

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. 9

NO. 1

MAR. 1970

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (REPORT OF P. H. R. I)

第9巻 第1号 (Vol. 9, No. 1), 1970年3月 (March 1970)

目次 (CONTENTS)

1. 組グイの水平抵抗に関する実験的研究
..... 沢口正俊 3
(Experimental Investigation on the Horizontal Resistance of Coupled Piles
..... Masatoshi SAWAGUCHI)
2. 港湾埋没に関する移動床模型の再現性—鹿島港模型実験の場合—
..... 佐藤昭二・田中則男・入江功・平原淳次 71
(Similitude of the model Test on Harbour-Shoaling in Movable Bed
—The Case of the model Test of Kashima Port—
..... Shoji SATO, Norio TANAKA, Isao IRIE, Junji HIRAHARA)
3. 水平全方向流速計の試作について (第1報)
..... 柴山煒彦・須藤茂 125
(A New Current-Meters of All-Direction-Type (1st Report)
..... Akihiko SHIBAYAMA, Shigeru SUDO)
4. 定置式波向計 (抵抗歪線型) の開発
..... 高橋智晴・鈴木禧実・佐々木弘 151
(On the Development of A New wave Direction meter
..... Tomoharu TAKAHASHI, Yoshimi SUZUKI, Hiroshi SASAKI)
5. 鋼直杭棧橋の耐震性に関する研究
..... 山本隆一・林聰・土田肇・山下生比古・小蔵紘一郎 179
(Evaluation of Seismic Stability of Trestle Type Pier with Vertical Steel Piles
..... Ryuichi YAMAMOTO, Satoshi HAYASHI,
Hajime TSUCHIDA, Ikuhiko YAMASHITA, Koichiro OGURA)

6. ふ頭エプロンの荷役活動と面積に関する研究
.....工藤和男・高力健次郎・久保重美..... 229
(Studies on Area of Wharf Apron and Related Cargo Handling Activities
.....Kazuo KUDO, Kenjiro KOHRIKI, Shigemi KUBO)
7. 軟底質における超音波の反射透過特性—フライアッシュ底質における室内実験—
.....木原純孝..... 275
(Reflection and Transmission Characteristics of Ultrasonic Wave in Soft Mud Layer
—An Experiment on Fly-Ash mud Sediment—
.....Sumitaka KIHARA)
8. 捨石均し機の開発
.....小岩苔生・大平勝・平山勇・白鳥保夫..... 307
(Development of a Leveling Equipment for Rubble Mounds
.....Taisei KOIWA, Katsu OHIRA, Isamu HIRAYAMA, Yashuo SHIRATORI)

4. 定置式波向計(抵抗歪線型)の開発

高橋智晴*・鈴木禧実**・佐々木弘***

要 旨

沿岸波浪の波向の測定器として、昭和35年頃からその開発実用化研究を進めてきた定置式波向計(抵抗歪線型)が実用段階に達したと考えられるので、開発の経過、水路実験結果の概要、構造、測定原理、検定方法、観測データ例の紹介、および観測データの取扱い方法についてとりまとめた。

* 水工部 観測調査課長
** 水工部 主任研究官
*** 水工部 観測調査課

4. On the Development of a New Wave Direction Meter

Tomoharu TAKAHASHI*

Yoshimi SUZUKI**

Hiroshi SASAKI***

Synopsis

It is important to have the knowledge of the wave direction characteristics of coastal waves for understanding of coastal phenomena and consequently for the planning and design of coastal works.

Since 1960, an effort to develop a new wave direction meter which can be used for long term field observation, has been made in our laboratory. The apparatus was tried several times in field observations and it has proved to have enough accuracy in finding the direction of coastal waves.

The following are discussed in this report ;

- a) Process of the development,
- b) Principle of observation and structure,
- c) An outline of the results of the hydraulic model experiments,
- d) Method of calibration and Sample records of the field observation,
- e) Method of analysis of the record.

* Hydraulics Division, Chief of observation and Inquiry Section

** Hydraulics Division, Senior Research Engineer

*** Hydraulics Division, Observation and Inquiry Section

目 次

要 旨	151
1. まえがき	155
2. 開発の経過	155
3. 定置式波向計（抵抗歪線型）	160
3.1 測定原理	160
3.2 構造および測定回路	162
3.3 波向の算定方法	165
4. 水路実験	166
4.1 固有振動数	166
4.2 静荷重による特性試験	168
4.3 流れの中での変位	169
4.4 波動中の挙動	169
5. 現地観測データ例	170
5.1 波向計の検定方法	170
5.2 現地観測データ例	171
6. 簡易法による波向の算定	172
6.1 簡易法による波向の算定理論	172
6.2 簡易法による波向の算定手順	174
7. むすび	175
参考文献	175
記号表	176

定置式波向計（抵抗歪線型）の開発

1. まえがき

沿岸波浪の特性解明，沿岸過程，港湾および海岸施設構造物に対するそれ等の影響等を調査研究するうえで，現地海岸に襲撃する波の諸元，すなわち，波高，周期および波向の実態を観測により知ることは極めて重要なことである。

我々は従前より沿岸波浪測定法の研究を進め，波形に關しては3種類の水圧式波高計（摺動抵抗型¹⁾，直記型²⁾および抵抗歪線型³⁾，階段抵抗式波高計⁴⁾（その後北海道開発局村木⁵⁾等によってより実用的に改良された），および超音波式波高計⁶⁾（Ⅲ型，Ⅴ型）等を開発し，また波向の観測については海象観測用（高分解能）レーダを開発し，これらの開発研究成果は沿岸波浪の定常観測に広く実用化されるに至っている。

海象観測用レーダの開発以前における波向の観測方法は，陸上より実体写真法による海面の撮影図化あるいは，航空機による垂直撮影写真以外に適切な方法がなく，一般にはトランシットあるいは方位盤による目視観測によって行われてきた。これらの測定法はいずれも立地条件，気象あるいは日照条件による制約を受ける場合が多く，実体写真法あるいは航空写真による場合には相当の経費を要するとともに特殊な機器装置および測定技術によらねばならないので普遍的な観測法とはいえず，目視観測の場合には観測者の主観に左右されるところが大であり定量的な直接記録を得ることは出来ない。また波高計と併置使用する定常観測用波向計として Rayleigh Disc の原理を応用した定置式波向計⁴⁾を試作し，小名浜港，秋田沖（石油資源開発K. K.）等で実験的に現地観測を試みたが，定常流の成分を分離することが機構上，原理的に困難であり汎用的な波向観測には不適當であるとの結論が得られた。近年，波高計を正三角形に3台設置して，これらによる波形の同時観測記録から波向を求める方法^{8),9),10),11)}，海底に設置した測流器により水粒子の直角二成分の測定値から波向を求める方法¹²⁾，などが報告されているがいずれもそのデータ整理段階でかなり複雑な計算を必要とし，遠隔操作により定常的に長期間の自記記録を得る方法としては難点がある。

この報告では，昭和31年に波向計Ⅰ型として小名浜港で実用化試験を行なったレーリー盤型波向計⁴⁾の性能を検討した結果に基づき，新たな構想のもとに研究を進めてきた定置式波向計（抵抗歪線型）の開発経過とその測定原理，構造，基礎実験結果，および現地観測例について

述べる。

2. 開発の経過

筆者等の一人，高橋は昭和29年10月に，従来音波の強さの測定に用いられてきた Rayleigh disk の理を応用した現地用の波向計を試作⁴⁾し，二次元造波水路による実験を経てこれを福島県小名浜港外に設置して現地波の波向を測定した。その後機構，材質に改良を加え秋田沖（石油資源開発K. K.「白竜号」における道川沖での観測）において現地波向観測を実施したが，これ等の現地観測の結果から，Rayleigh disk による波向の測定は顕著な卓越波向が存在し，附近の流れが波による水粒子運動に較べ無視し得る場合にのみ可能であり，結論としてこの波向計は汎用的な波向観測に使用することはできないことが確認された。

その後筆者等は通常用いられる波高計を併置して，汎用的な定常観測に使用することを目的とした新しい現地用の波向計を開発すべく，上記の経験を基にして考えられるいくつかの方法を検討し，今回開発した定置式波向計の基本形を定め，開発研究に着手した。

設定された基本形とは，海中に一端を固定し，他端を自由端とした円筒棒を鉛直に設置し，波力による棒の撓みを直交座標上の x 方向， y 方向2成分として検出し，それより波力の作用方向を求め，波向を知ろうとするものである。

はじめに，設定した基本形による方向検出の可能性を確認するため，精密に加工された金属パイプの基部四隅にワイヤーストレインゲージを貼りつけた基本装置を作成し，空中において静的な試験を行った。

実験は上記の金属パイプを垂直に立て，パイプの先端に，パイプを中心とする円周上の水平方向に荷重を加え，基部に貼付けられたワイヤーストレインゲージにより棒の撓みによる基部の歪を直交座標上の x ， y 2方向成分として検出測定し，荷重方向検出確度を求めた。同時に流れを仮定して，ある一定方向に一定の水平荷重を加えた状態で上記と同様な測定を行った。結果は図-2-1(a)，(b)のように求められ，いずれの場合も荷重方向を精度良く検出できることが確認された。

次にこのパイプを二次元造波水路に入れ，進行波中での性状を観察したが，波による水粒子運動の速度変化にともなって，受感棒は本来の被測定撓みとともに複雑な振動を起こし，初期の目的を満足する結果は得られなかった。

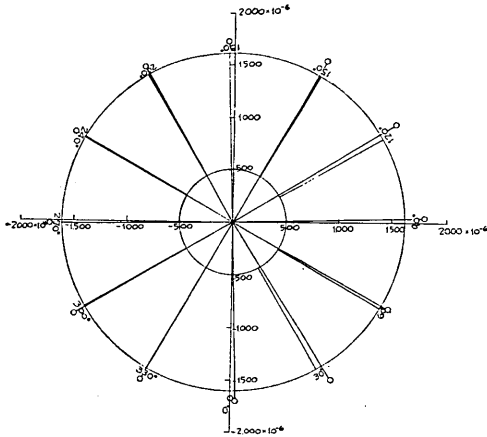


図-2・1 (a) 一端を固定されたパイプの自由端に水平荷重を作用させた場合の固定端の歪量

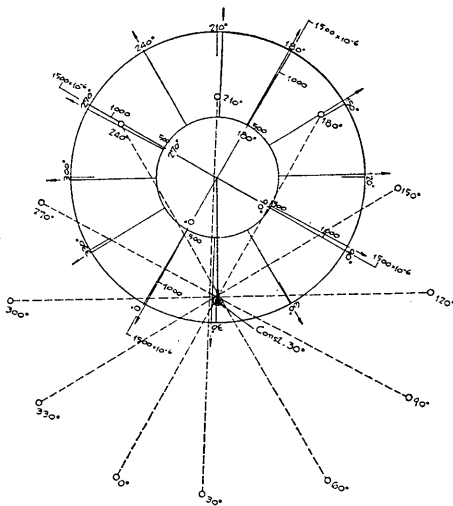


図-2・1 (b) 一端を固定されたパイプの自由端に水平荷重を作用させた場合の固定端の歪量(一定の水平荷重が同時に作用する場合)

記録に現れたこの複雑な振動の原因は次のように説明される。

一般に流水中の円柱のうしろにはカルマンの渦が生じ、これにより円柱は流れの進行方向に対して直角方向に横振れする。渦の発生周期は円柱の直径が一定の場合には、流速に逆比例する。水中の円柱に波が作用するときは、水粒子速度は正弦波状に変動し渦の発生周期もそれに応じて変動するであろう。このような水理条件下において撓み量により円柱に作用する波力を検出しようとするれば、円柱のバネ定数は制約されることとなり、被測

定最大流速附近以下の領域でカルマン渦の発生周期と円柱の固有振動数は一致点を生じ共振現象を起すこととなる。即ち測定しようとする波力と同時に他の外力が作用したと同じような測定結果が得られることとなる。勿論水粒子の加速度による力の影響も含まれるであろう。

上記の結果により、現地用波向計の構造を検討するための実験用波向計を試作し、港湾技術研究所水工部の大型造波水路を使用して進行波に対する波向計の動作性状の観察実験を行った。この実験に供した波向計の構造を図-2・2、外観を写真-2・1に示す。実験は波力受感部を図-2・3(a)~(h)に示す8種類の形状について段階的に行い、次のような結果が得られた。写真-2・2(a)~(e)にはこの実験で得られた波形記録例を示す。

(a)の形状は、波力受感部の構造は一本の金属等を直立させたもので、受感棒の太さ、バネ常数等の異なる数種類について測定を行ったが、本質的には前述の基本装置の場合と同様に、測定目的とする波向方向の撓みの他に複雑な振動現象が発生し、単純な棒状の受感体によって波向を測定することはほとんど不可能であることが確認された。

