

砂漣と水面の波との関連について

東京工業大学 正員 工博 吉川秀夫

東京工業大学 正員 工修 〇福岡捷二

1 まえがき

砂漣の発生と伝播は流砂量や流れの抵抗と関連して實際上非常に重要である。しかし現段階では現象が複雑なため次元解析や単純化したモデルを使用して砂漣の発生、伝播の現象を説明しようとしているが、その力学機構を十分説明するまでには至っていない。

この中で Anderson - Kennedy - Reynolds による一連の研究は興味深い。彼等は完全流体の微小振中波の理論を用いて水面の変動が速度の変動を引き起し、砂漣の発生、伝播を促すという考えから dune - antidune の発生や卓越波長などについて考察している。しかし発生の原因を水波に求めると次の2点で矛盾を生じる。

- 1) 自由表面が存在しない管路中でも砂漣が生じる。
- 2) 水深が深くなり、水面変動が底面において砂漣発生に影響を持たないと考えられる時にも砂漣が発生する。

著者らはこれらの矛盾を含まずに砂漣の発生、伝播の機構を説明するため次のモデルを考えた。即ち実際の流れは多数の流体塊(渦粒子)の不規則な運動からなるものと考え、渦粒子が速度変動を引き起し、砂漣の発生、伝播を促す。この渦粒子には大小種々のものがあり、それらの作用により種々の大きさの砂漣の発生、消滅をくり返し、最終的な砂漣の形態は流れに依じた最も卓越した渦によるものと考え。ここで渦を特長とするものとして如何なるものを用いるかが問題である。

一般には速度変動や圧力変動から定からであるが、これらの測定は難かしいので水面変動で代表させる。水面変動と速度変動の関連について、糸井⁽¹⁾の研究で殆どと同期が一致することが報告されている。乱流場は種々の大きさの渦から成立しているが、砂漣に結びつける代表渦径として、自己相関係数から定義される最小渦径は、速度変動やエネルギーの消散に特に大きく作用するので、本研究では代表渦径の1つの目安として最小渦径を用いる。

2 実験装置と方法

実験水路は長さ8m、中0.4mの鋼製環流式可変水路であり、水路中央部は両面ガラス張りである。実験に用いた砂は平均粒径0.015mm、比重2.65の一般的な普通標準砂である。

水面変動の測定は抵抗線式波高計を水路中央部縦断方向に25cm間隔に3本据えつけ、次の3段階について測定した。

- ① 砂漣の発生開始時
- ② 砂漣が水面との関連のもとに次第に発達している時
- ③ 十分長い時間を経過し、砂漣がほぼ平衡状態に達している時

河床変動は③の段階に相当した砂漣が十分発達した平衡状態に達したものについて、水路中央部縦断方向にポイントゲージで1cm間隔に測定した。

3 計算方法

水面の時間的な変化の記録を1つの時系列量とみなし波高の自己相関係数 $R(\tau)$ を求めた。

計算に用いたデータは 0.02 sec 間隔 1000 個でずらし数を 200 個である。

一河床変動は 通水後水路中央部を縦断方向に測定し同様に自己相関係数 $R(L)$ を求めた。

計算に用いたデータは 400 個 ずらし数 150 個、ずらし間隔 1.0 cm である。

計算精度を調べたため水面については $N=1700$ 河床については $N=600$ まで ずらし数もそれぞれ 300, 200 まで大きくして比較してみたが上述の信頼度で十分信頼できる結果が得られることがわかった。計算は東京大学大型計算センター HITAC 5020 によった。

水面とそれに対応する河床の変動の自己相関係数の例を図1, 図2に示す。

前述の如く代表波径(最小波径) λ は 乱流理論と同様に自己相関係数からそれぞれ λ_e が求まる。一例を図3に示す。

Taylor によれば homogeneous field で流水の平均速度 $\bar{U}$ と変動速度 u の関係が $\bar{U} \gg u$ であれば近似的に

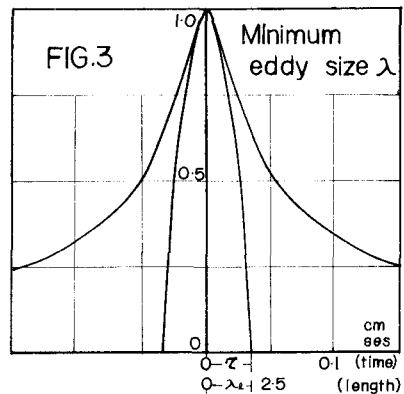
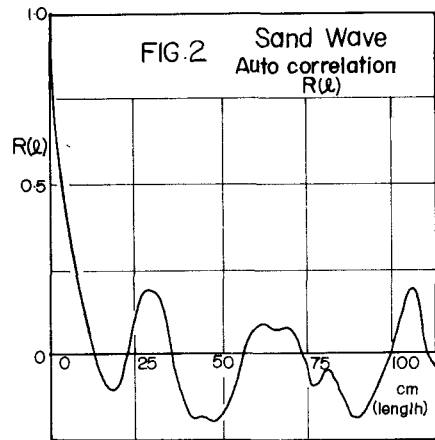
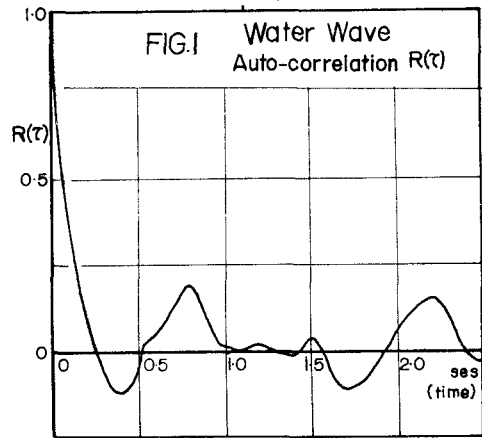
$$\lambda_e = U\tau = \lambda_c$$

