

日本船舶振興会 昭和46年度補助事業
"船体の構造計算方法の精密化に関する開発"

研究資料 No. 164

第132研究部会

実船塔載用波浪計に関する研究

報告書

昭和47年3月

社団法人
日本造船研究協会

132 研究部会報告 替 正誤表

誤

正

20頁 表2.4.2下から4行 ホトマルク 102 ホトマル 7102

22頁 15~16行 反射波との干渉で (削除)

はしがき

本報告書は、日本船舶振興会の昭和46年度補助事業「船体の構造計算方法の精密化に関する開発」の一部として、日本造船研究協会が第132研究部会においてとりまとめたものである。

第132研究部会委員名簿（敬称略、順不同）

部会長	田宮 貞（東京大学）	
幹事	泉 晃（三菱重工業）	岩柳 順二（船舶技術研究所）
	横竹 信次郎（日立造船）	尾花 皓（運輸省）
	河村 四朗（気象庁）	雁野 昌明（日立造船）
	高橋 幸佑（東京大学）	坂井 欣一（海上保安庁）
	田口 賢士（大阪府立大学）	田中 銀造（航海訓練所）
	前田 久明（東京大学）	舛田 吉郎（日本海事協会）
	光易 恒（九州大学）	山内 保文（船舶技術研究所）
	渡辺 四郎（川崎重工業）	
委員	岡田 高（沖電気工業）	梶田 悅司（石川島播磨重工業）
	立木 正昭（佐世保重工業）	西岡 正美（日本造船工業会）
	根角 幸明（日立造船）	福田 淳一（九州大学）
	藤田 孝（三菱重工業）	藤原 労夫（名村造船所）
	堀之北 克朗（運輸省）	望月 光宣（三井造船）
	山口 雄三（住友重機械工業）	

目 次

1. 昭和46年度研究調査概況	1
1.1 研究調査の概要	1
1.2 波浪計測法および機器	1
1.3 実船試験用波浪計の選定	2
1.4 関連諸問題の調査、研究	3
1.4.1 船体による大洋波の擾乱	3
1.4.2 レーダによる波浪のマクロ的観測	4
1.4.3 その他の	5
2. 波浪計の改良と開発	6
2.1 加速度計式波浪計	6
2.2 水圧検知式波浪計	8
2.3 クローバー型波浪計	10
2.3.1 構造	11
2.3.2 測定量	11
2.3.3 波浪計の検出器の性能	12
2.3.4 波に対する波浪計の応答	12
2.3.5 結語	13
2.4 レーザ使用波浪計測装置	17
2.4.1 レーザ出合波浪計研究の目的	17
2.4.2 レーザによる測距法	17
2.4.3 位相差測距方式の原理	18
2.4.4 レーザ波浪計測装置	18
2.4.5 実験結果	21
2.4.6 考察	24
2.4.7 まとめ	26
3. 実船計測	27
3.1 平塚沖の実験	27
3.1.1 実験の概要	27
3.1.2 水圧検知式波浪計	28
3.1.3 加速度式波浪計	30
3.2 博多沖の実験	34
3.2.1 概要	34
3.2.2 加速度式波浪計	38
3.2.3 水圧型波浪計	39
3.2.4 水圧型自記式波浪計	39
3.2.5 クローバー型波浪計	40
4. あとがき	42

1. 昭和46年度研究調査概況

1.1 研究調査・概要

当132部会の目的は、昭和48年度実船試験のために、信頼できる波浪計を開発製作することにある。しかし部会としては同時に今后行われる他の実船試験に際しても、波浪計測のより容易化、かつ適切正確に行えるよう、計測原理、計測記録表示装置に関する一般的基礎的研究もとづく研究開発を行ひ船舶用波浪計のレベルを向上させることが重要であるとの認識のもとに、事業を推進した。

今年度の事業内容を大別して、次の3項目としたところが出来た。

- (1) 波浪計測の原理および機器の調査
- (2) 実船試験の利用可能な波浪計の改良、開発研究
- (3) 関連諸問題の調査研究

(1)は主として既存の原理、機器に関する一般的調査であり、(2)は直接関連する事項についての調査、研究である。(3)は(1)(2)の一端につなげて次章以下に詳述されるので、本章では(1)(3)について概況を説明する。

1.2 波浪計測法および機器

海洋波の計測原理や機器の種類は非常に多い。対象と沖合波浪はかぎつても、時間的および空間的にはかなり大きさと不規則度があり、また注目する波浪特性により、適切な波浪計として種々の方式が考えられる。波浪情報を利用した立場を船舶工学上局限して、これを船体運動に主用するのみ、強度振動や推進性能に着目するので、波浪計に要求される性能や使用法が変わってくる（参考）¹³。さらに計測の実施については、専用の觀測船や基地を用いるか、巡視船等を利用してとか、一般商船を使用するかなどの事情は大きくかわってくる。当部会としては、当初の目的に従ふべきをめざしつつ制限のもとに、より適当な波浪計測法、計測機器を開発する必要があるが、最初から狭い範囲に限定しては、見落しをくさる危険もあり、また実船試験の具体的な姿が未定の部分が多いため、年度半ばまでを費して出来たばかり広く波浪計の調査を行った。

一般に船舶用波浪計として利用できる計測法や、機器の review については山内委員が担当し、船体構造計算法開発を目的とする実船試験の立場から現存機器の得失、原理の変換轉用の可否等について慎重に検討した。

一方わが国で現用され、または波浪計として転用可能な見込のある若干の計器については、関係委員等からくわしい説明を聽取り、研究推進に資する資料とした。その名前等は次にあげる所である。

クロ一小型波浪計(九大), 加速度ゲイ型波浪計(東大),

水圧ゲイ型波浪計(大府大および東大), レーザ反射型波浪計(船研),

実航式波浪計(日本オセテニクス研),

ミリ波レーダーおよび超音波波浪計(港湾技研)

タツカ一波浪計および水圧ゲイ, 加速度ゲイ型波浪計(気象庁)

タツカ一波浪計および元の波浪記録(海上保安庁)

これらうち最初に記した四種については当部会の研究事項としてとりあげ、逐次研究進捗状況の報告をうけて検討を重ねた。またミリ波レーダーは全く海上陸上基地より使用して波長、波向等の概況を知るのに利用されてゐるが、当部会でもとりあげて検討することにした。これについては後にあれる。

1.3 実船試験用波浪計の選定

48年度に予定された実船試験については、その大綱もあきらかでない段階であつたが、おおよそあるいは姿を予定して波浪計開発の具体的な方向を設定せざるを得なかつた。このため供試船として、長さ200m, 50,000重量t, 15ノット程度の鉱石船を想定し、ここで使用する際具備すべき波浪計の性能について検討を行い、必要性能を具有し、しかも限られた時間内に製作・實用可能なものとして次の各種を選んだ。

(a) 船体に装着するもの。レーザ反射型(船研)

(b) 海上に設置使用するもの。加速度ゲイ型(東大), 圧力ゲイ型(東大, 大府大)

(c) レーダー波向計(川重, 大府大)

(a), (b)は一気にかけて波高の情報を時間べ一気に提供する。(c)はある面積をもつ海面上で、波峰の影像をえたえるもので、これから波長、波向等を知ることができる。このほかステレオ・カメラによつて海面状況を三次元的にとらえようとも予定したが、波浪情報としては不便な点(不備が多い)、一般的な状況記録装置と併せて波浪計のみでは不十分になつた。

上記を選んだ理由は、実船試験に必要な次の各要件を一度満足するに考へられたからである。

(1) 商用航海を行つてゐる商船上で使用可能など。(使用のたゞ停船、減速、転針等を要しないこと)

- (2) 実船上で使用実績があるか、全等と考えられる信頼性のあること。
- (3) 操作に人手を要しないこと。(実船上の全計測〔応力測定等を含めて〕は 2~3 人があてられることある)
- (4) 极端なシケを除き大波高海面で使用可能かこと。
- (5) 波高 1.5 mまでの精度 $\pm 10\%$ 。波周期 4~17 sec. 記録まで 3.
- (6) 少くとも 1 回 2.0 分の計測が出来ること。
- (7) 一式 1 億円以下で製作できること。

多くの波浪計は(1)に接触を利用できない。実航式はこの点に有利であるが、船の走行性能に不安があり、(2)(3)(4)に未知の因子や不利があると考えられた。しかしながら今后我々が設定した實船試験の要綱に大いに変更があれば、上記の計画と再検討する必要が生じ得るであろう。

レーザ反射型波浪計については(2)に接触するので一応予定からはずされた。アローナの大きさ、重量をかなり軽減出来るメリットがあり、将来多情報波浪計として利用の望もあるので、實用化をめざして鏡意開發を急ぐことにした。

冲合波浪計の一つのなまやせは、特にそれが大波高用のものになると、適當な検定、較正試験が困難なことである。陸地または海底に基礎をもつ波高計が利用できない場合はほとんどで、精度の確認がむづかしい。そこで實船試験には直接使用できないが、波浪計を實際海面上で精度を確認し、要すれば較正を行なうためアローナ型波浪計を製作することとした。この型式のものは英國において開発され、すでに實績をつんでいて信頼性の高いものである。波浪特性についても岸に 1 重の上下変位を知るものではなく、波面傾斜、曲率、波の進行方向に関する情報をも提供するので、現在資料のすくな方向性エネルギースペクトルについても、有効な測定値をもたらすと考えられる。

1.4 関連諸問題の調査、研究

1.4.1 船体による大洋波の擾乱

波浪計は船体の擾乱をうけない大洋波の性状をとらねる必要があるが、實際にはそれまで困難である。投げすて型の場合、船体との相対位置も不明確で、船体後方に伝播する船体の擾乱については距離とともに輕減されるとして、無視するほかない。計測時間と投下後 20 分、船速をかりに 1/4 ノットとするとき、平均的には船体後方 2~3 リンの海面情報をえられるが、これは船の長さの 20 倍程度で、船体近傍の擾乱は $1/5$ 程度に減少すると推定されるが、これがなぜ風向、船の針路、風速等にも影響され偶然に支配される面が多い。一方船体に

装着する波浪計は必然的に船体による擾乱波の影響をうける。この擾乱は基本的には船体によって大洋波が乱されることがほとんどとのと、船体の動搖運動によるものによって発生するものの和と考えられ、従来大洋波の平均周期を周期としてそのものが支配的なエネルギー配分をもつと思われた。この擾乱をうけることは常識的で船首前方で波を計測するのかよって推測されるが、従来このよどみ観察から船体近傍の波高分布を実験計測したり、理論計算した例はそれほど多く、また一々えらぶまでは現状ではある。幸い雁野委員が別目的で行った計算で船体中央部船側附近の波高を求められていて、それで説明と討論を行なった時、船速の相異があり、位置も限られていて一般的なことを推測することは不十分である。次年度の計画としてこの計算を拡張し、模型試験を併用して船体近傍の擾乱についてさらに定量的な検討を加え、船体に装着する波浪計設計の基礎資料を充実する予定である。この計算はあたり、船体運動等の計算によく用いられるストリーム法は、元来三次元計算（船体長さ方向に直角平面内）で、船首前方の波の計算には大いにでは無力であり、別の取扱いを考慮する必要がある。なおMITで行われた模型試験の結果を紹介され、船首前方における擾乱が存在するとの結論であるが、水槽水中的模型寸法が小さく、全体として精度に疑問があると指摘された。

1.4.2 レーダによる波浪のクロロ的観測

現在レーダ映像として、ある面種の波峰状況をうるえ上昇或程度成功し、陸上基地で観測に実用してみた例がある。船橋に設置されてる船用レーダをこの目的に併用さればはかなり便利であるが、現状では波峰の映像としてえらばれるメカニズムは不明な点もあり、計測用に別種特別の性能のものを用意する必要があるかどうかはつきりしない。今年度はしあたり、借用可能な船用レーダを機会の許す限り活用して、波向、波長等の計測が可能か否かを調査し、なるべく早く計測装置としての具体化を方向けて、努力を行なう。現状や問題点を参考されることは

- (1) レーダ映像の主として波面上の微細なあらぎ分布による乱反射によるものと推定され、波峰と風との關係で像が明視されたり、消滅したりする事がある。
- (2) 陸上ではミリ波レーダが多く用いられており、船舶工学の立場からはセンチ波レーダキサル検討は値があると思われる。
- (3) 船体動搖、振動等の影響
- (4) 映像のモーフロジー的意義の明確化等である。

1.4.3 等の他

1.4.1 の検討結果をまとめると、レーダー反射型波浪計を船体の上に装備するが最も効果的であるが、常識的に波浪計測に都合がいい行なわれた船首に突出させた場合、このように天候機知可能かを手順的に調査した。ガローブ主体の重量を100kg程度と假定し、喫水線上の高さを推定して、(つ)の表が示された時、出入港時等、異常に大きな干渉の有無を考慮すると、突出長さは船首垂線部より測って船長の5~6%程度の実現可能な限界と思われる。船首支柱の存在は、操船上に問題があるとの懸念があるが、大洋航行中はあくまでも配慮するに付なうとの意見である。今後波浪計測上の要件をつめ、もつとつとこんな構造上の検討を早期に行なうことを期待している。

海洋波の情報が不規則乱雑なままである。これを定量化するには普通工具やスベントルに直接してその情況を把握してみると、いかにもせよ極めて多量の情報を處理する必要がある。各部会では波浪計として各種をとり入れており、現在日本と伯の担当者の多くで種々改良工夫がなされていて、相互比較実験を行なった場合その成果を互いに部会にてアードバックスするには、データ処理に十分の配慮を行なう必要があるとの指摘が行われた。実船試験に当つては、元される情報量は飛躍的に増大するので、各部会は理 SR124 部会と協同して次年度にはデータ処理方式に関する調査を整えようとする準備中である。

最後に検査方法(如速度や水圧変化の信号を無線で本船にオーナーへ居り、電波法の規制を行なう場合)などの点、事務局を通じて關係法規、取扱規則を調査し、該許可申請設立、実験実施の際十分の注意をはらうとした。

2 波浪計の改良と開発

2.1 加速度式波浪計

加速度式波浪計は、洋上に投下したブイの上下加速度を無線送達し、本船上で受信後電気的に2回積分し、ブイの上下動変位としてペン書き記録器に連続記録させるものである。元来、本協会第124研究部会において航美中の実船計測用として、昨年度から開発してきしたものである。本部会ではさらに、ブイ形状、検出器、受信増幅器などに若干の改良を加えたものである。

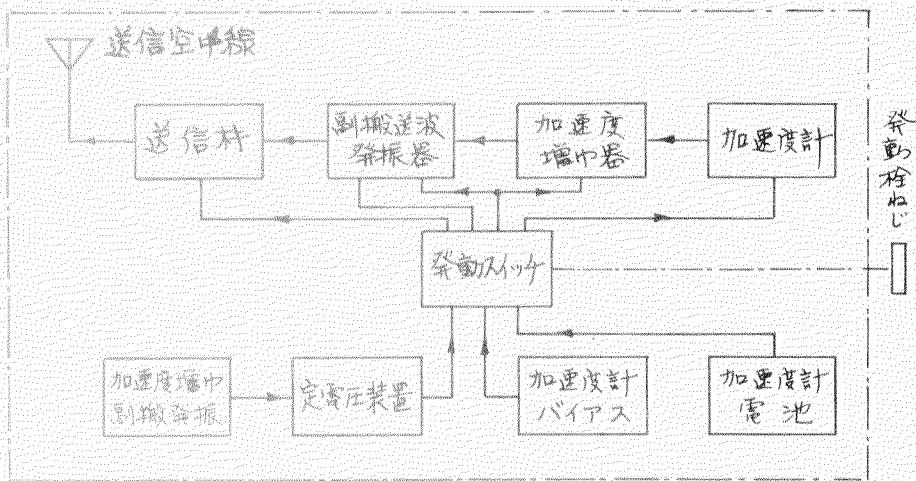
仕様の概略を表2.1-1に、プロック図を図2.1-1に、外観を図2.1-2および3に示す。検出素子は抵抗線ひずみゲージ応用の加速度計で、ジンバル吊りの重錘に取付け、鉛直方向の加速度のみを取出すようになっている。第124研究部会の計測では、約35 km の距離まで受信計測が可能であった。

