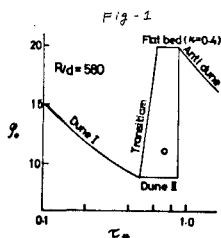


北 大 正 員 ○ 森 明 巨
 北 大 〃 岸 力
 東北電力 〃 佐々木哲郎

1. はじめに 前回⁽¹⁾と同様に移動床流れにおける流速、砂面、水面の変動を測定し、それぞれの統計的な特性を調べた。実験水路は長さ20m、巾1mである。砂面及び水面変動は水路下流端より1/2mの水路中央で砂面計を用い20秒毎に測定した。流速変動は砂面計より左岸より18cm、平均河床より9cm地床で直径18mmの小型フロウ流速計を用い1秒毎に測定した。測定は、予め7時間通水し河床波が充分発達したと思われる時より10時間行なった。実験条件は、水面勾配 $I=1/500$ 、平均水深 $H=14.8\text{cm}$ 、平均流速 $\bar{U}=57.4\text{cm/sec}$ 、 $F_r=\bar{U}/\sqrt{gR_b}=0.50$ 、河床砂平均粒径 $d_{50}=0.23\text{mm}$ 、であった。(RUN-23) 河床形状は、図-1に示される様に岸、黒木⁽²⁾の方法によると dune と思われる。



2. 砂面変動と水面変動の特性 図-2に、そのスペクトラム $S_y(f)$, $S_z(f)$ が示されている。日野⁽³⁾は、そのスペクトラムに慣性領域の存在を仮定し、次元解析より(1)式を得た。

$$S_y(f) \propto f^{-2}, f_0 < f < f_1; \quad S_y(f) \propto f^{-3}, f < f_0 \quad (1)$$

図-2中に実線で示される様に(1)式で近似される領域が認められた。 $f > 0.07\text{ sec}^{-1}$ では $S_y(f) \propto f^{-2} \sim f^{-3}$ であり、ripple に対応するものと思われる。

図-3に、そのそれぞれの標準偏差の比 σ_z/σ_y と $F=\bar{U}/\sqrt{gH}$ の関係が示されている。図中に示されている実線は(2)式である。

$$\sigma_z/\sigma_y = F^{1/2}/(1-F^2) \quad (2)$$

Kennedy⁽⁴⁾は、移動床土の流に2次元 potential flow と仮定し、砂面と水面の形に正弦波を与え、それぞれの振巾比 $A(t)/a(t)$ と(3)式の様に導かれた。

$$A(t)/a(t) = FkH / (FkH - \tanh kH) \cosh kH \quad (3)$$

すなわち、図-2からわかる様に低周波領域で大きなエネルギーを持っている。そこで、(3)式が $k \rightarrow \infty$ で成立するとし、 $kH \approx 0$, $1/A \approx \sigma_z/\sigma_y$ とすると(3)式は(2)式で近似される。

図-4に、その間のコヒーレンシー $\gamma(f)$ 、位相差 $\theta(f)$ が示されている。図によると γ と θ は比較的低周波の範囲で相関を構っている。位相差は、ごく低周波の領域では $\theta \approx \pi$ であるが、 θ は f の増加とともに増加し、 $f \approx 2\text{ cycle/hr}$ では $\theta \approx 3/2\pi$ になっている。これは、ある周波数成分の変動において、水面の山又は谷が、砂面の谷又は山より下流側にあることを意味する。同様な傾向が、図-4中に示される様に他の水理条件でも見られた。⁽¹⁾

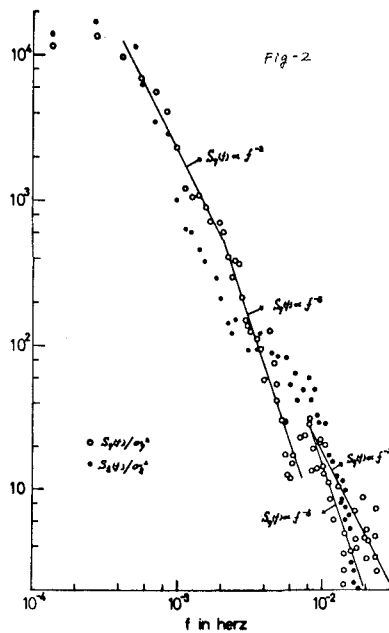


Fig-3

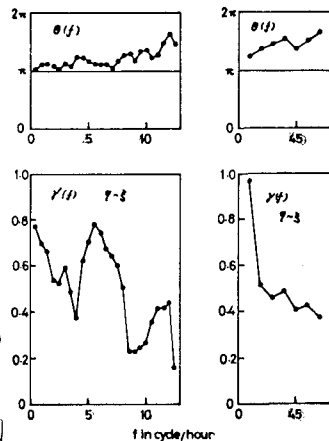
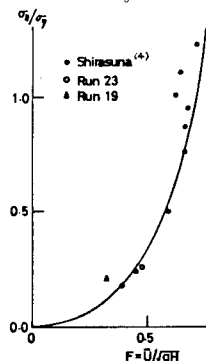