$$U = \bar{U} + C_g$$

が成立する。この関係は必ずしも homogeneous field であっても壁面の極く近い所でなければ非等粘性剪断流についても成立することが認められている⁽²⁾。上式は砂運の特性長 λ_e と代表波径(最小波径) λ_c との関係である。 $\bar{U}$ は流水の平均流速であり C_g は水面の波の観測から種々の波長の波が群をなしその群が相次いで伝播していく群波の形をとると予想される。水深が浅いので 群波の波速は浅水波の波速 C_1 とすると

$$C_g = \frac{C_1}{2} \left\{ 1 + \frac{4\pi h}{L} \cdot \frac{1}{\sinh \frac{4\pi h}{L}} \right\}$$

長波の波速 $\sqrt{gH}$ とこれらの間には次式が成立する。



$$C_q < C_i < C_s$$

図-1から明らかなように水面の波に明確な周期性がなく卓越波長、同期を決めることは困難であるので便宜的に長波の式で計算し実験の範囲では $C_q = (0.55 \sim 0.7) \cdot C_s$ より群波速度 C_q を換算する。その結果表-1に砂漣の特性長 λ_e と渦の代表径 λ_t との関係が砂漣の発達段階と共に比較されている。

表-1

実験番号	J_1 T_1	J_2 T_2	J_3 T_3	T_m (sec)	Q (l^3/sec)	h (cm)	I	F_r	U (cm/sec)	C_q (cm/sec)	λ_t (cm)	λ_e (cm)
A-①	0.05	0.04			8	5.4	$\frac{1}{270}$	0.51	37.0	44.0	3.0	2.9
A-③	0.032	0.04		0.035								
B-①	0.066	0.064	0.068		10	8.0	$\frac{1}{300}$	0.35	31.2	53.0	3.8	3.4
B-②	0.085	0.086	0.085									
B-③	0.043	0.050	0.04	0.045								
C-①	0.08	0.07	0.05		7	4.5	$\frac{1}{200}$	0.60	39.0	47.0	4.6	4.8
C-②	0.07	0.06	0.05									
C-③	0.055	0.055	0.048	0.053	7	3.6	$\frac{1}{150}$	0.82	48.6	42.0	4.1	4.0
D-①	0.052	0.055	0.034									
D-③	0.047	0.043	0.045	0.045								
E-①	0.05	0.05	0.032		7	4.3	$\frac{1}{180}$	0.62	40.6	46.0	3.5	3.7
E-②	0.058	0.053	0.043									
E-③	0.042	0.040	0.038	0.04								

ここで同一時刻に3点 ($J=1, 2, 3$) で測定した T の値はほとんど同一値であるので それぞれの平均値をもって各時刻の T とし又砂漣のスペクトルから求めた λ は③の段階の λ に対応する。

3 結果の考察と今後の研究の方向

現段階では資料数が少なく 又限られた範囲の水理条件についてしか実験を行っていないが表-1の結果から次のことがいえる。

1. 平衡状態が達成された段階では 砂漣の特性長 λ_e と代表渦径 λ_t の系統的な説明がつかうのである。しかし砂漣の発生時 及びその発達過程での代表渦径 λ_t は最終段階の λ_t と同じではなくやや大きいことがわかった。今後 砂漣の最終段階ばかりでなく種々の発達段階について調べ 砂漣の時間的な変化を代表渦径 λ_t との関連のもとに調べる必要がある。
2. 自己相関係数から推定される砂漣は Yandom 性の他に 比較的明確な周期性がある。これに対し水面の変動は 周期性が殆んどみられず Yandom 性の強い変動を示す。

この研究は 砂漣の発生、伝播は大小種々の渦による速度変動であり、最終的な砂漣は流れの最も卓越した渦(代表渦)で起るという著者の研究の第一歩であり、或る程度確められたことである。

今後はこの点を更に明らかにするため 水面に一定の波を送った場合、Yandom な擾乱を水面に与えた場合、底に固定した二次元的な砂漣を与えた場合、などこれから推定される λ_t と砂漣から定まる λ_e の間にも前述の関係が成立するかどうか検討中である。

更には 前述の如く砂漣に関して 比較的周期性が認められるので 周期性と代表渦径 λ_t との関係や水理量との関係についても検討するつもりである。

参考文献

- (1) 細井, 杉山: 流れの中に発生する波の実験的研究(第一報) 第10回水理講演会講演集
- (2) 日野輯雄: 河川の乱流現象, 1966年度水工学に関する要期研究会講義集 A. 河川, ダムコース。