

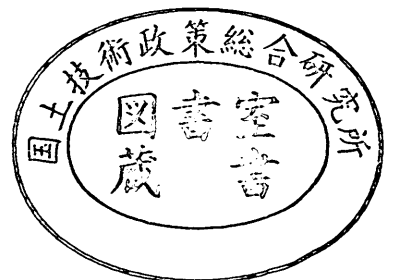
運輸省港湾技術研究所

港湾技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 27 NO. 2 JUNE 1988

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第27巻 第2号 (Vol. 27, No. 2), 1988年6月 (June 1988)

目 次 (CONTENTS)

1. Stability Analysis of Geotechnical Structures by Adaptive Finite Element Procedure
..... Masaki KOBAYASHI 3
(適応有限要素法による地盤の安定解析.....小林正樹)
2. 改良型波力発電ケーソン防波堤の特性
——波エネルギーに関する研究, 第7報—— ...高橋重雄・安達 崇・田中 智..... 23
(Stability and Function of Improved-type Wave Power Extracting Caisson Breakwater
——A Study on Development of Wave Power, 7th Rept.——
.....Shigeo TAKAHASHI, Takashi ADACHI and Satoru TANAKA)
3. 現地観測データを用いた方向スペクトル推定法に関する検討
..... 橋本典明・小舟浩治・亀山 豊..... 59
(Examination of the Various Directional Spectral Estimation Methods for
Field Wave Data.....Noriaki HASHIMOTO, Koji KOBUNE and Yutaka KAMEYAMA)
4. 海象観測用船型ブイの運動特性に関する模型実験と現地観測
..... 高山智司・平石哲也・高山 優・甲斐源太郎・中埜岩男・古賀道明..... 95
(Model Tests and Field Observation on Motions of a Ship-shaped Buoy for
Marine ObservationTomotsuka TAKAYAMA, Tetsuya HIRAISHI, Masaru
TAKAYAMA, Gentaro KAI, Iwao NAKANO and Michiaki KOGA)
5. 深層混合処理工法による改良体に作用する外力
..... 寺師昌明・北誥昌樹・中村 健.....147
(External Forces Acting on a Stiff Soil Mass Impoved by DMM
.....Masaaki TERASHI, Masaki KITAZUME and Takeshi NAKAMURA)
6. アスファルトコンクリートの老化性状..... 佐藤勝久・八谷好高・阿部洋.....185
(Changes in Properties of Asphalt Concretes due to Aging
..... Katsuhisa SATO, Yoshitaka HACHIYA and Yoichi ABE)
7. 剛基礎上の重力式係船岸の地震時滑動量推定手法の実験的研究
..... 上部達生・守屋正平・工藤勝己.....211
(An Experimental Study on Estimation Procedures of Seismic Sliding Displacements
for the Gravity Type Quaywall on the Rigid Base
..... Tatsuo UWABE, Masahira MORIYA and Katsumi KUDO)
8. CFRP ロッドを緊張材としたアンボンド PC 梁の曲げ性状
..... 大即信明・山本邦夫・浜田秀則.....241
(Bending Behavior of Unbonded Prestressed Concrete Beams Prestressed with
CFRP Rods Nobuaki OTSUKI, Kunio YAMAMOTO and Hidenori HAMADA)

4. 海象観測用船型ブイの運動特性に関する 模型実験と現地観測

高山知司*・平石哲也**・高山 優**

甲斐源太郎***・中基岩男***・古賀道明***

要 旨

国際的な海洋開発の時代を迎えて、我国でも、沿岸より200海里沖合までの海域の有効利用を図る必要性が高まっている。沖合の海域を有効に利用するためには、海象条件を的確に把握しておくことが重要であり、精度のよい海象観測装置を設置する必要がある。水深数百mの外洋における海象観測装置としては、大型のディスクスブイなどが実用化されているが、製作および設置費用が高価である上に、運搬にも手間がかかる。そこで、廉価で陸上および海上での運搬が簡単な小型海象観測ブイとして、船型ブイが開発された。

船型ブイは、小型ヨット程度の大きさで、FRPで製作されており、陸上では、小型トラックによって輸送可能であり、海上では小型漁船で曳航することができる。本研究は、船型ブイの波浪応答特性、および波と風の作用下における運動特性を模型実験および実機を用いた現地観測によって検討し、現地に対する船型ブイの適用性を調べたものである。

本報告で示した模型実験および現地観測の結果から得られた主な結論をまとめると、次のようになる。

- 1) 2次元造波水路において規則波および不規則波を作用させた模型実験の結果、船型ブイのheaving動揺量を測定することによって作用波の波高と周期を求めることができることが判明した。
- 2) 風と波を作用された平面水槽における模型実験の結果、ブイの平面運動は波だけでなく、風の影響を強く受けるため、船軸は、風のない場合を除いて波向とは一致しなかった。したがって、船型ブイの平面運動から波向を推定することは困難であることが判明した。
- 3) 熱海港沖の初島近海で行われた現地観測の結果、現地においても、船型ブイによって波高および周期を精度良く推定できることが明らかとなり、海象観測装置として、船型ブイの適用性が高いことが判明した。

キーワード：浮体の運動、船型ブイ、模型実験、現地観測、海象観測

* 海洋水理部波浪研究室長

** 海洋水理部波浪研究室

*** 海洋科学技術センター海洋開発研究部

4. Model Tests and Field Observation on Motions of a Ship-shaped Buoy for Marine Observation

Tomotsuka TAKAYAMA*

Tetsuya HIRAISHI**

Masaru TAKAYAMA**

Gentaro KAI***

Iwao NAKANO***

Michiaki KOGA***

Synopsis

In the era of worldwide ocean development, we must accumulate the marine and meteorological information in the Japanese economical ocean area up to 200 nautical miles off the coasts in order to gain natural resources and utilize the ocean space in the area. Moreover, its accidents has often taken place though their causes are not clarified.

A large discus-buoy is one of observation facilities which have been developed for the observation of marine climate in the sea deeper than 100 m. However, the cost of its manufacture and installation is very expensive and its transportation is not easy. Therefore, a ship-shaped buoy has been newly developed as a substitute of the discus-buoy. The cost of its manufacture is cheaper than that of the discus-buoy, and it seems to have a good stability in seas.

The present paper investigates the characteristics of the motions of the ship-shaped buoy in waves and winds to confirm the applicability of the ship-shaped buoy to the facility for the observation of marine climate by field observation as well as model tests.

The main conclusions are as follows:

- 1) The model experiments confirms that the heave motions of the ship-shaped buoy can estimate the wave heights and periods for the period more than 4.5s.
- 2) The direction of the bow of a ship-shaped buoy departs from the incident wave direction due to the influence of wind, especially, strong wind. The observation of the direction of the bow can not always estimate the wave propagation direction.
- 3) The ship-shaped buoy can be employed as one of observation facilities, because the heave motions of the ship-shaped buoy can estimate the wave profiles with a good accuracy in the results of the comparison with the wave profiles observed by a wave rider buoy in the field experiments.

Key Words: Motions of Floating Body, Ship-shaped Buoy, Model Test, Field Observation of Marine Climate

* Chief of Wave Laboratory, Marine Hydrodynamics Division.

** Member of Wave Laboratory, Marine Hydrodynamics Division.

*** Japan Marine Science and Technology Center.

目 次

要 旨	95
1. ま え が き	99
2. 船型ブイの概要	99
2.1 船型ブイの仕様	99
2.2 数値計算による応答特性の検討	100
3. 模型実験の方法と条件	103
3.1 水路実験における実験方法と実験条件	103
3.2 平面水槽実験における実験装置	108
3.3 平面水槽実験で用いた波と風の特徴	111
3.4 ブイ変位の計算方法	115
4. 船型ブイの波浪応答特性と係留張力	117
4.1 船型ブイの波浪応答特性	117
4.2 係留張力	123
5. 風と波の作用下における船型ブイの運動	124
5.1 船型ブイの動揺量と係留張力	124
5.2 風および波によるブイ船軸方向の変化	126
6. 現地観測の方法	129
6.1 観測地点と観測期間	129
6.2 観測システムと観測項目	131
7. 現地観測への船型ブイの適用性	133
7.1 船型ブイで観測された波高と周期	133
7.2 船型ブイの動揺と係留張力	136
7.3 船型ブイの船軸方向の変化	138
8. む す び	141
参 考 文 献	143
主 要 記 号 表	144

1. ま え が き

国際的な海洋開発の時代を迎えて、我国でも沿岸部より200海里沖合までの海域の有効利用を図る必要性が高まっている。沖合の海域を有効に利用するためには、海象条件を的確に把握しておくことが重要であり、精度のよい海象観測装置を設置する必要がある。

我国沿岸の海象観測は、気象庁をはじめとする数省庁および機関で実施されており、運輸省港湾局でも昭和45年から、全国的な拠点観測網の整備に努めている¹⁾。全国の拠点観測地点では、水深30m以上の海域での波浪観測が行えるように機器設置点および機器の更新を行っている。

水深数十mの海域における波浪観測装置としては、主に超音波式波高計あるいは水圧式波高計が用いられている。超音波式波高計および水圧式波高計は比較的小型で運搬が容易であるという利点を持つ。しかし、測定データを送るために、陸上観測基地まで海底ケーブルを敷設しなければならず、機器の設置の際には、潜水作業が必要である。したがって、水深50m以上の海域で超音波式波高計等を用いることは困難である。

水深100m以上の外洋における海象観測装置としては、大型のディスクスブイが実用化されている²⁾。ディスクスブイは水面と同じ運動をしているので、ディスクスブイの上下動から水面変動を求めることができる³⁾。また、ディスクスブイの傾斜から水面勾配を測定して、水面の上下動と勾配から波向を推定することも可能である⁴⁾。さらに、ブイ上に、風向・風速計等を取り付けることによって海上風の観測を行うことができる。ディスクスブイで取得されたデータは、通常テレメータ方式により無線で陸上局へ送信される。

大型ディスクスブイ以外にも、水深数十m程度の海域における海象観測施設としては、石油掘削用プラットフォームを利用した観測塔⁵⁾および水中浮体式観測塔⁶⁾が実用化されている。水中浮体式観測塔は直立円筒浮体をユニバーサルジョイントで海底に接地した施設で、浮体の側面にステップ式波高計⁷⁾が取り付けられており、浮体の傾斜方向から波向に関する情報も得ることが可能である。これらの大型観測施設は、大波浪に対しても安定しており、優れた観測施設として今後も利用されていくものと思われる。

しかし、これらの大型施設は製作および設置に多額の費用がかかる上に、運搬にも手間がかかる。また、一度設置すると取りはずすことが非常に困難で、観測点を容易に変更することができない。

そこで、廉価で陸上および海上での輸送が簡単な小型の海象観測装置として船型ブイが開発された。船型ブイは小型ヨット程度の大きさの船の形をしたブイで、陸上では小型トラックによって輸送可能であり、海上では、小型船舶によって所定の海域まで曳航することができる。したがって、必要に応じて、観測地点を変更したり、観測を取りやめることが容易にできる。米国では、すでに、V.E. NÖMAD と呼ばれるアルミ製の船型ブイが試作されており、種々の機能に対して試験が行われている⁸⁾。

本研究は、我国において試作された船型ブイの波浪に対する応答特性および波と風の作用下における運動特性を、模型実験および実機を用いた現地観測によって検討し、現地に対する船型ブイの適用性を調べたものである。

船型ブイで波浪観測を行うためには、船型ブイの上下動が水面変動と一致し、ブイの上下動から波高が推定されなければならない。そこで、本研究では、まず、2次元の長水路を用いた模型実験を行い、波浪中におけるブイの動揺特性を検討するとともに、ブイの係留索に作用する張力についても検討した。

次に、ブイの運動特性、特に船軸方向の変化を調べるために、波と風を同時に作用させて、平面水槽において模型実験を行っている。そして、船体の向きが風向および波向とどのような関係にあるか、について検討している。本文中では、2次元長水路における実験、および平面水槽における実験を、それぞれ、“水路実験”および“平面水槽実験”として記述している。

最後に、船型ブイの試作機を用いて、現地観測を行い、船型ブイの運動特性を検討して、ブイの小型波浪観測装置としての実用化の可能性を議論している。

2. 船型ブイの概要

2.1 船型ブイの仕様

本ブイの設計にあたって、対象とした環境条件を表-1に示す。表-1に示すように、船型ブイは水深120~5000m、最大平均風速60m/s、最大有義波高30m程度の環境に耐え得るように設計されている。表-2は、本船型ブイの基本仕様を示したもので、ブイは長さ6m、幅3mのずんぐりした船形をしている。表中の浮心の位置に関する数値は、船体最下端の点を基準として示されている。

図-1は、試作された船型ブイの外観と装備内容を示した図である。図-1に示されるように、船尾にはブイの船軸の向きを安定させるために大型のフィンが付いてい

る。船底からブイ重心までの高さは1.2mであり、船体の傾斜角が140°になるまで復原力を失わない安定性に優れた構造となっている。また、船体はFRP (Fiber Reinforced Plastic) で製作されている。

表1 設計環境条件

No.	項目	条件
1	水深	120~5000 m
2	風速	平均 60 m/S
3	波高	30 m (最大有義波高)
4	波周期	25 sec (最大有義波高時)
5	海潮流	9 knot (最大、風浪による影響を含む)
6	気温	-10~50°C (室内0~45°C、甲板-10~60°C)
7	海水温度	0~45°C
8	湿度	10~100% (室内10~98%)

表2 浮体の基本仕様

長さ (m)	6.0	浮心の前後位置 (m)	0.14
幅 (m)	3.0	メタセンタ高さ (m)	1.64
深さ (m)	2.10	方形係数	0.44
喫水 (m)	1.41	柱形係数	0.62
全容積 (m ³)	19.5	中央横断面係数	0.72
浮心高さ (m)	0.94	水線面係数	0.90

主要諸元

全長	6.0 m
全幅	3.0 m
深さ	2.1 m
マスト高	7.0 m
排水量	約 8 ton
喫水	約 1.4 m

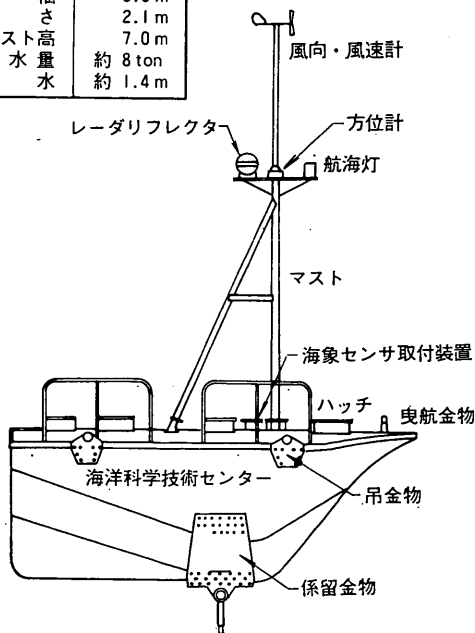


図-1 船型ブイの完成図

ブイは、高さ7mのマストを有しており、マストの頂上にプロベラ式の風向・風速計、マスト中段に磁北からのブイ船首方向の傾きを測るための方位計、航海灯およびレーダリフレクタが取り付けられている。ブイの内部には、ブイの動揺量を計測するピッチ・ロール・ヒーブセンサー²⁾とアルカリ蓄電池が搭載されている。ブイ表面には試験的に太陽電池が取り付けられているが、太陽電池の発電量が現在のところ不明なので、計測器と航海灯の電源にはアルカリ蓄電池を用いている。

ブイの両舷の下部には、薄い板状の係留金物が固定されている。2枚の板は、ブイ横断方向を軸として回転する1本の鉄パイプによって連結されており、このパイプの中央部に、係留索が取り付けられる。ブイ上面の四隅には吊り上げ用のフックが取り付けられており、小型クレーンで吊り上げることができる。ブイの船首には、曳航用のフックが取り付けられており、小型船舶の所有するロープで曳航できる。

写真-1 は、現地観測のために、熱海港へ陸送されたときの船型ブイを撮影したものである。

2.2 数値計算による応答特性の検討

(1) 運動方程式

試作された船型ブイが波浪中でどのような運動をするかを、また、船型ブイが波高計として適用可能かどうか

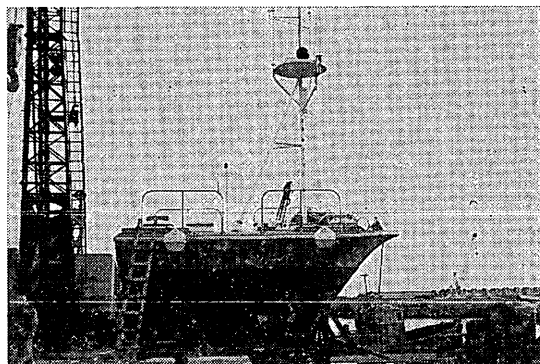


写真-1 船型ブイの外観

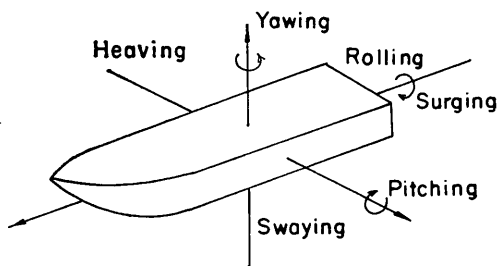


図-2 船体の運動成分¹⁰⁾

をあらかじめ検討するために、数値計算によってブイの動揺量を求めた。

一般に船舶の運動は、図-2 に示すような六つの運動成分に分けることができる。船軸方向の水平運動は surging, 船軸に対して直角方向の水平運動は swaying, 鉛直方向の運動は heaving, 船軸回りの回転は rolling, 船軸と直角方向の軸の回りの回転は pitching, 鉛直軸まわりの回転は yawing と呼ばれている。上記の六成分に関する運動方程式とその解法については、すでに多くの解説書が公刊されている。ここで、本研究で用いた数値計算法について概述する。

船体の運動方程式は6元の連立方程式となり、次のように表される。

$$F_{Ii}(t) = F_{Ri}(t) + F_{Vi}(t) + F_{Si}(t) + F_{Ei}(t) \quad (i=1\sim 6) \quad \dots\dots(1)$$

上式において添字の i は、運動成分を示し、 $i=1, 2, 3, 4, 5$ および 6 は、それぞれ surging, swaying, heaving, rolling, pitching および yawing に対応する。 F_I は船体の慣性力で、船体自身の質量、慣性モーメントに、運動成分の加速度や角加速度を乗じた力である。

F_R は、船体が運動することによって周りの流体から反作用として受けるラディエーション流体力であり、通常船体運動の加速度に比例する成分と速度に比例する成分に分解される。加速度に比例する成分は付加質量あるいは付加慣性モーメントと呼ばれ、速度に比例する成分は造波減衰力と呼ばれる。

F_V は、粘性流体力で、船体運動理論では、船体が細長体であるので rolling についてのみ一般に考慮されている。粘性流体力は速度の2乗に比例する非線形な流体力であるが、角速度に比例する力として擬線形化して取り扱われることが多い。

F_S は、船体運動の変位に比例する復原力で、保留力もこの中に含まれている。

F_E は、外力となる波強成力であり、規則波だけで船体が無いものとして求められるフルード・クリロフ力と、船体の散乱波によって生じるディフラクション力に分けられる^{10), 11)}。

F_E を除く他の力は、運動成分の変位、速度あるいは加速度に比例する力であり、それぞれの比例定数を求めることができ、外力である F_E を求めることができれば、式(1)は連立常微分方程式として解くことができる。

(2) ストリップ法の考え方^{9), 11), 12)}

運動方程式中のラディエーション流体力と波強制力の係数を、厳密に理論的に求めることは困難である。

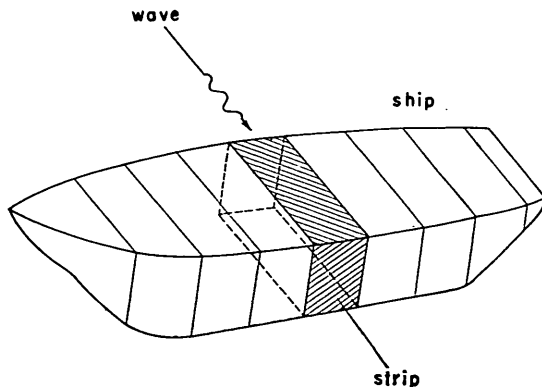


図-3 ストリップ法の考え方

そこで、二次元物体の動揺による流体力に関する知識を用いて三次元物体の流体力を求める手法が便宜的に用いられている。この手法は、ストリップ法と呼ばれ、船体が細長体であることに着目して、船体をカマボコを切るように輪切り(ストリップ)にし、各ストリップに働く二次元の流体力を船長方向に積分することによって、3次元船体に働く流体力を求める。図-3 はストリップの考え方を模式的に示している。

ストリップ法は、最初、Korvin-Kroukovsky や渡辺により開発され、実用的計算法として用いられるようになった¹³⁾。この初期の頃のストリップ法は OSM (Ordinary Strip Method) と呼ばれる。その後、高木、田才が改良を加えた NSM (New Strip Method)^{11), 14), 15)} や、STFM (Salvesen Tuck Faltinsen's Method)¹⁶⁾ が開発され今日広く用いられている。

ストリップ法で船体を切ったときに、その横断面に働く流体力は、船体断面をルイスフォーム断面で近似することによって求められる。ルイスフォーム断面とは、図-4の左側に示すような、左右対称なカマボコ状の断面である。この断面は、右側の単位円からの等角写像で求められ、そのときの写像関係は次式で表される。

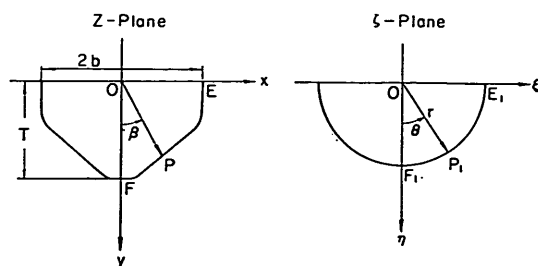


図-4 ルイス断面

$$\frac{w}{R} = \zeta' + \sum_{n=1}^{\infty} a'_{2n-1} \zeta'^{-(2n-1)} \quad \dots\dots(2)$$

ここに、

w ; 船体横断面の複素座標 ($=x+iy$)

ζ' ; 円の断面の複素座標 ($=ire^{-i\theta}$)

R ; 縮率係数

a'_{2n-1} ; 写像パラメーター

である。

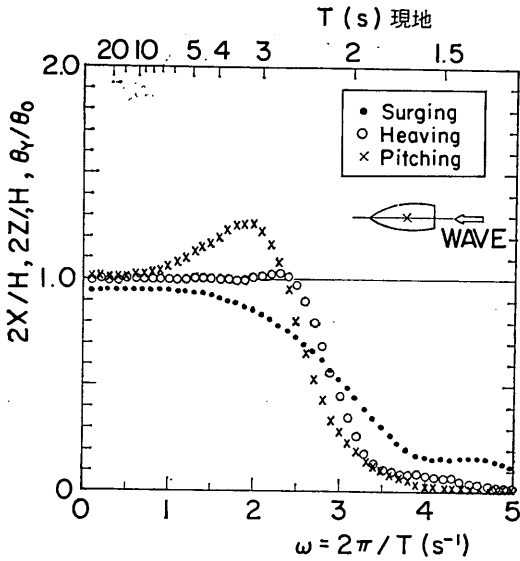
円形断面に働く流体力は、Ursell によって求められ、^{18,19)}その手法を拡張して、田才は、ルイス・フォーム断面に働く流体力を求める手法を確立している²⁰⁾。この手法は、計算時間が短くて済むので最も実用的な手法と言われている。

(3) 数値計算の結果

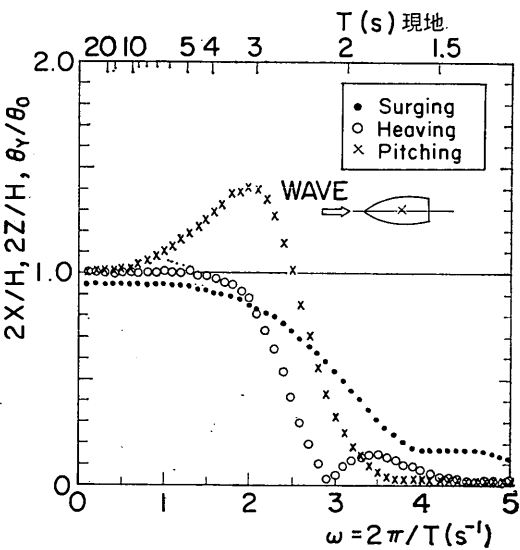
本研究では、船型ブイを細長船舶とみなして、NSM (New Strip Method) によって波浪中におけるブイの動揺を計算した。船体断面はルイス・フォーム断面で近似した。また、船は自由振動をするものとし、周期の異なる規則波が船首、船尾および船腹方向からそれぞれ別個に作用するものとした。

図-5に、数値計算結果を示す。図-5(1), (2), (3)はそれぞれ規則波が船尾、船首および船腹から作用した場合を示す。波が、船首あるいは船尾から作用した場合には、船体は二次元的な動揺しかしないので、運動は、surging, heaving, pitching の3成分のみとなる。また、船腹から作用した場合には surging は生じない。

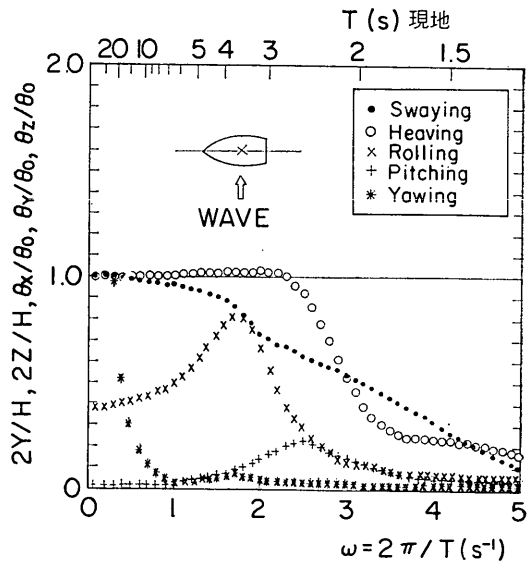
図-5は横軸に角周波数、縦軸に無次元の動揺量を示した。すなわち、surging ($2X$), swaying ($2Y$) および heaving ($2Z$) の両振幅については、波高で除して表し、pitching (θ_Y), rolling (θ_X) および yawing (θ_Z) の片振幅は最大水面傾斜角で除して表した。水面が次式の正弦波形で表されるとすると、



(1) 波が船尾から作用した場合



(2) 波が船首から作用した場合



(3) 波が船腹から作用した場合

図-5 数値計算の結果

$$\eta = \frac{H}{2} \sin(\omega t - kx) \quad \dots\dots(3)$$

最大水面傾斜角は、次式のようになる。

$$\theta_0 = \tan^{-1}\left(\frac{k}{2}H\right) \quad \dots\dots(4)$$

ここに、 ω は再周波数、 k は波数である。

図-5(1)に示されるように、波が船尾から作用した場合には、pitching の無次元量は、 $\omega = 2$ で極大値となり、その値は 1.2 である。そして、周期が長くなると 1 に近づく。heaving の無次元量は、 ω が 2.5 以下になると 1 になる。surging の無次元量は、 ω が小さくなると徐々に 1 に近づくが、1 とはならず 0.95 程度に収束する。

図-5(2)に示されるように、波が船首から作用した場合には、pitching の無次元量の極大値は、波が船尾から作用した場合より大きくなり 1.4 となる。heaving の無次元量は $\omega = 1.5$ 以下で 1 になる。surging の無次元量は、(1)と同様に ω が小さくなると 1 に近づき、0.95 程度に収束する。

波が船首および船尾に作用した場合ともに、 ω が小さくなると、surging, heaving および pitching が 1 に近づくので、長周期の波浪中では、船体は水面に追従して動いている。また、surging と heaving は 1 より大きくなり、pitching の極大値も 1.5 以下なので、共振現象のためにブイが大きく動揺する危険性はない。

船型ブイを波高計として用いるためには、heaving の振幅が波高と一致しなければならない。図-5(1)(2)から判断すると、 $\omega < 1.5$ すなわち現地で 4 s 以上の周期を持つ波に対しては、heaving の振幅と波高とがよく一致しており、heaving 運動から波高が推定できる。実際の海の波では、ほとんどの波の周期は 4 s 以上であるので、船型ブイの heaving から波高を推定しても大きな支障は起きない。

