

参照法を用いた水圧波補正アルゴリズムの開発

DEVELOPMENT OF A METHOD TO CORRECT WAVE PRESSURE BY USING REFERENCE METHOD

北村康司¹

Yasushi KITAMURA

¹正会員 博(工) 株式会社ソニック (〒190-1222 東京西多摩郡瑞穂町箱根ヶ崎東松原19-6)

Ultrasonic wave gauges are most common apparatus for field wave measurements in Japanese coastal waters. The disadvantage of the ultrasonic wave gauges is that they can not to measure rough seas when water surface is disturbed by strong winds or breaking waves. This is quite inconvenient, because one of the major purposes of field wave observation is to obtain records of extreme seas. To overcome such disadvantage, the simultaneous operation of pressure gauge as an auxiliary wave gauge is carried out in Japan.

Accuracy of estimate method of surface wave recovery from wave pressure by using standard method is not good. The purpose of this study is to develop a method for estimate of good accuracy. In this study, it is developed a database of transfer function to correct of wave pressure. As a result, it is improvement the accuracy of surface wave recovery from wave pressure is improved using the database.

Key Words : Surface wave, Pressure profile, Wave observation, DWM, Reference method

1. はじめに

近年, 沿岸域における大規模構造物の建設にともない, 沿岸域での環境問題や防災が注目を浴びている. このような大規模構造物の建設前後において, 沿岸域の海洋環境をモニタリングするための現地調査は極めて重要である. そのため深水域での単体センサによる精度良い波浪や波向, 潮位, 潮流を定常的に観測できるセンサの開発が望まれていた. このような背景のもと海象計^{1), 2)}は, 波向観測の標準化を目指して開発され, わが国の沿岸域に多数設置されている. 現在では幅広いユーザーに提供されており, その使用目的は近年多様化している. これに伴い, より安定した観測を行うための改良が継続的になされてきた. 特に水中超音波を利用した波浪観測における課題として, 砕波時における欠測があげられる. この課題を解決する手法として, 水圧データを用いた表面波の換算法や, 水粒子速度を用いた手法などが提案されている. 海象計では水圧データを用いた解析手法が実用化されている.

水圧データを用いて表面波に換算する方法は, これまで多く提案されており, 大きく二つに分類できる. 一つは水圧波の周波数スペクトルに周波数応答関数を乗じて表面波の周波数スペクトルを推定する周波数領域での解析方法, もう一つは, 水圧波と表面波との関係を表す回帰式をもとに表面波を推定

する時間領域での解析方法である. 例えば橋本³⁾らは, 波浪の多方向性と弱非線形を考慮した水圧波から表面波への換算法を提案している. また小船⁴⁾らは水圧波形の有義波に換算係数を乗ずる方法や, 線形回帰式を用いて表面波形を推定する方法などの検討をおこなっている. しかしながら, 必ずしも精度や安定性の面で必ずしも満足すべき換算法はいまだ提案されていない.

本研究では, まず水圧波の補正に用いられる伝達関数について検討を行った. 次に海象計で得られた1年間の波浪データを用いて, 表面波と水圧波から各地点毎の有義波高・周期に対応する伝達関数表を作成し, その伝達関数表を用いて, 海象計で観測される有義波高・周期にもっとも近い伝達関数を用いる参照法アルゴリズムを開発し, その検討を行った.

2. 海象計における水圧波から表面波への換算

図-1 に海中に設置されたセンサが観測する水圧波と表面波(超音波)のそれぞれの利点と弱点の模式図を示す. 図中, 圧力波は砕波時においても, 圧力測定のため超音波観測と異なり欠測にならない利点があげられる. しかし, 圧力波は海面変動による圧力が海底に到達するまでに, その圧力が減衰し, 正確な波高が算定できない弱点があげられる. 特に,

海上作業の実施判断基準となる波高 1 m 程度の波浪状況では、水圧記録から正しい波高値を得ることは困難である。このように、超音波観測と水圧波観測は利点と弱点を補う関係にあることがわかる。そのため海象計では欠測期間をなくすために超音波センサと水圧センサによる同時観測を行っている。

