

多方向不規則波の屈折・回折・碎浪変形計算法の現地適用性

清水 琢三*・鶴飼 亮行*・原 基久*・磯部 雅彦**

1. まえがき

近年、3次元海浜変形予測モデルの現地への適用が盛んに試みられるようになってきたが、モデルの現地適用性を高めるためには、海浜流が発達し、漂砂の活発な碎波帯内を含む現地多方向不規則波浪場を精度良く再現することがまず重要である。したがって、平面波浪場計算法としては、多方向不規則波の屈折、回折、浅水・碎波変形を同時に考慮でき、なおかつ広範囲の計算が比較的短時間に可能な方法を用いる必要がある。このような平面波浪場計算法としては、現在のところ、緩勾配方程式の放物型近似による方法が最も実用的かつ精度の高い方法と考えられ、磯部(1986)により波向線座標を用いた計算法が提案されている。この方法の現地適用性については、屈折・回折領域における現地観測結果に基づき方向スペクトルレベルで検証されているが(磯部ら, 1988)、比較的単純な海底地形で、しかも静穏な波浪条件下でのデータしか得られておらず、碎波帯を含む現地適用性については十分確認されていない。

また、多方向不規則波の屈折計算法として従来より広く用いられている Karlsson (1969) のエネルギー平衡方程式による方法は、現地観測ならびに多方向不規則波を用いた水理実験により、現地の複雑な海底地形に対しても適用性がある程度確認されている(例えば、鹿島ら, 1986; 高山ら, 1991)。しかしながら、エネルギー平衡方程式には回折を表す項が含まれていないため、構造物の遮蔽による回折のみならず、球面浅瀬による波浪変形など地形による回折効果を厳密には考慮できないという欠点がある。

そこで本研究では、多方向不規則波浪場の実用的な計算法として、磯部(1986)の放物型方程式による方法と Karlsson (1969) のエネルギー平衡方程式による方法を取り上げ、浅瀬を含む複雑な海底地形で、しかも防波堤による回折域も存在する現地海岸を対象に、各モデルの現地適用性とその適用限界を現地観測データとの比較を通して検討した。また、波浪場計算法の違いが海浜流場

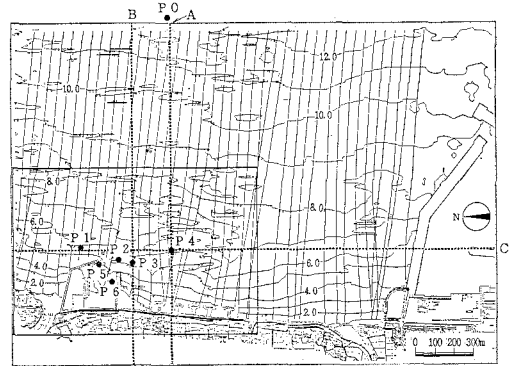


図-1 検討対象地点の海底地形

の計算結果に及ぼす影響についても検討した。

2. 検証データ

2.1 現地観測の概要

検証地点は、図-1に示す福島県富岡漁港周辺海岸で、全般的にはほぼ汀線に平行な等深線を有する海底勾配 1/70~1/100 の緩勾配海岸であるが、砂層厚が薄く、所々岩礁が露出して起伏の激しい凹凸部も存在する。図中には、調査期間中の高波浪時の平均的な有義波周期 8.6 s、波向 E6°S に対する波向線も併せて示しているが、波向線の集中・発散が顕著で、特に漁港港口の南東沖側の舌状に沖に張り出した浅瀬背後では波向線が交差するなど、極めて複雑な海底地形となっている。

現地観測は、漁港の漂砂調査の一環として周辺海岸の波浪・海浜流場の把握を目的として実施されたもので、結果の一部は既に報告されている(清水ら, 1991)。観測地点は、入射波観測地点(水深 13 m)と漁港周辺の 6 地点であり、なかでも屈折による波高増大と地形による回折が生じる浅瀬背後の P4、防波堤背後の回折領域の P5 に着目して検討した。観測は、水圧センサー付き電磁流速計と超音波波高計を用いて、1990年9月5日~10月11日の約1ヵ月間、毎偶数時に約10分間、0.5 s 間隔で実施され、その間に 3 m を越える高波浪が 2 回来襲した。

