

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

Shoreline Change Model due to Beach Nourishment using 1D Advection Diffusion Equation

澁谷容子¹・黒岩正光²・松原雄平³

Yoko SHIBUTANI, Masamitsu KUROIWA, Yuhei MATSUBARA

This study is concerned with a one-line model for predicting shoreline changes after beach nourishments. The behavior of the injected materials was represented using one-dimensional convection diffusion equation in the alongshore direction. The shoreline changes were calculated by solving the fundamental equation for the conservation of bed material, combined with the advection diffusion equation. First, the proposed model was applied to tombolo formation behind offshore structure in the field. Secondly, the performance of the model was investigated by a model test. Finally, the presented model was applied to the sand recycle project at Yumigahama Coast, Japan, in order to investigate the applicability of the model.

1. はじめに

従来、海岸侵食対策として、離岸堤防や人工リーフなどによるハード的な対策が実施されてきた。しかし、すべての海岸侵食がこのような対策で解決できるものではない。海岸侵食の主要因として、海岸構造物の建設や、河川からの土砂供給の減少があげられ、海岸構造物の建設により、新たな侵食域を発生させる恐れがある。例えば、突堤などを建設した場合、流れの上手側で堆積、下手側で侵食が起こる。したがって、最近では、養浜やサンドバイパス、サンドリサイクルなどのソフト的な対策が行われる場合がある。

一般に何らかの海岸侵食対策を講じる場合、対策後の周辺海域の海浜変形予測が実施される。このような侵食対策を施す場合も、その効果を評価する、すなわち海岸線変化の将来予測が必要不可欠となる。現地においては比較的簡単な汀線変化モデルがよく用いられる（例えば、山本ら、1992）。養浜などを行った場合においても汀線変化モデルが適用され、養浜後の評価が行なわれている（水谷ら、2003）。最近では、等深線変化モデルをベースとした養浜効果の計算も試みられている（住谷ら、2005）。

本研究では汀線変化モデルに投入土砂に関する1次元の移流拡散方程式を導入し、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する。本報では、まず従来の汀線変化モデルの妥当性を評価するために、島式の国縫漁港での現地適用を試み漂砂量係数の同定を行う。つぎに、養浜効果を数値実験的に検討するとともに、実際にサンドリサイクルが実施されている皆生海岸に適用し、モデルの妥当性を検討しようとするものである。

2. 数値モデル

図-1に示すように、本モデルは1) 波浪場、2) 沿岸漂砂量、3) 投入土砂の移流拡散計算および4) 汀線変化計算の4つのサブモデルから構成される。波浪場は間瀬ら（1999）の回折波を考慮したエネルギー平衡方程式を用いた。

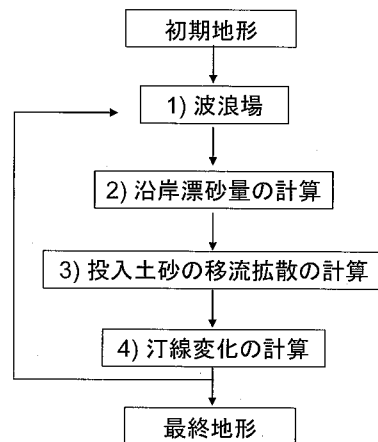


図-1 システムの概要

(1) 汀線変化の計算

y 軸を沿岸方向に、 x 軸を沖方向にとると、汀線変化は次式で表される。

$$\frac{\partial x_s}{\partial t} + \frac{1}{D_s} \left(\frac{\partial Q}{\partial y} - q_s \right) = 0 \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 x_s は汀線位置の岸沖変化量、 Q は空隙を含む沿岸漂砂量、 D_s は移動高さ、 q_s は土砂付加量で岸沖方向の土砂移動量、河川からの土砂供給あるいは、養浜等による土砂供給量で、対象とする計算に応じて考慮される。なお、本研究では、養浜による土砂供給を表す。

