

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

黒岩正光*・野田英明**・芳地康征***

1. はじめに

最近、海浜流の3次元性が重要視され、いくつかの3次元モデルが提案されている。Svendsenら(1989)は3次元のN-S方程式から沿岸方向に一樣な場の海浜流の鉛直分布を沿岸方向と岸沖方向に別々に解くモデルを提案している。Sanchezら(1992)および岡安ら(1993)は平面2次元(2DH)数値モデルに戻り流れの鉛直1次元(1DV)モデルを重ね合わせた準3次元(Q-3D)モデルを提案しているし、高木ら(1996)はモードスプリット法を用いたQ-3Dモデルを提案している。これらのモデルの適用性については一樣斜面上の単純な場に対してのみ検討されている。構造物周辺や、複雑な地形上での適用性については明かにされていない。構造物(例えば離岸堤)が存在する場については、Pechonら(1994)によって循環流の準3次元計算が試みられている程度である。

本研究は、複雑な地形や構造物が存在するような場にも容易に適用できるような新たな準3次元海浜流場の数値計算手法を開発することを目的とし、その第一段階として鉛直循環流場(戻り流れ)、沿岸流場および構造物(離岸堤)周辺の海浜流場を計算し、実験結果と比較することによってQ-3D数値モデルの適用性について検討しようとするものである。

2. 数値モデル

2.1 支配方程式

波と流れの相互干渉は考慮せず、まず、渡辺ら(1984)の非定常緩勾配方程式を用いて波浪場を計算する。つぎに、流れ場の計算に必要な諸量を算定し、以下に示す運動方程式ならびに連続式を用いて3次元的海浜流場を求める。

図-1に示すように座標系をとり、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。

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + W \frac{\partial U}{\partial z} = -g \frac{\partial \bar{\xi}}{\partial x} - R_x + \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_h \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_h \frac{\partial U}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_v \frac{\partial U}{\partial z} \right) \cdots (1)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + W \frac{\partial V}{\partial z} = -g \frac{\partial \bar{\xi}}{\partial y} - R_y + \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_h \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_h \frac{\partial V}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_v \frac{\partial V}{\partial z} \right) \cdots (2)$$

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項の R_x および R_y 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。

連続式は

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

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

であり、鉛直方向流速 W は式(3)から、平均水位 $\bar{\xi}$ は式(4)から算定される。 $\bar{U}$ および $\bar{V}$ はそれぞれ岸沖および沿岸方向の断面平均流速である。

2.2 渦動粘性係数

水平方向の渦動粘性係数 ν_h は2DHモデルに適用されているLonguet-Higgins(1976)の評価式を適用する。鉛直方向の渦動粘性係数 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。例えば、土屋ら(1986)は、波高 H と波速 C (長波近似)の関数で鉛直方向に一定と仮定し、次式のように与えている。

$$\nu_v = ACH \cdots \cdots (5)$$

ここに、 A は0.01程度の無次元定数である。著者ら(1997)

は式(5)および、波のエネルギー逸散

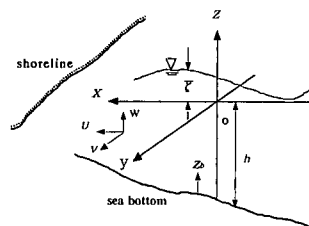


図-1 座標系

* 正会員 工修 鳥取大学助手 工学部土木工学科

** 正会員 工博 鳥取大学教授 工学部土木工学科

*** 正会員 工修 (株)建設技術研究所

率 D_f を用いた岡安ら (1989) のモデルを参考に以下のような 2 次式の渦動粘性係数を提案した。土屋ら (1986) のモデルから、

$$\nu_v = A_7 CH \left(\frac{z+h}{h} \right)^2 + B_7 CH \dots\dots\dots (6)$$

となる。ここに、 A_7 および B_7 はそれぞれ無次元定数で $A_7=0.01$, $B_7=0.001$ 程度の値をとる。また、岡安ら (1989) のモデルを参考に、

$$\nu_v = A_o h \left(\frac{D_f}{\rho} \right)^{1/3} \left(\frac{z+h}{h} \right)^2 + B_o h \left(\frac{D_f}{\rho} \right)^{1/3} \dots\dots\dots (7)$$

