

多点同時計測システムによる実河川洪水流中の 3次元大規模乱流構造の測定

Field Measurements on the 3D Turbulent Large-scale Structures in the Flood
Flow by Multi-channels Simultaneously Measuring System.

日野幹雄* 孟 岩** 村山宣義***

by Mikio HINO, Yang MENG, and Nobuyoshi MURAYAMA

Field measurements on turbulent large-scale structure of a flood flow in the Hinuma river were conducted with 16-channels electromagnetic anemometers. The turbulent velocity components (u, v) at 8 points on a plane perpendicular to the mean flow have been sampled and recorded simultaneously by a A/D converter. The quasi-instantaneous 3D images of coherent structures in the flood flow were reconstructed from these obtained data by using conditional technique and a new method of data analysis. These structures detected near the river bed are low-velocity lumps of fluid and generate intermittently peaks of the high positive Reynolds stress. The high generation of the suspend load in the flood flow may be explained by these structures. Near water surface, coherent structures have also been found and they generated small-scale boils.

Keywords: field measurements, river flood flow, 3D quasi-instantaneous image, coherent structure of turbulence, boil, virtual load and mascon method.

1. はじめに

近年は、実河川における乱流計測に関する研究が数多く報告されている¹⁾²⁾。しかし、それらの研究はいずれも流速・水深の小さい河川を対象としており、洪水時の実河川流に関する計測は建設省土木研究所の報告³⁾など少数例に過ぎない。その理由としては、洪水時の河川流の流速が非常に大きく測定者の危険を伴うため、洪水観測施設が設置されていない河川で洪水流の内部構造を計測することはきわめて困難であることが挙げられる。ところが、ボイルやコルクをはじめとした実河川における複雑な乱流現象のほとんどは洪水時において頻繁にみられるものであり、これらの河川乱流の構造は、流速分布・河川せん断応力・砂ろ砂堆の発生発達・土砂輸送に密接に関連している。このような洪水流の乱流構造を解明するために、従来室内水路における実験が数多くなされてきたが⁴⁾⁵⁾、室内実験水路における流れのレイノルズ数は高々 $10^2 \sim 10^4$ であり、流れの3次元的挙動が顕著ではない場合が多い。特に、実河川にみられるような砂の巻上がりやボイルなどの現象を室内で再現することは困難である。従って、洪水流の内部構造を解明するためには、実河川での現地計測が不可欠である。そこで、本研究では洪水時の実河川流の3次元構造の瞬間像を計測・解析し、実河川の洪水流における乱流特性及びボイルやバーストを含む乱流構造を調べた。

2. 本観測の概要と計測システム

2.1 計測地点

まえがきに述べたように、しっかりした観測施設が設置されていない河川で、洪水流を測定することはき

* 正会員 東京工業大学工学部土木工学科教授

** 学生員 東京工業大学大学院土木工学専攻

(〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1)

わめて危険であるため、今回の観測は建設省土木研究所河川研究室の協力を得て、酒沼川洪水観測施設で行った。図-1は酒沼川観測区間の平面図と28.1km地点の横断面図を示しており、洪水観測施設はちょうど低水路の直線部分に設置されており、主流方向に垂直に設置されている。観測位置における河道の諸特性について

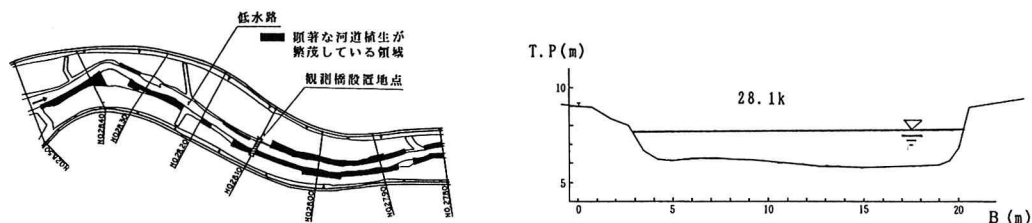


図-1 酒沼川観測区間の平面図と28.1km地点の横断面図

ては文献(6)を参照されたい。写真1は酒沼川洪水観測施設を示す。観測施設はスパン30mの支持台とスパン15mの昇降台から構成され、昇降台は洪水位の変化に応じて6mの範囲内で上下に昇降できるようになっている。この昇降台から流速、河床高など種々の測定が可能である。

