

方向スペクトルの推定精度に関する現地観測

磯部 雅彦*・清水 琢三**・細貝 隆司**
青木 徹***・泉宮 尊司****

1. 序 論

海の波は、周波数に関して不規則であると同時に波向に関しても不規則であり、大水深海域に構造物を建設する際には、後者の波向に関する不規則性も考慮すべき重要な要素になると考えられる。最近になって、方向スペクトルを比較的精度よく推定する方法が開発されたこともあって^{1),2)}、方向スペクトルの現地観測も継続的に行われるようになった^{3),4)}。しかしながら、実際に行われる現地観測で使用される測定装置の台数は数台と限られており、このような条件のもとで、いかに方向スペクトルを精度よく推定するかが、重要な課題となっている。

本研究では、測定装置の台数の違いによる方向スペクトルの推定精度の変化について調べるために、2成分流速計と波高計を1台ずつ組み合わせた3成分アレイの組の数を変化させて、拡張最尤法 (EMLM)¹⁾を用いて方向スペクトルを算定した。それらの結果を比較することによって推定精度について議論した。また、最大エントロピー法 (MEP)²⁾によっても方向スペクトルを算定し、EMLMによる推定結果と比較した。さらに、このようにして得られた方向スペクトルをもとに、屈折の影響による方向スペクトルおよび long-crestedness パラメータの変化についても考察した。

2. 現地観測およびデータ処理の方法

(1) 現地観測の方法

現地観測は、1986年9月15日より3日間かけて、福島県いわき市の夏井川河口付近で行われた。観測地点として、屈折による方向スペクトルの変化も調べることが可能なように、図-1に示すように水深約15mの地点(A地点)および水深約8mの地点(B地点)を選定した。測定装置として、同期された自記式の超音波式波高計と電磁流速計 (コンパス内蔵) を図-1の右側の図に

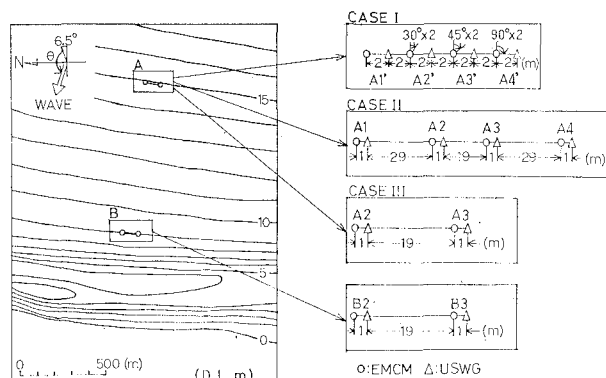


図-1 観測位置および測定装置の配置

示すように配置した。まず最初に行った観測は、電磁流速計による方向スペクトルの推定精度に関するもので4台の電磁流速計と4台の超音波式波高計 (そのうち、2台の波高計は欠測) をその図の CASE I に示すように直線上に配置した。そして4台の電磁流速計のうち3台をそれぞれ 30°, 45° および 90° ずつ時計回りに回転させて測定を行い、電磁流速計の方向特性について調べた。その記録時間間隔は 0.5 秒であり、2046 個分 (約 17 分) 連続して記録されるようにセットした。

次に、電磁流速計および超音波式波高計の台数および配置による方向スペクトルの推定精度について検討するために、図-1の CASE II に示すように電磁流速計および超音波式波高計を設置し測定を行った。これらの計測装置間で可能な種々の組合せを用いて方向スペクトルを算定し、それらの結果を比較することにした。第3番の現地実験 (CASE III) として、屈折による方向スペクトルの変化を調べるために、図-1に示すA地点およびB地点に電磁流速計および超音波式波高計をそれぞれ設置した。

なお、観測第1日 (9月16日) の気象・海象は、特に午前中は北よりの風が強く、風波が卓越しているように思われたが、夕方になると風も比較的弱くなり、うねり性の波に変化しつつあった。2日目のそれは、風も弱くうねり性の波に近い状態であった。