表2.1-1 加速度式波浪計仕様

測定範囲	波高	0.05	—	15	m
	波周期	3	—	20	sec
測定精度	波高	周期 3 sec の波に対して +10 % " 8 " ± 5 " " 20 " -10 "			
	波周期	± 0.5	%		
送信ブイ	送信用波数	40.68			MHz
	発振方式	水晶制御	24 倍		
	変調方式	副搬送波を用いた FM-FM 方式			
	送信空中線	垂直ロッドアンテナ	90 cm		
	電源	乾電池 UM-1×3, 水銀電池 H-L×4, HM-4N×1			
	電源持続時間	2			時間
	信号通達距離	20			km
	出力	0.5			W
受信空中線		簡易型 半波 ダイポール			
受信積分器	受信機	水晶制御 Z 型スーパー ヘテロダイイン			
	整流器	内蔵 +12 V および -12 V 定電圧			
	電源	船内電源 AC 100V 50/60 Hz			
記録器		高感度ペン書き記録器			
重量	ブイ(電池を含む) 52 kg 受信空中線 2 フィーダー線 12	受信積分器 8 kg 記録器 6 付属品ほか 4	合計	84	kg

図2.1-1

加速度式波浪計
ブロック図



送信空中線

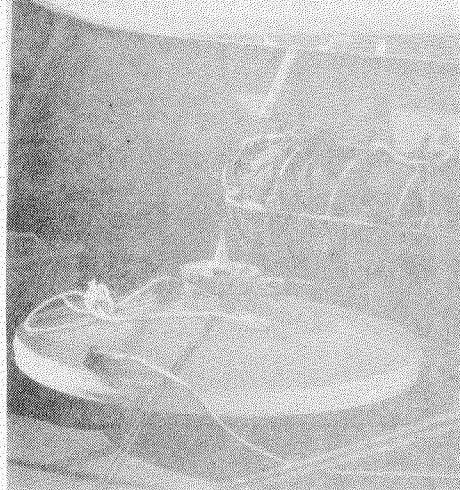
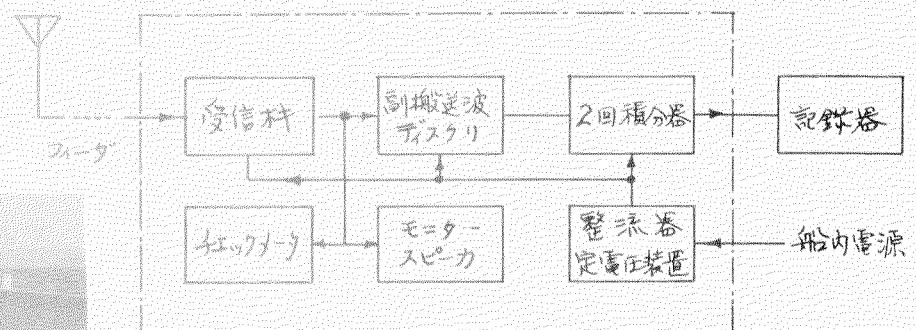


図2.1-2 加速度式波浪計

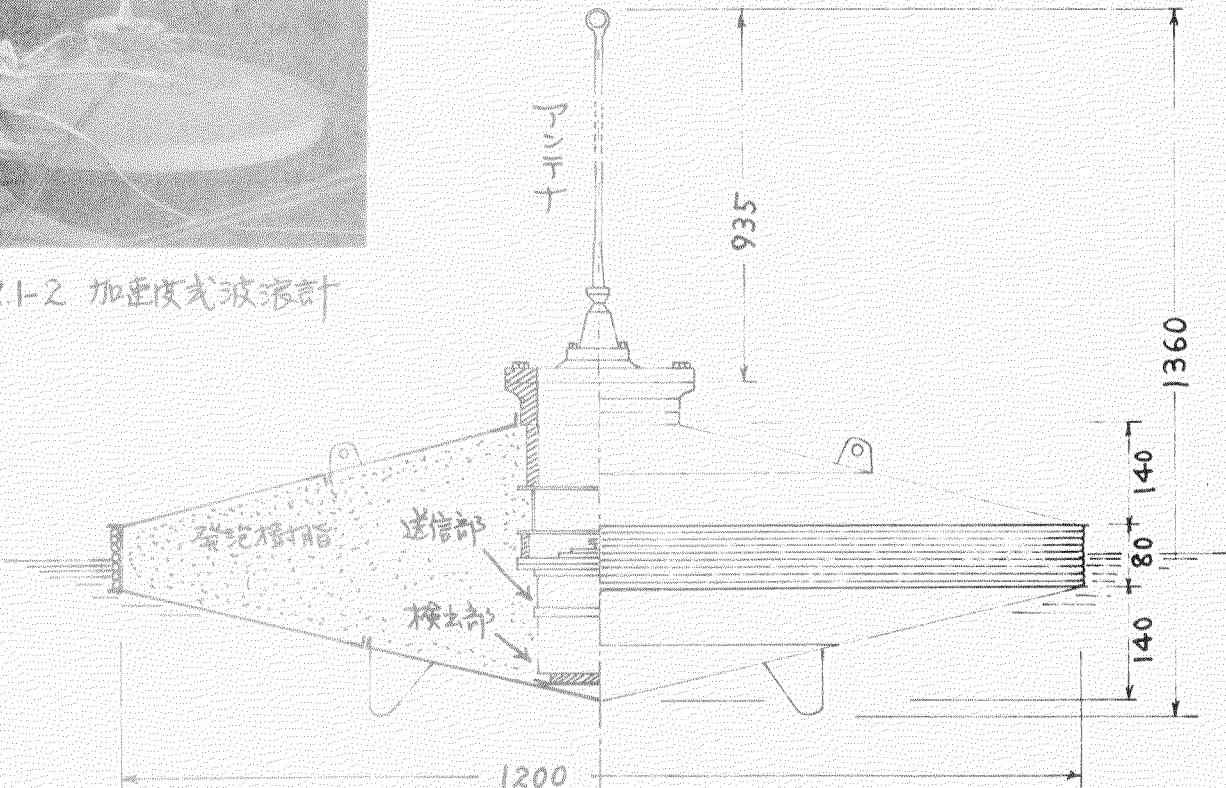


図2.1-3 加速度式波浪計ブイ

2.2 水压検知式波浪計

水压検知式波浪計は、水面のブイから水中に吊された圧力検出部に感知され、ブイの波に伴う上下動に起因する、水压変動量を波高の記録として扱うものである。この形式の波浪計はすでに波浪調査の実用機器として実績を挙げつゝあるものも多い。

この部会で使用した波浪計は、既存の波浪計について、その記録送受信部、記録部等について新しい機器を追加したものである。すなわち、ブイの作成、ブイ内蔵される通信機、A/D 変換部、タイマーおよび船上に設けられる受信機、記録器が整備された。

波浪計本体はブイの下方約20mに吊され、ブイとは吊り索およびコードによつて結ばれる。ブイは直径約1.2"であり上蓋に送信アンテナを持つ、観測船から投入されたブイは波浪の中と自由に漂流し、その設定されたタイマーによつて、一定休止時間とばれて、一定時間記録を船上に送る二種が生来る。信号はA/D 変換されて船に送られるので、送信の確度は高い。記録のサンプリング間隔は0.2秒、0.4秒および1.0秒の3種とし、これらを船上の記録部において任意に選ぶことができる。

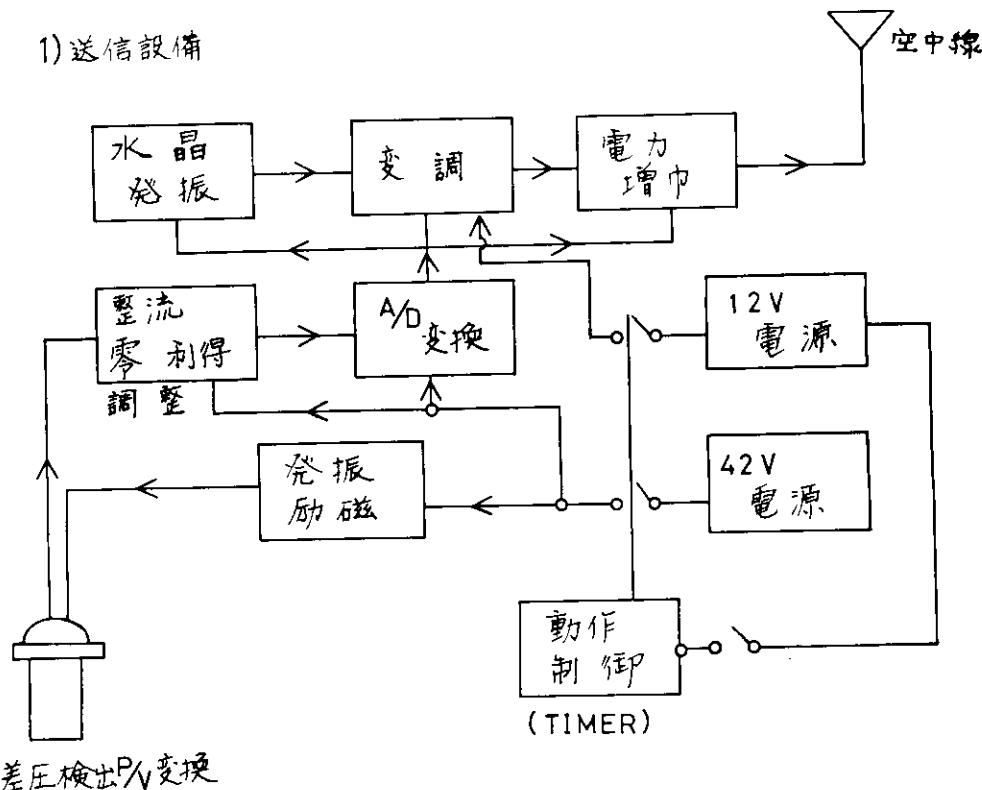
波浪計および送信、受信、記録部の仕様を表2.1-2に示す。波浪計およびブイの寸法、重量とも多少過大であつて、本部会の最終目標に合致しない嫌いがあるとか、これは波浪計本体に既存のものを用いた為であつて、性能を二分うることはなく、現状のものより更に小型化、軽量化することは容易である。

表2.1-2 水压検知式波浪計仕様

1. 波浪計本体	寸法	直径 19cm, 高さ 38cm
	重量	約 15kg
	測定範囲	波高 4m までに調整
2. 主ブイ	材料	F.R.P.
	寸法	直径 1.2", 高さ 0.73"
	重量(計器内蔵)	約 100kg
3. 送信部	送信周波数	42.00MHz (当初予定)
	発信方式	水晶制御方式
	変調方式	FM 变调による数値变调
	送信室中線	垂直ロットアンテナ 5/4
	電源	アルカリ蓄電池 12V " 42V

4. 受信部	電源持続時間	4 時間
	信号通達距離	20 km
	出力	実効電力 0.5 W
	受信室中線	アドックスアンテナ
	受信機	水晶共振ダブルスパヘロダ方式
	電源	AC 100V ± 10% , 50/60 Hz
	記録紙	紙幅 10cm 記憶方式 (20種毎8BIT)

1) 送信設備



2) 受信設備

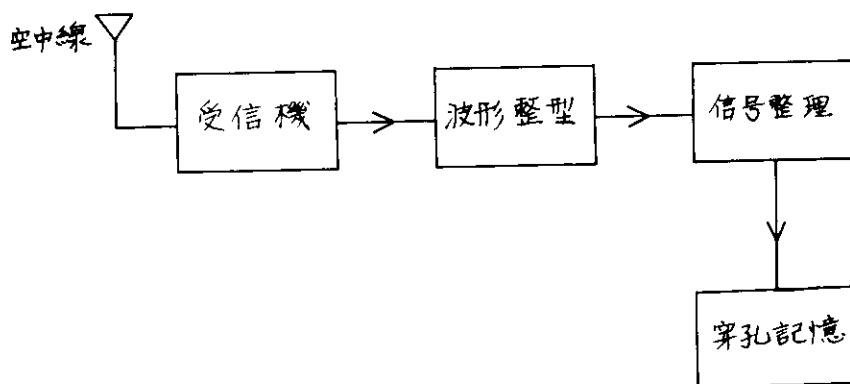


図2.1-4 水压検知式波浪計ブロック図

2・3 クローバー型波浪計

この波浪計は各種の検出器を内蔵したクローバー型のブイで、海面に浮んで、波による水面の動きに忠実に追尾して運動し、その動きをなわち上下動、傾斜角、方位角などを内蔵された検出器で精密に測定することにより、海洋波に関する高精度の情報（方向スペクトル）を得ることが出来る。

2・3・1 構造

この波浪計は図-1に示されたような構造を有し、次のような各部より構成されている。

(1) 金属パイプ製の組フレーム 1組、(2) フロート 3ヶ

(3) ジャイロその他の計測器を納入したケース 1ヶ (4) コンパスを納入した
ケース 1ヶ (5) 係留索ならびにケーブル 各1式

(1) 組フレームは、辺長約3.3mの正三角形に近い形をなし、この上にフロート、各種計測器を納入したケースなどが取り付けられており、計測中には、このフレームは3ヶのフロートに吊下げられたような状態になっている。ただし、このフレームは運搬時には3ヶに分解することが出来る。

(2) 3ヶのフロート（直径 1m、高さ 20cm）は、フロートの中心部に近い位置にある2軸シンバルを介して組フレームの各頂点に近い位置に辺長2mの正三角形を構成するように取り付けられており、組フレームに対して全方向に30°まで自由に傾斜することができる。各フロートのフレームに相対的な傾斜角はフロートに内蔵されたボルテンシオメーターにより精密に測定される。

(3) 組フレームの中央部には、パーティカル・ジャイロ、加速度計、電源装置（DC-DCコンバーター）ならびに各種増幅器などを内蔵したケースが固定されている。内蔵されたパーティカル・ジャイロにより、波浪計全体の傾斜角が測定され、ジャイロに取り付けられた加速度計により、波浪計全体の上下方向の加速度が計測される。

(4) 組フレームの上方には吊支柱を介して水密ケースに納入された特殊なマグネット・コンパスが取り付けられており、これにより、波浪計の方位角を検出することが出来る。

(5) このブイは係留索（中6mmステンレス・ワイヤー 長さ 200m）により船に係留されて航測に使用される。係留索には10m間隔に浮子が取り付けられる。この装置に対する電源（DC-24V 5A）の供給ならびに各種の計測信号（7種類）の船上の記録装置への伝送のために、12心キャブタイヤ・コード（長さ 230m）が使用され、このコードは 航測中には係留索に沿わせて10m間隔で固定される。係留されて航測に使用されている状態は 図-2の上段に示されている。

2.3.2 測定量

3ヶのフロートの位置をA, B, C, ジャイロ
および加速度計の位置をDでそれぞれ表わし、水
平座標x, yを図のようにとる。波による水面の
変位を $\eta(x, y, t)$ で表現する。

(1) 辺長2mの正三角形ABCの中心Dにおける
ジャイロにとりつけられた加速度計により
フイの中央D点の波による上下加速度 \ddot{z} が測定
される。

$$\ddot{z} \longrightarrow \text{信号 } S_1 (\doteq \ddot{\eta})$$

(2) 同じくDにあるバーティカル・ジャイロ
により x軸およびy軸に対するフイの傾斜 θ_x および θ_y が測定される。

$$\theta_x \longrightarrow \text{信号 } S_2 (\doteq \partial \eta / \partial x)$$

$$\theta_y \longrightarrow \text{信号 } S_3 (\doteq \partial \eta / \partial y)$$

(3) 各フロートに内蔵されたポテンシオメーターによりフレームに相対的な各フロー
トの傾斜 $\theta_{x,i}$, $\theta_{y,i}$ ($i : A, B, C$) 即ち、次のような6ヶの量が測定される。

$$\text{フロート } A \quad \theta_x(A),$$

$$\text{フロート } B \quad \theta_x(B), \quad \theta_y(B)$$

$$\text{フロート } C \quad \theta_x(C), \quad \theta_y(C)$$

この5ヶの測定量より、波面の曲率 $\partial^2 \eta / \partial x^2$, $\partial^2 \eta / \partial y^2$, $\partial^2 \eta / \partial x \partial y$ が次のようにして近似的
に求められる。

$$[2\theta_x(A) - \theta_x(B) - \theta_x(C)] / 2\sqrt{3} \longrightarrow \text{信号 } S_4 (\doteq \partial^2 \eta / \partial x^2)$$

$$[\theta_y(B) - \theta_y(C)] / 2 \longrightarrow \text{信号 } S_5 (\doteq \partial^2 \eta / \partial y^2)$$

$$[\theta_x(B) - \theta_x(C)] / 2 \longrightarrow \text{信号 } S_6 (\doteq \partial^2 \eta / \partial x \partial y)$$

