

社 团 法 人

日本造船研究協会報告

第 65 号

昭 和 43 年 6 月

船舶の耐航性に関する実船試験 第63研究部会

Investigations on the Seakeeping Qualities of
Ships by Actual Ship Measurement The 63rd Research Committee

Report No. 65
The Shipbuilding Research Association of Japan
Tokyo, JAPAN
June 1968

東京都港区芝琴平町35番地
船舶振興ビル8階
社団 法人 日本造船研究協会
電話(502)2371~80(代)

第 63 研究部会委員名薄

部 会 長	田 宮 真	折 原 洋	加 名 生 浩 二
幹 事	石 井 信 夫	高 橋 幸 伯	田 中 銀 造
	塙 野 純 作	西 牧 興 郎	山 内 保 文
	田 況 一 郎	渡 边 四 郎	
	吉 見 俊 一	宇 川 豪	小 野 寺 哲 郎
委 員	浅 野 順 一	北 島 義 久	国 安 常 雄
	金 沢 修 一	鈴 木 宏	曾 我 峰 雄
	桑 山 守	宝 田 直 助	竹 鼻 三 雄
	田 井 虎 一	谷 初 藏	千 種 茂 雄
	田 崎 亮 一	西 岡 正 美	西 村 弘 道
	寺 田 泰 治	長 谷 川 敬	原 山 豊 道
	野 崎 政 治	平 井 達 雄	藤 井 斉 茂
	播 磨 哲 夫	松 岡 史 香	山 名 俊 茂
	藤 田 純 夫		
	渡 边 英 一		
編 集 長	田 宮 真		
編 集 員	小 畑 和 彦	高 橋 幸 伯	能 勢 義 昭
	毛 利 武 弘	山 内 保 文	吉 野 泰 平
	渡 边 四 郎		

Membership of the 63rd Research Committee

Chairman	Shin TAMIYA		
Secretaries	Nobuo ISHII	Hiroshi ORIHARA	Kōji KANAO
	Junsaku SHIONO	Yukinori TAKAHASHI	Ginzō TANAKA
	Ichirō TABUCHI	Kō NISHIMAKI	Yasufumi YAMANOUCHI
	Syun-ichi YOSHIMI	Shirō WATANABE	
Members	Jun-ichi ASANO	Tsuyoshi UKAWA	Tetsuo ONODERA
	Osamu KANAZAWA	Yoshihisa KITAJIMA	Tsuneo KUNIYASU
	Mamoru KUWAYAMA	Hiroshi SUZUKI	Mineo SOGA
	Toraichi TAI	Naonosuke TAKARADA	Mitsuo TAKEHANA
	Ryō TAZAKI	Hatsuzo TANI	Shigeo CHIGUSA
	Yasuharu TERADA	Masayoshi NISHIOKA	Hiromichi NISHIMURA
	Masaharu NOZAKI	Takashi HASEGAWA	Yutaka HARAYAMA
	Tetsuo HARIMA	Tatsuo HIRAI	Hitoshi FUJII
	Sumio FUJITA	Fumika MATSUOKA	Toshishige YAMANA
	Eiichi WATANABE		
Managing Editor	Shin TAMIYA		
Editor	Kazuhiko OBATA	Yukinori TAKAHASHI	Yoshiaki NOSE
	Takehiro MORI	Yasufumi YAMANOUCHI	Taihei YOSHINO
	Shirō WATANABE		

Investigations on the Seakeeping Qualities of Ships by Actual Ship Measurement

1. Introduction

Investigation of the 63rd Research Committee of the Shipbuilding Research Association of Japan had been carried out for three years from April 1963 to March 1966, partly sponsored by the Ministry of Transportation.

The first purpose of this committee was to develop new consistent system of measuring, recording and analysing, to be used in full scale tests of seakeeping quality of ship.

Another aim was to clarify the correlation of various kinds of ship responses in rough seas, and to obtain pertinent parameters to represent plainly the seakeeping quality of ship.

In the first place, we studied the development of experimental apparatus for ship use, and investigated various kinds of instrumental systems for full scale testing.

After the development of some new equipments, full scale seakeeping tests were conducted on a 12,000 t D W cargo liner from January to March in 1965.

2. Measuring Apparatus and Analysing System

2.1. Consistent System of Data Processing

At the beginning, considerations were given to the present stage of development in various kinds of measuring converters used in seakeeping performance quality test as well as the data handling system, including measuring, recording and analysing function.

Then the ideal and desirable features of the integrated data processing system were discussed in the following items.

- (1) History of the full scale test method
- (2) Various types of consistent systems of data processing
- (3) Comparison of analogue and digital processing
- (4) Present stage of development of recording and analysing system
- (5) Consistent system used in this investigation

2.2. Present State of Development of Apparatus

(1) Investigation of the Availability of Apparatus

For the measuring converters for full scale tests, the specifications and availabilities of the present apparatus were investigated.

Most of the items can be measured satisfactorily by the present converters, but the following problems seem to be left for further investigation or development.

- (a) High speed towing type ocean wave recorder
- (b) Long-term stability of resistance type strain gage
- (c) Simple deflection meter for ship bending
- (d) Simple stress frequency counter
- (e) Severe utility conditions as the instruments on board

2.3. Measuring, Recording and Analysing Apparatus Used in This Investigation

(1) Measuring Converters

- (a) Anemometer-anemoscope (Fig. 2.4)
- (b) Towing type ocean wave meter (Fig. 2.5~2.8)
- (c) Super sonic type water level meter
- (d) Pressure meter for deck wave loads
- (e) Shaft torque meter (Fig. 2.9)
- (f) Shaft thrust meter (Fig. 2.10)
- (g) Shaft revolution meter (Fig. 2.11)
- (h) Steering angle meter and steering frequency counter (Fig. 2.12)
- (i) Ship speed meter
- (j) Rolling and pitching meter (Fig. 2.13)
- (k) Yaw meter (Fig. 2.14)
- (l) Acceleration transducer
- (m) Electric resistance strain meter
- (n) Stress frequency counter

(2) Recording Apparatus

- (a) Electro-magnetic tape data recorder
- (b) Electro-magnetic oscillograph

(3) Data processing Apparatus

- (a) Frequency analyser (Fig. 2.22, 2.23)
- (b) Correlogram-spectrum analyser

3. Preliminary Tests

Three preliminary full scale tests were carried out on the following ships.

TANSEI MARU : Research ship of the Ocean Research Institute, University of Tokyo (250 GT).

HOKUTO MARU : Training ship of the Navigation Training Establishment, Ministry of Transportation (1,630 GT).

SHIKINE : Patrol ship of the Maritime Safety Agency.

The main purpose of these tests were to confirm and investigate the performance of the newly developed equipments.

4. Final Full Scale Tests on SEATTLE MARU

The final full scale tests were conducted on M. S. SEATTLE MARU (12,000 t DW) of the Mitsui O. S. K. Line Co.. Her principal particulars are in Tab. 4.1. The time process and the route of the test voyage are in Figs. 4.2 and 4.3 and measuring items in Tab. 4.3.

5. Test Results and Analysis

5.1. Outline of the Test

Regular tests were conducted 44 times from No.1 to No.44. In each test, the variation of each item in Tab. 4.3 was recorded continuously for about 15 minutes in the 14 channel data recorder. Environmental condition of each test is listed up in Tab. 5.1. Tests numbered from 101 to 143 are the measurements of rudder angle and steering frequency.

To our regret, the towing type ocean wave meter was destroyed by a storm in this test voyage, and also the super sonic type water level meter was somewhat out of order. Then the data of ocean wave in Tab. 5.1 were obtained only by visual measurements by eyes.

Loading condition at each harbour is shown in Tab. 5.2. In the outward voyage the loaded weight was about 33% of the dead weight, and about 75% in the homeward voyage.

5.2. Ship Oscillations

Characters of oscillations such as rolling, pitching and vertical accelerations were investigated, analysing the correlograms and spectra of these motions for representative test runs (Fig. 5.8~5.11). The following characteristics for each mode of oscillations were derived.

- (1) Because of its small damping, the rolling spectrum has a predominantly sharp peak around the ship's natural frequency. Namely the ship rolls rather regularly with nearly constant frequency, and the compulsory oscillations with wave encountering frequency have very little energy, for any angle of encounter to the waves.
- (2) On the contrary, the damping is larger for pitching and accordingly the frequency component of oscillation with its natural frequency is not so predominant in pitching spectrum, and the forced oscillation with the waves prevails, and results to give a rather more irregular pattern of oscillation for pitching than for rolling.
- (3) The natural period of rolling and pitching of this ship deduced from the spectra is as follows.

	Rolling	Pitching
Jan. 24, 1966 (outward voyage)	12.1 sec	7.48 sec
March 7, 1966 (homeward voyage)	14.7 "	7.84 "

- (4) In the spectrum of the vertical acceleration at the bow, there are not only the peaks corresponding to wave encounter and to pitching frequency but also a peak due to heaving oscillation.

5.3. Frequency Distribution of Hull Stress

The short-term and long-term frequency distribution of wave bending stresses and wave bending moments were analysed.

- (1) Root mean square \sqrt{E} of the peak values of wave bending stresses in each short-term distribution was classified by wave heights and heading angles (Tab. 5.7 and Fig. 5.20).

If we take the significant wave height H as a single parameter neglecting the heading angle, the values of R.M.S. show very wide dispersion (Fig. 5.21), but very roughly we can get a mean curve of H vs. R.M.S..

- (2) Comparing the nondimensional wave bending moment $M = M/\rho g L^3 B$, we got very similar $\sqrt{E_M} \sim H$ curves for various cargo ships of similar type (Fig. 5.23). These curves roughly coincide with the calculated curve which was derived from the report of the 90th Research Committee of this Association. This calculation was based on an approximate theoretical analysis using the strip method and the I. S. S. C. (International Ship Structures Congress) wave spectrum.

- (3) The long-term distribution of wave bending moment can be estimated integrating the value of R.M.S. of the short-term distribution using the long-term statistical data of ocean waves.

- (4) R.M.S. of the stresses of transverse members were also analysed. It seems that they cannot be classified by only one or two parameters such as wave height or heading angle. The number of sample data, however, seems to be too deficient to analyse further with many parameters.

5.4. Correlation between Ship Motion and Hull Stress

The relations between the wave induced longitudinal or transverse stresses and the ship oscillations were investigated, comparing their spectra (Figs. 5.4 and 5.7). The followings are noticed clearly.

- (1) The longitudinal stresses are related closely to pitching motion, as the transverse stresses are to rolling motion. The position of the peak in energy spectrum coincides very well respectively.
- (2) In the spectrum of transverse stress, besides the peak at the frequency of rolling, another peak appears clearly at the frequency just twice of the rolling frequency, although no good explanation is possible at this moment.

5.5. Steering Tests

Some manoeuvring characteristics of this ship were measured. Namely, the manoeuvring indices K and T were obtained by zig zag tests, the transient response

characters were obtained by autopilot tests varying its adjustments, and also the statistical frequency of the steering of the rudder was investigated over the period of the whole voyage.

- (1) From the zig zag tests, the manoeuvering characteristics of this ship was found to be about the average of the characters of this type of ship.
- (2) A rather interesting result was obtained by the autopilot tests in which the effect of each adjustment, helm adjust, checking rudder adjust and weather adjust were clarified.
- (3) The statistical investigation was conducted on the time rate of the steering (the percentage of the shared time at any helm angle), as well as the steering frequency (the total number of steering of any helm angle).

The statistical characteristics are effected by sea conditions and especially by the adjustment of the autopilot system, resulting in rather frequent use of large helm angle of 5 degrees or more.

5.6 Power Increase and Speed Reduction

Power increase and speed drop were analysed under rough assumptions.

- (1) Rate of power increase due to yearly increase of surface roughness is about 1% per year.
- (2) Assuming that power increase due to wave (ΔP_w) is proportional to square of pitching angle amplitude (Θ_p), the following relation fits the voyage data approximately.

$$\Delta P_w = 320 \Theta_p^2 \quad (\text{HP, deg.})$$

5.7 Decline of Propulsion Factors

The lack of reliable data about the propeller open characteristics made it difficult to investigate the propulsive performance of ship. Under bold assumptions, following results are obtained.

- (1) The propeller surface was estimated to be deteriorated in certain degree.
- (2) Both the relative rotative efficiency and the assumed propeller open efficiency diminish with the pitching amplitude in comparatively good order.

6. Conclusion

The 63rd Research Committee of the Shipbuilding Research Association of Japan has conducted investigations on the following items.

- (1) The development of a consistent system of measuring, recording and analysing to be used in full scale ship testings.
- (2) Full scale seakeeping tests and their analysis
 - (a) Investigation of ship motion
 - (b) Statistical research of hull stress and wave loads
 - (c) Correlation between hull stress and ship motion

- (d) Manoeuvering performance tests
- (e) Study of power increase and speed reduction
- (f) Study of decline of propulsion factors

The actual tests were carried out for a very short-term of only one voyage, so the volume of test data is not sufficient enough for the second purpose of our investigation. But we believe that the first object of our committee was accomplished effectively.

In future, the followings seem to be left as very important problems to be investigated thoroughly.

- (1) Instrumental measurements of ocean waves
- (2) Correlation between ship motion and hull stress
- (3) Correlation between ship motion and propulsion factors
- (4) Actual condition of steering and steering equipments
- (5) Evaluation of each effect of various factors on the seakeeping quality of ship
- (6) Development of optimal data processing system

This project was helped by the aid of the Ministry of Transportation and completed under the co-operation of related shipbuilding companies, shipping companies, universities and research institutes. We wish to thank the parties concerned for their continued support.

船舶の耐航性に関する実船試験

目 次

緒 言.....	1
第 1 章 研究の目的と経過の概要.....	2
1. 1 研究の目的.....	2
1. 2 経過の概要.....	2
1. 3 船舶の耐航性に関連する因子.....	3
第 2 章 実船試験における計測機器と解析処理方式.....	5
2. 1 一貫処理システム.....	5
2. 1. 1 実船試験測定法の変遷.....	5
2. 1. 2 一貫処理システムの形式について.....	7
2. 1. 3 アナログ処理とデジタル処理の得失.....	9
2. 1. 4 記録器および解析器の現状.....	11
2. 1. 5 この研究で使用した一貫処理システム.....	13
2. 2 機器の現状.....	14
2. 2. 1 機器の現状調査.....	14
2. 2. 2 船主の要望事項.....	19
2. 3 本研究に使用した計測記録および処理装置.....	20
2. 3. 1 計測装置.....	20
2. 3. 2 記録装置.....	27
2. 3. 3 処理装置.....	28
第 3 章 予備試験.....	31
3. 1 昭和 38 年度.....	31
3. 2 昭和 39 年度.....	31
3. 3 昭和 40 年度.....	32
第 4 章 しあとる丸による実船試験.....	33
4. 1 実験船しあとる丸.....	33
4. 2 試験日程.....	34
4. 3 試験項目.....	35
4. 4 計測方法.....	37
4. 4. 1 定時計測.....	37
4. 4. 2 頻度計測.....	37
4. 4. 3 特殊計測.....	37

第 5 章 しあとる丸実船試験結果および解析	39
5. 1 試験概要	39
5. 2 船体運動	47
5. 2. 1 コレログラム・スペクトラム解析法の概略	47
5. 2. 2 動揺の性質	54
5. 2. 3 8角航走試験	56
5. 2. 4 動揺のスペクトラムの理論計算との比較	59
5. 3 船体応力、応力頻度および荷重頻度	66
5. 3. 1 縦曲げ応力	66
5. 3. 2 波浪曲げモーメント	70
5. 3. 3 船体横応力	74
5. 4 船体運動と応力との相関	76
5. 4. 1 応力の頻度分布解析とスペクトラム解析との比較	77
5. 4. 2 応力と船体運動との相関その他	79
5. 5 操縦性能	80
5. 5. 1 Z操舵試験	80
5. 5. 2 自動操舵装置の応答試験	81
5. 5. 3 操舵頻度	84
5. 6 就航中の馬力増加と船速低下	87
5. 6. 1 計測値	87
5. 6. 2 就航中の馬力増加と速力低下の概観	89
5. 6. 3 Foulingに基づく馬力増加	89
5. 6. 4 風および波浪に基づく馬力増加	93
5. 6. 5 風速と船速低下	95
5. 6. 6 まとめ	95
5. 7 就航中の推進効率の低下	96
5. 7. 1 伴流	96
5. 7. 2 推進器効率比	100
5. 7. 3 推進器の汚損と荷重変化に伴う推進器効率の低下	102
5. 7. 4 まとめ	102
5. 8 計器の故障その他	103
5. 8. 1 計器の故障と信頼性	103
5. 8. 2 変航式波浪計の損傷	103
5. 8. 3 舵側水位計の故障	103
5. 8. 4 風向風速計の電波妨害	103
5. 8. 5 本船電信の干渉	104
言	105
献	109

緒 言

第63研究部会は「船舶の耐航性に関する実船試験」を研究題目として、昭和38年度発足し、3年継続研究を行ない、昭和40年度をもって終了した。この間委員会を7回、幹事会を19回開いて研究計画を推進した。

昭和41年10月3日の委員会で報告書作成が幹事会に委託されたので、報告書作成幹事会は引き続き実船実験で得られた資料の整理、解析を行ない、それにもとづいて報告書原案を作成した。この間報告書作成幹事会は14回開催され、報告書としてのまとめを完了したので以下に報告する。

部会を構成した委員、幹事等の氏名は別に掲げたとおりである。

第1章 研究の目的と経過の概要

1. 1 研究の目的

船舶の経済性を向上させるためには、航海中の船舶が遭遇する外界条件と、これに対する船舶の応答に関する十分な知識と理解の上に立って船体構造の軽量化と運航性能の改善をはかる必要がある。

ここに考える外界条件、およびこれに対応する船舶の応答が、はなはだ不規則乱雑なものであることを前提として、設計に必要かつ十分な資料をうるためには、多数の変動値を正確に計測して、これを迅速に処理解析して設計に活用できる形に整理することが必要である。

また船舶の耐航性には多くの因子が関連しているが、将来計測記録装置の小型化無人化がはかられて、より多くの機会にぼう大な資料の集積ができるようになるとしても、これらすべての因子を記録することは必らずしも合理的経済的とはいえない。これらの因子の多くは互に密接に関連しているから、その相関関係を見出すことができれば、耐航性を決定づけるなるべく少数の独立変数を求めて、計測の簡単化をはかることもまた重要な研究課題である。

本研究部会はこれらの見解に立って、

- (1) 耐航性に関する実船試験において計測・記録データ処理・解析などと、総合的に容易かつ迅速に行なえるよう一貫したシステムを開発すること。
- (2) 同時計測された船舶の多くの応答の相互の関連を求め、耐航性を端的に代表する指標を求めることができないかを検討すること。

を目的として、昭和38年から3年間継続研究を行なった。

1. 2 経過の概要

本部会設立の当初においては、実船試験を伴うと考えられる課題を掲げたいいくつかの研究部会が、同時に3ヶ年計画で発足した。これらの研究部会が個々に実船試験を行なうことは不経済であり、まとめて行なうことが望ましいと考えられた。そのためにはかなりぼう大な資料の解析処理まで考えて、実験計画や計測機器の準備を行なう必要があり、本部会の研究課題の一半はまさにこれにあたるものであった。

この要請にもとづいて、昭和38・39年度においては、実船試験用の計測・記録・データ処理・解析用機器の開発の現状および性能の調査を行ない、一貫処理システムの方式選定の基礎資料を求めた。またこれと併行して、船主・用船者側において自動計測装置の開発に関してどのような要望があるかも調査した。

しかしながら具体的な研究計画が進むにつれて各研究部会の独自性が明らかとなり、統合した実船実験を行なうことは個々の研究部会の性格上適当ではなく、実現困難とみられるに到った。このため本部会は他部会との連絡を中止し、従来の研究目標の一部についてはその攻撃範囲を若干局限し、独自に能率のよい耐航性実船試験の実施法に専念し一層の努力を集中することとなった。

そこで昭和39・40年には、耐航性に関する総合実船試験に新たに必要とされる計器の開発・製作または購入を行なった。

これら新しい機器の海上における性能確認と、要すれば改善処置を購するため、東京大学海洋研究所淡青丸および運輸省航海訓練所北斗丸による予備実験その他の、昭和38～40年度に実施された。

本部会としては、できれば北太平洋航路と印度洋航海の南方航路との両方で実船試験を行なうことを希望していたが、予算と期間の制約から北太平洋航路のみにしばることとし、かつ船舶技術研究所が例年実施してきた実船試験をも同じ船で同時に行なうことが決定し、この線で供試船を選んだ結果、大阪商船三井船舶側の貨物船しあとる丸に便乗の便が与えられることになった。この決定は昭和40年3月に行われ、以後はすべての実船試験準備は船舶技術研究所と合同で、しあとる丸の現状に適合するように進められ、昭和40年11月同船が入渠の際、必要な準備工事と計器の搬入取付けを行なった。

昭和40年12月31日、同船は神戸を出港し、パナマ運河を経て北米東岸を北上、カナダのハリファクスを終点として復航し、再びパナマおよびアメリカ西岸を経て昭和41年3月9日横浜に帰港した。この間に定時計測のほか応力頻度・オートパイロット試験・8角航走試験・出力試験等を実施した。

船舶技術研究所機関性能部では、航海中における主機の性能調査を主研究目的として種々の計測を行なったが、このうち本研究部会の研究目的に直接役立つものについては詳細資料が提供されている。

1. 3 船舶の耐航性に関する因子

耐航性の概念は人によって必ずしも明確に一定していない。このことは、類似の概念が凌波性・耐波性等の名でいわれることにも表われている。以下本報告においては、耐航性とは、

船舶が風・波等の外力を受けて航行するとき、有効な平均船速の低下を最小にとどめ、安全かつ快適に航海できる性質

を指すものと定めよう。ここに「有効な平均船速」とは、予定針路を一時的に離れて航行せざるを得ないとき、予定針路方向の分速度の平均値を指すものとする。

また、現在の船舶特に貨物船にあっては、耐航性を問題とする場合、「快適な航海」の考えを入れることはかなり無理があり、荒天に際して当直乗組員の精神的・肉体的苦痛はある程度やむを得ないものとされている。したがって、「快適な」と記したところは「あまり大きな苦痛でなく」とすべきかも知れないが、われわれは労働強化によって耐航性を見かけ上向上させることを期待するものではなく、合理的な船質向上がその目的であるから、前向きの姿勢でこの語を使用することにした。

この意味での耐航性を低下させる直接の原因を求めるとき、次の諸項が挙げられるであろう。

1. 風や波の作用による船体抵抗の増加
2. 保針のための操舵にもとづく抵抗の増大
3. 変針・蛇行等による有効船速の低下
4. 波浪と船体運動とともにとづく推進効率の低下
5. 機関出力・回転数の制限による船速の低下
6. 波浪曲げモーメントの増大
7. スラミング、青波打込み等の船体強度、振動への影響
8. 過度の運動による貨物の移動や、それによる貨物や船体の損傷
9. 船体運動の激化や青波打込みによる安全性低下

また別の見方から次のようにいふこともできる。ある船がある外界条件（風・波）のもとで航行し

うる最高船速は、つぎのようにして決まる。すなわちこの平均船速のもとでは、広義の周期的船体運動が持続され、非周期的・衝撃的現象（スラミング・海水打込、推進器空転・異常な大波との激突等）の発生頻度が、多分に経験のある限界に達するがこれを越えないものである。この際ありそうな仮定として、広義の周期的諸現象の大きさおよび激しさが、異常現象の発生確率に密接に関連するものと考えている。耐航性のすぐれた船とは、その船速が平水中の船速になるべく近いものであるということができるよう。

この見解のもとに、耐航性に関連の深い因子として計測対象となるものは、次の諸項と考えてよい。

- (a) 外力：風（風向・風速）、波（波高、周期、波向）
- (b) 船舶の応答：船体の剛体運動、船体の弾塑性体としての応答、振動現象、船速変動、軸トルク、推力および回転数の変動
- (c) 人为的入力：操舵（舵角）、平均機関出力

これらの諸因子のなかには、すでに述べたように互に密接に関連し相互に干渉するものもあるが、現在のわれわれは、わずかに若干の船の外力と応答との関係を断片的に知るのみで、耐航性評価に必要な指標についてはほとんど無知であるといつてもよい。

従来わが国をはじめ多くの実船試験が行なわれたが、種々の理由から計測項目が制限せられ、特に外力としての波浪について連続記録が得られたものはきわめてまれである。今回は、予算と実験実施との条件が許すかぎり多数点の同時計測を行ない、これら諸因子間の相関を求めることが期待し、また曳航式波浪計を開発して波浪に関する情報を得ようと試みた。

第 2 章 実船試験における計測機器と解析処理方式

2. 1 一貫処理システム

2. 1. 1 実船試験測定法の変遷

実船実験が種々の目的のもとに頻繁に行なわれるようにになったのはこの10年来のことである。昭和26～27年にかけて行なわれた日聖丸の実船実験は、^{1), 2)} わが国の内外を通じて組織的に行なわれた大規模な近代的実船実験のさきがけであったといってよい。その後は Ocean Vulkan³⁾ による著名な実験等をはじめ多くの実験が世界の各国で行なわれ、その数は枚挙に暇がない。

初期の実船実験においては、まず船の航海中の運動、動搖、振動、応力変動、推進器軸性能等の実態をとらえることが主眼とされた。これらの諸性能を確実に計測する変換器がほとんど揃わなかった段階であったから、まず、これらの変換器の開発に多くの関心が払われ努力が注がれたのは当然である。したがって極力変換器を整え、これらの諸性能の同時記録をとり、その実態をとらえることがまず当面の目標であった。しかしそれから得られた結果は、海象・気象とこれら諸性能の平均値との関連、いわばかなりマクロな関係で示された。シーマージンの把握というような目標がかかけられたのも当然である。日聖丸で毎回の計測が連続記録時間は3分間という短時間に過ぎなかったこともこのことを示している。

その際、連続記録を取ろうと努力されたものは、船の速度・推進器回転数・同トルク・舵角・船首揺れ・縦揺れ・上下揺れ・横揺れ・応力変動・風向・風速等であったが、計測用の変換器としてでき上っていたものをそのまま用いることができたのは、その頃実用され始めたばかりの型式の風向風速計のみであって、他はいずれもその実験のために特に開発試作されたものであった。

しかも同時記録といっても記録器によいものがいまだ得られなかつたので、各計測項目ごとに動コイル型ペン記録計（いわゆる KR-1）・電磁オシログラフ・直示式ペン記録器、感光フィルム式記録器、その他で、計8個の記録器が平行して用いられた。そのため各記録器に整合マークを入れ、同一のタイムマークを入れる等の顧慮が払われたが、3分間とはいへ忠実な連続同時記録をうるためには、データの読み取り、整合、同一時間軸上への図示等にかなりの手数を要した。

解析の結果得られた多くの関係は、航海中の船の諸性能の実態、それらの関係を一つの形で捉えたものとして極めて貴重なものであつて、平行して行なわれた模型実験との比較とも合せて実船の航海性能を示す画期的な総合的な成果であった。しかし、「単なる平均値は事実を示さずむしろ掩ふものである」という言葉がある通り、単なる平均値はその現象の性質を示すのに大きな限界があることもこれによって明らかとなった。

たとえば、この実験で試用された対水速度計の計測値の変動の性質等が問題になつたが、これらを解析する手法を欠いていた。動搖の測定等には統計的な頻度計測等の必要があるのではないか、との先覚的な意見が述べられ、たとえば、繰返し露光式の記録による感光紙の濃淡等を用いて記録解析することも、一部には考慮されたが実現はしなかつた。この実船実験のうち、ちょうど時を同じうして急激な発達を遂げた米国等の研究とは全く独立に、日本においてこれら不規則な現象の解明に統計的な手法を取り入れる試みがなされ、この方向に沿った研究⁴⁾ が始まられたのも、この対水速度計測結

果の解析方法の模索時代のことであった。この方法の研究は着々と進み、やがて今日ではこの方向の研究上古典ともいわれる米国における M. St. Denis & W. J. Pierson 等の研究成果⁵⁾ が明らかになるとともに、波浪そのものあるいは計測される船のあらゆる応答のような不規則な記録の処理に確率過程論の成果が着々と取り入れられるようになってきた。

昭和31年(1956年)練習船北斗丸において行なわれた日本造船研究協会第17研究部会の研究⁶⁾ では、早くも船の動揺のコレログラム・スペクトラムが多量に解析されたが、それには専用相関函数演算リレー計算機が製作されて用いられた。これは日本の国内のみならず、世界的に見てもこのような手法のきわめて早い応用例であるといってよい。

その後、Neumann, Pierson 等による風浪のスペクトラム表示の研究⁷⁾ が成果を挙げ、これとともに Jasper⁸⁾ 等による波浪や 船体応力の発生頻度分布各種異常値の期待値等に対するいわゆる短期分布、長期分布等の研究が進むにつれて、このような統計的な手法は実船実験結果の解析を行ない、その結果を船体構造設計にそのまま役立たせえるものとして常識となってきた。

この線に沿った実験としては、大規模なものは昭和34～36年にいたって原子力船研究協会によって「原子力船における外力の原子炉に及ぼす影響に関する試験研究」として行われた、おれごん丸・もんたな丸・穂高山丸・剛邦丸等の実船実験⁹⁾ がある。これは、原子力船の動揺および振動に基づく加速度の実態把握に関する実船試験として行なわれたもので、加速度の記録には特に考案された磁気テープ装置が用いられた。これによって磁気テープにアナログ量として記録された加速度は、実験後一定レベルによる時間軸方向の走査によって、加速度の各レベル階級の発生頻度分布が極めて容易に得られるように考えられたものであって、大いに活用され成果を上げた。なおこの実験の解析では、動揺・応力等のコレログラム・スペクトラム解析も行なわれたが、これらはいずれもまだ電磁オシロの記録の目による読み取り数値によって行なわれ、計算も電動計算器によって行なわれ、莫大な手数と時間を要している。

今まで述べた二、三の例は、いずれも主として応答を時系列として扱い、確率過程論の成果を用い、主としてコレログラム・スペクトラムによって応答の性質、外力や応答の周波数的構造等を明らかにしようとする、統計的ではあるがミクロな立場に立っている。したがってその解析も、アナログ的に行なおうとすれば適当な長さにわたる連続記録が必要であり、デジタル的に行なおうとすれば連続的な計測からかなり細かい時間間隔によってサンプリングを行ない、かつ何らかの方法によってデジタル化を行なった時系列が必要であった。一方先に述べた Jasper, Gumbel 等の立場は、確率過程論の成果の上に立ってはいるが、表面上は時間的な要素を取り去り、応答、主としてその振幅を単なる確率変数として取扱う立場である。すなわち、その分布函数の形を推定し、それからたとえば船の全生涯に遭遇する推定最大値等種々の期待値を求めようとする立場である。したがって解析も主として変動値の見掛けの極小極大値等の頻度分布を求めるところから出発することが多い。いわば前の立場にくらべてややマクロな手法であるといってよい。この立場に立って Jasper は沿岸警備艇¹⁰⁾、航空母艦¹¹⁾、その他について多くの実船実験を行ない成果を挙げている⁸⁾。さきに述べた原子力船研究協会の実験も⁹⁾ この立場についてもかなり多くの資料を得ている。

昭和35～36年にわたって日本造船研究協会第49研究部会によって、「高速船の波浪中応力頻度ならびに甲板荷重の実験的研究」として行なわれた研究¹²⁾ も、この立場に立ったものである。ここでは9隻のいわゆる高速貨物船・その他油送船・鉱石兼油送船・冷凍運搬船等、のべ17隻について応力頻度

及び青波の水圧の計測が行なわれた。用いられた応力頻度計、青波水圧頻度計は極値の頻度分布が直接求められるように開発されたものであって、いずれも一般船舶の乗組員によって操作しうるよう簡易化されており、実際に6隻の船では実験員が乗船することなく乗組員によって資料がとられた。これはのちにも述べるように実船計測の将来を考えるに当って示唆される一つの方向である。

その後、確率過程の標本理論的な取扱いについてもさらに研究が進み¹³⁾、1963年には我が国において応答の統計的解析法の標準ともいべきものがほぼ確立^{14), 15)}し、これに伴って高速電子計算機によるコレログラム・スペクトラム等の計算用プログラムもほぼ定まったものが得られるに至った¹⁶⁾。これらの基礎の上に立って、昭和38年船舶技術研究所が行なった山陰丸実船実験¹⁷⁾では、A-D変換器を船上に搭載し、記録も二つの直視式電磁オシログラフ（ヴィジコーダー）の16チャンネルにまとめ、そのうちから任意の組合せで選んだ4チャンネルについては、計測と同時にデジタル変換し、紙テープに穿孔して電子計算機入力テープとして使用できるようにされた。その結果、実験終了後はこのテープを直ちに電子計算機にかけて、コレログラム・スペクトラムを求める計算をきわめて能率よく行なうことができ、解析の時間と労力を大巾に減少することができた。このような段階で本部会の研究が計画され実行された。

2. 1. 2 一貫処理システムの形式について

さてここで一貫処理システムという表現で意味しているところは、前項で述べてきたところで自ずから明らかと思われるが、実船実験において船の性能の各要素を計測し、記録し、解析することまでを一貫して考えて容易に行なうことのできるシステムという程度の表現である。なお、その際計測と記録という語には疑問はないが、解析という言葉はあまり明確ではない。ここではこれを次のように定義する。

一般に対象とする現象の計測記録によって、多かれ少なかれ求めようとする現象の属性（signal, information）の一部は失われ、その現象には属さない余分の物理量（noise）を拾い上げることを免れることはできない。そこで計測された物理量またはその記録から、実験目的に応じ現象そのものの最も目的に関係の深い属性だけを取出さなければならないが、その操作を解析といっている。したがって解析には様々な段階があつてフィルターやまたのちに述べるような実時間A-D変換などのように計測と同時に行なうものもある。

計測結果の処理のすべての段階、そして最終的には実験計画者による結果の総合判断も解析に含まれるといってよい。要するに計測記録によって得られた情報（information）から最終的なその現象に関する知識・判断（intelligence）に至るすべての操作を解析といつていい。

一貫処理システムに必要な要件は、これまでの説明で明らかであろうが、まとめると以下のようになる。

- (a) 計測・記録・解析の各段階の操作になるべく入手・時間を要しないこと。
- (b) 精度が十分高く、処理の各段階の操作を行なうごとにあらべく余分な誤差が導入されないこと、また必要な情報を失わないこと。
- (c) 止むを得ず含まれる誤差および統計的信頼度の推定が容易なものであること。
- (d) 解析上の目的に応じて、特に必要な情報を必要でない情報から容易に分離できるものであること（フィルター等の選択、フィルター効果の判定が容易であること）。

- (e) 装置全体に信頼度が高く、安定で故障が少なく、故障した場合の対策の立て易いものであること。特に船に搭載する場合は環境条件を十分に考慮したものであることが必要で、防湿には特に注意を払ったものであることが必要である。
- (f) 各操作の段階の監視が容易なものであり、かつ必要に応じて各段階を取出してみることが可能であること。
- (g) 各計測項目ごとの較正が容易に行ないうること。また較正常数の挿入も容易であること。

などである。

計測される諸量の記録→解析→結果の表示の流れ、いわば情報の流れを考える場合、これらの諸量（情報）の扱い方あるいは表現には、アナログ量とデジタル量の2種類がある。性能の諸量は本来アナログ量であり、結果の曲線による表現はまたアナログ量の扱いと考えてよい。したがって計測・記録・解析・結果の表示という過程のうち、第1段階の計測の対象となる諸量と最終段階の結果の図示とはアナログ量である。したがって記録・解析等の過程もアナログ量として扱うことができれば、まったくA-D変換の必要がなく Fig. 2. 1 (A) のように全過程をアナログ量の処理として一貫して取扱うことができる。

またもし結果の表示を曲線によらず数表等によって行ない、計測も直接デジタル計測（変換器の

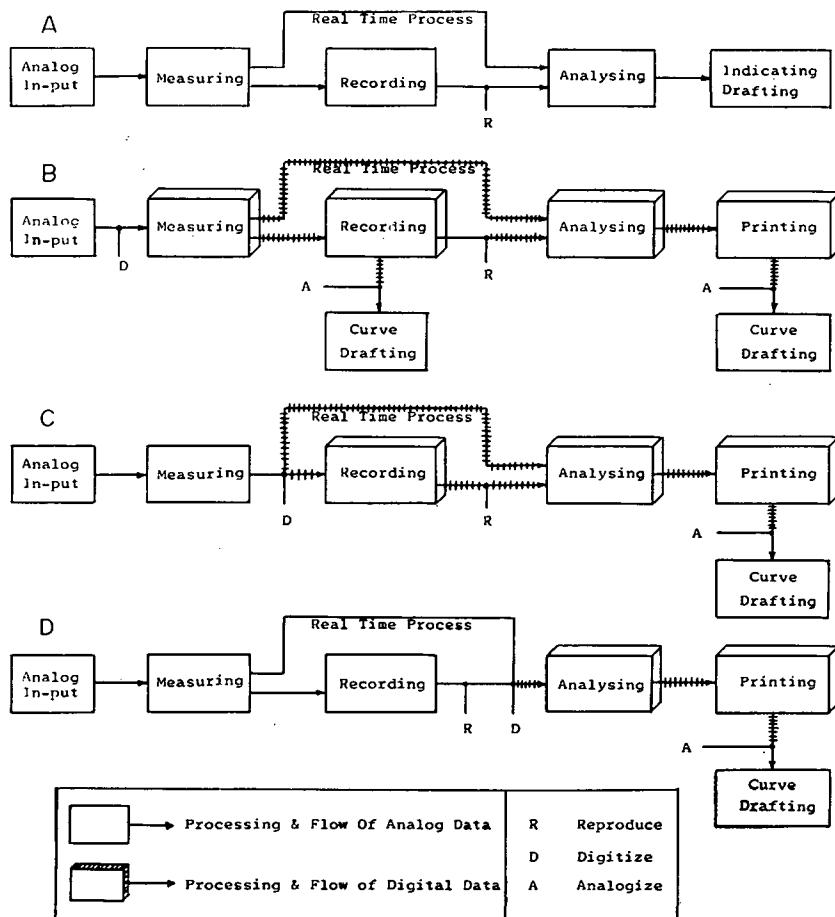


Fig. 2. 1 Flow of Information

出力がディジタル量のもの)を行なうとし, 解析はディジタル処理とすれば, Fig. 2.1(B)のように全経過をディジタル量として扱うことができる。この場合, もし記録の再現結果の曲線表示等を行なうとすれば, A-D 変換を行なってアナログ量に変換する必要がある。しかし現在はディジタル的な X-Y プロッターの X, Y の刻みが十分小さいため, ほとんど曲線表示と思われるものも用いられている。これら (A) (B) の二つの場合を両極端として, この間にこれらの処理の各段階のうちどの段階でディジタル化を行なうかによって (C)(D) のような様々な組合せが存在する。

従来行なわれてきたような単なる平均値を求めるような場合も含め, 解析の操作は元来ディジタルによる場合が多い。しかし, たとえばアナログ量のまま計測値を階級ごとに分類し, その量の階級ごと発生頻度分布曲線をアナログ的に求めることも可能であるし, 乗算や積分演算もアナログ的に行なうことが可能であるから, コレログラム・スペクトラム等もアナログ的に求める装置も考えられ, また一部実用もされている。

2. 1. 3 アナログ処理とディジタル処理との得失

主として記録解析をアナログ量によって行なう場合と, ディジタル量によって行なう場合とを比較すると, 次の得失がある。

a) アナログ量による記録は一般にディジタル記録より装置が簡単でよいが, 精度の維持が困難である。アナログ記録は古くから用いられてきた方法で, 各種オシログラフ・動コイル型ペン記録計・自動平衡型記録計等をはじめとし, 比較的簡単である。ところが, ディジタル記録は A-D 変換器の他に, プリンター, パンチャーあるいはディジタル磁気テープ装置等を用いる必要があり, 一般により複雑である。しかし最近のディジタル技術によってディジタル化されたものを記録する場合, 装置の総合精度は 1% 程度にまで上げることができるといわれている。一方ふつうに用いられるオシログラフや磁気テープ式記録器は, ふつうの使用状態では 4 ~ 5% の精度を保つのが, せい一杯であるといわれている。

b) ディジタル処理は一種のフィルター処理であるために, 情報の一部を失う。ディジタル計測にしてもディジタル化を通してのディジタル記録にしても, まずある時間間隔ごとのディジタル化である。たとえば相関函数の計算も, この時間間隔ごとにしかも有限な時間内について行なうものである。これはいわゆる Dirac の Finite comb といわれる函数 (Fig. 2.2) を, 無限連続量である真の相関函数に乗じたものと考えてよい。したがって当然情報の一部は失われ, aliasing 等の原因ともなる。このような函数のフーリエ変換の形は分っているから, たとえばこのような相関函数のフーリエ変換を行なってスペクトラムを問題とする場合, ディジタル化の影響を周波数領域で考えた場合の効果も評価することができる。またディジタル化をする以上, ある単位量の倍数として読み取らざるを得ない。このためにディジタル化した数値の統計的分散は真の分散よりも増加する。



Fig. 2.2 Dirac Finite Comb

c) ディジタル解析の方がアナログ解析にくらべ, 現状では各種の演算の誤差が少なく, また統計的処理を必要とする場合, 統計的誤差の評価が容易である。ディジタル解析では一般に上記の誤差を含め, その他種々の原因で導入される誤差の評価がむしろ確実である。このことは, コレログラム・スペクトラム等の解析においてもいえることである。フィルター等の効果も, 数値フィルターの方が電気的フィルターよりもその効果の推定が容易な場合がある。また, たとえば変動曲線に高周波の変

動量が重畠している場合、記録を視察によって平滑化を行なう等ということが、意外に大きな周波数特性を持った誤差を導入するのに驚くことがあるのもこの一例である。

d) その他ディジタル量は、情報の伝達に当ってアナログ量による伝達よりもシグナルに対する雑音の混入が少ない。また分離が容易であることももちろんディジタル量を用いようとする本質的な理由の一つである。したがって上記の情報の伝達の中に雑音の入る余地の大きいとき、すなわち大きな距離の無線または有線の伝送等が含まれる場合には、ディジタル量を用いる利点は大きい。

アナログ、ディジタル量の処理の得失は上記の通りであるが、処理の目的によってどの特長を活かしてどの方式を用いるかを定める必要がある。たとえば、短時間の間に大まかな見当をつけたい場合(いわゆるパイロットエスティメーションの場合)、同じ方式に従って多くの計測量の処理を流したい場合、あるいはまた種々の異なった解析の方法を試みたい場合等で異ってくるからである。一つの処理の目的には非常に適した方式でも、他の目的に対しては必ずしも向いていない場合がある。

以上を総合して将来実船実験用一貫処理システムとして望ましい形として次のようなものが考えられるであろう。

- (1) 解析の目的に応じてそれぞれ単能単一目的のシステムが用いられるようになろう。
- (2) 解析の速さが次第に大きくなり、目的によっては計測と同時に実時間的な解析演算を行なうことも可能となるであろう。(このことはデータ処理の結果をフィードバックして制御にまで用いようというような場合には重要である)。
- (3) 目的に応じてアナログーディジタルの切換えが自由自在なハイブリット型の処理装置も用いられるであろう。

その他さきに述べた基本的要件のすべてにわたってかなりな程度まで満足するようなものが出現在するであろう。

さらに項目別に示したことをやや詳しく述べると次のようなことである。すなわち、実船の性能の計測が、さきに述べたようなスペクトラム・コレログラム等を介したかなりミクロな解析を行なうこと前提としたもの、あるいは多くのディジタル演算処理を必要とするものであるか、あるいはまた極値の分布特性を見出し、その種々の期待値を推定するために頻度分布を得ればよいのか、あるいは対象とする現象の実験パラメーターの変化による現象そのものの大まかな変化の有様をとらえるのでよいのか、などによって適したもののが異なる。もちろんより技術が進めば、今回の実船実験のように、この両者あるいはさらにもっと種々の解析法を予想しても、一つのシステムですべてを掩いうるようなものを作ることも可能になるであろうが、一般にはまだ上記のように考えるのが適当であろう。

また他の例としては極値の分布の形なども一つのものと仮定して、現象(たとえば応力等)の分散 σ^2 (あるいはいわゆる累積密度エネルギーと呼ばれる $E \equiv 2;^2$)等のみを直接求めるような計測装置も考えられる。

また一方では、完全な自動化と信頼性の向上をはかり、他方では極度の簡易化をはかることによって、実船計測に実験員の乗船を不必要とするような計測システムの出現が待たれている。のちに述べるように、この部会ではその方向にも調査に着手したが、実際の開発に踏み出すまでには至らなかつた。これは将来の問題として残される。

2. 1. 4 記録器及び解析器の現状

ここでこの一貫処理システムを考えるに当って、その全体の構成に大きな影響を与える記録器および解析器の現状について簡単に調べることとする。

a) 記録器

記録器は、計測量そのものを記録して後に残すことを目指して使用されるのみでなく、解析の各段階における物理量を次の段階の解析にそなえて記録するにも用いられる。しかしここではふつうに用いられているように計測量そのものを残すことを目指して用いられる記録器について述べることとする。記録器においても最近の進歩は著しい。すなわち低インピーダンス型の代表的記録器として用いられてきた光学型ガルバノメータ式電磁オツシロを例に取っても、同じ光学基線長を持ちながら装置全体はずっと小さくするなど軽量小型化がかなり進み、また感光剤の進歩に伴って、たとえば無現像直視方式いわゆるヴィジコーダと呼ばれるものが多く用いられるようになってきた。また昔は多く油漬ガルバノメータが用いられ、それによってガルバーの固有振動を減衰する方式が多かったが、温度による油の粘性の変化、ゴミの混入等によって減衰効果が変化し、0点復帰にもかなりの疑問のあるものが多かった。今日ガルバーの部分のみを恒温装置内に入れてこれを防止し、あるいは電磁制動を用いるなどの工夫により、この点の疑問も減少してきている。また同じ感度に対する固有振動数は上昇してきている。オシログラフの現像を要する繁雑さを嫌って、直視式の動コイル型ペン書き記録計いわゆるK.R.が用いられるようになったのもかなり前からのことであるが、やがて増幅器の性能が向上するにつれてこれと磁場の強化とによって作り上げられたペン書きオシログラフが用いられ始め、現在ではこれもかなり進歩したものが作られて、依然として用いられている。そしてまたペンによって曲率を持った記録を改良して直線書きにするなど新らしい工夫をこらしたものも現われている。

これらと別に、また自動平衡型記録器がこの10年来急激に発達して使用されるようになり、この型式では最も問題となるペンの追随速度も、最近は大いに向上し、たとえばフルスケール(25cm) 0.5秒というようなもの、また多素子のもの打点式のものなども現われている。X-Yレコーダもこの一種と考えてよい。

以上はいずれも直視によって現象の全体的傾向を捉えるには適しているが、記録を再生して頻度解析を行なったりA-D変換したりするには適していない。そこで再生可能な記録器として磁気テープ記録が用いられるようになってきた。これにもPCM, PWM, FM式、その他の方式があって、それぞれその目的に応じて選択する必要がある。これも年々改良を重ねて多チャンネル化、小型化、高速化が進んでいる。

