

汀線変化モデルの新しい開境界処理法

三浦正寛* · 宇多高明** · 芹沢真澄***
小林昭男**** · 酒井和也*

しばしば実務に使われる汀線変化モデルでは, 沿岸漂砂が境界を自由に通過する開境界の処理法に課題が残されている。これを解決するために, 汀線変化の解析解から導かれる沿岸漂砂量の沿岸方向分布が, 誤差関数によって表されることを利用して, 境界内の沿岸漂砂量をもとに境界を通過する沿岸漂砂量の外挿手法を開発した。検証計算として, 愛知県の赤羽根漁港周辺の汀線変化と, 新潟県の寺泊海岸における大河津分水路開削に伴う河口デルタの発達に係る汀線変化の予測にこの手法を適用し, 精度良く短時間で数値計算ができることを確認した。

1. はじめに

汀線変化モデルは, 沿岸漂砂による広域的長期的地形変化予測のための最も基本的なモデルとして実務に普及している。しかし沿岸漂砂が自由に通過する境界条件の, 実用に耐えうる設定法は存在しない。既存の境界条件設定法としては, まず, 境界での沿岸漂砂量を隣接点の値と等しいと置く方法があるが, 原理上, この方法は境界での汀線変化が全く生じないため現実的ではない。この点を改善できる方法として, 丸山・鹿島 (1981) のような沿岸漂砂量の直線的外挿法がよく用いられるが, この方法は理論上境界での汀線の傾きが時間的に不変であることを暗に仮定したことに同じである。しかし, 現地海浜では汀線の傾きは直線ではなく曲率をもって変化するため, 境界付近の汀線変化の実態と適合せず, その適用には問題がある。また実務で用いる際には境界条件の影響が混入するのを防ぐため, 計算領域を対象領域の外側に十分広く設けることで対処することが多いが, このことは計算効率を大きく損ねる原因となっている。そこで, 本研究では汀線変化モデルと同一の基礎式である汀線変化の解析解を用いて, 境界付近を通過する沿岸漂砂量の場所的分布を考慮した新しい開境界処理法を考案した。

2. モデル化

(1) 突堤などによる沿岸漂砂阻止に起因する汀線変化の場合

汀線変化モデルは, 図-1 に示すように, 汀線位置 y_i に対してスタッガードメッシュ上で沿岸漂砂量 Q_i を計算し, 汀線位置 y_i を挟む両側の沿岸漂砂量の差から汀線変化を計算するものである。したがって, 沿岸漂砂量を算出すべき点の数は汀線位置の n 個に対して $n+1$ 個存在する。このとき, $2 \sim n$ 番の沿岸漂砂量については

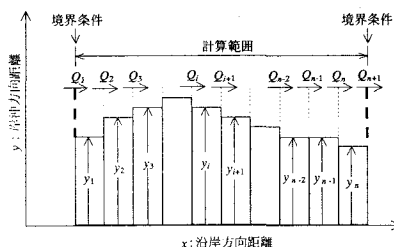


図-1 汀線位置 y_i と沿岸漂砂量 Q_i の配置

境界内での波浪条件から CERC 型の沿岸漂砂量式により算出できる。これに対して境界上の沿岸漂砂量 (Q_1 と Q_{n+1}) は境界条件として別に与える必要がある。本研究では, 沿岸漂砂が自由に通過する開境界条件についてこれらの値を境界内の沿岸漂砂量から外挿する新しい方法を考える。

まず, CERC 型の沿岸漂砂量式を採用すると, 汀線変化モデルの基礎式は式 (1), (2) である。

$$Q = K(EC_g)_b \sin \alpha_b \cos \alpha_b \dots \dots \dots (1)$$

$$\frac{\partial y}{\partial t} = -\frac{1}{h} \left(\frac{\partial Q}{\partial x} - Q_m \right) \dots \dots \dots (2)$$