と表すこともできる。ここに、 $A_o=0.03$, $B_o=0.003$ である。本研究ではこれらの式を用いて計算を試みる。

2.3 波による過剰運動量フラックス

式 (1) および (2) における R_x および R_y はそれぞれ次式で表される。

$$R_x = \frac{\partial}{\partial x} (\overline{u_w^2} - \overline{w_w^2}) + \frac{\partial \overline{u_w v_w}}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial}{\partial x} \int_z^0 \overline{u_w w_w} dz' + \frac{\partial}{\partial y} \int_z^0 \overline{v_w w_w} dz' \right) \dots\dots\dots (8)$$

$$R_y = \frac{\partial}{\partial y} (\overline{u_w^2} - \overline{w_w^2}) + \frac{\partial \overline{u_w v_w}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial}{\partial x} \int_z^0 \overline{u_w w_w} dz' + \frac{\partial}{\partial y} \int_z^0 \overline{v_w w_w} dz' \right) \dots\dots\dots (9)$$

ここに、 u_w , v_w および w_w は波の水粒子速度を表す。上式中の積分項は波の重合を考慮した項で、進行波のみであるならば消去される。 R_x および R_y は鉛直方向にも分布を有するが、本研究では簡単のため水深方向に一定と仮定し、渡辺ら (1984) の波の重合を考慮した radiation stress の評価式を適用する。

2.4 境界条件

沖側、岸側ならびに側方境界は対象領域に応じて 2 DH モデルと同様な方法で設定し、その詳細については堀川 (1985) に譲る。ここでは、水面と底面境界の取扱いについてのみ述べる。

a) 水面境界

碎波することにより生じる surface roller を考慮したせん断応力を水面境界に、波向き方向に次式で与える。

$$\nu_v \frac{\partial U}{\partial z} \Big|_{z=\xi} = \tau_s \cos \alpha / \rho, \quad \nu_v \frac{\partial V}{\partial z} \Big|_{z=\xi} = \tau_s \sin \alpha / \rho \dots\dots\dots (10)$$

ここに、 τ_s は平均水位面におけるせん断応力であり、 α は波向きを表す。 τ_s は Svendsen ら (1989) の surface roller モデルを参考に、次式で評価する。

$$\tau_s = A_s \rho g h \frac{\partial h}{\partial x} \left(\frac{H}{h} \right)^2 \left(2.7 \frac{h}{L} \right) \dots\dots\dots (11)$$

ここに、 A_s は無次元定数で 1.0 程度の値である。

b) 底面境界

底面では波と流れの相互干渉を考慮したせん断応力を次式で与える。

$$\nu_v \frac{\partial U}{\partial z} \Big|_{z=-h} = \tau_{bx} / \rho, \quad \nu_v \frac{\partial V}{\partial z} \Big|_{z=-h} = \tau_{by} / \rho \dots\dots\dots (12)$$

ここに、 τ_{bx} および τ_{by} はそれぞれ岸沖および沿岸方向のせん断応力である。せん断応力の計算の詳細は堀川 (1985) に譲る。なお、鉛直方向流速は簡単のため $W=0$ とする。

2.5 数値計算法

本計算では、Koutitas ら (1980) の方法に従って、運動方程式を水平方向には有限差分法、鉛直方向には Garelkin 有限要素法を用いて離散化し、時間積分には Fractional Step 法を用いて計算する。計算領域は、直交格子 ($\Delta x = \Delta y = 10$ cm) に分割し、鉛直方向には接点分割 (平均水深を 10 等分割) する。時間間隔 Δt は計算の安定性を考慮して 0.01 sec とする。計算ステップは計算領域や波浪条件に応じて 10000~12000 回とする。

3. 数値モデルの適用性

3.1 鉛直 2 次元循環流場 (戻り流れ)

