

渦運動による岸沖漂砂量モデル

辻 本 剛 三*・早 川 典 生**

1. 緒 言

海底に砂漣が形成されている場での砂の移動機構と岸沖漂砂量に関する研究は、この数年間において著しい進歩が見られており様々なモデルが提案されている。中でも野田・松原¹⁾、砂村²⁾は、波、底質の条件のみで漂砂の卓越方向も考慮した移動量を算出するモデルを提唱しているが、実際の移動床時に必ず見られる砂漣上の渦運動を充分に取り入れているかどうか疑問が多い。

本研究では、砂漣の形状と砂漣上の渦運動を記述し波の一周期を数区間にかけ、砂漣上を輸送される砂粒子の移動機構を各位相毎に模擬化して考え、漂砂の移動方向を考慮した岸沖漂砂量公式を導き出すことを目的とする。

2. 流速波形と砂漣形状について

(1) 流速波形

波は浅海域に接近してくると有限振幅性を帯び底面近傍の流速波形は、岸向きに強くなり沖向きに弱くなって非対称性をなしてくる。岸沖方向に net の砂移動を生じさせる要因には、波の有限振幅性による流速波形の非対称性、底床の傾き、質量輸送速度、流れの定常成分、砂漣形状の非対称性などが考えられる。本研究においては流速波形は岸向きの最大流速が沖向きの最大流速よりも大きくなる浅海域のストークス第2近似解を用いて、次のように表わした。

$$u = u_1 \cos \theta + u_2 \cos 2\theta \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $u_1 = (H\pi/T)(\sinh kh)^{-1}$ 、 $u_2 = (3/4)(H\pi/T)^{-2} \cdot (T/L)(\sinh kh)^{-4}$ 、 T 、 H 、 kh は波の周期、波高、波数、水深である。式 (1) による流速波形の一周期を図-1 に示す。図中添字“N”は岸向き（岸側），“F”は沖向き（沖側）を表わしている。 θ_{cN} は野田・松原³⁾ が用いた岸向きの砂移動限界流速となる位相を示し、式 (2) のように与えられる。

$$\theta_{cN} = \cos^{-1} \left\{ \frac{\sqrt{1+8u_2(u_2+u_0)} - u_1}{4u_2} \right\} \quad \dots\dots\dots (2)$$

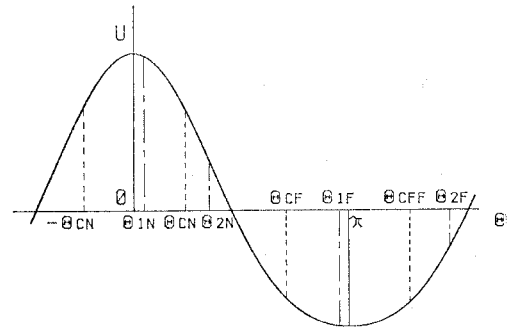


図-1 流速波形

同様に沖向きの砂移動限界流速となる位相 θ_{cF} は

$$\theta_{cF} = \cos^{-1} \left\{ \frac{\sqrt{1+8u_2(u_2-u_0)} - u_1}{4u_2} \right\} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 u_0 は砂の移動限界流速である。ここでは、波及び底質の条件で決まる Komar-Miller⁴⁾ により提案された式 (4) を用いる。

$$\frac{u_c^2}{sgd_s} = 0.21 \left(\frac{u_0 T}{\pi d_s} \right)^{1/2} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 d_s は底質の粒径、 s は底質の水中比重、 θ_{1N} 、 θ_{2N} は岸向きの流れの時に岸側斜面に形成される渦の発生位相、発達停止位相を示す。同様に θ_{1F} 、 θ_{2F} は沖側斜面の渦の生発位相、発達停止位相を示し、 $\theta_{cFF} = 2\pi - \theta_{cF}$ である。

(2) 砂漣形状

浅海域では波が底面付近まで影響を及ぼしているため砂漣が形成される。砂漣のスケールに関しては、本間・堀川・鹿島⁵⁾の算定式があり式 (5) で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \eta/\lambda &= 0.175(\lambda/d_0)^{0.19} \\ \lambda &= \alpha T^\beta d_0^\gamma \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 $d_0 = H(\sinh kh)^{-1}$ 、 η は砂漣波高、 λ は砂漣波長、 α 、 β 、 γ は粒径により決定される定数である。砂漣形状に関しては、流速波形の影響を著しく受け特に砂漣波長については、Bagnold⁶⁾ が実験的に水粒子の軌道半径に比例することを見出ししている。本研究では、岸向きの最大流速と沖向きの最大流速の比でもって砂漣の非対称性を表わした。

