

海浜変形の簡単なモデル

土 屋 義 人*・安 田 孝 志**

1. 緒 言

最近、河川流域の高度利用に伴う流出土砂量の減少や、また沿岸の開発利用に伴う海岸構造物の設置などによる漂砂源の変化が余儀なくされ、各地で海岸侵食が助長されてきている。この現状から、海岸侵食の定量的な予測法の確立が重要視されていることは周知のとおりであるが、河床変動の予測と相違して、根本的には1次元解析法が適用できないので、漂砂機構の究明とともに、海岸水理学上の困難な問題の1つとなっている。

しかし、1次元解析法の適用性の究明は、その予測法の確立における第1歩として重要であり、すでに Grijm¹⁾、Pelnard & Considère および Bakker²⁾ らをはじめ、最近では Komar³⁾ によって実証的な試みがなされてきた。著者の一人土屋もこの問題を取りあげ、標記と同じ題目で、第28回の年次学術講演会で発表した⁴⁾が、都合で投稿が延び今回に至ったが、その後同様な方法による海浜変形の予測法の研究が橋本⁵⁾らによって進められた。

本文では、海浜変形の連続式を検討したのち、沿岸漂砂量則に関する1つの試みを示して、具体的な海浜変形の予測に関する簡単なモデルとその数値計算結果について述べる。

2. 海浜変形の基礎式

いま、図-1に示す座標系を用いれば、海浜変形の連続式は、岩垣⁶⁾によって次式で与えられている。

$$-\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{(1-\lambda)} \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} \right) = 0 \quad \cdots \cdots (1)$$

ここに、 h ；水深、 q_x および q_y ；それぞれ x および y 方向の漂砂量、 t ；時間および λ ；海底土砂の空隙率を100で割った値である。漂砂量 q_x および q_y が波の変形特性との関係で、時空間座標の関数として、さらには海浜変形との関係で与えることができれば、所要の初期および境界条件のもとに式(1)を解けば、海浜変形を原理的には予測することができる。しかし、漂砂の機構とくに沖方向漂砂については、いまだ定式化がなされてい

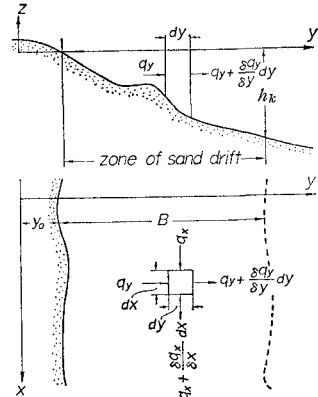


図-1 海浜断面と座標系

ないので、ここでは主として1次元解析法について述べる。

海浜変形のうち主として長期的変化を取扱うこととし、季節変化を省略して $\partial q_y / \partial x = 0$ と考え、漂砂帯の幅 B にわたり式(1)を岩垣にならって積分すれば、平均水深 $\bar{h}$ を用いて次式が得られる。

$$\frac{h_k}{B} \frac{\partial y_0}{\partial t} = \frac{\partial \bar{h}}{\partial t} - \frac{h_k}{B} \left(1 - \frac{\bar{h}}{h_k} \right) \frac{\partial B}{\partial t} - \frac{1}{(1-\lambda)B} \frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{1}{B^2} Q_R(t) \delta(x-x_0) \quad \cdots \cdots (2)$$

ここに、 h_k ；漂砂の移動限界水深および Q_x ；沿岸漂砂量であり、また $\delta(x-x_0)$ は Dirac の δ 関数で、 $x=x_0$ に河川などの漂砂源 $Q_R(t)$ があるものとする。

さて、海浜変形を式(2)に基づいて取扱う場合には、海浜形状 $\bar{h}$ 、漂砂の移動限界水深 h_k および沿岸漂砂量 Q_x に対する一般的表示を必要とし、これらが波の変形特性と底質特性の関数として与えられれば、所要の初期および境界条件に対して式(2)を積分することは原理的には可能であろう。しかし、ここでは、こうした手法を確立する第1歩として、来襲する波の特性が長期的には一定であり、かつそれは海浜変形に伴って漸変すると仮定できる場合の海浜変形の予測法を試みることにしたい。この立場では、式(2)の右辺第1および第2項は省略されるであろうし、また海浜断面は海浜変形に伴って変化しないとする。なお、波の特性が時間的に変化する

