

砂漣河床における浮遊砂について Suspended Sediment with Rippled Bed

埼玉大学工学部 正員 池田 駿 介
埼玉大学工学部 正員 浅 枝 隆

1. 序

一方向流中の浮遊砂については従来数多くの研究が見られるが、そのアプローチには二種類の手法が比較的良好に用いられている。一つはRouse¹⁾に代表される拡散型モデルであり、浮遊砂の濃度分布や流体の速度分布について数多くの成果が挙げられている。他の一つはLane & Kalinske²⁾によって提案された河床付近の乱れと浮遊砂の巻き上げを直接結びつける手法である。近年、実験水路³⁾や自然河川^{4) 5)}において河床波及びそれに付随する大規模乱れと浮遊砂の強い関連性が指摘され、拡散モデルにおいて仮定されている平面内での一様な乱流場における浮遊現象ではなく、非一様場における浮遊現象の解明が次第に必要となりつつある。

本研究は砂漣を有する移動床実験および砂漣モデルによる乱れと浮遊砂濃度変動の測定によって浮遊砂の巻き上げ機構や大規模乱れの構造・役割を考察するものである。

2. 実験装置及び手順

実験は巾40cm、長さ10mの可変勾配水路を用いて行なわれた。実験砂は中央粒径0.18mm、均等係数1.3の細砂を用いた。実験は水路実験とモデル実験から成り立っている。水路実験は固定床実験と移動床実験に分けられる。固定床実験では砂が水路床に堆積しないよう給砂量を調節し、ピトー管および採水器を用いて流速および濃度の測定を行った。移動床実験においてはあらかじめ2.5cmの厚さに実験砂を敷きつめ、砂漣の発達とともに浮遊砂の濃度が変化して行く過程と発達した砂漣近傍の浮遊砂の挙動を前記の測定装置の外に光電式濃度計を用いて調べ、更にスリット光線を用いて可視化を行った。図1に光電式濃度計の試験結果を示す。

モデル実験では三次元形状を有する砂漣を詳細に測定し、石膏を用いてモデルを作製した。実際の砂漣はよく不規則性が見られるので、復元に際しては写真1(b)に示される円柱背後に形成された砂漣を原型として用い、長さのスケールはYalin⁶⁾の結果に習い、粒径の約1000倍程度の20cmとした。

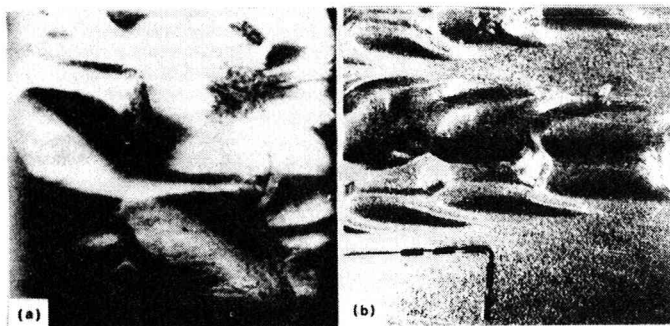


Photo 1. Ripples generated: (a) naturally; (b) artificially by inserting a circular cylinder. Note the resemblance. Flows are from right to left.

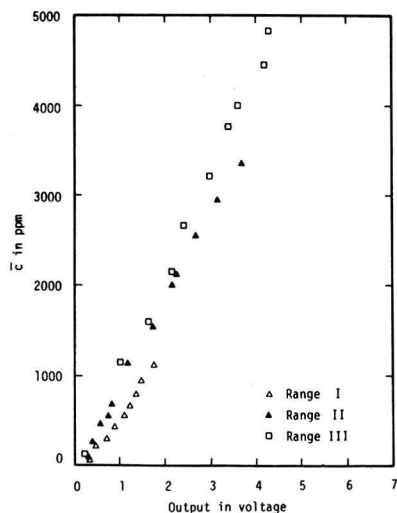


Fig. 1. Calibration of electro-optical concentration meter.

