

## 圧力式ジンバル波浪計の開発研究\*

徳田正幸\*\*・江口純弘\*\*\*

国立防災科学技術センター

### Buoy Techniques for Obtaining Directional Wave Spectra

By

M. Tokuda

*Hiratsuka Branch, National Research Center for Disaster Prevention*

S. Eguchi

*Institute of Industrial Science, University of Tokyo*

#### Abstract

Buoy techniques of a pressure-type wave meter, which is attached to gimbals, were newly developed for obtaining directional wave spectra.

Response of heaving and pitching motions of the buoy to the regular wave mechanically generated was investigated in the towing tank. The wave period used ranged from 1.0 sec. to 3.0 sec. The natural periods of heave and pitch from the free damping test were approximately 1.25 sec. and 0.87 sec., respectively. Because of the high damping, the amplitude response factor of heave did not differ much from unity for  $T \geq 1.3$  sec., and that of pitch for  $T \geq 2.0$  sec. However, the scattering of data in pitch was rather large.

In conclusion, the presented results indicates that there still remains a great room for improvement with respect to the pitching motion of the buoy.

#### 1. はじめに

波浪による沿岸の自然災害の防災研究において、もっとも重要なことの一つは、沿岸付近に伝播して来る波浪を長期間にわたって観測しデータの集積・解析を行い、どのような気象条件にどのような波浪が伝播してくるのかを明らかにすることである。このためには沿岸付

脚注\* この研究は海洋開発調査研究促進費による「海洋遠隔探査技術の開発研究-波浪・長周期波等に関する研究-」の一環として行われたものである。

\*\* 国立防災科学技術センター平塚支所,

\*\*\* 東京大学生産技術研究所

近での観測だけでは不十分で、湾口とか湾内の波浪の伝播と減衰過程を明らかにする観測が必要となる。このような波浪の特性を観測するためには、波高と波向が比較的簡単に測定できる波浪計が必要となる。現在使用されている波浪計は多くの種類があるが、後で述べるピッチロール型ブイとクローバーリーフ型ブイを除いて、ほとんどのものが波高だけしか測定できない。これらのブイも、比較的精度よく測定できるが、上述した条件つまり比較的簡単に測定できる条件を満していない。このようなことから、著者らは波高と波向が簡単に測定できかつ安定性の良い波浪計を開発することを試みた。

## 2. 波浪計ブイの現状

今まで開発された波高と波向の両方が測定できる代表的な波浪計ブイは、Longuet - Higgins, Cartwright and Smith (1963)によるピッチロール型ブイと光易ら(1973a, b)によるクローバーリーフ型ブイである。これらについて少し詳しく検討する。

### 2.1 ピッチロール型ブイ

ピッチロール型ブイは次のような構造をもっている。このブイはアルミ合金でできており、直径約1.7 mの円盤型ブイである。ブイの中にはジンバル上に取り付けられた加速度計、縦揺れの角度を測定する2つのジャイロそしてガバルノメータが収納されている。風向に対してブイを一定の姿勢で保持させるために、ブイに抵抗用の吹き流しが取り付けられている。ブイの特性は実験室で調べられ、上下揺れと横揺れの固有周期がともに約1.57秒であった。しかしそれらの振動はともに高い減衰係数をもつものであったので、その周波数応答関数は周期1.80秒以上の波に対して1に近い値となった。

次にブイからの加速度  $\eta_{tt}$ 、縦揺れと横揺れの傾き  $\eta_x$ 、 $\eta_y$  のデータから、どのようにして波高、波向そして方向分布関数が求められたかを概略的に述べる。水面変位  $\eta$  を次のように仮定する。

$$\eta(x, y, t) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(x k_n \cos \theta_n + y k_n \sin \theta_n + \omega_n t + \varepsilon_n) \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここで  $x$  と  $y$  は平均水面上の座標を表す。 $a_n$ 、 $k_n$ 、 $\omega_n$  そして  $\varepsilon_n$  は、それぞれ成分波の振幅、波数、角周波数そして位相を示す。 $k_n$  と  $\omega_n$  は次の深海波の分散関係を満たすものとする。

$$\omega_n^2 = g k_n \quad \dots \dots \dots (2)$$

2次元スペクトル密度  $E(\omega, \theta)$  は次のような形に書ける。

$$\sum_{\delta\omega, \delta\theta} \frac{1}{2} \eta_n^2 = E(\omega, \theta) d\omega d\theta \quad \dots \dots \dots (3)$$

$$E(\omega, \theta) = \Phi(\omega) h(\theta), \quad \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} h(\theta) d\theta = 1 \quad \dots \dots \dots (4)$$

$$\Phi(\omega) = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} E(\omega, \theta) d\theta \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで $\Phi(\omega)$ そして $h(\theta)$ は、それぞれ一次元スペクトル密度そして方向分布関数を示す。水面変位は加速計の出力を時間に関して2回積分することによって求められる。ここでは、この処理を電気回路で行っている。ブイの中央の点( $x=0, y=0$ )での加速信号を次のようにおく。

$$\eta_{tt}(t) = \sum_{n=1}^{\infty} a'_n \cos(\omega_n t + \epsilon_n) \quad \dots\dots\dots (6)$$

式(6)を2回積分すると、

$$\eta(t) = \sum_{n=1}^{\infty} -\frac{a'_n}{\omega_n^2} \cos(\omega_n t + \epsilon_n) \quad \dots\dots\dots (7)$$

式(1)で $x=0, y=0$ として式(7)と比較すると、次式を得る。

$$a_n = -a'_n / \omega_n^2 \quad \dots\dots\dots (8)$$

これによって低周波成分に非常に大きな重みがかかることになる。加速度計からの低周波成分は、零点ドリフトそして波圧による衝撃の影響によって誤差を受けやすいので、測定がむずかしい成分と言える。このために平均波高や有義波高を求める場合は測定値が経験公式の値とほぼ一致するように、適当に低周波領域をカットするフィルターによる処理が行われている。得られた水面変位から、パワースペクトル解析を行い、エネルギースペクトル(一次元パワースペクトル)を求めることができる。

方向分布関数 $h(\theta)$ は一般に次のように表すことができる。

$$h(\theta) = \frac{1}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cos n\theta + B_n \sin n\theta) \quad \dots\dots\dots (9)$$

逆変換して

$$A_n + iB_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} h(\theta) e^{in\theta} d\theta = \frac{\int_0^{2\pi} E(\omega, \theta) e^{in\theta} d\theta}{\int_0^{2\pi} E(\omega, \theta) d\theta} \quad \dots\dots\dots (10)$$

式(10)の第2式から第3式への展開は式(4)より容易に示される。方向分布関数を求めるためには、 $A_n, B_n (n=1, \dots, \infty)$ の値を得ればよい。これらの係数は式(10)から示されるように、 $E(\omega, \theta)$ の積分値から求めなくてはならない。この積分は、波浪計の記録 $\eta, \eta_x$ そして $\eta_y$ の間のクロス・スペクトルから計算される。これらの量を原点( $x=0, y=0$ )で見積ることにする。

$$\left. \begin{aligned} S_1 &= \eta \Big|_{x=0, y=0} = -\sum_n a_n \cos(\omega_n t + \epsilon_n) \\ S_2 &= \eta_x \Big|_{x=0, y=0} = -\sum_n a_n k_n \cos \theta_n \sin(\omega_n t + \epsilon_n) \end{aligned} \right\}$$

$$S_3 = \eta_y \Big|_{x=0, y=0} = - \sum_n a_n k_n \sin \theta_n \sin(\omega_n t + \varepsilon_n) \Big] \dots\dots\dots (11)$$

$S_i$  についてクロス・スペクトルを計算する.

$$C_{ij}(\omega) + iQ_{ij}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} S_i(t) S_j(t+\tau) e^{i\omega t} d\tau \dots\dots\dots (12)$$

式(11)と式(12)そして式(3)を使うと,

$$\left. \begin{aligned} \alpha_1 &= Q_{12}(\omega) = \int_0^{2\pi} E(\omega, \theta) k \cos \theta d\theta \\ \beta_1 &= Q_{13}(\omega) = \int_0^{2\pi} E(\omega, \theta) k \sin \theta d\theta \\ r_1 &= Q_{11}(\omega) = \int_0^{2\pi} E(\omega, \theta) k d\theta \\ \alpha_2 &= Q_{22}(\omega) - C_{33}(\omega) = \int_0^{2\pi} E(\omega, \theta) k^2 \cos 2\theta d\theta \\ \beta_2 &= 2C_{33}(\omega) = \int_0^{2\pi} E(\omega, \theta) k^2 \sin 2\theta d\theta \\ r_2 &= C_{22}(\omega) + C_{33}(\omega) = \int_0^{2\pi} E(\omega, \theta) k^2 d\theta \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (13)$$

式(10)と(13)より

$$A_n = \alpha_n / r_n, \quad B_n = \beta_n / r_n \dots\dots\dots (14)$$

以上のことにより、波浪計で測定された水面変位  $\eta$  と波面の傾き  $\eta_x, \eta_y$  の間でクロス・スペクトルが計算され、これらの値から方向分布関数が得られることが示された。ピッチロール型ブイの場合データとして  $\eta, \eta_x, \eta_y$  の3つの量しかないので、方向分布関数式(9)は次のようになる。

$$h_2(\theta) = \frac{1}{2} + \sum_{n=1}^2 (A_n \cos n\theta + B_n \sin n\theta) \dots\dots\dots (15)$$

この分布関数は方向分布関数であるが、唯一の解でない。この分布は負の値をもつ可能性があるため、負の値をもたないように修正する。一般に  $h_2(\theta)$  は真の方向分布関数  $h(\theta)$  にある重み関数がかかったものと考えることができる。

$$h_2(\theta) = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} h(\theta') W_2(\theta' - \theta) d\theta' \dots\dots\dots (16)$$

Longuet-Higgins らは上式を満たす負の値をもたない分布関数として、次の結果を示した。

$$\left. \begin{aligned} h_2(\theta) &= \frac{1}{2} + \frac{2}{3} (A_1 \cos \theta + B_1 \sin \theta) + \frac{1}{6} (A_2 \cos 2\theta + B_2 \sin 2\theta) \\ W_2(\theta) &= \frac{8}{3} \cos^4 \frac{1}{2} \theta \end{aligned} \right\} \dots\dots (17)$$

方向分布関数は式 (17) の第一の式で与えられる。また重み関数  $W_2(\theta)$  は、測定量が  $\eta, \eta_x$  として  $\eta_y$  だけの場合の方向特性を示している。

上述した解析に基づき観測が風速  $4 \text{ m/s} \sim 12.5 \text{ m/s}$  に対して実施された。このブイで測定できる条件は、風速  $12.5 \text{ m/s}$  までの風浪に対してであった。加速度計の非鉛直性に対する補正は、周期  $1.57$  秒以上の波に対して行う必要が認められた。得られた結果は次のようであった。ブイの上下揺れ、横揺れそして縦揺れの頻度分布と波面の傾きの分散値が求められた。この分散値は Cox and Munk (1954) の光学的観測結果と比較された。また一次元スペクトル分布が求められ、高周波領域でよく知られているマイナス 5 乗則の領域が認められた。方向分布関数は周期  $1.57$  秒から  $15.6$  秒までの波について求められ、一応風波成分とうねり成分が異なった方向から伝播して来た観測例が示された。

以上がピッチロール型ブイの研究によって示されたことである。問題点として次のことがあげられる。全般的に見て観測精度が問題であると言える。とくに強風時のブイの姿勢がある傾きでつり合う可能性が強いために、波浪に対してのブイの応答が変わり、加速度計そしてジャイロの出力の補正が容易でなくなる。このことはとくに方向分布関数の測定に影響を与えると思われる。実際に観測された分布は周波数に対して急激に変化しているところが多く見られ、不自然な分布となった。

