

構造物周辺における準 3 次元海浜流モデルの適用性に関する研究

黒岩 正 光*・野田 英 明**・中 嶋 孝 昌***・森 山 貴 之****

1. はじめに

沿岸域における波浪や海浜流の予測は、構造物設置に伴う海浜変形、水質や生態系などの環境変化を予測するうえでも重要である。近年、計算機の発達と研究成果の蓄積により、実験室ならびに現地レベルを問わず、容易に予測が可能となってきた。波浪場は、不規則波であってもかなりの精度で再現されるようになってきたが、海浜流場の計算は検討の余地が多々残されている。従来、海浜流場の予測には水深方向に断面平均した平面 2 次元モデル (2DH モデル) が適用されているが、戻り流れが顕著に発生する場合は再現性が悪く、実測値と大きく異なることが確認されている (清水ら, 1992)。また、離岸堤のように遮蔽域に発生する循環流場の予測は精度が低く、清水ら (1995) は水平拡散項の渦動粘性係数あるいは摩擦項の与え方について検討している。このように、従来の 2DH モデルでは再現出来ない場合があるのが現状である。

特に、砕波帯内では、戻り流れの影響で鉛直方向に螺旋状の分布を有することが確認されており、海浜流の 3 次元性が重要視され、理論あるいは数値計算による準 3 次元モデル (Q-3D モデル) が提案されている (例えば、Svendsen ら, 1989; Sanchez ら, 1992; 岡安ら, 1993 など)。しかしながら、これらのモデルのほとんどは、構造物の無い単純な平行等深線を有する沿岸域に対してのみ適用されている。最近では、Pechon ら (1994) によって離岸堤背後の循環流の準 3 次元計算が試みられているが、実験値や現地観測結果との比較はなく、適用性については検討されていない。著者ら (1997) も、準 3 次元海浜流場の数値モデルを提案し、鉛直 2 次元の定常流速場 (戻り流れ) および沿岸流場への適用性について検討した。さらに、構造物 (離岸堤) 背後の循環流場に対しても数値計算を試みたものの構造物周辺の 3 次元特性が不明確であるためモデルの適用性については明らかにされていない。

本研究は、構造物 (離岸堤) 周辺の海浜流場の 3 次元特性を模型実験によって明かにし、著者ら (1997) が提案した準 3 次元海浜流モデルの構造物周辺における海浜流場に対する適用性について検討しようとするものである。

2. 準 3 次元海浜流場数値モデル

黒岩ら (1997) によって提案された準 3 次元数値モデルは、波と流れの相互干渉は考慮せず、まず、渡辺ら (1984) の砕波減衰を考慮した非定常緩勾配方程式を用いて流れ場の計算に必要な諸量を算定し、後述する運動方程式ならびに連続式を用いて 3 次元的な海浜流場を数値的に求める方法である。詳細な計算方法は黒岩ら (1997) に譲るとし、ここでは概略だけを述べる。

2.1 運動方程式および連続式

沖から岸向きに x 軸、沿岸方向に y 軸、静水面から鉛直上向きに z 軸に座標系を取り、Svendsen ら (1989) と同様な手法に従って、3 次元の N-S 方程式から、以下のような運動方程式および連続式を導くことができる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + W \frac{\partial U}{\partial z} \\ = -g \frac{\partial \bar{\xi}}{\partial x} - \frac{\partial S_{xx}}{\partial x} - \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_h \frac{\partial U}{\partial x} \right) \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_h \frac{\partial U}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_v \frac{\partial U}{\partial z} \right) \dots\dots\dots (1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + W \frac{\partial V}{\partial z} \\ = -g \frac{\partial \bar{\xi}}{\partial y} - \frac{\partial S_{yx}}{\partial x} - \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_h \frac{\partial V}{\partial x} \right) \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_h \frac{\partial V}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_v \frac{\partial V}{\partial z} \right) \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \dots\dots\dots (3)$$

$$\frac{\partial \bar{\xi}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{U}(\bar{\xi} + h)}{\partial x} + \frac{\partial \bar{V}(\bar{\xi} + h)}{\partial y} = 0 \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 U 、 V および W はそれぞれ岸沖、沿岸および鉛直方向における定常流速、 g は重力加速度、 $\bar{\xi}$ は平均水位である。また、式 (1) および (2) の右辺第 2 項お

