

各種方向スペクトル解析法の性能比較に関する研究

池野正明*・田中寛好**・岡本直樹***

1. はじめに

多方向不規則波を用いた水理模型実験を行う場合、造波された波が要求どおりの方向スペクトル特性を有しているかどうかの検定が必要不可欠となるため、推定精度のよい方向スペクトル解析法を用いることが望ましい。さらに、推定結果が要求どおりでない場合には、推定値と目標値の残差を造波信号にフィードバックして造波・計測・解析を効率よく実施する必要があるため、これに不都合のない程度の計算時間の解析法が望ましい。ところが、現在提案されている手法の中には何等かの原因で方向集中度を真値より低く推定してしまう場合もあるため、発生波の特性を誤って認識してしまうことになり、使用者側にこの種の混乱が生じているように思われる。

そこで、本研究では、実験設備の解析システムに効率よく組み込むことを念頭に置いて、現在推定精度にかなりの信頼性があり有望視されている3種類の方向スペクトル解析法を取り上げ、種々の性能等を比較することにより、各手法を使用する場合の特性の違いや留意点をとりまとめたものである。

2. 方向スペクトル解析法

本研究で検討対象とした方向スペクトル解析法は、ベイジ型モデル BDM (橋本, 1987), 拡張最大エントロピー原理法 EMEP (橋本ほか, 1993), 拡張最尤法 EMLM (磯部ほか, 1984) の3種類である。BDM は現在提案されている方向スペクトル解析法の中で最も推定精度が高い反面長い計算時間を要すると称される手法である。計算に際しては、超パラメータ u を変化させるとともに各々の u に対して Householder 法による収束計算を行う必要がある。橋本 (1987) は収束判定条件として $n-1$ ステップ目と n ステップ目の推定値の差の標準偏差 $|\sigma_{\epsilon_n}|$ が 10^{-3} 以下を提案している。平口 (1990) はこの収束判定条件を再検討し $|\sigma_{\epsilon_n}|$ が 0.5×10^{-1} 以下であれば、方向分布形状や方向集中度等の特性が従来の収束判定条

件時とほぼ一致し計算時間を従来の方法の $1/3 \sim 1/2$ 程度に短縮できるとしている。本研究では平口 (1990) の収束判定条件を採用した。また、方向関数を表現する離散的一定値関数の方向分割数 K の値を 180 とした。EMEP は、BDM に匹敵する推定精度を保ち BDM に比べて計算時間を大幅に短縮するためにごく最近開発された手法である。特に、EMEP に対するノイズ混入時等の詳細な分解能や水理模型実験への適用性については十分把握されておらず、他の手法と同一の入力条件下で詳細に比較しておく必要がある。

3. 数値実験による性能比較

(1) アレーの配置と方向スペクトルの推定精度

パワー・クロススペクトルに真値 (解析解) を入力した場合に、アレーの配置が方向スペクトルの分解能に及ぼす影響を検討する。方向関数として光易型を採用し方向集中度を風波を代表した $S=10$ とうねりを代表した $S=75$ の2種類とした。実験で用いる代表的なアレーの配置方法である星型アレー (波高計4台) と3成分アレー (波高計と流速計) を対象に主波向きを変化させた。

図-1 および図-2 は、星型アレーの波高計間の最小距離 D と波長 L の比 D/L を種々変化させた場合の方向関数の推定値の変化状況を示したものであり、図-1 が $S=10$ の風波、図-2 が $S=75$ のうねりの場合に対応する。図の縦軸は真値の方向関数の最大値で無次元化して表示している。また、図中の S_1 , S_2 は、方向関数の推定結果から磯部ほか (1988) にならぬ各周波数毎の long-crestedness パラメータ γ を求めて方向集中度パラメータ S に換算したものであり、 S_1 が周波数毎のモーメントを求める際の波向き積分範囲を 360° としたとき、 S_2 がその積分範囲をピーク波向きを中心とした $\pm 90^\circ$ の範囲に限定したときの S の結果である。また、図中に BDM と EMEP による推定値の適合度の目安となる ABIC (赤池のベイズ型情報量規準) と AIC (赤池の情報量規準) の値も併記している。

図-1 の風波を対象とした場合には、 D/L を 0.2 から 1.5 まで大きくしても BDM と EMEP は真値と極めてよく一致しているが、EMLM では、 D/L が 0.2 の時に推定