## 2.2 クローバーリーフ型ブイ

これは Cartwright and Smith (1964) によって最初に開発されたものである。このブイの十分な特性実験と実際の海での観測及び解析法は、光易ら (1973 a, b) によって確立された。ブイの構造は辺長約  $3.3 \text{ m}$  の正三角形に近い形をなし、各々の頂点にフロート (直径  $1 \text{ m}$ , 高さ  $20 \text{ cm}$ ) がとりつけてあり、これらの 3 つのフロートの浮力でブイ全体を浮かせるものである。中央にジャイロとコンパスの納入ケースがある。計測される要素として、ブイの中心点における方位  $\theta$ 、加速度  $\eta_{tt}$  として波面の傾き  $\eta_x, \eta_y$  となり、各々のフロートではその点での波面の傾き  $\eta_x, \eta_y$  が測定される。中心点での加速度計はパーティカル・ジャイロにとりつけられ、ブイ全体の上下方向の加速度成分が測定される。またこのジャイロによりブイ全体の傾斜角が測定される。フロートでは、ブイのフレームに対してのフロートの傾きが測定される。以上概略的に説明したように、このブイは原理的に上述したピッチロール形ブイと同じであるが、相異なる 2 点間の傾きの差の値から波面の曲率を計測できる点で優れている。このために分解能の高い方向分布関数が期待される。

このブイの特性は、実験用水槽で実物大の模型を使用して調べられた。その結果ブイの固有周期について、上下揺れに関してブイ全体とフロート単体はそれぞれ  $1.35$  秒と  $0.945$  秒となり、縦揺れに関してそれぞれ  $1.34$  秒と  $0.967$  秒となった。また位相の遅れが  $10$  度以下でかつ応答関数が  $0.9$  以上になる周期の範囲が調べられた。その範囲は上下揺れに対してブイ全体が周期  $2.4$  秒以上で、フロート単体に対して周期  $2.0$  秒以上となった。縦揺れに関しては、ブイ全体もフロ

ート単体もともに2.0秒以上となった。このような実験結果から、クローバーリーフ型ブイ波浪計は周期2.5秒より長い周期の波に対して十分に精度よく計測できることが示された。しかし波面の曲率に関して、用いられたジャイロとポテンショメータの精度は高々0.1度であるために、波形勾配が1/100以下の波に対して精度よく測定することはむずかしい。実際の海で波形勾配が1/20となることはほとんどないので、曲率に関して信頼のあるデータを得ることは容易でない。もう一つ考えねばならないことがある。それはこのブイにおいても表面波形を得るには加速度信号を2回積分しなければならないことである(ここではこの積分は測定後計算機で行われている)。このためにピッチロールブイで述べたように、低周波成分に雑音が入り、実際より高い平均波高値等を与えてしまう可能性がある。

次に解析法を述べることにする。測定される量は方向 $\theta$ 、加速度 $\eta_{tt}$ 、波面の傾き $\eta_x, \eta_y$ 、波面の曲率 $\eta_{xx}, \eta_{xy}, \eta_{yy}$ の7つの量である。ピッチロールブイの場合に比べて波面の曲率の量だけが多い。解析法はこれら新たに加わったところを除けば全くピッチロールブイの場合と同じものとなる。ただしここでは式(11)の $S_1$ として $\eta$ のかわりに $\eta_{tt}$ を用いた。そのために式(13)において右辺に $k$ が加わり、さらに式(11)に次の3式が加わることになる。

$$\left. \begin{aligned} S_4 &= \eta_{xx} \Big|_{x=0, y=0} = -\frac{\sum a_n k^2 \cos^2 \theta_n \cos(\omega_n t + \epsilon_n)}{n} \\ S_5 &= \eta_{xy} \Big|_{x=0, y=0} = -\frac{\sum a_n k^2 \sin^2 \theta_n \cos \theta_n \cos(\omega_n t + \epsilon_n)}{n} \\ S_6 &= \eta_{yy} \Big|_{x=0, y=0} = -\frac{\sum a_n k^2 \sin \theta_n \cos \theta_n \cos(\omega_n t + \epsilon_n)}{n} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (18)$$

上式に対応して、式(13)に次の3式が加わる。

$$\left. \begin{aligned} \alpha_3 &= \{Q_{24}(\omega) - 3Q_{25}(\omega)\} = \int_0^{2\pi} E(\omega, \theta) k^3 \cos 3\theta d\theta \\ \beta_3 &= \{3Q_{34}(\omega) - Q_{35}(\omega)\} = \int_0^{2\pi} E(\omega, \theta) k^3 \sin 3\theta d\theta \\ \gamma_3 &= \{Q_{14}(\omega) + Q_{15}(\omega)\} = \int_0^{2\pi} E(\omega, \theta) k^3 d\theta \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (19)$$

式(17)に対応する方向分布関数と重み関数は、Cartwright and Smith (1964)によって与えられた。それによると、

$$h_4(\theta) = \frac{1}{2} + \sum_{n=1}^4 W_n (A_n \cos n\theta + B_n \sin n\theta) \dots\dots\dots (20)$$

ここで $W_1 = 8/9, W_2 = 28/45, W_3 = 56/165$  そして  $W_4 = 14/99$ である。

$$W_4(\theta) \sim \cos^{16} \frac{1}{2} \theta \dots\dots\dots (21)$$

ブイの方向特性の特徴を示す重み関数 $W_2(\theta)$ と $W_4(\theta)$ の分布の半値角度幅の比較から、クローバーリーフ型ブイは原理的にピッチロール型ブイに比べて約2倍の方向分解能を有すると言える。ここで注意すべきことは、上記のことは曲率が正確に測定できてはじめて言える

ことである。

観測は博多湾そして外洋で行われ、全般的に精度の高い結果が得られた。これらの結果は従来の研究結果と比較された。観測方法は漂流状態にある船から長さ200mのロープで波浪計ブイを係留させて行われた。データはすべて有線で船上にある記録計に送られた。得られた観測結果は概略的に次のようであった。

表面波形  $\eta(t)$  は、加速度計からのデータから周波数 0.1Hz 以下の波の成分を切り捨てた後に2回積分して得られた。これらから求められた有義波高は、同時に行われた吊り下げ式圧力計の結果とよく一致した。海洋波の一次元スペクトルに関しては、風洞水槽で見られるようなスペクトルピーク付近で非常にスペクトル密度の集中したものから、Pierson - Moskowitz 型のように集中度があまり大きくないものが観測された。海洋波の方向スペクトル分布において、その平均的な方向はほぼ風向に一致していること、近似的に一つのピークの形 (Unimodel) であること、そして方向に関しての集中度はピーク付近で高く、低周波と高周波領域で低く、その方向分散性が高いことが示された。

問題点をまとめると次のようになる。第一にブイ全体が大きく重いので取り扱いが容易でない。第二に加速度の信号から変位を求める時の低周波領域における雑音の影響があること。第三に波浪の曲率のデータを得るには非常に多くの労力を要するが、その割には得られた方向の分解能は、曲率を含まない場合に比べて実用的に意味のあるほど向上していないように思われる。

### 3. 圧力式ジンバル波浪計

#### 3.1 開発目標

前節で詳しく述べたように、今まで開発された波浪計の特性を検討した結果、私たちは次のような特性をもつ波浪計を開発することを目標とした。

- 1) 波浪の波高と波向を同時に測定できること。
- 2) 測定方法はより直接的なもので、構造的に簡単なものであること。
- 3) ブイは小さく軽いものであること。

このような基本的な方針に基づいて波浪計の測定法を検討した。波浪の波高と波向は、それぞれ水面変位と水面傾斜を計算すれば得られるものである。従来の波浪計において水面変位を測定する方法は、加速度計によるものと吊り下げ式圧力計によるものがある。前者は前章で述べた波浪計で採用されたものであり、加速度計をジンバル又はパーティカル・ジャイロに取り付けてブイの鉛直方向の加速度を計り、水面変位を求めるものである。後者は圧力計をブイから表面波による圧力変化の影響が比較的少ない深さまで吊り下げ、その圧力計がブイと同じ上下運動をすることによる圧力変化を測定し、水面変位を求めるものである。この方法は加速度計の方法に比べて、圧力計を十分に深いところまで吊り下げなければならない

い欠点があるが、より簡単な装置であること、センサーが深いところにあるために波圧による雑音がほとんどないことそして比較的簡単な解析で処理できることの長所がある。一方水面傾斜を測定する方法には、パーティカル・ジャイロによるものと重力利用型の傾斜計によるものがある。前者の代表的なものはクローバーリーフ型のブイである。この方法は測定精度において優れているが、比較的大きな電力が必要でありかつ高価なものとなる欠点をもっている。後者は振り子型のような比較的簡単な装置のものが多く用いられているが、波浪の水平方向の運動や波圧による雑音を受けやすく、まだ十分に安定した精度のものとなっていないと言える。

以上のことから、上述した基本的な考えに基づくと水面変位の測定方法に関して、吊り下げ式圧力計の方法が加速度計の方法に比べてより良いものと言える。水面変位の測定においてもまた水面傾斜の測定においても重要なことは、基準方向としていかに安定した鉛直方向を作るかということになる。吊り下げ式圧力計は圧力計を比較的深いところまで細いケーブルで吊り下げることであるので、そのケーブルは波浪があっても比較的安定した鉛直性を保つことが可能である。このことはこの方法による波浪の波高観測の結果から裏付けされる。例えば細田ら(1977)や徳田ら(1981)の観測がある。よって水面傾斜の測定においても、この安定した圧力計のケーブルの鉛直性を利用して測定ができれば、波浪計の構造が非常に簡単なものになることは明らかである。このケーブルを利用した水面傾斜測定法は、次のように比較的容易に示される。圧力計を吊り下げたケーブルの他端に2軸ジンバルを介して、波面によく追従するブイに取り付けることである。

このような測定方式にすれば、水面変位に関して2回積分する必要はなくなり、波圧による雑音の影響も小さくなり、水面傾斜に関してはよく用いられている2軸ジンバル機構を使用するだけであるので、構造はきわめて簡単となり安価であることが期待される。私たちはこの測定方式に基づいて圧力式ジンバル波浪計を製作した。

### 3.2 圧力式ジンバル波浪計の製作

波浪計のブイの構造は、主として測定方式によって決められるものである。前節で述べたように、測定方式は吊り下げ式圧力計とジンバル機構を組み合わせたものである。この測



写真 1 圧力式ジンバル波浪計  
photo.1 Pressure type gimbal-wave meter

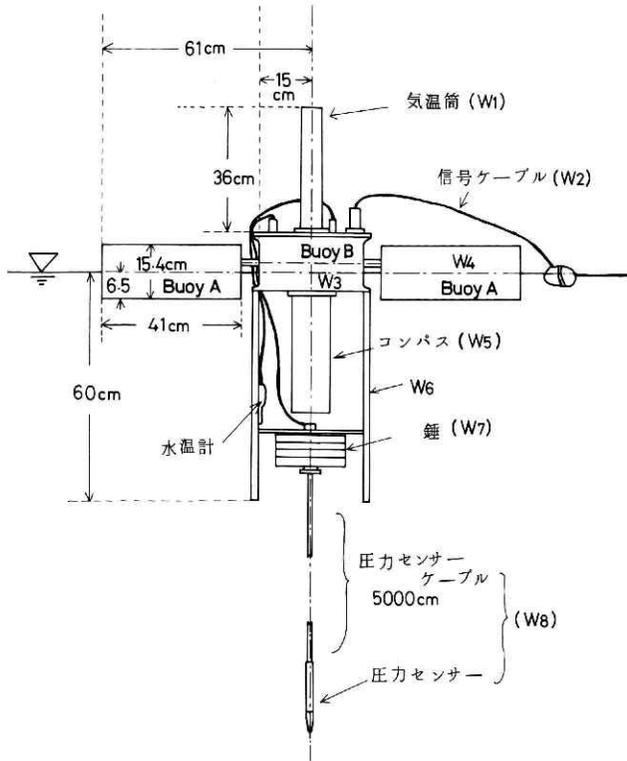


図 1 波浪計の構造  
Fig.1 Structure of the buoy of the wave meter.

