

非定常流による平坦床漂砂量と砂の移動機構に関する実験的研究

山下俊彦*・沢本正樹**・横山博美***

1. はじめに

波の軌道流速による岸沖方向の砂移動形態には、大別すると、① 表層の砂のみが掃流状態で移動する場合、② 砂漣が形成される場合、③ 何層かにわたって高濃度の砂移動が生じるシートフロー状態がある。主に砕波帯内で起こるシートフロー状態では多量の砂が移動するので、海浜変形を取り扱う際に重要である。シートフロー状態の漂砂に関する研究には香取・渡辺・堀川 (1980)¹⁾ のものがある。しかし、実験室の造波水路で大きな底面流速で起こるシートフロー状態を発生させることは困難なため、砂の移動機構はもとより漂砂量のデータも不足しているのが現状である。香取らはピストン駆動式のU字管型振動流装置を用い、シートフロー状態の砂移動機構を知る上で重要である濃度分布、砂粒子の移動速度を詳細に測定し、両者を掛け合わせることで漂砂量を求めている。

著者らは、数年前より波による漂砂現象を力学的に把握することを目的として研究を行なってきた。① の場合については、前報 2) で掃流砂の素過程である個々の砂粒子の運動を基にした掃流砂量公式を提案した。①、③ の場合、底面は両方とも平坦であり、表面の砂のみが移動する場合と多層の砂が移動する場合とを比較することにより、平坦床上の漂砂現象がより明確になるものと考えられる。そこで本研究では、工学的に重要である砂移動の激しいシートフロー状態の漂砂現象を対象とし、漂砂量公式を導く際の基礎的諸量である漂砂量と砂移動機構について、重力式U字管振動流を用いた実験により詳細に調べた。

2. 実験装置および方法

シートフロー状態の砂移動が起こるためには大きな底面流速を発生させる必要があり、本研究では、図-1 に示す様な重力式U字管振動流を用いた。本体はアクリル板製である。座標系は図に示す様に定める。U字管の鉛

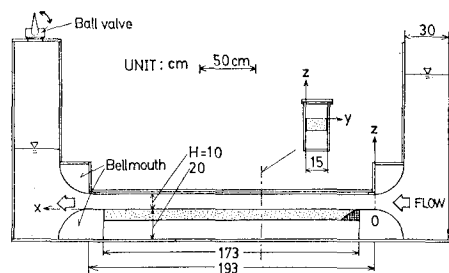


図-1 実験装置

直部の片方にはボールバルブ ($\phi=65\text{ mm}$) が取り付けられており、これを閉じた状態で水を入れることにより定められた水位差をつけ、バルブを瞬時に開きほぼ正弦関数形の非定常流を作った (図-2)。流速振幅 U_m は水位差を、周期 T は水平部の高さ H を変えることにより変化させることができる。今回は $H=10\text{ cm}$ としたため実験の周期はすべて 4.2 秒である。水平部の長さは 193 cm、幅は 15 cm で、水平部の中央 173 cm の所に砂を敷くことができる。水平部の上板は取りはずし可能であり、水平部の両端には流れを整流するベルマウスが取り付けられている。

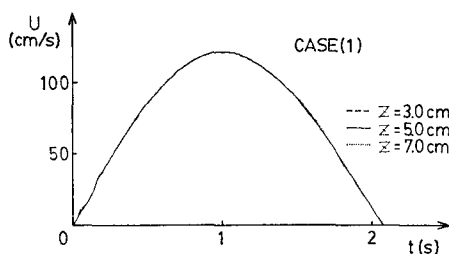


図-2 流速記録

流れが起きて半周期後にバルブを閉じるにより半周期だけの振動流を発生させ、その間の漂砂量を測定した。漂砂量の測定は次の様に行なった。図-3 に示す様にベルマウスとベルマウスの間に深さ h の箱を入れ、上流端とそこから距離 L だけ離れた A-A 断面の間に、あらかじめ乾燥重量 W_1 を測定した砂を入れて平らに敷き均す (図-3(a) の斜線部)。次に半周期間流れを作らせ、A-A 断面より手前にある砂 (図-3(b) 斜線部)