前述したように、船体の pitching は $\omega = 2$ で共振のために極大になる。極大値が 1.5 であるとし、波形勾配が大きく、0.05 であるとする。 $\omega = 2$ であるので、最大水面傾斜再 θ_0 は式(4)から計算できて、 8.8° となる。pitching の無次元量が 1.5 であるので、船体の実傾斜角は、 13.2° となり、復原性能と比較すると十分小さく、船型ブイが転倒することはない。

図-5(3)の船腹から波が作用した場合を見ると、船体の無次元の動揺量は 1 より大きくなり波との大きな共振は起きていない。特に、pitching と yawing は非常に小さく無次元量が 0.2 以下である。船体の rolling の固有角振動数は 1.6 程度であり、 $\omega = 1.6$ のとき、rolling は極大値をとるが、その無次元量は 0.8 程度で大きくは

ない。船型ブイには、大型のフィンが付いているので rolling に対しては非常に安定していると言える。

heaving の振幅は、 $\omega < 2.5$ すなわち $T > 3$ s の範囲で波高と一致しており、船腹から波を受けた場合には、現地において周期 3 s 以上の波については、波高を求めることが可能であると考えられる。

以上のように、いずれの方向から波が作用した場合でも、周期 4 s 以上の波については波高と船型ブイの heaving 振幅が一致しており、現地において船型ブイの heaving を測定することにより波高と周期を求めることが可能であると推定できる。

ただし、数値計算法では船体が細長体であり、船体運動方程式が線形であるというような多くの仮定を含んでいる。また、船尾のフィンの影響や、係留による浮体運動の変化などが十分に考慮されていないので、次章からは、模型実験によって船体の動揺特性を明らかにする。

3. 模型実験の方法と条件

3.1 水路実験における実験方法と実験条件

(1) 船型ブイの模型

模型実験を行うためには、実機に対する模型の縮尺を決めることが重要である。模型縮尺は 1/2, 1/5 のように大きいほど、現地の状態を正確に再現することができる。しかし、通常、実験水槽の大きさに制限があるため

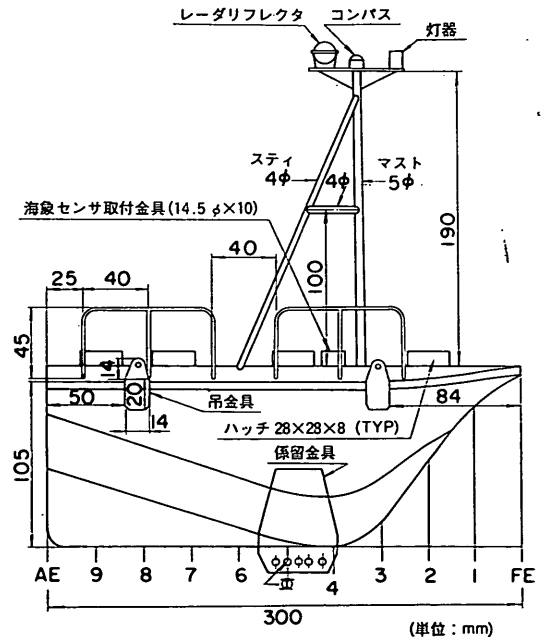


図-6 船型ブイの模型側面図

に、水理模型実験の場合 1/20~1/100 程度の縮尺となることが多い。

本実験では、1/20 縮尺の模型を製作して実験を行った。図-6 は、1/20 縮尺の船型ブイの模型を示した図である。

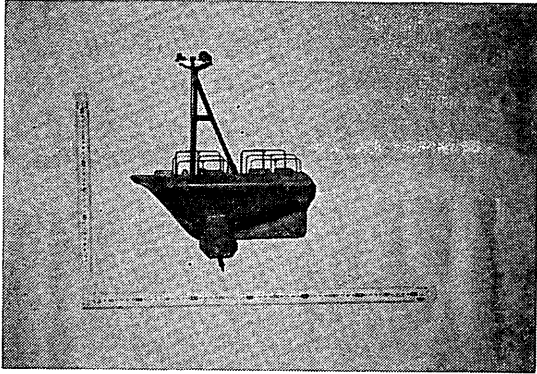


写真-2 船型ブイ模型の外観

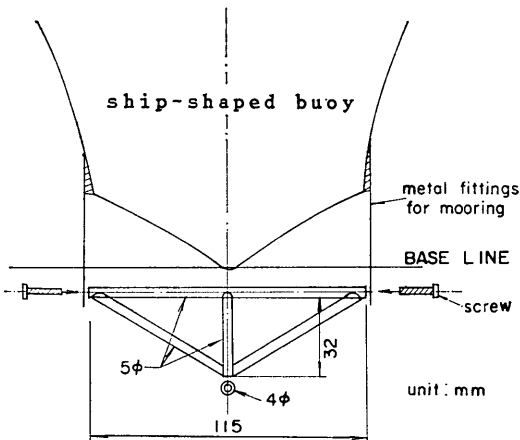


図-7 係留装置取り付け部分

る。ブイ模型の船長は30 cm、マスト長19 cmであり、実機と同様に FRP で製作した。船内には鉛製のバラストを接着剤で固定して、ブイの重心位置等が実機と一致するように調整した。写真-2 は、製作完了した船型ブイの模型を示したものである。

図-6 において、○の印で示した点が船型ブイの基準点であり、重心位置、吃水等は、すべてこの点を基準にして示した。図の係留金具は船の左右両舷に固定されている。係留金具の下部に5個の穴が開いているが、このうちの真中のものに回転可能な連結棒を取り付け、連結棒に係留装置を取り付けた。係留装置取り付け部の詳細を、図-7 に示す。図-7 のビス止めされた部材が回転可能な連結棒(係留用シャフト)である。シャフト中央の円型金具に係船索は取り付けられる。

実験では、水路実験でも平面水槽実験でも2個の豆電環を船体に取り付けたので、2組の電源コード($\phi 1 \times 2$)が船体に沿って貼り付けられており、船尾と船首で船体から離れて空中あるいは水中に延びている。

(2) 実験装置と実験方法

最初に、非係留および係留時の船型ブイの波浪応答特性を調べるために、長水路において二次元水路実験を行った。

図-8 に、水路実験で用いた実験装置および装置の配置を示す。実験に用いた水槽は、長さ40m、幅1.5m、深さ1.5mの長水路であり、水路中央部付近の水槽壁がガラス張りになっており、模型の運動を水路の断面方向から観測できるようになっている。水路の一端には、ピストンタイプの不規則波造波装置が設置されており、0.7s以上の周期を持つ波を造波することができる。もう一方の端と造波機の背後には、ステンレス切片を詰めた消波工が設置されている。

ブイ模型は、伸びが極めて小さいナイロン製の釣り糸を

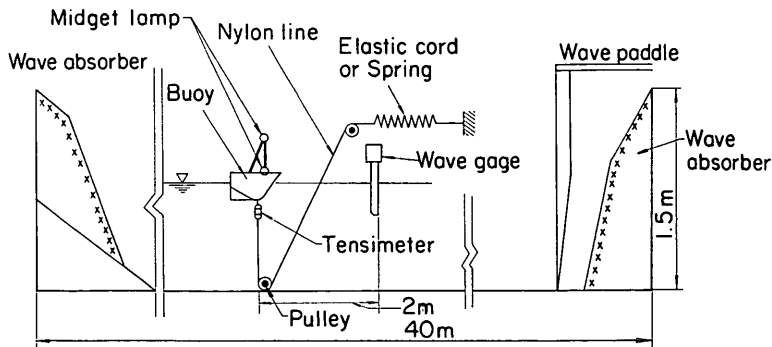


図-8 水路実験における実験装置

用いて水槽中央付近に係留した。釣り糸は、水路床上の滑車を介して、水面上に設置された架台上のバネ、ゴム等の弾性体に結ばれており、このバネあるいはゴムを変えることによって係留系全体の伸び特性を変化させた。

ブイの係留索に作用する張力は、ブイとナイロン製釣糸の間に小型張力計をつけて測定した。小型張力計のケーブルあるいはナイロン製係留索がねじれて、船型ブイが静水中で回転することのないよう、張力計と船型ブイは、釣りで良く使われる“よりもどり”を介して結ばれている。張力計は、実験前にあらかじめ分銅を釣るして検定した。

ブイに作用する波は、ブイ設置点から2m造波板側の点で容量式波高計によって測定した。実験中は、ブイ設置点から造波機と反対側へ2m離れた点にも容量式波高計を取り付け、ブイの動揺によって、ブイに作用する波の波高および周期が変化していないかどうかを調べた。2本の波高計で測定された波の統計量は一致していたので、ブイ設置点での作用波の諸元としては、図-8で示される波高計で測定された統計量を用いた。

また、ブイのマストの頂上と根元に1.5Wの豆電球をつけ、水槽側面のガラス壁を通して、X-Yトラッカーで、この2つの光点の鉛直面内における変位を測定した。

X-Yトラッカーは、テレビカメラを応用した光点追

跡装置で、カメラで撮影し、テレビに写された画像の中で、最初に指定した光点の変位を出力する装置である。実験では、ブイの電球を点灯する前に、10cm格子上に豆電球を配置した検定板を水槽内に入れてX-Yトラッカーの出力の検定を行った。本実験で用いたトラッカーは、1台のカメラで2つの光点の座標を同時に求めることができる。

(3) 実験条件と係留索の特性

船型ブイの設置が予定される海域の水深は100m以上であり、縮尺1/20で実験を行うと、実験水槽の水深は5m以上必要になる。しかし、実験水槽の水深は最大でも1.5mしかとれず、波を造波したときに水面が上昇することを考慮すると実験水深は1m以下にしなければならない。さらに、本実験水路には走行台車を取り付けてあり、水深が大きい場合には、波高が大きい波は台車の下部に当たってしまう。そこで、本実験では、実験水深を80cmとして一定とした。

表-3に、水路実験の実験ケース一覧表を示す。表中、および以下の文章中の数値はすべて模型での値とし、現地換算値は〔 〕で示した。

表-3に示すように、実験では、規則波および不規則波を作用させた。規則波は周期0.7s〔3.1s〕から2.5s〔11.2s〕まで、0.1~0.2s毎に周期を変化させて作用させた。実験で用いた造波機では、波高が大きくなると正

Mooring Condition	Regular wave									Irregular wave							
	Free			Spring			Elastic cord			Spring			Elastic cord				
	T (s)	H (cm)	H/L	T (s)	H (cm)	H/L	T (s)	H (cm)	H/L	T _{1/3} (s)	H _{1/3} (cm)	H/L	T _{1/3} (s)	H _{1/3} (cm)	H/L		
1	0.7	3.2	0.04	0.7	2.5	0.03	0.7	3.0	0.04	①	1.70	2.47	0.006	①	1.67	2.45	0.006
2	0.8	2.3	0.02	0.9	6.4	0.05	0.9	5.8	0.05		1.69	2.47	0.006		1.70	2.49	0.006
3	0.9	6.2	0.05	1.0	6.7	0.04	1.0	6.3	0.04		1.72	1.72	0.004		1.76	1.69	0.004
4	1.0	7.3	0.05	1.2	7.8	0.03	1.2	7.7	0.03		1.71	1.68	0.004		1.72	1.74	0.004
5	1.2	8.6	0.04	1.2	4.8	0.02	1.5	5.6	0.02								
6	1.3	9.6	0.04	1.5	5.9	0.02	1.8	5.1	0.01	②				②			
7	1.3	5.6	0.02	1.8	5.3	0.01	2.0	4.8	0.01		1.70	6.63	0.016		1.67	7.39	0.019
8	1.4	5.4	0.02	2.2	4.6	0.01	2.2	4.3	0.01		1.67	6.65	0.017		1.65	7.21	0.019
9	1.5	11.9	0.04	2.5	4.7	0.01	1.5	11.9	0.04		1.66	4.71	0.012		1.70	5.37	0.013
10	1.5	5.9	0.02	1.5	12.6	0.04	2.0	10.6	0.02		1.68	4.64	0.012		1.68	5.19	0.013
11	1.6	11.3	0.03	2.0	10.9	0.02	2.5	9.7	0.01					③			
12	1.7	11.1	0.03	2.5	9.7	0.01				③							
13	1.7	5.5	0.01								2.44	1.71	0.002		2.48	1.99	0.002
14	1.8	10.2	0.02								2.56	1.77	0.002		2.50	1.95	0.002
15	1.9	9.8	0.02								2.47	2.35	0.003		2.54	2.56	0.003
16	2.0	10.8	0.02								2.54	2.38	0.002		2.53	2.48	0.003
17	2.0	5.6	0.01														
18	2.1	11.4	0.02														
19	2.2	9.5	0.02														
20	2.2	4.9	0.01														
21	2.3	4.8	0.01														

表-3 水路実験の実験ケース

弦波形をもった規則波を造波することが困難であった。そこで、規則波の波高は、波形勾配が、0.02以下になるように、各周期に応じて設定した。いくつかの周期については、波形勾配の相違による応答特性の相違を調べるために、波形勾配 H/L を0.04に設定した。

不規則波は、Bretschneider-光易型の周波数スペクトル²¹⁾を持つ、目標有義波周期 $T_{1/3a}$ が1.8 s [8.1 s]で、目標有義波高 $H_{1/3a}$ が3 cm [0.6 m]、および8 cm [1.6 m]の波と、 $T_{1/3a}$ が2.7 s [12.1 s]で、 $H_{1/3a}$ が3 cm [0.6 m]の3種類の波を作用させた。各波をWAVE 1, 2, および3とする。各波とも、異なる2つの波連について、2回計測を行った。表-3の有義波高 $H_{1/3}$ 、有義波周期 $T_{1/3}$ はそれぞれ実測した値を示しており、表中の丸数字が波の番号を示す。各波において波群が2種類、各波群について計測回数が2回あるので、表中には、4回の測定値が示されている。実験結果は、4回の計測値の平均値として整理した。

係留索の相違による波浪応答特性の変化を調べるために、ブイの係留状態は無係留、係留力の小さいゴム係留、係留力の大きいコイルバネ係留の3通りとした。図-9に実験で用いた係留索の伸び特性を示す。伸び特性は、実験室内でコイルバネあるいは糸ゴムに100 g~1 kgの分銅を釣るして、ゴムおよびバネの伸びを測定することによって求めた。

図-9の縦軸は作用張力 T_R を示し、横軸は、実験で用いたバネおよび糸ゴムの伸びを、ブイ下端からアンカー点の滑車までの距離で割った伸び率を示す。コイルバネの伸び率は糸ゴムの伸び率に比べると1/5程度で非常に小さく、100gfの荷重をかけてもほとんど伸びなかった。

実験では、現地での係留状態を考慮して、静水状態でブイに作用する初期張力はないものとした。

予備実験は、ブイの初期の向きを変化させて、船首方向から波が作用する、船尾方向から波が作用する、船腹方向(直横)から波が作用する場合の3つのケースについて行った。船体の初期状態を船尾および船腹から波が作用するように設定した場合には、ブイは急速に回転

し、ほぼ波向に船首を向け、船首から波を作用させた場合と同様になった。そこで、実験では船首から波が作用するようにブイを設置した。船首が向く方向を船軸方向とする。船軸方向が波向とはほぼ同じ向きになるのは、船型ブイの船尾に付いているフィンと船影の影響と思われる。数値計算では、船腹から波が作用する場合でもブイの向きが波向に向くようにはならなかった。したがって、船型ブイのような小型で大きなフィンが付いている船体の運動を求めるためには、長周期運動を考慮できる数値計算法を応用しなければならない。

実験では、規則波の場合、約1分間波を作用させ、ブイの向きが安定した後、30秒間、水位、ブイ変位、張力を計測した。不規則波の場合、約4分間波を作用させ、ブイの向きが安定した後、約3分間計測を行った。計測されたデータはアナログデータレコーダに収録され、実験終了後、A/D変換器を用いてデジタルデータに変換して計算機用の磁気テープに再収録した。アナログデータをデジタルデータに変換する際のサンプリングタイムは、規則波の場合、0.05 s、不規則波の場合、0.2 sとした。波、ブイ変位、張力の解析は、磁気テープを用いて当所大型計算機で行った。解析に用いた各チャンネルあたりのデータ数は、規則波の場合512、不規則波の場合1024個である。

規則波を作用させた場合の解析は、ペンレコーダ等で記録されたアナログデータを用いて行われることが多い。しかし、本実験では、(5)に述べるように、測定されたブイの2光点の変位から計算によって、ブイの heaving, surging, pitching を求めなければならないので、すべて計算機によって解析を行った。

(4) 実験波の特性

実験水路内で不規則波を造波する場合、造波機に与える造波信号は、 N 個の正弦波の重ね合わせとして次式のようにシミュレーションできる²²⁾。

$$\zeta(t) = \sum_{n=1}^N \frac{a_n}{F_n} \cos(\omega_n t + \varepsilon_n) \quad \dots\dots(5)$$

ここに、

$\zeta(t)$; 造波板の時間 t における変位

N ; 周波数分割数

a_n ; n 番目の成分波の振幅

ω_n ; n 番目の成分波の角周波数 ($= 2\pi f_n$)

f_n ; n 番目の成分波の周波数

F_n ; n 番目の成分波の造波効率

ε_n ; 乱数で与えられる n 番目の成分法の位相角

F_n は、ピストン型造波機の場合、次式で与えられる²³⁾。

$$F_n = 4 \sinh^2 k_n h / (2k_n h + \sinh 2k_n h) \quad \dots\dots(6)$$

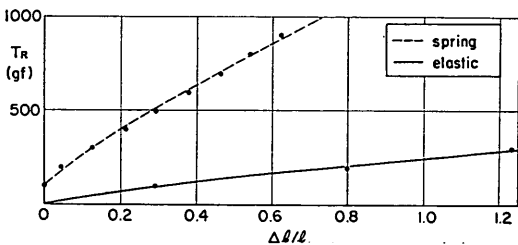


図-9 係留索の伸び特性

ここに k_n は成分波の波数, h は水深である。

各成分波の振幅 a_n は次式で与えられる。

$$a_n = \sqrt{2 \int_{f_{n-1}}^{f_n} S(f) df} \quad \dots\dots(7)$$

ここに, f_{n-1} , f_n は, n 番目の正弦波が代表する周波数帯の下限と上限値である。周波数の分割法としては各成分法の振幅がほぼ同程度となるように周波数スペクトルを等エネルギー分割する手法を用いた²⁴⁾。

周波数スペクトルは, 前述したように, 次式で示す Bretschneider - 光易型を採用した²¹⁾。

$$S(f) = 0.257 H_{1/3}^2 T_{1/3} (T_{1/3} f)^{-5} \times \exp\{-1.03(T_{1/3} f)^{-4}\} \quad \dots\dots(8)$$

実際には, 式(5)はある時間間隔 Δt ごとに計算されて, 造波機に出力される。本実験の場合, $\Delta t = 0.04$ s, $N = 50$ とした。

前述したように, 波高計で収録した水位データはデジタルデータに変換し, 計算機で解析する。本実験では波の解析にはゼロアップクロス法を用いて, 有義波高 $H_{1/3}$, 有義波周期 $T_{1/3}$ を求めた。規則波の場合, $H_{1/3}$ および $T_{1/3}$ が波高 H と周期 T に相当する。

不規則波を作用させた場合には, FFT 法²⁵⁾ によって周波数スペクトルを求めた。

図-10 は, 本実験で用いた不規則波の周波数スペクトルを示したものである。実線が実験波のスペクトル, 破線が, $H_{1/3}$ と $T_{1/3}$ から式(8)によって計算される理論スペクトルを示す。

エネルギー密度がピークとなるピーク周波数付近では, 実験波のスペクトルの方が理論スペクトルより若干

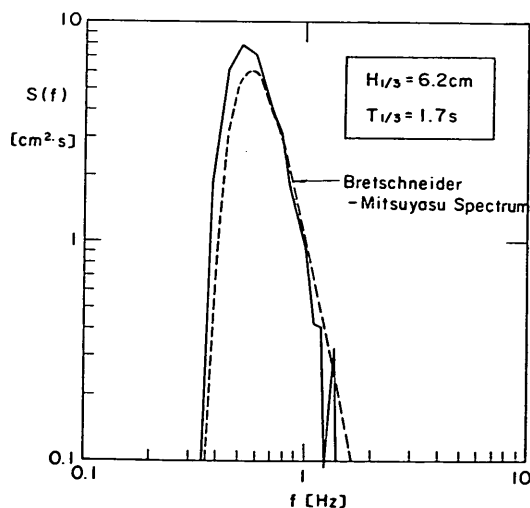


図-10 作用波の周波数スペクトル

大きくなっているが, 実験波のスペクトルと理論スペクトルはほぼ同一の形状を示し, ほぼ目標とするスペクトル形を持った不規則波が造波されていることがわかる。

(5) ブイ変位の計算方法

実験で測定されるデータは, マストの頂上と下端に取り付けられた2つの豆電球の変位であるから, ブイの動揺量を求めるためには, ブイ重心の変位を計算しなければならない。

図-11 は船体変位に関する座標系を示したものである。図中, $X-Z$ は空間に固定された座標系で, 原点を静水面上にとった。 $x-z$ はブイ上に固定された座標系で, 原点は, 図-6 に示したブイ下面の基準点とした。 P_1, P_2 および G は, それぞれブイマスト上に取り付けた電球と重心を示す。 P_1, P_2, G の空間固定座標を $(X_1, Z_1), (X_2, Z_2)$ および (X_G, Z_G) とし, ブイ固定座標系における座標を $(x_1, z_1), (x_2, z_2)$ および (x_G, z_G) とする。空間固定座標系に対するブイ固定座標系の傾き角を θ とすると, 座標点間で次の関係が成立する。なお (X_0, Z_0) は, ブイ固定座標系原点の空間固定座標系における座標値である。

$$\begin{aligned} X_1 &= X_0 + x_1 \cos \theta + z_1 \sin \theta \\ Z_1 &= Z_0 - x_1 \sin \theta + z_1 \cos \theta \\ X_2 &= X_0 + x_2 \cos \theta + z_2 \sin \theta \\ Z_2 &= Z_0 - x_2 \sin \theta + z_2 \cos \theta \\ X_G &= X_0 + x_G \cos \theta + z_G \sin \theta \\ Z_G &= Z_0 - x_G \sin \theta + z_G \cos \theta \end{aligned} \quad \dots\dots(9)$$

今, ブイ固定座標系における座標は, 図-11 に示したように既知であり, $x_1 = x_2$ の関係にある。 $x_1 = x_2$ を式(9)に代入すると, 座標軸 X と x のなす角, すなわち, ブイの pitching 変位 θ が次のように計算できる。

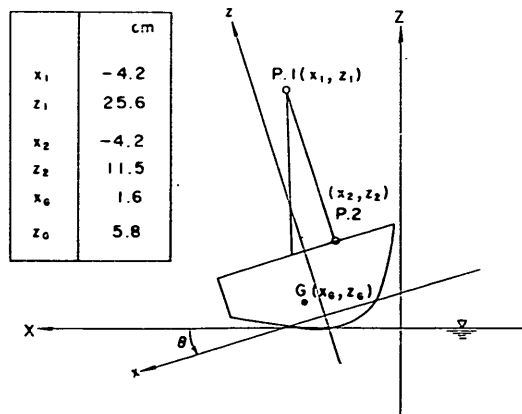


図-11 船体変位に関する座標系

$$\tan\theta = \frac{X_1 - X_2}{Z_1 - Z_2} \quad \dots\dots(10)$$

(X_1, Z_1) と (X_2, Z_2) は実験における測定データであるので、測定値 X_1, Z_1, X_2, Z_2 の時系列から式(10)によって θ の時系列が計算できる。

ブイ重心の空間固定座標は次式で求めることができる。

$$\begin{cases} X_G \\ Z_G \end{cases} = \{X_1 - (x_1 \cos\theta + z_1 \sin\theta)\} + x_G \cos\theta + z_G \sin\theta$$

$$= \{Z_1 + (x_1 \sin\theta - z_1 \cos\theta)\} - x_G \cos\theta + z_G \cos\theta \quad \dots\dots(11)$$

X_G の時系列がブイの surging 変位量, Z_G がブイの heaving 変位量を示し, X_G および Z_G を解析することによって, ブイの surging と heaving 動揺量を求めることができる。

3.2 平面水槽実験における実験装置

(1) 実験装置と実験方法

平面水槽実験では, 風と波を同時に作用させて現地に近い状態を再現してブイの動揺特性を調べた。

図-12 は, 平面水槽実験における模型, 造波装置および送風機の平面配置を示した図である。また写真-3 は, 実験の様子を示したものである。

平面水槽は, 当所大水深海洋構造物実験棟の切れ波造波水槽であり, 長さ35m, 幅25m, 深さ1.2mである²⁶⁾。水槽の一端の水路壁に沿ってサーペント型造波装置²⁷⁾が設置されており, 残りの3方の側壁には, 横スリットを持った階段護岸状のコンクリート製消波工が設置されている。サーペント型造波機は, 造波板幅 80 cm のピストンタイプの造波機35台から成っている。各造波機には独立の信号を入力できるので, 一方向不規則波および多方向不規則波²⁸⁾が造波できる。また, 波向をある範囲で任意に変えることが可能である。実験では, 30台の造波機を用いたので, 造波板総延長は図-12 に示すように, 24 mである。写真-4 はサーペント型造波機を正面から見たところである。

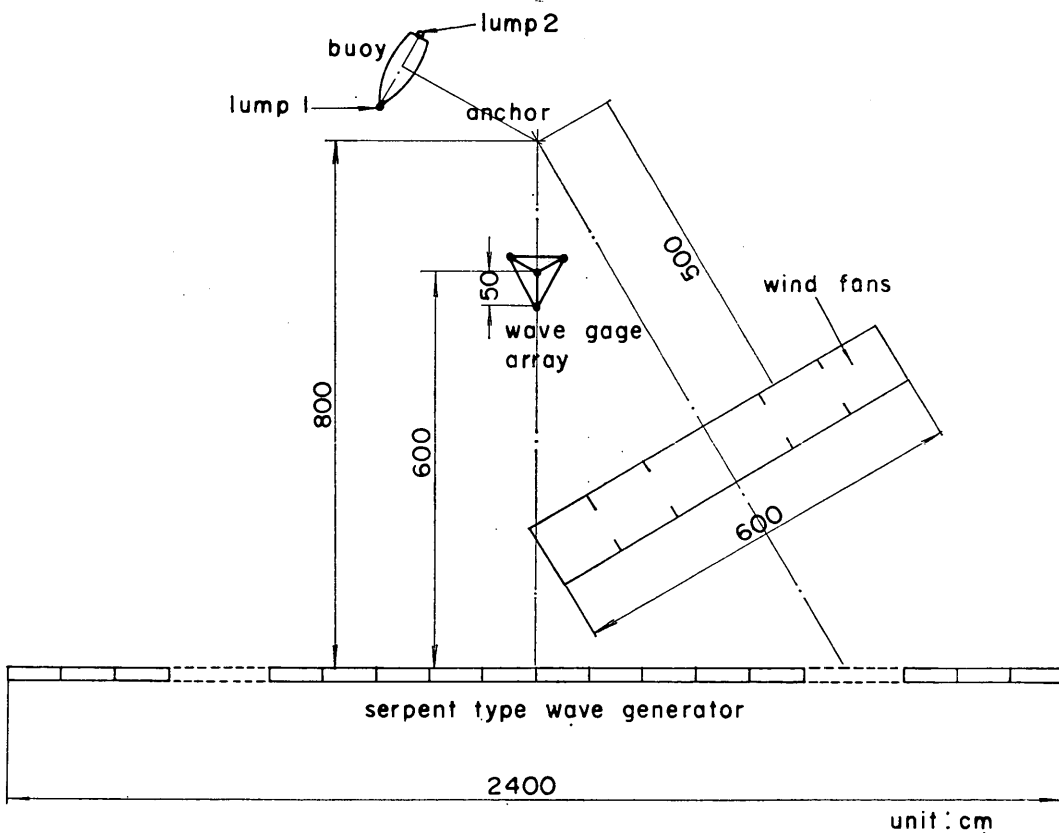


図-12 平面水槽実験における実験装置

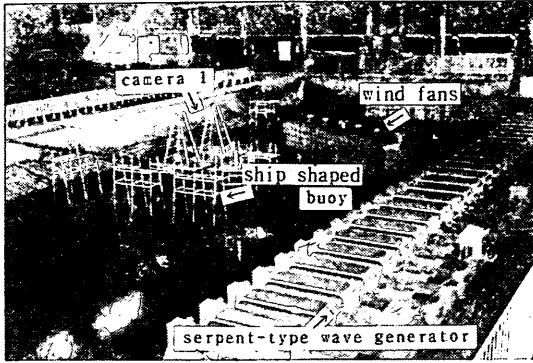


写真-3 平面水槽実験の状況

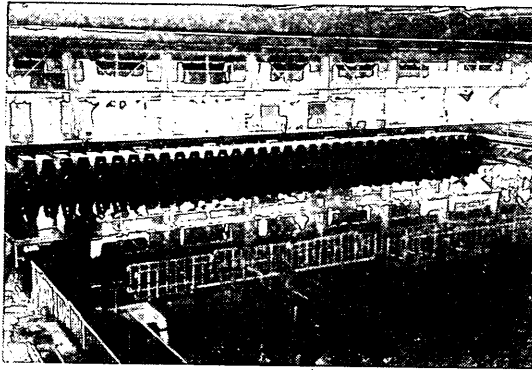


写真-4 サーペント型造波装置

ブイの模型は、造波板列から6 m離れた中央点にアンカー用の滑車を水底に置いて設置した。ブイの係留方法は水路実験と同様にして、伸びが極めて小さいナイロン製釣り糸を用いて係留し、ナイロン製釣り糸は水面上の架台に置かれた糸ゴムあるいはコイルバネに結んだ。ナイロン製釣り糸とブイの係留用シャフトの間には、水路実験と同様に、釣りの“より戻り”と超小型張力計を取り付けた。

