

砂礫河床上の乱れ特性(第一報)

松岡保正*

Turbulent structure of flow over gravel river bed.

Yasumasa MATSUOKA

The field measurements of turbulence are carried out in the Chikuma river and the Sai river, using 3 electro-magnetic flowmeter.

Estimations of turbulence are made for the results of the observations. In this paper, vertical distributions of turbulent characteristics are represented.

The following results are obtained from this observation.

- 1). The values of Reynolds stress and energy dissipations decrease uniformly with height. Some of the observation data show that the distribution pattern of the Reynolds stress has turning point of a curve.
- 2). The scale of energy containing eddies increase with height. When Z/H equals to 0.8, the scale takes the value of about $10H$.

1. ま え が き

日本の川は大陸系の河川とくらべ、川の源流部から海に到達するまでの距離が短かく、河床勾配が急である。また、ずば抜けた大河が無いかわりに、同じ位の規模の川の数が多く、延長 20km 以上、流域面積 150km^2 以上の川は約260にのぼる。こうした小規模の川の大半は、山地から急勾配で流下するため、大量の土砂を運び出し、結果として、かなりの粒径の石を含む砂礫河床を形成している。

砂礫河床は、出水時にはかなりの厚さで移動する為、上流・中流域では洗掘による河川構造物の崩壊等を引き起こす大きな原因となる。護岸や水制等を利用した安全な河川管理の為には、そうした礫床河川の流れの構造を把握しておく必要が有る。

本研究は、礫床河川の乱流構造を解明するために、先ず、礫床河川における現地観測から鉛直乱流場における乱れの諸特性を明らかにしようとしたものである。

2. 観 測 方 法

一口に砂礫河床上の流れと言っても、出水時と濁水時ではかなり異なった様相を程する。濁水時には、水深と粗度要素の石や礫が同じオーダーとなり、出水時には先に述べた様に、かなりの厚さで河床の砂礫が移動する。本研究では、通常の状態では観測を行なうが、ここで言

* 土木工学科 助教授
原稿受付 昭和63年9月27日

う通常とは、出水時以外で、河床材料の粒径と水深とが1オーダー以上離れている状態を指す。その様な状況下では、謂ゆるボイル現象が観察される。

流速変動の測定には、計測技研製 VM201 とアレック電子製の ACM-200P 2台を用いた。流速計の固定には、外径 25mm の鋼管を用い、鉛直方向への移動を容易にするため、外径 19mm の鋼管を用いた骨組に沿ってスライドできる様にしている。

自然河川では、断面形状の一樣でない場合が多いため、測線は一本ではなく、河道中央に向けて複数設けた。延長コード長、水深、流速の大きさ等の制限が有り、本数は観測地点の状況により異なる。

観測地点を右に示す。A地点は河岸から9m地点で水深が55cm。河床を構成している石礫の代表径は20cm内外であり、余り掘れ易くはない。

B地点は河岸から6m地点で水深が93cm。河床の石礫の代表径はA地点と同程度であるが、洗掘され易く、20cm程度は簡単に掘れる。

C地点は河岸から9m地点で水深が70cm。横断方向に、余り大きな水深の変化は無い。河床はA地点とはほぼ同様であるが、かなり緩勾配である。

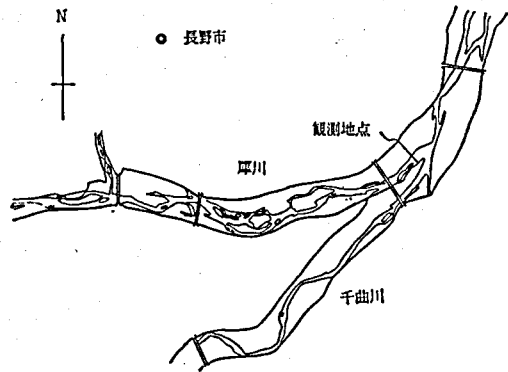


図1 観測地点

3. 観測結果

3-1 データ処理

1 データ当りの観測時間は約20分とし、TEAC社製 R210B に収録した。解析にあたり市販の AD ボードを用いて AD 変換を行なった。サンプリング間隔は0.1秒で、1チャンネル当り2048個のデータをサンプリングした。サンプリング後の流速変動記録の一つを、図2に示す。 u' は流れ方向の、 v' は鉛直方向の流速変動を表わしている。

