

線形応答関数を用いた汀線変動の予測モデル

A Model for Predicting Shoreline Change by Applying Linear Response Function

Thien Khang TRUONG¹・田中 仁²

Thien Khang TRUONG and Hitoshi TANAKA

When predicting shoreline changes, process-based modeling, which is usually based on the sediment transport process and external forces, is usually applied. Nevertheless, some models which based on the effect of wave and deposit conditions to shoreline changes are also proposed. One of the advantages of these models is short computing time due to not consider sediment transport process. However, lots of empirical coefficients are the problems of these models. In this study, by applying the convolution integral, a model for predicting the response of shoreline has been developed and based on long term survey data, the constant calibration as well as verification of this model has been examined.

1. はじめに

近年, 日本各地の海岸において侵食現象が顕在化している。そのため, 海岸防護対策のための構造物に関する検討がなされる。その際, 海岸地形変化に関する将来予測が求められる。

海岸地形変化を予測する際, 外力と漂砂との間の物理的関係を記述する諸式に基づくモデル (process-based modeling) によるアプローチが多用されてきた。一方, 砂移動過程をブラックボックスとして扱い, 波浪・底質の条件と海岸線変化を直接結びつけるモデルも提案されている。このようなモデルには複雑な波浪場・土砂移動の計算などを含まないため, 計算時間がきわめて短いなどの利点を有している。

例えば, 砂村 (1980) は Sunamura・Horikawa (1974) のパラメータに基づくモデル化を行い, 現地データとの比較を行っている。加藤ら (1987, 1988) は波崎海岸における連続的な観測データに基づき, 侵食過程と堆積過程を別々の式で表現した経験的な汀線変動モデルを提案している。また, David・Dean (1993) は畳み込み積分を応用することにより, 水位上昇時の海岸線変化について検討を行っている。近年, 坂上・田中 (2005) は汀線変動予測へのニューラルネットワークの応用を検討している。ただし, これらのモデルには複数の経験的係数が含まれ, これらの係数の普遍性も問題となる。

本研究では汀線変動を線形力学系と仮定することにより, 畳み込み積分を応用した岸沖漂砂による汀線応答モデルを提案する。長期間にわたる仙台北海岸の実測データを使用することにより, モデル定数のキャリブレーション過程とモデル検証過程とに分けて, 総合的な検討を行った。

2. 線形応答モデル

(1) モデルの概要

図-1 に示すように, 一定の水位・波浪条件のもとで長時間にわたり波浪を作用させると, 平衡海浜断面に至ることが知られている。David・Dean (1993) は高潮時の海面上昇・低下に対する過渡的な海浜応答を表現するために, 線形システムモデルを用いた。本研究においても, 任意時刻 t における汀線位置 $y_s(t)$ を求めるためのモデルの基礎式として, David・Dean (1993) と同様に次の様な積分型の式を用いることとする。

$$y_s(t) = a \int_0^t [f(\tau)] e^{-(t-\tau)/T_s} d\tau \dots \dots \dots (1)$$

ここで, a : 定数, $f(t)$: 波浪による外力条件を表す関数, T_s : 海浜応答の時定数である。同様なモデル化は様々な工学分野でもなされている。このうち, 水工学分野において良く知られているものは, 水文流出過程の計算に使用される unit hydrograph 法である (例えば, 日野・長谷部, 1985)。

本研究においては, Sunamura・Horikawa (1974) により提案された次の無次元パラメータ C_s を用いて関数 $f(t)$ を表現することを試みた。

$$C_s = \left(\frac{H_0}{L_0} \right) / \left\{ (\tan \beta)^{-0.27} \left(\frac{d}{L_0} \right)^{0.67} \right\} \dots \dots \dots (2)$$

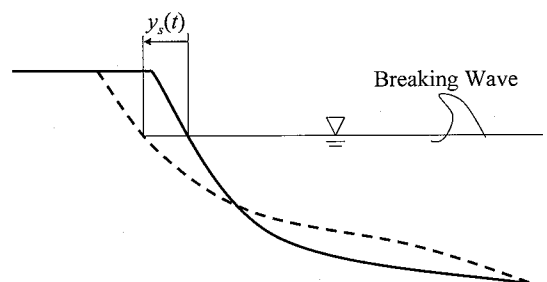


図-1 汀線応答の概念図

1 学生会員 東北大学大学院 工学研究科
2 フェロー 工博 東北大学大学院教授 工学研究科

ここで、 H_0 : 沖波波高, L_0 : 沖波波長, $\tan \beta$: 海浜勾配, d : 底質粒径である。 C_s には、堆積型海浜形状・侵食型海浜形状の境界値 C_0 が存在することが知られている。そこで、砂村(1980)と同様に、本研究では式(1)の関数 $f(t)$ を $C_0 - C_s$ とおくこととする。これにより、時刻 t における汀線位置 $y_s(t)$ は、線形応答関数を用いた重ね合わせの原理を応用することにより、式(3)の重畳積分により表されるものと仮定する。