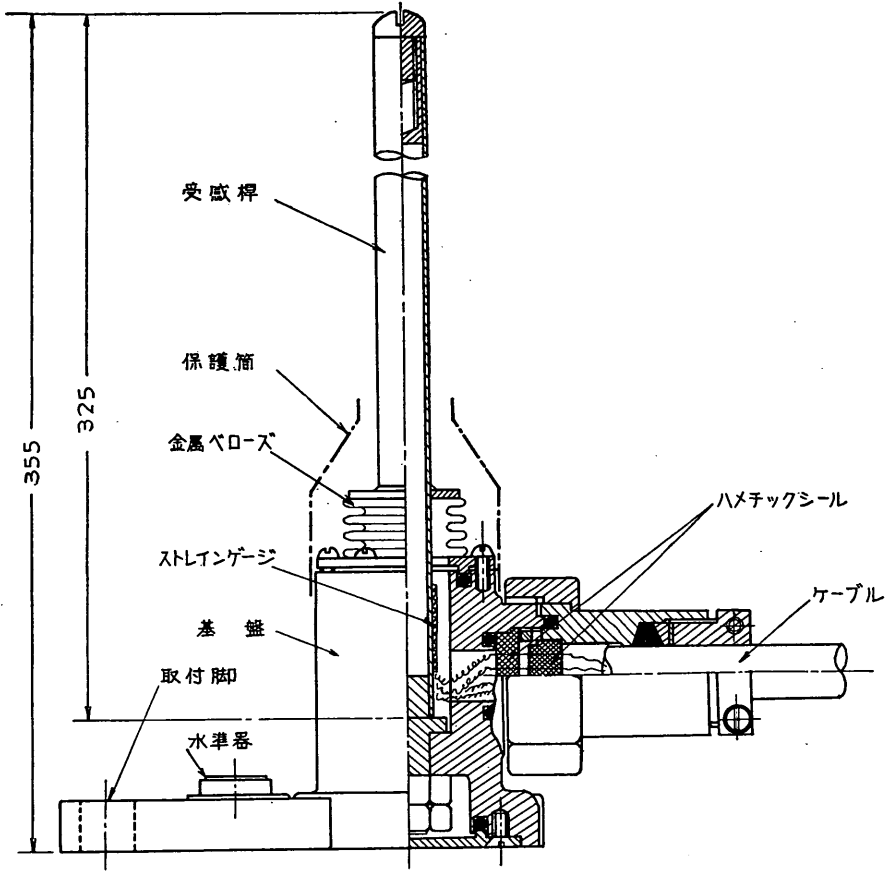
(b)は、(a)の場合に生じた受感棒の振動エネルギーを吸収減衰させ、波による被測定作用力を大きくするために波力受感棒の先端に吹き流し状のヒレを取付けたものである。結果は(a)で見られた振動はある程度小さくなったが、別の周波数の振動が発生し、(a)に対する改善策とはならなかった。

(c)は、(b)で用いた吹き流しに替えて浮力の大きい球体(バレーボール)を細紐で取りつけたものである。この場合棒の振動の振幅は余り変化しないが、受感面積が増加したので波力による受感棒の撓みは極めて大きくなり S/N (S : 正規の被測定信号入力, N : 計測上の障害となる不正な雑音信号入力)比は大幅に改善された。しかし球体をつけた結果、装置全体の固有振動数が低くなり、また水中での浮体の動きは波による水粒子の運動に忠実に追従せず、結果は芳しくなかった。

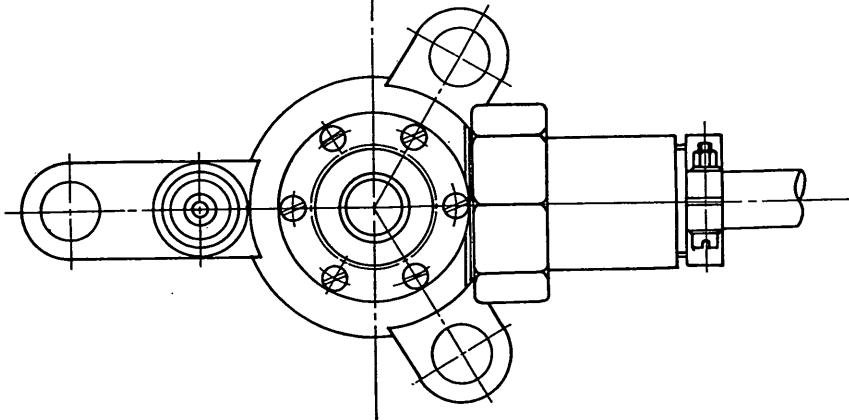
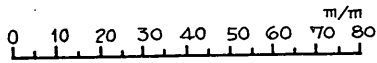
(d)は上記の浮球に替えて、受感棒の先端に球体を固定して取付けたもので(a), (b), および(c)に較べて測定上の障害となる雑音振動の振幅は減少し、かなり良好な結果を示した。

(e)および(f)は以上の実験経過において最大の障害となっていると考えられたカルマン渦による雑音振動の影響を確認するために行った実験で、(e)は受感棒に添ってロープを巻きつけたもの、(f)は受感棒の周囲に不規則な角

定置式波向計（抵抗歪線型）の開発



側面図



平面図

図-2.2 実験用波向計構造図

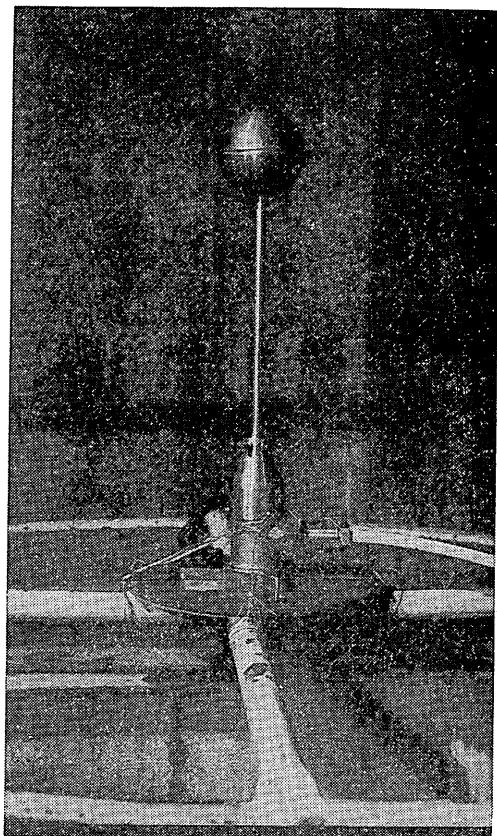


写真-2・1 実験用波向計外観

を植えたもので、いずれもカルマンの渦列の発生を擾乱抑制した場合、受感棒の振動がどのように変化するかを観察するために行ったものである。これらの結果では棒の雑音振動は波向計として実用上無視し得る程度まで減少した。しかしこの形状は水平全方向に対して受感面の作用力が必ずしも一様ではなく、また現地海底に設置した場合の保守上の問題を考慮すると波向計として使用する場合適当な形状とは考えられない。

(g)は(a)~(f)の実験結果から得られた形状で受感棒を円筒カバーによって流れから遮蔽し球体のみで波力を受ける構造としたものである。結果は他の方法に較べて良好であり共振現象の挙動は一応排除されたが、比較的小さな雑音振動は常時生じていた。

(h)は受感球体の表面に凹凸をつけ、粗面にし球体背後に生じる渦を局部的に不規則に多数発生するようにしたもので雑音振動はほとんど消去され、同時に感度も向上し一応満足すべき結果を得ることができた。この場合球体の表面を粗にする方法として球体表面をロープで作った網で覆う方法、突起を乱立する方法の2種類について検討を行ったが製作上の問題点等を考慮して現地用波向計の基本的形状としては前者を用いることとした。

