

容量式波高計の改良と現地観測への適用

土 屋 義 人・藤 木 繁 男

IMPROVEMENT OF CAPACITANCE-TYPE WAVE GAUGE AND ITS APPLICATION TO WAVE OBSERVATION

By Yoshito TSUCHIYA and Shigeo FUJIKI

Synopsis

To investigate wave transformation in shallow water, accurate multi-point observations of waves have to be carried out in the offshore direction from the shoreline. For this, improvement of capacitance-type wave gauges, especially about their electronic circuit of the amplifier and probe sensor is made through detail calibration. Sets of capacitance-type wave gauge both for laboratory experiment and field observation are constructed successfully. Application of the sets of wave gauges is made to multi-point observations of waves along an observation pier 315m long in the offshore direction at Ogata coast. Comparison test between the capacitance- and sonic-type wave gauges is also made. Wave profiles, spectral properties, wave grouping, as well as statistical properties of the observed waves are compared. We conclude that the improved wave gauge is successfully applicable to field wave observations with high accuracy and stability. Some informations of transformation of random waves in very shallow water are described.

1. 緒 言

海岸災害における主要外力の1つである波浪の現地観測は、計測機器の進歩に伴って、より精密に、かつより広域的に、それぞれの目的に対して、短期的に、また長期的に実施されてきている。種々の波高計が開発され、それらが有効に利用されてきているが、とくにわが国では超音波式波高計が多用されている。

防災研究所附属大潟波浪観測所においても、当初は階段抵抗式波高計および水圧式波高計を用いていたが、昭和43年ころより超音波式波高計を用いるようになり、これによるデルタレイが構成されて波向波高観測装置がわが国の最初の試みとして設置され、波浪の方向スペクトルの観測が行われてきた。ほぼ同じ頃、帝国石油（株）第1人工島長大栈橋を利用して、より精密な波浪観測を多点において実施するために、容量式波高計の現地海岸への適用を試みてきた。この方法は、比較的簡便であるうえに、経費的にもきわめて安価であり¹⁾、とくに砕波帯における波浪観測に適している。しかし、耐久性に乏しいうえ、なお改良すべき点が少なくなかった。そのため、昭和48年ころより、現地観測において十分な耐久性をもち、かつ最近のエレクトロニクスの進歩を取り入れて、できるだけ安価で、かつ高精度の容量式波高計の開発を行ってきた。

本容量式波高計の改良もしくは開発は種々試みられてきたが^{1),2)}、ここではその原理に基づいて、現地観測に適した回路とセンサーの改良に主眼をおくことにした。約数年を経過して、ほとんど初期の目的に適するものを試作することに成功したので、各種の水理実験に有効に利用するとともに、現地観測における特殊性、とくに耐候性、耐水性において確実な性能を確保させるため、回路、センサーのみならず、これらの保護エレメント（たとえば、増幅器のボックス、センサーの細部構造など）について種々の改良を加え、また数回以上に及ぶ試験観測を経て、現地観測用に適した波高計とすることに成功したので、第1人工島長大栈橋に多数設置して、同時観測を実施した。本文では、これら容量式波高計の改良とその波浪観測への適用の結果

について述べる。

2. 容量式波高計の改良

1) 原 理

絶縁されたセンサー線を用いた場合、水と接触して生じる静電容量 c は、導体のみの半径を a 、絶縁体を含めた半径を b 、絶縁体の比誘電率を ϵ_s とすれば、次式で表される³⁾。

$$c = 2\pi\epsilon_0\epsilon_s / \log(b/a) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 ϵ_0 は真空の誘電率で、 8.854×10^{-12} である。したがって、この式によれば、導体と絶縁体外径が均一であれば、その絶縁されたセンサー線が水と接触する長さに静電容量 c が比例することになるので、この容量変化を水位の変化として電気的に変換するものが容量式波高計である。

実際には、空気中でも静電容量をもつので、まず Fig. 1 に示すように、センサー部にできる容量を表すと、次のようになる。

$$c = \frac{c_1 c_a}{c_1 + c_a} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 c_1 は絶縁体による容量であり、また c_a は空気中の絶縁電線の外被と電気回路アース側の導体棒間の容量である。しかし、空気中では、一般に $c_1 > c_a$ であるので、 $c \approx c_a$ としてよい。

次に、センサー線の一部を水に没入した場合について、Fig. 2 のように考えれば、合成容量 c' は次式の

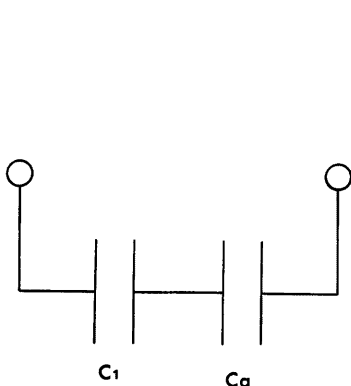


Fig. 1 Schema of capacitance connected directly in air

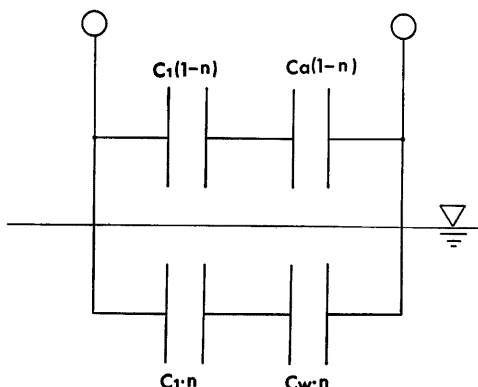


Fig. 2 Schema of capacitance connected in water showing principle capacitance-type wave gauge

ようになる。

$$c' = \frac{c_1(1-n)c_a(1-n)}{c_1(1-n) + c_a(1-n)} + \frac{c_1 n c_a n}{c_1 n + c_w n} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、センサー線の長さを l 、水に没入した部分の長さを η とすれば、式 (2) は次のように変形される。

$$c' = \frac{c_1 c_a l}{c_1 + c_a} + \frac{c_1^2 (c_w - c_a)}{(c_1 + c_a)(c_1 + c_a)} \eta \quad \dots\dots\dots (4)$$

すなわち、水位変化 η は、静電容量 c と確実に直線性があることがわかる。ここでは、回路中の容量だけを取りあげているが、実際には水質による水の抵抗が関係し、 c_w の静電容量がショート状態になる場合も考

