

沿岸観測所用一遠隔自記波浪計 MR-Mark III について

気象研究所海洋研究部 降 簾 常 雄

この論文は、激しい外洋の波浪のある沿岸でいかなる気象条件下にも経続して精密に波の Routine 観測ができるために現在の測器でどこに問題があるかをまづ明らかにし、一つの解決策として (1) 差動変圧器を Transducer とする零位法測定方式を導入することにより、従来の電気式波浪計の本質的困難がいくつか除かれる事実を実験用波浪計 MR-Mark I で示めし、つぎに (2) 拡張された応答特性をもつ新しい一つの圧力・受圧素子を提出し、それがもつ三つの応答特性のうちの一つの Special case をつかえばすぐれた機能を有する堅牢な High pass filter 装置が実現され、従来の電気式水圧型波浪計で最も問題の多かつた水中の受圧装置の難点が容易に克服できることを実験用波浪計 MR-Mark II で述べ、さらに (3) 以上二つの原理を融合した MR-Mark II がより改善されてここに高性能の実用波浪計 MR-Mark III が実現し、従来の電気式水圧型波浪計に共通とみられるいくつかの困難がすべて解決して、厳しい条件下での波浪観測の Routine 化に一つの可能性をもたらした事情を説明する。また参考として (4) (2) にのべた受圧素子の他の二つの応答特性をつかうことにより、従来は全く別扱いされた検潮器、および津浪計などもすべて MR-Mark III と同列の機構、形態で遠隔測器として直に実現できることを指摘し、最後に電気式波浪計で常に問題になる信号伝送ケーブルについて二、三の事柄をのべる。

§1. Routine 用波浪計の問題点

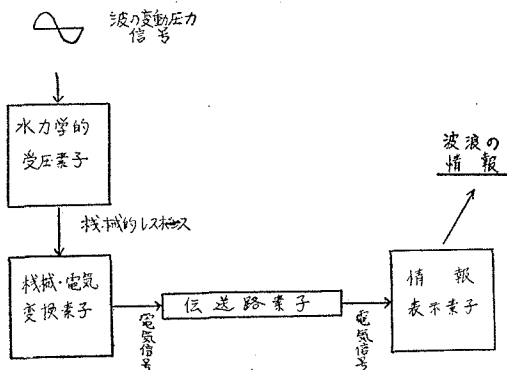
激しい波浪のある海岸で岸から数キロメートル以内の任意の点に器械を設置して、いかなる気象条件下でも随時に波浪の波高と週期とを安定、精密に測定しうするためには、器械の設置工事もあることながら測器自体がまづ堅牢で長期の経続使用に耐え、安定、精密な動作が期待できて取扱容易であることが必要である。従来しられている短週期波浪計は各国あわせて数十種余にのぼり、それぞれに特徴があつて優れた性能のものもすくなくないが、厳しい諸条件に耐えて長期の Routine 観測をも容易ならしめるまでにはなお検討すべき余地が少くないと思われる。

現在実用化されている Routine 用波浪計はいろいろの理由から水圧式 (Pressure gauge-type) の形態をとるものが多く、使用上の便宜からも隔測形式 (Telemetry System) がより多く採用されている。したがつてこの種

の波浪計は電気式波浪計のかたちを必然的にとり 図-1 のブロック図に示す 4 つの素子 (element) の結合をもとに構成されることになる。

すなわち波の波高に応じた水圧変動が海水を通して海底近くに置かれた水力学的受圧素子 (Hydraulic pressure detecting element) に伝わり、受圧素子がうけとつた波の変動圧力信号 (pressure signal) は機械的レスポンスに換えられて機械・電気変換素子 (M-E-Transducer) に伝えられる。この機械的入力にはトランスデューサーによつてその強さに応じた電気信号に変換され、伝送路素子 (Transfer channel) をえて情報表示素子 (Indicator element) に伝達され、入力側の受圧素子が感じた波の情報 (Information) として表示、記

図-1



録される。

いまこの図式に従い衆知の電気式 (水圧型) 波浪計のいくつかを構造、各部の機能、強度、その他得失について吟味すれば、いちじるしい問題点としてつぎの三点があげられる；

- (1) 受圧素子の動的応答 (Dynamic response) の良否、および素子自体の機械的強度の程度
- (2) トランスデューサーの機械的インピーダンスの大きさ、およびトランスデューサーの変換効率とその機

械的強度の程度

(3) 測定系に用いた測定方式の種類(偏位法, 零位法のいずれであるか)

結果について言えば, (1) は測定系が測定対象を追尾しうる速さとその分解能とに関係し, また素子の機械的強度は明らかに受圧素子が海中で良好な機能を発揮できる命数に関係する。(2) は測定系が測定対象に及ぼす慣性の大きさをあらわし, (1) の動的応答とも関連して従来看過されがちであつた測定対象についての情報損失 (*Information loss*) の程度に関係する。また変換効率も測定の精度に関係する。そして機械的強度はトランスデューサーが信頼できる寿命の限界を与える。(3) は外乱や経年変化などに対する測定系の安定度に直接関係し, また系が測定対象に及ぼす反作用の大きさにも関係がある。われわれが必要とする波浪計は当然この三点のほかにも幾つかの事柄を含め, 在来の測器に充分な吟味, 検討を加えた結果でなければならない。