* 正会員 工修 五洋建設(株) 土木設計部

** 正会員 工博 東京大学教授 工学部土木工学科

2.2 データ処理の方法

超音波波高計のデータは、波高がおおよそ 2 m 以上の高波浪時に碎波による気泡の混入により正常なデータが得られなかったため、水圧センサーによる観測データを水面波形に変換し、水位変動データとして用いた。変換に際しては、水圧の時系列データを FFT 法により成分波に分解し、0.03~0.3 Hz の波浪成分のみを微小振幅波理論により成分波毎に水位変動に変換し、それらを再び位相を考慮して合成することにより水位変動の時系列を求めた。さらに、同時刻データが正常に取得されている場合の超音波波高計データとエネルギーが同じになるように補正した。波高、周期については、このように水圧データから変換された水位変動データを波別解析するとともに、波向は共分散法により主波向を求めた。

方向スペクトルは、最大エントロピー法 (MEP) (橋本・小舟, 1985) により推定した。また、推定された方向スペクトル $D(f, \theta)$ より式 (1) で long-crestedness パラメタ $\gamma(f)$ を周波数毎に求め、式 (2) より光易型方向関数の方向集中度パラメタ $s(f)$ を算定した。

$$\gamma(f) = \frac{\{M_{20} + M_{02} - \sqrt{(M_{20} - M_{02})^2 + 4M_{11}^2}\}^{1/2}}{\{M_{20} + M_{02} + \sqrt{(M_{20} - M_{02})^2 + 4M_{11}^2}\}^{1/2}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$s(f) = \left(\frac{1}{\gamma(f)^2} - \frac{1}{2} \right) + \left(\frac{1}{\gamma(f)^4} - \frac{3}{4} \right)^{1/2} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$M_{pq}(f) = \int_{\theta_p - \pi/2}^{\theta_p + \pi/2} D(f, \theta) \cdot k^{p+q} \cdot \cos^p \theta \cdot \sin^q \theta d\theta \quad \dots\dots\dots (3)$$

2.3 浅海域の波浪特性

浅瀬や構造物の影響が比較的少ない P3 と浅瀬による屈折ならびに回折の影響を受ける P4 に着目して、碎波を含む浅海域の波浪変形特性を検討した。検討には当地点の卓越波向で、汀線にはほぼ直に入射する E 方向のみについて検討した。図-2 は、入射波観測地点 P0 に対する波高および方向集中度パラメタ s_{max} の比と P0 の有義波高の関係を示したものである。

浅瀬背後の P4 では、波高が 2 m 以下の時には波向線の集中による波高増大が生じており、周期の長い方が屈折により波高増大率も大きくなっている。また、P3、

P4 は入射有義波高がおおよそ 2 m 以上になると碎波の影響が現れる。一方、方向集中度は、浅海域では P3 のように増大するのが普通であるが、波向線が集中する浅瀬背後の P4 では集中度の増大はほとんど認められない。このような傾向は、多方向不規則波による実験でも指摘されている (高山ら, 1991)。また、碎波の影響が現れると、P3、P4 ともに方向集中度が低下する傾向がみられる。碎波帯内で方向集中度が低下する理由は現在のところ定かではないが、線形理論を基礎とした方向スペクトルの推定理論に限界があること、また、現象的にも碎波という非線形な現象によって方向スペクトルの形状を変えないままエネルギーが減衰するわけではないことを示唆しているものと考えられる。

3. 平面波場計算法の現地検証

3.1 計算手法の概要

放物型方程式に基づく方法として、ピーク周波数・ピーク波向の成分波に対する波向線座標を用いた多方向不規則波の屈折・回折・碎波変形計算法である磯部(1986)による方法を用い、規則波と多方向不規則波の2通りに対して計算した。多方向不規則波の計算では、周波数は10等エネルギー分割、角度はピーク波向 $\pm 90^\circ$ の範囲を15分割した。磯部(1986)は不規則波の碎波流速・波速比として規則波の0.8倍を与えて碎波位置を決定しているが、本研究では実測値との比較から規則波の0.7倍とした。

