

等深線変化モデルの改良とその適用性について

田島 芳満*・清水 琢三**・関本 恒浩***・渡辺 晃****

1. はじめに

平面的な地形変化予測モデルは、海岸線変化モデルと 3 次元海浜変形モデルに大別される。3 次元海浜変形モデルでは、平面波浪場の計算とその結果に基づく radiation stress の空間勾配を起因力とする海浜流場の計算を行うことによって、微小振幅波理論の範囲内では任意の海岸構造物条件、波浪条件に対して、地形変化と外力場の変化の相互作用を反映することが可能である。しかしながら、現在のところ、海浜流場の算定には多大な計算時間を要するため、地形変化の履歴を逐次考慮しながら長期間の地形変化を計算するには実用上の限界がある。

一方、海岸線変化モデルは、汀線変化モデル、複数の等深線の変化を扱う等深線変化モデルともに、沿岸漂砂による地形変化機構を単純化したモデルであり、全沿岸漂砂量は砕波点における波高と波向の影響を陽に含むモデルを用いて評価される。このとき、地形変化に伴う沿岸漂砂量の変化は、等深線角度に対する砕波波向のみに依存する。したがって、海岸線変化モデルでは、細かい計算時間間隔で地形変化の履歴を考慮しながら沿岸漂砂量を補正することが可能であり、この補正効果によって、地形変化は初期の外力場に対して定常的に安定となる等深線形状に漸近する。このため、長期間の予測解析においても計算が安定で、沿岸漂砂の遮断と供給土砂の減少による広域的かつ長期的な土砂収支を議論する際に有用な予測手法である。しかしながら、複雑な海底地形や海浜循環流が発達する場合など、任意の計算条件に対しては課題が残されている。

そこで本研究では、長期的な予測に有利で、かつ平面的な地形変化を予測することが可能な等深線変化モデルに着目し、これらの利点を有したまま、複雑な波浪条件や地形条件下でも適用可能なモデルを新たに構築した。さらに、既往の海浜変形モデルとの相互比較を試み、その適用性を検討した。

2. 等深線変化モデルの概要

(1) 既往のモデル

等深線変化モデルは、砕波波高および砕波波向から沿岸方向の全漂砂量を簡易的に評価し、その岸沖方向分布を考慮して、漂砂の連続式から各等深線毎に前進・後退量を算定するモデルである。

宇多・河野 (1996) は、沿岸漂砂量の算定に Savage 公式を用い、沿岸漂砂量の岸沖分布は実験結果から経験的に得られる汀線にピークを有する分布形を用いている (以後、宇多モデルと呼ぶ)。モデルの妥当性は、主として平面移動床実験結果に基づき検討されるとともに、現地適用例も数多く報告されている。しかしながら、宇多モデルの沿岸漂砂量の岸沖分布は、バー・トラフの形成が顕著でない比較的急勾配の海岸に限定されると述べている (宇多・河野, 1996)。したがって、沿岸漂砂量の岸沖分布を物理的なメカニズムに基づき評価することが等深線変化モデルの汎用化を図る上で重要な課題である。

そのような観点から、高木 (1998) は、合田・渡辺 (1990) の不規則波の沿岸流速公式を若干補正して沿岸流速の岸沖分布を評価し、局所沿岸漂砂量フラックスが、渡辺ら (1984) のモデルと同様、沿岸流速と底面剪断応力の積に比例すると考えて、外力場に基づき沿岸漂砂量の岸沖分布を評価することを試みている (以後、高木モデル)。全沿岸漂砂量は、沿岸漂砂量式として最も一般的な CERC 公式 (宇多モデルの Savage 公式と基本的には同型) に、沿岸方向の波高分布によって生じる radiation stress 勾配に起因する流れの効果を考慮した小笹・Brampton (1979) の沿岸漂砂量式を用いている。モデルの適用例は土木学会編 (1996) に示されている。合田・渡辺の沿岸流速公式を用いることにより海浜流場の計算時間を短縮することに成功しているが、流速公式が平行等深線海岸の沿岸流場に対して得られたものであり、複雑な海底地形や遮蔽などによって沿岸方向の波高分布が生じる場合には適用できない。

(2) 改良等深線変化モデル

本研究で提案する等深線変化モデルの基本的な考え方は、高木モデルと同様、沿岸漂砂量の岸沖分布を局所的

* 正会員 五洋建設(株) 技術研究所
** 正会員 工修 五洋建設(株) 企画部
*** 正会員 工修 五洋建設(株) 技術研究所
**** 正会員 工博 東京大学教授 工学系研究科社会基盤工学専攻