* 正会員 工博 京都大学教授 防災研究所
** 正会員 工修 岐阜大学講師 工学部土木工学科

る場合には、これら2項に加えて、式(1)における沖方向漂砂による項 $\partial q_y / \partial y$ を直接導入しなければならない。

沿岸漂砂量については、次章において改めて述べるが、通常波向をはじめとする波の特性を含む表示たとえば、

$$Q_x = \bar{Q}_0 f(\vartheta_B) \quad \dots\dots\dots (3)$$

で与えられるので、砕波点における波向 ϑ_B は海浜変形に伴って図-1のような座標系では変わることになる。

すなわち、基準の波向を ϑ_0 として ϑ_B は、

$$\tan \vartheta_B = [\tan \vartheta_0 - (\partial y_0 / \partial x)] / [1 + \tan \vartheta_0 (\partial y_0 / \partial x)] \quad \dots\dots\dots (4)$$

によって表わされるので、右辺の第1および第2項を省略した式(2)と式(3)とを連立させてとけばよい。ただし、式(3)中の $\bar{Q}_0$ は、一般には波の変形特性に関係し、また海浜変形に伴って変化することになる。この方法は数値解析によって、実際に適用することができるであろう。

ここでは、このような取扱いの特徴と適用性を明らかにするために、いまだ少し単純化して任意の沿岸漂砂量則に適用可能な取扱いで考察することにする。前述した仮定のもとでは、Pelnard-Considère にならって、

$$Q_x = Q_{x0} - (\partial Q_x / \partial \vartheta_B) (\partial y_0 / \partial x) + \dots\dots\dots (5)$$

で表わすことができるので、式(2)に代入して、次式を得る。

$$\frac{\partial y_0}{\partial t} = A_x \frac{\partial^2 y_0}{\partial x^2} + B_x \frac{\partial y_0}{\partial x} + C_x \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに、

$$\left. \begin{aligned} A_x &= \frac{1}{(1-\lambda)h_k} \left(\frac{\partial Q_x}{\partial \vartheta_B} \right)_0 \\ B_x &= \frac{1}{(1-\lambda)h_k} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial Q_x}{\partial \vartheta_B} \right)_0 \\ C_x &= \frac{1}{(1-\lambda)h_k} \left(\frac{\partial Q_x}{\partial \vartheta_B} \right)_0 + \frac{B}{h_k} \frac{\partial \bar{h}}{\partial t} \\ &\quad - \left(1 - \frac{\bar{h}}{h_k} \right) \frac{\partial B}{\partial t} + \frac{1}{h_k B} Q_R(t) \delta(x-x_0) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (7)$$

であるが、前述したように波浪特性が長期的に変化しない場合には、式(7)の C_x における第2および第3項は省略してよい。式(6)に対する初期条件は $t=0$ において $y_0=f(x)$ のように与えられ、また境界条件は海浜条件によって定められるはずである。

3. 沿岸漂砂量則

周知のように、沿岸漂砂に関する研究は数多いが、とくに最近 Komar⁶⁾ は沿岸漂砂量と波のエネルギーフラックスとの関係を再検討するとともに、その沖方向分布を求めている。一般に、沿岸漂砂を究明するためには、砕波機構との関連において進めるべきであり、その機構は非常に複雑であるが、ここでは大局的につぎのように考

えることにする。すなわち、底質は波の作用によって、一般に滑動、跳躍などの運動をするけれども、大局的には往復運動であり、それが沿岸流によってその方向に運搬されるものと考え、その機構を次式のように表わすことにする。

$$q = \bar{c}_0 \cdot h \cdot u(y) \quad \dots\dots\dots (8)$$

Wave motion Longshore currents

ここに、 q は沿岸漂砂量および $u(y)$ は沿岸流速である。Einstein⁷⁾ にならって、流体によって輸送される底質の運動は、たとえば流砂量則によって普遍的に表わされるものとし、著者ら⁸⁾ の飛砂・流砂量則を適用すれば、波による底質の平均濃度 $\bar{c}_0$ は、近似的に次式で与えられる。

$$\bar{c}_0 = c_0 \left(\frac{\rho}{\sigma} \right) \left(1 - \frac{\tau^*}{\tau_c^*} \right) \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここに、 c_0 は τ^* によってわずかに変化するが、近似的には0.2程度の値である。ただし、この場合 τ^* は次式で与えられるものとし、また τ_c^* は波による底質の移動限界時の値である。

$$\tau^* = (\tau/\rho) / (\sigma/\rho - 1) g d, \quad \tau/\rho = (1/2) f \bar{v}^2 \dots\dots\dots (10)$$

