

水圧波から表面波への換算における精度向上に関する研究

九州大学 学生会員 ○吉野日和吏

九州大学 フェロー 橋本典明

九州大学 正会員 井手喜彦

1. はじめに

我が国の波浪観測では超音波式波高計が標準で使用され、また何らかの原因によるデータの欠測に対処するため水圧計も標準で装備されている。水圧波から水面波を推定する方法はこれまでに多くの方法が提案されている。一方、コンテナ船などの大型船舶において有義波高が小さいにもかかわらず、船体のサージ方向の動揺により係留索が切断し、緊急離岸するなどの事故が多数報告されている。長周期波成分は波高が小さくても荷役に大きな影響を与えることから、長周期波成分を含む精度の良い水面波の推定が必要である。しかし、既往の研究には水圧波から水面波、特に長周期成分を精度良く推定できる方法は皆無であり、その方法の開発は喫緊の課題である。

2. 理論的背景および手法

微小振幅波理論では、水圧波と水面波はスペクトル比の二乗根である次式の伝達関数 $H(f)$ で関係付けられる。

$$S_{\eta}(f) = |H(f)|^2 S_p, \quad H(f) = \rho g \cosh kz / \cosh kd \quad (1)$$

実際のデータから計算された伝達関数は(1)で計算される理論値との比をとったとき、低周波数側と高周波数側で1から外れた値をとる。理論値の高周波側では値が指数関数的に増大するため、これを水圧波に適用して推定した水面波は過大になる。逆に低周波側では過小になる。この問題に対して橋本ら(1993)¹⁾は、波浪の弱非線形性と多方向性を考慮した理論的検討を行い、伝達関数の特性と方向集中度 $S_{\max}$ との関係を示すとともに、伝達関数の高周波側を水平な直線で近似する方法を検討した。しかし、伝達関数の低周波数側で理論値から乖離する特性を考慮しておらず、精度が不十分であった。一方で、橋本(1990)²⁾はバイスペクトルを用いて波浪の非線形性成分を分離し、多方向性の影響について言及した。

水圧波の1次元の時系列データから方向スペクトル情報を抽出することは一見不可能に思える。しかし、同じデータから推定されるバイスペクトルには方向スペクトルの影響が含まれることから、何らかの方法でその影響を抽出・利用できれば、それを伝達関数に考慮することにより、高精度な水面波の推定法を開発できる可能性がある。

以上を踏まえ、本研究では弱非線形性と多方向性の情報を含む水圧波のバイスペクトルから、水面波と水圧波のスペクトルの比である伝達関数を推定する方法を提案する。具体的には、水圧波の時系列データのみが与えられた条件ではバイスペクトルと伝達関数の関係を理論式で表すのは不可能であることから、伝達関数の推定にニューラルネットワークを用いることとした。なお、伝達関数は水面波を水圧波で除した次元を有する非負の実数であるが、バイスペクトルは水圧波の3乗の次元を有する複素数であり、本研究では不要な位相情報が含まれている。そこで、ここでは、次式で表されるバイコヒーレンスを用いて検討することとした。

$$b(f_1, f_2) = \frac{|\sum_n F_n(f_1) F_n(f_2) F_n^*(f_1 + f_2)|}{\sum_n |F_n(f_1) F_n(f_2) F_n^*(f_1 + f_2)|} \quad (2)$$

なお、バイコヒーレンスは非線形性の影響のみを表し、線形成分の情報は含まれない。一方で、伝達関数には線形成分と非線形成分が混在している。そのため、観測して得られる伝達関数（教師データ）を線形理論から導かれる伝達関数で除して正規化することにより、2つの物理量の非線形成分のみを抽出して学習させることとした。これにより、バイコヒーレンスと正規化された伝達関数はいずれも非線形性の影響のみを含む正規化された無次元量になることから、ニューラルネットワークでの学習がより効率的かつ有効になり得ると期待される。

3. ニューラルネットワークによる予測手法

使用するニューラルネットワークにはディープニューラルネットワーク(DNN)および畳み込みニューラルネットワーク(CNN)の2種類を用意した。DNNは入力層、隠れ層、出力層のみを持つ基本的なニューラルネットワークで

ある。その仕組みは入力層に学習元となるデータを入力し、これに重み行列を掛ける作業を数回繰り返す。最後に出力された値を教師データと比較することで誤差を計算し、各重み行列の値を更新することで誤差を小さくするものである。これに対し CNN は入力データを二次元配列として画像様に認識し、2 次元の重み行列の役割をなすフィルターを作用させて特徴を抽出するような仕組みとなっている。フィルター自体もニューラルネットワークの最適化によって自動的に決定され、出力は 1 次元とすることができる。以上のような仕組みでバイコヒーレンスから正規化された伝達関数をニューラルネットワークにより予測した。

