

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 (2)

Field Measurements on the 3D turbulent large-scale structures in a Flood Flow
by Multi-channel coherent Simultaneous Velocity Measurement System (2)

日野幹雄* 村山宣義**

by Mikio HINO and Nobuyoshi MURAYAMA

The aim of this paper is to study the turbulent structure of a flood flow in the Hinuma river by field measurements conducted with 16-channel electromagnetic velocitymeters. As a result of this field measurements, it has become clear that there is the high negative Reynolds stress near the river bank convected from there when the water-level is close to peak. 3D images of coherent structures in the flood flow reconstructed from obtained data show that large-scale boils are generated by the local strong ascending lumps of fluid surrounded with low-velocity descending ones. Mascon method for the estimation turbidity distribution has been developed and checked with success for a simulation data. However, when applied to the real flood, we failed to catch the instantaneous image of sediment distribution, because of the uniform concentration distribution of the suspended wash load.

Keywords: field measurements, river flood flow, 3D quasi-instantaneous image, coherent structure of turbulence, boil, MASCON method for turbidity

1. はじめに

前回の水理講演会において筆者らは実河川洪水流中の乱流構造について、多点同時計測システムによる現地観測結果(1991.10.2 酒沼川)を基に論じた¹⁾。その中で、レイノルズ応力の発生形態や、乱流構造の瞬間像による考察など、実河川洪水流中の乱流構造に関する興味深い事柄について報告した。その反面、観測が水位下降期に入ってからしばらく経った後の、きわめて非定常性の弱い条件にて行われたこと、河岸植生が繁茂した酒沼川においてその影響を無視したことなど、実河川の洪水流を論ずる上で重要な議論が欠けていた。今回はこうした反省点を踏まえた上で観測を実施し、水位ピーク付近の増水期の性格を残していた時期にデータを採取した。また、計測場所を河岸付近に絞り、植生も含めた河岸が洪水流中の流れ場にどのような影響を及ぼすかを調べた。また本論文では、疎らな濁度データから流れ場全体の濁度分布を推定するモデルを開発した。また、試験的に洪水流中に流速計と供に濁度計プローブを投入して観測を行った。

2 現地観測の概要および結果

2.1 観測地点

今回の観測も昨年に引き続き、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。酒

* 正会員 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科

** 学生会員 東京工業大学大学院 理工学研究科 土木工学専攻

(〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1)

沼川の低水路河岸には、篠竹・雑草が繁茂しており、こうした植生は流れ場に大きな影響を及ぼしている。観測地点の河岸の植生の状況を写真-1に示す。沼沼川の平面形、横断形及び、洪水観測施設の詳細については前報を参照されたい。その他、河道特性等は文献(2)に詳細に報告されている。

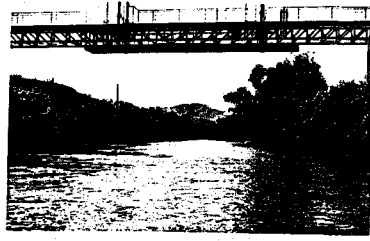


写真-1 観測地点の河岸の様子

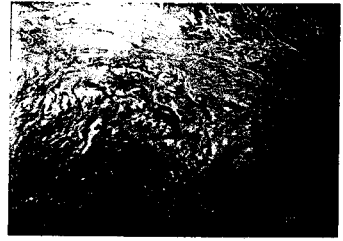


写真-2 観測時に見られたボイル

2. 2 計測システム

基本的には前報と同じである。今回の観測では流速の他に、濁度計を用いて6測点の濁度を測定した。データ・サンプリング周波数は20Hzとし、1回の測定で、1チャンネルにつき4096個（約3分20秒）のデータを採取した。

2. 3 計測結果及びその考察

2. 3. 1 観測時の流況

観測時の降雨ハイレットグラフ及び沼沼川の観測地点での水位ハイドログラフを図-1に示す。降雨量のデータは水戸気象台のもので、沼沼川付近の降雨の状況をおおまかに表している。観測は10月9日、10:30に現地に到着、12:30から1:30まで（CASE 1）と3:00から17:30まで（CASE 2）の2回に分けて観測を行った。CASE 1は水位ピーク付近での観測で、水面が激しく波立ち、両河岸沿いのある幅の水域において大規模なボイルが間断なく発生し、増水期の洪水流の性格を残していたが、CASE 2では水面変動も目に見えて緩やかになり、ボイルもきわめて小規模なものが間欠的に現れるのみとなっていた。写真-2にCASE 1でのボイルの発生の様子を示す。表-1に今回の観測の水理条件、図-2に平均流速の鉛直分布を示す。これらを見て分かるように、昨年より大きい洪水流を観測できた。

