

現地観測データを用いた高精度な方向スペクトルの推定手法に関する研究

九州大学大学院工学府 学生会員 ○齋藤隆介  
 九州大学大学院工学研究院 フェロー会員 橋本典明  
 株式会社ソニック 三井正雄

1. 研究の目的

方向スペクトルの概念が提案されて以来、様々な機器および解析法により方向スペクトルが観測・解析されてきた。海に機器を設置する直接測定法では波浪が本来有する自由度に比べて僅かの情報しか測定できず、方向スペクトルの精度が不十分であることが多い。例えば、ブイでは波動量(x,y,z)の3方向の情報が測定できるが、この様な少数の情報から方向に関するエネルギー分布を精度良く推定することは困難である。一方、我が国では超音波ドップラー式海象計(図-1 および図-2(1))が1990年代から利用され、ある程度の精度を有する方向スペクトルが推定されてきた。本研究では秋田港、八戸港と下田港の多層型超音波ドップラー式海象計のシステムに改修を加え、10層の水粒子速度30成分と水位変動の計31成分の観測データを収集した(図-2(2))。我が国ではこれまでに前例の無いこれらの多数の波動量の情報に基づき、より高精度な方向スペクトルを観測・解析可能な方法を検討することにより、波浪情報を必要とする種々の分野へのより高精度で信頼性の高い波浪情報の提供に資することを目的としている。

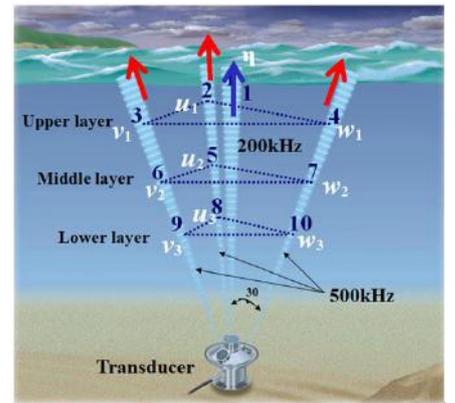


図-1 多層型超音波ドップラー式海象計(DMW)

2. 研究内容

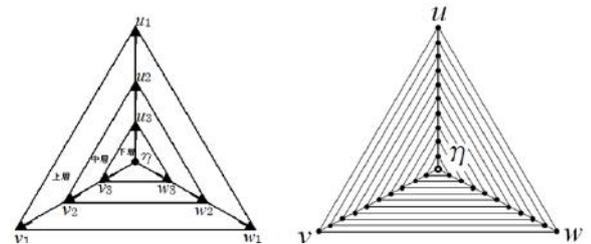
今、N個の波動量 $\xi_i(t)$  ( $i = 1, \dots, N$ )を計測すると、下記の組み合わせのクロススペクトル $\Phi_{i,j}(f)$ が得られる。

$$\begin{pmatrix} \Phi_{1,1}(f), & \Phi_{1,2}(f), & \dots & \Phi_{1,N}(f) \\ \Phi_{2,1}(f), & \Phi_{2,2}(f), & \dots & \Phi_{2,N}(f) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Phi_{N,1}(f), & \Phi_{N,2}(f), & \dots & \Phi_{N,N}(f) \end{pmatrix} \quad (1)$$

