

# 高度化した海象計による海洋波の方向スペクトル 推定精度向上に関する研究

## Accuracy Improvement of Directional Spectrum Estimation with Upgraded Submerged Doppler Type Directional Wave Meter

三井正雄<sup>1</sup>・橋本典明<sup>2</sup>・河合弘泰<sup>3</sup>・横田雅紀<sup>4</sup>・北村康司<sup>5</sup>

Masao MITSUI, Noriaki HASHIMOTO, Hiroyasu KAWAI, Masaki YOKOTA and Yasushi KITAMURA

An upgraded submerged Doppler-type directional wave meter can measure 10 wave quantities related to directional wave motions, i.e. water surface elevation, 3 components of water particle velocities at each layer of 3 different water depth ranging from shallow to deep. In this study, accuracy of directional spectrum estimation is comprehensively investigated for various cases where directional spectra are estimated with various sets of different number of wave quantities. As a result, accuracy improvement is generally confirmed in various wave conditions when all the quantities are applied to the estimations, compared with the cases where conventional 4 wave quantities are applied to the estimations.

### 1. はじめに

沿岸域の開発・利用・防災といった多くの側面において、波浪は最も特徴的かつ支配的な自然外力である。そのためわが国沿岸域の多くの地点で波浪の観測・調査が継続的に実施され、今日では全国港湾海洋波浪情報網(NOWPHAS)をはじめとして全国各所で波浪観測が実施・運用されるに至っている。

本来波浪観測は、波高と周期のみならず、互いに密接な関係を有する波向あるいは潮流、潮位等とあわせて、同一地点で包括的に同時観測を行うことが望ましい。しかしながら、実際に種々複数の海象事象を観測する場合、測器の使用条件あるいは周辺環境条件による制約から、同一地点における多項目の定常同時観測は通常困難を強いられる場合が多い。以上のような背景から開発された海象計は、「波向観測の標準化」を実現させた標準的波浪観測機器として、現在わが国沿岸域の約80地点に設置され観測を実施している。そしてこの海象計を利用した観測地点の増加と共に、例えば波高計アレイ群等に代表される大規模な波浪観測システムによってのみ、これまで計測可能であった高精度な方向スペクトルが、より幅広いユーザに提供されるようになり、2山型方向スペクトルをはじめとする興味深い多方向性波浪の方向スペクトル形状が各地で観測・確認されるようになった。さらに近年では、計算機能力の著しい向上と電子記憶媒体の大容量化が進み、これに伴い従来の間欠的な波浪観測か

ら、切れ目のない連続観測が可能になると共に、海象計で観測された多層の生データが収集・処理される時代となった。このような時代変化に対応して、波浪観測データのより高度な解析手法を検討すべき段階に至った。

本研究は、高速・大容量化の時代の中で、より高精度な海洋波の方向スペクトルを提供可能とするシステムを開発するため、多層ドップラー式海象計による方向スペクトルの推定精度について検討し、港湾・海岸構造物の計画・設計・施工に対する信頼性の高い与条件として、あるいは台風等による被災メカニズムの究明や高精度波浪推算モデル開発における基礎情報として、今後の海洋波出現特性の解明に資することを目的とするものである。

### 2. ドップラー式海象計

ドップラー式海象計とは、沿岸域における波浪(波高・周期・波向)、流況(通常3層の流向・流速)、および沖合の潮位変動を海底に設置される単一センサにより同時計測可能なものである。機能的には、従来わが国沿岸域の定常波浪観測に多用されていた海底設置型超音波式波高計の機能と主に船舶や係留式として使用されてきた多層式ドップラー流速計の機能とを一体化した定常観測用の複合型海象観測機器である。

観測システムとしては、海底に設置される送受波器と陸上に設置される制御・計測・演算部およびこれらを結ぶ海底ケーブルによって構成される。図-1は海象計の測定概念を示したものである。

