

CMS-M2D モデルによる離岸堤・潜堤・DRIM 背後の 海浜変形シミュレーション

小野信幸¹・Nicholas C. Kraus²・山口 洋³・入江 功⁴

著者らが新たな漂砂対策工法として提案している砂れんマット (DRIM) を効果的に適用するには, 周辺の海底地形変化に与える影響を適切に評価するシミュレーションモデルが必要である。また, 対策工の選定においては, 種々の漂砂対策構造物の効果を相互比較し, 建設コストや周辺海域への影響の最小化を図ることが求められる。本研究では, Coastal Inlet Research Program (CIRP) において開発されている CMS-M2D モデルをベースに, 移流分散漂砂モデルに DRIM の漂砂制御モデルを追加した。また, 離岸堤・潜堤・DRIM を設置した場合のシミュレーションをおこない, それぞれの地形変化の特徴を比較した。

1. はじめに

海岸侵食や航路埋没対策の検討では, 対策工の設置による外力条件の変化に応じた底質移動を正しく予測し, 建設コストや周辺海域への影響の最小化を図ることが求められる。また, 漂砂問題は, その影響が時間的・空間的に広範囲に及ぶため, 広域かつ長期的な海浜変形を簡便かつ精度よく評価する数値モデルが必要とされている。

著者らは, 新たな漂砂制御工法として, 安価で景観・環境・利用面に優れた歪み砂れんマット (以下 DRIM) の利用を提案し, その漂砂制御機能の有効性について, 水槽実験を通して確認してきた (小野ら, 2002, 山口ら, 2002, 2003)。また, 2004 年 6 月からは, 福岡県芦屋海岸において, 詳細な調査を伴う初の現地試験が開始され, 現地レベルにおける DRIM の漂砂制御機能や耐波安定性などを総合的に検討してきた (DRIM 工法研究会, 2005, 山口ら, 2005)。今後, DRIM 工法を有効に漂砂対策に用いるためには, DRIM が周辺の海底地形に与える影響を適切に評価するシミュレーションモデルが不可欠である。

本研究では, 米国陸軍工兵隊の Coastal Inlet Research Program (CIRP) において開発されている CMS (Coastal Modeling System)-M2D モデル (Buttolph ら, 2006) をベースとして, 移流分散式による漂砂モデルを導入した。また, DRIM の効果を簡便な形で移流分散漂砂モデルに取り入れた。以下では, まず移流分散漂砂モデルの特徴を整理し, 次に DRIM 設置時の地形変化シミュレーションをおこなった。また, 離岸堤や潜堤設置時の地形変化と相互比較をおこない, それぞれの特徴を整理した。

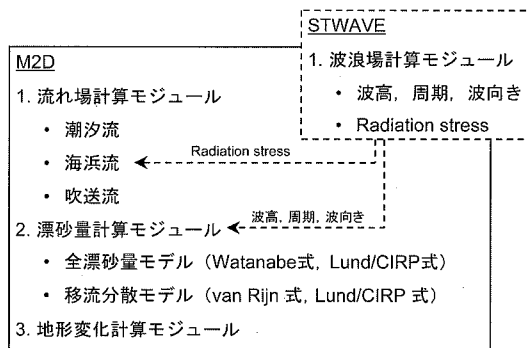


図-1 CMS-M2D モデルによる海底地形変化計算

2. CMS-M2D モデルの概要

CMS-M2D は, 水深積分型の連続式と運動方程式を基礎式として, 特に Tidal Inlet 周辺の流れ場と地形変化を計算するために開発されているモデルである。モデルの特徴は, 潮汐, 海浜流, 吹送流などの多様な外力を考慮できること, 幾つかの漂砂量公式が導入されていて結果を相互比較できること, 潮位変動にともなう底面の Wet/Dry 条件と, 岩盤などの固定面 (ハードボトム) がある場合の漂砂量の修正アルゴリズムが組み込まれていることなどが挙げられる。