既に、著者ら (1997) によって鉛直 2 次元循環流場に対する適用性が検討されている。それによると、碎波帯内の定常流の分布は水面におけるせん断応力 (水面境界) の与え方と鉛直方向の渦動粘性係数 ν_v のオーダーとその形状に大きく左右される。渦動粘性係数 ν_v は式 (7) のモデルを用いたほうが、trough level 以下における定常流の再現性が良い。しかしながら、上層部における定常流速が過大評価され、さらに、その影響で過大な平均水位の上昇を引き起こすことが明らかにされている。

ここでは、渦動粘性係数の与え方について、前述した 2 つのタイプの渦動粘性係数 ν_v を用いた計算結果に土屋ら (1986) のモデルによる計算結果を付け加えて考察する。検証データは著者ら (1994) によって行われた spilling 型碎波の実験結果を用いることにする。図-2 (a)~(c) は式 (5)~(7) の渦動粘性係数 ν_v を用いて計算した戻り流れの鉛直分布と実験によるそれとを比較したものである。なお縦軸の z_b は底面からの高さを表す。これらの図からどの評価式を用いても戻り流れの鉛直分布を概ね再現することができるが、碎波点付近 ($h/h_0=0.87$) では式 (7) を用いたほうが底面ならびに上層部において実験値に近い結果が得られる。一方、汀線付近 ($h/h_0=0.30$) では、渦動粘性係数 ν_v を一定とした土屋ら (1986) のモデルの方が適合性は良いようである。

3.2 沿岸流場

ここでは、Visser (1991) の実験結果と比較し沿岸流場に対する Q-3D 数値モデルの適用性について検討した。検証データの実験条件は海底勾配 1/20、沖波波高 $H_0=$

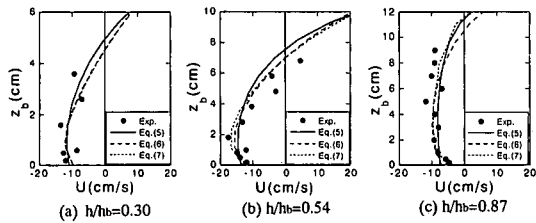


図-2 戻り流れの鉛直分布の計算結果と実験結果

8.50 cm, $T=1.02$ sec, 沖波入射角 $\theta_0=17.0^\circ$ である。沿岸流場の計算には、清水ら (1995) と同様に底面摩擦係数の与え方について検討した。

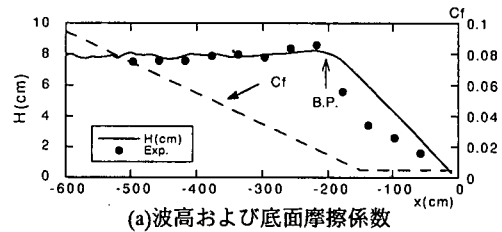
図-3(a), (b) および (c) は波高, 平均水位および断面平均した沿岸流速分布の計算値と実験値を比較したものである。比較のため 2DH 数値モデルによる計算結果も図に示した。図 (a) 中に示す破線は Q-3D モデルに用いた摩擦係数の岸沖分布を表したもので、砕波帯内では $C_f=0.005$ と一定とし、砕波帯外では沖向きに増加させた。これらの図から清水ら (1995) も指摘しているように、2DH モデルの場合、平均水位の変化はほぼ実験結果と一致するが、通常の $C_f=0.01$ を用いた場合の沿岸流の計算値は明らかに実験値を過小評価する。 C_f を小さく 0.003 とした場合は砕波帯外においては過大評価するが砕波帯内ではほぼ実験結果に近い結果となっていることがわかる。一方、摩擦係数の空間分布を与えて計算した Q-3D モデルでは、沿岸流速分布は 2DH モデルに比較して実験結果とよく一致することがわかる。しかしながら、平均水位の上昇量は鉛直循環流場と同様に過大評価されているのが明らかである。

