

砂漣上の渦運動による浮遊砂輸送機構

早川典生*・辻本剛三**・森下憲治***

1. ま え が き

海底に砂漣を形成する場合の漂砂の運動機構と岸沖漂砂量の算定は、近年著しく研究の進展している分野ではあるが、実用的段階に達するには研究の余地が残されている。本研究では実験水槽において砂漣を発生させ、砂漣上の流れと砂粒子の運動を、ビデオカメラを用いて詳細に観察し、さらに流速計および濁度計により流速および浮遊砂濃度を時間的・空間的に詳細に測定することにより、浮遊砂輸送機構を考察しようとするものである。

2. 実験方法および実験条件

実験は、長さ 15m、幅 60cm、高さ 80cm の造波水槽に、長さ 2.5m、厚さ 10cm にふるいをかけた砂(中央粒径 0.3, 0.4mm)を敷きつめて行った。主として本報の解析の対象となった実験は 8 ケースであり、その実験条件を表一に示す。実験ケース中 Run 1-5 は造波機をフラッター型に、Run 6-8 はピストン型にして実験した。全実験を通して水面波形には非線型性が見られたが、その傾向は Run 6-8 において著しかった。従って得られた砂漣波形には非線型性が見られ、表一の最

表一 実験条件

Run No.	波 高 H (cm)	周 期 T (sec)	水 深 h (cm)	波 長 L (cm)	中央粒径 d_m (mm)	砂漣波長 λ (cm)	砂漣波高 η (cm)	非対称度 $\lambda_{off}/\lambda_{on}$
1	16.5	1.32	40	224	0.4	7.7	1.1	1.3
2	21.5	1.39	50	268	0.4	8.5	1.5	1.3
3	18.2	1.57	60	272	0.4	8.9	1.4	1.5
4	21.0	1.41	55	287	0.3	7.6	1.2	1.2
5	19.0	1.30	45	234	0.3	7.1	1.0	1.2
6	15.8	2.01	40	384	0.3	11.4	1.9	1.4
7	14.3	2.01	35	358	0.3	11.1	1.7	1.4
8	8.8	2.00	30	324	0.3	7.9	1.5	1.3

注) λ_{off} , λ_{on} は各々砂漣の沖側および岸側半波長

後の欄に沖側半波長と岸側半波長の比でこれを示す。
砂漣上の微細な流れの観測には、ビデオカメラとトレーサーを用いた。ビデオカメラは再生時に 0.02 秒間隔

でタイマーが表示され、波高計出力のシンクロスコープ画面を写し込むことにより、水面波形との位相関係を求めた。トレーサーには四塩化炭素とトルエン・銀粉を混合した中立浮遊粒子を用いた。また径 3mm のプロペラ正逆流速計と濁度計を用いて、砂漣のクレスト、トラフ、岸側斜面、沖側斜面上において流速と浮遊砂濃度の連続測定を行った。正味の漂砂量の測定は、50cm 区間モルタル製の固定砂漣で置き換え、堆積した砂の重量を測定することにより求めた。

3. 砂漣上の渦運動と流速分布

(1) 渦の発生・消滅について

砂漣上には、振動流により岸側・沖側斜面上に交互に渦が発生し、砂粒子をまき上げる事実は良く知られている。本実験でも砂漣上に渦の発生を観察した。一般に渦は、岸向きまたは沖向き流速が最大になる付近で、各々岸側・沖側斜面に発生する。これは最大流速時に圧力勾配が流れ方向に逆勾配を呈し、流線が剝離し易くなるためである。Tunstall and Inman¹⁾は「平衡状態」の砂漣上の渦の発生位相は、最大流速と一致すると報じている。しかしながら、砂漣波形と流速値の組み合わせによっ

て、必ずしも一致するとは断定できない。

砂村ら²⁾は $\pi/6$ の位相遅れを観測している。

本実験ではビデオ再生画面でトレーサー粒子と砂粒子の動きを観察し、明確に渦の発生を観察される時刻 t_1 を求めた。表二にこの値を示す。ただしこ

では最大流速時を基準にしている。同様にビデオ画面において、渦が明確には認め難くなる時刻 t_2 (仮に渦の消滅時刻と呼ぶ) も求め、表二に示した。この t_1, t_2 を砂漣上の最大流速値でプロットしたのが図一である。図にはまた、Tunstall and Inman の測定値、および辻本³⁾の観測値も示した。図から、 t_1, t_2 共に最高流速の増