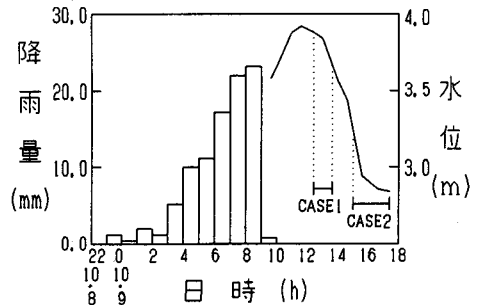


図-1 観測時の降雨・水位の状況

	水深 (m)	平均流速 (m/s)	レイノルズ数	$U \tau$ (cm/s)
CASE1	約3.9	約1.6	約 6.6×10^6	約19.5
CASE2	約2.9	約1.5	約 4.6×10^6	約16.8

表-1 観測地点の水理条件

2. 3. 2 速度変動の生データによる考察

図-3にブロープの配置図を示す。今回の観測では洪水流の勢いが激しく、投入した計測器・ロッド等が非常に大きな流体力を受けるため、ブロープは水面付近でのみ配置した。図-4はそれぞれCASE 1のブロープ1, 8及びCASE 2のブロープ1, 8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、データの長さはサンプリングした200秒のデータのうちの前半100秒をとっている。図(b)を見ると、正のレイノルズ応力より負のレイノルズ応力が卓越しているのがはっきりと分かる。また図(a)をみると、負のレイノルズ応力の勢いが弱まっているのが分かる。図(c), (d)についても同様の傾向がみられるが、CASE 2で現れるレイノルズ応力はCASE 1で現れるものの1/2以下の値になっている。これらのデータを4象限解析したものが図-5である。図(b)では、

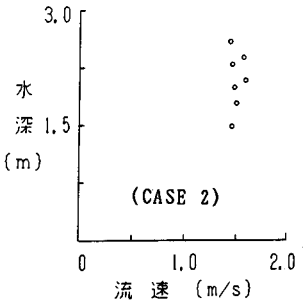


図-2 平均流速分布

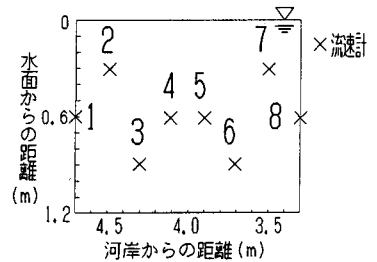


図-3 ブロープ配置図

はっきりとした正の相関がみられ、特に第3象限の低速下降流の方向に伸びているが、(a)ではそのような傾向が曖昧になっている。(c)、(d)では非定常性が小さくなったためか流速変動幅が小さくなっているが(d)では僅かに正の相関が見えているが、(c)では負の相関が出始めている。