図-2 の (a) 低波浪時、(b) 高波浪時に水圧センサで観測された水圧波と超音波センサで観測された表面波の経時変化を示す。(a)、(b) いずれの事例でも水圧波は表面波と比較して、振幅が小さいことがわかる。これは先に述べたように水圧変動が海底に達するまでに減衰してしまうためである。(b) の事例のように、周期が長く振幅が大きい場合においては、表面波と比べて位相も一致し比較的減衰も少ない。しかし、(a) のように振幅が小さく、周期が短い場合においては、表面波と比べて位相が一致せず減衰も大きいことがわかる。

これらのことから通常波浪時には表面波を用い、表面波が欠測しやすい碎波時には水圧波を用いることにより、欠測のない安定した観測を行うことが可能となる。しかし、図より水圧波は減衰するため、そのままでは正確な波高を算定することができない。

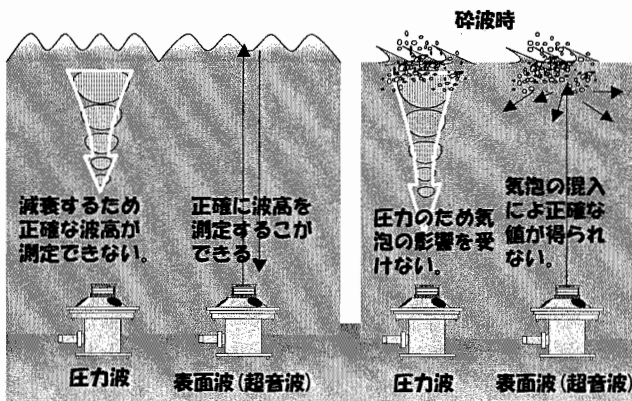


図-1 水圧波と超音波(表面波)の計測特性の模式図

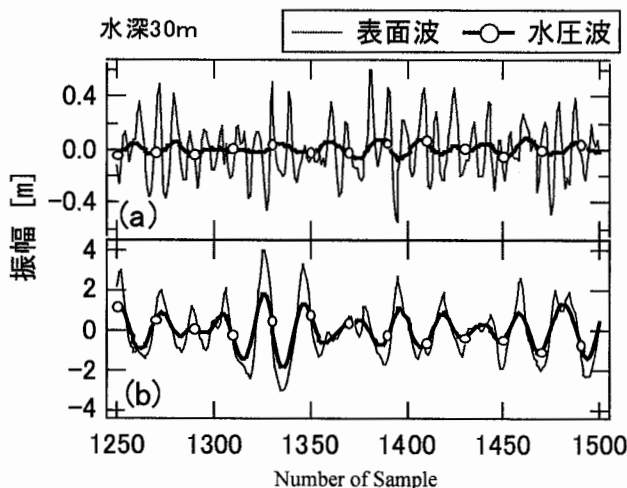


図-2 水圧波と表面波の観測データの経時変化

(2) 水圧波から表面波への換算方法について

先に述べたように、海象計では水圧データによる表面波換算手法を用いており、その手法について簡単に述べる。

$$S_{\eta}(f) = |H(f)|^2 S_p(f) \quad (1)$$

$$H(f) = \frac{1}{\rho g} \frac{\cosh(\kappa|d|)}{\cosh\{\kappa(d+z)\}} \quad (2)$$

ここで $S_{\eta}(f)$ は表面波から得られる周波数スペクトル、 $S_p(f)$ は水圧波から得られる周波数スペクトル、 $H(f)$ は線形波理論より得られる水圧波から表面波への伝達関数、 ρ は密度、 g は重力加速度、 d は水深、 z は海象計の設置高さ、 κ は波数ベクトルである。