また、多方向不規則波の屈折計算法として従来より広く用いられているエネルギー平衡方程式による計算法は基本的には丸山ら(1984)と同じであるが、放物型方程式による方法と同様、磯部(1986)のモデルによる碎波減衰項を考慮した。計算に当たっては、周波数は10等エネルギー分割、角度はピーク波向 $\pm 90^\circ$ を45等幅分割した。

計算範囲は、図-1に示すように、沿岸方向約 2.5 km (格子間隔 12.5 m)、岸沖方向約 1.5 km (格子間隔 10 m) である。調査期間中の入射波観測地点 P0 の方向集中度 s_{max} は平均的には 20~30 で、周期が長くなると大きくなる傾向がみられた。Bretschneider・光易型周波数スペクトルと光易型方向関数による標準スペクトルを用いた計算では s_{max} を 25 とした。

3.2 波高・波向・方向集中度の比較

検討対象期間中の卓越波向 E に対して波高段階別に3ケースに分類し、それぞれの平均有義波 (1.0 m, 8.8 s, E2°N), (1.7 m, 9.8 s, E), (2.9 m, 8.5 s, E6°S) に対して、標準スペクトルを用いた計算を行った。

図-3 は、波高 2.9 m、周期 8.5 秒に対して、図-1に示す測線 A、B における有義波高と方向集中度の変化の計算結果を示している。測線 A は浅瀬背後の P4 を、測

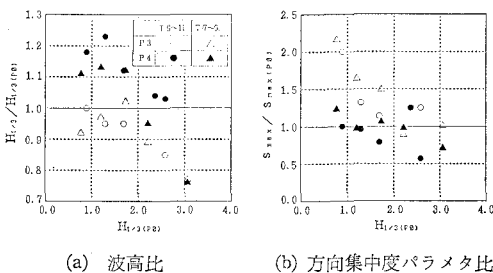
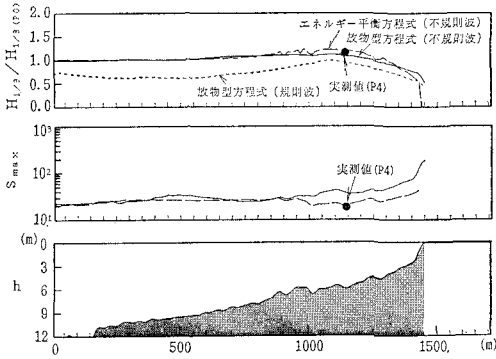
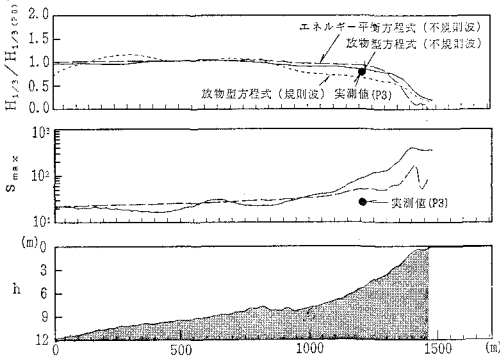


図-2 浅海での波浪変形特性



(a) 測線 A



(b) 測線 B

図-3 有義波高と方向集中度の岸沖方向変化

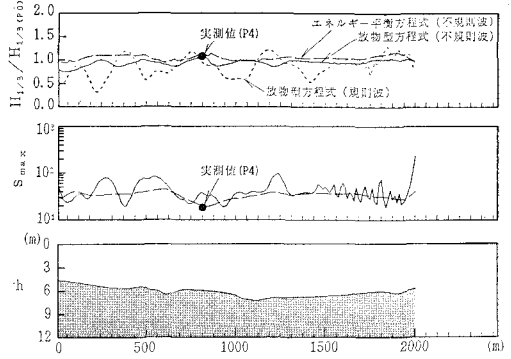


図-4 有義波高と方向集中度の沿岸方向分布

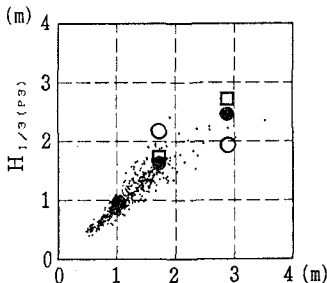
物型方程式による方法に比べて方向集中度の増加が小さく、線形理論の範囲では、放物型方程式による方法が精度の高い結果を与える。しかしながら、いずれも計算値は実測値に比べて過大評価となっており、非線形性の強い砕波帯内では計算通りに集中度は増大しないことがわかった。

