

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

清水 琢三*・山田 晶子*・内山 一郎**・渡辺 晃***

1. ま え が き

3次元海浜変形モデルは、①波浪場の計算、②海浜流場の計算、③地形変化の計算の3つのサブモデルより構成されており、各ステップ毎に現地観測データに基づき検証されるとともに、現地の長期的な地形変化の定量的な再現も数多く試みられるようになってきた。最終的な地形変化の予測精度は、漂砂量算定式の精度はもとより、波、流れなどの外力場の計算精度に大きく左右される。平面波浪場の計算法に関しては、実験、現地を問わず、かなりの精度で予測可能となっているものの、海浜流場の計算精度はそれに比べて低いのが現状である(例えば、清水ら, 1993)。そこで本研究では、まず海浜流場の計算において、田中・Thu (1993) の波・流れ共存場の摩擦則を用いて平均流方向の摩擦項を直接評価し、場所的に変化させる方法について、既往の水理実験ならびに現地観測の結果を検証データとして検討した。

また、著者らは、3次元海浜変形モデルと汀線変化モデルを組み合わせることにより、汀線変化を含む平面的な地形変化を計算する実用的な数値モデルを提案した(清水ら, 1994)。汀線変化モデルと整合する形で水深の深いところの平面的な地形変化が計算できるため、構造物近傍の長期的な地形変化の予測に適したモデルであると考えられる。本研究では、長期予測モデルとしての現地適用性を検証することを目的として、底面摩擦項を改良した海浜流場計算モデルを用いて、わが国初の離岸型漁港である国縫漁港建設に伴う背後のトンボロ地形の発達を再現することを試みた。

2. 海浜流場の計算における底面摩擦項の検討

従来の海浜流計算で一般に用いられている底面摩擦項は、定常流に対する評価式を準用しており、流速変化としてしか波の影響は考慮されておらず、その妥当性については必ずしも確認されているわけではない。また、摩擦係数は波高分布や水深変化などにより空間的に変化する

ものであるが、通常は、それを空間的に一様であると仮定しており、また実測値と合うように調整すべき係数として取り扱われる場合が多い。そこで本研究では、底面摩擦項の評価法について水理実験ならびに現地観測データに基づき検討した。

2.1 底面摩擦項の評価法

海浜流計算における底面摩擦項は、定常流に対する評価式を準用して、波・流れ共存場の平均摩擦応力として、次式が一般的に用いられている。

$$\tau_x = \rho C_f \sqrt{(U + u_b)^2 + (V + v_b)^2} \quad \cdots (1)$$

ここに、 τ_x : x 方向の平均剪断応力、 U, V : x, y 方向の平均流速、 u_b, v_b : x, y 方向の波による底面軌道流速、 ρ : 海水の密度、 C_f : 摩擦係数、上式中の上付バーは時間平均を示している。

西村 (1982) は正弦波を矩形波に近似することにより簡便かつ精度の高い評価式を提案しており、実際の数値計算では式 (1) の平均操作を数値的に行う代わりに、西村の近似式が用いられることが多い。摩擦係数の値としては通常 0.01 程度の一定値が用いられるが、摩擦係数は波・流れの大きさ、水深、底質粒径によって変化し、海浜流速に大きく影響すると考えられるので、場所的に変化させる試みも行われている(例えば、渡辺, 1992)。

しかしながら、実際の波・流れ共存場の底面剪断応力は、式 (1) のように流速の大きさと波と流れの寄与が決まるのではなく、底面剪断応力レベルで波と流れの影響を考慮する必要がある。そこで、田中・Thu (1993) の波・流れ共存場の摩擦則を用いて、流れ方向の平均剪断応力を直接評価し、摩擦項を場所的に変化させた。この摩擦則は、遷移領域を含む全ての flow regime に対して適用可能で、しかも陽形式近似されているため、数値計算モデルに取り込むことが容易で、計算時間の面でも実用的である。

