

波 浪 観 測

北海道開発局土木試験所

村 木 義 男

1 序 論

最近の港湾技術研究所の調査⁴⁰⁾によれば、現在の日本国内における波浪観測地点の数は実に225箇所、現用波高計数は292台ということである。全国海岸線はおよそ27,000 kmであるから、ざっと100 kmに1箇所、1台ということになる。このように密度の高い観測網はおそらく諸外国にも例をみないものであろう。

一方観測資料の利用状況をみると、過去においては、波浪予報法確立のための資料として、あるいは、設計波決定のための資料として使用されるのが主であったが、現在では、海岸における一般的諸種の計画資料として、災害の原因究明ならびに復旧工法検討の資料として、合理的な施工計画、施工管理の資料として、その他漂砂調査など諸種の調査研究の資料として、またこれら海岸港湾関係ばかりでなく、船舶の安全航行、漁業開発、海洋開発、造船技術の開発などの基礎資料として、さらにはまた、海岸におけるレジャーなどのために、その観測資料は極めて広く有効に利用されている。以前は波浪観測と云えば国の機関のみに行なわれていたが、現在では民間によってもかなり多く行なわれている。

このように波浪観測は現在非常によろこばしい状態にあるが、これのよってきたたの所以を考えると、これはこの20年間におけるわが国の波浪観測に関する研究が非常にめざましいものであったためと考えられる。本文末に載せてある参考文献を見ればその進歩の過程を容易に理解することができる。この20年間に日本で実施された観測機器の種類は非常に多くあるが、これを方法的に分類してみると表-1のようなもので、原理的に一応考えられるものはほとんど手がつけ

表-1 波浪観測法的方法的分類

直接観測法	光学的方法	—— 標柱法, ¹⁰⁾ 実体写真法 ¹⁰⁾ 実体視式波高計, ^{6), 10)} スタジヤ式波高計 ⁷⁾
	音響学的方法	—— 水中発射型超音波式波高計, ^{30), 40)} 空中発射型超音波式波高計 ²⁴⁾
	機械的方法	—— フロート式
	電気的方法	—— 平行線式波高計, 抵抗線式波高計, ステップ式波高計, ^{6), 11), 30), 35)} 容量式波高計 ⁴¹⁾
間接観測法	気圧変化を利用する方法	
	加速度変化を利用する方法	—— ブイ式波高計
	浮力変化を利用する方法	—— 浮力式波高計 ¹⁾
	水压変化を利用する方法	—— 摺動抵抗型, ^{2), 3), 4), 40)} 直記型, ¹⁰⁾ 差動変圧器型, ⁹⁾ ストレインゲージ型, ²⁰⁾ バイプロトン型 ²⁰⁾ 差圧検出型, ³³⁾ スタスコープ式, ^{7), 34)} 吊り下げ式 磁歪型, 圧電素子型, 各水压式波高計

られたとみてよいように思われる。波浪観測に関する研究はいろいろな人によってなされているが、わが国については、海岸港湾工学にたずさわる人による研究が多く、その貢献も非常に大きいものがある。これもその必要性が、海岸港湾工学の場合特に強いものがあるためであろう。

上記したように、たしかにわが国における波浪観測は着実な進展をみせてはきたが、しかし社会の進歩、高度化にともない、さらに高度な進歩が要求されているのが現状である。港湾の大型化にともなうやや深い海での波浪観測、海洋開発にともなう非常に深い海での波浪観測、海岸港湾工学の学問上の進歩にともなう精度の向上、スペクトル云々、方向スペクトル云々に対応するための高度な観測法、また、収集される莫大なデータを能率的に処理するためのデータ処理方法の開発などその例である。

このように現在波浪観測については、その高度化の方向の研究が非常に強く要求されているが、しかしまた一方においては、初歩的ミス、初歩的トラブルも多く、これをいかにして解消するかということも現在なお大きな問題であることは否定できない事実である。稀れにみる大しけのあと、設置された波高計のうち何台が果して満足なデータを提供してくれるであろうか。われわれはその数の意外と少ないことに驚かされる場合が多い。

本講は、このようなことから、初歩的ミス、初歩的トラブル解消の立場に立って、国内における波浪観測施設の整備状況ならびに国内現用波浪観測機器についてその概要を解説し、さらに機器設置にあたって経験した失敗例など話題を提供しながら現観測法の問題点を考察する。

2 全国波浪観測施設整備状況

序論でも述べたようにわが国の波浪観測体制は、世界的にも例をみないほどまでに充実したものとなっている。しかしこの辺で一度全国的な立場から整備の実態をよくながめ、問題点を忠実に抽出して検討し、その上で今後の進歩発展をはかることも必要ではなかろうかと考える。このような意味から、港湾技術研究所で調査された資料⁴⁰⁾（開発局所管の分について一部修正）をもとに2、3の考察をこころみただ、それをここに述べることにする。

2-1 全国波浪観測地点

現在日本国内にある波浪観測地点の総数は表-2に示されてあるように225箇所となっている。この数は一応定常観測および準定常観測とみなされるものの数である。この数の中には、文献40)にも記されてあるように、かなり不確定なものも入っているが、一応現在の大勢を示しているものと思われる。これを所管別にみると表-2のとおりで、港湾局63で当然ながら最も多く、以下表に示すとおりであるが、国の行政機関（港湾局、水産庁、建設省）の合計130に対し地方公共団体と民間の合計が77で意外に多いことに気付く。おそらく10年位前までは、波の観測といえばほとんど国の機関により実施されていたと思われるが、それがこのように地方公共団体、民間により実施されるようになったことは、計器の進歩もさることながら、その必要性がそれぞれの機関に直接的になったことを示すもので、興味深く思われる。

このように多くの地点で日本沿岸の波が観測されていることは、まことに幸なことであるが、しかし、そのデータの測得率、信頼度などについては（確かなことをつかんでいないので言及し難いが）、筆者の知る北海道内の観測の実態から類推すれば、かなりいろいろと問題がありそうと思われる。このようなこともあってか、運輸省港湾局では、全国15の港を拠点観測指定港と名付けて、波浪観測の半義務づけを行っている。この15の港では、何としても、充実した定常観測を行ない、資料をとろうというねらいである。図-1にこれら15の指定港の地

表-2 全国波浪観測地点数および現用波高計数

区 分	港湾局 関 係	水産庁 関 係	建設省 関 係	そ の 他 の 機 関 大 学 関 係	地方公共 団体関係	民 間	計
観 測 地 点	63	33	29	18	49	28	225
観 測 塔	11	2		3	2	1	19
摺動抵抗型水压式波高計	35	25	20	6	36	15	137
直記型水压式波高計	13	1	6	5	17	9	51
リレー型ステップ式波高計	14	1	10	6	2	4	37
スタジャ式波高計	10	10					20
水中発射型超音波式波高計	8	2		1	2	2	15
ストレーンゲージ型水压式波高計	10	1		2	1		14
実体視式波高計	2			1	3		6
差圧検出型水压式波高計	4					1	5
容量式波高計	2			1			3
差動変圧器型水压式波高計					1	1	2
パイプロトン型水压式波高計				1	1		2
計	98	40	36	23	63	33	292
ストレーンゲージ型波向計	3			1			4
海象レーダー	8						8

点名と位置を示した。

次に、全国観測地点の地域的分布を調べてみることにする。便宜上、本州を大きくほぼ2分する位置として能登半島と伊豆半島を結ぶ線で北と南に分け、さらにこれを太平洋岸と日本海岸に区分し、これに島である北海道と九州を加えて、全国を表-3、図-1に示すように5つの地域に区分し考察してみる。表-3からわかるように、本州太平洋岸は、北も南も60地点を越え、他地域の20のオーダーをはるかに越えている。これは、太平洋岸の人口密度、開発度合、重要性、ならびに台風の常襲地帯ということから当然うなづける結果である。

本州太平洋岸南北がほぼ同数、また他の地域が20代ではほぼ同数というのは、上記したような自然条件、人工条件に対し結果的にバランスのとれた状態を示しており興味深い。

港湾局の指定港湾の地域的分布については、本州太平洋岸南と北海道の両者で、約半数の7港となっているが、これは前者は台風常襲地域であること、北海道は、日本海、オホーツク海、太平洋と3海洋に囲まれているという特殊事情によるものである。