表 1 波浪計の材料と重さ  
Table 1 Materials and weights.

名 称	記号	材 料	重 さ
気 温 筒	W <sub>1</sub>	塩 化 ビ ニ ール	0.8 kg
信号ケーブル (コネクター付)	W <sub>2</sub>	ポリウレタン+芯線 コネクターはステンレス	0.9
ブ イ B	W <sub>3</sub>	ア ル ミ	12.2
ブ イ A	W <sub>4</sub>	発泡スチロール	27.5
コンパス	W <sub>5</sub>	ア ル ミ	2.3
フ レ ーム	W <sub>6</sub>	ス テ ン レ ス	8.9
錘	W <sub>7</sub>	鉛	15.4
圧力センサー と ケーブル	W <sub>8</sub>	ステンレス ポリウレタン+芯線	5.1

合計 73.1 kg

定方式に基づくブイの構造は次のように考えた。第一にブイをできるだけ軽くするために、ブイには測定感部と必要最小限のプリアンプだけを内蔵させ、データは有線で近くの船に伝送する方式とした。よって増幅器、記録計そして電源はすべて船上に設置することにした。第二にブイは圧力計を吊り下げるブイ本体(B)と波面の傾きを追従するブイ(A)から構成されるものとした。そしてブイAとブイBはジンバル機構で結合されているだけで、それぞれが独立に浮き、波に追従するようにした。このような考えで実際にブイの設計を進めたが、小型化することとブイAとブイBの運動の独立性をもたせることを両立させることが非常に困難

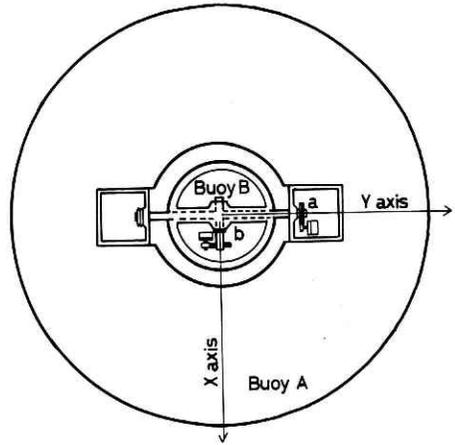


図2 波浪計のジンバル機構。aとbはそれぞれx軸方向とy軸方向の波面の傾きを検出するポテンシオメータである。

Fig.2 Mechanism gimbals in the buoy. Symbols a and b indicate the potentiometers for detecting the slope along the x-axis and the y-axis, respectively.

であることが分った。ブイAとブイBの独立性は、ブイBがコンパス、圧力計そして錘等の重さのためかなりの浮力を必要とし、そのためにブイBの水面下の体積を増加させることになった。このことによって、小型化できないことと top heavy になる可能性が引き起された。いろいろな試みを行った結果、製作されたブイは写真1と図1に示されているように、円柱形のブイBとRinged Plate形のブイAから構成されるものとなった。この図と表1から分るように、ブイは重さ約73kg,水平方向の長さ約1.2mとなり、あまり小型化されていないこと、そしてブイBは単独には浮くことができないことである。ブイAはブイ全体の浮力

表2 測定用感部の性能

Table 2 Specifications of the wave mater.

測定項目	測定感部	測定範囲	分解能
波高	拡散形半導体圧力計	0 ~ ± 2.5 m	± 1 cm ( 0.2 % )
波向(傾き) X軸	ジンバル・ポテンシオメータ	斜角 0 ~ ± 20°	0.5° ( 1.3 % )
	"	"	"
方位	サーボ式方位計	± 180°	1.6 方位(6.25%)
気温	白金温度計	-10° ~ 40° C	0.25° C ( 0.5 % )
水温	"	"	"

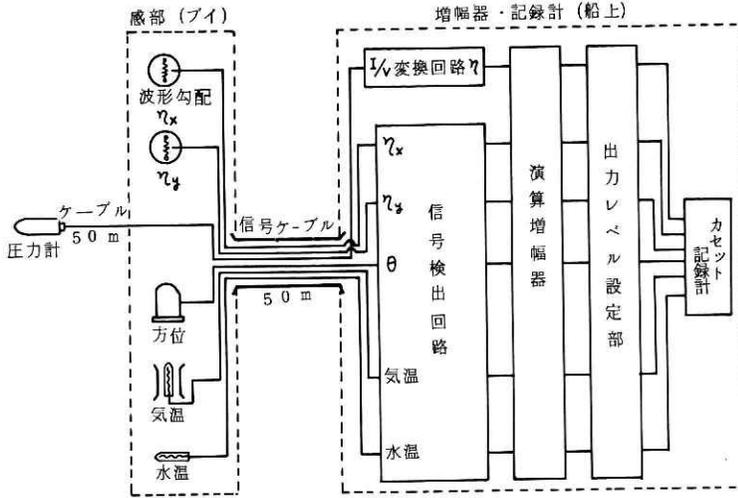


図 3 波浪計の概略系統図  
Fig.3 Block diagram of the wave meter.

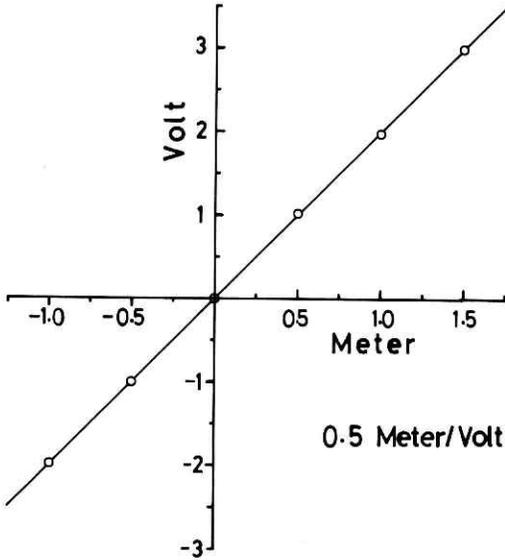


図 4 圧力計の検定曲線  
Fig.4 Calibration curve of the pressure gauge for the displacement of water surface elevation.

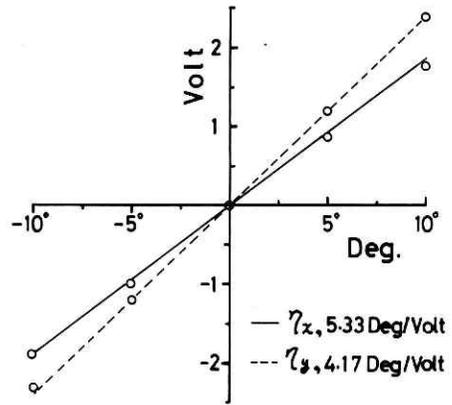


図 5 波面の傾き計の検定曲線  
Fig.5 Calibration curve of the potentiometer for the wave slope.

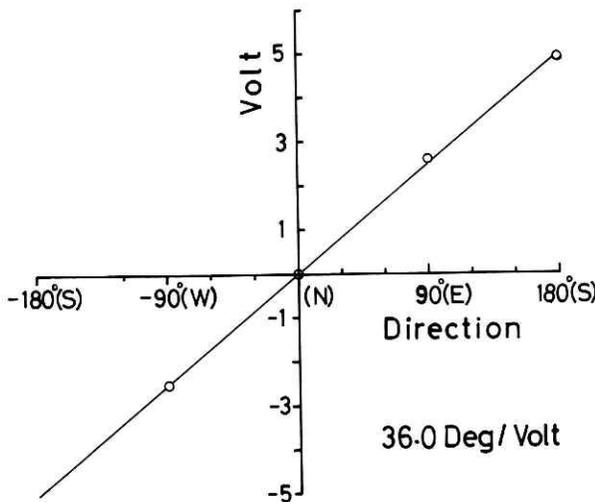


図 6 方位計の検定曲線

Fig. 6 Calibration curve of the compass.

の92.8%を負担している。またブイ全体の重心の位置は、圧力計とケーブルをとり除いた場合水面下約13.7cmとなり、圧力計とケーブルがある場合約270cmとなることである。この場合の計算は、圧力計のケーブルが曲がらない線と仮定している。このことから、吊り下げ式圧力計はブイを非常によく安定させる効果を有していると言える。浮心は水面下約4cmのところにあるので、ブイ全体は top heavy にならない。

次にブイAとブイBを結合させているジンバル機構について述べることにする。図2はこのジンバル機構を示したものである。圧力計を吊り下げているブイBは、波面の傾きに追従するブイAに対して、この機構により常に鉛直性を保つことになる。よって波浪の波面の傾きが、水平面において2次的に測定される。y軸方向に傾き成分がある時はポテンシオメータbで、x軸方向に傾き成分がある時はポテンシオメータaで、それぞれの傾き成分が測定される。y軸の方位はコンパスから求められる。ここではy軸の正の方向が北に向いた時、コンパスが北を示すように設定した。以上のことから、波面の最大の傾きをもつ方向と傾きの大きさが求められ、それらはそれぞれ波浪の波向と波形勾配になる。

測定される項目及び性能は表2にまとめた。これらの電気回路のブロック図は図3に示した。表2の中で、傾角の分解能が0.5度となっている。この値は波形勾配に直すと0.0025に対応する。用いられているポテンシオメータの分解能は0.04度である。ポテンシオメータは2枚の歯車を介してジンバル軸に結合されている。その歯車は遊び(バックラッシュ)をほとんど生じさせない構造となっているため、ジンバル軸からポテンシオメータへの情報伝達は、ほとんど正確に行われることになる。よって上記の分解能は主としてジンバル軸とブイの間の遊びに依存するものと考えられる。方位計はサーボ式で、リスポンスに関する精度はあまり期待できない。

波浪計の圧力計、傾斜計そして方位計について検定を行い、これらの結果をそれぞれ図4、図5そして図6に示した。

3.3 解析方法

パワースペクトル分布と方向スペクトル分布を求める解析法には、線形法と個々波法とがある。始めに線形法について述べる。この方法は第2章で述べた方法で、独立に伝わる成分波の重ね合せと water wave の分散関係を仮定するものである。ここでは測定される物理量が水面変位  $\eta$  と波面傾斜  $\eta_x, \eta_y$  であるので、次の点をのぞけばピッチロール型ブイと全く同じとなる。異なる点は  $\eta$  を求める方法である。吊り下げ式圧力計の出力から水面変位を求める方法は、徳田ら (1981) に詳しく示されている。それによると次のようになる。式(1)において、ブイ中央の点での水面変位は、

$$\eta(0, 0, t) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(\omega_n t + \epsilon_n) \dots\dots\dots(22)$$

圧力計からの出力は次のように表される。

$$\eta_p(t) = \sum_{n=1}^{\infty} P_n \cos(\omega_n t + \epsilon'_n) \dots\dots\dots(23)$$

式(22)と式(23)より、徳田らによれば  $\epsilon_n \sim \epsilon'_n$  で振幅に関して次の関数式が成立つ。

$$a_n = P_n / T_r \quad T_r = 1 - \frac{\cosh k_n (h-D)}{\cosh k_n h} \dots\dots\dots(24) \quad (25)$$

$$k_n \tanh k_n h = \omega_n^2 / g \dots\dots\dots(26)$$

ここで  $k_n$  と  $\omega_n$  は、それぞれ成分波の波数と周波数を示す。 $h$  と  $D$  はそれぞれ水深と圧力計の深さを表す。 $g$  は重力加速度である。よって圧力補正係数が式(25)で与えられるので、式(22)から水面変位が決まることになる。