$$y_s(t) = a \int_0^t [C_0 - C_s(\tau)] e^{-(t-\tau)/T_s} d\tau \dots \dots \dots (3)$$

式(3)によれば、 $C_s = C_0$ の時、汀線位置に変化は生じず、 $C_s > C_0$ の条件では $y_s(t) < 0$ となり後退が、 $C_s < C_0$ では $y_s(t) > 0$ となり前進が生じる。この様に、式(3)は Sunamura・Horikawa (1974) の C_s パラメータが有する侵食・堆積に関わる特性を反映したモデルとなっていることが分かる。

(2) モデルによる汀線応答の特徴

図-2 は、式(3)による汀線応答の原理を、後述する2002年8月の仙台海岸で観測した波浪データをもとに示したものである。図-2の上段は1日毎の $C_0 - C_s$ を示すものである。各 $C_0 - C_s$ の値に応じて、汀線応答が図-2の中段の様に生じる。その線形和が最下段の汀線の応答を生む。 C_s の変動に応じて、汀線の前退・後退の現れることが確認される。

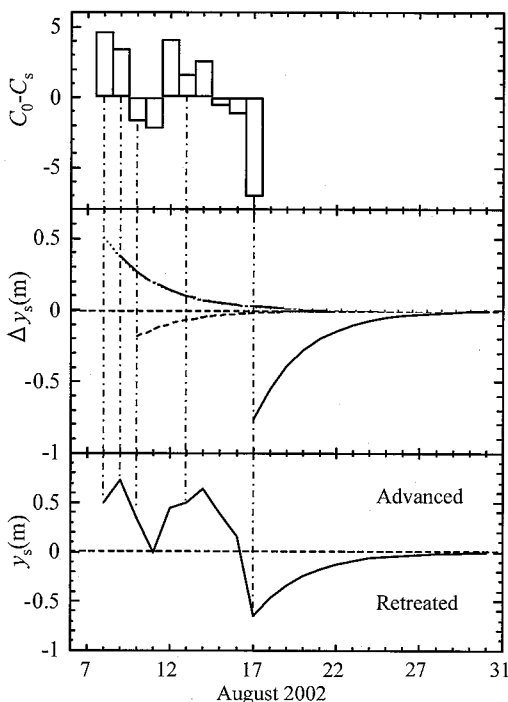


図-2 線形応答モデルによる汀線変動予測の原理

3. 理想的な波浪条件下での汀線応答

式(3)によるモデル化を現実の海浜変形に応用する前に、単純化された外力条件の下において得られる解析的な解をもとにして、汀線変動の特徴を示す。

(1) 正弦変動する外力時の応答

台風や暴風などの際、一回の大きいエネルギーを持つ波浪の作用で汀線が後退し、その後のより低いエネルギーをもつ波浪の作用で汀線が回復する。また、年間を通してみた場合、砂質海岸は暴浪の襲来する季節に侵食され汀線が後退するが、波浪の静穏な季節には堆積が生じ汀線の前進が見られる。ここでは、このように周期性を持っている理想的な波浪変動過程を仮定し、その条件下における汀線応答について検討を行う。

ここでは、上記のような周期的な外力変化を次式の正弦関数で表現する。

$$C_0 - C_s(t) = A \sin\left(\frac{2\pi}{T_b} t\right) = A \sin(\sigma t) \dots \dots \dots (4)$$

ここで、 T_b は波浪の変動に伴う $C_0 - C_s$ の変動の周期である。無次元パラメータ $(C_0 - C_s)/A$ の変化を図-3の上段に示す。ここで、式(4)を式(3)に代入すると以下のようなになる。

$$y_s(t) = a \int_0^t A \sin(\sigma \tau) e^{-(t-\tau)/T_s} d\tau \dots \dots \dots (5)$$

