

# 多方向不規則波浪場計算法の人工島背後海域への適合性比較

池野正明\* ・鹿島遼一\*\* ・鶴飼亮行\*\*\*  
清水琢三\*\*\*・秋葉 徹\*\*\*\*・窪 泰浩\*\*\*\*\*

## 1. はじめに

汀線から1 km程度の沖合い海域に沿岸方向1 km, 岸沖方向0.5 km程度の規模の人工島を建設した場合, その背後海域の静穏度や波浪変形特性を適切に予測するためには, 予測精度が高くかつ広範囲が計算可能な実用的な数値計算法の開発が必要となる。また, 沖合いでは多方向不規則波としての性質が強くなるため, 予測手法にもこの性質を適切に取り入れる必要がある。多方向不規則波浪場を扱うことのできる計算法は現在幾つか提案されており, 最近土木学会(1993)ではこれらをモデルケースに適用して特性比較がなされている。しかしながら, 実験結果との比較等による人工島背後海域への適合性の詳細は十分検証されていない。

本研究は, 多方向不規則波浪場の波浪変形計算法として現在有望視されている幾つかのモデル方程式を取り上げ, 多方向不規則波を用いた人工島背後の波浪変形実験(池野ほか, 1993)との比較により, その適合性を方向スペクトルレベルまで含めて詳細に検討したものである。

## 2. 多方向不規則波浪場の計算法

本研究では, 以下に示す3種類の計算法を検討対象とする。以下にモデル方程式の概要と計算条件を示す。

### ① 非定常緩勾配不規則波動方程式

緩勾配方程式を異なる周波数成分が同時に取り扱えるように書き換えたものであり, 不規則波の屈折, 回折および反射を直接的に解析するために導かれたモデル方程式である。本研究では, 小竹ほか(1992)が断面1次元波浪場を対象として開発した2次近似モデルを平面2次元波浪場へ拡張して検討する。砕波減衰モデルとしては, 磯部(1986)のモデルを用いる。本モデル方程式は, 多方向不規則波の屈折, 回折および反射現象を厳密に再現することを目的とした計算法であるため比較的長い計算時間を必要とする。計算時間・容量と計算精度との関係

から, 汀線から沖へ10 mの地点までを岸沖方向の計算対象領域とし(後述する図-1参照のこと), その空間格子間隔を5 cm, 時間刻み間隔を0.05 s, 統計量処理時の計算ステップ数が入射波100波分以上となるようにした。従って, 計算対象領域の沖側境界では, 汀線から沖へ10 mの地点で計測した入射波の実験結果を入力条件とした。また, 人工島に直角入射時の規則波および単一方向不規則波を対象とした計算では, 結果の左右対称性が保証されるため, 沿岸方向の計算対象領域を左側導波板から人工島中心軸までの半平面領域とした。ただし, 多方向不規則波を対象とした計算では, 沿岸方向の計算対象領域を実験時と同様に設定した。なお, 人工島に対する境界条件としては, 沖側と側面の護岸が直立護岸の場合には, 実験時と同様に不透透条件を適用し護岸で波が完全反射されると設定した。沖側と側面の護岸が消波護岸の場合には, 実験時の反射率0.4と一致するように, 消波護岸に相当する部分にエネルギー減衰帯を設けた。

不規則波を対象とした計算では, 入射波の周波数スペクトルとしてBretschneider-光易型, 方向関数は光易型を用いた。池野ほか(1993)の実験結果によると, 造波機設置地点で $S_{max}$ が25の多方向不規則波は, 斜面上で屈折変形することにより, 汀線から沖へ10 mの地点で $S_{max}$ が50程度に増大している。これを考慮して, 計算対象領域の沖側境界では $S_{max}=50$ として入力した。モデル方程式の適用限界を考慮して, 計算対象とする周波数帯をピーク周波数の0.5~2.5倍の範囲とし, エネルギー等分割のシングルサンメーション法により512成分を入力した。

### ② 放物型波動方程式

モデル方程式の仮定により人工島沖側の反射波卓越領域には適用できないが, 厳密モデルである上記の非定常緩勾配不規則波動方程式の場合に比べ短時間で計算できることから, 人工島背後海域を対象とした場合に有望な手法であると考えられる。本研究では, 人工島背後回折領域の計算精度を上げるため, 波向線座標を用い, さらに成分波の重ね合わせにより多方向不規則性と砕波減衰項を考慮した磯部(1986)による方法を検討対象とする。ただし, 人工島背後を計算する場合, 両端からの回折波

