Deconvolution法を用いた長周期波の 水位波形推定法に関する研究

APPLICATION OF DECONVOLUTION INTERFEROMETRY TO AN INFRAGRAVITY WAVE FIELD

小林雄一¹・泉宮尊司²

Yuichi KOBAYASHI and Takashi IZUMIYA

¹正会員 修(工) 東亜建設工業株式会社 横浜支店 (〒231-8983 横浜市中区太田町1-15番地)

²正会員 工博 新潟大学教授 工学部建設学科 (〒950-2181 新潟市西区五十嵐2の町8050番地)

The deconvolution interferometry is applied to estimate wave profiles of infragravity waves propagating in intermediate water depths near and in a port. The method of deconvolution interferometry is used for estimating the impulse responses and has an advantage that remove the effect of source function, whereas the cross-correlation interferometry depends on the power spectrum of the source function. The wave profiles of infragravity waves are estimated with the deconvolution interferometry and compared with the cross-correlation interferometry. The deconvolution method produce better results for wave profiles of infragravity waves than cross-correlation interferometry.

Key Words : *infragravity wave, cross-correlation Interferometry, Green function, deconvolution Interferometry, source function*

1. はじめに

高波浪中に存在する長周期波は、海岸付近において増幅し、波の遡上・越波や浮遊砂の移動に大きな影響を及ぼすだけでなく、港湾内において多重反射を繰り返し減衰することなく存在し続けるために、荷役の大きな障害となっている。長周期波の発生要因に関しては様々な要因が挙げられているが、現地海岸では複数の要因が共存して作用している可能性があり、その要因を明確に提示するには至っていない。また、拘束長周期波については、波高やスペクトルの推定は中畑ら^{1),2),3)}により行われているが、長周期波の入射方向や位相が不明なために自由長周期波の波形予測までには至っていなかった。泉宮ら⁴⁾は干渉合成法を用いて自由長周期波の波形推定を行い、長周期波の水位波形推定に有効であることを示した。これは、地震波干渉法(Seismic Interferometry)の考えを海洋の長周期波に応用したもので、その中では2つの観測地点間の相互相関関数がGreen関数に相当することを利用した相互相関法を用いた手法である。長周期波の波形を予測することができれば、船舶の動揺解析に直接用いることができ、非常に有用となる。さらに近年では、相互相関法よりもDeconvolution法と呼ばれる手法を用いた地震波干渉法の方が、減衰系媒質の中でも適用でき、より高精

度の物理探査ができる可能性があることが明らかになりつつある。

そこで本研究では、Deconvolution法を用いた干渉合成法により長周期波の水位波形推定を行い、相互相関法によるものと比較・検討し、水位波形推定の高精度化を目指すことを研究の目的とする。

2. Deconvolution法を用いた長周期波の水位波形推定法

地震波干渉法は、地震波等の波動場を異なる2地点で観測した場合、それらの観測波形の相互相関関数を求めると、一方を仮想的な震源に他方を受信点とした場合の波形を合成できるというもので、精度の高い物理探査が行えるとして注目を浴びている⁵⁾。

しかしながら、相互相関法を用いた地震波干渉法では、観測記録に含まれる震源関数の影響を受けたGreen関数が得られ、厳密なGreen関数を得るには震源関数が既知でなければならなかった。これに対し、相互相関法で得られるGreen関数に震源関数の影響を除去できるDeconvolution法により、震源関数が未知の場合でも適用できることが明らかになりつつある(例えばWapenaar and Fokkema^{6),7)})。

Deconvolution法とは、画像解析などに用いられている技術であり、あるたたみ込み(convolution)されたものから、ノイズが加わった信号を原信号と応答関数とのたたみ込みと見なして、原信号あるいは応

