

水圧式波高計の表面波変換における補正上限 周波数の深度依存特性に関する再考察

金 成 誠 一*

キーワード：表面波変換、伝達関数、水圧式波高計

1. はじめに

水圧式波高計の圧力センサー出力信号を表面波に変換するには、圧力波の深度補正を必要とすることは良く知られていることである。しかし、深度補正関数が周波数(または波数)とともに関数値が増大するという性質のために、単純に補正を実行すると高周波側で過剰補正となり、変換された波は異常に増幅された高周波雑音を含んだ波形になってしまう。こうした過剰補正を抑制するには、高周波域の適当な周波数以上で圧力応答関数による補正を抑制する必要がある。たまたま、波浪観測データの解析の機会に直面し、この解析に供する目的で、新たな表面波変換方法を開発した。この方法は、ある周波数以上で、伝達関数を人為的に抑制することにより、高周波域での過剰補正を避けるというもので、抑制開始周波数(以下では上限周波数または F_b と呼ぶ)の最適値は、表面波変換された時系列と同時観測された超音波波高計時系列との差を最小にするように逐次法で決定するという変換手法である。この方法を、いろいろな場所、深度で計測された波高データに適用して上限周波数を求めた結果、上限周波数が深度に密接に関係していることが明らかになった。その原因のひとつとして、比較に用いた超音波波高計の分解能が深度に依存することを示し、これが、上限周波数の深度依存特性に反映している可能性を考察し、前回報告(金成、2003)で報告した。しかし、その後、伝達関数特性を詳細に調べた結果、上限周波数の深度依存特性が、伝達関数の深度依存特性を反映したものに過ぎないことが明らかになった。ここでは、 F_b の深度依存性が伝達関数の深度依存特性によるものであるという点に焦点をしばって報告する。

2. 伝達関数の深度特性

水深 h 、振幅 a 、角周波数および角波数がそれぞれ σ, k の表面波の位置 x 、時刻 t における表面波を $\eta(x, t)$ とすると、この波は

$$\eta(x, t) = a \sin(kx - \sigma t + \theta) \dots\dots\dots(1)$$

で表される。ここに、 θ は波の位相角である。この波による深度 z における水圧変動 $p(x, z, t)$ は、水の密度を ρ 、重力の加速度を g とすると

$$p(x, z, t) = \rho g a \frac{\cosh(k[h+z])}{\cosh(kh)} \sin(kx - \sigma t + \theta) \dots\dots(2)$$

で与えられる。(1)、(2)式から、 $\eta(x, t)$ と $p(x, z, t)$ の関係を求めると次式が得られる。

$$\eta(x, t) = p(x, z, t) / \rho g K_p(z) \dots\dots\dots(3)$$

ただし、

$$K_p(z) = \frac{\cosh(k[h+z])}{\cosh(kh)} \dots\dots\dots(4)$$

である。(3)式は、水圧から表面波に変換するための基本式で、例えば、海底設置型の水圧計で波を計測した場合、設置深度を $z = -h$ とすると、(3)式は

$$\eta(x, t) = p(x, -h, t) / \rho g K_p(-h) \dots\dots\dots(5)$$

となり、 $K_p(z)$ は、圧力応答関数と呼ばれている(Robert and Robert, 1984)。ここでは、 $[K_p(-h)]^{-1}$ を水圧補正伝達関数、以下では、単に伝達関数と呼ぶ。以下では伝達関数を $H(h, f)$ と書く。

* 立正大学地球環境科学部

3. 伝達関数 $K_p(-h)$ の深度依存特性

伝達関数 $[K_p(-h)]^{-1} = \cosh(kh)$ は(4)式から明らかのように、波数 k と深度 h の関数となっている。波数 k は角周波数 σ が与えられると、波の分散式

$$\sigma^2 = gk \tanh(kh) \dots\dots\dots(6)$$

から求めることができる。そこで、水深をパラメータにして、周波数に対する伝達関数がどのような特性になるかを調べてみる。水深 h を 5 m から 30 m まで 5 m 毎に変化させ、そのときの伝達関数値を周波数についてプロットしたものを Fig. 1 に示す。図から、伝達関数は、浅い深度では立ち上がりがゆるく、深度が増すにつれて、立ち上がりが急になることがわかる。周波数が低周波域に近づくとき伝達関数が 1 に漸近するのは、低周波域では、水圧の補正がほとんど不要であることを示している。すなわち、水圧波高から表面波を算定するには、高周波域で、水圧計測値に伝達関数値に相当する補正倍率を掛けて補正しなければならないことを示している。高周波域で、伝達関数の過大補正を避けるために、ある上限周波数以上の領域で、伝達関数を一定値にして、抑制を掛けるというのが表面波変換のひとつの手法であった。Fig. 2 は、ある水深の水場で計測された水圧波に対する伝達関数と上限周波数 F_b の模式図である。周波数 F_b よりも高周波域では、伝達関数の値を $H(h, F_b)$ の一定値になるように固定する。すなわち、 $H(h, F_b)$ は、この場合、計測された水圧波に施す補正最大増幅度を表すことになる。設置水深 h が異なれば、伝達関数の形が変わるので、高周波域の最大増幅度を同一に固定したとしても、 F_b は違った値になる筈である。したがって、

