	16698	— 2930	—	— 542	273	191	273	(注 1)
25.0	1409	861	998	1018	1432	—	506	294	123	101	
30.0	— 4156	918	716	688	388	—	—	337	197	139	
35.0	6556	751	833	451	2496	2496	198	—	321	85	
5°~7.5° の範囲に よる。	1742	1280	1644	— 824	12710	832	596	442	593	225	(注 2)

(注 1) 左欄の俯角を主に次およびその次の俯角の底信号値を一組として算出

(注 2) サイの目選出によるランダムな底信号を一組として算出

表 2.12 予測計算距離値表 (2)

俯角 地点	距 離					備 考
	1 (1000 m)	2 (750 m)	3 (500 m)	2 (465 m)	3 (215 m)	
5°	654	509	362	532	176	
10	577	531	357	473	188	
15	779	278	138	1420	182	
20	382	360	195	499	205	(注 3)
25	677	264	— 278	254	1018	
30	325	142	71	1440	214	
35	433	— 565	84	170	155	

(注 3) 左欄の俯角を主に次およびその次の俯角の底信号値を一組として算出

(6) ま と め

今年度の研究結果より次のことがわかつた。

- (a) 座礁事故例は年間にかなりの隻数を数え、日本近海のみならず世界の各海域においても発生している。
- (b) 研究を進めている間接的な探知方法は、場合により不確な点もあるが、直接に暗礁を探知することが不能な場合には有用であると判断される。
- (c) 電算機使用によるためには海底と魚群などの識別や雑音除去の問題が併存する。
一方、これらの問題は、ブラウン管上に信号を表示した場合に常に正確な海底反射のみを表示しているものでもないこととなり、この点より人間の判断のみによることがまさつているとも断言できない。
- (d) 現在設定している値をもつソーナーもまだ能力に不明な点が存在する。

以上により今後の研究方向としては、ソーナーの探知能力の確認ひいてはスキヤンニーグ方式ソーナーによる座礁予防システムの性能確認を行なう予定としている。

1.3 衝突予防システムの開発

1.3.1 システムの調査

(1) 衝突予防に関する文献の収集、調査

衝突予防システムの研究に際し、内外の多数の文献を収集し、調査した。以下にその主なものを列挙し、かつその要点について述べる。

(1-1) 衝突予防システム全般に関するもの

- (a) Final Report, Contract MA-2228 to Maritime Administration, Merchant Ship Automation Study (262 R 0012 ~ 0013)

この文献は [1.1.1] (1) 自動航法に関する文献の項でもとり上げたものであるが、衝突予防システムについても非常に有益な資料となつた。ここに述べられている装置は、Good Year Aircraft 社が研究開発を行なつたものである。本文献では衝突予防システムに対する基本的な考え方方が述べられている。

- (b) 庄司和民：レーダ・データ・コンピュータ

航海 昭和43年9月号 p 89 ~ 95

米国の Good Year Aircraft 社が製作した衝突防止計算機(レーダ・データ・コンピュータ)の概要および海上評価試験の結果を紹介している。

- (c) Lookout Assist Device Feasibility Studies Prepared by Sperry Piedmont Company

本文献に紹介されている衝突予防装置は、当直士官の援助として、目標を数浬までの距離で発見する装置で、近接警報レーダとして動作する。すなわち、設定した海域に入つてくる目標があれば、警報を発し、その方位を表示する。

- (d) Marine Radar System RAYTHEON 社カタログ

電子カーソルを使用して CPA, TCPA を測定できる衝突予防専用の指示機である。

その他の文献としては次のものがある。

- (e) 市瀬信夫：レーダによる衝突防止について

- (f) 庄司和民他：指示装置を付した2船の見合関係計算機

- (g) 楠 順三：ベクトル計算機

- (h) 飯塚 登：レーダプロツタについて

(1-2) 衝突予防用レーダに関するもの

レーダ航法による衝突予防に関しては、古くから種々検討されていたが、この基本概念をとりまとめたものが文献(a)である。

この思想を発展させて、ある一定距離内へ相手船が接近した時、警報を発生させるものに文献(b)～(e)がある。

さらに、電子計算機を導入した超自動化の構想へ発展したものが、文献(f), (g)である。このようなレーダ情報の高度処理のためには、レーダ自体の高性能化はもちろん、レーダ出力の生ビデオ信号を効率よく変換して計算機入力にするため種々の処理を必要とするが、これは(1-3)以降にゆずり、ここでは省略する。なお、この方面的システム全体に関する参考例が非常に少ない点も一つの特徴で、逆説的ながら本研究の必要性を裏付けるものと見るべきであろう。

船舶用と趣きを異にするが、航空機用の衝突予防システム、CAS (Collision Avoidance System) に関しては、文献(f)～(g)がある。航空機専用の必要条件のもとに開発されたものであるため、システムは全然異なる形をとつていて、しかし基本的構想のなかに、相互の message を必須条件にしている点

今後の船舶用衝突予防システム発展のための参考と考えられたので、ここに、収録した。

衝突予防という直接的な目的からはずれるが、レーダ情報を電子計算機で処理する例は他方面に多く見られる。ここでは、グループの検討対象となつた空港の自動管制システムに関し、国内の1例を文献(s)に、米国のものを(s)に挙げた。

- (a) 茂在 寅男; "「レーダ航行について」" 電波航法 No.6 P 28 ~ 34, Dec. 1964
- (b) Final Report on Lookout Assist Radar Evaluation Program Maritime Administration Department of Committee, March, 1966
- (c) Final Report on Lookout Assist Radar Development Maritime Administration Development of Committee June, 1966
- (d) Final Report Lookout Assist Device Feasibility Study, Vol. II (System Recommendation), US Department of Commerce Maritime Administration, Aug. 1966
- (e) 大岡 茂他; "航海用レーダ自動警報装置" 電波航法研究会 No.3 1964
- (f) 庄司 和民; "船舶航行の自動化" 計測と制御 VOL.5 No.8 P 579 ~ 590
昭和41年8月
- (g) 庄司 和民; "海外における電波航法技術と出張報告" 電波航法 No.10 P 34 ~ 39 May 1968
- (h) F.C.White; "Airborne Collision Avoidance System Development - Introduction" IEEE Trans. AES VOL AES-4 No.2 P 234 ~ 237 March, 1968
- (i) M.R.Bates; "History of Time - Frequency Technology" IEEE Trans AES VOL AES-4 No.2 P 238 ~ 256 March, 1968
- (j) R.L.Jaycox; "Collision Avoidance System Synchronization" IEEE Trans AES VOL AES-4 No.2 P 257 ~ 264 March, 1968
- (k) C.O.Thornburg; "Master Timing of CAS Ground Station" IEEE Trans AES VOL AES-4 No.2 P 265 ~ 272 March, 1968
- (l) R.E.Perkinson; "CAS Message Format" IEEE Trans AES VOL AES-4 No.2 P 273 ~ 277 March, 1968
- (m) K.E.Toerper; "Biphase Barker-Coded Data Transmission" IEEE Trans AES VOL AES-4, No.2 P 278 ~ 282 March, 1968
- (n) C.E.Steen; "Spectral Energy Requirements and Adjacent-Crosstalk in CAS" IEEE Trans AES VOL AES-4, No.2 P 283 ~ 289 March, 1968
- (o) H.A. Steinberg; "Slot Length and Line-of-Sight Protection" IEEE Trans. AES VOL AES-4, No.2 P 290 ~ 294 March, 1968
- (p) W.G.Shear; "Elements of the ATA Collision Avoidance System" IEEE Trans AES VOL AES-4, No.2 P 295 ~ 304 March, 1968
- (q) J.H.Holt; "Analysis of Warning Times For Collision Avoidance System" IEEE Trans AES VOL AES-4 No.2 P 305 ~ 314 March, 1968
- (r) 大曲恒雄他; "航空交通管制業務の自動化" 東芝レビュー VOL.22 No.4 P 462 ~ 475
昭和42年
- (s) Final Report "Radar Video Data Processor" SR DR Report on RD-64-128 Dec. 1964 Burroughs Corporation

(1 - 3) 雑音除去方法に関するもの

レーダビデオ信号に含まれるセット雑音、外来雑音を除去して計算機入力とするのに十分な S/N を得る手段に範囲を限定して述べる。したがつて、信号に密着した海面反射、雨雪反射等は(1 - 4)にゆづる。また、レーダ方式全体に関するもの、たとえば Pulse Compression 方式等は、経済的理由等でとりやめ、Conventional Radar の小改修か、そのビデオ出力への付加装置にしばらざるを得ないため、ここでは自らこの範囲に限定し、他は割愛した。

文献(a)(b)は、もつとも効率よく信号検出する手段として、いわゆる Matched Filter の概念を述べたものである。文献(c)(d)は、この思想をビデオ信号に応用した具体例である。

さらに、文献(e)～(h)は Correlation Detection に関するもので、(f)には、cross-Correlation と autocorrelation の効果を比較している点、注目すべきであろう。

ビデオ出力への付加装置としては、Video Integrator として、文献(i)～(l)を挙げた。文献(m)は、この種の改善器に属し、グループ検討の対象になつたものの基礎的考察を示したものである。

上記は、いずれも、レーダ信号の周期性を利用したものであるため、セット雑音を抑圧して、 S/N 改善に効果的である一方、非同期性の外来雑音 — たとえば、他レーダの干渉 — に対しても、抑圧の効果があるが、とくに、この外来の干渉を対象として、その対策を考察したものに、文献(n)～(p)がある。

(a) D.O.North ; "An Analysis of the Factors Which Determine Signal / Noise Discrimination in Pulse - Carrier System, RCA Tech.Rept PTR - 6 C, June 25, 1943

(b) G.L.Turin ; "An Introduction to Matched Filters" IRE Trans. VOL IT - 6 No.3 P 311 ~ 329 June, 1960

または

E.C.Westerfield ; "Processing Gains against Reverberation (clutter) Using Matched Filter"

IRE Trans. VOL IT - 6 No.3 P 342 ~ 348

(c) L.J.Cutrona ; "Optical Data Processing and Filtering System"

IRE Trans. VOL IT - 6 No.3 P 386 ~ 400

(d) G.R.Welte ; "Quaternary Codes for Pulsed Radar"

IRE Trans. VOL IT - 6 No.3 P 400 ~ 408

(e) H.R.Raemer ; "Correlation Devices Detect Weak Signals"

Electronics VOL 32 No.21 P 58 ~ 60 May 22 1959

(f) Y.W. Lee ; "Application of Correlation Analysis to the Detection of Periodic Signals in Noise,"

Proc IRE VOL 38 No.12 P 1165 ~ 1171, 1950

(g) H.E.Singleton ; "A Digital Electronic Correlator"

Proc IRE VOL 38 No.12 P 1422 ~ 1428, Dec. 1950

(h) P. Hudnick ; "The Detection of Weak Signals by Correlation Methods"

J. Appl. Phys. VOL 24 P 128 ~ 131 Feb. 1953

(i) A. Wang ; "Static Magnetic Storage and Delay Line"

J. Appl. Phys. VOL 21 P 49 ~ 54 Jan. 1950

(j) P. Sverling ; "The Double Threshold Method of Detection"

Rand Corp. Rept RM-1008 Dec. 1952, Santa Monica, Calif.

(k) J.V. Harrington "A Analysis of the Detection of Repeated Signals in Noise by Binary Integration"

IRE Trans. VOL IT - 1 P 1 - 9, March. 1955

(l) M. Schwartz ; "A Coincidence Procedure for Signal Detection"

IRE Trans. VOL IT - 2 P 135 ~ 139 Dec. 1956

(m) 松田 季彦 "残留効果のある零次ホールド回路"

制御工学 VOL. 6 No. 5 P 277 ~ 286

昭和37年5月

(n) D.B. Brick ; "Radar Interference and its Reduction" Sylvania Technologist
VOL 11, No. 3 P 96 ~ 108, July 1958

(o) J.J. Lamb ; "A Noise Silencing I.F. Circuit for Superheterodyne Receiver"
QST. VOL 20 P 11 Feb. 1956

(p) K.H. Chase ; "Reducing Mutual Radar Interference"
Electronics VOL 32, No. 28
P 39 ~ 43 July 10, 1959

(1 - 4) 海面反射除去方法に関するもの

(a) Clutter on Radar Displays. Reduction by Use of Log Receivers. J. Croney
Wireless Eng. 1956

Log Amp と FTC によって Rain Clutter および Sea Clutter がある程度除去できることについて、理論および実験結果が述べられている。

(b) Back-Scattering Characteristics of the Sea in the Region from 10 to 50 KMc.
J.C. Wiltse IRE. 2. 1957

(c) On the Polarization and the Wavelength Dependence of the Sea Echo. M.W. Long
PGAP-12 No. 5, Sept. 1956

(b), (c)は海面反射の強度を測定した実験報告である。(b)には周波数、偏波面、入射角度についてのデータが報告されている。(c)では海面で再分極されるエコー強度を測定し、海面反射のメカニズムについて論じている。海面反射は海面による反射波と波、風のしぶきによつて生ずるダイポールからの反射波の合成であると結論している。

(d) Method of Distinguishing Sea Targets from Clutter on a Civil Marine Radar.
Radio & Electronics 4, 1964 A. Harrison
船舶レーダについて、船やブイ等と Sea Clutterとの弁別をよくするためのいろいろな方法が比較検討されている。波長、Log Amp FTC、パルス幅およびアンテナビーム幅、円偏波等について述べている。信号の積分効果については、Sea Clutterがレーダビームが走査する時間中には変化しないので連続するパルス相互間の積分を行なつても、Sea Clutterについては改善されない。しかし、ブラウン管の残光性による Scanごとの積分については有効であろうとしている。

(e) Improved Radar Visibility of small Targets in Sea Clutter.
J. Crony Radio & Electronics 9. 1966

高速回転のできるレーダ空中線(1400 rpmまで)を持つレーダを使って、アンテナビーム幅内に1パルス程度しか含まれないようなレーダ系を構成する。Sea Clutter の自己相関値は約8 ms 程度の時間幅をとると $\frac{1}{2}$ 程度に減少できるので、このようなレーダ系で受信される信号は Sea Clutter 成分が平均化されて減少し、ターゲット信号は積分され強調されるのでターゲット信号が見分けやすくなる。すなわちアンテナが高速回転しているため相連続するパルスは PPI 面上で積分されず Scanごとのパルスのみが積分される。したがつて、ノ

イズ性の振幅分布をもつ Sea Clutter は平均化されて減少して除去できることを説明している。これと同じ効果を低速回転のアンテナで実現するために蓄積管を使って行なった Scan ごとの積分についても実験して有効であつたと報告している。

(f) Digital Automatic Radar Data Extraction Equipment.

J.V. Hubbard Radio & Electronics 11, 1963

レーダのビデオ信号を量子化しこれをメモリする場合の問題について論じている。レーダ信号を background level に比較して描出するために差延線を使用して background level の積分を行ないこのレベルに比較してレーダ信号をピックアップする方法を提案している。この方法は Rain Clutter については有効であつたと報告している。

(1-5) 目標判別追尾方法に関するもの

目標判別追尾の目的は、レーダ信号の中から目標信号を検出し、その動きを追尾することにより雑音による擬似目標を除去し、真の目標の移動を知ることである。これらを行なうためにはアンテナのスキヤンごとに目標を検知すること、およびアンテナのスキヤンごとのデータの相関を調べることが必要となる。スキヤンごとのデータの相関を調べるには、数スキヤン分の目標データの記憶とこれら相互の相関を調べるために演算を必要とし、コンピュータを用いてソフト的に処理するのが有利である。コンピュータはそのためのデータとして目標の位置情報を必要とするが、これをレーダアンテナの回転に従つて実時間に得るのが目標判別追尾装置である。これはレーダ信号をデジタル処理することにより、目標の方位角と距離をデジタル信号として検出するが、その方法についてはレーダ情報処理の分野で研究が進められている。

次にレーダ信号のデジタル処理による目標の検知方式の概要を述べる。

レーダ信号は図 3.1 のごとく目標が存在すると受信信号の振幅の変化として検出され、同一目標からはアンテナビームが照射している間検出されるが、これらの信号振幅はビームのパタンに従つて図 3.2 のごとく山形を成す。これをある閾値により "1" "0" 信号に量子化し、量子化ビデオ信号のパターンにより目標を検出することが可能である。これらの処理は大きく信号の量子化と目標の検知処理に分けることができ、特に目標の検知処理については種々の方式が検討されている。信号の量子化を行なう部分を量子化器というが、ここでは振幅軸の量子化と同時に距離方向の量子化を行なう。レーダトリガを基準として時間軸を小さなセルに分割し、受信信号の得られたセルに対応する距離を目標の距離として検知するが距離の量子化である。この時間セルが距離量子化の最小単位となり、量子化区間といふ。振幅の量子化は、閾値による判定に

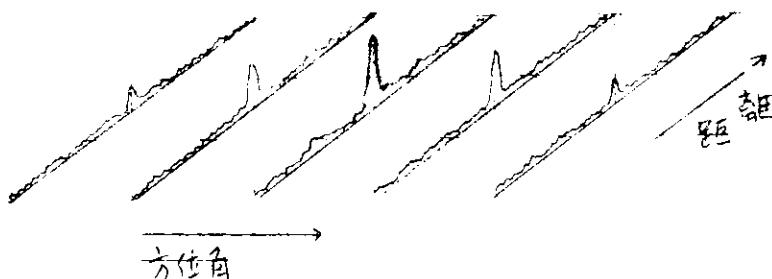


図 3.1 レーダ受信信号

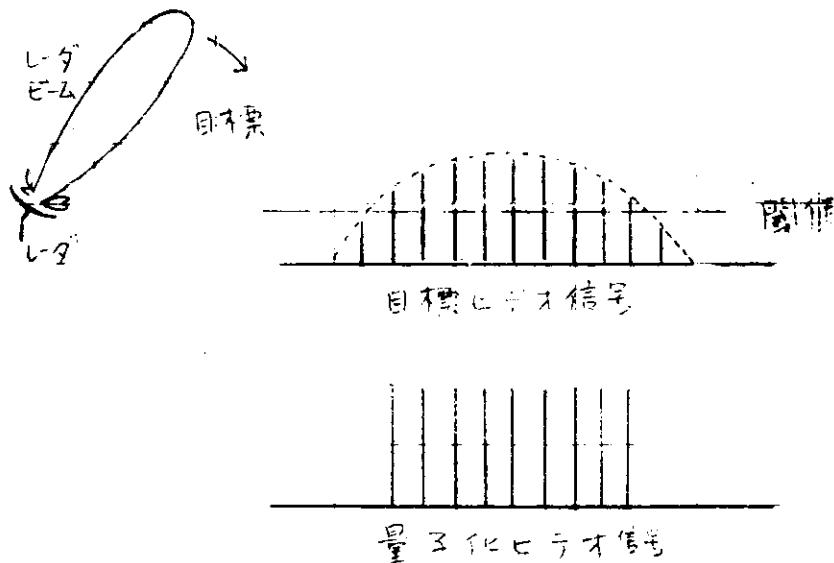


図3.2 目標信号とその量子化ビデオ

より、各量子化区間内で受信信号を“1”または“0”にすることであるが、この判定方法については次のようなものが考えられる。

- (a) 量子化区間内のどこかで閾値を越えるものがあればその量子化区間で信号有りとし“1”をたてる。
- (b) 量子化区間内のどこかで、閾値を下から切るものがあればその量子化区間で“1”をたてる。
- (c) サンプリングパルスによるサンプル値が閾値を越える場合に、その量子化区間で“1”をたてる。
- (d) 適当な時間平均値が閾値を越える場合にその量子化区間で“1”をたてる。

これらの方法は、ビデオの特性、ハードウェアの複雑さによりどれを用いるか決定される。

目標の検知は量子化されたビデオを統計的に処理することにより行なわれる。アンテナから同一距離の量子化区間を方位角方向に連ねてみると、目標のない所では雑音による信号“1”がランダムに発生するが、目標のある部分では信号“1”が集中して発生することになる。この特徴を利用して雑音による擬似信号を少なくし、目標を正しく検知するのが統計処理である。統計処理全般についてはいくつかの文献に述べられているが^{(1), (2), (3)}、主なものとしてスライディングウインド検知器、コインシデンス検知器、サクセスラン検知器、シーケンシャル検知器があげられる。

スライディングウインド検知器は同一距離の量子化区間で“1”的発生密度により目標を検知する方式で、さらにいくつか的方式が考えられている⁽¹⁾。

- (a) イクスピーネンシャル検知器(Exponential Detector) x_i : 量子化ビデオ入力、 s_i : 検知器出力とするとき、 $S_i = X_i + kS_{i-1}$ ($k < 1$) なる関係で与えられ、この S が閾値を越える時目標を検出する方式でアナログの場合のビデオ積分に対応する。この様子を図3.3に示す。
- (b) ムービングアベレージ検知器(Moving Average Detector)

ウインドの幅を ℓ とすると

$$S_i = \sum_{j=i-\ell}^{\ell} X_j$$

とし、 S_i が閾値を越えるかどうかを調べる。

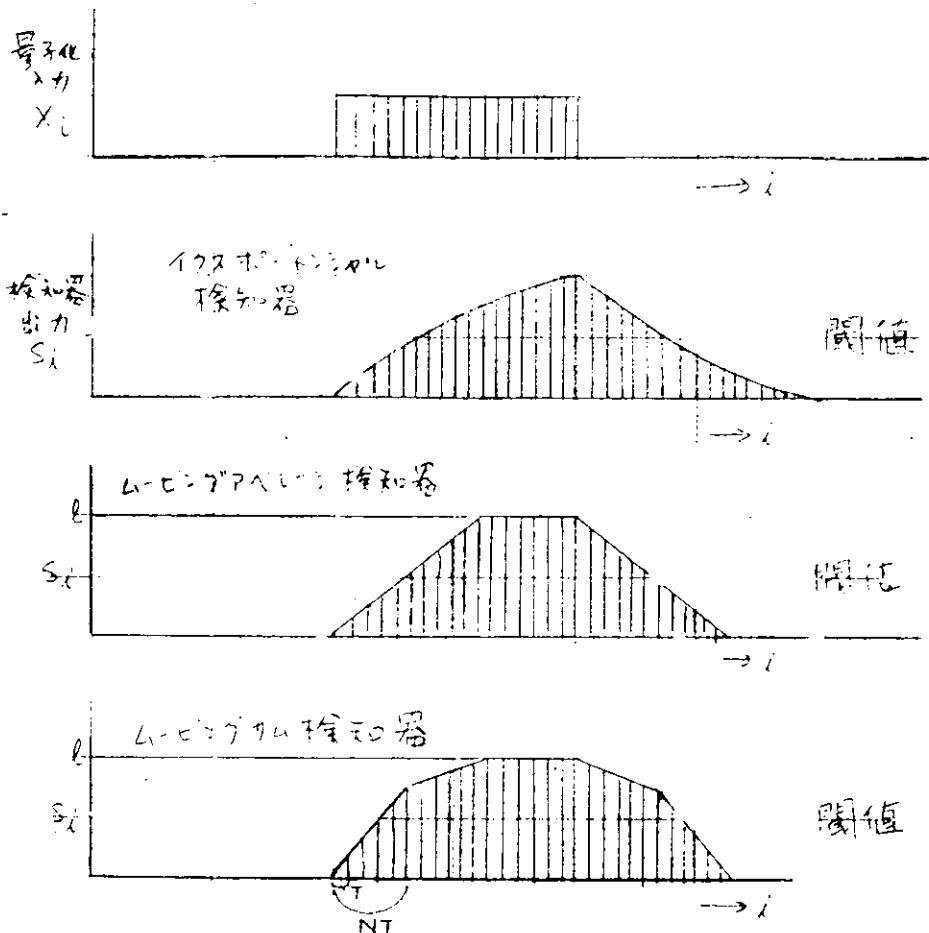


図3.3 スライディングウインド検知器

(c) ムービングサム検知器 (Moving Sum Detector)

$$S_i = X_1 - S_{i-1} = \frac{1}{l} S_H$$

$$S_H = \sum_{j=N-l}^N X_j \quad l : \text{ウインド幅}$$

これらの様子を図3.3に示す。いざれも閾値を越える時と閾値以下になる時の方位角の中心方位角に補正を加えて真の方位角を算出する。いざれも過去の情報を記憶する必要があるが(a)は中心方位角を検出するのに誤差がありやすい。(b)は方位角算出、目標検知能力の点ですぐれているが記憶容量が多くなる。(c)は両者の中間となる。

コインシデンスディテクタ⁽⁴⁾は同一距離の量子化区間に一定回数以上“1”が連続してあることにより目標を検出する検知器である。これはランダム雑音による擬似目標を抑止する効果が大きい。

サクセスラン検知器⁽³⁾はある特定の“1”的連(run)が現われてから“0”的連りが現われるまでの間隔が閾値以上にあるか、または特別な“1”、“0”的連を計数し、その計数値が閾値を越えるかどうかにより目標を検出する方式である。

シーケンシャル検知器⁽³⁾は可逆カウンタを設けておき、“1”があればRを加算し、“0”的時はRを減算してカウンタが閾値を越えると目標を検知する検知器である。

これらの検知器に要求される特性としては、目標を正しく検知できること、雑音による擬似目標の検出が少ないと、方位角の検出精度が良いこと等であるが、いくつかの検知器については検討が加えられており(3)、(5)、スライディングウインド検知器が良好な結果を得ている。

擬似目標の検出に関しては、これがランダム雑音に原因する場合は統計検知器の特性により決まるがクラッターに原因する場合には特にこれを除去する必要があり、この具体的方法^{(1), (6)}としては、目標の方位角の広がり

(これを run length という)を検出し、これが目標らしからぬ値の時これを除去する方式、量子化器で閾値を自動的に制御し、目標がクラッターにうもれた時は目標信号のみを検出する方式等が一般に用いられている。

参考文献

- (1) F.H. Krantz and W.D. Murray : "A survey of digital methods for radar data processing" Proc Eastern Joint Computer Conf., 1960.
- (2) J.V. Hubbard : "Digital Automatic Radar Data Extraction Equipment" J.Brit IRE Nov. 1963
- (3) G.P. Dinneen and L.S. Reed : "An Analysis of Signal Detection and Location by Digital Methods" IRE Trans on Information Theory, Mar. 1956
- (4) K. Enderson and R. Hedemank : "Coincidence Techniques for Radar Receivers Employing a Double-Threshold Method of Detection" Proc of the IRE, Oct. 1961
- (5) M. Schwartz : "A Coincidence Procedure for Signal Detection" IRE Trans on Information Theory, Dec. 1956
- (6) W.J. Evansia : "Cutting through Clutter in Flight-control Radar" Electronics, Aug. 10 1964

(1-6) 衝突予防ディスプレイに関するもの

- (a) "レーダ高輝度表示装置の評価試験"
1966.9 宇宙航行エレクトロニクス研究会資料
片野、石橋、御法川、小杉

二電子銃走査変換用蓄積管を用いてレーダPPIビデオ信号をTV走査(525本)に変換しTV用CRTに高輝度表示したもの

問題点としては解像度が通常のPPIの半分位であり距離、方位の分解能が悪くなるとともに画質の劣化を招いている。

- (b) "高分解能走査変換装置"
1967.12 宇宙航行エレクトロニクス研究会資料
御法川、小杉

走査線数945本のTV走査により分解能の向上を計つたもので、方式は(a)とほとんど同じものである。なお問題点として残るのはCRTのソフトサイズ、輝度、螢光色、表面の曲率が解像度にかなり影響している。

- (c) "RADAR BRIGHT DISPLAY"
レイセオン社製 BRIGHT DISPLAY 資料
ATC用として開発された BRIGHT DISPLAYのシステムの紹介ならびにその応用としてRATAN (RADAR AND TELEVISION AID TO NAVIGATION) システム等の紹介

(1-7) VTRを使用するシステムに関するもの

- (a) Evaluation of Radar Video Recorders
Final Report Project No.231-003-02 x.
Report No RD-67-34 May 1967 (AD-655635)
Federal Aviation Administration
Test and Evaluation Division

National Aviation Facilities Experimental Center

Atlantic, N.J. 08405

この paper は T.V Tape Recorder を Scan Converted Radar Information の記録、再生に用いた場合、その使用価値がどの程度あるか評価テストを行なつた結果について述べてある。その結果、TV Tape Recorder は元の生の display より若干質は劣るが実用上十分 air traffic の状況を完全かつ正確に再生し得ること、また Air Traffic Control Facilities において TV Recorder を Scan Converter と一緒に用いれば FAA の Requirement を満足するよう改修可能であることが判明したと述べている。この TV Recorder として Sony 製 Video recorder PV-120 U が試用されている。

試験結果は

- (1) Sensitivity (2) Resolution (3) Accuracy
- (4) Equipment Performance (5) Operational Utilization
- (6) System Cost (7) Discussion of Results

の各項にわたり評述してある。

(b) 磁気記録再生方式

特許出願公告 昭43-16573 (日本特許) ソニー

(c) 映像信号の再生方式

特許出願公告 昭43-16574 (日本特許) ソニー

(d) 航跡および航行方向を表示し得るようにしたレーダ および類似装置

特許出願公告 昭38-26101 (日本特許)

財團法人望月電波研究所

(e) レーダ 記憶装置

特許出願公告 昭35-16076 (日本特許)

石川 源光

(2) システムの要目の調査

船舶の安全航行のためにはレーダによる衝突防止システムの開発が最も重要な課題であることはレーダが航行援助装置として利用されるに至つた当初より世界の関心事であった。今回の船舶の高度集中制御方式の開発に当つても本課題が重要問題として採りあげられたのも当然である。現在一般的に考えられている衝突防止システムはレーダより得られる情報を処理して目標の距離、方位を求め、そのデータを電子計算機に入れ自動追尾を行ない危険船の判別、さらに回避法の決定を行ない、自動操舵装置および主機自動制御装置に指令を与えることにより衝突を回避するシステムである。かかるシステムの設計に当つては下記の事項について考慮を払う必要がある。すなわち、

- (a) あらゆる海域で使用可能なシステムであること。
- (b) 目標を自動的に発見し衝突の危険のあるときは自動的に回避できるシステムであること。
- (c) 衝突予防用ディスプレイは人間工学的配慮が十分されたものであること。
- (d) 最新の電子技術を十分に駆使し信頼性の大きいものであること。

以上を大体の命題として問題点について詳細に各種文献および各社の実験資料を持ちより調査検討を行なつた。

その結果下記の基本条件を決定した。

- (a) この衝突予防方式なし装置は原則として広海域においてのみ使用するものとし狭海域では使用しない。
- (b) 対象とする船舶の種類および大きさは特に限定はしない。
- (c) 対象とする目標の数は最大 10 個とする。
- (d) レーダによる標的の最大探知距離は 10 ~ 15 リン程度とする。

- (e) 標的の入力方法は自動、手動切換可能とする。
- (f) FPI 指示器の他にもスーパーブライトディスプレイ装置を設ける。
- (g) 空中線の安定台（スタビライザ）は設けない。
- (h) 船速は 16 ノット程度、船の停止距離は超大型タンカの場合主機停止のとき約 10 Km、主機逆転のとき約 5 Km (16 ノット → 4 ノット) 情走し、旋回直径は 1000 m (舵角 35°) ~ 1700 m (舵角 15°) 程度であるとする。
- (i) 空中線の設置高は水面から 33 ~ 44 m 位 (超大型タンカの場合) であるとする。
- (j) シークラッタ (Sea Clutter) ウエザクラッタ (Weather Clutter) 等の擾乱雑音の除去方法を考慮する。
- (k) 避航操船法は電子計算機が算出するが、試行操船も行なえるようにし、最終的避航操作の判断は人間が行なうものとする。

詳細は 1.3. 1 (3) にその仕様を記すが概略は次のとおりである。

- (a) レーダとしては 3 cm 波帶のものと 10 cm 波帶のものを併用しダイバーシティ方式とし、それぞれの空中線は同軸上に設置する。
- (b) レーダデータプロセッサにより上記レーダより得られるロービデオ信号を統計的に処理し、シークラッタ等による擾乱雑音の影響を極力小さくして電子計算機にレーダ情報を供給するプロセッサとしてアナログ型とデジタル型の両者を考慮する。
- (c) 通常のディスプレイの外にスーパーブライトディスプレイを使用してライトペン等により標的のイニシエイション (initiation) ができるようとする。
- (d) ディスプレイ装置には通常の映像の外に各標的の速力、針路、CPA、TCPA が表示できるようとする。
- (e) オペレーターは警報で表示された衝突危険船に対し試行操船が可能のようになっている。

これらの基本条件を満足する衝突予防システムのプロックダイヤグラムを図 3.4 に示す。

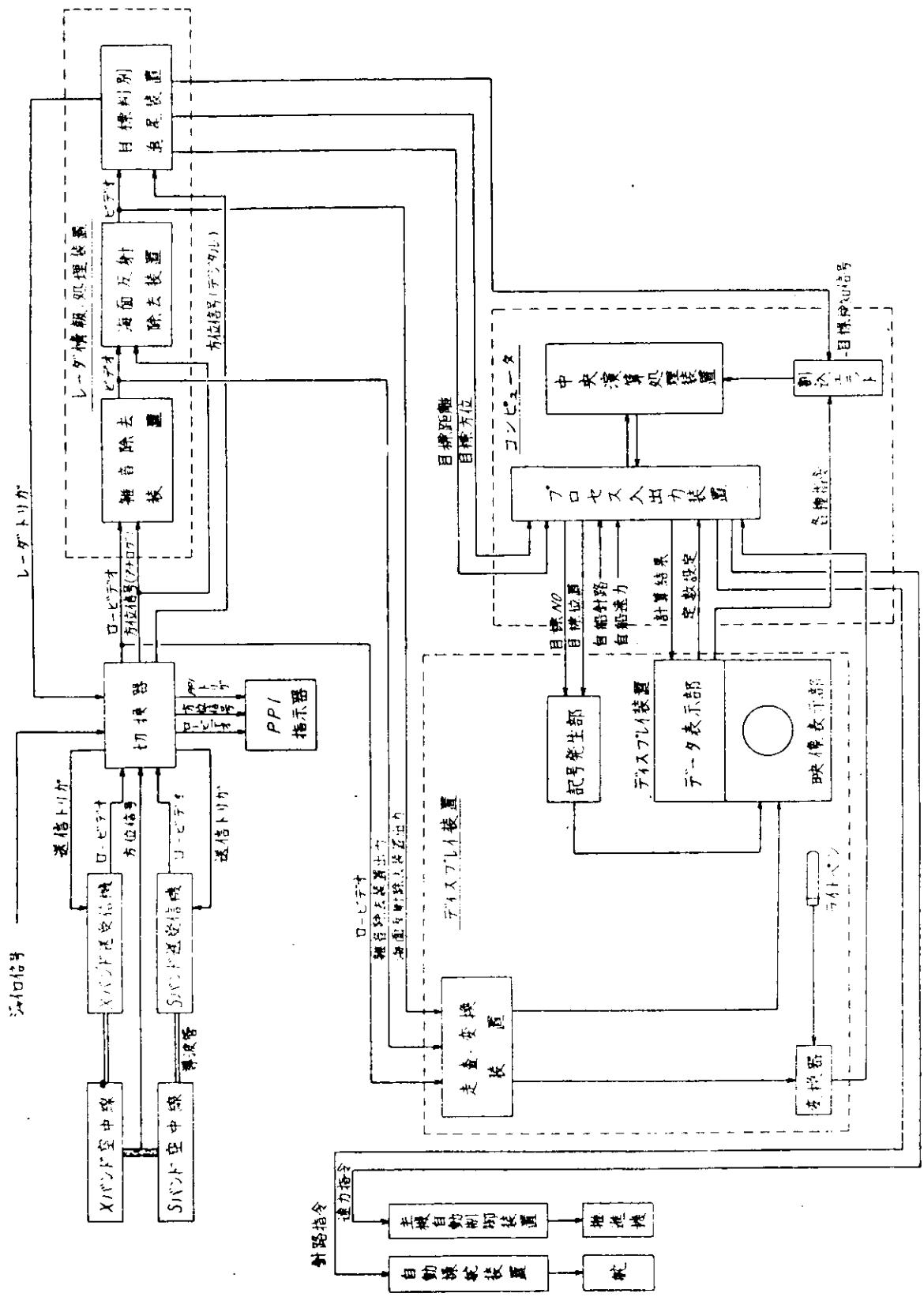


図 3.4 戰闘子防装備のプロツクダイアグラム

(3) 開発を要する機器の要目仕様の決定

(3-1) アンテナ・システムの仕様

(a) 概 説

このアンテナ・システムは、衝突予防用レーダの電波ふく射とその回転を行なう部分であつて、大別して、ふく射部、回転部および回転信号発生部からなる。

ふく射部は3cm波帶用、10cm波帶用の2ヶのスロット型アンテナから成りそれぞれ同軸上にふく射方向が合致するように取付けられている。

このふく射部の基部に回転部、回転信号発生部を収容しており、構造堅牢防水型で、船舶のレーダ・マスト上に装備され、全天候下永年使用が可能である。

(b) 主要諸元

(i) 使用周波数帯

- | | |
|------------|---------------|
| (A) 3cm波帶 | 9375 ± 30 MHz |
| (B) 10cm波帶 | 3050 ± 25 MHz |

(ii) ピーク幅

- | | |
|----|-----------|
| 水平 | (A) 0.35° |
| | (B) 1.9° |
| 垂直 | (A) 24° |
| | (B) 30° |

(iii) 偏 波 面

水 平

(iv) サイド・ローブ抑圧比

- | | |
|----------|------------|
| ± 20° 以内 | - 26 dB 以上 |
| ± 20° 以外 | - 35 dB 以上 |

(v) 交さ偏波抑圧比

- 40 dB 以上

(vi) 回 転 数

15 RPM

(vii) ふく射部全長

約3,600 mm

(viii) 回 転 信 号

シンクロ電機(1X、10X)

(ix) 所 要 電 力

100 V A.C. 2 KVA

(c) 構成および構造

(i) 構 成

構成は、表3.1に示すとおりである。

表3.1 構 成

構 成 品	備 考	数 量
ふく射部	3cm波帶用スロット 10cm波帶用スロット	1 1
回転部	2重ロータリ・ジョイント 歯車群 駆動モーター	1 1 1
回転信号発生部	1X 10X	1 1

(ii) 構造

構造は図3.5に示すとおりである。

(iii) 動作の概要

3cm波帯、10cm波帯それぞれのレーダ送信機出力は、き電導波管をへてこのアンテナ・システムにき電される。これらは2重同軸型のロータリ・ジョイントを経て同軸上に取付けられたそれぞれのスロット型アンテナに給電される。スロット・アンテナによつて、水平偏波の尖鋭なビーム幅の電波ふく射を行なう。

到來信号に対しては、上記とは全く逆順路で動作し、き電導波管をへてレーダ受信機へ供給される。

回転部は、上述の2重スロット・アンテナを回転させるもので、駆動モータよりの回転出力は、歯車群をへて約15 RPMの回転を行なわせる。

この時、同時に発生した回転角度信号をシンクロ電機(1X、10X)により、指示機へ伝達する。

(d) 設計上の問題点とその検討結果

(i) ビーム幅 サイドローブ抑圧比

ここでは(b)に述べた主要諸元の裏付けとして、ビーム幅、サイドローブ抑圧比と素子数の相互関係を、まず、明確にし諸元算定の根拠を示す。

指定されたサイドローブ抑圧比に対して、最小のビーム幅をもつ放射特性をうるために最適分布形と考えられるドルフ・チエビシェフ分布を採用する。この場合、ビーム幅、サイドローブ抑圧比、素子数の間にはつきの関係が成立する。

$$\sin \frac{\phi}{2} = \frac{\lambda}{\pi M d} \sqrt{\frac{3}{4} \log^2 2 + 2 \log 2 \cdot \log r + \frac{\log^2 r}{2 r^2}}$$

ただし ϕ : ビーム幅 λ : 波長 $(M+1)$: 素子数 r : サイドローブ抑圧比

d : 素子間隔である。ここで、アレイ全長を D ($= M d$) とすると、ビーム幅とアレイ全長との関係を与える一般形がつきのように表わされる。

$$\phi = A \frac{\lambda}{D}$$

ここで定数 A は、必要とするサイドローブ抑圧比によつて与えられるもので、図3.6に示すとおりである。

このシステムでは、サイドローブ抑圧比の設計値として数dBのOver Designを行ない -40 dBとした。この場合 A の値は 68.7 となり、全長 3,600 mm のアレイで設計ビーム幅は 3cm 波帯で 6.2°、10cm 波帯で 1.9° となる。

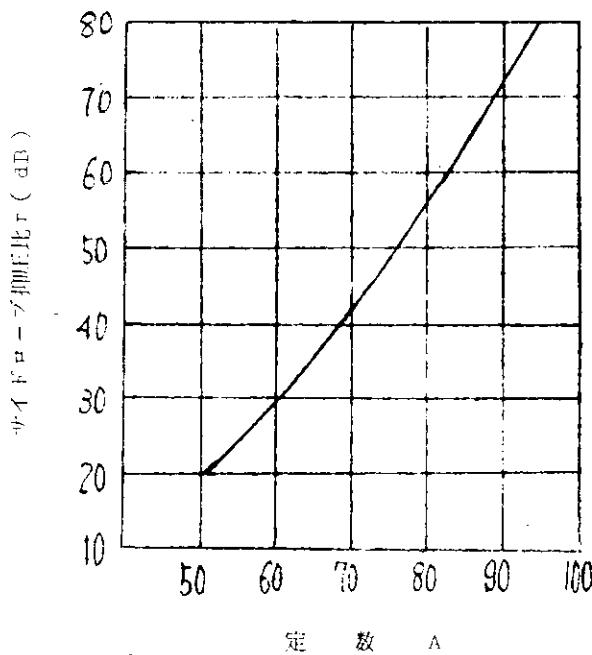


図3.6 定数Aとサイドローブ抑圧比の関係

(ii) 交さ偏波抑圧比

このシステムでは水平偏波を使用するため、スロットとしては方形導波管の狭面にあけられたいわゆるエッジ・シヤント・スロットを採用した。したがつて、その傾斜スロットから垂直偏波成分の放射があり、これが、アレイとして合成されると、主ビームの両側約45°付近に不要ビームとして現われる。この不要放射ビームの抑圧には各種の方法が考えられているが、もつとも一般的な方法は格子による抑圧である。

このシステムでは、格子間隔、奥行などから20 dBの抑圧特性をもつ格子を付加して、交さ偏波抑圧比 - 40 dB以上を確保している。

(iii) ロータリ・ジョイント

2重ロータリ・ジョイントとしては、高電力性、多段可能性にすぐれた導波管形環状ロータリ・ジョイントがあるが、構造の複雑さ、形状、重量等の見地からもつとも一般的な同軸形を採用した。

同軸形2重ロータリ・ジョイントとして、もつとも重要な問題は同軸管の選定にある。すなわち、高次モードの遮断波長による太さの制限、電力容量最大条件と損失最小条件との相異、方形導波管への変換の容易性等を考慮のうえ、内側同軸と外側同軸の管径を決定しなければならない。ここに採用したものは、同軸導波管変換器をドア・ノブ形とし、同軸管は電力容量に重点をおき、10 cm波を外側同軸で3 cm波を内側同軸で給電し、いずれも電力容量 50 kW以上を確保できる。

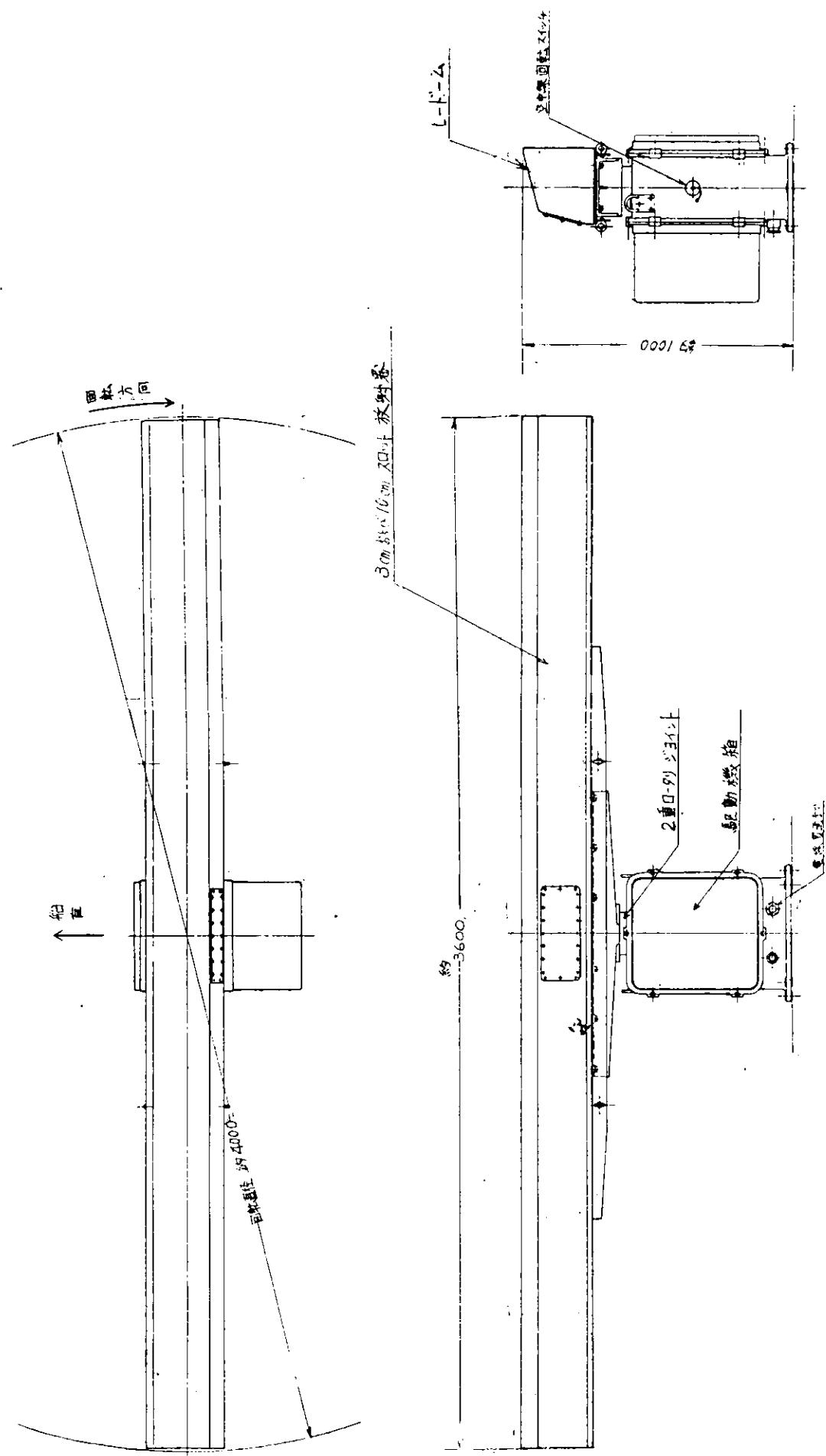


図3.5 衝突予防装置
二重スリットアンテナ外観図

(3-2) 雑音除去装置の仕様

(a) 用途

船舶用レーダの受信信号は一般に、セット雑音、干渉雑音、雨反射などを含むことが多く、この信号をそのまま、デジタル処理を行なうと、精度が劣化するのみならず、衝突予防装置自体の機能をそこなうことも予想される。

この装置は種々の雑音成分がレーダの繰返し周期と非同期であることに着目し、自船レーダの送信パルスに同期した目標信号のみを効率よく抽出して、雑音成分を除去し、 S/N の高い信号として、これ以後のデジタル処理を有効かつ、容易に行なわしめるものである。

(b) 特徴

レーダ、ソナのようないわゆる周期性があり、しかも同期のとれる信号と雑音成分を除去する試みは古くからあり、その実用化においても相関器、遅延帰還型フィルタ、蓄積管法など種々のものが考案されている。

しかしながら、理論面の発展に比し、実用化の点において安定性、効率、経済性などを考えた場合不十分な点が多い。

本方式は動作原理上、遅延帰還型相関法ともいえるものでレーダ、PCM通信、サンプル値制御などにおいてよく知られている零次ホールド回路(いわゆるポツクスカ復調器)の開閉素子に適切な時定数を持たせることによつて、蓄積管法とほぼ同等の S/N 改善を容易に行なえるもので、単純な構成でありながら、安定な動作が得られる。

また、蓄積管などのように特殊な部品は必要としない特徴がある。

その反面、単純ではあるが多数個の相関素子を必要とする欠点があるが、最近の半導体素子の急速な開発とデジタル技術の進歩によつて、これを克服できる条件が整えられ、はじめて、本方式の特徴が生かされたといえる。

(c) 主要諸元

(i) 雑音除去範囲

- {(i) 距離……約3マイルから16マイル } ドーナツ状の範囲
(ii) 方位……全域

注1) 距離0～3マイルまでは処理しないロービデオ信号を送る。

(ii) 量子化距離幅(距離分解能)

約 0.04 マイル

注2) 衝突予防装置全体の距離精度は0.1マイルであり、レーダの送信パルス幅0.5 μ sec(約0.04マイル)のため、量子化距離は後者としている。

注3) 0.04マイルの距離幅をひとつの相間器で受持たせるので、13マイル間約320個の相間器が必要となる。

(iii) S/N改善度

10 dB以上

注4) 雑音は白色雑音、受信信号のスイープ繰返し回数20回以上を考えた場合である。

(d) 方式

(i) 構成

雑音除去装置の構成は図3.7に示すようになる。

(ii) 動作概要

レーダからのロービデオ信号はビデオ増幅器で增幅後320個の相間器に並列に加えられる。一方、レーダ送信パルスに同期したトリガパルスはパルス遅延回路で3マイルに相当する時間(約36.9 μ sec)だけ遅れて、スタート、ストップ発振器をスタートさせる。この発振器は0.5 μ secのパルス間隔で発振し、出力はパルス分周回路で計数され、この場合320個のパルスを計数すると同時にストップパルスを出し、発振を停止する。以上の動作によ

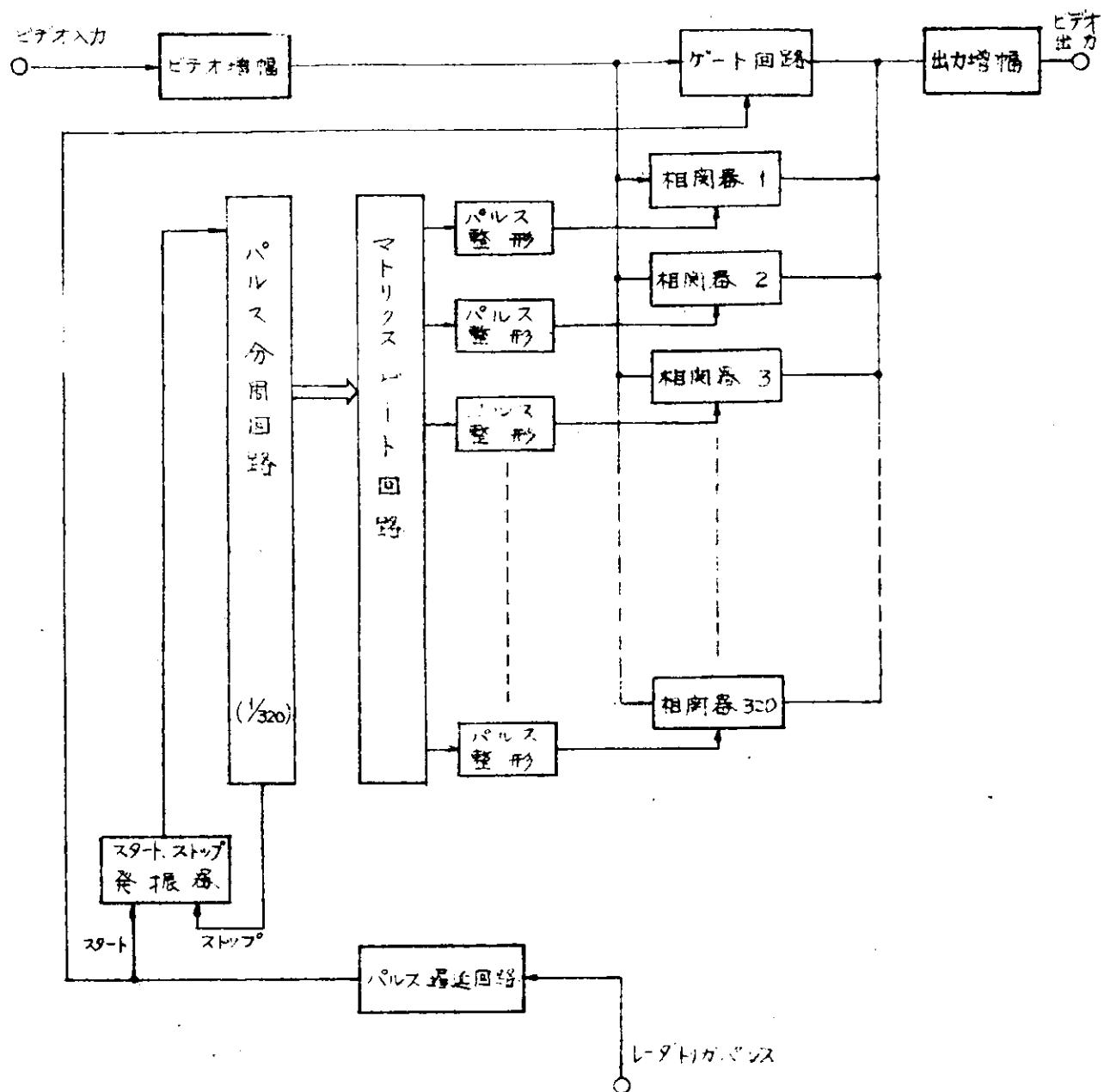


図3.7 雑音除去装置の構成

つて、レーダトリガパルスと分配パルスとはスイープごとに同期されることになる。

パルス分周回路の出力は並列にマトリクスゲート回路に加えられ、ANDゲート動作の組合せによって、順次遅延したパルスが得られる。このパルスを整形後320個の相関器のゲート信号となる。

相関器には前述のように全部の相関器に同時に加えられているので、ゲート信号が加えられた相関器のみビデオ信号を処理していくことになる。

ひとつの相関器をとつてみた場合、今回のスイープのビデオ信号はゲートパルスがきた瞬間、振幅が検出され、前回のスイープで記憶した信号に加算して、次回のスイープまで保持される。もし、そのビデオ信号が目標信号ならばスイープごとに加算されていくが、雑音のときは同じ周期で、しかもせまいゲート幅に何回も一致して出てくることは確率的にみてひじょうに少ないので、その出力は加算されることではなく、雑音成分を除去できる。

しかし、このままの信号では相関器の記憶作用によって、距離の情報が失なわれているので、さらにゲートパルスでサンプリングする必要がある。そのため、本質的にこの動作で距離分解能はきめられることになる。

以上の動作をAスコープ状に画くと図3.8のようになる。

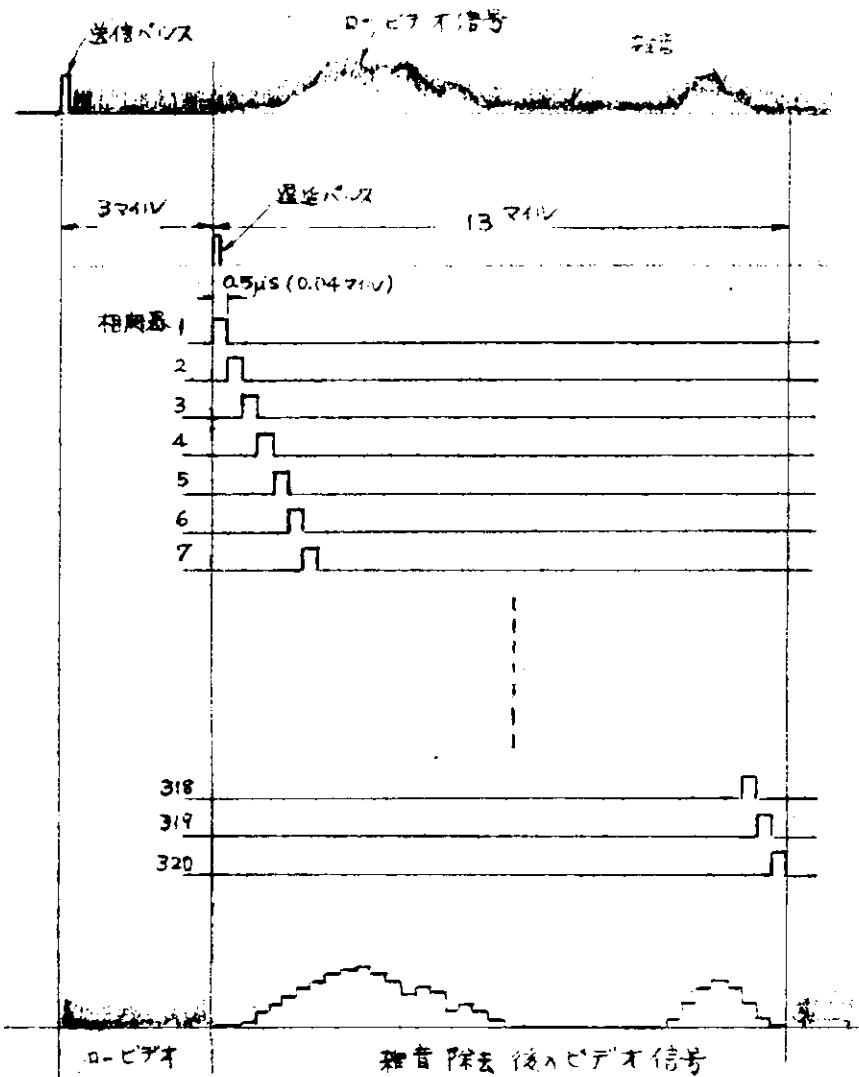


図3.8 動作原理図

(e) 主要回路の性能

(i) 相関器

相関器 — 素子のプロックダイヤグラムを画くと図3.9のようになる。

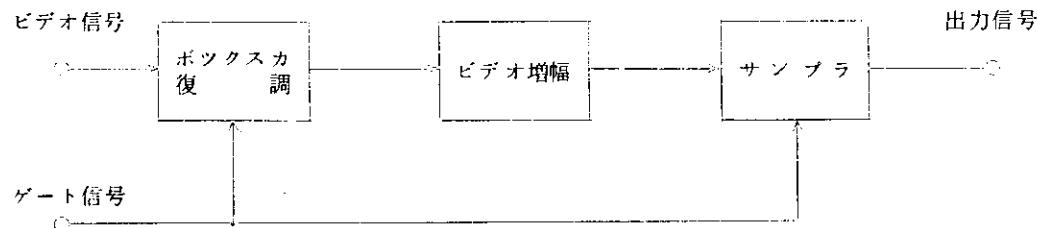


図3.9 相関器ブロック図

ボツクスカ復調器はゲート信号によってビデオ信号を開閉する素子で、閉のときの時定数をゲート時間幅に比しだ大きくとると残留効果があらわれてきて、

- (イ) ビデオ信号の尖頭値までは完全充電されない。
 - (ロ) 前回入力信号の保持値の放電はあまり行なわれず、これが重量する。
- のような特性を持つ。

ビデオ増幅器は残留時定数に起因する振幅減衰を補償するものである。

サンプラーは残留効果によつて処理された信号に距離情報を持たせるためゲートする回路である。

以上の動作を考慮して等価回路を画くと図3.10のようになる。

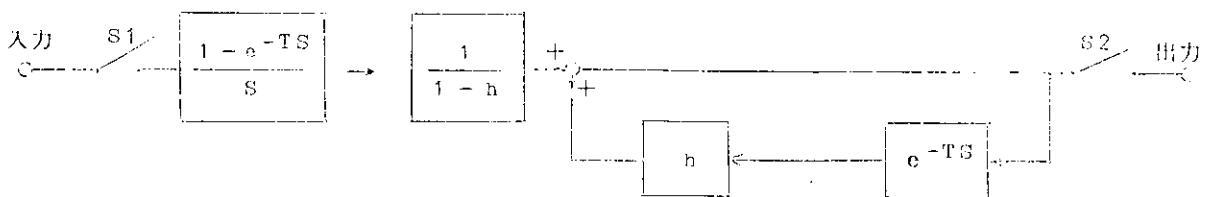


図3.10 相関器の等価回路

ここで、 S : ラプラス演算子

T : ゲート間の周期(レーダースイープ周期)

$$h = e^{-\frac{\tau_g}{\tau_o}}$$

τ_g : ゲート幅

τ_o : ゲート閉時の時定数

$$\frac{1}{1-h} \text{ ビデオ増幅器のゲイン}$$

S_1, S_2 の特性を考慮すれば、 $1 - e^{-TS} / S$ なるボックスカ復調器のホールド特性は消失して図3.11に示すような遅延帰還回路と等価となり、この回路を用いた周期信号の S/N 改善はこの遅延帰還特性にもとづくものといえる。