* 正会員 工 修 神戸市立工業高等専門学校講師 土木工学科

** 正会員 Ph.D. 長岡技術科学大学教授 建設系

(3) 渦のスケール

波動場で形成される砂漣上の渦は岸沖漂砂量に強い影響を与えているが、渦については未解決な点が多い。渦のスケールは流速、底質の特性、砂漣スケールなどの強い影響を受けるが、理論的な検討はほとんど行なわれておらず Tunstal・Inman⁷⁾、著者ら⁸⁾、Bijker・van Hijum・Vellinga⁹⁾ が実験的に渦に関する物理量を測定している程度である。

渦のスケールが砂漣の大きさに比例すると考え著者らの実験データより渦の面積と砂漣の断面積(波高×波長)の比を調べた。図-2は、横軸に砂漣の半波長毎の断面積、縦軸に渦の面積を取ったものである。岸側の直線勾配は0.4、沖側の勾配は0.25となり、渦のスケールと砂漣スケールの関係は

$$r_N = 0.4 \sqrt{\frac{\eta \lambda_N}{2\pi}}, \quad r_F = 0.25 \sqrt{\frac{\eta \lambda_F}{2\pi}} \quad \dots\dots\dots (6)$$

となる。ここに、 r_N は岸側斜面の渦の半径、 r_F は沖側斜面の渦の半径、 λ_N は砂漣の岸側半波長、 λ_F は砂漣の沖側半波長である。

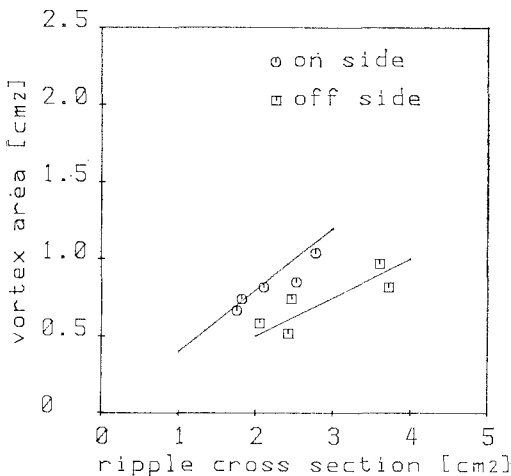


図-2 渦の面積と砂漣の面積

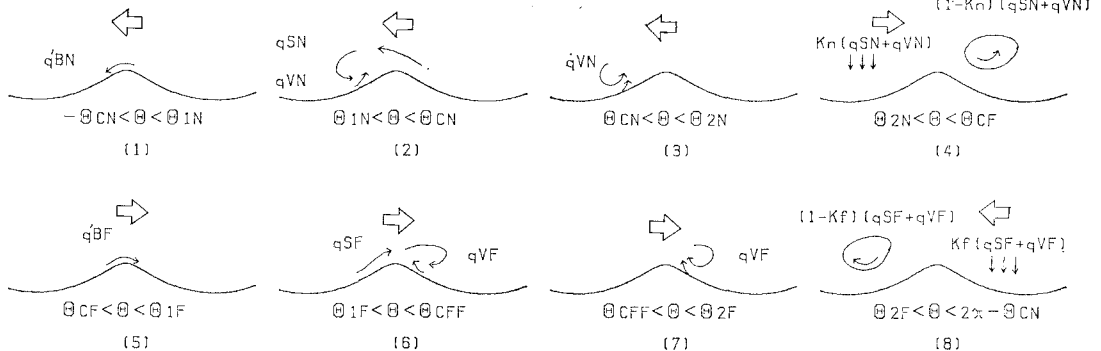


図-3 砂の移動状況

3. 砂粒子の輸送機構と流砂量

(1) 砂粒子の輸送機構

砂移動状況の模擬を図-3に示す。砂の移動開始及び停止する速度が同じと仮定すれば、砂の移動限界を越える位相になると岸向きの掃流砂 q'_{BN} が生じる(図-3(1))。さらに流速が増加し最大流速付近になると渦が形成され、この渦によって岸向きに移動している掃流砂は捕えられ浮遊砂 q_{SN} となる(図-3(2))。また渦によって底面から砂粒子が舞い上がり渦中に取り入れられ q_{VN} となる(図-3(3))。流れの方向が逆転し沖向きの流れとなると、岸側斜面の渦中の浮遊砂は、それを構成している砂粒子の一部を岸側斜面に堆積させながら沖側に移動していく(図-3(4))。沖向きの流れにおいても同様な砂移動を示す(図-3(5)~(8))。