* 正会員 Ph.D. 長岡技術科学大学教授 建設系
** 正会員 工 修 神戸市立工業高等専門学校講師 土木工学科
*** 工 修 丸磯建設株式会社

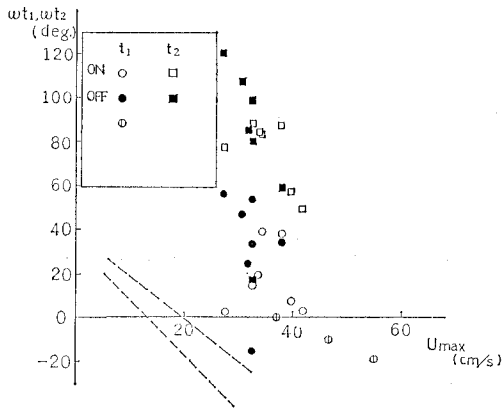


図-1 砂漣上の渦発生 (t_1), 消滅 (t_2) 位相
(○ は辻本, 破線は Tunstall and Inman)

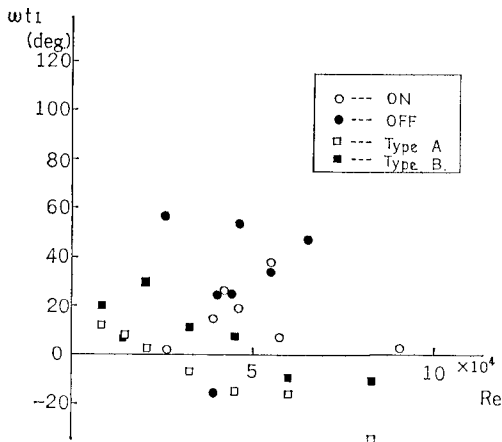


図-2 渦発生位相 (○ 印: 著者, □ 印: 文献 1))

加と共に位相の早まる傾向が読み取れる。

渦発生, 消滅の判定は, 必然的に主観を伴うものであるが, 図-1 の傾向を認めるならば, 支配する無次元量について考察できる。本間・堀川⁴⁾によると, η/λ , η/d_0 , λ/d_0 , $u_{\max}d_0/\nu$, w_0d/ν の 5 無次元量が考えられるが, λ/d_0 はほぼ一致であるので, η/d_0 および $Re = u_{\max}d_0/\nu$ について調べてみた。その結果 t_1 , t_2 の η/d_0 依存性は小さく, Re の方が依存度は大きかった。図-2 に t_1 についてこれを示す。図から t_1 は Re の増加と共に減少の傾向を示すが, 点群のパラッキも大きく, 関数関係まで明確にはし得ないように思われ, 将来の課題である。

(2) 流速分布と渦循環値

砂漣クレスト上の流速鉛直分布の

例を図-3 に示す。流速・時間曲線は, ほぼどの点にあっても水面波形と同位相であった。図-3 に示すように, 砂面直上の流速値には加速効果が見られた。これを $z = 3.0\text{ cm}$ 以上の最高流速値 U_∞ の割合, すなわち $k' = u_{\max}/U_\infty$ として表わした時の値を表-2 に示す。 k' の岸向流速 (ON) と冲向流速における値は, 岸向流速の k' が若干高めではあるが, 有意といえる程の差ではない。全体的に見て k' の値は沢本⁵⁾の得た値をやや下回っている。

砂漣上の渦運動による微細な流速の変化は, トレーサ

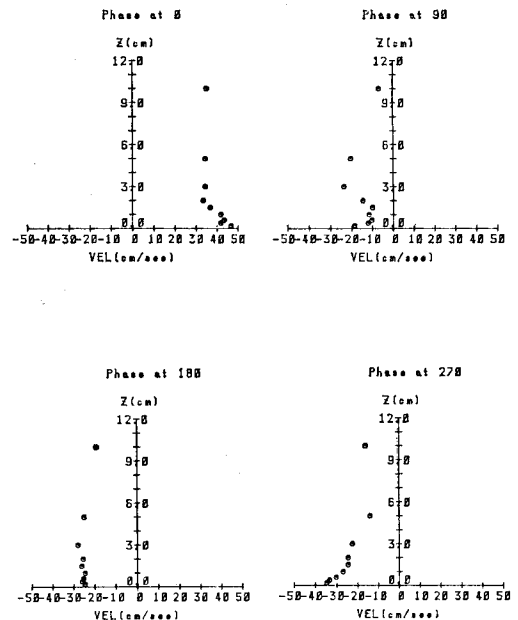


図-3 流速鉛直分布 (砂漣頂, 位相基準は最高水位, 流速値正は岸向き)

