

# 汀線に直角方向の漂砂

野田 英明\*・松原 雄平\*\*

## 1. 緒 言

海浜過程に関する研究の目標の一つは海浜地形の予測に他ならないが、その研究の根幹をなす底質の移動機構に関しては未だ十分な説明がなされていない。この問題を取り扱う場合、現象のモデル化に先立って、現象を観察する必要がある。本研究は、砕波点以深における汀線に直角方向の漂砂について、種々の観察を行い漂砂現象の適確な把握に主眼をおき、漂砂の移動に影響をおよぼす波や底質の特性について調べた結果を報告するものである。

## 2. 実験装置および方法

実験は長さ 25 m、幅 0.6 m、高さ 1.4 m の片面ガラス張り鋼製波動水槽を用いて行なった。水槽の一端にはフラッター式造波機を、また他端には 1/10 勾配の斜面を設置し、水槽の一部に長さ 4 m の段落を設け、ここに砂を敷きつめ移動床とした。なお、実験に使用した底質は比重 2.64、中央粒径 0.17 mm の豊浦標準砂である。

実験方法：砂床面を水平に整形した後、造波し砂れんを発生させ、砂れんが十分安定した後、砂面の両端に捕砂箱を設けて漂砂量を測定できるようにした。捕砂箱は長さ 60 cm、幅 20 cm、高さ 5 cm の大きさとした。砂れん形状の測定をガラス壁面で行なった後に、再び造波し、底面近くにおける底質の移動状況を 16 mm シネフィルムに撮影した。また超音波精密流速計および水素気泡法によって底面付近の水粒子速度を測定した。

実験条件：実験波は表-1に示すようであって、周期  $T=1.24, 2.06$  および  $3.14$  sec の 3 種類とし、それぞれの実験では周期を一定に保って波高を段階的に増大し

実験を行なった。なお水深はすべての実験において 45 cm と一定にした。

## 3. 実験結果および考察

図-1 は、周期が一定の場合、漂砂量  $q_s$  が波高  $H$  の増大とともにどのように変化するかを示したものである。ここで漂砂量  $q_s$  は岸側と沖側のそれぞれの捕砂箱で捕えられた砂量の差であって、 $q_s > 0$  は岸向き、また  $q_s < 0$  は沖向きの漂砂移動量を示している。この図より明らかなことは、

(1) 周期  $T$  を一定とした場合、波高  $H$  の増大とともに正味の砂の移動量は増加する。

(2)  $T=1.24$  sec の場合、波高が小さいとき漂砂の移動方向は沖向きであるが、 $H \geq 15$  cm 程度になると、その方向は沖向きから岸向きにかわる。

(3)  $T=2.06$  および  $3.14$  sec の場合、実験の範囲内では漂砂はすべて沖向きである。および

(4) 同図には Inman<sup>1)</sup> らの実験結果 ( $h=50$  cm) も示してあるが、 $T=1.4$  および  $2.0$  sec の場合、著者らの結果と同じ傾向を示している。以上の結果から、汀線直角方向の漂砂を評価するためには漂砂量とともに漂砂の移動方向についても明確にする必要がある。

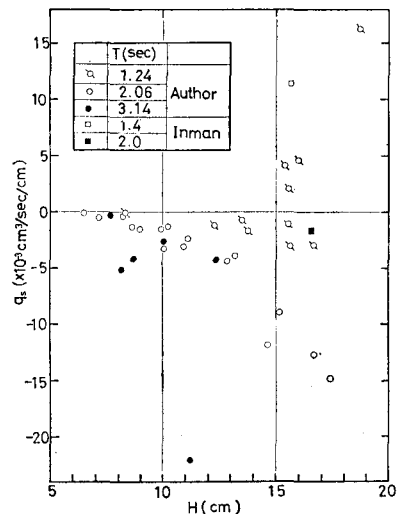


図-1 波高と漂砂量の変化

表-1 実験条件

| Run No. | $T$ (sec) | $h$ (cm) |
|---------|-----------|----------|
| Run 1   | 1.24      | 45       |
| Run 2   | 2.06      | 45       |
| Run 3   | 3.14      | 45       |