つぎに、図-3(c) に示す測線 (a)~(d) の位置における沿岸流の鉛直分布について検討した。図-4(a)~(d) は沿岸流速の鉛直分布について計算値と実験値を比較したものである。図中に示す、破線は岸沖方向の定常流速 U の計算値である。これらの図から沿岸方向と岸沖方向の定常流速の鉛直分布の形状が明らかに異なり、Svendsen ら (1989) や岡安ら (1993) が示した螺旋状の分布の結果と定性的に一致する。つぎに、図-4(a) および (b) から砕波帯内では沿岸流速 V の計算値は実験結果と良く一致することがわかる。一方、図-4(c) および (d) から砕波点近傍および砕波帯外では一致度は良くないことがわかる。なお、鉛直方向の渦動粘性係数として式 (6) あるいは (7) を用いて計算した場合、あまり良い結果が得られなかったので土屋ら (1986) の式 (5) を用いて計算した。

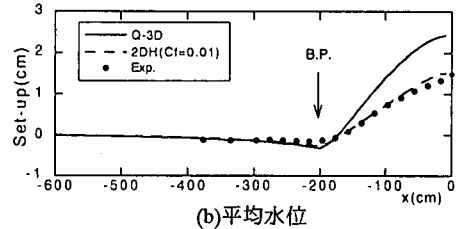
3.3 構造物 (離岸堤) 周辺の海浜流場

a) 実験方法

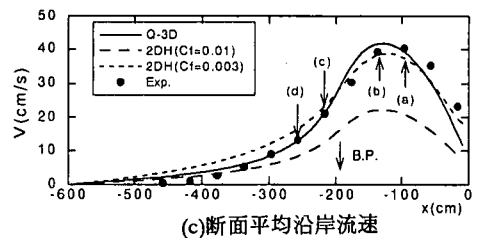
実験は長さ 12 m, 幅 5.0 m, 高さ 0.6 m の小型平面水



(a) 波高および底面摩擦係数



(b) 平均水位



(c) 断面平均沿岸流速

図-3 波高, 平均水位および断面平均沿岸流速の分布

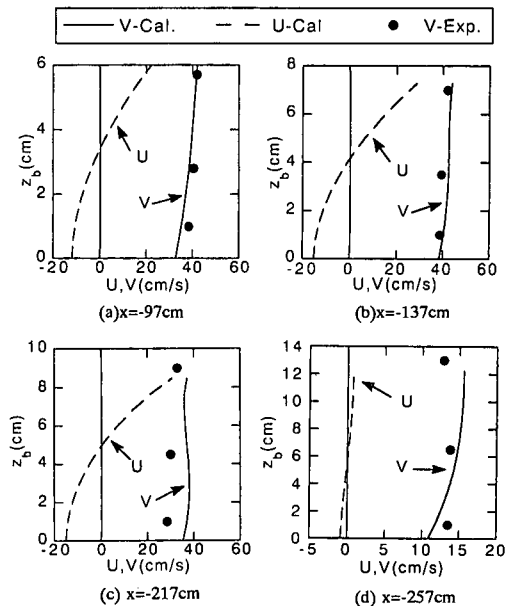


図-4 沿岸流速の鉛直分布

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。図-5 は実験領域と計算領域の概要を示したものである。この図に示すように、波が水槽の側壁の消波工の影響を受けないように

実験領域を幅2 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。離岸堤前面にはステラシートを取り付け反射波を50%程度とし、離岸堤背後は完全反射とした。実験条件は1ケースのみで、一様水深部 $h=30$ cmにおける入射波高は $H=8.76$ cmで、周期は $T=1.0$ secで、砕波形式はSpilling型である。波高は容量式波高計を用いて測定し、定常流速は水平2成分電磁流速計を用いて測定した。測定点は、図-5に示したとおりで、沿岸方向に8測線設置し、岸沖方向に20 cm間隔、水深方向に底面上2 cmの位置から2 cm間隔で1〜5点配置した。なお、図-5中に示す記号A〜Dは後述する計算値との比較のための代表測点を示したものである。

b) 実験結果と計算結果との比較

図-6(a)および(b)はそれぞれ底面上2 cmおよび静水面下4 cmにおける定常流速のベクトルの平面分布を表したものである。図(a)から汀線付近($x=260$ cm)では、沿岸方向に20〜30 cm/s程度の沿岸流が発生しているのがわかる。また、離岸堤背後の導波板に沿って沖向きに30 cm/s程度の定常流が発生している。図(a)と(b)から離岸堤背後に沿う定常流は底面付近でやや岸向きであるが、上層部では、やや沖向きであることがわか

