

掃流砂を伴う開水路流れの 乱流構造に関する研究

襮津家久¹・鬼束幸樹²・倉田昌明³・江崎慶治⁴

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 (同上)

³正会員 工修 (株)タクマ (〒660-0806 尼崎市金楽寺町2丁目2番33号)

⁴学生員 京都大学大学院 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)

粗面上の流れおよび掃流砂の存在する平坦河床上的流れにおいて、ファイバー型レーザ流速計(FLDA)を用いた高精度な乱流計測を行うと同時に、流砂量測定を行うことによって、掃流砂の運動、あるいは流砂量の変化に対して、乱流特性量がどのような影響を受けるかについて実験的検討を行った。その結果、特に河床付近を転動、滑動および跳躍しつつ流下する掃流砂の挙動によって、底面付近の主流速分布に一様化指向が生じること、乱れ強度およびReynolds応力が底面近傍で増加すること、また平均流エネルギーが掃流砂の運動に消費されるため底面付近における乱れ発生率の欠損が顕著となることなどが明らかとなった。

Key Words : FLDA, movable flat bed, mean-flow structure, turbulence intensity, sediment transport

1. 緒 論

一般に河川は、水流のみならず土砂を運搬する機能も兼ね備えている。そうした浸食、堆積による流路形状および河床形状の変化が洪水時に河川災害を引き起こす原因となり、また水運の円滑な運用を妨げることが、相当古くから注目され、その制御が望まれた。そのため、流れ、流砂および河床形状の三者間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。最近では、Nezu *et al.*¹⁾が河床波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もった渦の挙動と、土砂輸送現象との関連についても解明を行った。しかし、流砂が流れに及ぼす影響については、その流速計測の困難さのため、これまで十分な研究成果が得られておらず、未だ確固たる知見が得られていない

のが現状である。そのため、流砂運動が流れに及ぼす影響を解明することが現在望まれている。

掃流砂を伴う開水路流れの計測には、古くからピトー管が用いられ、底面付近を除いた領域における平均流速分布については幾分検討されているものの²⁾、ピトー管の精度で掃流層内を計測することは困難であった。しかし、超音波ドップラー流速計(ADVP)の出現により、近年掃流砂を伴った平坦河床上的流れが計測され、その平均流特性や乱流統計量について議論されるようになった。Song *et al.*³⁾は、ADVPを用いて掃流砂の存在する急勾配河床上的乱流計測を行い、掃流砂により河床付近において摩擦速度で無次元化された乱れ強度およびReynolds応力が、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。楊ら⁴⁾は、掃流砂の存在する平坦な移動床上的流れを計測し、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を示した。さらに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⁵⁾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ADVPを用い

表-1 水理条件 (上: 移動床実験, 下: 固定床実験)

Case	h (cm)	U _m (cm/s)	U _s (cm/s)	Q (l/min)	Re (x10 ⁴)	Fr	S _b	q _g U _g (g/s)	τ _{bc}	τ _{bc}
NMB	7.0	40.8	2.9	14.2	2.9	0.49	1/1000	-	-	0.023
MB1	7.0	50.0	3.2	17.5	3.5	0.60	1/700	2.4x10 ⁻⁴	-	0.035
MB2	7.0	94.7	3.5	19.1	3.8	0.68	1/600	7.1x10 ⁻⁴	0.027	0.043
MB3	7.0	97.8	3.7	20.2	4.0	0.70	1/500	8.9x10 ⁻⁴	-	0.046
MB4	7.0	94.0	4.1	22.4	4.3	0.77	1/400	1.9x10 ⁻⁴	-	0.053

Case	h (cm)	U _m (cm/s)	U _s (cm/s)	Q (l/min)	Re (x10 ⁴)	Fr	S _b
FB1	7.0	40.8	2.9	14.2	2.9	0.49	1/600
FB2	7.0	50.0	3.1	17.5	3.5	0.60	1/700
FB3	7.0	97.8	3.7	20.2	4.0	0.70	1/600
FB4	7.0	94.0	4.5	22.4	4.3	0.77	1/400

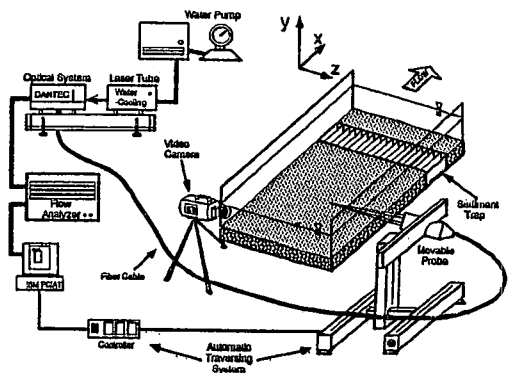


図-1 計測システム

て計測し、平均流速分布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。一方、後藤ら⁹⁾は、流体と粒子との相互作用を考慮した掃流層の数値解析を行い、掃流砂量の増大に伴って流れ場の運動量欠損が顕著となり、また底面付近のReynolds応力分布に若干の変化が認められることを示唆した。さらに酒井ら¹⁰⁾は、ガラスビーズを用いた移動床の上の流れ場をピトー管により流速測定し、底面せん断応力が増加するにつれ、粒子の不規則な跳躍現象が見られるsaltation層と清水層とから成るtwo-layer typeの構造から、粒子が河床近傍をシート状に移動するシートフロー層、saltation層および清水層とから成るthree-layer typeの構造へと変化する遷移領域の存在を見出し、それぞれの層における粒子の運動が流速分布に大きな影響を与えることを明らかにした。

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あるいはReynolds応力分布と掃流砂量との関係についても未だ確固たる知見が得られていないのが現状である。

以上のことから、本論文では、側壁の影響を受けない2次元流れを対象とし、移動床上での流れを高精度なファイバー型2成分レーザー流速計(FLDA)を用いて計測を行うことにより、平坦河床上における掃流砂が乱流構造に及ぼす影響について検討を行う。また、実験を行う上で掃流砂量を増加させるために流速を変化させると、無次元掃流砂量のみならず、粗度Reynolds数も変化する。そのため、同一の粗度Reynolds数における固定床実験も行い、両実験結果を比較することで掃流砂の運動による効果を考察する。

2. 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。移動床実験では、まず水路上流端より3mの位置から流下方向に長さ7mにわたって厚さ4cmに珪砂を平坦に敷き詰めて移動床とし、その上流側の3m区間および下流側の1m区間において、水路床高さが移動床と同一となるように固定床を設置した。なお、用いた珪砂は、中央粒径が $d_{50}=1.8\text{mm}$ で粒径のばらつきがほとんどない様砂である。また、固定床実験では、移動床で用いたものと同様の珪砂を鉄板にニスで張りつけた固定床のユニットを、水路上流端から11mの区間について敷き詰めた。

