

昭和42年度運輸省補助事業

研究資料 No.74

第 97 研 究 部 会

超音波による船底防汚に関する研究

報 告 書

昭 和 4 3 年 3 月

社団法人日本造船研究協会



社 团 法 人
日 本 造 船 研 究 协 会

はしがき

本報告書は昭和42年度運輸省応用研究補助金の交付を受けて日本造船研究協会が第97研究部会において研究を実施し、その成果をとりまとめたものである。

本部会の委員ならびに討議参加者は次のとおりである。

第97研究部会委員名簿（五十音順、敬称略）

部会長	重満	通	弥	(中華民国航業發展中心)
幹事	奥島	基	良	(東京工業大学)
	栄	幸	雄	(三菱重工業)
	鈴木		裕	(東京水産大学)
	森		稔	(川崎重工業)
	森	栄	司	(東京工業大学)
	安田		力	(東京工業大学)
	山口	富	夫	(三菱重工業)
委員	芦田	耕	一	(三井造船)
	岩沢	信	夫	(日本郵船)
	岡種	種比	古	(三菱重工業)
	笠原		宏	(日本作業船協会)
	賀田	秀	夫	(東京商船大学)
	金井	一十三		(昭和海運)
	久津間	裕	良	(運輸省船舶局)
	小島	喜七郎		(浦賀重工業)
	桜木	幹	夫	(航海訓練所)
	佐藤	信	夫	(日本油脂)
	飾磨	淳	吉	(三菱重工業)
	眞田		良	(日本船主協会)
	瀬尾	正	雄	(船舶技術研究所)
	妹尾	次	郎	(東京水産大学)
	高木	又	男	(日立造船)
	萬田		健	(海上保安庁)
	武田	智	則	(石川島播磨重工業)
	能勢	義	雄	(中國塗料)
	能本	乙	彦	(防衛大学校)
	橋本	富	寿	(芝浦工業大学)
	浜田	外	次郎	(日本鋼管)
	藤井	政	雄	(三井造船)
	馬渡	静	夫	(資源科学研究所)
	南井	義	夫	(横浜國立大学)
	大井		浩	(日本原子力船開発事業団)
	中山	康	市	(佐世保重工業)

委員以外の討議参加者名簿（五十音順、敬称略）

新	居	和	男	(三菱重工業)
有	川	正	一	(三菱重工業)
石	渡	昭	一	(超音波工業)
伊	藤	勝	彦	(東京工業大学)
奥	山	孝	志	(海上保安庁)
小	林	健	二	(東京工業大学)
齊	藤	興	治	(東京工業大学)
真	田	奎	介	(佐世保重工業)
塙	田	省	次郎	(三菱重工業)
谷	村	伸	一	(超音波工業)
富	川	喜	人	(東京工業大学)
西	川	彰	夫	(三菱重工業)
根	木	佐久良雄		(東京工業大学)
平	井	靖	男	(日立造船)
松	本	安	三郎	(名村造船)
本	岡	誠	一	(東京工業大学)
亘	理	民	郎	(三菱重工業)

目 次

は し が き	1
1. 生 物 実 験	2
1.1 持続波超音波およびパルス波超音波の生物に与える影響	2
1.2 毒物と超音波の併用効果	13
2. ホーンの形状検討	18
2.1 伝播特性の解析と測定	18
2.2 駆動点インピーダンスの解析と測定	36
2.3 振動系のパワ設計、材料および形状の選定	46
3. 超音波による海中生物付着防止臨海実験	56
3.1 試験片による臨海実験	56
3.2 実 船 試 験	87
4. 船体摩擦抵抗の基礎試験	115
5. 縦波振動の防汚効果および縦波付与に関する基礎実験	123
5.1 縦波振動の防汚効果	123
5.2 縦波付与に関する基礎実験	127

ま 前 が き

船底における生物の付着は船体摩擦抵抗の増加をきたし、燃料消費量の大巾な増大となることは周知のことであり、近年特に運航の高能率化が要請され 2 カ年以上入渠なしの運航条件を確立することが急務とされている。このために長期防錆防汚塗料の開発、電気防食法の長期持続性能の向上などの研究が鋭意行なわれている。

昭和 34 年度の研究では超音波による防汚効果が小型試験片による臨海実験により確認されているので、昭和 41 年度は海中生物を飼育し、生物の超音波選択性、最有效周波数、超音波出力の影響を実験室において調査するとともに超音波の伝播状況の基礎的傾向について小型実船を利用して調査を実施した。

昭和 42 年度は引き続いて現在までの成果を基礎として、海中生物の付着状況について試験片による実験および航海訓練所練習船進徳丸による実船実験を行ない超音波照射による防汚効果の調査を行なうとともに、一方実験室においては生物実験、超音波伝播理論を実船へ適用するための研究、ホーンの形状検討等を行なつて本方式の臨海実験による効果を確認するとともに有効な適用方法についての研究を行なつたので以下にその実施経過と結果を報告する。

生物実験

1.1 持続波超音波およびパルス波超音波の生物に与える影響

昨年度の研究の結果、フジツボなどは持続波に対して比較的強い耐久力を有していることが判明したので、今年は、生物の嫌うであろう巨大なパルスを照射した場合の効果を確認するために実験室において、フジツボ、イガイの幼生を飼育し、これに周波数、音圧、照射時間、パルス幅、パルス間隔の違った超音波を照射して、幼生の死亡率を観測するとともに、超音波パルス嫌忌性を観察した。

パルス波超音波は、付着生物を死滅あるいは破壊もしくは麻痺させなくても付着を防止できれば、目的を達成したことになるわけであるから、この観点に立つて、フジツボ類の発生、生育のもつとも盛んな夏季を選んで試験を実施した。

1.1.1 フジツボ、イガイの採集と幼生の飼育

採集は主として、館山湾で7月～10月にフジツボを、12月～2月にムラサキイガイを、また木更津で夏季にフジツボを、さらに横須賀においてフジツボおよびムラサキイガイを採集した。

採集したタテジマフジツボは縦、横、高さ $60 \times 30 \times 36\text{cm}$ のガラス水槽に入れ、天然海水で飼育した。水槽には万能フィルタを使用し、通気を行ない、冷却水循環装置によって飼育水温を夏季においても $25^{\circ}\pm 2^{\circ}$ 程度に保持した。

成体から放出されたノープリウスはビーカ、または丸型水槽で飼育した。今年度も昨年度と同様、飼料には培養したスケルトネマコスタツムを使用し、適宜に実験用試料とすることができた。

ムラサキイガイの飼育にあたっては、今年は飼料としてキートセラスシンプレックスを使用した。

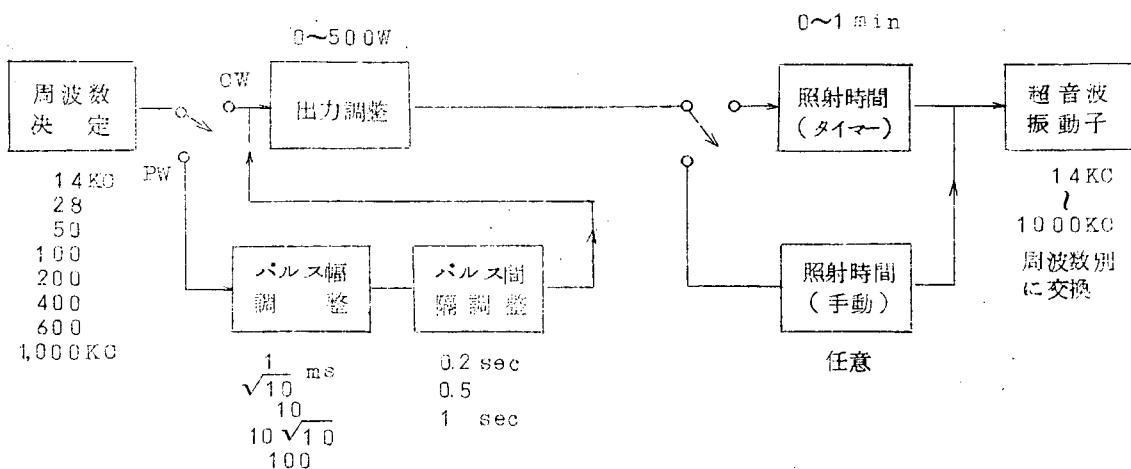
成貝を解剖し、外套膜に包まれた卵巣、精巣のうち成熟度の良いものを選び、湿導法によって助精し、ガーゼで渾過した後、沈澱、吸入、選別する。一昼夜以後に得られるトロコフオアを実験に使用し、残部は成貝と同じくキートセラス・シンプレックスによって飼育した。

1.1.2 実験装置

(1) パルス波発振制御装置

昨年度製作した500W型CW広帯域超音波発振器(10KC～1,000KC)に接続して、その発振を制御する装置で、仕様および取扱いは次のとおりである。

電源電圧	単相 100V 50㎐
消費電力	約 1.5 W
パルス繰返し周期	200 msec
パルス幅	1, $\sqrt{10}$, 10, $10\sqrt{10}$, 100 msec
制御方式	トランジスタスイッチング
被制御管	6AQ5
パルス発生方式	アステーブルおよびモノステーブルマルチバイブレータ
使用半導体	アステーブルマルチバイブレータ 2SC372×2
	モノステーブルマルチバイブレータ 2SC372×2
	増幅管 2SC696A
	スイッチング 2SC52D
	ダイオード 1S180
	電源用整流器 PR1
定格出力電圧	60V
外型寸法	300×120×200 mm
総重量	2kg



生物実験用超音波発振器取扱系統図

(2) 生物実験用のその他の装置

(a) 超音波の音圧測定装置

進行波型ソノデクタ

高感度真空管電圧計

(b) 超音波の周波数・波形観察

5桁フリーケンシ・カウンタ

2現象シンクロスコープ

(c) 水槽

生物飼育水槽（スケレトネマ、キートセラス、フジツボ、ムラサキイガイ飼育用、同幼生飼育用各種）

(d) 高温低温生物飼育槽（ムラサキイガイ受精卵用）

(e) 冷却水循環装置（フジツボおよび同幼生飼育用）

(f) ガラス水槽、角型、丸型

(g) 顕微鏡（普通型、立体式双眼、撮影装置）

(3) 超音波照射実験装置

ブラインシュリンプ、ノーブリウス等に超音波を照射する場合には、周波数14、20、28 KCにおいてはアクリル製角型水槽（ $400\text{ mm} \times 300\text{ mm} \times 350\text{ mm}$ ）、50 KC以上の周波数では、内径 240 mm 、深さ 110 mm 、中央部の深さ 105 mm のガラスバット内に超音波振動子を上向きに設置し、その上方に内のり $30\text{ mm} \times 30\text{ mm}$ で高さが使用超音波の水中における4分の1波長の整数倍よりやや浅くなるものを使用して、逐一、音圧を測定して実験した。このようにしたのは、昨年度の測定結果から水面による反射を極力抑制し、音圧を規制しやすいことが明らかとなったためである。

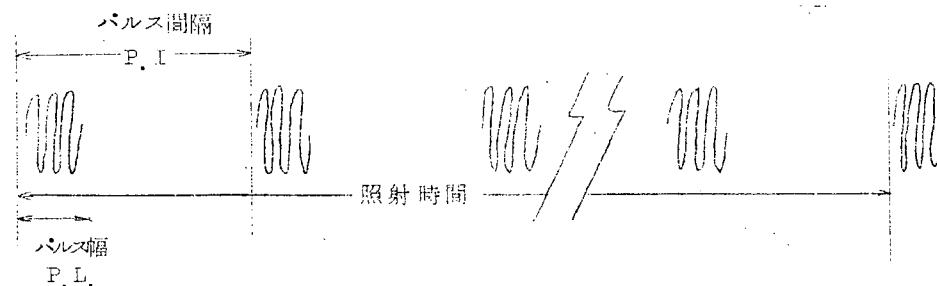
1.1.3 船底付着生物に対する超音波パルス照射実験

内のり $30 \times 30\text{ mm}$ のアクリル樹脂性角筒の底部に厚さ 0.03 mm のポリエチレン膜を貼り付け、その中に濾過海水を少量（約 2 ml ）入れて、その表面が1.1.4の条件を充すようにし、その中に20~50個程度の試料を入れてパルス波超音波の影響を調べた。

(1) ブラインシュリンプに対する影響

アルテミアサリナ、ブラインシュリンプは、比較的容易に卵からふ化して泳ぎ出す。海水性の甲殻類の一種である。船底付着生物ではないが、近似している点が多いために、実験に便利であり、多くの実験に使用されている。

図1.1は周波数5.0 KC の持続波超音波(CW)を音圧0.1 bar(加速度210g)の強さで照射した場合と、同じ超音波をパルス幅1.0 msec、パルス間隔1 secで照射した場合のブラインシェリングの死亡率の変化を示している。



照射時間の延長によって、いずれも死亡率は増加しているが、総合パワーが $1/100$ になっているこのパルス超音波(PW)でも、かなりの効果が認められる。

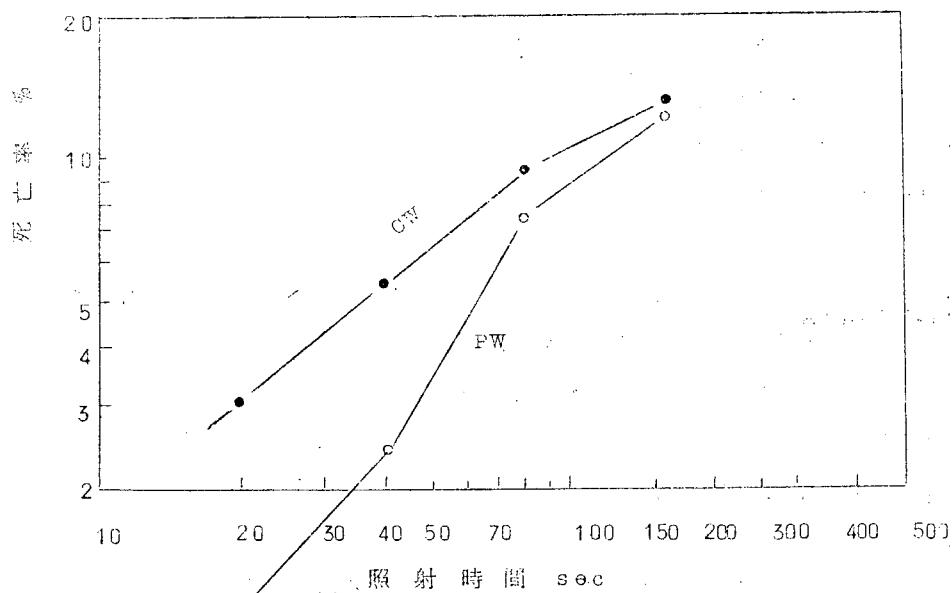


図1.1 ブラインシェリングに対する超音波の影響(5.0KC, 0.1bar, 210g)

図1.2はブラインシェリングに対して周波数2.8 KC、パルス幅1.0 msec、間隔1 sec、音圧0.2 bar(加速度230g)のパルス超音波を照射した場合の死亡率の変化を示している。

照射前、死亡個体のない試料が2.0秒の照射で約5%、4.0秒照射で7.4%、8.0秒照射で約11%、16.0秒で15%の死亡率を示した。図1.1の結果と比較して、加速度は、1割程度の違いがあるだけであるのに、ややこの方が大きく出ているのがわかる。

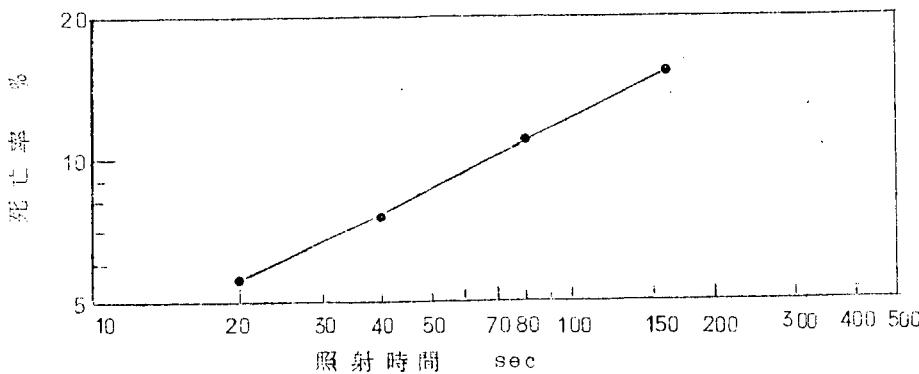


図 1.2 プラインシュリンプに対する超音波パルスの影響 (28 KC 0.2 bar 23.0%)

(2) タテジマフジツボのノーブリウスに対する超音波パルスの影響

7月に入ってパルス発振制御装置が使用可能となり、ノーブリウスに対するパルス波超音波の効果をみる実験が開始された。

タテジマフジツボのノーブリウス(生後2日)に対する持続波超音波とパルス波超音波の効果を比較するため、周波数28KC、音圧0.1bar(加速度115g)の超音波を照射した。その結果は図1.3に示すとおりで、CWとPWいずれを照射しても、照射時間の増加に伴って死亡率の増加が見られるが、その影響はパルス波の方が大きい。しかも照射時間が長い場合の方が効果が大きい。いいかえれば、パルス波の場合は、数多くのパルス波が当った方がよいといえる。

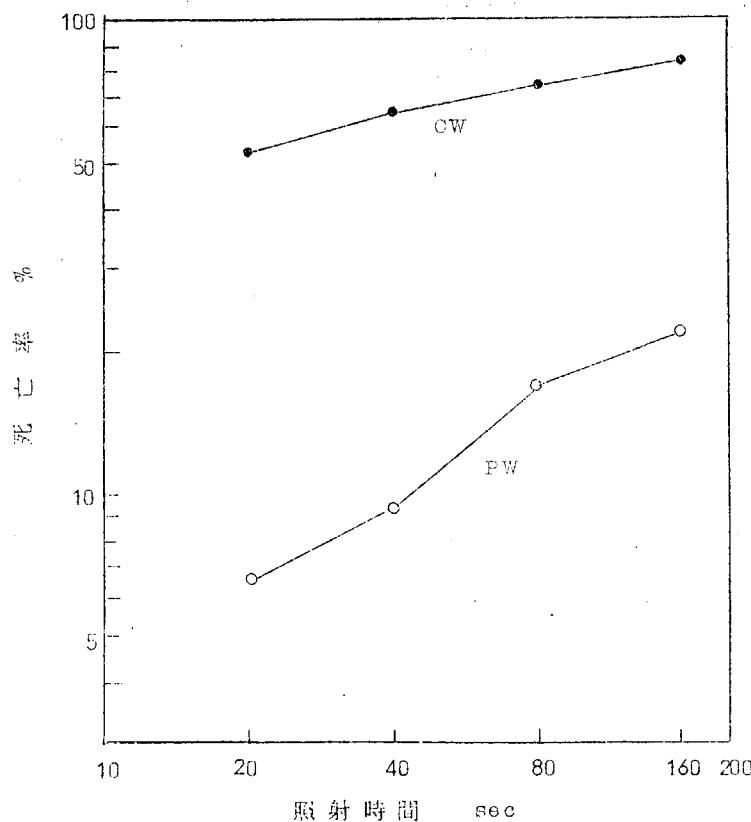


図1.3 タテジマフジツボのノーブリウスに対する超音波パルスの影響
(28 KC, 0.1 bar, 115g, パルス幅100 msec, パルス間隔1 sec, 24.3°C)

図1.4は周波数100KC、音圧0.1bar(加速度420g)の持続波超音波と周波数と音圧が等しく、パルス幅が100msec、パルス間隔1secのパルス波超音波のノーブリウスに対する影響を示している。

この結果より、PWの効果は前の28KCよりも、はるかに大きくなっていることがわかる。CWで20秒間

照射した場合は、28 KCよりもやや下回っていることがわかる。

図1.5は周波数200 KCの場合を示す。音圧は50mbar、この場合には、PWの方がCWよりも効果が上回っている。すなわち、28 KCから100 KC、200 KCと周波数が大きくなると、PWの効果が明瞭になってくることがわかる。

換言すれば、この点からだけ考えると周波数が大きく、パルス超音波を使用すればよいことになる。

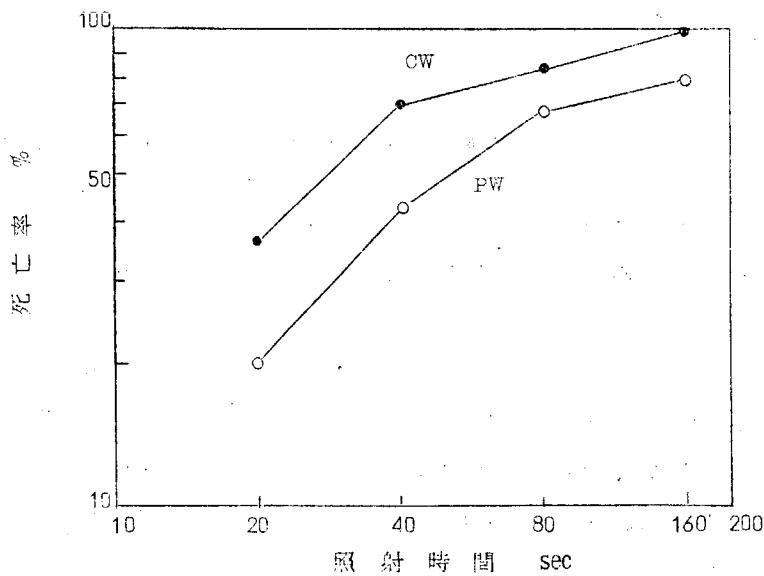


図1.4 タテジマフジツボのノーブリウスに対する超音波パルスの影響
(100KC, 0.1bar, 420g, パルス幅10 msec, パルス間隔1 sec 23.5°C)

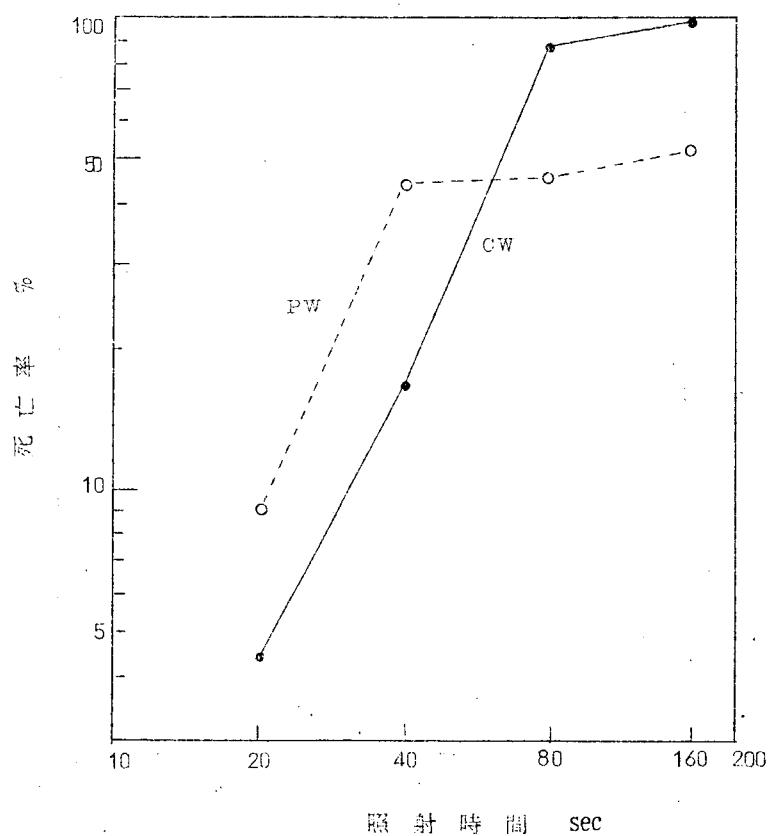


図1.5 タテジマフジツボのノーブリウスに対する超音波パルスの影響
(200KC, 50mbar, 420g, パルス幅100 msec, パルス間隔1 sec)

(a) パルス幅の影響

図1.6はノーブリウスに対する超音波パルス幅の影響を示したものである。発生後2日のノーブリウスに1 msecから $\sqrt{10}$ msec、10 msec、 $10\sqrt{10}$ msec、100msec およびCWの超音波で音圧0.1 bar のものを80秒間照射した。

その結果は、図より明らかなように、パルス幅は長いほど効率はあるが、それほど顕著でない。

これは、パルス幅が1msecのように短くても、その割合に効果が減少することのないことを示すものである。

周波数は、低い方として28 KC、高い方の200 KCともほとんど同様の傾向を示しているものと見てよい。パルス幅が $1/1000$ になっても、ノーブリウスの死亡率は4~5分の1にしかならない。このことは、いかに超音波パルスが経済的であるかを示すもの一つである。

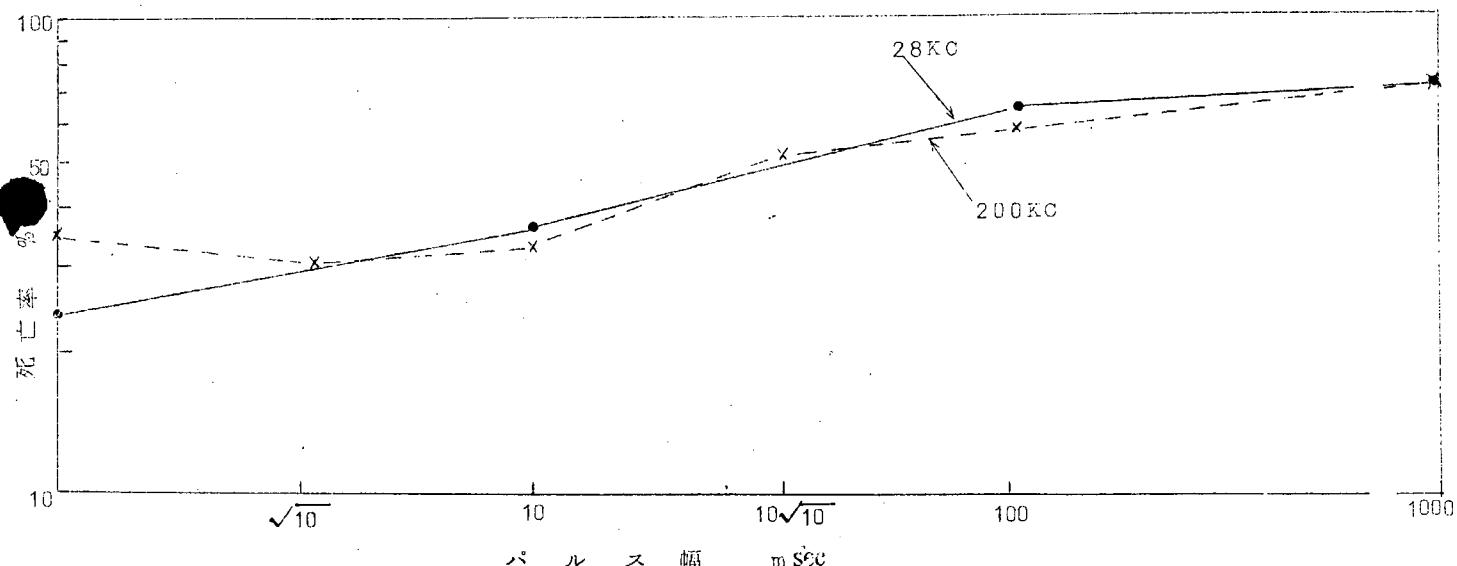


図1.6 タテジマフジツボのノーブリウスに対する超音波パルス幅の影響
(0.1 bar, 照射時間 80 sec, パルス間隔 1 sec)

(b) パルス間隔の影響

パルス間隔が延びれば、同一照射時間中に試料に当るパルスの数が少なくなる。

図1.7は、周波数200 KC、28 KC、音圧0.1 bar、パルス幅100msecのパルス波超音波をノーブリウス

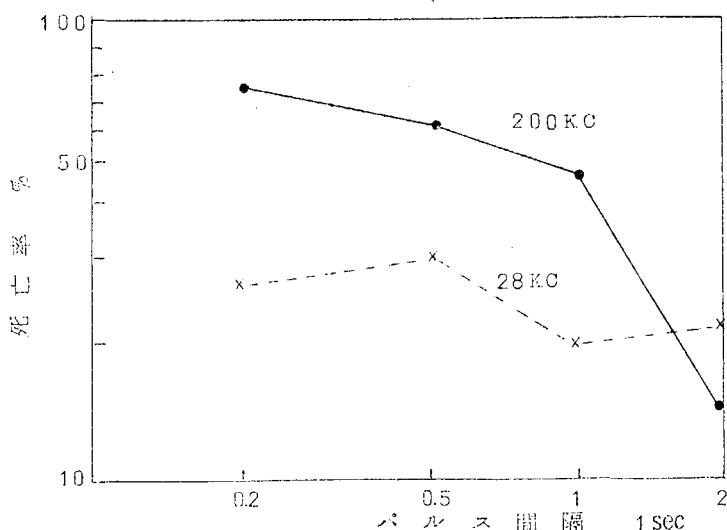


図1.7 ノーブリウスの死亡率と超音波パルス間隔の関係
(200 KC, 0.1 bar, 840 g, 照射時間 80 sec, パルス幅 100 msec)
(28 KC, 0.1 bar, 115 g, " " ")

に80秒間照射した場合の死亡率の変化を示している。

パルス間隔の影響は、28KCより200KCにおいて大きく表われている。

(c) ノーブリウスに及ぼす超音波音圧の影響

ノーブリウスに対して超音波音圧がどのように影響するかを持续波超音波およびパルス波超音波によって試験した。

持续波超音波の影響は図1.8に示すとおりで、200KCの方が、28KCよりも効果があり、さらに音圧が大となれば28KCより200KCの方がはるかに、その効果が期待される。

図1.9は、パルス波超音波を使用して周波数別に音圧の影響を調べたものである。

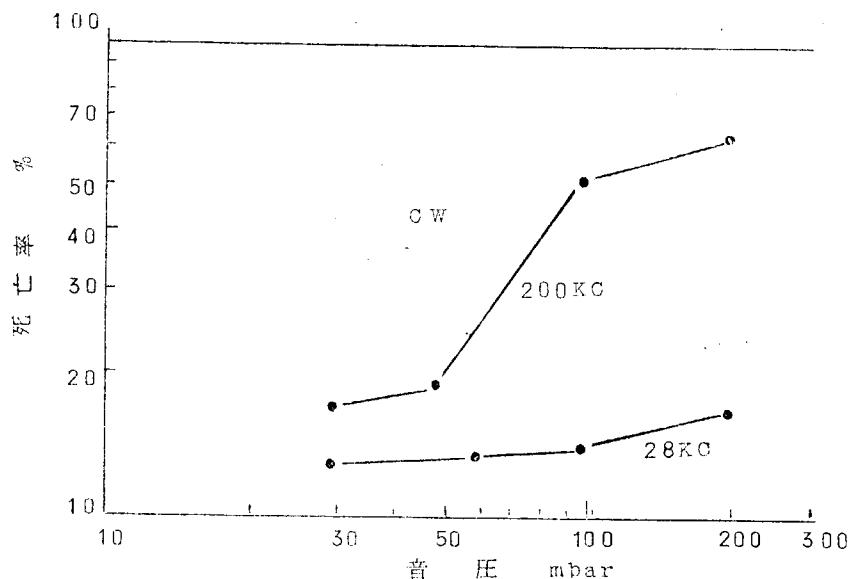


図1.8 ノーブリウスに対する持续波超音波音圧の影響
(照射時間 80 sec, ノーブリウス: 発生後 1~2 日)

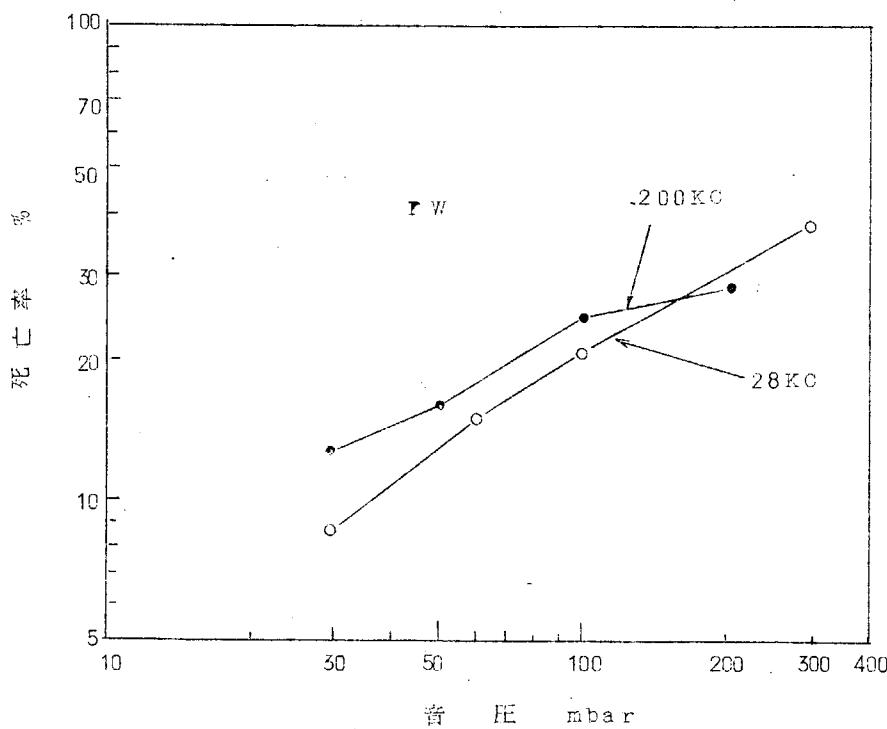


図1.9 ノーブリウスに対するパルス波超音波音圧の影響
(照射時間 80 sec, パルス幅 10.0 m sec, パルス間隔 1 sec, ノーブリウス: 発生後 1~2 日)

この結果から PWでは周波数の大きい 200 KC の方が 28 KC より上まっているが、音圧の大きいところでは逆に下降しているのがわかる。

パルス波超音波では持続波超音波の場合と異なり、28 KC に対して 200 KC の効果が少なくなっている。逆にいえば、周波数が低くてもパルス波ならば周波数の大きいものと近似の効果があるといつてもよい。

(1) ノーブリウスに対する超音波周波数の効果

図 1.1.0 はノーブリウスに対して音圧 0.1 bar の超音波を 80 秒間照射した場合の死亡率の変化を示す。

パルス波超音波の場合は、パルス幅 1.0 m sec、パルス間隔 1 sec である。

これらの結果から見ると周波数の増加に伴って、その効果が増し、死亡率の変化は周波数にはほぼ比例している。

昨年度の実験結果から見ても、持続波の場合、同様の効果があった。

超音波防汚を実施する場合には高い周波数の良いことを示している。それは生物に対して大きな加速度を与えていることである。

上記の場合、100 KC で 41.5 %、200 KC では 83.0 % という大きな加速度が加えられていることになる。

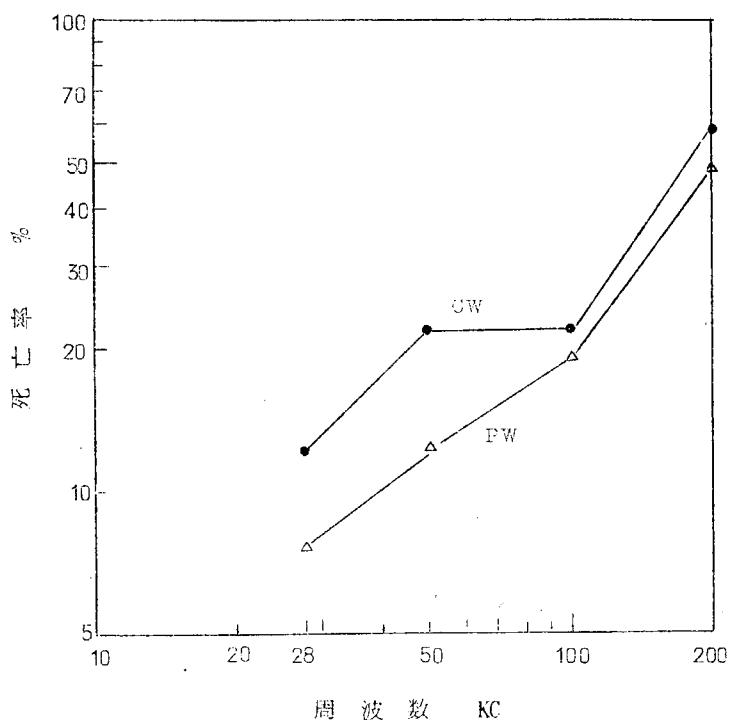


図 1.1.0 周波数に対する死亡率の変化
(0.1 bar, 照射時間 80 sec, パルス幅 1.0 m sec, パルス間隔 1 sec)

(3) ムラサキイガイのトロコフオアに対する超音波パルスの影響

(a) 音圧の影響

実験装置および実験方法は、タテジマフジツボのノーブリウスにおける場合と同じである。

図 1.1.1 はムラサキイガイのトロコフオアに対する持続波およびパルス波超音波の音圧の影響を調べた実験結果である。

図の(a)は、周波数 200 KC の超音波を 80 秒間照射した結果で、音圧 0.05 bar 付近から、死亡率が大きく変化している。ここに使用したパルス波は、パルス幅 1.0 m sec、パルス間隔 1 sec であるから、80 秒間の照射で、80 個程度のパルス刺戟しか受けていないことになる。

このようなパルスでも、図に示すように CW と効果の差違は、ほとんどないくらいである。

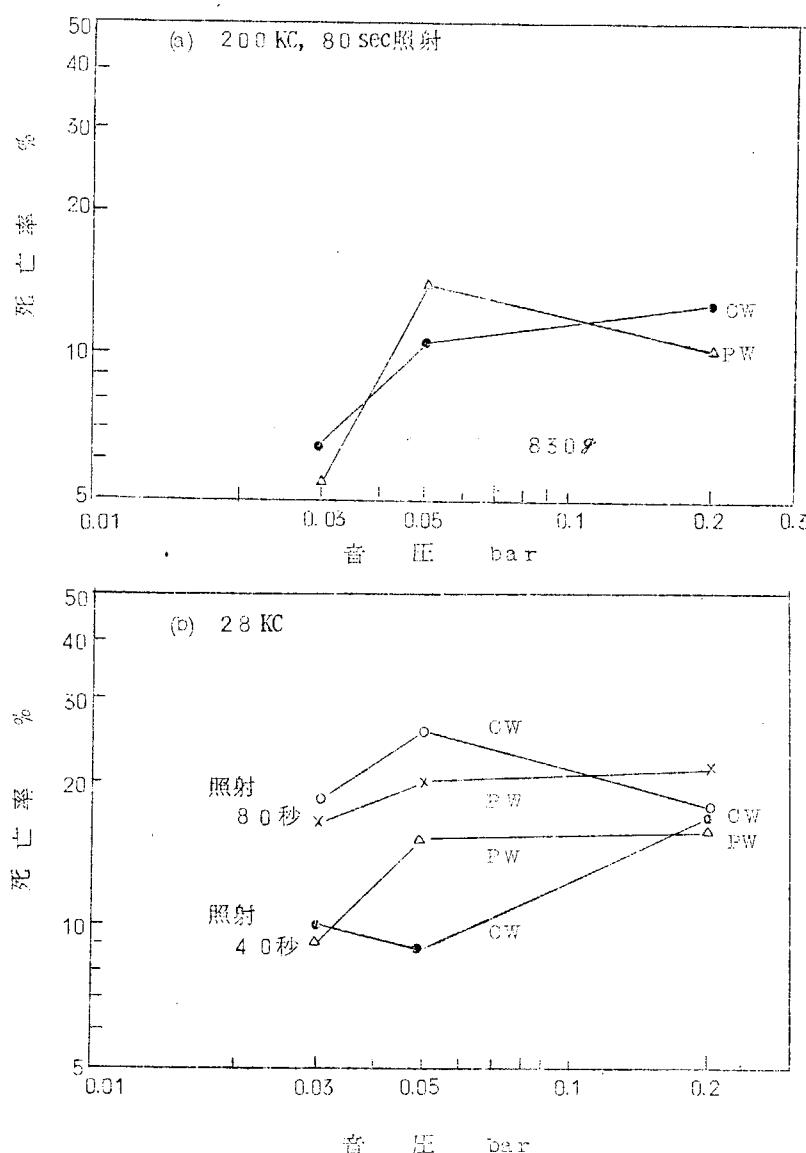


図 1.11 ムラサキイガのトロコフオアに対する超音波(CW, PW)音圧の影響
(パルス幅 10.0 m sec, パルス間隔 1 sec)

(b) は 2.8 KC で、照射時間 80 秒と照射時間 40 秒について持続波とパルス波について上記と同様に試験している。

当然、80 秒間の照射があった場合の方が上方に出ているが、この結果からは音圧が大きな影響を与えていとはいえない。海水であり、超音波による粒子加速度は音圧に比例するから、加速度についても明らかな影響は認められない。

この図においても PW の結果と CW の結果が同程度になっている点は明白である。

(b) 超音波パルス幅の影響

図 1.12 は 2.8 KC、音圧 0.1 bar、パルス間隔 1 sec の超音波パルスのパルス幅を変えて実験を行なった結果である。タテジマフジツボの場合(図 1.6)のようにきれいな結果は出なく、むしろ、パルス幅の増加によって死亡率が少々下降する傾向にあるが、カーブが屈曲しているので結論は出せない。

(c) 持続波とパルス波の影響

図 1.13 は、PW と CW との相違を示している。パルス幅 100 m sec、パルス間隔 1 sec では 2.8 KC でトロコフオアに対しては PW の方が上回っている。

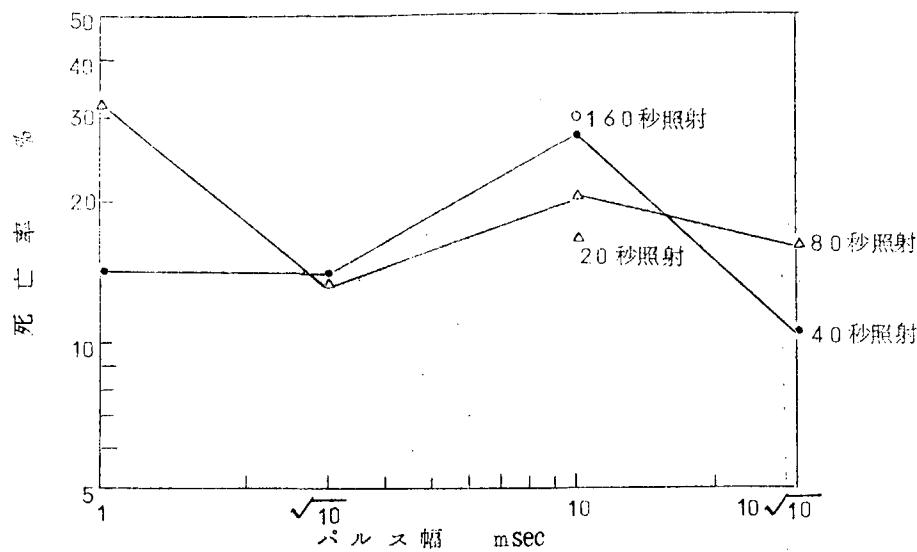


図1.12 パルス幅の影響
(28 KC, 0.1 bar, パルス間隔1sec, トロコフォア: 発生後2日)

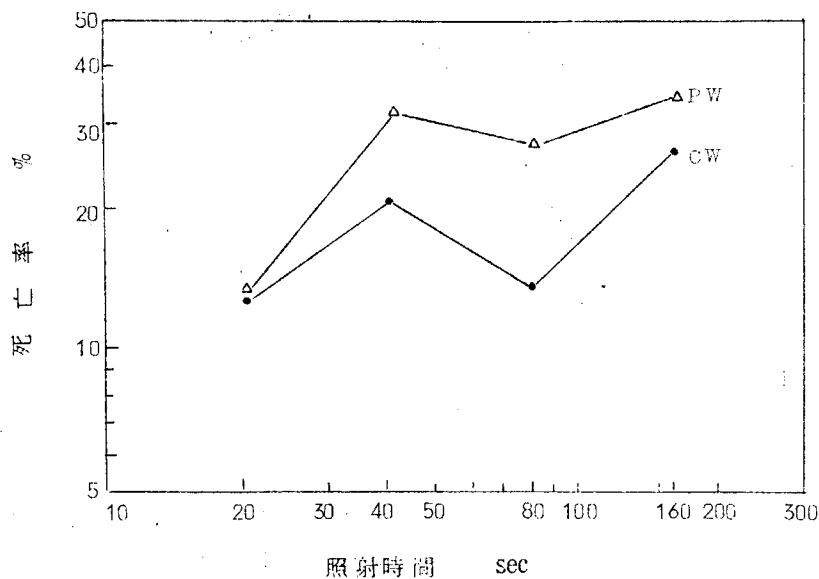


図1.13 PWとCWの効果の相違
(28 KC, 0.1 bar, パルス幅10.0 msec, パルス間隔1sec, トロコフォア: 発生後2日)

図1.14 (a)はトロコフォアに対して200 KC, 0.1 bar の超音波を照射した場合、持続波とパルス波(パルス幅10.0 msec、パルス間隔1sec)の影響を比較したものである。

図1.13 28 KCの場合においては、PWの方がCWより大きく現われているが、本図においては必ずしも同一でない。ここではPWでもCWでもこの程度の強さではあまり変りがないことを示している。

図1.14 (b)においては28 KCの超音波を発生後1日のトロコフォアに与えた結果を示す。

図1.13 では28 KC(同じ)で発生後2日の試料を使用している。両者を比較して見るとPWにおいてもCWにおいても、図1.14 の方が死亡率が大きく出ているのがわかる。

トロコフォアの発生後2日の方が耐性が強いのかも知れない。これに関する追跡は次年度に行なう予定である。

図1.14 (b)ではPWは照射時間が少なくても多くてもこの場合、同程度の効果がある。

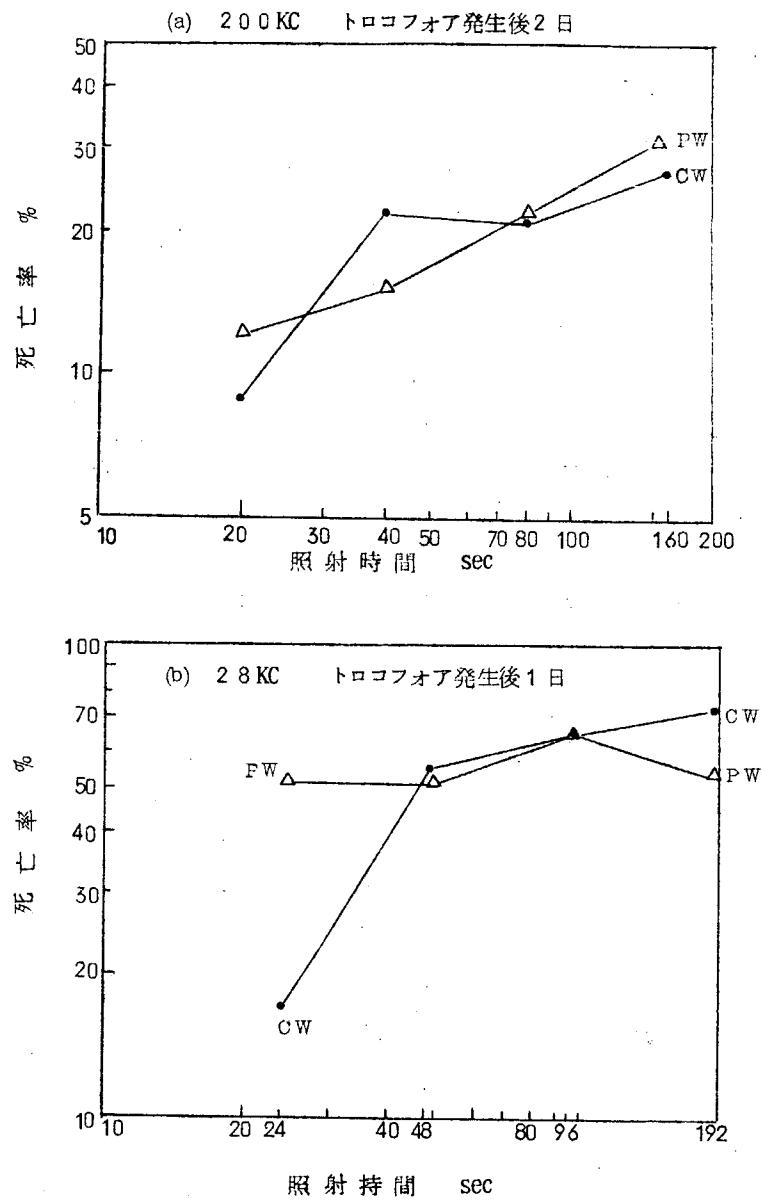
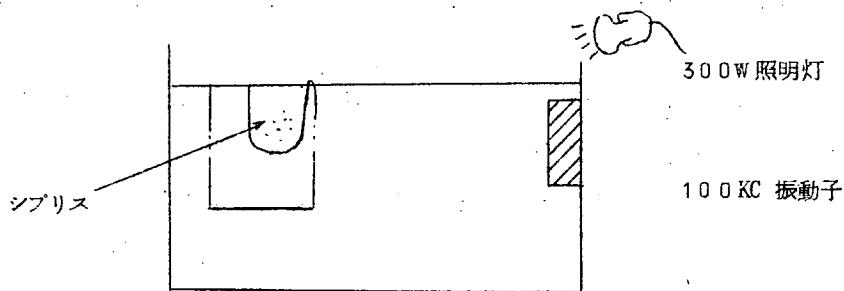


図1.14 ムラサキイガイのトロコフォアに対するパルス波超音波の影響
(0.1 bar, パルス幅100 msec, パルス間隔1 sec)

(4) タテジマフジツボのパルス波超音波嫌忌性に関する観察(シブリス幼生)



(a) 100 KC, 0.1 bar, CW, 20 秒照射

10 個体のシブリスは約 1 回づつ断続的に動きながら、光の方へ向かって浮沈運動をしている。

CW の照射によって 1 個体だけが転倒するように見えたが、その他の個体は、ほとんど遊泳状況に変化をもたらさない。

(b) 100 KC, 0.1 bar, PW, パルス幅 100 msec, パルス間隔 1 sec, 20 秒照射

浮沈運動をしているシブリスの遊泳方向、状態の変化はみられなかった。

(c) 100 KC, 0.25 bar ~ 0.3 bar, CW, 20 秒照射

遊泳中のシブリス 15 個体中 5 個体は約 4 mm の範囲を毎秒数回の速さで回転遊泳を起し、困惑しているように観察された。照射を停止すると数個体は底部に沈下した。

(d) PW, パルス幅 100 msec, パルス間隔 1 sec, 20 秒照射

特に遊泳状況その他に変化は見られなかった。

(e) 20 KC, 約 0.1 bar, CW, 20 秒照射

20 秒間照射したが特にシブリスの遊泳状況に変化は見られなかった。また一時的には、水粒子の運動に伴って、動くようにも観察されたが、特に斃死することもなかった。

(f) 20 KC, 約 0.1 bar, PW, 20 秒照射

多少遊泳速度が増加したように観察された。

1.1.4 結論

(1) 船底付着生物の採集、実験室における飼育、およびその幼生の採取、その飼育は順調であった。

タテジマフジツボ、ブラインシュリンプ、ムラサキイガイについて実施すれば、周年研究ができる。

(2) ブラインシュリンプに対して周波数 50 KC、音圧 0.1 bar の持続波超音波を照射すると、照射時間が 20 秒から 160 秒まで変わると死亡率が 3 % から 13 % まで変化し、パルス幅 100 msec、パルス間隔 1 sec のパルスでは 1 % から 12 % まで変化した。

照射時間が延びればパルス波でも効果があることわかる。

(3) タテジマフジツボのノーブリウスについては、パルス波超音波の持続波超音波（同一音圧）に対する効果は、周波数が大きくなるほど有効となり、照射時間が長いほど大となる。

(4) ノーブリウスについて、パルス波超音波のパルス幅の影響は全時間の $1/1000$ になっても効果は $1/5$ にしかならない。この関係は周波数が 28 KC でも 200 KC でも大差ない。

(5) ノーブリウスについて、パルス間隔が 10 倍に延びると 28 KC では大差なく、200 KC では効果が $1/5$ 程度になる。

(6) ノーブリウスに対する超音波音圧の影響は、持続波において 28 KC で明らかでなく、200 KC もともに著しい影響を示す。

(7) ノーブリウスに対する超音波周波数は、持続波、パルス波にかかわらず大きいほど大きな効果がある。

(8) ムラサキイガイのトロコフォアについて、音圧の影響はあまり明確に出ない。（持続波、パルス波とも）

(9) トロコフォアに対するパルス幅の影響もより明瞭に出ない。

(10) パルス波と持続波の効果を比較すると、28 KC、200 KC ともパルス幅 100 msec、パルス間隔 1 sec 程度のパルス超音波の効果が持続波の効果に相当する。

1.2 毒物と超音波の併用効果

超音波防汚を実用化する場合に船底防汚塗料を塗布すべきかどうかが問題であり、船底外板付近に超音波振動があり、音圧の放射があるとき毒物を含有した海水中で超音波の効果がさらに増加するかどうかを知る必要がある。

今年度は、この問題について、おおよその傾向を把握することを目的とし、毒物については銅イオンだけに限定した。対象とした生物は、ブラインショーリング、ノーブリウス、ムラサキイガイのトロコフォアである。

1.2.1 ブラインショーリングに及ぼす超音波と銅イオンの併用効果

実験に先立って、ブラインショーリングを顕微鏡で観察し、まず、死亡個体があるかどうかを確認し、もし、あれは少數ならば、実験後差引き、多數ならば、その全試料は廃棄することとした。

他の生物でも同様だが、一定量の海水中に試料となる動物が30～50個体ぐらい入れた。これより少ないと測定上の誤差が生じ、逆に数が多過ぎると数え違いによる誤差が出るからである。

この実験は、それぞれ3回づつ実施し、各回の死亡個体数、麻痺個体数、生個体数を数え、死亡率を求めた。死亡率は死亡個体数と麻痺個体数の2分の1を加えたものの総数に対する百分率で示すことはノーブリウスなどの場合と同様である。

銅イオン添加に先立ち、超音波のみをあてたときの死亡率を求め、つぎに銅イオンを加えて、さらに超音波を付与する方法をとった。この場合、実験は、すべて別の試料で行なった。

表1.1 ブラインショーリングに銅イオンを添加した場合、時間の経過に伴う
死亡個体数の変化（2回の和）

銅の濃度 mg/l	総 数	麻 痺 個 体 数					死 亡 個 体 数				
		直 後	2 分 後	4 分 後	8 分 後	16 分 後	直 後	2 分 後	4 分 後	8 分 後	16 分 後
なし	55	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	55	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	57～59	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1
10	76～86	0	0	0	0	0	0	0	1	1	3
100	71～82 1)	2	2	3	2 2)	2	0	0	0	1	4

註 1) 個体数を計数中、移動するために計測の誤差を伴なうから変化する。

2) 一旦麻痺したものが、時間の経過にしたがって活動を始めるものもある。

図1.15は銅イオンを添加しない場合と0.1mg/lの濃度にしてかつ超音波を併用した場合の死亡率の変化を示す。

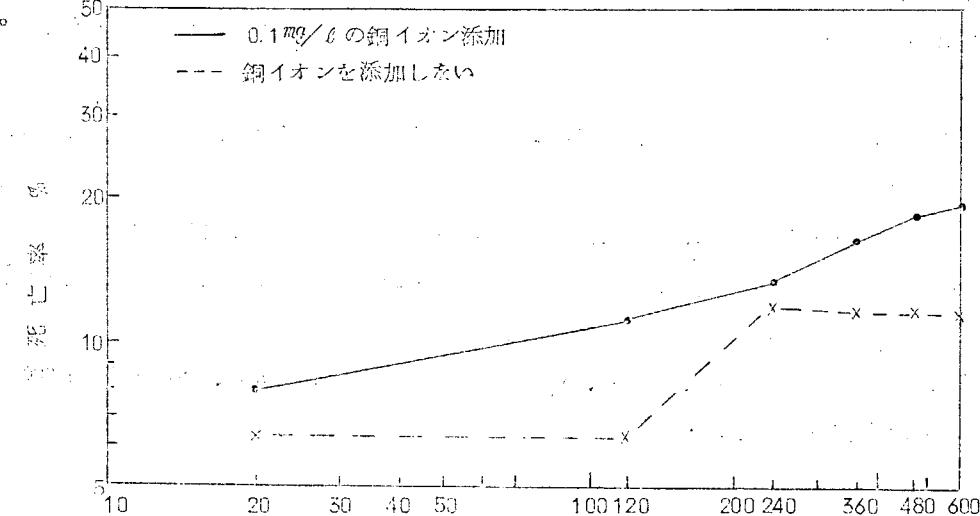


図1.15 ブラインショーリングに及ぼす超音波と銅イオンの影響 (2.8 KC, 0.1 bar, 0 W)

表1.2 ブラインシュリンプに対する超音波(28KC)照射と銅イオン添加併用の場合、時間経過に伴う死亡個体数の変化(%)

経過時間	20分	2分	4分	6分	8分	16分
① 試料のまま	0	0	0	0	0	0
② 銅イオン 0.1mg/l	0	0	0	0	0	0
③ 超音波 28 KC 0.1 bar	6.3	5.3	12.0	11.6	11.6	12.5
銅イオン、超音波併用実験値	8.0	11.2	13.6	16.7	18.1	20.0
①+②+③ 算術和	6.3	6.3	12.0	11.6	11.6	12.5
付加死亡率	1.7	4.9	1.6	5.1	6.5	7.5

表1.2に示すように、超音波と銅イオンとの併用によって付加死亡率が生じてくることがわかる。

図1.16は、周波数28KC、音圧0.2barのパルス波の照射時間に対する死亡率の変化を示す。他の実験結果と同様に、照射時間の増大によって死亡率の増加が見られる。

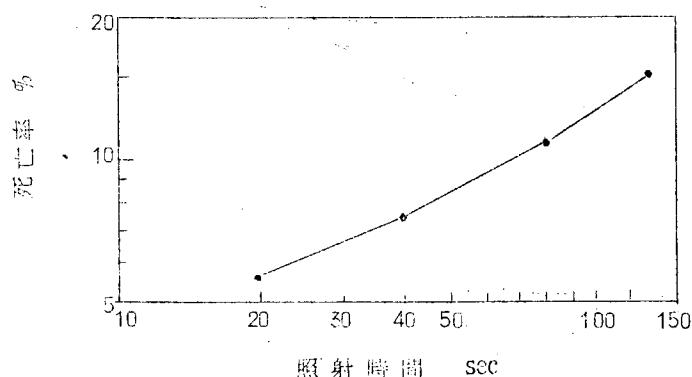


図1.16 ブラインシュリンプに及ぼす超音波パルス照射時間の影響
(28KC, 0.2bar, パルス幅10msec, パルス間隔1sec)

1.2.2 ノーブリウスに及ぼす超音波と銅イオンとの併用効果

周波数28KC、音圧0.1barの超音波を生後3日目のタテジマフジツボのノーブリウスに照射して死亡率を求めた。麻痺しているものは死亡個体数に $\sqrt{2}$ を加算した。

まず照射前の死亡個体数を求め、20秒、40秒、80秒、160秒、照射後の死亡個体数を顕微鏡下で数えた。これは、それぞれ違った試料によって3回づつ行なった。

実験後、各回の総和を求め、照射前の死亡個体数を差引くことによって、照射によって増加した死亡個体数の全数に対する比を求めた。

銅イオンを添加する場合も全く同様に行なったが、銅イオン(硫酸銅)と超音波は同時に与えた。

この結果は実験回数も多いのに、銅イオンを添加した場合の死亡率が超音波のみの場合より少ないようになっている。 $\text{No.4} \sim \text{No.6}$ 160秒 照射時だけが5.5%で同じ条件の超音波だけの結果3.8%を上回っているだけである。

また、周波数200KCについても全く同様に実験を行なった。

その結果を図1.17に示す。パルス幅10msec、パルス間隔1sec、音圧0.1bar、ノーブリウス発生後第1日目で、銅イオンは0.1mg/lの濃度になるようにした。

表1.3 ノーブリウスに対する持続波超音波と銅イオンとの併用効果(死亡率, %)
(28KC, CW, 0.1 bar)

	CWのみ No.1～3	CWと0.1mg/lの銅イオン	
		No.1～No.3	No.4～No.6
照射前	0	0	0
20秒照射	11.5	5.2	7.0
40秒〃	30	6.5	5.1
80秒〃	31	15.2	26
160秒〃	38	28	55

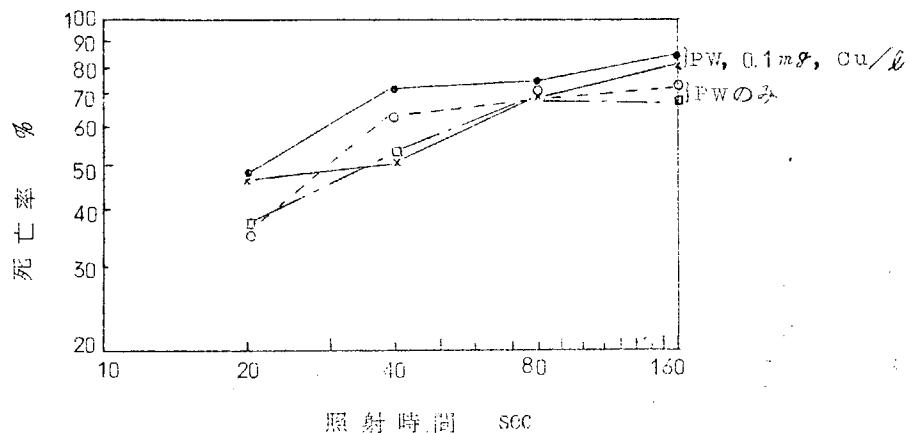


図1.17 ノーブリウスに対する超音波および銅イオンの併用効果
(200 KC, 0.1 bar, 340 g, パルス幅10 msec, パルス間隔1 sec)