ここに, K は漂砂量係数, $(EC_g)_b$ は碎波点における波浪エネルギーフラックス, α_b は碎波角であり, 汀線直角方向と波向 (α_0) のなす角度である。また, y は汀線位置, x は沿岸方向距離, h は漂砂の移動高, Q_m は単位幅当たりの海岸への流入 (または流出) 土砂量である。

次に, $\alpha_b \approx \alpha_0$ として, 初期汀線が直線状の海浜に沿岸漂砂を阻止する構造物を建設した際の汀線変化の解析解は式 (3) で与えられる (Pelnard-Considère, 1956)。

$$y(x, t) = \pm \frac{\tan \alpha_0}{\sqrt{\pi}} \left[\sqrt{4A_0 t} \exp(-\xi^2) - x \sqrt{\pi} \operatorname{erfc}(\xi) \right] \dots \dots \dots (3)$$

$$A_0 = \frac{K(EC_g)_b}{h} \dots \dots \dots (4)$$

$$\xi = \frac{x}{\sqrt{4A_0 t}} \dots \dots \dots (5)$$

ここに, erfc は余誤差関数であり, A_0 は汀線変化の解析

* 正会員 工修 (株)水域ネットワーク
** 正会員 工博 (財)土木研究センター理事なごさ総合研究室長
*** 正会員 海岸研究室 (有)
**** 正会員 工博 日本大学助教授理工学部海洋建築工学科

解の係数で宇多 (1997) により式 (4) のように表される。式 (3) を t で微分すれば沿岸漂砂量が算出され、式 (6) となる。

$$Q(x, t) = \frac{\partial y}{\partial t} = A_0 h \left(\tan \alpha_0 - \frac{\partial y}{\partial x} \right) = Q_0 \operatorname{erf}(\xi) \cdots (6)$$

$$Q_0 = A_0 h \tan \alpha_0 \cdots (7)$$

Q の関数形は図-2 のように与えられるので、境界を通過する沿岸漂砂量を Q_{n+1} 、それに連続する境界内の沿岸漂砂量を Q_n 、 Q_{n-1} とすれば、それぞれは式 (8) ~ (10) で与えられる。

$$Q_{n-1} = Q_0 \operatorname{erf}(\xi_n - \Delta\xi) \cdots (8)$$

$$Q_n = Q_0 \operatorname{erf}(\xi_n) \cdots (9)$$

$$Q_{n+1} = Q_0 \operatorname{erf}(\xi_n + \Delta\xi) \cdots (10)$$

ここで、 Q_0 は汀線変化以前の初期状態での沿岸漂砂量であるから数値計算の際には、1 ステップ目の沿岸漂砂量を用いればよい。また Q_n 、 Q_{n-1} は境界内の沿岸漂砂量であるから式 (1) の沿岸漂砂量式から計算できる。したがって 2 変数に対して、式が 2 つなので、 ξ_n と $\Delta\xi$ が求められる。これらの値を式 (10) へ代入すると式 (11) となり、 Q_{n+1} の算定式が導かれる。

$$Q_{n+1} = Q_0 \operatorname{erf} \left[2 \operatorname{erf}^{-1} \left(\frac{Q_n}{Q_0} \right) - \operatorname{erf}^{-1} \left(\frac{Q_{n-1}}{Q_0} \right) \right] \cdots (11)$$

Q_1 についても上述と同様にすれば境界内の沿岸漂砂量 Q_2 と Q_3 を用いて次式から算出することができる。

$$Q_1 = Q_0 \operatorname{erf} \left[2 \operatorname{erf}^{-1} \left(\frac{Q_2}{Q_0} \right) - \operatorname{erf}^{-1} \left(\frac{Q_3}{Q_0} \right) \right] \cdots (12)$$