流れ方向の底面剪断応力 τ_c は次式で表される。

$$\tau_c = \rho u_{c*}^2 = \rho \kappa \alpha \sqrt{\frac{f_{cw}}{2}} U_w^2 \quad \cdots (2)$$

* 正会員 工修 五洋建設(株) 技術研究所
 ** 正会員 五洋建設(株) 技術研究所
 *** 正会員 工博 東京大学教授 工学部土木工学科

$$\alpha = \begin{cases} \frac{1}{\ln(z_h/z_0)-1} \frac{u_c}{U_w} & \text{：粗面乱流,} \\ \frac{1}{\left(\ln\left(9.0 \frac{R_c}{u_c U_w} \sqrt{\frac{f_{cw}}{2}}\right)-1\right)} \frac{u_c}{U_w} & \text{：滑面乱流,} \\ \frac{1}{\kappa} \sqrt{\frac{f_{c(L)}}{2}} & \text{：層流} \end{cases}$$

.....(3)

ただし、層流の場合には、式(2)の f_{cw} を $f_{c(L)}$ に置き換える。ここに、 f_{cw} ：波・流れ共存場の摩擦係数、 κ ：カルマン定数(=0.4)、 z_h ：水深、 z_0 ：粗度長さ、 u_c ：平均流速、 U_w ：波の軌道流速振幅、 $R_c = u_c z_h / \nu$ 、 ν ：動粘性係数である。なお、式(1)の C_f は $f_{cw}/2$ に相当する。

遷移領域では、摩擦係数と同様に、次式で内挿した。

$$\tau_c = f_2 \{ f_1 \tau_{c(L)} + (1-f_1) \tau_{c(S)} \} + (1-f_2) \tau_{c(R)} \dots (4)$$

ここに、 f_1, f_2 は重み関数(詳細は田中・Thu (1993)を参照)、添え字 L, S および R は、それぞれ層流、粗面乱流および滑面乱流での諸量であることを示す。

2.2 沿岸流場に対する比較・検討

底面摩擦項の評価法の違いを比較するため、まず、一様勾配海浜上に斜め入射した場合に生じる沿岸流場に対して検討した。検証データとしては、① Visser (1984)の水理実験(海底勾配1/10、 $H_0=8.9$ cm、 $T=1$ s、波向 15.4° 、滑らかな固定床)と② Thornton・Guza (1986)の現地観測(海底勾配約1/30、水深4 m地点で $H_{rms}=0.56$ m、 $T=14.2$ s、波向 9°)を用いた。

波浪場計算法としては、磯部(1986)の碎波減衰項を考慮したエネルギー平衡方程式に基づく方法を用い、清水ら(1994)と同様に、波による平均水位上昇と波の遡上を便宜的な方法ではあるが考慮した。ただし、波高分布の計算では、実測の波高変化に合うように磯部(1986)の碎波変形モデルで碎波点の位置を決める流速波速比を調整した。また、海浜流場の計算では、不規則波に対してもエネルギーが等価な規則波に近似して、radiation stress項を評価した。水平拡散項は、Longuet-Higgins (1970)の評価法を用い、係数 N としては0.01とした。

底面摩擦項については、①西村(1982)の方法で、摩擦係数を0.01で一定にした場合、②西村(1982)の方法で、摩擦係数として全てのflow regimeに適用可能な田中・Thu (1993)の摩擦則の陽形式近似を用いて場所的に変化した場合、③田中・Thu (1993)の摩擦則の陽形式近似を用いて流れ方向の平均剪断応力を直接評価した場合の3通りについて比較・検討した。

a) Visser (1984)の実験結果の再現

図-1は、波高分布と沿岸流速分布の計算値と実測値の比較を、摩擦係数ならびに摩擦項の分布と併せて示したものである。流速分布は田中・Thu (1993)の摩擦則により摩擦項を直接評価したケースが最もよく一致してお

