

砂礫河床上の乱れ

Turbulent Flow over a Gravel River Bed

長野工業高専 松岡 保正 Yasumasa MATSUOKA

Observations of turbulence are made in the Chikuma river and in the Sai river with 3 electro-magnetic flowmeters. Representative scales of the river bed gravels at the observation points are the values from about 10cm to 20cm.

The observation data shows the fact that Ω -shaped vortex tubes contribute to Reynolds-stress positively and quickly. The results of the observations are as follows.

- 1) The values of Reynolds-stress decrease with height. Some of the observation data show that the distribution pattern has turning point of a curve near a river bed.
- 2) The values of the energy dissipation decrease almost uniformly with height. The maximum value obtained from the observation is $14.5 \text{ cm}^2/\text{sec}^3$.
- 3) The scales of energy containing eddies increase with height. When Z/H equals to 0.8, it takes the value of about $10H$. But some cases show that it does not exceed $5H$ through the whole depth.

KEYWORDS : Reynolds-stress, Ω -shaped vortex tube, Energy spectral density

1. 序 論

我が国の河川の特徴は、大陸系の河川にくらべて、源流部から海に到るまでの距離が短く、河床勾配が急なことで、中小河川の数が圧倒的に多いことである。このような中小河川の大半は、山地から急勾配で流下するため、大量の土砂を運びだすことになり、その結果河床はかなりの粒径の石を含んだ砂礫で構成されることになる。砂礫河床は、平常時でも移動床の名のとおり河床の砂礫が移動している。出水時ともなれば、条件にもよるが、「m」オーダーの厚さで移動しているのではないと思われる報告もある。こうした河床砂礫の大量の移動は、洗掘による河川構造物の崩壊につながる。そのため、洗掘に関連した研究は数多くなされてきている。しかし、礫床河川において、流れの構造に着目した研究例は意外に少ない。

河川乱流場に関する研究としては、国内では1960年代から1970年代にかけての余越の行っているものが総合的で、多くの示唆に富んでいる。しかし、実河川では境界条件が多様かつ複雑であることや観測自体の難しさ等もあってか、其の後は実験水路には多くの研究者達の研究対象となっていない。この間、実験水路では精密な計測や流れの可視化を背景に、多くの成果が得られている。また、測定計器類や解析処理技術も当時とくらべると大幅に進歩し、かなり小回りのきく取組が可能になった。

本研究は、礫床河川の乱流構造を解明するため、先ず、礫床河川における乱れの諸量の鉛直方向分布特性を明らかにするとともに、 Ω 型渦とレイノルズ応力との関わりに、時系列データから考察を加えるものである。

2. 現地観測及びデータ処理

観測地点を図1に示す。一口に碓床河川と言っても、同一地点でさえ出水時から濁水時まで様々な様相を呈する。本研究では、出水時以外で水深が河床材料の代表的な粒径の数倍以上ある状態の流れを対象とする。更に、今回の観測では水面のボイルに着目し、その強弱、有無による乱れの諸量の分布特性を比較する。

河川乱流場をごく簡単に表現すれば、平均流のエネルギーから渦を通して乱れのエネルギーを取り込み、その一部を系外に逸散させながら流下する過程であるという事になる。その渦は、主なものでも個々の河床砂礫に起因する小さなものから、河道の湾曲や川幅等に支配されている大きなものまで様々である。一般に、鉛直方向の速度勾配は水平方向にくらべて非常に大きく、そのため強い渦を頻繁に放出して平均流の歪みを解消しなければならない。そうした渦のモデルは幾つか提唱されているが、 Π 型渦モデルにより流れの状況をイメージしたものを図2に示す。

汀線近くの水深も流速も小さい所では、顕著なボイルは観測されない。測線は、出来るだけ汀線から離れた。

河床の状況を簡単に述べると、図1のA地点では、河床材料の代表的粒径は約20cm、B地点もほぼ同様である。しかし、B地点は、移動床の厚さがかなりあり、流れが速いこともあって洗掘され易い。C地点の河床材料の代表的粒径は約10cm程度である。