(2) 河口デルタの汀線変化の場合

河口デルタの汀線変化の解析解は、式 (13) で与えられる (橋本, 1975)。

$$y(x, t) = \frac{Q_{in}}{h} \left[\frac{1}{\sqrt{A_0}} \sqrt{\frac{t}{\pi}} \exp(-\xi^2) - \frac{x}{2A_0} \operatorname{erfc}(\xi) \right] \cdots (13)$$

ここに、 Q_{in} は河川流出土砂量であり、既知量である。式 (13) で表される汀線変化は、波向に全く依存していない。沿岸漂砂量については、前節と同様、式 (13) を t で微分すれば式 (14) となり、その関数形は図-3 となる。

$$Q(x, t) = \frac{Q_{in}}{2} \operatorname{erfc}(\xi) + Q_0 \cdots (14)$$

境界を通過する沿岸漂砂量 Q_{n+1} の両隣の沿岸漂砂量 Q_n 、 Q_{n-1} は式 (15)、(16) となり、 Q_{n+1} は式 (17) で表せる。

$$Q_{n-1} = \frac{Q_{in}}{2} \operatorname{erfc}(\xi_n - \Delta\xi) + Q_0 \cdots (15)$$

$$Q_n = \frac{Q_{in}}{2} \operatorname{erfc}(\xi_n) + Q_0 \cdots (16)$$

$$Q_{n+1} = \frac{Q_{in}}{2} \operatorname{erfc}(\xi_n + \Delta\xi) + Q_0 \cdots (17)$$

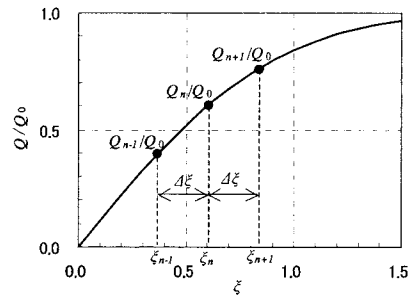


図-2 Q の関数形 (沿岸漂砂阻止に起因する汀線変化の場合)

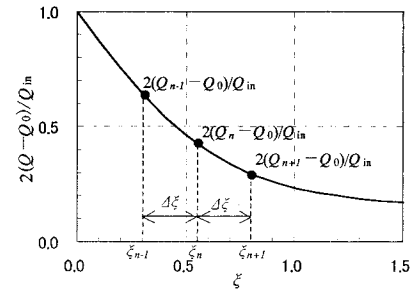


図-3 Q の関数形 (河口デルタの汀線変化の場合)

ここで、 Q_n 、 Q_{n-1} 、 Q_0 、 Q_{in} は既知であるから式 (15)、(16) より ξ_n と $\Delta\xi$ を求め、その結果を式 (17) へ代入すれば式 (18) により Q_{n+1} を算出することができる。

$$Q_{n+1} = \frac{Q_{in}}{2} \operatorname{erfc} \left[\frac{2 \operatorname{erfc}^{-1} \left[\frac{2(Q_n - Q_0)}{Q_{in}} \right]}{-\operatorname{erfc}^{-1} \left[\frac{2(Q_{n-1} - Q_0)}{Q_{in}} \right]} \right] + Q_0 \cdots (18)$$

Q_1 については、上述の手法と同様に式展開すれば、次式から Q_1 を算出することができる。

$$Q_1 = \frac{Q_{in}}{2} \operatorname{erfc} \left[\frac{2 \operatorname{erfc}^{-1} \left[\frac{2(Q_2 - Q_0)}{Q_{in}} \right]}{-\operatorname{erfc}^{-1} \left[\frac{2(Q_3 - Q_0)}{Q_{in}} \right]} \right] + Q_0 \cdots (19)$$