ブイには、船首と船尾の2ヶ所にそれぞれLump.1と2の豆電球を取り付けた。そして、写真-3に示すように、ブイ上方に測定用架台を設け、ブイ模型の上方1.5 mと、ブイ模型の斜め上方に、それぞれ X-Y トラッカーのカメラ1および2を取り付けて、ブイの2光点の変位を測定した。

ブイ設置点から造波板側へ2 m離れた地点には、図-12に示すように、正三角形の3頂点および中心点に波高計を取り付けた波高計アレイを設置した。そして、4台の波高計の同時記録から、入射波の波高、周期、周波数スペクトルを求めるとともに方向スペクトルを求めた。方向スペクトルの解析方法は、従来から多くの手法が提案されている^{29),30),31),32)}。本実験では、そのなかで最近に開発され、信頼度の高いベイズ型モデルを使った手法を用いた³³⁾。

ブイ設置点から5 m離れた点には、径1 mのファンを6台横一列に並べた送風機を設置した。写真-5に本実

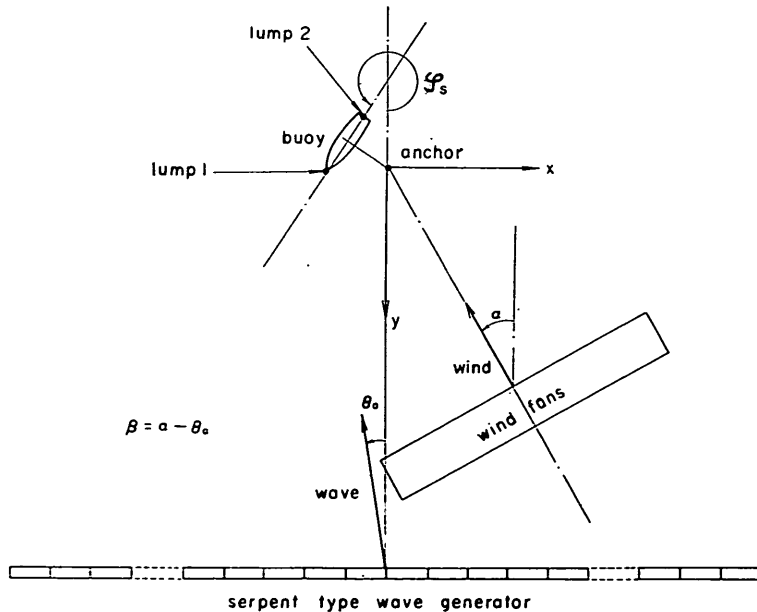


図-13 平面水槽実験における座標系と角度の定義

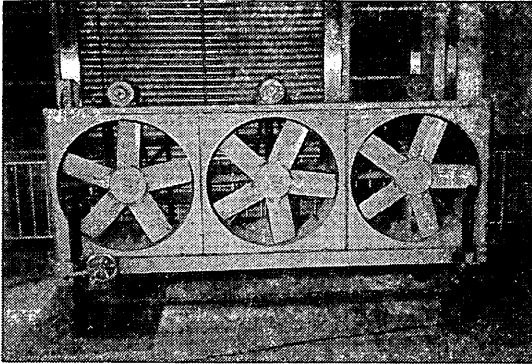


写真-5 送風機

で用いた送風機の外観を示す。送風機は、可搬式で、送風機の向きを移動させることによって自由に風向を変えることができ、またファンの回転数を調整することによって、風速の異なった定常風を発生させることができる。しかし、ファンの高さを調整することはできず、ファンの高さを高くするためには、送風機の架台の下にブロック等でマウンドを作っておく必要がある。

実験においては、風および波を作用させてブイがほぼ一定の場所で定常的な運動を始めてから4分間計測を行った。計測したデータは、4本の波高計で測定した水位変動（4点）、2台のX-Yトラッカーで測定した2光点の変位（8種類）および張力計で求めた変動張力（1個）である。

データはすべてアナログデータレコーダに収録した後A/D変換器を用いてデジタルデータに変換した。デジタルデータのサンプリングタイムは0.2sである。デジタルデータは計算機用の磁気テープに収録し、大型計算機を用いて解析を行った。解析に用いたデータ数は1ケース当たり1024個である。

(2) 実験条件

図-13に、平面実験で用いた座標系と角度の定義を示す。ブイのアンカー点の鉛直上方の静水面上の点を空間固定座標系の原点と考え、水平軸 $x-y$ を図のようにとった。 z 軸は鉛直軸で上方を正とする。 y 軸を基準線として、波向 θ_a は y 軸を 0° として定義した。風向 α も風と y 軸のなす角度として図のように定義した。 β は、 $\alpha - \theta_a$ で定義される波と風の相対角である。

ブイの船軸方向を φ_s とし、船軸方向が y 軸と一致したときを 0° として、反時計回りを正として定義した。

実験水深は、水路実験で考察したように、なるべく深い方が好ましいが、送風機の架台が低いこと、水中作業をしなければならないことから、水深 h は60cmとした。

Case, No.	θ_a	α	β	\bar{U}	T	H_a	$S_{max a}$
	[deg]	[deg]	[deg]	[m/s]	[sec]	[cm]	
001	0			0	1.5	5	888
002					2.0	10	888
003					2.4	20	888
004					2.0	10	10888
010		30		1			
020				2			
040				4			
311	0	30	30	1	1.5	5	888
312					2.0	10	888
313					2.4	20	888
314					2.0	10	10888
321				2	1.5	5	888
322					2.0	10	888
323					2.4	20	888
324					2.0	10	10888
341				4	1.5	5	888
342					2.0	10	888
343					2.4	20	10888
344					2.0	10	10888
011	30	30	0	1	1.5	5	888
012					2.0	10	888
013					2.4	20	888
021				2	1.5	5	888
022					2.0	10	888
023					2.4	20	888
041				4	1.5	5	888
042					2.0	10	888
043					2.4	20	888
611	0	60	60	1	1.5	5	888
612					2.0	10	888
613					2.4	20	888
614					2.0	10	10888
621				2	1.5	5	888
622					2.0	10	888
623					2.4	20	888
624					2.0	10	10888
641				4	1.5	5	888
642					2.0	10	888
643					2.4	20	888
644					2.0	10	10888
911	-30	60	90	1	1.5	5	888
912					2.0	10	888
913					2.4	20	888

表-4 平面水槽実験の実験ケース

ブイの係留方法としては、バネ定数の小さい糸ゴム係留のみとした。

表-4に、実験ケースの一覧表を示す。実験波は、目標有義波高 $H_{1/3a} = 5\text{cm}$ 、目標有義波周期 $T_{1/3a} = 1.5\text{s}$ の波1と、 $H_{1/3a} = 10\text{cm}$ 、 $T_{1/3a} = 2.0\text{s}$ の波2、および $H_{1/3a} = 20\text{cm}$ 、 $T_{1/3a} = 2.4\text{s}$ の波3を用いた。波1、2、3は単一方向の不規則波である、また、 $H_{1/3a} = 10\text{cm}$ 、 $T_{1/3a} = 2.0\text{s}$ の多方向不規則波である波4を造波した。多方向不規則波の方向集中度を表すパラメータは³⁴⁾、波が外洋波浪であると仮定して、 $S_{max a} = 10$ とした。ただ

し、これは造波信号をシミュレーションしたときの設定値である。また、主波向 θ_a が 0° のときのみ $S_{maxa}=10$ の多方向波を用いて実験を行い、 θ_a が 0° 以外のときは単一方向波のみを用いた。

風は、ブイの設置点付近の1分間平均風速 \bar{U} が 1 m/s [現地で 4.5 m/s]、 2 m/s [8.9 m/s]、 4 m/s [17.9 m/s] となる3種類の定常風を作用させた。

また、波向と風向は、波と風の相対角 β が 0° 、 30° 、 60° 、 90° と変化するように設定した。表中、ケース番号において、上1ケタが相対角を示し、2ケタ目が風速、3ケタ目が波の種類を示す。ケース番号001~004は波だけを作用させたケース、010~040は風だけを作用させたケースである。

3.3 平面水槽実験で用いた波と風の特性

(1) 風の特性

予備実験として、送風機前面における風速の分布を調べた。

図-14 は、送風機前面における風速測定点を示す。風速測定点は No. 1~No. 24 で、それぞれ、水面上 5 cm と 20 cm における風速を調べた。風速の測定には熱線風速計を用いて1分間ずつ3回同一点で風速を測定し、その平均値を、風速 \bar{U} として整理した。

図-15 は、測点 No. 1~24 における風速の分布を示す。図-15 (1), (2) はそれぞれ水面上 5 cm および 20 cm における分布を示す。図-15 の D は、送風機の出力を調整するダイヤルの値で、 D が大きくなると、ファンの回転数が増加する。

図-15 (1), (2) において、 D が増加すると全点で風速は大きくなるのがわかるが、測点によって風速に若干のばらつきがある。特に No. 7, 14, 20 における風速は他点に比べると、 $D=8$ の場合には、 $3\sim 4\text{ m/s}$ も高くなっている。図-14 をみると No. 7, 14, 20 は一直線上に並んだ点であり、このライン上の点だけが風速が大きくなっている原因としては、このラインの延長線上にあたるファンの回転数が高機よりも若干大きくなっていることが考えられる。No. 7, 14, 20 を除くと、風速は、ほぼ一様な分布をしている。ブイ設置点は、図-14 の No. 16 に相当するので、ブイ設置点を中心に 2 m 四方の実験領域ではほぼ一様な風速分布が得られるものと思われる。

そこで、No. 16 における風速をブイに作用する風速と考えた。図-16 は、No. 16 における風速を示した図である。送風機のダイヤル D が2以上では、ダイヤル値と風速はほぼ比例する。また、水面上 5 cm と水面上 20 cm での風速はほとんど同一である。したがって、ブイの船体には、高さ方向にも一様な風速が作用するものと推定さ

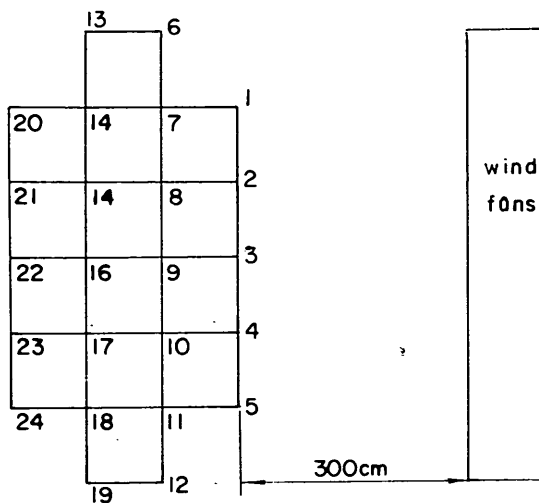
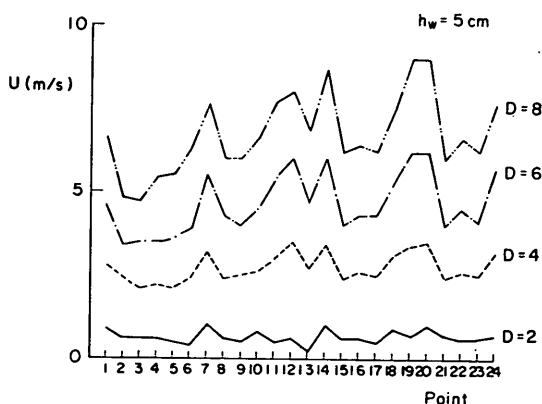
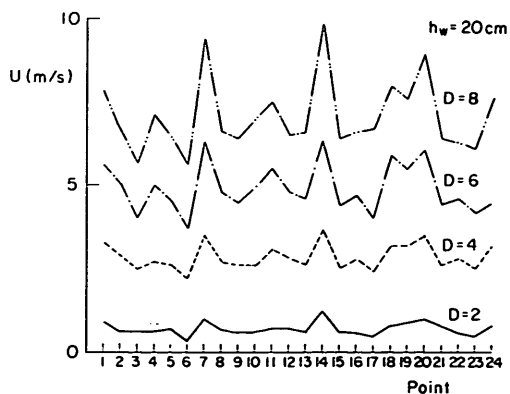


図-14 風速の測定点



(1) 水面上 5 cm における分布



(2) 水面上 20 cm における分布

図-15 風速の分布

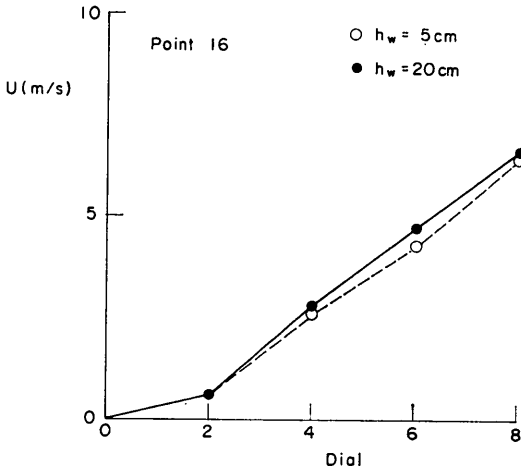


図-16 No. 16 における風速

れる。

実験では、作用風速 \bar{U} を 1 m/s, 2 m/s, 4 m/s と設定したので、図-16の水面上 5 cm における風速とダイヤル値の関係から、実験時に設定すべき送風機のダイヤル数を決定した。

(2) 波の造波方法

サーベント型造波機の造波方法と造波特性については、文献³⁵⁾が詳しく説明している。

サーベント型造波機で多方向不規則波を造波する場合、 l 番目の造波板の時間 t における変位 $\zeta(t, l)$ は次式で与えられる。

$$\zeta(t, l) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \frac{a_{nm}}{F_n} \times \cos(\omega_n t + lk_n b \sin \theta_m + \varepsilon_{nm}) \quad \dots\dots(12)$$

ここに、 N ；周波数分割数

M ；方向分割数

a_{nm} ； $n \times m$ 番目の成分波の振幅

b ；造波板幅

F_n ；式(6)で示されるピストンタイプ造波機の造波効率

θ_m ；成分波の波向

ε_{nm} ；乱数で与えられる位相角

である。

a_{nm} は次式で定義される。

$$a_{nm} = \sqrt{2 \int_{f_{n-1}}^{f_n} \int_{\theta_{m-1}}^{\theta_m} S(f, \theta) d\theta, df} \quad \dots\dots(13)$$

ここに、 $f_{n-1} \sim f_n$ および $\theta_{m-1} \sim \theta_m$ はそれぞれ成分波を代表する周波数および波向の範囲である。 $S(f, \theta)$ は造波目標とする方向スペクトルで、次式で示される。

$$S(f, \theta) = S(f)G(f/\theta) \quad \dots\dots(14)$$

ここに、 $S(f)$ は周波数スペクトルで前述の Bretschneider-光易型を用いた。 $G(f/\theta)$ は、方向別のエネルギー分布を示す方向関数である。 $G(f/\theta)$ の関数形としては、光易ほか³⁶⁾が提案した次式の光易型方向関数を用いた。

$$G(f/\theta) = G_0 \cos^{2S} \left(\frac{\theta}{2} \right) \quad \dots\dots(15)$$

ここに、 G_0 は波向範囲における $G(f/\theta)$ の積分値を 1 とするための定数で次式が示される。

$$G_0 = \left[\int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} \cos^{2S} \left(\frac{\theta}{2} \right) d\theta \right]^{-1} \quad \dots\dots(16)$$

θ_{\min} , θ_{\max} はそれぞれ成分波の波向範囲の最小値および最大値である。 S は波の方向集中度を示す値である。これは、方向集中度パラメータ S_{\max} を用いて次式のように提案されている³⁴⁾。

$$S = \begin{cases} S_{\max} \cdot (f/f_p)^5 & : f \leq f_p \\ S_{\max} \cdot (f/f_p)^{-2.5} & : f > f_p \end{cases} \quad \dots\dots(17)$$

ここに、 f_p は次式で推定されるピーク周波数である。

$$f_p = 1/(1.05 T_{1/3}) \quad \dots\dots(18)$$

実際に多方向不規則波を造波するときには、ミニコンピューターシステムによって、あらかじめ式(12)を計算しておき、計算結果をディスクに書き込んでおく。そして DMA(Direct Memory Access) 方式によって、ディスク内の造波信号を造波機に送信して多方向不規則波を造波する。ミニコンピューターシステムでは次のような入力を与えることによって造波信号を作成する。なお、添字の a は入力条件であることを示す。

H_a ；有義波高 (cm)

T_a ；有義波周期 (S)

h ；水深 (cm)

θ_{\min} , θ_{\max} ；最小および最大波向角

$$\left(\theta_a = \frac{1}{2}(\theta_{\min} + \theta_{\max}) \right)$$

N ；周波数分割数

M ；波向分割数

$S_{\max a}$ ；方向集中度パラメータ

t_a ；造波時間 (s)

j ；乱数を計算するときの初期値

ここで、 j は、乱数の初期値を設定する値で、 j が同じ場合は同一の波連が、異なる場合は異なった波連が造波される。

斜め方向に進む単一方向不規則波を造波する場合には、波向分割数 $M = 1$ とすればよい。また、 $M = 1$ で波向 $\theta_a = 0^\circ$ のときは、式(12)は式(5)と一致して、全造波板

海象観測用船型ブイの運動特性に関する模型実験と現地観測

が同一信号で動くようになり、造波板列より直角方向へ進む単一方向不規則波が造波される。

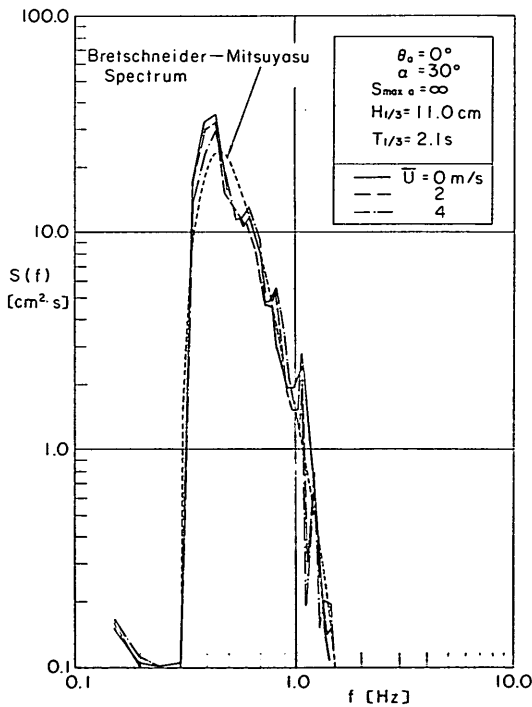
表-5に、本実験で用いた波1, 2, 3, 4を造波するためにミニコンピュータに与えた入力データの一覧表を示す。乱数の初期値 j は各波に対して2種類設定し

た。すなわち2種類の波速を作用させ、その平均値を実験結果として整理した。

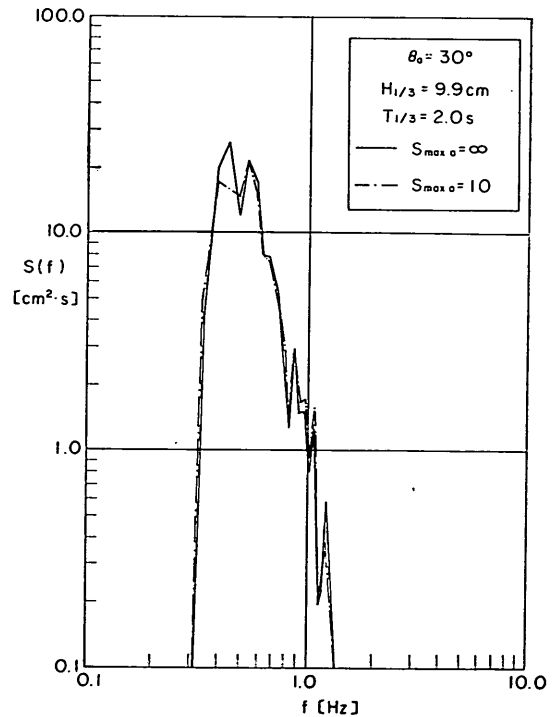
実験波は、前述したように造波機より6m離れた波高計アレイで測定し、周波数スペクトルは波高計アレイの中心の波高計のデータからFFT法を用いて求め、方向

case	θ_a	waveNo.	H_a	T_a	h	θ_{min}	θ_{max}	N	M	S_{maxa}	t_a	j
	deg		cm	sec	cm	deg	deg				sec	
001 004	1	1	5	1.5	60	-45	+45	30	1	—	300	0,5
311		2	10	2.0								
344		3	20	2.4								
611		4	10	2.0								
644								30	30	10		
011 043	30	1	5	1.5	60	-15	+75	30	1	—	300	0,5
		2	10	2.0								
		3	20	2.4								
911 913	-30	1	5	1.5	60	-75	+15	30	1	—	300	0,5
		2	10	2.0								
		3	20	2.4								

表-5 実験波の入力条件



(1) $\theta_a=0^\circ$ のとき



(2) $\theta_a=30^\circ$ のとき

図-17 平面水槽実験で用いた波の周波数スペクトル

関数は、ベイズモデルを用いた方向スペクトル推定法を用いて求めた。

(3) 実験波の特性

図-17 は、実験波の周波数スペクトルを示した図である。図-17(1), (2)はそれぞれ $\theta_a=0^\circ$ および 30° の場合にあたる。図-17(1)は全造波板を同一信号で駆動させて、造波板に対して直角方向に進む単方向不規則波を造波させた場合の周波数スペクトルであり、実線が、風の無い場合 ($\bar{U}=0\text{m/s}$)、破線が $\bar{U}=2\text{m/s}$ の風がある場合、一点鎖線が $\bar{U}=4\text{m/s}$ の場合である。3つの周波数スペクトルを比較すると、ピークの値は $\bar{U}=0\text{m/s}$ のときに最も大きく、 $\bar{U}=4\text{m/s}$ のときに最も小さくなっていることがわかる。しかし、その差は小さく、全体的なスペクトル形状をみると三者はよく一致している。したがって、実験波が風から受ける影響は小さく、風速が 4m/s 程度であっても、波の特性は変化しないことがわかる。

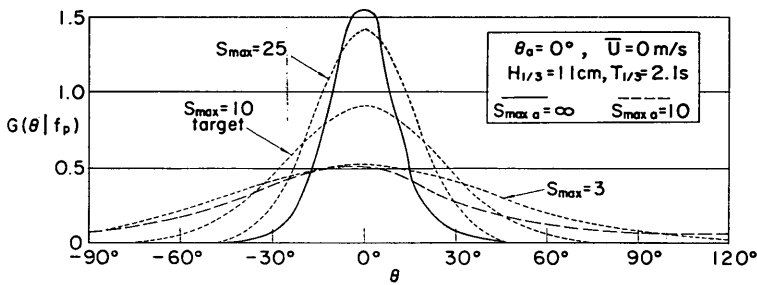
点線は、 $H_{1/3}$ と $T_{1/3}$ の測定値から計算した Bretschneider-光易型スペクトルの理論値である。実験値は理論値に比べると、そのピークが大きくなり、ピーク周波数もわずかに高周波側へずれている。目標とした理論スペクトルと実験スペクトルが完全には一致しないことは、合田³⁷⁾によって指摘されているので、本実験で用い

た不規則波の周波数スペクトルは、ほぼ Bretschneider-光易型のスペクトル形を示していると判断してもよい。

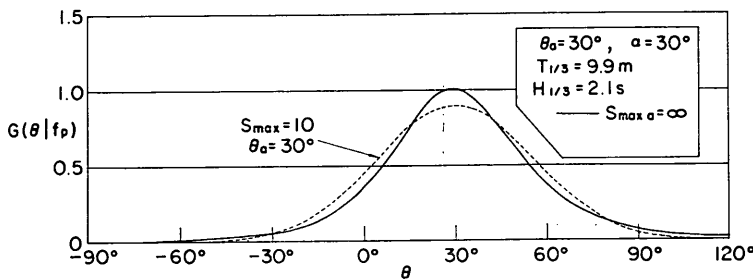
図-17(2)は、 $\theta_a=30^\circ$ の場合の周波数スペクトルを示す。実線が単方向波、一点鎖線が多方向波である。両者ともスペクトル形のピークは分裂しており、 $f=0.4\text{Hz}$ 付近で谷ができています。斜め波を造波した場合には、造波機前面の波高は様ではなく変動することが明らかにされており、ある点ではある周波数の成分波の振幅が他の周波数を持つ成分波の振幅より小さくなる。したがって、そのような点でスペクトルを求めた場合には、図-17(2)のような谷ができるものと推定される。スペクトル形は全体としては Bretschneider-光易型と見なせるがピーク付近の形状が若干異なる。

図-18 は、方向スペクトルの解析結果の一例で、周波数スペクトルのピーク周波数 f_p における方向関数を示したものである。

図-18(1)は、 $\theta_a=0^\circ$ のときの単方向不規則波と多方向不規則波の方向関数を示す。実線が単方向波、破線が $S_{\max a}=10$ として造波した多方向波である。単方向波は $\theta=0^\circ$ でピークを持つが、そのピーク値は小さく、1.5程度である。サーペント型造波機で造波された $\theta_a=0^\circ$ の単方向不規則波の方向関数は非常に鋭く尖



(1) $\theta_a=0$



(2) $\theta_a=30^\circ$

図-18 実験波の方向関数

り、線スペクトルに近い形状になることが確認されているので³⁵⁾、本実験で造波した単一方向波は何らかの影響で方向集中度が低下し、多方向波に近い性質を有するようになったと思われる。

破線で示した多方向波の方向関数は非常に滑らかな形状を示し、そのピーク値は、 $\theta=0^\circ$ で0.5である。点線で、 $S_{\max}=10$ として式(4)で計算した方向関数の造波目標値を示した。実験波のピーク値は目標値の5/9程度である。その値は、 $S_{\max}=3$ の理論値に近い。 $S_{\max a}=10$ で造波された多方向波は目標値よりも方向集中度が高くなると報告されている³⁵⁾ので、今回の実験波は、何らかの理由によって通常よりも方向集中度が低下したものと推測される。

単一方向波、多方向波両者共にその方向集中度が目標値より低下した理由としては、送風機の架台の影響が考えられる。本実験で用いた送風機は、3つのファンが1組となって4本の円筒形の足でささえられており、足の径は約5 cmである。また足と足を横方向に連結する横スパンが水面近くに位置しているため、波が送風機の架台によって散乱し、方向集中度が予想したものよりも低下したものと考えられる。

図-18(1)で示したように、本実験で造波した単一方向波の方向関数のピーク値は、 $S_{\max}=25$ とした計算値より若干大きい程度である。したがって、本実験では、 $\theta_0=0^\circ$ の場合、単一方向波を作用させたケースでは、実際には、 $S_{\max}=25$ より若干高い方向集中度を持った多方向不規則波を作用させており、 $S_{\max a}=10$ の波を作用させたときには、実際には、 $S_{\max}=10$ よりさらに低い方向集中度を持った多方向波を作用させたことになるかと判断できる。

