

開水路流れの乱流構造に及ぼす掃流砂の影響 Effect of Bed-Load on Turbulent Structure in Open Channel Flows

楊永荻*・平野宗夫**・藤田恭三***

by Yongdi YANG, Muneo HIRANO and Kyoza FUJITA

ABSTRACT: Mean flow properties and turbulent characteristics of open channel flow with bed-load transport were experimentally studied in the $550 \times 25.8 \times 20$ cm flume with erodible gravel bed. The sand with the diameters of 0.59 mm and 1.19 mm were used and the rate of bed-load transport reach to 13 g/cm²sec. The velocity were measured by ADV, and the characteristics of the turbulent intensity and the spectra of turbulent velocity were analyzed. The experimental results show that: 1) the mean velocity profile of open channel flow with bed-load can be expressed by a log-law; 2) the turbulent intensity near bed decreases with the increase of bed-load transport rate; 3) the spectrum of turbulent velocity also changes as the increase in bed-load transport.

Keywords: open channel flow, bed load, turbulent structure, spectrum, FFT

1. 緒言

移動床流れの乱流構造は河床形態や流砂の存在に影響される。掃流砂は河床近傍で運動するため、流れの境界面およびその近傍において大きな役割を果たすと考えられる。しかし、掃流砂が流れの乱流構造に与える影響の研究は、流水による掃流砂の運動の研究に比しかなり少ないのが現状である。著者ら^{1,2)}は河床が平坦な形態である移動床流れの抵抗係数と流砂量との関係を整理し、同じ砂礫固定床の場合にくらべ、河床上に砂が流れると流動抵抗が若干低下し、流砂量が大いほどその傾向が強くなるという結果を得た。Soon-Graf-Lemmin³⁾は急勾配河床上の流砂実験を行い、掃流砂により流れの乱れ強度が河床付近で変化し、抵抗係数および混合距離が固定床の流れのそれと異なる実験結果を示している。後藤ら⁴⁾は流体/粒子相互作用系としての掃流層を数値シミュレーションした結果、掃流砂量が増大するとともに流れ場の運動量欠損が顕著となることを得た。これらのことより、掃流砂が流れの乱流構造に与える影響の究明は移動床における現象を解明するために重要であると思われる。

本研究は、掃流砂を有する平坦な砂礫河床上の流れの流速および掃流砂量を計測し、その平均流速分布、乱れ強度および乱れのパワースペクトル密度特性を解析し、掃流砂の存在が流れの乱流構造に与える影響を検討するものである。

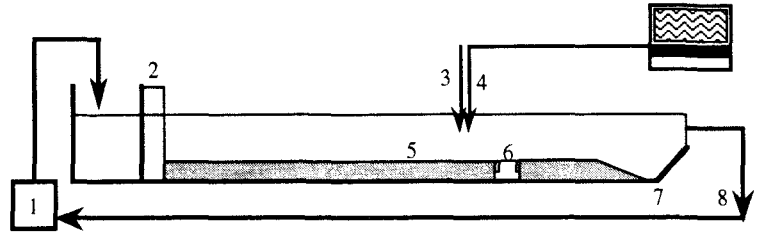
*正会員 工博 九州大学助手 工学部建設都市工学科 (〒812-81 福岡市東区箱崎6-10-1)

**正会員 工博 九州大学教授 工学部建設都市工学科

***学生会員 九州大学工学部建設都市工学科

2. 実験概要

実験は図1に示すような長さ550cm、幅25.8cm、高さ20cmの亚克力・鋼製の河床勾配可変型の直線水路で行われた。流れは主流方向に x 軸、河床に垂直な上向きに y 軸をとり、それぞれの流速を u, v と定義する。実験は、まず水路内に厚さ6cmに硅砂を敷き詰め、平坦な河床を作り出した上で、初期河床を壊さないように上流と下流から同時に注水し、水路内に一定