図-1 は, 本モデルによる海底地形変化の計算手法を示したものである。波浪場は, エネルギー平衡方程式に基づく波浪モデル (STWAVE; Smith ら, 2001) で別途計算し, その結果を M2D に受け渡して流れ場と波・流れ共存場の漂砂量を計算し, 水深変化を漂砂の連続式により求める。

3. 移流分散式による漂砂モデル

水深変化モデルにおける漂砂量の計算手法には, 局所的な底面せん断応力から直接漂砂量を評価する全漂砂量

1 正会員 博(工) (株)エコー 沿岸デザイン本部
2 Ph. D ERDC US Army Corps of Engineers
3 正会員 博(工) 若築建設(株) 技術研究所
4 正会員 工博 九州大学名誉教授

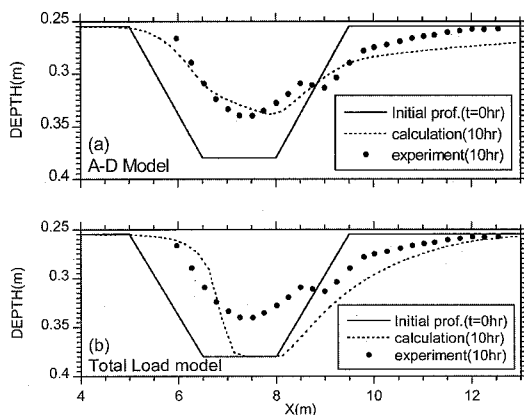


図-2 van Rijn (1984) の航路埋没実験の再現計算. (a) 移流分散モデル (van Rijn 式), (b) 全漂砂量モデル (Watanabe 式)

モデルと、浮遊砂移動を移流分散式により評価する移流分散モデルの2種類がある。本研究では、水深積分型の移流分散モデルを導入し、まず、全漂砂量モデルとの違いを比較した。

(1) 基礎式

移流分散モデルの基礎式は、以下の通りである。

$$\frac{\partial Cd}{\partial t} + \frac{\partial CUd}{\partial x} + \frac{\partial CVd}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x d \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y d \frac{\partial C}{\partial y} \right) + P - D \quad (1)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{1-p} \left[\left(\frac{\partial q_{bx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{by}}{\partial y} \right) + (P - D) \right] \quad (2)$$

ここで、 C は水深平均の浮遊砂濃度、 d は全水深、 U, V は平均流速の x 方向と y 方向成分、 K_x, K_y は移流分散係数であり、Elder (1959) により評価する。 P は底質の巻き上げ量、 D は底質の沈降量、 q_{bx}, q_{by} は x 及び y 方向の掃流漂砂量成分、 h は水深、 p は底質の空隙率である。本モデルにおいて、巻き上げ量 P は、van Rijn (1985) の公式と Lund-CIRP 公式 (Cammenon ら, 2005, 2006) に基づく2種類の方法を導入している。沈降量 $D (=c_0 w_f, c_0$ は底面における基準点濃度、 w_f は沈降速度) は、定常状態の浮遊砂濃度の鉛直分布を仮定して、断面平均濃度 C より底面濃度 c_0 を評価することにより求める。漂砂量式の詳細については、Buttolph ら (2006) に詳しいので、ここでは割愛する。

(2) 移流分散モデルの特徴

本モデルの特徴を把握するため、航路埋没現象のシミュレーションをおこなった。図-2 は、van Rijn (1985) による航路埋没実験を移流分散モデル (van Rijn 式) と全漂砂量モデル (Watanabe 式) で計算した結果である。実験条件は、粒径 0.1 mm の砂により作成された航路模

