

岸・冲向き漂砂量に関する研究

野田 英明*・松原 雄平**

1. 緒 言

一般に、岸・沖漂砂は波が汀線に対して直角に入射するとき支配的となる。波による水粒子の運動は、基本的には岸・沖に向う往復運動であるが、波と底質の特性によって、底質は岸向きかあるいは冲向きに正味の移動をすることが知られている。その正味の移動量がどの程度であるかは、古くは Manohar¹⁾, Vincent²⁾, 石原・樺木³⁾ らによって、また最近では Madsen⁴⁾, 浮遊砂の冲向き移動量については堀川・砂村⁵⁾, 斜面上の移動については, Bakker⁶⁾ によって研究が進められてきた。しかし、これらの研究成果からは正味の移動量が、岸向きか冲向きを判定することができず、少なくとも波と底質の特性によって、それらを分類できれば、岸・冲向き漂砂の移動方向を判別し、移動量を算出できることになる。

この研究では、碎波点より沖側の浅海領域で、かつ水平床という単純化したモデルにおいて、移動方向をも考慮した岸向き漂砂量の算定を試みるものである。なお、ここに示す漂砂量式には実験によって決定すべき定数が含まれているため、2次元波動水槽による実験を行ない、定数を決定するとともに、移動方向が著者らの提案とほぼ一致することを確かめた。

2. 岸・沖方向漂砂量式

(1) 掃流漂砂量

従来の研究成果を参照して、波による底質の無次元掃流砂量をつぎのように仮定する。

$$\frac{\Delta q_B}{w_0 \cdot d} = K \frac{u}{\sqrt{s g d}} (\Psi - \Psi_c) \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 Δq_B : 単位時間・単位幅あたりの掃流砂量、 w_0 : 底質の沈降速度、 d : 底質の粒径、 u : 波による底面付近の水粒子速度、 s : 底質の水中比重、および、 Ψ , Ψ_c は、それぞれ

$$\Psi = \frac{u^2}{s g d}, \quad \Psi_c = \frac{u_c^2}{s g d} \dots\dots\dots (2)$$

で表わされる無次元量である。ここに、 u_c は波および

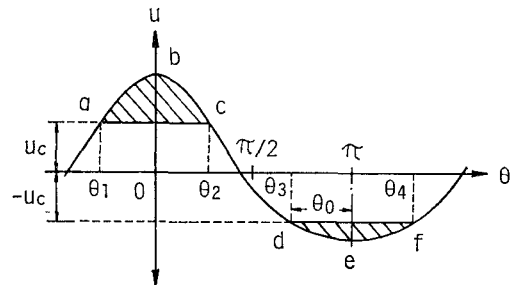
底質の特性から決定される砂の移動限界流速であって、ここでは、Komar-Miller⁷⁾ の示した関係式

$$\frac{u_c^2}{s g d} = 0.21 \left(\frac{u_o \cdot T}{\pi d} \right)^{1/2}$$

を用いる。流速 u は、岸向きの最大流速が冲向きのそれよりも大きくなる浅海域の波として、ストークスの第2近似解で次式のように表わす。

$$u = u_{01} \cdot \cos \theta + u_{02} \cdot \cos 2\theta \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 $u_{01} = (\pi H/T)(1/\sinh kh)$, $u_{02} = (3/4)(\pi H/T)/(\sinh kh)^4$, T , H , k , h は、それぞれ、波の周期、波高、波数、水深である。図—1 は、式 (3) から算定される流



図—1 流速の時間的変化の説明図

速 u を、波の一周期について表わしたものである。砂の移動開始および停止の流速が等しいと仮定すると、岸向きに $u \geq u_c$ となる位相 (図中、斜線部 abc) において、岸向きの掃流砂が発生し、同様に、冲向きに移動限界流速を超える位相 (斜線部 def) で冲向きの掃流砂が生じると考えることができる。したがって、岸・沖方向に掃流砂が発生している位相に関して式 (1) を積分すれば、波の一周期における正味の平均掃流砂量 q_B は、式 (1) の表示方法に従って、

$$\frac{q_B}{w_0 \cdot d} = \frac{1}{T} \left\{ \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{\Delta q_B}{w_0 \cdot d} d\theta + \int_{\theta_3}^{\theta_4} \frac{\Delta q_B}{w_0 \cdot d} d\theta \right\} \dots\dots\dots (4)$$