モデル実験では砂漣の側面で発生する上昇流の成分を熱膜流速計を用いて測定し、その後に前述の細砂を上下流にわたって十分に撒き、同じ地点で光電式濃度計を用いて浮遊砂の濃度変動の測定を行った。これらの測定は大規模乱れによる浮遊現象を対象としている為に、測定間隔は0.1秒とし、全測定時間は100秒とした。

3. 水路実験の結果

固定床および移動床における平均流の流速分布の例を図2に示す。この内Run 7は移動床の場合に対応しており、砂漣側面の強い上昇流（バースト）中で測定したので流速分布の一様性が高く、Karman 定数は1.07にも達している。

図3はこれとともに測定された濃度分布をRouseスケールを用いて整理したものである。固定床の場合にはRouse分布に極めてよく従い、 β = 質量拡散係数/運動量拡散係数も約1.5程度と妥当な値であるが、移動床の場合には巻き上げの激しい地点で測定した故もあって β の値は2.4程度とかなり大きくなっており、三次元性の砂漣が発生した場合には大規模な対流性の乱れによって砂の浮遊が行なわれていることを示唆している。

写真2はこれらの結果を可視化によって確かめたものである。写真中、浮遊している砂粒子は黒く写っているが、右の方に見える砂漣頂部の後側面から間歇的に砂が浮遊されている様子がよく見える。

平坦な移動床に水を流し始めると、まず横断方向に縞状の二次元的な砂漣が発生し、その後に三次元的な砂漣へと発達して行く（このように発達した砂漣は写真1(b)に示されている）。このとき浮遊砂の状況を観察すると、通水直後の縞状の砂漣の状態では浮遊砂の舞い上がり高さは低く、かつ浮遊砂量も極めて少ないが、砂漣が三次元形状へと変化して行くにつれて砂漣後側面から砂粒子は活発に浮遊され、それとともに浮遊砂量も顕著に増大する。このとき底面に働く平均摩擦速

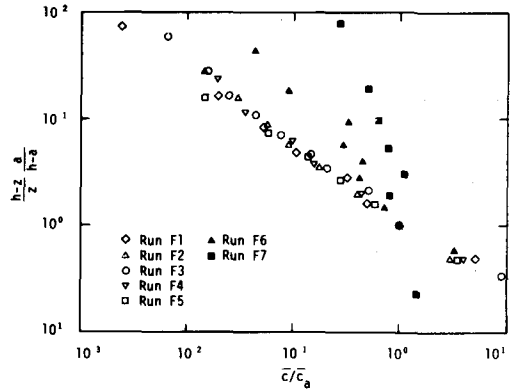


Fig. 3. Distribution of c/c_a scaled by the Rouse law.

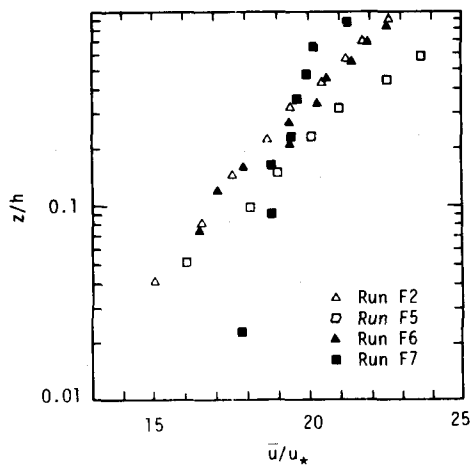


Fig. Vertical distribution of $\bar{u}/u_*$.

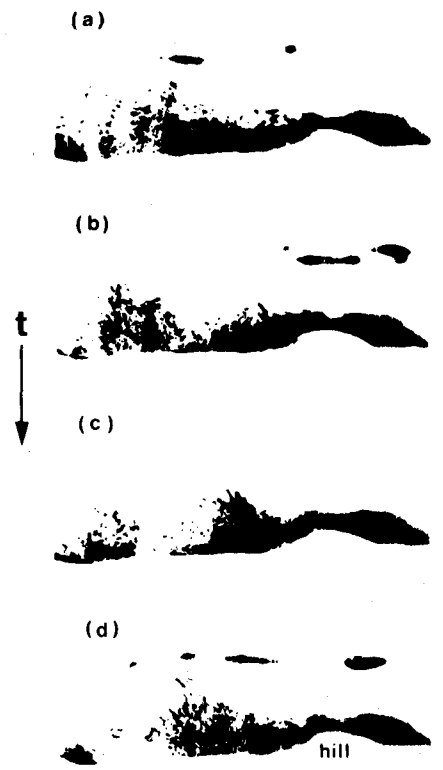


Photo 2. Intermittent ejection of sediment. $\Delta T = 1/6$ sec.