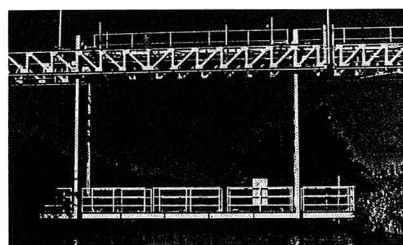


写真-1 酒沼川洪水観測施設

2.2 計測システム

今回の現地観測に用いた8チャンネル電磁流速計(MODEL SF-2042)は東京計測(株)の協力で新たに製作したもので、流速計1台につき4本のプローブが接続され、各プローブは流下方向xと鉛直方向yの二つの流速成分を測定する。2台の流速計で計8点、16チャンネルの流速を同時に計測できる。流速計の出力は16チャンネル同時サンプリングできるA/D変換器によりデジタル化し、パソコン(PC-9800)内のRAMディスク(4Mbyte)に一度取り込んでから、ハードディスク(100Mbyte)に記録した。現地では、家庭用電源が使用できないため、施設に設置した発動発電機を用いた。また、測定器とコンピュータに使う電源としてはその安定性が要求されるため、交流安定化装置を設けた。本測定では、データ・サンプリング周波数が20Hzとなり、1回の測定で、1チャンネルにつき2048個のデータを採取する。

2.3 トラバース

トラバースは流れによる抵抗力を十分に考慮した上で、強固かつ軽量となるように作成した(図-2)。トラバースの材料としては、厚さ2mm、長さ1mのアルミ製アングル材を使用した。プローブを上下左右に自由に配置するため、アルミ材の上に10cm間隔に穴を開け、測定点の位置は縦横10cm間隔、1mの範囲で自由に換えられるようにした。また、アルミ材に穴を開けたことにより、トラバース全体の表面積が小さくなり、流れによる抵抗を低減する効果をもたらし、プローブを河床底面から30cm離れたところまで下げても、観測台が振動せず安定した測定ができた。本研究では8本のプローブを取り付けるためにトラバースを2セット用意した。

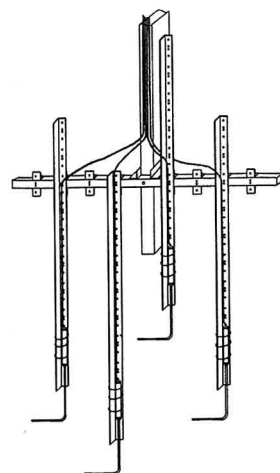


図-2 トラバース装置

3. 計測結果及びその考察

3.1 洪水流における乱流特性

台風9119号の影響で、9月31日から10月1日にかけて関東地方に大雨が降り、酒沼川の水位もかなり上がった。

た。その翌日に今回の現地観測が実施され、朝から空が晴れてきたため、観測が順調に進んだ。表-1に今回の観測の水理条件を示した。水深、平均流速及びレイノルズ数はかなり大きい値となっている。

測定地点	水路幅 (m)	水深 (m)	平均流速 (m/s)	レイノルズ数
酒沼川	約20.0	約1.8	約1.3	約 2.39×10^6

表-1 観測地点の水理条件

図-3は河川の中央部での平均流速の鉛直分布と無次元化された対数分布を示す。 $U\tau = \sqrt{g \cdot H \cdot I}$ が約11.90cm/s、レイノルズ応力分布から直接に評価したものが約12.25cm/s、対数則から評価したものが約11.76cm/sであった。平均流速分布は、水面付近の一点を除いて対数則をほぼ満たしている。最大流速点が水面下に現れる理由としては、河岸の植生による混合作用と側面せん断力の影響などが考えられる。