\* 正会員 工博 鳥取大学教授 工学部土木工学科

\*\* 正会員 工修 鳥取大学助手 工学部土木工学科

漂砂量：漂砂の方向を無視して漂砂量と波や底質の特性との関係を検討するために、従来から提案されている漂砂量公式と著者らの実験結果とを比較する。Manohar<sup>2)</sup>は振動板を用いた実験から単位幅あたりの漂砂量  $q_s$  が、

$$q_s = 1.41 \times \phi^{6.9} \times 10^{-14} \dots\dots\dots (1)$$

となることを示した。ここに

$$\phi = u_m / \{(\sigma/\rho - 1)g\}^{0.4} D^{0.2} \nu^{0.2}$$

なる無次元量であって、 $u_m$ ：底部での最大水粒子速度、 $\sigma/\rho$ ：砂の比重、 $g$ ：重力加速度、 $D$ ：砂の中央粒径、 $\nu$ ：水の動粘性係数である。式(1)の両辺は次元が一致しないため若干の計算により両辺の次元を一致させると

$$q_s / u_m D = \alpha \left\{ u_m \left/ \left( \frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) g D \right\}^{2.76} \{ u_m D / \nu \}^{0.38} \right. \\ = \alpha \phi' \dots\dots\dots (2)$$

となる。ここに  $\alpha$  は定数である。図-2 は著者および Inman らの実験からえられた漂砂量を用いて  $q_s / u_m D$  と  $\phi'$  の関係を示したものであって、いずれの方向に移動する砂も式(2)の傾向に一致するが、かなりのばらつきが見られ、さらに検討する必要があることを示している。

つぎに石原・榎木<sup>3)</sup>は Du Boys の流砂量公式を利用してつぎの漂砂量公式を導いた。すなわち、

$$q_s = c_{ss} \cdot (\omega^2 \cdot u_m^2 / T) \cdot \{ \pi - 2\omega t_c + \sin(2\omega t_c) \} \\ \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 $c_{ss}$  は底質により決まる定数であり、 $\omega = 2\pi/T$  である。さらに、砂の移動し始める流速を  $u_{bc}$  とすれば  $\omega t_c = \sin^{-1}(u_{bc}/u_m)$  となる。そこで式(3)を若干変形すると、無次元形で、

$$q_s / (u_m^2 \cdot T) = c \cdot f(u_{bc}/u_m) \dots\dots\dots (4.a)$$

と書きかえることができる。ここに

$$f(u_{bc}/u_m) = \pi - 2 \sin^{-1}(u_{bc}/u_m) \\ + 2(u_{bc}/u_m) \sqrt{1 - (u_{bc}/u_m)^2} \dots\dots\dots (4.b)$$

である。ここで問題となるのは  $u_{bc}$  の算定であるが、石

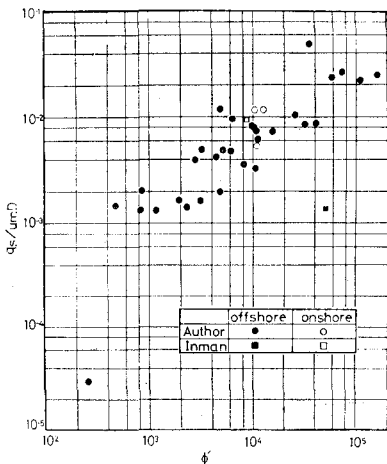


図-2  $q_s / u_m D$  と  $\phi'$  の関係

原・榎木は波動境界層理論を用いてこの値を算定している。著者らもここでは、その方法をそのまま適用した。図-3 は  $q_s / u_m^2 \cdot T$  と  $u_{bc}/u_m$  の関係を示したものであって、図中の実線は式(4.b)において  $c = 1.5 \times 10^{-6}$  としたものである。この図から

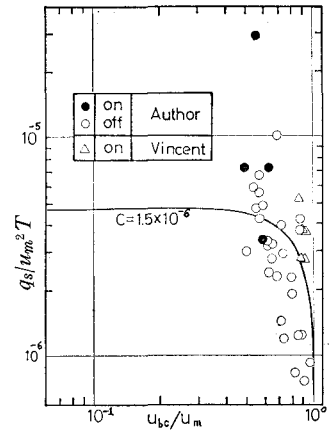


図-3  $q_s / u_m^2 \cdot T$  と  $u_{bc}/u_m$  の関係

明らかなように、実験結果は  $(u_{bc}/u_m)$  の値が 0.5 以上にかぎられ、砂の移動が激しい  $u_{bc}/u_m$  の値が小さい範囲が存在しないため、式(4)の適合性について十分検討することができないが、 $u_{bc}/u_m$  の値が小さくなると、 $q_s / u_m^2 \cdot T$  の実験値は理論値より大きくなる傾向を示している。

漂砂の移動方向：Rector<sup>4)</sup>は海浜変形に関する実験から冲向き岸向きの移動限界が  $D_{50}/L_0$  および  $H_0/L_0$  なる2つの無次元量によって表わされることを示した。すなわち

$$D_{50}/L_0 < 0.0146 (H_0/L_0)^{1.25} \dots\dots\dots \text{冲向き移動} \dots\dots\dots (5) \\ > \dots\dots\dots \text{岸向き移動}$$