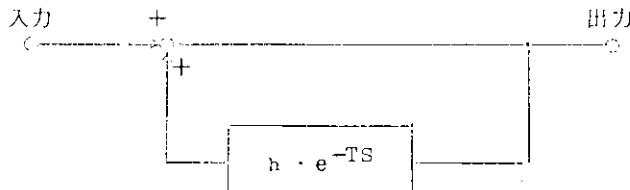


図3.11 単純化した等価回路

レーダ受信信号は一般にスイープ間相関は有限となり、 S/N 改善度を考える場合対象スペクトルは $0 \sim \omega_0 = 2\pi/T$ 間の主スペクトルのみであるから、この相関器の過渡応答を求め、時間領域で改善度を求める。

ここで仮定として

- (1) 信号は周期 T 、単位振幅のパルスが $t = 0$ のとき印加される。
- (2) 雑音は無限時間で考える。

時刻 mT における瞬時の入、出力信号を P_{ism} 、 P_{osm} 、雑音電力を P_{inm} 、 P_{onm} とすると、 S/N 改善度 G_m は

$$G_m = \frac{P_{osm}}{P_{ism}} / \frac{P_{onm}}{P_{ism}} \quad \dots \dots \dots (3.1)$$

$$= \frac{|f(t)|^2}{\frac{1}{2\pi j} \oint_{|z|=1} \tau(z) \tau(1/z) \frac{dz}{z}} \quad t = mT$$

$$= [G]_{t=\infty T} \left[1 + 2e^{-\frac{j\pi}{T}} + e^{-\frac{1-j\pi}{T} t} \right]_{t=mT} \dots \dots \dots (3.2)$$

$$\text{ここに } \{G\}_{t=\infty} = G = (1+h)/(1-h) \quad \left. \right\}$$

$t = mT$ m : 正の整数

式(3.2)の h をパラメータとして図示すると図3.12に示される。

ここで $m = 20$ $h = 0.9$ とすれば、信号対雑音比 $13 \pm (11 \text{ dB})$ が得られる。

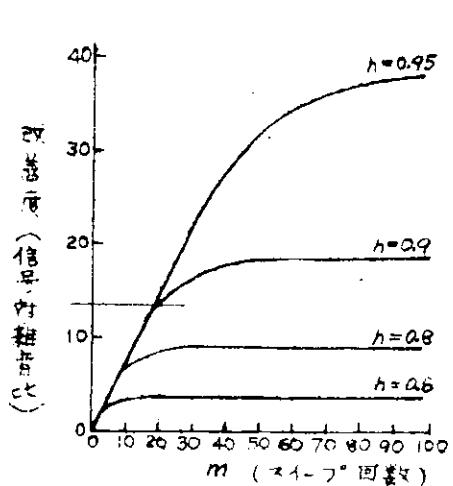


図3.12 h をパラメータとした改善度曲線

(f) パルス分配器

パルス分配器の性能は

(i) スイープ当たりのパルス列の同期ずれ(ジッター)全パルス列について $0.01 \mu \text{sec}$ 以下

(ii) パルス幅 $0.05 \pm 0.1 \mu \text{sec}$

(iii) パルス立ち上り、立ち下り 30nsec 以下である。

スイープごとに同期ずれがあつた場合、ひとつの相関器についてみれば、雑音と考えられるのでできる限り少ないことが望ましい。

パルス幅の誤差は分周回路に用いるプリツプ、フロップの遅延時間によつて発生する。 $0.1 \mu \text{sec}$ 以内のバラツキにおさえる

には、少なくとも分解能は $0.05 \mu \text{sec}$ 以上が要求され、応答周波数 20 MHz 以上のプリツプ、フロップが必要である。

分配回路に用いるゲート回路ではパルス波形がなまつてくるので、最終的にはプロツキング発振器で整形して所望のパルス波形を得る。

(3-3) 海面反射除去装置の仕様

(i) 蓄積管を使用した海面反射除去装置の必要性について

レーダ影像をみながら航行している場合とか今回の衝突予防装置としてレーダ信号を計算機処理して、當時使用するという場合に一つの問題となることは Sea Clutter 中よりブイや小船等の小ターゲットのエコーを弁別してピックアップすることのむづかしさをあげることができる。

小ターゲットの信号入力がその周辺の background の Sea Clutter の信号入力に比較して、平均数 dB 高い場合でも PPI でみている時に、たまたま Sea Clutter の信号が変動して、小ターゲットの信号と同じ位強くなつて PPI を光らせてしまうとターゲット信号がどれであつたか見失つてしまうことがある。また全然 PPI のような積分効果をもつた装置を経ないで、レーダ影像信号を量子化して計算機に入力しようとしている本装置のような場合は小ターゲットのエコー信号と Sea Clutter 信号の弁別がよく行なわれていないと、多数の信号が計算機に入力し計算機がオーバフローすることもあると考えられる。

このため、海面反射 Sea Clutter の信号を弱くし、小ターゲットの信号のみを強調するような海面反射除去装置に不可欠の装置であると考えられる。

Sea Clutter の信号を弱くしてターゲット信号と見分けやすくするための方法として従来から入出力関係が Log 特性の中間周波増幅器を通して増幅しその後 F T C をかけてみるという方法が採られてきた。この方法は雨の反射 Clutter を減少することには有効であつたが、海面反射 Sea Clutter を除去するのには十分ではなかつた。これは Sea Clutter の信号は雑音と同じような振幅分布特性をもつているが、雑音等と較べるとずつと変動がゆつくりした信号であるからレーダのくりかえし周期の間は変化せず、相連続するパルス間ではほとんど互いに同じ振幅を持つている信号であるためである。

すなわち、Sea Clutter の信号は海面の状態がパルスの一周期の間に変化しないので、各パルスごとでは同じ

海面反射波が受信されている。したがつて、この信号を各パルスごとに続けて積分平滑しても Sea Clutter 信号は全然小さくならない。

これに対して、各レーダ Scanごとの信号を積分して平滑する操作を行なえば、各 Scan ごとの Sea Clutter の信号は時間間隔が長いため、互いに相関がないので積分して平滑してやれば減少させることができる。

一方 Scanごとの積分を行なつても、小ターゲットからの信号は互いに相関のある信号であるため、積分すれば積分した分だけ強調されてくると考えられる。したがつて、各 Scan ごとのレーダ信号を積分すれば Sea Clutter の信号は減衰し、小ターゲットの信号は強調されるので、海面反射除去装置としては有効である。このような各 Scan ごとのレーダ信号を積分するために蓄積管を使用した装置を考えることができる。蓄積管に数 Scan 続けてレーダ信号を書き込めば数 Scan 分の信号が重ねて蓄積されるので、これを読出せば海面反射が抑制された信号が得られる。蓄積管を使用した例ではないが、同様な考え方で空中線を高速回転し PPI のブラウン管の蓄積効果を利用して海面反射を抑圧することに関する文献が発表されている。

(d) 海面反射除去装置の蓄積管の概要

海面反射除去装置は蓄積管 1本を有するビデオ信号の Scan ごとの積分を行なう積分装置である。蓄積管にはいろいろな積類のものが発表されているが、この装置においては電気的に書込んで電気的に読出し出力の得られる信号変換形の蓄積管が使用される。使用を予定している蓄積管は図 3.13 のような信号変換形の蓄積管であつて、電子銃は一つだけついている。このタイプの蓄積管は数種発表されているが今回の装置では Raytheon 社製の QK685

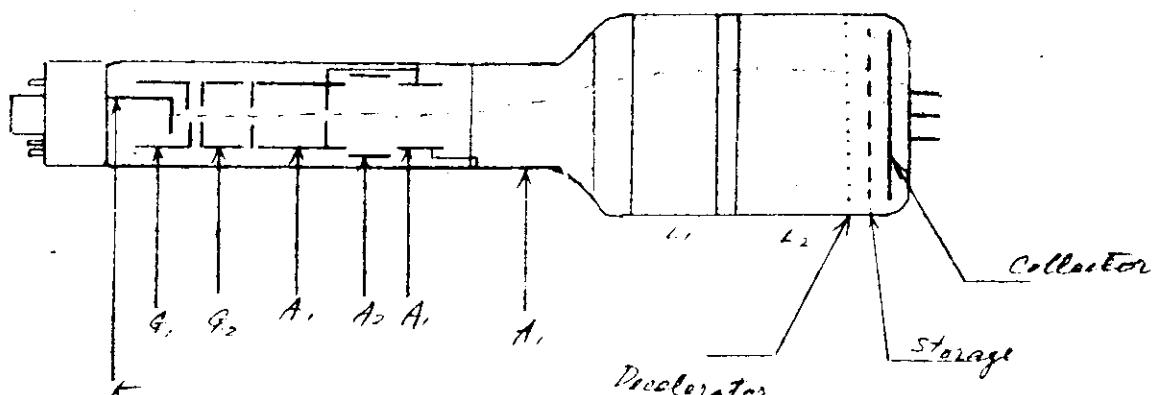


図 3.13 Storage Tube Outline of QK685

を使用することにしている。蓄積管の動作は絶縁物の蓄積ターゲットの電位によって蓄積が行なわれている。絶縁物を電子ビームで衝撃した場合その一次電子エネルギーと二次電子放射比とは図 3.14 のような関係があり、ある電圧 V_{crit} より高いエネルギーでは二次電子の放射比が 1 以上になる。

蓄積管に信号を書込むには電子銃のグリッド G_1 に書込信号を加えて電子ビームを変調し、二次電子放射の放射比の差により蓄積スクリーンに電荷模様を形成する方法がとられる。

蓄積電荷の読み取りは、読み取る電子ビームがスクリーンにあたらないようにして電子ビームを定位してやるとビームは電荷模様に応じて変化するので Collector より読出し信号出力を取出せる。このような单一電子銃形の蓄積管を採用した理由は次のとおりである。

(f) 単一電子銃形のものが他の二電子銃形のものに比

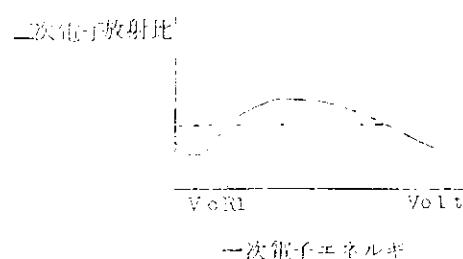


図 3.14

較して解像度が優れている。Q.K.685は直径あたり1,000本の解像度がある。

- (a) 単一電子銃形のものであるから読み取時と書き込み時に同じ偏向系が使用できる。したがつて、読み取時と書き込み時の位置の一元性が保ちやすい。
- (b) 読出しと書き込みは単一電子銃形の蓄積管であるため同時にできないが装置としてはその必要性がない。
- (c) レーダの生のビデオ信号に対してそのまま書き込みを行なえる応答速度を持つている。本装置での蓄積管の使用は数回書き込みを行なつてその間の信号を数回積分することが目的である。したがつて累積書き込みの直線性がよくなければならない。
- (d) 充分な蓄積時間を持つている。

なお、蓄積管の動作モードは実際には読み取と書き込みの他、書き込みの前に準備の動作が必要であり、また書き換るために消去のサイクルが必要となる。これらの動作モードの切換は手動または一定の順序で自動的に操作されることが必要である。

蓄積管の動作モードとその間の動作は次のとおりである。

(イ) 準備(Prime)

消去と同じく新しい信号を書き込む前に蓄積面の電圧を整定するのに必要なサイクルである。変調されていない電子ビームで記録面を走査する。準備の時は蓄積面のスクリーンの電圧はVCR1の電圧にえらばれている。それゆえ二次電子放射比 δ は1以下となり、蓄積面の表面電位は負となる。

(ロ) 書込み

蓄積スクリーンの電圧をVCR1以上の電圧(350V位)をかけて変調された電子ビームによって蓄積スクリーン上の電荷模様を形成するサイクルである。

(ハ) 読取り

読み取りビームが蓄積スクリーン面にあたらないように蓄積面の電位を設定しておいて、スクリーン上の電荷に比例したコレクタ電流を読み取るサイクルである。

(ニ) 消去

消去は一定のDC電圧を書き込んで、蓄積面の全域を100%書き込まれた状態にすることによって行なわれる。

(III) 海面反射除去装置の概要

海面反射除去装置の全体のブロック図を図3.15に示す。

(イ) 動作の概要

レーダ・ビデオ信号は書き込みビデオ・アンプを通り蓄積管の制御グリッドに入力される。蓄積管においては、システムトリガにより同期した偏向回路により処理領域(0~16N,M)をスイープし、さらに空中線の回転信号に同期してScanする電子ビームを発生し、蓄積スクリーンにビデオ信号を書き込む。この書き込みは2~5回行なう。書き込みが終るとモード、スイッチ回路が動作し信号の読み出しを行なう。信号の読み出しも書き込みと同じ電子ビームにより行なわれる。

読み出された信号は処理レベル設定部において処理された後出力される。

(ロ) モード切換えの時間関係

モード切換えの時間関係は図3.16に示すように2回転以上5回転の書き込みを行ない1回の読み出しが行なわれる。これらの動作はすべて空中線の回転と同期して行なわれる。書き込みの前には準備(Prime)、消去の動作が必要で、読み出しの前にも回路の安定度を高めるため若干の準備時間が望ましいので読み出しの前後に準備の時間を取つた。また書き込みの回数は海面の状況または蓄積管の特性等から初めから何回が適当であるか決められないので実験により決定することとし、現在、半固定で2回から5回まで変化できるように考慮している。

空中線回転数 15 rpm

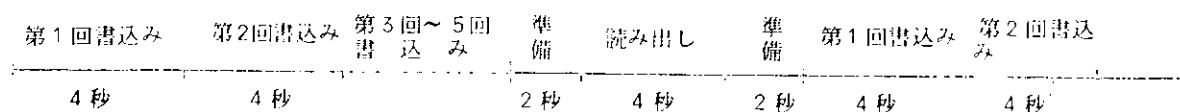


図3.16 モード切換の時間関係

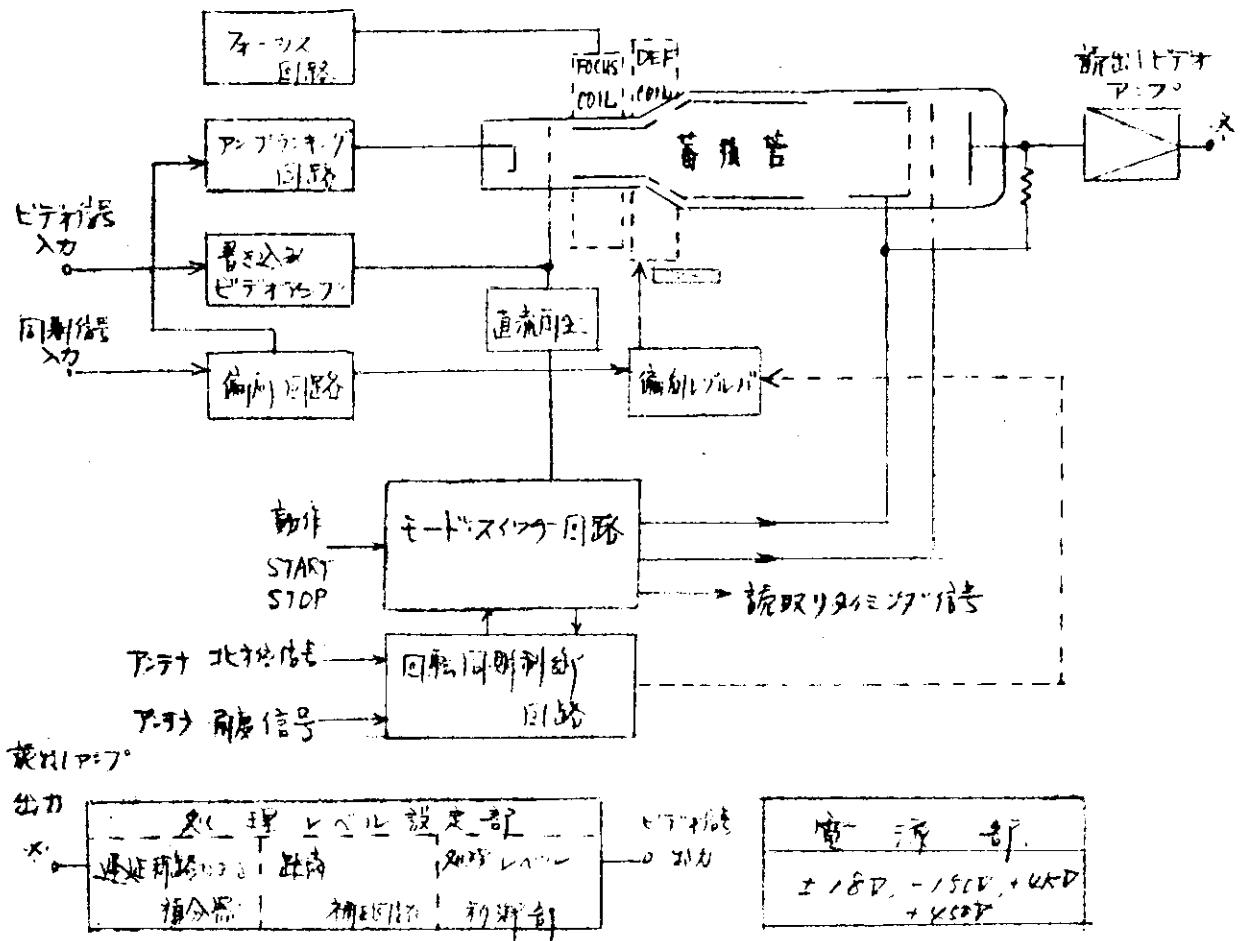


図3.15 海面反射除去装置ブロック図

(4) 处理レベル設定部

蓄積管から読み出した信号は処理レベル設定部において処理を行ない出力される。図3.17に処理レベル設定部のブロック図を示す。

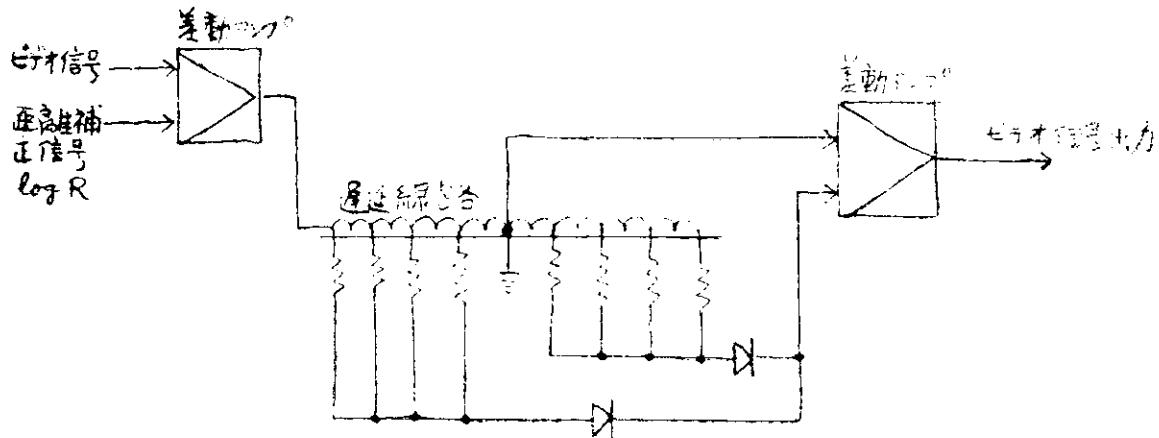


図 3.17 処理 レベル 設定部 ブロック図

信号処理は距離補正信号と読み出したビデオ信号を差動アプに投入し距離により振巾補正を行ない、その信号を信号の back ground level に比較してピックアップするために信号を遅延線路を使って積分しその積分平均値レベルを超えた信号を出力するように構成する。

(3-4) 目標判別追尾装置の仕様

目標判別追尾装置はレーダビームが目標を照射した時受信ビデオ信号をデジタル的に統計処理することにより目標の距離と方位角をデジタルデータとして実時間に出力する装置である。これらのデータは装置の処理分解能を最小単位として純2進数で得られ、計算機に転送され追尾のための基礎データとする。目標判別追尾装置のブロック図を図3.18に主要性能を表3.2に記す。

(a) 構成および各部の機能

本装置は下記の部分により構成される。

(i) ビデオ量子化器

入力ビデオ信号を振幅方向と時間軸方向に量子化する。振幅方向の量子化はアナログ信号であるビデオ信号をある閾値により“1”または“0”的パルスにすることで、この出力が量子化ビデオである。クラツタ等の雑音による擬似信号の検出を防ぐために、量子化ビデオの状態により閾値を自動的に制御する必要がある。

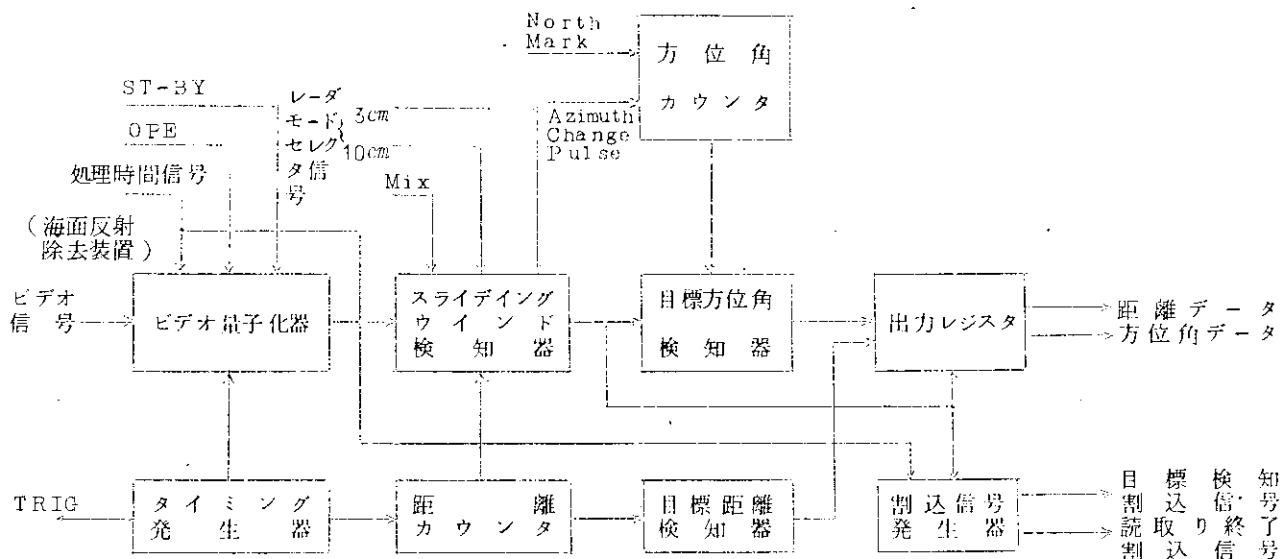


図 3.18 目標判別追尾装置ブロック図

表3.2 目標判別追尾装置主要性能

距離情報処理精度	0.1 N.M. 以下
方位角情報処理精度	360° / 4096 ($\approx 0.088^\circ$)
実目標検知方式	スライディングウインド方式
擬似目標除去方式	Run + Length 検知方式
出力データ	
方位角	12 ビット
距離	8 ビット
割込信号	
目標検知割込信号	1
読み終了割込信号	1
出力レジスタ	2 目標分
記憶素子	磁気コア
入力信号	
レーダビデオ信号	1
真北信号 (N.M.)	1
方位角変化パルス (ACP)	1
レーダモードセレクタ信号	3
S T - B Y	1
O P E	1
海面反射処理時間信号	1
出力信号	
トリガ	1

時間軸方向の量子化はタイミング発生器からのタイミングパルスにより決まる量子化区間に距離を分割し、得られた信号の距離に対応する量子化区間に“1”を立てる。この量子化器は、海面反射除去装置の蓄積管が信号を読み取っている時のみ動作すれば良い。

(ii) スライディングウインド検知器

量子化ビデオを統計処理する部分である。ビット数から決まるウインドを各量子化区間ごとに設け、過去の受信信号を記憶しておく。この記憶素子として磁気コアを用いる。ウインド内の“1”的数を計数し、これが閾値 S を越えた時レーダビームが目標を照射し始め、次に閾値 S 以下になつた時レーダビームが目標を通過したと判定する。ウインドの幅 L、閾値 S および R は信号のビット数により変化させる必要があり、3cm レーダと 10cm レーダではビーム幅が異なるので、レーダモードセレクタ信号により制御する。

(iii) 方位角カウンタ

真北信号 (North Mark) により初期化され、方位角変化パルス (Azimuth Change Pulse) を計数する 12 ビットのカウンタで、アンテナの回転角をデジタル信号として与える。

(iv) 目標方位角検知器

スライディングウインド検知器で閾値 S を越えた時の方位角カウンタの値を記憶しておき閾値 S 以下になつた時の方位角カウンタの値と、この記憶してあつた方位角とから目標の真の方位角を算出する。またこの時同時に目標

の信号の広がり(Run Length)を算出し、これが真の目標らしかぬ値の時擬似目標と判断しこれを除去する。

(V) タイミング発生器

量子化区間を規定し、磁気コアのメモリサイクルを規定するタイミングパルスを発生する。外部へ出力するトリガ信号もここで作る。

(vi) 距離カウンタ

タイミングパルス発生器のタイミングパルスを計数する9ビットのカウンタである。このカウンタで磁気コアの処理番地を指定し、この番地が距離に対応する。

(vii) 目標距離検知器

スライディングウインド検知器が目標を検出した時のウインドすなわち磁気コアの番地を距離カウンタからサンプルし、この値を目標の距離データとして出力レジスタにセットする。

(viii) 出力レジスタ

検知した目標のデータ、方位角12ビット、距離8ビットを計算機に転送するまでの間蓄えておくバッファで、2目標分設けてある。したがつてレジスタに2目標がつまり、計算機に読み込まれる前に新しい目標が検知されると、1目標のデータが捨てられることになるがデータの読み込みの優先度を高くしておけば実際にデータが捨てられることはほとんどないと考えられる。

(ix) 割込み信号発生器

計算機に対して割込みを発生させる。目標を検知してデータをレジスタにセットし終つた時に発生する目標検知割込み信号と、海面反射除去装置の蓄積管が1スキヤンの読み取りを終了するごとに発生する読み取り終了割込み信号がある。

(b) 処理方式

受信信号は量子化器で振幅、距離とともに量子化される。量子化されたビデオはスライディングウインド検知器の対応距離に記憶される。この検知器は図3.19のように各ワードNビットの磁気コアで構成され、各ワードごとのNビットが1つのスライディングウインドを構成している。このNビットはソフトレジスタを構成し最新の量子化ビデオが入ると1ビットソフトされ、第Nビットに入っているデータは捨てられる。使用するウインドの幅Lは実際にはN以下の適当な値が選ばれ、これはアンテナビーム幅、量子化器の閾値等に関連して実験的に最適な値を決める必要がある。このウインドの中の“1”的数を計数し、この値が閾値Sを越えた時の方位角のカウンタの内容を対応距離(同一番地)のコアに書き込む。次に“1”的数がE以下になつた時、方位角カウンタの値とコアから読み出した方位角とから目標方位角を算出してこのスライディングウインドの番地とともに出力レジスタにセットし、目標検知割込み信号を発生させる。

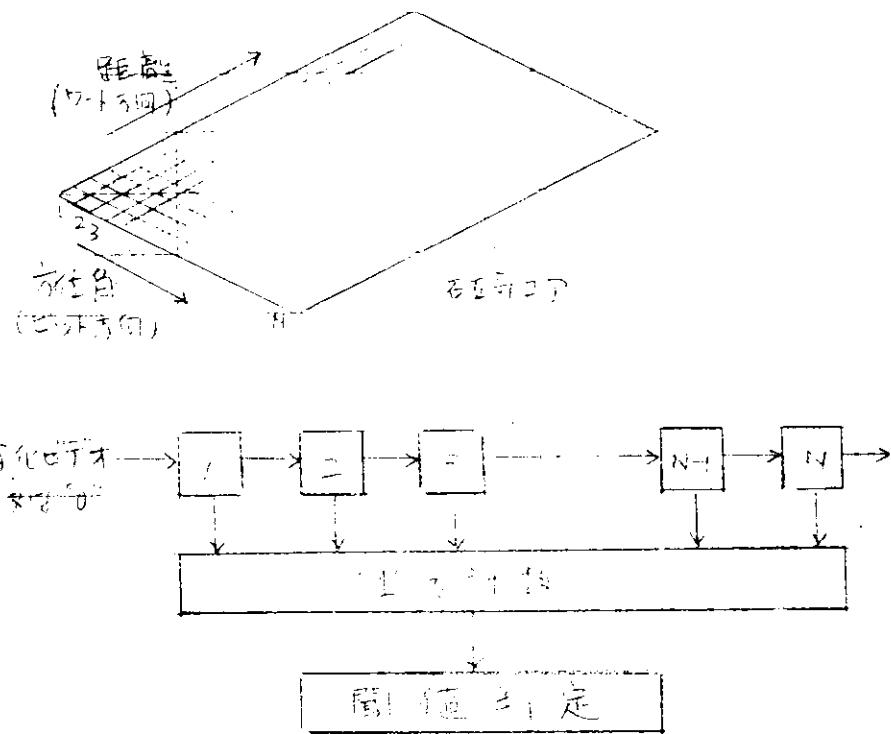


図 3.19 スライディングウインド検知器説明図

(3-5) ディスプレイ装置

(a) 概要

(i) 走査変換部および映像表示部

受信機(切換器経由)および雑音除去装置からのレーダビデオは PPI シースプによって蓄積管に書き込まれる。書き込まれたレーダビデオ信号は TV 走査で読み取られ、プラウン管上に高輝度表示される。一方、計算機からの記号発生信号は記号発生管によつてビデオ信号に変換されてプラウン管上に目標 No. が表示される。

(1) 蓄積管 — 書き込み

本装置に使用する蓄積管は 2 電子銃走査変換用蓄積管で PPI 走査を TV 走査に変換する。

まず Raw Video と Process Video (雑音除去装置後の Video) はレンジマーク、MINCPA 等の他の信号とともに混合されて一つのビデオ信号となりアンテナ回転と同期した PPI シースプによつて蓄積管に書き込まれる。

(a) 走査変換用蓄積管

入力ビデオ信号で輝度変調された書き込みビームは PPI シースプで走査されるため蓄積面には電荷バーンとして PPI 画像が蓄積される。一方反対側からは RF 信号で変調された読み取りビームを TV シースプで走査して、コレクタからは映像信号で振幅変調された RF 信号が取り出される。

(1) 蓄積管 — 読み取り

同期信号発生器からの TV 同期信号を受けて読み取り用 TV 走査のシースプを発生し、蓄積管および TV の CRT に加えて TV 走査を行なう。一方読み取られた RF 信号は RF 増幅され、検波されて TV 走査のビデオ信号となつて映像増幅部に入る。

(c) 記号発生

計算機からの目標 No. およびその位置(X、Y)のデジタル信号はメモリーで記憶されて位置X、Yに応じた時間に記号読み取り用のスイープを発生する。

このスイープによって記号発生管の中の所望の文字が読み取られ、入力 X Y の位置に相当する時間に文字(目標 No.)のビデオ信号を発生する。このビデオ信号は増幅器を経て TV のビデオ信号となる。

(e) 映像表示

映像の表示は 16 インチ CRT にレーダビデオおよびその目標No.を高輝度表示する。

同期信号発生器よりスキャヤンコンバータの読み取りスイープと同期した H スイープ・ V スイープ受けて TV 走査に変換されたレーダビデオ信号を表示するとともに、その目標位置に目標No.を表示するものである。

(f) ライトペン

目標追尾の際のマニアルイニシエーション、マニアルプロツティング、目標位置の修正の場合オペレータが手動でブラウン管上の目標を指示する場合に本装置ではライトペンを用いて上記の操作を行なう。

ライトペンの出力は変換器によつて目標位置(X、Y)のデジタル信号に変換されて計算機に送られる。

(ii) データ表示部

データ表示部は計算機による衝突予防計算の結果 10 目標についてのデータを表示するとともに計算に必要なデータの設定を行ない計算の割込指令信号を発生する一方レーダ系統のモード切換も行なう。

表示するデータは以下のとおり

- (a) 相手船のデータおよびその追尾状況
- (b) 操船法の指示
- (c) 自船の速度、針路
- (d) 危険船の判別表示
- (e) 最適針路の表示

設定するもの

- (a) データの設定
- (b) R A D A R M O D E の設定
- (c) 計算機への割込信号の設定
- (d) 電源系の制御

(i) データ表示内容

- (a) 相手船のデータ

指定された目標No.について計算機からデータをもつて内蔵のメモリで記憶して数字表示管およびランプで表示するものである。

- (1) 相手船のNo.：数字表示管
- (2) " 速度：" "
- (3) " 針路：" "
- (4) " 距離：" "
- (5) " 方位：" "
- (6) DIST or CPA：" "
- (7) TIME to CPA：" "
- (8) 追尾状況 AT、MT、TRIAL のいずれかのランプ表示

- (b) MANEUVREING

避行操船を行なう場合の計算結果の表示

(1) NEW COURSE：避行操船の新針路：数字表示管

(2) PROGRAM COURSE：原針路復帰指令：ランプ

(3) NO SOLUTION：避行操船不能：ランプ

(c) 自船の速度、針路

ログ、ジャイロからデジタル化された信号をもつて表示する。

(1) SPEED：数字表示管

(2) COURSE：〃

(d) 危険船の判別表示

計算結果10目標について下記の表示を行ない危険船の有無等を知らせる。またNoは目標指定の押ボタンスイッチとなつている。

(1) IMMEDIATE MANEUVERING

既に MIN CPA 内に入っている目標あるいは CPA が MIN CPA 以下であり、かつ T CPA が MIN T CPA 以下である目標のランプが点灯する。

(2) DANGER

計算結果衝突の危険のある目標についてランプを点灯させる。

(3) TRACKING

追尾している目標のランプの点灯、追尾目標が11隻以上になつた場合 OVER FLOWのランプを点灯する。

(4) LOST TARGET

追尾ミスが生じた場合、目標ランプを点滅する。

(e) 最適針路の表示

避行操船の場合予め定めておいた左右各々6通りの変針角のうち最適変針角をランプ表示する。

(f) 設 定

(a) データの設定

衝突計算に必要なデータをデジスイッチにより設定し計算機へ送るもので下記のものを設定する。

(1) MIN CPA

(2) " T CPA

(3) OCCUPY ZONE (自船の占有帯)

(4) △T (測定時間间隔)

(5) PROGRAM COURSE (計画針路)

(b) RADAR MODEの設定

このKEY BOARDはレーダー系統の切換スイッチで 3cm, 10cm, MEX のどれを選択するかまた DISPLAY と PPI のどちらでレーダー系を制御するかを設定する MODE選択のスイッチである。

(c) FUNCTION KEY

このKEY BOARDは計算機への衝突計算のための割込信専用のFUNCTION KEY でその機能は以下の様になつてある。

(1) AT : 自動追尾開始指令

(2) CORRECT : " 修正 "

(3) CANCEL : " 消去 "

(4) MI : マニアルエクエーション指令

(5) MF : " フロッティング "

- (6) TRAIL : 試行操船指令
- (7) MAN : 避行操船指令
- (8) DATA : データ表示指令
- (9) SET : データ読み込み指令

(d) POWER CONTROL

衝突予防系の電源の制御を行なうものでその機能は次のようになつている。

ST-BY : 系全体の電源の ON-OFF 信号

OP-E : レーダ送信機の高圧の ON-OFF 信号

ANT : ANT SCAN の ON-OFF 信号

ST-BY の ON でレーダ送信機の高圧を除いて他の装置は動作状態になり、OP-E の ON で RADAR MODE で選択された送信機が働く。

(e) 性能

(i) 走査変換部および映像表示部

(1) 書き込み装置

○ Raw Video 3 cm 1 V 正極性 50 Ω

〃 10 cm 〃

〃 M1x 〃

○ Process Video 3 cm 〃

〃 10 cm 〃

〃 M1x 〃

○ アンテナ角度信号、真方位-相対方位切換 15 RPM

1 ×、10 × 2 速度シンクロ (23 CRT 6)

○ PPT TRIG (PRETRIG) -5 μS、1 V、正極性 50 Ω

1500 / 750 PPS

(2) 走査変換装置

○ 2電子銃走査変換用蓄積管

○ 書き込み方式：二次電子放出による電子衝撃

○ 読み取り方式：格子制御型

○ 走査線数：945本

○ RF 周波数：30 MHz₂₅

(3) 記号発生

○ 入目標No：A B C D 1桁

目標位置 X : 10 bit Binary

〃 Y : 〃 "

○ 記号発生管

(4) 映像表示部

16インチ CRT 高輝度表示

距離範囲 4.8.16.60 NM

レーダ選択 { 3 cm レーダ 3、10 cm の MIX
10 cm 〃

ビデオ選択 Raw Video
 { Process Video

走査線：945 TV line

OFF... CENTER

MIN CPA レンジリング表示

目標Noの表示

(a) ライトペン

出力 目標位置

X : Binary 9 bit 電圧出力

Y : " " "

(i) データ表示部

(1) データ表示

(1) 相手船のデータ

	入力信号	表示
目標 No.	4BCD	接点
SPEED	"	3
COURSE	"	"
DISTANCE	"	"
BEARING	"	"
DIST of CPA	"	"
TIME to CPA	"	"
AT MT TRIAL	3bit	ランプ

(2) MANEUVERING

	入力信号	表示
NEW COURSE	4BCD	接点
PROGRAM COURSE	1bit	ランプ
NO SOLUTION	"	"

(3) 自船の速度・針路

	入力信号	表示
SPEED	4BCD	接点
COURSE	"	"

(4) 危険船の判別表示

	入力信号	表示
IMMEDIATE MANEUVERING DANGER	10 bit	接点
TRACKING	"	"
LOST TARGET	"	"
ALARM	1 bit	"
OVERFLOW	"	"

(5) 最適針路の表示

左右各々 5. 10. 20. 40. 60. 90 度の 12 とおりの変針角表示

入力信号	表示
12 bit 接点	ランプ 12

(a) 設定

(1) データの設定

	設定	出力信号
MIN CPA	デイジスイッチ 2	4 BCD 2 接点
MIN TCPA	" "	" " "
OCCUPY ZONE	" "	" " "
△T	" 1	" 1 "
PROGRAM COURSE	" 3	" 3 "

(2) RADAR MODE の設定

DISPLAY - PPI と 3cm - 10cm - MAX の 6 通りの組合せの MODE 切替スイッチ

設定： 押ボタンスイッチ

出力： 接点出力

(3) FUNCTION KEY の設定

AT, CORRECT, CANCEL, MI, MP, TRIAL,

MAN, DATA, SET の計算機への割込信号の設定

設定： 押ボタンスイッチ

出力： 接点出力

(4) POWER CONTROL

ST-BY, -ON OFF 接点出力

OPE - ON OFF "

ANT - ON OFF "

CPU 押ボタンによる接点出力

(4) システムのシミュレーション

(4-1) 概 要

衝突予防システムの開発においては、ソフトウェアの開発はハードウェアの開発と同様に非常に重要な事項であることはいうまでもない。ソフトウェアの開発、特に衝突回避航法の研究においては、その理論の正当性、妥当性を確認する方法は、もちろん実際の機器（衝突予防装置）とコンピューターとを組み合わせ、海上で評価試験を行なうことが一番良い方法ではあるが、その前に理論特に回避航法の基本論理を作成しておかなければ装置自体の基本的設計およびコンピュータプログラムの作成に着手することはできないであろう。そこで、その理論の確認の方法として、最も有効な方法はシミュレーションによる方法と考えられるので、本研究では〔1.3.4〕項で研究開発される衝突回避航法の理論の正当性および妥当性を評価するために、ハイブリッドコンピュータを使用して衝突予防システムのシミュレーションを行なつてみた。今回行なつたシミュレーションは〔1.3.4〕項の研究すべてを包含するものではなく最も重要で基本的な部分に限つてある。なお、これらの詳細検討は来年度の研究で行なう予定である。

運動体のシミュレーション（たとえば船体運動）にはアナログコンピュータが使われ、複雑な論理手順をふむものや確率的現象のシミュレーション（たとえば在庫管理、経済予測）にはデジタルコンピュータが多く使われている。衝突予防システムのシミュレーションにおいては船体運動のように微分方程式で表現される部分と、危険船の判断や衝突回避法の算出のように複雑な論理や数式が使用されている部分とがある。このよな場合には、前者にアナログコンピュータを使用し、後者にデジタルコンピュータを使用して、両者を有機的に結んでシミュレーションを行なうことは、非常に有効である。このように、アナログコンピュータとデジタルコンピュータとを適当な中間装置を介して結びつけて一つのコンピュータシステムを形成することができる。このコンピュータをハイブリッドコンピュータ（Hybrid Computer）と呼び、最近次第に使用されるようになってきている。なお、アナログコンピュータとデジタルコンピュータとの間に介在する装置をここではハイブリッドリンクージ（Hybrid Linkage）と呼ぶことにする。

幸いにして、われわれはハイブリッドコンピュータを使用することができたので、衝突予防システムのハイブリッドシミュレーション（Hybrid Simulation）を行なつてみた。ここにそのシミュレーションの方法およびシミュレーション例について述べる。

(4-2) シミュレーションの方法

(a) シミュレーションの範囲、条件等

衝突予防システムのシミュレーションを行なうにあたつては、次のような条件を設定した。

- (1) 相手船は1隻とし、その船に対して危険のある場合に避航操船法を算出する。（複数隻に対しては容易に拡張できる。）
- (2) 相手船の速力、針路は一定とする。これは〔1.3.4〕項の理論でも仮定されている。
- (3) 避航操船法は新針路操船と原針路復帰操船の2種とし、操船法が見出されないとときはメッセージをタイプし演算を終了させる。
- (4) (3)の条件より、自船の速力は一定とし、また操舵に対する船体運動は考慮する。（操舵特性のシミュレーションを行なう。）
- (5) 新針路角の決定に際しては、安全でかつできるだけ針路変更角の小さいものを選ぶ。ただし、針路変更角が左右同じ場合にはその針路変更により予測される CPA のうち小さい方を選ぶ。
- (6) 危険船の判別は一定時間毎に行なう。（本シミュレーションでは1分ごと）
- (7) 自船が操船中は危険船の判別は行なわない。操船が終了した後（整定期間後）再び判別を再開する。
- (8) 相手船に対するデータ（レーダでは距離と方位に対応）は北を α 軸、東を β 軸とした $\alpha\beta$ 平面上の点（ x, β ）

で得られるものとする。(デジタルコンピュータ内で距離と方位に変換している。)

(イ) レーダ情報の雑音等の処理に対応するシミュレーションは行なわない。すなわちハードウェアサイドのシミュレーションは実施しない。

(ア) 記録方法(観測方法)としてはXY記録計を使用し、自船に対する相手船の相対運動を真方位指示方式で表示する。また、時間軸をベースにしてX、Y、θ(自船針路)の記録も行なう。

(イ) 操船法の算出に際しては、衝突予防法を特に考慮せず、CPAから外へ出るような操船法を選ぶ。(シミュレーションプログラムを簡単にするためにある。)

(b) ハードウェアとソフトウェアとの関連

ここでは、どのような計算をどのようなハードウェアを使用してシミュレーションを実施したかについて述べる。(図3.20参照)

図3.20に示すように計算の内容は大略次のようになっている。

(イ) 自船の船体運動および他船の船体運動(微分方程式)

……アナログコンピュータを使用する。

(ロ) 速力成分の計算(三角関数と乗算)……ハイブリッドリンクージの高速アナログリンクージの部分を使用する。

(ハ) 相対位置の計算(減算)……アナログコンピュータを使用する。

(ニ) 危険船の判別および操船法の算出(複雑な数式および論理判断)……デジタルコンピュータを使用する。

(ホ) 記録……XYレコーダおよび6チャンネルペン書レコーダを使用する。

(c) コンピュータの概略仕様

(イ) アナログコンピュータ

名 称: CSS-2400 (I H I 社製)

演算増幅器: 約100台、直流通利得160 dB、

ドリフト $10\mu V/\text{day}$ 、出力 +50V、20mA

主な演算要素: 加算積分器、トラツク・ホールド兼積分器、汎用演算増幅器、加算係数器、リミッタ、デットゾーン、電圧比較器、計算リレー、係数ポテンショメータ、乗除算器、関数発生器

入出力装置: ペン書レコーダ(6チャンネル)、XYレコーダ、デジタル電圧計、テープパンチ・リーダ、タイプライタ、盤用電圧計

(ロ) デジタルコンピュータ

名 称: DDP-116 (Hewlett-Packard 社製)

記憶容量: 8 K語(コアメモリ)

語 長: 16ビット

サイクルタイム: 1.7 μs

入出力装置: ASR-33(入出力タイプライタ)、高速紙テープリーダ、高速紙テープパンチャ

(ハ) ハイブリッドリンクージ

名 称: I H I - H Y B R I D リンクージ(仮称)(I H I 社製)

主な構成要素: A/D変換器、D/A変換器、マルチプレクサ、高速トラツクホールド兼加算積分器、高速加算係數器、高速符号変換器、高速電圧比較器、高速乗除算器、係数ポテンショメータ、デジタルロジック要素

A/DおよびD/A変換器の語長: 符号+純2進10ビット

マルチプレクサの入力チャンネル数: 20チャンネル

(d) プロツク線図とフローチャート

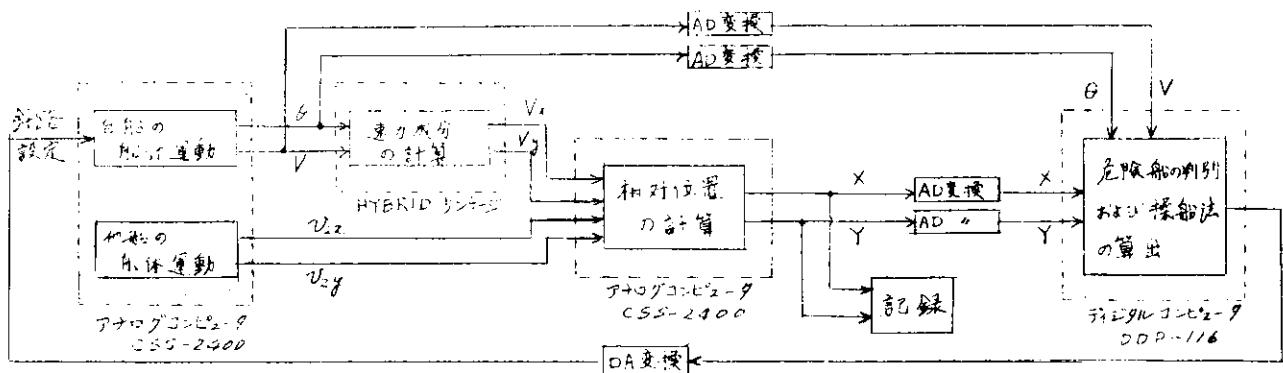
シミュレーションプロック線図を図3.21に、衝突回避航法の概略フローチャートを図3.22に示す。

(4-3) シミュレーション例

シミュレーション結果の一例を図3.23および図3.24に示す。図3.23はXYレコーダに真方位指示かつ相対運動表示で描いた相手船の航跡を示したものである。図3.24は同じシミュレーションにおいて、時間軸をベースにして相対位置(X、Y)と自船針路 θ を記録したものである。

図3.23において、相手船をA点でキャッチし、しばらく観測した結果、自船が現在の針路で進めば設定したCP A(この例では2浬)内に入る可能性があり、衝突の危険ありと判断し、B点で針路変更を行なつた(針路変更角40°)。そして避航操船を行ない、整定した後、しばらく観測した結果、危険がなくなり、しかも原針路にもどしても安全であると判断されたため、C点で針路を原針路へもどしている。すなわち本シミュレーションでは自動的に針路変更が2回行なわれている。

なお、本シミュレーションでは、自船の原針路をN方向としてある。



(注)(1) A/D変換およびD/A変換は HYBRID COMPUTER CSS-2400 を使用する。

(2) 記録は ANALOG X-Y 記録計等を使用する。

図3.20 衝突予防システムのシミュレーションの方法

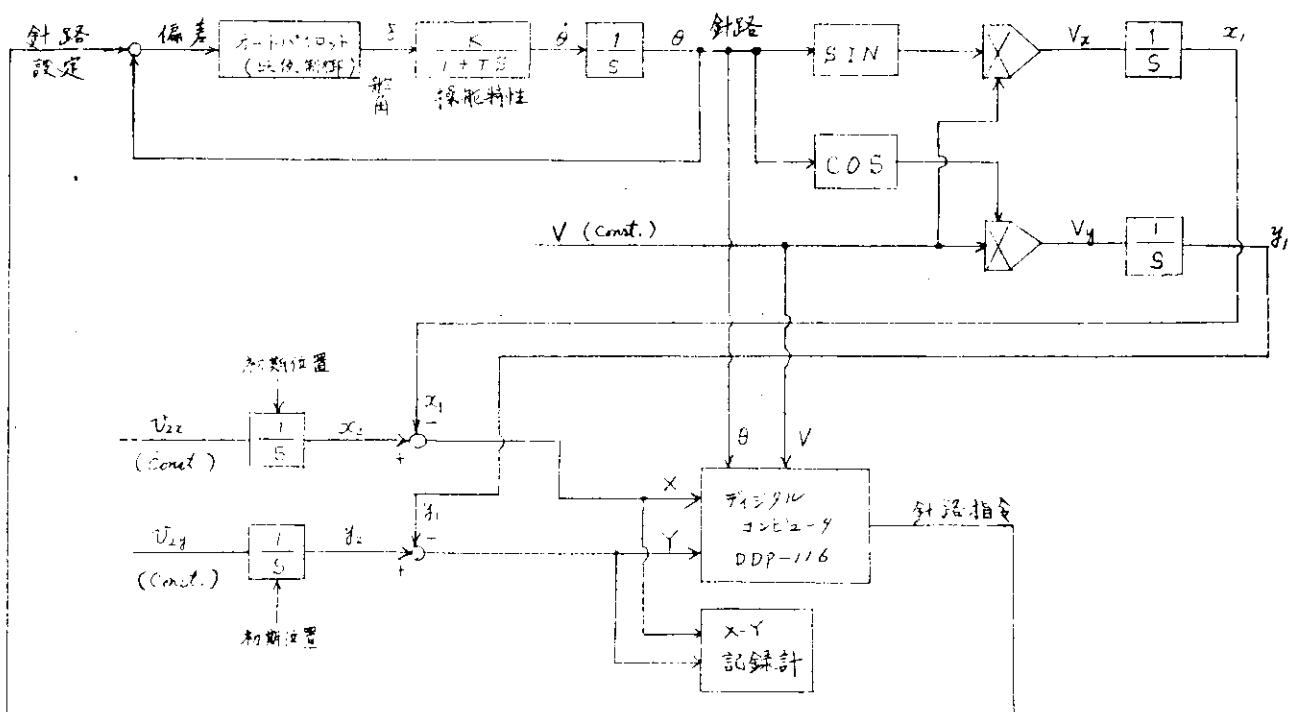


図3.21 衝突予防システムのシミュレーションプロック線図

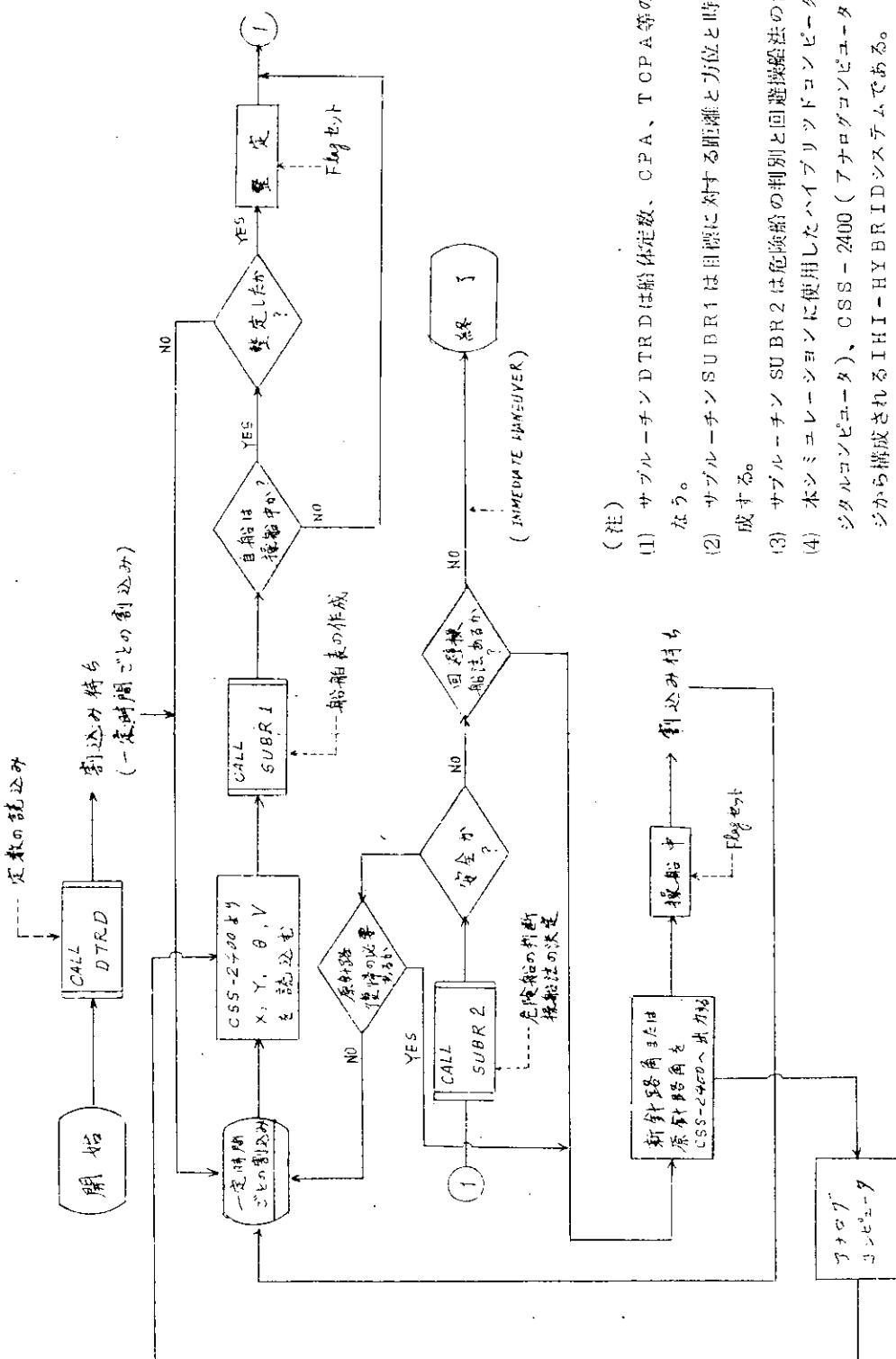
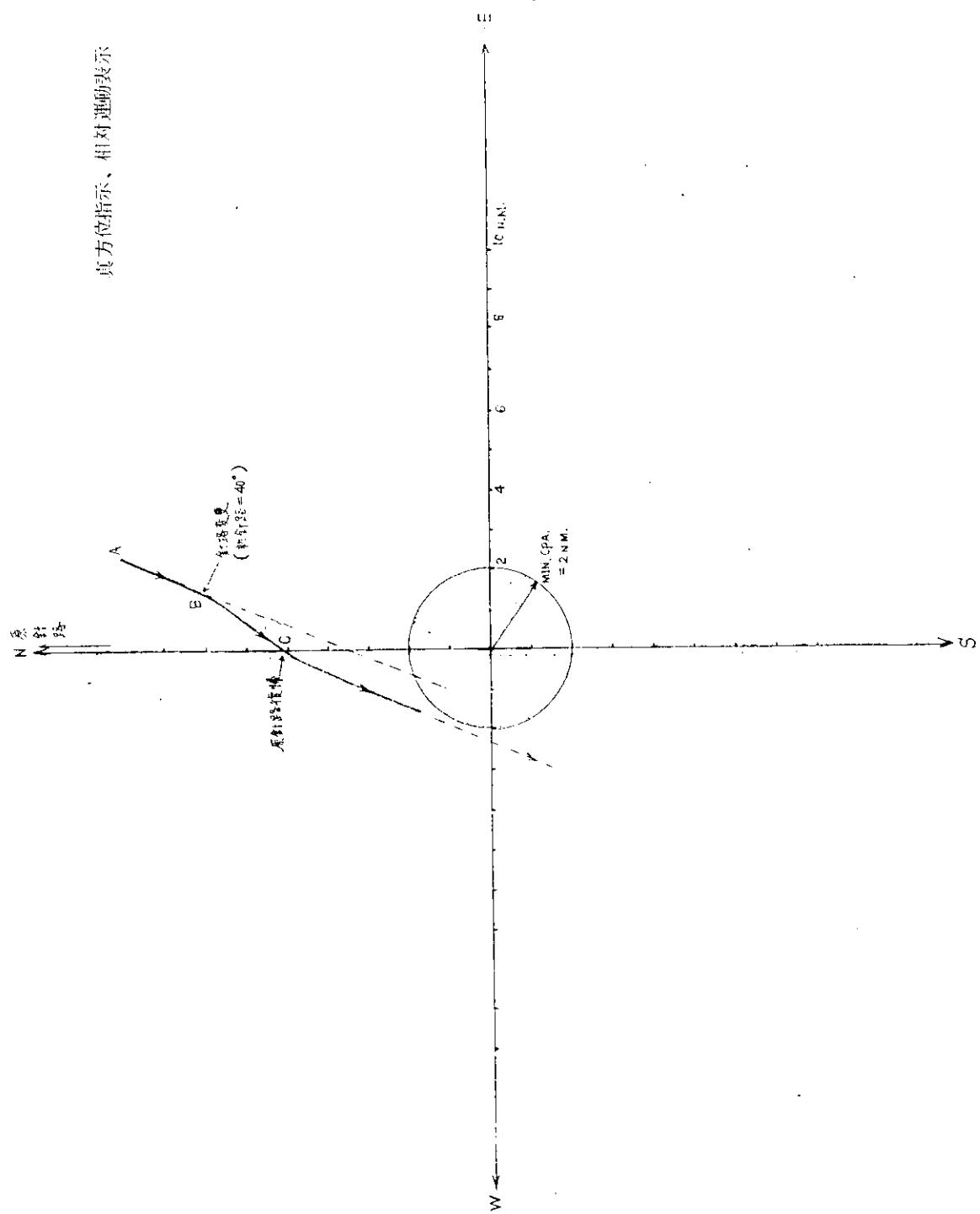


図 3.22 衝突予防システムのシミュレーションのフローチャート

図 3.25 シミニレーシヨン結果実例



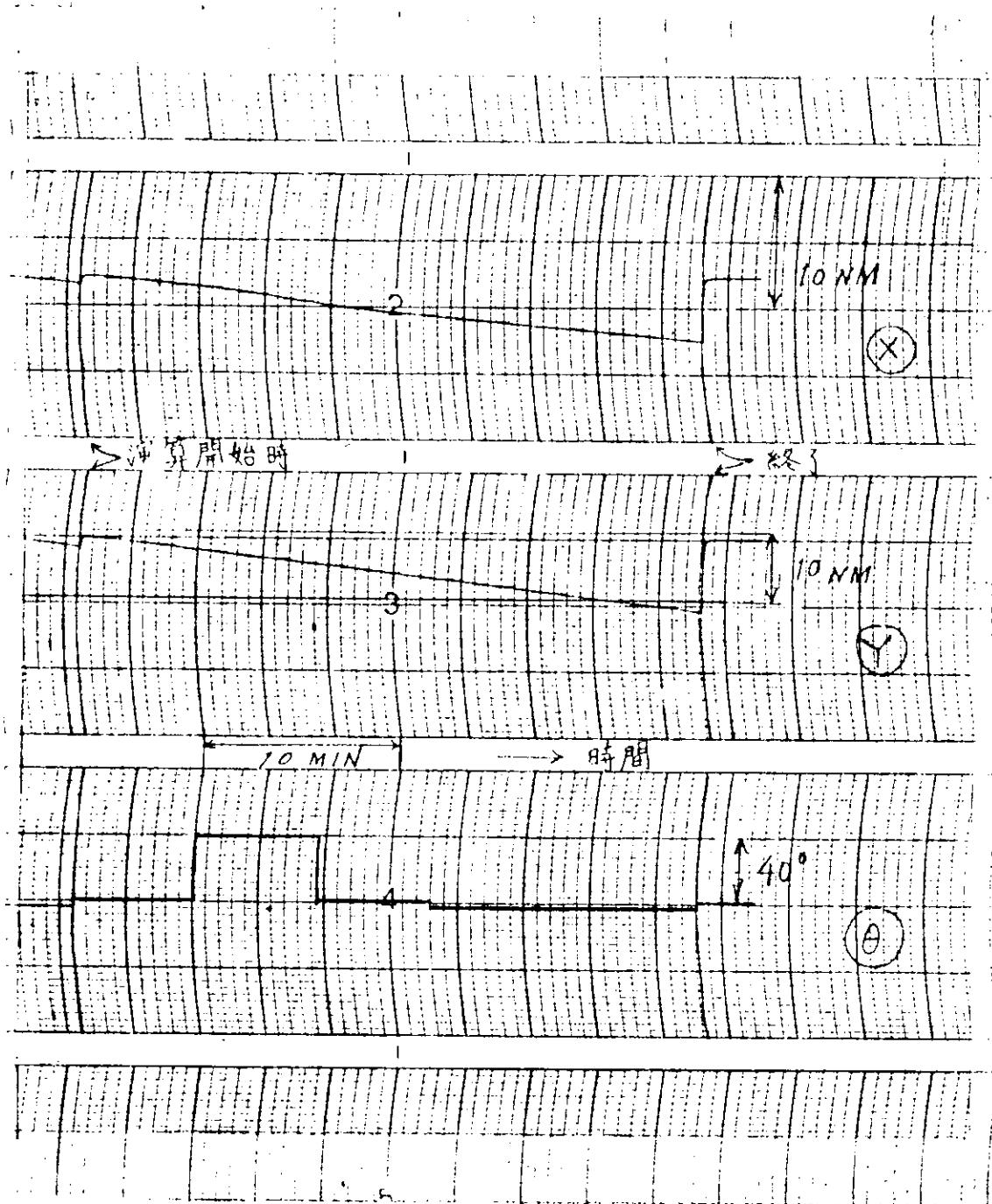


図3.24 シミュレーション結果例

1.3.2 航路の実状調査

(1) 緒 言

本調査は衝突予防システム開発にあたって、このシステムが作動する実際の場の実状を調査し、システムとしてそなうべき機能を考究する基礎を求める目的で行なわれた。

衝突予防システムのそなうべき機能を支配するものは、衝突危険、その回避を数学的に取扱う理論に加え、現行の衝突予防法との関連および航路の実情であろう。さらにハードウェアの性能が重要であるが、ここではそれにはふれない。