流れ場の作成方法としては、下流堰を上げた状態で水路内に慎重に注水し、十分に水深を上げた後、各ケースごとの流量に設定し、水路床勾配および堰を調節することにより水深を微調整し、平坦河床上に掃流砂の存在する等流を形成させた。

図-1に瞬間流速の計測に用いたレーザー流速計の計測システムを示す。座標軸は流下方向にx軸、x軸に直角上向きにy軸及び水路横断方向にz軸をとった。用いたレーザー流速計は、水冷(2W)の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ー流速計(FLDA)である。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下流の位置とし、計測点は、鉛直方向に35点設け、内層および外層部分を詳細に計測した。これらのレーザー流速計周辺の計測システムでは、バースト信号のソフト光の位相、バイアス制御などの計測に必要なすべての設定がコンピュータ支援で行うことが可能であり、またドップラー信号が相関法によって処理されるため、高精度の乱流計測が可能となっている。このようにして得られた計測データは、

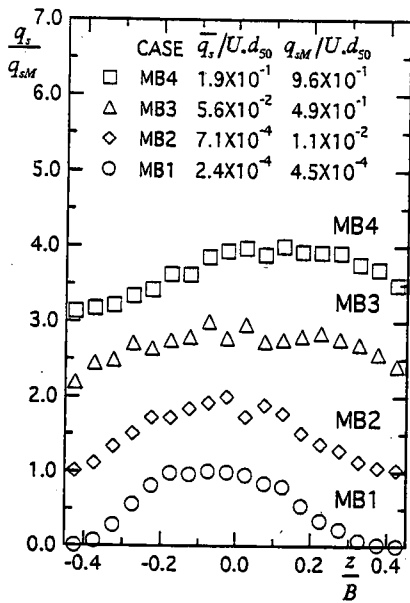


図-2 流砂量分布

ワークステーションに転送され、流速変換および乱流統計量に関する各種の統計処理が行われた。掃流砂収集箱は、流速計測断面から1m下流に設置した。この掃流砂収集箱は、プラスチック製の箱で作られており、水路幅50cmを18分割することにより、掃流砂の絶対量のみならず水路横断方向の流砂量分布も測定可能となっている。

表-1に、移動床実験および固定床実験の水理条件を示した。ここに、 U_m は断面平均流速、 U_s は摩擦速度、 $Re(=U_m h/\nu)$ はReynolds数、 $Fr(=U/\sqrt{gh})$ 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、 $q/U.d_{50}$ は無次元平均掃流砂量、 q_s は単位幅当りの流砂量である。移動床実験については、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 MB1~4合わせて5通りについて行われた。同様にして、固定床実験では移動床実験における掃流砂の存在する4ケースの水理条件にそれぞれ対応して、FB1~4の4ケースについて計測を行った。計測時間は、各測定点につきNMBは120sec、MB1, 2, FB1, 2は90sec、またMB3, 4, FB3, 4については60secとした。測定周波数は、ケース間に若干差があるものの、概ね底面近傍で約50Hz、その他の領域では120~200Hzであった。

3. 実験結果および考察

(1) 流砂量分布

掃流砂を伴う流れにおいて、流れが3次元である場

合、乱流統計量は掃流砂だけでなく3次元性にも影響を受ける。したがって、流れ場を2次元に保つ必要がある。Stearns⁸⁾は、2次流の影響により最大流速点が水面より降下することを指摘した。その後、Lane⁹⁾やEinstein¹⁰⁾等によりアスペクト比 B/h と最大流速点との定量的関係の検討が行われ、アスペクト比 B/h が10以上では最大流速点の降下現象は生じないことが示された。彼らは単に主流速分布のみを計測して流れの3次元性を考察したに過ぎないが、Nezu *et al.*^{11), 12)}は開水路等流の主流速分布だけでなく2次流の計測を行い、アスペクト比 B/h が5以上の場合に最大流速点の降下現象は生じないことを証明した。ただし、Nezu *et al.*の実験は滑面で行われているため、彼らの結果が本実験の対象の移動床流れに適用できる保障はない。そこで、本研究では、Nezu *et al.*の基準に大きく安全率を加え、水深を7cmにすることによりアスペクト比を7.14に設定した。一方、楊ら⁹⁾は平坦河床上の掃流砂の実験から、同一のアスペクト比においても掃流砂の絶対量によって流砂量の分布形状が変化し、また、非対称な分布を示す場合もあることを明らかにした。そのため、本実験においては、流れ場が2次元であるかどうかを検討し、あわせて流砂量によって横断方向の流砂量分布に相違が生じるかについても吟味した。

図-2に水路横断方向の流砂量分布を示す。ここに、 q_{sm} は等分割断面における掃流砂分布の最大値である。縦軸は各ケースごとに鉛直方向に1ずつ移動させて表示した。いずれのケースにおいても大略的に水路中央を中心とした山形の分布形状を示しており、楊ら⁹⁾の指摘したような水路横断面における2, 3の山形を有する非対称な形状分布は見られなかった。従って、楊らの結果はコーナーフローの影響を受けて掃流砂量の分布形状が変化したものと考えられる。これより、本実験における水路中央での流れはほぼ2次的であると考えられる。

(2) 原点補正量および平均流速分布

摩擦速度 U_s は乱流統計量および土砂水理学においてきわめて重要な水理量である。乱流理論において U_s は各種の乱れ特性量の内部変数表示に用いられ、一方、土砂水理学において無次元掃流力などの流砂量を算定する上で用いられる。このため、 U_s の評価は厳密に行うことが必要である。

図-3は、移動床実験および固定床実験のReynolds応力 $-\overline{uv}/U_s^2$ を示したものであり、横軸については、それぞれのケースを1ずつシフトさせて表示している。ところで、2次元開水路等流におけるReynolds応力は、粘性応力の効果を無視すれば次式の三角形

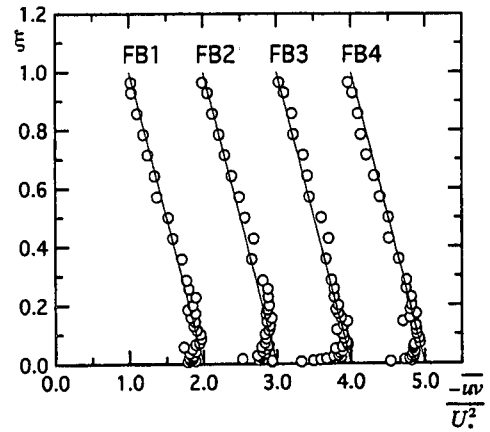
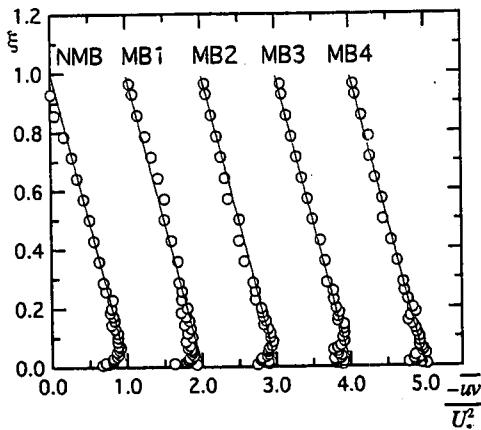