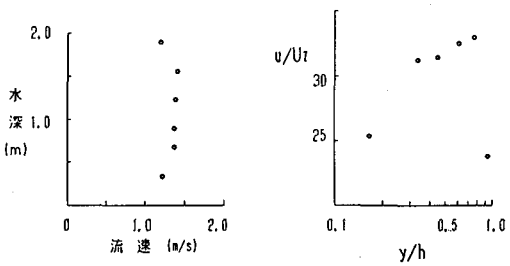


図-3 平均流速の分布と無次元化された平均流速分布

図-4は乱れ強度の鉛直分布を示す。図中の曲線は称津の乱れ強度分布式を示している⁷⁾。 u'_{rms} 、 v'_{rms} とも底面に近づくにつれて大きくなる傾向が見られ、また、この二つの乱れ強度の大小関係は $u'_{rms} > v'_{rms}$ となっている。この結果は従来の理論と傾向があっている。図-5はレイノルズ応力の鉛直分布を示している。水深の半分の深さまではレイノルズ応力の値の変化が小さいが、河床付近では直線的に増大している。この地点付近の河床については土木研究所の観測結果³⁾(図-6)からわかるように、洪水時の観測地点での河床波の波高は5cm程度であり、この値は水深と比べ小さい値となっている。

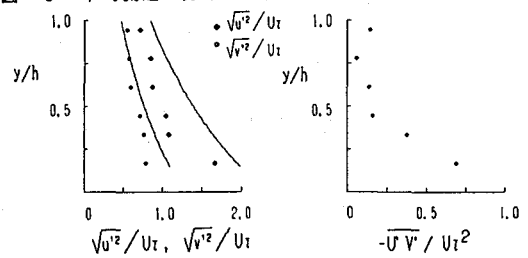


図-4 乱れ強度の分布 図-5 レイノルズ応力の分布

この結果は従来の理論と傾向があっている。図-5はレイノルズ応力の鉛直分布を示している。水深の半分の深さまではレイノルズ応力の値の変化が小さいが、河床付近では直線的に増大している。この地点付近の河床については土木研究所の観測結果³⁾(図-6)からわかるように、洪水時の観測地点での河床波の波高は5cm程度であり、この値は水深と比べ小さい値となっている。 K_s の値は5cmとし、対数則と Manning式から流速係数を求めて n に換算すると $n=0.025$ となる。つまり、観測地点の河床波は粗度と見なすことができ、河床は粗面と考えることができる(文献1)。

3.2 速度変動の生データによる考察

図-7はそれぞれ、底面から30cm、60cm、90cm、150cmの高さのところでの速度変動 u' 、 v' 及びレイノルズ応力 $-u'v'$ の時系列を示しており、データの全長さは100秒となっている。河床付近で(図-7-a)は速度変動とレイノルズ応力の値がかなり大きくなり、バースティングと思われる正の大きいレイノルズ応力のピークが頻繁に現れる。壁面から離れるにつれて(図-7-b)、正の大きいレイノルズ応力のピークの発生頻度が低くなる。この性質は、乱流境界層の場合によく似ており、大規模乱流構造を調べる際には壁面からある程度離れたところで構造を検出することが望ましいことを示している。更に離れると(図-7-c)、正の大きいレイノルズ応力のピークの発生頻度が更に低くなる。また、今回の観測データを見る限り、正の大きいレイノルズ応力のピークの発生は場所に依存せず、河床の至るところに検出されることがわかる。つまり、今回の観測で捉えられた正のレイノルズ応力のピーク、すなわち、低速上昇流あるいは高速下降流が必ずしも河床によって生成されているのではないということを示している。この結果は極めて重要であり、すなわち、従来の実験室内で捉えた大規模乱流構造は実河川洪水流の中にも存在することを示している。一