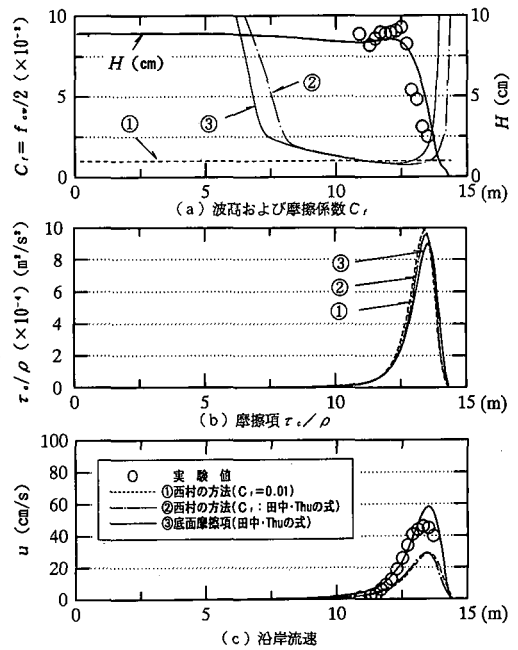


図-1 沿岸流速分布の比較(実験)

り、西村の方法では摩擦係数だけ場所的に変化させても過小評価することがわかった。摩擦係数 C_f は、碎波帯外と汀線近くで増大する傾向がみられるが、碎波帯内では0.01程度である。

b) Thornton・Guza (1986)の現地観測結果の再現

図-2は、現地観測結果に対する波高分布と沿岸流速分布の計算値と実測値の比較を示している。流速分布はやはり田中・Thu (1993)の摩擦則により摩擦項を直接評価したケースが最もよく一致している。ただし、摩擦係数 C_f は、碎波点付近で0.0025程度と、Visser (1984)の室内実験結果に比べて1/4程度の大きさである。Larson・Kraus (1991)も、摩擦項として西村の方法を用いて上記の2ケースについて同様の検討を行っているが、Visser (1982)の実験結果に対しては0.007、Thornton・Guza (1986)の現地データに対しては0.0035と小さくなることを示している。

以上のように、田中・Thu (1993)の摩擦則の陽形式近似を用いて摩擦項を直接評価すれば、実測値に基づくキャリブレーションを行わなくとも、外力と底面条件に応じて適切な沿岸流速分布を評価することが可能である。

2.3 海浜循環流場に対する比較・検討

離岸堤や人工島などの遮蔽域で発生する海浜循環流場に対しても、摩擦項ならびに水平拡散項の評価法による違いを比較した。検証データとしては、池野ら(1993)の人工島設置海浜の平面実験結果を用いた。実験は、規則波、単一方向不規則波、多方向不規則波($S_{max}=25$)に対して行われているが、ここでは多方向不規則波の実験

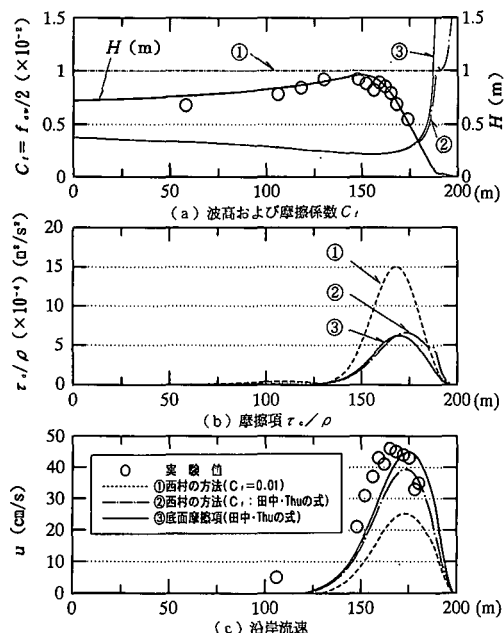


図-2 沿岸流速分布の比較 (現地)

結果との比較結果について紹介する。検証ケースの主な実験条件は、沖波有義波高 6.1 cm, 有義波周期 1.2 s, 海底勾配 1/50, 人工島護岸は直立護岸タイプで岸側の水深は約 13 cm, 人工島背面からの取水がない条件である。

