

海浜変形モデルの相互比較

清水琢三*・高木利光**・佐藤勝弘***・山田晶子****

1. ま え が き

近年、自然海岸の短期的な縦断地形変化ならびに構造物建設に伴う中・長期的な平面地形変化をシミュレートする数値モデルが開発・改良され、実規模実験および現地への適用例が数多く報告されている（例えば、清水、1996）。しかしながら、複数の海浜変形モデルを同一の問題に適用してモデルの相互比較を行った例は、ヨーロッパのMASTプロジェクトの縦断地形変化モデルの比較（Roelvink・Brøker, 1993）と平面地形変化モデルの比較（de Vriendら, 1993）を除けば報告されていないのが現状である。そこで本研究では、我が国で実用的に用いられている縦断地形変化モデルと平面地形変化モデルの相互比較を試みた。

2. 縦断地形変化モデル

2.1 検討モデルの概要

（1）渡辺モデルとDibajniaモデル

波浪変形と戻り流れの評価法は同じにして、局所漂砂量算定式の違いによる比較を行うことを目的として、渡辺モデルとDibajniaモデルを取り上げた。

検討に用いたモデルは、基本的にはDibajniaら（1993）と同じであり、波浪場は碎波減衰項を考慮したエネルギー方程式を用いた。戻り流れは、鉛直分布までは考慮せず、佐藤ら（1987）にならない、大規模渦による質量輸送が波高の2乗に比例すると考えて、それを補償する形で簡便に評価した。

$$U_b = -A \cdot H^2 / (d \cdot T) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 H ：波高、 d ：水深、 T ：周期、 A ：無次元定数である。不規則波に対しては碎波した波だけが寄与すると考えて評価した（Dibajniaら, 1993）。

局所漂砂量算定式としては、粒径の効果や移動方向の判別など改良・汎用化された清水ら（1996）の改良渡辺モデルと高沢ら（1996）の改良Dibajniaモデルを用いた。なお、Dibajniaモデルの移動形態ならびに向きの判別に

はDibajniaら（1993）の評価式を用いた。

遡上域の漂砂は地形変化の再現上重要であるので、便宜的ではあるが、以下の2通りの方法を検討した。

① 遡上域に仮想水深を設定する方法：最大遡上高を最大波に対してHuntの式で求め、汀線でのwave set-up高と最大遡上点を直線で結んで遡上域に仮想水深を設定し、再度波浪変形計算を行って局所漂砂量算定式を適用した。なお、最大遡上高は前浜の勾配に対して求めた。

② 遡上域の漂砂量分布の仮定：浅野・松岡（1996）にならない、遡上域の漂砂量 q_r を静水汀線での漂砂量 q_s から遡上点でゼロになるように次式で表した。

$$q_r = \left(\frac{x_r - x}{x_r - x_s} \right)^n q_s \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 x_r 、 x_s は遡上点および静水汀線の位置であり、 n は漂砂量の分布を決めるパラメータで、Larson（1994）は類似の表現で1.5を与えている。本研究でも、 n を0.5、1.0、1.5と変化させて検討した結果、最も検証データに近い値を与える $n=1.5$ を採用した。

なお、局所的に限界勾配（ここでは1/2と仮定）を越えないように底面地形を補正した（Dibajnia, 1992）。

（2）NPMモデル

ヨーロッパを代表するモデルとしてイギリスのNPMモデル（Southgate・Nairn, 1993；Nairn・Southgate, 1993）を取り上げた。波浪変形は、（1）とは表現が異なるが、底面摩擦と碎波減衰を考慮したエネルギー方程式を基本としている。戻り流れは、de Vriend・Stive（1987）の3層モデルを用いている。局所漂砂量算定式は、Stive（1986）によって拡張されたBailard（1981）のモデルである。遡上域の漂砂量は式（2）で $n=1$ を用いている。