そこで(1)については後述(§2.)にゆづり問題点(2)に言及すれば, よくしられたトランスデューサーの一つに摺動抵抗器 (*Potentiometer*) があげられる。衆知のように摺動抵抗器は所定の規格をもつ抵抗体上に適宜な接触圧力で摺動できる電極をもち, 巧に利用すればすぐれたトランスデューサーになるところから広く利用される。この摺動電極が電気的接触不良を生じないためには, 最低限度の接触圧力で抵抗体と常時圧着している必要があり, これを 0 にすることは論理的にも無意味である。この接触圧力は摺動抵抗器の構造上, 軸摩擦などの損失を含め一般に可動電極を摺動, 回転せしめるに必要なトルクの臨界値を定める。トルクの大きさはふつうの小型可変抵抗器で数百グラム・糎あり, 極く近年になつて現れた特殊な *Low torque potentiometer* (*Starting torque 1 gr·cm*) を除外すれば従来もつぱら使われているのは殆ど 100 *gr·cm* 以上のトルクのものが多い。したがつて摺動抵抗器をトランスデューサーにするさい, 必ずしも小さくはない機械的インピーダンスが測定対象に影響するからその使用はことさらに留意が必要になる。抵抗器の寿命はふつう N 回の往復摺動でその電気的規格が許容値を逸脱するとき, N 値であらわされることが多い。高信頼度の小型抵抗器で $N \approx 10^5$ のオーダーといわれ, 特殊規格のもので $N \approx 10^6$ が限度とされている。摺動抵抗器を波浪計のトランスデューサーにした場合, 器械を海中に浸けると同時に波の圧力信号で可動電極の往復摺動運動がはじまる。実際の海岸附近では週期 5 秒位の波が常時おこつていから, 器械が水中にある限りはこの運動をとることができない。摺動抵抗器の寿命を τ とし, かりに $N \approx 10^6$ として週期 5 秒の波が経続するものとすれば,

$$\tau = 5 \text{ 秒} \times 10^6 \approx 60 \text{ 日}$$

かりにこの値を 4 倍としてみても, 信頼できるトランスデューサーの寿命は高々 8 ヶ月にすぎない。実際にはそれを使用する環境からいつてこの推定値を下廻ることが予想される。抵抗器を油浸にすれば防湿は改善されるが有害なトルクがいちじるしく増大する。われわれが要求するトランスデューサーの寿命は少くとも上の推定値を 2 桁上廻るものでなければならないから当然別の考慮が必要になる。これに代るトランスデューサーは機械的インピーダンスが殆ど 0 に近く, 変換効率もすぐれていることが理想である。当然それに伴つて電気信号伝達の有効距離, 電気回路装置の構成の難易, 各種電源の問題などにも周到な配慮が必要である。

問題点(3)については, 従来の波浪計はすべて偏位法方式による測定に終始しており, ことに電気式波浪計の場合経年変化による各部定数の変動の影響, 部品交換による定数のゆらぎの影響などがただちに測定系の応答特性に効果的に影響を与え, 安定度を著しくさまたげる事実を見のがすことはできない。またこれとならんで電源電圧の変動をはじめ装置各部の微妙かつ不規則な状態のゆらぎが, 情報信号にことごとく情報のひずみを混入する懸念があることも見おとしてはならない。このような言わば外乱雑音の障害の効果を抑制して測定系の安定度を必要の域まで高めるには, 当然零位法による測定方式がここで導入されなければならない。

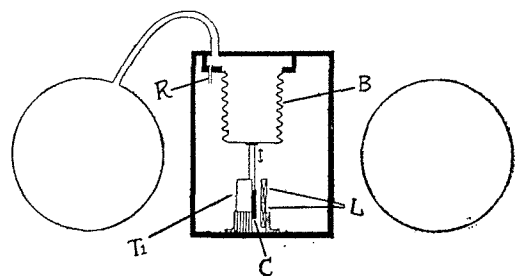
§2. 1 つの解決法

問題点(2)および(3)の議論から検討をすすめて 1957 年 9 月, 著者び一つの試みとして差動変圧器 (*Differential Transformer*) をトランスデューサーとする零位法の波浪測定方式を考案し, 翌年 6 月これによる実験用の波浪計 MR—Mark I (註: 気象研究所式—1 型の略) を試作完成した。

j) 波浪計 MR—Mark I

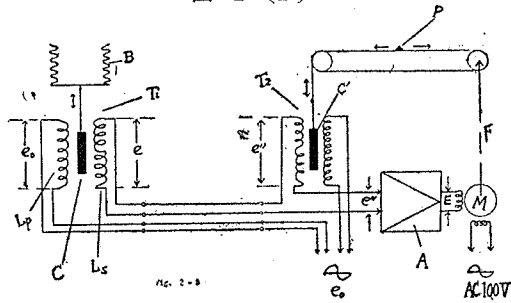
この波浪計は受圧装置(水中)と記録装置(陸上), および附属装置からなり, 信号の伝送は水中部分を鍍装

図—2 (A)



海底ケーブル（ポリエチレン絶縁：4芯），陸上部分をビニール被覆ケーブル（ポリエチレン絶縁：4芯）によつた。図-2（A）に示すように受圧装置の受圧素子は以前に使つた Ewing 型—High pass filter 受圧器（ゴムチューブ：空気充填）を用い，トランスデューサーの円筒型差動変圧器 T_1 を図示のように取りつけた。

図-2（B）



($e = 0$)。

いま波がおこつてベローズ B が上下に変位をはじめると，二次コイルの両端には電気的中性点からの鉄心の変位（すなわち波高）に比例する電圧 $e \propto 0$ があらわれ，その位相は変位の向きによつて異なる。したがつて問題は，陸上にいて信号電圧 e を位相検出しながら同時に 0 位追尾して記録することに帰着する。