図-18(2)は、 $\theta_a=30^\circ$ の斜め方向単一方向規則波の方向関数形を示したものである。実線が $S_{\max a}=\infty$ 、すなわち $M=1$ とした単一方向波を造波した場合のエネルギーのピーク周波数近傍における方向関数形である。

実線で示した単一方向波の方向関数のピークは、 $\theta=30^\circ$ で現れており、所定の波向を持った波が造波されていることがわかる。しかし、このピーク値は1.0で、図-18(1)で示された $\theta_a=0^\circ$ の場合の単一方向波のピーク値1.5に比べると小さい。サーベント型造波機で造波された斜め単一方向波は、多方向不規則波としての性質を持つことが確認されている³⁵⁾。本実験で用いた斜め単一方向波も多方向不規則波としての性質を持っており、その方向集中度は、図-18(1)で点線で示された $S_{\max}=10$ の多方向波のものにはほぼ等しいと考えられる。

以上の事をまとめると、本実験で用いた波については

- i) $\theta_a=0^\circ$ の造波板に直角方向の波向をもつ単一方向波を造波しようとしたが、実際に生じた波は、方向集中度が $S_{\max}=25$ の波と同程度の直方向へ進む多方向不規則波であった。
- ii) $\theta_a=0^\circ$ の直角方向に主波向を持つ多方向波を設定した場合、実際に造波された波は、 $S_{\max a}=10$ より方向集中度の低い $S_{\max}=3$ 程度の多方向不規則波であった。
- iii) $\theta_a=30^\circ$ の斜め方向に進む単一方向波を造波しようとしたが、実際に造波された波は、 $S_{\max}=10$ 程度の方向集中度を持つ多方向不規則波であった。

3.4 ブイ変位の計算方法

平面実験では、ブイの船首と船尾に取り付けた2つの光点を、真上および斜め上方に取りつけた2台のカメラ以下の事が言える。

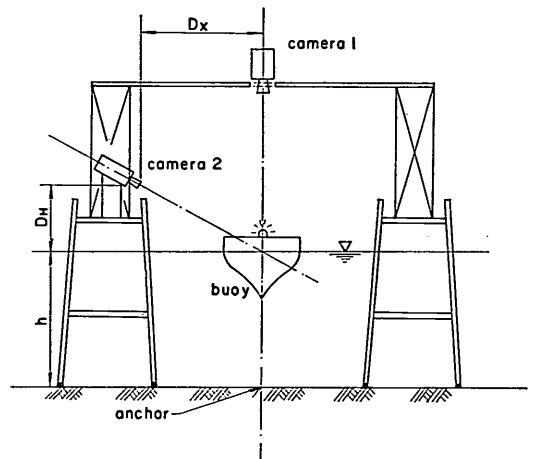


図-19 ブイとカメラの位置関係

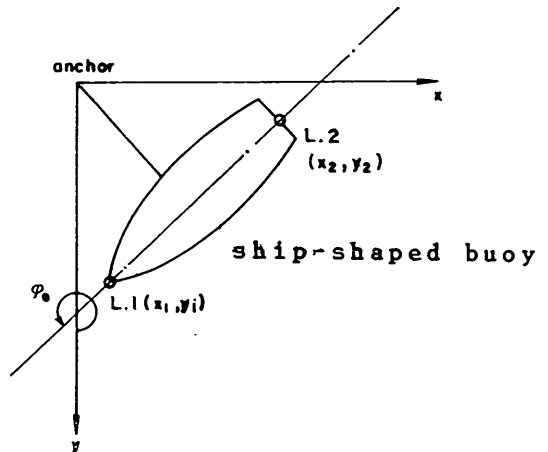


図-20 カメラ画像の模式図

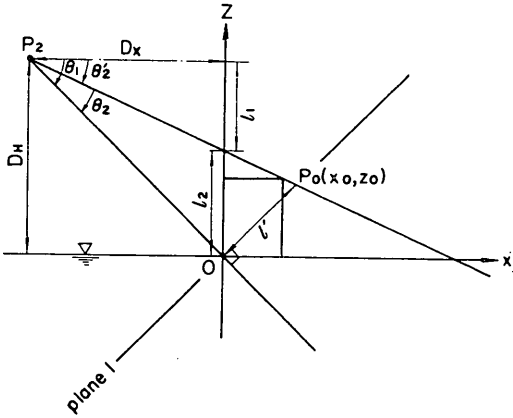


図-21 カメラと被写体との位置関係

で追跡し、画像スクリーン内の変位を測定した。図-19に、船型ブイとカメラの位置関係を示す。

カメラ1は、アンカー点の鉛直上方に取り付けたカメラで、水面上の高さは約1.5mである。図-20にカメラ1の地点からブイを撮影した場合の画像の模式図を示す。2光点 L.1, L.2の水平座標 (x_1, y_1) , (x_2, y_2) は、カメラ1の画像を入力したXYトラッカー1によって出力される。実際には、トラッカーからは電圧値として座標が出力されるので、実験の前に、水路実験で用いた検定板等を水平に置いて、出力電圧と変位との関係を探しておく必要がある。

次に、光点の鉛直座標 Z_1, Z_2 をカメラ1とカメラ2を用いて求める方法について検討する。図-19に示すように、カメラ2の焦点軸は正確に、水面上の原点 $(0,0)$ を通り、カメラ2のレンズ面は、原点より高さ D_H 、水平距離 D_X だけ離れているものとする。

図-21は、カメラと被写体との2次元的な位置関係を簡略化して示した図である。図-21においてOが水面上の原点、 P_2 がカメラ、 P_0 が被写体である。簡略化のた

めに、 $x-z$ 平面内で式を展開する。

P_0 の座標を (x_0, z_0) とする。 x_0 はカメラ1の画像解析により既知である。plane 1 は、カメラ2によって撮影される画像面を表した仮想平面であり、カメラの焦点軸 $\overline{P_2O}$ に垂直である。カメラ2は斜め上方から撮影しているために、カメラ2の画像面内では、被写体 P_0 は原点より l' 離れた点として投影される。

XYトラッカーの出力が原点Oで0になるように調整しておけば、 l' がXYトラッカーからの出力値となる。

次に、 P_2 と P_0 を結ぶ直線を想定して、図のように $l_1, l_2, \theta_1, \theta_2, \theta_2'$ を定義する。

簡単な幾何関係から、 θ_2 は次式で求められる。

$$\theta_2 = \tan^{-1} \frac{l'}{\sqrt{D_H^2 + D_X^2}} \quad \dots\dots(19)$$

さらに、 θ_2' は次式のようになる。

$$\begin{aligned} \theta_2' &= \theta_1 - \theta_2 \\ &= \tan^{-1} \frac{D_H}{D_X} - \tan^{-1} \frac{l'}{\sqrt{D_H^2 + D_X^2}} \quad \dots\dots(20) \end{aligned}$$

また、 l_1, l_2, z_0, θ_2' には次の関係が導かれる。

$$l_1 = D_X \tan \theta_2' \quad \dots\dots(21)$$

$$l_2 = z_0 + x_0 \tan \theta_2' \quad \dots\dots(22)$$

式(19)、(20)、(21)、(22)より、 P_0 の鉛直座標 z_0 は次式のように求められる。

$$\begin{aligned} z_0 &= D_H - (D_X + x_0) \\ &\quad \times \tan \left(\tan^{-1} \frac{D_H}{D_X} - \tan^{-1} \frac{l'}{\sqrt{D_H^2 + D_X^2}} \right) \quad \dots\dots(23) \end{aligned}$$

図-21は $l' > 0$ のときの位置関係を示しているが、 $l' < 0$ のときも、同様な関係式が成立して、式(23)と同一の式で z_0 を求めることができる。

次に、 z_0 の推定式(23)の検証を行った。

30cmの細長いアクリルパイプの中に、10cm間隔で豆電球を取り付けた検定棒を製作し、水面上の原点に、鉛

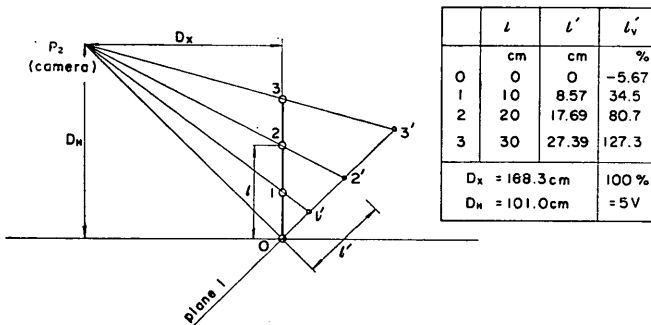


図-22 検定用円筒の測定状況

直に設置した。図-22 は、検定棒とカメラ2の位置関係を模式的に示したものである。

図の P_2 がカメラ2を示し、 O 、 1 、 2 、 3 が電球の位置を示す。 l は、豆電球の水面からの高さを表し、 l' は仮想された plane 1 に投影され、XY トラッカーで出力される豆電球の原点 O からの距離である。

l が既知であるので、式(23)が成立するものとするれば l' は、式(23)において $x_0=0$ とした次の関係式から計算できる。

$$l = D_H - D_X \times \tan\left(\tan^{-1}\frac{D_H}{D_X} - \tan^{-1}\frac{l'}{\sqrt{D_H^2 + D_X^2}}\right) \dots\dots(24)$$

図-22の右上の表に、 l と l' の計算値を示す。 l'_v は、トラッカーによって出力された電圧で、最大出力電圧に対する比で示している。 l' と l'_v の関係を示すと、図-23のようになり、最小二乗法により l' と l'_v は次式で関係づけられる。

$$l' = 0.206 l'_v + 1.17 \dots\dots(25)$$

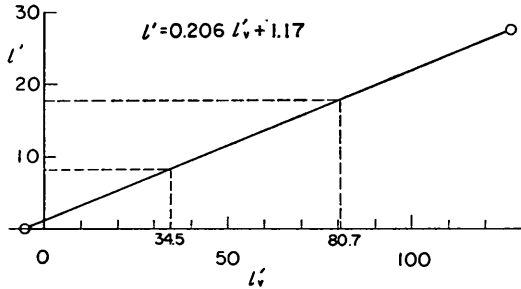


図-23 投影長と出力電圧

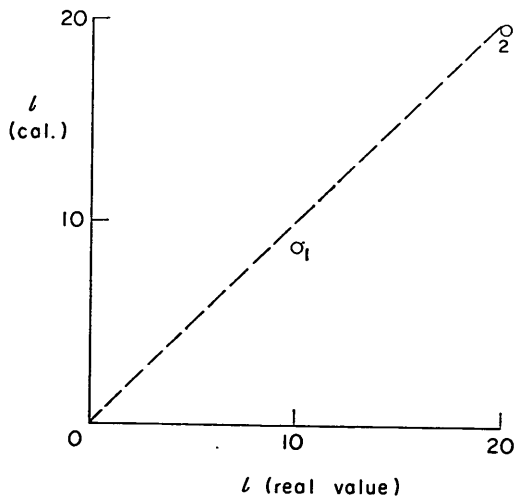


図-24 検定点の高さに関する真値と計算値の比較

点 $O \sim 3$ における l'_v の値から式(25)によって l' を求め、式(24)で実高 l を計算した。 l の計算値と真値との関係を、図-24に示す。図-24において直線が計算値、白丸が真値である。計算値は真値とほぼ一致しており、その誤差は真値の3%以内である。図-24から、計算式(23)によって、鉛直座標 z_0 が計算できることが確認された。

以上のような手法を用いて、真上に設置されたカメラ1の画像データから、船型ブイ上の2光点 L_1 、 L_2 の水平座標 (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) を求め、さらに、斜め上方に設置されたカメラ2の画像データから鉛直座標 z_1 、 z_2 を求めた。船軸の方向 φ_s は次式で計算した。

$$\varphi_s = \tan^{-1}\frac{x_1 - x_2}{y_1 - y_2} \dots\dots(26)$$

また船型ブイの heaving の動揺量は、 z_1 と z_2 の平均値として求めた。

4. 船型ブイの波浪応答特性と係留張力

4.1 船型ブイの波浪応答特性

(1) 動揺の固有周期

自由振動実験によってブイの動揺の固有周期を調べた。自由振動実験では、船体の一端を手で沈めて振動させて、マストの頂上にとり付けた光点の変位をアナログペンレコーダーで記録した。図-25に、アナログ記録の一例を示す。

上段の HEAVING は、船体を水平に、水中に沈めたあと自由振動させたときの、光点の鉛直変位を示す。中段の ROLLING は、船体を横方向へ傾けた後に自由振動させたときの、光点の y 方向の水平変位を示す。下段の PITCHING は、船体の一端を強制的に沈めて、自由振動させた場合の、光点の x 方向の水平変位を示す。

そしてそれぞれの変位の振動周期から、船体の heaving, rolling, pitching の固有周期を求めた。また、 n 周期目と $n+1$ 周期目の振幅の比を周期減衰比として求めた。なお、測定は、それぞれ数回行い平均値を採用した。

表-5 に自由振動実験で求めた船型ブイの heaving, rolling および pitching の固有周期を示す。実機に換算すると heaving, rolling および pitching の固有周期は、それぞれ2.55 s、3.49 s および 2.68 s で、heaving と pitching の固有周期は本船型ブイではほぼ等しくなっている。pitching の固有周期2.68 s は、図-5の数値計算結果から得られた共振周期3 s より若干短くなっている。

rolling の固有周期は図-3(3)の数値計算で求めた共振周期とほぼ一致している。

(2) 波浪中における動揺量

ここでは、規則波を用いた水路実験の結果から船型ブイの波浪応答特性を示す。

図-26 は、水路実験によって求められた測定値の時間

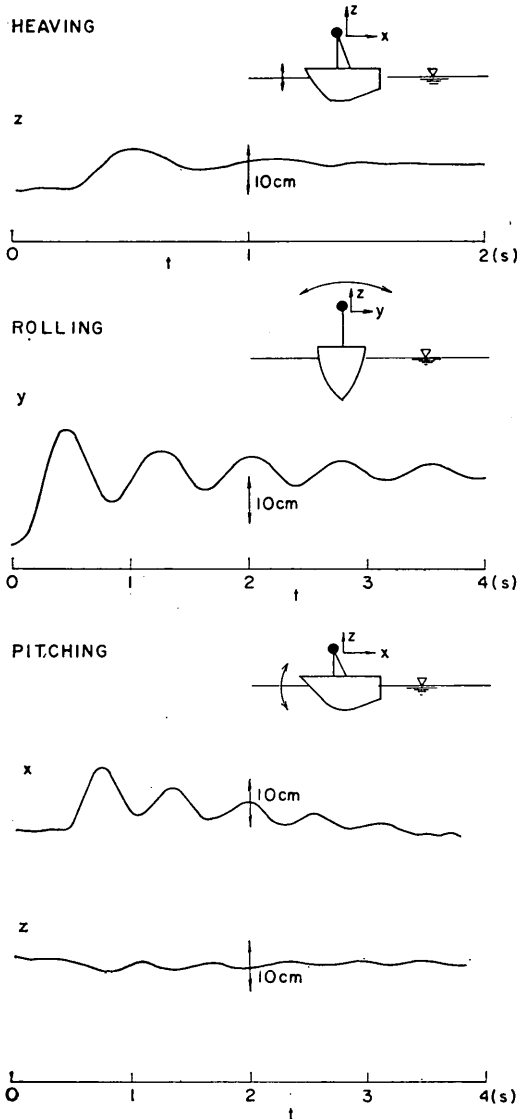


図-25 自由振動実験の結果

変化の一例を示す。図-26 において、上段の η は、水位変動を示し、二段目の X は、マスト頂上の光点1の水平変位 X_1 マスト下部の光点2の水平変位 X_2 、およびブイ重心の水平変位 X_G を示す。

三段目の Y は、光点1の鉛直変位 Y_1 、光点2の鉛直変位 Y_2 およびブイ重心の鉛直変位 Y_G を示す。四段目の θ_B は、ブイの pitching 動揺、すなわち傾斜角、最下段の T_R は、作用張力の変化を示す。

図-26を見ると、水位 η と X 、 Y 、 T_R の変動周期は一致しており、作用波の周期と、ブイの水平変動、すなわち surging、ブイの鉛直変動すなわち heaving の周期は一致することが確認できる。図-26 は、バネ係留で、作用波周期 2 s のケースを示している。他のケースにおいても波周期と surging, heaving および張力変動の周期はほぼ一致した。

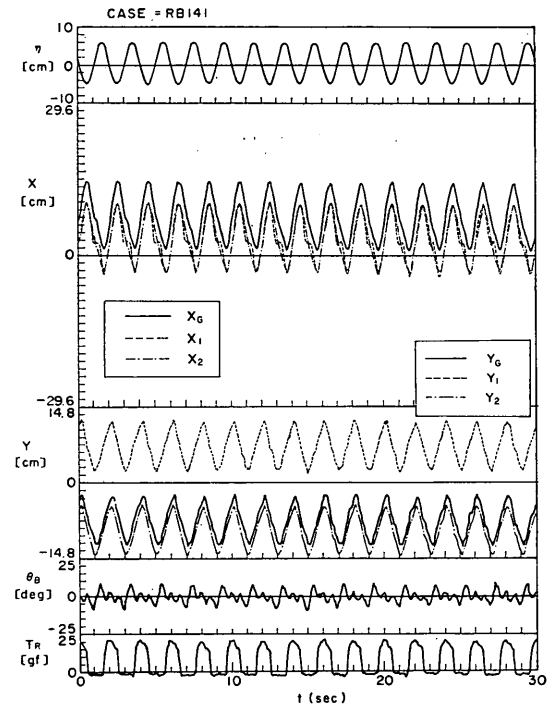


図-26 水路実験における測定値の時間変化

表-6 船型ブイの固有周期

	Heaving	Rolling	Pitching
固有周期 (s) [実験]	0.57 (2.55)	0.78 (3.49)	0.60 (2.68)
周期減衰比	0.33	0.64	0.62

また、波の振幅と heaving の振幅を比べると、図-26 では、heaving 振幅が約 12cm であるのに対し、波高が 14cm で、heaving 振幅の方が小さくなっている。したがってバネ係留の場合、heaving の振幅は、波高より若干小さいものとなると思われる。

船型ブイの傾斜角 θ_B の時間変化をみると、周期 2 s 程度の振動に、0.6 s 程度の短周期の振幅の小さな振動が重畳したような変動を示している。短周期の振動周期は、pitching の固有周期 0.6 s とほぼ一致しており短周期の振動は、pitching の固有振動によるものと考えられる。すなわち、固有周期と等しい振動周期を持つ外力との共振現象が生じている。

pitching の固有振動が pitching に及ぼす影響は大きく、図-26 では顕著に短周期変動が表れている。この短周期運動は時間がたっても減衰しない。したがって、ゼロアップクロス法で振動周期を求めたときには、波周期より短くなるものと思われる。pitching について共振を起こす外力としては、波以外には考えられないので、本実験で造波した規則波には、波の非線形性の影響により 0.6 s 程度の周期をもつ変動成分が含まれていたものと思われる。

ただし、実験期間中、目視したところ、ブイの上面が波をかぶることはなかった。

図-27 は、ブイ傾斜角の変動周期を示した図である。図の横軸が作用波の周期を示し、図の縦軸がゼロアップクロス法で求めた傾斜角の周期 T_θ と波の周期の比を示す。白丸が無係留状態の実験値、半白丸が糸ゴムによる緩い係留、黒丸がコイルバネによるきつい係留を示す。

波の周期 T_{wave} が 1.2 s 以下の場合には、係留状態にかかわらず、 T_θ と T_{wave} はほぼ一致している。波の周期が短い場合には、共振現象を顕著に起こすような成分波が含まれなくなるために、pitching について共振が

生じず T_θ と T_{wave} はほぼ一致するものと思われる。

T_{wave} が 1.2 s より長くなると、実験値にかなりのばらつきがあるものの、平均すると、図中に示した破線にしたがって、 T_θ/T_{wave} は小さくなる。すなわち、波の周期が長くなると、波による傾斜の一周期間の間に、共振によって起きる pitching の固有振動による傾斜の起こる回数が増えていくために、ゼロアップクロスで求めた T_θ の T_{wave} に対する比が短くなる。

しかし、振幅が小さいものは、ゼロアップクロス法によって一波と数えられることが無いため、実験値は大きくばらつくものと思われる。

次に、波周期と同じ周期を持つ surging, heaving の動揺について調べた。

図-28は、船型ブイの規則波中における heaving の動揺を示した図で、横軸に周期 T 、縦軸に heaving の両振幅 $2\bar{Z}$ を波高で除した無次元 heaving 動揺量を示した。

図の記号で、白丸が無係留、半白丸が糸ゴム係留、黒丸がバネ係留の場合を示す。また、丸記号に横棒のあるものは波形勾配が 0.04~0.05 のケースで、無いものは、波形勾配が 0.02 以下のケースである。

波形勾配の相違による動揺量の相違を検討したが、実験を行った範囲内では、各係留状態において、波形勾配が変化しても動揺量はほぼ同じであった。

白丸で示した無係留状態では、 $T > 1.0$ s [現地で 4.5 s] の範囲で、 $2\bar{Z}/H$ はほぼ 1 で、ブイは水面と同一の上下動を行い heaving 振幅が波高等しいことがわかる。 $T = 0.7, 0.8$ s では heaving の動揺量が若干、波高より大きくなっている。この範囲では造波機の性能限界により、正確な規則波が造波されていないので、その影響が含まれていると思われる。

$T = 0.9$ s において、 $2\bar{Z}/H$ が 0.4 程度に小さくなって

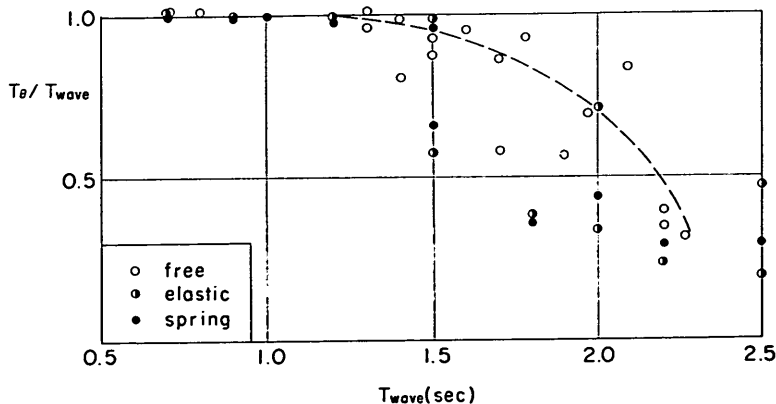


図-27 ブイ傾斜角の変動周期

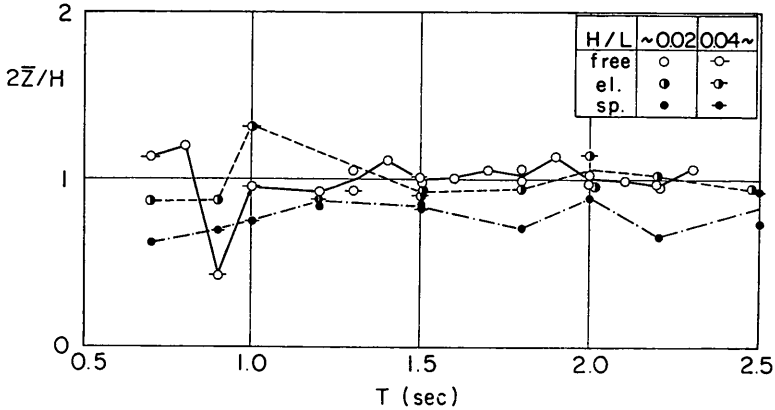


図-28 規則波中における heaving 動揺量

いる。この原因はよくわからないが、一点だけ、急に小さくなっているのが、実験中、ブイが、豆電球のコード等に引掛かかり動きが小さくなったためではないか、と推測される。しかし、はっきりしたことは不明である。

半白丸で示した糸ゴム係留の場合を調べると、 $T > 1.5$ s の範囲では、 $2\bar{Z}/H$ はほぼ 1 に等しく、波高と heaving の動揺量は一致している。 $T = 1.0$ s のとき、heaving 振幅は、波高の 1.3 倍となるが、 $T < 1.0$ s では、0.9 程度である。したがって、糸ゴムによる係留をした場合には、周期が短い場合に、heaving 振幅と波高とはずれるけれども、周期 $T > 1.0$ s [現地 4.5 s] の範囲では、heaving 振幅と波高とは一致する、と言える。

黒丸で示したバネによるきつい係留状態の場合には、 T が 1.0 s 以上の範囲で、 $2\bar{Z}/H$ は、ほぼ 0.8~0.9 程度で、heaving 振幅は波高より小さくなった。これはバネによって船型ブイがきつく拘束されているために、上下動が自由に行えないためと考えられる。

以上の事をまとめると、船型ブイを無係留あるいは、糸ゴムによる緩い係留状態に置いた場合には、周期 1.0 s [現地で約 4.5 s] 以上で、ブイの heaving 振幅は波高と一致し、ブイの heaving から波高を推定することが可能であると言える。 T が 1.0 s より短い場合には、heaving 振幅と波高とは一致しなかった。この原因としては、造波機の能力が限界で規則波の形が乱れたことなどが考えられるが、はっきりしたことはわからなかった。

バネで係留した場合には、ブイの上下動が係留索によって強く拘束されるため、ブイの heaving 振幅は波高より小さくなった。

現地では、ブイの漂流を防ぐために、ブイを係留しておかなければならないが、ブイの heaving から波高を求めるためには、できるだけ伸び率の大きいゆるい係留系

を用いるべきであると推論される。

数値計算では、現地での波の周期が 4 s 以上であれば、heaving 振幅と波高は一致するという結論が得られていたが、模型実験では、現地での波の周期が 4.5 s 以上の場合、heaving 振幅と波高は一致した。したがって、ブイの heaving から波高が推定できる波の周期の範囲は、模型実験と数値計算とは若干異なるが、その差は小さく、heaving に関しては、ほぼ同様な結論が得られていると思われる。

図-29 は、規則波を作用させた場合の、ブイの水平変位、すなわち surging の動揺量を示した図である。図の縦軸に、surging の両振幅を波高で除した無次元動揺量を示した。

水平方向の運動は、係留索による拘束を強く受けないので、無係留状態でも、バネ係留状態でも、糸ゴムによる係留状態でも、実験値は、周期が同じであればそれほど大きく変化していない。 $2\bar{X}/H$ は、波が乱れている $T < 1.0$ s の範囲を除くと、 T が増加するにつれて大きくなり、ほぼ一様に増加している。したがって、surging の両振幅は波高とは一致していない。

2.2 で示した数値計算結果では、周期が長くなると、 $2\bar{X}/H$ はほぼ 1 に近づいたので、模型実験結果とは異なる。この原因としては、模型では水深の影響が生じることが考えられる。

数値計算では、深海波を仮定しているので、水粒子は円運動を行い、その軌跡は次式で表される。

$$\xi^2 + \zeta^2 = \left(\frac{H}{2}\right) e^{2kz'} \quad \dots\dots(27)$$

ここに、 ξ ；水粒子の平均位置からの水平偏位
 ζ ；水粒子の平均位置からの鉛直偏位
 z' ；水粒子の平均位置の鉛直座標で、水面を 0 とし、鉛直上方を正とする。

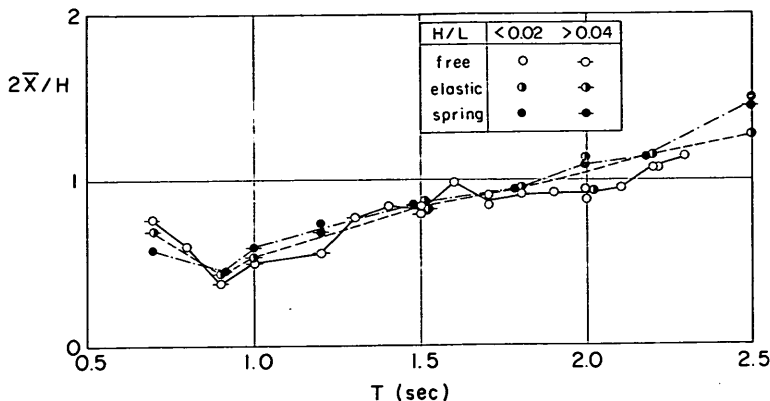


図-29 規則波中における surging の動揺量 (波高で無次元化した場合)

k ; 波数

H ; 波高

である。

したがって、水面での水粒子の水平偏位は、 $H/2$ であり、周期が長くなり、船長が波長に比して小さくなれば、surging 振幅が波高 H に一致するようになるものと思われる。