(2) 掃流砂量

掃流砂としての移動量の算定は、波動場の掃流砂量公式が確立されていないために、沢本・山口¹⁰⁾が用いたように定常流における流砂量公式を用いることにした。ここでは簡単な形である Brown の流砂量公式を用いた。

$$\frac{q_B(t)}{\hat{u}_* d_s} = 10 \left\{ \frac{\hat{u}_* u_*}{sg d_s} \right\}^2 \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 $q_B(t)$ は単位時間、単位幅あたりの掃流砂量の容積、 $u_* = \hat{u}_* \cos \theta$ 、 $\hat{u}_* = \sqrt{C_f/2} (k' \hat{U}_\infty)$ 、 $\hat{U}_\infty$ は十分上方の流速の振幅、 C_f は抵抗係数であり、粗面平板での抵抗則を用い式(8)のように表わされる。

$$C_f = \left[2.87 + 1.58 \log_{10} \frac{x}{d_s} \right]^{-2.5} \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 x は砂漣の半波長、 k' は砂漣により加速される割合である。式(7)を前述の位相ごとに積分すれば、岸向きに移動する掃流砂量 q'_{BN} 、岸側斜面の渦に捕えられ浮遊砂となる q_{SN} 、沖向きに移動する掃流砂量 q'_{BF} 、沖側斜面の渦に捕えられ浮遊砂となる q_{SF} が計算される。

(3) 渦により連行される浮遊砂量

渦の形成が始まる位相を過ぎると形成された渦により

砂漣の斜面から砂が浮遊すると考えられる。今、渦の平均回転速度を $\bar{V}_\theta$ とし、この回転による運動エネルギーと底面より連行される浮遊砂の有する位置エネルギーとを等しいとおけば、式 (9) となる。

$$\frac{1}{2} m (\bar{V}_\theta \sin \beta)^2 = q_V (\rho_s - \rho) g \cdot 2r \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここに、 m は渦の単位幅当りの質量である。岸側斜面の勾配を $\sin \beta_N$ 、岸側斜面の渦の平均回転速度を $\bar{V}_{\theta N}$ すれば、岸側斜面の渦により浮遊する砂の量 q_{VN} は、一周期中の渦の存在時間を考慮すれば式 (9) より

$$q_{VN} = \frac{\rho r_N \pi}{4g(\rho_s - \rho)} (\bar{V}_{\theta N} \sin \beta_N)^2 \frac{(\theta_{1N} - \theta_{2N})}{2\pi} T \quad \dots\dots\dots (10)$$

沖側斜面より浮遊する砂の量 q_{VF} も同様に求まる。

$$q_{VF} = \frac{\rho r_F \pi}{4g(\rho_s - \rho)} (\bar{V}_{\theta F} \sin \beta_F)^2 \frac{(\theta_{1F} - \theta_{2F})}{2\pi} T \quad \dots\dots\dots (11)$$

渦の平均回転速度の算定は次のように考えた。岸向きの流れにおける渦の循環値 Γ_N は従来より式 (12)¹¹⁾ で与えられる。

$$\Gamma_N = \varepsilon_N \int_{\theta_{1N}}^{\theta_{2N}} \frac{1}{2} (k'_N U_\infty) \frac{d\theta}{\omega} \quad \dots\dots\dots (12)$$

ここに、 ε_N は岸側の vorticity fraction である。一方、渦の回転速度を用いて循環を表わすと式 (13) となる。

$$\Gamma_N = \oint V_{\theta N} \cdot dr \approx 2\pi r \bar{V}_{\theta N} \quad \dots\dots\dots (13)$$

式 (12) と式 (13) より岸側斜面の渦の平均回転速度は

$$\bar{V}_{\theta N} = \frac{\varepsilon_N}{2\pi r_N} \int_{\theta_{1N}}^{\theta_{2N}} \frac{1}{2} (k'_N U_\infty) \frac{d\theta}{\omega} \quad \dots\dots\dots (14)$$

