

縦型傾斜式離岸堤システム周辺の波高分布と海浜流について

合田 良実*・吉崎龍太郎**・原田 智弘***

1. ま え が き

近年わが国では、海浜防護と景観保全を目的として離岸堤を没水型とした人工リーフが各地に建設されている。著者らは人工リーフの消波効率の増大、施工性の向上、水産協調型構造の開発などを目的として、先に図-1のような縦型傾斜式離岸堤を提案し、その波浪減殺効果を実験的に確認した(合田・山田, 1992; 第1報)。さらに、この構造物周辺の波浪場を放物型波動方程式による数値計算によって解析するとともに、その妥当性を水理実験で検証した(合田・高橋・高橋, 1994; 第2報)。

これらの第1, 2報では2次元水路内に縦型傾斜式離岸堤1基を設置した状態で実験・計算を行ってきた。今回は、平面水槽内に3基の縦型離岸堤を設置して斜め波を作用させ、離岸堤システム周辺の波高分布と海浜流について実験を行い、数値計算結果と比較した。

2. 実験方法

(1) 実験水槽

水槽は幅9.0m、長さ13.0mの大きさであり、端から2.7mのところに延長8.0mの多方向不規則波造波板が設置されている。水槽壁との隙間からの擾乱波を抑えるため、壁際には透過式の消波管を置いている。この水槽内に勾配1/20のモルタル斜面を、図-2のように造波板に対して15°の角度をなすように設置した。斜面先端の0.52mは取り付けの関係で勾配1/10とし、それから6.2mが勾配1/20、それから再び勾配1/10としてある。

実験では造波板前面の水平床部分の水深を0.30mに設定し、汀線を1/20勾配斜面の上端から1.0mの所に設定した。そして、この汀線を基線として6.0m四方の測定領域を定め、図-2の格子網で示すような0.5m間隔の測点を設けた。測定領域の左上隅を原点として、岸沖方向にx軸、沿岸方向にy軸を取った。なお、岸沖方向の測点間隔は正確には0.486mである。また、測定領域の両側には導波板を設置した。波の屈折状況を観察し

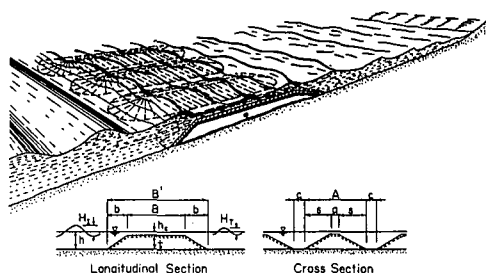


図-1 縦型傾斜式離岸堤の概念図

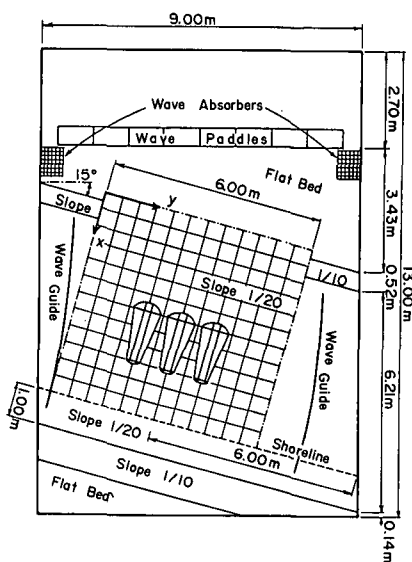


図-2 実験水槽と離岸堤模型の配置

ながら妥当と思われる曲線形を選び、これを固定してすべての実験波に使用した。

(2) 離岸堤模型

縦型傾斜式離岸堤の模型は、天端水深を $h_c=0.03$ m、天端長を $B=1.50$ m、天端幅を $a=0.10$ m とし、粒径30~50 mmの碎石で形作った。ただし、内部には粒径100~150 mmの碎石を使用した。前後面の斜面勾配は1/2、横斜面勾配は1/2.5である。この離岸堤はその天端前端を $x=3.0$ m(水深0.15 m)の地点に設置した。離岸堤の底幅は、モルタル斜面の勾配が1/20と急なため、前

* フェロー 工博 横浜国立大学教授 工学部建設学科

** 首都高道路公園

*** 横浜国立大学大学院 工学研究科

部が $A=0.80$ m, 後部が $A=0.42$ m と異なる値となった。図-2 に示すように、測定領域中央にこの模型 3 基を 1.0 m 間隔で設置した。