表-2 渦運動測定値

Run No.	Side	U_∞ (cm)	k'	t_1 (sec)	t_2 (sec)	$2r$ (cm)	$\bar{v}$ (cm/sec)	Γ (cm ² /sec)	ϵ
1	ON	25.0	1.30	0.05	0.32	0.97	12.2	37.7	0.43
	OFF	25.0	1.30	0.55	0.67	0.81	9.2	23.6	0.47
2	ON	30.3	1.25	0.15	0.34	1.15	10.0	47.8	0.36
	OFF	30.3	1.25	0.80	0.90	1.11	10.9	48.8	0.54
3	ON	19.2	1.44	0.01	0.34	1.04	11.5	37.6	0.63
	OFF	18.9	1.40	0.82	1.10	1.02	11.2	37.5	0.76
4	ON	25.1	1.34	0.08	0.34	1.02	12.7	40.7	0.46
	OFF	24.5	1.30	0.82	1.06	0.97	12.4	37.8	0.61
5	ON	25.6	1.34	0.14	0.30	0.92	14.1	40.0	0.66
	OFF	24.4	1.33	0.80	0.97	0.86	14.0	37.8	0.71
6	ON	30.3	1.45			2.40	14.6	110	0.42
	OFF	22.0	1.56			2.19	8.92	61.4	0.83
7	ON	30.0	1.40	0.02	0.28	2.21	16.4	114	0.54
	OFF	23.6	1.29	1.26	1.60	2.08	7.8	51.0	0.58
8	ON	28.5	1.40	0.04	0.32	2.20	13.7	95.0	0.46
	OFF	24.0	1.55	1.33	1.58	2.12	7.7	51.3	0.84

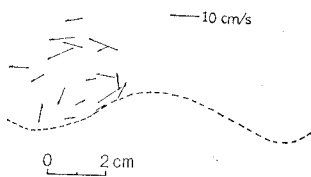


図-4 砂漣上流速ベクトルの例

一粒子の追跡により求めた。図-4 はこのような測定結果の一例である。これらの図から、渦運動の観察されるおおよその範囲（渦のスケール）と、渦の回転周辺速度を求めた。これらの値を $2\bar{r}$, $\bar{v}$ として表-2 に示す。また渦の持っている循環値 Γ を、近似的に次式で求め、同じく表-1 に示した。

$$\Gamma = \oint \mathbf{u} \cdot d\mathbf{r} \doteq 2\pi \bar{r} \bar{v} \dots\dots\dots (1)$$

沢本ら⁵⁾は渦の循環値 Γ を次式のように求めている。

$$\Gamma = \varepsilon \int_{t_1}^{t_2} \frac{1}{2} (k' U_{\infty} \cos \omega t)^2 dt \dots\dots\dots (2)$$

ここで ε は vorticity fraction 係数である。

ここでは本実験の測定結果を用いて、良く性質の分らない ε を求めた。すなわち Γ を (1) 式から求め、(2) 式の積分値を求めて ε を計算した。その際、 t_1 , t_2 は表-2 で得られた値を用いた。結果を表-2 に示す。

表-2 から岸側斜面の循環値 (Γ_{ON}) は沖側斜面の循環値 (Γ_{OFF}) より大きく、その比は 1~2 であることが分る。この比は、砂漣の幾何学的形状（例えば表-1 の非対称度）だけでは今のところ表し得ない。表-2 の数値は岸側斜面に形成される渦の方が強いことを示しており、砂村らの冲向き漂砂量の卓越を裏付けるものである。

ε についても、平均的には沢本ら⁵⁾と同程度の値を得た。さらに沖側斜面と岸側斜面の値の比、 $\varepsilon_{OFF}/\varepsilon_{ON}$ は、1~2 と大きな値を示した。 Γ_{OFF}/Γ_{ON} が 1 以下であるにもかかわらず、このような結果を得たのは、沖側斜面上の渦の寿命時間 $t_2 - t_1$ が、岸側斜面上の値よりも小さいことを意味している。

4. 浮遊砂濃度分布と漂砂量

(1) 浮遊砂濃度分布

図-5 に Run No. 6 の岸側斜面 (ON), 沖側斜面 (OFF) 上, 0.2 cm, 3.0 cm における、濁度計による浮遊砂濃度の変化を示す。位相の原点は最大流速時である。従って位相 90 度までは流速は岸向き、90° から 270° 過ぎまでは冲向きである。図は岸向き輸送砂量の大部分は岸側斜面で、冲向き輸送砂量の大部分は沖側斜面で発生することを示している。このことは、岸側斜面と沖側斜面に発生する渦の強さと一致している。すなわち、0-90° の岸向き流れ時に岸側斜面上に発生した強い渦によってまき上げられた砂粒子が、沖側斜面上で冲向き輸送砂量の主要部分をなし、岸向き輸送砂量についても同様なことが云えるものと思われる。

