

# 超音波式波高計（水中発射型）の特性改良

——碎波発生時における測定信号の入力方式について——

高橋 智晴\*・佐々木 弘\*\*・金子 大二郎\*\*\*

## 1. まえがき

沿岸波浪の定常観測における波高計として、従来より水圧式波高計と測桿式波高計が多用されてきたが、近年における海洋性施設計画の大水深化に伴い、水圧式波高計は測定値の資質において、また測桿式波高計は設置施設構築上の制約により実用上の限界を生じ、一方設計、施工技術の向上、施工海域の広域化あるいは急速施工の必要性等により、沿岸大水深海域を含む広範な場において経済的、技術的に比較的簡便に表面波形の測定を可能とする波高計の開発が望まれるに至った。

このような工学的要請を背景として筆者らは、先に水中発射型の超音波式波高計を開発し実用に供してきたが、普及台数の増加と使用条件の多様化に伴いその長所に対する評価とともに、汎用的な実用機器として碎波現象発生時など特に多量の気泡が水中に混在するような測定環境下での性能上の弱点が指摘されるに至った。

この報告においては、上記原因の究明と機器性能の改善についての研究過程において、現地において得られた現象と超音波式波高計の在来測定機能の関係、およびその改善策を試作回路による現地試用実験結果により明らかにし、一方水槽実験において得られた水中に気泡が介在する場での超音波伝播特性について、周波数と反射信号受波レベルの変動および S/N 比に対する考察を行い、超音波式波高計の性能改善についての方向づけを得たので、その概要について報告する。

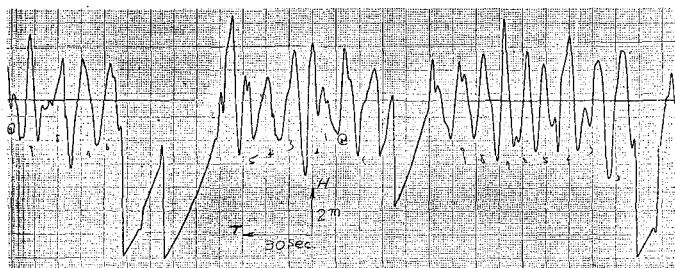


図-1 信号抜け型異常波形記録

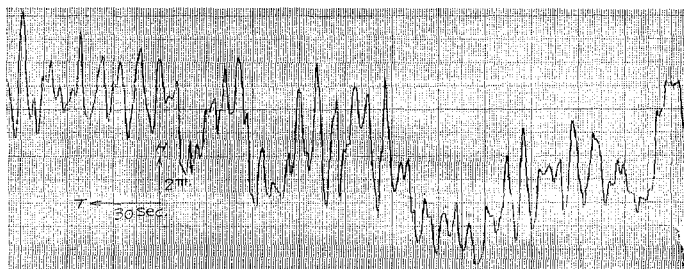


図-2 気泡追従型異常波形記録

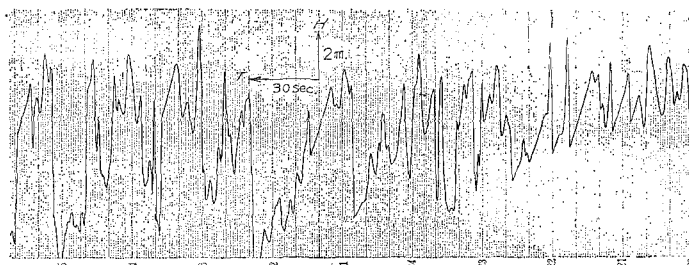


図-3 混合型異常波形記録

## 2. 異常記録とその原因

現地波浪観測において、風浪が激しくなり碎波現象が生じるようになると、超音波式波高計記録の中に、一見して海面波形とは異質な超音波式波高計固有の波形記録が出現することがある。ここでは、このような記録を異常波形記録と呼ぶこととする。

碎波現象発生時の異常波形記録にはいくつかのパターンがあるが、大別すると 図-1～図-3 に示す3種類の

\* 正会員 運輸省港湾技術研究所水工部海象観測研究室長  
 \*\* 運輸省港湾技術研究所水工部研究員  
 \*\*\* 正会員 運輸省港湾技術研究所水工部研究員