(3) 実験波浪

波高約 7.5 cm, 周期約 1.2 s と波高約 5.5 cm, 周期約 1.6 s の 2 種類の規則波, および有義波高・周期が規則波の諸元とほぼ等しい 2 種類の不規則波の計 4 種類の波を使用した。波高は容量式波高計, 流速は 2 成分超音波式流速計で測定した。

3. 放物型方程式による波浪場の数値計算

(1) 基本式と計算条件

波浪場の計算には, 第 2 報で述べた平口・丸山 (1986, 1987) による放物型波動方程式に基づく数値解析法を用いた。数値計算の格子間隔は $\Delta x = \Delta y = 0.10$ m とし, 沿岸方向に 85 格子, 岸沖方向に 60 格子を設定した。

水深は沖側を 0.30 m とし, 斜面部は簡単のために勾配 1/20 で一様に傾斜しているとして扱い, 縦型傾斜式離岸堤の地形を数式で入力した。

(2) 有限振幅性を考慮した波速・波数の修正

第 2 報で述べたように, 波の有限振幅効果によって波峰の前進速度が増大する現象を取り込むため, 波速 c については試行錯誤によって修正した次式を用いた。

$$c = \begin{cases} c_A [1 + 1.5(a/h)^2]^{1/2} : a < h \\ c_A [1 + 1.5(a/h)]^{1/2} : a \geq h \end{cases} \quad (1)$$

ここに, c_A は微小振幅波による波速, a はここでは波の振幅, h は水深である。 x, y 方向の波数 k_x, k_y はこの波速増大率で除すことによって有限振幅効果を導入した。なお, 第 2 報では群速度にも同一の増大率を乗じると記述したが, そうすると斜め波の計算に歪みが生じる。群速度は微小振幅波の理論値をそのまま使用した。

(3) 碎波減衰項の取扱い

碎波による波高減衰を表示する関数としては, 第 2 報で導入した次式を使用した。

$$f_D = \begin{cases} 0 & : a < \gamma h \\ \frac{K}{2h} \left[\left(\frac{a}{\gamma h} \right)^2 - 1 \right]^{1/2} & : a \geq \gamma h \end{cases} \quad (2)$$

ここに K は碎波減衰係数であって 0.125 に設定した。また, γ は碎波限界振幅と水深の比であり, 合田 (1973) の碎波指標式で水底勾配 1/30 としたときの値を使用した。

(4) Radiation Stress の計算

海浜流の数値計算に必要な radiation stress は, 各地点の振幅からエネルギー密度を求め, これとその地点の波向を用いて一般的に用いられる算定式で求めた。

(5) 不規則波に対する計算法

不規則波の変形計算には, 第 2 報で提案した波高の確率分布を考慮した重ね合せ法を用いた。すなわち, 不規則波中の波高がレーリー分布に従うと仮定し, それぞれの波高の波が規則的に変形するとみなし, 各波高の出現確率を考慮して計算結果を合成する。この際は, あらかじめ波高の分布範囲を出現確率が等しい N 個の区間に分割し, 各区間の代表波高としてその区間の確率を 2 等分する次式の値を用いた。

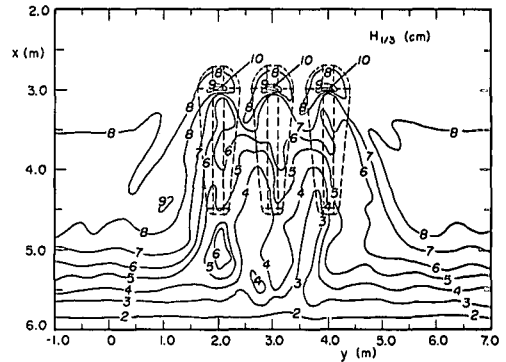


図-3 不規則波についての波高分布の計算結果: $(H_{1/3})_i = 7.5$ cm, $T_{1/3} = 1.2$ s

則波中の波高がレーリー分布に従うと仮定し, それぞれの波高の波が規則的に変形するとみなし, 各波高の出現確率を考慮して計算結果を合成する。この際は, あらかじめ波高の分布範囲を出現確率が等しい N 個の区間に分割し, 各区間の代表波高としてその区間の確率を 2 等分する次式の値を用いた。

$$H_m = 0.706(H_{1/3})_i [\ln\{2N/(2m-1)\}]^{1/2} \quad (3)$$

ここに $(H_{1/3})_i$ は入射有義波高, m は区間番号であり, 今回は $N=30$ を使用した。

各地点の波高は, 有義波高であれば上位の $N/3$ 個の計算結果の算術平均, 平均波高であれば N 個すべての計算結果の平均として求められる。なお計算の際の周期としては, 簡単のために入射波の有義波周期をすべての波高について使用した。