波浪場は、磯部 (1986) の波向線座標を用いた放物型波動方程式に基づく方法により評価した。実験結果を精度よく再現できることは既に池野ら (1994a) に示されている。海浜流場の計算では、摩擦項は 2.2 で沿岸流場に対して妥当性が検証された田中・Thu の摩擦則を用いて直接評価する方法を用いた。また、水平拡散項は、一様勾配海浜では Longuett-Higgins (1970) の評価法がよく用いられるが、構造物近傍では代表渦径として構造物からの距離と汀線からの距離の小さい方をとる方が再現性が高いことが報告されている (清水ら, 1993)。また、代表流速として波による軌道流速振幅を、代表長さとして水粒子振幅をとる Thornton (1970) の考え方があがるが、乱れの強さをローカルな波高と流速で代表させているため、バード地形や遮蔽域での水平拡散項を適切に評価できるものと考えられる。本研究では、Larson・Kraus (1991) にならない、渦動粘性係数 ϵ を Thornton (1970) の考え方に立てて次式で表した。

$$\epsilon = \Lambda U_w H \quad (5)$$

ここに、 Λ は経験定数であるが、本研究では 0.3 とした。式 (5) は一様勾配海浜では Longuett-Higgins (1970) の表示と一致する。

図-3 は、海浜流ベクトルの実験結果と計算結果を示

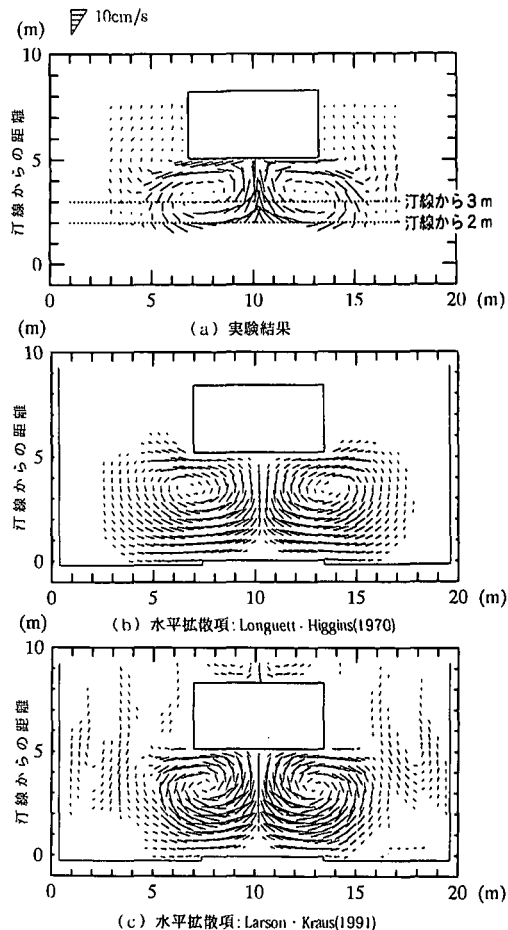


図-3 海浜流場の計算結果の比較 (多方向不規則波)

している。計算はいずれも、底面摩擦項として田中・Thu (1993) の陽形式近似を用いて直接評価した。(a) は実験結果を、(b) は Longuett-Higgins (1970) の水平拡散項を用いた場合 (ただし、構造物からの距離も考慮)、(c) は Larson・Kraus (1991) の水平拡散項を用いた場合の計算結果を示している。また図-4 は、汀線から 2 および 3 m 離れた代表測線上における岸沖方向流速 (人工島向きを正) の沿岸分布ならびに汀線から 2 m 離れた測線の沿岸方向流速の沿岸分布を示している。図中には、西村の方法で摩擦係数を 0.01 とした場合ならびに摩擦項を無視した場合の結果も併せて示した。

