

養浜土砂の移流拡散を考慮した等深線変化予測モデルに関する研究

N-Line Model due to Beach Nourishment using 2D Advection Diffusion Equation

澁谷容子¹・黒岩正光²・松原雄平³

Yoko SHIBUTANI, Masamitsu KUROIWA and Yuhei MATSUBARA

This study is concerned with a N-line model that takes into account contour line changes after beach nourishments. The behavior of the sand materials after beach nourishments is represented using two-dimensional advection diffusion equation in the horizontal plane. The effect of grain size of the nourished sand was considered in the advection diffusion equation. The contour line changes were calculated solving the fundamental equation for the conservation of bed material, which adapts the effect of the advection diffusion equation. Firstly, model tests were carried out in order to investigate the influence of grain size. The effect of grain size for beach nourishment was investigated. Secondly, the model was applied to preservation of eroded beach using a sand recycle method measures, and then the applicability was discussed.

1. はじめに

海岸侵食対策として、沿岸域にさまざまな構造物が設置されてきたが、このような構造物によって漂砂の連続性が絶たれ、新たな侵食を生む場合が多々ある。そこで、近年、直接土砂投入を行う養浜やサンドリサイクル、サンドバイパスなどのソフト的対策が検討されている。侵食対策の検討には、海浜変形の長期的変化予測を行うことが必要とされ、実務では、汀線変化モデルや等深線変化モデルが、良く用いられている。養浜を行った場合も、汀線変化モデルは適用でき、水谷ら（2003）によってその評価が行われている。しかし、汀線変化モデルでは沖合投入などが表現できないため、等深線変化モデルにおいても、宇多ら（2005）や住谷ら（2005）によって養浜効果の計算が行われている。このように、実際に汀線変化モデルや等深線変化モデルを用いて養浜後の評価が行われているが、その手法ははまだ確立されていない。また、養浜効果を予測した計算例はいくつもみられるが、養浜後の土砂移動特性の把握はされておらず、養浜された土砂の挙動は明らかにされていない。

澁谷ら（2007）は養浜土砂の移動特性を1次元の移流拡散方程式で表すことによって養浜後の汀線変化を予測する新たな汀線変化モデルを提案した。さらに、このモデルを拡張し、澁谷ら（2008）は養浜効果を予測可能な等深線変化モデルを提案した。しかし、養浜土砂の2次元移流拡散方程式において、岸沖方向土砂の移動速度の与え方が定式化されていないこと、養浜砂と現地の砂の

粒形が異なる場合の検討を行っていないことなど問題が残されている。そこで、本研究では、澁谷ら（2008）の移流拡散による土砂投入を考慮した等深線変化モデルをベースに、移動速度の与え方の再検討および養浜土砂の計算に粒径による影響を考慮した。

2. モデルの概要

本モデルは宇多ら（1996）の等深線変化モデルに養浜土砂の移流拡散を考慮したものである。図-1に示すように本モデルは、1) 波浪場の計算、2) 沿岸漂砂量の計算、3) 投入土砂の移流拡散の計算、および4) 等深線変化の計算の4つのサブモデルから構成される。

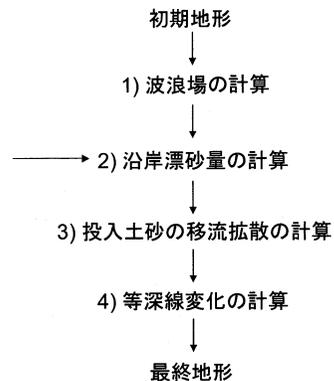


図-1 モデルの概要

(1) 波浪場の計算

波浪場の計算は間瀬ら（1999）の回折を考慮したエネルギー平衡方程式を用いた。

(2) 沿岸漂砂量の計算

沿岸漂砂量は小笹・Brampton 公式に Kamphuis ら（1986）による粒径の大きさを考慮した漂砂量係数を導入した（澁谷ら，2007）. 碎波点における有義波高 H_s 。