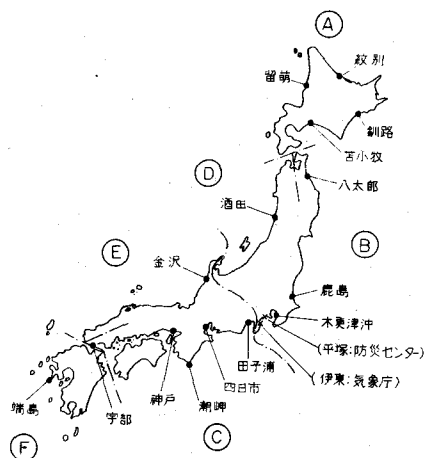


図-1 港湾局観測指定港

表－3 地域別観測地点数等

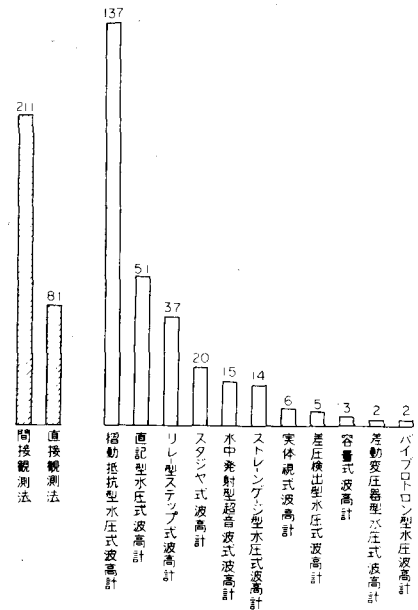
地 域 区 分	観測地点数	観測塔数	海象レーダー数	直接観測法の主体の地点	観測指定港数	観 測 指 定 港		
						塔所有	レーダー所有	直接法主
A 北海道地域	30	7	1	25	4	2	1	4
B 本州太平洋岸北地域	63	7	2	18	3	1	1	2
C 本州太平洋岸南地域	62	4	0	11	5	1	0	1
D 本州日本海岸北地域	25	0	3	2	1	0	1	0
E 本州日本海岸南地域	22	0	2	5	1	0	1	1
F 九州地域	23	1	0	4	1	0	0	0
計	225	19	8	65	15	4	4	8
太 平 洋 岸	157	15	2	48	12	3	1	5
日 本 海 岸	68	4	6	17	3	1	3	3

2－2 全国波浪観測機器

現用の全国波浪観測機器を機種別、所管別にしらべてみると表－2のとおりである。機種にして波高計11種、波向計2種、総数にして波高計292台、波向計4台となっている。総数が地点数を上まわっているのは、同一地点で複数以上の機器を具備している場合がかなりあるからである。所管別所属数は港湾局関係が圧倒的に多い。また併置、予備機についても港湾局関係が多い。全般的に、多少多く登録されている可能性があるが、観測地点の場合と同様、大勢はかなりよく示されているものと思われる。

次に機種別に全国現用台数を比較してみると、図－2に示すとおりで、摺動抵抗型水圧式が圧倒的に多く137台を示し、直記型水圧式が51台でこれにつき、さらにステップ式が37台でこれにつき、つぎにスタジャ式、超音波式などがこれに続いているが、台数はいずれも20台以下でかなり少ないものとなっている。上記の順位は必ずしも性能、得失によるものではなく、むしろ開発されてからの歴史的長短がこのような結果を示していると思われる。また、波向計が、その必要性にもかかわらず、現用台数が少ないが、これは計器自身の開発がまだ十分でないことによるものと思われる。今後の研究が必要である。

見方を少しかえて直接観測法による観測と間接観測法による観測とを比較してみると、間接観測法（水圧式）による観測が圧倒的に多い。しかしこの傾向は超音波式波高計の開発が進んだ今日おそらく大巾に変わるものと予想される。次に地域別に観測方法の主体をみてみると表－3からわかるように、北海道はその殆んどを直接観測法によっているが、他地域は殆んど間接



観測法によっている。本州太平洋岸北がその中でも18という多い数字を示しているが、これは東京近辺に総合観測のための観測塔が多くみられるようになったためである。また指定港について直接観測法の採用をみると、15の指定港のうち8港が直接観測法または直接、間接の併用を行っており、指定港としての充実度合がうかがえる。

2-3 全国海象観測用レーダー

次に海象レーダーの台数をみると、高価ということが原因してかその数は少ない。その数は8基、しかもそのほとんどの6基が日本海岸に設置されているのは、多分、日本海の波はシャープなためレーダーで観測するのに都合よいということによるものと思われる。指定港とレーダー配置との関係をみるに、表-3からわかるように、15の指定港のうち4港しかレーダーをもっておらず、レーダー配置については今後一考する必要があるように思われる。

2-4 全国観測塔

観測塔による総合的観測が盛んに話題になった時期があったが、それでは現在何基ぐらいの観測塔があるかをみてみると、表-2と表-3に示すとおりで、総計で19基、うち港湾局関係11基で大半を占め、他の機関ではそれぞれ2、3基にとどまっている。19基という数は、経費と効果からくる一種の定常状態を示しているように思われる。

次に観測塔を地域別にみると、北海道は7基で本州太平洋岸北地域と同数を占め、両者で全国19の大半14を占めている。これには立地条件がかなり影響しているように思われる。また指定港と塔数との関係をみると、15港のうち観測塔のあるのはわずか4港で、現在のところ指定港と観測塔の設置とは、それぞれ独立した立場で考えられているようである。

3 国内現用波浪観測機器解説

前節において、現在国内で使用されている波浪観測機器の機種ならびに数量について述べたが、ここでは各機種の原理得失などについて少しく述べることにする。実態把握を主眼とする立場から、ここでは、方法的に、機種の現用数の多い順に記した。紙面の都合もあり、2・3の浪高計以外については極く簡単に記した。なお、波向計、海象レーダー、データ処理システムについても若干触れることにする。

3-1 間接観測法による波高計

(1) 摺動抵抗型水圧式波高計^{2), 3), 4), 10)}

本器そのものの原理機構に入る前に水圧式波高計の一般的原理について概略を述べることにする。通常の教科書にも記されてあるので簡略に記す。

水深 h なる水底の圧力変動を Δp 、海水の単位重量を w 、波の波長を L とすれば水面波高は微小振巾波の理論により

$$H = \frac{\Delta p}{w} \cdot \cos h \frac{2\pi h}{L} \quad (1)$$

なる式で与えられる。

波長 L と周期 T との間には

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \cdot \tan h \frac{2\pi h}{L} \quad (2)$$

なる関係があり、 T がわかれば L がわかる。水深 h 、海水密度 w は既知であるから、結局、

波高計により Δp と T が得られれば式(1)を用い水面波高 H を求めることができる。実際には、図表を用い、水深と波の周期とから直ちに $\cos h \frac{2\pi h}{L}$ の値が読取られるようになっている。

実際に海の波を水圧式で観測した場合、一つ一つの波形を求めることは極めて多くの手数がかかり事実上困難である。一般には測定時間内の統計的な波高と周期を求めることになる。統計波として有義波をとれば、換算式は次のように示される。

$$H_{\frac{1}{3}} = n \cdot \frac{\Delta p_{\frac{1}{3}}}{w} \cdot \frac{\cos h \frac{2\pi h}{L}}{\cos h \frac{2\pi R}{L}} \quad (3)$$

ここで R は波高計の海底からの高さ、 n は補正係数である。

n 値については、現地実測の結果として、1.0～2.0の範囲の値が報告されている。この n 値はそれぞれの観測地点で、実例により決定するよう望まれているが、標準値として $n = 1.35$ が多く用いられてきた。しかしこの n 値は、このように単純な一定値で表わされるものではなく、少なくとも水深、波長、波高の関数として表わされるべきものであることが最近明らかにされつつある。

また n 値による補正がなぜ必要かについては、

- 1) 換算式が微小振巾波理論によって求められ、表面波の非線形性の影響が無視されている。
 - 2) 水中圧力の減衰率は波長によって異なるが、表面波形は性質の異なる無数の波の合成によってできている。
 - 3) 海底地形の影響および海底地盤の透水性の影響を無視している。
 - 4) 測定機器装置の応答特性によって一般に測定値には負の誤差が含まれる。
- などによるものと考えられている。

n 値については現在もいろいろと研究がすすめられているが、ともかく水圧式にとっては、性能の限界を支配する重要な因子である。換算手続が要ることと、この補正値が入ることとが水圧式波高計の欠点である。

次に摺動抵抗型水圧式波高計そのものの原理機構について若干記すことにする。

この波高計は当初運研式ケーブル型と呼ばれていたものである。現用の波高計としては最も早くに開発された機種である。図-3はその原理機構を示す。圧力変換部分に摺動抵抗を使っているのが特徴である。水面変動

によって水中にあるゴムチューブ内の空気圧が変化し、この圧力変化が金属ベローズ(B)を介して摺動抵抗器VRの中間タップの変動となる。摺動抵抗器VRは陸上回路と組まれ電氣的にブリッジを構成しているので、中間タップの変動は電氣的量的変化として得られ、これが記録計により記録される。なお