である。ここに、 $L_0$ ：沖波波長、 $H_0$ ：沖波波高、 $D_{50}$ ：底質中央粒径である。 $T = 1.24$  sec の場合、 $D_{50}/L_0 = 7.74 \times 10^{-5}$  であり、 $0.0146 (H_0/L_0)^{1.25} = 1.42 \times 10^{-4} \sim 6.76 \times 10^{-4}$  の範囲にあり、Rector の規準からは、すべて冲向きとなるが、著者の実験結果と一致しない。 $T = 2.06$  および  $3.14$  sec の場合、同様の計算より、すべて冲向きに砂が移動することになり、実験事実と一致している。また Dean<sup>5)</sup>も、同様の実験から砂の移動方向を示す規準として、

$$H_0/L_0 > 1.7\pi w_0/gT \dots\dots\dots \text{冲向き移動} \dots\dots\dots (6) \\ < \dots\dots\dots \text{岸向き移動}$$

を示している。ここに  $w_0$ ：砂の沈降速度である。 $T = 1.24$  sec の場合、 $H_0/L_0 = 0.027 \sim 0.0856$ 、 $1.7 w_0/gT = 8.2 \times 10^{-3} \sim 9.1 \times 10^{-3}$  となり、式(6)の結果からは、すべて冲向きに砂が移動することになるが、実験結果には岸向きに移動するものもある。一方、 $T = 2.06$  および  $3.14$  sec の場合、いずれも計算結果は冲向きとなり、実験結果と一致する。このように Rector および Dean の砂の移動方向を示す規準は、得られた事実をすべて説明するものではない。その原因の一つとして、その移動形態が正味の砂の移動方向と関連があると想定される。Engelund<sup>6)</sup>、Bijker および Wicher<sup>7)</sup>は、漂砂が掃流で移動す

るか、浮遊で移動するかは摩擦速度  $u_*$  と  $w_0$  の比によって

$$\left. \begin{aligned} u_*/w_0 < 1.0 &\cdots\cdots\text{掃流砂が卓越} \\ 1.0 < u_*/w_0 < 1.7 &\cdots\cdots\text{掃流砂と浮遊砂が共存} \\ u_*/w_0 > 1.7 &\cdots\cdots\text{浮遊砂が卓越} \end{aligned} \right\} \cdots\cdots\cdots(7)$$

となることを示した。ここで摩擦速度  $u_*$  をどのようにして算定するかが問題であるが、Jonsson の式を用い計算を行なった。その結果、 $u_*/w_0$  の値はすべて 1.7 より大きく、すべての実験結果は浮遊砂が卓越していることになる。しかし、移動形態が同じであっても移動方向は異なるという結果になり、さらに詳細な観察の必要であることが明らかとなった。

#### 底面付近の漂砂移動状況の観察

図-4 は  $T=1.24$  sec で、かつ  $H=12.25$  cm の場合の底面近傍における流れの状況および砂れん形状を示したものである。図中の  $N_a$  および  $N_b$  は、水とほぼ同じ比重をもつ、中立粒子の移動軌跡を表わしたものであって、0.042 sec 間隔で撮影されたフィルムからその位置を読み取ったものである。なお、図中の数字はフィルム(コマ)番号  $i$  を表わし、波の位相との対応は  $t/T=0$  で  $i=0$ ,  $t/T=1$  で  $i=30$  となる。平均砂面上 7.8 cm を移動する中立粒子  $N_a$  は、ほぼ楕円軌道を描き、ポテンシャル理論にもとづいた運動を行なっている。一方、平均砂面上ほぼ 3 cm のところを移動する粒子  $N_b$  の軌跡は、もはや楕円を示していない。また砂れん峰上において水素気泡法で測定した流速分布の形状もポテンシャル理論のそれと大きく違っている。さらに、 $N_a$ ,  $N_b$  の軌跡は波の一周期で閉じておらず質量輸送の存在を示している。 $i=0$  と 30 の間の水平距離を測れば、質量輸送速度が得られ、その結果を Longuet-Higgins の理論値と比較したのが表-2 である。これより  $z=7.8$  cm でもなお、質量輸送の存在すること、また理論値は実測値より、かなり