1 学生会員 鳥取大学大学院工学研究科土木工学専攻
2 正会員 博(工) 鳥取大学准教授工学部土木工学科
3 正会員 工博 鳥取大学教授工学部土木工学科

(2) 沿岸漂砂量式

沿岸漂砂量は小笹・Brampton 公式(1979)を適用するが、粒径の大きさを考慮した漂砂量係数を導入し、砕波点における有義波高 H_{bs} を用いた場合の式を以下に示す。

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

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、次式より求めた。

$$A = A_d / \sqrt{d_{50}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

また、式(2)中の $\hat{K}_1$ および $\hat{K}_2$ はそれぞれ以下で表される。

$$\hat{K}_1 = K_1 / \{16(\rho_s/\rho - 1)(1 - \lambda)1.416^{5/2}\} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\hat{K}_2 = K_2 / \{8(\rho_s/\rho - 1)(1 - \lambda)1.416^{5/2}\} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 K_1 および K_2 は無次元係数で、山本ら(1992)の関係式

$$K_2 = 1.62K_1 \quad \dots\dots\dots (6)$$

を適用した。 K_1 が与えられれば K_2 が決定される。 K_1 の与え方については後述する。

(3) 養浜土砂の考慮

投入された土砂は沿岸方向に拡散するとともに、沿岸流によって輸送されるものとし、その影響を考慮する。投入土砂の挙動に関する沿岸方向の1次元移流拡散方程式を以下に示す。

$$\frac{\partial q_n}{\partial t} + V_s \frac{\partial q_n}{\partial y} = K_y \frac{\partial^2 q_n}{\partial y^2} - \lambda q_n \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 q_n は投入された土砂量である。 V_s は投入土砂の移動速度、 K_y は投入土砂の拡散係数である。 λ は土砂の減衰係数で、汀線に寄与しない土砂を表すパラメーターである。実際の計算では、式(7)中の q_n は体積量であるため、式(1)中の q_s 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。そこで以下の関係式を適用した。

$$q_s = K_p q_n \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$K_p = 1/(\Delta t \cdot \Delta y) \quad \dots\dots\dots (9)$$

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、陽的有限差分法を適用し数値計算を行った。式(7)の移流項の差分は1次の風上差分を適用した。

3. 漂砂量係数および各種係数の評価方法

(1) 漂砂量係数

まず、土砂投入を考慮せずに、島式の国縫漁港建設に伴う汀線変化(清水ら、1995)の計算を行い、漂砂量係数を検討した。

漁港が建設され始めた1989年を基準とし、1年後および4年後の計算を行った。図-2(a)および(b)はそれぞれ漁港建設開始1年後および4年後における波浪場の計算結果であり、漁港建設に伴い、漁港背後の回折波の様子に変化していることがわかる。図-3(a)および(b)は、1年後および4年後の汀線変化の計算結果を示したものである。1年経過後には、漁港背後にはトンボロが形成されて、計算結果も現地データと良く一致していることがわかる。さらに、4年後の計算結果を見ると、若干トンボロ先端の位置に不一致が見られるものの、計算結果は実測値を概ね再現していることがわかる。以上の計算結果から、漂砂量係数は、 $K_1 = 0.2$ 、 $K_2 = 0.324$ と決定した。なお、計算に用いた浪条件および各係数は表-1に示すとおりである。

(2) 土砂の移動速度 V_s

一般に、海浜変形モデルにおける砂の移動は、波の水粒子速度や海浜流速を用いて表される。浮遊砂濃度を平面2次元あるいは3次元の移流拡散方程式で取り扱う場合においても、海浜流速を用いる場合がほとんどである(例えば、黒岩ら、2002)。しかしながら、本モデルでは、投入土砂の移動を取り扱うため、そのまま海浜流速を用