潮汐の干満による金属ベローズの異常伸縮を除く方法としてはスローリーク孔Lを設けてある。

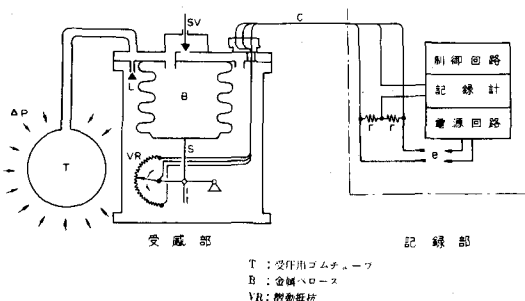


図-3 摺動抵抗型水圧式波高計原理

この波高計は電気回路が簡単であるので、ケーブル延長等設置条件がらくである。また修理も扱いも簡単である。しかし、機械的可動部分が多く、特に、摺動抵抗面は接触可動とな

っているので、長期間の使用にあたっては、この点十分注意を要する。

(2) 直記型水圧式波高計¹⁰⁾

運研式直結型といわれていたもので前記摺動抵抗型と平行して開発されたものである。ケーブルを使用せず、設置した受圧部内で直接記録できるのが特徴である。原理機構を図-4に示した。短期間用、移動用、応急用としては唯一のものである。

(3) ストレンゲージ型水圧式波高計¹¹⁾

抵抗線歪計型とも云われている。圧力-電気変換部にいわゆるストレンゲージを使用してあることが特徴である。図-5はその原理機構を示す。この波高計は、受圧部内に可動部分がほとんどないこと、内部調整の必要ないこと、そしてまた小型で頑丈であり、しかも高感度であることが利点である。しかし電氣的障害を生じやすくなるので、設置、調整には十分注意する必要がある。

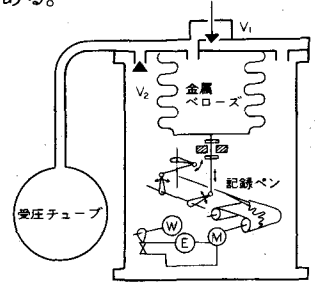


図-4 直記型水圧式波高計原理

(4) 差圧検出型水圧式波高計¹²⁾

別名トウジョウ式直読式波浪計ともよばれるもので、水圧式でありながら直読できるよう工夫した点に特徴がある。原理は、2台の水圧式波高計（実際には次に述べる差動変圧器型水圧式波高計を使用している）を同一測点の水深の異なる上下2点に設置し、この2点上下の差圧を補正係数を消去して検出し、表面波形を直読しようとするもので、

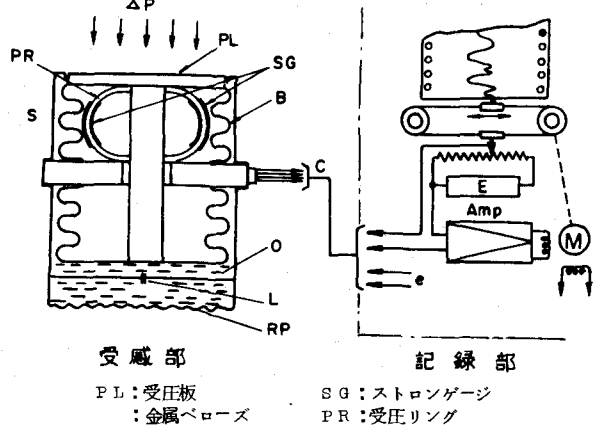


図-5 ストレンゲージ型水圧式波高計原理

面白い着想であると考えられる。実際の使用例はまだ多くはないようであるが、ある範囲の波についてはかなりよい結果を得ているようである。

(5) 差動変圧器型水圧式波高計¹³⁾

気象研Mark-III型とよばれているもので、圧力-電気変換部分に差動変圧器を使用したところに特徴がある。原理的には摺動抵抗型の可動接触部分の除去を意図したものである。図-6はその原理機構を示すものである。この波高計は、可動部分が少なく、またその可動部分も他に接触することがないので耐久性の点で有利である。しかし、電氣的には、信号伝送波が交流である関係上若干

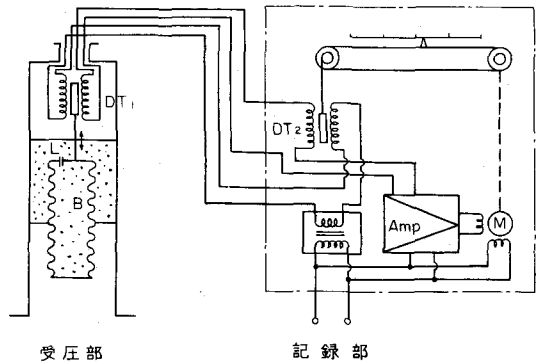


図-6 差動変圧器型水圧式波高計原理

障害をおこしやすくなる。

(6) バイプロトン型水圧式波高計²¹⁾

この波高計は、圧力電気変換部にバイプロトンと称する振動線型圧力一周波数変換器が使用されているところに特徴がある。圧力を感じるダイヤグラムと固定片の間に張られた磁場の中で振動するタングステン線の固有振動が、その線の張力によって変化することを利用したものである。動特性、感度のよいのが特徴である。また遠距離測定に有利である。

3-2 直接観測法による波高計

(7) リレー型ステップ式波高計^{(8), (11), (12), (30)}

北海道開発局型ステップ式波高計あるいはリレー型階段抵抗式波高計とよばれるもので、電極と測定回路とを分離したところに特徴を有する、表面波形を直接観測する定常観測用波高計である。

ステップ式波高計は、波高桿に取付けられた電極が海水に浸ったり空気中に出たりする際につくられる電氣的 on, off 作用を利用して、海面変動すなわち波高を測定するものであるが、過去において使用されていたステップ式波高計は、図-7のようなもので、これはつぎのような問題点すなわち①固定抵抗の値を1個1個実験的にきめてやらなければならない、②水あか、海藻、貝などの発生付着により感度、直線性がすぐに変る、③測定を続けるにはかなり頻繁に電極を掃除しなければならないなどの問題点をもっていた。このステップ式波高計は、リレーを用いてこのような問題点を除去したものである。リレーは次のような性能すなわち、電極が海水に浸ったときに流れるショート電流と電極が海水から出たときに流れるリーク電流とのほぼ中間の電流で作動しはじめ、かつ内部抵抗が十分小さいという性能をもつものである。図-8は抵抗並列バッテリー有型の回路、図-9は抵抗直列、バッテリー有型の回路、図-10は抵抗直列バッテリー無型の回路をそれぞれ示す。この波高計においては、ショート電流およびリーク電流が、電圧変動、電極部の残水量の変動（電極部における海中生物の付着状態による）など外的原因によりかなりの範囲で変動しても、電極が海水に浸ったか否かが安定した機械的リレー接点の開閉として得られ、したがって感度、直線性の変わらないものとなっている。

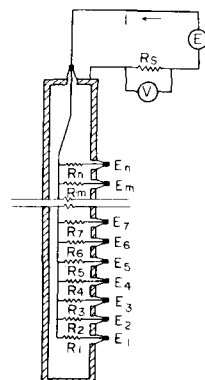


図-7

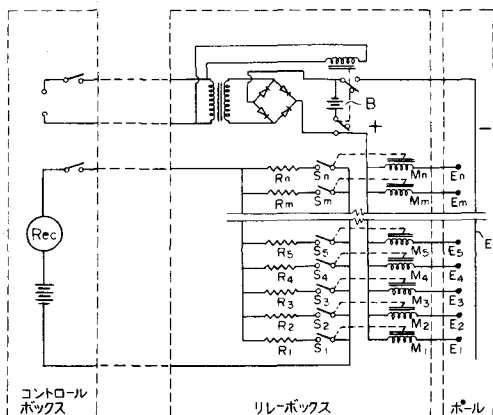


図-8 リレー型ステップ式波高計回路（抵抗並列、バッテリー有型）

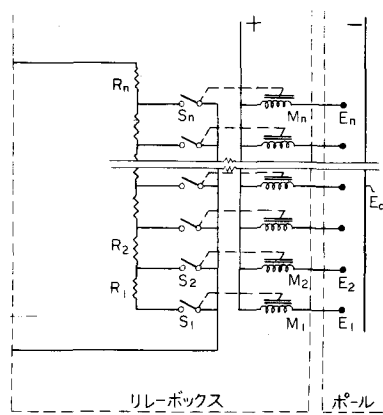


図-9 リレー型ステップ式波高計回路（抵抗直列バッテリー有型）

図-10のバッテリー無型は、水面付近のいくつかのリレーのみが作動するようリレーが組みこまれたものである。この型は、バッテリーがコンデンサーで置換えられているので、扱いやすくまたリレーの寿命の点からも都合よいが、故障の要素が多くなり安定性からみれば前2者の方が優位である。

