

透過・越波・回折効果を考慮した位相平均波浪変形モデルによる 捨石防波堤周辺の波浪場解析

沖 和哉¹・間瀬 肇²・酒井哲郎³

回折効果を考慮したエネルギー平衡方程式の高次差分モデルである ExEBED 波浪モデル (間瀬ら, 2001) をより実用的なモデルに改良するために, 透過および越波の効果を考慮するルーチンを組み込み, それぞれの効果について実験結果あるいは経験式と比較して検証を行った。また, Pan ら (1998) による多方向不規則波の捨石防波堤群周辺における浅海変形実験に本波浪モデルを適用し, 防波堤群前面の横断方向および防波堤間の岸沖方向の波高分布の比較を通して, 本波浪変形モデルの妥当性を示した。さらに, 防波堤背後において, 透過・越波が波高分布に与える影響を検討した。

1. はじめに

計算機性能の向上に伴い, 高精度で複雑な数値波浪予測モデルが開発・提案されている。計算モデルが複雑になると計算機の負担も大きくなり, 結果として計算に数日を要するものもしばしば見受けられる。その一方で, 計算機の能力をあまり必要としないエネルギー平衡方程式に基づく位相平均波浪モデルは簡便で使いやすく, また改良も重ねられており, 実務において広く用いられている。例えば, 間瀬ら (2001) は回折効果を考慮したエネルギー平衡方程式の高次差分モデル (ExEBED 波浪モデル) を開発し, 沖・間瀬 (2004) は, 反射を取扱う際に直交格子を用いながらも, 任意の角度で配置された構造物からの反射を正確に取扱うことができるモデルを提案している。ExEBED 波浪モデルをさらに実用的なモデルとするためには, 透過波あるいは越波の影響を考慮し, 透過性構造物周辺の波浪場推定にも適用できるように改良する必要がある。また, 複雑に構造物が配置された波浪場での検証は現状では十分ではなく, 適用例の蓄積も必要である。

本研究では, 間瀬ら (2001) の ExEBED 波浪モデルに透過・越波を考慮するルーチンを組み込み, 透過性構造物が設置された海域での多方向不規則波浪変形実験 (金澤ら, 2003) と比較してその妥当性を示す。また, Pan ら (1998) の行った捨石防波堤群の平面波浪模型実験の結果と比較し, 本モデルの適用性および透過・越波が波高分布に与える影響について検討する。

2. ExEBED 波浪モデル

定常波浪場における, 回折効果とエネルギー減衰項を有するエネルギー平衡方程式は, 次のように表される。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(v_x S)}{\partial x} + \frac{\partial(v_y S)}{\partial y} + \frac{\partial(v_\theta S)}{\partial \theta} \\ &= \frac{\kappa}{2\omega} \left[\left(C C_g \cos^2 \theta S_y \right)_y - \frac{1}{2} C C_g \cos^2 \theta S_{yy} \right] - \varepsilon_b S \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで, (x, y) は水平座標, θ は x 軸から反時計回りに測った波向角, S は波の方向スペクトル, κ は回折影響係数, ω は角周波数, C は波速, C_g は群速度, ε_b はエネルギー減衰係数である。特性速度 (v_x, v_y, v_θ) はそれぞれ

$$\begin{aligned} & (v_x, v_y, v_\theta) \\ &= \left[C_g \cos \theta, C_g \sin \theta, \frac{C_g}{C} \left(\sin \theta \frac{\partial C}{\partial x} - \cos \theta \frac{\partial C}{\partial y} \right) \right] \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (2)$$

と表される。

間瀬ら (2001) は, 高次風上差分である QUICK を用いてエネルギー平衡方程式の離散化を行った。それにより, 数値的な拡散効果の影響を抑えた上で回折項によって回折効果が考慮される。最終的な差分方程式は次のように示される。

$$\begin{aligned} & A_1 S_n^{ijk} + A_2 S_n^{i(j-2)k} + A_3 S_n^{i(j-1)k} \\ & + A_4 S_n^{i(j+1)k} + A_5 S_n^{i(j+2)k} + A_6 S_n^{ij(k-2)} \dots\dots\dots (3) \\ & + A_7 S_n^{ij(k-1)} + A_8 S_n^{ij(k+1)} + A_9 S_n^{ij(k+2)} = -B S_n^{(i-1)jk} \end{aligned}$$