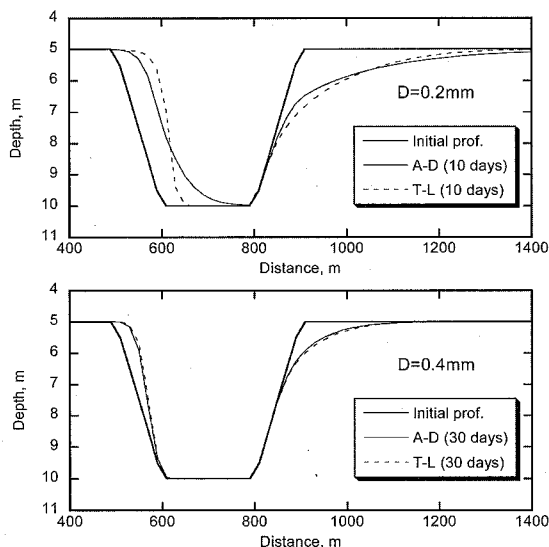


図-3 Lund-CIRP 式による移流分散モデル (A-D) と全漂砂量モデル (T-L) の航路埋没計算結果. 上: 粒径 0.2 mm , 下: 粒径 0.4 mm .

型に、流速 0.18 m/s の一方向流れと波高 0.08 m 、周期 1.5 s の波が作用するものである (波の進行方向は流れの方向と同じ)。図より、移流分散モデルは航路埋没現象を精度よく再現しているが、全漂砂量モデルでは、航路法面が前進するのみである。このことは、入江ら (1985) で指摘されているように、埋没現象は上流側から運ばれてきた浮遊砂が航路内で沈降する過程が含まれていない全漂砂量モデルでは再現できず、移流分散モデルが有効となる現象の一つである。

図-3 は、全漂砂量モデルと移流分散モデルの両方に導入されている Lund-CIRP 式を用いて航路埋没シミュレーションをおこなった結果である。計算条件は、航路外水深を 5 m 、航路内の水深を 10 m と設定し、流速 1 m/s の一方向流れを作用させた場合について、底質粒径が 0.2 mm と 0.4 mm の場合を比較したものである。粒径が 0.2 mm の場合は、図-2 と同様の傾向が見られるが、粒径が 0.4 mm の場合は、両モデルによる計算結果はほぼ等しい。つまり、移流分散モデルは、粒径が小さく、浮遊漂砂が卓越する場合の地形変化をより現実的に再現することができるといえる。

4. DRIM の効果の導入

(1) DRIM の漂砂輸送速度

DRIM の漂砂制御機能は、DRIM の周辺で波・流れによって巻き上げられた底質が、拡散により DRIM 上に運ばれ、それが DRIM 上に発生する底層流により移動することで発揮される。前節で述べたように、移流分

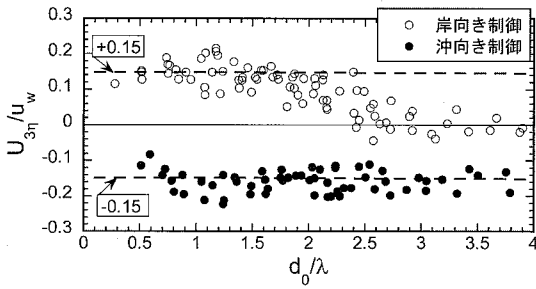


図-4 DRIM 上の底層流の特性

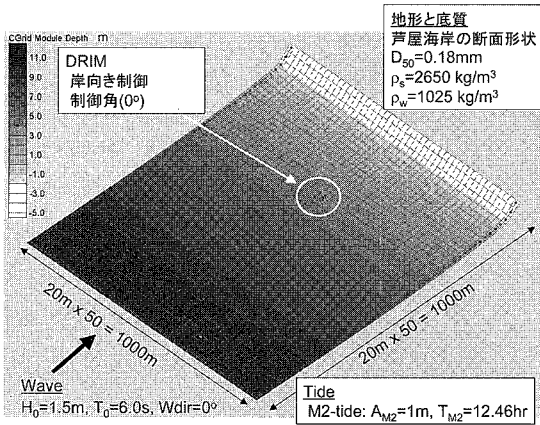


図-5 計算条件の設定

散モデルは浮遊漂砂が顕著な場合の地形変化を精度よく再現するため、DRIM の評価に適していると考えられる。ここでは、移流分散モデルで DRIM の効果を評価する方法について述べる。