ここに、 $\Phi_{i,j}(f)$ と $\Phi_{j,i}(f)$ は互いに共役の複素数であり、虚部の符号を除いては同じ情報を表す。そこで、上三角成分のクロススペクトル $\Phi_{i,j}(f); (i \leq j)$ を用いると、それぞれのクロススペクトル $\Phi_{i,j}(f)$ に対して次式の連立積分方程式が与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \Phi_{1,1}(f) &= \int_0^{2\pi} H_{1,1}(f, \theta) S(f, \theta) d\theta \\ \Phi_{1,2}(f) &= \int_0^{2\pi} H_{1,2}(f, \theta) S(f, \theta) d\theta \\ &\vdots \\ \Phi_{N,N}(f) &= \int_0^{2\pi} H_{N,N}(f, \theta) S(f, \theta) d\theta \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ここに、 $H_{i,j}(f, \theta)$ はi番目の波動量とj番目の波動量間の伝達関数を表す。上式の連立積分方程式において、非負の解 $S(f, \theta)$ が求められるならば、これが方向スペクトルの推定値である。本研究で用いた計測システムでは図-2(2)に示す水粒子速度と水位変動の計31個の波動量を計測している。水粒子速度の多層観測によりクロススペクトルの数を増大させることで、情報量が増え従来よりも推定精度の良い方向スペクトルを推定可能となることが期待できる。しかし有限桁数の数値計算の制約内では、 $\xi_i(t)$ の計測位置が近接し過ぎると、 $\Phi_{i,j}$



(1) 3層での観測 (2) 10層での観測

図-2 波動量(η,u,v,w)の観測配置 (上から見た投影図)

表-1 層数毎の組み合わせ

1層, 9層使用	各10通り
2層, 8層使用	各45通り
3層, 7層使用	各120通り
4層, 6層使用	各210通り
5層使用	252通り
10層使用	1通り

の値が互いに近くなって独立性が損なわれ、連立積分方程式に多重共線性の問題が生じる可能性がある。そこで本研究では拡張最尤法(EMLM)、拡張最大エントロピー原理法(EMEP)、バイズ法(BDM:NEWTON)および方向分布関数の推定に非負拘束条件最小二乗法(NNLS)を使用した BDM を用い、方向スペクトル解析に用いる波動量の数や組み合わせを種々に変えて観測データを解析し各方法の精度や安定性等について検討した。

### 3. 検討結果

図-3 は 2015 年 2 月 1 日 11 時において八戸港で取得された水位変動データをもとに方向スペクトルを推定したものであり、各図中に示すローマ数字は使用した層の数を示している。また、表-1 には用いた波動量の数や組み合わせをまとめている。全国港湾海洋波浪情報網(NOWPHAS)が提供する波向きと推定された方向スペクトルから得られる波向きが最も近い組み合わせを代表ケースとして抽出した。EMLM は 10 層を使用すると正常な方向スペクトル形状が得られないことが確認された。EMEP と BDM は層数を増やすと方向集中度は高くなっていく傾向が見られるが、BDM の方が EMEP に比べて多層のデータを使用することで概してより高い集中度を示すことが確認された。ただし、図-3 の例では BDM は 4~7 層分のデータを使用した場合は集中度が低下している。これは方向分布関数を推定する収束計算に問題があると考えられる。一方、図-4 は八戸港の観測データをもとに 10 層を用いた方向スペクトル推定を行い収束計算に NEWTON 法と NNLS を用いた場合で比較したものである。現地観測データにおいて NEWTON 法で計算が発散する場合にも NNLS を用いることで安定した推定値が得られることが確認できる。また、八戸港および下田港において最も安定した波向きが推定されるケースは海面から 10m 付近の観測データを使用した場合であることが確認された。