線形波理論により求まる伝達関数は、指数関数的な単調増加関数である。このため、この関数を直接用いて表面波換算を行うと、高周波領域で表面波の周波数スペクトルを過大評価、あるいは発散してしまう。この問題を避けるために、現地演算器で用いられている換算手法では、伝達関数の最大補正倍率を 30 倍で一定として表面波を推定している⁵⁾。また、波浪条件や水深によらずこの値を用いて表面波と水圧波補正値を比較した場合、特に設置水深が浅い場合において、最大補正倍率 30 倍を用いると過大評価する恐れがある。そのため、現地観測データが存在する場合においては、その現地データを用いて観測地点に妥当と思われる最大補正倍率を決定することが本来望まれる。

最新の演算器には、この最大補正倍率をパラメータとして任意に設定することが可能である。従って現地観測データが存在する場合には、その観測データから現地に適切な補正倍率を設定することが可能である。

3. 現地観測にもとづいた補正倍率の決定方法について

図-3 に、海象計によって観測された表面波と水圧波の観測データを示す。観測地点における設置水深は約 12 m である。また海象計から得られる波浪緒元は、通常 20 分間、0.5 秒サンプリングの水位変動記録から算出される。現地演算器では、連続観測を行っており毎分毎の波浪緒元が算出される。

図-4(a) に、水圧波と表面波より求められた周波数スペクトルを示し、(b) に線形波理論により求めた伝達関数と表面波と水圧波のスペクトルから得られた伝達関数を示した。図-4(a) のスペクトル図においても水圧波は表面波と比較して減衰していることがわかる。表面波が観測されている場合は、水圧波から表面波を推定するための伝達関数 $H(f)$ は、式 (1) より表面波のスペクトルを水圧波のスペクトル

ペクトルで割ることで算定できる (図-4(b) 実線)。

図-5 に水圧波のスペクトルと表面波のスペクトルから求めた伝達関数を水圧波のスペクトルに乗じた結果を示す。図より伝達関数を乗じた水圧波(補正後)のスペクトルと表面波のスペクトルは一致しており、このスペクトルを逆フーリエ変換することで、表面波へと換算される。しかし、砕波により表面波が欠測している場合、表面波のスペクトルを用いて伝達関数を算出することができない。そのため、ここでは表面波が正常に観測されているデータを用いて伝達関数の最大補正倍率の検討を行った。

図-6 に、線形理論によって得られる伝達関数と実測値から得られた伝達関数を示す。図に示したように、伝達関数は補正倍率 10 倍あたりから理論曲線から離れ、その後補正倍率 10 倍 ~ 20 倍程度の幅でほぼ一定となっていることがわかる。このことから前述の最大補正倍率を 30 倍として表面波換算を行った場合、水圧波から推定される表面波は、実際の波高より過大評価することが考えられる。そのためここでは、図-6 の実測値から得られた伝達関数に着目すると、適正な最大補正倍率は約 10 倍 ~ 20 倍の範囲であると判断し検討を行った。図-6 には最大補正倍率を 20 倍としたときの伝達関数をしてある。また高周波成分である 0.5 Hz 以上はゼロとした。

水圧波から正しい波高値を得るためにはこの伝達関数の与え方が重要となり、補正倍率を決定するにあたり、次の事に留意した。

1) 有義波高での比較においては、表面波の有義波高と近い値をとる。2) 波形での比較においては、表面波の波形と近い値をとるが、水圧波補正值は表面波と比較して傾き A は 1 を越えない。3) 表面波形と比較してばらつきが小さい。

図-7 に表面波と水圧波(補正)から求めた有義波高のスキヤットプロットを示し、図-8 に表面波と水圧波(補正)の波形のスキヤットプロットを示す。

図-7 の有義波高の比較では、補正倍率 8 倍で傾き A が 1 に近く表面波の波高に近いことがわかる。また、波形での比較においては、20 倍補正と 8 倍補正ともに傾き A はほぼ同程度で 1 に近い。しかし、先に述べたように波形において補正值は傾き A が表面波を越えない条件から 8 倍補正が妥当であると判断される。表面波に対する水圧波補正值の平均誤差は、補正倍率 20 倍のとき 0.44、8 倍のとき 0.32 となり 8 倍補正においてばらつきが小さい結果となった。よって伝達関数は、最大補正倍率 8 倍が妥当と判断される。図-9 に表面波と最大補正倍率 8 倍で補正された水圧波補正值と水圧の生データの経時変化を示す。8 倍補正による水圧補正值と表面波は良く一致していることがわかる。