* 正会員 工博 東京大学助教授 工学部土木工学科

** 正会員 工修 五洋建設(株) 土木設計部

*** 学生員 横浜国立大学大学院工学系研究科

**** 正会員 工博 東京大学助手 工学部土木工学科

(2) データ処理の方法

得られたデータの中には、ノイズが記録されている計測装置があり、それを除去する必要があった。そこで、水位のデータに関しては、平均水位と 2 m 以上の差があるものを、また流速のデータでは、その絶対値が 0.5 m/s 以上のものをノイズとみなし除去するとともに、両側の値より線形内挿することにした。また、2 成分流速計のデータは、内蔵のコンパスの値を利用して東西方向および南北方向の流速成分に分離した。

このようにして得られたデータを基に、17 分ごとに波浪の統計諸量を計算した。その結果の一部を表-1 に示す。観測第 1 日の 9 月 16 日の波浪の諸元は、有義波高が 0.7~0.8 m で、有義波周期は A3 の 18:02~18:20 のデータを除けば 6 秒台の値であった。

方向スペクトルの計算には、水面変動や流速変動等の任意の組み合わせに対して用いることのできる拡張最尤法 (EMLM)¹⁾を用いた。また、2 成分流速計と波高計を 1 台ずつ組合せた 3 成分アレイに対しては、最大エントロピー法 (MEP)²⁾によっても方向スペクトルを算定した。

3. 方向スペクトルの推定精度の比較

(1) 電磁流速計による方向スペクトルの推定精度

図-2 に、現地波浪のパワースペクトルを示す。9 月 16 日の 13 時 47 分から 14 時 4 分までの波浪は、高周波成分にもエネルギーが有意に含まれており、うねり性の波と風波が混在していることがわかる。しかしながら、その日の夕方 (18:02~18:20) には風も弱くなったこともあり、風波成分はほとんど消失している。

電磁流速計による方向スペクトルの推定精度の比較実験は、うねりと風波とが混在している時間帯に行われた。波高計と流速計を 図-1 の右図に示すように、2 m 間隔で一直線上に並べ、それぞれ近隣の超音波式波高計と電磁流速計を組合せた 3 成分アレイによって方向スペクトルを比較した。その結果を 図-3 に示す。この図の横軸の θ は、東方位より反時計回りに測定した方位角である。また、点線は周波数 0.0977 Hz の方向スペクトルを示し、実線は 0.117 Hz、破線は 0.156 Hz、一点鎖線は 0.195 Hz および二点鎖線は 0.234 Hz のものを示

表-1 波浪の統計諸量

観測地点	A1		A2	A3			備 考
	1986. 9. 16	1986. 9. 16	1986. 9. 17	1986. 9. 16	1986. 9. 16	1986. 9. 17	
観測時間帯	13:47~14:04	14:55~15:12	17:32~17:49	13:47~14:04	18:02~18:20	17:32~17:49	
η_{rms} (m)	0.214	0.210	0.272	0.214	0.206	0.260	水面変動の自乗平均の平方根
H_{max} (m)	1.228	1.338	1.525	1.346	1.223	1.660	最大波高
$H_{1/10}$ (m)	0.957	0.984	1.282	0.982	0.925	1.243	1/10 最大波高
$H_{1/3}$ (m)	0.768	0.785	1.050	0.787	0.745	1.002	有義波高
$\bar{H}$ (m)	0.480	0.488	0.634	0.499	0.463	0.634	平均波高
T_{max} (s)	8.23	7.02	6.34	9.51	8.08	6.43	最大波周期
$T_{1/10}$ (s)	6.99	6.62	7.27	7.17	8.14	7.56	1/10 最大波周期
$T_{1/3}$ (s)	6.19	6.32	7.49	6.27	7.50	7.27	有義波周期
$\bar{T}$ (s)	4.29	4.49	5.32	4.50	4.77	5.35	平均周期
f_p (Hz)	0.094	0.102	0.106	0.095	0.105	0.106	ピーク周波数
$\sqrt{\beta_1}$	-0.039	0.255	0.090	-0.060	0.089	0.199	歪度
β_2	3.075	3.347	2.982	3.007	2.971	2.927	尖度
θ_m (deg)	166.6	177.6	158.1	167.0	162.9	156.6	平均波向
θ_p (deg)	158.6	167.6	153.9	164.1	158.9	149.4	主波向
γ'	0.461	0.377	0.614	0.569	0.575	0.657	方向集中係数
γ	0.709	0.685	0.620	0.585	0.686	0.583	long-crestedness パラメータ
θ_κ (deg)	51.7	56.8	40.8	41.6	43.6	37.9	平均分散角
$H_{1/3}/\eta_{rms}$	3.587	3.754	3.860	3.667	3.543	3.852	
$H_{1/10}/H_{1/3}$	1.248	1.254	1.221	1.248	1.317	1.239	
$\bar{H}/H_{1/3}$	0.626	0.622	0.603	0.635	0.613	0.632	
$T_{max}/T_{1/3}$	1.329	1.111	0.847	1.517	1.442	0.884	
$T_{1/10}/T_{1/3}$	1.128	1.046	0.971	1.142	1.280	1.040	
$\bar{T}/T_{1/3}$	0.692	0.710	0.710	0.717	0.671	0.736	

