

平坦移動床土の縦渦を伴う流れの構造と 三次元土砂輸送分布に関する研究

Turbulent Structure of Cellular Secondary Currents
and 3-D Sediment Transport on Fluvial Sand Beds

京都大学工学部 中川 博次 H. Nakagawa
京都大学工学部 禰津 家久 I. Nezu
京都大学大学院 光成 政和 M. Mitsunari
京都大学大学院 川島 伸哉 N. Kawashima

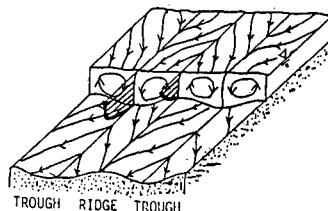
1. 概説

戦前より多くの河川技術者によって、水路幅・水深比（アスペクト比）が大きい河川には水深程度を直径とし、流れ方向に並列した2次流群（縦渦）が存在するであろうと推測され、約20年前に始まる木下(1967)¹⁾による洪水流の航測結果やCurbertson(1987)²⁾による河床形状計測（縦筋）によって縦渦の存在の可能性がさらに強く示唆された。しかし、縦渦の流速成分は主流速の数%であろうと見積られ、当時の流速器材では解明が不可能であって、その実体は全く不明であった。禰津ら(1984)³⁾は縦渦と河床に形成される縦筋(S-and Ribbons)との密接な関連に注目して、縦筋を模倣した人工突起を風洞の底面に付け、これが引き起こす縦渦構造を熱線流速計で詳細に計測した。次に、禰津ら(1985)⁴⁾は、風洞のアスペクト比 B/h (B は風洞幅、 h は風洞高半幅で水深に相当する。)の影響を検討し、 $B/h < 5$ の狭幅風洞では側壁効果のため、乱れの非等方性が生じ、コーナー2次流が生じるが、 $B/h > 5$ の広幅風洞では風洞中央部は2次流となり、間欠的に生じる縦渦は存在するかも知れないが、少なくとも安定した縦渦は存在しないことを示し、縦渦の発生には河床の縦筋が引き金になっていること実証した。

最近のレーザー流速計の開発で、水流の乱流計測が高精度に行なえるようになり⁵⁾、開水路流での縦渦の計測が可能となった。⁶⁾その結果、 $B/h < 5$ の狭幅水路では側壁効果とともに自由水面による乱れの減衰効果が加わり、風洞（閉水路）と対照的に自由水面近くに強い縦渦が発生していることを発見した。⁷⁾しかし、 $B/h > 5$ の広幅の滑面水路では風洞実験と同様に、水路中央部は2次元流であり、やはり安定した縦渦が存在しないことが明らかとなった。⁶⁾

以上の一連の研究により、河川で生じていそうな縦渦は河床面の何らかの微小な凹凸が引き金となって発生し、増幅して縦渦-縦筋といった整然とした組織構造を示すと考えられる。同様な仮説は最近Allen(1985)⁸⁾も行っており、十分発達した流れは図・1のように説明される。すなわち、ridge（凸部）上では低流速となり上昇流が生じ、trough（凹部）では高流速となり下降流が生じる。³⁾trough上はridge上より壁面せん断応力が強く、掃流砂量も多くなり3次元土砂輸送分布を示す。ridge上は浮遊砂が集まりやすく、上昇流によって浮上して自由水面に高濃度のボイルが形成される。

本研究は、このような縦渦-縦筋現象の発生機構及び相互作用を解明し、3次元土砂輸送分布にいかに関与するかを実証するため、レーザー流速計及び超音波測定器を駆使して平坦移動床から縦筋が発達するまでの乱流構造及び河床形状の変化を時間を追って解明したものである。縦渦の発生の引き金を解明するため、(1)自然状態の平坦河床(2)人工突起(3)2粒径混合砂を用いて、相互に比較検討を行った。ホットフィルムなどを流れに挿入する従来のプローブ計測法では流れや移動床面に攪乱を発生させ、これが縦渦を発生させたり変形させたりする一要因と