2.2 モデルの比較

検証データとしては、できるだけ現地条件に近く（実規模スケールで不規則波を対象とした実験）、しかも外国のモデルとの比較が可能なデータとして、①アメリカのSUPERTANKプロジェクトの実験結果の内、侵食型の地形変化のケースST 10（Kraus・Smith, 1994；Smith・Kraus, 1995）、②ヨーロッパのMASTプロジェクトの実験結果の内、ヨーロッパのモデルの相互比較に用いられたケース（Roelvink・Brøker, 1993）を選定した。

* 正会員 工修 五洋建設(株)企画部

** 正会員 工博 (株)アイ・エヌ・エー 海岸海洋部

*** 正会員 工修 (株)テトラ 環境技術センター

**** 正会員 工修 五洋建設(株)技術研究所 海岸海洋グループ

(1) SUPERTANK (アメリカ)

オレゴン大学大型造波水路で実施された侵食型（ケース ST 10）のケースについて検討した。初期海底勾配は $1/10$ ，中央粒径は 0.22 mm で，入射波条件は $H_{1/3}=0.8 \text{ m}$ ， $T_{1/3}=3.0 \text{ s}$ ，波作用時間は 1285 分 （ 21.4 時間 ）である。計算格子間隔は 0.5 m で， 2 分 毎に波浪場と地形変化の計算を繰り返した。式（1）の戻り流れの係数 A は戻り流れの実測値との対応から 4.0 で一定値とした。

図-1 は 400 分 後と 1240 分 後の波高と戻り流れの分布を比較した結果である（遡上域の漂砂の取り扱い：①

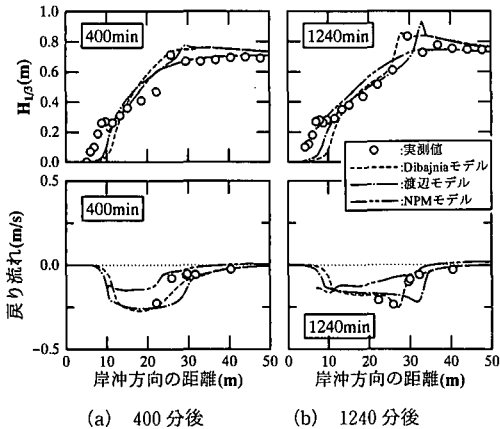
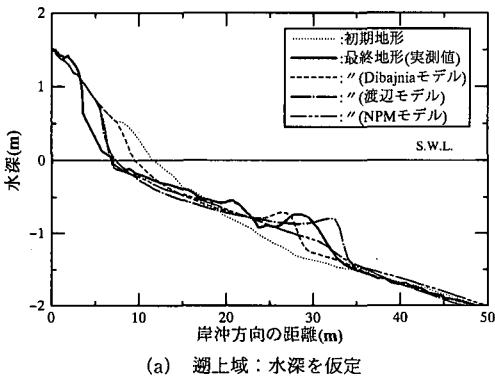
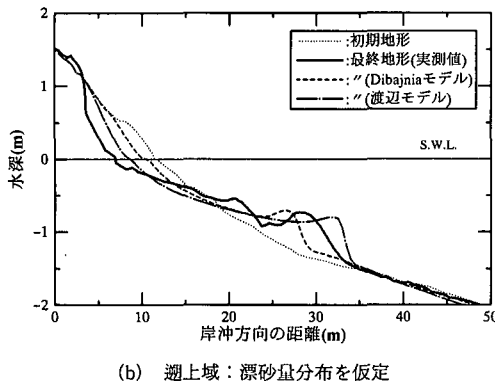


図-1 波高と戻り流れの縦断分布の比較 (SUPERTANK)



(a) 遡上域：水深を仮定



(b) 遡上域：漂砂量分布を仮定

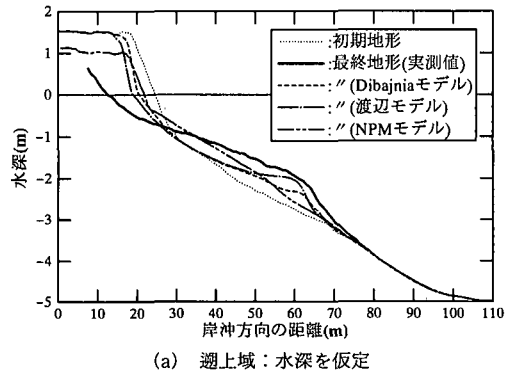
 図-2 縦断地形変化の比較 (SUPERTANK, 1240 分 後)