- | | |
|-----------|----------|
| 1 ポンプ | 5 砂 |
| 2 整流板 | 6 掃流砂収集箱 |
| 3 ポイントゲージ | 7 水路終点 |
| 4 流速計 | 8 流量測定 |

図1 実験装置

表1 実験条件

	No.	h (cm)	U (cm/sec)	u_* (cm/sec)	d (mm)	$\bar{q}_s / u_* d$ (-) (10^{-2})	$q_{SM} / u_* d$ (-) (10^{-2})	$(u_* d) / \nu$ (-)	b/h (-)	$U / \sqrt{gh}$ (-)
調整し、掃	K3-H	7.60	46.28	2.28	1.19	0.417	0.695	271	1.70	0.54
流砂層を有	K3-I	7.66	42.43	2.27	1.19	0.419	0.813	270	1.68	0.49
する平坦な	K3-J	7.97	37.84	2.31	1.19	0.652	1.112	275	1.62	0.43
砂礫河床上	K3-K	7.45	49.64	2.95	1.19	3.645	5.448	351	1.73	0.58
流れを形成	K3-L	7.50	41.91	2.40	1.19	0.321	0.545	286	1.72	0.49
させる。硅	K3-M	7.83	41.22	2.40	1.19	0.525	1.016	286	1.65	0.47
砂の粒径、	K3-N	8.50	43.07	2.20	1.19	0.112	0.249	262	1.52	0.47
給水流量お	K3-O	8.52	42.79	2.61	1.19	2.103	4.164	311	1.51	0.47
よび勾配を	K4-P	8.76	28.90	1.63	0.59	0.619	1.012	96	1.47	0.31
変化させ、	K4-Q	8.77	31.65	1.71	0.59	1.489	2.209	101	1.47	0.34
	K4-R	7.54	27.00	1.42	0.59	0.153	0.306	84	1.71	0.31
	K4-S	8.30	32.64	1.77	0.59	2.288	3.709	104	1.55	0.36
	K4-T	7.99	32.64	1.88	0.59	1.606	2.316	111	1.61	0.37
	K4-U	7.76	34.98	2.00	0.59	2.312	3.315	118	1.66	0.40

掃流砂が存在する状況でその流速分布を計測する。掃流砂量の計測は、流速の計測が終わってから図1中の6で横断方向に等分割された掃流砂採取箱のカバーを開け、流砂を採取し、その時間および乾燥重量を計って求める。流速の計測断面は上流から325cmに、掃流砂量の計測断面は流速の計測断面から50cm下流のところに設置する。移動床の流れと比較するため、移動床と同条件で敷き詰めた硅砂にセメントを散布し、固定床にした上で流速の計測を行う。

流速の計測はSONTEC製の超音波ドップラー三次元高精度流速計(ADV)を用いて行う。ADV流速計の基本性能⁵⁾は以下のである。超音波周波数が10MHz、流速測定分解能が0.1mm/sec、計測範囲が ± 1 mm/sec $\sim \pm 2.5$ mm/sec、計測周波数が0.1 ~ 25 Hz範囲で入力設定可能であり、流速を計測すると同時に壁面までの距離を0.1mmまで測定できる。

表1は実験条件を示したものである。ここに、 h は水深、 U は断面における平均流速、 u_* は摩擦流速、 d は硅砂の中央粒径、 $\bar{q}_s / u_* d$ は断面における無次元平均掃流砂量、 $q_{SM} / u_* d$ は等分割断面における掃流砂量分布の最大値、 b/h は断面のアスペクト比(半幅/水深)である。

本実験の摩擦流速は断面におけるレイノルズ応力分布から求める。

3. 実験結果と考察

3.1 掃流砂量の分布

本実験は砂礫河床上に掃流砂の流れの乱流構造に与える影響の究明を目的にするもので、河床形態は河床波が発生しない平坦な河床に限定して実験を行う。掃流砂量が大きくなると河床波および浮遊砂が発生する