答関数を求める操作である。なお、海洋の長周期波への相互相関法を用いた地震波干渉法の応用に関しては、泉宮ら⁴⁾に示されている。

以下に相互相関法およびDeconvolution法について、その概要を説明することにする。

(1) 相互相関法によるGreen関数の推定法

ある領域 D において、波源 $\mathbf{s}$ より生じる長周期波が観測地点AおよびBで観測される水位変動 η は、波源関数 $s(\omega)$ とGreen関数のたたみ込みで表現されたとすると、周波数領域ではそれぞれ次のように表すことができる。

$$\hat{\eta}(\mathbf{x}_A, \mathbf{s}, \omega) = s(\omega) \hat{G}(\mathbf{x}_A, \mathbf{s}, \omega) \quad (1)$$

$$\hat{\eta}(\mathbf{x}_B, \mathbf{s}, \omega) = s(\omega) \hat{G}(\mathbf{x}_B, \mathbf{s}, \omega) \quad (2)$$

ここに、 ω は角周波数、上付きhatはフーリエ変換量であることを示し、

$$\hat{\eta}(\mathbf{x}_A, \mathbf{s}, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \eta(\mathbf{x}_A, \mathbf{s}, t) \exp(-j\omega t) dt \quad (3)$$

であり、 j は純虚数である。

ここで、2地点AおよびBで同時観測された水位変動データに次式のように相互相関処理を施す。

$$\begin{aligned} \hat{C}(\mathbf{x}_B, \mathbf{x}_A, \omega) &= \hat{\eta}(\mathbf{x}_B, \mathbf{s}, \omega) \hat{\eta}^*(\mathbf{x}_A, \mathbf{s}, \omega) \\ &= |W(\mathbf{s})|^2 \hat{G}(\mathbf{x}_B, \mathbf{s}, \omega) \hat{G}^*(\mathbf{x}_A, \mathbf{s}, \omega) \end{aligned} \quad (4)$$

ここに、 $*$ は共役複素数を示す。式(4)は、時間領域では相互相関関数を取ることに相当する。また、右辺には波源関数のパワースペクトルの積で表されている。ここで、次式のように全ての波源に対して積分することで、2地点間のGreen関数が得られる。

$$\begin{aligned} \oint_{\partial D} \hat{C}(\mathbf{x}_B, \mathbf{x}_A, \omega) d\mathbf{s} \\ = \left\langle |W(\mathbf{s})|^2 \right\rangle \left[\hat{G}(\mathbf{x}_B, \mathbf{x}_A, \omega) + \hat{G}^*(\mathbf{x}_B, \mathbf{x}_A, \omega) \right] \end{aligned} \quad (5)$$

式(5)において、Green関数と波源関数のパワースペクトルの平均値の積となっており、Green関数の共役複素数の項は非因果的な作用によるものである。この非因果的な項は原因となる事象が起こる前に結果が起こるという因果関係が逆になっているもので、波源がランダムに分布していればその影響は無視できる⁵⁾。

ここで、観測地点AからB地点の長周期波の水位波形を推定する式は、線形システムを仮定した入出力関係式より、A地点で観測した水位変動を用いて次式のように表わせる。

$$\eta(\mathbf{x}_B, t) = K \int_{-\infty}^t G(\mathbf{x}_B, \mathbf{x}_A, t-\tau) \eta(\mathbf{x}_A, \tau) d\tau \quad (6)$$

ここに、 K は推定した水位変動の振幅の大きさを補正する比例定数であり、本研究では波形を比較する

ために観測長周期波とパワーが等しくなるように決定している。

(2) Deconvolution 法によるDeconvolution 関数の推定法

一般に、波源関数までも観測できるケースは数少ないと考えられる。そこで、Vasconcelos and Snider⁸⁾は、波源関数による影響を除去するためにDeconvolution法を用いた地震波干渉法を提案した。

2地点AとBのDeconvolution関数は、

$$\hat{D}(\mathbf{x}_B, \mathbf{x}_A, \omega) = \frac{\hat{\eta}(\mathbf{x}_B, \mathbf{s}, \omega)}{\hat{\eta}(\mathbf{x}_A, \mathbf{s}, \omega)} \quad (7)$$

と表される。ここで、分母の複素共役数の積を取ると、

$$\begin{aligned} \hat{D}(\mathbf{x}_B, \mathbf{x}_A, \omega) &= \frac{\hat{\eta}(\mathbf{x}_B, \mathbf{s}, \omega) \hat{\eta}^*(\mathbf{x}_A, \mathbf{s}, \omega)}{|\hat{\eta}(\mathbf{x}_A, \mathbf{s}, \omega)|^2} \\ &= \frac{\hat{G}(\mathbf{x}_B, \mathbf{s}, \omega) \hat{G}^*(\mathbf{x}_A, \mathbf{s}, \omega)}{|\hat{G}(\mathbf{x}_A, \mathbf{s}, \omega)|^2} \end{aligned} \quad (8)$$