3. 検証計算

(1) 突堤による沿岸漂砂阻止に起因する汀線変化

a) 愛知県赤羽根漁港周辺の汀線変化

突堤による沿岸漂砂阻止に起因する汀線変化の開境界処理法の妥当性を検証するため、現地海浜の汀線変化をもとに検証を行った。対象海浜は、図-4 の位置図に示すように、愛知県渥美半島の太平洋に面する赤羽根漁港周辺の海浜である。赤羽根漁港周辺では、防波堤の建設によって西向きの沿岸漂砂が阻止され、防波堤の東側で堆積が、西側で侵食が起きている (宇多, 1997a)。その後、この区域の海浜変形については三浦ら (2004) でも詳しく分析したが、ここではモデルの適用にあたって必

要とされる部分として、空中写真判読の結果を抜粋する。

1946年の空中写真を図-5(a)に示す。高松崎には岩礁があるためそこで海岸線に段差が付いていたが、1946年には全区域において海岸線に沿って約100 m 幅の砂浜が連続的に伸びていた。1973年には図-5(b)のように赤羽根漁港の東・西防波堤が既に建設されていた。長い東防波堤がこの地区で卓越した西向きの沿岸漂砂を阻止したために、防波堤の東側隣接区域では堆積が起ころ始め、西側では沿岸漂砂の連続性が絶たれたことに起因して海浜幅が狭まった。1986年では、図-5(c)のように東防波堤がさらに延長され、西向きの沿岸漂砂の移動がさらに困難となったため、東防波堤を境にして東側では細長い三角形の砂浜が広がり、一方西側では汀線がさらに後退したことが分かる。図-6は空中写真から読み取った汀線変化量の沿岸方向分布である。赤羽根漁港の突堤によって沿岸漂砂が阻止されたため漁港東側では汀線が経時的に前進し、一方西側では汀線が防波堤直近の遮蔽域を除いて後退している状況が見てとれる。

b) 赤羽根漁港付近の海浜へのモデルの適用

本研究の手法を赤羽根漁港付近の汀線変化予測に適用した。1946年の汀線を基準とした展開座標上で計算し、入力諸元の設定には三浦ら(2004)を参考とし、汀線変化の解析解の係数 A_0 が 1.23×10^4 であり、式(4)の右辺は $1/8\rho g^{3/2}/\gamma \times KH^{5/2}/h$ (γ は碎波波高水深比で $\gamma=0.7$)と表せるので、まず $KH^{5/2}/h$ を算出($KH^{5/2}/h=8.1 \times 10^{-4}$)する。次に、佐藤ら(2004)によれば、赤羽根漁港と同じ遠州灘に面する天竜川河口付近では、 $H=$

1.7 m (エネルギー平均波高, 周期6.6 s), 波による地形変化の限界水深 h_c が10 mであるので、波高についてはそのまま値を用いる。漂砂の移動高 h は宇多(1997a)の波による地形変化の限界水深と漂砂の移動高の関係より $h=13.3$ mとした。漂砂量係数 K については、上述の $KH^{5/2}/h$ の値と H と h の値から逆算し、 $K=0.32$ とした。また、波向については三浦らと同様に $\alpha_0=20.1^\circ$ とした。汀線変化予測の結果を図-7示す。図には同じ入力諸元を与えて左右に計算範囲を広げ境界位置を十分遠方に設けた場合の予測計算の結果も同時に示す。図-7より、本モデルによる予測結果は、遠方に境界を定めた際の汀線変化予測結果と完全な重なりを示し、現地の汀線変化とも良い対応を示している。しかしながら、この予測結果には防波堤直近の遮蔽域が含まれておらず、そこでの汀線変化の再現はできていない。そこで防波堤遮蔽域での汀線変化については、防波堤下手側の回折波の波浪場の変化を方向分散法によって計算し、波高および波向の入力値とした(酒井ら, 2003)。結果を図-8に示す。なお、ここでは開境界法の防波堤遮蔽域への適用性を調べるため、十分遠方に境界を定めた際の汀線変化と比較する。図-8から分かるように、この場合も遠方