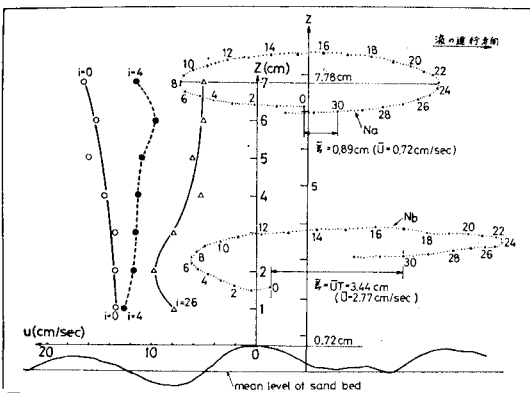


図-4 底面近傍における流れの状況および砂れん形状

表-2 理論値と実測値の比較

|       | 計算値  | 実測値  |
|-------|------|------|
| $N_a$ | 0.09 | 0.72 |
| $N_b$ | 2.20 | 2.77 |

(単位 cm/sec)

小さいことがわかる。Brebner<sup>9)</sup> も乱流境界層で同様の結果を報じているが、質量輸送の方向と正味の砂の移動方向とは一致していなくて、質量輸送が、かならずしも漂砂の移動方向を決定する要素であるとはいえない。

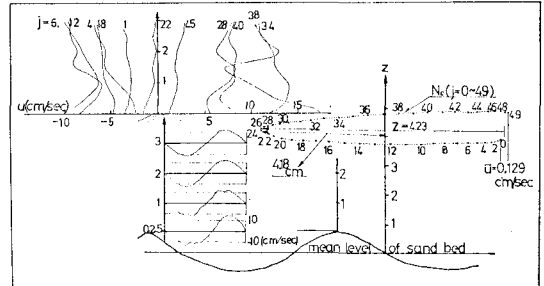


図-5 底面近傍における流れの状況および砂れん形状

図-5 は  $T=2.06$  sec,  $H=6.45$  cm の場合の結果を示したものである。この図において平均砂面上 4.23 cm の位置における中立粒子  $N_b$  の軌道長径および短径、質量輸送速度をそれぞれ、浅海波理論および Longuet-Higgins の理論にもとづいて計算し、測定値と比較した。それらの結果を表-3 に示す。これから中立粒子  $N_b$  の運動は、ほぼポテンシャル理論による運動を示しているが、底面近傍での水素気泡法、超音波流速計による水粒子速度の測定結果は、水粒子速度が沖向き岸向きにかかわらず速度が増大すると、その時間的变化に著しい乱れの現われてくることがわかる。

表-3 理論値と実測値との比較

|                 | 計算値  | 実測値  |
|-----------------|------|------|
| 長軸 (cm)         | 4.23 | 4.18 |
| 短軸 (cm)         | 0.27 | 0.53 |
| 質量輸送速度 (cm/sec) | 0.70 | 0.12 |

図-6 は Run 1 における  $i=10\sim 20$  の間の砂の移動を示したものである。ここで注目される一つの現象は、砂れん頂部に見られる掃流砂である。水粒子の速度が沖向きから岸向きに逆転し、徐々に水粒子速度が増大する  $i=12$  の時点で砂れん頂部が乱れ、いっせいに岸向きに移動を始めている。ところが、さらに流速が増す  $i=14\sim 16$  では、このような激しい砂粒子の移動は認められない。この現象は波の位相が進み水粒子速度が沖向きとなる場合にも同様に観察され、掃流による砂の移動が、

漂砂現象に大きな役割を果たしていることがわかる。

いったん掃流によって移動を始めた砂は、浮遊砂雲となり  $i=12\sim14$  の時点で、この雲は前半部と後半部の二つに別れる。雲全体の速度は後半部が遅いようである。浮遊砂雲は岸方向水粒子速度が最大値をとる  $i=14\sim16$  の間、

ほぼ一定の速さで移動しているが、

速度が減少する  $i=18\sim20$  では砂の沈降が見られる。また、 $i=10\sim20$  までの間の浮遊砂雲の移動量から、その平均移動速度は約  $15\text{ cm/sec}$  であることがわかる。

さて、砂の運動にともなって見られるもう一つの顕著な特徴は渦の発生である。渦は冲向き水粒子速度が減少し始める  $i=6$  において、砂れんの岸側斜面に発生し、このとき波による岸方向の加速度は最大値に近くなる。この加速度が最大となる  $i=8\sim10$  で渦は砂れん頂部へ移動して、その直後に消滅する。この状態から  $i=19$  までは渦の発生は見られない。その後  $i=20$  において、砂れんの岸側斜面上に渦が発生する。この渦は、さらに冲向きの加速度が大きくなると、発達しつつ砂れん頂部へと移動する。この渦の発生発達と波の位相の間には表4の関係がえられた。このように砂の移動は掃流形式と浮遊形式とから成り、渦の発生発達がそれに関連していることがわかる。