次に個々波法による方向スペクトルの求め方について述べる。この方法の詳しい説明は別の論文で述べることにするので、ここでは概略的に示す。個々波の解析法は Tokuda and Toba (1981) の研究で確立されたものである。個々波法は目に見える波浪の起伏を、従来の線形法のようにお互に独立した water wave の位相速度をもつ成分波の重ね合せとせず、起伏を特徴づける特性— 波高  $H$ , 周期  $T$  又は波長  $L$  として重心の位置  $t$  でパラメータ化して、波浪の統計的特性を求めるものである。

式(4)に対応する個々波の方向スペクトルは次のように表される。

$$E_{ik} = \Phi_i h_{ik} \quad , \quad i = 1, 2, \dots, M+1; K = 1, 2, \dots, 9 \dots\dots\dots(27)$$

$$\Phi = \frac{1}{8} H_i^2 \frac{m_i T_i}{\sum_{j=1}^9 m_j T_j} \cdot \frac{1}{\Delta\omega} \dots\dots\dots(28)$$

$$h_{ik} = \pi P_{ik} / (\Delta\theta \sum_{k=1}^9 P_{ik}) \quad , \quad P_{ik} = \frac{1}{8} H_{ik}^2 (m_{ik} T_{ik}) \dots\dots\dots(29)(30)$$

$$H_i = \sum_{k=1}^9 H_{ik} / m_i \quad , \quad T_i = \sum_{k=1}^9 T_{ik} / m_i \quad , \quad m_i = \sum_{k=1}^9 m_{ik} \dots\dots\dots(31)$$

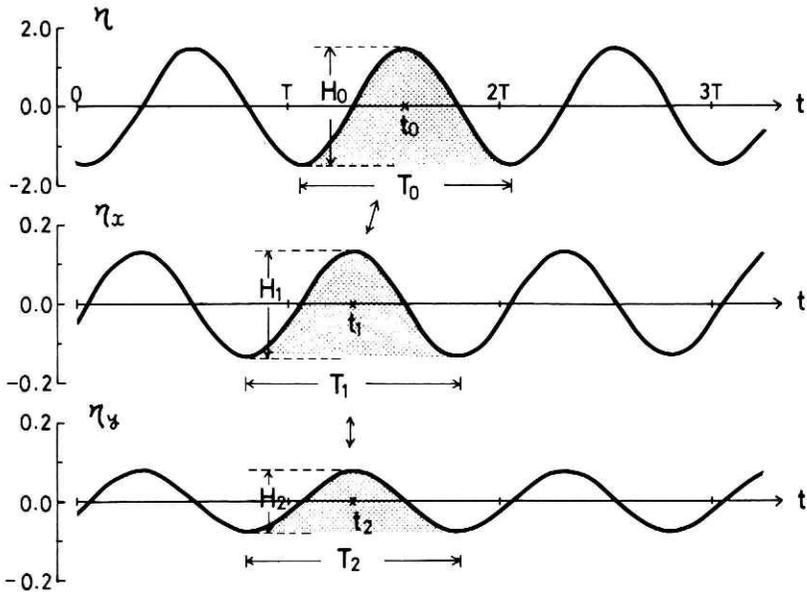


図7 個々波を特徴づける波高 $H$ ，周期 $T$ そして重心の位置 $t$

Fig.7 Illustration of the determination of the wave height  $H$ , the wave period  $T$  and the position of center of the wave  $t$  that characterize the individual waves.

個々波の特性は、あらかじめ決められた周波数帯と方位角帯に分類される。周波数帯は通常の線形法のスペクトル計算と同じものとした。よって上式の $M$ はラグ数となり、 $\Delta\omega = \pi / (M \Delta t)$ で、 $\Delta t$ は読み取り時間間隔である。方位角帯幅 $\Delta\theta$ は22.5度とした。これは16方位の区分に対応するものである。i番目の周波数帯のk番目の方位角帯での平均波高 $H_{ik}$ 、平均周期 $T_{ik}$ そして個数 $m_{ik}$ は、このバンドに属する個々波の特性から得られるものである。これらの特性を上式に代入すれば、個々波の方向スペクトル分布が得られる。

個々波の特性は、上述したように波浪の起伏から評価される。これについて具体的に説明するために、次のような単一周期 $T (= 2\pi / \omega)$ の振幅 $a$ をもつ規則波が $\alpha$ 方向から伝播してくる場合を考えることにする。

$$\eta = a \cos(x \cdot k \cos \alpha + y \cdot k \sin \alpha + \omega t) \dots\dots\dots (32)$$

ブイの中央での水面変位と傾きは、次式で表される変化となる。

$$\left. \begin{aligned} \eta &= a \cos \omega t \\ \eta_x &= -a k \cos \alpha \sin \omega t \\ \eta_y &= -a k \sin \alpha \sin \omega t \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (33)$$

式(33)に振幅1.5，波形勾配 $\delta = 0.05$ そして $\alpha = 30$ 度を与えると、図7を得る。この図から分かるように、水面傾斜の変化は水面変位に対して常に90度だけ位相が進んでいることである。個々波の特性を水面変位および水面傾斜の記録(時系列)から評価する時、上記のこと

に注意して各々の記録での起伏の対応を行えばよい。各々の記録に対して zero-cross Trough-to-Troughを適用して個々波の特性を読み取る。η, η<sub>x</sub> そして η<sub>y</sub> についての波高はそれぞれ次のようになる。

$$H_1 = H = 2a, \quad H_2 = 2ak \cos \alpha, \quad H_3 = 2ak \sin \alpha \dots\dots\dots (34)$$

個々波の波高と周期は η の記録から求めることにすると、波長 L, 位相速度 C, 波形勾配 δ そして進行方位角 α は次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \delta &= H/L = \sqrt{H_2^2 + H_3^2} / (2\pi) \\ L &= H / \delta \\ C &= L / T \\ \alpha &= \tan^{-1} H_3 / H_2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (35)$$

以上のことにより、個々波のすべての特性が得られた。これらの特性をもつ個々波を周波数・方位角空間で分類して式(27)から(31)に代入すれば、個々波の統計的な特性すなわちパワースペクトル分布、波高分布、個数分布、位相速度分布、波形勾配分布そして方向スペクトル分布が得られることになる。個々波法における圧力補正は、個々波の波高に対して適用すればよい。補正係数は求められた波長を式(25)に代入して得られる。

4. 圧力式ジンバル波浪計に関する水槽実験

開発された圧力式ジンバル波浪計は、新しい計測方法にもとづくものであるので、実用化

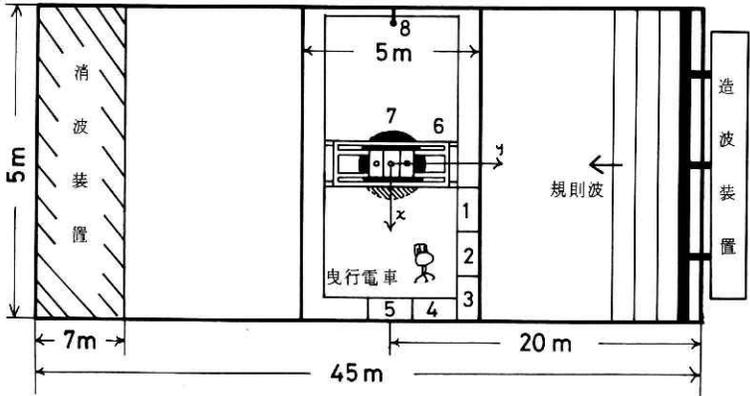


図 8 波浪計測ブイ, 運動計測装置そして容量型波高計の配置図. 1. 容量型波高計の増幅器 2. 運動計測装置の増幅器 3. 波浪計の増幅器 4. モニター用記録計 5. カセット記録計 6. 運動計測装置 7. 波浪計測ブイ 8. 容量型波高計

Fig.8 Schematic sketch of the towing tank at the ship Ship Hydrodynamics Laboratory. Symbol 1, 2 and 3 show amplifiers of the capacitance - type wave gauge (symbol 8), the ship motion measurement apparatus (symbol 6) and wave meter of the buoy (symbol 7), respectively. Symbols 4 and 5 are recorders of symbols 7 and 6, respectively. Hereafter, the capacitance -type wave gauge and the ship motion measurement apparatus are abbreviated as the wave gauge and the measurement apparatus apparatus, respectively.

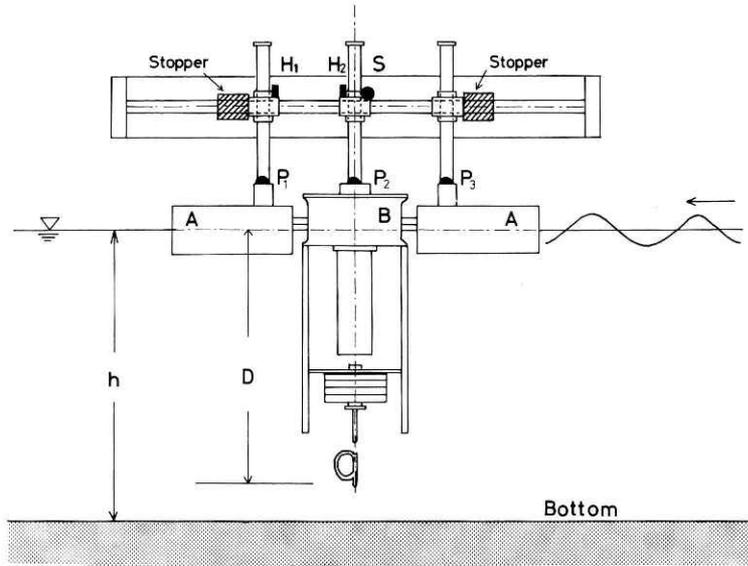


図9 運動計測装置の概略図。黒色の円板の部分はポテンシヨメータを示す。  
 Fig.9 Schematic sketch of the ship motion measurement system. Solid circles show the potentiometer.

するにはまだいろいろな点で改善しなければならぬところがある。これらの点を明らかにするために、波浪計測ブイの水槽実験を行った。ブイを水槽に設置し、造波機で起こされた規則波に対するブイの周波数応答関数を求めた。この実験で次のことを明らかにする必要がある。第一にブイ本体が規則波に対しどのように運動するのか。第二に波浪計のセンサーがブイの運動をど

のように記録するのかである。水槽実験は、水槽の曳行電車に運動計測装置を取り付け、その装置に波浪計測ブイを設置して行った。

#### 4.1 実験装置と方法

圧力式ジンバル波浪計の波に対する応答性を調べるための水槽実験は、東京大学船舶工学科船舶運動性能水槽（全長45m、幅5m、水深3m）において行った。基準となる実験波の特性は容量型波高計で測定された。水槽における容量型波高計、波浪計測ブイそして運動計測装置の配置図は図8に示した。波浪計測ブイは、とくに低周波の規則波が消波装置で完全に消滅せず、一部反射して来る可能性があるために水槽のほぼ中央に設置した。座標軸は図8

図3 水槽実験における測定量および測定器  
 Table 3 Instruments of experiment the towing tank.

	測定量	測定器
波浪計	上下揺 ( $H_B$ )	圧力計
	縦揺れ ( $\theta_B$ )	ポテンシヨ・メータ
	横揺れ	"
	方位	サーボ式方位計
運動計置	上下揺 ( $H_1, H_2$ )	ポテンシヨ・メータ
	縦揺れ ( $P_1, P_2, P_3$ )	"
	前後揺れ ( $S$ )	"
	Hc	容量型波高計

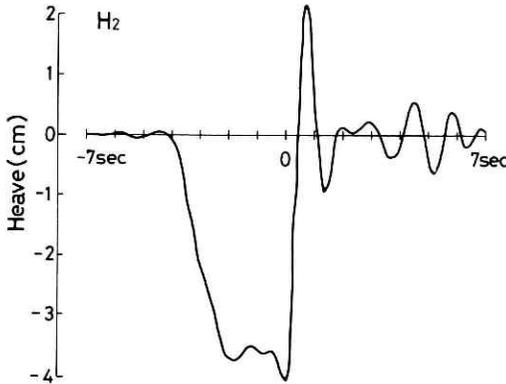


図 10 静水中のブイ全体の上下揺れの減衰振動

Fig. 10 An example of the free damping test with respect to the heaving motion of the whole buoy.