PWだけの場合よりも、銅イオンを添加した場合の方が効果が上っている。銅イオンのみ1.0 mg/lの濃度で $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ を添加した場合、生存率が50%となるのに8.4時間を要すると Pyefinch と Mott は報告している。

また、彼らは、各濃度の銅溶液中でシブリスの活動が停止する日数を求めており、0.5 mg/lで1日、0.1 mg/lで3日、0.05 mg/lで4～5日となっている。

本実験では、0.1 mg/lであるから、160秒の照射と死亡個体の計数に要する1分程度の間なら、銅イオンの影響はないと考えて支障はない。図1.17の結果において銅イオンの添加効果は単純に両者の差と考えてもよいであろう。

1.2.3 トロコフオアに及ぼす超音波と銅イオンの併用効果

ムラサキイガイのトロコフオアに対して上記同様の実験を実施した。

図1.18は28KC、CWの超音波を照射前死亡率0の試料に照射した結果を示す。実線と破線との差は銅イオンの影響と見てよい。

図1.19は28KC、PW(パルス幅100msec, パルス間隔1sec)と銅イオンの併用効果を示している。

両者について銅イオンの効果が明瞭である。特にPWにおいてその差の大きさがわかる。

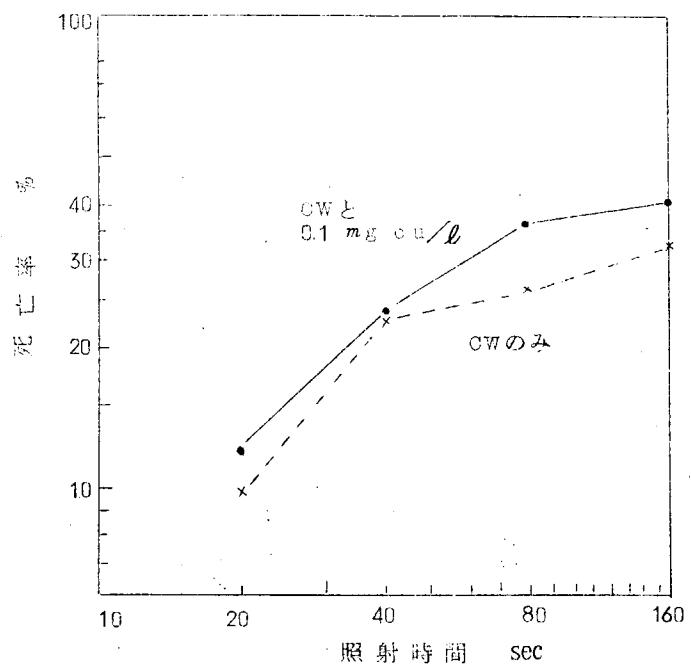


図1.18 ムラサキイガイのトロコフオアに対する超音波と銅イオンの併用効果
(28 KC, CW, 0.1 bar) (注) 照射前は死亡率は0

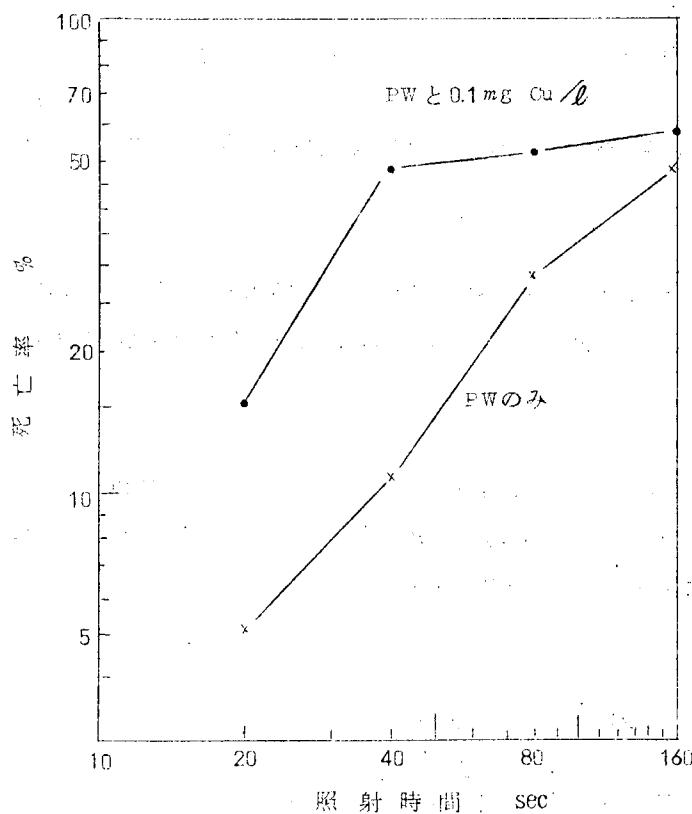


図1.19 ムラサキイガイのトロコフオアに対する超音波と銅イオンの併用効果
(28 KC, PW, 0.1 bar, パルス幅10.0 msec, パルス間隔1 sec)

1.2.4 結論

- (1) ブラインシュリンプに銅イオンと超音波を併用すると死亡率が付加される。
- (2) ノーブリウスについて 0.1 mg Cu/l の硫酸銅液中で持続波超音波を併用すると照射時間が長くなればさらに効果が増加する。200 KC パルス波を照射すれば銅イオンを添加した場合の方がやや効果が大きい。
- (3) トロコフオアについて銅イオンと超音波を併用すれば、持続波よりもパルス波の方がその効果の増加が大きい。

2 ホーンの形状検討

2.1 波形特性の解析と測定

2.1.1 板面に沿った振動の加速度ピックアップの試作

実船縮小模型で縦波伝播特性の測定を行なうためには、測定周波数である100 kHz付近で使用可能な振動ピックアップが必要である。この目的に沿うピックアップは市販されていないので、新たに考案したピックアップの試作を日本特殊陶業K.K.に依頼した。でき上った試作品は、感度が理論的設計値より低く、かつ、ばらつきが大きかつたが、本実験には十分使用可能であった。

(1) 接線方向加速度ピックアップの原理

図2.1のようにピックアップを縦振動する鉄板の上に導電接着剤を用いて接着する。ピックアップはジルコン酸チタン酸鉛磁器(以下PZTといふ)の薄板を、鉄板の振動方向に予め分極したものの上下両面にニッケル電極を電解メッキしたものである。鉄板が板面に沿った振動を行なうと、PZT薄板には厚みすべりひずみが生じ、その結果、振動加速度の分極方向成分に比例した電圧が出力端子に現われることになる。

PZTの厚さが厚みすべり振動の波長に比べて十分小さい場合には、感度の理論値は次式で求められる。

$$\frac{\text{開放出力電圧 } E_0 \text{ (V)}}{\text{加速度分極方向成分 } \alpha \text{ (G)}} = g_{15} \frac{\rho t^2}{2} \times 980 \quad (2.1)$$

ここに ρ は PZT の密度(約7.8/cm³)、 g_{15} は厚みすべり振動に対する出力電圧係数(約 2×10^{-5} V/cm²μbar)で、 t は PZT の厚さで試作品では1mmである。したがって試作品の感度の理論値は、約700 μV/Gである。

(2) ピックアップの感度の測定

試作したピックアップの寸法は、長さ7mm、幅5mm、厚さ1mmであり、これを図2.2の校正装置を作つて感度校正を行なったところ、多数のものについての平均値は約3.5 μV/Gで、理論値の700 μV/Gに比べて非常に小さく、かつ感度のばらつきも大きかった。その理由は不明である。

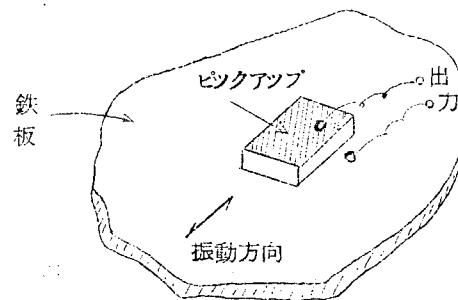


図2.1 ピックアップの接着

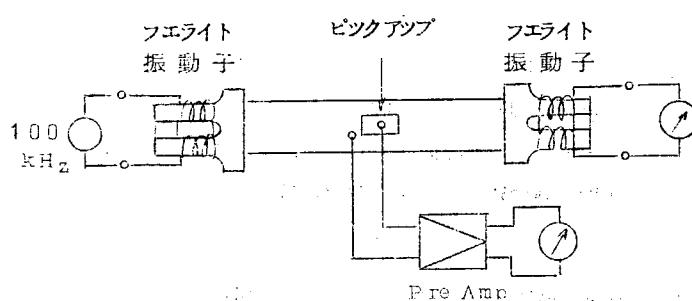


図2.2 感度校正装置

2.4.2. 縦波の減衰の測定および幅の広い板にのる振動の測定

船の舷側板の面に沿った適当な振幅の振動、たとえば縦波とか剪断波を付与すると防汚が経済的にも行なえそうなことは、昭和42年夏季の諸磯湾における実験から想像される。

しかし、この実験では波長にくらべて細い板の縦振動共振を利用して振動姿態が単純で、しかも励振も楽に行なえたが、実船では広い面積の舷側板を所要のモードで励振することが必要であるが、板の振動にくらべて板の振動は振動可能の自由度が多く、目的とするモード以外の振動モードが発生し、場合によっては不要なモードが勢力的に大きくて目的とするモードのエネルギーがくわれてしまうようなことも考えられる。

できるだけ目的とするモードが励振できるように工夫するため、3種の寸法の異なる試験板を試作し、その長手方向の端面に振動子を接着して板の励振を行ない、板にのる振動の模様を観察し、これから目的とするモードの励振法を考えることとした。

その結果、板にのるモードは、波長にくらべて狭い板では縦振動と曲げ振動の高次モードが重複したモードがあること、幅の広い幅方向に剪断的な振動ののる板では縦、剪断振動と高次の曲げ振動が重複したモードがあることが多いことがわかった。

また、板の面に垂直方向に適当な拘束を与えると、割合簡単に曲げ振動は減衰するが、縦および剪断振動はなお強勢にのることがわかった。これから、実船では補強材が各所に配置されていること、また板の片面は海水に接し、この実験で使用した試験板のように周辺自由でしかも空中で振動させるのと異なり、かなりの曲げ振動に対する拘束が大きいので、板の面に沿うような駆動法をとれば治具からの出力振動パワは大体目的とする縦波および剪断波など面に沿うた振動を励振するのに消費され、防汚の目的に寄与するものと考えられる。

(1) 試験に用いる板

次に述べるように3種の寸法の板を用意した。

(a) 厚さ7mm(昭和43年度実船試験に予定されている「みょうじょう」の舷側板の厚さ)、幅40mm、長さはこの測定に使用した28kHz(これも昭和43年度の実船試験に予定されている周波数)に対して縦波の10波長ののる長さにした。

この場合、板の材料は鋼を使用したので、板に沿うた縦波の音速 c_p が $c_p = \sqrt{E/\rho(1-\lambda^2)}$ だから、
 $E = 2.03 \times 10^5 \text{ dyne/cm}^2$ 、 $\rho = 7.83 \text{ g/cm}^3$ 、 $\sigma = 0.25$ を代入すると

$$c_p = 5.32 \times 10^5 \text{ cm/sec}$$

したがって、周波数28kHzにおける1波長 λ_p は

$$\lambda_p = c_p / f_0 = 190 \text{ mm}$$

試験板の長さは10波長としたから、1900mmとなる。図2.3に寸法諸元を示した。

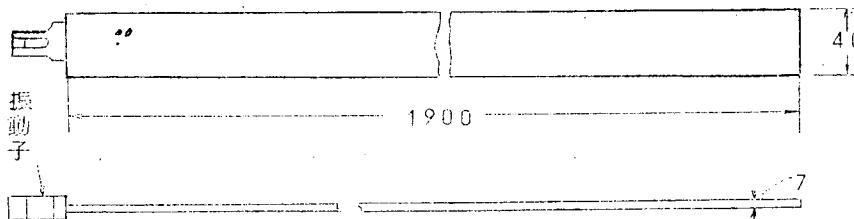


図2.3 幅の狭い試験板の寸法諸元

(b) 幅の広い板

1枚は厚み7mm、長さは28kHzで板に沿うた縦波の波長(上記の値)の5倍(5波長)で950mm、幅は幅方向にのる剪断波の28kHzにおける1波長の長さを選んだ。

剪断波の伝搬速度 c_s は $c_s = \sqrt{G/\rho}$ で与えられるので、板の材料を鋼としたので $c_s = 7.9 \times$

$10^{11} \text{ dyne/cm}^2$, $\rho = 7.8 \text{ g/cm}^3$ を上式に代入すると、

$$c_s = 3.18 \times 10^5 \text{ cm/sec}$$

28 kHz における1波長 λ_s は

$$\lambda_s = c_s/f_0 = 113.6 \text{ mm}$$

したがって、幅は 113.6 mm にした。図 2.4 にこの板の寸法諸元を示した。

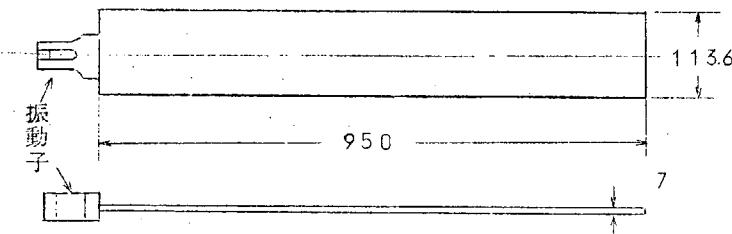


図 2.4 幅が剪断波の1波長ある試験板の寸法諸元

他の1枚の板は、厚さ 7 mm、長さは板の綫波の 28 kHz における波長の 5 倍で 950 mm、また幅は幅方向の剪断波の 28 kHz における波長の 2 倍、すなわち上記の計算から 227.2 mm とした。

図 2.5 にこの板の寸法の諸元を示した。

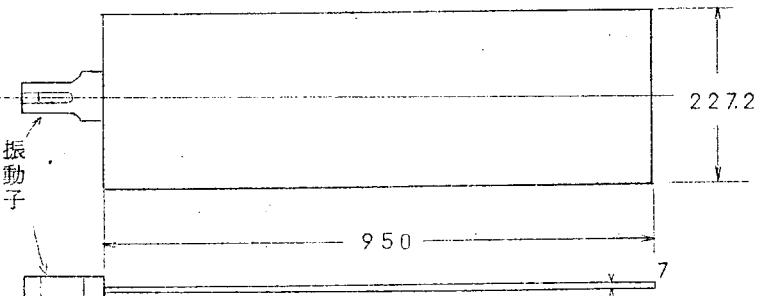


図 2.5 幅が剪断波の2波長ある試験板の寸法の諸元

(2) 実験の方法

各試験板の長手方向の片端面に π 形フェライト 28 kHz 共振の振動子（端面幅 40 mm、厚さ 20 mm）を各 1 個、瞬間接着剤で接着して励振した。

板の振動の模様は表面によく乾燥した砥粒粉（#200 程度の粒子）をまき、板を振動させた時表面にできる粉末模様を観察して板の振動モードを推察した。

(3) 測定の結果

28 kHz を中心として約 10 kHz 程駆動発振器の発振周波数を変えて、板の表面にあらわれる粉末図形を観察した。

その結果、板の表面にあらわれる模様はかなり複雑であるが大体各試験板について次のようなことがわかった。

(a) 幅の狭い板

この場合は板が純粹な綫共振だけをする周波数が存在する。（28 kHz 附近）

しかし、一般的には写真 2.1 に 1 例を示すような模様を示す。周波数を変えると粉末の間隔が多少変化するだけである。

この模様、および粉末のならび間隔、規則性および板の寸法、材質、駆動周波数を考慮して解析を進めた結

果、このパターンは縦波と高次の曲げ振動とが併存する結果発生することがわかった。

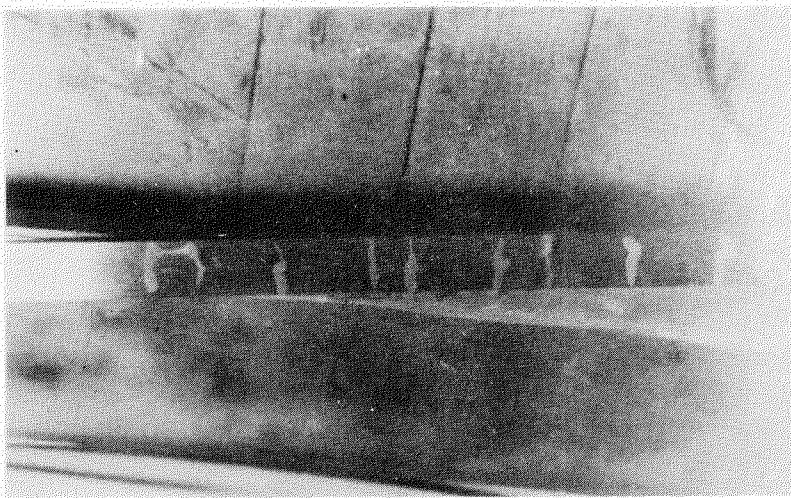


写真2.1 幅の狭い板の振動した時の粉末図形の1例

また、この板の面に垂直方向に大きな質量を介して静圧力を適当に加えると曲げ振動は割合簡単に消失し、単純な縦振動パターンが観察された。

これは、曲げ振動の駆動インピーダンスが小さく、僅かの曲げの励振力が存在しても板に曲げ振動を拘束するもののない周辺自由なこのような試験板ではかなりの振幅で振動し得ると考えられるが、一方縦振動は駆動点インピーダンスが曲げ振動にくらべてかなり大きく、したがって強勢な振動をするためには大きな励振力が必要なこと、また曲げ振動が割合小さな拘束でたちまち減衰するのにくらべて縦振動はもともと機械インピーダンスが大きなことから曲げにくらべて拘束による影響が小さるために上述のような現象があらわれるものと考えられる。

また、以上のような考え方が成立つとすると、この場合の振動でも、駆動振動子が縦波を駆動し易いように接合されていることから振動のエネルギーとしては縦振動の方が圧倒的に大きいのではないかと考えられる。

結局、複合振動が励振されてもわれわれの目的とするモードがパワの大半を占めるように励振できればよいので、必らずしも单一モードだけをねらう必要はない。

(b) 幅の広い板

この場合は縦、曲げの振動のほか幅方向の剪断振動がカントリブルするのでなお一層複雑な粉末模様を呈すると考えられる。

写真2.2は、幅が剪断波の1波長の板の振動图形の1例で、粉末の長手方向の間隔は板の縦波の $\frac{1}{2}$ 波長に等しく（板の端に最も近い粉末の中心は端面から $\frac{1}{4}$ 波長の間隔）、また中央部に粉末が集中堆積するのは幅方向の剪断波の振動分布によるものと考えられる。

これ以外の周波数では、むしろ縦振動と曲げの高次振動の結合して生じたと考えられる粉末模様が観察された。

また、この場合にも板の面に垂直に適当な拘束を与えると曲げ振動が急激に減少し、縦と剪断振動がのこることが観察された。

写真2.3、2.4は幅が剪断波の2波長に等しい板の粉末图形の例で、写真2.3は板の縦振動と幅方向の剪断振動の複合振動であり、また写真2.4は板の縦と曲げと剪断振動の3つが各々の位相と振幅とをもって干渉し

あつてできた模様であることが検討の結果明らかとなった。

この板でも、板面上に垂直に拘束を加えると曲げが減衰し、縦と剪断振動とが干渉した図形を呈することが観測された。

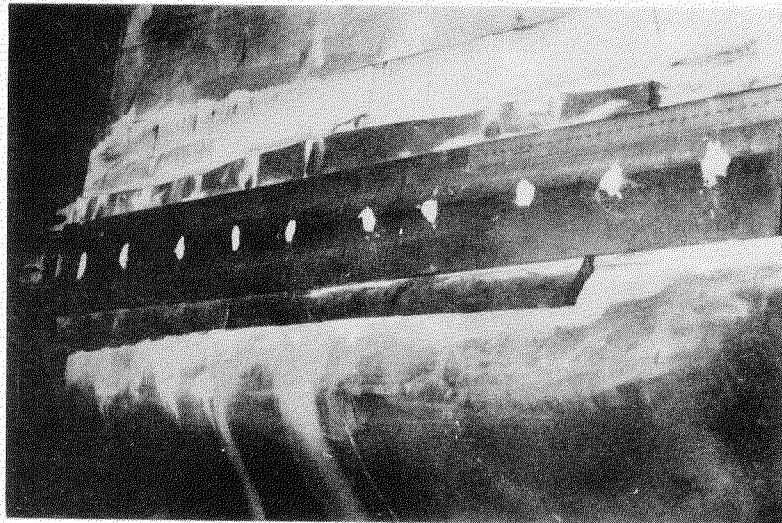


写真 2.2 幅が剪断波の 1 波長である板の振動粉末図形の 1 例

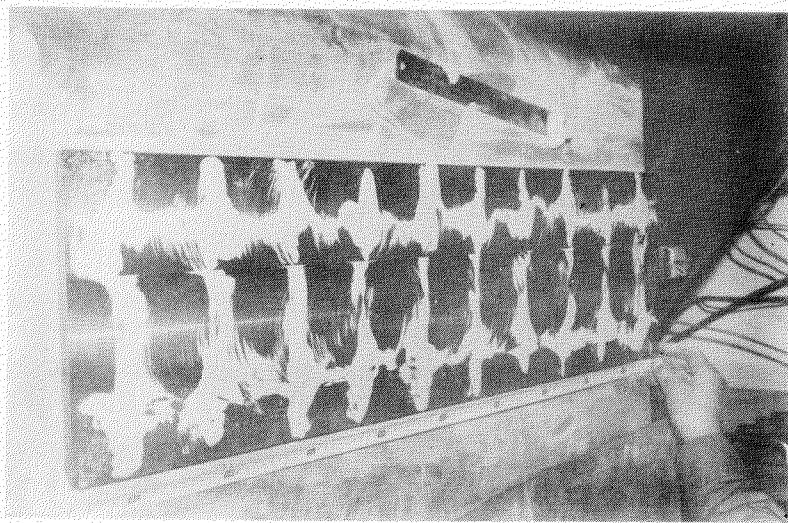


写真 2.3 幅が剪断波の 2 波長である板の振動粉末図形の 1 例

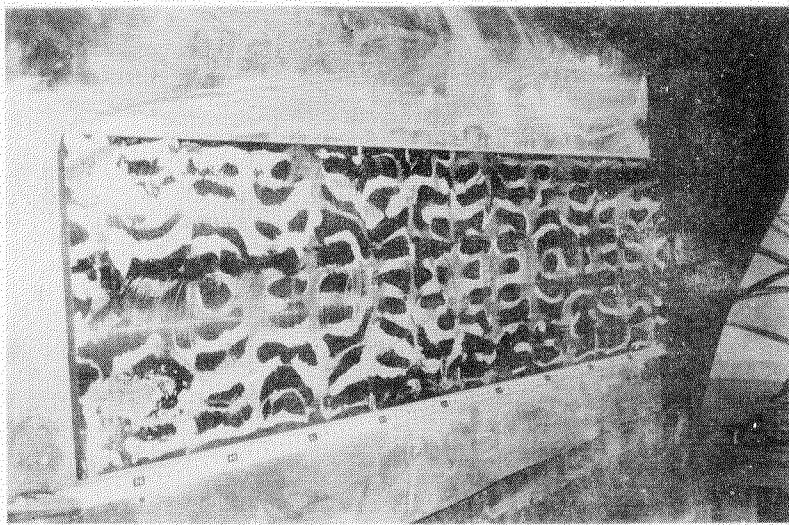


写真2.4 板の幅が剪断波の2波長である板の振動粉末图形の1例

(4) む す び

船板を想定して、モデル試験板を作製し、その端面に振動子を接着して励振を行ない、板の面の振動の模様を粉末图形で観測した。その結果、

- (a) このように縦および剪断振動だけを励振するように振動子を接合しても、このような周辺自由を板では必ずといっていいくらい曲げ振動が結合してきて、一見複雑な振動模様が発生する。
- (b) 面に垂直な方向から拘束を加えると曲げ振動は急激に減小する。このことから、曲げの励振力が小さく、ただ曲げの機械インピーダンスが小さいので、場合によつては振動が *run down* するのであらうが、総体的にその振動エネルギーは小さく、大半のエネルギーはわれわれの目的とする縦および剪断の面に沿うた振動に費さるものと考えてよかろう。
- (c) 実船（進徳丸）で船板の面に沿うての振動を強制する治具を使って駆動インピーダンスを測定した例では、振動系（振動子と治具からなる系）の自由インピーダンス軌跡は单一の円となつた。仮に曲げの高次の振動が強くおきていると单一の円の軌跡にはなりにくくと考えられるので、この場合には主体的に板の面に沿うた縦および剪断振動が励振されているものと考えられる。

以上から、実船では曲げ振動を拘束し易い条件が存在するので、板の面に沿うて振動を付与するような励振を行なう限り、大体のところわれわれの目的とする縦および剪断の振動を与えることができるものと考えていふ。

2.1.3 実船縮小模型による波の伝搬状況の測定

長さ1.8 m、幅1 m、厚さ4.5 mmで、周辺部分に吸音材を接着した鉄板の片面に、多数の振動ピックアップを接着し、フェライト振動子で100 kHzのパルス波で縦波駆動して、振動の分布を測定することを試みたが、ピックアップの感度が前述のように不揃いであったことと、各種の振動モードが発生して受信波形が複雑になるために定量的なデータを得ることができなかつた。そこで次のような残響法を考案して測定を行なつた。

(1) 残響法の原理

原理の概略は次のようである。この場合、次の仮定が成立するものとする。

仮定1. 鉄板上の振動エネルギーの分布は一様である。

鉄板の寸法があまり大きくなく、かつ縦波の減衰定数が小さい場合にはこの仮定は成立する。実験に使用したものではこの仮定は十分に成立した。

仮定2. 鉄板の周縁では振動は完全反射する。

実験に使用した鉄板は厚さ 4.5 mm と 2 mm の 2 種類であり、鉄板の端面から水中への音響放射は極めて小さいはずであるので、この仮定も十分成立していると考えられる。

以上の仮定から出発して次の結果が得られる。

鉄板を縦波駆動し、鉄板上の振動エネルギーの分布が一様となった後、駆動を停止すると、鉄板上の縦波の振動エネルギーは、ほぼ

$$a_e = 2 c_p \alpha' p \quad (2.2)$$

の時定数で対放減衰する。ここに c_p は縦波の伝播速度で、波長に比べて薄い鉄板では約 5300 m/sec 、 $\alpha' p$ は曲げ振動などの他の振動モードへの変換のために生じた見かけ上の減衰も含めた、実際的な縦波の減衰定数 [neper/m] である。そこで、鉄板上に接線加速度ピックアップを接着して、ピックアップ出力の減衰の時定数

$$a_p = \frac{1}{2} a_e = c_p \alpha' p = c_p \frac{2.3}{20} \alpha_p \quad (2.3)$$

を測定すれば、鉄板の実際的な状況下の減衰定数 α_p [dB/m] が測定できる。

(2) 縦波減衰定数の測定装置

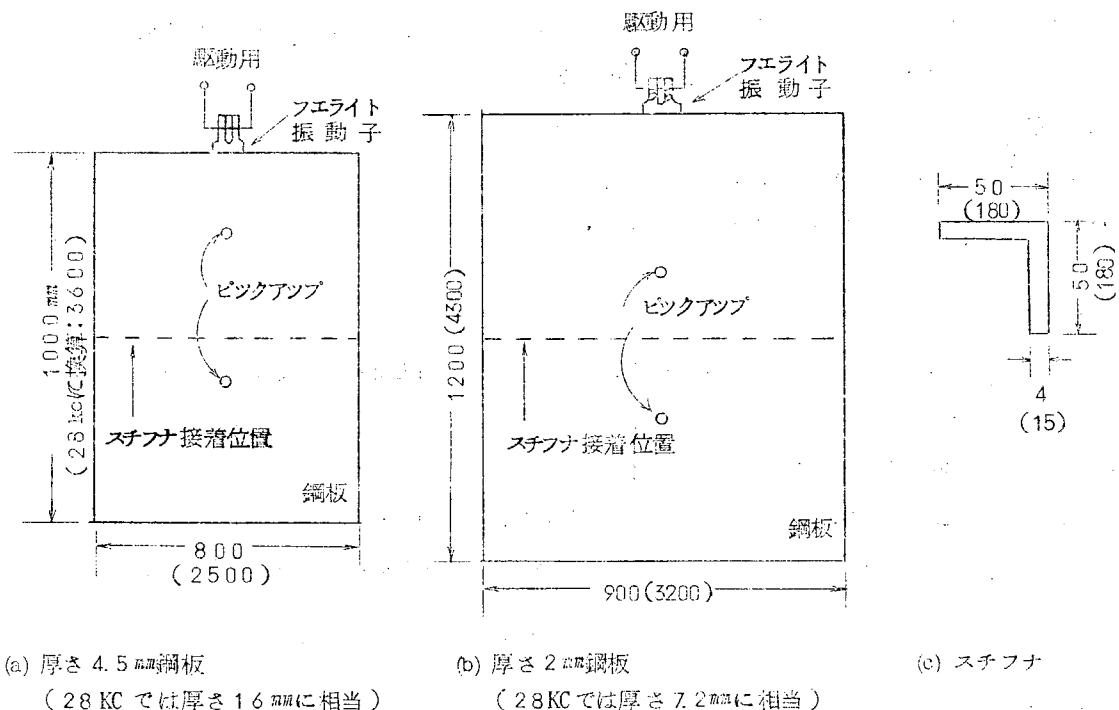


図 2.6 測定装置

図 2.6 のような厚さ 4.5 mm と 2 mm の 2 種類の鉄板の端面に、100 kHz 用フェライト振動子を接着して縦波駆動した。厚さ 2 mm のものは、43 年度の実船実験に使用予定の「みようじょう」の縮小モデルと見なしうる。図 2.7 に測定回路のブロック図を示す。

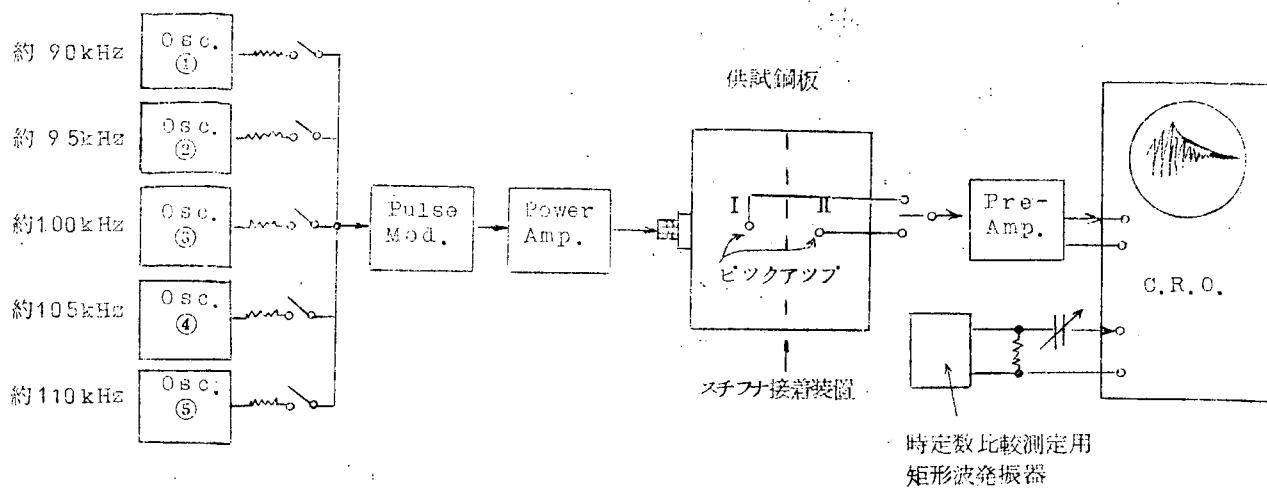


図 2.7 測 定 回 路

図 2.7において約 90 ~ 110 kHz の 5 台の発振器を使用したのは、残響波形を綺麗な対数減衰波形とするためであり、実験ではほぼ満足な残響波形とすることができた。

(3) 測定結果

(a) スチフナをアロシアルファで接着しても、スチフナの前後に接着してある 2 個の振動ピックアップの出力の比はほとんど変化がなかった。このことから、スチフナからの縦波の反射が極めて小さいことがわかった。

表 2.1 ~ 2.6 に、緩解時間の測定から得られた縦波減衰定数の測定値を示す。

(b) 鋼板のみの場合(スチフナなしの場合)、片面接水時には、41 年度報告の理論値、100 kHz、4.5 mm 厚で約 0.58 dB/m、2 mm 厚で 0.17 dB/m に比べて、4.5 mm 厚では約 1.6 倍、2 mm 厚では約 4.3 倍大きい。これは、前年度報告では省略していた、内部損失による減衰のためと考えられる。2 mm 厚のものでは、さらに、曲げ振動への変換による減衰も寄与しているものと考えられる。

(c) スチフナ接着によって減衰定数が大きくなるのは、接着剤の吸収減衰と、曲げ振動への変換が増加したための 2 者が考えられる。スチフナ密着の場合には前者は小さくなると思われる。

表 2.1 4.5 mm 鋼板スチフナなしの減衰定数 (dB/m)

ピックアップ	片面接水	空気中	差
I	0.68	0.40	0.28
II	0.55	0.33	0.22
平均	0.61	0.36	0.25

表 2.2 4.5 mm 鋼板スチフナ付きの減衰定数 (dB/m)

ピックアップ	片面接水	空気中	差
I	0.81	0.45	0.36
II	0.76	0.39	0.37
平均	0.78	0.42	0.36

表 2.3 4.5 mm 鋼板スチフナ付きとなしの減衰定数の差 (dB/m)

	片面接水	空気中
平均	0.17	0.06

表 2.4 2 mm 鋼板スチフナなしの減衰定数 (dB/m)

ピックアップ	片面接水	空気中	差
I	0.79	0.54	0.25
II	0.68	0.51	0.17
平均	0.73	0.52	0.21

表 2.5 2 mm 鋼板スチフナ付きの減衰定数 (dB/m)

ピックアップ	片面接水	空気中	差
I	0.91	0.71	0.20
II	0.84	0.65	0.19
平均	0.87	0.68	0.19

表 2.6 2 mm 鋼板スチフナ付きとなしの減衰定数の差 (dB/m)

	片面接水	空気中
平均	0.14	0.16

(4) 実船における場合についての考察

43年度実施予定の「みようじょう」で28kHzで縦波駆動する場合について考察する。

縮小モデル実験における2mm鋼板の場合に相当するので、スチフナなしの場合の減衰定数は、実船では $0.73 [dB/m] \times \frac{2.8}{100} = 0.2 [dB/m]$ となる。ただし、材料内部の吸収による減衰はさらに小さくなると考えられるので、 $0.2 dB/m$ よりは小さくなる可能性はある。

実船では550mm間隔でスチフナがある。したがって縮小モデルの場合、7.8本のスチフナを取り付けたことに相当する。スチフナ1本について $0.14 dB/m$ だけの減衰定数の増加とし、減衰定数の増加がスチフナの本数に比例すると考えれば、スチフナ7.8本による減衰定数の増加は、 $0.14 [dB/m] \times 7.8 = 1.1 [dB/m]$ となる。実船では換算すれば、 $1.1 [dB/m] \times \frac{2.8}{100} = 0.3 [dB/m]$ となる。ただし、実船ではスチフナの寸法はもっと小さいので、 $0.3 dB/m$ よりは小さくなると考えられる。

実船では、上述のほかに塗膜による減衰の増大と、船体内部の構造物への伝播のために減衰定数が増大することが考えられるが、上記の要因による減少と相殺されて、恐らく $0.2 + 0.3 = 0.5 [dB/m]$ の程度の減衰定数になると想像される。

(5) 「みようじょう」における防汚範囲に関する考察

実船において、1点で駆動する場合は振動が拡散して減衰し、防汚面積が非常に小さくなると考えられる。これに対し、駆動点をある程度分散し、しかも反射材を外板に接続して、反射材に囲まれた範囲内に振動エネルギーを閉じこめることができれば、その範囲内では振動の分布はほぼ一様となって、比較的少ない超音波のパワーで防汚できると考えられる。

防汚効果のある加速度域値を300(G)peakとしたとき、28kHzにおける速度域値速度域値 v_T 〔実動値〕は $v_T = 300 \times 9.8\sqrt{2} \times 2\pi \times 28 \times 10^3 = 1.2 \times 10^{-2} [m/s]$ となる。このとき、外板の単位面積に蓄積されている縦波のエネルギー E_P は、(鉄板の密度： ρ 、厚さ： t)

$$E_P = \rho t v_T^2 \quad (2.4)$$

単位面積当たり外部から供給される縦波パワー P_P と E_P との間には、振動パワーを閉じこめられた範囲内では、
(α'_P [neper/m]:縦波減衰定数])

$$P_P = 2\alpha'_P E_P \quad (2.5)$$

となるので、 $\alpha'_P = 53.20 m/s$ 、 $t = 7 \times 10^{-3} [m]$ (7mm)の数値と、 $\alpha_P = 0.5 [dB/m] = 8.7$
 α'_P と仮定した値を代入し、防汚加速度域値を得るために P_P を求めてみると、

$$\begin{aligned} P_P &= \frac{1}{8.7} \times 2 \times 0.5 \times 53.20 \times 7.8 \times 10^3 \times 7 \times 10^{-3} \times 1.2^2 \times 10^{-4} \\ &= 4.8 [W/m^2] \end{aligned} \quad (2.6)$$

したがって、1m²当たり最低約5Wの音響パワーが必要であり、もし音響出力100Wの振動子で縦波駆動すれば、最大約20m²の面積の範囲が防汚できると考えられる。なお、このためには防汚範囲の周囲を反射材で完全に囲んでおくことが重要である。

2.1.4 船側板ならびに付属構造体の振動計測用の加速度ピックアップの試作、およびその振動面への装着法

前年度の研究の結果により、船側板へ付加する超音波振動の振動様式として、あらたに船側板の板面に沿った振動方向をもつ波動(板に沿って伝わる縦波およびすべり波)の方が、それまで主として試みられて来た板面に垂直な方向の振動(屈曲振動)によるよりも水中への音響的エネルギーの散逸が少ないので有利であるとの結論が出されたため、本年度の研究においては板の垂直方向の振動振幅のみでなく、板に沿った方向の振動振幅も同時に測定することが見込まれ、したがってそれに使用することのできる加速度ピックアップ装置の開発が必要となった。

つぎにこのような板面の接線方向振動の測定の場合もふくめて、30kHz程度までの、機械振動計測としては

きわめて高い周波数において、振動面に振動ピックアップを装着することの実用的検討が従来ほとんど得られていなかったので、実船による実験の場合を想定してその装着法に関する実験的検討を行なった。その結果装着面に垂直な振動成分を測定する場合には、現在市販され、また広く用いられている装着方法がいずれも高い信頼度で使用できることがわかったと同時に、装着面に沿った接線方向の振動を測定する場合には、それらの装着方法のはほとんどに致命的な欠陥があることがあきらかになった。

(1) 振動加速度ピックアップの試作と校正

(a) 加速度ピックアップの試作

振動加速度ピックアップの基本的な構造は図2.8に示すようなもので、圧電素子(チタンジルコン酸鉛等)を基板と質量(Mass)となるべきものとの間にはさみこみ接着したものである。被測定点へねじまたは接着剤でとりつける。被測定点の振動の加速度により質量(Mass)に慣性力が働き、この慣性力で圧電素子に歪が、その歪に比例した電圧が output 端に現われる。すなわち加速度に比例した電圧を取り出すことができる。質量(Mass)の慣性力により圧電素子に加わる力は

$$F = m \ddot{x} \quad (N) \quad (2.7)$$

ここで m : 質量(Mass)の質量(kg)、 \ddot{x} : 加速度の大きさ(m/sec^2)

この力によって圧電素子に生ずる電荷は

$$q = 2 d_{33} m \ddot{x} \quad (Coulomb) \quad (2.8)$$

ここで d_{33} は圧電定数で分極が z 軸とする場合の z 軸方向に力が加わったとき z 軸に直角な面上に発生する電荷を表わす定数で、圧電素子の静電容量は

$$C_e = \frac{\epsilon \pi D^2}{2 t} \quad (F) \quad (2.9)$$

ここで ϵ : 誘電率、 D : 圧電素子の直径、 t : 圧電素子の厚さ、この圧電素子に生ずる開放端出力電圧は

$$v = \frac{4 d_{33} m \ddot{x}}{C_e} \quad (V) \quad (2.10)$$

たとえば我々が試作した加速度 Pick-up のうちの一例は図2.9のような構造であり、その感度は(2.10)式に次のような定数を代入すると



図2.8 加速度ピックアップの原理図

$$m = 2 \times 10^{-3} \text{ (kg)}$$

$$t = 0.45 \times 10^{-3} \text{ (m)}$$

$$\pi (\frac{D}{2})^2 = 2 \times 10^{-6} \text{ (m²)}$$

$$g_{33} = \frac{d_{33}}{\epsilon} = 1.69 \times 10^{-8} \text{ (V/N)}$$

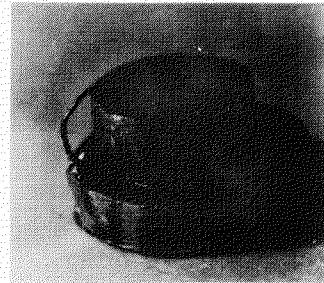


図2.9 加速度ピックアップ

感度 7.5 (mV/g) より重力の加速度 ($9.8 m/sec^2$) を得ることができる。

実験の製作にあたって、本測定の目的にそういう加速度ピックアップは次のような条件を満足しなければならない。

(i) 機械的に十分な強度を持たなければならない

現在までの報告（水産大学による）では、フジツボの付着をさまたげるために必要を振動加速度の大きさは少なくとも $300 g$ 以上の大さが必要である。この大きさの振動を船側板のかなり広い面積（数m²以上）にわたって付与するためには、その加振点の近傍には少なくとも数 $1000 g$ 以上の振動加速度が加えられなければならない。すなわち加速度ピックアップは数 $1000 g$ 以上の大きさの加速度測定にも正常な動作を行なうものでなければならない。

付与振動の変化を長期間（数ヶ月以上）にわたって観測するためには、加速度ピックアップを船側板上へ取り付け後、長期にわたって放置するので、船内の湿度、温度に十分なえられるものでなければならない。

我々が試作している加速度ピックアップはその構造上または原理上質量（mass）と圧電磁器素子、また圧電磁器素子と基板間の接着剤がこれらの条件を左右すると考えられる。

用いた接着剤はシアノアクリレート系接着剤（アロンアルハル201）およびエポキシ系接着剤（スーパーセメダイン）の2種である。シアノアクリレート系の接着剤は圧電素子の銀膜電極と引き出し電極との間の接触、接着の迅速性等の点では優れているが接着強度の点ではエポキシ系の方が優れている。またシアノアクリレート系のものは、温度、および熱に対しては不安定な特性を示す。これらの点を考慮して、我々はエポキシ系接着剤を用いて試作した。超音波加工機のホーンの先端に試作ピックアップを接着しB&K社の加速度ピックアップ（Type 4356）と比較しながら、20 kHz, 5000 g で5時間振動を加えた結果、出力電圧には変化はなかった。加速度はピックアップの強度に関係するもう一つの要素は、圧電器材に装着してある銀膜電極の強度である。これは当研究室で試作したピックアップを質量（mass）と圧電材料の接着面（図2.9 A点）で破壊した場合に大部分のものが、質量（mass）の方へ銀膜を伴なって破壊するので、エポキシ系接着剤を使用した場合には、接着剤の接着強度より銀膜の接着強度が問題になるであろうと思われる。しかしこれも上記耐久性試験から船側板の振動分布測定には問題ないと思われる。

(ii) 質量（mass）の高さによる周波数特性の問題

図2.9の構造の加速度ピックアップで圧電素子上の質量（mass）が被測定振動の波長に対してある程度以上高くなると、質量（mass）が集中定数としては考えられなくなり、質量（mass）を分布定数（いわゆる波が乗る）として考える必要がある。^{*} 加速度ピックアップの感度をよくするには(2.10)式から判るように、質量（mass）の質量を大きくすればよいのであるが、このためには質量（mass）として比重の大きいものを用い、またその高さを高くしなければならない。しかしこの問題も、本研究会の実船試験におけるように非常に大きい振動を計測するときは、上記試作ピックアップでも十分大きい出力電圧を（例えば $100 g$ では $0.75 V$ ）を得ることができるからより問題にはならない。以上の考察から我々が試作した加速度ピックアップは本研究の遂行上十分に実用的に使用可能である。

(b) 加速度ピックアップの校正

加速度ピックアップの感度校正をするのに、感度の絶対値を知る方法として、加振器でピックアップを振動

* 一般に質量（mass）を集中定数として取り扱える範囲は

$$\frac{\omega t}{\phi} < \frac{\pi}{8}$$
 の範囲である。

$$\omega = 2\pi f \quad f ; \text{振動周波数}$$

ϕ ; Mass 中の音速

t ; 質量（mass）の高さ

させ、振動周波数と振動の振幅を（光学顕微鏡等）を測定し加速度を知り被校正用ピックアップの出力電圧とから感度の絶対値を知る、また3個のピックアップを用い、2個づつの組合せを用いて、入力電圧と出力電圧の比から感度積を求め、これをちがった組合せで3回行ない、これから個々の感度を求める。いわゆる相互校正があるが、ここでは感度の既知のピックアップの出力電圧と、同一の振動面に取りつけた被校正用ピックアップとの出力電圧を比較してその感度を知る比較校正法を用いて、加速度ピックアップの比較校正を行なつた。

標準の加速度ピックアップとして Brüel & Kjaer 社製 (Type 4336) を用いた。その感度は 4.6 mV/g で周波数特性は図 2.1 0 のようなものである。測定は図 2.1 1 のような、比較校正装置によつた。校正試作した加速度ピックアップの校正例を図 2.1 2 に示す。感度は 4.1 mV/g であり、誤差 4 dB 内にあることが判る。

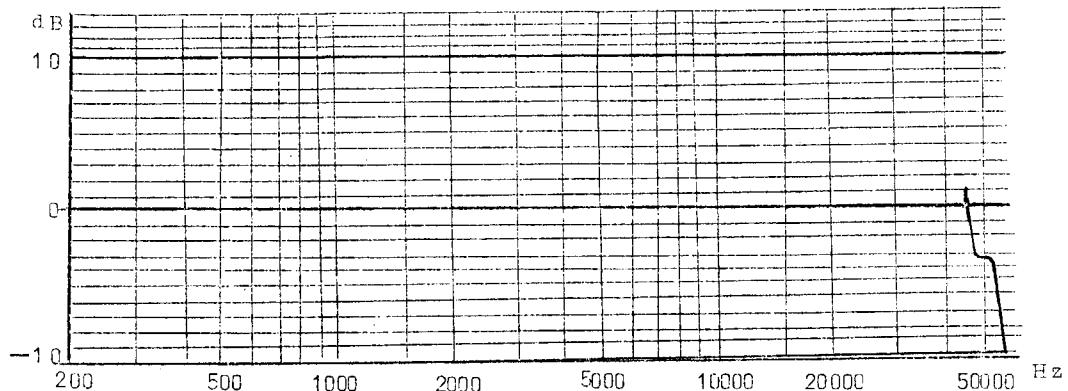


図 2.1 0 標準加速度ピックアップの特性

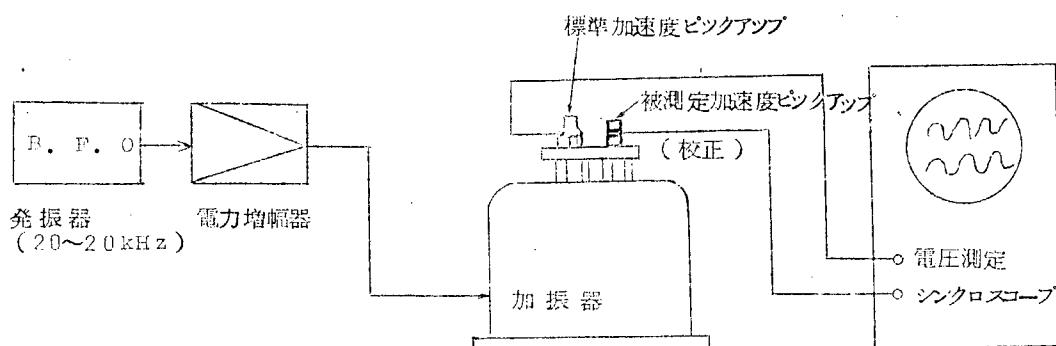


図 2.1 1 比較校正の装置

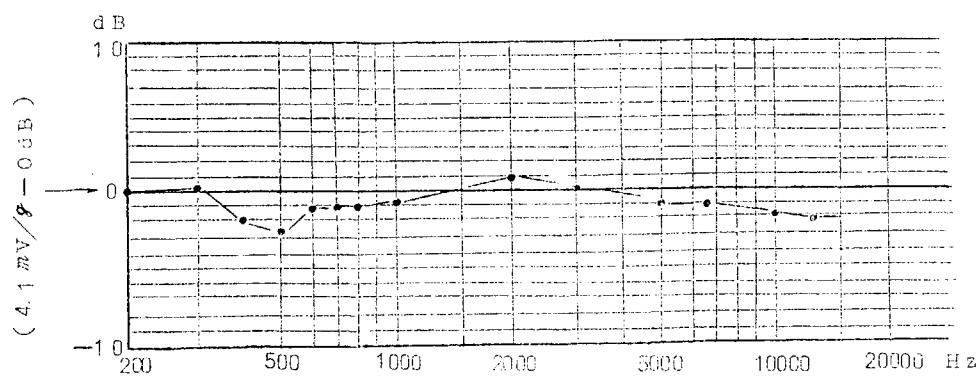


図 2.1 2 試作した加速度ピックアップの周波数特性の一例

(2) 被測定振動面に対する振動ピックアップの装着方法に関する検討

振動を付与された船側板の振動分布を測定するためには、振動加速度ピックアップを船側板上の多くの点に順次固定して振動加速度を測定する方法が最も簡単である。側板上へ加速度ピックアップを固定する方法としては次のようなものが考えられる。

(i) ねじ止め。 (ii) 接着剤を用いる。 (iii) 両面接着テープを用いる。 (iv) ワックス(ろう)を用いる。 などであるがこのうち(i)は最も確実な方法と思われるが被測定物が実船側板であり、側板上にねじ穴を開けることは不可能なので考察の対象とはならない。我々は最も確実性があり、また測定実験に都合の良い方法(ii)、(iii)、(iv)の間で取捨選択するために、実験的考察を行なった。

(a) 加速度ピックアップの取りつけ方、すなわち、接着剤、両面接着テープ、ワックスなどの効果の実験の方法

低い周波数の範囲(20~3kHz)では電磁形加振器(日本測器社製Type 512)の加振台に標準となる加速度ピックアップ(B&K社製Type 4336)をねじ止めし、同一面上に試験すべき接着剤でもう一つの加速度ピックアップを固定する(図2.13)。加振器の振動面上は各点で同一の振動姿態を持つものと考えられ、ま

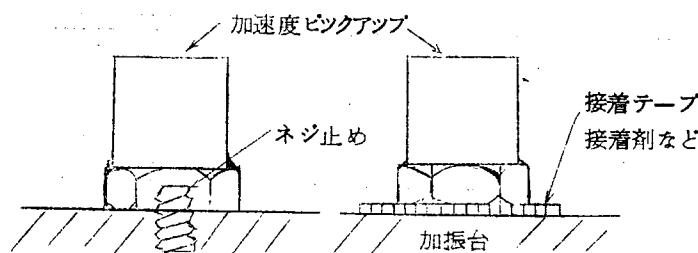


図2.13 加速度ピックアップの取付法

たねじ止めによる加速度ピックアップの出力は一応正しくその振動面の加速度を示していると考えられるので、ねじ止めのピックアップと他の接着材料によるものとを比較して、接着材料の特性を測定することができる。周波数の高い範囲(3kHz)以上では加振器の加振面の振動姿態は一様とは考えられなくなるので二つの比較で正しい特性を得るのは困難であり、また加振器の周波数特性も非常にはげしく変化するので動電形加振器の代りに、ランジコバン形の超音波振動子を振動発生器として用いて、先の方法と同様にねじ止めと接着材料によるものとを比較することにした。ただしこの場合、ランジュバン形の超音波振動子の端面に同時に二個の加速度ピックアップを固定することは困難であるので、ねじ止めによるもの、接着材料によるものとを順次とりかえて行なう。

(b) 加速度ピックアップの装着において接着材料の効果の実験

実船における船側板へ超音波振動を付与する方法には、加振点で面に垂直な振動を与えて、側板上を屈曲振動(ベンディング)させ波を伝搬せしめる方法、と加振点で面に水平な振動を与えて側板上にすべり波(接線方向の振動)もしくは縦波(面内で面に垂直な振動)を伝搬せしめるものの二つが考えられるので、加速度の振幅分布測定の立場からも面に垂直な振動と、面に水平な振動の二つに分けて考えなければならない。

(i) 被測定振動面の運動が面に垂直な場合

我々はまずははじめに測定面に垂直な振動に対して、各種接着材料の影響を前述の実験方法によって行なった。測定対象として使用した接着材料は、

- (1) シアノアクリレート系接着剤(アロンアルファ#201)

- (a) 両面接着テープ I (住友スリーエル社、スコッチテープ #465)、厚さ 0.05 mm の合成のりテープ。
- (b) 両面接着テープ II (住友スリーエル社、スコッチテープ #400)、厚さ 0.125 mm の紙製テープで両面にのりがついている。
- (c) ワックス。B & K 社加速度ピックアップに附属している接着用材料

以上の 4 種である。各々の接着材料の周波数に対する応答の測定結果を図 2.14 ~ 2.17 に示す。上記の周波特性の測定は加速度のある程度小さな値で行なったものであるが、一方これら接着材料が加速度の大きな値に対してどのような応答を示すかということは、特に実船における計測のような大きな振動加速度を測定する場合には重要であるので加速度の大きさと各々の接着材料との関係を測定した。この測定では実船実験の測定に対応させて周波数 28 kHz を固定して加速度の大きさと各々の接着材料の特性を前記のねじ止めとの比較で測定した。加振装置は 28 kHz に共振周波数をもつランジュバン形の超音波振動子を用いた、測定結果を図 2.18 に示す。

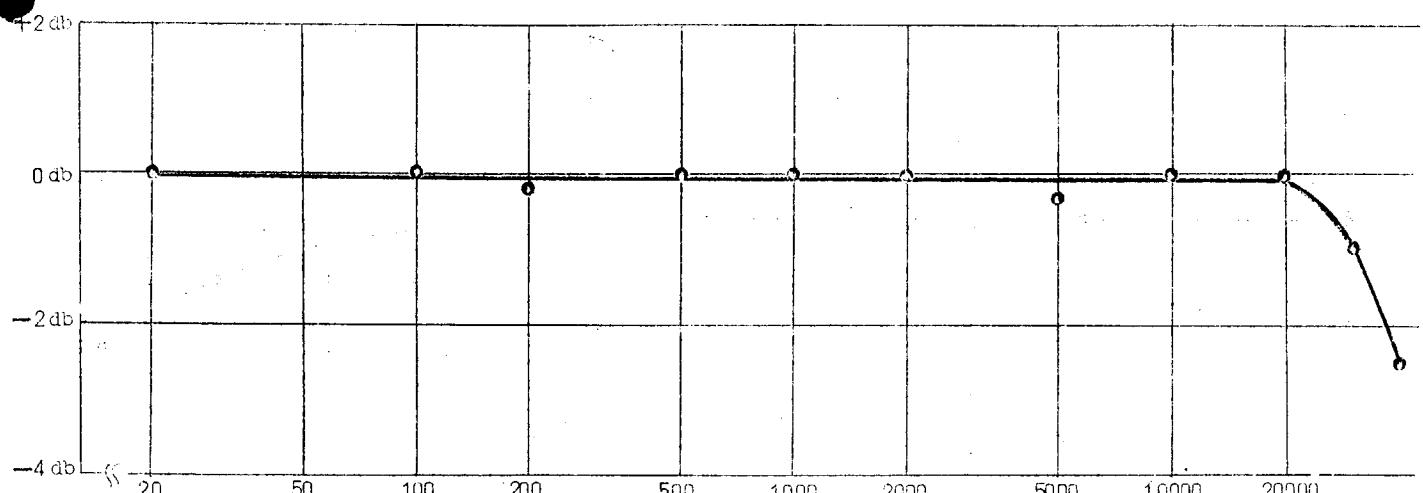


図 2.14 接着剤で取付た場合の周波数特性

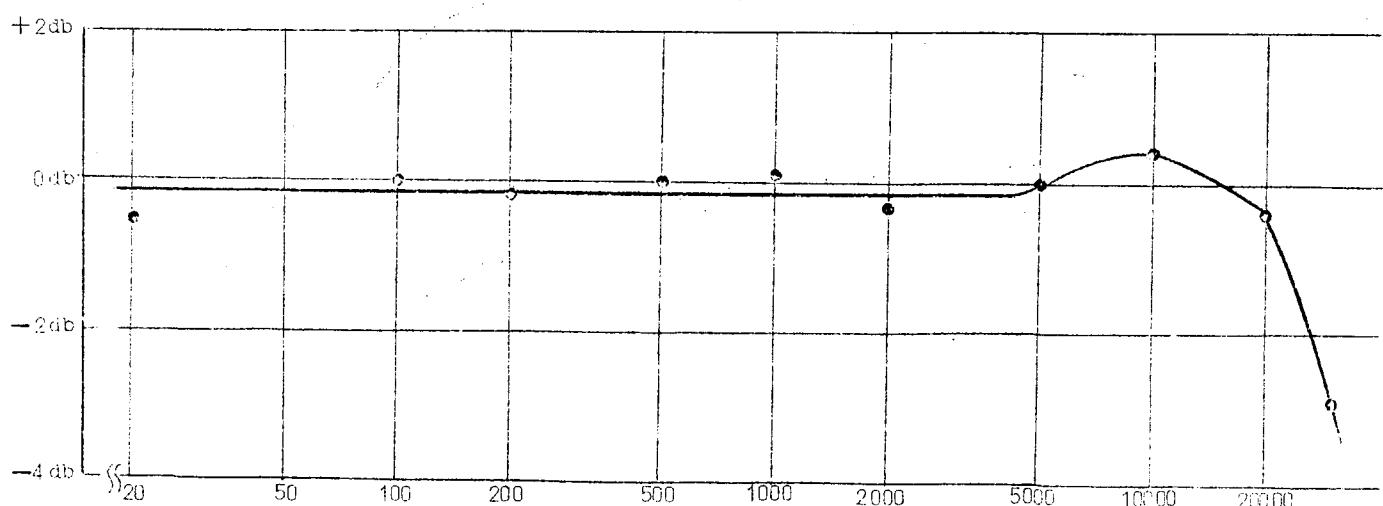


図 2.15 両面接着テープ(I)で取付た場合の周波数特性

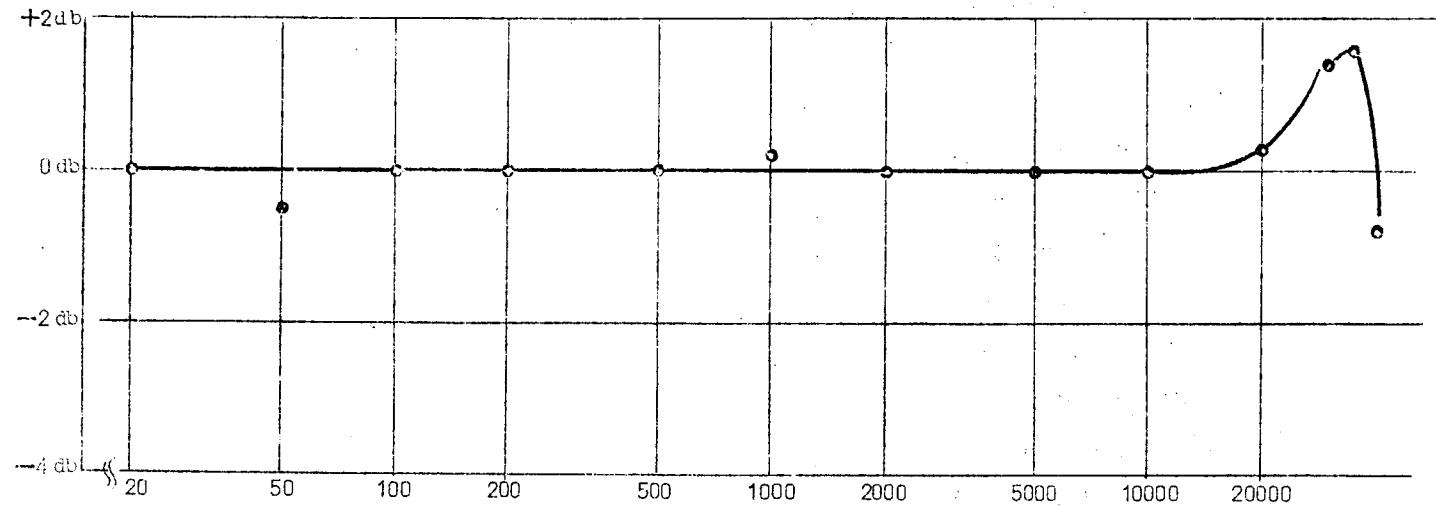


図 2.16 両面接着テープ(II)で取付た場合の周波数特性

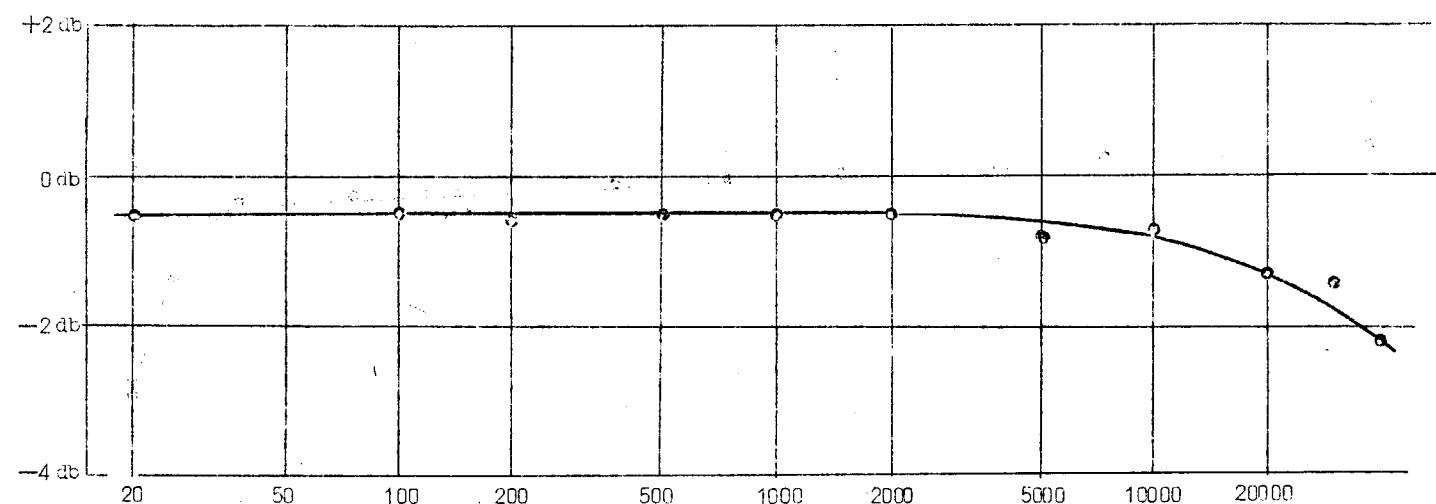


図 2.17 ワックスで取付けた場合の周波数特性

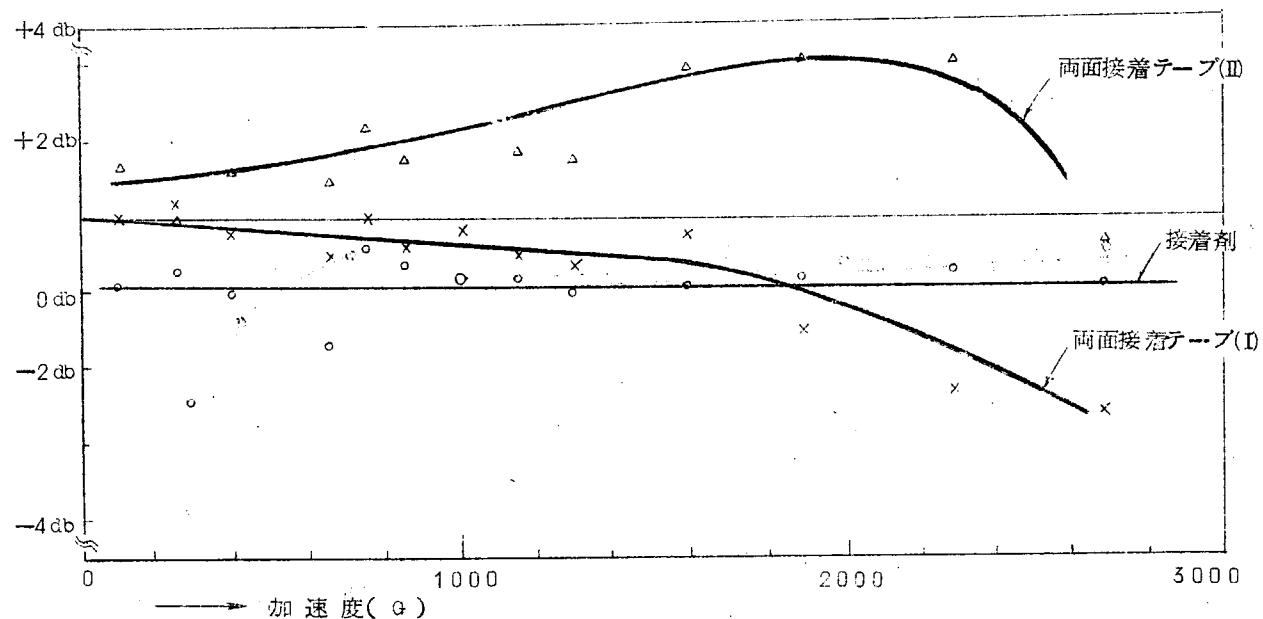


図 2.18 加速度に対する直線性

(ii) 被測定振動面の運動が面に水平な場合

現在までの研究で、船側板に与える振動は前記の面に水平な振動が有利であると考えられている。それに従って振動計測も面に水平な振動を確実に測定する事が必要であるので、前と同一の接着材料の、面と水平な振動に対する応答を調べてみた。すなわち図 2.19 に示すように、加速度ピックアップを黄銅製サイコロ