えられる。たとえば、水の抵抗率がセンサー線の絶縁体や空気の絶縁体の固有抵抗 $10^{16} \sim 10^{18} \Omega \cdot m$ に比べると、塩分濃度 5 % の溶液の固有抵抗は $0.155 \Omega \cdot m$ であり、これらの抵抗差で水質によって水の容量が存在する場合とそうでない場合とが考えられる。この場合には、

$$c'' = \frac{c_1 c_g l}{c_1 + c_g} + \frac{c_l^2}{c_1 + c_g} \eta \dots \dots \dots (5)$$

で表されるので、両者の水位変動に対する比例常数の比をとれば、次式のようになる。

$$\frac{c'}{c''} = \frac{c_g - c_g}{c_1 + c_g} \dots \dots \dots (6)$$

これから、空気の容量 c_g が、絶縁体容量に比べて十分、小さければ、塩分を含んだ水溶液、または抵抗の非常に小さい液体では、検出する容量値が純水の場合に比べて大きくなるのがわかる。

2) 電気回路の改良

一般に、電気回路素子である IC の発達に伴い電気回路を簡素化することが容易になった。従来、前述した容量式波高計の原理に従って、センサー線に発生する静電容量を変調度として検出していたが、通常波形記録における、いわゆる山かけをはじめ、ドリフトや、相互干渉が起こる場合が少なかったので、本研究では Fig. 3 に示すような新しいパルス回路を用いて電気回路を改良することにした。Fig. 4(a) に示す回路 1 は、水晶発振子により正確な基準周波数を作り、この発振周波数で複数の波高計を作動させるもので、

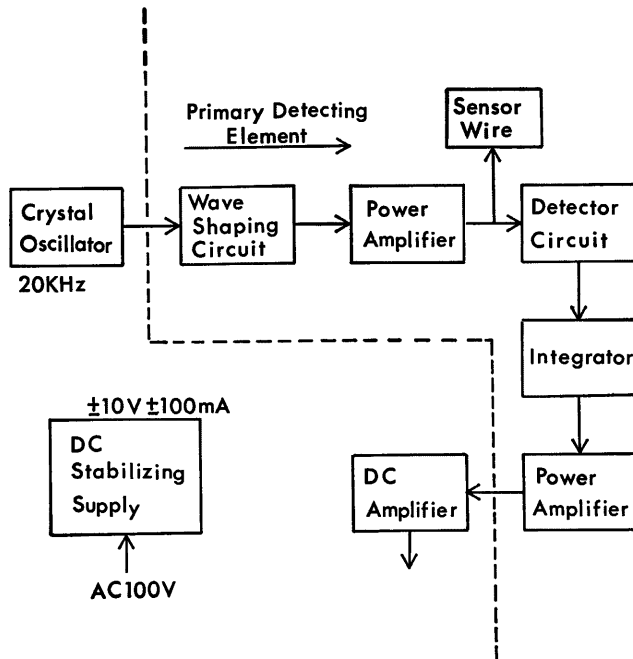
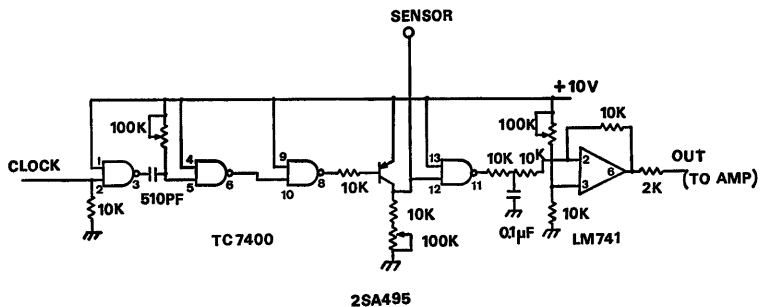
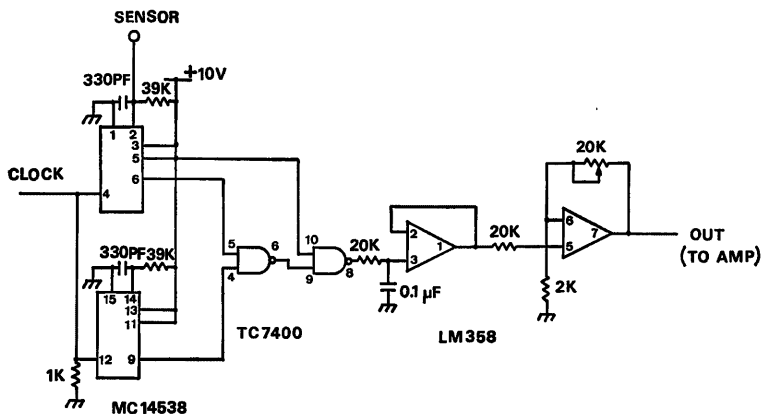


Fig. 3 Pulse circuit newly devised for capacitance-type wave gauge



(a) Circuit 1



(b) Circuit 2

Fig. 4 Pulse circuits improved for capacitance-type wave gauge

センサー線を近づけても干渉しない方式である。その信号をセンサー線の長さや絶縁体の厚さ、誘電率の違いによる静電容量差に合せて、分周を行ったパルス信号として、その信号を NAND C-MOS-IC で、波形整形 (1/5デューティ比) したあと、トランジスタにより電流増幅を行い、センサー線に加えた放電変形を C-MOS-IC のスレシホールド電圧によりスイッチングさせる。その変化分を積分し、OP増幅器で増幅し、バイアス電圧を加えて、直流電圧の変化として出力する。この回路による波高計で、直線性をはじめ、センサー線の違い、水温・水質の影響およびドリフト特性など系統的な実験を行った。その結果、センサー線の低容量化にともなう、回路の感度を高める必要が生じたので、C-MOS-IC 素子のスレシホールド電圧の温度ドリフトが大きな問題となった。これを解決するために、電気回路を改良し Fig. 4(b) に示す回路 2 を製作した。この回路では、DUAL・モノステーブル IC を使い、1つのモノステーブルでセンサ容量を検出し、残りのモノステーブルを比較用として一定の容量値を持たせ、検出用のモノステーブル出力 Q と比較用のモノステーブル出力 $\bar{Q}$ の反転出力を用いて、温度差による変動を打ち消し、補正することにした。このようにして、低容量のセンサー線に対しても、本波高計の回路が適用できるようにしたので、この回路は後述するように良好な特性をもつことがわかった。このようにして製作された増幅器 (6要素) を