図-2（B）で L_s に直列にケーブルを介して，別の一つの差動変圧器 T_2 の二次コイルをつなぎ増巾器 A の入力側に加える。 T_1 から送られる信号電圧（位相を含む）を e' ， T_2 の二次端子電圧を e'' とすれば増巾器入力信号 e''' は，

$$e''' = e' + e'' \quad \dots\dots\dots (1)$$

であらわされる。増巾器の増巾度を μ とすればその出力電圧は，

$$E = \mu e'''$$

になるから，これをたとえば高速サーボ・モーターの駆動コイルなどに与えて大きな機械出力 F ，

$$\pm F = kE \quad ; \quad k = \text{Const.} = (\text{変換効率})$$

に変換する。当然 F は入力信号 e の位相に応じた力の向きをもっている。

さて情報信号 e を零位測定するには，(1) 式の増巾器入力（誤差信号という） e''' を，

$$e''' = 0 = (e' + e'')$$

$$\therefore e'' = -e' \quad \dots\dots\dots (2)$$

ならしめるよう差動変圧器 T_2 の鉄心位置を定める必要がある。それには増巾器の機械出力 F を帰還率（feedback rate） β で入力側にフィードバックさせ，これを行えばよい。(2) 式の符号から β は負帰還を意味しており， F によつて (2) 式を満足するよう鉄心 C' の位置を定めれば，その座標位置が情報入力信号 e の測定値（すなわち波高）をあたえる。鉄心 C' の運動の向き，すなわち e'' の符号は入力 e と反対であるから座標を適当にえらぶことが必要で，その座標上で鉄心 C' の運動を逐一記録すれば波高の時間的推移をすべて知ることができる。

増巾器入力の誤差信号 ($e' + e''$) について考えれば，

$$e'' = -\beta F \quad \dots\dots\dots (3)$$

であることから増巾器出力 F は

$$\mu (e' - \beta F) = \frac{1}{k} F \quad \dots\dots\dots (4)$$

で，これから

$$F = \frac{e'}{\beta \left(k + \frac{1}{\beta \mu} \right)}$$

とあらわされる。ここで増巾度 μ を充分大きく ($10^2 \sim 10^3$) とれば $\left(-\frac{1}{\beta \mu} \right) \rightarrow 0$ となり，

$$\therefore F \approx \text{Const.} \cdot e'$$

となつて記録器出力 F が入力信号 e' のみに比例し，装置内部の状態 μ によらないことがわかる。 μ を支配するのは波浪計装置に与えた電源電圧，および装置の電気回路の諸要素，たとえば電子管その他 L ， C ， R —素子などの定数であつて，これらに相当程度の変動がおこつたとしてもそれによる効果はほとんど測定に響かないことを

上の結果がしめている。故にこの方式によれば自然の外乱にさまたげられずにいつも安定な測定を高い精度で行うことができる。なお鉄心 C' が座標原点に対して一定のズレをもつていと、明らかに、

$$e'' = -e' + de$$

となつて、入力のない場合 ($e' = 0$) でも $e'' = de$ だけの偏倚電圧があらわれ、記録ペンが記録座標の原点 (たとえば記録紙の中心線) 上から一定値ずれる現象がおこるから、 $de = 0$ になるようははじめに C' の位置を調整しておくことが必要である。

波浪計 MR-Mark I の一つの特徴として記録倍率の切換が容易に陸上でできる利点がある。すなわちトランスデューサー T_1 の一次励磁電圧を N 倍にすると瞬間的に記録倍率が N 倍 (ここでは $N=5$ とした) になるから、波高に応じて随時に測定フルスケールを、たとえば $\times 1$ または $\times \frac{1}{5}$ などにスイッチ切換して精細な観測を常に継続することができる。この点は従来の波浪計がその都度少くない時間と労力を費して水中装置を引揚げ、ペローズその他の弾性定数を変更して機械的に記録倍率をかえたのにくらべずこぶる実用的である。

この方式による測定の有効距離は、使用される信号伝送ケーブルの分布定数、とくにその静電容量の大ききでさまる。静電容量はつとめて小さいことがのぞましく、著者が用いたケーブル (§. 4) では $C \approx 40 \text{ } \mu\text{f/km}$ 程度で、MR-Mark I の実験 (以後の実験も同じ) にはこれを 800 m つかつてゐる。この種のケーブルによれば装置に C , R -素子 からの簡単な補償回路をつけるだけで、最大有効距離 6 km は可能で、等価分布定数回路による実験でたしかめられた。また特に必要な場合これを 8 km 程度まで延長することもさして困難ではない。実際の海岸での使用を考えるとこの値はまづ充分なものといつてよい。

波浪計のトランスデューサーに差動変圧器をつかつた例は M. J. Tucker (英国: 1946 年項) や石黒氏 (1948 年) の実験にみられる。しかし彼等の用いたものは簡単な円筒型ではなく構造が複雑である。また用いられた測定方式はいづれも偏位法によるものであつて信号電圧を単に増巾、検波し、ペン・ガルバノメーターで記録したにすぎない。したがつてその動作特性が必ずしも長期にわたり均一、安定であつたかどうか疑はしく、装置の複雑さからみて偏位方式に常に附随する外乱の効果もある程度さげがたかつたであろうことが想像される。彼等の装置ではもちろん記録倍率の電氣的切換は行はれず、ケーブルの長さもわれわれの要求と比較にならない短い範囲でしか実験されてゐない。

MR-Mark I のトランスデューサーはプラスチック防湿処理をしたコイルと軽い小さな鉄心だけで、強度が大きく損耗は 0 であるから寿命は半永久的である。また鉄心の運動には摩擦がないから実効機械インピーダンスは殆ど 0 で、トランスデューサーによる情報損失はないとみて差支ない。また容易にわかるように記録装置の増巾度 μ を充分大きく ($10^2 \sim 10^3$) すれば、総合的に極めて高い分解能を波浪計に与えることも雑作ない。