図・1 2次流の模式図

なるからレーザー流速計の使用がこの種の研究では不可欠である。

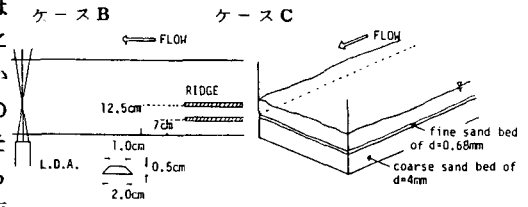
2. 実験方法

実験水路は、長さ8m、幅30cmの勾配可変型ある。水理条件は全ケースで統一し、水理勾配1/573、流量2.5l/s、平均水深2.6cmとした。アスペクト比は11.5である。通水時には、平均粒径0.7mmのケイ砂を平坦に敷きつめた。流速変動は、流下方向(x軸)成分と鉛直(y軸)成分を2成分レーザー流速計を用いて計測し、その出力電圧は200Hzのサンプリング周波数で1測点30から80秒間A-D変換され、以後電算処理された。河床形状は超音波測定器で計測し、自動制御した台車で水路横断方向(z軸)及びx方向の河床形状が3次元計測された。実験項目は、上の(1) - (3)であり、それぞれA、B、Cとよぶ。(図・2参照)

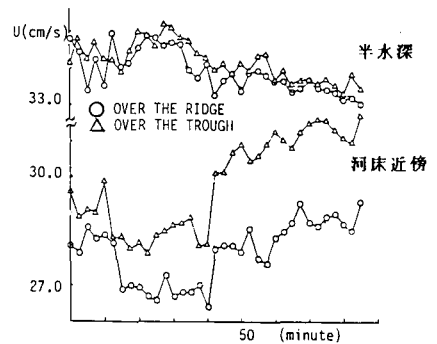
3. 実験結果及び考察

3・1 短時間平均の局所流速の時間的変化 図・3、図・4は、ケースA、すなわち自然状態での短時間平均された主流速U、鉛直流速Vの河床近傍及び半水深での時間的変化を示している。測点は水路側壁から $z/h=2.5$ 、及び $z/h=3.8$ であり、それぞれ時間経過とともに、図・9に示すようにリッジ及びトラフになる点である。ケースAの場合、河床近傍での主流速Uは、初期には

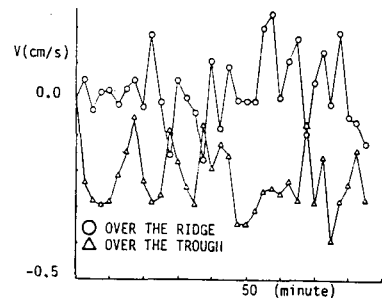
あまり差は見られないが、いったん減少した後、約40分後には、トラフ上、リッジ上共に増加する傾向が見られる。しかし、その増分はトラフ上の方が大きい。Uの増加は、河床の低下がせいぜい0.5mm程度であることを考慮すると、単にそれが原因であるとは考えにくく、流れ場が場所ごとに異なった変化を示したと考えられる。すなわち、トラフ上では河床近傍の流速増分 ΔU が大きく、リッジ上よりも速度勾配が大きくなり、その結果、河床でのせん断応力は増加したと考えられる。この結果は、後で示す定常状態での横断方向の流速分布と流砂量の横断方向分布の対応からも妥当である。これに対して、半水深でのUはトラフ上及びリッジ上で減少する傾向が見られる。これは、河床近傍の流速が増加したため連続式により減少したと考えられるが、トラフ上及びリッジ上で減少がほぼ同じである点は注目される。以上の結果より、時間経過と共に水深方向の流速分布は、トラフ上ではリッジ上よりもフラットな高速流になるが、河床の極近傍で速度勾配は逆に大きくなり、壁面せん断応力も大きくなる。それら異なった2つの流速分布が河床形状や流砂量の横断方向の分布特性と関与し、図・1に示すように水路横断方向に交互に並んだ3次元構造を呈することが推察される。鉛直方向の流速成分Vは、時間経過に対して変動が大きいもののトラフ上では負に、リッジ上では正に向かう傾向が見られ、時間経過と共にトラフ上では下降流が、リッジ上では上昇流が発生することがわかる。短時間平均されたこれらの流速成分U、Vの特性から、高流速部で下降流が生じ、運動量が河床面に輸送されるために、せん断応力が増加し、河床は洗掘されやすく、凹型のトラフとなる。一方、低流速部では上昇流が生じて、低運動量が水面側に輸送されるためにせん断応力は小さく、河床は凸型のリッジになると考えられる。