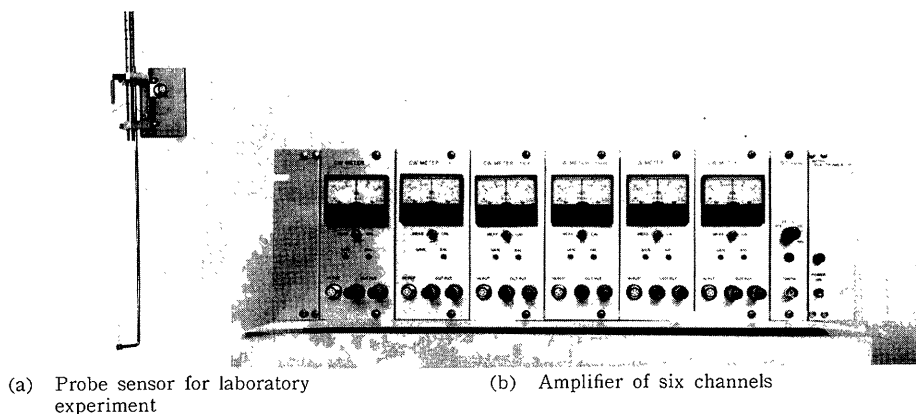


Photo 1 Capacitance-type wave gauge improved

Photo 1 に示す。

3) センサー線の選定

従来、一般的にセンサー線として用いられてきたホルマル線およびテフロン線を用いて、実験的にその特性を検討した。Fig. 5 は、ホルマル線（外径 0.12mm）の水温による温度特性を調べたものである。実験は、ポイントゲージに取り付けたセンサーを最初 15 mm 没入してから、10 mm づつさらに没入して、そのときの直流電圧値を出力として表してある。この図では、折り線が一定値を示すと直線性が良いことになるが、

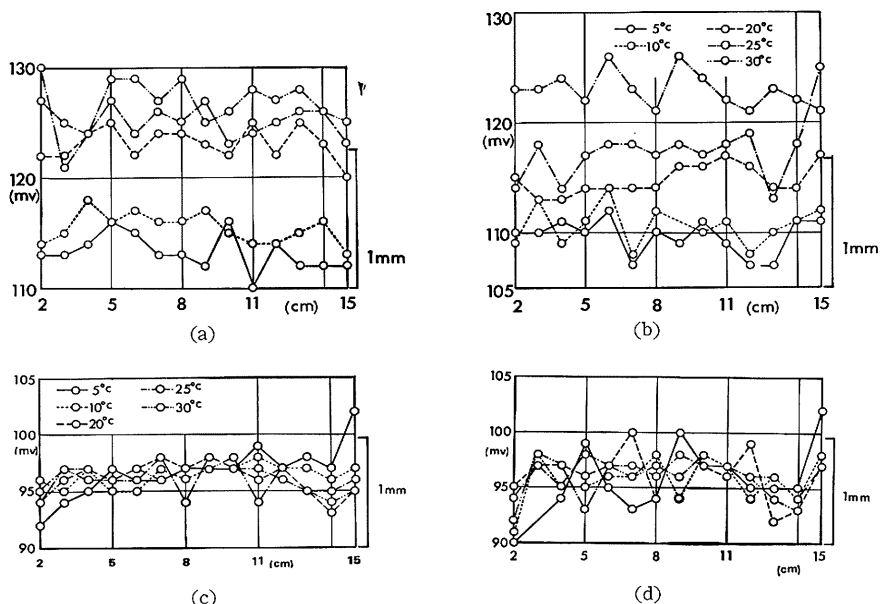


Fig. 5 Results of calibration of capacitance-type wave gauges

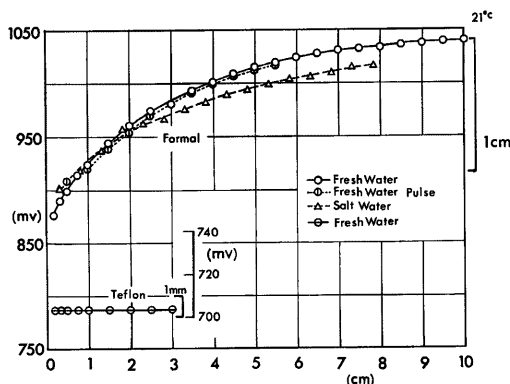


Fig. 6 Calibration for permeability of probe sensors of formal and teflon wires

Fig. 5 (a) および (b) に示したホルマル線の場合では、かなりの出力差が生じている。これは (b) において左側より測定を始め、センサー線を没入させて行い、その後、(a) で示したように右側より測定を始めた結果であるが、ホルマル線の吸水性のため絶縁体の中に水分が浸透し、静電容量が増加したと考えられる。また、水温差によっても出力差が 3~8 mV 生じており、結果として 3~6 % の出力ドリフトとなっていることがわかる。次に Fig. 5 (c) および (d) に示したように、テフロン線 (外径 0.40 mm, 芯線 0.16 mm) の場合には、このような吸水性による変化は全くなく、また水温による出力のドリフトがほとんどないことがわかる。

次に、センサー線の吸水性を調べるために、ポイントゲージに取り付けたセンサー線をゲージ値 16cm まで瞬間的に没入させ、吸水性によるドリフトの特性を調べた結果を Fig. 6 に示す。この結果においても、ホルマル線はかなりのドリフトを示すが、テフロン線は吸水性が全くないことが確認される。なお、電線ハンドブックに示されているテフロン線の吸水率は、0.00%である。図中、水道水 (パルス) とあるのは、センサー線に印加するのが直流電圧のため、電気回路を測定する時だけ働かせたものであり、通常動作時と大差なかった。次に、対象とする液体の性質によるセンサー線のドリフト特性を実験で確かめることにしたが、その結果を Fig. 7 に示す。Fig. 7 (a) および (b) では、ホルマル線を水道水と塩水 (濃度 5%) に没入させて、ポイントゲージによるセンサー線の上下移動に対する検定を行なった。これによれば、水道水と塩水による違い、たとえば水の抵抗や粘性によるホルマル線のドリフト特性が次のようにわかる。すなわち、ホルマル線の場合には、水面の高さが 10 mm 違っているため、ポイントゲージの読値は異なっているが、水質の影響は生じなかった。しかし、Fig. 7 (c) および (d) のテフロン線において 10 mm ごとの出力差の値を取りあげると、実線で示したようにセンサー線を没入させて行く方向ではその差は小さいが、1 時間そのまま水に沈めてから破線で示したようにセンサー線を引き上げて行く方向では、各 10 mm 移動してから、出力電圧を読み取るまでの経過時間を 10 秒以内にすると、テフロン線では両過程における差は 3 mm 以上に及ぶ。この原因としては、塩水の場合表面張力の状態が変化すると考えられるが、抵抗線式波高計においては、この表面張力の影響は少ないことが知られている。これは、抵抗線式波高計では、液体としては抵抗が存在しなければ測定できないが、表面張力によってセンサー線にメニスカスが生じて、それによる抵抗が水中に没入したセンサー線による抵抗に比べて非常に大きいので、問題にならないことになるためである。しかし、容量式波高計では、その原理から、水の抵抗に依存せず、メニスカスの高さまでの水位を検出することになり、その影響を直接受けることになるのである。以上の実験結果から、前述したように、電気回路を修正し、センサー線の低容量化を行ってさらに詳細な実験を行った。この場合、ポイントゲージの読み取り誤差を少なくするために、ポイントゲージの読値を中心に 10 mm ずつ上下動させて各 10 回読みとり、そ

