

掃流砂による平坦河床上の 乱流構造に及ぼす影響

EFFECT OF BED LOAD ON TURBULENT STRUCTURE IN AN OPEN CHANNEL FLOW

瀬津家久¹・鬼束幸樹²・倉田昌明³

Iehisa NEZU, Kouki ONITSUKA and Masa-aki KURATA

¹正会員 工博 京都大学大学院教授 工学研究科環境地球工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

²正会員 博(工) 京都大学大学院助手 工学研究科環境地球工学専攻

³学生員 京都大学大学院 工学研究科環境地球工学専攻

In open channel flows with bed-load transport, mean flow properties and turbulent characteristics are affected by the bed load motions. In this study, FLDA measurements over flat movable bed were conducted in an open channel flow. It was found that the mean velocity profile can be expressed by the log-law in the inner layer, but near the bed, the velocity profile is uniform, and its tendency become stronger as the volume of bed-load transport increases. Turbulence-intensity distributions also change in the inner layer; it curves upward from the exponential relation.

Key Words : bed load, FLDA, flat movable bed, turbulent structure

1. はじめに

一般に河川では、流れ、流砂および河床形状の三者が相互に、かつ複雑に作用し合い、流れ場を形成するため、それらの相互作用を解明することの重要性が従来より指摘されてきた。

このうち河床形状が流れに及ぼす影響については、現在までに様々な研究がなされた。特に瀬津ら^{1)~4)}は段落ち、正弦波あるいは砂碓(dune)などの河床形状上の流れを、ファイバー型レーザ流速計(FLDA)を用いて計測し、境界断面の変化による加速・減速域あるいは逆流域の存在が、平均流構造や乱流統計量に大きく影響を及ぼすことを明らかにし、またそれにより発生・発達する組織的構造を持った渦の挙動と、土砂輸送現象との関連についても解明を行ってきた。

一方で、流砂が流れの構造に与える影響に関する研究として、Song *et al.*⁵⁾は、超音波ドップラー流速計(ADV)を用いて掃流砂の存在する急勾配河床上の乱流計測を行い、掃流砂により河床付近での乱れ強度およびReynolds応力の摩擦速度 U_* による無次元値が固定床の流れのそれと比較して減少するとともに、抵抗係数が増加することを示した。楊・平野⁶⁾

は、掃流砂の存在する平坦な移動床上の流れの計測を行い、従来の知見とは相反し、同じ砂礫固定床の場合と比較して、抵抗係数が減少すること、かつ流砂量に比例してその傾向が顕著となることを示した。さらに楊ら⁷⁾は、同様に掃流砂の存在する平坦河床において比較的アスペクト比(水路幅 B と水深 h の比 B/h)の小さい流れ($1.4 < B/h < 1.8$)をADVを用いて計測し、平均流速がほぼ対数則に従うことや、掃流砂の影響で河床付近における乱れ強度が減少することなどを明らかにした。

このように、掃流砂の挙動が乱流構造に与える影響は無視できない。しかし、抵抗係数については、先述のとおり研究者間でも意見の分かれるところであり、また底面付近における主流速分布と掃流砂量との関係についても未だ確固たる知見は得られていないと言える。

以上のことを踏まえ、本研究は、2次流の発生しないアスペクト比の大きい($B/h=7>5$)⁸⁾、2次元的な流れを対象とし、かつ移動床上の流れの計測としては初めての試みであるFLDAを用いた高精度な計測を行い、平坦河床上における掃流砂が乱流構造に及ぼす影響を解明するものである。