度はほとんど変化しなかったことから、浮遊の機構が変化したと考えられる。

図4は砂漣が発達した後に光電式濃度計を用いて濃度変動を記録した一例である。砂漣頂部では濃度は小さく、かつ変動も小さいのに対して砂が盛んに巻き上げられている凹部では濃度は大きく、又変動も大きいことが知られる。

図5は砂漣の形状変化に伴う浮遊砂濃度の変化を示したものである。砂漣が二次元的である場合と比較して時間が経過し、砂漣が三次元形状へと発達するにつれて濃度は飛躍的に増大することが知られ、先述の目視による観察を裏付けている。

4. モデル実験の結果

まず、三次元砂漣モデル近傍の流れの概況を知る為にモデル近傍に過マンガン酸カリウムの細粒を散き、底面流線を調べる。更に水素気泡法を併用して流れの構造を把握した。

底面流線の概要を図6に示す。非常に明確な再付着線が砂漣頂部横の凹部に見られる。それよりも砂漣頂部寄りでは流線は砂漣に向い、砂漣斜面上向き成分を得、その後流れは反転し同時に下流方向の成分を得る。このように剥離線よりも内側の流れは縦渦構造を形成している。剥離線よりも外側の流れはこのような縦渦は形成せず、下流へ向う。このような流れの構造は水深を変えてもほとんど変化を示さなかった。

このような過マンガン酸カリウムによる観察および水素気泡法による観察では砂漣頂部背後に存在するリッジの斜面において最も上昇流が強く、又その強さは一定ではなく間歇性を示していた。この結果は写真2に示されている移動床実験の結果とよく一致し、砂漣頂部の後側面から間歇的に砂が浮遊される事実を裏付けている。

上昇流が最も顕著であった図6の点Aにおいて熱膜流速計を用いて流れの鉛直成分 w を測定した。測定点の高さは底から $\eta = 3, 5, 10, 20$ mmの高さであって、 $\eta = 20$ mm の場合は主流の影響もを受けていると考えられる。

鉛直方向成分 w の確率密度分布の一例を図7に示す。 $\eta = 3, 5, 10$ mmの各高さにおいてはその分布形は正規分布形を示し

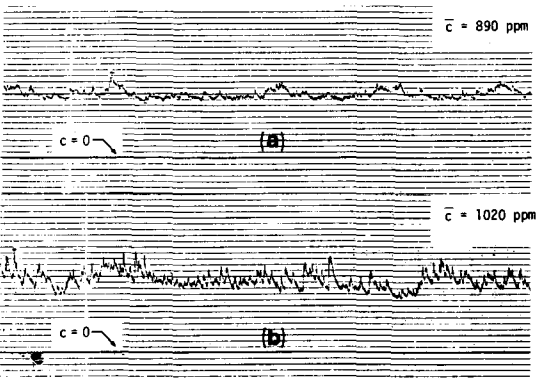


Fig. 4. Time history of concentration at: (a) above the hill; (b) depression.

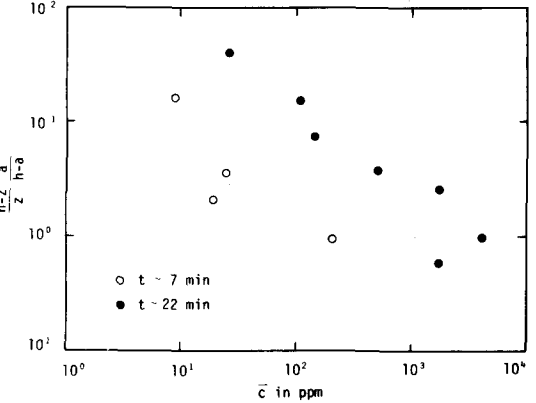


Fig. 5. Variation of c with time. Run F8.