ここで, $i=1 \sim I$ および $j=1 \sim J$ はそれぞれ x 軸および y 軸方向の格子番号, $n=1 \sim N$ は周波数識別番号, $k=1 \sim K$ は波向き識別番号である。方向スペクトル S_n と特性速度の定義点の配置にはスタッガードスキームを用いる。係数 $A_1 \sim A_9$ および B は, 特性速度, i, j および k の差分間隔, 波速, 群速度, 回折影響係数およびエネルギー減衰係数の関数である。

式 (3) の右辺の $S_n^{(i-1)jk}$ は既知であり, 周波数成分 n に対して沖側境界条件として任意の入射波スペクトルを与えると, $J \times K$ 個の連立方程式を解くことによって i の増加する方向に順次 S_n^{ijk} を求めることができる。また, 計算された S_n^{ijk} を用いて, 有義波高 $H_{1/3}$, 有義周

1 正 会 員 工 修 京都大学助手大学院工学研究科都市環境工学専攻
2 正 会 員 工 博 京都大学助教授防災研究所
3 フェロー 工 博 京都大学教授大学院工学研究科都市環境工学専攻

期 $T_{1/3}$, 平均波向き $\bar{\theta}$ が得られる. 以上の基礎式に基づく位相平均波浪変形モデルを ExEBED (Extended Energy Balance Equation with Diffraction) 波浪モデルと呼ぶ.

エネルギー平衡方程式による計算では, 波の進行方向に解を求めるため反射波を同時に計算することができないが, 構造物などの境界における計算値を新たに入射条件として設定して逆方向に計算することにより, 反射波を計算することができる. 直交計算格子上に任意の角度で配置された構造物からの反射を計算する場合には, 沖・間瀬 (2004) の考案したモデルを用いると反射角を正確に取扱うことができる.

3. 透過波モデル

エネルギー平衡方程式モデルでは波の伝播方向に計算を進めるため, 不透過構造物背後では波のエネルギーを0として計算する. 構造物に入射する波浪が透過する場合には, 構造物前面における計算値をもとに構造物直背後において新たに入射条件を与えることにより, 透過波を計算できるようにする. 透過条件として与えるエネルギーは, 構造物前面における計算値に透過率 K_{TR} の2乗をかけたものとする. 直交計算格子に対する構造物背後の傾きおよびその地点における透過率は, 沖・間瀬 (2001) の反射条件を与える方法と同様に各格子で設定する. 本研究では, 図-1 に示すように構造物の背後面の角度に対して直となる前面に入射する波浪のエネルギーをもとに透過波のエネルギーを求める. 本モデルでは構造物の幅については考慮していないが, 透過条件を与える地点ごとに透過率を設定できるため, 透過率にその影響を含める.

上記のモデルの妥当性を検証するために, 透過性構造物が設置された海域での多方向不規則波浪変形実験 (金澤ら, 2003) との比較を行った. 図-2 は, 実験に用いられた水深 0.3 m の一様水深地形のもと, 水槽中央部

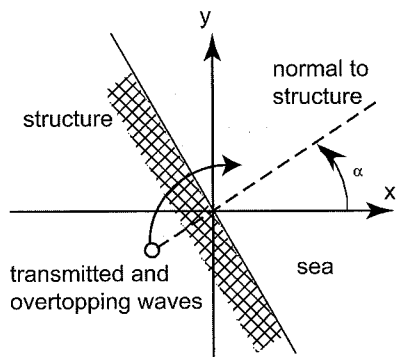


図-1 透過波および越波による伝達波

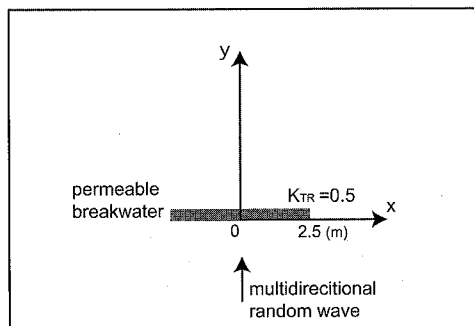
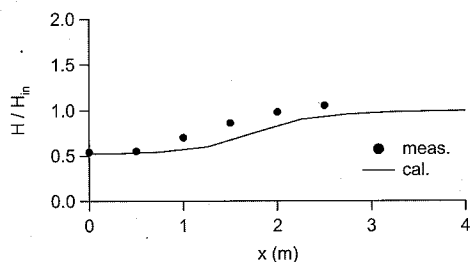
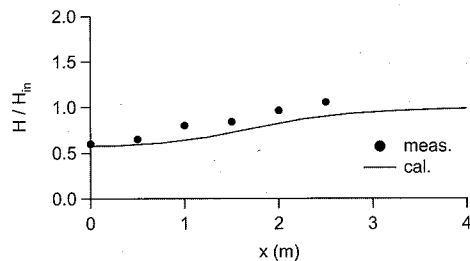