海底に設置される海象計の送受波器には、その上部中央に鉛直上方を向いた水位変動検出用振動子(200kHz)、およびその周りに鉛直軸から30度傾いた3方向の水粒子速度検出用振動子(500kHz)の計4つの超音波振動子が

1 非会員 理修 (株)ソニック 海象機器部長  
2 フェロー 博(工) 九州大学大学院教授  
3 正会員 博(工) (独)港空研 海洋情報研究領域長  
4 正会員 工修 九州大学大学院助教  
5 正会員 博(工) (株)ソニック 海象機器部技術G主任

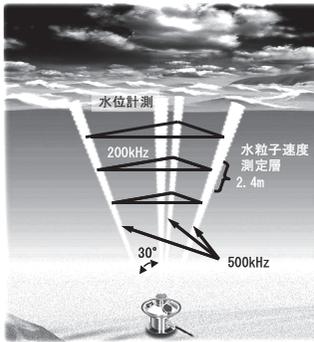


図-1 海象計の測定概念図

配されている。そして図-1に示すように鉛直上方へ超音波を送信し、海面での反射波を受信することにより、海面の上下変動を計測する部分と、斜め3方向に超音波を送信し、受信波のドップラー周波数偏移を周波数解析することにより、任意水深層における水粒子速度を計測する部分からなっている。

### 3. 観測例

海象計では、海底に設置される送受器から鉛直上方および斜め3方向の計4方向に0.125秒間隔で超音波を送信し、水位変動および各超音波ビーム方向の水粒子速度を計測している。

図-2は、海象計によって計測された各種波形記録の一例である。図中上段より、水位変動、および3方向の水粒子速度をそれぞれ示している。このようにして得られた各波形記録から、有義波高・周期、平均波向をはじめとする代表波諸元、所定水深層の流向・流速、潮位変動等が算出される。

#### (1) 多層情報を活用した方向スペクトル解析

現在各地で利用されている海象計では、通常図-1に示す通り、上層、中層および下層の水粒子速度を同時に計測しており、水位変動記録を含め最大10成分が方向スペクトル解析に利用可能である。そこで本研究では、これまで方向スペクトルの解析処理に利用されることがなかった中層と下層を加えた計3層の水粒子速度情報を組み合わせて方向スペクトル解析を実施し、それぞれのケースで推定された方向スペクトル特性について検討する。

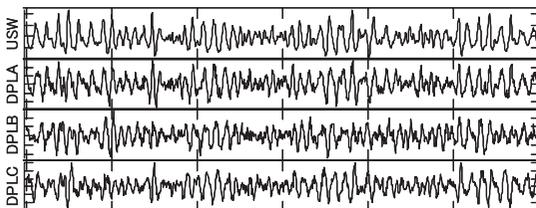


図-2 海象計による観測波形例

なお、方向スペクトルの解析に際しては、従来手法である拡張最尤法 (EMLM) に加え、拡張最大エントロピー原理法 (EMEP) およびベイス法 (BDM) を使用した。

図-3は、岩手県久慈港沖の海象計によって観測された2008年における方向スペクトルの年平均値を等値線図として表したものであり、縦軸は周波数、横軸は波向である。図中、左図が従来手法である上層の水粒子速度情報を利用したEMLMによる方向スペクトル、右図が全層(3層)の水粒子速度情報を利用したBDMによる方向スペクトルである。これによると、従来手法に比べ全層の水粒子速度情報を利用したBDMによる方向スペクトルの方向集中度が高く推定されており、方向スペクトルの推定精度向上が期待される。そこでこの推定特性を詳細に確認するため、図-3に示した方向スペクトルの年平均値を月別平均値として示した結果が図-4である。

図-4の結果から、久慈港沖では年間を通して東寄りの波が卓越していることが確認できる。また1月を中心とした冬季には、他の時季と異なり、季節風の影響と思われる北からの風波が卓越する特徴的な様子を確認することができる。

