

高精度で実用性の高い方向スペクトル推定法の改良に関する研究

九州大学大学院工学府 学生会員 ○友清 裕介
九州大学大学院工学研究院 フェロー 橋本 典明

1. はじめに

近年、周期の長いうねり性波浪に起因する港湾施設の被災事例が散見される。これらの被災事例を従来の有義波高・周期、平均波向の3つの波浪諸元で検討するのは不十分であり、波浪の本質的構造を表す方向スペクトルを用いた検討が必要かつ合理的である。我が国では図-1に示すドップラー式海象計(DWM)によって水位変動および水粒子速度が観測されている。最近、10層観測データを用いた方向スペクトルの検討が行われ、3層分の水粒子速度成分の情報を用いることで高精度な方向スペクトルが推定可能であることが示された。しかし、

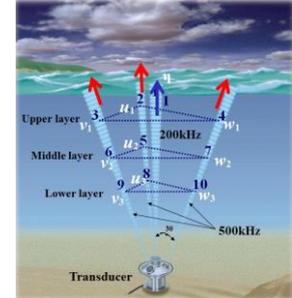


図-1 ドップラー式海象計(DWM)

方向スペクトルの推定法や推定に用いる3層の組合せ法については、更なる検討の必要性がある。そこで本研究では、高精度で実用性の高い方向スペクトル推定法の検討と、10層観測データを用いた方向スペクトルの推定法の精度について検討した。

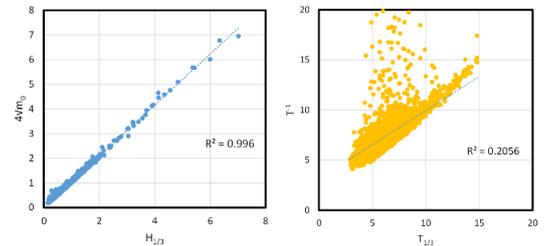


図-2 波高・周期の相関関係

2. 従来の波浪諸元とスペクトル情報に基づく波浪諸元

図-2は志布志港の2007年における有義波高・周期とスペクトル・モーメントに基づいて算出した波高・周期の相関図である。波高は両者が非常に強い相関を示すのに対し、周期には大きな分散が見られる。図-3は波高の大きさの違いによる、有義波周期とスペクトル・モーメントに基づく周期の相関を示したものである。波高が2~6mの間では周期の比がほぼ1に近いが、波高が6m超と2m以下の場合には両者間で差が生じる。これは、港湾施設の設計のみならず、荷役等の港湾の利用においても有義波周期に基づく種々の検討には問題があることを示唆しており、方向スペクトル情報に基づいて検討する必要性を示す一例である。

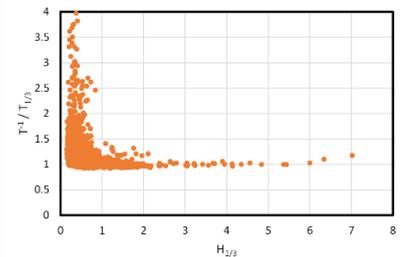


図-3 有義波周期とスペクトル解析による周期の関係

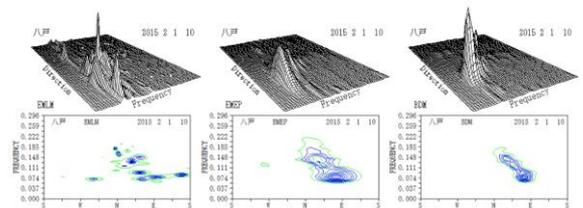
3. 拡張最大エントロピー原理法 EMEP の改良

方向スペクトルの推定値は次の連立積分方程式の非負の解 $S(f, \theta)$ として得られる。

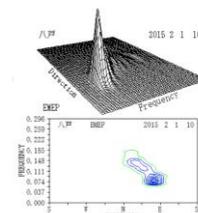
$$\Phi_{i,j}(f) = \int_0^{2\pi} H_{i,j}(f, \theta) S(f, \theta) d\theta$$

ここに、 $\Phi_{i,j}(f)$ はクロススペクトル、 $H_{i,j}(f, \theta)$ は波動量間の伝達関数である。また $S(f, \theta)$ は、周波数スペクトル $S(f)$ と各周波数の方向角に関するエネルギー分布を表す方向関数 $G(\theta|f)$ の積として、 $S(f, \theta) = S(f)G(\theta|f)$ と表される。我が国の方向スペクトル推定法には、拡張最尤法(EMLM)、最大エントロピー原理法(MEP)、ベイズ法(BDM)、拡張最大エントロピー原理法(EMEP) 2)などの方法が提案され、実務等で用いられている。

BDMは最も高精度であるが計算時間を要する。EMEPは計算は早い精度がBDMに比べてやや低い。実務で使用される方向スペクトル推定法としては、高精度で計算速度の速い方法が求



(4-A) 左図：EMLM、中図：旧 EMEP、右図：BDM



(4-B) 改良後の EMEP

図-4 八戸港における方向スペクトル解析例

められる. そこで本研究では, EMEP の高精度化に向けた改良を行った. いま, 前述の連立積分方程式を以下のように書き換える.