\* 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 工修 (財)電力中央研究所 我孫子研究所 参事

\*\*\* 正会員 工修 五洋建設株式会社 土木設計部

\*\*\*\* 正会員 (株)開発計算センター 科学システム事業部

\*\*\*\*\* 東京電力株式会社 原子力建設部

が存在するため、両側からの各々の回折波に対する波向線座標を用いる必要がある(土木学会, 1993). すなわち、砕波を考慮せずに、はじめに人工島の沖側および左側からの進入波に対して波向線座標を用いて計算を行う。つぎに右側からの進入波に対する計算を同様に行い両者をエネルギー合成により重ね合わせる。この場合、両端からの回折波の位相干渉を無視しているが、波長に対して沿岸方向距離が長い構造物を対象としているため、位相干渉の影響は小さいと考えられる。本研究では、砕波を簡便に取り扱えるように、得られた計算結果から換算沖波波高を求め、合田(1975)の砕波モデルを用いて砕波波高を算定することにする。計算対象領域は池野ほか(1993)の実験と同様とした。空間格子間隔は波向線方向と初期の波峰線方向に0.1波長間隔で計算した結果を直交座標で20 cm間隔で出力した。

なお、人工島に対する境界条件としては、完全反射境界および減衰帯による透過境界として取り扱った。不規則波を対象とした計算では、実験に対応した造波機設置地点での入射波の方向集中度パラメータの最大値  $S_{max}$  を25(多方向不規則波)と $\infty$ (単一方向不規則波)の2種類に設定した。ただし、成分波の分割数は、計算時間の制約上からエネルギー等分割のダブルサンメーション法により周波数5個×波向15個の合計75成分とした。

### ③ エネルギー平衡方程式

モデル方程式の仮定により回折現象が原理的に考慮されていないが、多方向不規則波浪場では方向分散性により回折が疑似的に表せることや方向スペクトルの変形を直接取り扱えるため広範囲な領域を短時間で計算できることから、実用上有望な手法であると考えられる。本研究では、まず砕波を考慮せずに計算した結果から換算沖波波高を求め、合田(1975)の砕波モデルを用いて砕波波高を算定することにする。計算対象領域は池野ほか(1993)の実験と同様とし、その空間格子間隔を20 cmとした。なお、人工島に対する境界条件としては、人工島を透過率0として取り扱った。実験に対応した造波機設置地点での入射波の成分波分割数はエネルギー等分割のダブルサンメーション法により周波数10個×波向45個の合計450成分とした。

また、比較のための基礎検討として、上記3手法以外に規則波を対象とし非定常緩勾配方程式(渡辺・丸山, 1984)と直交座標系の放物型波動方程式(平口・丸山, 1986)を用いた計算も実施した。なお、入射波条件の詳細は池野ほか(1993)の文献を参照されたい。

### 3. 人工島背後における1/3最大波高分布の比較

ここでは、紙面の都合上沖波波高  $H_o/L_o$  が0.03の多方向不規則波を対象として、人工島背後の1/3最大波

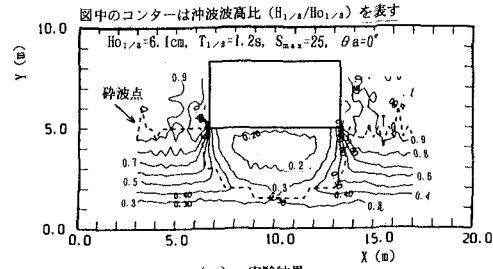
高の平面・断面分布の特性を議論する。図-1および図-2は人工島の沖側と側面が直立護岸の場合、図-3および図-4は人工島の沖側と側面が消波護岸の場合の平面分布および代表測線における断面分布を示したものである。図では、非定常緩勾配不規則波動方程式、放物型波動方程式、エネルギー平衡方程式による計算結果および実験結果を併記している。

まず、平面分布の特性について議論する。上記の3種類の計算結果同士を比較すると、人工島の沖側と側面領域における波高分布のコンターは、反射を考慮できる手法と考慮できない手法とで計算結果に差異が生じている。これに対して、人工島背後の遮蔽領域では、3種類の計算結果の間に顕著な差異は認められない。エネルギー平衡方程式は、多方向不規則波の屈折計算を行うためのエネルギー保存のモデル方程式なので、原理的には人工島背後へ廻り込む回折波を再現できないが、多方向不規則波の方向分散性を考慮することにより、消波護岸の場合には実用上非定常緩勾配不規則波動方程式や放物型波動方程式の計算結果と同程度の結果となっている。