抵抗配列方式については、それぞれ一長一短あるが、並列型は、抵抗値が同一であるので、互換性がよく、また、

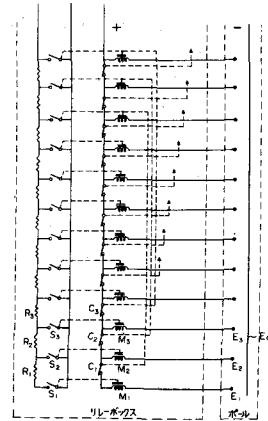


図-10 リレー型ステップ式波高計回路
(抵抗直列、バッテリー無型)

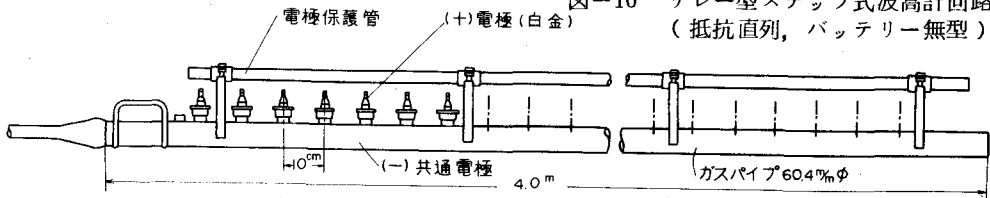


図-11 リレー型ステップ式波高計波高桿

製作上も、結線上(順序不同でよい)も、記録読取り上からも都合よい。しかしケーブル延長がかなり制限される欠点がある。これに対し直列型は、ケーブル抵抗の補正が容易であるのでケーブル延長上とくに制限がない。

図-11は、波高桿の外見図である。電極 E_1 、 E_2 ……には、白金製のものと真鍮製のものとある。真鍮の場合は(-)電極として、白金の場合は(+)電極として使用される。真鍮電極の場合、マグネシウム付着の問題、共通電極消耗の問題がともなうが、白金電極の場合、これらの問題は解消され、さらに電極部に発生する塩素ガスが海中生物の付着をさまたげる効力をもっているので都合よい。ただし白金の場合高価になる。

このステップ式波高計は、直接表面波形を読みとることができ、また精度のまぎらわしい記録をとる心配もなく、総合的信頼性の高いものである。しかし、これを取付けるには観測塔のような海上施設が必要であり、これの建設には多額の経費と大がかりな工事をともなう。これはこの波高計の大きな欠点である。

北海道では現在7箇所での波高計による定常観測が行なわれている。

(8) 水中発射型超音波式波高計^{36), 40)}

この波高計は、器体を水中に設置し、しかも表面波形を直接測定できる点に特徴がある。超音波式波高計そのものの着想はかなり古いものであるが、このように実用化されたのは最近のことである。港湾技術研究所とメーカーとの共同による数年にわたる研究の成果である。

原理は図-12に示すように、海中に超音波送受波器を鉛直上方に向けて固定し、鋭いビームの超音波パルスを発射して大気と境界をなす海面からの反射波を受信し、その間に要する経過時間を測定して、受波器から海面までの距離 l を伝播所要時間 t と超音波の海中伝播速度 c とから次式により求めるものである。

$$l = \frac{1}{2} \cdot c \cdot t$$

海水中の超音波の伝播速度は一応次式によってあらわされている。

$$c = 1410 + 4.21T - 0.037T^2 + 1.14S + 0.0168h$$

ここで c は音波の水中伝播速度 (m/sec), T は水温 ($^{\circ}\text{C}$)
 S は塩分濃度 (‰), h は水深 (m) である。実際にはこのような測定操作を極く短時間間隔で継続的くり返し、往復所要時間を電圧出力に変換して記録装置に導入し表面波形を得るものである。

この波高計においては主として次の問題点を解決することにより実用化を行った。その問題点というのは、超音波伝播径路上の浮遊物、魚類の遊泳等による不正反射波の影響をいかにとり除くかということである。この波高計においては二重のノイズゲート回路を具備することにより解決をはかっている。すなわち、その1つは、或限定された水深域内（振動子面と最低水位面の間）からの反射波を除去するゲート回路、いま一つは水位自動追尾比較方式によるゲート回路で、簡単に言えば水面からある深さまでの範囲からの反射波のみを有効な測定値として検出するようなゲート回路である。図

一13で a は測定可能範囲、 b は前者のゲート範囲による入力信号除去範囲、 c が後者のゲート回路による有効範囲を示している。この波高計は、表面波形を直読でき、したがって換算手続きが不要である点、また機体を海中に設置できる点大きな利点である。しかし水質条件が複雑あるいは急変する場所また海水が著しく攪拌される場所、船舶の航行のはげしい場所での設置はさげなければならない。

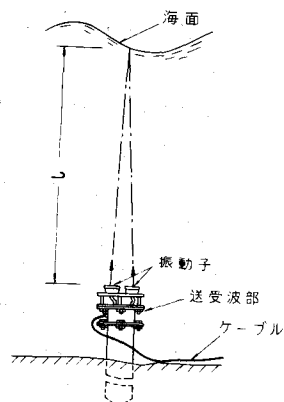


図-12 水中発射型超音波式波高計原理

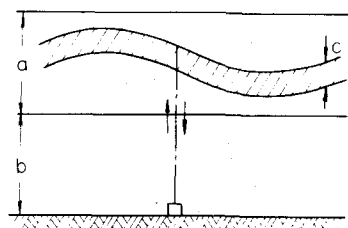


図-13

(9) 容量式波高計⁴⁰⁾

金属線または金属パイプの外側にこれに密着させて絶縁体を設け、このようにしてできる金属線または金属パイプを海中に垂直に設定し、金属—絶縁物—海水をもって1つのコンデンサーを形成させ、海水の変動にともなうこのコンデンサーの電気的容量変化を利用して波高を測定しようとするのがこの容量式波高計である。発想は特にあたらしいものではないが過去においては主として室内的測定に試用されていた。図-14は現用の検出部、図-15は現用の基本回路を示す。この波高計においては、 V_c を一定に保つようにしたところに特徴

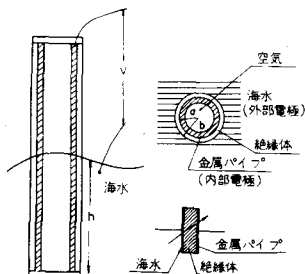


図-14 容量式波高計検出部

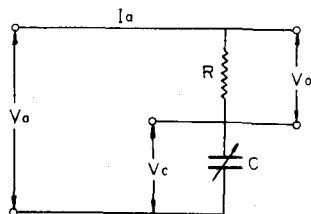


図-15 容量式波高計基本回路

がある。この種の波高計は周期に対する応答のよいのが利点である。使用にあたっては、検出部の海中生物付着除去に注意が必要である。

(10) スタジャ式波高計³⁾

宇田居式波高計ともよばれている。海上に設置した浮標の上下動を望遠鏡で追跡し、その望遠鏡の伏角変化を記録するようにしたものである。

図-16はその実際の構造を示す。

この波高計の利点は、比較的容易に準備でき、簡単に表面波形を記録できることである。欠点としては、視界の悪い時は測定できないこと、個人誤差が入りやすいことである。

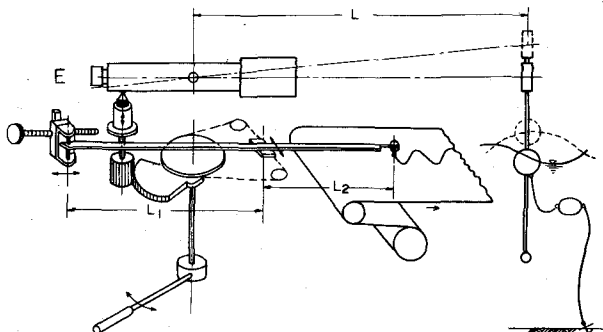


図-16 スタジャ式波高計原理

(11) 実体視式波高計^{3),10)}

この波高計は、測定しようとする海面に標柱あるいは浮標のような目標物を一切使用せずに波を観測できるところに特徴がある。原理機構は図-17のとおりである。この波高計によれば砕波帯内の波形観測も可能である。欠点としては、実体視に習熟した観測員を要すること、気象、日照条件に支配されることである。