以上はいずれもアナログ記録器の例であるが、デジタル式の変換器を用いる場合、計測と同時にA-D変換を行なう場合にはデジタル記録を行なうことが必要となる。それには紙テープ穿孔によって行なうもの、プリンターによって数字を直接紙上に打出すもの、磁気テープにデジタル記録を行なうものなどがある。また最近は電子計算機のハードウェアの一部として、磁気テープのほかに磁気コア-磁気ドラム等にデジタル記録を行ない、計算機処理にはすぐ呼出せるような方式も用いられている。このような各種の記録器の長所や欠点は、その後の解析法の如何によって活き、かつ補われる場合も、また活かされず短所の助長される場合もあるので、解析法の如何によって最も適した記録器を選ばなければならない。

b) 解析器

解析の定義についてはすでに 2.1.2 の始めに述べた。すなわち計測された物理量またはその記録から、実験目的に応じて目的に最も関係の深いものだけを他の属性のうちから取出す操作、計測によって得られた対象に関するすべての情報から、必要な知見を取出すすべての処理操作が解析である。

解析器はそれに役立つ装置である。したがってその規模、種類も極めて多岐にわたっている。計測と同時に行なうものがあることもさきに述べた通りである。解析器の働き、用途に応じてそれらの現状について概観すると次のようになる。

i) 現象のいづれかの意味における分離、属性の抽出を行なうもの。

各種の機械的、電気的フィルターはこれに属する。一昔前に考えられていたように、たとえばすべての周波数範囲にわたって忠実な反応を示す計測、いわゆる *high fidelity* をもった計測は決して最上の計測ではない。むしろ適当なフィルターを用いて実験目的に応じた周波数成分のみを取出して詳細に処理することが必要なことが最近は常識となっている。

昔から多く用いられてきた簡単な電気抵抗 R と電気容量 C または電気インダクタンス L との組合せによるフィルターに代って、サーボ増幅器を備えたフィルターも最近は多く用いられている。*Low pass filter, high pass filter, band pass filter* などに極めて性能のよいものが作られており、万能フィルターと称するものも表われている。

これらはアナログフィルターであるが、デジタル化した記録について数値フィルターの形で行なうこともある。このようなフィルター操作にも、移動平均型、自己回帰型等様々なものが考えられているが、デジタルフィルターの方がむしろフィルター特性（利得や位相シフト）の評価が確実かつ容易であるという考え方もある。しかしこの場合には一般にフィルター装置という特別な形をとらず、他の演算処理と同時に電子計算機によって行なう場合が多い。

周波数解析も現象の分離、周波数の成分ごとの抽出と考えるとこの範ちゅうに属する。これにも可変特性フィルター方式やスーパー型一定フィルター方式、あるいは相関方式等様々なものがあり、いずれにもアナログ型もデジタル型もある。

一般に時間とともに変動する波型には、さまざまな意味でランダムな要因が含まれ、あるいは雑音が含まれていて統計的な考え方を導入することが必要であるが、ふつう分離のシャープなフィルターは、結果の統計的なバラツキを大きくし、統計的なバラツキを少なくする分離のあまりシャープでないフィルターは、現象そのものに含まれる急激な変化を消してしまうという傾向がある。したがってフィルターの選択は極めて慎重にしなければならない。デジタル記録を行なうため A-D 変換の前提として行なう一定時間間隔 Δt によるアナログ記録のサンプリングも、ディラックのくし函数による一つのフィルターとも考えられる。この場合も Δt の選択は aliasing 等のことを考えて行なわなければならない。

A-D 変換器には、100 チャンネル、サンプリング速度 20kc、有効桁数 4 桁などという高速度、高性能のものも現われている。この場合デジタル化されたデータは磁気テープ、磁気ドラム、磁気コア等に高速で格納され、のちにこれをタイプライターで印字製表したりあるいは紙テープに穿孔し、または直接計算機に接合して計算機の入力と/or することができるようなものも多い。

調和振動的に変動する二つの量の間で、一方の現象と位相の合った他の現象の成分と、位相が 90° ずれた成分の 2 成分への分離を行なうような解析器も、この範ちゅうに属するものである。

ii) 他の物理量との関連を見出したり、他の物理量と組合せて新しい物理量を作り、これによっ

て現象の属性を示すもの。

ある計測値と関連する計測値とを組合せて無次元表示を行なったり、あるいはいくつかの計測量から運動方程式を解いて、その現象の他の性質を導いたりするものである。このような操作を行なうものには古くからある各種計算機、近代のアナログまたはデジタル計算機がある。この進歩は目覚しく、しかも最近は取扱いやプログラムの作成も極めて容易になってきている。

計算機をオンラインで同時解析に用い、さらにそれによって得られる値をフィードバックして制御を行なわせるようなものも最近は多いが、ここで扱うものとは直接関係はない。

調和振動をするような二つの現象相互の間の振幅利得、位相関係を求めるようなものもこの種類に属する。汎用アナログ計算機、デジタル計算機についてはここではこれ以上述べないが、それぞれ得失があることはよく知られており、最近はその両者の利点を組合せて、いわゆるハイブリッド型として用いることのできるものも多い。

iii) 各種統計量を求めるもの。

計測量のある時間内の平均値、分散、種々の定義による平均周期等の統計量統計分布型等を求ることを始め、たとえば、一つの時間とともに変動する現象のコレログラム・スペクトラムを求めたり、他の現象とのクロスの関係を求めたりするものはこれに属する。この分野も最近の発展は目ざましく、多くの種類のものがある。汎用アナログまたはデジタル電子計算機をこの目的に用いる場合も多い。もちろん多数の変動量を計測し、これをデジタルに変換し、各級の大きさごとの発生頻度分布を直接自動的に求めるようなもの、あるいは直接極値の分布のみを求めるものなど、単能目的のものも数多く用いられている。

ある現象の発生頻度分布型を求めるようなものにも、さまざまな方式のものが考えられている。

iv) そ の 他

以上述べた分類のどれにも属さないようなものもある。たとえば、高速写真に撮影したものから時間軸を延長し、あるいは一駒づつ映写して運動体の運動を求めるなどのことを行なうシネ解析等もある。それらの個々のものについては述べない。

2. 1. 5 この研究で使用した一貫処理システム

今まで述べたようなところを顧慮し、この研究では 2.1.2 で述べた諸式のうち Fig. 2.1(D) の方式を採用することにした。すなわち、

- (1) 計測の変換器としてはまだ開発途上のものもあり、またすでに開発されたものも用いられるが、それらはみなアナログ型変換器であること。
- (2) 現象そのものの中には周波数特性が事前にあまりよく推定できないものがあり、はじめからサンプリング時間間隔を定めディジタル化を行なうよりは、再生可能なアナログ記録とし、実験室内でサンプリング時間間隔を変化させ、あるいはアナログフィルターを種々に変えて解析を行なうことが望ましいこと。
- (3) 極大・極小値の分布あるいは振幅の分布を求めるため、種々の頻度分布解析を実験室内で繰返し行なうに適していること。
- (4) 経費の制限があって、多チャンネル、デジタル記録器を制作購入するには経費が不足したこと。

などの理由によってアナログ磁気記録器を用いることとした。そして実験の性質上多目的に用いられるものとし、次のようなものとした。

- 極大、極小値の頻度分布、振幅の分布等を求めるために、アナログ入力型の解析機をあらたに作製し、船の上でも種々の頻度分布の解析ができるようにした。
- A-D変換器としては、さきに述べた船舶技術研究所のA-D変換器を用い、これによってスペクトラムコレログラム処理を行なうチャンネルについては穿孔紙テープを作製することとした。
- コレログラム・スペクトラム等による数値的な統計計算は、船舶技術研究所のFACOM 230-10電子計算機に組まれたプログラムによって行なうこととした。

以上が今回用いられたシステムの考え方であり、またその選択の理由である。おのとの詳細についてはのちの各項で述べることとするが、情報の流れは Fig. 2.3 のようである。

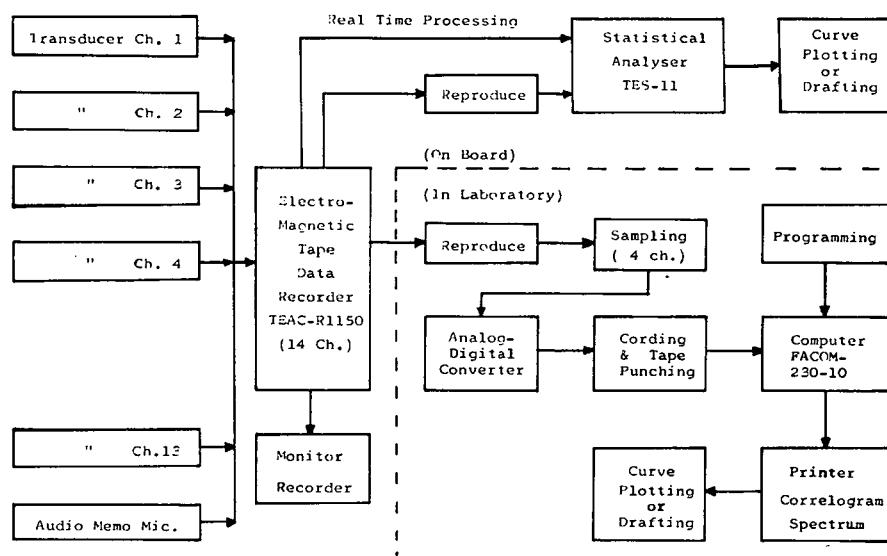


Fig. 2.3 Block Diagram of Used System

2. 2 機器の現状

2. 2. 1 機器の現状調査

実船試験において、船の環境、外力およびそれに対応する船の各種応答などを、同時に計測記録し解析に至る一貫システムを開発するための基礎資料として、各計測項目ごとに実船計測用機器の現段階における性能や有用性などの調査を行なった。

計測項目を便宜上次のように大別して展望を行なった。

環 境	1. 風	風速、風向
	2. 波	波高、波長、波周期、波向、舷側波高
	3. 溫 度	気温、水温
荷 重	4. 水 圧	船側水圧、船底水圧
	5. 波浪曲げモーメント	波浪荷重、荷重頻度
	6. 集中荷重	スラミング、青波衝撃

機 関	7. 軸トルク 8. 軸スラスト 9. 軸回転 10. 軸馬力 11. 舵 角	舵角, 舵角頻度
船体運動	12. 船 速 13. 横揺れ 14. 縦揺れ 15. 船首揺れ 16. 上下動揺	角度, 加速度 角度, 加速度 角 度 変位, 加速度
船体振動	17. 船体振動	振幅, 加速度, 振動数
船体強度	18. 船体変形 19. 船体応力 20. 応力頻度	船体たわみ, 局部変形 縦曲げ応力, 橫応力, 局部応力 極値頻度, 振幅頻度, 最大値頻度

(1) 風

風向風速計としては、早くから 3 杯式または 4 杯式の発電式風速計および風見型の風向計が船でも用いられてきた。しかし現在では、飛行機型の風向風速計が多く用いられている。気象業務法によつて海上気象資料を通報する船舶では、その装備が義務づけられており、立入検査を受けるほどである。

装備位置によって風向風速に船体の影響が入りやすいので注意が必要である以外は大きな問題はない。

(2) 波

船の海上におけるすべての挙動は海洋波によって大きい影響を受けるにもかかわらず、今日実船計測用計測器のうちで最も開発の遅れているものは波浪計である。もちろん今までにも研究が進められており、定置型、浮泛型については、やや不満足ながらほぼ実用となるものも現われている。しかし舶載型では Tucker 式以外実用となっているものは少ない。

Tucker 式のものも、舷側における水位の変化を計測し、船の舷側の運動を差引くという方式であるから、船体の影響によって変形された波浪を計測することになり、実際 3 kt 以上の前進速度を持つ場合にはほとんど使用できない。しかし、実際航走中の船の波浪に対する応答を明らかにするためには、航走中の船が遭遇する出会い波浪を直接計測しなければならない。そのため日本においても、特殊いかだ曳航式や舶載式の二、三の型の開発が進められている。のちに示すような本研究において開発に努めた波浪計も曳航式の一つである。舶載型として超音波方式、センチ波レーダー方式、レーザー方式なども試みられているが、実用になっているものは少ない。

これにくらべれば、横強度等に対する外力変動の一つとして、舷側の船に対する相対水位の変動のみを測定することは遙かに容易である。上記舶載式の波浪計に用いる種々の水位測定方式のほか、舷側に直接電気接点を設けて水位変動を計測することも行なわれたことがある。

定置式にも、底置式、やぐら式、ポール式などがあり、それに用いる変換器にも、圧力型、超音波型、容量型、接点型、抵抗型、バイプロトロン型等種々のものがある。浮泛型にも、ブイ式、ポール

式など種々あるが、変換器としては同様なものが用いられる。特定海面において実船試験を行なう場合などには、これらも海面状況の測定器として有用である。

(3) 溫 度

気温、液温、海水温度などの計測には古来寒暖計による読み取りが広く行われているが、新しい指示型のものや自動記録方式のものも十分開発されている。

(4) 水 圧

水圧計としては、船側外板や船底外板にとりつけるもの、プロペラ周辺の水圧分布を測るもの、タンク内の液体の運動による水圧を測るものなど各種のものが開発されている。使用箇所や条件によって仕様はそれぞれ異なるが大体においてダイヤフラムの変形を抵抗線ひずみゲージで検出するものが多い。水圧計測に関しては、大体どのような仕様にも応じられる程度に開発されているようである。

(5) 波浪曲げモーメント

船体中央部の甲板または船底の主縦通部材の応力と曲げモーメントとの関係が計算および進水時計測などで求められており、波浪曲げモーメントおよびその頻度の計測は応力計測によるのがふつうであるので、(19)(20)項で一緒に論ずることにする。

(6) 集中荷重

船首船底のスラミング荷重、上甲板や船樓端への青波衝撃荷重なども、水圧計測(4)または応力計測(19)に帰着する。

(7) 軸トルク

軸トルクの計測も古くからさまざまな方法によって行なわれてきた。ただし船の場合には伝達トルクがきわめて大きく、直接計測変換器を介してトルクを伝達させることは難しいため、中間軸の捩りによる標点間の変位を取出す方が多く用いられてきた。その変換器としては、光学系方式、インダクタンス方式(差動変圧器方式)、磁歪方式、抵抗線歪計方式等が用いられている。多くの場合、直接測定軸に荷重トルクをかけて検定をすることが不可能なので、その軸の材料の捩り剛性率を別に求めておいて、捩り変形をトルクに換算している。その剛性率の推定は、測定軸と同一製造過程によって作った試験片によって行なうこともあるが、一般にトルク測定の精度をかなり左右する。

また、回転軸から変位の計測量を取出すためスリップリングを用いることが多いが、その接触子の接触抵抗の変動も誤差の原因となることが多い。非接触型の伝達機構、テレメータ装置等の導入によってこれを除く努力もなされている。また、さまざまな原因によって、長時間の航海の中途でトルクの零線の移動、変動等がきわめて起り易く、かつその検出がきわめて困難であることも一つの問題である。最近では船の装備計器として軸のトルク計を備える船もかなり多い。

(8) 軸スラスト

軸スラストの計測についても、軸トルクの計測とほぼ同じことがいえる。直接推力の変換器を推力軸承に挿入するくふうもなされているが、さまざまな変換器によって軸の2標点間の圧縮を取出すものが多く用いられている。しかし一般には軸トルクよりもさらに計測が困難である。計測軸の圧縮のヤング率の推定、スリップリング、零点の変動、軸の曲げ、捩りなどの混入による誤差の導入等の問題が多い。

軸のスラスト計を船用計器として持つ船舶はほとんどない。

(9) 軸回転計

軸回転の計測は比較的容易である。機械式、スリット方式、発電機方式等によって、ディジタルまたはアナログ方式のそれぞれの目的に適した方法が採用されている。

(10) 軸馬力計

軸トルクと軸回転数との積は軸馬力に比例した値となる。そこでたとえば、それを電圧と電流で表わし電力計を使用して軸馬力を指示させる方式のものなどが考えられ、実船に装置されたものもある。ただしトルク測定の問題点はそのまま軸馬力計の問題点であって、必らずしも満足すべきものは現われていない。

(11) 舵 角

舵角の計測、指示については別に問題はない。

(12) 船 速

対水船速の測定の歴史も古いが、必ずしも信頼度の高い決定版といい得るもののが完成しているとはいひ難い。翼車式、ピトー圧力管方式、電磁流量計方式等は現在でも用いられている。船底に装備する方式では流線伴流、摩擦伴流、波浪伴流等の影響を受け船尾曳航型では、さらに、それ以外に船の動搖による影響が増幅されて混入する場合が多い。さらによりよいものの出現が望まれる。

(13) 横揺れ、(14) 縦揺れ

古くは短振子型の振子を用いるものが多かったが、これでは装備位置における動搖の加速度場を測定してしまうので、地軸に対する動搖を求めるためには、いろいろ修正が必要で精度も十分ではない。

最近は小型ジャイロがきわめて得やすくなっているので、もっぱらジャイロを用いて地軸に対する横揺れ縦揺れを直接測定している。自由ジャイロと束縛ジャイロの両者が用いられるがそれ得失がある。自由ジャイロは、摂動モーメントを与え適当に遅い速度で起立させて、常に地軸の方向にジャイロ軸が向くようにした、いわゆる人工水平儀方式が用いられてことが多い。一つの人工水平儀によって横揺れと縦揺れ両方が計測される。束縛ジャイロの方がより小型軽量とすることが可能であるが、これからは動搖角速度が検出されるので角変位にするには一度積分しなければならない。

(15) 船首揺れ

この計測にも小型自由ジャイロまたは束縛ジャイロが用いられている。同じくそれ得失がある。

(16) 上下動搖

船の上下動搖が確実に計測されるようになったのは、比較的最近のことである。波と船との出会い周期が非常に長くなって、上下動の周期もきわめて長い場合があり、上下動変位を直接測定するのは困難であった。

精密微気圧計等を用いることが考えられたこと也有った。しかし現在では、加速度計測技術の進歩により、上下動搖加速度の測定を行なうことによって、上下動搖を捉えようとする場合が多い。演算回路の進歩によって、2重積分して変位を直接求めるようなものも作られている。加速度の計測においては、他の動搖にもとづく静傾斜のため、重力の成分が混入するので、純粹に上下動にもとづく加速度を計測するためには人工水平面をジャイロ等によって設定し、その上で計測しなければならない。加速度の計測には歪み計方式、磁歪方式、インダクタンス方式等が多く用いられている。

船体動搖には上記(13)～(16)のほかに前後揺れ左右揺れなどもあるが、これは上に述べた人工水平面の上でそれ前後、左右方向の加速度を計測することによって計測されている。大きな問題はないが

その量も小さく、船の運動にはふつうあまり重要でないと考えられ計測されることも稀である。

(17) 船体振動

簡単なポータブルの指示式のものから、記録用の各種変換器あるいは多点同時計測用のテレメータ方式のものまでいろいろあり、これも大体どんな要求にも応じられる態勢にあるものと思われる。

検出部は大別すると、振動振幅を測る変位型のものと、振動加速度を測る加速度型のものとに分けられる。

(18) 船体変形

船体たわみ計としては、光学レバーを用いる方法、長スパンの棒を用いる方法などが開発されているが、小型で比較的たわみの大きい木船の場合、または大型船でも進水時のたわみ計測などが主で、航走中の大型船で長期にわたって計測するのに適当したたわみ計はまだ開発されていないようである。

局部的な変形については、簡単な機械的拡大機構をもった指示式のもの、あるいは長期間の最大変位を知るための直針式のものなど、計測箇所によって各種各様のものが用いられている。しかしこれも、最近は抵抗線ひずみゲージなどを検出部に用いる電気式のものが多くなってきたようである。

(19) 船体応力

近年の抵抗線ひずみ計の進歩はめざましく、船体応力計測にはほとんどこれが利用されている。それだけでなく、これまで述べてきたように、各種変換器の検出部として抵抗線ひずみゲージの用いられているものはきわめて多い。

長期間の耐候性、防水処理の問題、温度補償の問題などもほぼ解決され、最近は多点同時記録あるいはきわめて多数点のディジタルプリンター方式なども利用できるようになって、きわめて便利なものである。

ただし、船体応力のように出港から入港まで静止することなく常時変動している場合には、長期間の安定性が最も大切である。どこを応力零の状態と考えるかは問題であるが、仮に平水中の空船時（または満載時）の応力を零と考えるにしても、(a)航走中の応力変動の平均値は船速や船の姿勢などによって異なり、必ずしも零と一致しないこと、(b)荷重変動（貨物、燃料、水など）によって荷重分布が変り平均値が移動すること、(c)末端のゲージ位置における環境あるいはゲージから計器までの導線の状態などの変化によっても零点が移動すること、(d)計器（增幅器）内部の原因によって零点が漂動すること、などがある。これらすべてが重畠していわゆる零点移動と考えられているが、(a)および(b)は計算や実験によってある程度は推定することができるが、(c)と(d)とはその絶対量と計測することも分離することもできないのが現状である。最近は計器およびゲージによる漂動も少なくはなってきているが、船舶のように10～20日間というような長期間では無視できない量となっている。止むを得ずそのときどきの変動分だけを問題として、平均値の絶対値は考慮していないのが一般的の実情である。

純粹に機械的拡大機構のみを用いたひずみ計（伸計）も、外国ではまだ実用されている例もあるようである。温度補償の問題を注意さえすれば、上記の(c)(d)の混入するおそれがなく、簡便で故障もきわめて少ないものであるから、長期計測用には再び考え方直してもいい方式ではないかと考えられる。

(20) 応力頻度

応力頻度計は大別して、検出部に機械的機構を用いたものと、抵抗線ひずみゲージを用いたものと

に分けることができる。

機械式のものはいずれも、前項で述べたように簡便で安定した動作が期待できるものが多い。機械式のものには、応力レベルをあらかじめ設定しておいて、極値頻度計数方式かまたは経過頻度計数方式によるものが多い。船体応力の変動は、小さいリップル波を数多く含んだ不規則変動であるから、機械的フィルターを通してしても、場合によっては実際と相当異なった頻度を計数するおそれがある。

電気式の場合もリップル波の問題は同じであるが、電気的フィルターの場合はその濾波性能を比較的簡単に切換えることができるるので、場合場合に応じて適量のフィルターを選定できるという利点がある。

抵抗線ひずみの零点漂動はここでも大問題で、極値頻度を計数する場合には、適當な平均値を仮定して短時間の頻度をとる以外に方法がない。長期分布の場合には、変動量だけに注目する振幅頻度計数方式をとらざるを得ない。

応力頻度計として独立したもの用いないで、応力変動をディジタルまたはアナログのデータレコーダで記録してきたものを、頻度解析装置、スペクトル解析機、電子計算機などを用いて解析する方法が最近大いに普及してきたようであるが、これについては2.1で触れたので省略する。この方式の利点はここで述べるまでもないが、この方式には相当大規模の機器システムを必要とするという難点がある。

多くの現象の同時記録と対照して総合的解析を行なう必要のある場合以外は、もっと簡便安価で長期間の信頼性があり、特別の計測要員の乗組む必要もないような小型計器を開発して、できるだけ多くの船、できるだけ多くの海面で多くのデータを集めるというような方向もまた望ましいものである。

以上、各計測項目ごとに主として変換器の現状を展望してきたが、記録・処理装置については2.1で述べているのでここでは省略する。

変換器のみについて要約すれば、

- (a) 相当の高速航行にも十分有用な曳航式波浪計の開発
 - (b) 抵抗線ひずみ計の長期間の安定性の問題
 - (c) 簡便な船体たわみ計の開発
 - (d) 簡易応力頻度計の改良
 - (e) 振動、潮風、故障修理の困難性など、舶載使用という特殊条件に対する考慮
- などが今後に期待する主な問題のようである。

2. 2. 2 船主の要望事項

前項の調査と併行して、本研究部会設立の当初第1章で述べたような経緯から、船主・用船者側において自動計測装置の開発に関してどのような要望があるかを調査した。開発要望のあったものを列挙すると次のようなものである。

- (1) 波浪計
- (2) 青波水圧計、青波頻度計
- (3) 応力計、応力頻度計

- (4) 馬力計
- (5) 荷役計算機, 荷役時の応力計
- (6) その他船舶自動化に必要な各種自動計測装置

いずれも特殊の熟練計測員を必要とせず、船の日常業務として簡便に利用できるものという要望が非常に強い。上記のうち(5)(6)は実船試験用機器ではないので、前項では触れなかったが、それぞれの計測対象によって前項のうちいずれかの計測項目に帰納できるものである。この種の船舶自動化のための各種計測機器は、ここ数年来急速に進歩しているようである。それ以外の(1)~(4)の各項目は、直接自動化とは関係ないが、航行中の船舶の環境と応答との実態を把握する意味できわめて大切なものであり、船主側にこの要望のあることは非常に喜ばしいことである。波浪計以外はすでにある程度開発されており、日常簡単に使用できるように自動化・簡易化するという問題だけのように考えられるので、船主側もメーカー側も早急実現の機運を一層盛上げてもらいたいものである。

2. 3 本研究に使用した計測・記録および処理装置

2. 3. 1 計測装置

本研究のしあとる丸実船試験における計測項目および計測装置は、のちに Table 4.1 に示すところであるが、前節の順序に従って今回使用した計測装置の概要を記すこととする。

(1) 風向風速計

コーチンペーンの風向風速計を、本船備付けのものとは別にもう1台取付けた。記録用出力を取出すために新たに検出記を加え、それぞれの出力は増幅器を通じて記録計に合うよう高低両方のインピーダンス用端子を取付けた。その概略を Fig. 2.4 に示す。

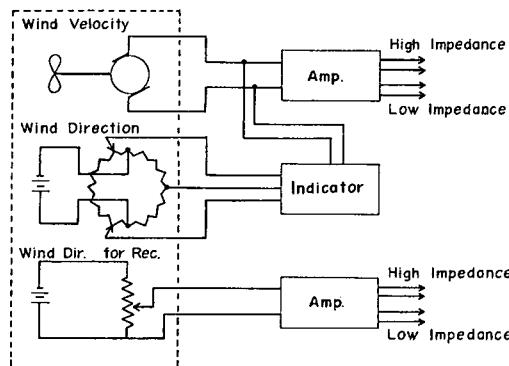


Fig. 2.4 Anemometer-Anemoscope Koshin-Vane

(2) 波浪計

本装置は、船舶によって曳航されるフロートに検出部および送信部を、本船に受信部および復調部をおいて、ほぼ波傾斜に順応して曳航されるフロートの角変位を検出記録し、波浪の表面傾斜角を求めて波長・波高を航走しながら計測しようとするものである。本装置は特に本研究部会で開発試作したもので、予備実験においては船速14kt程度までは大体所期の性能が得られたが、本実験においてはフロートの強度不足のため早期に破損して、残念ながら計測資料を得るに至らなかったものである。現時点ではまだ実用化の域に達していないものであるが、以下にその概要だけを述べる。

フロートは Fig. 2.5 に示すような外観のもので、強化プラスチック製の本体の前後に、フレキシ

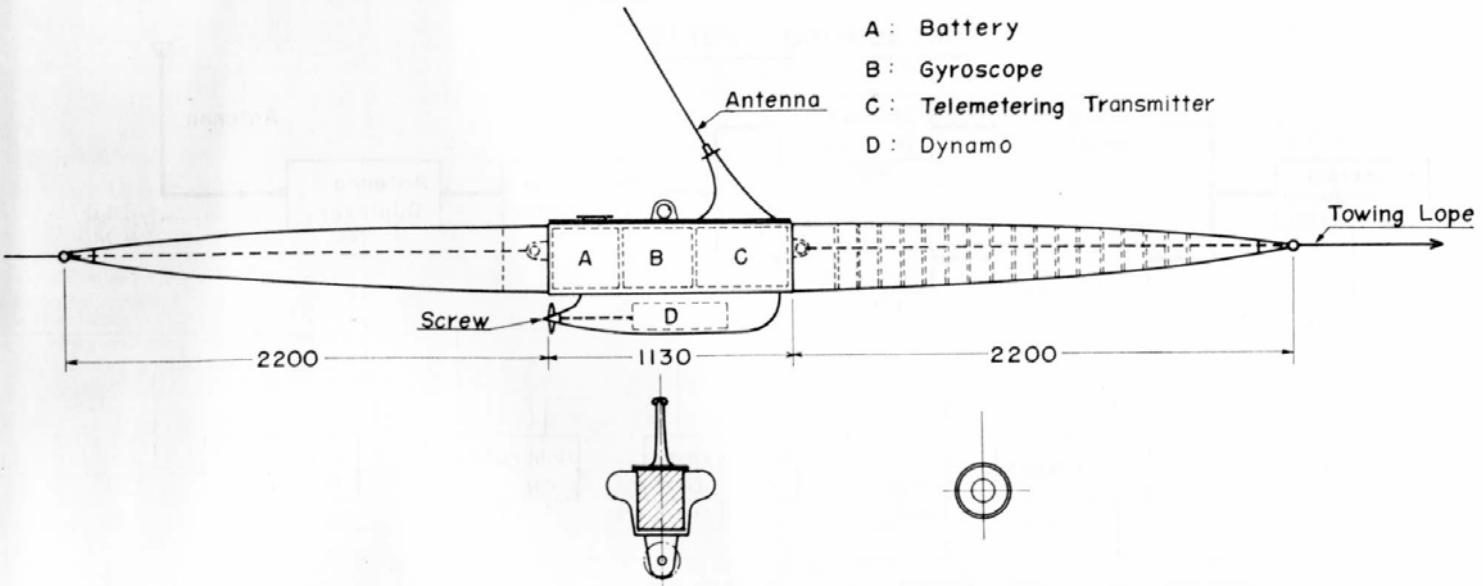


Fig. 2.5 Float of the Wave Meter

ブルな円錐形のゴム袋を取付けたもので、全長約 5.5 m、全装備重量約 150 kg である (Fig. 2.6)。本体内部に検出器（ジャイロ）・送受信装置および電源部を收容し、底部にはプロペラによって駆動される発電機を備えている。2 個のレートジャイロで検出されたフロートの縦揺れおよび横揺れの角速度を積分して、FM 変調したのち本船に発信する。

本船側では受信電波を復調・記録する (Fig. 2.7) が、発信部の電源の on-off および較正信号発信の on-off も本船側から無電制御するようになっている。

本装置のブロック図を Fig. 2.8 に示すが、その構成概要は次のとおりである。

(a) 検出・送受信部 (フロート側)

検出変換器(ジャイロ)，積分増幅および副搬送部，主搬送波送信部，制御受信部，安定化電源部，充電部，電池，発電部，空中線



Fig. 2.6 Float of the Wave Meter

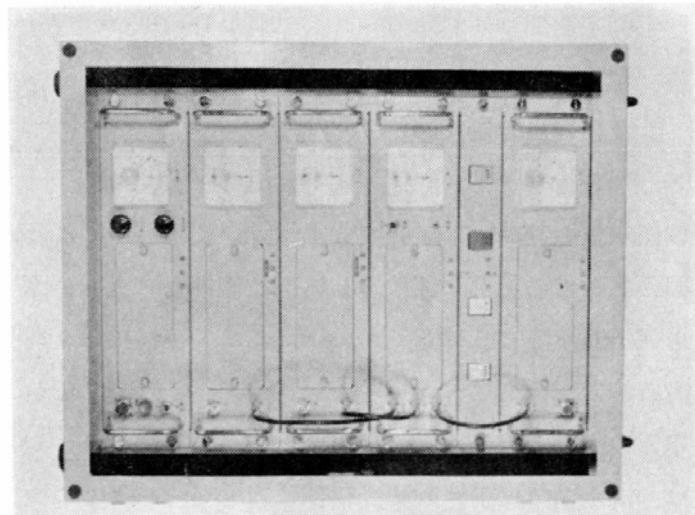


Fig. 2.7 Recording and Controlling Unit of the Wave Meter

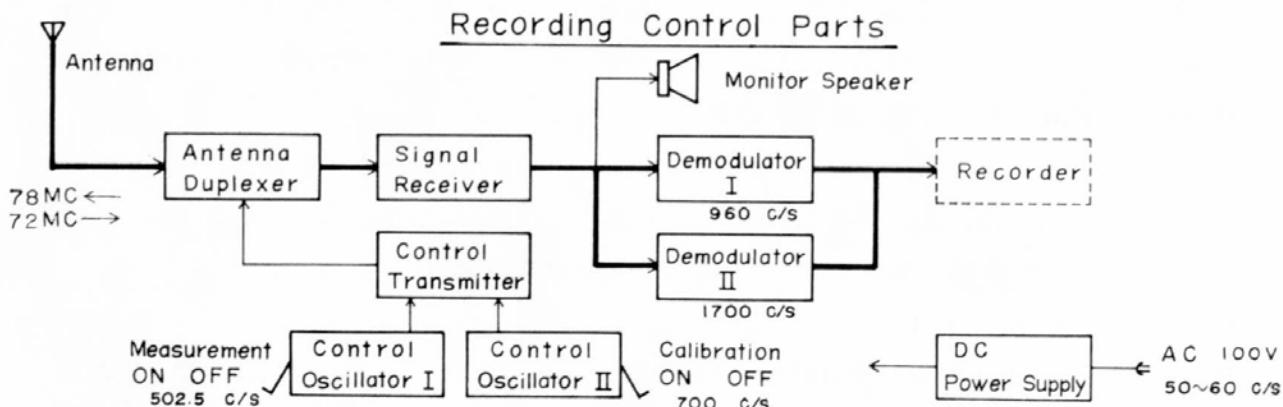
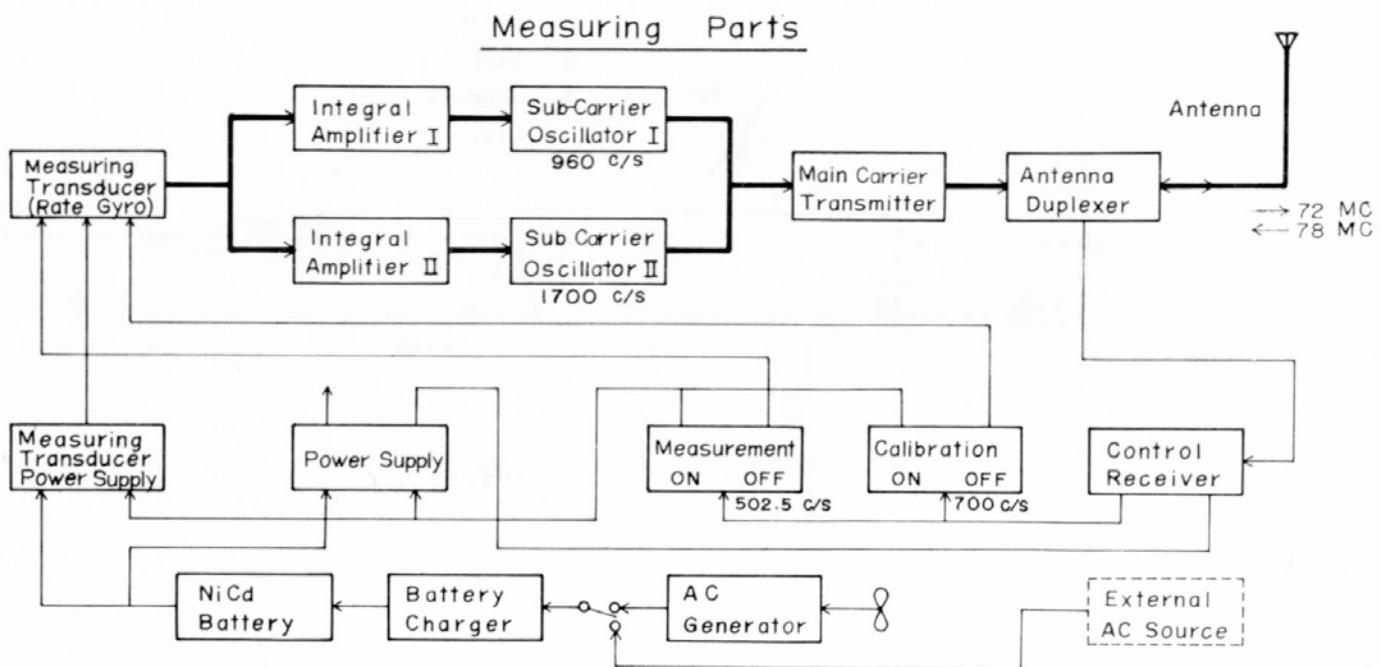


Fig. 2.8 Block Diagram of the Wave Meter

(b) 記録・制御部（本船側）

受信部、復調部、送信部、電源部、制御部、空中線、チェック回路計

また本装置の仕様概要は次のとおりである。

測定範囲：傾斜角 $1\sim10^\circ$ 、周期 $1\sim30$ sec

精度： $\pm 5\%$ 以内

変換器出力： $100 \text{ mV}/\theta^\circ/\text{sec}$

(3) 水位計

舷側水位の計測には超音波式水位計を使用した。これは、船舶技術研究所が水中翼船の浮上計として製作したものを、一部改造して測定範囲を拡大し、本来の測定範囲 $0.9\sim4.5\text{m}$ を $2\sim13.5\text{m}$ としても使用しうるようにしたもので、超音波発信部および受信部は、本船の右舷海面上約 9m の高さに設置した。

本器の作動原理はおよそ次のようにある。発信部から毎秒 6.3 回の割合で発射された 20kc の超音波は、海水面で反射されて受信部に返ってくる。この発信信号で一定電圧を加えた電気回路のゲートを開き、受信信号でゲートを閉じるようにしておくと、一つの矩形波ができる、それを時間について積

分することにより、発受信部と海水面との距離に比例した電気量が得られ、舷側水位として指示および記録されるもので、その仕様は次のような。

(性能) 船の速さ: 0~25 m/s (0~32 kt)

船の傾斜: 縦横とも 10° 以内、周期 0.5 s 以上

水面状態: 水面傾斜 10° 以下

気温: 0~40°C

測定範囲: 0.9~4.5m 2.0~13.5m

誤差: 3% または $\pm 5\text{ cm}$ 3% または $\pm 15\text{ cm}$

記録出力: $100\text{ }\mu\text{A}/\text{m(L)}$ $33.3\text{ }\mu\text{A}/\text{m(L)}$

2 V/m(H) 0.667 V/m(H)

パルス回数: 19 pps 6.3 pps

(4) 青波水圧計

今回の試験では、青波による上甲板への水圧衝撃現象は一度も生じなかったが、船首部第1貨物倉の左右上甲板に、ペローズと電気接点回路を用いた青波水圧頻度計と、銅薄板の塑性変形を応用した青波最高水圧計とを、それぞれ1台ずつ配置した。これらはいずれもさきに当研究協会の第49研究部会¹²⁾で開発したものである。

(5) 軸トルク計

軸トルクの計測には、抵抗箔ひずみ計による軸表面のねじり剪断ひずみの検出、およびリアクタンス利用のひずみ計による軸標点間のねじり角度検出の両者を併用した。いずれも電気出力を軸外に取出すために簡易な黄銅板スリップリングと焼青銅板ブラシを使用した。

各装置は十分な注意のもとに取付けられ、試験全期間を通じていずれも零点移動、感度変化などはほとんどなく安定な記録が得られた。出入港時に軸を前後進ターニングさせて、その中間を記録の零点とした。記録はいずれもオシログラフに描かせたが、捩り振動による振動のほかに船体振動によるトルク変動を含んでいるので、これらを含めた平均値をもって各計測時のトルク量を算出した。計測回路の概略を Fig. 2.9 に示す。

(6) 軸スラスト計

抵抗箔ひずみ計により、軸の縦方向ひずみを直接計測してスラストを求めた。このひずみ量は非常に小さく、長期安定の計測が困難であったが、直流ブリッジ方式による高感度ガルバー直接駆動方式

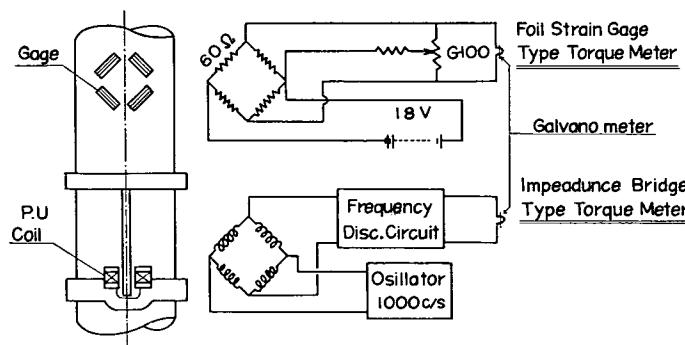


Fig. 2.9 Torque Meter

を採用して、予期以上の好成績が得られた。ただ、高感度ガルバーマーターは船体動揺の加速度により記録点が多少動搖し、またスリップリングの抵抗変化等が影響して、若干の零点移動はまぬがれなかった。計測回路概要を Fig. 2.10 に示す。

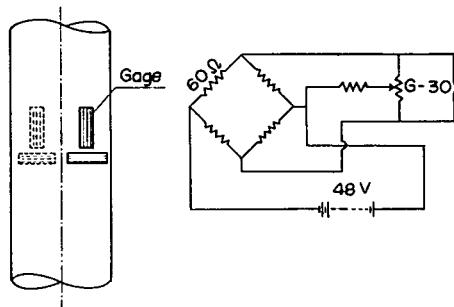


Fig. 2.10 Thrust Meter

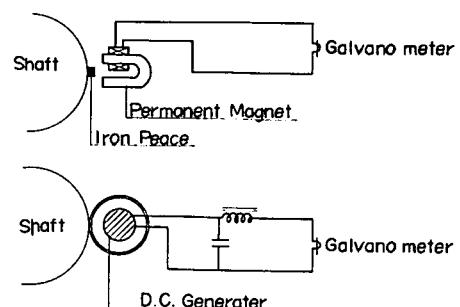


Fig. 2.11 Measurement of Shaft Revolution

(7) 軸回転計

軸回転数の計測は、軸 1 回転ごとのパルスと時間記録との対比による方式と、軸表面速度検出による回転数に比例した電圧を取出す方式の両方を使用した。パルスは軸に取付けた鉄片と軸外に固定した永久磁石の組合せにより、また軸周速度は軸表面に圧着した回転板で駆動される直流発電機電圧により求め、オシログラフ上に他の記録と同時記録した。軸周速の記録はパルス式からの回転数で較正し、軸回転数の連続記録とした。計測回路概要を Fig. 2.11 に示す。

(8) 舵角計、操舵頻度計

舵角の計測は、舵軸の上に取付けた 20cm 径のドラムの回転をピアノ線でポテンシオメータに導く方式によった。

操舵頻度計は、操舵回数頻度と操舵角保持時間率とを計測するため、本実験用に開発自作したもので、Fig. 2.12 にプロックダイヤグラムを示す。これは舵軸の回転角度に比例して動く操舵機の舵角指針の動きを、ピアノ線でカム板の動きに変え、カム板の動きに応じてマイクロスイッチ $\delta_0 \sim \delta_4$ を開閉して、電磁式カウンタ $N_0, NS_1, NP_1, \dots, T, T_0, TS_1, TP_1$ 等を動かして、操舵回数および舵角保持時間を数える方式のものである。

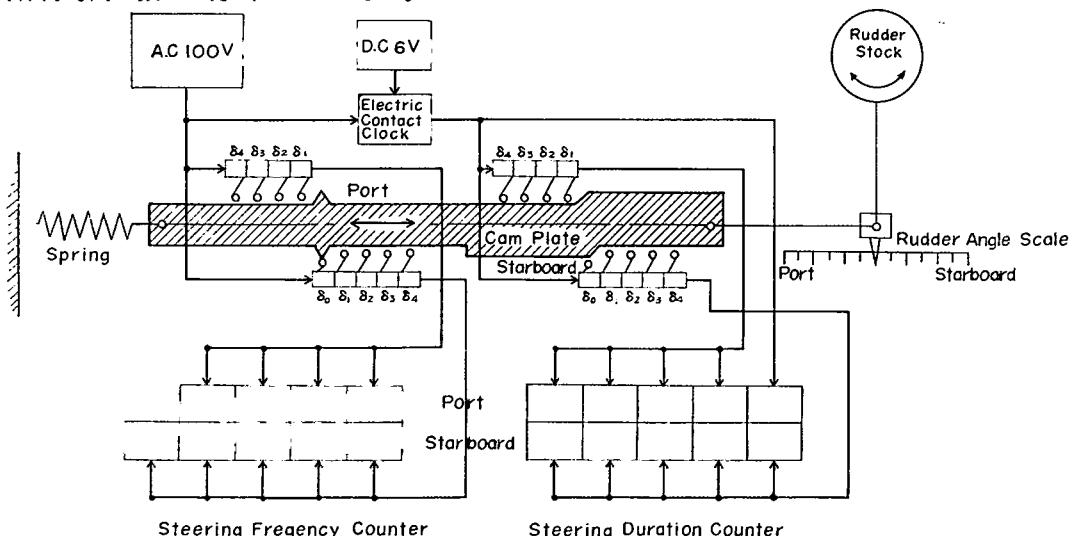


Fig. 2.12 Steering Frequency Counter

操舵回数頻度側のカムは、左右舷各 1 個ずつの突起で、これが舵角 0, 2, 4, 6, 10 度に相当する位置に設けられたマイクロスイッチ $\delta_0, \delta_1, \dots, \delta_4$ を押し、各舷角帯域に操舵された回数を数える。

舵角保持時間率側のカムは梯形カムで、マイクロスイッチ $\delta_0, \delta_1, \dots, \delta_4$ が押されている間の時間を、電接時計から送られる 2 秒ごとのパルスの数でカウンタ T_0, TP_1, TS_1 等で数えるようになっている。またカウンタ T は操舵頻度の全計測時間を数えるためのものである。

操舵頻度計の概略仕様は次の通りである。

計測項目：操舵頻度、操舵角保持時間率

計測範囲：左舷 40°～右舷 40°

舵角区分点：0, 2, 4, 6, 10 度

カウントタ：電磁式 5 枠

(9) 船速

船速計測には特殊の計器を用意せず、本船装備のピトー管を用いたいわゆるサルログによることにしたが、都合によって記録用の電気出力を取出すことができなかつたので、船橋における指示器の読み取りを行なうこととした。

(10) 動揺計

船体縦揺れ角および横揺れ角の測定には、新に製作した自動起立人工水平儀型ジャイロ式動揺計を使用した。これは Fig. 2.13 のブロックダイヤグラムに示すように、縦横 2 組の水銀接点によって作動し、ジャイロ起立用の慣性モーメントを与える 2 組のトルクモーターの作用によって、常に地軸の方向を保つジャイロの回転軸と、ジャイロ筐体（船体に固定）との相対角変位を、縦揺れ角および横揺れ角用の 2 組のマイクロシンで検出し、これを増幅復調後指示および記録する方式のもので、その仕様は次の通りである。