しかし本手法では、波高 2 m 以上で一致することを目的としていること、また波浪条件にかかわらず伝達関数が同じであるため全ての波浪条件には適応が困難であると思われる。

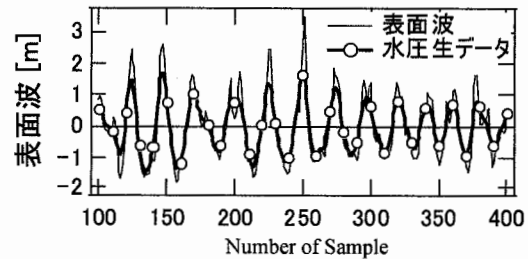
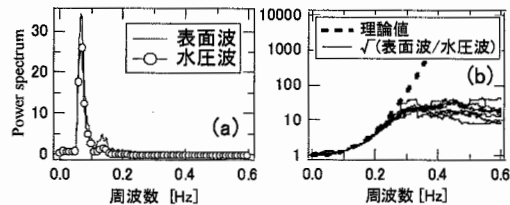


図-3 海象計で観測された表面波と水圧波の経時変化



(a) 水圧波スペクトルと表面波スペクトルの比較(左図)
(b) 実測値から得られる伝達関数と線形波理論による伝達関数の比較(右図)

図-4 観測されたスペクトルと伝達関数

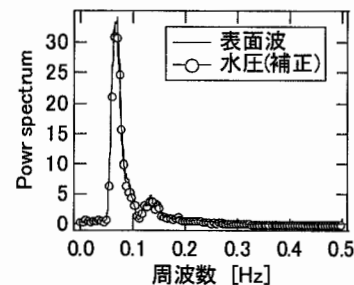


図-5 実測値から得られる伝達関数を水圧波に乗じた結果

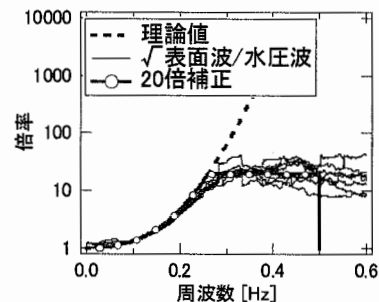


図-6 最大補正倍率を 20 倍としたときの伝達関数

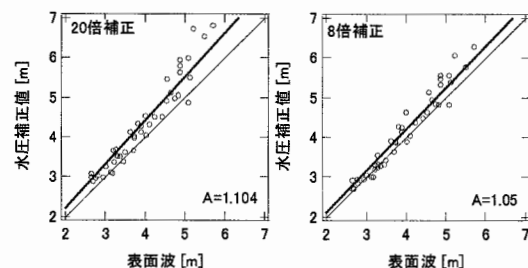


図-7 最大補正倍率 8 倍と 20 倍における表面波と水圧波(補正)の有義波高のスキヤットプロット

4. 参照法による水圧波補正の検討

(1) アルゴリズムについて

ここまで、現地観測にもとづいた最大補正倍率の決定方法について述べてきた。その結果として従来の手法である最大補正倍率 30 倍を用いた場合、推定される波浪緒元は、設置水深によって過大評価する恐れがあることがわかった。しかし上述した手法においても、過去データから波高が比較的一致する最大補正倍率を決定しており、この場合どのような波浪条件に対しても伝達関数が同じであるため、波浪条件によっては誤差が大きくなるようなケースも十分考えられる。また最大補正倍率の設定によっては、過小評価または過大評価する恐れがあることが分かった。そこで、実測される伝達関数について波高および周期別に算出し、その検討を行った。