2. 実験装置および実験方法

本実験で使用した水路は、長さ12m、幅50cmの可変勾配型循環式直線水路である。実験は、まず水路の上流端より3mの位置から下流側に長さ7mにわたって厚さ4cmに中央粒径 $d_{50}=1.80\text{mm}$ の珪砂を平坦に敷き詰め移動床とし、その上流部分に高さが移動床と同一となるように固定床を設置した。その後、水路内に慎重に注水し、十分に水深を上げた後に流量を調節して、平坦河床上に掃流砂の存在する流れ場を形成させた。図-1に実験に用いた計測システムを示す。瞬間流速の測定には、4ビーム後方散乱型アルゴン・イオン・ファイバー型レーザ流速計(FLDA)を使用し、鉛直方向の計測点の移動については、コンピュータ制御による自動トラバース装置によって行った。この自動トラバース装置の移動精度は0.01mmである。また流速の計測断面は、上流端より8mに、掃流砂収集箱は計測断面から1m下流に設置した。計測点は、鉛直方向に35点設け、底面付近、内層および外層部分を詳細に計測した。なお、計測時間は60secとした。

表-1は、実験条件を示したものである。ここで、 U_m は断面平均流速、 U^* は摩擦速度、 $Re=U_m h/\nu$ はReynolds数、 $Fr=U_m/\sqrt{gh}$ はFroude数、 S_b は水路床勾配、 ν は動粘性係数、 g は重力加速度である。実験は、掃流砂の存在しないケースNMBと、掃流砂量のそれぞれ異なるケースMB1,MB2,MB3,MB4の合わせて5通りについて行われた。

3. 実験結果および考察

(1) 掃流砂量の分布

本実験の目的は、掃流砂の存在が乱流構造に及ぼす影響について検討することであるため、流れが2次元である必要がある。滑面開水路流においては、Nezu *et al.*⁸⁾がアスペクト比5以上の水路中央では流れが2次元であることを明らかにしている。これは、断面内2次流の構造がアスペクト比によってほぼ決定されることを示すものである。楊ら⁷⁾は平坦河床上の掃流砂の実験から、同一のアスペクト比を持つ流れでも、掃流砂の絶対量によって分布形状が変化することを明らかにした。このことから、掃流砂量の分布形状はアスペクト比のみならず掃流砂の絶対量にも依存するものと考えられる。本実験で設定された流れのアスペクト比は先述したとおりであり、滑面開水路では流れが2次元である条件を満たしている

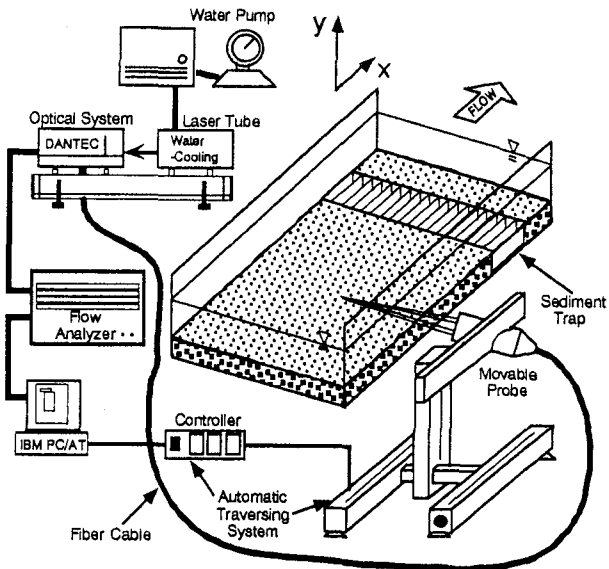


図-1 実験装置

表-1 水理条件

Case	h (cm)	U_m (cm/s)	U^* (cm/s)	Re ($\times 10^4$)	Fr	S_b
NMB	7.0	40.6	2.6	2.8	0.49	1/1000
MB1	7.0	50.0	3.2	3.5	0.60	1/700
MB2	7.0	54.7	3.5	3.8	0.66	1/600
MB3	7.0	57.8	3.7	4.0	0.70	1/500
MB4	7.0	64.0	4.1	4.5	0.77	1/400