図・2 ケースB、Cの実験条件



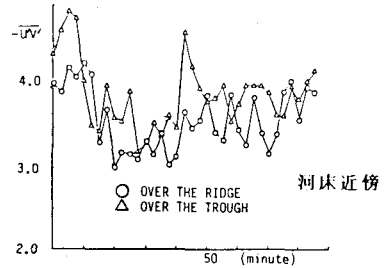
図・3 短時間平均された主流速Uの時間的変化



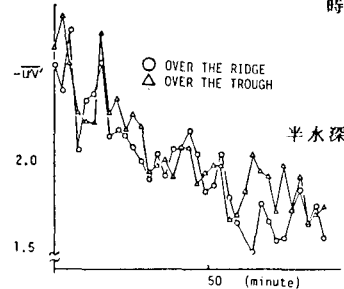
図・4 短時間平均された鉛直流速Vの時間的変化

3・2 レイノルズ応力の時間的变化 図・5及び図・6に河床近傍及び半水深でのレイノルズ応力の時間的变化を示す。河床近傍ではやや減少するものの一定値に近づきつつある。しかし、半水深ではトラフ上、リッジ上共に減少するのがわかる。トラフ上、リッジ上でレイノルズ応力の鉛直方向の分布は、時間経過と共に半水深ではかなり減少することから、2次流が存在しない2次元流れの場合に考えられるレイノルズ応力の直線分布（河床近傍を除く）からはずれ、分布形は定常状態ではかなり歪曲した複雑なものとなることが予測される。

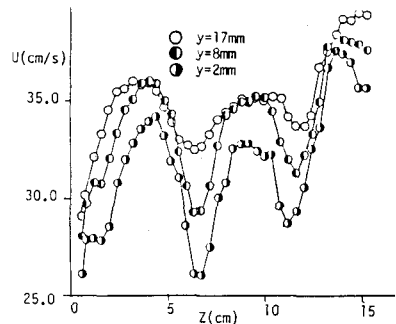
3・3 定常状態における流速分布特性 図・7に、ケースBでの主流速 U の横断方向（ z 軸）の流速分布を計測位置 y を3通り変化させて示す。水路横断方向には波形分布になっており周期性が見られる。高速部でのピーク間隔は、約7cmであり、図・8に示すように、河床高変動の横断方向の自己相関図によるピーク間隔とよく一致しており、これは、流速分布の横断方向の周期特性がそのまま河床変動に反映したと考えられる。また、横断方向に高流速部と低流速部が交互に並んでいることもわかり、それぞれ詳しく考察してみる。図のピーク部の鉛直方向の分布は全体的に密になっており、河床近傍ですらかなり高速度であり、河床での速度勾配が大きく高せん断力が作用していると考えられる。 $y=8\text{mm}$ での流速が $y=17\text{mm}$ での流速よりも速くなり、最大流速点が水面でなく水面下に現れることが高流速部の特徴となっている。このように、高流速部で流速下降現象が現れることから、高速部には顕著な下降流が存在していることが予測され、この妥当性は図・9に示した2次流（ V, W ）ベクトル図からよくわかる。次に、図・7の流速分布の極小部分では、鉛直方向の分布は前述のピーク部分ほど密になっておらず疎な分布となっている。全体的に流速は遅く、最大流速点の降下という現象も見られない。また、河床近傍での速度勾配が小さく、せん断力もピーク部のそれよりもかなり小さいと考えられる。以上のような2つの異なった流速分布から、せん断力の大きい部分と小さい部分とが横断方向に周期的に並び、流れが3次元構造を示すことは、視覚的には図・10に示すような河床形状の3次元表示によって確認される。図・11に示すように、この流れでの流砂量分布の横断方向分布からも流れと流砂の3次元性が確認される。すなわち、流砂量分布も波形の分布を示し、流砂量の多い部分は流速分布のピーク部に、少ない部分は極小部分に対応している。次に、ケースCでの流速分布を図・12に示す。このケースでもケースBと同様のことがいえる。すなわち、流速分布は横断方向に周期的に変化しており、ピーク部とその他の部分では鉛直方向の分布が異なり、それによって河床でのせん断力が波状に変化したものと考えられる。事実、流速分布のピーク部では河床の細砂は掃流され粗砂が露出しておりせん断力は大きいと考えられ、それ以外の部分では粗砂が露出するほどには細砂が掃流されずせん断力はそれほど大きくはなかったといえる。ケースCでの20分毎の流砂量分布の変化が図・13に示される。これから、横断