図-10 に、表面波で観測された有義波高 1 m と 2 m の各周期帯における伝達関数を示す。図中破線は線形波理論により得られる伝達関数を従来の最大補正倍率 30 倍で一定としたものである。図中実線で示す伝達関数は、過去 1 年間の表面波と水圧波から得られた伝達関数を表面波で観測された有義波高および周期帯別に平均化したものである。階級分類は、有義波高 (H3), 0.1 m, 有義波周期 (T3) 1 s 毎で行い、波高 H3 の ± 0.1 m, 周期 T3 の ± 1 s で平均化を行っている。図より表面波と水圧波のスペクトルから得られた伝達関数に着目すると形状については同じものの、波高・周期によって最大値が大きく異なっている。実線で示した実測された伝達関数は波高 1 m および 2 m とともに周期が短いほど大きな値を示している。これは先の図-2 の水圧波と表面波の経時変化で述べたように、周期が短い場合においては水圧の減衰が大きいため実測される伝達関数についても大きくなることを示している。また波高 1 m および 2 m とともに周期約 8 秒以上で最大補正倍率 30 倍に近い値となっている。これらのことから、有義波周期が短いような波浪条件において、従来の最大補正倍率 30 倍を用いて水圧波補正を行った場合、その波浪緒元は表面波の波浪緒元と比較して、波浪状況や観測地点によっては誤差が大きくなると考えられる。よって、水圧波を補正するための伝達関数は、観測地点や波浪状況に応じた伝達関数を用いる事が望ましいと考えられる。しかし、伝達関数はこれまで述べてきたように水深、波高、周期で大きく異なるため一様に決定することは難しい。

本研究では、表-1 に示す各地点の過去 1 年間の観測データを用いて表面波と水圧波のスペクトルから得られる伝達関数を有義波高・周期の階級に分類した表を各地点毎に作成した。本アルゴリズムは表面波が欠測した場合に用いるため、階級分類は水圧データをもとに行う必要がある。しかし水圧波は海底付近では振幅が減衰し波形の周期が長くなるため、本研究ではまず水圧波を補正するための最大補

正倍率を 30 倍として計算を行い、その結果から得られた有義波高および有義波周期を用いて表面波と水圧波から得られる伝達関数の階級分類を行った。階級分類は、有義波高 (H3), 0.1 m, 有義波周期 (T3) 1 s 毎で行い、波高 H3 の ± 0.1 m, 周期 T3 の ± 1 s で平均化を行っている。つまり、図-10 で示した伝達関数を最大補正倍率 30 倍で得られる有義波高・周期で階級分類を行うことに相当する。

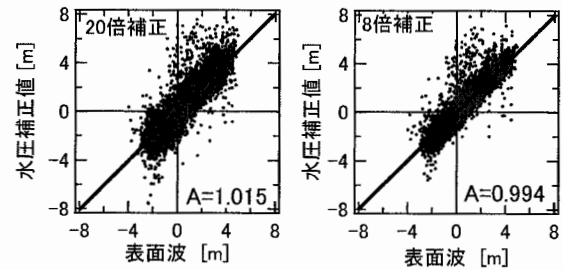


図-8 表面波と水圧波補正値の波形のスキットアップ

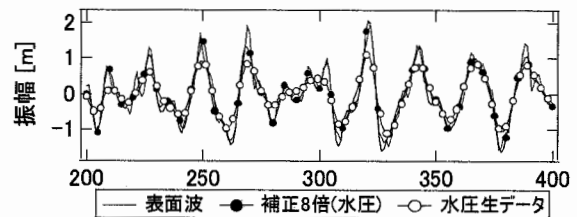
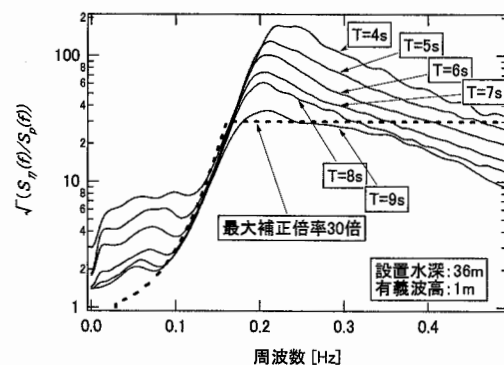
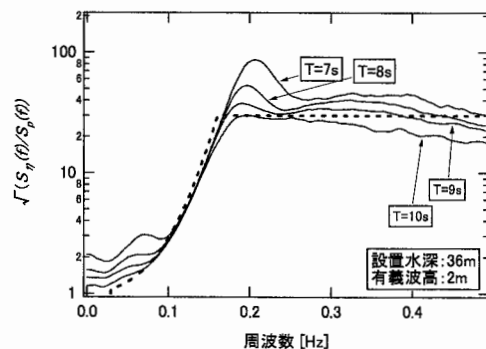