図-5は、高知県室津港沖の海象計によって測得された台風0918号来襲前におけるうねりの方向スペクトルの一例を示したものである。左からEMLM, EMEPおよびBDMによって推定された方向スペクトルを示し、上段が上層、下段が全層の水粒子速度をそれぞれ利用して得られた方向スペクトルの推定結果である。これによると、上層に比べ全層から推定した方向スペクトルの方向集中度が高くなっている。またEMEPおよびBDMでは、明瞭なピーク値の上昇が確認できる。この原因は、観測対象が周期の長いうねり性波浪であったため、海底方向への波動現象の減衰が小さいことに加え、水深の増加が物理的なフィルタの役割を果たしたことによるものと推察される。すなわち周期の長いうねり成分のS/Nが向上し、この成分データが解析処理に利用された影響であると考えられる。これは、周期の長いうねり性波浪の場合、下層の情報の有用性を示唆するものであると推察される。

図-6は、石川県金沢港沖の海象計によって測得された方向スペクトルの一例であり、図中、上段が下層、下段が全層の水粒子速度をそれぞれ利用して得られた方向ス

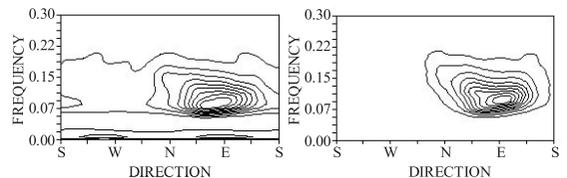


図-3 久慈港沖の方向スペクトルの年平均値 (左図：EMLMによる上層、右図：BDMによる全層)