模型実験においては、波は深海波ではなく浅海波である。浅海波における水粒子運動の軌跡は次式で与えられる³⁸⁾。

$$\frac{\xi^2}{A^2} + \frac{\zeta^2}{B^2} = 1 \quad \dots\dots(28)$$

ここに、

$$A = \frac{H}{2} \frac{\cosh k(h+z')}{\sinh kh} \quad \dots\dots(29)$$

$$B = \frac{H}{2} \frac{\sinh k(h+z')}{\sinh kh} \quad \dots\dots(30)$$

である。

水粒子は、 $2A$ を長軸、 $2B$ を短軸とする楕円運動を行い、水面 ($z'=0$) での水平方向の最大偏位は次式で表される。

$$\bar{\xi}|_{z'=0} = \frac{H}{2} \frac{1}{\tanh kh} \quad \dots\dots(31)$$

したがって、模型実験では、水粒子の水平運動の両振幅は波高と一致せず、波高を $\tanh kh$ で除したものとなる。また、周期が長くなれば、 $\tanh kh$ は小さくなるので、水平振幅は大きくなる。このことは、surging 振幅が、周期が長くなると大きくなることと、一致する。

図-30は、surgingの動揺量を式(31)で計算される水粒子の水平運動振幅で除した値を示した図である。図-30の横軸が波周期、縦軸が surging 振幅 $2\bar{X}$ を、水粒子の水平運動振幅 $2\bar{\xi}$ で割った値を示す。

$2\bar{X}/2\bar{\xi}$ は、係留状態によって変化せず、 $T=1.0$ s のとき、0.5程度である。 T が1.0より長くなるにしたがって、 $2\bar{X}/2\bar{\xi}$ は大きくなるが、 $T > 1.5$ s の範囲では、ほぼ一定で0.8~1.0程度である。したがって、周期1.5s [現地換算値で6.7s] 以上の場合、船型ブイの水平振幅は波による水粒子の水平運動振幅と等しくなると推論できる。

(3) 波高と周期の推定

図-31は、不規則波を作用させたときの水路実験の結果を示した図である。

図-31において、 $H_{1/3}$ 、 $T_{1/3}$ はそれぞれ、作用させた不規則波の有義波高および有義波周期である。 H_h と T_h はそれぞれ、船型ブイの heaving から推定される有義波高と有義波周期である。図中、白丸がゴムによって係留した場合、黒丸がバネによって係留した場合に示す。図-31(a)および(b)は、それぞれ横軸に有義波高および有義波周期をとった場合の H_h と $H_{1/3}$ との比を示す。(c)および(d)は、 T_h と $T_{1/3}$ の比を示す。各点ともに、2種類の波群を作用させ、それぞれについて2回計測したときの平均値を示す。

作用波の波高および周期が変化しても、 H_h と $H_{1/3}$ の比、および $T_{1/3}$ と T_h の比はそれぞれ1に等しく、船型ブイの heaving から作用波の有義波高および有義波周期が推定できることがわかる。

規則波を作用させたときには、(2)で指摘するように、バネ係留の場合には、 $2\bar{Z}/H$ が1より若干小さくなり、船型ブイの heaving 振幅が波高より小さくなったのに対して、不規則波を作用させた場合には $H_h/H_{1/3}$ はバネ係留の場合でも1となった。この原因としては、実験で作用させた不規則波の波高が少し小さかったことが挙げられる。波高が小さかったので、バネによる拘束力がほとんど作用せず、船体はゴム係留と同様な運動を示した

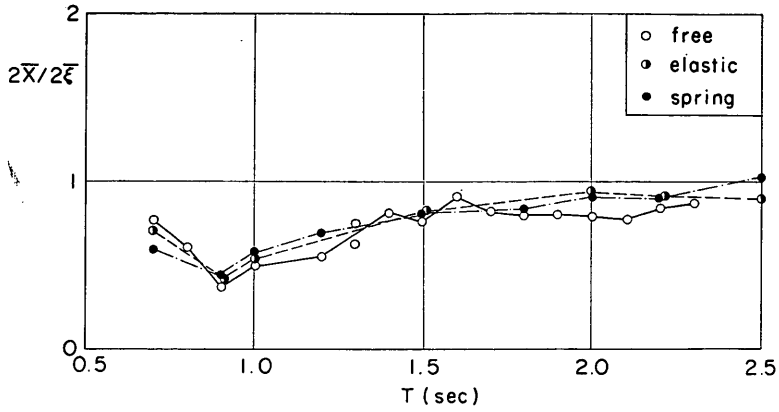


図-30 規則波中における surging の動揺量
(水粒子水平運動振幅で無次元化した場合)

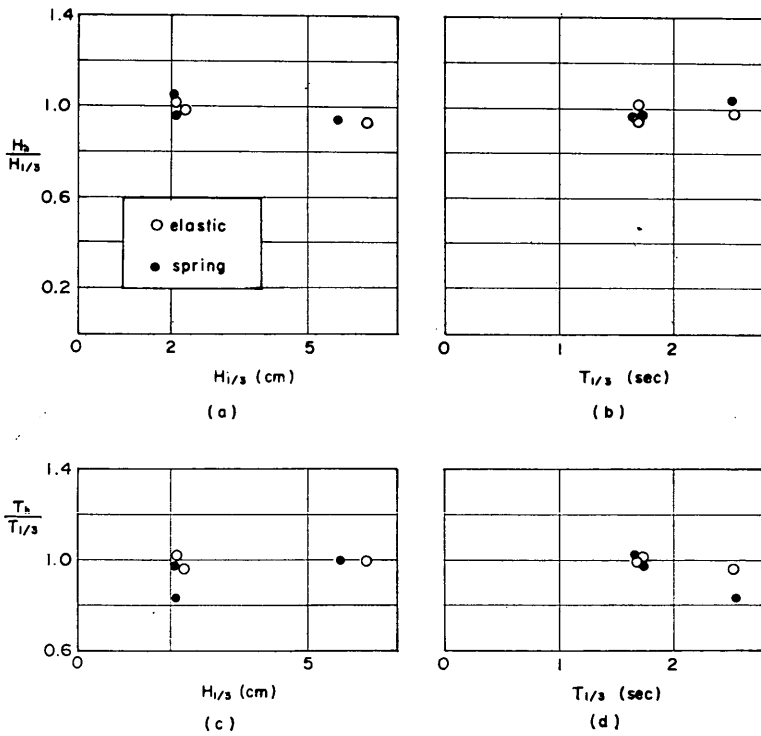


図-31 heaving から推定された有義波高および周期

ものと思われる。

なお、無係留状態では、ブイが漂流して測定範囲を越えてしまい、不規則波の統計計算に必要な測定データ数が得られないので、不規則波の場合には、無係留状態については解析を行わなかった。

図-32 は、ブイの heaving および pitching のスペクトルを調べたものである。図-32 では、パネ係留時の波の周波数スペクトルを実線で、heaving のスペクトルを破線で、pitching のスペクトルを一点鎖線で示した。

実線で示した波の周波数スペクトルと、heaving の周波数スペクトルはほぼ一致し、そのピーク周波数も一致している。したがって、ブイの heaving の周波数スペクトルを求めることによって、波の周波数スペクトルを求めることができることがわかる。

一点鎖線で示した pitching の周波数スペクトルをみると、1.3 Hz 付近で鋭いピークをもつ。図の f_0 は、pitching の固有振動周波数であり、1.3 Hz にほぼ一致する。すなわち、pitching については共振の影響が強く生じている。共振を起こす外力は、不規則波の中に含まれる pitching の固有周期と同じ周期を持つ成分波である。

4.2 係留張力

図-33 は、ブイの係留索に作用した最大張力を示したものである。図の横軸には、heaving の片振幅 $(2\bar{Z})/2$ を示し、縦軸に最大作用張力 T_{Rmax} をとった。図の黒丸がパネで係留した場合の最大張力を示す。振幅が大き

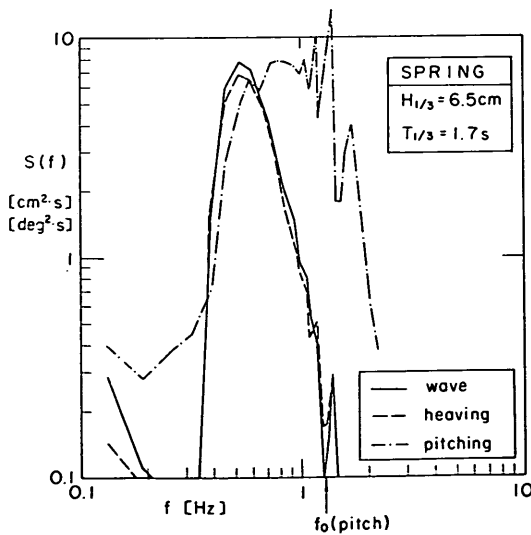


図-32 heaving および pitching の周波数のスペクトル

なると、係留索の伸びも大きくなるので、最大張力 T_{Rmax} も大きくなる。本実験における T_{Rmax} の最大値は 230gf であった。白丸は、糸ゴムで係留した場合の最大張力 T_{Rmax} を示す。heaving の片振幅が 5 cm 以下のとき、 T_{Rmax} の値はばらつき、20~60 gf 程度である。そして、heaving の片振幅が大きくなっても、 T_{Rmax} が大きくなる傾向は見られない。逆に、振幅が小さい方が係留張力はやや大きい。heaving の片振幅が 5 cm 程度以上になると T_{Rmax} は 100gf 程度に増加する。同一の振幅のときに、パネ係留の場合とゴム係留の場合を比較すると、パネ係留をした場合の T_{Rmax} の方が大きく、ゴム係留をした場合の 2 倍以上の値になる。すなわち、パネのように伸び率の小さい係留索を用いた場合には、係留張力が大きくなる。したがって、係留索に作用する張力を小さくするためには、ゴムのよう伸び率の大きい係留索を用いる必要がある。

図-9 に示した係留索の伸びと作用張力の関係から、最大作用張力を推定することができる。すなわち、ブイの変位が係留索の伸びに等しいものと考えて、最大張力を計算することができる。図-33 の破線および一点鎖点は、水路実験の結果から求めた最大作用張力の推定値を示す。

本実験では、ブイの heaving の片振幅 $(2\bar{Z})/2$ が係留索の伸び Δl に等しくなるものと仮定した。パネ係留をした場合、破線で示した計算値と黒丸で示した計算値はよく一致しており、ここで示した簡単な計算手法でも

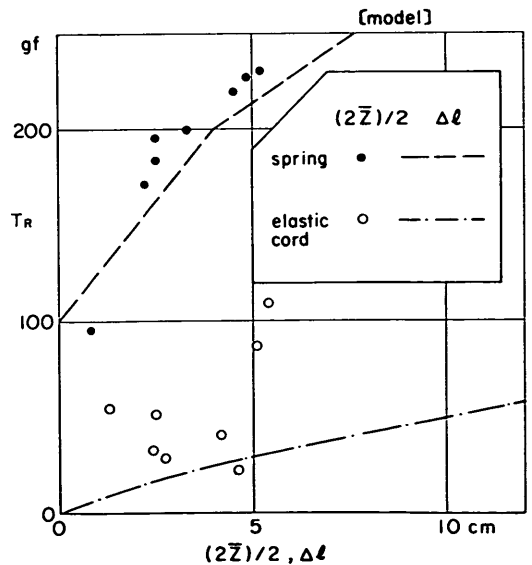


図-33 係留索張力の実験値と計算値

作用張力を推定することが可能であることがわかる。

しかし、ゴムで係留した場合、白丸で示した実験値は推算値より大きく、振幅が 5 cm 程度のときには、推算値の 4 倍程度になった。

このように、ゴム係留の場合に、ヒービングの振幅から推定される張力よりも作用張力が大きくなる。波が作用した場合には、縦方向だけではなく水平方向にもブイは移動するので、実験値が推算値より大きくなるのは、この水平変位の影響によるものと考えられる。したがってバネ係留のように伸び率の小さい係留索を使用した場合には、水平方向の変位も小さいので、作用する最大波高から最大張力を推定できるけれども、ゴムのように伸び率の大きい係留索を使用した場合には、上下運動だけで係留張力が決定されるのではなく、水平運動をも考慮しなければならないことがわかる。

5. 風と波の作用下における船型ブイの運動

5.1 船型ブイの動揺量と係留張力

(1) 平面水槽実験結果の時系列

図-34 は、平面水槽実験で求められた測定データの時

間変化を示したものである。図-34 は、波向 $\theta_a=0^\circ$ 、風向 $\alpha=60^\circ$ で、有義波高 $H_{1/3}=10.8\text{cm}$ 、有義波周期 $T_{1/3}=2.2\text{s}$ の波と、風速 2m/s の一様風を作用させたケースを示す。図-34の上段の η は波高計アレイの中央の波高計で測定した水位変動で、 η_H は船型ブイの heaving 変位を示す。 η_H と η の変動の様子はほぼ一致しており、ブイが水面とほぼ同じ上下動を行っていることがわかる。しかし、一波ごとを比較すると、heaving 振幅の方が波高より少し大きくなっているようである。

φ_s は船軸の方向で、船軸方向は大きく変化せず、ほぼ安定していることがわかる。3 段目の T_R は作用張力の変動を示す。

4 段目の円は、水平座標系における船首と船尾のブイ光点の位置を示した図である。円の中心が原点、すなわちアンカー設置点にあたり、 y 軸の向いている方向に造波機が設置されている。円内の丸印は、測定時間中のブイ光点の位置を 10 秒おきにプロットしたものであり、光点の位置からブイの水平面内における位置を確認することができる。光点の位置は他のケースにおいても、1 ケースの測定時間内では、ほぼ一定していた。したがっ

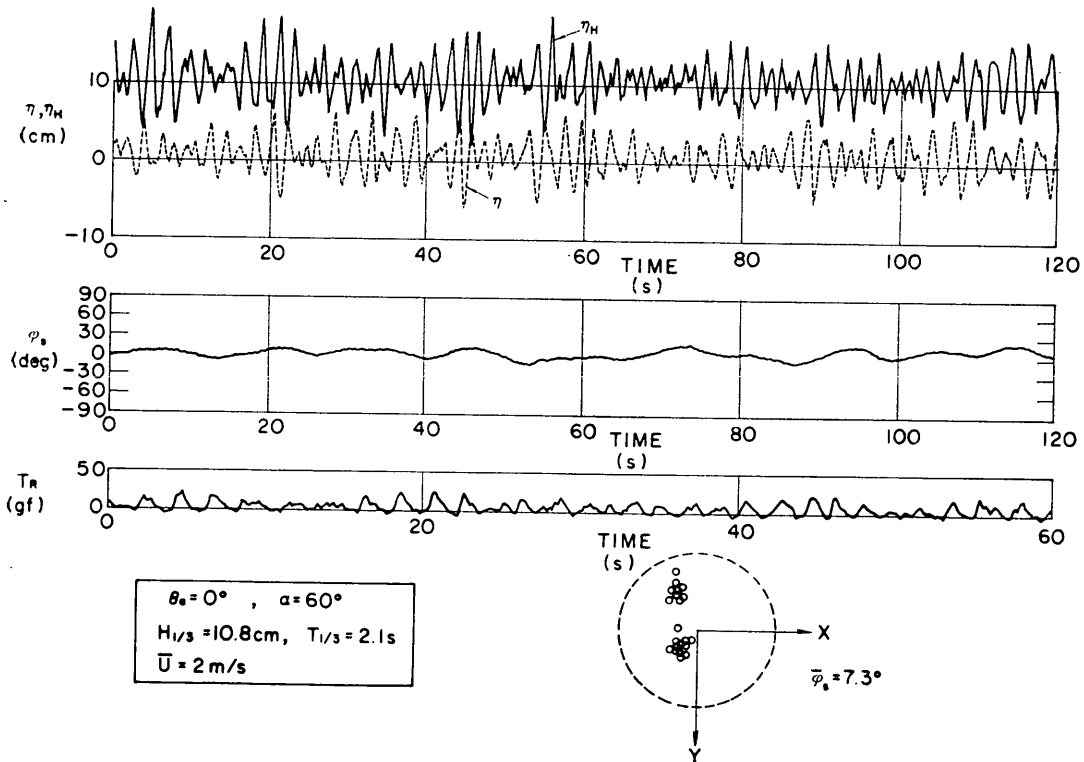


図-34 平面実験における測定データの時間変化

て、波向、風向、風速が一定しておれば、ブイの位置はほぼ一定しており、ある決まった場所で動揺を行うものと思われる。また、船軸の向きも大きく変動せず、測定時間内にブイが大きく回転したりすることはなかった。

(2) 船型ブイの heaving

図-35 は、平面水槽実験における船型ブイの heaving 動揺量の有義値 H_h を示したものである。ブイの heaving は、3.4 で示した手法に従って計算した。

図-35 の横軸は、波高計で求められた波の有義波周期 $T_{1/3}$ を示し、縦軸は、 H_h と有義波高 $H_{1/3}$ の比を示す。

図は $\theta_a=0^\circ$ 、 $\alpha=30^\circ$ のケースにおける heaving から求めた有義波高を示した。図中、白丸が風速 $\bar{U}=0\text{m/s}$ 、半白丸が $\bar{U}=2\text{m/s}$ 、黒丸が 4m/s のケースであり、記号に斜め棒を引いたケースは方向集中度の低い多方向不規則波を作用させたケースである。

風が無い場合、 $T_{1/3}$ が 2.1s 以下では $H_h/H_{1/3}$ はほぼ 1.1 で、 H_h は $H_{1/3}$ より 10% 大きい。 $T_{1/3}=2.3\sim 2.5\text{s}$ 程度では、 $H_h=1.0 H_{1/3}$ となり、 H_h と $H_{1/3}$ は一致する。

$\bar{U}=2\text{m/s}$ の場合、 $H_h/H_{1/3}$ はほぼ 1.1 である。 $\bar{U}=4\text{m/s}$ の場合、 $H_h/H_{1/3}$ は $1.17\sim 1.04$ である。

したがって、 $\bar{U}=0\text{m/s}$ 、 $T_{1/3}=2.3\text{s}$ の場合を除いて、 H_h はほぼ $1.1 H_{1/3}$ となっており、 H_h と $H_{1/3}$ は 10% 程度ずれている。

このように、平面水槽実験において、船型ブイの heaving から推測された波高と実波高とは一致しない。水路実験の結果から考えて、船型ブイの heaving の振幅と波高とが実際にずれているとは考えられない。したがって、実波高と heaving から推定された波高とがずれるのは、船型ブイの heaving の推定手法に問題があるためと考えられる。

すなわち、平面水槽実験では、真横から船型ブイを撮影することができなかったため、斜め上方のカメラで写

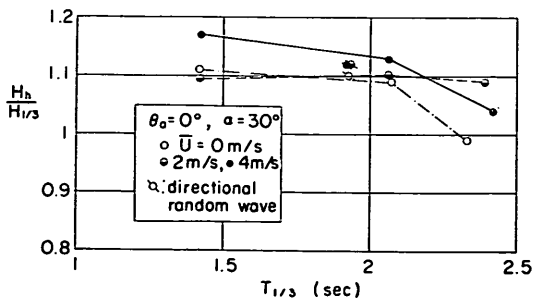


図-35 平面水槽実験における船型ブイの heaving 動揺量

した画像データを 3.4 の手法にしたがって解析して、ブイ光点の鉛直変位を求めた。3.4 では水平面座標の原点付近を対象にして幾何関係を定めたもので、たとえば、 y 軸方向に被写体が移動した場合には、3.4 で設定した推定式の誤差が増加するものと思われる。

平面水槽実験の場合には船体位置が水平座標の原点からずれるために、heaving 推定式の誤差が生じ、 H_h と $H_{1/3}$ が、図-35 に示したように一致しなかったと思われる。

図-35 で、 $\bar{U}=4\text{m/s}$ の場合に H_h が 1.1 以上になり、他のケースより $H_{1/3}$ とのずれが大きいのは、風速が大きいために、船体の位置が水平座標の原点から、他のケースに比べて大きく離れたためと思われる。

また、本水槽実験結果からは、被写体が大きく水平移動した場合でも、斜め上方から撮影された画像データを解析することによってほぼ 15% 程度以内の誤差で、被写体の heaving 動揺を求めることが可能であると言える。

斜め棒を引いた方向集中度の低い多方向不規則波を作用させたケースの実験結果は他のケースに比べて大きくずれることはなく単一方向波の実験結果とほぼ同様であった。ただし、本実験で用いた単一方向波は、3.3 で示したように、実際には多方向不規則波の性質をもっているため、本実験では方向集中度の異なる多方向不規則波を作用させたケースを比較したことになる。したがって、本実験結果から、方向集中度の異なる多方向不規則波を作用させた場合でも、 H_h は変化しないことがわかる。

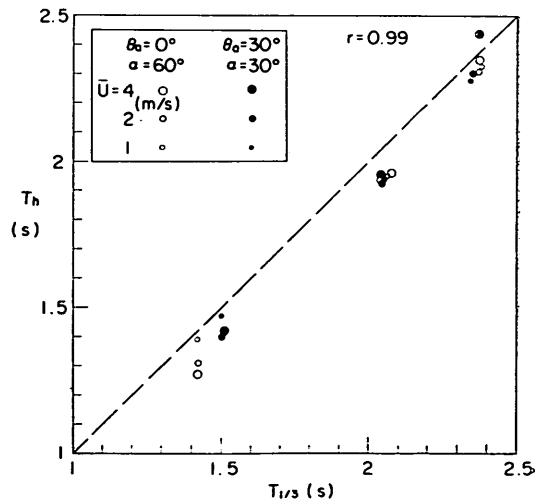


図-35 船型ブイの heaving から推定された有義波周期

図-36 は heaving から計算された有義波周期 T_h を示した図である。図-36 の横軸に、波高計で測定された実有義波周期 $T_{1/3}$ 、縦軸に T_h を示した。白丸は、 $\theta_a=0^\circ$ 、 $\alpha=60^\circ$ のケースで、黒丸は $\theta_a=30^\circ$ 、 $\alpha=30^\circ$ のケースである。丸印の大きさは風速を表す。

図-36 を見ると、 $\theta_a=0^\circ$ 、 $\alpha=60^\circ$ 、 $\bar{U}=4$ m/s の場合には、 $T_{1/3}$ が 1.42 s であるのに対して T_h が 1.27 s で、誤差は、10% 程度である。それ以外のケースでは、 T_h と $T_{1/3}$ の差は、5% 以内であり、 T_h と $T_{1/3}$ はほぼ一致している。また、全ケースについて T_h と $T_{1/3}$ の相関係数を求めると、 $r = 0.99$ であった。

したがって、有義波周期については、有義波高の場合と異なり、船型ブイの heaving から、作用波の周期を正確に推定できることがわかる。

図-35, 36 で得られたことをまとめると、次のようなことが言える。

船型ブイの heaving 動揺から有義波周期を求めたところ、波高計で求められた実有義波周期 $T_{1/3}$ と一致し、風と波が作用した場合でも、船型ブイの heaving から、有義波周期を推定できることが確認できた。有義波高については、heaving から求められる有義波高の推定値 H_h の精度に多少の問題があり、風と波を作用させた場合に H_h と $H_{1/3}$ が一致するかどうかについては、平面水槽実験のみでは確認ができなかった。

(3) 係留張力

図-37 に、平面水槽実験における作用張力の測定結果を示す。張力の場合には、最大値が問題になることが多いので、最大作用張力を示した。図-37 の横軸は作用波の最大波高、縦軸に最大張力を示す。図-37 は、 $\theta_a=0^\circ$ 、 $\alpha=30^\circ$ の場合を示した。

最大波高 H_{max} が大きくなると、最大張力 T_{Rmax} も大きくなる。風速 \bar{U} が 0 m/s、2 m/s の場合には、 H_{max} と T_{Rmax} はほぼ比例しており、波高が大きくなり、係留索の伸びが大きくなるために、作用張力も大きくなっている。また、 $\bar{U}=0$ m/s、2 m/s のときには、斜め棒を引いた $S_{max}=3$ の多方向不規則波のケースと他のケースとでは、顕著な差が生じていない。

$\bar{U}=4$ m/s と風速が強くなった場合には、 H_{max} が大きくなれば T_{Rmax} は大きくなるけれども比例はしていない。また、 $S_{max}=3$ の多方向不規則波を作用された場合には、 T_{Rmax} は単一方向波（実際には $S_{max}=25$ 程度の多方向波）と比べると小さくなっている。すなわち、 H_{max} が 16 cm [現地で 3.2 m] 程度のとき、 $S_{max}=25$ の多方向波の場合、 $T_{Rmax}=140$ gf [現地で、1.12 tf] 程度であるのに対して、 $S_{max}=3$ の多方向波の場合には、

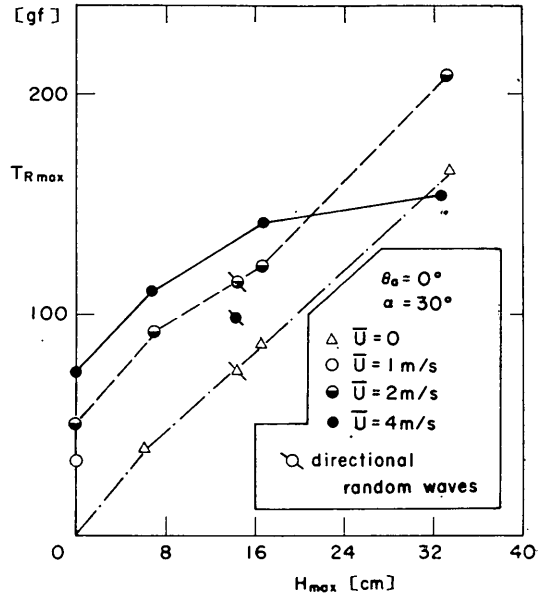


図-37 平面水槽実験における作用張力

T_{Rmax} は 100gf [0.8 tf] 程度になる。すなわち、波の方向集中度が低くなると、係留索に作用する張力は小さくなる。

風速による相違を調べると、ほぼ、風速 \bar{U} が増加すると最大張力 T_{Rmax} も増加する。ただし、 $H_{max}=32$ cm のときには、 $\bar{U}=2$ および 4 m/s の場合、 T_{Rmax} はそれぞれ 165 gf および 155 gf となり、風速 4 m/s の場合が最も小さくなる。これは、波と風の相対的な力関係によって、ブイの向きが風を受けにくい方向になったためと推定できる。

現地で船型ブイを係留した場合を想定すると、平面水槽実験で作用させた波の最大波高は、現地換算値で、6.4 m、周期約 10 s、最大風速は 18 m/s になり、かなり厳しい海象条件を与えている。この場合、係留索に作用する最大張力は、1.7 tf 程度となり、通常、係留索として用いられるチェーンやナイロン製ロープの破断強度が数十～数百 tf 程度であることを考慮すると非常に小さい。

したがって、実験で用いたような伸び率の大きい係留索を用いた場合には、係留索に作用する張力は大きくなるということがわかる。

5.2 風および波によるブイ船軸方向の変化

図-38 は、平面水槽内におけるブイの船軸方向 φ_s の測定結果を示した図で、波向 $\theta_a=0^\circ$ 、風向 $\alpha=30^\circ$ 、波と風の相対角 $\beta=30^\circ$ の場合である。 φ_s は前述したよう

に、船首が造波板の方向を向いたときを 0° として定義し、反時計回りを正とした。図-38の丸印は、 φ_s の平均値であり、直線区間は φ_s の標準偏差を示す。横軸は入射波の有義波高である。

図において、 $H_{1/3} = 0$ は、波を作用させずに、風だけを作用させたケースで、 $\alpha = 30^\circ$ である。このとき、 $\bar{U} = 1 \text{ m/s}$ のとき $\varphi_s = 64^\circ$ 、 $\bar{U} = 2 \text{ m/s}$ のとき、 $\varphi_s = 84^\circ$ 、 $\bar{U} = 4 \text{ m/s}$ のとき $\varphi_s = 105^\circ$ であった。 $\bar{U} = 0$ 、 $H_{1/3} = 0$ は波も風も作用させない場合、すなわち、静止状態におけるブイ船軸方向である。静止状態においては、ブイは造波板の方向を向くように、すなわち $\varphi_s = 0^\circ$ となるように調整して、設置した。しかし、測定ケースの平均をとると、 φ_s の初期値はほぼ 20° であった。ブイの船軸が $\varphi_s = 20^\circ$ で安定した原因としては、ブイに取り付けた張力計、豆電球のコードの影響と、設置時の調整誤差が考えられる。