な波高、波向、流速等の外力から評価される局所漂砂量分布に基づき一般的に設定することである。そのためには、まず沿岸流速分布を任意の海底条件、波高分布に対して精度良く評価する必要がある。そこで、radiation stress 勾配は平面波浪場の計算結果をそのまま用い、沿岸方向流速のみを簡易的に計算する方法を導入した。

a) 改良モデル

全沿岸漂砂量として小笹・Brampton (1979) の沿岸漂砂量式を用い、各等深線間でもこの式と同様の関係が成立すると仮定する。本モデルでは、沿岸漂砂量式は異なるものの、宇多モデルと同様、各等深線に対する相対的な碎波波向の変化に応じて沿岸漂砂量を等深線毎に変化させる。なお、沿岸漂砂量の岸沖分布は、波と流れの外力から改良渡辺モデル(清水ら, 1996)を用いて設定する。すなわち沿岸流速の評価法を除けば、高木モデルと基本的には同じである。

b) 3D-LINE

沿岸漂砂量は、波と流れの外力から改良渡辺モデルを用いて局所的に評価するとともに、全沿岸漂砂量も局所漂砂量の等深線平行方向成分を遡上点から移動限界点まで積分することにより評価する。等深線の変化は radiation stress の等深線平行方向成分の変化として沿岸流速変化に反映させる。例えば、離岸堤などの遮蔽域でのトンボロ状の堆積地形は、従来の等深線変化モデルでは等深線に対する碎波波向の変化を通して平衡状態に漸近するが、3D-LINEでは沿岸流の起因力の変化を通じて沿岸流が減少することで平衡状態になることを表現する。また、3D-LINEは、平行等深線海岸の沿岸流場では、Shimizuら (1996) の汀線変化を考慮した3次元海浜変形モデル(3D-SHORE)と整合したモデルになっている。

(3) 3D-LINEの計算法

3D-LINEの計算フローを図-1に示す。3D-SHOREと同様、モデルは波浪場、海浜流場、地形変化の3つのサブモデルによって構成される。

a) 波浪場の計算

平面波浪場の計算は、任意の海底地形、構造物条件に対して、不規則波の屈折、回折、浅水・碎波変形を同時に考慮できる計算手法を用いる。本検討では、エネルギー平衡方程式に、磯部(1986)の碎波減衰項を考慮したモデルを用いた。また、遡上域の波浪場の評価についても3D-SHOREと同様の方法を用いた。

b) 沿岸流場の計算

沿岸流速は、式(1)の運動方程式を基礎式として、平面波浪場の計算結果から求まる radiation stress 勾配を用いて数値的に評価する。

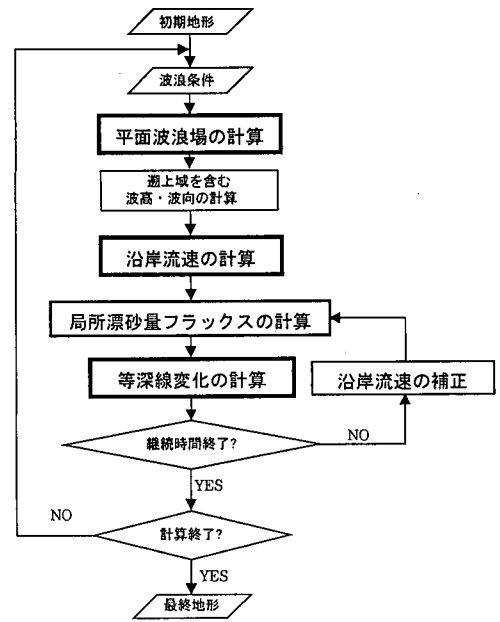


図-1 3D-LINEの計算フロー

$$\frac{\partial V}{\partial t} + F_y - \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\epsilon \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\epsilon \frac{\partial V}{\partial y} \right) \right] + R_y = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$R_y = \frac{1}{\rho D} \left(\frac{\partial S_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial x} \right) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 V ：沿岸方向流速成分、 R_y ：radiation stress 項、 S_{yy} 、 S_{xy} ：radiation stress、 F_y ：底面摩擦応力項、 ϵ ：水平拡散係数、 D ：wave set-up を考慮した水深、 ρ ：海水の密度である。式(1)では、岸沖測線方向の流速値は定常的にはほぼ無視できるものと仮定し、かつ沿岸方向の重力項、移流項は無視した。Wave set-up については、平面波浪場の計算で遡上高さを算定する際に評価した値を用いた。水平拡散項は、Longuet-Higgins の評価式で係数 $N=0.01$ とした。