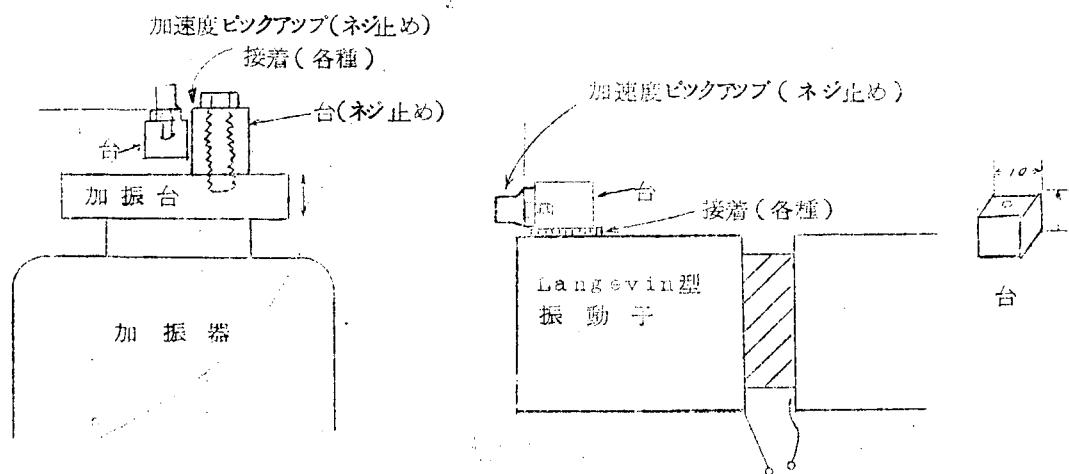


図 2.17 加速度ピックアップの取付法

状の取りつけ治具に取り付け、その治具を一面を振動方向と一致する方向に、加振器の加振台にねじ止めした四角柱にとりつける。また前記と同様に周波数の高い範囲(3 kHz 以上)ではランジュバン形超音波振動子の側面を平らにけずりサイコロ状治具を直接に取りつける。その取り付けを上記、各種接着材料で行なったものとサイコロ状治具と取りつけ面をねじ止めしたものとを比較して、接着材料の影響をあきらかにした。測定結果を図 2.20 ~ 2.23 に示す。

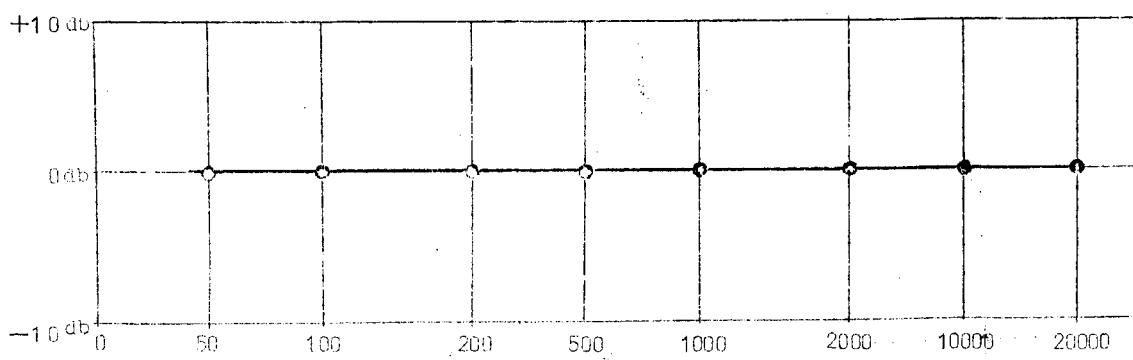


図 2.20 接着剤で取付けた場合の周波数特性

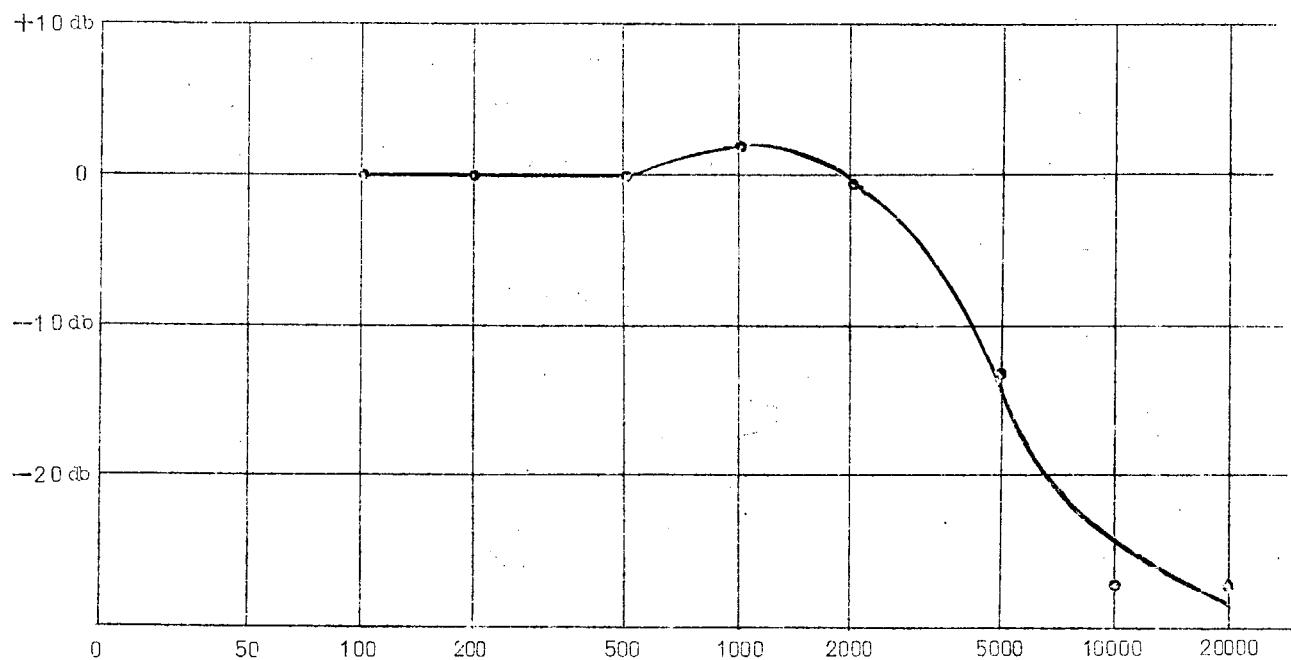


図 2.21 両面接着テープ(I)で取付た場合の周波数特性

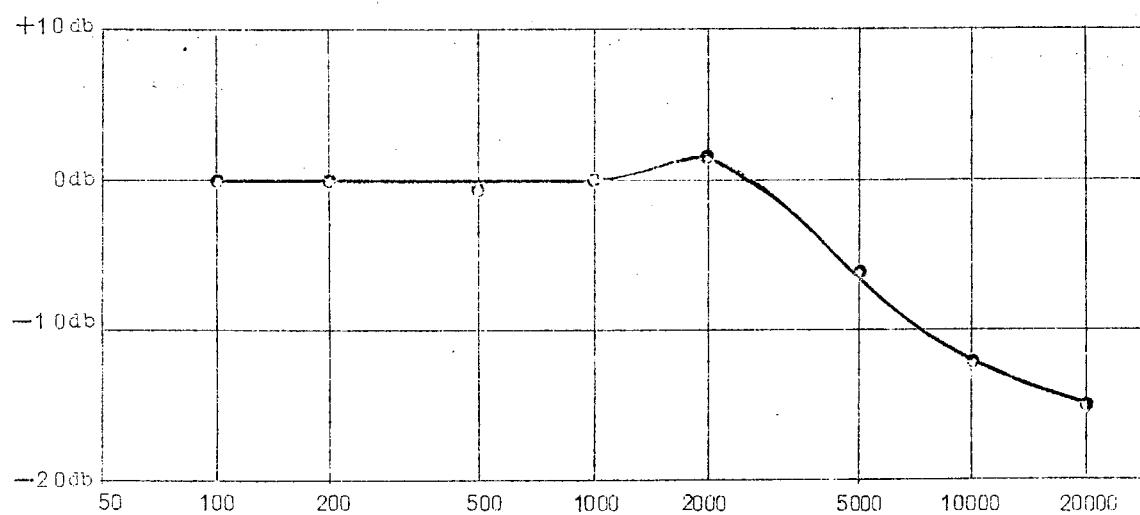


図 2.22 両面接着テープ(II)で取付た場合の周波数特性

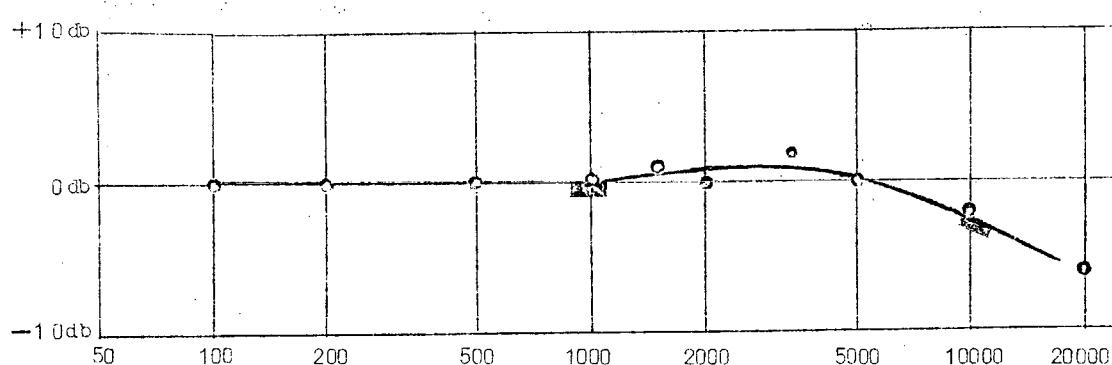


図 2.23 ワックスで取付た場合の周波数特性

(c) 実験結果(加速度ピックアップ装着材料の影響)

被測定振動面に振動ピックアップを装着する場合の接着の材料の効果について、振動が面に垂直な場合と水平な場合について、各種接着材料を用いたときの影響を調べ、次の結論を得た。

- (i) 面に垂直な振動測定の場合はいずれの接着材料も数dBの誤差を許容するなら、本研究で、現在測定対象となっている28kHzの超音波振動の分布測定には十分実用的な測定結果が得られる。
- (ii) 28kHzの周波数で数dBの誤差を許容するなら3000%程度までの大きな加速度(面に垂直な場合)測定も接着テープ等で簡単に測定できる。
- (iii) 次に面に水平な振動計測では、接着テープ、ワックス等では28kHzの周波数ではほとんど信頼性のある測定是不可能である。
- (iv) ただしシアノアクリレート系接着剤(アロンアルファキ201)のみが使用可能であることが判った。アロンアルファは瞬間接着であり他のものは、接着が完了するまでの時間がかかり本研究の実船実験には向きである。

(3) 結　　び

本年度研究を行なった結果得られた主な成果はつぎのとおりである。

(a) 超音波周波数で使用することのできる加速度ピックアップの設計・試作ならびにその感度校正

市販の加速度形振動ピックアップは使用可能な周波数帯域が低い範囲に限定され、当面行なわれている実船実験において使用されている28kHz程度の高い周波数において使用することのできる小形のピックアップを製作するとともに、その感度校正を使用周波数までの範囲で行なう必要がある。幸い周波数が高い場合には加速度も非常に大きいから、きわめて小形の付加質量をもつ小さいピックアップが実現可能であり、多数のピックアップが試作された。

また校正是通常の比較校正の方法のほか、とくにこのような高い周波数までのピックアップの感度-周波数特性の平坦性を検討することを可能とする相互校正法を抽出して良い成績を収めることができた。

なお本年度実施された実船試験においては振動の方向が多様になるので、それに対応して任意の方向の振動加速度成分も計測を可能とする治具も製作されて使用された。

(b) 被測定振動面への振動ピックアップの装着法に関する研究

在来比較的広く使用されている方法が、本研究の目的にも十分適合するかどうかについて検討したもので、とくに振動ピックアップ装着用として市販されている両面接着テープ、ワックス、シアノアクリレート系瞬間接着剤、エポキシ系樹脂接着剤などについて主としてこれらの振動伝達特性が測定された。その結果振動方向が振動ピックアップの装着面に垂直である場合には上記のいずれの方法によってもほぼ正しい振動伝達を容易に実現できることが判明したが、一方振動方向が装着面に沿った場合には上記のうち両面接着テープとワックスはいずれもきわめて低い周波数までの使用だけが可能で、本研究で本年度採用されている周波数においては注意深い使用方法のもとでのシアノアクリレート系瞬間接着剤とエポキシ樹脂接着剤のみが正しい振動伝達を実現させ得ることが明確となった。なかでもシアノアクリレート接着剤はその着脱操作がきわめて簡単で、單一の加速度ピックアップで多数の点の振動振幅分布を測定するのにもっとも適している。なお振動付与の効率が格段に改善された結果、計測する加速度振幅の値も飛躍的に向上し、接着面に加わる力の振幅もそれに応じて大きくなるので、とくに加振点近傍の加速度振幅測定のための振動ピックアップの方法については特別な注意が必要である。

2.2 駆動点インピーダンスの解析と測定

2.2.1 進徳丸における船側板の駆動点機械インピーダンスの測定

実船で超音波振動を船板に付与して海中生物の付着を防止する超音波防汚を行なう場合に、駆動用振動体を船板に接合した場所から測定した船板の駆動点機械インピーダンスがかわっていると駆動用振動系の合理的なパワ設計が行ない易い。

このような駆動点機械インピーダンスの測定データは現在までのところ皆無なので、今回進徳丸で実験する機会を得たので測定を試みた。

測定は防汚を行なう場合に有効であると考えられる板の面に沿うた縦波を付与する駆動用治具を船板に接着剤で接着し、この治具にフェライト縦振動振動子を接合して弱振幅時の振動子電気インピーダンスを測定し、その結果から駆動点機械インピーダンスを算出した。

測定の結果、駆動点インピーダンスの機械抵抗分は 10^6 dyne/kine の桁で、予想していた値ほど重い負荷ではなく、この程度ならば従来の超音波技術によって船板に有効な振動変位を与えることが割合に容易であるとの見通しを得ることができた。

(1) 測定装置

図2.2.4はこの実験に使用した縦波駆動振用治具で、振動子の機械共振周波数50kHzに $\lambda/2$ 波長の長さで縦共振する長さをもち、かつその断面は直徑22mmの丸棒の1部を削り落してカマボコ形にしてある。

船の舷側面には治具の平らな部分を瞬間接着剤アロンアルファ（東亜合成化学製）で接着した。

治具の駆動用振動子はフェライトπ形50kHz振動子を治具の両端に各1個づつ瞬間接着剤で接着し、また両振動子は逆方向で助け合って振動できるように巻線の方向を考慮してある。

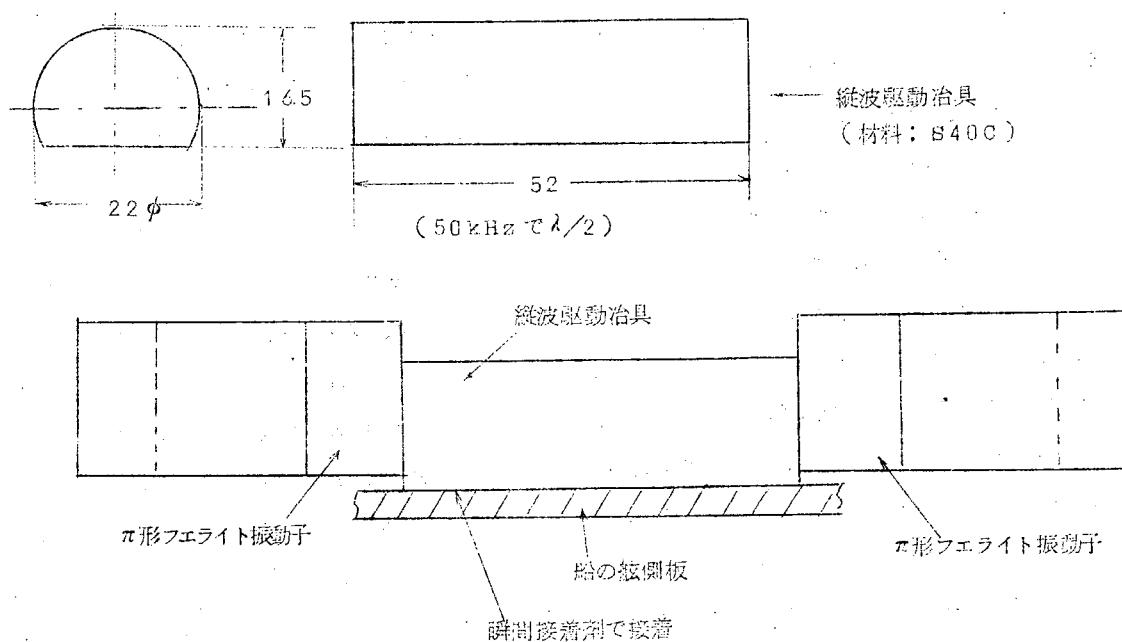


図2.2.4 駆動点機械インピーダンス測定用治具および舷側板への取付状況

(2) 測定方法

図2.2.4に示した駆動用振動系の駆動振動子の巻線端子から振動系の船板に取付ける前と取付けてからの自由インピーダンス軌跡を直記式振動子電気インピーダンス軌跡測定装置（安藤電気製DRZ-100形）を使用して測定し、両軌跡から各々の場合の動インピーダンスの直達、船板に接合しない時の振動系の象限周波数差などを

求めて次式によって駆動点負荷機械抵抗 R_L を算出した。

$$R_L = 2\pi \cdot m \cdot \delta f \left(1 - \frac{Z_{m0}}{Z_{m00}} \right) \quad (2.11)$$

ここで、 m ：振動系の等価質量（振動子と治具棒の等価質量から算出）、 δf ：振動系を船板に接合しない時の振動系の共振周波数差、 Z_{m00} および Z_{m0} ：振動系を船板に取付ける前と取付けてからとの各動インピーダンスの直徑。

なお、測定治具はその長手方向を

- (i) 船の機関室の舷側面に船の船首-船尾方向に一致させて接着した場合
 - (ii) (i)と同じ場所で、船の船首-船尾方向と直角の方向に向けて接着した場合
- との2つの場合について測定した。

(3) 測定の結果と考察

図2.2.5は振動系を船板に接合しない時の自由インピーダンス軌跡を、図2.2.6は治具を船首-船尾方向に向けて接着した時の自由インピーダンス軌跡を、また図2.2.7は治具を船首-船尾方向と直角方向に向けて接着した場合の自由インピーダンス軌跡を示した。

これらの測定結果から、各場合の負荷機械抵抗の値 R_L を算出した結果を示す。

(i) 船首-船尾方向の場合

$$R_L = 1.43 \times 10^6 \text{ dyne/cm/sec}$$

(ii) 船首-船尾方向と直角方向の場合

$$R_L = 4.92 \times 10^6 \text{ dyne/cm/sec}$$

以上の実験結果から次のようなことを考えていく。

- (i) 船に接着した時に振動系の自由インピーダンス軌跡がシングルループを示すことから、船板の高次の曲げ共振はほとんど build up せず、板の中を伝搬する波は主として縦波と面に沿うた剪断波であると想像される。
- (ii) 負荷機械抵抗の大きさが 10^6 dyne/cm/sec の桁であることから、負荷としては必ずしも大きなものでないことがわかった。

この程度の負荷なら、従来の超音波技術で目的とする振動変位を船板に与えることは割合容易である。

ただ問題なのは、音源の寸法が波長にくらべて小さいので、音源を出た弹性波が急速に拡がり、拡散的に減衰してしまったり、音源より多少はなれた場所の振動振幅が音源の振

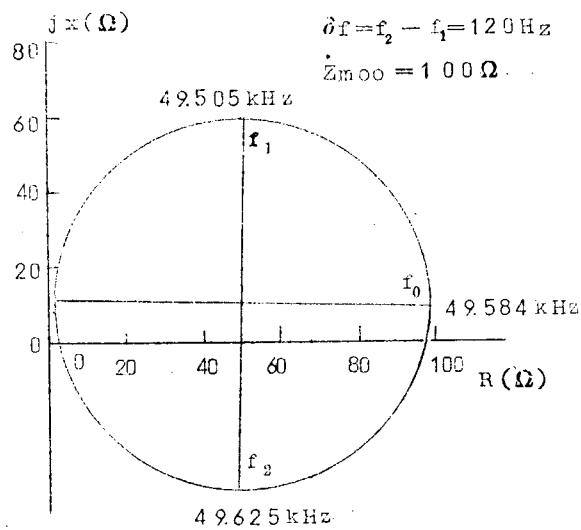


図2.2.5 船板に取付けない場合の振動系の自由インピーダンスの軌跡

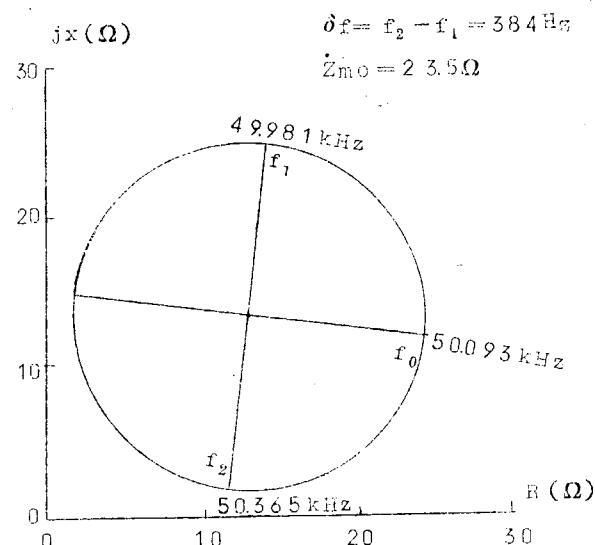


図2.2.6 船首-船尾方向に治具をむけて取付けた場合の振動系の自由インピーダンス軌跡

幅にたいしかなり小さくなってしまい防汚効果をあげにくくなることである。(このような場合には駆動用振動系より見た船板の負荷機械抵抗も小さくなるはずである。上記の測定結果はそれを裏づけているようにも考えられる。)

むしろ、この実験で使用したような治具でもっと放射の指向性をつける(長さを数波長の共振の長さにする)とともにこれらを分散配置して相互干渉させて広い面積にわたって所定の振動振幅を得ることができるように分散配置することを考える必要がある。

このようにすれば、振動系1個当たりのパワはそれ程大きくなくてもよかろう。また振動子としてはニッケルなどの能率の悪いものを使用せずにフェライトとかチタン酸ジルコン酸鉛磁器振動子のような高能率のものを使用するようになると全体としての入力電力が節約できるので経済性が大きくなり、超音波防汚の実用化性が大きくなると考えている。

(4) むすび

実船で使用する駆動用治具はなにもこの測定で使用したもののが最上であるとは限らず、寸法、周波数など今後とも大いに工夫する必要がある。

その意味で、今回の測定結果は1例にすぎないが、この測定を通して駆動用治具の基本的形態、治具の配置、振動系の合理的設計の緒口が得られたことは意義が深いと考えている。

2.2.2 進徳丸における海水中への放射音圧の測定

(1) 第1次放射音圧の測定

測定の目的は進徳丸の左舷と右舷に装備してある振動子近傍の放射音圧を調べることにある。そこで放射音圧最大のところを基準として、船首、船尾方向(横方向)と、上下方向にHydrophoneを移動させ、左舷と右舷での放射音圧の分布を測定した。図2.28に測定ブロック図を示す。

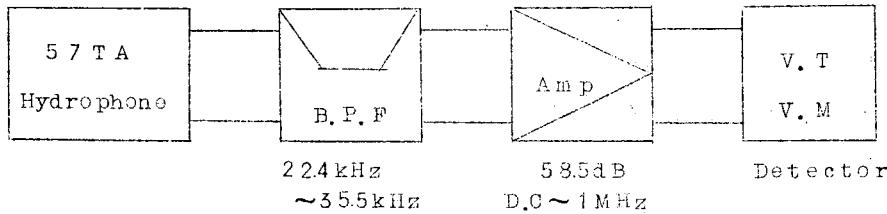


図2.28 Blockdiagram

(注) 57 TA型 Hydrophone は沖電気KK 製で、受波感度は 3~30 kHz で $-104 \text{dB} \pm 2 \text{dB}$ 、28 kHz では -103.5dB である。

図2.29の0(原点)は振動子の中央部前面で放射音圧最大のところである。以下原点を中心(基準)として、船首、船尾、上、下方向にHydrophoneを移動させ、各点での音圧を測定し、その結果を図2.30、2.31に

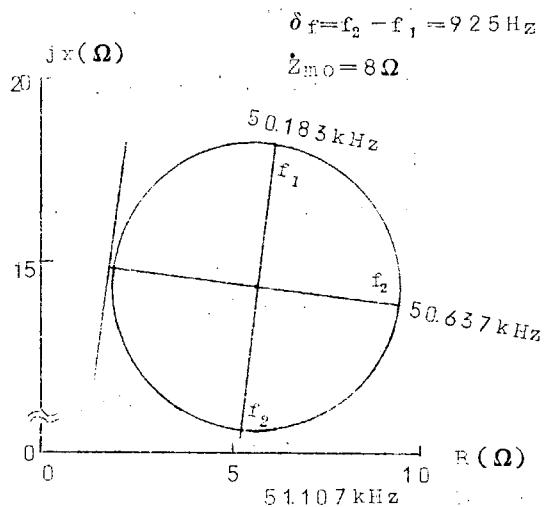


図2.27 船首-船尾方向に直角方向に治具を取り付けた場合の振動系の自由インピーダンス軌跡

示した。最大音圧値は右舷で、1.78 mbar、左舷で、2 mbarとかなり弱かった。

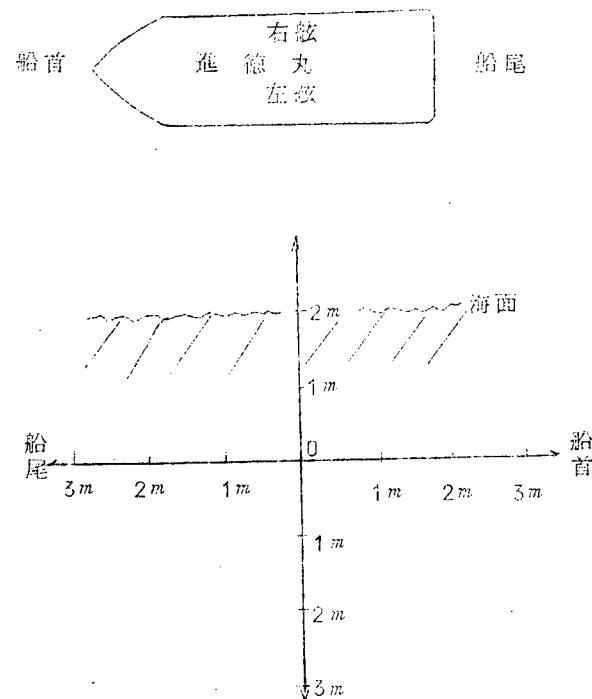


図2.29 測定位置(右舷の外側から見た図)

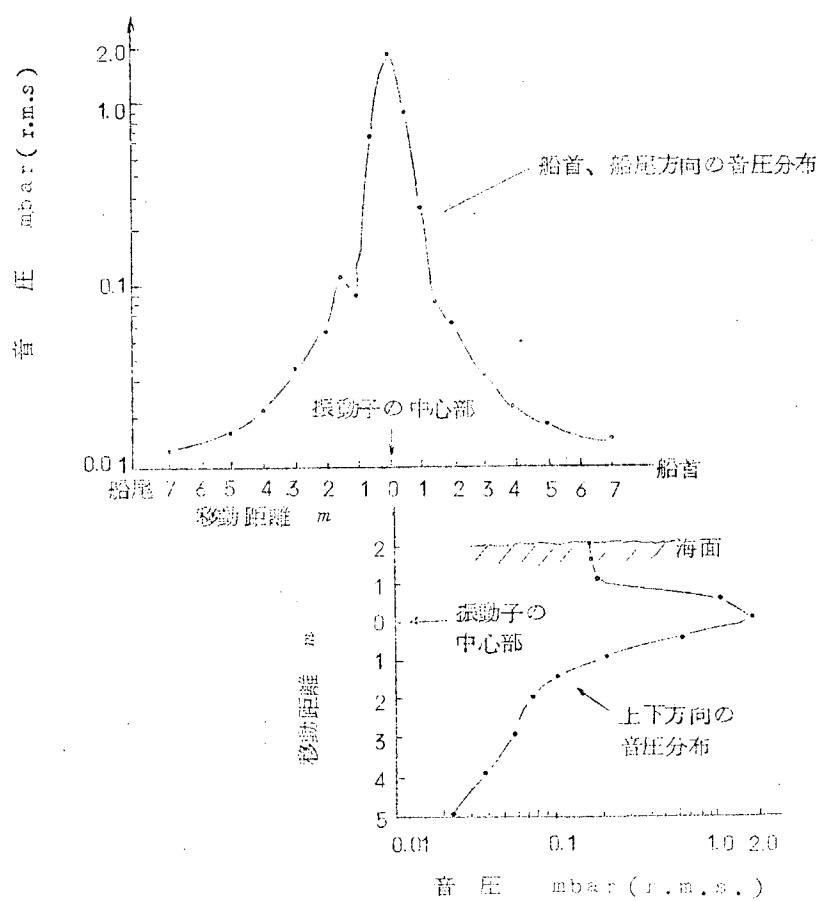


図2.30 右舷での音圧分布

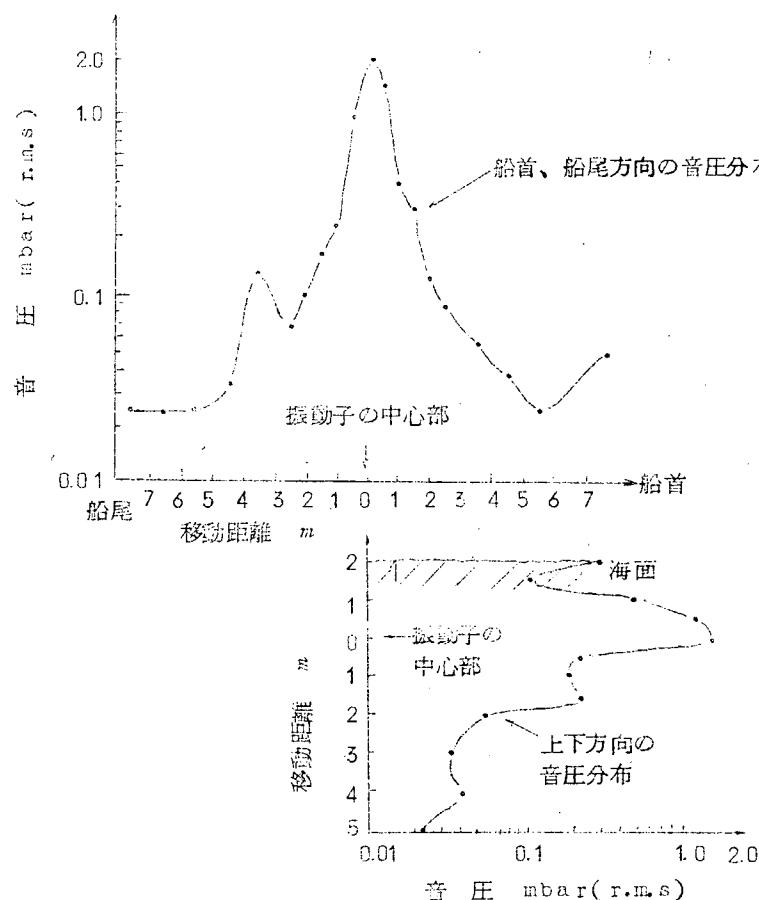


図 2.31 左舷での音圧分布

(2) 第2次放射音圧の測定

進徳丸の左舷と右舷に装備してある振動子近傍で、放射音圧最大のところを基準として、船首、船尾方向（横方向）と、上、下方向に Hydrophone を移動させ、左舷と右舷での放射音圧の分布を測定した。

図 2.32 に測定ブロック図を示す。

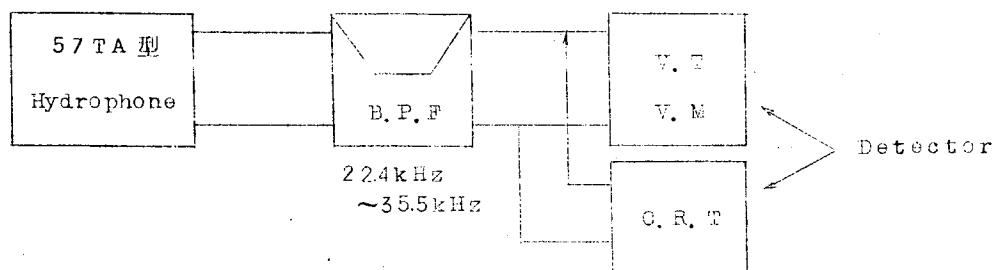


図 2.32 Block diagram

(注) 57 TA 型 Hydrophone は沖電気 KK 製で、受波感度は 3 ~ 30 kHz で、-104 dB ± 2 dB、28 kHz では -103.5 dB である。

船首、船尾方向と上、下方向の音圧分布を、左舷と右舷の両舷でそれぞれ測定し、その結果を図 2.34 に示す。今回の測定における最大音圧は右舷で 180 mbar、左舷で 240 mbar と前回の測定時のほぼ 100 倍程度に強くなっている。特に、左舷では振動子から船首、船尾方向に約 10 m 離れた位置でも、前回測定時の最大

音圧値とほぼ等しくなっている。

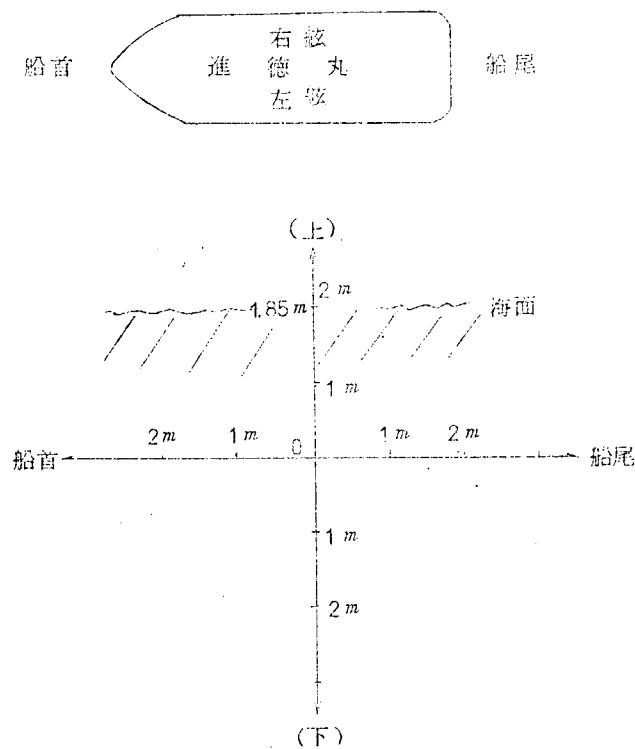


図 2.29 測定位置(左舷の外側から見た図)

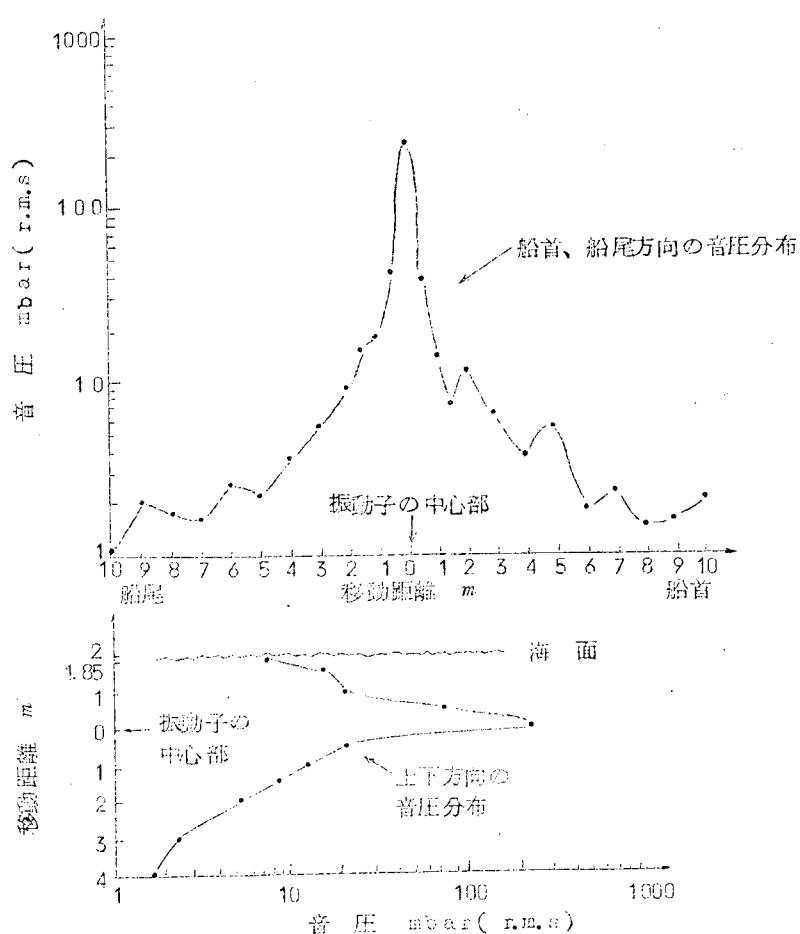


図 2.33 左舷での音圧分布

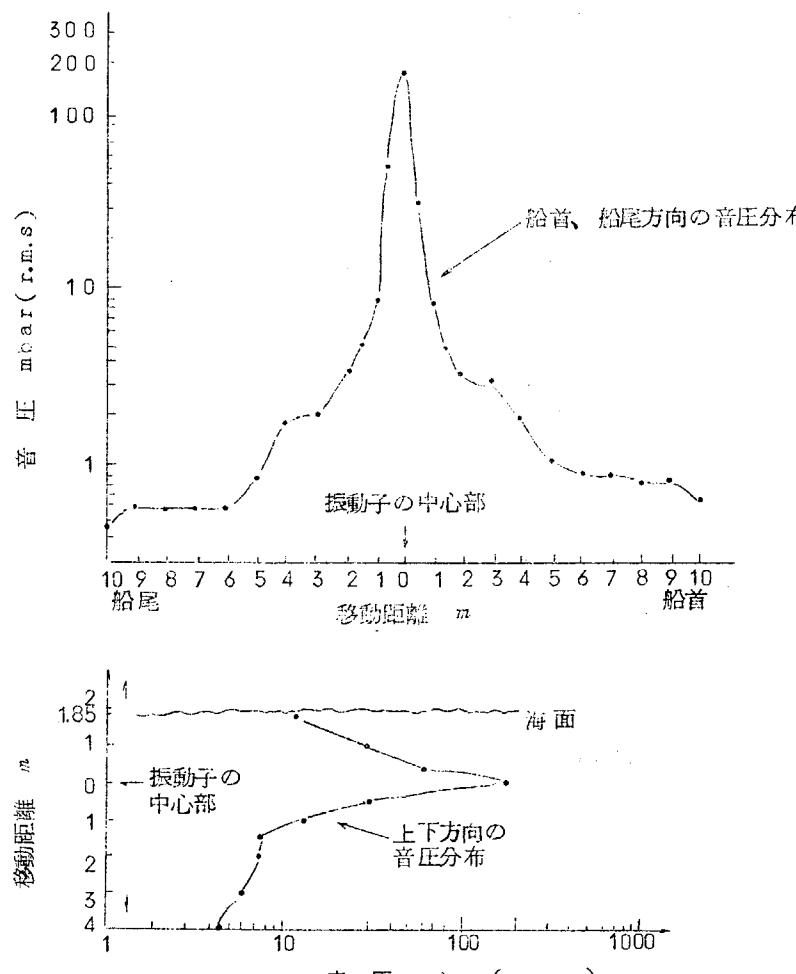


図 2.34 右舷での音圧分布

2.2.3 進徳丸における船側板上の振動分布の測定

昭和42年9月進徳丸による第2次実験のための超音波加振装置の取りつけが行なわれ、ひきつり、船側板上に付与されている超音波振動の振動分布の測定が行なわれた。第2次実験では進徳丸の右舷には側板に垂直に振動子が取りつけられている一方、左舷は斜角対称の治具により船側には面に水平な超音波振動が付与されている。すなわち右舷には面に垂直な屈曲振動が、左舷には、側板の上下方向にはすべり波（接線方向の振動）が伝搬し、船首、船尾方向には縦波がまた二つの振動の結合によるものやステイフナなどの隔壁による振動モードの変換が起り、面に垂直な屈曲振動が起っていると思われる。

(1) 船側板上の振動加速度の測定方法

左舷の加速度測定では加速度ピックアップ（B & K社製Typ.4336、上限周波数40kHz、感度4.6mV/g）を図2.35のようなサイロ状（ $10 \times 10 \times 10$ ）治具ねじで取りつけ、治具の一つの面を、測定しようとする振動加速度の方向に合せて、船側板上の測定点に、直接シアノアクリレート系接着剤（アロンアルファ#201）で接着し、加速度ピックアップの出力をオシロスコープで測定した。また右舷では加速度ピックアップを直接両面接着テープにて船側板に固定して行った。

(2) 船側板上の振動分布の測定結果

以上に述べた方法により測定した結果を示す。まず左舷の測定について述べる。駆動点から船尾の方向に向って水平に、振動面に沿った振動（図2.35のように加速度ピックアップを固定して）を測定したものと面に垂直

な振動を測定したものについて図 2.36 に示した。また図 2.37 に、振動面に沿った振動のみを船側板のいくつかの点で測定し、等しい振動レベルの点を結んだものを示した。

右舷の測定結果は図 2.38 に示してある。図 2.39 は駆動点から船首の方向へ水平に 4.6cm の点を上方に測定したものと、駆動点から船尾の方向に 2.5cm の点を下方に、それぞれ面に垂直な加速度を測定したもので、いずれも振幅の片ピーク値を示している。

加速度ピンクアップ取りつけ治具

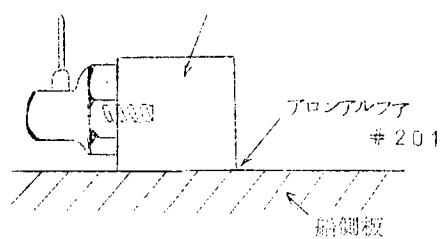


図 2.35

—●—○—：面に沿った振動
—△—△—：面に垂直な振動

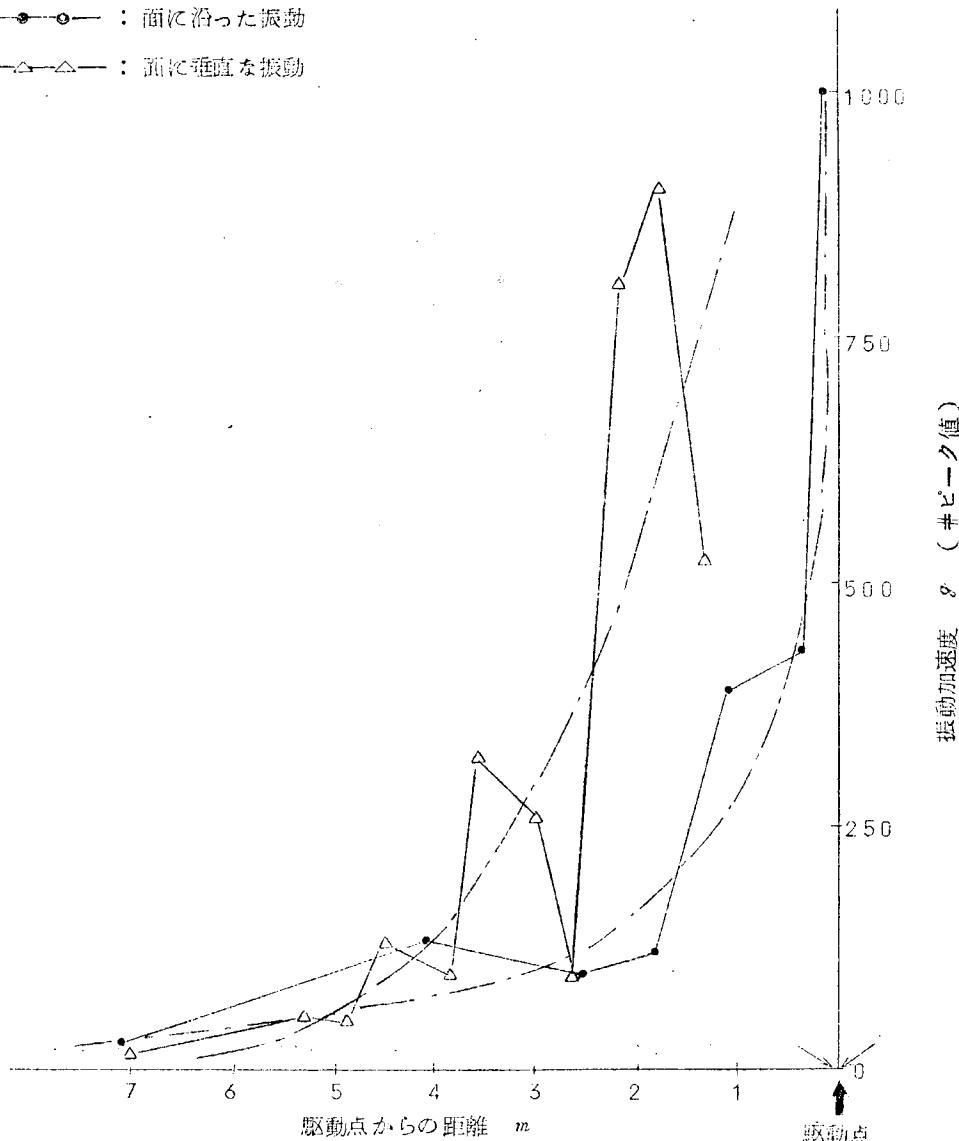


図 2.36 進徳丸における第 2 次実験
左舷の振動分布の測定結果

(注) ピンクアップを板にアロンアルファで接着(シアノアクリレート系接着剤)

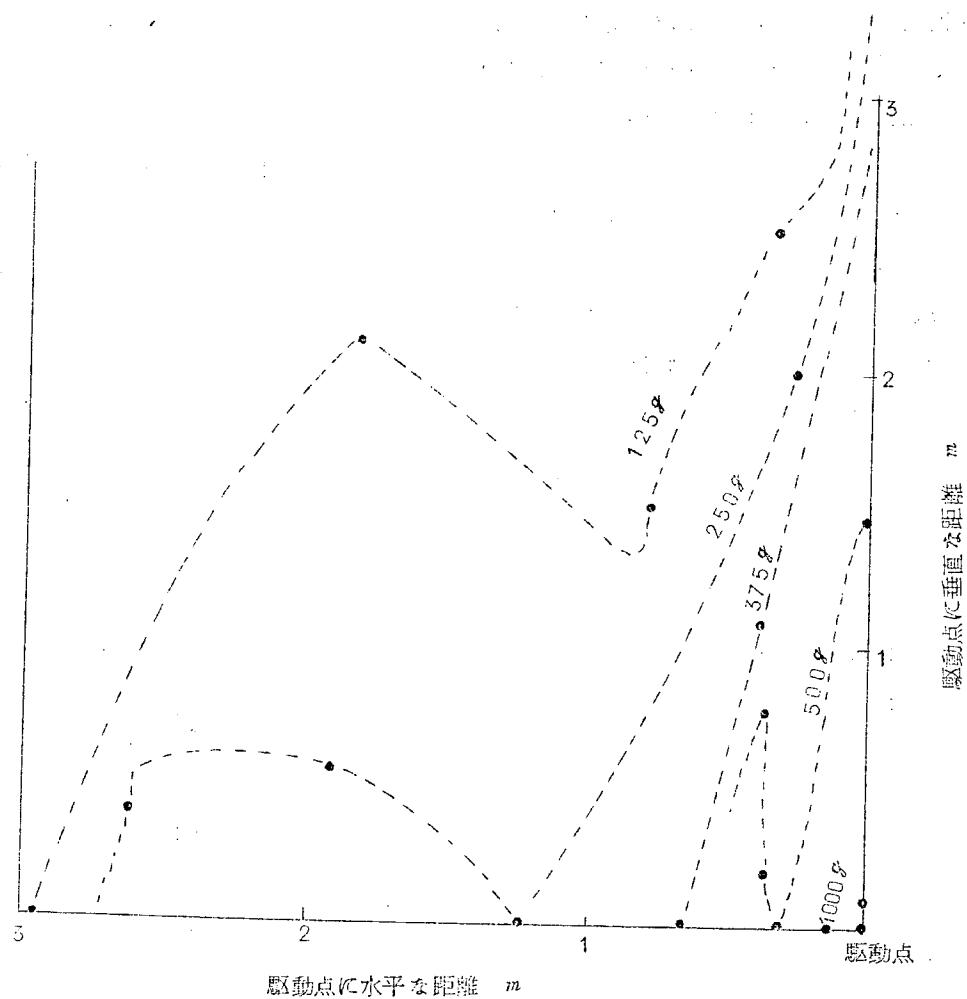


図 2.37 側板振動分布の測定結果(面にそった振動の分布)
側板面上の等加速度曲線 (g・peak)

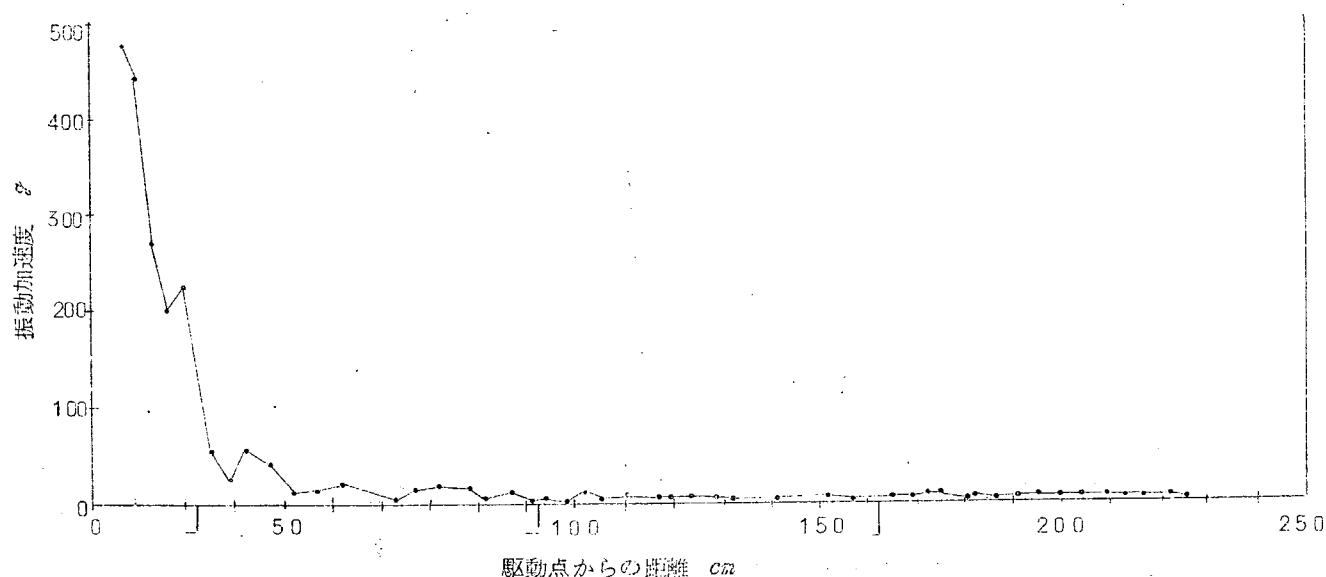


図 2.38 進徳丸における第 2 次実験
外板に垂直な振動加速度(右舷)の測定結果

(注) i) ピックアップを両面接着テープにて固定したもの。 ii) 右舷は外板に垂直に駆動している。

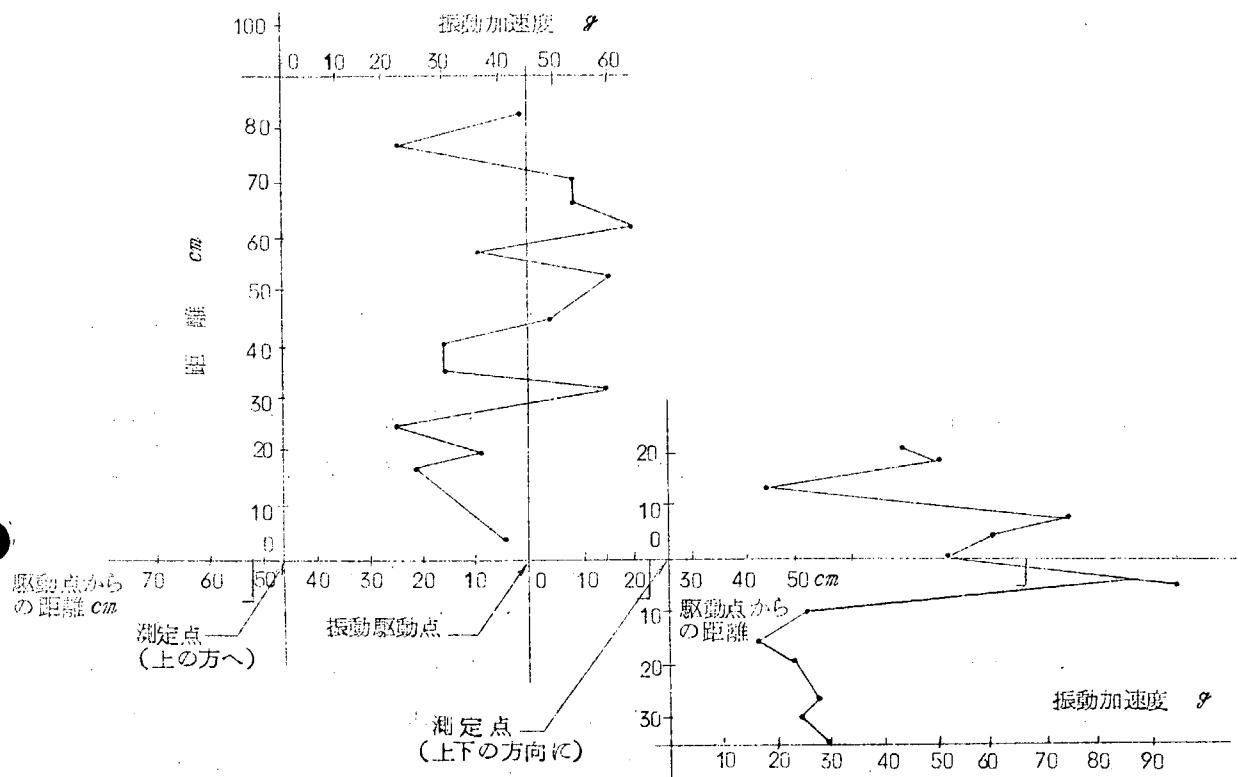


図 2.39 進徳丸における第 2 次実験
外板に垂直な振動加速度の測定結果(右舷)

(注) I) 驅動方法は外板に垂直
II) ピックアップを両面接着テープにて固定したもの

(3) 結 び

実船の防汚試験における船側板ならびに構造体等の各部における振動振幅の分布の測定を行なった結果、試験船進徳丸右舷の船側板の垂直方向の振動振幅は加振点付近ではかなり大きいが、加振点からの距離とともに目立って減少し、とくにスチフナ等の通過にともなってその振幅の減り方が甚だしいことがわかったが、このことは沿側板に対する垂直方向の振動付与方式では振動エネルギーは主として板の曲げ振動の形で四方に拡散するとともに、船側板は一種の海水への音響放射面となるため、かなりの部分は海水中へ音響エネルギーとして散失することを裏付けるもので、またスチフナ通過に当たってはそれによって振動が抑制され、スチフナ内へもエネルギー吸収が行なわれるものと考えられる。ただそれらのエネルギーの存在は加振点からかなりの遠方までスチフナなどを経由して振動エネルギーが伝達することの可能性をも示すもので、事実小振幅ながら加振点から遠い点においても振動は検出できた。ただこの右舷の実験における振動振幅は加振点のごく近傍以外では生物付着防止に必要と推定される値に達していなかった。

つぎに進徳丸左舷においては、船側板に対して面に沿った振動が施されていたので、振動振幅分布は板面に平行な成分が主として測定された。また板面に垂直の成分も同時に測定され、水平・垂直両方向成分を比較した結果、進徳丸左舷にはほぼ予定されたモードの運動が実現されたことが確認された。ただ駆動点からの距離の増大