* 正会員 工博 (財)電力中央研究所 我孫子研究所 水理部
 ** 正会員 工博 (財)電力中央研究所 水理部 構造水理グループリーダー
 *** (株)電力計算センター 我孫子事業部

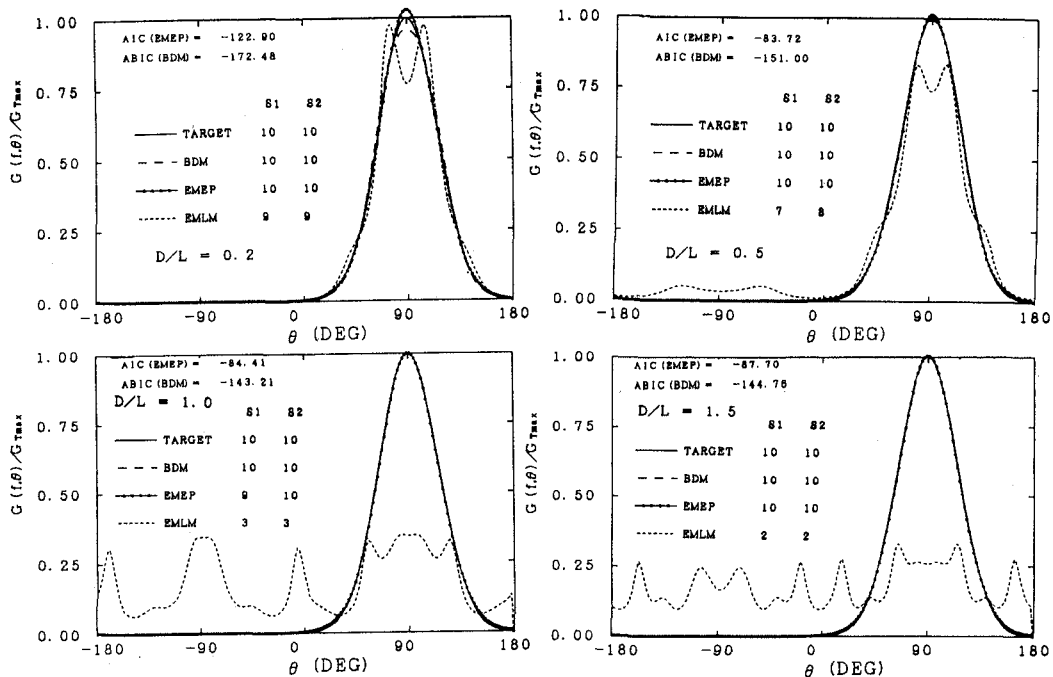


図-1 星型アレーの大きさと方向スペクトルの推定精度 (風波の場合)