上記の実験結果を基にして現地用の波向計の構造を検討、設計、試作し久里浜港に設置して現地観察実験を進めると共に、水路実験を行い基本的な特性を検討した。

その後、第一港湾建設局の協力を得て酒田港に設置し

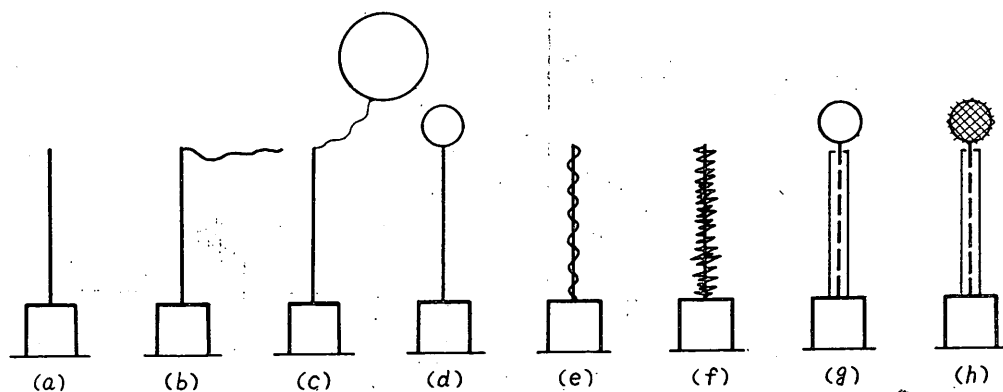


図-2・3 (a)~(h) 基礎実験に用いた種々の波向計の模型形状

定置式波向計（抵抗歪線型）の開発

写真-2・2 (a)~(b) 基礎実験に用いた種々の波向計の記録例

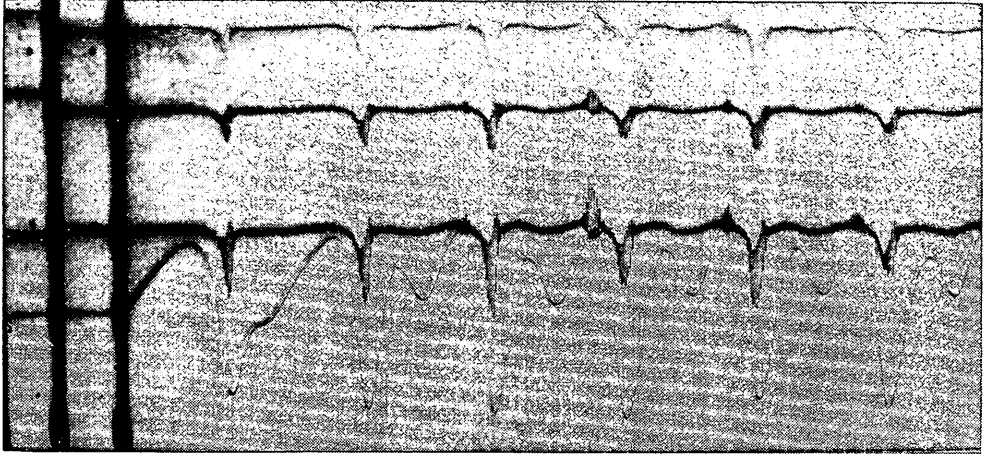


写真-2・2 (a) 上側の記録（2本）波向計，下側の記録抵抗線波高計 形状(a)の場合

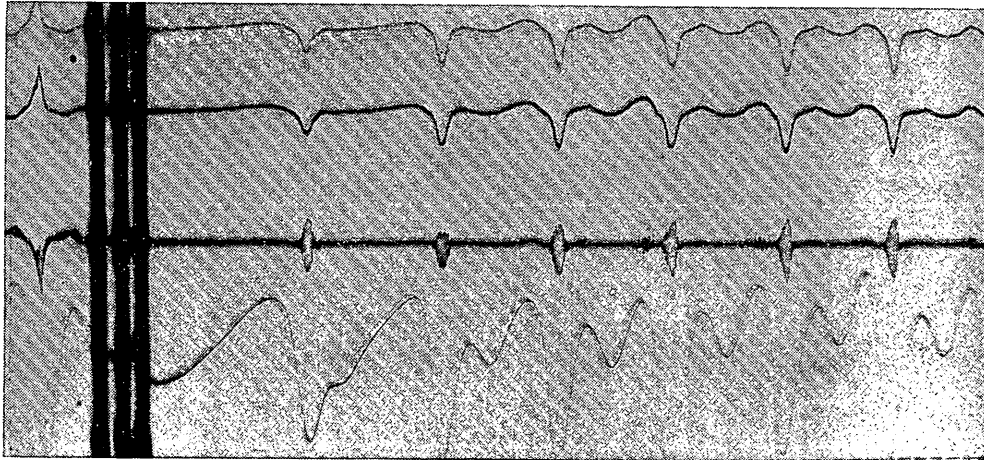


写真-2・2 (b) 形状(b)の場合

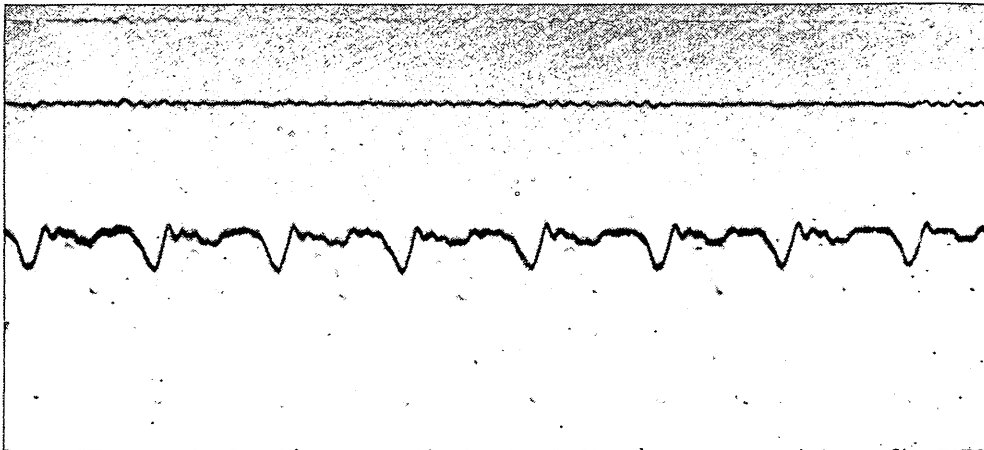


写真-2・2 (c) 形状(c)の場合

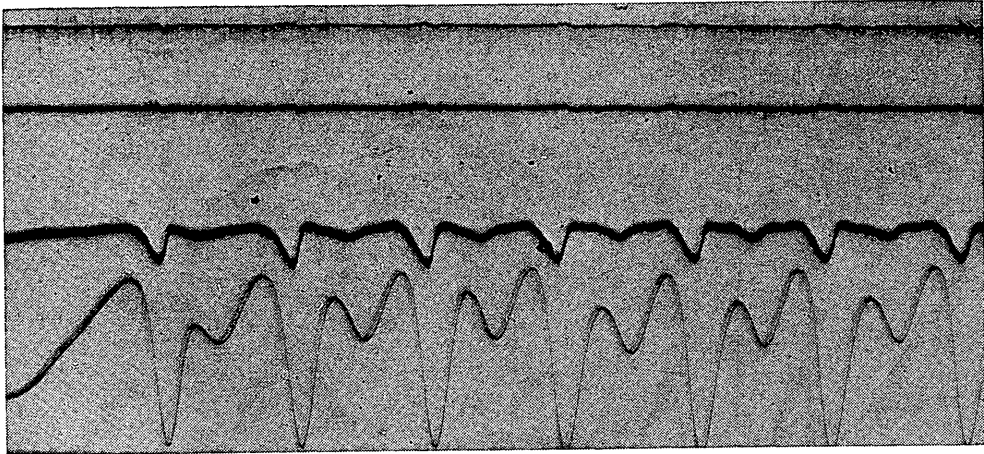


写真-2・2 (d) 形状(d)の場合

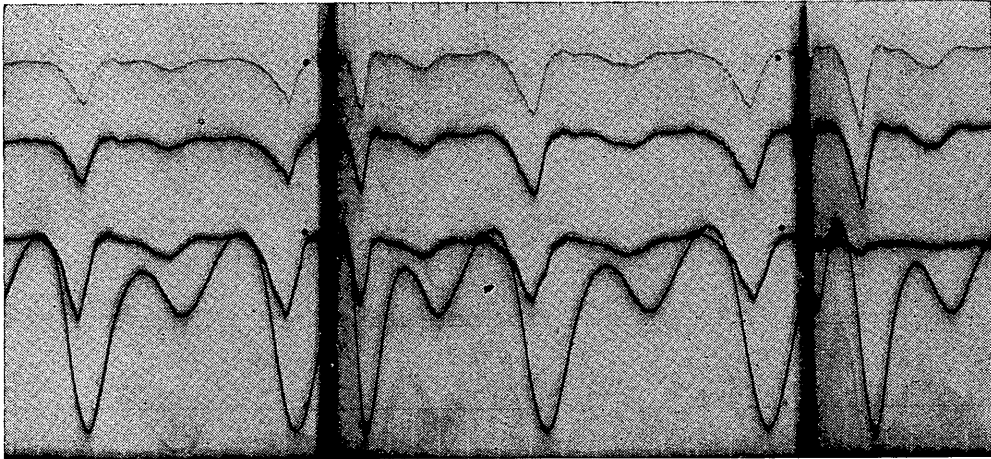


写真-2・2 (e) 形状(h)の場合

現地観測実験を行い、これ等の結果から機構の改良、測定データの解析法等を検討し、装置の実用化を進めた。

本機の開発研究経過は下記の通りである。

昭和35年；予備実験，並びに実験用波向計の設計。

昭和36年；水路実験による定置式波向計基本形状の検討，決定

昭和36年；現地用波向計の設計試作。久里浜港における現地観測実験，水路実験

昭和36年；酒田港における現地観測実験の開始

昭和40年；鹿島港における現地観測の実施

3. 定置式波向計（抵抗歪線型）

3.1 測定原理

定置式波向計（抵抗歪線型）の測定原理を 図-3・1 に示

す。

図-3・1のように円筒棒で支持された球体を海中に設置し、球体だけに波力が作用するものと仮定すると、波力により、球体を支持する円筒棒は撓み、側面に歪を生ずる。図-3・2のように、この円筒棒の側面に、互いに直角に位置するようにストレインゲージを貼りつけ、対向する2枚のゲージをアクティブゲージとする2組のブリッジ回路を作り、歪測定をすれば、球体に作用する波力による円筒棒の歪の x, y 2成分を測定することができる。この歪量の x, y 2成分から波力の作用方向を知ることができる。

これを図-3・3(a)の x, y 座標上で考える。球の中心 O について波の水粒子の運動により、 x 軸と θ_a の角をなす $a-a'$ 方向の交番荷重が作用する場合、比例定数を k' と

定置式波向計（抵抗歪線型）の開発

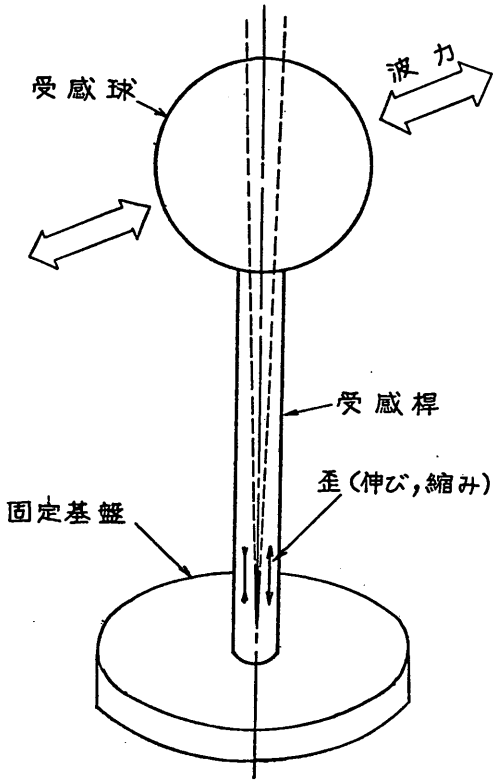


図-3-1 波向測定原理図

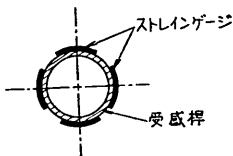


図-3-2 歪検出部説明図

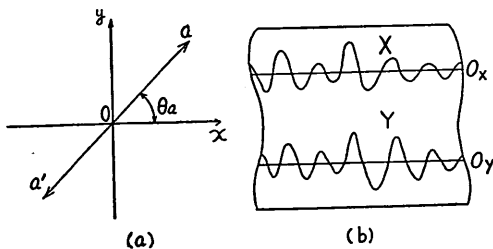


図-3-3 (a), (b) 波力が作用する場合の x, y 方向の歪量の説明図

して、 x 方向の歪を検出するゲージの歪量は $k' \overline{aa'} \cos \theta_a$ 、 y 方向の歪量は $k' \overline{aa'} \sin \theta_a$ となるので波力の作用方向、

θ_a は次式により求められる。

$$\tan \theta_a = \frac{k' \overline{aa'} \cos \theta_a}{k' \overline{aa'} \sin \theta_a} = \frac{y \text{ 方向の歪量}}{x \text{ 方向の歪量}} \quad (3-1)$$

この場合記録紙上に x, y についての原点 O_x, O_y を定めておけば、 x および y 方向の歪量は O_x, O_y を中心にして図-3-3(b)のようになる。

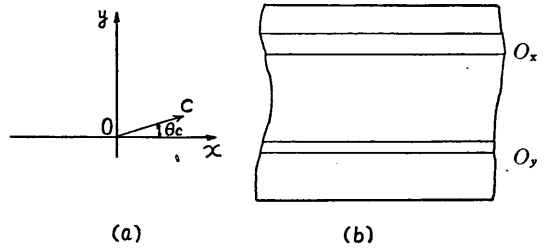


図-3-4 (a), (b) 定常流が作用する場合の x, y 方向の歪量の説明図

次に定常流のみが作用している場合には、図-3-4(a)のようになり、 x および y 方向の歪量は $k' \overline{oc} \cos \theta_c$ 、 $k' \overline{oc} \sin \theta_c$ となり記録は図-3-4(b)のように x, y の原点 O_x, O_y から $k' \overline{oc} \cos \theta_c$ および $k' \overline{oc} \sin \theta_c$ に比例する量だけ平行移動した点で直線を描くことになる。

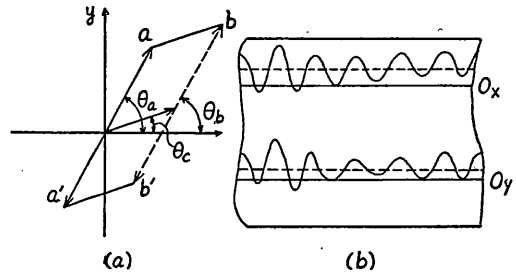


図-3-5 (a), (b) 波力および定常流が同時に作用する場合の x, y 方向の歪量の説明図

今この球体に定常流による力と波による波力とが同時に作用しているものとするとき図-3-5(a)に示されるように合成された歪量の変化は $\overline{bb'}$ であらわされる。 $\overline{aa'}$ と $\overline{bb'}$ は平行で等しいから b 点と b' 点を知ることにより θ_a は

$$\tan \theta_a = \tan \theta_b = \frac{k' \overline{bb'} \cos \theta_b}{k' \overline{bb'} \sin \theta_b} = \frac{y \text{ 方向の歪量の変化}}{x \text{ 方向の歪量の変化}} \quad (3-2)$$

と求められる。

$k' \overline{oc}$ が短時間内に変動する場合には $\overline{bb'}$ は上の条件を満足しなくなるので b および b' を求めて θ_a を求めることは原理的に不可能となる。

表面波の波向を波峯線に直角方向と定める場合、一般には波向と波力の方向は一致しないが、表面波の波向と波力の方向が一致するものとし、流れが流速、方向とも一定とみなし得る場合には波力の x, y 2成分の記録紙上での対応する波形の振巾の比を求めれば個々の波の波向が求められることになる。

この場合波力の作用方向を一定と考えているが実際の海岸の波は卓越方向をもちながらも、種々の方向に進行する無数の波の集りと考えられるので、個々の波の波向の変化、表面波の波向と波力の作用方向の差を考慮しなければならない。現地観測データから波向を算定する方法については3.3および6.に詳述する。

3.2 構造および測定回路

(1) 構造

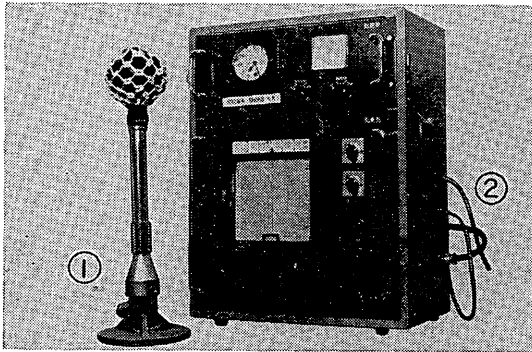


写真-3-1 定置式波向計（抵抗歪線型）外観

定置式波向計（抵抗歪線型）の外観を写真-3-1に示す。写真において①は測定点の海中に設置する波向計受感部、②は自動平衡型記録計を使用した記録装置で、記録装置には測定回路の一部が組込まれている。

図-3-6(a)は波向計受感部の構造を示すもので、①は波力を直接受けるための受感球体で②の連結棒③の撓み検出円筒よりなる受感桿の先端に取付けられており、球体の表面は、流れによる渦の発生を抑制するため、ナイロンロープで編んだ目の粗い網で包まれている。受感桿の下端は④の組立基盤に固定されている。検出円筒③は受感球体に作用した波力による受感桿の撓みを測定する部分で、4枚のストレインゲージ⑤が検出円筒の側面四囲に対称的に貼付けられている。このストレインゲージは波力による円筒桿の撓みを検出し、波力の作用方向とその大きさを知るためのもので図-3-7の測定回路に示すごとく結線され、4芯ケーブルにより陸上の記録装置内測定回路につながれている。

基盤④は本器の組立および設置に際しての取付基盤と

なるもので検出円筒の部分收容する水密室⑥を形成しており、下端フランジには本器を設置固定するための取付用ボルト孔⑭がある。水密室下端はOリングと金属円板⑦によって密封されており、上部受感桿と基盤の間は小型の金属ベローズ⑧とOリングにより密封されている。⑨は水密用ベローズおよび連結棒を保護すると共に、これらの部分に直接波力が作用して測定出力信号に影響がおよぶのを防止するための保護筒である。この保護筒の上部には受感桿の最大撓みを規制するためのストッパー⑩、保護筒の内部には砂、泥などが侵入するのを防ぎ受感桿の感応を正常に保持するための柔軟なゴムベローズ