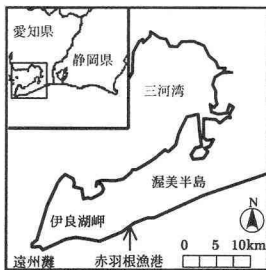


図-4 愛知県赤羽根漁港の位置

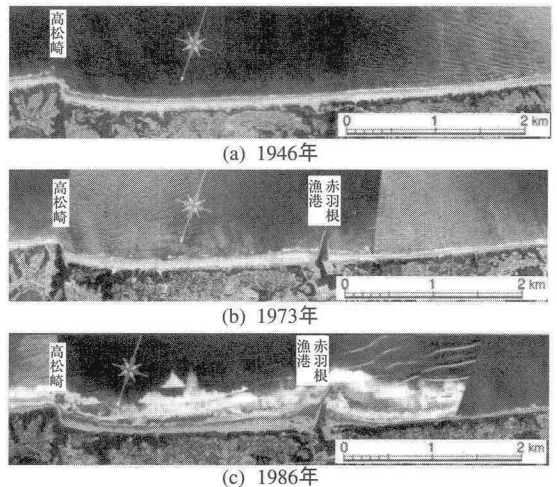


図-5 赤羽根漁港周辺の空中写真の比較

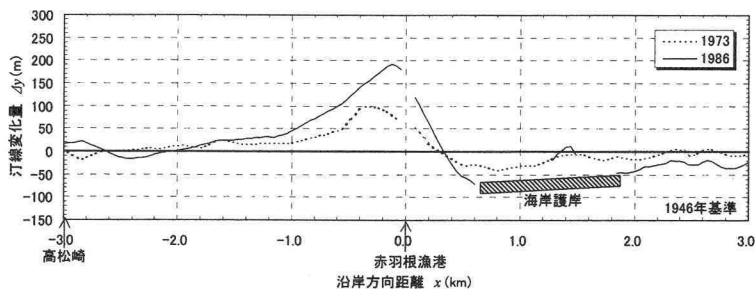


図-6 赤羽根漁港周辺の汀線変化

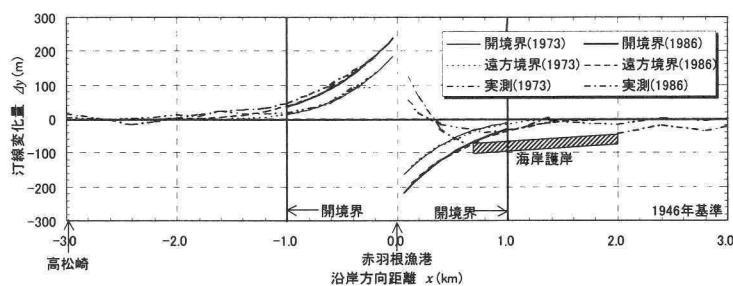


図-7 赤羽根漁港周辺の汀線変化予測結果の比較

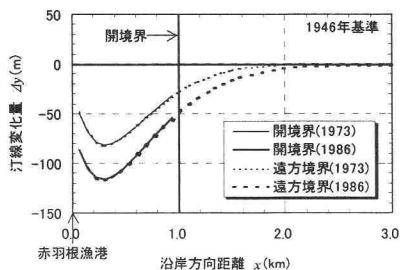


図-8 赤羽根漁港の防波堤遮蔽域における汀線変化予測結果の比較



図-9 新潟県寺泊海岸の位置

に境界を定めた際の汀線変化と良い対応を示している。

(2) 河口デルタの汀線変化への適用

a) 新潟県寺泊海岸の汀線変化

河川から海岸に土砂が流入する場合における汀線変化の開境界処理法の妥当性を検証するため、現地海浜の汀線変化をもとに検証を行った。対象海浜は、沿岸漂砂に関して閉じた系であることと、初期条件が明確に定められるという2点より新潟県の寺泊海岸を選定した。図-9に海岸の位置を示す。