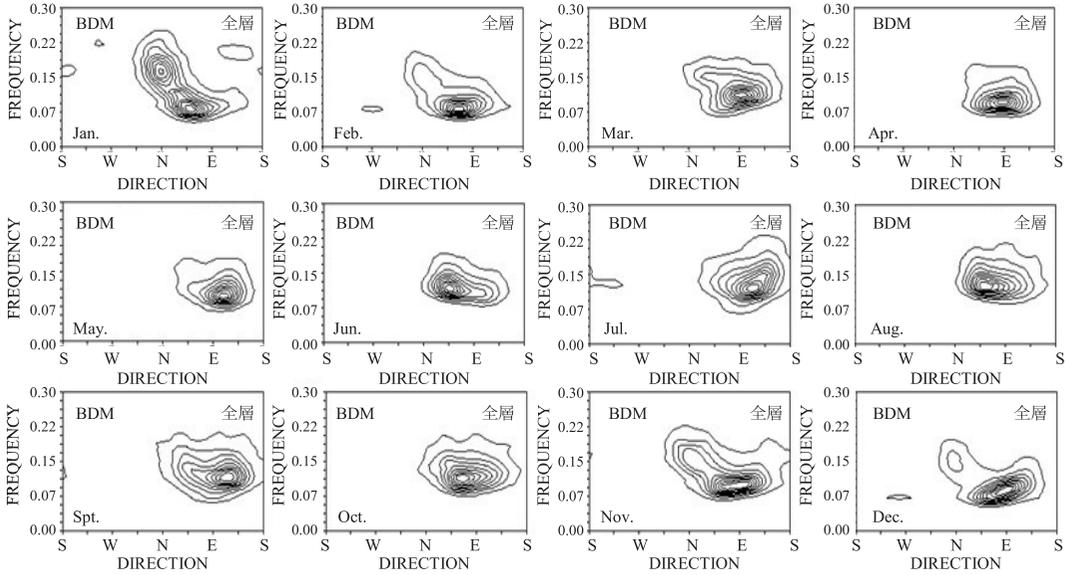


図-4 久慈港沖の海象計によって観測された方向スペクトルの月別平均値

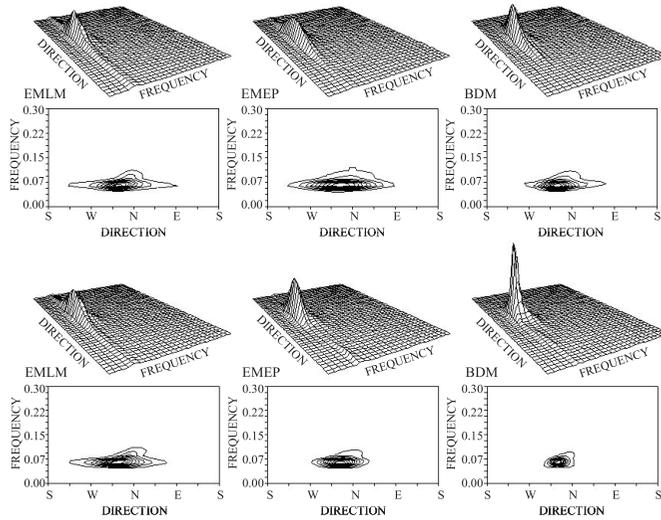


図-5 上層 (上段) および全層 (下段) の情報を利用して得られた方向スペクトルの一例

ベクトルの推定結果である。図-5とは対照的に、周期の短い風波が卓越した事例である。なお、ここには図示していないが、上層および全層から推定された方向スペクトルの形状はほぼ同様であった。図-6によると、下層の水粒子速度情報を利用したEMLMによる方向スペクトルの推定結果には、明瞭なピークを確認することができない。これに対し、全層の水粒子速度情報を利用した場合には方向スペクトルの方向集中度の向上が認められる。

これは、周期の短い波浪を対象とする場合、海底方向への波動現象が大きく減衰するため、下層の情報のみでは精度の良い方向スペクトル推定が困難であることを示

している。そしてこの下層の情報に波動現象の大きな上層の情報を加えたことにより、方向スペクトルの方向集中度が向上したものと推察され、周期の短い風波の場合、上層の情報が有用となることが確認された。またEMEPとBDMでは、EMLMよりも方向集中度の高い方向スペクトルが推定されており、全層の情報を利用することによる精度向上と安定性の向上が確認できる。

(2) 方向関数に関する検討

図-7は、図-5に示した方向スペクトルをピーク周波数付近の各周波数別方向関数として、上層 (上段) と全層 (下段) の水粒子速度を利用した場合について比較した

ものである。なお、縦軸はBDMで推定された方向関数で正規化している。図中破線がEMLM、実線がEMEPそして実線上に丸印を付したものがBDMである。CASE1からCASE3において、3つの方向スペクトル推定法による波向はほぼ同一方向を示しているが、BDMに比べ、EMLMおよびEMEPではピーク値が過小評価されており、方向スペクトル推定法として、BDMの優位性を示唆するものであると思われる。また上層と全層の方向関数を比較すると、全層から推定された方向関数の方向集中度が高くなっていることが確認できる。特にBDMにより全層の水粒子速度から推定された方向関数では、周波数が低くなるにつれ方向集中度が増加し、これに伴いEMLMおよびEMEPによって推定されたエネルギーピーク値との差が大きくなり、最も低周波数（約14秒）の

CASE1においては、BDMによって推定されたエネルギーピーク値が他方の倍以上に達している点特徴的である。

(3) 波浪条件と $S_{max}$ に関する検討

以上の検討結果から、方向スペクトルの推定においては、従来の上層のみの水粒子速度情報を利用する場合より全層の水粒子速度情報を利用した方が多様な波浪状況下で方向集中度の高い方向スペクトルを推定可能であることが確認できた。また方向スペクトルの推定法として、安定性と推定精度が高いと言われるBDMの優位性を確認できた。そこでここでは、これらをより定量的に検討するため、多様な波浪条件下における上層利用時と全層利用時の方向スペクトル推定値から推定された $S_{max}$ （方向集中度パラメータ）と波浪諸元との関係を整理する。