図-3 Reynolds 応力分布 (左図：移動床実験，右図：固定床実験)

分布を示す。

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

$$\xi' = \frac{y'}{h} \quad (2)$$

ただし、 y' は粗度頂部からの鉛直方向高さを表している。同図より、いずれのケースについても、流砂の影響が及ばないと考えられる外層領域において概ね三角形分布に従っていることがわかる。そこで、式(1)に実測値を当てはめて、最小自乗法により摩擦速度を算出した。

ところで、粗面流れにおいて、平均流速を対数則表示する際には、しばしば原点補正が行われる。原点補正量を Δy とすると、対数則は次式で表される。

$$U^+ = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{y' + \Delta y}{k_s} + A_s \quad (3)$$

ここに、 $U^+ = U/U_s$ 、 A_s は積分定数、 κ はKarman定数、 k_s は相当粗度で $k_s = d_{50}$ とした。Nezu&Nakagawa¹²⁾は、境界層流、管路流および開水路流れにおいてもKarman定数が $\kappa=0.41$ の普遍定数となることを指摘しており、本研究のような掃流砂の存在する平坦河床上の流れにおいても適用可能と考えられる。したがって、式(3)においてReynolds応力から評価した摩擦速度および得られた流速分布を用いた最小自乗法により、 Δy および A_s が算出される。固定床実験においては、いずれのケースにおいても Δy はほぼ $d_{50}/4$ となった。これは過去の粗面流れの知見と一致する⁹⁾。よって、固定床実験における原点補正量は $d_{50}/4$ 一定とした。移動床実験の原点補正量についても固定床実験と同様にして Δy 及び A_s を求めた。図-4に掃流砂量に対する原点補正量の変化を示した。なお、図中には移動床上の流速計測を行ったGuy *et al.*²⁾および

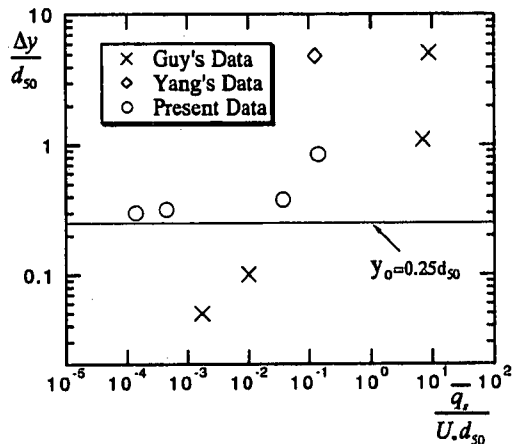


図-4 掃流砂量と原点補正量との関係

Yang&Hirano¹³⁾の実験結果を併示した。本実験における原点補正量 Δy は多少のばらつきを見せるものの、掃流砂量の増加に伴い全体的に増加傾向を示していることがわかる。しかし、Guy *et al.*及びYang&Hiranoの結果に見られるような、粒径の6倍程度の大きな補正を行うと、対数則表示した際の流速分布の勾配が変化し、みかけ上のKarman定数が未知量となることから、補正量が大きい際にはこの方法は適当ではない¹⁴⁾。また、先述したとおり、移動床上の乱流構造は、粗面による影響のみならず掃流砂の運動による影響も受けるので、掃流砂の影響のみを抽出するためには、固定床実験で行ったものと同量の原点補正を施すことが適当であると考えられる。以上の観点から、本研究における移動床実験の原点補正量は固定床実験における補正量と同じ $\Delta y = d_{50}/4$ 一定とし、鉛直座標を以下のように定義する。

$$y = y' + \Delta y \quad (4.a)$$

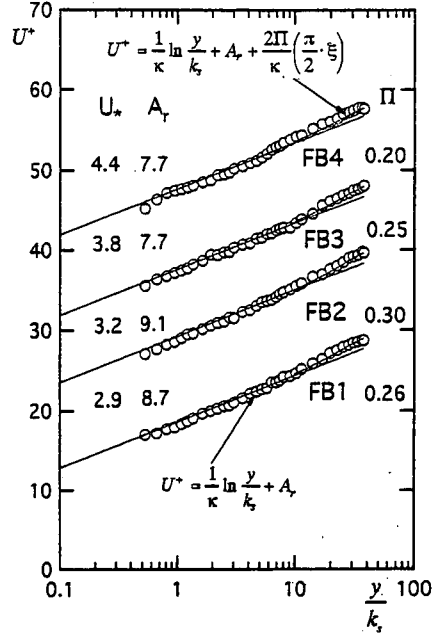
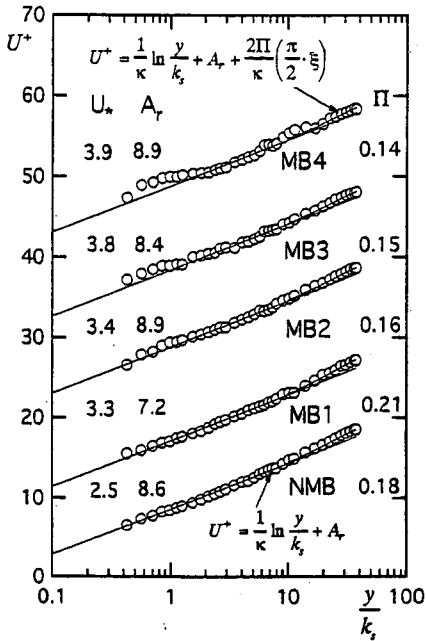


図-5 平均流速分布 (左図：移動床実験，右図：固定床実験)

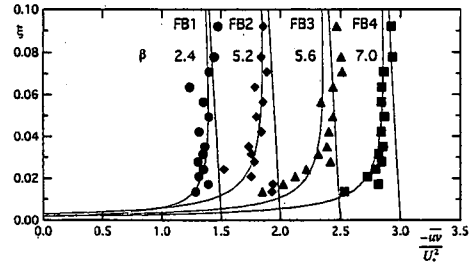
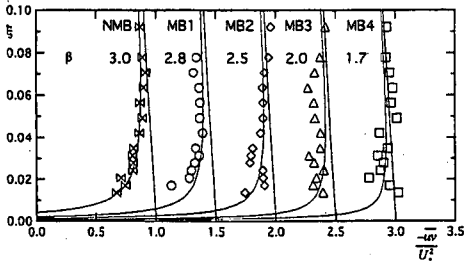