信号 S_4 , S_5 , S_6 を求めるための演算はジャイロケースに内蔵された演算増幅器を
使用して行なわれる。

(4) D部の上方にあるマグネット・コンパスによりフイ全体の方位の変動が測定され
る。

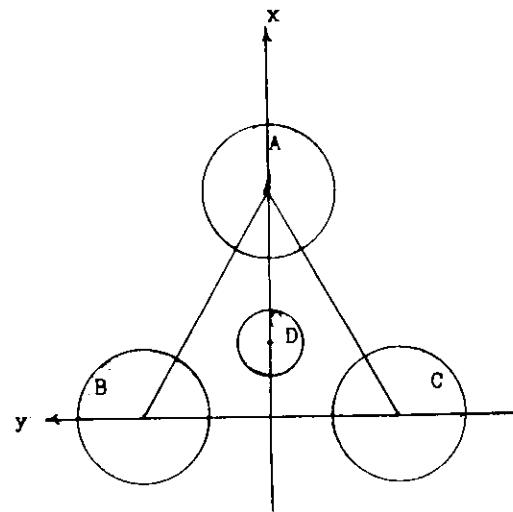
$$\theta^o \longrightarrow \text{信号 } S_7$$

測定中にフイの方位がいちじるしく変化した場合には、この方位の測定値をもとにし
てフイの回転角を補正し、静止座標系に対する波の方向特性が求められる。
この補正是電子計算機でデータを整理する過程で行なわれる。

以上の測定量ならびに対応する信号をまとめて示すと次の7種類である。

$$\text{測定量 : } \ddot{z} \quad \frac{\partial \eta}{\partial x} \quad \frac{\partial \eta}{\partial y} \quad \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} \quad \frac{\partial^2 \eta}{\partial y^2} \quad \frac{\partial^2 \eta}{\partial x \partial y} \quad \theta$$

$$\text{信号 : } S_1 \quad S_2 \quad S_3 \quad S_4 \quad S_5 \quad S_6 \quad S_7$$



2. 3. 3 波浪計の検出器の性能

波浪計に内蔵された各種検出器の性能をまとめて示すと次の通りである。

(1) 鉛直加速度 \ddot{Z} 加速度計

- (a) 測定範囲 $\pm 2g$,
- (b) 直線性 1%以内,
- (c) 分解能 0.1%
- (d) 固有振動数 45Hz

(2) 傾斜角(ピッチ、ロール) θ_x, θ_y ジャイロ・ポテンシオメーター

- (a) 測定範囲 $\pm 55^\circ$,
- (b) 直線性 0.5%以内,
- (c) 分解能 0.1°
- (d) 自立精度 0.4° 以内,
- (e) 自立速度 $20^\circ/5\sim 9\text{分}$

(3) フロート傾斜角 $\theta_x(i), \theta_y(i)$, ($i : A, B, C$) ポテンシオメーター

- (a) 測定範囲 $\pm 30^\circ$ (角度拡大比 1:5),
- (b) 直線性 0.2%,
- (c) ポテンシオ分解能 0.056% (角度で 0.04°)

(4) 方位角θ マグネット・コンパス(含変換器)

32方位 (分解能 11.25°)

2. 3. 4 波に対する波浪計の応答

この波浪計で直接計測される量は、波面の運動そのものではなく、波面に追従して動くクローバー型フイの運動である。したがって、計測精度を確かめるためには、波に対するフイの応答特性が問題となる。主要な測定量は、2. 3. 2で述べたように、フイ全体の上下加速度および傾斜角(2成分)ならびにフロート単体の傾斜角(実際には複数ヶの前の線型結合)であるのでこれらについて、それぞれ 波に対する応答が調べられた。実験は、津岸崎海洋災害実験所にある大型水槽($70\text{m} \times 8\text{m} \times 3\text{m}$)を使用して行なわれ、あわせて理論的な解析も行なわれた(力石、北、高木 1971、未発表)。

主要な結果は図-3、図-4および図-5に示されている。図-3は、フイ全体のheavingに対する応答の振幅特性で、実験値とともに理論計算の結果も示されている。破綻は、3ヶのフロート単体はそれぞれ波に完全に追尾したと考えた場合の理論的の応答(3ヶのフロートが空間的に離れて配置されることによる応答特性)であるが、比較的実測値に近いことがわかる。図-4は、フイ全体のpitchingに対する応答を示したものである。この図にも実験値とともに、フロート単体は波に完全に追尾したと考えた場合の理論的応答曲線が示されている。これらの結果より、この波浪計の応答が良好なのは 周期 3秒以上の波に対してであって 周期 2秒以下の波に対しては 無速に応答が悪くなることがわかる。図-5は、波面の曲率の測定を受け持っているフロート単体のpitchingに対する応答の実測値を示したものである。この場合には、応答曲線は周期1.6秒附近にかなり大きな値を示し、一種の共振曲線に近い形を示している。この原因は 現在のところまだはっきりしていないが、3ヶのフロートの流体力学的相互干渉の影響ではないかと考えられ、目下、この原因の追求と、特性の改善を目的とした研究がはじめられている。

以上のような波浪計の波に対する応答特性より考えて、この波浪計により正確に波の計測が行なえるのは、周期 3秒以上の波に対してであって、それ以下の短周期の波に対しては、この応答特性を考慮しないとかなりの誤差が生じることがわかる。一方、周期が非常に長くなると、曲率の測定精度が低下して來るので、この波浪計の測定対象となる波は 周期 2.5秒～17秒の範囲の波と考えられている。

2. 3. 5 結語

クローバー型波浪計による計測結果を解析して方向スペクトルを求める作業は現在進行中であるので、計測結果に関しては、次回報告されるが、これまでに行なわれた、本波浪計に関する各種テストならびに現地実験の結果をもとにしていえることは次のような点である。

- (1) 波浪計自体は相当荒れた海面でも充分使用出来、現在までの所 目視観測の波高 3m～4mまで使用出来たけれども、船上と海面との間のブイの昇降作業はかなり困難であった。普通の船では、波高 2m～3mが限度のように思われるし、特に 風速 10m/sを超えると作業が困難となった。
- (2) 波浪計の各種検出器の性質に関しては、ほぼ満足すべき結果が得られた。博多沖の実験においては、シャイロのロール角検出回路ならびに、フロートの傾斜検出用のポテンシオにトラブルが発生したけれども、後者は機械的構造を一部改良することにより、後者は、ロール角検出用ポテンシオを改良することにより 今後は充分さけられる見通しである。
- (3) 係留用ロープならびにケーブルにより、波浪計の運動が影響されるのではないかと心配したけれども、少なくとも目で見た範囲では、係留中のブイの波に対する追尾は 比較的良好のようであった。ただ、フロート単体の回転運動の応答は 水槽実験の結果にも見られるように多少問題があるので、今後の改善が必要である。
- (4) フロート単体と、ブイ全体とで 波に対する応答特性がかなり異っているので、データー処理上 注意が必要である。

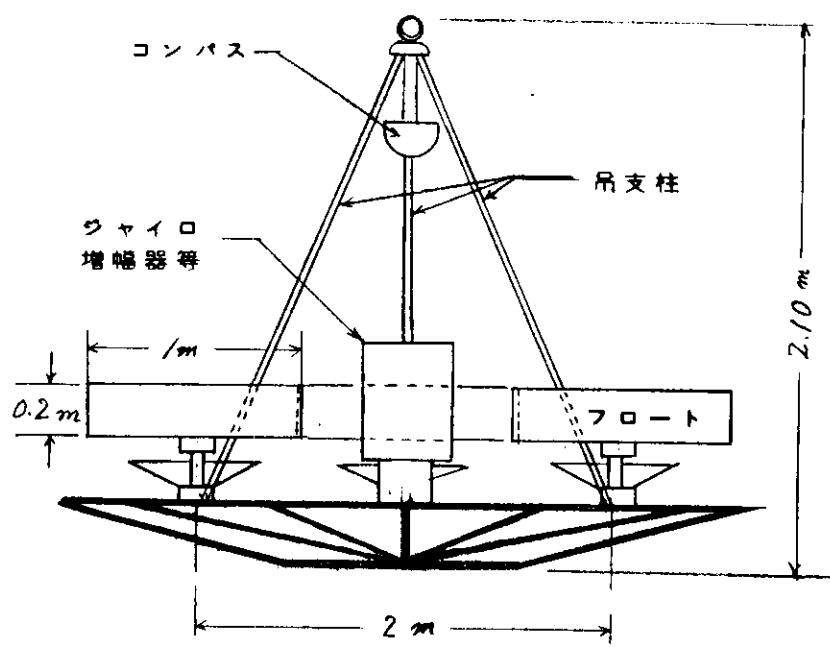
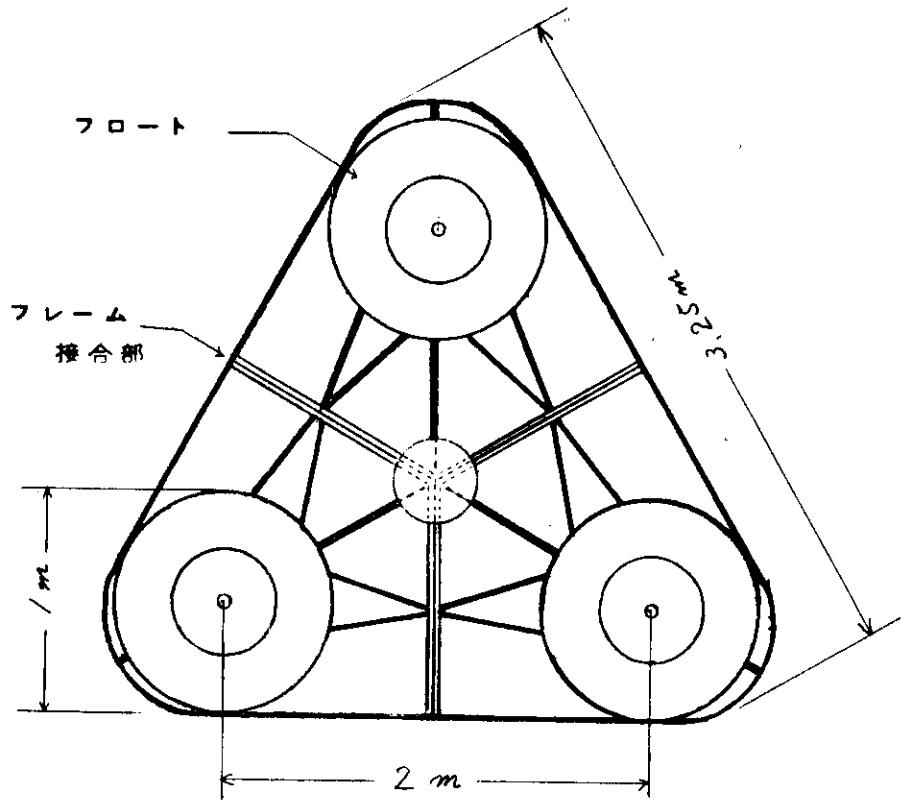


図-1 タローバー型波浪計 説明図

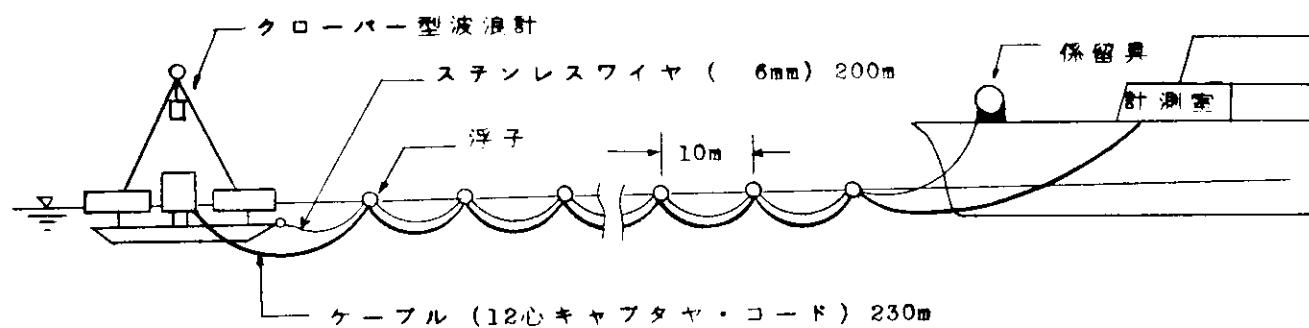


図-2 クローバー型波浪計による波浪計測の説明図

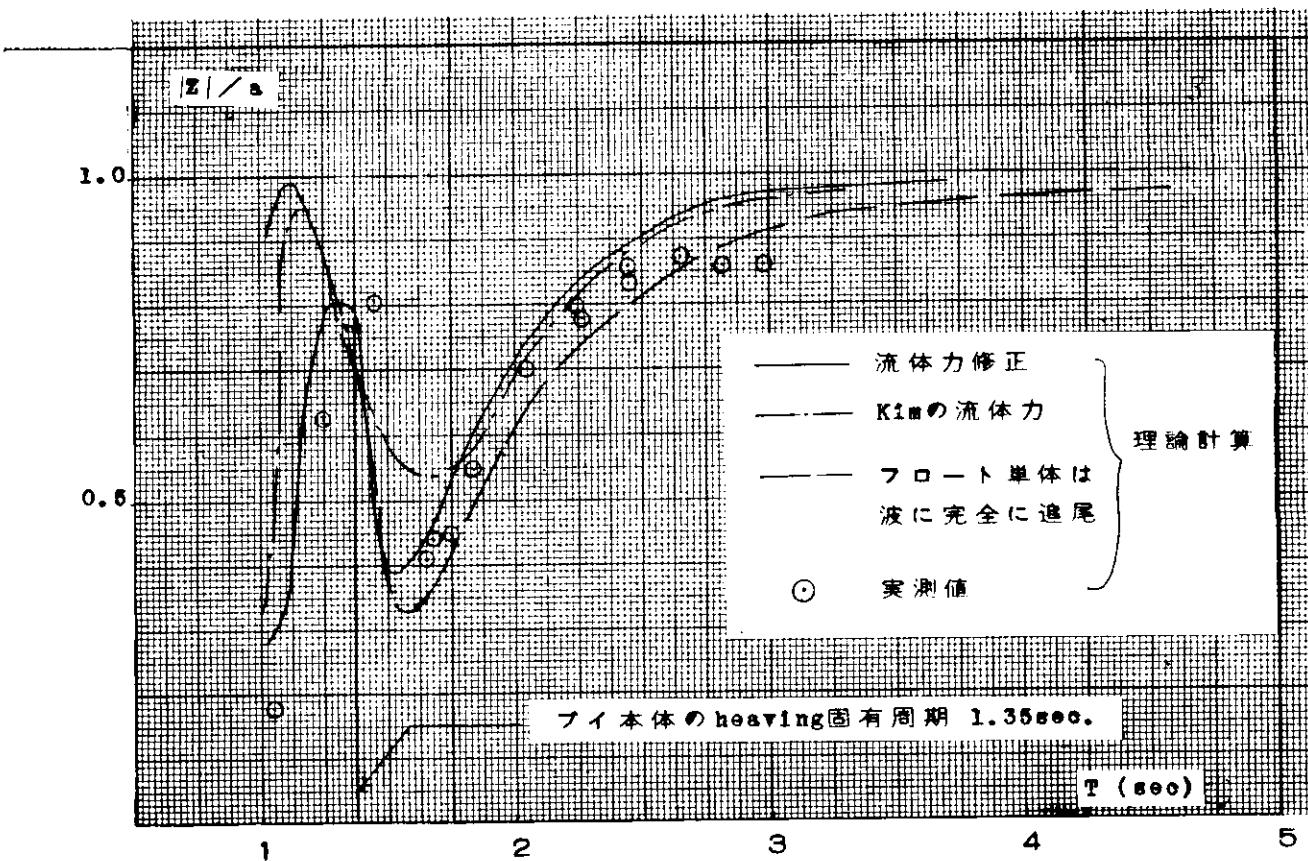


図-3 クローバー型波浪計の応答特性 (1)
(ブイ本体の Heaving Amplitude)