3-2 乱れの解析

1チャンネル当り2048個のデータを用いて、乱れ強さ $\sqrt{u'^2}$ 、エネルギースペクトル密度 $F(n)$ を計算した。エネルギースペクトル密度に $-5/3$ 乗則を適用し、エネルギー逸散率 ϵ を求めた。また、最大乱子スケール L_0 は、エネルギースペクトルのピークから求めた。

解析結果の一覧を、表1から表7に示す。表中の U_* は摩擦速度、 Y は岸からの距離、 H は水深、 Z は河床からの高さを表わしている。ここで言う河床とは、流速計設置のために組んだ鋼管による骨組の最下端の位置であり、厳密な意味での河床ではない。移動床における河床位置は重要な問題であるが、ゼロ面修正量や粗度の面から、別の機会に触れる。

3-3 速度変動頻度分布

移動床上の乱れの取り入れ口として、河床近傍からのカルマン渦管を考えた場合、速度変動の頻度分布形は大変興味深い。河床近傍から上昇するに伴い、周囲の水を巻き込み、湧昇流を発生させ、表面近傍で崩壊すると言う馬蹄形渦モデルの考察を試みる。頻度分布は、A

1 のものを図 4 に示す。

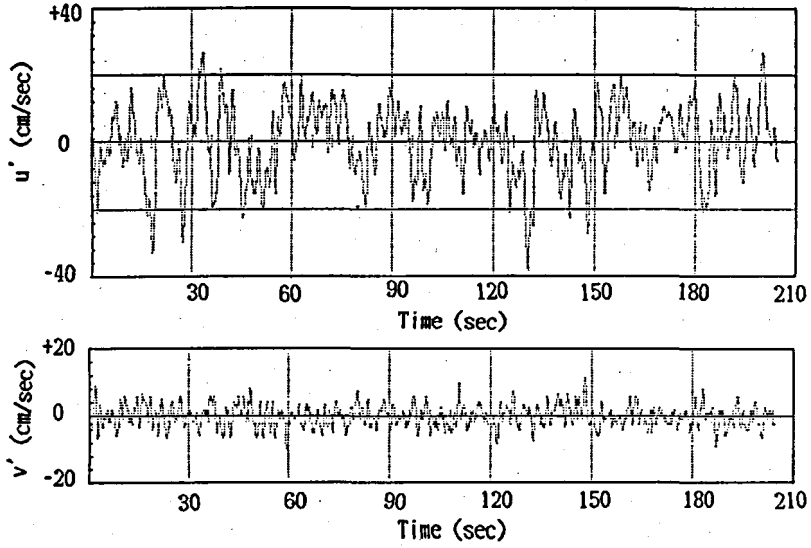


図 2 速度変動

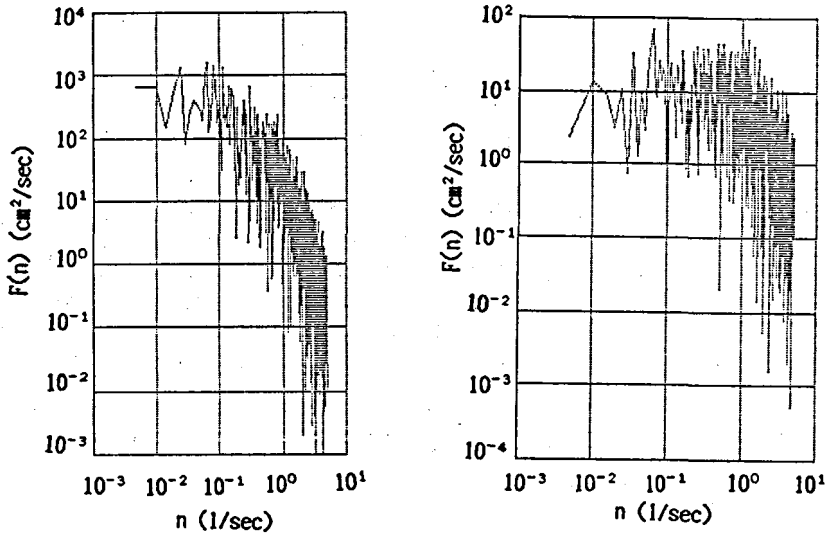


図 3 エネルギースペクトル密度

表1 観測諸元 Z (cm)

	T (sec)	Δt (sec)	y (m)	H (cm)	\bar{U} (cm/sec)	U_* (cm/sec)
A1	204.8	0.1	9	55	86.9	8.9
A2	204.8	0.1	7	47	79.7	7.8
A3	204.8	0.1	5	44	71.7	7.3
A4	404.8	0.1	4	46	67.7	5.6
B	204.8	0.1	6	93	115.3	9.2
C	204.8	0.1	9	70	61.0	7.6

表2 A1

Z (cm)	$\bar{U}(z)$ (cm/sec)	$\sqrt{u'^2}$ (cm/sec)	ϵ (cm ² /sec ³)	$-\overline{u'v'}$ (cm ² /sec ²)	Lo (cm)
10	69.5	13.2	12.4	27.8	131
15	77.3	13.9	8.7	36.6	309
20	88.7	14.2	7.0	28.9	148