に示したように置く。この座標軸から見ると、実験波は後退波となる。波浪計測ブイの運動は運動計測装置で調べられる。この装置へのブイの設置は図9で示されている。この装置はx軸方向の運動を完全に拘束し、y軸方向の運動のみを計測する構造となっている。またこの装置において水平方向の可動部に stopper を入れて、ブイ全体の水平移動を拘束した。水槽の水深は3mであるので、ブイの圧力計の感部の深さは2.4mとした。この実験装置から得られる測定量および測定器は表3で示した。運動計測装置の記録からブイ本体の周波数応答関数を、ブイの波浪計の記録からセンサーの性能とそれを含んだ波浪計測ブイの周波数応答関数を調べることが可能となる。実験波としては、プランジャー型造波機で起こされた規則波を用いた。解析されたデータは、造波機によって発生された規則波が定常状態に達した直後に得られたものとした。実験波の周期は1.0秒から3.0秒の範囲に、波形勾配は約 $1/500 \sim 1/50$ の範囲とした。これらの主要な特性は、容量型波高計で測定されたもので、波形勾配を求める時に必要な波長の値は式(26)に測定された周期を代入して求めた。

以上のことにより、実験はブイ全体についての上下揺れ(Heave)とブイAの縦揺れ(Pitch)について行った。実験データの解析は、使用する実験波が規則波であるために個々波解析ですべてを行った。

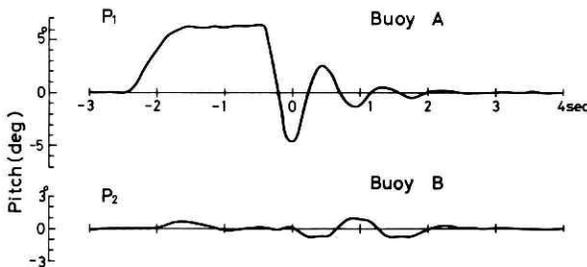
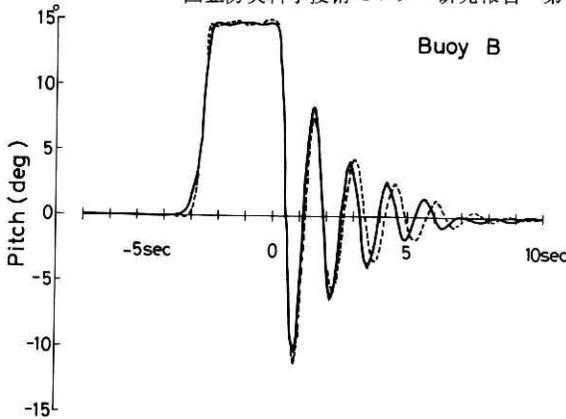


図 11 静水中のブイAの縦揺れの減衰振動。

Fig. 11 An example of the free damping test with respect to the pitching motion of the buoy A.



12 静水中のブイBの縦揺れの減衰振動。実線と破線はそれぞれ圧力センサーを吊り下げた場合と吊り下げない場合を示す。

Fig.12 Same as Fig.11 but for the buoy B. The heavy line corresponds to the case of buoy B with the hanged pressure gauge, the dashed line the case of the buoy B only.

#### 4.2 実験結果

実験はブイの特性を明らかにするために、実験波がない（静水中）場合と実験波がある（規則波中）場合について行われた。前者について調べられたブイの特性は上下揺れと縦揺れの固有周期と縦揺れの復元モーメントで、これらの値からブイの付加質量、付加慣性モーメントそして減衰係数が得られる。後者についての特性は、実験波に対してのブイの上下揺れそして縦揺れの周波数応答関数に関するものである。

##### 静水中のブイの特性

はじめに、ブイ全体の上下揺れの実験に関して述べる。図9の運動計測装置の中央のHeave H<sub>2</sub>用の支柱の上に適当な重さの錘（おもり）を載せ、突然それを取り去ってブイの上下揺の性質を調べた。運動計測装置H<sub>2</sub>から得られた代表的な記録は図10に示した。この図から分かるように約2.4秒後の振動は、水槽の側面からの反射波の影響によるものと見られる。よってスタートから2.4秒間の減衰振動から、上下揺れの周期 $T_1$ と対数減衰率 $r$ を求めた。この $r$ はよく知られているように隣り合う峰又は谷の振幅の対数比であり、周期 $T_1$ 、固有周期 $T_0$ 、対数減衰率 $r$ そして減衰係数 $\mu$ の間の関数は次式で与えられる。

$$T_1 = T_0 \sqrt{1 + r^2 / 4\pi^2} \quad , \quad r = \mu T_1 \quad \dots \dots \dots (36)$$

この実験を3回繰り返して、式(36)を使って平均の固有周期と減衰係数を得た。

$$T_0 = 1.25 \text{ 秒} \quad , \quad \mu = 1.07$$

次にブイAの縦揺れについて述べる。これは錘をブイAの端に置いて、上述した上下揺れと同様に実験を行った。運動計測装置P<sub>1</sub>とP<sub>2</sub>から得られた代表的な記録は図11に示した。P<sub>1</sub>の記録からの平均的な縦揺れの固有周期 $T_{\theta 0}$ そして減衰係数 $\mu_{\theta}$ は、それぞれ次の値となった。

$$T_{\theta 0} = 0.87 \text{ 秒} \quad , \quad \mu_{\theta} = 1.34$$

ここで注意すべきことは、P<sub>2</sub>の記録から示されるように、ブイBの縦揺れの運動が主に摩擦を通じてブイAの運動によって誘引されたことである。このような運動は、正確な波面の

表 4 水槽実験で使用した規則波の特性.

Table 4 Characteristics of regular waves.

造波周期 sec	周期 Tc(sec)	波高 Hc(cm)	波形勾配 $\delta$
1.0	1.0 0	2.5 0	0.0 1 6 0
	1.0 9	3.3 2	0.0 1 7 9
1.2	1.2 0	2.1 2	0.0 0 9 4
1.3	1.3 3	3.3 4	0.0 1 2 1
1.5	1.4 9	2.9 6	0.0 0 8 5
	1.4 9	4.7 4	0.0 1 3 7
	1.5 0	4.1 3	0.0 1 1 8
1.7	1.6 9	3.4 1	0.0 0 7 7
	2.0	4.1 6	0.0 0 6 8
2.0	1.9 9	6.0 1	0.0 0 9 8
	2.0 0	4.3 5	0.0 0 7 0
	2.0 0	7.2 0	0.0 1 1 6
	2.1 8	4.2 7	0.0 0 5 8
2.5	2.4 8	2.9 4	0.0 0 3 2
2.7	2.6 8	3.7 6	0.0 0 3 6
3.0	3.0 0	2.9 4	0.0 0 2 3
	3.0 0	6.6 6	0.0 0 5 3
	3.0 0	8.2 0	0.0 0 6 5
	3.0 1	4.2 5	0.0 0 3 3

傾きの測定をさまたげるものである。この点がこのブイの大きな欠点と言える。このようなブイ B の運動については、規則波に対する応答関数の議論のところで再び考えることにする。

ブイ B の縦揺れの特性について調べておくことにする。これに対する代表的な記録は図 12 であり、平均的な縦揺れの固有周期  $T_{B0}$  として減衰係数  $\mu_B$  はそれぞれ次の値となった。圧力センサーを吊り下げた場合

$$T_{B0} = 1.35 \text{ 秒} , \quad \mu_B = 0.462$$

圧力センサーがない場合

$$T_{B0} = 1.46 \text{ 秒} , \quad \mu_B = 0.474$$

ブイ A の単位傾斜角当りの復元モーメント  $K_\theta$  は、次のような傾斜試験によって求めた。ブイ A の一方の端で 10 kg 重の加重に対して、ブイ A は 3.0 度傾斜した。これよりブイ A のメタセンターの高さ  $\overline{GM}$  は 2.83 m となり、

$$K_\theta = M_g \cdot \overline{GM} = 7.77$$

となった。M はブイ A の質量である。

#### 規則波中のブイの特性

造波機で起された規則波に対して、ブイ全体の上下揺れとブイ A の縦揺れの周波数応答曲線を実験的に求めた。前者は波高に、後者は波面の傾きすなわち波形勾配に対する応答曲

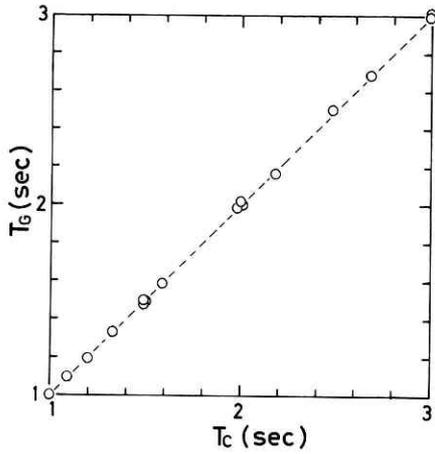


図 13 a 周期に関して容量型波高計と運動計測装置 (Heave) の結果の比較.

Fig.13 a Comparison between the wave periods measured by the wave gauge ( $T_G$ ) and the measurement apparatus ( $T_C$ ).

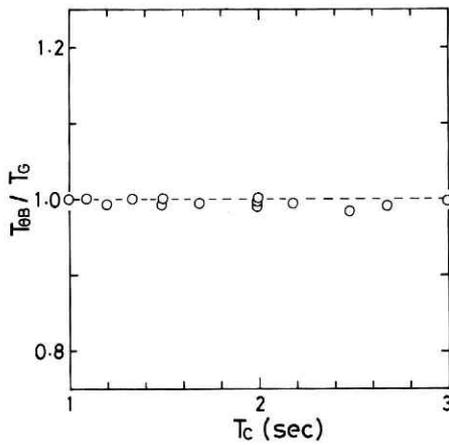


図 13 b 周期に関して運動計測装置 (Heave)と波浪計 ( $\eta$ ) の結果の比較.

Fig.13 b Same as Fig. 13 a but for the case of the measurement apparatus ( $T_G$ ) and the wave meter ( $T_{\theta B}$ ).

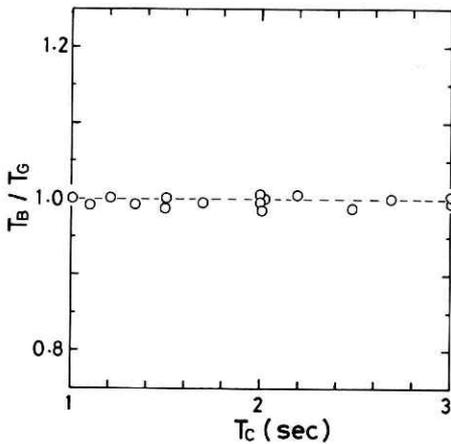


図 13 c 周期に関して運動計測装置 (Heave)と波浪計 ( $\eta_y$ ) の結果の比較.

Fig.13 c Same as Fig. 13 a but for the case of the measurement apparatus ( $T_G$ ) and the wave meter ( $T_B$ ).