図-9 表面波と水圧波補正値の経時変化



(a) 有義波高 1 m



(b) 有義波高 2 m

図-10 有義波高・周期帯別における伝達関数

図-11 に本研究で用いたアルゴリズムのフロー図を示す。水圧センサにより観測された水圧波 (①) を、最大補正倍率 30 倍とし補正を行う (②)。③ 補正された水圧波から有義波高および有義波周期を算出する。④ 水圧波と同時観測された表面波のスペクトルと水圧波のスペクトルを算出。⑤ 水圧波のスペクトルと表面波のスペクトルから伝達関数 $H(f)$ を算出。⑥ ③で算出した有義波高および有義波周期をもとに階級分類を行う。これを観測データ毎に算出し、階級表を作成する。⑦ 表面波欠測時 ⑥ で作成した表より当てはまる階級の検索を行い一致する場合は、その伝達関数から水圧補正を行う (⑧)。⑨ 伝達関数がない場合は最も近い階級を選択し水圧波の補正を行う。最後に補正された水圧波より有義波高・周期を算出する (⑩)。

(2) アルゴリズムの検討

アルゴリズムの妥当性の検討方法として表-1 で示した各地点毎の過去 1 年間のデータを用いて階級表の作成を行った。その階級表を用いて図-11 に示したフロー図に従い水圧波の補正を行い有義波高および有義波周期を算出した。その結果と階級表を作成した同地点の同時時刻から算出した表面波の有義波高および有義波周期と比較を行いアルゴリズムの妥当性の検討を行った。従って、データの比較は表面波が観測されている時刻でのみ行った。また従来の最大補正倍率 30 倍の結果とも合わせて比較を行った。

図-12 に参照法アルゴリズムによって得られた有義波高と表面波の有義波高の結果を示す。有義波高値 2 m 以上で比較を行った。図中横軸は表面波から得られた有義波高であり、縦軸は従来の手法で得られた有義波高および参照法によって得られた有義波高である。傾き A は、従来の手法で傾き 1.06、表面波との平均偏差 0.19 となり、参照法では傾き 0.95、平均偏差 0.17 となった。従来の手法と参照法と比較して、傾きはほぼ同じ結果となっているが、平均偏差で参照法においてやや改善された結果となった。

次に表-1 で示した地点毎における従来の最大補正倍率 30 倍で求めた手法と参照法で得られた有義波高と表面波より得られた有義波高の比較を行った。比較方法は、図-12 と同様に参照法で補正された水圧波と最大補正倍率 30 倍で補正された水圧波の有義波高と表面波の有義波高から得られる傾きによる比較で行った。

図-13 および図-14 にその結果を示す。図-13 および図-14 は、横軸に各地点の水深、縦軸に図-12 で述べた方法と同様に、表面波と参照法で得られた有義波高の傾きと最大補正倍率 30 倍から得られた有義波高の傾きである。図中実線は最大補正倍率 30 倍の結果であり、破線は参照法の結果である。図-13 は表面波の有義波高 1 m 以上 2 m 未満、周期は観測された全周期での波浪条件である。図より、参