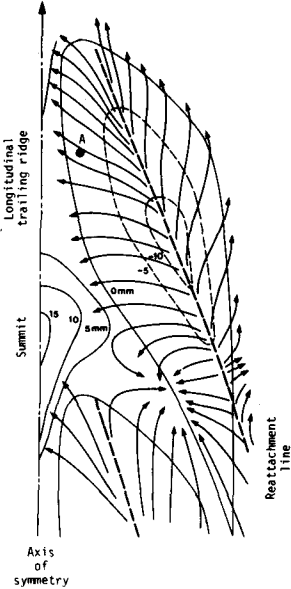


Fig. 6. Streamlines on the bottom.

$$f(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(\omega-1)^2}{2\sigma^2}\right) \dots\dots\dots(1)$$

となる。ここに σ は標準偏差、 $\omega = w/\bar{w}$ である。この例では $\sigma = 0.18$ であって、この値は流れの条件が変化してもほとんど変化がなかった(表1を参照)。 $\eta = 20\text{mm}$ に対しては対数正規分布がよくあてはまり、

$$f(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma\omega} \exp\left[-\frac{(\log\omega)^2}{2\sigma^2}\right] \dots\dots\dots(2)$$

と表現される。このとき $\sigma = 0.4$ が実際の測定値をよく表わした。

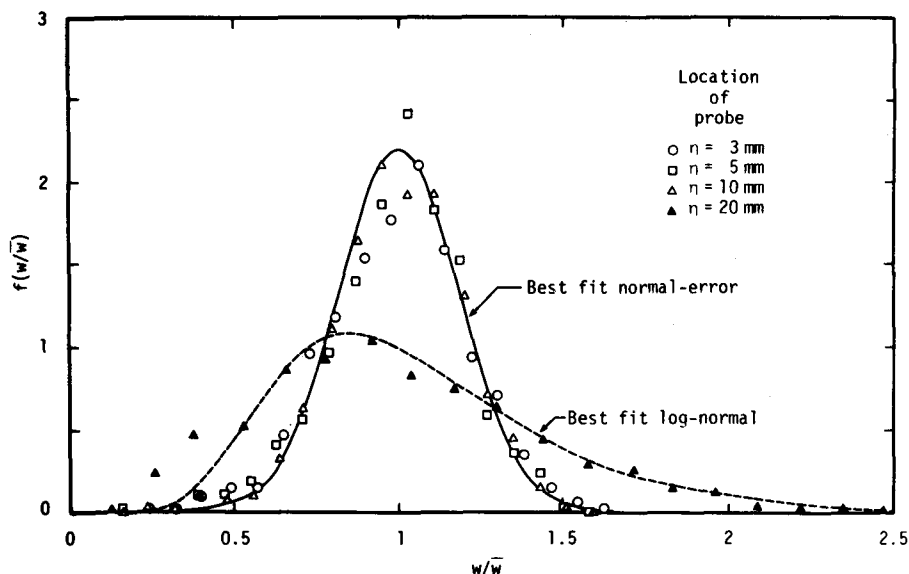


Fig. 7. Probability density function of $w/\bar{w}$ at point A. Run M4.

Table 1. Summary of data for model test-vertical fluid velocity.

Run number (1)	η , elevation in millimeters (2)	Q, in cubic centimeters per second (3)	h, depth in centimeters (4)	U, mean velocity in centimeters per second (5)	S, slope of free surface (6)	Reynolds number (7)	u_s , shear velocity in centimeters per second (8)	$\bar{w}$, mean vertical velocity in centimeters per second (9)	σ , dimensionless standard deviation of w (10)
M1	3	1,920	5.97	8.04	1/5,130	2,350	1.07	2.94	0.27
	5							4.01	0.18
	10							3.20	0.20
	20							1.32	0.54
M2	3	4,000	6.77	14.8	1/1,230	4,680	2.33	5.88	0.23
	5							7.41	0.16
	10							7.07	0.21
	20							3.76	0.45
M3	3	6,370	7.54	21.1	1/1,000	7,220	2.72	8.24	0.23
	5							9.54	0.16
	10							8.87	0.20
	20							4.65	0.42
M4	3	8,140	8.84	23.0	1/980	8,810	2.98	8.59	0.20
	5							9.38	0.18
	10							9.18	0.18
	20							4.69	0.40
M5	3	10,650	9.59	27.8	1/580	11,300	4.02	9.50	0.22
	5							12.08	0.19
	10							9.75	0.24
	20							6.72	0.40
M6	3	13,240	10.40	31.8	1/520	13,600	4.41	12.55	0.19
	5							15.47	0.15
	10							11.70	0.21
	20							7.23	0.41