実際 MR-Mark I による記録は一貫した高分解能と安定な動作とを示し、1958 年夏から連続 2 ヶ月間銚子市、名洗海岸の実験場でおこなつた機能試験に Routine 用として此の方式が充分実用しうる見通しをあたえた。

ii) 一般化した受圧素子

そこで残つた問題 (1) に言及すると、たとえば MR-Mark I で用いた Ewing 型受圧器の場合、圧力信号の伝達の媒体に空気を利用するためゴムチューブ、空盒収容室など空気充填部からの自然的漏洩が機器の動作にいちじるしい障害を与える事実がある。甚しい場合、充填した空気の全量が水中のケーブルの被覆下を逆し短期間でぬけてしまつて受圧器が動作不能になつた例すらもある。著者の実験では受圧器のケーブル引出口に金属製ハーメチック・シール電極を接着して完全に気密を保ち、ケーブルによる洩れを抑えたので 2 ヶ月間の連続試験には一応の支障は免れた。しかしそれ以外の部分の微量な漏洩をとめることは事実不可能であるから、長期間にわたるこの種の受圧器の使用には根本的に問題がある。

特性上からみた此の種の受圧素子の最大の欠点は、信号伝達の媒体である充填気体に圧縮性があることから生ずる過渡応答特性の劣化である。著者の実験によれば前記の受圧器で過期換算、約 3.5 秒より速い現象の追尾は不可能で、この点は気体を媒体とするすべての受圧素子に本質的に共通する欠陥と考えられる。こんにちの波浪の測定ではいわゆるスペクトルの非線型領域まで含めた短過期成分の波の情報をよくすることが大切であるから、水圧型波浪計では受圧素子を沈める水深を考慮すると同時に、素子自体の過渡応答特性にも充分の関心を払う必要がある。

さて MR-Mark I のトランスデューサーと測定方式を使えば、入力に対する損失がないから原理的には被測定入力信号が何ほど小さくとも測定上に支障はおこらない。したがつて従来の波浪計でトランスデューサーの駆動に要した損失を考慮にいれた大きな入力エネルギー、たとえば強いトルクなどは此の場合不必要になる。故に受圧素子は大きな受圧面積をもつ必要がなく、素子自体をはかるに軽量小型にしてもさしつかえない。此のことは波浪計

の水中装置の小型化の可能性を意味し、実際に浅い沿岸附近の海底にとりつけるさい強い潮流や波浪の Orbital motion による効果の度合が小さくなって結果的に強固な Mounting が容易になることをも暗示している。

以上の見地から考察した結果著者は 1958 年 8 月、流体圧力の受圧素子として最も一般的な応答特性をもつ新しい一つの方式原理を考案した。図-3 にその構造をしめす。

図で 1 つの頑丈な耐蝕金属円筒の中に、2 つのベローズ B_1 , B_2 が壁をへだてて取付けられ、2 つの毛細管 R_1 , R_2 がそれぞれの位置で通じている。 B_1 , B_2 の内部および B_2 の外部の円筒密閉室内には一定量の適当な粘度の作動油 O が充填され、油面の上部には一定量の不活性乾燥気体 G がつまめられている。此の場合 G の本質的な役割はこの流体回路に一定の強さのコンプライアンスを与えることだけで、圧力の伝達媒体は非圧縮性の作動油である。毛細管の内径を $2r$ 、長さを l とし作動油の粘性係数を μ とすれば管の流体抵抗 R は、

$$R = \frac{8\mu l}{\pi r^4}$$

で適宜に与えることができる。

いまこの受圧素子に静圧力 P_0 、および任意の角周波数 ω の変動圧力 $\Delta P(\omega)$ を同時に作用させると、表-1 にしめす (a) (b) (c) の三つの場合に依じて異つた三種類の応答特性がえられる。

表 - 1

状態	R_1	R_2	応答の種類	用途の一例
a	$R_1 \neq 0$	$R_2 \neq 0$	$Band\ pass\ filter$	津浪計
	$R_1 < R_2$			長週期波浪計
b	$\rightarrow 0$	$R_2 \neq 0$	$High\ pass\ filter$	短週期波浪計
c	$R_1 \neq 0$	∞	$Low\ pass\ filter$	潮汐計 (検潮器) 液面計

(a) の状態は理論上もつとも一般の場合と考えられ、他の二つはいずれも特殊な場合として容易に (a) から導かれる。図-4 は三つの場合に対する周波数応答の振巾特性を模型的にしめし、縦軸の $\left(\frac{P_{out}}{P_{in}} = 1\right)$ は受圧素子出力に減衰がないことをあらわす。三つの曲線のかたちは受圧素子がそれぞれの状態に応じてとる、いわゆる系の伝達函数 (Transfer function) のかたちを示している。

この受圧素子は μ の温度効果をもつて温度変化による特性の変動はない。作動油として安定した μ をもつシリコン油、その他を使えば実際の使用上で起こる温度変化の影響は全く問題にならない。

この方式によると、従来は別物とされたいわゆる波浪計も、また検潮器も共に同一の原理と機構で導かれる たんに二つの

Special case にすぎず、構造上も容易に流通性をもつて同列に実現できることがわかる。しかもその一般的なケースは直に特殊な波浪計、たとえば津浪計などの目的に利用できる。

iii) 波浪計 MR-Mark II

1958 年 10 月 著者はうえに述べた受圧素子の原理をつかひその特殊ケース (b) によつて全金属製油充填型受圧素子 図-5 を試作し、これに MR-Mark I の測定方式を融合して従来しられない新しい原理による短週期波浪計 MR-Mark II を試作完成した。図-6 (A) にその受圧装置 (左) と記録装置 (右) をしめし、図-6 (B) に記録装置の内部をしめした。受圧装置の大きさは高さ 30 cm、直径 8 cm (肉厚 1 cm)、重量およそ 5 kg で、