図-2 金澤ら (2003) による実験地形

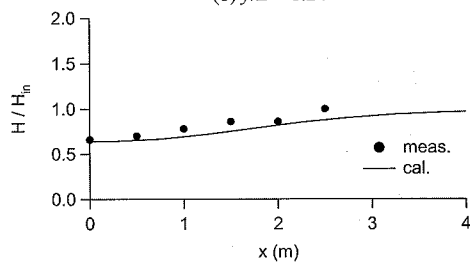
に長さ 5.0 m, 透過率 0.5 の透過性構造物が設置されている実験模型配置と座標系を示したものである. 実施されたいくつかの実験のうち, 有義波高 5.0 cm, 有義波周期 1.12s, Bretschneider-光易型スペクトル, $S_{\max}=25$ の光易型方向関数を有する多方向不規則波を用いた実験を, 本研究での検証対象とした. 入射波の主波向きは, 構造物に対して直交するものである.



(a) $y/L = 0.62$



(b) $y/L = 1.24$



(c) $y/L = 1.86$

図-3 3断面における x 方向の波高分布に関する実験結果と計算結果の比較

まず、構造物背後の x 方向の断面 ($y/L=0.62$, $y/L=1.24$ および $y/L=1.86$) における波高分布を図-3(a)~(c)に示す。●印は実験結果、実線は計算結果を表し、波高は入射波高で無次元化されている。無次元化に用いた L は、入射波の有義波周期に対応する波長 (1.61 m) である。構造物に近い断面である図-3(a)の $y/L=0.62$ においては、構造物中央後方における計算結果と実験結果の波高はよく一致している。構造物の端部に近くなると計算結果は実験結果より少し小さくなる。

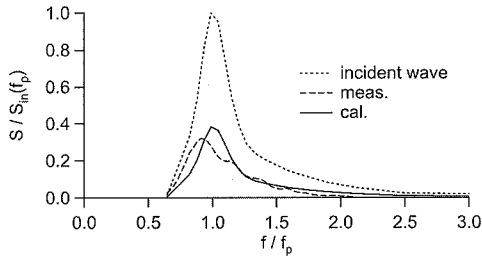
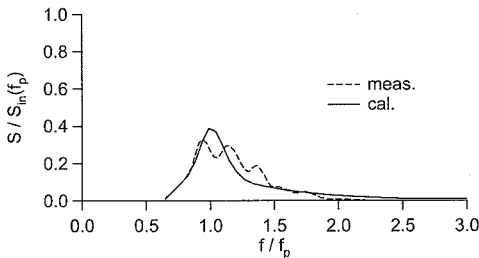
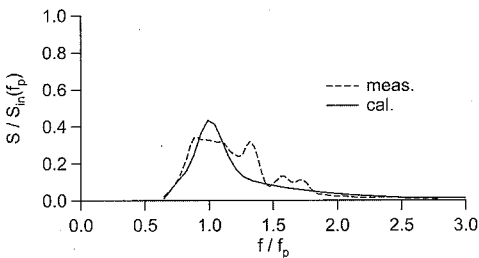
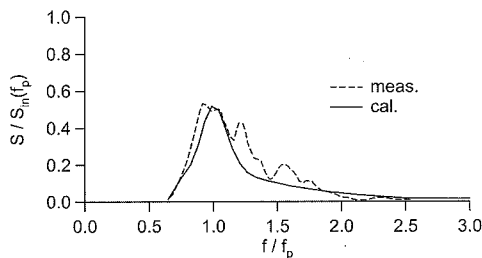
(a) $y/L = 0.31$ (b) $y/L = 0.62$ (c) $y/L = 1.24$ (d) $y/L = 1.86$