のケース）。波高分布はいずれのモデルも大差がないが，戻り流れは NPM モデルの結果がやや小さい結果を与えている。Dibajnia モデルは，図-2 で示すようにバー頂部の位置がほぼ一致していることもあって，波高ならびに戻り流れともにバーで急激に碎波して戻り流れが速くなる様子等実測値の傾向を最もよく再現している。

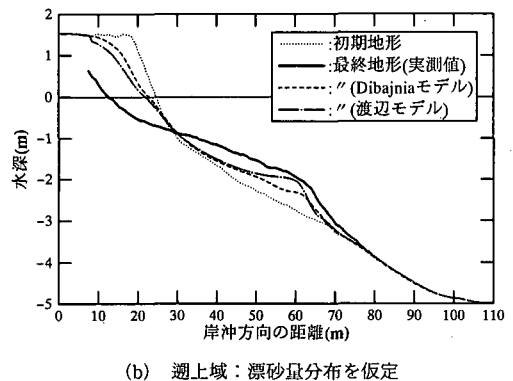
図-2(a) は，遡上域に仮想水深を与え，局所漂砂量式を適用した場合の 1240 分 後の地形変化を比較した結果である。いずれのモデルも前浜の後退がやや不十分であるが，渡辺モデルと Dibajnia モデルはバーの位置が多少ずれているものの，バーの高さなど全体的には概ね実験結果を再現している。図-2(b) は遡上域の漂砂量を式（2）で表した場合の結果を示しているが，(a) の結果とほぼ一致しているが，汀線付近がやや改善されている。

(2) MAST (ヨーロッパ)

ハノーバー大学大型造波水路で実施された不規則波の実験結果で，ヨーロッパのモデルの比較にも用いられているケースを取り上げた (Roelvink・Bröcker, 1993)。初期海底勾配は $1/20$ ，前浜勾配 $1/4$ と比較的急で，中央粒径は 0.22 mm ，入射波浪条件は $H_{1/3}=1.5 \text{ m}$ ， $T_{1/3}=6.0 \text{ s}$ ，波作用時間は 6.9 時間 である。計算格子間隔は 0.5 m で， 1 分 毎に波浪場と地形変化の計算を繰り返した。式（1）の戻り流れ係数 A は surf similarity parameter を考慮した Dibajnia ら (1993) の評価式により評価した。 A



(a) 遡上域：水深を仮定



(b) 遡上域：漂砂量分布を仮定

 図-3 縦断地形変化の比較 (MAST, 6.9 時間 後)

はモデルによって異なるが、12~15程度の値である。

図-3(a) は最終地形の計算値と実測値の比較を示している。前浜の侵食が計算では十分再現できていないものの、Dibajnia モデル、渡辺モデルによる計算結果はテラスの沖端の位置と高さについては概ね良好に再現できている。図-3(b) の遡上域の漂砂量分布を式(2)で仮定した場合は多少汀線付近が改善されているものの、結果はほとんど変わらない。

以上のように、大型造波水路実験の再現計算を行った結果、高波浪時の縦断地形変化は、砕波帯外のシートフローによる岸向き漂砂と砕波帯内の戻り流れによる沖向き漂砂を考慮すれば、基本的には説明できることが明らかになった。しかしながら、今回検討したモデルだけでなく、ヨーロッパの各モデルも前浜の侵食を十分表現できていない。このことは swash zone の漂砂を適切に扱うことの重要性を示している。また、不規則波を扱う以上、長周期波は無視できず、前浜の侵食に大きな影響を及ぼすことが知られているので、長周期波をモデルに取り込むことも今後の重要な課題である。さらには、砕波による巻き上げ機構をモデルに取り込むことも精度を上げる上で重要であると考えられる。