流速変動の測定には、3台の電磁流速計を用いた。流速計は鋼管製の取付台に設置したが傾斜計等の計器での水平チェックは行っていない。解析の段階で補正している。観測時間は、A、B、C地点については、一測点20分として、アナログデータレコーダーに収録した。

アナログデータはパソコンに内蔵した市販のADボードにより0.1秒間隔でAD変換した。解析長は、これまでのスペクトル解析の結果等から2048個(204.8秒)とした。A、B、C地点における観測のうちの代表的なものの観測諸元を表1に示す。

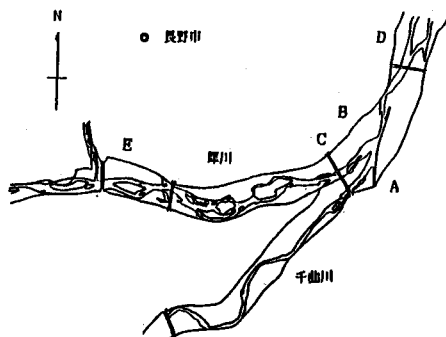


図 1

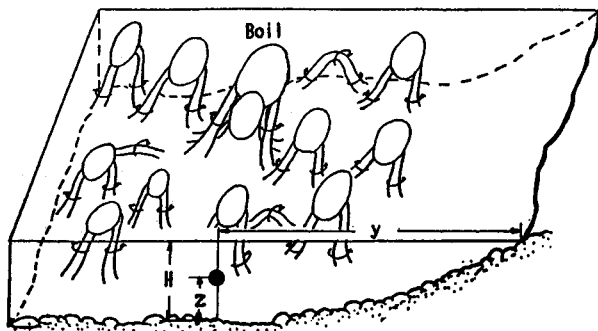


図 2

表 1

	T (sec)	Δt (sec)	y (m)	H (cm)	$\bar{U}$ (cm/sec)	U_a (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

3. 解析結果及び考察

図3に $-\overline{u'v'}$ の鉛直分布を示す。a、b、c、dはA1、A2、A3、A4に対応し、e、fはB、Cに対応している。a、b、e、に着目すると、 $Z/H=0.3$ あたりでピークとなっている。3地点とも、外の地点よりも顕著なボイルが観測でき、河床近傍で強い渦管が生成されているものと推察されるが、生成高度とこのピークは密接に関係していると考えられる。

図4にエネルギー逸散率の鉛直分布を、図5に最大乱子の鉛直分布を示す。a、b、c、はそれぞれA1、B、Cに対応している。エネルギー逸散率については、Cはきれいな傾向が得られなかった。