移流分散モデルによる浮遊漂砂量 Flux は、

$$\vec{q}_s = Cd\vec{U} + DIFF \quad (3)$$

により表される。ここで、 $\vec{U}$ は海浜流ベクトル、 $DIFF$ は拡散による成分を表す。DRIM 上に生じる底層流による底質輸送を表現するために、浮遊砂輸送速度 $\vec{V}_{sg}$ を用いて、DRIM 上の浮遊漂砂量 Flux を次のように表すものとした。

$$\vec{q}_s = Cd(\vec{U} + \vec{V}_{sg}) + DIFF \quad (4)$$

浮遊砂輸送速度 $\vec{V}_{sg}$ は、DRIM の設置方向に作用するものとし、その大きさは、過去におこなった水槽実験におけるデータを再整理して次のように与えた。

$$|\vec{V}_{sg}| = 0.15u_w \cos \phi \quad (5)$$

ここで、 u_w は波の進行方向の底面流速振幅、 ϕ は DRIM 設置方向と波向きのなす角である。図-4 は、水

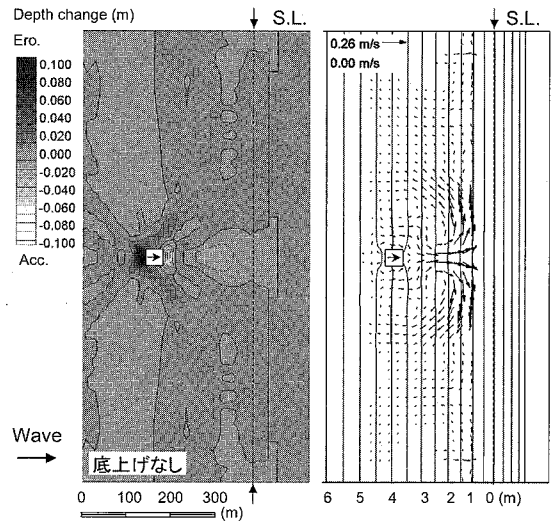


図-6 DRIM 設置時の地形変化量 (左, 初期地形と 5 日後の地形の差), 等深線と流れ場のパターン (右). DRIM の底上げなし

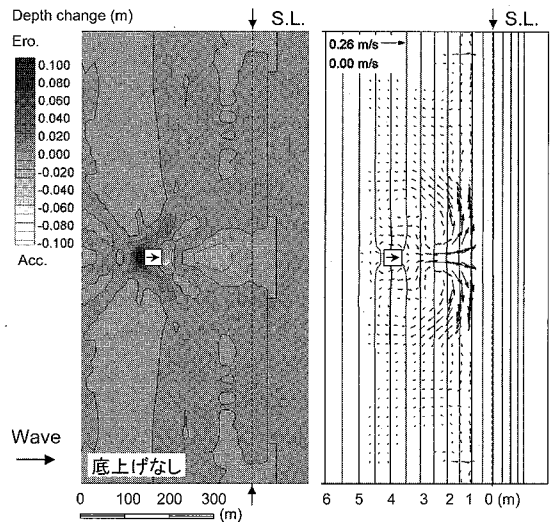


図-6 DRIM 設置時の地形変化量 (左, 初期地形と 5 日後の地形の差), 等深線と流れ場のパターン (右). DRIM の底上げなし

槽実験において測定された DRIM 上の底層流 $U_{3\eta}$ (底面から DRIM の波高の 3 倍の高さまでの平均流速) を、底面の水粒子軌道径 d_0 と DRIM の波長の比についてプロットしたものである。図より、岸向き制御の場合の $d_0/\lambda > 2.5$ の条件において $U_{3\eta}$ の値に変化が見られるが、 $\vec{V}_{sg}$ が $U_{3\eta}$ に等しいと仮定すれば、式 (5) により DRIM 上の底層流速を概ね表現できることがわかる。また、既往の実験結果 (山口ら, 2002) により、 $\vec{V}_{sg}$ の向きは、波向きによらず DRIM による漂砂制御を意図