池野ら (1994b) は、実験結果では海浜循環流は狭い範囲で速い流れが明瞭に生じているにもかかわらず、摩擦係数を 0.01 とした西村の方法を用いた場合には循環流は定性的には再現されるものの、流れの強弱があまりつかず、人工島背後の沖向き流れを過小評価することを報告している。図-4 からわかるように Longuett-Higgins の水平拡散項を用いた場合には、田中・Thu の摩

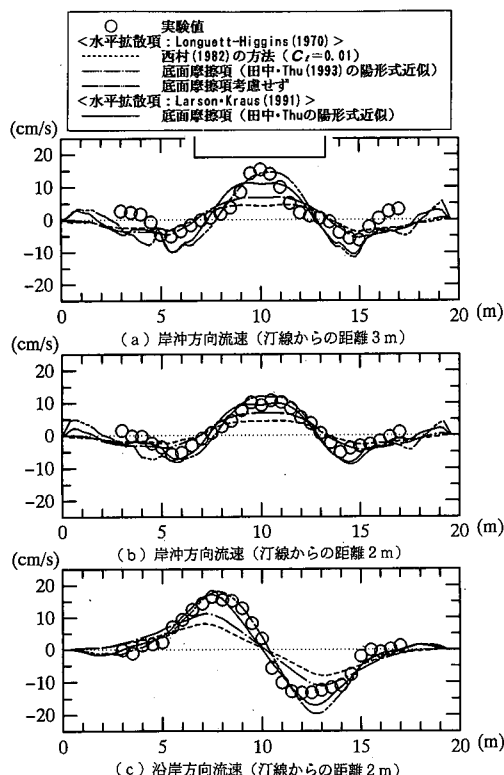


図-4 代表測線の流速値の比較 (多方向不規則波)

擦則を用いて直接評価した場合でも、西村の方法を用いた場合よりは速い流速が計算されるものの、実測値に比べると小さい。また、図-3からもわかるように循環流の中心がずれており、再現性はよくない。一方、水平拡散項として Larson・Kraus の評価法を用いた場合には、実測値をかなり精度よく再現できることがわかる。しかしながら、汀線からの距離が 3 m といった人工島背後の沖向き流れが速いところでは、摩擦項を無視した場合の方がさらに再現性が高いことから、摩擦項の評価についても今後さらに検討の余地が残されている。

3. 3次元海浜変形モデルの現地適用性の検討

3.1 汀線変化を考慮したモデルの概要

清水ら (1994) は、汀線変化モデルと 3 次元海浜変形モデルの長所を組み合わせた実用的かつ現地適用性の高い海浜変形予測手法を提案した。このモデルは、3 次元海浜変形モデルにより平面的な地形変化を計算するとともに、汀線平行方向の局所漂砂量フラックスを岸沖方向の測線毎に碎波点から遡上点まで積分して沿岸漂砂量の総量を評価し、汀線変化モデルと同様の考え方で汀線変化を評価するモデルである。

モデルの詳細は省略するが、海浜流場の計算では、上述の検討結果を踏まえ、摩擦項として田中・Thu (1993)

の摩擦則と水平拡散項として Larson・Kraus (1991) の評価法を用いた。また地形変化の計算では、渡辺ら (1984) の局所漂砂量モデルを用い、波による漂砂量係数 A_w を渡辺 (1981) の波による漂砂量係数 B_w との関係から場所毎に変化させるとともに、流れによる漂砂量係数 A_c は A_w の 10 倍に設定した。なお、 B_w は、既往の研究によれば、規則波実験に対しては 7 程度、現地あるいは実規模実験に対しては 4 程度の値をとることが知られているが、本研究では実際の地形変化と整合するように調整した。なお、底面剪断応力の評価には、海浜流場の計算と同様、田中・Thu (1993) の摩擦則を用いた。