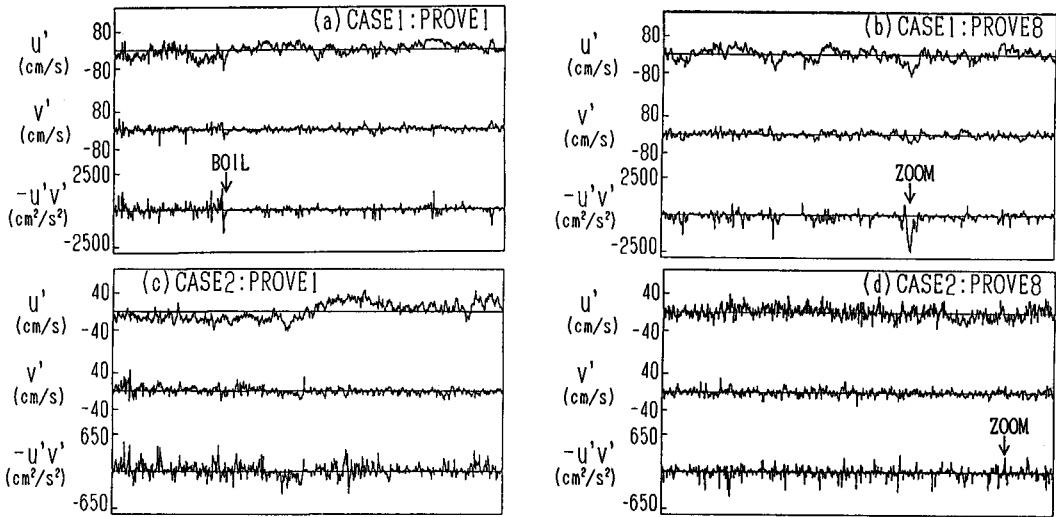


図-4 速度変動、レイノルズ応力の時系列生データ

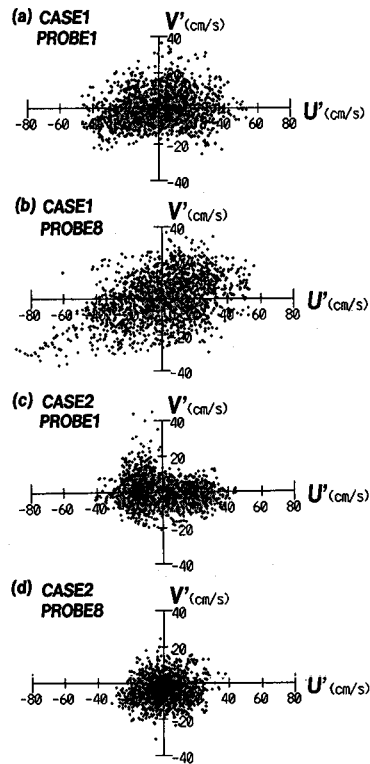


図-5 時系列生データの4象限解析

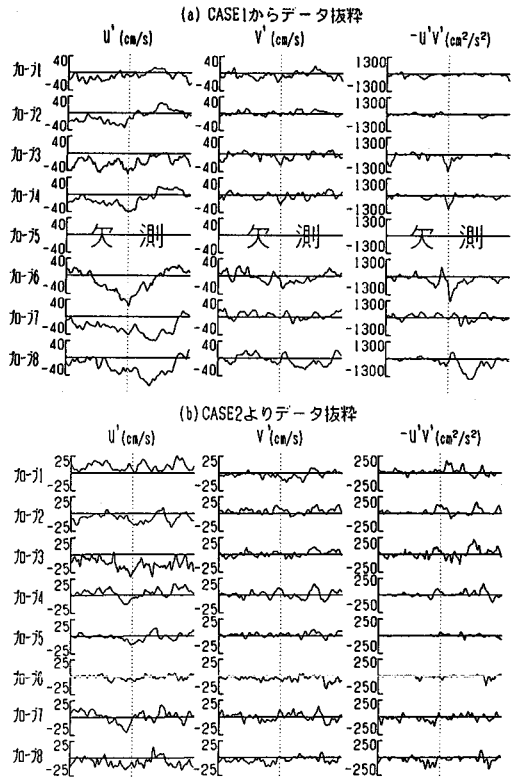


図-6 流速変動とレイノルズ応力の生データ拡大図

図-6は図-4に書かれてあるZOOMの部分抜き出し、拡大したもので、横軸は時系列データの長さにして10秒となっている。(a)、(b)はCASE 1、CASE 2からそれぞれ各プローブ間の相関性が強く、採取されたデータの

特性を代表するレイノルズ応力を中心として取り出したものである。図(a)をみると、河岸に近づくにつれて負のレイノルズ応力の位相が遅れ、絶対量が大きくなっていく傾向が見える。このことは、河岸にて植生等により作り出された大きな負のレイノルズ応力が移流によって、河道中央側に運ばれたと推定される。図(b)でもプローブ6、7、8に負のレイノルズ応力がみられるが、規模が小さい上に早く減衰する。また、正のレイノルズ応力についていえば、そのような傾向が見られない。このことからレイノルズ応力に限っていうと、河岸植生により作り出されるのは負のレイノルズ応力、特に低速下降流であり、減水期にはにはその影響が河道中央側に及びにくくなると考えられる。