風のみが作用した場合、前述のように φ_s は $75 \sim 110^\circ$ となり、風向に対して $45^\circ \sim 80^\circ$ 程度船首方向はずれている。

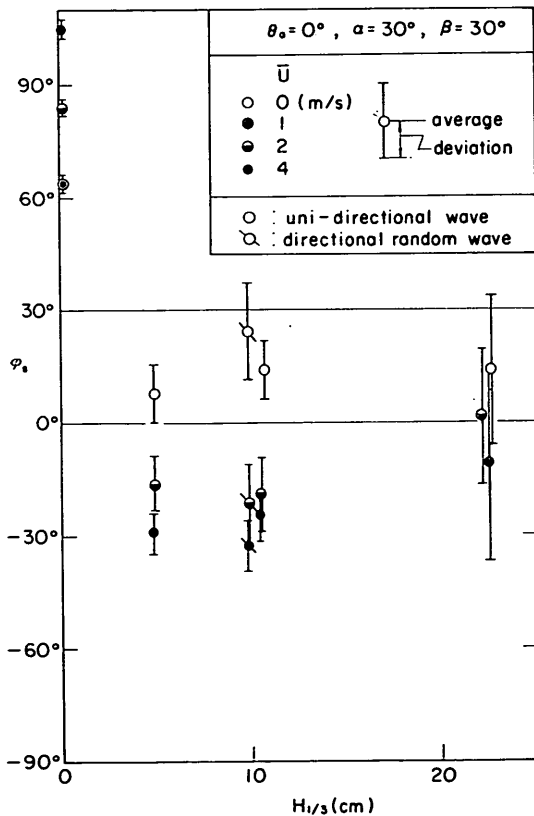


図-38 ブイ船軸方向の変化

る。そして、風速が大きくなるほどそのずれは大きくなり、船体は風に対して腹を向けるようになる。ただし実験したケースにおいては、 φ_s は風向 α より大きく、 $\alpha + 45^\circ \sim 90^\circ$ となったが、船の初期位置によっては $\alpha - 45^\circ \sim -80^\circ$ になる可能性もあると考えられる。風が一樣風であるために、 φ_s の標準偏差は小さく 3° 程度であり、船体の動揺は小さいことがわかる。

白丸印で示した波だけを作用させた場合には、波高によって φ_s の平均値が大きく変化することはない、ほぼ $9 \sim 25^\circ$ で、静止状態での船軸方向とほぼ等しくなった。すなわち、船首の方向は、波だけを作用させた場合でも波向とは $9 \sim 25^\circ$ 程度ずれていることがわかる。これは、前述したようにブイに取り付けられた各種のコードの影響によるものと思われる。

波と風を同時に作用させたとき、 $H_{1/3}$ が 10 cm 以下のときには、 $\varphi_s = -15^\circ \sim -30^\circ$ で、 $H_{1/3}$ が 20 cm 以上のとき $\varphi_s = 0 \sim -10^\circ$ となった。また、風速が大きい方が φ_s の絶対値が大きくなった。これらのことから、次のようなことが考えられる。

風だけが作用した場合には、 φ_s は風向に対して $45^\circ \sim 80^\circ$ ずれる。そして、船の初期の位置によって正あるいは負の方向へずれるものと考えられる。したがって、風向 α が 30° の場合には、 φ_s は $-15^\circ \sim -50^\circ$ となることも考えられる。このとき $\varphi_s = 0^\circ$ の方向から波が作用すると、船軸は波の影響を受けて正方向へ回転し、波高が比較的小さいときは $\varphi_s = -15^\circ \sim -30^\circ$ に、波高が大きくなり、波の影響が大きくなると、 $\varphi_s = 0 \sim -10^\circ$ になる。

したがって、船体の平面運動は、波だけでなく、風、計測用のコード等の影響を受けるために、船軸の方向は必ずしも波向とは一致せず、船軸の方向から波向を判断することは困難であることがわかった。

φ_s の標準偏差は、 $H_{1/3}$ が 10 cm 以下では $6^\circ \sim 15^\circ$ で小さいが、 $H_{1/3}$ が 20 cm 以上では $15^\circ \sim 20^\circ$ となり大きくなる。すなわち、波高が大きくなるほど、 φ_s のばらつきは大きくなっている。しかし、風速によっては φ_s の標準偏差はそれほど大きく影響を受けない。

記号に斜め棒を引いた $S_{\max} = 3$ の多方向不規則波のケースを、波高が等しい単一方向波のケースと比較すると、 φ_s の平均値はほぼ等しい。 φ_s の標準偏差もほぼ等しく、差は見られない。本実験で用いた単一方向波が実際には、 $S_{\max} = 25$ 程度の多方向不規則波と同程度の方向分散性を持っており、本実験結果は方向集中度の異なる多方向不規則波を比較したものとなっている。実験結果から、ブイの平面的な回転運動の変動性は、波の方向

分布性には大きく影響されないものと思われる。したがって、船首方向の変動性から波の方向分布特性を推測することは困難である。

図-39 は、 θ_a と α および β が変化した場合の φ_s の平均値を全ケースについてまとめて示したものである。

$\theta_a=0^\circ$ と $\alpha=30^\circ$ のケースは図-38 で示したものと同一ケースである。

四角印で示した $\theta_a=0^\circ$, $\alpha=60^\circ$ の場合、波高が 12 cm 以下で、 φ_s は -30° 程度であり、波高 $H_{1/3}$ が大きくなると φ_s は $0 \sim -10^\circ$ になっている。すなわち、 $\alpha=60^\circ$ であるので波のない場合は、船体が風に対して腹を向けるようになるものとする、 $\varphi_s = -30^\circ$ 前後になる。また、波向と船軸は $10^\circ \sim 20^\circ$ ずれた方が安定するので、波高が小さく $H_{1/3}$ が 12 cm 以下の場合には、 φ_s は波が作用しても -30° 程度であり、 $H_{1/3}$ が 20 cm より大きくなった場合には、波の影響が増加して、船体は波向方向へ回転し、 φ_s は $0 \sim -10^\circ$ 程度になる。

三角印で示した $\theta_a=30^\circ$, $\alpha=30^\circ$, 相対角 $\beta=0^\circ$ の

ケースでは、 φ_s は $0 \sim 15^\circ$ 程度に分布している。すなわち、風だけが $\theta_a=30^\circ$ 方向に作用するものとする、船体は風に対して腹を向けるように、 $\varphi_s = 0 \sim -60^\circ$ 程度になるけれども、波が $\theta_a=30^\circ$ の方向から作用するので、波向の方向へ回転し、 $\varphi_s = 0^\circ \sim 15^\circ$ で安定するものと思われる。

菱形で示した $\theta = -30^\circ$, $\alpha = 60^\circ$ のケースでは、 φ_s は $5^\circ \sim 12^\circ$ である。この場合、風が 60° の方向から作用すると、船体は、 $0^\circ \sim -30^\circ$ で安定するが、波が -30° の方向から作用するので、波向とずれた $\varphi_s = 0^\circ$ 近くで、船軸が安定するものと思われる。

以上のように、 φ_s と θ_a および α とのずれは、ケースによってばらつきがあり、船軸の方向に対する波向、波高、風速、風向の影響を定量的に明らかにすることはできなかった。しかし、風向と波向から船軸方向をほぼ定性的に説明することができた。

図-38, 39 で示したように、波高が小さいときには、 φ_s は風の影響を強く受け、波高が大きくなると、風と波の影響を強く受けるが、ばらつきが大きくなる。したがって、船軸方向を決定する要因としては、風が第一のものであると思われる。

図-40 は、風向を基準として船軸方向を表したものである。図の φ_{sw} は、船軸と風向の相対角で、船軸方向と風向が一致したとき 0 となる。 φ_{ww} は、風向を基準とした波向の相対角である。

図-40 に示されるように、有義波高 $H_{1/3}$ が 12 cm 以下では、 φ_{sw} は 1 ケースを除いて、 $-45^\circ \sim -60^\circ$ に集中しており、ブイの船体が風向に対して $45^\circ \sim 60^\circ$ 傾いた場合に最も安定することがわかる。有義波高 $H_{1/3}$ が 12 cm

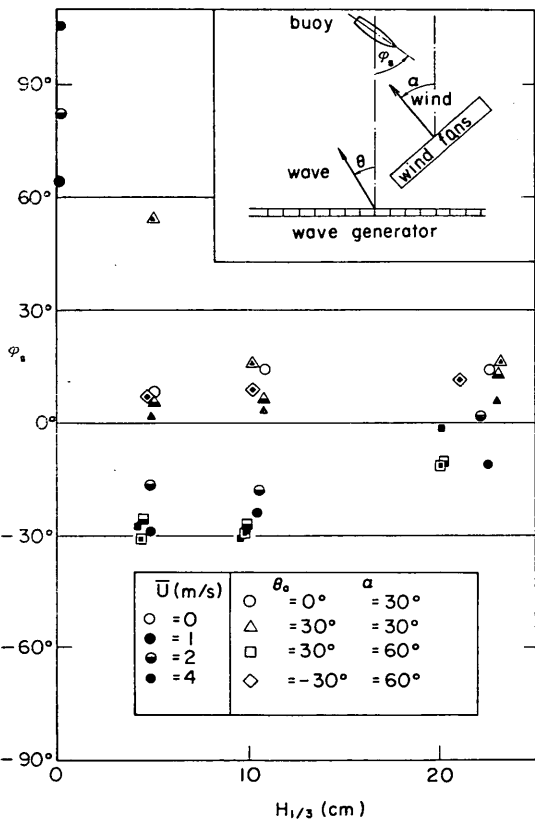


図-39 波向・風向とブイ船軸方向の関係

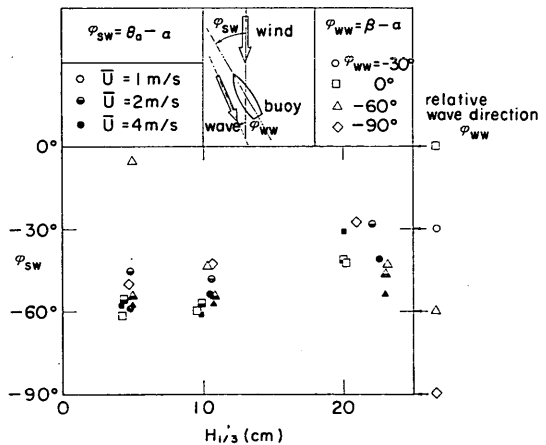


図-40 船軸と風向の相対角

以下の場合について、風速 \bar{U} ごとに φ_{sw} の平均値 $\bar{\varphi}_{sw}$ を求めると、 $\bar{U}=1\text{ m/s}$ のとき $\bar{\varphi}_{sw}=-52^\circ$ 、 $\bar{U}=2\text{ m/s}$ のとき $\bar{\varphi}_{sw}=-53^\circ$ 、 $\bar{U}=4\text{ m/s}$ のとき、 $\bar{\varphi}_{sw}=-58^\circ$ となる。したがって、風速が強くなるほど、船軸方向と風向とのずれ $\bar{\varphi}_{sw}$ は大きくなるが、その差は小さく、あまり大きく変化はしないことがわかる。

$H_{1/3}$ が大きくなり 20 cm 以上の場合には、 φ_{sw} は、 $-28^\circ\sim-54^\circ$ の範囲に分布し、波によって φ_s が大きくばらつくため、 φ_{sw} のばらつきも大きくなっている。 $H_{1/3}$ が 20 cm 以上のときの φ_{sw} の平均値 $\bar{\varphi}_{sw}$ は、 -40° であり、船軸方向と風向とのずれは小さくなっている。図-40の右端に、各ケースにおける波向 φ_{ww} を示したが、 $H_{1/3}$ が 20 cm 以上のケースにおいても、 φ_{sw} と φ_{ww} は一致せず、また両者の差も、各ケースによって異なる。

以上のことから、波高が小さい場合〔現地換算値で、2.4 m 以下〕、船軸方向はほとんど風によって決定され、ほぼ、風向に対して $45^\circ\sim 60^\circ$ 程度ずれることがわかる。波高が大きくなった場合〔現地換算値で 4 m 以上〕には、波の影響を受けて、平均値自体もばらつくけれども、波から何度ずれるかは一定しておらず、風向に対して、 $-30^\circ\sim-60^\circ$ 程度ずれるものと推測され、船軸は方向は、風による影響を強く受けることが明らかとなった。

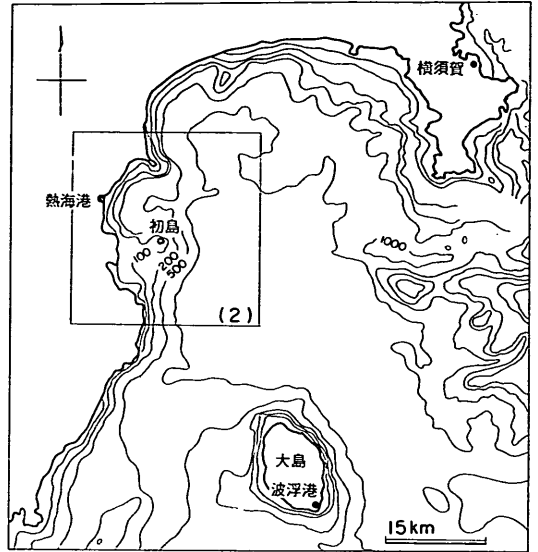
6. 現地観測の方法

6.1 観測地点と観測期間

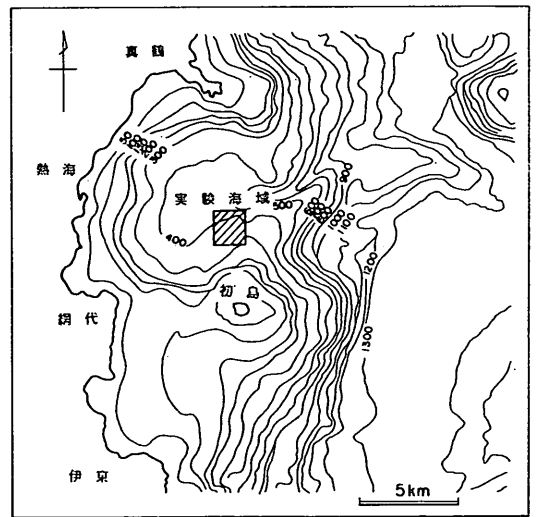
現地観測は、静岡県熱海港の 10 km 沖合の初島から北方へ 5 km 離れた水深 350 m の地点において、1986 年 12 月より 1987 年 3 月まで行われた³⁹⁾。

図-41 (1), (2) は、観測地点周辺の地形と水深を示した図で、(1) は、観測地点を含めた相模湾の海底地形を示す。相模湾の海底はトラフ状になっており、陸岸から数 km 離れただけで水深が急激に深くなり、500 m \sim 1000 m になる。特に初島北方の海域では、陸岸近くまで水深 500 m の等深線が入り込んでおり、水深数百 m の海域での観測を対象とした船型ブイの現地観測実験点としては都合がよい。また、初島が近くにあり、容易に陸上受信施設を設けることができる。図-41 (2) は、実験海域の詳細地形図である。

船型ブイは、海上が穏やかであった 1986 年 12 月 17 日に実験海域に設置された。設置点の位置は、ほぼ北緯 $35^\circ 04.5'$ 、東経 $139^\circ 10'$ であった。観測データは、一部欠測期間もあるが、1986 年 12 月 18 日 15 時より、1987 年 3 月 2 日 12 時まで 3 時間毎に収録した。各時間とも正時の前後



(1) 周辺地形図



(2) 周辺地形詳細図

図-41 実験海域

10分間ずつ観測を行った。たとえば、12時の観測は、11:50 \sim 12:10の20分間の観測を示す。

観測期間中、ブイ設置直後の12月18日 \sim 21日に最も海象条件が悪くなり、観測期間中の最大波高を記録したので、本報告ではこの期間の観測データを主に解析した。

図-42 は、設置後の12月17日 \sim 24日の天気図を示している。12月18日には、日本海に入った低気圧が発達している。12月18日から19日にかけて、二ツ玉低気圧が発達し、12月19日の早朝には、関東 \sim 東海地方に突風、強雨

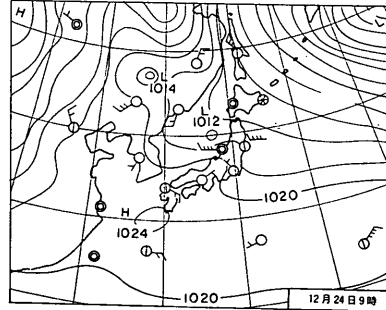
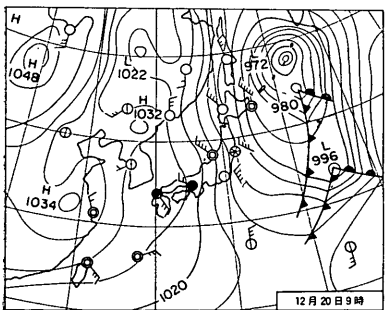
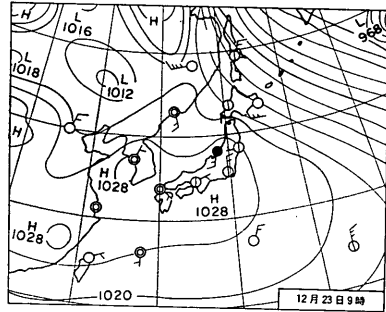
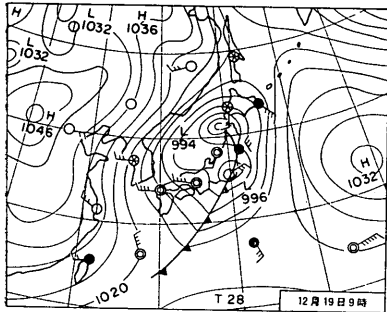
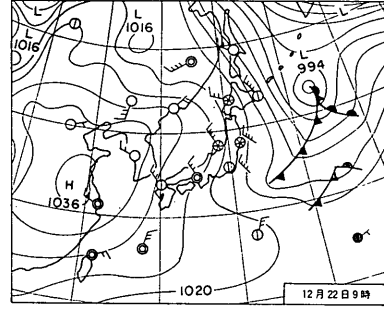
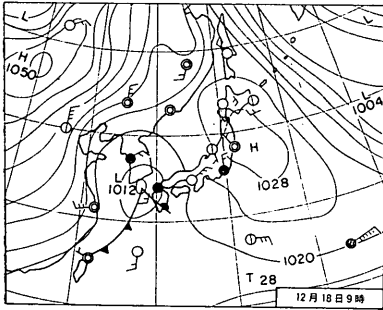
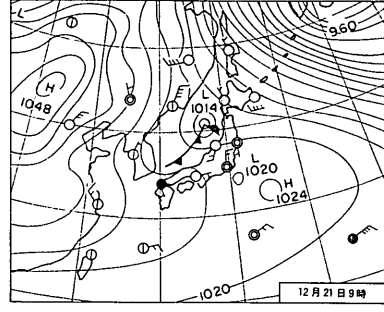
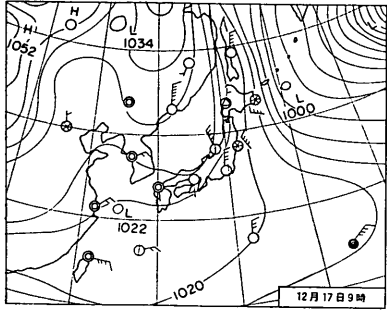


図-42 観測期間の天気図⁴⁰⁾

が起り、大島で最大瞬間風速 39.1m/s を記録している⁴⁰⁾。この時には、船型ブイの設置海域においても風雨が強まり、波高も大きくなったものと推測される。12月20日も、引き続き強い冬型の気圧配置が続き、強い季節風が吹いている。12月21日には、冬型の気圧配置もゆるみ、12月22日には風速も弱まっている。12月23日には、弱い低気圧が日本海、関東付近に発生したが、風速が弱く、24日は穏かな日となっている。

天気図から、12月18日～19日早朝にかけて、日本海上での二ツ玉低気圧の発達によって、船型ブイの実験海域の海象条件は最も厳しくなったものと推測される。

6.2 観測システムと観測項目

(1) 曳航と係留方法

船型ブイは、熱海港まで陸送し、熱海港から設置点まで、小型船によって曳航した。写真-6 は、曳航中の船型ブイを曳航船から撮影したものである。

④ 曳航速度は最大4ノット程度であり、曳航中に、ブイが水没したり、曳航索が切断されるようなことはなかった。

図-43 は、現地における係留索の構成を示した図である。ブイにはまずシャックルを通して、長さ10mのスタッド付リンクチェーンが接続され、続いて長さ約150m、直径26mmのステンレスワイヤーロープがつながれている。ステンレスワイヤーロープの端には、100m のテ

ロンSロープ、さらに、250m のエスラインロープが結ばれている。エスラインロープの先端には、長さ250mのスタッド付リンクチェーンおよびアンカーが連結されており、チェーンと海底面との摩擦およびアンカーの把駐力によって、ブイの漂流を防いでいる。チェーンとエスラインロープの接続部にはブイがつけられており、海底面と接続部を離して、海底面との摩擦による切断を防いでいる。

ステンレスワイヤーロープの径は小さく、エスラインロープは比重が1以下である。係留前と係留後でブイの砲水はほとんど変化しなかったが、スタッド付リンクチェーン、テロンロープおよび接続金具の重量を合計す

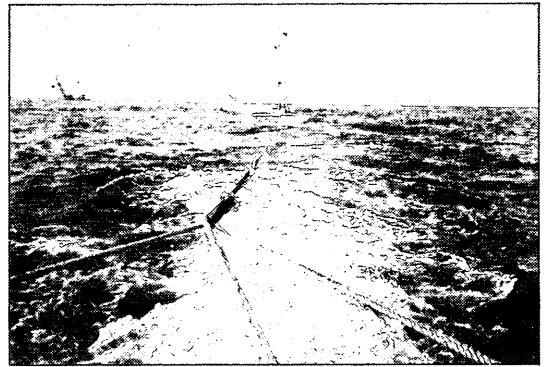


写真-6 船型ブイの曳航状況

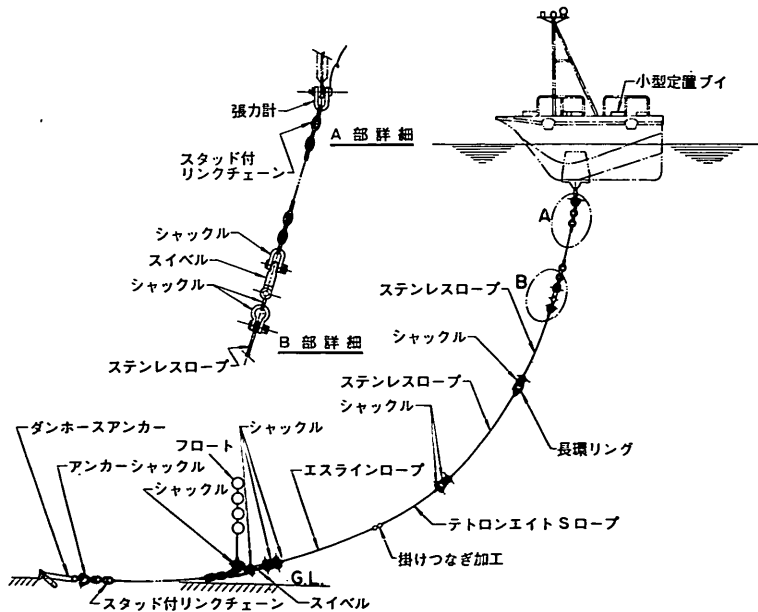


図-43 係留索の構成

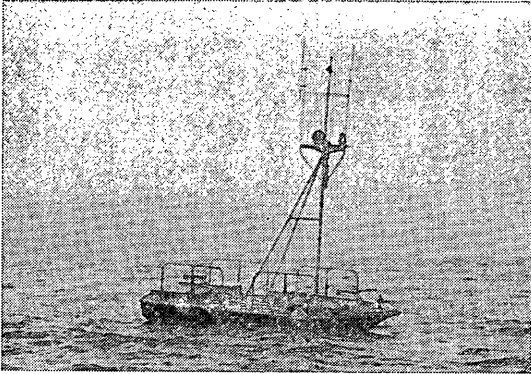


写真-7 実験海域における設置状況

ると、約670kgになるので、静水中では、若干の初期張力が係留索に作用している。

ステンレスワイヤーロープ、テトロンエイトSロープ、エスラインロープともに破断荷重は30tf以上である。

写真-7は、実験海域に設置されたブイの状況を示す。

(2) 観測項目と観測方法

表-7は、船型ブイによって観測した項目を示す。現地観測では、ピッチ・ロール・ヒープセンサー²⁾によりブイの動揺量(ピッチ, ロール, ヒープ)を測定した。また、方位計によってブイの船首の方向を、マスト上の風向・風速計で風向と風速を測定した。風向および風速は10分間平均値である。さらに、ブイ船室内の装置によって係留索の作用張力と、標識灯電圧、標識灯電流、テレメータ電圧・電流を測定し、ロランCによって船の緯度、経度を測定した。ただし、標識灯電圧・電流、テレメータ電圧・電流および船の緯度、経度はブイ上の計測システムが正常に作動しているかどうか、および、ブイの係留索が切れて、ブイが漂流していないかどうかを監視するために測定した項目である。

また、ブイから数10m離して波高観測用小型ブイとして数多く使われている球形ブイを設置して、球形ブイによっても水位変動を測定し、実験海域における波高を測定した。写真-8に本観測に用いた球形ブイを示す。表-7の項目中「波高」は球形ブイによる観測データを示している。球形ブイには40mの係留用テトロンロープを取りつけ、ロープの一端は、船型ブイの係留索であるスタッド付リンクチェーンとステンレスロープの接続部に結んだ。

測定されたデータはテレメータシステムによって、初島に設けられたデータ収録装置に送信され、固定ディスク装置にデジタルデータとして収録された。1チャンネルあたりのデジタルデータのサンプリング周波数は2

表-7 観測項目

観 測 項 目

ch	項 目	単 位
1	ピ ッ チ	deg
2	ロ ー ル	deg
3	ヒ ー プ	m
4	ブイ方位	deg
5	風 向	deg
6	風 速	m/s
7	波 高	m
8	張 力	tf
9	標 識 灯 電 圧	V
10	標 識 灯 電 流	A
11	テ レ メ ー タ 電 圧	V
12	テ レ メ ー タ 電 流	A
13	緯 度	分
14	経 度	分



写真-8 球形ブイの外観

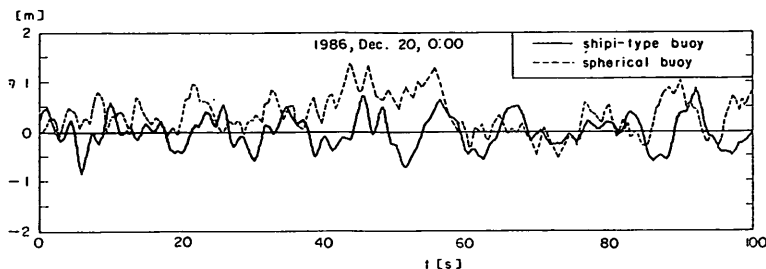


図-44 球形ブイと船型ブイの観測値の時間変化

Hzとした。すなわち、0.5秒間隔で、一項目あたりの測定値が記録されることになる。

7. 現地観測への船型ブイの適用性

7.1 船型ブイで観測された波高と周期

(1) 球形ブイによる観測値との比較

球形ブイは、別名「ウェーブ・ライダー」と呼ばれ、球形ブイ自身が水面と同じ上下動を行う。ブイ内部には加速度計が組み込まれており、加速度計のデータを2回積分すると、ブイの上下動、すなわち水面変動を求めることができる⁴¹⁾。球形ブイは、波高観測用ブイとして従来から使用されてきた実績があり、その測定データには信頼を置くことができる。そこで、船型ブイが現地において波高計として機能するかどうかを検討するために、球形ブイで測定された水位変動と船型ブイの heaving 動揺量を比較した。

図-44 は、球形ブイで観測された水位変動と、船型ブイの heaving (上下) 変動の時間変化を示したものである。図-44 の実線が船型ブイ、破線が球形ブイの上下動を示している。