* 正会員 工修 東京工業大学助手 工学部土木工学科

** 正会員 工博 東京工業大学助教授 工学部土木工学科

*** 五洋建設 (株)

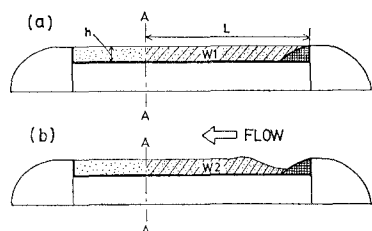


図-3 漂砂量の測定方法

を回収乾燥させ重量 $W2$ を測定する。上流側からの砂の供給はないので $W=W1-W2$ が $A-A$ 断面を通過した求めるべき漂砂量である。漂砂量の測定精度を上げるため、 L は水粒子移動距離 d_0 より 5cm 程度大きめとし(砂粒子半周期移動距離 l は d_0 より小さいため、 $L>d_0$ としておくと入口の影響を受けた砂は $A-A$ 断面を通過できない)、深さ h は底面の粒子が動かない程度に浅くした。この様な L, h にすると、シートフロー状態では多量の砂が移動するので、半周期間の砂移動量より十分な精度で漂砂量を測定することができた(例: $L=150$ cm, $h=1$ cm, $W1=3000$ g, $W=100$ g)

表-1 粒子の特性

No.	種類	比重 s	粒径 d (cm)	沈降速度 w_0 (cm/s)
1	豊浦標準砂	2.65	0.02	2.50
2	砂 A	2.65	0.07	10.5
3	砂 B	2.65	0.16	22.5
4	石炭	1.58	0.15	7.60
5	人工真珠	1.60	0.50	25.1

表-2 流れの条件

Case	周期 T (s)	流速振幅 U_m (cm/s)
1	3.8	125.5
2	3.8	114.6
3	3.8	101.5
4	3.8	88.7
5	3.8	74.4
6	3.8	56.2
7	3.8	44.3

今回は、比重、粒径の異なる表-1に示す5種類の底質材料を用い、流れの条件は表-2に示す7ケースとし、全体で約60回の実験を行なった。実験条件を金子(1981)³⁾の領域区分図上にプロットしたのが、図-4である。以下の図では、粒子ごとに異なった記号(No. 1:

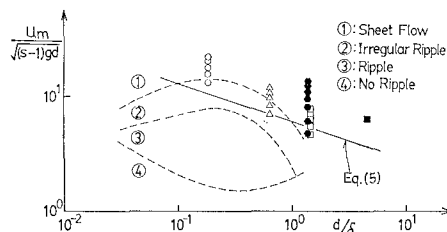


図-4 実験条件

○, No. 2: △, No. 3: □, No. 4: ●, No. 5: ■)で示してある。図中の実線については3.で説明する。

漂砂量を測定する実験は、すべてロータリーシャッタービデオカメラを用いて撮影し、これから砂の移動形態、移動層厚さを調べた。さらに、個々の粒子の運動機構を調べるために、Case 3のみについて、人工真珠($d=5$ mm, 比重 1.60)の移動状況を16mm高速度カメラを用いて撮影した。粒子の移動速度を求める際には、染料を用いて6色に染めた真珠を用い、濃度を求める際には白色のみの真珠を用いた。濃度分布は、平野・岩元・猿渡(1978)⁴⁾と同様な方法で求めた。すなわち、白色ポスターカラーで水を白くし側壁に接している粒子だけ見える様にして撮影し、 z 方向に5mmごとに分割し、各々の高さにおいて x 方向に10cmの範囲に存在する粒子数より求めた。

アクリル板で固定床を作り、Case 1の場合についてレーザー流速計を用いて流速を測定し、流れのチェックを行なった。入口と水平部の中央の2断面で、 y 方向と z 方向の流速分布を調べた。その一例(中央断面 z 方向)を示したのが前の図-2である。上下方向に対称な理想的な流れが起きていることがわかる。ここには示さなかったが y 方向にも流れは対称になっている。図に示した3本の曲線は各々別の実験で得られたものであるが、3者はよく一致しており再現性もよいことがわかる。

漂砂量を求める際には初めの半周期のみの流れを用いた。そこで、この初めの半周期の流れと周期的な流れがどの程度異なっているかを調べた。理論的に乱流状態のものを比較することは困難であるので、層流状態で周期解と動き始めの流れとを比較した。動き始めの流れは、無次元化された基礎方程式(1)を差分化し、初期条件 $t=0$ で $u=0$, 境界条件 $y=0$ で $u=0$, $y=20$ で $u=\sin t$ の下で解くことにより求めた。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \dots\dots\dots (1)$$