と船側板に対するスチフナの存在の影響などにより、モード変換が生起され、垂直方向と接線方向の振幅の比も加振点近傍ほど明確でなくなる。いずれにしてもこの左舷における接線方向への駆動においては、板の垂直方向の振動振幅がきわめて小さいので、振動エネルギーは板中を効率良く遠方まで伝わることが確かめられた。板に溶接されたスチフナの振動抑止効果もこの場合には比較的小さい。結果として左舷がわにおける、300(%)程度以上の加速度振幅の面積はほぼ8平方メートルに達していることがわかった。

2.3. 振動系のパワ設計、材料および形状の選定

2.3.1 縦波駆動用治具の検討および駆動実験

船板の面に沿うた振動をある振幅以上与えれば防汚ができるとはすでに昭和42年夏季に諸磯湾で行なった実験により明らかになったので、今度は現実の船板にどのようにして面に沿うた振動を有効に付与するかが問題になった。

われわれは、これに対する1つの回答として、断面が角断面でその長さが防汚に使用する周波数に対し棒の縦波の速度で定まる波長の $\frac{1}{4}$ の整数倍であるような棒を考え、棒の長手方向の一面を船板に密接し、また振動子を棒の長手方向の端面に接合して船板を面に沿うて振動させることを考えた。

棒の断面寸法が $7.0\text{ mm} \times 7.0\text{ mm}$ 、長さが 2.8 kHz の周波数に対し半波長 $= 9.2\text{ mm}$ および1波長 $= 18.4\text{ mm}$ (いずれも材料は鋼)の2種類の駆動治具を試作し、かつ振動子としてπ形フェライト振動子を端面に接着して、まず治具単体の振動姿態を調べた結果予想通りうまく縦共振振動することが確かめられたので、次には厚さ7mmの鉄板に1つの側面を接着して、この駆動治具による板の駆動を行ない、板の振動の模様を測定したところ、曲げ振動、板に面に沿うた剪断振動がともなうが、主体的には縦振動の励振が行なえることがわかった。

(1) 駆動治具の検討

単純な形で、船板への溶接作業も楽に行なえ、また振動子の接合も容易なものという考え方から、図2.4.0に示す形状の治具を考えた。

断面はπ形 2.8 kHz の振動子を少くとも3個は接合できるものとして $7.0\text{ mm} \times 7.0\text{ mm}$ の正方形断面とした。

また、長さは振動子の共振周波数 2.8 kHz に対し、棒中の縦波の音速 c_s で定まる $\frac{1}{4}$ 波長および1波長とした。

材料は鋼(機械構造用鋼S45C)を使用することにしたので、 2.8 kHz における $\frac{1}{4}$ 波長、1波長の長さは次のようになった。

$$c_s = 5.15 \times 10^5 \text{ cm/sec}$$

$$\frac{1}{4} \text{ 波長} = c_s / f_0 = 5.15 \times 10^5 / 2.8 \times 10^4 = 18.4 \text{ mm}$$

$$1 \text{ 波長} = c_s / 2 f_0 = 9.2 \text{ mm}$$

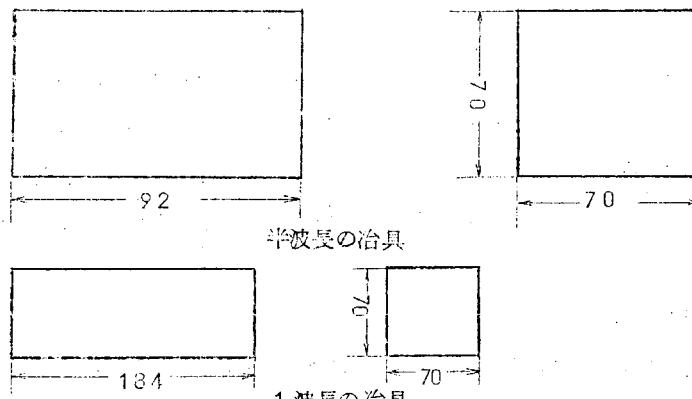


図2.4.0 板に面に沿うての振動を駆動するための駆動用治具

(2) 治具の振動測定

前記の治具の端面にπ形フェライト振動子を樹脂で接着し、治具の励振を行ない、治具の長手方向の側面に砥粒粉（充分乾燥したもの）をまき、その砥粒粉が振動によってどのような模様を形成するかを観察して、それから治具の振動が正常か否かを大まかに判定することにした。

その結果、写真2.5に1波長の治具の場合の例を示すように、砥粒粉は振動の節の付近に集積した。

砥粒粉の間隔を測定したところ、丁度9.2mmにはば等しく、先に2.8頁でこの治具について算出した棒中の縦波の1/4波長に等しかったので、治具は正常な縦振動共振を行なっているということを確認できた。

半波長の治具の場合は振動の節が1ヶ所なので、治具の端面からの砥粒の堆積している部分までの距離を測定したところ、丁度4.6mmにはば等しく、棒中の縦波の1/4波長に等しかったことから、この治具も正常に縦振動していることを確認できた。

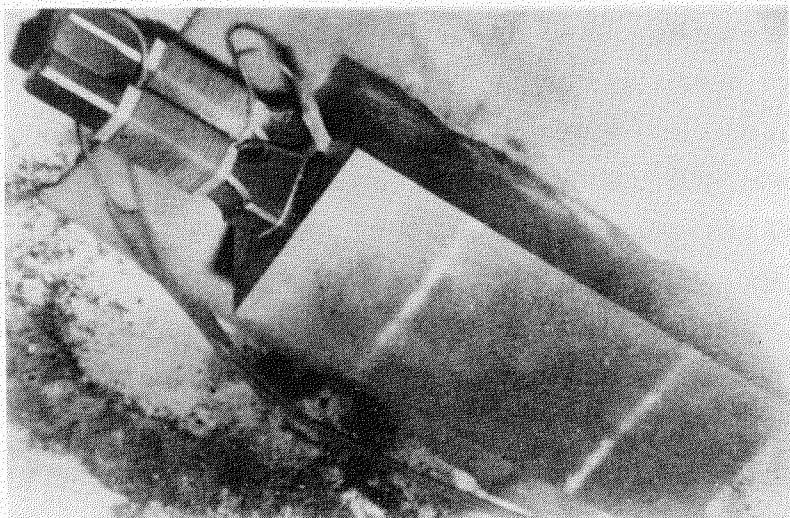


写真2.5 1波長治具に振動子を接合し、側面に砥粒粉をまいて振動させた時の
砥粒粉の分布(振動パターン)
(砥粒粉の部分が振動の節になる)

(3) 駆動治具による板の振動実験

別項に記載した試験用の板に上記の治具を図2.41に示すように接着して駆動の実験を行なった。



図2.41 治具の試験板への取付状況

治具は試験板に瞬間接着剤で接合した。また、治具の振動の節の附近は接着せず、振動の腹の部分だけ接着した。

治具の振動の腹の部分が試験板の2.8頁における縦振動分布の腹の部分に一致するようを具合に、治具を試験板の上にのせて接着した。

試験板の振動姿態は砥粒粉をまいて、振動によって砥粒粉の示す模様から判定することにした。

振動子の駆動周波数を種々変化して砥粒の示す模様を観察した結果、次のようなことがわかった。

(a) 試験板の長手方向の端面に振動子を接着して駆動した時と全く同様な振動を行なうことがわかった。

(b) 試験板の振動は、幅の狭い板では曲げの高次の振動と縦振動の重なった振動をする。

ただし、試験板に垂直方向に拘束を加えると曲げ共振はいちぢるしく減衰し、縦振動のパターンだけになる。

これから想像すると、勢力的には縦振動成分が曲げ振動成分より大きいものと考えられる。

幅の広い、幅方向にさらに剪断振動共振があるような板では、縦振動、剪断振動および曲げ振動が複合した複雑な振動がのることがわかった。

しかし、この場合も板の面に垂直に適当な拘束を与えると、曲げ振動が減衰し、縦振動と剪断振動の複合した振動がのることが観測できた。

以上から、このような治具を使っても単純な縦振動だけを励振できることはなく、必ずしも剪断とか曲げ振動がともなって生ずる。

しかし、曲げ振動（不必要的振動）は治具からの駆動点インピーダンスが小さいので、わずかな励振力でもかなり振れることになると考えられるが、治具から出てゆく振動パワーのうちパワ的にどの程度の割合を占めるかが問題で、実験的にもわずかな拘束で急激に減衰すること、しかし縦振動とか剪断振動のような駆動点インピーダンスの高い振動はあまり減衰しないことから考えると、勢力的には曲げ振動パワーの占める割合はかなり小さく、主体的には縦振動とか剪断振動であると考えてよからう。

また、この実験に用いた板は共振の長さで、しかも周辺が拘束のない板で、しかも空中での測定なので曲げ振動がかなり強く出たと考えられるが、実船では補強材その他の拘束に働く部材が多く、かつまた片面が海水に接することから、上記のような治具で運動する限り、曲げ振動はそれ程大きくなく、大体の治具の出力パワーは面に沿うた縦波とか剪断波の防汚の目的に有効な振動を励振するのに消費されるものと考えてよからう。

(4) むすび

面に沿うた振動を励振する目的で、駆動用治具を考察、試作して治具単体の振動姿態をまず調べた結果、予想通り縦振動することが確認できた。

また、この治具を使って試験板の励振実験を行なったところ、目的とする縦、剪断振動のほか高次の曲げ振動が同時に励振されることがわかった。

しかし、種々実験の結果から現実の船板では種々の拘束が存在するため、曲げの成分はあまり build up せず、目的とする縦および剪断振動という板の面に沿うた振動が治具の出力パワーの大部を占めると考えられる。その意味で、このような治具は実用性が大きいと考えている。

2.3.3 塗膜の振動の減衰の測定

実船では必ずしも防食塗料および防汚塗料を塗布しているが、鉄板を面に沿うて振動させる（たとえば縦振動または剪断振動）と塗料の層の表と裏（鉄板の面）とでは塗料膜厚内の振動の減衰（塗料の剪断変形減衰）のため振動変位の大きさが異なることが考えられる。

鉄板に振動を附与するための駆動用振動系の設計、すなわち塗料の表面に海中生物が付着することを防止するためには、塗料膜による振動の減衰を見込んで鉄板自体をいくらの大きさの振動を行なわせたらよいかということが大きな問題となる。

われわれは、幅40mm、厚さ7mm、長さが板の中の縦波の1波長=190mm (28kHz) の試験板を作り、片面に塗料を種類、厚さを変えて塗布し、また片面は塗料なしの無垢の鉄板面のままの状態にして、試験板の長手方向の端面に28kHz 共振の振動子を接着して試験板を縦振動させ、塗料のある面、ない面の振動の振幅分布を測

定し、両者を比較した結果、塗料のある面は10～30%も塗料のない鉄板面に対して振動振幅が少なくなく、予想外に塗料膜による振動減衰が大きくなることがわからるとともに、駆動用振動系の設計に重要な資料を得ることができた。

(1) 試験用振動体

図2.42に示す形状、寸法の振動体を使用した。

厚さは7mm、幅は40mmで長さは28kHz（実船での防汚実験に使用予定の周波数）で板の綫波の音速から算出できる1波長=190mm（材料は機械構造用鋼）である。

（板の綫波の音速 $c_p = \sqrt{E/\rho(1-\sigma^2)}$ ）、 E =板材の綫弾性率、 ρ =板材の密度、 σ =板材のポアソン比。鉄板では $E = 2.03 \times 10^5 \text{ dyne/cm}^2$ 、 $\rho = 7.8 \text{ gr/cm}^3$ 、 $\sigma = 0.25$ であるから c_p の値は上式から $c_p = 5.32 \times 10^5 \text{ cm/sec}$ したがって 28kHz における1波長 λ_p は $\lambda_p = c_p/f = 190 \text{ mm}$ ）。

駆動振動子はπ形 28kHz 磁気ひずみ振動子を用し、図2.42に示すように瞬間接着剤アロンアルファ（東亜合成化学製）を使って試験用振動体の端面に接合した。

塗料は試験振動体の片面に刷毛で塗布した。

塗料の種類および塗料膜厚は次のとおりである。

- (a) 油性AC塗料。塗装厚さ：実船での標準の厚さで160～170μ。試料数：1ヶ。
- (b) 油性AC塗料。塗装厚さ：320～340μ（厚塗り）。試料数：1ヶ。
- (c) 塩化ビニール塗料。塗装厚さ：実船での標準の厚さ150～160μ。試料数：1ヶ。

塗料は1967年11月末に塗布し、試験は3月上旬に行なった。塗布後約100日経過したが、自然乾燥でしかも冬季の気温の低い期間であったため多少軟らかい感じであった。

(2) 塗料膜による振動の測定

圧電形の振動分布測定用カートリッジおよびこの種の測定を目的として研究室で自作した測定装置を使用して、塗料を塗布した表面と反対側の塗料のない鉄板面との綫波の振動変位分布を測定し、両者のデータを比較対照して塗料による振動減衰の状態を調べることにした。

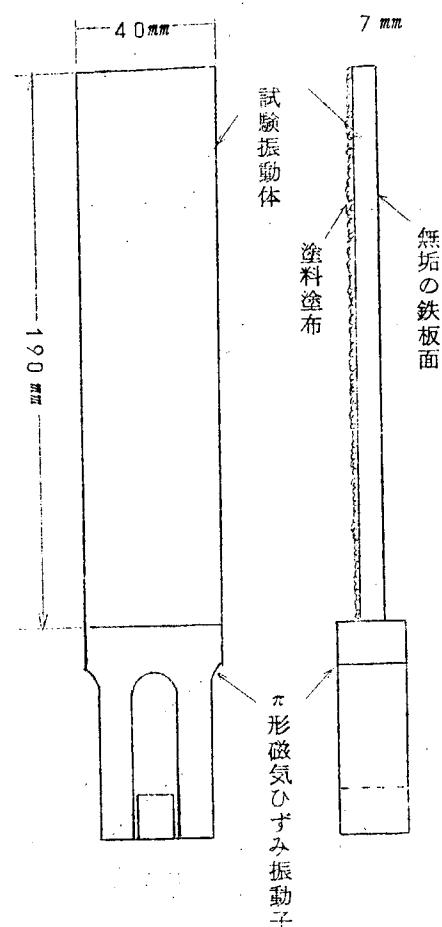


図2.42 塗料膜による振動減衰測定用振動体

図2.43は測定のプロツクダイヤグラムを示したものである。

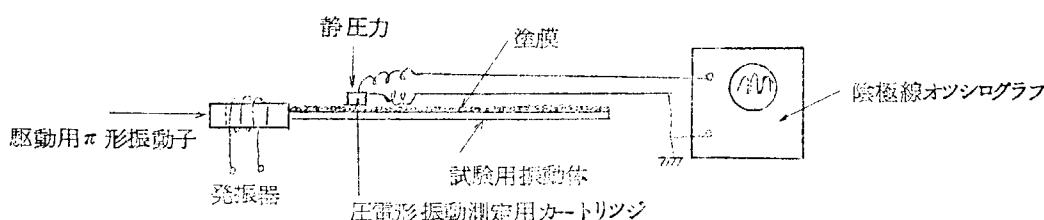


図2.43 測定のプロツクダイヤグラム

(3) 測定結果

振動変位分布の測定結果を図 2.44 ~ 2.46 に示す。

各図で×印の点を連ねた曲線は塗料のない鉄板面の振動分布を、また○印を連ねた曲線は塗料の表面の振動分布を示したものである。

各図に示した結果を総合して摘記すると、

(a) 振動変位の大きさを振動の腹の附近程塗膜による減衰が大きく、変位が極小の振動の節附近ではほとんど差が認められない。

(b) 油性 A C 塗料の標準の厚さのもの(図 2.44)と塩化ビニール塗料の標準の厚さのもの(図 2.46)と比較すると、塗膜はほぼ同一であるにもかくわらず、塩化ビニールのはうが減衰はかなり大きく、A C 塗料の約 13%に対して約 2 倍の 27%にもおよんでいる。

爪で押した感じでは塩化ビニール膜の方が多少やわらかい感じでしたが、減衰の大小が塗料の種類によるとともに塗装後の硬化の度合によっても変化することが考えられるので、常に塩化ビニール塗料が A C 塗料の 2 倍もの減衰があるとは断定できない。

(c) 油性 A C 塗料で膜厚を約 2 倍に変化させた結果(図 2.44~2.45)では、塗膜の厚さによる減衰の変化はほとんど認められず、振動の腹の附近で両者とも約 13%程度であった。

以上、測定の結果を摘記したが、実際の船で超音波振動による防汚を行なう場合には、船側板の振動の大きさを塗膜による振動の減衰を見込んで設定することが必要であることが明らかになった。

ただ、定量的にどの位の減衰を見込んだらよいかはこの実験の結果だけでは不十分で、塗料の種類、厚さ、鉄板と塗料との密着度、塗料塗布後の日数、塗布された塗料のおかれる環境(塗料に接触する媒質……海水、温度など)などの多くの因子が関係するから、改めてそれらの影響を調べる必要がある。

現段階での大雑把な感じでは 30% も減衰を見込んでおけば、大体のところよいのではないかと考えている。

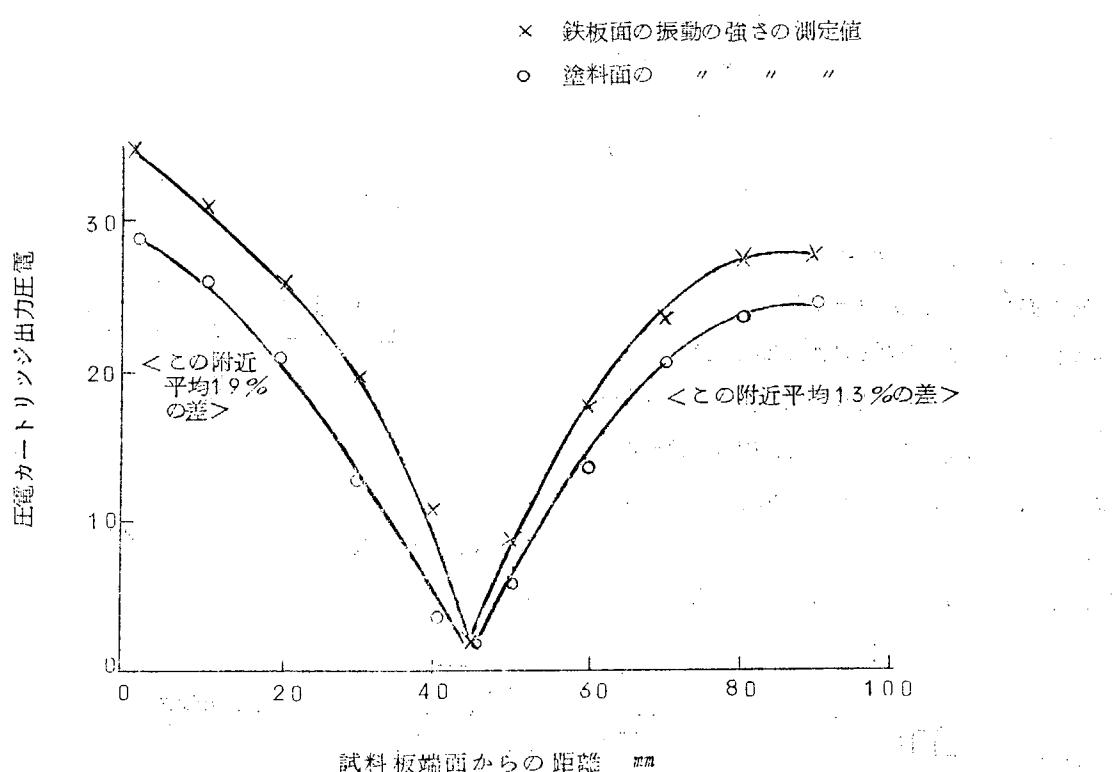


図 2.44 油性 A C 塗料標準厚さの場合の測定結果

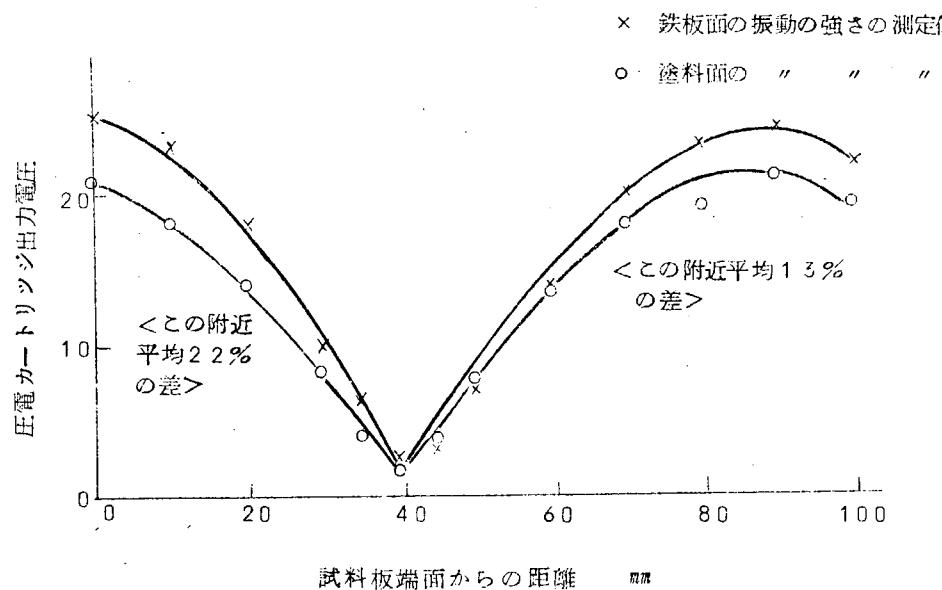


図 2.45 油性 A-C 塗料厚塗りの場合の測定結果

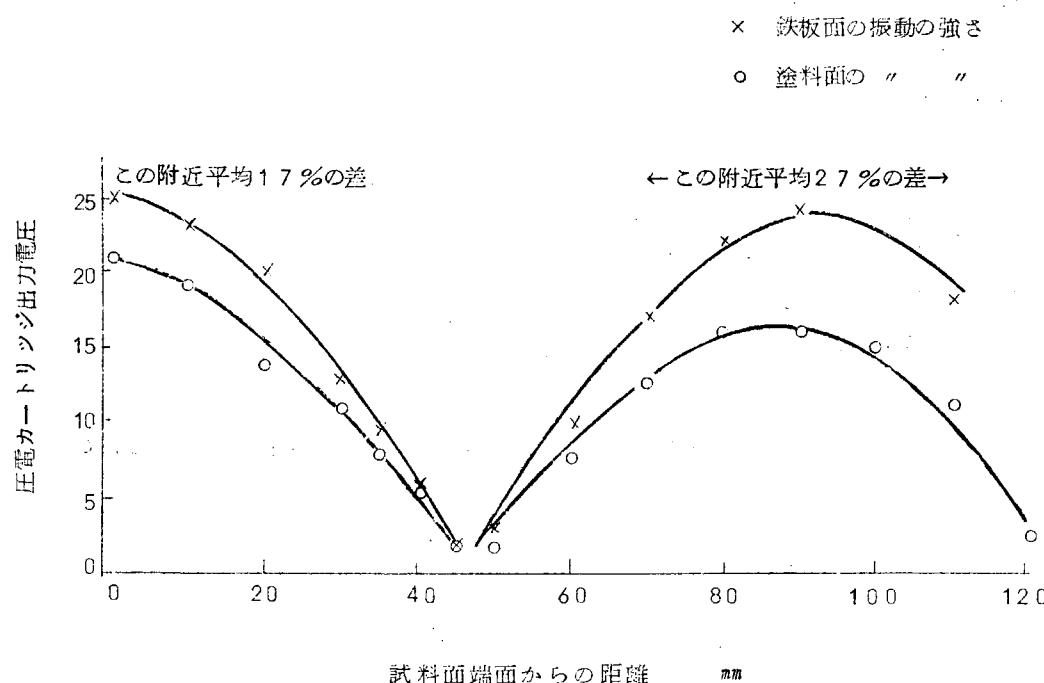


図 2.46 塩化ビニール塗料標準厚さの場合の測定結果

(4) むすび

鉄板の面に沿うた振動が塗膜の厚さ、種類で膜表面でどの程度減小してあらわれたかという測定を 2、3 の例について行なった結果、塗料の種類によってはかなりの減衰があるということが明らかになった。

今回の結果を基礎として、なかつ今後とも減衰の定量的なデータを集積して、駆動用超音波振動系の設計資料を構築することが必要である。

また、超音波による防汚に適合した塗料の種類、塗料の鉄板への密着性のすぐれた塗装法の研究も必要と考えられる。

2.3.3 駆動用振動子の特性の検討

今までの防汚実験では駆動用振動子としてはすべてニッケル磁気ひずみ振動子が使用されてきた。

ニッケル振動子は金属なので丈夫でしかも加工性もよく、その上振動伝送用治具への取付も銀ろうなどで強固にできるなど多くのすぐれた利点をもっているが、うす電流損が大きくそのため能率（電気入力パワが音波となって船側板へ出てゆく音パワに変換される割合）が悪く、同じパワを船板に付与するのに大きな出力の発振器が必要であり、防汚を必要とする船板の面積が広大な実船ではまず経済的に成立つや否や大きな問題である。

われわれはニッケル以外の振動子で防汚に好適で、しかも能率がよく、また価格も安いものということで現在かなり実用されているフェライト磁気ひずみ振動子および最近研究段階をはなれて実用されはじめたボルト締ランジバン形振動子（磁気としてはチタン酸ジルコン酸鉛磁器EZTを使用）に着目し、これらの振動子の大振幅時の振動特性を測定し、在来のニッケル振動子の同様な特性と比較検討し、防汚の目的への適用性を吟味した。

その結果、フェライトおよびランジバン形とも能率ではニッケルの2倍以上であり、また同じ端面積の振動子の場合取扱えるパワはほぼ同程度で総体的にニッケルにまさるものであることを確認した。

ただ、フェライトでは治具との接着を熱硬化性樹脂で行なうため耐久力の点で心配があること、ボルト締ランジバン形振動子では実用時の長時間にわたる特性の経時変化のデータに乏しい点いずれも問題はあるが、将来はニッケルに代ってこれらの振動子が多いに実用されるものと考えられる。

(1) 振動子の能力の表示

振動子の能力を拘束する因子としては

- (i) 駆動力の磁気的または誘電的飽和による限界値 F_s の存在
- (ii) 振動による振動子の疲れ破壊を防止するための端面振動速度の限界値 V_F の存在
- (i), (ii)の因子は振動子の材料、形状に支配される。また、(i)は直流偏倚磁場または電場によっても変化する。

次に振動子内部で形成される振動機械パワ W_m の限界値 W_{ms} は

$$W_{ms} = F_s \times V_F \quad (2.12)$$

で与えられる。

この W_m は、振動子の内部で損失として消費されるパワ W_v と治具を通して船板へ音響出力パワとして出てゆくパワ W_a とに別れる。

$$W_m = W_v + W_a \quad (2.13)$$

W_v と W_a とは振動子の出力端面からみた振動子の内部機械抵抗 r_v と治具および船板方向を見た振動子の負荷機械抵抗 r_L の値によって定まる。振動子の出力端面の振動速度の実効値を v_e とすると、 W_v 、 W_a はそれぞれ、

$$W_v = r_v v_e^2 \quad (2.14)$$

$$W_a = r_L v_e^2 \quad (2.15)$$

で与えられる。

W_v を小さく、 W_a を大きくすることが能率よく振動子を使うことの要點になるが、そのためにはまず r_v の値の小さな振動子を使用することが先決になる。

r_v の値は振動子の振動応力の分布、応力の大きさ（振動子端面の振動速度または振動変位振幅に比例する）の関数であって、一般的に振動応力（振動速度）が大きくなると増大し、やがて一定に落着く傾向があるので、振動速度の関数として測定しておくことが必要である。

また、電気パワが機械振動パワに変換される効率は振動子材料の磁気損失（うす電流損、磁気ヒステリシス損）または誘電損失（誘電ヒステリシス損）の大きさによって支配される。これらの値は振動子に与える磁場の振幅または電場の振幅および印加周波数によって変化するので、磁場および電場の振幅、周波数に対する依存性を測

定する必要がある。

振動子の能力を拘束する因子 F_S 、 V_F の値は上記とは別に測定する。

V_F の測定は金属材料の疲れ限度応用測定法と同じ方法を用いて $S-N$ 曲線を測定し、これから安全率を見て V_F の値を決定する。

F_S の値は振動子に重負荷を与えて、振動子振幅が V_F に到達する前に一定の値になり始める磁界または電界の値を測定し、これと大振幅で別に測定した振動子の力係数の平均値とを使って大体の F_S の値を算出する。

以上から、振動子の能力の表示として必要な因子を摘記すると

- (I) F_S 、 V_F の測定
- (II) γ_V の応力振幅依存性の測定
- (III) 力係数の振幅依存性の測定
- (IV) 磁気および誘電損失の磁界または電界振幅依存性の測定

である。

なおこのほかに材料の経時変化特性の測定が必要である。

(2) 大振幅特性の測定

測定法および測定装置については一般的な立場すでに多くの検討が行なわれ、実行されているのでここでは一切文献に譲り省略する。（文献は本文の末尾にかかげておいた。）

今回、防汚には 28 kHz を使用しようとの申合せがあったので、測定は 28 kHz の π 形フェライト振動子および $30 \phi 5 \text{ mm}$ 厚の 2 枚の磁器（磁器材料は Fe 添加の PZT-8 の磁器）を使用したボルト締ランジバン形振動子について行なうとともに、すでにデータの得られているニッケル振動子との比較検討を行なった。

図 2.4.7 および図 2.4.8 は測定に使用した π 形 28 kHz 振動子および $30 \phi 28 \text{ kHz}$ ランジバン形振動子の諸元を示したものである。

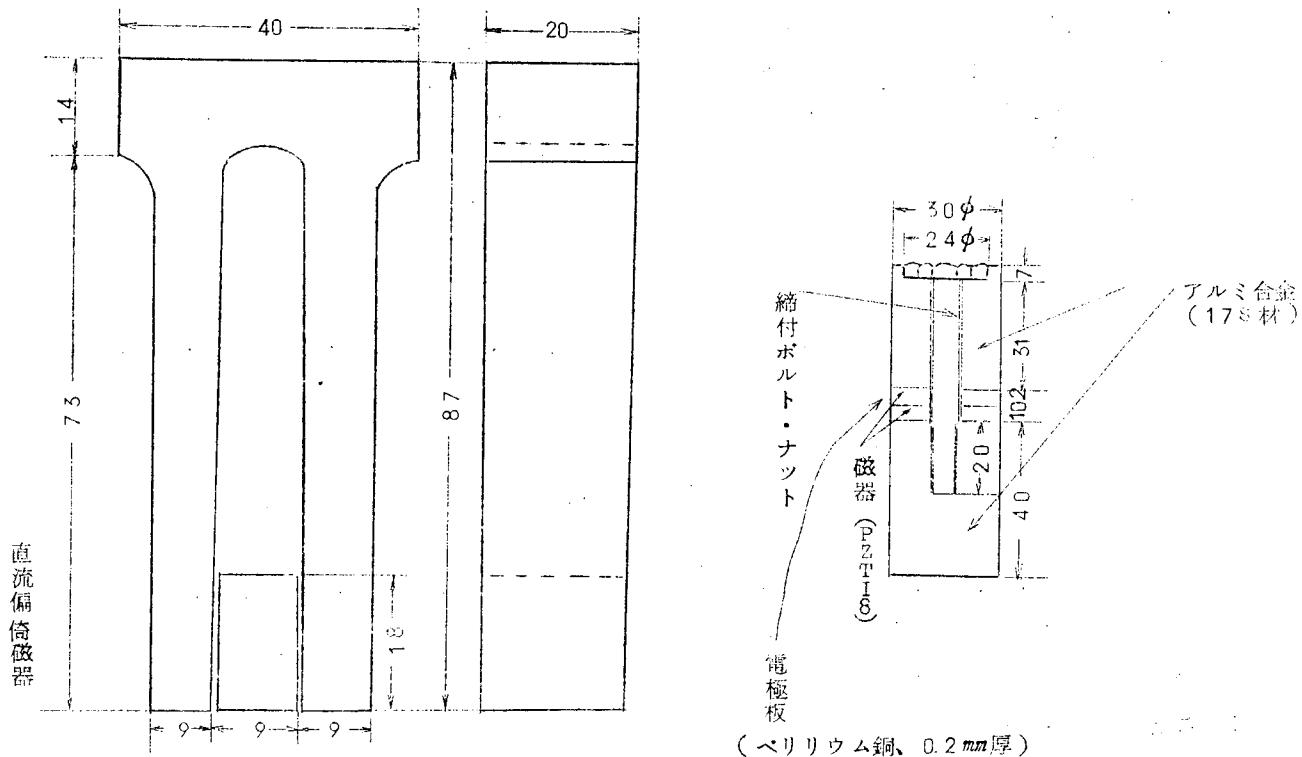


図 2.4.7 測定に使用した 28 kHz π 形磁気
ひずみフェライト振動子

図 2.4.8 測定に使用した 28 kHz ボルト
締ランジバン形振動子

(3) 測定結果

個々の測定結果の曲線を示すことをやめ、一括して表で示すこととした。

表2.7は各振動子について示した性能表で、これから考えると次のようなことがいえる。

- (a) 振動子の最大駆動応力 $T_s = \dot{F}_s / S_v$ はニッケルが最も大きく、フェライト、ランジバン形はこれに劣る。したがって、きわめて重い負荷の場合はニッケルが威力を発揮できるが、防汚の時の振動子に加わる負荷機械抵抗は 10^6 の桁なので、それほど重負荷でもないので、フェライト、ランジバン形で十分に励振可能である。ただし、ニッケルにくらべて振動子の面積を多少大きくとる、または数をふやすことが必要であろうが、価格的にニッケルにくらべて安価（フェライトでニッケルの $\frac{1}{10}$ 位、ランジバン形で $\frac{1}{10}$ 以下）なので、経済性ははるかに大きい。

表2.7 振動子の性能表

振動子の種類	端面積 S_v (cm^2)	\dot{V}_p (実効値) (cm/sec)	$T_s = \dot{F}_s / S_v$ (実効値) (dyne/ cm^2)	W_{ms} / S_v (実効値) (watt/ cm^2)	R_v / S_v (dyne/ cm^2 / sec/ cm^2)	最大全能率 η_{ec} (%)
ニッケル振動子	9	7.4	1.5×10^7	1.11	1.35×10^5	40
フェライトπ形振動子	8	6.0	7.9×10^6	4.7	4.6×10^4	70~80
ランジバン形振動子	7	8.8	7.9×10^6	6.95	0.96×10^4	80以上

註：1. ニッケル振動子は角形振動子で、脚の断面積係数が0.5（したがって脚の断面積 $4.5 cm^2$ ）、直流动磁界が1.5エルステッドの場合の測定値。

2. 全能率は電気一音響変換能率をあらわし、振動子の電気入力パワが振動子から音波となって出てゆくパワの割合をあらわす。この値が大きな程振動子としては優秀である。

3. ランジバン形の最大駆動応力 T_s は電極間に500V印加した時の値で、まだ駆動力は限界に達していない。ただ、実験的に使用した装置に問題があってこれ以上の電圧が印加できなかったのである。したがって、 T_s および W_{ms} / S_v の値はさらに大きなものであることは確かである。

なお、ニッケル、フェライトは与えた直流バイアス（ともに1.5エルステッド）における限界値を示してある。

(b) 振動子の能率を左右する振動子の内部機械抵抗 R_v / S_v はランジバンが最も小さく、ニッケルが最も大きくランジバンの1.3倍程度もある。

R_v を通して振動子の発熱があり、ニッケルではそれが非常に大きいため水で冷却しないと振動特性が劣化してしまう。これに対し、ランジバン形、フェライトは自然空冷または強制空冷で冷却すればすむので装置が楽になる。

(c) 全能率がランジバン形、フェライトの70~80%もあるのにくらべ、ニッケルは40%どまりなので、同じ出力パワを要求した時にニッケルでは2倍以上の出力パワの出せる発振器が必要であり、したがって超音波のパワの1 Watt 当りの価格が2倍以上にもなり広い面積の防汚を必要とする実船の場合には経済性に乏しいことになりかねない。

(d) ニッケルは加工性に富み、治具との接合も耐久力のある銀ろう付でできるなど保守、運転の面では確かに有利な面がある。

この点、フェライトは熱硬化性の接着剤で治具に接合するほかなく、また焼物のため脆いので衝撃に対しても

弱いなど取扱い、保守の点に難点があるので、使用にはこれらに対して十分の考慮が必要である。

ランジバン形は脆い磁器を使っているが、大半は軽合金なので衝撃に対してかなり強く、また治具との接合はネジを使って簡単に行なえる点実用性が大きく、振動特性も極めてすぐれている。

しかし、このような構造体として誕生してからの日数が浅いため経時変化の特性が十分明らかになっていない点心配がある。軽く使うようにして寿命を長くするよう考えて実用してゆくのが1つの方策と考えられる。

(4) む す び

超音波のパワ発生に使用されている3つの振動子の性能の比較を行なった。

その結果、従来のニッケルに比較してフェライト、ボルト締ランジバン形が性能がすぐれていることが明らかになつたが、防汚に使用する場合には、振動子単体の性能の良さだけでなく、使用される環境も十分考慮する必要があるので、今後ともその点をよく考えて実用化を計ることが必要であると考えられる。

〔文 献〕

森：日本音響学会講演論文集 P. 117 (昭和31年5月)

森：" " P. 65 (昭和32年5月)

以上、ニッケル振動子。

森・高橋：日本音響学会講演論文集 P. 103 (昭和38年10月)

森・高橋：" " P. 25 (昭和41年5月)

森・高橋：" " P. 15 (昭和40年5月)

森・高橋：" " P. 27 (昭和39年10月)

森・高橋：" " P. 17 (昭和41年11月)

以上、フェライト、PZT振動子の測定。

森・上羽：日本音響学会講演論文集 P. 15 (昭和41年11月)

森・上羽：" " P. 43 (昭和42年11月)

以上、ボルト締ランジバン形振動子。

3. 超音波による海中生物付着防止臨海実験

3.1 試験片による臨海実験

3.1.1 パルス波超音波の防汚効果

(1) 試験方法

パルス波超音波が生物を死滅させなくても付着を防止できる限界を求めることが、パルス波超音波の海中における効果を求めるために実験したものである。

42年7月4日、諸磯湾にある三崎観光KK真珠養殖場の筏を利用して、図3.1のように布設して超音波の発振を開始した。

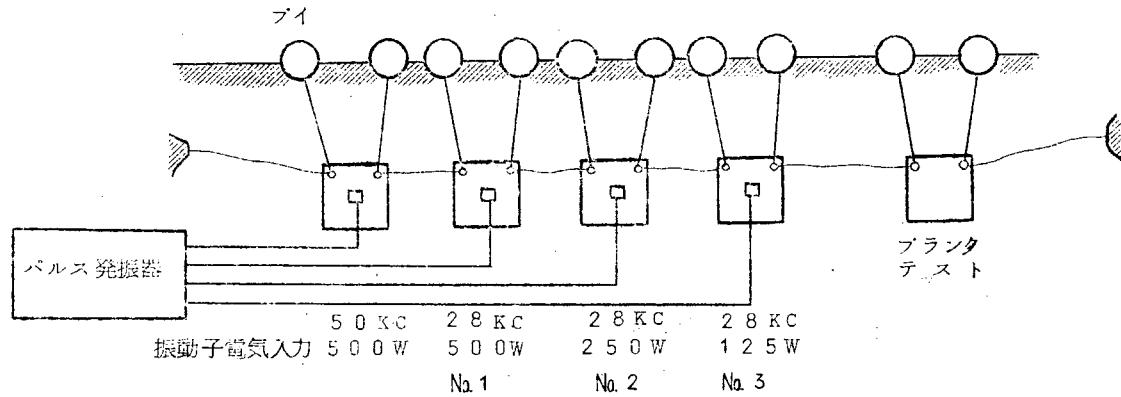


図3.1 試験板海中布設図

試験片は $500\text{mm} \times 500\text{mm} \times 6\text{mm}$ で、よく研磨し、A/Pを使用せず、W/PとA/Cのみ1回塗装した。試験片の中央部に振動子を接着し、各振動子には上記超音波が4.16回/秒の割合で順次加えられる。実際の周波数は2.8KCが24.5KC、50KCが44.7KCとなり、いづれもパルス幅は2msecであつた。

振動子の輻射面積は 61cm^2 (50KC)、 64cm^2 (28KC, No.1)、 32cm^2 (28KC No.2)、および 16cm^2 (No.3) であつた。

これらの試験片は、この海面でもつとも生物の付着する海面下 $50\text{cm} \sim 1\text{m}$ 付近に垂下させ、観察は次のように行なつた。

7月 4日 発振開始

11日
18日
25日
31日

18日 中間観察

8月 9日 最終調査、音圧測定

10日 揚収

(2) 試験結果

(a) 浸漬後7日目(7月11日)の状況

どの試験片もほとんど付着生物が見られず、超音波の効果は判定できない。

(b) 浸漬後14日目(7月18日)の状況(水温24.5°C)

(i) ブランク板:

表側(南西向き)全面に2~3mmのフサコケムシの付着が見られ、アオノリがわずかに付着はじめた。
裏側(北東向き)には1~4mmのアオノリが密生し、11、12、13、14、31、32、42、43
(註 参照)に比較的多い。

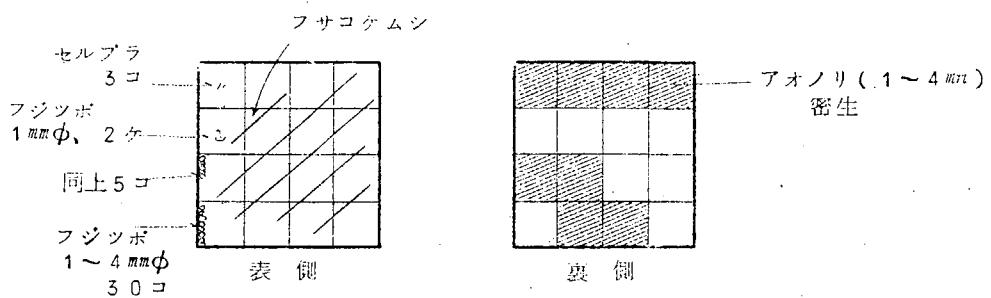


図3.2 浸漬後14日のプランク板の状況

(ii) 50 KC 超音波パルス振動板

周波数50KC、振動子入力500Wの超音波を付与したところ、振動子の直前附近には、ほとんど付着が見られなかつた。試験片の周縁部には図3.3に示すように、フジツボ、セルプラ、アオノリなどの付着があつた。

プランク板に付着がやや少ないようにも感ぜられるが、試験片の浸漬位置は3m程度しか離れていないのでこの理由はわからない。

また、付着しているフジツボも3mm程度に成長していた。

フジツボ (1~4mmφ) 17コ	フジツボ (1mmφ) 2コ	フジツボ (1mmφ) 4コ	フジツボ (1mmφ) 19コ セルプラ (4mmφ) 3コ	フジツボ (2.5~3mmφ) 30コ	フジツボ (2.5~3mmφ) 10コ		
フジツボ (1~3mmφ) 16コ			フジツボ (1~3mmφ) 6コ	フジツボ (1~3mmφ) 18コ 2.5~3mm			
フジツボ (1~3mm) 5コ	フジツボ (3mmφ) 18コ		フジツボ (1~3mmφ) 14コ セルプラ (4mmφ) 1コ	フジツボ (2~4mm) 18コ	フジツボ 18/ 10cm ²	フジツボ 15~20/ 10cm ²	フジツボ (4mmφ) 50コ/ 10cm ²
50 KC 表				50 KC 裏			

図3.3 浸漬後14日の50KC振動板の状況

(註) 試験片各部を示すのにつきのようにつきのようにつきのようにつきのよに16等分して数字で示した。

11	12	13	14
21	22	23	24
31	32	33	34
41	42	43	44

(iii) 2.8 KC 超音波パルス振動板 (No.1)

全面に2～4cmのアオノリが密生し、上縁部に径2mm程度のフジツボの付着があつたほかは付着していないかつた。振動子の全面の表側に径約1～2cmの塗膜の剥離があつた。

(iv) 2.8 KC 超音波パルス振動板 (No.2)

全面に4～5cm長のアオノリの密生が目立ち、フジツボの付着は見られなかつた。ただ4.3位置に径1mmのフジツボの付着があつた。裏面もノリの付着が多い。

(v) 2.8 KC 超音波パルス振動板 (No.3)

振動子全面径7cmの範囲にだけ付着物がなく、その他は、ほとんど全面に長さ3～4cmのアオノリの付着が多い。特に試験片の周囲には比較的大きなフジツボの付着が見られた。裏面側ではノリは1.1、1.2、1.3、1.4、2.3、2.4、3.3、3.4の上部に密生し、その外では少ない。3.1、3.2に3mm中のフジツボ2.4に13コ付着している。2～3mm中のフジツボが1.4に19コ、4.1、4.4に22コ付着した。

超音波振動の直接当らない浮きのビン玉の下部には径4～5mmの大きなフジツボが29個／10cm²付着し、ノリは水線から5cm下まで密生していた。

(c) 浸漬後21日目(7月25日)の状況(水温28.0°C)(写真3.1参照)

(i) ブランク板

表側ではフジツボの付着は左下部に径6mmのもの14コ、径4～5mmのもの10コ、右側面に4.9コ認められた。セルプラは約12mmに生長し、A/C塗膜が点々と剥離してW/Pが見えているところがある。アオノリの付着は比較的少ない。

裏側ではアオノリの付着は全面に及ぶ。左縁下部径4～5mmのフジツボが47コ、下側面は21コ付着しているが設置位置の影響も多少考えられる。

(ii) 5.0 KC 超音波パルス振動板

全般的にアオノリの付着が多いが、フジツボの付着は少ない。特に付着に関して縞模様などは見られない。

フジツボ 4～5mmΦ 10コ 1mmΦ 7コ	フジツボ 4～5mm 6コ 1mmΦ 9コ	セルプラ 10mm 2コ	セルプラ 10mm 3コ フジツボ 2～3mm 11コ
フジツボ 4～5mmΦ 13コ 1mmΦ 2コ	フジツボ 3～4mm 4コ	セルプラ 10mm 1コ フジツボ 3mmΦ 5コ	フジツボ 3～4mmΦ 8コ セルプラ 10mm (11コ)
フジツボ 4～5mmΦ 14コ セルプラ 10mm 2コ	フジツボ 5mmΦ 12コ	フジツボ 5mm 2コ セルプラ 10mm 1コ	フジツボ 5mm 18コ

図3.4 浸漬後21日目の5.0 KC振動板の状況

(iii) 2.8 KC 超音波パルス振動板 (No.1)

全般的にアオノリの付着が多い。長さ15mm程度で、5.0 KC の場合より付着量が多い。フジツボは、右上縁部の少部分、左下一部に径4mmのものがそれぞれ、15コおよび10コ付着しているのみで、その外の場所では、ほとんど付着していない。

中央部に塗膜の剥離が6ヶ所あり、その径は3～10mmである。4.1にセルプラ(1.0～1.2mm程度)2コ、1.1に1コ、1.4に1コ付着している。

(V) 2.8 KC 超音波パルス振動板 (No.2)

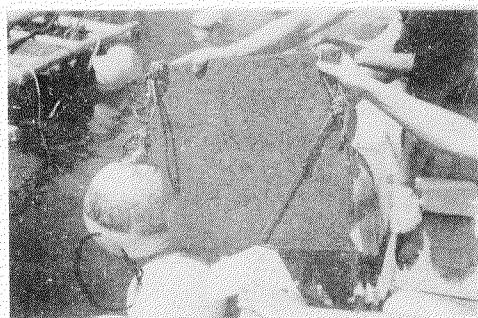
フジツボの付着はほとんど見られない。周囲に1mmΦのものが2コあるのみである。

フサコケムシも全く付着していない。2.4にセルプラ1コ。中央部に塗膜の剥離が2個所あり、鉄板が露出している。中央部にA／C塗膜の剥離が径1.0cmの円内、および各部に点在している。アオノリの付着は、比較的多い。

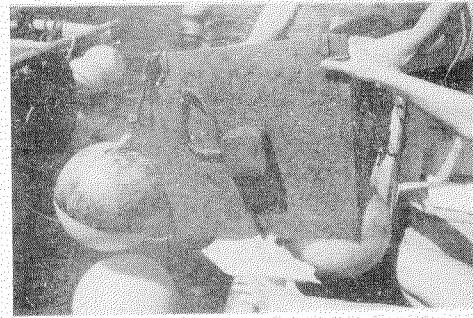
表面も比較的フジツボの付着が少ない。塗膜の剥離も所々に見られ、アオノリの付着が多い。



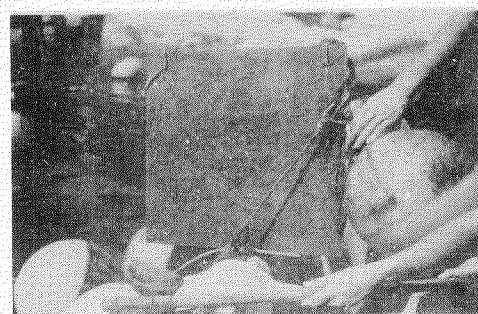
対照用 ブランク板



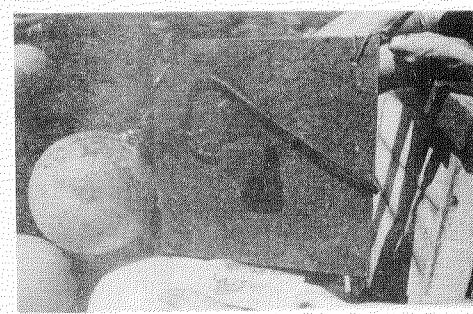
2.8 KC No.1 (500W)
中央部は付着しない



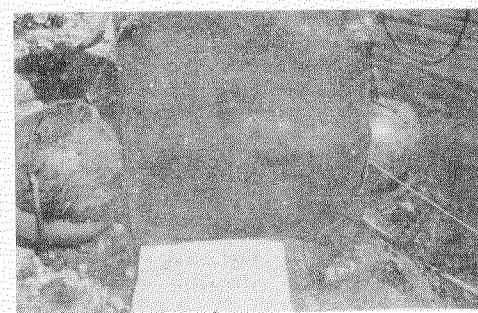
同左　裏面側



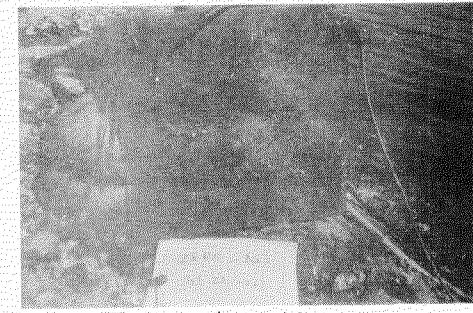
2.8 KC No.2 (250W)



同左　裏面側



2.8 KC No.3 (125W)
中央の振動子の直前のみ付着せず



同左　裏面側

写真3-1、浸漬後21日目の状況

(V) 28KC 超音波パルス振動板 (No.3)

全般にアオノリの付着が著しい。フジツボは左上縁部、左中央部にわずかに付着し、その大きさは、径5～6mmあり、左上縁は28コ、左中央部は6コであつた。

アオノリの付着について特記すべきことは、中央部の振動子の前面において長短径 5、4 cm の橢円状の範囲のみ付着していないことである。

裏面も、ほとんど同様に周縁部を除いてアオノリの付着が多い。

(d) 浸漬後27日目(7月31日)の状況(水温28.5°C)

(i) ブランク板

全面にアオノリ(15mm)の付着がきわめて多い。

フジツボは、左周縁部に径7mmのもの21コ、径2~3mmのものが10コ付着していた。

全般的にアオノリの成育が遅れているようである。

裏面もフジツボの付着があり、右側全面に3mmのものが20コ／10cm²付着しており、左下に5～6mmのもの10コ、左側に10コ／10cm²付着していた。

プランク板を浮かしている合成浮子(径30cm)には、6.5~9.0mmまで成長しているアオノリ、径6~7mmから約10mmに達する大型フジツボの付着が見られた。このフジツボは15コ/10cm程度の密度をもつていて、

(ii) 50 KC 超音波 パルス 振動板

裏側はアオノリ(約10mm)の付着が少なく、フジツボの付着が多い。これに対して表側は全面にアオノリの付着が著しく、その長さは15~20mmに達する。表側のフジツボは周縁部および下側の隅に径約2mmのものが30%／10cm²の割合で付着しているが、裏面にくらべて成育が悪いように認められた。

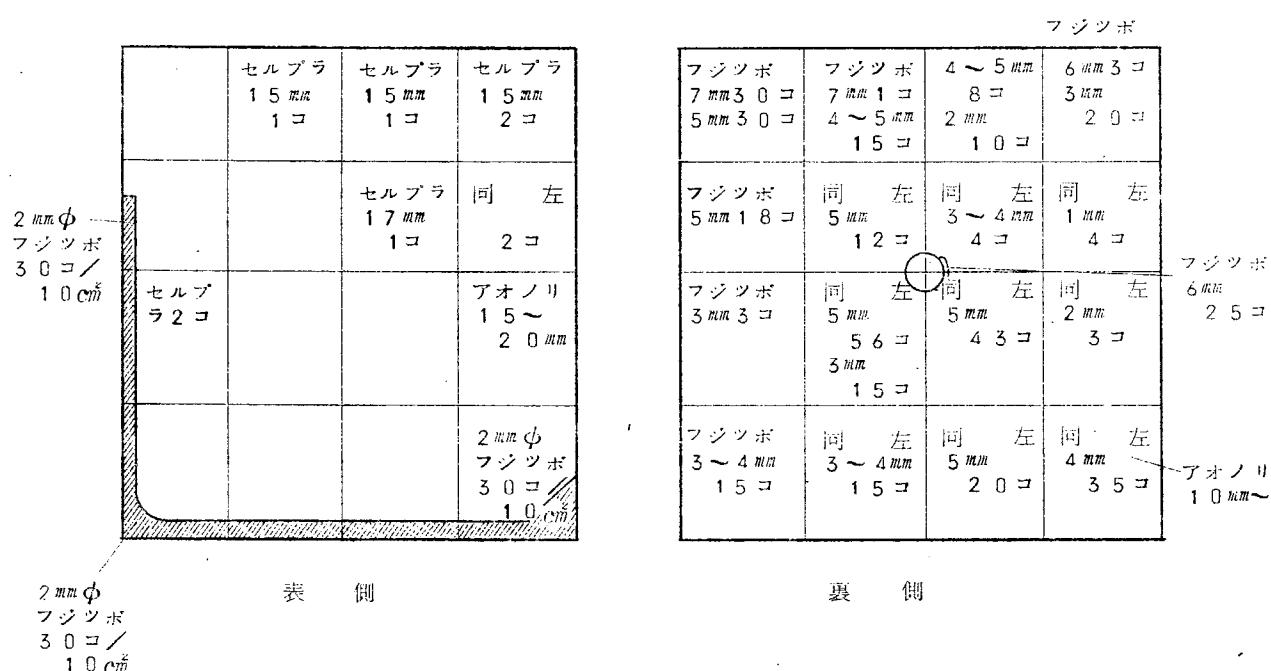


図 3.5 浸漬後 27 日目の 50 KC 振動板の状況

(iii) 28 KC 超音波パルス振動板(No. 1)

表側には全面にアオノリの付着が多く、その長さは20~40mmに達するものもあり、中央部を除き3~6mm大のアオサが1ブロックあたり10コ程度生長していた。

フジンボは右上線部に径 5 mm～6 mm のものが 20コ(先週 15コ)となり、左下部に径 4 mm のものが 6コ

(4コは脱落), 径3mmのもの4コ、4.1に径3mmのものが7コ認められた。

中央部に塗膜の剥離が前回と同様6カ所あり、この付近はフジツボおよびアオノリ、アオサの付着は全く見られなかつた。

裏面では前回と同様、上縁部上から7cm幅の範囲はアオノリの付着が少ない。その他の部分にはアオノリが大量に付着しており、振動子背部にはアオノリ(1.0~1.2mm)とアオサ(3mm)が多く付着し、フサコケシ(5mm大)の付着が認められた。

(iv) 2.8 KC 超音波パルス振動板(No.2)

上縁部7~10cm幅には、アオノリ、アオサ、フジツボ(径0.5mmのものを除く)の付着は見られない。その外全面に8~12mmのアオノリの付着が確しい。ただし、中央部は、塗膜の剥離が見られる。形状は8字形で、たて3cm、よこ8cm、また、径2cmの円形剥離がある。また、中央部の径1.5cmの円内はA/C塗膜の剥離があり、W/Pの黄色地の露出が点々と散在している。

左上(2.1)側に径1~2mmのフジツボが12コ群落し、右側中央部下側(3.4)に、フジツボ(径2~3mm)3コ、右下側(4.4)に径1~2mmのフジツボが3コ付着するだけで、その外、大型のフジツボの付着はなかつた。

裏面ではコードおよび振動子背面に径4~5mmのフジツボが20~30コ付着している。

アオノリ(1.0mm大)が大部分を占め、3~4mmのアオサが、まばらにまじつて付着している。

フジツボは、1.1に径3mm2コ、1.4に径5mmのもの1コ、2.4に2コ付着し、振動子付近の裏側の鉄板部付近にはアオノリの付着もなかつた。

(v) 2.8 KC 超音波パルス振動板(No.3)

中央部径5cmの範囲は全く生物の付着がなかつた。その外の部分には1.0~1.5mmのアオノリの付着が多い。セルプラは3.2に1.5mmのもの1コ、4.4に1コだけ付着した。径3~4mmのフジツボが1.1、1.2に計20コ、上縁部のみに付着、1.3、1.4に径5mmのもの2コ、径3~4mmのもの6コ、径2~3mmのもの30コ付着、3.4に径2~3mmのもの3コ、4.4に3コ、4.2に2コ、4.1に30ヶ(脱落)、2.1左縁部に径4mmの脱落あとが7コ認められた。

裏面ではコードおよび振動子接着部付近に、フジツボ(径5~6mm)が20コ/1.0cm付着し、全面を覆う。長さ1.5mmのアオノリ、1.0mmのアオサが全面に付着していた。

なお、鉄板用合成浮子の下面には水線付近では十分成長した3.0~4.0mmのアオノリが密生し、その1.0cm下方から径5~6mmのフジツボが20コ/1.0cm、3.0~4.0mmの中型フサコケムシが密生していた。

(e) 浸漬後36日目(8月9日)の状況(水温27.4°C~28.6°C)

(i) ブランク板

全面にアオノリ(1.5mm長)の付着があり、その上に径9mmのフジツボ(タテジマフジツボが30ヶ/1.0cm程度付着、特に1.1、2.1、3.1、3.4、4.1の周縁部に多い。3.0mm長のフサコケムシの付着があり、裏面(北東面)には1.0~1.5mmのアオノリの付着が多い。周縁部には径8~10mmのフジツボが付着し、特に左縁、4.4部右縁下部に多かつた。

(ii) 5.0 KC 超音波パルス

鉄板の中央部の径2.0cmの範囲にはフジツボの付着はなかつた。

下側4.1~4.4には、6~10mmのフジツボが1.5~2.0ヶ/1.0cm付着、1~5cmのコケムシ類多数、2.0~3.0mmのセルプラ10ヶのほか全面にアオノリ(1.5mm長)の付着が多かつた。

裏面では全面にコケムシ類(3~10cm)の付着が確しく、こんもりと繁茂していた。

(iii) 28 KC 超音波パルス振動板 (No.1)

中央部径 8、 16 cm の楕円状の範囲に限りフジツボ、ノリ等の付着が見られない。

ノリは 7 月下旬より成長が少なく 10 ~ 15 mm にとどまつた。

フジツボは周囲に多く、大きさは径 8 mm 程度で、22 に 8 ケ、23 に 12 ケ、13 に群落をつくり 30 ケ、セルプラ (2 cm 長) 3 ケの付着が見られた。

裏面では比較的動物の付着は少なく、アオノリ (10 ~ 15 mm) が全面に付着しているだけである。

ブイには大型 (径 10 ~ 12 mm) のフジツボが密生していた。

(iv) 28 KC 超音波パルス振動板 (No.2)

フジツボの付着は少ない。43 および 44 に 6 ~ 8 mm のフジツボが数個付着していた。

中央部に 8 字型 (5 ~ 10 cm) の塗膜の剥離があり、鉄板面が露出している。また、アオノリ (長さ 10 ~ 13 mm) が全面に付着していた。

裏面は全面にアオノリ (10 mm) の付着があり、コードの付近にホヤ類 7 個、43 に 1 個付着、フジツボ (径 5 ~ 8 mm) は下縁部、上縁部、側縁部に 10 個 / 10 cm² 程度付着、振動子背面下部には径 10 ~ 12 mm の大型フジツボが密生していた。

(v) 28 KC 超音波パルス振動板 (No.3)

中央部の振動子前面径 5 cm の内はフジツボ、ノリは付着しない。

A/C 塗膜の剥離は中央部径 1 cm の範囲内のみにあり、全面にアオノリ (長さ 8 ~ 10 mm) の付着が多い。セルプラ (2.0 ~ 3.0 mm) 3 個体径 4 ~ 6 mm のフジツボは上縁と下部に一團となつて付着。ホヤ 32 に 1 個付着していた。

裏面はアオノリ (15 mm) が全面を覆い、コケムシ類 (3 ~ 4 cm) がコード付近、ホヤ類 4 個、10 mm のフジツボもコード付近に付着していた。下側の幅 10 cm はアオノリ、フジツボの付着がなかつた。