となる。 $\theta_1 (= -\theta_2)$, $\theta_3 (= 2\pi - \theta_4)$ は、式 (3) の左辺の u を、それぞれ u_c , $-u_c$ とおくことによって、次のようになる。

$$\theta_1 = -\theta_2 = \cos^{-1} \left\{ \frac{\sqrt{1+8v(v+u_c)}-1}{4v} \right\}, \quad \left\{ \right.$$

* 正会員 工博 鳥取大学教授 工学部海洋土木工学科
** 正会員 工修 鳥取大学助手 工学部土木工学科

$$\theta_3 = \cos^{-1} \left\{ \frac{\sqrt{1-8v(v-v_c)}-1}{4v} \right\} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 $v=u_{02}/u_{01}$ であり、波形勾配に関係する無次元量、また、 $v_c=u_c/u_{01}$ であり、砂の移動しやすさを表わす量と解釈することもできる。ただし、 $1+v>v_c$ で、かつ、 $(1-v)\leq v_c$ の場合には、岸向きの掃流砂のみが発生する。 $\theta=0, \pi$ における流速 u の対称性を考慮して、式(1)、(2)、および(5)を、式(4)に代入し整理すると、 v, v_c の関数として、一周期あたりの、正味の平均掃流砂量として次式をうる。すなわち、

$$\begin{aligned} \frac{q_B}{w_0 \cdot d} \left(\frac{u_{01}}{\sqrt{sgd}} \right)^{-3} &= K' \cdot Q(v, v_c) \\ Q(v, v_c) &= \left\{ \begin{aligned} &\frac{1}{6} \sin 3A \cos 3A_* + \frac{3}{2} \sin A \cos A_* \Big) v^3 \\ &+ \left(\frac{3}{5} \cos \frac{5}{2} A \sin \frac{5}{2} A_* + \cos \frac{3}{2} A \right. \\ &\quad \cdot \sin \frac{3}{2} A_* + 6 \cos \frac{A}{2} \cdot \sin \frac{A_*}{2} \Big) v^2 \\ &+ \left\{ \frac{3}{4} \sin 2A \cos 2A_* \right. \\ &\quad \left. + (3-2v_c^2) \cos A_* \sin A + \frac{3}{2} A \right\} v \\ &+ \frac{1}{3} \cos \frac{3}{2} A \sin \frac{3}{2} A_* \\ &\left. + (3-4v_c^2) \cos \frac{A}{2} \sin \frac{A_*}{2} \right\} \end{aligned} \right. \quad \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

ここに、 $A_*=\theta_2-\theta_0$ 、 $A=\theta_2+\theta_0$ であり、 $\theta_0=\pi-\theta_3$ で、 A, A_* は、 v および v_c の関数であり、 $K'=(K/2\pi)$ である。図-2は、式(6)の $Q(v, v_c)$ と v の関係を、 v_c

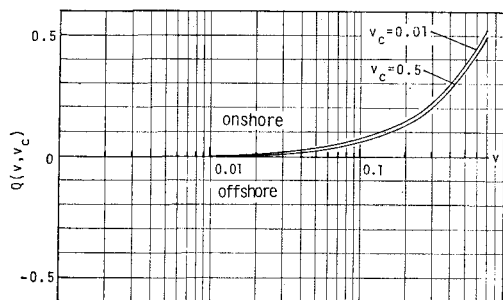


図-2 $Q(v, v_c)$ と v の関係

をパラメータにとって示したものである。この図から、いかなる v, v_c に対しても、正味の掃流砂量は常に岸向きに生じること、また、 v_c の値の変化は、掃流砂量に、ほとんど寄与しないことがわかる。したがって、ストークスの第2近似解で示されるような非対称な流速場を仮定して掃流砂の移動量を算定すれば、いかなる条件に対しても岸向きとなることがわかる。