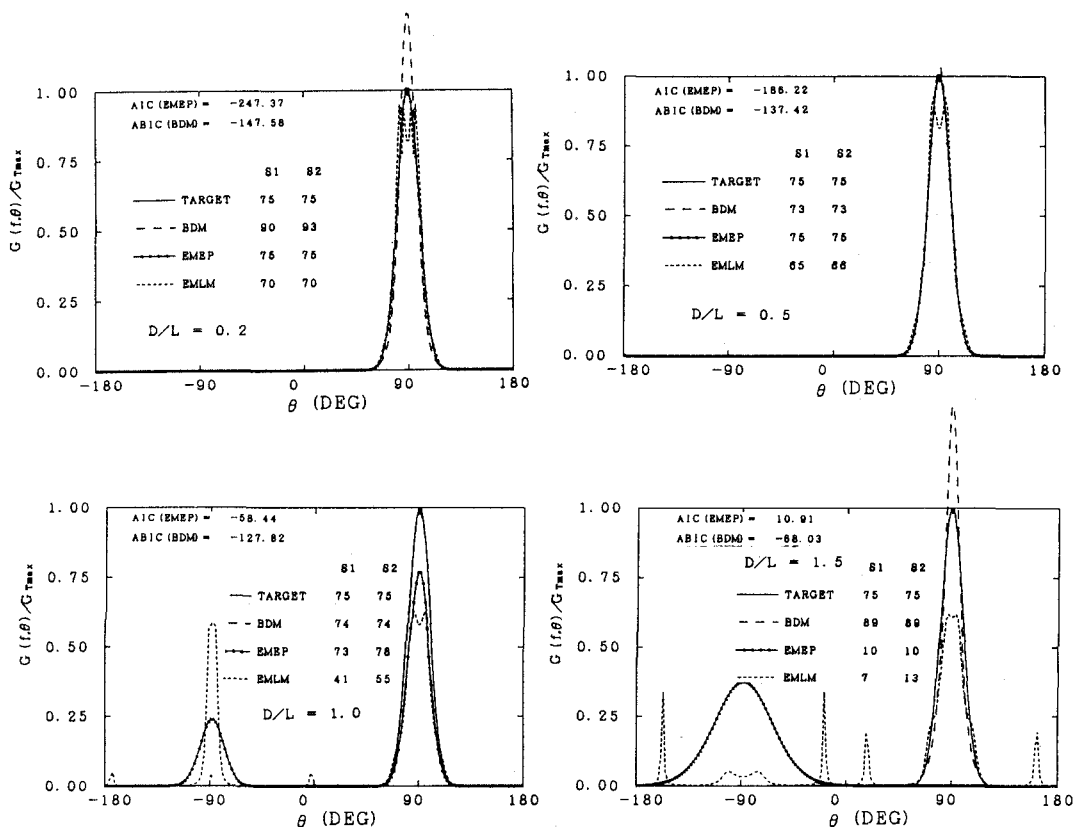


図-2 星型アレーの大きさと方向スペクトルの推定精度 (うねりの場合)

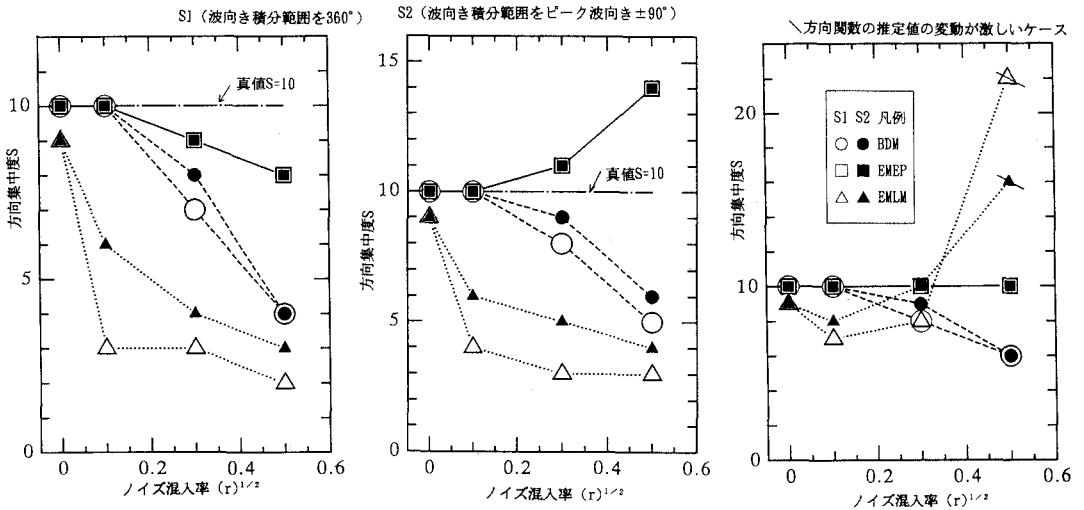
値のピークが2つに分裂しており、 D/L が1.0の時にはピーク波向きに対応する推定値は低下しそれ以外の波向きで多数の小さなピークが生じ、もはや実用的な波向き推定は困難となる。図面は省略するが、 D/L が2.0の場合や主波向きを変化させた場合でもBDMとEMEPは真値と極めてよく一致した。

図-2のうねりを対象とした場合には、 D/L が0.2, 0.5の時にはBDMとEMEPは真値とよく一致している。 D/L が1.0, 2.0の時にはEMEPはピーク波向き(90°)と逆方向に見かけのピークが生じており推定精度が低下しているが、BDMは真値とよく一致してる。EMLMでは、 D/L が0.2の時に推定値のピークが2つに分裂して

おり、 D/L が1.0の時にはEMEPと同様にピーク波向きと逆方向に見かけのピークが生じている。なお、3成分アレーを対象にパワー・クロススペクトルに真値を入力した場合の方向スペクトルの分解能を検討したところ、橋本ほか(1993)と同様にEMLMよりもEMEPやBDMの推定精度が高いことを確認した。