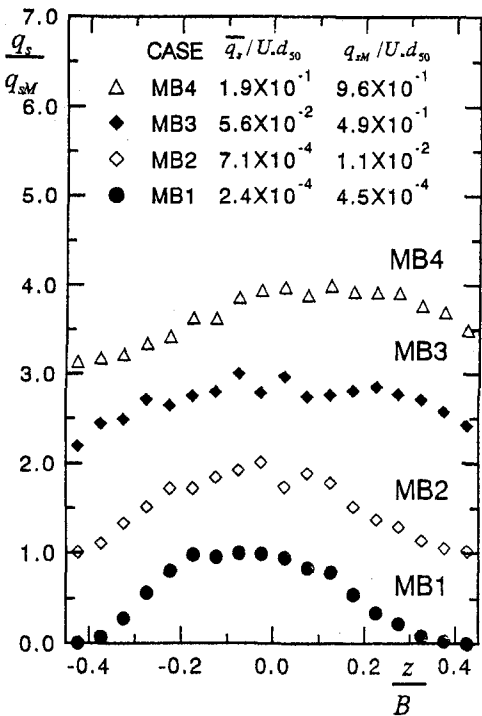


図-2 掃流砂量の横断方向分布

が、楊らの指摘に従い、実際に流れが2次元であるかどうかをまず確認する必要がある。

図-2に、流砂量分布を示した。なお、横軸は水路の横断方向を水路幅 B で無次元化したもので、水路中

央を原点とした。縦軸は横断方向の等分割断面における掃流砂量 q_s をそれぞれのケースの最大値 q_{sM} で無次元化し、鉛直方向に1ずつずらして表示してある。また、図中の $\bar{q}_s/U \cdot d_{50}$ は断面における無次元平均掃流砂量、 $q_{sM}/U \cdot d_{50}$ は等分割断面における掃流砂分布の最大値である。いずれのケースもほぼ水路中央を中心とした山形の分布形状をとっており、楊らの指摘したような水路横断面内で非対象な分布とはなっていない。このことから、水路中央での流れはほぼ2次元のと見なしうと思われる。しかし、同一のアスペクト比でも掃流砂の絶対量によって流砂量分布に若干の差異は見られた。これは、アスペクト比が同一でも断面内の構造、特に主流速分布および2次流の構造が流砂量によって異なることを示唆していると考えられ、今後の研究課題としたい。

(2) 主流速分布

図-3は、主流速分布を示したものである。掃流砂の存在しないケースNMBから最も掃流砂量の多いケースMB4までを、下方から順に無次元時間平均流速 $U^*(=U/U_*)$ を10ずつシフトさせて示したものである。図中に、次式に示すようなlog-wake則を曲線で併示した。

$$U^* = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{y}{k_s} + A_r + \frac{2\Pi}{\kappa} \sin^2\left(\frac{\pi}{2} \xi\right) \quad (1)$$

ここに、 κ はKarman定数($=0.41$)、 A_r は積分定数、 Π はwake強度パラメータ、 $\xi=y/h$ である。また、相当粗度 k_s については、中央粒径 d_{50} と同一とした。いずれのケースについても、平均流速は内層においてはほぼ対数則に従うことがわかる。ただし、河床付近において、掃流砂の存在するケースでは、NMBのケースと異なり主流速が対数則分布よりも上方へある傾きをもって逸れることが観察される。さらにこの傾向は、流砂量の増加に伴い顕著となる。これは、掃流砂の存在により底面近傍で流れの一樣化が生じたためであると考えられる。このような対数則分布から逸れる底面付近における無次元時間平均流速 U^* の傾きを $1/\kappa_p$ とする。

図-4に、 κ_p と掃流砂量との関係を示した。図中、ガラスビーズを用いた平坦河床上の流速測定を行った酒井ら⁹⁾の結果を併示した。MB2からMB3にかけては、掃流砂量の増加に伴い κ_p の値は減少しているが、全体的には増加傾向を示している。このことから、掃流砂量が大きくなるにつれて、流速分布の傾きが緩やかとなり、河床近傍における流速の一樣化が進むと考えられる。しかし、本実験結果は酒井らの結果と異なっており、今後検討の必要がある。