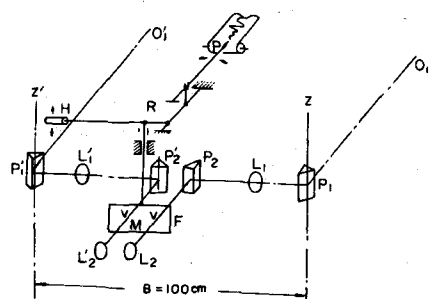


図-17 実体視式波高計原理

(12) その他の波高計

現用の機種ではないが、以上述べた波高計の外に浮力式波高計¹⁾、吊り下げ式波高計^{1),34)}、平行線式波高計、抵抗線式波高計、スタートスコープ式波高計、空中発射型超音波式波高計²⁰⁾、実体写真法などがあるが、紙面の都合で省略する。

3-3 波向計・海象観測用レーダー

(13) ストレインゲージ型定置式波向計⁴⁰⁾

この波向計は測定点における波による水粒子運動の水平方向二成分を連続的に測定することにより通過する波の進行方向を知るものである。その原理は図-18に示すようなものである。図において $\overline{a o a'}$ は波による水粒子運動の方向、 $\overline{o c}$ は海流などの流れで、測定された二成分からきまる $\overline{b b'}$ の方向 θ_0 が波向を示す。

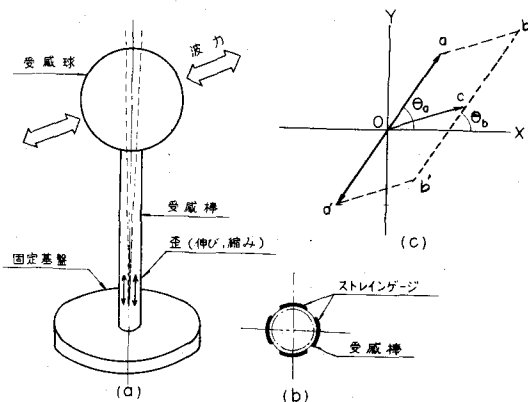


図-18 ストレインゲージ型定置式波向計原理

(14) 海象観測用レーダー^{17),40)}

図-19に装置の構成を示した。これは測定しようとする海域の波峯線の分布をP・P・I表示し波向を求めるものである。レーダ装置は、極めて巾の狭い

パルス波状電波をアンテナから連続して発射し、同時にこのアンテナは一定速度で水平方向に回転する。パルス発射と反射受信時の時間差が距離をあらわし、これはブラウン管上に、それに相当する距離（ブラウン管上のレーダの位置からの）のところに輝点として示され、その位置に反射物体のあったことを示す。一般に風波のような波の場合、上記の理によりブラウン管上に峯線の像が示され、これに直交する方向をもって波向とする。

(15) その他の波向計

以上の外にレーリー盤式波向計¹⁰⁾電磁流速計を使用した波向計¹⁰⁾実体写真による観測法、方位盤による観測法¹⁰⁾トランシットによる観測法¹⁰⁾などあるがここでは省略する。

3-4 データ処理システム

(16) データ処理システム(1)

従来現地波浪の観測データの処理は、殆んど手計算により行われてきた。しかし最近ではこの方法では記録の読取りに個人的主観がかなり多く入ること、スペクトル解析を行う場合膨大な時間と人的労力を必要とすること、膨大な観測資料に対し作業能率を飛躍的に向上させなければならないこと、しかもこれを統一的技術水準のもとに実施したいことなどの理由から観測データのデジタル化と電子計算機による処理、いわゆるデジタルデータ処理システムの開発がすすめられてきた。図-20は現在考えられるいくつかの処理システムを示したものである。諸種の事情から現在はb)の方法が一般的な方法とされている。

港湾技術研究所では種々研究の結果、f)の方法を開発しこれを実用に供している。

(17) データ処理システム(2)

図-21(a), (b)は北海道開発局で現在実用に供しているデータ処理システムの系統図である。

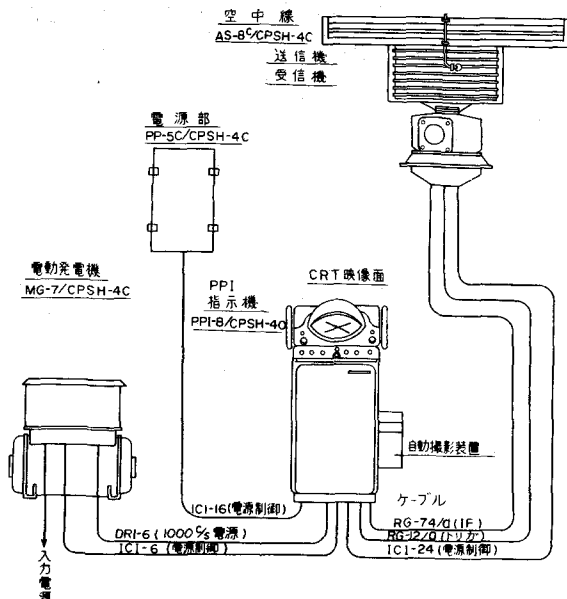


図-19 海象観測用レーダー構成

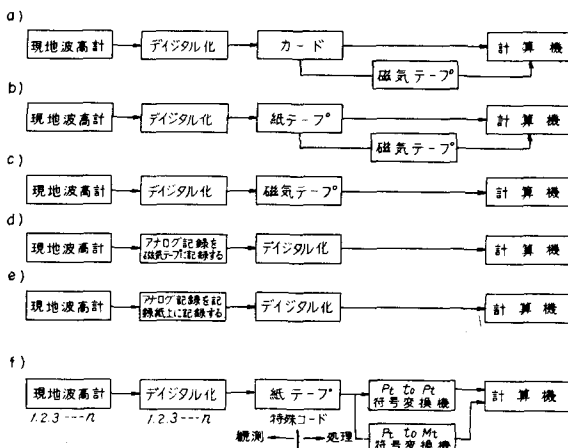
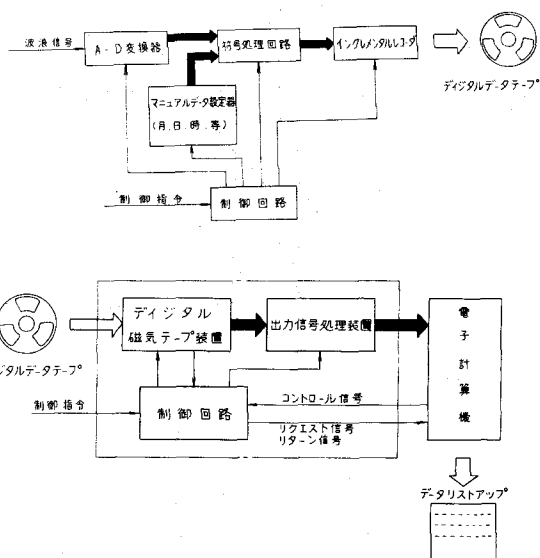


図-20 データ処理システム

データ処理の高速化，電子計算機により効率的使用という立場から，種
種検討の結果現地での磁気テープに
よるデジタル記録の方法をとった。
すなわち，A-D変換を具えたイン
クレメンタルレコーダーを波高計出
力につなぎ，実際の観測時に磁気テ
ープにデジタル記録し，月に1回テ
ープを計算センターに集め，電子計
算機にかけけるものである。



4 国内既設の観測塔

現在国内には前にも記したように19
の観測塔がある。これらはそれぞれ目的，
規模，所管，構造型式，立地条件等を異
にするものであるが，いずれもここ10年

図-21 データ処理システム（北海道開発局）

内に建設され日本の海象観測に大きな貢献をなしているものである。ここにそのいくつかについて概要を紹介し，現況認識と今後のこの分野の発展に役立たせたいと思う。なお紙数の都合もあり一括して表-4に示した。調査不充分のため他の観測塔について紹介できないのは残念であるが，一応各所管代表ということでそれぞれを載せてある。なお図-22～図-34にそれぞれの概略構造を示した。