3.2 島式漁港建設に伴う地形変化の再現

我が国初の島式漁港である国縫漁港は、北海道内浦湾のほぼ中央に位置し、防波堤の建設に伴い背後にトンボロ状の顕著な堆積が生じている (Kawaguchi ら, 1994)。本研究では、防波堤の建設が本格的に始まった平成元年から漁港が完成した平成 5 年までの 4 年間の地形変化の再現を試みた。検討に当たっては、Kawaguchi ら (1994) の論文を参考に、近隣の中の沢における目視による波浪観測記録に基づき、1 年間を 2 時化で代表させたモデル時系列波浪を設定した。ただし、波高 0.5 m 以下のときは地形変化が小さいので無視している。また、波向は汀線直角方向とした。なお、波浪場の計算にはエネルギー平衡方程式による方法を用いた。

まず、最も顕著な地形変化を生じた平成元年から 1 年間を対象に、海浜流場の計算で摩擦項を西村の方法で摩擦係数を 0.01 で一定とした場合と、田中・Thu の摩擦則で評価した場合の比較を行った。ただし、後者の場合、水平拡散項は Larson・Kraus (1991) の評価法を用いた。

2.3 の検討結果と同様、流況パターンは変わらないものの、後者の方が流速値で 1.5~3.0 倍速くなっており、田中・Thu (1993) の摩擦項を用いた場合には、漂砂量係数 B_w を 0.5 と、従来現地への適用によく用いられてきた値で西村の方法を用いた場合の 4.0 に比べて、1 オーダー小さくする必要があった。しかしながら、漂砂量係数を適切に調整すれば、図-5 に示すように、いずれのケースも 1 年後の地形変化の再現性は汀線変化も含めて良好であった。

海浜流計算で田中・Thu (1993) の摩擦則を用いて、平成元年から平成 5 年までの 4 年間の地形変化を連続して計算した結果を図-6 に示す。図中には、1 年毎の汀線と水深 2 m の等深線と 4 年後の実測値が示されている。実測値は、かなり鋭角的なトンボロ地形が形成されており、4 年後には汀線が防波堤背後に到達している。これに対して、計算では 2 年後以降、背後のトンボロが沖に張り出すというよりは汀線が沿岸方向に広がる傾向がみられる。これは、汀線変化の計算で沿岸漂砂量の評価に際し

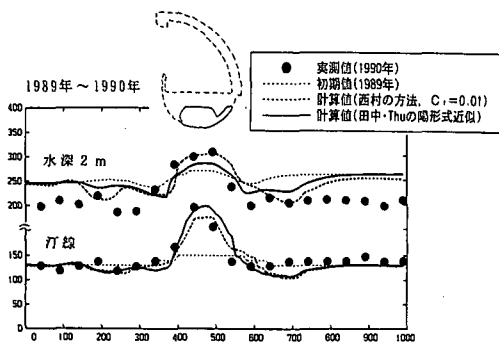


図-5 1年間の地形変化の再現 (1989~1990年)

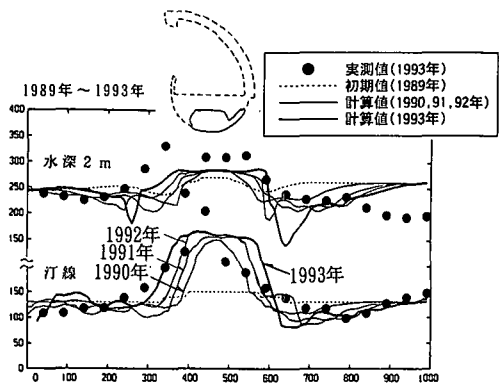


図-6 長期的な地形変化の再現 (1989~1993年)

て、直交座標系の岸沖方向の測線で局所漂砂量を積分しているため、トンボロの発達に伴い汀線平行方向の漂砂量の計算精度が悪くなったものと考えられる。

4. あとがき

3次元海浜変形モデルの外力場の計算精度をさらに向上させるため、海浜流場の計算モデルの底面摩擦項と水平拡散項について検討した。全ての flow regime に適用可能な田中・Thu (1993) の摩擦則の陽形式近似は、理論的には海浜流が発達するような碎波帯内や swash zone に対しては適用性が保証されているわけではないが、実験、現地を問わず、海浜流計算における底面摩擦項を適切に評価できることが明らかになった。また、水平拡散項としては、Thornton (1970) の考え方に立つ Larson・Kraus (1991) の評価法が汎用的で優れていることがわかった。