この付近の海浜は、信濃川の氾濫を防ぐために1922年に大河津分水路が通水し、その後河口デルタが急速に発達した海浜である(土屋ら, 1994)。本研究では、まず、大河津分水路付近の海浜変形の特徴を調べるため、地形図と空中写真を用いて海浜の特性を調べた。

図-10(a)に1911年の地形図を示す。1911年当時分水路は通水しておらず、南北に緩やかに湾曲した海岸線形状を有していた。また、大河津分水路より南側約3 km地点には寺泊港が位置していた。1931年の地形図が図-10(b)である。分水路通水後、急激な土砂流出が発生したため大河津分水路を頂部とした河口デルタが発達したことが明らかである。図-11は1947年に撮影された空中写真である。河口デルタはさらに発達し、南側は寺泊港付近まで北側は男釜付近まで汀線が前進している。

図-12は1911年を基準とした汀線変化である。この図より汀線が大河津分水路を中心としてデルタ状に前進していることが分かる。河口デルタの平面積は1911年か

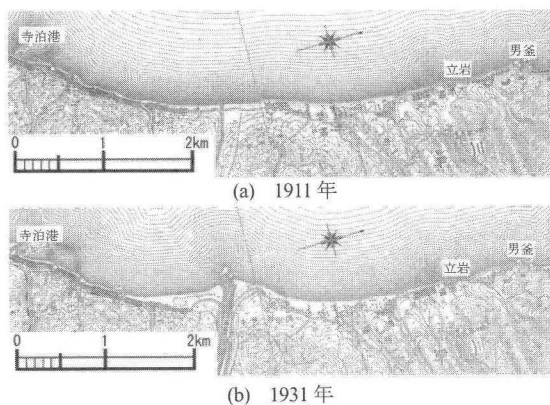


図-10 地形図による大河津分水路通水前後の海岸線変化比較

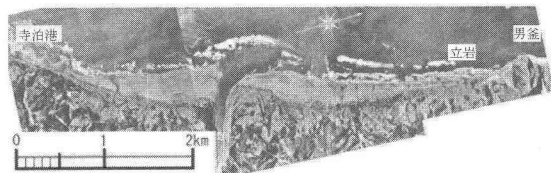


図-11 寺泊海岸の空中写真(1947年)

ら1931年までに、 $5.1 \times 10^5 \text{ m}^2$ 、1911年から1947年までに、 $2.0 \times 10^6 \text{ m}^2$ 増加している。その増加率は、1922年に分水路が通水していることを考慮して1911～1931年で $5.7 \times 10^4 \text{ m}^2/\text{yr}$ 、1911～1947年で $8.0 \times 10^4 \text{ m}^2/\text{yr}$ であった。