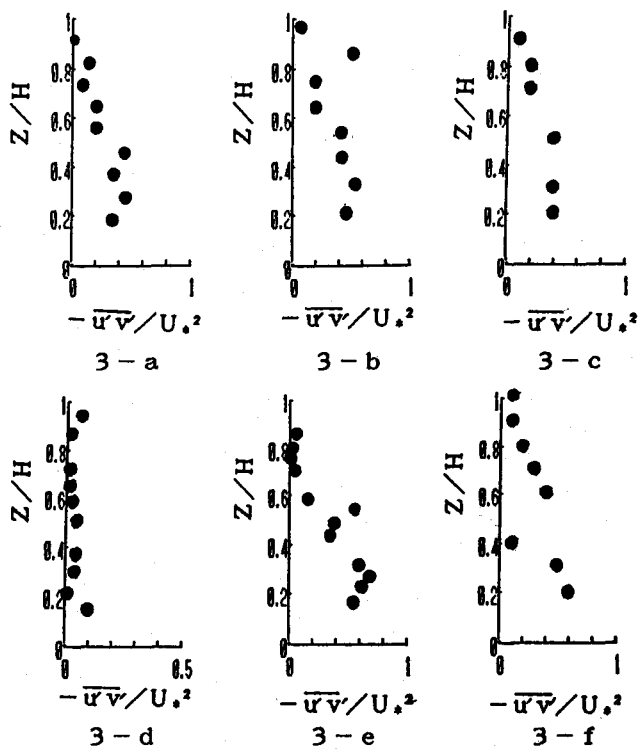


図 3

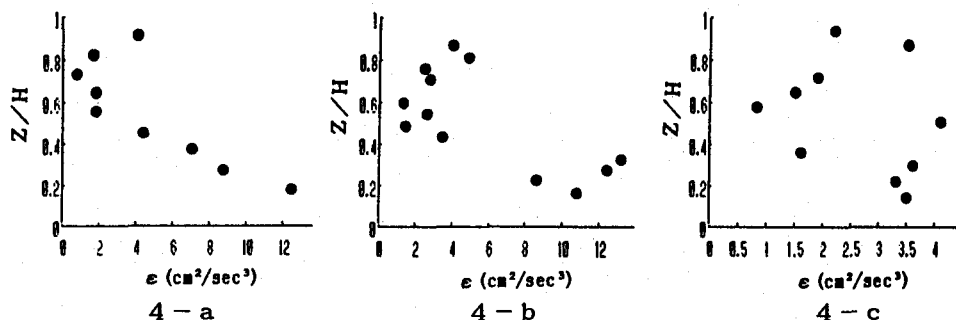


図 4

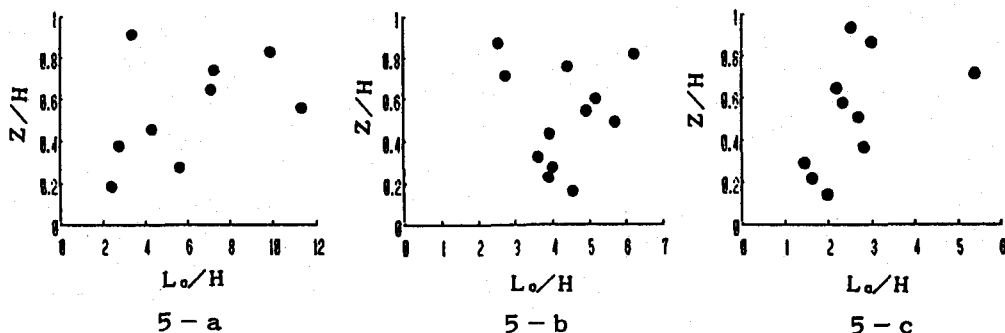


図 5

値としては、最大流速点あたりで余越の求めたものと同じオーダーのものが得られたが、河床近傍では、 $10 \text{ cm}^2/\text{sec}^3$ を超える大きなものが得られた。分布の傾向としては、顕著なボイルの観測される地点では、最大流速点あたりを境に河床に向かってほぼ一様に増加している。

最大乱子スケール L 。については、A1では $Z/H=0.8$ あたりで $L/H=10$ 程度となるが、B、Cではそこまで達していない。B地点の場合は、強いボイルが間断なく発生し、ひしめきあって流下していることから、 Ω 型渦が十分に発達し寿命時間を全うする前に他の Ω 型渦に干渉され消滅してしまう為、 L がA1地点程には大きくならないものと考えられる。逆に、Cでは顕著なボイルは観測されず、こうした緩やかな流れでは平均流の歪み解消のための Ω 型渦は其程の頻度と強さを必要としない為に、 L が小さいものと考えられる。

図6は v と渦管の通過を模式的に表わしたもので、

U_i は流れ方向の流速 T_i は通過時間、 D_i は渦管の直径を表す。こうした、 v の負から直線的に正に変化するパターンを抽出し、頻度分布を求めた。図7はA3地点、 $Z=20 \text{ cm}$ における渦管径の頻度分布であり、代表径は 25 cm 程度と推定できる。