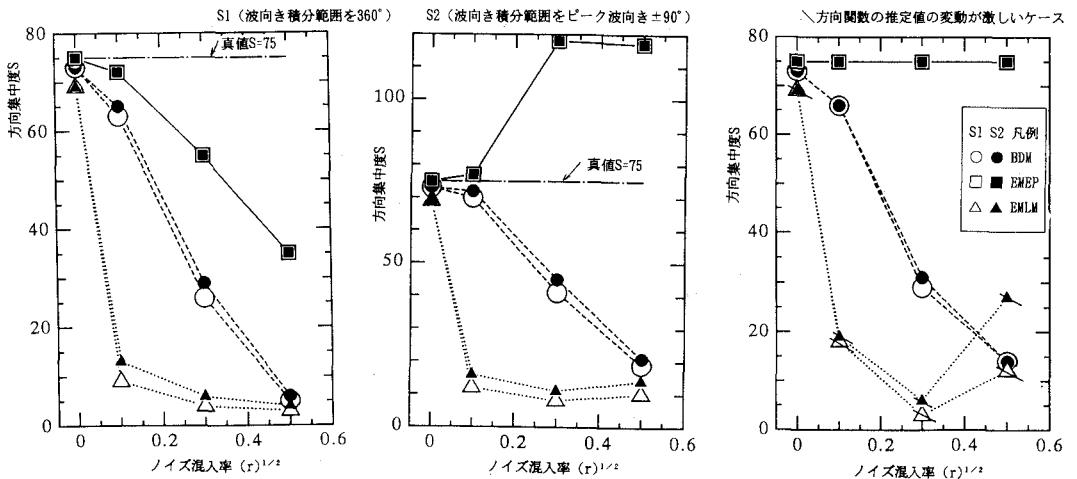
(2) パワー・クロススペクトルの誤差と推定精度

図-3および図-4は、星型アレーを対象としたパワー・クロススペクトルにノイズ等が混入し誤差が含まれた場合を想定して方向集中度パラメータ S の推定値の変化状況を示したものである。図(a)(b)(c)はパワースペクトルのみ、クロススペクトルのみ、パワー・クロス



(a) パワー・クロススペクトルともに誤差が含まれる場合 (b) クロススペクトルのみ誤差が含まれる場合 (c) パワースペクトルのみ誤差が含まれる場合

図-3 ノイズ混入率を変化させた場合のSの推定値の変化状況 (風波の場合)



(a) パワー・クロススペクトルともに誤差が含まれる場合 (b) クロススペクトルのみ誤差が含まれる場合 (c) パワースペクトルのみ誤差が含まれる場合

図-4 ノイズ混入率を変化させた場合のSの推定値の変化状況 (うねりの場合)

ベクトルともに誤差が含まれた場合の検討結果であり、**図-3**が風波、**図-4**がうねりの場合に対応する。ノイズとしては、パワー・クロススペクトルの実部および虚部の絶対値を r 倍した値を標準偏差とする平均0の正規乱数を付加している。

図-3と**図-4**を比較すると、ノイズの付加の仕方に係わらずうねりの方が風波よりも誤差の影響を受け易く同一のノイズ付加率でも真値との差が大きい。パワー・クロススペクトルともに誤差が含まれる場合ではEMEP, BDM, EMLMの順に推定精度が安定している。つぎに、クロススペクトルのみに誤差が含まれる場合ではEMEPによる S の推定値はノイズ付加率が大きくなると真値よりも高くなるのに対してBDM, EMLMでは真値よりも低くなっている。つぎに、パワースペクトルのみに誤差が含まれる場合ではEMEPによる推定値がノイズ付加率を大きくしても真値とよく一致していることから、EMEPはパワースペクトルに対する誤差に強い手法であると言える。

4. 水理実験による性能比較

(1) 実験条件

多方向不規則造波機を用いて風波とうねりを発生させた実験データを用いて3種類の方向スペクトル解析法の推定精度を検討する。長さ35m、幅45m、深さ1.1mの平面水槽に設置された幅40cmのサーベント型造波装置72台(全長28.8m)を用いて造波した場合の実験データを対象とした。この場合、平口ほか(1991)と同様に3組の星型アレー($D=50$ cm)を造波機から4m離れた位置に4m間隔で設置した。実験は水深50cmの一樣水深で行い水槽の内側は碎石を用いて消波した。