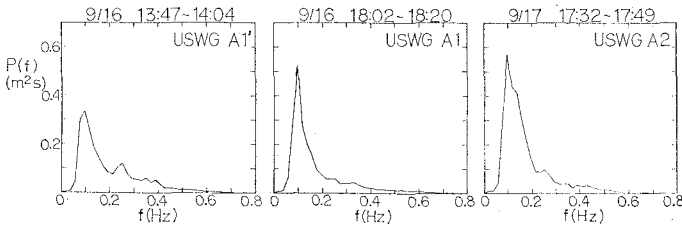


図-2 波浪のパワースペクトル

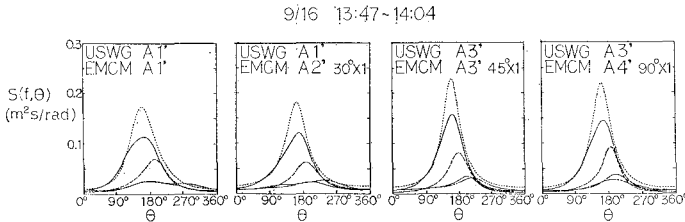


図-3 電磁流速計の方向特性

す。流速計を回転していない場合(左より1番目の図)について見ると、ピーク周波数 $f=0.117$ Hz に対する方向スペクトルのピークは、 $\theta=150^\circ$ であるが、それより高周波数になるにつれて卓越波向角が大きく(南よりの方向)になっており、異なる周波数における波向の変化が識別できることが確認された。

一方、回転した電磁流速計を用いて方向スペクトルを推定した結果は、回転しなかったものと比較すると平均波向で2度から3度程度、主波向で7度から8度程度変化していたが、波浪場の空間的変動や統計的なばらつき²⁾を考慮するならば、電磁流速計の方向特性は比較的精度が高いと言える。

(2) 計測装置の種類、台数および配置による方向スペクトルの推定結果の相違

方向スペクトルを精度よく推定するためには、より多くの測定装置の同時記録が必要であると考えられており、数値シミュレーションによってもそのことが確認されている¹⁾。しかしながら、現地で実際に波浪を観測する場合には、観測装置の位置の測定誤差、ノイズの混入、伝達関数の誤差および波浪の不規則性等の原因により観測装置の台数や種類をただ単に増すだけでは、方向スペクトルの推定精度が向上するとは限らない。そこで、計