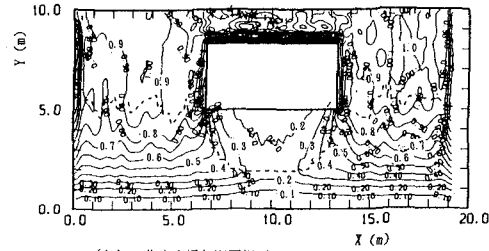
つぎに、代表測線について実験結果と3種類の計算結果とを比較する。沿岸方向の代表測線における比較では、非定常緩勾配不規則波動方程式による計算結果と実験結果との対応は極めて良好である。また、エネルギー平衡方程式による計算結果は、直立護岸の場合に人工島直背後の遮蔽領域で過小評価となっているが実験結果の概略を概ね再現している。従って、上記の3種類の計算手法による多方向不規則波を対象とした人工島背後の波浪場への適用性は高いと判断できる。また、非定常緩勾配不規則波動方程式の計算結果から判断すると、磯部(1986)の砕波減衰モデルを多方向不規則波を対象とした人工島背後の回折波重合領域での砕波問題へ適用しても実用上十分な精度で砕波帯内の1/3最大波高の推算が可能である。

### 4. 多方向不規則波浪場における人工島背後の方向スペクトル特性

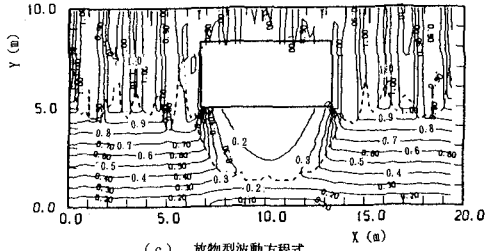
ここでは、紙面の都合上多方向不規則波が作用する場合の人工島背後の方向スペクトルの分布特性について実験結果と計算結果を比較検討する。この際、放物型波動方程式とエネルギー平衡方程式では、不規則波を構成する周波数・波向き成分波毎に計算結果が得られるため、方向スペクトルの算定が容易であるが、実験および非定常緩勾配不規則波動方程式による計算では、得られた水位変動と水平方向の流速2成分の時系列データから方向スペクトル解析により算定する必要がある。方向スペクトル解析には、3成分アレーを用いる場合に最も高い推定精度を有する最大エントロピー推定法(橋本・小舟,



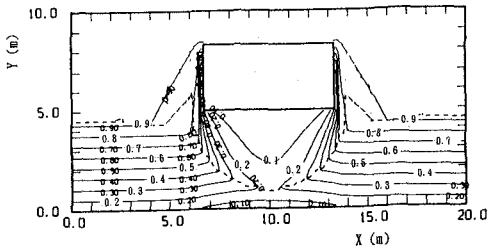
(a) 実験結果



(b) 非定常緩勾配不規則波動方程式

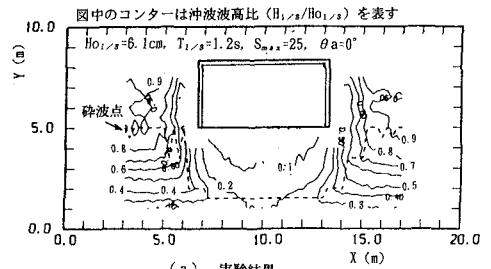


(c) 放物型波動方程式

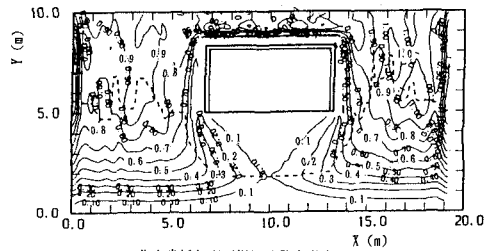


(d) エネルギー平衡方程式

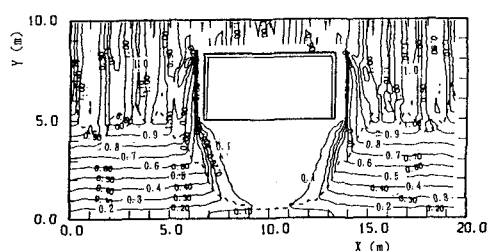
図一 直立護岸の人工島背後の 1/3 最大波高の平面分布 (多方向不規則波)