以上の見地から海難審判論の専門家の立場からの衝突予防法との関連、衝突事故例の調査および瀬戸内海、外航航路の実情調査を行ない、一応の結論を得た。

来年度は本結果を〔1.3.4〕衝突回避航法の研究の成果に反映させる予定である。

(2) 本研究と海上衝突予防法との関係

航行中における船舶の衝突は要約すれば船舶の針路が交叉するかまたはその針路が対向する同一線にあるかを前提とする条件の下に、船舶およびその船舶が流動性のある水上に存在しているという制約にある環境によつて現出するものである。

たとえば船舶の接近の度合が物理的には紙一枚の差によつて間隔を保たれるために、理論上は衝突ないしは接触があり得ないとされる場合であつても、船舶と船舶が水上にあるという特殊性によつて、そこに衝突：接触がありうるのが現実である。

海上衝突予防法はまず二船間における衝突を回避するために、衝突のおそれが生じた時点より二船の双方に衝突回避の航法上の義務を課して、衝突を予防させる規則であるが、法上には具体的には航法義務の生じる時点は明示されず、専らいわゆる船員の常務による判断に委ねられているものとされている。文言的にはそれは「十分余裕のある時期」とされてきたものではあるが、具体的には一般大型船の航灯の光達距離が2浬以上とされているため、航灯中の船舶の動向は一応マスト灯と舷灯とによつて察知できるものとして2浬説がその大宗をしめていたものである。マスト灯の光達距離の規定が5浬以上であるから、この説は必ずしも定説とは断定できず、かつその場合、場合における状況も千差万別であるから結局は船員の常務的判断によつて解決されねばならないとするのが妥当である。

しかしながら衝突のおそれは単に二船間の距離のみによつて判断されることには限らず、その船舶の進行方向、速力、風潮等によつて大幅な差が生ずることは当然である。特に高速船の近事著しい出現は従来のままの海上衝突予防法の適用範囲とともに、航海灯の光達距離の規定の再検討を要する時期に入つて、法改正の問題が具体的に進められているのが現段階の実情である。

この時機における本研究は「衝突のおそれ」が生ずるに「衝突のおそれ」が生じないような方法を考察しようとするものであるから同法の範囲外にあることを明らかにしておく。

本衝突回避システムの研究においてとり上げる船舶の見合関係は海上衝突予防法の適用範囲の以前において、あらかじめ衝突のおそれが生じないように回避の措置をとろうとする研究であるから、相手船が同様な趣旨の下に同様な措置に出るならば混乱を生じて所期の目的たる衝突回避が不可能であることは双務的な義務の下に航法により行動する海上衝突予防法による衝突回避の方法と大きな相違のあることはあらかじめ関係者は十分に銘記しておく必要がある。

いざれにせよ本研究も衝突回避の措置の研究であるから、基本的には二船間の見合関係の問題より導入して行かねばならない。したがつて海上衝突予防法に規定される見合関係が遠距離、時間的には相当以上の余裕のある時期において確認されねばならないことになる。

見合関係は次の4つの場合に集約される。

ただしNo(4)の場合には衝突には關係ないけれどもレーダ上にターゲットとして現出した場合はNoとしてデスプレイさ

れるものである。

(a) 見合関係の区分

No(1)行き合い船、真向いまたはほとんど真向いに行き合う場合

END ON または NEARLY END ON

No(2)互に進路を横切る場合

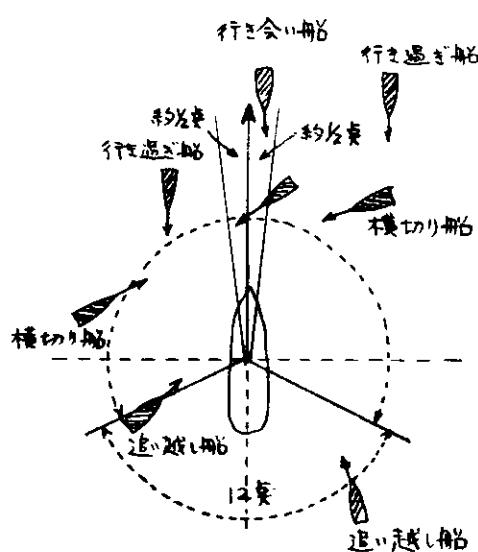
CROSSING

No(3)一船が他船を追越す場合

OVERTAKING

No(4)無難航行で衝突のおそれのない場合

PASSING



(b) 海上衝突予防法における衝突予防の規定

(i) END ON (NEARLY END ON) の場合

右転して左舷対左舷で航過する。

右転は双方にとつての航法義務

(ii) CROSSING の場合

他船を右舷側に見る船を避航義務船とし、他船を左舷側に見る船は針路速力の保持義務船とする。

(iii) OVERTAKING の場合

追越し船は追越され船の進路を避けねばならず、かつ確実に追越し、十分に遠ざかるまで追越され船の進路を避けねばならない。追越され船は針路速力の保持義務船となる（保持義務については多少の異論は存在する）。

(3) 衝突事故例の調査

海難審判裁決例集（第1巻～第8巻）と同例集以後の最近の海難審判裁決録（昭和40年1月～昭和41年3月）および海上保安庁、第7管区海上保安本部における調査により約100件の衝突事故例について衝突以前の状況、初認距離、衝突状況および海難発生場所等につき詳細な分類資料を作製した。

それら資料は大部にわたるので本報告書はその1部を実例として表示するにとどめ、統計数値を以下示す。

(a) 衝突のおそれのある状況にあつた見合関係

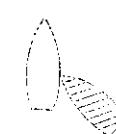
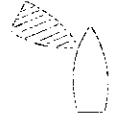
見合い関係	出合関係	横切関係	追越関係	計
件 数	26	64	10	100

このうち横切り関係においては、相手船を左3点に見た場合 15 %、右3点に見た場合 14 %、右2点にみた場合 16 %である。

(b) 初認距離

初認	300m以内	500m以内	800m以内	1,800m以内	3,500m以内	5,000m以内	6,000m以内	計
件 数	3	7	11	32	18	13	16	100

(c) 衝突状況

					
18 件	8 件	35 件	18 件	9 件	14 件
59 件			41 件		
100 件					

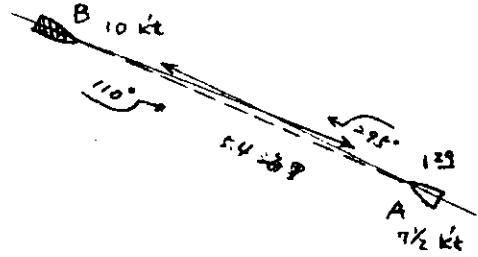
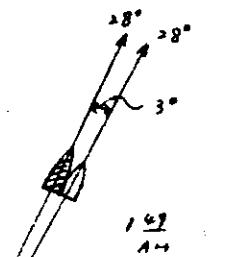
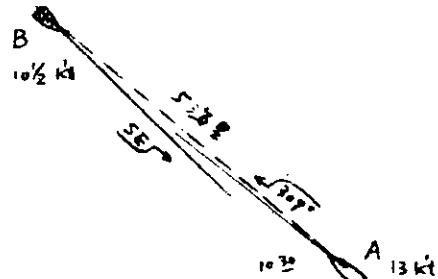
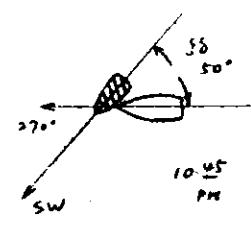
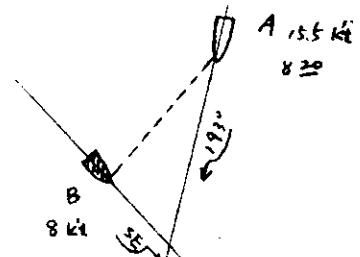
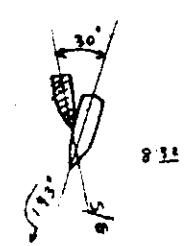
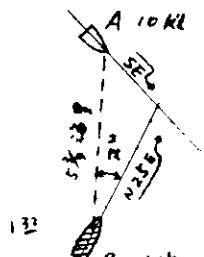
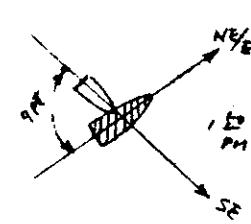
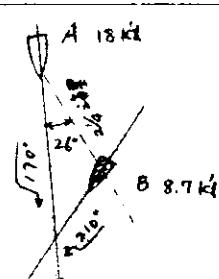
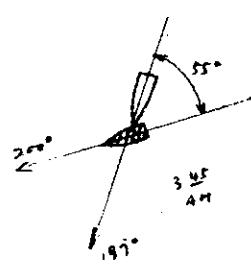
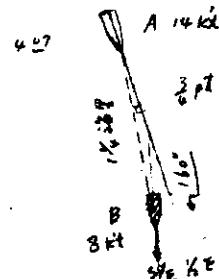
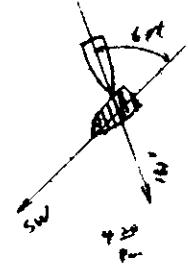
(d) 海難発生場所を海難審判裁決録(昭和 26 年～29 年と同 33 年～同 37 年、昭和 40 年 1 月～41 年 3 月)より END ON CROSSING OVERTAKING 違反の計を算出しその%をとつてみると次のとおりであつた。

発生場所	港	狭水道	内海・湾	外海	計
件数	116	90	109	54	369
%	31%	24%	30%	15%	100%

註 昭和 42 年度における海上保安庁の統計は遭難全船舶について次のとおりの数字をあげている。

港内	3 浬未満	50 浬未満	100 浬未満	500 浬未満	1,000 浬未満	1,000 浬以上	計
924 隻	1,029 隻	510 隻	53 隻	109 隻	32 隻	86 隻 不明 4 隻	2,747 隻

衝突事故例の二三（海難審判裁決録）

	発生時・場所	視認時	衝突状況
行き合い船関係 (18条)	昭和25年5月 市江崎南東方沖合 A 汽船 明島丸(1993 G/T) B 機船 Q 012 (2700 G/T)		
	昭和36年1月 大藻路岩北方沖合 A 汽船 ゴールデン・ステイト号(7598 G/T) B 機船 神光丸(1431 G/T)		
横切り船関係 (19条)	昭和31年1月 紀伊水道 A 義務船 汽船 ワイオミング号(7644 G/T) B 権利船 機船 喜代丸(874 G/T)		
	昭和38年11月 金帶山灯台南方沖合 A 義務船 機船 第一海幸丸(96 G/T) B 権利船 機船 第八東洋丸(3713 G/T)		
追越・被追越船関係 (24条)	昭和38年3月 東京湾第二海堡附近 A 義務船 機船 賀茂春丸(9282 G/T) B 権利船 てるづき (2350 G/T)		
	昭和39年9月 伊勢湾 A 義務船 機船 イースタン・タケ号(11,222 G/T) B 権利船 機船 日代丸 (339 G/T)		

(4) 主要航路における船舶の行き合い、見合い関係

(a) 一般論

大洋航行中ある船が他船と出会う状況は北大西洋航路とペルシヤ湾航路とでは大きな差が見られる。

すなわち北大西洋航路では出発地と目的地との距離が長いため途中の分散が大きく、また一般に東行と西行の航路に多少の差があるため他船と接近する機会は意外に少なく、他船と出会う間隔は通常日の単位となり時には一航海中他船に出会わぬことさえある。したがつて他船を避航せねばならないこともほとんど生じないし、複数隻の他船と接近することも操業中の漁船群以外にはまづないといつてよい。

一方ペルシヤ湾航路は沖縄附近を除いてほとんど同一航路上を多数の船が往復するためシンガポール水道、マラッカ海峡を除いてもなお他船に接近する機会は多く、南シナ海、インド洋においても平均出会い間隔は1時間前後である。また変針点間の距離もあまり大きくはないため、大洋中でも案外狭い範囲を航行しており、必然的に他船を避航せねばならない回数も多い。

ペルシヤ湾航路の大型タンカは大洋航行中ほぼ15時間に1回程度の避航をしているが、避航方向は左右いずれも大差はない。避航変針角は5°の倍数の場合が多くまたあまり大角度変針は行なつていない。しかし避航回数の1/4程度は変針後さらに変針角をかえているが約半数は一度の変針では不十分として変針角を増大させている。

大型タンカでは6~4マイル前方で変針を開始しており夜間は避航変針角が大きい。

なお瀬戸内海航路では大洋中に較べて行合回数は格段に多く、また近接して航過しており大洋中の避航とは全く様相を異にしており、自動的な避航が行なえるかどうか大いに疑問である。

(b) 調査方法

調査方法としては次頁に示す調査カードを作製し、船舶乗組員に依頼し、当面時行合い、見合い船について必要な事項を記入してもらう。

1つの航路につき10数隻のデータを集め、該調査カードによつて分類集計する方法である。

調査項目としては調査カードに示すとおりであるが概略を示すと次のとおりである。

- (I) 相手船の種類
- (II) 相手船の大きさ
- (III) 行合関係
- (IV) 避航関係
- (V) 通過距離、時刻等
- (VI) 避航関係

調査結果は以下のとおりである。

船の種類		避航		本船の運航状況		N.O.			
(GT)	<input checked="" type="radio"/> 貨物船 <input type="radio"/> クルーザー [*] <input type="radio"/> 専用船() <input type="radio"/> 渔船() <input type="radio"/> その他() <input type="radio"/> 機帆船 <input type="radio"/> 不明	行 合	<input checked="" type="radio"/> 反航 <input type="radio"/> 避越 <input type="radio"/> 他避越 <input type="radio"/> 横切り	本船 <input type="radio"/> 右舷側を <input type="radio"/> 左舷側を <input type="radio"/> 前方を <input type="radio"/> 後方を	前正横 後正横 前追跡 後追跡 横前 横後		約 , m		
						時刻	日	h m	
相手船の種類	GT 約 .. 万トン	航 合	本船が避航	時刻	A				
	GT 約 .. 千トン		● 石炭 ● した			● 石炭 ● した			
GT 約 .. 百トン	DW 約 t	相手船は避航			B				
				● 石炭 ● した					
本船の位置(1-1ル)		最初距離		正確距離(2ル)		正確距離(1-1ル)			
X1000m		X100m		<X23ル		<X1.000m			
<input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/>		<input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/>		<input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/>		<input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/>			
本船の避航状況 (本船が避航動作を行った時に記入)									
1. 避航した相手船と発見した時の距離				5. その時の本船の速力 約()ノット					
約()マイル				6. 本船はコースを()度 {右} {左}へ変えた					
2. 発見したのは <input type="checkbox"/> レーダー <input type="checkbox"/> 目視				7. 变に接近した時は					
3. 発見した時の相手船の南極位置				()分後 ()度 {左} {右}					
<input type="checkbox"/> 真正面 <input type="checkbox"/> 正面右寄り <input type="checkbox"/> 正面左寄り <input type="checkbox"/> {左方}より{前方}を攻める態勢				()分後 ()度 {左} {右}					
				8. 段階的に接近した理由					
4. 接近を決意した時の両船間の距離				9. 本船は()分後原針路に戻した					
<table border="1" style="width: 100%; height: 50px;"> <tr> <td style="width: 50%; vertical-align: top;">(m) 水深</td> <td style="width: 50%; vertical-align: top;">(m) 両岸</td> </tr> </table>								(m) 水深	(m) 両岸
(m) 水深	(m) 両岸								

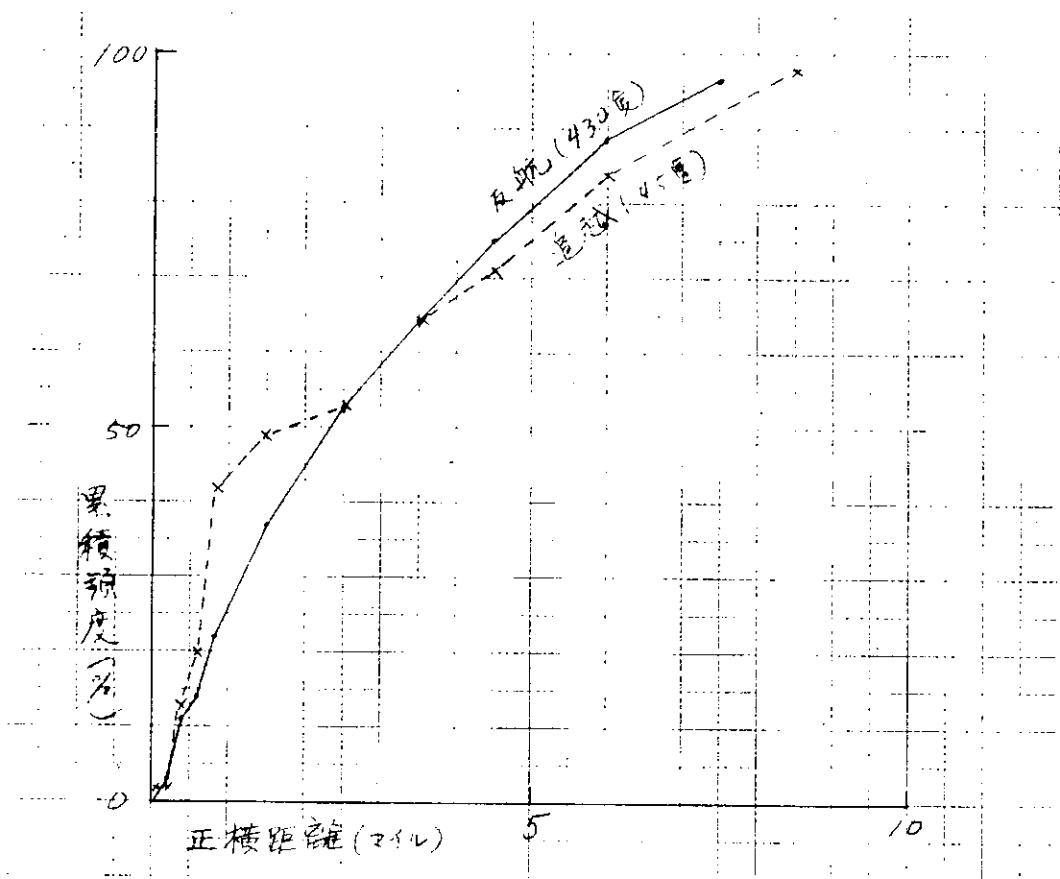
表3.3 ベルシャ湾航路行合船調査結果

自航より10マイル以内の他船を算入
日章丸第42次航で調査

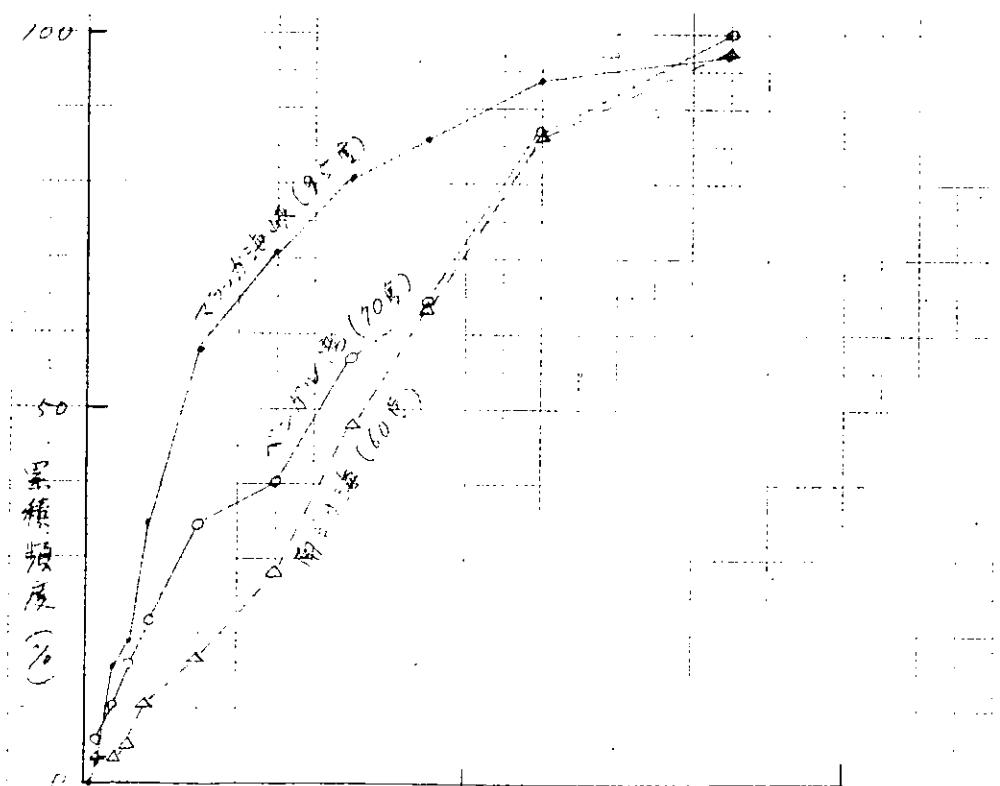
航 行 地 域	区 間	調 査 日 時	延 時 間	船 種					別 計	平 均 行 合 間 隔 (分)
				カ ー ゴ	カ ン カ ー	専 用 船	漁 船	船 舶		
1 アラビア海（往）	アラビア海北部ーリトルコイン	25日 9:00 - 26日 1:30	h 16 - m 30	17	3	-	-	-	20	50
2 ベルシャ湾（往）	リトルコイン-アマディ	26日 1:30 - 27日 6:00	h 28 - m 30	49	7	-	-	4	60	28
3 ベルシャ湾（復）	アマディ-リトルコイン	29日 4:00 - 30日 10:15	h 50 - m 15	33	4	-	-	1	38	48
4 アラビア海	リトルコイン-インド南端	30日 10:15 - 4月3日 18:00	h 103 - m 45	45	9	-	-	2	56	111
5 インドセイロ開港	インド南端-セイロン南端	3日 18:00 - 4日 9:45	h 15 - m 45	11	5	4	-	-	20	47
6 ベンガル湾	セイロン南端-スマトラ北端	4日 9:45 - 6日 19:50	h 58 - m 05	42	28	-	1	6	77	45
7 マラッカ海峡	スマトラ北端-シンガポール西口	6日 19:50 - 8日 11:00	h 39 - m 10	42	45	5	6	5	103	23
8 シンガポール東口	シンガポール港東口-マンカイ灯台	8日 12:15 - 21日 21:55	h 9 - m 40	10	3	2	2	1	18	32
9 南シナ海	マンカイ灯台-ヤミニ島	8日 21:55 - 12日 18:10	h 92 - m 15	37	29	-	4	1	71	78
10 東シナ海等	ヤミニ島-豊後水道	12日 18:10 - 14日 24:00	h 53 - m 50	6	17	-	1	4	28	115
復航計				402	45	226	140	11	14	411
総計				447	45	292	150	11	14	491
										55

		G T 別						時 刻 別												
		行 向 関 係 別	被追越	横 切	不 明	~ 千	~ 5千	~ 1万	~ 3万	~ 5万	5 万 以 上	0 ~ 4	4 ~ 8	8 ~ 12	12 ~ 16	16 ~ 20	20 ~ 0	0 ~ 4	4 ~ 8	8 ~ 0
1	18	2	-	-	-	-	-	5	7	5	5	-	-	-	-	-	-	-	-	
2	57	3	-	-	4	1	1	10	36	12	5	14	12	14	9	4	7	23	16	
3	32	6	-	-	-	1	-	4	26	7	2	6	6	8	6	5	7	12	11	
4	51	4	-	1	1	3	1	6	28	19	2	3	4	11	20	13	5	23	17	
5	15	1	-	4	-	1	1	5	12	3	1	-	-	-	-	-	-	-	-	
6	70	7	-	-	-	1	8	25	53	8	1	8	11	13	20	13	12	28	24	
7	97	6	-	-	2	8	13	29	48	13	2	31	22	18	8	9	15	39	31	
8	16	2	-	-	-	4	2	1	10	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
9	60	10	-	1	-	3	9	14	36	10	5	11	9	10	7	14	20	18	23	
10	24	4	-	-	3	2	6	4	11	2	1	2	3	-	1	4	18	3	7	
復計	365	40	6	411	6	23	40	88	224	64	14	64	63	62	69	70	83	133	133	145
総計	440	45	6	491	10	24	41	103	267	81	24	81	75	80	79	76	100	160	151	180

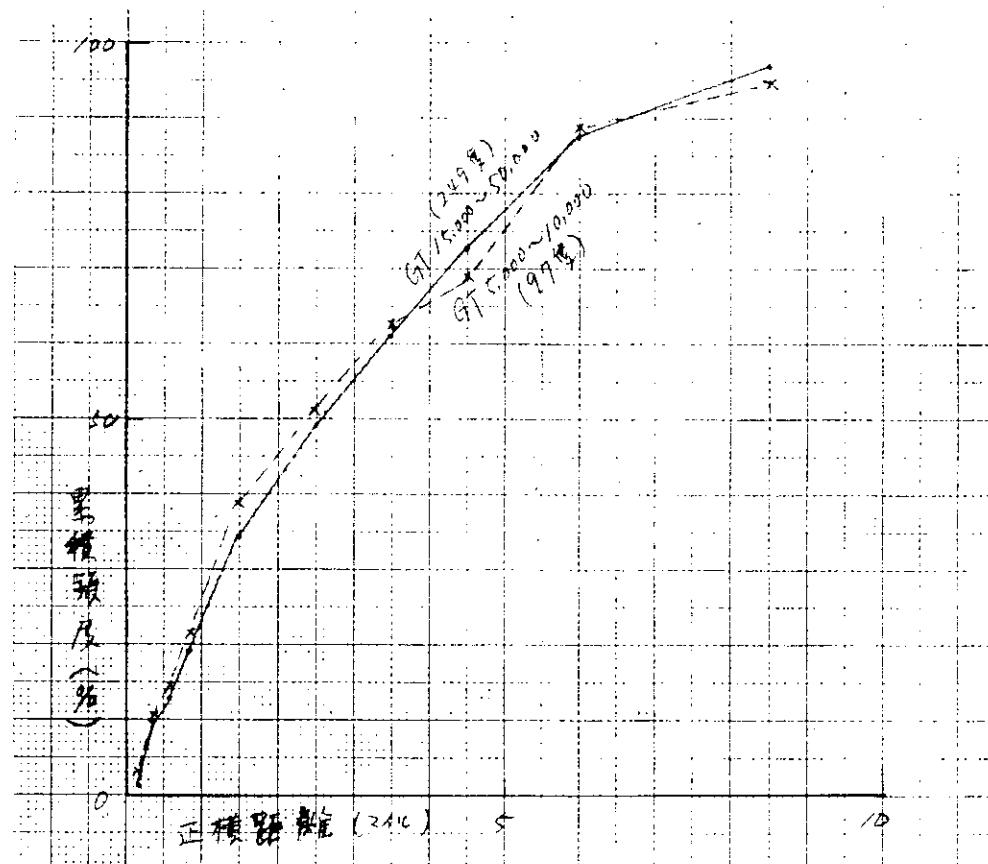
正横距離累積頻度



正横距離累積頻度(反航のみ)

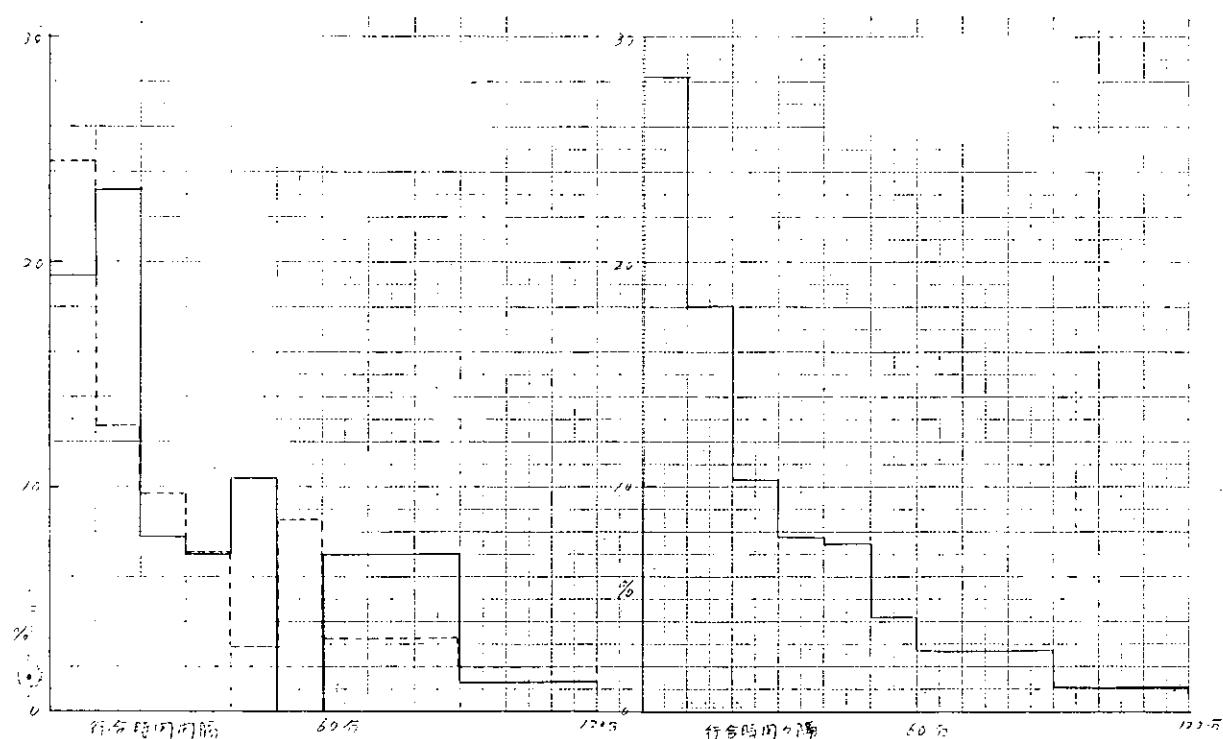


正 橫 距 離 累 積 頻 度



行合時間間隔

符合時間間隔分布
(全船舶 491隻)



行合時間間隔分布
(マラツカ海峡 103隻)

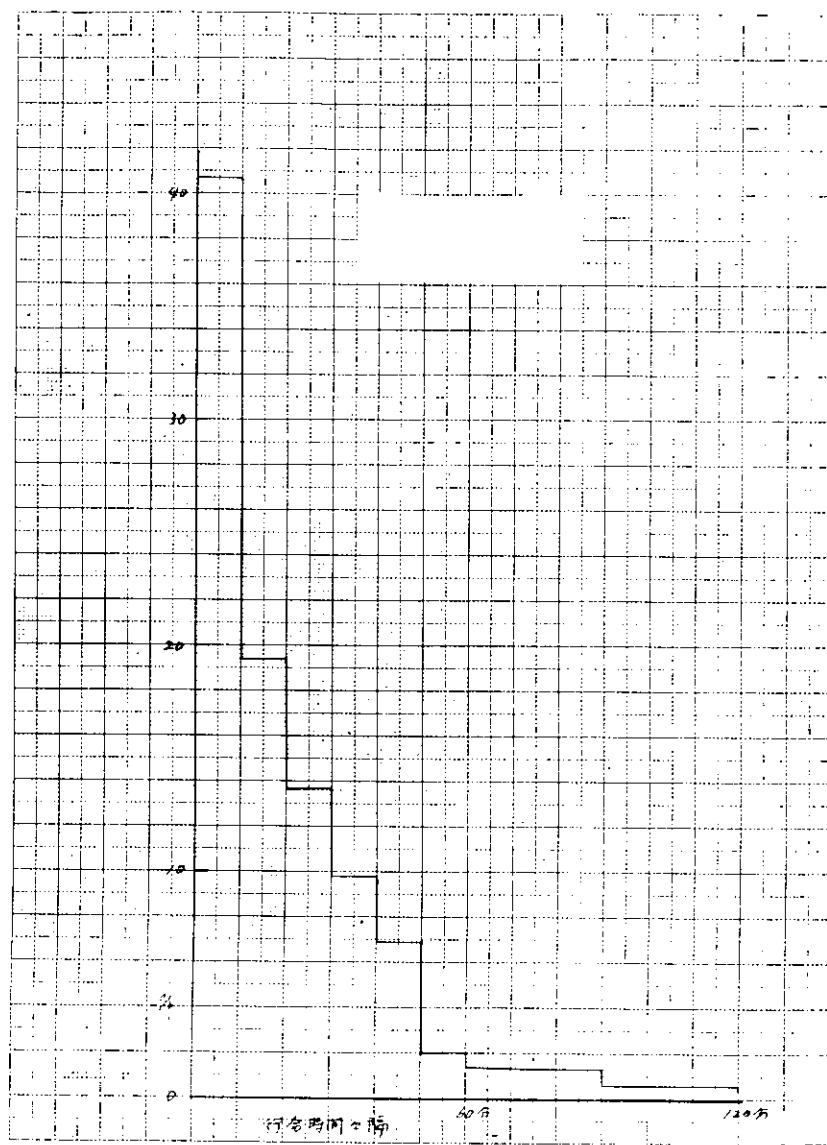


表3.4 濱戸内海での行合船調査

調査日時：昭和43年7月24日 10:25 ~ 17:20

調査水域：明石海峡西口より本船航路を備讃瀬戸西方六島まで

使用船：神戸商船大学深江丸 (GT: 360, L: 38 m, Vs: 11 kt)

調査方法：船の大きさ：推定

正横距離：目測、遠方のものはレーダー

種類

種類	隻数
貨物船	27
タンカー	10
専用船	8
漁船	19
機帆船	11
その他	15
計	90

大きさ

大きさ(トン)	隻数
0 ~ 50	23
~ 200	10
~ 500	37
~ 1,000	8
~ 5,000	7
~ 10,000	2
10,000以上	1
不明	2
計	90

行合関係、通過舷

	右舷	左舷	計
反航	14(1)	52(1)	66(2)
追越	4(2)	6	10(2)
被追越	1	1	2
横切り	7(1)	5(2)	12(3)
計	26(4)	64(3)	90(7)

() 内は本船が避航

避航関係

		隻数
本船がした	相手船がした	1
本船がした	相手船がしない	6
本船がしない	相手船がしない	78
本船がしない	相手船がした	5
計		90

近接航過船

正横距離(m)	船の種類別							行合関係別			
	貨物船	タンカー	専用船	漁船	機帆船	その他	反航	追越	被追越	横切り	
0 ~ 50	2(2)	1		7(3)			1(1)	5(2)		4(2)	
~ 100		1		6	2		5	1		3	
計	2(2)	2		13(3)	2		6(1)	6(2)		7(2)	

正 横 距 離

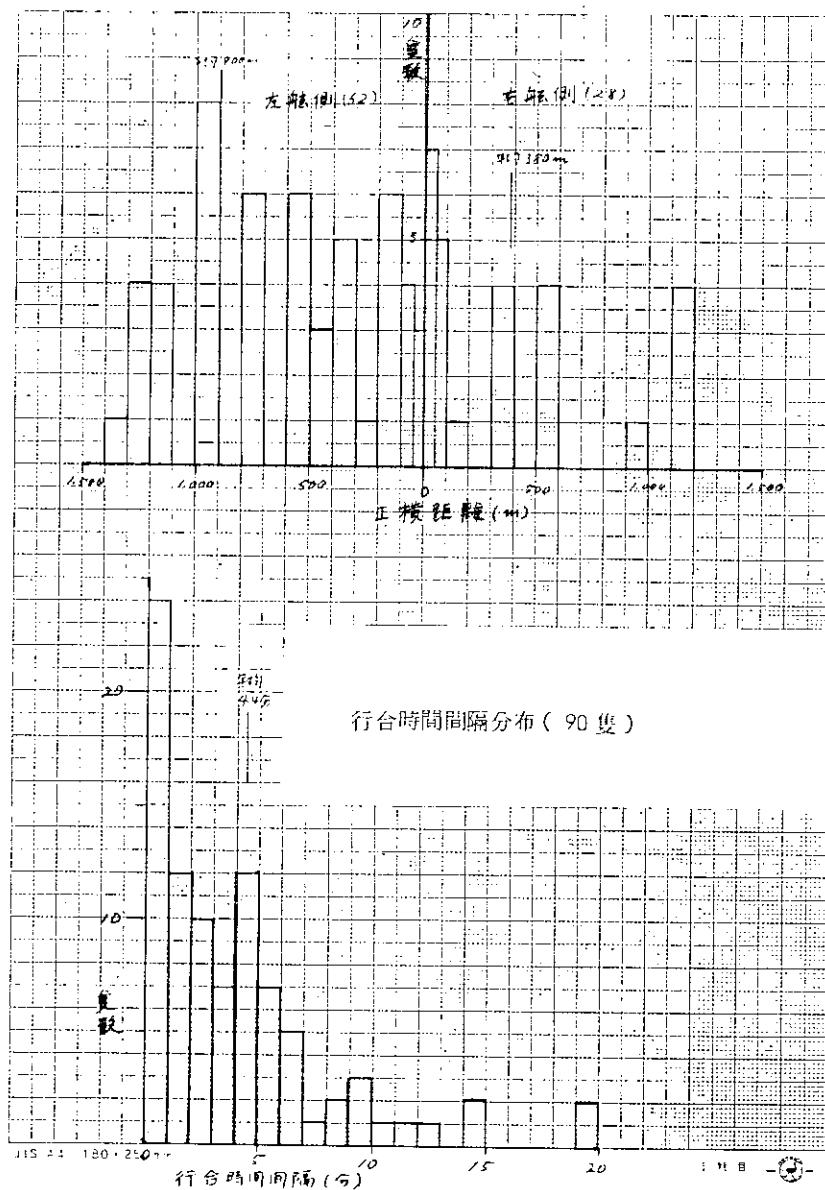
(m)	右舷	左舷	計
0~ 50	7	3	10
~ 100	5	4	9
~ 200	1	6	7
~ 300	1	1	2
~ 400	4	5	9
~ 500		3	3
~ 600	4	6	10
~ 700			
~ 800		6	6
~ 900			
~ 1,000	1	8	9
~ 1,100			
~ 1,200	2	4	6
~ 1,300		4	4
~ 1,400		1	1
~ 1,500			
~ 1,600			
~ 1,700			
~ 1,800			
~ 1,900	1	11	12
~ 2,000			
~ 2,800		2	2
計	26	64	90
平均距離(m)	379.8	898.2	748.5

時 間 間 隔

分	A	B(反航のみ)
0~ 1	24	15
~ 2	12	6
~ 3	10	6
~ 4	7	6
~ 5	12	7
~ 6	7	3
~ 7	5	4
~ 8	1	2
~ 9	2	2
~ 10	3	4
~ 11	1	2
~ 12	1	
~ 13	1	2
~ 14		
~ 15	2	3
~ 16		
~ 17		
~ 18		2
~ 19		
~ 20	2	2
計	90	66
平均間隔(分)	4.4	5.8

No.	相手船発見時 距離(マイル)	相手船の 関係位置	変針決心時 両船間距離 (マイル)	変針角	方 向	巾よせ量 (m)	正横通過時の 両船間隔(m)	行合 関係	通 過 舷	相 手 船
1	1	真 正 面	0.1	5°+5°	左	103	10	追越	右	20トン漁船
5	2	"	0.7	5°	左	90	30	反航	右	10トン漁船
8	2	正面左寄り	0.2	8°	右	24	30	横切	左	10トン漁船 (相手船も変針)
33	3	正面右寄り	1	?°	右	?	560	反航	左	50トン機帆船
45	3	正面左寄り	0.3	10°	左	?	185	横切	右	50トン機帆船
49	3	真 正 面	0.7	7°	右	125	50	横切	左	300トン貨物船
69	7	"	0.1	3°	左	?	30	追越	右	500トン貨物船

深江丸行合船調査(昭和43~7、明石~六島)
行合船の正横距離分布



(5) 乗船調査

(a) 乗船期間

S 43年7月5日(金)~7月8日(月)

(b) 船舶

神戸商船大学練習船「深江丸」

主要寸 L pp × B × D × d = 37 m × 7.8 m × 4.1 m × 2.7 m

G . T = 361.71 G/T

N . T = 115.01 N/T

V s = 11.5 kts

Main Engine = DAIHATSU Diesel (6気筒)

MCR = 750 Ps × 720 rpm

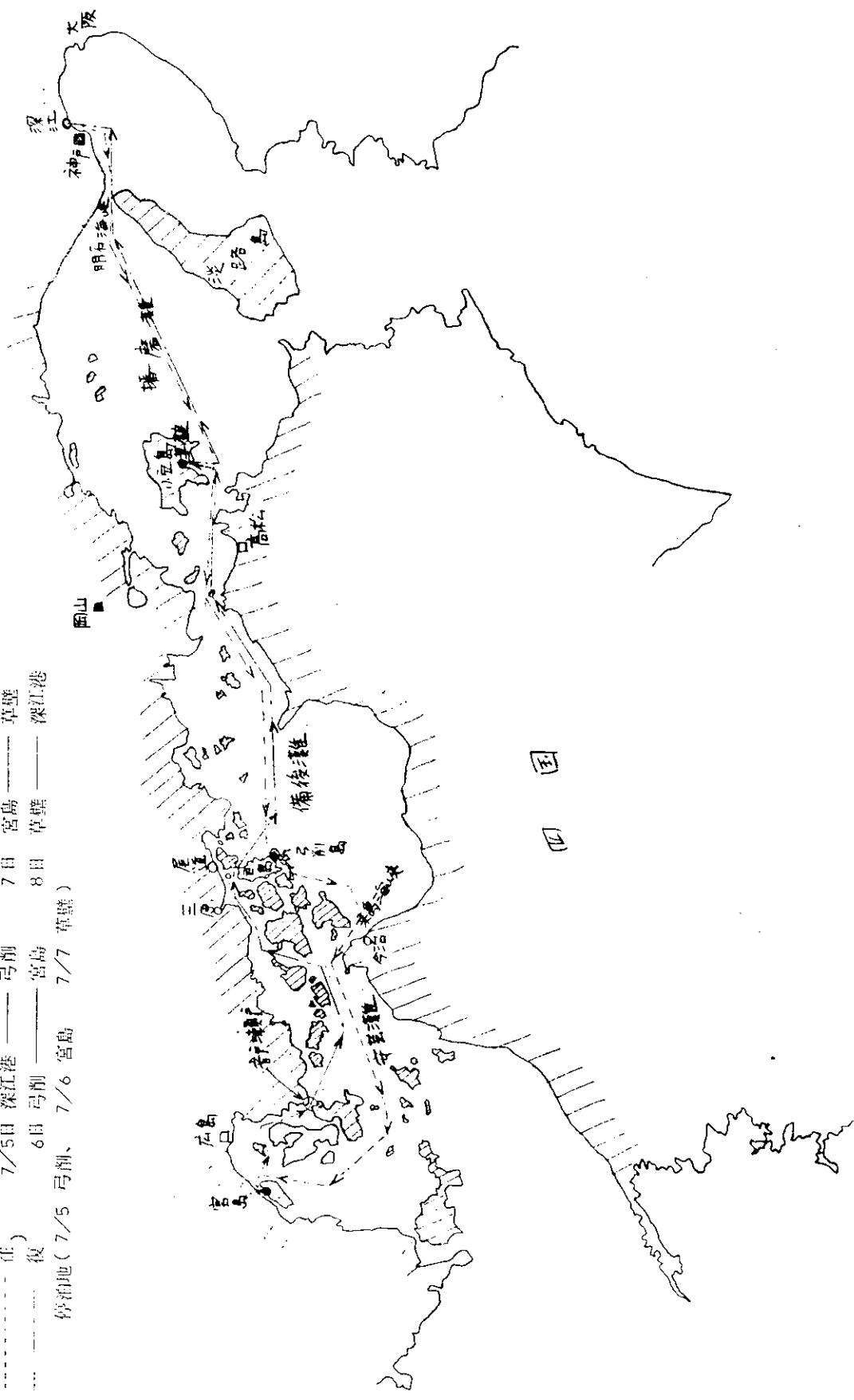
NOR = 660ps × 690 rpm (88% MCR)

乗組員 66名 内訳 士官 4
教官 4 属員 10
学生 48

今回の乗船時 教官その他 21
学生(航海科) 35 計 56 名

(c) 航路および日程

(----) 往
(—) 復
停泊地 (7/5 弓削、7/6 宮島 7/7 草壁)



四国

(d) 避航操船の実際

今回の航海はすべて昼間の航海であつたので夜間航海における操船の実際は体験できなかつた。

- (i) 相手船が複数の時、自船の避航がどの相手船に対して行なわれたものか判別することはむずかしい。むしろ単に一隻の相手船に対してというよりも、全体の状況で種々の避航操船をしているという方がいい。

自船を含む船の全体の配置のパターンおよび特に瀬戸内海のような内海ではその地形が操船に対して大きく影響する。

(ii) 漁船群に対して

瀬戸内海では非常に多くの小型の漁船がいる。この漁船の仕事の内容の判別、特に網張の有無の判別によつて自船の航行可能範囲を決定し、網張がなければ漁船群の中央をつつきるような操船も行なわれる。

この時の相手船との距離は 50 m 以下ということもあつた。

こうした小型の漁船に対してわりあい注意は払っていないように見うけられた。相手船の種類、およびその船の仕事の内容が自船の操船に影響を与える。

(iii) 相手船の大きさ

目で見てだいたい同距離に相手船がある時はやはり大型船を先に注意している模様。つまり相手船の大きさによつて避航操船法を区別しているといえる。一般的にいつて、大型船になればなるほど CPA (Closest point of approach) T c p A を大きくとる必要があるようと思われた。

(iv) 相手船の speed

相手船の speed の違いによる操船の区別はわりあい少ない。もつとも今回の航海における相手船の speed はいずれも同じような speed であつたせいもある。

しかし、この相手船の speed の違いもある程度は考慮する必要はある。

(6) 結 言

以上の乗船経験から次項の判定ができることが今まで考えられていたものに追加されることが望まれる。

相手船の種類およびその船の作業内容

" 大きさ

" speed

航海航路(地形的なもの)

行き関係の注意度の区別(実際では横切船に対して非常な注意を払っていた。)

1.3.3 舵法システムに適応した船体運動の解析的表現の検討

(1) 緒論

本研究は 1.3.4 衝突回避航法の研究と関連して船体運動をいかなる解析的表現でソフトウェア化すべきを研究するものである。

本研究の企画立案段階においては衝突回避航法の全容が不明確であったので、研究計画は広い意味の主要な船体運動をすべて包含するよう計画したが、衝突回避航法研究の進展に伴い、該研究に関連する船体運動表現の対象が明確になつた。衝突回避航法で必要とする船体運動は最終的にオートパイロットの針路設定入力を変化させた場合、船はいかなる運動を行ない最終的に設定針路に鎮定するかである。

本論は以上の要求にしたがい、次のような方針でこの問題を取り扱つた。舵～船体運動系は角速度の 3 次に比例する旋回抵抗を考慮した 1 次系近似で表現し、オートパイロット（針路設定～操舵）系は市販のものの性能を良く表現し得るものとして、比例制御、角速度制御、非線型制御として針路設定器の非直線性、Weather adjust (Threshold 又は Hysteresis) および舵角制限を含むものとした。

舵～船体運動系の運動指数は操縦性理論の現状から見て、正確を期するなら問題とするすべての載貨状態について実船実験で求めるべきであるが、しかし 1 隻ごとにそのような大規模な計測を行なうことは商船としては不可能に近いことである。したがつて最小 2 case の載貨状態での実船計測をもとにし、現状の理論により他の載貨状態の性能指数を確定する方法を採用した。

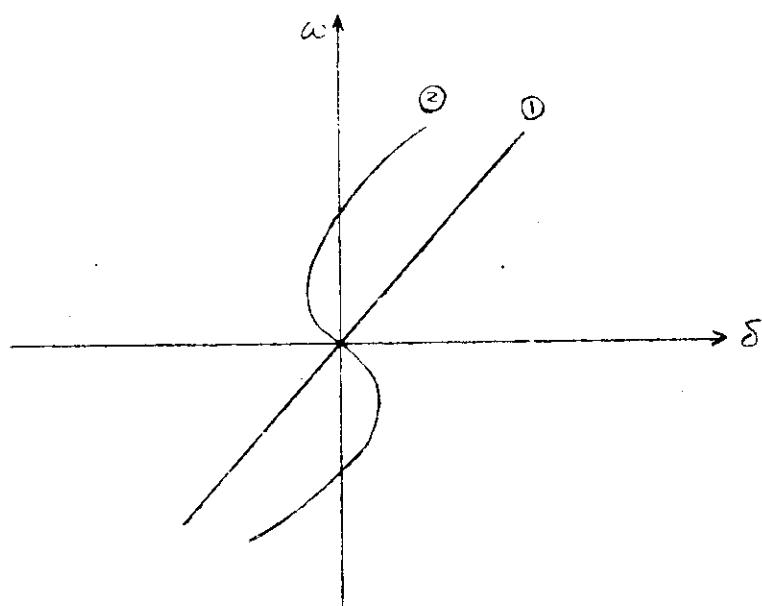
以上のような方針で以下論を進め、具体的な計算例を 1 例示す。

(2) 舵～船体運動系

操舵に対する船体運動系は実用上 1 次系近似で取扱いうることは今や衆知のことである。

しかし最近大型船において非常に C/D の大きい、また L/B の小さい船型が多用され、これらの船型は 1 次系近似では不十分であり、非線型項の導入が考えられてきた。

1 次系近似が好精度で成立するには 1 つの条件として旋回角速度 ω と舵角の関係が図の①のように直線性があることである。



一方、最近の大型タンカではこの関係が非直線性であり、上図の②のようになつております、3次の非線型系を示しています。

そこで、 $\dot{\theta} \sim \omega$ の関係を

$$\dot{\theta} + \nu \dot{\theta}^3 = K \dot{\theta} \quad \text{ただし } \dot{\theta} = \omega \quad \dots \dots \dots \quad (3.2)$$

で近似し、これに 1 次系の概念である Inertia 項を導入して

$$T \ddot{\theta} + \dot{\theta} + \nu \dot{\theta}^3 = K \dot{\theta} \quad \dots \dots \dots \quad (3.3)$$

なる運動方程式で近似するわけである。

この式の各係数を実船実験より推定する方式は種々考えられる。以下それを論ずる。

(a) K , ν の求め方

原理的には $\omega \sim \dot{\theta}$ 曲線を $\dot{\theta} + \nu \dot{\theta}^3 = K \dot{\theta}$ で curve fitting し、 K , ν を決定することである。

(i) 最小 2 乗法を適用する場合

最小 2 乗法を適用する場合、次の点の注意が必要である。

(1) 一般には $\omega \sim \dot{\theta}$ 曲線の 3 次式としての中心は原点にない。

したがつて、fitting curve の近似式は

$$(\dot{\theta} + \Delta \dot{\theta}) + \nu (\dot{\theta} + \Delta \dot{\theta})^3 = K (\dot{\theta} + \Delta \dot{\theta}) \quad \dots \dots \dots \quad (3.4)$$

とすべきである。

(2) 計測点 base で curve fitting すべきであるが、計測点があまりにもばらついている場合はむしろ入手による Faving curve base で最小 2 乗法 curve fitting とすべきであろう。

(ii) 特異点を fix する場合

この場合も 3 次式としての中心は原点にない点に注目し、左右の点対象中心を作図で求め、整型した $\omega \sim \dot{\theta}$ 曲線を対象とすべきである。特異点としては次の観点から選定する。

$$\begin{aligned} \dot{\theta} + \nu \dot{\theta}^3 &= K \dot{\theta} \\ \omega \text{ 3 value at } \dot{\theta} &= 0 \\ \frac{d \dot{\theta}}{d \dot{\theta}} + 3 \nu \dot{\theta}^2 \cdot \frac{d \dot{\theta}}{d \dot{\theta}} &= K \\ \frac{d \dot{\theta}}{d \dot{\theta}} &= \frac{K}{1 + 3 \nu \dot{\theta}^2} \\ \frac{d \dot{\theta}}{d \dot{\theta}} &= \infty \rightarrow 1 + 3 \nu \dot{\theta}^2 = 0 \\ \therefore \nu &= -\frac{1}{3 \dot{\theta}^2} \text{ at } \frac{d \dot{\theta}}{d \dot{\theta}} = \infty \\ \frac{d \dot{\theta}}{d \dot{\theta}} (\text{at } \dot{\theta} = 0) &= K \end{aligned}$$

および

$$\dot{\theta} = 10^\circ \text{ における } \dot{\theta}$$

以上の特異点によれば、 ν 2 種、 K 2 種が得られるので、これらの平均値等で妥当な curve fitting かどうか目で判断しなければならない。

(b) T の求め方

式 (3.3)において導入した T は本質的には運動の大きさによって変り得るものである。 T なる概念は、

$$T = \frac{\text{Inertia 比例項}}{\text{旋回抵抗比例項}}$$

なる性格を持ち、分母の旋回抵抗比例項は、 $\omega \sim \dot{\theta}$ 曲線からもわかるとおり、運動の大きさにより、 $\infty \sim$ 負または正の定値の間で大きく変化し得るものである。

したがつて式 (3.3) に用うる T はその性格から運動に附隨させて求めるべきであろう。

考えられる方法としては、Analogue computer または digital computer を用いて式(3.3)で ζ 試験の実績を simulate し、 T を求める方法である。

以上(a)、(b)の各手法はある物理的現象を1つの相似性のある数学表現で近似しようという思想であり、その近似度についての厳密な定義がないかぎり、その手法で個人差が出るのは当然である。

(3) 操縦運動方程式と載貨状態の関係

前章で見たごとく、舵～船体運動系の運動を示す指数はわずか3ヶ、 K 、 T 、 ν にすぎない。これらと載貨状態（吃水、トリム）との関係が必要である。

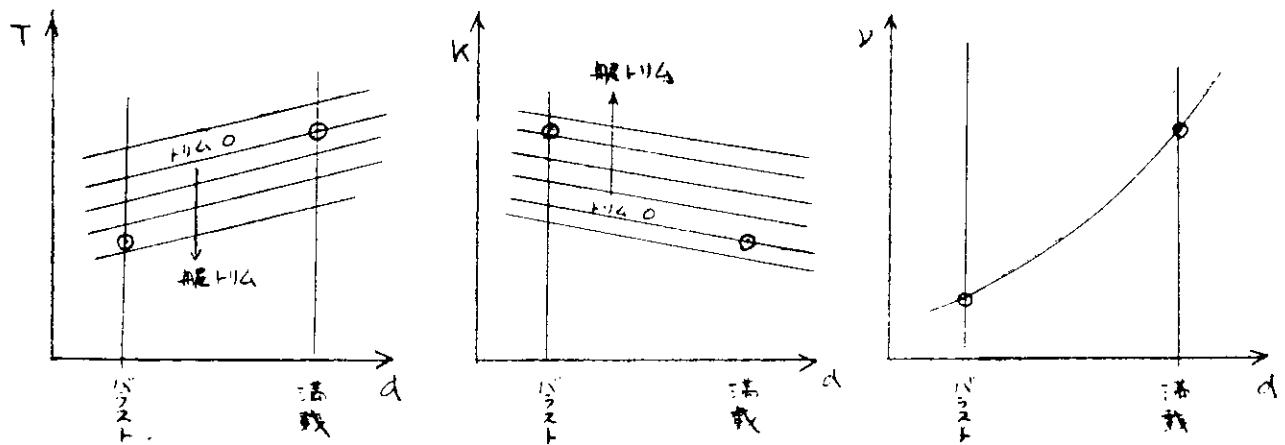
ここでは基本方針にそつて、2つの載貨状態の実船計測データすなわち、 ζ 試験と逆スパイラル試験があり、それ以外の状態に対しては理論計算を物指とし、実船計測結果を修正していく方式を用いる。

ただし、このような実用的方式には本質的無理があることは当然であつて、たとえばタンカのバラスト状態の K ・ T ・ ν を理論計算による比較法で満載状態のものに修正交換しても必ずしも実船計測のものに合致するとは期待できない。

それは現状の理論が必ずしも正確とはいえないためである。したがつてここで述べる方法はあくまでも便宜的なものであり、2点の実績とその中間をうめるものは理論計算を援用しつつ適宜推測していく以外にない。

操縦運動方程式の係数の理論計算法としては次章で紹介する九大井上教授他の作製したものがあり、これを利用するが、この方程式は前述の1次系近似とは異なり、運動論的に厳密な取扱いをしているため、1次系近似との関係をもたせるため若干の工夫を要するものである。

筆者が意図することは以上の方針で下図のようなものを得るにある。



(4) 船の操縦運動の数学的表現

直進中の船の操縦運動の運動方程式は微小運動との仮定と速力の変動が微小であるとの仮定のものと次のように表現される。ただし以下すべての無次元表示とする。

$$\mu_y \frac{d\beta}{dt} + C_y \beta \cdot \dot{\beta} - (\mu_x - C_y \omega) \omega + C_{y\beta} \omega \cdot \beta \cdot \omega = C_y \delta \cdot \dot{\delta} \quad \dots \dots \dots \dots \dots \dots \quad (3.5)$$

$$+ \frac{d\omega}{dt} + C_m \omega \cdot \omega - C_{M\beta} \beta + C_{M\omega} \omega \cdot \beta \cdot \omega = C_{M\delta} \cdot \dot{\delta} \quad \dots \dots \dots \dots \dots \dots \quad (3.6)$$

式(3.5)は横流れの平衡式であり、式(3.6)は重心まわりの回転運動の平衡式である。

この運動方程式の各係数については種々与えられているが、ここでは九大の井上教授の基礎研究とそれに改良を加えた渡辺教授の表現にもとづき、さらに舵まわりの表現に三菱の藤井氏の研究結果を加味したものを用いる。それは以下のとおりである。

$$C_y \beta = K \pi + 0.45 [4.1 \frac{B}{L} - 0.045] - 0.785 (\frac{\tau}{L}) + r C_N \quad \dots \dots \dots \quad (3.7)$$

$$C_y \omega = K \pi + (-0.367 + 0.21 K) - 0.196 (\frac{\tau}{L}) + j r \ell_r C_N \quad \dots \dots \dots \quad (3.8)$$

$$C_N \beta = 1.2 K (0.62 + K) (1.224 + 0.932 C_{\omega} - (0.156 + \frac{C_{\omega}}{5}) \frac{d_m}{B} \quad \dots \dots \dots \quad (3.9)$$

$$= (-\frac{\tau}{d_m}) (0.393 K + 1.154 \frac{B}{L} - 0.0233 - 0.145 (C_{\omega} - 0.8)) \\ = r C_N \ell_r + \frac{\kappa G}{L} C_y \beta \quad \dots \dots \dots \quad (3.10)$$

$$C_M \omega = 0.54 K + 0.5 (\frac{\tau}{d_m}) (0.1964 K + 0.610 C_{\omega}^2 - 1.037 C_{\omega} + 0.3897) \\ + r \ell_r^2 C_N - \frac{\kappa G}{L} C_y \omega \quad \dots \dots \dots \quad (3.11)$$

$$C_y \beta r = 8 C_{\omega} (1 - C_{\omega}) \ell_r^2 \quad \dots \dots \dots \quad (3.12)$$

$$C_M \beta r = 8 C_{\omega}^2 (1 - C_{\omega}) \ell_r^3 - \frac{\kappa G}{L} C_y \beta \omega \quad \dots \dots \dots \quad (3.13)$$

$$\mu_x = 2 C_b \frac{B}{L} (1 + e_x) \quad \dots \dots \dots \quad (3.14)$$

$$\mu_y = 2 C_b \frac{B}{L} (1 + e_y) \quad \dots \dots \dots \quad (3.15)$$

$$i = 2 C_b \frac{B}{L} \left(\left(\frac{K_0}{L} \right)^2 + \left(\frac{K_1}{L} \right)^2 \right) \quad \dots \dots \dots \quad (3.16)$$

$$C_y \delta = C_N \quad \dots \dots \dots \quad (3.17)$$

$$C_M \delta = C_N \cdot \ell_r \quad \dots \dots \dots \quad (3.18)$$

$$C_N = (1.146 + 0.8406 \lambda) (1 + 3.605^{1.5}) (1 - \omega)^2 \frac{A_r}{L \cdot d_m} \quad \dots \dots \dots \quad (3.19)$$

$$\tau = -0.155 + 0.45 C_b + (-105 C_b^2 + 216.5 C_b - 84.6) \left(\frac{A_r}{L \cdot d_m} - 0.01 \right) \quad \dots \dots \dots \quad (3.20)$$

$$K = \epsilon \frac{d}{L} \quad \dots \dots \dots \quad (3.21)$$

ここで L : 船長 (L_{pp})、B : 船幅、C_ω : 水線面積係数

d_m : 平均吃水、τ : リム量 (negative)