検出範囲：縦揺れ $\pm 5^\circ, \pm 10^\circ, \pm 15^\circ$ の 3 段階

横揺れ $\pm 5^\circ, \pm 15^\circ, \pm 45^\circ$ の 3 段階

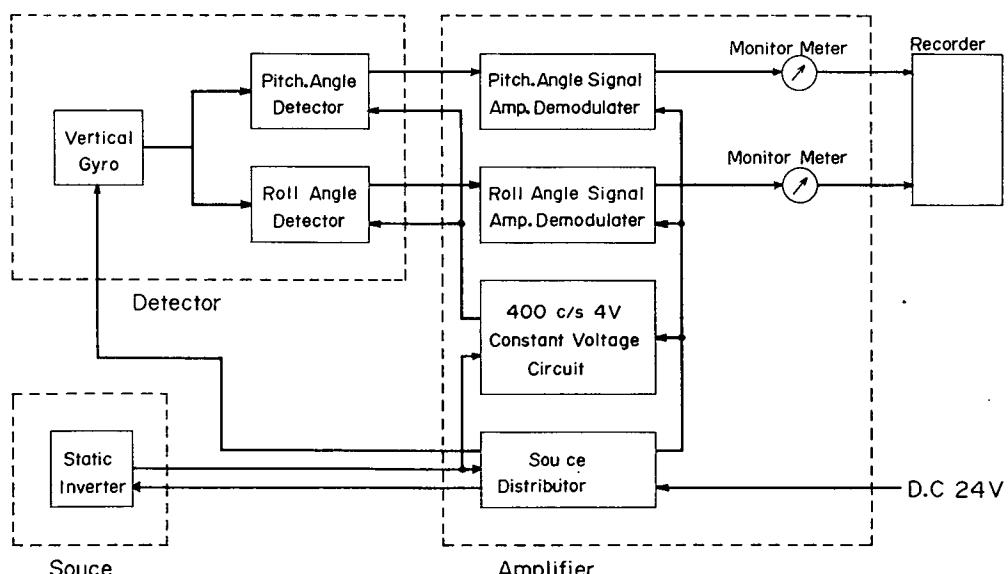


Fig. 2.13 Block Diagram of Oscillation Meter

分解能 : 0.1%以下
 精度 : ±1%以下
 出力 : ±1 V.DC. Max(1 kΩ), ±2 mA Max(10Ω)
 電源 : DC 24 V, 4 A 以下

(11) 方位計

船首揺れ角度を計測するため新たに製作したジャイロ式方位計のブロックダイヤグラムをFig.2.14

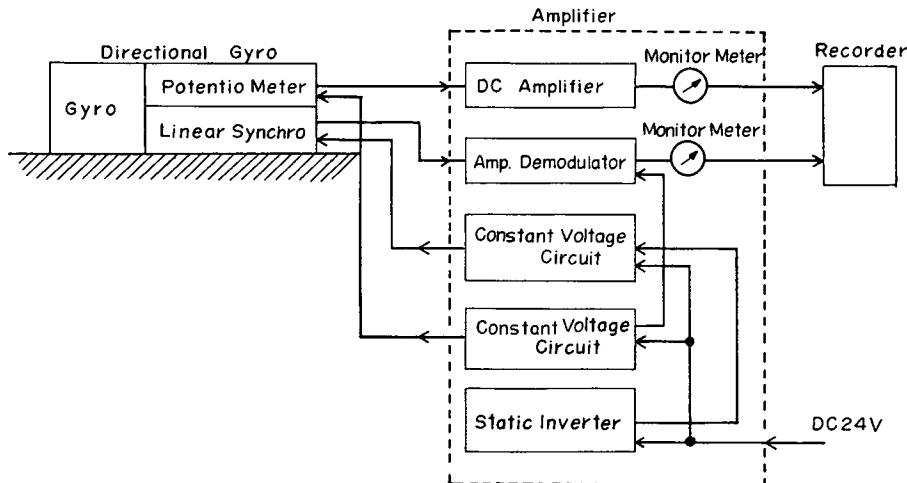


Fig. 2.14 Block Diagram of Yaw Meter

に示す。この方位計は回転軸をほぼ水平に保つ自由ジャイロで、大角度の角変位を計測するためのポテンシオメータと、小角度の角変位を計測するための直線型シンクロ電機の2種の検出器を有しており、仕様は次のようにある。

	ポテンシオメータ	直線型シンクロ電機
検出範囲	0~357°	±20°
分解能	0.2°以下	0.1°以下
精度	±1%以下	±1%以下
出力	16 V.DC Max (1kΩ) ±2 mA Max (10Ω)	±1 V.DC Max (1kΩ) ±2 mA Max (10Ω)
保針精度	0.5 deg/min	
電源	DC 24 V 4 A 以下	

本実船試験においては、定時計測時および8角航走試験には直線型シンクロ電機を、Z操舵試験および自動操縦装置の応答試験にはポテンシオメータの方を使用した。

(12) 加速度計

本船の上下加速度は、船体中央の左右両舷および船首（船首樓甲板下）の3点について計測した。加速度検出器は非接着型の抵抗線ひずみ計を応用したもので、測定範囲 ±2 g のものを用いた。

加速度検出器は船体に固定したため、記録された上下加速度には船の縦揺れ角 θ の影響が $g \cdot \cos \theta$ として含まれたものを記録したことになる。

(13) 船体応力

ポリエチルベースの抵抗箔ひずみゲージを貼付け、動的ひずみ測定装置で計測した。特に湿気の

多い場所の計測は行なわなかったので、ゲージの防湿処理としては簡単にワックスを塗っただけである。

(14) 応力頻度計

抵抗線ひずみ計の出力と解析する電子管式頻度解析機については次項で述べるが、これとは別に機械式の応力頻度計も併用した。これは第49研究部会¹²⁾で使用したもので、50 cm の標点距離間のひずみと、ダイヤルゲージ式の接点装置で受け、設定レベルの帯域通過頻度を計数し、簡単な計算によって極値頻度を求める方式のものである。船体中央左舷の舷側厚板のひずみゲージ貼布位置と同じ場所に取付けて、船体の縦曲げ応力の頻度を計測した。

2. 3. 2 記録装置

(1) データレコーダ

磁気テープを利用して、同時に発生する多種の変動現象を多数のトラックに同時記録し、任意の時間にその現象を忠実に再現させることを目的とするものである。

本研究では14チャンネル（うち1チャンネルは音声記録用）のデータレコーダを購入したが、そのブロックダイヤグラムを Fig. 2.15 に、外観を Fig. 2.16 に示す。増幅器は7チャンネルずつ2台に分れているが、外観の異なるのは、予算の都合で2年度に分けて製作し、一方はトランジスタ回路方式をとっているためである。仕様概要は次の通りである。

テープ幅: 1 in

使用リール: 10½ in NARTB

テープ速度: 60, 30, 15, 7½, 3¾, 1⅞ in/sec

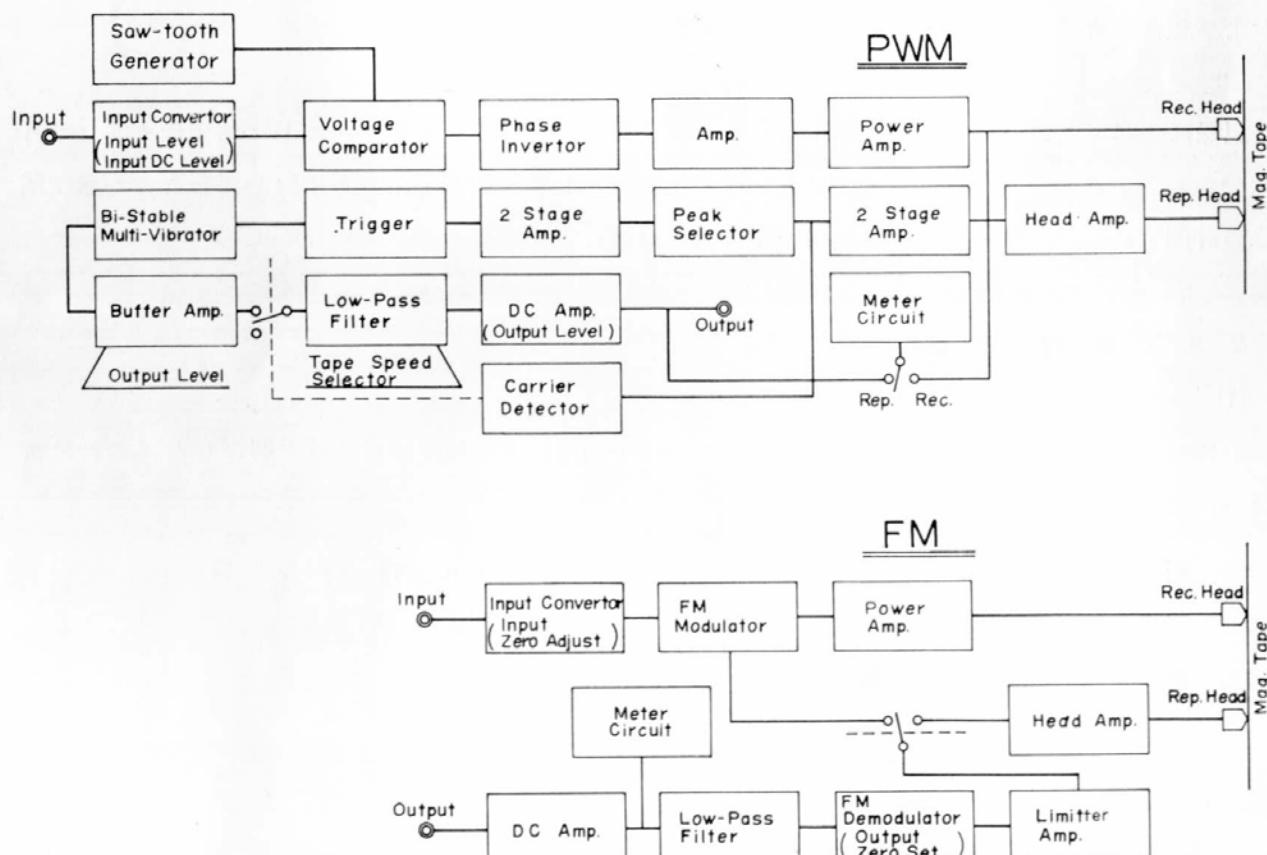


Fig. 2.15 Block Diagram of Data Recorder

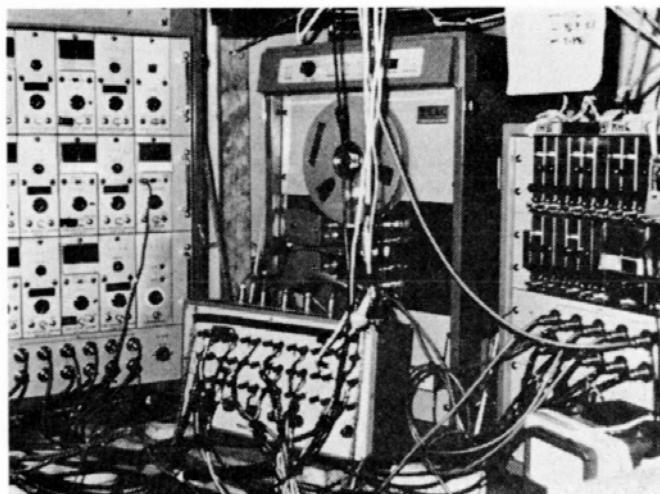


Fig. 2.16 Data Recorder

トラック数: 14

変復調方式: PWM (パルス幅変復調)

入力電圧: $\pm 1.0 \sim \pm 2.0$ V ピーク

入力インピーダンス: $100\text{ k}\Omega$ 不平衡

出力電圧: $\pm 1.0 \sim \pm 1.5$ V ピーク

出力電流: $\pm 10\text{ mA}$ (入力 ± 1 V ピーク, 20Ω)

周波数特性: $0 \sim 1000$ c/s (60 in/s)

$0 \sim 30$ c/s ($17/8$ in/s)

附属品として、13チャンネルの入力を3段切換えて、合計39点まで計測できる手動切換スイッチ、および頻度解析器への入力用として5c/sの低域濾波器を1チャンネル用意した。

(2) オシログラフ

記録はすべて上記のデータレコーダによるのを原則としたが、モニター用として無現像方式（紫外線発色）の電磁オシログラフ12エレメント用を用いた。船舶技術研究所の方で同時に行なった機関関係の計測では、データレコーダは使用せず同様の直視式電磁オシログラフを用いた。

2. 3. 3 処理装置

(1) 頻度解析装置

船体応力、船体動揺などの統計解析用として、電子回路による頻度解析装置を製作した。これはスイッチ切換によって、

- (a) 極大・極小値頻度、極大（または極小）値頻度 (peak count 法) (Fig. 2.17)
- (b) 零通過最大・最小値頻度、最大（または最小）値頻度 (Fig. 2.18)
- (c) 振幅頻度 (range count 法) (Fig. 2.19)
- (d) 帯域通過頻度 (level crossing count 法) (Fig. 2.20)
- (e) 経過時間率分布 (Fig. 2.21)

などの計数ができる汎用型のもので、そのブロックダイヤグラムを Fig. 2.22 に外観を Fig. 2.23 に示す。仕様概要は次の通りである。

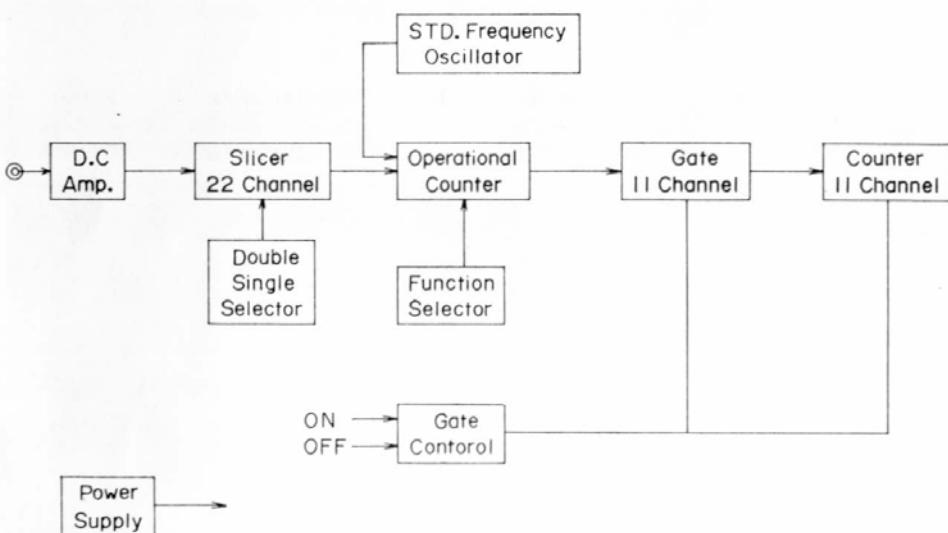
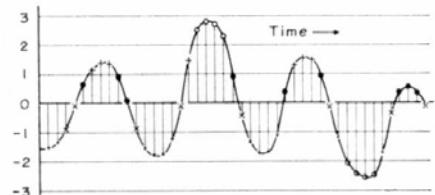
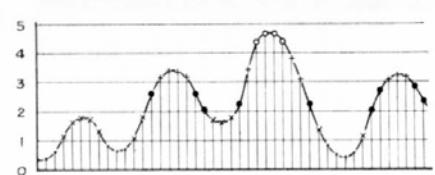
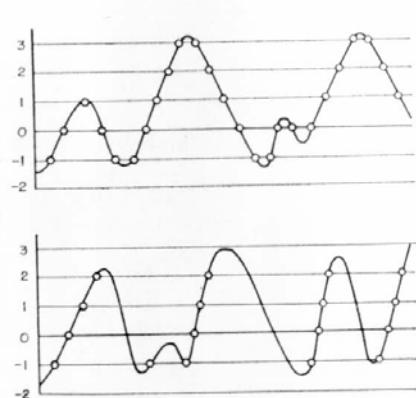
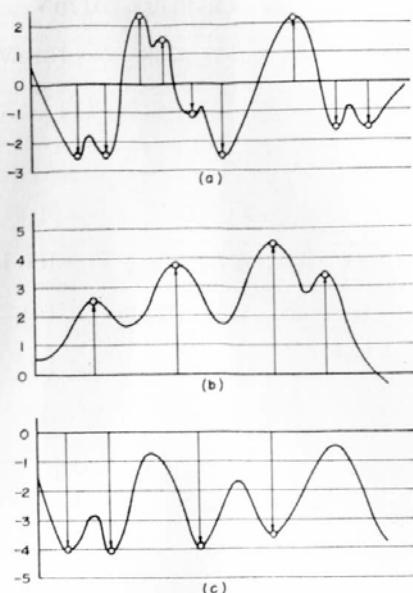


Fig. 2.22 Block Diagram of the Frequency Analyser

直 流 增 幅 器：入力 $\pm 1 \text{ V(p-p)}$, $20 \text{ k}\Omega$

周 波 数 特 性 150 kc/s

ス ラ イ サ ー：設 定 段 数 10 段

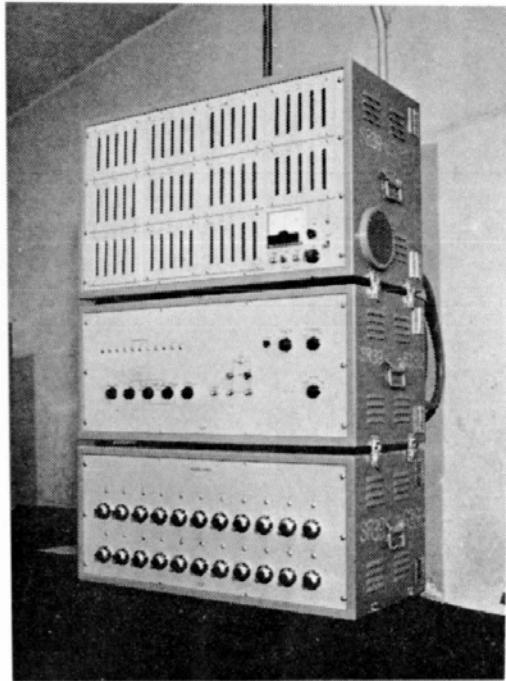


Fig. 2.23 Frequency Analyser
時間率計数の基となるものである。

設定精度	10 mV 以下
無効振幅	設定範囲 ±(10mV～1V) 以内
外部ゲート	エレメント 11素子
波形	矩形波
基準信号	水晶発振子 100 kc/s
分周周波数	$10^4, 10^3, 10^2,$ $10, 1 \text{ c/s}$
カウンター	5桁 11個

無効振幅とは、当初設定するスライスレベルを線でなくある幅をもったバンドとして、そのバンドを超えない小さいリップル波は計数しないようにして、一種のフィルター効果をねらっているが、そのバンド幅を無効振幅といっている。基準信号はカウンターの較正および経過

(2) コレログラム、スペクトル解析器

コレログラム、スペクトラム等の計算に当っては、船舶技術研究所運動性能部の電子計算機を使用した。その性能は次に示すようなもので、FORTRAN IV のプログラミングを使用することのできる計算機のうちでは、最も小型のものに属する。

型式番号	富士通信(株) FACOM 230-10
中央処理装置	コアメモリー 8,192 バイト
	ドラムファイル 65,536 バイト
入出力装置	タイプライタ オンライン 1台
	オフライン 1台
	高速紙テープ読取装置 200 または 400 字/s
	高速紙テープせん孔装置 100 字/s

第3章 予備試験

3.1 昭和38年度

昭和38年度は、ジャイロ式船舶動搖計、3チャンネルデータレコーダの購入および光電式頻度解析器の試作を行ない、その性能調査を主目的として、下記の実船試験を行なった。動搖計は前章2.3.1の(10)で述べたもの、データレコーダは $\frac{1}{4}$ インチ幅の磁気テープを使用する3チャンネル用の小型のものである。光電式頻度解析器は、電磁オシロと同様な鏡式のガルバノメーターから反射する光ビームの揺れを、適当な間隔で並べたいくつのかの光電素子で受けて電磁カウンターを働かせる方式のもので、計数方式としては2.3.3の(1)で述べた(d)帯域通過頻度を計数するものである。

試験期日：昭和39年2月20, 21日

試験船：東京大学海洋研究所 淡青丸 (250 G T)

試験海面：館山西方海面

計測項目：(1) 縦揺れ角 (2) 横揺れ角 (3) 船体応力 (4) 応力頻度
(5) 風速、風向 (6) 船速 (7) 主機回転数

短期間の試験であるため、外界条件はあまり変わらないので、45°変針の8角航走、60°変針の角航走などの試験を行なった。

上記計測項目中(5)以下は本船装備の計器で読取っただけであるが、(4)までの各項目（応力は数点）は磁気テープ式データレコーダに記録して、陸上でその再生出力の頻度解析、スペクトル解析などを行なった。

大体において、諸計測機器の性能テストとしては所期の目的を達したが、計測室の環境や計測室への導線の引き方などによって、データレコーダの記録に相当の雑音の混入する場合のあること、動搖角、応力などの変動の平均値（基準線）がずれることがあり、帯域通過頻度や極値頻度を計数する方式の頻度計は不適当で、振幅頻度計数方式の方が望ましいことがわかった。計測—記録—解析のシステムとしてはこの方式を押進めることにして、次年度は記録エレメント数の増加をはかり、同時に各種変換器に若干の改良を加えることにした。

3.2 昭和39年度

昭和39年度は、14チャンネルのデータレコーダの購入と電子管式頻度解析装置の製作を行なった。データレコーダは、14チャンネル用のテープ駆動部と7チャンネル用の増幅部のみで、残り7チャンネルの増幅部は次年度廻しとした。頻度解析装置は、スイッチ切換によって各種の異なる計数方式がとれるようにしたものである（2.3参照）。

これらの装置および東京大学生産技術研究所で試作した曳航式波浪計の性能テストを目的として、下記の実船試験を行なった。

試験期日：昭和39年11月23日～12月3日

試験船：運輸省航海訓練所練習船 北斗丸 (1,631 G T)

試験海面：横浜——塩釜——神戸

試験項目：風向，風速，波傾斜，縦揺れ角，横揺れ角，上下加速度，船体応力，応力頻度

波浪計はさきに2.3で述べた波浪計の原型ともいべきものである。フロート内部の検出器としてジンバル吊りの振子を用い、その傾斜角をポテンシオメータで検出して、テレメータで本船の受信機に送る方式のもので、フロート前後部のフレキシブルな部分には市販の大径ゴムホースを用いた。検出部、送受信部に不十分な点が多く、所期のデータは得られなかつたが、目視および写真観測によるフロートの曳航および動搖性能は、ほぼ満足すべきものであったので、これを改良して長期間の洋上計測を行なうことに明るい見通しをたどることができた。

試験期間中の適当な海面状態のときを選んで、波浪計曳航試験、漂流試験、旋回試験、8角航走試験などを行なつた。きわめて短期間であるため、計測データそのものは断片的とならざるを得なかつたが、船内電源の電圧変動、記録への雑音の混入、各計器の較正信号の入れ方、振動対策および自動記録方式などについて、多くの有益な経験を得ることができた。

3.3 昭和40年度

本年度試作した曳航式波浪計（2.3参照）の予備実験に主力を注ぎ、昭和40年9月28～30日および10月6、7日浜名湖において、モータボートによる曳航試験、10月28日東京大学工学部において強制動搖装置による動搖試験、11月4、5日伊豆下田沖において海上保安庁巡視船「しきね」による曳航試験を行なつた。

伊豆沖における曳航試験では、波浪階級5程度の比較的荒天で、船速、出会いなどをいろいろに変えて試験を行なつた。船速14～15 kt程度までの試験ではほぼ満足すべき結果が得られたが、フロートのゴムノーズ部に損傷を生じたので、本試験に備えて補強対策を急いだ。

第4章 しあとる丸による実船試験

4.1 実験船

総合実船試験には、船主協会および大阪商船三井船舶株式会社の御好意によって、ニューヨーク航路貨物船しあとる丸への便乗が許された。本船の主要要目は Table 4.1 に示すとおりである。本船の外観を Fig. 4.1 に、ハイドロ曲線を Fig. 4.2 に示す。

Table 4.1 Principal Particulars of SEATTLE MARU

Kind	Diesel Vessel	
Purpose of Employment	Cargo Ship	
Owner	Mitsui O.S.K. Line, Ltd.	
No. of Register	83824	
Playing Limit	Ocean Going	
Class & Type	N.K. 1st Class, Flash Decker	
Length (o.a.)	156.13	m
Length (p.p.)	145.00	m
Breadth (mld)	19.40	m
Depth (mld)	12.50	m
Designed Draft (mld)	9.18	m
Designed Load Displacement	18,250	t
Block Coefficient	0.674	
Prismatic Coefficient	0.687	
Midship Coefficient	0.981	
Water Plane Coefficient	0.811	
Gross Tonnage	9,243.60	T
Dead Weight Tonnage	12,022	t
Full Load Service Speed	17.7	kt
Longitudinal Center of Buoyancy	Aft	1.65 m
Main Engine	Mitsubishi Kobe Sulzer 9RSAD-76	
Power & Revolution	12,000 BHP × 118 r.p.m.	
Build at	Mitsubishi Heavy Industry Co., Ltd.,	
	Kobe Shipyard.	
Completion	Nov. 1959	

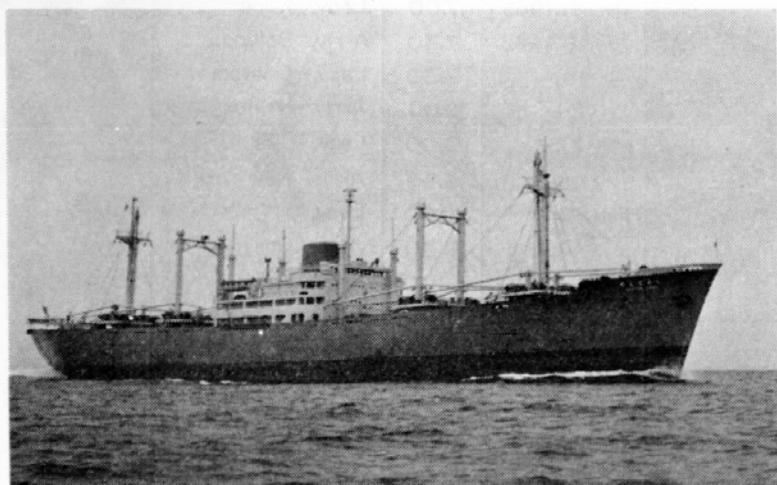


Fig. 4.1 SEATTLE MARU

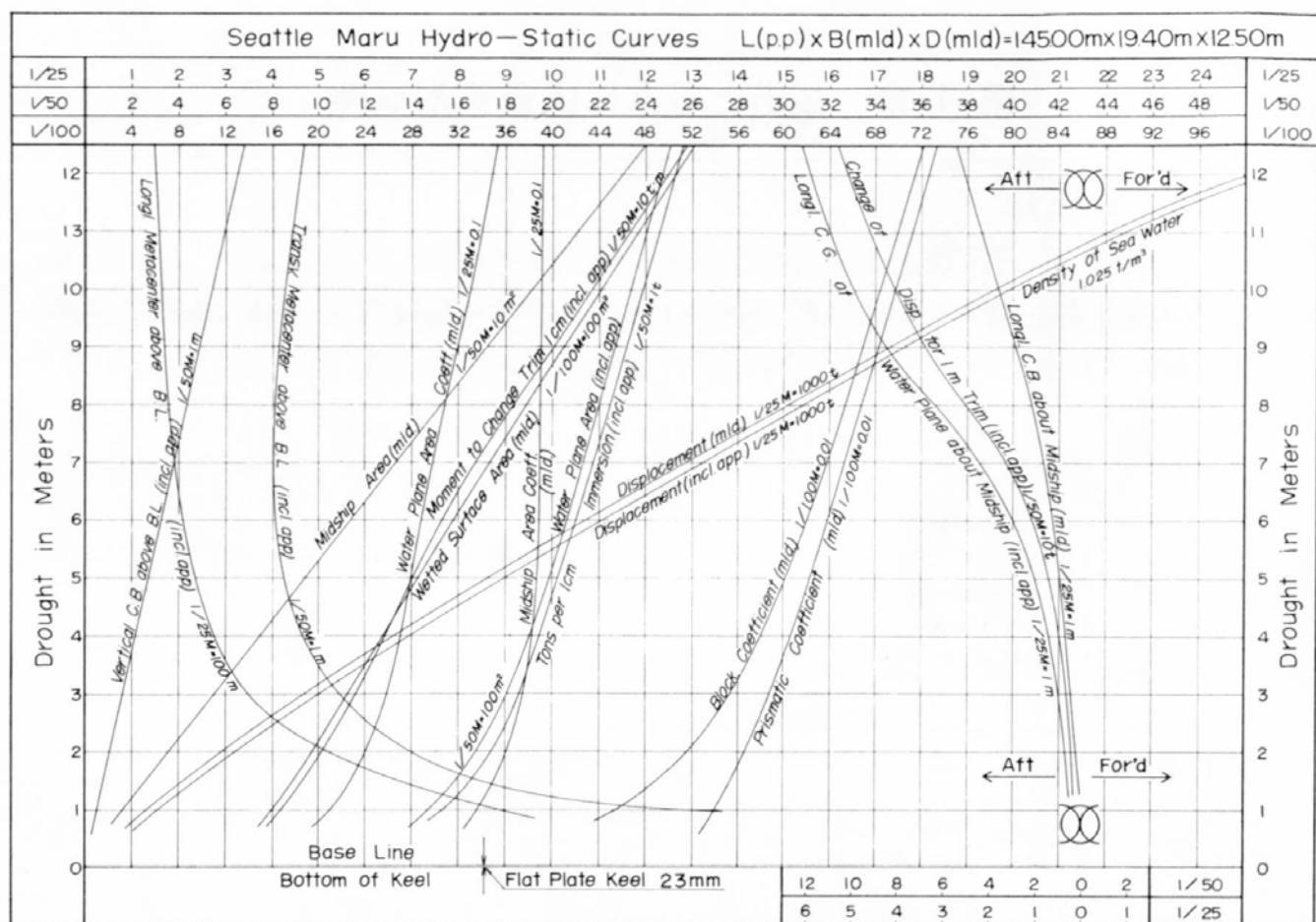


Fig. 4.2 Hydrostatic Curves of SEATTLE MARU

4. 2 試験日程

昭和40年11月下旬、本船の入渠時を利用して計器の取付けおよび配線などの準備工事を行なった。12月上旬出港、2月中旬帰港の予定であったが、海員組合争議のため計画が数次に亘って変更され、結局12月31日出港、3月9日帰港となった。試験日程を Table 4.2 に、航路概要を Fig. 4.3 に示す。

Table 4.2 Time Process of the Test

Date	Time	Port
Dec. 31.1965	17.00	Leav. Kobe
Jan. 18.1966	7.30	Arriv. Balboa
19.	3.00	Leav. Cristbal
24.	19.00	Arriv. Halifax
27.	3.00	Leav. :
28.	16.30	Arriv. New York
Feb. 3.	20.00	Leav. :
4.	8.30	Arriv. Philadelphia
	22.00	Leav. :
5.	11.00	Arriv. Norfolk
9.	2.00	Leav. :
13.	9.00	Arriv. Cristbal
13.	17.30	Leav. Balbol
20.	12.30	Arriv. Los Angeles
23	18.00	Leav. :
Mar. 9	8.00	Arriv. Yokohama

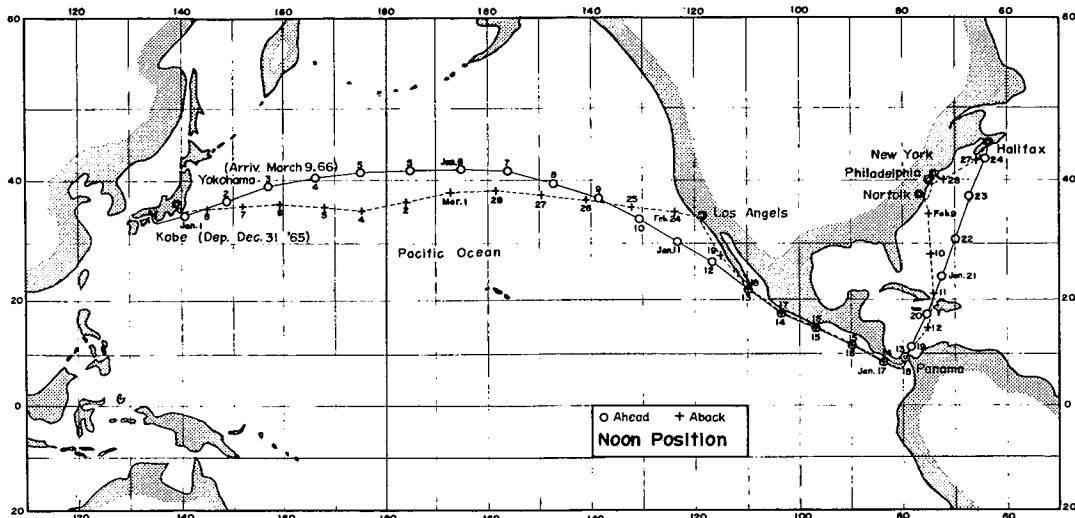


Fig. 4.3 Route of SEATTLE MARU

4.3 試験項目

実験項目を大別すると概略

- (1) 波浪の定量的測定
- (2) 波浪中の船体動揺
- (3) 波浪中の船体応力頻度
- (4) 波浪中の推進性能
- (5) 青波打込水圧
- (6) 操舵頻度
- (7) 船体運動と馬力増加との関係

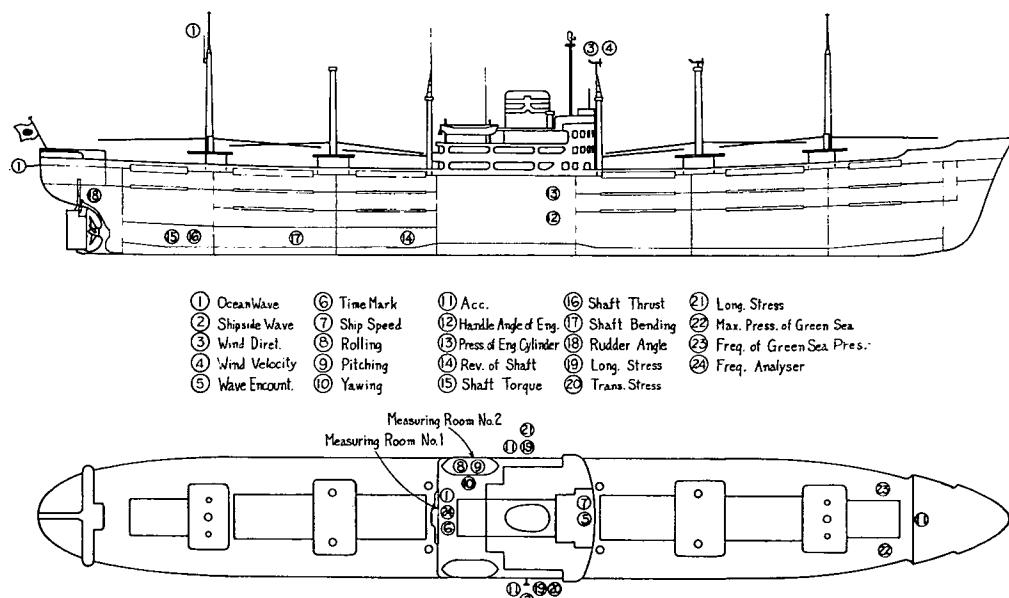


Fig. 4.4 Measuring Points

(8) 波浪中の主機性能

(9) 波浪中のプロペラ軸の曲げ

となる。今回の試験は船舶技術研究所との共同実験の形で実施されたので、機関関係の項目が加えら

Table 4.3 Measuring Items and Used Apparatus

Section	No.	Measuring Items	Position	Measuring Devices	No. of Elements
Environmental Conditions	1	Waves	250~300 m from Stern	Towing Type Wave Slope Meter	2
	2	Shipside Water Level	Starboard Side	Super Sonic Freeboard Meter	1
	3	Wind Direction	Mast	Anemometer-anemoscope (KOSHIN-VANE)	1
	4	Wind Velocity	Mast		1
	5	Wave Encounter	Navigation Bridge	Push Button	1
	6	Time Mark	Measuring Room	Electric Contact Clock	1
Ship Motion	7	Ship Speed	Navigation Bridge	Speed Meter (Nautical Instrument)	1
	8	Rolling	Measuring Room		1
	9	Pitching	Measuring Room	Free Gyroscopic Oscillation Meter	1
	10	Yawing	Measuring Room	Free Gyroscopic Yaw Meter	1
	11	Acceleration (Heaving)	Bow Port & Starboard	Unbonded Gage Type Accelerometer	3
Engine & Shaft	12	Handle Angle	Fuel Handle of Eng.	Potentiometer	1
	13	Pressure of Engine Cylinder	Top Floor of Engine Room	Pressure Indicator	1
	14	Revolution	Tunnel Shaft	Magnetic Pulse & DC Dynamo Type Tachometers	2
	15	Torque	Tunnel Shaft	Strain Gage & Inductance Type Torque Meter	2
	16	Thrust	Tunnel Shaft	Strain Gage Type Thrust Meter	1
	17	Shaft Bending	Propeller Shaft	Strain Meter	4
	18	Rudder Angle	Steering Eng. Room	Steering Angle Meter	1
	18'	Frequency of Steering	Steering Eng. Room	Steering Angle Frequency Counter	1
Strength	19	Longitudinal Stresses	Sheer Stake of Midship	Strain Gages	2
	20	Transverse Stresses	Frame & Web Frame	Strain Gages	4
	21	Longitudinal Stress Frequency	Sheer Stake of Midship	Mechanical Stress Frequency Counter	1
	22	Max. Green Sea Press.	Upp. Dk. No. 1 Hatch Side	Max. Water Pressure Gage	1
	23	Frequency of Green Sea Press.	Upp. Dk. No. 1 Hatch Side	Water Press. Freq. Counter	1
Common	24	Freq. Analysis	Measuring Room	Frequency Analyser	1

れている。

試験項目の内訳および使用計器一覧を Table 4.3 に、計測位置の概略を Fig. 4.4 に示す。また縦曲げ応力および横応力の計測位置は Fig. 4.5 に示すとおりである。

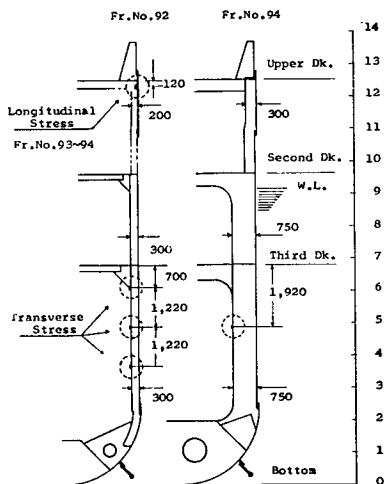


Fig. 4.5 Position of Strain Gauges

4.4 計測方法

4.4.1 定時計測

原則として毎日定時に実施し、データレコーダに前項の各項目の連続記録をとるので、記録エレメント数の関係で2回に分けて計測し、それぞれ15分間ずつの連続記録をとった。

1回の計測は較正その他の時間を含めて約50分を要する。毎日定時に1～2回実施する予定であったが、本船の無電装置との相互干渉が激しいので、無電発信の合間にねらって実施し、時刻は毎日不定となつた。特に荒天の場合は1日2回計測を実施したが、原則として1日1回とし、平水区域では省略したこともある。今回の試験では通算44回の試験を行なつた。

4.4.2 頻度計測

応力頻度計と舵角頻度計は毎日定時に読み取り記録を行なつた。応力頻度計は全期間連続通電、舵角頻度計は毎日一定時間(3～4時間)だけの使用であった。

電子式の頻度解析装置は本船の無電や電源の乱れなどに敏感に影響されてたらめな計数をすることが多く、長時間の船内での使用は不可能であったので、当初計画していた記録テープの船内での解析は断念し、短時間の使用のみに止めざるを得なかつた。

青波水圧の最高値や頻度も適時読み取ることにしていたが、青波らしいものを経験したのは横浜入港直前の2～3回だけで、しかも最低の水圧計(1mH)にも感じない程度のものであった。

4.4.3 特殊計測

上記はいずれも本船の平常航走状態のままで行なつた計測であるが、このほか特に本船に依頼して

- (1) 波浪中の 8 角航走
 - (2) 平水中の Z 操舵試験
 - (3) 自動操縦装置の作動試験
 - (4) 速力遅増・遅減試験
- などを、それぞれ 1 ~ 2 回ずつ実施した。

第5章 しあとる丸実船験試結果および解析

5.1 試験経過

本試験における各計測時の気象、海象その他の外界条件の一覧表をTable 5.1に示す。定時計測時の天候および風は船橋における計測値、波は計測員3名と本船の当直員とが独立に観測した4個の目測値の平均をとった。定時計測時以外の波浪は本船のログブックからとったものである。一般に計測員の観測値よりもログブックの値の方が波長、波高ともに大きい値を示す場合が多かった。ハリファクス入港直前（1月24日）と横浜入港直前（3月7日）以外はあまり激しい荒天には遭遇しなかった。

曳航式波浪計は、フロートの計器を収容している本体とゴム袋との接合部が投入直後に破損し、応急修理も不可能で、計測を断念せざるを得なかった。また併用した舷側の超音波式水位計も作動が思わしくなく、今回の試験の主要項目の一つであった波浪計測が、ほとんど目視観測のみに頼らざるを得なくなってしまったのは残念である。

本航海中の各寄港地における重量変化をTable 5.2に示す。往航は約33%の軽荷、復航は約75%の載荷状態である。

各計測項目の記録は、すべて磁気テープ式データレコーダに記録したが、モニター用として電磁オシログラフもときどき使用した。そのオシロ記録例をFig. 5.1に示す。

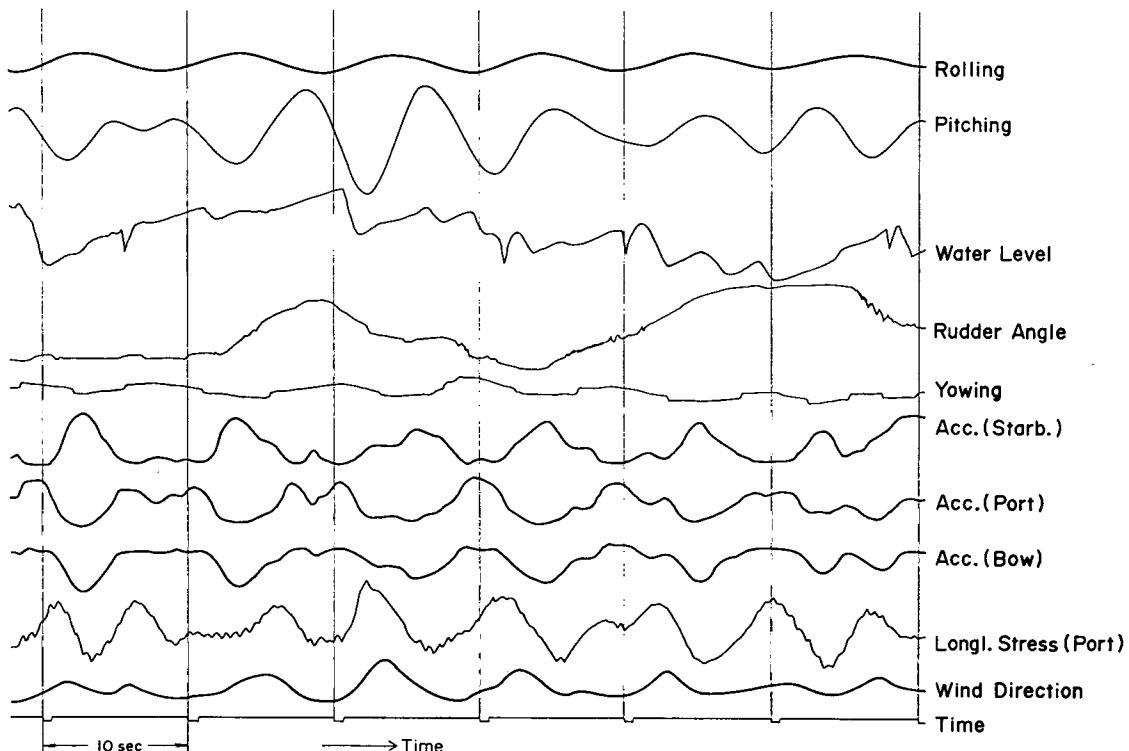


Fig. 5.1 Sample of Oscillogram

Table 5. 1 Table of the Environmental Conditions No. 1

Table 5.1 Table of the Environmental Conditions No. 2

Table 5.1 Table of the Environmental Conditions No. 3

Table 5.1 Table of the Environmental Conditions No. 4

<i>Exp No.</i>	<i>Regular</i>																		
<i>Rudder Angle Special</i>																			
<i>Date</i>	Feb. 1	Feb. 2	Feb. 3	Feb. 4	Feb. 5	Feb. 6	Feb. 7	Feb. 8	Feb. 9	Feb. 10	Feb. 11	Feb. 12	Feb. 13	Feb. 14	Feb. 15	Feb. 15			
<i>Time</i>																			
<i>Lat. deg.</i>																			
<i>Position</i>																			
<i>Long. deg.</i>																			
<i>Course Angle deg.</i>																			
<i>Ship Speed kt.</i>																			
<i>Weather</i>																			
<i>Atm. mb.</i>																			
<i>Air Temp °C</i>																			
<i>Sea Temp °C</i>																			
<i>Rel. Dir. deg.</i>	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
<i>Rel. Vel. m/s</i>																			
<i>Wind</i>																			
<i>Abs. Trai. Bauf.</i>																			
<i>Sea Ht. scale</i>																			
<i>Wave</i>																			
<i>Lth. m.</i>																			
<i>Small Ht. m.</i>																			
<i>Lth. m.</i>																			
<i>Remarks</i>																			
	Dept. NEW YORK Arriv. CHRISTIAN PAUL 2000 0820	Arriv. CHRISTIAN PAUL 2000 1100																	

Table 5.1 Table of the Environmental Conditions No. 5

Regular									30	31	32	33				34
Exp. No.	Rudder Angle	127	128	129	130				131		132		133		134	
Special		204														205
Date	Feb. 16	Feb. 17	Feb. 17	Feb. 18	Feb. 19	Feb. 20	Feb. 21	Feb. 22	Feb. 23	Feb. 24	Feb. 25	Feb. 26	Feb. 26	Feb. 27	Feb. 27	
Time	0945-1015	1120-1155		1000-1030	1020-1020				0945-1045	1045-1045	1045-1045	1045-1045	1045-1045	1045-1045	1045-1045	
Lat. deg.																
Position																
Long. deg.																
Course Angle deg	295	295	307	316					280	280	280	280	280	275	275	
Ship Speed kt	17.6	17.3	17.5	17.8					16.3	15.6	16.4	16.7	17.1	16.8	17	
Weather	tc	tc	tc	tc					tc							
Atm. mb	1012	1011	1013	1017					1010	1020	1022	1022	1023	1023	1023	
Air Temp. °C	28.5	27	22.5	20					13.5	14	13	13	17	16.5	16.5	
Sea Temp. °C	24	27.5	22.5	18					14	13	13	15	14.5	13	13	
Rel. deg.	Dir.	Dir.	Dir.	Dir.					Dir.							
Wl. %	8	12	15	16					15	15	11.3	12	4.9	5	13	
Wind	Dir. deg.	220	215	25	340				310	311	291	300	69	70	50	
Abs. rel. %	2	4	6	4					7	7.5	2.8	4	4.8	5	14	
Wl. %	3	3	5	4					4	4	2	3	3	3	7	
Dir.	Dir.	Dir.	Dir.	Dir.					Dir.							
Sea Ht. m	0.3	0.3	1	0.7					0.8	0.5	0.5	0.5	0.3	0.3	0.3	
scale	2	2	3	3					3	3	3	3	2	2	2	
Lth. m	10	20	20	15					20	10	20	25	1.5	30	30	
Wave	Dir.	Dir.	Dir.	Dir.					Dir.							
Swell	Ht. m	0.5	0.4	1	1				1.5	2	1.5	2.5	2.5	2.5	2.5	
Lth. m	30	110	80	80					80	70	100	120	100	90	130	
															Octagonal Maneuver Point	
															Dept. PROBLEMS 1000 1230	