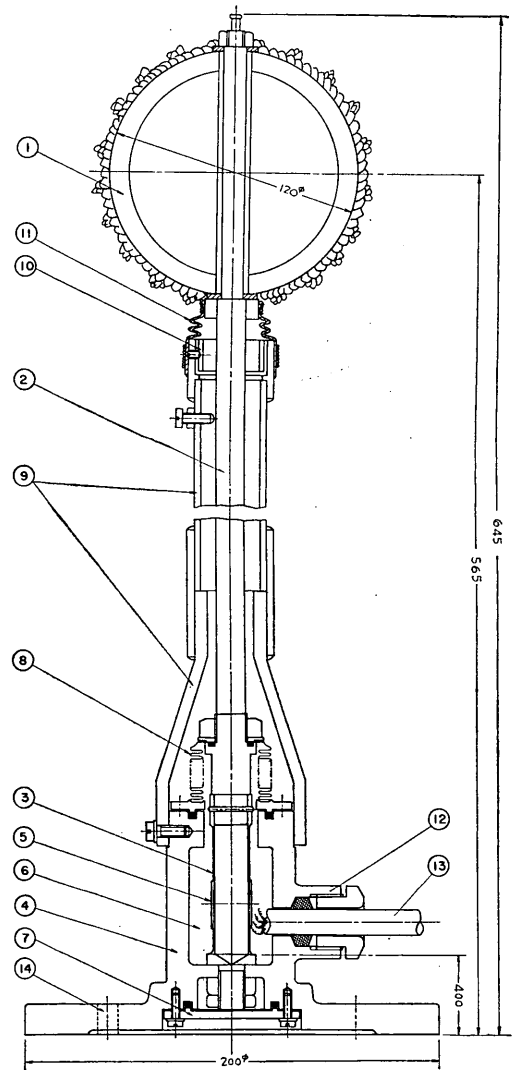


図-3-6. (a)

定置式波向計（抵抗歪線型）の開発

番号	名称	備考
1	受感球体	ハイゼックス
2	連結棒	B_s
3	撓み検出用円筒	PB_z
4	組立基盤	B_zC
5	ストレインゲージ	1000 Ω ポリエステルゲージ
6	水密室	
7	金属円板	B_s
8	金属ベローズ	B_z
9	保護筒	B_zC, B_sT
10	ストッパー	B_s
11	ゴムベローズ	ネオプレン
12	ケーブル取出口	
13	ケーブル	4芯
14	固定用ボルト孔	10 ϕ 4ヶ所
15	取付方向規制孔	

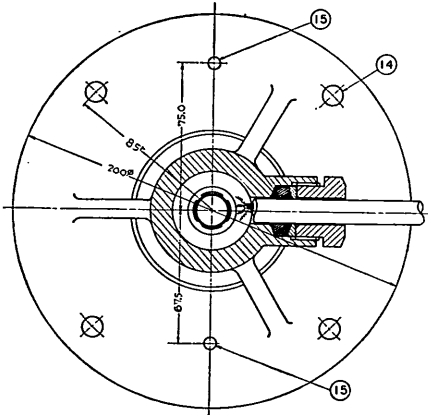


図-3-6. (b) 波向計受感部構造図

①が取り付けられている。②はケーブル取出口③はケーブル、④は本器を設置する場合の固定用ボルト孔である。

図-3-6(b)に示す⑤は本器を設置する際、その取付方向を規制するための孔で固定用ボルト孔④に対して非対称な位置にノックピンを設けておき、この孔とノックピンが適合した位置方向のみ正しく取付けられるようにするものである。

(2) 測定回路

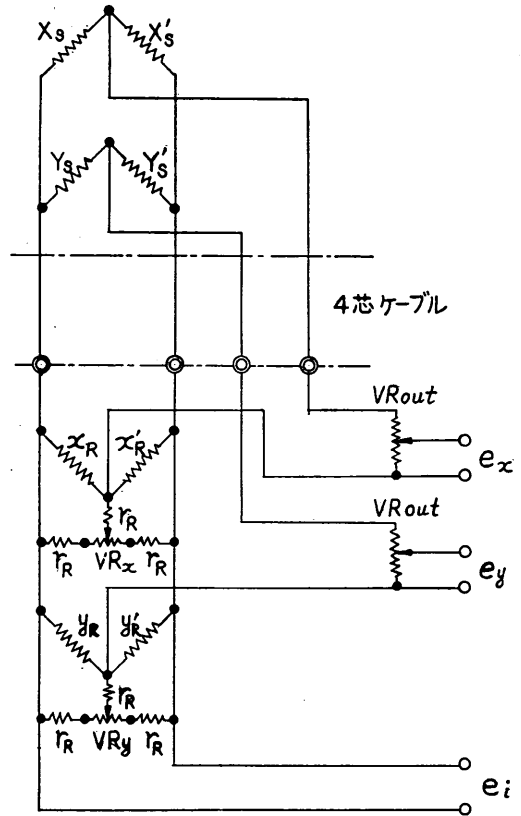


図-3-7 波向計測定回路図

図-3-7はこの波向計の測定回路で、受感部の検出円筒に対称的に貼付けられた2対のストレインゲージ $X_s - X_{s'}$, $Y_s - Y_{s'}$ と、記録装置に組込まれた測定回路の2対のダミー抵抗 $x_R - x_{R'}$, $y_R - y_{R'}$ を夫々組合せて2組の測定ブリッジを形成しており、波力による受感桿の x 方向、 y 方向の歪みをストレインゲージで検出し2組のブリッジ回路の不平衡電圧変化としてとりだし、記録計により作用波力の x 方向および y 方向2成分を同時に連続的に記録するものである。

図-3-7において各符号は下記の通りである。

$X_s, X_{s'}$: 受感桿 x 方向撓み検出用ストレインゲージ (1000 Ω ポリエステルゲージ)

$Y_s, Y_{s'}$: 受感桿 y 方向撓み検出用ストレインゲージ (1000 Ω ポリエステルゲージ)

$x_R, x_{R'}$: x 方向測定ブリッジのダミー抵抗 (1000 Ω 固定抵抗)

$y_R, y_{R'}$: y 方向測定ブリッジのダミー抵抗 (1000 Ω 固定抵抗)

定抵抗)

e_i : 測定電源 (定電圧直流電源)

e_x, e_y : x 方向, y 方向測定ブリッジ出力電圧

VR_{out} : 出力調整抵抗

VR_x, VR_y : ブリッジ零バランス調整抵抗

r_R : 固定抵抗

(3) 測定回路の検討

本器は受感桿の歪検出用にストレインゲージを使用している。従って測定回路上の問題として、ストレインゲージを使用した一般の装置と同様なことがあげられる。しかしながらそれらの問題点が測定値におよぼす影響はデータの活用上要求される精度に較べて小さく、そのほとんどは測定原理、構造並びに測定回路の構成により実用上無視しうる程度である。以下個々の問題について本器の場合どのような影響があるか述べる。

(a) 温度変化による受感桿の歪の影響

受感部が温度変化を受けると、検出円筒は伸縮しこれに貼りつけられているゲージの抵抗は変化する。この場合の影響は次のように考えられる。図-3・8に示すブリッジ回路においてその平衡条件は $R_1R_3=R_2R_4$ で与えられる。いま R_1 および R_2 が温度変化により $(R_1+\Delta R_1)$ および $(R_2+\Delta R_2)$ に変化しても $R_1=R_2$, $\Delta R_1=\Delta R_2=\Delta R$ であれば $(R_1+\Delta R)R_3=(R_2+\Delta R)R_4$ でブリッジの平衡は得られる。本器の場合 R_1, R_2 は受感桿検出円筒に貼りつけられた同一抵抗値のゲージであり図-3・9に示すように受感桿の軸方向とゲージの軸方向が同一であるように貼られている。従って温度によるゲージ抵抗の変化は $\Delta R_1=\Delta R_2$ となり R_1, R_2 は測定用ゲージであると同時に、一つのゲージは他のゲージに対して補償として働き受感桿の伸縮による影響はとり除かれ、問題とはならない。

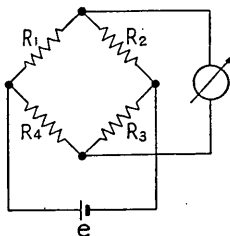


図-3・8 ホイートストンブリッジ

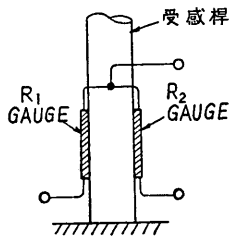


図-3・9 ストレインゲージ貼付説明図

(b) ゲージの温度変化による影響

ゲージ抵抗 R , 抵抗温度係数 α , ゲージ率 F_A のストレインゲージにおいて、温度変化が ΔT であったとす

れば誤差 ϵ は

$$\epsilon = \frac{\Delta R}{R} / F_A = \frac{R \cdot \alpha \cdot \Delta T}{R} / F_A \quad (3-3)$$

で示される。従ってゲージ R_1, R_2 間に温度差があれば上式で表わされるようなみかけ上歪に相当する誤差が生じることになるが本器ではゲージ R_1, R_2 は同一の検出円筒に貼付けられており、貼付け部分は水密容器により外部と遮断されているから、ゲージ間の温度差は殆んど考えられない。また全体的に温度変化を示す場合には R_1, R_2 の抵抗変化は同じであり、①の場合と同様測定上の問題とはならない。

ブリッジの R_3, R_4 辺については同様の理由から、同質の抵抗を同一の基盤上に取付けて両者間に温度差が生じるのを防いでいる。

(c) リード線 (ケーブル) の抵抗および温度変化による影響

本器の測定ブリッジ回路はリード線 (ケーブル) を含めて考えれば図-3・10のようなになる。 R_1, R_2 は検出円筒に貼りつけられたゲージの抵抗, R_3, R_4 はブリッジの固定辺を形成する抵抗, r_1, r_2 は受感部と陸上の測定回路を接続するケーブルの抵抗, r_3, r_4 および r_5 は陸上測定回路の配線抵抗, r_6 は記録計の内部抵抗, e_s は電源, r_s は電源の内部抵抗である。このうち r_3, r_4, r_5 の各抵抗は極く小さい値であり、また r_s は電源として定電圧電源を用いているので実質上零に近い値と見做しうるのでこれらを見れば図-3・11のように示される。

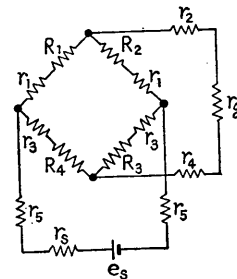


図-3・10 リード線を含めた測定系ブリッジ回路

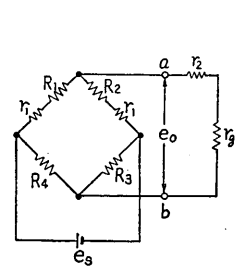


図-3・11 一部の抵抗を無視した場合のブリッジ回路

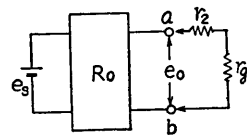


図-3・12 図3-11の等価回路

図-3・11で r_2 および r_6 を切離して端子 a-b からみ

定置式波向計（抵抗歪線型）の開発

たブリッジの合成抵抗 R_0 は

$$R_0 = \frac{(R_1+r_1)(R_2+r_1)}{(R_1+r_1)+(R_2+R_1)} + \frac{R_3R_4}{R_3+R_4} \quad (3-4)$$

となり、このときの a-b 間の電圧 e_0 は

$$e_0 = \frac{(R_1+r_2)R_3 - (R_2+r_1)R_4}{(R_1+r_1+R_2)(R_3+R_4)} e_s \quad (3-5)$$

で示される。

ここで図-3-11について等価回路を考えれば図-3-12のようになる。いま a-b 端子に r_2, r_g を接続すれば負テブナンの定理から r_g の両端の電圧 e_g は

$$e_g = \frac{r_g}{R_0+r_g+r_2} e_0 \quad (3-6)$$

となる。

ここで、ケーブルの抵抗 r_1, r_2 を無視した場合を考えると、端子 a-b からみたブリッジの抵抗 R_0' は式から解るように $R_0 > R_0'$ となり、 $r_2 = 0$ 。

従って式 3-6 は次のようになる。

$$e_g = \frac{r_g}{R_0'+r_g} e_0 \quad (3-7)$$

このように、ケーブル抵抗によってブリッジの出力は変化するが、本器の場合は原理上波力の絶対値を知るものではなく x, y 水平方向 2 成分の相対的な大きさを知るものであるから、 x, y の二つのブリッジの感度の間に差がなければ問題にはならない。 x, y 両ブリッジに使用されるケーブルは同一のものであり、従ってケーブル抵抗による影響は無視できる。

またケーブル抵抗の温度変化による誤差は僅かであり、上述の理由からいっても問題とはならない。

(d) ゲージの絶縁不良による影響

検出円筒に貼付けられたゲージの絶縁抵抗が変化するとみかけ上歪に相当する抵抗変化を生じ記録上の零点の漂動となり、またゲージ感度も低下する。

いまゲージのベースの絶縁性が低下して $10M\Omega$ になったとすると、この抵抗はゲージ抵抗に並列抵抗として加わることになり、ゲージの抵抗を 1000Ω とすると、その合成抵抗 R_0 は

$$R_0 = \frac{1000 \times 10 \times 10^6}{1000 + 10 \times 10^6} = 999.9 \quad (3-8)$$

となり、ゲージ抵抗が 0.1Ω 小さくなったことになる。ゲージ率 $F_A = 2.00$ とすれば見かけ歪は次のように求められる。

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{1}{F_A} \cdot \frac{\Delta R}{R} = 50 \times 10^{-6} \quad (3-9)$$