* 正 会 員 工 修 鳥取大学助手 工学部土木工学科
** フェロー 工 博 鳥取大学教授 工学部土木工学科
*** 学生会員 鳥取大学大学院 工学研究科土木工学専攻
**** りんかい建設株式会社

よび第3項の S_{xx} , S_{xy} , S_{yx} および S_{yy} は波の存在による過剰運動量フラックス項 (radiation stress に相当する項) であり, 構造物による反射や回折による波の重合を考慮した渡辺ら (1982) による方法を適用する。 ν_h および ν_v はそれぞれ水平方向および鉛直方向の渦動粘性係数である。 ν_h の算定には, 乱れの代表スケールを汀線からの離岸距離で表す Longuet-Higgins (1976) の評価式を適用するが, 構造物が存在する場合にはそのまま適用すると構造物近傍において過少評価するため, それを改善するために, 清水ら (1989) による方法, すなわち, 構造物近傍では代表渦径を構造物からの距離を取って計算を試みた。 ν_v の評価方法についてはいくつかの式が提案されているが, ここでは簡単のため, 鉛直方向に一定とした波高と波速の関数として表される土屋ら (1986) の式を採用した。

2.2 境界条件および計算方法

運動方程式から海浜流場の鉛直分布を解く際に, 水面および底面における境界条件の与え方が重要である。水面境界には砕波することにより生じる surface roller の影響を考慮したせん断応力を波向き方向に与えた。底面境界には波と流れの相互干渉を考慮したせん断応力を与えた。底面における鉛直方向流速は簡単のため $W=0$ とする。

運動方程式の数値解法は, Koutitas ら (1980) の方法に従い, 水平方向には有限差分法, 鉛直方向には有限要素法を適用し, 時間軸方向の積分には Fractional Step 法を採用した。

3. 離岸堤背後の循環流に関する水理実験

3.1 実験方法および実験条件

図-1 に示すように実験は長さ 12 m, 幅 5.0 m, 高さ 0.6 m の小型平面水槽を用いて行った。水槽の一端には 1/10 勾配の鋼製斜面を設置し, 一様水深部は 30 cm とした。波が水槽側壁の消波工の影響を受けないように実験領域を幅 3 m に導波板で仕切り, 水深 15 cm ($x=150$ cm) の位置に幅 1 m の離岸堤模型を設置した。離岸堤前面には碎石による消波工を施し, 反射波を 50% 程度とした。一方, 離岸堤背面は完全反射とした。なお, 図中に示す○印 (a~h) は計算結果と実験結果を比較するための代表測点を表す。

実験条件は表-1 に示すとおりで, 周期を 1.0 s と一定にし, 波高のみを変化させ, 2 種類の砕波形式のもとで行った。波高は容量式波高計を, 定常流速は水平 2 成分電磁流速計を用いて測定した。定常流速は 100 波分の水粒子速度の時系列データを時間平均することによって抽出した。測定点は, 主に離岸堤背後において沿岸方向, 岸沖方向に 20 cm 間隔に設置し, 水深方向には底面上 2

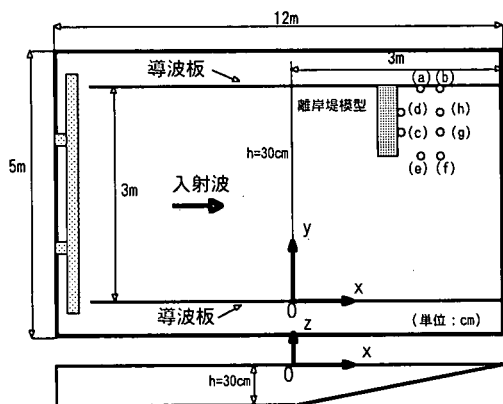


図-1 実験水槽の概要と座標系

表-1 実験条件

CASE	H (cm)	T (s)	H_0 (cm)	H_0/L_0	Breaker type
1	6.9	1.0	7.53	0.048	Plunging.
2	11.25	1.0	12.25	0.079	Spilling.