25	94.5	14.5	4.4	34.9	236
30	99.6	14.5	1.8	16.6	622
35	101.5	14.8	1.8	16.5	390
40	107.6	9.0	0.7	7.7	399
45	108.3	10.2	1.6	11.6	542
50	116.1	11.0	4.1	0.2	185

表3 A2

Z (cm)	$\bar{U}(z)$ (cm/sec)	$\sqrt{u'^2}$ (cm/sec)	ϵ (cm ² /sec ³)	$-\overline{u'v'}$ (cm ² /sec ²)	Lo (cm)
10	70.1	12.0	13.0	28.6	389
15	77.7	12.5	12.9	32.6	173
20	85.5	12.7	6.2	26.3	238
25	91.7	11.9	3.4	25.7	480
30	74.2	7.4	1.3	11.9	391
35	98.4	9.9	1.8	12.2	394
45	106.4	8.0	0.6	4.0	502

表4 A3

Z (cm)	$\bar{U}(z)$ (cm/sec)	$\sqrt{u'^2}$ (cm/sec)	ϵ (cm ² /sec ³)	$-\overline{u'v'}$ (cm ² /sec ²)	Lo (cm)
10	65.8	13.3	10.9	20.0	188
15	74.5	9.9	9.7	18.8	233
20	79.8	9.4	6.7	19.4	380
30	85.6	7.7	1.4	10.7	268
35	89.1	7.8	2.0	10.4	318
40	92.4	7.5	1.5	5.7	462

表5 A 4

Z (cm)	$\bar{U}(z)$ (cm/sec)	$\sqrt{u'^2}$ (cm/sec)	ϵ (cm ² /sec ³)	$-\overline{u'v'}$ (cm ² /sec ²)	Lo (cm)
10	56.9	10.7	14.5	20.9	237
15	64.6	9.8	6.5	17.1	196
25	70.6	11.2	8.8	12.1	353
30	80.1	7.8	2.8	10.0	385
35	81.9	7.8	2.2	7.0	431
40	85.0	7.1	0.7	2.8	708
45	85.5	8.1	0.5	2.3	712