図-3 は縦型傾斜式離岸堤 3 基周辺の波高分布の数値計算結果であり, $H_{1/3}=7.5$ cm, $T_{1/3}=1.2$ s の場合である。離岸堤先端部で波高が急増し, 離岸堤背後が遮蔽されている状況が示されている。また, 波は図の左上方から入射しており, 離岸堤システムの右側がやや静穏になっている。

4. 海浜流の数値計算

(1) 基本式と計算条件

海浜流速 U, V および平均水位の上昇量 ζ は, 沼野・佐藤・柴山 (1989) を参考として大規模渦の効果を導入した岡安・瀬尾・柴山 (1993) による連続・運動方程式を解くことによって求めた。入力, 波浪場の計算で得られる各地点の radiation stress であり, その空間的勾配が起動力となる。計算は初期静止状態から開始し, radiation stress は緩始動方式により, タイムステップ 400 回の間に 0 から所定値まで直線的に増加させた。数値計算は差分法を用い, 空間微分は中央差分, 時間微分は前方差分である。空間格子は波浪場と同一の 10 cm 間隔の正方形である。計算時間間隔は $\Delta t = 0.05$ s とした。

底面摩擦項は海浜流と底面水粒子速度との合成流速を用いて計算するようになっており、摩擦係数は $C_f=0.01$ を使用した。なお、海浜流と波との干渉は考慮していない。水平拡散項のうちの渦動粘性係数については、Longuet-Higgins (1970) が導入した $N=0.016$ の無次元定数を使用している。

(2) 流速の収束条件と境界条件

数値計算は、与えられた radiation stress の空間的勾配に対応する流速と平均水位上昇量が平衡状態に達するまで繰り返される。この収束の判定は、全計算点における流速の1タイムステップ前との差がある限界値以下になることとし、当初は U, V の両者とも 0.025 cm/s の収束限界値を設定した。しかし、この条件では一様勾配斜面に波が直角入射する条件において流速が0とならないうちに収束と判定されてしまい、平均水位上昇量も沿岸方向に変動していた。このため、試行錯誤によって収束条件を 0.001 cm/s と厳しく設定せざるを得なかった。空間格子の大きさとタイムステップの間隔との選定に起因するものかも知れないが、理由については不明である。この厳しい収束条件の結果として、今回の実験に対応する条件での数値計算は3000~5000ステップを要した。特に離岸堤システムに規則波を入射させたときには、30,000ステップの計算でも収束しなかった。これは離岸堤先端部で radiation stress の勾配が非常に大きくなるためと考えられる。不規則波の場合には、空間的平滑化によって収束条件を満足することができたと思われる。

側方境界条件は、実験において設置した導波板の位置で流速を0とする固定壁の条件である。この固定壁の条件は、長方形の計算領域の中に人為的に流速0の格子を設定することで導入した。

(3) 海浜流の数値計算結果

図-4は、離岸堤システム設置前の斜め入射不規則波 ($(H_{1/3})_I=7.5 \text{ cm}$) による海浜流の数値計算結果である。導波板によって水域が区切られているため、一様な沿岸流は $x=2.0\sim 4.0 \text{ m}$ の範囲に限定されている。また、 $x=5.0 \text{ m}$ の線の右側には反時計回りの循環流が形成されてしまっている。導波板に対応する固定境界の形状を微修正してもこの循環流を消すことができなかった。沿岸流は汀線から 0.5 m 前後 (水深約 2.5 cm) で最強となり、流速 19.0 cm/s である。合田・渡辺 (1990) の沿岸流の不規則波モデルと比べると、最大流速の出現地点が大幅に汀線に近づいている。これは離岸堤を設置しない場合の実験でも確認されており、水域の幅が狭いために海浜流が反時計回りに強制的に循環させられることによると考えられる。ただし、実験での最大流速は 10 cm/s 程度であり、これを合致させるためには底面の摩擦係数を割増す必要がある。