ℓ_r : 重心から舵中心までの距離、C_b : Block coeff

κG : 船体から重心までの距離 (negative)

e_x : 前進方向の Virtual mass coeff ≈ 1

e_y : 横流れ方向の Virtual mass coeff ≈ 2

K₀/L : 船体の慣動半径

K₁/L : Virtual mass の慣動半径

λ : 舶のアスペクト比 S : スリップ比

ω : Wake fraction Ar : Rudder area

(a) 整定時の旋回角速度と舵角の関係

式 (3.5)、(3.6)において整定時は慣性項が消える。したがつて、

$$C_y \beta - (\mu_x - C_y \omega) \cdot \omega + C_y \beta \omega \cdot \beta \cdot \omega = C_y \delta \cdot \delta \quad \dots \dots \dots \quad (3.5')$$

$$- C_M \beta \cdot \beta + C_M \omega \cdot \omega + C_M \beta \omega \cdot \beta \cdot \omega = C_M \delta \cdot \delta \quad \dots \dots \dots \quad (3.6')$$

両式から横流れを示す変数 β を消去すると求める舵角 δ と旋回角速度 ω の関係を得る。それは

$$d_2 \omega^2 + (C_2 \delta + d_1) \omega - C_1 \delta = 0 \quad \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \quad (3.21)$$

$$d_2 = (\mu_x - C_y \omega) CM_\beta \omega + CM_\omega C_{y\beta} \omega \quad \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \quad (3.22)$$

$$d_1 = C_{y\beta} CM_\omega - CM_\beta (\mu_x - C_y \omega) \quad \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \quad (3.23)$$

$$C_2 = CM_\beta \omega C_{y\beta} - C_{y\beta} \omega CM_\beta \quad \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \quad (3.24)$$

$$C_1 = CM_\beta C_y \delta + C_{y\beta} CM_\delta \quad \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \quad (3.25)$$

となる。式(3.25)は安定不安定の判別式であつて正是安定を示す。

式(3.21)はスパイラルテストで得られる $\delta \sim \omega$ 曲線を示すものである。

この式を用いて $\delta \sim \omega$ 曲線を描く場合、次の点に注意せねばならない。

$\omega > 0$ の Range については、

$$\omega = \frac{-(C_2 \delta + d_1) \pm \sqrt{(C_2 \delta + d_1)^2 + 4 d_2 C_1 \delta}}{2 d_2}$$

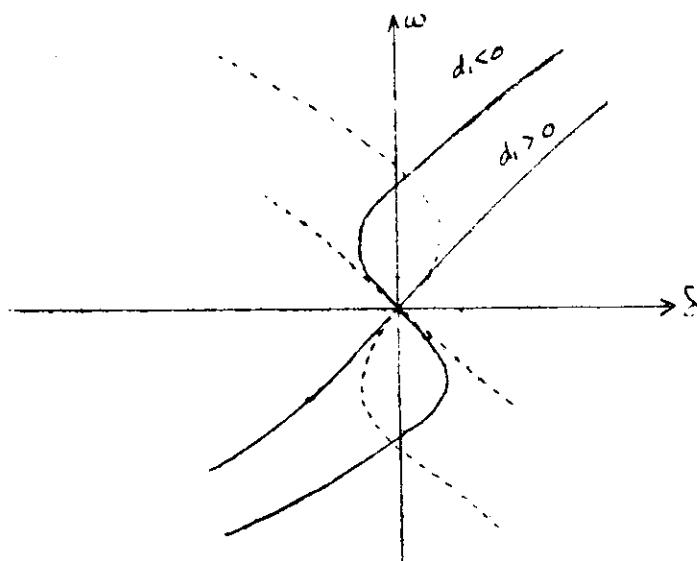
について解く。ただし土符号は、 $d_1 > 0$ (安定な船) では $\delta > 0$ の範囲のみで \oplus 、 $d_1 < 0$ (不安定な船) では $\delta > 0$ の範囲で \ominus 、 $\delta < 0$ の範囲で \pm とし、1つの δ (< 0) に対して2つの ω が存在する。

$\omega < 0$ の Range については

$$\omega = \frac{(C_2 \delta + d_1) \pm \sqrt{(-C_2 \delta + d_1)^2 - 4 d_2 C_1 \delta}}{2 d_2}$$

ただし、土符号は、 $d_1 > 0$ (安定な船) では $\delta < 0$ の範囲のみで \ominus 、 $d_1 < 0$ (不安定な船) では $\delta < 0$ の範囲で \ominus 、 $\delta > 0$ の範囲で \pm とし、1つの δ (> 0) に対して2つの ω が存在する。

以上の関係を図示すると左図のとおり。



以上の取扱いの変則性は式(3.5)、(3.6)の非線型項の符号が不適当なことに原因があるものと考えられる。
正しくは $C_{y\beta} \omega_1 \beta_1 \beta$ および $CM_\beta \omega_1 \beta_1 \omega$ とすべきである。

(解説)

式(3.5)、(3.6)において

$$(C_{y\beta} + C_{y\beta} \omega_1 \beta_1 \beta) \beta - (\mu_x - C_y \omega_1) \omega = C_y \delta \cdot \dot{\delta} \quad \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \quad (3.5'')$$

$$-CM_\beta \cdot \beta + (CM_\omega + CM_\beta \omega_1 \beta_1) \omega = CM \delta \cdot \dot{\delta} \quad \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \quad (3.6'')$$

と書き換える。

この場合

番号	①	②	③	④
β	+	-	+	-
ω	+	-	-	+

の4つの組合が考えられる。

①の場合

$$\begin{aligned} & (C_y\beta + C_y\beta\omega \cdot \omega) \beta - (\mu_x - C_y\omega) \omega = C_y\delta \cdot \delta \\ & (-C_M\beta + C_M\beta\omega \cdot \omega) \beta + C_M\omega \cdot \omega = C_M\delta \cdot \delta \\ d_2 &= (\mu_x - C_y\omega) C_M\beta\omega + C_M\omega C_y\beta\omega \\ d_1 &= C_y\beta C_M\omega - C_M\beta(\mu_x - C_y\omega) \\ C_2 &= C_M\beta\omega C_T\delta - C_T\beta\omega C_M\delta \\ C_1 &= C_M\beta C_y\delta + C_y\beta C_M\delta \quad \omega = \frac{-(C_2\delta + d_1) \pm \sqrt{(C_2\delta + d_1)^2 + 4d_2C_1\delta}}{2d_2} > 0 \\ d_2\omega^2 + (C_2\delta + d_1)\omega - C_1\delta &= 0 \end{aligned}$$

これは前述のものに相当し、 $\omega > 0$ の条件で、 $d_1 > 0$ なら $\delta > 0$ の範囲で \oplus 符号、 $d_1 < 0$ なら $\delta > 0$ の範囲で \ominus 符号、 $\delta < 0$ の範囲で \ominus 符号で、 $\delta (< 0)$ に対して2つの ω が存在する。

②の場合

$$\begin{aligned} & (C_y\beta - C_y\beta\omega \cdot \omega) \beta - (\mu_x - C_y\omega) \omega = C_y\delta \cdot \delta \\ & -C_M\beta \cdot \beta + (C_M\omega - C_M\beta\omega \cdot \beta) \omega = C_M\delta \cdot \delta \\ d_2 &= -\textcircled{1} d_2 \\ d_1 &= \text{不変} \\ C_2 &= -\textcircled{1} C_2 \\ C_1 &= \text{不變} \quad \omega = \frac{(-C_2\delta + d_1) \pm \sqrt{(-C_2\delta + d_1)^2 - 4d_2C_1\delta}}{2d_2} < 0 \\ -d_2\omega^2 + (-C_2\delta + d_1)\omega - C_1\delta &= 0 \\ d_2\omega^2 - (-C_2\delta + d_1)\omega + C_1\delta &= 0 \end{aligned}$$

これは①の場合の原点対象の ω の2次式であり、前述の $\omega < 0$ のものに相当する。

③の場合

$$\begin{aligned} & (C_y\beta - C_y\beta\omega \cdot \omega) \beta - (\mu_x - C_y\omega) \cdot \omega = C_y\delta \cdot \delta \\ & (-C_M\beta + C_M\beta\omega \cdot \omega) \beta + C_M\omega \cdot \omega = C_M\delta \cdot \delta \\ d_2 &= (\mu_x - C_y\omega) C_M\beta\omega - C_M\omega C_y\beta\omega \quad (\text{値が變る}) \\ d_1 &= \text{不變} \\ C_2 &= C_M\beta\omega C_y\delta + C_T\beta\omega C_M\delta \quad (\text{値が變る}) \\ C_1 &= \text{不變} \\ d_2\omega^2 + (C_2\delta + d_1)\omega - C_1\delta &= 0 \\ \omega = \frac{-(C_2\delta + d_1) \pm \sqrt{(C_2\delta + d_1)^2 + 4d_2C_1\delta}}{2d_2} &< 0 \end{aligned}$$

これは①②の場合と d_2 、 C_2 の絶体値が異なり、式の形は①と等しいので $d_1 > 0$ に対しては $\delta > 0$ で \oplus 符号、 $d_1 < 0$ に対しては $\delta > 0$ で \ominus 符号、 $\delta < 0$ で \pm 符号である。

絶体値表現を用いた根処理流れの平衡において、共存する ω の正負によって $C_{y\beta}$ の値が異なるのは微小近似の原理から見て不適当との判断による。

④の場合

$$(C_{Y\beta} + C_{Y\delta}\omega \cdot \omega) \beta - (\mu_K - C_{Y\omega}) \omega = C_{Y\delta} \cdot \delta$$

$$(-C_M\beta - C_M\delta\omega \cdot \omega) \beta + C_M\omega \cdot \omega = C_M\delta \cdot \delta$$

$$d_2 = -\textcircled{3} c_2$$

$$d_1 = \text{不変}$$

$$c_2 = -\textcircled{3} c_2$$

$$c_1 = \text{不変}$$

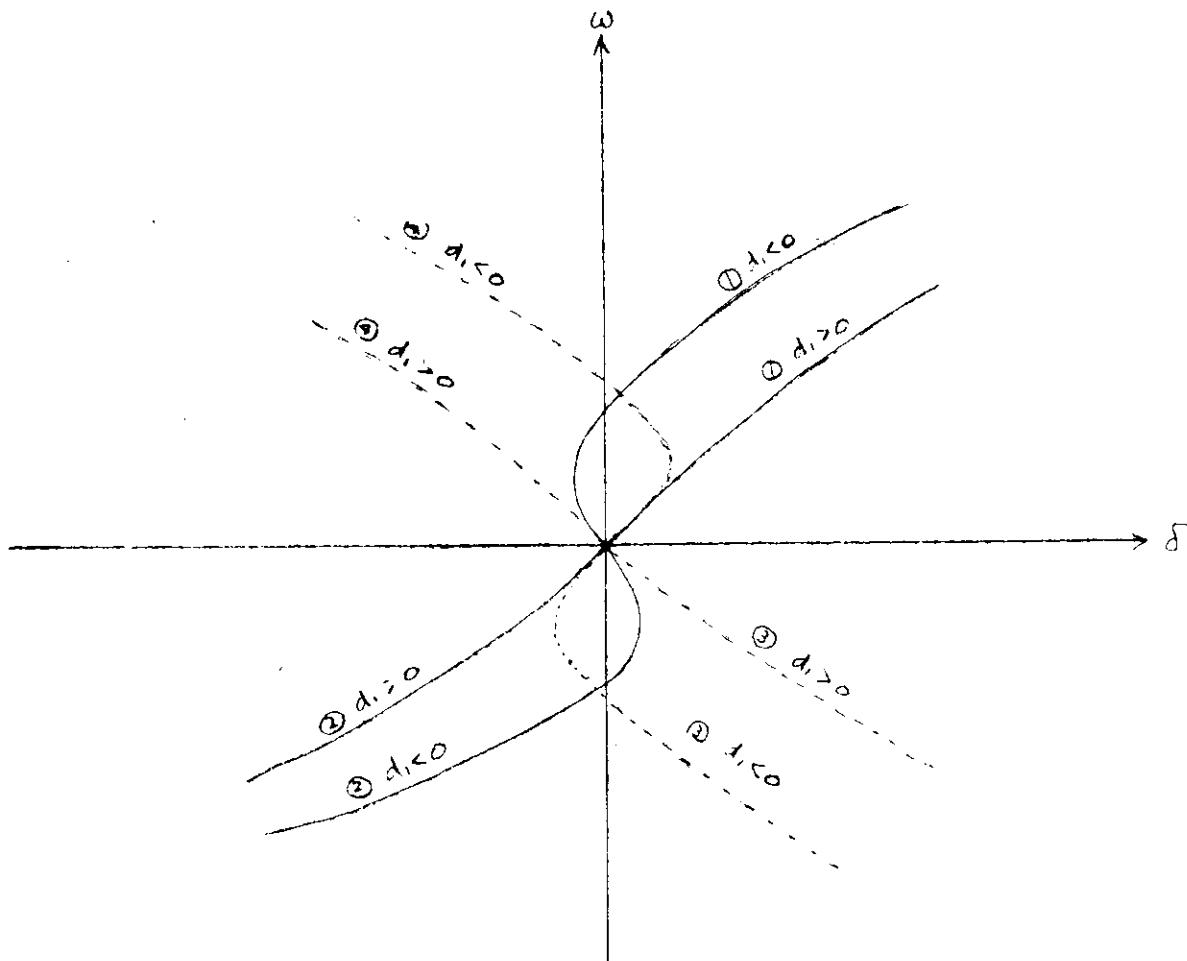
$$-d_2 \omega^2 + (-c_2 \delta + d_1) \omega - c_1 \delta = 0$$

$$d_2 \omega^2 - (-c_2 \delta + d_1) \omega + c_1 \delta = 0$$

$$\omega = \frac{(-c_2 \delta + d_1) \pm \sqrt{(-c_2 \delta + d_1)^2 - 4 d_2 c_1 \delta}}{2 d_2} > 0$$

これは③の場合の $\omega > 0$ の領域に相当するものである。

以上を勘案すれば次図のようになる。



したがつて一般にスパイラル試験で得られる $\omega \sim \delta$ curve は β と ω が同符号の場合であると結論される。

また第1象限の曲線と第3象限の曲線は原理的に原点における点対象であるはずであるから式(3.5'')(3.6'')の表現が正しく、なおかつ β 、 ω が同符号の条件が必要と考えられる。

(5) 理論計算と実船計測との関連

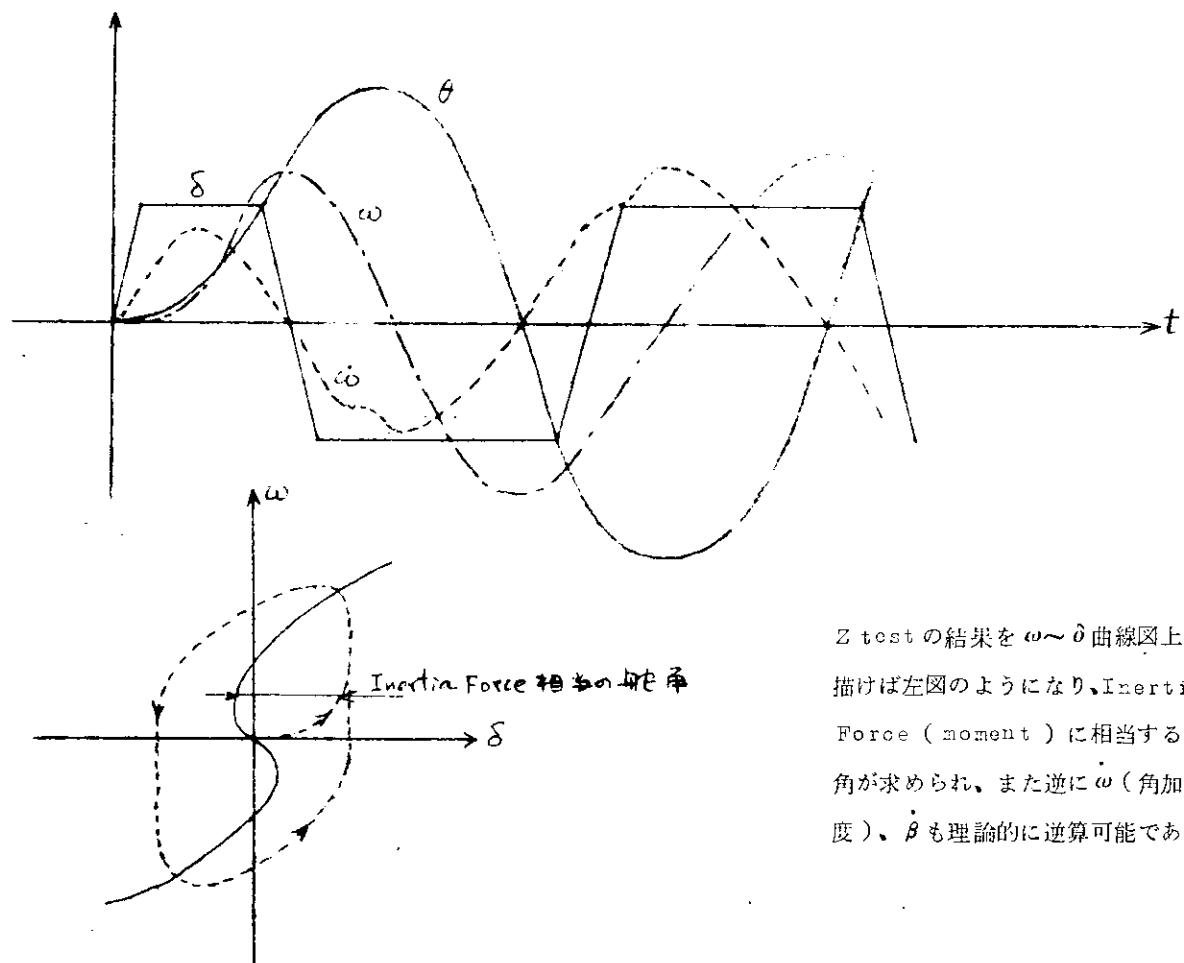
実船の試運転においてある状態における操縦性指標 EPT は Z 試験を行なうことである程度容易に求め得る。また Z 試験と同一の状態で逆スパイラル試験を行なうことで $\omega \sim \delta$ 曲線も比較的容易に求められる。したがつて試運転において2つの載貨状態で上記の2試験を行ない、これらの間の状態は理論で連結する手段を用いれば比較的容易に船の

状態と操縦性指数の関係を定義できる可能性がある。

(a) Z試験のKの意味(1次近似の場合)

Z試験で得られたKは第1次近似的には $\omega_{max} \pm \delta$ の範囲での $d\omega/d\delta$ のある条件での平均値を示すものにはかならない。しかばいかなる形式の平均値であるかという問題はさらに詳細に検討せねばならないが、ここではその問題の追求が主目的でないので別にゆずる。ただしこの問題に若干ふれておく。

Z試験と $\omega \sim \delta$ 曲線の関係を図示すると次のとおりである。



この逆算した ω を Z test 上に描けば図示のようになる。

$\int \omega dt \rightarrow \omega$ 、 $\int \omega dt \rightarrow \theta$ なる関係がある。今 loop が δ に比して非常に大きい場合、 ω の peak における波打ちが非常に大きくなり、その積分値が ω の周期運動を発生しない場合が考えられる。すなわち loop が大きい小舵角の Z test が施行困難となる現象はこのような状態を示していると考えられる。

(b) K・T および β 表現の各指標の性格

舵～船体運動系の表現を式(3.3)のように表現する根拠をもつと詳細にみると、

1次系近似の意味は、船体運動を支配する主要な要素は

$$\text{慣性項} + \text{旋回抵抗項} = \text{旋回力項}$$

と考え、これを

$$I \ddot{\theta} + R \dot{\theta} + M \dot{\theta}^3 = F \delta \dots \dots \dots \dots \dots \dots \quad (3.26)$$

とかりに表現し、

I: 慣性モーメント

R: 旋回抵抗の $\dot{\theta}$ 比例係数

らを勘案して曲線の形状、トリム変化による指数の変化等についてさらに修正可能であろう。

しかしこのような便宜的な方法がどの程度の精度を持つかは今後以上のような観点からの資料の入手と多数の計算との比較検討をまたねばならない。

(6) オートパイロット系の取扱い

基本方針で述べたごとく、本論で取扱うのはオートパイロットの針路設定入力の step 変化に対して、船がどのような針路変更を行なうかの算出法の構成である。

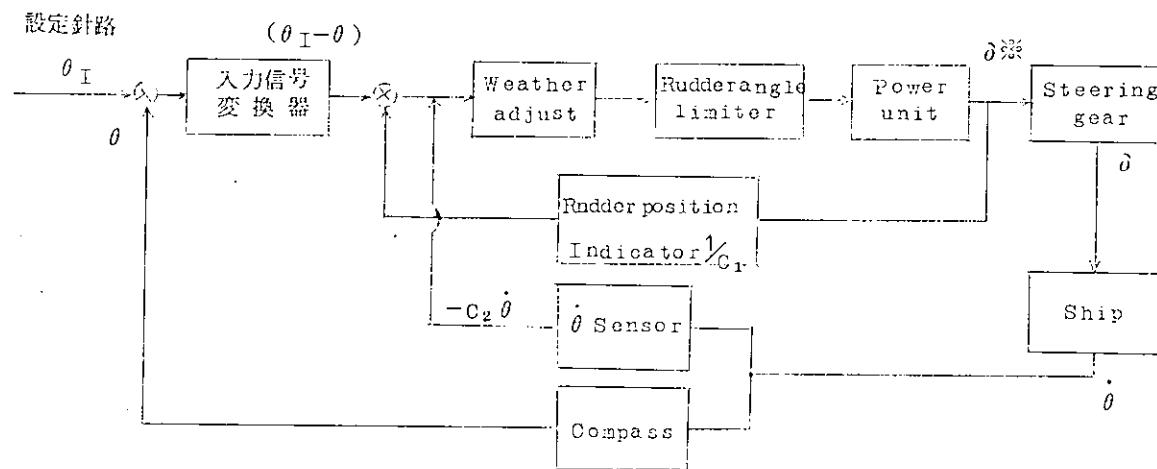
オートパイロット装置は多数の内外メーカが種々の型式のものを作製販売している。

これらの機器の機能は一見複雑ではあるが、いずれも基本的な機能としては針路設定入力と原針路との差を入力とし PDI 制御と不感帶要素 (weather adjust) をもつている。その他非線型要素としては入力信号発生器の非直線性 (シンクロレギュラー)、飽和特性 (舵角制限) および Back lash (ある種の weather adjust) 等がある。これらの内工動作は一般に導入されていない。

これらの機能を持つ制御系の総合特性は、現在は Analog computer または digital computer によって比較的容易に演算可能である。

(a) 制御系の構成

制御系の概念を示すと下図のとおりである。



C_1 は比例制御係数

C_2 は微分制御係数

このように多くの非線型要素を内包する制御系の総合特性を伝達関数表現するのはあまり意味はないが、一応制御素の特性を概略、見るには適しているので簡単に記述して見る。

伝達関数の定義

入力信号変換器 $I(s)$

Weather adjust $W(s)$

Rudder angle limiter $L(s)$

Power unit $P(s) = \frac{1}{1 + T_p s}$

Steering gear $E(s) = \frac{1}{1 + T_E s}$

Ship $B(s) = \frac{K}{1 + N(s) + TS}$

3次の非線型要素

$N(S)$ ただし係数として r/k がかかる。

compass

$1/S$

とすれば Overall transfer function は

$$\frac{\theta}{\theta_I} = \frac{s C_1 I(s) W(s) L(s) P(s) E(s) B(s)}{s (C_1 + A(s)) + (C_1 I(s) + C_1 C_2 s) W(s) L(s) P(s) E(s) B(s)}$$

ただし $A(s) = W(s) L(s) P(s)$

Under line は Inner loop effect である。

これを見ると、Differential control (Rate control) は $C_1 C_2$ の積として作用していることがわかる。

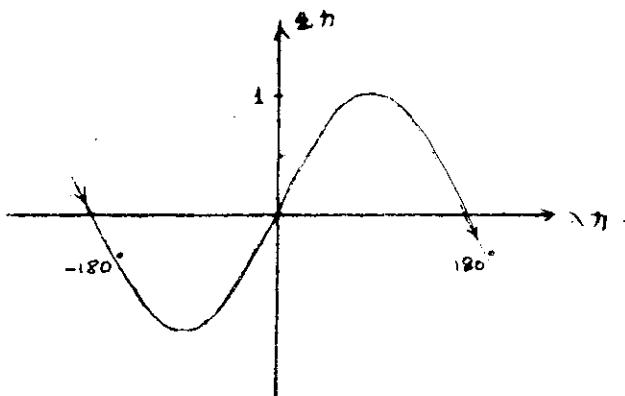
(b) 各要素の機能と記述法

(i) 入力信号変換器

この機能は設定針路入力と現針路角の差をシステムの内部信号に変換するものである。

大別すれば直線性を持つものと非線型のものがあり、前者は Potentio meter 利用又は歯車による機械的なものがある。

非直線性のものはシンクロレゾルバを使用したもので入出力特性は図のとおりであつて入力 180° から -180° へは連続性がある。



このような入力変換器は一見問題がありそうであるが、制御系として 180° 点は不安定点であるため、 $|\theta_I - \theta| < 180^\circ$ という条件で用いれば問題はない。またたとえ $\theta_I - \theta = 180^\circ$ としても正常に作動する。

しかし 90° 以上の大角度変針に対して追従性が減ずる可能性を考えられるが大したものではないと推測される。本論で取り扱いオートバイロットの入力信号変換器は $\theta_I - \theta$ が -180° から $+180^\circ$ の全域において作動可能なものでなければならない。

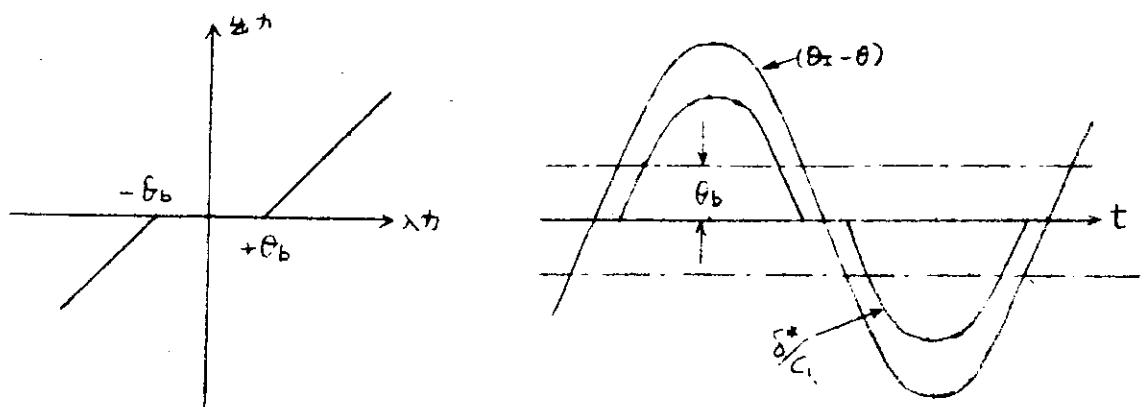
(ii) Weather adjust

Weather adjust の機能と特性については阪大野本助教授の論文〔造協論集 104・S 34 自動操舵の安定性について〕に論じつくされているが、ここでは実用面から前記論文を参照しつつ記述する。

Weather adjust の目的は荒天航海中の周期的な外力ヨーイングモーメントで船が平均周期的に小規模のヨーイングを行なう。この場合オートバイロットが線型特性を持つければ頻繁かつ無効な操舵を繰返し、Steering gear の耐久性にも影響を与える。したがつて制御系内に不感帯をもうけて無駄な微小操舵を消す方式が導入されている。そして荒天の程度により不感帯の巾を自由に変更可能とし、航海中最適の不感帯巾を選択し得るようになっている。

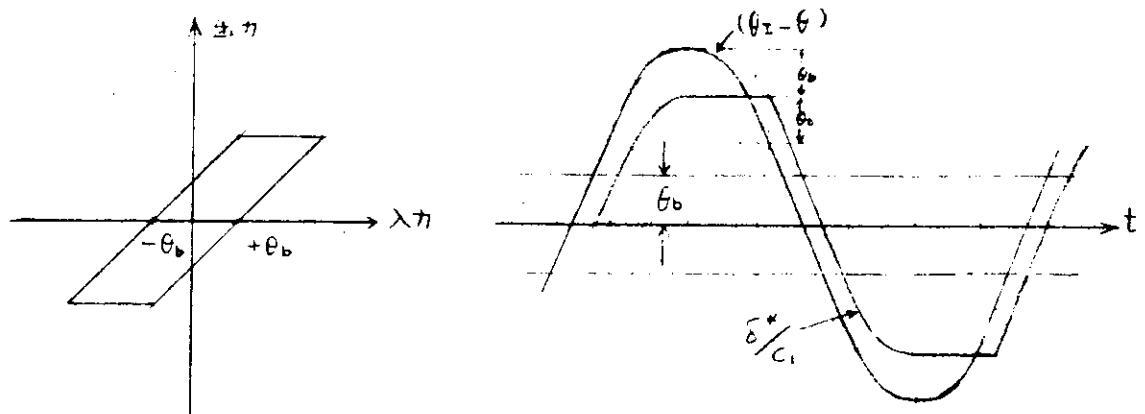
この不感帯要素を実現する機能要素の選択において、純粹な不感帯と Backlash 要素の 2 つに分かれる。これらの入出力特性は次のとおりである。

(イ) 不感帯 (Threshold) の作用



(ロ) Back lash の作用

この特性は制御機構の内部に機械的な Back lash が近似的に mass less と見なしてよい駆動部と被駆動部の間に存在するため、いわゆる Hysteresis 動作を示すものである。



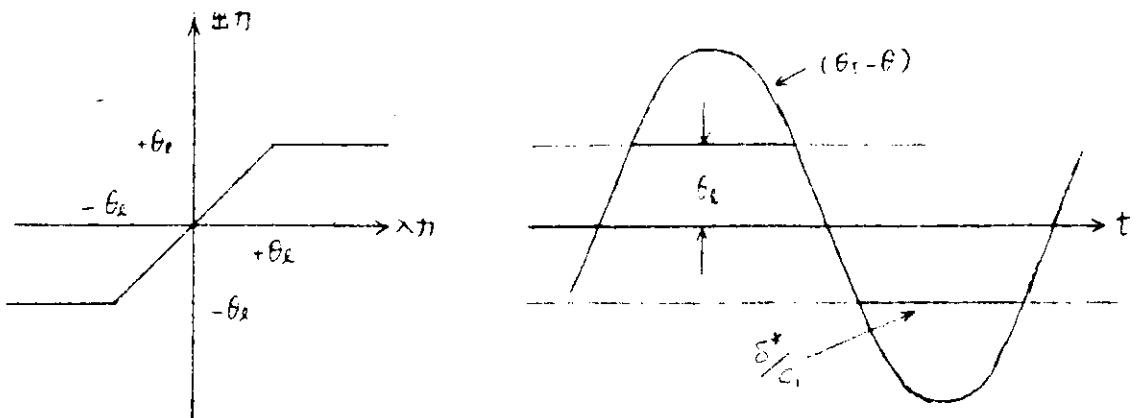
この Hysteresis 動作は位相おくれをおこすもので系に発振を起すものであるといわれている。

このような Weather adjust は土 θ_b の大きさによって針路設定入力のステップに対する船の進路整定の時間に影響をおよぼすものと推定される。

(ミ) Rudder angle limiter

舵角制限は舵配置および操舵機に存在する。しかしある種のオートパイロットでは制御系内に舵角制限をもうけ、 $\delta = \pm 15^\circ$ 程度以上は取らないようにしたものもある。これはオートパイロットは定められた針路角を保持するもので、針路変更機能は 2 次的に考えて設計されている装置と考えられる。

このような舵角制限機能は次のように記述される。



(IV) その他の

Power unitはSteering gearのpilot valveを駆動するものである。この系のTime constant T_p はSteering gearの T_E に比較しても小さく、さらに船の T に比べ十分小さいので無視してさしつかえないものと考えられる。

またSteering gearの T_E も船の T に比べ相当小さく、よほどのFineな小型船の場合以外は無視して問題ないと考えられる。

以上説明した各要素を考慮することでオートパイロットの特性の記述は本論の目的に十分適合するものと考えられる。

計算対象のオートパイロットの機能解析により C_1 、 C_2 、 θ_b 、 θ_ℓ 等の値と調節器指数との関連を求める必要があるが、これはメーカーと十分相談する必要があろう。

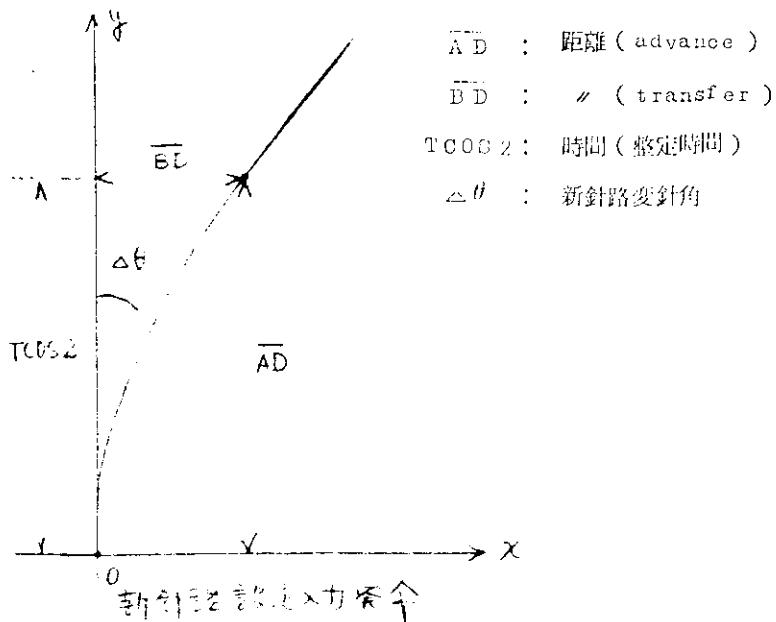
(7) 変針軌跡の計算

前章までに述べた方法にしたがい、船の各種の載貨状態において、オートパイロットの各パラメータの組合せに対して、一定の新針路設定入力のステップに対する船の反応が $\dot{\theta}$ および θ のtime historyとして得られる。

これを用いて、1.3.4衝突回避航法の研究において述べた。

\overline{AD} 、 \overline{BD} および $T \cos 2$ を求める必要がある。

\overline{AD} 、 \overline{BD} および $T \cos 2$ は次のように定義されている。



直進中の船の速力を V_s とし、操船中の船の速力を ϵV_s とすれば

$$\overline{BD} = \epsilon V_s \int_0^T \sin \theta(t) dt$$

$$\overline{AD} = \epsilon V_s \int_0^T \cos \theta(t) dt$$

$$TCOS2 \text{ は time t at } \frac{\theta(t)}{\Delta \theta} = E$$

とし、Eは1とすれば $TCOS2 = \infty$ となるゆえ、実用的には $0.632 < E < 1$ の範囲で適当に選択すべきであろう。

ただし、Eを小さくすれば針路変更後の衝突危険性判定の精度が悪化し、Eを大きくすれば $TCOS2$ が大きくなり、相手船の接近するまでの危険性確認サイクルが減少し、また他の測定値等のデータの精度のバランスが悪くなる点に留意せねばならない。

以上のような演算を必要なすべての case について計算すれば、縦軸に \overline{AD} または \overline{BD} または $TCOS2$ を取り、横軸に吃水、パラメータとしてトリム量とした曲線群が各 $\Delta \theta$ ごとに得られる。

また制御系のパラメータが変わればまた別の曲線群が必要となる。しかし、衝突予防装置としての digital computer の記憶容量には制限があるので、これらの曲線群を整理し代表的なもので近似的に表現することを考える必要がある。その具体的な方法は今後多くの計算例を見て適宜考慮せざるを得ない。

しかし考え得る方法としては、

- (i) オートパイロットの C_1 、 C_2 、 θ_e は const とする。
- (ii) Weather adjust の効果はすべての case について一定値の変化量で近似する。
- (iii) $\overline{AD}/\Delta \theta$ 、 $\overline{BD}/\Delta \theta$ 、 $TCOS/\Delta \theta$ で全 $\Delta \theta$ 値を代表させる。

が考えられる。

(8) 計 算 例

(a) 供試船の要目等

大型タンカ

実船実験データ、FULL、BALLAST、各スパイラル試験、Z試験

(b) 状 態 $B/L = 0.1670$

状態 名称	Full 1	Full 2	Full 3	状態 名称	Ball 21	Ball 22	Ball 23
d/d FULL	1.0	1.0	1.0	d/d FULL	0.51	0.51	0.51
Cb	0.807	0.807	0.807	Cb	0.761	0.761	0.761
τ	0	0.75%	1.5%	τ	0	0.75%	1.50%
v/\sqrt{Lg}	0.158	0.158	0.158	v/\sqrt{Lg}	0.161	0.161	0.161
d/L	0.05638	0.05638	0.05638	d/L	0.02874	0.02874	0.02874
$Ar/L \cdot d$	0.01661	0.01661	0.01661	$Ar/L \cdot d$	0.03257	0.03257	0.03257
状態 名称	Ball 11	Ball 12	Ball 13				
d/d FULL	0.784	0.784	0.784				
Cb	0.785	0.785	0.785				
τ	0	0.75%	1.50%				
v/\sqrt{Lg}	0.1595	0.1595	0.1595				
d/L	0.04422	0.04422	0.04422				
$Ar/L \cdot d$	0.02118	0.02118	0.02118				

(c) 計 算 結 果

図3.25～3.27は供試船について(4)の諸計算式で $\omega \sim \delta$ の関係を計算した実例である。

図3.28は供試船の実船実験で行なわれた $\omega \sim \delta$ 曲線であり、これを $0 \sim 5^\circ$, $0 \sim 10^\circ$, $0 \sim 15^\circ$ の各範囲について3次曲線近似したものと示す。

図3.29～3.31は実船実験で得られた状態の中間の状態の K_0 , T_0 および ν を推定したものである。

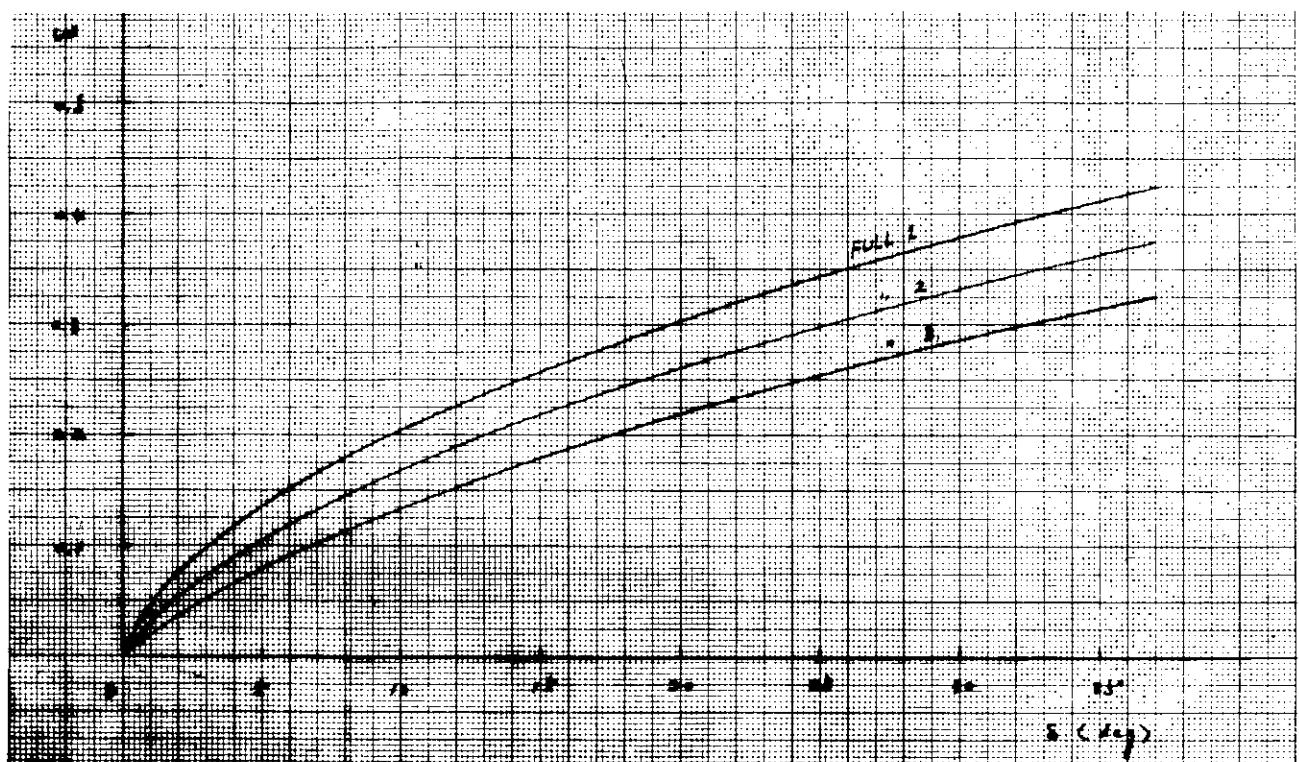


図3.25 計算結果 FULL 1.2.3

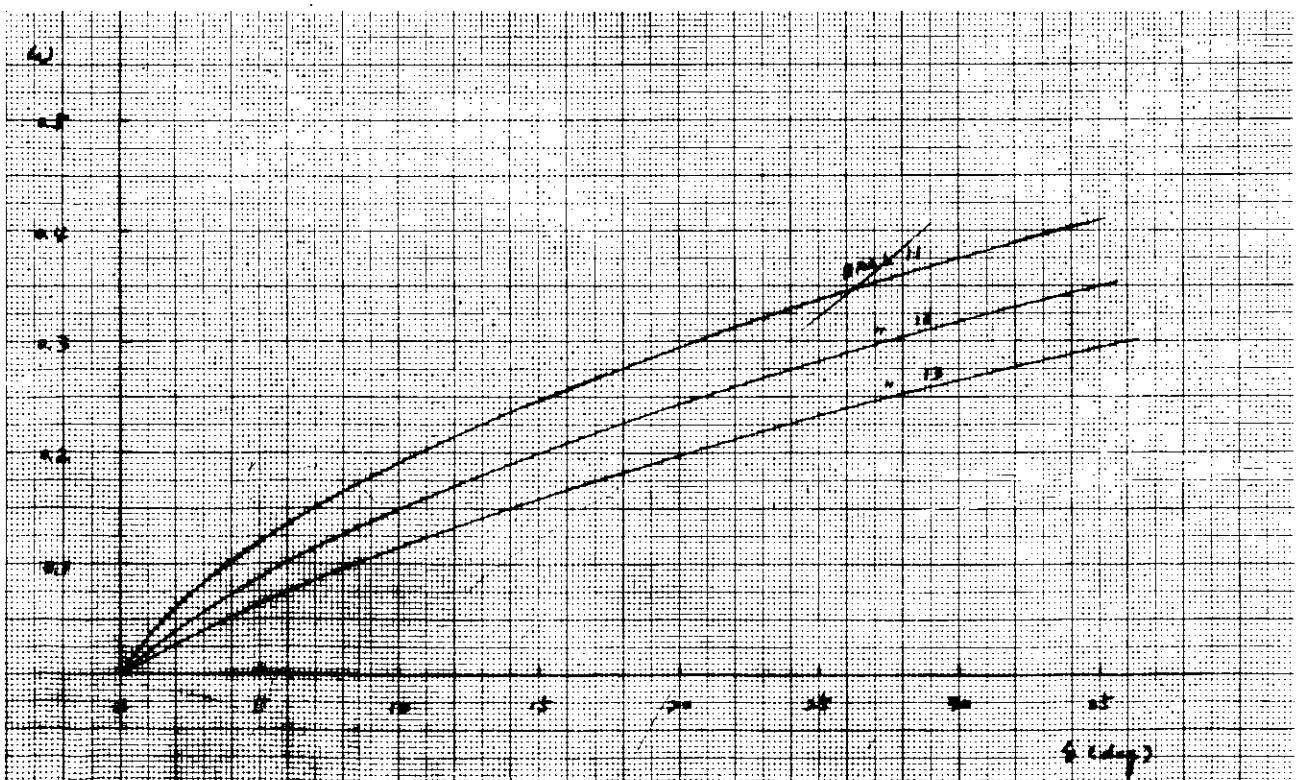


図3.26 計算結果 BALLAST 1

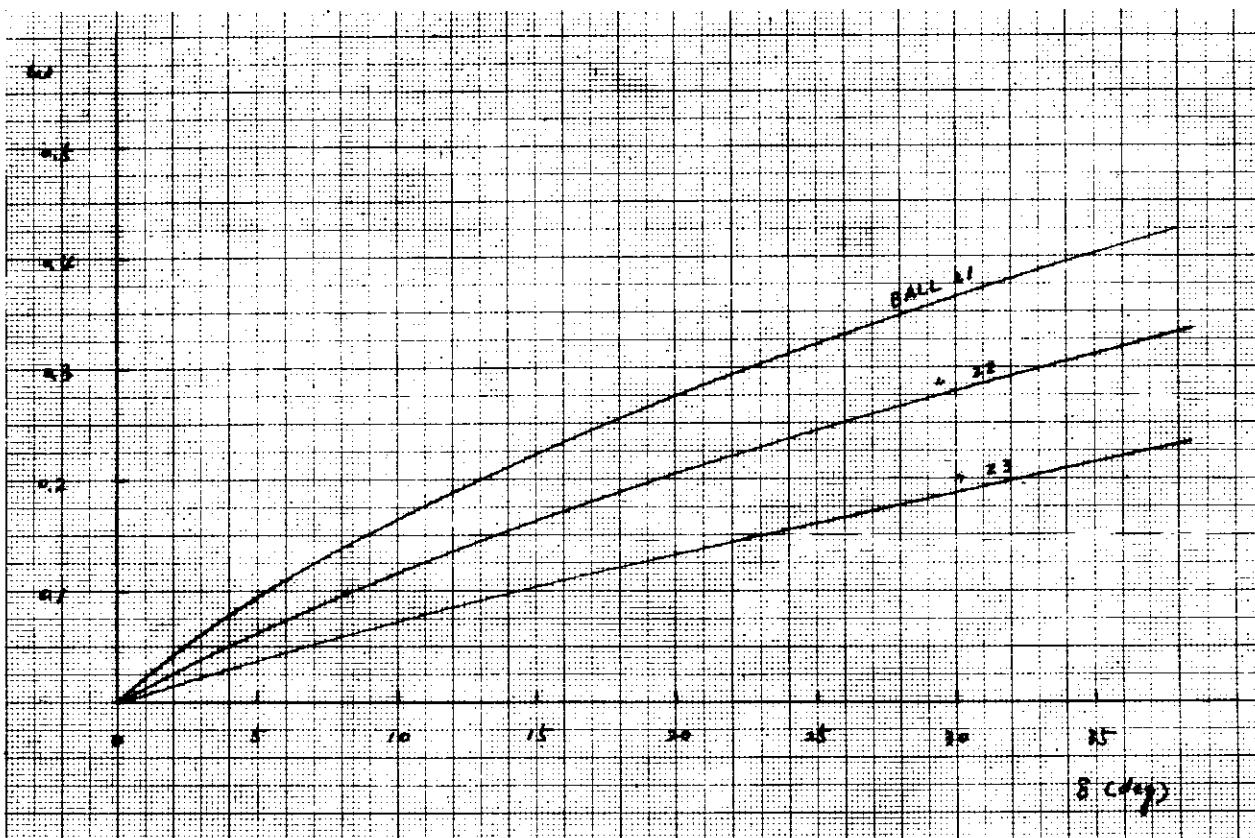


図 3.27 計算結果 BALLAST 2

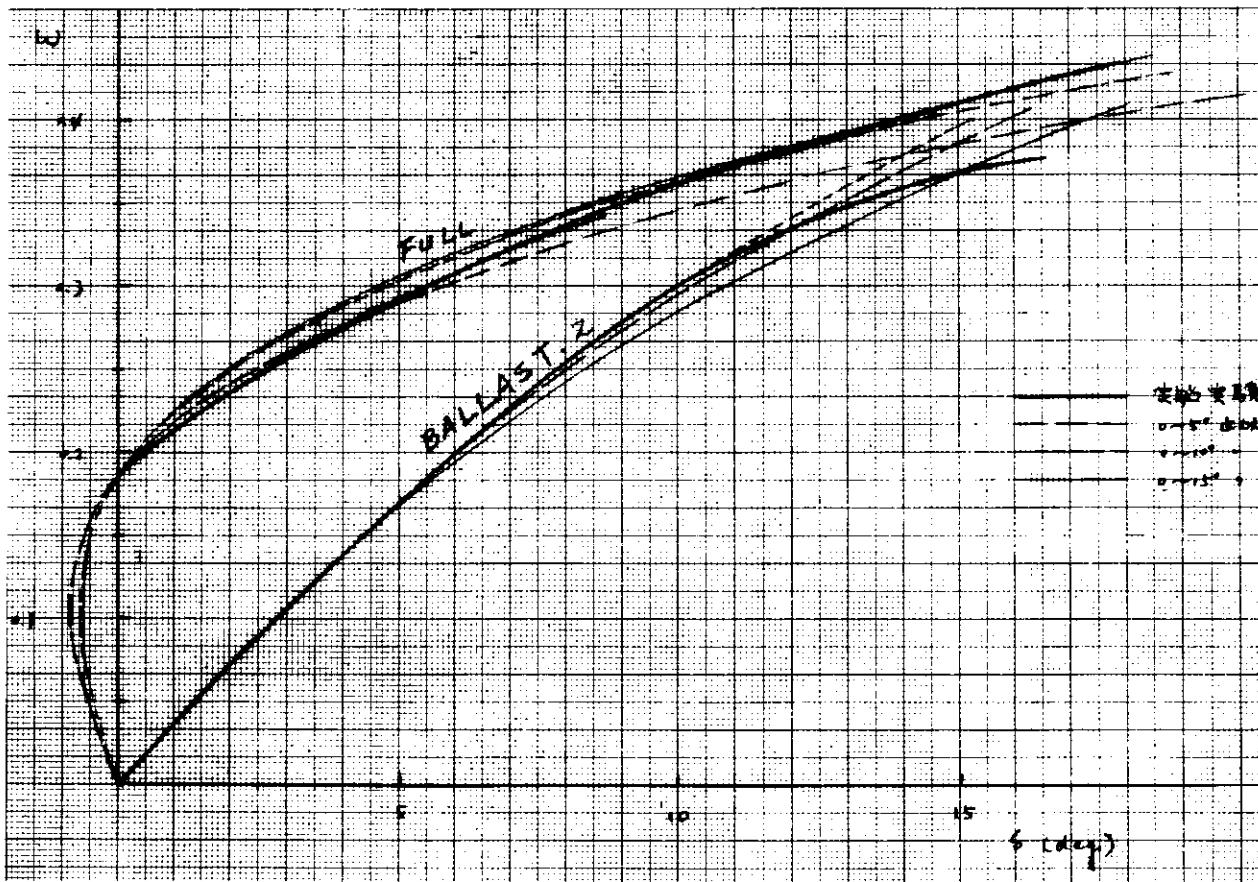


図 3.28 實船実験結果と 3 次近似

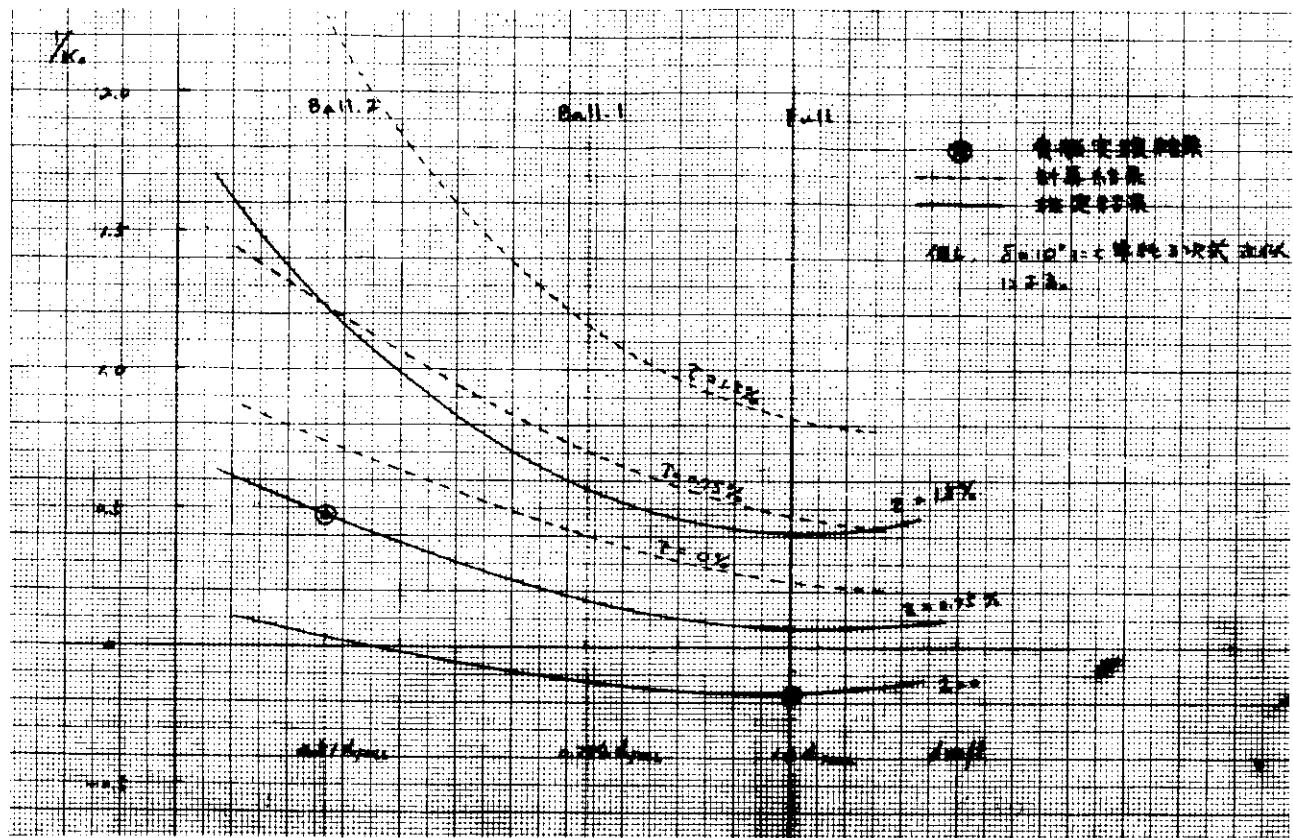


図 3.29 載貨状態と K_c との関係

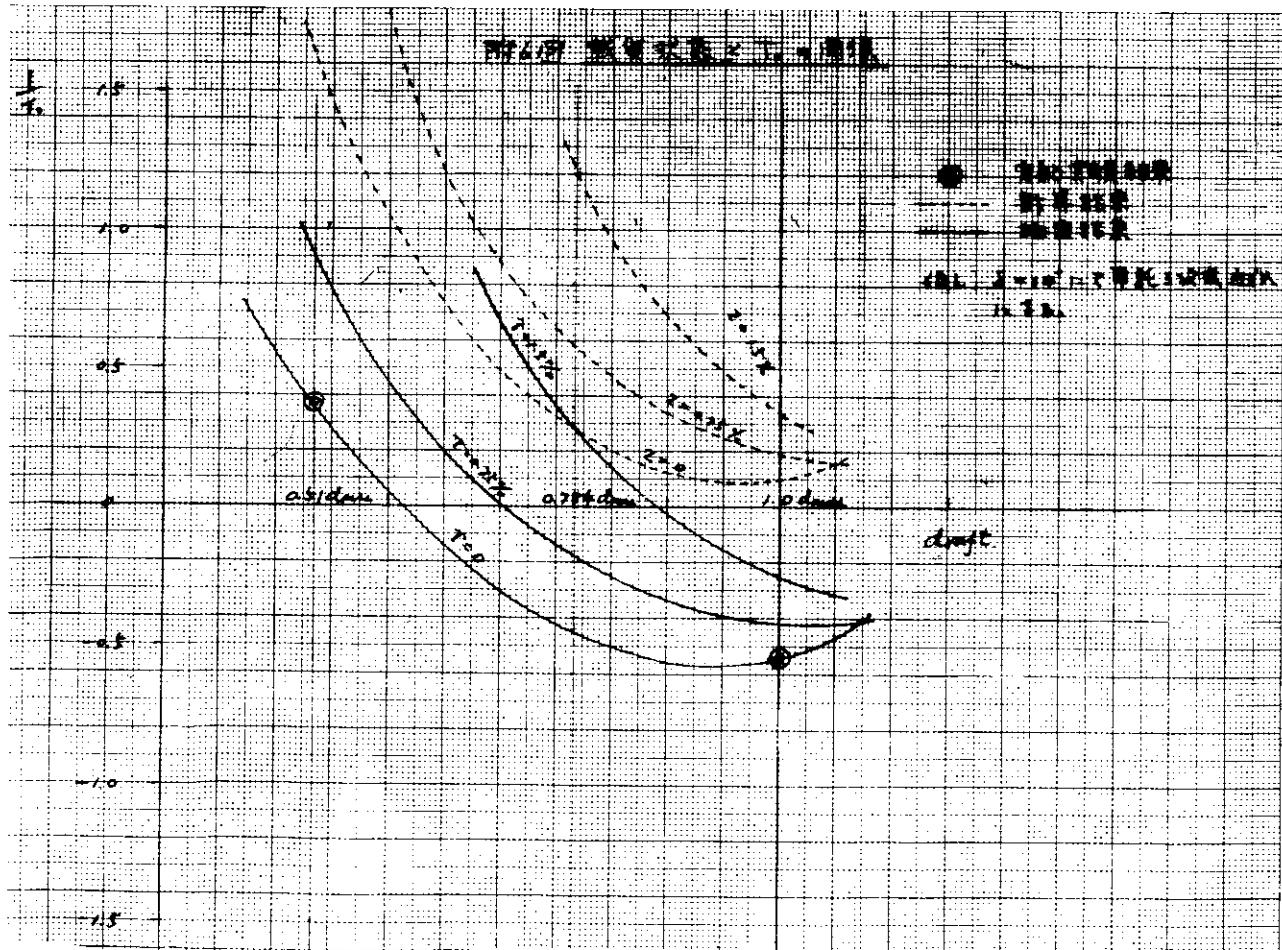
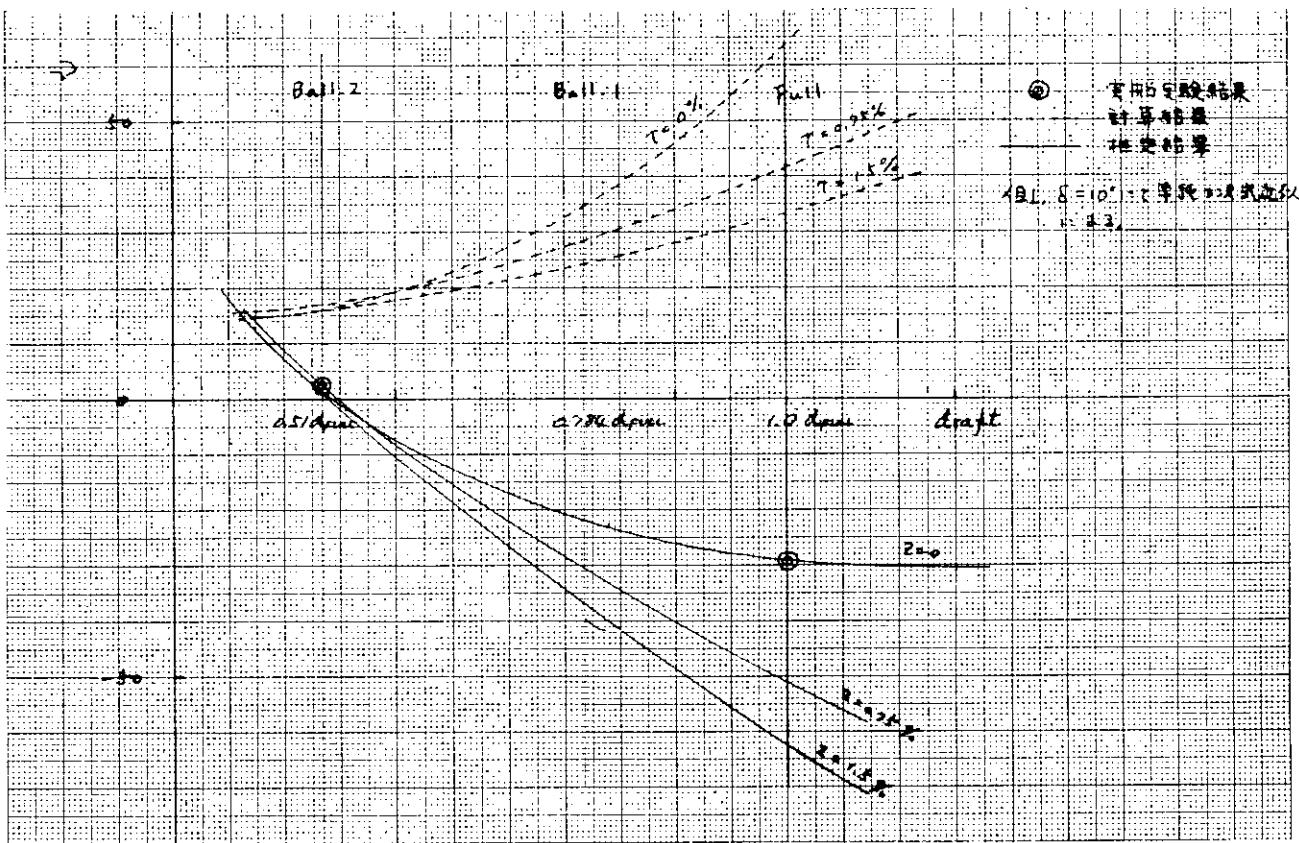