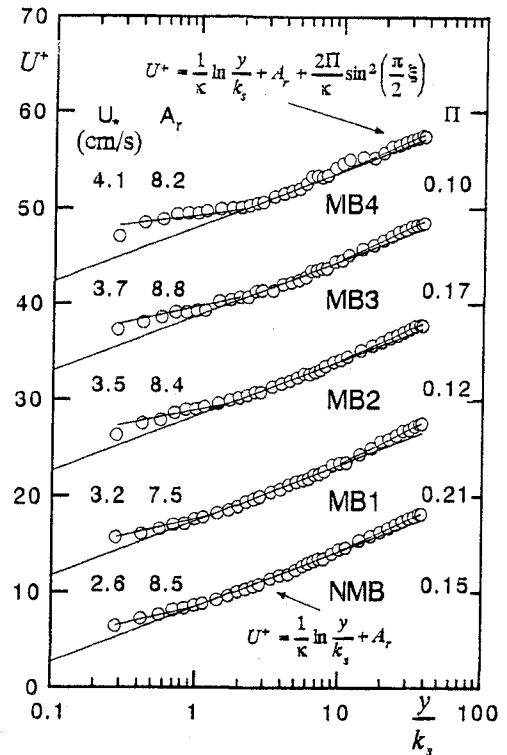


図-3 主流速分布

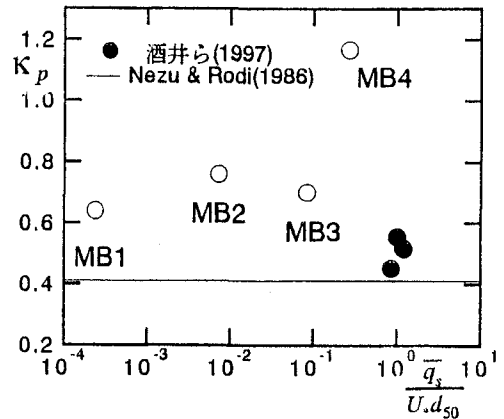


図-4 κ_p と掃流砂量との関係

(3) 乱れ強度およびReynolds応力分布

図-5は、主流方向および鉛直方向の乱れ強度 u'/U_* 、 v'/U_* の分布を示したものである。河床付近での分布を詳細に検討するため、 $0 \leq y/h \leq 0.3$ の範囲を示している。なお、図中には次式で表されるような定常等流時に成立する乱れ強度の普遍分布式¹⁰⁾を併示した。

$$u'/U_* = 2.26 \exp(-0.88 \xi) \quad (2)$$

$$v'/U_* = 1.23 \exp(-0.67 \xi) \quad (3)$$

底面近傍においては、NMBで乱れの遷減が見られるが、掃流砂量の増加にともなう u'/U_* 、 v'/U_* ともに大きくなる傾向がある。これは、掃流砂の背後に発生するせん断層によって、乱れが増加することが一因と考えられる。