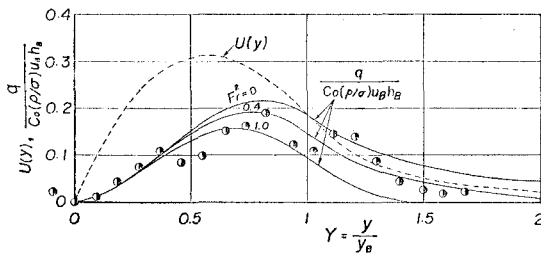
ここに、 f は摩擦係数で Jonsson⁹⁾ らの研究によって推定されるものとし、また $\bar{v}$ は波による最大水粒子速度で近似的に次式で表わす。なお、 d および σ/ρ は底質の粒径および比重、および g は重力の加速度である。

$$\bar{v} = \begin{cases} \alpha \sqrt{g h}, & \alpha = \frac{1}{2} (L/T \sqrt{g h})_B (H_B/h_B); & 0 \leq Y \leq 1 \\ (1/2) (H/H_0) (L/L_0) (H_0 L_0 / T h); & 1 \leq Y < \infty \end{cases} \quad \dots\dots\dots (11)$$

ここに、サフィックス 0 および B はそれぞれ沖波および砕波点におけるものを表わし、 L ; 波長、 H ; 波高、 T ; 周期、 h ; 水深および $Y=y/y_B$ である。Longuet-Higgins の沿岸流理論¹⁰⁾ を適用すれば、沿岸漂砂量の沖方向分布は、次式で表わされる。

$$\frac{q}{\sqrt{g h} B d} = \begin{cases} \left(\frac{5\pi}{16} \right) c_0 \left(\frac{\alpha}{f} \right) \left(\frac{\rho}{\sigma} \right) \left(\frac{h_B}{d} \right) \\ \quad \times (\tan \beta \sin 2\vartheta_B) (1 - R^2 F_r^2 Y) \\ \quad \times Y U(Y); & 0 \leq Y \leq 1 \\ \left(\frac{5\pi}{16} \right) c_0 \left(\frac{\alpha}{f} \right) \left(\frac{\rho}{\sigma} \right) \left(\frac{h_B}{d} \right) \\ \quad \times (\tan \beta \sin 2\vartheta_B) \left(1 - \frac{F_r^2}{Y} \right) \\ \quad \times Y U(Y); & 1 \leq Y < \infty \end{cases} \quad \dots\dots\dots (12)$$

ここに、 $U(Y)=u/u_B$ で u_B は砕波点における沿岸流の基準流速、 $\tan \beta$; 海浜の平均勾配、および R および F_r は次式で表わされる。



図—2 沿岸漂砂および沿岸流速の沖方向分布 ($R^2=0.5$ および $P=0.2$ の場合)

$$\left. \begin{aligned} R &= (1/2)(H_B/H_0)(L_B/L_0)(H_0/H)(L_0/L) \\ F_r^2 &= 16\pi(h_B/H_B)^2(L_0h_B/L_B^2)(\tau_0^*/(\sigma\rho-1)d/fh_B) \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

図—2 は式 (12) による沿岸漂砂量の沖方向分布を示したものであり、比較のために沿岸流の流速分布も示してある。ただし、図において $P=0.2$ は沿岸流理論における定数である。これによれば、沿岸漂砂量は沿岸流速より若干沖側で碎波点に近いところで最大となり、このことは図中に示した実験値ともよく一致している。

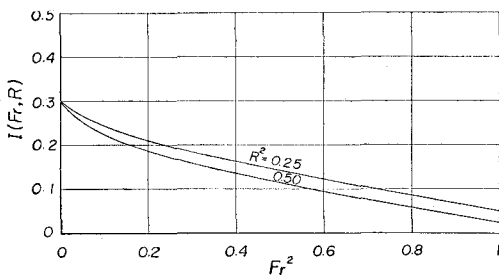
つぎに、全沿岸漂砂量 Q_x は、式 (12) を汀線から漂砂の移動限界水深まで積分して、次式のように表わされる。

$$Q_x = C \left(\frac{\rho}{\sigma} \right) h_B^2 \sqrt{gh_B} \sin 2\theta_B I(R, F_r) \quad (14)$$