1 学生会員 修（工） 鳥取大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻
2 正 会 員 博（工） 鳥取大学准教授 大学院工学研究科社会基盤工学専攻
3 正 会 員 工博 鳥取大学教授 大学院工学研究科社会基盤工学専攻

を用いた場合の式を以下に示す。

$$Q = AH_{bs}^2 C_{gb} \left(\hat{K}_1 \sin 2\alpha_{bs} - \hat{K}_2 \cos \alpha_{bs} \cot \beta \frac{\partial H_{bs}^2}{\partial y} \right) \quad (1)$$

ここに、 C_{gb} および α_{bs} は砕波点における郡速度および波向きを表す。 $\cot \beta$ は海底勾配の逆数である。 A は Kamphuis (1986) による粒径に関する係数であり、 $A = A_d / \sqrt{d_{50}}$ とした。 d_{50} は中央粒径である。

(3) 投入土砂の移流拡散の計算

投入された土砂は沿岸方向ならびに岸沖方向に拡散しつつ、沿岸流と波の作用によって輸送されるものと考えられる。投入土砂の挙動を表す2次元の移流拡散方程式を以下に示す。

$$\frac{\partial q_n}{\partial t} + C_1 U_s \frac{\partial q_n}{\partial x} + C_2 V_s \frac{\partial q_n}{\partial y} = C_3 K_x \frac{\partial^2 q_n}{\partial x^2} + C_4 K_y \frac{\partial^2 q_n}{\partial y^2} \quad (2)$$

ここに、 q_n は投入された土砂量である。 U_s 、 V_s は投入土砂の岸沖方向ならびに、沿岸方向の移動速度、 K_x 、 K_y は投入土砂の岸沖方向ならびに、沿岸方向の拡散係数である。また、 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 は粒径の大きさを考慮するための係数であり、次式で表される。

$$C_1 = C_{1d} / \sqrt{dd_{50}} \quad (3)$$

$$C_2 = C_{2d} / \sqrt{dd_{50}} \quad (4)$$

$$C_3 = C_{3d} / \sqrt{dd_{50}} \quad (5)$$

$$C_4 = C_{4d} / \sqrt{dd_{50}} \quad (6)$$

ここに、 C_{1d} 、 C_{2d} 、 C_{3d} 、 C_{4d} は粒径の大きさに関する係数で、 dd_{50} は養浜砂の中央粒径である。

a) 土砂の拡散係数

拡散係数は、Kuroiwa ら (1994) の蛍光砂による漂砂調査結果から、図-2に示す波浪特性と蛍光砂の拡散係数との関係から求めた。 C_{1d} 、 C_{2d} 、 C_{3d} 、 C_{4d} については、調査海岸の中央粒径が0.2mmの場合を基準としており、 $dd_{50}=0.2\text{mm}$ のときに C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 が1となるよう決定した。

b) 土砂の移動速度

沿岸方向の土砂の移動速度 V_s は、灘岡ら (1981) より $V_s=0.01V$ とし、 V は沿岸流速で、Inman・Quinn (1951) より求めた。岸沖方向の土砂の移動速度は底面水粒子速度の最大値の関数として与えることとし、移動方向については、砂村 (1980) の C_s パラメータで判定した。以下に岸沖方向土砂の移動速度式を示す。

$$U_s = C_u \frac{\pi H_{sh}}{T_s} \frac{1}{\sinh kh} \quad (7)$$

ここに、 H_{sh} は水深 h に対する有義波高、 T_s は有義波周期、 k は波数、 C_u は無次元係数で、以下に示す C_s の値によって方向 (正負) を決定した。

$$C_s = \frac{H_0 / L_0 (\tan \beta)^{0.27}}{(dd_{50} / L_0)^{0.67}} \quad (8)$$

ここに、 H_0 および L_0 は、沖波波高および沖波波長である。 $\tan \beta$ は海底勾配である。砂村 (1980) は $C_s > 18$ で汀線は前進、それ以外で汀線は後退するとしていることより、 $C_s > 18$ ならば、漂砂は岸向き ($C_u > 0$)、それ以外で漂砂は沖向き ($C_u < 0$) とする。