となる。 ε_N 、 k'_N 、 θ_{1N} 、 θ_{2N} に関しては理論的な検討が充分でないため $\varepsilon_N = 0.6$ 、 $k'_N = 1.46$ 、 θ_{2N} は流速の方向が岸向きとなつて後の $7/8 \cdot \pi$ の位相の値を沢本・山下・栗田¹²⁾ にならうて用い、 θ_{1N} は岸向きの最大流速となる位相を用いた。沖側斜面の渦の平均回転速度も同様に求まる。

(4) 渦中の浮遊砂の減衰率

渦の発達停止後はいわゆる standing vortex の状態となり、この状態においては渦自身の回転が弱く渦中に含まれている砂粒子の一部が沈降し浮遊砂としての移動量が減少するものと考えられる。渦の舞い上がり高さが砂漣波高と同じ高さとなれば、岸側の渦中の浮遊砂の減衰率 K_N 、沖側の減衰率 K_F は

$$K_N = \frac{t_{VN} \cdot \omega_0}{\eta}, \quad K_F = \frac{t_{VF} \cdot \omega_0}{\eta} \quad \dots\dots\dots (15)$$

となる。ここに、 ω_0 は砂の沈降速度、 t_{VN} 、 t_{VF} は岸側、沖側の渦が standing vortex となり流れの方向が反転するまでの時間である。

(5) Net の移動量

岸向きに移動する砂の量を Q_{ON} 、沖向きに移動する砂

の量を Q_{OFF} とする。 Q_{ON} は岸向きに掃流砂として移動する q'_{BN} 、岸側斜面の渦中に含まれている浮遊砂のうち沈降し岸側斜面に堆積する浮遊砂 $(q_{SN} + q_{VN})K_N$ 、沖側斜面の渦中に含まれて沈降しないで岸側に運ばれる浮遊砂 $(q_{SF} + q_{VF})(1 - K_F)$ の和となり式 (16) のように表わされる。

$$Q_{ON} = q'_{BN} + (q_{SF} + q_{VF})(1 - K_F) + (q_{SN} + q_{VN})K_N \quad \dots\dots\dots (16)$$

同様に Q_{OFF} は

$$Q_{OFF} = q'_{BN} + (q_{SN} + q_{VN})(1 - K_N) + (q_{SF} + q_{VF})K_F \quad \dots\dots\dots (17)$$

Net 量 Q_{Net} は、式 (16) と式 (17) の差を

$$Q_{Net} = A(Q_{ON} - Q_{OFF}) \quad \dots\dots\dots (18)$$

ここに、 A は定数。

3. 計算結果

式 (18) の妥当性を調べるために、砂村・阪東・堀川¹³⁾ の実験データを用いて検討した。図-4 は横軸に実験値、縦軸には式 (18) で $A = 1/3.27$ とした理論値を用いた。移動方向は実験値、理論値共に沖向きとなり全て一致した。漂砂量に関しては、理論値は実験値をよく表わしており、式 (18) が成立すると言えよう。

図-5、6 に式 (18) で計算された結果を示す。縦軸に底質の粒径と沈降速度を用いた無次元漂砂量を取り横軸に波の非対称性を表わすアーセル数を用いた。図中無次元漂砂量の値が正の場合が岸向き、負の場合が沖向きの漂砂量を与える。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。このように波の特性の変化に伴い底質の移動方向が変化することは、これまでほとんど得られなかったものである。今後は計算結果を整理し移動方向、移動量が統一的に表示できるパラメーターを検討する予定である。