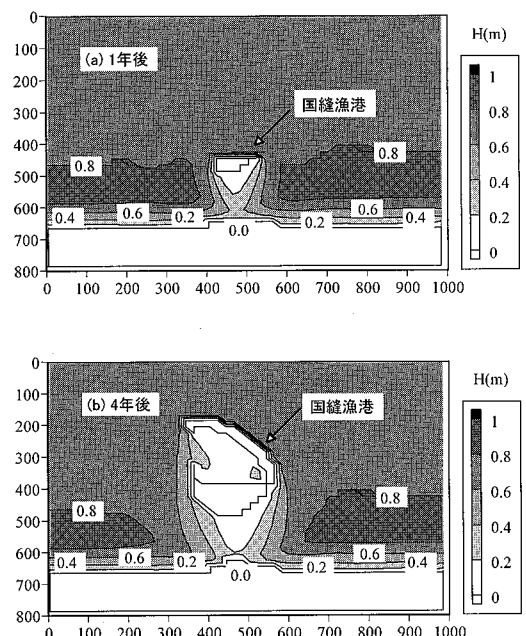


図-2 波浪場の計算結果

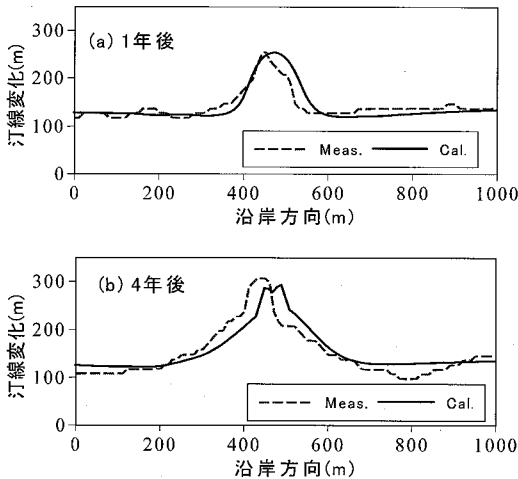


図-3 国縫漁港建設に伴う汀線変化計算

表-1 計算条件
(a) 波浪条件

H_s (m)	T_s (s)	S_{max}	$\alpha(^{\circ})$
0.75	7.0	75	0.0

(b) 漂砂量係数

$Ad(m^{0.5})$	K_1	K_2	$\tan \beta$	$d_{50}(mm)$	$D_s(m)$
0.016	0.2	0.324	1/50	0.25	10.0

いるのは早計である。そこで、土砂の移動速度は灘岡ら (1981) が実施した蛍光砂漂砂調査結果を参考に、沿岸流速と砂に移動速度の関係

$$V_s = 0.01V \quad (10)$$

を用いて算定を試みた。ここに、 V は沿岸流速、 V_s は砂の移動速度である。沿岸流速については、Inman・Quinn (1951) の沿岸流実用公式を用いて算定した。

$$V = \left[\left\{ \frac{1}{4X^2} + Y \right\}^{1/2} - \frac{1}{2X} \right]^2 \quad (11)$$

$$X = 646H_b i \cos \alpha_b / T \quad (12)$$

$$Y = c_b \sin \alpha_b \quad (13)$$

ここに V は沿岸流速、 H_b は碎波波高 $i = h_b/l_b$ 、 $c_b = \sqrt{2028gH_b}$ 、 α_b は碎波点における入射角、 l_b は汀線から碎波点までの距離である。