図-5は、漂砂現象に最も関連の深い底面せん断力について両者を比較したものである。せん断力は周期解の最大せん断力 τ_{pm} で無次元化している。 $t=0$ では両者はかなり違っているが時間の経過とともに差はなくなり、半周期以後はほぼ一致することがわかる。Jonsson(1966)⁵⁾ および田中(1984)⁶⁾の振動流の領域区分図によると、今回のすべての実験条件は完全乱流領域に入って

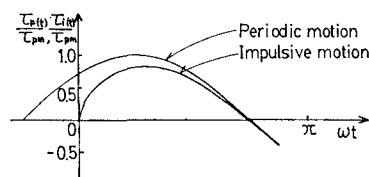


図-5 底面せん断力

いる。乱流では、主流とせん断力の位相差が層流の場合よりも小さいため、周期解と動き始めの流れの一致は全体的によくとなると考えられる。そこで、各実験に対するせん断力 $\tau(t)$ を Jonsson (1966)⁵⁾ の摩擦抵抗係数 f_w を用いて $\tau(t) = 1/2 \cdot \rho_w \cdot f_w \cdot u_*^2$ で算定した。ただし、乱流状態でも位相差が存在するので、位相差を固定床上の底面付近の流速を測定することにより推定し、最初の半周期間に底面にある砂粒子が感じるせん断力の期間を求めた。その期間は全ケースほぼ 1.9 秒であり、漂砂量を整理する際には周期 $T = 3.8$ 秒とした。

3. 半周期平均漂砂量

漂砂量の実験値を、横軸にシールズ数 $\Psi (= \tau_m / (\rho_s - \rho_w)gd)$ 、縦軸に無次元漂砂量 $\Phi (= \bar{q}/w_0d)$ を取りプロットしたのが図-6 である。図中には、香取³⁾、Abou-Seida⁷⁾ の実験値もプロットしてある。実線は Madsen・Grant (1976)⁹⁾ の提案した掃流砂量公式である。

$$\Phi = 12.5\Psi^3 \dots\dots\dots (2)$$

全体的には、実験値と M・G 式 (2) はよく一致しているが、粒子の種類ごとに見ると実験値の方が傾きがゆるやかで、沈降速度が大きい粒子程下に来ていることがわかる。

図-7 は、縦軸に Φ 、横軸に u_*/w_0 (u_* : 摩擦速度) を取ったものである。すべてのデータは一直線上に並び、次式でほぼ表わせることがわかる (図中の実線)。

$$\Phi = 2.2 \left(\frac{u_*}{w_0} \right)^3 \dots\dots\dots (3)$$

シートフロー状態の漂砂現象を規定すると思われる他の

パラメータを軸に取り (例えば横軸を Ψ にして、縦軸を $\bar{q}/u_* \cdot d$, $\bar{q}/\sqrt{(s-1)gd^3}$)、プロットしてみたが、式 (3) が一番相関がよかった。 u_*/w_0 は浮遊砂現象を支配するパラメータである。 u_*/w_0 がシートフロー状態の漂砂現象とどのように関係しているかは今のところはっきりしていない。

図中には、前報 2) で表層の砂のみが少量動く場合について、個々の砂粒子の運動を基にして導いた掃流砂量公式 (4) の計算結果も示してある (破線)。

$$\bar{q} = \frac{2}{T} k_3 \frac{\pi d^3}{6} \frac{N}{2} \int_0^{T/2} l(t)p(t)dt \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 k_3 : 砂粒子の形状特性に関する定数、 N : 単位表面積当りの表面の砂の個数、 $l(t)$: 時刻 t に飛び出した砂粒子半周期移動距離、 $p(t)$: 移動確率である。

式 (4) の計算結果は粒径 d ごとに異なる別々の直線 (傾きはほぼ同じ) となる。式 (3) と式 (4) の交点を求め、その点を金子の領域図 (図-4) 上にプロットすると、交点はほぼ直線上に並び次式 (図中の実線) で近似できる。

$$\frac{u_m}{\sqrt{(s-1)gd}} = 6.0 \left(\frac{d}{\delta} \right)^{-1/3} \dots\dots\dots (5)$$