Table 5.1 Table of the Environmental Conditions

No. 6

Exp. No.	Regular	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44
Rudder Angle	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	
Special /											
Date	Feb. 28	Mar. 1	Mar. 2	Mar. 4	Mar. 5	Mar. 5	Mar. 6	Mar. 7	Mar. 7	Mar. 8	Mar. 9
Time	0830-1000	0930-1100	1104-1300	1335-1500	0925-1025	0922-1022	0938-1300	1604-1630	1755-1831	1005-1147	1045-1048
Position	Lat. 36°-37°N	35°-36°N	35°-36°N	35°-36°N	35°-36°N	36°-36°N	36°-36°N	36°-36°N	35°-35°N	35°-35°N	35°-35°N
Long.	148°-149°E	148°-149°E	148°-149°E	148°-149°E	148°-149°E	148°-149°E	148°-149°E	148°-149°E	147°-148°E	147°-148°E	147°-148°E
Course Angle	215°	215°	215°	215°	216°	216°	216°	216°	216°	215°	215°
Ship Speed	16.6	17.8	16.7	16.8	17.2	16	16.8	15.9	16.3	15.5	16.6
Weather	O	sc	sc	sc	sc	c	c	c	c	c	0
Atm.	mb. 1023.9	1023.5	1024.6	1025	1029	1029	1022	1025	1029	1011	1015
Air Temp.	°C 1.2	1.4	1.2	1.5	1.5	1.4	1.3.5	1.3.5	1.5	1.1	1.5
Sea Temp.	°C 1.2	1.3.5	1.3.5	1.6.5	1.7	1.7	1.5.5	1.5	1.5	1.3.5	1.6
Wind											
Rel. dir.	→	↔	↓	↑	↓	↑	↔	↓	↑	↔	↓
Tel. %	5	6	7.6	1.2.2	1.2	1.5.7	1.4	16.5	16	1.5.4	2.2
Dir. deg.	90	45	2	140	185	190	329	340	334	276	290
Abs. Tel. ms.	-3	4	4.8	3	1.3	1.3.6	1.3	10.3	1.4	9.2	14.5
Beauf.	6	3	3	6	6	6	5	7	5	7	5
Dir.	→	↔	↓	↑	↓	↑	↔	↓	↑	↔	↓
Sea Ht. m Scale	2.5	1	0.5	1.5	1.5	2	1.5	4	2	5	1.5
Wave											
Lm. m.	25	20	20	25	20	20	20	20	15	20	30
Dir.	→	↔	↓	↑	↓	↑	↔	↓	↑	↔	↓
Swell Ht. m	4	1.5	2	2.5	3	3	3	4	2.5	2	3
Lm. m.	100	100	100	110	80	60	50	60	50	70	70
Remarks											Arriv. YO1947/08/20
											Pass. Date Line

Table 5.2 Draft, Displacement and Weight at the Ports

Position	Draft (m)			Disp. (t)	Weight (t)	
	For.	Aft.	Mid.		Cargo	Water & Fuel
Lv. Kobe	5.72	8.07	6.81	12,550	4,922	1,695
Ar. Cristobal	5.25	7.54	6.45	11,750	4,922	758
Lv. "	5.72	7.88	6.8	12,550	4,922	1,520
Ar. Halifax	5.58	7.62	6.59	12,100	4,922	1,215
Lv. "	5.48	7.49	6.43	11,750	4,595	1,144
Ar. New York	5.70	7.40	6.55	12,000	4,595	1,176
Lv. "	3.79	6.46	5.13	9,000	1,205	1,614
Ar. Philadelphia	3.88	6.48	5.19	9,120	1,205	1,593
Lv. "	4.43	5.85	5.14	9,050	898	1,695
Ar. Norfolk	4.41	5.58	5.01	8,750	898	1,659
Lv. "	7.91	8.25	8.06	15,280	7,465	1,613
Ar. Los Angeles	7.38	8.18	7.74	14,570	7,465	999
Lv. "	8.22	9.36	8.78	16,920	8,946	1,838
Ar. Yokohama	7.95	9.02	8.44	16,160	8,946	1,142

Table 5.3 Maximum Amplitude of Oscillation Angle and Hull Stress

Exp No.	Rolling		Pitching		Yawing		Stress	
	Amp (deg)	Period (sec)	Amp (deg)	Period (sec)	Amp (deg)	Period (sec)	Deck (kg/mm ²)	Web Frame (kg/mm ²)
1	7.5	12	1.0	12	0.8	15	0.8	1.4
2	7.6	11	1.1	21	1.8	17	0.8	1.3
3	5.6	12	2.9	20	1.5	21	1.1	1.2
4	-	-	3.0	17	2.0	21	0.8	1.4
5	3.4	13	1.3	12	-	-	1.0	1.2
6	5.0	15	1.3	18	0.8	19	0.9	1.2
7	4.0	12	2.8	12	0.8	27	0.7	1.1
8	2.4	13	1.3	12	-	-	1.3	2.2
9	5.0	16	1.8	15	-	-	1.4	1.8
10	2.9	14	0.9	12	-	-	1.2	1.8
11	1.5	13	1.4	13	0.4	25	0.5	0.5
12	2.4	12	1.0	14	1.7	22	0.5	0.8
13	1.1	17	1.2	19	0.6	25	0.2	0.4
14	1.2	12	0.9	14	0.3	46	0.2	0.4
15	-	-	-	-	-	-	-	-
16	2.1	13	0.8	13	0.9	60	0.5	0.4
18	0.7	11	1.1	5	0.3	31	1.1	1.8
19	0.9	10	1.0	10	0.5	28	0.5	1.0
20	1.1	6	2.0	6	0.2	22	0.9	1.1
21	1.0	13	1.6	6	0.5	24	0.8	0.7
22	7.5	12	2.0	7	1.8	25	3.1	2.0
23	11.5	11	7.0	9	3.1	10	2.5	2.9
24	6.0	12	1.8	12	2.5	17	1.0	1.1
25	1.2	12	1.5	12	0.7	40	1.1	1.4
26	2.0	19	2.0	13	1.2	28	0.6	0.9
27	2.7	20	2.2	7	0.6	22	1.2	1.0
28	6.6	18	2.1	12	2.0	16	1.1	2.0
29	3.5	25	1.5	24	1.9	12	0.9	-
30	0.8	17	2.0	11	1.1	38	1.7	-
31	2.0	14	1.8	7	1.7	14	0.6	1.6
32	2.1	13	3.6	9	1.0	15	1.3	1.2
33	10.9	12	2.7	9	1.9	12	1.6	2.0
34	2.1	12	2.6	11	2.2	22	1.4	1.4
35	2.8	14	1.8	20	1.3	21	0.7	0.8
36	2.5	13	2.0	20	2.1	20	1.2	1.3
37	1.2	15	1.6	9	1.4	15	1.2	1.8
38	3.6	14	2.2	8	1.5	25	1.7	2.2
39	2.7	15	1.5	5	2.2	40	1.1	2.6
40	1.5	16	1.4	10	2.0	40	0.5	0.9
41	5.0	13	6.2	8	1.1	50	3.0	2.7
42	4.4	12	2.0	7	2.4	40	1.6	1.9
43	5.7	11	6.2	8	2.9	45	1.9	1.8
44	5.5	15	2.1	8	0.4	45	1.9	2.6

各試験番号ごとの動揺船体応力など各種応答の最大振幅（片振幅）と平均周期を表示すると Table 5.3 のようになる。この値は主として、モニター記録としてとった短時間のオシロ記録から読み取ったものである。

各定時計測時における波高と出合角度とをそれぞれ 5 段階に分類してみると Table 5.4 のようにな

る。波高としては 1.5~2.5 m の範囲が最も多いようであるが、ほとんど平水に近い状態の場合（主としてアメリカ西岸およびカリブ海海面）には、定時計測を省略した日も多いので、0~1.5mの範囲は実際にはもっと多く、この表は必ずしも全航海の外界条件分布を示すものではない。

Table 5.4 Classification of Wave Height and Heading Angle

Wave Height		1	2	3	4	5	
Heading Angle		0~1.5m	1.5~2.5m	2.5~3.5m	3.5~5.5m	5.5~	
1 Head Sea			21 40	42	25	41	5 12 %
2 Bow Sea	16 20	26 27 30 31 32 44	18 33 37 38 39			23 43	15 36 %
3 Beam Sea			19	8 36	22		4 9 %
4 Quartering Sea	13 14	6 7 9 10 12 24 29	1 2 4 5	3 28			15 36 %
5 Following Sea	11	34 35					3 7 %
		5 12 %	18 43 %	12 29 %	4 9 %	3 7 %	42 100 %

The number in each column shows the Test No.

5.2 船体運動

今回の実船試験において、動搖計の不調な場合が多かったことはまことに残念である。なかんづく船首揺れ測定用のジャイロは動作極めて不安定で、ほとんど全くデータが取れなかった。また縦揺れ横揺れ計測用の自動起立式人工水平儀も、その最終調整において不良部分があったため、正常に働くかのあり、結果的には横揺れ、縦揺れとも振幅のかなり大きい場合の記録はおおむね良好であったが、振幅の小さい場合の記録に信頼できないものが含まれていたのはまことに残念なことである。最近のジャイロ式動搖計は集電子の酸化防止、防塵の見地から、アルゴンガス封入容器に密封されており、設備のある工場内でなければ全く内部に手を触ることはできないので、このような故障があった場合は 船上では手を下すすべがない。その点からいっても故障発生率は極めて低く信頼性は十分大きいものでなければならない。

このような計器の不調のため、全試験にわたっての動搖の連続記録を詳細に解析することができなかった。各試験ごとの動搖の最大振幅については、すでに Table 5.3 に示してある。このような動搖と船体応力との関連については 5.4 に、また動搖と推進馬力増加との関連については 5.6 に考察されている。

ここでは、測定結果の信頼度の十分高い少数の動搖記録について、スペクトラム・コレログラム解析を行ない、その結果から動搖の性質を検討することとした。そのような代表例として、5.4 に述べる応力と運動との関連を調べるために適した Test No. 23, 43, および 8 角航走の結果を採用した。本節ではまずここで用いたコレログラム・スペクトラム解析の方法の概略について述べ、次に Test No. 23 および 43 のスペクトラム解析の結果について考察し、ついでそのうち Test No. 43 の実験状態に対し、理論的に動搖の応答特性を推定し、波浪スペクトラムをも推定して、その両者から計算のみによって求めた動搖のスペクトラムと実験結果との比較を行なうとする。最後に 8 角航走結果について検討する。

5.2.1 コレログラム・スペクトラム解析法の概略^{14), 19)}

Test No.23, No.43 の縦揺れ, 横揺れ, 船首加速度, 縦応力, 横応力について磁気テープ記録をA-D変換機にかけ, ディジタル化してテープ穿孔し, 船舶技術研究所運動性能部の電子計算機FACO M230-10によって計算したコレログラム・スペクトラムが Fig. 5.2 から Fig. 5.7に示してあるが, まずこれらを例に取って, ここに用いられたコレログラム・スペクトラムの解析法について概要を述べることとする。

コレログラムは自己相関函数 $R(\tau)$, またはこれをノルマライズした自己相関係数 $\rho(\tau) = R(\tau)/R(0)$ の图表であり, スペクトラムはふつう自己相関函数 $R(\tau)$ のフーリエ変換 $S(\omega)$ の图表であるといってよい。すなわち, 時間とともに変動する現象を $x(t)$ で表わし, これの平均値は 0 になるようにしたとすると理論的には次のようなものである。

$$\rho(\tau) = \frac{R(\tau)}{R(0)} = \frac{R(\tau)}{\sigma_x^2} \quad \dots \dots \dots \quad (5.2.1)$$

$$R(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t+\tau) \cdot x(t) dt \quad \dots \dots \dots \quad (5.2.2)$$

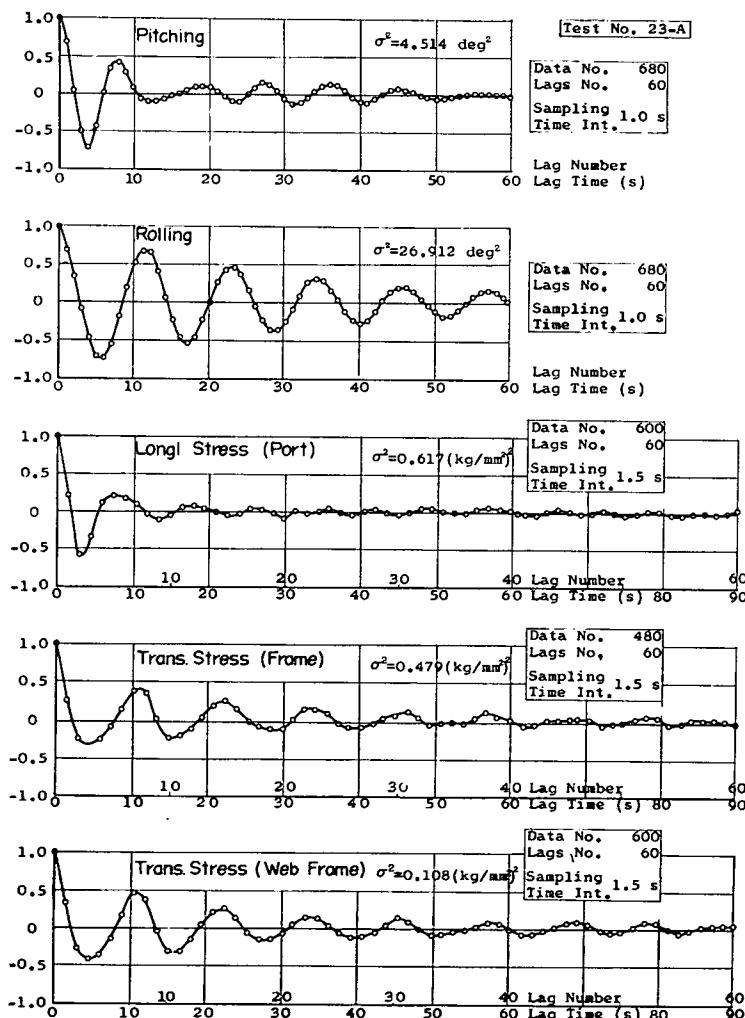


Fig. 5.2 Correlograms of Oscillation and Stress

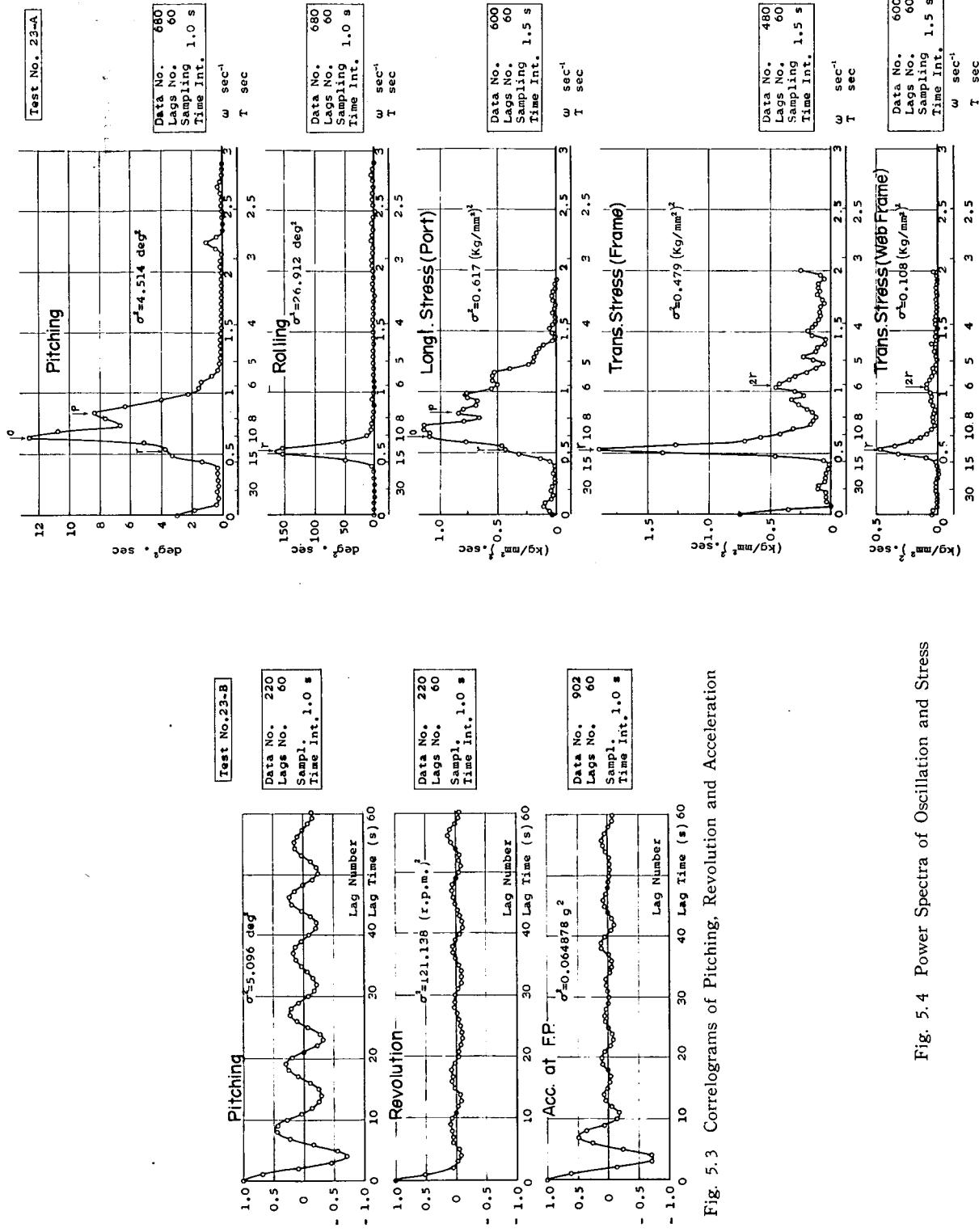


Fig. 5.3 Correlograms of Pitching, Revolution and Acceleration

Fig. 5.4 Power Spectra of Oscillation and Stress

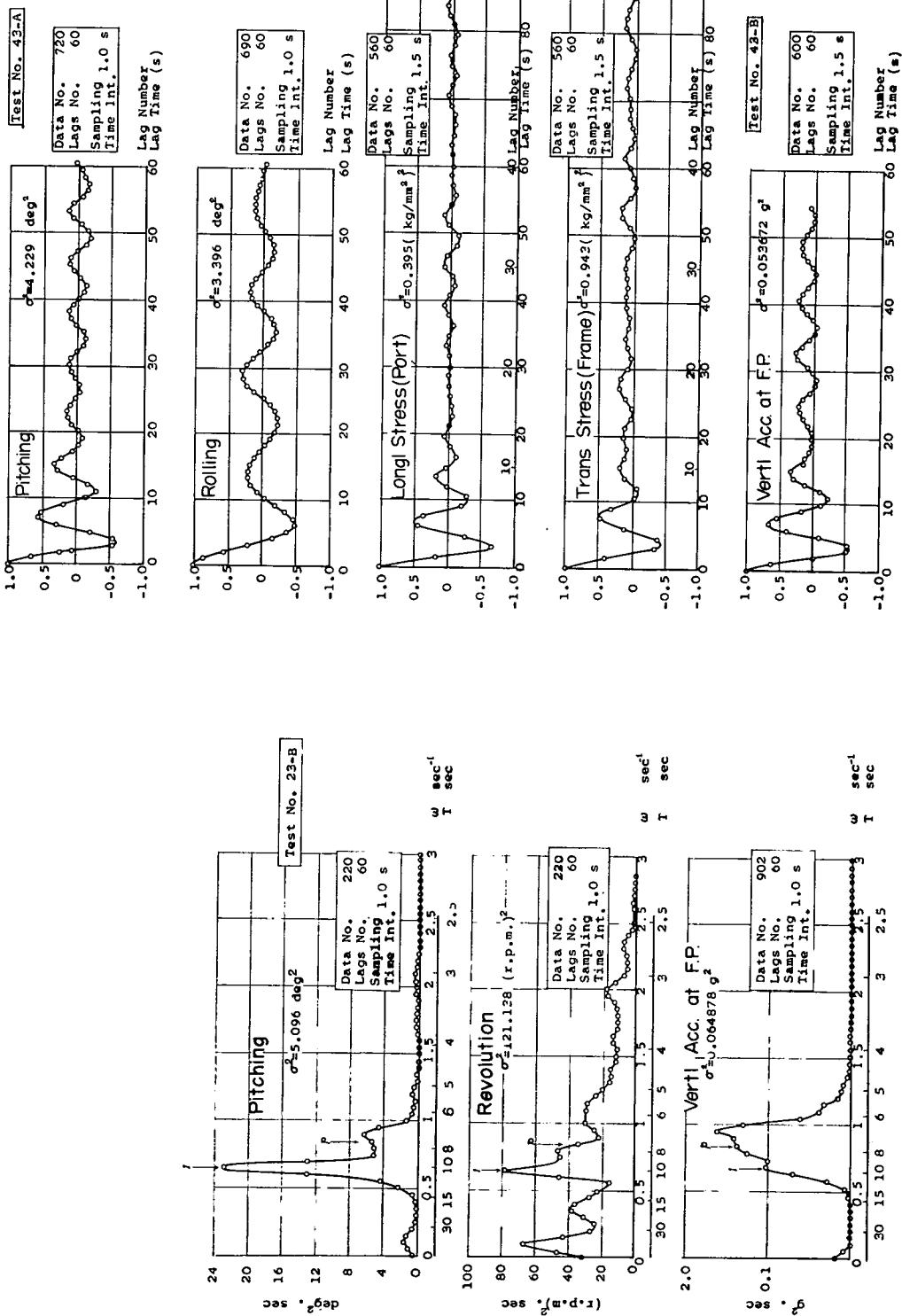


Fig. 5.5 Power Spectra of Pitching, Revolution and Acceleration

Fig. 5.6 Correlograms of Oscillation, Stress and Acceleration

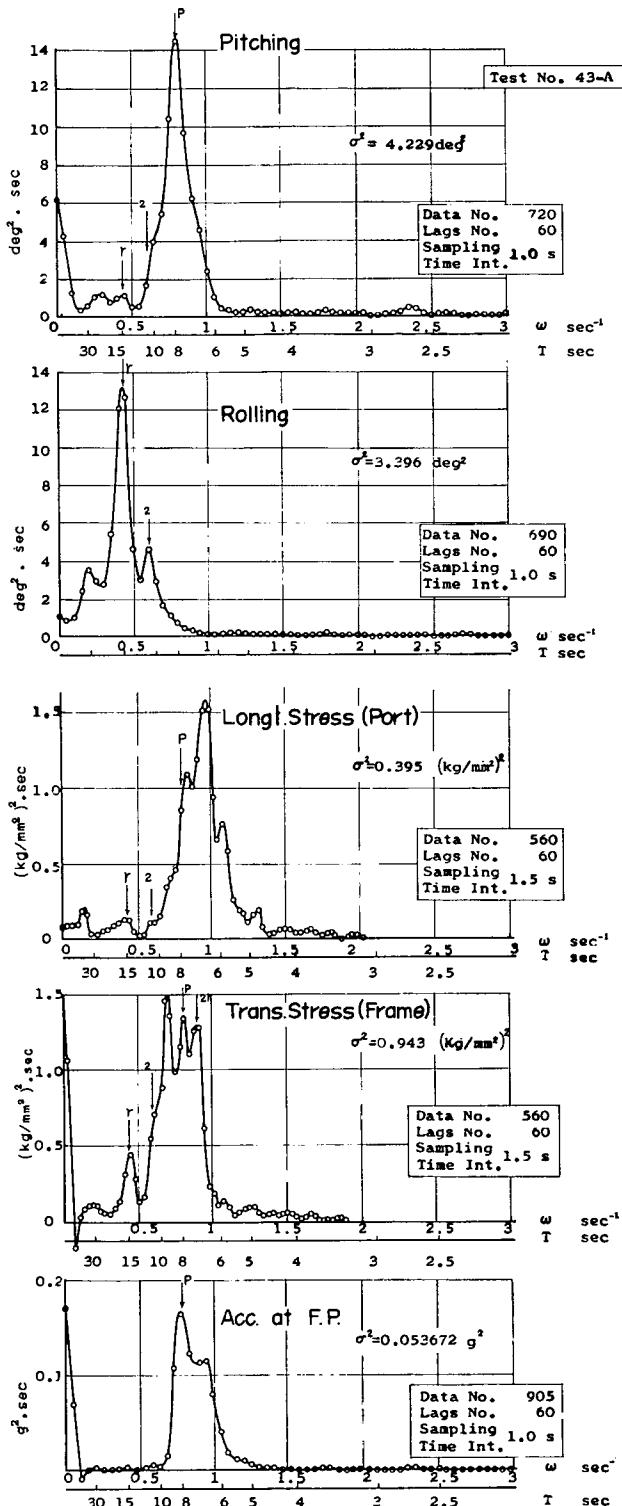


Fig. 5.7 Power Spectra of Oscillation, Stress and Acceleration

ただし、現実には $x(t)$ は t の有限な範囲についてしか与えられないで、相関函数の積分は有限範囲に止まり、かつすべて計算はデジタルで行なうので、 Δt の間隔ごとに読み取った離散的な値 $x(\Delta t), x(2\Delta t) \dots x(N\Delta t)$ によって行なうことになる。すなわち、

$$\hat{\rho}(\tau) = \rho(h\Delta t) = \frac{\hat{R}(h\Delta t)}{\hat{R}(0)} \quad \dots \quad (5.2.5)$$

$$\hat{R}(0) = \frac{1}{N \cdot \Delta t} \sum_{i=1}^N [x(i\Delta t)]^2 \Delta t \quad \dots \dots \dots \quad (5.2.7)$$

$h=0, 1, 2, \dots, M$ (M はラグの最大の数)

オートスペクトラムは ω について偶函数であるから、最近多く用いられる波浪スペクトラムの定義と合わせるため ω の正の範囲のみについて考え、負の側を折りかえし正の部分の 2 倍として定義する。そしてサンプリング時間間隔から定まる最大の解析周波数、すなわちナイキスト周波数

$$\omega_N = -\frac{2\pi}{2At} = -\frac{\pi}{At}$$

の間を、ラグの最大の数と同じ M 個に分割した点で求めることとする。すなわち、

$$\Delta\omega = \frac{\pi}{M \cdot 4t}$$

これは次に述べるウィンドウの演算を容易にし、かつ分解能を合理的なものとするためである。すなわち、

$$\hat{S}(\vec{p} \cdot \vec{A}\omega) = -\frac{1}{\sum_{j=-j}^j a_j} \sum_{j=-j}^j a_j \hat{L}(\vec{p} + \vec{j}\omega) \quad \dots \dots \dots \quad (5.2.8)$$

$$\hat{L}(p \cdot \Delta\omega) = \frac{4\omega}{\pi} \sum_{h=-M}^M \hat{R}(h \cdot \Delta t) \cos \{ p \Delta\omega h \Delta t \} \quad \dots \dots \dots \quad (5.2.9)$$

これに $\Delta\omega = \frac{\pi}{M \cdot At}$ を入れて

$$\hat{L} \left(\frac{p\pi}{M \cdot At} \right) = \frac{1}{M \cdot At} \sum_{h=-M}^M \hat{R}(h \cdot At) \cos \left(\frac{h \cdot p}{M} \pi \right) \quad \dots \dots \dots \quad (5.2.10)$$

a_j は

にとる。そこで

$$\begin{aligned}
 \hat{S}\left(\frac{p}{M \cdot \Delta t} \pi\right) &= a_{-n} \hat{L}\left(\frac{p-n}{M} - \frac{\pi}{\Delta t}\right) + a_{n+1} \hat{L}\left(\frac{p-n+1}{M} - \frac{\pi}{\Delta t}\right) + \dots \\
 &+ a_{-2} \hat{L}\left(\frac{p-2}{M} - \frac{\pi}{\Delta t}\right) + a_{-1} \hat{L}\left(\frac{p-1}{M} - \frac{\pi}{\Delta t}\right) + a_0 \hat{L}\left(\frac{p}{M} - \frac{\pi}{\Delta t}\right) \\
 &+ a_1 \hat{L}\left(\frac{p+1}{M} - \frac{\pi}{\Delta t}\right) + a_2 \hat{L}\left(\frac{p+2}{M} - \frac{\pi}{\Delta t}\right) + \dots \\
 &+ a_{n-1} \hat{L}\left(\frac{p+n-1}{M} - \frac{\pi}{\Delta t}\right) + a_n \hat{L}\left(\frac{p+n}{M} - \frac{\pi}{\Delta t}\right) \dots \dots \dots (5.2.12)
 \end{aligned}$$

この $a_{-n}, a_{-n+1}, \dots, a_{-2}, a_{-1}, a_0, a_{+1}, a_2, \dots, a_{n-1}, a_n$ として Table 5.5 に掲げるようなものが用いられる。ここでは最も一般的なものとして Q ウィンドウを用いた。

Table 5.5 Values of a_j for Several Windows

Windows	a_0	$a_{-1}=a_1$	$a_{-2}=a_2$	$a_{-3}=a_3$
W1	0.5132	0.2434	0	0
W2	0.6398	0.2401	-0.0600	0
W3	0.7029	0.2228	-0.0891	0.0149
Q	0.64	0.24	-0.0600	0
Hamming	0.54	0.23	0	0
Hanning	0.50	0.25	0	0

すなわち

$$\begin{aligned}
 \hat{S}\left(\frac{p}{M} - \frac{\pi}{\Delta t}\right) &= -0.06 \left\{ \hat{L}\left(\frac{p-2}{M} - \frac{\pi}{\Delta t}\right) + \hat{L}\left(\frac{p+2}{M} - \frac{\pi}{\Delta t}\right) \right\} \\
 &+ 0.24 \left\{ \hat{L}\left(\frac{p-1}{M} - \frac{\pi}{\Delta t}\right) + \hat{L}\left(\frac{p+1}{M} - \frac{\pi}{\Delta t}\right) \right\} \\
 &+ 0.64 \left\{ \hat{L}\left(\frac{p}{M} - \frac{\pi}{\Delta t}\right) \right\} \dots \dots \dots (5.2.13)
 \end{aligned}$$

Test No. 23-Aについての解析において、応力の資料数 N が少ないので、テープ記録の一部が不良でサンプリング、A-D変換に適しないところがあったからである。しかしそれでもデータ総数480であり、ラグの数最大60に対しては $480/60 = 8$ とかなり大きいから信頼度は十分高いといつよい。応力以外はデータ総数600個で、最大ラグに対しては $600/60 = 10$ となっているので、この点はさらに十分である。解析されたコレログラム及びスペクトラムをみるとサンプリング時間間隔、ラグの数ウィンドウの選択等ほぼ適当であったことがわかる。Test No. 43-Aについても同様である。

(5.2.3) 式から逆変換として

$$R(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) e^{j\omega\tau} d\omega \dots \dots \dots (5.2.14)$$

すると今の場合には、スペクトラムは ω の正の範囲に折返し2倍として定義したから、

$$\hat{R}(h \cdot \Delta t) = \frac{\pi}{M \Delta t} \sum_{p=0}^{p=M} \hat{S}\left(\frac{p}{M} - \frac{\pi}{\Delta t}\right) \cos\left(\frac{p \cdot h}{M} - \frac{\pi}{\Delta t}\right) \dots \dots \dots (5.2.15)$$

したがって $h=0$ とおいて、

$$\hat{R}(0) = \frac{\pi}{M \cdot \Delta t} \sum_{\nu=0}^M \hat{S} \left(\frac{\nu}{M} - \frac{\pi}{\Delta t} \right) \quad \dots \dots \dots \quad (5.2.16)$$

すなわち $\omega=0 \sim \frac{\pi}{M \Delta t}$ の間でスペクトラムで囲まれる面積は、 $\hat{R}(0)$ すなわち $\hat{\sigma}_{xx}^2$ に等しくなるはずである。

5. 2. 2 動 摆 の 性 質

Test No. 23 は往航時の、Test No. 43 は復航時の代表例として選んだもので、いずれも縦揺れ、横揺れのみでなく船首の上下加速度、縦応力、横応力等の記録が揃って得られているものである。計測時の気象・海象の観測値をさきの Table 5.1 から抜き出し、それを補うものとして、船から気象庁に通報する海上気象資料として観測された、その時間をはさんだ 4 時間ごとの風向、風速および船の針路の変動を Table 5.6 に掲げた。

Table 5.6(1) Environmental Conditions at the Time Close to Test No.23 and 43

Date	Time (on ship)	Ship Course	Wind	
			Absolute Direction	Absolute Speed
Jan. 23	8 : 00	20°	148°	17.2 kt
	12 : 00*	20	135	23
	16 : 00	22	160	14
	20 : 00	22	275	12.5
Jan. 24	8 : 00	22	20	20
	12 : 00	22	20	26
	16 : 00	25	45	20
	20 : 00	—	—	—
March 5	8 : 00	276	333	15.0
	12 : 00	276	340	14.0
	16 : 00	276	330	10.0
	20 : 00	276	350	6.5
March 6	8 : 00	276	275	14.0
	12 : 00	276	290	16.0
	16 : 00	266	290	16.0
	20 : 00*	266	293	17.5
March 7	8 : 00	266	180	4.5
	12 : 00	266	160	10.0
	16 : 00	265	190	18.5
	20 : 00	265	190	23
March 8	8 : 00	265	10	12
	12 : 00	265	30	8
	16 : 00	262	40	12
	20 : 00	262	45	7.5

* The time closest to Test No. 23 & 43 respectively

Table 5.6(2) Environmental Conditions at Test No. 23 and 43

Test No.	Date	Time	Relative Direction of wind	Sea Wave			Swell		
				Relative Direction	Height (m)	Length (m)	Relative Direction	Height (m)	Length (m)
23	1966 Jan. 24	11 : 13 11 : 52	Star. Bow	Head	2	30	Star. Bow	8	80
43	1966 March 7	21 : 57 22 : 35	Port Bow 45°～50°	Port Bow 45°～50°	3	30	Port Bow	6	70

このような海象気象と動搖のコレログラム・スペクトラムから、次のような性質が推論できる。

- i) 横揺れは減衰が極めて小さいため、固有周期の近くに大きいスペクトラムの山を有する。そして出会い波浪の出会い角、出会い周期のいかんにかかわらず、出会い周期による横揺れはそう大きくはない。
 - ii) 縦揺れはこれにくらべると減衰の大きい動搖であるため、固有周期による動搖もそう大きくなく、出合周期による動搖も同じ程度で、場合によってはそれ以上大きいパワーを有する。したがって動搖波形も横揺れ波形よりも不規則である。
 - iii) これから推定される縦揺れ、横揺れの固有周期は、1月24日の往航軽荷時、3月7日の復航満載時のそれぞれに対し、次のように推定される。

		縦 摆 れ	横 摆 れ
往 航	輕 荷 時	7.48 s ($\omega = 0.84$)	12.1 s ($\omega = 0.52$)
復 航	滿 載 時	7.83 s ($\omega = 0.80$)	14.7 s ($\omega = 0.43$)

- iv) 船首樓甲板下で船首の上下加速度が計測されている。このコレログラム・スペクトラムもTest No. 23, No. 43 のそれぞれについて求められている。ただしこれは 23-B, 43-B としてある通り、定時計測時に記録エレメント数の制限から 2 回に分けて各 15 分ずつ計測したあとの方の計測時間中の記録である。Fig. 5.2, 5.4 に示したのは前の 15 分のものであるから、直接の比較のためには同時に取ったものと比較しなければならないが、15 分の差ではスペクトラムは大きくは変化しないはずであるから、多くの場合はほぼ同時記録のスペクトラムを見てよい。Test No. 23 については B についても縦揺れのスペクトラムが求められる。Test No. 23 の船首加速度のスペクトラムをみると、縦揺れ固有周期 $\omega=0.84$ 、および縦揺れスペクトラムに表われた出会波浪によると思われる $\omega=0.65$ の山のほかに、もう一つ $\omega=0.95$ ($T=6.6$ s) に明らかなピークが認められる。

いま船首の上下変位を ζ とすると、

z : 重心 C.G. の上下揺れ

θ : 縦揺れ角

l : 重心と船首加速度測定点との距離

であり、

となるから $\ddot{\gamma}$ のスペクトラム $S_{\ddot{\gamma}\ddot{\gamma}}$ の中には、縦揺れのスペクトラム $S_{\theta\theta}$ のほかに、上下揺れのスペクトラム S_{zz} の変動の模様が含まれることが考えられる。

Test No. 43 の船首上下加速度のスペクトラムについてもほぼ同じようなことがいえて、 $\omega = 0.925$ 、すなわち $T = 6.77$ に明らかなピークがあり、これは復航時の上下揺れスペクトラムからくるものではないかと推察される。

- v) 縦揺れには横揺れ固有周期が表われるが、横揺れには縦揺れ固有周期が現われない場合が多い。このことはあとで示す8角航走の結果にも現われている。

5. 2. 3 8角航走試験

船の動揺と波との応答特性は、定時計測においてその都度計測したが、定時計測は計測日時や計測場所によって気象、海象等が異なるばかりでなく、船自体の状態たとえば排水量、トリム等が変るので、いろいろな条件での資料が得られる利点がある反面、一定の気象、海象条件下で船の針路の差にもとづく船の応答の変化を求めるることは困難である。そこでこの点を明らかにするため一つの海象気象を選んでいわゆる8角航走試験を試みた。

この試験は外界条件がほぼ一定と見られる短時間内に、船の針路を45°ずつ変えて8角型を画いて航走する試験である。こうすることにより船はほぼ一定のスペクトラムを持つ不規則波中で出合角度45°間隔の斜め波試験を行なったことになる。今回の試験では8角形の全辺を航走はせず、風浪に対して180°(向波)、135°、90°、45°、0°(追波)の5辺を10分間ずつ航走し、その間の縦揺れと横揺れとを記録した。記録方法は定時計測と同じで、その時の気象、海象は次のようにある。

風	風力階級	8	絶対風速	17.5m/s
風浪	波浪階級	7	波高	3m、波長30m
うねり	うねり階級	6	波高	4m、波長90m

この試験記録は前記動揺特性の解析と同様に、A-D変換機でデジタル変換したのち、電子計算機によりコレログラム解析およびスペクトラム解析を行なった。Fig. 5.8 および Fig. 5.9 に縦揺れおよび横揺れのコレログラム解析結果を示した。 χ_0 および χ_1 は風浪およびうねりとの出合角度で、向波を180°、追波を0°として示してある。うねりに対してはこれと90°の差があることはさきに述べた通りである。

図の中の分散(σ^2)の値からみると、縦揺れは $\chi_0 = \text{右}90^\circ$ (対うねり180°)の場合が最も大きく、平均2°に近い縦揺れをしており、 $\chi_0 = \text{右}135^\circ$ (対うねり左135°)および右45°(対うねり右135°)がこれに次ぎ平均1.6°前後、 $\chi_0 = 0^\circ$ (対うねり右90°)のときが最小で1°程度である。横揺れは、 $\chi_0 = \text{右}135^\circ$ (対うねり左135°)のときが最も大きく平均3°に近く、 $\chi_0 = 180^\circ$ (対うねり左90°)と0°(対うねり右90°)の場合が2.5°でこれに次ぎ、 $\chi_0 = \text{右}90^\circ$ (対うねり180°)の場合が最小で1.6°程度である。

Fig. 5.10 と Fig. 5.11 は縦揺れと横揺れのスペクトラム解析結果である。Fig. 5.11 ではどの方向に走った場合も14sec附近に明瞭なピークがみられ、このピークは本船の横揺れ固有周期と思われる。Fig. 5.10 の縦揺れの方は横揺れと異なり、2~4個の山が現われている。これらの山はそれぞれ船の縦揺れ、横揺れの固有周期および波との出合周期を示すものと思われる。まづ13.5secあたりの山は横揺れ周期と一致しており、これは船が斜め波により、または横波でも有限な波頂線のために“みそり運動”的な揺れ方をしていたために現われたものであろう。次にどの方向に走った場合にも7.5sec附近にかなり明瞭なピークがあるが、これは縦揺れの固有周期と考えられる。その他の山は波との出合周期と思われるが、航海日誌の記録により計算を試みたが周期が一致しないので計測中の覚え書きにより修正を試みた。

まず、(1) 計測中の船の速さ(Vs)は船底ログによっているので信頼性が高いこと、(2) 波の方向は目視観測であるが波長の観測よりは信頼がおけることが考えられる。以上の観点から風浪およびうねりの波長を変え、風浪の波長を100m、うねりの波長を300mとして計算した結果、スペクトラムと

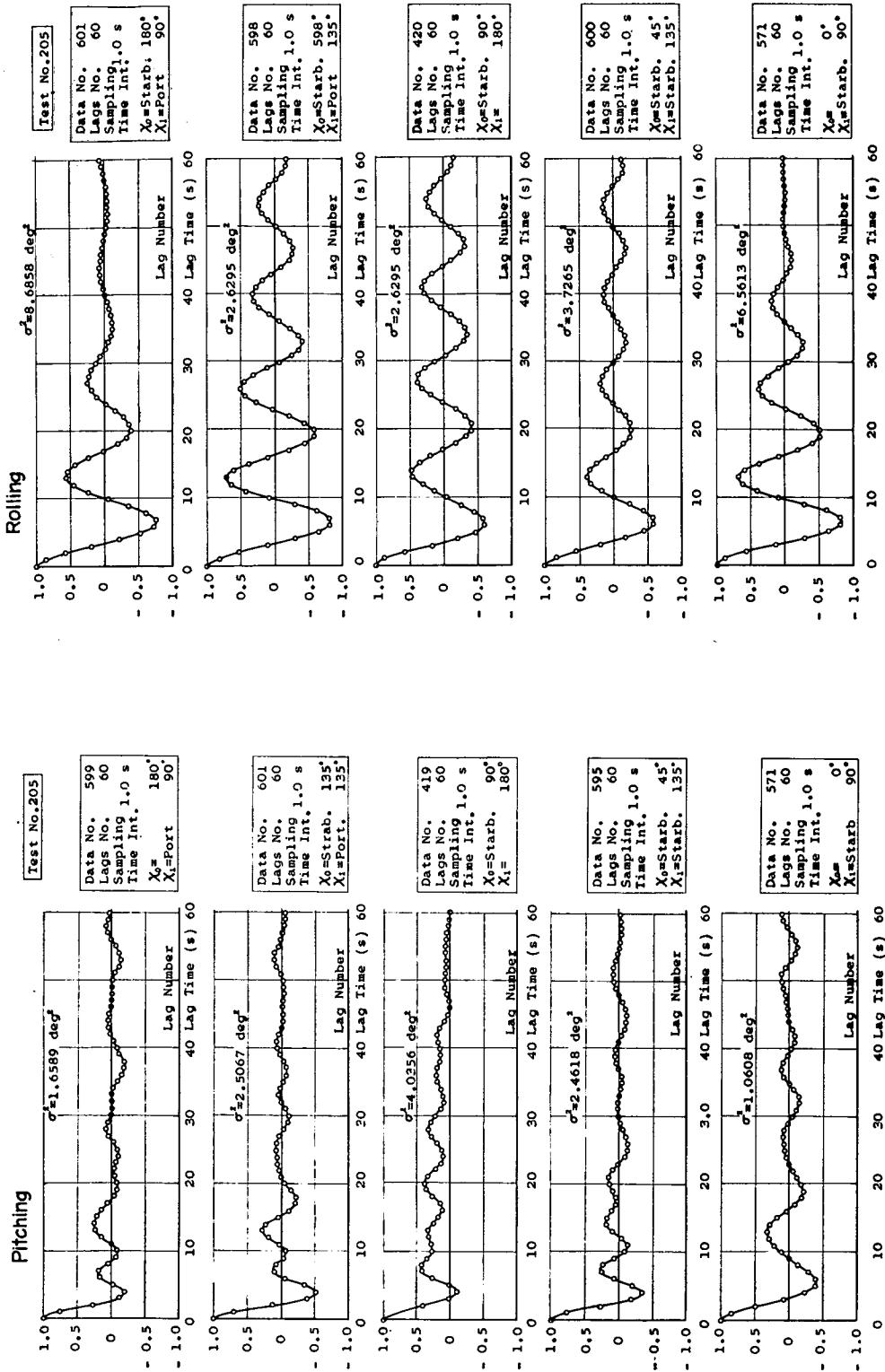


Fig. 5.8 Correlograms of Pitching

Fig. 5.9 Correlograms of Rolling

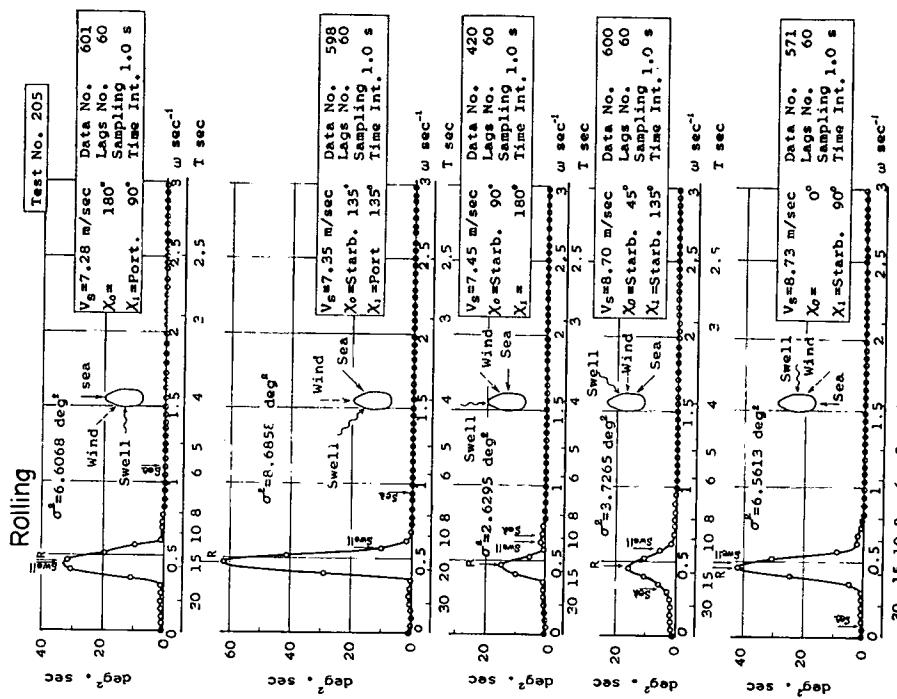


Fig. 5.11 Power Spectra of Rolling

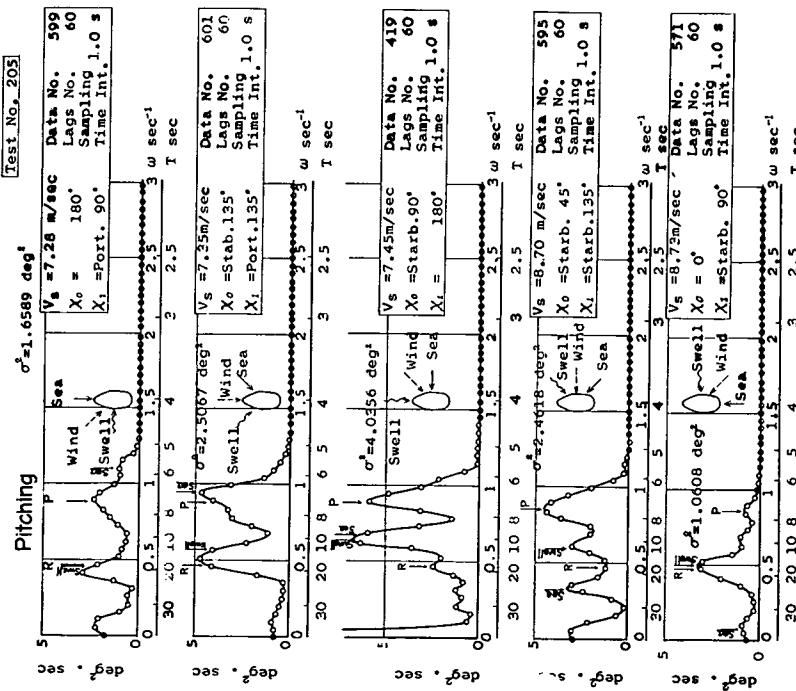


Fig. 5.10 Power Spectra of Pitching

かなりよく一致する次の値を得た。

出会角度 (度)	風浪(波長 100m) との出会周期(sec)	うねり(波長 300m) との出会周期(sec)
180	5.73	13.9
135	6.58	11.2
90	9.8	10.3
45	24.6	11.0
0	68.0	13.9