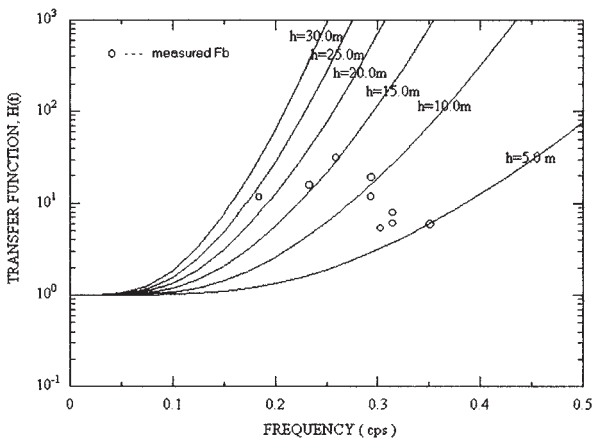


Fig. 1 Transfer function v.s. frequency characteristics for the various depth parameters. Open circles show F_b , determined from measurements.

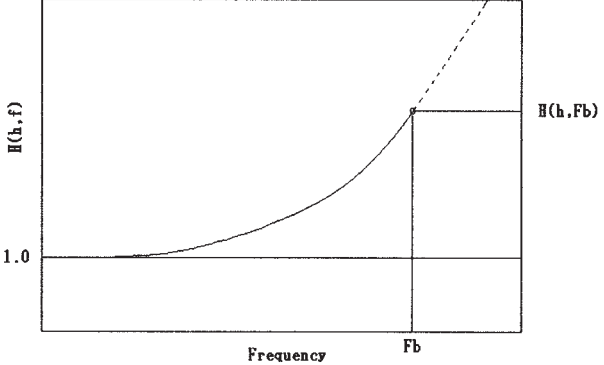


Fig. 2 Schematic graph of a Transfer Function modified as a constant above a break frequency F_b for a depth h . The maximum correction factor can be given by $H(h, F_b)$.

Fig. 1 の伝達関数曲線群に $H(h, F) = const.$ の水平直線を作ると、この直線とそれぞれの深度に対応する各伝達関数曲線との交点に対する周波数が、それぞれの深度の F_b となることを意味する。そこで、実際のデータでは、 $H(h, F) = const.$ に対応する値がどれくらいになっているかをみている。前回報告した種々の海域での上限周波数 (Table. 1) を Fig. 1 の伝達関数曲線群上にプロットしたものが Fig. 1 の印である。ばらつきはあるものの伝達関数値の平均約15の付近に限定されており、深度とは無関係であることがわかる。つまり、どの海域でも、伝達関数の上限値は、深度にかかわらず、平均して15乃至20倍程度であったことを示している。

Table. 1 Break Frequency (F_b), determined at various coastal regions with different depths.

Depth (m)	F_b (Hz)
5	0.35
9.6	0.297
10.9	0.278
16	0.25
17	0.23
23	0.17
3.675	0.29
6.549	0.28
6.387	0.28
6.252	0.3
6.171	0.3
6.146	0.31
6.905	0.31
6.471	0.31

4. 増幅度上限均値から求めた上限周波数 F_b の深度依存特性

伝達関数の上限値を15として、Fig. 1 に示す曲線群が $H(h, F_b) = 15.0$ と交わる点の周波数値をそれぞれの深度の F_b とみなし、この方法で求めた $F_b(h)$ が、深度とどのような関係になるかを検討してみる。得られた $F_b(h)$ を深度に対してプロットしたものを Fig. 3 に示す。縦軸は、 F_b の値 (Hz) で、横軸は深度 (m) を表す。この結果は、深度が増すにつれて F_b が減少するという特性を示し、種々の海域で求めた F_b の特性と酷似している。ちなみに、Fig. 3 のデータを実際に観測から求めた F_b の深度特性と比較したものを Fig. 4 に示してある。Fig. 4 の Δ は実測から求めた F_b で、 \circ は $H(h, F_b) = 15.0$ として、グラフから求めた F_b である。両者はほとんど一致していることがわかる。この結果から、種々の海域での観測データから得られた F_b の深度依存特性は、伝達関数の深度依存特性を反映した結果であることが結論できる。すでに前報でも示したことであるが、図中の点線は、実測による F_b 特性を最小2乗法で求めた曲線で、その式は

$$F_b = 0.56807h^{\frac{1}{3}} \dots\dots\dots(7)$$

で与えられる。

上限周波数が(7)式の形で確定できると、水圧式波高計の設置深度 h を与えれば(7)式から上限周波数が決まり、この上限周波数を用いて表面波変換ができることになり、もはや超音波波高計との比較は不要となる。