以上の関係を用いて砂の移動速度を評価した。

(3) 土砂の拡散係数 K_y

拡散係数は、Kuroiwa ら (1994) の蛍光砂による漂砂調査結果から、図-4 に示す波浪特性と蛍光砂の沿岸方向における拡散係数との関係から評価した。

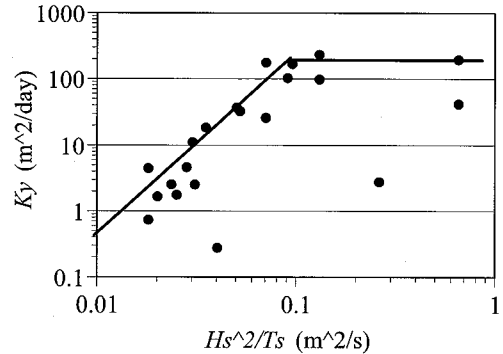


図-4 波浪特性と拡散係数との関係

4. 養浜土砂を考慮した計算結果

(1) モデル地形における汀線変化計算例

ここでは、沿岸方向 4000m の砂浜海岸において両端に突堤が設置され、沿岸漂砂によって上手側が侵食された場合を想定した状況をモデル化して数値計算を行った。なお、初期汀線は図-5 (a) に示すとおりで、下手側の前進した汀線は取り除いた状態、すなわち土砂を浚渫し、養浜を実施する場合の状況である。

図-5 (b) および (c) は土砂投入を行った際の投入土砂および汀線の時間的な変化の例を示したものである。図-5 (b) は、図-5 (a) に示す侵食域に投入した、土砂の移動の時間的な変化を示したものである。(b) の縦軸は単位幅当たりに換算した土砂量である。図-5 (b) から、投入土砂が移動拡散していく様子がわかる。以上の計算結果はモデルの特性を示したもので、実際の土砂量の保存については検討していない。

図-6 は、モデルの精度の評価として質量保存の観点から投入土砂量を考慮して計算した結果である。図-6 (a) は、養浜土砂を考慮した場合と、しない場合の汀線変化を比較したものである。土砂を $y=40$ (m) 付近に $50,000 \text{ m}^3$ 点源瞬間投入し、2 年後の汀線変化を計算した結果、投入した土砂が汀線に寄与したことがわかる。漂砂量係数については、国縫漁港の結果を用い、計算に用いた各係数を表-2 に示す。

沿岸流速は Inman・Quinn (1951) より求め、 $V=0.123 \text{ m/s}$ つまり $V_s=0.00123 \text{ m/s}$ とした。拡散係数は、波高 $H_s=1.2 \text{ m}$ 、周期 $T_s=7.0 \text{ s}$ より $H^2/T_s=0.34 \text{ m}^2/\text{s}$ となり、図-4 より $K_y=0.0023 \text{ m}^2/\text{s}$ を得た。図-6 (a) より土砂投入後、投入土砂が沿岸方向に移流拡散するとともに、汀線が侵食域で前進し、養浜しない場合と比較して汀線が維持されている。実現現象でも同様の傾向が見られ、養浜後の汀線が再現できている。

汀線に寄与した土砂量については、汀線変化量と移動

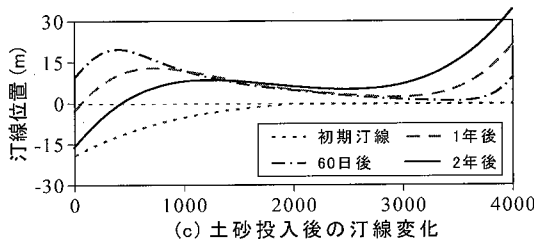
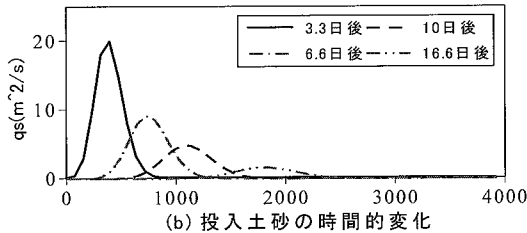
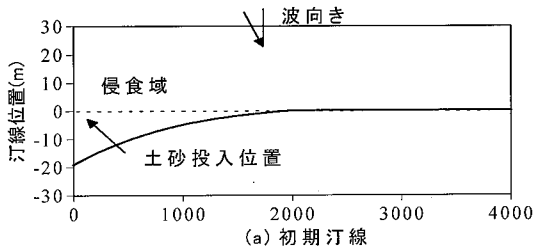