表6 B

Z (cm)	$\bar{U}(z)$ (cm/sec)	$\sqrt{u'^2}$ (cm/sec)	ϵ (cm ² /sec ³)	$-\overline{u'v'}$ (cm ² /sec ²)	Lo (cm)
15	105.1	16.6	10.8	46.7	420
20	107.4	18.0	8.6	52.4	358
25	115.1	17.3	12.4	57.6	376
30	120.5	15.7	13.2	51.2	335
40	130.5	15.2	3.5	29.9	363
45	131.4	17.1	1.4	32.4	526
50	136.5	15.1	2.6	47.1	455
55	139.0	13.3	1.3	14.3	479
65	135.3	10.9	2.8	3.0	251
70	134.6	10.6	2.5	0.6	408
75	138.9	11.2	4.9	1.3	579
80	139.0	10.9	4.0	4.1	240

表7 C

Z (cm)	$\bar{U}(z)$ (cm/sec)	$\sqrt{u'^2}$ (cm/sec)	ϵ (cm ² /sec ³)	$-\overline{u'v'}$ (cm ² /sec ²)	Lo (cm)
10	50.2	7.9	3.5	5.9	140
15	54.0	7.5	3.3	3.5	115
20	58.2	7.1	3.6	2.2	100
25	64.3	7.0	1.6	3.1	198
35	75.0	8.2	4.1	2.8	188
40	73.2	7.3	0.8	1.5	163
45	75.1	6.2	1.5	0	153
50	79.1	6.0	1.9	0.4	377
60	92.0	5.5	3.5	-1.3	209
65	81.4	3.4	2.2	3.7	177