図-4 構造物背後のスペクトル

図-3(b)の断面 $y/L=1.24$ および図-3(c)の断面 $y/L=1.86$ のように構造物から離れるごとに、計算結果と実験結果の対応はよくなる。すべての断面において、 $x=0$ 付近の波高の実験値と計算値はよく一致した。

次に、防波堤中心 ($x=0$) を通る y 方向断面上の防波堤背後の3地点における周波数スペクトルの比較結果を図-4(a)~(d)に示す。横軸は入射波のピーク周波数で無次元化した周波数、縦軸は入射波の実測ピークエネルギー密度で無次元化したスペクトルである。図中の鎖線は実験結果、実線は計算結果を表す。図-4(a)の $y/L=0.31$ 地点においては、スペクトルピークについて実験結果と計算結果はややずれているが、分布形はよく一致している。なお、図中の点線は計算に用いた入射波スペクトルを無次元化したもので、透過波スペクトルは入射波スペクトルの全周波数に対して一律に減衰した分布形になっている。図-4(b), (c)の $y/L=0.62$ および $y/L=1.24$ 地点においては、スペクトルピーク値は計算値が実験値よりやや大きいものの、低周波数側での分布形はよく一致している。高周波側では実験結果と比較して計算結果はやや小さくなっている。さらに構造物の背後から離れた図-4(d)の $y/L=1.86$ 地点では、ピーク周波数を含めて実験結果と計算結果の低周波側での分布形はよく一致している。高周波側では前出の2地点と同様に、計算結果よりも実験結果の方がやや大きくなっている。

以上のように、波高分布およびスペクトルの比較を通して実験結果と計算結果は満足できる程度に一致していることから、本透過モデルの妥当性が確認された。

4. 越波モデル

鉛直2次元の場合の越波による伝達波については研究が進んでおり、比較的精度よく伝達波高を求めることができるのに対し、平面場における越波伝達波に関する研究はそれほど多くない。単一方向不規則波を対象とした研究では、平口ら (1991) および鈴木ら (1996) はその越波伝達波の周波数特性と方向分布特性について調べ、入射波の2倍、3倍周波数成分が発達すること、高周波数成分は方向分散性が強くなることを示している。多方向不規則波に関しては、東江ら (1999) は実験により平面波浪場における越波伝達波の特性について調べ、多方向性が増すほど、そして越波量が小さいほど、入射波の方向特性と越波伝達波との相関は小さくなくなっている。これらの結果を鑑み、本研究では次のような越波伝達波の周波数スペクトルモデルを用いる。

$$S_{ot}(f) = K_T^2 \{ (1 - K_T) S_i(f) + K_T S_i(f/2) \} \dots \dots (4)$$

ここで、 S_{ot} は越波伝達波の周波数スペクトル、 K_T は

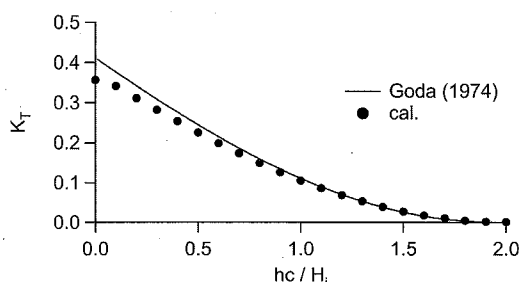


図-5 越波による波高伝達率

越波伝達率, K_T は 2 倍周波数成分への配分率, S_i は構造物前面でのスペクトルである。2 倍周波数成分を大きくするために、元のスペクトル分布に対してエネルギーの一部を高周波側へ配分する式になっている。式 (4) の $S_i(f/2)$ の項のように、入射波スペクトル関数を周波数方向に 2 倍すると、計算においてもとと取扱っている最大周波数よりも大きい周波数成分が出てくるが、通常その部分のエネルギーは小さいため無視する。 $K_T = 0.5$ とすると、鈴木ら (1996) の提案した式とほぼ同等となる。類似のモデルとして、van der Meer ら (2000) は伝達波の全エネルギーの 40% を入射波ピーク周波数の 1.5 倍から 3.5 倍の成分に等配分するモデルを提案している。一方、方向分布特性に関しては、先述の文献においては概して入射波よりも方向分散性が大きくなると示されているが、一般化するのは難しい。そのため、本研究で用いる ExEBED 波浪モデルでは、越波伝達波の方向分布特性は入射波と同じであるとする。