図-4 は、P4 を含む測線 C 上の沿岸方向分布を示している。エネルギー平衡方程式による計算結果は、数値分散の影響が大きいこと、ならびに地形的な回折を考慮できないことから、浅瀬を含む海底地形に対しても全体的に滑らかに波高変化が小さい結果が得られている。これに対して、放物型方程式による不規則波の計算結果は比較的滑らかな波高分布でありながら、海底地形の凹凸に応じてめりはりの効いた波高分布を示している。また、放物型方程式を用いた規則波による計算では、屈折による波高の集中、発散が極端に現れており、複雑な海底地形であっても比較的なめらかな波高分布となる現地に対しては多方向不規則波の取り扱いが不可欠であることが改めて確認された。

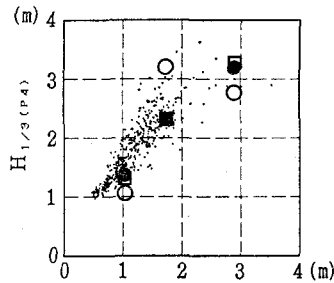
図-5 は、P0 (水深 13 m 地点) の波高と、P3、浅瀬の背後の P4 と港内の P5 の波高の関係を実測値とともに示した結果である。放物型方程式による方法は、い

線 B は P3 を含む測線であるが、エネルギー平衡方程式による計算結果は浅海域で波高をやや過大評価する傾向があるが、概ね放物型方程式による不規則波の計算結果と一致している。また、方向集中度 S_{max} が浅海波への伝播に伴い増加する傾向や浅瀬背後の P4 を含む測線 A では増大傾向にはあるものの測線 B ほど増大しない様子など、図-2 に示した観測値の傾向が再現されている。また、エネルギー平衡方程式による方法は、西村(1987)により指摘されているように数値分散が大きいので、放

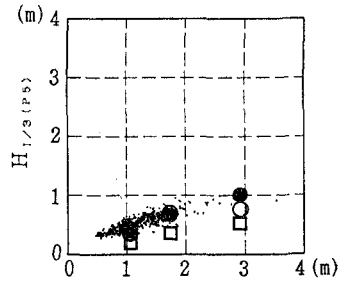
● 放物型方程式 (不規則波) ○ 放物型方程式 (規則波) □ エネルギー平衡方程式 (不規則波) ・ 実測値



(a) P3 地点



(b) P4 地点



(c) P5 地点

図-5 入射波高と各地点の波高の関係

ずれの地点も実測値との対応が良いのに対して、エネルギー平衡方程式による方法は回折を厳密に考慮できないため、漁港内の遮蔽領域では過小評価する傾向がみられるが、浅瀬背後ではさほど大きな相違はみられなかった。

さらに、図-6, 7 は、放物型方程式を用いた場合とエネルギー平衡方程式を用いた場合の全地点の計算値と実測値を比較した結果である。波向は両者で大差がないが、波高は回折領域も含めて放物型方程式を用いる方が実測値との一致は良好であり、屈折のみならず、地形による回折効果と構造物による回折のいずれも評価できることが確認された。

3.3 スペクトルレベルの比較

高波浪時の入射波観測地点 P0 の方向スペクトルを入力条件として変形計算を行い、スペクトルレベルでの比較検討を行った。入力方向スペクトルとしては、有義波高 3.5 m, 周期 8.5 s と調査期間中に波高が最大となった時刻とその2時間後のスペクトルを平均して与えた。

図-8, 9 は、それぞれ P3, P4, P5 における方向分布関数と光易型方向関数の方向集中度パラメタの周波数変化の実測値と計算値の比較を示したものである。

P3 では、放物型方程式による方法、エネルギー平衡方程式による方法は、ともに方向集中度が実測値に比べて大きく、特にピーク周波数付近での差が大きい。浅瀬背後の P4 では、いずれの方法も方向集中度が沖に比べてあまり増加しない様子が再現されており、計算値と実測値の対応は比較的良好である。また、港内の P5 では、放物型方程式による方法は回折を精度よく計算できるため、防波堤先端を見通す方向に s_{max} が1000を越え