る。つぎに、底面上2 cmの位置における計算結果と実験結果を比較したものが図-7である。この図から定性的には離岸堤背後の循環流が再現されているが、離岸堤直背後に沿う定常流の実験結果はやや岸向きであるのに対し、計算結果は沖向きであり再現性の良くないことがわ

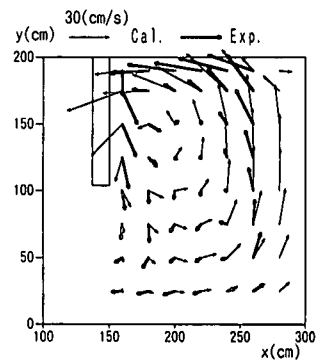


図-7 底面上2 cmにおける海浜流の実験値と計算値の比較

かる。つぎに、代表測点A〜D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が図-8(a)〜(d)である。これらの図から、St. Aにおいて、岸沖流速 U は鉛直方向にほぼ一定で、計算値と実験値はほぼ一致する。一方、沿岸流速 V は、計算結果と実験結果との一致度は良くないことがわかる。St. Bでは、実験において沿岸流速 V は約30〜20 cm/s程度で、鉛直方向に顕著な変化はなく、計算結果は実験結果とほぼ一致する。岸沖流速 U の実験結果は鉛直方向に分布を有し、底層と上層部では流向が反転しているが、 $z_0=6$ cm以上においてはほぼ一定であることがわかる。計算結果は底面および水面における流速の絶対値は小さく、 $z_0=6$ cm付近で最大となり、実験結果の再現性は良くないことがわかる。つぎに、St. Cでは、実験の U および V とも鉛直方向には顕著な分布は持たず、計算結果は実験結果と良く一致する。St. Dでは、実験において20 cm/s程度の沿岸流速と戻り流れが発生しているのがわかる。実験値は一点だけで、十分な比較検討はできないが、St. Dは砕波帯内で沿岸流が十分発達する領域であることから、計算においても沿岸方向に40 cm/s程度の沿岸流速と10 cm/s程度の戻り流れが発生しており、定性的に計算結果は実験結果と一致する。

以上の結果から、汀線付近に発生する沿岸方向の定常流速ならびに導波板に沿う沖向きの定常流速は計算結果と実験結果とでほぼ一致するが、離岸堤直背後における再現性はあまりよくないことがわかる。

図-9(a)および(b)は底面および平均水位面における循環流の数値計算例である。この図から汀線付近において、平均水位面では岸向きに、一方、底面では沖向きに定常流速が発生し、鉛直方向に螺旋状の分布が再現されているのがわかる。また、離岸堤直背後における離岸堤に沿った流れは、水面でやや岸向きとなり、前述した実験結果とは逆の傾向になっている。