3. 平面地形変化モデル

3.1 検討モデルの概要

検討対象モデルは、①構造物建設に伴う中・長期的な海浜変形モデルとして我が国で実用的に用いられている汀線変化モデルと②それを発展させた宇多・河野(1996)の等深線変化モデルならびに③汀線変化モデルと3次元海浜変形モデルを組み合わせた実用的な海浜変形モデル(3D-SHORE)(Shimizu ら, 1996)である。いずれも沿岸流による漂砂のみを考慮したモデルであるという点では共通である。モデルの詳細については省略するが、汀線変化モデルおよび等深線変化モデルともに小笹・Brampton(1977)の沿岸漂砂量式を用いた。また、3D-SHOREでは、縦断地形変化モデルと同様に、遡上域に仮想水深を設定し、海浜流場ならびに地形変化の計算を行っている。

3.2 平面地形変化のモデルケース

モデルの比較は、①沿岸漂砂阻止に伴う海浜変形(小規模港湾建設に伴う海浜変形)と②遮蔽域形成に伴う海浜変形(人工島建設に伴う海浜変形)を想定したモデルケース(海底勾配1/50の海岸に汀線直角方向から11.25°斜め入射)に対して検討した。波浪条件

としては、太平洋岸の波浪観測データに基づき(永井ら, 1993)、汀線変化モデルではエネルギー平均有義波を、3D-SHOREではトータル波浪エネルギーが同じになるようにピーク有義波高4mの2時化で代表させたモデル時系列波浪を用いた。

(1) 沿岸漂砂阻止に伴う海浜変形

沿岸漂砂阻止に起因する海浜変形の典型的なモデルケースについて、1年後の地形変化を比較した結果を図-4に示す。汀線変化モデルは沿岸方向10kmの範囲で、その他は小規模港湾周辺の3kmの範囲で計算した。また、各計算領域の端では漂砂の流入は生じるが、汀線が変化しない固定境界とした。小笹・Bramptonの沿岸漂砂量係数 K_1 は0.4、 $K_2/K_1=1.62$ 、3D-SHOREの渡辺モデルの漂砂量係数 B_w を中央粒径0.2mmの砂の一般的な係数として4.0を用いた。

汀線変化に着目すると、3D-SHOREと汀線変化モデルによる結果は構造物近傍では概ね一致しており、両モデルの整合性が確認できる。なお、3D-SHOREの計算領域の両端付近での相違は計算領域の違いに起因している。

等深線変化モデルによる結果は、漂砂の上手側の汀線の張り出し状況と、下手側の沿岸方向の距離の0から

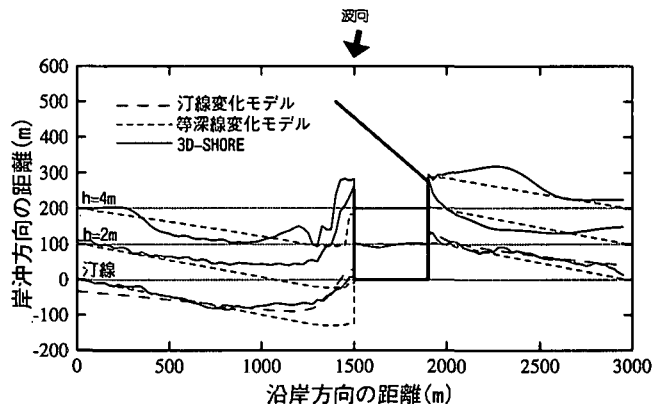


図-4 1年後の地形変化の比較(沿岸漂砂阻止海浜モデル)

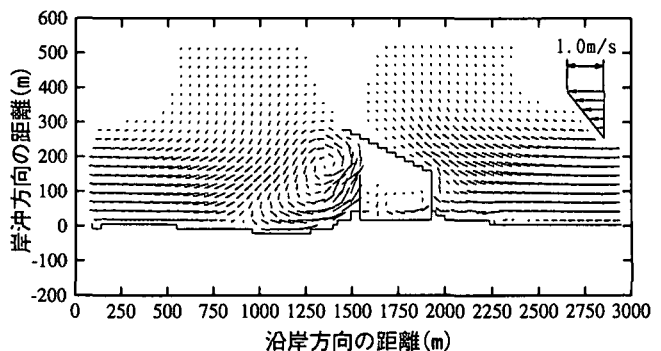


図-5 海浜流場の計算結果(沿岸漂砂阻止海浜モデル)