ただし、波周期 T_w は次の式を使用した。

$$\text{うねり} : L_w = \frac{g}{2\pi} T_w^2 \div 1.56 T_w^2, \quad V_w = 1.56 T_w \cdots (5.2.19)$$

$$\text{風浪}^{19)} : L_w = \frac{2}{3}(1.56 T_w^2), \quad L_w = \frac{2}{3} \cdot \frac{g}{2\pi} T_w^2 \div 1.0 T_w^2, \quad V_w = 1.0 T_w \cdots (5.2.20)$$

Fig. 5.10, Fig. 5.11 に Sea→, Swell→ と示してあるのは、風浪の波長 100m, うねりの波長 300m とした場合のもので、P および R は縦揺れ固有周期および横揺れ固有周期の位置を示したものである。

以上の 8 角航走の結果から、本船のこの状態での 縦揺れ固有周期はほぼ 7.5 sec, 横揺れ固有周期は 13.5 sec としてよいことが分ったと同時に、目視による波長観測の困難さが改めて認識される。

5. 2. 4 動揺のスペクトラムの理論計算との比較

ここでは Test No. 43 の実験状態について本船の斜め波中の縦揺れおよび上下揺れの応答特性をストリップ理論によって計算し、実験時の気象観測値をもとにして波浪スペクトラムを推定し、この両者から縦揺れおよび上下揺れのスペクトラムを理論的に計算して実験結果と比較してみた。

Test No. 43 は 3 月 7 日夜に行なわれたが、横浜入港は 3 月 9 日 午前 8 時であるから、船の状態は帰港時の状態に極めて近いと考えて、そのときの喫水および排水量を用い、次に示すような状態とした。

前 部 喫 水	7.95m
後 部 喫 水	9.02m
排 水 重 量	16,571 t
対 水 速 度	13.5kt
フ ル ー ド 数	$F_r = 0.184$

この状態に対し、船舶技術研究所で常用しているストリップ法のプログラムを用い、波長と船長の比 $\lambda/L = 2.00, 1.60, 1.40, 1.20, 1.00, 0.90, 0.80, 0.70, 0.60, 0.50$ の斜め波中における縦揺れと上下揺れとの応答特性を求めた。さきに Table 5.6 で示したような Test No. 43 における波の観測結果から $\chi = 120^\circ$ であったとみてよいので、 $\chi = 120^\circ$ と参考のために向波 $\chi = 180^\circ$ の二つの場合に対する計算結果を Fig. 5.12 および Fig. 5.13 に示す。

次に同じく Table 5.6 に示した Test No. 43 の前後にわたる 4 時間ごとの風の観測結果から、15 m/s の風が 1 昼夜以上吹き続けたと考えてよいこととした。Test No. 43 を選んだのは、風浪とうねりとがほとんど同方向で、一つの波で代表させても大きな誤りはないと思われたからである。した

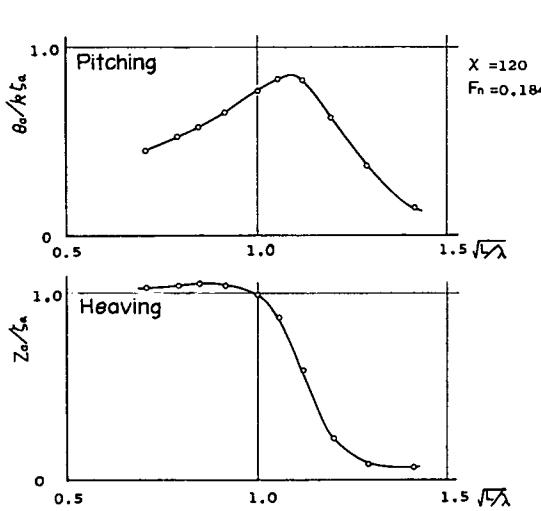


Fig. 5.12 Amplitude Response of Pitching and Heaving Calculated by Strip Method (1)

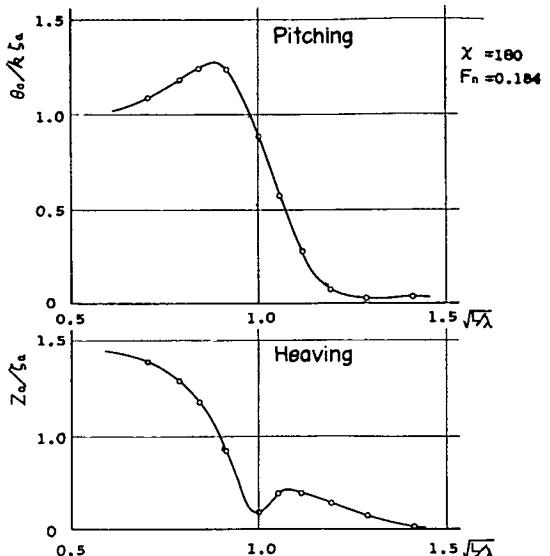


Fig. 5.13 Amplitude Response of Pitching and Heaving Calculated by Strip Method (2)

がって波の観測値としてはうねりの観測値を取り波高 6 m, 波周期は 7 sec 前後であるとした。

さて風速を与えて波のスペクトラムを推定するにも、現在いくつかの方法が考えられるが、その代表的なものは以下の三つであるといつてよい。

- i) Moskowitz-Pierson のスペクトラム表示そのまま²⁰⁾
- ii) I.S.S.C. (国際船体構造会議) スペクトラム²¹⁾
- iii) I.T.T.C. (国際試験水槽会議) スペクトラム²²⁾

1960年頃までは風速に対して定まる海面波の標準的なスペクトラムとして、Neumann-Pierson の実験式⁷⁾が用いられる場合が極めて多かった。しかしその後の研究により、この実験式は、最近得られるようになった実測波高のスペクトラムにくらべ、やや過大な値を与えること、風波の発生理論との矛盾があること、次元の上で不具合があることなどが明らかとなり、Moskowitz-Pierson のスペクトラム²⁰⁾がこれに代って用いられることが多くなってきた。これは、Tucker の波浪計を装備したイギリスの海洋観測船、主として大西洋定点 A, I, J および K による 1955~1960 年の波浪観測結果のうち、アメリカ気象局の総観天気図から風の連吹時間の十分大きいものを選び 20, 25, 30, 35 および 40 kt の風に対し、総計 54 個のスペクトラムを計算し、それらの無次元表現値の平均として求められたものである。その形は

$$S(\omega) = \frac{\alpha g^2}{\omega^5} e^{-\beta} (\frac{g}{U\omega})^4 \quad \dots \dots \dots (5.2.21)$$

$$\alpha = 8.10 \times 10^{-3}$$

U =風速 (海面上 19.5m 高さ)

$$\beta = 0.74$$

g =重力の加速度

$$\omega = 2\pi f$$

であり、 ω の $0 \sim \infty$ の範囲にのみ定義されて、そのスペクトラムの ω 軸上に閉む面積が、このときの波高記録の分散 σ^2 に等しくなるようになっている。これはいわゆる fully arisen sea, すなわち風の連吹時間も吹送距離も十分長く、波浪が完全に発達した海面に対するものである。

しかしながら実際には、大洋においてもこのような十分な連吹時間吹送距離をもつことは稀であり、波浪は発達段階にあり、一方その海域において以前に存在していた暴風によってひき起こされた波浪、またはその海域以外の波浪発生域から伝播されてくるうねり等がそれに混在している場合が多い。

これらの点を加味し、風速が与えられた場合、それに対する海面の標準として、I.S.S.C.（国際船体構造会議）²¹⁾ および I.T.T.C.（国際試験水槽会議）²²⁾ はそれぞれの活動の目的にあわせて、いわゆる“標準スペクトラム”の表現を定めている。

すなわち I.S.S.C. は Moskowitz-Pierson のスペクトラムの形状をそのまま採用し、これが二つの係数 α, β によって定まり、有義波高 $H_{1/3}$ (H_w と表現する) と平均周期 T_w とはこのスペクトラムのモーメントによって表現されることを利用して風速を消去し、 α, β を H_w と T_w によって表現し、 H_w と T_w とが定まったときには、逆にこれら係数がそれに応じた値をとると仮定したものと、スペクトラムの標準として与えている。

すなわち、その形は風速が消去されて H_w と T_w によって、

$$S(\omega) = \frac{1}{2\pi} \times 0.11 H_w^2 T_w \left(\frac{T_w}{2\pi} \cdot \omega \right)^{-6} \exp \left\{ -0.44 \left(\frac{T_w}{2\pi} \cdot \omega \right)^{-4} \right\} \quad \dots \dots \dots (5.2.22)$$

で与えられる。この H_w, T_w として、実際の観測値あるいは目的に応じては、ある海域に対して風速ごとに発生頻度の高いもの、あるいは適当な平均値をとるという方法である。

一方 I.T.T.C. は同じく Moskowitz-Pierson の表示式を使用するが、その場合風速 U として風速そのものを使用せず、有義波高が与えられたとき、これから定められる等価（nominal）風速を使用する。この有義波高と風速との関係は多くの実測値の平均として、次のように定めている。

U (kt)	20	30	40	50	60
$H_{1/3}$ (m)	4.42	5.64	8.08	10.97	14.63

Moskowitz-Pierson の式そのものから風速が定まれば、有義波高は定まってくるが、この値は風速の低いところではそのようにして定まる波高よりもやや高く、風速の高いところではかなり小さい値として与えられている。この方法では、周期はこの等価風速を風速とする Moskowitz-Pierson のスペクトラムから自然に定まるとして与えていない。したがって結果的には、有義波高によってすべて定まり、有義波高を与えると、

$$S(\omega) = \frac{A}{\omega^5} e^{-\frac{B}{\omega^4}} \quad \dots \dots \dots (5.2.23)$$

$$A = 8.10 \times 10^{-3} g^2$$

$$B = 3.11 / H_w^2 \quad (H_w : \text{m})$$

の式を用いることになる。

さて、ここでは、I.S.S.C. スペクトラムおよび I.T.T.C. スペクトラムを用いて波浪をいくつかに変え、さきにストリップ理論によって求めた、 $\chi=120^\circ$ のときの船の縦揺れおよび上下揺れの特性 Fig. 5.12 を用いて、縦揺れ、上下揺れのスペクトラムを計算した。すなわち、

$$\begin{aligned} S_{\theta\theta}(\omega) &= |H_{\theta\zeta}(\omega)|^2 \cdot S_{\zeta\zeta}(\omega) \\ S_{zz}(\omega) &= |H_{z\zeta}(\omega)|^2 S_{\zeta\zeta}(\omega) \end{aligned} \quad \dots \dots \dots (5.2.24)$$

ここで、 $S_{cc}(\omega)$ は波高の、 $S_{\theta\theta}(\omega)$ 、 $S_{zz}(\omega)$ は縦揺れおよび上下揺れのスペクトラム、 $H_{\theta z}(\omega)$ 、 $H_{zc}(\omega)$ は波高に対する縦揺れ角および上下揺れの周波数応答特性を示す。さきにストリップ理論で求めた応答のうち、縦揺れの応答は $\theta/k\zeta$ というように、縦揺れ角と波の傾斜角すなわち $k\zeta (k = \frac{\omega^2}{g})$ の比、すなわち $H_{\theta z}(\omega)$ として求められているので、 $|H_{\theta z}(\omega)| = |H_{\theta k\zeta}(\omega)| \times k$ として使用した。またこれらの応答特性は、船の長さ L に対する波長 λ の比を変えて求めてあり、Fig. 5.12 では $\chi=120^\circ$ の方向からの波に対する応答特性を $\sqrt{\frac{L}{\lambda}}$ に対して置点してあるが $\lambda = \frac{2\pi}{\omega^2 \cdot g}$ であるから、

$$\sqrt{\frac{L}{\lambda}} = \sqrt{\frac{L}{2\pi \cdot g}} \omega \propto \omega \quad \dots \dots \dots (5.2.25)$$

となって、波がこの角度で来たときに、固定点で測定した波周波数 ω に対して示される応答特性であることに注意する必要がある。使用した波スペクトラムは次のようなものである。

種類	有義波高 H_w (m)	平均周期 T_w (m)	風速 U (m/s)	種類	等価風速 U_n (m/s)	対応波高 H_w (m)	対応周期 T_i (s)
I.S.S.C. スペクトラム	6	7.0		I.T.T.C. スペクトラム	15	4.81	8.47
	6	8.0			16	5.46	9.00
	6	9.0			17	6.18	9.60
観測値	6		15	観測値	15	6	

すなわち、風速 15 m/s、観測波高が 6 m であったことを根拠に、I.S.S.C. スペクトラムで波高 6m、周期を 7.0, 8.0, 9.0 sec とした場合、および I.T.T.C. スペクトラム等価風速を 15, 16, 17 m/s とした場合（これは有義波高を 4.81, 5.46, 6.18m としたことに相応する）のそれについて計算した。

このとき、波スペクトラム $S_{cc}(\omega)$ は海面上の固定点で測定した波浪のスペクトラムである。また応答特性は、さきに述べたように船の速度がこのときの $V=13.5 \text{ kt}$ であったとき、 $\chi=120^\circ$ の斜の前方からくる波を固定点で測定したときの、波周波数 ω に対する応答の特性である。波が長波頂線を持ち $\chi=120^\circ$ の方向からくるものと考えているので、この波浪スペクトラムも、13.5 kt ($=0.69 \text{ m/s} \equiv v$) で航走中の $\chi=120^\circ$ 方向からの波に対する船の応答も、いずれも海面上に固定した座標に関して計算されていることになるから、この両者はともに同じ横軸 ω に対するものであり、掛け合わせることができる。ただしその結果得られる船の応答のスペクトラムは、海面上に固定した座標軸に関するものである。一方、実際に測定される船の運動は、船上において測定されるので、周波数も航走する船に固定されている座標軸に関するものである。したがって周波数について座標軸の交換をしなければ両者の比較はできない。

いま波と χ の出会い角をもって進行する船の長さ L 、速度を v とすると (Fig. 5.14)、出会い周波数 ω_e は波の周波数から次のように交換される。

$$\begin{aligned} \omega_e &= \omega - kv \cos \chi \\ &= \omega - \frac{\omega^2}{g} v \cos \chi \quad \dots \dots \dots (5.2.26) \end{aligned}$$

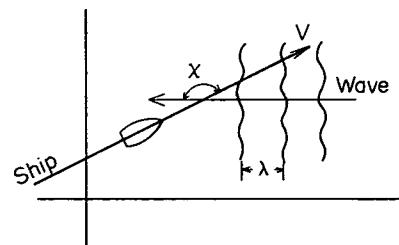


Fig. 5.14 Definition of Encounter Angle

そこで、スペクトラムも ω を ω_e に交換することによって、

でなければならないから、変換式は

$$S(\omega_e) = S(\omega) \cdot \left| \frac{d\omega}{d\omega_e} \right| = S(\omega) \cdot \left| \frac{1}{\frac{d\omega_e}{d\omega}} \right|$$

(5.2.26) から

$$\frac{d\omega_e}{d\omega} = 1 - \frac{2v \cos \chi}{g} \omega$$

したがって

$$S(\omega_e) = S(\omega) \cdot \left| \frac{1}{1 - \frac{2v \cos \chi}{g} \omega} \right| \quad (5.2.28)$$

となる。もし逆に $S(\omega)$ を $S(\omega_e)$ に変換する必要のある場合には、(5.2.26) から、

$$\frac{v \cos \chi}{g} \omega^2 - \omega + \omega_e = 0$$

を ω について解いて、

$$\omega = \frac{1 - \sqrt{1 - 4 \frac{v \cos \chi}{g}}}{2 \frac{v \cos \chi}{g}} \omega_e$$

が得られるから、

$$\frac{d\omega}{d\omega_e} = \frac{1}{\sqrt{1 - 4\frac{v \cos \chi}{g} \omega_e}}$$

したがって、

によって変換すればよい。

Fig. 5.15 から Fig. 5.16 まではこのようにして計算した縦揺れ、上下揺れの理論的スペクトラムである。Fig. 5.15, 5.16 は海面上に固定した座標軸に関する絶対周波数 ω についてのスペクトラムであり、Fig. 5.17, 5.18 は、これを上記に従って航走する船に固定した座標軸に関する出会い周波数 ω_e についてのスペクトラムに変換したものである。Fig. 5.15, Fig. 5.17 には Test No. 43 (A)において実測された縦揺れのスペクトラムを記入した。すなわち、Fig. 5.15 の方は実測値のスペクトラム $S_{\theta\theta}(\omega_e)$ を、 $S_{\theta\theta}(\omega)$ に変換して理論的に ω について計算したスペクトラムと比較し、Fig. 5.17 の方は理論的に ω について計算したスペクトラム $S_{\theta\theta}(\omega)$ を、 $S_{\theta\theta}(\omega_e)$ に変換して実測値のスペクトラム $S_{\theta\theta}(\omega_e)$ と比較したもので、比較の上からはどちらか一方があればもちろん十分である。

これらによれば結果的には、I.S.S.C. スペクトラムでは波を $T_w=9.0 \text{ sec}$, $H_w=6 \text{ m}$ としたものが、I.T.T.C. スペクトラムでは等価風速を 17 m/s としたものすなわち対応波高が観測値 6 m に最

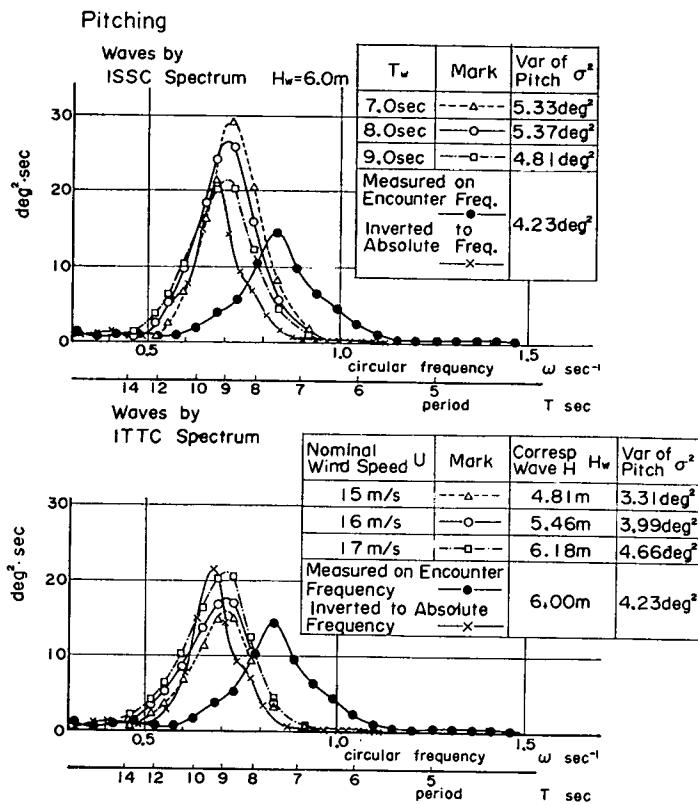


Fig. 5.15 Comparison of Measured and Calculated Spectra (On absolute frequency)

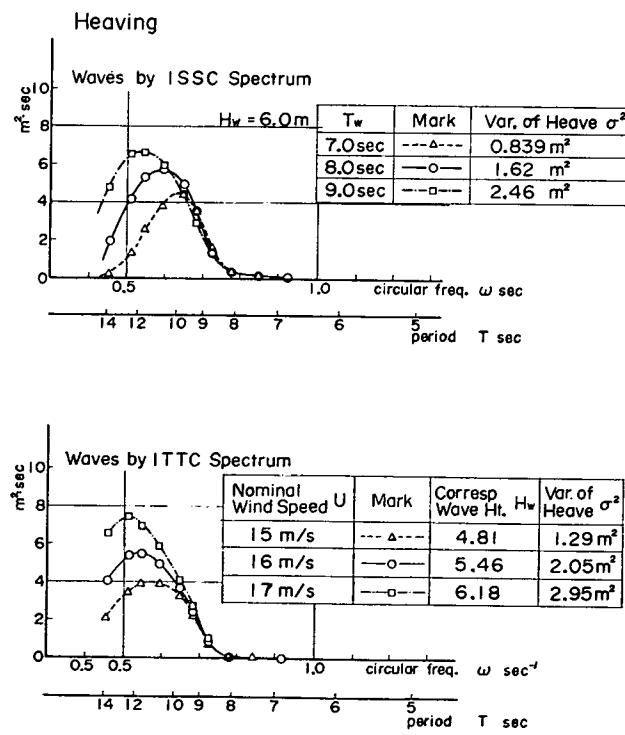


Fig. 5.16 Calculated Spectra of Heaving (On absolute frequency)

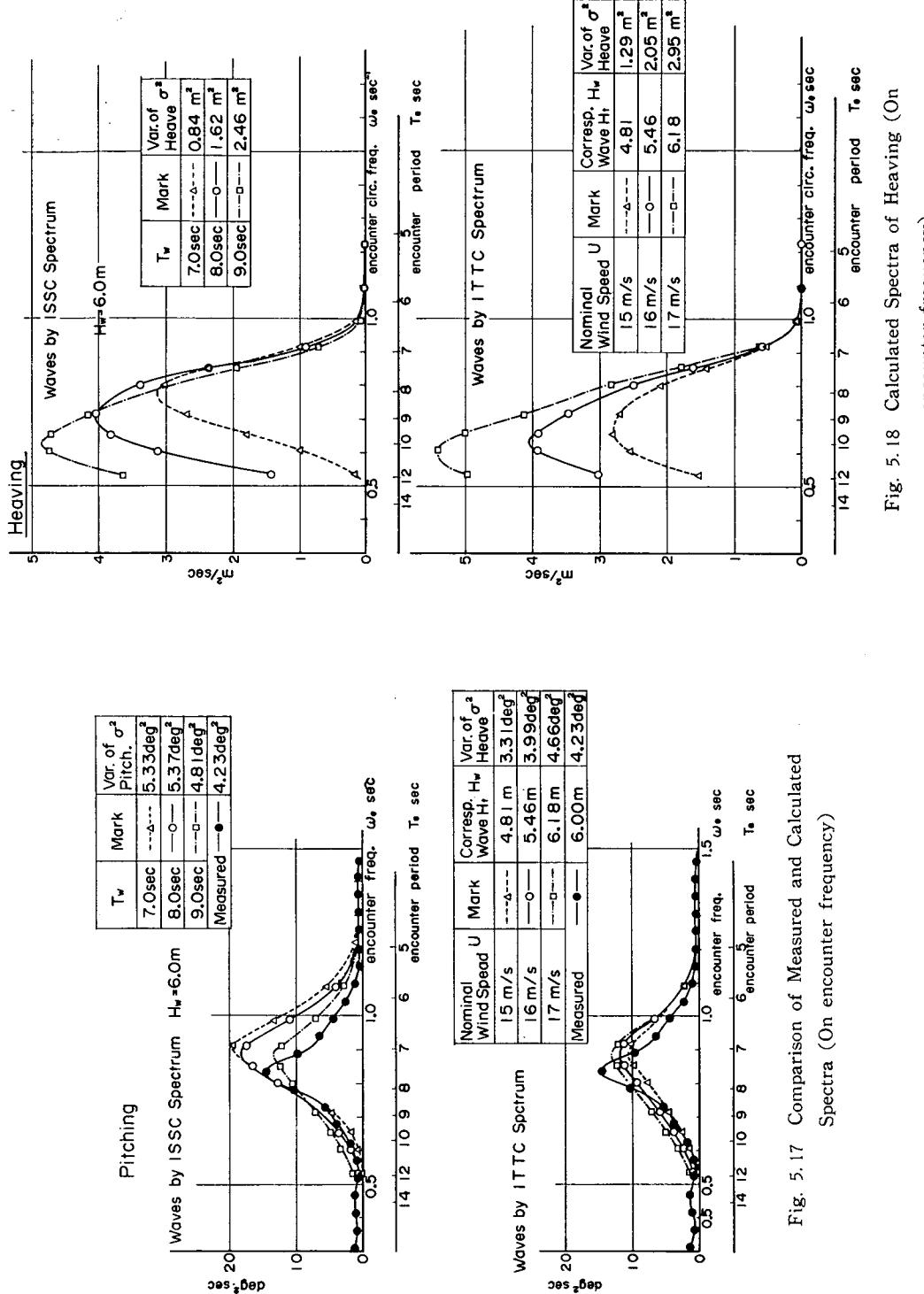


Fig. 5.17 Comparison of Measured and Calculated Spectra (On encounter frequency)

Fig. 5.18 Calculated Spectra of Heaving (On encounter frequency)

も近い 6.18 m を示すスペクトラムを用いたものが近いように表われている。 17 m/s という等価風速は、Table 5.6に示されている計測時に近い時刻の風速の記録からいっても極めて妥当な値である。計算では、出会い角度 χ を 120° としているが、 χ をやや大きくして $130^\circ\sim140^\circ$ とすれば、同じ波でもさらに一致はよくなることが予想される。しかし波の観測値の精度からいっても、またその観測値にもとづいて推定した波スペクトラムが実際をどこまで表現しているかの精度からいっても、この程度の一一致を示すことが判れば十分と思わなければならない。

スペクトラム理論に基づく応答特性の計算結果が、10%以内の誤差で実際のものをよく示しているといわれるが、上に述べた計算スペクトラムと実測スペクトラムとのよい一致は、I.T.T.C. スペクトラムも I.S.S.C. スペクトラムも、海面の表現としてはかなりよく実際を表わしているということを示している。

なおこれらの図には計算したスペクトラムの面積としても表われる縦搖れの分散 σ^2 を実測値の分散とともに記入した。上に示したようにスペクトラムの形状の一致が比較的よい計算値の分散を用いれば、縦搖れの平均値、有義値、最高値等種々の期待値の推定にも、理論計算の結果が十分使用できることが分かる。

5. 3 船体応力、応力頻度および荷重頻度

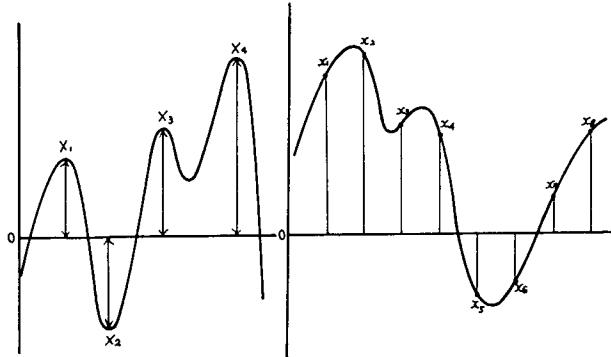
5. 3. 1 縦曲げ応力

縦曲げ応力はさきに Fig. 4.5 で示したように、船体中央部左右舷において上甲板下の舷側厚板に抵抗箔ひずみゲージを貼付して計測した。また左舷側にはゲージと同位置に機械式応力頻度計を取付けて頻度計測を行なった。

機械式応力頻度計はさきに述べた通り、帯域通過頻度を計数しておいて、あとで計算によって極値頻度を求める方式である。そのため、船体応力のように規則的な変動をせず正の谷や負の山が相当多い不規則変動曲線を示すものの場合は、小さい応力範囲のところではやや実際と異なる頻度が算出されるおそれがある。ひずみゲージで計測しデータレコーダで記録再生した出力を、頻度解析装置で解析した結果と比較検討してみるとよくわかる。現在わが国でも、当研究協会の第90研究部会²³⁾などで試みられ、諸外国²⁴⁾でも一般的な傾向となりつつある、理論計算による応力または荷重頻度の推定という方向に連絡づけるためには、この機械式応力頻度計の資料はやや不適当である。低サイクル疲労強度との関連において、材料または構造物の S-N 線図との対応を概略的に見るためには、この資料を要素ヒストグラム¹²⁾の形で解析するこれまでの方法も有意義であるが、ここでは、上記の応力頻度の理論計算のラインに沿って、短期分布の root mean square (R.M.S.) \sqrt{E} を求めるという方針をとり、主として頻度解析装置の解析結果を用いることにした。

各試験番号ごとの 15 分間の応力振幅（平均値を基準とした極大・極小値） X_i は、周知の通りほぼ Rayleigh 分布に適合し、各ピーク値 X_i の自乗平均 E 、またはランダムサンプリングされた x_i の分散 σ_x^2 （または標準偏差 σ_x ）によって（Fig. 5.19）、その頻度分布は

によって一義的に定められる。



Mean Square of Peak Values
 $E = \sum X_i^2 / N$

Variance of Random Sampling
 $\sigma^2 = \sum X_i^2 / n = E / 2$

Fig. 5.19 Mean Square of Peak Values and Variance of Random Sampling

さきに Table 5.4 に示した各外界条件ごとに、左舷の計測点の縦曲げ応力の、いくつかの試験番号における短期分布を合計したヒストグラム、およびそれぞれの R.M.S. \sqrt{E} の平均値 (Table 5.7) によって上式から計算した分布曲線とを Fig. 5.20 に示す。

Table 5.7 Root Mean Square of Wave Bending Stress (kg/mm^2) for Each Testing Number and Their Means

Heading Angle	Wave Height (m)				
	0~1.5	1.5~2.5	2.5~3.5	3.5~5.5	5.5~
Range					
Head Sea		0.199(290)	0.608(293)	0.306(374)	
	0.075(299) 0.110(318)	0.096(244) 0.328(287)	0.280(390) 0.700(272)		1.720(276) 0.700(262)
Bow Sea		0.761(266) 0.090(307)	0.615(223) 0.466(334)		
	0.138(268) 0.840(293)	0.425(330)			
	0.092	0.379	0.376		1.210
Beam Sea		0.031(223)	0.610(225) 0.337(113)	0.624(249)	
		0.479			
Quartering Sea	0.018(134) 0.022(177)	0.122(159) 0.184(165)	0.232(156) 0.564(127)	0.336(179)	
	0.810(263)	0.264(236)	0.206(146)		
	0.258(97)	0.290	0.340		
Following Sea	0.020				
	0.112(88)	0.727(117) 0.598(94)			
	0.590				
Mean	0.067	0.363	0.458	0.422	1.210

Numbers in the brackets show the sampling numbers

抵抗線ひずみ計には、貨物・燃料・水などの荷重変動、日照・水温変化などによる熱応力などから、およそ推定できる量以上の相当の零点漂動が認められた。これはゲージおよびひずみ計增幅器自体に起因するものと思われるが、その変動量を上記の原因による分と正確に分離することができないので、零点（出港直前平水中の基準点）からの変動の絶対量は未知のまま、それぞれの計測時の変動

分だけを記録するという方針で、適時計器の調整をしながら記録をとってきた。極値頻度解析に当っては、変動曲線のほぼ平均値をねらってそのときの基準点と考えた。したがって、この基準点と当初の零点との差は未知であるから、引張応力と圧縮応力を比較するということはあまり意味がなく、いずれも平均値を基準とした応力振幅を示すものと考えるべきである。しかし、実際には図示のよう

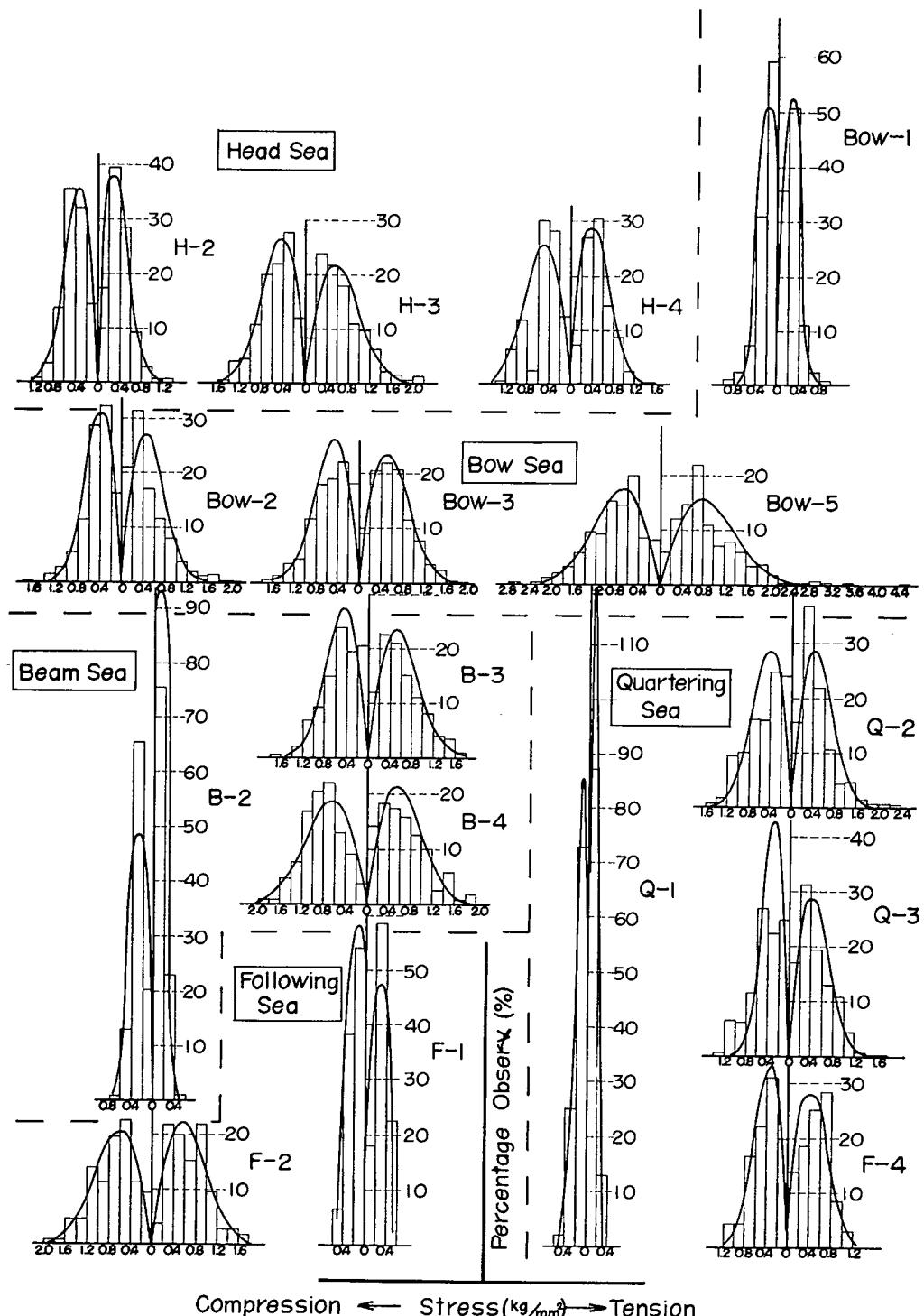


Fig. 5.20 Histograms of Hull Bending Stress

に、引張側と圧縮側でややヒストグラムの形の異なるものも相当あったので、一応両者を別々に表示することにした。

この頻度解析に当っては、設定したスライスレベルの幅は 0.4 kg/mm^2 、無効振幅（第2章30頁参照）も同じく 0.4 kg/mm^2 とした。これについては、無効振幅をいろいろに変えたいいくつかの予備

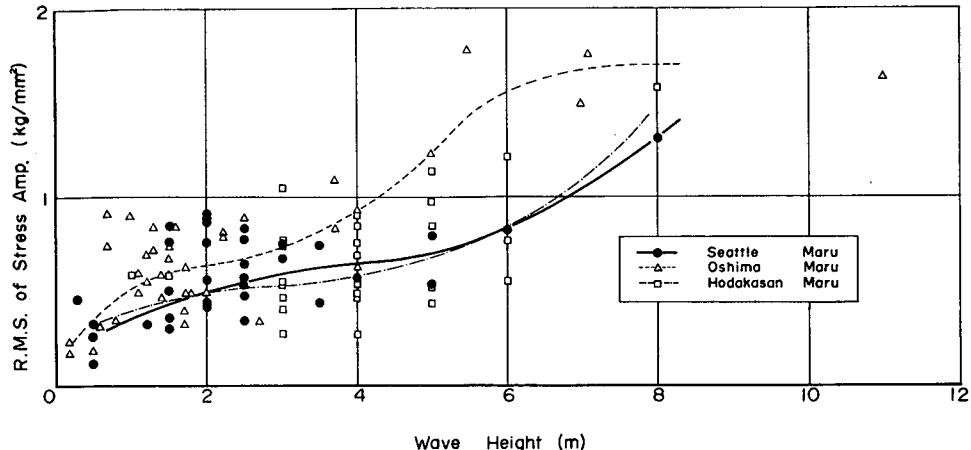


Fig. 5.21 R.M.S. of Bending Stress versus Wave Height

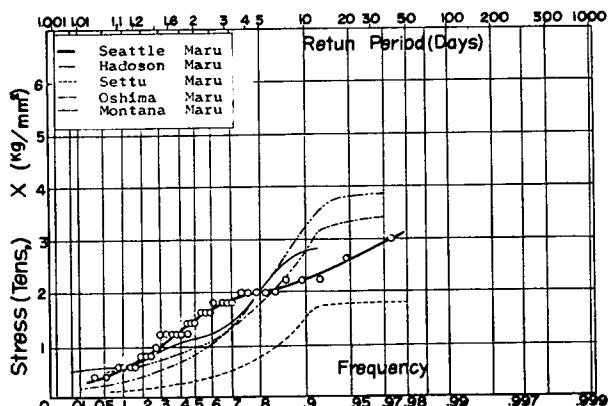
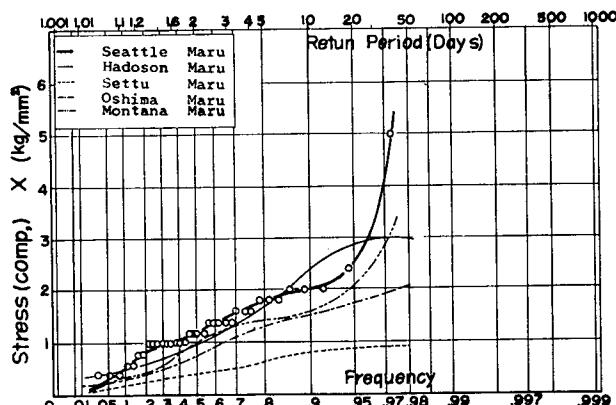


Fig. 5.22 Distribution of Maximum Stresses in a Day

試験を行なった。無効振幅の大きさによって、同じ記録から解析した短期分布のヒストグラムがきわめて大幅に変化するので、オシログラフに描かせた記録から手動解析によって（人間というフィルターを通して）求めたヒストグラムの形に、最も近いヒストグラムを示すものとして、上記の無効振幅値を探ることにした。この無効振幅の値は、このように処理装置の性能の都合で決められるべきものではなく、ある値以下の応力変動は疲労被害その他の検討には無視してよいというような、確とした裏付けがあって決めるべきものであるが、この解決はまだ今後に残されている問題である。

同じ外界条件でも、短期分布の指数 $\sqrt{E_x}$ は Table 5.7 にみるようにきわめてばらつきの大きいものであるが、さらに外界条件を大きくまとめて、出会い角の変化を無視して波高のみの函数として表わしてみると Fig. 5.21 のようになる。なお参考のために、さきに第49研究部会¹²⁾で求めたほぼ同型の 2 船大島丸(12,033 DWT), 穂高山丸(11,184DWT) の計測結果も同図に入れてみた。この 2 船の資料はオシログラムの手動解析によるものである。相当にはらつきが大きく、その変動の傾向を論ずるにはまだ多数の資料を蓄積する必要があるようである。

Yuiile²⁵⁾ の手法に従って各試験番号ごとの最大応力値の分布をプロットすると Fig. 5.22 のようになる。本図にも参考のため、ほぼ同型の摺津丸、大島丸、もんたな丸およびはどそん丸の計測結果¹²⁾を入れておいた。

5. 3. 2 波浪曲げモーメント

最近船舶の大型化に伴って、設計の合理化のために、就航中の船舶が実際に受ける波浪荷重の長期分布を考慮して、構造設計をしようという動きが活潑となり、船級協会の構造規則にもこのような考え方方が採入れられようとしている。波浪荷重のうち最も重要なものは縦曲げモーメントで、これまで波浪荷重に関する実船試験のほとんどが、この浪波曲げモーメントを対象として、船体中央部の主縦通部材の曲げ応力の計測を行なっている。

波浪荷重は船型・載貨状態・航路・外界条件などによって大幅に変化するものであるから、実測のみによってあらゆる船の波浪荷重の長期分布を求めることは不可能で、想定された上記諸条件のいろいろな組合せについて、理論計算または水槽試験などで船体の波浪中の荷重や応答を求め、実測された海洋波の統計資料を用いて長期分布を推定しようという試みがなされている。

たとえば、福田^{26)~28)} や本研究協会の第90研究部会²³⁾などでは、貨物船および油送船の代表的船型について、方型係数 C_b 、フルード数 F_r 、出会い角度 χ 、波高 h 、波長 λ 、波周期 T 、載貨状態などをそれぞれ変化させたう大な系列計算を行なっている。これらの計算では、波浪曲げモーメント M を無次元化した $M/\rho g L^2 B h$ の形でとり扱っているので、ここでもこれに準じた無次元化を行なうこととする。

ここで、波浪曲げモーメント振幅（片振幅）を M (t-m), 船の長さを L (m), 海水の比重を ρg (t/m^3), 応力振幅を X (kg/mm^2), 応力計測点の断面係数を $Z=I/y$ (cm^3) として、無次元化モーメント \bar{M} を

と定義することとし、Table 5.8にしあると丸および類似船のこれらの常数を表示した。R.M.S. につ

Table 5.8 Principal Dimensions and Factors of Referred Ships

	<i>L</i> (m)	<i>B</i> (m)	<i>D</i> (m)	<i>D. W.</i> (t)	<i>C_b</i>	<i>I/y</i> (cm ³)	<i>c</i> = $\frac{I/y}{\rho g L^3 B}$ (kg/mm ²) ⁻¹
Seattle Maru	145.0	19.4	12.5	12,000	0.67	6.0×10^6	1.06×10^{-4}
Ōshima Maru	145.4	19.5	12.3	12,000	0.67	6.0×10^6	1.04×10^{-4}
Hodakasan Maru	145.1	19.6	12.5	11,200	0.67	6.1×10^6	0.98×10^{-4}
Hoosier State	151.5	21.8	16.5	15,100	0.61	9.0×10^6	1.17×10^{-4}
Wolverine State	151.5	21.8	16.5	15,100	0.61	9.0×10^6	1.17×10^{-4}
Morumacscan State	140.0	20.8	12.5	12,200		6.0×10^6	1.03×10^{-4}

$$\text{Non-dimensional Bending Moment} \quad \bar{M} = M / \rho g L^3 B = c \cdot X \quad (\rho g : \text{t/m}^3, M : \text{t-m}, X : \text{kg/mm}^2)$$

いても同様に、応力振幅の R.M.S. を $\sqrt{E_X}$ 、無次元化モーメント \bar{M} の R.M.S. を $\sqrt{\bar{E}_M}$ と記することにする。

波浪曲げ応力振幅 X の R.M.S. $\sqrt{E_X}$ は、さきに Fig. 5.21 で示したように、波高のみの函数として表わすときわめてばらつきが大きいが、各波高ごとに $\sqrt{E_X}$ の平均値をとり、これを無次元化した $\sqrt{\bar{E}_M}$ についてプロットし、それらを通る大体なめらかな曲線を描くと Fig. 5.23 が得られる。大島丸、穂高山丸の曲線も同様にして引いたものである。米国においても、類似の貨物船 3隻についてぼう大な計測結果^{29), 30)}があるので、その平均点を結んだ線を参考のために附加した。米国の計測・記録および解析法も、ほぼ本試験の場合と同じで、解析結果はビューフォート風力に対する曲げ応力の複振幅の R.M.S. という形で表示されているが、これを $H \sim \sqrt{\bar{E}_M}$ の形に換算したものである。これら船の要目も Table 5.8 に併記しておいた。

前述の電子計算機による計算結果²⁸⁾のチャートから、本船類似の船型について不規則波中の波浪曲げモーメントを求めて、同じく Fig. 5.23 に入れてみると太線のようになる。この計算では以下の平均化や仮定を設けた。

- a) 船の長さは $L=150\text{m}$ とした。
 - b) $C_b=0.60$ および 0.70 の計算結果から、本船と同じ C_b の場合に内挿した。
 - c) フルード数は本船では大体 0.22 程度であるが、 $F_r=0.20$ の場合の値をそのまま用いた。
 - d) 出会角度別の計算チャートが用意されているが、あらゆる出会角度に 平均に遭遇するものと仮定してその平均曲線を用いた。
 - e) 計算は波浪曲げモーメントを平均波周期の関数として表わしているので、平均波周期 T と波高（有義波高） h との関係を次のように仮定した。

海洋波の観測資料として著名な Roll³¹⁾ と Walden³²⁾ の大西洋の波の資料を整理すると Fig. 5.24³³⁾ のようになる。両者で若干差があるがその平均をとると Fig. 5.25 の関係が得られる。一方本試験航海において観測した波長 λ と波高 h の関係 (Table 5.1) を相当ばらついているが 1 本の曲線で仮定し、さらに重力波の近似式³⁴⁾