図-6 に一周期平均した浮遊砂濃度の鉛直分布図を示

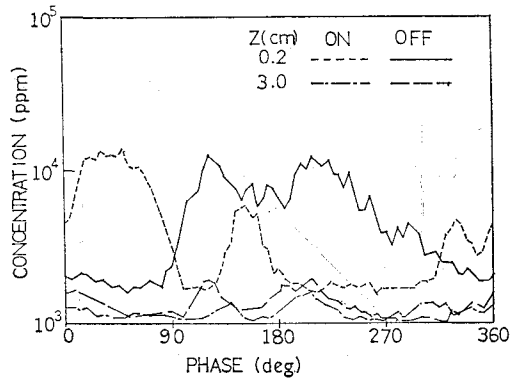


図-5 浮遊砂濃度・時間曲線 (Run No. 6, ON: 岸側斜面, OFF: 沖側斜面)

す。本実験における浮遊砂濃度の鉛直分布は、大体において直線状であったが、トラフ上ではほぼ砂漣頂の高さまで一定値の“く”の字型を呈することが多かった。これらの分布から求めた鉛直拡散係数は、 $z=1\sim 2$ cm 以内で 10^2 cm²/sec の大きな値を示すこともあるが、大体において $10^0\sim 10^1$ cm²/sec の値であった。

図-6 の $z=0$ 近傍の濃度、いわゆる基準点濃度に関しては、沢本らの研究、橋本ら⁶⁾の研究があるが、ここでは後者の考えを本実験結果に適用して見た。この考え方は、“渦層”内浮遊砂の位置エネルギーを、渦の持つエネルギーに等しいとするもので、本実験の成果である岸側斜面上と沖側斜面の値の相違を考慮すると次式で計算される。

$$C_0 = \left[\left(\frac{\Gamma}{t_2 - t_1} \right)_{ON} + \left(\frac{\Gamma}{t_2 - t_1} \right)_{OFF} \right] \frac{\sigma}{(\sigma/\rho - 1)} \dots\dots\dots (3)$$

ここで σ , ρ は各々砂・水の密度である。

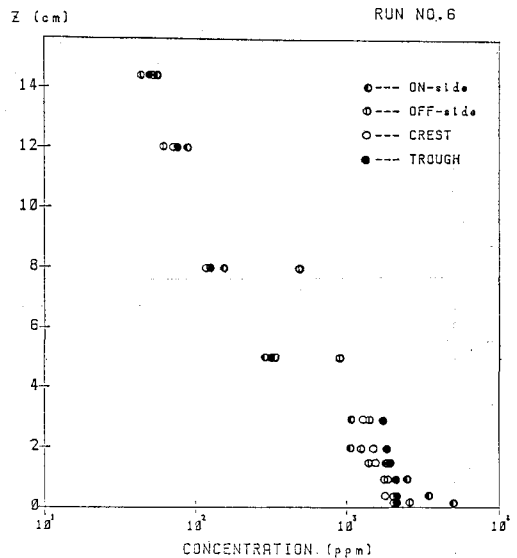


図-6 一周期平均浮遊砂濃度鉛直分布

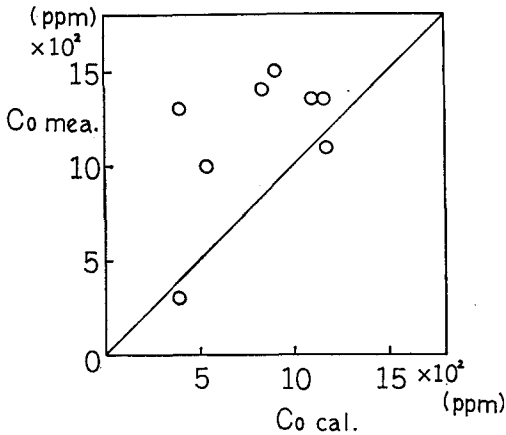


図-7 基準点濃度の測定値と計算値

図-7に(3)式による計算結果と、測定結果の比較を示す。図より(3)式はある程度の傾向は示すものの、計算値はやや小さい値を与える場合が多かった。

なお、砂村ら³⁾は渦中の浮遊砂濃度を次式で表わしており、

$$C = k'_2 \rho \frac{u_{\max}(u_{\max} - u_c)T}{\nu} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$k'_2 = 4.2 \times 10^{-7}$ を得ているが、本実験の結果をあてはめると、 $k'_2 = 4.2 \times 10^{-8}$ という結果を得た。