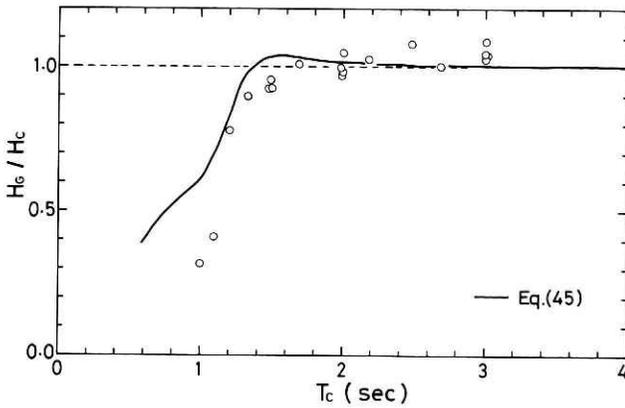


図 14 運動計測装置で測定されたブイ全体の上下揺れの波高応答曲線。

Fig. 14 Frequency response of the heaving motion of the buoy among the regular waves. The response was expressed by the ratio between the wave height measured by the measurement apparatus ( $H_G$ ) and the wave gauge ( $H_c$ ).

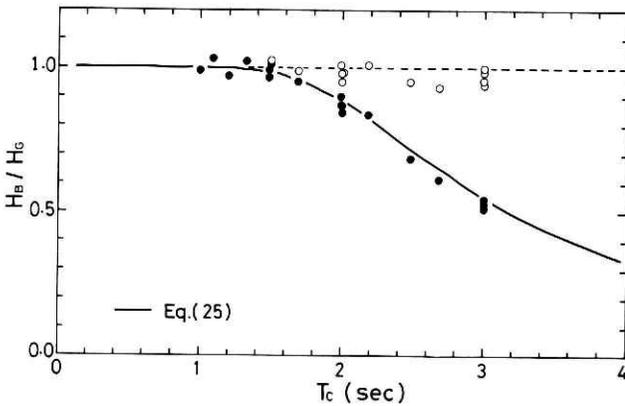


図 15 運動計測装置で測定された上下揺れに対する波浪計の波高応答曲線。白点は黒点で示されたデータに圧力補正を行った値を示す。

Fig. 15 Same as Fig. 14 but the response expressed by the ratio  $H_B/H_G$ . Symbols (●) and (○) indicate the uncorrected values by eq. (25), respectively.

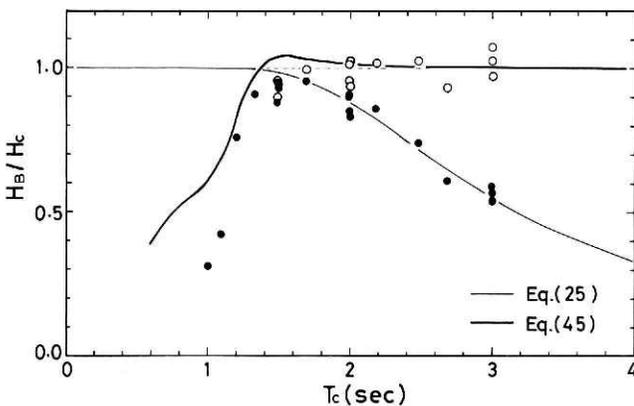


図 16 波浪計で測定された上下揺れの波高応答曲線。黒点と白点の値は図 15 と同じ意味をもつ。

Fig. 16 Same as Fig. 14 but for the response expressed by the ratio  $H_B/H_c$ . Each symbol means the same as in Fig. 15.

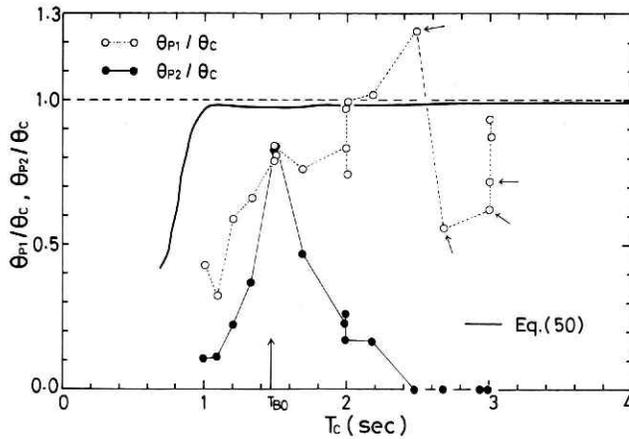
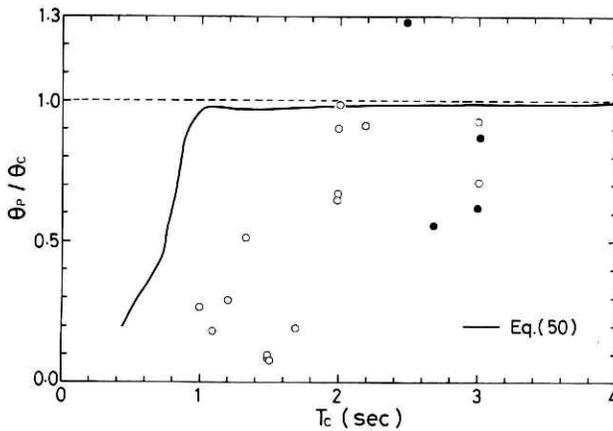


図 17 運動計測装置で測定されたブイ A とブイ B の縦揺れの振幅応答曲線。  $T_{BO}$  は圧力センサーがない場合のブイ B の固有周期を示す。矢印は波形勾配が 0.005 以下の場合を示す。

Fig.17 Frequency responses of the pitching motion of the buoy A and B among the regular waves. The responses are indicated by the ratio between the amplitude measured by the measurement apparatus ( $\theta_{P1}, \theta_{P2}$ ) and the wave gauge ( $\theta_C$ ). The  $T_{BO}$  represents the natural period of the buoy B with the hunged pressure gauge. The arrows indicate the condition of the wave steepness  $\delta < 0.005$ .

線を測定することになる。具体的なデータ解析は、次のようにして行った。解析された個々波は一つの Run 当り 5 波とし、各々の波について波高、周期そして重心の位置が読み取られた。重心の位置は図 7 で示されているように、便宜的に zero-crossing Trough-to-Trough で定義された個々波の水面を切った部分の midpoint の位置とした。この位置のデータは位相差を求める時に利用される。記録計のチャンネル数の制限から表 3 で示された測定量をすべて同一の記録計に収録することはできなかった。このために波浪計からのデータについては容量型波高計の水面変位を、運動計測装置のデータについてはその装置の Heave  $H_2$  の水面変位をそれぞれ基準として位相差が求められた。両者の波面の傾きについての比較は、両者の水面変位の間位相のずれがないと仮定して行った。実験は表 4 で示された 19 種類の規則波に対して行った。

はじめに、入射された周期  $T_c$  (会合周期) をもつ規則波に対して、水面変位  $\eta$  及び水面傾斜  $\eta_y$  がどんな周期をもつか調べた。その結果は図 13 に示されている。添字 C, B そして G は、それぞれ容量型波高計、波浪計測ブイそして運動計測装置の記録を示す。また添字  $\theta$  は波面の傾きの記録を示すことにする。図 13 から分るように、得られた水面変位と水面傾斜の変化の周期は、ほぼ容量型波高計で測定された規則波の周期と一致していることである。このことは個々波的に述べると、図 7 に示されているように、規則波の 1 つの起伏に対して運動計測装置と波浪計測ブイの  $\eta$  及び  $\eta_y$  の起伏が 1 対 1 に対応することを意味する。



18 波浪計で測定された波形勾配の振幅応答曲線。黒い点は波形勾配が 0.005 以下のものである。  
**Fig.18** Frequency response with respect to the wave steepness. The  $\theta_B$  represents the amplitude of pitching measured by the wave meter. Symbol (●) indicates the condition of the wave steepness,  $\delta < 0.005$ .

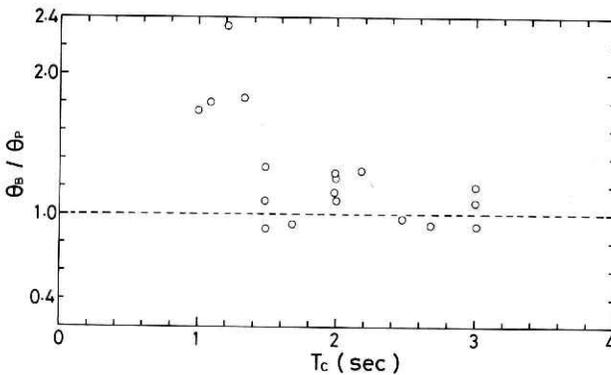


図 19 波形勾配に関して波浪計と運動計測装置の結果の比較。

**Fig.19** Comparison between the wave steepness measured by the wave meter ( $\theta_B$ ) and the measurement apparatus ( $\theta_G$ ).

第二に、ブイの上下揺れの波高応答曲線を調べた。ブイの上下揺の運動に対しての波高応答曲線は、運動計測装置の Heave  $H_2$  の記録から求められ、その結果は図 14 に示された。上述した静水中のブイの特性実験から、固有周期は 1.25 秒であった。しかし減衰係数が非常に大きいため、応答曲線は固有周期付近においてもほとんど大きな値をもたないことが示された。この図から、波浪計測ブイは周期 1.20 秒以上の波の波高に関して十分に応答できると言える。他方波浪計測ブイの上下揺の運動に対しての波浪計の圧力センサーの波高応答曲線は図 15 に示された。圧力センサーは 2.4 m の深さに吊り下げられたが、周期 1 秒以上の波に対して非常によく理論式 (25) と一致し、十分な精度を有していることが明らかとなった。図 14 と図 15 から示されるように、圧力式ジンバル波浪計は周期 1.40 秒以上の波

に対して十分な精度で波高を測定できると結論される。このことはまた図16によっても支持されることである。

第三に、ブイAの縦揺れの振幅応答曲線及び位相の進みについて調べた。ブイAの縦揺れの運動に対する振幅応答曲線は、運動計測装置のPitch  $P_1$  の記録から求められ、その結果はPitch  $P_2$  の結果とともに図17に示された。ここでは周期1秒以上の波を測定対象と考えているために、ブイAの縦揺れの固有周期の影響はほとんど考えなくてもよいが、ブイBの固有周期は1秒より大きな値をもつので、その影響が問題となる。この図から明らかのように、ブイBは圧力センサーを吊り下げない時の固有周期約1.47秒付近でピークをもつ

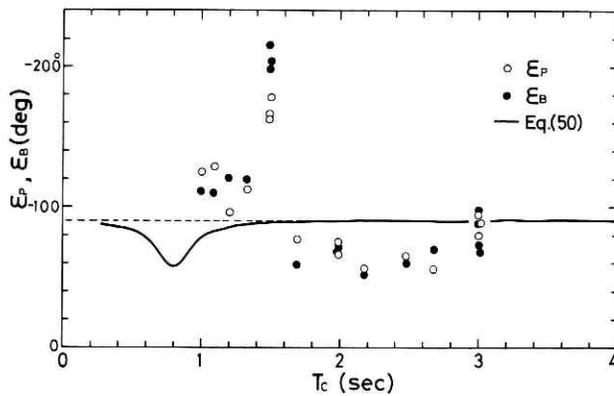


図20 運動計測装置で測定されたブイAとブイBの縦揺れの上下揺れに対する位相の進み。

Fig.20 Characteristics of phase of the pitching motion of the buoy A and B with respect to the heaving motion.