代表的な事例に区分することができる。

このような異常波形記録が出現する原因は、波によって海中に巻込まれた気泡群によるものと考えられる。碎波を生じるような異常気象時の現地での海中の状況がどのようなものであるか具体的にはわからないが、観察される海面の状況や、水路実験などの結果からみて水中に著しい量の気泡が巻込まれることは十分に推察できる。

波頭が碎ける時点で発生した気泡は、波動とともに海中に突入し、更に深部に潜入する。巻込まれた気泡群のうち径の大きい気泡はその浮力が海水の粘性に打勝って短時間で海面に浮上し、消滅すると思われるが、径の小さな気泡は浮力が小さいため海水中に割合長く滞留する。気泡が、水中を伝播する超音波に及ぼす影響は、気泡密度が同じであれば反射率、減衰ともにその周波数に対して共振する径の気泡の場合が最大で、より大きい気泡については著しく小さく、より小さい気泡の影響はそれより強く<sup>2)</sup>。また気泡の大きさが同じであれば気泡密度に比例する。現在波高計に使用している周波数 200 kHz に共振する気泡の粒径は約 0.02 mm であり、従って影響するのはほぼこれ以下の大きさの気泡である。

周知のように、超音波式波高計水中発射型は、海底に設置された送受信器より海面に向けて鉛直上方に超音波パルスを連続的に発射して海面と空気の境界層からのエコーを受信し、この間に要した時間と音速度との関係から海面までの距離を電氣的に計測して海面波形(水位の時間変化)を得るものである。したがって超音波パルスが伝播、反射過程において吸収、散乱などにより減衰し、波高計回路に入力される反射信号が写真—1(a)のように低く、そのレベルが機器回路の動作に必要なトリガーレベルに達しないと、受信信号は欠測となる。このような現象がある時間継続した場合は、図—1のような鋸歯状の信号抜け型異常波形記録が出現する。この原因は反射信号の受信レベル変動とトリガーレベルの相対値によるものであるが、単純に発振パルスのパワーや受信回路の増幅度を高めて受信レベルの最低値を補償しようとする、気泡の混入等により比較的明瞭な境界層や反射強度の強い条件が発生した場合には、反射信号は写真—1

(b), (c) のような波形となり図—2 に示す気泡追従型の異常記録となって現われる。

図—3 は、前記2種類の異常波形記録が同時に発生した場合の記録である。また写真—1(d) はノイズ信号を含まない良好な海面エコー、(e) は気泡反射信号を含んでいるがトリガーレベル以下であるため影響のない場合、(f) は気泡反射に比べて海面エコーが小さい場合の反射信号の例である。

### 3. 改善のための方策

上記のような異常波形の原因は、上述のように海中に巻込まれた気泡およびその間の超音波伝播特性によるものであるが、回路機構に以下の改良を施すことによりこの影響を除去することができた。

#### (1) PC方式

現地波高計による当初の実測では、気泡が混在する場合の海面エコーと気泡からの反射信号のレベル差は、通常 25 db~12 db 程度で、レベル差がこの程度あれば機器および観測場所の条件に応じて送受信感度を調整し、受信信号のレベルをトリガーレベルに対して適切な値にとれば、気泡の影響を除去して異常波形記録の発生を防ぐことが可能であると考えられたので、振動子のインパルス励振電圧を 3 db ステップで 11 段可変するパワーコントローラ(PC)と、受信回路の増幅度を調節する組合せ方式により所要の送受信感度を設定する方法を用い、一応の成果をおさめた。

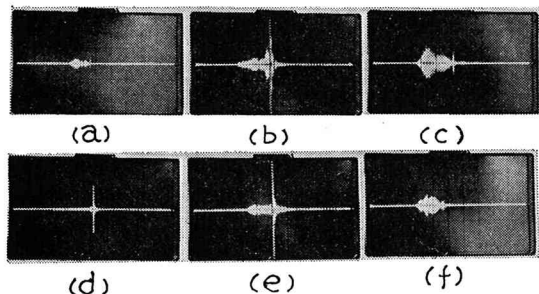
#### (2) 立下り検出方式

PC方式の効果は、海面エコー  $S$  と気泡よりの反射信号  $N$  の比が 1 以上 ( $S/N > 1$ ) であることを前提としたものであるが、その後の現地調査実験過程において海面エコーよりレベルの高い気泡からの反射信号 ( $S/N < 1$ ) の存在が、酒田港における冬季荒天時の観測において確認され、これによってPC方式のみでは異常波形記録の発生を防止することが不可能であることが判明した。

