

前浜勾配と汀線の短期変動の予測モデル

MODEL FOR PREDICTING SHORT-TERM VARIATION OF FORESHORE SLOPE AND SHORELINE APPLYING CONCEPT OF EQUILIBRIUM SLOPE

福濱方哉¹・宇多高明²・山田浩次³・芹沢真澄⁴・石川仁憲⁵

Masaya FUKUHAMA, Takaaki UDA, Koji YAMADA, Masumi SERIZAWA and Toshinori ISHIKAWA

¹ 正会員 工修 国土交通省国土技術政策総合研究所海岸研究室長 (〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地)

² 正会員 工博 (財) 土木研究センター理事なぎさ総合研究室長兼日本大学客員教授理工学部海洋建築工学科 (〒110-0016 台東区台東1-6-4 タカラビル)

³ 正会員 国土交通省国土技術政策総合研究所海岸研究室 (〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地)

⁴ 正会員 海岸研究室 (有) (〒160-0011 東京都新宿区若葉1-22 ローヤル若葉301)

⁵ 正会員 工修 (財) 土木研究センターなぎさ総合研究室 (〒110-0016 台東区台東1-6-4 タカラビル)

A foreshore slope changes in response to the variation of incident wave height on a coast composed of fine sand, resulting in seasonal shoreline changes. During storm wave conditions, rapid shoreline recession occurs due to offshore sand transport. Bowen (1980) showed that during storm wave conditions the equilibrium slope is reduced, since the ratio W/u of the bottom velocity of waves u to the falling velocity of sand W takes a smaller value under the condition that the suspended sediment load is very high. In this paper, a model for predicting these short-term changes in the foreshore slope and shoreline position in response to changes in the wave intensity was developed on the basis of the concept of equilibrium slope while applying the contour-line-change model.

Key Words : Short-term changes, foreshore slope, predictive model, contour-line-change model

1. まえがき

一般に、細砂からなる海浜にあっては、波高の変動に応じて前浜勾配が変化するとともに汀線の前進後退が繰り返され、高波浪時には冲向き漂砂により汀線が急速に後退する。この現象は、細砂海岸特有のものと考えられるが、この点に関しBowen¹⁾は、Bagnold²⁾の掃流砂・浮遊砂の流砂量式と、Inman・Bagnold³⁾が示した平衡勾配の概念をもとに波浪の瞬間流速場に着眼して理論的に考察した。これより浮遊砂が卓越する場合には、底面流速 u と砂の沈降速度 W の比(W/u)が小さいほど平衡勾配が緩くなることを示し、波高が大きくなると平衡勾配が小さくなって冲向き漂砂が生じるとした。これは従来筆者らが開発を進めてきた等深線変化モデル⁴⁾における、平衡勾配が砂の粒径に強く依存するという考え方とは異なるが、これは筆者らの等深線変化モデルは主に砂の粒径が大きく、掃流砂が卓越する場合を考えていることによる。しかし、実務上短期変動による汀線の前進・後退の予測も不可欠であることもまた事実である。このことから、本研究ではこのような細砂からなる海浜における縦断変化に着目し、芹沢ほか⁴⁾による単一粒径を対象とする等深線変化モデルを発展させ、波浪

の強弱による岸向き・冲向き漂砂による縦断形変化の予測モデルを構築する。なお、本研究は前浜地形変化にのみ注目した予測モデルの構築を目指しており、バーの形成・消失は予測の対象としない。

2. 基本的考え方の整理

橋本・宇多⁵⁾は、細砂からなる阿字ヶ浦海岸で縦断形変化の観測を行い、波浪条件の季節的変動により、波高が高い時期にはフラットな縦断形であったが、波高が低くなると汀線付近に砂が堆積してバームが形成されるとともに、前浜勾配が次第に大きくなって最終的に急な前浜勾配となって安定するという結果を示した。一方、バームが十分発達した条件で高波浪が作用した場合には、堆積した砂は急速に削り取られたが、堆積以前のフラットな縦断形まで削られれば侵食はほぼ止まった。これは波高変動に応じて平衡勾配が変動するという考え方をとることで説明可能であろう。高波浪に対応して平衡勾配が緩くなれば冲向き漂砂が生じて前浜は侵食され、逆に静穏時には平衡勾配が急になると考えると、岸向き漂砂が発生し前浜で堆積が起ると考えられる。海浜縦