図-6 底面付近におけるReynolds 応力分布 (左図：移動床実験，右図：固定床実験)

$$\xi = \frac{y}{h} \quad (4.b)$$

$$y^* = \frac{U_* y}{\nu} \quad (4.c)$$

以下に原点補正後の平均流速分布および乱流諸量について検討を行う。

図-5は、移動床実験および固定床実験の平均流速分布を示したものである。なお、図中には式(3)に示した対数則を直線で、次式で表されるlog-wake則¹⁵⁾を曲線で示した。

$$U^* = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{y}{k_s} + A_r + \frac{2\Pi}{\kappa} \sin^2 \left(\frac{\pi}{2} \cdot \xi \right) \quad (5)$$

ここに、 Π はwake強度パラメータである。固定床実験については全てのケースにおいて、内層の平均流速分布が、概ね式(3)の対数則に従っている。一

方、移動床実験については、比較的掃流砂量の少ないMB1及びMB2では、内層の流速分布が式(3)の対数則に従っているが、比較的掃流砂量の多いMB3及びMB4では、底面付近の掃流砂層 $y/k_s = 1 \sim 2$ までの領域において流速分布が対数則から上方に大きく逸れていることが観察される。この傾向は掃流砂量の増加に伴い顕著となる。これは、底面付近における掃流砂の運動が流体を鉛直方向に混合させるために、底面付近で流速勾配が一様化したものと考えられる。また、MB3及びMB4における底面の極近傍で流速勾配が急激な増加をしている。これは、河床がルーズであるために仮想底面よりも下方の流れである浸透流によって上層の流れが引っ張られるために生じたものと考えられる。

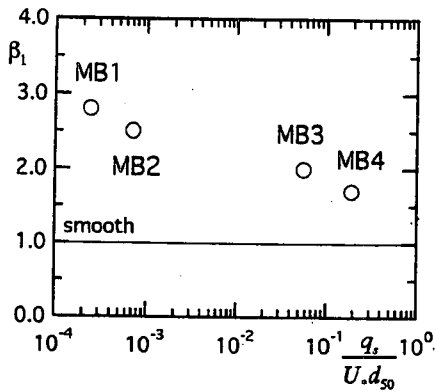


図-7 (a) 掃流砂量に対する β_1 の変化

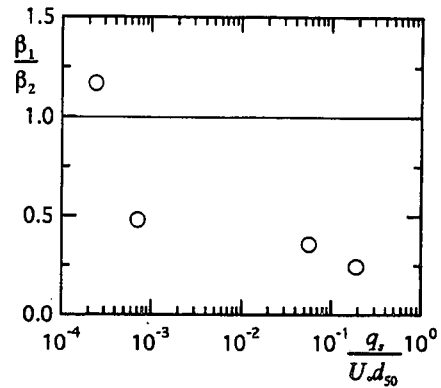


図-7 (b) 掃流砂量に対する β_1/β_2 の変化

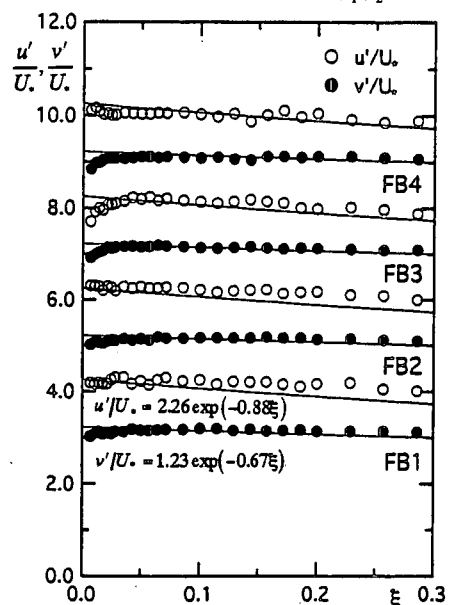
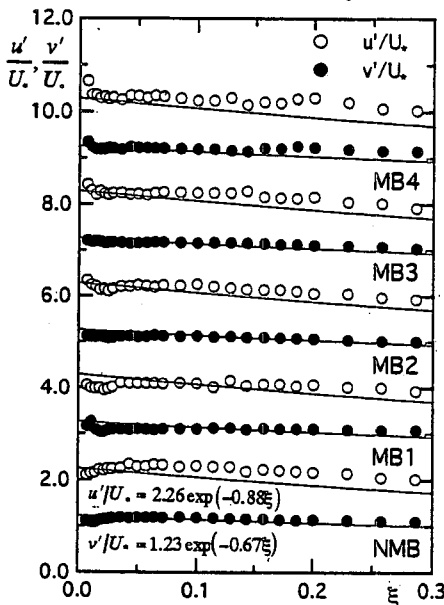


図-8 乱れ強度分布 (左図：移動床実験，右図：固定床実験)

(3) Reynolds応力分布

Reynolds応力分布については、図-3で既に示した。先述したとおり、式(1)で表される三角形分布に概ね従っていることから、ほぼ等流状態で実験が行われたことが確認できる。また、底面付近においては、粘性のために式(1)からずれることが知られており、粘性応力の効果を付加した次式で表される。

$$-\frac{\overline{uv}}{U_*^2} = 1 - \xi - \frac{1}{ky^*} \quad (y^* \geq 30) \quad (6)$$

移動床実験については、掃流砂量の増加に伴い式(1)に近づく傾向が見られる。特に、掃流砂層厚が $y/k_s = 1 \sim 2$ のMB3及びMB4では、その傾向が顕著である。そのため、図-6に底面付近のReynolds応力分布を拡大して示す。なお、図-6は、横軸に0.5ずつシフトさせて表示している。掃流砂量の増加に伴い

Reynolds応力が増加していることが分かる。そこで、Reynolds応力分布の第一近似として、底面における流砂量の効果を考慮し、粘性項に類似した補正項を加えた次式で近似する。

$$-\frac{\overline{uv}}{U_*^2} = 1 - \xi - \frac{\beta}{ky^*} \quad (7)$$

当然、滑面2次元等流時において補正係数 β は1をとる。掃流砂の存在しないNMBおよび固定床実験では、Reynolds応力分布に欠損が生じている。これは、粗面の効果によるものであり、従来の粗面乱流研究の見解と一致する。一方、移動床実験の場合、掃流砂量の増加に伴ってReynolds応力の底面付近の欠損量が減少していることが観察される。また、植生の場合、平均流が持つ平均エネルギーは乱れに対し、乱れエネルギーとして伝達され、さらに乱れか