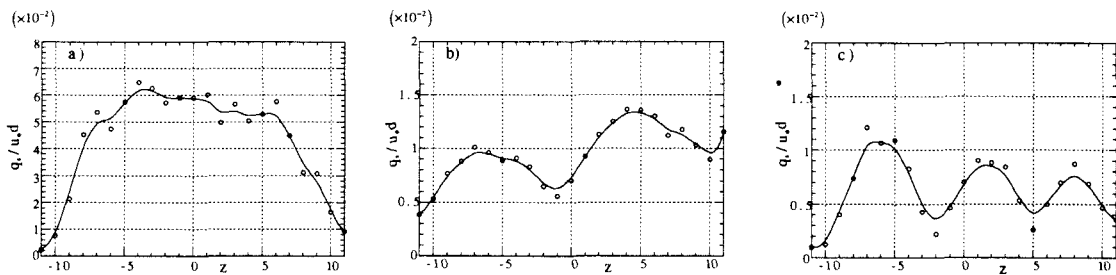


図2 掃流砂量の分布例

ため、本実験の掃流砂量は比較的小さい状態に設定されている。横断方向の掃流砂量の分布は概ね図2のような三種類のパターンを示す。掃流砂量が比較的大きい場合には掃流砂量の分布はほぼ中央を中心にした山形になるが、掃流砂量が少ない場合には、断面のアスペクト比が同じでもその分布が二つの山形、または三つの山形となり、断面のアスペクト比とその河床せん断力の分布との関連性が複雑であることを示している。

3.2 平均流速の分布

図3は珪砂K4($d=0.59\text{mm}$)および珪砂K3($d=1.19\text{mm}$)の異なる掃流砂量のもとでの流れの平均流速分布である。図より、平均流速はほぼ対数則に従うことがわかる。河床付近では掃流砂の影響で平均流速がバラツキしているが、掃流砂量が少ないので、掃流砂量による系統的な変化はあまり見られない。

3.3 乱れ強度の分布

図4は珪砂K4($d=0.59\text{mm}$)の場合の流れ方向流速 u とその垂直方向流速 v の乱れ強度分布を示したものである。固定床の開水路流れの乱れ強度は次のような形で与えられる。

$$\sqrt{u'^2} / u_* = D_1 e^{(-\lambda_1 y/h)} \quad \sqrt{v'^2} / u_* = D_2 e^{(-\lambda_2 y/h)} \quad \dots (1)$$

ここで、係数 D 、 λ は実験定数である。従来、それぞれ $D_1=2.04$ 、 $\lambda_1=0.97$ 、 $D_2=1.14$ 、 $\lambda_2=0.76^{(6)}$ 、 $D_1=2.3$ 、 $\lambda_1=1.0$ 、 $D_2=1.27$ 、 $\lambda_2=1.0^{(7)}$ および $D_1=2.26$ 、 $\lambda_1=0.88$ 、 $D_2=1.23$ 、 $\lambda_2=0.67^{(8)}$ などの研究結果がある。図より、本実験