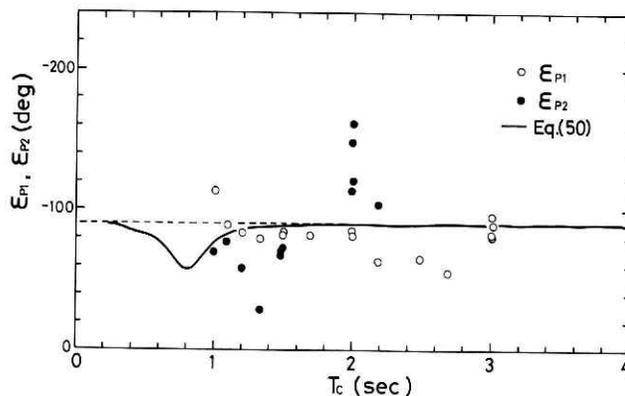


図21 波面変位に対するの波面の傾きの位相の進み。黒丸が波浪計で、白丸が運動計測装置の結果を示す。

Fig.21 Characteristics of phase of the wave slope change with respect to the elevation change. Symbols (●) and (○) are obtained by the wave meter and the measurement apparatus, respectively.

共鳴振動的な分布を有している。このことから、静水中のブイの特性のところでも述べたブイ A により誘引されたブイ B の運動は、全般的に吊り下げられた圧力計と錘によって抑制されるが、ブイ B の固有周期付近だけは共鳴振動のために増幅されると考えられる。波浪計の波面の傾きはブイ B に対してのブイ A の傾きによって測定されるもので、ブイ B が鉛直性を保たず縦揺れを起こせば大きな誤差を含むものとなる。またブイ A の振幅応答曲線から分るように、波形勾配の測定に関して全般的に精度が非常に良いとは言えない。これらの点は、今後の圧力式ジンバル波浪計の実用化において、もっとも考えなくてはならない点である。

波浪計で測定された波形勾配の振幅応答曲線は図 18 に示した。この図において応答曲線は、周期 1.5 秒付近で非常に大きく落ち込んでいることが示された。これは明らかに図 17 で述べたように、その周期付近の周期をもつ波に対してブイ B が共鳴し、その結果ブイ A とブイ B が一体となって縦揺れの運動を起していることによるものである。運動計測装置の Pitch ( $P_1 - P_2$ ) は波浪計の  $\eta_y$  に正確に対応する。これらの比較は波浪計の  $\eta_y$  の精度の目安を与えるもので、図 19 に示した。それによると、波浪計は約 2.0 秒以上の周期の波に対して波形勾配を  $\pm 20\%$  の精度で測定していることである。

波面の傾きは式 (33) そして図 7 に示したように、波面の変位に対して常に  $90$  度だけ位相が進んでいることである。図 20 は、運動計測装置で測定されたブイ A とブイ B の縦揺れの上下揺れに対しての位相の進みを示したものである。これによると、ブイ A は全般的にほぼ  $90$  度進んだ位相であるが、ブイ B は固有周期付近と 2 秒付近で  $90$  度から大きくずれている。一方波浪計の結果  $\epsilon_B$  は、上述した運動計測装置 ( $P_1 - P_2$ ) の結果  $\epsilon_P$  とともに図 21 に示されている。この図から分るように、波浪計はブイ B の固有周期付近をのぞく 1 秒以上の周期の波の波面の傾きの変化を、位相に関して約  $\pm 20\%$  の精度で測定できると言える。

以上のことにより、製作された波浪計測ブイは 2.0 秒以上の周期の波に対して、約  $20\%$  の精度で波面の傾きの大きさとその変化を測定できると結論できる。

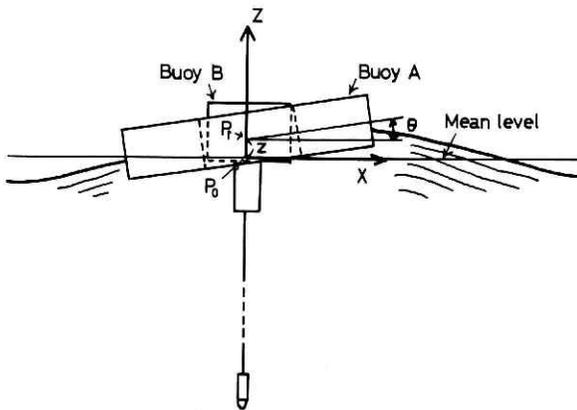


図 22 座標説明図。  $P_0$  と  $P_1$  はそれぞれ座標軸の原点とブイ B の中心点を示す。

Fig. 22 Co-ordinate system The  $P_0$  and  $P_1$  represent the origin of the coordinate axis and the center of the buoy, respectively.

4.3 波浪計の周波数特性に関する理論計算

波浪計の周波数特性は、船の波浪中動揺応答の解析法と全く同様に解析することができる。山内(1971)によれば、船の動揺の一般的な性質はFroude - Kriloffの仮定を用いて、次のように示される。船の運動は線型な関数で近似され、波浪中の船の動揺の性質は、静水中の船の性質に波から静止している船にかかる強制項の性質を別箇に考え合わせることで近似的に表されることである。この考えに基づいて、波浪計測ブイに関する上下揺れとブイAの縦揺れの運動方程式が求められる。上下揺れと縦揺れの運動がお互に独立とし、図22に示した座標で $Z'$ と $Y'$ をそれぞれ平均水面からのブイの変位そして波の変位とすると、浮体の吃水が無視できる場合には、これらの動的平衡の運動方程式は一般に次のように書くことができる。

$$M_1 \frac{d^2 Z'}{dt^2} = M_2 \frac{d^2}{dt^2} (Y' - Z') + N \frac{d}{dt} (Y' - Z') + K (Y' - Z') \dots\dots\dots (37)$$

式(37)を変形すると、

$$\frac{d^2 Z'}{dt^2} + 2\mu \frac{dZ'}{dt} + \omega_0^2 Z' = \alpha \frac{d^2 Y'}{dt^2} + 2\mu \frac{dY'}{dt} + \omega_0^2 Y' \dots\dots\dots (38)$$

$$\mu = N / (2M), \quad \omega_0 = \sqrt{K / M}, \quad \alpha = M_2 / M \dots\dots\dots (39)$$

ここで $M = M_1 + M_2$ とする。式(38)の左辺において第一項は加速度の項、第二項は減衰項そして第三項は復元力の項である。右辺はすべて規則波による強制力を表す。上述したように式(38)の左辺の係数 $\mu$ と $\omega_0$ が外力である波の特性に依存しないと仮定すると、これらの係数は第4.2で示した静水中のブイの特性によって示されることになる。これらの値を用いて、波浪計測ブイの規則波中の周波数応答関数を理論的に計算した。

(1) ブイ全体の上下揺れの周波数応答関係

式(38)において、 $Z'$ と $Y'$ はそれぞれブイの変位 $Z$ と波の水粒子の変位 $Y$ となる。

$$\frac{d^2 Z}{dt^2} + 2\mu \frac{dZ}{dt} + \omega_0^2 Z = \alpha \frac{d^2 Y}{dt^2} + 2\mu \frac{dY}{dt} + \omega_0^2 Y \dots\dots\dots (40)$$

$$\mu = N_z / (2M), \quad \omega_0 = \sqrt{K_z / M}, \quad \alpha = m / M \dots\dots\dots (41)$$

式(41)の係数を求めるために、上下揺れに関してブイの形は穴のあいていない円盤型と見なす。 $A$ を水線面積とすると、 $K_z = \rho g A$ となる。 $M_1 = M - m$ と $M_2 = m$ はそれぞれブイの全質量と付加質量である。第3.2節のブイの大きさと重さから $K_z$ と $(M - m)$ の値が、そして第4.2節の静水中のブイの特性から $\mu$ と $\omega_0$ の値が示されるので、式(41)の係数はすべて得られることになる。よって付加質量 $m$ と減衰抵抗係数 $N_z$ の値は、それぞれ次の値となった。

$$m = 38.9 \text{ kg} \quad , \quad N_z = 98.9$$

これらの値は, MacCamy (1961) 及び前田・江口 (1976) の理論値と比較された. この場合 Isshiki, Maeda and Hwang (1974) によれば, 深さのパラメータ (ブイの半径  $r$  / 水深  $h$ ) の値が 0.2 であるために, 深海波近似が成立する. 理論との比較のために,  $m$  と  $N_z$  について次のような無次元化を行い, それぞれ  $m'$  と  $N'_z$  とした. 後者の無次元化において分母に  $\omega$  が入るので, 代表値として周期 1 秒と 3 秒に対して得られた値の平均値を採用し,  $\bar{N}'_z$  で表した.

ここで  $\rho$  は水の密度である.

$$m' = m / \rho r^3 \approx 1.7$$

$$\bar{N}'_z = N_z / \rho r^3 \omega \approx 1.8$$

理論によれば, 周期 1 秒から 3 秒の範囲で, 付加質量は  $\omega$  の値に対してゆるやかに変化するが, 減衰抵抗係数はほとんど一定の値になっている. この周期間の理論の平均値は, 上述の実験値とほぼ一致した.

式 (40) の右辺は, 水粒子の鉛直方向の速度  $W$  を導入すると, 次のように変形される.

$$\alpha \frac{dW}{dt} + 2\mu W + \omega_0^2 Y$$

規則波の水粒子の運動は次の速度ポテンシャルで与えられる.

$$\Phi = -a \frac{g}{\omega} \frac{\cosh kh(h+z)}{\cosh kh} e^{i(kx + \omega t)} \dots\dots\dots (42)$$

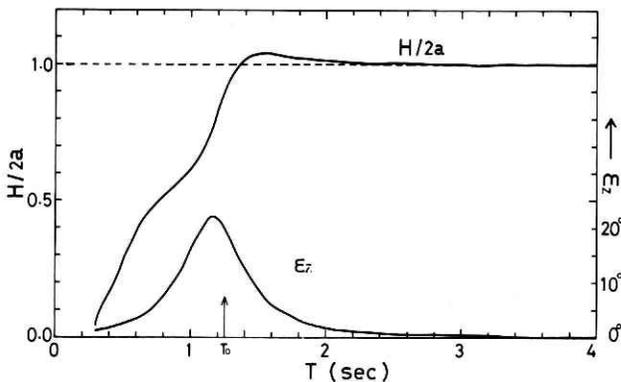


図 23 ブイ全体の上下揺れに関する周波数応答の理論曲線.  $T_0$  は固有周期を示す.  
 Fig. 23 Theoretical frequency response of the heaving motion of the whole buoy. The  $T_0$  represents the natural period.

式(40)の右辺は  $x = 0, z = -d$  で近似的に評価される。ここで  $d$  はブイAの吃水の深さである。  $Y = (1/g) \partial \Phi / \partial t$  と  $W = -\partial \Phi / \partial Z$  に注意して式(40)を変形すると下式を得る。

$$\frac{d^2 Z}{d t^2} + 2\mu \frac{d Z}{d t} + \omega_0^2 Z = (F_r + i F_i) a e^{i\omega t} \dots\dots\dots (43)$$

$$\left. \begin{aligned} F_r &= \omega_0^2 \frac{\cosh k(h-d)}{\cosh kh} - \alpha \omega^2 \frac{\sin k(h-d)}{\sin kh} \\ F_i &= 2\mu \omega \frac{\sinh k(h-d)}{\sinh kh} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (44)$$

式(43)は光易ら(1973)が導出した式と本質的に一致した。  $Z = (H(\omega)/2) e^{i\omega t}$  を上式に代入すると、次のような周波数応答関数を得ることができる。

$$\frac{H(\omega)}{2a} = \frac{F_r + i F_i}{\omega_0^2 - \omega^2 + i(2\mu\omega)} \dots\dots\dots (45)$$

式(45)は図23に示される。図において  $H = |H(\omega)|$ 、  $\epsilon_z = \text{Arg}(H(\omega)/2a)$  を表す。この図から、位相の遅れ  $\epsilon_z$  は固有周期より短い周期である約1.15秒のところでもっとも大きな遅れ約25度をもつ分布となった。また波高応答曲線については、ほぼ周期1.3秒以上の波に対して1となる分布となった。これらの理論値と実験値の比較は、図14と図16に示された。それによると、1.20秒以上の周期をもつ波に対してほぼ両者はよく一致したことである。

(2) ブイAの縦揺れの周波数応答関数

式(38)において、  $Z'$  と  $Y'$  はそれぞれブイAの傾き  $\theta$  と波面の傾き  $\varphi$  となる。

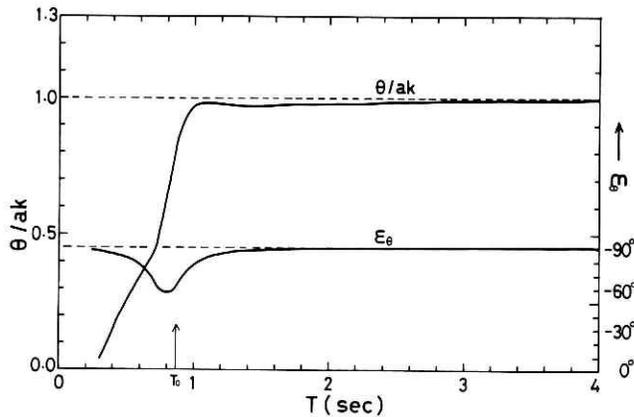


図 24 ブイAの縦揺れに関する周波数応答の理論曲線。  $T_0$  は固有周期を示す。  
 Fig. 24 Theoretical frequency response of the pitching motion of the buoy B. The  $T_0$  represents the natural period.