750 m 付近の後退状況が 3D-SHORE の結果とよく一致している。

一方、下手側の小規模港湾近傍では等深線変化モデルは防波堤沿いのごく近傍を除いて侵食しているのに対して、3D-SHORE では水深 2, 4 m の等深線が張り出している。また、下手側の計算領域の中央付近では 3D-SHORE の 4 m の等深線が等深線モデルに比べて後退している。これは主防波堤による遮蔽域で図-5 に示すように海浜循環流が発達するため、等深線変化モデルで仮定するよう

な沿岸方向の砂移動のみならず、海浜循環流による岸沖方向の砂移動が生じるためである。このように等深線変化モデルでは港湾近傍の遮蔽域の反時計廻りの循環流の影響を考慮できない。また上手側でも 3D-SHORE の水深 2 m の等深線が等深線モデルより後退し、4 m の等深線が前進しているが、これは沿岸流が港湾に遮断されて、沖に流出するためである。このように沿岸漂砂による平均的な地形変化は等深線変化モデルでも十分評価できるが、構造物近傍の海浜流による地形変化を精度よく評価するためには、3次元海浜変形モデルを用いる必要があることがわかる。

図-6 は 1 年間の累積沿岸漂砂量の沿岸分布を示している。3D-SHORE の沿岸漂砂量は初期段階では漂砂の下手側で反時計廻りの循環流により港湾向きの沿岸漂砂がみられるが、1 年を通してみると全域で図面上左向きの沿岸漂砂が卓越することがわかる。しかも、年間の沿岸漂砂量の分布は汀線変化モデルの計算結果とほぼ一致している。等深線変化モデルの結果は計算範囲の下手側では概ね汀線変化モデルと一致している。このように、漂砂量係数（今回の計算に用いた漂砂量係数は全沿岸漂砂量式も、局所漂砂量式も現地で一般的に用いられる大きさである）と境界条件（計算範囲）を適切に選べば、沿岸漂砂量の総量としては 3 つのモデルはいずれも概ね一致した結果を得ることができる。

(2) 遮蔽域形成に伴う海浜変形

遮蔽域形成に伴う海浜変形の典型的なモデルケースとして、幅 0.5 km、長さ 1.0 km の人工島を水深 10~20 m に設置した場合の 1 年後の地形変化の比較を図-7 に示す。汀線変化モデルは沿岸方向 10 km の範囲で、その他は人工島周辺の 4 km の範囲で計算した。漂砂量係数ほかの計算条件は (1) と同じである。

汀線に着目すると、汀線変化モデルは双峰型のトンボ

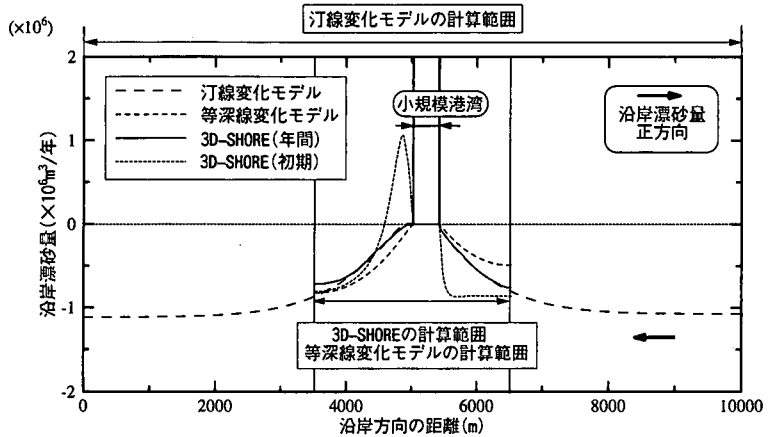


図-6 沿岸漂砂量の比較（沿岸漂砂阻止海浜モデル）

ロが形成されているのに対して、3D-SHORE と等深線変化モデルは単峰型のトンボロが形成されている。いずれのモデルも漂砂の上手側寄りにトンボロのピークが形成されており、上手側で沿岸漂砂を遮断して堆積、下手側で侵食する傾向がみられる。また、トンボロの前進量の最大値と下手側の汀線後退量の最大値は 3 つのモデルで概ね一致している。