した方向に一致するものとする。

また、以下で示す DRIM 設置時の地形変化シミュレーションにおいて、DRIM は上記の付加的な漂砂制御流れが生じるハードボトムとして取り扱う。

(2) DRIM 設置時の地形変化シミュレーション

次に、DRIM 設置時の地形変化のシミュレーションをおこなった結果について述べる。計算は、図-5 に示すような、1,000 m 四方の正方形領域を 20 m メッシュで分割した格子を用いた。岸沖方向の断面形状は、DRIM の現地試験が実施された芦屋海岸の平均地形を用い、格子中央の水深 3.5 m の 4 つの格子に DRIM を配置した場合を想定した。波浪条件は、高波浪時に相当する波高 1.5 m、周期 6.0 s の波が直入射するものとし、振幅 1 m、周期 12.46 時間の潮位変動を与えつつ計算をおこなった。底質条件は、粒径 0.18 mm の砂とし、DRIM の設置方向は、汀線に直角方向の岸向き制御方向とした。

図-6, 7 に、DRIM を底上げなしで設置した場合と DRIM の高さを考慮して 0.5 m 底上げして設置した場合の 5 日後の水深変化量、及び等深線と流れ場のパターンを示す。水深変化量についてみると、底上げなしの場合は、DRIM の前面で侵食し、DRIM の直背後で堆積が生じており、沖側の砂が DRIM により岸側へ運ばれる効果がよく再現されている様子がわかる。一方、DRIM を底上げして設置した場合は、DRIM 前面の侵食は同様であるが、DRIM の直背後においても侵食がみられる。また、DRIM の岸側には、堆積域が広範囲に生じている様子も確認される。DRIM 直背後の侵食については、DRIM の底上げが一種のマウンドとなるため、波浪の屈折により DRIM の直背後に波エネルギーが集中するため生じると考えられる。また、その結果として、図中の流れ場のパターンに見られるような DRIM の岸側の向岸流が生じて砂をさらに岸側に運ぶため、DRIM 岸側の広範囲に堆積領域が生じる。

このような DRIM 直背後の侵食域は、現地試験においても発生しており、本シミュレーションにより、その原因が明らかとなった。

5. 構造物背後の地形変化

DRIM の効果を他の海岸侵食対策構造物と相互比較するため、離岸堤、潜堤、及び DRIM 背後の地形変化計算をおこなった。計算上、離岸堤は Land セルとして、潜堤はその天端高をハードボトムで表現する。

図-8 から図-10 に、離岸堤、潜堤、及び DRIM について、設置位置と面積を同一の条件とした場合の地形変化量と流れ場のパターンを示す。また、表示条件も同一としている。各構造物は計算領域の中央の水深 3.5 m

地点に沿岸方向の延長を 160 m (8 メッシュ)、岸沖方向 20 m (1 メッシュ) とした。潜堤の天端水深は 1.5 m で、DRIM の天端水深は 3.0 m (0.5 m の底上げ) と設定した。その他の外力条件は、図-5 に示した条件と同一である。なお、この条件において、離岸堤と潜堤の設置位置は碎波点の沖側に位置する。これは、DRIM の設置条件に合わせたためである。

図-8 より、離岸堤の背後では両端部の周辺に侵食域、中央部に堆積域が見られる。また、流れのパターンは離岸堤外側から内側へ巻き込む強い循環流が形成されている。汀線付近にトンボロの形成はみられないものの、そ