表-4 国内観測塔例概要

観 測 塔 名	構 造	場 所	所 管	設置目的	水深	全 高	岸 距	建 年	設 時	備 考
白浜海洋観測塔 ²⁾	図-22	和歌山県白浜	京都大学	海洋基礎研究	-5m	13.5m	300m	1961		気象，風，水温，塩分，潮位，波，流向，流速など
伊東海洋気象観測塔 ⁴⁾ 2)	図-23	静岡県伊東	気象庁	海洋気象研究	-2.0	3.0	500	1964		水温，気温，潮流，塩分，潮度など
平塚波浪等観測塔 ³⁾	図-24	神奈川県平塚	防災科学技術センター	波浪等海象研究	-2.0	3.0	1,000	1964		風，波浪，波力，振動など
東海区水産研観測塔 ³⁾ (B)	図-25	神奈川県/田和湾	水産庁	漁場環境調査研究	-3.5	9		1963		水温，流向流速など
内海区水産研観測塔	図-26	広島県広島湾	水産庁	漁場環境調査研究	-8.8	16		1965		水温，電気伝導度，流向流速など
神戸港波浪観測塔	図-27	神戸港	港湾局	波浪等観測	-1.3	2.4	2,700	1965		波浪，流向，流速，風など
京葉港（仮称）海象観測塔 ³⁾	図-28	東京湾船橋	千葉県	気象，海象，観測	-6.7	2.7	5,000	1967		波浪，風，潮位，気象など
北海道開発局波浪観測塔 ³⁾ 2)	図-29	苫小牧港	北海道開発局	波浪等観測	-1.0	18.4	1,000	1963～1970		波浪，風など
同 ²⁾ (2)	図-30	石狩湾	同 上	同 上	-1.0	2.0	1,200	1966～1969		同 上
同 ³⁾ (3)	図-31	留萌，岩内，松前，山背泊，室蘭，樺太各港	同 上	同 上	-1.0 -12.0r	2.0	500 1,000r	1967 or 1968		同 上
同 ³⁾ (4)	図-32	苫小牧港	同 上	同 上	-1.3	2.4	1,300	1970		波浪，風，流向，流速など
大島第二人工島 ³⁾	図-33	新潟県大島	帝国石油KK	天然ガス採取	-1.5	3.0	1,300			波浪観測に利用
北海道開発局波浪観測海中マウンド ³⁾	図-34	紋別港	北海道開発局	波浪等観測	-1.0		900	1967		波浪

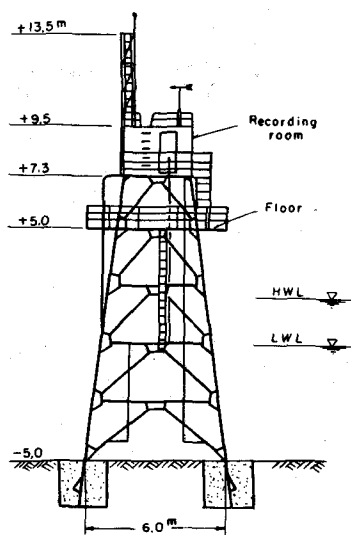


図-22 白浜海洋観測塔

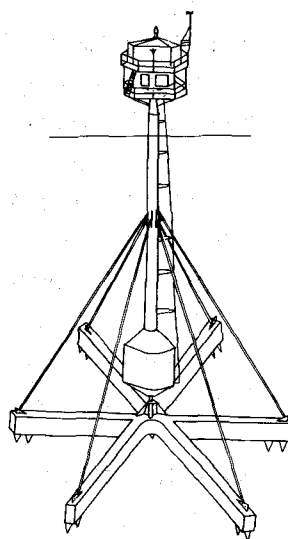


図-23 伊東海洋気象観測塔

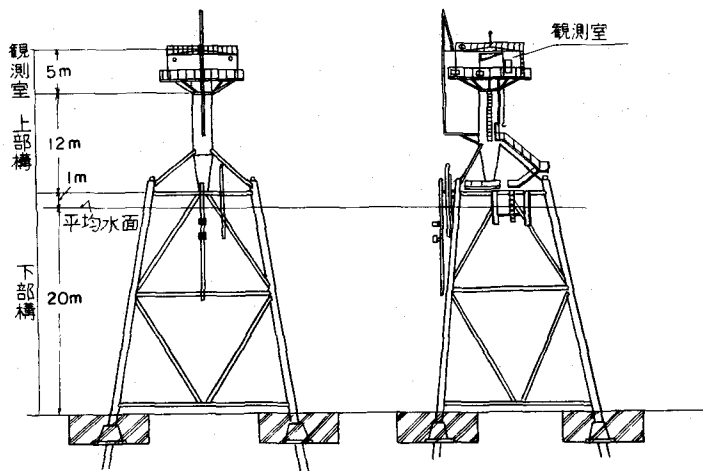


図-24 平塚波浪等観測塔

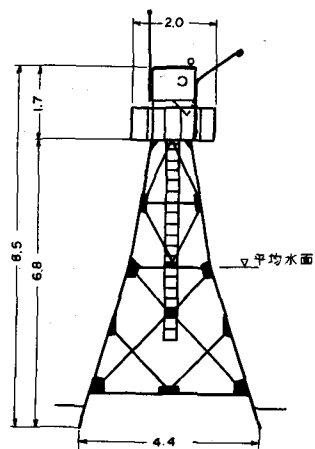


図-25 東海区水産研究所観測塔

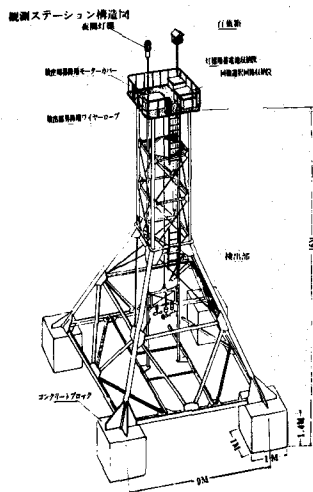


図-26 内海区水産研究所観測塔

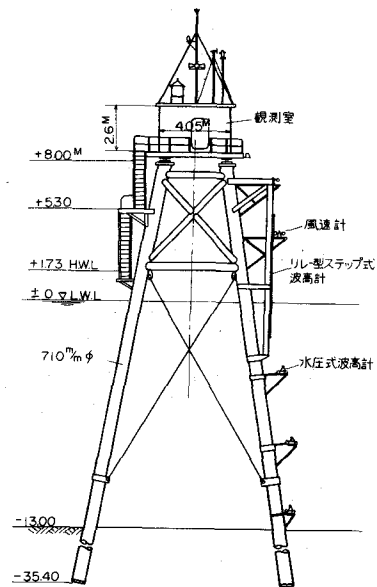


図-27 神戸港波浪等観測塔

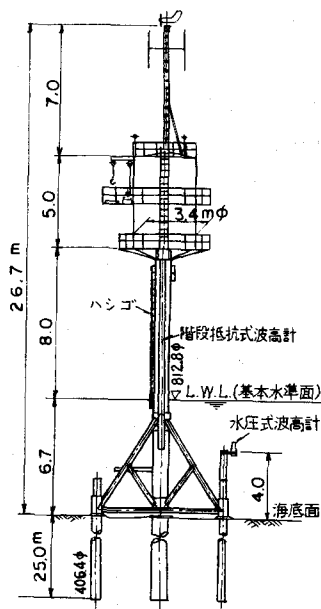


図-28 京葉港（仮称）海象観測塔

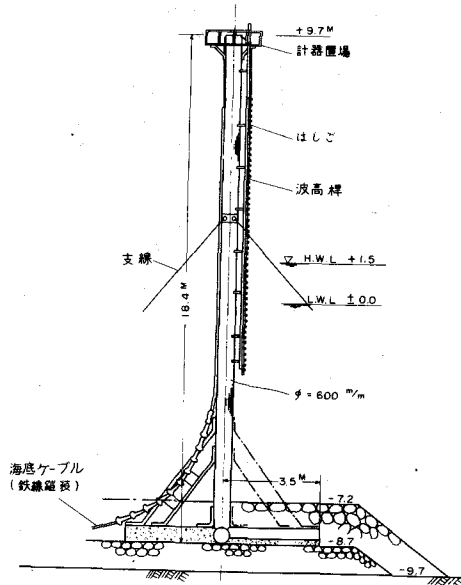


図-29 北海道開発局波浪観測塔
(苫小牧)

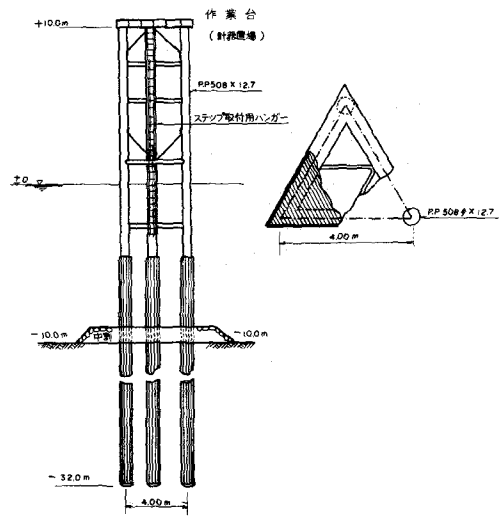


図-30 北海道開発局波浪観測塔
(石狩湾)