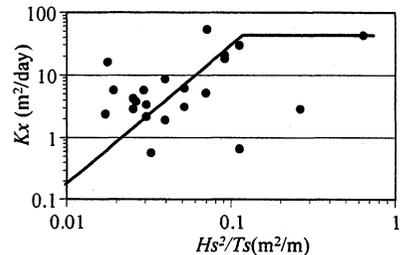


図-2(a) 波浪特性と岸沖方向における拡散係数との関係

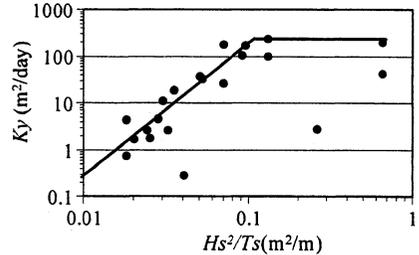


図-2(b) 波浪特性と沿岸方向における拡散係数との関係

(4) 等深線変化の計算

y 軸を沿岸方向に、 x 軸を岸沖方向にとると、等深線変化は次式で表される。

$$\frac{\partial x_m}{\partial t} + \frac{1}{h_m} \left(\frac{\partial Q_m}{\partial y} - q \right) = 0 \quad (m=1 \dots N) \quad (9)$$

ここに、 x_m は m 番目の等深線位置、 Q_m は m 番目の等深線の沿岸漂砂量、 h_m は m 番目の等深線の移動高さ、 m は等深線番号、 N は等深線の本数である。 q は養浜土砂による寄与分である。

また、式(2)中の q_n は体積量であるため、式(9)中の q の単位時間、単位長さ当たりの土砂量に変換する必要がある。そこで以下のような関係を適用した。

$$q = K_p q_n \quad (10)$$

$$K_p = 1/(\Delta t \cdot \Delta y) \quad (11)$$

ここに、 Δt は計算時間間隔、 Δy は格子間隔である。実際の計算では、有限差分法を適用し数値計算した。

3. モデルテスト

(1) 養浜による等深線変化の計算

図-3はモデルテストに用いた初期地形で、沿岸方向2000m、岸沖方向1000mの砂浜海岸において、両端を固定境界とし、流れの上手側で侵食、下手側で堆積する状態を想定している。土砂投入は、Case1（汀線付近）、Case2（水深6m）、Case3（移動限界水深付近）の3ケース計算を行い、投入した土砂はいずれも30,000m³である。用いた波浪条件、各係数を表-1に示す。

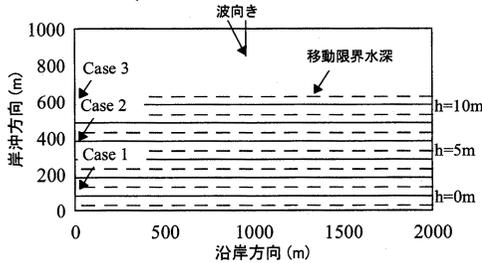


図-3 初期地形

表-1 計算条件

$H_s(m)$	$T_s(s)$	$A_d(m^{0.5})$	$\alpha(^{\circ})$	$d_{50}(mm)$	$\tan \theta$
1.20	7.0	0.016	5.0	0.25	1/50
K_1	K_2	U_s	$V_s(m/s)$	$Kx(m^2/s)$	$Ky(m^2/s)$
0.2	0.324	-0.023	0.00123	0.00057	0.0023
$C_{1d}(m^{0.5})$	$C_{2d}(m^{0.5})$	$C_{3d}(m^{0.5})$	$C_{4d}(m^{0.5})$	$dd_{50}(mm)$	
0.014	0.014	0.014	0.014	0.25	