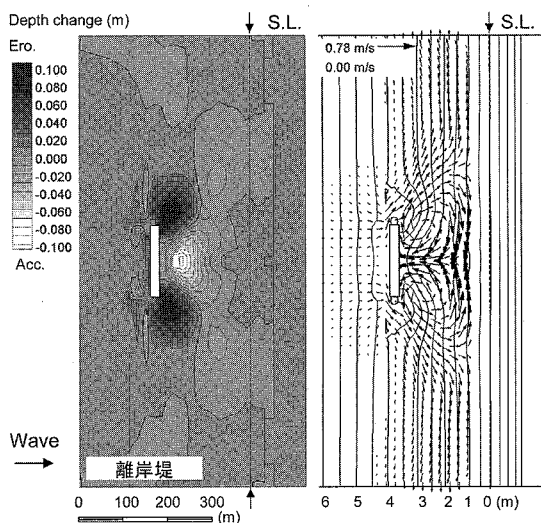


図-8 離岸堤設置時の地形変化量 (左, 初期地形と 5 日後の地形の差), 等深線と流れ場のパターン (右)。

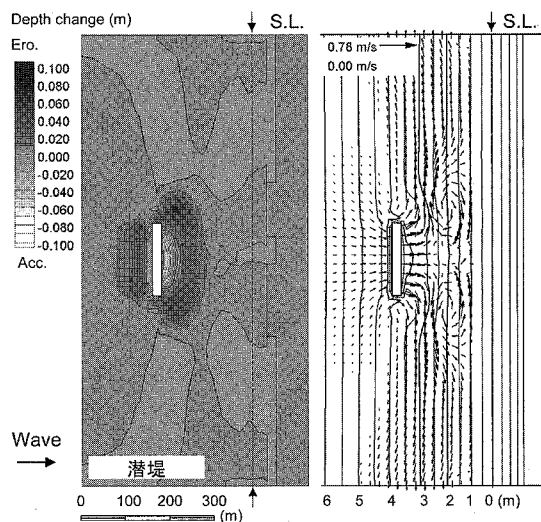


図-9 潜堤設置時の地形変化量 (左, 初期地形と 5 日後の地形の差), 等深線と流れ場のパターン (右)。

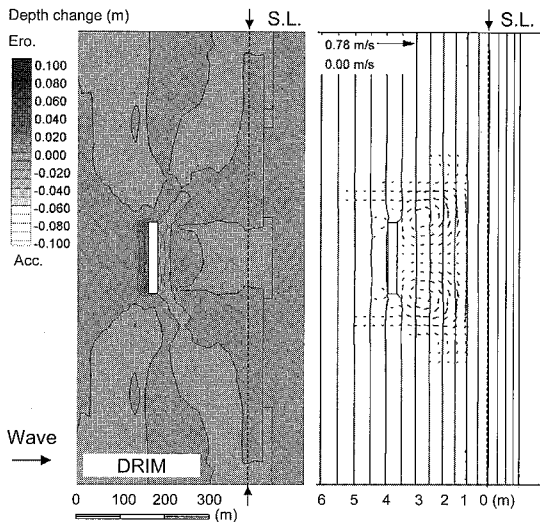


図-10 DRIM 設置時の地形変化量 (左, 初期地形と 5 日後の地形の差), 等深線と流れ場のパターン (右)。

のやや沖側ではトンボロ形状の等深線が形成されている。このように, CMS-M2D モデルにより, 離岸堤設置時の特徴的な地形変化がよく再現されている。

図-9 の潜堤の場合, 潜堤を囲むような侵食域が形成され, 堆積域は潜堤の直背後にのみ生じており, 汀線付近にはその効果が及んでいないように見える。侵食と体積の程度は離岸堤に比べて小さいものの, 等深線が前進する様子も見られない。