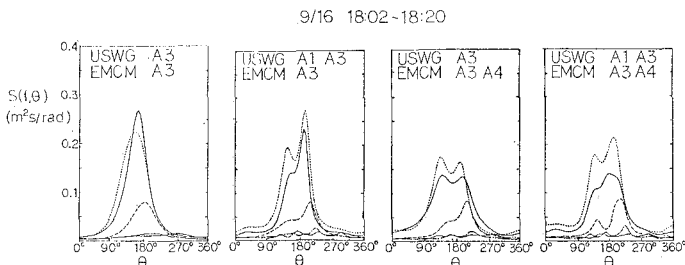


図-4 計測装置の種類、台数および配置による方向スペクトルの推定結果の相違

測装置の種類、台数および配置によって方向スペクトルの推定結果がどのように変化するかを調べることにした。

超音波式波高計 (USWG) 1 台と電磁流速計 (EMCM) 1 台の3成分アレイのみでは、図-4の左から1番目の図に示すように、いずれの周波数についても単峰性であり、そのピークは、周波数が $0.098 \sim 0.117$ Hz の範囲ではおよそ160度である。それに対して、USWG (A1, A3) および EMCM (A3) の組合せ、USWG (A3)、EMCM (A3, A4) の組合せおよび USWG (A1, A3)、EMCM (A3, A4) の組合せでは、2つのピークが存在し、それらの位置は $\theta \approx 140^\circ$ および $\theta \approx 200^\circ$ である。詳細にこれらの図を

みると、2番目の図の場合では右側のピークが鋭くとなっており、左側のピークより値が大きくなっていることがわかる。ところが、3番目の図では、左側のピークの方が右側のそれよりやや大きくなっている。また、4番目のケースでは右側のピークの方がやや大きくなっている。このように、測定装置の台数を増すことによって、同一周波数成分に対する2方向系波浪場の推定が可能となることが示唆される。しかしながら、方向スペクトル密度関数の絶対値については、先にも述べた誤差の要因、特にノイズの混入や伝達関数の絶対値の誤差があるために必ずしも精度が向上しているとは断定できない。

現地観測当日の気象条件および目視による海面の観測から推測すると、図-4にみられる右側のピークは風波によるもので、左側のそれはいりねりによるものと考えられる。それは、風が弱くなった翌日の観測では右側のピークが消滅したこと、およびピーク周波数よりも高周波成分 ($f=0.156$ Hz) の主波向からも推測され得る。

(3) 拡張最尤法 (EMLM) と最大エントロピー法 (MEP) との比較

超音波式波高計と電磁流速計との組合せによる成分アレイに対して、拡張最尤法 (EMLM)¹⁾と最大エントロピー法 (MEP)²⁾による方向スペクトルの推定結果を比較したものを、図-5に示す。この図より、

いずれの周波数に対しても、平均波向は両者ともほぼ一致しているが、MEPによる推定結果の方が若干とがった形となっていることがわかる。また、EMLM および MEP によっても、3成分アレイでは方向スペクトルの形状は単峰性であることがわかる。後述する図-6では双峰性のものも見られるが、同一周波数での2方向系波浪場の定量的評価

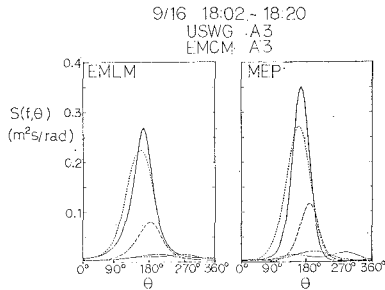


図-5 EMLM と MEP による方向スペクトルの比較

に対しては、3成分アレイのみでは不十分であると考えられる。

4. 屈折による方向スペクトルおよび統計パラメタの変化

屈折による方向スペクトルの変化に関する観測は、現地波浪観測2日目(9月17日)に行われた。観測地点は図-1に示されているように、A地点(水深約15m)およびB地点(水深約8m)である。まず、A地点におけるUSWGおよびEMCMの3成分アレイによる方向スペクトルの推定結果を図-6に示す。周波数0.117 Hz以上での方向スペクトルは、A2地点とA3地点で幾分値が異なっているが、周波数0.098 Hzのそれは両

者はほぼ一致している。これらの差異は、統計的変動の一種と考えられる⁵⁾(本ケースでは、観測時間が17分と比較的短いために、統計的変動が有意に出現したものと推測される)。

図-7に、A地点とB地点の方向スペクトルを比較したものを示す。この図の左から1番目の図は、A地点のUSWGおよびEMCMを2台ずつ用いて方向スペクトルを推定した結果であり、2番目のものはA地点のEMCMを2台用いた場合、3番目のそれはB地点のEMCMを2台用いて推定した結果である。なお、B地点にも超音波式波高計を設置したが、良好なデータを取得することができなかった。図-7を見るとすぐわかるように、1番目と2番目の図では絶対値の差がかなり大きいことに気付く。これは、実際の水面変動と流速変動との伝達関数が線形理論より得られるものと相当異なるためである。