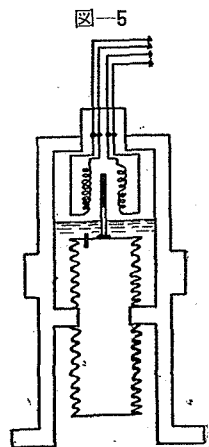
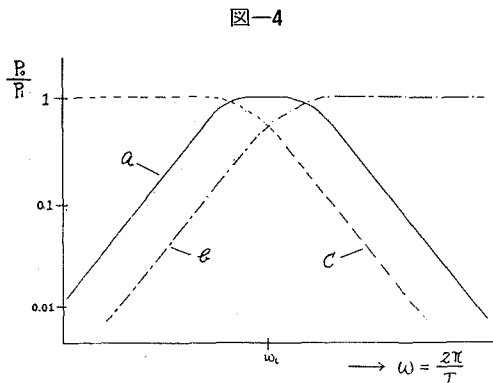
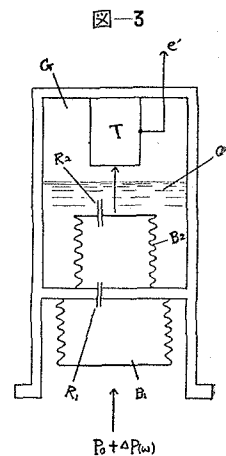
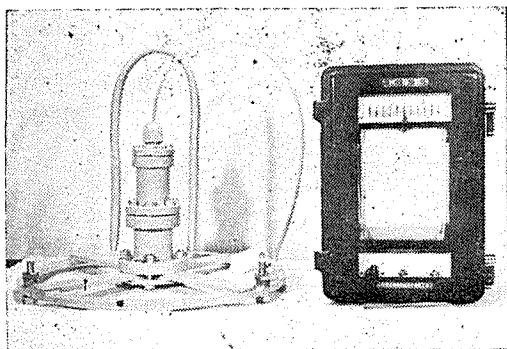
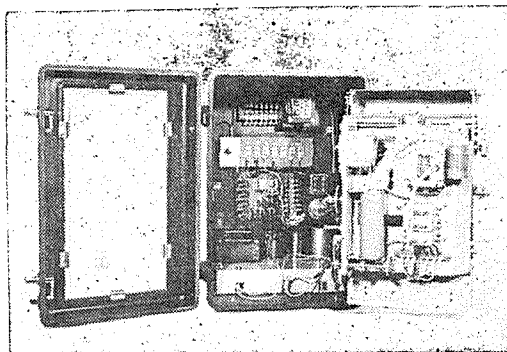


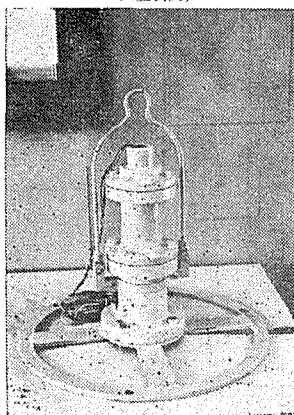
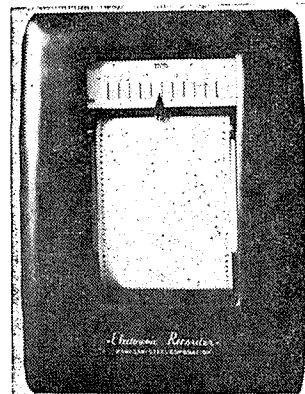
図-6 (A) 波浪計 MR-Mark II
(受圧装置と記録装置)図-6 (B) MR-Mark II
(記録装置の内部)

従来の Ewing 型と比較すれば著しく軽小で、その機械的強度は桁違に大きくなった。この装置では使用したベローズ、その他の流体回路素子にやや特性上の不備があつたため、過渡応答特性に一、二の小さな問題がのこされた。しかし此の受圧素子は応答速度がきわめて速く、また感度が鋭敏で、改良によつて充分実用に供しうることが室内の機能試験で判明した。

1958 年 12 月初旬に MR-Mark II は銚子市、名洗の実験場に設置され、連続 10 ヶ月余の耐久試験をおこなつた。その結果一、二の附随的な点で加工を加える必要のあることが判明したほかは、本質上に何等の欠陥がないことが明かになった。

こうした Running Test 期間中の MR-Mark I および -Mark II の老大なデーターは、従来しられた様々の波浪記録にくらべことごとくに精細を極めており、いろいろの条件下の波浪構造の複雑さや、その動態のいちじるしさを明瞭に示していた。これについては他の機会にゆづる。

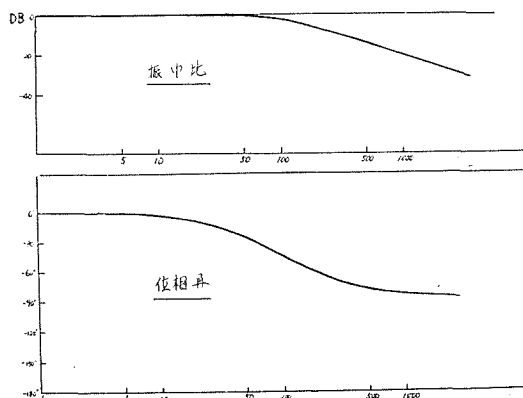
§ 3. 実用型波浪計 MR-Mark III

図-7 (A) MR-Mark III
(受圧装置)図-7 (B)
(記録装置)

§ 2. の予備実験にもとづいて 1960 年 6 月実用化した波浪計 MR-Mark III を完成した。この器械は -Mark II にほぼ似た機構をもつほかは、動作機能、特性などの点が大巾に改良されて実用にふさはしい性能をもっている。全体の装置は受圧装置、記録装置、および伝送ケーブルとからなり、図-7 のような外観(ただし受圧装置、記録装置のみを示す)をもっている。図-8 はその周波数特性で週期 1 秒 ~ 60 秒の測定用レンジにわたり振巾、位相ともに特性は平坦である。