図—4 は、受信信号とトリガーレベルの関係を在来方式、改良方式について模式的に示したもので、 $S/N < 1$  の場合には同図 4, 5 のようになり、 $S > N > TL$  の 3 の場合と共に在来方式では海面エコーと気泡からの信号を弁別することはできず、回路は気泡からの反射信号でトリガーされ、異常波形記録となる。

そこで筆者らは、在来方式の波高計が持つ有用な機能(AFNG 回路等)<sup>3)</sup>を損なうことなく、かつ  $S/N$  が 1 以下であっても海面波形の測定が可能な波高計として、以下に述べる回路方式を考案、試作し、現地観測によりその機能動作を検討し、有用性の確認を得た。

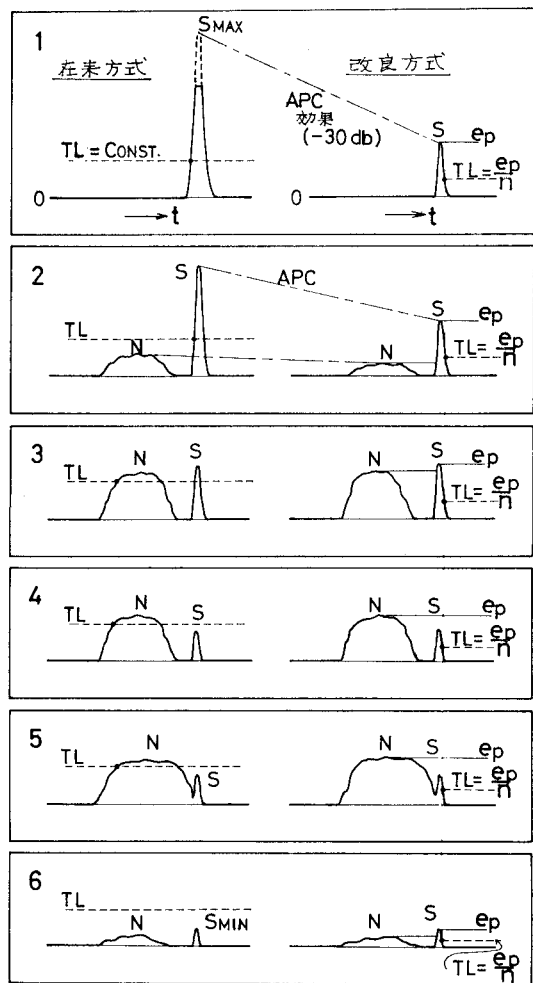
試作した改良型波高計は図—5 のブロックダイアグラムに示す回路構成のもので、この方式を実現するために