(vi) 生物付着量

8 月 9 日引上げ、鉄板の表面の周囲 5 cm 幅の部分を除いた中央部の生物付着量を調べた。その結果は次のとおりである。

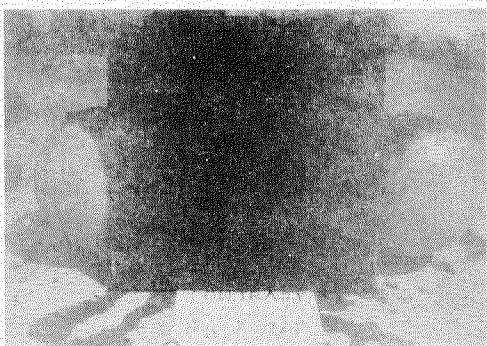
試験片	混重量 g
プランク板	16.0
50 KC 超音波パルス振動板	36.2
28 KC 超音波パルス振動板	16.7
No. 2	17.0
No. 3	27.2

付着物の重量からはプランク板の方が付着量が少ないと期待外れの結果であつた。

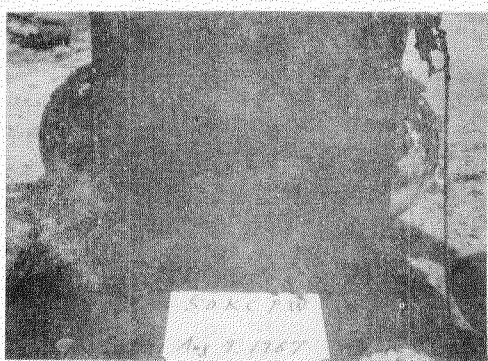
(vii) 試験片表面の音圧測定結果

諸磯湾の実験海面において試験片直前の水中音圧のピーク音圧をゾンデとシンクロスコープで測定した。

(P - P 値, mV)



对照比較用

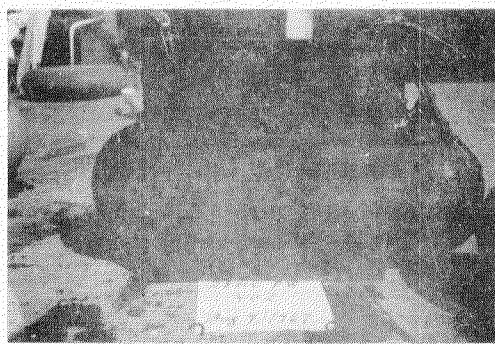


50 K.C. (500W)

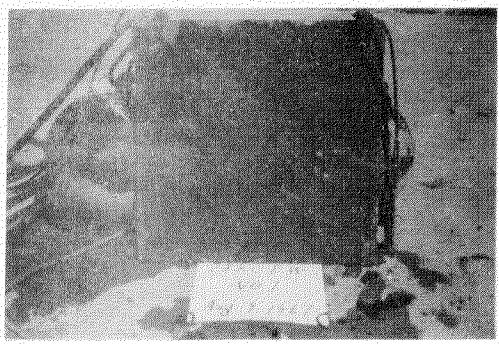


28 K.C. No.1 (500W)

写真の記号は誤り。



28 K.C. No.2 (250W)



28 K.C. No.3 (125W)

写真中の番号No.1はNo.3の誤り。

写真3.2 浸漬後3-6日目の状況

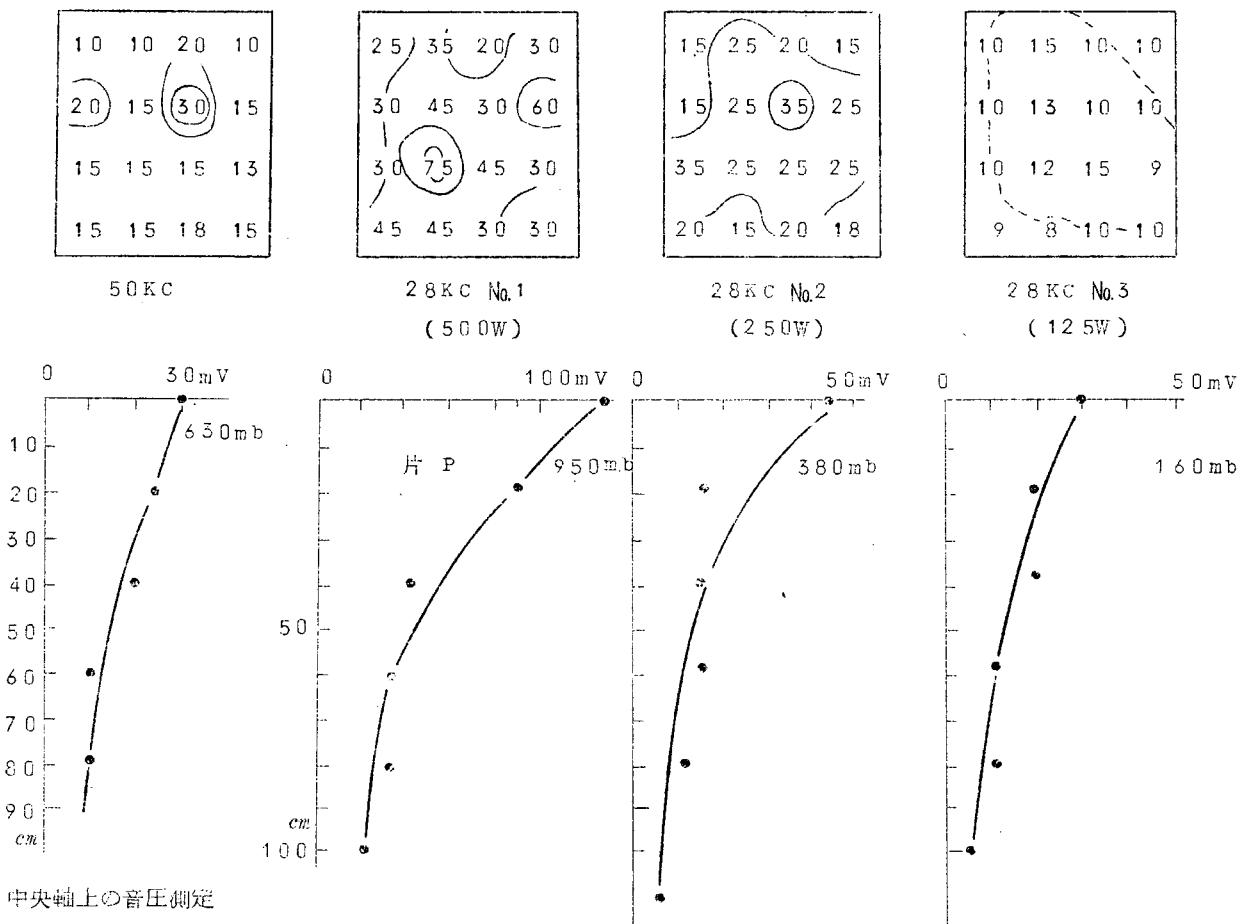


図3.6 試験片前方の超音波水中音圧の変化

測定結果を図3.6、表3.1および写真3.3に示す。

試験片の近傍には大きな音圧が発生していることがわかる。

表3.1 試験片表面付近の超音波の測定結果

周波数出力 項目	50KC PW (500W)	28KC PW		
		No.1(500W)	No.2(250W)	No.3(125W)
ゾンデ出力電圧(実効値)	30mV	130mV	44mV	30mV
同上 音圧	500mb	260mb	90mb	63mb
同上 加速度(実効値)	1040g*	300g*	105g*	73g
音圧(片ピーク値)	630mb	950mb	380mb	160mb
同実効値	450mb	670mb	270mb	110mb
同加速度(実効値)	940g*	780g*	320g*	120g

表3.1の*印のついた試験片の振動子直前には、生物の付着が見られなかつた。大分、測定に誤差があるようだが、揺れる海上での測定結果であるから、これ以上の測定精度は期待できないであろう。

今まで述べた生物付着の限度と超音波強度との関係を概略考えると、およそ100g以上 加速度、音圧では90mb程度以上を考えるべきであろう。

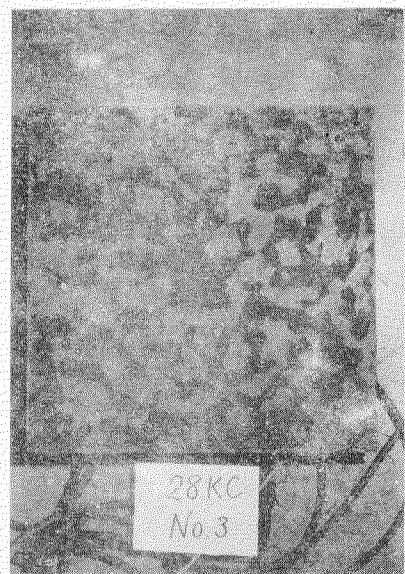
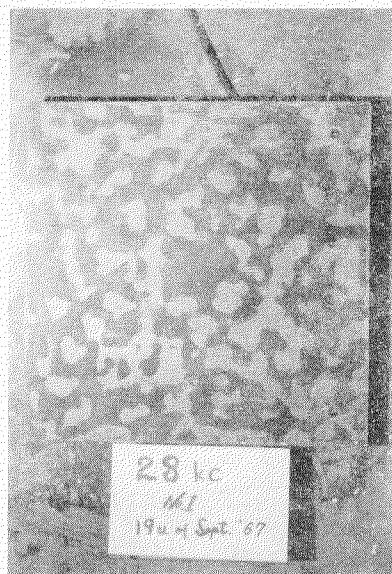


写真3.3 28KC No.1(500W)およびNo.3(125W)
の振動モード、鉄板の一边は500mm

(3) 結　び

以上研究の結果次のような結論を得た。

- (a) フジツボの付着防止については、28KC-500～125Wの間において大差なく効果はある。
- (b) アオノリに関しては振動子前面の一部を除いて付着が多い。
- (c) 50KCと28KCの差は明らかには出なかつた。
- (d) 28KC 125Wの鉄板では振動子直前のごく小範囲に限りアオノリ、アオサの付着がなかつた。
- (e) 超音波を付与すると明らかにフジツボの付着は減少するが、アオノリなどが逆に繁茂する。強力超音波ではアオノリなども付着しない。
- (f) 強力な超音波振動のある付近では、塗膜も剥離することがある。
- (g) フジツボ類の付着限界はおよそ100タ以上加速度が必要で300タもあれば全く付着しない。

3.1.2 縦波の防汚効果

船舶に海中の生物（フジツボ、カキ、アオサその他）が附着し、船舶の速度が低下し燃費が増大することが知られている。この対策として、毒物系の塗料（A/P）を使用することで防止を行なつてはいるが、塗料の寿命が十分でないため長期にわたる防止が行ないがたい現状にある。

生物付着の防止を塗料だけでなく、船板を超音波振動させることで行なう方法が看過され、実験的には効果があることが確認されているが、データが定量性を欠き実船に適用する場合の設計基準が不明確であつた。そこで從来の実験データについて種々討論の結果、次のような考えに到達した。

- (i) 船板を超音波周波数で曲げ振動させることで防汚できたとの情報もあるが、この時の振動振幅、振動加速度、板の曲げ振動の姿態など設計に必要なデータが一切不明である。
- (ii) 防汚効果が板そのものの振動によるものか、または板の曲げ振動によって海中に放射された超音波によるものか不明である。
- (iii) 曲げ振動で下部分の防汚ができたにしても、広い面積をもつ船体に対しては巨大なパワーを必要とするので、経済的に実行不可能になるであろう。

以上の討論の結果にもとづき、われわれグループは振動による付着物防止の機構は不明であるが、1つの仮定として船板をある程度以上の加速度で振動させれば海中生物が付着できなくなるのではないか、仮にそうだとす

ると曲げ振動のような海中に音波を放射するようなモードでは巨大なパワーを必要とし、かつ能率がわるいはずだから、むしろモードとしては板の面に沿うた振動、たとえば板の縦波または板の面に沿うた剪断波を使えば減衰も少なく、小さなパワーで広い面積の防汚が可能であろうとの結論に達した。

この考え方の実験的証拠をつかむためには、実際に海中で実験を行なうことが必要であるとの考え方から、諸磯湾で音響放射をともなわないよう工夫した継振動体を使って防汚の可能性、必要な振動振幅、加速度などの測定を行なつた。

その結果、防汚が可能であり、また必要な振動加速度は数100μ程度以上であることがわかつた。

(1) 実験の試料

実験に使用した試料を図3.7に示した。

超音波周波数は2.8kHzを使用して実験した。

振動体の材料は機械構造用鋼S45C、振動体の寸法は図3.7に示した値で、長さが2.8kHzで縦波の1波長（縦波の音速 $c = 5.15 \times 10^5 \text{ cm/sec}$ 、周波数2.8kHzとすると1波長 $= \lambda = c/f = 1.84 \text{ mm}$ ）で、直徑が3.0mmの充実棒である。

試料は4本用意し、そのうち1本は棒の端面の振動変位振幅（片振幅）が1.3μ、1本が0.7μ、1本が0.3μで、のこりの1本は無振動とし、生物付着状況の標準用とした。

なお、各試料とも振動面からの海中への音響放射を防止するため、図3.7に示すように音響放射を伴なう振動面に独立気泡のスポンジゴムを貼付けて放射を極力防止した。

これらの試料を海中に設置して、その近傍の音圧を測定した結果では、最大音圧は0.3mbarできわめて微弱なものであつた。

また、各試料の表面にはW/Fを下塗りし、その上にA/Cを重ね塗りして防錆した。なお、この実験は振動だけによる付着防止の効果を見る目的としたので、A/Fは一切使用しなかつた。

各試料は振動の節の位置に棒の全周にわたつて4個のフックを取り付け、フックにザイルをかけて、海面下約1mの所に並列に吊下げた。なお、各試料は真珠養殖用のイカダから吊下げたので潮の干満によつて海中の試料の水深は一定に保たれた。

各試料の振動振幅は図3.7に示す振動振幅に比例した出力電圧

を示すピックアップ振動子の出力電圧を真空管電圧計で測定し、その値が所定の値を保持するように実験中毎日監視してずれたら確実に補正するようにした。

振動体の振動振幅の校正是駆動用振動子と振動検出用ピックアップ振動子との相互作用を実験的に測定し、その結果を用いて算出した。図3.8に校正の結果を示した。

駆動用発振器は各試料ごとに別々の発振器を使用し、合計3台使用した。

(2) 実験場所および期間

海中付着物が多く、外洋の影響が少ない場所ということで、諸磯湾を選定し、その三崎觀光株式会社真珠養殖部のイカダに試料を設置した。

なお、発振器、測定器類は陸上の建物内に収容し、試料との間を長距離の電線で結合した。

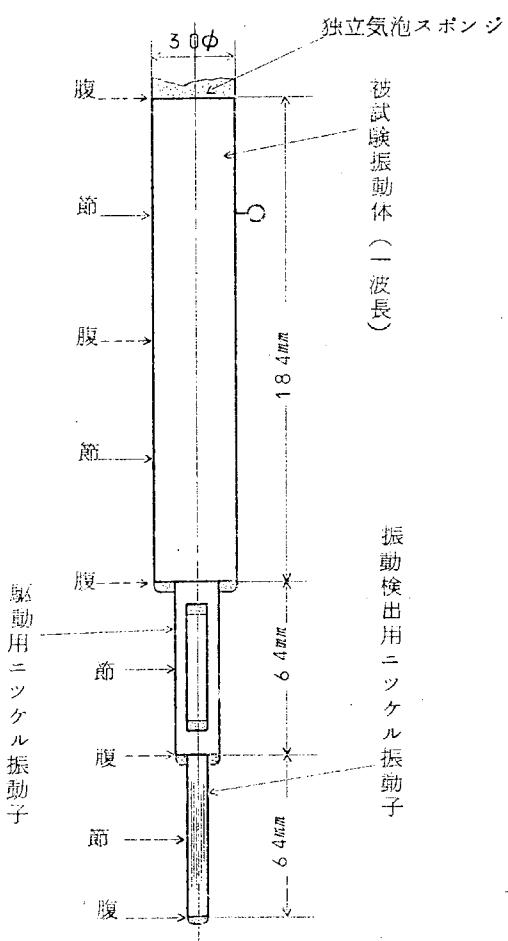


図3.7 試験に用いた振動体

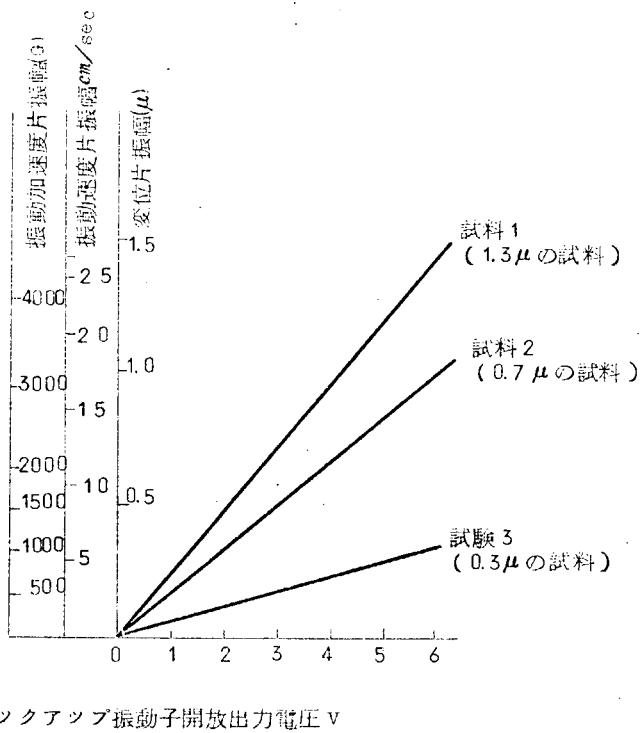


図3.8 試料端面の振動振幅とピックアップ振動子出力電圧との校正曲線

実験期間は、水温が高く生物の繁殖、付着の最盛期である昭和42年7月4日～8月10日とした。

フジツボなどは幼虫が付着後約1週間で3mm程度にまで成長し、肉眼で付着の有無を弁別することができるから、実験期間を二期に分割し、第一期を7月4日から7月22日、第二期を7月22日から8月10日までとした。

なお、図3.9に実験場所の略図を示した。

(3) 実験結果

7月22日現在（第一期実験の終了日）で、端面振動振幅1.3μ、0.7μの2本の試料には全く付着物が認められなかつた。

振幅0.3μの試料は振動の節の附近にフジツボが数個付着していた。

また、無振動の比較対照用の試料にはフジツボなどが一様に分布して付着しており、さらに各試料とも振動子の巻線（ビニール被覆電線）とか、試料吊下げ用ザイルにはかなりの生物の付着が認められた。

以上の実験から

- (a) 実験場所への生物の到来が確認できた。
- (b) 端面振動振幅が0.7μ程度あれば、防汚はできるとの見通しが得られた。

この結果にもとづき、7月22日から8月10日までの実験方針として、

- (a) 防汚可能な最低振動振幅を見出したい。

このため、端面振幅1.3μの試料は一応見込みで0.3μに振動レベルを下げる。

ただし、7月22日までの実験第一期に使用した0.3μの試料は発振器の都合もあるので実験を中止する。

- (b) 端面振幅0.7μの試料は引き続いてそのまま実験を継続することにした。

この第二期実験の結果、次のようなことが明らかとなつた。

- (a) 端面振幅0.7μの試料は全然生物の付着が認められなかつた。

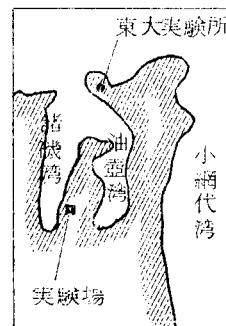


図3.9 実験場の略図

- (b) 端面振動変位 1.3μ の試料（第一期実験で 1.3μ であつたもの）は、振動の節附付にアシジボの付着があつた。
(c) 比較対照用の無振動試料は第一期における付着物の成長のほか、さらに多数の付着物がついた。

(4) む す び

海中生物の繁殖の最盛期である盛夏に、しかも付着には好都合な箇内で、その上試料には A / F を塗らずに、1ヶ月強の期間海中に静置するという、現実の実船では考えられぬ苛酷な条件下で実験を行なつたのであるが、

- (a) 音響放射をほとんど伴なはない、而に沿うた振動をする継波モードで生物付着を防止できるという、最初に意図した事柄が実際に有効であるということがはつきりした。

のことから、生物付着の機構、また振動による防汚について使用するモードの選択の基本的考え方が一応明確になつた。

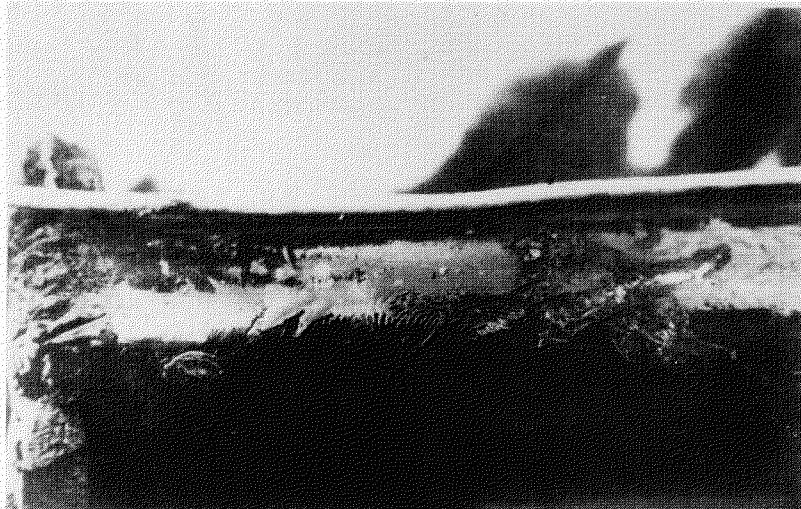
- (b) この実験結果によると、端面振動変位 0.7μ (振動速度で 1.2 cm/sec 振動加速度で約 2.000 g) 程度の振動を与えると、試料の全体にわたつて防汚できる。

このような試料での防汚可能な振動振幅の最低値は十分な実験が行なれなかつたので不明であるが、実験の状況、結果から推論すると 0.5μ 程度と考えられる。

実船では盛夏の付着物の多い時期に、このような長期間停船することは実際にはすくないこと、また毒性塗料も塗ることから、実際に防汚可能な振幅はもつと低い値になることも想像できる。

なお、試料に付着した生物（主としてアシジボ）の試料の長手方向の数の分布と振動振幅との関係を調べたが、両者の間には明確な相関が見出しえなかつた。

試料への生物付着の状況を写真 3.4 に示した。



a) 試料端面振動変位振幅 0.7μ (約 2.000 g) における結果
(生物附着なし)

写真 3.4

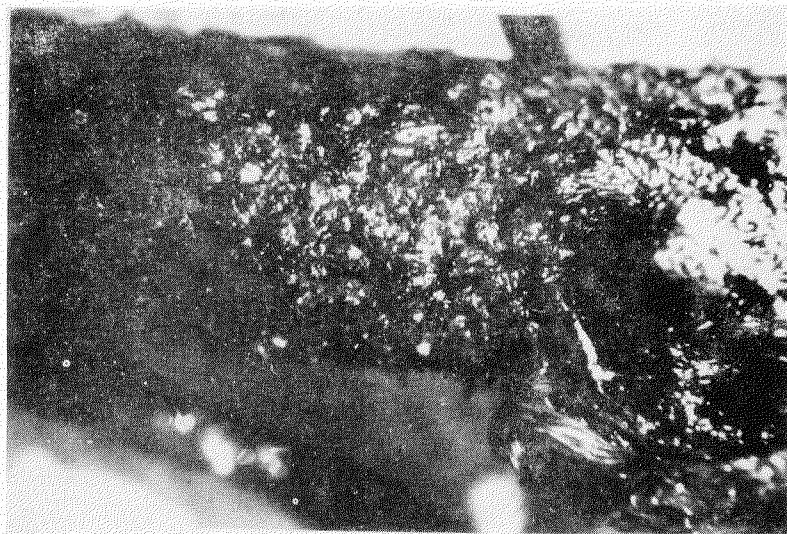


写真 3.4
b) 比較用無振動試料における結果
(全面に生物の附着あり)

写真 3.4

3.1.3 防汚効果を發揮するのに必要な超音波強度

実験は7月～8月および9月～10月にかけて2種の試験片により行なつた。

(1) 第一次実験

(a) 試験片

図3.1.0のような梯形鋼板に油性A／Cを2回塗装したものを試験片とした。試験片の超音波強度を実験水槽中で測定した結果から振動の強弱を2段階とし、A／Fでマーキングして区分け（端から80cmのところ）した。振動は図3.1.1の要領で測定し、その結果を図3.1.2に示す。

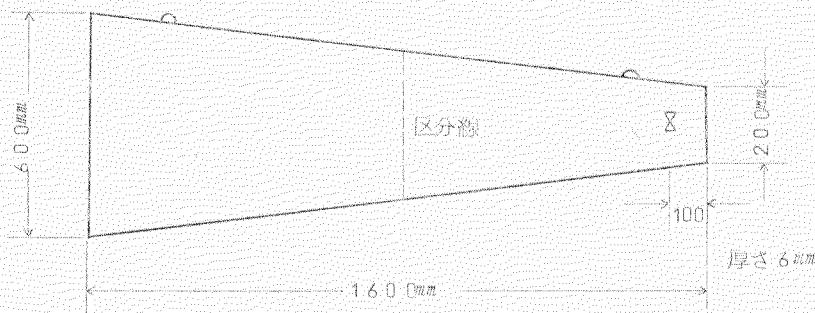


図3.1.0 梯形試験板

(b) 超音付与条件

周 波 数 17 K.C

出 力 10.0 W

振 動 子 ニッケル振動子直角形(22 K.C 30.0 W)

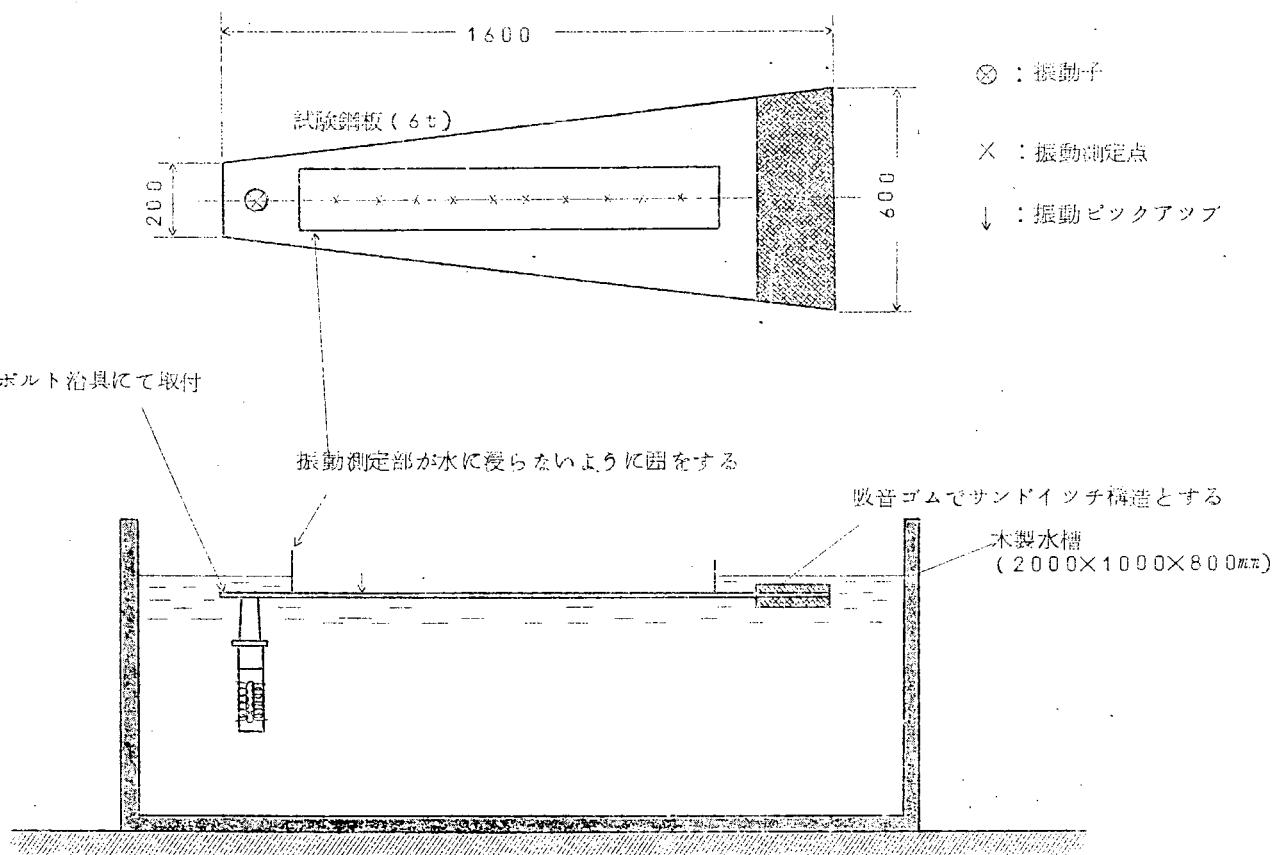


図 3.1.1 試験板の振動測定要領

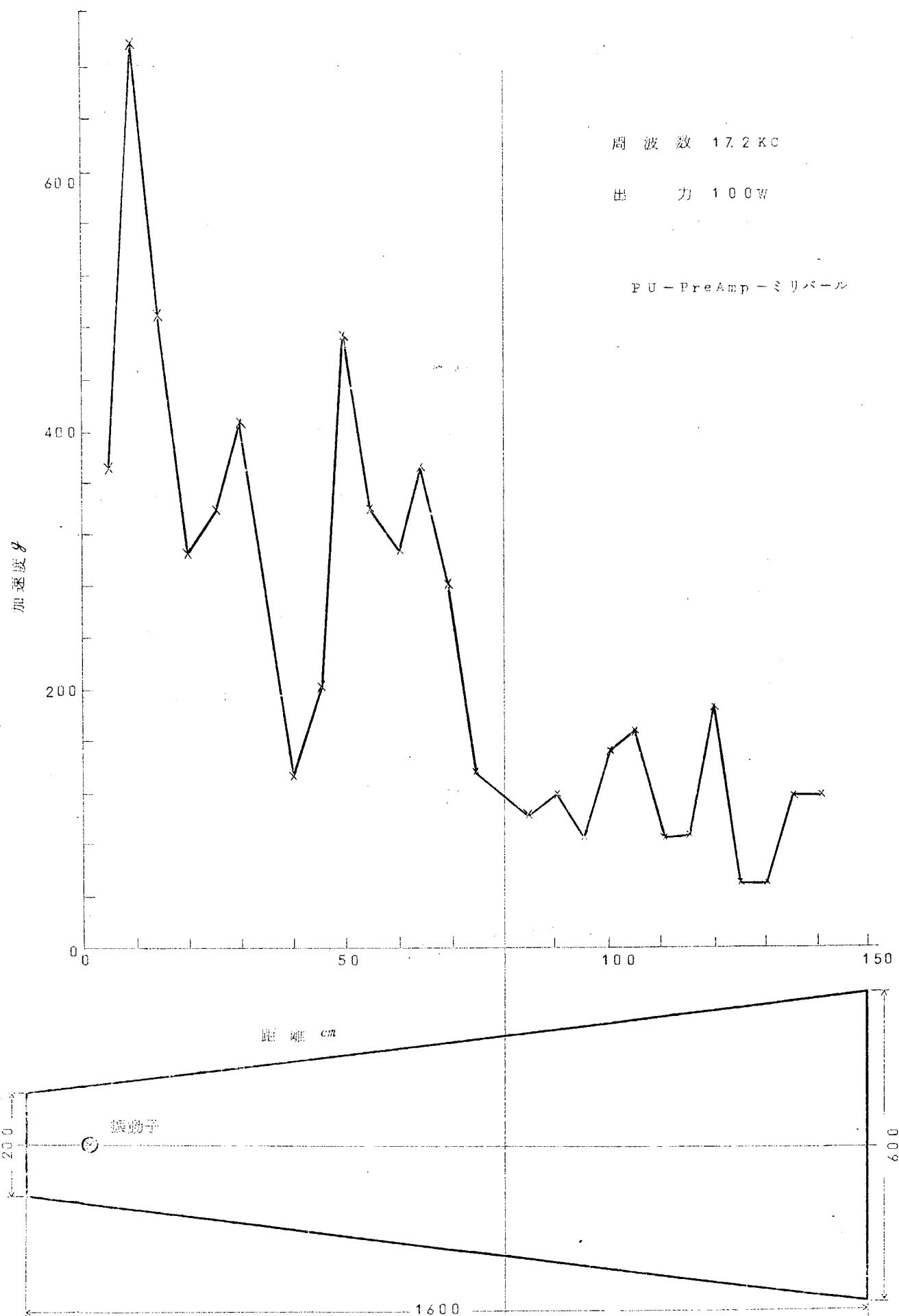


図 3.1.2 試験板上の振動分布

(c) 臨海試験方法

試験海域での生物付着状況を調査するため、上記の試験板のほかに超音波を付与しないブランク板(30.0 mm×30.0 mm×3 mm A/C 2回塗装)も同様に浸漬した。

(i) 浸漬場所：三菱重工業㈱神戸造船所 7岸臨海試験場

(ii) 浸漬深度：試験板の中央が水面下約1.3 mになるように浸漬

(iii) 浸漬期間：7月26日～8月16日(3週間)

(iv) 調査：8月2日、7日、16日の3回にわたり生物付着状況などの外観調査を行い、8月16日にさらに片面を8区分して付着生物の重量を測定した。また浸漬時の音圧も測定した。

(d) 臨海試験結果

(i) 第1回調査結果(42.8.2)

(1) 振動子側(南面)

長さ5mm以下のセルプラが散在し、径1mm以下のフジツボが1部に若干付着していた。また振動子から20～50mmのところに1.5cm以上のA/Cハクリが4カ所みられた。

(2) 反対側(北面)

フジツボ、セルプラとも多数付着(南面部よりはるかに多い)しておりムラ状付着を認めた。また、振動子付近に径5mm以下のA/Cハクリ1カ所がみられた。

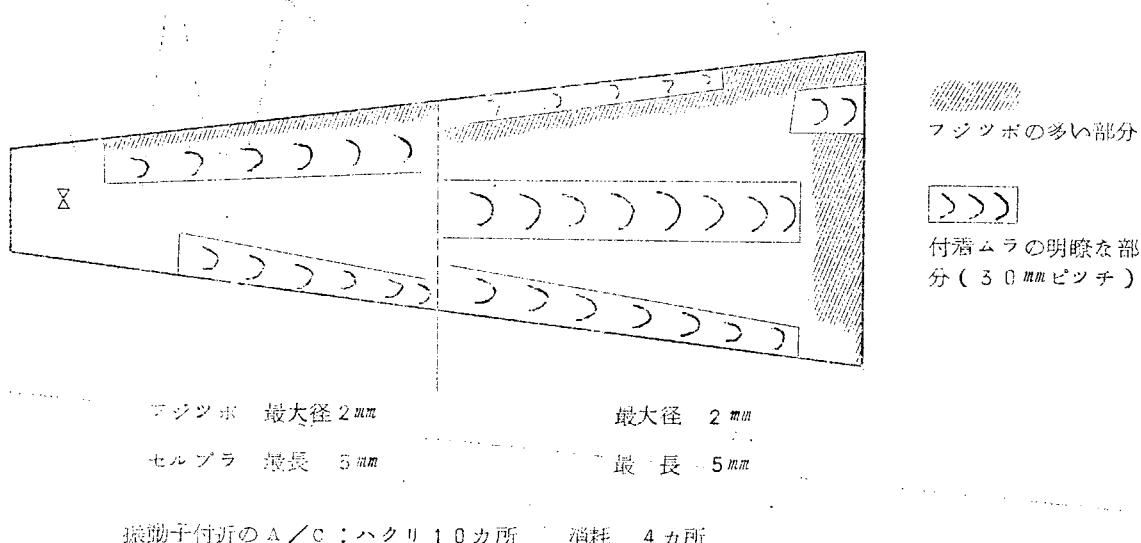
(3) ブランク板

径1mm以下のフジツボ多く付着しており、長さ5mmのセルプラが若干ついていた。

(ii) 第2回調査結果(42.8.7)

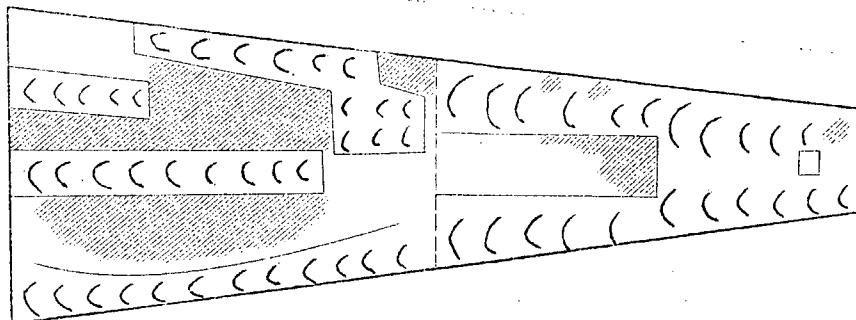
(1) 振動子側

生物は裏面に比べてはるかに少ない。前回付着の認められなかつた部分にもフジツボが付着していた。



(e) 反対側

左半部にフジツボが多くみられた。(底 1mm以上のもの $100^2 / \text{in}^2$)



フジツボ 最大径 3mm (大きさは左右差なし)
セルプラ 最長 5mm

振動子付近の A / C ハクリ 6カ所 消耗 2カ所

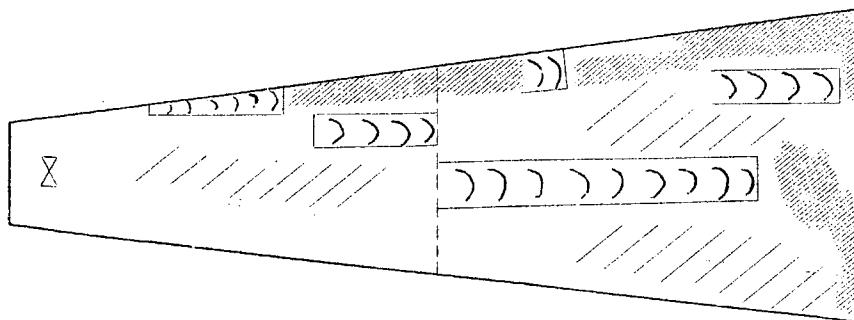
(f) ブランク板

南面部	フジツボ	最大径 3mm	9.6%	} 9.8%
	セルプラ	最長 10mm	2%	
北面部	フジツボ	最大径 3mm	8.5%	} 9.0%
	セルプラ	最長 13mm	5%	
	フサコケ	// 4mm	若干	

(iii) 最終調査結果 (4.2.8.16)

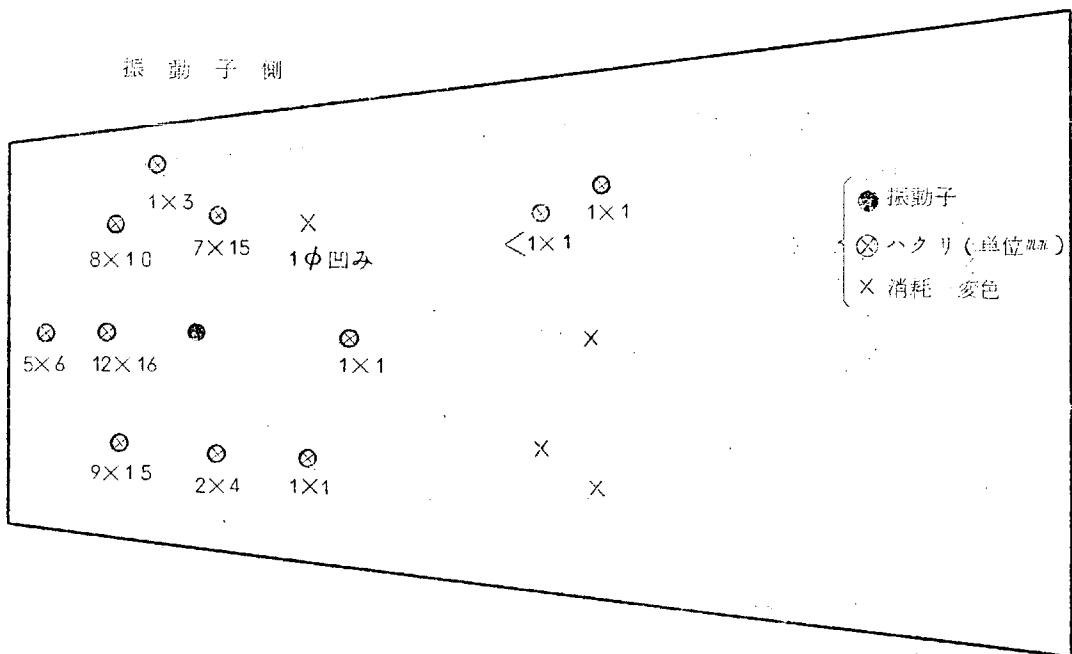
(f) 振動子側

裏面と比べて生物付着量少なく、A / C のハクリは多かつた。(図 3.1.3)



フジツボ 最大径 5mm 平均径 4mm 最大径 7mm
セルプラ 最長 10mm 最長 10mm

振動子側



反対側

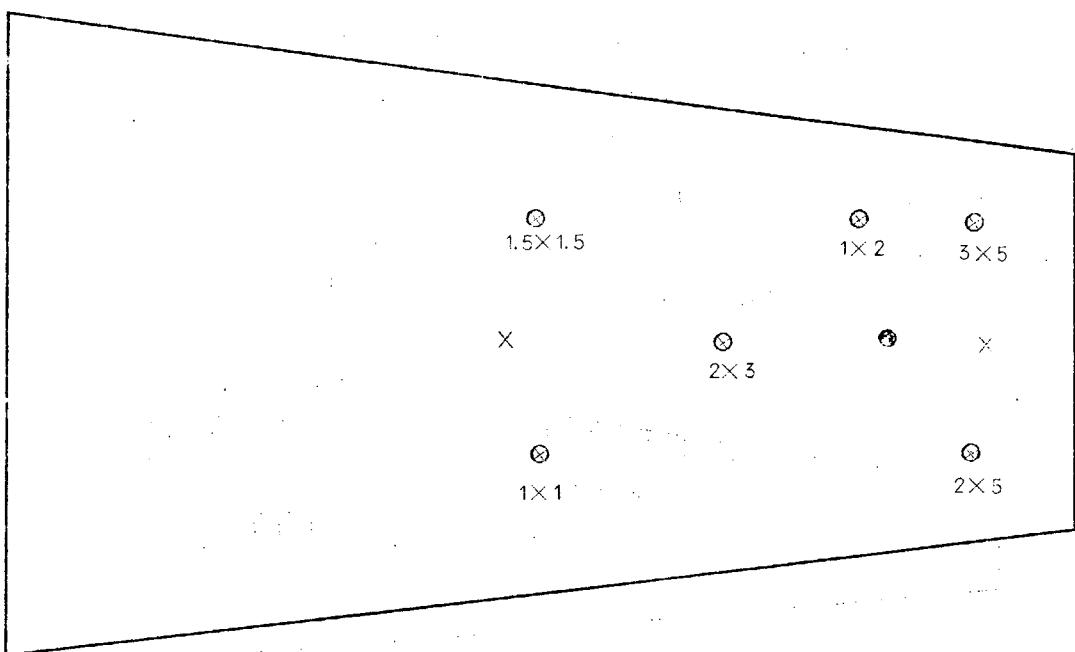
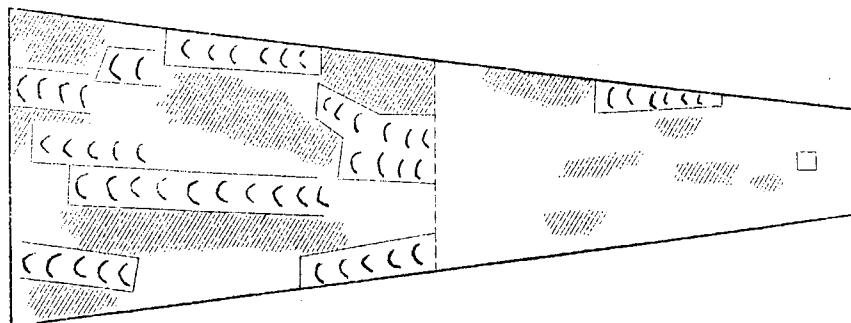


図3.13 A／C塗膜ハクリ箇所および寸法(4.2.8.13)

(ロ) 反対側



フジツボ 最大径 8mm 平均径 5mm 最大径 7mm

セルプラ 最長 10mm 最長 10mm

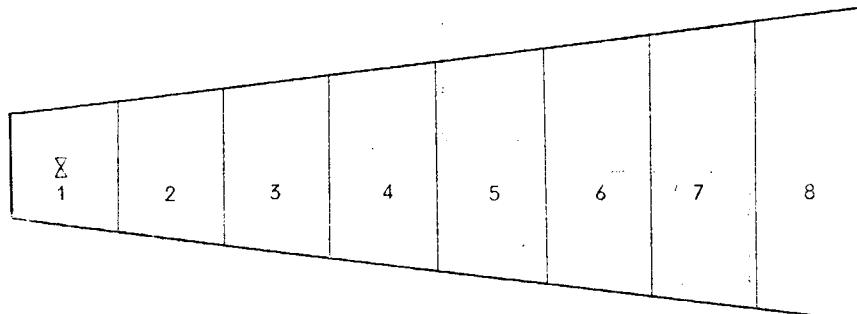
(ハ) ブランク板

	フジツボ	セルプラ	フサコケ	ホヤ	計
南面部	68%	4%	6%	2%	100%
北面部	74	14	4	8	100
最大	径 8mm	径 1mm × 長さ 18mm	長さ 8mm	径 8mm	

(二) 付着生物量

生物付着量を図3.14に、付着生物量と加速度、音圧との関係を図3.15に、また生物の付着状況を写真3.5に示す。

振動板は下図のように8区分して重量を測定し、m当たりに換算した。



それぞれ 2.0 cm 間隔

(イ) 音圧測定結果

振動子からの距離の影響を図3.16に、また、試験板からの距離(垂直方向)の影響を図3.17に示す。

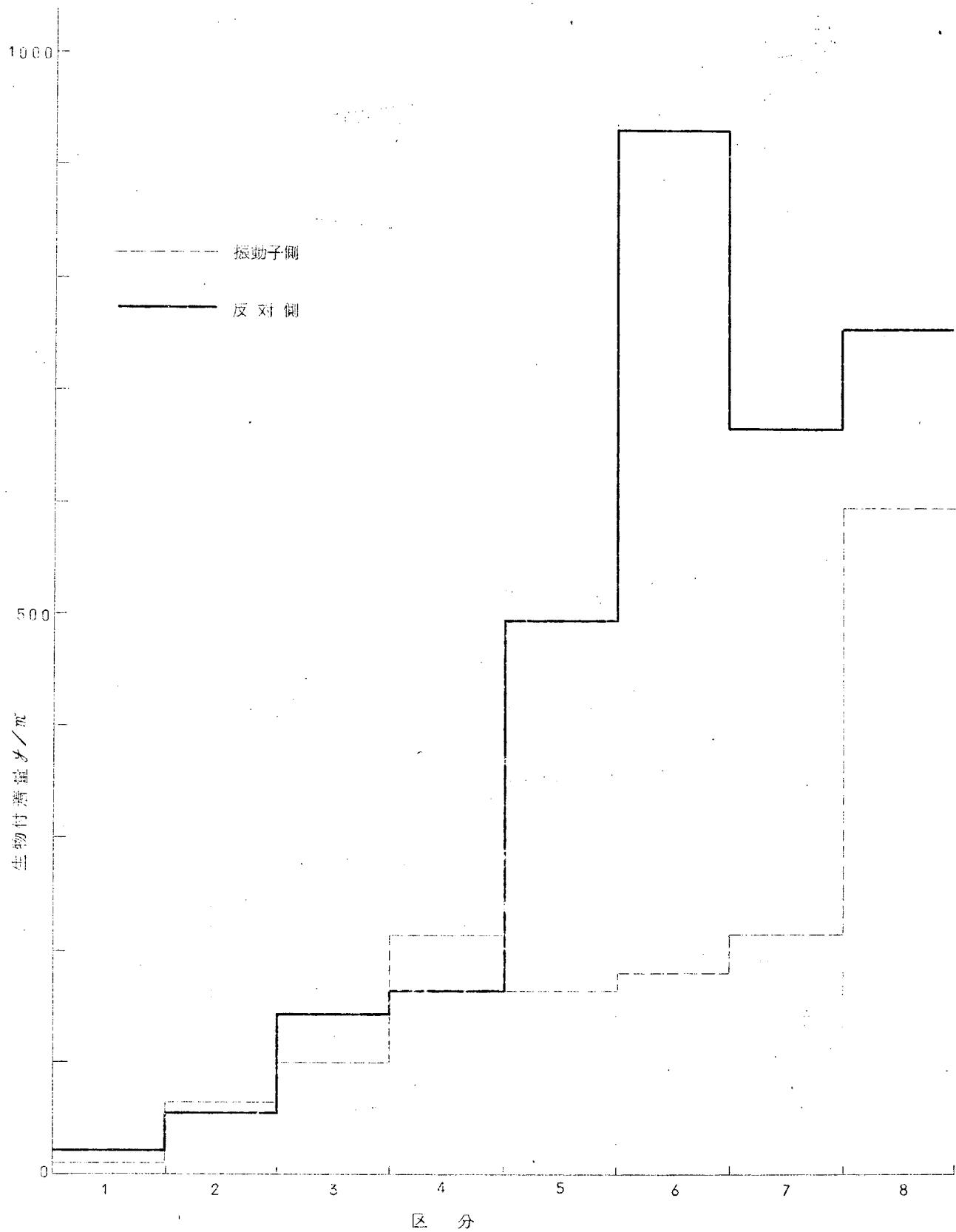


图 3.1.4 生物付着量 (g/m^2)

Control Panel

南面 3310 g/m^2
北面 3820

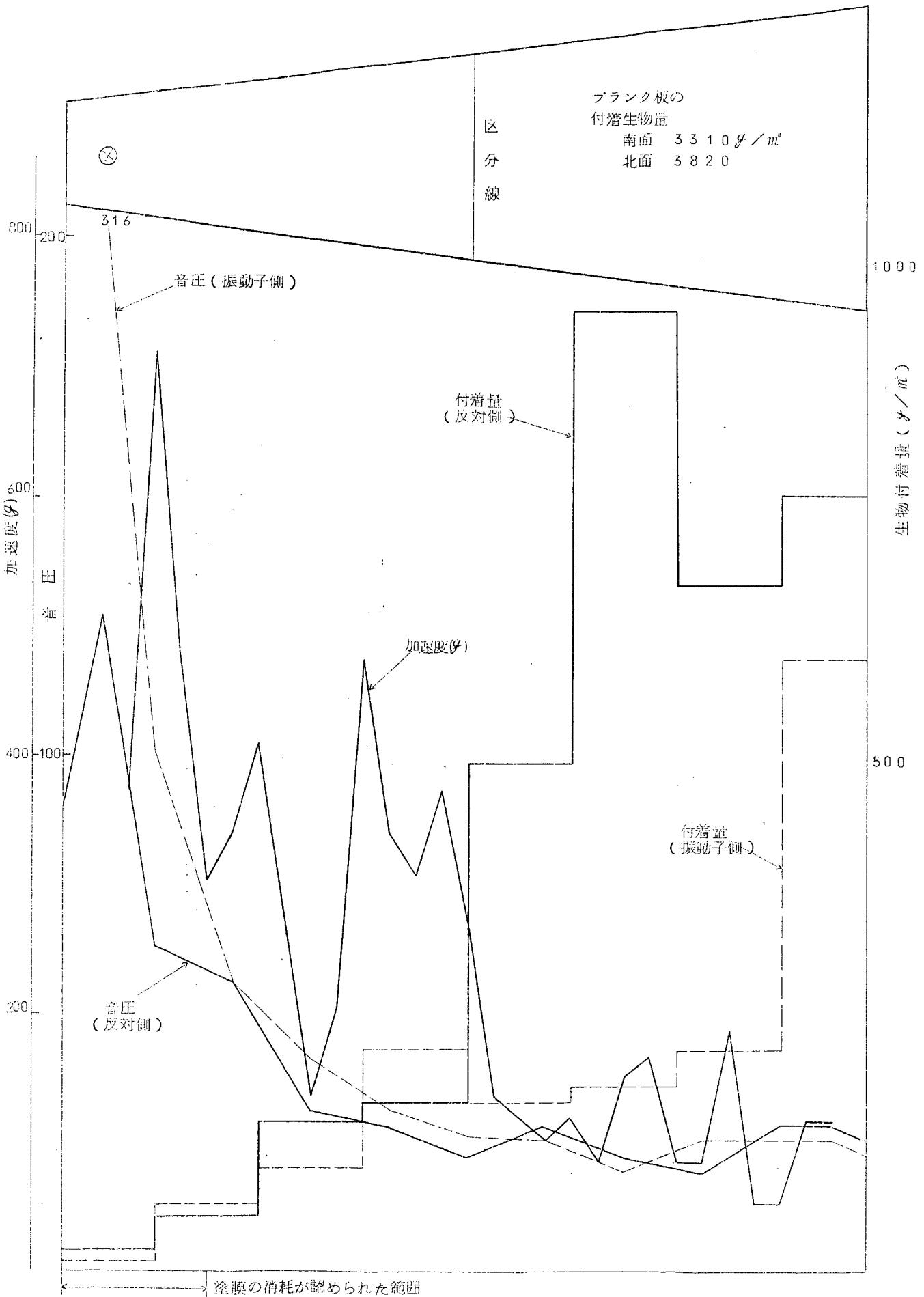


図 3.1.5 付着生物量と加速度、音圧との関係

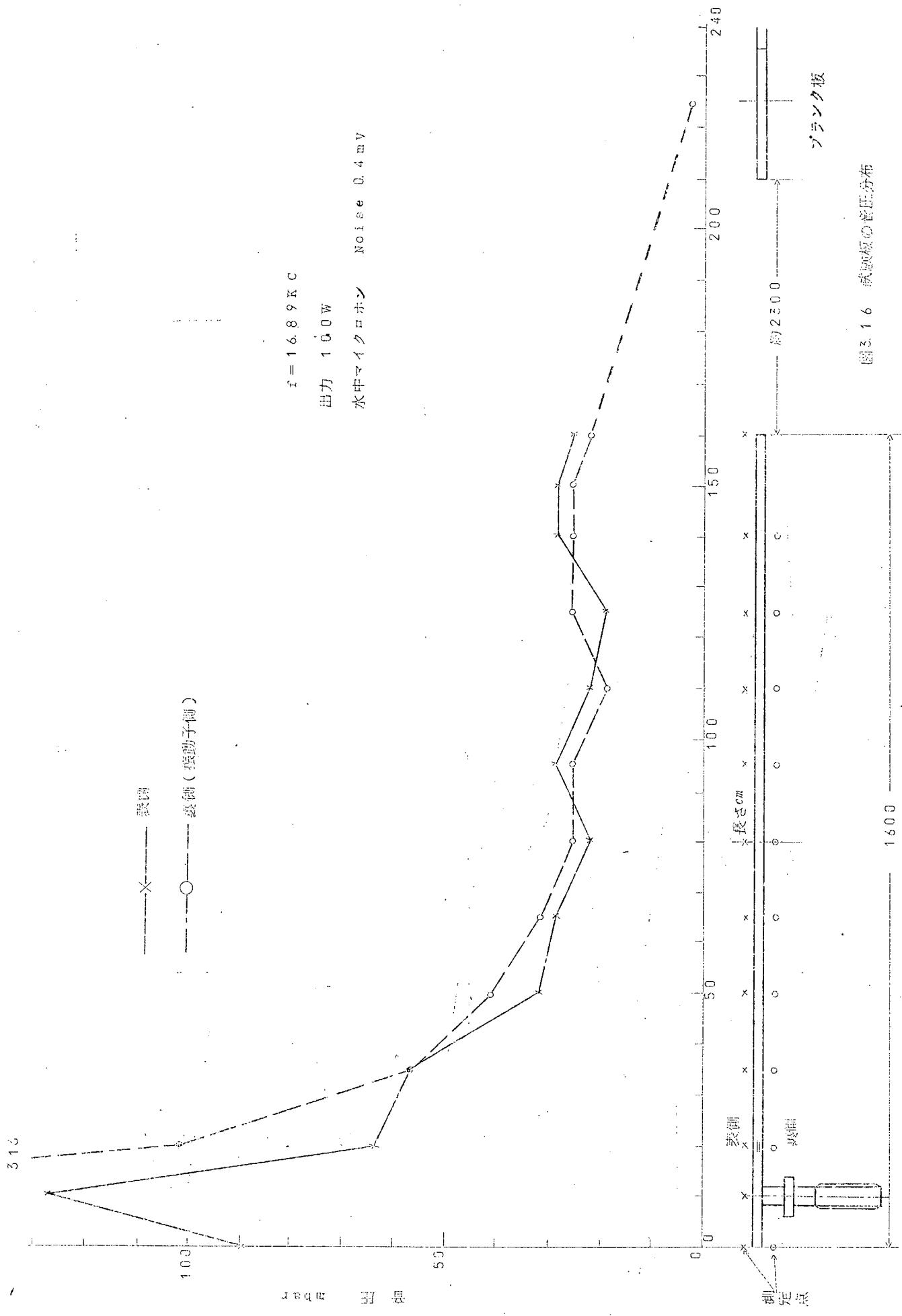


図3.16 試験板の管圧分布

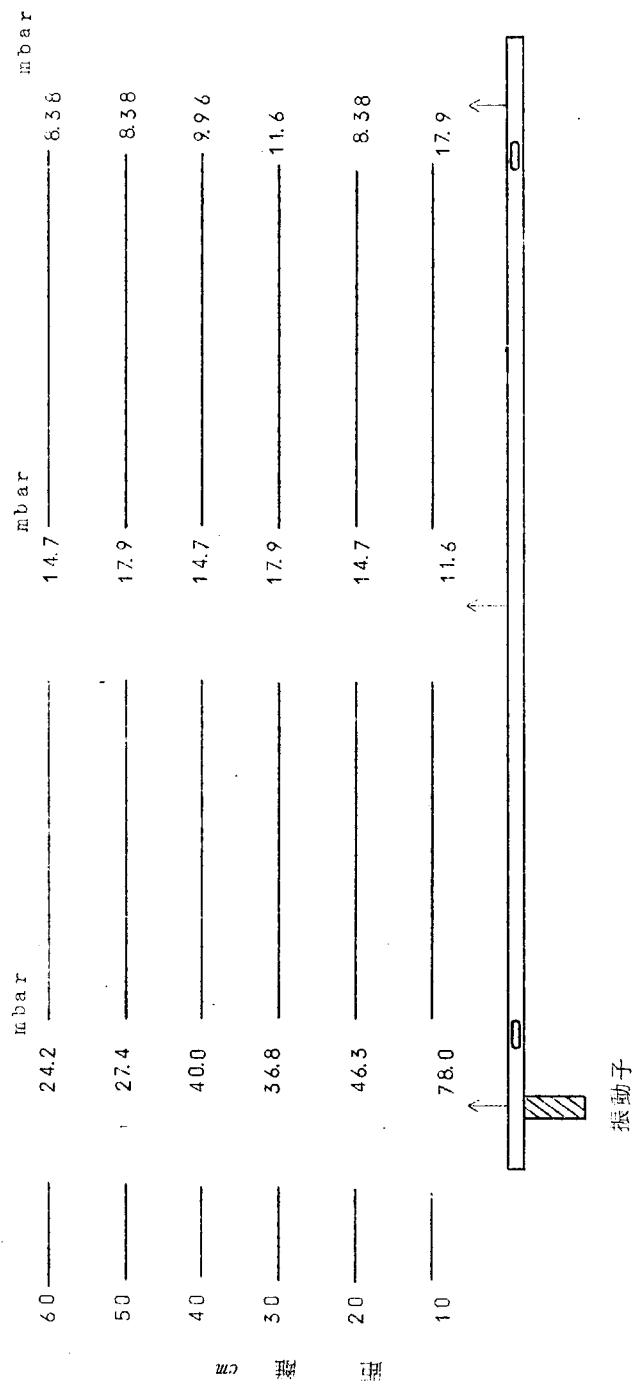


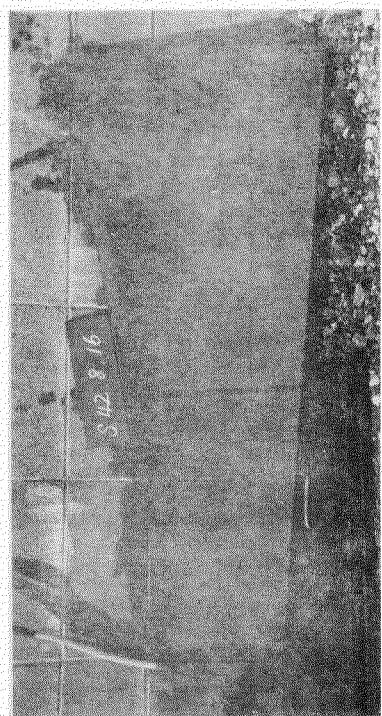
図3.17 音圧測定結果
(水: noise 3.5 mV)