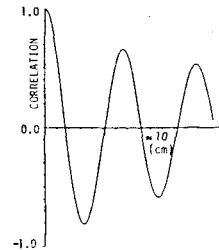
図・5 短時間平均されたレイノルズ応力の時間的变化



図・6 短時間平均されたレイノルズ応力の時間的变化

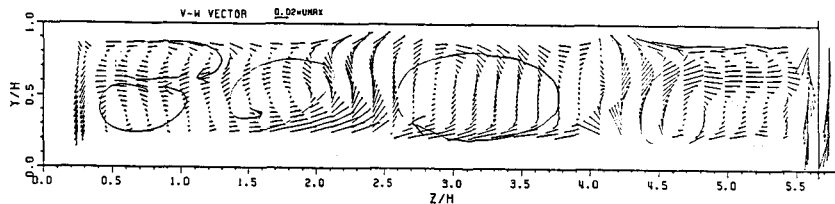


図・7 主流速 U の横断方向の変化 (ケースB)



図・8 河床高変動の横断方向の自己相関

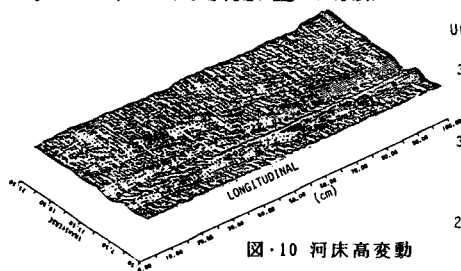
方向の流速分布の時間的変化の概略がわかる。すなわち、通水後20分後にはまだ流速分布の顕著な発達特性は見られないが、



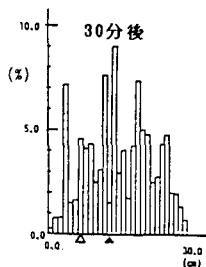
図・9 2次流 (V, w) のベクトル表示

40分後にはかなり凹凸分布がられる。この分布特性は縦渦が発達している例証であろう。60分後には、側壁近傍の流砂量の割合がさらに増大し、しかも、分布の凹凸がある程度周期的に並んでいるのがわかる。この流砂量の分布と特性と図・12の流速分布特性とは良好に対応している。すなわち、この時点で大ききの等しいセル状の縦渦が横断方向に並列して安定し、流れの場が3次元になったといえる。