点 A における上昇流の時間平均 $\bar{w}$ と平均流速 U の関係を図 8 に示す。各高さにおいて $\bar{w}$ と U の間には直線関係が存在し

$$\bar{w} = \alpha U \dots\dots\dots(3)$$

と表わすことができる。ここに α は比例定数であって $\eta = 3, 5, 10, 20\text{mm}$ に対して各々 0.38, 0.46, 0.39, 0.23 であり、 $\eta = 5\text{mm}$ 近傍において上昇流の流速は最大となっている。

点 A における浮遊砂平均濃度 $\bar{c}$ の測定結果を U に対して図 9 にプロットしている。 $\bar{c}$ は U の増加に対応して急速に増大し、その関係は次式の通りである。

$$\bar{c} = 7.42 \times 10^{-10} U^8 \dots\dots\dots(4)$$

観測された最大濃度 $c_{\max}$ も同図に示されているが、上式と同様な関係が存在することが知られる。

もし、浮遊砂のような細砂が遅れなく流速変動に従うと仮定すれば、式(3)および(4)から次のような関係を仮定することができる。

$$c = r w^8 \dots\dots\dots(5)$$

ここに r は比例定数である。式(5)の平均は

$$\bar{c} = r \bar{w}^8 \dots\dots\dots(6)$$

である。 $\bar{w}^8$ は確率密度関数 $f(\omega)$ を用いて

$$\bar{w}^8 = \int_0^\infty f(\omega) w^8 d\omega \dots\dots\dots(7)$$

と表わせる。式(1)を(7)に代入すれば、

$$\bar{w}^8 = 6.138 \bar{w}^8 \dots\dots\dots(8)$$

となる。従って式(5)、(6)および(8)から

$$\frac{\bar{w}}{w} = 1.255 \left(\frac{c}{\bar{c}} \right)^{\frac{1}{8}} \dots\dots\dots(9)$$

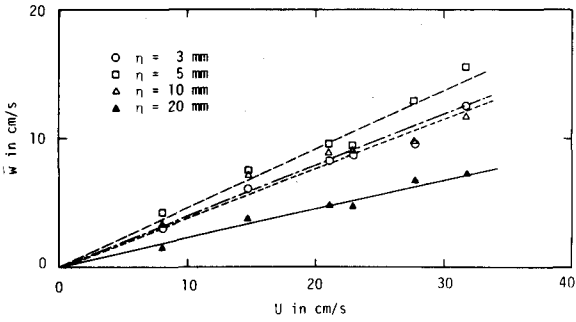


Fig. 8. Relation between $\bar{w}$ and U at point A in Fig. 6.

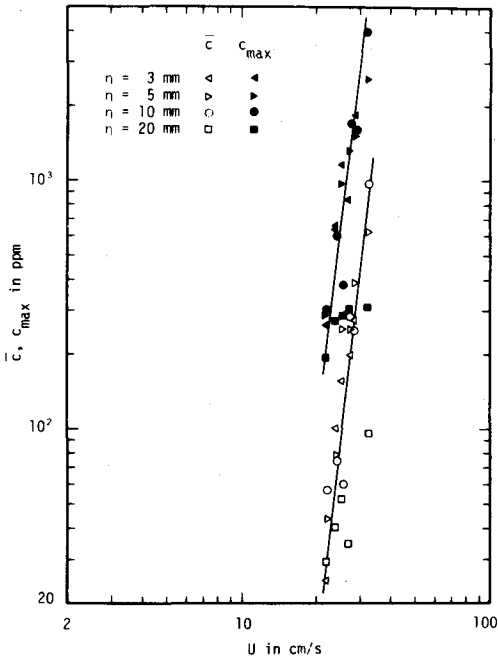


Fig. 9. $\bar{c}$, $c_{\max}$ plotted against U measured at point A in Fig. 6.