を用いて $h \rightarrow \lambda \rightarrow T$ の関係を求めたものも、ほぼ Fig. 5.25 の関係に近いので、これを用いる

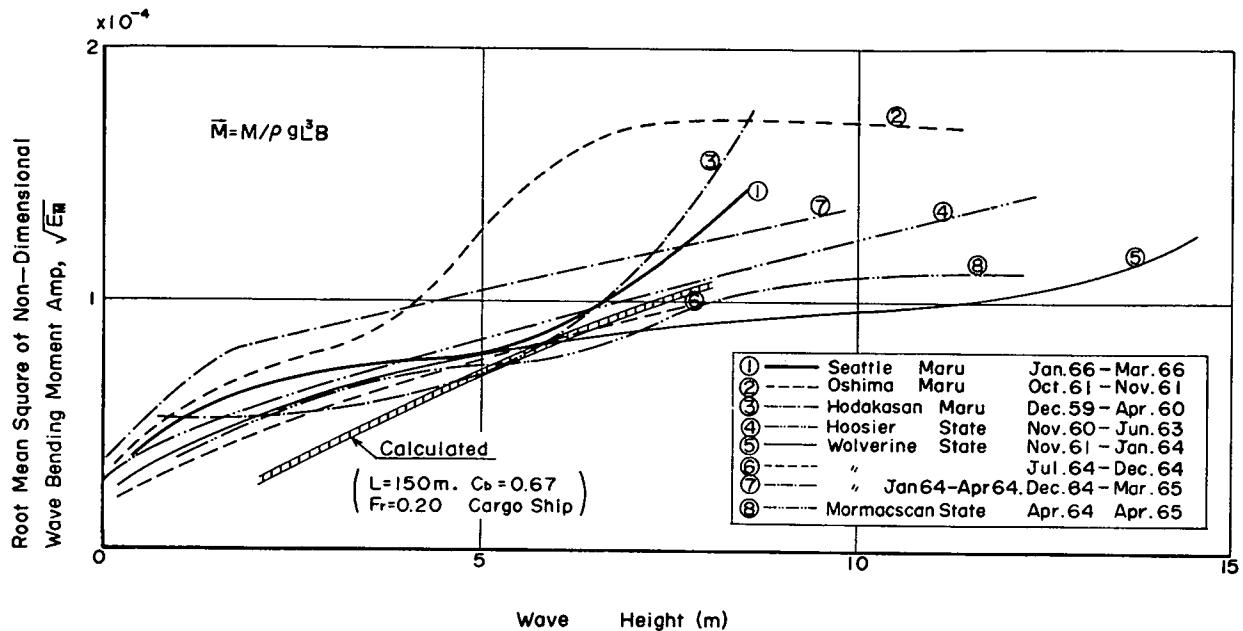


Fig. 5.23 Mean Line of R.M.S. of Wave Bending Moment vs Wave Height

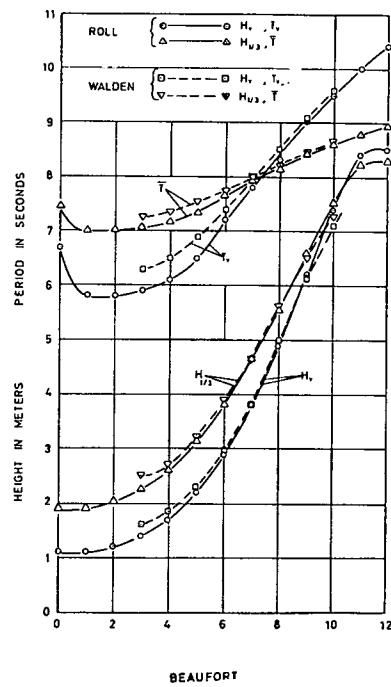


Fig. 5.24 Wave Height and Period as a Function of Beaufort³³⁾

ことにした。

f) 計算結果は波浪曲げモーメント M の標準偏差を R_M として $R_M/\rho g L^2 B h$ なる無次元表示をしているが、これをしあとる丸の主要寸法を用いて $\sqrt{E_M}$ の形に換算した ($\bar{M}=M/\rho g L^3 B$)。

以上のような概略的な計算であるが、Fig. 5.23 にみる通り、しあとる丸およびほぼ類似船型の諸船の実測結果と大体よく一致している。

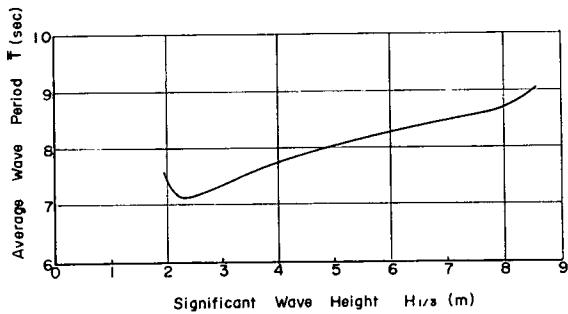


Fig. 5.25 Average Wave Period vs Significant Wave Height

これから、波浪曲げモーメントの短期分布は理論解析による近似計算が相当精度の高いものと考えてよい。第90研究部会などでは、各種の船種船型、波、操船条件その他についてぼう大な計算が進められているので、航海海面の波浪の統計資料さえ十分であれば、実船計測を行わなくても計算によって、任意の船の長期の荷重頻度分布を求ることは可能になるものと思われる。ただし、今後も各種の船型について、短期分布の近似計算の精密度を確認する意味での実船計測の必要性はやはり大きいと考えるべきである。

本試験航海における波の観測結果中、日本～米国西岸間の北太平洋区域のみの波高の頻度分布は、Fig. 5.26 の(A)に示す通りで比較的低い方に偏っているが、造船研究協会第 80 完究部会³⁵⁾ および山内らの調査資料³⁴⁾によれば冬期北太平洋の波高の長期分布は(B)および(C)のように相当高い方へずれている。10年間を通じての年平均の分布(D)は偶然しあとる丸の 1 航海の場合とほぼ同じ分布形を示している。この資料はほとんど目視観測によるもので、精度には若干の問題もあるが、これを用いて北太平洋航路船の大体の波浪荷重長期分布を推定することは可能である。一例として、Fig. 5.23 中のしあとる丸の実測の $\sqrt{E_M}$ と h との関係を示す平均曲線と、Fig. 5.27(D) の年平均の波高頻度分布とから、年平均の荷重頻度分布を求めてみると Fig. 27 のようになる。

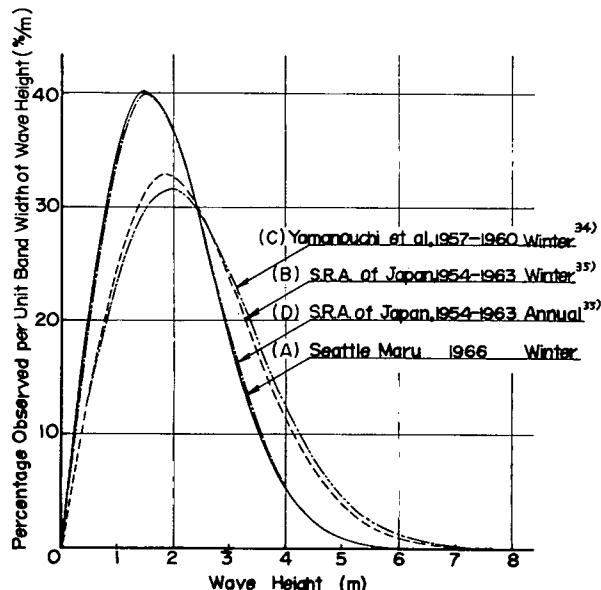


Fig. 5.26 Frequency Distribution of Wave Height in North Pacific Ocean

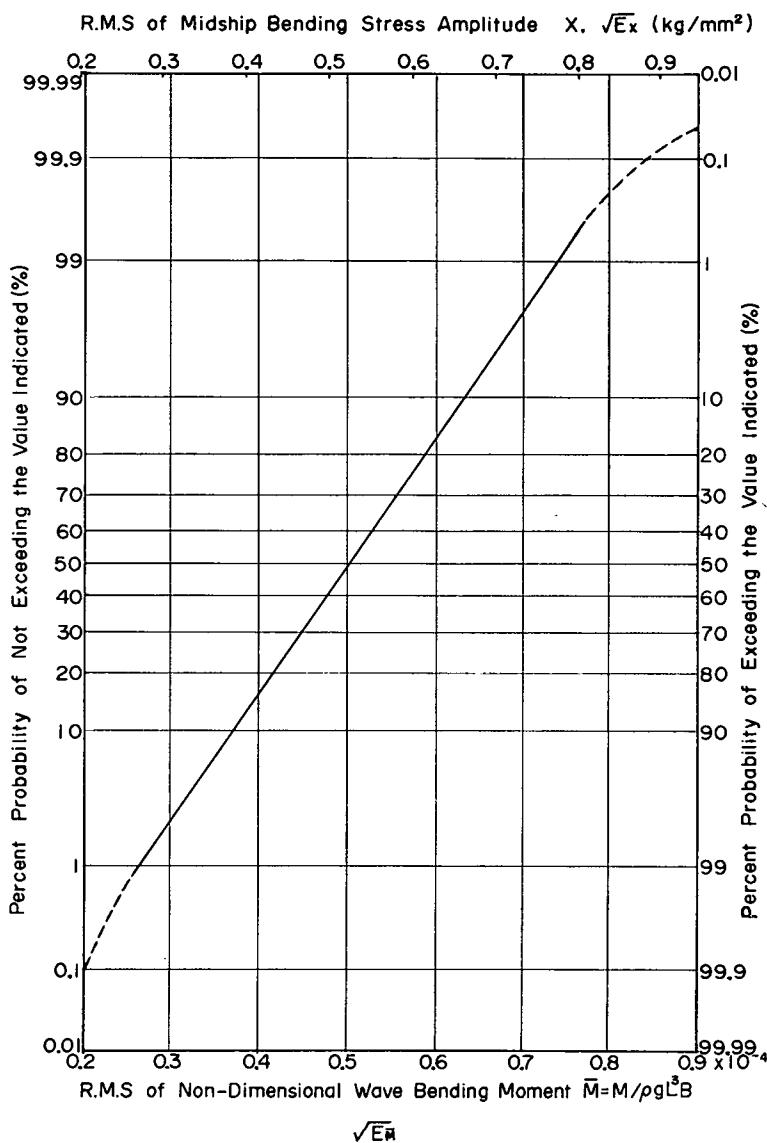


Fig. 5.27 Estimated Long Term Distribution of Wave Bending Moment of the Ships of SEATTLE MARU Class

5. 3. 3 船体横応力

船体横応力は Fig. 4.5 に示した通り、船体中央機関室内右舷第3甲板下のフレーム (No. 92) に上中下3点、ウエブフレーム (No. 94) の中央部に1点、合計4点計測した。いずれもフランジ表面で計測した。計測点が少ないため、横方向荷重との関連を解析するには不十分であるが、縦方向応力と同様に頻度解析装置による頻度解析を若干行なった。

ウェブフレームよりも小骨の応力の方が大体において大きく、約1.5倍程度の値を示している。小骨の上中下3点における応力振幅にはあまり差がなく、Fig. 5.28 に見るようにほぼ同位相でその振幅も大体一致している。ゲージ貼布の関係からもっと下方のビルジ附近の計測ができなかったのが残念である。この3点について、応力の時間的变化を図示してみると Fig. 5.29 のようになる。大体に

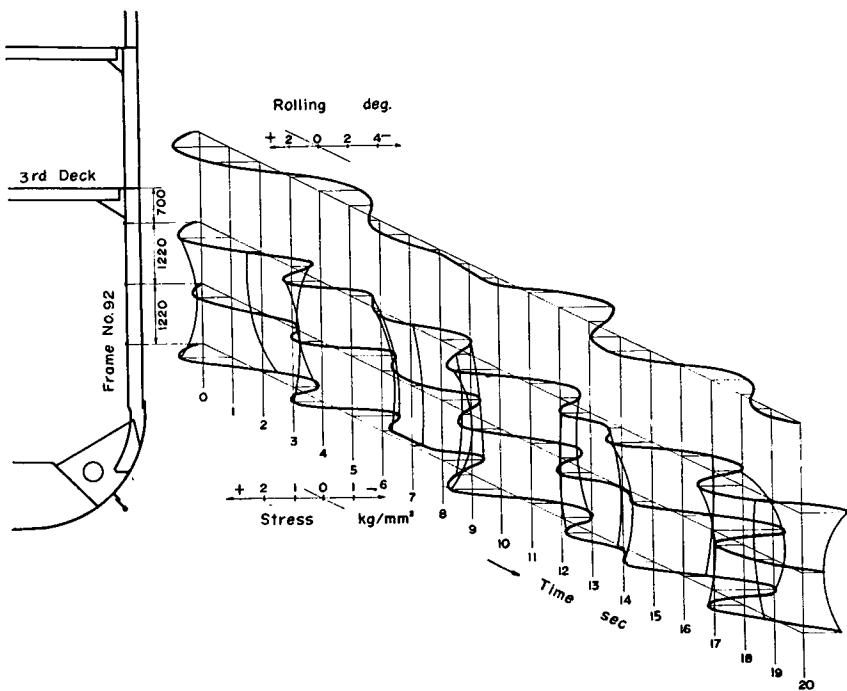


Fig. 5.28 Stresses of Transverse Frame

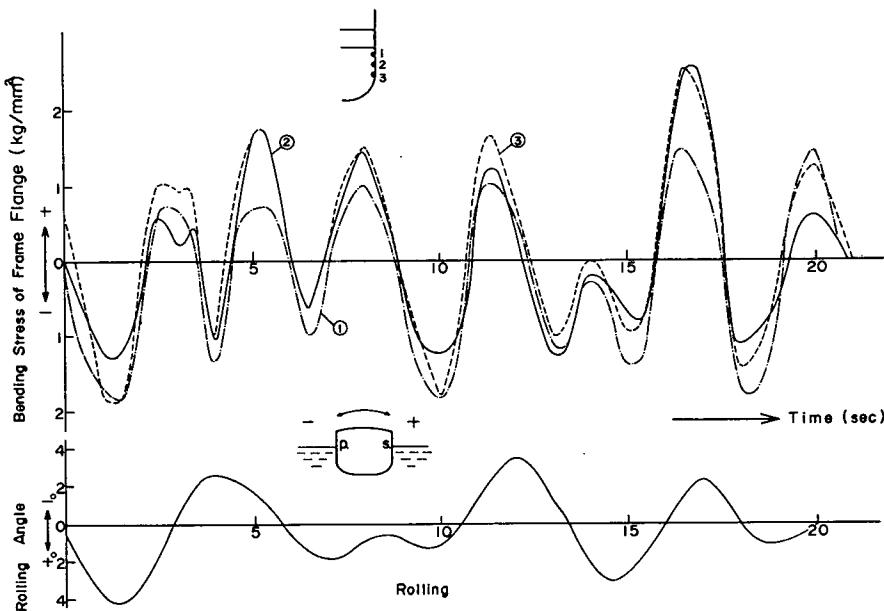


Fig. 5.29 Transverse Stress and Rolling Angle

において横揺の $\frac{1}{2}$ 周期の変動が表われているようにみられる。

計測した4点中なかんづく振幅の大きかった小骨の中央点の応力について、短期分布の例を Fig. 5.30に示す。この場合も縦応力のときと同様に、応力零の基準線はわからないので、変動曲線の大体の平均値を零と考えたものである。ほぼ同じ海面状態であっても、右舷側（計測位置の側）から波を受ける場合は、左舷からの波の場合に比べて応力振幅ははるかに大きくなっている。

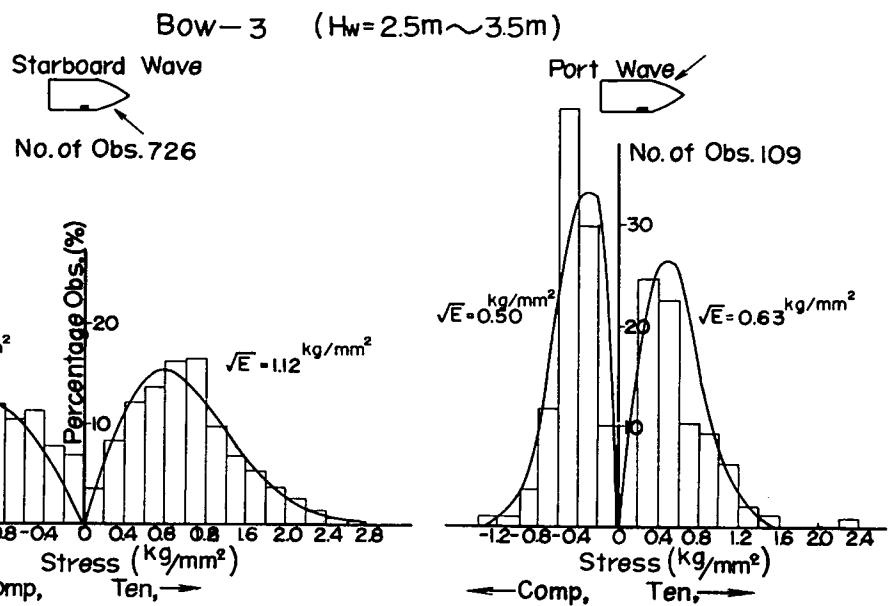


Fig. 5.30 Short Term Distribution of Transverse Stress

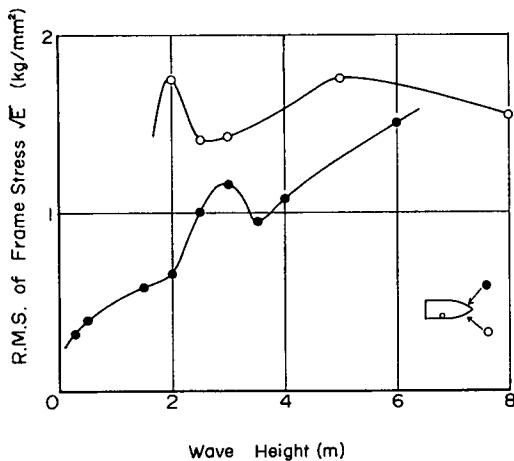


Fig. 5.31 Effect of the Encounter Angle on Transverse Stress

側方から波を受けた場合 (Bow Sea, Beam Sea および Quartering Sea) のみについて、波の左右別の同点の応力の R.M.S. を波高を基準にして表わすと Fig. 5.31 のようになる。波の方向によって応力振幅が甚だしく変ることがよくわかる。

したがって、縦応力の場合のように、波高だけの関数として整理するにはばらつきが大き過ぎ、出会い角別に分類するには標本が少な過ぎることとなり、外界条件と荷重や船体応答との関係も縦曲げの場合ほど理論的解析も行なわれていないので、これだけの計測結果のみで有意の結論を導くことは困難と思われる所以、今後の問題として保留することにした。

5. 4 船体運動と応力との相関

さきに 5.2 で述べたように、代表的な測定結果、Test No. 23 と No. 43 について求められたコレログラム・スペクトラムが Fig. 5.2 から Fig. 5.7 に示されている。ここには縦揺れ、横揺れ、

船首の上下加速度と縦応力、横応力が含まれているので、これらによって船体運動と応力との相関をある程度うかがうことができる。まずこれらのスペクトラム解析によって得られる応力の性質とさきに 5.3 で導かれた応力の頻度分布の性質との比較を行なうこととする。

5.4.1 応力の頻度分布解析とスペクトラム解析との比較

さきに 5.2.1 の式 (5.2.16) で示したように、スペクトラムで囲まれる面積は $\hat{R}(0)$ すなわちもとの過程の分散 $\hat{\sigma}_x^2$ に等しくなる。 $\hat{\sigma}_x^2$ はこのようにスペクトラムの囲む面積から求められるが、より簡単にコレログラムの計算の際に $\hat{R}(0)$ として求められている。もし 5.3 で述べた仮定、すなわち、極大極小値がレイレイ分布に従うとすれば、 $E = 2\hat{\sigma}_x^2$ であるから、5.3 の方法、すなわち平均値からの極値までの応力振幅 (X) の自乗平均として求めた E_x と、コレログラム解析で求められた $2\hat{\sigma}_x^2$ とは一致するはずである。その比較を示すものが、Table 5.9 である。

Table 5.9 Comparison of the Results of Different Process of Frequency Analysis

			A-D Converter Punched Tape & Computer $\sigma_x = \sum x_i^2/n$	Freq. Analyzer, Peak Count Method $E_x = \sum X_i^2/N$
			(+)	(-)
Longl.	Variance	σ_x^2	0.395	•
	Mean Sguare	$E_x = 2\sigma_x^2$	0.790	0.70 0.63
	R. M. S.	$\sqrt{E_x}$	0.889	0.84 0.79
	Mean Amp.	$0.866 \sqrt{E_x}$	0.770	0.73 0.68
	1/3 max	$1.416 \sqrt{E_x}$	1.259	1.19 1.11
Trans.	Variance	σ_x^2	0.943	
	Mean Sguare	$E_x = 2\sigma_x^2$	1.886	1.41 2.28
	R. M. S.	$\sqrt{E_x}$	1.373	1.91 1.51
	Mean Amp.	$0.866 \sqrt{E_x}$	1.189	1.03 1.31
	1/3 max	$1.416 \sqrt{E_x}$	1.944	1.68 2.14
(Fr. 92)	Variance	σ_x^2	0.479	
	Mean Sguare	$E_x = 2\sigma_x^2$	0.958	2.35 1.29
	R. M. S.	$\sqrt{E_x}$	0.979	1.53 1.14
	Mean Amp.	$0.866 \sqrt{E_x}$	0.848	1.33 0.99
	1/3 max	$1.416 \sqrt{E_x}$	1.386	1.17 1.61
Test	Variance	σ_x^2	0.479	
	Mean Sguare	$E_x = 2\sigma_x^2$	0.958	2.35 1.29
	R. M. S.	$\sqrt{E_x}$	0.979	1.53 1.14
	Mean Amp.	$0.866 \sqrt{E_x}$	0.848	1.33 0.99
	1/3 max	$1.416 \sqrt{E_x}$	1.386	1.17 1.61
No.43-A	Variance	σ_x^2	0.479	
	Mean Sguare	$E_x = 2\sigma_x^2$	0.958	2.35 1.29
	R. M. S.	$\sqrt{E_x}$	0.979	1.53 1.14
	Mean Amp.	$0.866 \sqrt{E_x}$	0.848	1.33 0.99
	1/3 max	$1.416 \sqrt{E_x}$	1.386	1.17 1.61
No.23-A	Variance	σ_x^2	0.479	
	Mean Sguare	$E_x = 2\sigma_x^2$	0.958	2.35 1.29
	R. M. S.	$\sqrt{E_x}$	0.979	1.53 1.14
	Mean Amp.	$0.866 \sqrt{E_x}$	0.848	1.33 0.99
	1/3 max	$1.416 \sqrt{E_x}$	1.386	1.17 1.61

解析方法の相違、レイレイ分布の近似度等を考えれば多くの場合、両者の間には比較的よい一致が見られるといってよいが、中には必ずしも一致のよくないものも含まれている。この原因として次のようなものが考えられる。

i) 較正信号の精度の不足

応力の較正は、ある値の歪みによって生ずるゲージの抵抗変化と等価な抵抗変化をプリッジに与えて行なっているが、その値が現象波形に重畠される形となっていて較正信号による振れの振幅を読みとる場合の精度が十分でなかった。

ジャイロ式人工水平儀による縦揺れ、横揺れの計測においては、零線からの振れが等価動揺角になるような等価インピーダンスによって較正を行なっているので、較正信号はある時間零線からの振れとして連続直線として明らかに記録され、較正常数は比較的精度よく出すことができた

といってよい。

ii) 磁気テープ記録に際し、応力そのものの高周波数の変動、および高周波雑音の混入があったこと。

ディジタイザには低域濾波回路が附属していたが、作動および設計は必らずしも十分でなく、なおかなりの高周波成分が混在した。これは余分な分散を与える傾向を生ずる。このことは前項 i) の方法によって常数を求める際にも誤差を増大させる原因となった。

iii) 磁気テープ記録の際にドリフトが混入したこと。

現象そのものには長期傾向がなくても、計測変換器・記録器の全システムにドリフトその他で平均線が次第に変化したものがある。その場合にはもちろんまず長期傾向を統計的に見出し、これを取去ってから解析を進める必要がある。もしこれを行なわなかった場合は長期傾向を残したまま、 Δt の時間間隔でサンプリングを行ない、その読み取り値を用いて分散・相関函数およびスペクトラムが計算され、分散 c^2 には誤差が含まれることになる。

平均値 $m(t)=0$ ならば問題はないが、平均線が長期傾向によってゆるやかに変動しているものに対しては、修正なしに機械的にこのような操作を行なったとする。長期傾向として最も簡単に 1 次の偏倚と考える。すなわち、

そして平均線は

で表わされる。するとこれを Δt ごとに読み取った値を x_i とすると

$$x_i = m_i + y_i \quad i = 1 \sim N$$

m_i と y_i とは互に相関はないから、 x_i の分散 σ_x^2 は、 y_i の分散 σ_y^2 と m_i の分散に対応する散らばり σ_{m^2} との和となり、求めている真の分散 σ_y^2 に対して常に分散は σ_{m^2} だけ大きく出る。 m_i は $+c \sim -c$ の間に平均に分布するから、簡単な考察によりこの値は

となることが分る。この長期傾向としての $m(t)$ の推定は、

とおいたときの $\sum y_i^2$ が最小になるように、最小自乗法的に \hat{a} , \hat{b} を求めればよい。その \hat{a} , \hat{b} の信頼度も統計的に求めることができる。

iv) 極値の分布が厳密にはレイリイ分布ではないこと。

5.3 で述べた方法では E_r は多くの極値の自乗平均として求められている。これが $x(t)$ の分散 σ_x^2 の 2 倍に等しいというのは、厳密には極値の分布がレイリイ 分布になるときにのみ成立つもので、そのためにはスペクトラムはいわゆる狭帯域でなければならない。ところが、Test No. 23-A や No. 43-A の例でみると、応力のスペクトラムの有効幅は比較的大きい。すなわち、スペクトラムの帯域幅を示すパラメタ \in

$$\epsilon^2 = \frac{m_0 m_4 - m_2^2}{m_0 m_1} \dots \quad (5.4.5)$$

ただし、

$$m_0 = \int_0^\infty S(\omega) d\omega \rightarrow \frac{\pi}{M \cdot \Delta t} \left[\sum_{i=1}^{M-1} \hat{S}(\omega_i) + \frac{1}{2} \left\{ \hat{S}(0) + \hat{S}(\omega_M) \right\} \right]$$

$$m_2 = \int_0^\infty \omega^2 S(\omega) d\omega \rightarrow \frac{\pi}{M \cdot \Delta t} \left[\sum_{i=1}^{M-1} \omega_i^2 \hat{S}(\omega_i) + \frac{1}{2} \omega_M^2 \hat{S}(\omega_M) \right]$$

$$m_4 = \int_0^\infty \omega^4 S(\omega) d\omega \rightarrow \frac{\pi}{M \cdot \Delta t} \left[\sum_{i=1}^{M-1} \omega_i^4 \hat{S}(\omega_i) + \frac{1}{2} \omega_M^4 \hat{S}(\omega_M) \right]$$

の値を、Test No. 23 の縦応力・横応力の各々について計算してみると次のようになる。

項目	縦応力	横応力 (フレーム No. 92)	横応力 (ウェブフレーム No. 94)
\in	0.606	0.741	0.737

\in は 0 ~ 1 の間の値をとるが、これによるといわゆる狭帯域スペクトラムといわれる $\in \approx 0$ にはやや遠く、むしろ $\in \approx 1$ の方に近い。

すなわち、このスペクトラムは相当広帯域であり、狭帯域を前提とする極値の分布のレイレイ分布はあくまでも単なる近似に過ぎないことがわかる。事実変動波形をみても、狭帯域の場合には存在しないはずの正の極小値や負の極大値がかなり存在し、このことを裏付けている。 \in の値と極値の間には、極大値全体のうちで負の極大値の占める割合を r として

$$\in^2 = 1 - (1 - 2r)^2 \quad \dots \dots \dots \quad (5.4.6)$$

の関係があるといわれているが³⁶⁾、原波形からみるとほぼよい一致を示している。

5. 4. 2 応力と船体運動との相関、その他

このようにして求められたスペクトラムを細かく観察すると次のような相関が求められる。

- i) 縦応力のピークを示す周波数は縦揺れのピーク周波数に、横応力のピーク周波数は横揺れのピーク周波数によく一致している。すなわちFig. 5.4, Fig. 5.7に明らかに表されているように、縦応力は縦揺れ運動と密接に関連し、横応力は横揺れ運動と密接に関連していることが分る。なおこの場合にもかねていわれているように³⁷⁾、 ii) 横応力のスペクトラムには横揺れがピークを示す周波数の2倍の周波数の点にピークが存在するという事実は明らかに表されている。その理由は横応力の非線型性にあるのか、あるいは他の原因があるのか、現段階ではまだ不明である。iii) なおここに示した例でみると横応力、縦応力ともエネルギーの存在する周波数はもちろん縦揺れ、横揺れなどの動揺より広い範囲ことに高周波にわたっているが、予期された値よりは比較的低い所で止っていて、周期ではほぼ 3 sec 以上であってそれ以下の短周期成分はない。縦応力、横応力とも、同じような上限周波数であることからみると、出会い波の周波数成分の上限もほぼそのあたりにあることが想像される。
- iv) また縦揺れと横応力、横揺れと縦応力との間にはむしろ驚くほど関連が少ないともうかがわれる。
- v) Test No. 43 の横応力が、横揺れのピークの周期とその $\frac{1}{2}$ 倍の周期に明らかなピークを示しながら、なお、その上下にもかなりの周波数幅にわたってエネルギーをもっているのは、波との相対方向が船首から 60° という具合にかなり横方向に寄っており、しかも横揺れはふつう考えられるのとは逆に、波がほぼ真向いから來ていた Test No. 23 の場合がはるかに大きく、Test No. 43 はそれに比べると非常に小さいことから、横揺れによって起こされる横応力に比べ、波の外力によって直接発生する横応力の方がむしろ大きかったためであろう。Test No. 23 はこれに反して、横揺れのスペ

クトラムの囲む面積が極めて大きく、ピークも極めて高く、そのために横応力のスペクトラムも横搖れがピークを示す周波数に極めて大きい明らかなピークを持っている。したがってスペクトラムの有効幅はより狭く、分散 σ^2 はほぼこの両者で同じオーダーであるが極値の最大期待値は Test No. 23 の状態では Test No. 43 の状態に比べてより大きいことが想像され、これは事実と合っている。

5.5 操縦性能

5.5.1 Z操舵試験

船の操縦性能は旋回性能と針路安定性能とに大別される。操縦性能を表わす指標として、よく K と T が用いられる。 K はある舵角で定常旋回に達したときの旋回角速度と舵角との比で、旋回力を示す指標であり、模型実験等でよく用いられる定常旋回特性 Ω （船長／定常旋回半径）と舵角との比

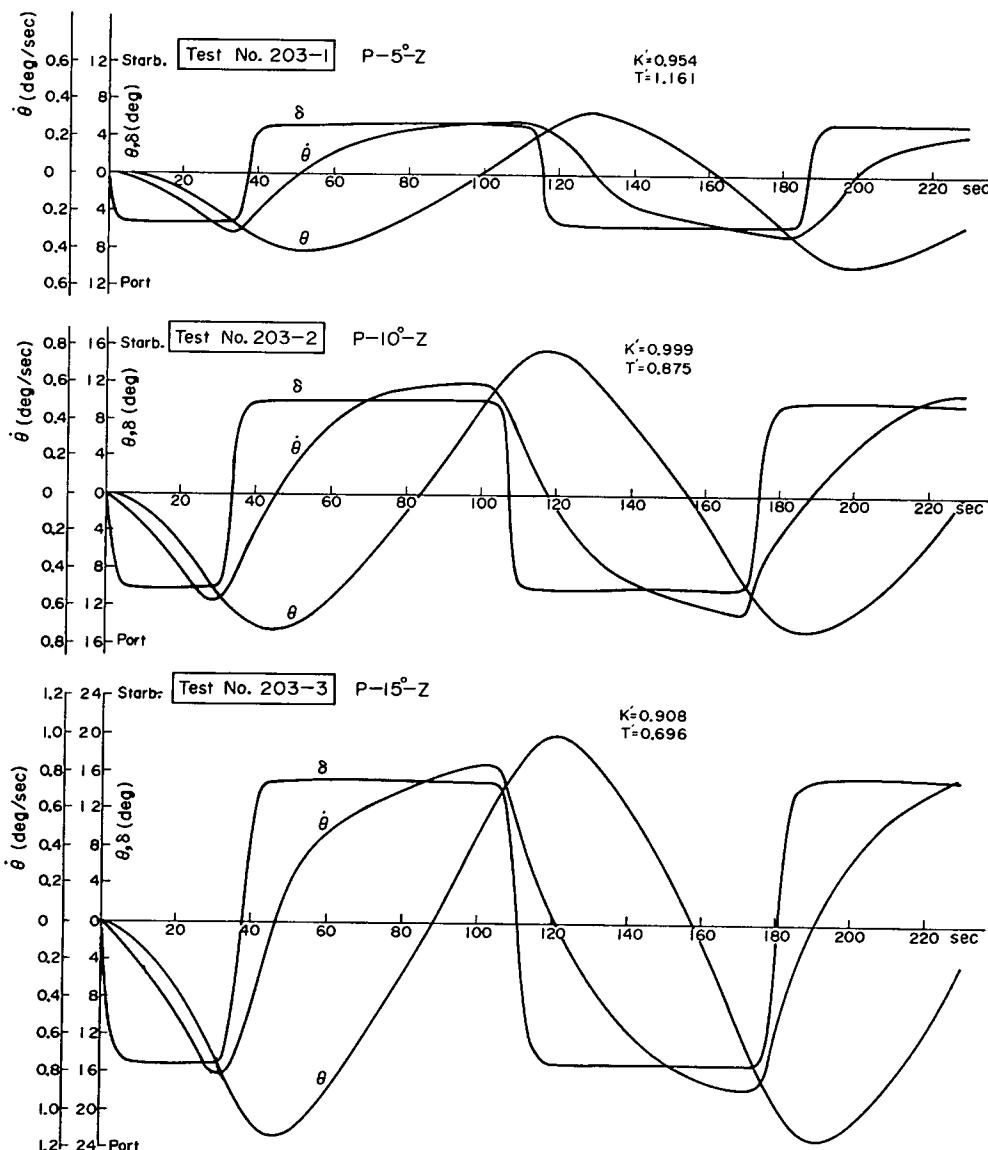


Fig. 5.32 Zig Zag Steering Tests

に対応されるものである。 T は操舵に対する船の応答の早さすなわち追従性を示す指標で、ある舵角に操舵してから定常旋回に達するまでの時間で決まるものである。追従性と針路安定性とは別のものであるが、追従性のよい船は少しの操舵で進路を保てるので、進路安定性もよいと考えて差支えないであろう。

操縦性能を調べる方法として、定常旋回試験、スパイアラル試験、Z操舵試験等があるが、Z操舵試験がよく用いられるので、今回もこの方法によることにした。操舵試験は静穏な水面で舵角 5° 、 10° 、 15° 、 20° で左右両舷について実施することが望ましいが、今回は比較的海面の穏やかなカリフォルニア半島沖において、舵角左舷 5° 、 10° 、 15° の3種について行なった。試験実施時の気象、海象条件は風力階級3、風浪階級2、うねり階級1であり、船の条件は $d_f = 5.35\text{m}$, $d_a = 7.54\text{m}$, $\rho = 11,800\text{t}$, $\rho/\rho_{full} = 0.676$, $\rho/L^2 \cdot d = 0.087$, $B/d = 3.01$, $Ar/L \cdot d = 1/47.8$ (ただし ρ は排水容積) であった。

Fig. 5.32 に左 5° 、 10° 、 15° のZ操舵試験結果を示した。またこれらの試験から得た無次元の操縦性能指標 $K' = K \cdot L/V$, $T' = T \cdot V/L$ (V は船の平均速度, L は船の垂線間長) を無次元化した試験中の回頭角速度の平均を横軸としてプロットしたもののが Fig. 5.33 に示されている。またこの図には本船と条件のよく似た山下汽船の貨物船山隆丸のZ操舵試験の結果も併記してある。両者を比較してみると、 $5^\circ Z$ 試験の T' 以外はかなりよく一致した値を得ている。

この試験結果をみると、貨物船としては旋回性が悪く、針路安定性がよく現われているが、その理由として、載貨量が少ないため喫水が浅く、舵面積比が大きくなっていること、また船尾トリムが大きいことが考えられる。

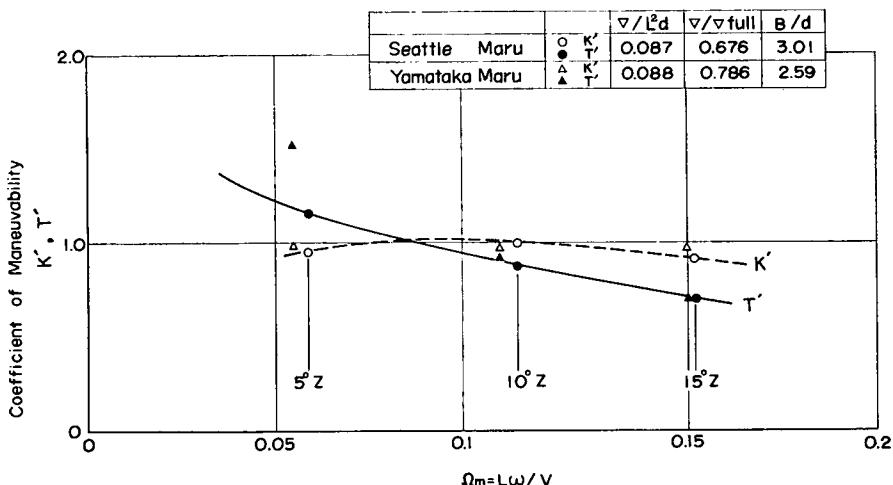


Fig. 5.33 Manoeuvering Indices versus Angle Velocity

5.5.2 自動操縦装置の応答試験

大洋を航行中の船は、ほとんど自動操縦装置によって一定の針路を保つような操舵を行なっている。したがって、自動操縦装置の性能の優劣とその使用法の適否は、船の航海性能に大きな影響を与えるものと考えられる。そこで本実船試験では、自動操舵系を含めた本船の操舵に対する応答特性を調べるために、海面の静かなときを選んで自動操縦装置の応答試験を実施した。

本船に装備されている自動操縦装置は、北辰電機(株)製 PT-4 型自動操縦装置で、helm adjust, checking rudder adjust および weather adjust の3種の調整がある。helm adjust は船が設定針路から外れた場合、その偏り角に比例した舵角の操舵、いわゆる比例制御を行なうために、その比例常数を決める調整で、1~2.5までの調整目盛りがあり、checking rudder adjust は rate-control に当り、船の回頭角速度に比例した舵角の操舵を行なわしめるための調整で、0~5までの目盛りがある。また weather adjust は、風浪に基づく船の頻繁な偏擺に対する無視し、無駄な操舵ひいては有害な抵抗増加をひきおこすことを防ぐための、一種の不感帯の帯域幅を加減するもので、0~6までの目盛りがある。

各調整目盛の示す物理的な数量はその船によって異なるが、本船の場合およそ次のように付けられているようである。helm adjust 1, 2 …… は、偏針 1° に対し舵角 1° , 2° …… のように偏角に対する倍率を示し、weather adjust は、0は不感帶域 $\pm 0.3^\circ$, 1は $\pm 1.5^\circ$, あとは目盛1を増すごとに 1.5° 増しとなっている。checking rudder adjust は helm adjust によって変るが、helm adjust を2としたとき、目盛りの0, 1, 2, …… 等は10分間で1旋回する角速度、つまり $0.6^\circ/\text{sec}$ の回頭角速度に対して当舷量 0° , 4° , 8° …… となっている。船はこれらの調整を、その時の気象、海象および載貨の状態等に応じて、最も適した位置に設定して航行するようになっている。

本試験は上記3調整を Fig. 5.34 に示すような組合せに種々変化させて行なった。試験方法は各調整を所定の目盛に設定したのち、自動操縦装置の進路設定を急に右へ 10° 変え、船がその設定進路に入っていく間の舵角と船の回頭角度、ならびに経過時分を記録した。試験時の気象、海象は比較的平穏なときを選んだが、ビューフォート階級で風力3、風浪階級2、うねり階級1程度であった。

Fig. 5.35 は上記試験結果で、 θ は原針路からの偏り角度、 δ は舵角である。これら記録には設定進路に静定するものと、設定進路には近づくが振擺を起しているものとある。これらの図から設定進路（右 10° ）附近の船首擺れ、舵振幅、操舵周期の大体の値を読み取ってみると、Table 5.10-A のようである。針路が設定進路に静定したものは Test No. 202-7, 202-1, 202-4 の3ケースで、202-2は

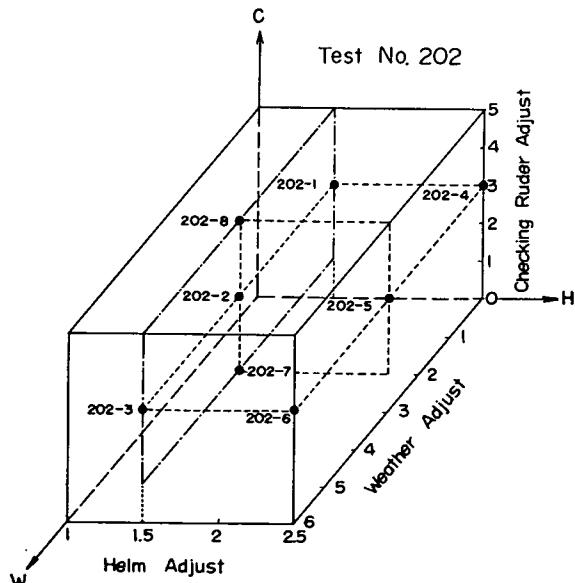


Fig. 5.34 Conditions of Auto-Pilot

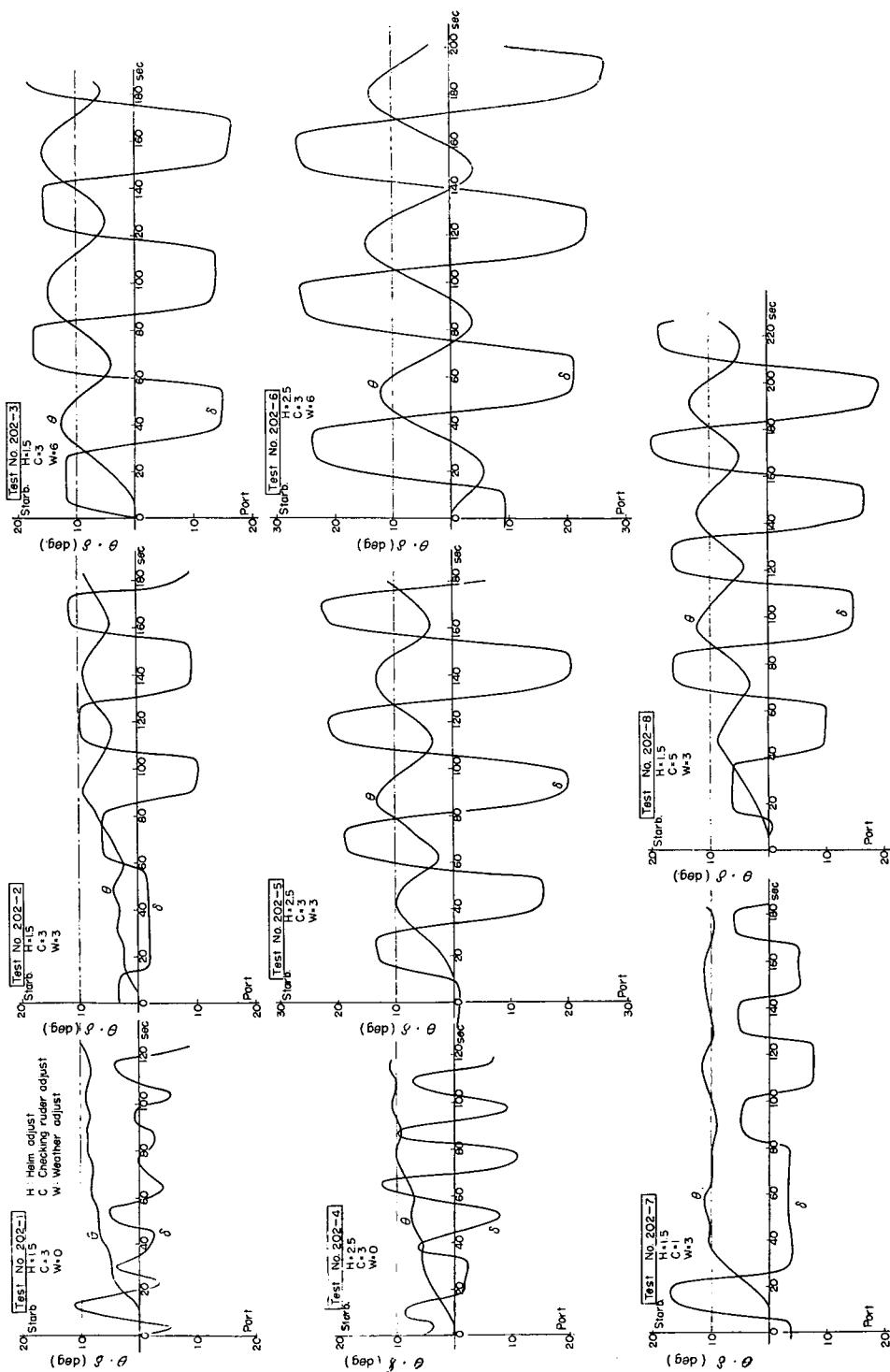


Fig. 5.3 5Response Test of Auto-Pilot

Table 5.10 Results of Auto-Pilot Test

Auto-Pilot Adjusting*			Yawing Angle	Rudder Amplitude	Steering Period	Course	Test No.
H	C	W	deg.	deg.	sec	○ Stable × Unstable	
1.5	3	0	1	8	20	○	202-1
"	"	3	5	20	45	×	" -2
"	"	6	11	30	58	×	" -3
2.5	"	0	2	16	23	○	" -4
"	"	3	9	40	48	×	" -5
"	"	6	19	52	64	×	" -6
1.5	1	3	2	12	42	○	" -7
"	5	3	9	36	47	×	" -8

* H : Helm adjust, C : Checking rudder adjust, W : Weather adjust.