式 (5) と底面形態の領域図とを比較してみると、式 (5) はほぼシートフローの発生限界と一致していることがわかる。よって、平坦床上の漂砂量については、式 (5) でシートフローの発生・非発生を決定し、シートフローが発生する場合には式 (3) で、発生しない場合には式 (4) で漂砂量を見積ればよい。砂澱が発生した場合でも、砂澱前面の掃流砂に対しては、平坦床の場合と同じ様に取り扱えると考えられるので、式 (4) を改良することにより (特に重力の斜面方向成分を考慮する)、見積ることが可能だと思われる。式 (4) を基に発達初期の微小砂澱上の非平衡漂砂量分布を求める方法については本論文集に報告した⁹⁾。

式 (4) で漂砂量を求める際には、 $p(t)$, $l(t)$ を各々計算しなければならず、大変である。そこで、式 (4) を以下の様に無次元化することにより簡略化を試みる。まず式 (4) を式 (6) の様に書かえる。

$$\bar{q} = c_1 \frac{d}{T} \bar{l} \bar{p} \dots\dots\dots (6)$$

$$c_1 = \frac{\pi k_1 k_2 k_3}{6}, \quad \bar{p} = \int_0^{T/2} p(t)dt$$

$$\bar{l} = \int_0^{T/2} l(t) \cdot p(t)dt / \bar{p}$$

ここに、 k_1, k_2 は砂粒子の配列および形状に関する定数である。ここで式 (6) の $\bar{l}$ と $\bar{p}$ について考えてみる。 $\bar{p}$ は、半周期間のせん断力の最大値 τ_{max} から、砂粒子に働く重力 W と最大せん

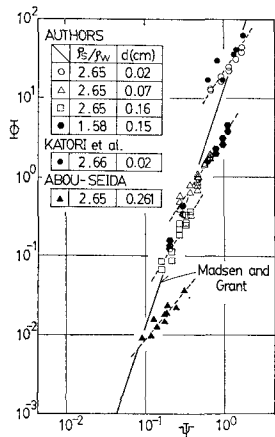


図-6 半周期平均漂砂量 ($\Phi \sim \Psi$)

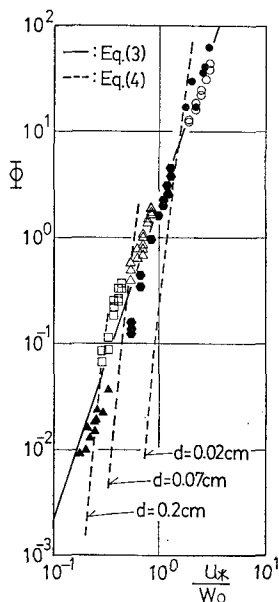


図-7 半周期平均漂砂量 ($\Phi \sim u_*/w_0$)

断力 $\tau_{\max}$ による外力 F のモーメントの釣合より、砂粒子の底面に置れた状態を表わす θ の分布がわかれば、見積ることができる。 F/W がシールズ数 Ψ ゆえ、粒径によって θ の分布が変らなければ、 $\bar{p}$ はシールズ数 Ψ だけの関数である。また、 $\bar{l}$ は $u_m \cdot T$ にほぼ比例する。以上より式 (6) は式 (7) となる。

$$\frac{\bar{q}}{u_m d} = c_2 \cdot f(\Psi) \quad \dots\dots\dots (7)$$

式 (7) と式 (4) で得られる結果を比較すると、広い範囲でよく成立していた。特に、 $\Psi < 0.15$ 以下では、式 (8) でよく表わすことができる。

$$\frac{\bar{q}}{u_m d} = 5.6(\Psi - \Psi_c)^3 \quad \dots\dots\dots (8)$$

ただし、 Ψ_c は限界シールズ数で $\Psi_c = 0.05$ である。この Ψ のべき乗については、 θ の分布から推定することもできる。前報で $\bar{l}$ を求める際には、境界層の影響と底面摩擦を無視したため、 $\bar{l} \propto u_m \cdot T$ となった。実際には両者の影響があるため $\bar{l} \propto u_m \cdot T$ という関係が少し変わてくることが考えられるが、両者を考察するためには砂粒子の運動を2次元の(水平と鉛直)に解析しなければならず、それ自体非常に難しい問題である。