図-4および図-5はそれぞれCase1における土砂の移流拡散および、等深線変化の様子である。図-4の凡例は単位幅単位時間あたりに換算した土砂量である。図-4(a)および(b)より、投入した土砂は、沖方向ならびに沿岸方向に移動しながら拡散している様子がうかがえる。また、図-5より土砂投入直後、投入付近の等深線は一時的に前進し、その後、後退している様子が確認できる。

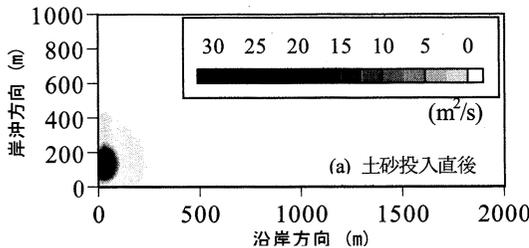


図-4 土砂投入による移流拡散の様子

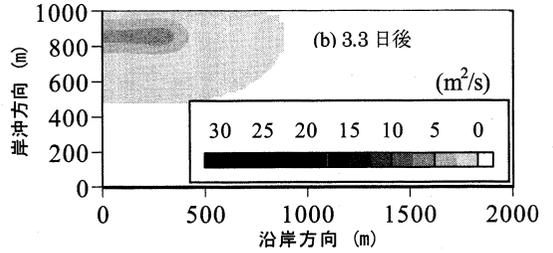


図-4 続き（土砂投入による移流拡散の様子）

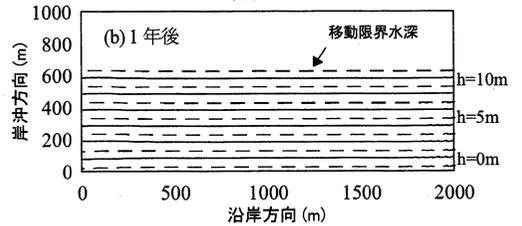
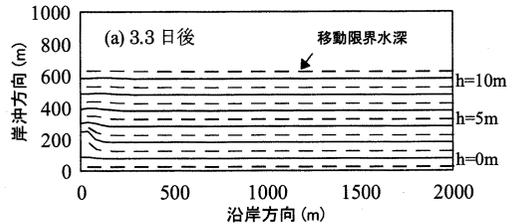


図-5 土砂投入による等深線変化の様子

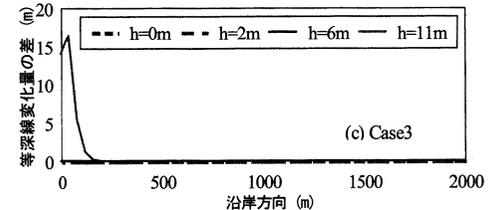
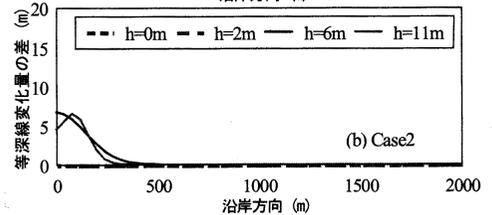
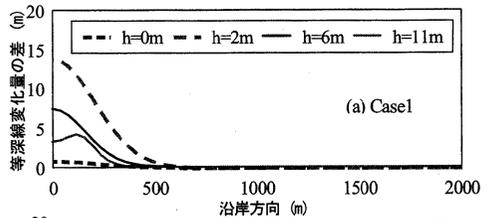


図-6 養浜の有無による等深線変化の違い

図-6は各ケースにおいて、養浜を行った場合と、行わなかった場合の差をとったものである。侵食域において、養浜土砂が等深線に寄与した。さらに、汀線に近いと

ろに土砂投入を行ったほうが、より効果的であるとが明らかに示されている。

(2) 粒径の違いによる計算

本研究では、養浜土砂の移流拡散の計算に、粒径に関するパラメータを導入し、現地の砂の粒径と養浜砂の粒径が異なる場合の計算を試みた。初期地形、波浪条件および各係数は表-1と同様で、計算は Case1 および Case2 について行った。なお、養浜砂の粒径は $dd_{50}=0.15\text{mm}$, $dd_{50}=0.25\text{mm}$, $dd_{50}=0.4\text{mm}$ とした。