る先鋭な方向関数が計算されているが、実測値は30程度と沖に比べれば増大しているものの、計算結果に比べればなだらかな方向分布である。このような傾向は、P5 地点に比べて水深が深く、しかも波高が小さくなる性質の波浪条件で行われた現地観測結果でも得られている(泉宮ら, 1986)。また、エネルギー平衡方程式による計算では回折を厳密に考慮できず、方向分散性のみが考慮されているが、数値的な方向分散が大きいため、回折領域でも方向集中度の小さな結果しか得られない。しかしながら、皮肉なことに、理論、数値誤差のいずれの観点からも問題のあるエネルギー平衡方程式の方が実測の方向関数とよく一致した。

3.4 海浜流場に及ぼす影響

波浪場計算の違いが海浜流場の計算結果に与える影響

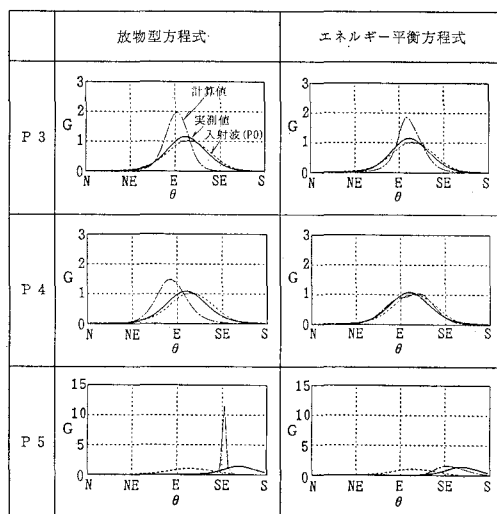


図-8 方向関数の実測値と計算値の比較

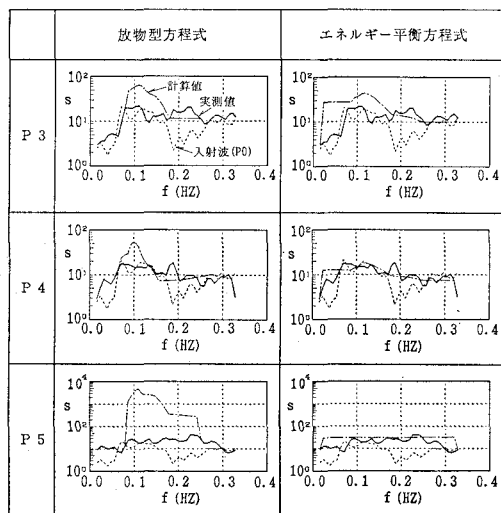


図-9 方向集中度パラメタの計算値と実測値の比較

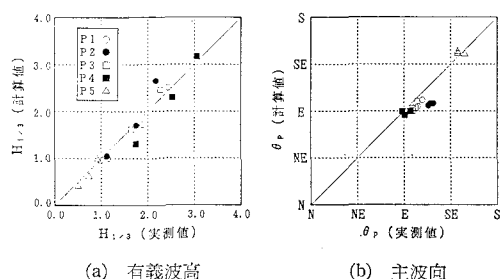


図-6 放物型方程式による計算値と実測値の比較

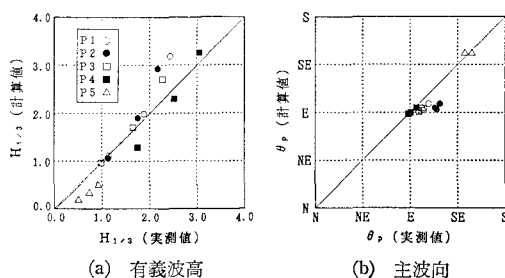
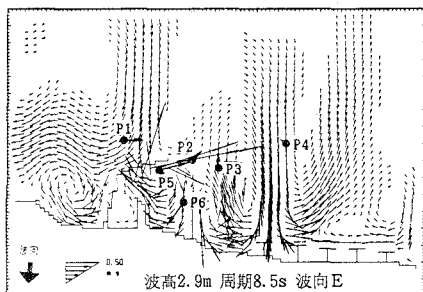