を得る。

以上の結果を用いれば、式(9)を式(1)に代入することにより、浮遊砂濃度の確率密度関数 $g(c/\bar{c})$ を導くことができる。結果は次の通りである。

$$g\left(\frac{c}{\bar{c}}\right) = \frac{1}{0.4512} \exp\left\{-15.43\left[1.255\left(\frac{c}{\bar{c}}\right)^{\frac{1}{8}} - 1\right]^2\right\} \quad \dots\dots\dots (10)$$

予測された確率密度関数 $g(c/\bar{c})$ の分布形を図10に示す。濃度変動の測定値から得られた確率密度分布を同図に同時にプロットしているが、ピークの位置の若干の違いはあるものの、概ね両者は一致しており、以上の考察によって浮遊砂濃度の確率密度分布に見られる歪みを説明することができる。

このように三次元砂連近傍における浮遊砂の巻き上げは砂連側背部に形成される縦渦がひきおこす間歇的な上昇流に起因することが明らかとなった。

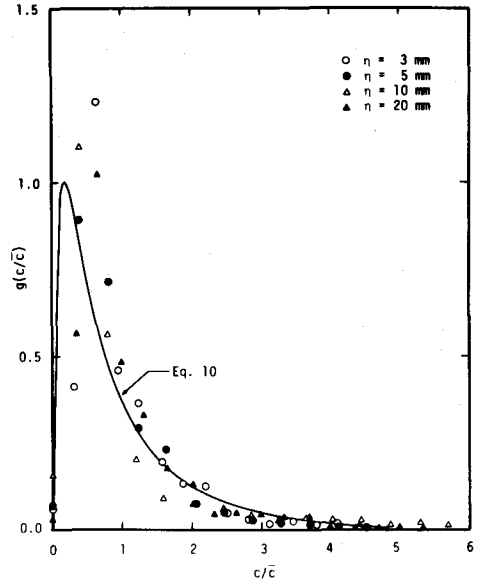


Fig. 10. Probability density function of $c/\bar{c}$ at point A. Run M10.

Table 2. Summary of data for model test-concentration of suspended sediment.

Run number (1)	n , elevation in millimeters (2)	Q , in cubic centimeters per second (3)	h , depth in centimeters (4)	U , mean velocity in centimeters per second (5)	S , slope of free surface (6)	Reynolds number (7)	u_s , shear velocity in centimeters per second (8)	$\bar{c}$, mean concentration in part per million (9)	λ , dimensionless standard deviation of c (10)
M7	3	8,870	8.71	25.5	1/740	9,670	3.40	157	0.76
	5							255	0.67
	10							60	0.78
	20							53	0.74
M8	3	6,930	7.89	22.0	1/1,680	7,780	2.15	25	0.76
	5							44	0.57
	10							57	0.65
	20							30	0.63
M9	3	9,830	9.00	27.3	1/1,080	10,600	3.29	198	0.51
	5							255	0.73
	10							286	0.82
	20							35	0.83
M10	3	8,090	8.41	24.0	1/725	9,050	2.76	104	0.77
	5							80	0.85
	10							75	1.09
	20							41	0.85
M11	3	10,400	9.09	28.6	1/380	11,400	3.51	279	0.47
	5							392	0.59
	10							250	1.01
	20							-	-
M12	3	12,900	9.93	32.5	1/380	13,700	5.04	161	0.81
	5							633	1.00
	10							980	0.68
	20							99	0.48

間歇的な上昇流は一般にバースト、又は水表面に現われればボイルと呼ばれ、この発生周期を他の水深や流速のような水理量と関連付けて研究した例は多くみられる。ここでは浮遊砂濃度 c の時間変動測定値からエネルギー・スペクトルを求め、このような大規模乱れとの関連性を考察した。図11にその内のいくつかの例を示す。スペクトルは周波数の増加とともに減少するものの、途中でピークが見られる。このピークは写真2で示したように浮遊砂の間歇的な巻き上げに起因するものと考えられ、これから得られる巻き上げの周期 T を外部変量 h (水深) および U (平均流速) で無次元化し、図12に UT/h をレイノルズ数の関数として示した。従来大規模乱れのバーストの周期として報告されている値 $UT/h \approx 5$ 程度⁴⁾ とはよく一致しており、浮遊砂がこのような間歇的な大規模乱れと密接な関係にあることを示唆している。