また、汀線変化を考慮できる3次元海浜変形モデルの現地適用性について、島式漁港である国縫漁港を検証地点として検討したところ、背後のトンボロが最も発達した1年間の地形変化は、汀線変化も含めて精度よく再現できたが、長期的には現実のシャープなトンボロは再現できなかった。初期汀線に対して直交した岸沖方向の測

線で汀線平行方向の沿岸漂砂量を評価しているため、トンボロが発達した後はその精度が低下したものと考えられ、汀線変化の計算に際しては、例えば宇多 (1982) のように直交曲線座標を採用するなどの工夫が必要である。

参考文献

- 池野正明・鹿島遼一・松山昌史・榊山 勉・窪 泰浩 (1993): 人工島式発電所背後の波浪場・海浜流場に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 621-625.
- 池野正明・鹿島遼一・鶴飼亮行・清水琢三・秋葉 徹・窪 泰浩 (1994a): 多方向不規則波浪場計算法的人工島背後海域への適合性比較, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 126-130.
- 池野正明・鹿島遼一・定森良夫・清水琢三・鶴飼亮行・窪 泰浩 (1994b): 不規則波モデルの違いによる人工島背後海浜流の再現性比較, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 126-130.
- 宇多高明 (1982): 新しい海浜変形モデルによる河口砂州周辺の変形予測, 土木学会論文報告集, No. 322, pp. 77-88.
- 磯部雅彦 (1986): 放物型方程式を用いた不規則波の屈折・回折・碎波変形の計算法, 第33回海岸工学講演会論文集, pp. 134-138.
- 清水琢三・水流正人・嶋田昌義・窪 泰浩・山田富朗 (1993): 取水港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・熊谷隆宏・三村信男・渡辺 晃 (1994): 汀線変化を考慮した3次元海浜変形長期予測モデル, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 406-410.
- 田中 仁・A. Thu (1993): 全ての flow regime に適用可能な波・流れ共存場抵抗則, 土木学会論文集, 第467巻/II-23, pp. 93-102.
- 西村仁嗣 (1982): 海浜循環流の数値シミュレーション, 第29回海岸工学講演会論文集, pp. 333-337.
- 渡辺 晃 (1981): 海浜流と海浜変形の数値シミュレーション, 第28回海岸工学講演会論文集, pp. 285-289.
- 渡辺 晃 (1992): 局所漂砂量算定式による沿岸漂砂の総量と岸沖分布の検討, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 306-310.
- 渡辺 晃・丸山康樹・清水隆夫・榊山 勉 (1984): 構造物設置に伴う三次元海浜変形の数値予測モデル, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 406-410.
- Kawaguchi, T., O. Hashimoto, T. Mizumoto and A. Kamata (1994): Construction of offshore fishing port for prevention of coastal erosion, Proc. 24th Int. Conf. on Coastal Eng., pp. 1197-1211.
- Larson, M. and N. C. Kraus (1991): Numerical model of longshore current for bar and trough beaches, J. Waterway, Port, Coast. and Oc. Engrg., Vol. 117, No. 4, pp. 326-347.
- Longuet-Higgins, M. S. (1970): Longshore currents generated by obliquely incident wave, J. Geophys. Res., Vol. 75, No. 33, pp. 6778-6789.
- Thornton, E. B. (1970): Variation of longshore current across the surf zone, Proc. 12th Int. Conf. on Coastal Eng., pp. 291-308.
- Thornton, E. B. and R. T. Guza (1986): Surf zone longshore currents and random waves, J. Phys. Oceanography, Vol. 16, pp. 2192-2207.
- Visser, P. J. (1984): Uniform longshore current measurements and calculations, Proc. 19th Int. Conf. on Coastal Eng., pp. 2192-2207.