図 3.30 載貨状態と $T/draft$ との関係



図図 3.31 載貨状態と δ の関係

(9) 結 言

本論で取扱った問題は、現在の船の操縦性理論の段階からみて良精度を期待することは相当困難な分野に属する。特に舵～船体運動系の特性と載貨状態の関係については決定的な理論はまだ存在していないといつても過言ではないと考えられる。

またこのような問題を本論のような目的で取扱う必要は今まで造船界でもほとんどなかつた。したがつて今後は本論のような手法、または他の考え得る手法によつて、多くの計算例と実船計測との比較検討を積み重ねることが必要であり、その結果次の理論的飛躍へのステップとせざるを得ないであろう。船の操縦性理論の研究の目的は現象そのものの解明もあるが、むしろそれは手段であり、真の目的は舵面積の決定規準、オートパイロットの最適化および船体運動の予測等にあるべきであろう。

1.3.4 衝突回避航法の研究

(i) 緒 言

船舶の衝突回避を自動的に行なうということは長い間の船舶運航者の夢である。そして今まで多くの試みがなされ、米国では本格的な装置の実用実験が行なわれた。（文献1）、またもっとも基礎的な問題として船舶の衝突条件に関する数学的な取扱いが盛んに研究され、最近この方面の作業として、衝突回避に関連する危険率の推定の試みがなされている。（文献2.3）

さて、衝突予防を1つのシステムとして考える場合、レーダの発達はきわめて大きい要素である。レーダ装備の一般化により人間の肉眼よりもはるかに大きい距離能力を持つ相手船の発見機能が船舶に導入されたわけである。そこで初步的な1つの試みとして、レーダ像において自船中心のある範囲内に相手船が入った場合、そのことを警報（音響等）として乗組員に注意をかん起することが試みられた。またレーダ像を肉眼で識別して、相手船と自船との相対運動を紙面上にプロットし、衝突の可能性の判定と回避すべき針路の探索が一般的に行なわれるようになつてきた。

さて最近のエレクトロニクス技術とコンピュータ（Digital Computer）の利用技術の進歩により、前述のレーダ情報の利用と理論的な衝突条件計算および回避航法推定の有機的な連絡が可能となつてきた。

これは主としてレーダ情報の雜音処理技術と目標の自動追跡技術の発展によつている。この2技術によりレーダ情報からきわめて信頼性の高い相手船の存在とその位置、速力および針路情報を On Line Real Time に得ることが可能となつた。

本研究の目的は以上の背景のもとにコンピュータ利用による上記の相手船の運動情報を用いて自船はいかにして回避運動をすべきかという問題を実際の運航状態にそくして解いていく手法を研究し、かつこれをコンピュータにより On Line Real Time に解き船舶運航者に適切な指令を与えるシステムを構成するにある。まず初期の段階では最終的な操船実行の決断は船長によるが、将来のめざす最終目標はすべてを自動化し自動操船システムとすることにある。

(2) 一 般 論

(2-1) 必要な機能

実際の運航技術に則した自動的衝突回避航法システムには少なくとも次のような機能をもたせる必要が考えられる。

- (a) 相手船との衝突危険の判定
- (b) 衝突危険の程度の判定
- (c) 緊急時の処理
- (d) 衝突状況の判定
- (e) 安全回避航法の求解
- (f) 回避した後の原針路復帰の安全性確認

これらの機能を持つ論理はすべて船舶の海上衝突予防法の規定と矛盾しないものでなくてはいけない。

(2-2) 主要な問題点

本システムの詳細にふれる前に現状にて単独では解決し得ない重要な問題点にふれておきたい。

第1は安全な回避航法の探索は本質的に未来予測の問題であり、相手船の意志に関する情報がない限り、相手船の動きは線型推測によらざるを得ないことである。したがつて自船が過去（直前）の情報をもとに1つの決断を下した後相手船が予想外の行動に出た場合とか、予測のつけがたい複雑な操船を連続して行なつている相手船に対する場合は、本質的に線型推測による未来予測（すなわち相手船の針路、速力は未来も不変であるとの前提）は確率的な精度を持つにすぎないことである。

第2は衝突予防法との関連である。この問題は（2-3）でやや詳細にふれるが、結論として本システムは海上

衝突予防法の規制する海域外（自船中心半径2哩内）の場のことを対象とせざるを得ず、実際の航法は予防法の精神に準処するという立場を取らざるを得ないことである。

思うに衝突予防は相手あつての問題であり、自船単独でこの問題を解決しようとする態度は本質的に誤っているといえるであろう。この問題の解決には基本的に2つの方法が考えられる。第1の方法は自船中心の他船を入れない閉塞域を拡大確保するものであり、第2の方法はレーダの確認可能海域内での合理的な衝突回避航法の国際的規制である。筆者は海上のような2次元平面交通でかつ自由度の大きい船舶に対しては第2の方法を取るべきだと考える。以上のように多くの重大な問題はあるが、一方これらの問題を長期的な見通しのもとに解決をはかる必要がある。そしてこの解決の手段は決して机上の計画では進まない。むしろ現状での多くの問題点を良く認識した上で、積極的に実用化をはかり、その貴重な経験でさらに前進するという方式の採用が必要であろう。本論は以上のような考えに立つての第1歩の作業である。

（2-3）海上衝突予防法との関連

海上衝突予防法の各条文の中で本論に特に関連があるのは第4章航法であり、その中でもその前文と第17条～24条である。

まず前文の第4項には次のように明記されている。すなわち

第4章前文第4項

第17条から第24条までの規則は船舶が互いに他の船舶の視野の内にある場合にのみ適用する。

このことは以後の論理の構成にきわめて重大な効果をおよぼしている。船舶が互いに他の船舶の視野内にあるとの確認は昼間と夜間においておのずから異なる。そもそもつとも視認距離が短いのは一般には（霧等の視界制限以外）夜間であり、航海灯の視認距離は2哩以上と規制されている。

このことは海上衝突予防法は少なくとも両船が互いに2哩以内に接近した時から効力を発生することを意味している。

2哩の離隔距離は海上では非常に接近した状態といえる。この点では陸上の感覚とはかけはなれている。たとえば両船が互いに正面した出会い状況で、互いに10ノットで接近している時2哩の距離はわずか6分でちぢめられる。この間に正確な判断で急速に回避せねばならない。

一方一般の運航状態ではレーダによる相手船の発見とそのプロットティングにより2哩以上の離隔距離において早期に衝突回避を行なう方法がとられている。特に大洋航海中においては両船が衝突危険な状態のまま2哩以内に接近することを極力防止するのが正しい運航とされている。

以上の理由に附加し、後述するレーダによる相手船の自動追跡によって正確な相手船の行動を探知するに必要な時間的制約のため本論では

衝突予防法によつて規制される状況になる以上のはるか遠い離隔距離において衝突の危険の認知とそれに対する早期回避運動

に問題を限定することにした。

しかし一方回避航法においては、いかに衝突予防法規制以前の状態で自由とはいえ、おのずから常識的な航法が存在する。したがつて本論では

出会い関係においては衝突予防法の定めに準処した航法を採用し、横切り関係では安全性を重視し、安全性の1つの目安として相手船の船尾を通過する航法を求める方式
としている。

海上衝突予防法に関連してもう1つ指摘すべき問題がある。1960年SOLASの国際海上衝突予防規則附録書に「海上における衝突回避の援助としてのレーダ情報の使用に関する勧告」がある。この(2)項および(3)項においてレーダ情報に対する本規則の態度が明確に見てとれる。

主旨は視界制限時レーダによる相手船の位置確認は規則の定める注意して航行すべき義務を免除するほど十分な情報とは見なさないということであり、この見地からしても衝突予防法規則範囲内のレーダを用いた自動衝突予防装置は現状では法的に成立し得ないものである。

(2-4) 航路の制限

1.3.2 航路の実情調査で見られるごとく、衝突事故は内海、沿岸等の狭い海域で多く発生している。

しかし、大洋航行中でも衝突事故は皆無ではない。

本論は対象を大洋航行中に限定しているが、これは次のような理由によっている。

- (a) 内海は(2-3)で述べた予防法との関連で除外せざるを得ないが、また別の理由としてレーダ情報のみでは回避航法決定が困難である。
- (b) 沿岸等一側方が閉塞された海域は本論の応用問題として取扱いは可能であるが論理が複雑となり、必ずしも正確を期し難い。むしろ開発の方針としては大洋航行中の問題が解決を見た後第2段階として取上げるべきであろう。

(2-5) 結論

以上本論はとりかかる前に本問題の本質とその立場を述べてきた。さらに若干の解説が必要であるが、それは以後の本論で行なうこととし、一応の結論を以下に整理して見る。

- (a) 本システムは相手船の針路速力が変わらないとの前提で回避航法を求める。また情報はレーダのみである。したがつてそれからくる欠点については不可避的である。
- (b) 対象を海上衝突予防法で規制される離間距離よりもはるか遠方での衝突回避問題に限定する。
- (c) 海面は十分広い海域であるとする。
- (d) 海上衝突予防法規制外の問題であるので、回避航法は自由であるが、出会い関係に対しては予防法の規定に準拠して処理し、横切り関係においては相手船の船尾通過可能な航法を第1の安全航法とする。

(3) 基本構想

一般論において述べた基本方針に従つて以下論理を組立ててゆくが、本章ではその全般的な概観とハードウェア側との関連について述べ、各論理の詳細は(4)の各論によつてその全容を明らかにする。

(3-1) 全体のシステム構成

本論理過程は次の8部から成る。そしてそれらの各論理の機能的関連を図3.3.2に示す。

(a) 相手船の自動追跡位置情報の抽出部

この部分はハードウェアと密接な関連を持つものであり、機能としては10隻の相手船を自動追跡し、一定時間間隔において相手船の位置（自船よりの見通し角と距離）情報を抽出する。

または相手船の一時刻の位置と相対速度ベクトルの抽出でもかまわない。

本論では自動追跡の論理はハードウェア側にまかせ特に取上げていない。その他は次の危険船判定論理の応用問題として解決できる。

(b) 危険船判定論理 (Sub①)

この部分では、相手船の2点の位置情報と時間間隔または1点の位置情報と相対速度ベクトルを用いて、衝突三角形の演算をし、両船の最接近距離と最接近時間を求めこれらをあらかじめ定めてある最小許容値と比較し、衝突の危険性の判定および危険の切迫の程度の判定を行なう。詳細は(4-1)に示す。

(c) 衝突状況判定論理 (Sub②)

この部分はSub①によって危険と判定された相手船に対して、そのまま両船が針路速力を保ち、衝突予防法の規制距離範囲内に入った場合、予防法の規定するどのような衝突状況となり、自船は針路保持義務船か避航義務船となるかの未来予測を行なう。これは現基本方針が予防法の範囲外を対象としていることと矛盾するようであるが、以後の操縦法判定において予防法に準拠して処理する場合の一つの判定基準となるものである。

詳細は(4-2)に示す。

(d) 危険船(複数)の優先順序決定論理(Sub③)

この部分は危険船の中にも

- (i) 最接近距離(CPA)が非常に小さい船
- (ii) 離間距離が非常に小さい船
- (iii) 相対速度が大きく、最接近時間(TCPA)が非常に小さい船等の差異があり、まず当面の衝突回避をどの船を対象に行なうべきか判定せねばならないために設けられたものである。

詳細は(4-3)に示す。

(e) 安全操船法の摘出論理(Sub④, Sub⑧)

この部分では全ての危険船(10隻以内)について安全に回避し得る針路があるかどうかを求める演算を行なう。

その方法としては基本的には試行操船法という、トライアンドエラー方式によつて安全針路を求める方式と、純理論的に安全針路の範囲を求める方式が考えられる。

ここでは試行操船方式に従い、かつ大洋航行中との条件から自船速力の変更は考慮せず針路変更のみを対象として論理を構成した。

この部分はさらに別的方式を広く検討すべき余地が残されている。

詳細は(4-4)および(4-9)に示す。

(f) 操船方向判定論理(Sub⑤, ⑤-1)

Sub④で求めた安全針路範囲は一般には左舷にも右舷にも同時に存在し得るものである。そのいずれを選ぶかはその針路が最危険船に対して出会い状況なら予防法に準拠した航法であり、横切り関係にあれば可能な限り相手船の船尾を通過し得るものである必要がある。また一般に相手船により接近しない限り右転が望ましい。

この部分は以上のような論理過程をへて Sub④で摘出した安全針路の中からその望ましい操船方向を求めるのである。詳細は(4-6), (4-7)に示す。

(g) 操船法の選択論理(Sub⑥)

この部分は Sub④, Sub⑤ の結果および現針路が原針路(計画航行針路)よりずれている場合の復帰の必要性等の総合判断より最終的に安全操船法(複数)の内いずれを選択採用するかを最終的に決定するものである。詳細は(4-7)に示す。

(h) 原針路復帰試行操船論理(Sub⑦)

この種の衝突予防装置で予想される一つの欠点は相手船を連続して回避して行くと、一般に右へ右へと針路が替わる原針路と次第にずれて行くことである。

本システムではそれを避けるため、常時計画航行針路と現針路を比較し、衝突危険船がない場合でも常に安全性を確認しながら、原針路に復帰することを考える部分を設けている。

詳細は(4-8)に示す。

(3-2) 本システムのマン・マシンコミュニケーション

本システムのマン・マシンコミュニケーションはソフトウェア側で考えるよりむしろハードウェア設計の段階で考慮すべき問題であり、1.3.1システムの調査の項でその実例が示されている。ここではむしろソフトウェア設計者の立場からディスプレイすべき情報(数値およびステイトメント)の指摘にとどめたい。

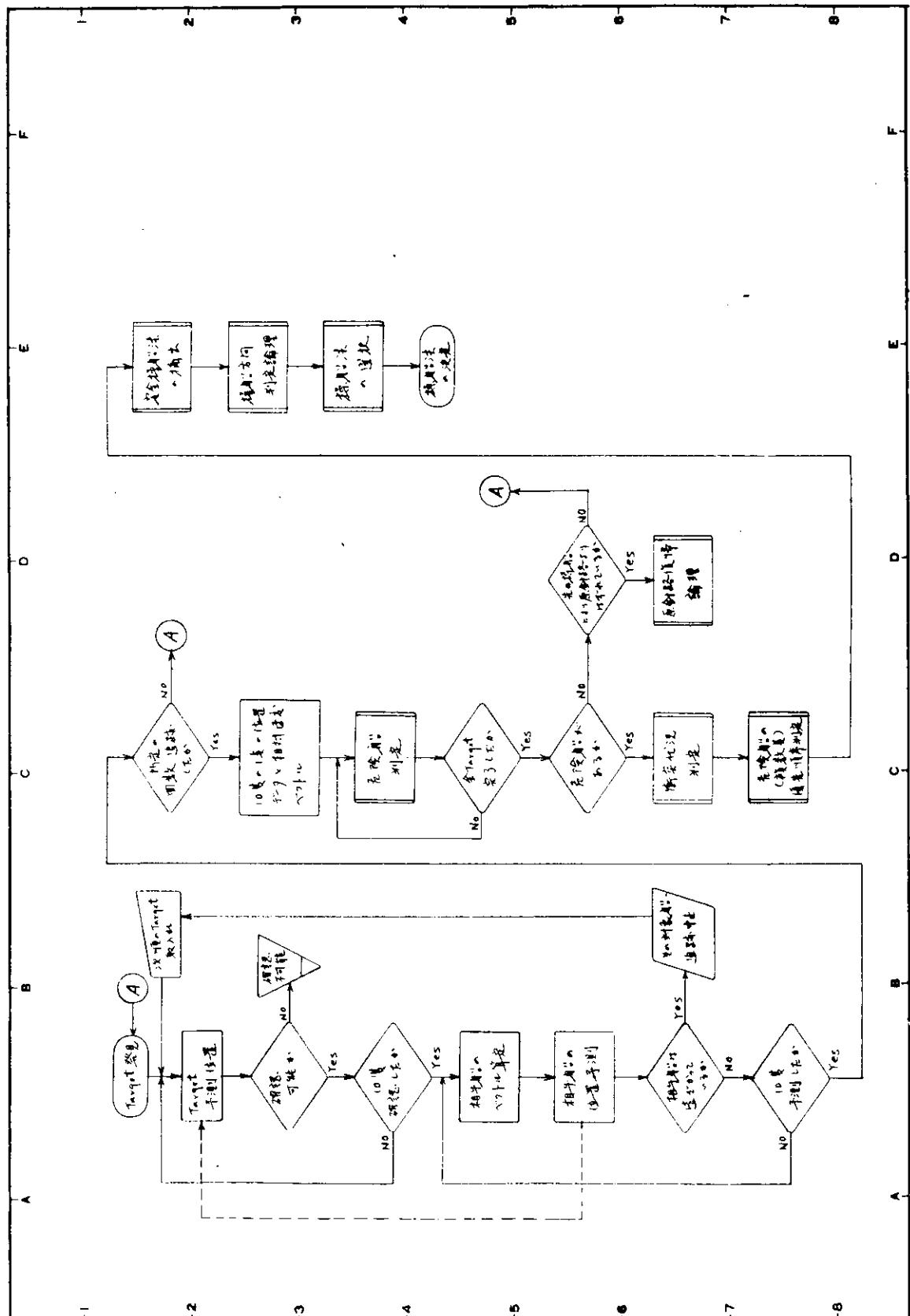
要はこのシステムを用いる人間の能力、好みおよび心理状態に適応しつつ必要最小限の情報のディスプレイの設計を行なうべきであろう。

一方最終的な操船指令は一般論で述べた本システムの不十分な周辺条件およびハードウェア側の信頼性の未知から

総合的に判断し、直接オートパイロットの針路設定器と連結せず、たとえ連結しても人間の同意がなければ発動しない方式とし、指令発令と実行の間には人間の能力と心理にかなつた適当な有余時間を置くべきであろう。

本システムで用いた変数と判断機構における判定ステイトメントを一覧表にし、表3.5、3.6に示す。

表3.5の変数、常数Table にはディスプレイの要否を指摘しておいた。



(社) 日本造船研究協会
船舶の高度集中制御方式の研究

題目 SBR106 衝突回避避航法
項目 衝突回避避航法 フローチャート
整理番号

プロジェクト
昭和 年月日

図 3.32 衝突回避避航法 フローチャート

表3.5 変数、常数 Table

原則として単位は Sec, Radian Meter とする。

名 称	内 容	桁 数	備 考
T ₀	第1観測の時刻 TH ₀ TM ₀ (時刻 分)	時刻 Integer 桁 分 F 4. 2	Display 時 分 12:32
T ₁	第2 " TH ₁ TM ₁ (時刻 分)	"	"
T ₂	針路整定の時刻	"	"
R ₀	T ₀ 時の自船と相手船の距離	F 6. 1	Display 4.850 m
R ₁	T ₁ 時 " "	"	"
R ₂	T ₂ 時 " "	"	"
θ ₀	T ₀ 時の自船から相手船の絶対見通し角 Dθ ₀ , Mθ ₀	F 6. 5	Display 度 分 30:43
θ ₁	T ₁ 時の " "	"	"
θ ₂	T ₂ 時の " "	"	"
θ' ₁	T ₁ 時の自船針路方向からの自船から相手船の 見通し角	"	
θ' ₂	T ₂ 時の " "	"	
V _s	自船の絶対速度 (m/sec)	F 4. 2	Display 17.28 kts 内部コントロール可能
θ _s	自船の絶対針路角 Dθ _s , Mθ _s	F 6. 5	" 度 分 12:30 "
θ _{sA}	操船後の自船の絶対針路角 Dθ _{sA} , Mθ _{sA}	"	
MinCPA	最接近安全距離	F 5. 1	Display 3.700 m 外部コントロール可能
MinTCPA	" 時間	F 4. 1	Display 10 分 "
OCCUPY	対行占有巾	F 5. 1	Display 1.500 m "
△R	相対運動量	F 6. 1	
△T	T ₀ から T ₁ までの時間差	F 5. 1	
△θ	θ ₀ と θ ₁ の角度差	F 6. 5	
V _r	相対速度	F 4. 2	
φ _r	" ベクトルの絶対方位	F 6. 5	
V _{rA}	操船後の相対速度	F 4. 2	
φ _{rA}	" " ベクトルの絶対方位	F 6. 5	
C _{PA}	最接近距離	F 5. 1	Display 3.750 m
T _{CPA}	" 時間	F 4. 1	Display 11.84 分
V _b	相手船の絶対速度	F 4. 2	Display 14.25 kts
θ _b	" 針路角	F 6. 5	Display 度 分 178:23
θ _{b'}	自船針路方向からの相手船の絶対針路角	F 6. 5	
θ _c	衝突角	"	Display 度 分 112:17
ξ'	自船針路方向からの最接近点の方位	"	
τ	(第2回研究会資料参照)		
T _{CAL1}	危険船判定演算時間	F 4. 1	内部コントロール可能

名 称	内 容	指 数	備 考
TCAL ₂	試行演算時間	F 4. 1	内部コントロール可能
TCOS ₁	人間の判断時間	"	"
TCOS ₂	操船発令から針路整定までの時間	"	"
AD	TCOS ₂ 間に於ける自船針路方向に直角に左又は右舷への移動距離	F 5. 1	"
BD	TCOS ₂ 間に於ける自船針路方向に平行に前方へ移動した距離	"	"
α	最終回頭角	F 6. 5	Display 度 分 20:24 内部コントロール可能
ε	操船中の平均速力係数	F 5. 4	
T	原針路復帰の為の余裕時間	F 4. 1	内部コントロール可能

表3.6 Statement Table

名 称	内 容	備 考
(1) 危険船判定		
• Estimated as dangerous by CPA	CPA内にあり危険(相対Vector)	CPA \leq Min CPA
• Immediate maneuver	至急回避操船	TCPA \leq Min TCPA
• Estimated as safe by CPA	CPA外で安全(相対Vector)	CPA > Min CPA
• The Target go away from own ship	相手船は遠ざかっている	TCPA < 0
• No dangerous ship	危険船なし	
(2) 状況判定		
• The target is in A ₁ SHOGEN	相手船が第1象限に存在	$0^\circ \leq \theta_1' < 90^\circ$
• " A ₂ "	" 2 "	$270^\circ \leq \theta_1' < 360^\circ$
• " A ₃ "	" 3 "	$180^\circ \leq \theta_1' < 270^\circ$
• " A ₄ "	" 4 "	$90^\circ \leq \theta_1' < 180^\circ$
• The target is in occupy zone	相手船が占有帯内に存在	$R_1 \sin \theta_1' \leq \text{occupy}$
• Pass each other	対航であるが要注意(占有帯内)	ただし CPA < Min CPA
• Estimated as safe by situation	対航で安全(占有帯外)	
• Meet situation	出会い状況	
• Over taking situation	追い越し状況	
• Over taken situation	追い越され状況	
• Cross situation	横切り状況	
(3) 操船方向決定		
• On/off original course	原針路がはずれているか	判断条件
• "	時間的余裕充分ありや	
• Right/left	右舷/左舷	TCPA < T か

名 称	内 容	備 考
(4) 左右転の優先順序 Statement 不要		
(5) 安全操船法判定 • List of safety maneuver method • Shift maneuver No. 1 No. 6 • New course maneuver No. 1 No. 6 • No safety maneuver • Command of safety maneuver	安全操船法リスト 巾よせ操船 新針路操船 安全操船法命令	
(6) 操船後における危険船判定 Statement 不要		次回の操船まで表示しておく
(7) 原針路復帰試行操船 • On/off original course • Return maneuver • List of safety return maneuver method Shift/new course maneuver each No. 1 No. 6 • Command of return maneuver	原針路復帰の要否 復帰させる操船 安全操船法リスト 巾よせ／新針路操船 復帰操船命令	

(3-3) タイムシーケンス

本システムのタイムシーケンスは次のように考える。

レーダデータプロセッサが複数の相手船のデータを更新するピッチを

Time of one scan = TSCA

とする。

計算機が演算を行ない、操船開始までの時間を

Calculation time = TCAL

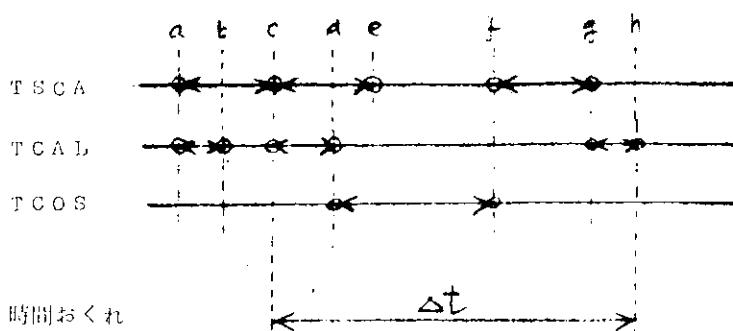
とする。

操船開始後整定するまでの時間を

Time on new course = TCOS

とする。

この場合これらの時間の間に次の関係がある。



TCAL(\overline{ab})により演算した結果、危険船なく、TSCA(\overline{ac})のピッチでデータが更新され、TCAL(\overline{cd})で演算した結果危険船ありで操船が開始された。TCOS(\overline{ef})で操船運動が整定した。

この間自船の運動で相手船の

データは規則的ではあるが乱れる。この間はレーダーデータプロセッサの性能にもよるが、一般に scanning は無意味と考えられる。time(f)にて自船の運動は整定し、他船の予想位置を基としてTSCA(\overline{fg})でデータが更新され、TCAL(\overline{gh})にて操船の真の効果が判定される。

以上の考察から次の問題が考えられる。

(a) 時間おくれ Δt と min |TCPA|

Δt は必要なものであり、その短縮は TSCA および TCAL 上の短縮以外にない。

$$\Delta t = (TCAL)_1 + TCOS + TSCA + (TCAL)_2$$

この Δt 時間に衝突危険船との距離は

$$\Delta R = \Delta t \cdot V_r$$

だけ減少する。したがって $\min |TCPA|$ は Δt の数倍以上大きいものでなければ操船中相手船に接近しすぎる。

$$\text{ゆえに } \min |TCPA| = n (\Delta t)$$

この n は衝突状況（出会い、横切り、追越し）および相対速度 V_r で異なるべきである。しかし衝突状況により n を変化することは論理回路上難点があるようと考えられる。

この n 値の決定法を求めるため、今ここで 1 つの試算を行なつて見る。

2 船が衝突角 180° 完全出会い状況で相対速度 30 ノット (15 m/sec) で接近しているとする。

$$TSCA = 180 \text{ sec}$$

$$(TCAL)_1 = 10 + 30 = 40 \text{ sec}$$

$$TCOS = 180 \text{ sec}$$

$$(TCAL)_2 = 10 \text{ sec}$$

とすれば

$$\Delta t = 180 \times 2 + 40 + 10 = 410 \text{ sec}$$

この間両船は

$$\Delta R = 15 \times 410 = 6150 \text{ m} \quad \text{約 } 3.5 \text{ 海里}$$

接近する。

避航動作をとる標準として右図のようなものがある。

今 8 海里で避航運動を行ない、

その結果まだ危険水域外にある

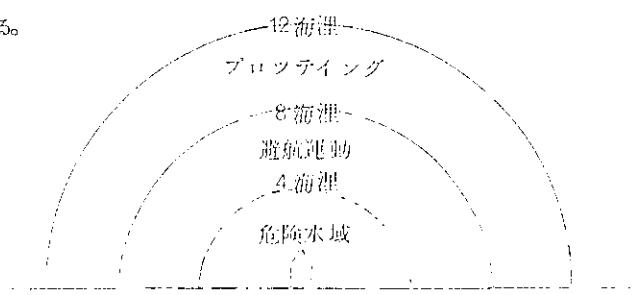
ためには

$$8 - 3.5 > 4$$

$$n = \frac{8}{3.5} = 2.4$$

$$\min |TCPA| = 2.4 \times 410 = 984 \div 1000 \text{ sec}$$

となる。



以上のこととを代数表現すれば次のとおり。ただし $V_{r,\Delta t}$ は最大値とする。

$$\text{避航動作開始距離} = 7500 + V_{r,\Delta t} > 15,000 \text{ m}$$

$$n = \frac{\text{避航動作開始距離}}{V_{r,\Delta t}}$$

$$\min |TCPA| = \frac{\text{避航動作開始距離}}{V_r}$$

したがつて避航動作開始距離が 15,000 m 以上の場合

$$\text{すなわち } V_{r,\Delta t} > 7,500 \text{ m}$$

$$\min |TCPA| = \frac{7,500}{V_r} + \Delta t$$

また避航動作開始距離はこれにそれ以前のプロットティング距離を含めてレーダの有効範囲により上限がある。すな

$$\text{わち } \text{レーダ有効距離} > \text{避航動作開始距離} + TSCA \cdot V_r$$

である。

以上の関係の 1 例を図 3.33～図 3.36 に示す。

図 3.33～図 3.36 の説明と結論

図 3.33 $\min |TCPA|$ と $TSCA$ の関係を示す。

時間おくれ Δt を $TCA_L = 25 \text{ sec}$, $TCO_S = 180 \text{ sec}$ とすれば

$$\Delta t = 25 + 180 + TSCA + 25 = 230 + TSCA \text{ となり}$$

前述の算式の通り、避航動作開始距離を求めた後 $\min |TCPA|$ を得る。一方、避航動作開始距離を避航運動区域 8 海里であることから、これに一定とした場合の $\min |TCPA|$ も両方示されている。

相対速度が小さく、 $TSCA$ が大きい程 $\min |TCPA|$ がかなり大きな値になる。

図 3.34 レーダ有効距離と $TSCA$ の関係を示す。本図も $\Delta t = 230 + TSCA$ とし前述レーダ有効距離の算式より求めたものである。なお避航動作開始距離を 8 海里一定とした場合のレーダ有効距離も計算されている。実線は少くとも避航動作開始距離 8 海里を満足している。

相対速度が大きくなるに従い、かつ $TSCA$ の間隔が増すにつれ有効距離を充分大きくもつレーダが必要となる。

図 3.35 $\min |TCPA|$ を一定としたレーダ有効距離と $TSCA$ の関係を示す。

$\min |TCPA| = 1000 \text{ sec}$ 一定とした避航動作開始距離を定め、そのレーダ有効距離を求めたものである。

$\min |TCPA|$ が同じであるような場合もレーダ有効距離は相対速度に比例する。よつて自船が高速船の場合、かなり性能の高いレーダが必要となる。

図 3.36 操船後の離間距離と $TSCA$ の関係を示す

時間おくれ $\Delta t = 230 + TSCA \cdot \min |TCPA| = 1000 \text{ sec}$ とし避航動作開始距離を求め、そして第 1 回操船後の 2 船間距離は（避航動作開始距離 - $V_r \cdot \Delta t$ ）で得られる。

$\min |TCPA|$ が同じであるような場合、相対速度が大きい程、第 1 回操船後の両船間距離は大きい。

(b) レーダデータプロセッサと操船運動との関係

操船中のレーダデータプロセッサは自船の運動で他船の相対位置が乱れる問題がある。

この場合次のような状況が考えられる。

- (i) レーダデータプロセッサの追従性が良好で操船運動程度のかんまんな運動には十分追従でき、データ更新時点での定常時と同程度の精度でデータを提供できる。（しかしこの場合でも $TSCA$ の Pitch 次第で、操船中にデータ更新しても意味はない。）
- (ii) 操船中レーダデータプロセッサは自船運動の外乱で正確なデータ採取困難
- (iii) 操船運動の整定期とデータプロセッサの $TSCA$ Pitch が一致する必要がある。

以上を勘案して次の 2 方式が考えられる。

第一案 レーダデータプロセッサのデータ更新 Pitch は中断可能とし、それは操船開始と同期とする。以後 TCOS を船速の関数とし、TCOS 経過後自動的にレーダプロセッサを起動する。

レーダデータプロセッサは操船開始時に自船の位置変更による他船の将来位置を予測したものに基づいて以後のデータ採取を行なう。

問題点

一般操船の取扱い、特に Check helm をどうするか。

、操船開始信号を何から pick up するか。

第二案 レーダデータプロセッサのデータ更新 pitch は中断することなく連続して作動する。この場合 TGAU + TCOS は TSCA の整数倍で一定とする。

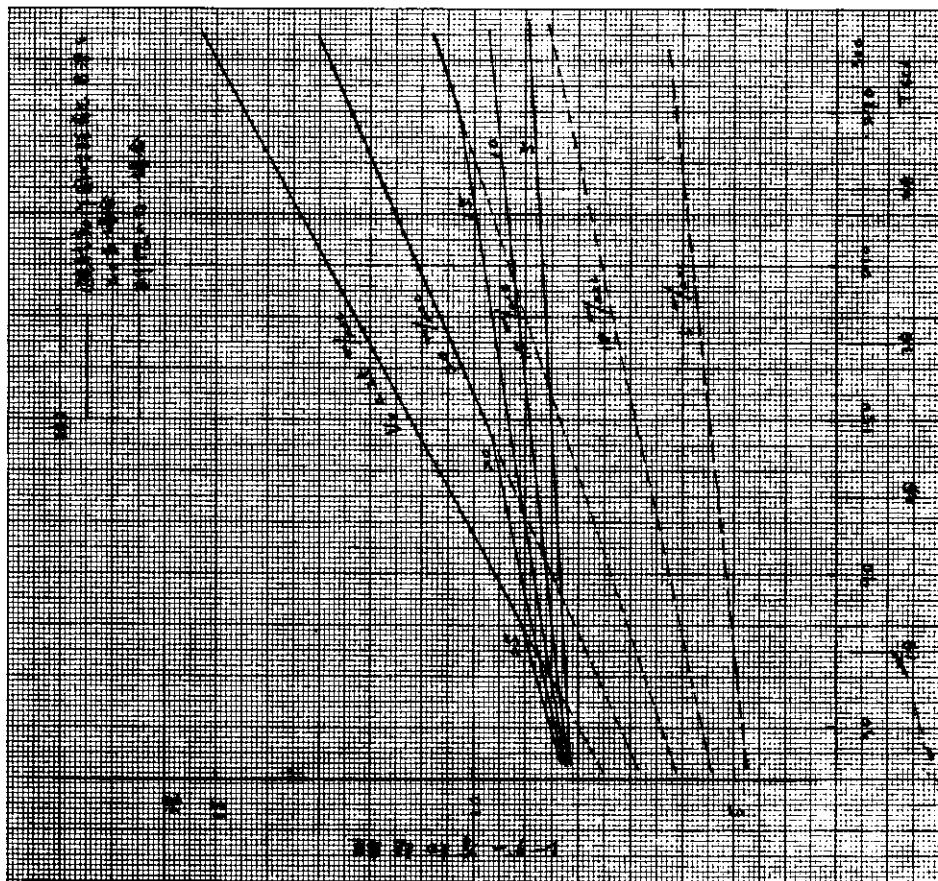


図 3.34 λ —TSCA

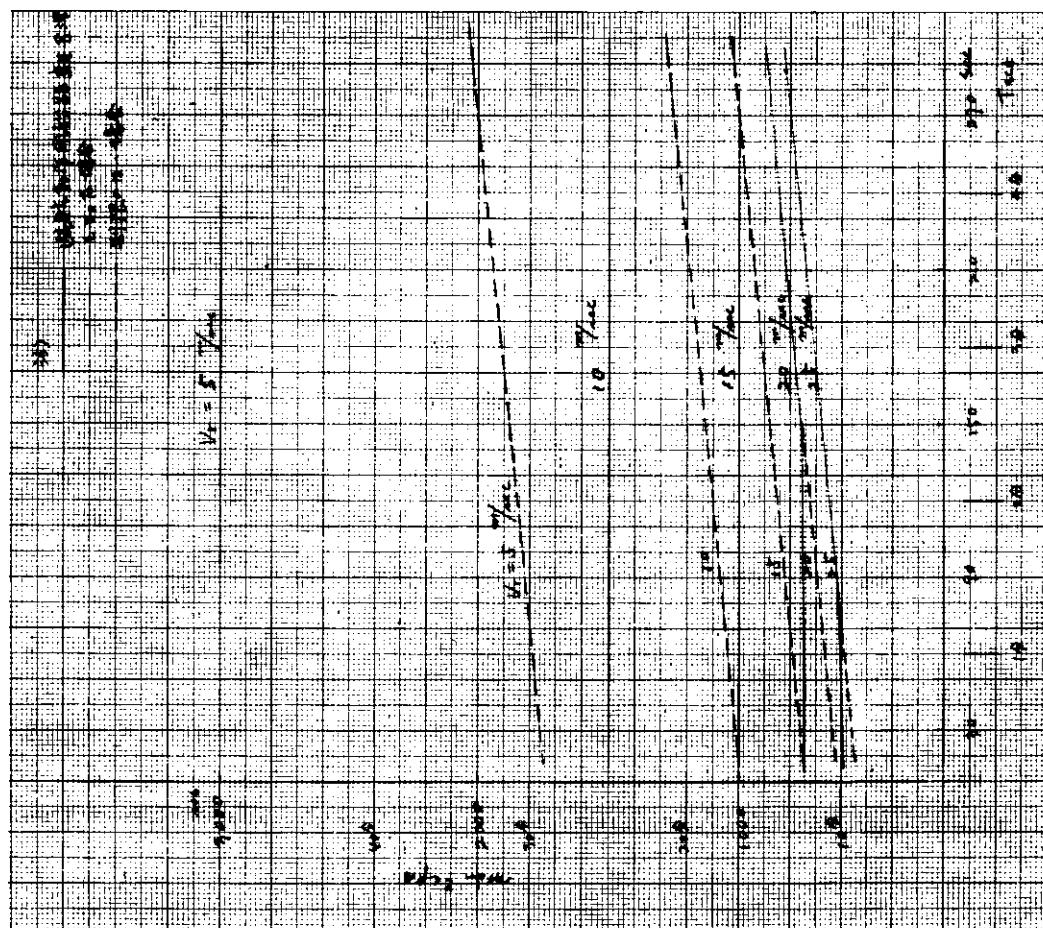


図 3.35 Min TCPA ~ TSCA

図 3.36 避航動作開始距離可変とした場合

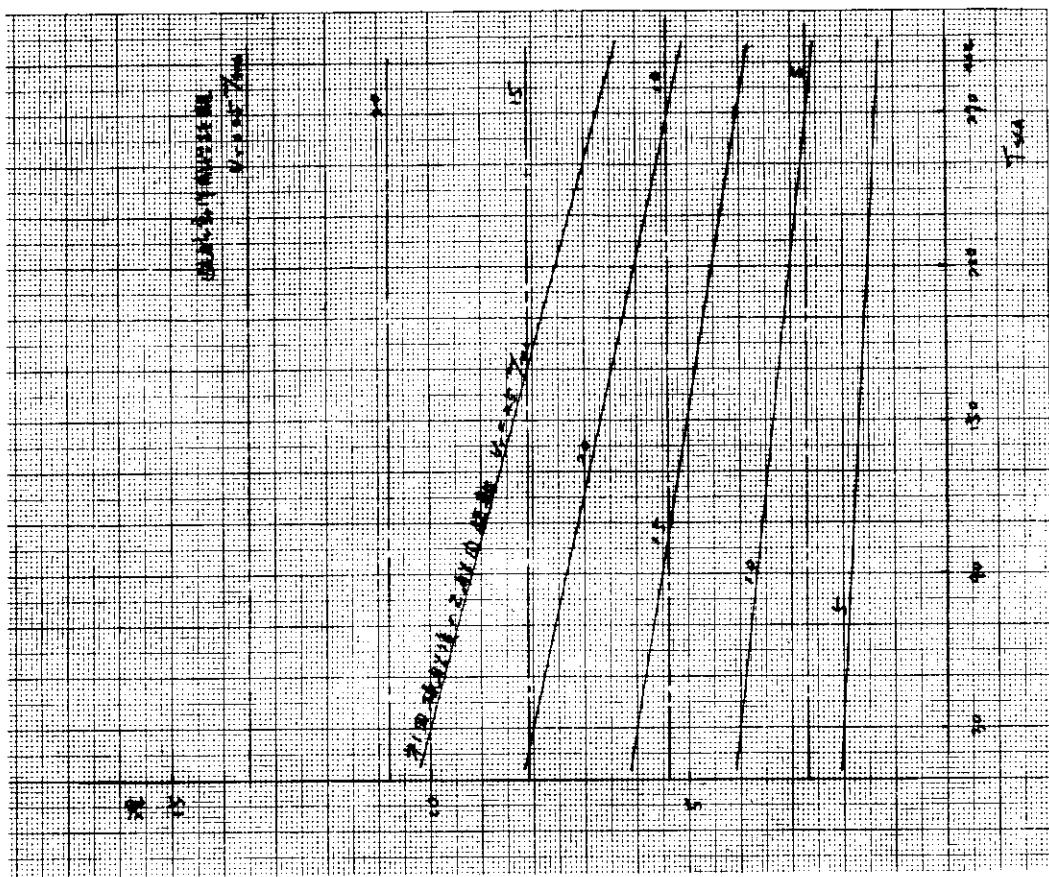
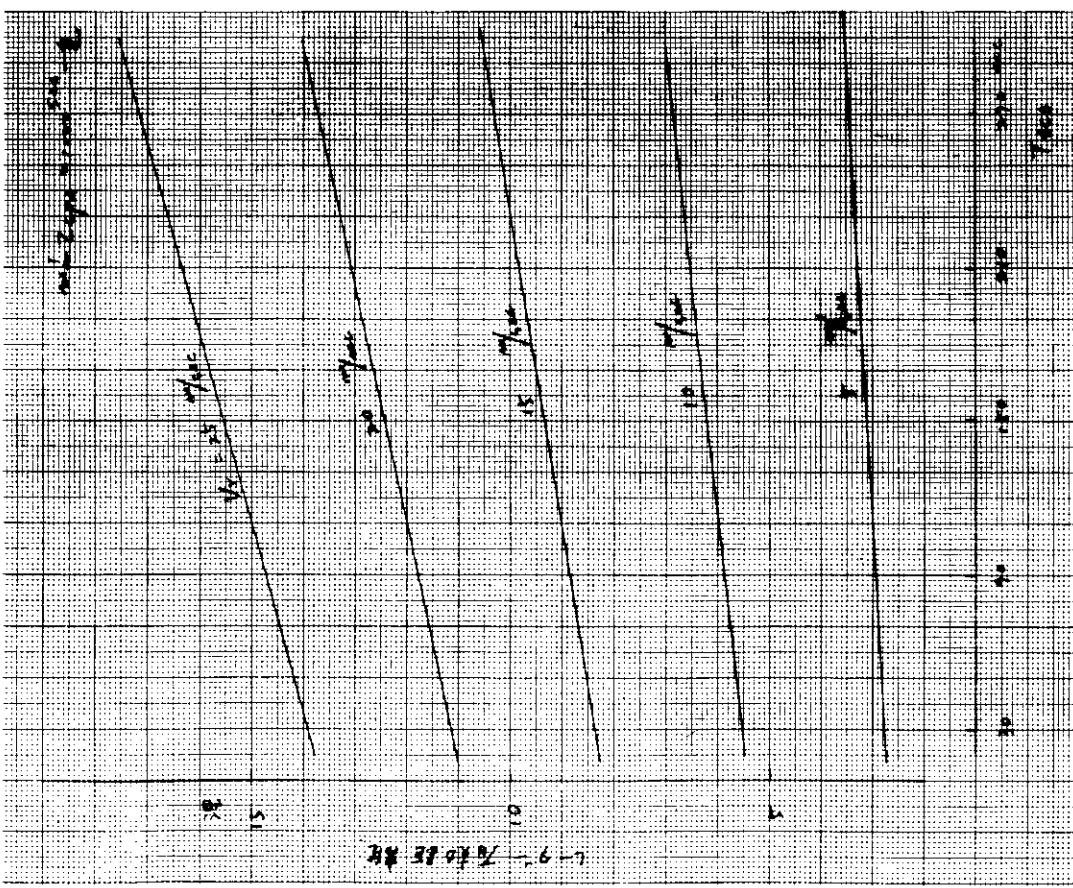


図 3.35



(4) 各論

以下本論理システムの各部について詳細に述べる。

(4-1) 危険船判定論理 Sub①

本部分はソフトウェアとしては Sub routine①と名付ける。

本論理のフローチャートを図3.37に示す。

本論理には入力データの差異により2種存在するがいずれも目的は同じものである。

(a) 二点の位置データによる場合

入力データ

T_0 , T_1	: 第1第2観測時刻
R_0 , R_1	: 上記時刻の自船と相手船の距離
θ_0 , θ_1	: 上記時刻のN方向から相手船の見通し角
θ_s , V_s	: 自船の針路角および速度
Min CPA	: 最接近安全距離
Min TCPA	: 最接近安全時間

出力データ

CPA	: 最接近距離
TCPA	: 最接近時間
$\Delta\theta$	: 第1.2観測時の見通し角の差
V_r	: 相対速力
ϕ_r	: ベクトルの方向
θ_c	: 衝突角
φ	: θ_0 と ϕ_r との狭角
ξ	: 最接近点の方向
γ	: 図3.38参照
V_b	: 相手船の速度
θ_b	: 相手船の針路角

その他Statementは図3.37参照

絶対角度はすべてN方向から測つたものである。

演算の原理は図3.38に示す衝突三角形(相対ベクトル図法)によつている。

計算の詳細は(c)(i)に示す。

(b) 一点の位置データと相対ベクトルによる場合

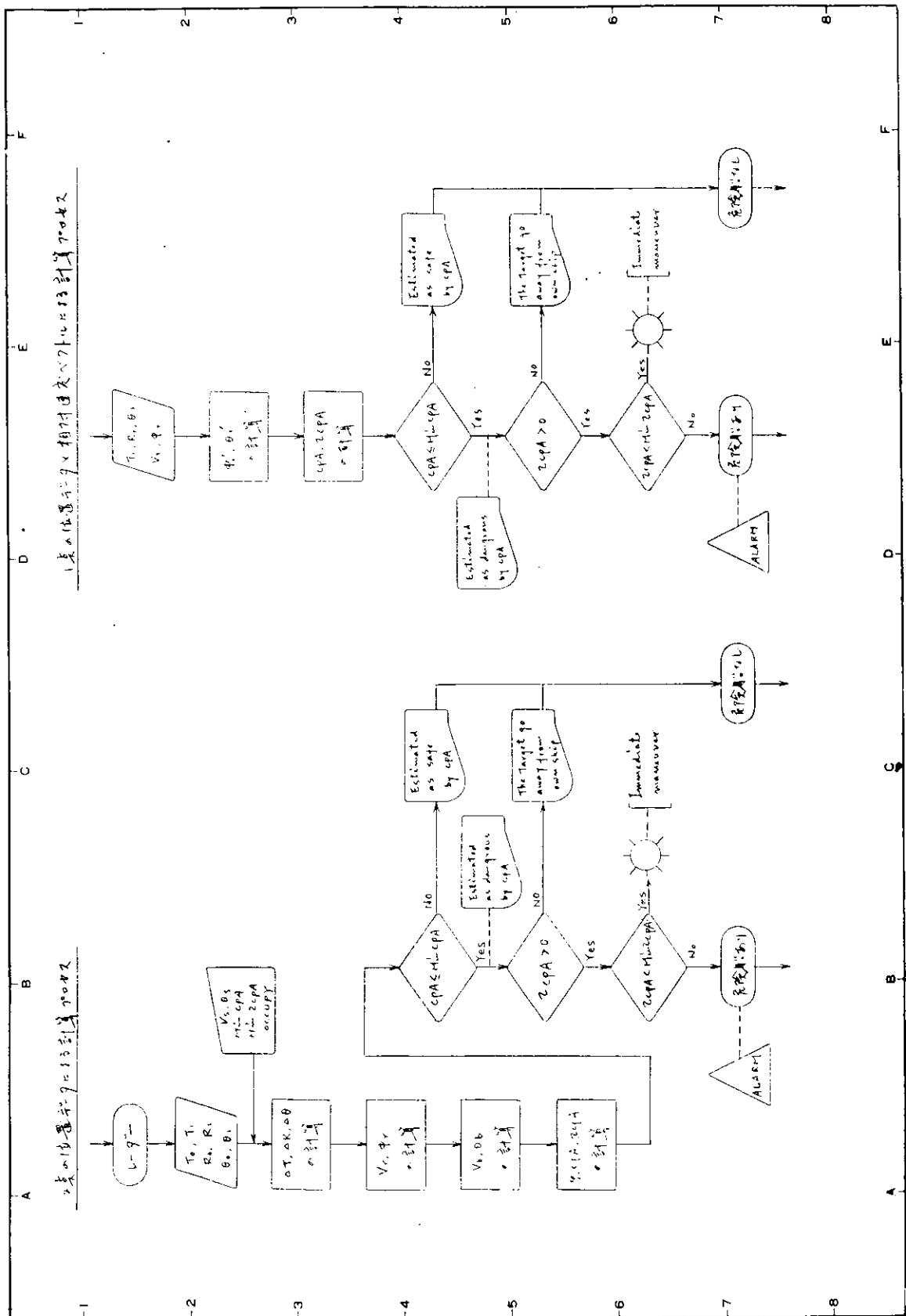
入力データ

T_1	: 観測時刻
R_1	: 上記時刻の自船と相手船の距離
θ_1	: N方向から見た相手船の見通し角
V_r	: 相対ベクトルの大きさ(相対速度)
ϕ_r	: 相対ベクトルの方向

出力データは(a)と同じ

計算法の詳細は(c)(ii)に示す。

ただし、(c)(i)～(ii)では θ_c , ξ , γ の計算は示さず実際に必要とする次節において示す。



(社) 日本造船研究協会
船舶の高度集中制御方式の研究

監理番号

題目 S.R.10.6 断突予防システム
プロセス

プロダクター
昭和 年 月 日

[図 3.57 危険判定論理フローチャート Sub (1)]

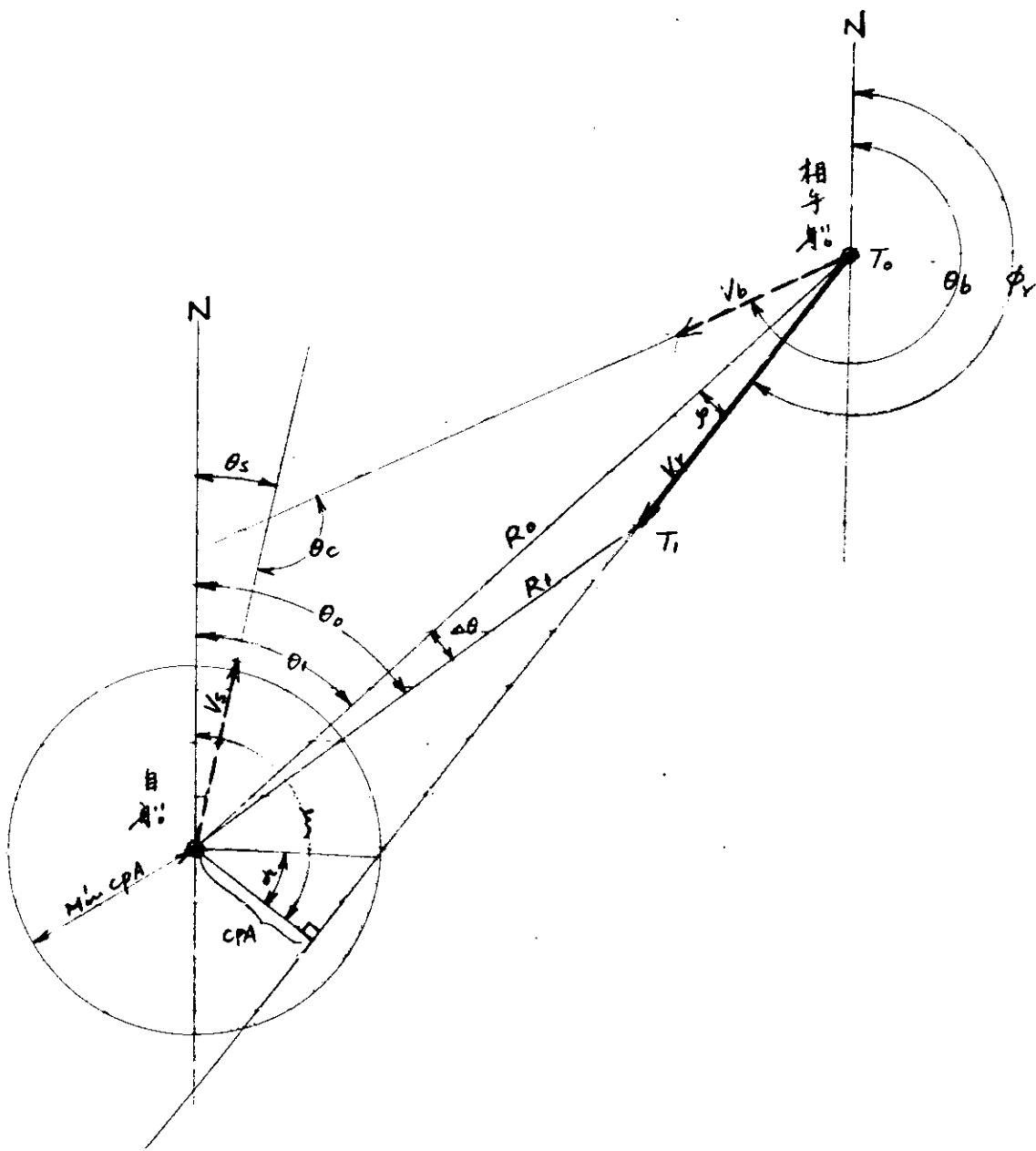


図 3.38 衝突三角形

(c) 衝突回避論理の計算式（危険船判定論理）

(i) 二点の位置データによる計算プロセス

$$\triangle\theta = |\theta_1 - \theta_0|$$

$$\triangle R = \sqrt{R_0^2 + R_1^2 - 2R_0 R_1 \cos \triangle\theta}$$

$$\triangle T = T_1 - T_0$$

$$V_r = \frac{\triangle R}{\triangle T}$$

$$\phi_r = m \cdot \pi + n \cdot \tan^{-1} \left| \frac{R_1 \sin \theta_1 - R_0 \sin \theta_0}{R_1 \cos \theta_1 - R_0 \cos \theta_0} \right|$$

ただし \tan^{-1} の中の $\frac{\text{分子}}{\text{分母}}$ の符号と m, n の関係

分子	$\begin{array}{l} (+) \\ (-) \end{array}$	$\begin{array}{l} (+) \\ (-) \end{array}$	$\begin{array}{l} (-) \\ (+) \end{array}$	$\begin{array}{l} (+) \\ 0 \end{array}$	$\begin{array}{l} (-) \\ 0 \end{array}$
分母	$\begin{array}{l} (+) \\ (-) \end{array}$	$\begin{array}{l} (-) \\ (+) \end{array}$	$\begin{array}{l} (-) \\ (+) \end{array}$	$\begin{array}{l} 0 \\ 0 \end{array}$	$\begin{array}{l} 0 \\ 0 \end{array}$

m	0	1	1	2	$\phi_r = \frac{\pi}{2}, \frac{3}{2}\pi$
n	1	-1	1	-1	

$$V_b = \sqrt{V_r^2 + V_s^2 + 2V_r \cdot V_s \cos(\phi_r - \theta_s)}$$

$$\theta_b = m \cdot \pi + n \cdot \tan^{-1} \left| \frac{V_r \sin \phi_r + V_s \sin \theta_s}{V_r \cos \phi_r + V_s \cos \theta_s} \right|$$

ただし、 \tan^{-1} の中の分子と分母の符号とm・nの関係は

$$\varphi = m \cdot \pi + n \cdot \tan^{-1} \left| \frac{R_1 \sin \Delta \theta}{R_0 - R_1 \cos \Delta \theta} \right|$$

ただし、 \tan^{-1} の中の分子と分母の符号とm・nの関係は ϕ_r と全く同様

$$\begin{array}{c} \text{分子} \\ \text{分母} \end{array} \quad \begin{array}{ccccc} (+) & (+) & (-) & (-) & (+) \\ (-) & (+) & (+) & (-) & 0 \end{array} \quad \begin{array}{c} 0 \\ 0 \end{array}$$

$$\begin{array}{ccccc} m & i & 0 & 0 & i \\ n & -1 & 1 & 1 & -1 \end{array} \quad \varphi = 90^\circ, 270^\circ$$

また $\Delta \theta = 0$ ($R_0 \geq R_1$)、 $\Delta \theta = \pi$

$$\varphi = 0^\circ$$

$$\Delta \theta = 0$$
 ($R_0 \leq R_1$)

$$\varphi = 180^\circ$$

$$CPA = R_1 \cdot \sin(\varphi + i \Delta \theta)$$

$$TCPA = \frac{R_1 \cos(\varphi + i \Delta \theta)}{V_r} \quad (\text{正は接近、負は離隔を示す})$$

ただし、 $R_1 \sin \Delta \theta$ と i の関係

$$R_1 \sin \Delta \theta > 0 \quad R_1 \sin \Delta \theta < 0$$

$$i = 1 \quad i = -1$$

$$\text{また、} \Delta \theta = 0, \pi \text{ の時} \quad CPA = 0$$

(II) 1点の位置データと相対ベクトルによる計算プロセス

$$\theta_{1'} = \theta_1 - \theta_s \quad (\theta_1 > \theta_s)$$

$$= \theta_1 - \theta_s + 2\pi \quad (\theta_1 < \theta_s)$$

$$\phi r' = \phi r - \theta_s \quad (\phi r > \theta_s)$$

$$= \phi r - \theta_s + 2\pi \quad (\phi r < \theta_s)$$

$$CPA := |R_1 \cdot \sin(\phi r' - \theta_{1'})|$$

$$TCPA = \frac{R_1 \cdot \cos(\pi + \phi r' - \theta_{1'})}{V_r}$$

(4-2) 衝突状況判定論理 (Sub (2))

前節は衝突危険船検出論理について述べたが、本節は次の段階として海上衝突予防法にもとづく衝突状況の早期判定について述べる。

海上衝突予防法はその性格上両船の接近距離が十分近く肉眼で相手船の姿勢等を確認できる時期から効力を発生するものと見られている。

したがつて本節で述べるものはそのような距離に到達するよりはるか前面にてそのまま運航すれば発生すると考えられる状況を予測するという性格をもつている。

本論理はソフトウエアとしては Subroutine ②と名付ける。

(a) 判断機構への入力、出力

入力 初期入力データ

$\sim\sim\sim$ T_0, T_1 : 第1、第2観測時刻

r_0, r_1 : 上記時刻の自船と相手船の距離

θ_0, θ_1 : $\sim\sim\sim$ の $\sim\sim\sim$ 方向から相手船の見通し角

θ_s, V_s : 自船の針路角および速度

Min CPA : 最接近安全距離

Min T CPA : " 時間

OCCUPY : 対行占有巾

危険船検出後のデータ

$\Delta\theta$: 第1、第2観測時の見通し角の差

VR : 相対速力

ϕ_r : " ベクトルの方向

θ_c : 衝突角

φ : θ_0 と ϕ_r との狭角

ξ : 最接近点の方向

γ : 右回参照

θ_b : 相手船の速度

V_b : " の針路角

出力 状況判断の種類

出会い状況(占有巾内、外)

追い越し状況(追い越され)

横切り状況(占有巾内、外)