また微小時間での Y , Y_R , $\cot\beta$ の変化量の相互関係は式(4)となる。

$$\Delta(\cot\beta) = -\frac{\Delta Y_R}{h} = -\frac{\Delta Y}{h_{node}} \quad (4)$$

いま、図-4において微小時間 Δt の間に汀線位置が a から a' まで前進したとする。その場合の堆積断面積を ΔA 、単位時間あたりに節を通過する岸向き漂砂量を q 、節から上の部分の海浜の移動高を h とすると、単位時間の地形変化について土砂収支より式(5)が成立する。

$$\Delta A = \frac{h}{2} \cdot \Delta Y_R = q \Delta t \quad (5)$$

これより式(6)の連続式を得る。

$$\frac{\partial Y_R}{\partial t} = \frac{2q}{h} \quad (6)$$

式(6)と式(4)より、 $\cot\beta$ で記述した連続式として式(7)が得られる。

$$\frac{\partial(\cot\beta)}{\partial t} = -\frac{2q}{h^2} \quad (7)$$

ここで q には芹沢ら⁴⁾と同じ式(8)を用いる。

$$q = A \left(\frac{\cot\beta}{\cot\beta_c} - 1 \right) \quad (8)$$

式(8)を式(7)へ代入すると、前浜勾配予測のための基本式、式(9)を得る。

$$\frac{\partial(\cot\beta)}{\partial t} = B(\cot\beta_c - \cot\beta) \quad (9)$$

ここに B は次の係数である。

$$B = \frac{2A}{h^2 \cot\beta_c} \quad (10)$$

式(9)で、とくに $\cot\beta_c$ および B が一定の場合、 $t=0$ で $\cot\beta = \cot\beta(0)$ なので、式(11)の解析解となる。

$$\cot\beta(t) = \cot\beta_c + (\cot\beta(0) - \cot\beta_c) \exp(-Bt) \quad (11)$$

式(11)で与えられる $\cot\beta$ は時間的に急速に変化し、 $t \rightarrow \infty$ では $\cot\beta_c$ に収束する。以上は $\cot\beta$ に着目した式であるが、汀線位置 Y に着目した表示もできる。式(3)を式(8)、(9)に代入すれば、漂砂式は式(12)、汀線変化の予測式は式(13)となる。ここに Y_c は前浜勾配が平衡勾配に等しい時の汀線位置であり、式(14)で与えられる。

$$q = \frac{A}{h_{node} \cot\beta_c} (Y_c - Y) \quad (12)$$

$$\frac{\partial Y}{\partial t} = B(Y_c - Y) \quad (13)$$

$$Y_c = Y_{node} - h_{node} \cot\beta_c \quad (14)$$

式(13)で、とくに Y_c および B が一定の場合、 $t=0$ で $Y=Y(0)$ の条件下で解析解は式(15)となる。式(15)は Y は急速に変化し $t \rightarrow \infty$ で Y_c に収束する。汀線の方程式(式(13))は、Sunamura⁷⁾のモデルと同じタイプの式となっている。Sunamura⁷⁾の式は汀線変化機構をブラックボックスとした経験式であるが、当モデルは漂砂式と連続式から得たものであり物理的意味が明確となっている。