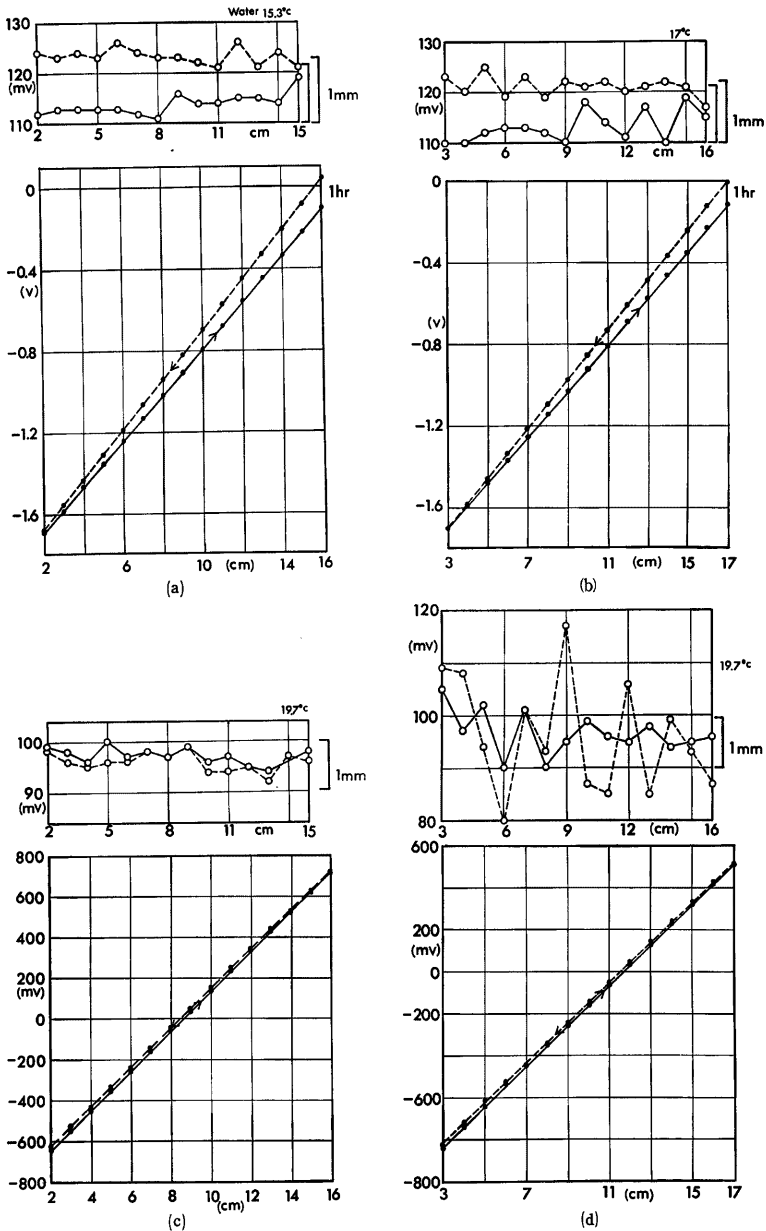


Fig. 7 Drift calibration of capacitance-type wave gauge

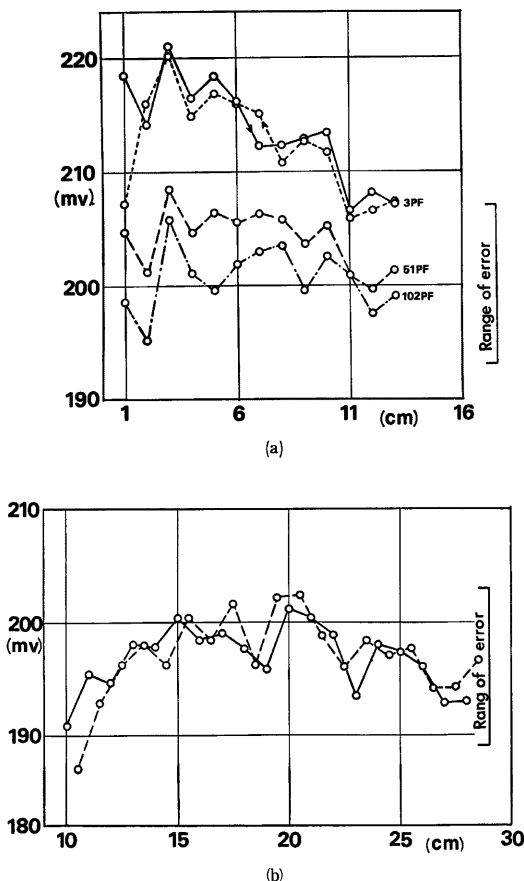


Fig. 8 Results of calibration of capacitance-type wave gauge of teflon wire

れらを平均した値を検定値とすることにした。

Fig. 8 は波高計の直線性を検討したものであり、センサー線はすべて同一のテフロン線で外径 0.40 mm、容量値 127.5 PF/m のものである。この図の横軸には、センサー線末端部より 10 mm 没入したところより 10 mm ごとの出力電圧値を13ステップについて表わしてある。この図から、センサー線を没入させていった場合と引き上げていった場合とでは、ほとんど差が生じないが、負荷が多くなると出力が若干減少することがわかる。さらに、スチロールコンデンサ 102 PF のスチロールコンデンサを付けて負荷率を変えると、ほぼ一定の出力が得られることがわかった。しかし、C-MOS-IC の特性から 10 μ s 以上の時間幅が必要とされるので、抵抗値は 39 K Ω で容量は 256.4 PF のベース負荷が必要となる。したがって、ここでは若干の余裕をもたせて 330 PF をベース負荷とした回路を製作した。Fig. 8 (b) はこの場合の検定結果である。これによれば、出力の平均値は 196.78mV となり、その最小および最大値はそれぞれ 190.8mV および