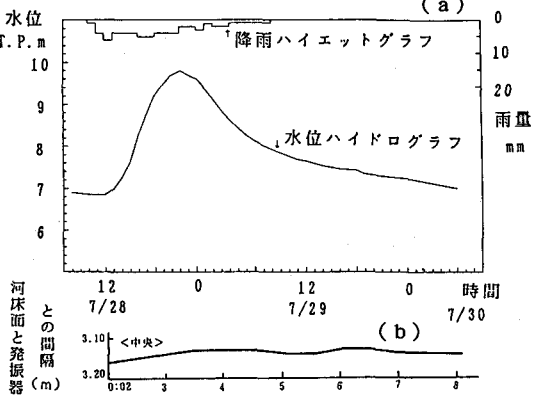


図-6 (a) 1988.7.28 出水のハイドログラフ (b) 河床の経時変化

図-7-a)は速度変動とレイノルズ応力の値がかなり大きくなり、バースティングと思われる正の大きいレイノルズ応力のピークが頻繁に現れる。壁面から離れるにつれて(図-7-b)、正の大きいレイノルズ応力のピークの発生頻度が低くなる。この性質は、乱流境界層の場合によく似ており、大規模乱流構造を調べる際には壁面からある程度離れたところで構造を検出することが望ましいことを示している。更に離れると(図-7-c)、正の大きいレイノルズ応力のピークの発生頻度が更に低くなる。また、今回の観測データを見る限り、正の大きいレイノルズ応力のピークの発生は場所に依存せず、河床の至るところに検出されることがわかる。つまり、今回の観測で捉えられた正のレイノルズ応力のピーク、すなわち、低速上昇流あるいは高速下降流が必ずしも河床によって生成されているのではないということを示している。この結果は極めて重要であり、すなわち、従来の実験室内で捉えた大規模乱流構造は実河川洪水流の中にも存在することを示している。一

方、水面の近くでは（図-7-d）、レイノルズ応力のピークが間欠的に現れ、その周期は約25秒となっている。実際、観測を行っている時、水面が時々持ち上げられ、小規模なボイルが観察された。その周期もやはり25秒のオーダーとなっている。水面が持ち上げられる時の流れの構造は後でまた詳しく説明する。