cm の位置から 2 cm 間隔で 1~5 点配置した。なお, 測定限界は水深 5 cm 程度であり, 離岸堤背後の砕波帯内の測定は困難であった。

3.2 循環流の実験結果の一例

図-2(a) および (b) はそれぞれ CASE 1 および 2 の底面上 2 cm における定常流速の平面分布を表したものである。図中に示す実線は目視による砕波線を表す。CASE 1 では, 構造物遮蔽域特有の循環流が発生しているのがわかる。循環流の中心は $x=180$ cm, $y=250$ cm 付近にあることがわかる。約 30 cm/s 程度の沖向きの定常流速と 20 cm/s 程度の沿岸流速が発生している。一方, CASE 2 では閉じた循環流ではなく, 離岸堤に沿った背後の定常流は開口部において流向を岸向きに変えず, やや沖向きに流出している。定常流速の値は CASE 1 と比較して大きく, 40 cm/s 以上の岸沖ならびに沿岸方向の定常流速が発生している。CASE 1 と 2 の実験条件の相違は入射波高のみで, 開口部における砕波点の位置がどこに存在するかによって流れのパターンが異なるようである。すなわち, CASE 2 における砕波点は CASE 1 のそれと比較して沖側に位置し, 離岸堤の設置離岸距離にほぼ等しく, 離岸堤の設置位置が砕波帯内に存在する場合は循環流のパターンが異なるようである。

4. 数値モデルの検討

4.1 計算条件

計算は図-1 に示したように, 岸沖方向に x 軸, 沿岸方向に y 軸を取って 3 m × 3 m の範囲で行った。数値計算の格子間隔 Δx および Δy は波浪場では 2.5 cm に, 海浜

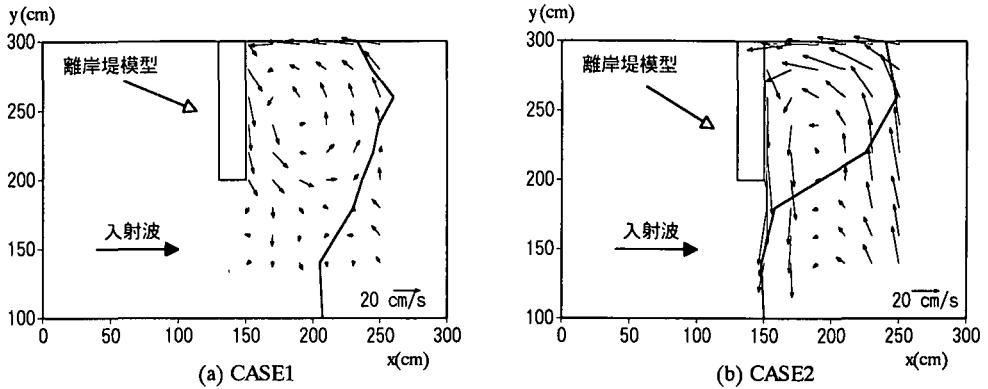


図-2 実験による離岸堤背後の定常流速分布 (底面上2 cm)

流場ではその2倍の5.0 cmとした。時間間隔 Δt は計算の安定性を考慮して、0.01 s とし、計算の時間ステップ数は10000回とした。

4.2 波高分布

図-3は離岸堤周辺における波高の岸沖分布の計算結果と実験結果を比較した一例であり、CASE 1の結果を表している。この図から、線形理論で、なおかつ流れの相互干渉を考慮せずとも波高分布に関しては実験結果をほぼ再現出来ることがわかる。計算による砕波点は波の水粒子速度の水平成分と波速との比が0.45を超えると砕波したものとした。

4.3 海浜流の平面分布

図-4(a) および (b) はCASE 1の波浪条件のもとで行った平均水位面および底面における海浜流場の計算結果の一例である。図中に示す実線は緩勾配方程式から得られた砕波点を表したものである。これらの図から砕波帯内では、平均水位面と底面における定常流速は流向が異なり、螺旋状の鉛直分布が再現されているのがわかる。特に、開口部では冲向きの戻り流れが発生している。ま

た、離岸堤背面においても水面と底面では流向が異なり、螺旋状の鉛直分布であることがわかる。

図-5(a) および (b) はそれぞれ、CASE 1および2における計算結果で、底面から2 cmの高さにおける定常流速の分布を表したものである。これらの図からCASE 1と2の結果を比較すると、両ケースとも循環流が再現されているが、離岸堤背面において流向が異なっているのがわかる。さらに、前出しの図-2に示した実験結果と比較すると、CASE 1の計算結果は実験結果をほぼ再現しているが、CASE 2の計算結果は開口部および離岸堤背面において実験結果と異なることがわかる。