写真3.5 第1次鹽海試験結果（3週間後）

振動板（北面）



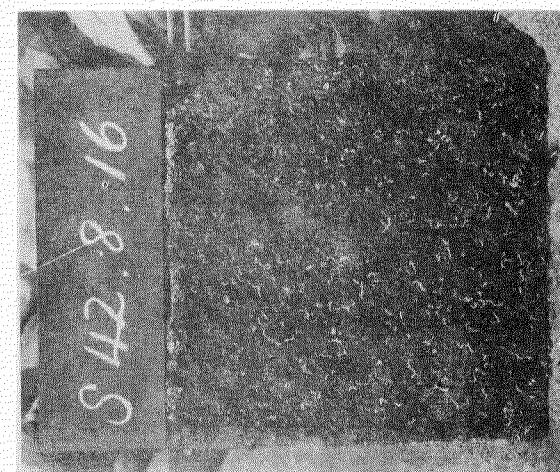
振動板（南面）



ブランク板（北面）



ブランク板（南面）



(2) 第2次実験

(a) 試験板

第1次実験に用いた試験板を図3.18のようく加工し振動付与方向を 90° 変えたもので、臨海試験終了後 ϕ の測定を行なうため試験板面の区分けは行なわなかつた。

形状寸法は図3.18のとおりで油性A/Cを2回塗装したものを使用した。

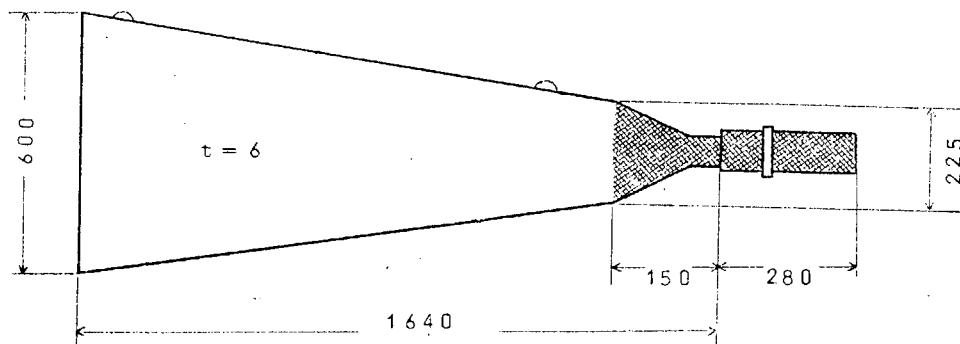


図3.18 試験板

(b) 超音波付与条件

今回の実験では周波数をsweepさせた。(約700~1500c/sの間)

周 波 数 14.60 ~ 15.30 (Kc) (中心周波数・・・15.00 Kc)

出 力 75 ~ 100 (W)

振 動 子 ニッケル振動子(300W)(第1次実験に使用したもの)

(c) 臨海試験方法

(i) 浸漬場所：神船7岸臨海試験場

(ii) 浸漬深度：試験板の中央が海面下約1.3mになるように浸漬

(iii) //期間：9月25日～10月24日(1ヶ月)

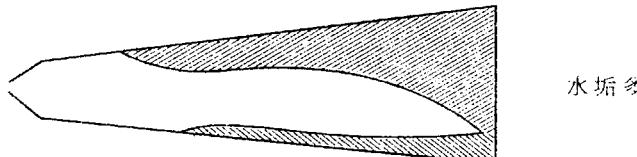
(iv) 調査：10月12日、10月24日の2回にわたつて生物付着状況の外観調査および音圧測定を行なつた。

(d) 臨海試験結果

(i) 第1回調査結果(4.2.1.0.1.2)

(1) 振動付与板

① 南面



//// フジツボ 最大径 5mm 平均径 4mm

\\\セルプラ 最大長 20mm 平均長 12mm

② 北面 付着生物の大きさは南面部と同様であるが付着数は多い。プランク板の北面部と差はない。

③ 南面 北面とも生物の付着にムラは認められない。

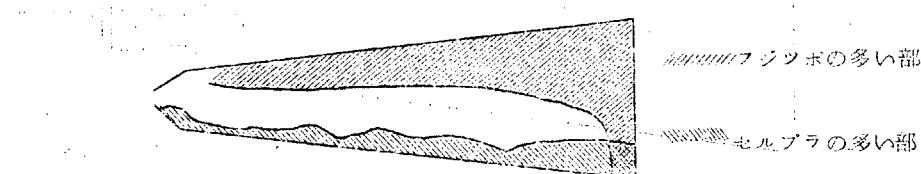
(ロ) ブランク板

南面	フジツボ	最大径	4 mm	平均径	3 mm	2 %
	セルプラ	最大長	10 mm	平均長	8 mm	0 %
北面	フジツボ	最大径	4 mm	平均径	3 mm	2 %
	セルプラ	最大長	16 mm	平均長	10 mm	2 %

(リ) 最終調査結果(4.2.10.2.4)

(イ) 振動付与板

① 南面部



フジツボ 最大径 10 mm 平均径 6 ~ 7 mm

セルプラ 最大長 27 mm 平均長 18 mm

フジツボの密度は 線部でブランク板と同程度

セルプラの密度は 線部でブランク板より大 以外の部で同程度

② 北面部 生物の付着に部分差はない。生物の寸法は南面部と同様

フジツボの密度はブランク板と同程度

セルプラの密度はブランク板より大

(ロ) ブランク板

南面	フジツボ	最大径	10 mm	17 %
	セルプラ	最大長	20 mm	1 %
北面	フジツボ	最大径	10 mm	38 %
	セルプラ	最大長	28 mm	5 %

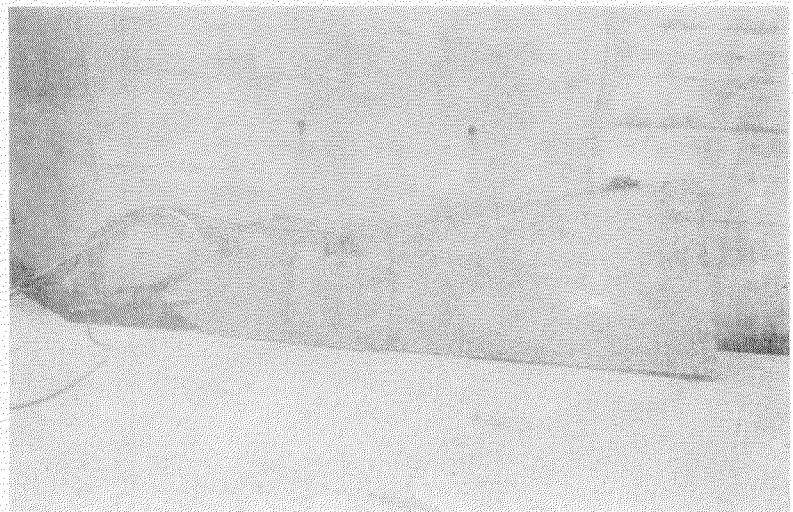
(ハ) 付着生物量

外観的に振動子からの距離と付着生物量の関係が認められなかつたので第1次試験のような区分けはせず、各面ごとに一括秤量した。(写真3.6)

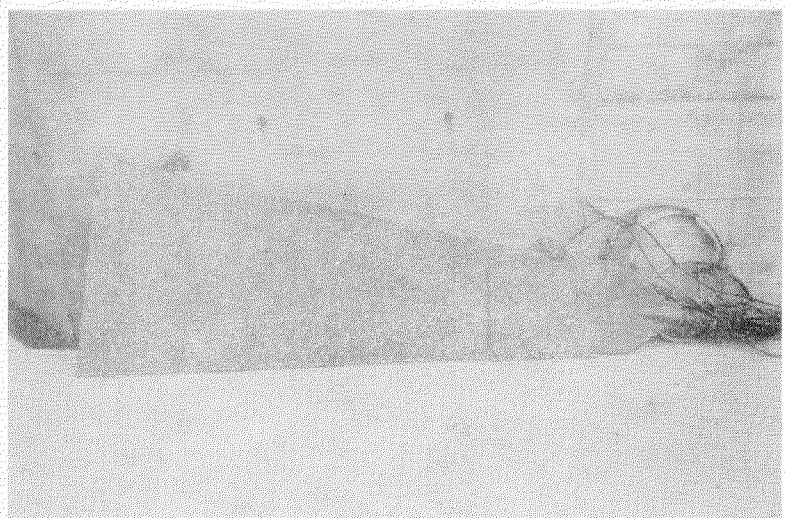
	南面部	北面部
テスト板	8.5 g/m ²	25.5 g/m ²
ブランク板	30.9	48.8

(両) 音圧測定結果(図3.19)

中心周波数 15.00 K.C.においては 9.5 m bar ~ 31.6 m bar の範囲で三角の部分(図3.18の斜線部)が一番高い。

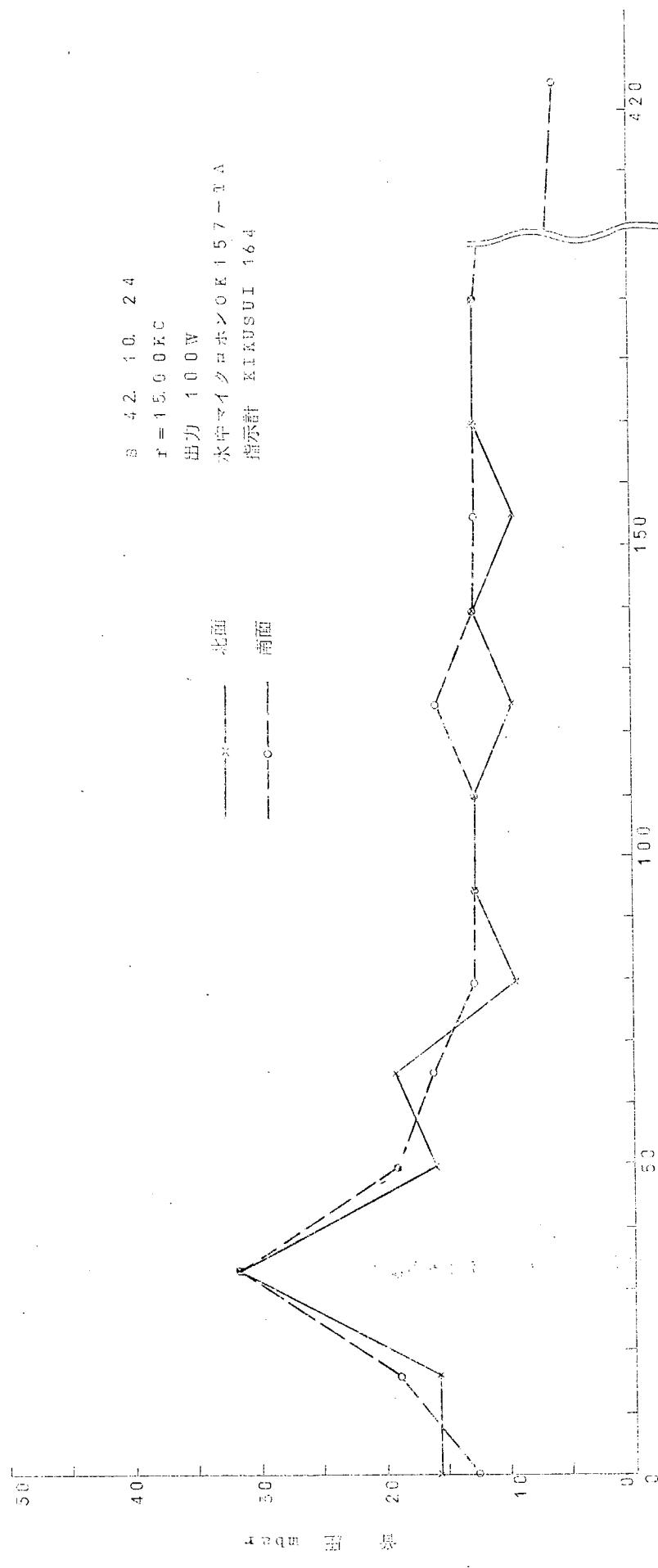


試験板とプランク板（南面）



同上（北面）

写真3.6 第2次臨海試験結果（1カ月後）



-10dB

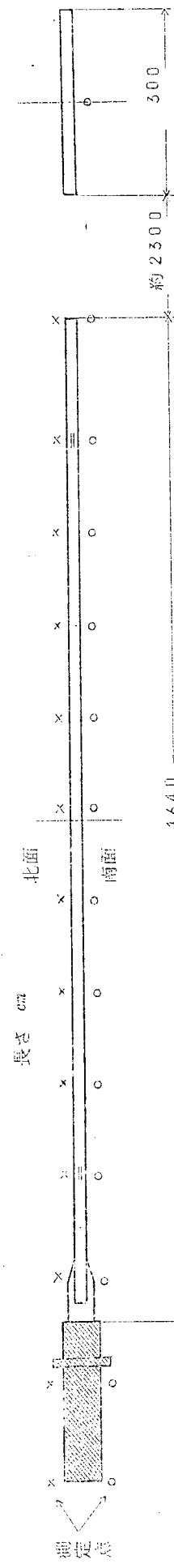


図3.14 マイクロホンの前面分布

(e) 振動分布測定結果(図3.20)

臨海試験終了後加速度(g)を測定したが、振動子からの距離の影響は認められず、その値も第1次試験の700～50 g に比べて50～15 g と著しく低かつた。

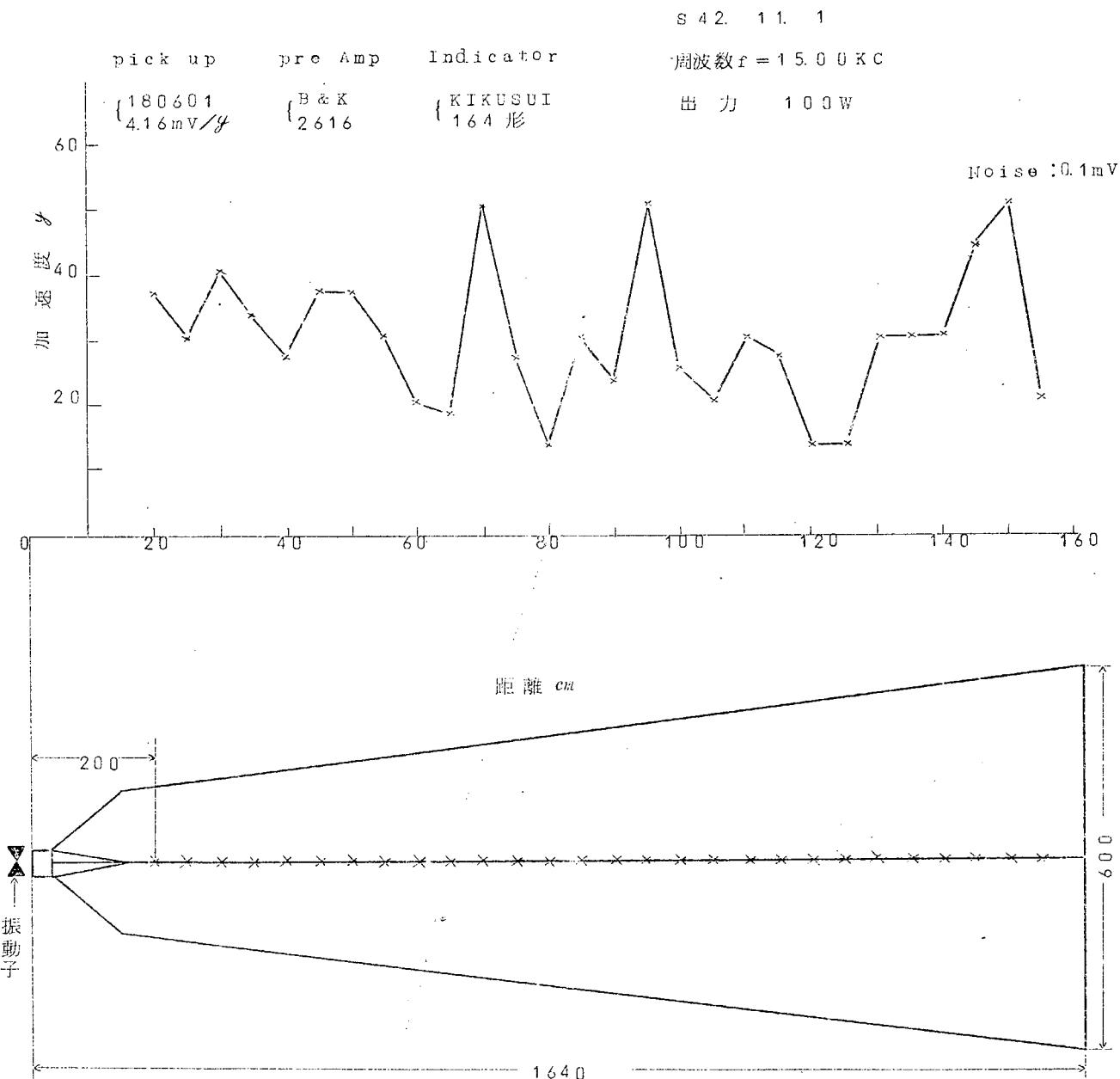


図3.20 試験板上の振動分布

(3) 考察

第2次実験では加速度が5.0%以下であり、生物も全面にわたりてほぼ均一に付着していたので、加速度5.0%～7.0%の第1次実験の結果を対象として考察を加える。(図3.2.1)

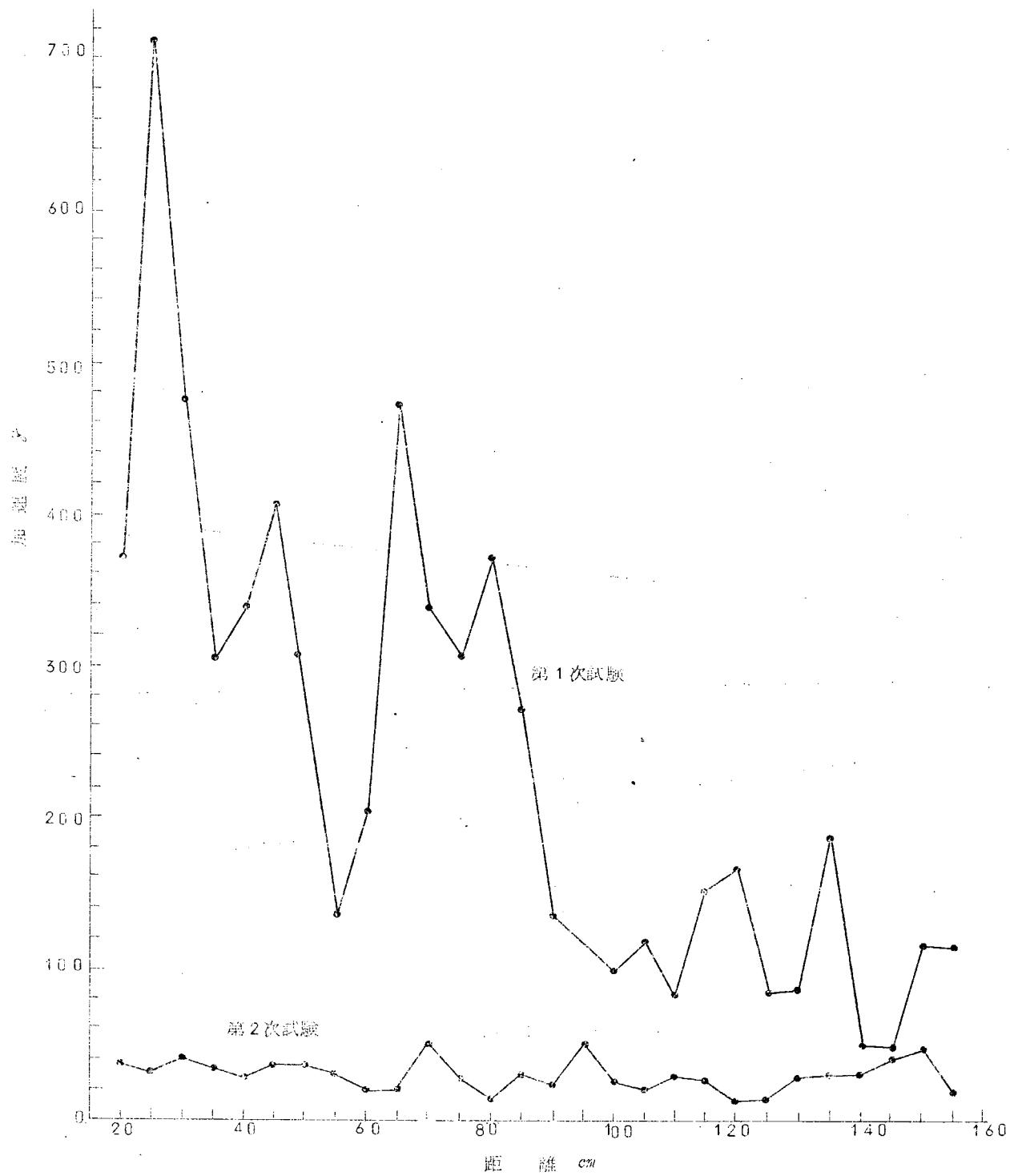


図3.2.1 第1次、第2次試験の加速度比較

(i) 超音波と付着生物の種類およびその成長度

- ① フジツボについては超音波付与の有無にかかわらず同時期に付着したもののその後の成長はほぼ同様であった。したがつて超音波にはフジツボの成長を抑制する効果が認められない。
- ② セルプラは早期に付着はするが、その後の成長は抑制されている。
- ③ その他の生物に関してはブランク板への付着も少ないので傾向が把握できなかつた。

(ii) 超音波の防汚効果

- ① 超音波の防汚効果は音圧よりも振動加速度に依存していると考えられる。
- ② 超音波の強さによつて生物付着量に差がある。すなわち本実験(第1次)では振動加速度によつて試験板を2分したが、丁度その中央を境として生物の付着量が大きく変化している。(図3.15)
この結果から、振動加速度を200g以上にすれば生物付着量を大幅に減少しうることが判る。
- ③ 超音波によつて生物の付着にムラを生ずる。すなわち写真3.5で明瞭に認められるように、本試験では約30mmピッチで生物が付着している。これはnodeの部に生物が付着しうることを示すものであるから、周波数を一定にした場合にはnodeの部も決まるために、その部への生物付着は防止しえないと考えられる。本試験では、浸漬期間が3週間でフジツボが直徑7mm程度にしか成長していないが、期間がさらに長くなると、上記のように超音波にフジツボの成長抑制効果がないことからnodeに付着したフジツボが漸次成長して幼虫の付着しえない100p部にまで拡がり、あるいはすでにnodeに付着したフジツボの上にさらにbridge状に付着したりして、遂には全面が生物に覆われてしまうのではないかと推察される。

船速低下または燃料消費量の増加を防止するためには生物の付着を完全に抑止しなければならないから、生物が付着しうるようなnode部があつてはならないことになる。そのため周波数をsweepしてnode部または100p部を常時移動させることにより、生物の付着可能箇所を消滅させる試みで第2次実験を行なつたが前述のように振動振幅が小さすぎたためその効果は確認できなかつた。

(iii) 超音波の塗膜に及ぼす影響

図3.13に示すように、振動子付近の塗膜は部分的に消耗ハクリする傾向があり、本実験では振動加速度が300g以上になるとこの傾向が認められるようである。しかしこの傾向は塗覆装の種類および周波数のsweepなどによつてかなり緩和しうるものと考えられる。

(4) むすび

防汚効果を発揮するのに必要な超音波強度(限界加速度)を把握するために2期にわたつて臨海試験を実施したが、その結果から得られた結論は次の通りである。

- (i) 超音波の防汚効果は振動加速度が支配的である。
- (ii) 振動加速度を200g以上にすれば防汚効果が大となる。
- (iii) しかしnode部への生物付着は抑止できないから、周波数をsweepするなどの方法を講じて全面防汚を計る必要がある。
- (iv) 超音波にはフジツボの成長抑制効果が認められない。
- (v) 振動加速度が大きくなりすぎると防食塗膜が消耗ハクリする傾向を示す。

5.2 実船試験

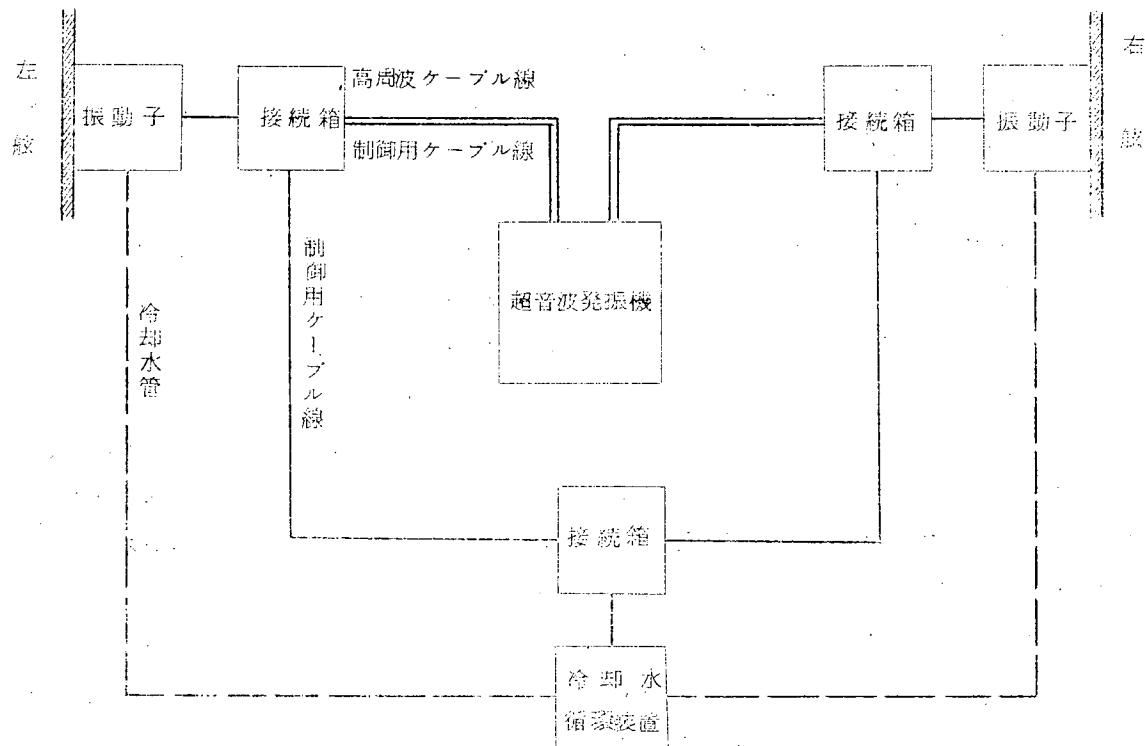
本研究は中型船における超音波の伝播効果および外板汚損に対する防汚効果その他について調査研究するため、運輸省航海訓練所の御協力を得て同所“進徳丸(3000ton)”において実験を行なつたものである。

3.2.1 超音波防汚実験装置

(1) 超音波発振機

型式 U.S.V - 1000V - 3A (初年度研究に用いたものと同じであり詳細)
 高周波出力 1kW
 使用振動子 ニッケル振動子 (詳細後記)

(2) 超音波防汚装置系統図



3.2.2 實施方法

図3.2.2に示すように本船の両舷に各1基、計2基の振動子をとりつけ1台の発振機で同時にかつ連続して駆動せしめた。一方、防汚効果の判定を行うため加振点を中心にして巾1m、長さ10mの部分の外板は試験部としてA/Fを塗装しない。また、比較部として船尾部に(加振点より約2.6~2.8m離れている)同じく巾1m、長さ1.5mのA/Fを塗装しない部分を設けた。

写真3.7に塗りわけ状況を示す。

3.2.3 実験

(1) 第1次実験

(a) 実験条件

実験期間	90日 15時間35分(6月27日~9月26日)
停泊期間	49日 2時間50分
海水温度	最低16.8°C、最高29.0°C
超音波周波数および入力	2.8kc 470W
振動子取付場所	機関室中央附近
加振方式	左舷:斜角(30°)型、右舷:直角(平治具)型
振動加速度	(加振点より1m離れた点にて)左舷:4g、右舷:3~6g
運転条件	実験期間中連續運転

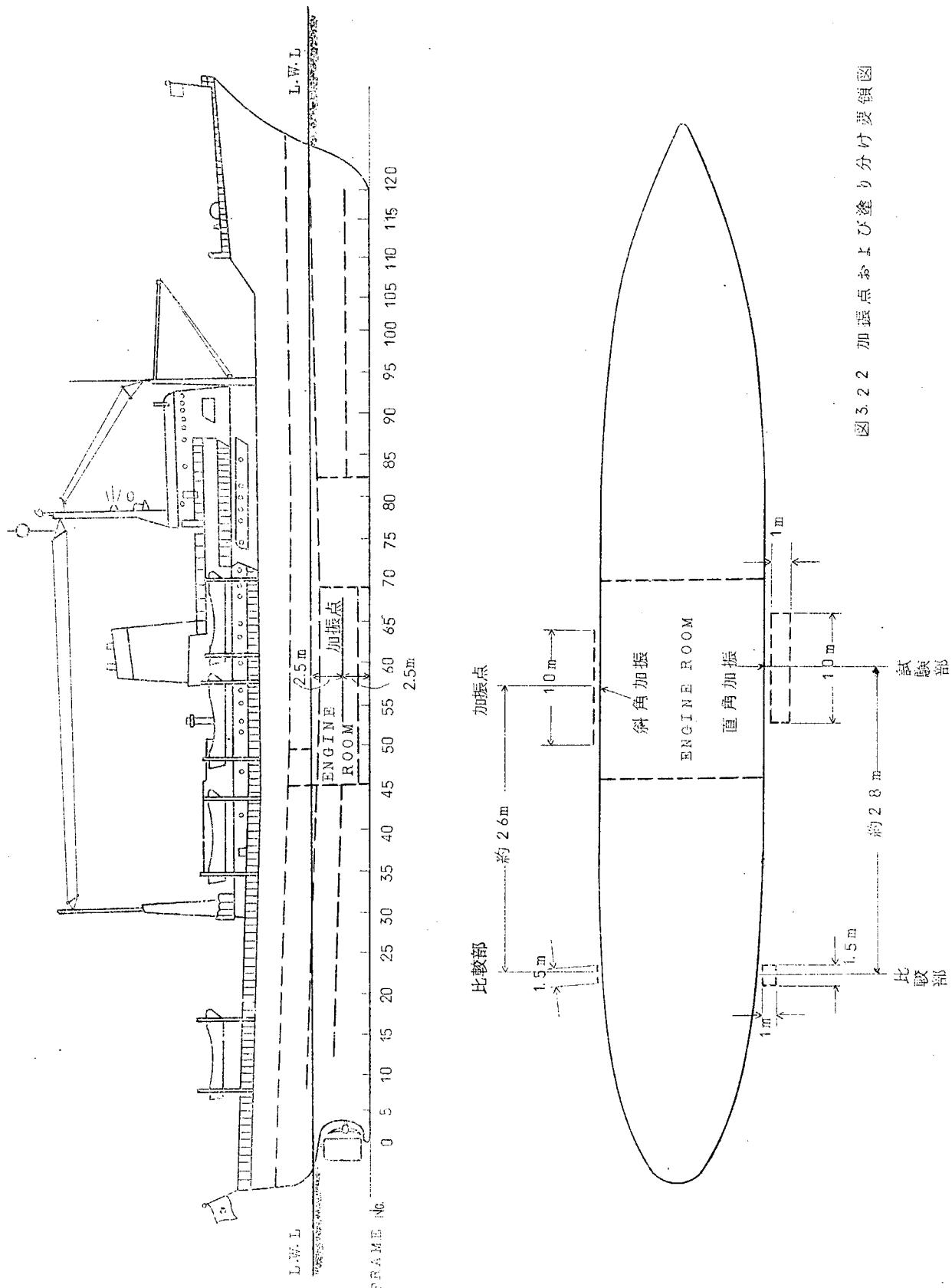
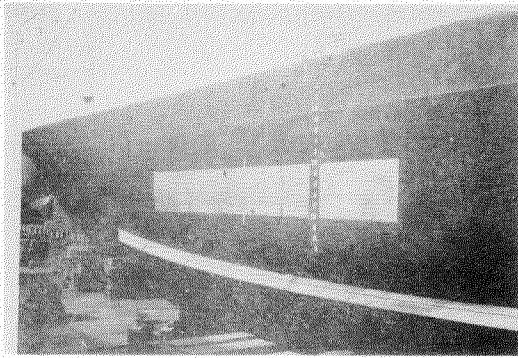


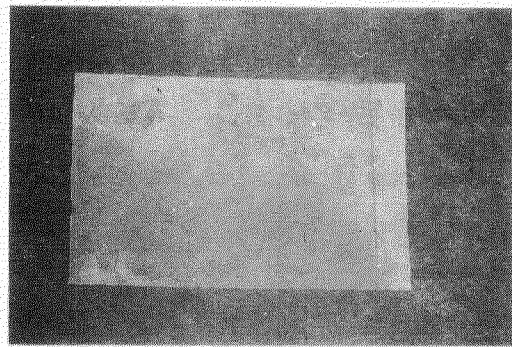
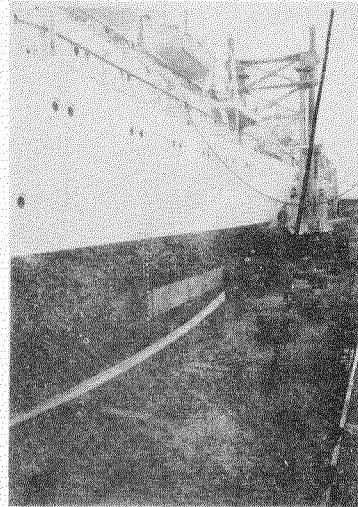
図3.2 加振点および塗り分け要領図



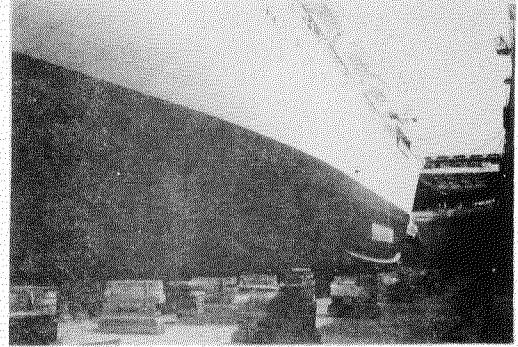
防汚性能判定のためハノアを塗らない試験部

写真上 右舷側

写真右 左舷側



船尾の比較部 (左舷)



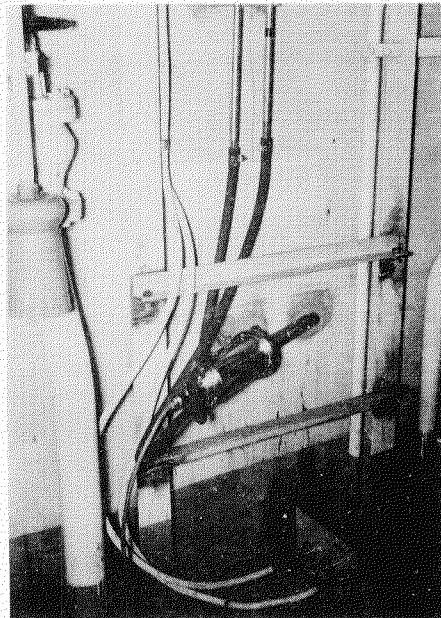
↑ 比較部

↑ 試験部

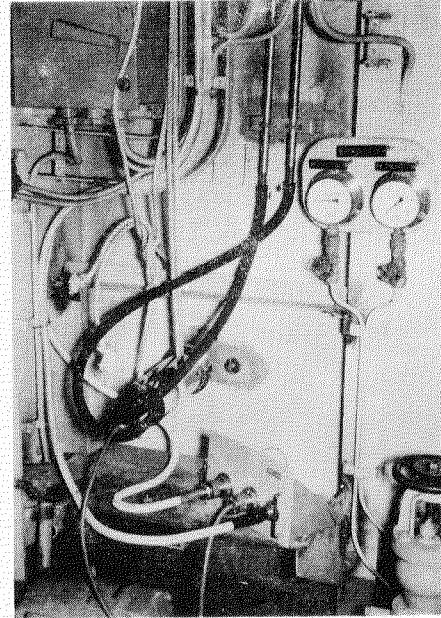
写真3.7 第1次実験ありわけ状況

(b) 振動子取付治具および取付方法

図3.2-3に取付治具を示す。外板への取付方法としては最初、全面銀ロウづけを予定していたが外板の歪が多くなる恐れがあるので全周を電気溶接とした。(写真3.8)



左舷振動子取付状態



右舷振動子取付状態

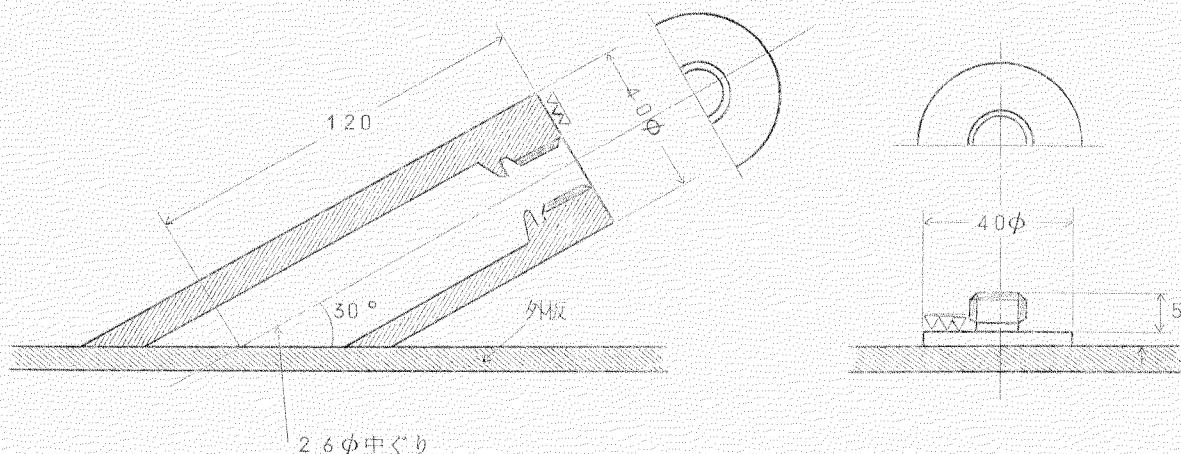
写真3.8 第1次実験振動子取付状態

斜角治具(斜角加振)

左舷に使用したもの

平治具(直角加振)

右舷に使用したもの



両治具とも外板に全周溶接してある

図3.2-3 振動子取付治具

(c) 共振周波数の測定および整合実験

(i) ホーンの長さと共振周波数の関係

振動子の最適駆動条件を求めるため外板に取付けた状態において図3.2.4の要領で調整用治具の長さを変えてその時の共振用周波数を測定した。

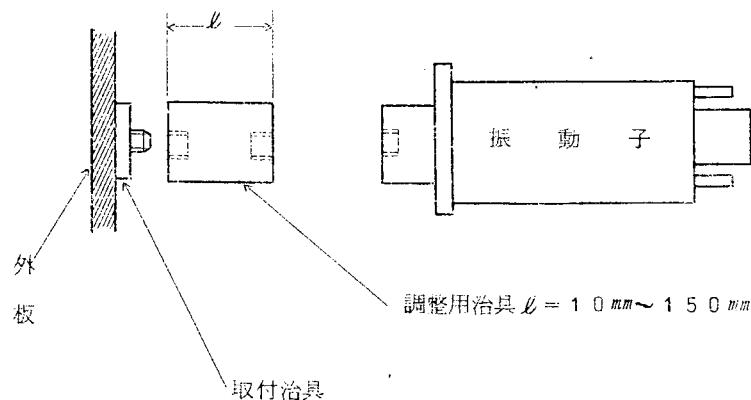


図3.2.4 共振周波数測定装置

この結果、船体が空気中にある時(DRY UP した時)はホーンの長さと共振周波数は一応関係づけられたが、船体が水中に入つた時、明確な関係は得られなかつた。(図3.2.5参照)したがつて最適長さが不明であるため接続箇所を少なくし、伝達損失を防ぐ意味で調整用治具は用いない事とした。

(ii) 総合調整

左舷および右舷の各振動子をそれぞれ単独に駆動して周波数-入力曲線をとつた後、両振動子を直列に接続し同じく周波数-入力曲線をとつてみた。図3.2.6にこの結果を示すが単独の場合と直列に駆動した場合とでは特性曲線が異なることがわかつた。この原因については後日、究明するがとりあえず動作周波数を28KC付近に定めた。なお周波数を28KCに設定した理由は振動子の共振周波数である17KCで駆動した場合は可聴音が発生し居住性に影響を与えるのでやむをえず28KCに設定したものである。

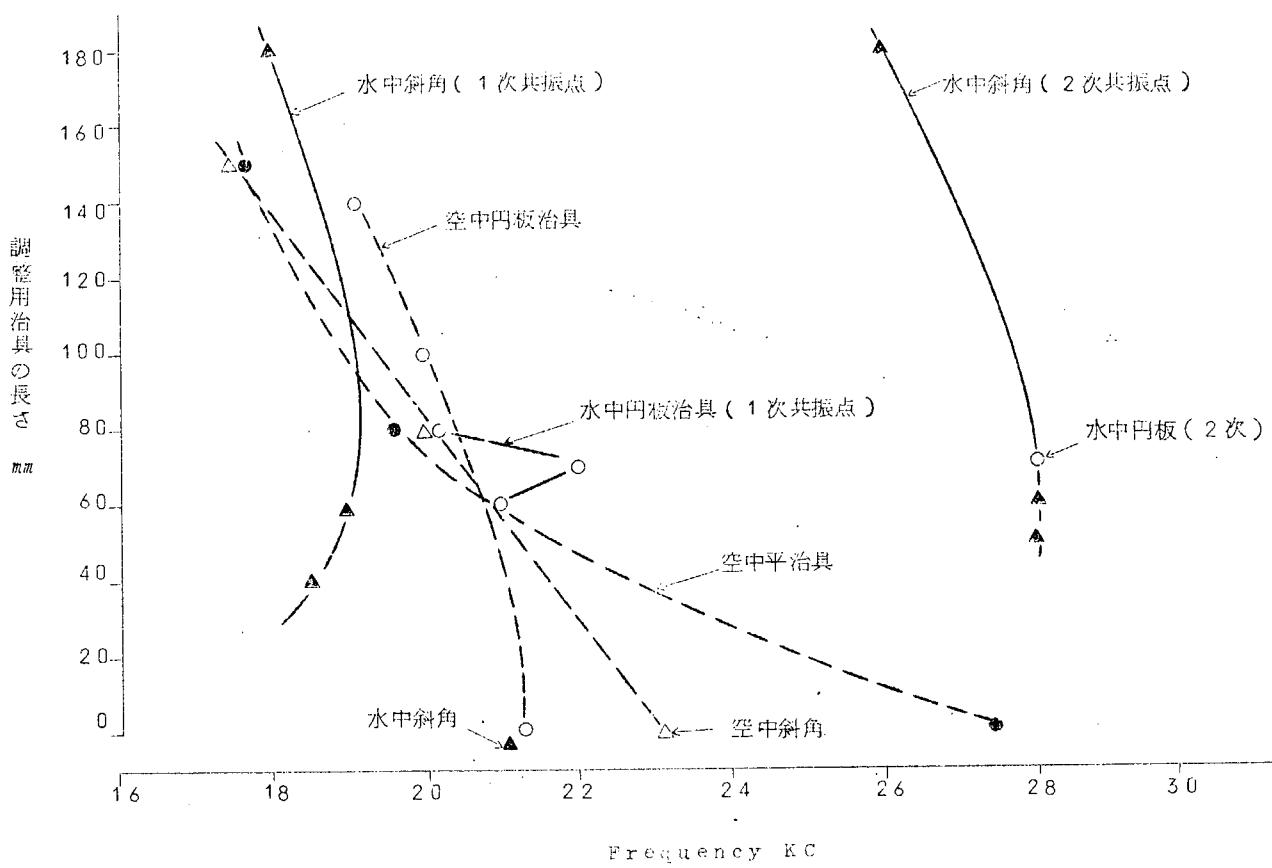
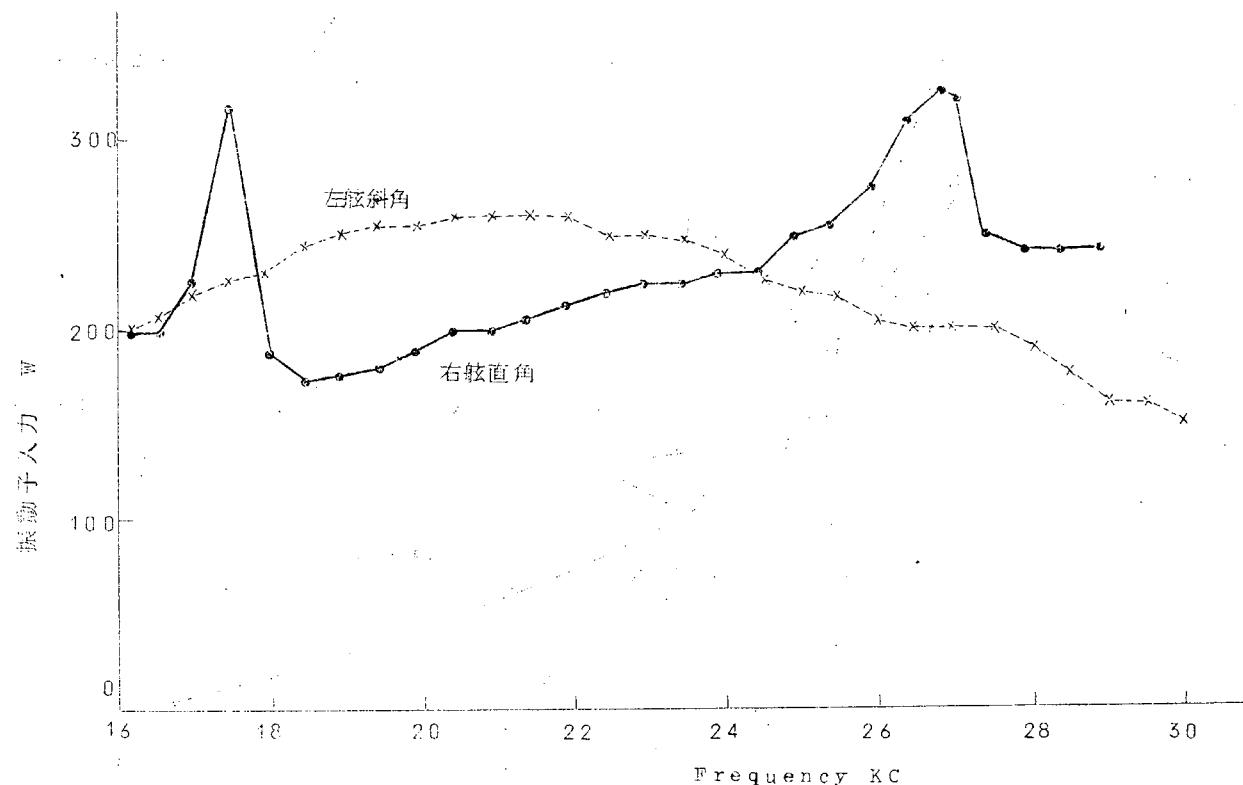


図3.25 治具の長さと共振周波数の関係

単独駆動時の周波数特性



2基直列駆動時における周波数特性

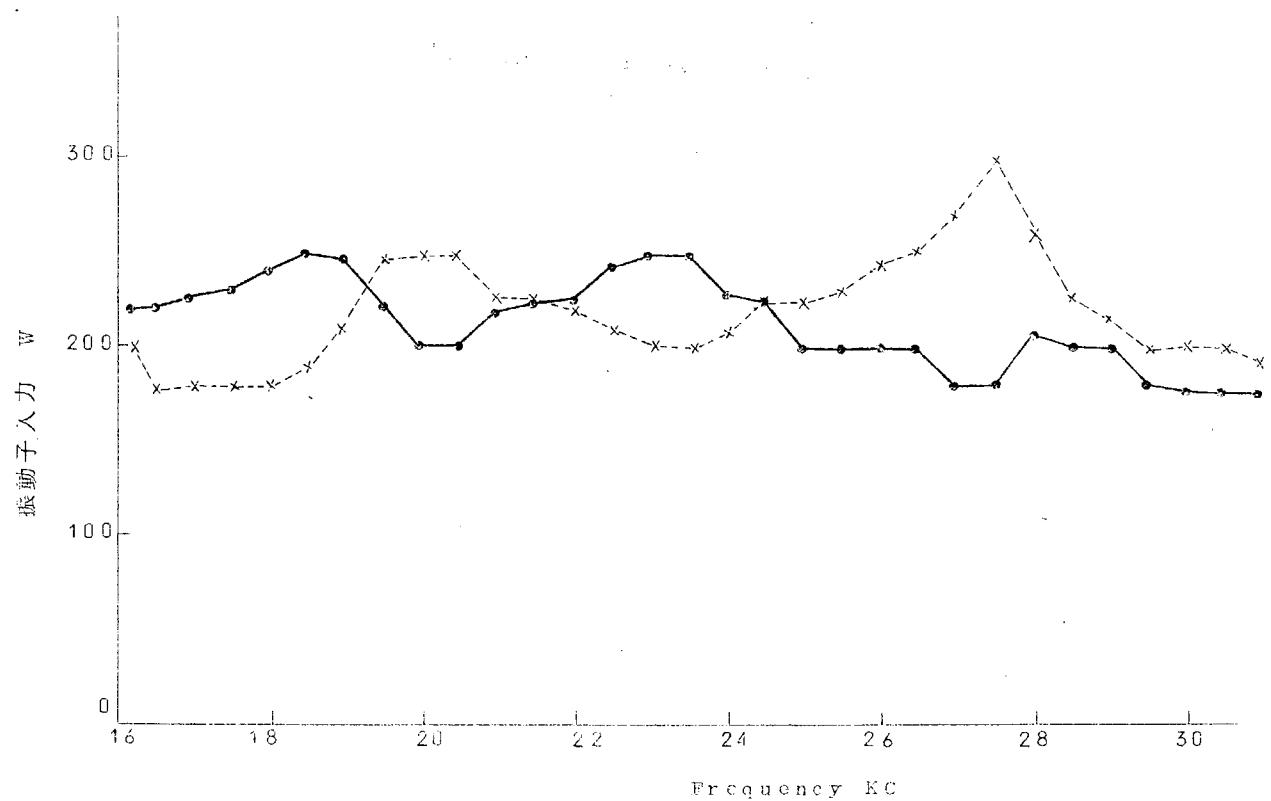


図3.26 周波数特性

(d) 第1次実験結果

(i) 本船の航海状況

第1次実験期間中における本船の航海状況を表3.2に示す。

表 3.2 航 海 状 況

停泊地	着月日時刻	発月日時刻	航 海 時 間	停 泊 時 間
川崎	☆6月27日 17:00	6月29日 13:00	日 時 間 分 0 0 2 1 0	1日 19時間 30分
東京	6月29日 15:00	7月 6日 16:00		7 0 1 0
アカブルコ	7月26日 12:00	8月 2日 13:55	2 0 0 7 1 0	7 0 1 5 5
東京	8月24日 07:35	*9月26日 12:00	2 1 0 3 2 5	3 3 0 4 2 5
☆ 出港	* 船底調査		計 41日 12時間 45分	49日 02時間 50分

(ii) 加速度測定結果

機関室内における外板の加速度(外板に垂直な成分)を測定した結果を図3.27に示す。なお測定方法は図3.28のとおりである。

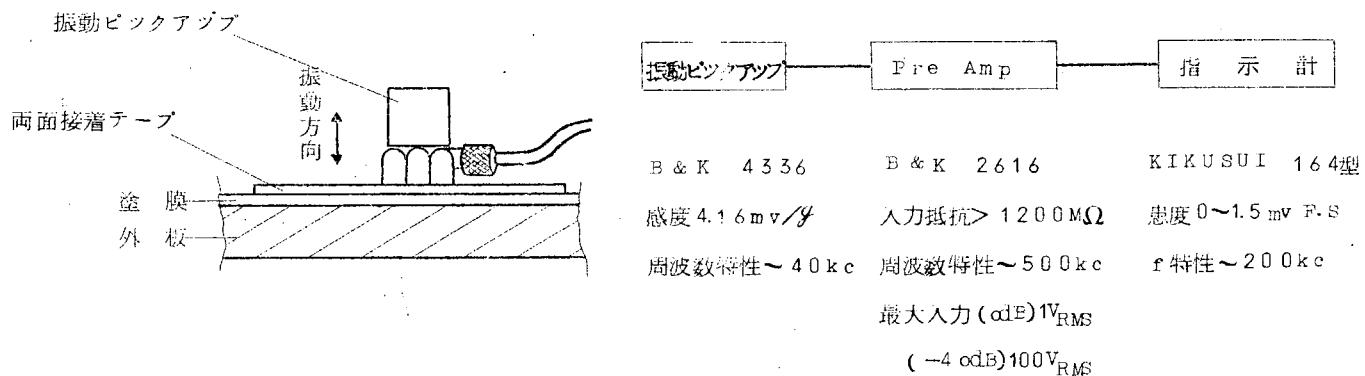


図3.28 加速度測定方法

(iii) 船外音圧の測定

停泊中の本船において船外の音圧を測定した結果を図3.29に示す。なお測定方法は図3.30のとおりである。

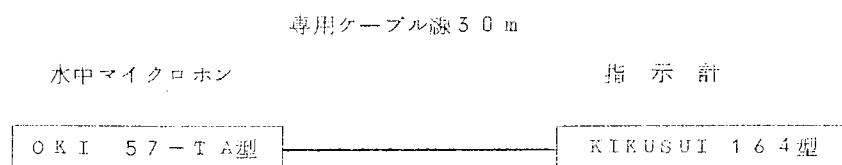
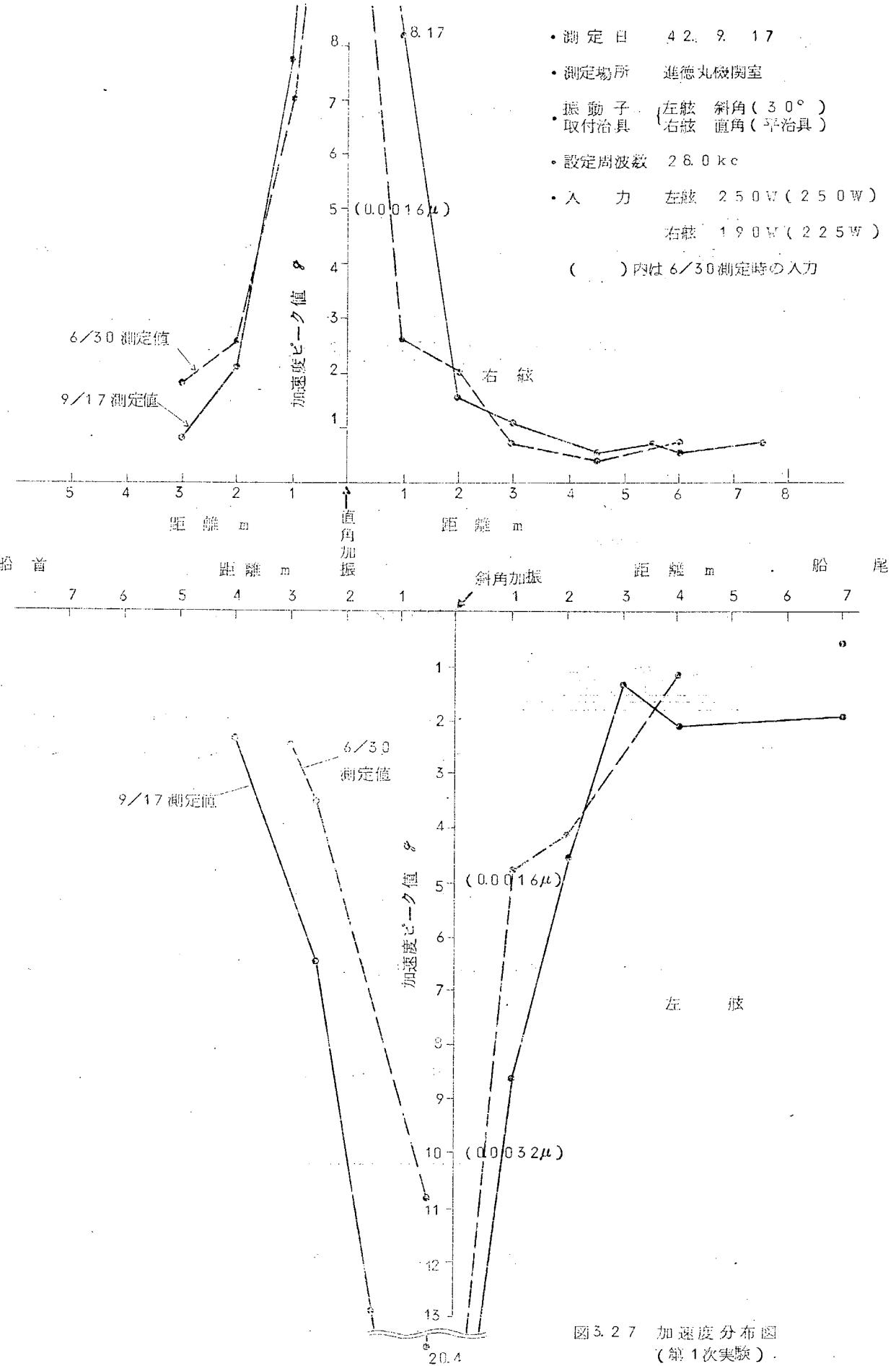


図3.30 音圧測定系統図



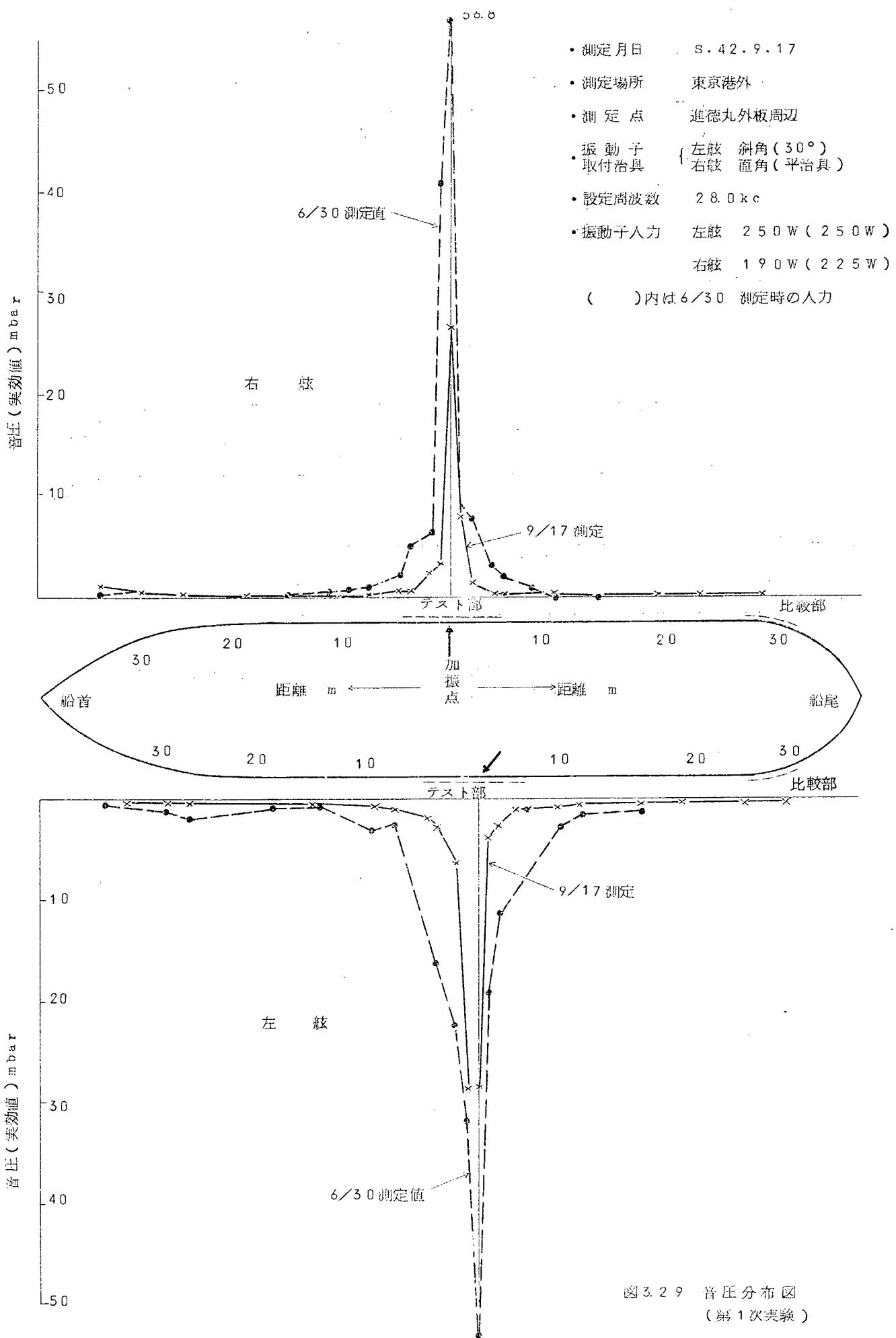


図3.29 音圧分布図
(第1次実験)

(IV) 防汚装置運転状況

設置以来約3ヶ月の間連続運転を行なつたのであるが装置は特に異常はなくほぼ正常に動作していた。運転状態などの記録をグラフにしたものと図3.3.1～3.3.2に示す。なお真空管類は約2,200時間使用したので第2次実験にそなえて一応新しいものと取替えることにした。