201.2mV となるので、誤差は水位変動 10mm に対して、最大 $\pm 3\%$ 以内である。図中の絶縁体の外被外径公差は約 $\pm 5\%$ であり、それによる出力誤差を図中の右端に示したが、検定値はこの範囲内にあり、本回路による波高計の直線性は十分であると確認される。

さらに、Fig. 9 は、表面張力によるメニスカスのセンサー線材質による違いを検出する水位の誤差として表わしたものである。センサー線の材質が、ガラス質のものであれば、メニスカスの接触角 θ は正であり、一般に

$$h = a\sqrt{1 - \sin^2 \theta} \quad \dots\dots\dots (7)$$

で表されるので、この場合 3.85 mm のメニスカスを生じることになる。一方、テフロン質であれば、接触角 108° であるから、メニスカスによる h は 0.85mm 降下することになり、表面張力の影響はかなり少ないと考えられる。しかし、実験の結果によれば、塩水中ではバラツキが若干大きい結果となった。実際、波の測定においては、水面変動による波の峰部の通過時間が短い場合には、表面張力の影響で水面が高いとき、次の波の立ち上がりのため長周期の波高値が小さくできると予想されるが、現地波没ではほとんど問題にならないであろう。また、センサー線の汚れや、温度によっても特性が変わることにも注意すべきであろう。

なお、センサー線は、水中に没入すると、絶縁電線の端部の防水処置が必要であるので、強度および防水を考慮し、容量変化を大きくするため、端部でセンサー線を折り返す構造とした。この方式でセンサー線を固定するために、直径 5mm 径のリングを用いたので、その影響によるセンサー端部の測定限界を調べた結果が Fig. 10 である。これから、約 6 mm 以上センサー線を没入する場合には、直線性は十分維持できることがわかる。

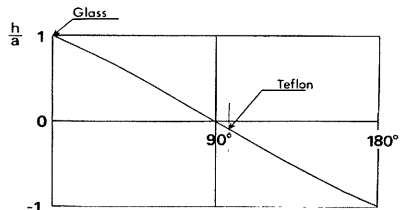


Fig. 9 Meniscus of probe sensor of teflon wire

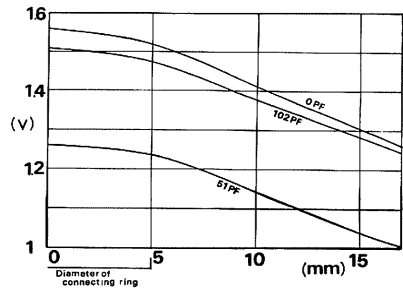


Fig. 10 Influence of probe sensor end on properties of capacitance-type wave gauge

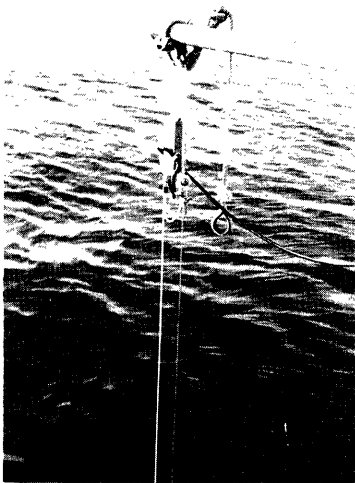


Photo 2 Capacitance-type wave gauge in field calibration

4) 現地用波高計

前述した実験結果では、吸水性の無いテフロン (PTFE) 外被電線を模型実験用として選定したが、現地観測用としては、テフロンの機械強度を増したテフロンとエチレンの共重合の ETFE 絶縁体を肉厚 0.4mm として用いることにした。この外被においては、吸水率が 0.029% とわずかながら吸水を生じることになるが、この影響より外被強度を増すことを重視したことによる。また、同時に波力により芯線の断線を防ぐため、金属疲労の少ないステンレス $7/7 \times 0.28\text{mm}$ の撚線を導体芯線としてある。この現地用波高計では、検出器内部の電気回路の保護のため、防水型のステンレス容器を製作し、またセンサー線、信号電源線などの引き出しには、波力によるセンサー部の震動によって、防水コネクタの締め付け部の緩みや漏水が起らないように、直接線類を O リングを

用いて引き出し防水する構造のものとしてある。**Photo 2** には、これらの状況を示す。

5) 現地用波高計の耐久性

実験用容量式波高計においては、絶縁電線の外径が細いので、容量変化を大きくするために線端部を折り返して使用しているが、現地用に採用しているセンサー線は、外径 3.2mm 絶縁体外被肉厚も 0.4mm に及ぶので、端部ステンレス導体の露出部に、径、材質とも同じ絶縁体丸棒を取り付け、それに外径より少し大きい同じ材質の熱収縮チューブをかぶせ、溶融接合を行って端部は完全に防水性を保つようにしてある。一方、検出器に接続させる端部は、前述したようにコネクターなどを用いず、直接リングにより防水された検出器容器に入れてある。この構造としたことにより、流木など直接物体との衝突以外、汙水によるトラブルはなくなった。また、センサー線に採用した ETFE 外被電線は、溶融抽出法で製造されているため、外被とステンレス電線との密着性もテフロン線に比べ良好であり、誤差も少なくなった。

そして、材質の特長である耐食性、耐候性に優れていることから、後述する観測期間中12台の波高計を用いたが、10月より翌年3月までの季節風襲来期間中、センサー線の交換の必要のないチャンネルも数台あった。一般的には長期間、容量式波高計を設置する場合、センサー線に藻や、富士壺などの海生物が付着し、その特性の劣化が生じるが、高波浪が続いていると、センサー線への生物の付着はほとんど生じなかった。しかし、海藻などが流れてきてセンサー線に絡むことは避けられないし、また季節によっては、藻などの付着が生じるが、センサー線外被の物性により、手で簡単に取りのぞくことができる。いままです側には、28mm の水道用パイプを用いセンサー線に直接 80kg の重さが加わらない構造としていたが、センサー線にステンレス線を使用しているので、センサー線外被の強度の範囲内において、直接アース線（ステンレス熱線 4 mm）を兼ねて2個の鉛球体の錘（7.3kg）で張力を加えられるようにしたが、このことにより、波浪による波高計の振動も少なくなった。この方式で、同じ重さの錘を2個一台のセンサー線アース側に適当な間隔で取り付け、より振動を取り去る実験を行っている。

3. 現地観測への適用

1) 観測システムの概要

京都大学防災研究所附属大潟波浪観測所は、日本海に面した直線状の大潟海岸の中央部に位置する。近くには大きな湾や岬などもなく、日本海で発生した波浪がそのまま浅海域に侵入するため、波浪およびその変形特性を観測するのに適しているうえ、帝国石油株式会社所有の第一人工島長大棧橋（総延長315m）、およ