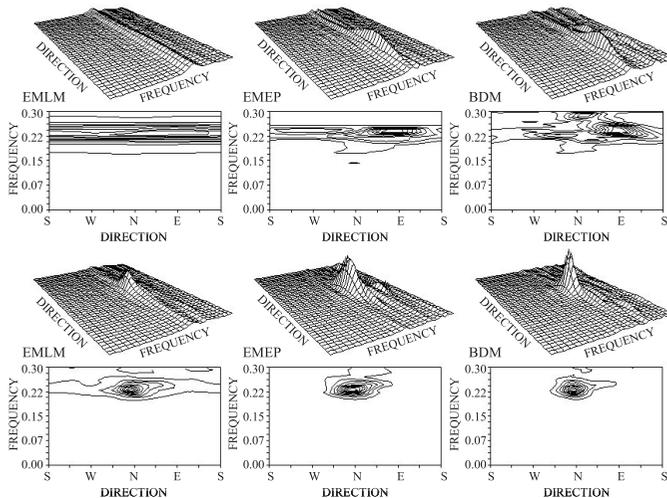


図-6 下層（上段）および全層（下段）の情報を利用して得られた方向スペクトルの一例

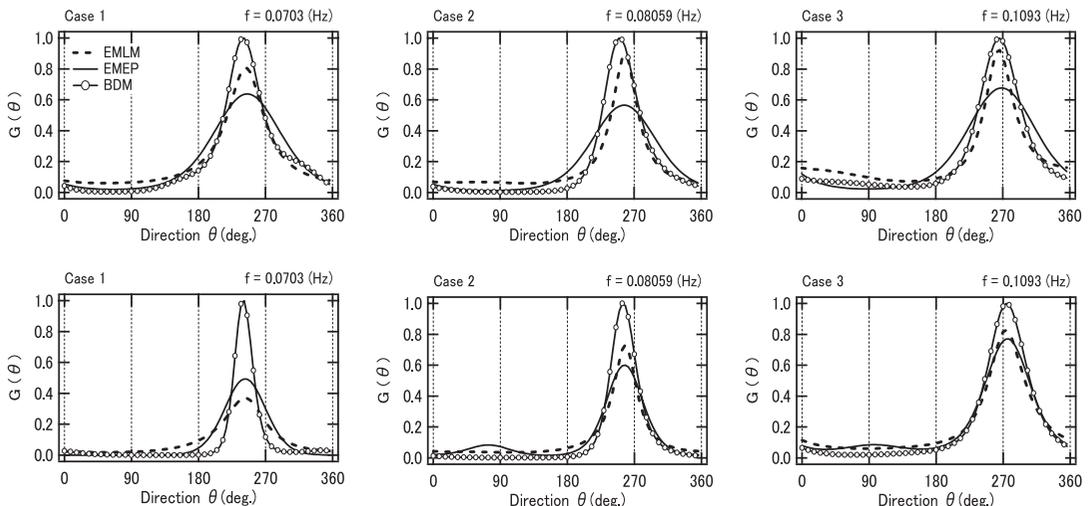


図-7 各方向スペクトル推定法による上層（上段）および全層（下段）の情報を利用したピーク周波数付近の方向関数

図-8は、日本海側における冬季波浪の代表例として、金沢港沖の海象計によって得られた2008年1月から2月および11月から12月の計4ヶ月間を対象に有義波高と $S_{max}$ の関係(左図)および波形勾配と $S_{max}$ の関係(右図)をそれぞれ示したものである。なお $S_{max}$ の算出については、BDMによって推定された方向スペクトルから推定した。図中実線が全層利用時、破線が上層利用時の $S_{max}$ を表している。なお、期間中の $S_{max}$ の最大値は、全層の水粒子速度を利用した場合の30程度であった。

図-8より、有義波高に対する $S_{max}$ の変化は、波高の増大と共に多少変化はあるものの、系統的特徴はなく、全層利用時の $S_{max}$ の方が上層利用時に比べ5割程度高い16前後の値となった。また、波形勾配に対する $S_{max}$ の変化は、予想に反して、波形勾配の増加と共に緩やかな増加傾向を示した。これは全データを単純に波形勾配によって整理したためと推察される。すなわち、日本海の冬季波浪を対象としたが、実際には多様な波浪条件の混在による影響と考えられる。ただし、左図と同様に全層利用時の $S_{max}$ の方が上層利用時に比べ5割程度高い16前後の値となった。風波が卓越する日本海側の冬季において、風波の代表的な $S_{max}$ として利用されている10を超え、平均的に16前後の値を示したことは興味深い。