$$Y(t) = Y_c + (Y(0) - Y_c) \exp(-Bt) \quad (15)$$

本モデルの基本は以上のとおりであるが、日々の波浪強度の変動に応じた前浜勾配・汀線の変動を予測するには、予測対象海岸毎に平衡前浜勾配を波浪強度と関連付けて定式化する必要がある。本研究では加藤ほか⁸⁾⁹⁾が扱った波崎海岸を予測対象として取り上げる。加藤ほか⁸⁾⁹⁾は、汀線位置を D.L.+1.4m の静止海水面と前浜が交わる場所と定義し、波崎海岸の汀線の短期変動予測モデルを構築した。なお、D.L.+1.4m は鹿島港内の潮位がこのレベルを超えることがほとんどないレベルであるが、前浜部で地形変化の最も大きいところの平均レベルに相当する、とされている。加藤ほか⁸⁾⁹⁾は、その際波崎の観測データから、侵食時の無次元エネルギーフラックス \hat{E} (毎日のエネルギーフラックスを平均値で割ったもの) と平均汀線位置を基準とした汀線位置 Y の関係を式(16)で表した。ここで加藤ほかは、波浪外力パラメータとして既往研究にあるように波形勾配を用いずにエネルギーフラックスを用いた理由として、海浜に及ぼす影響は波高が高く周期の長い波の方が大きいという性質が反映できること、また波崎の波浪観測データの統計分析によれば波形勾配とエネルギーフラックスの間に正の相関関係が見られたことよりエネルギーフラックスを用いても波形勾配をパラメータとする既往研究と大きな矛盾は生じないためとした。また橋本・宇多⁵⁾が阿字ヶ浦海岸で実施した4年間の海浜変形の連続観測によれば、前浜勾配と有義波高は良好な相関を示すが、波形勾配と前浜勾配の間には波高ほど高い相関関係は見られなかったことも理由の一つである。

$$Y = -16.0 \cdot \log \hat{E} + 1.63 \quad (16)$$

さらに加藤ほか⁸⁾⁹⁾は、式(16)の物理的意味を平衡前浜勾配と \hat{E} の関係から考察し、式(16)とほぼ同じ結果を与える関係式として式(17)を示した。ここに、平衡前浜勾配 $\cot\beta_c$ は式(18)で定義され、係数値は式(19)の通りである。

$$\hat{E} = C' (\cot\beta_c)^\alpha \quad (17)$$

$$\cot\beta_c = \frac{Y_{node} - Y}{h_{node}} \quad (18)$$

$$C' = 7.15 \times 10^{-10}, \alpha = 6.0, Y_{node} = 39.7m, h_{node} = 1.12m \quad (19)$$

加藤ほか⁸⁾は、平衡前浜勾配を侵食・堆積の限界状態を定める勾配として、侵食時にはこの平衡勾配に急速に戻るとしてモデル化を行った。これは平衡勾配概念に基づくモデル化と同じである。本研究でもこれにならう。ただし一般化のため、式(20)のように $\hat{E}=1$ に対する値を平均平衡勾配と定義してオーバーバーを付け、平衡前浜勾配を式(21)とおく。

$$\overline{\cot\beta_c} = \cot\beta_c|_{\hat{E}=1} \quad (20)$$

$$\cot\beta_c = \overline{\cot\beta_c}(\hat{E})^{p_1} \quad (21)$$

ここに、式(21)と加藤ほか⁸⁾⁹⁾の式(17)の等値関係から式(21)の係数値を定めると、式(22)となる。本研究では、波崎の計算を行うに当たって、式(22)の値を用いて式(21)を平衡勾配の算定式に使う。

$$p_1 = 1/\alpha = 1/6.0 \quad (22a)$$

$$\overline{\cot\beta_c} = \left(\frac{1}{C'}\right)^\alpha = \left(\frac{1}{7.15 \times 10^{-10}}\right)^{6.0} = 33.4 \quad (22b)$$