4. 砂の移動機構

4.1 個々の砂粒子の運動

個々の砂粒子の運動を調べるために、粒子としては大粒径 ($d=5\text{mm}$) の比重 ($s=1.60$) の軽い人工真珠を用い、その運動を 16mm で撮影した。4.1, 4.2 にその結果を述べる。撮影コマ数は 64コマ/秒 である。

個々の砂粒子の運動の特徴をまとめると次の様である。① 動いている砂は、同じ半周期のうちに一度停止

して再び移動するというのではなく、表面近くの粒子は半周期間移動しつづける。これは表面の砂のみが移動する場合と同じである。② 流速が0付近では、圧力勾配が大きく、圧力は深い層まで伝わるため、砂は圧力勾配によりかなり下の層まで移動する。この時の移動速度は大きくないが(図-8の位相 π 参照)、粒子のかみ合せがはずれているので、次に砂粒子に外力が作用した時に動きやすい状態になっていると思われる。③ 流速が増加してくると、粒子に働く外力は圧力勾配によるものより、抗力によるものが卓越し、圧力勾配により移動して動きやすい状態になった粒子は、上にあるものほど流れにさらされる面積が大きいため大きな抗力を受けて速い速度で移動する。もう少し下の粒子は、流体からの抗力よりも、その粒子よりも上にある粒子とのぶつかりによる外力により移動する。もう少し下の粒子は、圧力勾配が小さくなる(流速は大)と静止する。④ 減速時では、上層の砂粒子は流れから抗力をあまり受けられないので、下にある粒子とぶつかるそこで運動エネルギーを失い徐々に静止する。以上より、シートフロー状態の砂移動では、砂粒子を動かす機構は外力により3つに分けることができる。すなわち、上層では流体より受ける抗力が卓越する。中層では上層の粒子とのぶつかりによる外力が卓越する。下層では流体の圧力勾配による外力が卓越する。

4.2 砂粒子の移動速度と濃度分布

図-8に、各位相における砂粒子の水平方向の移動速度 U_p と濃度分布を示す。動かし始めの位相を0とし、 $z=0$ は静止時底面である。位相 π を除いて、流速分布は直線分布に近く、その勾配もほぼ同じである。移動している層の厚さは流速が大きい位相ほど大きいわけでは