4.4 海浜流の鉛直分布

図-6(a)～(h) はCASE 1における海浜流の鉛直分布の計算結果と実験結果を比較したものである。図(a)～(h)は図-1中に示した測点に対応するものである。これらの図から側壁付近の(a) および (b)、開口部付近の(e) および (f)、ならびに、堤内中央部の(g) および (h) 点では実験から得られた定常流速 U および V 両者とも鉛直方向にほぼ一定であり、計算結果は実験結果とほぼ一致する。一方、離岸堤背面の(c) および (d) 点では、底面付近の定常流速 V の実験値は水面付近のそれと比較して大きく、また、 U の実験値は水面と底面付近の流向が反転しており、鉛直方向に螺旋状の分布を有することがわかる。次に、計算結果から、 U の計算値は、実験値と同様に水面と底面における流向が反転しており、実験結果を良く再現しているのがわかる。一方、 V の計算結果は実験結果を過大評価しているが、底面付近の流速は水面付近のそれに比較して大きく、実験結果と同様な傾向を示していることがわかる。図-7はCASE 2の同様の結果を示したものである。CASE 1の結果と同様に、側壁付近の(a) および (b)、堤内中央部の(g) および (h) 点では実験から得られた定常流速 U および V は鉛直方向にほぼ一定であり、計算結果は実験値を良く再現しているのがわかる。離岸堤背面の(c) および (d) における V

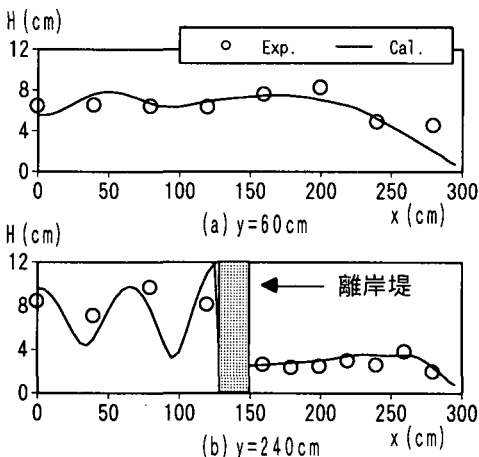


図-3 岸沖方向の波高分布 (CASE 1)

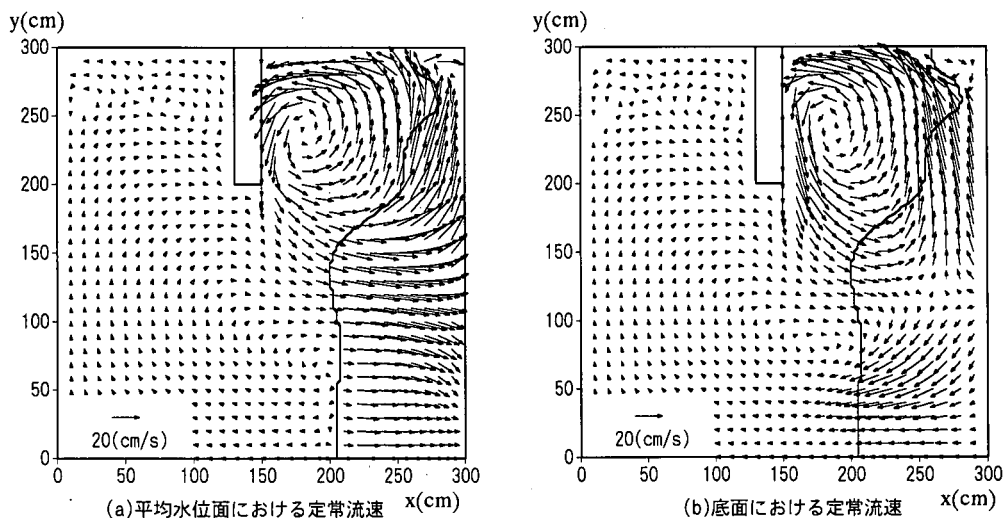


図-4 離岸堤背後の海浜流場の計算結果 (CASE 1)