実験時の目標周波数スペクトルはBretschneider-光易型およびJONSWAP型とし目標方向関数は光易型とした。有義波高・周期および方向集中度パラメータ S_{max} は風波の場合5cm, 1.0s, $S_{max}=10$, うねりの場合4cm, 1.25s, $S_{max}=75$ とし、主波向きを造波機が並ぶ方向に対して直角方向($\theta_0=0^\circ$)とした。波のシミュレーション方法としてはDS法を用いた。エネルギー等分割で周波数分割 $512 \times$ 方向分割90個の成分波を重ね合わせ初期位相の設定に用いる一樣乱数列を3種類変化させた。また、風波とうねりが共存する波浪場の検討では、有義波高・周期・主波向きを各々風波5cm, 1s, -30° , うねり5cm, 2s, 30° (交差角 60°)とした。波の計測時間は約7分、サンプリング時間間隔は0.05s, データ数は8192である。

(2) クロススペクトルの正規化

一般に離散有限フーリエ変換を用いて算定したパワー・クロススペクトルには統計的推定誤差が含まれている。3. で述べたように、特にうねり性波浪の場合には

パワー・クロススペクトルに混入する推定誤差が方向スペクトル解析結果に敏感に影響を及ぼすため、この推定誤差を何らかの方法で極力小さくすることが望ましい。

統計的誤差を小さくするのに2つの方法がある。第1の方法は N 回計測したデータに対してパワー・クロススペクトルを計算し N 個でスペクトルのアンサンブル平均をとる方法である。第2の方法は1回計測したパワー・クロススペクトルにスペクトルウィンドウを用いて周波数平滑化する方法である。いずれにしても、パワー・クロススペクトルを同一の方法で平均した場合異なる統計的変動性を有する。特にクロススペクトルの変異係数がコヒーレンスと逆比例の関係にあるためにその統計的変動性は周波数毎に異なりパワースペクトルの場合よりも大きくなる(橋本ほか, 1988)。合田(1981)はクロススペクトルをその対応する波動量のパワースペクトルの幾何平均で正規化すれば、パワースペクトルと正規化されたクロススペクトルの統計的変動性は見かけ上同一なることを数値的に確かめている。また、橋本ほか(1988)や平口(1990)は同正規化法を現地観測データや実験データに適用し正規化しない場合よりも方向スペクトルの推定精度が向上することを確認している。一方、橋本ほか(1993)は上記と同じ効果を発揮すると考えられる正規化法として、期待値から理論的に求められるクロス

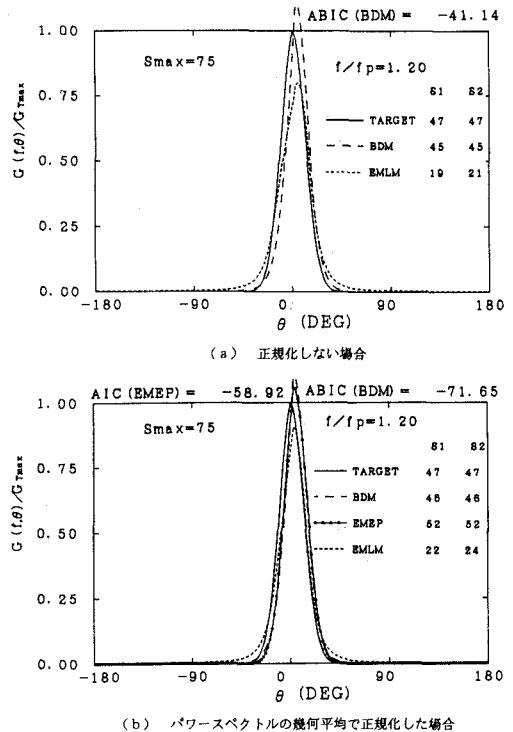


図-5 クロススペクトルの正規化による推定精度の向上(うねりの場合)

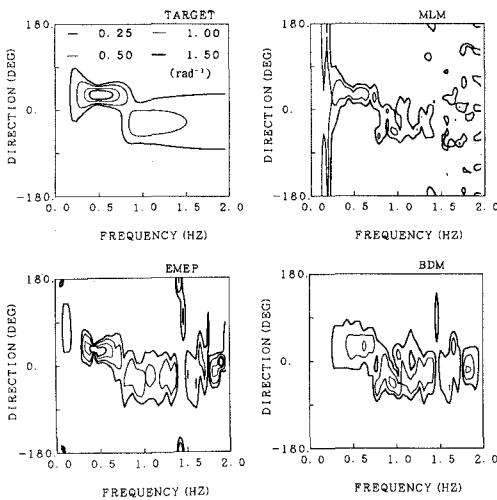


図-6 風波とうねりが共存する場合の方向関数のコンター図

ペクトルの推定誤差の標準偏差で正規化する方法を提案している。本研究では、上記2種類の正規化方法を実験データの方向スペクトル解析時に適用してその効果を比較検討した。