となり、式(8)の分子部分は相互相関法と同じであり、それを分母のパワースペクトルで除したものである。これにより波源関数 $s(\omega)$ の影響が除去され、2地点間のインパルス応答をより精度良く再現できる可能性がある。これを全ての波源に対して積分することでGreen関数に相当する2地点間の応答関数が得られる。

$$\oint_{\partial D} \hat{D}(\mathbf{x}_B, \mathbf{x}_A, \omega) d\mathbf{s} = \oint_{\partial D} \frac{\hat{G}(\mathbf{x}_B, \mathbf{s}, \omega) \hat{G}^*(\mathbf{x}_A, \mathbf{s}, \omega)}{|\hat{G}(\mathbf{x}_A, \mathbf{s}, \omega)|^2} d\mathbf{s} \quad (9)$$

式(9)の実際の計算に関して、計算の安定化を図るために、ホワイトノイズとして地点Aにおける水位変動の平均パワースペクトルの10% ($\varepsilon^2=0.1$)を与えた次式を用いた。

$$\hat{D}(\mathbf{x}_B, \mathbf{x}_A, \omega) \approx \frac{\hat{\eta}(\mathbf{x}_B, \mathbf{x}, \omega) \hat{\eta}^*(\mathbf{x}_A, \mathbf{x}, \omega)}{|\hat{\eta}(\mathbf{x}_A, \mathbf{x}, \omega)|^2 + \varepsilon^2 \langle |\hat{\eta}(\mathbf{x}_A, \mathbf{x}, \omega)|^2 \rangle} \quad (10)$$

長周期波の水位波形推定には、相互相関法と同様に式(6)の右辺のGreen関数の代わりにDeconvolution関数を用いる。

3. Deconvolution関数の推定結果と考察

本研究では、新潟県上越市の直江津港において、2009年12月9日から2010年1月8日にかけて行われた長周期波の観測の結果⁴⁾を用いた。直江津港の概略は図-1に示す通りであり、P₁およびP₂地点は港外で、水深はそれぞれ25mおよび16mである。また、P₃地点は港外ではあるが、防波堤の遮蔽域内で水深17m、

P₄地点は港内の一文字堤の端から約50mの前面であり、水深は12mである。また、NOWPHASによる水深32m地点での観測期間中の有義波高および有義波周期は図-2の通りであり、有義波高4mを超える波浪が4回ほど襲来しており、様々な波浪条件の下で長周期波が観測されている。なお、本研究では長周期波は周期30s～300sのものと定義している。

1時間分の観測データを用いて、Green関数およびDeconvolution関数を推定すると、時々刻々の変動がやや大きく、これは長周期波に対して1時間では統計的な安定性が十分には得られないことやノイズの影響が含まれていると考えられる。そこで本研究では、ランダムノイズを除去するために1時間分のデータを24時間重ね合わせることを試み、その結果を図-3および図-4に示し、破線は包絡波形を表す。重ね合わせを行った結果、図-3の相互相関関数よりも図-4のDeconvolution関数の方が、高周波成分が多く含まれるものの、遅れ時間が700s以降においてノイズ成分が減少し、S/N比が改善されてピークが見やすくなっているのがわかる。このピークが出現する時間は、長周期波が2地点間を伝播する時間に相当し、これらを詳しく調べることで長周期波の伝播経路および反射位置が同定できる。

180s前後のピークはP₁地点からP₃地点へ伝播する時間であり、かなり沿岸方向に近い方向にも長周期波が伝播しているのが分かる。さらに、0s～100sでも相関がやや高く、岸沖方向に伝播する長周期波も確認され、長周期波の方向分散性が存在していることが分かる。また、280sおよび400s程度のピークは、

図-1 直江津港内外の長周期波観測地点

図-2 有義波高および有義波周期の変化(NOWPHAS)