ただし l ; ゲージの自然長, Δl ; ゲージの変化した長さ, R ; ゲージ抵抗, ΔR ; ゲージ抵抗の変化量,

したがってゲージの絶縁抵抗が無量大から $10M\Omega$ に低下すると、記録上の零点は歪にして約 50×10^{-6} だけ移動する。

また絶縁抵抗が $10M\Omega$ に低下したゲージの感度 K_s は歪が ϵ_s のとき絶縁が無量大の場合に比べて

$$K_s = \frac{999.9}{1000} \epsilon_s = 0.9999 \epsilon_s \quad (3-10)$$

となる。一般にゲージの絶縁低下は長い時間の間に生ずるから、本器のように偏位法により短時間ごとの測定をする場合には、極端な絶縁低下のある場合を除き殆んど無視できる。また x, y いずれか一方のブリッジの零点の移動は現象として受感部に波力以外の定常流が作用した場合と同じ結果になるが波力の作用方向のみを求めるときは原理上問題とならない。しかし極端な絶縁抵抗の低下はゲージ感度の低下、回路雑音の発生などの原因となり、誤差を生じることになる。回路の絶縁抵抗は通常 $100M\Omega$ 以上が望ましく、最低数 $10M\Omega$ 程度に保持される必要がある。

(a) 出力の直線誤差

単辺のストレインゲージによる測定の場合には、歪の大きさおよび測定回路の構成によって、出力の直線性が失われ誤差を生じることとなるが、本器の場合はブリッジ回路であり、測定は 2 ゲージ法を使用していることと最大歪は 2 ゲージ法で約 $\pm 2500 \times 10^{-6}$ 程度であり、出力の直線誤差は問題とならない。

3.3 波向の算定方法

水中に固定された球体に作用する波力は、二次元の波の作用下では次のようにあらわされる¹³⁾。

$$F = -\frac{C_D \omega}{2g} (\pi r^2) \cdot V |V| + \frac{C_M \omega}{g} \left(\frac{4\pi}{3} r^3 \right) A \quad (3-11)$$

ここに F : 波力 V : 水粒子の速度
 A : 水粒子の加速度 r : 球体の半径
 ω : 海水の単位体積重量 g : 重力の加速度
 C_D : 抵抗係数 C_M : 質重係数

従って波力の x および y 成分は次のようにあらわされる。

$$\left. \begin{aligned} F_x &= -\frac{C_D \omega}{2g} (\pi r^2) V_x |V| + \frac{C_M \omega}{g} \left(\frac{4}{3} \pi r^3 \right) A_x \\ F_y &= -\frac{C_D \omega}{2g} (\pi r^2) V_y |V| + \frac{C_M \omega}{g} \left(\frac{4}{3} \pi r^3 \right) A_y \end{aligned} \right\} (3-12)$$

ここに、 F_x : 波力の x 成分, F_y : 波力の y 成分
 V_x : 水粒子速度の x 成分

V_y : 水粒子速度の y 成分
 A_x : 水粒子加速度の x 成分
 A_y : 水粒子加速度の y 成分
 $V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2}$

実際の海の波は、波高、周期、波向、および位相の異なる無数の波の重ね合わさったものと考えられるので、測定される F_x, F_y は方向スペクトルをもつ波により水中の球体に作用する波力の x および y 成分である。

Pierson¹⁴⁾ によると、任意の地点 x, y における時刻 t の海面 $\eta(x, y, t)$ は次のようにあらわされる。

$$\eta(x, y, t) = \int_0^\infty \int_0^{2\pi} \sqrt{4p(f, \theta)} d\theta df \cos(kx \cos \theta + kysin \theta - 2\pi ft + \phi) \quad (3-13)$$

ここに、 $p(f, \theta)$: 方向スペクトル密度、 k : 波数 = $\frac{2\pi}{L}$ 、 ϕ : ランダムな位相

著者の一人¹⁵⁾は、同様の表現を球体に作用する波力の x および y 成分に適用して波力のパワースペクトル密度、 x 方向と y 方向の波力のクロススペクトル密度を求めている。この際、波力公式における非線形項 $|V|V$ を CV で近似し、方向スペクトル密度は次式であらわされるとしている。¹⁶⁾

$$p(f, \theta) = p\eta(f) \frac{e^{a \cos(\theta - \tau)}}{2\pi I_0(a)} \quad (3-14)$$

ここに $p\eta(f)$; 表面波のパワースペクトル密度
 θ ; 個々の波の波向
 τ ; 最も多くの波のエネルギーが進む方向
 a ; θ の τ への集中度を表わす定数
 $I_0(a)$; 変形された第一種のベッセル関数

表面波の波向を上式の τ と同様に定義し、最も多くの波のエネルギーが進む方向とすると、 τ は次式で求められる。

$$\sin 2\tau = \frac{2p_{F_x F_y}(f)}{\sqrt{\{p_{F_x}(f) - p_{F_y}(f)\}^2 + \{2p_{F_x F_y}(f)\}^2}}$$

ここに $p_{F_x F_y}(f)$; F_x と F_y のクロススペクトル密度
 $p_{F_x}(f)$; F_x のパワースペクトル密度
 $p_{F_y}(f)$; F_y のパワースペクトル密度
 クロススペクトル密度は一般には実部と虚部とからなり、通常実部は Co-spectraum, 虚部は Quadrature-spectrum と呼ばれるが、上式を導く時には F_x, F_y をガウス分布にしたがうものとしており、Quadrature-spectrum を零としているので実部のみをとるものとする。一般には Quadrature-Spectrum は零とならないようであるので、この仮定は解析法における基本的な誤差

の原因となろう。式 (3-15) において、右辺は全て波向計の実測値から計算可能であり、 τ は周波数 f 毎に求められるから、波向はそれが観測された時間内に観測される表面波の周期毎に得られる。

卓越波向が複数の場合にもそれぞれの卓越波向を求めることができる。但し、卓越波向が異っていても卓越周期がほぼ等しいときには、夫々の波向を判定することは不可能となる。

この解析方法の精度については既存の模型実験では検討することは出来ないが、電子計算機を用いたシミュレーションや実体写真法による精度の高い連続観測による現地データの積重ねにより検討されるべきであろう。

4. 水路実験

定置式波向計（抵抗歪線型）と同様の原理の流速計が考案された例があるが、実験の内容は明確ではない。Harleman¹⁷⁾ 等は係留索で海底に固定された水中の球体の運動を研究する際に棒の一端に固定された球体に作用する波力の実験を行っている。また椎貝および河野¹⁸⁾も同様の実験を行っている。Grace¹⁹⁾ 等は現地用波力計として使用した。

前述のごとく、海中の球に作用する波力を方向スペクトルをもつ波によるものとする場合には、水槽による模型実験は現在のところ不可能である。したがって水路実験およびその他の特性試験としては、静的外力による実験、定常流を用いた実験、および二次元の波動中の実験を実施した。

4.1 固有振動数

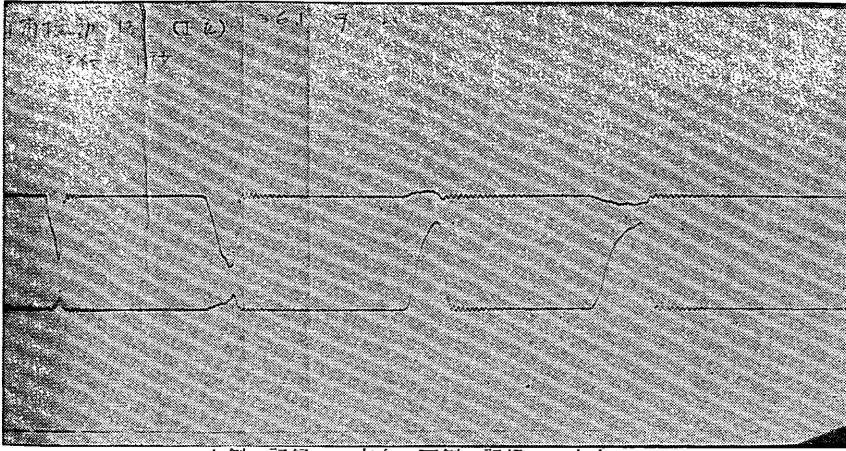
この波向計の受感部は一端を固定された棒の自由端に固定された球体であるが、これらは一体となって一つの振動系を構成している。

この系の振動特性を検討するために、試作された現地用波向計について空中および水中での固有振動数を実験的に求めた。

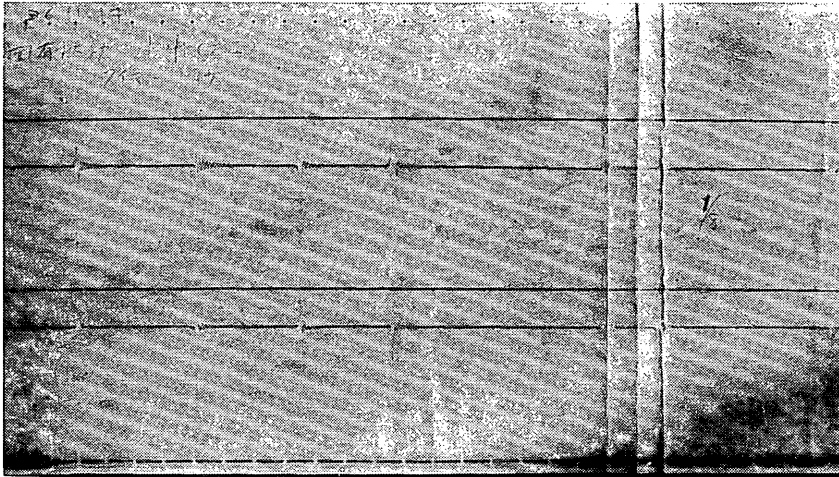
空中での実験においては水平方向に手で荷重をかけ瞬間的に手を離して自由振動させ、このときの歪量を電磁オシログラフで記録した。空中での自由振動の記録例は写真-4・1に示すとおりで固有振動数はおよそ 16Hz であった。

水中での固有振動数は、水圧式波高計（摺動抵抗型）の安定輪に波向計下端を固定し、当所水工部の大型実験水路に沈め、受感部を、空中の場合と同様、手で水平方向に押し急いで手を離し、自由振動させて振動状況を記

定置式波向計（抵抗歪線型）の開発



上側の記録…x方向, 下側の記録…y方向
写真-4.1 大気中での自由振動記録例



上側の記録…x方向, 下側の記録…y方向
写真-4.2 水中での自由振動記録例

録した。自由振動の記録例を写真-4.2に示す。水中での固有振動数はおよそ 8Hz であった。

今棒の重量を無視して球の質量を m 、棒のバネ定数を k_1 とすれば、空気中での自由振動は次式であらわされる。

$$m \frac{d^2 \lambda}{dt^2} + k_1 \lambda = 0 \quad (4-1)$$

ここに λ : 球の静止位置からの変位量
式 (4-1) から空気中での系の固有振動数 ω_A は次式であらわされる。

$$\omega_A = 2\pi f_A = \sqrt{\frac{k_1}{m}} \quad f_A; \text{ Hz 単位の振動数} \quad (4-2)$$

水中での自由振動については、水の抵抗力が加わるので振動方程式は

$$m \frac{d^2 \lambda}{dt^2} + \mu \frac{d\lambda}{dt} + k_1 \lambda = 0 \quad (4-3)$$

となる。

この場合の固有振動数 ω_W は

$$\omega_W = 2\pi f_W = \sqrt{\frac{k_1}{m} - \frac{\mu^2}{4m^2}} \quad f_W; \text{ Hz 単位の振動数} \quad (4-4)$$

であらわされる。減衰係数 $\xi = \frac{\mu}{2\sqrt{k_1 m}}$ を用いれば

$$\omega_W = \omega_A \sqrt{1 - \xi^2}$$

となり、減衰係数は空気中の固有振動数 ω_A と水中での固有振動数 ω_W を用いて次のようにあらわされる。

$$\xi = \sqrt{1 - \left(\frac{\omega_W}{\omega_A}\right)^2} \quad (4-5)$$

さて次に波が作用する場合を考える。波を周期 T_0 、

振巾 F_0/k_1 の正弦波と考えれば、振動方程式は次のようになる。

$$m \frac{d^2 \lambda}{dt^2} + \mu \frac{d \lambda}{dt} + k_1 \lambda = F_0 \sin \omega_0 t \quad (4-6)$$

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T_0}$$

自由振動の項は比較的短時間に減衰して、ある時間後には強制振動の項のみが重要となる。この式を λ について解くと、

$$\lambda = \frac{F_0}{\sqrt{(k_1 - m\omega_0^2)^2 + \mu^2 \omega_0^2}} \sin(\omega_0 t - \varphi) \quad (4-7)$$

$$\tan \varphi = \frac{\mu \omega_0}{k_1 - m\omega_0^2}$$

となる。したがって強制振動の項のみによる振動の振巾は

$$\frac{F_0}{\sqrt{(k_1 - m\omega_0^2)^2 + \mu^2 \omega_0^2}}$$

となり、これを書き変えると、

$$\frac{F_0}{k_1 \sqrt{\left(1 - \frac{\omega_0^2}{\omega_A^2}\right)^2 + \left(\frac{\omega_0}{\omega_A}\right)^2 (2\xi)^2}}$$