次式で与えられる合田 (1974) の越波伝達率 K_T を用いると、入射波高 H_i は計算過程で得られるため、伝達率の算定に必要なパラメータは天端高さ h_c のみとなる。

$$K_T = \sqrt{0.25 \left[1 - \sin \frac{\pi}{2\alpha} \left(\frac{h_c}{H_i} + \beta \right) \right]^2} \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 $\alpha = 2.2$, $\beta = 0.25$ である。透過波の与え方と同様に越波を考慮する格子を設定し、構造物前面に入射するスペクトルを用いて越波伝達波を与える (図-1)。

上記の越波モデルの検証のため、横断方向に一樣な構造物の高さを変化させ、越波伝達波計算を行った。先述の既往の研究を参考に、 $K_T = 0.4$ とした。図-5 は、構造物の天端高さに対する越波伝達率の計算結果を示したものである。構造物の天端高が小さい場合には合田の越波伝達率に対して計算結果がわずかに小さくなるが、全体的によく一致する。なお、 K_T を変化させるとそれに伴って K_T も変化したはその差はわずかであった。越波モデルの平面的な検証については比較に用いる適当な実験等が見当たらなかったため、次節において数値計算のみで評価を行う。

5. 捨石防波堤群周辺の波浪場解析

本波浪モデルを Pan ら (1998) の捨石防波堤群周辺の多方向不規則波浪変形実験に適用して、実験結果と計算結果を比較する。Pan らは、彼らの波浪モデルによる数値計算結果と平面実験結果を比較して、反射波と透過波の影響を取り入れることの必要性を述べている。この実験においては越波は生じないので、越波に関しては数値計算のみ行ってその影響を調べる。

実験に用いられた地形は、図-6 に示すように、浅海域に 5 つの捨石防波堤が設置されている。入射波高 5.0 cm, 有義波周期 1.2 s, 主波向き 20° (ただし、 x 方向に対して反時計回りを正とする) の多方向不規則波が実験では用いられた。計算では格子間隔を 0.1 m とし、反射計算には沖・間瀬 (2004) の方法を用いる。

図-7 は、防波堤群前面 $x = 16.5$ m の y 方向の波高分布に関する実験値と計算結果を比較を示したものである。●印は実験値を、実線は反射および透過を考慮した結果を、点線は反射・透過を考慮しない計算結果をそれぞれ表す。反射率および透過率については示されていないため、ここでは、反射率は 0.4, 透過率は 0.3 と与えて計

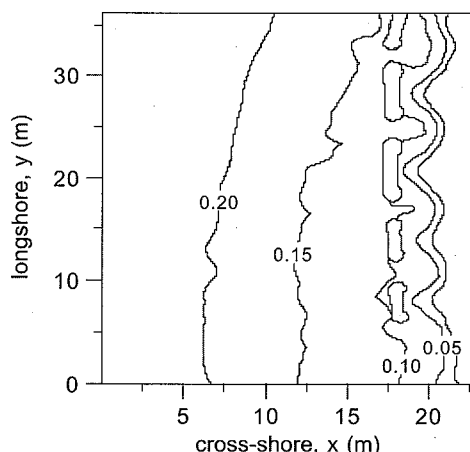
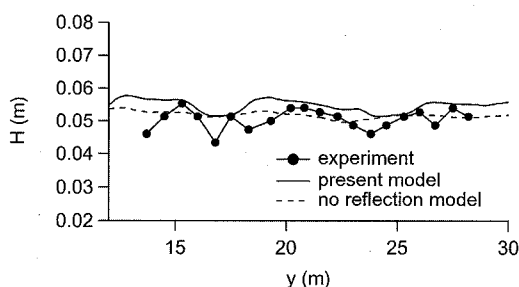


図-6 Panら (1998) による実験地形

図-7 防波堤前面 $x = 16.5$ m における y 方向の波高分布

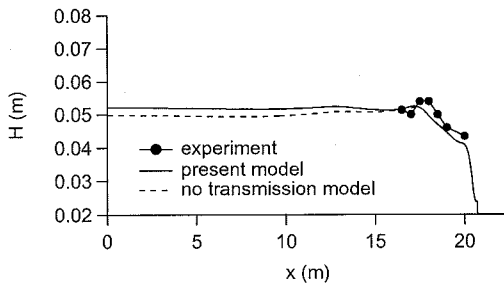
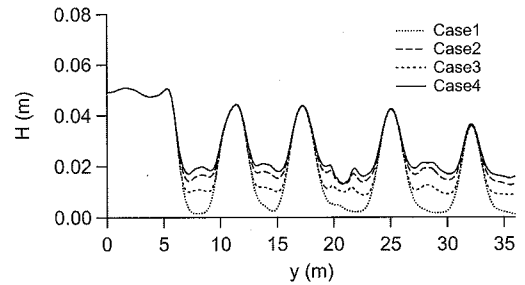
図-8 $y=17.3\text{m}$ 断面における x 方向の波高分布図-9 防波堤背後 $x=19.2\text{m}$ における y 方向の波高分布