図-3 P₁とP₃地点の相互相関関数

図-4 P₁とP₃地点のDeconvolution関数

それぞれ砕波点および汀線で反射してからP₃地点へ伝播する時間に相当すると考えられる。

4. 長周期波の水位波形の推定結果と考察

ここでは、1時間のデータよりDeconvolution関数を評価し、長周期波の水位波形の推定を行う。本研究では、一番沖側のP₁地点の観測水位変動を用いて、P₁地点から各地点の水位波形を推定している。

図-5は、P₄地点の水位波形を推定したものであり、実線は観測長周期波を、一点鎖線はDeconvolution法による推定結果を示す。P₁地点とP₄地点では直線距離にして約5.5km、さらにP₄地点では港内における多重反射が想定されるが、観測波形と比べると位相もほぼ一致しており、精度良く推定されているのが分かる。また、式(10)中の e^2 の値を変化させても推定波形への寄与は小さいことを確認している。図-6は、P₄地点において港内共振が発達しているケースの水位波形の推定結果である。この場合にも位相が

図-5 P₄地点の長周期波の水位波形推定

図-8 Deconvolution法によるP₂地点の水位波形推定

図-6 P₄地点の長周期波の水位波形推定
(港内共振時)

図-7 相互相関法によるP₂地点の水位波形推定

ほぼ合っており、共振が発達している場合でも本手法は有効であることが確認できた。また、約700sに現れた大きな水位変動も再現できている。

図-7および図-8は、それぞれ相互相関法およびDeconvolution法によるP₂地点の水位波形の推定結果を示す。P₁地点とP₂地点では約1km離れている。大きな水位変動も再現できているが、全体的には両手法とも精度良く推定することができているが、650s～700sではDeconvolution法による方が細かい水位変動の変化を再現できていることが分かる。

長周期波の水位波形推定において、推定地点によって推定精度に傾向が見られ、精度が良い順にP₄、P₂、P₃地点となった。P₄地点の推定精度が良いのは、汀線や砕波点での反射波の影響が小さく、またP₁地点との距離が一番遠く、防波堤の影響により2地点間の伝播経路の方向がある角度に限定されていることに起因している可能性があると考えられる。

5. 長周期波の水位波形の予測結果と考察

水位波形の再現において比較的精度の良かったP₄地点の水位波形の予測を行う。1時間分のデータを用いて推定した相互相関関数およびDeconvolution関数は、先に述べた通りに時々刻々の変動がやや大きく、波形推定に常時用いることは難しいと考えられる。そこで本研究では、高波浪が落ち着いて有義波周期が長く、かつ風が比較的治まっている時間帯において、1時間分のDeconvolution関数を12時間分重ね合わせたDeconvolution関数を用いて、長周期波の波形予測を行うことにする。これにより、ランダムなノイズ成分の影響が軽減され、長周期波に対する統計的な安定性が確保された応答関数により長周期波の水位波形を予測できる可能性がある。実際に用いた相互相関関数およびDeconvolution関数は、1月3日午前0時～12時の時間帯のものを重ね合わせて推定している。

図-9 相互相関法による長周期波の水位波形推定

図-10 Deconvolution法による長周期波の水位波形推定

図-9および図-10は、それぞれ相互相関法およびDeconvolution法により港内のP₄地点の長周期波の水位波形を推定したものである。ここに、有義波高が(a) $H_{1/3}=1.65\text{m}$, (b) $H_{1/3}=3.27\text{m}$ および(c) $H_{1/3}=5.38\text{m}$ の場合における両手法の比較を行う。

有義波高が(a) $H_{1/3}=1.65\text{m}$ 時の水位予測結果を比べると、両手法とも位相は観測波形と良く合っていることが確認でき、両手法とも良く似た予測結果が得られていることが分かる。

次に、(b) $H_{1/3}=3.27\text{m}$ のケースでは、両手法とも観測波形と似た傾向を示していることが見て取れる。波形変化に誤差が生じていることが見られているが、その前後に観測波形と良く似た波形があり、位相だけが前後していると考えられる。これは、用いた応答関数を推定した時間帯と予測した時間帯では、長周期波の振幅および伝播方向が異なるために、それに伴いGreen関数も多少変化することが原因となっていると考えられる。