ここに、

$$\left. \begin{aligned} C &= (5\pi/16)c_0(\alpha/f) \\ I(R, F_r) &= a_0 - b_0 F_r^2 - d_0 (R F_r)^{a_0} + e_0 (R F_r)^2 \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

であり、また $P=0.2$ の場合、 $a_0=0.298$, $b_0=0.124$, $d_0=0.373$, $e_0=0.207$ および $\alpha_0=1.11$ となる。ただし、この理論では、いわゆる swash transport を考慮していないので、これを加味するため前述の積分は汀線まで行うことにした。式 (15) で与えられる $I(R, F_r)$ の特性を図—3 に示す。現地海岸では、一般に $F_r \approx 0$ であって $I(R, F_r) \approx 0.3$ で一定に近いが、実験では $F_r \approx 0.2 \sim 1$ 程度と広範囲に変わり、 $I(R, F_r)$ の値もかなり小さくなるものと考えられる。もし、 $I(R, F_r)$ が一定であれば、全沿岸漂砂量が波のエネルギーフラックスの沿岸方向成分に比例することになり、Komar の再確認とも一致することになる。なお、このような取扱いによれば、全沿岸漂



図—3 $I(R, F_r)$ の R および F_r による変化

砂量が全沿岸流量に比例することになるので、さらに任意の海浜流の場合における漂砂量則の実用的表示を試みることも可能であろう。

4. 海浜変形の予測

前述した 1 次元解析法による海浜変形の予測について、簡単な具体例をあげよう。

4.1 海岸構造物による海浜変形

いま簡単のために、海岸構造物による波の変形を省略することにすれば、式 (6) は近似的に次式で表わされる。

$$\frac{\partial y_0}{\partial t} = A_0 \frac{\partial^2 y_0}{\partial x^2} \quad (16)$$

ここに、 $A_0 = A_x$ であって、 $A_0 > 0$ となる場合を対象とし、これを定数として取扱う。波向 θ_B で、一様海浜における防砂堤近傍の海浜変形を対象とすれば、初期および境界条件は、次式で与えられる。

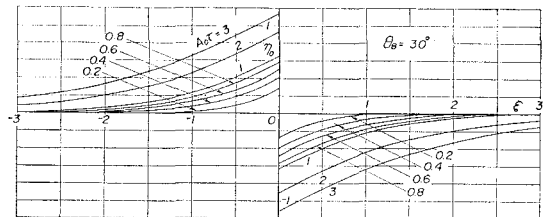
$$\left. \begin{aligned} t=0 \text{ において, } y_0 &= 0 \\ x=0 \text{ において, } \partial y_0 / \partial x &= \tan \theta_{B0} \quad (Q_x=0) \\ x=\pm\infty \text{ において, } y_0 &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

この式 (16) の解を求めるに当って、

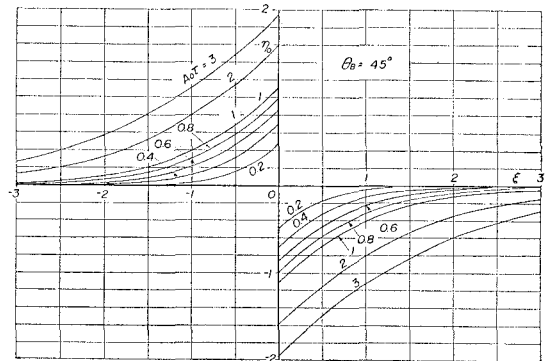
$$\left. \begin{aligned} \tau_0 &= y_0 / h_k, \quad \xi = x / h_k, \\ \tau &= \bar{Q}_0 d / h_k^3, \quad A_0 = \frac{1}{(1-\lambda)} \left(\frac{df}{d\theta_B} \right)_0 \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

とすれば、次式の解が得られる。

$$y_0 = \theta_{B0} \left[2\sqrt{\frac{A_0 \tau}{\pi}} e^{-\xi^2/4\sqrt{A_0 \tau}} - \xi \operatorname{erfc} \left(\frac{\xi}{2\sqrt{A_0 \tau}} \right) \right] \quad (19)$$



(a)



(b)