表-1 透過波および越波伝達波に関する計算条件

Case1	透過波・越波伝達波ともなし
Case2	透過波のみ
Case3	越波伝達波のみ
Case4	透過波・越波伝達波ともにあり

算した。反射および透過を考慮しないモデルによる結果では y 方向にはほぼ一様な波高分布である。反射および透過を考慮した波浪モデルでは防波堤前面での波高が大きく、防波堤の間ではその逆になり、分布形が実験結果と一致する。図-8は防波堤間を通る断面 $y=17.3\text{m}$ における x 方向の波高分布を比較したものである。どちらの計算結果においても分布形状に大きな差はなく、ともに実験結果とよく一致している。

次に、捨石防波堤群背後において、透過・越波が波高分布に与える影響について検討する。表-1に示す4つの条件のもとで計算を行った。防波堤背後の断面 $x=19.2\text{m}$ における y 方向の波高分布を図-9に示す。越波が生じると仮定した場合の天端高さは、 $h_c=0.0$ (m)として計算した。防波堤のすき間後方においてはどの条件による結果もほぼ同じである。一方、防波堤の背後では容易に予測できるように、透過と越波の影響を両方とも考慮する Case1 では波高が大きくなり、いずれの影響も考慮しない Case4 の結果と比較してその差は大きくなる。

6. おわりに

本研究では ExEBED 波浪モデルに透過および越波を考慮するルーチンを組み込み、単純な実験と比較して検証した。その結果、どちらの影響もうまく取り入れるこ

とができた。また、捨石防波堤周辺での多方向不規則波浪変形実験と比較し、複雑な波浪場でも本モデルによって計算可能であることを示した。さらに、反射・透過および越波の影響を考慮することが重要であることがわかった。越波伝達波の方向分布特性については未検討のため、今後の検証が必要である。

参考文献

- 沖 和哉・間瀬 肇 (2004) : 位相平均型波浪予測モデルの高精度化に関する研究, 海岸工学論文集, 第 51 巻, pp. 1-5.
- 金澤 剛・長山英樹・藤原隆一・松村章子 (2003) : 透過性構造物を有する多方向不規則波浪場の計算方法, 海洋開発論文集, 第 19 巻, pp. 165-170.
- 合田良実・鈴木康正・岸良安治 (1974) : 不規則波浪実験とその特性について, 海岸工学論文集, 第 21 巻, pp. 237-242.
- 鈴木通仁・横木裕宗・藤田 龍・渡辺 晃・磯部雅彦 (1996) : 越波を考慮した港内波浪場の計算法, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp. 536-740.
- 東江隆夫・伊藤一教・織田幸伸・灘岡和夫 (1999) : 平面波浪場の越波伝達波の特性と算定法, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp. 746-750.
- 平口博丸・池野正明・井上素行・柏木洋之, 阿部光信 (1991) : 越波直後の伝達波の方向スペクトルを考慮した港内波の算定法, 海岸工学論文集, 第 38 巻, pp. 531-535.
- 間瀬 肇・沖 和哉・高山知司, 酒井哲郎 (2001) : 高精度差分による位相平均不規則波浪変形計算モデルに関する研究, 土木学会論文集, No. 684/II-56, pp. 57-68.
- Pan, S., N. MacDonald, J. Nicholson and B. A. O'Connor (1998) : Hydrodynamics Associated with Offshore Structures CRF Experiments (JUPY), Department of Civil Engineering, The University of Liverpool, Rep. No. CE/06/98, 14p.
- van der Meer, J. W., E. Regeling and J. P. de Waal (2000) : Wave transmission: spectral changes and its effects on run-up and overtopping, The 27th International Conference on Coastal Engineering, pp. 2156-2168.