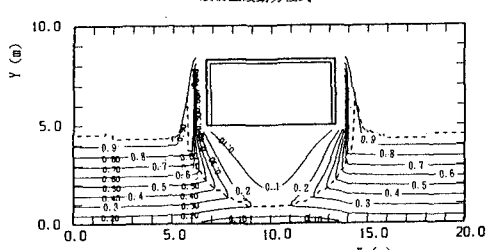
(a) 実験結果



(b) 非定常緩勾配不規則波動方程式

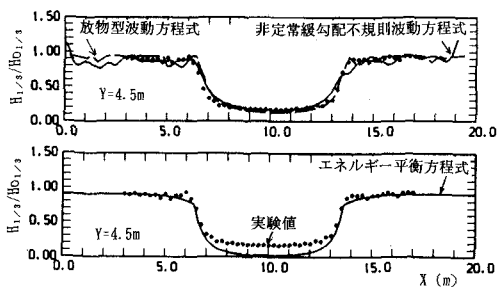


(c) 放物型波動方程式

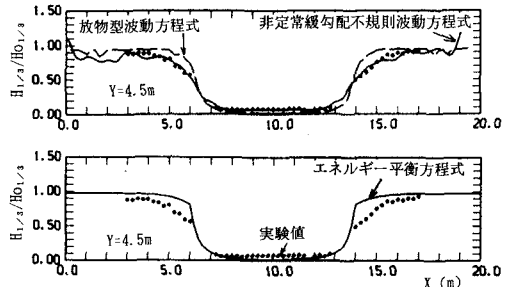


(d) エネルギー平衡方程式

図三 消波護岸の人工島背後の 1/3 最大波高の平面分布 (多方向不規則波)



図二 直立護岸の人工島背後の代表測線の比較 (多方向不規則波)



図四 消波護岸の人工島背後の代表測線の比較 (多方向不規則波)

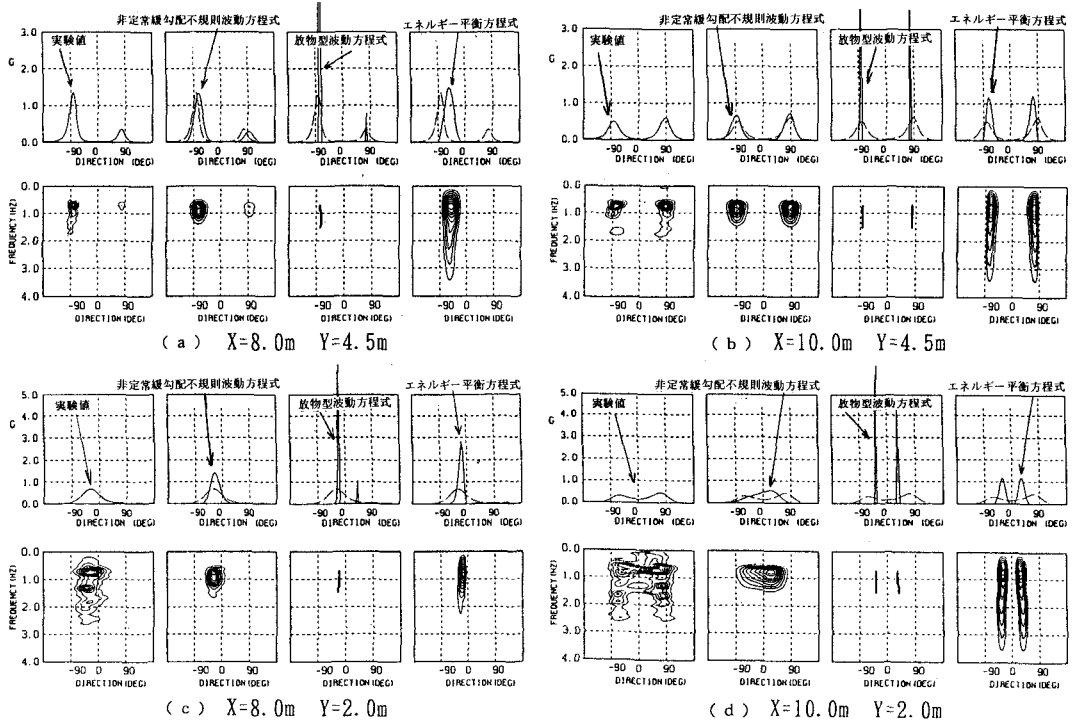


図-5 直立護岸の人工島背後の1/3最大波高の平面分布 (多方向不規則波)