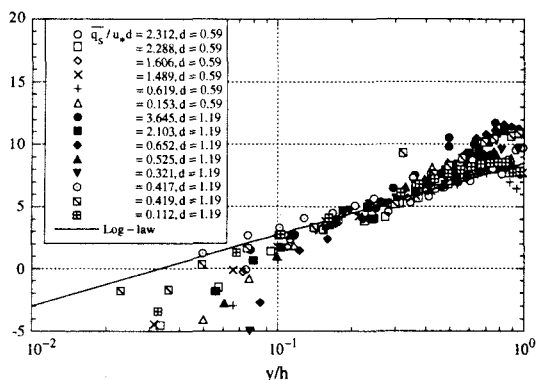


図3 平均流速分布

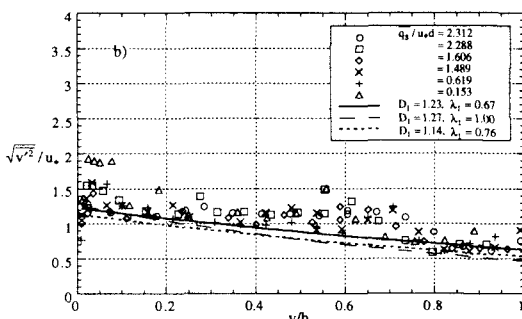
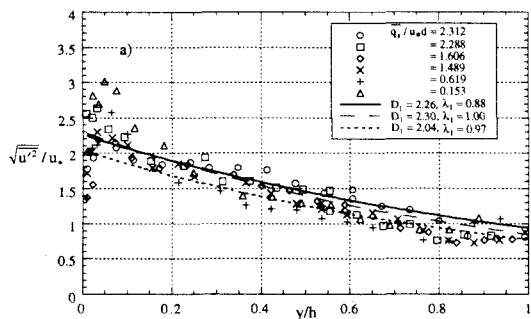


図4 乱流強度分布 ($d=0.59\text{mm}$)

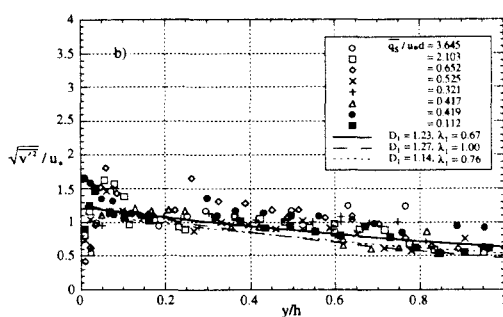
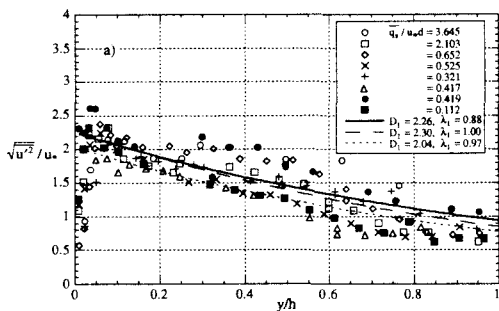


図5 乱流強度分布 (d=1.19mm)

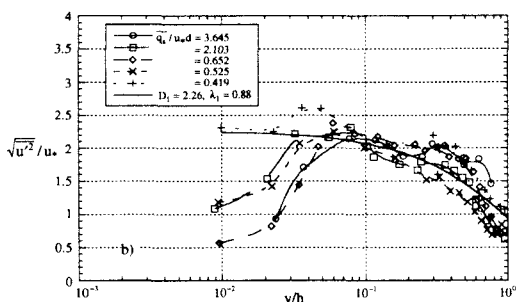
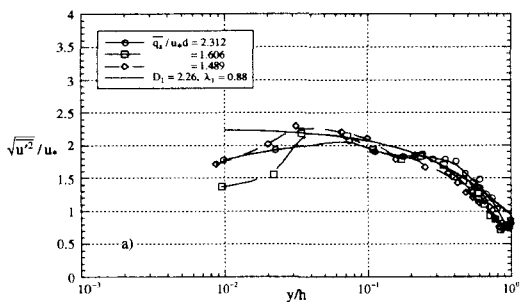


図4 河床付近での乱流強度分布

のデータを式(1)と比較すると、河床付近以外では、両者は同じ傾向を示しており、 $D_1=2.04$ 、 $\lambda_1=0.97$ 、 $D_2=1.14$ 、 $\lambda_2=0.76$ が比較的良好に一致するが、河床付近では、両者が大きく異なっている。これは掃流砂の存在によるものと思われるが、その影響は河床付近に限られている。

図5は珪砂K3(d=1.19mm)の場合の乱れ強度分布である。図より掃流砂量による乱れ強度の変化は珪砂K4の場合と同様な傾向を示している。また粒径が大きくなるとその変化が若干大きくなることもわかる。