表4 波の位相と渦の発生場所の関係

| $i$   | $t/T$     | 渦の発生場所  | 水粒子速度の方向 | 加 速 度  |
|-------|-----------|---------|----------|--------|
| 6     | 0.2       | 砂れん沖側斜面 | 冲向き(減速期) | 岸方向に最大 |
| 8~10  | 0.27~0.33 | 砂れん頂部   | 沖から岸へと逆転 | "      |
| 20    | 0.67      | 砂れん岸側斜面 | 岸向き(減速期) | 沖方向に最大 |
| 22~24 | 0.73~0.8  | 砂れん頂部   | 岸から沖へと逆転 | "      |

Inman および Tunstall<sup>9)</sup> は砂れんの形状特性が渦の発生を支配し、かつ、渦の強さにより砂の移動方向が決定されることを示している。著者らの実験における砂れん形状は、Run 1 の場合、ほぼ対称であったが、Run 2, Run 3 と周期が大きくなるにつれ、対称性を失ない、岸側に急斜面を持つ形状となっている。Inman らの考えに

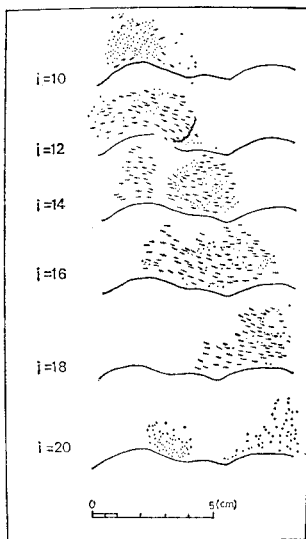


図-6 浮遊砂の移動とその変化

従えば、このように非対称な砂れんでは、砂れんの岸側斜面に沖側斜面よりも強い渦が発生し、それによって沖側へ、より多くの砂が運ばれることになる。すなわち、正味の砂の移動量は冲向きとなる。Run 2 および Run 3 の実験結果とよく一致している。以上の結果から、砂の移動方向を決定する要因として、前述の質量輸送よりも砂れん斜面に発生する渦がより支配的であると考えられる。

#### 4. 結 語

汀線に直角方向の漂砂に関する実験を行い、得られた結果を要約すると、つぎのようになる。

(1) Manohar および石原・榎木の漂砂量式と、縦漂砂量の実験値を比較した結果、実験値のばらつきは、いずれの場合も同程度であり、さらに検討する必要があることがわかった。

(2) 砂の移動方向・移動形態に関する従来の提案は、必ずしも実験結果を十分説明し得ないことが明らかとなった。

(3) 漂砂現象は掃流と浮遊から成っており、渦の発生・発達が砂移動に重要な影響を及ぼすことがわかった。

(4) 砂の移動方向を決定する支配的要素は、砂れんの沖側および岸側に発生する渦であることが明らかとなった。

#### 参 考 文 献

- 1) Inman, D. L. and A. J. Bowen: Flume experiments on sand transport waves and currents, Proc. 8th Conf. on Coastal Eng., pp. 137~150, 1963.
- 2) Manohar, M.: Mechanics of bottom sediments movements due to wave action, B.E.B. Tech. Memo. 75, 121p, 1955.
- 3) 石原藤次郎・榎木 亨: 漂砂の移動限界流速・限界水深および移動量について, 第7回海講論文集, pp. 47~57, 1963.
- 4) Rector, R. L.: Laboratory study of equilibrium profile of beaches, B.E.B. Tech. Memo. No. 41, 38p., 1964.
- 5) Dean, R.G.: Heuristic models of sand transports in the surf zone, Conf. on Engineering Dynamics in the Surf Zone, pp. 208~213.
- 6) Engelund, F.: Turbulent energy and suspended load, Coastal Eng. Lab., Technical Univ. of Denmark, Rep. No. 10.
- 7) Best, A. D., E. W. Bijker, J. E. W. Wichers: Scouring of a sand bed in front of a vertical break water, Proc. of 1st Conf. on Port and Ocean Eng., pp. 1077~1085, 1971.
- 8) Brebner, A., J. A. Askew and S. W. Low: The effect of roughness on the mass transport of progressive gravity waves, Proc. 10th Conf. on Coastal Eng., pp. 175~184.
- 9) Inman, D. L. and E. B. Tunstall: Phase dependent roughness controll of sand movement, Proc. 14th Conf. on Coastal Eng., pp. 1154~1170.