また自船の義務判断には

保持義務船

避航義務船

(注) 角度は全て N 方向から測つたものである。ただし φ 、 γ に関してはそうでない。

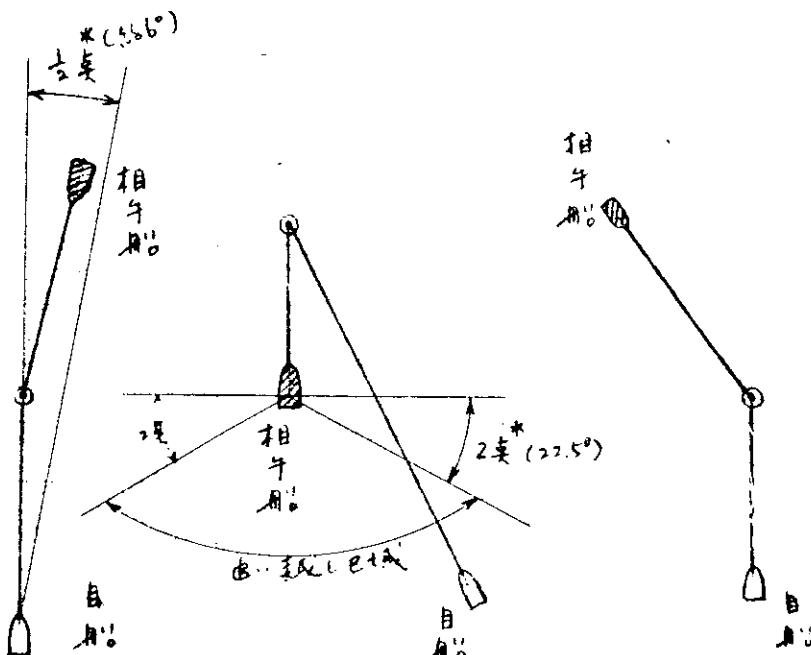
(b) 衝突予防法による両船の衝突状況

(i) 出会い状況(航法第18条)

二隻の船が真向かいまたはほとんど真向かいに接近する時衝突のおそれが生じる状況

(ii) 追い越し状況(航法第24条)

他船の正横後2点を越える後方の位置から追い越す時、衝突のおそれが生じる状況。



出会い状況

追い越し状況

横切り状況

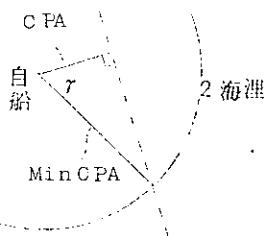


図3.39 衝突状況

* 航海術では 360° を 32 点と定義している。ここでは $\frac{1}{2}$ 点、2 点を各々約 6° 、 22.5° とする。

(c) 相対位置による判断

自船の位置を座標軸の原点にとり、しかも針路方向(北方向とは限らない)を縦軸とする。そして針路方向から右回りに 90° づつで定められた領域を第1, 2, 3, 4象限とし、相手船の位置を判別する。

どの象限が判定した後、前述の計算プロセスを経て得られた相手船の針路角や速力で両船の遭遇状況を判定する。現在は両船の間隔が十分あるが将来、両船がそのままの姿勢で進み、衝突予防法に適用される2海里に接近した場合の状況を予想するものである。なおかつ自船が保持ならびに避航義務船かは自船針路方向からの相手船の見通し角で判断できる。

象限については第1と第2、第3と第4は左右対称性をもつものでここでは第1および第4象限についてのみ検討する。第2, 3象限は第1, 4象限から容易に考察できる。

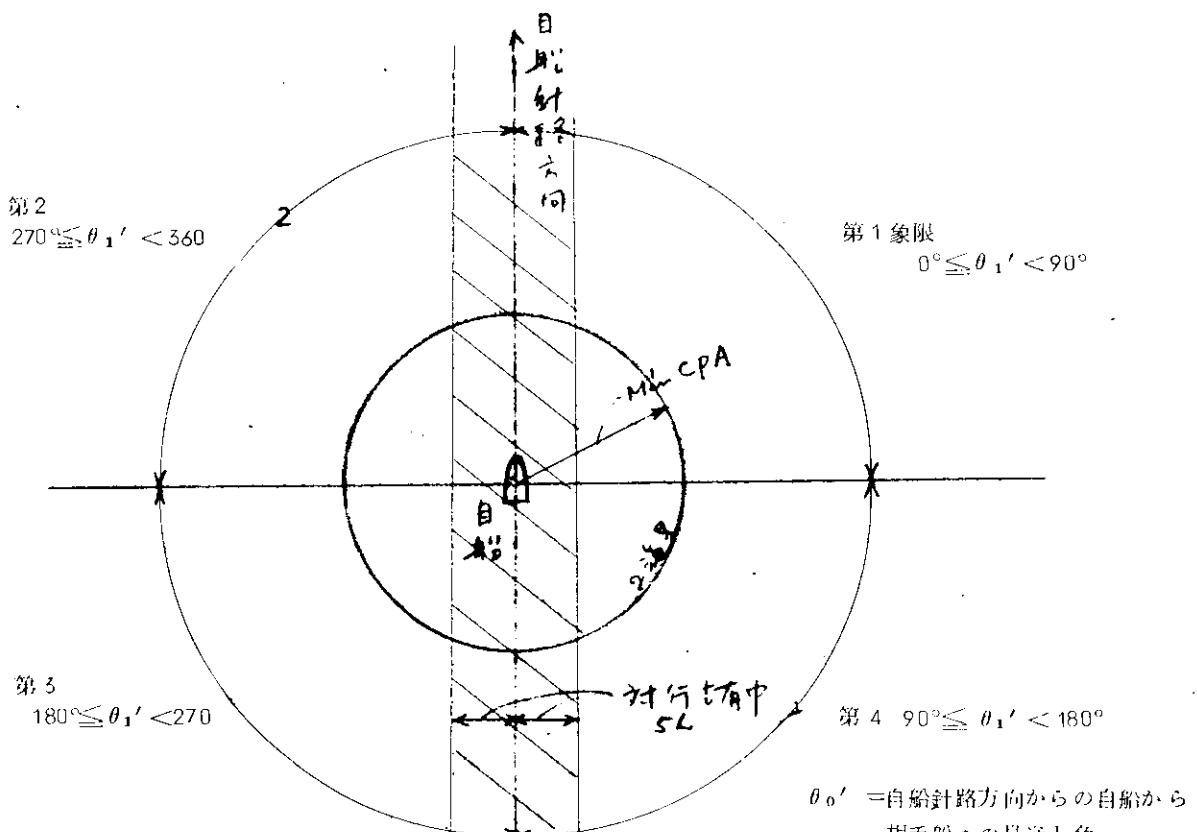


図 3.40

(i) 第1象限にある場合

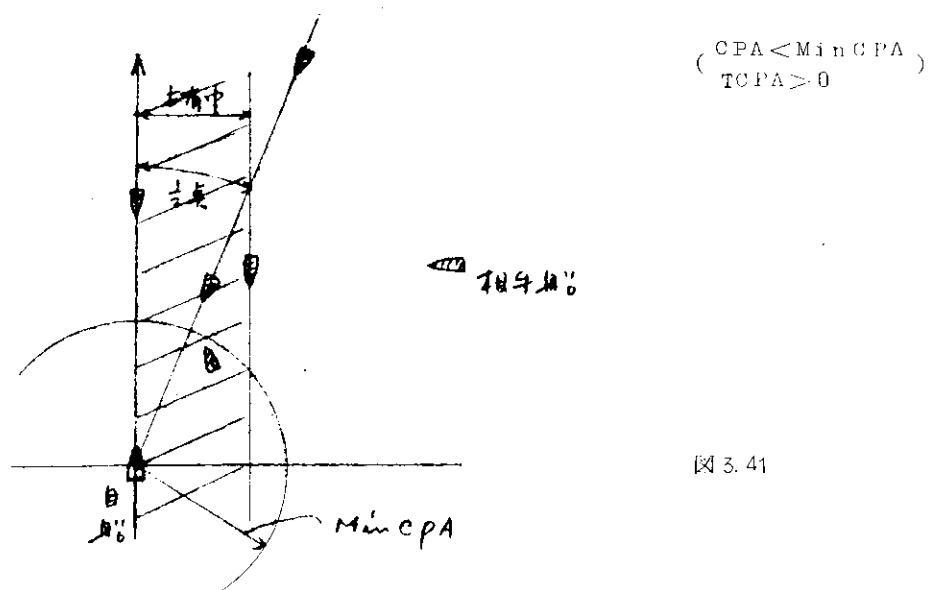


図 3.41

(イ) 相手船が対行占有巾内かどうか

判定基準 $0 \leq r_1 \sin \theta_1' \leq$ 対行占有巾

(ロ) 出会い状況

$\theta_{1'} \leq 6^\circ$ 且つ $180^\circ \leq \theta_{b'} \leq 186^\circ$

(ハ) 対行船(出会い以外)

占有巾内且つ $\theta_{1'} > 6^\circ$, $\theta_{b'} = 180^\circ$

(ニ) 追い越し状況 (図 3.42 参照)

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 \leq \theta_{b'} \leq 90^\circ \\ 270^\circ \leq \theta_{b'} \leq 360^\circ \end{array} \right.$$

$$\pi - |\xi'| - \gamma - \theta_c \geq 112.5^\circ$$

(ホ) 横切り状況

(イ)～(ニ)以外のすべて

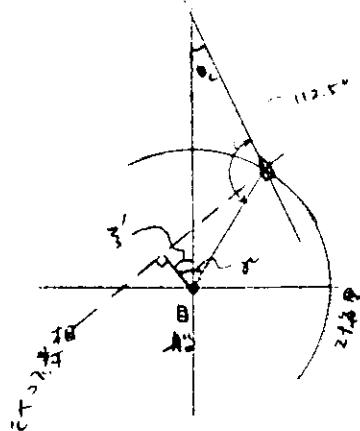


図 3.42

(イ) 第4象限にある場合 ($\frac{\text{CPA}}{\text{TCPA}} < \text{Min CPA}$)

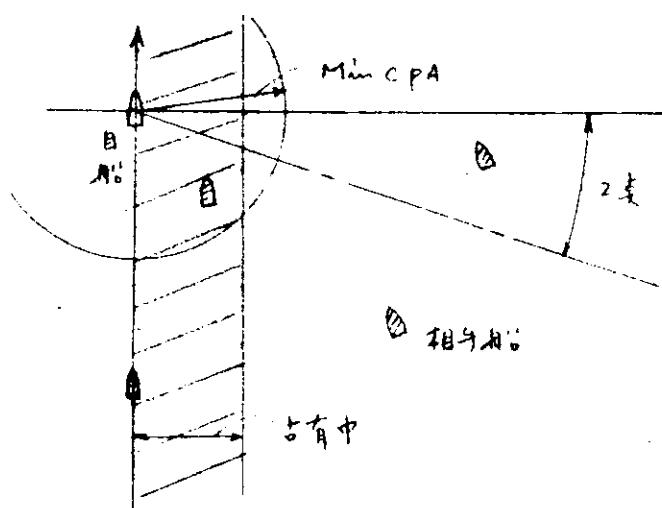


図 3.43

(イ) 相手船が対行占有巾内かどうか

判定基準 $0 \leq r_1 \sin \theta_1' \leq$ 対行占有巾

(ロ) 対 行 船

$\theta_{b'} = 0^\circ$ 且つ 対行占有巾内

(イ) 追い越され状況 (図3.44参照)

$$247.5^\circ \geq |\xi'| + \gamma \geq 112.5^\circ$$

(ロ) 横切り状況

上記(イ)、(ロ)で危険とされる以外のもの

ただし(甲)の判定で占有巾外は安全とする。

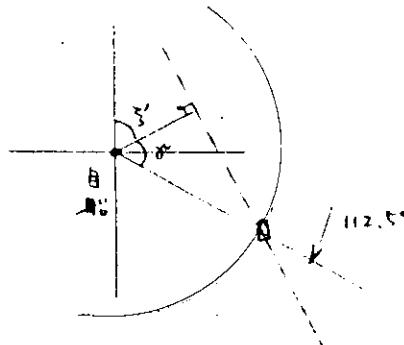


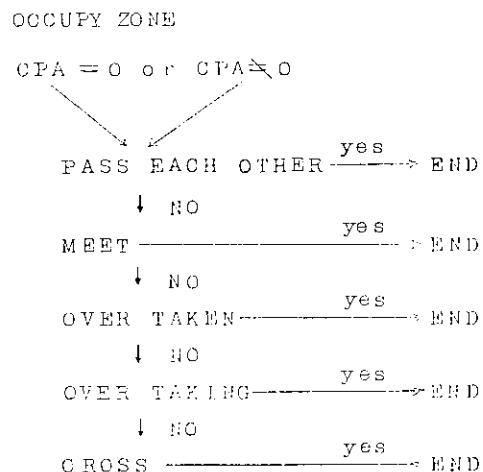
図3.44

(ア) フローチャート

本論理のフローチャートを図3.45に示す。

基本的な状況判断の判定順序は次のとおりとした。

象限



(エ) θ_c 、 γ および ξ' の計算式

$$\theta_c = |\theta_s - \theta_b|$$

ただし $|\theta_s - \theta_b| > 180^\circ$ の場合 $360^\circ - |\theta_s - \theta_b|$ とする

$$\gamma = \cos^{-1} \left(\frac{\text{CPA}}{\text{Min CPA}} \right)$$

(f) ξ' の計算法(代数的手法)

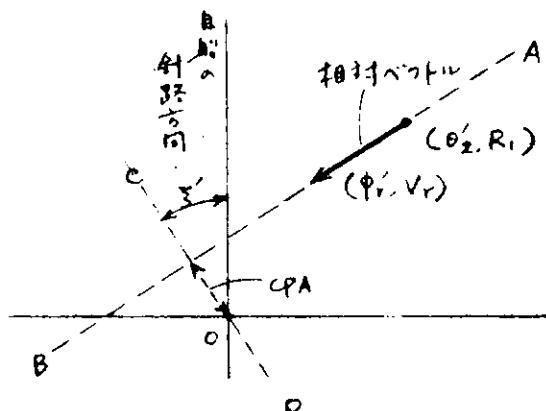


図 3. 46

直線 A B の y 軸交点の値: b

$$b = R_1 \cos \theta'_2 - a R_1 \sin \theta'_2$$

直線 C D の勾配

$$= -\frac{1}{a}$$

ただし

$b > 0$ の場合

$$a < 0 \quad \xi' = 90^\circ - \tan^{-1} \left(-\frac{1}{a} \right)$$

$$a > 0 \quad \xi' = -\left\{ 90^\circ + \tan^{-1} \left(-\frac{1}{a} \right) \right\}$$

$$a = 0 \quad \xi' = 0^\circ$$

$b < 0$ の場合

$$a < 0 \quad \xi' = -\left\{ 90^\circ + \tan^{-1} \left(-\frac{1}{a} \right) \right\}$$

$$a > 0 \quad \xi' = 90^\circ - \tan^{-1} \left(-\frac{1}{a} \right)$$

$$a = 0 \quad \xi' = 180^\circ$$

$b = 0$ の場合

CPA = 0 で別扱い

$\phi_{r'} = 0^\circ$ or 180° の場合

$a = \infty$ となる。

$$0^\circ < \theta'_2 < 180^\circ \quad \xi' = 90^\circ$$

$$180^\circ < \theta'_2 < 360^\circ \quad \xi' = -90^\circ$$

(4-3) 危険船の優先順序決定論理

基本構想で述べたごとくここでは複数隻の危険船の中から次の順序で優先度をつけて行く論理を示す。

TCPA の順序



離間距離の順序



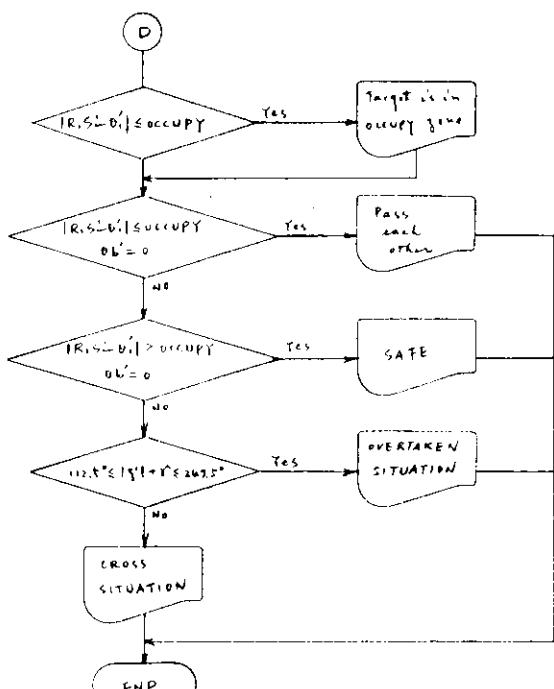
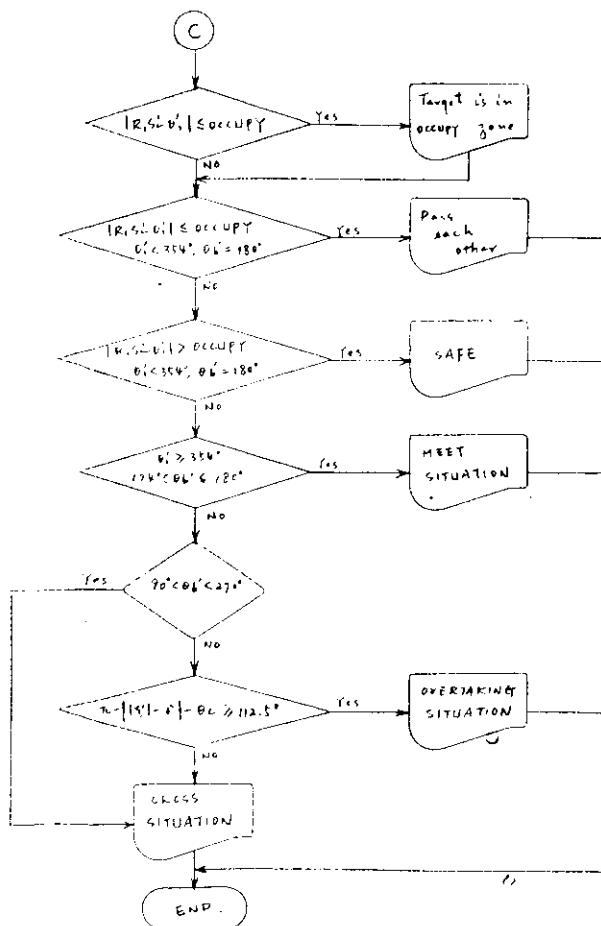
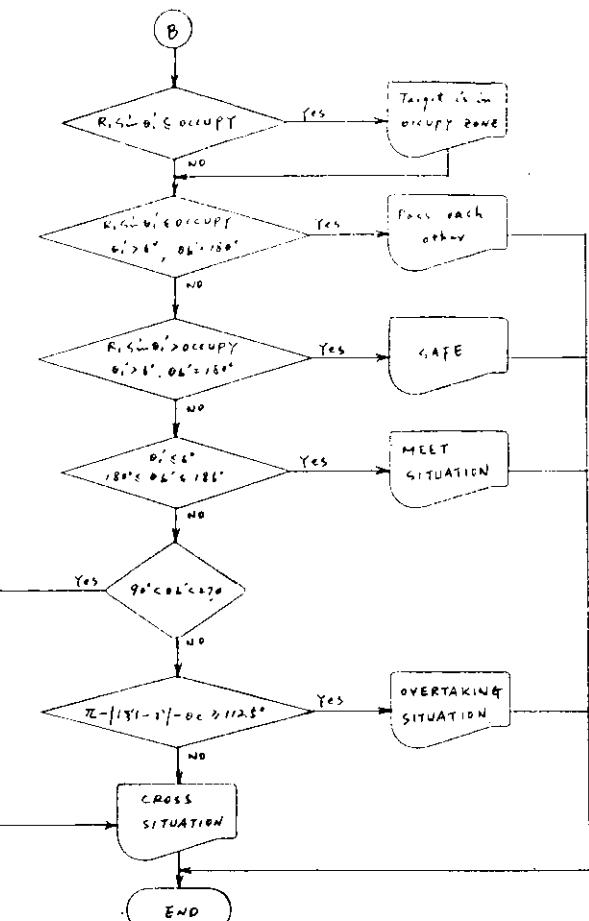
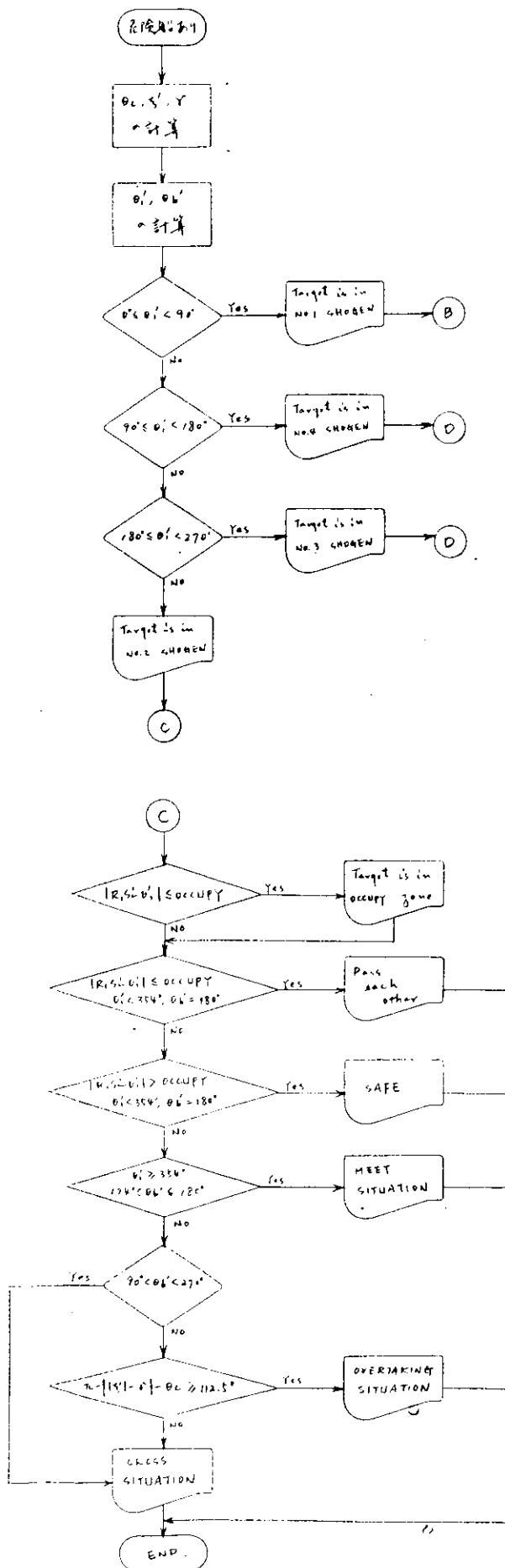
速力の順序

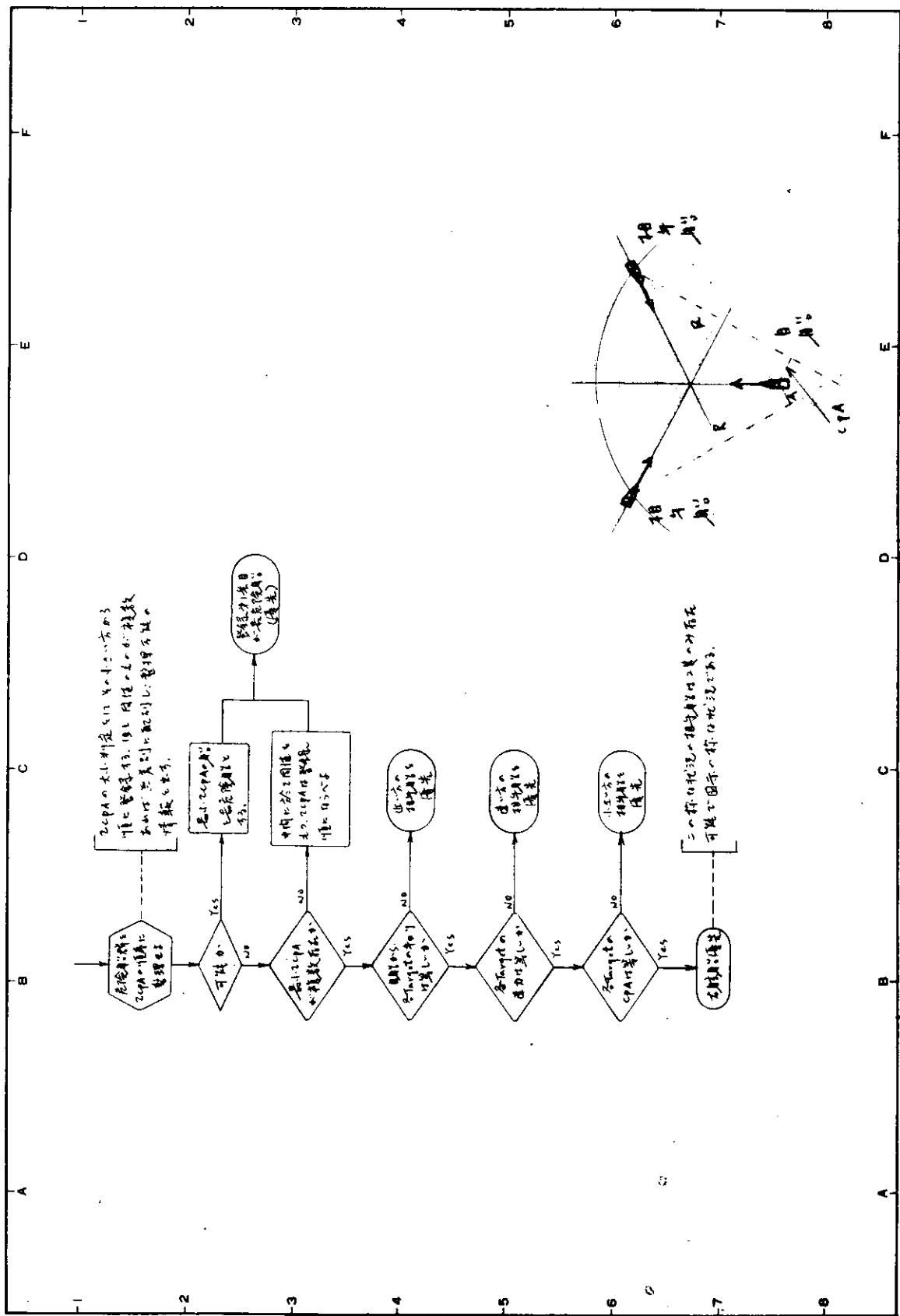


CPA の順序

この順序で仕分けて行くと最後に自船の針路を中心として左右対象の位置に相手船を見て順序のつけ難い場合が残る。その場合は右舷船を優先とした。

本論理のフローチャートを図 3.47 に示す。





（社）日本造船研究協会
整理番号
題目 S R 106 衝突予防システム分科会
危険船の優先順序判定論理 フローチャート
危険船の優先順序決定論理 (Sub ③)
プログラマー 昭和 年月日

(4-4) 安全操船法の抽出論理

基本方針で述べたごとく、本論では試行操船法で安全操船法を求める方式を採用した。

(a) 試行操船の問題点

試行操船とは衝突危険船がある場合、その相手船を自船の早期の操船によって回避するとともに、残りの9隻の船とも衝突の危険のないような操船法を計算機上で各種操船を試行することで求める操作をいう。

この試行操船の問題点は次のとおりである。

(i) 他船は操船を行なわないという前提条件が必要。

これは最大の欠点である。

(ii) 試行を行なう操船法の選択

2つの方法が考えられる。

(A) 衝突危険船の位置と CPA の方位による操船法の選定。

これは危険船の回避という目的には合理性がある。

(B) 一定数の試行操船法を準備し、一定の順序でその効果を確認していく。

(iii) 試行操船効果の評価

- Min CPA, Min TCPA による一定の衝突危険判定規準に従う。
- 衝突危険船以外の他船に対しては判定規準を離間距離に従いあまくする。
- 最初に見つけた安全な操船法を採用する。
- 全試行を行ない、操船のめんどうさと危険性の程度を一定の評価関数で比較して操船法を決定する。

(iv) 試行操船の形式と船体運動の推定

(A) 試行操船の形式を限定する。

(a) 外部入力として任意の試行操船指定可能とすべきか

(b) 試行操船による船体運動をあらかじめ store しておく方式

(c) 試行操船による船体運動を直接運動方程式を解いて求める方式

(B) 試行操船の方法

(a) 試行操船の問題点を種々指摘したが、本論では最終的に次のような結論を採用した。

(i) 試行操船は針路変更（新針路操船）のみとする。

これは対象が大洋航行中であり、緊急の場合以外は速力の変化は操船上好ましくないこと。および船を用いて操船する限り、すべて新針路操船の連続で実行可能であるからである。

(ii) 新針路操船は左右舷の針路角について、あらかじめ定めた有限個の針路角を準備し、これに対して発令から近似整定までの船の運動を (a) で示すようにあらかじめ実験と計算により準備しておく。

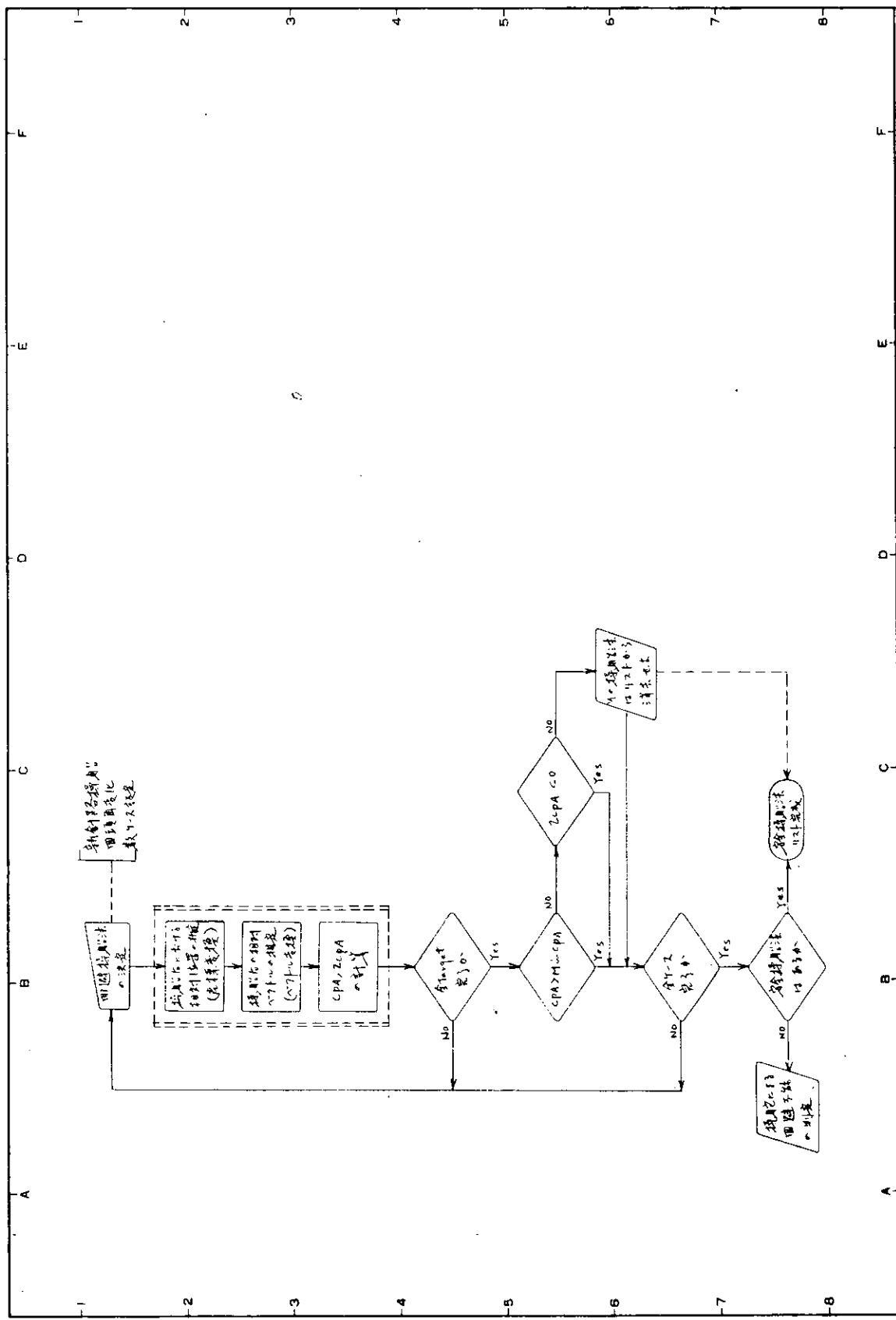
そして船の運動は吃水とトリム等で可変としておく。

(iii) 試行操船結果の評価は対象とする全危険船（10隻以下）に対して $CPA > \text{Min CPA}$ または $TCPA < 0$ とする航法を安全とし、あらかじめ作成しておいた操船法リストから危険操船を除外し、安全操船法リストを作製するものとする。

ただし以下の理論的取扱いでは単よせ、变速もあわせ検討している。

本論理はソフトウェアとして Subroutine④ と Subroutine⑤ より成り、Sub④ は (4-9) において示す。

Sub④ のフローチャートを図 3-48 に示す。



(社) 日本造船研究協会
船舶の高度集中制御方式の研究
題目 安全操作法の抽出
整理番号
所和 年 月 日
図3.48 安全操作法の抽出 (Sub ④)

(c) 操船後の相対関係の推定

入力データで危険船検出を行ない、その結果両船間に衝突の恐れがある場合、適当な回避操船をとらなければならない。回避操船には次の 6 つおりが考えられる。

操 船 法	Vector 変 化
巾よせ操船	無
巾よせ変速操船	有（速力変化）
新針路操船	有（針路変化）
新針路変速操船	有（速力、針路変化）
変速操船	有（速力変化）
停止	有（〃）

これら回避操船の数学的な理論は次の 3 つおりに表現され、各々の操船法の理論は表 3.7 のごとくである。

回避操船後の状況変化と理論

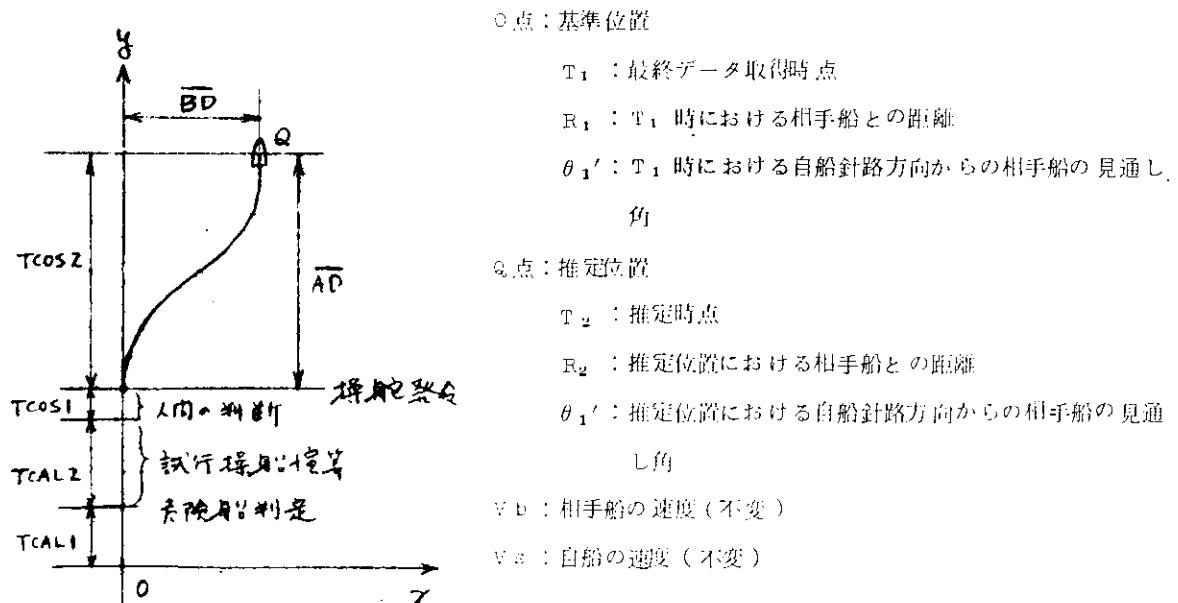
- (i) 座標変換
- (ii) 針路変換
- (iii) 相対ベクトル変換

表 3.7 操船法と理論の関係

操 船	巾よせ	変速巾よせ	新針路	変速新針路	変 速	停 止	理 論 式
座標変換	○	○	○	○	○	○	共通
針路変換	×	×	○	○	×	×	共通
相対ベクトル変換	×	○	○	○	○	○	共通

(d) 座標変換

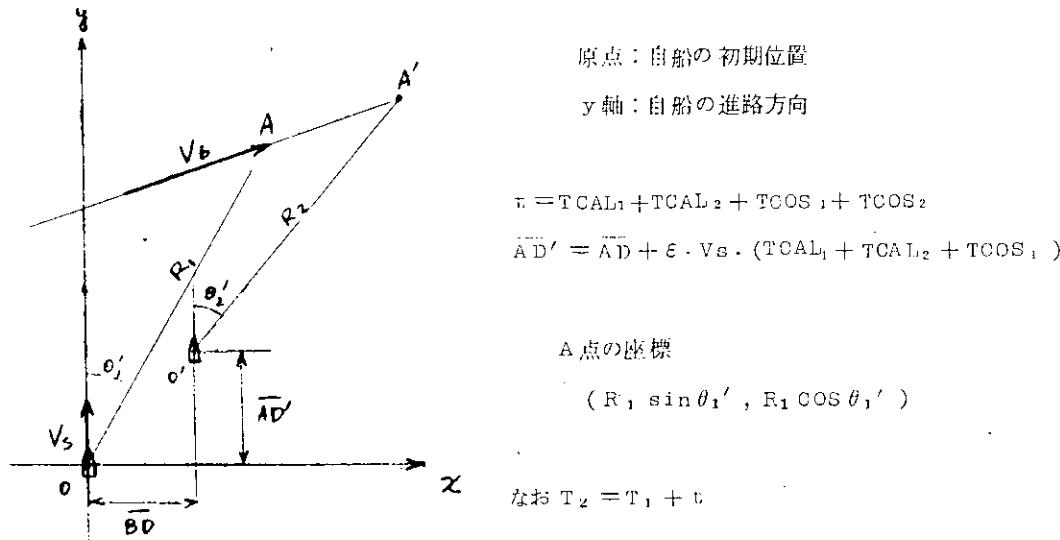
(i) 操舵要領(例：巾よせ操船)



操舵発令後 $T \cos_2$ (sec) にて自船進路方向に直角に左(右)または右舷(左)へ \overline{BD} (m), 本船進路方向に平行に前方へ \overline{AD} (m) 変位、整定し以後原針路を保つ。

ただし最終データ取得時刻と操舵発令までの間の時間差は $(TCAL_1 + TCAL_2 + T \cos_1)$ (sec) であるとする。

(ii) 論理の検討



ϵ : 操舵中の平均速力係数

$A \rightarrow A'$ すなわち $O \rightarrow O'$ に要する時間は t sec である。

A' 点の座標 $(R_1 \sin \theta_1' + V_b \cdot t \cdot \cos \alpha, R_1 \cos \theta_1' + V_b \cdot t \cdot \sin \alpha)$

O' 点 $\approx (\overline{BD}, \overline{AD}')$

したがつて

$$\overline{O'A'}x = (R_1 \sin \theta_1' + V_b \cdot t \cdot \cos \alpha) - \overline{BD}$$

$$\overline{O'A'}y = (R_1 \cos \theta_1' + V_b \cdot t \cdot \sin \alpha) - \overline{AD} \quad (\alpha \text{について後述})$$

ゆえに T_2 時における相手船との距離は

$$\begin{aligned} R_2 &= \sqrt{(\overline{O'A'}x)^2 + (\overline{O'A'}y)^2} \quad (R_2 \geq 0 \text{ で考える}) \\ &= R_1^2 + V_b^2 \cdot t^2 + \overline{BD}^2 + \overline{AD}'^2 + 2R_1 \cdot V_b \cdot t \sin(\theta_1' + \alpha) \\ &\quad - 2\overline{BD}(R_1 \sin \theta_1' + V_b \cdot t \cos \alpha) - 2\overline{AD}'(R_1 \cos \theta_1' + V_b \cdot t \sin \alpha) \end{aligned}$$

また T_2 時における自船針路方向からの相手船の見通し角は

$$\theta_2' = n\pi + \tan^{-1} \frac{\overline{O'A'}x}{\overline{O'A'}y}$$

ただし \tan^{-1} の中の $\frac{\text{分子}}{\text{分母}}$ と n の関係

分子	$\frac{+}{+}$	$\frac{+}{-}$	$\frac{-}{+}$	$\frac{-}{-}$
分母	$\frac{+}{+}$	$\frac{-}{-}$	$\frac{+}{-}$	$\frac{-}{+}$

$$n \quad 0 \quad 1 \quad 2 \quad 1$$

なお $\overline{O'A'}y = 0$ のとき

$$\overline{O'A'}x > 0 \rightarrow \theta_2' = \frac{\pi}{2}$$

$$\overline{O'A'}x < 0 \rightarrow \theta_2' = \frac{3}{2}\pi$$

$$\overline{O'A'}x = 0 \rightarrow \text{衝突}$$

aの計算

$\theta_{b'}$: 自船の針路方向から測った相手船速度ベクトルの向きのなす角

$$0 \leq \theta_{b'} < \pi$$

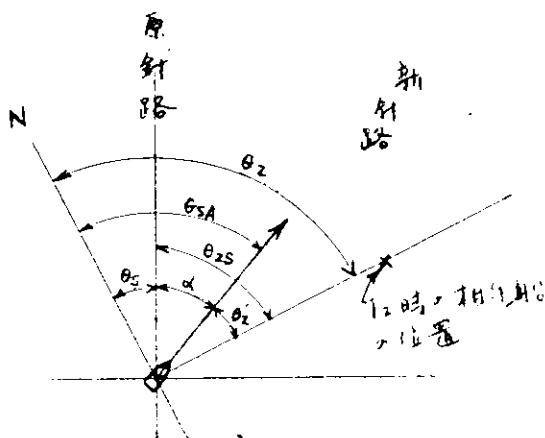
$$a = \frac{\pi}{2} - \theta_{b'}$$

$$\pi \leq \theta_{b'} < 2\pi$$

$$a = \frac{3}{2}\pi - \theta_{b'}$$

(e) 針路変換(新針路操船)

(i) T_2 時における各種角度の関係



変数の定義

θ_2 : Nからの相手船への見通し角

θ_{SA} : Nからの自船新針路角

θ_{2s} : Nからの自船の原針路からの相手船への見通し角

θ_s : Nからの自船針路角(原針路)

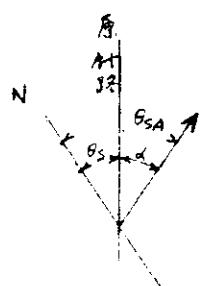
α : 最終回頭角

θ'_2 : 新針路からの相手船への見通し角

ここで最終回頭角 α に正負をもたせる。すなわち右転 $+ \alpha$ 、左転 $- \alpha$ 。

また θ_{2s} は前節の θ'_1 に相当するものである。

(ii) $\theta_{SA} \sim \theta_s, \alpha$ の関係



$$\theta_{SA} = \theta_s + \alpha$$

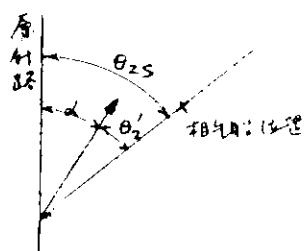
ただし、 $\alpha > 0, (\theta_s + \alpha) > 2\pi$ の時

$$\theta_{SA} = \theta_s + \alpha - 2\pi$$

$\alpha < 0, \theta_s < \alpha$ の時

$$\theta_{SA} = \theta_s + \alpha + 2\pi$$

(iii) $\theta'_2 \sim \theta_{2s}, \alpha$ の関係



$$\theta'_2 = \theta_{2s} - \alpha$$

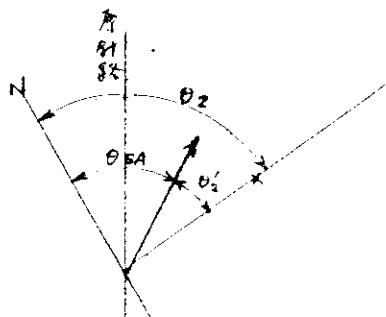
ただし、 $\alpha > 0, \theta_{2s} < \alpha$ の時

$$\theta'_2 = \theta_{2s} - \alpha + 2\pi$$

$\alpha < 0, (2\pi - \alpha) < \theta_{2s}$ の時

$$\theta'_2 = \theta_{2s} - \alpha - 2\pi$$

(iv) $\theta_2 \sim \theta_{SA}, \theta'_2$ の関係



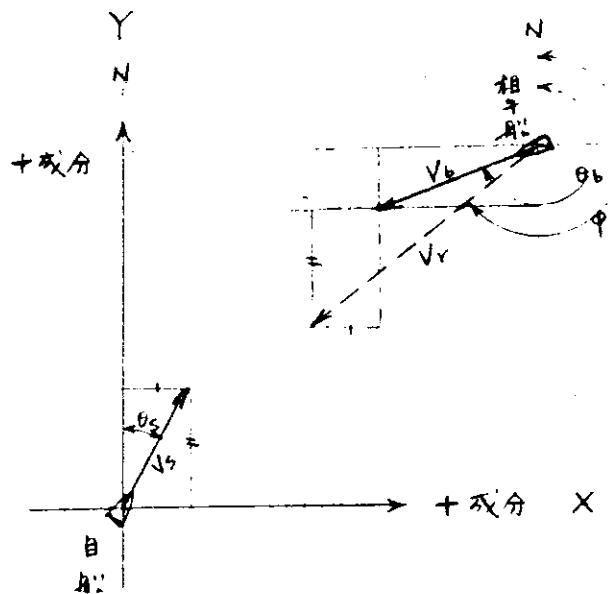
$$\theta_2 = \theta_{SA} + \theta'_2$$

ただし、 $(\theta_{SA} + \theta'_2) > 2\pi$ の時

$$\theta_2 = \theta_{SA} + \theta'_2 - 2\pi$$

(f) 相対ベクトル変換

回避操船前に危険船判定論理においてすでに V_b, θ_b を算出済である。今衝突の恐れがあつて回避操船を行なう（試行演算）のであるが、 V_b, θ_b を不変と見なせば相対速度 V_r とその方位 ϕ_r は次式で求められる。



(g) INPUT & OUTPUT

(i) 操船後の状態の推定計算プロセス

$$① T_2 = T_1 + t$$

$$② R_2 = \sqrt{(\bar{O}'A'x)^2 + (\bar{O}'A'y)^2}$$

$$③ \theta'_2 = n\pi + \tan^{-1} \frac{\bar{O}'A'x}{\bar{O}'A'y}$$

$$④ VrA = \sqrt{A^2 + B^2}$$

$$⑤ \phi_{rA} = m\pi + n \cdot \tan^{-1} \frac{|A|}{|B|}$$

$$⑥ CPA = R_2 \cdot \cos \beta \quad (\text{後述})$$

$$⑦ TCPA = \frac{R_2 \cdot \sin \beta}{Vr} \quad (\text{後述})$$

$$⑧ \xi' = (\text{後述})$$

$$⑨ \theta_c = |\theta_s - \theta_b|$$

$$⑩ \gamma = \cos^{-1} \left(\frac{CPA}{\min CPA} \right)$$

(ii) Input Data

T_1, R_1, θ_1

$\min CPA$

V_s, θ_s

$\min TCPA$

V_b, θ_b

OCCUPY

TCAL₁, TCAL₂, TCOS₁, TCOS₂

AD, BD, α

(iii) Out Put

T_2, R_2, θ'_2

VrA, ϕ_{rA}

CPA, TCPA

θ_c

γ, ξ' (後述)

$$X \text{成分: } A = V_b \cdot \sin \theta_b - V_s \cdot \sin \theta_s$$

$$Y \text{成分: } B = V_b \cdot \cos \theta_b - V_s \cdot \cos \theta_s$$

・操船後の相対速度

$$VrA = \sqrt{A^2 + B^2}$$

・操船後の相対速度ベクトルの方位

$$\phi_{rA} = m\pi + n \cdot \tan^{-1} \frac{|A|}{|B|}$$

ただし \tan^{-1} の中の分子と分母と m, n の関係

$$\begin{array}{c} \text{分子} \\ \text{分母} \end{array} \begin{array}{ccccc} (+) & (+) & (-) & (-) \\ (+) & (-) & (-) & (+) \end{array}$$

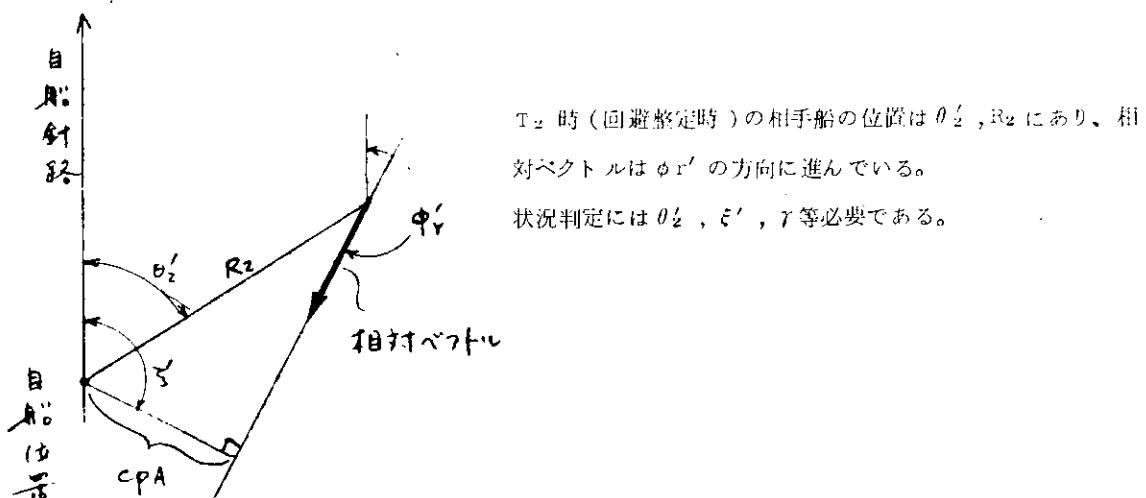
$$m \quad 0 \quad 1 \quad 1 \quad 2$$

$$n \quad 1 \quad -1 \quad 1 \quad -1$$

(h) 操船後の状況判断

前回までの衝突危険の判定は2点のDataより推定してきた。しかし今回1点の相対位置Dataと相対ベクトルより判定することとなる。

(i) 1点の相対位置と相対ベクトル



(ii) CPAとTCPAの計算式

$$CPA = |R_2 \cdot \sin(\phi r' - \theta_2')|$$

$$TCPA = \frac{R_2 \cdot \cos(\pi + \phi r' - \theta_2')}{v_r}$$

(i) 既製論理との結合

一般にT₁時にて取得したデータをもとに危険船を判定し、それら危険船との衝突を回避すべく操船を行なうのであるが、回避操船したことにより、先に非危険船であつたものが時には危険船となり得る可能性があるので、回避操船試行演算資料の中に非危険船のデータもStoreする必要がある。

(4-5) 操船方向判定論理

(4-5)によつて危険船(複数)の中から最危険船が求められ、(4-4)によつて安全操船法リストが作製された。

本論理では以上の情報と(4-2)の衝突状況判定の結果を用いて最危険船に対して右転すべきか左転すべきかを主に求めるのである。

その基本原理は基本方針でも述べたが以下のとおりである。

- (i) 出合い状況に対しては衝突予防法の規定に準拠した操船方向を選択
- (ii) 横切り状況に対しては可能な限り相手船の船尾を通過する操船方向とする。
- (iii) 上記いずれにても処置不能なものは常識的な回避操船すなわち相手船から遠ざかる方向を選択する。

本論理はソフトウェアとしてはSubroutineと名付けフローチャートは図3.49に示す。

(4-6) 回避操船後の船尾通過判定論理

本論理は(4-3)で求めた最危険船に対するものである。

判断過程は次のとおりである。

- (i) 自船よりみた最危険船の位置(右舷または左舷)
- (ii) その見通し線よりMin CPAの方位(右、左)

以上により回避操船後において最危険船の船通過可能か否かを判定するものである。

これは安全操船法の中で船通過可能な操船法があればそれを採用するということで予防法のPrincipleに準拠している。

本論理の数学的証明は後述のごとくであり、ソフトウェアとしては Subroutine (5)-1 と名付けフローチャートは図 3.50 に示す。

(a) 船尾通過の判定論理の証明

相手船の針路

$$y_b = R \cos \theta = \text{const}$$

$$x_b = R \sin \theta + V_b t$$

自船の針路

$$\left\{ \begin{array}{l} y_s = V_s (\cos \theta_s) t \\ x_s = V_s (\sin \theta_s) t \end{array} \right.$$

$$y_s = (\cot \theta_s) x_s$$

針路上の交点

$$y_s = R \cos \theta = (\cot \theta_s) x_s$$

$$\therefore x_s = R \cos \theta \tan \theta_s$$

自船が相手船の針路を切る時刻 t

$$y_s = y_b = R \cos \theta = V_s (\cos \theta_s) t$$

$$t = \frac{R}{V_s} \frac{\cos \theta}{\cos \theta_s}$$

その時刻での自船の x 軸方向の位置 \bar{x}_s および相手船の同様のもの \bar{x}_b

$$\bar{x}_s = V_s (\sin \theta_s) \frac{R}{V_s} \frac{\cos \theta}{\cos \theta_s} = R \cos \theta \tan \theta_s$$

$$\bar{x}_b = R \sin \theta + V_b \cdot \frac{R}{V_s} \frac{\cos \theta}{\cos \theta_s}$$

$$H = \bar{x}_b - \bar{x}_s = R \sin \theta + \frac{V_b}{V_s} \cdot R \frac{\cos \theta}{\cos \theta_s} - R \cos \theta \tan \theta_s$$

$$\frac{H}{R} = \cos \theta \left\{ \tan \theta - \frac{V_b - V_s \sin \theta_s}{-V_s \cos \theta_s} \right\}$$

{ } 中、第 2 項は相対ベクトルの方向の \tan を示している。

今、相対ベクトルの方向を $180^\circ + \theta \pm \epsilon$ とおけば、自船が相手船の針路と直交する針路にあると仮定した場合に相手船を自船を右側に見るような相対位置の時図上の Min CPA の円に外接する 2 つの相対ベクトルの方向①②に相当することになる。

すなわち

$180^\circ + \theta + \epsilon$ は①
 $180^\circ + \theta - \epsilon$ は②

したがつて

$$\begin{aligned} \frac{H}{R} &= \cos \theta \left\{ \tan \theta - \tan (180^\circ + \theta \pm \epsilon) \right\} \\ &= \cos \theta \left\{ \tan \theta - \tan (\theta \pm \epsilon) \right\} \end{aligned}$$

今、 $90^\circ > \theta \geq 0$ の範囲で少なくとも衝突の問題が発生するからこの範囲で考えればよい。

$$\therefore \cos \theta > 0$$

したがつて $\frac{H}{R}$ の正負は

+ ϵ の場合、すなわち相対ベクトルの方向が①の場合 $\frac{H}{R} < 0$ 、これは $\bar{x}_b - \bar{x}_s < 0$ で、自船が相手船の

針路を切った瞬間において相手船は自船の左側にあり船尾通過（相手船発見時、相手船を右に見ていた）となる。

逆の場合は船首通過である。

(b) 結論

自船が相手船の針路と直交する針路にあると仮定した場合、相手船を右（左）に見る時、安全操船法の中で相対座標上においてその Min CPA の位置が相手船の方を見て左（右）にあれば船尾通過可能である。

(4-7) 操船法の選択論理

(4-4) によって安全操船法が抽出され、(4-5) によって操船方向が判定された。

本論理は以上の情報（数種の安全操船法）を以下の判別条件をへて 1 ケースの安全操船法を選択するものである。

(i) 原針路復帰希望の有無

(ii) 原針路復帰のための余裕時間の有無

(iii) 操船方向との比較

(iv) 安全操船法の中から(iii) を満たす操船法の抽出

(v) 安全操船法の種類

(vi) 操舵角と原針路角との比較

以上により選択された操船法は最終的に取られる操船法である。

本論理はソフトウェアとしては Subroutine ⑥と名付けフローチャートは図 3.51 に示す。

(4-8) 原針路復帰試行操船論理

本論理は(4-1)の危険船判定の結果、危険船なしの場合に適用されるものである。

すなわち、相手船（複数隻）と全く危険がなければいかなる時点においてもできるだけ原針路（Program Course）に復帰しようとするものである。

その基本原理は以下のとおりである。

(i) 現在の針路と原針路のずれ

(ii) ずれと逆方向の操船法選択

(iii) 操船パターンの設定

(iv) 操船後における危険船の推定判定（次節で後述）

(v) 安全操船法リストの作製

(vi) 原針路に最も早く復帰できる操船法の選択

以上により何らかの操船法が得られると、原針路復帰可能な操船法が存在することである。

本論理を採用することは大洋航行中、當時、原針路復帰を目指し理想的な航路を航行することになる。

本論理はソフトウェアとしては Subroutine ⑦と名付けフローチャートは図 3.52 に示す。

(4-9) 操船後における危険船の推定判定論理

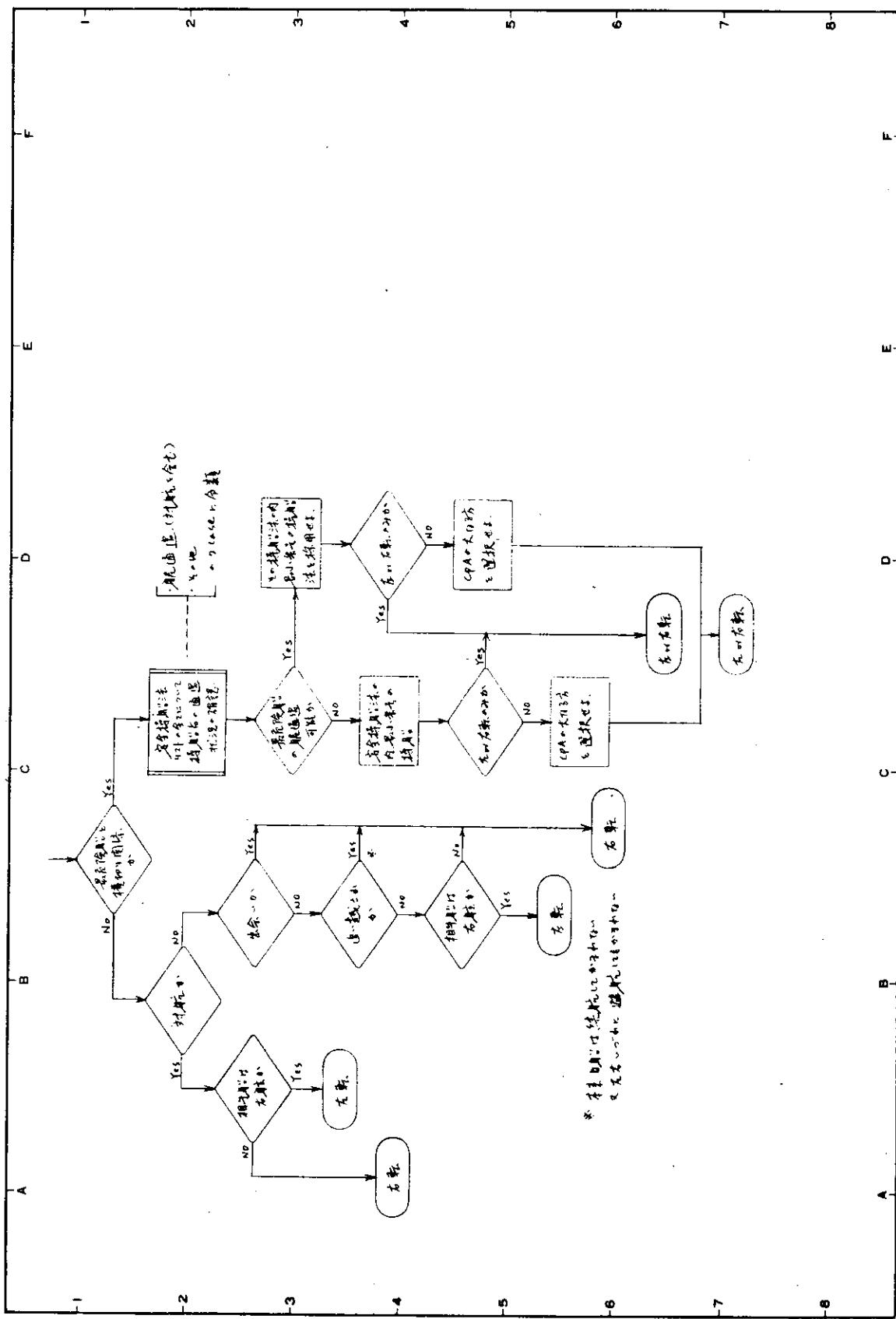
本論理は(4-4)の安全操船法の抽出、(4-6)の原針路復帰試行操船論理の一部を構成している。