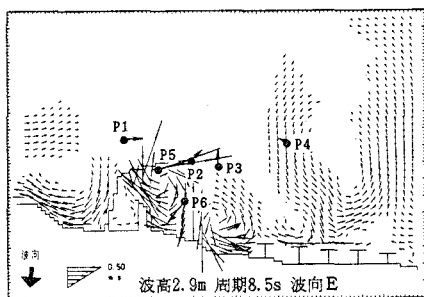
図-7 エネルギー平衡方程式による計算値と実測値の比較

についても検討した。有義波高 2.9 m, 周期 8.5 s, 波向 E6°S の条件に対して計算された放物型方程式による規則波の結果, 不規則波の結果, エネルギー平衡方程式の結果を用いて, 海浜流場を計算し, 実測の海浜流況と比較した。その結果を図-10 に示す。

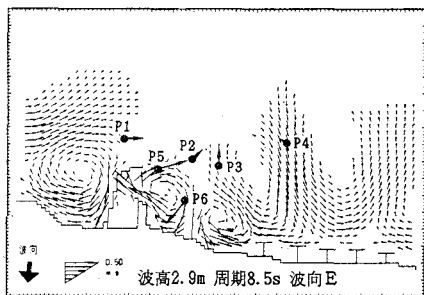
規則波の計算結果を用いると波高ならびに波向の空間変化が急激であるため, 浅瀬から岸向きの早い流れが発生し, 現地再現性はよくない。しかしながら, 多方向不規則波の取り扱いをした場合には, 放物型方程式とエネルギー平衡方程式のいずれを用いても, 基本的な流況パターンに大きな差異はみられない。



(a) 放物型方程式 (規則波)



(b) 放物型方程式 (不規則波)



(c) エネルギー平衡方程式 (不規則波)

図-10 波浪場の計算法が海浜流場に及ぼす影響

4. あとがき

多方向不規則波浪場の屈折・回折・砕波変形法として, 放物型方程式による方法とエネルギー平衡方程式による方法を取り上げ, 複雑な海底地形を有する現地海岸に対して砕波帯を含む現地適用性を検討した。その結果, 波エネルギーの変化は, 屈折による波高集中と地形による回折が生じる浅瀬や防波堤背後の回折域も含めて, 放物型方程式の現地適用性がきわめて高いことが明らかになった。また, 屈折・回折による方向スペクトルの方向集中度の変化も定性的には再現できたが, 実測値によれば砕波により方向集中度が計算値ほど増大しないことがわかった。また, エネルギー平衡方程式による方法も回折が顕著な領域を除けば実用的には適用可能であることが確認された。

また, 方向スペクトルの変化はむしろエネルギー平衡方程式の方が実測値との一致がよかったが, この一致はむしろ数値誤差による見かけ上の一致であり, 現象の本質を説明しているわけではない。したがって, 方向スペクトルレベルまで現地の現象を再現するためには, さらに現地砕波帯内の精度の高い現地観測データを蓄積していく必要があると考えられる。

参考文献

- 泉宮尊司・磯部雅彦・清水琢三・大下哲則 (1986): 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.
- 磯部雅彦 (1987): 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.
- 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. 103-112.
- 鹿島遼一・丸山康樹・平口博丸・鈴木和三郎・田中典明 (1986): 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.
- 合田良實・鈴木康正 (1975): 光易型方向スペクトルによる不規則波の屈折・回折計算, 港湾技研資料, No. 230, 45 p.
- 清水琢三・野谷 斉・坂野雅人・水流正人・杉本雅一・長野 章 (1991): 富岡漁港建設途上における港口および港内埋没, 海岸工学論文集, 第 38 巻, pp. 406-410.
- 高山知司・池田直太・小杉宣史 (1991): 多方向不規則波を用いた波浪変形模型実験, 港研報告, 第 30 巻, 第 1 号, pp. 69-121.
- 橋本典明・小舟浩治 (1985): 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, 港研報告, 第 24 巻, 第 3 号, pp. 123-145.
- 丸山康樹・平口博丸・鹿島遼一 (1984): 不規則波に対する屈折計算法の適用性, 第 31 回海岸工学講演会論文集, pp. 123-152.
- Karlsson, T. (1963): Refraction of continuous ocean wave spectra, Proc. ASCE, Vol. 95, No. WW4, pp. 437-448.