やや不安定であり、その他は船首揺れ、舵振幅とも収斂せずに発散している。

Weather adjust を大きくすると舵振幅が急に大きくなり、操舵周期もそれに従って大きくなり、操舵が発散する傾向が強くなっている。また checking rudder adjust は helm adjust を大きくしたときに制御系が不安定になるのを防止する効果があるといわれているが、この結果もそれを実証している。

今回の試験結果からは、操舵の収斂と発散との境界がどの辺にあるかは明確には求められなかったが、各調整は小さい方が結果はよいように表わされた。特に weather adjust と checking rudder adjust は目盛の 2 度までが無難のように思われた。

自動操舵系の安定は船の操縦特性と密接な関係がある。たとえば操縦性指数 K , T と制御系を安定に働く helm adjust, checking rudder adjust, weather adjust との関連等については、より詳細な解析が必要である。

5. 5. 3 操 舵 頻 度

船は航行中、波や風などの外力による所定進路からの偏針を正そうとして、手動または自動操舵装置を介して常に舵を操作している。その場合、大舵角を頻繁にとると、舵の抵抗増加、横流れ、船首揺れ、横揺れ等が増大し、蛇行なども生じて抵抗増加が大きくなり、速度低下の原因となる。そのため、実際に大洋を航行している船がどのような操舵を行なっているかを知ることは、船の航海の実状を知るために必要なことである。このような観点から船舶技術研究所において、昭和38年から39年にかけて山隆丸により操舵頻度を計測したが¹⁷⁾、今回もさらに資料を豊富にするため操舵頻度の計測を行った。

操舵頻度計測は、操舵頻度計を操舵機室に設置し、原則として定時計測時間を含む 3 ~ 4 時間の記録をとった。山隆丸においては時間頻度（ある舵角にある時が全計測時間の何%を占めるか）を計測したが、今回はさらに操舵回数頻度（ある操舵角が全計測時間中に何回操作されるか）も記録した。また、船では大洋航行中の操舵はほとんど自動操縦装置によっているので、自動操縦装置の helm adjust, checking rudder adjust, weather adjust の 3 調整の設定位置も記録に留めた。

Table 5.11 は操舵頻度計測の結果で、自動操縦装置の各調整の設定位置は helm adjust は 1 ~ 2.5 の中 1 ~ 1.5 に、checking rudder adjust は 0 ~ 5 の中 2 および 3 に、また weather adjust は 0

～6の中1～2がおもに使用されている。全計測時間を全操舵回数で割った平均操舵周期は30～50secにわたるが30～40secのものが大半である。操舵回数頻度は1時間当たりの各舵角域の操舵回数で示してあるが、6°以上の操舵が相当頻繁に行なわれていることが判る。操舵時間頻度は全計測時間に対して、各舵角域に舵があった時間の100分率で示してあり、これによれば舵が5°附近にあることが非常に多いことを示している。計測結果の中の数例をFig. 5.36に示した。図中の風・風浪およびうねりの数字はビューフォート階級である。Test No. 103は操舵時間率が広い舵角にわたって

Table 5.11 Frequency and Time Ratio of Rudder Angle

Test No.	Adjusting Auto-Pilot * H C W	Mean Period sec	Freq of Occ. of Rudder Angle per Hour						Time Rate of Rudder Angle (%)							
			Port			Starboard			Port			Starboard				
			0.4°	0.8°	1.6°	2.4°	4.0°	6.4°	10.8°	16.0°	24.0°	40.0°	64.0°	100.0°		
101	1.5	2	2.2	23.4	6.9	54.8	29.5	22.0	14.3	0.2	11.9	19.2	52.0	10.8		
102	1.5	2	2.2	23.9	12.2	59.4	24.5	21.8	11.2	0.2	11.8	20.8	52.4	10.8		
103	1	2	2.5	22.2	12.4	41.7	21.0	11.8	4.7	14.7	27.8	47.0	12.0	14.6		
104	1	2	2.5	22.5	11.2	24.5	15.5	8.9	11.3	20.8	29.8	18.0	10.0	12.5		
105	1	2	2.5	28.8	11.2	32.5	24.5	15.5	8.9	11.3	20.8	18.0	10.0	12.0		
106	1	2	2.5	41.1	12.0	27.7	19.4	10.1	21.0	26.8	14.3	12.0	11.1	12.2		
107	1	2	2.5	41.2	12.0	20.0	14.0	7.2	9.6	10.5	2.4	15.9	17.9	16.0		
108	1	2	2.5	40.2	19.5	44.0	22.5	6.2	8.7	24.9	6.2	3.4	12.5	11.9	5.2	
109	1	2	1.5	20.1	18.4	40.2	19.7	5.9	0.6	4.0	24.1	34.4	11.7	5.8	11.6	
110	1	2	1.5	20.5	0.2	24.6	42.8	40.7	6.0	19.0	106.5	12.2	0.2	3.5	2.0	
111	1	2	1.5	2.1	0	4.7	5.1	1.8	8.2	12.5	21.2	49.0	4.2	0.2	5.4	
112	1	2	1.5	2.1	0	5.0	29.7	28.9	15.8	15.4	47.9	9.7	0	0	0	
113	1	2	1.5	2.1	0	7.8	72.2	43.5	25.0	0.2	32.5	10.4	0.1	9.4	1.1	
114	1	2	1.5	2.1	0	0	17.8	81.8	24.6	50.2	0.2	7.2	0	0	0	
115	1	2	1.5	2.1	0	0	4.2	17.3	49.1	5.9	2.8	38.0	3.2	0	0	
116	1.5	2	1	2.2	0	20.9	6.0	0.2	7.6	27.6	20.0	20.8	11.0	0	0	
117	1.5	2	1	2.2	0	52.4	22.2	15.2	4.1	27.8	57.2	16.5	0	2.1	0	
118	1.5	2	2	15.8	54.6	20.0	12.9	14.6	24.0	20.2	18.1	2.6	2.2	16.9	15.2	
119	1.5	2	2	42.4	15.6	27.4	19.6	10.7	2.6	2.4	7.6	22.4	29.5	16.9	2.4	
120	1.5	2	2	42.4	14.5	27.6	20.2	2.4	16.7	0.4	12.2	29.5	16.9	12.8	1.1	
121	1.5	2	2	2.2	14.5	6.2	42.4	20.2	1.6	0.8	25.0	15.6	0.2	2.2	0.6	
122	1.5	2	2	45.2	0.4	12.7	27.8	21.6	1.5	6.8	21.9	56.2	12.5	0	1.2	
123	1.5	3	1	57.5	0.4	20.5	8.7	0.2	0.9	11.1	41.0	42.3	0.1	0	0.2	
124	1.5	2	1.5	57.2	0	21.6	20.2	0.6	0.9	21.2	57.2	51.1	4.1	0.0	0.2	
125	1.5	2	1.5	57.1	0.4	57.1	36.4	12.1	2.1	27.5	47.4	47.4	0.8	0	0.2	
126	1.5	2	1	57.1	0.2	9.5	56.0	4.5	15.7	45.6	5.3	0	0	1.6	0.3	
127	1.5	2	1	57.1	0.2	7.2	50.4	42.7	5.2	52.0	24.0	54.6	2.5	0	0.1	
128	1.5	2	1	24.0	0	9.1	65.0	4.1	26.2	57.5	16.2	0.7	0	1.7	0.1	
129	1.5	2	1	25.0	0	0.7	42.1	53.7	6.4	11.1	58.4	52.7	0.3	0	0.2	
130	1.5	2	1	22.8	0	0.7	2.1	0.2	0.1	2.4	41.1	44.5	0.4	0	0.2	
131	1.5	2	1	40.0	0	10.3	58.4	2.2	0.1	2.4	29.4	43.7	18.0	0	0	
132	1.5	3	1	40.1	0	18.1	41.6	20.3	0.2	2.4	23.4	43.7	18.0	0	0	
133	1.5	2	1	28.1	0	0.4	18.2	55.2	11.7	4.9	11.0	24.2	26.6	0.2	0	0
134	1.5	2	1	29.6	5.9	64.0	27.5	14.2	21.8	13.8	23.3	10.0	0.6	1.0	0.3	
135	1.5	2	2	25.2	11.7	40.7	20.1	17.9	5.9	8.2	21.1	23.1	2.4	1.2	0.7	
136	1.5	2	2	27.0	0	13.0	31.2	29.9	12.2	14.0	17.2	15.2	1.1	0.2	0.7	
137	1.5	2	1	2.2	14.5	27.4	19.6	10.7	2.6	2.4	7.6	22.4	29.5	16.9	2.4	
138	1.5	2	2	45.2	0.4	12.7	27.8	21.6	1.5	6.8	21.9	56.2	12.5	0	1.2	
139	1.5	3	1	57.5	0.4	20.5	8.7	0.2	0.9	11.1	41.0	42.3	0.1	0	0.2	
140	1.5	2	1.5	57.2	0	21.6	20.2	0.6	0.9	21.2	57.2	51.1	4.1	0.0	0.2	
141	1.5	3	2	55.8	14.8	22.0	23.0	1.9	2.3	11.0	22.0	22.2	2.4	0	0	
142	1.5	2	2	47.3	11.6	49.2	17.2	1.0	0	1.8	12.7	43.4	13.5	8.2	5.1	
143	1.5	2	2	52.5	2.2	47.3	16.4	12.7	4.4	0.2	4.2	27.9	26.5	6.4	10.0	

* H : Helm Adjust, C : Checking Rudder Adjust, W : Weather Adjust

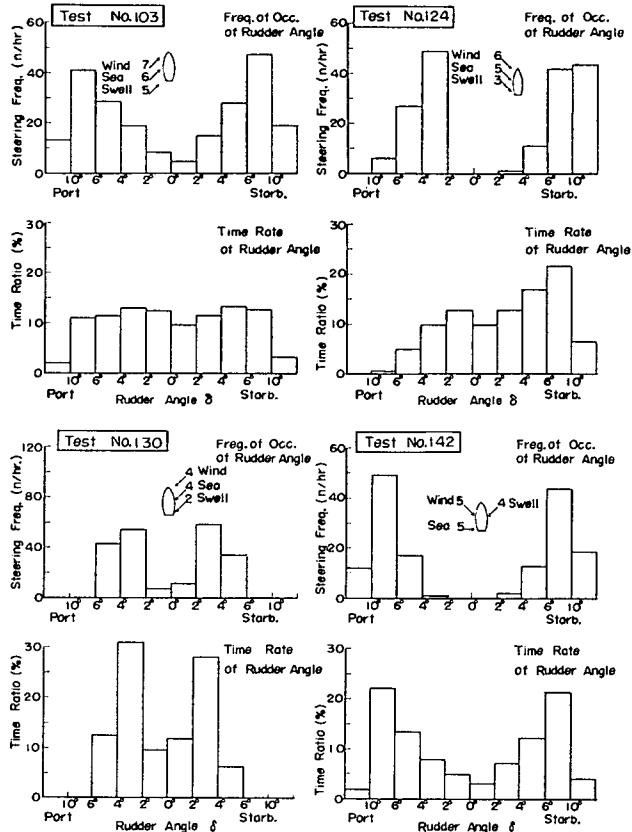


Fig. 5.36 Histogram of Steering Angle and Time Ratio (1)

平均されているものの例であり、風・風浪・うねりを斜め後方から受けているが操舵の偏りはあまりみられない。Test No. 124 は風・風浪・うねりを斜め左前方から受けており、操舵はかなり右に偏っていて、船が風や波の来る方向に向けられるのを修正している様子がみられる。Test No. 130 は比較的静かな海域のもので、操舵角は小さいところに集中している。この場合も風と波は斜め前方から来ており、海面が割合穏やかであるにもかかわらず操舵はやや右に偏っている。

以上の三つの試験結果は、船は向い波・向い風のときの方が追波・追風のときより針路が外れやすいことを示しているようである。Test No. 142 は風・風浪・うねりの方向が異なり、海面が荒れているときのものである。操舵の偏りはあまりみられないが、大舵角を頻繁に使用している様子がみられる。

操舵頻度計測結果のうち、太平洋上におけるものを北太平洋海域とカリフォルニア沿岸海域とに分け、さらにそれぞれを往航と復航とに分けて集計して示したのが Fig. 5.37 である。East-ward total としたのは北太平洋上での往航、west-ward total は同じく復航のものであり、south-ward total と north-ward total はそれぞれカリフォルニア沿岸海域での往航、復航である。これらの図では、北太平洋のような荒れた海域と、カリフォルニア沿岸のような比較的静かな海域との差が明瞭に現われている。往航と復航とではあまり差異がみられない。Fig. 5.38 は前記山隆丸による北太平洋上の頻度計測の結果であるが、これとしあとる丸との結果とを比較すると非常に大きな差異が認められる。山隆丸は全計測時間の 70%~75% が 2.5° 以内の小舵角であり、5° 以上の舵角は 10% に満たない。これに対ししあとる丸は、舵角が 2° 以内にあるのは 20~25% 程度で、4° 以上の舵角の場合が

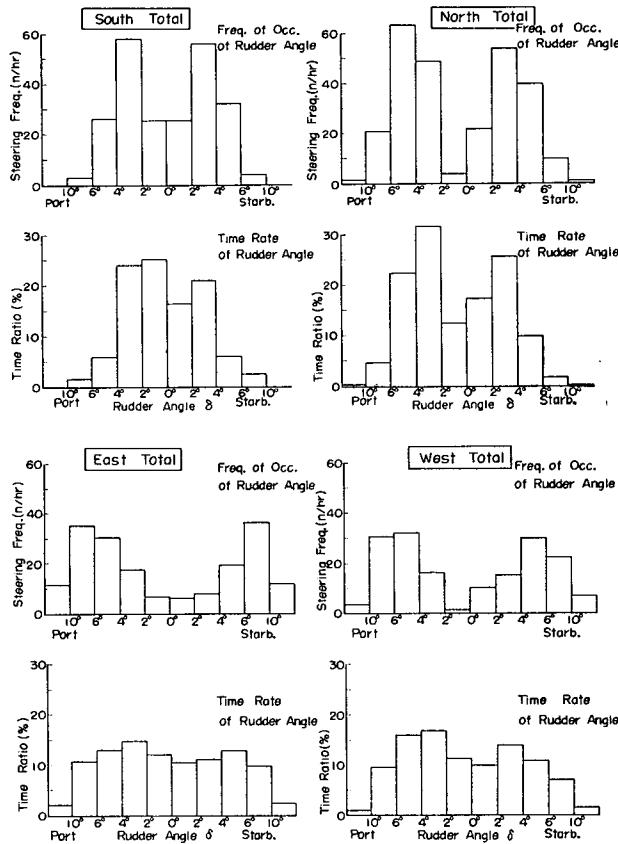


Fig. 5.37 Histogram of Steering Angle and Time Ratio (2)

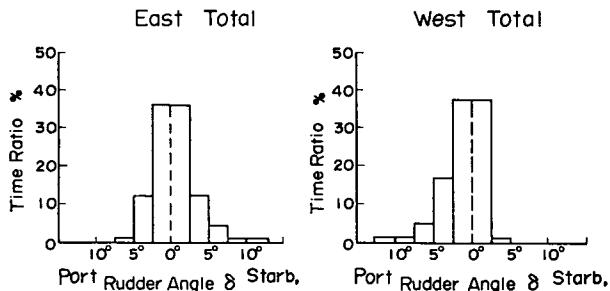


Fig. 5.38 Histogram of Steering Time Ratio of YAMATAKA MARU

50%に達する。さきにZ操舵試験の項に示したように、両船の操縦性能にあまり違いがないことを考えると、その原因は自動操縦装置の調整の使い方の差にあるものと思われる。

5. 6 就航中の馬力増加と船速低下

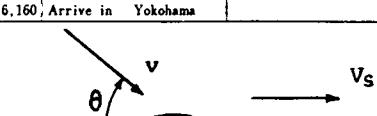
本実船試験は船舶技術研究所との協同実験の形で実施され、機関部関係の諸計測は船舶技術研究所機関性能部によって計測されている。本節ではこれらの計測値により耐航性上の重要なテーマの一つである就航中の馬力増加について若干の検討を加える。

5. 6. 1 計測値

Table 5.12 Power Increase Analysis

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22		
Ship's Conditions etc.				Power, Revolution etc.								Power Increase Analysis											
Test No.	Date	Time	Displacement	Ship Speed	Relative Direction	Relative Velocity of Wind	Pitching Range	Pitching Period	Fuel Handle Notch	Revolution of Propeller Shaft	Torque of Propeller Shaft	Engine Out put	Rate of Fuel Consumption	Power at Calm Sea	Power Increase	Rate of Power Increase	Wind Resistance	Power Increase due to Wind	$P - P_0$	Power Increase due to Wave	Rate of Power Increase due to Wave		
			Δs	V_s	θ	v_w	26p°	Tp sec	N rpm	Q t m	P P.S.	P ₀ kHP/h	ΔP	P ₀ P.S.	P ₀ %	P P.S.	R kg	P ₀ P.S.	ΔP_0 P.S.	P ₀ P.S.	P_0 %		
1965 Dec.31	17:00	12,550	Leave Kobe																				
1 1966 Jan. 1	15:45	18.5 245 7.0 1.9 12.0	108.8	61.6	9,350	165.0	9,110	+ 240	+ 2.63	+ 236	+ 45	9,395	+ 285	+ 3.13									
2 1966 1 10:30		19.0 230 8.0 2.1 21.0	109.6	63.5	9,640	165.5	10,500	+ 860	+ 8.19	+ 720	+ 141	9,781	- 719	- 6.85									
3 1966 1 13:30		19.0 210 7.0 1.5 20.0	109.3	63.1	9,610	165.5	10,500	+ 890	+ 8.48	+ 826	+ 161	9,771	- 729	- 6.94									
4 1966 1 10:30		18.5 240 9.4 5.9 17.0	108.1	62.5	9,420	166.5	9,110	+ 310	+ 3.40	+ 656	+ 124	9,544	+ 434	+ 4.76									
5 1966 1 15:30		18.5 258 9.8 2.5 12.0	108.5	62.8	9,520	163.5	9,110	+ 410	+ 4.50	0	0	9,520	+ 410	+ 4.50									
6 1966 1 15:30		18.5 300 3.6 2.6 18.0	109.1	63.3	9,630	166.1	9,110	+ 520	+ 5.71	+ 125	+ 24	9,606	+ 496	+ 5.45									
7 1966 1 15:30		18.5 60 11.4 5.6 12.0	108.5	64.4	9,740	164.6	9,110	+ 630	+ 6.92	+ 1,250	+ 240	9,500	+ 390	+ 4.28									
8 1966 1 15:30	about	18.5 75 16.3 2.5 12.0	107.0	63.4	9,450	167.0	9,110	+ 340	+ 3.73	+ 427	+ 81	9,369	+ 259	+ 2.84									
9 1966 1 15:30		18.0 60 19.3 3.6 15.0	106.6	64.0	9,500	165.5	8,030	+ 1,470	+ 17.30	+ 3,600	+ 667	8,833	+ 803	+ 10.0									
10 1966 1 11:00		18.5 38 8.7 1.8 12.0	109.0	63.0	9,560	168.0	9,110	+ 450	+ 4.94	+ 1,360	+ 259	9,301	+ 191	+ 2.10									
11 1966 1 11:00		18.6 8 9.7 2.7 13.0	109.3	62.9	9,540	168.5	9,370	+ 170	+ 1.81	+ 1,530	+ 293	9,247	- 123	- 1.31									
12 1966 1 14:30		19.0 282 11.0 1.9 14.0	109.5	63.4	9,680	168.3	10,500	+ 820	+ 7.81	+ 583	+ 114	9,566	- 934	+ 8.89									
13 1966 1 15:30		19.0 - 2.4 19.0	109.3	63.6	9,700	167.5	10,500	- 800	- 7.62	-	-	-	-	-									
14 1966 1 10:00		18.5 0 10.4 1.7 14.0	108.8	63.5	9,620	171.0	9,110	+ 510	+ 5.90	+ 1,740	+ 331	9,289	+ 179	+ 1.97									
15 1966 1 10:00		18.5 - 109.2	63.0	9,620	167.0	9,110	+ 510	+ 5.90	-	-	-	-	-	-									
16 1966 1 14:30		18.5 345 10.5 1.6 13.0	108.2	63.4	9,550	167.8	9,110	+ 440	+ 4.83	+ 1,940	+ 369	9,181	+ 71	+ 0.78									
17 1966 1 7:30	Arrive in Balboa																						
18 1966 1 3:00	12,550	Leave Cristobal																					
19 1966 1 13:00	17.2 0 18.0 2.2 5.0	105.9	61.0	8,930	176.0	6,700	+ 2,230	+ 33.30	+ 5,200	+ 920	8,010	+ 1,310	+ 19.55										
20 1966 1 20:30	18.0 15 14.0 2.0 10.0	108.2	62.0	9,320	171.5	8,030	+ 1,290	+ 16.07	+ 3,470	+ 643	8,677	+ 647	+ 8.06										
21 1966 1 21:30	about 17.8 36 11.9 3.9 6.0	107.2	61.0	9,120	173.0	7,660	+ 1,460	+ 19.05	+ 2,720	+ 499	8,621	+ 961	+ 12.55										
22 1966 1 22:30	12,000 17.5 45 12.7 3.2 6.0	106.2	62.5	9,270	169.0	7,160	+ 2,110	+ 29.50	+ 2,460	+ 443	8,827	+ 1,667	+ 23.30										
23 1966 1 23:30	17.3 90 16.8 6.0 7.0	103.7	62.9	9,090	166.5	6,860	+ 2,230	+ 32.50	+ 680	+ 121	8,969	+ 2,109	+ 30.80										
24 1966 1 21:30	12.6 30 28.0 14.0 9.0 6.5	94.6	60.4	7,970	163.5	(2,300)	(+ 5,670)	(+ 246.7)	+ 14,980	+ 1,940	6,030	(+ 3,730)	(+ 162.2)										
25 1966 1 19:00	12,100	Arrive in Halifax																					
26 1966 1 27 3:00	11,750	Leave Halifax																					
27 1966 1 28 10:30	11,750 18.0 215 6.7 3.6 12.0	104.3	62.9	9,160	164.5	8,030	-	-	-	-	721	- 124	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
28 1966 1 28 16:30	12,000 16.3 15 26.7 3.0 12.0	7.0	104.3	62.9	9,160	164.5	5,580	+ 3,580	+ 64.10	+ 2,110	7,050	+ 1,470	+ 26.30										
Feb. 9 2:00	15,280	Leave Norfolk																					
26 1966 1 10 11:00	about 17.0 315 18.3 3.9 13.0	106.4	-	-	-	-	-	-	-	-	7,800	-	-	+ 4,480	+ 783	-	-	-	-	-	-	-	
27 1966 1 11 13:30	16.8 300 18.2 4.3 7.0	7.0	105.5	64.6	9,460	164.5	7,450	+ 2,010	+ 27.0	+ 2,800	+ 510	8,950	+ 1,500	+ 20.10									
28 1966 1 11 13:30	17.3 270 14.0 4.2 13.0	7.0	107.2	65.6	9,820	162.0	8,300	+ 1,520	+ 18.31	+ 413	+ 74	9,746	+ 1,446	+ 17.36									
29 1966 1 13 09:00	Arrive in Cristobal																						
30 1966 1 13 17:30	Leave Balboa																						
29 1966 1 15 11:45	about 17.2 75 8.0 3.0 24.0	7.0	107.9	64.4	9,700	163.8	8,120	+ 1,580	+ 19.40	+ 90	+ 16	9,684	+ 1,564	+ 19.27									
31 1966 1 20 12:30	Arrive in Los Angeles																						
32 1966 1 23 18:00	16,000 17.2 75 8.0 6.1 8.0	106.0	64.0	9,450	170.5	7,130	+ 2,320	+ 32.6	+ 843	+ 144	9,306	+ 2,176	+ 30.53										
33 1966 1 9 08:00	16,160, Arrive in Yokohama																						

*1)



*2) Po : Including 5% margins for fouling.

*3) $\Delta P = P - P_0$ *4) $P = 100 \times \Delta P / P_0$ *5) $\Delta P_w = \Delta P - P_0$ *6) $P_w = 100 \times \Delta P_w / P_0$

機関部関係の定時計測項目のうち、耐航性に関連のある 軸トルク・軸回転数・燃料消費量等をTable 5.12 中項目 10~14 に示してある。本表には馬力増加の解析に必要な縦揺れ・風速・風向等の諸量も併記してある。

また上記の定時計測のほか、往復航に各 1 回比較的平穏な海況の時を選んで、速力遞増遞減試験を実施したが、その測定結果は Table 5.13 の通りである。なお馬力は $\frac{\text{トルク} \times \text{回転数}}{75}$ として計算してある。

Table 5.13 Results of Progressive Speed Test

	1. Outward Voyage				2. Homeward Voyage			
Date	Jan. 12, 1966				Feb. 17, 1966			
Weather	Cloudy				Blue sky with detached clouds			
Beaufort Wind Scale	4				1 ~ 3			
Wave Scale	3				1			
Swell Scale	1				1			
Diplacement (t)	11,960				14,675			
r. p. m	76.2	92.3	106.0	111.8	76.0	96.1	105.4	110.8
B. H. P.	3,340	5,770	8,750	10,400	3,480	6,970	9,000	10,530
Ship Speed (kt)	14.2	16.5	18.5	19.3	13.0	16.3	17.3	18.3

5. 6. 2 就航中の馬力増加と速力低下の概観

本船の就航中の馬力増加および速力低下の概観をうるために、全計測値について馬力と船速との関係を図示すると Fig. 5.39 の通りである。本図から Test No. 23, 41, 43 のような荒天時には、馬力が 2 倍以上になっていることがわかる。風速、海況との関連をみるために Fig. 5.39 の馬力のスケールを大きくしてみると Fig. 5.40、および Fig. 5.41 の通りである。Fig. 5.40 は絶対風速の風力階級との関連を示したもので、Fig. 5.41 は波浪階級との関連を示したものである。

これ等の海象、気象と馬力増加との関係は、船に対する風および波浪の方向・波長・波高等の要因が関連し合っているものであるから Fig. 5.40, 41 はごく大略的に就航状態の馬力増加の程度を示しているにとどまる。そこで、次項以下で各要因についてやや詳細に解析して見ることとする。

5. 6. 3 Fouling に基づく馬力増加

就航中の馬力増加の要因として考えられるものは、fouling・波浪・風および操舵である。本節ではこれらのうち、まず fouling に基づく馬力増加を Table 5.13 速力遞増遞減試験のデータと新造時の公試運転データとを比較して概略を推定する。

速力試験実施時の本船の排水量は、往航時 $A=12,000\text{ t}$ 、復航時 $A=16,000\text{ t}$ と考えられるので、これらの排水量に対応する馬力曲線を、新造時の推定馬力曲線 Fig. 5.42 から内そうして求めたのが Fig. 5.43 である。この図に本実験中に測定された速力および馬力の測定値が置点してあるが、本図によれば往航時の馬力増加はほとんど無視しうる程度であり、復航時の馬力増加は約 10% 程度である。そして速力試験時の海況はほとんど平穏であるから、海況の影響はないものと考えてよい。したがつ

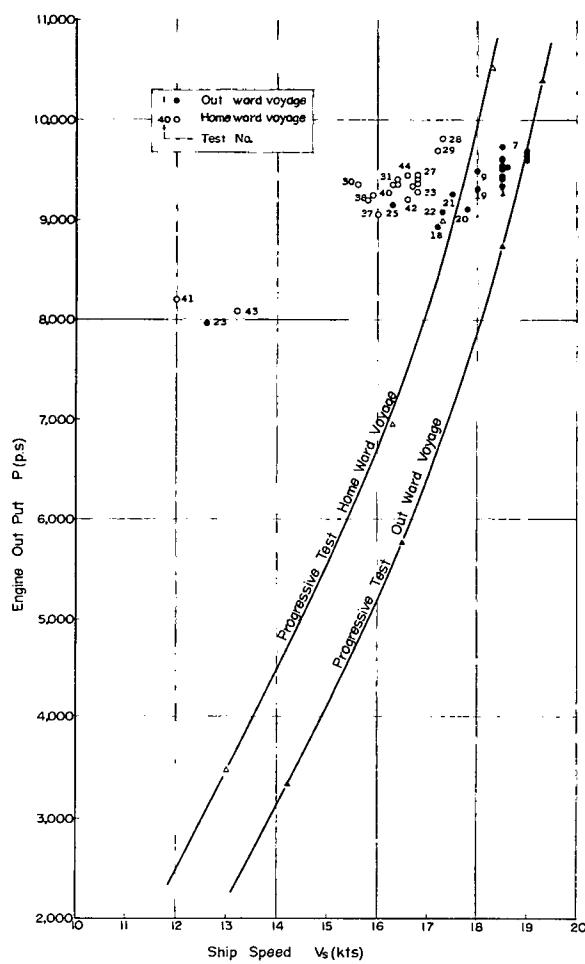


Fig. 5.39 Engine Out-Put versus Ship Speed

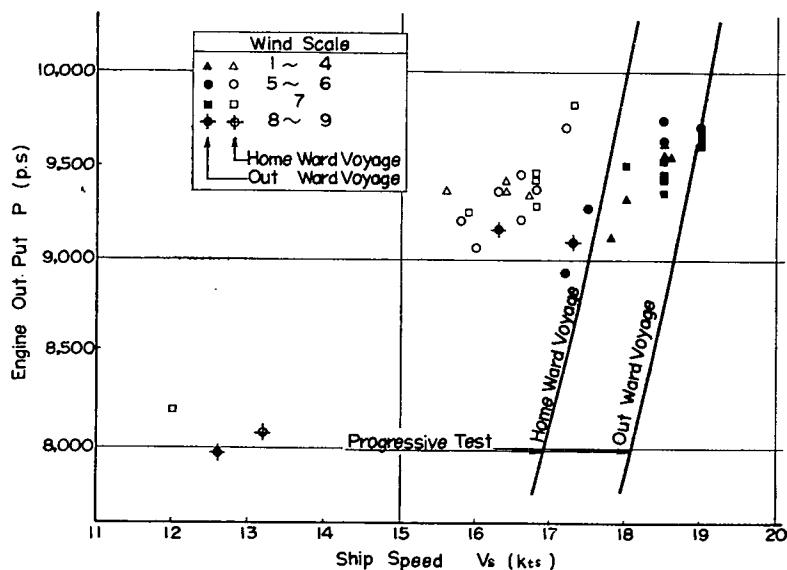


Fig. 5.40 Relation of Speed, Power and Wind Class

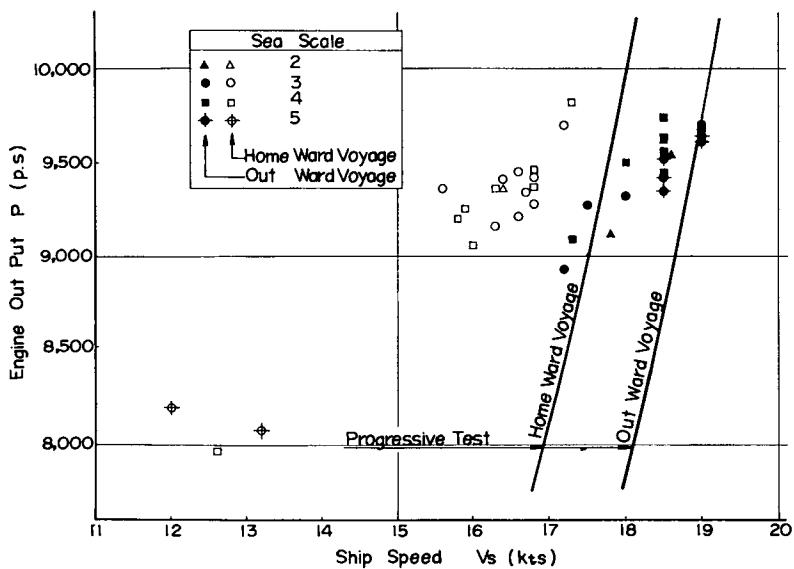


Fig. 5.41 Relation of Speed, Power and Wave Class

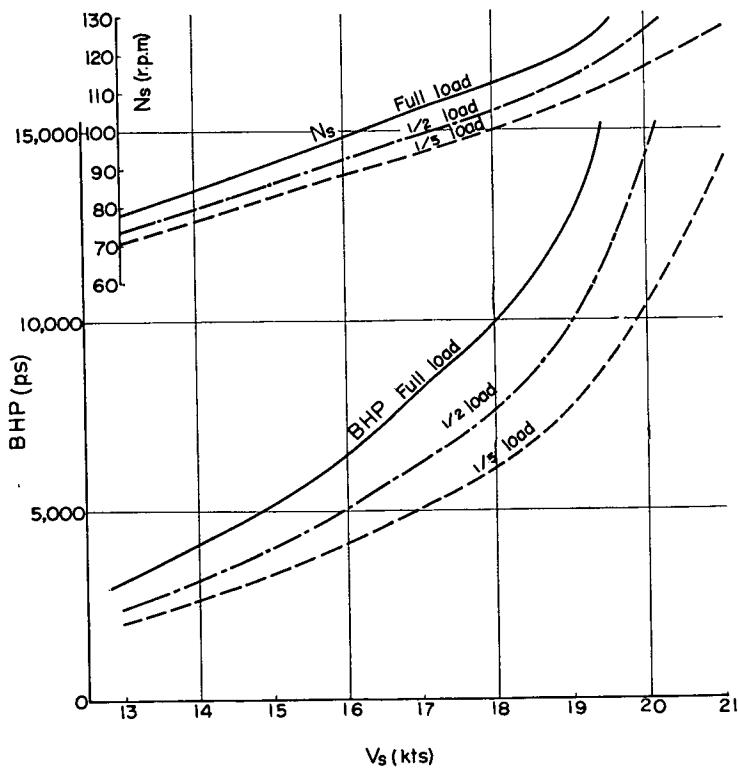


Fig. 5.42 Estimated V-BHP Curve (New Ship)

て新造時との差は主として fouling にもとづくものと考えられる。そこで、測定および解析方法の精度が十分でないことを考慮して、fouling にもとづく馬力増加は往復航の平均と考えると、馬力増加率は約 5 % と見なすことができる。

本船は本航路就航前に入渠しているので、上記の値は経年変化による馬力増加と考えられるが、本船は1959年11月引渡しであるから、本実船試験実施日（1966年1月～3月）までには約6年経過して

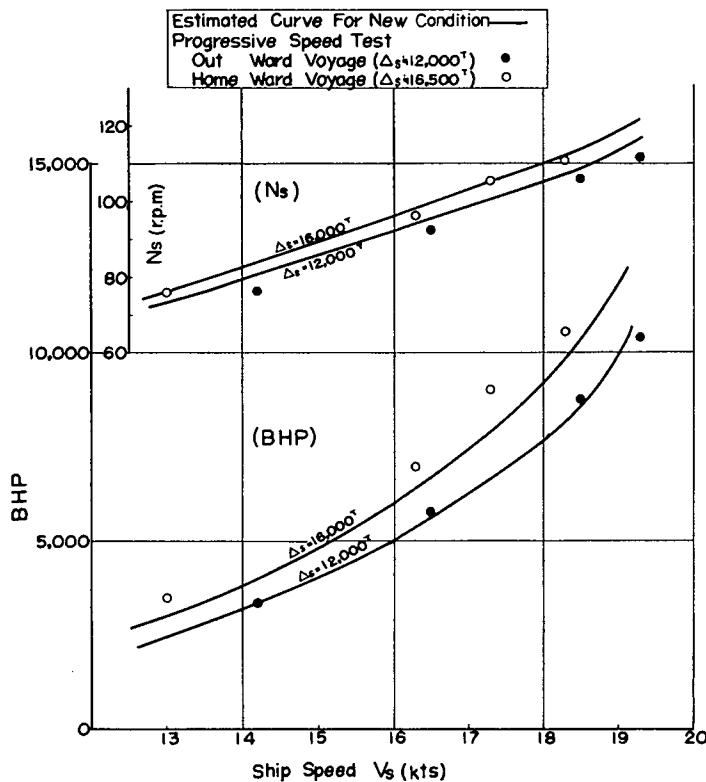


Fig. 5.43 Results of the Progressive Speed Test

いる。故に本船の場合、外板粗度の経年変化に基づく馬力増加は年率約1%と考えられる。この点について「シーマージンに関する調査報告」³⁸⁾によっても、建造後の経過年数1年につき1~2%のアドミラルティー係数の低下が認められるとしているが、今回の実用試験の結果も妥当なものと考えられる。

また「摩擦抵抗の減少に関する調査」³⁹⁾によれば、

1) 剰余抵抗=粘性抵抗

$$2) \frac{\Delta e_i}{e_i} \doteq \frac{1}{3} \cdot \frac{\Delta c_f}{c_f} \quad \dots \quad (5.6.1)$$

$$e_i = \frac{1-w_m}{1-w_s}$$

と仮定した場合、

$$\frac{\Delta DHP}{DHP} = 0.72 \frac{\Delta R_i}{R_i} = 0.36 \frac{\Delta R_f}{R_f} \quad \dots \quad (5.6.2)$$

となる。本船の場合、

$$\frac{\Delta DHP}{DHP} \doteq 0.05$$

であるから、

$$\frac{\Delta R_f}{R_f} \doteq 0.14 \quad \dots \quad (5.6.3)$$

すなわち外板粗度増加による摩擦抵抗の増大は大略10~15%と考えられる。

5. 6. 4 風および波浪に基づく馬力増加

外板粗度增加による馬力増加は前述の通り、本船の場合約5%と推定され、また一方風による馬力増加 P_a は次の諸式で与えられる⁴⁰⁾。

$$\text{ただし} \quad R_a = kc_0 \frac{1}{2} \rho A V_w^2$$

R_a : 風压抵抗

ρ : 空氣密度

A ：水面上船体正面投影面積

V_w : 相對風速

c_0 : 0.7~0.95

k : 風向影響係數

η : 推進效率

V_s : 船速

である。したがって各定期計測における船速に対応する新造時の馬力と計測馬力との差、すなわち全馬力増加から、上記の諸量を計算して差引くと、残りは波浪による馬力増加である。Table 5.12にこれらの値を計算してある。ただし風圧による馬力増加については、

$$c_0 = 0.83$$

$$\rho = 0.125 \text{ (15°C)}$$

$$A \doteq 270 \text{ m}^2 \quad (A = 16,000 \text{ ton})$$

$\doteq 310 \text{ m}^2$ ($A = 12,000 \text{ ton}$)

$$\frac{1}{\eta} = 1.5$$

として計算した。

そこで、このように計算した風圧にする馬力増加を P_a とすると、計測馬力 P から P_a を差引いた量 $P - P_a$ は波浪および操舵の影響を入れた馬力である。操舵にもとづく馬力増加には、風にもとづくものと考えるべき成分が含まれるが、ここでは便宜上これを分離せず、操舵による馬力増加をすべて波浪の影響の中に含ませて考え、この $P - P_a$ を船速に対して表示すると Fig. 5.44 の通りである。本図では sea scale のほかに出会い角度を矢印で示してある。観測された波浪と馬力増加または速度低下との関連は、この程度のデータからは把握しにくいが、向波で sea scale の大きいものほど馬力増加が大きくなる傾向は示している。

ところで、波浪による馬力増加は船の縦揺れ、上下揺れに密接に関連しているが、上下揺れの計測値が得られてなかつたので、縦揺れのみをとり上げてみる。波浪による馬力増加量を縦揺れ振幅に対して置点すると、Fig. 5.45 に示す通りで、飛び離れた点もあるが、縦揺れの増加とともに馬力が増加する状況を明らかに示している。また図中の曲線は、波浪による馬力増加が縦揺れ振幅の自乗に比

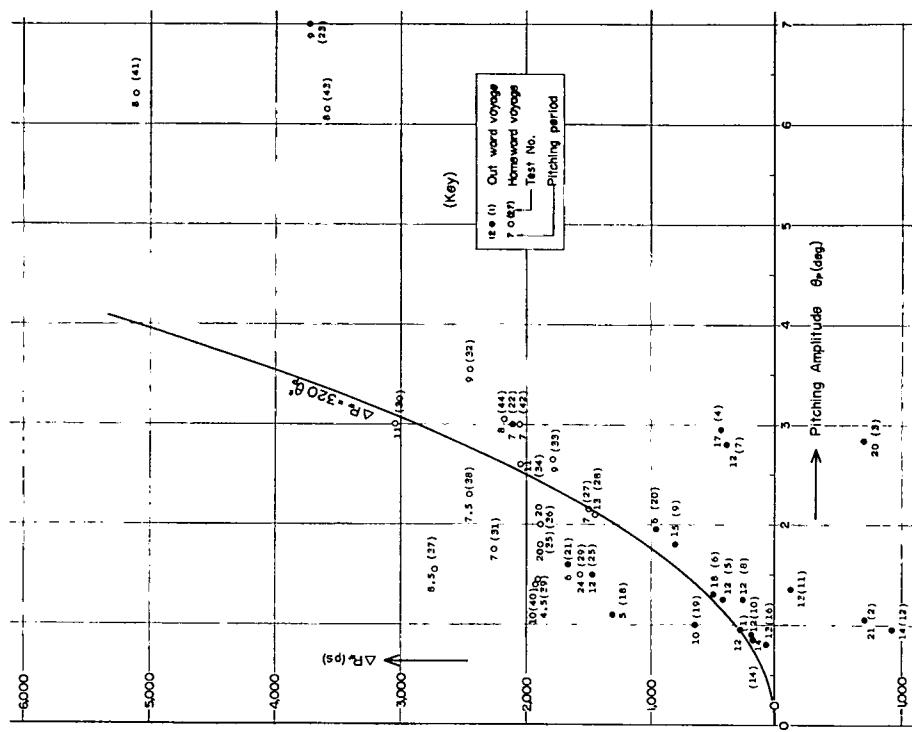


Fig. 5.45 Relation between ΔP_w and θ_p

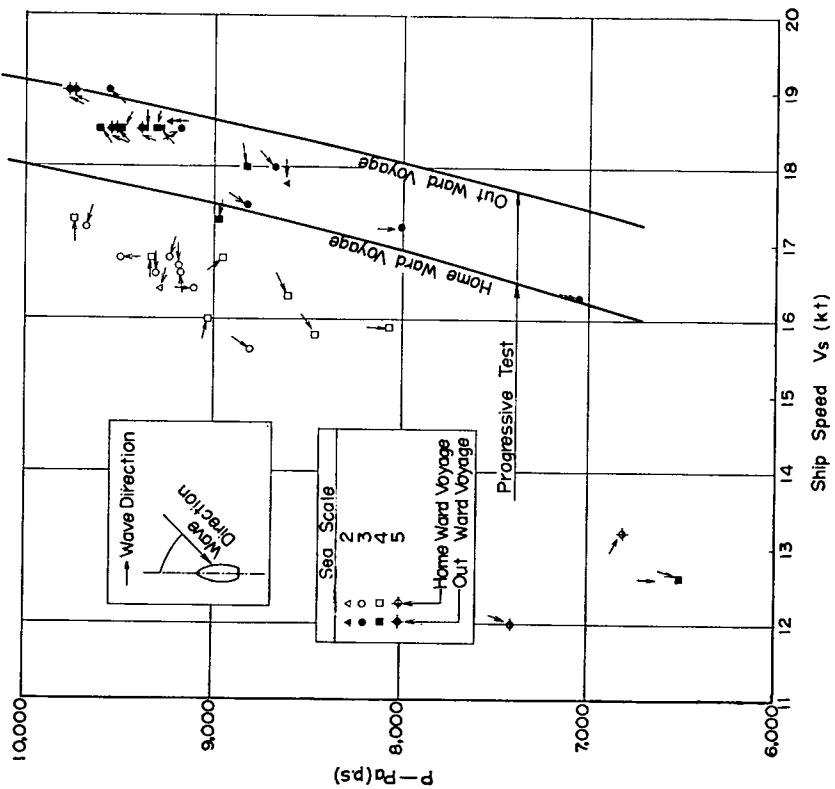


Fig. 5.44 $P - Pa$ versus Ship Speed

例するものとして引いたもので、本船の場合

とすれば、ほぼ計測値を代表することができる。

5. 6. 5 風速と船速低下

造船研究協会第91研究部会第2分科会⁴¹⁾では、1954～1960年間の気象通報資料に基づいて約450隻の船舶について、風速と船速低下との関係を統計的に調査しているので、この調査報告書から本航海実験に対応する資料を引き出して比較してみる。

本船は一般貨物船で船型は船首樓付平甲板船、船長=145m、試運転最高速力=21.083 kt であるから第91研究部会で定義する満載速力は $0.865 \times 21.083 = 18.2 \text{ kt}$ となり、したがって ship group 21 が対応する。そこで同部会と同じ記号法で本船の資料を置点し、ship group 21 と比較すると Fig. 5. 46 の通りである。本図で、実線で結んであるのは第91研究部会の資料である。本図によれば、傾向的には似ているが同部会の結果とは十分よい一致は示していない。これは、本船の資料数が少ないと認め、ばらつきの大きいことを考えれば当然のことである。

	Seattle Maru	SR91 (Group 21)
Head	○	—○—○—
Bow	✗	—✗—✗—
Beam	△	—△—△—
Quarter	□	—□—□—
Follow	⊗	—●—●—

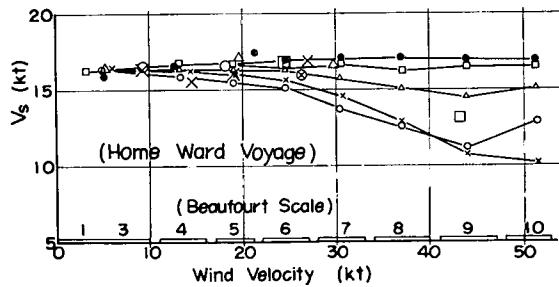
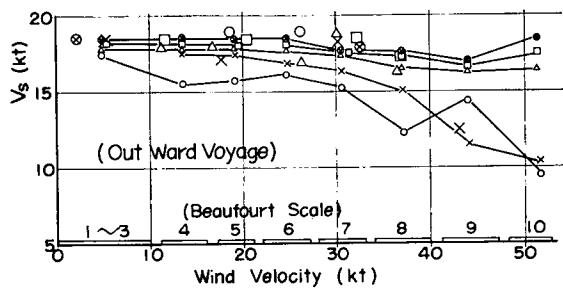


Fig. 5.46 Relation between the Speed Drop and Wind Scale

5. 6. 6 ま と め

本航海によって得られた資料は数においても、また精度においても満足しうるものではないが、これを解析した結果は次の通りである。

- i) 外板粗度の経年変化に基づく馬力増加は約 5 %で、年率にすると約 1 %である。
- ii) 風力階級・波浪階級を指標として馬力増加を整理してもよい相関は得られなかった。
- iii) 風による馬力増加を計算によって求め、これを差引いた残りの馬力増加を波浪による馬力増加とし、縦揺れ振幅に対して置点するとよい相関が得られた。縦揺れ振幅の自乗に比例するすると本船の場合波浪による馬力増加 ΔP_w は
$$\Delta P_w = 320 \theta_p^2 \quad \dots \dots \dots \quad (5.6.5)$$
で表わすことができる。
- iv) 風速と船速との関係を調べ、第91研究部会の資料と比較したところ、傾向的には似ているが十分よい一致は得られなかった。これは本船の資料数が少ないので、ばらつきの大きいことを考えれば当然のことである。