2. 3. 3 乱流構造の瞬間像からの考察

図-7に図-4-(a)より取り出した、ボイル発生時の推定結果を示す。今回は境界条件として測定点を含む $Z=0, 14$ 及び $X=0, 20$ の面では仮想荷重法による推定値を用いて、前報より境界付近での誤差を軽減するよう試みた。図(a)をみるとボイルの発生場所に流れが集まっている様子が分かる。また全体的に低速流が卓越する中でボイルの発生場所では高速流が生じている。図(b)ではボイルを形成する上昇流の近傍に強い下降流が生じており、ボイルが縦渦によって作られている様子がはっきりと分かる。図(c)では上昇流が下方から鉛直上向きに伸びており、その周囲を低速下降流が取り巻いている。左方には鉛直下向きの下降流が現れており上下方向に激しい混合が行われているのが分かる。図-8は瞬間的な速度変動 u' 、 v' 、 w' を空間的に示したものである。この図から上昇流の周りを低速な

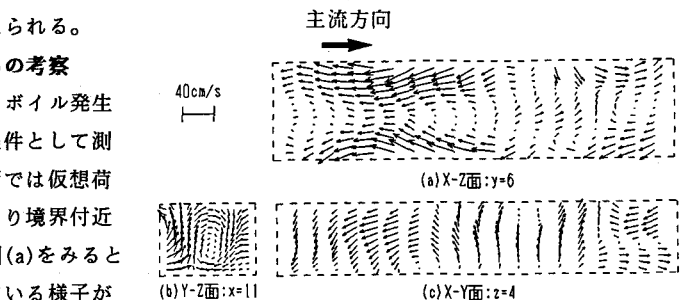


図-7 CASE 1からの推定結果

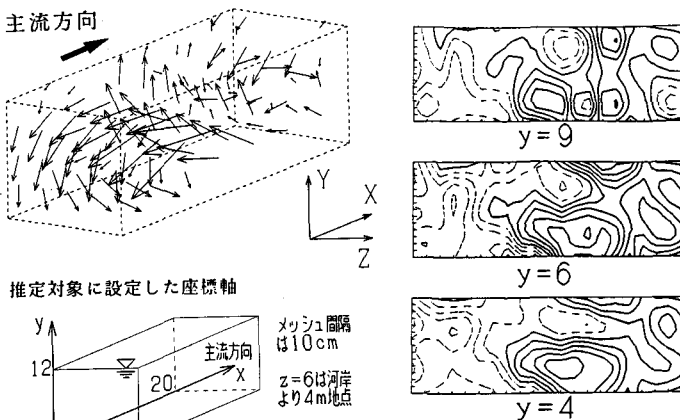


図-8 CASE 1でのボイルの速度変動の空間分布

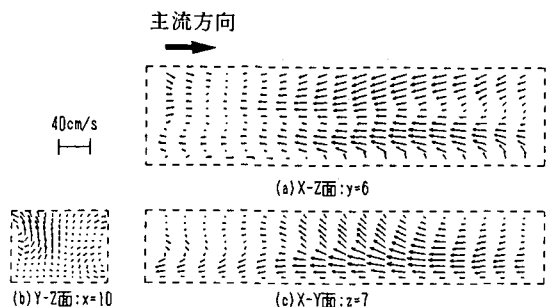


図-10 CASE 2からの推定結果

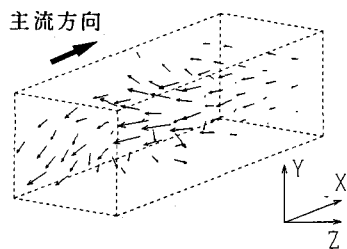


図-11 CASE 2での速度変動の空間分布

下降流が取り囲んでいる様子が分かる。CASE1のような低速下降流の卓越した流れでは、これらの下降流による混合が局所的な上昇流を励起し、ボイルを発生させやすい流れ場としていると予想される。図-9に各高さでの流速変動 v' のコンターを示す。コンターラインの間隔は 4 cm/s 、正を実線、負を点線で表している。図-