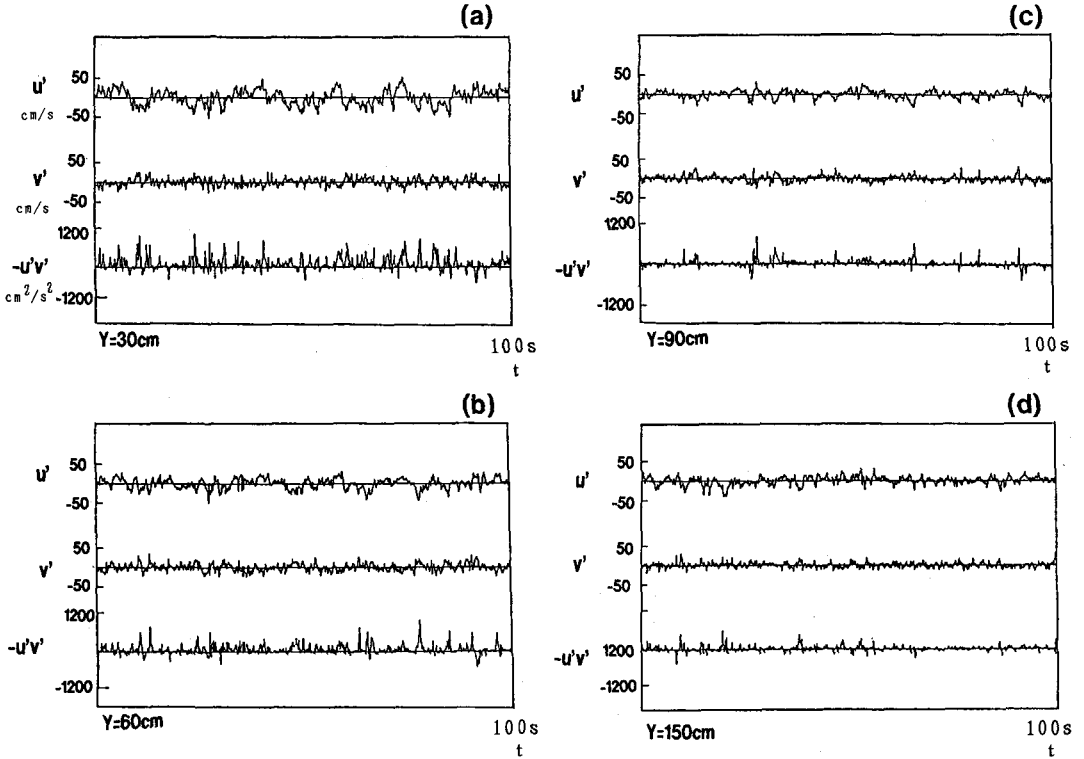


図-7 各高さでの瞬間流速変動 u' 、 v' とレイノルズ応力 $-u'v'$ の生データ

乱流構造の瞬間像のデータを取るため、プローブは図-8のように水面近傍と底面近くに配置された。図中の数字はプローブの番号、×印は測定プローブを表している。図-9は底面付近で取れたデータを示しており、まん中の点線はプローブ1で大きいレイノルズ応力のピークが検出された瞬間を表している。図に示されている時系列データの長さは10秒となっている。そのとき、速度変動 u' が負で、 v' が正、すなわち、低速上昇流が生じていることが分かる。また、四つのプローブから得られた速度変動 u' 、 v' とも強い相関を持っており、レイノルズ応力 $-u'v'$ のピークもすべて正の値をとり、

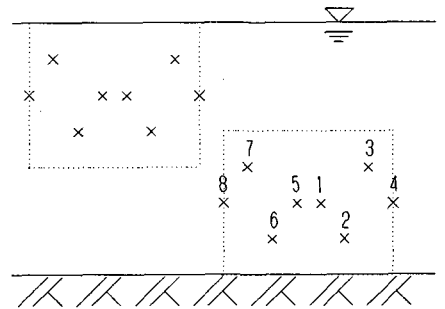


図-8 プローブの配置図

大規模乱流構造がそこに発生していることが分かる。速度変動の最大値は底面付近で u' は40cm/s、 v' は20cm/sまで達しており、底面付近の浮遊砂などを持ち上げるのに十分な大きさとなっている。洪水時における砂の巻上がりが大規模乱流構造の発生に伴う現象と考えられる。図-10は水面付近のデータを示しており、低速上昇流が生じていることがわかる。測定時に見られた小規模なボイルはこの低速上昇流によって流体塊が水面付近まで輸送されたためと考えられる。この低速上昇流が底面付近で発生した大規模乱流構造の一部であるかどうかは本観測のデータから結論を出せなかったが、ボイルが大規模乱流構造によって作られているものである可能性が十分にあり、次回の観測でこの点を明らかにしたい。