(2) 浮遊漂砂量

これまで、波動運動と底質の浮遊機構について、理論的・実験的に検討した例は数多い。しかし、現象がきわめて複雑であることから、波および底質特性と浮遊漂砂量の関係式を導いた研究例はわずかである。砂村ら⁸⁾は、正味の沖向き浮遊砂量 S を、砂れんスケールならびに浮遊砂の平均濃度と結びつけて、理論的に式(7)に示される一波当り、単位幅の正味の沖向き浮遊砂量式を導き、その実験的な検証も行なっている。

$$S = 2.1 \times 10^{-6} \cdot \rho \cdot \left(\frac{u_m d_0}{\nu} \right)^{0.422} (u_m - u_c) d_0 T \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 $d_0=(u_m \cdot T/\pi)$ であり、 u_m は、底面付近の最大流速である。いま、

$$\left. \begin{aligned} u_m &= (1+v)u_{01} \\ u_c &= v_c \cdot v_{01} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (8)$$

とし、さらに単位時間、単位幅あたりの浮遊砂量を q_s として、式(7)を変形し、式(1)と同様の表示にかえれば、次式がえられる。

$$\frac{q_s}{w_0 \cdot d} \left(\frac{u_{01}}{\sqrt{sgd}} \right)^{-3} = \beta \{v^2 + (2-v_c)v\} \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここに、 β は実験から求まる定数である。図-3は、式

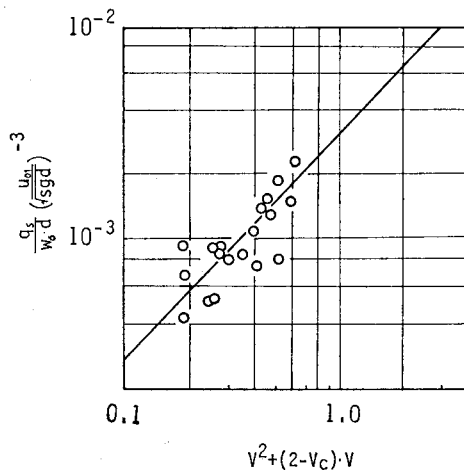
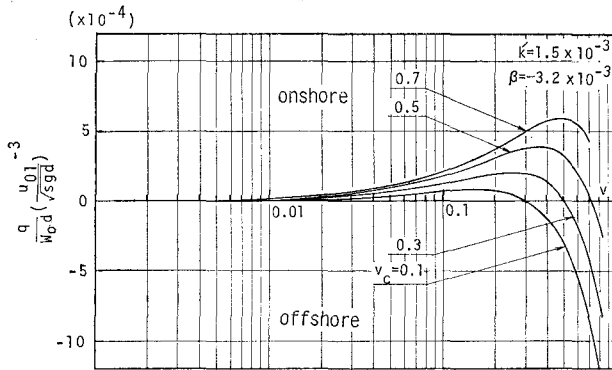


図-3 沖向き浮遊砂量

(9)において、 $\beta = -3.2 \times 10^{-3}$ とおいて算定される沖向き浮遊砂量と砂村らによって行なわれた実測値を比較したものである。これより、実験結果に若干のばらつきは見られるものの、式(9)において $\beta = -3.2 \times 10^{-3}$ とすれば沖向き浮遊砂量が、かなりの精度で算定されることがわかる。

以上の考察から、掃流漂砂量と浮遊漂砂量とを加えた単位時間、単位幅当りの正味の全漂砂量 q は、式(6)および式(9)から、 v, v_c の関数として

$$\frac{q}{w_0 \cdot d} \left(\frac{u_{01}}{\sqrt{sgd}} \right)^{-3} = K' \cdot Q(v, v_c)$$