3D-SHORE の計算結果は、トンボロのピークの位置が他に比べて人工島背後に寄っており、しかも上手側でやや侵食している。これは、図-8 に示すように上手側から人工島に向かって形成される海浜循環流が人工島の中央よりも下手側まで入り込む形となっており、上手側

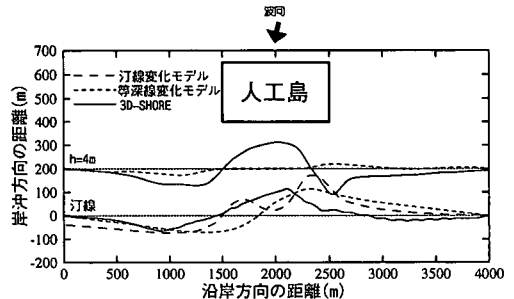


図-7 1年後の地形変化の比較（人工島設置海浜モデル）

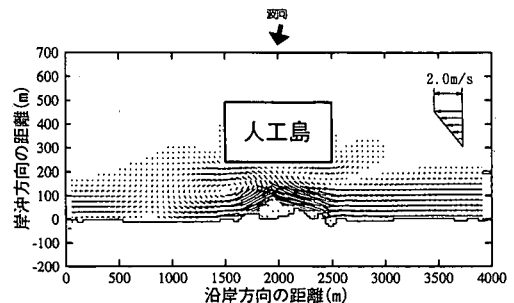


図-8 海浜流場の計算結果（人工島設置海浜モデル）

では速い海浜流により汀線付近がむしろ侵食している。

一方、水深4mの等深線は、3D-SHOREの計算結果によれば人工島背後で広範囲に堆積しており、人工島の両側で侵食した砂が海浜循環流によって人工背後に大量に堆積する結果となっている。等深線変化モデルでは沖向きの循環流による砂移動を精度よく取り扱えないため、水深4mの等深線の張り出しは不十分である。

3.4 モデルの適用範囲

現在、我が国で問題となっている海岸侵食はほとんどが何らかの土砂収支の不均衡に起因するものであり、我々の関心事は海岸に構造物を建設する際にどのような外力場の変化あるいは土砂収支の変化が生じるかを事前に適切に予測することである。しかも、平面的な地形変化、特に汀線付近の砂浜の変化が重要である。3次元海浜変形モデルで対象とするのは、前者の外力場の変化による1～5年の比較的短期的かつ急激な地形変化であり、検討範囲はせいぜい5kmの範囲である。それより広域かつ長期的な土砂収支の不均衡に起因する海浜変形は汀線変化モデルあるいは等深線変化モデルで検討せざるを得ないし、またその方が計算時間も短く、計算も安定であるので現実的な答えが得られる。したがって、実際問題への適用に当たっては、検討対象の空間スケールならびに時間スケールで適切に使い分けるとともに、構造物の影響の少ないところで整合がとれるように、境界条件および計算範囲を適切に設定する必要がある。図-4, 6に示した沿岸漂砂阻止海浜のモデル計算結果は、上記のモデルの使い分けの妥当性を示している。

4. あとがき

本研究では、現在実用的に用いられている縦断地形変化モデルと平面地形変化モデルの相互比較を行った。縦断地形変化モデルについては、swash zoneでの外力、漂砂量の評価に課題が残されており、さらに精度を向上させるためには浜崖の形成・崩壊のメカニズムを考慮したモデル化が必要である。また、平面地形変化モデルについては、汀線変化モデル、等深線変化モデル、3D-SHOREの整合性が沿岸流場に対して確認された。適用に当たっては、対象とする海浜変形のメカニズムと時・空間スケールに応じて、モデルを適切に使い分けの必要がある。

なお、本稿をまとめるに当たり、平成6年度から2年間にわたり実施された研究現況レビュー小委員会海浜変形WGでの議論が有益であったことを付記し、委員の方々に深甚なる謝意を表します。

参考文献

浅野敏之・松岡昌夫 (1996): 浜崖の形成過程に着目した2次元海浜海浜変形に関する研究, 海岸工学論文集, 第43巻, pp.