$$\phi_{i,j}(f) = \int_0^{2\pi} H_{i,j}(f, \theta) G(\theta|f) d\theta$$

ただし, $\phi_{i,j}(f) = \Phi_{i,j}(f)/S(f)$ である. EMEP では, $G(\theta|f)$ の方向角に関する積分が 1 である条件, すなわち, $H_{1,1}(f, \theta) = 1$ として $\phi_{1,1}(f) = 1$ を厳密に満たすことから, $\phi_{1,1}(f)$ の推定誤差は 0 である. 一方で, 他の $\phi_{i,j}(f)$ には推定誤差を考慮して最小二乗法を適用しており矛盾がある. そこで本研究では, EMEP の $G(\theta|f)$ では方向に関する積分が 1 になる条件から自動的に決まる $a_0(f)$ を, 次式の様に陽的に考慮することで $\phi_{1,1}(f)$ の推定誤差を考慮した.

$$G(\theta|f) = \exp\left[\sum_{n=1}^N \{a_n(f) \cos n\theta + b_n(f) \sin n\theta\}\right]$$

図-4 は 2015 年 2 月 1 日 10 時における八戸港の観測データを解析した例である. (4-A) の 3 つの方向スペクトルは左からそれぞれ EMLM, 旧 EMEP, BDM で推定した結果である. (4-B) は本研究で改良した EMEP を用いた推定結果である. 改良後の EMEP を用いた場合には, 旧 EMEP を用いた場合に比べて, 推定値が BDM に近い値を示すことがわかる.

4. スペクトル推定に使用する 3 層の組合せの検討

図-5 は 2015 年 2 月 1 日 11 時における八戸港の観測データを BDM と EMEP で解析し, 用いた層と方向集中度 S_{max} の関係を示したものである. S_{max} の算定は方向関数に光易型を仮定し, 方向関数のピーク値の半値幅 α を用いて $S = \log(1/2)/\log\{[1 + \cos(\alpha/2)]/2\}$ で推定した. 3 層以上のデータを用いれば S_{max} は安定化するが, 水位変動の影響が及びにくい下層を用いた場合には, S_{max} が乖離する傾向がある. また 10 層の中から 3 層の幾つかの組み合わせのデータを用いて推定した際も, 組合せに下層を含めた場合には S_{max} が他の結果とは乖離した. 以上のことから, 推定には上〜中層を用いることが適切であることが示された. また他の例では, 推定に使用する層を増やしても S_{max} が一定に収束しない場合が見られた. これは S_{max} が方向関数の形状に鋭敏なパラメータであり, 少しの形状の違いで大きく変動することが原因と示唆される. なお, 改良 EMEP は旧 EMEP よりも S_{max} の値は大きい, BDM よりもかなり小さい. 上記の EMEP の推定式はパラメトリックな関数で光易型を表現しやすい. 一方, BDM の推定式は離散的関数であり方向分布形状の表現の自由度が高い. したがって, もし BDM の推定値が真値に近いと仮定すると, うねりの方向関数のピーク値付近は光易型よりもさらに先鋭な形状であることを示唆しており, 更なる検討が必要である.

5. おわりに

本研究では従来の有義波高・周期とスペクトル解析で算出した波高・周期を比較し, スペクトル解析による検討の必要性を示した. また方向スペクトル推定法のうち, 拡張最大エントロピー原理法(EMEP)の改良を行った. 改良後の EMEP を用いることで, BDM に近い高精度な方向スペクトルを推定できることが確認できた. さらに DWM で観測された多層の観測データを用いて方向スペクトルの推定を行う場合, 上〜中層から 3 層のデータを用いて方向スペクトルを推定することが適切であることが示された. S_{max} の値には更なる検討の余地があることが判明した.

参考文献

- 1) 橋本典明, 三井正雄, 川口浩二, 藤木峻: 超音波ドップラー式海象計で観測された方向スペクトルの安定性と信頼性の向上, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol.76, No.2, pp.I_199-I_204, 2020
- 2) 橋本典明, 永井紀彦, 浅井正, 菅原一晃: 海洋波の方向スペクトルの推定における最大エントロピー原理法(MEP)の拡張, 港湾技術研究所報告, Vol.32, No.1, pp.3-25, 1993

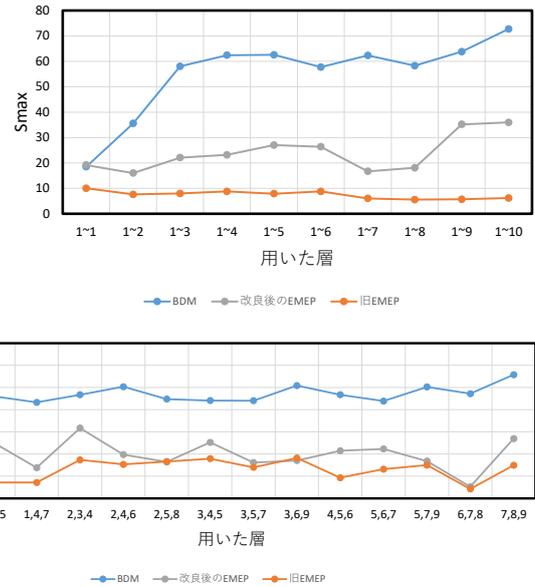


図-5 推定に用いた層の組合せと方向集中度 S_{max} の関係