写真—1 受信信号の種々

必要な新しい回路方式として次節に述べる APC 回路、ATL 回路を付加することを提案するものである。

改良型波高計の基本的な考え方は次の通りである。



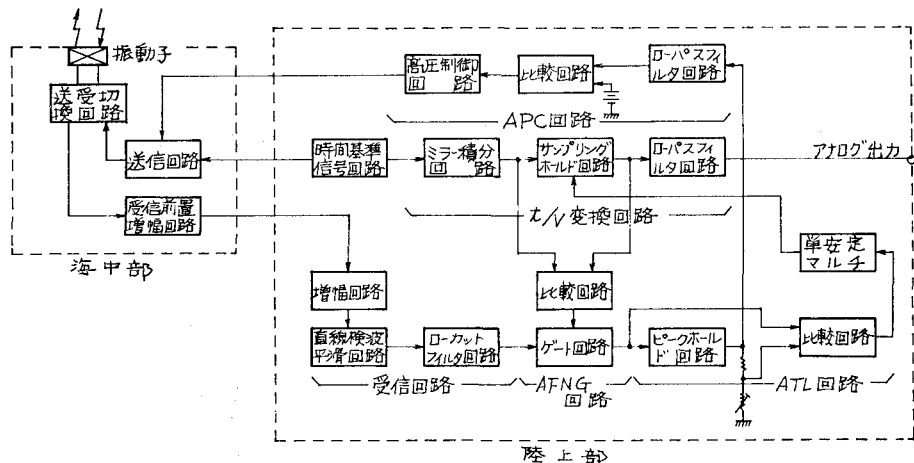
図—4 受波信号とトリガーレベル

波高計の受波信号は、海面エコー  $S$  と気泡その他による雑音信号  $N$  で形成されている。この  $N$  は測定原理上時間的に常に海面エコー  $S$  より前にあり、後側には原則的には生じないはずであるが、実際には海中に存在する気泡等による境界層と海面との間の多重反射、伝播線路上での多重反射等による伝播時間の遅れ、sub lobe の影響などにより雑音信号が見られるが、海面エコーとの相対的レベルは一般的に低い。また海面エコーは送信パルスに応じた幅の狭いパルスで、その立下りは、立上りより幾分裾が広がっているが上部は割合急峻な形をしている。したがって海面エコーを回路が飽和しない範囲で充分増幅し、トリガーレベルをサンプリングごとにその時々を入力反射信号の最大値を分圧した値で設定すれば、海面エコーの立下りを検出することにより気泡等による雑音信号の影響を受けることなく、立上りを検出する従来方式の波高計とほぼ同一の測定精度により海面波形を得ることができる。実際の測定では海面エコーの形状は常に相似ではなく伝播、反射によって崩れるが、それによる測定の誤差は、海面エコーのパルス幅が送信パルス幅の 2 倍に変動しても、現用波高計の送信パルス幅は約  $20 \mu\text{sec}$  程度<sup>4)</sup> であるから測定波高として約 3 cm の誤差に過ぎない。

#### 4. 波高計回路の改良

##### (1) APC 回路

測定された海面エコー  $S$  および気泡からの反射信号  $N$  を模式的に表現すれば 図—4 のように示すことができる。現地波高計での実測によれば、 $S_{\min}$  と  $S_{\max}$  のレベル幅は最大で約 80 db 弱ある。したがって入力信号をひずみなく有効に活用しようとするれば、回路のダイナミックレンジは 80 db 必要となる。これに対し現用回路のダイナミックレンジは約 50 db であり、所要の値に対して約 30 db 不足である。このため入力信号が大きくなると



図—5 改良型波高計ブロックダイアグラム

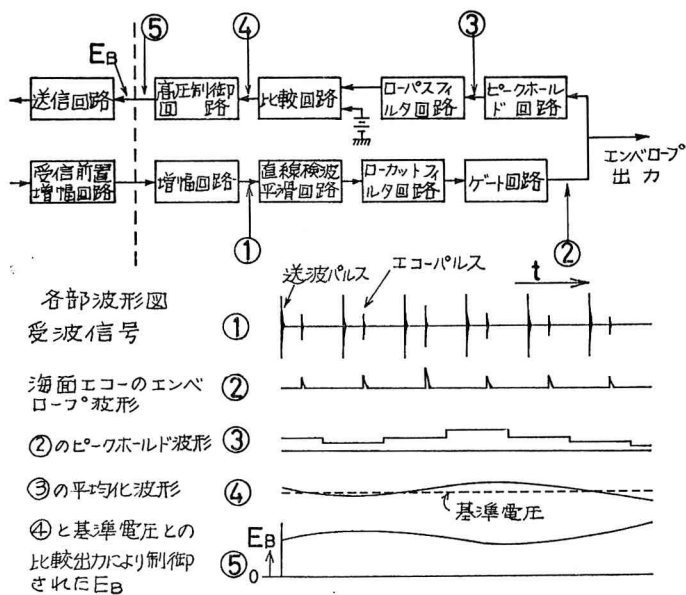


図-6 APC回路

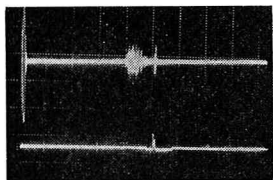


写真-2 受波信号とそのエンベロープ

回路は飽和し、信号は図-4の1に示すように頭がクリップされて  $S/N$  比は低下し、測定可能範囲は狭くなる。

この回路は、前節で述べたPC方式における振動子のインパルス励振電圧  $E_B$  の制御を、受信した反射信号の大きさに応じて自動的に約 30 db の範囲で調節して発射パルスのパワーを制御し、これにより不足する 30 db のダイナミックレンジを実効的に補うものである。

回路は図-6に示すブロックにより構成され、その動作は同図①～⑤の波形図によって説明される。

写真-2は送受波器部からの入力信号①(上段)とエンベロープ波②(下段)で、受波のエンベロープの前後凹んだ部分が AFNG 回路のゲート機能範囲である。これらの機能により海面エコーの前面にある気泡からの反射信号が取り除かれているのがわかる。