図—4 防砂堤による海浜変形

また、任意の海浜形状 $f(x)$ からの変形は、次式で表される。

$$\eta_0 = \frac{1}{2\sqrt{\pi A_0}} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{f(\zeta)}{\sqrt{\tau}} e^{-(\xi-\zeta)^2/4A_0\tau} d\zeta \dots\dots\dots (20)$$

図-4 は式 (19) による海浜変形の特性を図示したものである。これから漂砂の上手側では次第に堆積し、下手側では侵食されていくことがわかるが、この計算では防砂堤による波の回折の効果を入れていないので、後者の傾向は実際と一致しない。さらに、詳細には波の変形特性をあらわに導入して計算する必要があるが、それも数値計算で可能である。

4.2 河口デルタの発達・縮小による海浜変形

河川は一般に主要な漂砂源であって、河口デルタの発達・縮小はその流出土砂量に依存する。このような場合の海浜変形の予測は、わが国で最近とくに問題になってきていることは周知のとおりである。いま、簡単のために波の特性が一定で、前述の仮定のもとでは、この場合の基礎式は次式で与えられる。

$$\frac{\partial y_0}{\partial t} = A_0 \frac{\partial^2 y_0}{\partial x^2} + \frac{1}{B^2} Q_R(t) \delta(x-x_0) \dots\dots\dots (21)$$

まず、直線状の海岸に形成される河口デルタの発達過程を考えれば、初期および境界条件は次式で与えられる。

$$t=0 \text{ および } x=\pm\infty \text{ において, } y_0=0 \dots\dots\dots (22)$$

この解は、次式で与えられる。

$$y_0(x, t) = \frac{1}{B^2} \int_0^t \frac{Q_R(t')}{2\sqrt{\pi A_0(t-t')}} e^{-\frac{(x-x_0)^2}{4A_0(t-t')}} dt' \dots\dots\dots (23)$$

さらに、河川からの供給土砂量が一定であれば、 $Q_R(t) = Q_{R0}$ とし、また $\xi_0 = x_0/h_k$ とすれば、次式のようになる。

$$\eta_0 = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \bar{Q}_{R0} \sqrt{\tau} \left[e^{-\frac{(\xi-\xi_0)^2}{4\tau}} - \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{|\xi-\xi_0|}{\sqrt{\tau}} \operatorname{erfc} \left(\frac{|\xi-\xi_0|}{2\sqrt{\tau}} \right) \right] \dots\dots\dots (24)$$

ここに、

$$\bar{Q}_{R0} = Q_{R0}/B^2\sqrt{A_0 h_k} \dots\dots\dots (25)$$

つぎに、河口デルタの縮小を考察するために、最初河川からの供給土砂量が $Q_R(t)$ で、そのときに形成されたデルタ地形 $F(x)$ が式 (23) で表わされるとし、それが河川流域の条件によって、 $\bar{Q}_R(t) \rightarrow \bar{Q}'_R(t)$ ($Q_R > Q'_R$) に変化した場合を取扱う。このときの解は、次式で表わされる。

$$y_0(x, t) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{F(\zeta)}{2\sqrt{\pi A_0 t}} e^{-\frac{(x-\zeta)^2}{4A_0 t}} d\zeta + \frac{1}{B^2} \int_0^t \frac{Q'_R(t')}{2\sqrt{\pi A_0(t-t')}} e^{-\frac{(x-x_0)^2}{4A_0(t-t')}} dt' \dots\dots\dots (26)$$

図-5 は式 (24) によって、河口デルタの発達過程を

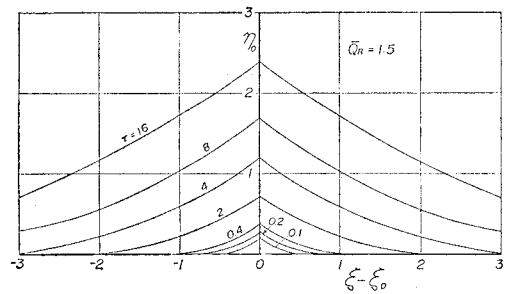
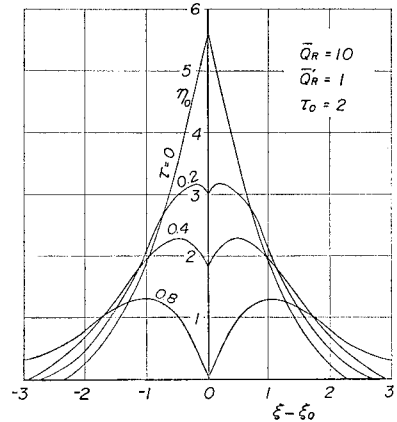
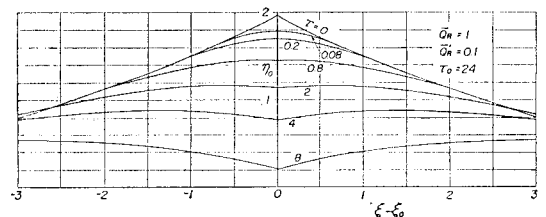