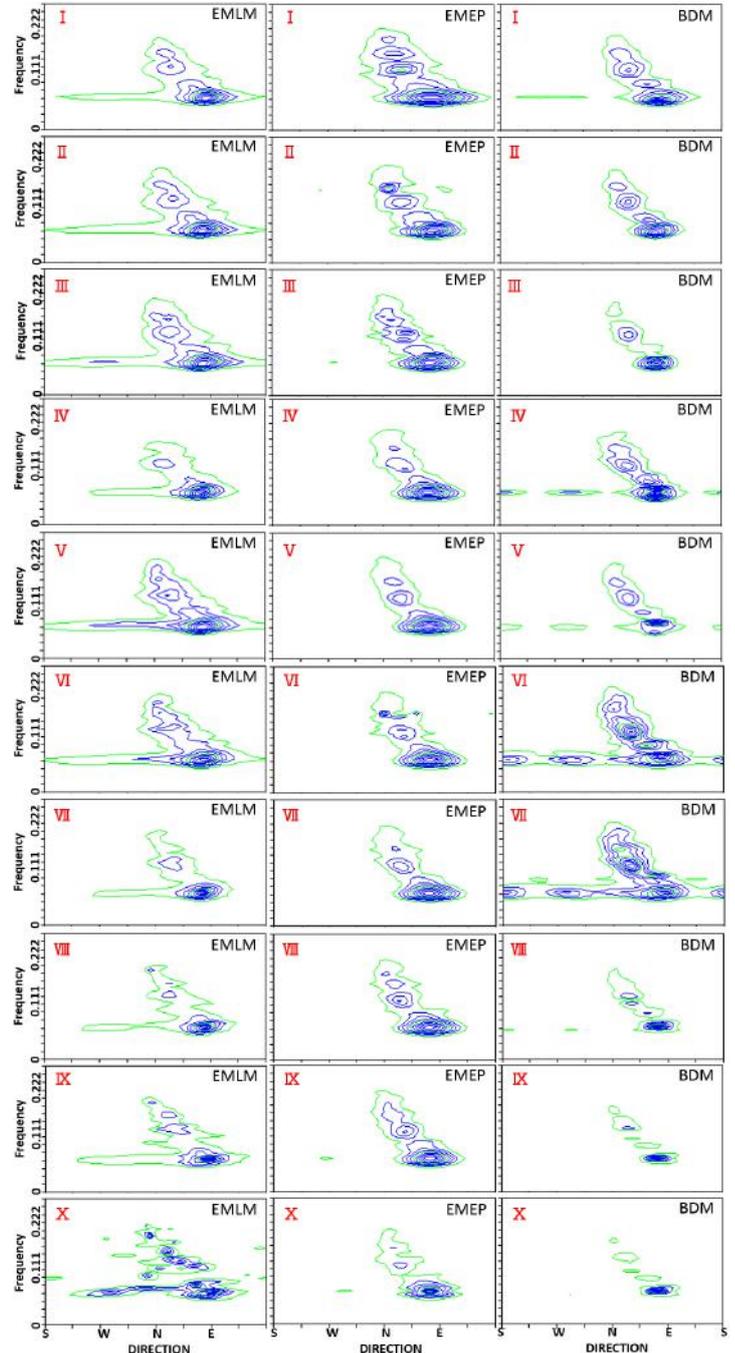


図-3 現地観測データの方向スペクトル解析例  
BDM-NEWTON BDM-NNLS

### 4. おわりに

本論文においては 10 層分の観測データを用いて方向スペクトルの推定を行った。これにより、多量データを用いることで推定精度の向上と使用するデータの組み合わせに関する課題が確認された。今後はより詳細な検討を行うことで精度と安定性ともに優れた波動量の数や組み合わせについて検討していく予定である。

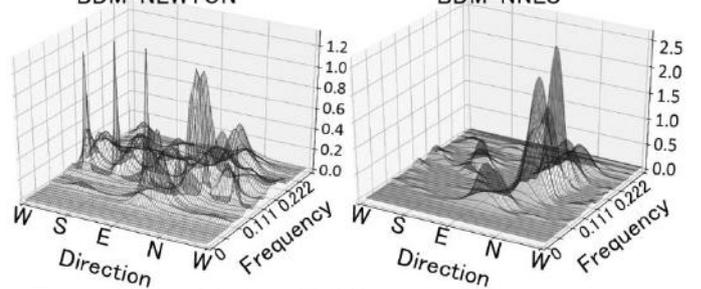


図-4 方向スペクトル解析比較(左:NEWTON,右:NNLS)

謝辞：本研究は科学研究費補助金（課題番号：：17H03315）の助成を受けたものである。ここに謝意を表す。