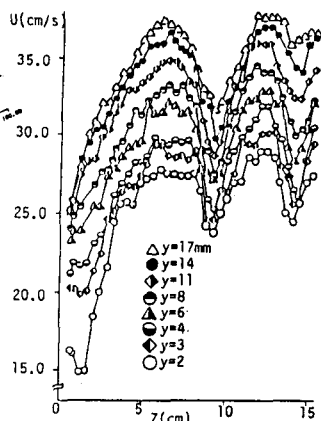
以上、ケースB及びCでの定常状態での主流速 U の鉛直分布のトラフ上、リッジ上での違いやその横断方向の周期性について、また、それから推測される河床でのせん断力の分布を流砂量分布から確認した。福津ら(1984)³⁾はすでに、縦筋が存在する場合2次流が発生することを、Studerus(1982)⁹⁾は粗滑交互面で2次流が発生することを示し、ケースB及びCの条件で何らかの攪乱があると流れと河床の相互作用により2次流が発生すると考えられる。自然状態でのケースAは側壁でのコーナー2次流の影響で側壁近くにリッジが形成されやすく、これが縦渦のトリガとなると考えられる。⁴⁾本研究の一連の実験により、縦渦と縦筋が流れと河床との相互作用により形成されることが判明した。2次流の存在下ではセル状のらせん流砂量分布が横断方向に並び、流れが3次元的になり流速分布の異なる部分が相互に現われる。そして、これら U の分布の相違によって縦筋が河床に発生すると考えられる。せん断力の大きいトラフでは下降流が、せん断力の小さいリッジでは上昇流が生じ、水深スケールの大規模らせん流が存在しているのがわかる。(図・9参照)



図・10 河床高変動

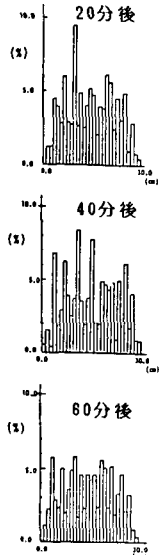


図・11 掃流砂の横断方向分布



図・12 主流速 U の横断方向の変化 (ケースC)

図・13 掃流砂の横断方向分布の時間的変化

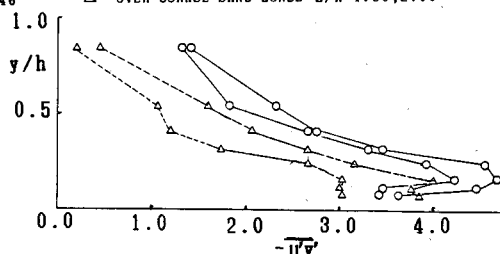
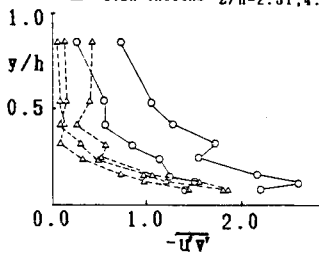


3・4 縦渦が存在する流れでのレイノルズ応力の鉛直分布 ケースB及びCでのレイノルズ応力の鉛直分布をそれぞれ図・14, 15に示す。ケースBの場合、トラフ上、リッジ上に共に直線分布から大きくずれ、特にトラフ上ではレイノルズ応力は河床から遠ざかるに従って急激に減少し、 $y=10\text{mm}$ 以上ではほとんど0 となり

水面付近では負値の可能性もありそうである。レイノルズ応力は、3・2で述べたように、時間と共に直線分布からずれ、2次流の発達に大きく関係していると考えられる。レイノルズ応力分布はトラフ上、リッジ上共に双曲線のような分布をしているが、トラフ上の方が歪曲が著しくリッジ上よりも値が小さくなる傾向をもつことから、下降流のあるトラフ上と上昇流のあるリッジ上では乱れ発生、拡散プロセスが異なると考えられる。すなわち、トラフ上では上層の低乱れ部が下降流によって流入し、一方、リッジ上では河床近傍の高乱れが上層へ流出されるためと考えられ、この移動床上の乱れ特性は人工突起をつけた固定床上でも観測され³⁾注目される。ケースCでは、 $y=8\text{mm}$ より上ではレイノルズ応力は直線分布に近いが、それより河床側では2次流と粗度の影響を受け複雑である。粗砂面上のレイノルズ応力分布は細砂面上に比べて、河床の極近傍では粗度の影響を直接受けて増大するが、河床から離れると細砂面上より急低減して下降流による先述の2次流効果が現れる。しかし、人工突起をつけたケースBに比べて粗砂面上のレイノルズ応力の低減はそれほど大きくなく、