5. むすび

前回報告で述べたとおり、水圧式波高計を用いた、新しい表面波変換方法の提案を行った。

方法の検討に伴って行ったいくつかの波浪データの解析により、 F_b の深度依存関係が見出され、その定式化を行ったが、その後の詳細な検討により、上限周波数の深度依存特性が伝達関数の深度依存特性を反映したものであることが明らかになった。また、 F_b を深度の関数として表すことにより、 F_b を設置深度から計算で求めることができる。この方法によれば、いちいち超音波波高計データとの比較により F_b を決めるという手続きが不要になり、水圧式波高計だけで表面波変換が可能になる。実際に、この方法で変換した表面波を、同時計測した超音波波高計のデータと比較し、きわめて良好な一致

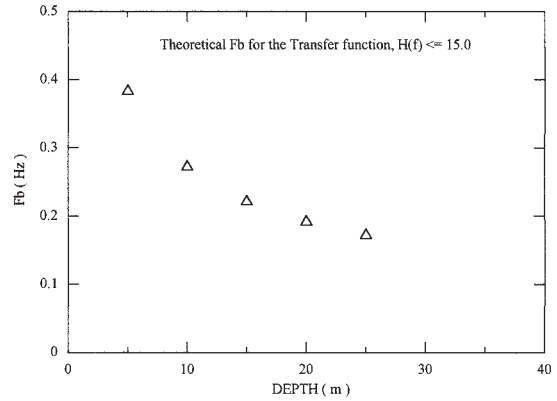


Fig. 3 Theoretical F_b (Δ) for depth parameters, assuming a constant maximum correction factor of 15 in the transfer function in Fig.1.

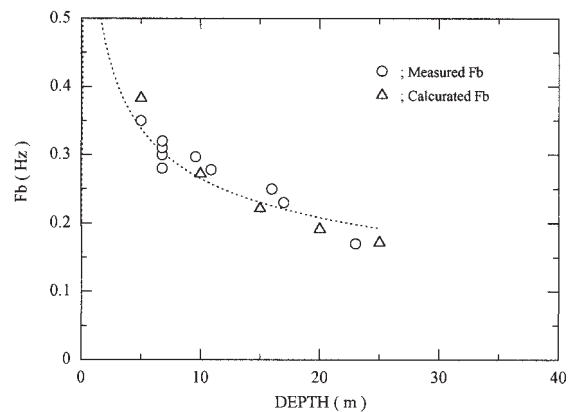


Fig. 4 Total plot of the theoretical F_b (Δ) and measured F_b (\circ). Both points of Fbs nearly ran along a same curve.

が得られたことはすでに前報で述べたとおりである。

ここで示した方法は、超音波波高計の波形を正しいものと仮定した上でのもので、前報で触れたように、超音波波高計自体が深度の増大とともに高周波分解能が劣化する可能性があるため、こうした影響が水圧変換波に直接反映される可能性があることは否めない。これを回避する手段は、残念ながら、現時点では見当たらない。また、以上に示した変換方法は、線形波理論に立脚したもので、浅海域で卓越するであろう非線形効果がどの程度影響するかの評価についても考慮外である。このような問題点はあるが、上で述べた方法は、水圧式波高計だけで超音波波高計とほとんど変わらない表面波時系列が得られるという点できわめて実用性の高いものである。

文献

Robert, G. D., and A. D. Robert (1984) Water wave mechanics for Engineers and Scientists. Prentice-Hall, Inc., 352pp.
 金成誠一 (2003) : 水圧式波高信号の表面波変換と補正上限周波数特性. 地球環境研究, 5, 51 - 57.

Revisited to the Depth-Dependency of Break Frequency (F_b) in the Surface Wave Transformation of Pressure Gauge Wave Meter Data

Sei-ichi Kanari

Faculty of Geo-environmental Science, Rissho University

Abstract

Owing to linear wave theory, amplitudes of pressure signal measured at depth $z = -H$, is reduced by $[\cosh(KH)]^{-1}$, where k is angular wave number. Therefore, in order to recover surface waves from the pressure signals, the measured pressure signal must be corrected using pressure transfer function given by $\cosh(KH)$. However, it is well known that the theoretical pressure transfer function leads an over correction in the region of higher frequency. Then, it is needed to use a suitably modified pressure transfer function for theoretical one. In this paper, a modification was adopted, in which transfer function is suppressed as a constant value in the frequency region higher than a break frequency, F_b . The break frequency, F_b is determined so as to minimize the error between the transformed surface wave and the waves measured with an acoustic wave meter.

The above method was applied for wave data taken at various coastal regions with different depths. The determined F_b showed a clear depth dependency, and it is found that the depth dependency of F_b is due to the depth dependency of pressure transfer function itself. If formulation of F_b v.s. depth is once established, it enables us to determine a most suitable F_b without any acoustic wave meter data. And it makes us possible to estimate the corrected surface wave time series solely with a pressure wave meter.

Keywords: surface wave transformation, transfer function, wave meter, pressure waves.