5. 7 就航中の推進効率の低下

就航中の船舶は船体および推進器の汚損、波浪、操舵およびそれに伴う運動、推進器の空気吸込み、空洞現象、レーシング等種々の影響を受けているが、これらの原因と推進効率との関係は詳らかでない上、航海実績からこれらの個々の要因を量的に把握することは甚だ困難であるため、就航中の推進効率の解析には、いくらかの不確定要因が混入してくることになる。ことに本船の場合は、推進器単独性能が不明であるので、解析をさらに困難にした。このような不確定な要因に対しては、合理的と考えられる仮定を設けて解析を進める必要があるが、仮定のおき方によっては解析結果にかなりの相異が出てくる。

以下に述べる解析結果は、本節全体を一貫した思想のもとでの解析にはなっていないが、本節ではそれにこだわらず、異なった立場での解析を並列的に述べることとする。

なお以下の解析では、航海中の馬力は、測定されたトルクと回転数の数分間の平均値から NQ/75 として求め、航海中の船速は船底ログによる測定値を使用している。また、新造時の試運転の数値は、実際の試運転成績であって、標準解析はしていない。

5. 7. 1 伴 流

(1) 推進器は清浄であり、open 特性は不变で、比較的平穏な海面では推進器効率比も不变であると仮定し、推進器の open 特性は判らない場合

就航中の計測値および新造時の試運転成績 (Table 5.14) から

$$K_q = Q / \rho n D^5, J' = V_s / n D \quad \dots \dots \dots \quad (5.6.6)$$

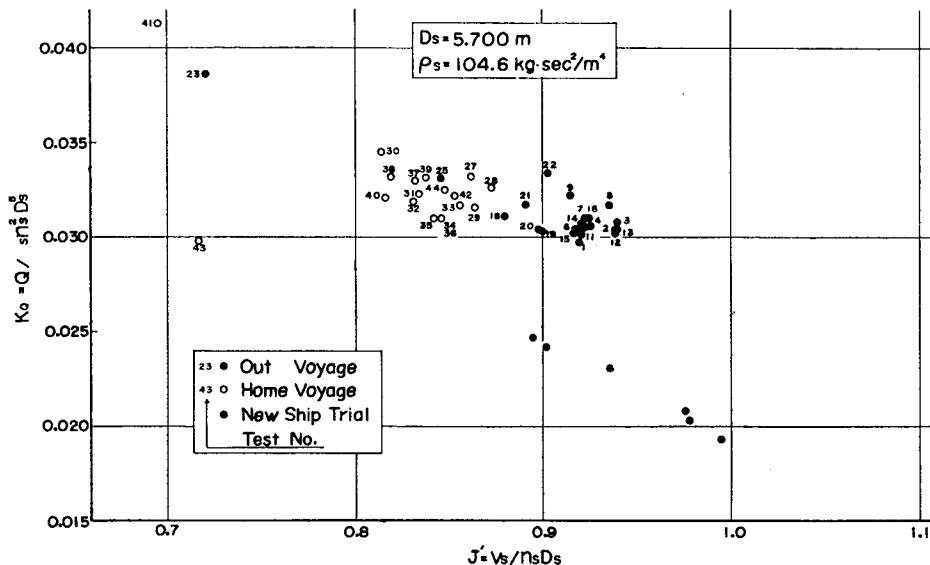
を計算し、Fig. 5.47 のようにプロットする。ここに、 J' はプロペラの前進速度 V_a の代りに船速 V_s を用いた前進係数である。このようにプロットしたものの中、比較的平穏な海面（うねり波高 2 m 以下）を取出すと Fig. 5.48 のようになる。

就航中のデータと試運転時のデータの間には明らかな差があるが、(1)の仮定のもとでは、この差は就航中と新造時との伴流 (wake) の差に帰因するものと考えられる。すなわち、 K_q は J に比例すると考えれば、 $K_q \sim J'$ 表示における直線は、 $J' = 0$ で 1 点に交わり傾斜は $1 - w$ に比例する放射線群となる。

すなわち、Fig. 5.48 のデータから、航海実績および試運転時の各々について、上記の条件を満する

Table 5.14 Results of Trial Speed Test at Newly Built Condition

Date	Nov. 2, 1959		
Sea State	Smooth		
Ship's Condition	Draft	For'd	3.528 m
	Aft		5.766 m
	Displacement		8,085 t
Propeller	Diameter	5.700 m	
	Pitch	5.268 m	
Engine	Power	12,000 BHP	
	Revolution	118 rpm	
1/4	15.514 kt	84.4 rpm	2,910 BHP
2/5	17.502	96.8	4,630
1/2	18.598	103.1	5,719
3/4	19.850	114.9	8,814
M.C.R.	20.812	125	11,885
Max.	21.083	127.7	12,921

Fig. 5.47 Relation between K_Q and J'

ように ($J'=0$ での K_Q の値は本船の推進器要目から推定した性能曲線 Fig. 5.49 の値をとり, K_Q は J に対して直線的に変化するとした) 平均線を引き, $\frac{\partial K_Q}{\partial J'}$ を求め, それぞれ指標 S および T で表わすと,

$$\frac{1-w_S}{1-w_T} = \left(\frac{\partial K_Q}{\partial J'} \right)_S / \left(\frac{\partial K_Q}{\partial J'} \right)_T \quad \dots \dots \dots \quad (5.6.7)$$

となり $(1-w_S)/(1-w_T)$ が求められる。

本船の航海実績データはかなりばらついているが, かなりに Fig. 5.47 に示すような代表線についてこの値を計算してみると,

$$\frac{1-w_T}{1-w_S} = \frac{0.028}{0.020} = 1.4$$

となり、就航中の $1-w$ は新造時の $1/1.4$ になっていることになる。

(2) 推進器の open 特性を仮定し、推進器は清浄であり、open 特性は不变で、比較的平穏な海面では、推進器効率比は不变であるとした場合。

本船の推進器の open 特性は判らないが、推進器の要目 (Table 5.15) から近似的な推進器性能曲線を Troost series のデータから求め、これにより伴流解析を行なうと次の通りである。

得られた推進器性能曲線は Fig. 5.49 に示すが、以上のように近似的に求めたものであるから、翼型、ボス比、breadth thickness ratio などは本船の推進器とは異なる。この性能曲線により、公試運転時および就航中の計測値のうち、比較的海面の平穏なデータ（うねり波高 2 m）以下のものを解析すると Fig. 5.50 の通りである。

これによれば、新造時は

$$1-w_{mean} \approx 0.78$$

程度であり、就航中のデータによれば、

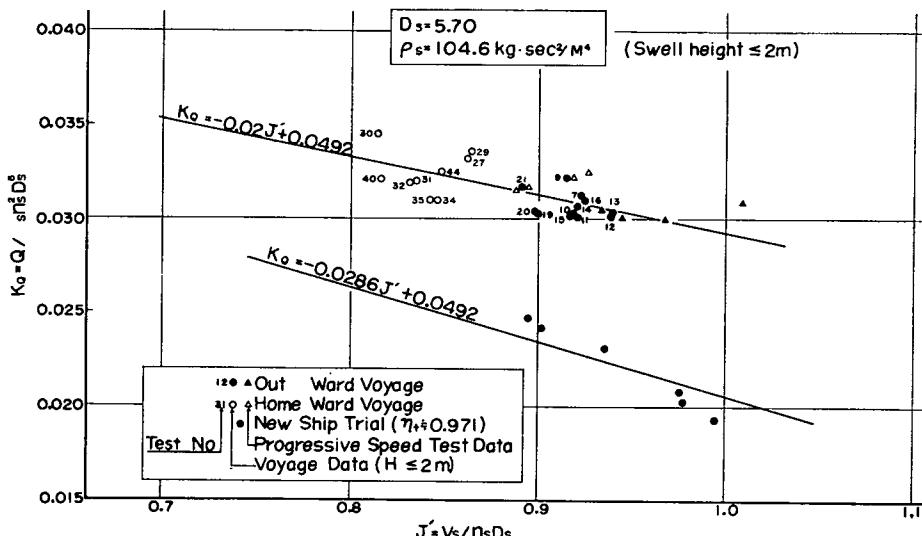


Fig. 5.48 Relation between K_Q and J' (Swell Height ≤ 2 m)

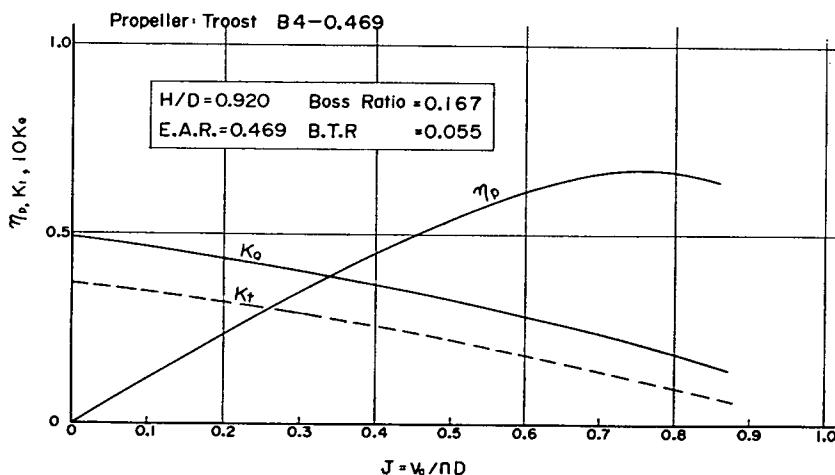
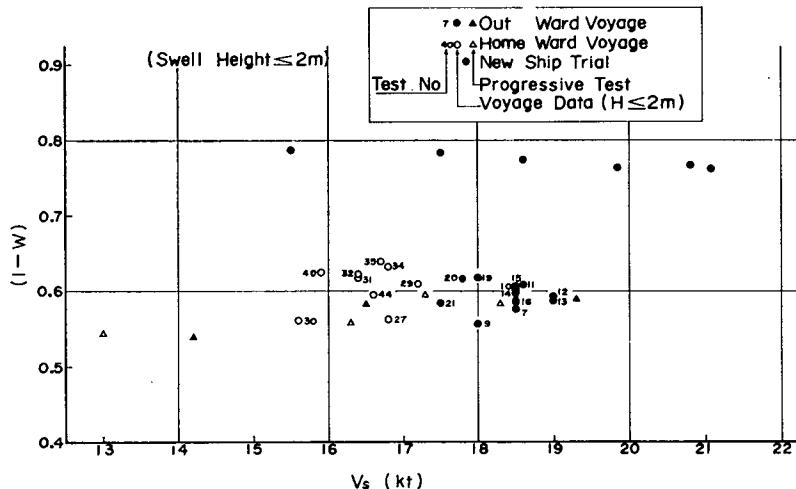


Fig. 5.49 K_Q , K_t and η_p of an Assumed Troost Series Propeller

Table 5.15 Particulars of Propeller

Blade Number	4 (built up)
Type	Mitsubishi Type
Diameter	5.700 m
Pitch	increase
Pitch Ratio	0.925
Exp. A. R.	0.469
B. T. R.	0.0658
Boss Ratio	0.2385

Fig. 5.50 Wake versus Ship Speed (Swell Height $\leq 2m$)

$$1-w_{mean} \approx 0.6$$

程度になっている。したがって $1-w$ の比は 1.3 程度である。(1)と比較すると、同じ対象を別の方で求めただけであるから、 $1-w$ の比が同程度の値となることは当然である。

(3) 推進器の open 特性を仮定し、就航中の推進器は汚損しており、open 特性は新造時と就航中とでは相異しているとし、推進器効率比は比較的平穏な海面では不变であるとした場合。

前記の(1)(2)では、推進器は清浄であり、就航中でもその open 特性は変わらないものとして、伴流解析を行なったが、その結果では就航中の伴流はかなり大きい。船体汚損による馬力増加は、前節で述べたようにたかだか 10~15% 程度であり、伴流の増加量はこれより小さいと考えられるから、航海中では、推進器表面粗度の増加のために、その特性が変ったと考える方が実際に近いのではなかろうか。そこで二三の仮定のもとに汚損推進器の特性を推定し、これにより解析してみることにする。

推進器の粗度による open 特性の変化については、いくつかの実験資料があるが、本船の推進器の汚損状況がはっきりしないから、大体ありそうな order を推定するほかはない。Ferguson⁴¹⁾によると、粗度が増すと K_q と K_r との関係は平行にずれており、 ΔK_q , ΔK_r は一定のようである。また「やよひ丸」の実験結果⁴²⁾によると、0.6~1.0 mm のゴムの突起がプロペラ半径の内側 $\frac{1}{3}$ ~ $\frac{2}{3}$ を覆ったとき $\Delta K_q \approx 0.004$, $\Delta K_r \approx 0.02$ である。

そこで、Fig. 5.49 の推定性能曲線に対し、これだけの粗度修正をして、航海中の推進器性能曲線を作ると、Fig. 5.51 の通りとなる。航海中のデータは、この性能曲線により伴流を求めるところ Fig. 5.52 の通りで、新造時について解析した Fig. 5.50 の伴流と比較して、ほぼ合理的な値を示してい

る。

以上の結果からみて、実際の推進器表面の粗度はわからないが、少なくとも推進器を清浄と考えるよりは汚損していると考えた方が、実情に即しているようである。

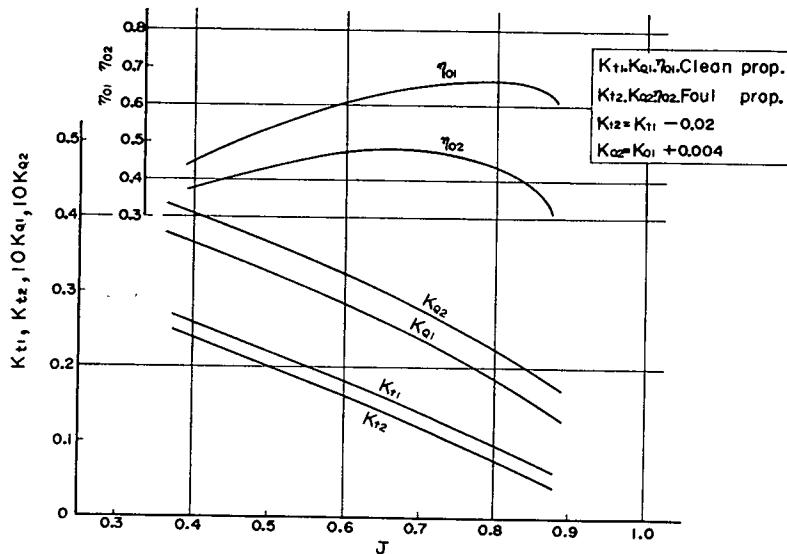


Fig. 5.51 Assumed Characteristics of Foul Propeller

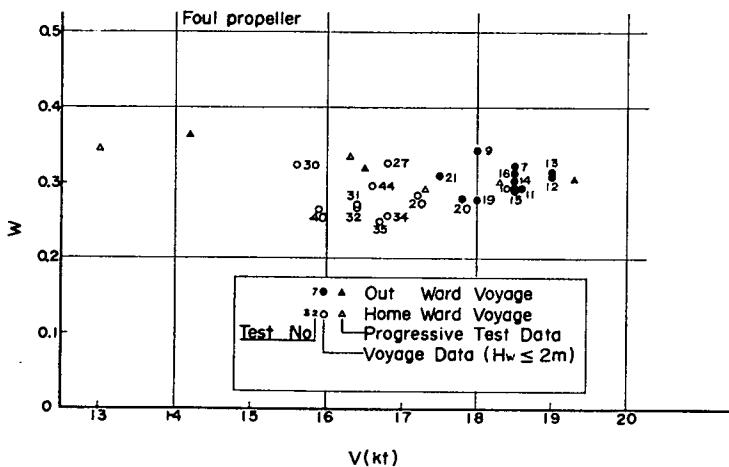


Fig. 5.52 Wake versus Speed (Foul Propeller)

5. 7. 2 推進器効率比 (relative rotative efficiency)

(1) 航海中の推進器特性はわからないが、その open 特性は航海中を通じて変わるものとし、伴流率 (wake fraction) は全航海中不变であり、比較的平穏な海面 (波高 2 m 以下) での推進器効率比は一定であるとする。

ここでは以上の仮定のもとに荒れた海面での推進器効率比の低下率を $K_Q \sim J'$ 表示から求める。前に示した Fig. 5.48 の比較的平穏な海面でのデータの平均線を K_{QM} とする。伴流率は全航海中不变としているので、同一の J' に対する K_{QM} と、観測された K_Q との比率は、波浪による η_r の変動を示していることになる。 K_{QM}/K_Q を e_r とし、荒れた海面における馬力増加を示す示標として、縦

揺れ振幅 θ_p に対して置点すると, Fig. 5.53 の通りである。荒れた海面でのデータが少ないと, 基準にした平穏な海面のデータがかなりばらついているので, 本図から η_r の低下率を量的に表現することはさしひかえるとしても, 大体の傾向は示しているものと考えられる。

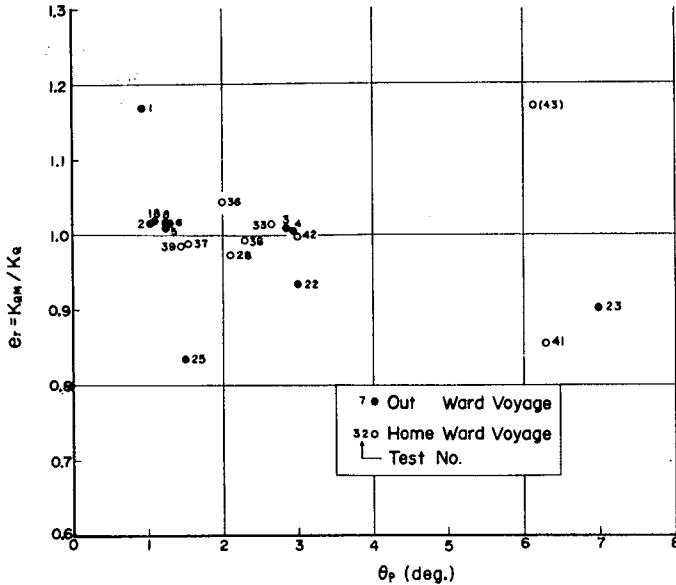


Fig. 5.53 Drop of the Relative Rotative Efficiency

なお Test No. 43 は荒れた海面であるにもかかわらず, η_r が増加しているようになっているが, 同種の測定値と比較してみると測定値そのものに疑問があるので括弧付としてある。

(2) 推進器は汚損しており, 汚損推進器の特性は Fig. 5.51 の通りとし, この特性は航海中不变であり, 速力試験時の $\eta_r=1$ とした場合。

推進器の特性がわかっているとしているので, 谷口氏の方法⁴³⁾に準じて解析する。ここで推進器特性として, 清浄推進器のものでなく汚損推進器のものを使ったのは, 伴流解析の項で示したように, 推進器が清浄であるとすると新造時と航海中とで伴流の相違が大き過ぎるからである。

解析の方法は次の通りである。

- 1) 速力試験データと推進器特性曲線とから速力試験時の平均伴流率を求める。また, 速力試験時のスラスト T_T を求める。
- 2) 1)で求めた平均伴流率を用い, 推進器特性曲線から就航中の各観測値に対応するスラスト T_s よび $K_{Q\cdot open}$ を求める。
- 3) 就航中の各観測点における推力増加率 $\frac{dT}{T_T} = \frac{T_s - T_T}{T_T}$ を 1) 2) から同じ V_s に対して求めること。
- 4) 就航中の各観測値から求めた $K_{Q\cdot service}$ と $K_{Q\cdot open}$ とから $e_r = K_{Q\cdot open} / K_{Q\cdot service}$ を同じ I に對して求める。
- 5) 以上の結果から $4T/T_T$ に対して e_r を置点する。

このような方法によって得られた図が Fig. 5.54 である。この結果には, 比較のために日聖丸の資料についての谷口氏の解析結果⁴³⁾を転載してあるが, 本船のデータがばらついている点はあるが,

大体似た傾向を示している。また(1)で述べた解析結果と比較しても、 e_r の値としてはほぼ同じ程度になっている。

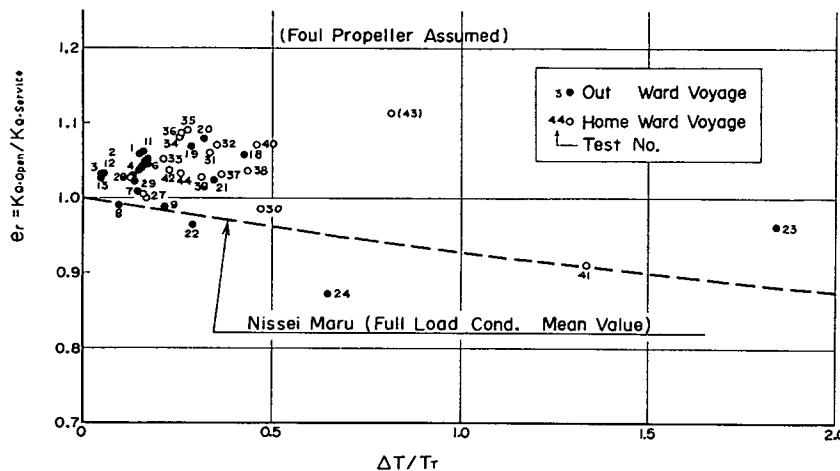


Fig. 5.54 Relation between e_r and $\Delta T/T_T$ (Foul Propeller Assumed)

5. 7. 3 推進器の汚損と荷重変化に伴なう推進器効率の低下

推進器効率は、推進器の汚損による効率低下と、船体抵抗が増大したために推進器の荷重が変化し、従ってその作動点が移動したことによる効率低下が考えられる。本船の場合、前節に示したように、推進器は清浄でないと考えた方が実際の状況に対応しているようであるが、汚損の状況が判らないので、具体的にどの程度の効率低下になっているかは判らないが、前節で使用した汚損推進器特性からみて、ある程度効率は低下しているものと考えられる。

また荷重変化に伴なう推進器効率低下についても、同じ特性曲線（汚損推進器）を使用して η_p を求め、縦揺れ振幅 θ_p に対して置点すると Fig. 5.55 の通りで、 θ_p を基準に取ればかなりよくデータを整理することができる。

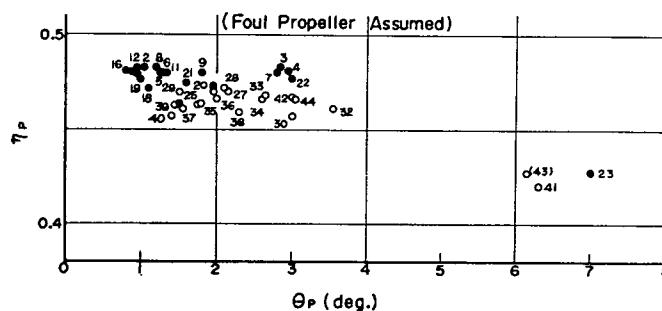


Fig. 5.55 Relation between η_p and θ_p (Foul Propeller Assumed)

5. 7. 4 ま と め

資料の不足を補うためにかなり大胆な仮定のものに解析を試みたが、これらの結果をまとめると次の通りである。

- 1) 二、三の方法で伴流解析を行なったが、推進器が清浄であるとした場合には航海中の伴流が大

きくなり過ぎ、むしろ汚損推進器を仮定した方が実情に合うようである。

2) η_r について一、二の方法で解析し、荒れた海面でのデータが少ないが、その低下の傾向を把握した。

3) 波浪中の抵抗増加に伴ない、推進器の荷重度が増加するが、そのために荒れた海面では η_p はかなり低下している。また縦揺れ振幅 θ_p を基準に取ればかなりよくデータを整理することができる。

5. 8 計器の故障その他

5. 8. 1 計器の故障と信頼性

実船計測用の計測機器としては、さきに第2章でも述べたように、一方では完全な自動化と信頼性の向上をはかり、他方では極度の簡易化をはかることによって、特別の計測要員の乗船を必要としないで、多数のデータが蒐集できるようなものが望ましい。今回の試験に用いた計測および記録装置は、その特性の点でもいくらか改良すべき点が残されているが、長期間の信頼度と安定性という点でも多くの問題があるようであった。陸上では問題とならないような簡単な故障でも、洋上または国外での使用という特殊条件のため、補修部品の入手難その他の理由で修理不能となつたものも多く、無人計測への道遠しの感を深くせざるを得なかつた。

個々の部品の耐用性、信頼性を高めることはもちろんあるが、特に舶用計器としては、振動・湿気・塩分などの条件に対して特別の注意が払わなければならぬと痛感した。故障部品の交換なども、未熟練者にも簡単にできるようなユニット方式の予備部品を備えることが望ましい。

5. 8. 2 曜航式波浪計の損傷

今回の試験で大きな重点を置いていた曳航式波浪計は、1月2日投入日に重大な損傷を起し、残念ながらその後の波浪計測は不可能となつた。

フロート本体の後部についているゴムノーズのバンド固縛部が損傷を起して、高速水流を巻込み予想外の強い力で引張られたものらしく、後部のワイヤロープが切断して後半のゴムノーズが流失してしまつた。当時波高は約4mの追波で、船速は19ktであった。

幸いに本体には損傷なく、完全な状態で回収できたので、内部の波傾斜検出装置を、動搖計故障時の代用として用いた。

強度的にもまだ研究不十分の点があったようであるが、運動性能的にも問題があるようで、高速曳航時の挙動については今後一層の研究が必要と思われる。

5. 8. 3 索側水位計の故障

超音波式の索側水位計は、往航は一応順調に作動したが、復航時損傷を起して部品交換もできず、復航の計測は全くできなかつた。故障原因は不明であるが、ニューヨーク入港直前に寒波に遭つて相当の着氷現象をみて以来のことである。往航の計測においても精度の点で若干の疑問があり、残念ながら波浪に関する計測はすべて目視観測のみに頼ることになつてしまつた。

5. 8. 4 風向風速計の電波妨害

風速計のプロペラに連結された発電機から発するノイズが、本船の無電受信に致命的な妨害を与えた。

ることがわかったので、リード線の取替え、シールドの強化などいろいろ対策を試みたが、改善することができなかった。ついにプロペラを罔縛して回転を止め、風速の計測は断念し風向の計測だけとした。このような現象はこれまでたびたびの実船計測でも経験がなく、前年度の北斗丸の計測でも同一計器でいさかの異常も認められなかつたものである。風向風速計の取付位置が本船の受信アンテナに比較的近かつたこと以外には原因が考えられない。

5. 8. 5 本船電信の干渉

本船側から無電を発信する場合に、その信号音に合わせて計測室内の電源が大幅に攪乱される現象がみられた。電磁オシログラフはきわめて大振幅のノイズを記録し、頻度解析器はでたらめな計数をしてしまってそれまでの計数が全部無効になることがしばしばあった。これもいろいろ対策は講じたが根本的に解決することはできず、結局無電の休止時間をねらって計測を行なうこととした。これも従来の実船試験では経験しなかつた現象である。

結 言

「船舶の耐航性に関する実船試験」の題目のもとに行なわれた研究の詳細は以上に述べたとおりである。

われわれは研究目的を、(1)実船試験に関する計測記録および解析処理の一貫システムを開発する、(2)船舶の多くの応答の相互関連を求め、耐航性を代表する指標を求める、の2点に集約した。

目的の(1)については、現時点を考えられる最適の計測・記録および解析のシステムのあり方を考察し、その例を実現し、これを用いて実船の記録をとることができた。実験実施上予想外の事故のため記録は必ずしも完全ではなく、資料数も十分とはいえないが、所期の目的は一応達成せられたものと信ずる。もちろん、実船実験の方法・計測システムおよび機器に改良・開発を要する点は多々あり、これはのちに再記するとおりである。

目的の(2)については、個々の相互関係をいくつか発見し得たけれども、資料の不足と時間的制約から結論を見出すには至らなかった。この点は甚だ残念である。

本研究の成果は個々の章、節に示されたが、そのうち主要なものを改めてかかげると次のとおりである。

(1) 実船試験のシステム開発に関する事項

一貫処理システムは急速な進歩の途上にあり、最終的なものが確立されたとはいはず、今日の時点で考えられる未来の型式の種々について、その片鱗をうかがうことのできるものも現われている。本研究ではこのような情勢を考慮し、経済的・時間的制約のもとに、A-D変換、演算計算機等は既存の設備をシステムの一環として流用し、研究目的と計測変換器の現状を考慮して、これにアナログ・磁気テープ式データ集計装置・頻度解析装置等を加え、一応現実的なものを作り上げた。

結果は該システムに固有の欠陥や思わぬ故障等もあって、必ずしも完全なものが得られたとは考えないが、システムの各部にわたってきわめて多くの教訓をうることができ、かつ一応、計測・記録・解析の一貫処理システムとしての機能を果たすものをうることができた。

(2) 計測とその解析結果に関する事項

船体運動

i) スペクトラム解析の結果、従来知られている横揺れ・縦揺れ特性をコレログラム・スペクトラムの面から再び明らかにすることができた。

ii) 船首加速度のスペクトラムから得られた加速度の $1/\omega^2$ 最高期待値は、航海中もっとも荒れたときに $0.65 g$ にも達し、現実に記録された値もほぼこれに近い大きさである（スラミング等非線型な応答は除く）。

iii) いわゆる8角航走を行なって縦揺れ・横揺れのスペクトラムを調べた。このとき風浪とうねりとがほぼ90度ずれていたためもあり、航走方向のいかんにかかわらず、縦揺れ成分の中には横揺れ固有周期と同じ周期の成分がかなり大きく含まれた。このような航走試験では、船の応答の特性を見出すために、波浪を正しく把握する計器の必要性が殊に痛感された。

iv) 代表的な例につき、船の縦揺れ・上下揺れの応答特性をストリップ理論によって推定し、これ

にそのときの風の観測値をもとにして I.S.S.C. スペクトラム・I.T.T.C. スペクトラムを決定し、両者から縦揺れ・上下揺れスペクトラムを計算した結果は、実測値ときめてよい一致を示した。もしストリップ理論が応答特性をよく表わすものと考えれば、I.S.S.C., I.T.T.C. スペクトルは open sea での現実の海面状態をよく代表するものであるといえる。

逆に波浪に前記の標準スペクトルを用い、船体応答をストリップ理論で計算し、open sea での動揺の応答を求めるとき、この結果から最高値・異常値等の統計的推定値を線型運動の範囲でかなり的確に推定することが可能であるといってよい。

船体応力および波浪荷重

船体中央部の波浪曲げ応力、およびこれから換算した波浪曲げモーメントの振幅（片振幅）の、各試験番号ごとの短期頻度分布および R.M.S. \sqrt{E} を求めた。 \sqrt{E} の値およびヒストグラムの形は、海象・気象・船速・出港角度・載貨条件などによって大幅に変るものであり、またこれらの外界条件がほぼ同じであっても相当大きいばらつきを示すものである。観測数が少ないのであまり細かい条件の分類はできないが、もっとも大きい影響因子である波高について整理して \sqrt{E} の平均的な傾向を求めた。

その結果は国内外にこれまでに行なわれたいくつかの実船計測結果の傾向ともほぼ一致し、近似解析式によって電子計算機で求めた推定値とも比較的よい一致を示している。したがって、波浪に関する長期の統計資料さえあれば、上記の短期分布の計算値を用いて、波浪荷重の長期分布をある程度正確に推定することができるといってよい。本船についても、過去10年間の北太平洋の波の観測資料を用いて、長期分布を試算してみた。

機関室内のフレームについて横応力の計測も行なったが、この応力値と横方向荷重との関連については、理論解析もきわめて困難なので、ここでは動揺との相関を検討する程度に止めた。

船体運動と応力との相関

- i) 見かけの振幅の頻度分布をレイレイ分布と仮定して推定した船の縦応力・横応力の分散は、スペクトラム解析の際得られる分散の値と一般によく一致する。一致しない原因の一つとして、レイレイ分布からのズレが考えられるが、船体設計の立場から無視してもよさそうである。
- ii) 縦応力と縦揺れ、横応力と横揺れは互に密接に関連している。
- iii) 縦応力と横揺れ、横応力と縦揺れとは互にほとんど無相関である。
- iv) 横応力のスペクトラムには横揺れ周波数における大きなピークのほかに、横揺れ周波数の2倍の周波数にも明らかなピークが認められる。
- v) 横および縦応力エネルギーの存在する周波数範囲は、動揺エネルギーのそれより高い周波数にわたっているが、上限は意外に低く、周期でいって3 sec 以下の成分はほとんどない。

操縦性能

- i) 平穏な海面で3種の舵角についてZ操舵試験を行ない、旋回性能指数 K' および針路安定性指数 T' を得た。この $K' \cdot T'$ はこの級の貨物船として問題点のない値と考えられる。
- ii) 自動操縦装置の応答試験を行なった。helm adjust (設定針路からの角変位に比例した操舵)、checking rudder adjust (回頭角速度に比例した操舵) および weather adjust の組合せを変えて8回の計測を行ない、weather adjust を大きくすると舵振幅が急に大きくなり、操舵が発散し易く

なること, checking rudder adjust は helm adjust を大きくしたときの制御系の不安定化を防止する効果があることなどを実証した。ただし, 試験回数不足のため, 操舵の発散する限界を明らかにすることはできなかった。

iii) 大洋航行中の本船の操舵時間頻度を調べた結果によると, 舵角 2 度以内にある時間率は 20~25 %, 4 度以上の舵角をとっている時間率が 50% に達している。

iv) 操舵回数頻度計測結果によると, 4 度以上操舵を行なう場合は全操舵回数の約 70% に達し, 平均操舵周期は 30~40sec である。これは昭和 38 年に貨物船山隆丸で行なわれた結果に比べ非常に大きい。本航海は比較的平穏であり, 本船の操縦性指数が普通であったことを考えると, 本船の操舵はやや異常で, その原因は自動操縦装置の調整にあったものではないかと推定される。

馬力増加と船速の低下

i) 外板粗度の経年変化にもとづく馬力増加は, 新造時に対し約 5% で, 年率 1% 位となっている。

ii) 荒海中における馬力増加から, 風圧抵抗に対するものを除いたものを ΔP_w (P.S.) とし, 縦揺れ振幅を θ_p (deg) とすると, 本船の場合両者の関係はほぼ

$$\Delta P_w = 320 \theta_p^2$$

で表わすことができる。

iii) 風速と船速低下の関係は, SR. 91 の資料と傾向的には一致している。

就航中の推進効率の低下

i) 本船の推進器単独性能は不明であるが, これが新造時と変わないとすると, 伴流率が不当に大きく変化したと考えなければならない結果となった。

ii) 推進器表面粗度が単独性能を変化させ, K_q において 0.004 の増加, K_r において 0.02 の減少があったとすると, 航海中の伴流率は約 0.30, 新造時は 0.22 となりかなり改善される。

iii) 前記 ii) の仮定のもとに, 谷口の方法で推進器効率比の低下を推力増大に対して求めると, 結果は日聖丸の資料と大体似た傾向を示した。この低下の傾向は, これを別の方法で求めて θ_p に対して置点しても同様の結果が得られた。

iv) 伴流率が不变とし, 仮定された推進器単獨特性から推進器効率 η_p を求めて, θ_p に対して置点すると測定点はかなりよく 1 本にまとまり, θ_p の増大とともに η_p が低下する。

今回の実船試験によって種々の成果が得られたが, 運航中の船舶の耐航性を向上させるためには, なお下記の諸問題を解決するため一層の努力が必要と考えられる。

1) 外洋波浪実態の把握

浮遊観測基地の増設や曳航式・船体内蔵型等波浪計の開発が望まれる。船体の運動や応力等を扱う立場からは, 出会いの外洋波を直接正確に把握することがもっとも望ましい。完全を期するには外洋波浪と出会いの波との両者を独立に計測する必要があるが, 実船試験実施上の諸制約を考えると, 船速の不規則な変動にもとづくスペクトル変換の困難を避けるために, 出会いの波浪をまづ把握することがより大切であると考えられる。この場合船速が 15 kt 程度以下ならば曳航式波浪計にも利点があるが, 高速時では内蔵型等による計測にまつほかないであろう。

2) 船体運動と応力との関係

縦揺れと縦応力, 横揺れと横応力との間に強い相関があり, 縦と横との相関は予想外に小さいこと

がわかったが、資料をもっと増し、一般的、量的な相関の求められることが望ましい。横応力と横揺れの場合のように相関が必ずしも1対1でない場合もあるが、荒天における船速調整に経験的につながっているこの問題を、もっと明瞭にする必要がある。

3) 船体運動と推進性能の変化

強風や波浪にもとづく船体運動（縦揺れ・上下揺れ・斜航・船首揺れ）や、操舵が伴流・推力減少等をふくめて推進性能をいかに変化させるかについて、実験結果はあまりにも少ない。この現状に対する説明はいろいろあると思われるが、荒天中で推進性能が低下することは事実であり、運動軽減による抵抗減少とともに推進効率増加の方策が考究せられるべきであると考える。

4) 操舵および操舵装置の実態

大洋航行中の操舵の実態について今回得られた結果は以前に山陰丸で得られた結果とかなり異なっている。このようにほぼ同時期に建造された同程度の貨物船において、操舵の実態が異なるとする、船体自身の操舵性能とともに自動操縦装置の優劣、あるいはその調整の適否について、基礎的研究とともに実態の調査を機会あるごとに行なうべきである。不必要的大舵角は、舵抵抗の増大のみならず、誘発される船体の蛇行運動によって、意外に大きな抵抗増加を招くもので、船の耐航性・経済性を損う所が大きいことを認識しなければならない。

5) 耐航性の指標

耐航性を局限する因子は、船体運動の増大・船体強度への危険および船速低下であると考えられる。船の大きさ・平水中の船速・船型・構造寸法等の差および海況によってこれらの因子の比重は変ってくると考えられ、船の耐航性を共通の尺度で示すことはかなり困難であると思われる。この問題はこれらの因子のもつ重要性を、結局は船価と運航費の面で計量して初めて解決できる問題であろうが、まず個々の因子の耐航性に対する寄与の度合を明らかにする必要があり、このためには運航の実態を外界条件とともに明らかにする努力が地道につづけられなければならない。

6) データ処理システムの開発・改良

今回使用した一貫処理システムは、諸制約のもとにおいて最適と考えられるものを具体化し、一応の成果をあげ得たことはすでに述べたとおりであるが、船舶上で使用するという条件はかなりきびしく（場所・取扱者の数・振動・湿気・他の環境上の諸制約等）、このため予想外の困難を生じ、得られた計測記録の処理についても、意外に時間を要した面がある。今後の実船実験の計画に当っては、このような諸制約を十分に考慮した上で処理システムを構成すべきであるとともに、各要素機器の軽量小型化・耐振・耐衝撃性・耐湿性の向上をはかり、信頼性の大きなものを開発使用すべきである。また不規則変動量を取扱う関係上、各種記録の同時性はことにきびしく規制される必要があり、これを怠った記録はせっかくの情報の利用率を半減させることを銘記すべきである。

稿をとじるに当たり、3年間陰に陽に当部会の研究に協力を賜わった関係各位に厚く御礼申上げる。特に下記の方々には格別の御援助、御協力を頂いた。ここに記して深甚の謝意を表する。

しあとる丸実船試験に関し 船主協会、大阪商船三井船舶株式会社、"しあとる丸"乗組員、

三菱重工業株式会社神戸造船所

予備実船試験に関し

"淡青丸"（東京大学海洋研究所）、"北斗丸"（運輸省航海訓練所）、巡視船"しきね"（第3管区海上保安本部）

波浪計設計製作に関し

明星電気株式会社、日本楽器株式会社新居工場

文 献

- 1) 菅四郎：“日聖丸実験報告”，造船協会論文集，**92**，1957.
- 2) Kan, S.: "An Investigation into the Sea Going Qualities of the Single Screw Cargo Ship NISSEI MARU by Actual and Model Ship Experiments", *Trasport. Tech. Res. Inst.*, 1954.
- 3) Johnson, A.J. & Ridler, A.V.: "The Measurement and Recording of the Force Acting on a Ship at Sea, Part II The Instruments", *Trans. I.N.A.*, **91**, 1949.
- 4) 山内保文：“船の動揺の時系列論的解析について”，造船協会論文集，**99**，1956.
- 5) St. Denis, M. & Pierson, W.J.Jr. : "On the Motion of Ships in Confused Seas", *Trans. S.N.A. M.E.*, **61**, 1953.
- 6) 日本造船研究協会第17研究部会：“船舶の波浪中における復原性に関する研究”，造船研究協会報告，**25**，1959.
- 7) Neumann, G. & Pierson, W.J.Jr. : "A Detailed Comparison of Theoretical Wave Spectra and Wave Forecasting Methods", *Deutsche Hydrographische Zeitschrift*, **10(3)** & **10(4)**, 1957.
- 8) Jasper, N.H. : "Statistical Distribution Pattern of Ocean Waves and of Wave Induced Ship Stresses and Motion with Engineering Applications", *Trans. S.N.A.M.E.*, **64**, 1956.
- 9) 日本原子力船研究協会：“原子力船における外力の原子炉に及ぼす影響に関する試験研究”，原船協，**14-I**, **II**, **23-I**, **II**, **31**; 1960, 1961, 1962.
- 10) Jasper, N.H. & Brooks, R.L. : "Sea Tests of the USCGC UNIMAK, Part 2 Statistical Presentation of the Motions, Hull Bending Moments and Slamming Pressures for Ships of the AVP Type", *D.T.M.B. Rep.*, **977**, 1957.
- 11) Jasper, N.H. Birmingham, J.H. : "Strains and Motions of USS ESSEX (CVA 9) During Storms Near Cape Horn", *D.T.M.B. Rep.*, **1216**, 1958.
- 12) 日本造船研究協会第49研究部会：“高速船の波浪中の応力頻度ならびに甲板荷重の実験的研究”，造船研究協会報告，**49**，1965.
- 13) 山内保文：“船の波浪中動揺応答の解析法について”，その1～その3，造船協会論文集，**109**, **110**, **111** ; 1961, 1962.
- 14) 山内保文：“波浪中の応答特性の統計的解析に関する二三の考察”，造船協会論文集，**117**, 1965.
- 15) Akaike, H., Yamanouchi, Y. et al: "Studies on the Statistical Estimation of Frequency Response Functions", Suppl. III, *Annals of the Institute of Statistical Mathematics*, 1964.
- 16) 山内保文ほか：“船の波浪中動揺応答の解析法について”，その4，耐航性試験データ処理システムについて，造船協会論文集，**119**, 1966.
- 17) 高石敬史ほか：“ニューヨーク定期貨物船山隆丸による北太平洋航海性能実船試験について”，船舶技術報告，**2-2**, 1965.
- 18) 山内保文：“応答理論と船体運動”，造船協会誌，**382**, 1961.
- 19) Pierson, W.J.Jr. : "An Interpretation of the Observable Properties of Sea Waves in Terms of the Energy Spectrum of the Gaussian Record", *Trans. Amer. Geophysical Union*, **35-5**, 1954.
- 20) Pierson, W.J.Jr. & Moskowitz, L., "A Proposed Spectral Form for Fully Developed Seas Based on the Similarity Theory of S.A. Kitaigorodskii", *J. of Geophysical Research*, **69-24**, 1964.
- 21) Rep. of the Commit. No.1 on Environmental Conditions, *Proc. and Intern. Ship Structures Congress, Delft 1964*, Vol. I, 1964.
- 22) Technical Decisions and Recommendations Concerning Seakeeping Committee, *Proc. 11th Interr. Towing Tank Conference, Tokyo 1966*, 1967.
- 23) 日本造船研究協会第90研究部会：“海象気象と船体構造との関連に関する調査研究報告書—波浪曲げモーメントの計算”，造船研究協会研究資料，**56**, 1967.
- 24) Rep. of the Commit. 2b-I on Wave Loads-Model and Theory, *Proc. 3rd Intern. Ship Structures Congress, Oslo 1967*, Vol. I, 1967.
- 25) Yuille, I.M. : "Longitudinal Strength of Ships", *Trans. Roy. I.N.A.*, **105**, 1963.
- 26) 福田淳一：“波浪荷重の長期分布推定法”，造船協会誌，**448**, 1966.

- 27) 福田淳一：“電子計算機による規則波中の波浪曲げモーメントの応答関数の計算”，西部造船会会報，32，1966.
- 28) 福田淳一：“電子計算機による不規則波中の波浪曲げモーメントの応答関数の計算”，未刊
- 29) Band, E.G.U. : "Analysis of Ship Data to Predict Long Term Trend of Hull Bending Moment", *American Bureau of Shipping*, 1966.
- 30) Fritch, D.J., Bailey, F.C. & Wheaton, J.W. : "Results from Full Scale Measurements of Midship Bending Stresses on Two Dry Cargo Ships", Rep. #2, SSC-181, 1967.
- 31) Roll, H.U. : "Height, Length and Steepness of Seawaves in the North Atlantic and Dimensions of Seawaves as Function of Wind Force", *Deutsch. Wetterd. Seewetteramt.*, Pub. No. 1, 1953 (English Transl. SNAME Tech. & Res. Bull. No.1-19 1958).
- 32) Walden, H. : "Die Eigenschaften der Meerswellen im Nordatlantischen Ozean", *Deutsch. Wetterd. Seewetteramt.*, Pub. No. 41, 1964.
- 33) Nordenström, N. : "Written Discussion to the Rep. of I.S.S.C. Commit. 2b-II on 'Wave Loads-Full Scale Statistical'", *Proc. of the 3rd ISSC, Oslo 1967*, Vol. III, 1967.
- 34) Yamanouchi, Y., Unoki, S. & Kanda, T. : "On the Winds and Waves on the Northern North Pacific Ocean and South Adjacent Seas of Japan as Environmental Conditions for the Ship", *Papers of Ship Res. Institute*, 5, 1965.
- 35) 日本造船研究協会：“北太平洋の風と波，1954—1963”，追研資料，1966.
- 36) Cartright, D.E. & Longuet-Higgins, M.S. : "The Statistical Distribution of the Maxima of a Random Function", *Proc. Roy. Soc. London A*, Vol. 237, 1956.
- 37) 日本造船研究協会第80研究部会第2分科会：“船体性能の向上に関する調査報告書，1. シーマージンに関する調査報告”，造研調査資料，46，1966.
- 38) 日本造船研究協会第80研究部会第2分科会：“船体性能の向上に関する調査報告書，2. 摩擦抵抗の減少に関する調査”，造研調査資料，25，1964.
- 39) 造船協会：“改訂船舶工学便覧”，第1分冊，コロナ社，1960.
- 40) 日本造船研究協会第91研究部会第2分科会：“海象気象と船体性能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連に関する統計調査”，造船研究資料，57-2，1967.
- 41) Ferguson, J.H. : "The Effect of Surface Roughness on the Performance of a Model Propeller", *Trans. Roy. I. N. A.*, 100, 1958.
- 42) Kan, S. et al : "Effect of Fouling of a Ship's Hull and Propeller upon Propulsive Performance", *I.S.P.*, 5-41, 1958.
- 43) 谷口中：“波浪中の推進性能”，造船協会誌，383，1961.

C₁+R'

昭和43年6月20日 印刷
昭和43年6月28日 発行

日本造船研究協会報告 第65号

発行人 菅 四 郎
発行所 社団法人日本造船研究協会
東京都港区芝琴平町35
船舶振興ビル8階
電話(502)2371~80
内線(421)~429)

印刷所 船舶印刷株式会社
東京都台東区東上野1-28-3
電話(831)4181~4