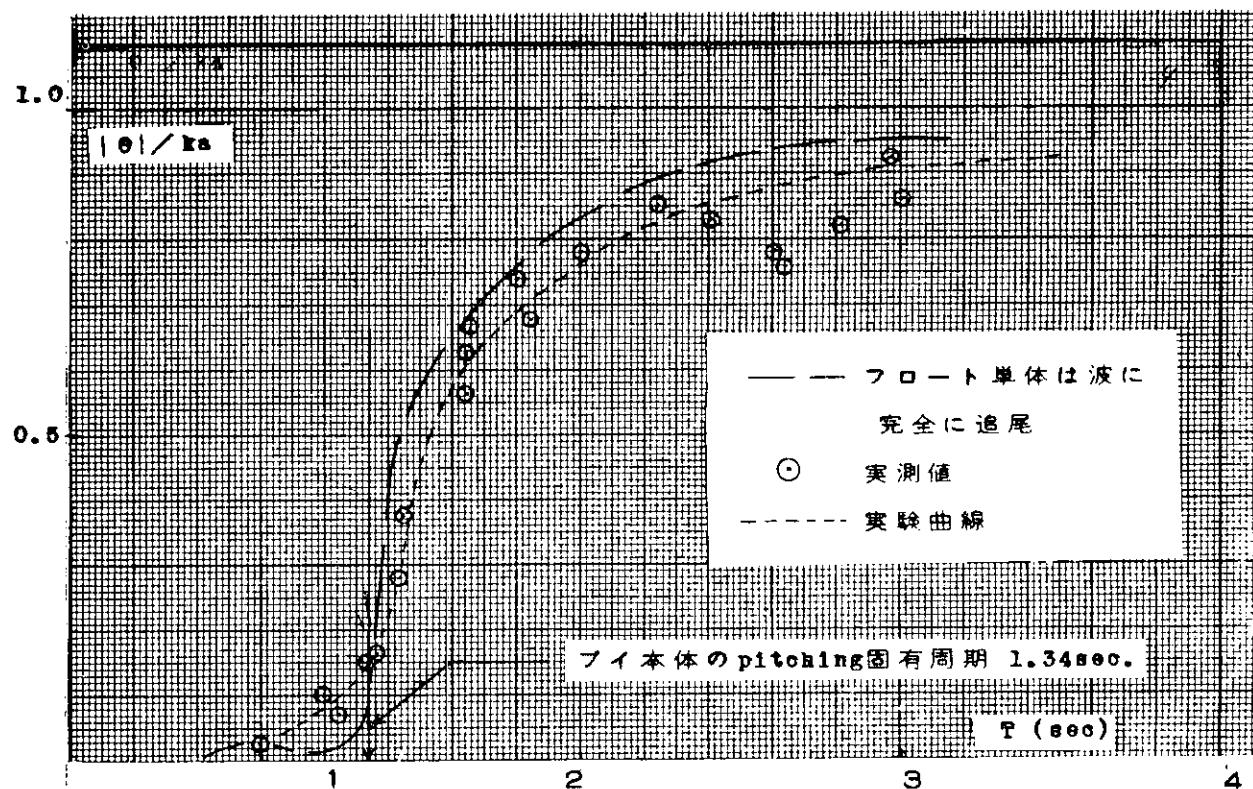


図-4 クローバー型波浪計の応答特性 (2)
(フィ本体の Pitching Amplitude)

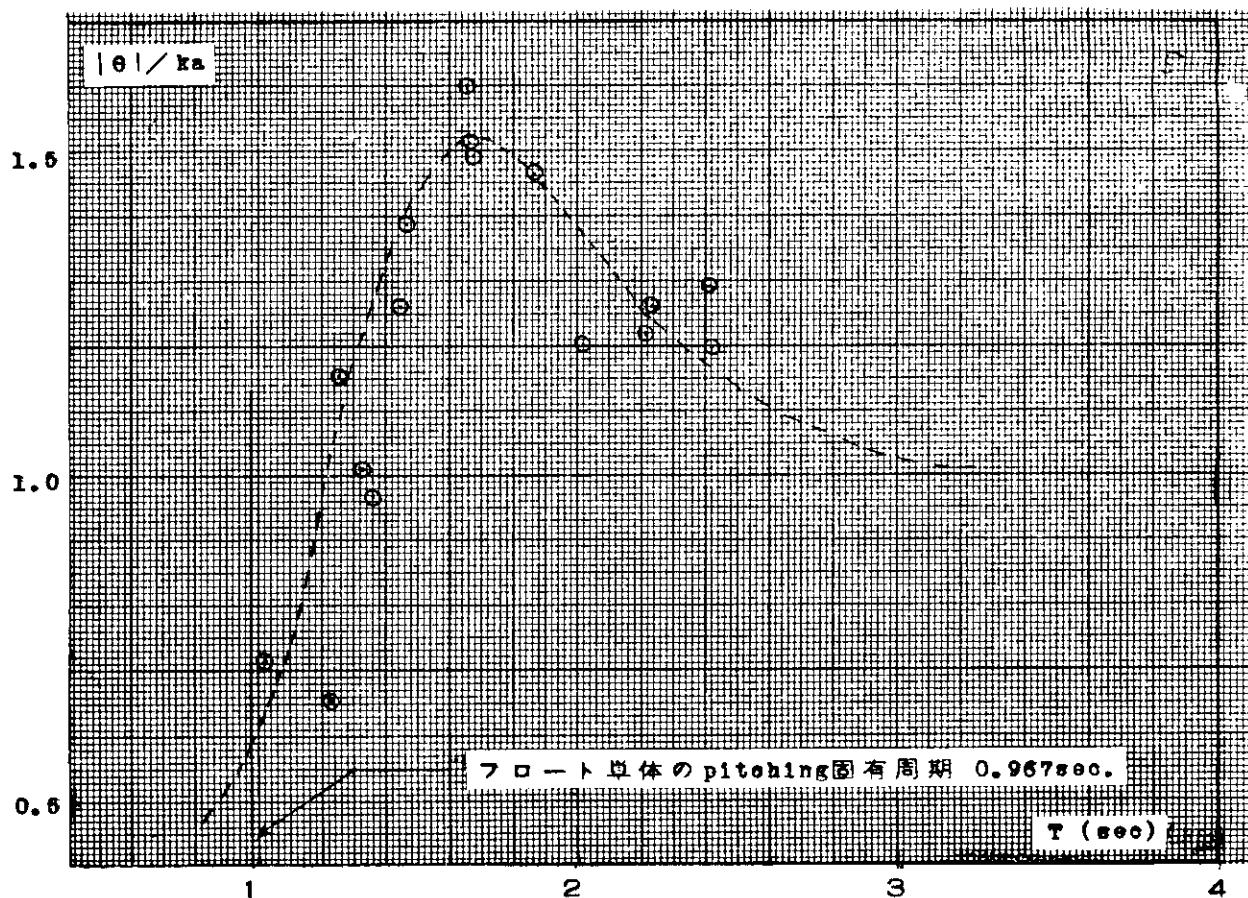


図-5 クローバー型波浪計の応答特性 (3)
(フロート単体の Pitching Amplitude)

2.4 レーザー使用波浪計測装置

2.4.1 レーザー出合波浪計研究の目的

本部会において研究する波浪計は、2種類に大別される。一つは、航行する船との相対位置は問題とせず、船に近接した海域の波浪観測を行なうもので、前節までに述べられたブイによるものがこれを代表する。他の一つは、船と波浪波形との相対関係まで含めて観測し、船の運動、船体応力等との対応を各時刻ごとに行なうもので、ここに述べるレーザー出合波浪計は、これに属する。この型の波浪計には、運輸省航海訓練所練習船「青雲丸」に装備された、電波の海面反射の位相差の波高による変化を測定する「出合波浪計システム」がある。昭和43年以来、海洋波浪観測を実施し、多くの波浪データを得ている。このシステムは、実船用波浪計の理想に一步近づいたものであるが、次のいくつかの欠点を持っている。

- (1) 送受信の電波ビーム中が半値中で 15.5° である。距離 30 mにおいて直徑 7.5 m の円にひろがり測定点の定義が不明確となり、短波長の波浪成分の観測に疑問が残る。
- (2) 船首前方の 1 点で計測を行なうために、波浪の指向性についての情報が得られない。測定用レーダードームの個数を増加すればよいが、計測システムの寸法および重量の点で困難である。
- (3) 船体運動を計測し、絶対波高を求めるための加速度計の出力より変位を求める二重積分回路のドリフト制限回路が不完全である。
- (4) 実船用波浪計としての耐航性が十分でなく、荒天時に使用不可能である。そこで、電波のかわりに、レーザーを使用してこれらの欠点のいくつかを克服することを試みることにした。レーザーは、指向性がきわめてよく、正確に測定点が定められること、反射ミラー等の使用で測定装置の軽量化が可能であること、測定点の増加が容易に考えられること等の長所を持っている。そこで、研究の目標として、従来の出合波浪計システムのレーダー波高計を、レーザー波高計におきかえることにおき、さらにレーザーの特長を利用した他の種類の波浪観測用測定器開発の可能性も検討することにした。

2.4.2 レーザーによる測距法

レーザー光は、光共振器（レーザー光源）の発振を利用して取り出された光であり、その波長は、紫外線領域より遠赤外線領域までの広い範囲のものが得られ、サブミリ波まで達している。その光としての特徴は、可干渉性、单色性、指向性、大強度があげられる。これらの特徴を利用して各種の距離測定器がつくられているが、大別して表2.4.1の3種類に大別される。表中の数字は、めやすである。

表 2.4.1 レーザー測距方式

測定方式	レーザー	測長範囲	精度
干渉による精密測長	He-Ne (安定化)	数 m	0.2 ~ 1 μ
レーザーレーダー測距	固体レーザー (Qスイッチ)	数 10 km	± 5 m
変調波位相差方式測距	He-Ne (CW)	数 km	± 1 cm

波浪観測に使用される可能性のあるのはレーザーレーダー方式と位相差方式であるが、レーダー方式は現在の技術水準では、現在の要求測定精度波高「1.5 mにおいて±10%」を満たすことはできない。そこで本研究では、位相差方式を採用することとした。

2.4.3 位相差測距方式の原理

位相差方式の原理

図 2.4.1 に示す。光源より出たレーザー光は、光変調器を通してその強度が、周波数 MHz の振幅変調を受け、測定物体に向う。反射光は、光電変換器で

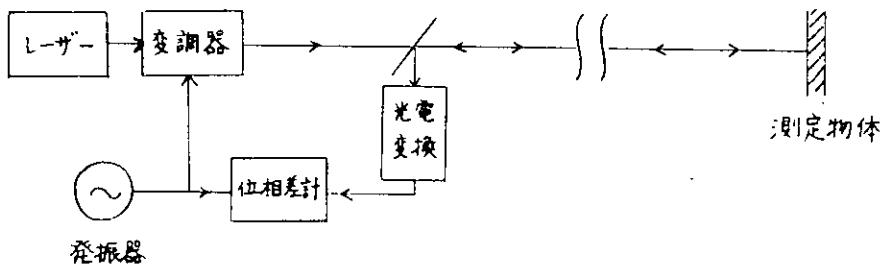


図 2.4.1 位相差測距方式の原理

受光されて、 $f \text{ MHz}$ の電気信号となる。この出力と、発振器より取出した基準電圧の位相の比較を位相差計で行なう。位相差計の測定範囲を $0 \sim 180^\circ$ であるとすれば、距離の変化をこの範囲に対応させねばよい。そこで、使用する変調周波数が決定される。測定する最大波高を $H_{\max} \text{ m}$ とすれば

$$f = 300 / 2 H_{\max} \text{ MHz}$$

となる。このときの測定精度は、位相差計の分解能 $\Delta \theta$ で制限され、精度 ΔH は次式であらわされる。

$$\Delta H = 300 \Delta \theta / 360 f \text{ m}$$

$$H_{\max} = 20 \text{ m}, \Delta \theta = 1^\circ \text{ とすれば}$$

$$f = 7.5 \text{ MHz}$$

$$\Delta H = 0.11 \text{ m}$$

となる。

2.4.4 レーザー波浪計測装置

レーザー波浪計については、海面反射強度、海象条件の影響、強い太陽光の影響等の問題が考えられるが、もっとも基本的なものはレーザー光の海面反射の機構であろう。この問題を研究するために、レーザー波浪計測装置を作成し

た。これは、レーザー波高計と水面反射実験水槽より成っている。写真2.4.1にレーザー波高計を、図2.4.2にそのブロック図を示す。

仕様を表2.4.2に示す。レーザー発振器の出力は10mWであるが、光学系を通過して、送り出される出力は1mW(開業式)程度となる。

このレーザービームの軸と、受光光学系の光軸は、最大3°の傾き

があり可変である。KDP変調素子の温度特性により、位相のずれがおこるため、基準の位相は、発振器からでなく、変調光をモニターで受光し、その出力電圧の位相を使用している。

写真2.4.2に水面反射実験用水槽を示す。2000×400×700の鋼製水槽で中央部に幅500のガラス窓がある。水槽の上には、微動ダイヤルで回転する100×100の反射ミラー(移動可能)が取付けてある。図2.4.3に概略を示す。光源を出た入射光は、水面と45°の傾きを持つ反射ミラーで、水面にはほぼ垂直に入射する。入射光は、大部分は水中に透過し、一部分が反射光となり反射ミラーによって、集光レンズに達する。波面の反射機構をし

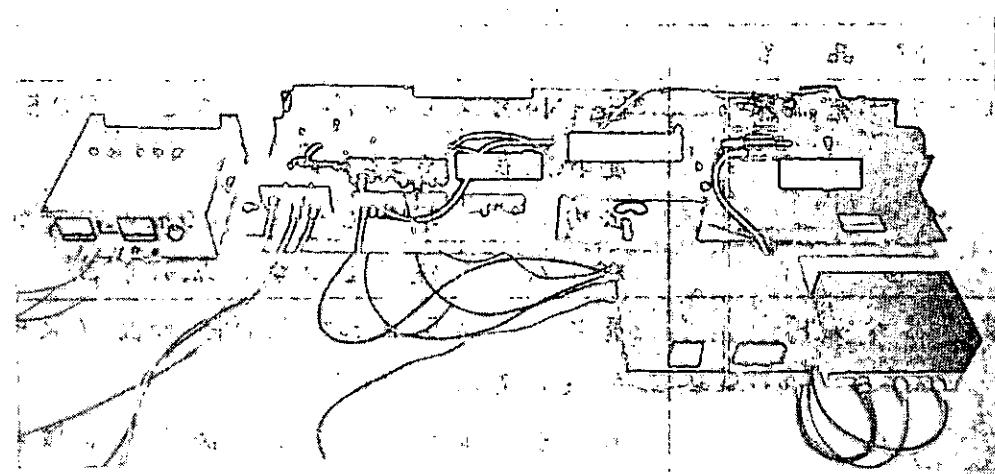


写真2.4.1 レーザー波高計

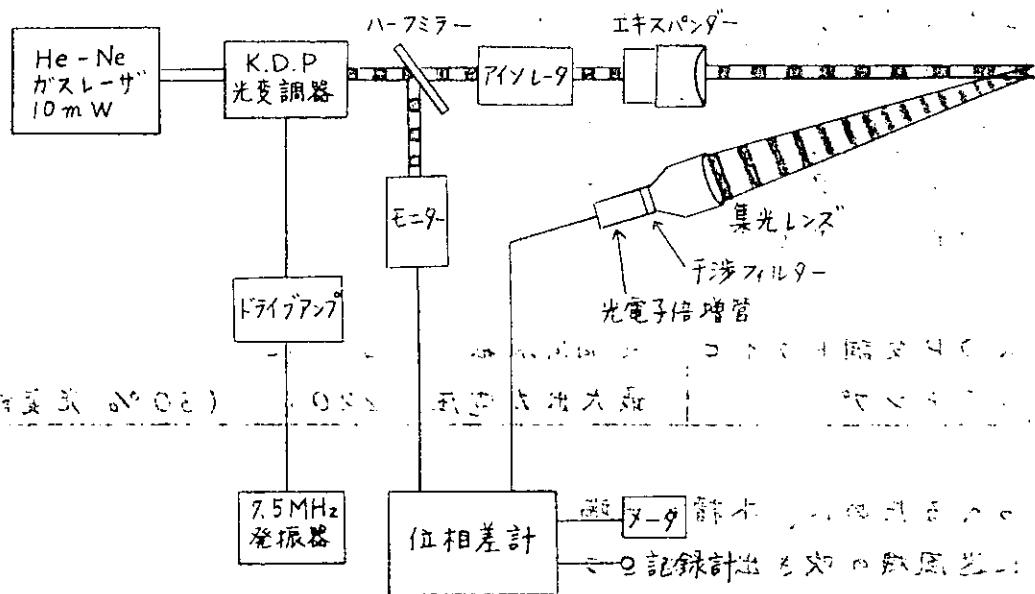


図2.4.2 レーザー波浪計ブロックダイヤグラム

表 2.4.2 レーザー波高計の仕様

部品名	性 能
レーザー発振器	He-Neガスレーザー NAL-705 GS 発振波長 6328 Å 出力 単一モード 10 mW 直線偏光 ビーム 径 2.0 cm 拡がり角 1 mrad (半頂角)
変調器ヘッド	素子 $45^\circ Z$ cut KDP 結晶 (KH_2PO_4) 半波長電圧 900 V 偏光子 レーザーの直線偏光 $1/4$ 波長板 検光子 グラムトムソンアーリズム
ビームスプリッター	ハーフミラー BS-30
アイソレーター	PNI-18 偏光素子 円偏光板
エキスパンダー	BX-40 倍率 10倍
モニター	ホトマル IP21 (浜松テレビ)
集光レンズ	寸法 90 cm , 焦点距離 $f = 120$
干渉フィルター	波長 6328 Å 通過巾 120 Å
二次電子増倍管	ホトマルク 102 (浜松テレビ) 分光感度特性 S-1タイプ 最高感度 8000 Å
KDP 変調ドライバ シグアンプ	変調周波数 7.5 MHz 最大出力電圧 220 V (30% 光変調)