図-9は、図-8のデータを有義波高別に整理したものであり、有義波高が2m以下の場合とそれを超える場合の各ケースにおける波形勾配と $S_{max}$ の関係を示したものである。左図が有義波高2m以下、右図が2mを超えるケースである。有義波高が2m以下のケースでは、図-8と同様に波形勾配の増大に伴い $S_{max}$ は増大している。これに対して、有義波高が2mを超えるケースでは、逆に波形

勾配の増大と共に $S_{max}$ は減少傾向を示している。波浪特性と $S_{max}$ の関係は、海岸工学上の様々な問題に少なからぬ影響を及ぼすことから、今後、更に詳細な検討を行っていく予定である。

#### 4. おわりに

各地の波浪観測実施点をはじめ、方向スペクトルの解析処理を実行するに際しては、これまで例外なく上層の水粒子速度情報が利用されてきた。しかしながら、波浪観測の主たる目的である高波観測を対象として考えた場合、その周期は概して長いことから上層だけではなく、下層の情報をも利用した方がより信頼性の高い方向スペクトルが得られるものと推察される。一方、年間を通して最も発生頻度が高いと同時に、港湾・海岸工事の実施判断に使用される1m程度あるいはそれ以下の波に注目した場合、その周期は通常短いことが多く、このような時には下層に比べ測定対象により近い上層の情報が有効になろう。以上のように、観測対象とする波浪の特性に応じて、適切な水深層における水粒子速度情報を選択的に利用することが、信頼性の高い方向スペクトルを推定するために必要かも知れない。しかし現時点においては、多様な海象条件下で常に最良の水深層を選択して解析するアルゴリズムの検討はされておらず、その妥当性も明らかではない。この検討が今後の課題である。当面は、上層・中層・下層の全ての情報を包含した全層の情報を利用することが、より適切な方向スペクトルを推定する上で効果的であると考えられる。

最後に本研究の一部は、科学研究費補助金(20360222)の助成を受けたものであり、ここに記して謝意を表する。

#### 参考文献

- 高山知司, 橋本典明, 永井紀彦, 高橋智晴, 佐々木弘: 水中ドップラー式波高計(海底設置式波浪計)の開発について, 海岸工学論文集第39巻, pp. 176-180, 1992.
- 橋本典明: ベイズ型モデルを用いた方向スペクトルの推定, 港湾技術研究所報告, 第29巻, 第2号, pp. 97-125, 1987.
- 橋本典明: 海洋波の方向スペクトルの推定法に関する研究, 港湾技研資料, No. 722, 1992.
- 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, 第32巻, 第1号, pp. 3-25, 1993.
- 橋本典明, 永井紀彦, 高山知司, 高橋智晴, 三井正雄, 磯部憲雄, 鈴木敏夫: 水中超音波のドップラー効果を応用した海象計の開発, 海岸工学論文集第42巻, pp. 1081-1085, 1995.

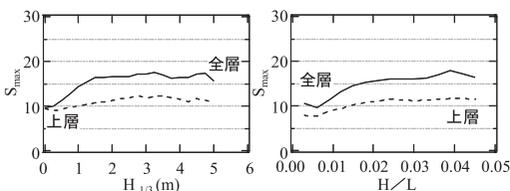


図-8 有義波高および波形勾配と $S_{max}$ の関係

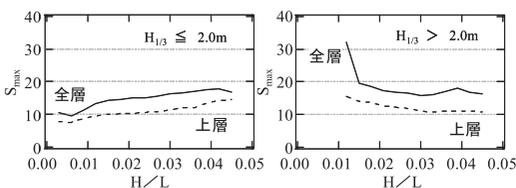


図-9 有義波高別の波形勾配と $S_{max}$ の関係