図-5は離岸堤3基設置時の海浜流の状況であり、波は図-4と同一である。離岸堤の天端上では強い岸向きの流れが発生し、流速は 50 cm/s を超えるところがある。天端上の水深 3 cm に対する長波の波速は 54 cm/s であり、計算上はこの限界値に達している。離岸堤システムの設置によって流況は複雑なものとなり、離岸堤左 (上手側) の時計回りの循環流を始めとして、幾つものセルが形成されている。ただし、実験では上手側の循環流などは観察されていない (後出の図-11, 12 参照)。

図-6は、不規則波による平均水位上昇量の計算結果の1例である。波浪条件はこれまでと同じであり、縦横の縮尺比は図-3と同じである。離岸堤先端の波高増大箇所でも水位が局所的に低下し、その少し岸側で水位がわずかに上昇している。傾向としては離岸堤天端上で水位がやや低く、離岸堤間の水域でやや高くなっている。 $y=5.0 \text{ m}$ 付近に平均水位が急変する線が岸沖方向に伸びているのは、図-4, 5に見られる離岸堤右 (下手側) の循環流との潮目に相当する。なお、平均水位上昇量は分布形としては物理現象を再現していると思われるものの、絶対値としては過小である。一様勾配斜面の場合でも汀線で 1.7 mm の上昇にとどまっていた。

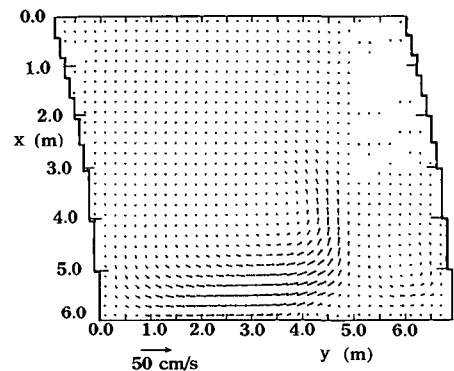


図-4 一様勾配斜面での不規則波による海浜流の流況図：
($H_{1/3}$)_I = 7.5 cm, $T_{1/3}$ = 1.2 s

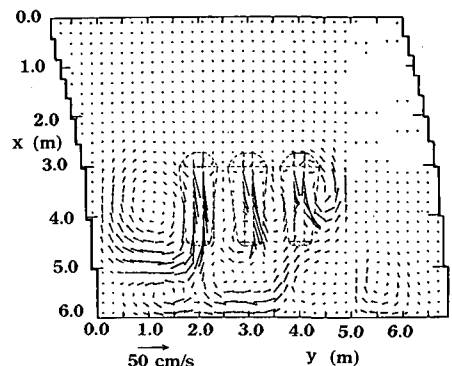


図-5 離岸堤システム周辺の海浜流の流況図： $(H_{1/3})_I=7.5 \text{ cm}$, $T_{1/3}=1.2 \text{ s}$

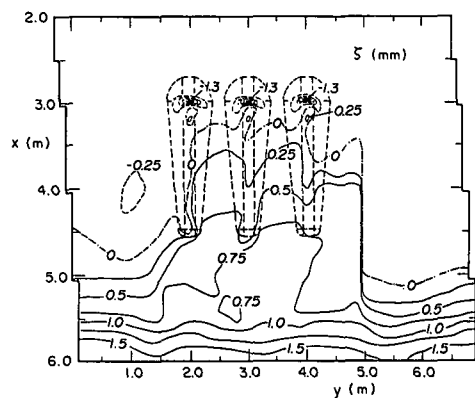


図-6 不規則波による平均水位上昇量の計算結果：
 $(H_{1/3})_t = 7.5 \text{ cm}$, $T_{1/3} = 1.2 \text{ s}$

5. 実験と数値計算の比較

(1) 波高分布

図-7~10は、離岸堤3基設置時の波高分布の実験値と計算値を比較したものである。図-7, 8は $H_{1/3} = 7.5 \text{ cm}$, $T_{1/3} = 1.2 \text{ s}$ の不規則波の場合、図-9, 10は $H_{1/3} = 5.5 \text{ cm}$, $T_{1/3} = 1.6 \text{ s}$ の場合である。岸沖方向の波高分布は、左側と中央の離岸堤の間の水域 ($y = 2.5 \text{ m}$) の縦断測線のものであり、沿岸方向は離岸堤システム背後 ($x = 4.75 \text{ m}$) の横断測線のものである。