A地点とB地点の方向スペクトルを比較する(図-7の2番目と3番目の図)と、卓越波向に有意な変化は見られない。これは、方向スペクトルのピークの波向 $\theta = 160^\circ$ は等深線に対してほぼ垂直であるために、屈折が生じなかったことによる。しかしながら、図-7を詳細にみると、B地点の方向スペクトルの方がA地点のものよりも幾分とがっていることがわかる。この変化をもう少し定量的に比較するために、Nagata (1964)⁶⁾が提案した周波数ごとの long-crestedness パラメタ $\gamma(f)$ を用いることにした。

$$\gamma(f) = \left[\frac{(C_{uu} + C_{vv}) - \sqrt{(C_{uu} - C_{vv})^2 + 4C_{uv}^2}}{(C_{uu} + C_{vv}) + \sqrt{(C_{uu} - C_{vv})^2 + 4C_{uv}^2}} \right]^{1/2} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $C_{uu} = C_{uu}(f)$ 、 $C_{vv} = C_{vv}(f)$ および $C_{uv} = C_{uv}(f)$ であり、これらは流速変動のコスペクトルを表わす。周波数ごとの long-crestedness パラメタを表-2に示す。これによると、周波数が0.117 Hzより低周波数の波に対しては、明らかにB地点の $\gamma(f)$ の値の方がA地点のそれよりも小さくなっていることがわかる。すなわち、屈折により波の方向集中度が増加したことを意味している。一方、0.195 Hzより高周波数側では、波長が短いために水深15mから9mの間ではほとんど屈折しないので、 $\gamma(f)$ の系統的な変化は見られない。

ここで、屈折による $\gamma(f)$ の値の変化を近似的に予測するために、主波向の方向が等水深線に対してほぼ垂直であり、波向集中度が十分に大きく、Snellの法則が適用できるものとする、

$$\frac{\sin \Delta \theta_B}{\sin \Delta \theta_A} \approx \frac{\Delta \theta_B}{\Delta \theta_A} \approx \frac{k_A}{k_B} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{\gamma_B}{\gamma_A} \approx \frac{\Delta \theta_B}{\Delta \theta_A} \approx \frac{k_A}{k_B} \quad \dots\dots\dots (3)$$

なる関係を得る。ここに、 $\Delta \theta_A$ および $\Delta \theta_B$ は等

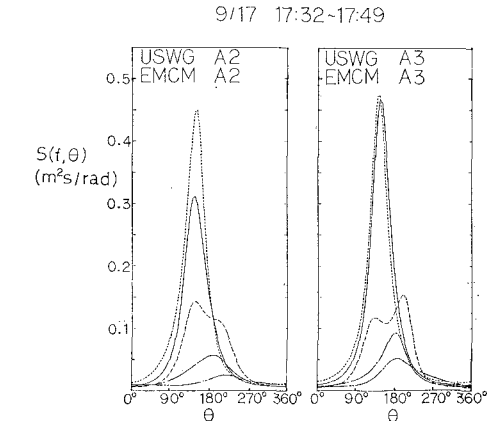


図-6 A地点における方向スペクトルの推定値(USWGおよびEMCMによる3成分アレイ)