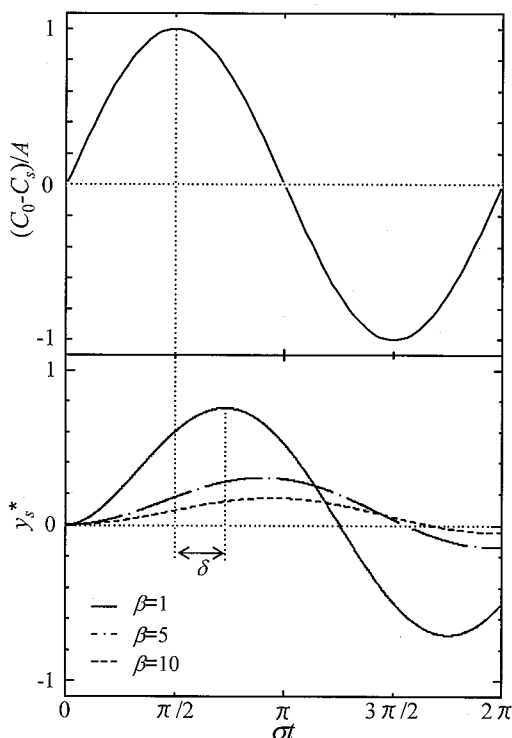


図-3 理想的な波浪状態における汀線応答

式(5)の積分は容易に求められ、これより、無次元汀線位置 y_s^* が次式の様に得られる。

$$\begin{aligned} y_s^*(t) &= \frac{y_s(t)}{aAT_s} \\ &= \frac{1}{1+\beta^2} (\sin \sigma t - \beta \cos \sigma t + \beta e^{-\sigma t/\beta}) \\ &= \frac{\beta}{1+\beta^2} e^{-\sigma t/\beta} + \frac{1}{\sqrt{1+\beta^2}} \sin(\sigma t - \delta) \cdots (6) \end{aligned}$$

ここで、 δ は外力と汀線応答の間の位相のずれであり、次式のように表される。

$$\sin \delta = \frac{\beta}{\sqrt{1+\beta^2}} \cdots (7)$$

式(6)によれば、無次元化された汀線変動は、次式で定義される海浜変形の時間スケール T_s と波浪作用時間 T_D の比 β により異なることが分かる。

$$\beta = \sigma T_s = 2\pi \frac{T_s}{T_D} \cdots (8)$$

なお、David・Dean (1993) は高潮による水位上昇を対象として、式(6)と同様な解を導き、式(8)で定義される時間スケール比の重要性を指摘している。

図-3 の下段は式(6)により与えられる汀線変動の様子を示している。同図より、無次元パラメータ C_0-C_s の正負によって、汀線の前進・後退が現れることが確認される。また、無次元パラメータ β により異なる振る舞いを示すことが分かる。さらに、式(6)から明らかのように、 $t \rightarrow \infty$ での汀線は C_0-C_s と同様に正弦関数的に変動しており、 β が大きいほど、 C_0-C_s と汀線変動の間に大きな位相のずれ δ が見られる。

図-4 は無次元化された最大汀線変化量 $y_s^*_{\max}$ と、無次元パラメータ β との関係を表している。 β が小さいほど、外力の変動に対して瞬時に応答するため、最大汀線変化量が大きい値を有する。

次に、図-3 のように定義された汀線変化量と作用波浪との位相ずれ δ を求め、無次元パラメータ β との関係を図-5 に示した。前述の通り、 β が小さいほど汀線が短い時間で応答するため、位相差が小さい。

(2) 矩形状の外力条件時の応答

次に、先の想定条件よりも急な立ち上がりを伴って波浪条件が変化する現象を考える。すなわち、急激な高波浪の来襲を想定し、 $C_s=C_0$ の状態から、急に C_0-C_s が負側に減少し、それが負の一定値 $-A_0$ を保って、一定時間 T_E にわたって継続する様な波浪条件を考える。このとき、波浪関数 $f(t)$ は以下のような関数で与えられる。