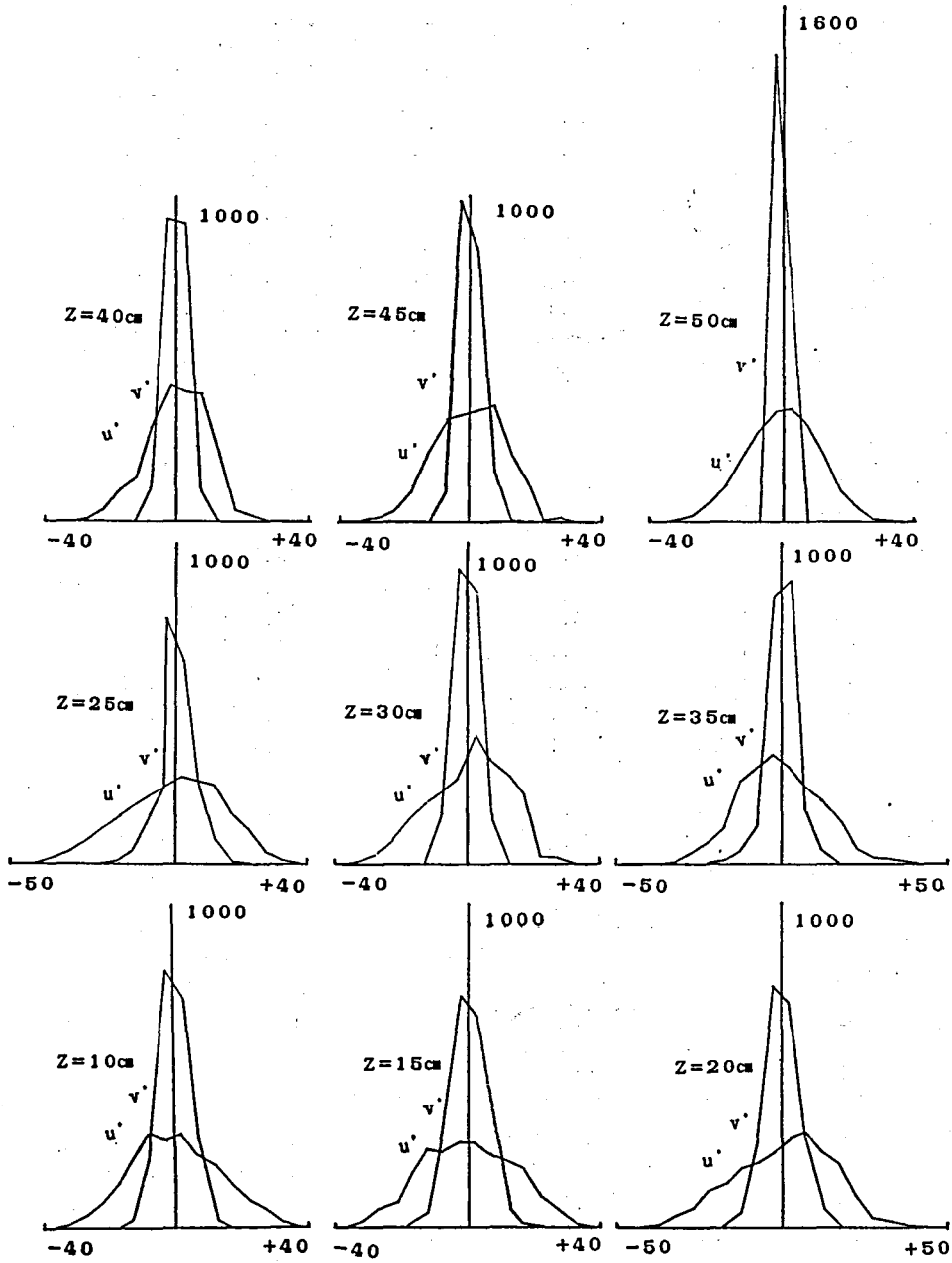


図4 u' , v' 頻度分布

4. 考 察

河岸の影響、河床近傍からの渦の生成の可能性等について検討を加えるため、A地点における解析結果をもとに若干の考察を加える。

4-1 レイノルズ応力

平均流からのエネルギーの取り入れ口は、物理モデルの側面からは馬蹄形渦であり、力学的にはレイノルズ応力であると考えられる。A1~A4を一つにまとめ、より直観的にするため、縦軸を相対水深、横軸を $-\overline{u'v'}$ としてプロットしたものが、図5である。

レイノルズ応力の大きさは、河岸から離れる程全体的に大きな値となっているが、表1からも明らかな様に、断面平均流速も同様の傾向に有る事からすれば、当然の結果と言えよう。

重要な事は、A1, A2共に相対水深0.2~0.25で変曲点を持っている事である。室内実験水路に於ける固定床での研究例では、そうした傾向は何えないが、最近の浸透性水路床での結果の中には、本研究と同様の結果が得られたものも報告されている。

4-2 渦管断面の推定

レイノルズ応力の鉛直分布形からすると、相対水深 $Z/H=0.2\sim0.25$ で最も強い渦管が生成しているものと考えられる。渦管は間欠的に放出され、通過時間も短い。応答時間が遅く、流れ方向の流速しか測定出来なかったプロベラ流速計での現地観測ではこうした渦管はとらえられない。2成分電磁流速計の導入により、鉛直方向流速変動の測定が可能になって、ようやく渦管をとらえる事が出来る様になった。移動速度 U_i 、渦管の直径 D_i 、渦管の通過時間 T_i 、鉛直方向流速変動 V' とし、渦管断面がセンサーに直角に通過するものと仮定すると、図6の様になる。