高波浪時の(c) $H_{1/3}=5.38\text{m}$ のケースでは、誤差が生じているものの、波形変化の傾向は似ていると思われる。これは風速 10m/s を超える強風が吹いている場合であり、風速および圧力変動によって長周期波が発達していることが想定される。

これらより、重ね合わせを行ったGreen関数を用いて長周期波の水位波形の予測を行った結果、両手法とも予測結果の精度はやや劣るものの、比較的風速が小さく波浪変化が小さい場合には、振幅および波形の傾向は良好に予測できていることが分かった。

6. 結論

本研究では、Deconvolution法を用いた長周期波の干渉合成法を海洋の長周期波に適用し、長周期波の水位波形の推定を行い、以下の事柄が明らかとなった。

- (1) 相互相関関数とDeconvolution関数を比較すると、Deconvolution関数の方が波源関数の影響を除去でき、2地点間の長周期波の伝播経路および反射位置を同定しやすいことが示された。
- (2) Deconvolution法により、長周期波の水位波形を推定した結果、観測波形と比較的良く一致し、本手法は長周期波の推定に有効な手法であることが示された。
- (3) 水位波形の推定に関して、距離的に近い港外地点の推定よりも、2地点の方向特性が限定された一番遠い港内地点P₄を推定した方が推定精度が良い結果となった。
- (4) 相互相関法およびDeconvolution法により、長周期波の水位波形の予測を行ったところ、両手法と

も波形の位相を比較的良く予測できており、長周期波の水位波形予測に対しても本手法は有効であることが示された。

(5) 両手法を比較したところ、Deconvolution法の方がより細かく長周期波の波形を推定することができていることが確認され、Deconvolution法はより精度の良い長周期波の水位波形を推定することが示された。

謝辞：本研究の一部は、平成22年度科学研究費基盤研究Cによったことを付記し、感謝いたします。また、本研究で用いた現地波浪観測データは、新潟大学と五洋建設による合同現地波浪観測によるデータを用いたこと、および有義波高・有義波周期については、NOWPHASデータを用いたことを付記し、関係各位に感謝いたします。

参考文献

- 1) 中畑 禎, 落合敏浩, 柏原裕彦, 関本恒浩, 花山格章: 冬季日本海における波浪・長周期波の現地観測, 海洋開発論文集, 第17巻, pp.31-36, 2001.
- 2) 中畑 禎, 落合敏浩, 柏原裕彦, 花山格章, 森屋陽一, 関本恒浩: 冬季日本海の現地観測に基づく浅海域への入射長周期波の評価, 海岸工学論文集, 第48巻, pp.256-260, 2001.
- 3) 中畑 禎, 落合敏浩, 柏原裕彦, 花山格章, 関本恒浩: 冬季日本海の現地観測に基づく長周期波の沿岸方向特性, 海岸工学論文集, 第48巻, pp.261-265, 2001.
- 4) 泉宮尊司, 小林雄一, 石橋邦彦, 関本恒浩, 高橋研也, 若松厚, 石垣順, 井上俊二: 干渉合成法を用いた長周期波の伝播・反射特性の解明および水位予測, 海岸工学論文集, 第66巻(1), pp.176-180, 2010.
- 5) Wapenaar, K. and Fokkema, J.: Green's function Representations for seismic interferometry, Geophysics 71(4), pp. S133-S146, 2006
- 6) Wapenaar, K., Draganov D., Roel Snider, D., Campman, X. and Verdel, A.: Tutorial on Seismic Interferometry: Part 1 –Basic principles and applications, Geophysics 75(5), 75A, pp.195-209, 2010.
- 7) Wapenaar, K., Draganov, D., Roel Snider, Xander Campman, Arie Verdel (2): Tutorial on seismic interferometry: Part 2 –Underlying theory and new advances, Geophysics 75(5), 75A, pp.211-227, 2010.
- 8) Vasconcelos, I. And Snider, R.: Interferometry by deconvolution, Part1-Theory for acoustic waves and numerical examples, Geophysics 73 (3), pp. S115-S128, 2008.