図-5 土砂投入による汀線および土砂変化計算

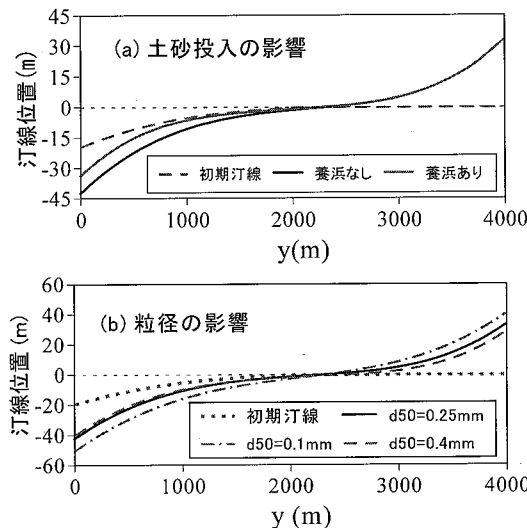


図-6 土砂投入による汀線変化計算

限界水深でつくられる三角形断面で計算を行った結果、 $45,300 \text{ m}^3$ となり、 $50,000 \text{ m}^3$ 土砂投入を行い減衰したことを考えれば、妥当な結果と言える。

また、図-6 (b) は養浜を行わず、2年後の粒径による汀線変化の相違を示したものである。粒径が大きくなるほど、漂砂は移動しにくくなり、汀線の前進ならびに

表-2 計算条件

$H_s(\text{m})$	$T_s(\text{s})$	$S_{\max}$	$\alpha(^{\circ})$	$d_{50}(\text{mm})$	$Ad(\text{m}^{0.5})$
1.20	7.0	75	5.0	0.25	0.016
K_1	K_2	$V_s(\text{m/s})$	$K_y(\text{m}^2/\text{s})$	$\lambda(\text{s}^{-1})$	$D_s(\text{m})$
0.2	0.324	0.00123	0.0023	3.0×10^{-5}	10.0

後退量は少ない。

(2) 現地への適用

最後に皆生海岸のサンドリサイクル（佐藤ら，1999）を例として、現地への適用を試みた。皆生海岸は日野川上流のカンナ流しによって供給された多量の土砂により育成されたものである。このためカンナ流し衰退後の侵食は著しく、構造物などでさまざまな対策がなされ、1994年からサンドリサイクルが実施されている。図-7はサンドリサイクルが実施される前の1989年から1994年までの5年間を対象に土砂投入を行わないで、汀線変化を計算した結果であり、汀線変化計算の適用性を検討した。計算結果は概ね良好であり、これによって得られた漂砂量係数を用いて養浜による土砂投入の計算を行う。

図-8 (a) はサンドリサイクルによる土砂投入の計算

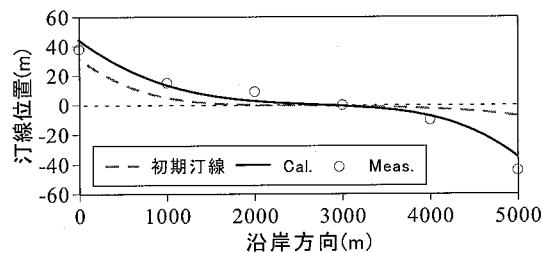


図-7 5年後の実測値との比較（皆生海岸）

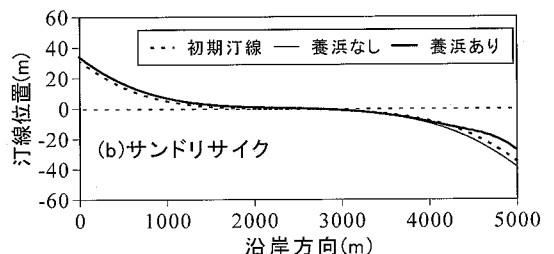
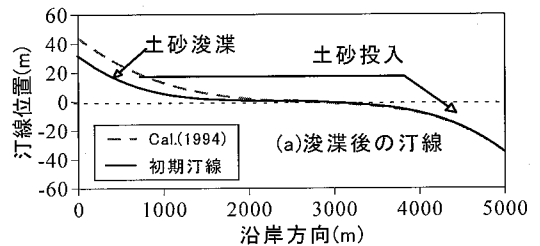