図-44 は、1986年12月20日0時、すなわち12月19日、11:50~12月20日0:10の観測値の一部である。船型ブイは、正負どちらの側へも変動しており、通常の水面上変動の時間変化の様子とよく一致している。球形ブイの上下変動は、40~60sの間では、変動しているけれども、その値は常に正である。また、全体として、その平均値が正側にずれている。したがって、観測データには“ドリフト”が生じているようである。

他のケースでも、船型ブイの上下動は、その平均値がほぼ0で、水面変動の様子とよく一致した。それに反して、球形ブイの観測値には、図-44のようなドリフト現象が生じることも多く、また、多くのデータには、スパイク状のノイズが多数混入し、解析が困難であった。この理由としては、球形ブイの加速度計の調子が悪かったことや、球形ブイの係留索が十分長くない、球形ブイ

が、船型ブイの係留索にある程度拘束されて運動しており、船型ブイの運動から影響を受ける場合があることが考えられる。また、テレメーターの送受信過程で何らかの異常が入ったことなども考えられるが、はっきりしたことは不明である。球形ブイ以外の観測データには、ドリフトやノイズは発生していなかった。

そこで、スパイク状のノイズの発生しなかったデータについて解析を行い、周波数スペクトルを求めた。図-45に球形ブイで測定された水面変動および船型ブイの上下動の周波数スペクトルを示した。周波数スペクトルの計算には、観測ケースの中で、最初から2048個のデータを用い、FFTによって解析し、三角形フィルターをウィンドーとして⁴²⁾スペクトルを求めた。

図-45の破線が球形ブイから得られた水面変動のスペクトル、実線が、船型ブイの上下動のスペクトルを示す。 $f > 0.05\text{Hz}$ の範囲では両者のスペクトル形はほぼ一

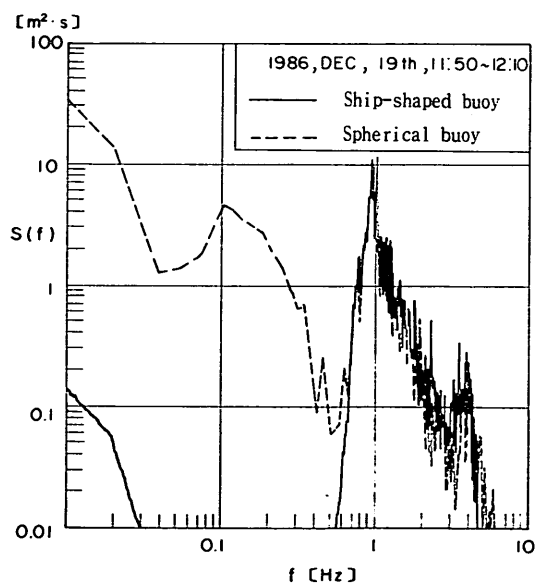


図-45 観測された周波数スペクトルの比較

致し、ピーク周波数も同じである。 $f < 0.05\text{Hz}$ の長周期側では、船型ブイの上下動はほとんどエネルギーを持たないのに対して、球形ブイの上下動のスペクトルは大きなエネルギー値を示しており、球形ブイの上下動に大きなエネルギーを持つ長周期成分が含まれていることがわかる。これは、観測データのドリフトの影響である。

球形ブイの上下動から、ドリフトの影響を除去すると水面変動を表す⁴³⁾。したがって、そのスペクトル形と船型ブイの上下動のスペクトル形を比較することによって、船型ブイの上下動から波高および周期を求めることができるかどうか検討することができる。そこで、図-45に示したようなスペクトルから $f < 0.5\text{Hz}$ の長周期波成分を除去して、スペクトルを求め、波高を推算して、両者を比較した。

有義波高 $H_{1/3}$ は、スペクトルから以下の式によって計算した。

$$H_{1/3} = 3.8\sqrt{m_0} \quad \dots\dots(32)$$

ここに、

$$m_0 = \int_{f_1}^{f_2} S(f)df \quad \dots\dots(33)$$

であり、 f_1 、 f_2 は、スペクトルの総エネルギーを求めた周波数の下限値および上限値である。

図-46 は12月の観測データの中で、球形ブイの観測データの中にスパイク状のノイズが生じておらず、大きなドリフトによる長周期変動の少ないケースについて、式(32)、(33)によって波高を推算した結果である。

図-46の横軸は、球形ブイから求めた有義波高 $H_{1/3}$ を示し、縦軸は、船型ブイの上下動スペクトルから求めた

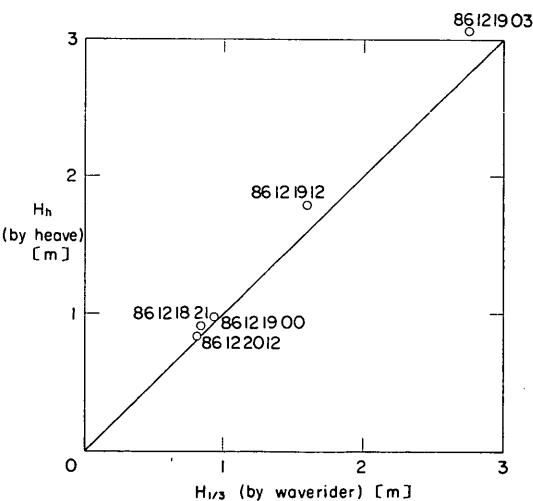


図-46 球形ブイと船型ブイで観測された波高の比較

有義波高 H_h を示す。図中のプロットされた点の右側の数字はケース番号で、たとえば86121912は、1986年12月19日12時の観測ケースであることを示す。

$H_{1/3}$ が1 m以下の場合には、 $H_{1/3}$ と H_h はよく一致する。 $H_{1/3}$ が大きくなると、 H_h の方が、 $H_{1/3}$ より若干大きくなるが、その誤差は、4~10%でありそれほど大きくない。

すなわち、本観測で用いた球形ブイの測定状態が良好ではなかったため、全観測値について比較できなかったが、状態が良好なものについては、球形ブイの観測結果と、船型ブイの観測結果とはほぼ一致することが確認できた。したがって、船型ブイの heaving を求めることによって、現地で波浪観測を行うことができる。

(2) 波浮港の観測値との相関

図-41 に示したように実験海域から東南方向30kmの海上には、伊豆大島がある。大島南岸の波浮港では、第二港湾建設局によって常時、波浪観測が行われている。実験海域の周辺の港湾で波浪観測が行われているのは波浮港だけである。

波浮港では港外の水深50mの地点に、超音波波高計を設置して、2時間毎に20分間の観測を行っている⁴⁴⁾。すなわち、12時の観測ケースであれば、11:50~12:10の観測データにあたる。

図-47 は、第二港湾建設局がまとめた1986年12月17日から12月26日までの、波浮港における有義波高 $H_{1/3}$ と有義波周期 $T_{1/3}$ を示す。波浮港における $H_{1/3}$ は、ニッ玉低気圧が近づいた12月19日に大きくなり、19日8:00に最大値5.9mを記録している。このときの $T_{1/3}$ は、9.5sであった。波形勾配を求めると、0.04で、発達途中の風波であると考えられる。12月19日8:00をピークとして波高は小さくなり、低気圧が過ぎ去った12月21日10:00には1m以下になっている。その後、波高は再び増大し、12月21日20:00~22日4:00にピークとなり、 $H_{1/3} = 2.4\text{m}$ となった。12月24日12:00にも波高は大きくなっており、 $H_{1/3} = 2.0\text{m}$ となっている。

図-48 は、図-47 とほぼ同期間の船型ブイの heaving から推算された有義波高 $H_{1/3}$ 、最大波高 H_{max} と有義波周期 $T_{1/3}$ 、最大波周期 T_{max} 、および風速計で測定した風速 U を示す。風速は、観測ケースの中で最大の10分間平均風速を示している。

船型ブイの観測値は3時間毎のデータなので、図-47の波浮港の観測値と観測時刻はずれている。図-48の上段が最大風速、中段が周期、下段が波高を示す。

波高は、ニッ玉低気圧が近づいた12月19日6:00に最大となり、そのとき $H_{1/3} = 2.8\text{m}$ 、 $H_{max} = 4.5\text{m}$ 、 $T_{1/3}$

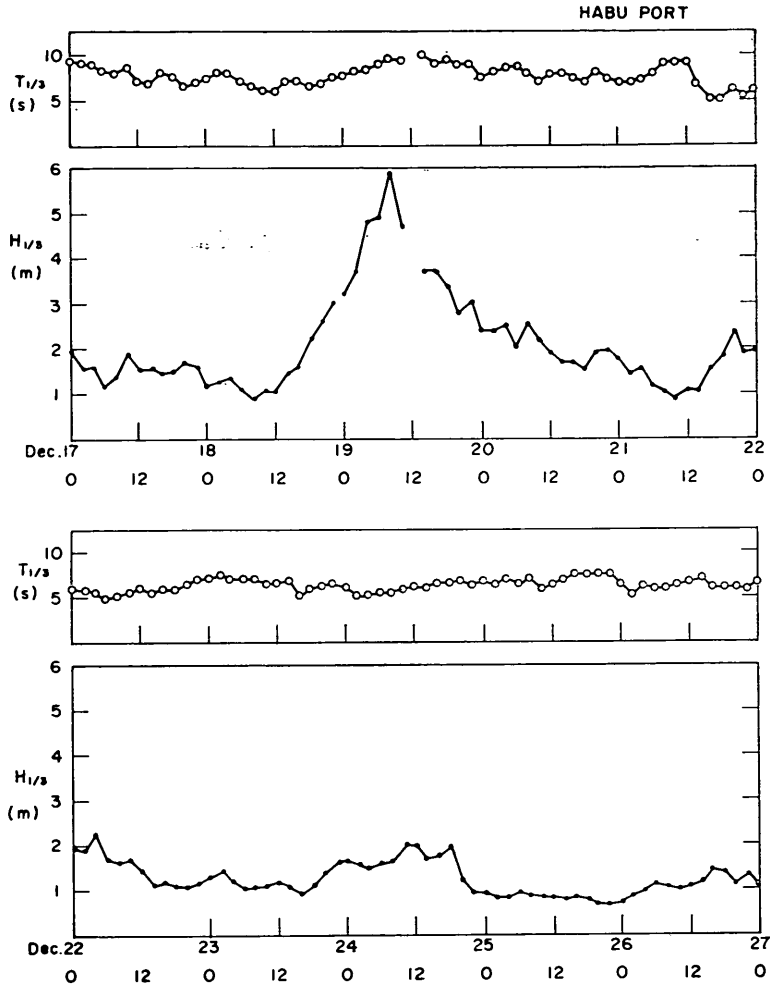


図-47 波浮港における有義波高と周期

=8.5 s, $T_{max}=13.0$ sであった。 $H_{1/3}$ の最大値は、波浮港での5.9mに比較すると1/2程度で小さいが、出現時刻は、ほぼ一致している。また、19日6:00の $T_{1/3}$ は、波浮港の8:00における $T_{1/3}$ より10%程度短い。12月19日9:00における船型ブイで観測された $T_{1/3}$ は、10.0 sで、波浮港の8:00における観測値とほぼ一致している。

船型ブイで観測された $H_{1/3}$ は、19日6:00をピークとして減少し、12月21日9:00~12:00に最小となった。最小となった時刻は、波浮港の観測値とほぼ一致する。その後、 $H_{1/3}$ は増大し、22日早朝にピークを示したと思われるが、欠測となっている。しかし、このピークを示したと推測される時刻も波浮港の観測値と一致している。12月21日~24日の $T_{1/3}$ は、5~8.5 sで、波浮

港の観測データとはほぼ一致する。

このように、船型ブイで観測された実海域の $H_{1/3}$, $T_{1/3}$ は、波浮港の超音波式波高計で観測された $H_{1/3}$ および $T_{1/3}$ と、同様な時間変化を示し、周期についてはその値がほぼ一致している。したがって、船型ブイは、実海域においても水面に一致して上下動を行っており、ブイの heaving から、海域の波高、周期を求めても、ほぼ妥当な値を得ることができることがわかる。

船型ブイで観測された $H_{1/3}$ が、波浮港で観測された $H_{1/3}$ より小さくなる原因としては、地形の影響が考えられる。図-41 に示したように、波浮港は大島南岸の太平洋に面した位置にあり、波向が北寄りの外洋波浪を直接受けることになる。船型ブイの実験海域は、房総半島、三浦半島、大島、伊豆半島に囲まれた相模湾内に位置し

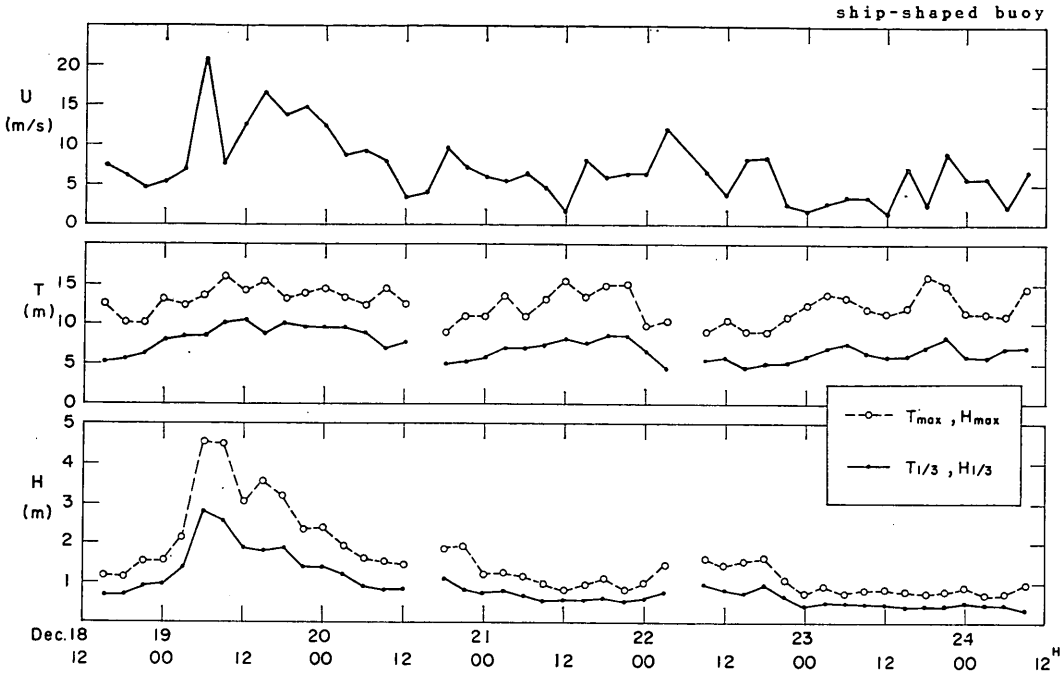


図-48 船型ブイで観測された有義波高と周期

ており、また、南から来る外洋波浪に対しては、大島が防波堤となり、外洋波浪を直接受けにくい。波高が最大となったときの船型ブイで観測された風向は東～南であった。したがって、波向も風向にほぼ等しいと考えると、東～南の方向から来襲した波は大島である程度さげられる。それゆえに、船型ブイで観測された $H_{1/3}$ が波浮港で観測された $H_{1/3}$ より小さくなったものと思われる。

以上のように、船型ブイで観測された波高は、波が南側から来る場合、波浮港における値より小さくなる。しかし、その時間変化の様子はよく似ている。船型ブイで観測された周期は波浮港の観測値と一致する。

7.2 船型ブイの動揺と係留張力

(1) pitching と rolling

図-49, 50は、12月18日15:00～12月25日9:00の観測データより求めた船型ブイの pitching と rolling の動揺周期および振幅である。動揺周期および振幅は、波高解析と同じ手法で、ゼロアップクロス法を用いて有義値として整理した。1ケースあたり、0.5s間隔で収録された2048個のデジタルデータを用いて解析した。

図-49は、横軸に船型ブイの heaving から求めた有義波周期をとり、縦軸に、pitching 動揺量および rolling 動揺量の有義波周期に相当する $T_{1/3p}$ および $T_{1/3r}$ を

示している。観測期間中、波の周期 $T_{1/3}$ は、4～11s程度で変動しているが、 $T_{1/3p}$ 、 $T_{1/3r}$ 共にほとんど一定している。それぞれ、平均値と標準偏差を求めたところ、 $T_{1/3p}$ の場合、3.39sと0.26sで、 $T_{1/3r}$ の場合、3.51sと0.31sであった。

4.1(1)の図-25および表-6で示したように、模型実験から求めた船型ブイの pitching と rolling の固有周期は、それぞれ2.68sと、3.49sであった。図-26および27で

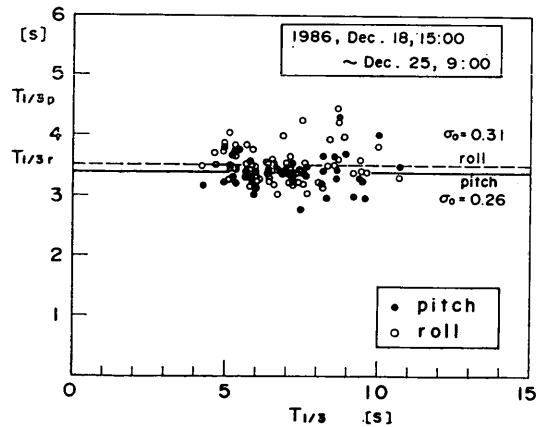


図-49 船型ブイの pitching および rolling の動揺周期

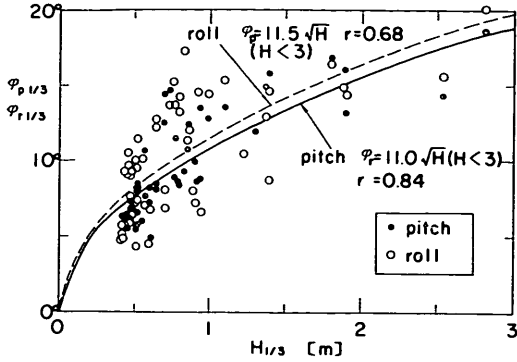


図-50 船型ブイの pitching および rolling の動揺振幅

示したように、船型ブイの pitching 周期は、共振により固有振動周期に近くなる。

したがって、現地観測結果において、ブイの pitching および rolling の周期が、波周期によらずほぼ一定となるのは、pitching および rolling の動揺がそれぞれの固有振動によって大きく影響を受けており、その振動周期の有義値が固有振動周期に近くなっているためと思われる。

rolling に関しては、観測された $T_{1/3r}$ と、実験で得られた固有周期とはほぼ等しい。pitching に関しては、0.7s 程度、実験値の方が短くなっている。これは、実機と模型では、模型製作時に若干の誤差が生じたために、わずかに、固有振動数が異なるためと思われる。

図-50は、横軸に船型ブイの heaving から計算された有義波高 $H_{1/3}$ をとり、縦軸に、pitching および rolling の有義波高に相当する有義動揺量 $\varphi_{p1/3}$ および $\varphi_{r1/3}$ を示したものである。

観測された $\varphi_{p1/3}$ および $\varphi_{r1/3}$ は波高が増大するにつれて大きくなり、観測期間中の最大値は、 20° 程度であった。このときの最大傾斜角は、pitching, rolling ともに 17° 程度であり、ブイが転倒してしまうことはなかった。

図-50に示すように、 $H_{1/3} < 3$ の範囲で1/2乗相関曲線をひいてみると、pitching については $\varphi_{p1/3} = 11.0\sqrt{H_{1/3}}$ 、rolling については、 $\varphi_{r1/3} = 11.5\sqrt{H_{1/3}}$ となった。しかし、それぞれの相関係数 r は、 $\varphi_{p1/3}$ の場合 0.84、 $\varphi_{r1/3}$ の場合 0.68で、あまり相関は良くない。したがって、観測値はかなりばらつき、 $H_{1/3}$ との相関を定量的に求めることは困難であった。

pitching および rolling は、マスト頂上で観測している風速に大きな影響を与えらると思われる。

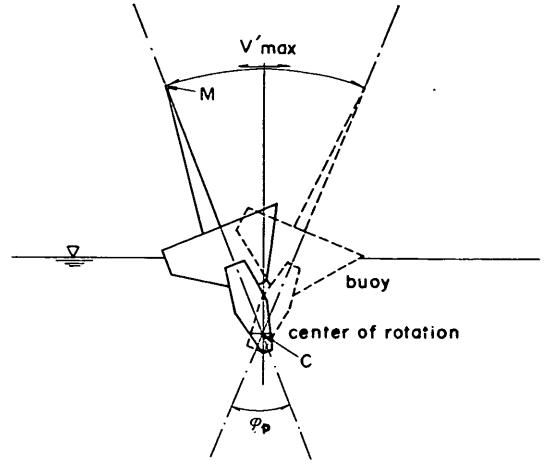


図-51 ブイの動揺の模式図

ここで、ブイの動揺時のようすを模式的に図-51のように表す。ブイは、図-51のCを中心として pitching あるいは rolling を行っており、その両振幅は φ_p である。マスト頂上の点をMとする。観測期間中、最も動揺が大きかったケースを想定して、 $\varphi_p = 20^\circ$ 、その振動周期 T を 3.5s とする。ここに、 φ_p は、風速データが瞬時値ではないので、傾斜角の最大値ではなく、有義値を用いた。

動揺中心からのマスト頂の距離 \overline{CM} は、約 10m である。マスト頂点Mの水平運動振幅は次式で示される。

$$x' = 2\overline{CM} \sin \frac{\varphi_p}{2} \quad \dots\dots(34)$$

(ただし、 φ_p はラジアン)

最大水平速度は次式で計算される。

$$V'_{max} = \overline{CM} \cdot \varphi_p \pi / T \quad \dots\dots(35)$$

各諸元を入れて V'_{max} を計算すると、 $V'_{max} = 3.1\text{m/s}$ となる。

図-49で示した観測値の時間変化をみると、 $H_{1/3}$ が最大、すなわち φ_p および φ_r が最大となるときの最大風速は 21m/s であった。このとき、式(35)によって求められた船型ブイのマスト頂上の、風速計自体の水平移動速度が 3.1m/s とすると、観測データには、最大で、15% 程度の誤差が含まれていることになる。

しかし、この値は、ブイのマストが風速と同じ方向に移動したと仮定して求められる値であり、また、マストは 3s 程度の短周期で動揺しており、10分間平均風速が 10分間の平均値であることを考えれば、風速計自体の移動速度が、観測される風速に与える影響は非常に小さいものと考えられる。

したがって、pitching および rolling の動揺によって

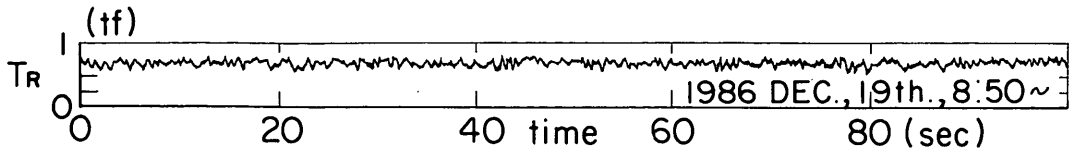


図-52 係留張力の変動

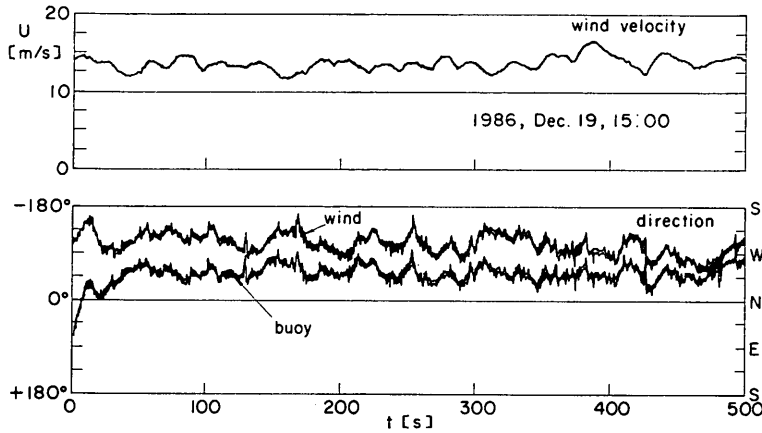


図-53 風向 φ_w 、船軸方向 φ_s および10分間平均風速 U の時間の変化

風速に生じる誤差は、瞬時値に対しては15%以内であるが、10分間平均風速にするとさらに小さくなるものと思われる。

(2) 係留張力

図-52 は、船型ブイの係留索に作用した張力を示したものである。図-52 は、1986年12月19日9:00のデータであり、作用張力の時間変化を示している。図に示されるように、作用張力は観測期間中ほとんど変化せず0.75tf程度であった。他のケースにおいても作用張力はほとんど0.75tf程度で一定であった。

船型ブイで用いた係留システムは、ナイロンロープを中心に構成されており、自重が非常に小さい。また弛緩係留をしているので、ブイが数mの上下動を行ってもほとんど係留張力は変化しないものと考えられる。

図-43 で示した係留システムのなかで、径26mm、長さ150mのステンレスワイヤーロープの水中重量を求めると、390kg程度になる。この他に、10mのスタッド付リンクチェーンの重量170kgおよびシャックル等の重量が加わるため、装備の自重だけで、張力計には0.7tf程度の張力が作用するものと思われる。これ以外に、潮流等の影響を受けるために、作用張力は0.75tf程度になるものと推定される。

観測期間中、波高が大きい場合でも、作用張力は0.75

tf程度で変化せず、係留系の破断強度から比較すれば十分小さい。したがって、船型ブイは、現地において安全な係留ができるものと考えられる。

7.3 船型ブイの船軸方向の変化

図-53 は、船型ブイで観測された風向 φ_w 、船軸方向 φ_s および10分間平均風速 U の時間変化を示した図で、1986年12月19日15:00のデータを示している。図-53において、上段が U 、下段に φ_w と φ_s の変化を示す。

φ_s および φ_w は、図-54に示すように、北向を 0° として、時計回りを正として定義した。

図-53 は、観測期間の中でも風速が大きかったケースであり、 U は12m/s~16m/s程度である。図-53をみると、風速 φ_w および船軸方向 φ_s は、周期数秒程度の短周期の微小な変動を含んでいる。これは、ブイの pitching, rolling の影響と思われる。短周期の変動成分の振幅は小さく、風向 φ_w は、 $-90^\circ \sim -170^\circ$ 程度で、長周期の変化を示している。船軸方向 φ_s も φ_w と同様に長周期の変動を示しており、その値は、初期の10秒間を除くと $0 \sim -90^\circ$ 程度であった。

他のケースにおいても、図-53に示されるように、rolling および pitching による短周期の変動成分を除くと、風向 φ_w 、船軸方向 φ_s ともに数十秒の長周期で変化し、また1分間に、 30° 以上大きく変化することはなかった。

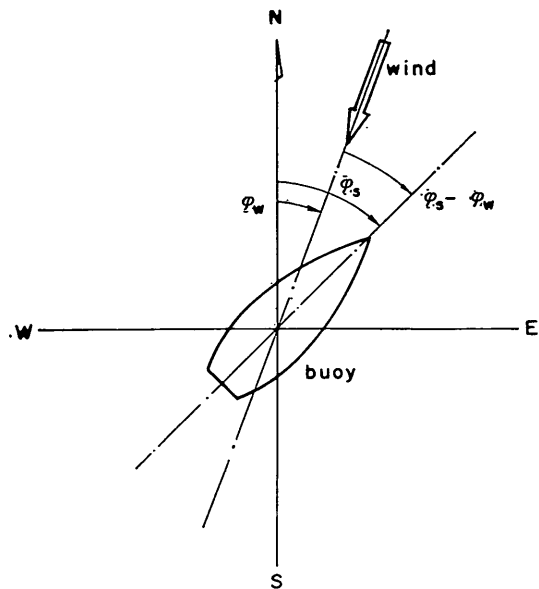


図-54 φ_s と φ_w の定義

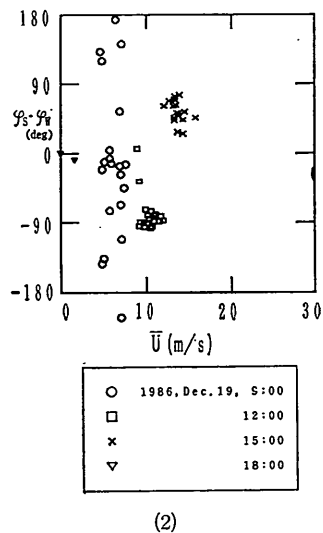
そこで、 U 、 φ_s および φ_w の観測値の1分間平均をとって、 φ_s と φ_w および風速 U との相関を調べた。すなわち、1ケースあたり20分間の観測値があるので、1分間ずつ平均して、1ケースあたり20個の1分間平均値を求めた。