波高分布の数値計算結果は実験で得られた値とかなりよく一致している。ただし、図-8の $H_{1/3} = 7.5 \text{ cm}$ の沿岸方向の波高分布は離岸堤システムの外側で過大な値を与えている。ここでは水深が6.25 cmであり、勾配1/20斜面における不規則波の碎波変形による有義波高としては5.3 cm程度のはずである。波浪場の数値計算では、第2報で述べたように離岸堤による波高減衰を主として定数などを調整したため、一様勾配斜面における不規則波の碎波変形のキャリブレーションが未調整の段階である。今後、さらに改良を行う予定である。

(2) 海浜流の分布

図-11, 12は、離岸堤周辺の流況に関する実験値と計算値の比較である。流速の数値計算は完全には収束していないが、30,000ステップで打ち切った結果である。図-11は $H = 5.5 \text{ cm}$ の規則波の場合であり、図-12は $H_{1/3} = 7.5 \text{ cm}$ の不規則波の結果である。実験では、離岸堤天端の水深が小さいために波の谷の時に流速計のセンサー部が干出し、測定不能であった。しかし、岸向きの強い流れは観察されており、計算結果を裏付けていた。

離岸堤の間の水域には沖へ向かう離岸流があり、これは実験、計算とも同じである。この離岸流の絶対値は15 cm/s内外であり汀線近傍の沿岸流速よりもやや小さい。

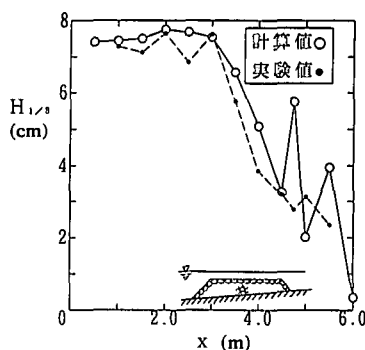


図-7 不規則波の岸沖方向の有義波高分布 ($y = 2.5 \text{ m}$):
 $(H_{1/3})_t = 7.5 \text{ cm}$, $T_{1/3} = 1.2 \text{ s}$

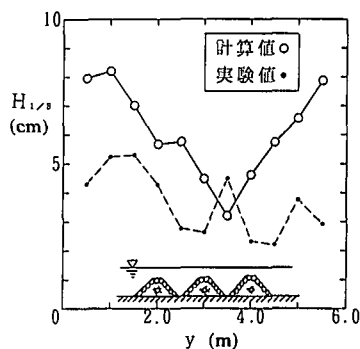


図-8 不規則波の沿岸方向の有義波高分布 ($x = 4.75 \text{ m}$):
 $(H_{1/3})_t = 7.5 \text{ cm}$, $T_{1/3} = 1.2 \text{ s}$

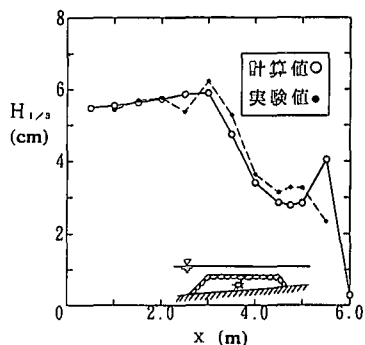


図-9 不規則波の岸沖方向の有義波高分布 ($y = 2.5 \text{ m}$):
 $(H_{1/3})_t = 5.5 \text{ cm}$, $T_{1/3} = 1.6 \text{ s}$

離岸堤システム周辺の海浜流を規則波と不規則波とで比較すると、エネルギー的にはほぼ同等の波浪であるが、規則波の方が全体的に流速が大きくなっている。これは規則波では radiation stress の場所的变化が大きく、その勾配が強まるためと考えられる。

(3) 離岸堤連続設置時の検討

図-13は、実験水槽の水域内に縦型傾斜式離岸堤7基を設置した状態を想定して海浜流を計算した結果である。図-4の一様勾配斜面の場合に比べて沿岸流速の最大値がやや岸側に寄っているが、流速値としてはあまり