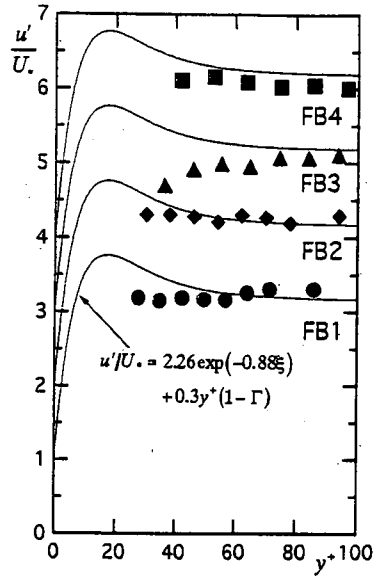
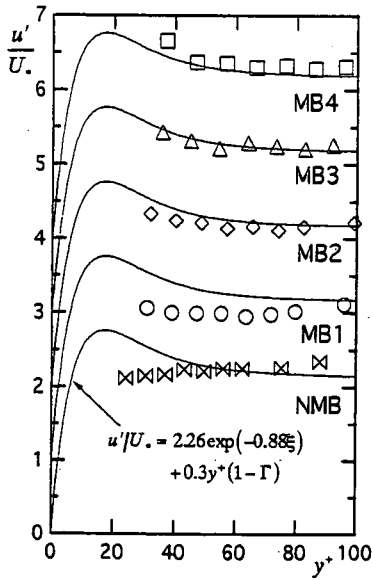


図-9 流下方向乱れ強度分布 (左図：移動床実験，右図：固定床実験)

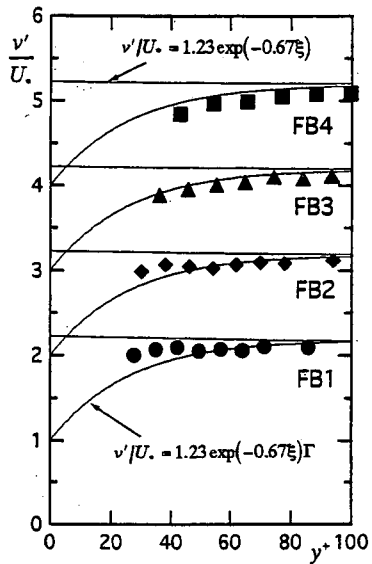
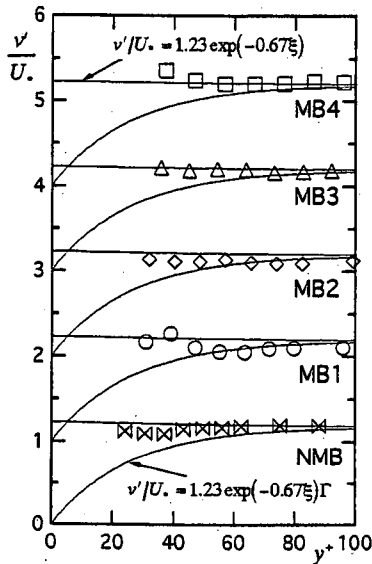


図-10 鉛直方向乱れ強度分布 (左図：移動床実験，右図：固定床実験)

ら植生へと乱れエネルギーが伝達されることによって植生が動揺する。このため、植生を伴う流れにおいては、流水が持つ乱れエネルギーは植生に分配されて減少し、Reynolds応力の欠損が明瞭に現れるものと考えられる。しかし、掃流砂を伴う流れ場の場合、掃流砂は流水が持つ乱れエネルギーからではなく、重力からも直接エネルギーを受けると考えられる。そのため、掃流砂量が増加すると、逆に掃流砂から流水へと乱れエネルギーが伝達され、その結果として、流砂を伴う流れでは清水や植生を有する流

れと比較し、底面付近での乱れが増加すると思われる。ただし、上述の説は仮説の域から脱しておらず、今後実験的に検討する必要がある。ここで、図-7 (a)に移動床実験における式(7)の係数 β_1 を掃流砂量に対して示す。掃流砂量の増加に伴い、滑面等流の値($\beta=1$)に漸近する様子が窺える。したがって、底面付近のReynolds応力については、粗面の効果よりも流砂運動の効果が支配的になるものと考えられる。また、図-7 (b)は固定床実験の β_2 に対する移動床実験の β_1 の比を示したものである。流砂量の増加に伴っ

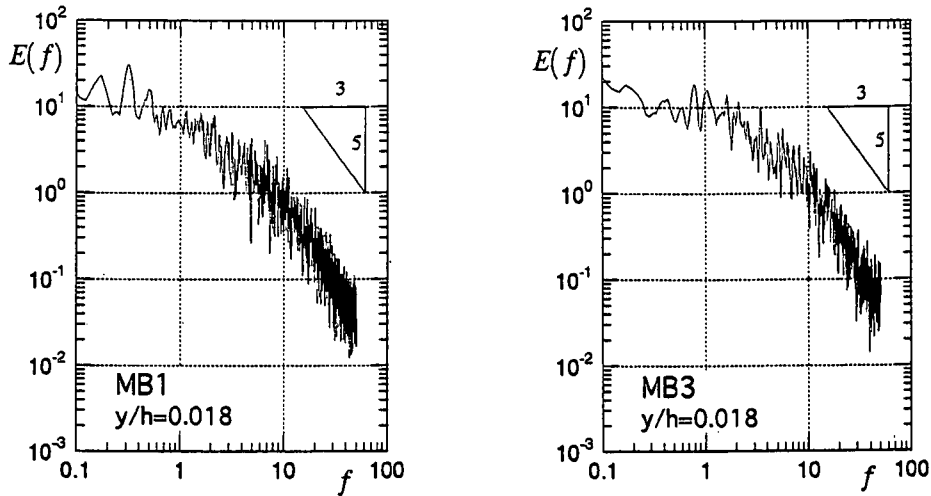


図-11(a) スペクトル分布 (移動床実験)

て、値は1付近から減少する傾向を示す。従って、同一の水理条件下においても掃流砂が存在する場合、底面におけるReynolds応力は粗面流れよりも欠損量が減少し、また、その傾向は掃流砂量の増加に伴い顕著となることが推察される。

(4) 乱れ強度分布

図-8(a)、図-8(b)はそれぞれ移動床実験及び固定床実験における乱れ強度の主流方向成分と鉛直方向成分の分布 u'/U 及び v'/U を ξ に対して示したものである。なお、図中には次式で示される定常等流時に成立する欄柵¹⁵⁾の乱れ強度の普遍式を併示した。

$$\frac{u'}{U} = D_u \exp(-\lambda_u \xi) \quad (8)$$

$$\frac{v'}{U} = D_v \exp(-\lambda_v \xi) \quad (9)$$

式(8)および式(9)の係数は、 $D_u=2.26$ 、 $\lambda_u=0.88$ 、 $D_v=1.23$ 、 $\lambda_v=0.67$ である¹²⁾。固定床実験及び移動床実験における鉛直方向の乱れ強度は底面付近を除くと普遍式と概ね一致していることが観察される。ここで、掃流砂の影響が顕著な底面付近の乱れ強度分布について検討する。図-9は移動床実験及び固定床実験の底面近傍における乱れ強度 u'/U を内部変数 y^* に対して示したものである。図中には乱れ強度分布の普遍式に粘性の効果を付加した経験公式を併示した¹⁵⁾。