次に、式(10)の係数 B を定式化する。解析解の式(11)、(15)から明らかのように、 B は変化の速度を規定するパラメータである。式(10)より B は係数 A に比例する。芹沢ら⁴⁾と同様、係数 A はエネルギー逸散率 Φ に比例するとし、縦断底面長の単位長さ当りのエネルギーフラックスに比例するとすれば、式(23)のように A はエネルギーフラックスの3/5乗に比例すると考えられる。そこで式(10)の B を式(24)で与えた。

$$A \propto \frac{\text{Energy flux}}{h_c + h_R} \propto \frac{H^{\frac{5}{2}}}{H} \propto H^{\frac{3}{2}} \propto (\text{Energy flux})^{\frac{3}{5}} \quad (23)$$

$$B = C_1 \cdot (\hat{E})^{p_2} \quad (p_2 = 3/5) \quad (24)$$

ここに、 C_1 は変化速度(漂砂強度)を規定する係数であり、 B を無次元化した波エネルギーフラックス、つまり対象海岸における日々の波浪の相対的強弱と結び付ける係数である。 C_1 は、加藤ほか⁸⁾⁹⁾の観測にあるように汀線の前進は緩やかで高波浪時には急激に後退するという事実を再現する必要がある。式(24)によれば高波浪時には B が大きく変化速度が大きくなる。しかし、実際に波崎の試計算を行ったところ、侵食時と堆積時で同じ係数値を用いたのでは前進・後退の両方を同時にうまく再現できなかった。侵食時には、浮遊砂として戻り流れにより急速に沖に運ばれるのに対し、堆積時は掃流砂移動が卓越するため動きが遅いという土砂移動形態の違い、および高波浪時の急激な前浜侵食には長周期波の浜への遡上とそれに伴う砂浜地下水位の上昇が関与している可能性があること¹³⁾¹⁴⁾などから、同じ係数値ではこれらの要因による侵食現象が十分表現できないことが上記

原因と考えられる。そこで C_1 は、侵食時と堆積時で区別して与えることとし、波崎海岸の実測データに対する検証計算で試行的に定め、式(25)のように与えた。加藤ほか⁸⁾⁹⁾のモデルでは侵食時と堆積時で予測式が異なるが、本モデルでは侵食と堆積時で C_1 値が異なる。

$$C_1 = \begin{cases} = 0.2 & (\text{accretion : } \cot\beta \leq \cot\beta_c) \\ = 1.0 & (\text{erosion : } \cot\beta > \cot\beta_c) \end{cases} \quad (25)$$

4. 数値計算の方法と結果

数値計算には式(9)、(21)、(24)、(25)、(3)を用いた。ただし実務で使いやすいように、微分方程式(式(9))を数値的に解かずに、漸化式表示の式(26)~(31)を用いた。式(26)は (i) 日目~ $(i+1)$ 日目の間に平衡勾配および波エネルギーが一定値であると仮定して解析解(式(11))を用いたものである。 (i) 日目の $\cot\beta(i)$ に対して、 $(i+1)$ 日目の $\hat{E}(i+1)$ が作用したとき、 $(i+1)$ 日目の $\cot\beta(i+1)$ を求める式である。式(27)より $\Delta t=1$ 日、式(28)より $(i+1)$ 日目の $\cot\beta_c(i+1)$ を求め、式(29)より係数 B を計算して、式(26)に代入して $(i+1)$ 日目の前浜勾配 $\cot\beta(i+1)$ が計算できる。さらに、式(31)を使ってこの $\cot\beta(i+1)$ から $(i+1)$ 日目の汀線位置 $Y(i+1)$ に換算できる。

$$\cot\beta_{(i+1)} = \cot\beta_{c(i+1)} + (\cot\beta_{(i)} - \cot\beta_{c(i+1)}) \exp(-B\Delta t) \quad (26)$$

$$\Delta t = t_{(i+1)} - t_{(i)} \quad (27)$$

$$\cot\beta_{c(i+1)} = \overline{\cot\beta_c}(\hat{E}_{(i+1)})^{p_1} \quad (\overline{\cot\beta_c} = 33.4, p_1 = 1/6) \quad (28)$$

$$B = C_1 \cdot (\hat{E}_{(i+1)})^{p_2} \quad (p_2 = 3/5) \quad (29)$$

$$C_1 = \begin{cases} = 0.2 & (\text{accretion : } \cot\beta_{(i)} \leq \cot\beta_{c(i+1)}) \\ = 1.0 & (\text{erosion : } \cot\beta_{(i)} > \cot\beta_{c(i+1)}) \end{cases} \quad (30)$$