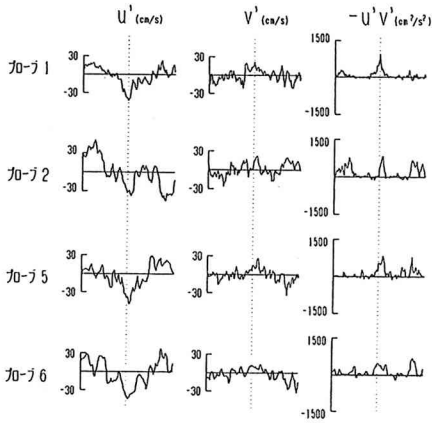


図-9 底面付近の瞬間流速変動 u' , v' とレイノルズ応力 $-u'v'$ の生データ

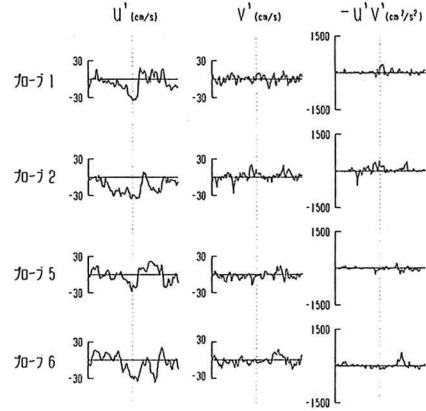


図-10 水面付近の瞬間流速変動 u' , v' とレイノルズ応力 $-u'v'$ の生データ

3.3 洪水流における乱流構造の瞬間像

洪水流における大規模乱流構造は水面と底面付近に存在していることをすでに節3・2で明らかにしたが、更に構造を詳しく調べるために、速度変動の生データを何等かの方法で解析する必要がある。本研究では著者らが1990年に提案したデータ解析手法を用いる。その詳細は文献⁸⁾に参照されたい。解析手順としては、まず、時系列データから空間データに変換し、そして、仮想荷重法を用いて各 $y-z$ 断面内の u , v 成分のデータを内挿する。最後に、MASCON法によって w 成分を求める。また、境界条件としては仮想境界上の数点で0流速を与えた。図-12は底面付近のデータからの推定結果を示している。尚、 X, Z に関しては中心を0としている。図-11-aは、 $Y=60\text{cm}$ 断面内の u , w のベクトルを示しており、低速上昇流を軸として、その両側に流れが回転している様子がわかる。図-11-bは $X=0$ 断面内の v , w のベクトルを示しており、低速上昇流のもっとも卓越している部分にも強く回転している流れの様子がはっきり出ている。図-11-cでは $Z=0$ の鉛直断面内の速度変動 u , v のベクトルを示し、低速上昇流が生じていることがわかる。この大規模乱流構造の全体像を見るために、瞬間的な速度変動 u , v , w の空間分布を図-12に示した。図-13は水面付近のデータからの推定結果を示している。水面付近の乱流構造と底面付近の乱流構造とは基本的に似た構造ではあるといえる。ただし、水面付近は自由水面が一つのソフトな壁となり、上昇流塊が水面に達したら水面上に出ることができず、下降せざるを得ないため、上昇流のまわりにはっきりとした下降流が生じている。図-14はこの大規模乱流構造に伴う瞬間的な速度変動 u , v , w の空間分布を示している。このように、

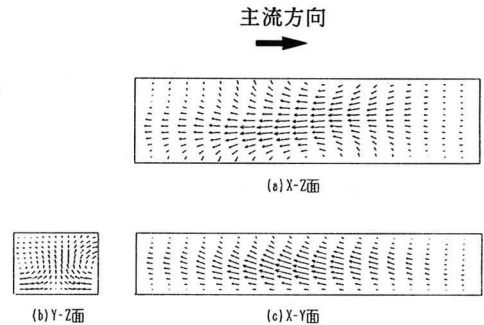


図-11 底面付近のデータからの推定結果

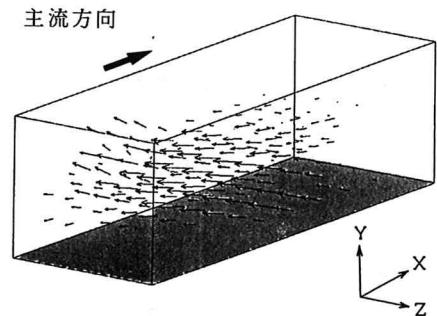


図-12 底面付近の大規模乱流構造に伴う速度変動 u , v , w の空間分布

洪水流中の大規模乱流構造の瞬間像の大まかな様子は我々が提案したデータ解析手法によって捉えられた。仮想境界上の数点での流速を0として与えたため、仮想境界付近の流速には誤差が含まれている可能性があると考えられる。