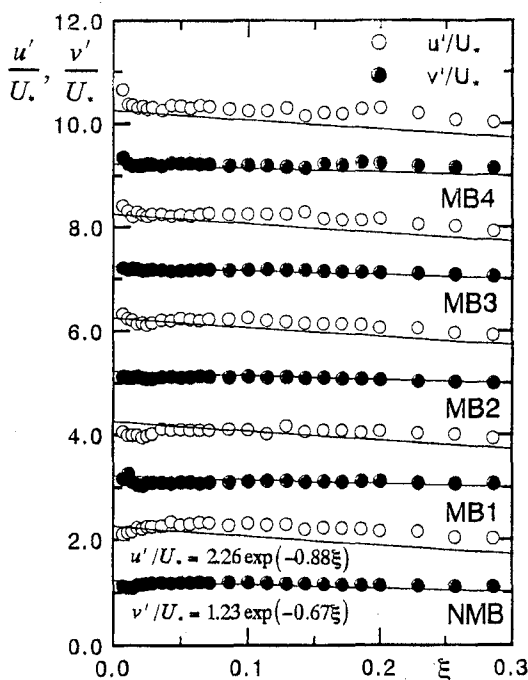


図-5 乱れ強度分布

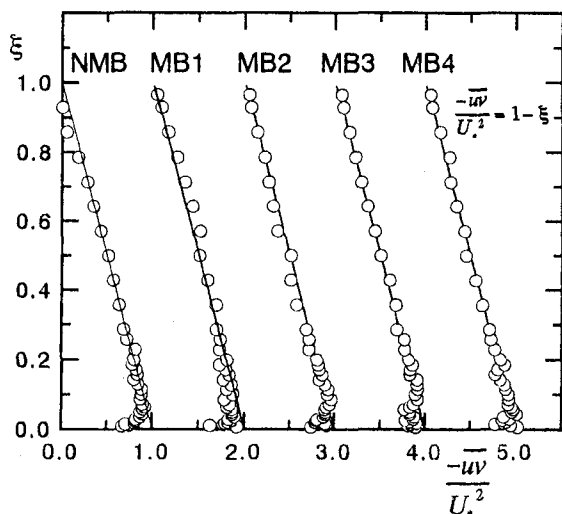


図-6 Reynolds応力分布

図-6は、Reynolds応力 $-\overline{uv}/U^2$ を示したものである。図中の直線は、2次元開水路等流時に成立するReynolds応力の三角形分布である。

$$-\overline{uv}/U^2 = 1 - \xi \quad (4)$$

いずれのケースについても、式(4)とよく一致しており、ほぼ等流状態で実験が行われたことが確認できた。また、掃流砂量の増加に伴って底面付近で式(4)に近づく傾向が見られる。これも先述の通り、掃流砂の後方に生じるせん断層によって、運動量輸送が活発に行われたためであろう。

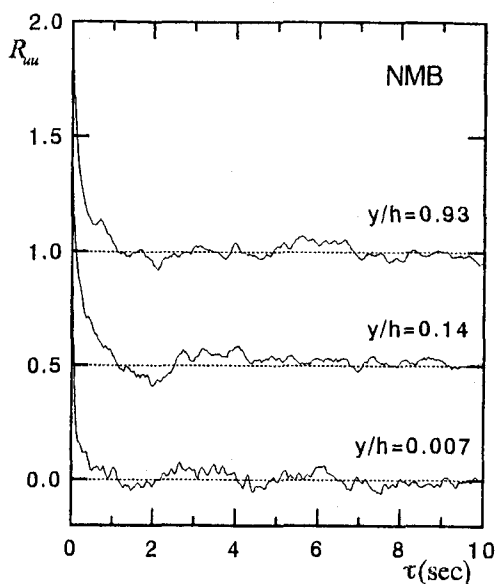


図-7(a) 自己相関係数(NMB)

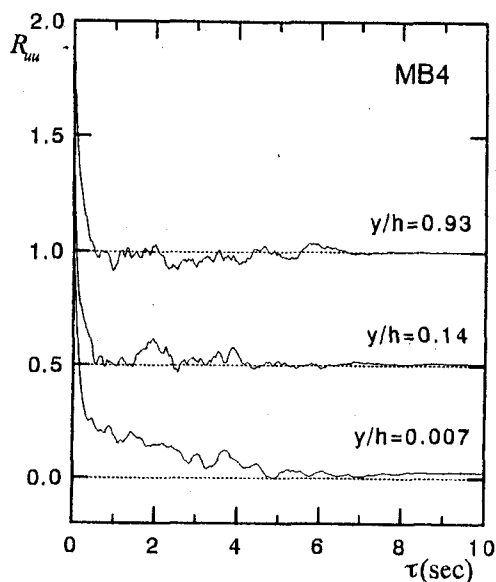


図-7(b) 自己相関係数(MB4)