$$C_0 - C_s(t) = -A_0, \quad 0 < t < T_E \cdots (9)$$

ここで、 A_0 は正の値であるとし、汀線が後退する侵食条件の波浪を想定する。上式を式(3)に代入すれば、

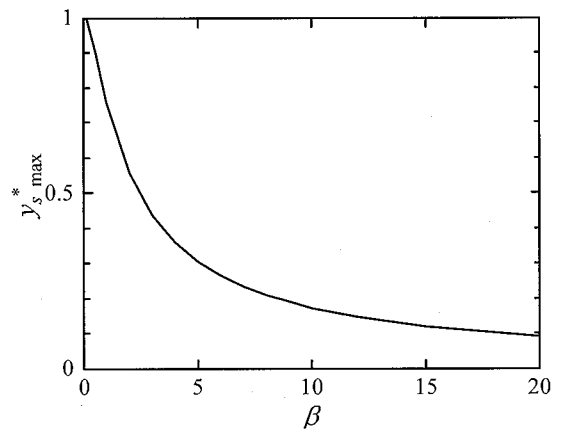


図-4 最大汀線変化量と β との関係

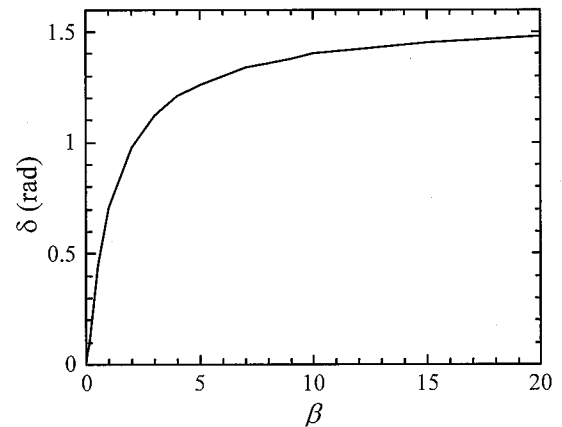


図-5 位相のずれ δ と β との関係

次式を得る。

$$y_s(t) = -a \int_0^t A_0 e^{-(t-\tau)/T_s} d\tau, \quad 0 < t < T_E \cdots (10)$$

先の場合と同様に、無次元汀線変化量を求めると、式(10)から式(11)が得られる。

$$y_s^*(t) = \frac{y_s(t)}{aA_0T_s} = \exp\left(-\frac{1}{\gamma} \frac{t}{T_E}\right) - 1 \cdots (11)$$

ここで、 $\gamma = T_s/T_E$ は海浜応答の時間スケールと波浪作用時間の比であり、式(8)と同様な物理的意味を有している。式(10)から明らかのように、汀線応答は指数関数的に変化し、変化した波浪条件でのもとの平衡汀線位置 ($y_s^* = -1.0$) に漸近する。式(11)により得られる無次元汀線変化過程を図-6 に示した。図より明らかのように、 γ の大小に応じて、最大汀線までに到る時間の長さが異なる。

図-7 は γ と最大汀線変化量 $y_s^*_{\max}$ との関係を表したものである。また、汀線の変化量が最大汀線変化量の 99% まで変化するのに必要とする時間を t_{99} とし、 γ と t_{99}/T_E との関係を図-8 に示した。図-7、図-8 は、基本的に図-4、図-5 と同様な特性を示している。

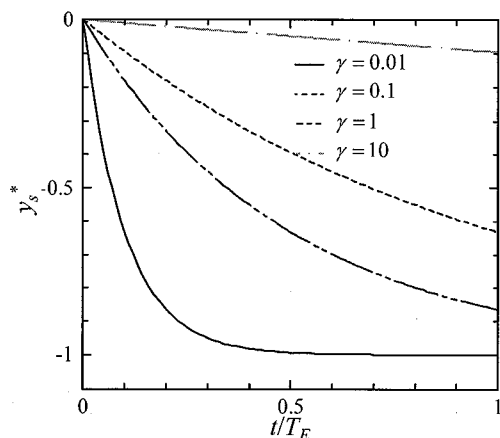
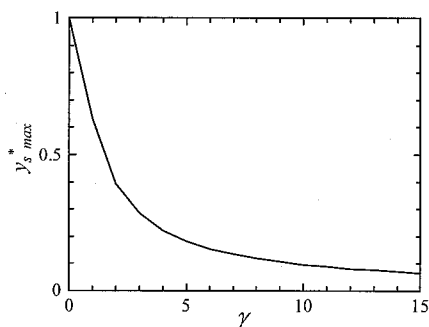
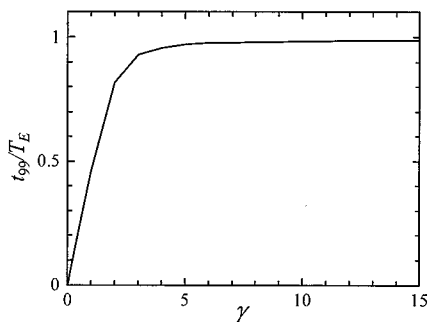