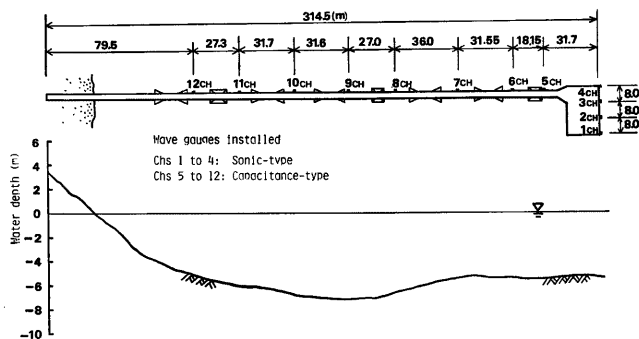


Fig. 11 Array of wave gauges on observation pier

び沖合 2km に第 4 人工島（水深約 25m）があり、これらを利用して波浪およびそれに伴う諸現象の観測研究を行っている。1981 年の冬期観測時より、本長大栈橋に、容量式波高計 8 台および空中発射式超音波波高計 4 台の合計 12 台の波高計を取りつけて観測が続けられてきた。全波高計のデータは、定常観測時には毎正時 15 分間、データレコーダに収録されている。また、高波浪時および長周期波の観測時には、随時連続観測が行なわれるようになっており、栈橋先端部と観測所本館屋上のコーシーンペーン風速計およびビデオカメラによる波向、碎波形態などのデータとともに、観測システムの充実とあいまって、貴重な資料が蓄積されている。また、これらの記録は、すべて観測所本館の波浪観測室において集中的に収録されている。

長大栈橋に設置されている諸計測機器の配置は、Fig. 11 に示すようであり、栈橋にそって汀線とはほぼ直角方向に 8 台の容量式波高計がほぼ等間隔に設置され、先端部には汀線とはほぼ平行に 4 台の空中発射式超音波波高計によるラインアレイが構成されている。

また、これらの波高計の設置にあたっては、波高計の特性および数と観測目的に応じて、次のような点を考慮する必要がある。

1) 容量式波高計

(a) 一般に波速は 2 台の波高計によって測定された波形から算出されるため、測定精度は波高計間隔に依存するが、クロススペクトルから成分波の波速を求めようとする場合には、波高計の間隔が波長の $1/4$ 以下であることが必要となる。例えば、周期が 5 s の波を対象とする場合では 7 m、10 s の波では 30 m 以下に設定する必要がある。このような相反する条件を加えて、現在用いられている現地観測用容量式波高計は Photo 3 に示すように、80 kg の鉄の錘りをワイヤロープでつるし、これに波高計センサーを取りつけているため、高波浪時には波動運動に伴って若干往復運動をする。このために、もしその振幅が 1 m で、波の位相が $1/2$ 周期ずれる位置に両波高計が設置されていれば、約 2 m ほど波高計間隔が短く、または長くなるという不都合が生じるが、これは crest to crest を時間波波形から求めるような場合には、個々の波高計の振幅の差程度の誤差であろう。

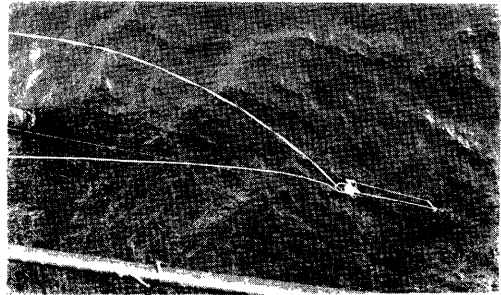


Photo 3 Capacitance-type wave gauge installed on observation pier

(b) 波浪の伝播に伴う波形、波高、周期、envelope、平均海面およびスペクトルの諸特性の変化や保存量を知り、さらにはこれらを用いて海底摩擦などを推定するためには、栈橋全体を可能な限り短い間隔でカバーするように設置されているのが望ましい。

(c) 観測用栈橋は、帝国石油 K. K. 所有のもので、本来は石油掘削に供されていたので、その構造は必ずしも波浪観測に適しているとはいえず、特に橋脚による影響は皆無とはいえない。この影響については、すでに山口・上屋らによって検討され、若干の影響はあるが卓越波の特性を左右するほどではないことがわかっている。しかしながら、これらのじょう乱を少しでも除去するためには、橋脚から少しでも離れた位置に波高計を設置することが望ましい。

以上 (a)～(c) のような点を考慮して Fig. 11 に示したように容量式波高計 8 台が設置されたわけであるが、特に (a) で述べたように成分波の波速を求めることと、次節で述べるように容量式および超音波波高計の検定を行うという目的から、本観測前に Fig. 12 において CAL 1～3 に 2 台の容量式とその中央に 1 台の超音波波高計を設置して若干の観測を行った。

2) 空中発射式超音波波高計ラインアレイ

(a) このラインアレイは、現地波浪の重要な特性である波向あるいは方向スペクトルを求める目的で設置されているもので、特に方向スペクトルを求める場合には、その分解能はアレイの組み方と全長に依存する。

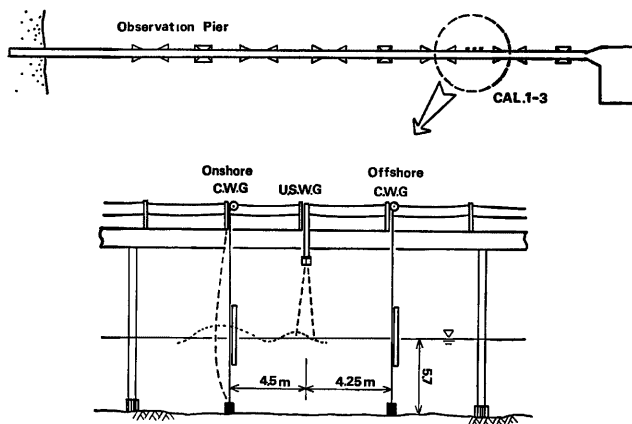


Fig. 12 Array for comparison test of capacitance- and sonic-type wave gauges

しかしながら、栈橋の先端の幅は約 27 m で、しかも波高計の設置が可能な場所は 24 m であるという制約に加えて、7m 以内の間隔では超音波の散乱による波高計間の干渉が生じる点も考慮して、Fig. 11 のように 8m の等間隔に設置されていた。その後、この干渉ノイズがデータ処理時に除去できることおよび新たな波高計の設置方法が考案されたことにより、1981年11月には 6m を最小間隔とするアレイに組みこまれた。