図-4 岸・沖向き漂砂量の計算結果Ⅰ ($K'=1.5 \times 10^{-3}$)

$$+\beta\{v^2+(2-v_c)\cdot v\} \cdots (10)$$

となる。図-4 は、式 (10) の計算結果の一例であり、 $K'=1.5 \times 10^{-3}$ 、 $\beta=-3.2 \times 10^{-3}$ とおき、 v_c をパラメータとして示したものである。図中、漂砂量の値が正の場合岸向き、負の場合沖向きの漂砂量を与える。ここで注目すべき点は、 v_c の値が 0.1~0.5 の場合、 v の値の増加とともに、砂の移動方向が、岸向きから沖向きへと変化する点が現われていること、ならびに、その移動方向の変化点は、 v_c の値の増加とともに大きくなっていることである。このような波の特性の変化にともなう底質の移動方向の変化は、これまでの漂砂量式では得られなかった結果である。また、 v_c の値が大きい場合、岸向きに生じた漂砂量は v の値の増加とともに増大するが、ある 1 点で最大値を示し、その後、減少すること、そして、いったん沖向きに底質の移動方向が変化すると、急激に沖向きの漂砂量が増加することがわかる。図-5 は、 $K'=0.8 \times 10^{-3}$ 、 $\beta=-3.2 \times 10^{-3}$ とした場合の式 (10) の算定結果を、 v_c をパラメータとして示したものである。この図より K' の値が相対的に小さい場合、 v ならびに v_c の値の変化にかかわらず、常に移動方向が沖向

きとなること、またその場合、 v_c の値が小さい程、沖向き漂砂量の値は大きくなることがわかる。図-6 は、 v_c の値を 0.5 と一定にし、 K' の値を変化させた場合、漂砂量がどのように変わるかを調べたものである。図より、 $K' < 1.11 \times 10^{-3}$ の範囲では、 v の値によらず、常に沖向きの漂砂量が得られ、 K' の値が小さいほど、沖向きの漂砂量が卓越することがわかる。

3. 実験装置および方法

実験は、図-7 に示す長さ 18.1m、幅 0.5m、深さ 0.6m の二次元波動水槽に、高さ 15cm の水平固定床を設け、その一部に長さ 7.5m、

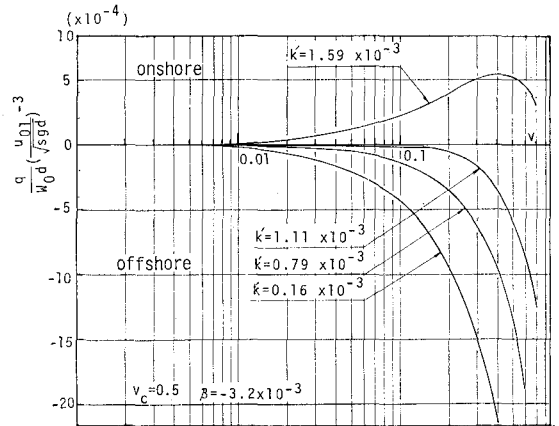
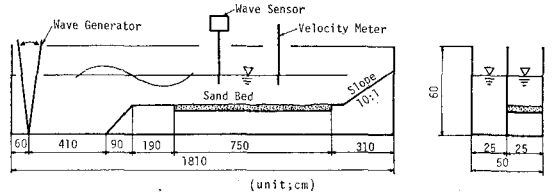
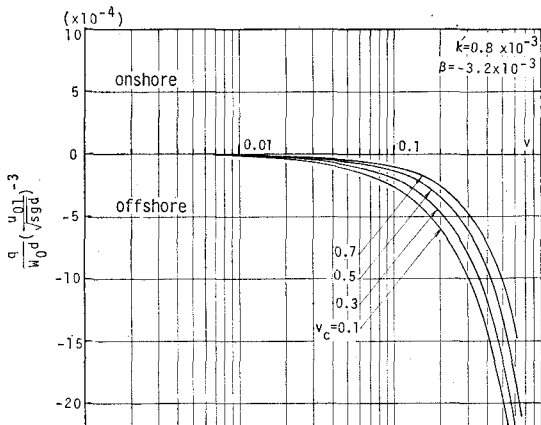
図-6 K' の値による漂砂量の変化