ケースBとCとは、2次流の強さが異なっていたと思われ、ケースBのように強い縦渦が発生した場合レイノルズ応力は直線から大きくずれ、弱い縦渦の場合はあまりずれないと考えられる。

○ OVER RIDGES $Z/h=3.23, 3.54, 3.85$ ○ OVER FINE-SAND ZONES $Z/h=0.77, 4.31$
△ OVER TROUGHS $Z/h=2.31, 4.48$ △ OVER COARSE-SAND ZONES $Z/h=1.38, 2.00$

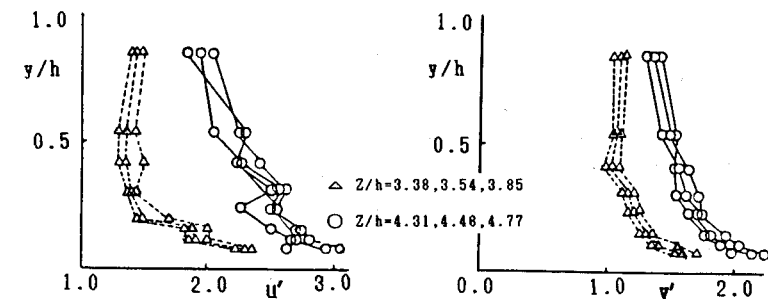


3・5 縦渦が存在する 流れの乱れ強度分布

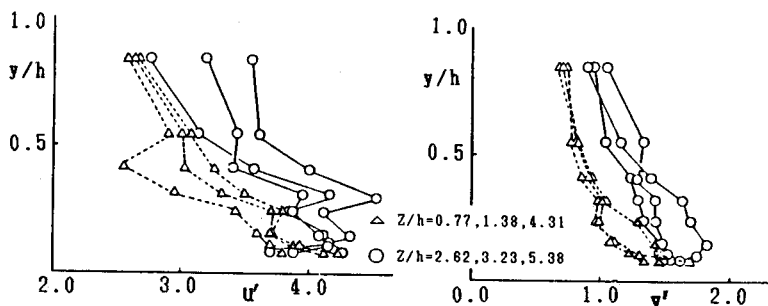
図・14 レイノルズ応力の水深方向の分布 (ケースB) 図・15 レイノルズ応力の水深方向の分布 (ケースC)

図・16 及び17にそれぞれケースB及びCの乱れ強度 u', v' を示す。鉛直流速 V が正となる位置での乱れ強度を○で、 V が負となる位置でのそれを△で表す。乱れ強度は、リッジ上($V>0$)ではトラフ上($V<0$)よりも大きく、上昇流によって河床近くの高乱れが上方に輸送され、一方、下降流によって水面付近の低乱れが下方に輸送されるのがわかる。

この結果は、福津ら(1984)³⁾による風洞実験でも得られている。図・4と比較すると、乱れ強度 v' のオーダーの方が平均流速 V よりも大きく、 v'/V は u'/U に比べるとかなり大きい。鉛直方向の瞬間流速成分 $\tilde{v}=V+v'$ は時間平均的には正あるいは負であってもある瞬間には負あるいは正となる確率が高い。このため、短時間平均の V は図・4で示すように変動が大きく、 V を2次流の存在の1つの指標とみなすならば、2次流は固定的に安定したのではなく、空間的にも時間的にもかなり間欠性をも



図・16 乱れ強度の水深方向の分布 (ケースB)



図・17 乱れ強度の水深方向の分布 (ケースC)