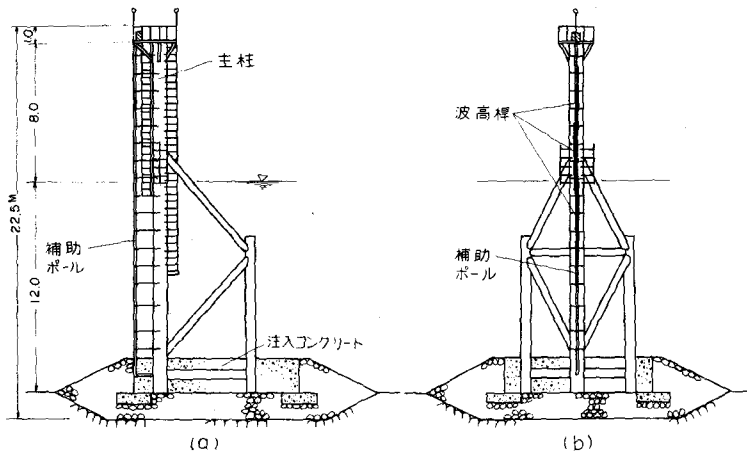


図-31 北海道開発局波浪観測塔
(昭和43年度)

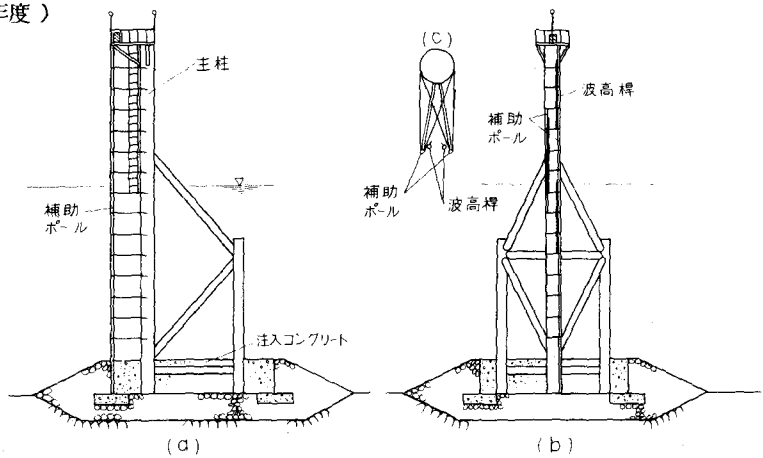


図-32 北海道開発局波浪観測塔
(昭和43年度)

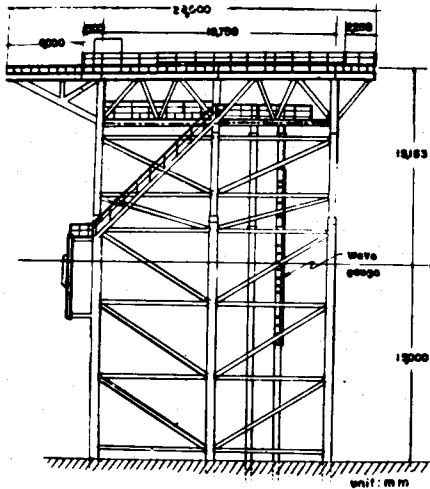


図-33 大瀨第二人工島

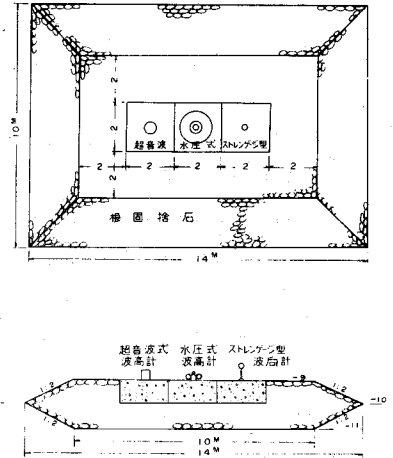


図-34 北海道開発局波浪観測
海中マウンド

5 波浪観測における2、3の問題と考察

5-1 波浪観測における最小課題

筆者は長年波浪観測にたずさわってきたが、現在、次のようなことを早急実現すべき最小の課題と考えている。

- 1) 15港の観測指定港において、表面波形の観測を2時間毎20分間、 $\pm 5\%$ の精度、年間観測率100%（年最大波高が必ず含まれる）の条件で10年間継続する。
- 2) その他の定常観測施設においては、表面波形の観測を、2時間毎20分間、 $\pm 5\%$ の精度、年間観測率90%（但し年最大波高を2年に1回はキャッチする）の条件で6年間継続する。

これは現在の全国観測地点数、波浪観測機器数、波浪観測機器の性能、観測歴、必要性等から考えて当然要求される課題であろうと考える。一般に海象観測は気象観測と異なり海上というきびしい条件に支配されるが、しかし現在では陸上気象観測にかなり近い観測実績が確保されるべきであるとする。以下、ここに述べたことに関連して、2・3の問題点の考察を行うことにする。

5-2 現用波高計の精度の問題

現用の波高計が一体どの程度の精度をもっているのか、そしてそれを現地に設置した場合、どの程度の精度が常時確保されるのか、これは観測する者にとって大きな問題である。文献(40)をもとに考察すると現用の波高計については次のようにいえそうである。

理想的条件下にあって必然的に考えられる最悪の精度として

水圧式： $\pm 5 \sim \pm 15 \%$ — 周期3～20秒の波、但し電極間隔は10 cm

ステップ式： $\left. \begin{array}{l} 1 \text{ m } \pm 10 \% \\ 2 \text{ m } \pm 5 \% \\ 5 \text{ m } \pm 2 \% \\ 10 \text{ m } \pm 1 \% \end{array} \right\} \text{ 周期に無関係}$

超音式： 10～5 %以内 — 周期3～5秒の波

5～1 %以内 — 周期5～20秒の波

実際には、このような極限の精度のあらわれるのは、確率的にかなり少なくなるのでこれよりよい精度が得られる。しかし、また実際の海では、いろいろと他に不確定な要素が誤差として入るので、結局は大体上記の精度に近いものになると考えられる。

計器そのものの精度がよくても、その精度を維持する条件が確保し難ければ結局精度の悪いものになってしまう。波高計については特にこの点が大事である。外的条件の大巾な変動にも余り影響されず、その波高計のもつ本来の精度が容易に常時確保されることが実際的には精度のよい波高計ということになる場合が多い。この点ではデジタルタイプのステップ式がかなり有利なように思われる。ステップ式については前記したように、波高が小さい場合に精度が悪いという欠点があるが、これは電極間隔を10 cmに限るためであり、波高桿の中間部（静水面附近）に別の波高桿（10 cm 間隔）を5 cmずらして並列に設置することにより、波高が小さい場合の精度を2倍に上げることが容易にできる。

5-3 波高計の故障率の問題

現実には、故障の発生しない波高計を期待するのは無理というものであろう。もちろん計器として、極力、故障の発生しないような設計、製作がなされ、また可能なだけよい条件のもとで使用されるようつとめるべきであるが、筆者は波高計の故障という問題について現時点では次のような考え方をもっている。

- 1) 海上部分の計器は、極力シンプルにする。
- 2) 海上というきびしい自然条件下における波高計の故障発生を素直に認め、海上部計器は常に2台設置、もしくは他波高計との併設を一応原則とする。
- 3) 陸上部計器については、メーカー側で共同スペアを応急用として準備する。同時に、簡単な手動式記録装置を応急用として観測室に備える。
- 4) 記録の一部を定期的に計器関係指導者へ送付し、故障発見の資とする。

5-4 観測塔設置上の問題点

小規模ではあるが9基の波浪観測塔の設置を経験し、感じていることを記すならば、第1に大変多額の金がかかるということ、第2に工事実施にいろいろと困難をとまなうこと、第3に耐用年数が不確定で、設計上、維持管理上常に不安をとまなうということである。これらのことは海中構造物という特殊性から生ずるものであるが、しかし今後はこれまでの経験が生かされ、経費以外の問題についてはかなり容易になっていくものと思われる。2・3 具体的なことについて述べる。

(1) 塔の構造

杭打型和据置型両者とも経験したが、結果からみて据置型がやりやすかった。両者について若干考察すると、

設置型：多少波があっても比較的容易に作業ができる。

杭打船が要らないので作業船も少なくすむ。しかし起重船はかなり大きなものが必要となり、また海底の比較的硬いところであることが必要である。

抗打型：杭打船をはじめとし多くの船を必要とする。したがって、近くにかなり大きな港があり、さらに比較的長い期間なごの続くような海域で、且つ海底地盤が抗打に適していないと実際上工事はできない。