図-5 河口デルタの発達過程



(a)



(b)

図-6 河口デルタの縮小過程

計算した結果の一例であるが、もし波向によるデルタの形状変化を論じる場合には、海浜変形に伴う波の変形を導入する必要がある。数値計算によれば、そのような計算も可能であろう。つぎに、図-6 には、式 (26) で $Q'_R(t)$ を一定とした場合の河口デルタの縮小過程を計算した結果の一例を示す。図中に示した計算条件は、 $\bar{Q}_R = 10$ または 1 で、それぞれ $\tau_0 = 2$ および 24 までデルタが発達した直後、 $\bar{Q}_R \rightarrow \bar{Q}'_R (= \bar{Q}_R/10)$ まで減少した場合に対応している。まず、 $\bar{Q}_R$ が大きい場合には、当然のことながら急激にデルタは発達するが、それが Q'_R に減少すると、デルタの先端付近から急激に縮小が起り、双峯形の地形を形成しつつ変形する。これに対して、 $\bar{Q}_R$ があまり小さくなく、かつデルタの形成期間を長くとした場合には、(b) に示すようにその変形は比較的緩やかで、著しい双峯形の地形は見られない。これらは、河口

デルタの発達・縮小過程の一部を説明するものであり、さらに詳細な実験との対比を経て、現地海岸への適用を試みていくべきであろう。

5. 結 語

以上述べた1次元解析法による海浜変形の予測法には、海浜断面形状の一般化、沿岸漂砂量則の確立など究明すべき問題も少なくないが、海浜変形に伴う波の変形特性の導入とあいまって、さらに実的な展開を行えば、現地海岸への適用も可能である。また、沿岸漂砂量則に関する試みは、漂砂則の一般化とあいまって、現在基礎実験を実施中であるので、その結果によっては、漂砂則、沿岸流、波の変形計算と式(1)とを連立させた一般的な海浜変形の予測法を試みることも可能であろう。

なお、本研究は文部省科学研究費(試験研究)による成果の一部であって、愛媛大学山口正隆助教授をはじめ河田恵昭助教授および芝野照夫助手のご協力に感謝する。

参 考 文 献

- 1) Grijm, W.: Theoretical forms of shoreline, Proc. 9th Conf. on Coastal Eng., 1964, pp. 219~235.
- 2) Bakker, W. T.: The dynamics of a coast with a groyne system, Proc. 11th Conf. on Coastal Eng., 1968, pp. 492~517.
- 3) Komar, P. D.: Computer models of delta growth due to sediment input from rivers and longshore transport, Geol. Soc. American Bull., Vol. 84, 1973, pp. 2217~2226.
- 4) 橋本 宏: 海浜変形モデルの富士海岸への適用, 第23回海岸工学講演会論文集, 1976, pp. 218~222.
- 5) 岩垣雄一: 海岸侵食論, 1966年度水工学に関する夏期研修会講義集, B, 1966, pp. 17-1-17.
- 6) Komar, P. D.: Beach sand transport, distribution and total drift, Proc. ASCE, Vol. 103, No. WW2, 1977, pp. 225~239.
- 7) Einstein, H. A.: Sediment transport by wave action, Proc. 13th Coastal Eng. Conf., 1972, pp. 933~952.
- 8) 土屋義人・河田恵昭: 砂粒の saltation に基づく飛砂量則について, 第14回水理講演会論文集, 1975, pp. 7~12.
- 9) Jonsson, I. G.: Wave boundary layer and friction factors, Proc. 10th Conf. on Coastal Eng., 1966, pp. 127~148.
- 10) Longuet-Higgins, M. S.: Longshore currents generated by obliquely incident sea waves, 1・2, Jour. Geophy. Res., Vol. 75, No. 33, pp. 6778~6801.

1) Grijm, W.: Theoretical forms of shoreline, Proc.