図6は図4aと図5aの横軸を対数で示し、河床付近の流れ方向の乱れ強度の変化を拡大したものである。図より、掃流砂層の存在により、流れの乱れ強度は式(1)より下まわり、掃流砂量の増加とともにその乱れ強度が減少していることがわかる。これは掃流砂層の存在により流れの境界面条件が変化し、乱れを抑制することを示している。

3.4 スペクトル特性

乱れのパワースペクトル密度は流速測定値より高速Fourier変換 (FFT) によって求められる。図7は珪砂K4(d=0.59mm)の掃流砂量 $2.73\text{kg}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{sec}$ での乱れのパワースペクトル密度の水深方向における変化を示したものである。図より、スペクトル密度の分布は1Hzの付近でピークになり、それより高周波数側で $-5/3$ 乗に従う傾向を示しているが、河床付近では、高周波数側でその傾きが緩やかになることを示している。

図8は珪砂K4(d=0.59mm)の場合で、掃流砂量の変化が乱れのパワースペクトル密度に与える影響を調べるものであり、深さごとに示されている。また、パワースペクトル密度は摩擦

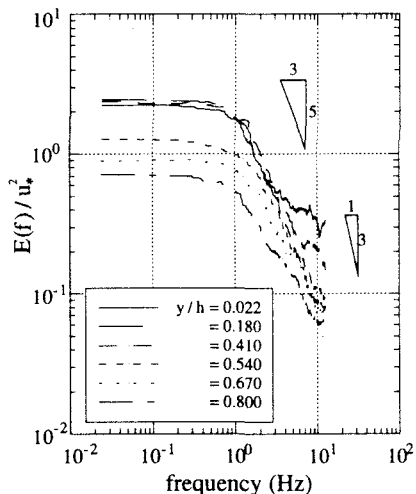


図7 パワースペクトル密度の分布

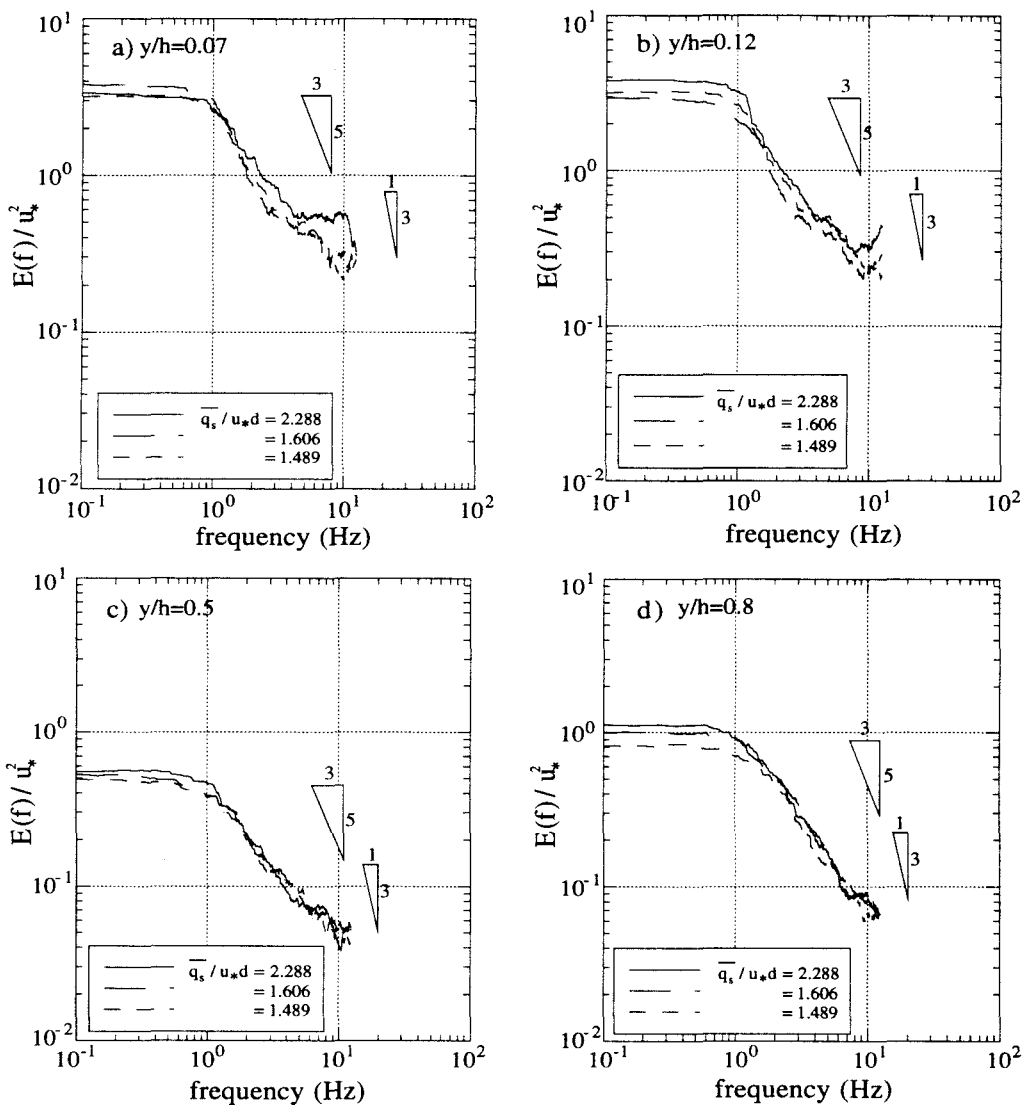


図8 パワースペクトル密度と掃流砂量の関係 ($d=0.59\text{mm}$)

流速を用いて無次元化される。図によると、河床付近では、スペクトル密度は掃流砂量が多いほど高周波数側でその影響を受け、波数成分間のエネルギー伝達がゆるやかになる。これは慣性領域から伝達するエネルギーの散逸が低くなることが推察される。また河床付近以外では河床から遠ざかるほどその影響は小さくなる。これは乱れ強度と同様な傾向を示している。

図9は硅砂K3($d=1.19\text{mm}$)の場合で、掃流砂量の変化が乱れのパワースペクトル密度への影響を示したもので、硅砂K4の図8と同様な傾向を示している。

4. 結 論

掃流砂層を有する平坦な砂礫移動床上流れの流速およびその掃流砂量を計測し、掃流砂による流れの乱流構造の変化を検討した。その結果、掃流砂の存在により流れの乱れ強度は河床付近では減少し、掃流砂量が多いほどその傾向を強いことを明らかにした。また、乱れのパワースペクトル密度を解析した結果も同様な傾向を示している。