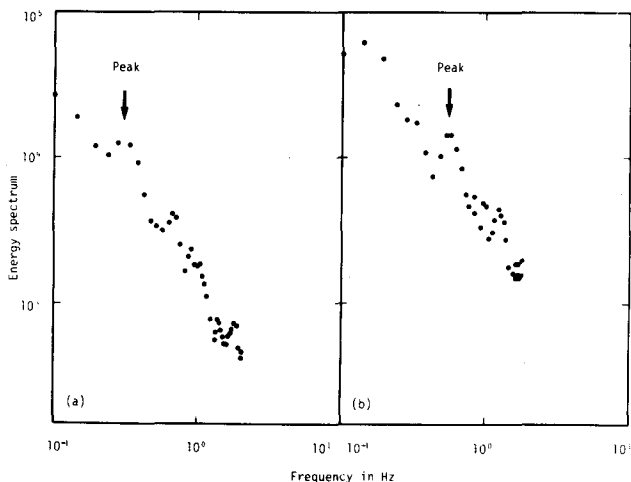


Fig. 11. Energy spectrum of c for: (a) Run M10; (b) Run M12 $\eta = 20$ mm at point A. Note the peaks. The same tendency is also found for other runs.

5. 結 語

移動床およびモデル実験の結果、以下のことが明らかとなった。

(1) 浮遊砂濃度は砂漣の三次元性の増大とともに増加し、浮遊砂は砂漣頂部の後側部から間歇的に巻き上げられる。

(2) 砂漣近傍では縦渦とそれに伴う強い上昇流が形成されており、この上昇流の時間変動の確率密度分布は正規分布となる。

(3) 浮遊砂濃度の確率密度分布形は正の歪みを示しており、予測式(10)によってよく表しうる。

(4) この間歇的な上昇流による浮遊砂の巻き上げ周期は $UT/h \approx 5$ 程度である。

本研究に際して文部省科学研究費（代表芦田和男京都大学教授）の補助を受けた。記して謝意を表します。

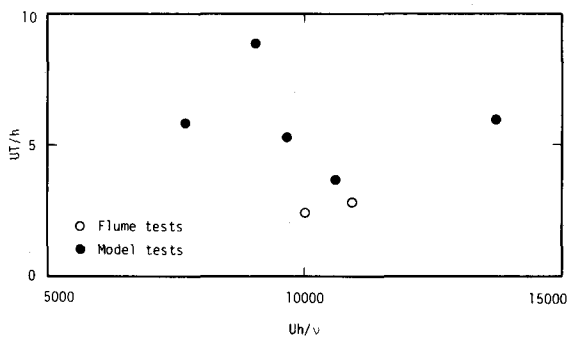


Fig. 12. Burst periodicity scaled by h , U .

REFERENCES

- 1) Rouse, H., "Modern Conception of the Mechanics of Turbulence," *Transactions, ASCE*, Vol. 102, 1937.
- 2) Lane, E. W. and Kalinske, A. A., "The Relation of Suspended to Bed Material in Rivers," *Transactions, American Geophysical Union*, Vol. 20, 1939.
- 3) Tsuchiya, A. and Hoshihata, K., "On the Suspension Mechanism of Sediment," *Proceedings of Annual Meeting, JSCE*, Vol. 25, No. 2, 1970 (in Japanese).
- 4) Coleman, J. M., "Brahmaputra River - Channel Process and Sedimentation," *Sedimentary Geology*, Vol. 3, 1969.
- 5) Jackson, R. G., "Sedimentological and Fluid-Dynamic Implications of the Turbulent Bursting Phenomenon in Geophysical Flows," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 77, 1976.
- 6) Yalin, M. S., "Geometrical Properties of Sand Waves," *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, Vol. 90, No. HY5, 1964.