図-7 実験水槽

厚さ 7cm の移動床を設置して行なった。実験に使用した砂は、比重 2.64、中央粒径 0.3mm の自然砂である。砂面形状の測定は、測深器を台車に搭載し、水槽に沿って自走させ、ペン書きオシログラフならびにデータレコーダーに記録した。水面波形、水粒子速度の測定は、容量式波高計および超音波流速計を用いて行なった。実験では、砂面を整形した後に、一定の波を作用させて砂れんを発生させる。その後 5~6 時間継続して造波し、測深器により造波開始前後の砂面形状の差と漂砂の連続式を用いて算定した。実験条件は、波の周期 $T=1.1\text{sec}$ ~ 2.5sec 、水深 $h=30\text{cm}$ 、波高 $H=7.91\text{cm}$ ~ 12.05cm の範囲で行なった。

図-5 岸・沖向き漂砂量の計算結果Ⅱ ($K'=0.8 \times 10^{-3}$)

4. 実験結果および考察

図-8 は, v_0 をパラメータとして, 式 (10) から算定される漂砂量(実線)と実験結果を比較したものである。定数 K' の値は, 実験値と最も良く一致するよう 1.15×10^{-3} とした。図中の数字は, それぞれの実験結果に対応する v_0 の値を示している。この図からわかるように,

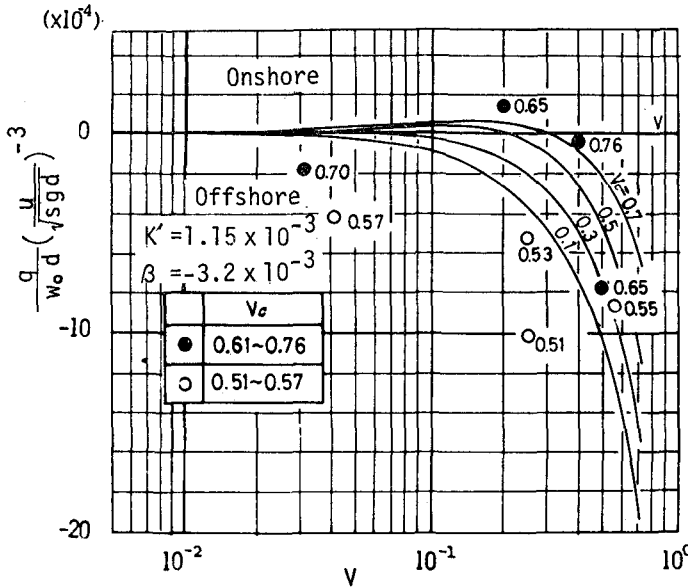


図-8 岸・沖向き漂砂量式と実験結果の比較

(10) 式による算定結果は, $K' = 1.15 \times 10^{-3}$ とすると, ほぼ妥当な結果をうる。さらに詳細にみれば, v の値が大きくなると, 底質の移動量も, それにともなって増加するが, v_0 の値によって岸向きあるいは沖向きに移動し, v の値が1に近くなると, すべての v_0 に対して, 沖向きの漂砂量が卓越してくることがわかる。また, $v_0 \geq 0.5$ の場合, v の増加にともなって, 漂砂の移動方向は, 岸向きから沖向きへと変わることがわかる。実験結果においても, ほぼ同様の傾向が見られ, 特に, $v_0 = 0.61 \sim 0.76$ の結果については, v の値が, 0.3 付近で移動方向が変わり, 式 (10) の結果とよく一致している。 $v_0 = 0.51 \sim 0.57$ の範囲の実験結果は, すべて沖向きの移動方向を与えており, 一部計算結果と異なる例が認められるが, その傾向は一致している。これまで, 底質の岸向き・沖向きの移動限界について, Dean⁹⁾, Rector¹⁰⁾ らは, 沖波波形勾配と底質特性によって表現していたが, 著者らの結果から底質の移動しやすさを表す無次元量 v_0 によって移動方向が統一的に表示しえることが明らかとなった。