10は図-6-(b)のデータから得られた推定結果である。図(a)では上流側の高速流が下流側の低速流と衝突して、収束している様子が見え、図(c)を見ると水面付近で、収束した流体が上方に持ち上げられて低速上昇流となっているのが分かる。水面付近の上昇流の鉛直成分はボイルのときは20cm/s強まで達していたのに対して、10cm/s弱と小さい。図-7と比較すると洪水流の減水期に、洪水流の水面付近に発生する上昇流とボイルを形成する上昇流とではスケールがかなり違うことが分かる。図-11に空間的速度変動ベクトル図を示す。図-8とは3次元性の違いがはっきりとでている。

2. 4 濁度の3次元構造に関するMASCONモデルの拡張

2. 4. 1 濁度MASCONモデルの考え方

MASCONモデルはmass consistentな場を表わすモデルという意味で、Sasaki³⁾によって提案された方法である。筆者らがこれまで流速場に適用してきたMASCONモデルは仮想荷重法で得られたU, Vから連続式を満たすように、付帯条件付変分法によってW成分を含めて流れ場を調整するものである。この手法に関する基本的考え方やその適用例については文献4)に詳しく論ぜられているので参照されたい。今回のように濁度場にMASCONモデルを用いる場合は、付帯条件に拡散方程式を用いる。実河川洪水流のように移流の効果が時間項や拡散項に比べて卓越する流れでは、輸送方程式におけるそれぞれの項を落とした次の式

$$u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

を付帯条件として、 $(C - C_0)^2$ を最小とするように濁度Cを決定すればよい。ここで、 C_0 は仮想荷重法等で求めた1次推定値である。Lagrange乗数 λ を導入すれば、問題は次式の汎関数Fの極小値を求めることに帰着する。

$$F = \int_V \left\{ (C - C_0)^2 + \lambda \left(u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} \right) \right\} dv \quad (2)$$

式(2)の第一変分を0とおき、U, V, Wに関し(連続式)=0を用いて濁度Cを求めると次のようになる。

$$C = C_0 + \left(u \frac{\partial \lambda}{\partial x} + v \frac{\partial \lambda}{\partial y} + w \frac{\partial \lambda}{\partial z} \right) \quad (3)$$

これを輸送方程式(1)に代入すると λ に関する次の偏微分方程式

$$\text{式を得る。} u^2 \frac{\partial^2 \lambda}{\partial x^2} + v^2 \frac{\partial^2 \lambda}{\partial y^2} + w^2 \frac{\partial^2 \lambda}{\partial z^2} + 2uv \frac{\partial^2 \lambda}{\partial x \partial y} + 2vw \frac{\partial^2 \lambda}{\partial y \partial z} + 2uw \frac{\partial^2 \lambda}{\partial z \partial x}$$

$$= u \frac{\partial C_0}{\partial x} + v \frac{\partial C_0}{\partial y} + w \frac{\partial C_0}{\partial z} \quad (4)$$

境界条件は浮遊砂の出入りを許す場合 $\lambda = 0$ となり、出入りを許さない場合 $\partial \lambda / \partial n = 0$ となる。式(4)をSOR法で解けば得られた λ によって式(3)より修正された濁度Cが求まる。

2. 4. 2 濁度MASCONの妥当性

上で述べた濁度MASCONの妥当性を調べるにあたり、3次元シミュレーションデータが必要となる。しかし、3次元の濁度場を正確に記述した、シミュレーションデータに適したモデルが現在までに確立されるに至っていない。そこで、本研究ではシミュレーションデータとして以下のような3次元場を考え、今回開発した濁度MASCONの妥当性を調べることにした。①流れは主流以外にない場を考え、流速分布は鉛直方向の対数則を満たす。また、流下方向、横断方向の流速分布はすべて同形とした。②濁度分布は鉛直方向にRouseの理論式

$$\frac{C(y)}{C_a} = \left[\frac{h-y}{y} \cdot \frac{a}{h-a} \right]^s \quad Z = w_0 / \kappa u_* \quad (5)$$

を考える。ここで、hは水深、aは基準高さ、Caは $y=a$ での濁度、 w_0 は浮遊砂の沈降速度を示しており、今回は $h=20$ 、 $a=10$ 、 $Ca=100$ 、 $w_0=0.08$ を選んだ。横断方向の濁度分布には同形を考え、流下方