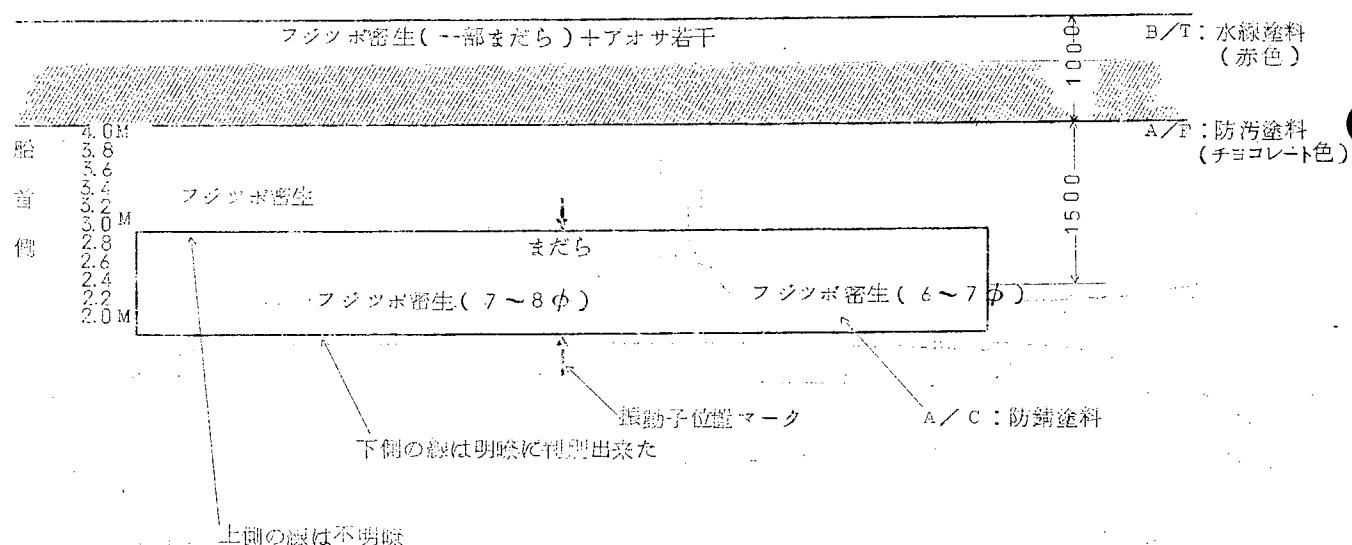
(V) 船体外板における生物付着状況

4・2年9月26日東京港外、羽田沖において外板の汚損状況を潜水夫の調査結果を聴取してとりまとめたものである。

なお、9月8日～9日千葉県館山沖において水中撮影による外板状態の調査を試みたが写真が不明で判定ができないなかつた。

(イ) 左舷中央の塗り分け部(試験部)付近の状況

外舷塗料
(白色)



- ① B/T部は上方部400mmを残して全面にフジツボ密生し(一部まだらな付着部あり)、さらにアオサが若干付着していた。
- ② A/Cの上部塗り分け線は船尾方500mmが判別できるが、他部はA/F部にもフジツボが付着して不明瞭であつた。
- ③ 中央振動子付近の径500mm程度がまだらに付着していた。
- ④ A/Cの船首側半分には径7～8mmのフジツボが、船尾側半分には径5～6mmのフジツボが多数付着していた。
- ⑤ A/Cの下部塗り分けはそれ以下のA/Fに生物が認められないので明瞭に判別できた。

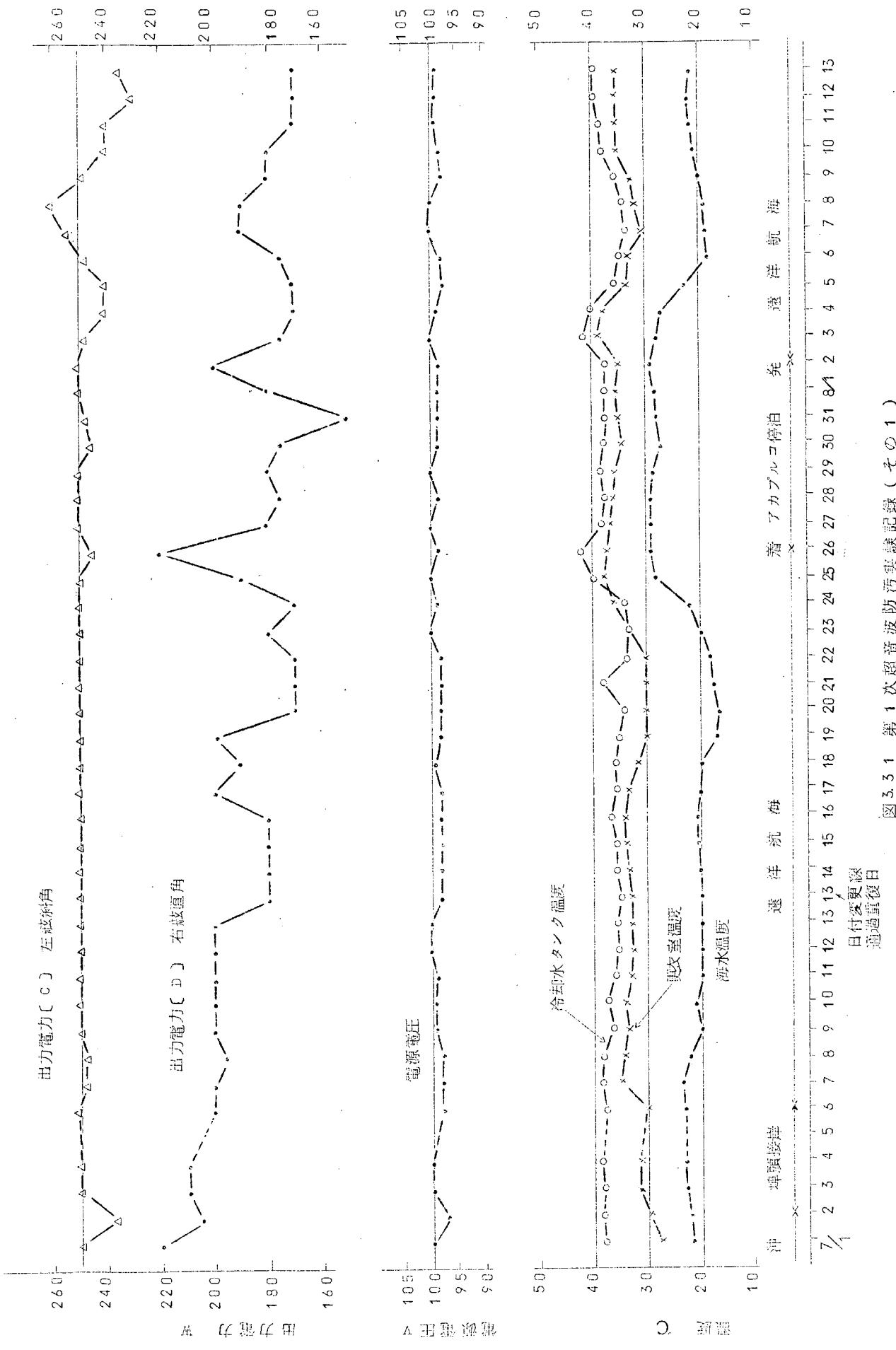


図 3.31 第 1 次超音波防汚実験記録(その 1)

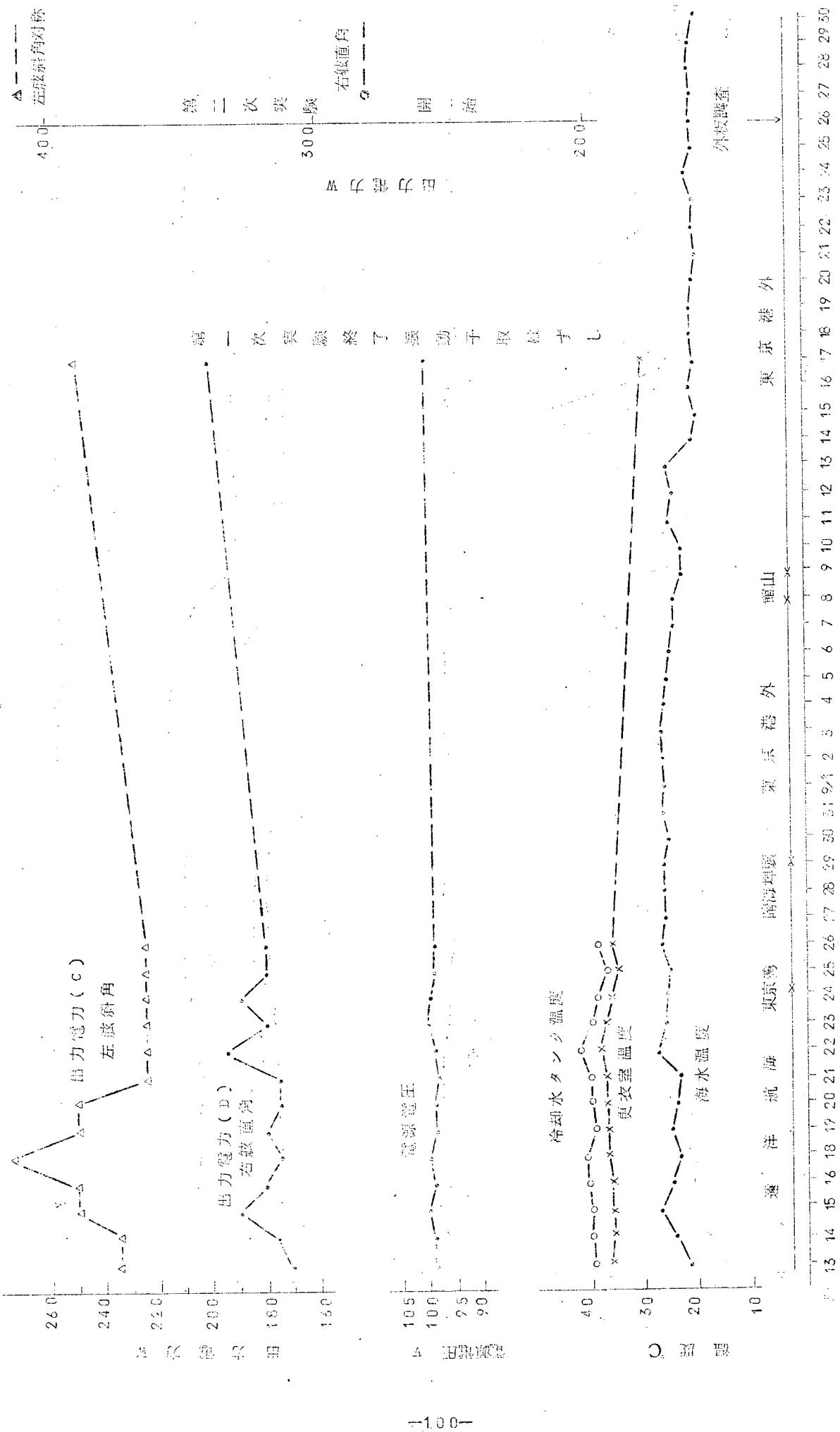
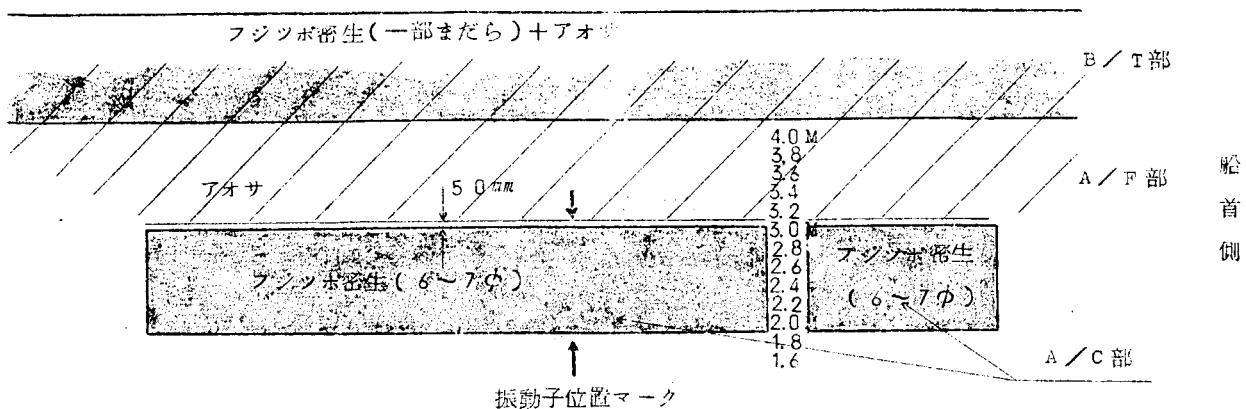


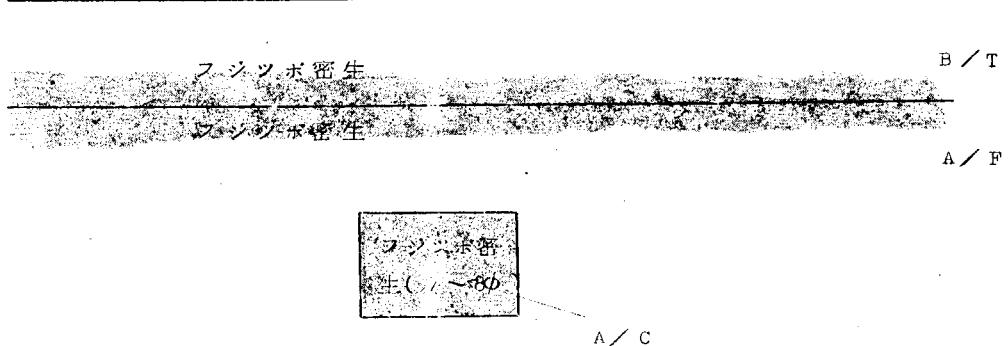
図3.3.2 第1次越音波防汚実験記録(その2)

(口) 右舷中央の塗り分け部(試験部)付近の状態



- ① B/T部は左舷と同様
- ② B/TとA/Cとの間にはアオサのみでフジツボはほとんど付着していない。
ただしA/C上部塗り分け線付近の50mm幅には、小さいフジツボが少數付着していた。
- ③ A/C部には径6~7mmのフジツボが密生していた。
- ④ A/C下部塗り分け線以下のA/F部には生物は認められなかつた。

(ハ) 両舷尾部の塗り分け部(比較部)付近の状態



- ① B/T部は上方部400mmを残してフジツボが密生していた。ただし、中央部と異なりアオサの付着は認められなかつた。
- ② B/TとA/Cとの間はほぼ上半部がフジツボで覆われていた。
- ③ A/C塗り分け部周辺のA/Fにはフジツボが点々と付着しているのみで、塗り分け線は明瞭に判別できた。
- ④ A/C部のフジツボは径7~8mmであつた。

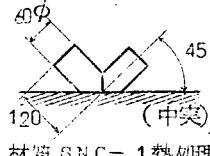
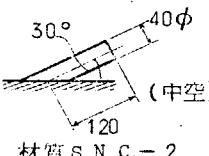
(2) 第2次実験

第1次実験では可聴音の発生による影響をさけるため共振周波数17KCの振動子を28KCで使用したので極めて加振効率が悪く充分な効果が得られなかつた。したがつて第2次実験では27KCの振動子を使用するとともに取付治具も新しいものとした。その他、振動子近傍ハウジング内の振巾の測定を容易にするため振動ビックアップを常設し、また発振装置の電気的状態、温度などを記録する記録計を取り付け実用的防汚装置の設計資料を得んとするなど諸種の新しい実験の他、通常の測定(船外音圧、外板加速度)も実施した。一方、防汚効果の判定については第1次実験と同じく外板のしみぬりわけ部によつて行なうのであるが第2次実験の結果の判定を容易にするため9月26日ダイバーによつてぬり分け部の清掃作業を実施した。

(a) 実験条件

新旧の実験条件を対比したものを表3.3に示す。

表3.3 実験条件比較表

	第2次実験(新)	第1次実験(旧)
発振装置	U.S.V.-1000-3A(超音波工業製)	同左
振動子	27KC 300W型 ニッケル×3基	17KC 250W型 ニッケル×2基
取付場所	左舷(FRAME: No.55~56)	右舷(FRAME: No.58~59)
加振方法	斜角(45°)対称	直角(ボーン)型
取付治具	 材質 SNC-1 热処理	 材質 SNC-2
調整治具	なし	60φ×9mm spacer
初期入力	410W	280W
総入力	690W	470W
駆動方式	3基直列(左舷の2基は逆相接続)	2基直列
整合インピーダンス	280Ω	125Ω
力率改善コンデンサー	発振器側にて0.036mμ(並列)	各振動子に0.1μF(並列)
運転条件	実験期間中常時連転	同左

(b) 新しい取付治具と振動子

(i) 斜角対称型治具

外板に平行な成分の音波を与える事を目的としたものであつて、外板に対し45°の角度で対称にかつ逆位相で加振することにより図3.3.3のベクトル図でもわかるように垂直成分が打ち消され板に対して平行な成分のみが働くことになる。そしてその大きさは1振動子の場合の2倍となる。



図3.3.3 斜角対称型治具の原理

実際の場合は完全に平行成分のみとはならず相当垂直成分も出ている。これはA, Bの大きさが同じでないことや点接触ではなく平面接觸である、などの理由による。参考までに図3.3.4に逆位相駆動の回路図を示す。

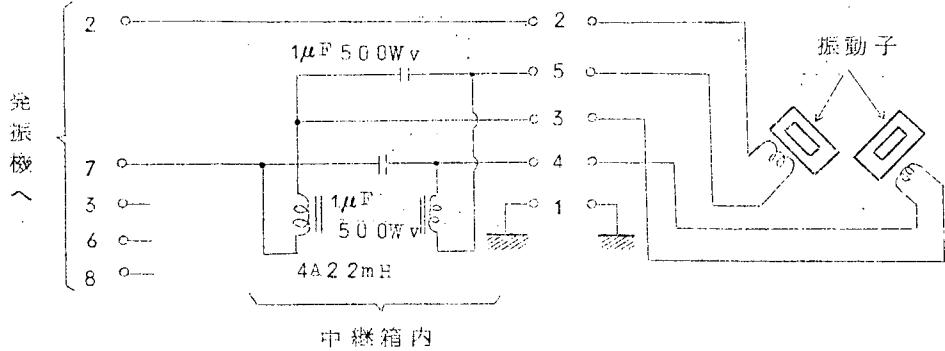


図3.3.4 逆位相駆動接続図

(ii) 直角型治具(ボーン型)

直角型として3点溶接型治具および全面溶接型治具の2種類を用意した。それぞれの治具の特徴とするとこは3点溶接型治具は点接触でもつて外板上における音波の同一位相点を加振することを目的とし、一方の全面溶接型治具は振動子から外板に伝達されるPOWERは低電圧一大電流型であると考えられるのでできるだけ接触面積を大きくしたものである。

(iii) 新しい取付治具および振動子の略図

(1) 左舷用 斜角対称型

図3.3.5のよう2基の振動子を対称に取付け逆位相で駆動する。

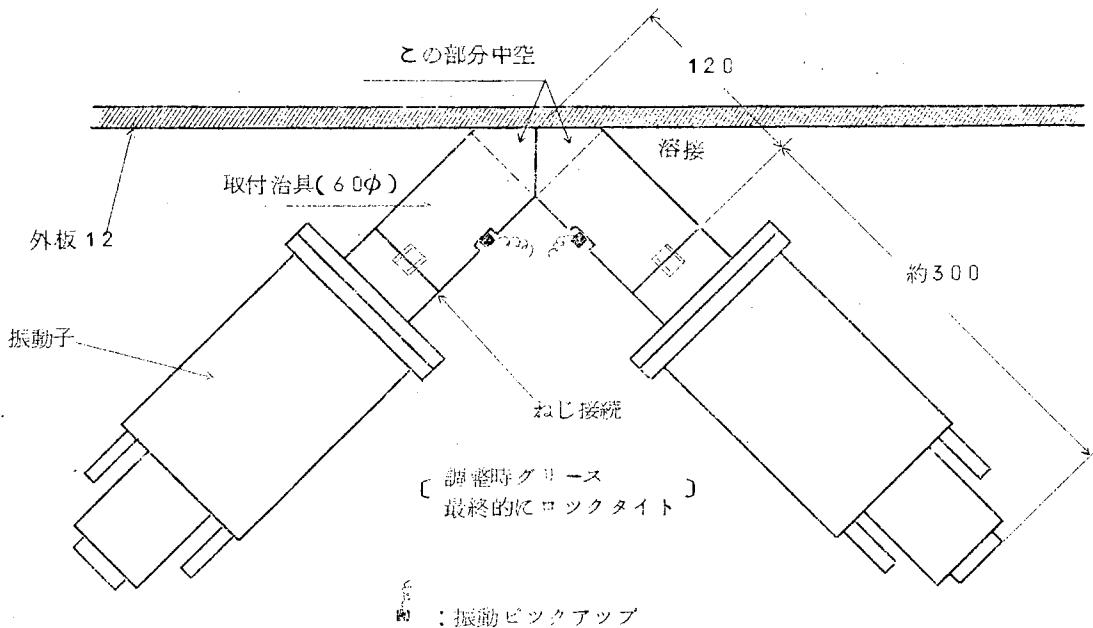


図3.3.5 左舷側振動子取付図

(iv) 右舷用 直角(ボーン型)

図3.3.6のよう全面溶接治具と3点溶接治具の2種類を取付け比較実験の結果、全面溶接治具を採用した。

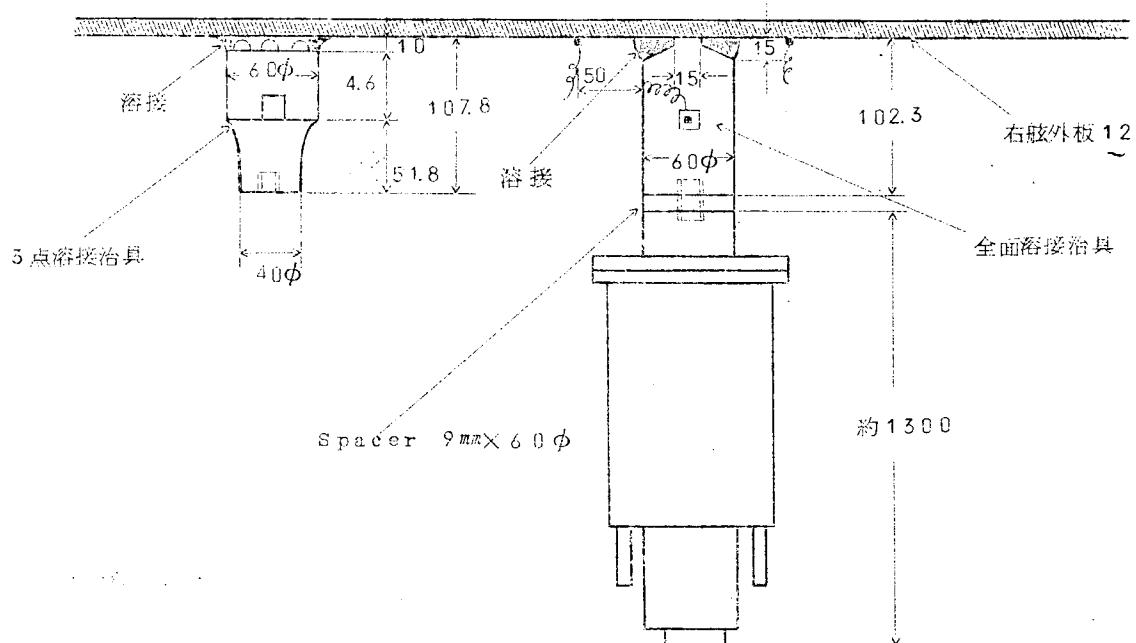


図3.3.6 右舷側振動子取付図

(c) 整合実験

船体に取付けた振動子を最適状態で加振するため以下の手順で調整を行なつた。なお、この実験は東京工大にお願いした。

(i) 振動子自体のインピーダンス測定

新しい振動子は合計4基あり、まずそれぞれの特性を測定した。その結果を表3.4に示す。

表3.4 振動子特性表

振動子No.	Zmo	Q	r (kc)	取付場所
1	100	75	25.813	右舷
2	70	66	25.875	使用せず
3	115	99	25.851	左舷
4	100	91.5	25.885	左舷

(ii) 船体との整合実験

最も問題となるのは取付治具の寸法であるがこれは計算だけでは簡単に決められない。実用的には概略の見当をつけて作つた治具を船体に取付けておき図3.3.7のようにSpacer(1~9mm)を入れて長さを調整し機械的なMatching最良点を見つける方法を用いた。

表3.5

Spacer	f_o	検出電圧 (P-p)
1 mm	27.02 KC	1.5 V
3 mm	27.009 KC	1.4 V
5 mm	26.789 KC	1.1 V
7 mm	26.34 KC	1.5 V
9 mm	25.743 KC	1.9 V

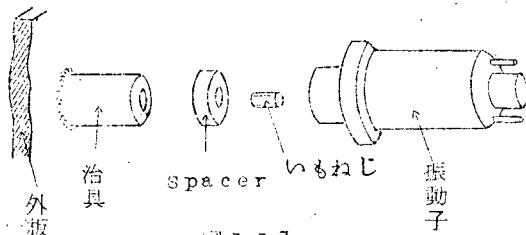


図3.37

☆ 検出電圧：加振点から約 25.0 mm 離れた点に振動ピックアップを取り付け検出した電圧

右舷における調整データを表3.5に示す。なお、推測によると、9mm以上に最良点があると思われたが時間の制約もあり一応 9mmとした。

引き続き左舷の調整を開始したが励磁回路からの誘導があり測定ができないため正規の配線を用いず別に配線して測定した。最初 spacer なしで測定したところ大体良い結果が出たのでそのまま spacer なしとすることに決定した。

(iii) 総合調整

各舷の調整を終つたあと 3 基の振動子を直列に接続した状態で電気的な Matching をとつた。すなわち、共振時におけるリアクタンス分を打消するための C の選定および最適負荷抵抗とするため Aut. Trans. の 2 次側 Tap 切替である。測定は振動子インピーダンス直視装置を用いて自由インピーダンスをみながら並列コンデンサーの容量を切替える方法で行なつたので従来の方法より正確に早く測定することができた。測定結果を図3.38に示す。

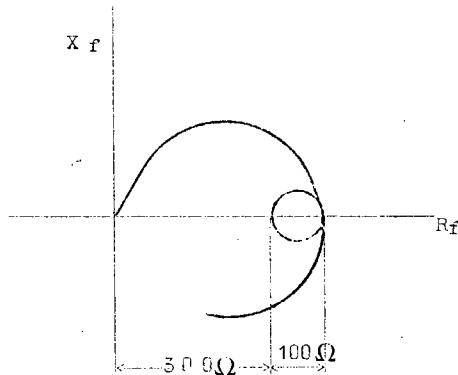


図3.38 3基直列駆動時の特性

共振周波数	26.809 KC
並列コンデンサー	$0.036 \mu F$
インピーダンス	300 Ω

(3) 記録装置の新設

防汚装置の動作状態を常時記録して実験条件の把握と実用的な防汚装置の設計資料を得ることを目的として記録装置を新設した。図 3.2.9 に被測定要素とその変換回路を示す。

番号別	被測定要素	信号取出点	D C 1 0 m V への変換回路	
			AC 100V AC 100V モータ line	AC 100V モータ line
1. 紫	電源電圧 AC 100V 低圧 line	A 1 2		
2. 黒	高圧 2.5 kV 圧計	B 1 2		自記記録計 ET1200V 12 干野製
3. 水色	冷却水回路 AC 100V モータ line	C 3 4		入力電圧 DC 0~10mV 12打点式
4. みどり	出力電力 300W P.P.M	D 5 6		
5. 茶	出力電力 600W U.P.M	E 7 8		
6. 紫	装置温度 42~55°C サーミスタ	F 9 10		
7. 黄	周波数 28kc±2kc カウンタ子	G 11 12		

較正表	温度°C	25	30	3.5	40	4.5	50	5.5	60	周波数kc	26	27	28	29	30
	電圧mV	6.6	6.0	5.5	5.0	4.5	4.0	3.5	3.0	電圧mV	4.6	5.1	5.6	6.1	6.6

図 3.3.9 記録計入力回路

(e) 第2次実験結果

供試船進徳丸が入港した1月27日12:00をもつて第2次実験を終了したので結果の概要を報告する。

(1) 実験期間：123日(42・9・26～43・1・27)近海航路

(2) 停泊期間：98日3時間45分

(3) 海水温度：最低6.0°C、最高21.9°C

(i) 本船の航海状況

第2次実験中における本船の航海状況を表3-6に示す。なお、水温グラフを図3-4-0に示す。

表3-6

停泊港	着月日時刻	発月日時刻	航海時間	停泊時間	備考
			日時 分	日時 分	
東京	9月26日12:00	10月5日14:00	2 22 35	9 02 00	※1
小樽	10月8日12:35	10月11日08:30	1 08 20	2 19 55	
新潟	10月12日16:50	10月15日14:00	1 20 40	2 21 10	※2※3
博多	10月17日10:40	10月20日09:00	2 05 30	2 22 20	
横浜	10月24日09:15	10月29日10:50	1 06 10	3 18 45 5 01 35	
神戸	10月30日17:00	11月10日10:30	1 01 10	10 17 30	
清水	11月11日11:40	11月15日11:00	1 00 20	3 23 20	
神戸	11月16日11:20	11月17日13:00	06 35	1 01 40	
高松	11月18日10:05	11月18日14:20	1 05 05	3 14 30 04 15	
長崎	11月20日07:00	11月23日16:10	16 40	3 09 10	
鹿児島	11月25日09:30	11月28日10:00	1 23 30	3 00 30	
名古屋	11月30日14:35	12月4日13:55	18 35	3 05 05 3 23 20	
東京	12月5日08:30	12月11日09:55	1 08 45	6 01 25	
神戸	12月12日18:40	12月18日10:05	1 21 00	5 15 25	大阪湾にて錨実験
鹿児島	12月20日07:05	12月22日11:25	2 00 20	2 04 20	
東京	12月24日11:45	1月16日10:00		22 22 15	
木更津沖	1月17日 :	1月18日 :		1 01 50	
神戸	1月20日07:00	1月22日14:00	03 50	2 07 00	
相生	1月22日17:50	1月27日12:00		4 18 10	
※1、※2 運力が出ないので入港時の水線附近の生物を除去した。			日 時 間 分	日 時 間 分	
※3 川に約4日程入った。			24 20 15	98 3 45	
			合 計		

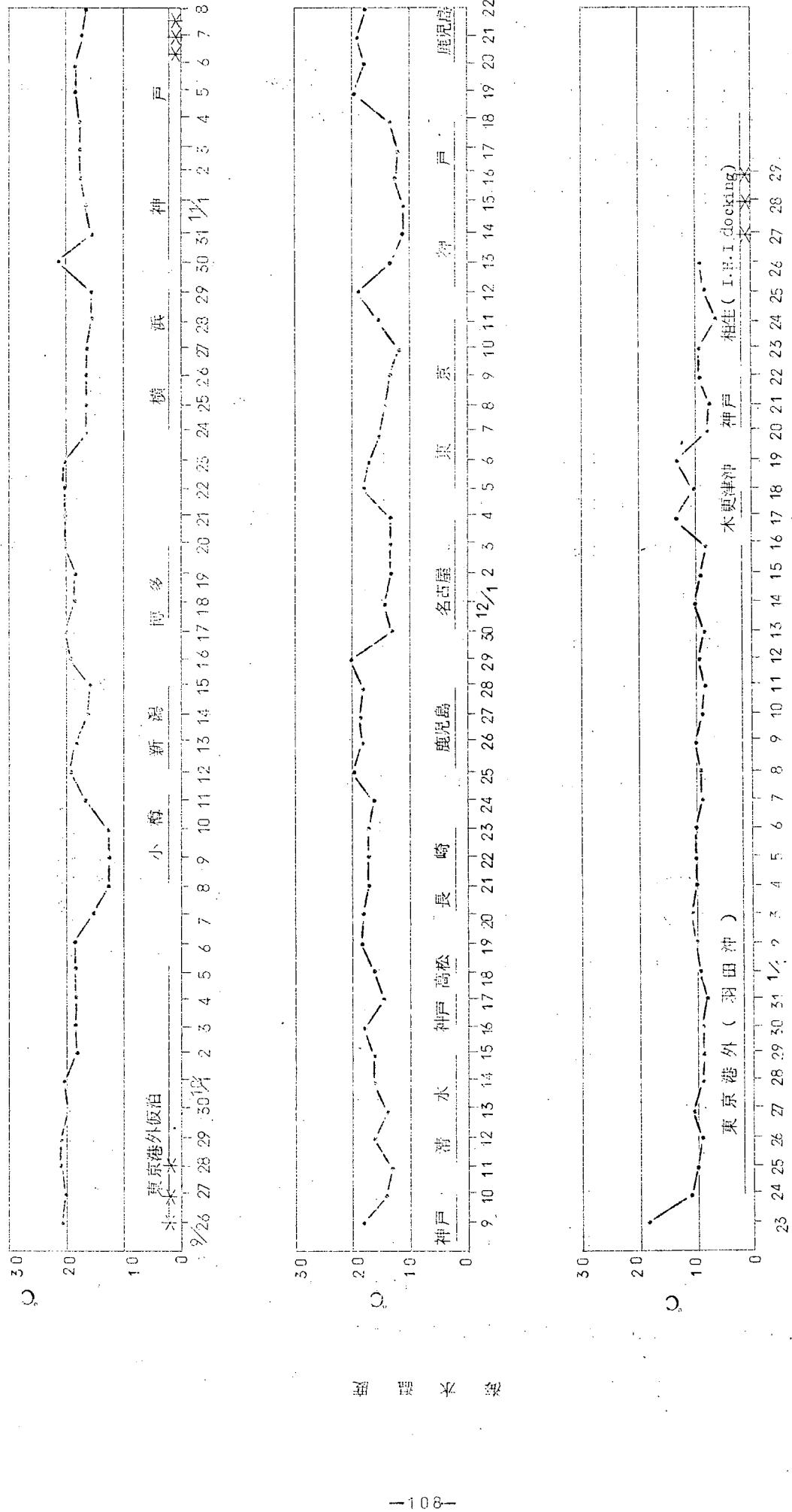


図3.40 第2次実験中ににおける本船の行動および海水温度(正午現在)

(ii) 加速度測定結果

(1) 一般測定

機関室内における外板の加速度分布を測定した結果を図3.4.1に示す。なお測定点における測定回数は1個所で5回以上としその最大値をとつた。

(2) 振動子近傍における加速度の測定

加振点における加速度を監視することを目的として東京工大で試作した簡易型ピックアップを図3.4.2のようにハウジング内に取付けた。

当初の予定ではこの出力電圧を監視計(Diodeと電圧計の組合せ)に入れ常時監視する予定であつたが、電圧計の入力Impedanceが高くとれずうまく指示しなかつた。とりあえず手持の真空管電圧計で測つた値を図中に示す。なお、取付状態を写真3.9に示す。

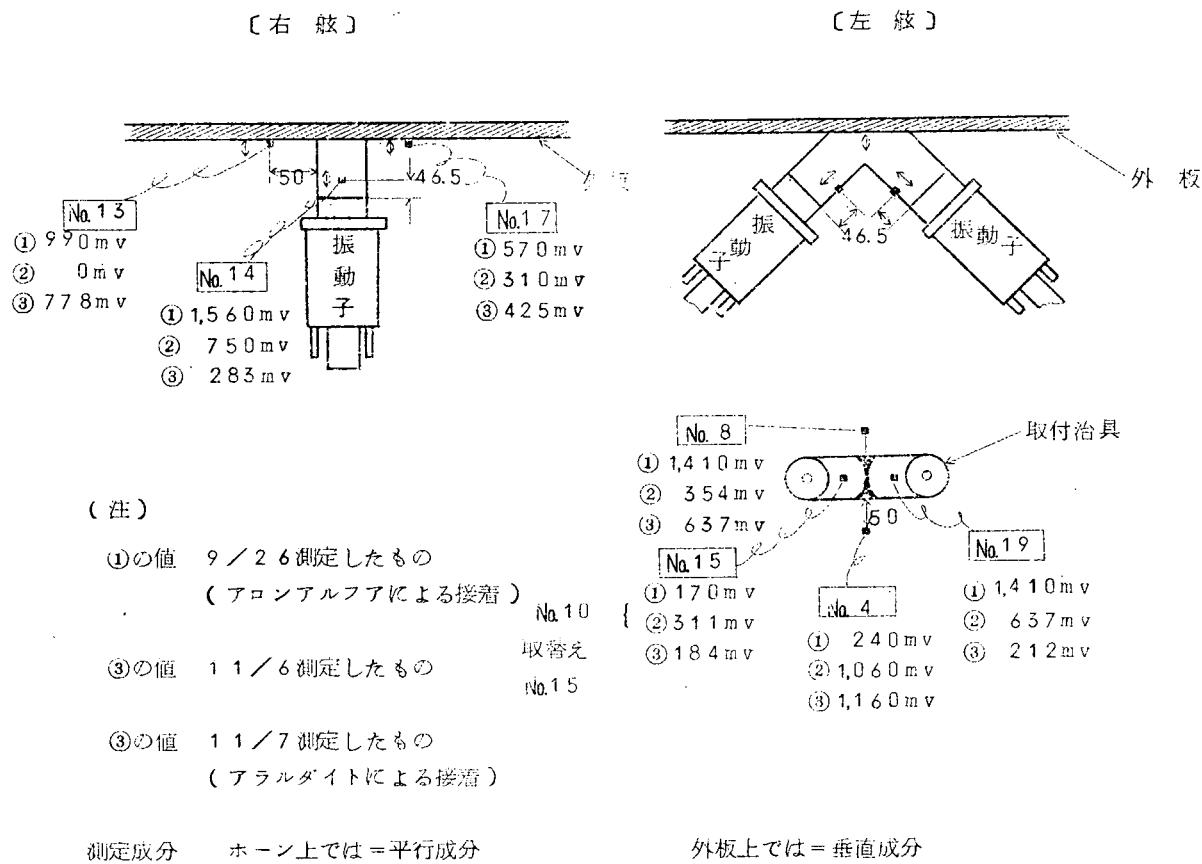
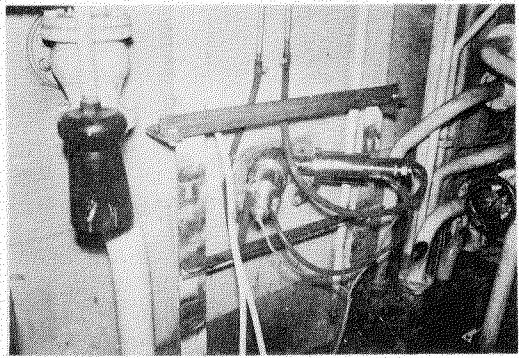


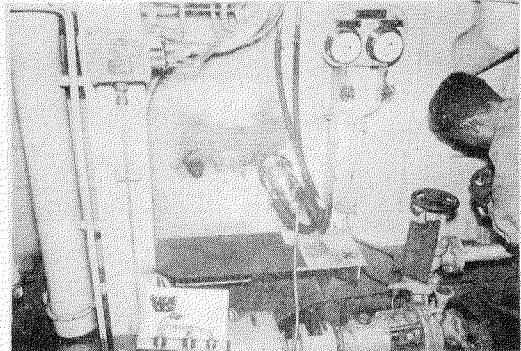
図3.4.2 簡易型ピックアップ配置図

(iii) 船外音圧の測定

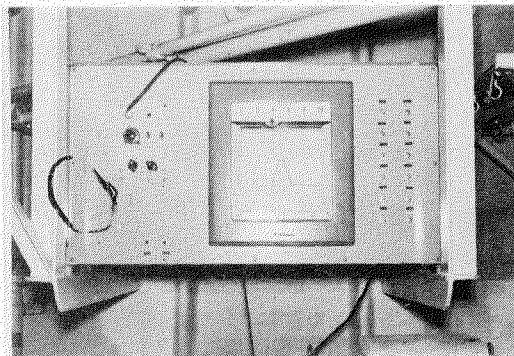
停泊中の本船において船外音圧を測定した結果を図3.4.3に示す。なお測定方法は第1時実験の時と同じである。



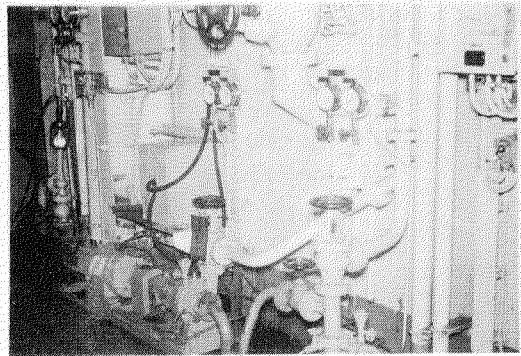
左舷振動子取付状態



右舷振動子取付状態

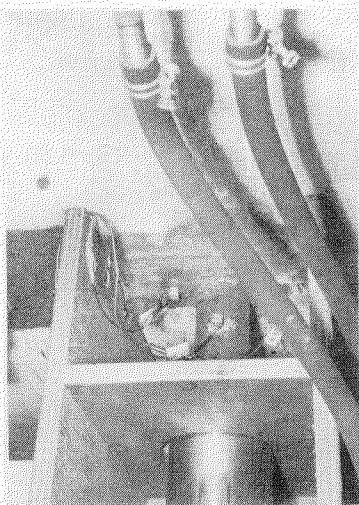


新しく取付けた記録装置



第1次に比べ、小さくなつたハウジング

写真3.9 第2次実験振動子取付状態



振動子近傍に取付けた振動ピックアップ

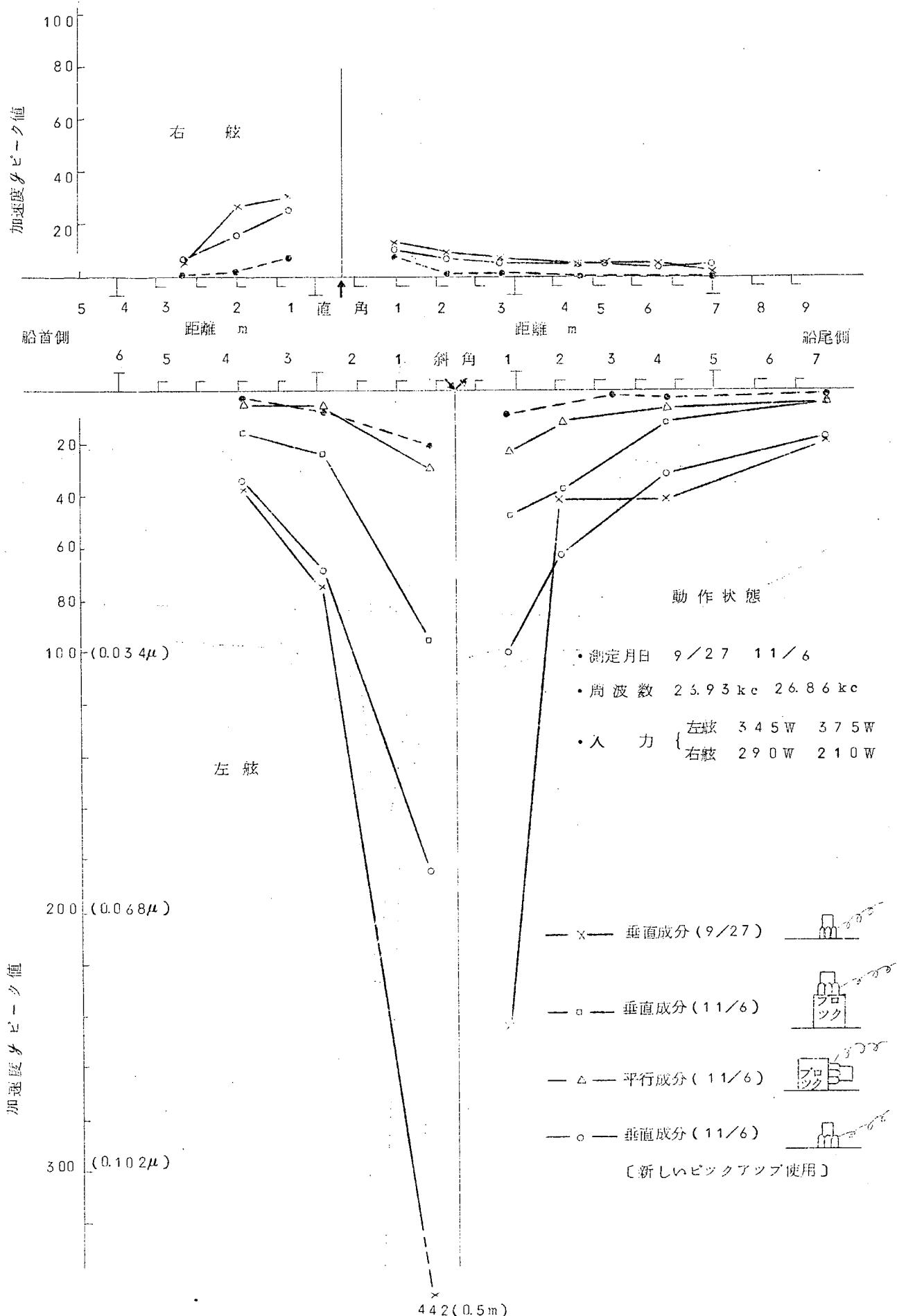


図3.4.1 加速度分布図
(第2次実験)

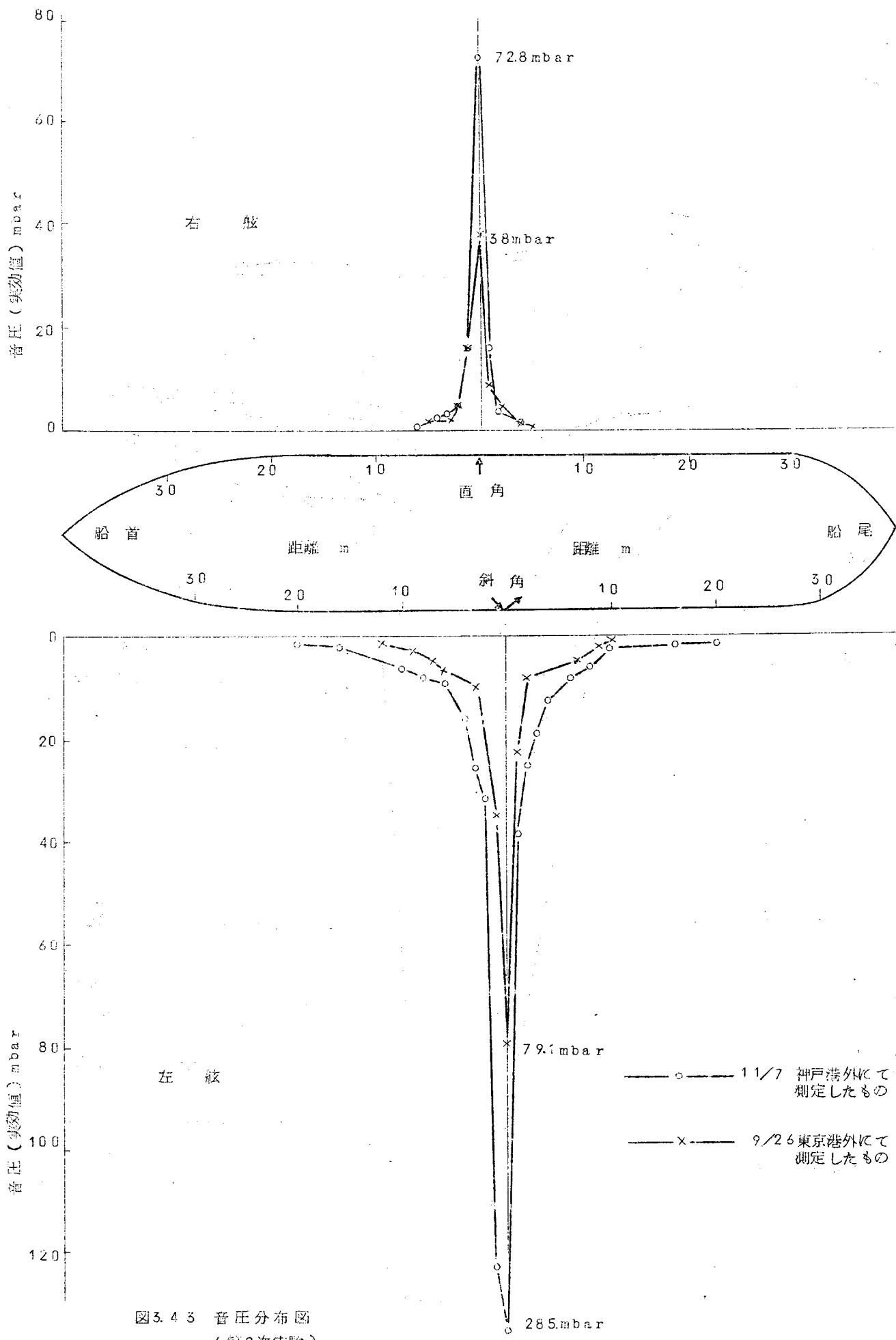


図3.4.3 音圧分布図
(第2次実験)

IV) 船体外板の汚損調査

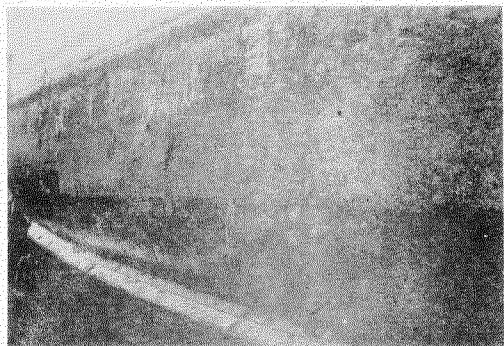
43年1月29日本船が石川島播磨重工業(株)相生第1工場に入渠したのを期に外板の汚損状況を調査した結果、全般的にみると停泊期間が長かつた関係上 A／F部にも相当生物が付着しており、塗り残し部も含めて垂直部には径10mm以下のフジツボと径1～1.5mmの短かいセルプラが多く湾曲部および平底部では径2.0mm以下のフジツボと径2mm・長50mmのセルプラが量に付着していた。なおA／F部汚損のため、上部塗り分け線が左舷では全線が不明瞭であつた。

前回調査時(42・9/26)ととくに変わっていたのはセルプラとアオサが付着増加している点であり、アオサは左舷では水線部からビルギールのやや上部までの範囲にわたつて成長しており、右舷では水線付近30～40cm幅および振動子取付部30cm径に発生していた。これらの状況を写真3.10に示す。

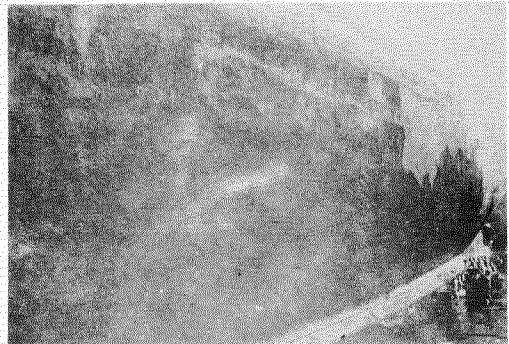
3.2.4 むすび

第2年度研究の目標である超音波による海中生物の付着防止実験を実船において実施したのであるが本文中に記した理由により防汚効果があまり明確ではなかつたので引き続き同船にて第3次実験を実施中である。

なお防汚装置は第1次実験で3ヶ月、第2次実験で4ヶ月の間、連続運転を行なつたが全く異常は認められず船舶搭載に適することを確認した。



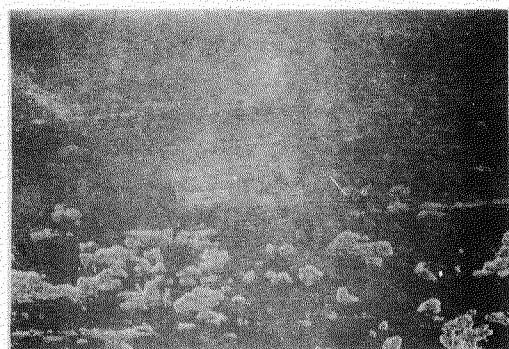
右舷試験部全景



左舷試験部全景



右舷比較部



左舷比較部



船底部(A/F塗装)



右舷船首付近(A/F塗装)

写真3.1.0 第2次実験外板汚損状況

4. 船体摩擦抵抗の基礎試験

超音波による船底防汚に関する研究は各造船所、大学、及び発振器メーカーによって進められ、現在ではほぼ実用化の見通しを得るに至っている。ところが超音波によって船底外板を振動させた場合、境界層の流速分布が変化して非ニュートン流体と同じような状態になり摩擦抵抗も変化する可能性が考えられる。

本報告はこの点について昭和42年12月、三菱重工業神戸研究所の水力実験装置を使って実験研究を行ない、超音波による船底防汚法の船体抵抗に与える影響を明らかにしたものである。

4.1 実験装置

(1) 供試管

実船の速度からレイノルズ数は $10^6 \sim 10^7$ 程度と推察され、SGP 150（内径 155.2 mm）を使用した。

(2) 超音波発振器

現在船底防汚実験に使用されている周波数帯から下記のものを使用した。

発振器 16~22, 28, 50, 100 KC用

振動子 17 KC, 28 KC (ニッケル振動子)

4.2 実験方法

図4.1に実験装置を示す。

実験は図4.1に示すように供試管の中央に振動子を取り付け、圧力タップは上流側に 2.25 m、下流側に 2.25 m の位置に径 2 mm の静圧孔を同一円周上 4ヶ所にもうけた。

実験は流量 $20 \text{ l/sec} \sim 180 \text{ l/sec}$ の範囲で任意に変え超音波を当てた時と当てないときの管路損失を水中マノメータによって測定し流量を縮流堰によって測定する。

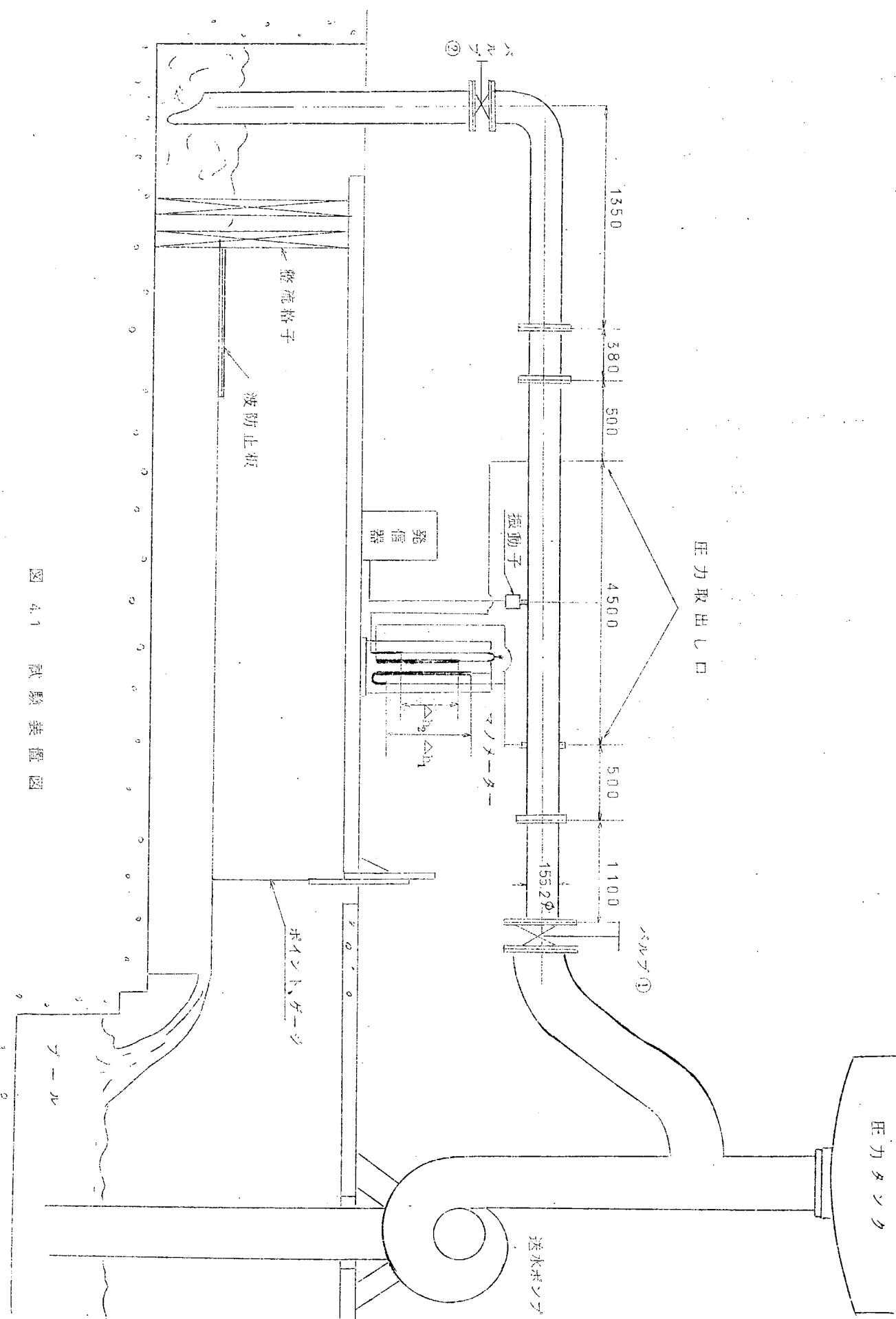


図 4.1 試験装置図

4.3 計算式

管内レイノズル数 (R_e)

$$R_e = \frac{v \cdot d}{\nu}$$

$$v \dots \text{管内平均流速} \quad v = \frac{Q}{\frac{\pi}{4} d^2} \dots m$$

$$d \dots \text{管内径} = 0.1552 \dots m$$

$$\nu \dots \text{動粘性係数} = 1.11 \times 10^{-6} \text{ (水温 } 16^\circ\text{C) } \dots m^2/\text{sec}$$

管摩擦係数 (λ)

$$\lambda = \frac{h}{\ell / d \cdot v^2 / 2 g}$$

$$h \dots \text{管の損失水頭} \dots m$$

$$\ell \dots \text{管の長さ} = 4.5 \dots m$$

$$d \dots \text{管内径} = 0.1552 \dots m$$

$$v^2 / 2 g \dots \text{速度水頭} \dots m$$

4.4 試験結果および検討

図4.2にムーディ線図「 R_e 数および相対あらさ ϵ/d (d =管内径、 ϵ =壁面の凹凸の平均高さ)によって変化する管摩擦係数曲線」との比較を示す。

図4.2(イ)は17KC(出力130W)の振動を与えた時とあてない時の比較をしたもので、一流速に対しそれぞれ3回計測し平均したものである。

図4.2(ロ)は振動数を21KC、130Wに変えた時と同一振動数に対し出力を22.0Wに上げた場合をそれぞれ加振しない時との比較を示す。

図4.2(ハ)はさらに振動数を26.6KC(28KC用)130Wで上記同様振動を与えない時の比較をしたもので(ロ)、(ハ)の計測点は、流速を荒く変え一流速につきそれぞれ20回計測した平均値を示す。

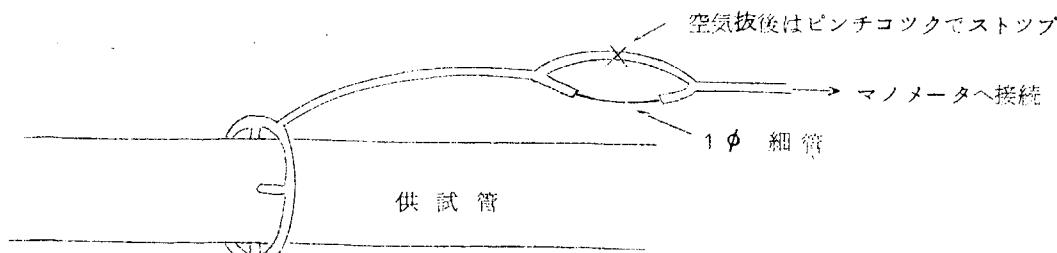
図4.3は損失水頭 $\log h \sim \log Q$ 曲線を示したもので、17KC 130Wの計測点すなわち損失水頭 h に対する流量 Q を直線(対数)で比較した。

図4.4は供試管に加振した時の振動子から下流側における加速度分布を示す。

管路損失および流量計測にあたってはできるかぎり精度を上げるために下記の点に注意を払った。

(1) 管路損失

送水ポンプが回転することによって発生する圧力の脈動および電圧変動による圧力の変化等による読み取り誤差を少くするため、圧力取出口から水中マノメータに至るビニール管の中間に別に内径1mmの細管を取り付(下図参照)水中マノメータに表われる圧力変動を極力小さくした。