照法において各水深で傾き A は 1 に近く適正に補正されていることがわかる。最大補正倍率 30 倍の有義波高は、表面波と比較して傾き A は 0.6 程度である。これは最大補正倍率 30 倍で推定した場合、表面波と比較して大きく過小評価していることを示している。この理由として、図-10(a) 中実線で示した実測された伝達関数に着目すると、有義波高 1 m では周期が短いとき表面波と水圧波から得られる伝達関数は最大補正倍率 30 倍と比較して実測される伝達関数は、大きな値を示している。このため、周期が短い波浪条件が多い有義波高 1 m 以上~2 m 未満では、最大補正倍率 30 倍において過小評価する結果となった。

表-1 本研究で用いた地点毎の水深

NO.	水深(m)	NO.	水深(m)	NO.	水深(m)	NO.	水深(m)
ST.1	21	ST.6	29	ST.11	38	ST.16	50
ST.2	22	ST.7	31	ST.12	41	ST.17	51
ST.3	23	ST.8	33	ST.13	42	ST.18	52
ST.4	24	ST.9	34	ST.14	45	ST.19	53
ST.5	27	ST.10	36	ST.15	49	ST.20	55

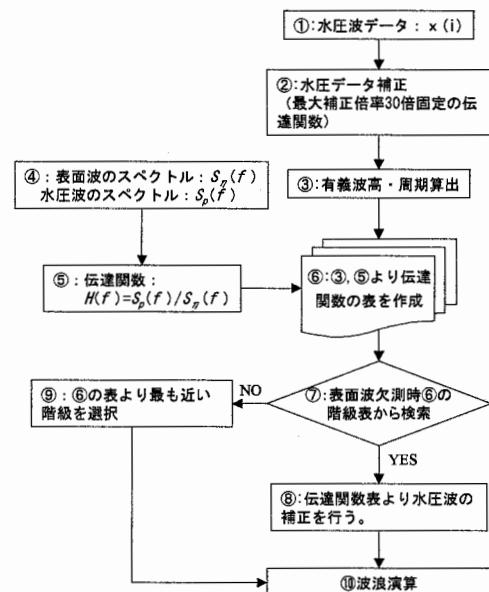


図-11 本アルゴリズムの流れ

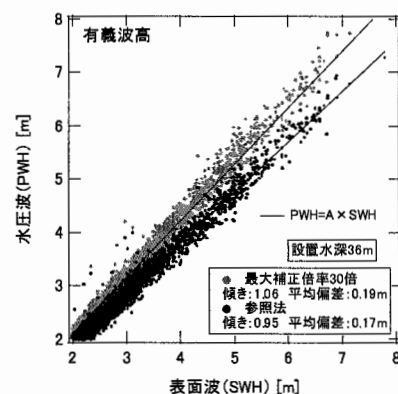


図-12 従来の手法と参照法のスキュットプロット (有意義波高 2 m 以上)

次に図-14(a) に有義波高 2 m 以上で周期 5 s ~ 8 s, (b) に周期 8 s 以上で同様の比較を行った。

(a) の周期 5 s ~ 8 s において, 参照法と最大補正倍率 30 倍の結果は, ほぼ同様の値を示している。(b) の周期 8 s 以上では, 最大補正倍率 30 倍では水深毎でばらつきが多いことがわかる。参照法において傾き A は安定して 1 に近い結果を示した。

これらのことから伝達関数は, 水深・波高・周期によって異なり, 最大補正倍率を一定とした場合, 波浪条件によっては過大評価もしくは過小評価することがわかった。しかし, 参照法においては観測される波浪条件に応じて伝達関数を決定するため, 推定される有義波高は安定して表面波の有義波高と近い結果を示した。よって, 本研究で示した参照法によるアルゴリズムは十分適用可能であると判断される。