受圧装置は高さ約 40 cm、直径約 8 cm、肉厚 1 cm 程度の耐蝕金属円筒からなり、底部に架台取付用の金属リング(φ. 50 cm)を装着している。重量は -Mark II の経験から多少増加されて約 9 kg 位になっている。耐久度は換算水深 50 m の水压で機能に支障なく、いろいろの振動試験、衝撃試験にも充分耐えてつくられている。また -Mark II の経験から海中生物の固着などによつて支障がないよう考慮が払はれている。信号伝送用海底ケーブルは写真でみる円筒頭部の水密プラグを通り内部に設けた気密電極端子につながる。この接続は簡単でほとんど技術を要しない。

図-8 振巾比と位相角

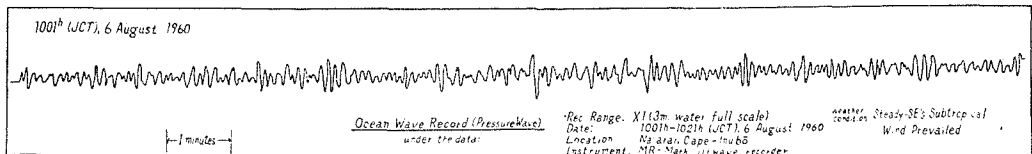


受圧装置は通常、トライボードとよぶ安定のよい海底 Mounting 用架台（水中重量、約1トン：高さ1.5m）上にステンレス・ボルト（ ϕ 12 mm）3本で固定し使用する。トライボードは §. 2 の実験過程で経験をいれて最終的に工夫、設計されたもので、規格、寸度だけを設置場所の底質その他の状況に応じて変更するだけでたいいの場合に利用できる。受圧装置とトライボードは水中作業に便利よう明る黄色で塗装され、いづれも入念に防蝕処理がほどこされている。とくに前者は海中生物の干渉を考へ有毒塗料が用いられている。この受圧装置は使用現場での調整等は一切不要で、およそ数年に一度の割合で工場検定をするだけで充分である。

記録装置は附属装置と一体になって大型の金属製気密キャビネット内に収容され、正面パネルのスイッチ卓上で苦干のスイッチにより単一操作できるようになっている。装置に使用される電気回路素子は主要部分に特殊な高信頼度部品がつかわれ、たとえば真空管は Computer-tube が使用されて連続数年以上におよぶ長期の使用にも安定な動作が保たれるよう配慮されている。電子管回路には一Mark I 以来の経験から、ケーブルと地球電磁場との電磁的相互作用による二次的障害の影響をさけるため、電子回路に特殊な工夫がなされて測定の安定を高めている。

波浪の記録は有効巾 120 mm の記録紙上に Rectilinear 方式で赤インキなどで記録され、紙送りはふつう 40 mm / 分の正確な速さ（必要に応じ 5 段切換）でおこなわれる。記録された記象の読取りに紙上の印刷目盛で直接に、充分な精度でよむことができる。Rectilinear 型記録であるから従来の波浪計のような波形のひづみがなく極めて理想的といえる。われわれの場合はこの記録紙を自動データ処理機械 MERIAC-1-F にそのまま投入し、手数を要せずに至短時間（5 分、もしくは 10 分）の計算時間で解析処理する。解析された結果はいわゆるフーリエ・スペクトラム（近くエネルギー・スペクトルをだす予定）で、これからエネルギー・スペクトラム、全エネルギー、微分スペクトラム、有義波高、平均週期、その他の物理量が求められる。その一例をあげると 図-9～図-12 のようになる。図-9 は名洗海岸の実験場で測定した MR-Mark III の記録（1960 年 8 月 6 日 10 時 01 分～10 時

図 — 9



21 分) で、よく発達した夏の季節風のもとでの波をあらわしている。図-10 はそのエネルギー・スペクトラムで実線がスペクトラムをあらわし、二本の点線が自由度 33 のカイ自乗分布の 90 %信頼限界を与えている。図-11、図-12 はさらに 10 時間前後の状況を示す。この二つのエネルギー・スペクトラムからみると、波の構造中に或種のエネルギー・バンドに似たものが認められるがこの点は詳しい吟味を必要とする。この点は従来あまり観測上で明瞭にはされていないようである。

図 — 10

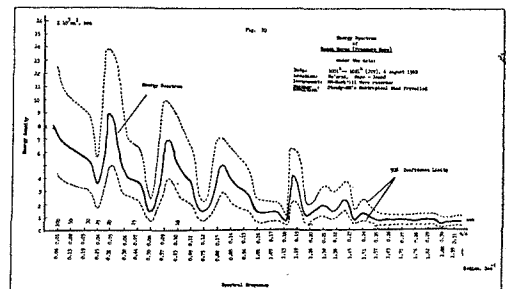
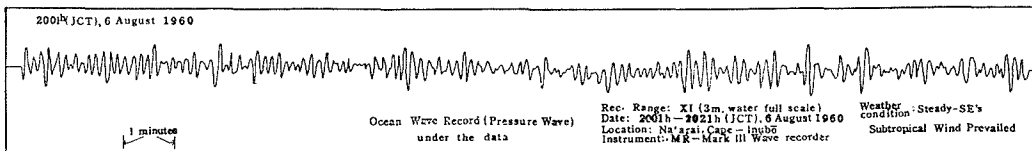
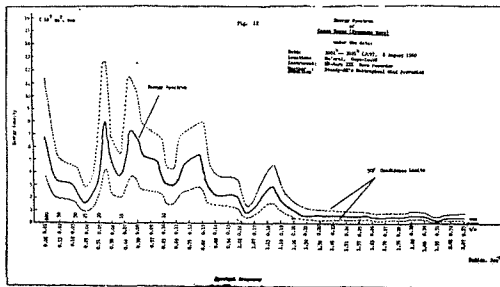


図 — 11



MR-Mark III の附属装置は自動観測用制御装置および非常電源装置とからなり、前者はルロア型標準時計（乾電池式）とリレー、およびスイッチからなるコントロール装置とでなつていて、また後者は大容量の空気湿電池群 1 組と特殊型バイブインバーター装置とからなり商用交流による供給電力の極端な低下、もしくは停電時のみに必要な交流電力を供給（ただし観測時間中のみ）する。