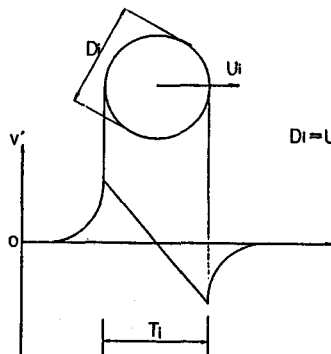


図 6

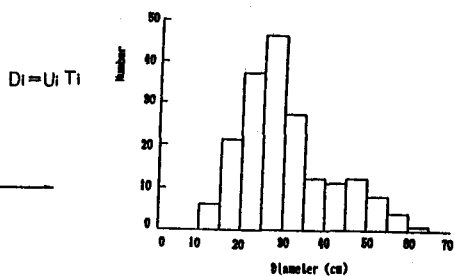


図 7

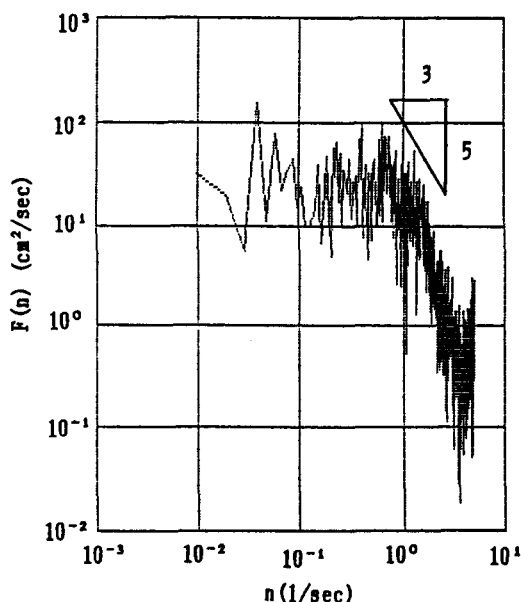
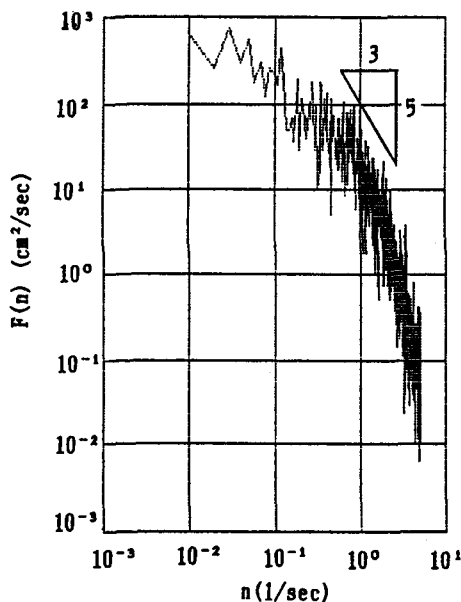