となる。 F_0/k_1 は空気中で水平静荷重 F_0 が作用したときの球の変位であるから、球に水平静荷重が作用した場合の変位 λ_0 と周期 T_0 の振巾 F_0/k_1 の正弦波外力が作用した場合の振巾、 λ_0 との比は

$$\frac{\lambda_{st}}{\lambda_0} = \sqrt{\left(1 - \left(\frac{\omega_0}{\omega_A}\right)^2\right)^2 + \left(\frac{\omega_0}{\omega_A}\right)^2 (2\xi)^2} \quad (4-8)$$

となる。

この波向計に作用する波力の周期として周期3秒を考え、前述の f_A , f_w の実験結果を用いて λ_{st}/λ_0 の値を計算すると

$$\frac{\lambda_{st}}{\lambda_0} = 1.002$$

となる。波力の周期が3秒以上の場合には $\frac{\lambda_{st}}{\lambda_0}$ は1.002より小さく、かつ、1.0より大きいから、波による球の変位量と静的荷重による変位量は全く等しいと考えて良いであろう。また位相のずれは、式(4-7)を用いて、 $T_0=3$ 秒の場合約 2° 、それより大きな周期の外力に対しては 2° 以下となる。

以上の実験結果およびその考察結果に基づき次に静的な荷重による特性試験を実施した。

4.2 静荷重による特性試験

4.1の実験の結果、本器の受感部の静的外力による変位と波による変位が等しいことが明らかとなったので、

次に静的外力を加えた場合の変位の直線性の問題と方向測定精度を試験した。

抵抗歪線ゲージは検出円筒の側面に 90° ずつの間隔で円筒の軸方向と平行に貼付けられるが、任意の方向に力が作用した場合に、 x 方向および y 方向に対して外力の作用方向に対応する歪量が検出されることを確認するわけである。

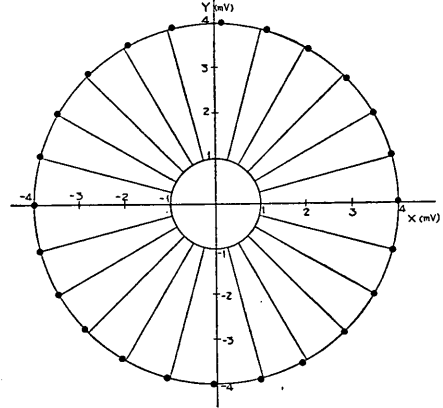


図-4-1 静荷重による特性試験結果、方向測定精度

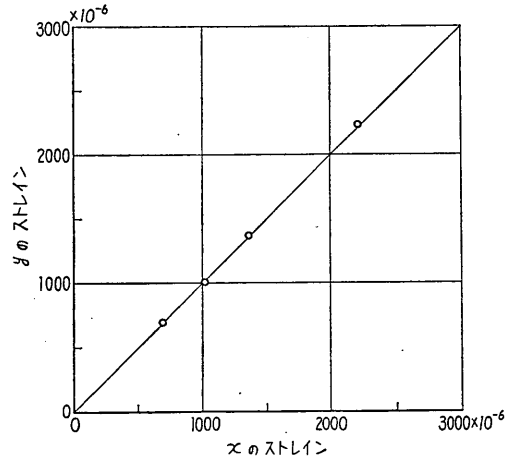


図-4-2 静荷重による特性試験結果、直線性

実験は円板の中心部を切り取りこの中心に波向計受感球が位置するようにセットし、一定の水平荷重を受感球頂部にかけた。すなわち、受感球頂部から、方位盤の縁に取付けられた滑車を通して一定の重さの分銅をぶら下げた。方位盤上には 15° ずつの目盛を刻んでおき、水平荷重の作用方向を 15° ずつずらしてゆき、各方位での x 方向、 y 方向の歪量を記録した。

これらの歪量に相当する量を $x-y$ 座標上にプロット

定置式波向計（抵抗歪線型）の開発

したものが図-4・1である。

従って

$$\theta = \tan^{-1} \frac{y}{x} \quad (4-9)$$

から球体に作用した外力の向きが求められ、外力が等しい場合にはこれらの点は原点を中心とする正しい一つの円になるはずである。図-4・1はこれらの点がほぼ正しい円周上に位置していることを示しており、方向に対する測定精度は十分であると考えられる。

次に同一方向の外力に対する歪量の直線性について検討した。

方向に対する応答特性は一樣と考えられるから、ここでは一方向についてのみ、結果を例示する。

図-4・2は水平荷重を変えた場合の x 方向、y 方向の歪量を x-y 座標平面にプロットしたものであり、極めて

良い直線性をもっているといえよう。

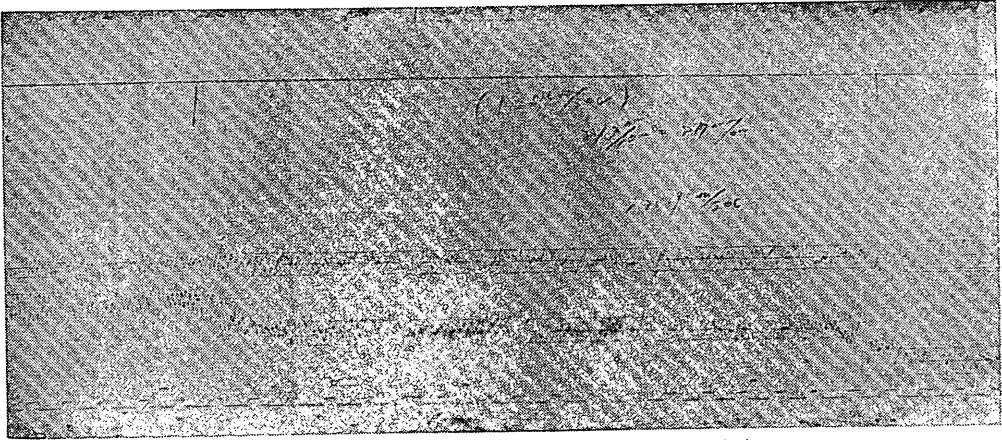
歪量と外力の関係から、この波向計により波向測定可能な波の諸元を求めることもできる。ゲージや材質の選定の仕方により測定可能な波の諸元は変化する。

4.3 流れの中での変位

本器を流水中に入れた場合には、流れによる力を受けてそれに相当する歪が生ずる。この歪量は流れの速度の2乗に比例するが、比例定数は球面の性質、球の直径等により変化する。

流れの中での変位の実験は通産省流速計検定所の水槽で実施した。この水槽の側壁上部にはレールが敷かれており、このレールの上に一定速度で走行する台車が乗せられている。波向計は台車に球を下に向けて垂直に取付けられ、記録計も台車の上にセットされた。

この実験の記録例を写真-4・3に示す。この写真から明



上側の記録… x 方向・下側の記録… y 方向、流速130cm
写真-4・3 定常流の中での波向計の記録例

らかなように、記録には周期の小さい振動が出ているが、これらの平均値として一定流速に対応する歪量を求めた。この短周期の変動は台車の振動、記録計として使用した電磁オシログラフのガルバノメータの振動、波向計の振動が合成されたものであろうが、これらについては解析未了である。

実験結果を記録紙上の振巾と流速についてプロットすると図-4・3のようになる。流速を記録紙上の振巾の平方根に対してプロットすると図-4・4になり流れによる歪量が流速の2乗に比例することが明らかである。

4.4 波動中の挙動

二次元水路の中での波向計の挙動は波向が一定と考えられるので、波向計を固定すれば x 方向の歪量、y 方向の歪量は一定の周期で繰返す。また波向計を受感桿軸の

まわりに回転させ波の作用方向を変えると、それに応じて x 方向、y 方向の歪量は変化する。

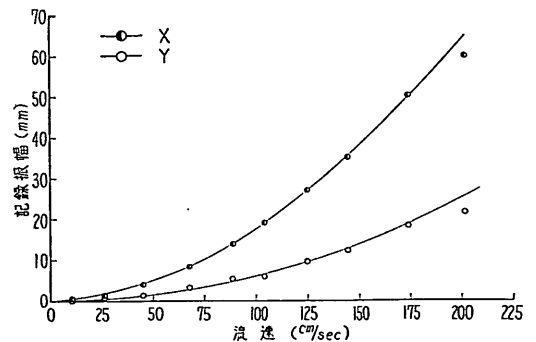


図-4・3 定常流の流速と歪量の関係

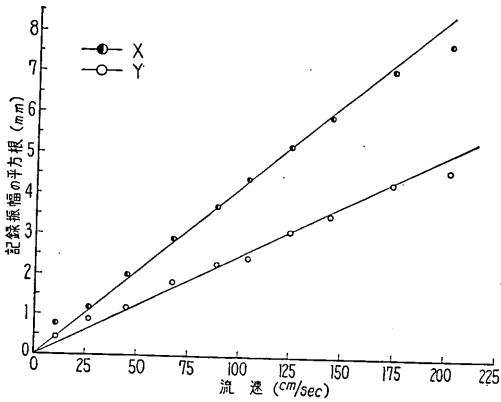
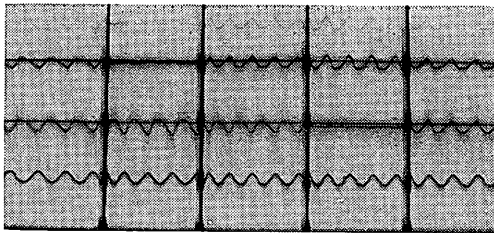
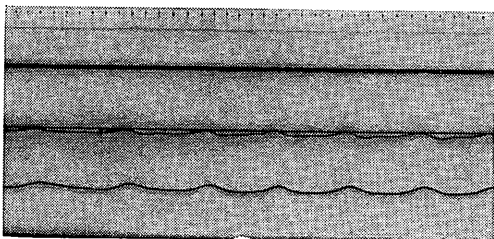


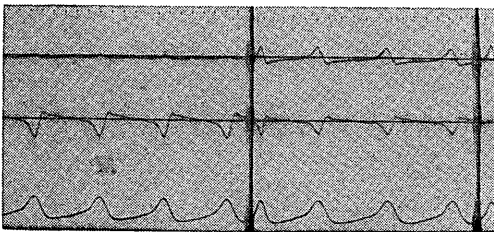
図-4.4 定常流の流速と歪量の平方根の関係



(a)
H=55cm, T=3sec
上段の記録-波向計 x 方向
下段の記録-波向計 y 方向
下段の記録-実験用抵抗線型波高計

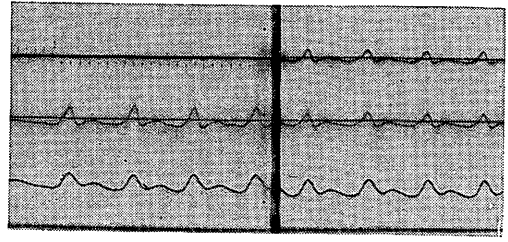


(b)
H=20cm, T=5.5sec



(c)
H=80cm, T=6sec

写真-4.4-(a)は周期3.0sec, 波高55cm, 水深約100cmの場合について波力のx, y方向および実験用抵抗歪線



(d)
H=60cm, T=7sec

写真-4.4 (a)~(d) 波動中の波向計の記録例

型波高計で同時に測定された波形例を示す。波向計を受感桿軸のまわりに45°ずつ回転させて、その時の波力を記録したものである。上段の記録で明瞭な波形が描れていない部分は波がx,y座標上のy軸上の正の方向から作用している場合である。右端の記録は第三象限の45°方向から波が作用している場合でx方向,y方向にずれの記録も波の位相と合っている。

写真-4.4-(b)は波高20cm, 周期5.5secでy軸上の負の方向から波を作用させたものである。

写真-4.4-(c)は波高80cm, 周期6secの波を作用させた例であり, 右側の記録はx,y座標上の第二象限の45°の方向から波が作用している場合である。

写真-4.4-(d)は波高60cm周期7secの波が作用した場合の記録例である。

波高が大きく, 周期が短い場合には波形記録に若干の短周期振動が見られるが実用上問題はないと考えられる。

5. 現地観測データ例

4.には, 本器の特性に関する若干の水路実験結果を示したが, 実際に現地海岸で波向観測を行う場合には, 個々の波向計の特性について検定を行う必要がある。本章では現地用波向計の検定方法を詳述し, 現地観測データの数例を示す。

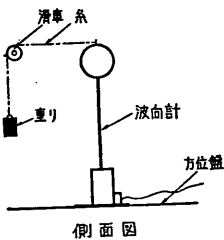
5.1 波向計の検定方法

この波向計は3.1測定原理で述べたように, 波力を受けて撓む受感桿基部の歪を水平方向2成分として測定し, その作用方向を求め波向を求めるものである。従って受感桿は, 一定の大きさの荷重に対して, 全周囲に亘って同一の歪が生じるものが要求される。また受感桿基部に貼られる歪検出用の4枚のスレインゲージは検出円筒の側面四冊に同一条件で(同一高さをもって, その軸方向中心が互に直角に位置するように)正確に貼りつけられる必要がある。

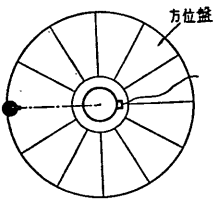
定置式波向計（抵抗歪線型）の開発

しかし実際には常にこのような条件に適合したものを得ることは材質および工作技術上困難な点も多いので、現地に設置する前に、方位検出確度を検定によって確認することが必要である。