(2) 正味の漂砂量

浮遊砂を伴う時の正味の(一周平均した)漂砂量は沖向きであるとはしばしば言われていることであるが、本実験においても大体において沖向きであった。測定は前述したモルタル砂漣に、50波の波をかけ、沖側端よりに堆積した砂を岸向き漂砂量とし、岸側端よりに堆積した砂を沖向き漂砂量とした。

前述の如く、正味の漂砂量は岸沖斜面上に発生する渦の不均衡によるものと思われるので、無次元化した正味の漂砂量 $Q/w_0 d_m$ (ここで w_0 は沈降速度) を、 Γ_{ON}/Γ_{OFF} でプロットしたのが図-8である。図-8はこの

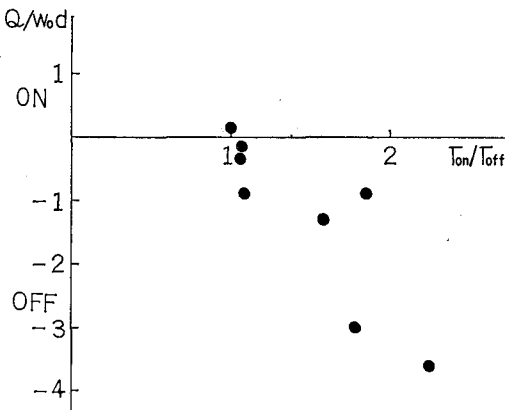


図-8 正味の漂砂量と循環値比

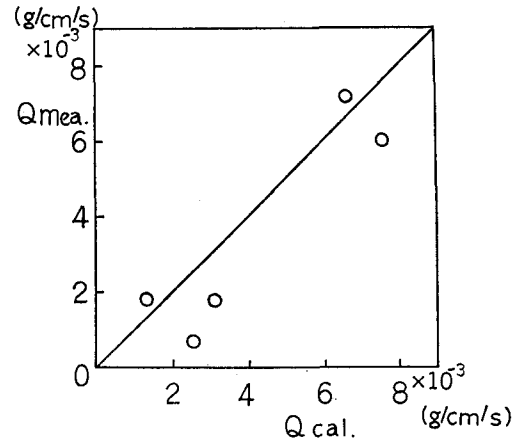


図-9 正味の漂砂量の測定値と計算値の比較

考えの正しいことを示唆しているが、ここから直ちに有用な公式に直結するものではない。

正味の漂砂量に関しては、砂村ら³⁾が、形成直後の浮遊砂雲中の砂の量に等しいとして提唱した算定式がある。本実験結果にその式をあてはめると、図-9の結果を得る。ただし、前述の k'_2 と、渦の大きさを表現する係数 k_1 に連う値(9.8, 砂村らは4.9)を使わねばならなかった。浮遊砂全量を考慮し、浮遊砂雲の挙動を追跡するモデルが必要であるように思われる。

5. おわりに

限られた条件の下であるが、実験水槽における実験結果から渦運動と浮遊砂機構について知ることができた。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) 砂漣上に明確に渦が発生、消滅する位相は、最大流速と水粒子軌道長を用いたレイノルズ数に強く依存する。
- 2) 砂漣の岸・沖側斜面上にできる渦の循環値は、岸側で大きく、寿命時間も長い、従って vorticity fraction 係数 ϵ は沖側で大きい。
- 3) 浮遊砂濃度の分布から岸向き輸送砂量の大部分は岸側斜面で、沖向き輸送砂量の大部分は沖側斜面で発生する。
- 4) 基準点濃度については橋本ら²⁾の考え方が適用できる。
- 5) 正味の漂砂量は Γ_{OFF}/Γ_{ON} と強い相関がある。

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) Tunstall, E. B. and D. L. Inman: Vortex generation by oscillatory flow over rippled surfaces, J.G.R., Vo. 80, No. 24, pp. 3475~3484, 1975.

- 2) 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.
 - 3) 辻本剛三：修士論文，長岡技術科学大学，1982.
 - 4) Homma, M. and K. Horikawa: Suspended Sediment due to Wave Action, Coastal Engrg., 1963.
 - 5) 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と浮遊砂濃度の算定法，土木学会論文報告集，No. 288，pp. 107～133，1979.
 - 6) 橋本 宏・辻本剛三・早川典生：大規模砂漣上の流速分布と浮遊砂濃度，第29回海岸工学講演会論文集，pp. 244～248，1982.
-