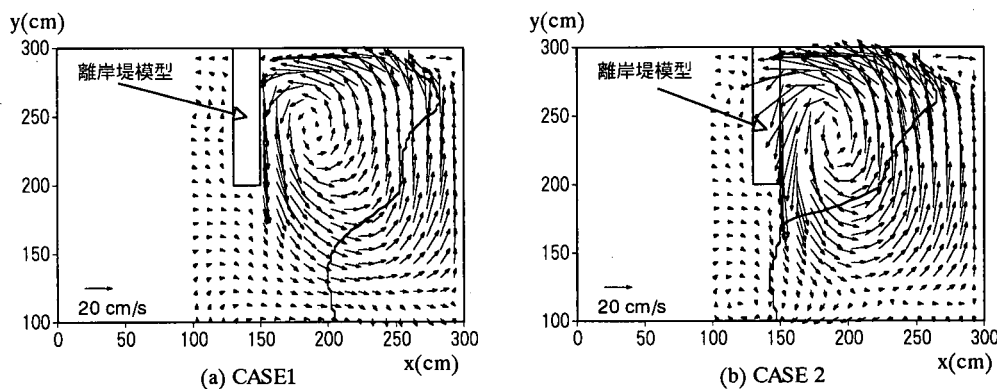


図-5 底面上 2 cm における海浜流場の計算結果

の実験値は CASE 1 と同様に水面付近で小さく、底面付近で大きいのがわかる。計算結果は CASE 1 の場合に比較して再現性がやや良いようである。一方、開口部付近の(e)および(f)の測点では CASE 1 の結果とは異なり、鉛直方向には一定ではなく、計算による再現性が低い。

以上の結果から一致度の低いところもあるものの本数値モデルは概ね実験結果を再現でき、構造物周辺における海浜流場に適用可能であることがわかる。

5. おわりに

本研究では、構造物周辺における海浜流場の特性について実験的に明らかにし、さらに海浜流場の準3次元数値モデルの適用性について検討した。得られた結果を要約すると次のようになる。

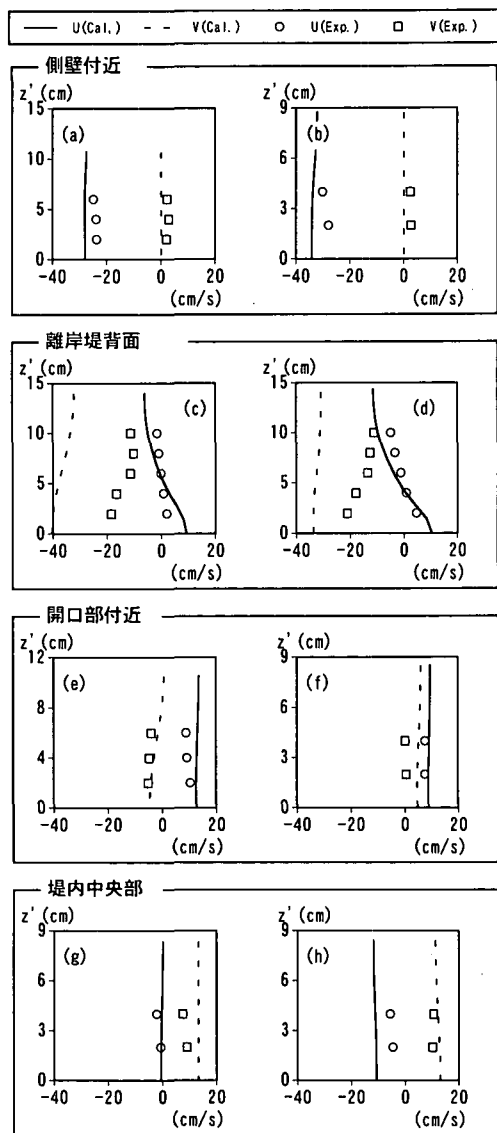
1) 実験結果から、離岸堤背後の海浜流は波浪条件、すなわち、碎波点の位置によってパターンが大きく異なることがわかった。