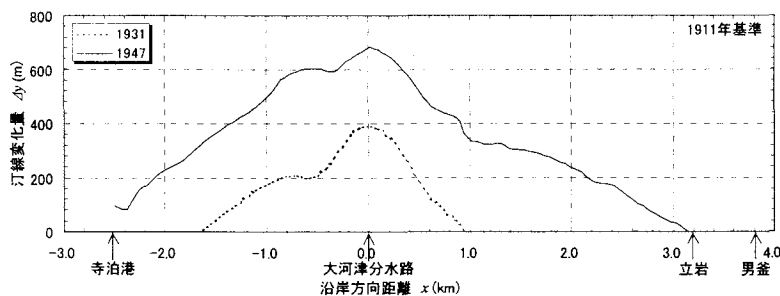


図-12 寺泊海岸の汀線変化

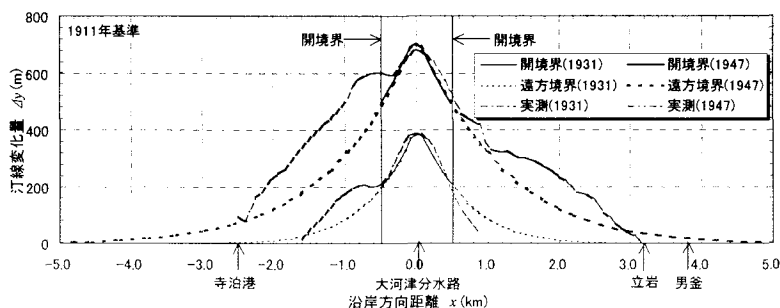


図-13 寺泊海岸の汀線変化予測結果の比較

b) 寺泊海岸の汀線変化への適用

本手法を寺泊海岸の汀線変化予測に適用した。1911年の汀線位置を基準とした直線展開座標上で計算し、入力諸元として土屋らの手法をもとにして、 $H = 1.0 \text{ m}$ 、 $h = 10 \text{ m}$ 、 $\alpha_0 = 0^\circ$ 、 $K = 0.33$ と設定した。なお、波向に関しては、式(13)で表される汀線変化は波向には依存しないので、ここでは初期汀線に対して直角入射とした。汀線変化の計算結果を図-13に示す。計算結果は、上述の海浜面積の増加率の差異を考慮して、1931年までの汀線変化計算では、大河津分水路からの流出土砂量を面積の増加率に漂砂の移動高(h)を乗じて $5.7 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{yr}$ 、一方、1947年の計算結果では、 $8.0 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{yr}$ と設定して計算した。また、計算結果には、境界を無限遠に定めた場合の計算結果を同時に載せている。本手法による計算結果は遠方に境界を定めた場合の計算結果とよく対応しているのが分かる。また、実測値の汀線変化とも良く合っていることから本手法の有効性は明らかである。

4. 結 論

汀線変化モデルは実務でよく使われる手法であり、その信頼性、利便性は高いが従来の開境界処理法は、一次関数的に境界を通過する沿岸漂砂量を近似していた。しかしながら、沿岸漂砂量の分布は一次関数的ではなく誤差関数曲線で近似される。このため、従来の汀線変化モデルの開境界処理に関しては、課題が残されていた。本研究では、境界を通過する沿岸漂砂量を、それに連続す

る境界内の沿岸漂砂量から誤差関数を用いて算出し、外挿する手法を示した。この手法を用いれば、短時間で精度良い数値計算を行うことができる。

参 考 文 献

- 宇多高明(1997a):「日本の海岸侵食」, 山海堂, p. 442.
- 宇多高明(1997b): 沿岸漂砂の卓越する海岸における暗渠型放水路吐口の設計上の留意点, 海洋開発論文集, 第13巻, pp. 627-632.
- 佐藤廣司・宇多高明・岡安徹也・芹沢真澄(2004): 天竜川-遠州灘流砂系における土砂移動の変遷と土砂管理に関する検討, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 571-575.
- 酒井和也・小林昭男・宇多高明・芹沢真澄・熊田貴之(2003): 波の遮蔽構造物を有する海岸における3次元静的安定海浜形状の簡易予測モデル, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 496-500.
- 土屋義人・山下隆男・斉藤正勝(1994): 河口デルタの拡大・縮小に起因する海浜変形(1)-寺泊・野積海岸での河口デルタの形成-, 京都大学防災研究所年報, 第37巻, pp. 539-568.
- 橋本 宏(1975): 河口部海岸線の変化特性, 土木技術資料, 第7巻, 第12号, pp. 32-37.
- 丸山康樹・鹿島遼一(1981): 海岸変形予測における1-lineモデル計算手法の改良, 第36回年次学術講演会講演概要集, 第二部, pp. 835-836.
- 三浦正寛・小林昭男・宇多高明・芹沢真澄・熊田貴之(2004): 基本資料不足の海浜における汀線変化予測モデルの開発, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 436-440.
- Pelnard-Considère R. (1956): Essai de théorie de l'évolution des formes de rivage en plages de sable et de galets. 4th Journées de l'Hydraulique. Les Energies de la Mer. Question III, Rapport No.1, pp. 289-298.