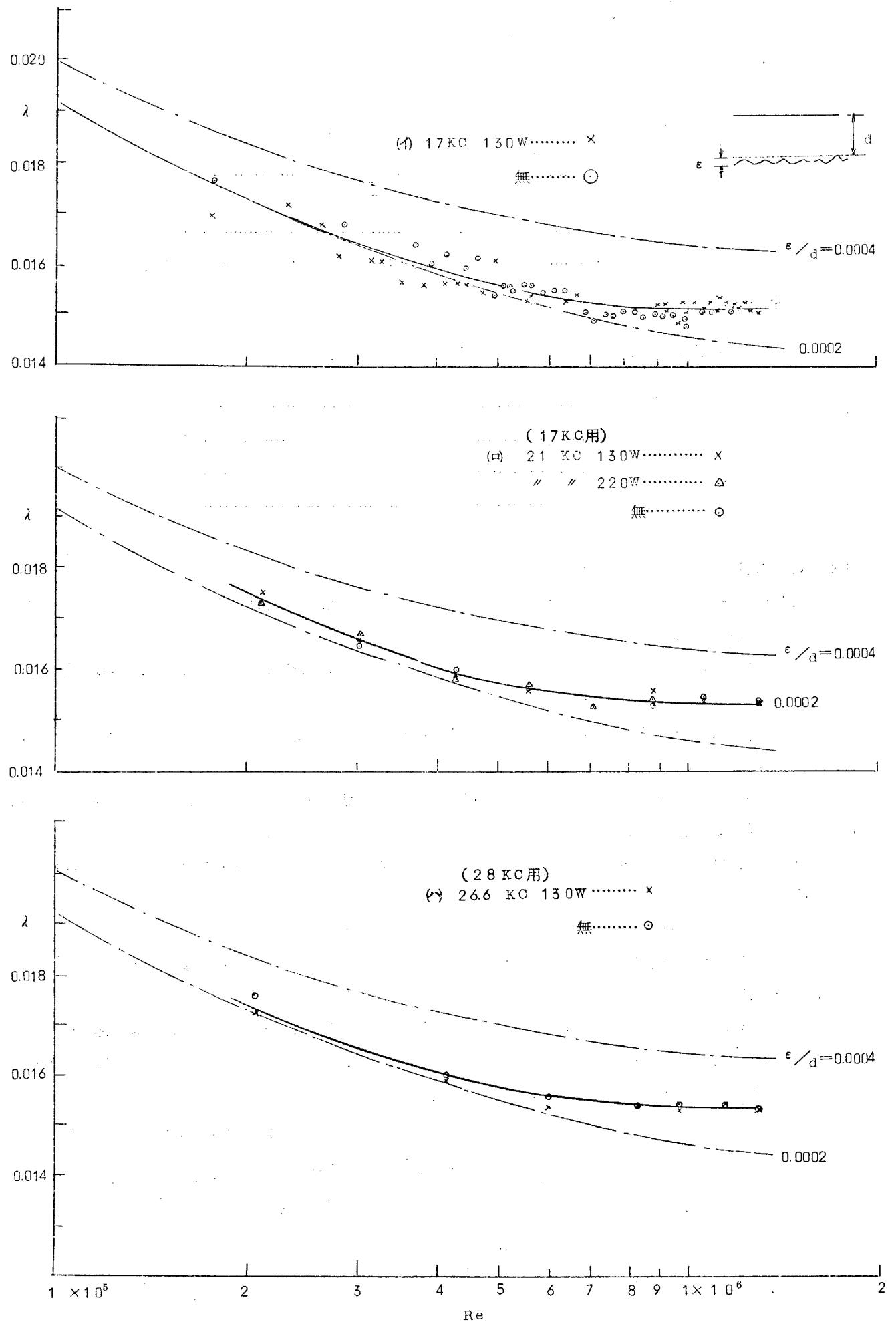


図 4.2 ムーディ線図との比較

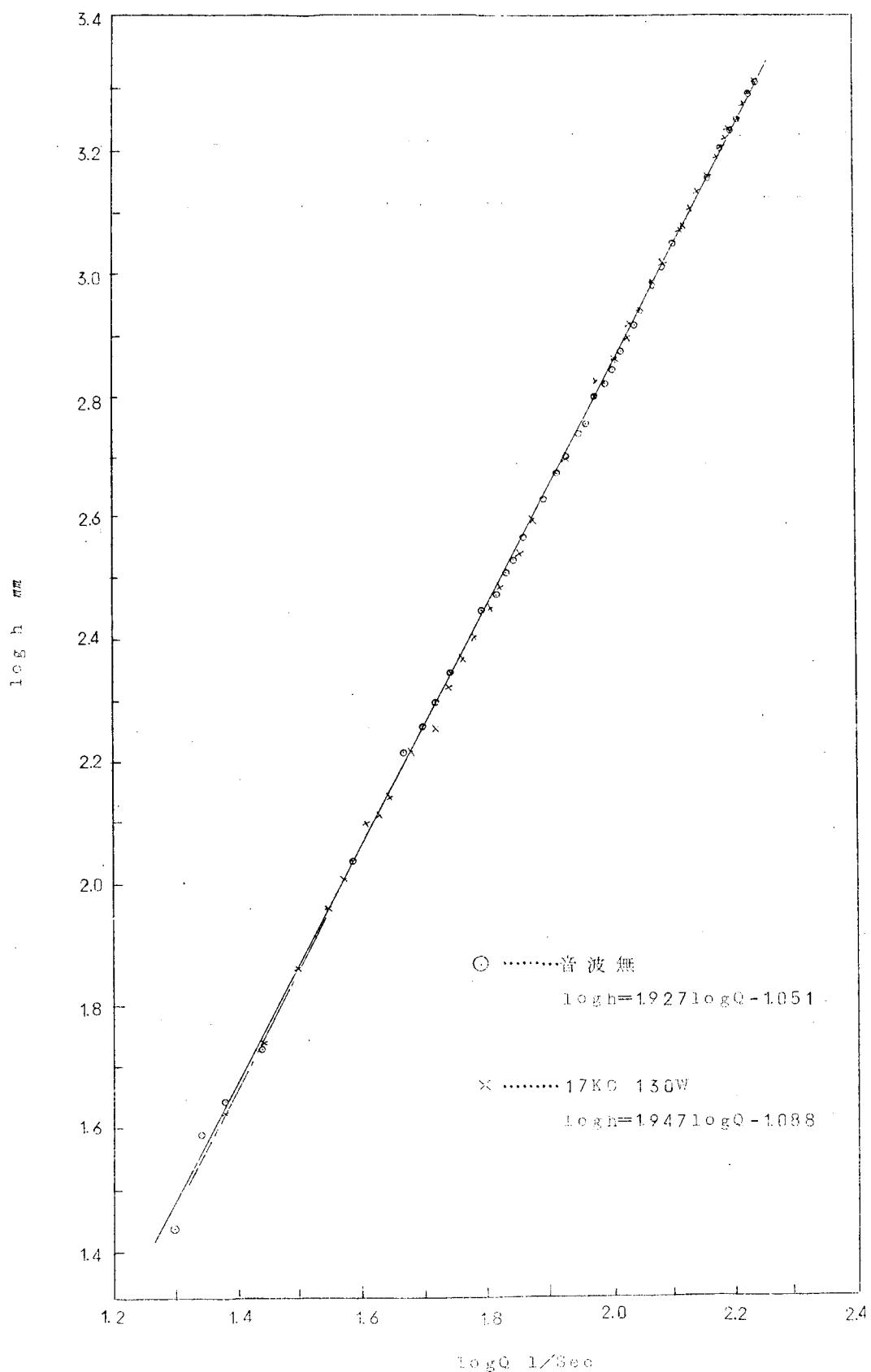


図 4.3 損失水頭 $\log h \sim \log Q$ 曲線

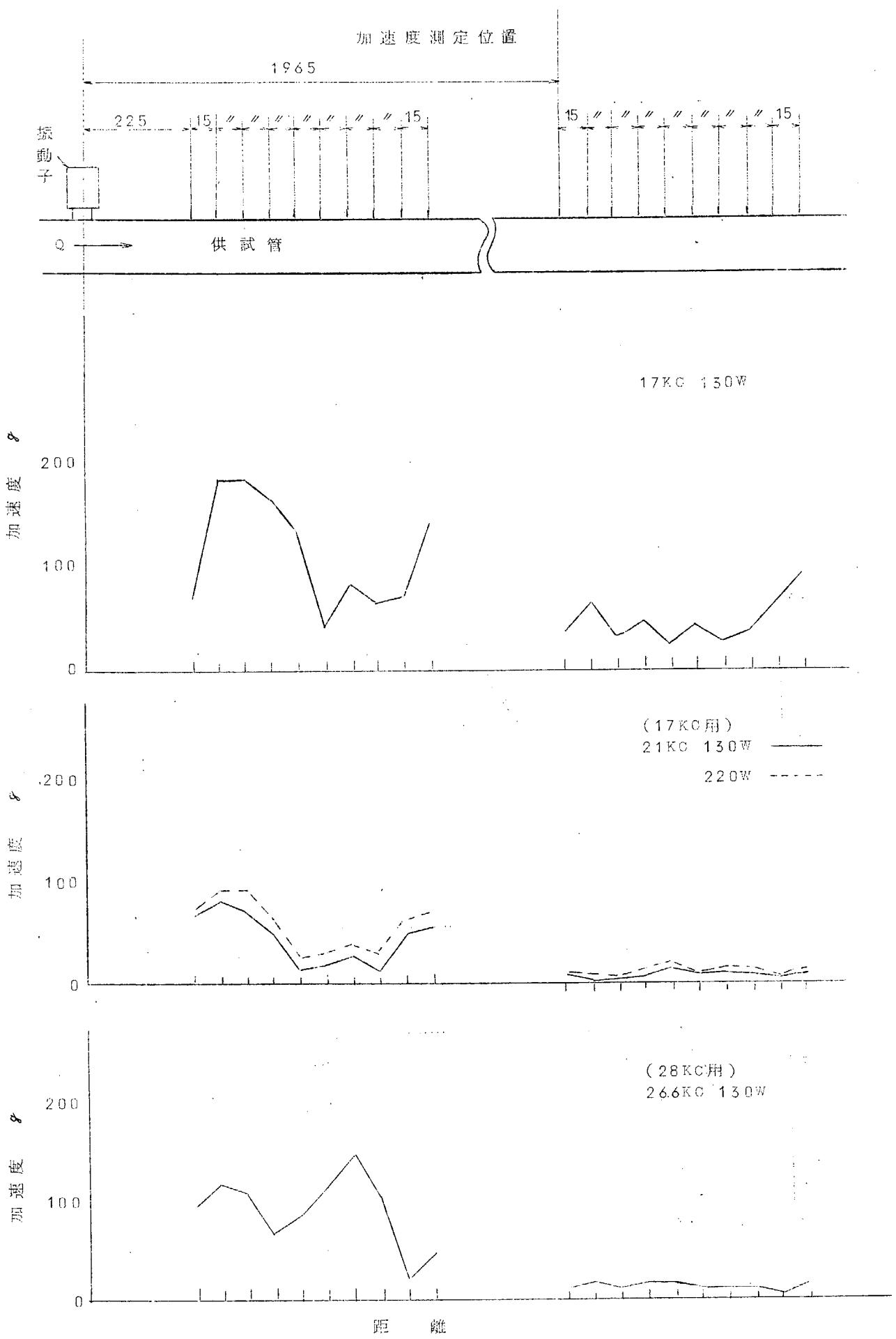


図 4.4 加速度分布図

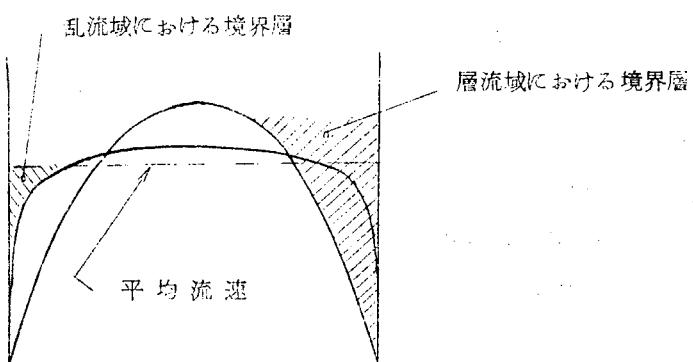
圧力取出部上流の流速分布を乱さないため、バルブ④を全開にし流量調整はバルブ②で行なった。

(2) 流量測定

既設の整流格子の他に波防止板を別に取付、ポイントゲーデの読取誤差を少くした。

一般に流体はその流体の持っている粘性のため流体障壁が互に相対的の運動をする時にその影響が抵抗となって現われる。層流域では流体粒子が管軸の方向に一定の速度で流れるのに対し乱流域では、流体粒子が複雑な入り混る運動をする現象であって粘性それ自身の直接の影響より流体の入り混り運動による作用の方が強い。したがって、乱流域における境界層は層流域に比べてかなり小さい。

流速分布図



流速分布図

上記のことより考えて、超音波を作用させることによって、境界層が破壊されるか、壁面と流体との間隙に空気の薄い皮膜（キャビテーションのようなもの）のような現象が起るか、水の分子に超音波のエネルギーが伝達されることによって分子間に作用を及ぼし非ニニートン流体のような状態が起つて、摩擦損失に影響を及ぼすとしても、その量はきわめて小さい値であることが推察される。

17KCにおける損失水頭 $\log h$ と $\log Q$ から最小自乗法をもじいて直線の式 $y = ax + b$ を求めると次式を得る。

$$\text{音波無} \quad \log h = 1.927 \log Q - 1.088$$

$$17\text{KC} \quad \log h = 1.947 \log Q - 1.088$$

h m

Q l/s

両式を比較すると $\log Q < 2.0$ を境にして加振したときの損失水頭が減少し、 $\log Q > 2.0$ で逆に損失水頭が増加する傾向にある。この変化量は $\log Q = 1.4$ で約 0.5% 減少し $\log Q = 2.2$ で約 0.2% 増加している。もし摩擦抵抗が超音波の影響を受けるとするならば、流量の大、小にかゝわらずどちらか一方に作用すべきである。この値は実験、精度、実験値のはらつき等から考へて問題にならない差である。

今回実施した 17KC、21KC、26.6KCにおける加速度分布をみると最大 18.0g、最小 1.0g で振動子からの距離が長くなるにつれてそれが減少する傾向である。

摩擦抵抗に加速度の影響があるならば、供試管全体にある大きさの均一な加速度分布が望ましい。このことは、実船の船底防汚に対する超音波の使用から考えて加速度分布の不均一はある程度避けられないことである。大きさについては、昭和 42 年 1 月に予備実験として実施したときの加速度が 14.50g で摩擦損失に影響が見られなかつたことから推察して今回の加速度が特に小さいとは、考えられない。

4.5 む す び

超音波による船底防汚法の研究と並行して船底外板を振動させた場合、境界層の流速分布が変化して摩擦抵抗も変化する可能性について実験的に調査した結果、およそ次のことが云える。

- (1) 17 K C, 21 K C, 26.6 K C の周波数帯では、摩擦抵抗に変化は見られない。
- (2) 上記周波数における加速度は最大 180 g 最小 10 g であるが加速度の大きさによる摩擦抵抗への影響は、さほどないものと予想される。
- (3) 実験誤差は実験値より、推察しては ± 1 % 以内である。

参 考

SGP150 前後の管内粗度 $\epsilon = 0.0045 \text{ mm}$ SGP150 新管の摩擦係数 $\lambda = 0.0153$ である。

参考文献

1. 機械実用便覧
2. 超音波による摩擦抵抗変化の研究
(予備実験) Q.A.S 2506

5. 縦波振動の防汚効果および縦波付与に関する基礎実験

超音波による船底防汚の研究に関し、伝播特性のきわめて良好な縦振動の適用が提案され、音圧を伴なわない疏密波である縦振動の防汚効果を明らかにするために臨海浸漬実験を行ない、縦振動の防汚効果の優秀性を立証することができた。つづいて、平板への縦振動の付与について、一連の基礎実験を行なったので、あわせて報告する。

5.1 縦波の振動防汚効果

超音波振動モードとして、当初は曲げ振動を用いていたが、鋼板中の伝播特性に関する理論解析の結果、曲げ振動は接水面において水中への音圧輻射による損失がきわめて大であることが明らかとなつた。

すなわち、片面接水の無限大の鋼板中を振動が伝播する場合、振動勢力の減衰の原因として

- (1) 鋼板内部の吸収損失
- (2) 水の粘性抵抗による損失
- (3) 水中に音圧を輻射するために生ずる損失
- (4) 拡散減衰(点駆動の場合)

が考えられ、一方縦振動を採用した場合は、曲げ振動や横波に比べて $1/1000$ 程度の減衰しかないので、実船に対する超音波力の振動では当然縦振動を目標とすべきであろう。

しかし縦振動を指向する場合

- (1) まず純粹な縦波を付与する方法が困難
 - (2) 防汚効果について考えた場合、曲げ振動に比して鋼板表面よりの音波の放射が伴なはないから、防汚効果が低減するのではないか
- などの問題が考えられる。

したがって本実験では、まず縦波の防汚効果を確認するため、下記の実験を行なった。

5.1.1 試験条件および試験

試験鋼板 1050(L) × 76(W) × 16(t) mm 鋼板に油性A/C 2回塗装

超音波周波数 16.5 KC (Ni 振動子)

試験鋼板 A 16.5 KC 見掛けの入力 50 W

B 16.5 KC 見掛けの入力 80 W

最大加速度(A/C 塗料の上から測定したもの)

A 4.0 g

B 14.0 g

浸漬場所 神戸港(三菱重工業㈱ 神戸造船所構内)

浸漬期間 3週間 (42.8.7 ~ 8.27)

浸漬深さ 海面下 0.5~1.0 m

すなわち試験鋼板の長さ $\ell = 1050 \text{ mm}$ は、17 KC での縦波の半波長

$$\frac{\lambda}{2} p = c_p / 2f = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \cdot \frac{1}{1 - \sigma^2} / 2f \doteq 150 \text{ mm}$$

から、7節の縦振動共振体となるように設計したので、駆動は端面駆動とした。

5.1.2 試験結果

図5.1および5.2は両試験板による浸漬実験結果と、試験板の加速度分布実測結果とを合せ示した。

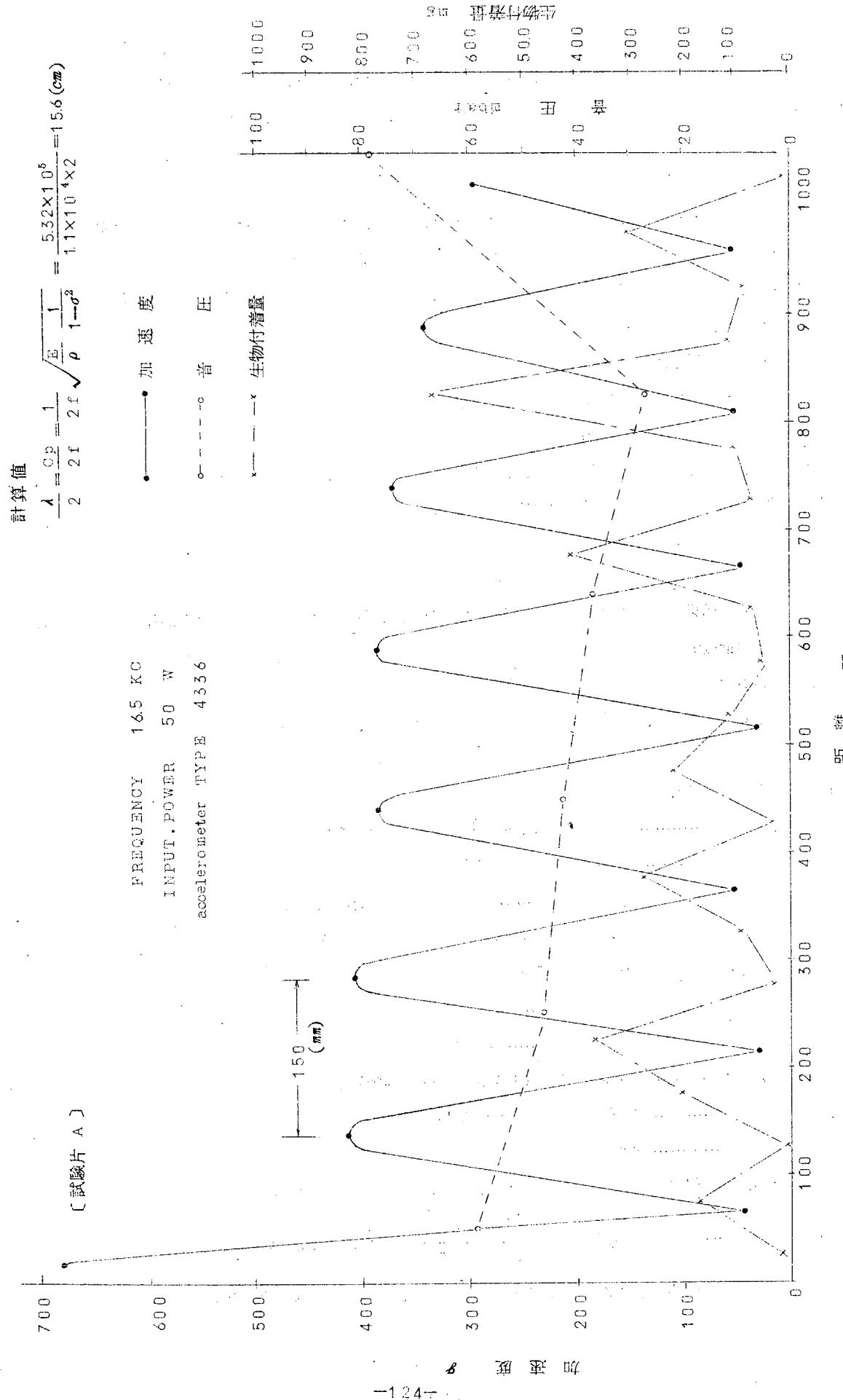


図5.1 第1回臨海浸漬実験綱要基礎実験結果

計算値

$$\frac{\lambda}{2} = \frac{C_p}{2f} = \frac{1}{2f} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \cdot \frac{1}{1-\sigma^2} = \frac{5.32 \times 10^5}{1.1 \times 10^4 \times 2} = 15.6 \text{ (cm)}$$

[試験片 B]

FREQUENCY 1.66 KC
INPUT POWER 80 W
accelero meter TYPE 4336

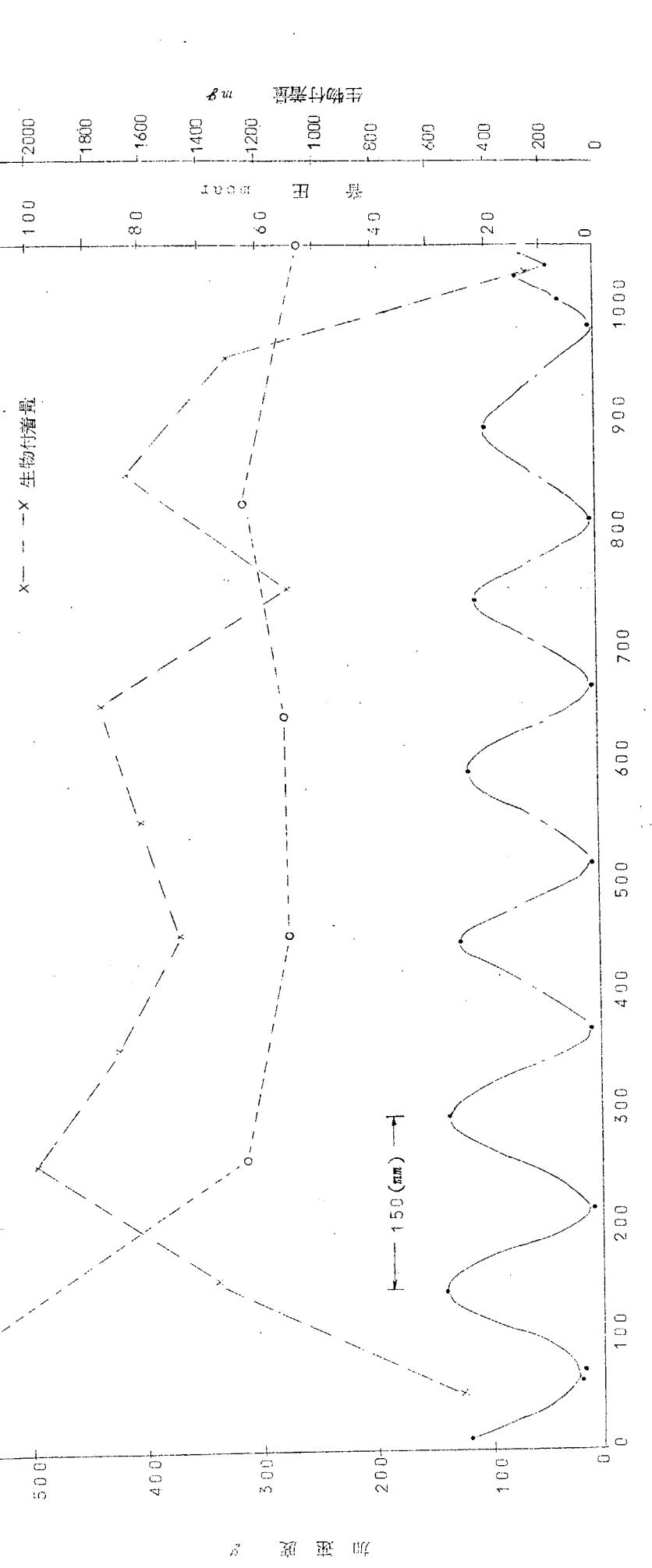


図 5.2 第1回臨海浸漬実験継波基礎実験結果(続き)

この結果では特に試験板 A では鋼管を防汚効果が見られるが、B では有効な防汚効果を示していない。

これらの結果から次の事実が認められる。

- (1) 振動の腹部 (Loop) と節部 (Node) とで生物付着量に明確な差がある。
- (2) 加速度 150 g では生物が付着し、少なくも 200 g ~ 300 g 以上が防汚上必要な g と考えられる。
- (3) 縦振動も横振動も防汚効果に大差がない。
- (4) したがって超音波による防汚の機構は、板の振動加速度が支配的であり、鋼板表面の輻射音圧は必ずしも支配因子ではない。

実験に用いた試験片の形状とその面上の振動の模様を図 5.3 に示した。また、加速度の分布と 3 週間 (8/7 ~ 8/27) の浸漬実験の結果の生物付着状況からみた防汚限界線を図 5.4 に示した。

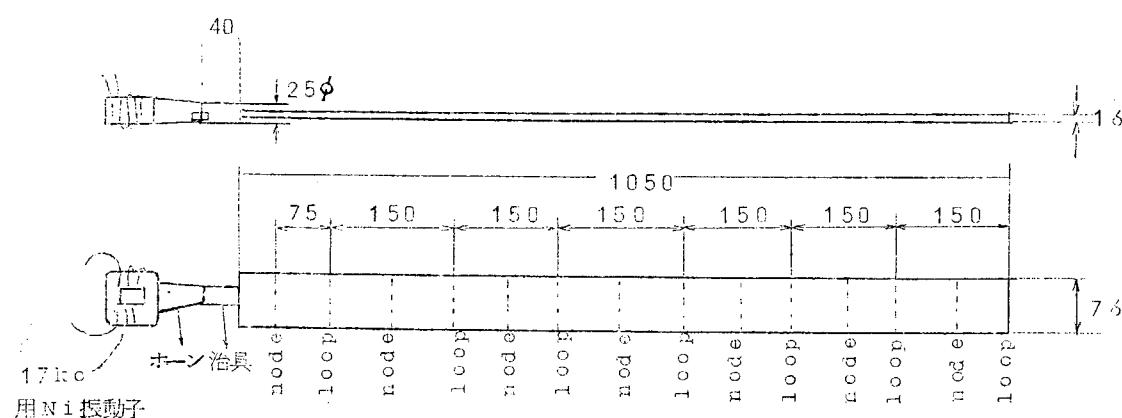


図 5.3

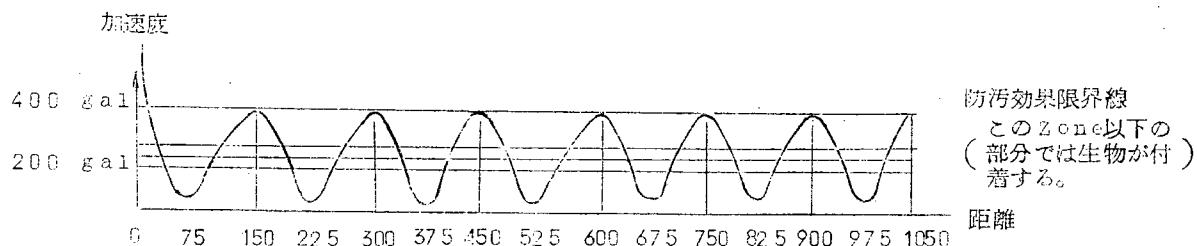


図 5.4

なお、同様の試験板を用いて曲げ振動を付与したものについての浸漬試験結果を図 5.5 に示した。

試験板は 1050 (L) × 40 (W) × 1.6 (t) mm、浸漬期間は 4.2.1.0.4 ~ 1.0.2.4 (約 3 週間)、 $f=16.9$ KC、水中での加速度 400 g 程度であり、防汚作用については縦波の場合とほとんど同様であった。

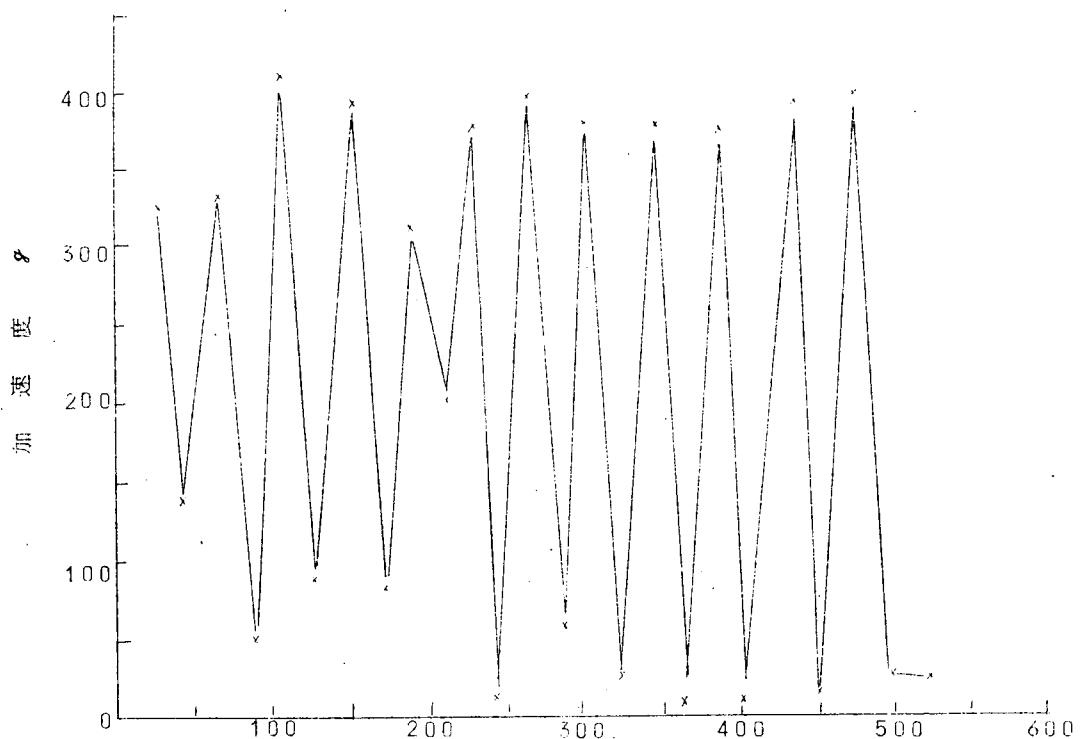


図 5.5 曲げ振動による防汚効果

5.2 縦波付与に関する基礎実験

曲げを伴なわない縦波の付与方法は、非常に多くの技術的困難を有しており、とくに船体のような大構造物に対しては至難とも思われる。

しかし、曲げ振動の減衰性の大きさを考えた場合、超音波防汚の実用化には、いかにしても縱振動の付与方法の確立を計ることが必要となってくるので、ここではその基礎的資料をうるための諸実験を行なった。

5.2.1 端面駆動による付与

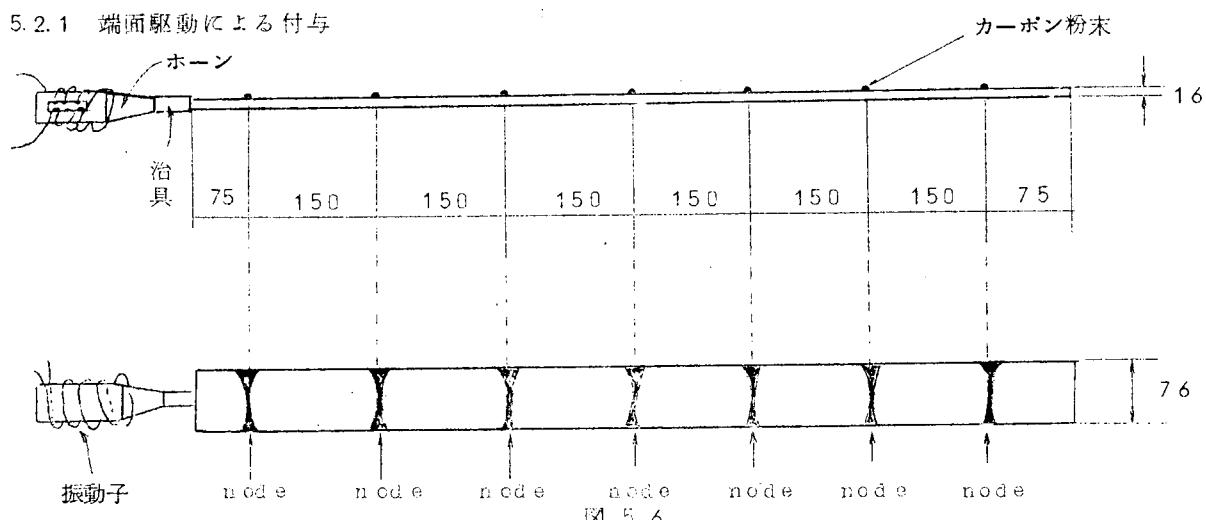


図 5.6

1.7 K.C の縦波の半波長は 1.5 cm であるので、長さ 1.05 cm の鋼片は 1.7 K.C で共振状態となり定常波が立つ。

1.5 cm おきに Node が存在するのでカーボン粉末などを撒けば図 5.6 のように Node の位置には粉末が留まるので振動モードを直接見ることができる。

起振には端面に円粒状の治具を溶接して、振動子ホーンを治具の先端にネジ止めした振動系によった。

図 5.7 は長さ方向の加速度分布を示す。次に鋼片の幅巾が広くなると、横にも高次の振動モードが存在するようになるので単純なモードではなく、複雑なモードを示すようになる。この場合の加速度分布を図 5.8 に掲げた。

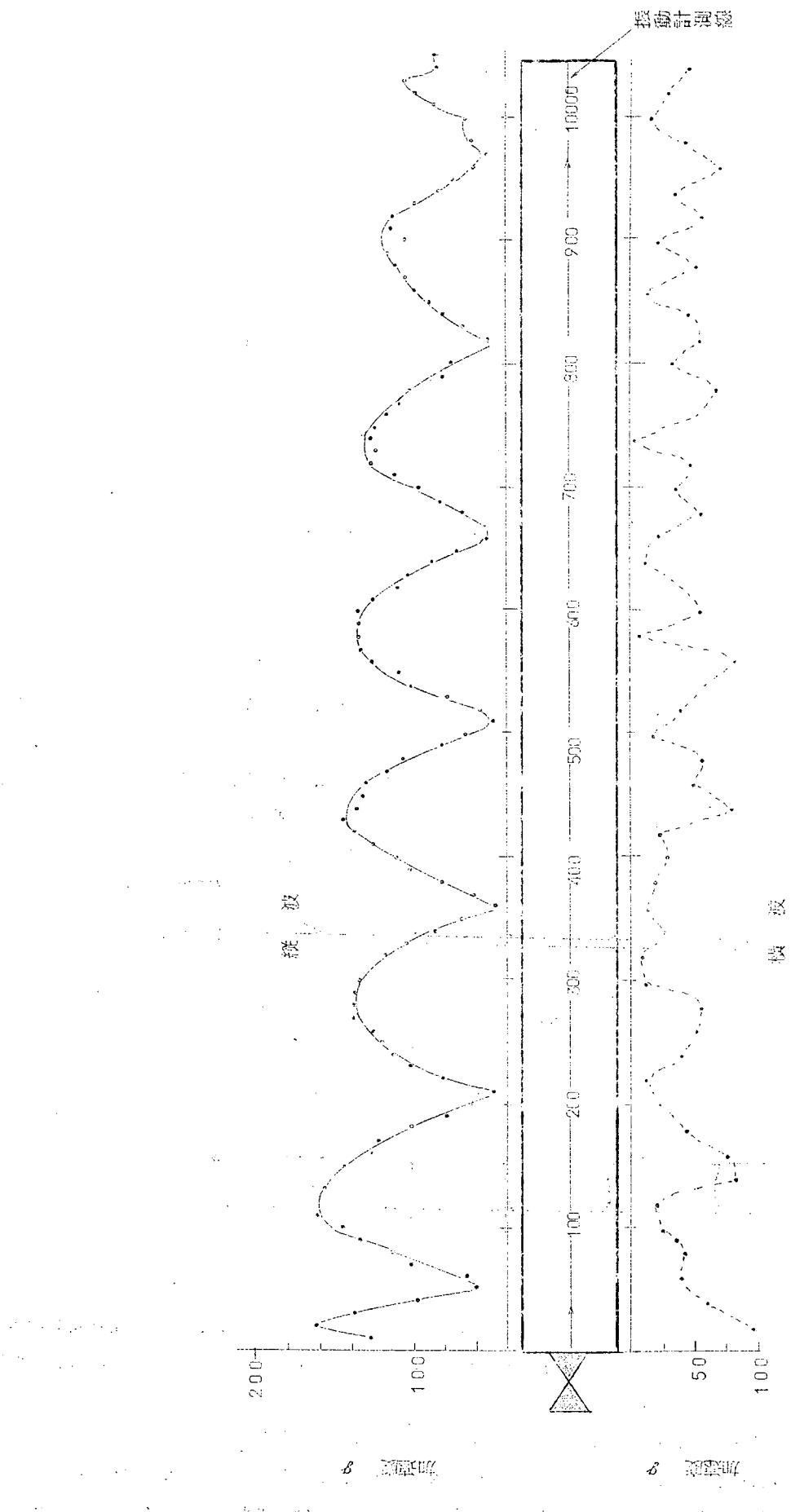
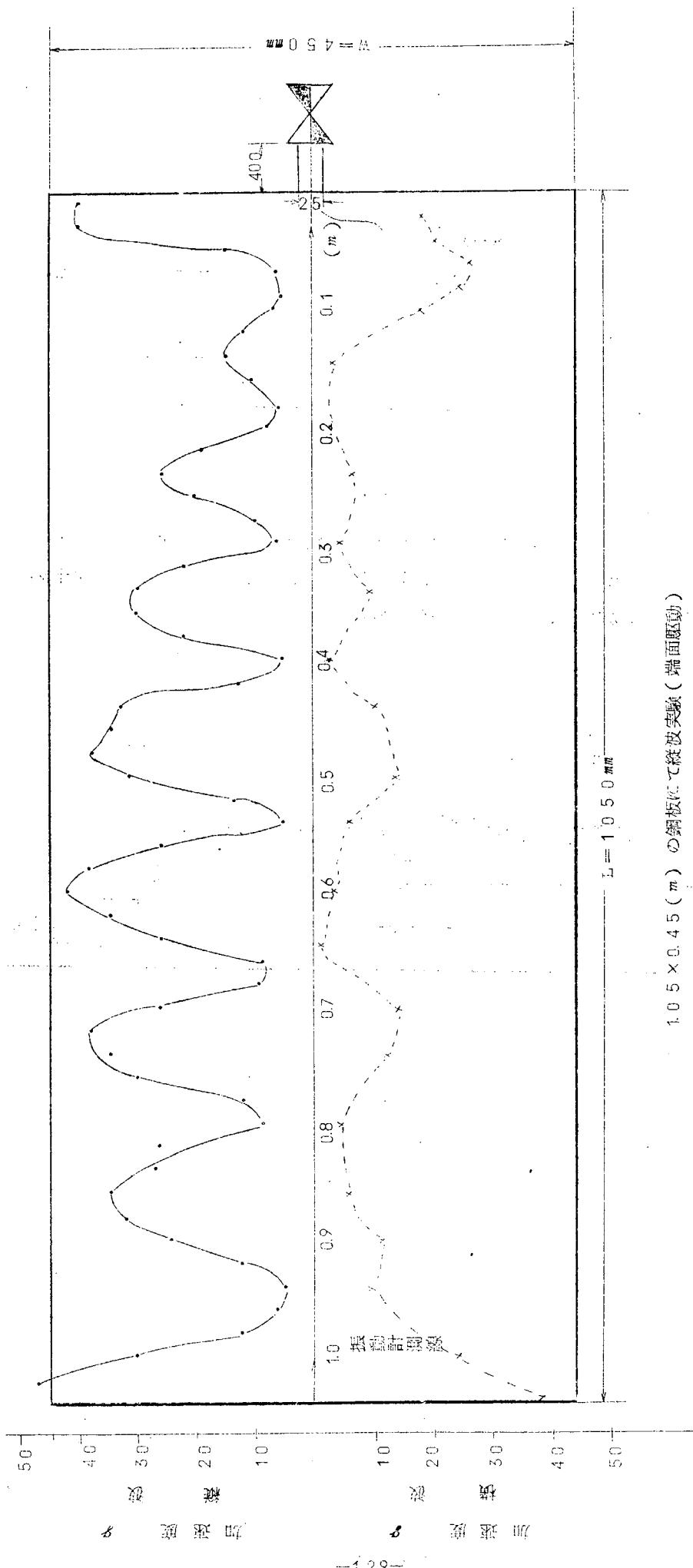


図5.7 縦波の基礎実験(端面駆動)
鋼板 $\theta = 10.50$ (mm) $t = 1.6$ (mm) $W = 7.6$ (msec)
Accelerometer Type 4356 Voltage Sensitivity: 50.9 mV/g
Frequency: 16.7 kHz
input power; 20 w



1.05 × 0.45 (m) の鋼板にて緩波実験(端面運動)

図5.8 緩波による鋼板(中央部)の加速度分布測定

$f_0 = 17.434 \text{ k}\cdot\text{c}$ P.U. = $5.09 \text{ mv}/\varphi$
 $Pow = 20 \text{ w}$

5.2.2 側面駆動による縦振動の付与

前節に述べた端面駆動法は実船に適用する場合、不適当な点が多いので鋼板間に溶接した治具を介して縦振動を付与する方法について調査して見た。

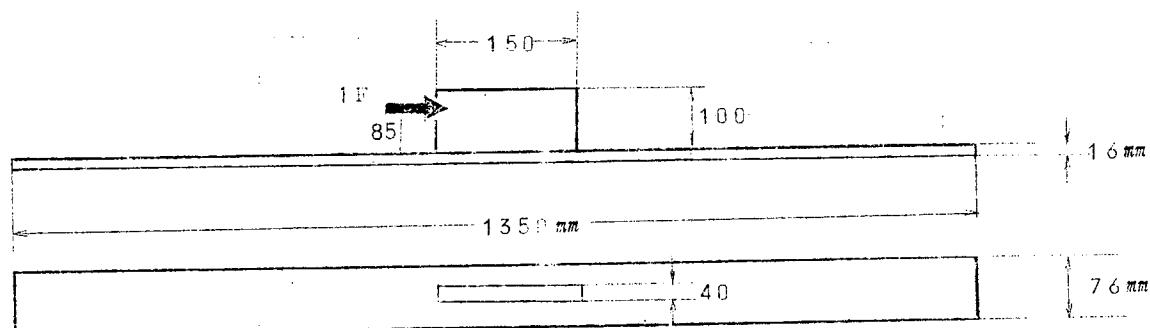


図 5.9

すながち、図 5.9 のように直方体の治具を 9 節の縦振動共振板上に溶接した側面駆動系の場合の振動モードは端面駆動に見られたような単純な縦振動共振モードは全く見られなくなり、図 5.10 の振動分布計測値からも判るよう、明らかに純粹な縦波ではなく、曲げ振動が優勢となってくる。

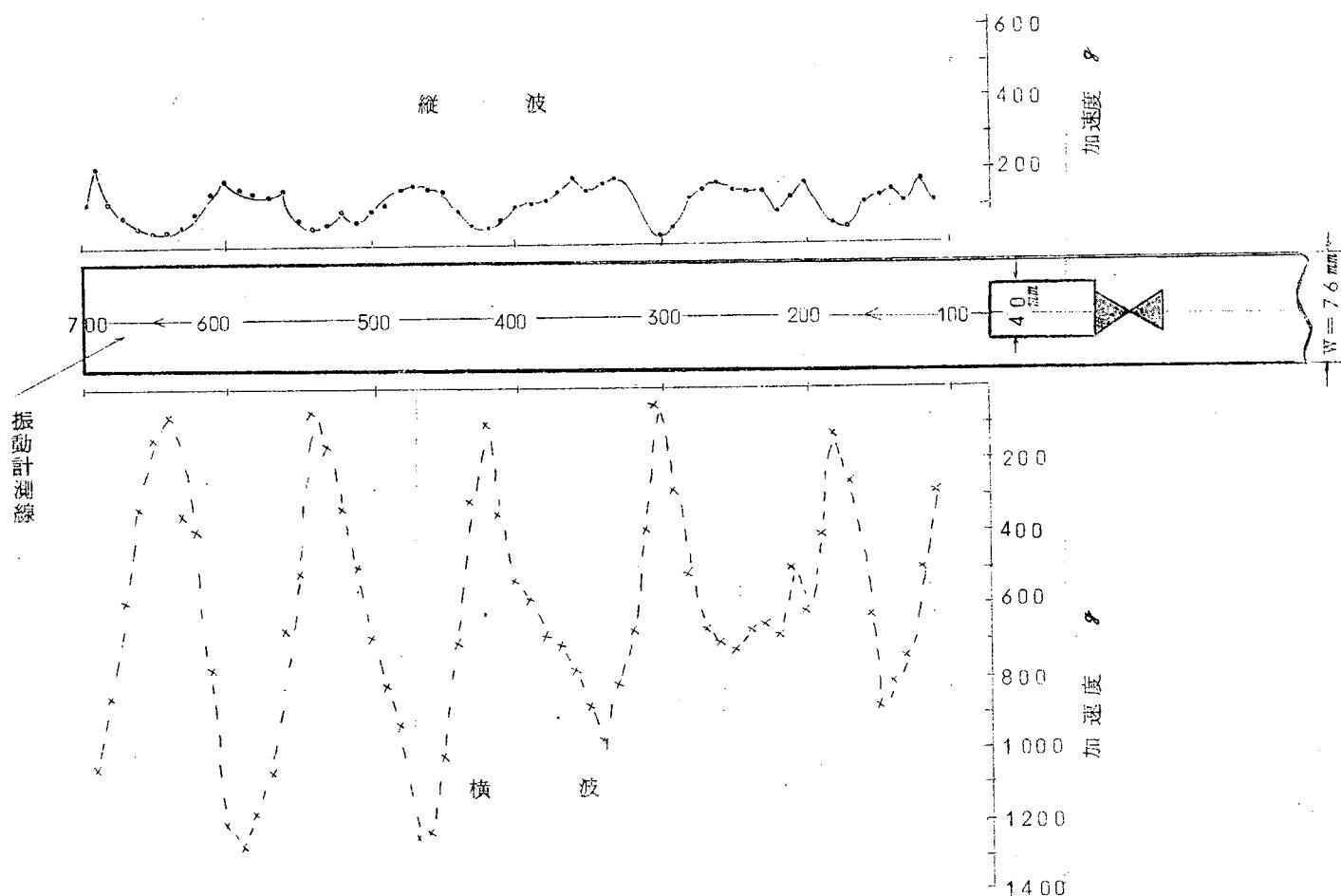


図 5.10 縦波の基礎実験(側面駆動) 取付治具 $150^L \times 100^H \times 40^W$

鋼板 $\ell = 1350$ $t = 16$

Accelerometer Type 4333 Voltage Sensitivity 5.09 mV/g

Frequency 16.416 KC Input power = 20 W

これらの理由は、主として上部に付着した治具の剪断振動、起振力による曲げモーメントなどによると考えられ、治具自体が完全に rigid でないことも理由の一端となろう。

次に曲げモーメントによる影響を見るために、起動力の高さ（試験片の中立軸からの距離）を変えて図 5.11 のように実験を行なった。

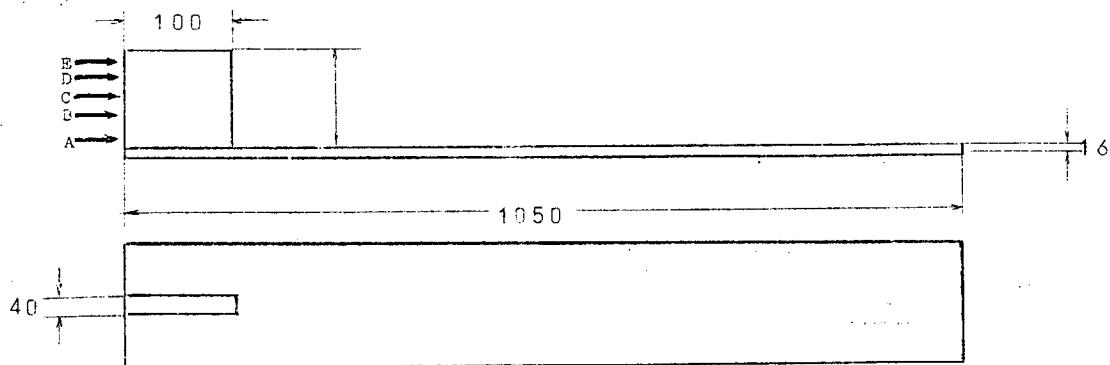


図 5.11

これらの場合の励振モードの一例を図 5.12、5.13 に示したが、これらのモードと加速度（縦振動と横振動の加速度）実測結果とから総合して、駆動点が最も低い 'A' 点以外では単純な縦波は得られないことが判った。
(実船ではこのような低い駆動点での駆動は困難である。)

5.2.3 縦振動共振ビーム治具による付与方法

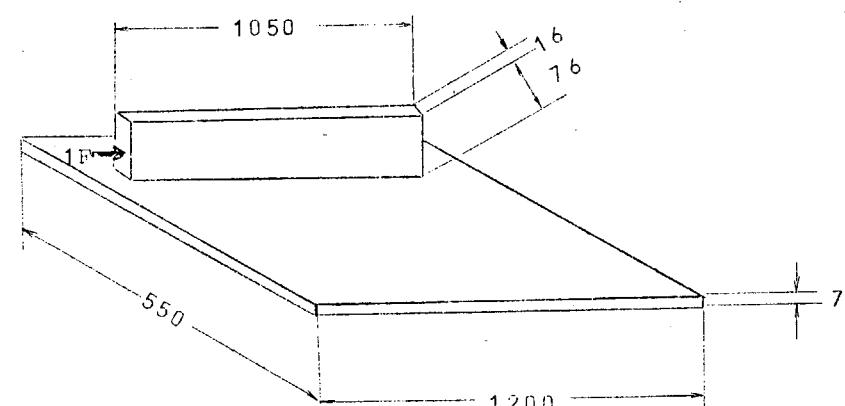


図 5.14

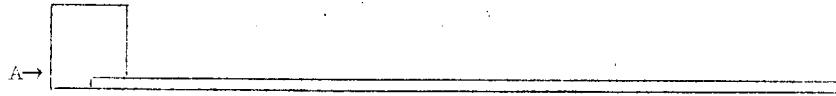
5.2.1 のような端面駆動の縦振動共振ビームの一端を、薄い平板面に溶接すると、ビームが共振状態で振動すれば平板もそれに従って振動することが考えられるので、図 5.14 のような試験片を用いて実験を行なった。

実験によれば、単独では縦振動共振状態にある治具は平板と溶接することにより複雑な振動をすることになり、振動の分布も図 5.15 に示すように変ってしまい、振動モードを見てもはなはだ不規則であり、ビームの振動について平版が振動してゆく様子は見られなかった。

5.3 むすび

超音波船底防汚の研究の一端として、伝播減衰の極めて小さい縦振動を用いる可能性を明らかにするとともに平板への縦振動の付与方法に関する基礎実験を行なった。

平板への縦振動付与方法については本実験でもなお不明確の点が多い上、実船適用上のポイントを把握するに至っていないが、一応二、三の実例について振動モード・加速度分布の実態を知ることができた。



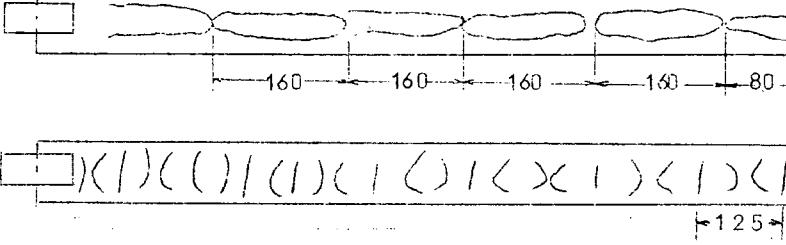
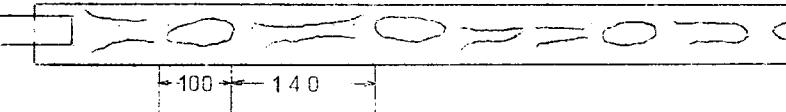
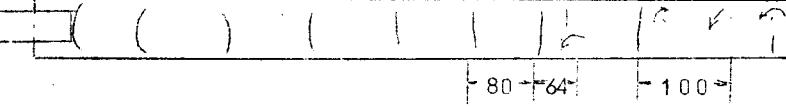
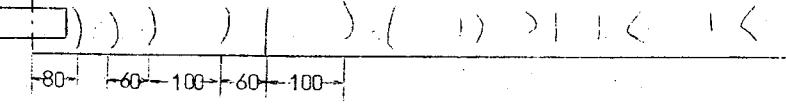
- 1) 
 $f = 14.839 \text{ kHz}$
 $* (\frac{\lambda_p}{2} = 180 \text{ mm})$
- 2) 
 $f = 16.909 \text{ kHz}$
- 3) 
 $f = 17.275 \text{ kHz}$
- 4) 
 $f = 16.138 \text{ kHz}$
 $* (\frac{\lambda_p}{2} = 16 \text{ mm})$
- 5)
 $f = 16.133 \text{ kHz}$
- 6)
 $f = 18.107 \text{ kHz}$
- 7)
 $f = 21.118 \text{ kHz}$
- 8)
 $f = 19.968 \text{ kHz}$
- 9)
 $f = 21.611 \text{ kHz}$
- 10) 
 $f = 20.07 \text{ kHz}$
 $* (\frac{\lambda_p}{2} = 13.3 \text{ mm})$

図 5.1.2 端面駆動に縦振動モード（駆動点：A）

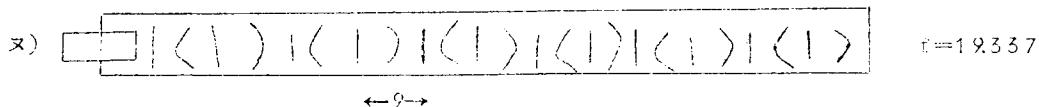
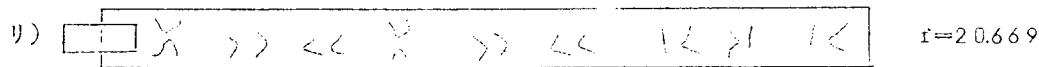
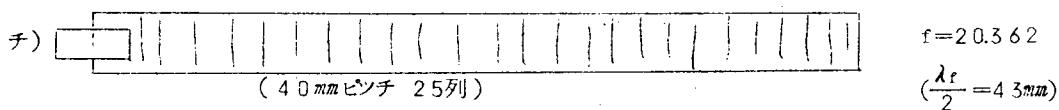
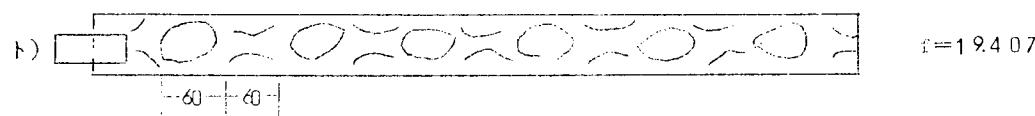
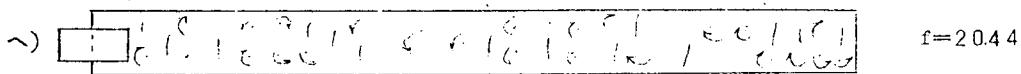
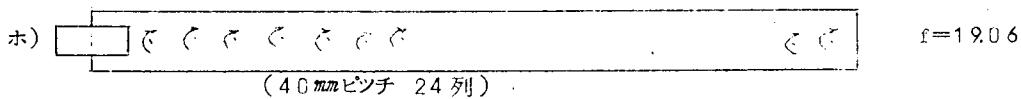
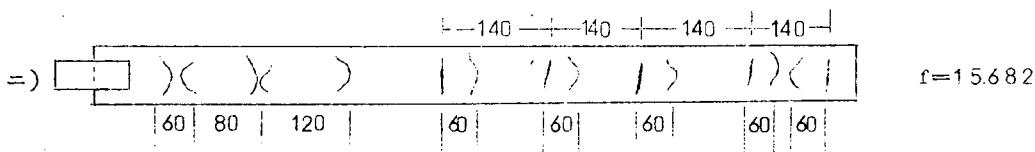
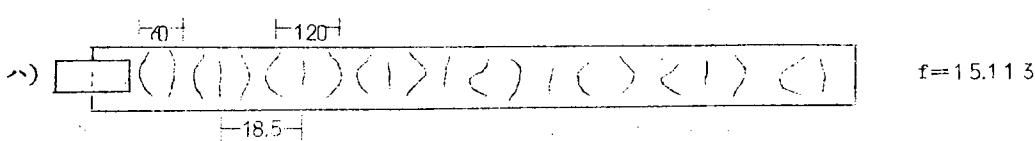
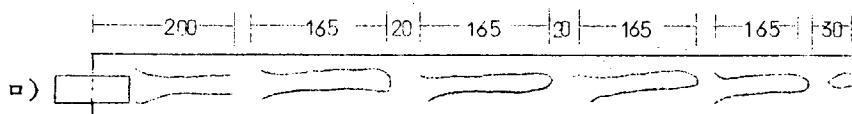
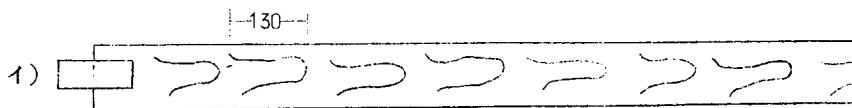


図 5.1.3 端面駆動による継振動モード(駆動点: ③)

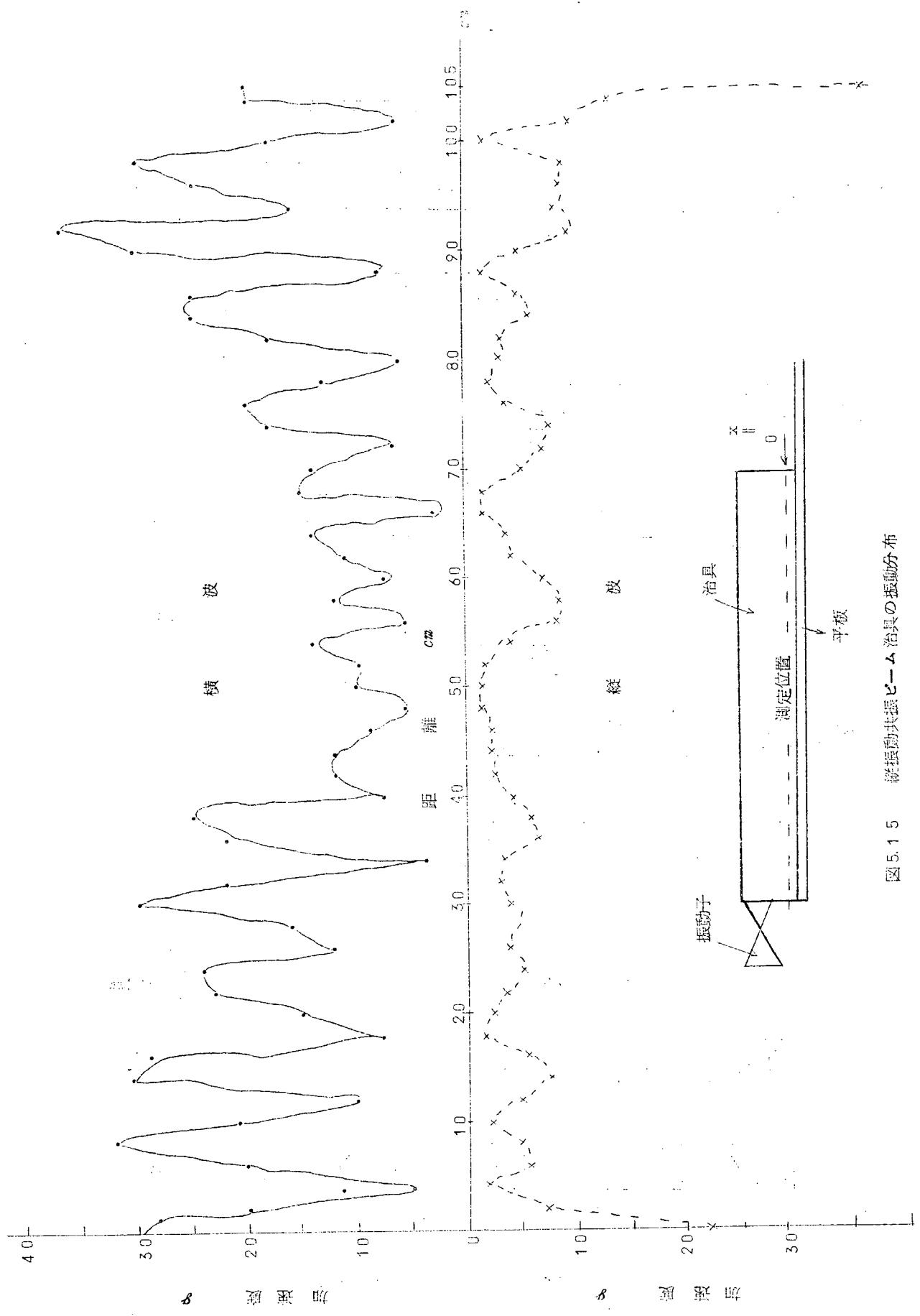


図 5.1.5 振強動共振ビーム治具の振動分布

$$\left\{ \begin{array}{l} f = 16.34 \text{ Hz} \\ P_{im} = 100 \text{ W} \end{array} \right.$$