検定方法としては、水中において波力を作用させて行う動的方法と空中において一定荷重をかけて行う静的方法が考えられるが、実際上動的な方法は大規模な検定装置を要することとなり、4.1でも述べたように静的方法によっても問題は無いと判断されるので検定は全て静的方法によって行っている。



側面図

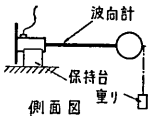


平面図

図-5-1 検定方法説明図
(波向計直立)



側面図



平面図

図-5-2 検定方法説明図
(波向計水平)

我々は静的な検定方法として次に述べる2つの手法を用いたが、いずれも本質的に差異はない。

その一つは、図-5-1に示すように水平面上に角度を目盛った方位盤をおき、この中心に波向計を立て方位盤の各角度方向に一定の水平荷重をかけ、各角度毎の波向計の出力を測定する方法であり、他の一つは図-5-2のように波向計基板裏面に、受感桿の軸を中心として角度を目盛った方位盤を貼りつけ、波向計を横にして水平に置

き、受感桿の先端に一定重量の分銅を糸で吊して荷重をかけ、波向計を受感桿軸のまわりに回転させて各角度方向の出力を測定する方法である。

このようにして求められた出力値を直交座標上にプロットすれば円形方位グラフの検定曲線が得られる。図-5-3に検定曲線の一例を示す。このとき出力値は前述のように受感桿の材質が均一で加工が正確になされ、ストレインゲージの貼りつけが正しく行われていれば、座標の原点を中心として正しく一つの円周上にプロットされ、対応する各点を結んだ線の交点は座標の原点と一致するが、もし前述の条件が満たされていない場合（不良な製品の場合）出力は楕円状にプロットされたり、対応点を結んだ線の交点は座標原点からはずれたりする。

上述のような場合、プロットした各点が楕円状に分布しても、対応点を結んだ線の交点が座標原点と一致する場合には、 x 方向、 y 方向のブリッジの出力を増減して両ブリッジの出力を同一レベルになるように調整することにより、正しい測定を行うことができるが、対応する各点を結んだ線の交点が原点と一致しない場合には測定上の誤差はさげられない。

この検定は、波向計の方位検出確度を求めると同時に、測定データを解析する場合に必要な波向計の設置方位、波力の作用方向と測定出力の極性の関係を知るために使用される。

5.2 現地観測データ例

写真-5-1～5-3に現地観測データ例を示す。

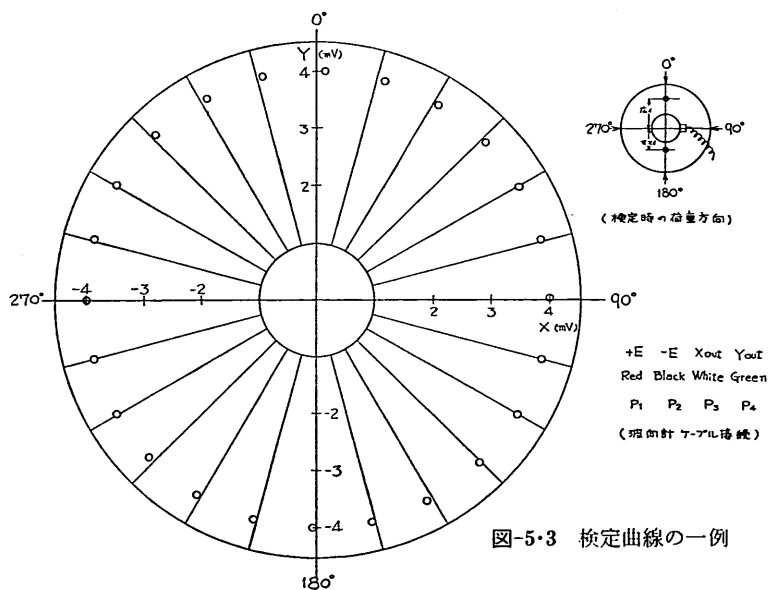


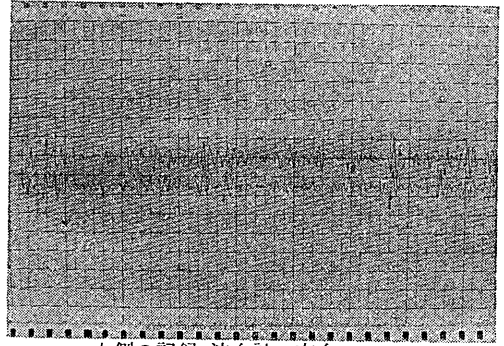
図-5-3 検定曲線の一例

写真-5・1は久里浜港内の水深約6mの地点に設置された第一号機による昭和38年6月14日の記録例である。

写真-5・2写真は酒田港外の水深約8.5mの地点に設置された波向計による昭和40年11月14日の記録例である。下段は同時刻に観測された水圧式波高計(P.W)による波浪記録であり、波高は有義波高でおよそ3mであった。波向計の記録には若干の短周期振動が見られるが実用上問題とはならないであろう。

写真-5・3は金沢港外の水深約10mの地点に設置された波向計による昭和43年9月30日の記録例である。

これらの記録と4.4で示した二次元水路での実験により得られた記録(写真-4・4-(a)~(d))を比較すると、後者は波力の変化が規則的であるのに反し、現地観測データは波形も不規則であり、x方向、y方向の記録間の位相の関係も極めて不規則である。この事実は現地海岸における波の波力の方向、大きさが極めて不規則であることを示すものである。



上側の記録-波向計y方向,
下側の記録-波向計x方向
写真-5・3 金沢港における観測記録例

6. 簡易法による波向の算定

前述した通り3.3の方法により、この波向計のデータから表面波の各周波数毎の卓越波向を算定することができるが、スペクトル解析法による場合には高速電子計算機が必要であり、記録もデジタル化されたものが要求される。しかしながら特別な場合については以下に述べるように従来の波高計のアナログ記録の解析処理程度の作業で波向、 τ 、を求めることが可能である。

6.1 簡易法による波向の算定理論

3.3と同様、波力公式において非線形項を線形近似して方向スペクトルをもつ波力 F_x, F_y の自己相関関数を計算すると次のようになる¹⁵⁾。

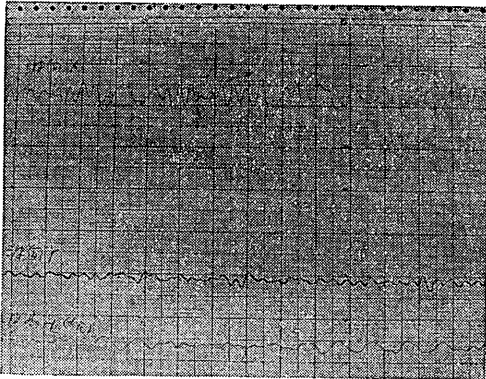
$$\left. \begin{aligned} C_{F_x}(f) &= 2 \int_0^\infty \int_0^{2\pi} (C_D'^2 + C_M'^2) p(f, \theta) \cos^2 \theta \cos(2\pi f \tau) d\theta df \\ C_{F_y}(f) &= 2 \int_0^\infty \int_0^{2\pi} (C_D'^2 + C_M'^2) p(f, \theta) \sin^2 \theta \cos(2\pi f \tau) d\theta df \end{aligned} \right\} (6-1)$$

上式において $\tau=0$ とおくと F_x, F_y の分散 σ_x^2 および σ_y^2 が次のように求められる。

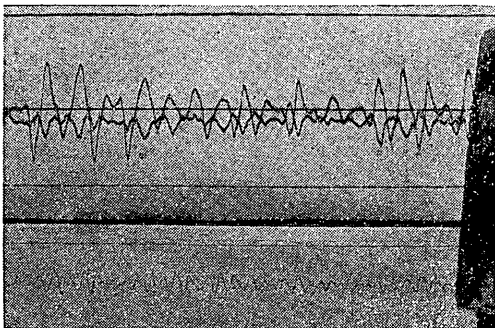
$$\left. \begin{aligned} \sigma_x^2 &= 2 \int_0^\infty \int_0^{2\pi} (C_D'^2 + C_M'^2) p(f, \theta) \cos^2 \theta d\theta df \\ \sigma_y^2 &= 2 \int_0^\infty \int_0^{2\pi} (C_D'^2 + C_M'^2) p(f, \theta) \sin^2 \theta d\theta df \end{aligned} \right\} (6-2)$$

ここに C_D' および C_M' は次式であらわされるものである。

$$\left. \begin{aligned} C_D' &= C_D \times \frac{\omega}{2g} \cdot \pi r^2 \cdot V_{1ms} \sqrt{\frac{8}{\pi}} \left(\frac{\cosh kR_h}{\sinh kh} \right) \\ & \quad (2\pi f) \\ C_M' &= C_M \times \frac{\omega}{g} \left(\frac{4}{3} \pi r^3 \right) \cdot \left(\frac{\cosh kR_h}{\sinh kh} \right) \\ & \quad (2\pi f)^2 \end{aligned} \right\} (6-3)$$



上側の記録-波向計x方向,
中側の記録-波向計y方向,
下側の記録-波高計(S.G.W)
写真-5・1 久里浜港における観測記録例



上段上側の記録-波向計y方向
上段下側の記録-波向計x方向
下段の記録-波高計(P.W)
写真-5・2 酒田港における観測記録例

定置式波向計（抵抗歪線型）の開発

V_{rms} ; 一次元スペクトルから求められる水粒子速度の標準偏差

R_h ; 海底から波向計の球体中心までの高さ

h ; 水深

ここで方向スペクトル密度, $p(f, \theta)$ に式(3-14)の関係を仮定して上式に代入して計算すると, F_x の分散について

$$\sigma_x^2 = 2 \int_0^{2\pi} h(\theta) \cos^2 \theta \left\{ \int_0^\infty (C_D'^2 + C_M'^2) p\eta(f) df \right\} d\theta \quad (6-4)$$

となり { } の中には θ を含まないので周波数 f について積分可能とすると, 定数になり次のようにおける。

$$C_f = \int_0^\infty (C_D'^2 + C_M'^2) p\eta(f) df \quad (6-5)$$

したがって式6-4は

$$\begin{aligned} \sigma_x^2 &= 2 \cdot C_f \int_0^{2\pi} h(\theta) \cos^2 \theta d\theta \\ &= 2 \cdot C_f \int_0^{2\pi} \frac{e^{a \cos(\theta-\gamma)}}{2\pi I_0(a)} \cos^2 \theta d\theta \\ &= \frac{C_f}{2\pi I_0(a)} \int_0^{2\pi} e^{a \cos(\theta-\gamma)} (\cos 2\theta + 1) d\theta \quad (6-6) \end{aligned}$$

となる。

$\theta - \gamma = \beta$ とすると $\theta = \beta + \gamma$, $d\theta = d\beta$ であるから式(6-6)は

$$\sigma_x^2 = \frac{C_f}{2\pi I_0(a)} \int_{-\gamma}^{2\pi-\gamma} e^{a \cos \beta} \{ \cos(2\beta + 2\gamma) + 1 \} d\beta \quad (6-7)$$

上式の { } の中には $\cos 2\beta \cos 2\gamma - \sin 2\beta \sin 2\gamma + 1$ であるから

$$\begin{aligned} \sigma_x^2 &= \frac{C_f}{2\pi I_0(a)} \left[\cos 2\gamma \int_{-\gamma}^{2\pi-\gamma} e^{a \cos \beta} \cos 2\beta d\beta \right. \\ &\quad \left. - \sin 2\gamma \int_{-\gamma}^{2\pi-\gamma} e^{a \cos \beta} \sin 2\beta d\beta + \int_{-\gamma}^{2\pi-\gamma} e^{a \cos \beta} d\beta \right] \quad (6-8) \end{aligned}$$

第二項は 0 になり, $e^{a \cos \beta}$ の対称性から

$$\begin{aligned} \sigma_x^2 &= \frac{C_f}{\pi I_0(a)} \left[\cos 2\gamma \int_0^\pi e^{a \cos \beta} \cos 2\beta d\beta \right. \\ &\quad \left. + \int_0^\pi e^{a \cos \beta} d\beta \right] \quad (6-9) \end{aligned}$$

式(6-9)の [] の中の第一項は $\pi I_2(a) \cos 2\gamma$, 第二項は $\pi I_0(a)$ になるから

$$\sigma_x^2 = C_f \left[1 + \frac{I_2(a)}{I_0(a)} \cos 2\gamma \right] \quad (6-10)$$

同様に F_y の分散 σ_y^2 は

$$\sigma_y^2 = C_f \left[1 - \frac{I_2(a)}{I_0(a)} \cos 2\gamma \right] \quad (6-11)$$

となる。式(6-10), (6-11)から $\cos 2\gamma$ を求めると

$$\cos 2\gamma = \frac{I_0(a)}{I_2(a)} \times \frac{(\sigma_x^2 - \sigma_y^2)}{(\sigma_x^2 + \sigma_y^2)} \quad (6-12)$$

となるが, a の値が求められなければ γ を決定することはできない。

a の値が大きい場合には

$$I_2(a) \approx I_0(a) \quad (6-13)$$

が成立することを考えて σ_x^2 と σ_y^2 の比をとってみると,

$$\frac{\sigma_y^2}{\sigma_x^2} = \frac{1 - \frac{I_2(a)}{I_0(a)} \cos 2\gamma}{1 + \frac{I_2(a)}{I_0(a)} \cos 2\gamma} \quad (6-14)$$