危険船（複数隻）がある種の操船法で回避する場合の操船後の危険を推定判定するものである。

本論理は設定された有限個の回避操船法の操縦性能と既知の持込み情報を元に後述の計算プロセスをへて CPA TGA を求める。

以後は(4-1)の衝突船判定論理と同様な Routine で危険船との有無を判定するものである。

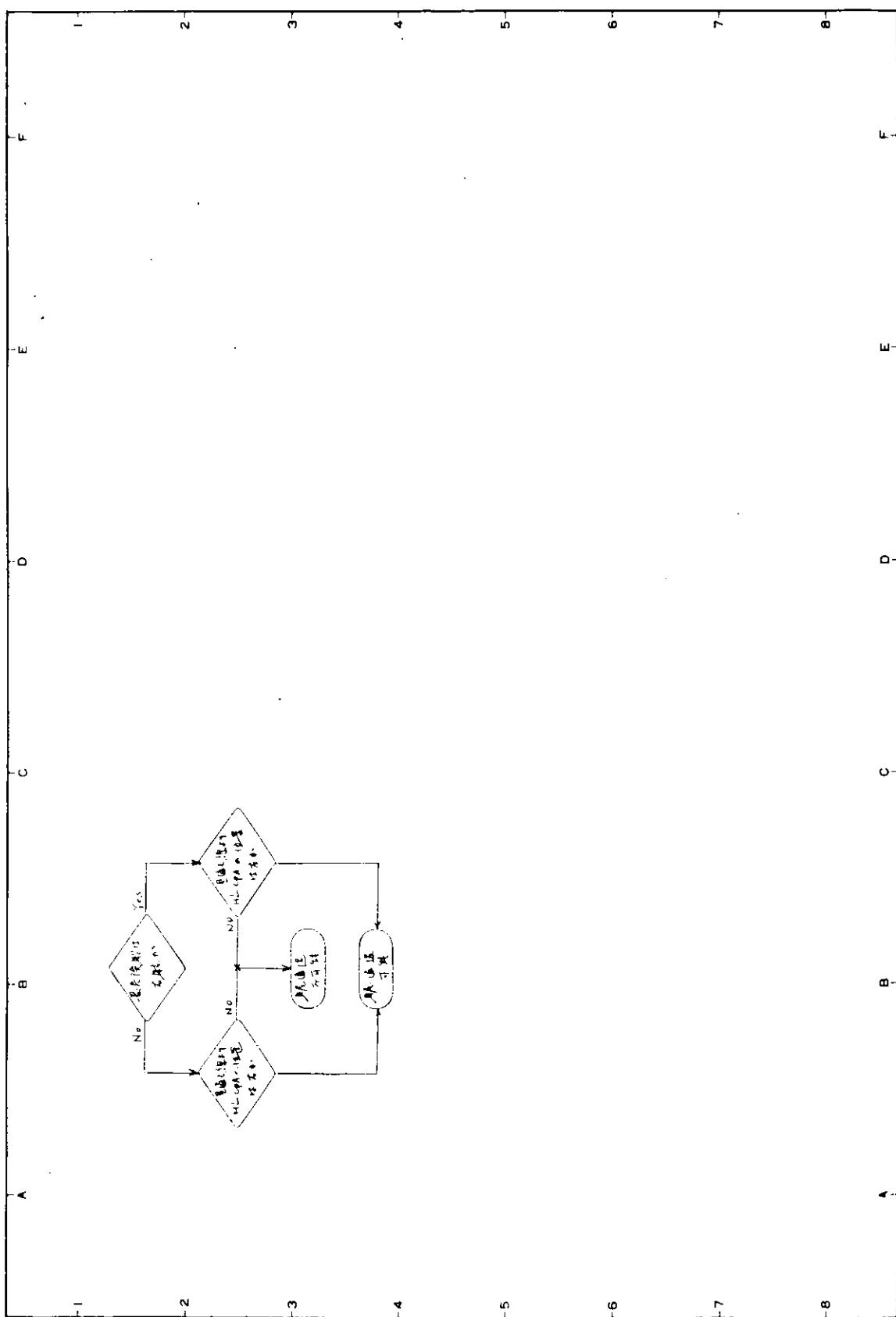
本論理はソフトウェアとしては Subroutine ⑧と名付け、フローチャートは図 3.53 に示す。



(社) 日本造船研究協会
船舶の高度集中制御方式の研究

図 3.49 操舵方向判定論理 (Sub ⑤)
題目 SR106 撃突予防システム分科会
整理番号

プログラム
西和
年月日



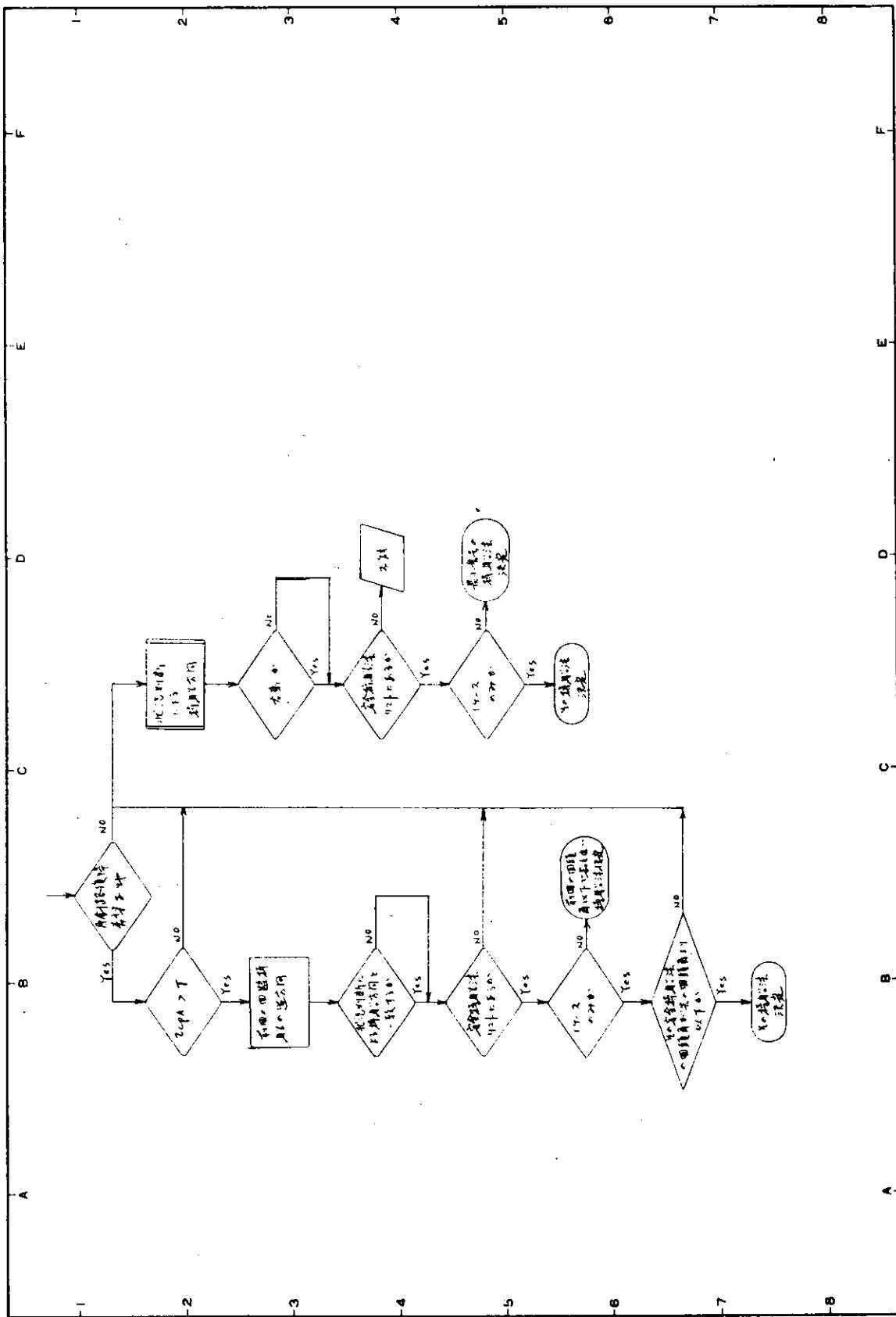
(社) 日本造船研究協会
船舶の定期集中制御方式の研究

図 5.30 問診結果後の経過観察定期点検 (5u b ⑤-1)

アーチャード
昭和 4 年 1 月 1 日

SR106 船舶予防システム分科会
定期点検後の経過観察定期点検フローチャート

(社) 日本造船研究協会
船舶の定期集中制御方式の研究



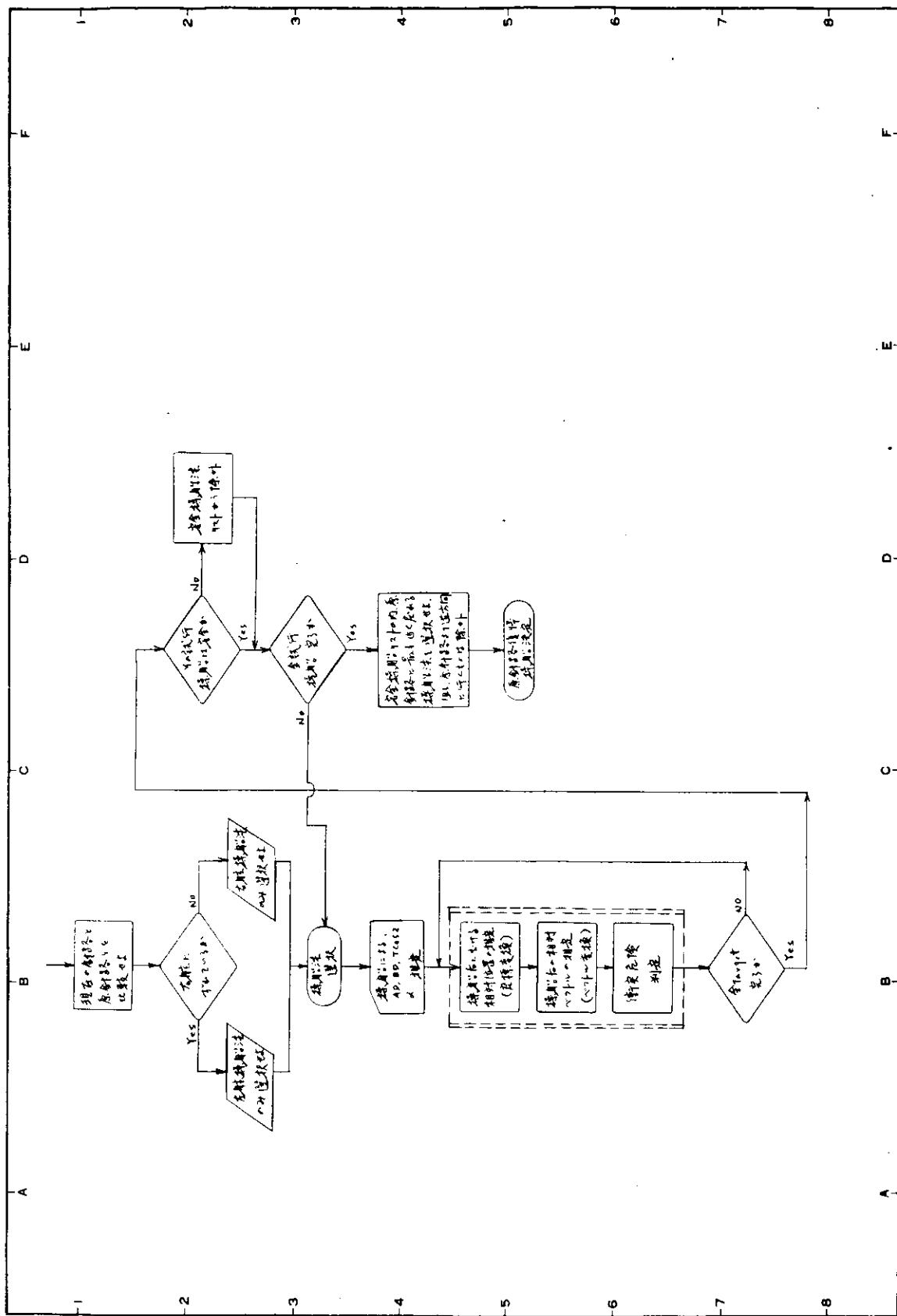
(社) 日本造船研究協会
船舶の荷重集中制御方式の研究

整理番号

題目 S R106 衝突予防システム分科会
検出法選択論理フローチャート

プログラムー
年和 月 日

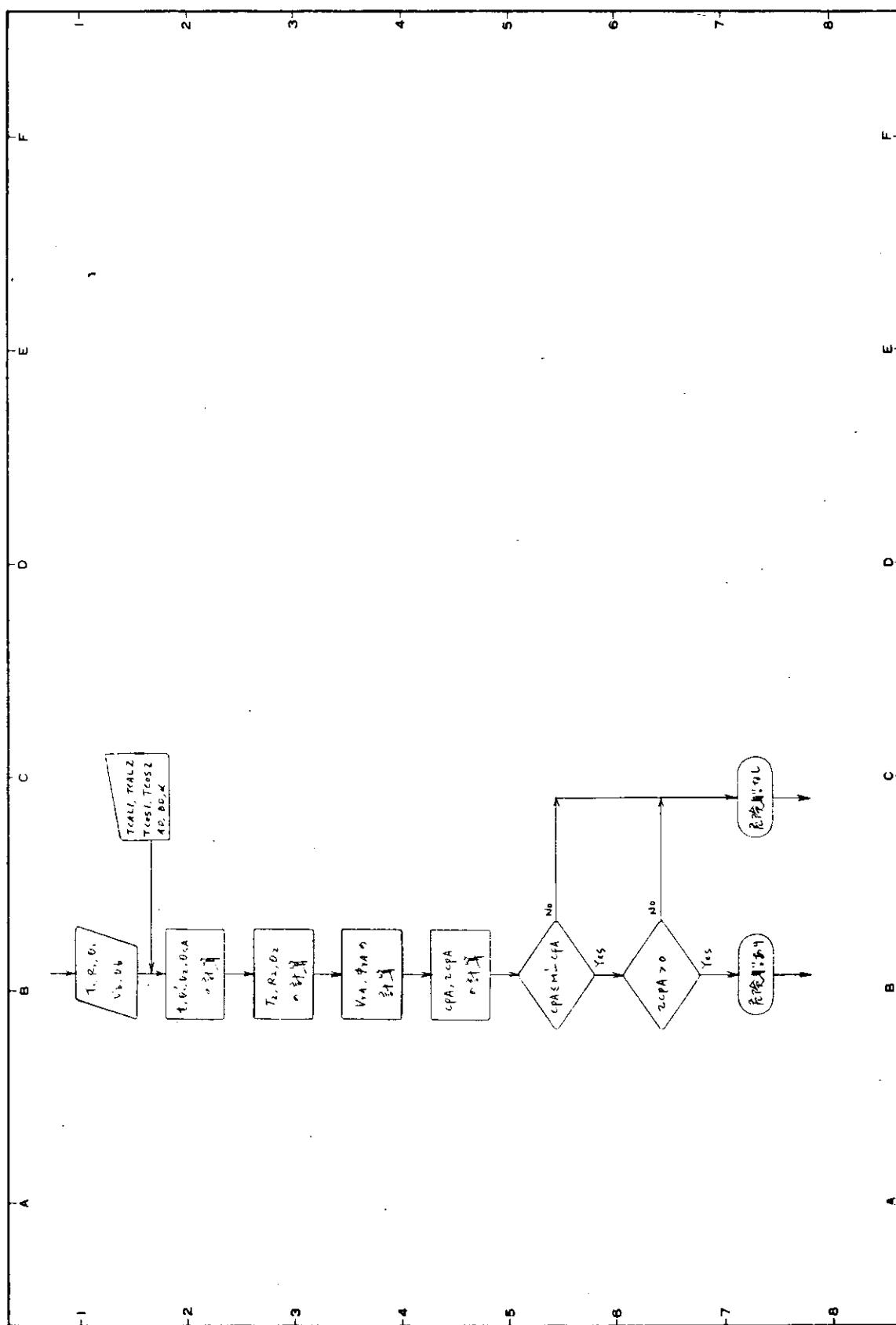
図 3.51 検出法の選択論理 (Sub ⑥)



(社) 日本造船研究協会
船舶の高度集中制御方式の研究

題目 SR106 衝突予防システム分科会
原針路後処理実験実施方針
監理番号
図3.52 原針路後処理実験実施方針 (Sub ⑦)

アドバイザー
指揮官
年月日



(社) 日本造船研究協会
船の高度集中制御方式の研究

図3.53 撞船後における危険船の推定判定論理フローチャート (Sub⑧)
題目 SIE106 衝突予防システム分科会
研究会における危険船の推定判定論理フローチャート 整理番号

プログラマー
昭和 年 月 日

(a) 操船後における危険船の推定判定論理計算プロセス

$$t = T_{CAL1} + T_{CAL2} + T_{COS1} + T_{COS2}$$

$$\theta'_1 = \theta_1 - \theta_s \quad (\theta_1 > \theta_s)$$

$$= \theta_1 - \theta_s + 2\pi \quad (\theta_1 < \theta_s)$$

$$\theta_{SA} = \theta_s + a - 2\pi \quad (a > 0, (\theta_s + a) > 2\pi \text{ の時})$$

$$= \theta_s + a + 2\pi \quad (a < 0, \theta_s < a \text{ の時})$$

$$T_2 = T_1 + t$$

$$R_2 = \sqrt{[(R_1 \sin \theta'_1 + V_b \cdot t \cdot \cos a) - \overline{BD}]^2 + [(R_1 \cos \theta'_1 + V_b \cdot t \cdot \sin a) - \overline{AD}]^2}$$

ただし、 a の計算

$$0 \leq \theta_b' < \pi \quad a = \frac{\pi}{2} - \theta_b'$$

$$\pi \leq \theta_b' < 2\pi \quad a = \frac{3}{2}\pi - \theta_b'$$

$$\theta'_2 = n\pi + \tan^{-1} \frac{R_1 \sin \theta'_1 + V_b \cdot t \cdot \cos a - \overline{BD}}{R_1 \cos \theta'_1 + V_b \cdot t \cdot \sin a - \overline{AD}}$$

ただし、 \tan^{-1} の中の $\frac{\text{分子}}{\text{分母}}$ と n の関係

$$\begin{array}{c|ccccc} \text{分子} & (+) & (+) & (-) & (-) & (+) \\ \hline \text{分母} & (+) & (-) & (+) & (-) & 0 \end{array}$$

$$n \quad 0 \quad 1 \quad 2 \quad 1 \quad \theta'_2 = \frac{\pi}{2}, \frac{3}{2}\pi$$

$$VrA = \sqrt{(V_b \cdot \sin \theta_b - V_s \cdot \sin \theta_s)^2 + (V_b \cdot \cos \theta_b - V_s \cdot \cos \theta_s)^2}$$

$$\phi rA = m \cdot \pi + n \cdot \tan^{-1} \frac{V_b \cdot \sin \theta_b - V_s \cdot \sin \theta_s}{V_b \cdot \cos \theta_b - V_s \cdot \cos \theta_s}$$

ただし、 \tan^{-1} の中の $\frac{\text{分子}}{\text{分母}}$ と n の関係

$$\begin{array}{c|ccccc} \text{分子} & (+) & (+) & (-) & (-) & (+) \\ \hline \text{分母} & (+) & (-) & (-) & (+) & 0 \end{array}$$

$$m \quad 0 \quad 1 \quad 1 \quad 2 \quad \phi rA = \frac{\pi}{2}, \frac{3}{2}\pi$$

$$n \quad 1 \quad -1 \quad 1 \quad -1$$

$$CPA = |R_2 \cdot \sin(\phi r' - \theta'_2)|$$

$$TCPA = \frac{R_2 \cdot \cos(\pi + \phi r' - \theta'_2)}{Vr}$$

(4-10) 決定すべき常数

本研究の各論理の中で用いられている常数に対する考え方と一定の基準値が必要と思われる。

その常数としては次のものがある。

常数	内 容	考え方
Min CPA	最接近安全距離	レーダの精度、船体運動の外乱、安心感
Min TCPA	最接近時間	最高速船同志の接近速度と安全距離のかねあい
OCCUPY	対航占有率	安全感
T _{COS1}	人間の判断時間	船長の好みによる
ε	操船中の平均速力係数	実績による
T	原針路復帰のための余裕時間	最高速船同志の接近速度と安全距離のかねあい
TCPAの制限値	危険船と避復先順序決定の判定論理	測定精度のかねあい
R ₁		
V _b		
CPA		

これら常数は本論理においてインプット型式になつておる、その都度可変のものである。

すなわち将来の海運界、海難状況にマッチした基準を設定すればよい。しかるに現在（本研究の段階）においてわれわれが基準値を設定することは甚だ困難なように思われる。むしろ海運業界、航海機器側の関係者の判断による方が妥当であろう。

(5) 結 論

以上45年度の研究の詳細について述べてきたが、この種の研究は1年で完了することはきわめて困難であり、またこの種研究で解決することも困難であることが判明した。また研究の最終段階において新たな解決の方向を示す考案も出てきている。以下45年度研究成果で残された問題点、本研究の意義について若干言及する。

(5-1) 問 题 点

(I) 衝突回避は2隻の船の協調動作が必要である。この点について本システムは(4-5)～(4-7)に示したとおり極力安全な航法を取るよう論理を組立て、両者が本装置をそなえている場合でも矛盾のないように努めたが、特に横切り関係においては十分問題を解決していない。

この問題の解決には1つはハードウェアの機能として自船運動中においても相手船を完全に追跡し、かつ新しい情報として相手船の針路角の変化率が必要である。

次に抜本的な解決には海上衝突予防法の抜本的見直しを行ない遠距離回避においての両船協調回避に矛盾のない法則を確立することである。

(II) 安全操船法の摘出論理は本論では試行操船法を採用しているが、その後の予備的検討によって衝突三角形の数学的取扱いで総合的に検討し得る方向が見いだされてきた。たとえば(4-6)の船尾通過航法の数学的証明はその一部である。

今後は安全航法はこの範囲であるといつたとらえ方に改正すべきであろう。

(III) (4-10)で述べたごとく本システムの合理的な運用は内部で利用する諸常数の合理的な設定にある。

この設定はシステムとしては運航者の自由であるが、その設定にあたつての基準を権威ある機関で制定すべきであろう。

(IV) 本システムのように相手船の意志情報のないシステムでは、少なくとも相手船は針路速力をそのまま保つとの仮定は避け難い。これはこの種システムの失天的欠陥である。

(V) 現状では自動衝突予防システムを狭海域において用うことは絶望的に困難である。

(VI) ハードウェアの追跡対象船数を何隻に限定するのが妥当か、この点の検討を続行する必要がある。

(5-2) 本研究の意義

わが国において、衝突予防システムの論理についてこの種の総合的検討が行なわれたのは本研究をもつて始めるといえるであろう。そのため本研究はこの分野においては初步的な分野から出ることは困難であつたと考えている。その結果われわれが研究当初予想していた以上の多く問題が摘出された。これらの問題の多くはこの分野の専門家の間ではすでに十分予知されていたものもある。しかしそれらが総合的なシステムとしての立場から検討され、海運造船界の広い分野に認知される必要があつた。

本研究は幸いにしてその実用化への道がついているのである。そのためにも本研究を基礎としてさらに確度の高いかつ漸進的進歩の可能な方式に整備して行く必要があろう。

1.3.5 信号変換システムの研究

(1) 信号変換の必要性

(1-1) 序論

レーダ信号の存否判定を人間観測者に依存する場合、判定基準が心理的、生理的な諸条件および個人誤差などにより動搖せざるを得ない欠陥がある。まして、このような存否の判断から、追尾と未来位置の予測、さらには、最適避航操船の選定までを、しかも多目標に対して短時間に人間観測者に要求することは、最終判断の大転をもたらし、しばしば、誤判断に至らしめていることは、慶重なる“衝突”事故例から見て明らかである。

ここで、コンピュータを導入して、この判定を自動化することは、レーダ情報の効率化と信頼化のための有力な手段であつて、本衝突予防システムの意義も、またここにあると見てよい。

しかし、一方、レーダ受信信号をコンピュータにより自動処理するためには、いわゆるロウ・ビデオを、そのままデジタル化するのではなくて

- (i) 信号対雑音電力比の改善
- (ii) Sea-clutter, Weather-clutter の抑圧
- (iii) 他船からのレーダ干渉波の除去
- (iv) 受信信号 Scintillation の改善

等、信号と雑音の相克をいかに処理すべきかが、まず、第1の課題となつてくる。

コンピュータによる安定な情報処理の前提条件としては、周知のように S/N 比で $15 \sim 16\text{dB}$ 以上、Detection Probability として 99.9% 以上、False-alarm rate として 10^{-9} 以下を必要とする。一方、レーダ受信機の出力、とくに PPI スコープ上での存否判定基準は、たかだか数 dB の S/N 比で十分である。この差 10dB こそ、レーダ情報自動処理に際し課せられた雑音対策の一目安と見てよいであろう。

ここでは、レーダ・ビデオ信号の信号変換に際し、まず必要な S/N 比改善の方法について種々の研究成果を紹介するとともに、具体的な一方法 — 残留効果のある零次ホールド回路 — について詳述し、ついで、その原理を応用した試作装置の概要と、実験結果について述べる。

(1-2) 信号対雑音電力比 (S/N 比) の概念

本論に入るに先立ち、信号対雑音電力比 (S/N 比) とその Detection Probability, False-alarm probability の関係を概念的に述べよう。

まず、レーダ受信機の系統を図 3.5.4 のように考え、包絡線検波出力の雑音波形を図 3.5.5 とする。

I/F 出力における雑音を Gauss 状と仮定すると、その確率密度関数 $p(v)$ は

$$p(v) \propto v = \frac{1}{\sqrt{2\pi\varphi_0}} \exp \left(-\frac{v^2}{2\varphi_0} \right) \quad (3.3.0)$$

こゝに $p(v) \propto v$: 電圧、 v 、 $v + \Delta v$ の間にあら雑音の確率

φ_0 : 雜音電圧の自乗平均値

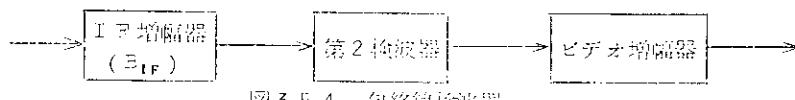


図 3.5.4 包絡線検波器

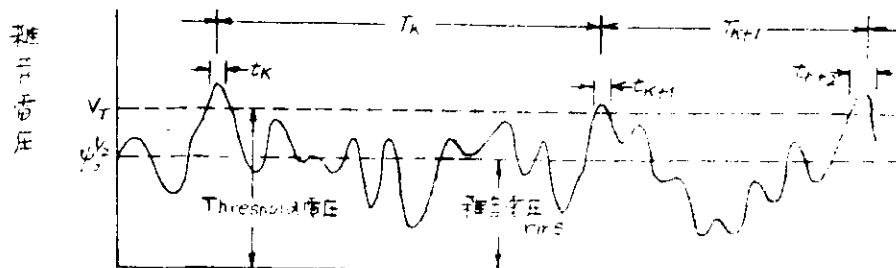


図 3.5.5 包絡線検波出力の雑音波形

Gauss 状の雑音が、IF 増幅器を通過したときの包絡線 Probability density は

$$P(R) \alpha R = \frac{R}{\varphi_0} \exp \left(-\frac{R^2}{2\varphi_0} \right) \alpha R \quad \dots \dots \dots \quad (3.31)$$

こゝに R : 出力における包絡線振幅

であつて、式(3.31)は Rayleigh 分布形を示している。

False-alarm Probability P_{fa} は、上記の雑音振幅 R が所定の電圧 V_T をこえる確率であるから

$$P_{fa} = \int_{V_T}^{\infty} \frac{R}{\varphi_0} \exp \left(-\frac{R^2}{2\varphi_0} \right) \alpha R = \exp \left(-\frac{V_T^2}{2\varphi_0} \right) \quad \dots \dots \dots \quad (3.32)$$

一方、False-alarm time T_{fa} は

$$T_{fa} = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N T_k \quad \dots \dots \dots \quad (3.33)$$

こゝに T_k : 雜音電圧が V_T をこえる時間间隔

P_{fa} は、図 3.5.5 からも明らかのように次式でも与えられる。

$$P_{fa} = \frac{\sum_{k=1}^N t_k}{\sum_{k=1}^N T_k} = \frac{\langle t_k \rangle_{av}}{\langle T_k \rangle_{av}} = \frac{1}{T_{fa} \cdot B_{if}} \quad \dots \dots \dots \quad (3.34)$$

式(3.32)、(3.34)から

$$T_{fa} = \frac{1}{B_{if}} \exp \left(\frac{V_T^2}{2\varphi_0} \right) \quad \dots \dots \dots \quad (3.35)$$

図 3.5.6 は、式(3.35)を図示したものである。たとえば、IF 増幅器の帯域 B_{if} を 1 MHz とし許容しうる T_{fa} を 6 分とするとき、 $\log_{10}(V_T^2 / 2\varphi_0) = 12.95 \text{ dB}$ であるが、これを僅か 1.77 dB 変化させ 14.72 dB とすると T_{fa} は 10,000 時間になり、完全に無視できる値になる。

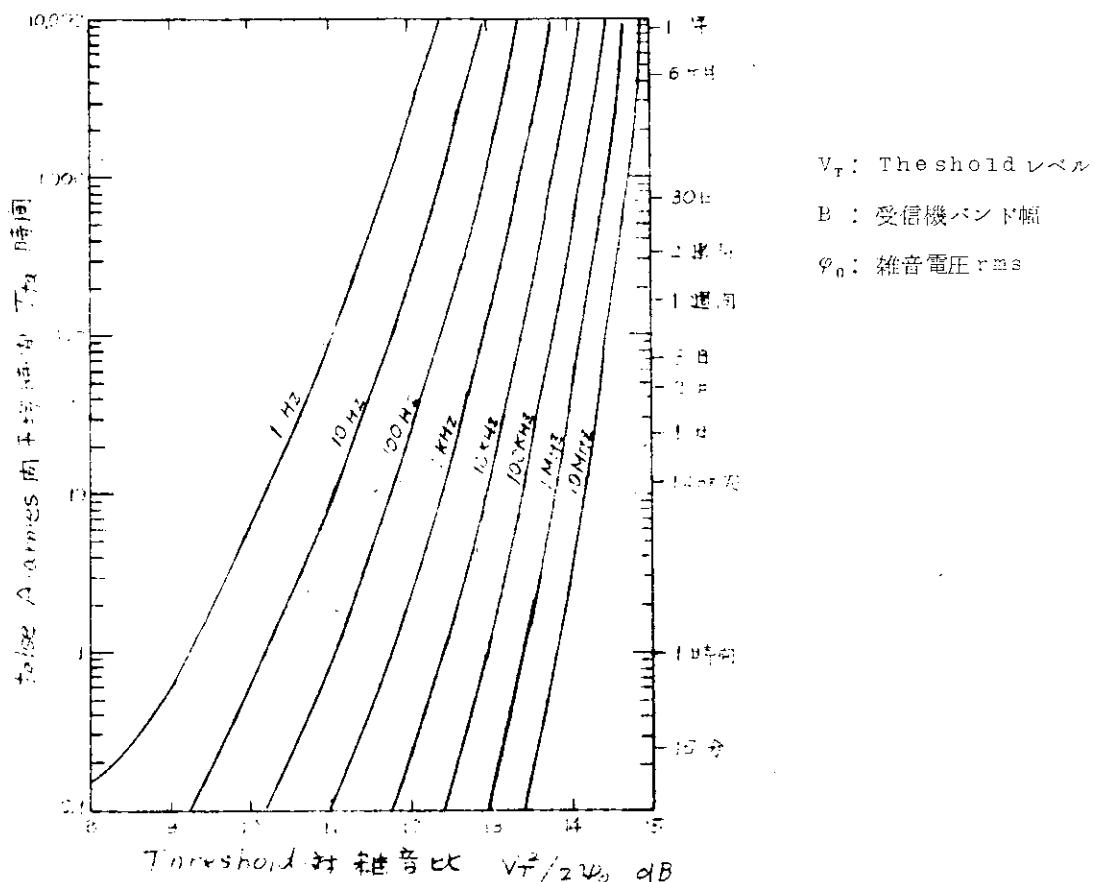


図 3.5.6 V_T 、 B 、 φ_0 を関数とした false Alarms 間平均時間

つぎに、雑音とともに振幅 A の Sine-wave の信号入力を考察する。

検波器(包絡線検波)出力において

$$P_s(R) \alpha R = \frac{R}{\varphi_0} \exp\left(-\frac{R^2+A^2}{2\varphi_0}\right) I_0\left(\frac{RA}{\varphi_0}\right) \alpha R \quad \dots \quad (3.36)$$

ここに I_0 : 零次の1種変形ベッセル関数

Detection Probability P_d 、すなわち上記が V_T をこえる確率は

$$P_d = \int_{V_T}^{\infty} P_s(R) \alpha R = \int_{V_T}^{\infty} \frac{R}{\varphi_0} \exp\left(-\frac{R^2+A^2}{2\varphi_0}\right) I_0\left(\frac{RA}{\varphi_0}\right) \alpha R \quad \dots \quad (3.37)$$

ここに $RA/\varphi_0 \gg 1$ 、 $A \gg |R - A|$ とすると

$$P_d = \frac{1}{2} \left(1 - \operatorname{erf} \frac{V_T - A}{\sqrt{2\varphi_0}} \right) + \frac{\exp\left(-\frac{(V_T - A)^2}{2\varphi_0}\right)}{2\sqrt{2\pi}(A/\sqrt{\varphi_0})} \times \left[1 - \frac{V_T - A}{4A} + \frac{1 + (V_T - A)/\varphi_0}{8A^2/\varphi_0} \right] \quad \dots \quad (3.38)$$

ここに

$$\operatorname{erf} Z = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^Z e^{-u^2} du$$

信号対雑音電力比との関係は、次の式(3.39)で示される。

$$\begin{aligned} \frac{A}{\varphi_0^{1/2}} &= \frac{\text{信号の振幅}}{\text{雑音の rms}} = \frac{\sqrt{2} (\text{信号の rms})}{\text{雑音の rms}} = \left(2 \frac{\text{信号電力}}{\text{雑音電力}} \right)^{1/2} \\ &= \left(\frac{2S}{N} \right)^{1/2} \end{aligned} \quad \dots \quad (3.39)$$

図3.57は雑音と、信号重疊の確率密度関数を示したものであり、図3.58は式(3.38)を図式化したものである。

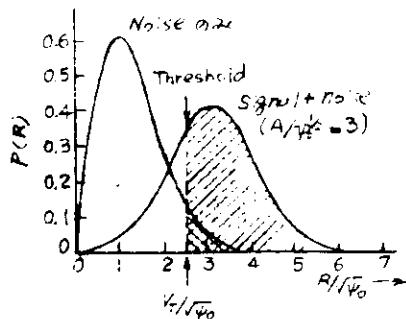


図3.57 雑音と信号重疊の確率密度関数の関係

$P_{fa} \approx 1 \times 10^{-9}$ に対し、 $S/N = 3.1 \alpha B$ では $P_d \approx 0.5$ にすぎないが、 $1.47 \alpha B$ では 9.0%、 $1.65 \alpha B$ で 9.9% に達することを示している。

以上は、あくまで単純条件についての理論的考察にすぎないが、コンピュータ処理

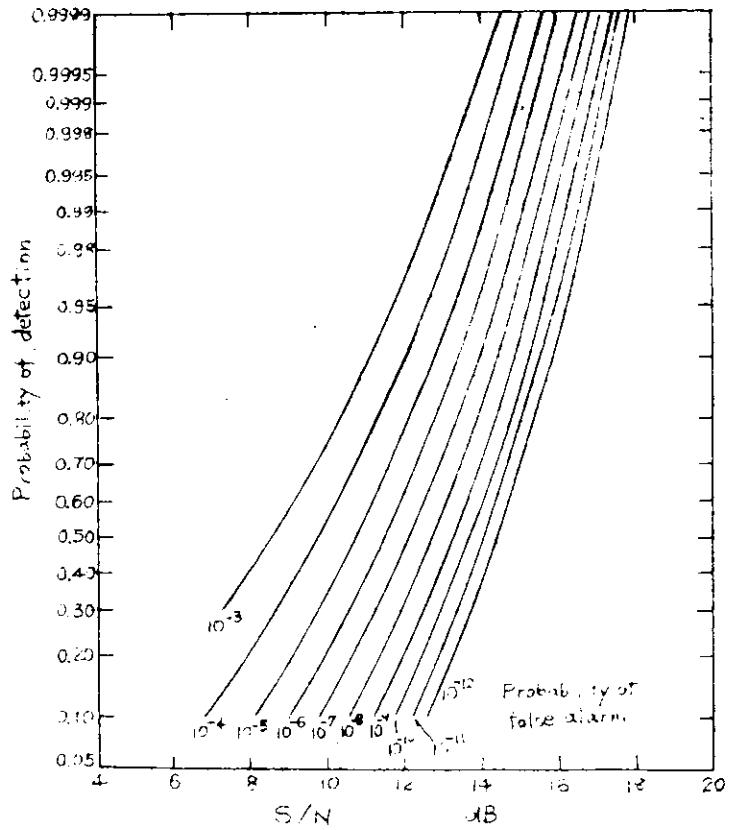


図3.58 Probability of false alarm をパラメータとして S/N と検出確率

の前提であるデジタル化——すなわち、ある“いき値” V_T を設け、 V_T を基準に1.0の時系列信号と変換する時ににおいて、僅かなS/Nの改善がシステム総合機能に及ぼすところ大であることを示した。

(2) 信号変換方式

(2-1) 主要方式の概要

信号変換回路の構成は大別して

(i) S/Nの改善回路

(ii) 自動判定回路

の2回路から構成される。

(i)は、雑音と共に存するレーダ信号を効果的に抽出するため、その前提としてS/N比の改善を行なうものであり、(ii)は、信号の存在を統計的決定論に基づき判定するものである。

以下この2つの回路について主要な方式の概要を述べる。

(a) 相関検波方式

(i) 相互相関型

$v_1(t)$ 、 $v_2(t)$ の2信号に対する相互相関々数は

$$C_{12}(T_r) = \int_{-\infty}^{\infty} v_1(t) v_2(t - T_r) dt \quad (3.40)$$

であらわされる。

受信信号 $y_1(t) = s(t) + n(t)$ と信号 $s(t)$ の遅延分 $s(t - T_r)$ を図3.5.9のように組合せると、フィルタ出力としては相互相関々数を求めた結果になる。

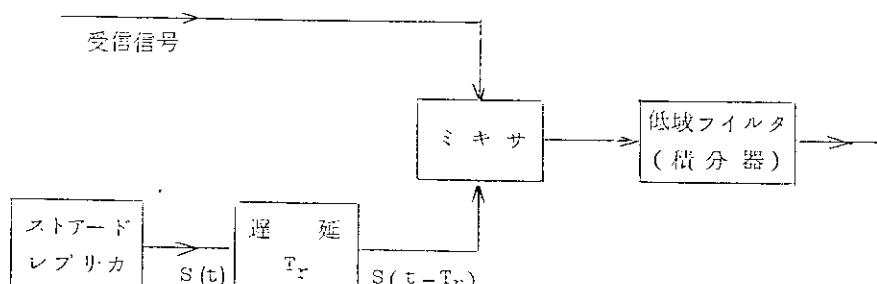


図3.5.9 相互相関型のプロック線図

(ii) 自己相関型

式(3.40)と同様に

$$C_{11}(T_r) = \int_{-\infty}^{\infty} v_1(t) v_1(t - T_r) dt \quad (3.41)$$

で与えられる。

相互、自己相関器によるS/N改善の効果は、図3.6.0のとおりである。

(b) Matched-filter型受信機

雑音が任意のスペクトラムをもち、かつ、この上に重畳する信号パルスの波形が与えられている場合に、これらを1つのfilterを通してその出力における信号パルスの尖頭値と雑音のrms値との比を最大にするためには、このfilter

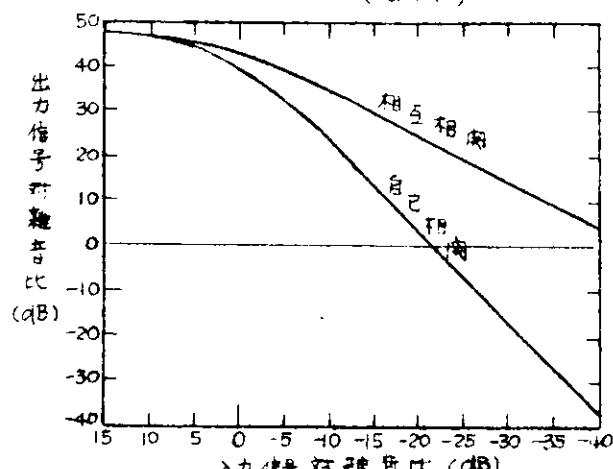


図3.6.0 相関検波によるS/N改善度

の通過帯域特性をどのように選べばよいかについて、B. Dworkは次のような結論を出した。¹⁾

図3.6.1に示すように、入力信号パルス $S_i(t)$ のフーリエ変換、すなわちスペクトラムを $S_f(\omega)$ で表わし、入力雑音のパワースペクトラムを $N_i(\omega)$ で表わした場合に、上のように定義された出力の信号対雑音比を最大にするfilterの周波数伝達関数 $W(j\omega)$ は

$$W(j\omega) = \frac{S_f^*(\omega)}{N_i(\omega)} \exp(-j\omega\tau) \quad \dots \quad (3.4.2)$$

で与えられる。

ここに、 $S_f^*(\omega)$ は、 $S_f(\omega)$ の共役複素数であり、 τ は任意の実数である。

また、この際の信号対雑音比の最大値は

$$\left(\frac{S_0}{N_0}\right)_{\max} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|S_f(\omega)|^2}{N_i(\omega)} d\omega} \quad \dots \quad (3.4.3)$$

以上の1例としてMatched-filterを用いて、Clutterの影響を軽減する方法について検討しよう。

Clutterのパワースペクトラム $N_i(\omega)$ は、送信パルスのそれに等しいことが知られているから送信パルスのスペクトラムを $S_f(\omega)$ とすれば

$$N_i(\omega) = |S_f(\omega)|^2 \quad \dots \quad (3.4.4)$$

$$|S_f(\omega)|^2 = S_f(\omega) \cdot S_f^*(\omega) \quad \dots \quad (3.4.5)$$

これをMatched-filterの式(3.4.2)に代入し、位相の項を省略すれば

$$W(\omega) = \frac{1}{S_f(\omega)} \quad \dots \quad (3.4.6)$$

となり、Clutterに対するMatched-filterの周波数特性としては、図3.6.1に示したような、送信パルスの逆数に等しいものを選べばよいことがわかる。

ここで、受信機に対する入力信号対Clutter比を考える。ただし、信号としては、受信各号パルスの尖頭値をとりClutterとしては、受信Clutterのパワーラムスをとることは今までと同じであるが、計算の簡単のため、この平方を S_i/N_i で表わすと

$$\frac{S_i}{N_i} = \frac{1}{\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |S_f(\omega)|^2 d\omega} \quad \dots \quad (3.4.7)$$

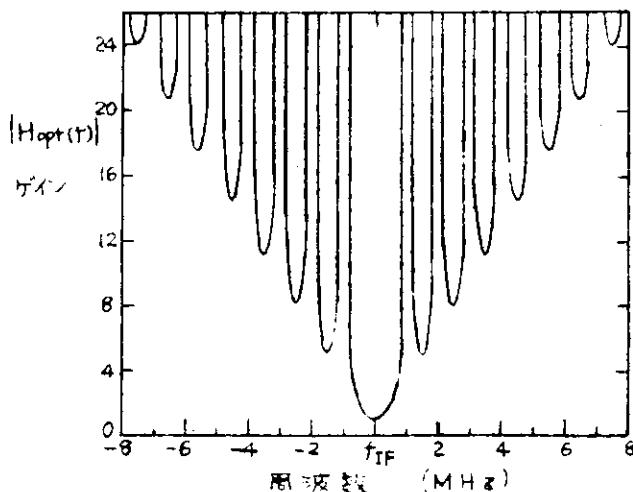


図3.6.1 雜音除去フィルタの特性

1) B. Dwork, Detection of a Pulse Superimposed on Fluctuation Noise; Proc IRE, July 1950

ここで $S_f(\omega)$ は送信パルスのスペクトラムと同じであるから、送信パルス幅を α 、角周波数を ω_s 、振幅を 1 とすると

$$S_f(\omega) = \int_{-\alpha/2}^{\alpha/2} \cos \omega_s t \exp(-j\omega t) \alpha dt \\ = \frac{\alpha}{2} \left[\frac{\sin \{ (\omega - \omega_s) \alpha / 2 \}}{(\omega - \omega_s) \alpha / 2} + \frac{\sin \{ (\omega + \omega_s) \alpha / 2 \}}{(\omega + \omega_s) \alpha / 2} \right] \dots \dots \quad (3.4.8)$$

を式(3.4.7)に代入すれば

$$\frac{S_i}{N_i} = \frac{2}{\alpha} \dots \dots \quad (3.4.9)$$

式(3.4.8)を式(3.4.6)に代入して、フーリエ変換をほどこすことにより、filter 出力端における信号パルスの尖頭値が求められる。

$$S_o(t)_{\max} = 2 \frac{\omega_c}{\pi} \dots \dots \quad (3.5.0)$$

一方、filter の Clutter 出力パワは

$$N_o = \frac{1}{2\pi} \int_{-(\omega_s - \omega_c)}^{-(\omega_s + \omega_c)} \alpha \omega + \frac{1}{2\pi} \int_{(\omega_s - \omega_c)}^{(\omega_s + \omega_c)} \alpha \omega = \frac{2\omega_c}{\pi} \dots \dots \quad (3.5.1)$$

出力端における S_o/N_o は

$$\frac{S_o}{N_o} = \frac{[S_o(t)_{\max}]^2}{N_o} = \frac{2\omega_c}{\pi} = f_c \dots \dots \quad (3.5.2)$$

Clutter 抑圧の効果 G は、式(3.4.9)、(3.5.2)から

$$G = \frac{S_o}{N_o} \sqrt{\frac{S_i}{N_i}} = 2f_c \alpha \dots \dots \quad (3.5.3)$$

図 3.6.2 は、Matched-filter と、矩形 filter との改善度の比較を示したものである。

(c) Delay-line Integrator

先に述べた S/N 比、Detection Probability 等の概念は、すべて 1 ケのパルスに対応したものであるが、実際のレーダの受信信号は、n ケのパルス列から成るため Integration による S/N 比の改善効果が期待される。

理想的には Pre-detection Integrator、すなわち受信機の I/F 段で Integration を行なうべきであるが具体的には種々の困難がある。Post-detection Integrator、すなわち、ビデオ段での Integration は検波後の雑音スペクトラムに支配され、上記のような効果が少ない反面、容易に実現できる長所がある。

この後者の実例としては

(i) アナログ式

Magnetic drum

electrostatic storage tube

recirculating delay line

(ii) 振幅アナログ、距離デジタル式

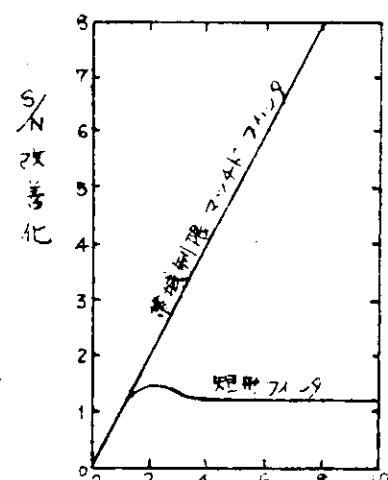


図 3.6.2 矩形フィルタと帯域を制限したマッチドフィルタとの S/N 改善比

残留効果のある零次ホールド回路

(iii) 振幅、距離ともデジタル式

flip-flop

Shift register

Magnetic-core memory

Magnetic-drum memory

等がある。

いずれも、等価ブロック線図としては、図3.6.3に示したよう、遅延き還回路で表現され、その周波数特性は図3.6.4のようなComb状のfilterになる。

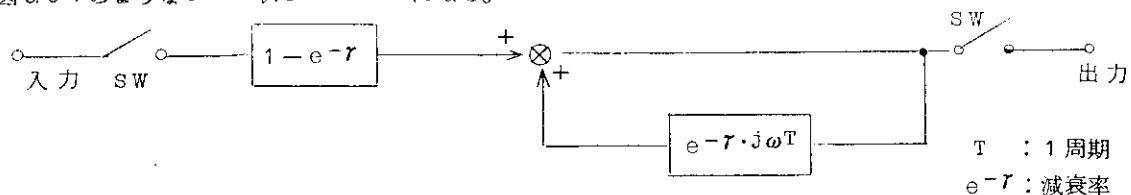


図3.6.3 等価ブロック線図

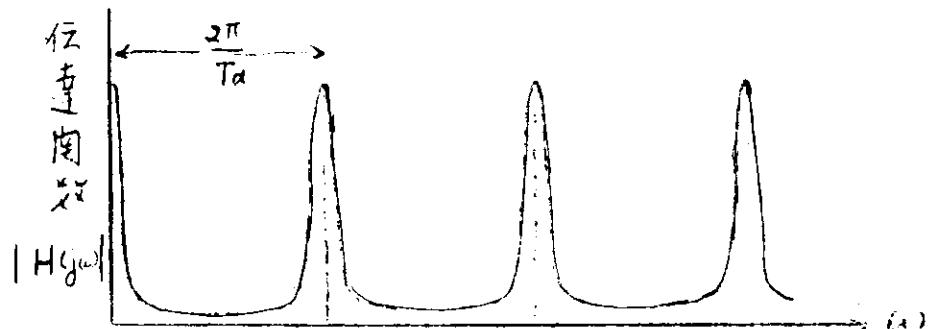


図3.6.4 周波数特性

(d) Binary Integrator

レーダ受信機の出力信号をデジタル化するときに用いられる方式で、別名double-threshold detection, M-out-of-n detectionともいわれている。

図3.6.5に示したブロック線図のようにfirst thresholdを通過した後、デジタル化された信号はレンジゲート群で分割され、それぞれのレンジ・チャンネルに入る。ここにBinary Counterを設けてn回のStep中に少なくともmヶの信号があつたとき、はじめて、このレンジから出力されてコンピュータに入力されるようになる。

このようにfirst thresholdではアナログ信号を取り扱うが、2nd thresholdはデジタルカウンタとして動作する。

任意の入力パルス数nに対して、最適なmヶの値は図3.6.6に示した。

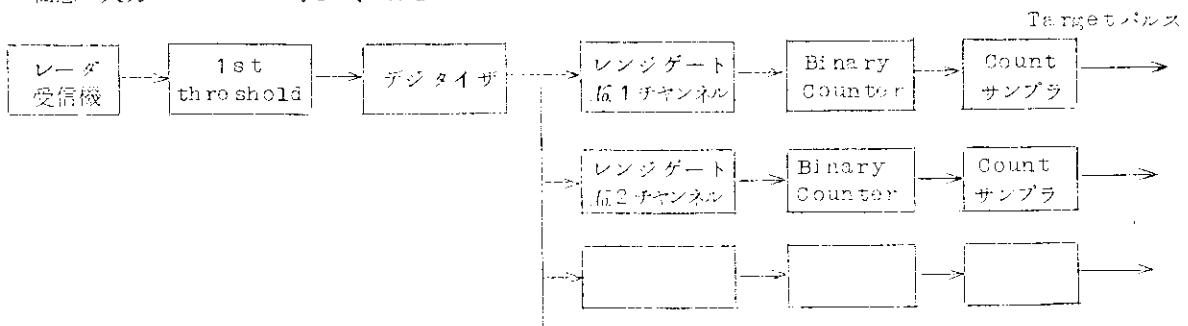


図3.6.5 Binary Integratorブロック線図

(2-2) 各方式の特徴

前節に引き続き、各方式の結論として特徴を列挙するところとのおりである。

(a) 相関検波方式

S/N改善度に関しては、効果的である。

ただし、検波後の I.P.F の帯域で支配されるので、パルス系列から連続信号に変換される Tracking Servo 系に適している。

本装置に応用するためには、レンジ・ゲート群で分割し、それらが低周波出力になつても、時間 — レンジ情報を消失しないよう配慮の要がある。このため装置がだいぶ大化する難がある。

相互相関型が、より改善効果で優れている。

(b) Matched-filter 型受信機

原理的には、(a)と類似してくる。Clutter 除去の有力な方式で、実験室的にはすでに成果が確認されている。

ただし、送受信のシステムを全面的に改変する要があり、船用レーダへそのまま応用することはむつかしい。

(c) Delay-line Integrator

ビデオ帯域の処理で済むため、最も実用的である。

アナログ方式は、き選側御系の安定度の問題があり、改善効率に限界がある。

デジタル方式は、リセットされるために、き選度を ≈ 1 に近づけても不安定現象を起さない長所がある反面、振幅デジタル化のときに、S/Nを劣化させる欠点がある。

この意味で、本報告書に採りあげた“残留効果のある零次ホールド回路”は、距離（時間）方向はデジタル化されているが、振幅方向は、アナログのため、両者の長所を集めたものと見てよいであろう。さらに、この“零次ホールド回路”的特徴を列記すると、下記のとおりである。

- (i) 回路素子が簡素で、かつ、改善の効率は、ほど理論上最適値までとれる。
- (ii) 繰返周期の変動には随意追隨可能である。
- (iii) 有効範囲は、順次積上方式で可変になる。

ストレージ管による方法は、アナログ方式と同一であるが他のすべて Sweep to Sweep の Integration を行なつてゐるのに対し、これは Scan to Scan のへば、映像面全域にわたつて Integration している点が明らかなる特徴であろう。

これら諸方式は、それぞれ特徴を有しているため多者選一はきわめて困難、かつ、危険性を伴うと見てよく、下記のようなブロック構成により、互に相補性を發揮するのが目下の時点における最適方式と思われる。

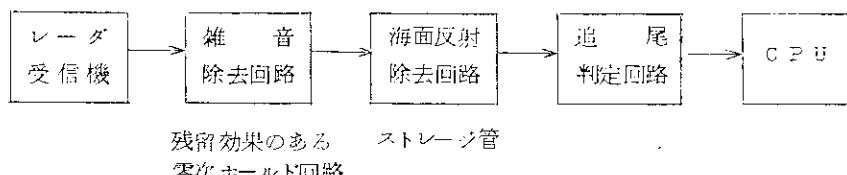


図 3.67 目下の時点における最適方式

(2-3) 残留効果のある零次ホールド回路の基礎理論

(a) 回路の伝達関数および周波数特性

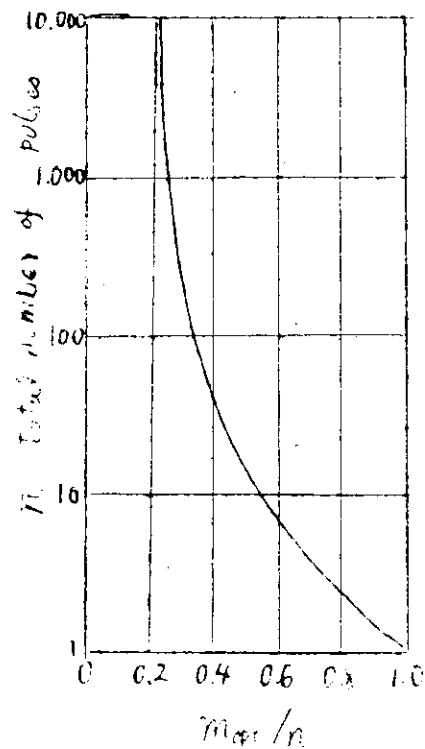


図 3.66 Binary Integrator
の最適パルス数曲線

(i) 等価回路

ゲート回路の時定数を考慮した等価回路を画くと図3.6.8に示すようになる。

ここで、閉動作のときの時定数がゲート時間幅 τ_g に比し無視できないときは残留効果が現れてきて

- ① 入力パルスのせん頭値までは完全に充電されず、
- ② 前回の入力パルスの保持値の放電は完全におこなわれずに残留を生じ、これが順次重畳する。

ことになる。

r_1 : 電子的開閉素子閉のときの
等価抵抗

r_2 : 入力端子間等価抵抗

C : 保持コンデンサ容量

R : Cに並列と考えられる漏洩
抵抗

ここで $r = r_1 + r_2$ とすれば

$\alpha = 1 / Cr$ となる。

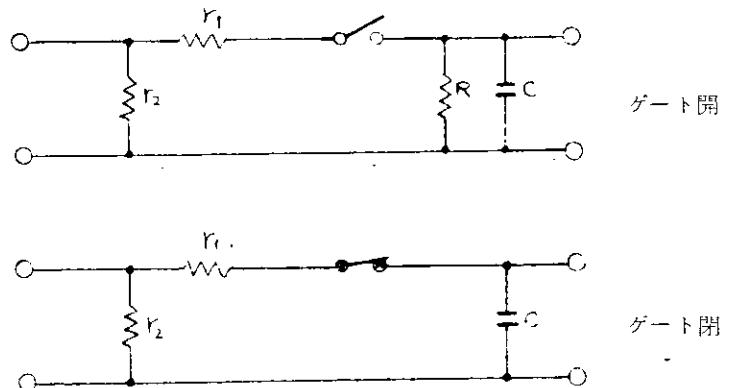


図3.6.8 ゲート回路の等価回路

(ii) 伝達割合

入、出力の時間波形を図3.6.9(a), (b)のように仮定する。

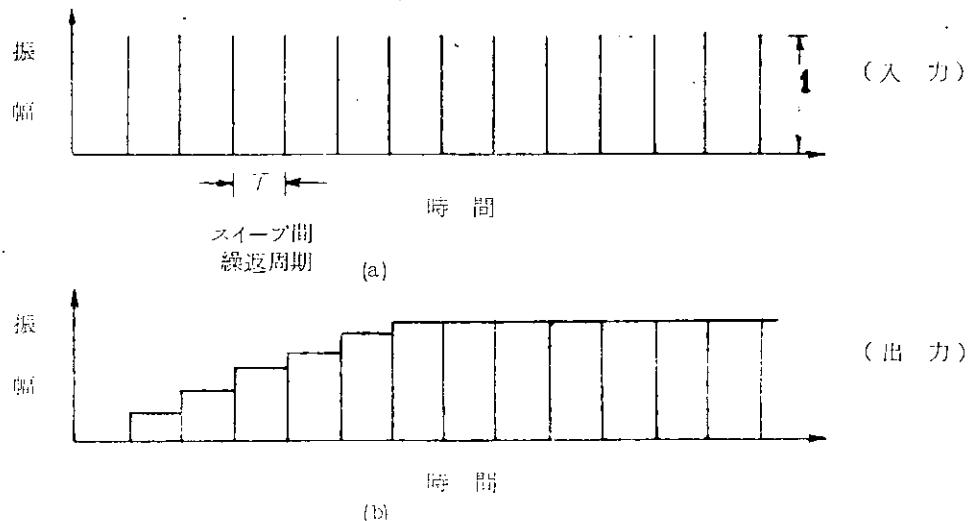


図3.6.9 入、出力の時間波形

入力パルスR(t)は周期Tのインパルス波形で単位高1の連続波形であるから

$$R(t) = \sum_{n=0}^{\infty} \delta(t - n\tau) \quad \dots \quad (3.5.4)$$

ラプラス変換により

$$\begin{aligned} L\{R(t)\} &= R(s) \\ &= 1 (e^{-ts} + e^{-2ts} + \dots + e^{-(k-1)ts} + \dots) \\ &= \sum_{k=0}^{\infty} e^{-kts} = \frac{1}{(1 - e^{-ts})} \quad \dots \quad (3.5.5) \end{aligned}$$

一方、出力波形をC(t)として、定常状態に達した $t = k\tau$ について考える。

残留効果による条件を考えると、

$$C(\tau + k\tau) = (1 - h) R(\tau + k\tau) + h c\{\tau + (k-1)\tau\} \quad \dots \quad (3.5.6)$$

ここに

$$h = e^{-\alpha \tau} g = e^{-\frac{1}{c} r \tau} g \quad \dots \dots \dots \quad (3.57)$$

で表わされ、閉のときの時定数とゲート幅で定まる定数で残留係数と呼ばれる。

式(3.56)の右辺第1項は条件①に、第2項は条件②に基づくものである。

第2項に対し、順次1周期前の値を入れていくと

$$\begin{aligned} C(t-k\tau) &= (1-h)R(t-k\tau) \\ &+ (1-h)hR\{(t-(k-1)\tau\} \\ &+ (1-h)h^2R\{(t-(k-2)\tau\} \\ &+ \dots \dots \dots \\ &+ (1-h)h^kR(t) \\ &= (1-h)\sum_{r=0}^{k-1} h^r R\{t-(k-r)\tau\} \quad \dots \dots \dots \quad (3.58) \end{aligned}$$

同様に、それぞれの時刻に対して求めると

$$\begin{aligned} C\{t-(k-1)\tau\} &= (1-h)\sum_{r=0}^{k-1} h^r R\{t-\{(k-1)-r\}\tau\} \\ &\dots \dots \dots \\ &\dots \dots \dots \\ C\{t-(k-n)\tau\} &= (1-h)\sum_{r=0}^{k-n} h^r R\{t-\{(k-n)-r\}\tau\} \\ &\dots \dots \dots \\ &\dots \dots \dots \quad (3.59) \end{aligned}$$