$$\frac{u'}{U} = D_u \exp(-\lambda_u \xi) \Gamma + C y^* (1 - \Gamma) \quad (10)$$

$$\Gamma = 1 - \exp\left(-\frac{y^*}{B}\right) \quad (11)$$

ダンピング関数中の B は減衰係数、また、 C は粘性底層における乱れ強度分布の勾配である。これらは滑

面等流であれば $B=10$ 、 $C=0.3$ となる¹⁵⁾。固定床実験については、併示した滑面等流の経験式よりも小さな値をとっており、過去の粗面乱流の知見と一致している¹⁴⁾。一方、移動床実験の乱れ強度 u'/U は、流砂量が増えるにつれて大きくなる。特に、流砂量の最も多いケースMB4においては、式(10)で表される関数と大略的に一致していることが分かる。これは、掃流砂層内の活発な粒子運動により河床付近の流体が混合した結果、流下方向成分の乱れ強度が増加しものと考えられる。本実験結果は、流砂量が増加しても顕著な変化がないことを示したSong et al.³⁾の結果や、掃流砂量の増加に伴い流下方向の乱れ強度が減少すると指摘した楊ら⁹⁾の結果とは異なる。この相違は、彼らの実験では超音波ドップラー流速計(ADVP)という比較的精度の低い流速計で計測され、しかも底面付近は詳細に測定されていないのに対し、本実験では、FLDAを用いて極めて底面近傍まで高精度に測定されたことで生じたものと考えられる。また、図-10に移動床および固定床実験における乱れ強度分布 v'/U を、 u'/U と同様の表示方法で示した。図中には、式(9)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式にダンピング関数を付加した壁面付近における鉛直方向乱れ強度の式(12)を併示した¹⁶⁾。

$$\frac{v'}{U} = D_v \exp(-\lambda_v \xi) \Gamma \quad (12)$$

ダンピング関数は式(11)と同様である。固定床実験における底面付近の鉛直方向乱れ強度分布は、粘性の効果を考慮した滑面の式(12)を若干上回る傾向は見られるものの、概ね一致している。一方、移動床実験の鉛直方向乱れ強度は、流砂量の増加に伴い底面近傍において乱れ強度が増加しており、普遍式(9)とほぼ一致する。これは、掃流砂の運動による空間的な

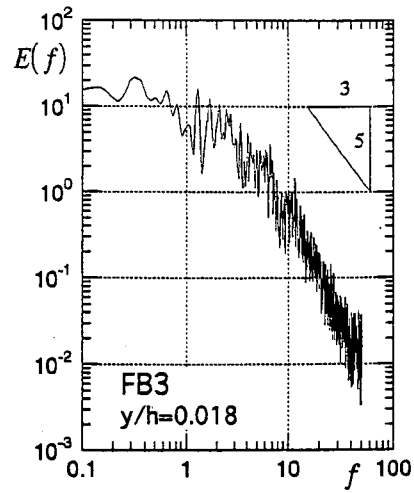
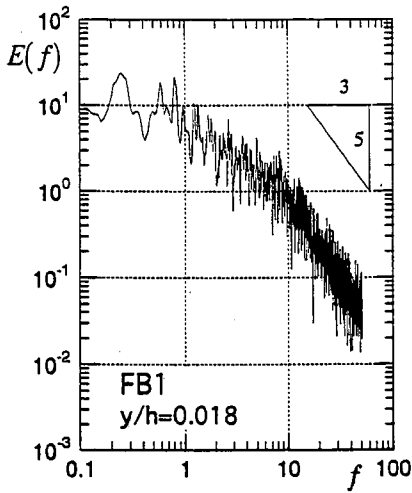


図-11 (b) スペクトル分布 (固定床実験)

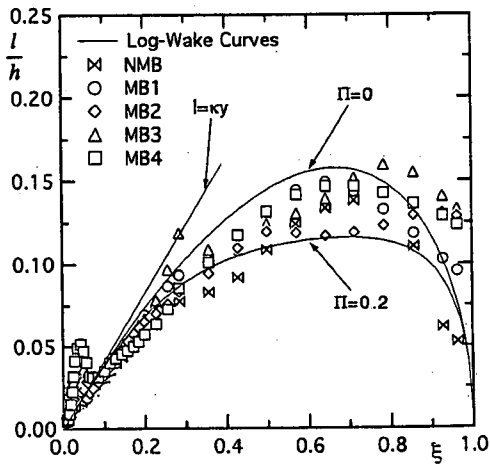


図-12 混合距離

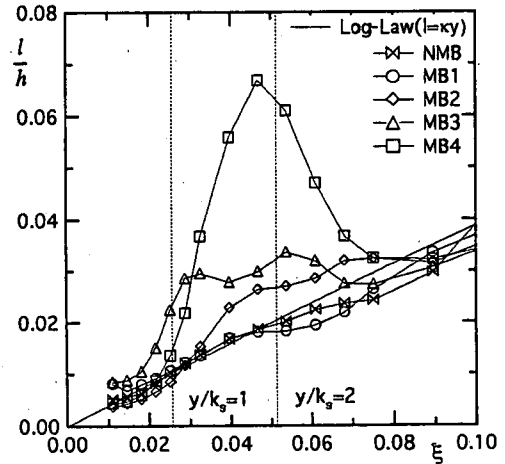


図-13 混合距離 (底面付近)

流体混合により増加した主流方向成分の乱れ強度のために、乱れの再配分率が増加し、鉛直方向成分の乱れ強度も増加したと解釈できる。また、その結果、等方位が促進されたと考えられる。なお、この傾向は、普遍式よりも減少するといったSong *et al.*³⁾の結果とは異なっており、その原因は主流方向成分のそれと一致すると思われる。

(5) スペクトル分布

図-11 (a)に、移動床実験について、図-11 (b)に、固定床実験におけるスペクトル分布をそれぞれ示した。これは、流れの計測が従来困難だった河床近傍 $y/h=0.018$ における分布を例として示したものである。いずれのケースも、慣性小領域において次式のKolmogoroffの-5/3乗則を満たしていることがわかる。

$$E(f) = \frac{A_s}{(2\pi)^{2/3}} U^{2/3} \varepsilon^{2/3} f^{-5/3} \quad (13)$$

ここに、 $A_s=0.5$ はKolmogoroff定数であり、 $E(f)$ は乱れのパワースペクトル密度関数、 ε は逸散率、 f は周波数である。MB1とFB1においては、概ね同様のスペクトル分布をしているが、MB3とFB3を比較すると、MB3の底面付近では、FB3よりも低周波領域から続く高いエネルギーレベルの領域が、若干高周波数側に伸びていることがわかる。これは移動床の流れ場においては、乱れエネルギーが、低周波領域で平均流から受け取ったものに加えて、流砂運動から得たものによって構成されているためと考えられる。そのため、間欠的に通過する掃流砂の運動がスペクトル分布に影響を与えたものと推測される。