## (2) ATL回路

この回路は、改良方式における海面エコーの立下り点検出を具体化したもので、APCを通して入力された反射信号をゲート回路を通すことによりゲートが機能する範囲内の信号だけを取り出し、その中に含まれる信号のピーク値  $e_p$  をホールドし、トリガーレベル  $T_L$  を  $e_p/n$  (分圧比)  $= T_L$  として自動的に逐次設定し、この  $T_L$  とゲート通過信号を比較して一番最後に  $T_L$  と一致した信

号の立下り点を求め、この点をサンプリングすることにより海面波形(水位)を測定するものである。

このようにATL方式は入力信号のレベル値によって自動的にトリガーレベルを可変するため、大入力から小入力まで波形上のほぼ同じ位置で検出することができるので、測定範囲の拡大とような測定精度が保持される。分圧比  $n$  は、反射信号がどのような形態をもつかによって異なるが、実験では4程度で良い結果を得ている。

回路は図-7に示すブロックにより構成され、その動作は波形図によって説明される。写真-3は受波信号のエンベロープとATLトリガーレベルを示すものである。

## 5. 改良方式と在来型による記録の比較

改良方式による波高計の機能を確認するため、在来型波高計と同時に動作させて波形を記録した。

図-8は、ATL回路の動作を確認するため、混合型異常波形記録が発生した時の酒田港 -20m 水深に設置された波高計の送受波器よりの超音波パルス信号をそのままの形でデータレコーダに記録し、これを再生して現

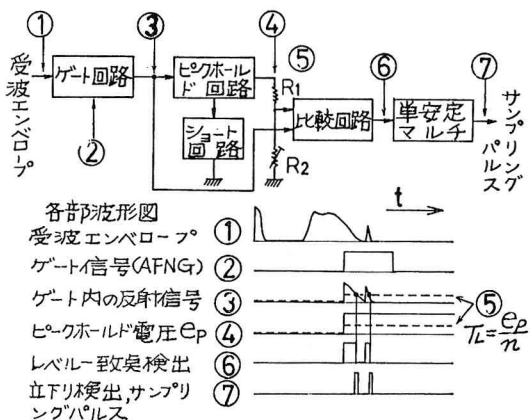


図-7 ATL回路

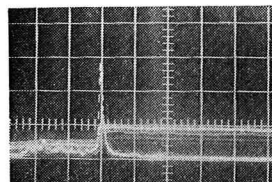
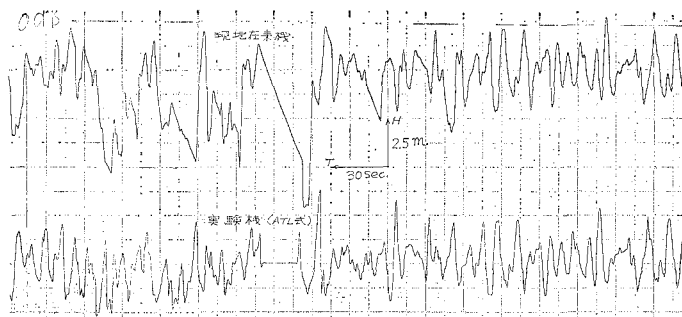
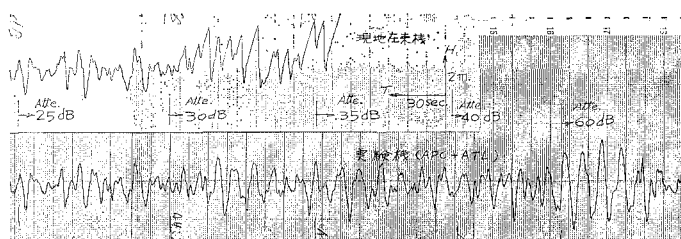


写真-3 エコーのエンベロープと ATLレベル



図—8 改良方式 (ATL) と在来型の同時記録



図—9 改良方式 (APC+ATL) と在来型の同時記録

地在来機とATL回路をもった実験機とで同時に波形記録を再現したもので、在来機では欠測している波形記録が実験機ではほぼ正常に記録されることを示している。

図—9 は、APC回路とATL回路を備えた改良方式実験機と現地在来機による同地点の同時記録で、機能を確認するため入力をアッテネータで減衰させて、その時の波形を記録したものである。この例では、在来機は $-30\text{ dB}$ の入力減衰で異常波形記録となっているが、改良方式実験機では $-60\text{ dB}$ 以上の減衰でも正常な記録が得られており、両回路の機能が効果的に動作していることが確認された。