(b) 超音波波高計は照射角 5° で照射領域中の最短距離の水面形を測定するもので、その指向性は必ずしも良いとはいえないが、その設置にあたっては、送受波器を水平かつ同一直線上に保つことが必要である。このため直径 100 mm と 200 mm の鋼管の支持台を作製し、ワイヤロープで調整および固定が行えるようにし、水準器およびトランシットを用いて調整設置した。

2) 容量式波高計と空中発射式波高計による比較観測

一般に、現地観測用の波高計としては、長期間の観測に対して階段抵抗式波高計、水中発射式超音波波高計、およびブイ式波高計などが用いられ、また、短期間の場合にはこれらの波高計のほか、容量式波高計などが使用されている。また、それらの特性については、従来より検討が重ねられているがいずれも一長一短である。

最近、本観測所では、計測技研株式会社製の空中発射式超音波波高計を用いることとし、容量式波高計による観測と比較して、その特性および適用性について検討を行った。検定には、水面変動に対する応答性が良好で、しかも温度の急激な変化が無い限り、電氣的に安定な容量式波高計を、Fig. 12 のように超音波波高計の前後に設置し、後述するような項目について両者の記録を比較した。なお、容量式波高計は宇治川水理実験所の検定用水槽で、また超音波波高計もこれを取付けた反射板を移動させて、あらかじめ較正値を求めた。

1) 波別解析法に基づく検討

Fig. 13 には、3 点で観測された波形を長波の波速で移動させて補正し、位相をあわせたものを示す。実線は沖側の容量式波高計、点線は岸側の容量式波高計、および破線は超音波波高計の記録である。一連の図から明らかなように、水面変動に対する応答性は岸側の容量式波高計に顕著な差異はない。しかしながら、超音波波高計の記録には、crest で若干大きめの値をとる傾向がある。たとえば、Fig. 14 に示すような両波高計による有義波高および最大波高の相対関係を調べてみると、次のようなことがいえる。まず、沖側の容

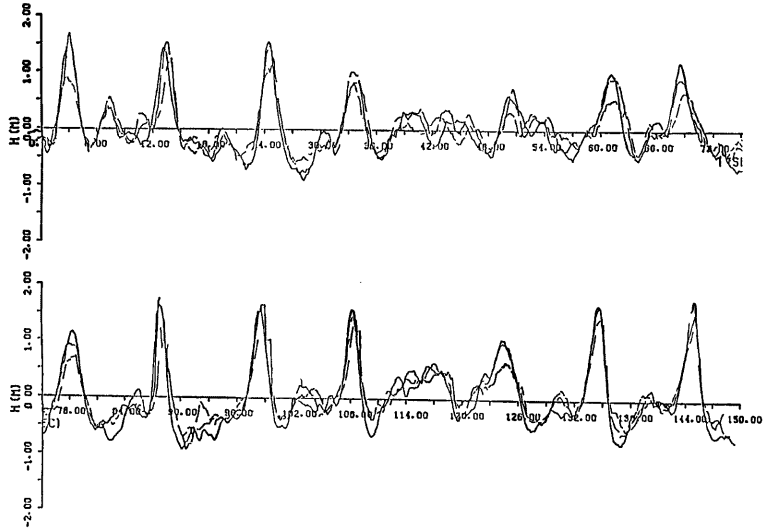
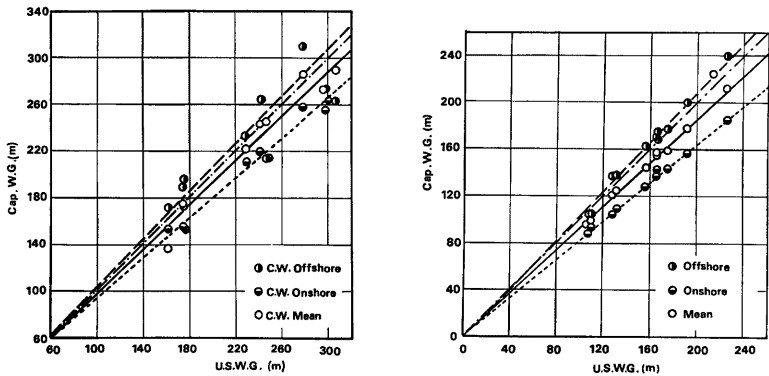


Fig. 13 Comparison of wave profiles measured with capacitance- and sonic-type wave gauges



(a) 1/10 maximum wave height

(b) 1/3 maximum, significant wave height

Fig. 14 Comparison of significant wave heights measured with capacitance- and sonic-type wave gauges

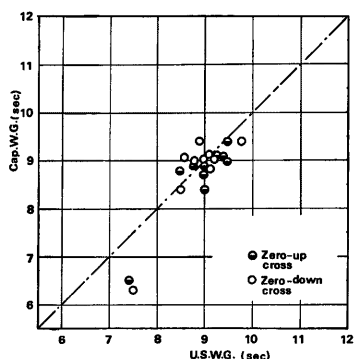


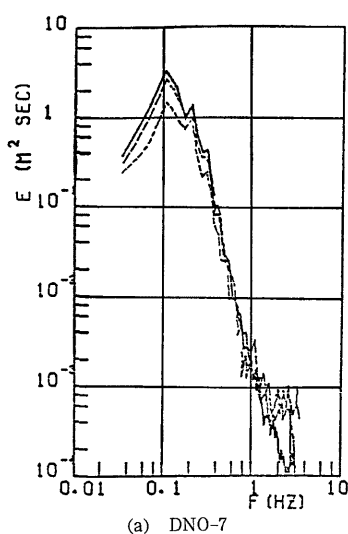
Fig. 15 Comparison of significant wave periods measured with capacitance- and sonic-type gauges

スペクトルの形状はいずれも非常によく似ているが、有義波高の比較で示したのと同様、超音波波高計によるスペクトルのピーク値は、沖、岸の両容量式波高計の平均値よりも若干大きくなっている。一方、高周波側では、容量式波高計の周波数 0.8 Hz 付近に顕著なピークが見られるが、超音波波高計にはみうけられない。また、超音波波高計では、2 Hz 以上ではいわゆるホワイトノイズになっているが、容量式波高計の場合は高周波側までテールがのびている。すなわち、超音波波高計のデータをスペクトル解析する場合には、高周波成分を考慮しない限りではさほど問題はなからう。