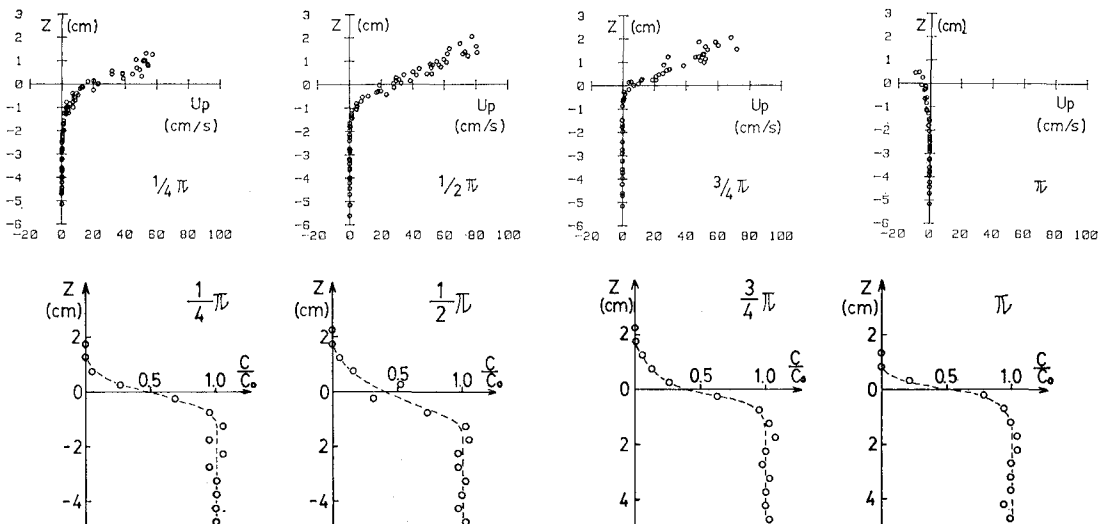


図-8 砂粒子の移動速度および濃度分布

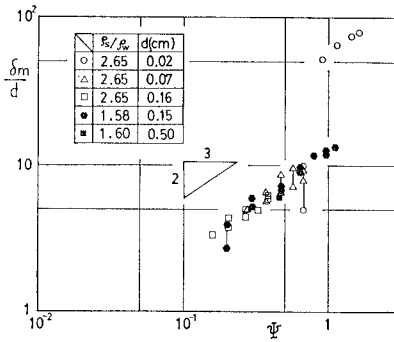


図-9 移動層厚さ

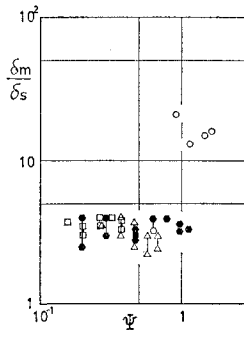


図-10 平均濃度

なく、これには圧力勾配が影響する。濃度分布は、あまり精度は良くないが、流速が急に大きくなる所で濃度は急激に減少し、砂粒子の移動速度が大きい位相ほど濃度勾配がゆるやかになっている。

4.3 移動層厚さと平均濃度

移動層厚さ δ_m は、砂粒子が移動している層の厚さであるが、非定常の場合には δ_m は時間により変化する(図-8 参照)ため、ここではその半周期間の最大値とする。移動層の下端は、移動速度が急に大きくなる所とした(図-8 参照)。移動層厚さと粒径の比 δ_m/d とシールズ数の関係を図-9 に示す。図中の縦棒はデータのちらばりの範囲を示す。上方にある標準砂(白丸)の4つのデータを除くと、 δ_m/d はシールズ数の2/3乗に比例することがわかる。この関係にない標準砂の場合には、砂粒子が浮遊状態で移動しており、そのため移動層厚が大きくなったものと思われる。

移動していた層が静止した時にとる厚さを静止時厚さ δ_s とし、 δ_m/δ_s とシールズ数の関係を示したのが図-10 である。 δ_m/δ_s は移動層の平均濃度を表わす。標準砂を除くと、平均濃度は Ψ によらずほぼ一定(静止時の1/3~1/4)の濃度になることがわかる。

本研究では、砂粒子の移動速度については1ケースのみしか調べていないが、この移動速度がわかれば、図-

9、図-10 で得られた移動層厚さ、平均濃度を用いて漂砂量を算定することができる。

5. おわりに

重力式U字管振動流を用いて、シートフロー状態の漂砂量および砂の移動機構を調べ、次の結果が得られた。① 平坦床上の漂砂量は、式(5)でシートフローの発生非発生を決定し、シートフロー状態が発生する場合には式(3)で、非発生

の場合は式(4)あるいは式(8)で見積ればよい。② 砂移動機構を基にした漂砂量式を導びく際の基礎データとして、砂粒子運動の特徴、移動層厚さ、濃度分布、流速分布が得られた。

参考文献

- 1) 香取完和・渡辺 晃・堀川清司: シート・フロー状態の底質移動に関する研究, 第27回海岸工学講演会論文集, pp. 202~206, 1980.
- 2) 山下俊彦・沢本正樹・秋山義信・山崎泰助: 波動場での砂粒子の移動確率と掃流砂量に関する研究, 第30回海岸工学講演会論文集, pp. 194~198, 1983.
- 3) 金子 新: A Study of Sand Ripples Generated under Oscillatory Flow, 九州大学学位論文, 1981.
- 4) 平野宗夫・岩元 賢・猿渡裕明: 固定床における土石流の流動特性について, 第15回自然災害科学総合シンポジウム, pp. 483~484, 1978.
- 5) Jonsson, I. G.: Wave Boundary Layers and Friction Factors, Proc. 10th Conf. on Coastal Engng., pp. 127~148, 1966.
- 6) 田中 仁: 波・流れ共存場の乱流構造と漂砂現象に関する研究, 東北大学学位論文, 1984.
- 7) Abou-Seida, M. M.: Bed Load Function due to Wave Action, U. of Calif., Berkeley, Hydraulic Engineering Lab., Rep. HEL-2-11, 1965.
- 8) Madsen, O. S. and W. D. Grant: Sediment Transport in the Coastal Environment, Rept. No. 209, Dept. Civil Eng., MIT, 1976.
- 9) 沢本正樹・山下俊彦・秋山義信: 流れおよび砂移動の物理機構を考慮した波による砂運の安定理論解析, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 376~380, 1984.