2) 離岸堤背面において水面付近と底面付近の定常流速は流向が異なり、螺旋状の分布を有することがわかった。

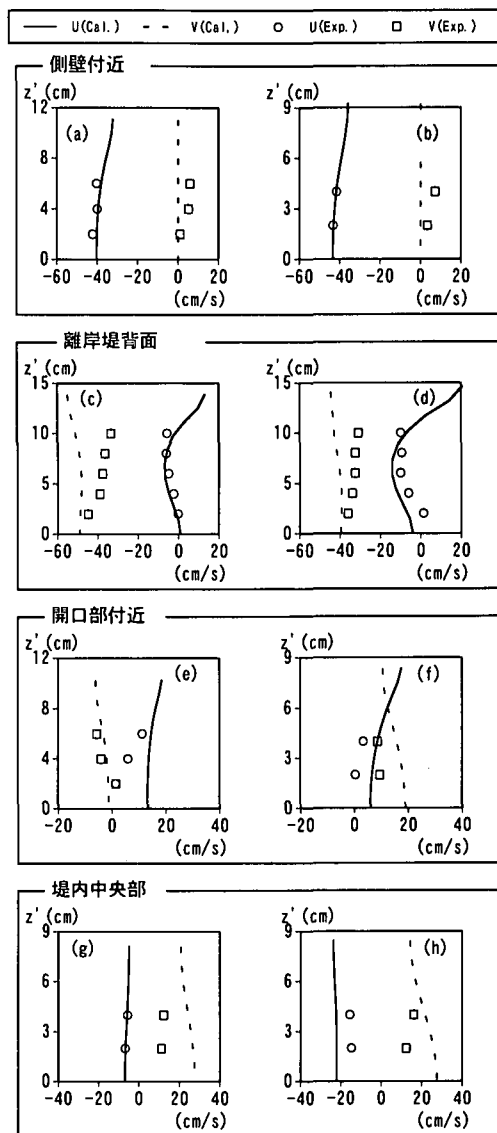
3) 著者らが提案した準3次元海浜流数値モデルを用いて碎波帯内および離岸堤背面の螺旋状の鉛直分布を再現することが可能である。また、実験結果とほぼ一致することから構造物周辺の海浜流場に対して適用可能であることがわかった。

参考文献

- 岡安章夫・瀬尾貴之・柴山知也 (1993): 碎波による運動量を考慮した海浜流の準3次元数値モデル, 海岸論文集, 第40巻, pp. 251-255.
- 黒岩正光・野田英明・芳地康征 (1997): 準3次元海浜流場の数値シミュレーションに関する研究, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 151-155.
- 清水琢三・水正人・渡辺 晃 (1992): 3次元海浜変形モデルによる長期的な地形変化予測, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 416-420.



図—6 海浜流の鉛直分布の比較 (CASE 1)



図—7 海浜流の鉛直分布の比較 (CASE 2)

清水琢三・水流正人・嶋田昌義・窪 泰浩 (1993): 取水港湾港口部の長期的な地形変化の再現, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 496-500.

清水琢三・山田晶子・内山一郎・渡辺 晃 (1995): 汀線変化を考慮した3次元海浜変形モデルの現地適用性, 海岸論文集, 第42巻, pp. 606-610.

土屋義人・山下隆男・植本 実 (1986): 砕波帯における戻り流れについて, 第33回海岸工学講演会論文集, pp. 31-35.

渡辺 晃・塩崎正孝 (1982): 構造物周辺の波浪・海浜流場について, 第29回海岸工学講演会論文集, pp. 110-114.

渡辺 晃・丸山康樹 (1984): 屈折・回折・砕波減衰を含む波浪場の数値解析法, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 103-107.

Koutitas, C. and B. O'Connor (1980): Modeling three-

dimensional wind-induced flows, J. the hydraulics division, HY 11, pp. 15836-1865.

Longuet-Higgins, M.S. (1970): Longshore current generated by obliquely incident sea waves, 1, 2, J. Geophys. Res. Vol. 75, pp. 6778-6801.

Pechon, P. and C. Teisson (1994): Numerical modeling of three-dimensional wave-driven current in the surf zone, Proc. 24th ICCE, ASCE, pp. 2503-2512.

Sanchez-A, A, F. Collado and A. Rodriguez (1992): Vertical varying velocity field in Q-3D nearshore circulation, Proc. 23th ICCE, ASCE, pp. 2811-2824.

Svendsen, I. A. and R. S. Lorenz, (1989): Velocities in combined undertow and longshore currents, Coastal Eng., Vol. 13, pp. 57-79.