4. 計算結果

4.1 スペクトルの計算

ニューラルネットワークの入力値とするため、パワースペクトル、伝達関数、およびバイコヒーレンスの計算を行った。解析は欠測が少なく、非線形性が大きくなる波高の大きい期間を含むよう、水深が変化しない年度内において有義波高を比較することで選び、常陸那珂港(1998.1-3, 2000.9)、中城港(1996)とした。また橋本ら(1993)¹⁾との比較のため常陸那珂高および中城港の 1990 年のデータも使用した。結果は図 1 のようになり、右 2 つの図において 0.05 Hz までに見られるように(1)で計算される線形理論の値と実測値が乖離している。

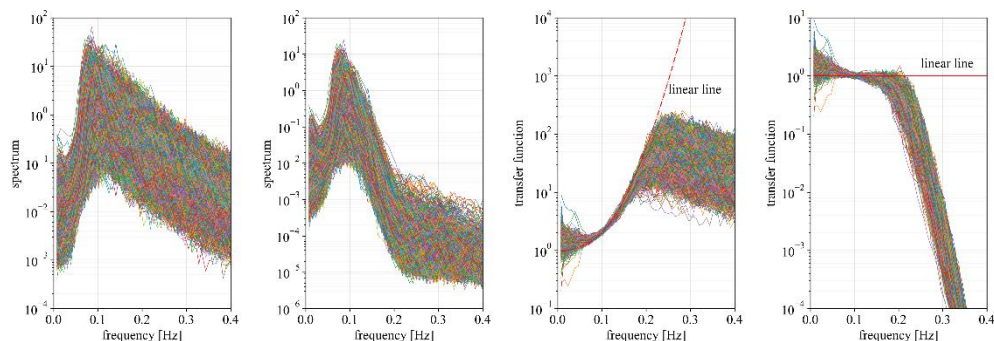


図 1 常陸那珂港(1998)における 水面波のスペクトル、水圧波のスペクトル、伝達関数、線形理論の計算値により正規化された伝達関数

4.2 ニューラルネットワークによる伝達関数の予測

学習には常陸那珂港(1998.1-3)、中城港(1996)、予測には常陸那珂港(1990.10)、中城港(1990.8-9)の解析結果を使用した。結果は図 2 に示すとおりであり、左から 1998 年の実測値、予測値、2000 年の実測値、予測値の順に並んでいる。2 つ目、4 つ目の図において、線形理論では考慮できない高周波数側と低周波数側の非線形成分が予測値に含まれることがわかる。特に図 1 同様 0.05 Hz までに低周波側の非線形性をも含むことが見て取れる。

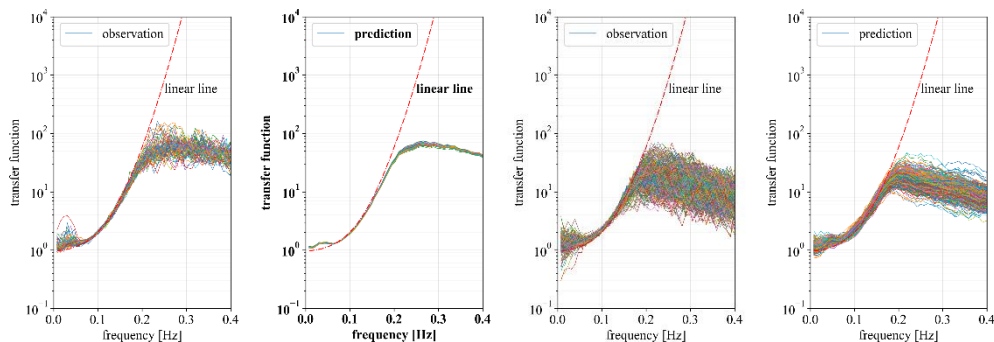


図 2 DNN による伝達関数の予測(常陸那珂港, 1998 年 10 月, 2000 年 9 月)

5. おわりに

線形理論では困難であった水圧波から水面波への精度の良い推定が、ニューラルネットワークを用いることにより可能になった。特に長周期波の非線形性も予測できるような結果となった。

参考文献

- 1) 橋本典明ら(1993): 波浪の多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、港湾技術研究所報告, 第 32 巻第 1 号 pp. 27-51.
- 2) 橋本典明: ベイズ型モデルを用いた海洋波浪の非線形核関数の数値的推定、港湾技術研究所報告, 第 29 巻第 3 号, pp. 27-56