図-6 一定の波浪状態における汀線応答

図-7 γ と最大汀線変化量との関係図-8 γ と t_{99}/T_E との関係

4. 仙台湾岸に対するモデルの適用

(1) キャリブレーション計算

現在のところ、式(3)に含まれる時定数 T_s と係数 a を定量的に評価するための知見は存在しない。そこで、実測された汀線位置をもっとも良く再現する値を経験的に定めることとする。そのために、計算結果と実測データとの間の誤差 e を式(12)のように定義した。

$$e = \frac{\sum_{i=1}^N |y_{s(m)} - y_{s(c)}|}{N} \quad (12)$$

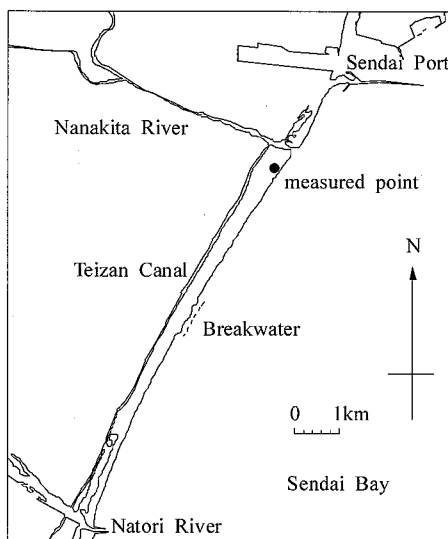


図-9 実測地点

ここに、 $y_{s(m)}$ 、 $y_{s(c)}$ ：汀線位置の計算値と実測値、 N ：総データ個数である。実測値は仙台新港から南に約 2.5 km の仙台湾岸において定期的に取得されたものであり、これを経験的固有関数展開し、岸沖漂砂による成分を取り出したデータ（姜・田中，2006）を使用した。図-9 に実測地点を示す。ここで、時間の刻みは一日とし、一日毎の平均波浪から得られる C_s 値を入力した。

2002 年のデータを用いて得られた誤差のコンター図を図-10 に示す。この結果から、(A)、(B)、(C)、(D) と示した組み合わせはほぼ同じ誤差の値である。その中、(A) と示した $T_s=3.0$ 日と $a=0.15$ m/day の組み合わせにより良好な計算値が得られている。この時の計算と実測の汀線変動を図-11 に示す。

図-11 の上段は 2002 年の日平均の沖波波高を表している。その波高データから C_0-C_3 の値を計算した。その結果を図-11 の中段に示す。図-11 の下段は本モデル

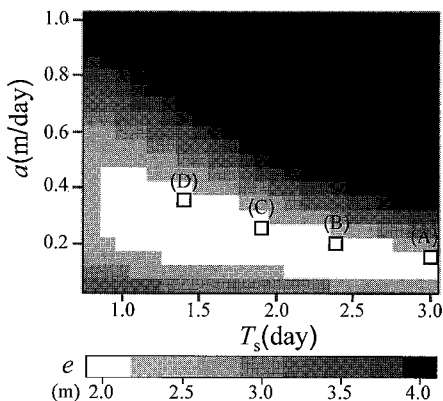
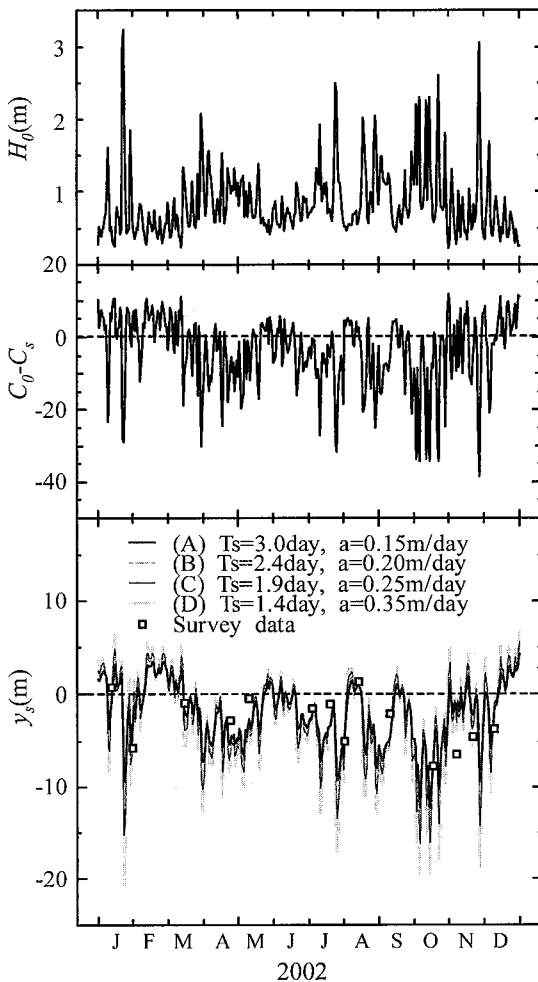