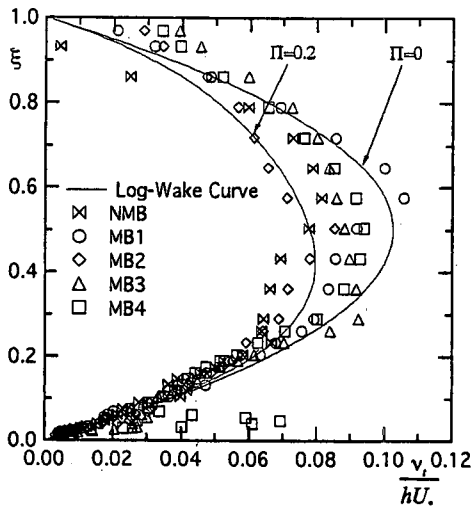


図-14 渦動粘性係数

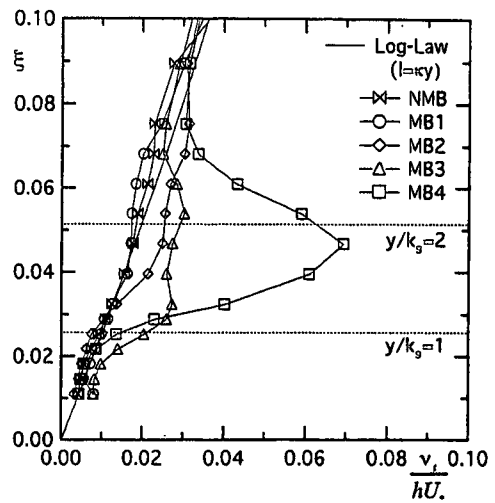


図-15 渦動粘性係数 (底面付近)

(6) 混合距離および渦動粘性係数

Prandtlの混合距離仮説より導入された混合距離 l は、式(14)のように定義づけられたもので、渦同士が衝突するまでの平均的な距離を示したものであり、渦のスケールを表す一つの指標である。

$$l^2 = -\overline{uv} / \left| \frac{\partial U}{\partial y} \right| \frac{\partial U}{\partial y} \quad (14)$$

図-12は、混合距離 l を示したものである。図中には、log-wake則を用いて求められた理論曲線および壁面付近で近似的に成立する直線分布 $l=ky$ を併示した。なお、流速勾配は3次の平滑化スプライン曲線により算出している。全体的に概ね理論曲線と一致しているが、底面付近では値が大きく変化していることがわかる。そこで、底面近傍を詳細に検討するために、図-13に、底面付近の混合距離 l の変化を拡大して示す。流砂量の増加に伴って、砂粒子が通過する領域における混合距離の値が系統的に増大している様子を確認することができ、MB3及びMB4では $y/k_s = 1 \sim 2$ までの領域でより顕著となっている。これは、流砂量の増加に伴いReynolds応力が増加することと速度勾配の一様化によるものである。つまり、掃流層内における流砂の挙動が水流の混合に寄与するため、組織だった構造が形成され、掃流砂が存在する層で渦のスケールが増大し、混合距離は顕著な増加を示す。一方、掃流層より若干上方では、漸次Reynolds応力が三角形分布に従い、速度勾配も対数則に従うために混合距離は理論曲線と一致を示す。

渦動粘性係数 v_t は、次式のように定義される。

$$v_t = -\overline{uv} / \frac{\partial U}{\partial y} \quad (15)$$

図-14に水深 h と摩擦速度 U によって無次元化された渦動粘性係数 v_t の実測値を記号で、滑面等流の分布を曲線で示した。渦動粘性係数も混合距離とほぼ同様に、全体的には、等流の分布と一致するが、底面付近で極端に増加していることが観察される。図-15に底面付近における渦動粘性係数の分布を拡大して示す。流砂量の増加に伴い渦動粘性係数も系統的に増加し、混合距離が示す分布と類似した形状を示す。これにより、流砂量の増加に伴い、底面における流速勾配が減少し、渦動粘性係数が系統的に大きくなることが示された。

(7) 乱れの発生機構

開水路等流のエネルギー収支は、乱れの発生率 G 、逸散率 ε 、乱流エネルギー拡散率 T_d 、圧力拡散率 P_d 、粘性拡散率 V_d の次式で表される関係から成り立っている。

$$P_d = G - \varepsilon - T_d - V_d \approx G - \varepsilon - T_d \quad (16)$$

$$G = -\overline{uv} \frac{\partial U}{\partial y} \quad (17)$$

$$\varepsilon = \left(\frac{(2\pi)^{2/3}}{A_s} \cdot E(f) \cdot U^{-2/3} \cdot f^{-5/3} \right)^{3/2} \quad (18)$$

$$T_d = \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{2} (\overline{u^2 + v^2 + w^2}) v \right) \approx \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{3}{4} (\overline{u^2 v + v^3}) \right) \quad (19)$$

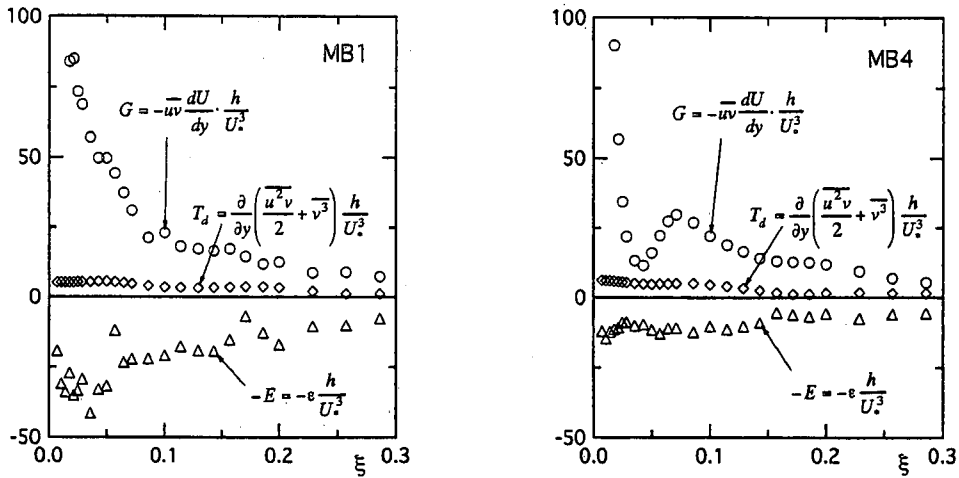


図-16 エネルギー収支 (左図:MB1, 右図:MB4)