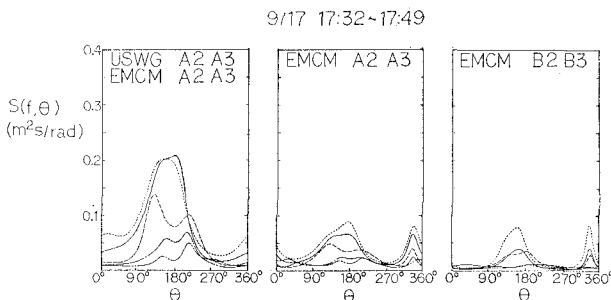


図-7 A地点とB地点の方向スペクトルの比較

表-2 long-crestedness パラメタの比較

時間帯	周波数 (Hz)	$r_A(f)$	$r_B(f)$	r_B/r_A	k_A/k_B
17:32 17:49	0.098	0.412	0.397	0.964	0.803
	0.117	0.635	0.437	0.688	0.819
	0.156	0.807	0.642	0.796	0.865
	0.195	0.630	0.770	1.222	0.925
	0.234	0.713	0.792	1.111	0.970
17:49 18:06	0.098	0.423	0.405	0.948	0.803
	0.117	0.492	0.458	0.931	0.819
	0.156	0.674	0.731	1.084	0.865
	0.195	0.699	0.712	1.019	0.925
	0.234	0.799	0.718	0.904	0.970
18:06 18:23	0.098	0.418	0.389	0.931	0.803
	0.117	0.612	0.543	0.887	0.819
	0.156	0.693	0.599	0.864	0.865
	0.195	0.686	0.818	1.192	0.925
	0.234	0.743	0.683	0.919	0.970

水深線に対して直角方向より測った主波向を示し、 k_A および k_B はそれぞれ A 地点および B 地点の波数を表す。表-2 の r_B/r_A と k_A/k_B の値を比較すると、値自体は幾分異なるものの、長周期成分ほど long-crestedness パラメタがより減少するという傾向はほぼ一致している。式(2)および(3)を導く際に、波向集中度が十分に大きいと仮定しているが、この仮定は方向スペクトルの推定結果から考えると、やや不適切なこともあり、より厳密な比較を行うためには、流速変動のコスベクトルを数値積分により計算する必要がある⁷⁾。

5. 結 論

超音波式波高計と電磁流速計をそれぞれ4台用いて、方向スペクトルの現地観測を行い、測定装置の種類、台数および配置による方向スペクトルの推定結果の相異について調べた。以下に、主要な結果について列挙する。

(1) 波高計と流速計をそれぞれ1台ずつ用いた3成分アレイに対して、流速計を 30° 、 45° および 90° ずつ回転させてもほぼ同様な方向スペクトルが得られた。そし

て、周波数の異なる二方向性波浪に対しては、周波数による波向の変化を把えることができた。

(2) 計測装置を3台から4台に増すと、方向スペクトルの形状は同一周波数に対しても双峰性となり、方向スペクトルの推定精度が向上することが示唆された。

(3) 3成分アレイでは、EMLM および MEP を用いても同一周波数に対する2方向波浪場の方向スペクトルの定量的評価には不十分であり、少なくとも2組以上の波高計と流速計の組合せが必要であった。

(4) 屈折による方向スペクトルの変化について調べたが、今回の観測では主波向が等水深線に対してほぼ直角であったために、顕著な変化は見られなかった。しかしながら、周波数ごとの long-crestedness パラメタで比較すると、特に低周波数側においては有意な減少が認められた。

(5) 電磁流速計のみを用いて推定した方向スペクトルは、波高計のみを用いて推定した方向スペクトルと比較すると、その大きさが幾分異なる。このことは、実測データの伝達関数が線形理論による伝達関数と異なることを意味する。

参 考 文 献

- 磯部雅彦・近藤浩右・堀川清司：方向スペクトルの推定における MLM の拡張，第31回海岸工学講演会論文集，pp. 173~177, 1984.
- 小舟浩治・橋本典明：最大エントロピー原理 (MEP) を用いた方向スペクトルの推定，第32回海岸工学講演会論文集，pp. 159~163, 1985.
- 鹿島達一・丸山康樹・平口博丸・鈴木和三郎・田中典明：複雑な海底地形上における波浪変形現地観測と解析，第33回海岸工学講演会論文集，pp. 123~127, 1986.
- 泉宮尊司・磯部雅彦・清水琢三・大下哲則：回折領域における波浪場の現地観測，第33回海岸工学講演会論文集，pp. 129~133, 1986.
- 磯部雅彦・古市耕輔：不規則波に対する統計量の変動に関する理論的考察，第33回海岸工学講演会論文集，pp. 159~163, 1986.
- Nagata, Y.: The statistical properties of orbital wave motions and their application for the measurement of directional wave spectra, J. Oceanogr. Soc. Japan, Vol. 19, pp. 169~181, 1964.
- 泉宮尊司：屈折・回折による方向スペクトルの変形算法，第33回海岸工学講演会論文集，pp. 176~180, 1985.