考察の対象を完全連続として $k \rightarrow \infty$ とし、平坦保持の特性を加味すれば、出力波形のラプラス変換は

$$\begin{aligned} C_f(s) &= \left[\frac{1 - e^{-ts}}{s} \right] \cdot \left\{ (1-h)e^{kts} \cdot \sum_{r=0}^{\infty} h^r e^{-rts} \right. \\ &+ (1-h)e^{(k-1)ts} \cdot \sum_{r=0}^{\infty} h^r e^{-rts} \\ &+ \dots \dots \dots \\ &+ (1-h)\sum_{r=0}^{\infty} h^r e^{-rts} \} \\ &= \left[\frac{1 - e^{-ts}}{s} \right] \cdot \sum_{r=0}^{\infty} (he^{-ts})^r \cdot \sum_{k=0}^{\infty} e^{-kts} \cdot (1-h) \\ &= \left[\frac{1 - e^{-ts}}{s} \right] \cdot \left[\frac{1}{1 - he^{-ts}} \right] \cdot \left[\frac{1}{1 - e^{-ts}} \right] \cdot (1-h) \\ &\dots \dots \dots \quad (3.60) \end{aligned}$$

式(3.55)と式(3.60)より伝達関数 $T_f(s)$ は

$$T_f(s) = \frac{C_f(s)}{R(s)} = \left(\frac{1 - e^{-ts}}{s} \right) \left(\frac{1 - h}{1 - he^{-ts}} \right) \quad \dots \dots \dots \quad (3.61)$$

零次ホールド回路が正規動作のときの伝達関数を $T_O(s)$ 、残留効果にもとづくものを $T_{r1}(s)$ とすると

$$\begin{aligned} T_O(s) &= \frac{1 - e^{-ts}}{s} \\ T_{r1}(s) &= \frac{1 - h}{1 - he^{-ts}} \end{aligned} \quad \left. \right\} \quad \dots \dots \dots \quad (3.62)$$

ゆえに

$$T_f(s) = T_0(s) \cdot T_{r1}(s) \quad \dots \quad (3.63)$$

この式を z 変換して、パルス伝達関数を求める

$$T_f(z) = (1-h) \frac{z}{z-h} \quad \dots \quad (3.64)$$

式(3.61)と(式3.62)から等価ブロック線図を画くと、図3.70となる。

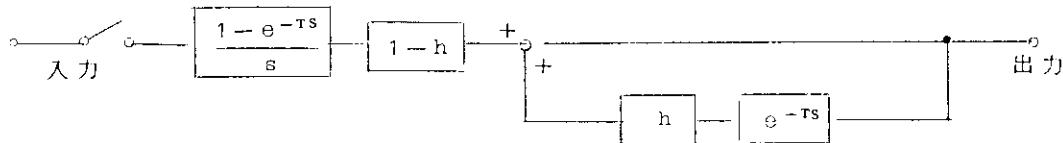


図3.70 残留効果を持つ零次ホールド回路

時定数が大となると $h \approx 1$ となり、振幅減衰をともなうのでこれを補償し、さらに出力をゲイトすれば、 $(1 - e^{-Ts})/s$ のホールド特性は消失して、図3.71のような遅延帰還回路と全く等価となる。

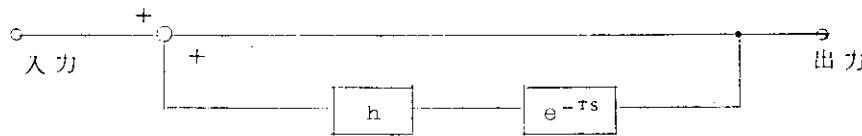


図3.71 単純化された等価回路

本回路を用いた周期信号のS/N改善はこのような遅延帰還特性によるものといえる。

(iii) 周波数特性

式(3.62)で $s \rightarrow j\omega$ において、周波数特性を求める

$$\begin{aligned} T_{r1}(j\omega) &= \frac{1-h}{1-h e^{-j\omega T}} \\ &= \frac{(1-h)[(1-h \cos \omega T) + j h \sin \omega T]}{1+h^2 - 2 h \cos \omega T} \quad \dots \quad (3.65) \end{aligned}$$

$$|T_{r1}(j\omega)| = \frac{1-h}{\sqrt{1+h^2 - 2 h \cos \omega T}} \quad \dots \quad (3.66)$$

$$\angle T_{r1}(j\omega) = -\tan^{-1} \frac{h \sin \omega T}{1-h \cos \omega T} \quad \dots \quad (3.67)$$

$$\begin{aligned} T_f(j\omega) &= T_0(j\omega) \cdot T_{r1}(j\omega) \\ &= |T_f(j\omega)| \angle T_f(j\omega) \quad \dots \quad (3.68) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} |T_f(j\omega)| &= |T_0(j\omega)| \cdot |T_{r1}(j\omega)| \\ &= T \cdot \frac{\sin \omega T / 2}{\omega T / 2} \cdot \frac{1-h}{\sqrt{1+h^2 - 2 h \cos \omega T}} \quad \dots \quad (3.69) \end{aligned}$$

式(3.67)、式(3.69)を h をパラメータに画くと図3.72、図3.73のようになる。

(b) 過渡応答および安定度

(i) 過渡応答

入力に時刻 $t=0$ において周期 T の単位パルス列が、加わったときの出力波形はつぎのようにして求まる。

入力波形を z 変換すると

$$R(z) = \frac{z}{z-1} \quad \dots \quad (3.70)$$

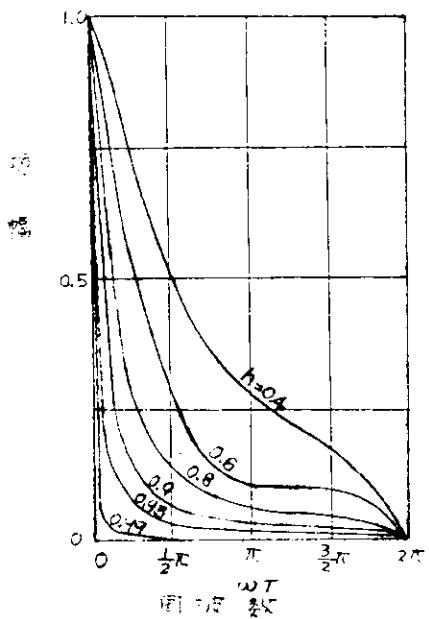


図 3.7.2 周波数対振幅関係

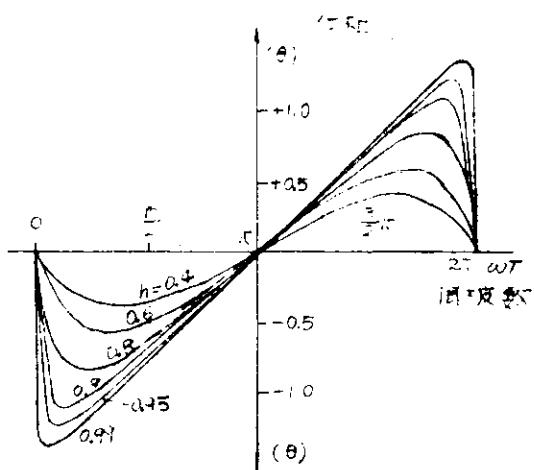


図 3.7.3 周波数対位相の関係

出力波形の z 変換 $C(z)$ は

$$C(z) = R(z) T(z) \quad (3.7.1)$$

ここで $T(z)$ はパルス伝達関数である。

平坦保持特性であるから、式(3.6.4)、(3.7.0)、(3.7.1)より

$$C_F(z) = \frac{(1-h)z^2}{(z-1)(z-h)} \quad (3.7.2)$$

逆 z 変換により時間波形 $f(nT)$ を求めると

$$\begin{aligned} f(nT) &= \frac{1}{2\pi j} \oint_{|z|=1} C_F(z) z^{n+1} dz \\ &= \frac{(1-h)}{2\pi j} \oint_{|z|=1} \frac{z^{n+1}}{(z-1)(z-h)} dz \quad (3.7.3) \end{aligned}$$

積分路は単位円に沿つて行なう。

式(3.7.3)の右辺の積分を留数計算によつて求めると、

$$R_B = \left[\frac{z^{n+1}}{z-h} \right]_{z=1} + \left[\frac{z^{n+1}}{z-1} \right]_{z=h} = \frac{1-h^{n+1}}{1-h}$$

したがつて

$$f(nT) = 1 - h^{n+1} \quad (3.7.4)$$

また、

$$\begin{cases} f(0) = \lim_{z \rightarrow \infty} C_F(z) = 1-h \\ \lim_{n \rightarrow \infty} f(nT) = \lim_{z \rightarrow 1} (1-z^{-1}) C_F(z) = 1 \end{cases}$$

式(3.7.4)を図示すると、図 3.7.4 のように階段式の上昇曲線となる。

つぎに式(3.7.4)より包絡線を求める。

残留係数 h は $C_F \rightarrow \infty$ となると $h \rightarrow 1$ となり、残留効果のけん引を範囲では $h \approx 1$ と考えられる。

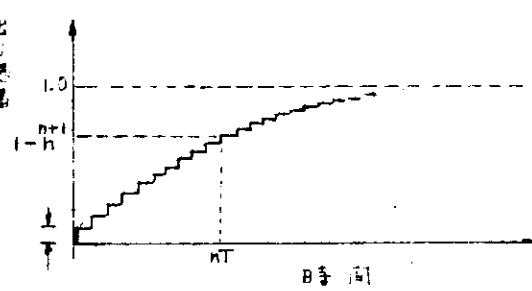


図 3.7.4 過渡応答曲線

したがつて、

$$\begin{aligned} h = 1 - \Delta \\ \Delta^2 \neq 0 \end{aligned} \quad \left. \right\} \quad \dots \quad (3.75)$$

とすると、一次近似として包絡線 $f(t)$ は

$$f(t) \doteq -e^{-\frac{1-h}{T} t} \cdot t \quad \dots \quad (3.76)$$

$$t = mT \quad (m: \text{正整数})$$

出力が定常値の約 6.3 % に達するまでの時間は $f(\tau) = 1 - e^{-1}$ となり、 $\tau = m \cdot T$ とすれば

$$M = \frac{1}{1-h}$$

$h = 0.9$ とすると $M = 1.0$ 、入力パルス 1.0 回目となる。このふくれは方位についてみれば誤差の原因となるので、残留係数 h の値はつきに検討する S/N 改善度と相反することになり、両者から最適値がきめられる。

(ii) 安定度

(a) 帰還回路としての安定度

本回路のパルス伝達関数 $T_f(z)$ は式 (3.64) より

$$T_f(z) = (1-h) \frac{z}{z-n}$$

$T_f(z)$ の極は $z = n$ であるが、 $\alpha \tau_g \geq 0$ であるから $n \leq 1$ すなわち極はかならず z 平面単位円内にあるから、絶対安定といえる。

(b) 繰返周期のゆらぎ

本回路の特徴のひとつとして、ゲートパルスの存在があり、いま、信号とゲートパルスの周期にゆらぎがあると、当然ゆらぎ雜音として、出力の S/N の劣化となる。

しかし、この問題はつきに示す条件を満たせば、ゆらぎの影響は無視できる。

(1) $\tau_s > \tau_g \quad \tau_s: \text{信号パルス幅}$

(2) $0 < \alpha < \tau_s - \tau_g \quad \alpha: \text{パルス相互の前線のゆれ}$

実際にこの相間器を多素子用いて信号変換を行なうことになるので、遅延パルス分配器の出力のゆらぎがここにあらわれてくる。

最近の技術ではこのような条件を満たす回路を製作することは容易である。

また、信号とゲートパルスの相互の関係を一定のまま、いわゆるレーダ自体の繰返し周期にゆらぎが生じても、周波数特性の項で検討したように、自動的に信号の主スペクトルただ 1 個を対象として動作するため、一般的のコヒ・フィルタのような複雑さはおこらない。

(c) S/N 改善度

レーダで得られる目標信号のように、繰返周期が有限なばいの S/N 改善度について考える。

有限信号に対する改善度の取扱いは一般に、信号の周波数スペクトルが線スペクトルより連続スペクトルに変るため周波数領域では複雑になる。

しかし、この場合、対象スペクトルは $0 \sim \omega_0 = 2\pi/T$ の間の主スペクトルのみであるから、過渡応答の式 (3.76) を用いると、周波数領域をはなれて時間領域となるため、容易に考察できる。

ここで、つぎのようを仮定をする。

- ① 信号は周期 T 、単位振幅パルスの波列が $t = 0$ のとき印加されたとする。
- ② 雜音は無限時間で考えたものとする。

③ 時刻 mT における瞬時の入、出力信号を P_{iSm} 、 P_{oSm} とする。

④ 同じく雑音電力を P_{iNm} 、 P_{oNm} とする。

S/N 改善度 G_m は

$$G_m = \frac{P_{oSm}}{P_{iSm}} / \frac{P_{oNm}}{P_{iNm}} \quad \dots \quad (3.77)$$

平坦保持として過渡応答の式から

$$P_{oSm} = |f(t)|^2 \Big|_{t=mT} \cdot P_{iSm} \quad \dots \quad (3.78)$$

したがつて

$$\frac{P_{oSm}}{P_{iSm}} = |f(t)|^2 \Big|_{t=mT} \quad \dots \quad (3.79)$$

また、雑音電力に対しては仮定から、電力スペクトル $\phi_N(\omega_n) = \text{一定}$ とみなせるので、

$$P_{iNm} = \int_0^{\omega_0} \phi_N(\omega_n) d\omega = \phi_N(\omega_n) \cdot \omega_0 \quad \dots \quad (3.80)$$

$$\begin{aligned} P_{oNm} &= \int_0^{\omega_0} \phi_N(\omega_n) |T(j\omega)|^2 d\omega \\ &= \phi_N(\omega_n) \int_0^{\omega_0} |T(j\omega)|^2 d\omega \\ &= \frac{P_{Ni}}{\omega_0} \int_0^{\omega_0} |T(j\omega)|^2 d\omega \end{aligned} \quad \dots \quad (3.81)$$

の 2 式が成立し、したがつて、

$$\begin{aligned} \frac{P_{iNm}}{P_{oNm}} &= \frac{\omega_0}{\int_0^{\omega_0} |T(j\omega)|^2 d\omega} \\ &= \left[\frac{1}{2\pi j} \oint T(z) T(1/z) \frac{dz}{z} \right]^{-1} \end{aligned} \quad \dots \quad (3.82)$$

$$\begin{aligned} G_T = mT &= \frac{|f(t)|^2 \Big|_{t=mT}}{\frac{1}{2\pi j} \oint T(z) T(1/z) \frac{dz}{z} \Big|_{|z|=1}} \\ &\doteq [G]_{t=\infty T} \left[1 - e^{-\frac{1-h}{T} t} \right]^2 \Big|_{t=mT} \\ &= [G]_{t=\infty T} \left[1 - 2e^{-\frac{1-h}{T} t} + e^{-\frac{2(1-h)}{T} t} \right] \Big|_{t=mT} \end{aligned} \quad \dots \quad (3.83)$$

ここに

$$[G]_{t=\infty T} = G = (1+h)/(1-h) \quad \left. \begin{array}{l} t=mT \\ m: \text{正整数} \end{array} \right\} \quad \dots \quad (3.84)$$

たとえば、 $h = 0.9$ とすると $m = 20$ で改善度は G_∞ の約 70 % となる。

図 3.75 は式 (3.84) を、 h をパラメータにして図示したものである。

(d) ゲート幅と S/N 改善度の関係

これまでの動作考察ではゲート幅は無限小のインパルス状波形と仮定しており、いかえれば、ゲート幅内に入力波形の変化はおこらないとしている。

したがつて、諸特性、なかでも S/N 改善度は $h = \exp(-\tau_g/C_r)$ で定義された残留係数により一義的に

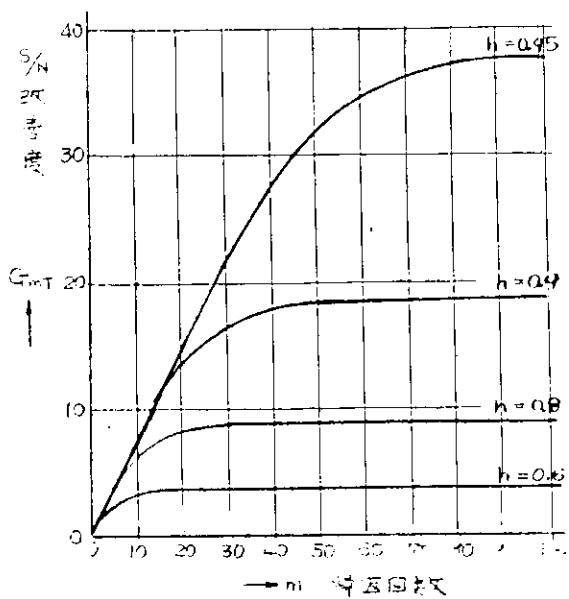


図 3.7.5 繰返し S/N 改善度

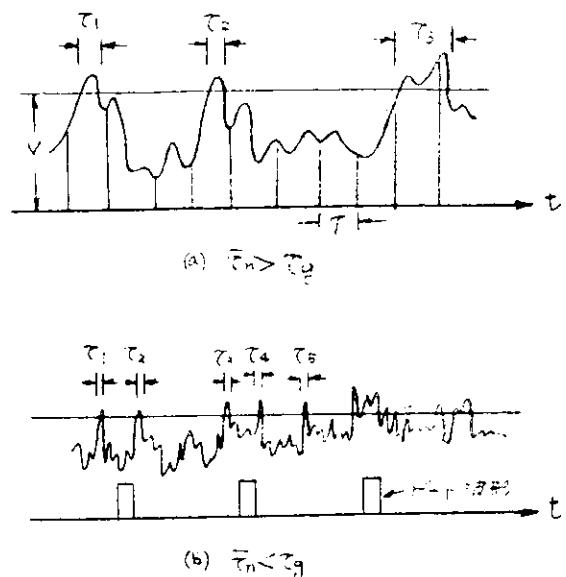


図 3.7.6 雑音とゲート波形

定まつてくる。

これはゲート幅 τ_g のいかんにかかわらず、時定数との比さえ一定としてやれば、 h は変わらないので同じ特性が得られることを意味している。

しかし、入力として考える雑音電圧波形において、その平均パルス幅 $\bar{\tau}_n$ がゲート幅 τ_g よりせまいときは既述のような仮定は成立せず、 S/N 改善度は劣化してくる。図 3.7.6 は雑音とゲート波形の関係を示したものである。

相関器は図 3.7.0 で示したような等価回路になり、周期 T で遅延帰還動作を行なうものであり、ゲート幅が $\bar{\tau}_n$ に比してひろい場合の改善度劣化はこの周期 T と τ_g の関係からきまつてくる。

$\bar{\tau}_n < \tau_g$ の場合の改善度 G' は

$$G' = \frac{P_{S0}}{P_{N0}} \cdot \frac{R_N(0)}{S(t)^2} \\ = \frac{R_N(0)}{R_N(0) + 2 \sum_{i=1}^{\infty} h^i R_N(iT)} \cdot \frac{1+h}{1-h} \quad (3.8.5)$$

実際に、 $i = 2$ 以上の相関係数は無視し得るから、

$$G' = \frac{R_N(0)}{R_N(0) + 2h R_N(T)} \cdot \frac{1+h}{1-h}$$

さらに

$$h \cdot \frac{R_N(T)}{R_N(0)} \ll 1 \quad \text{と考えてよいから}$$

$$G' = \frac{1+h}{1-h} \cdot \left\{ 1 - 2h \left(\frac{R_N(T)}{R_N(0)} \right) \right\} \quad (3.8.6)$$

すなわち、雑音の相関長が周期 T 以上になる場合、 S/N 比改善度は

$$2h \left(\frac{R_N(T)}{R_N(0)} \right) \quad \text{だけ、減少する結果となる。}$$

ここで、 $R_N(\tau)$ ($\tau = T$ あるいは 0) は雑音の自己相関係数、 $S(t)$ ：信噪比、 P_{N0} ：雑音電力、 P_{S0} ：信号電力

電力である。

雑音の相関長に影響を与える要素はもちろん、高周波部、中間周波部の帯域、検波器の特性等が考えられるが、最も大きな影響を及ぼすものはゲート幅およびゲート回路の時定数である。

すなわち、時定数をもつた回路によるGatingの結果、雑音スペクトラム分布がせまくなると同時に、相関長が周期T以上となるためである。

式(3.8.6)を変形すると

$$G' = \left(\frac{1+h}{1-h} \right) \left(1 - \frac{C^2 r^2}{T^2} \right) \quad (3.8.7)$$

となるが、ここで $h \approx 1$ の範囲では

$$h \approx 1 - \frac{\tau_g}{C_r}, \quad \therefore C_r \approx \frac{\tau_g}{1-h} \quad \text{となつて}$$

$$G' = \left(\frac{1+h}{1-h} \right) \left\{ 1 - \frac{\tau_g^2}{T^2 (1-h)^2} \right\} \quad (3.8.8)$$

図3.7.7は残留係数hをパラメータとして、 (τ_g/T) に対する改善度の補正比率を示したものである。

(e) 実験結果

相関器1素子について、S/N改善度の実測を行ない、理論的考察と比較した結果以下に示すようになつた。

(i) ゲート幅、ホールドコンデンサと改善度の関係

図3.7.8は、信号ピーク電圧対雑音実効値の関係をゲート幅 τ_g とホールドコンデンサ容量をパラメータとして求めた図で、改善度は $\sqrt{\alpha}$ で示されている。

この場合、受信機の帯域幅約3MHz、検波器は直線検波特性であり、信号パルス幅0.66μs、ゲート幅は検波後の平均雑音パルス幅 τ_h に対し、せまくし $\tau_g = 0.11\mu s, 0.22\mu s, 0.36\mu s$ としている。

(ii) ゲート幅がひろいとき

表3.8はゲート幅を0.6μsまでひろくして $\tau_h < \tau_g$ の条件でゲート幅による改善度補正の近似理論と実測の対照を示した表である。

当然、この場合、信号パルス幅は0.6μsよりも広いものとしている。

表3.8 理論と実測値の対照

理 論 値 (αB)		実測値 (αB)
未補正	補 正	
3.0	2.85	2.85
3.15	3.0	3.0
3.3	3.05	3.05

ゲート幅 0.6μs

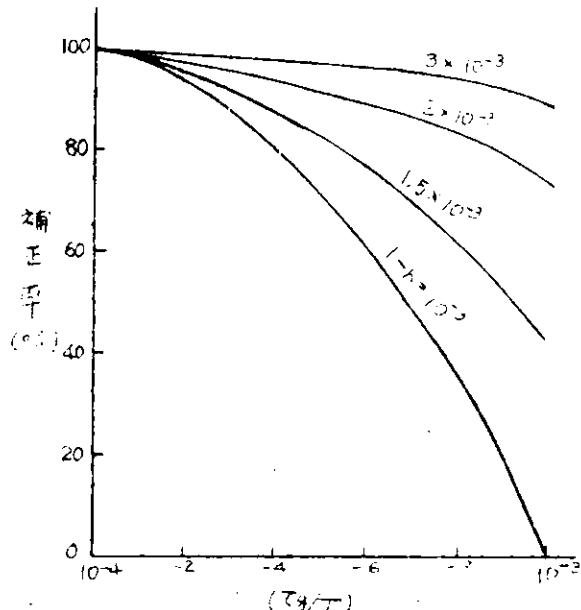
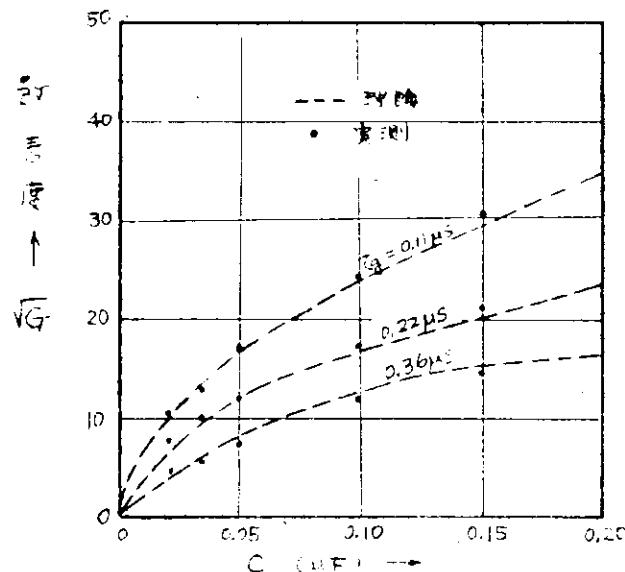


図3.7.7 ゲート幅と改善補正率の関係



(iii) Aスコープ上確認

レーダ受信信号として、マイクロ波標準信号発生器(S+G)を使用し、相関器一素子でゲート偏移を3ns/sec(レーダ距離約4.50m/sec)の速度でストローブさせたときの出力をAスコープ上に表示したのが、図3.7.9である。

実際の装置では次章で説明のとおり、相関器を多素子並べ、ゲートのストローブを行なわず、信号の搬送速度をリアルタイムで行なわせることになる。

実験装置はS/N改善度、過渡応答速度などを考慮して $h = 0.9$ 、相関器は0.5μsおきに並べる方法をとっている。

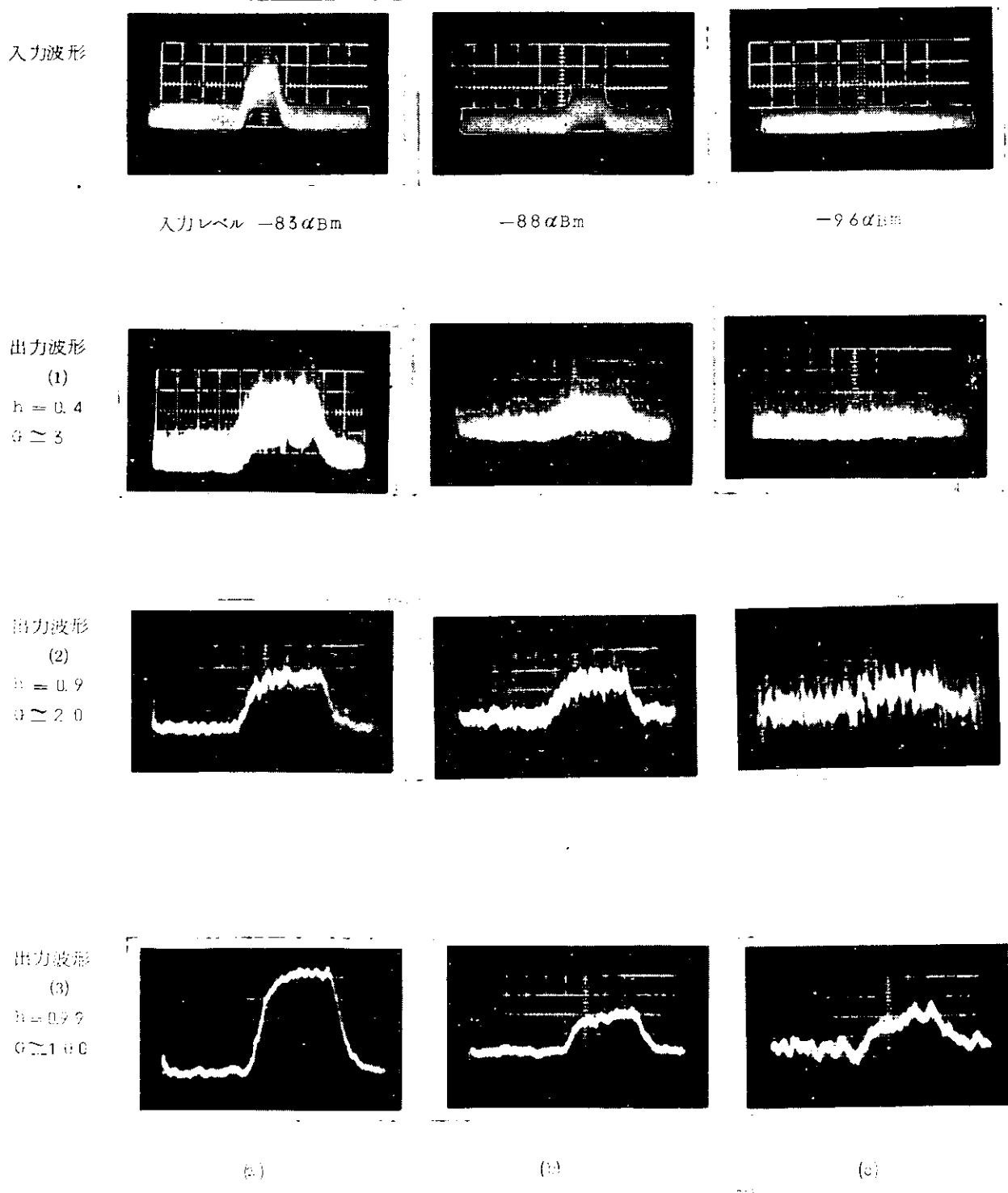


図3.7.9 S/N比改善波形

(3) 実験および結果

(3-1) 実験計画

前節において述べたように、相関器一素子の基本的な特性であるN/S改善度および過渡応答について理論的な考察と実験結果の妥当性が確認されている。

しかし、相関器一素子ではゲート信号を距離に対してストローブさせ、Aスコープ上で雜音除去の効果を確認しているため、信号変換の処理に時間がかかり、方位に対する考慮はまつたくなされていない。

そこで、この実験では相間器を約80個用い、4マイル以上の距離について、実時間で信号処理のできる装置を試作し、これを船舶用レーダに付加し、PPIスコープ上に映像を表示させる方法をとることにした。

実験は海上における実際の映像について、信号処置の効果を確認するとともに、実験結果に定量性を持たせるため、マイクロ波標準信号発生器を用いて受信レベル既知の目標と雜音（周期性の干渉波も含め）を加え、その除去効果を確認することにした。

PPIスコープ上の映像はすべて写真に撮影して、多人数による客観的な判定ができるようにした。

実験の具体的な構成は図3.8.0、および図3.8.1に示す。

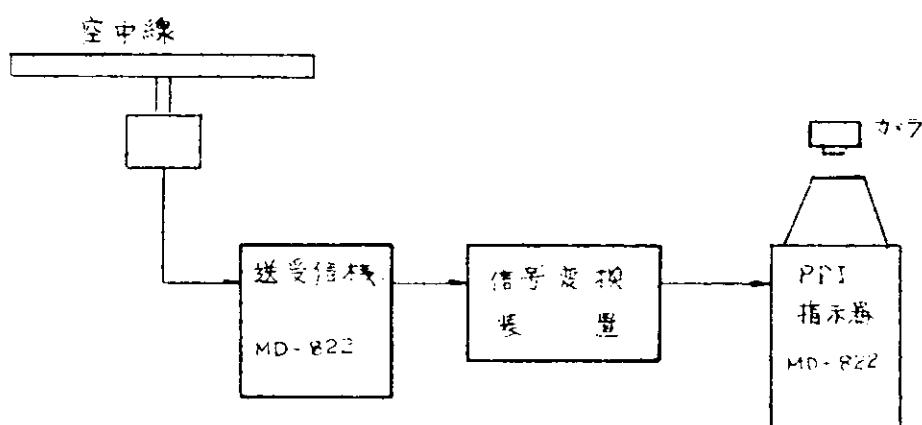


図3.8.0 海上目標信号変換系統図

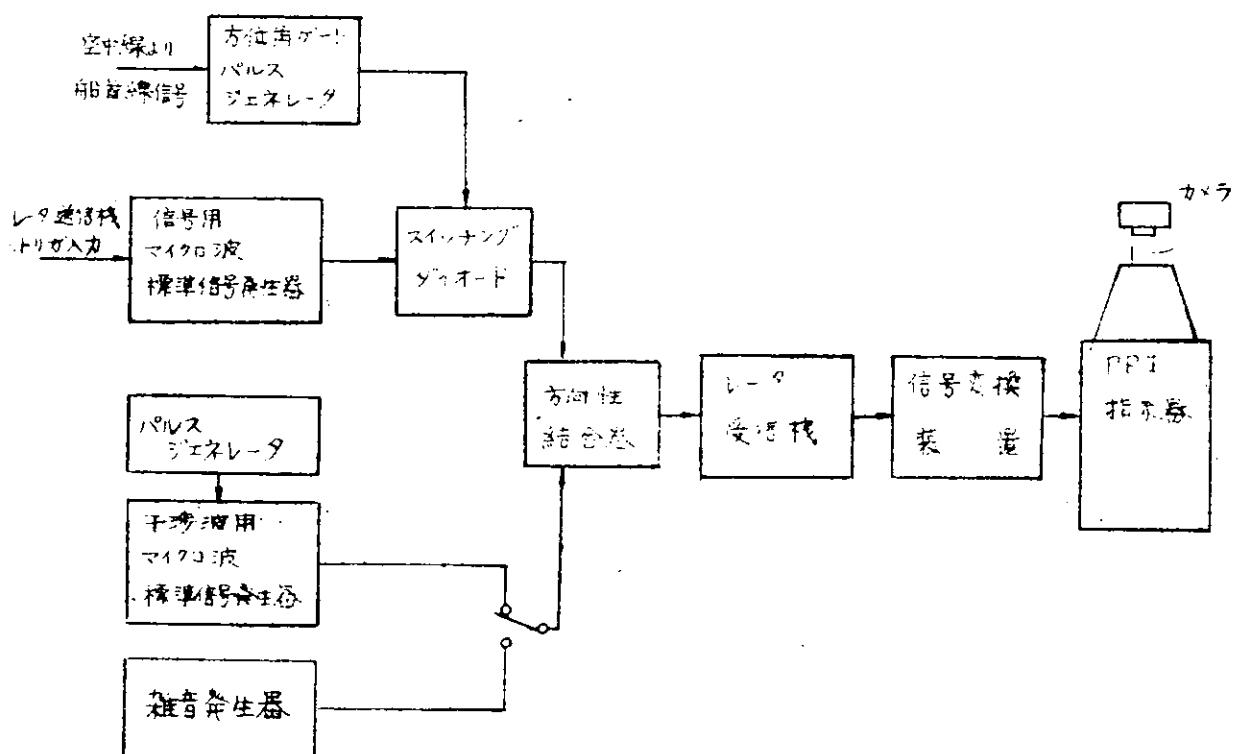


図3.8.1 標準映像による信号変換系統図

(3-2) 実験装置

(a) M D-822型レーダ

大型船舶用レーダとしての性能を有する機種で、表3.9にその主要性能を示す。

表3.9 M D-822 レーダ性能表

No.	項目	性能
1	周波数帯	9375 ± 4.5 MHz
2	送信出力	5.0 kW (ピーク値)
3	パルス幅	0.1 μs、0.8 μs 切換
4	繰返周波数	1600 PPS、600 PPS 切換
5	空中線回転数	1.5 RPM
6	空中線ビーム幅	1.3° (水平)、2.0° (垂直)
7	距離分解能	25 m 以下 (1マイルレンジ)
8	指示方式	PPI 方式
9	指定ブラウン管	30 cm (12インチ) 静電ホーカス
10	測定距離範囲	1、2.5、5、10、25、50 マイル 各レンジとも 50% (1マイルを除く)
11	測定距離可変範囲	1/5、1/2、1、2、5、10 マイル
12	測定距離目盛	0.5 ~ 50 マイル
13	移動距離目盛	水平、垂直、約 1/8 半径まで可能
14	中心位置調整	海面反射抑圧装置
15	補助装置	雨雪反射除去装置 線首線表示装置
16	所要電力	1.0 KVA

また、実際に用いたレーダの外観を図3.8.2に示す。

(b) 信号変換装置

信号変換装置のブロックダイヤグラムは図3.8.3に示すようになる。

また、外観図は図3.8.4に示す。

以下、各回路について説明する。

(i) 遅延パルス分配回路はフリップ・フロップを用いた分周回路と AND ゲートの組合せからなる分配器で構成される。回路素子はすべて集積回路 (IC) を用いている。

フリップ・フロップ

M5373P (Dual J-K Master-Slave F/F)

NAND ゲート

M5340P (Quadruple 2-Input AND Gate)

(ii) スタート、ストップ発振器はスタートパルスに対し、いつも完全に同期のされたパルス列を発生するもので、図3.8.5に示すようである。パルス列の間隔はこのばい 0.5 μs である。

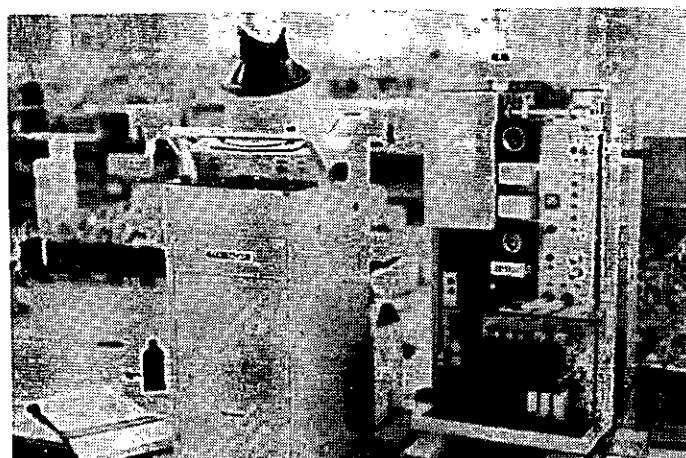


図3.8.2 実験に用いたレーダ (MD-822)

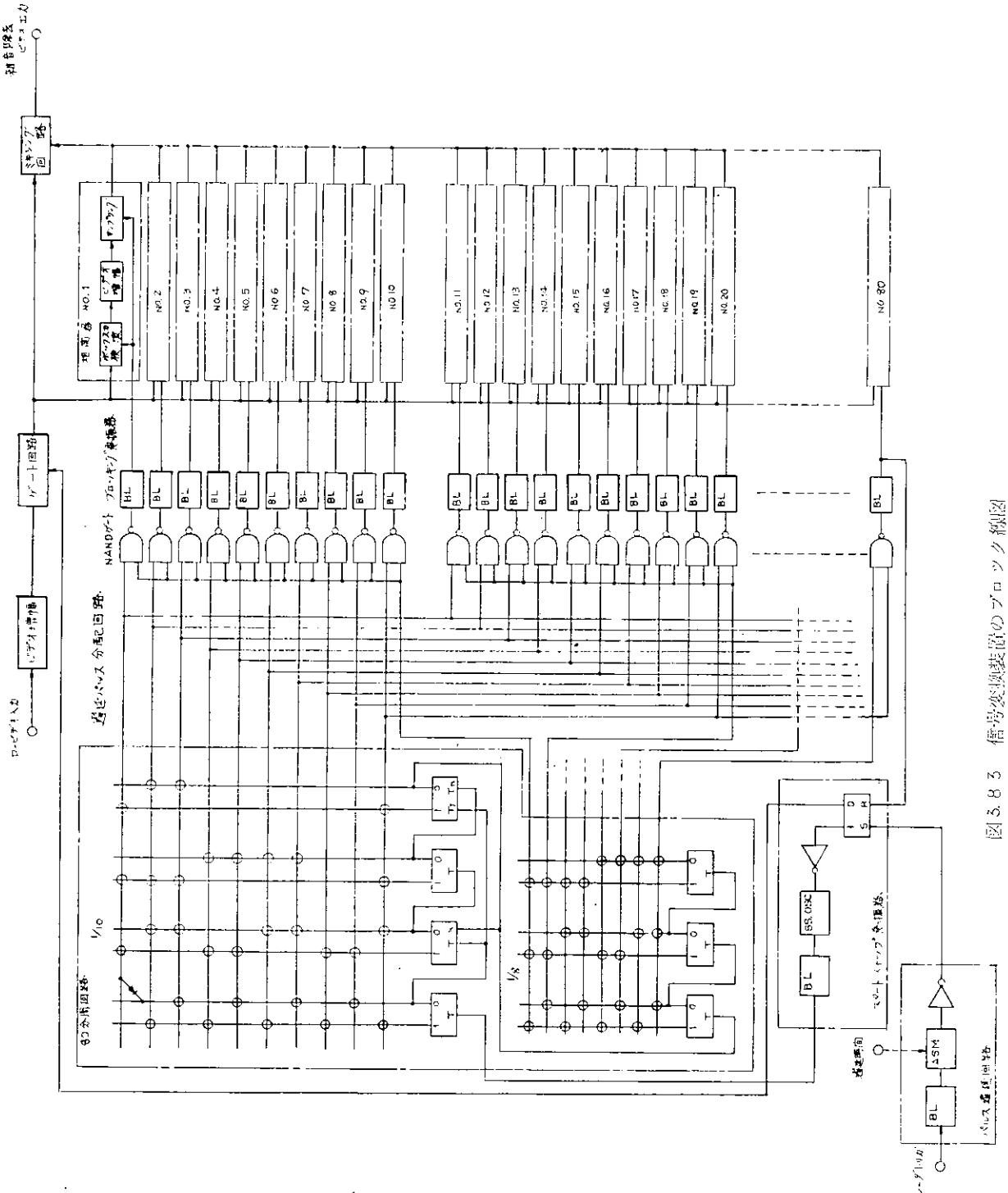


図 5.83 優秀変換装置のプロック線図

発振回路に QO 2 によるハートレイ回路の変形で、QO 1 によつて、発振が制御される。いま、フリップ、フロップ (FF) がリセット状態で、①点の電圧が H レベル (約 +8 V) になつていると、QO 1 は ON となり QO 1 を見かけ上、短絡したことになり、発振は停止している。

スタートパルスがきて、FFを反転すると①点は L ベル (0 V) となり、QO 1 は OFF となつて、

直ちに発振が開始される。

必要な数だけ (この場合 80 パルス) 発振すると、計数回路からストップパルスが送られてきて、FF をリセットし発振をとめる。

以上のように、この回路は間欠発振を行なりのでスタートパルスに対し発振開始時刻が異なると、相関器の出力では雑音となるので、この点が十分注意されている。

(iii) プロッキング発振器はパルス分配回路の出力を整形増幅し、正確なパルス幅で、つきの相関器を駆動する回路である。図 3.8.6 は具体的な回路で、PFN (パルス整形回路) を用いたプロッキング発振器である。

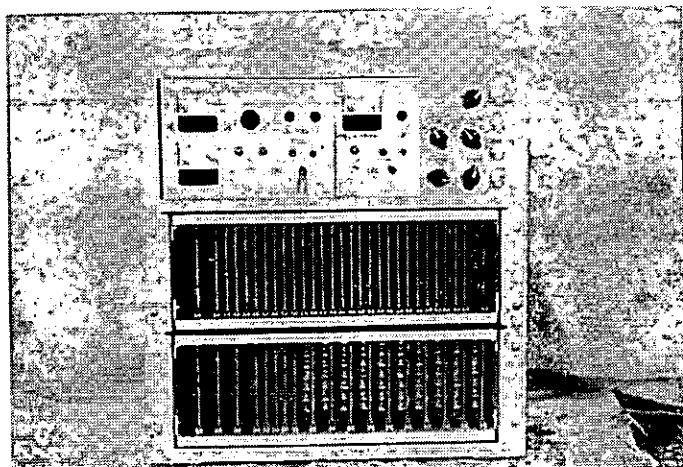


図 3.8.4 信号変換装置の外観図

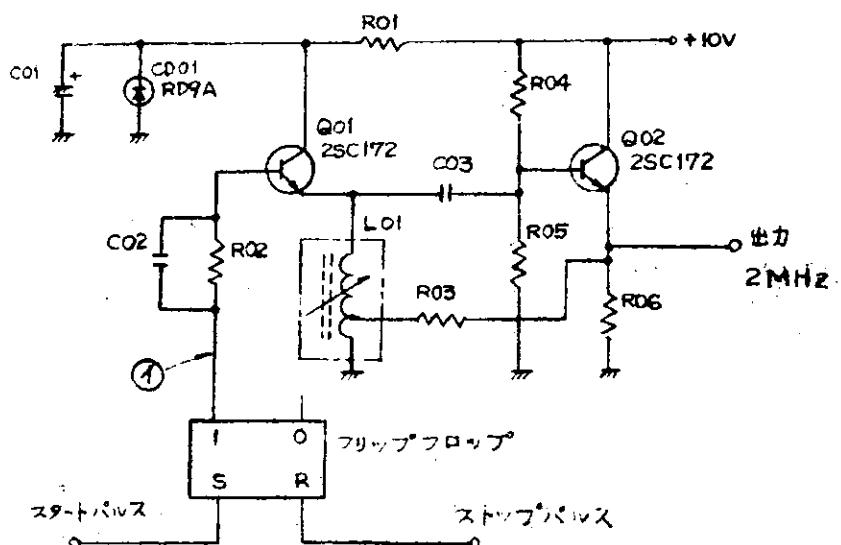


図 3.8.5 スタートストップ発振器回路図

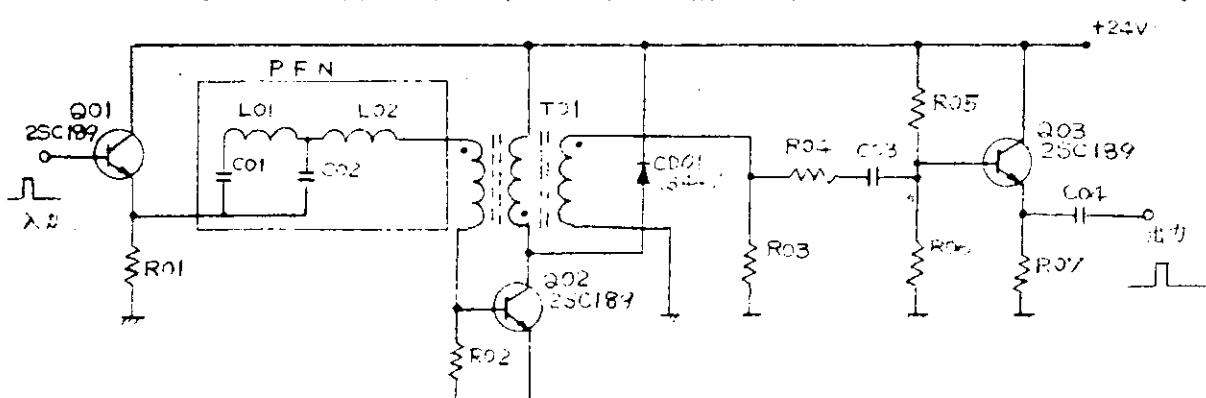


図 3.8.6 ブロッキング発振器回路図

(iv) 相関器はボックスカス力検波、ビデオ增幅、サンプリング回路からなり、回路は図 3.8.7 に示す。

距離ゲートパルスが加わると、ダイオード D1 ~ D14 はすべて導通状態となり、QO 2 をゲートパルスのピーク値近くまで充電する。

このとき、ビデオ信号があると②点の電位は①点より高くなり、QO 3 を充電する。

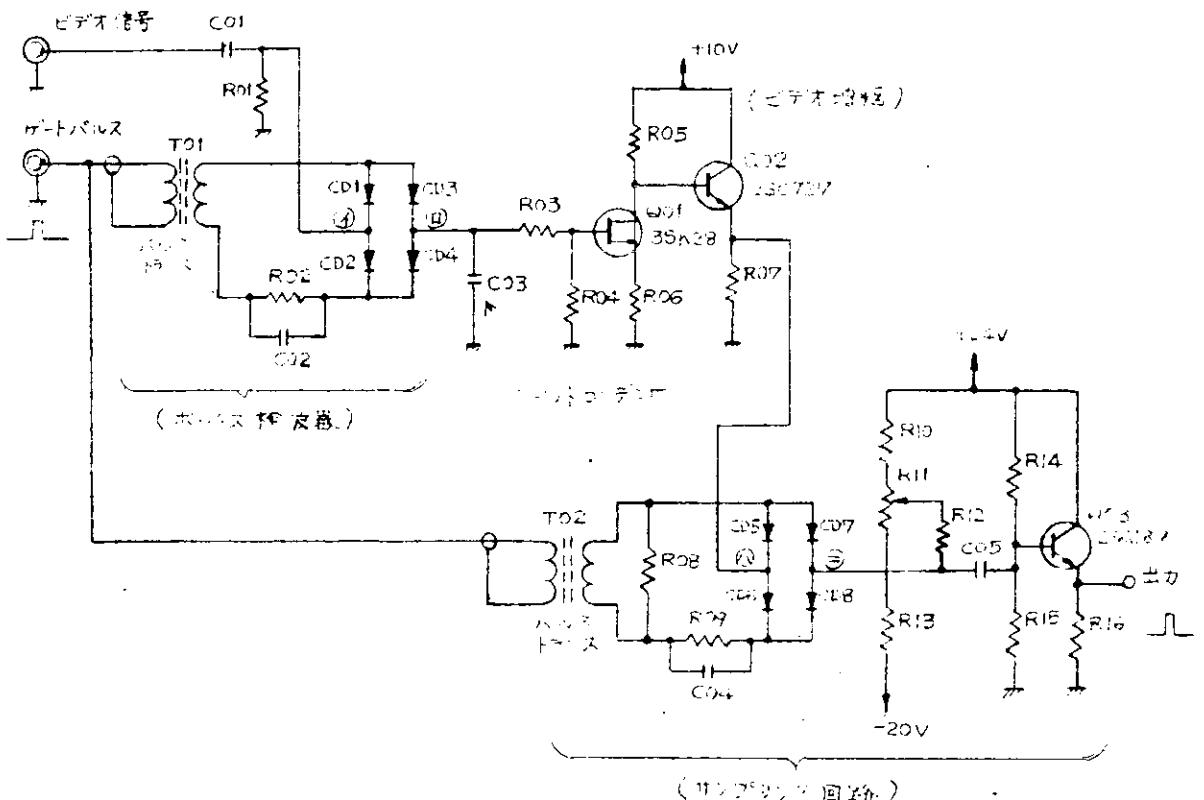


図 3.8.7 相関器回路図

ゲートパルスがなくなると、コンデンサ \$C_{02}\$ に充電されていた電荷は抵抗 \$R_{02}\$ によつて放電されるが、時定数を大きくしているので、つきのスイープまでは各ダイオードは逆バイアスがかかり、検波器は動作せずゲートパルスによつて、スイッチングされることになる。

このようにして得られたビデオ信号は \$C_{03}\$ に充電されるが、回路の時定数を適当に選ぶことによつて、スイープごとにビデオ信号が加算されていくことになる。

しかし、このままの信号ではホールド回路の作用によつて距離の情報が失なわれているので、次段のビデオ增幅回路で增幅後、ゲートパルスでふたたびサンプリングして、距離情報を持たせていく。サンプリング回路はボクスカ力検波器からホールド回路を除去したもので、ゲートパルスが加えられた時のみ、ビデオ信号を $0.5\mu s$ のパルスとして送り出す回路である。

(V) その他の回路

パルス遅延回路は信号変換を始める距離を規制する回路で、任意に設定することができる。

ゲート回路は信号変換を行なわない範囲のビデオ信号はそのまま通過させ、信号変換する範囲はロービデオを抑圧する回路である。

ミキシング回路はゲート回路を通過したロービデオと信号変換をした信号をひとつに集める回路で両者間相互に影響がないようにしている。

(3-3) 実験結果

(a) 海上実験結果

図 3.8.0 に示すように船舶用レーダに信号変換装置を付加し、海上目標に対する信号変換効果を測定した。

図 3.8.8 は港内において、他船レーダからの干渉妨害をうけた時の映像で、陸地は比較的はつきりしているが、近傍を通過する船舶はほとんど識別できない。

このような干渉妨害は近接するレーダ船が多いとき、しばしば発生するものである。

図 3.8.9 は信号変換装置によつて、妨害を除去した映像で、画面で見る限り完全に除去できている。

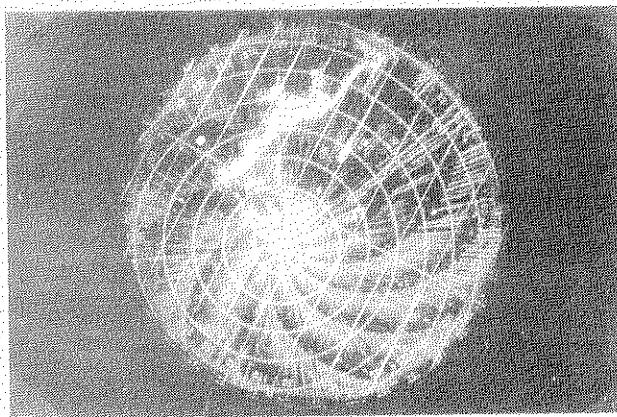


図3.8.8 近接レーダによる干渉妨害をうけた時

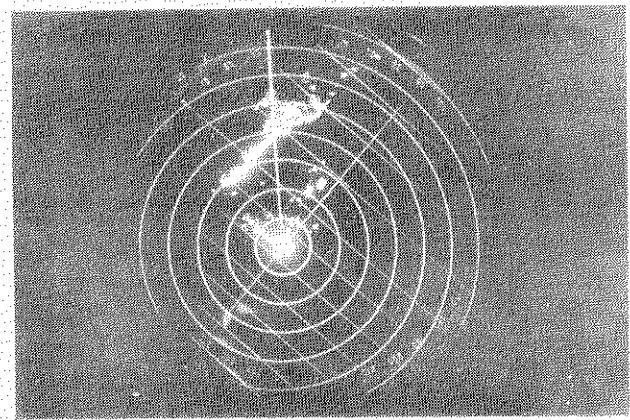


図3.8.9 妨害を除去した映像

(d) 標準映像信号による実験結果

図3.8.1に示す構成で標準映像と雜音、あるいは干渉波のレベルを感知として加えたときの信号変換装置の効果を測定した。

(i) 目標映像信号の発生

レーダ送信機からトライガ信号を得て、マイクロ波標準信号発生器（以下S・Oといふ）を制御し、一定時間遅延したマイクロ波信号を発生させる。パルス幅は1μsecとしている。

方位は空中線から船首線信号を得て、パルスジェネレータを動作させ、約3°の目標信号となるようナインチングダイオードを制御する。

(ii) 雜音の発生

雑音はダイオードを用いた白色雑音発生器の出力をレーダ受信機に直接加える。

(iii) 干渉波の発生

レーダの繰返し周波とは非同期で、パルス幅1～1.0μsec間任意に切換えてより、マイクロ波信号を発生させる。

方位に対してはまつたく制御せず全方向に對し一様に発生させる。

(iv) 雜音と映像信号のとき

図3.9.0は雑音と映像信号が混入したときの電子写真である。雑音と信号のレベル関係はいわゆるダンジョンシャル感度と呼ばれるもので、図3.9.1に示す

すうじを關係にある。

図3.9.0において、雑

音が強く出ている範囲が約4マイルに相当し、信号変換装置によつて雑音を除去できる範囲である。このときの信号受信レベルは-85dBmとしている。

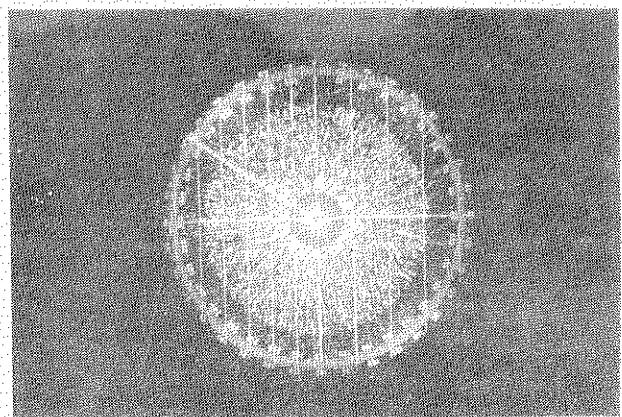


図3.9.0 雜音と目標を同時に表示

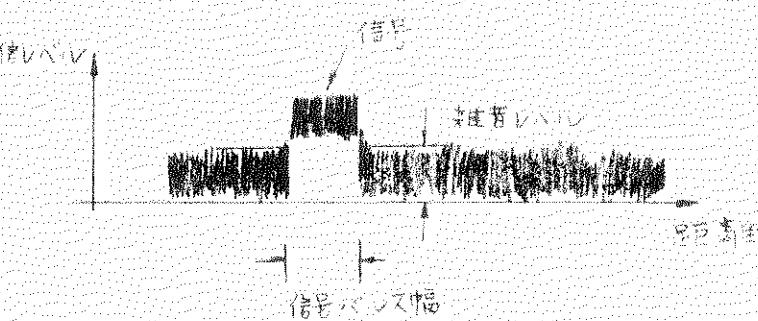


図3.9.1 ダンジョンシャル感度

図3.9.2は信号交換装置によって、雑音を除去したときのPPI映像であつて、4マイル間完全に除去されている。

(V) 干渉波と映像信号のとき

干渉信号は近接するレーダから直接受信するもので、受信レベルは雑音に比し相当高い。ここでは、干渉波と信号はいずれも飽和レベル（受信電力として -5.0 dBm 以上）としている。

図3.9.3は信号と干渉波が同時にPPIスクリーン上に現われた映像で、また、図3.9.5は干渉波を信号交換装置で除去した映像である。

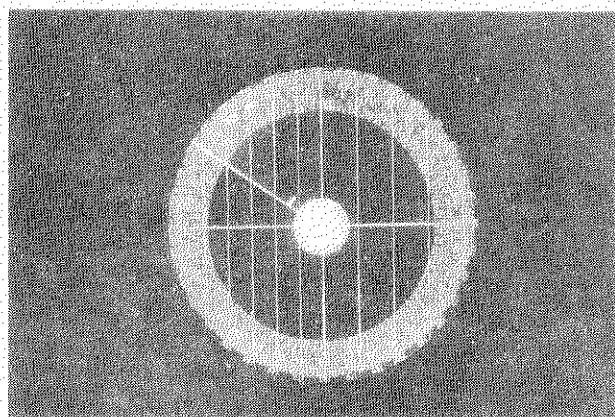


図3.9.2 雜音を除去したとき

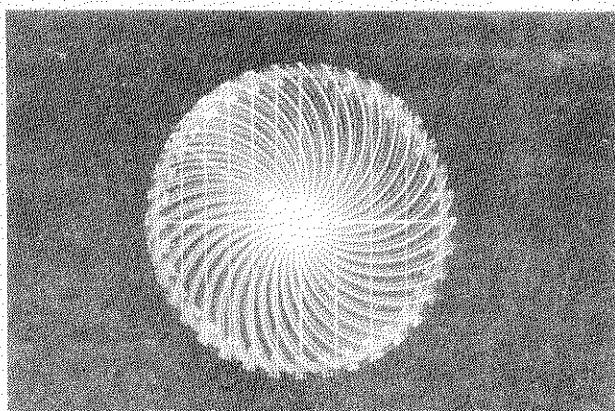


図3.9.3 目標と干渉波を同時表示

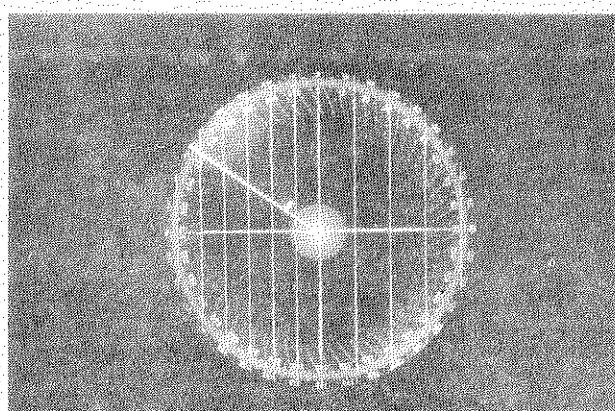


図3.9.5 干渉波を除去した映像

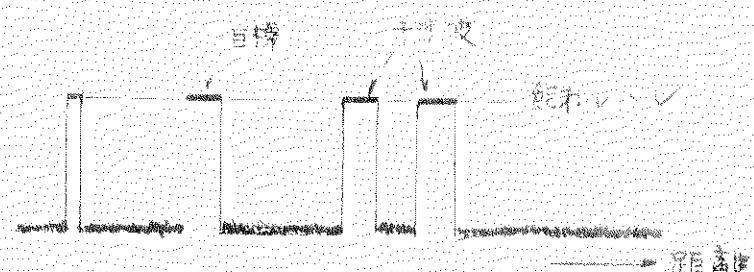


図3.9.4 目標と干渉波のレベル

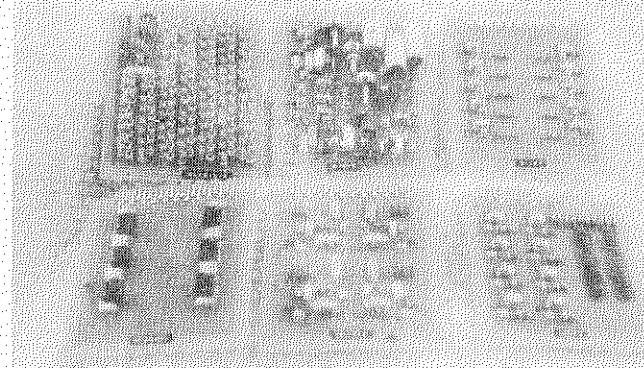


図3.9.6 信号処理装置ユニットパッケージの一部