ここに、 $E(f)$ は乱れのパワースペクトル密度関数、 $A_s=0.5$ はKolmogoroff定数である。なお、逸散率 ϵ については図-11に示したように、掃流砂を伴った平坦河床上の流れにおけるスペクトル分布が慣性小領域においてKolmogoroffの-5/3乗則を満たしたことから、式(18)より算出している。また、今回取り扱ったような高Reynolds数の場合には、きわめて底面近傍においてしか粘性拡散率の圧力拡散項に対する効果がないために無視できる。図-16は移動床実験における乱れエネルギーの収支を $0 < y/h < 0.3$ の範囲に対して表したものであり、乱れ発生率 G 、逸散率 ϵ 、乱流エネルギー拡散率 T_d の3つの変化特性について示した。拡散率は、鉛直方向の乱れ成分 v によるエネルギーの輸送を表すものであるが、相対的に非常に値が小さいためその変化特性が全体の収支へ及ぼす影響は小さいと言える。底面付近における発生率は、流砂量の増加に伴って減少する。これは、Reynolds応力の値が大きくなるものの、流速勾配が激減したことによる。特に、流砂量の最も多いMB4ではその傾向が底面付近で顕著に見られる。また、底面付近での急激な増減は、図-5で示したように浸透流の上層と流れの下層を計測したために、流速勾配が急激な増減を呈しているからである。掃流砂を伴った流れ場では、底面付近において平均流のもつエネルギーの一部は河床近傍を運動する流砂に与えられるため、その分、発生率が急激に減少していると考えられる。また、逸散率は流砂量の増加に伴い全体的に値が減少しており、発生率と比較すると、底面極近傍で値に差異が生じている。掃流砂量の最も多いMB4では、底面とのせん断による損失に加えて、河床近傍に形成された砂粒子濃度の高いシートフロー的な層内の粒子間衝突による損失、あるいは砂粒子を水

流中に維持するために生じる損失 ϵ が、発生した乱れエネルギーから補填されるものと推測される。このことが、底面近傍における発生率と逸散率の間に差異が生じた原因であると考えられる。

4. 結論

本研究では、掃流砂を伴った平坦河床上の乱流構造を解明することを目的とし、FLDAを用いた高精度な乱流計測を行い、掃流砂の存在によって平均流速、乱れ強度分布、あるいはReynolds応力分布などの平均流構造ならびにスペクトル分布、乱れ発生機構等に与える影響などを検討した。以下に得られた知見を列挙する。

- (1) 移動床上の主流速分布は、内層においては対数則分布と概ね一致するが、底面近傍においては、砂粒子の上下運動により流速の一様化が生じるために対数則分布から上方に外れる。また、その傾向は掃流砂量の増加に伴い顕著となる。
- (2) 掃流砂の運動により底面付近の流体が攪乱され、底面付近における乱れ強度は、流下方向成分および鉛直方向成分がともに増大する。
- (3) Reynolds応力は外層領域において三角形分布に従う。一方、掃流砂層内におけるReynolds応力は、粗面の効果よりも掃流砂の効果が支配的パラメータとなり、底面付近で欠損量が減少する。
- (4) 掃流砂を伴った流れ場では、底面付近において混合距離および渦動粘性係数は滑面等流よりも大きな値をとる。これは、水流の攪乱により組織的構造が構築されるためである。
- (5) 移動床上の流れにおける乱れの発生率は、流砂量の増加に伴い底面付近で減少する。これは平均流の

エネルギーの一部が流砂の運動に与えられたためである。また発生率と逸散率は、底面近傍において差異が生じる。

謝辞：本研究を行うに当たり、(財)住友財団より補助を受けた。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) Nezu, I., Kadota, A. and Kurata, M. : Free-surface flow structure of space-time correlation of coherent vortices generated behind dune bed, *6th International Symposium on Flow Modeling and Turbulence Measurements*, IAHR, Balkema, Rotterdam, pp.695-702, 1996.
- 2) Guy, H. P., Simons D. B. and Richardson, E. V. : Summary of alluvial channel data from flume experiments, *1956-61, USGS Prof. Paper 462-I*, pp.1-96, 1966.
- 3) 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, 1994.
- 4) 楊永荻, 平野宗夫, 羽田野袈裟義 : 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) Stearns, F. P. : On the currentmeter together with a reason why the maximum velocity of flowing in open channels is below the surface, *Trans. of ASCE*, 12, 331-338, 1883.
- 9) Lane, E. W. : Stable channels in erodible material, *Proc. A.S.C.E.* 270, 1935.
- 10) Einstein, E. A. *Proc. A.S.C.E.*, 1941.
- 11) Nezu, I., Tominaga, A. and Nakagawa, H. : Field measurements of secondary currents in straight rivers, *J. Hydr. Engrg.*, ASCE, vol.119, No.5, 1993.
- 12) Nezu, I. and Nakagawa, H. : *Turbulence in Open Channel Flows*, IAHR Monograph, Balkema, Rotterdam, 1993.
- 13) Yang, Y. and Hirano, M. : Uniform flow in open channels with movable gravel bed, Discussion, *J. Hydr. Res.*, Vol.33, pp.877-880, 1995.
- 14) Tsujimoto, T., Shimizu, Y. and Kozai, M. : Turbulent characteristics of flow over rough permeable bed, *Memoirs of the Faculty of Technology, Kanazawa Univ.*, Vol.21, No.2, pp.19-30, 1988.
- 15) Nezu, I. and Rodi, W. : Open-channel flow measurements with a laser Doppler anemometer, *J. Hydr. Engrg.*, ASCE, vol.112, pp.335-355, 1986.
- 16) Onitsuka, K. and Nezu, I. : Turbulent structure in the near-wall region of 2-D open channel flows, *The 7th Int. Sympo. on Flow Modeling and Turbulence Measurements*, pp.679-704, 1998.
- 17) Itakura, T. and Kishi, T. : Open channel flow with suspended sediments, *Proc. ASCE*, Vol.106, HY8, pp.1325-1343, 1980.

(1998.3.24 受付)

CHARACTERISTICS OF TURBULENT STRUCTURE OVER MOVABLE FLAT SAND BED

Iehisa NEZU, Kouki ONITSUKA, Masa-aki KURATA and Keiji ESAKI

In open-channel flows with bed-load transport, mean flow properties and turbulence characteristics are affected by the bed load motions. In this study, FLDA measurements over the flat movable sand bed were conducted in open channel flows, and simultaneously the bed loads were collected and these volumes were measured. It was found that the mean velocity profile can be described by the log-law in the inner layer. In contrast, at the near bed region, the velocity profile deviates from the log-law. Turbulence intensity distributions, both horizontal and vertical, also change in the inner layer; these curves deviate upward from the exponential formula proposed by Nezu. The Reynolds stress profile near the bed is similar to that of a two dimensional uniform flow. The generation rate of turbulence defects in the near bed region. The phenomena are almost controlled by the bed-load motions.