漂砂量に関する実験例が少なく, 実験結果もばらついているが, 漂砂量は, 従来の漂砂量式による算定結果よ

りも比較的良く一致していることがわかる。この実験結果のばらつきの原因として考えられるのは, 非定形波の条件のもとで, 実験を行なったことにより, 漂砂量が場所的に変動し, その場所的な平均値で漂砂量を表わしたことによるものと思われる。したがって今後, 石田ら¹¹⁾ が示した非定形波による漂砂量の場所的な分布をも検討し, 水平床における岸・沖向き漂砂についてさらに詳しく検討する予定である。

5. 結 語

この研究では, 水平床で, かつ碎波点より沖側の浅海域という条件のもとで, 汀線に直角な方向の漂砂量式を導き, その実験的検証を行なった。得られた結果を要約すると以下のようである。

1) 本研究で導いた漂砂式は, 式中含まれる定数を適当に与えれば, 従来の漂砂量式では表示されなかった底質の移動方向を明らかにすることができ, 実験結果とも良く一致することがわかった。また, 底質の移動方向は, 波形勾配に関係する無次元量 v と底質の移動限界に関する無次元量 v_0 によって大きく影響されることがわかった。

2) 漂砂量の実験値と計算値を比較すると, 実験値に若干のばらつきは見られるものの, 両者は比較的良く一致することがわかった。

3) 掃流および浮遊漂砂量もまた, v ならびに v_0 の関数で与えられることがわかった。

最後に, この研究は, 文部省科学研究費による研究の一部であることを付記する。

参 考 文 献

- 1) Manohar, M.: Mechanics of bottom sediment movement due to wave action, B.E.B. Tech. Memo. No. 75, 121 p., 1955.
- 2) Vincent, G. E.: Contribution to the study of sediment transport on a horizontal bed due to wave action, 6th Conf. on Coastal Eng., pp. 320~355, 1958.
- 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回海岸工学講演会講演集, pp. 47~57, 1963.
- 4) Madsen, O. S. and Grant, W. D.: Quantitative description of sediment transport by waves, Proc. 15th Conf. on Coastal Eng., pp. 1093~1112, 1976.
- 5) 堀川清司・砂村鑑夫・柴山知也: 二次元海波変形に関する実験的研究—沖浜帯における漂砂量測定法—第24回海岸工学講演会論文集, pp. 170~174, 1977.
- 6) Bakker, W. T.: The dynamics of a coast with a groyne system, Proc. 11th Conf. on Coastal Eng., pp. 492~517, 1968.

- 7) Komar, P. D. and Miller, M. C.: Sediment threshold under oscillatory waves, Proc. 14th Conf. on Coastal Eng., pp. 756~775, 1974.
 - 8) 砂村継夫・阪東浩造・堀川清司: 非対称砂れん上での砂移動機構と漂砂量に関する実験的研究, 第25回海岸工学講演会論文集, pp. 250~254, 1978.
 - 9) Dean, R. G.: Heuristic models of sand transports in the surf zone, Conf. on Engineering Dynamics in the Surf Zone, pp. 208~213.
 - 10) Rector, R. L.: Laboratory study of equilibrium profile of beaches, B.E.B. Tech. Memo. No. 41, 38 p., 1964.
 - 11) 石田 昭・石田和生: 浅水領域における波形の分裂現象—二次波峰と Soliton について—第20回海岸工学講演会論文集, pp. 403~409, 1973.
-