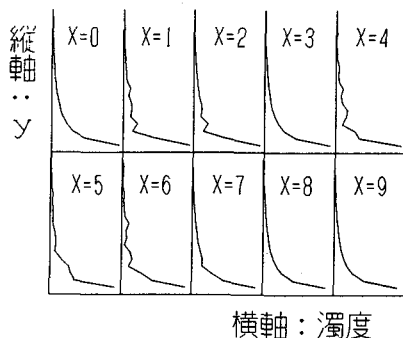


図-12 濁度MASCON検査用データ

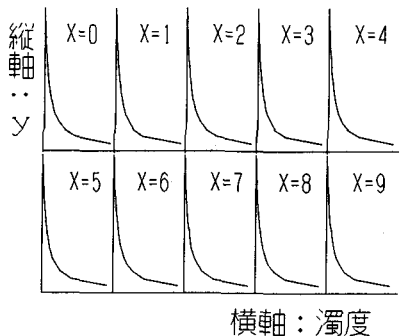


図-13 濁度MASCONによる推定結果

向には(1)式と $v=w=0$ より導かれる

$$\frac{\partial C}{\partial x} = \frac{w_0}{u} \frac{\partial C}{\partial y}$$

の関係を満たすような分布形にした。③メッシュは $10 \times 20 \times 10$ とした。今回開発した濁度MASCON法の妥当性を確かめるために、上記のシミュレーションデータに予めいくつかのノイズをランダムにいて場を乱したデータを用い、濁度MASCON法を適用することによってどこまで修正されるかを見た。図-12は修正前の乱した濁度場を示していて $x=0$ から $x=9$ まで流下方向に順に並べている。なお、境界条件を規定する $x=0$ と $x=9$ には厳密解をいれてある。図-13は修正された濁度場であるが良好に修正されたのが分かる。

2. 4. 3 濁度計による計測結果

今回の観測では試験的に濁度計を洪水流の中に投入してみたが、濁度変動等の有益な情報は得られなかった。これは観測時には酒沼川の水面近傍がWASH LOADとなっていて、ほぼ均一にシルト分が分布していたためである。濁度計による浮遊砂の計測は観測時期・河床材の影響を受ける上にキャリブレーション方法や浮遊するゴミ等の問題があるため、今後これらの対策について考える必要がある。

3. おわりに

本研究では昨年に引続き、建設省土木研究所で実河川洪水流の現地観測を行った。今回は特に河岸近傍の水面付近の流れ場に注目し、またボイルをはじめとした乱流構造の瞬間像を明らかにした。観測結果をまとめると以下ようになる。

(1) 河岸植生により大きな負のレイノルズ応力、特に低速下降流が作られ、移流によって河道中央側に運ばれる。しかし、減水期にはそうした効果が弱くなる。

(2) 水位ピーク時に河岸付近にて発生していたボイルを形成する上昇流は、下方で収束した流体塊を縦渦が持ち上げることによって作られている。ボイルと大規模乱流構造である組織渦とは密接な関係があり、またこの構造は減水期に現れるものと比べてかなりスケールが大きい。

濁度MASCONの開発については本論文で記載した条件で良好な結果を得た。今後、さらに多様な濁度場への適用について検討したい。

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(代表者 日野幹雄)」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、建設省土木研究所河川研究室、特に藤田光一、藤井政人、深谷涉各氏に便宜をとって頂いた上、親身なアドバイスを賜った。現地観測では東工大助手の神田学氏、東工大大学院の奥村卓也君、森暢典君、学部の安部智久君、軽部裕君に協力を得た。流速データ解析システムは東工大・院博の孟岩氏(現清水技術研究所)の開発したものである。これらの方々に謝意を表する。

参考文献

- 1) 日野幹雄・孟岩・村山宣義 : 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、水工学論文集第36巻、pp.175~180、1992.
- 2) 建設省土木研究所河川部河川研究室 : 酒沼川洪水観測レポート[1] 1988-1989、土木研究所資料、第2895号、1990.
- 3) Sasaki, Y. : An objective analysis based on the variational method. J. Meteor. Soc. Japan, vol. 36, pp. 77~88、1958.
- 4) 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、pp. 513~518、1991.