$$Y_{(i+1)} = Y_{node} - h_{node} \cot\beta_{(i+1)} \quad (31)$$

なお、式(13)、式(15)をもとに、汀線 Y について記述した次式でも計算できる。砂村⁶⁾、Sunamura⁷⁾のモデル、加藤ほか⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾のモデルと同一方式である。ただし、本研究は、平衡勾配概念に基づく漂砂式と連続式から誘導したモデルである。

$$Y_{(i+1)} = Y_{c(i+1)} + (Y_{(i)} - Y_{c(i+1)}) \exp(-B\Delta t) \quad (32)$$

ここに、

$$Y_{c(i+1)} = Y_{node} - h \cot\beta_{c(i+1)} \quad (33)$$

図-5は加藤ほか⁸⁾⁹⁾が求めた波崎で観測された波の

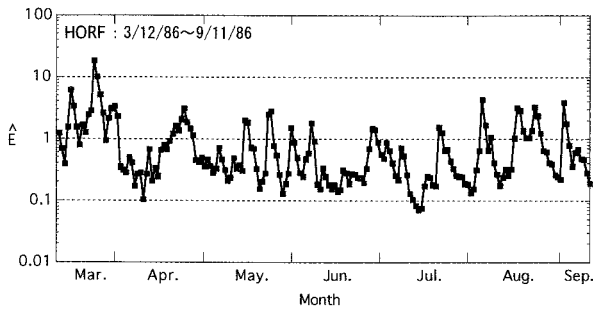


図-5 無次元エネルギーフラックスの経時変化

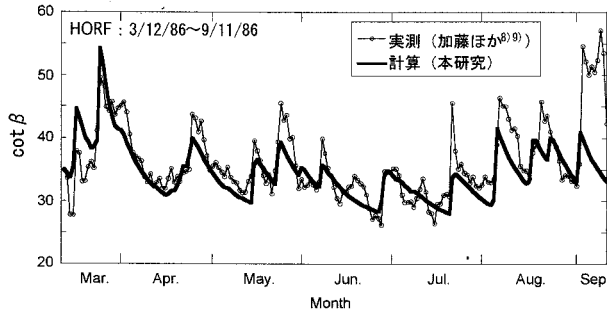


図-6 前浜勾配の計算結果と実測値との比較⁸⁾⁹⁾

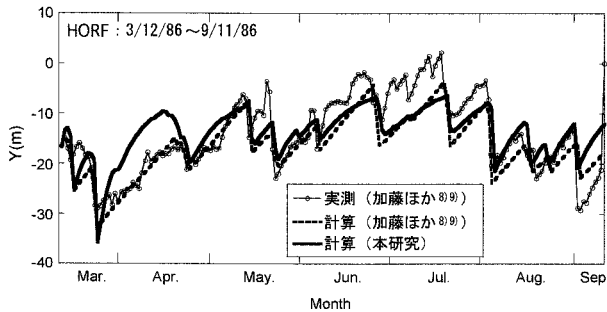


図-7 汀線変化の計算結果と実測値との比較⁸⁾⁹⁾

エネルギーフラックスを期間平均値で割って無次元化したものである。この値を用いて前浜勾配と汀線位置の予測を行った結果を、加藤ほか⁸⁾⁹⁾の実測・計算結果とともに示したのが図-6, 7である。なお図-7の縦軸Yは $Y_{node}+25m$ とした座標である。前浜勾配は本研究の方法によって良好に予測されている。一方、汀線位置については平衡勾配ほど精度は高くないものの、全体的傾向はうまく計算されている。

5. 簡易手法

現地の波浪条件と平衡勾配の関係が明らかになつておれば、簡易手法として、上記の手法により数値計算を実施せずとも短期変動量(最大汀線後退量)や砂浜の変形限界を直接的に予測することもできる。とくに実務では、ある対象期間(例えば10年オーダー)に対する汀線の最大後退量を予測することが重要となる。上記の方法によれば、汀線が最も後退するの