(2) 伝送方式

観測塔を計画した場合、測定量の伝送を無線にするか有線にするかは大きな問題となる。それぞれ一長一短あり、その決定はむづかしいが、一般的にみて、今後は無線テレメーターの傾向が強くなるものと考えられる。筆者らは、これまでのところ、海底ケーブル敷設に特に不都合がなかったので、すべて有線方式をとった。現在は、電力は有線で送り測定量は無線で伝送することを既設観測塔について考えている。

(3) 耐久性

鋼管杭の腐食の問題、外力に対する安定性の問題、材料の強度低下の問題等、不確定な要素がかなり多く、予測は難しいが、これまでの経験から、現在のもとで最低10年は確実とみている。

(4) その他

海上保安庁に対する許可の問題、漁業補償の問題があるが、これは技術的問題とは別なので省略する。

5-5 初歩的ミス、初歩的トラブルをなくすために

初歩的ミス、初歩的トラブルの例については口頭にて説明することとし、ここではこれらをなくすためにメーカー、ユーザーそれぞれどのようなことをなすべきか、筆者の考えている主だったことをまとめてここに記すことにする。

メーカー：

- ① 海上というきびしい自然条件をもっときびしく考えて、設計を2重に安全なものにする。
- ② 工場検査をより実際に合った条件で実施する。特に、現地で長時間経過後発生する現象に対する検査が必要である。
- ③ 新材料、新技術の導入については、十分予備実験を行い気象等外的条件の変化に対する耐久性を十分検討の上実施する。
- ④ 一般にメーカーは使う立場と異なり技術的に高いレベルにあるためか機構、回路等複雑になる傾向があるのでこの点を検討する。
- ⑤ ユーザーの不満、意見、報告は素直にきき、間に合わせ的ではなく根本的に改善をはかる。
- ⑥ 意外に設計、製作ミスが多いので（試作過程にあるものが多いためと思われるが）、これを皆無にする。

ユーザー：

- ① 使用前、一応疑いの目をもって十分点検し、特に海中に入るものについては、二重水密なるよう手を加えるなど、要すればメーカーの不足を補うようつとめる。
- ② 設置前に、最寄りの海中でリハーサルを実施し、完全な記録が得られることを確認する。
- ③ 運搬あるいは取付中に、破損、調整くずれなどの生じないように、特に人夫、潜水夫の取扱に予め十分な指導を行う（このような配慮の不必要な計器であることが望ましいが）。

- ④ 現地観測要員に対し、海上故障か陸上故障か判断ができる程度まで技術を修得させる。

あとがき

以上、わが国における現状を背景に、観測機器等波浪観測に関し種々述べた。紙面に限りもあり、十分意をつくさなかった点多々あったと思うが、本講が今後の観測計画、実施にいささかなりとも役立つところあれば、筆者のこの上ないよろこびとするところである。

参 考 文 献

- 1) 石黒鎮雄：波浪の研究——浮力を利用する自記波高計の設計——，長崎海洋気象台報告，2巻2号，昭和26年，（1951）
- 2) 井島武士：波高計による波浪の観測（第1報），波高計の試作について，運輸技術研究所報告，第3巻8号，（1953）
- 3) 井島武士：波高計による波浪の観測（第2報），運輸技術研究所報告，第3巻8号，（1953）
- 4) 井島武士，高橋智晴，中村憲一：波高計による波浪の観測（第3報）——水圧式波高計およびそれによる小名浜港における波浪観測（その1），運輸技術研究所報告，第4巻7～8号，昭和29年，（1954）。
- 5) 宇田居吾一：トランシットによる波浪の記録観測法，第2回海岸工学講演会講演集，昭和30年（1955）
- 6) 井島武士：実体視式波高測定器の試作，運輸技術研究所報告，第5巻3号，昭和30年，（1955）
- 7) 谷口 中：吊り下げ式波高計について，西部造船会会報，16，（1958）
- 8) 村木義男：ステップ式 波浪計の改良について，北海道開発局土木試験所月報，第71号，昭和34年（1959）
- 9) 降旗常雄：沿岸観測用遠隔自記波浪計MR-Mark III，第7回，海岸工学講演会講演集，昭和35年，（1960），
- 10) 井島武士：海岸・港湾測量，森北出版株式会社，昭和35年，（1960）
- 11) 村木義男：河川，海岸用計測器の研究とその応用，北海道開発局土木試験所報告，第31号，昭和37年9月（1962）
- 12) 永田 豊，彦坂繁雄，松本信保：電磁流速計による流向観測，第10回海岸工学講演会講演集，昭和38年（1963）
- 13) 永田 豊：波の方向スペクトルの測定——電磁流速計の応用——沿岸海洋研究ノート，第2巻第1号（1963）
- 14) 菱田耕造，小泉宗三郎，高田吉治：伊東海洋気象観測塔について，沿岸海洋研究ノート，第2巻第2号（1963）
- 15) 国司秀明：海洋観測塔とその測器について，沿岸海洋研究ノート，第2巻第2号，（1963）
- 16) 村木義男，石田直之，高島和夫：リレーを用いたステップ式波高計と波浪観測塔，第11回海岸工学講演会講演集，昭和39年（1964）
- 17) 井島武士，高橋智晴，佐々木弘：波向観測等におけるレーダー等の応用，

第11回海岸工学講演会講演集，昭和39年（1964）

- 18) 降旗常雄：Ocean Waves の沿岸観測について，沿岸海洋研究ノート，第3巻第1号（1964）
- 19) 本間仁，堀川清司，小森修蔵：水圧変動波形と水面波形の相関性，第12回海岸工学講演会講演集，昭和40年（1965）
- 20) 港湾局建設課：港湾工事に關する調査・観測・試験機器特集，港湾技術要報，No 44（1965）
- 21) 富永正照，松村圭二，橋本宏：バイプロトン式波高計について，防災科学技術総合研究報告，第1号，昭和41年（1966）
- 22) 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，昭和41年度（1966）
- 23) 高橋智晴，佐々木弘，鈴木福実，菅原一晃，中井徹也：波浪観測の一例について（デジタル記録方式による波浪観測データ処理システム），第4回港湾技術研究所発表会講演概要，昭和41年（1966）
- 24) 岩田憲幸，稲田亘：超音波式波高計（空中型）について，防災科学技術総合研究報告，第1号（1966）
- 25) 川島利兵衛：海岸附近の波高及び波向の遠隔測定装置について，沿岸海洋研究ノート，第5巻第1号（1966）
- 26) 岩田憲幸：沿岸実験観測施設概要，沿岸海洋研究ノート，第5巻第1号（1966）
- 27) 村木義男：北海道開発局における波浪観測塔と海象観測，沿岸海洋研究ノート，第5巻第1号（1966）
- 28) 菱田耕造：海洋観測塔についての私見，沿岸海洋研究ノート，第5巻第1号（1966）
- 29) 岩田憲幸：沿岸実験観測施設概要，沿岸海洋研究ノート，第5巻第1号，（1966）
- 30) 上原進，杉浦健三，平野敏行：水産における定置観測の現状について，沿岸海洋研究ノート第5巻第1号（1966）
- 31) 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回海洋工学講演会講演集（1966）
- 32) 岩垣雄一：長大栈橋による沿岸海況の観測，沿岸海洋研究ノート，第5巻第1号，（1966）
- 33) 内田則夫，斎藤幸義，東条定義，進藤 勉：小名浜港の風波について，第14回海岸工学講演会講演集，昭和42年，（1967）
- 34) 川鍋安次：吊り下げ式波浪計について，海と気象，第12巻6号，昭和42年，（1967）
- 35) 港湾局：港湾調査基準（案）第1編水工，昭和43年9月（1968）
- 36) 仁保武人，鈴木稔，浜田治男，安部京也，鈴木善三，寺西良輔：海象気象の観測・解析について——京葉港（仮称）における観測の実例——，土木学会誌，Vol 53 No9（1968）
- 37) 志水 武：超音波式波高計と水圧式波高計による観測結果について——紋別港における観測記録より——，第12回北海道開発局技術研究発表会論文集，昭和43年，（1968）
- 38) 高橋智晴，鈴木福実，佐々木弘：超音波式波高計について，第16回海岸工学講演会講演集，昭和44年（1969）
- 39) 村木義男，高島和夫：リレーを用いたステップ式波高計と波浪観測塔(2)，

第 16 回海岸工学講演会，昭和 44 年（1969）

- 40) 高橋智晴：沿岸波浪観測法，運輸省港湾技術研究所業務資料，昭和 44 年 11 月（1969）
- 41) 稲田亘，渡部勲：容量型波高計について，国立防災科学技術センター研究報告，第 2 号，昭和 44 年 3 月（1969）
- 42) 北海道開発局土木試験所：石狩湾の自然条件について，昭和 45 年 3 月（1970）