図-55は、 U の1分間平均値 \bar{U} と、 φ_s および φ_w の1分間平均値 $\bar{\varphi}_s$ および $\bar{\varphi}_w$ を示した図である。図の横軸には \bar{U} 、縦軸には、風向からの船軸方向のずれ、 $\bar{\varphi}_s - \bar{\varphi}_w$

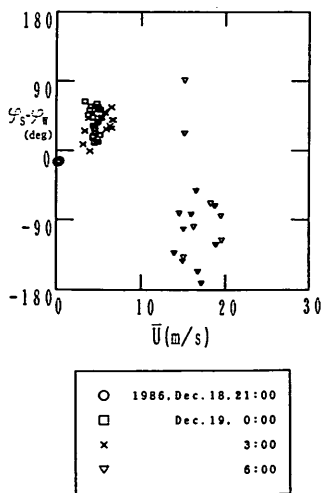
$\bar{\varphi}_w$ を示した。

図-55(1)、(2)および(3)は、それぞれ、1986年12月18日21:00~19日6:00、12月19日9:00~18:00および12月19日21:00~20日6:00の観測を示す。

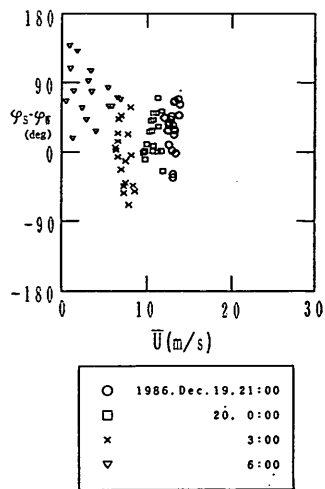
図-55(1)をみると、12月18日21:00は風速が非常に小さく、ほとんど0に近い。このとき $\bar{\varphi}_s - \bar{\varphi}_w$ は10°程度である。12月19日0:00と3:00には、風速 \bar{U} の変動は小さく、ほぼ5~6m/s程度であった。 $\bar{\varphi}_s - \bar{\varphi}_w$ も大きくは変動せず、0°~80°程度であり、風向と船軸方向は0°~80°ずれている。19日6:00には、風速 \bar{U} は



(2)



(1)



(3)

図-55 船軸方向と風向の相対角の変化

14m/s~20m/s と大きくなり、有義波高 $H_{1/3}$ も最大の 2.8m となっている。このとき、 $\varphi_s - \varphi_w$ の変動も大きく、 $-180^\circ \sim 90^\circ$ にばらついているが、ほぼ、 -90° を中心に分布しており、風向に対してブイは横方向を向いていることがわかる。

図-55(2)において、12月19日 9:00には、風速 \bar{U} は弱くなり、5~8 m/s 程度であるけれども、 $\varphi_s - \varphi_w$ は大きくばらついている。12月19日 6:00と 9:00の20分間の間に、 $\varphi_s - \varphi_w$ が大きくばらつく原因としては、波の影響が考えられる。12月19日 6:00および 9:00の $H_{1/3}$ は、それぞれ、2.8m および 2.5m で大きく、波の影響を受けて、 $\varphi_s - \varphi_w$ は大きくばらついたものと思われる。しかし、20分間で、波向が数十度も変化することはないので、船軸方向 φ_s が常に波向を向いているのではないと推測できる。 $\varphi_s - \varphi_w$ の平均はほぼ 0° である。19日 12:00 および 15:00 には $\varphi_s - \varphi_w$ は一定しており、それぞれ、 -90° および 60° 程度を中心に分布している。12:00 および 15:00 には、 $H_{1/3}$ がそれぞれ 1.9m、および 1.8m と小さくなっているのも、 $\varphi_s - \varphi_w$ のばらつきが小さくなっているものと思われる。12月19日 18:00 はデータにノイズが混入し、欠測となった。

図-55(3)において、12月19日 21:00 と 20日 0:00 には風速 \bar{U} がほぼ一定でそれぞれ、10m/s, 13m/s 程度である。 $\varphi_s - \varphi_w$ はともに、 $-30^\circ \sim 90^\circ$ 程度である。 $\varphi_s - \varphi_w$ のばらつきは12月19日 12:00 および 15:00 に比べて大きいので、波高 $H_{1/3}$ を調べると、12月19日 21:00 および 20日 0:00 には $H_{1/3} = 1.4\text{m}$ で小さかった。したがって $\varphi_s - \varphi_w$ のばらつきが大きくなったのは、波だけでなく潮流の影響と思われるが詳細は不明である。3:00 には \bar{U} はほぼ 10m/s であり、 $\varphi_s - \varphi_w$ は 0° 中心に分布していた。12月19日 6:00 においても $\varphi_s - \varphi_w$ はばらつきを示すものの、船動方向と風向は 90° 程度ずれる場合が多い。

以上のように、現地観測においても、風向と船軸方向とは、ほとんどの場合 $0 \sim 90^\circ$ 程度ずれている。本観測においては、波向、流向等を測定していないが、一般に、風向と波が来る方向とは一致するものと考えられる。したがって、船軸方向 φ_s は、波のやって来る方向とは一致せず、風向に対して $0 \sim 90^\circ$ ずれた方向を示すものと思われる。

図-56 および 57 は、 $\varphi_s - \varphi_w$ に対する波および風の影響を、より簡単に調べるために、 $\varphi_s - \varphi_w$ の 1 ケースあたりの平均値すなわち、1 分間ではなくて、20 分間全データの平均値より求めた風向と船軸方向の相対角 φ_{sw} を示したものである。

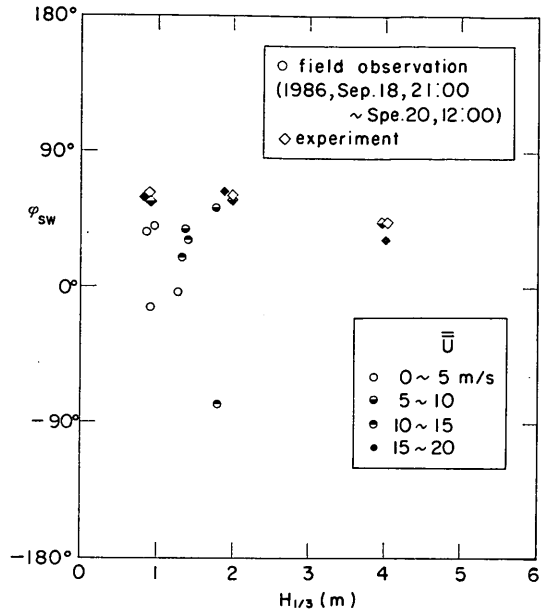


図-56 船軸方向に対する波高の影響

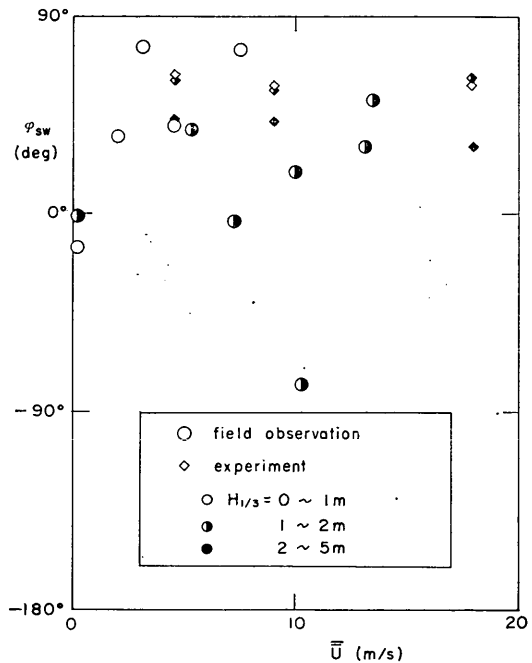


図-57 船軸方向に対する風速の影響

φ_{sw} を求めたケースは、図-55 で用いたケースと同じものであるが、20分間の間に $\varphi_s - \varphi_w$ が 180° 以上変化した、ばらつきの大きい、12月19日 6:00, 9:00 および欠測の19日 18:00 を除いた。また、12月20日 9:00 のデ

ータを加えた。

図-56は、横軸に $H_{1/3}$ 、縦軸に φ_{sw} を示している。 \bar{U} は20分間の平均風速である。図-56において、白丸で示した風速 \bar{U} が5 m/s 以下の場合には、波高 $H_{1/3}$ も小さく1.0m以内である。このとき、 φ_{sw} は、 -8° 程度のケースが1つある以外は、 $30^\circ \sim 80^\circ$ である。 $H_{1/3}$ が1~2 mのとき、 \bar{U} は5~15m/s であり、 φ_{sw} は、 0° に近いケースが1つあるものの、 $20^\circ \sim 50^\circ$ 程度に分布し、風速が強い場合には -80° 程度になる場合がある。以上のことから、 φ_{sw} は $H_{1/3}$ には大きく影響されず、波高が大きい場合でも小さい場合でも、2つのケースを除いて、その絶対値は $20^\circ \sim 80^\circ$ となることがわかる。 $|\varphi_{sw}|$ が 20° 以下となるケースが2つだけしかないので、 φ_{sw} はほぼ 0° で、船軸が波向とほぼ一致するとは、言えない。

図-57は、横軸に \bar{U} を表し、縦軸に φ_{sw} を示している。風速 \bar{U} が5 m/s 以下のときには、波高も小さく1 m以下である。 \bar{U} が0に近いケースでは、 φ_{sw} は -16° で 0° に近い。 $\bar{U}=7.2$ m/s で φ_{sw} が -40° 程度になるケースがあるものの、その他のケースでは、 φ_{sw} の絶対値は、 20° 以上になっており、その平均値は、 $40^\circ \sim 60^\circ$ 程度である。したがって、風速が1 m/s 以下で非常に小さいケースを除き、船軸は風に対して $40^\circ \sim 60^\circ$ 程度傾いて安定するものと思われる。

図-56, 57 においては、現地観測結果と、模型実験結果を比較するために、平面水槽実験で測定された φ_{sw} を菱形の記号で示した。模型実験における風速および波高は現地での値に換算し、また、角度は現地観測における角度の定義にしたがって示した。図-56, 57 に示した模型実験のケースは、 $\theta_a=30^\circ$ 、 $\alpha=30^\circ$ すなわち、波向と風向が同一のケースである。

図-56 において示されるように、模型実験値の φ_{sw} は、 $H_{1/3}$ が2 m以下であればほぼ一定で 60° である。したがって、船型ブイは風向に対して腹を向けて安定していると言える。 $H_{1/3}=4$ mのときには、 φ_{sw} は $35^\circ \sim 40^\circ$ 程度で、若干 0° に近づいている。これは、波高が大きくなったために、船軸方向がわずかに波向へ近づいたためと思われる。しかし、このときも風の影響が強く、 φ_{sw} は 35° よりも小さくならない。

図-57 においても、風速 \bar{U} にかかわらず φ_{sw} は、ほぼ 60° 程度で、 $H_{1/3}$ が2~5 mに大きくなると、 φ_{sw} は $35^\circ \sim 40^\circ$ になっていることがわかる。

実験値と観測値を比較すると、実験値に比較して観測値のばらつきが大きいことがわかる。これは、現地では実験と違って、風速、風向、波向、波高などが一定して

いないためである。

しかし、ばらつきが大きいことを除けば、観測値の分布の様子およびその値は、実験値とよく似ている。したがって、船軸方向が風の影響を強く受け、風向と $30^\circ \sim 80^\circ$ 程度傾いていることが模型実験において明らかにされ、同様の現象が現地においても生じていることが確認できた。すなわち、船型ブイの船軸方向から波向を判断することは困難である。

8. む す び

我国で初めて試作された海象観測用の船型ブイについて、模型実験および現地観測を行い、その波浪応答特性および現地への適用性について検討を行った。検討したおもな結果を以下にまとめた。

まず、数値計算と断面実験結果についてまとめると次のようになる。

- (1) ストリップ法を用いて、ブイの波浪中における動揺量を計算したところ、周期4 s以上の波の波高と、ブイの heaving 振幅は一致した。すなわち、船型ブイの heaving を記録することによって、現地において4 s以上の周期を持った波を観測することが可能である。
- (2) 水路実験によって船型ブイの波浪応答特性を調べた。規則波を作用させたとき、船型ブイの heaving および surging 動揺の周期は、波の周期と一致したが、pitching 動揺の周期は、波の周期より短くなった。これは、波の非線形性によって生じると思われる波の周期より短い振動成分の周期が、pitching の固有振動周期と一致して共振が生じたためである。
- (3) 船型ブイの heaving 振幅は、規則波を作用させた場合、現地で約4.5 s以上の周期を持つ波の波高と一致した。不規則波を作用させた場合でも、船型ブイの heaving から推定された有義波高および有義波周期は、波高計で求められた有義波高および有義波周期に一致した。したがって、模型実験においても、船型ブイの heaving を観測することにより、波高と周期を求めることが可能であることがわかった。
- (4) 船型ブイの surging 振幅は、水粒子の水平運動振幅とほぼ一致し、深海域においては波高と一致する。
- (5) ブイの係留張力を測定したところ、伸び率の大きいゴム係留時の方が、伸び率の小さいパネ係留時に比較して、係留張力は小さくなった。したがって、ブイの係留にはなるべく伸び率が大きい係留システムを使った方がよい。
- (6) ブイの heaving 動揺量が係留系の伸びに等しく

なると考えて、係留張力を推定した。推定値は、バネ係留の場合は実験値と一致したが、ゴム係留の場合には実験値より小さくなり一致しなかった。これは、ゴムのように伸び率の大きい係留索を用いると水平方向へ大きく移動するためである。すなわち、バネのように伸び率の小さい係留索を用いた場合には、簡単な手法で係留張力が推定できる。

平面水槽実験によって、風と波を作用させた場合の船型ブイの運動についてまとめると以下ようになる。

(7) 平面水槽実験においても、船型ブイの heaving から有義波高および有義波周期を求めることができた。ただし、有義波高の推定値は、実有義波高と15%程度異なる場合があった。これは、ブイの heaving の測定手法に含まれる誤差の影響である。

(8) 係留張力は、波高または風速が大きくなれば、大きくなることが示された。しかし、現地での値で、波高6.4mの波と、風速18m/sの風を同時に作用させた場合でも、張力の値は、係留系の破断強度に比較すると十分小さく、実験で用いたゴム係留のような伸び率の大きい係留索を使うことによって安全な係留ができる。

(9) ブイの平面運動は、波だけでなく、風の影響を強く受けるため、船軸方向は、波向とは一致せず、船型ブイの船軸方向から波向を観測することは困難である。現地観測結果から検討された船型ブイの現地観測への適用性についてまとめると次のようになる。

(10) 船型ブイの heaving 動揺量から計算された有義波高および有義波周期は、球形ブイで観測された有義波高および有義波周期と一致した。したがって、現地においても、船型ブイによって有義波高と有義波周期が精度良く観測でき、船型ブイは波高計としての機能を果たす。

(11) 船型ブイの pitching および rolling の周期は、波の周期が変化してもほぼ一定で、pitching および rolling の固有周期に近かった。したがって、船型ブイの pitching および rolling 動揺は、主に、共振によって生じている。

(12) 船型ブイの pitching または rolling によって、ブイのマスト頂上に取り付けられた風速計で測定された風速には、瞬間風速の場合、最大で15%程度の誤差が含まれることが推測された。しかし、10分間平均風速の場合には、pitching または rolling によって生じる誤差は無視できる。したがって船型ブイで風の観測を行うことも可能である。

(13) 現地観測で用いた係留システムに作用する張力を調べたところ、張力は0.75 tf程度で小さかった。したがって、現地において、船型ブイを安全に係留できる。

(14) 船型ブイの船軸方向を調べたところ、船軸方向は風によって大きく影響され、観測期間中、ほぼ、風向に対して30°~80°ずれていることが判明した。この値は模型実験で求められた値とも等しく、船型ブイの船軸方向から波向を判断することが困難である。

以上、述べたように、船型ブイは、外洋における海象観測装置として十分安全に精度良く機能を果たすことが、本報告から明らかとなった。ただし、船型ブイの運動自体から波向に関する情報を得ることは困難であり、波向を観測するためには、別の測定器を取り付ける必要がある。たとえば、係留索に、水平2成分の水粒子速度を測る流速計を取り付けるなどの手法が考えられる。

他の海象観測システムに対する船型ブイの大きな長所である。運搬および曳航の容易さ、設置および取りはずしの簡便さも、本現地観測を通じて十分確認された。したがって、船型ブイは、今後の海象観測システムとして優れた機能を有していると考えられる。

今後は、使用電源、メンテナンス方法等についても、検討を行い、より信頼度の高いシステムを作っていく予定である。

本研究を遂行するにあたり、港湾技術研究所水工部、小舟浩治海象観測研究室長並びに橋本典明主任研究官には、波向の観測方法および解析方法について丁寧な御教示をいただいた。構造部上田茂海洋構造研究室長ならびに白石悟主任研究官からはストリップ法に関する御教示を頂いた。また、元波浪研究室研究官（現港湾局付）永井紀彦氏には、船型ブイの模型実験手法について御指導いただいた。模型実験の一部は、波浪研究室、立石義博および本城智技官に手伝って頂いた。

以上の方々、ならびに、現地観測を心良く許可していただいた静岡県熱海市の関係者の皆様に、深く感謝する次第である。

最後に、本研究においては、高山知司の全般的な指導の下に、甲斐・中埜・古賀が現地観測および解析を相当し、平石・高山優が模型実験と解析を相当した。報告書の取りまとめは平石が行ったことを記しておく。なお、船型ブイ、係留システムおよび現地観測データ収集システムの詳細な仕様は文献⁴⁵⁾にまとめた。

本研究は、科学技術庁の昭和61、62年度科学技術振興調整費による「我が国周辺200海里水域における新調査システムの開発に関する研究」の一環として実施した。

(1988年3月29日受付)

参 考 文 献

- 1) 菅原一晃・小舟浩治 他4名：沿岸波浪観測15か年統計（昭和45年～昭和59年），港湾技研資料 No. 554, 872 p., 1986.
- 2) Kobune, K., H. Sasaki and N. Hashimoto : Characteristics of Ocean Waves off Cape Nojima in the Northwestern Pacific, Measured with a Buoy, *Report of the P.H.R.I.*, Vol. 24, No. 1985, pp. 3~30.
- 3) 合田良実, 鈴木康正, 蜂須賀和吉：厚円盤型ブイの波浪中応答特性, 第25回海岸工学講演会論文集, 1978, pp. 392~396.
- 4) Goda Y., K. Miura and K. Kato : Onboard analysis of mean wave direction with discuss buoy, *International Conference on Wave and Wind Directionality*, Edition Technip Co., 1981, pp. 339~359.
- 5) 運輸省第二港湾建設局小名浜港工事事務所：太平洋の波を測る, 一いわき沖波浪観測システム一, 1987. (案内パンフレット)
- 6) 岩谷文方・宮本卓次郎・宮井真一郎：酒田港における水中浮体式観測塔による波向観測について, 海洋開発論文集, Vol. 3, 1987, pp. 59~64.
- 7) 岩谷文方・宮井真一郎・三品欽治：酒田港における新構造形式による波浪観測について, 海洋開発論文集, Vol. 2, 1986, pp. 97~102.
- 8) William, H. : The world of NŌMAD-1, *Marine Technology Society, Buoy Technology Conference Proc.*, 1964.
- 9) たとえば, 元良誠三・小山健夫・藤野正隆・前田久明：船体と海洋構造物の運動学, 成山堂書店, 1982, 362 p.
- 10) 上田 茂：係岸船舶の動揺解析手法とその応用に関する研究, 港湾技研資料, No. 504, 1984, 372 p.
- 11) 田才福造・高木又男：規則波中の応答理論および計算法, 日本造船学会, 耐航性に関するシンポジウム, 1969, pp. 1~pp. 52.
- 12) 溝口純敏：ストリップ法とその周辺, 日本造船学会誌第683号, 1986, pp. 11.
- 13) 渡辺恵弘：船の上下動および縦揺れの理論に就て, 九州大学工学集報, Vol. 31, No. 1, 1958.
- 14) 田才福造：Short crested wave 中における sway, yaw 及び roll の運動について, 西部造船会会報, 第42号, 1971.
- 15) 小林正典 他：船舶の耐航性に関する理論計算プログラム（その1, 理論計算式）, 三井造船技報, 第82号, 1978, pp. 18~51.
- 16) Salvesen, N., Tnck E. O. and Faltinsen O. : Ship motions and sea load, *T.S.N.A.M.E.*, Vol. 78, 1970.
- 17) Lewis, F. M. : The Inertia of Water surrounding a Vibrating Ship, *T.S.N.A.M.E.* Vol. 37, 1929.
- 18) Ursell, F. : On the heaving motion of a circular cylinder on the surface of a fluid, *Quart. J. Mech. Appl. Math.* 2-2., 1949.
- 19) Ursell, F. : On the rolling motion of cylinders in the surface of a fluid, *Quart. J. Mech. Appl. Math.* 2-3., 1949.
- 20) 田才福造：船の上下動揺ならびに縦動揺における減衰力及び附加質量について, 日本造船学会論文集 105号, 1959.
- 21) 光易 恒：風波のスペクトルの発達(2)—有限な吹送距離における風波のスペクトルの形について, 第17回海岸工学講演会論文集, 1970, pp. 1~7.
- 22) 合田良実：港湾構造物の耐波設計, 鹿島出版会, 1982, pp. 225~226.
- 23) 鶴田千里・久田安夫：大型造波水路の設計について, 運輸技術研究所報告, Vol. 7, No. 1, 1957, pp. 18~32.
- 24) 永井康平：不規則波な海の波の屈折および回折の計算, 港湾技術研究所報告, Vol. 11, No. 2, 1972, pp. 47~119.
- 25) 桑島 進, 永井康平：任意個数試料の FFT 算法とそのスペクトル解析の応用, 港湾技研資料, No. 155, 1973, 33 p.
- 26) 合田良実・谷本勝利・高山知司：運輸省港湾技術研究所の大水深海洋構造物実験水槽について, 日本造船学会誌第691号, 1987, pp. 35~39.
- 27) 高山知司・永井紀彦・合田良実：サーベント型造波機の制御方式と造波特性, 港湾技研資料, No. 509, 1984, 30 p.
- 28) 富永政英：海洋波動, 共立出版, 1976, pp. 254~259.
- 29) Longuet-Higgins, M. S., D. E. Cartwright and N. D. Smith : Observation of the directional spectrum of sea waves using the motions of a floating buoy, *Ocean Wave Spectra*, Prentice Hall, Inc. New Jersey, 1963, pp. 111~136.
- 30) Capon, J. : High-resolution frequency-wave number spectrum analysis, *Proc. IEEE*, Vol. 57, 1969, pp. 1408~1418.
- 31) 磯部雅彦・近藤浩右・堀川清司：方向スペクトルの推定における MLM の拡張, 第31回海岸工学講演会論文集, 1984, pp. 173~177.
- 32) 橋本典明・小舟浩治：最大エントロピー原理(MEP)を用いた方向スペクトルの推定, 港湾技術研究所報告, Vol. 24, No. 3, 1985, pp. 123~145.
- 33) 橋本典明：ベイズ型モデルを用いた方向スペクトルの推定, 港湾技術研究所報告, Vol. 26, No. 2, 1987, pp. 97~125.
- 34) 合田良実・鈴木康正：光易型方向スペクトルによる不規則波の屈折・回折計算, 港湾技研資料, No. 230, 1975, 45 p.
- 35) 高山知司・平石哲也：サーベント型造波機による発生波の特性に関する実験, 港湾技術研究所報告, Vol. 26, No. 3, 1987, pp. 37~83.
- 36) Mitsuyasu, H. et al : Observation of the directional spectrum of ocean waves using a cloverleaf buoy, *J. Phy. Oceanography*, Vol. 5, No. 4, 1975,

- pp. 750~760.
- 37) 合田良実：数値シミュレーションによる波浪の標準スペクトルと統計的性質，第34回海岸工学講演会論文集，1987，pp. 131~135.
- 38) 岩垣雄一・榎木 享：海岸工学，大学講座土木工学25，共立出版，1979，pp. 22~31.
- 39) 海洋科学技術センター海洋開発研究部：小型定置ブイの海域試験，なつしま No. 87，1985，pp. 2~3.
- 40) 日本気象協会：気象，Vol. 31，No. 2，1987.
- 41) 合田良実・田中則男・高橋智晴・堀江毅：海岸・港湾調査法，新体系土木工学80，技報堂出版，1986，pp. 93~98.
- 42) 日野幹男：スペクトル解析，統計ライブラリー，朝倉書店，1977，pp. 183~226.
- 43) Edward C., Brainard II : Wave orbital following buoy, *Marine Technology '80 Conf.*, 1980.
- 44) 高橋智晴・菅原一晃・広瀬宗一：沿岸波浪観測施設台帳，港湾技研資料，No. 418，1982，286 p.
- 45) 海洋科学技術センター：定置ブイの小型高性能化・長期無保守化等の技術の開発，1988.

- l : 造波板の番号または被写体の実高
- l' : 投影長
- l'_V : 出力電圧
- m : 波向の番号
- M : 波向分割数
- n : 周波数の番号
- N : 周波数分割数
- r : 相関係数
- R : 縮率係数
- $S(f)$: 周波数スペクトル
- $S(f|\theta)$: 方向スペクトル
- S_{max} : 方向集中度パラメータ
- T : 周期
- $T_{1/3}$: 有義周期
- T_h : ブイの heaving から求めた有義波周期
- t : 時間
- T_R : 張力
- T_θ : pitching の動揺周期
- T_{wave} : 波の周期
- U : 10分間平均風速 (実験では一様風速)
- \bar{U} : 10分間平均風速の1分間平均値
- $\overline{\bar{U}}$: 10分間平均風速の20分間平均値
- V_{max} : ブイのマスト頂点の水平運動速度の最大値
- w : 船体横断面の複素座標
- x, y, z : 座 標
- x' : マスト頂点の水平運動振幅
- z' : 水粒子の鉛直座標
- X, Z : 水路実験における空間固定座標
- $2\bar{X}$: surging の両振幅
- $2\bar{Z}$: heaving の両振幅
- α : 平面実験における風向
- β : 平面実験における波と風の相対角
- ϵ : 位相角
- $\zeta(t, l)$: l 番目の造波板の時刻 t における変位
- ζ : 水粒子の鉛直変位
- ζ' : 円の写像平面の複素座標
- η : 水位
- η_h : ブイの heaving から計算された水位
- θ : 波向，ブイ固定座標軸の傾き角
- θ_a : 主波向 (設定値)
- θ_0 : 最大水面傾斜角
- θ_X : rolling の片振幅
- θ_Y : pitching の片振幅
- θ_Z : yawing の片振幅
- ξ : 水粒子の水平変位

主 要 記 号 表

- a_{nm} : $n \times m$ 番目の成分波の振幅
- a_{2n-1} : 写像パラメータ
- b : 造波板幅
- \overline{CM} : ブイの動揺中心とマスト頂部との距離
- D_x : カメラ2の原点からの水平距離
- D_H : カメラ2の水面からの高さ
- f : 周波数
- f_n : n 番目の成分波の周波数
- F_n : n 番目の成分の造波効率
- f_p : 周波数スペクトル密度が最大となる周波数
- f_0 : 固有振動周波数
- F_I : 船体の慣性力
- F_F : 波強成力
- F_R : ラディエーション流体力
- F_S : 復原力
- F_V : 粘性流体力
- g : 重力加速度
- $G(f|\theta)$: 方向関数
- G_0 : 方向関数の積分値を1にするための定数
- h : 水深
- H : 波高
- $H_{1/3}$: 有義波高
- H_h : ブイの heaving から求めた有義波高
- j : 乱数の初期値
- k : 波数
- k_n : n 番目の成分波の波数

海象観測用船型ブイの運動特性に関する模型実験と現地観測

$\bar{\xi}$: 水粒子の水平運動振幅	φ_w	: 現地での風向
φ_p	: 現地での pitching の振幅	$\bar{\varphi}_w$: φ_w の 1 分間平均値
φ_r	: 現地での rolling の振幅	φ_{sw}	: 現地での船軸と風の相対角
φ_s	: 現地での船軸の方位	ω	: 角周波数
$\bar{\varphi}_s$: φ_s の 1 分間平均値		