各等深線と平行方向の流速成分を直接算定するために、計算座標系は沿岸方向に等間隔、岸沖方向に等水深間隔とした。すなわち、 y 軸は各測線毎の等深線平行方向になり、陸地境界線が座標軸に対して有意な角度を持つ場合には、計算精度が向上することが期待される。

また、底面摩擦項は、田中・Thu (1993) のモデルを改良した田中・Sana (1996) の全ての flow regime に適用可能な波・流れ共存場における底面摩擦側の陽形式近似式を用いて、沿岸流方向の平均剪断応力を直接評価した。なお、地形変化を計算する際、等深線変化の履歴を考慮して沿岸流速を簡易的に逐次補正するが、この補正方法については後述する。

c) 地形変化の計算

波浪場と沿岸流の計算結果を用いて、岸沖測線上の各点の等深線平行方向の局所漂砂量フラックスを算定する。局所漂砂量フラックスは、3D-SHOREと同様、シートフロー状の砂移動にも適用性が拡張され、種々の外力、底質条件に対しても現地適用性が確認されている清水ら(1996)の改良渡辺モデルを用いた。波による漂砂量係数 A_w は、底質粒径や沈降速度、摩擦係数等の関数として表され、場所的に変化させた。流れによる漂砂量係数 A_c は A_w の10倍に設定した。底面剪断応力の評価には、沿岸流の計算と同様、田中・Sana(1996)の底面摩擦則を用いた。こうして得られた岸沖方向各測線毎の沿岸漂砂量を、任意の等深線間隔で積分し、漂砂の連続式からそれぞれの等深線の前進・後退量を算定した。

d) 地形変化の履歴を考慮した外力場の補正方法

図-1の計算フローに示したように、検討対象地点の波高の出現頻度に対応するように、それぞれ数日～数十日間の時間間隔でモデル化された入射波の時系列に対して、地形変化の履歴を考慮しながら波浪場と海浜流場を繰り返し計算する。それと同時に、地形変化計算の中では、さらに細かい時間間隔で等深線変化の履歴を考慮しながら、沿岸漂砂量フラックスの補正を行う。

- 1) 地形変化計算の同一ステップ内では、等深線位置が変化しても、同一水深上では波高が変化しないものと仮定し、各等深線に対する波向の変化を考慮して沿岸流の起因力である radiation stress 項の変化を評価する。
- 2) 砕波帯内で各等深線に平行な方向の radiation stress 項を積分し、その大きさに比例させて、初期の流速値を補正する。
- 3) 補正後の流速を用いて、底面剪断応力ならびに局所沿岸漂砂量を再評価する。

図-2は、平行等深線海岸に同一波高の波を角度を変えて入射させた場合の砕波帯内の沿岸流速の平均値と radiation stress 項の総和の関係を示したものである。

計算条件は、海底勾配 1/50、有義波高 2 m、周期 9 s で、波向 α を 5～45° の範囲で 5°ピッチで変化させた。結果は、縦軸、横軸ともに 45° のケースに対する比で無次元化している。砕波帯内の平均流速と radiation stress 項の総和はほぼ比例関係にあり、上述の 2) の流速値の補正の妥当性が確認される。

3. 既往の海浜変形モデルとの相互比較

新たに提案した等深線変化モデルの適用性を検討するため、清水ら(1987)が汀線変化モデル、等深線変化モデル(宇多モデル)ならびに3次元海浜変形モデル(3D-SHORE)の相互比較に用いた沿岸漂砂阻止に伴う海浜変形のモデルケースに対して検討した。