らべるために、水槽の一端に送風機の吹き出し口をつくり、短波長の波を発生させ、実際の波面を模擬することとした。

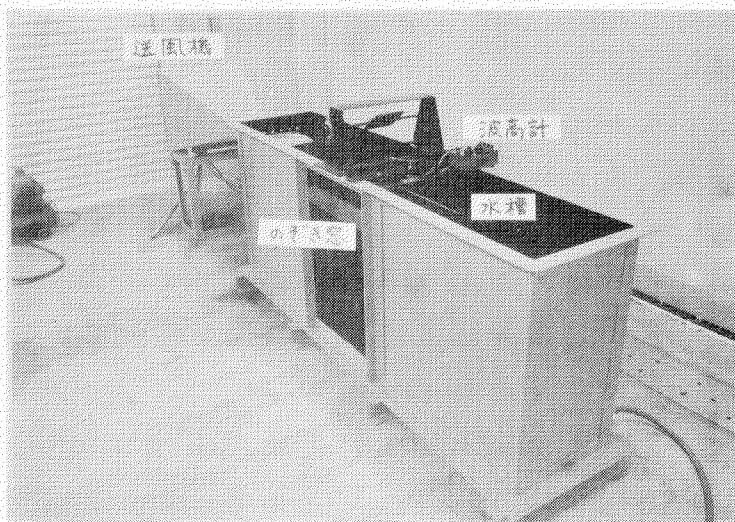


写真 2.4.2 水面反射実験用水槽

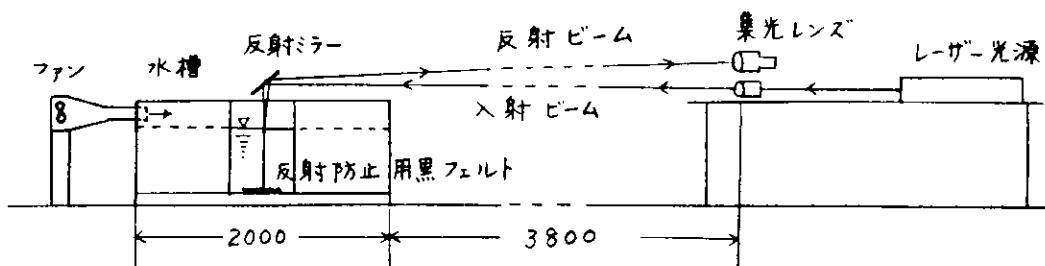


図 2.4.3 実験装置の概略

2.4.5 実験結果

(1) レーザー光源

レーザー発振器は、出力 10 mW であるが、やや不安定であった。変調度は、最大 30 % を取ることできた。しかし、変調電力が大きいため、誘導が大きく、モニターの取扱を行った。KDP は潮解性があり、海上での使用の際の一つの問題点である。レーザー装置の購入後、湿度の低い秋期にもかかわらず、結晶面がくもり、使用不能となつた。現在修理中である。

(2) 水面反射率

レーザー波浪計の場合に、受光できる反射光は、垂直入射だけであると思われる。その場合の反射率 τ は、 6328 Å に対する屈折率 $n = 1.33$ を用いて

$$\tau = (n-1)^2 / (n+1)^2 = 0.02$$

となり、わずかに 2 % にすぎない。反射ミラーで垂直に反射させた強度と、ミラーを 45° にして、一回水面反射を行つた強度を実測して、表 2.4.3 の結果を得た。

平均 1.3 % と、計算値よりかなり低い値を得たが、原因は不明である。

(3) 波面よりの反射

水面よりのレーザービームの反射を、水面が静止しているときに受光できること

表 2.4.3 水面反射率の実測値

ミラー反射(mV)	水面反射(mV)	反射率(%)
39.5	0.52	1.33
25.0	0.32	1.28
13.9	0.17	1.22

ように反射ミラーを調整して、水面を乱すと全く受光できなくなる。そのときビームスポットの運動を集光レンズの背後においたスクリーンで観察すると、乱れが静まるとともに肉眼でも認められるようになる。すなわち、乱反射による反射光はきわめて微弱であり、反射条件を満足する波面よりの反射光のみが集光レンズによってとうえられるものと思われる。

そこで波面よりの反射は、長波長の波面の上に乗つた短波長、短周期の波傾斜がビームに垂直になつた瞬間に生じるものと考えよう。この様子をしらべる

ために、図 2.4.4 のようにして、実験を行った。入射光は反射ミラーによって水面の法線と日 θ の角で入射する。反射光は、入射光と 2θ の方向に戻る。この状態では反射光は検出されないが、送風機によって数 cm の短重力波を発生させると、集光レンズの受光角内に、瞬間に反射光が入り、反射パルスが検出される。

反射ミラーは、水面に平行および垂直の回転軸を持っているので、入射角は波の進行方向に θ 、垂直方向に θ を取ることができる。

抵抗線式波高計によって測定した波の波形を図 2.4.5 に示す。反射波との干渉で波形はあまりよくない。

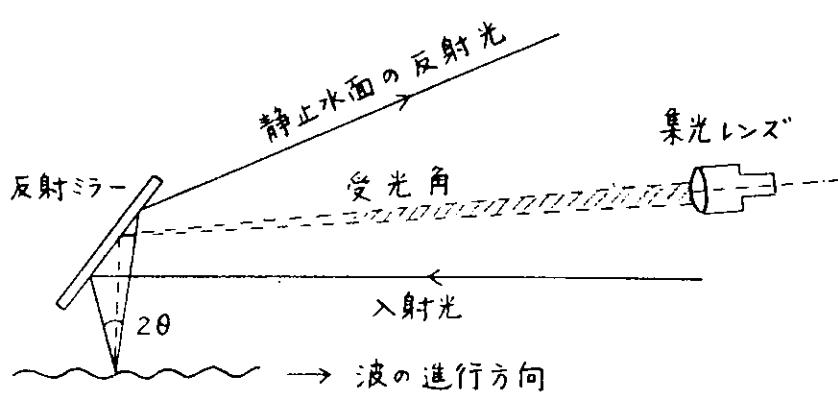


図 2.4.4 細波よりの反射光の測定

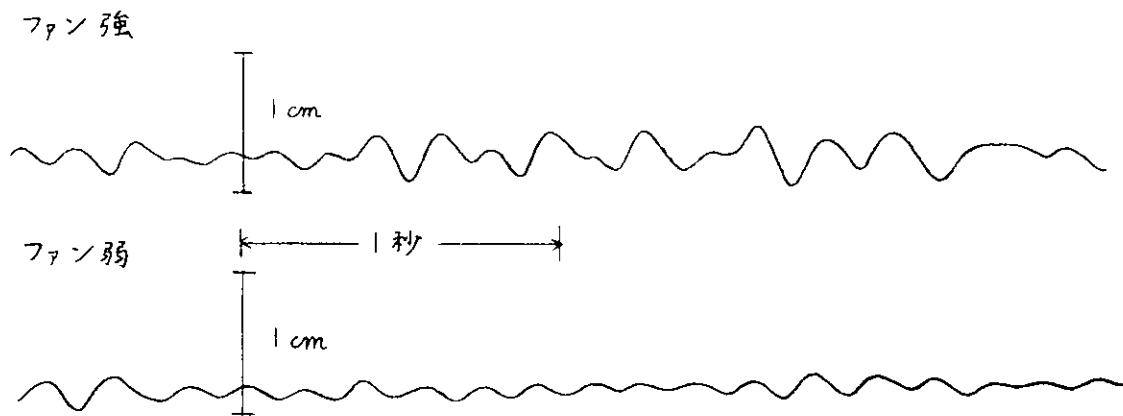


図 2.4.5 反射実験の波の波形

反射パルスをビジュグラフで計測した一例が図 2.4.6 である。

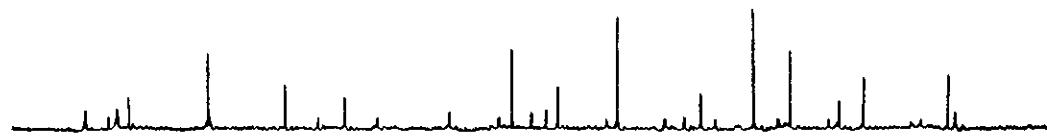
表 2.4.4 反射パルス実験に用いた波

ファン	風速 (ダクト中) m/sec	波高 cm	周期 sec	波長 cm	阻度
強	8.5	0.45	0.21	6.7	1/15
弱	7.0	0.24	0.19	5.6	1/24

たときより入射パルスが多い。

さらに反射パルスを定量的に計測するために、増中器およびシュミット回路を用い、カウンターによってパルス数の計測を行った。図 2.4.7 は、反射パルス数の入射角依存性を示し、図 2.4.8 はこの結果を用いてビームを中心とした

$\theta = 8.8^\circ \varphi = 0^\circ$



$\theta = 0^\circ \varphi = 11^\circ$

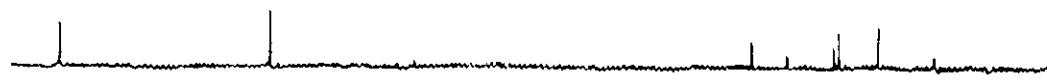


図 2.4.6 入射角が変化したときの反射パルス

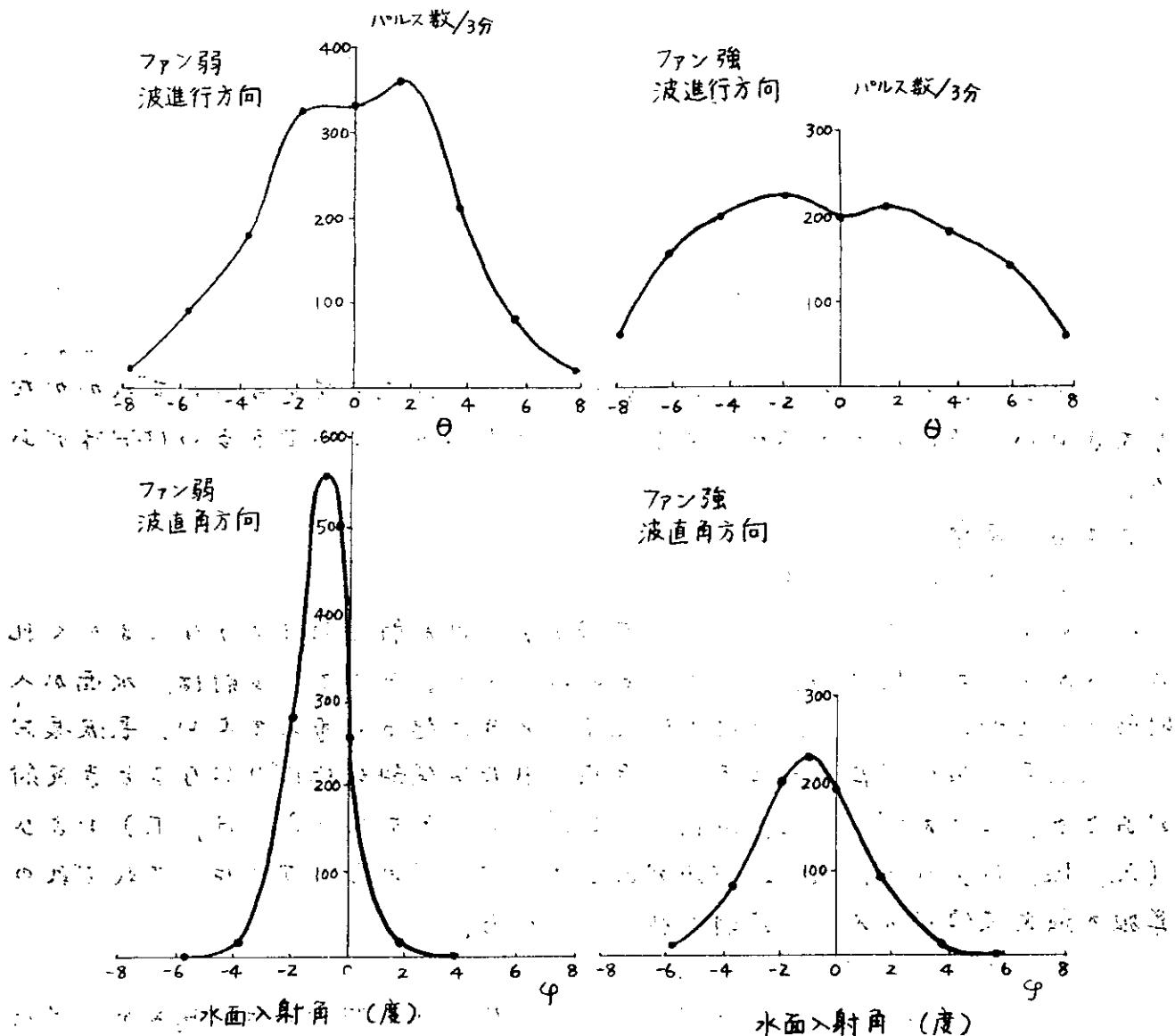


図 2.4.7 水面入射角と反射パルス数

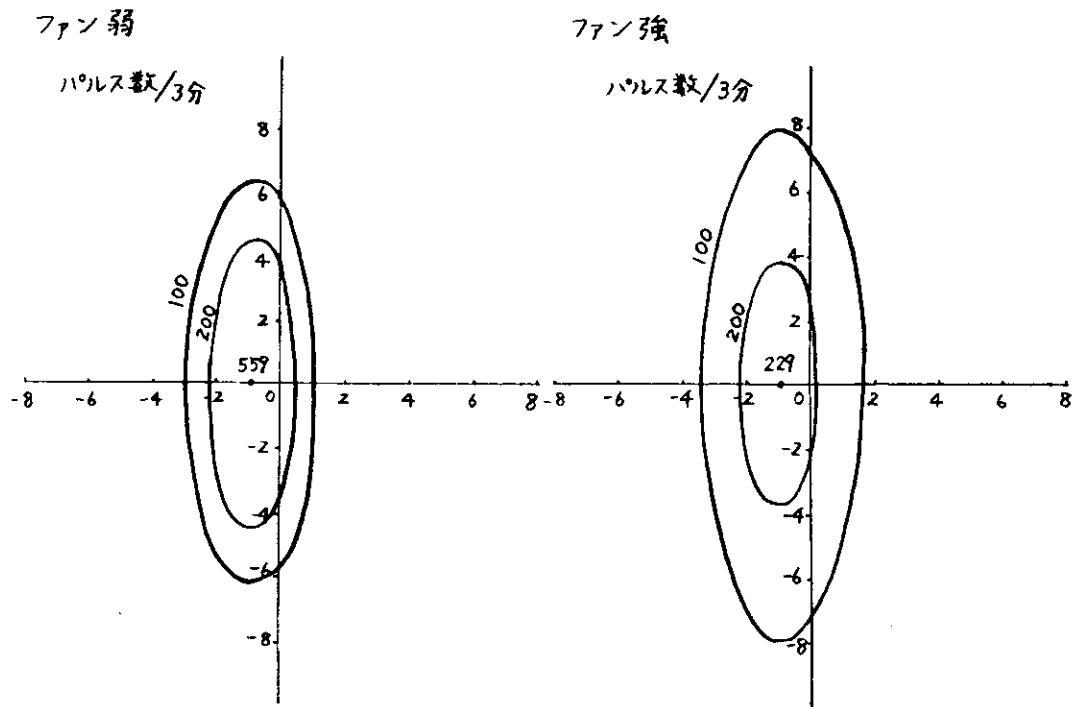


図 2.4.8 反射パルス数の等高線

パルス数の等高線を描いたものである。阻度の小さいときには、反射パルス数は大きく、パルスを受光する入射角度範囲がせまいことがはつきりわかる。さらに、波面の観察によると、ファン強の波は、一次元の波からののはずれがかなり大きいが、 ϑ に対する依存性よりこのことを知ることができるのは興味がある。