(4) 自己相関係数

流下方向乱れ変動成分の自己相関係数 R_{uu} は、遅れ時間を τ とすると、次式のように表される。

$$R_{uu}(\tau) = \overline{u(t) \times u(t+\tau)} / \overline{u(t)^2} \quad (5)$$

図-7(a)、図-7(b)はそれぞれNMBおよびMB4における自己相関係数 R_{uu} を底面近傍から内層にかけて示したものである。掃流砂のあるケースの方が自己相関係数のゼロに達する時間が増加していることが観察される。これは、掃流砂の大きな運動により、渦のスケールが増加していることを示すものである。

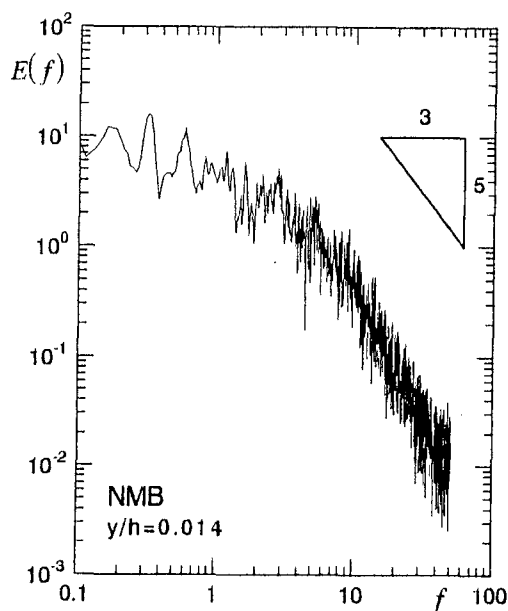


図-8(a) スペクトル分布(NMB:y/h=0.014)

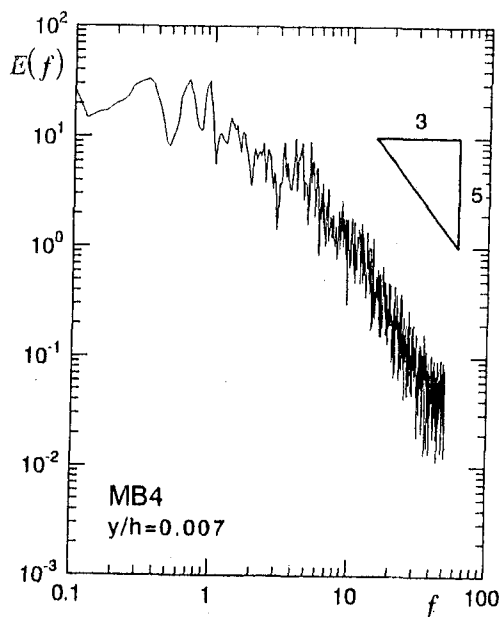


図-8(b) スペクトル分布(MB4:y/h=0.007)

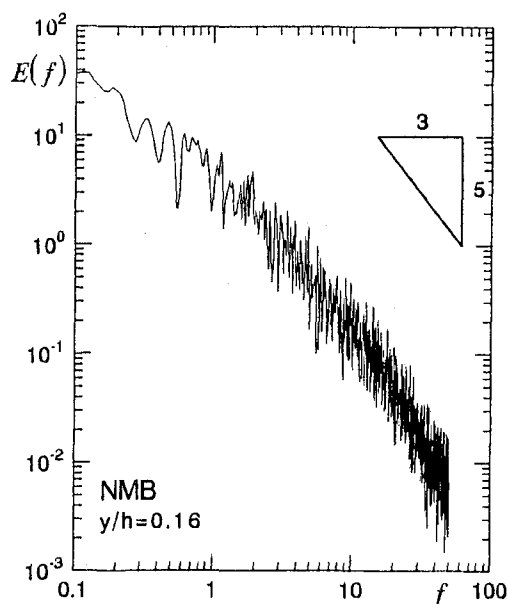


図-8(c) スペクトル分布(NMB:y/h=0.16)