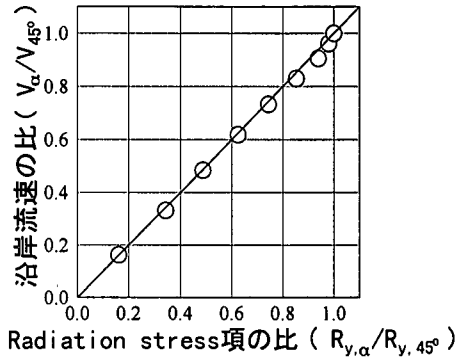


図-2 砕波帯内の平均流速(V_a)と radiation stress 項($R_{y,\alpha}$)の総和の関係

(1) 計算条件

等深線変化モデルと 3D-SHORE の計算範囲は沿岸方向 3 km の範囲であり、初期地形は海底勾配 1/50 の平行等深線海岸である。いずれのモデルも、ピーク有義波高 4 m の 2 時化で代表させたモデル時系列波浪に対して、1 年間の地形変化を計算した。波向は一定で汀線直角方向から 11.25° の斜め入射とした。

検討対象とする海浜変形モデルは、等深線変化モデルとして宇多モデル、改良モデル、3D-LINE の 3 種類と 3D-SHORE である。宇多モデルと改良モデルでは、小笹・Brampton (1979) の沿岸漂砂量式を用いたが、漂砂量係数は $K_1=0.4$ 、 $K_2/K_1=0.65$ とした。清水ら (1997) によれば、汀線変化モデルに対しては $K_2/K_1=1.62$ で、3D-SHORE の計算結果とほぼ一致する汀線変化が得られているが、本研究では漂砂量が大きい等深線間で計算が不安定になったため、小さな値を用いている。しかしながら、係数 1.62 は、小笹・Brampton (1979) が沿岸方向の波高変化に起因する砕波帯内の radiation stress 勾配を砕波点で代表させて導いた値であり、沿岸流の起因力としては過大であると判断される。また、改良渡辺モデルの漂砂量係数 B_w は、清水ら (1997) と同様、粒径 0.2 mm に対する一般的な値として、4.0 を用いた。

(2) 沿岸流速分布の比較

改良等深線変化モデルの沿岸流速分布を、通常の見海浜流場の計算結果と比較した。波浪条件は、入射境界で有義波高 2.0 m、周期 10 s、11.25° の斜め入射とした。図-3 に海浜流場の計算結果と比較する代表測線の位置を示す。測線 A は防波堤の遮蔽域、測線 B は沿岸流が発達する漂砂の上手端である。

各測線における沿岸流速の比較を図-4 に示す。等深線変化モデルでは岸沖方向の格子間隔を 10 m、3D-SHORE では 25 m としているため、汀線付近で違いがみられるものの、斜め入射波による沿岸流が発達する測線 B では、概ね良好に一致している。また、遮蔽域の測線 A

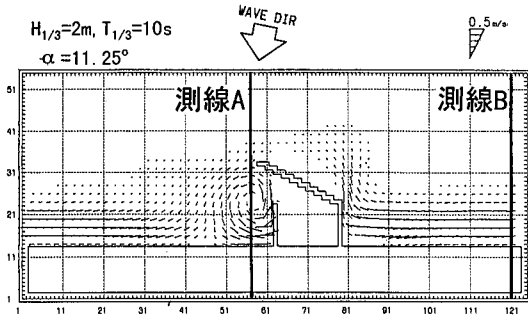


図-3 海浜流場の計算結果と代表測線の位置

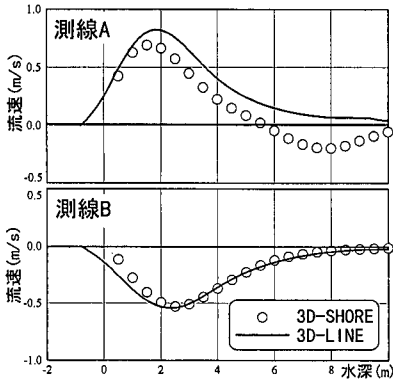


図-4 沿岸流速の岸沖分布

では、改良等深線変化モデルは沿岸方向の波高分布に起因する radiation stress の勾配が場全体に続くと仮定して計算しているため、実際には海浜循環流が発達して汀線付近と流れの向きが反転する領域においても港湾に向かう一方方向の流れが計算されている。このように遮蔽域ではやや過大評価しているものの、汀線付近では良好に一致しており、波高分布が存在する場合でも碎波帯内の沿岸流速分布は概ね評価できることがわかる。

(3) 沿岸漂砂量の比較

沿岸流が卓越する測線 B において、3D-LINE と 3D-SHORE の沿岸漂砂量の岸沖方向分布を比較した結果を図-5 に示す。計算条件は、図-4 と同じで、初期状態での漂砂量分布を示している。波高分布が同じで、流速分布もほぼ一致していることから、漂砂量の岸沖分布、大きさとも概ね一致している。