## 6. 使用周波数の検討

一般に超音波周波数が高いほど水中に混在する気泡の影響を受けにくいとされている。一方、超音波式波高計の開発に際して行った当初実験の結果では、高い周波数の音波は海面エコーレベルの変動が大であった。したが

って従来の波高計には海面エコーのレベルが比較的安定している  $200\text{ kHz}$  を採用して来たが、ここに提案する改良方式波高計の回路方式による場合には、その欠点が補償されることとなるので、高周波音波の使用効果に着目して実験的検討を行った。

図—10 は、水槽実験により気泡層が介在する場合の  $200\text{ kHz}$  と  $600\text{ kHz}$  の超音波の壁面反射レベルの変動を記録したものの一例で、気泡は電気分解によって発生させた極く細かいものである。図からわかるように  $200\text{ kHz}$  の超音波は、安定はしているが気泡が多くなってくるとエコーは消滅してしまう。これに対し  $600\text{ kHz}$  は安定度は  $200\text{ kHz}$  より低いが、気泡の影響によるエコーの消滅はほとんど認められない結果が得られた。

このことから今後の波高計には  $600\text{ kHz}$  の採用を考慮し、現在現地波高計に

より検証実験を進めている。

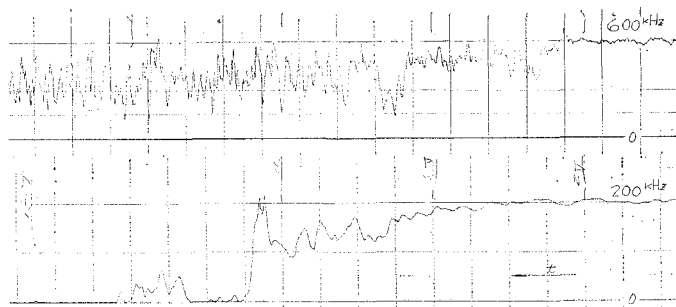
## 6. あとがき

この報告は、水中発射型の超音波式波高計における超音波パルスの海面反射信号と水中に混在する気泡の影響による雑音信号の介入および減衰効果を中心に、現地実測により総括的に実態を把握し、在来の測定回路と今回提案する改良回路 (APCおよびATLの組合せによるパルス立下り検知方式) について比較検討し、改良効果の有意性を実証的に例示した。

なお、この報告に述べた異常波形記録は、比較的浅い海域 ( $h < 20\text{ m}$ ) において強風により波高が急速に発達するような場合に散見され、大水深 ( $h \approx 50\text{ m}$ ) 海域に設置された波高計の記録では問題となっていないようである。

超音波の伝播過程における媒質の性状を、荒天時ににおいて定量的に把握することは現実には不可能であり、試行錯誤によって得られたこの研究結果を従来の理論的、実験室的研究成果と対応させて説明することは困難であるが、実験によって得られた結果は、今後水中超音波を採取分野において極めて興味ある内容を有するものと思われる。

また、改良回路の実用化は、在来機の汎用的性能向上に大きく寄与するほか、受信信号レベルの変動が大きく現地用の測定には不向きとされていた、より高周波領域の超音波の使用により更に測定精

図—10  $200\text{ kHz}$  と  $600\text{ kHz}$  の超音波に対する気泡の影響

度の向上をはかり得る可能性を示唆している。

この研究の実施に当っては、現地実験のため第一港湾建設局および第二港湾建設局、また、回路実験については海上電機(株)の関係各位に多大の協力をいただいた。記して深く感謝申し上げます。

#### 参 考 文 献

- 1) 高橋智晴・佐々木弘ほか： 超音波式波高計 につい

て、港湾技術研究所報告第12巻第1号，pp. 59~82，1973年3月。

- 2) 実吉・菊池・能本： 超音波技術便覧，日刊工業新聞社，1966年10月。  
3) 前出 1)  
4) 高橋智晴・佐々木弘ほか： 沿岸大水深海域（-50 m）における波浪観測の一例について，第20回海岸工学講演会論文集，1973年11月。
-