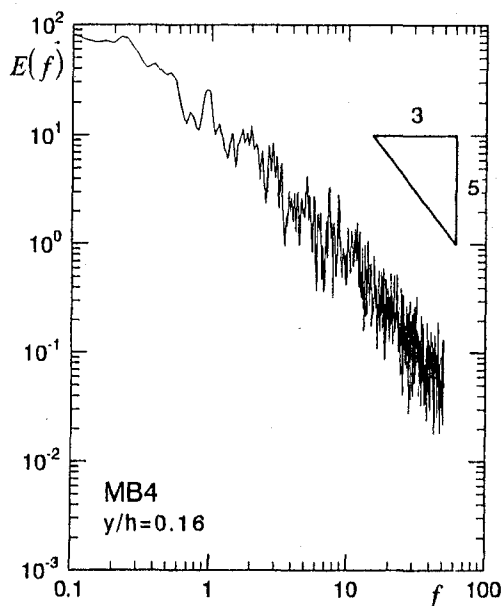


図-8(d) スペクトル分布(MB4:y/h=0.16)

(5) スペクトル分布特性

Nakagawa & Tsujimoto¹¹⁾は、河床波上の流れのスペクトル分布が、-3乗則を満たすことを示した。楊ら⁷⁾は、平坦河床上の流れのスペクトル分布について検討しているが、高周波領域における詳細は明らかではない。図-8に、掃流砂の存在しないNMBと最も掃流砂量の多いMB4について、その底面近傍および対数則領域におけるスペクトル分布を示す。いずれの場合にも、慣性小領域において式(6)のKolmogoroffの-5/3乗則を満たしていることがわかる。

$$E(f) = \frac{A_s}{(2\pi)^{4/3}} U^{2/3} \epsilon^{1/3} f^{-5/3} \quad (6)$$

ここに、 $A_s=0.5$ はKolmogoroff定数、 E は乱れのパワー・スペクトル密度、 ϵ は逸散率、 f は周波数である。また、MB4の底面近傍におけるスペクトル分布の低周波領域にピークが確認できたが、これが粗度の影響であるのか、掃流砂の運動によるものであるかは、現段階では断定できない。今後解明する必要があると考えられる。

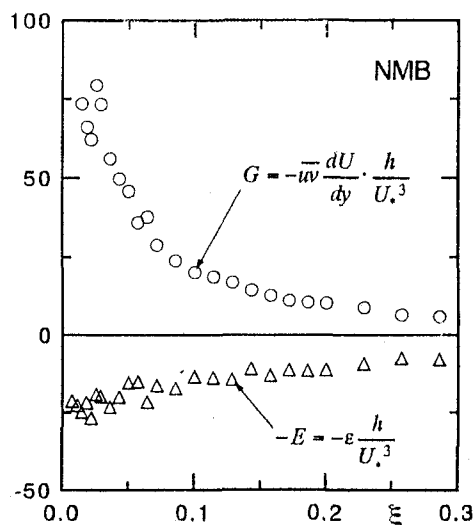


図-9(a) エネルギー収支(NMB)

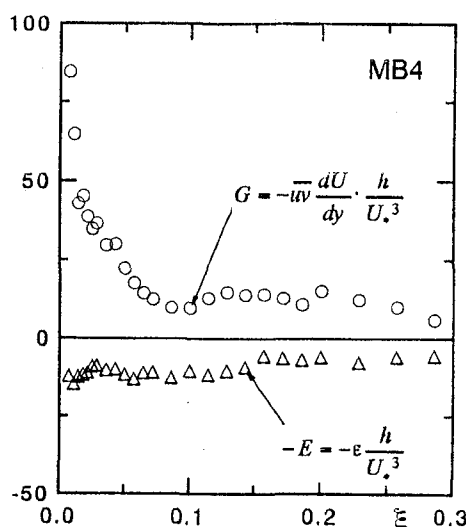


図-9(b) エネルギー収支(MB4)