宇多モデルの分布も図中に示されているが、仮定している分布形が汀線にピークを有しており、3D-LINE の分布形とは大きく異なっている。宇多・河野 (1996) の沿岸漂砂の岸沖分布は実験値に基づくものであり、これは波による岸沖方向の漂砂や戻り流れによる沖向き漂砂、ならびに浜崖の形成など swash zone の漂砂の影響が含まれているものと考えられる。

また、図-6 は沿岸漂砂量の総量の沿岸方向分布の比

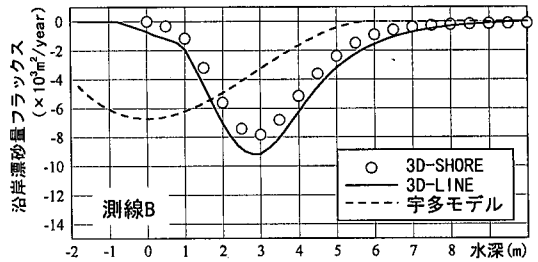


図-5 沿岸漂砂量の岸沖分布

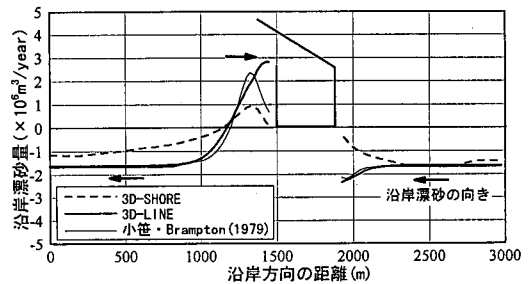


図-6 沿岸漂砂量の総量の沿岸方向分布

較結果を示している。沿岸漂砂の上手側（沿岸方向距離 2000～3000 m）では、港湾の防波堤に遮断されて沖に向かう流れが生じる領域を除けば、小笹・Brampton 式も含めよく一致している。一方、海浜循環流が発達する遮蔽域ならびに漂砂の下手側では、3D-SHORE の結果が全体的に小さくなっている。これに対して 3D-LINE と小笹・Brampton の分布は概ね一致している。いずれのモデルも、沿岸流のレベルでは原理的に同じ考え方に基いているため、沿岸方向の radiation stress 勾配を過大に評価すること、また、海浜循環流を考慮できないことから、3D-SHORE に比べて大きな沿岸流速と漂砂量を与えていると考えられる。

(4) 等深線変化の比較

図-7 に、3D-LINE と小笹・Brampton 式を用いた改良モデルによる 1 年間の等深線変化の計算結果と 3D-SHORE の結果の比較を示す。

図中には、汀線と、水深 2 m、4 m の等深線の変化を示しており、漂砂の上手側の堆積状況、遮蔽域も含めた下手側の侵食状況とともに、いずれのモデルも概ね良好に一致している。このことから、改良された等深線変化モデル (3D-LINE, 改良モデル) の妥当性が確認できる。

しかしながら、等深線変化モデルと 3D-SHORE の主な違いは、下手側の港湾近傍で 3D-SHORE では水深 2、4 m の等深線が沖に張り出していること、上手側でも 3D-SHORE の水深 2 m の等深線が等深線変化モデルより後退し、4 m の等深線が全般的に前進していることである。これらはいずれも沖向きの海浜流が発達している

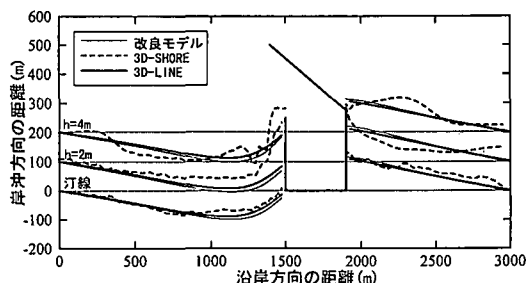


図-7 等深線変化の比較

ところで、構造物近傍での精度を向上するためには、海浜循環流による沖向き漂砂を何らかの形で取り込む必要があることがわかる。

4. 現地適用性の検討

3D-LINEの現地適用性を確認するため、北海道内浦湾中央に位置する国縫漁港の建設に伴って生じた地形変化(Kawaguchiら, 1994)の再現を試みた。検証期間は、Shimizuら(1996)の3D-SHOREの適用結果と同様、本格的な防波堤の建設が始まった1989年からの1年間である。