4. おわりに

本研究では、建設省土木研究所瀬沼川洪水観測所で実河川の洪水流の現地観測を行い、洪水流における内部構造を推定した。これらの観測データに基づき、実河川洪水流における大規模乱流構造の3次元瞬間像を明らかにした。観測結果をまとめると以下になる。

- (1) 河川の洪水流中には大規模乱流構造が存在し、これらの乱流構造によって大きいレイノルズ応力のピークが間欠的に作られ、その頻度は河床に近づくにつれて大きくなる。
- (2) 河床近くでは大規模乱流構造が強い低速上昇流をつくり、その瞬間の最大流速変動は u' は40cm/sで、 v' は20cm/sまで達しており、底面付近の浮遊砂などを持ち上げる十分な大きさとなっている。洪水時における砂の巻き上がりが大規模乱流構造によって作られていると考えられる。
- (3) 水面近傍では、低速上昇流に伴う乱流構造が存在し、測定時に見られた小規模なボイルはこの低速上昇流によって作られていると考えられる。

謝辞

本研究は文部省科学研究費試験研究(B)課題番号03555114「乱流場の3次元瞬間像の計測解析装置の開発と実河川流への適用」の補助を受けて行われたものである。また、本観測にあたり、建設省土木研究所、特に山本晃一、藤田光一両氏に便宜をとって頂いた。現地観測では奥村卓也君と中野充君に協力を頂いた。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 瀬良昌憲 : 現地観測に基づく実河川の流れの特性について、水工学論文集第35巻、(1991)
- 2) 柗津家久・中川博次・瀬谷和彦 : 琵琶湖疎水の3次元乱流計測、水工学論文集第35号、(1991)
- 3) 建設省土木研究所河川部河川研究室 : 瀬沼川洪水観測所レポート[1] 1988-1989、土木研究所資料、第2895号、(1990)。
- 4) 林泰造・南橋丈二・大橋正和 : 開水路大規模乱流の時空間構造に関する研究、中央大学理工学部紀要第29巻、(1986) pp. 233-254
- 5) 佐賀孝徳ほか : 開水路乱流内層の渦構造と流速波形の相互関係、土木学会論文集第393号(1988)
- 6) 福岡捷二ほか : 瀬沼川における洪水流と河床変動の研究、土木研究所報告第180号、(1990)
- 7) 柗津家久 : 開水路乱流の乱れ強度に関する研究、土木学会論文報告集第261号、(1977)
- 8) 孟 岩・村山雅昭・日野幹雄 : 3次元組織的乱流構造の瞬間像を推定する試み、水工学論文集第35巻、(1991)。

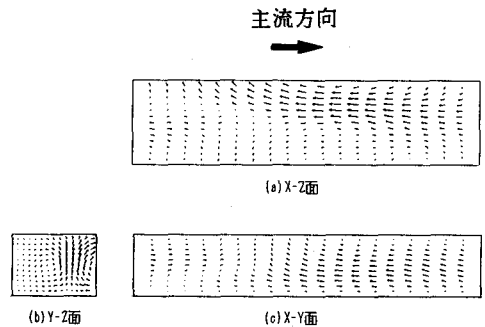


図-13 水面付近のデータからの推定結果

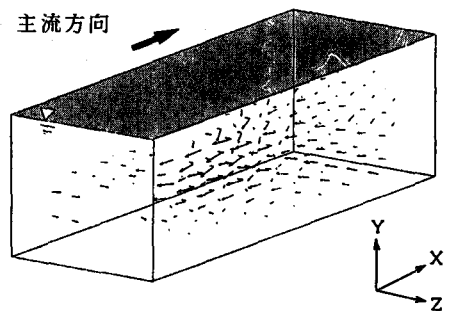


図-14 水面付近の大規模乱流構造に伴う速度変動 u , v , w の空間分布