2.4.6 考察

(1) レーザーの反射機構

約5mm中のレーザービームの反射実験より、乱反射を起すようなこまかく乱れた水面よりの反射は微弱であることがわかった。そこで、反射は、水面が入射軸と受光軸に対して反射条件を満足するときに起ると考えてよい。長波長および短波長の波が混存するときは、合成された波傾斜がほぼ0になるとき反射がおこる。たとえば、波長、波高および周期がそれぞれ (λ_1, H_1, T_1) および (λ_2, H_2, T_2) の2種類の正弦波があるときに、 $T_1 \gg T_2$ とすれば、それぞれの単独の最大波傾斜の大小で反射の様子が変わること。

$$\pi H_1 / \lambda_1 < \pi H_2 / \lambda_2$$

ならば、長波長の波の1周期のどこでも、ほぼ T_2 の周期で反射が起るが、逆に

$$\pi H_1 / \lambda_2 > \pi H_2 / \lambda_2$$

ならば、1周期の中で反射の生じない領域が生じることになる。たとえば、2.4.4の阻度 $1/24$ の波については、 $\pi H_2 / \lambda_2 = 0.131$ であり、これは入射角 7°

30' に相当する。実際、8° 近くの入射角で 24 パルス / 3 分であり、ほぼこのことが実証されている。ビームが拡がりを持っているときもこれより類推することができる。

(2) 受光系

製作した集光レンズは、直径 90 cm であるが、実効的な直径は半値中で 14 cm しかなかった。そのため受光能率はきわめて悪かった。波による反射パルス数の測定より、レンズの中心として少くとも 25 cm の半径内では、ビームの掃引する密度は一様と見られるので、受光能率の向上には、集光レンズの径を大きくすることが有効であり、反射望遠鏡の使用が考えられる。

(3) 太陽光の影響

海上での波浪観測では、受光器に入る太陽光の影響が大きいと考えられる。太陽が天頂にあるとき、地球表面に入射する太陽エネルギーは、約 1 kW/m^2 である。一方、レーザー光は、 1 mW であって、きわめて微弱である。海面で反射されて、光電変換器に入る太陽光の入射エネルギー N は

$$N = 1000 r A \cdot B \cdot C \cdot D \cdot E \text{ W}$$

であらわされる。ただし

r : 水の反射率 A : 受光系より見た有効反射面

B : フィルターの通過幅中のエネルギーの係数

C : 観測時刻の太陽の高さによる係数 (< 1)

D : 天候による係数 (< 1)

E : 海面条件による係数 (< 1)

レーザー信号 S は、出力 1 mW として、反射条件が満足されたときには

$$S = 0.001 r \text{ W}$$

$$A = 1 \text{ m}^2 \quad B = 0.013 \quad (120 \text{ Å 幅})$$

$$C = 0.5 \quad D = 1 \quad (\text{晴天}) \quad E = 0.1$$

とすれば

$$N/S = 650 \quad N \approx 6 \text{ mW}$$

となる。一方、図 2.4.9 に示すように、ホトマルは著しい飽和特性を持っているので、この太陽光によって飽和し、かつ劣化の心配がある。

この対策としては、次のことが考えられる。

(a) レーザー光源の出力を増加する。He-Ne レーザーでは 50 mW (現在の 5 倍) が限界であり、気体レーザーとしてはアルゴンレーザー (1 W)、固体レーザーでは YAG レーザー (10 W) が考えられ、特に YAG レーザーは小型で有望である。

(b) 光電変換器をホトマルのような飽和特性のないシリコンホトダイオードに置き換える。

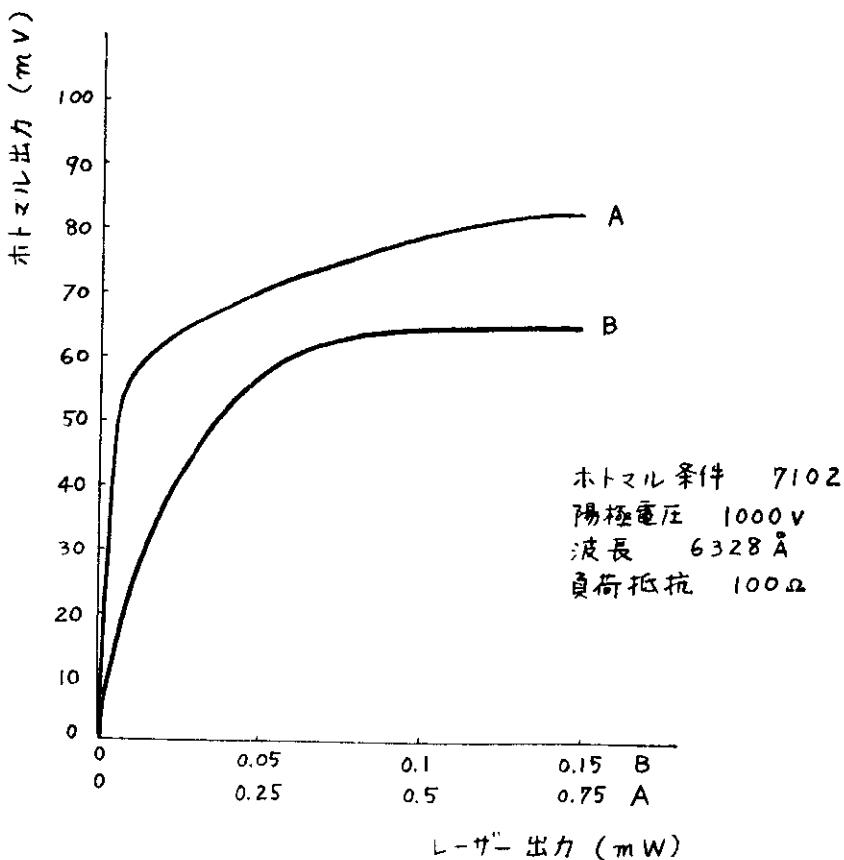


図 2.4.9 ホトマルの飽和特性

(C) 干渉フィルターを狭帯域のものに取換える。外国製で 10 \AA 幅のものが発売されているので、これを使用すれば S/N は大幅に改善される。これらについて、さらに来年度検討したい。

(4) 其の他

今年度において、製作した装置については、KDP 变調素子の潮解性のため使用不能となった。KDP を使用するならば防湿に十分注意しなければならない。ニオブ酸リチウム变調器は潮解性がなく、变調電圧も低いので非常に有利であるが温度特性が問題である。また、全体的に実船実験用に使用するには安定性が不足であり、細心な設計を必要とすることがわかった。

2.4.7 まとめ

レーザー波浪計測装置による室内実験により、ほぼ予想通り、水面による反射は、水面がレーザービームにはほぼ垂直になったときときに受光器に入ることが明らかになった。また、受光系および太陽光の影響について考察し、レーザー波浪計についての基礎資料を得ることができた。屋外における反射実験、波高観測については実施できなかったので、来年度はこれらの点について研究を行なう予定である。

3 実船計測

3.1 幸塙沖の実験

水压模倣式波浪計および加速式波浪計について、二種等機器よりえた波浪の計測値と同時に観測された固定波浪計の波浪記録（真値に近いものとして）と比較し、その動作性能および計測の精度について検討した。

3.1.1 実験の概要

比較の基準となる固定波浪計にて、国立防災科学技術センター幸塙支所の波浪観測塔を利用して、塔は相模湾幸塙沖約1km、水深20m(L.W.L.)の位置に設定されており、常時各種の波浪計によって津内の波浪を計測し、二種の海底ケーブルによって陸上研究施設にデジタル伝送し、目的に応じて記録しきつ解析する。水压模倣式波浪計と加速式波浪計は海上保安庁測量船「海洋」の塔の至近距離に投入し、個々に与えられた全時に波記録と探針による計画である。試験当时、塔の付近には定置漁網（複雑に張りめぐらされており、「海洋」は塔に十分近寄ることは不可能である）。また潮流によって波浪計の網にからむことを避けるために、2個の波浪計は同時計測を実施しており。以下の実験概要を記述する。

(1) 参加者

東京大学、大阪府立大学、船舶技術研究所、海上保安庁

(2) 実験の経過

12/6 波浪計および機器の搬入（東京）

12/7 10-00 東京出港、16-00 湘南港入港。この間実験の打合せ。

15-00 の風速 SW 18% / s, 風浪 SW 4, うねり SW 3

12/8 08-30 湘南港出港。塔付近にて計器の調整を行ふ。

11-48 東京大学第一回投入。大磯港 287°, 2300m

12-46 東京大学第一回終了。大磯港 92°, 3300m

12-50 東京大学第二回投入。大磯港 121°, 2700m

13-35 東京大学第二回終了。大磯港 112°, 2900m

13-56 大阪府立大学投入。観測塔 188°, 1450m。水深 100m。

14-40 大阪府立大学終了。観測塔 183°, 1300m。水深 100m。

16-00 湘南港入港。

12-00 の風速 SSW 8% / s, 風浪 SSW 2, うねり SSW 1

13-00 の風速 SSW 10% / s, 風浪 SW 2, うねり SSW 1

14-00 の風速 NSW 13% / s, 風浪 WSW 2, うねり SSW 1

12/9 08-30 湘南港出港

圧力検知式波浪計の記録は、虹ヶ浜研究施設の記録の仕方に合はせて、
 $\Delta t = 0.4$ 秒ごとにサンプリングを行ない、サンプル数 1200~1500 を一つの記録の区切りとした。又、スペクトル解析を行なう場合のラグ数は 120 を定めた。

図 3.1-2 は波浪計のセンサーおよび記録部を示す。センサーの位置は水面から 12.8m の所である。

虹ヶ浜研究施設の波浪計（容量型）の記録および圧力検知式波浪計の記録をそのまま統計処理した波の特性を表 3.1-1 に示す。

表 3.1-1 波浪の統計値

	容量型波浪計			圧力検出式波浪計			容量型は 13-55 の値（図 3.1-7）。 圧力検出式は投入 直後の記録による。
	T ₀	T _p	H _m	T ₀	T _p	H _m	
12/8, WSW 13% S	3.85 ^s	2.65 ^s	0.52 ^m	3.79 ^s	2.63 ^s	0.48 ^m	
12/9, NNE 9% S	3.33	1.58	0.10	3.54	1.82	0.11	

波浪計の原理上、容量型は水面上下量の真値を示すものと考えられるが、圧力検知式では記録が水圧の減衰の影響を受けているため、両者の統計値に差が出ている。水圧減衰の補正をパワースペクトルの場で行ない、両波浪計が与える統計値と比較すればより詳細な特性上の検討ができるであろう。しかし、各種の統計値の誘導にヨリスペクトルの高次モーメントを求めの場合の積分範囲の決定等に解決しなければならない課題が残つてある。

表 3.1-2 は圧力検出式波浪計のパワースペクトルについて、 $\omega = 0.65 \sim 3.27$ の範囲でスペクトルに水圧の減衰の補正を行ない、容量型波浪計と圧力検出式波浪計の与える variance を比較したものである。波周期の短い 10/9 は両者に向かって良好一致がみられる。

表 3.1-2 variance の比較

	圧力型 (補正前)	圧力型 (補正後)	容量型
12/8	660 cm ²	800 cm ²	904 cm ²
12/9	65	84	79

12/9 は沖合からの波の観測端の浅い海で波高を高めた為に両者の不一致が大きい。

圧力検出式波浪計について
 は、センサー深さを通常に運
 べば、実用上十分の精度の波
 記録を採録しうるであろう。

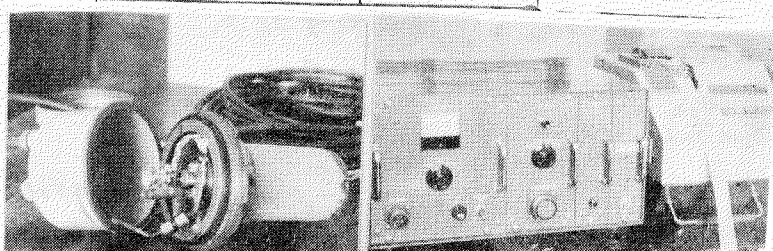


図 3.1-2 圧力検知式波浪計
 (左:センサー, 右:記録部)

09-20 大阪府立大学投入。観測塔より 142° , $1040''$ 。水深 $40m$

10-12 大阪府立大学終了。海上

風度検定の5午后湘南港入港。

09-00 の風速 NNE $9m/s$, 風浪 NNE 2, ラウリス 1

ただし上述の風速、風浪およびラウリス記録は「海洋」の航海日誌より転載したものである。

(3) 計測人員の配置

「海洋」の船上 東京大学、大阪府立大学および海上保安庁

虹ヶ浜研究施設 船舶技術研究所および大阪府立大学

(4) 記録

東京大学（加速式波浪計）上下加速度三重積分による波のアナログ記録

大阪府立大学（圧力検知式波浪計）水压変動のデジタル記録。紙テープ記憶方式

防災科学技術センター（水压式および容量型の波高計）リザーバーもデジタル記録。紙テープ記憶方式。
なお水压式は水面下約 $5m$ に固定されてる。

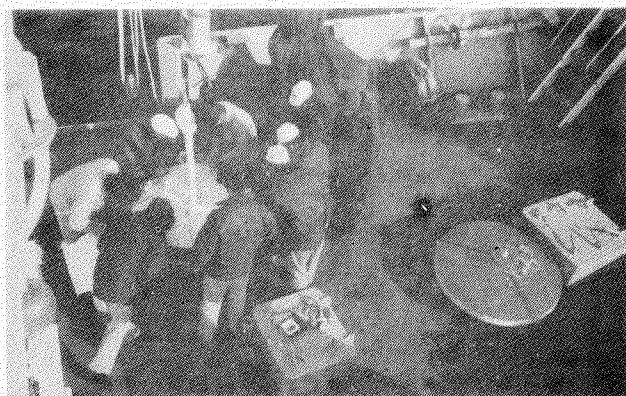


図 3.1-1 船上の波浪計(於海洋)

左:圧力型, 右:加速式型

3.1.2 水压検知式波浪計

虹ヶ浜研究施設での記録は、図 3.1-4 に例示するごとく水压型および容量型波高計について、 $\Delta\theta = 1^{\circ}$ 時間 $\Delta t = 0.4$ 秒、 $\Delta\theta = 1^{\circ}$ 數 $N = 2,000$ ごとに区切ってデジタル化してある。これらの記録がデータ処理システムによつて、エネルギースペクトルおよび各種の統計値を推定している。

波周期および波高の統計値は図 3.1-7 に示す。

3.1.3 加速度式波浪計

加速度式波浪計による記録の一例を図3.1-3に、またほぼ同時刻の観測塔における水圧型および容量型波高計の記録例を図3.1-4に示す。加速度式波浪計の記録では、平均値が長周期の変動を示し、波高曲線が大きく波うつことがある。これは、実際の水面の上下動とは肉眼のものとの、加速度検出器やこれを支えているシンバル吊り振子の振動特性などに起因するものと思われるが、好ましくない現象である。まだ十分な改善策が見出せないものである。