図-5(a)(b)は、星型アレーで測定された実験データのクロススペクトルをそのまま方向スペクトル解析に用いた場合(非正規化)とパワースペクトルの幾何平均で正規化した場合の代表周波数における方向関数の推定結果を比較したものである。いずれもパワー・クロススペクトルの計算の際にはハニングのスペクトルウィンドウを40回施している。BDM, EMEP, EMLMについて計算を実施したが、非正規化の場合にはEMEPの計算が発散し最適解が得られなかったため併記していない。BDMとEMLMについて非正規化の場合と正規化した場合の推定結果を比較すると、パワースペクトルの幾何平均で正規化した場合には非正規化の場合よりも推定結果が目標値に近くなりABICの値が小さくなっていることから適切な正規化方法であると判断できる。これに対し図面は省略するが、クロススペクトルの推定誤差の標準偏差で正規化した場合を検討した結果、必ずしも推定精度が向上した結果にはならなかった。これは、正規化に用いるクロススペクトルの推定誤差の標準偏差がクロススペクトルの期待値から理論的に算定されるため、数少ない実験データから得られるスペクトル値が必ずしも期待値と一致していないことに起因して結果的に不適切な正規化となっているためであると推察される。以上の検討結果から、星型アレーを対象とした実際の水理模型実験への適用にはパワースペクトルの幾何平均で正規化する

方法が実用的であると判断し以下の解析ではこの方法を用いることにした。

(3) 造波された方向スペクトルの比較

図-6は、主波向きが造波機中心軸から $\pm 30^\circ$ 傾き交差角が 60° となる風波とうねりが共存する場合の目標値と3種類の方向スペクトル解析法による方向関数のコンター図を比較したものである。図-6によると、EMEPとBDMの推定値はよく似ており目標値に近いと判断できる。EMLMの推定精度は前述の図-1, 2の検討結果から判断すると、 D/L が1.0以上となる周波数帯に対応する1.5 Hz以上では信頼性が低いと考えられる。なお、方向スペクトル解析法に要する1周波数当たりの平均的なCPU時間は、大型汎用計算機(HITAC M-680 H)を使用した場合BDM 40 s, EMEP 0.13 s, EMLM 0.02 sであり、ワークステーション(HP 9000/715)を使用した場合BDM 88 s, EMEP 0.29 s, EMLM 0.04 sであった。

5. おわりに

以上、本研究では、推定精度にかなりの信頼性がある3種類の方向スペクトル解析法を取り上げ、種々の性能を比較した。その結果、推定精度や計算時間等から判断すると、EMEPを実験設備の解析システムに組み込めば、造波・計測・方向スペクトル解析・造波信号修正の一連の作業を最も効率よく実施できると判断できる。

参考文献

- 磯部雅彦・泉宮尊司・堀川清司・清水琢三・大下哲則・関本恒浩(1988): 屈折・回折領域における波浪場の現地観測, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 108-112.
- 磯部雅彦・近藤浩右・堀川清司(1984): 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.
- 合田良実(1981): 共分散法を用いた波向推定方式の数値的検討, 港湾技術研究所報告, 第20巻, 第3号, pp. 53-92.
- 橋本典明(1987): 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26巻, 第2号, pp. 97-125.
- 橋本典明・小舟浩治・亀山 豊(1988): 現地データを用いた方向スペクトル推定法に関する検討, 港湾技術研究所報告, 第27巻, 第2号, pp. 59-94.
- 橋本典明・永井紀彦・浅井 正・菅原一晃(1993): 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.
- 平口博丸(1990): 多方向不規則波の水理実験手法の開発(2)一造波機による風波とうねりの再現一, 電力中央研究所報告, 研究報告U 90067, 55 p.
- 平口博丸・鹿島遼一・田中寛好・石井敏雅(1991): 多方向不規則波造波機の反射波吸収性能に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 121-125.