図 一 12



制御装置はふつう 2 時間ごとに 21 分間全装置を動作させ、その他のときは指令回路のみ待期状態におかれている。しかし必要に応じて任意の測定を行うこともできる。いずれの場合も動作指令スイッチが投入されると、はじめ 30 秒間は自動リレーによる電子管回路の予熱がおこなわれ、つづいて測定がはじまる。この間に記録紙はふつうに送られるから毎回（たとえば自動観測の場合）、記録に先立つて短い余白が生じ、これが後刻にデータを取扱うとき役にたつ。

波の観測時間を 20 分間と定めることの可否については従来あまり詳しい議論はなされていないようである。

この点について著者が行つた実験、すなわち“短周期の波浪のスペクトラム安定度と観測時間の長さとの関係”の結果によると、週期 2 秒～60 秒の範囲を問題にする限り約 19 分以上の観測時間が必要であることからして上記の値は一応妥当なものと考えている。この問題はしかし波浪の統計的性質に本質的な関連があり、深く立入った吟味を必要とする。一般にスペクトル分析の操作上で分析時間とスペクトル分解能との間に不確定性があらわれることが知られているが、これに似た事情がもしかするとここでもあるのかもしれない。

以上のべた波浪計 MR-Mark III は、1960 年 7 月 25 日に銚子市、名洗海岸の従来の実験場に設置され定常の観測を開始した。

この波浪計の主要な諸元は第二表のとおりである。ただし一般には必要に応じてその一部、もしくは全部が適宜に設計変更できることは勿論である。

表 一 2

使 用 水 深	(通 常)	15 m 以内
"	(最 大)	30 m
"	(最 低)	5 m 税度
測 定 波 高	(最 大)	15 m
測 定 週 期		2 秒～60 秒
記 録 倍 率	(スイッチ切換)	×1, 又は × $\frac{1}{4}$
記録紙フルスケール	(× $\frac{1}{4}$ のとき)	0 m～15 m 波高
"	(×1 のとき)	0 m～3 m 波高
測 定 精 度	(波 高)	±1% フルスケール
"	(週 期)	記録紙速度による
周 波 数 特 性	(振 巾 特 性)	ODB, (減衰なし)
(週 期 2～60 秒)	(位 相 特 性)	0°, (遅れなし)
記 録 追 尾 速 度	(フルスケール走行時間)	0.8 秒
記 録 紙 速 度	(切 換)	5, 10, 20, 40, 80 mm/分
記 録 紙	(ER-100-S-2)	有効巾 120 mm, 全長 40 m
電 源		Rectilinear 目盛り
消 費 電 力		AC. 100V ±15 V, 50 c/s, 又は 60 c/s
非 常 電 池	(個 数)	35 W 以内
	(電 圧)	空気湿電池 500 AH×24 個×2 列, 併列
	(放 電 率)	DC. 24 V
バイブインバーター	(入 力)	140 時間率(平均)
	(出 力)	DC. 24 V, 2.8 A
	(週 波 数)	AC. 100 V, 0.4 A
	(波 形)	50 c/s, 又は 60 c/s
		正弦波

§ 4. 信号伝送用ケーブルについて

従来よく波浪計につかわれる信号用ケーブルにピアノ線入ゴム被覆キャップタイヤー・コードや、おなじ型式のビニール被覆ケーブルなどがある。これらは価額、手騒さの点で極く短期間の使用には適すると思はれ、その他特殊な地勢にある波や流れの静かな内湾などで比較的短距離に限って使用する場合には支障が少いように思はれる。

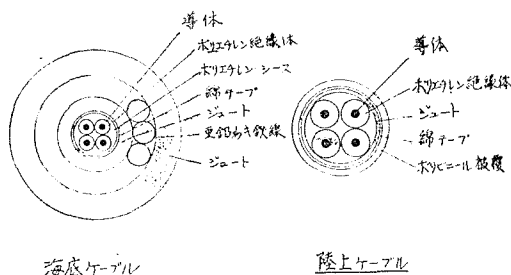
しかし一般に波の荒い外洋の沿岸でこの種のケーブルを用いることは多くの危険があり、使用が継続してことに

長期にわたる場合は常にいたづらな損耗を覚悟する必要がある。

表 — 3

規格諸元 名 称	ケーブル種別	
	陸 上 ケ ー ブ ル	海 底 ケ ー ブ ル
芯 線 数	4 本	4 本
導 体 径	1.0 mm (JIS C-3102)	0.9 mm (")
ポリエチレン絶縁体(厚)	2.5 mm (電々仕-2156)	0.8 mm (")
より合せ径	14.5 mm	—
ポリビニール, テープ(厚)	0.3 mm (JIS C-3401)	—
ポリビニール, 被覆(厚)	1.5 mm (JIS C-3401)	—
ケーブル外径	約 18 mm	—
導 体 抵 抗	24 Ω /km 以下	29 Ω /km 以下
耐 電 圧	2 KV/分	3 KV/分
絶 縁 抵 抗	10 KM Ω /km 以上	100 KM Ω /km 以上
静 電 容 量	32 μ F/km (1KC)	40 μ F/km (1KC)
芯 線 外 径	—	2.5 mm
ポリエチレン・シース(厚)	—	0.8 mm
カッド外径	—	7.6 mm
綿 テ ー プ (厚)	—	0.3 mm
ジュート層(厚)	—	2.0 mm
亜鉛引鍍装鉄線	—	径 6.0 mm $\times$ 9 本
ジュート層(厚)	—	4.0 mm
ケーブル外径	—	約 32 mm
重 量	約 1 トン/km	約 2.7 トン/km (空中), 2 トン/km (水中)