この平均値の変動の影響を除くため、波高の読み取りに当たっては図3.1-5のような操作を行なった。すなわち、peak to peak の変動量を読み、谷から山までの値Hiと山から谷までの値Hdの平均値の2分をhiとして

$$hi = \frac{1}{2}(Hi + Hd)$$

を波振巾と考え、図④の曲線を①の曲線と等価なものと考えて整理することとした。また、記録曲線中には、図④のR部のように変動量の小さな部分があるが、この変動幅が波高10cmに満たないものは無視することとした。(無効振巾を10cmとした)。たゞ、ペン書き記録の肉眼による解析であるから、この設定値が厳密に守られることはさうかについては若干疑問の点もある。

上記の操作によつて求めた波高および波周期の頻度分布例を図3.1-6に示す。それと30分間ずつの大短期分布があり、波高はpeak to peak 値(無効振巾)で表められている。この計測結果と観測塔における計測結果を比較したもののが、図3.1-7である。観測塔における計測結果は、容量型(O印)圧力型(X印)とともに、横軸表示の時刻から0.4secごとにサンプリングして2,000個のデータ(約3分間)を計算機処理したものである。加速度式波浪計の計測結果を○印でプロットすれば、最大値では観測塔の結果とほぼ一致しているが、平均値および有義平均値では相当の差がみられる。最高波高1m程度の比較的おだやかな海面での計測結果しかねばの、早急な判断は下せないが、こゝ差異を生ずるのはどちらかの波高計の誤差が多いことであることを察する。加速度式波浪計の計測結果では、さきに述べた図3.1-6 無効振巾の設定値をもつて小さくして小変動を計数するようになれば、平均値(H)も有義平均値(Hg)も観測塔の計測結果に近づくはずである。

反対に、観測塔の計測出力を適当な滤波器を通したあとでサンプリングするにしても、さらにこの近似はさくらるものと思われる。波高と波周期などの最大値を比較すると、加速度式波浪計と観測塔との計測(ともに容量型波高計)によつて一致を示しているのは、このことを裏付けるものと考えられる。

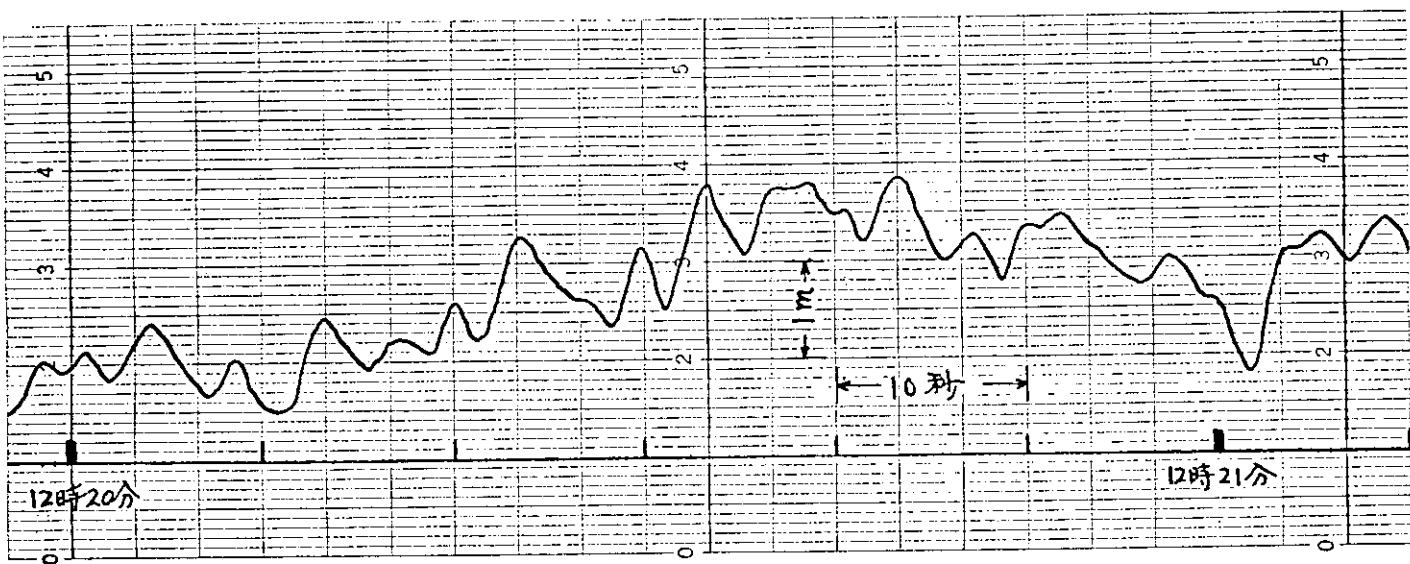


図 3.1-3 加速度式波高計による波高記録例

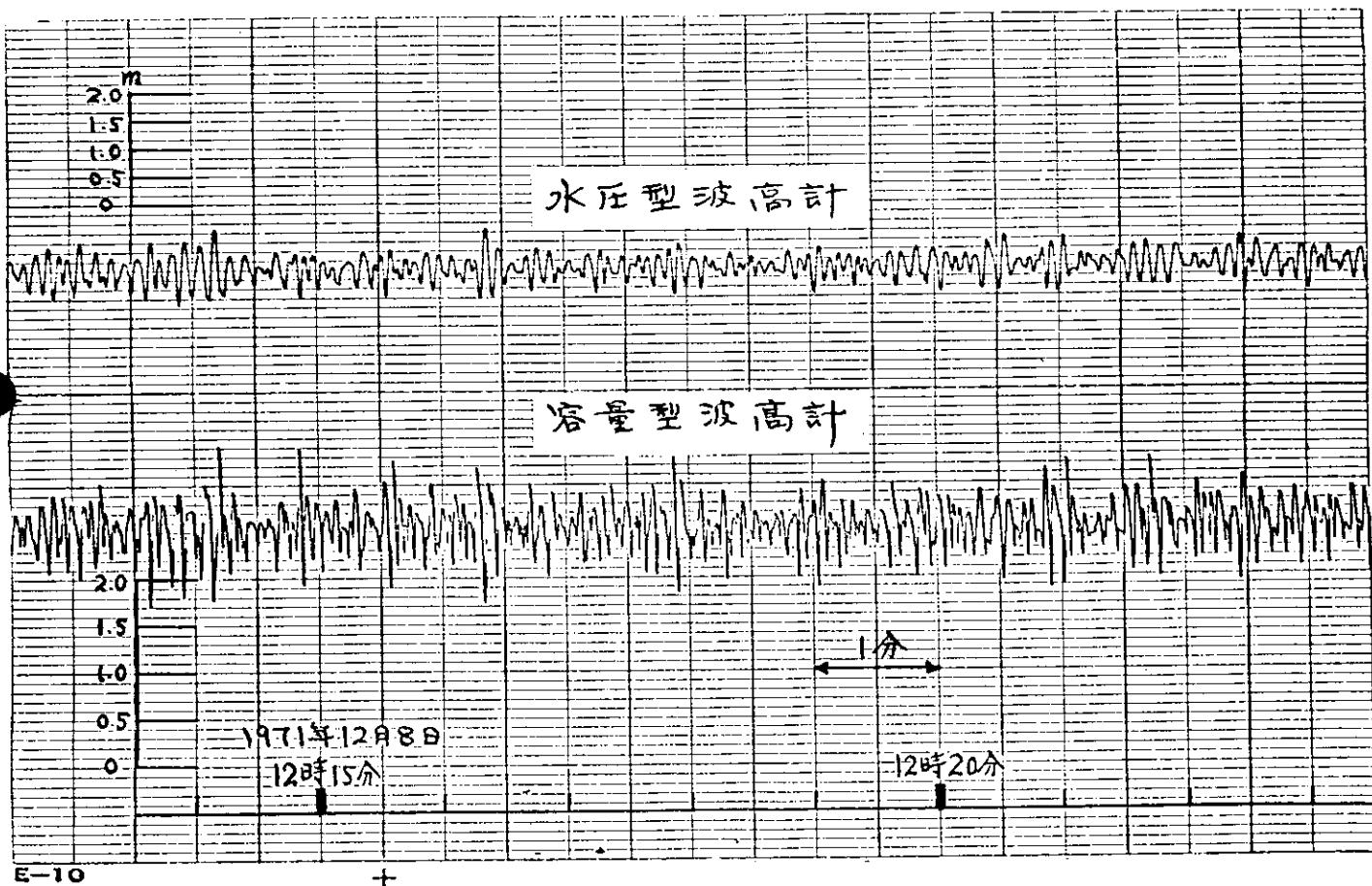


図 3.1-4 波高観測塔における波高記録例

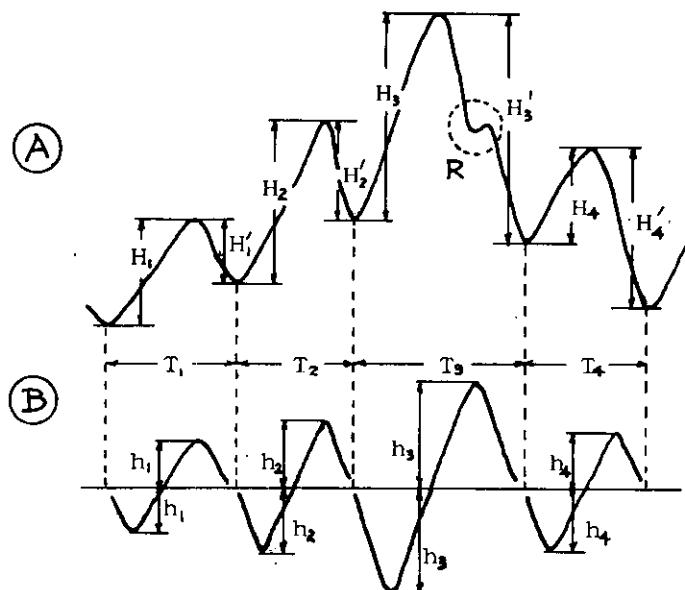
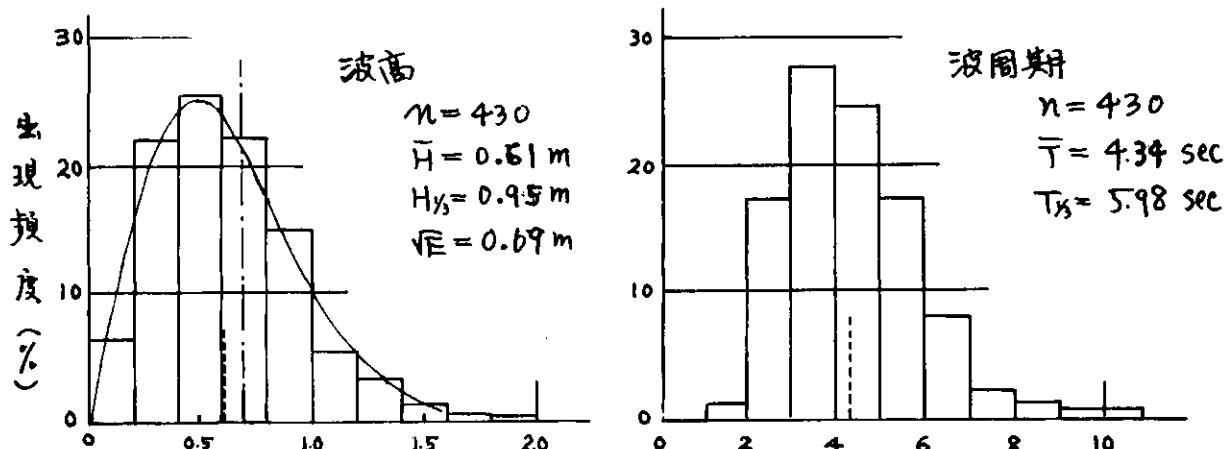


図 3.1-5 波高および波周期の読み方

第1回 1971.12.8 (水) 12:00 ~ 12:30



第2回 1971.12.8 (木) 13:00 ~ 13:30

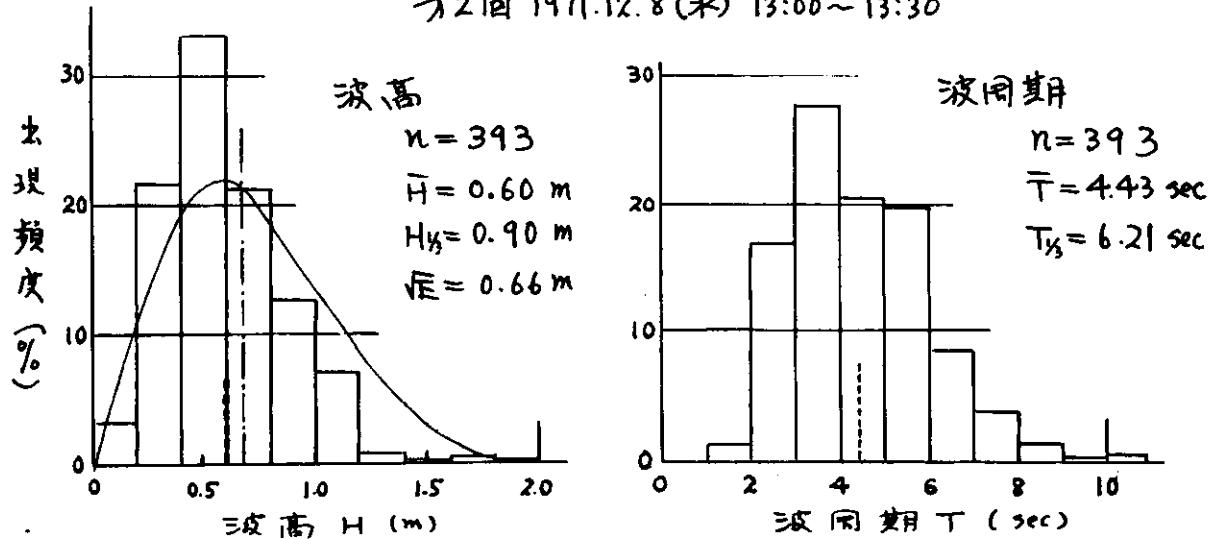


図 3.1-5 加速度式波浪計による波高および波周期の頻度分布

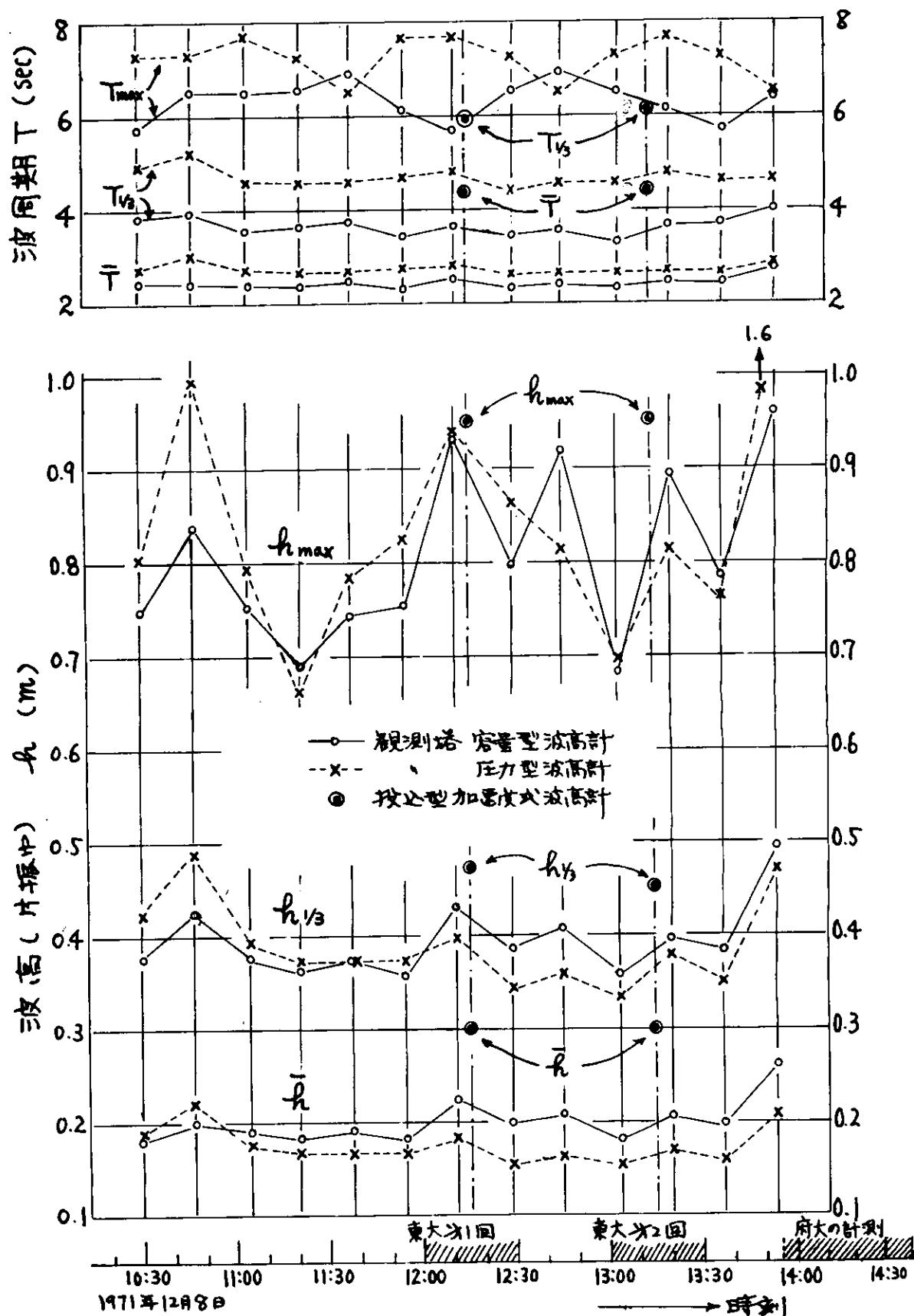


図 3.1-7 観測塔における計測結果との比較

3.2 博多沖の実験

3.2.1 概要

(1) 東京大学で開発された加速度式波浪計、(2) 大阪府立大学で開発された水圧型波浪計（有線テレメーター式、自記式の2種）、(3) 九州大学で開発されたクローバー型波浪計、この3種の波浪計のそれぞれの単独テストならびに各種波浪計の性能の相互比較に必要な同時テストを行なうための実験が、昭和47年1月18日より22日までの間 第七管区海上保安本部の設標船「かいおう」512.46t に便乗して 博多沖において行なわれた。