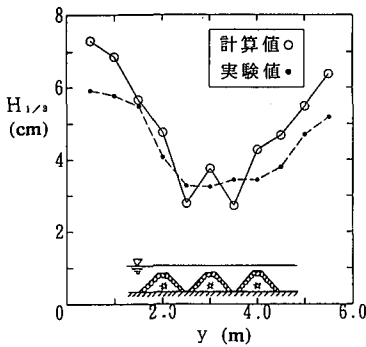


図-10 不規則波の沿岸方向の有義波高分布 ($x=4.75$ m):
($H_{1/3}$)_I=5.5 cm, $T_{1/3}$ =1.6 s

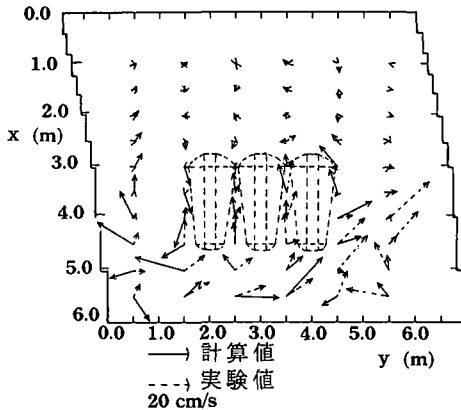


図-11 規則波による離岸堤周辺の海浜流速の実験値と計算値の比較: $H=5.5$ cm, $T=1.6$ s

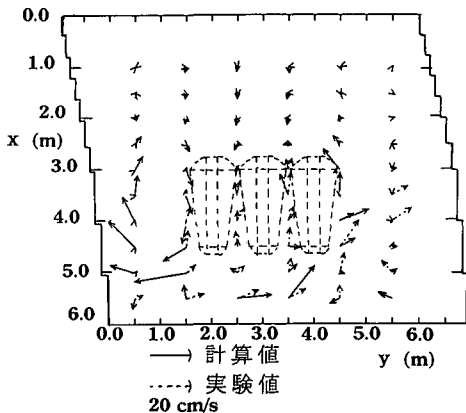


図-12 不規則波による離岸堤周辺の海浜流の実験値と計算値の比較: ($H_{1/3}$)_I=7.5 cm, $T_{1/3}$ =1.2 s

変わりがない。ただし、波高は離岸堤設置前と比べて大幅に減少しているの、底質を攪乱し浮遊させる力は衰えており、海浜保全機能は高いものと考えられる。

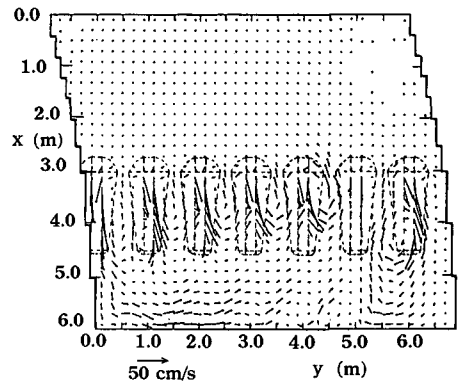


図-13 離岸堤7基設置時の海浜流の流況図: ($H_{1/3}$)_I=7.5 cm, $T_{1/3}$ =1.2 s

6. むすび

これまでの第1, 2報が縦型傾斜式離岸堤1基のみの実験であったのに比べ、今回は平面的な波浪変形および海浜流の状況について実験および数値計算によって検討することができた。特に不規則波に対する数値計算においては、比較的簡単な確率モデルを導入したにもかかわらず、実験値とかなり整合する結果を得ることができた。数値モデルの細部については今後改良すべき点が残されているが、縦型傾斜式離岸堤の水理機能の基礎的検討には十分に適用可能であると考えられる。

なお、本研究の一部は文部省科学研究費補助金（一般 A 07405024）によるものであることを付記する。

参 考 文 献

- 岡安章夫・瀬尾貴之・柴山知也 (1993): 碎波による運動量輸送を考慮した海浜流の準3次元数値モデル, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 251-255.
- 合田良実 (1973): 防波堤の設計波圧に関する研究, 港湾技術研究所報告, 第12巻, 第3号, pp. 31-69.
- 合田良実・高橋真介・高橋栄司 (1994): 放物型方程式による縦型傾斜式離岸堤周辺波浪場の解析, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 986-990.
- 合田良実・山田晶子 (1992): 屈折効果を利用した縦型傾斜式離岸堤の水理特性, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 566-570.
- 合田良実・渡辺則行 (1990): 沿岸流公式への不規則波モデルの導入について, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 210-214.
- 沼野祐二・佐藤慎司・柴山知也 (1989): 海浜変形数値シミュレーションにおける浮遊砂の移流過程と undertow の効果, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 395-398.
- 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回海講論文集, pp. 114-118.
- 平口博丸・丸山康樹 (1987): 斜め入射波に対する波浪変形計算法—新しい放物型方程式の提案—, 電力中央研究所報告, U 86045, 23 p.
- Longuet-Higgins, M. S. (1970): Longshore currents generated by obliquely incident sea waves, 2, J. Geophys. Res., Vol. 75, No. 33, pp. 6790-6801.