は、前浜勾配が最小のとき($\cot\beta$ が最大値)であり、これは \hat{E} が最大、つまり最大の高波来襲時となる。式(3)より、最大後退位置 Y_{min} は $\cot\beta$ の最大値を用いて式(34)となる。加藤ほか⁸⁾⁹⁾の観測結果によればこの時の汀線後退は急激(1日)であり、1日以内で平衡前浜勾配へと急速に変化すると考えられるから、式(21)より $\cot\beta_{max}$ は式(35)となる。年間の平均汀線位置 \bar{Y}_c を $\hat{E}=1$ のときの汀線位置で与えることにすると、式(3)より式(36)となる。この平均汀線を基準とした最大汀線後退量 $(\Delta Y_e)_{max}$ は、式(34)~(36)を用いると式(37)となる。この式によれば、期間中の最大波のエネルギーフラックスが平均値に対して何倍であるかがわかれば、最大後退量が予測できる。また、式(38)のようにエネルギー平均波高に対する波高比を導入して式(39)のようにエネルギーフラックスが波高の5/2乗に比例すると仮定すれば、式(37)は式(40)となる。この式によれば波高比を用いた予測が可能となる。例えば、波崎のエネルギー平均波高を1としたとき、10年確率波高がその5倍の大きさであると仮定すると、10年での最大後退量は36mと算出される。

$$Y_{min} = Y_{node} - h_{node} (\cot\beta)_{max} \quad (34)$$

$$(\cot\beta)_{max} \approx (\cot\beta_c)_{max} = \overline{\cot\beta_c} (\hat{E}_{max})^{p_1} \quad (\overline{\cot\beta_c} = 33.4, p_1 = 1/6) \quad (35)$$

$$\bar{Y}_c = Y_{node} - h_{node} \overline{\cot\beta_c} \quad (36)$$

$$(\Delta Y_e)_{max} = \bar{Y}_c - Y_{min} = \left\{ 1 - (\hat{E}_{max})^{p_1} \right\} h_{node} \overline{\cot\beta_c} \quad (37)$$

$$\hat{H}_{max} = \frac{H_{max}}{H} \quad (38)$$

$$\hat{E}_{max} = \frac{(H^2 T)_{max}}{(H^2 T)} \approx (\hat{H}_{max})^{\frac{5}{2}} \quad (39)$$

$$(\Delta Y_e)_{max} = \left\{ 1 - (\hat{H}_{max})^{\frac{5}{2}} \right\} h_{node} \overline{\cot\beta_c} \quad (40)$$

6. まとめ

波浪条件に応じて前浜平衡勾配が変化するという考え方のもとで、等深線変化モデルを拡張して前浜勾配と汀線の変動を予測する方式を開発した。これにより前浜勾配と汀線の時間的変化をほぼ予測することができた。これより、前浜変動についても平衡勾配の概念の適用が可能なることが分かった。なお、Yamamotoほか¹²⁾も、本研究と同様に平衡勾配概念に基づいて汀線・前浜勾配の短期変動予測モデルを構築し、本研究の前浜勾配変動の基礎式(11)と同じ式を示した。ただし、本研究では等深線変化モデルに使

用されている平衡勾配概念をexplicitに取り入れた漂砂量式と連続式から導き出されている点に違いがある。

実務では沿岸漂砂の不均衡に伴う長期的海浜変形予測がまず重要であるが、短期変動予測も重要である。加藤ほか⁸⁾⁹⁾、Yamamotoほか¹²⁾は、海浜の短期変動は長期的変化の上にある摂動と考えると、汀線変化モデルと短期変動モデルを組み合わせた汀線位置の長期変化・短期変動の予測手法を提案した。本研究の短期変動モデルは漂砂式との整合性がとれているので等深線変化モデルへの組み込みが容易であり、今後これらも組み入れた予測手法へと発展させることが可能と考えられる。