図-10 の DRIM の場合は, 離岸堤や潜堤に比べると地形変化はほとんど生じておらず, また DRIM 設置に起因する流れも弱い。しかし, DRIM の直背後及び汀線付近に堆積域が生じており, 図-6, 7 でみられたような, DRIM によって沖側から DRIM の直背後に運ばれた砂が, 背後に形成される海浜流により汀線付近まで運ばれた様子が再現されている。

これらの結果は, 離岸堤や潜堤が波の特性を大きく変え, 周辺へ多大なインパクトを与えるのに対し, 周辺海域へのインパクトが小さく, 少しずつだが確実に砂を浜へと供給するといった DRIM の特性をよく示している。

6. ま と め

CMS-M2D モデルに移流分散の漂砂モデルを導入し, モデルが浮遊砂の卓越する場合の航路埋没現象を精度よく再現できることを確認した。また, DRIM の効果を簡単な形で導入して, 地形変化シミュレーションをおこなったところ, 水槽実験や現地試験において確認された DRIM の漂砂制御効果と地形変化の特徴をよく再現す

ることが確認された。同一条件下において, 離岸堤・潜堤・DRIM 背後の地形変化シミュレーションをおこない, DRIM が周辺の波や地形に与える影響は, 離岸堤や潜堤の場合に比べて非常に小さいものの, 海岸侵食防止対策として必要な効果は確実に生じることが確認された。

謝辞: 本研究では, Coastal Inlet Research Program (CIRP) において開発されている CMS-M2D モデルを使用した。Dr. Nicholas C. Kraus をはじめ CIRP の方々には, DRIM の効果を表現するためにソースコードの一部を改変して使用することに対して, 快く許可していただくとともに, 数々の貴重なアドバイスをいただきました。ここに付記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 入江功・栗山善昭・田川昌宏(1985): 物理モデルと数値モデルとの組み合わせによる海底地形の予測, 第 32 回海岸工学講演会論文集, pp. 345-349.
- 小野信幸・入江功・緒方菊・山口洋(2002): ビーチサイクルを考慮した養浜断面の安定化に関する研究, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp. 626-630.
- 山口洋・小野信幸・入江功・申承鎭・村瀬芳満(2002): 歪み砂れんマットによる 3 次元的漂砂制御機能に関する実験, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp. 621-625.
- 山口洋・小野信幸・入江功・小島治幸・茶谷正明・五明美智男・児島和之(2005): 芦屋海岸における DRIM の漂砂制御機能に関する現地試験, 海岸工学論文集, 第 52 巻, pp. 646-650.
- DRIM 工法研究会(2005): 芦屋港海岸浜崎地区 DRIM 実海域試験 - 中間報告 -, DRIM 工法研究会, 121p.
- Buttolph, M. A., C. W. Reed, N. C. Kraus, N. Ono, M. Larson, B. Camenen, H. Hanson, T. Wamsley, and A. K. Zundel(2006): Two-Dimensional Depth-Averaged Circulation Model CMS-M2D: Version 3.0, Report 2, Sediment Transport and Morphology Change, ERDC/CHL TR-06-2, in press.
- Camenen, B., and Larson, M.(2005): A bedload sediment transport formula for the nearshore, Estuarine, Coastal and Shelf Science, 63, 249-260.
- Camenen, B., and Larson, M.(2006): A suspended load sediment transport formula for the nearshore, Estuarine, Coastal and Shelf Science, (in review)
- Elder, J. W.(1959): The dispersion of marked fluid in turbulent shear flow, Journal of Fluid Mechanics, 5, 544-560.
- Smith, J. M., Sherlock, A. R., and Resio, D. T.(2001): STWAVE: STeady-state spectral WAVE model: User's manual for STWAVE Version 3.0, Supplemental Report ERDC/CHL SR-01-1, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS.
- Van Rijn, L. C.(1985): Two-dimensional vertical mathematical model for suspended sediment transport by currents and waves, Report S488-IV, Delft Hydraulics, Delft, The Netherlands.