図-8 サンドリサイクル後の汀線変化（皆生海岸：1年後）

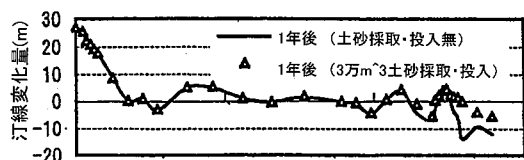


図-9 佐藤ら (1999) のよる皆生海岸におけるサンドリサイクルの予測結果

表-3 計算条件

$H_s(m)$	$T_s(s)$	S_{max}	$\alpha(^{\circ})$	$d_{50}(mm)$	$Ad(m^{0.5})$
1.12	7.62	75	-5.0(N.E)	0.25	0.016
K_1	K_2	$V_s(m/s)$	$K_y(m^2/s)$	$\lambda(s^{-1})$	$D_s(m)$
0.1	0.0	0.000943	0.0023	3.0×10^{-5}	10.0

に用いた初期汀線を示す。サンドリサイクルは堆積域の土砂を浚渫し、侵食域へ投入するため、浚渫した土砂を沿岸方向 5000 m 付近に投入する。投入土砂量は佐藤ら (1999) を参考に $30,000 m^3$ とした。図-8 (b) は、その結果であり、土砂投入を行った付近では汀線が 10 m ほど前進しているのがわかる。この結果は、佐藤ら (1999) が示したサンドリサイクルによる汀線変化計算 (図-9) とほぼ同様な傾向を示しており、モデルの妥当性が確認できた。また、波浪条件、各係数については、表-3 に示す。

5. おわりに

本研究では、養浜効果を予測可能な汀線変化モデルを提案した。得られた結果を以下に示す。

- 1) 国縫漁港の計算において、漁港の背後にトンボロの形成が確認でき、実測値との比較により、漂砂量係数 $K_1=0.2$, $K_2=0.324$ を得た。
- 2) 国縫漁港の計算によって得られた漂砂量係数を用い、養浜を行った際の数値計算において、養浜を行わなかった場合よりも侵食域での汀線の前進が確認できた。また、移動速度および拡散係数については灘岡ら (1981), Kuroiwa ら (1994) の結果の範囲内であった。
- 3) 皆生海岸において現地適用を行った結果、佐藤ら (1999) と同様の結果が得られ、モデルの妥当性が確認できた。
- 4) 最後に、投入土砂の移動速度と拡散係数は波浪条件との関係から決定したが、減衰係数については、汀線変化量が定性的な傾向を示すように、試行錯誤的に決

定した。実際には、移動速度や拡散係数と同様に、波浪特性や底質などとの関係から同定すべきである。今後の課題として、より多くの現地データと比較し、各係数を再評価する必要がある。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、波浪場の計算においては、間瀬ら (1999) を参考にさせていただき、五洋建設 (株) 清水琢三氏に国縫漁港のデータを快く提供していただいた。ここに記して謝意を表す。

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.
- 黒岩正光・口石孝幸・加藤憲一・松原雄平・野田英明 (2002): 多方向不規則波浪場における準 3 次元海浜流場と海浜変形予測に関する研究, 海岸工学論文集 第 49 巻, pp. 491-495.
- 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.
- 清水琢三・山田昌子・内山一郎・渡辺 晃 (1995): 汀線変化を考慮した 3 次元海浜変形モデルの現地適応性, 海岸工学論文集第 42 巻, pp. 606-610.
- 住谷勉夫・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礫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.
- 山本吉道・堀川清司・堀之内毅 (1992): 岸沖漂砂を考慮した汀線変化の予測法, 海岸工学論文集第 39 巻, pp. 406-410.
- 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.