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + 2\mu \frac{d\theta}{dt} + \omega_0^2 \theta = \alpha \frac{d^2\varphi}{dt^2} \quad \frac{d\varphi}{dt} \omega_0^2 \varphi \dots\dots\dots (46)$$

$$\mu = N_\theta / (2I), \quad \omega_0 = \sqrt{K_\theta / I}, \quad \alpha = I_2 / I \dots\dots\dots (47)$$

( $I - I_2$ ) と  $I_2$  は、それぞれブイ A の慣性モーメントと付加慣性モーメントである。式(47)の係数は復元モーメント  $K_\theta$  をのぞいて、上下揺れと同様に求められる。 $K_\theta$  は上下揺れの場合と異って簡単な計算から得ることはむずかしいので、第 4.2 節の静水中のブイの特性のところで示した実験値を用いた。その結果、得られた付加慣性モーメント  $I_2$  と減衰抵抗係数  $N_\theta$  は、それぞれ次の値となった。

$$I_2 = 1.18 \quad , \quad N_\theta = 3.95$$

これらの無次元量の値は上下揺れと同様に次の値となった。

$$I'_2 = I_2 / \rho \bar{r}^5 \approx 1.0$$

$$\bar{N}'_\theta = N_\theta / \rho \bar{r}^5 \omega \approx 1.0$$

ここで  $\bar{r}$  はブイ A の外径と内径の差とする。Ringed Plate に関しての Pitch の特性は、理論的には Maeda and Eguchi (1980) の計算方法によって求められる。それによると、

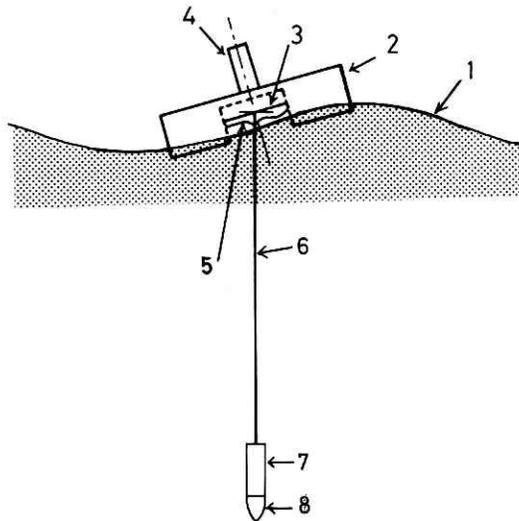


図 25 簡易型圧力式ジンバル波浪計の概略図。  
 1. 波面 2. ブイ本体 3. ジンバル 4. コンパス 5. 蛇腹状の防水膜 6. 圧力計のケーブル 7. 錘 8. 圧力計

Fig. 25 Schematic sketch of the pressure type gimbal-wave meter.

上記の無次元係数はともにほぼ 0.25 となった。よって実験値は理論値に比べて非常に大きい値になった。これは主にブイ A とブイ B 間の摩擦の影響によるものと推測される。式 (46) の右辺は水粒子の鉛直方向の速度  $W$  を導入すると次のように変形できる。

$$\alpha \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{dW}{dt} \right) + 2\mu \frac{\partial}{\partial x} (W) + \omega_0^2 \varphi$$

深さ  $d$  における流線の傾き  $\varphi$  は

$$\varphi = \left( \frac{\partial Y}{\partial x} \right)_{z=-d} = iak \frac{\cosh kh(h-d)}{\cosh kh} e^{i\omega t} \dots\dots\dots (48)$$

よって縦揺れの運動方程式 (46) は次のように変形される。

$$\frac{d^2 \theta}{dt^2} + 2\mu \frac{d\theta}{dt} + \omega_0^2 \theta = (F_r + iF_i) ak e^{i(\omega t + \pi/2)} \dots\dots\dots (49)$$

ここで  $F_r$  と  $F_i$  は式 (44) と同一の関数となる。

上式と式 (43) を比較すると、縦揺れの振幅は  $a$  でなくて  $ak$  であること、位相は上下揺れの場合に比べて  $90^\circ$  だけ進んでいることである。上式に  $\theta = \theta(\omega) e^{i\omega t}$  を代入すると、縦揺れの周波数応答関数が得られることになる。

$$\frac{\theta(\omega)}{ak} = \frac{(F_r + iF_i) e^{\frac{\pi}{2}i}}{\omega_0^2 - \omega^2 + i(2\mu\omega)} \dots\dots\dots (50)$$

式 (50) は図 24 に示される。図において  $\theta = |\theta(\omega)|$ 、 $\varepsilon_\theta = \text{Arg}(\theta(\omega)/ak)$  を表す。この図から分るように、縦揺れの応答曲線は固有周期を基準として見ると、上下揺れのものと同様に類似した分布である。このことは式 (45) と (50) の比較からも明らかとなる。異なる点は位相分布で、上下揺れの場合は  $0$  度が基準であるのに対して、縦揺れの場合はマイナス  $90$  度が基準となっていることである。傾きの振幅すなわち波形勾配の値及び位相の進みに関して、実験値と理論値の比較は図 18 に示されている。これによると、波形勾配に関して 2 秒以上の周期の波に対して、データのばらつきは大きいですが、ほぼ両者は一致している。一方位相の進みに関しては、1.7 秒以上の周期をもつ波に対して、実験値の方が平均  $20$  度ほど低い値となっている。

### 5. 考察と結論

私たちは、波浪の波高と波向の測定ができかつ簡単な構造にもとづく小さくて軽い波浪計測ブイとして、圧力式ジンバル波浪計を開発した。製作した波浪計測ブイは、予想したもの比べてあまり軽量化することはできなかった。しかしながら、この波浪計の性能を調べる実験を詳しく行った結果、次に示す問題点が明らかにされ、目標とする波浪計の実用化のための基礎的な資料が得られた。波浪計の精度に関してはあまり重点を置かず、むしろ安定した測定ができることが重要であると考えた。このような意味において、波高の計測は安定性

がよく精度的にも十分なものであったが、波向すなわち波面の傾きの計測は不十分なものであったと言える。これについてもっとも大きな原因は、実験結果から明らかに示されているように、波浪計測ブイが2つのブイから構成されていることである。圧力計を吊り下げているブイBの大きさをゼロとするような構造にすれば、波面の傾きの精度が向上しかつ軽量化することができる。なぜなら、このようにすればブイBの縦揺れの固有振動がなくなり、構造的にもより簡単なものとなるからである。

この研究の結論として、ブイBをなくした波浪計測ブイを概略的に図25に示す。この波浪計測ブイの計測法について、この図を用いて総括しておく。波面の変化によってブイ2が上下し、ジンバル3とケーブル6を介して圧力計8も上下する。圧力計は十分に深いところに設置されているので、圧力計による圧力測定で水面変位が計測できる。またケーブル6はほとんど鉛直性を有しているので、ブイ2の水平面との角度は2軸ジンバル3の各軸にあるポテンショメータで測定でき、これによって波形勾配と波向が求められることになる。

上記の波浪計の水面傾斜の測定においても波浪の水平方向の運動や波圧による雑音の影響を受けるが、水槽実験によれば、次のような工夫によってこれらの雑音の影響を軽減させることができると思われる。第一に、圧力計のところに錘をつけてより安定した鉛直性をもつことにより、高周波の横揺れと縦揺れが少くなり、かつ従来と同じような形をした円盤型ブイよりも安定したものとなる。第二に、漂流状態にある船又は海底に錨で留めたブイに波浪計測ブイを係留して観測することにより、波浪計はほとんどの場合波浪の進行方向に流れ、係留用のロープは緩まず常に張ることになり、その結果波浪による波浪計測ブイの水平の動きが抑制されることである。これによって、安定したブイの姿勢が保たれ、上記の雑音は小さくなることが期待される。

## 6. 謝 辞

本研究において多くの貴重な助言を賜りました東京大学生産技術研究所前田久明教授に厚くお礼申し上げるとともに、水槽実験にご協力頂いた東京大学船舶工学科運動性能研究室元良誠三教授及び石井裕司氏に、またブイの製作にご協力頂いた北斗理研株式会社倉科好磨氏に深く謝意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) Cox, C.S. and W.H. Munk (1954): Statistics of the sea surface derived from sun glitter. Jour. Marine Res., **13**, 198-227.
- 2) Cartwright, D.E. and N.D. Smith (1964): Buoy techniques for obtaining directional wave spectra. Buoy technology, Washington; Marine Technology soci.
- 3) 細田龍介・前田久明・外山嵩・田口賢士 (1977): 船舶設計における波浪資料の利用に関する検討. 関西造船協会誌, 第 165 号.

- 4) Isshiki, H., H. Maeda and J.H. Hwang (1974): On the heaving motion of a circular disk in shallow water. JSNA of Japan, **136**, 115-127.
- 5) Longuet-Higgins, M.S., D.E. Cartwright, and N.D. Smith (1963): Observations of the directional spectrum of sea waves using the motions of a floating buoy. Ocean wave spectra, New Jersey, Prentice Hall Inc. 111-132.
- 6) MacCamy, R.C. (1961): On the heaving motion of cylinders of shallow draft. J. of Ship Research, **5**, 7-18.
- 7) 光易恒ら (1973a) : 海洋波の計測法の開発研究 (1). 九州大学応用力学研究所所報, 第 3 9 号, 105-181.
- 8) ————— (1973a) : 海洋波の計測法の開発研究 (2).九州大学応用力学研究所所報, 第 4 0 号, 295-329.
- 9) 前田久明・江口純弘 (1976) : 浅海域において浅吃水船に作用する流体力について (第二報). 日本造船学会論文集, 第 139 号, 44-50.
- 10) Maeda, H. and S. Eguchi (1980): On the hydrodynamic forces for shallow draft ships in shallow water (3rd Report). JSNA of Japan, No. **147**, 89-95.
- 11) Tokuda, M. and Y. Toba (1981): Statistical characteristics of individual waves in laboratory wind waves. I . Individual wave spectra and similarity structure. J. Oceanogr. Soc. Japan, **37**, 243-258.
- 12) 徳田正幸・内藤玄一・都司嘉宜・渡部勲 (1981) : 圧力式波浪計による相模湾での波浪観測 . 国立防災科学技術センター - 研究報告, 第 2 6 号, 133-154.
- 13) 山内保文 (1971) : 船の波浪中動揺応答の解析法について (その 1). 造船協会論文集, 第 109 号, 169-183.

(1981年10月27日 原稿受理)