つ現象であると思われる。ケースBでは、トラフ上、リッジ上での u', v' の分布の違いは、 u', v' 共にトラフ上では水深方向に急激に減少するが、リッジ上では穏やかに減少する点である。また、トラフ上の $y=10\text{mm}$ 以上では乱れ強度はほとんど変化していない。これは前述したレイノルズ応力の分布特性と似ている。トラフでは、リッジよりも多くの土砂が輸送されており、この土砂輸送と乱れ強度 $u', v', -\overline{uv'}$ とは次のような関係があると考えられる。土砂輸送量の多いトラフでは、リッジよりも $u', v', -\overline{uv'}$ は抑えられる傾向が見られるが、逆に河床のせん断力は増加することがわかる。つまり、横断方向の主流速 U の分布特性と $u', v', -\overline{uv'}$ の乱れ特性とは逆の相関がある。次に、粗滑分離現象が生じたケースCにも上述の特性が見られる。下降流のある高速部は粗砂が露出し、上昇流のある低速部では細砂はそのままであった。粗砂面上では河床からある程度離れると低乱れ、細砂面上では高乱れという特性が見られる。粗砂面上と細砂面上では分布形に際立った差異はないが、 $y=4\text{mm}$ 以下では細砂面上ではかなりのばらつきが見られ、粗砂面上のような単調な減少ではない。このことから細砂面上での上昇流はかなり間欠性が強く、乱れ強度のばらつきの原因であると考えられる。上述の2つのケースは、自然発生する縦渦の場合のケースAに比べて、何らかの形で2次流が増幅されたと考え、定性的にはケースAでも同様な乱れ特性が十分時間が経過し2次流が発達すれば得られるであろう。ケースBとCでの流速、乱れ特性及び土砂輸送は縦渦の一般的な3次元構造特性を示していると考えられる。

4. 結論

本研究は、平坦移動床上で発生・発達する縦渦の乱流構造と河床のトラフ・リッジの形成、流砂量の3次元分布特性を解明したものであり、以下の結果が得られた。

〔1〕主流速 U は、高速部と低速部が横断方向に交互に並び、前者では下降流が、後者では上昇流が発生している。高速部では低速部よりも河床のせん断力が大きく、その結果、移動床上では流砂量が大きくなり縦筋が発生する。流砂量の横断方向の分布は、上述の高速部、低速部に対応して、前者では大きくなり、後者では少ない凹凸分布を示す。

〔2〕上述したように、平坦移動床上には上昇流と下降流が横断方向に交互に発生しているが、短時間平均された鉛直方向の流速成分の変動は大きく、2次流は常に固定した形状を維持せず、ある瞬間には不明瞭になったりする間欠性の強い現象であると考えられる。しかし、縦筋や粗滑交互面が形成されると、縦渦はある程度安定し、上昇流部と下降流部がほぼ整然と現れ、3次元土砂輸送分布が形成される。

〔3〕乱れ強度 u', v' やレイノルズ応力 $-\overline{uv'}$ は、高速部と低速部では異なっている。高速部では低速部よりも $u', v', -\overline{uv'}$ 共に小さくなっており、鉛直方向の分布形は、河床から遠ざかるに従って急激に減少する傾向をもつ。これらは、上昇流と下降流が乱れや運動量を輸送する結果であると説明される。

〔4〕掃流土砂輸送量の横断方向は上述のように主流速 U あるいはせん断力の横断方向変化の結果と説明されるが、浮遊砂輸送に及ぼす縦渦の影響には不明な点が多く、今後の研究にしたい。最後に、本研究を遂行するにあたり、文部省科学研究費一般研究(C)の補助を受けたことを記し、これに感謝する。

参考文献

- 1) 木下 良作 (1967)、『写真測量』, vol. 6, pp. 1-17
- 2) Culbertson, J. K. (1967), USGS, Prof. Paper 575, pp. D215-216
- 3) Nezu, I. and Nakagawa, H. (1984) J. Hydraulic Eng., ASCE, vol. 110, pp. 173-193
- 4) Nezu, I., Nakagawa, H. and Tominaga, A. (1985), Turbulent Shear Flows 4, Springer, pp. 246-260
- 5) Nezu, I. and Rodi, W. (1985), J. Hydraulic Eng., ASCE, vol. 112, pp. 335-355
- 6) Nezu, I. and Rodi, W. (1985), 21st IAHR Congress, Melbourne, vol. 2, pp. 115-119
- 7) 福津, 中川 (1986), 土木学会論文集第369号, pp. 89-98
- 8) Allen, J. R. L. (1985), Physical Sedimentology, George Allen
- 9) Studerus, X. (1982), Ph.D., ETH, Zürich.