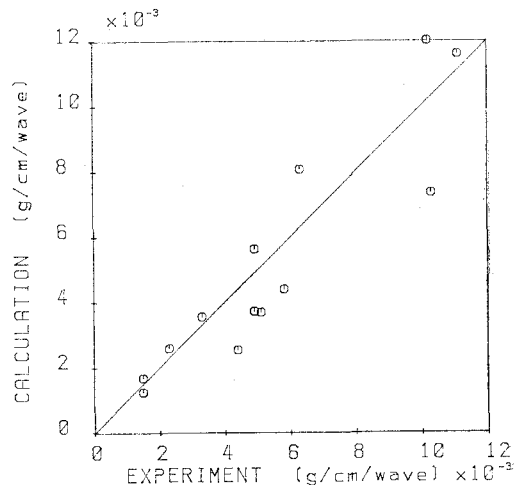
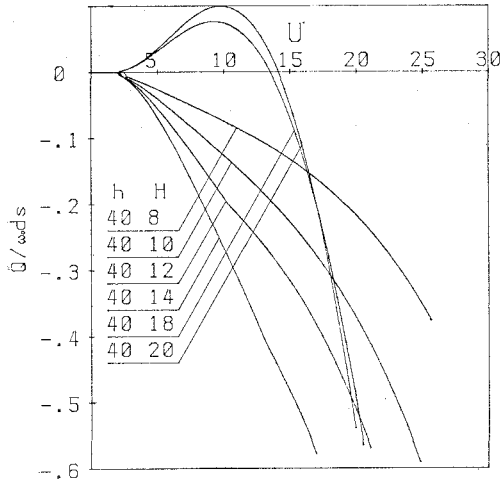
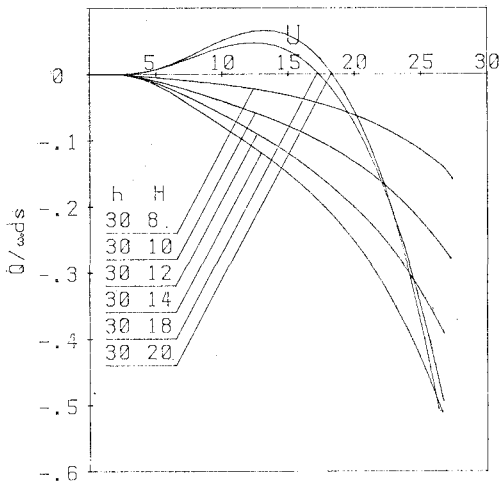


図-4 実験値と理論値の比較

図-6 計算結果 ($d_s=0.02$ cm)図-6 計算結果 ($d_s=0.03$ cm)

4. 結 論

既存の理論と大胆な仮定を用いて渦運動を考慮し、岸沖漂砂量の算定を試みた。波動場における掃流砂量の算定、砂漣上に形成される渦に関する物理量（例えば、渦のスケール、形成時間など）が未解決であり、式(18)中の定数 A についてもさらに検討が必要であるが、本研

究で得られた主な知見をまとめると以下の通りである。

- 1) 渦の大きさを砂漣スケールで近似でき、これによって渦の平均回転速度を求めることができる。
- 2) 本研究の漂砂量公式は砂漣上の渦に関する物理量に単純な仮定を用いているが、波と底質の条件のみで移動方向を明らかにすることができ、実験値に一致した。また、漂砂量も理論値は実験値をよく表わしている。

最後に、本研究の一部は文部省科学研究費補助金（自然災害）の援助により行ったものであることを付記する。

参 考 文 献

- 1) 野田英明・松原雄平：岸沖向き漂砂に関する研究，第27回海岸工学講演会論文集，pp. 197～201, 1980.
- 2) 砂村継夫：浅海域の岸沖漂砂量に関する実験的研究，第29回海岸工学講演会論文集，pp. 239～234, 1982.
- 3) 前出 1)
- 4) Komar, P. D. and Miller, M. C.: Sediment threshold under oscillatory waves, Proc. 14th Conf. on Coastal Eng., pp. 756～775, 1974.
- 5) 本間 仁・堀川清司・鹿島遼一：波による浮遊砂に関する研究，第11回海岸工学講演会論文集，pp. 158～163, 1964.
- 6) Bagnold, R. A.: Motion of waves in shallow water interaction of waves and sand bottoms, Proc. Royal Society of London, Series A, Vol. 187, pp. 1～15, 1964.
- 7) Tunstall, E. B. and D. L. Inman: Vortex generation by oscillatory flow over rippled surfaces, J.G.R., Vol. 80, No. 24, pp. 3475～3484, 1975.
- 8) 早川典生・辻本剛三・森下憲治：砂漣上の渦運動による浮遊砂輸送機構，第31回海岸工学講演会論文集，pp. 45～49, 1984.
- 9) E. W. Bijker, E. van Hijum and P. Veilinga: Sand transport by waves, Proc. 15th Conf. on Coastal Eng., pp. 1149～1167, 1976.
- 10) 沢本正樹・山口清一：波によって生じる砂漣近くの流れのモデル化と浮遊砂濃度の算定法，土木学会論文集，288号，pp. 107～113, 1979.
- 11) 前出 10)
- 12) 沢本正樹・山下俊彦・栗田敏寿：砂漣上の振動流境界層流れ，第27回海岸工学講演会論文集，pp. 226～229, 1980.
- 13) 砂村継夫・阪東浩造・堀川清司：非対称砂漣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.