486-490.

- 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): 護岸のある海浜のてい線変化数値計算, 港研報告, 第18巻, 第4号, pp. 77-103.
- 佐藤慎司・福沢方哉・堀川清司 (1987): 斜面上における不規則波の碎波変形と底面流速に関する実験的研究, 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 36-40.
- 清水琢三 (1996): 海浜変形シミュレーション, 水工学に関する夏期研修会講義集, pp. B-5-1～B-5-26.
- 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.
- 高沢大志・M. Dibajnia・渡辺 晃 (1995): シートフロー漂砂量公式の改良, 第51回年講要集, 第2部(B), pp. 124-125.
- 永井紀彦・菅原一晃・橋本典明・浅井 正 (1993): 全国港湾海洋波浪観測20年統計, 港研資料, No. 744, 304 p.
- Mohammad Dibajnia・清水琢三・渡辺 晃 (1992): シートフロー状態が卓越する海岸の縦断面地形変化の数値計算, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 301-305.
- Mohammad Dibajnia・清水琢三・渡辺 晃 (1993): 現地海岸における縦断面地形変化の再現, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 406-410.
- Bailard, J. A. (1981): An energetics total load sediment transport model for a plane sloping beach, J. Geophys. Res., Vol. 82., No. C 11, pp. 10938-10954.
- De Vriend, H. J. and M. J. F. Stive (1987): Quasi-3D modelling of nearshore currents, Coastal Eng., Vol. 11, pp. 565-601.
- De Vriend, H. J., J. Zyserman, J. Nicholson, J. A., Roelvink, P. Pêchon and H. N. Southgate (1993): Medium-term 2 DH coastal area modelling, Coastal Eng., Vol. 21, pp. 193-224.
- Kawaguchi, T., O. Hashimoto, T. Mizumoto and A. Kamata (1994): Construction of offshore fishing port for prevention of coastal erosion, Proc. 24 th Int. Conf. on Coastal Eng., pp. 1197-1211.
- Kraus, N. C. and J. M. Smith (1994): SUPERTANK laboratory data collection project, Vol. I: Main text, CERC, Waterways Experiment Station, US Army Corps of Engineers, Technical Report CERC-94-3, 274 p.
- Larson, M. (1994): Predictive beach profile change at mesoscale under random waves, Proc. 24 th Int. Conf. on Coastal Eng., pp. 2252-2266.
- Nairn, R. B. and H. N. Southgate (1993): Deterministic profile modelling of nearshore processes, Part 2, Sediment transport and beach profile development, Coastal Eng., Vol. 19, pp. 57-96.
- Roelvink, J. A. and I. Brøker Hedegaard (1993): Cross-shore profile models, Coastal Eng., Vol. 21, pp. 163-191.
- Shimizu, T., T. Kumagai and A. Watanabe (1996): Improved 3-D beach evolution model coupled with the shoreline model (3D-SHORE), Proc. 25 th Conf. on Coastal Eng. (in printing).
- Smith, J. M. and N. C. Kraus (1995): SUPERTANK laboratory data collection project, Vol. II: Appendices A-I, CERC, Waterways Experiment Station, US Army Corps of Engineers, Technical Report CERC-94-3, 153 p.
- Southgate, H. N. and R. B. Nairn (1993): Deterministic profile modelling of nearshore processes, Part 1, Waves and currents, Coastal Eng., Vol. 19, pp. 27-56.
- Stive, M. J. F. (1986): A model for cross-shore sediment transport, Proc. 20 th Int. Conf. on Coastal Eng., pp. 1550-1564.