となり (6-13) が成立する場合には γ を次のようにあらわすこともできる。

$$\tan \gamma = \sqrt{\frac{1 - \cos 2\gamma}{1 + \cos 2\gamma}} = \sqrt{\frac{\sigma_y^2}{\sigma_x^2}} \quad (6-15)$$

従って γ の値は F_y と F_x の標準偏差の比として近似的に求められ, 近似の精度は a の大きさおよび γ の値によって決定されることになる。

a の大きい場合というのは波のエネルギーの進む方向が一つの方向に進中している場合でうねりのような例である。

今種々の a および γ について γ' を次式

$$\tan \gamma' = \sqrt{\frac{1 - \frac{I_2(a)}{I_0(a)} \cos 2\gamma}{1 + \frac{I_2(a)}{I_0(a)} \cos 2\gamma}} \quad (6-16)$$

で計算し γ' についてプロットすると 図-6-1 のようになる。図中の点線は $\gamma' = \gamma$ の線であるが, 式(6-16)を用いて求められる γ' は $\gamma = 45^\circ$ で γ と一致するが, $\gamma < 45^\circ$

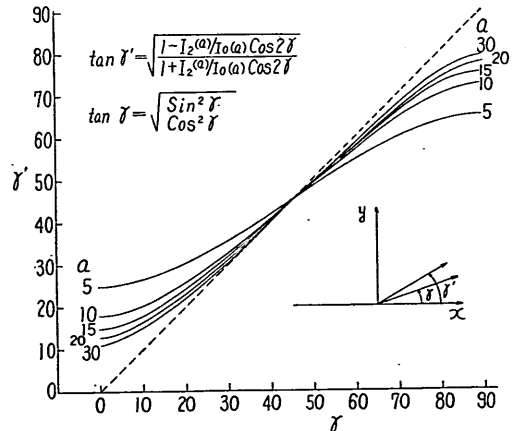


図-6-1 γ' と γ の関係

では $r' > r$, $r > 45^\circ$ では $r' < r$ となっている。

a の値については現地観測データの解析結果が少ないが、10~20の間の値が多いものとする、 a の大きさによる r' と r の差は 10° 以内である。従って a が10~20の間の値たとえば $a=15$ の線を用いて r' の補正係数 $r-r'$ を考えれば式(6-16)を用いて求められる r' と r との差を $\pm 5^\circ$ 以下にすることが出来る。

6.2 簡易法による波向の推定手順

6.1 の結果を用いて、簡易法による実際の波向算定方法について述べる。

1) 記録紙上の F_x, F_y の符号の確認

検定曲線を参考にして、記録紙上の F_x, F_y の符号を確認する。

2) 長周期変動を取除く

波力以外の一定方向の流れが球体に作用し、その流速がゆるやかに変化する場合(潮位変動による流速の変化など)には記録紙上に極めて長い周期の変動が現れるが、この長周期変動は、周期の短い雑音信号と同様記録解析上障害となるのでこれを取除く。

3) 分散を求める。

F_x, F_y の分散 σ_x^2, σ_y^2 に相当する量を求める。

4) r' の算定

r' の値は次式により求める。

$$r' = \tan^{-1} \sqrt{\frac{\sigma_y^2}{\sigma_x^2}}$$

式(6-17)で求められる r' は図-6.2の $r'_1 \sim r'_4$ のいずれかの角度を示すものである。1)で F_x, F_y の符号の判定をしているが、 $F_x \times F_y$ が正の場合には r' は r'_1 または r'_3 であり、 $F_x \times F_y$ が負の場合には r' は r'_2 または r'_4 である。すなわち、 F_x と F_y の位相が合っている場合には波向 r' は第一又は第三象限の角度を示し、位相が合わない場合には第二又は第四象限の角度を示している(図-6.3参照)。

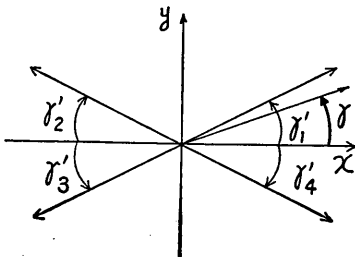


図-6.2 波向の算定説明図

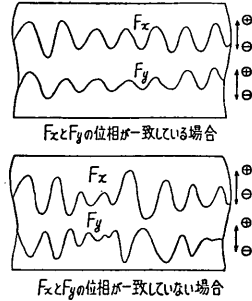


図-6.3 波力のx成分y成分の位相の説明図

一般には一定時間内の F_x, F_y について常に $F_x \times F_y$ の符号が変わらないことはない、振巾の大きいところを数ヶ所選定して $F_x \times F_y$ の符号の検討をする。

いま $F_x \times F_y$ の符号が正であるものとする、 r' は第一象限か第三象限の角度をあらわすことになるが、前者か後者の区別は不可能である。しかしながら実際の沿岸における観測では波向が r'_1 か r'_3 であるかを判断することは容易であると考えられる。波向観測地点において波高計による同時観測記録が得られている場合には r'_1 と r'_3 の区別をすることが出来る。

5) 角度の補正

4)で求められた r' に角度補正量 $r-r'$ を加えれば r が求められる。 $r-r'$ の値は a により変動するが、図-6.1を利用し、図-6.1の左側の r' の目盛に対応する $a=15$ の線上の r を下側の目盛で読み取ることにより r は直ちに求まる。誤差の範囲は図-6.4のようにあらわされる。 r'

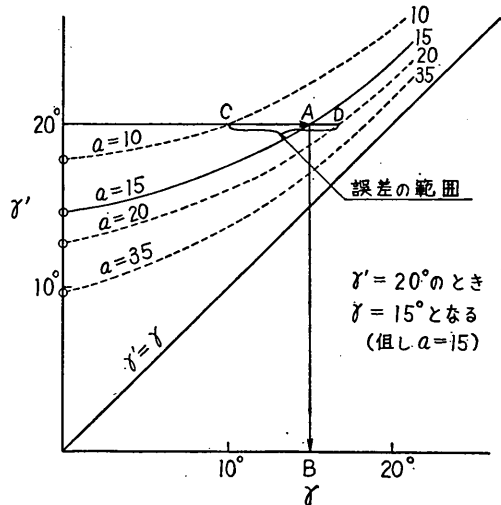


図-6.4 r' の補正説明図

- けるレーダの応用”, 第11回海岸工学講演会講演集, 1964, pp 81~88
- 8) Munk, W. H., G. R. Miller, F. Snodgrass & N. F. Barber: "Directional recording of Swell from distant Storms" Phil. Trans. Roy. Soc. A, Vol. 255, 1963
- 9) 井島武士, 木内政鋭, 関口雅臣: "波高計を利用した波向観測", 第13回海岸工学講演会講演集, 1966, pp 30~35
- 10) 柿沼忠男, 石田昭: "波浪スペクトルにもとづく大瀧海岸の波向の推算について" 京都大学防災研究所年報, 第11号B, 1968, pp 337~354
- 11) 光易恒: "博多湾の風と波一低風速時の一例一", 第15回海岸工学講演会講演集, 1968, pp 337~354
- 12) 永田豊, 彦坂繁雄, 松本信保: "電磁流速計による波向観測, 一福井県三国港における観測結果より一", 第10回海岸工学講演会講演集, 1963, pp 37~41
- 13) Wiegel, R. L.: Oceanographical Engineering, Prentice-Hall, 1964, pp 248~269
- 14) Kinsman, B.: Wind waves, Prentice-Hall, 1965, pp 377~386
- 15) Suzuki, Y.: "Determination of Approximate Directional Spectra for Coastal Waves", 港湾技術研究所報告, 第8巻第4号, 1969, pp 43~101
- 16) Mobarek, I. E.: "Directional Spectra of Laboratory Wind Waves", Proc. of A.S.C.E. WW3. 1965 pp 91~116
- 17) Harleman, R. F. and W. C. Shapiro: "The Dynamics of a Submerged Moored Sphere in Oscillatory Waves", Proc. of 7th conf. on Constel Eng. 1961, pp 746~765
- 18) 椎貝博美, 河野二夫: "波動による球の振動", 第15回海岸工学講演会講演集, 1968, pp 97~102
- 19) Grace, R. A. and F. M. Casciano: "Ocean Wave Forces on a Subsurface Sphere", Proc. of A.S.C.E. WW3, 1969, pp 291~317

記 号 表

A	: 水粒子の加速度
A_x	: 水粒子の加速度の x 成分
A_y	: 水粒子の加速度の y 成分
a	: θ の r への集中度をあらわす定数
$\overline{aa'}$: 波力による受感球の変位
$\overline{bb'}$: 波力と定常流が同時に作用したときの受感球の変位
C_D	: 抵抗係数
C_D''	: 式 (6-3) 参照
$C_{F_x}(f)$: x 方向の波力の自己相関関数
$C_{F_y}(f)$: y 方向の波力の自己相関関数
C_f	: 定数 (式 (6-5) 参照)
C_M	: 質量係数
C_M''	: 式 (6-3) 参照
e_0	: ブリッジの開放出力電圧

e_i	: 測定電源 (図 3-7 参照)
e_s	: 電源電圧 (図 3-10 参照)
e_x	: x 方向測定ブリッジ出力電圧 (図 3-7 参照)
e_y	: y 方向測定ブリッジ出力電圧 (")
F	: 水中の球に作用する波力
F_A	: ゲージ率
F_0	: 水平荷重
F_x	: 水中の球に作用する波力の x 成分
F_y	: 水中の球に作用する波力の y 成分
f	: 波の周波数
f_A	: 現地用波向計の空中での固有振動数, Hz 単位
f_W	: 現地用波向計の水中での固有振動数, Hz 単位
g	: 重力の加速度
h	: 波向計設置点の水深
$I_0(a)$: 第一種変形ベッセル関数
$I_2(a)$: 第一種変形ベッセル関数
K_S	: 絶縁抵抗が $10M\Omega$ に低下したゲージの感度
k	: 波数
k'	: 比例定数
k''	: 比例定数
k_1	: 波向計受感桿のパネ定数
L	: 波長
l	: ゲージの自然長
Δl	: ゲージの長さの変化量
m	: 波向計受感球の質量
N	: 測定上の障害となる不正な雑音信号
\overline{oc}	: 定常流による受感球の変位
$p(f, \theta)$: 表面波の方向スペクトル密度
$p_{F_x}(f)$: 波力の x 成分のパワースペクトル密度
$p_{F_y}(f)$: 波力の y 成分のパワースペクトル密度
$p_{F_x F_y}(f)$: 波力の x 成分と y 成分のクロススペクトル密度
$p\eta(f)$: 表面波のパワースペクトル密度
R	: ゲージ抵抗
R_0	: ブリッジの合成抵抗 (図 3-11 参照)
R_0'	: ブリッジの合成抵抗
R_1	: 検出円筒に貼付けられたゲージの抵抗
R_2	: " "
R_3	: 測定ブリッジの固定抵抗
R_4	: " "
ΔR	: ゲージ抵抗の変化量
ΔR_1	: R_1 の変化量
ΔR_2	: R_2 の変化量
R_h	: 海底からの波向計受感球中心までの高さ
r	: 波向計受感球の半径
r_1	: ケーブルの抵抗
r_2	: " "
r_3	: 配線抵抗
r_4	: " "
r_5	: " "
r_g	: 計録計の内部抵抗

定置式波向計（抵抗歪線型）の開発

r_R	: 固定抵抗 (図 3-7 参照)	r	: 最も多くの波のエネルギーが進む方向
r_s	: 電源の内部抵抗	r'	: 波力の平均的な作用方向
S	: 正規の被測定信号入力	ϵ	: ゲージの温度変化による誤差
T_0	: 強制振動の周期	ϵ_s	: 絶縁抵抗が無限大のときのゲージの歪量
ΔT	: 温度変化	$\eta(x,y,t)$: 点 (x, y) 時間 t における海面
t	: 時間	θ	: 波の進行方向
V	: 水粒子速度	θa	: 波力の作用方向
V_{rms}	: V の標準偏差	θb	: 波力と流常流の合力の作用方向
VR_{out}	: 出力調整抵抗	θc	: 定常流の作用方向
VR_x	: 測定ブリッジ零バランス調整抵抗	λ	: 受感球の静止位置からの変位量
VR_y	: "	λ_0	: 強制振動の振幅
V_x	: 水粒子速度の x 成分	λ_{st}	: 受感球に水平荷重を作用させたときの変位量
V_y	: 水粒子速度の y 成分	μ	: 係数
X_S	: 受感桿 x 方向撓み検出用ストレインゲージ	ξ	: 減衰係数
X_S'	: "	π	: 円周率 (3.1415……)
x_R	: x 方向測定ブリッジのダミー抵抗	σ_x^2	: 波力の x 成分の分散
x'_R	: "	σ_y^2	: 波力の y 成分の分散
Y_S	: 受感桿 y 方向撓み検出用ストレインゲージ	τ	: 遅れ時間
Y_S'	: "	φ	: 強制振動時の位相の遅れ
Y_R	: y 方向測定ブリッジのダミー抵抗	ω	: 海水の単位体積重量
Y_R'	: "	ω_0	: 強制振動の角周波数
ϕ	: ランダムな位相	ω_A	: 現地用波向計の空中での固有振動数
β	: $=\theta-r$	ω_W	: 現地用波向計の水中での固有振動数

(1969. 12. 26受付)