Fig-4

2. 移動床流れにおける流速変動 u の特性と u の図形

図-5 に u のスペクトラム $P_u(f)$ が示されている。黒丸は、 u に 3.3 秒の移動平均を施したものから求めたものであり、白丸は、 u から 60 秒以下の低周波成分を cut し、切り取り中 5.6 秒で short time spectrum を計算し、その平均値から求めたものである。図中の実線は、図-2 中に示されたものと同一のものである。図より、 u の低周波成分が河床波の移動による平均流の変化によるものであることがわかる⁽⁹⁾。一斉、 $f > 0.02 \sim 0.03$ hertz では、河床波の振巾は著しく近くなり、乱流境界層による乱れの領域と見られる。

乱流境界層の乱れの特性を次の採目方法を調べた。
すなわち、 u に比べ時間的にゆっくり変化する。従って、ある微小時間 Δt を考えると、 Δt 内では u はその時の河床形状に対する近似的に定常な乱れと見なすことが出来る。今、 $\bar{u}$ 、 u_s を (4) 式の様に定義すると、それらを近似

$$\bar{u}(t) = \frac{1}{\Delta t} \int_{t-\Delta t}^{t+\Delta t} u(t') dt', \quad u_s(t) = \frac{1}{\Delta t} \int_{t-\Delta t}^{t+\Delta t} \{u(t') - \bar{u}(t')\}^2 dt' \quad (4)$$

的にある河床形状に対する流速測定点での平均流速、乱れのエネルギーとみる事ができる。本報告では、図-5 の結果より $\Delta t = 40$ 秒とした。ところで、それとそれの Δt での乱流構造は、そのときの河床形状に依存するが測定を長時間行はうと、任意の点の乱流構造が類似する様相境界条件が何回か発生するであろう。この様な境界条件を判定するのに u_s を用い、それは u_s に比べ河床形状との対応性、従って、乱流構造との対応性は良くなりと思われる。ある範囲の u_s とする区間につき、Short time spectrum の平均値を求めた。得られた結果が図-6 に示されている。図からわかる様に $u_s > 40$ と $u_s \leq 40$ では、乱流構造に大きな違いが認められた。

表-1

NO	u_s の範囲	区間数	$\bar{u}_s$	U	H	T_E	L_x/H
1	0~5	288	4.05 cm/sec	32.8 cm/sec	13.8 cm	0.88 sec	5.3
2	5~10	748	7.32	78.0	14.5	0.98	5.3
3	10~15	383	12.10	74.5	15.3	1.10	5.3
4	15~20	137	17.00	72.9	15.9	1.16	5.3
5	20~40	87	26.77	69.1	15.7	1.07	4.7
6	40~60	11	50.09	60.8	15.1	1.13	4.5
7	60~	14	92.20	53.5	21.0	1.50	3.8

$u_s > 40$ では、流速変動は特殊の構造をしているが、Allen⁽⁴⁾ によりと次の様に解釈される。河床波の crest 下流において、自由流線近傍の速度の速さの異なる層の間に、Helmholtz instability により crest より規則的な大きな渦の剥離が起り、crest のすぐ下流では、流速変動は規則的でありある周波数成分が卓越する。

それとそれの u_s での Macro scale と水深の比 $L_x/H = U T_E/H$ のおおよその値と次の様に求めてみた。(U , H は、それ

ぞれの u_s での平均流速、平均水深である。) 流速変動のエネルギーと u_s^2 とおくと、 $T_E = P_u(f)/u_s^2$ である。ここで、 $P_u(f) \approx P_u(f=0.028 \text{ hertz})$ とし、表-1 に示す様な結果が得られた。今回の測定では、 u の記録は 1 秒の平均値であるので $f > 1 \text{ hertz}$ の成分は cut されている。今、 $f \geq 0.5 \text{ hertz}$ で $P_u(f) \propto f^{-9/5}$ と仮定し、 u_s^2 を概算すると実測値の 2 倍程度となり、た。このことを考慮すると、移動床流れにおける乱流境界層の乱れでは $L_x/H \approx 2$ 程度と推定さ