図-10 誤差のコンター図

図-11 波高, C_s-C_0 , 汀線の変動 (2002 年)

の計算結果と実測データの汀線位置の変動を示す。図-11によると実測汀線には C_s の大小に応じた変動が現れており、式(3)によるモデル化の妥当性を示唆している。実測汀線と計算値との間には良好な一致が見られる。また、図-10に示す(B), (C), (D)による計算結果も図-11に示した。時間スケール T_s が短いほど、顕著なスパイク状の汀線変動が見られる。

(2) 検証計算

2002年のデータにより得られた定数 a , T_s を用い、2003年の汀線データに対して検証計算を行った。その結果を図-12に示す。図-12により、実測と計算は良い一致を示すことをわかる。本モデルの係数は信頼度が高いと考えられる。

David・Dean(1993)は数値計算結果をもとに、汀線応答の時間スケールの特性に関する検討を行っている。その結果、時間スケール T_s は碎波波高、底質粒径に依存することを示した。仙台海岸における条件の下では、時定

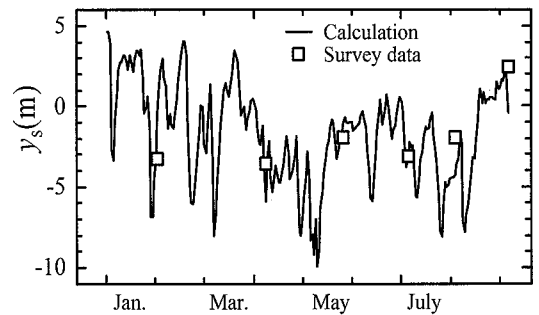


図-12 検討計算結果 (2003 年)

数は波浪状態によって5時間から80時間の範囲で変動する。一方、本研究の結果から、時定数は72時間と求まり、上記の範囲の中に収まっていることが確認された。

5. おわりに

本研究では、汀線変動を線形力学系と仮定することにより、以下のような結論を得た。

- (1) 重畳積分を用いて汀線応答を推定する手法を提案した。海岸線の前進・堆積現象を Sunamura・Horikawa(1974)の C_s パラメータと指数関数で表現した。また、理想的な外力の下での汀線応答特性を明らかにした。
- (2) 仙台海岸の実測結果を対象とする計算によれば、式(1)における時定数 $T_s=3.0$ 日と係数 $a=0.15$ m/day で最適の結果を与える。また、同じ値を用いることにより、検証計算においても良好な結果を得ることが出来た。

参考文献

- 加藤一正・柳島慎一・村上裕幸・末次広児(1987): 汀線位置の短期変動特性とそのモデル化の試み, 港湾技術研究所報告, 第34巻, 第2号, pp. 63-96.
- 加藤一正・柳島慎一・村上裕幸・末次広児(1988): 短期汀線変動のモデル化の試み, 海岸工学論文集, 第35巻, pp. 297-301.
- 姜 炫宇・田中 仁(2006): 汀線変化モデルの漂砂量係数同定に及ぼす検証データの影響, 海岸工学論文集, 第53巻, pp. 556-560.
- 坂上 毅・田中 仁(2005): ニューラルネットワークを用いた海浜変形予測の試み, 海岸工学論文集, 第52巻, pp. 531-535.
- 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, 海岸工学論文集, 第27巻, pp. 255-259.
- 日野幹雄・長谷部正彦(1985): 水文流出解析 - FORTRAN と BASIC による, 森北出版, 254p.
- David, L.K. and R.G. Dean (1993): Convolution method for time-dependent beach-profile response, Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, Vol. 119, No. 2, pp. 204-226.
- Sunamura, T. and K. Horikawa (1974): Two-dimensional shore transformation due to waves, Proc. 14th Conf. Coastal Engineering, pp. 920-938.