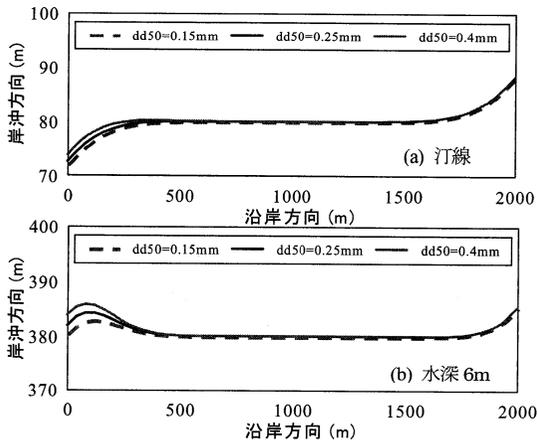


図-7 養浜砂の粒径の違い (Case1)

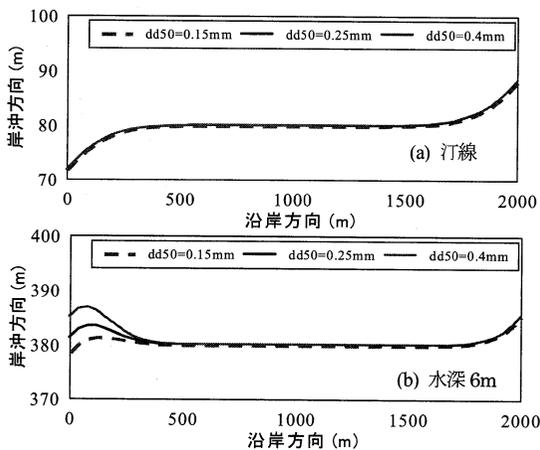


図-8 養浜砂の粒径の違い (Case2)

図-7および図-8はそれぞれ Case1 および2の計算結果を示したもので、各図の(a)および(b)はそれぞれ汀線および水深6mの等深線の粒径の違いを示したものである。図-7より、汀線付近に土砂投入を行った場合、養浜砂の粒径が大きいほど、侵食域において、汀線の回復また、等深線の前進が確認できる。また、図-8より投入地点より岸側の汀線では違いがみられないが、投入地点の水深6mでは養浜砂の粒径が大きいほど、等深線が前進する

ことがわかる。宇多ら (2005) によると、現地の砂の粒径よりも粗い粒径のものを養浜することで、沖合 (水深6m 付近) 投入でも、汀線付近まで土砂が運ばれ、養浜効果が高いとされている。今回の結果は、水深6m 付近に投入した土砂が汀線付近まで運ばれるには至らなかったものの、養浜砂の粒径を大きくするほど、養浜効果が高いという結果を示すことができた。

4. 現地適用

最後に澁谷ら (2007) 同様、皆生海岸への現地適用を試みた。図-9はサンドリサイクルが行われる以前の1989年の等深線である。これを初期地形とし、漂砂量係数 K_1 , K_2 を求めるために、土砂投入無しで5年後の再現計算を行った結果が図-10である。波浪条件は佐藤ら (1999) より、エネルギー平均波 (1997年の観測値より) を用い、各係数とともに表-2に示す。さらに図-11は汀線と水深5mの実測値と計算値の比較で、図-12は5年間の等深線の変化量を比較したものである。計算結果は実測値をよく再現しており、これをもとにサンドリサイクル1年後の計算を行う。