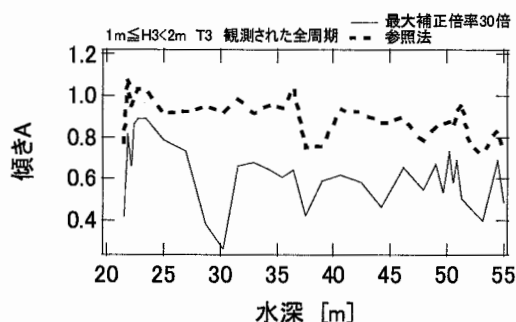
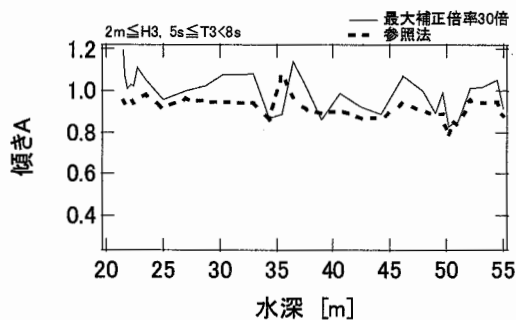
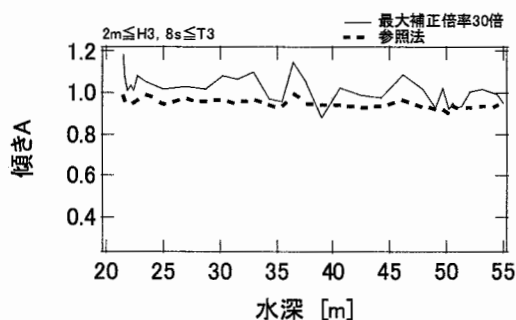


図-13 従来の手法と参照法による傾き A の比較
(有義波高 1 m 以上 2 m 未満)



(a) 有義波周期 5 秒以上 8 秒未満



(b) 有義波周期 8 秒以上

図-14 有義波高 2 m 以上における従来の手法と参照法による傾き A の比較

5. おわりに

本研究では, 安定した連続観測を可能とするために精度良い水圧波の補正方法について参照法を用いたアルゴリズムを開発しその検討を行い, 以下の知見を得た。

- (1) 最大補正倍率 30 倍として水圧波を補正した場合, 水深や波浪条件によって過小評価または過大評価することが示された。
- (2) 水圧波を補正するための伝達関数は, 水深や波高・周期で大きく異なることが示された。
- (3) 伝達関数は, 水深や波高・周期に応じて決定する必要があることが示された。
- (4) 参照法アルゴリズムによる結果は, 最大補正倍率 30 倍と比較して安定して表面波に近い結果となり, 本アルゴリズムの有効性が示された。

本研究では, 伝達関数が存在する場合でのみ検討を行っており, 伝達関数がない事例での検討を行っていない。またデータ処理手法についても海象計で用いている現手法でのみ検討を行っており, 他の手法との比較検討などは行っていない。今後は, 他の手法とあわせて伝達関数が得られない事例についても比較検討していくとともに, 解析対象地点や期間を増やし検討を行っていく予定である。

謝辞: 本研究をまとめるにあたり, 独立行政法人港湾空港技術研究所からデータ提供を頂きここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 高山知司, 橋本典明, 永井紀彦, 高橋智晴, 佐々木弘: 水中ドップラー式波向計(海底設置式波浪計)の開発について, 海岸工学論文集, 第39巻, pp.176-pp.180, 1992.
- 2) 橋本典明, 永井紀彦, 高山知司, 高橋智晴, 三井正雄, 磯辺憲雄, 鈴木敏夫: 水中音波のドップラー効果を応用した海象計の開発, 海岸工学論文集, 第42巻, pp.1081-pp.1085, 1992.
- 3) 橋本典明, 永井紀彦, 菅原一晃, 浅井 正, 朴慶寿: 波浪の他方向性と弱非線形性を考慮した水圧波から表面波への換算法について, 港湾技術研究報告書 第32巻 第1号, pp.27-pp.51, 1993.
- 4) 小船浩治, 合田良実, 成田 明, 佐々木 弘, 森田行司: 現地観測における水圧波から表面波への換算法について, 港湾技術研究報告書 第27巻 第3号, pp.161-pp.183, 1988.
- 5) 三井正雄, 岩崎峯夫, 橋本典明, 永井紀彦: 海象計により計測された波浪情報のデータ処理手法 -安定した波浪情報の供給を目指して-, TECNO-OCEAN, 1998.