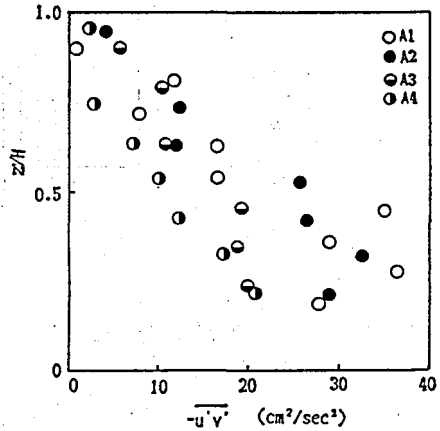


図5 $-\overline{u'v'}$ 鉛直分布

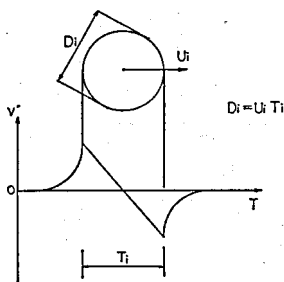


図6 渦管径と速度

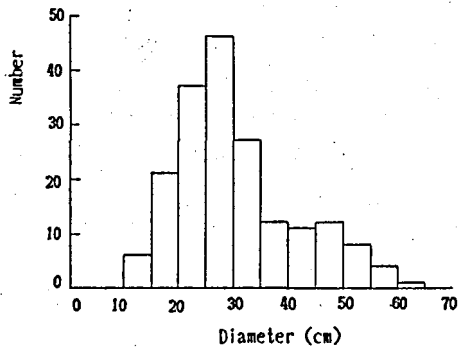


図7 渦管頻度

図6に於ける鉛直方向流速変動パターンを、A3の $Z=20\text{cm}$ とA1の $Z=15\text{cm}$ の記録から拾い出し、 $D_i=U_i T_i$ としてその頻度分布を表わしたものが図7と図8である。水深に匹敵する程のスケールのものは、湧昇流等であると考えられるが、詳細は今後の検討課題としたい。図7、図8から、相対水深 $Z/H=0.2\sim0.25$ 辺りで、直径25cm程度の渦管が生成さ

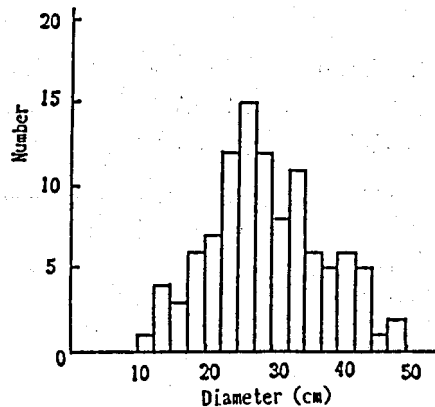


図8 渦管頻度

れていると言えよう。

4-3 流速変動の頻度分布の偏り

流れ方向の流速変動 u' についてみると、 $Z=20\text{cm}$ から 30cm にかけて、ピークが正側に有り、裾が負側に伸びている。これは湧昇流が、負側に寄与する事と符合する。水面近傍ではほぼ正規分布になっており、等方性は良く成立しているようだ。 v' については、水面近傍に近づくとつれ、水面の抵抗を受け、小さくなる傾向が出ている。

5. あとがき

礫床河川に於いて流速変動を測定し、乱れの諸量の鉛直方向分布特性を求めた。最大乱子スケールとエネルギー逸散率については、これまで得られている結果と大差無いものが得られた。従来の研究では、河床近傍については余り明らかにされていなかったが、今回の測定で、興味深い結果が得られた。河床近傍でレイノルズ応力の分布形が極大値を持ち、反転する傾向を持つ事は、その辺りで渦管が生成されている可能性を示唆している。それが渦管であるかどうか、更には渦管であるとすれば横方向の拡がりや発生周期がどの程度であるか、今後の観測で明らかにしていきたい。

今回の観測では物理モデルの検証が主目的ではなかった為、ボイルの同時観測は行なっていない。従って、変動速度の頻度分布については、十分な考察を加えるには到らなかった。

最後に、本研究を進めるにあたり、御指導を頂いた広島大学工学部余越正一郎教授、計器類の便宜を図って頂いた信州大学工学部富所五郎助教授に感謝致します。

参考文献

- 1) 日本の水とダム, 日本ダム協会, 1986.
- 2) 松岡保正: 開水路における最大乱子の諸特性, 長野高専紀要, 第6号, pp.79-88, 1976.
- 3) 松岡保正: 河川の大规模乱れ(第2報), 長野高専紀要, 第14号, pp.93-98, 1983.
- 4) 中川博次, 辻本哲郎, 清水義彦, 村上正吾: 礫床河川の流砂過程解明に果たす流れ構造の意義, 第32回水理講演会論文集, pp.535-540, 1988.
- 5) Nezu, I. and Rodi, W.: Open-channel flow measurements with a laser doppler anemometer, J. Hydraulic Eng., ASCE, Vol. 112, pp.335-355, 1986.