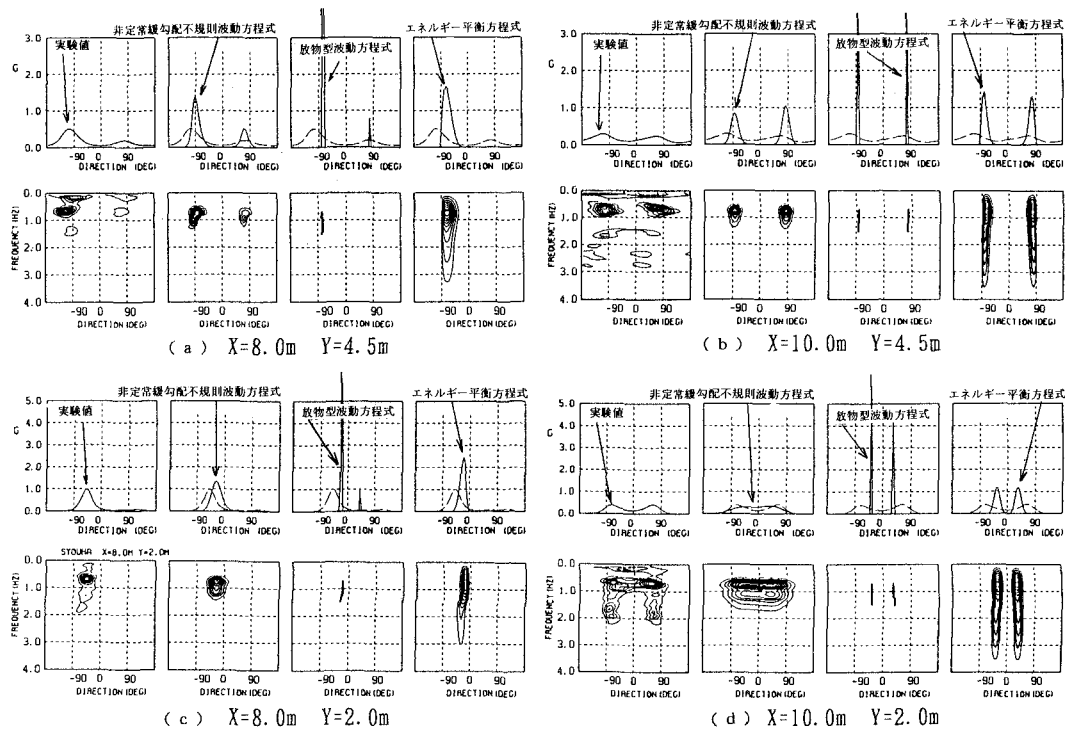


図-6 消波護岸の人工島背後の方向スペクトルの平面分布 (多方向不規則波)

上段図縦軸は方向スペクトルの周波数積分値をパワースペクトルの0次モーメント値で無次元化した値 (単位:  $rad^{-1}$ )  
 下段図は方向スペクトルのコンター図 (単位:  $cm^2 \cdot s/rad$ )

1985) を用いた。

図-5~図-6は、図-1~図-4に示した多方向不規則波の場合に対応したケースの人工島背後の代表地点における方向スペクトルの分布特性を示したものであり、図-5が人工島の沖側と側面が直立護岸の場合、図-6が人工島の沖側と側面が消波護岸の場合に対応する。図(a)と(b)が人工島直背後の砕波帯より沖側の地点に対応し、図(c)と(d)が人工島背後の砕波帯付近の地点に対応している。上段図は方向スペクトルの周波数積分値をパワースペクトルの0次モーメント値で無次元化したものであり、下段図は方向スペクトルのコンター図である。図には、実験結果および非定常緩勾配不規則波動方程式、放物型波動方程式、エネルギー平衡方程式による計算結果が併記されている。