実際の海上実験は 1月20日、21日の両日に行なわれ、下記に示すような要領で、計測No.1よりNo.5までの5回のテストが行なわれた。

計測No.1 まず加速度式波浪計を放流し、続いて水圧型自記式波浪計（水圧調整 10m）を放流、さらにクローバー型波浪計を船よりおろしロープを約200m延長して係留し、3種の波浪計による波の計測が行なわれた。

計測No.2 計測No.1を終了し、各波浪計を船上に揚収した後、水圧型波浪計（水圧調整 20m）を海面におろし、ケーブルを延長し、船に係留した状態で波浪計測が行なわれた。

計測No.3 船にロープならびにケーブルにより係留されたクローバー型波浪計に加速度式波浪計を約10mのロープを使用して係留し、両波浪計による波の同時計測が行なわれた。

以上 No.1～No.3の計測は1月20日に 玄界島の北約7kmの海域（水深約40m）にて行なわれ、これらの計測では船はアンカーしないで 風下に向って、ゆっくり漂流させて、ブイはこの船によってひきずられるような状態にあった。

計測No.4 船にロープならびにケーブルで係留された水圧型波浪計（水圧調整 20m）に加速度式波浪計を約10mのロープを用いて係留し、さらに、加速度式波浪計の下に水圧型自記式波浪計の検出部（水圧調整 10m）を吊り下けて、3種の波浪計による波の同時計測が行なわれた。

この計測No.4は 1月21日の午前中に志賀島の北約5kmの海域（水深約35m）で船首側でアンカーして行なわれ 波浪計は風下（船尾）側に流されて 係留状態にあった。計測No.4にひき続いてクローバー型波浪計による計測が行なわれる予定であったが風速が13m～14m/sに達し、海面も非常に荒れて、波浪計のあけおろしに危険が生じたため、瀬内の大口附近（宮ノ浦の東北東約2km）の海域（水深約20m）に船を移動し、午後の 計測No.5が行なわれた。

計測No.5 船にロープならびにケーブルにて係留されたクローバー型波浪計に約10mのロープを用いて、加速度式波浪計を係留し、さらに加速度式波浪計

の下に水圧型自記式波浪計の検出部（水圧調正10m）を吊り下げ、3者による波の同時計測が行なわれた。この場合も 船首側でアンカーされ、波浪計は風下（船尾）側に流されて係留状態にあった。

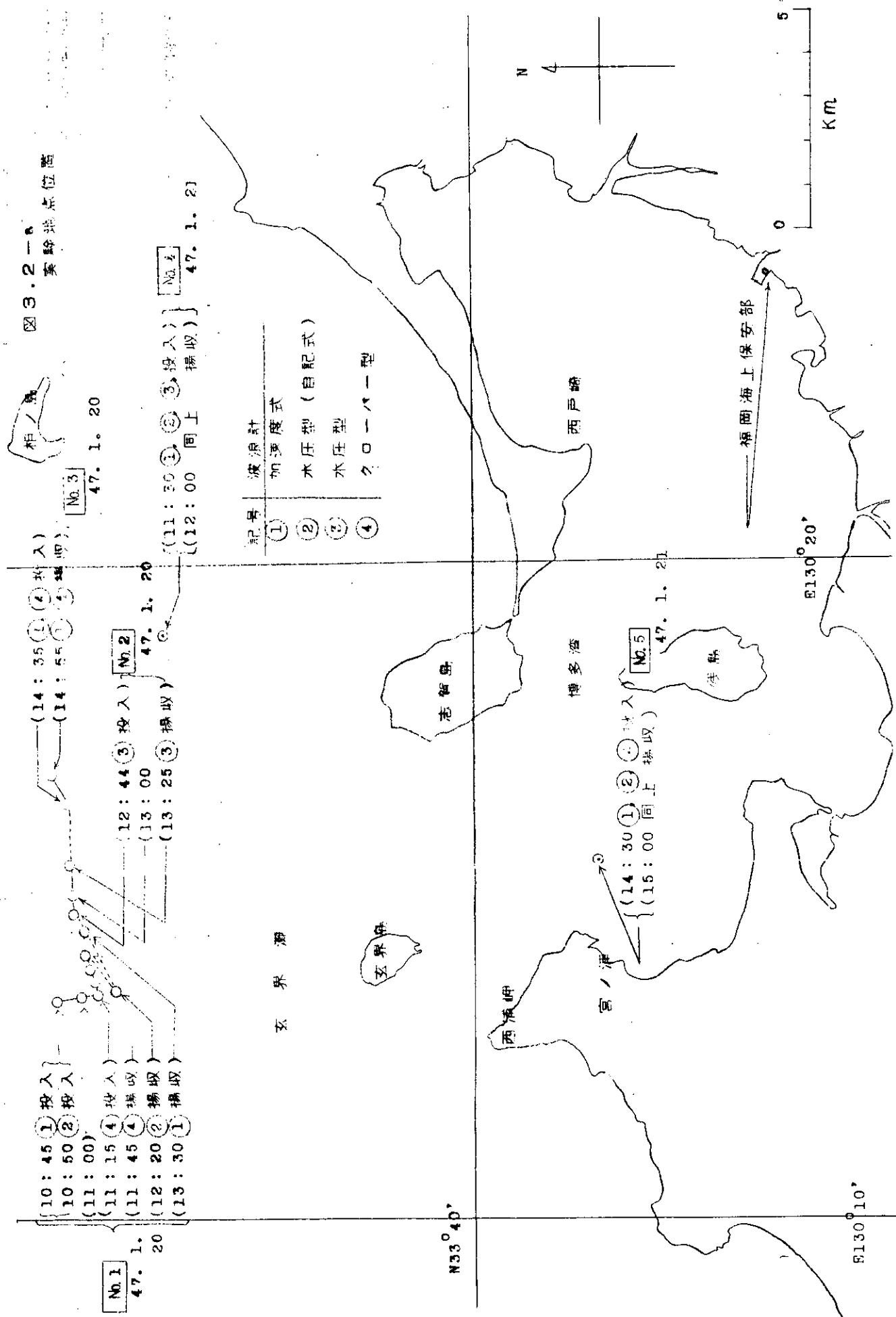
以下の計測No.1からNo.5にいたる実験の際の気象海象条件は下記に示すとおりであった。

波浪計の実験時の気象海象条件

計測No.	年月日	時間	天候	風向 °	風速 m/s	気温 °C	水温 °C	気压 mb	波高 m	波向 °
1	47. 1. 20	10: 45	曇 (9)	260	5.0	14.4	14.4	1028	0.4	285
		12: 30		275	6.5	17.6	14.5	1029	0.8	315
2	47. 1. 20	12: 40	晴 (3)	270	6.0	15.2	15.0	1027	260	?
		13: 30		280	7.0	15.3		1028	275	
3	47. 1. 20	14: 30	晴	270	6.5	14.9	15.0	1027	1.0	260
		14: 55		(1~3)	8.0	15.3		1027	?	330
4	47. 1. 21	11: 30	曇 (8)	280	12.5	12.0	13.3	1030	2.5	280
		12: 00		285	13.0		13.4		?	?
5	47. 1. 21	14: 30	晴 (1)	265	9.5	10.4	13.0	1029	0.7	315
		15: 00		280	11.0	10.8		1030	0.2	うねり
									?	280
									0.3	風波

図-3.2-aは 各計測が行なわれた地点に対応する船の位置を示したものである。また、上記の各種波浪計に関する実験と併行して、船上からステレオカメラによる海面撮影も試みられた。このカメラは、本協会の第124研究部会が大型鉱石船の実船計測に際して 昨年度試作されたもので、その外観図を図-3.2-bに示す。計測室からの押ボタン操作によって、基線長800mmのステレオ写真がとれる。撮影されたステレオ写真の一例は図-3.2-cに示されている。

図3.2 実験地点位置



3. 2. 3 水圧型波浪計

さきに、2. 2において紹介し、平壌沖比較実験で使用したものと同一計器である。ただし、今回は都合により有線テレメータ方式を使用した。すなわち、波浪計と測定船上の記録部の間は長さ300mのコードで結ばれ、船上にはA/D変換器および紙テープ穿孔器を配し、別に参考のためにアナログ記録も同時にとれるよう、記録器を配している。

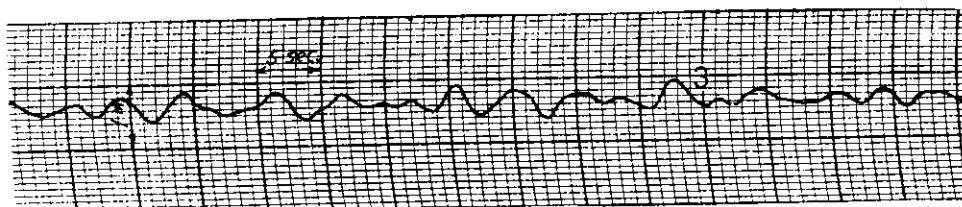
波浪計の投入、揚収は無線方式と異なる点はない。

3. 2. 4 水圧型自記式波浪計

作動原理は上項と異なる点はないが、本器は記録部を計器内部に蔽し、波浪計投入後2時間の連続記録が可能であり、計器を揚収ののち、記録を回収する。本器を単独に使用する場合は、直径800mmの主パイの下、水深10mに吊り下げ、主パイを漂流させる。比較実験では、本器を他のパイの下方10mに吊り下げて同時記録を行なった。今回の記録の一部を図-3.2-dに示す。

上記2個の波浪計による波記録の解析および他機種との比較検討は未だ終っていない。

水圧型波浪計は図示のことく記録としては満足なものを与えるが、現状の重さ、吊り棊の配當などの点からみれば、より軽量・合理化する必要があろう。



(a) 3.2.3 による記録の一例



(b) 3.2.4 による記録の一例

図-3.2.-d 水圧型波浪計の記録計

3.2.5 クローバー型波浪計

3.2.1で述べたように、計測No.1, No.3 およびNo.5において、クローバー型波浪計と他の形式の波浪計とを並用した波の同時計測が行なわれた。記録は現在解析ならびに検討中であるので、結果に関する次回にゆずるが、今回の観測を通じて明らかになった点をあけると次の通りである。

(1) クローバー型波浪計自体は相当の荒れた海面でも使用出来るが、船より海面に降す作業あるいは船に揚収する作業にかなりの工夫を要する。普通の観測船(400~500トン)の場合には波高3~4mの時が限度のように考えられる。風もかなり強い影響を与え、10m/s程度になると作業が困難となった。

(2) 薩摩沖の実験においては、フロートの傾斜角検出用のポテンシオ・メータならびにブイ本体の傾斜角検出用のジャイロに若干のトラブルが発生した。前者は、ポテンシオ・メーターのシャフトを太いものに交換することにより、後者に、ジャイロ附属のポテンシオ・メーターを交換することにより、それそれぞれ現在修理されている。

(3) 鉛直加速度信号 \ddot{z} の記録より \ddot{z} のスペクトラム $\Phi_{zz}(f)$ を高速フーリエ変換法を適用して求め、これを $\frac{1}{2}$ で割って水位変動 $\tilde{z}(t)$ のスペクトラム $\Phi_{zz}(f)$ を求めること、ならびに、フーリエ分解した鉛直加速度 $\ddot{z}(t)$ の周波数成分 $a_1(t)$, $b_1(t)$ をそれぞれ $\frac{1}{2}$ で割って、再び合成して水位変動 $\tilde{z}(t)$ を求めることを現在試みているが、低周波側に様々な原因で混入する誤差のために、波のスペクトルの周波数帯域より低い周波数帯域に非常に大きなエネルギーレベルを生じたり、水位変動に長周期変動を生じたりして、かなりの誤差を引き起している。加速度信号のスペクトルにおける低周波成分を切り捨てるにより便宜的にこのような問題をある程度さけることは可能であるが、この原因是、測定器ならびに記録器に様々な原因で混入するノイズ、ならびにスペクトル解析に必然的につきまとう、リーケージ効果およびAliasing効果などに原因するものと考えられるので、それぞれの効果の大きさの見積り、適切に除去する方法を現在研究している。

(4) 方向スペクトルの計算に関しては、現在、計算機による処理プログラムを一応完成し、各種のテスト用解析を行っているが、計算法(解析法)自体によって結果の精度が著しく影響されることがわかったので、現在出来るだけ精度の高い計算法の開発を目指して研究を進めている。

(5) 今回の結論として、先ず波浪計本体に関しては、ブイの波に対する追尾性能を更に向上させるためのフロートの改造、一部の変換器の信頼度の向上など多少改良を要する点は残されているが、ほぼ満足すべき結果が得られた。

ただ、荒風海面と船上との間で波浪計を昇降する作業はかなり困難であったので、この点なんらかの考慮が必要である。次に計測データーの解析法に関して

は、精度の高い情報を得るために、かなり高度の解析法を必要とすることがわかつたけれども、これは一度方法が確立されたならば電子計算機の活用により容易に解析出来るようになるであろう。

4.あとがき

21

当部会は最初に記したように、47年度実船試験用波浪計の開発製作目的として研究事業を発足したが、現在は以下で実船試験の具体的な骨組は色々な意味で確定していい。このため研究推進は常にかなりの不確定要素の上に、かたり具体的にまかレーダー制限を考慮しつつ行はなければならぬといふ困難を也かってます。しかし平塚沖や、博多沖の実験では、幸い天候にめぐまれて前例を付けて比較実験が十分に行われたことは非常に喜ぶべきです。次年度への期待を大にすらものと見えます。47年度においてはこの経験を十分に生かし、本年度よりあたる各波浪計の性能向上につとめると共に、レーダー反射型については早急にその装着位置、方法を決定し、仕様を決めて製作に着手しなければならない。またレーダー波向計についても調査と早期に完了し、計測装置としての全体計画を確定し、実船試験の供試船決定と共に、その細部化検討と並んで取扱工事に時間を使しないよう準備を怠じ必要がある。また実船試験担当部会（現SR124）と協力してデータ記録、処理システムの確立を急ぐねばならない。

最後に資料や実験船の提供を通じて多大の協力を賜わった気象庁、海上保安庁関係各位に厚く御礼申し上げる。