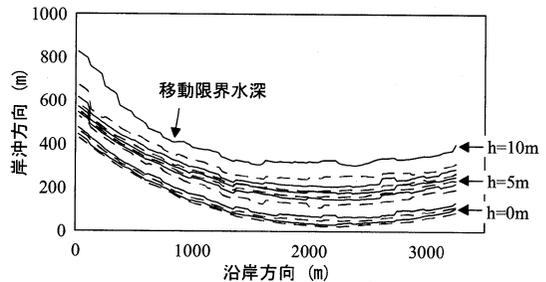


図-9 初期等深線 (皆生海岸再現計算)

表-2 計算条件

$H_s(\text{m})$	$T_s(\text{s})$	$A_d(\text{m}^{0.5})$	$\alpha(^{\circ})$	$d_{50}(\text{mm})$	$\tan \theta$
1.12	7.62	0.016	-10.0	0.25	1/50
K_1	K_2	U_s	$V_s(\text{m/s})$	$Kx(\text{m}^2/\text{s})$	$Ky(\text{m}^2/\text{s})$
0.1	0.0	-0.19	-0.001	0.00057	0.0023
$C_{1d}(\text{m}^{0.5})$	$C_{2d}(\text{m}^{0.5})$	$C_{3d}(\text{m}^{0.5})$	$C_{4d}(\text{m}^{0.5})$	$dd_{50}(\text{mm})$	
0.014	0.014	0.014	0.014	0.25	

サンドリサイクル後の計算を行う際、侵食域の汀線および陸域上の等高線1mラインを後退させ、土砂浚渫を表現するものとする。沿岸方向3200mの汀線付近に30,000 m^3 土砂投入を行う。土砂投入1年後の結果が図-13である。図-6同様、サンドリサイクルを行った場合と行わなかった場合の差をとったものである。土砂投入を行った場合、投入位置から流れの上手側 (沿岸方向2000m 付近) にかけて等深線が前進した。図-14は実測値と計算値の等深線の変化量を比較したものである。等深線の変化量は概ね再現することができた。

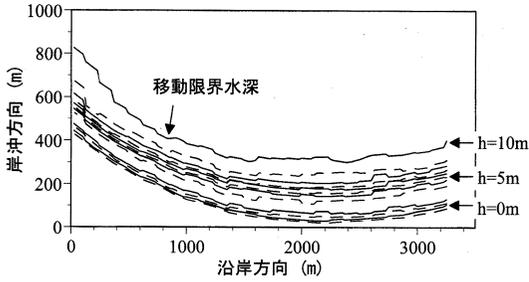


図-10 皆生海岸再現計算結果(1994年)

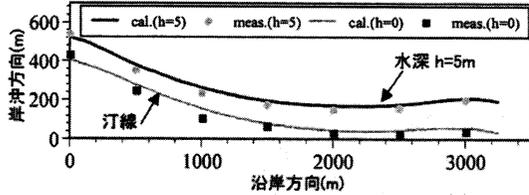


図-11 計算値と実測値の比較

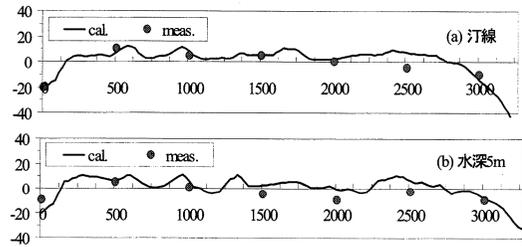


図-12 計算値と実測値の変化量の比較(1989-1994)