図 8

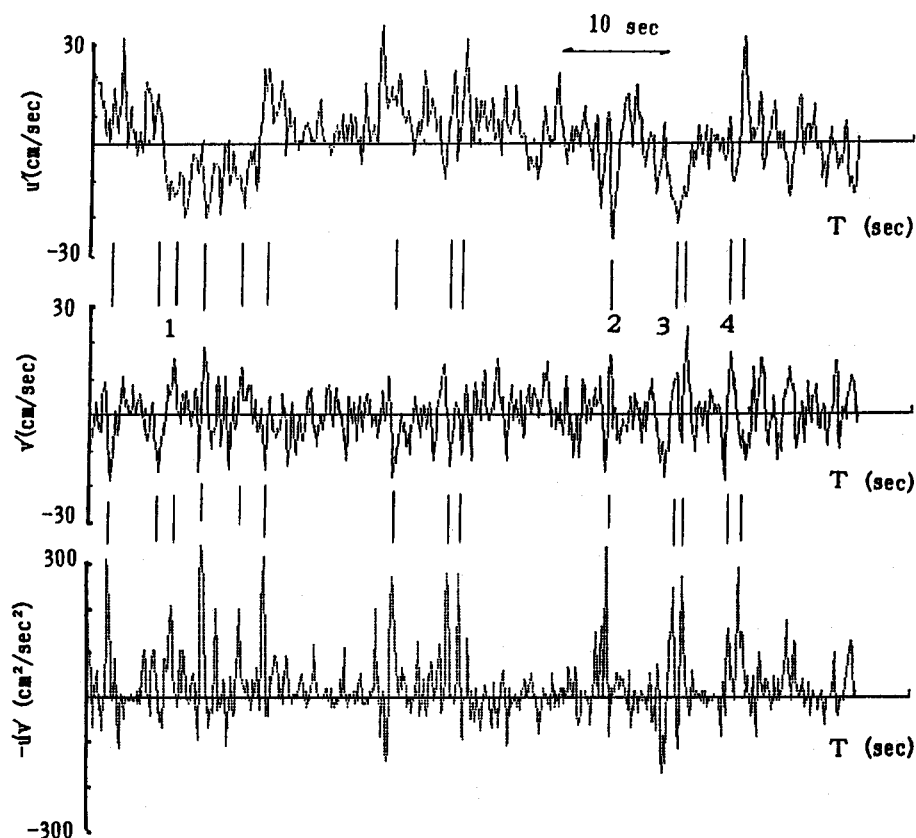


図 9

A、B、C地点における観測結果から、水面で適度なボイルが観測される状態の流れに於ては顕著な Π 型渦が十分に発達しているものと考えられる。そこで、新たにE地点を観測地を選び、水面のボイルを観察しながら、河床近傍に於て渦管の存在を確かめる為の観測を行った。

E地点における観測結果の一例を示す。図8は $y = 11.5\text{ m}$ 、 $Z = 15\text{ cm}$ の点に於けるエネルギースペクトル密度で、aが流れ方向、bが鉛直方向のものである。鉛直方向については、エネルギースペクトルが $n = 0.6 (1/\text{sec})$ あたりから急激に小さくなる。一方、流れ方向については急激に小さくはなっていない。その理由は、この高さでは乱れのエネルギーに寄与する「もの」の「寄与率」が、流れ方向と鉛直方向では異なる為であると考えられる事も出来る。

図9は同点の u' 、 v' 、 $-u'v'$ の時系列記録である。図中の1に続く10秒程度の時間帯は、大きな湧昇流が通過しているとみられ、内部には幾つもの渦管の存在を仮定することが出来る。レイノルズ応力への寄与は、湧昇流が連続的にゆったりと行うもの、個々の渦管が急激に行うもの、湧昇流とは逆方向に連続的にゆったりと行うものの3パターンに分類出来そうである。水面のボイルの観察結果では、ボイルのパターンは単一型と複数型に大別できる。その大きさは、E地点の場合、単一型で30 cmから1 m程度で、複数型の大きいものは4 m～5 mにも達する。複数型のものの多くは流れ方向に並んで、或いは次々に連続して発生しながら流下する。

4. 結 論

砂礫河床上の乱れを観測し、レイノルズ応力、エネルギー逸散率等の鉛直分布特性を求めた。更に、その結果を元にして、水面のボイルに着目した観測を行い、 Π 型渦モデルを参考に渦管の存在の可能性を確かめた。以下に、顕著なボイルの観測される砂礫河床上の乱れについて得られた結果を要約する。

- 1) レイノルズ応力の鉛直分布は河床に向かってほぼ一様に増加を示すが、最大流速点の外に、河床近傍でもピークが存在する。
- 2) レイノルズ応力への寄与は、単一の渦管からも急激な形で行われる。
- 3) 最大乱子は $Z/H = 0.8$ あたりで $10H$ 程度となるが、乱れが強すぎても弱すぎても小さな値となる。

今回の観測では、 Π 型渦をイメージしながらも、それ自体を捉えて様々の角度から実体を明らかにしてはしていないが、今後はその方向で研究を進めて行きたい。

最後に、本研究を遂行するにあたり多くの面で大変お世話になった広島大学教授余越正一郎先生と信州大学助教授富所五郎先生に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 余越正一郎: 河川の大規模乱れ, 京都大学防災研究所年報 10 号 B, 1967, PP. 199-206
- 2) 余越正一郎: 河川に於ける乱流エネルギー逸散率について, 京都大学防災研究所年報 11号 B, 1968, PP. 191-201
- 3) 石原安雄・余越正一郎: 河川の乱流構造に関する一考察, 京都大学防災研究所年報 13 号 B, 1970, PP. 323-331
- 4) 宇民 正・上野鉄男: 可視化法による大スケール乱れに関する研究, 京都大学防災研究所年報 19 号 B, 1976, pp. 267-287
- 5) 棚津家久・中川博次: 開水路乱流の組織だった構造の検出について, 第25回水理講演会論文集, 1981, PP. 439-445