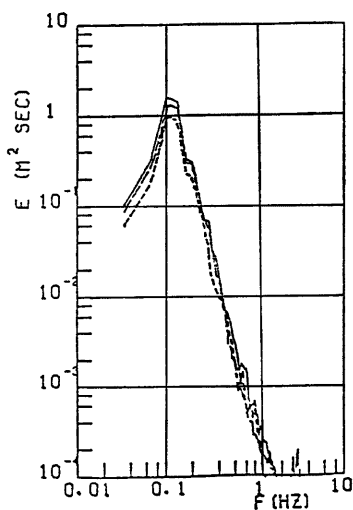
量式波高計の波高は超音波波高計のものよりも大きく、岸側のものは小さい。しかしながら、両者の平均をとってみると、明らかに超音波波高計の波高が若干大きく見積もられていることがわかる。このことは、超音波波高計の測定原理が照射角 5° で発射された照射領域の最大値を記録としてとることによるものか、容量式波高計の揺動によるものかを明らかにする必要がある。一方、周期に関する両波高計の相対関係を調べてみると、Fig. 15に示すように顕著な差異は認められない。図中半黒丸印はゼロアップクロス法により求めた有義波諸量、および白丸印はゼロダウンクロス法により求めた結果で、両者には大きな相違はみられない。

2) スペクトル解析法に基づく検討

Fig. 16 は3台の波高計の周波数スペクトルを比較したもので、実線は沖側の容量式波高計、点線は岸側の容量式波高計、破線は超音波波高計からのものである。



(a) DNO-7



(b) DNO-8

Fig. 16 Spectral properties of waves measured with capacitance- and sonic-type wave gauges

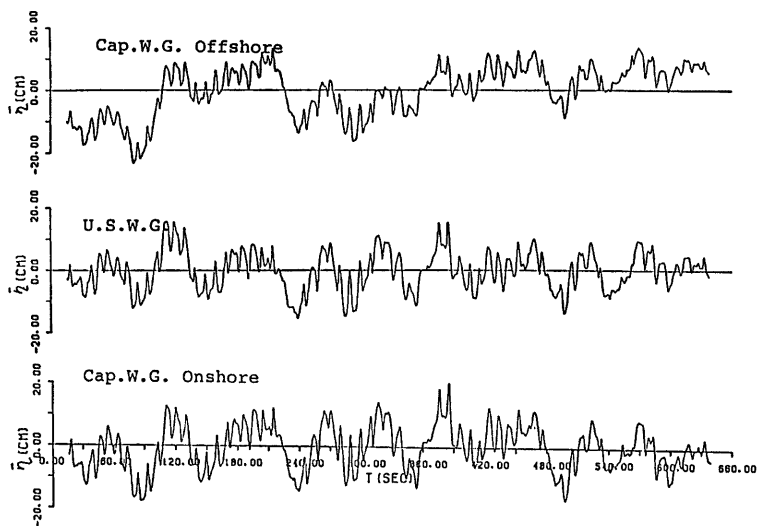


Fig. 17 Comparison of average sea level measured with capacitance- and sonic-type wave gauges

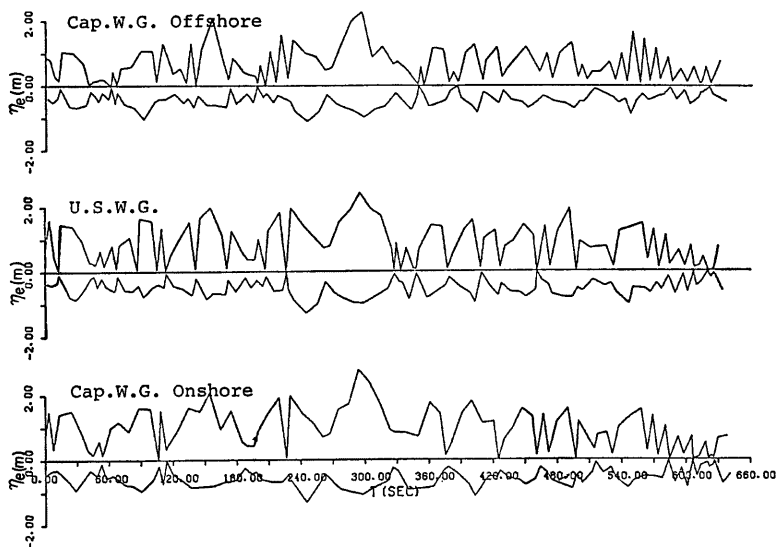


Fig. 18 Comparison of wave envelope (SIWEH) measured with capacitance- and sonic-type wave gauges

3) Envelope および平均海面の変動に関する検討

Fig. 17 には、32 sec の移動平均から求めた平均海面の変動を示し、また Fig. 18 にはそれに対応した波の envelope の比較を示す。これらの図から明らかなように、平均海面の変動のような長周期の波に対しては、両波高計の差異はまったく見られないし、envelope についても同様のことがいえる。

4. 結 語

以上、現地波浪観測に適用できる容量式波高計の改良を行い、耐侯性、耐水性の十分な、現地用として耐久性をもつ方式を構成することができたので、大潟波浪観測所における多点波浪観測に適用した若干の結果を述べて、その適用性を明らかにした。その結果、波高計センサーの取付法を若干工夫することによって、観測用栈橋にきわめて簡便に取付けられることも可能であり、かつ波高計の特性から、碎波帯中において有効に利用されることがわかった。便宜上、空中発射式の超音波式波高計との比較観測も実施したが、これはむしろ超音波式波高計そのものの検定であるというべきかも知れない。

本容量式波高計は、今後大潟波浪観測所における碎波帯内における波浪観測に有効に利用されることはいうまでもないが、そのほかより長周期の波動現象の解明にも適用されるであろう。

最後に、本文において述べた多点波浪観測は、大潟波浪観測所の白井助教授および内山技官をはじめ、海岸災害部門の河田助教授、芝野助手および山下助手のご協力によって実施できたものであり、またその資料解析と原稿の執筆においては、山下助手の熱心な協力をいただいた。ここに明記して、感謝するしだいである。

参 考 文 献

- 1) 川上善久 : 容量式波高計の現地への適用, 港湾技術資料, No. 32, 1967, pp. 57-80.
- 2) 宇井正和・安井 浩 : 液体の付着による容量式水位計への影響, 第33回土木学会年次学術講演会講演概要集, 1978, pp. 660-661.
- 3) 電気学会編 : 電気磁気学, 1977, pp. 76-79, pp. 100-103.
- 4) 山口正隆・土屋義人 : 発達過程にある風波の方向スペクトルの特性, 第27回海岸工学講演会論文集, 1980, pp. 99-103.