図-13 ケーブルの構造



著者はさきに行つた予備実験の過程 (§ 2.) で、從來とちがつた波浪計用ケーブルを設計し、その機能、耐久度、および自然劣化の模様について実際の現場の使用上から検討をおこなつた。使用したケーブルは陸上ケーブル、および海底ケーブルの二種類で、図-13 にその構造をしめす。またその規格を第三表にかかげる。

実験の主な結果は、陸上ケーブルについては3ヶ年余の継続使用で機械的、電気的な自然劣化は認められない。このケーブルのおかれていた状態は、全長の1/5が地表にあり、また1/5が地中に直接埋設してあり、残余

の部分は防波堤マンホール中にあつて常時海水にぬれている。次に海底ケーブルについては、上と同じ期間の使用でたとえば海底の岩盤上にほとんど常時露出していると思はれる部分は、第1年度でケーブル外皮のジュート層が完全に失はれ、鍍装鉄線表面に小さな擦痕(深サ0.5 mm 最大)が部分的に多数きざまれた。第3年度ではおよそ同じと思はれる部位にかなり進行した電蝕の痕が鍍装鉄線表面に認められる。しかしそこから50 m はなれた深い砂中に埋没している部分は殆ど新品と同じ外観を呈し劣化のあとが認められない。

ケーブルの布設されている海底は比較的遠浅の土砂の多い底質地形で、砂の水平分布は沖に向つて急速に減少している模様で、ケーブル先端附近およびその中間で部分的に岩の露出がある。このケーブルは水中重量が大きく自重によつて或る程度砂の中に自然沈下してゆく。最初しらべたところではケーブル投入後24時間で2 m 以上、砂中に埋没している。われわれの実験では岩盤地帯のケーブルを固定用アンカー、(水中重量 150 kg) 数個でおさえ水平方向の動揺を防止した。これは充分有効と思はれるが上述の劣化の様子から推して、さらにアンカーを密にとりつける必要がありさうである。第4年度目にはケーブル露出地帯の附近で電蝕による鍍装鉄線の切断(数本)がほとんど同一部位で生じているのが二ヶ所発見された。

海底ケーブルの電気的特性の劣化は絶縁抵抗に使用上は問題にならない程度の自然劣化が認められるほか、他の定数にはあまり変動がない。

以上から推すと、特に潮流の激しい場合をのぞいて此の種のケーブルでも布設の状況次第で優に数年以上にわたつて自然の劣化、損傷に耐え、継続使用に供することが可能と思はれる。また潮流の強い地帯や岩盤、礫などの多い底質の場所では当然ケーブルの機械的強度を増すことが必要で、それには同じ電気的特性をもち機械的に強い重

鎧装ケーブル, (鉄線 ϕ . 8 mm $\times$ 9 本) を使用することが必要である。これらの事柄は同時に水中の設置工事の技術上の問題とも密接に関連があるので, ここでは深くは立入らない。

§ 5. 結 言

以上でわれわれは, 極めて困難の多い海の波の長期にわたる Routine 観測の実施上に, 従来以上の確実さと精密さを導入する有用な一つの進歩した方法に到達した。ここでなお残されている問題といえば, 一つは商用交流電源のない場所で此の方式を利用するに必要な機器全体のトランジスター化であり, また一つは受圧素子のもつ他の 2 つの特性を活用して従来の測器の不備を急速に補うことであつて, 共に実現は容易であると思はれる。

此の研究は元気象研究所海洋研究部長, 中野猿人博士の提唱で 1957 年に開始され, 気象庁海上気象部の支持をえて継続された。研究の遂行に当り竹内研究部長ほか研究部の多くの方々が, 一貫して深い理解と支持をよせられた。ことに畏友, 宇野木早苗博士は絶えずよき助言を与えられた。研究過程にわたつて必要とした龐大な記録の整理や計算, MERIAC によるデータ解析などの労は北原榮子嬢に負うところが多い。ここに併せて感謝する。

研究機器の現場試験には運輸省第二港湾建設局が理解をしめされ, ことに同局, 名洗港工事事務所は終始ふかい理解と協力とを惜しまれなかつた。元所長星野晃氏, 所長庄司忠夫氏, 麻生与吉氏をはじめ安野工務課長, 原枝官ほかの方々に厚く御礼を申上げる。

また多くの犠牲的努力を伴つた設置工事を一貫して担当された銚子市, 岡田土建株式会社をはじめ, 実験機器の運用, その他に研究開始以来, 努力を惜しまなかつた千葉大学臨海実験所, 高木仁平氏に深甚の謝意を表す。また MR-Mark I 以来密接な協力をよせられた川崎製鉄株式会社計量器工場, 岩谷産業株式会社, および日本海底電線株式会社の各関係者の方々に感謝申上げる次第である。最後に此の研究が 1957 年以来, 気象研究所項目別研究費によつて行はれたことを附記する。

文 献

- 1) : 降旗; 沿岸観測所用波浪計 MR-Mark I の試作と現場試験について
日本海洋学会年会, 1958 年 11 月 10 日講演
- 2) : 降旗; 沿岸観測所用波浪計 MR-Mark II について——附: 一般化した波浪計について——
日本海洋学会年会, 1959 年 4 月 8 日講演
- 3) : 降旗; 沿岸観測所用波浪計 MR-Mark II について
日本気象学会年会, 1959 年 5 月 日講演
- 4) : M. Nakano; "A Wave recorder and Wave Analyser Recently Devised in the Oceanographic Laboratory, Meteorological Research Institute, Tokyo."
International Conference on Oceanography, New York, ; September, (1959) で紹介講演.
- 5) : T. Furuhashi; A new electric-wave recorder MR-Mark III——With notes on wave recorder MR-Mark I, and-Mark II—— Papers in Meteorology and Geophysics に発表予定