本研究の方法は、波崎海岸と同様、細砂からなる自然海岸に適用可能と考えられるが、実際の適用にあたっては海岸ごとに諸係数を決める必要がある。また実務上は、経時変化の予測よりも、ある期間内における最大汀線後退量を予測できればよいと考えられる。これには、モニタリングにより暴浪時における汀線後退量、波エネルギーレベル、前浜勾配、節の水深を調べ、式(37)に含まれる係数の最適値を海岸ごとに見出しておく必要がある。波崎海岸は太平洋に面し、年平均波高が約1.4m、年平均周期が約8s、大潮時の潮位差が約1.5m、前浜勾配が約1/50、前浜の底質粒径が0.17~0.19mm、汀線から沖200~400mにouter barが発達している⁸⁾¹³⁾。このことから、同じ細砂からなる緩勾配海岸であっても潮位差の小さい日本海側の海岸への適用には注意が必要と考えられる。また、波候特性としてエネルギーフラックスと波形勾配が正の相関を有することも適用の必要条件と考えられる。さらに、本研究では護岸や消波構造物の影響などは考慮できてない。加藤ほか¹⁰⁾は消波構造物の影響を考慮する方法を示しているが、本研究ではこれらは今後の課題としたい。

参考文献

- 1) Bowen, A. J.: Simple models for nearshore sedimentation; beach profiles and longshore bars, in *The coastline of Canada*, The Geological Survey of Canada, S.B. McCann, (editor), Paper 80-10, pp. 1-11, 1980.
- 2) Bagnold, R. A.: Mechanics of Marine Sedimentation, in *The Sea*, M. N. Hill (editor), Vol. 3, pp.507-528, New York, Wiley, 1963.
- 3) Inman, D. L. and Bagnold, R. A.: Littoral Processes, in *The Sea*, M.N. Hill, (editor), Vol. 3, pp. 529-533, New York, Wiley, 1963.
- 4) 芹沢真澄, 宇多高明, 三波俊郎, 古池 鋼, 熊田貴之: 海浜縦断形の安定化機構を組み込んだ等深線変化モデル, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp.496-500, 2002.
- 5) 橋本 宏, 宇多高明: 前浜勾配, 粒径および波高の動的關係について, 第 27 回海岸工学講演会論文集, pp.221-225, 1980.
- 6) 砂村継夫: 自然海岸における汀線位置の時間的变化に関する予測モデル, 第27回海岸工学講演会論文集, pp.255-258, 1980.
- 7) Sunamura, T.: A predictive model for shoreline changes on natural beaches caused by storm and post-storm waves, *Trans. Japan. Geomor. Union*, Vol.4, pp.1-10, 1983.
- 8) 加藤一正, 柳嶋慎一, 村上裕幸, 末次広児: 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 26 巻, 第 2 号, pp.297-301, 1987a.
- 9) 加藤一正, 柳嶋慎一, 村上裕幸, 末次広児: 短期汀線変動のモデル化の試み, 第 34 回海岸工学講演会論文集, pp.297-301, 1987b.
- 10) 加藤一正, 村上裕幸, 栗山善昭, 藤田 誠: 面的防護方式における汀線変動特性の検討, 海岸工学論文集, 第 36 巻, pp.429-433, 1989.
- 11) Komar, P. D.: *Beach Processes and Sedimentation*, Second Edition, New Jersey, Prentice-Hall, pp. 544, 1998.
- 12) Yamamoto, Y., Horikawa, K. and Tanimoto, K.: Beach prediction of shoreline change considering cross-shore sediment transport, *Proc. 25th ICCE*, pp. 3405-3418, 1996.
- 13) 栗山善昭: 海浜変形 - 実態, 予測, そして対策 -, 技報堂出版, pp.157, 2006.
- 14) 加藤一正, 柳嶋慎一: 長周期波によるバームの侵食, 土木学会論文集, No.452/II-20, pp.41-50, 1992.