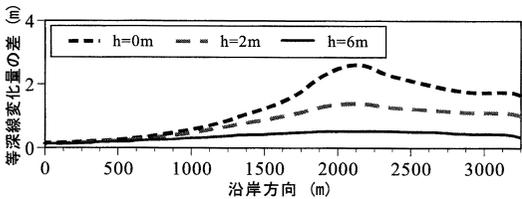


図-13 サンドリサイクルの有無による等深線変化の違い

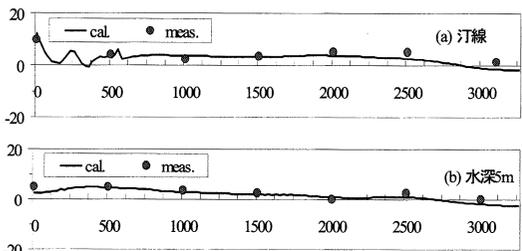


図-14 計算値と実測値の変化量の比較(1994-1995)

5. おわりに

本研究では、養浜砂の粒径を考慮し、養浜土砂を考慮した等深線変化モデルを提案した。モデルテストより、岸側に土砂投入を行うほど、その効果は高いことが確認できた。また、養浜砂の粒径が現地の砂の粒径よりも大きい方が、養浜効果が高いという、宇多ら(2005)と同様の結果を示すことができた。皆生海岸における現地適用では、土砂投入位置において等深線が前進することが確認でき、また、実測値の変化量を再現することができた。最後に、投入土砂の岸沖方向および沿岸方向の移動速度については、今後、さらに現地データとの比較を行い、再検討する必要がある。

謝辞：本モデルでは、波浪場の計算において、間瀬ら(1999)を参考にさせていただきましたことを、ここに記して感謝いたします。

参考文献

小笹博昭・A.H.Brampton(1979)：護岸のある海浜のてい線変化計算、港湾技術研究所報告、第18巻、第4号、pp.77-104
 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、No539/II-35、pp.121-139
 宇多高明・清野聡子・大矢忠一・安田武夫・高橋功・古池綱・星上幸良(2005)：沖合投入土砂の養浜効果予測手法の開発、海岸工学論文集第52巻、pp.641-645
 佐藤慎司・古屋隆男・坂根博吉・山本幸次・田子洋一・牧野一正(1999)：弓ヶ浜海岸におけるサンドリサイクルシステムの有用性、海岸工学論文集第46巻、pp.686-690
 澁谷谷子・黒岩正光・松原雄平(2007)：養浜土砂の移流拡散を考慮した汀線変化予測モデルに関する研究、海岸工学論文集第54巻、pp.646-650
 澁谷谷子・黒岩正光・松原雄平(2008)：移流拡散による土砂投入を考慮した等深線変化予測モデルに関する研究、海洋開発論文集、第24巻、pp.1249-1254
 砂村継夫(1980)：自然海浜における汀線位置の時間的変化に関する予測モデル、第27回海岸工学論文集、pp.225-259
 住谷迪夫・松浦健郎・宇多高明・高橋功・大木康弘・熊田貴之・芹沢真澄(2005)：粒度組成の平面変化を考慮した等深線変化モデルの鹿島灘海岸への適用、海岸工学論文集第52巻、pp.546-550
 灘岡和夫・田中則男・加藤一正(1981)：蛍光砂を用いた碎波帯内における局所的移動の観測、港湾技術研究所報告第20巻、第2号、pp.75-126.
 間瀬肇・高山知司・国富将嗣・三島豊秋(1999)：波の回折を考慮した多方向不規則波の変形計算モデルに関する研究、土木学会論文集、第628号、II-48、pp.177-187
 水谷法美・許東秀・上運天陽次・神谷篤史(2003)：人口リーフと養浜による磯浜海岸の汀線変化の現地調査とその予測、海岸工学論文集第50巻、pp.581-585
 Inman, D. L. and W. H. Quinn(1951)：Currents in the surf zone, Proc. 2nd Conf. on Coastal Engineering. 1951
 Kamphuis, J.W., M.H.Devies, R.B.Narin and O.J.Syao(1986)：Calculation of littoral sand transport rate, Coastal engineering, Vol.10, pp.1-12
 Kuroiwa, M. and H. Noda(1994)：Field investigation of sand drift using fluorescent tracer, Proceedings of the international symposium : waves-physical and numerical modelling, pp.1483-149