図-8は、3D-LINEの計算結果を実測値ならびに3D-SHOREの計算結果と比べた結果である。島式漁港の背後では1年間で汀線が顕著に張り出している。3D-LINEの計算結果も漁港背後で堆積する様子が計算されているが、汀線の張り出しは十分ではない。これに対して3D-SHOREの再現性は高い。海浜循環流が発達する場では、radiation stress項の等深線平行成分がゼロになっても、沖向きの速い流速が生じるため、動的な平衡状態に達するまで砂が遮蔽域に運ばれるというメカニズムが存在する。このような現象を沿岸方向の流れと砂移動しか考慮していないモデルで再現するには限界がある。

5. おわりに

従来の等深線変化モデルの利点を損なうことなく、より複雑な波浪条件や地形条件下にも適用が可能となるモデルとして、3D-LINEを開発し、既往の海浜変形モデルとの相互比較を通じてその妥当性を確認した。

海浜循環流など、沖向きの速い流れが卓越するような場における精度向上、遡上域における漂砂量の評価精度の向上、および、特に汀線付近における適切な等深線間隔の選び方などが、今後の課題として残されている。

今回提案した3D-LINEは、3D-SHOREと同様に、局的な外力場から漂砂量を評価するモデルであるため、海浜循環流の簡便な評価法や遡上域での漂砂量の精度向上が外力と関連づけて適切にモデル化できれば、モデルに組み込むことは容易である。また、波による岸沖漂砂

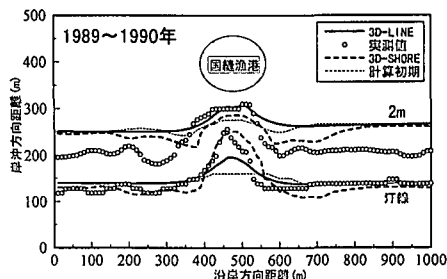


図-8 国縫地点における1年間の等深線変化の比較

や戻り流れによる沖向き漂砂による縦断地形変化モデル(例えば、Dibajniaら, 1993)とのカップリングによって、本モデルはより一般的かつ実用的な海浜変形モデルへと発展する可能性を秘めていると考えられる。

参考文献

- 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.
- 宇多高明・河野茂樹 (1996): 海浜変形予測のための等深線変化モデルの開発, 土木学会論文集, No. 539/II-35, pp. 121-139.
- 小笹博昭・Brampton, A. H. (1979): 護岸のある海浜の地形変化数値計算, 港研報告, 第18巻, 第4号, pp. 77-103.
- 合田良實・渡辺則行 (1990): 沿岸流速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.
- 清水琢三・山田晶子・渡辺 晃 (1996): 沿岸漂砂量の岸沖分布と漂砂量係数, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 571-575.
- 清水琢三・高木利光・佐藤勝弘・山田晶子 (1997): 海浜変形モデルの相互比較, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 506-510.
- 高木利光 (1998): 海岸線変化モデル, 漂砂環境の創造に向けて, 第III編, 2.3, 土木学会海岸工学委員会研究現況レビュー-小委員会編, pp. 232-245.
- 田中 仁・Thu, A. (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号/II-23, pp. 93-102.
- 田中 仁・Sana, A. (1993): 交差する波と流れの抵抗則の検討, 土木学会論文集, 第533号/II-34, pp. 273-277 (論文中の式(4)の修正が論文集 No. 565/II-39 に掲載されている; 正, $C_i = -0.0101 - 0.3469\gamma^{0.2}$).
- 土木学会編 (1996): 周辺海域の波・流れ・海浜変形の評価, 人工島式海上立地技術, 第3.4節, 原子力発電所の立地多様化技術, 第4編, 原子力土木委員会, pp. 173-191.
- 渡辺 晃・丸山康樹・清水隆夫・神山 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.
- Mohammad Dibajnia・清水琢三・渡辺 晃 (1993): 現地海岸における縦断地形変化の再現, 海岸工学論文集, 第40巻, 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.
- Shimizu, T., T. Kumagai and A. Watanabe (1996): Improved 3-D beach evolution model coupled with the shoreline model (3D-SHORE), Proc. 25th Conf. on Coastal Eng., pp. 2843-2856.