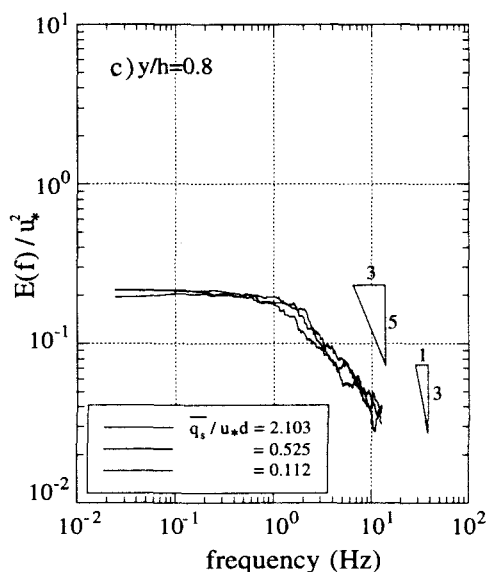
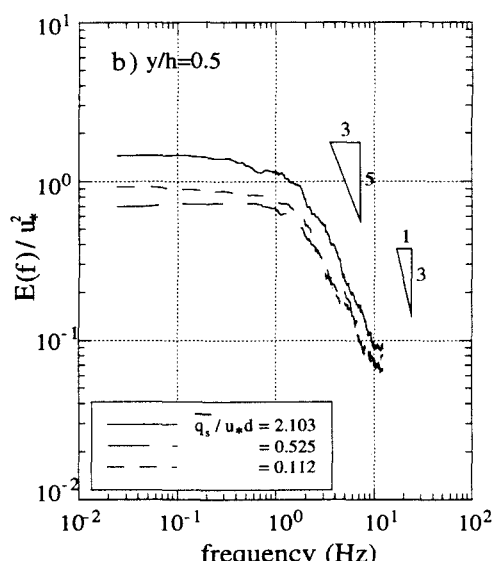
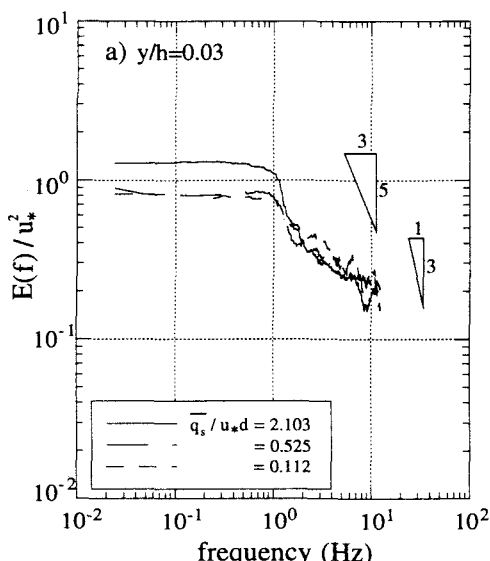


図9 パワースペクトル密度と掃流砂量の関係 ($d=1.19\text{mm}$)

本実験の範囲は河床が平坦な形態であり掃流砂量が比較的小さいものに限られている。今後さらに実験装置と実験手法を改良して、実験データを積み重ねて移動床流れの乱流構造を詳細に検討する予定である。

【謝辞】 本研究は平成8年度文部省科学研究費基盤研究B（課題番号：08455231、研究代表者：九州大学平野宗夫）の援助のもとに行われた。また、本実験に際し、本研究室の卒業生岡谷利之（現大成建設）、大学院生木本大介、卒研究生安田伸司各氏の協力を得た。記してここに謝意を表す次第である。

参考文献

- 1) 楊永萩・平野宗夫：平坦な移動床流れの抵抗則、水工学論文集、Vol.39、pp.483-488、1995.2
- 2) Yang Y. and Hirano M.: Discussion for "Uniform flow in open channels with movable gravel bed", Journal of Hydraulic Research, IAHR, Vol.33, No.6, pp.877-880, Dec. 1995
- 3) Song T., Graf W. H. and Lemmin U.: Uniform Flow in Open Channels with Movable Gravel Bed, Journal of Hydraulic Research, Vol.32, No.6, pp.861-876, Dec. 1994
- 4) 後藤仁志・辻本哲郎・中川博次：流体・粒子相互作用系としての掃流層の数値解析、土木学会論文集、No.485/II-26、pp.11-19、1994.2
- 5) 楊永萩・平野宗夫・木本大介：ADVを用いた固液二相管流の乱流構造に関する実験的研究、水工学論文集、Vol.40、pp.819-824、1996.2
- 6) Kironoto B. A. and Graf W. H.: Turbulence Characteristics in Rough Uniform Open-Channel Flow, Proc. Institute Civil Engineering Water, Marit. & Energy, Vol. 106, pp.333-344, Dec. 1994
- 7) Nezu I. and Rodi W.: Open Channel Flow measurements with a laser doppler anemometer, J of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.112, No.5, pp.335-355, 1986
- 8) Nezu I. and Nakagawa H.: Turbulence in Open Channel Flows, IAHR-Monograph, Balkema, Rotterdam, 1993