れ、自然河川で得られた結果⁷⁾と同程度の大きさである。

図-7に $U_0 \leq 40$ のときのそれぞれの区間のスペクトラムを U_0, T_0 で基準化したものが示されている。図によると、 $P_u(f)$ は f のかなり広い範囲で $P_u(f) \propto f^{-0.5}$ に近似され、自然河川で得られたものと幾分違った傾向を示している。 U_0 の記録は1秒の平均値であるが Aliasing の効果を考えるとスペクトラムの形にそれはほとんど影響が及ぼさなれるものと思われる。(Fig-5参照) Bradshaw & Wong⁸⁾ は、flat plate 上に種々の obstacle を置いた乱流境界層に関しての点を指摘した。「obstacle 下流の剥離域において、逆流する量が多いと乱れに存在する大きな渦は Reattachment point において2つに分割され、乱流構造は大きく変化し、その影響はかなり下流まで持続する。」Cramer⁹⁾ は、大気乱流において地表付近で $P(f) \propto f^{-n}$, $n < 5/3$ となる原因を「地表から、地表粗度の1/10倍程度の高さでは、大きな渦は障害物により小さな渦に分解されやすく、低周波領域から高周波領域へエネルギーが輸送されるため」としている。又、Allen は、「crest 下流で発生する規則的な大きな渦(vortices)は、流下とともに小さな渦に分解され乱れの要素となる」と述べている。これらのことを考慮すると図-7に示された様な乱流構造は充分あり得るものと思われる。この様な傾向は、白砂の実験¹⁰⁾、芦田の実験¹¹⁾、及び出水時における自然河川での測定¹²⁾、普者うの他の水理条件での実験(図-8)においても見られた。

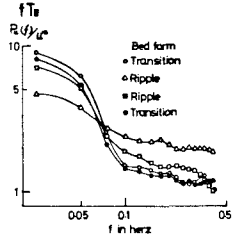
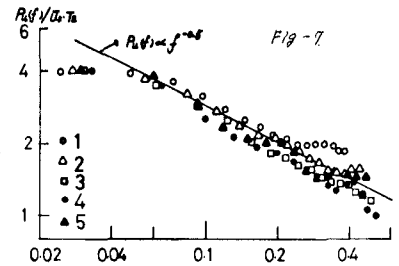


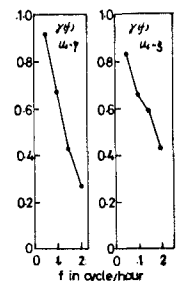
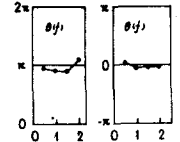
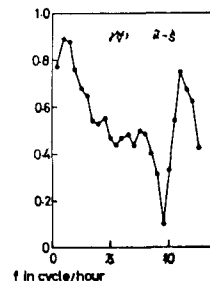
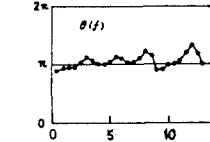
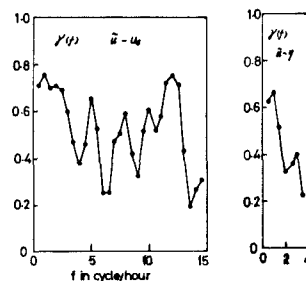
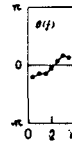
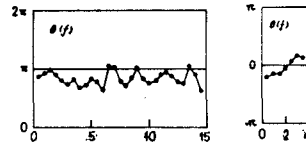
図-9に $\bar{u}$, U_0 の $\theta(f)$, $\theta(f)$ が示されている。図によると $\bar{u}$, U_0 は f のかなり広い範囲にわたって相関をもっている。 $\theta(f)$ は平均的に 2π よりやや小さい。図-10, 11に $\bar{u}$, U_0 と θ , θ の間の相関がそれぞれ示されている。これらの相関は、 $\bar{u}$ の測定誤と θ , θ の測定誤が違ぐため、高周波領域では信頼性に乏しい。お、よとの傾向をみると、低周波領域において相関が大きく、河床が谷のとき流速は小さく、乱流強度が大きくなることばわがかる。

4. おわりに 図-3, 4, 10の結果は、河床波が充分発達した流れにおいて、卓越波長に対応する低周波領域では、流れを2次元 potential flow で近似できる可能性を示している。

乱流境界層の乱れの構造は、流れの剥離の影響を大きく受けているが、より高周波領域の乱れを測定し、その構造により明確にし、流れの mechanism を調べる基礎としたい。

実験及びデータの整理には、当時本学学生波辺達君の熱心な協力を得た。ここに、記して謝意を表します。

参考文献 1) 岸、森、黒木；土木学会第27周年講義、II-130, 1973. 2) 岸、黒木；土木工学部研究報告第67号, PP1~23, 1973. 3) 日野；東工大土木工学科研究報告NO.4, PP30~34, 1968. 4) 白砂；電中研技二研報告NO72003, 1972. 5) Kennedy; Annu. Rev. Fluid Mech. vol 1 PP147~168, 1969. 6) Allen; Current Ripples, PP13~16, PP222~226, 1968. 7) 岸、森、佐々木；土木学会第27周年講義II-97, 1973.



8) Bradshaw & Wong; J. F. M. vol 52 PP12~18, 1972. 9) Cramer; Meteor. Monog. vol 4, PP12~18, 1960. 10) 芦田他；京大防災研年報第12号B PP449~462, 1969. 11) 芦田他；京大防災研年報第13号B PP1~11, 1970.