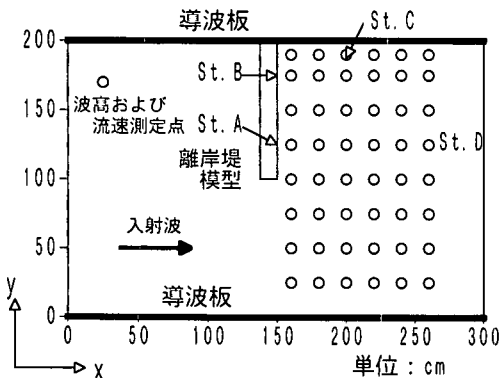


図-5 実験領域と計算領域の概要

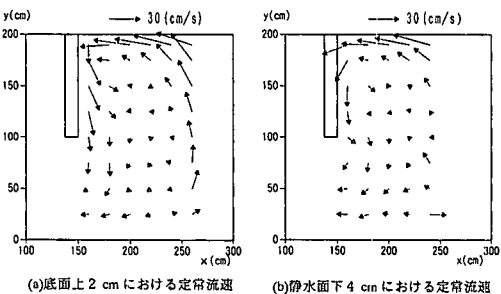


図-6 離岸堤背後の海浜流の実験結果

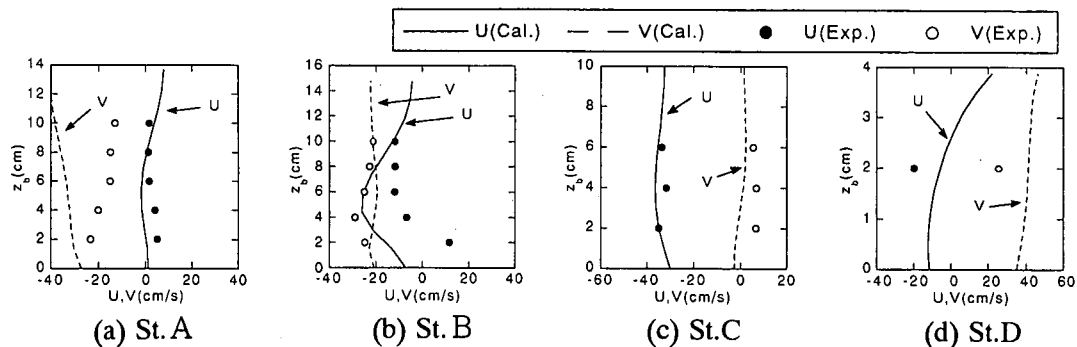


図-8 離岸堤背後の海浜流の鉛直分布の計算結果と実験結果の比較

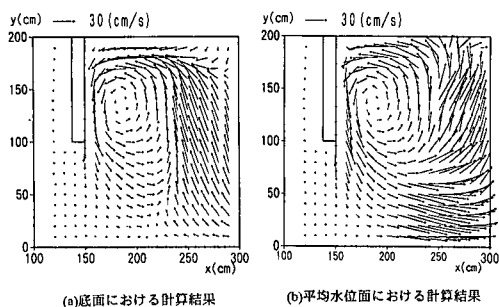


図-9 底面および平均水位面における循環流の計算例

4. おわりに

本研究では、Koutitasら(1980)の数値解法を用いて準3次元海浜流場の数値モデルを構築し、戻り流れ、沿岸流場および離岸堤背後の循環流場に対する適用性について実験結果と比較検討した。

鉛直循環流場の計算の場合、trough level 以下における定常流速の計算値は実験値とほぼ一致するが、平均水位の上昇量は過大評価される。沿岸流場の計算では、底面摩擦係数の空間分布を与えることによって実験値とよく一致し、螺旋状の鉛直分布を再現できるが、平均水位の過大な上昇が見られ、数値モデルを再検討する必要がある。離岸堤周辺の計算では離岸堤背後の沿岸方向流速を除いて実験結果を概ね再現できることがわかった。構造物周辺の流れの3次元構造は十分明かにはできなかった。今後、模型実験によって綿密に流速を計測し、流れの3次元構造について明かにするとともに、モデルの適用性について再検討する予定である。

最後に、本研究における数値計算では、多大な御助言を賜った鳥取大学工学部土木工学科の檜谷 治助教授に感謝の意を表する。

参考文献

- 岡安章夫・磯部雅彦・渡辺 晃 (1989): 碎波帯におけるエネルギー収支と戻り流れのモデリング, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 31-35.
- 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, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 251-255.
- 黒岩正光・野田英明・広川 啓 (1994): 碎波帯における砂移動機構と戻り流れに関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第41巻(1), pp. 146-150.
- 黒岩正光・野田英明・芳地康征 (1997): 碎波帯内における鉛直循環流場の数値シミュレーションに関する研究, 海洋開発論文集, Vol. 13, pp. 543-548.
- 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, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 606-610.
- 高木利光・川原睦人 (1996): モードスプリット有限要素法を用いた準3次元海浜流シミュレーション, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 361-365.
- 土屋義人・山下隆男・植本 実 (1986): 碎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.
- 堀川清司 (1985): 海岸環境工学, 第3編, 第3章, pp. 249-271.
- 渡辺 晃・丸山康樹 (1984): 屈折・回折・碎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. 24 th ICCE, ASCE, pp. 2503-2512.
- Sanchez-A, A, F. Collado and A. Rodriguez (1992): Vertical varying velocity field in Q-3 D nearshore circulation, Proc. 23 th 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.