人工島直背後の地点に対応する図(b)の実験結果によると、波向きが $\pm 90^\circ$ 付近で2つのピークが見られるが、これは人工島直背後で人工島の両端から廻り込む回折波の波動エネルギーに対応している。非定常緩勾配不規則波動方程式による計算結果は、このような双峰型の方向スペクトルとなる実験結果の特徴をよく再現している。これに対し、放物型波動方程式による計算結果は、双峰型の方向スペクトルを再現しているものの、実験結果に比べピーク値が急峻である。これは、本手法が屈折と回折効果を正確に再現できることに加えて方向スペクトルが直接算定できるため、方向スペクトル解析に伴う推定誤差の影響を受けていないことおよび計算時間の制約上から他の2種類の手法に比べ成分波の分割数が若干少ないことに起因していると推察される。また、エネルギー平衡方程式による計算結果は、数値分散が大きいためか放物型波動方程式による計算結果よりもピーク値が鈍った形状となっており、結果として実験結果に近くなっている。ただし、方向スペクトルのコンター図を比較すると実験結果よりも幾分周波数方向に間延びした分布形状となっている。人工島背後の砕波帯付近の図(d)の実験結果によると、砕波の影響により方向集中度が図(b)と比べて幾分低下している。非定常緩勾配不規則波動方程式による計算結果は実用上実験結果を概ね再現している。他の代表地点における実験結果と計算結果との対応は同様の傾向である。

## 5. おわりに

以上、多方向不規則波浪場計算法として有望視されている3種類の計算法を取り上げ水理模型実験結果との比較によりその適合性を検証した。非定常緩勾配不規則波動方程式は人工島背後の波高分布や方向スペクトルを最も精度高く再現した。しかしながら、他の手法に比べて

かなりの計算時間を要することは避けられない。放物型波動方程式を応用し人工島両端からの各々の回折波に対する波向線座標を用いて別々に計算し合成した結果に砕波を考慮する方法は、実用上十分な精度で人工島背後の波高分布を再現した。エネルギー平衡方程式は、人工島直背後では波高分布を過小評価するが、それ以外の背後領域では波高分布や方向スペクトルを再現可能である。また、磯部(1986)の砕波減衰モデルを多方向不規則波を対象とした人工島背後の回折波重合領域での砕波問題へ適用しても実用上十分な精度で砕波帯内の1/3最大波高の変化を評価できる。

本研究は電力9社と日本原子力発電(株)による電力共同研究の一部として実施したものであり、土木学会原子力土木委員会海域分科会(主査 合田良実横浜国立大学教授)、同耐波浪設計WG(主査 西村仁嗣筑波大学教授)の各位には多くの有益な御助言を賜りました。また、数値計算を実施するにあたり、西村仁嗣筑波大学教授ならびに磯部雅彦東京大学教授には、懇切丁寧な御教示を頂きました。ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- 池野正明・鹿島遼一・松山昌史・榊山 勉・窪 泰浩(1993): 人工島式発電所背後の波浪場・海浜流場に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 621-625.
- 磯部雅彦(1986): 放物型方程式を用いた不規則波の屈折・回折・砕波変形の計算法, 第33回海岸工学講演会論文集, pp. 134-138.
- 窪 泰浩・小竹康夫・横木裕宗・磯部雅彦・渡辺 晃(1992): 非定常緩勾配不規則波動方程式を用いた波浪場・海浜流場・海浜地形変化の予測モデル, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 201-205.
- 小竹康夫・磯部雅彦・渡辺 晃(1992): 非定常緩勾配不規則波動方程式の高精度化, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 91-95.
- 合田良実(1975): 浅海域における波浪の砕波変形, 港湾技術研究所報告, 第14巻, 第3号, pp. 59-106.
- 清水琢三・鶴飼亮行・原 基久・磯部雅彦(1992): 多方向不規則波の屈折・回折・砕波変形計算法の現地適用性, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 181-185.
- 土木学会海岸工学委員会編(1993): 波・構造物・地盤の調査・設計手法調査研究報告書, pp. 4-117.
- 橋本典明・小舟浩治(1985): 最大エントロピー(MEP)を用いた方向スペクトルの推定, 港湾技術研究所報告, 第24巻, 第3号, pp. 123-145.
- 平口博丸・丸山康樹(1986): 斜め入射波に対する放物型方程式の適用性の拡張, 第33回海岸工学講演会論文集, pp. 114-118.
- 渡辺 晃・丸山康樹(1984): 屈折・回折・砕波変形を含む波浪場の数値計算法, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 103-107.
- Karlsson, T. (1969): Refraction of continuous ocean wave spectra, J. Waterways and Harbors Division, Proc. ASCE, Vol. 95, pp. 437-448.