(6) エネルギー収支

図-9は、乱れの発生率 G および逸散率 ε の鉛直方向分布を示したものである。なお、逸散率については、先述したとおり式(6)が慣性小領域で成立することが示されたので、式(6)から逸散率を算出した。若干発生率の方が逸散率より大きな値をとっている。これは、拡散作用によって外層にエネルギーが輸送されるためと思われる。すなわち、発生したエネルギーの一部が流砂の運動エネルギーに転化するためであろう。このように、全体的傾向は滑面開水路流れと同様であるが、掃流砂の存在するケースMB4では、掃流砂の存在しないNMBに比べて、河床付近で発生率 G が減少していることが認められる。これは、河床付近における流速の一様化によって、速度勾配が減少したことが原因である。

4. おわりに

掃流砂を有する平坦河床上流れについて、掃流砂量の測定を行うとともに、FLDAによる乱流計測を初めて行い、以下のような結論が得られた。

(1) 主流速分布は、内層ではほぼ対数則に従うが、底面付近では対数則から上方に逸れ、流速の一様化が生じている。また、流速の一様化の傾向は、流砂量の増加に伴い強まる。

(2) 掃流砂の存在によって、河床付近では乱れ強度が増加し、その傾向は掃流砂量が大きいくほど顕著となる。

(3) 掃流砂の存在する流れの底面近傍においても、スペクトル分布は慣性小領域でKolmogoroffの-5/3乗則を満たしていることが示された。

(4) 掃流砂の存在する場合の乱れの発生率は、底面付近において掃流砂の存在しない場合に比べて小さくなる。これは、流速の一様化によって速度勾配が減少したことによるものである。

参考文献

- 1) Nakagawa, H. and Nezu, I. : Experimental Investigation on Turbulent Structure of Backward-Facing Step Flow in an Open Channel, *J. of Hydr. Res.*, Vol.25, pp.67-88, 1987.
- 2) Nezu, I. and Nakagawa, H. : *Turbulent Shear Flows*, Springer-Verlag, Vol.6, pp.313-337, 1989.
- 3) Nezu, I., Kadota, A., Toda, T. and J. X. He : *6th International Symposium on Flow Modelling and Turbulence Measurements*, IAHR, pp.91-98, 1997.
- 4) Nezu, I., Kadota, A. and Kurata, M. : *6th International Symposium on Flow Modelling and Turbulence Measurements*, IAHR, Balkema, Rotterdam, pp.695-702, 1996.
- 5) Song, T., Graf, W. H. and Lemmin, U. : Uniform Flow in Open Channels with Movable Gravel Bed, *J. Hydr. Res.*, Vol.31, No.6, pp.861-876, Dec. 1994.
- 6) 楊永荻・平野宗夫：平坦な移動床流れの抵抗則，*水工学論文集*，第39巻，pp.483-488, 1995.
- 7) 楊永荻・平野宗夫・藤田恭三：開水路流れの乱流構造に及ぼす掃流砂の影響，*水工学論文集*，第41巻，pp.795-800, 1997.
- 8) Nezu, I., Tominaga, A. and Nakagawa, H. : Field measurements of secondary currents in straight rivers, *J. Hydr. Engrg.*, ASCE, Vol.119, No.5, 1993.
- 9) 酒井哲郎・後藤仁志・アバス・イエガネ・バクチャリ：シートフローへの遷移領域における砂粒子運動と流れ場の相互作用に関する基礎的実験，*水工学論文集*，第41巻，pp.825-830, 1997.
- 10) Nezu, I. and Nakagawa, H. : *Turbulence in Open Channel Flows*, IAHR Monograph, Balkema, Rotterdam, 1993.
- 11) Nakagawa, H. and Tsujimoto, T. : Spectral analysis of sand bed instability, *J. Hydr. Engrg.*, ASCE, Vol.110, No.4, pp.467-483, 1984.

(1997. 9. 30受付)