

ガス巻き込み現象詳細実験
くぼみ渦発達機構に関する研究

平成16年度

(共同研究報告書)

2005年3月

東京大学
核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松 4 番地49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

電話：029-282-1122（代表）

ファックス：029-282-7980

電子メール：jserv@jnc.go.jp

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:

Technical Cooperation Section,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184, Japan

© 東京大学

(The University of Tokyo)

© 核燃料サイクル開発機構

(Japan Nuclear Cycle Development Institute)

2005

ガス巻き込み現象詳細実験：くぼみ渦発達機構に関する研究
平成16年度
(共同研究報告書)

岡本 孝司¹ 上出 英樹²

要 旨

高速炉の実用化概念として、経済性の向上のために原子炉容器をコンパクト化した炉型が検討されている。コンパクト化された原子炉容器では冷却材流速が増大することから、自由界面からのガスの巻き込みの判定は、設計成立性の観点から重要な評価項目となっている。設計で遵守すべきガス巻き込みの判断基準を策定することを目的に共同研究を実施する。

本研究では、ガス巻き込み発生に大きく影響するくぼみ渦について、現象を渦の生成、発達（成長、減衰）、気泡の巻き込みの段階に分け、特にくぼみ渦の発達段階について、実験研究を実施する。これにより、ガス巻き込み現象の解明、及びガス巻き込み判定手法策定に必要なデータを取得することを目的とした。

ダイナミックPIVを用いて、垂直・水平2断面の高速度同時計測に成功した。さらに、ガルバノミラーを応用することで、水平垂直間のクロストークを無くし、より精度の高い下降流速分布と循環を取得した。これにより渦の成長に対して下降流速が大きな影響を有することを明らかにした。また、長時間計測データベースを構築した。

1：東京大学大学院 工学系研究科システム量子工学専攻

2：核燃料サイクル開発機構 大洗工学センター 要素技術開発部

Study on the Gas-Entrainment from Free-surface
Experimental Study on the evolution mechanism of gas-dimple core

K. Okamoto¹ and H. Kamide²

ABSTRACT

In order to evaluate the gas-entrainment phenomena from free-surface, the experimental study on the evolution of gas-dimple core was carried out. The interaction between the surface dimple and downward flow was clearly visualized using the high-speed camera and high-speed pulse laser. The quantitative velocity information around the vortex dimple was obtained.

With combining the Galvano mirror, simultaneous measurement systems of vertical and horizontal cross-sections are developed. As the result of experiment, it is confirmed that the downward flow plays very important role on the evolution of the gas-dimple core.

1: Dept. Quantum Engineering Systems Science, The University of Tokyo

2: O-arai Engineering Center, Japan Nuclear Cycle Development Institute

< 目 次 >

要 旨	i
第1章 緒 言	1
第2章 試 験 装 置	2
第3章 水平・垂直面同時計測	4
第4章 ガルバノミラーによる水平・垂直同時計測	7
第5章 長時間計測データベース	10
第6章 結 言	19

表リスト

表 1 : 計測条件	11
------------	----

図リスト

図 1 試験装置	2
図 2 試験装置写真	3
図 3 計測断面	3
図 4 レーザーシートによる縦横同時照射	4
図 5 レーザーシート	5
図 6 縦断面計測画像例	5
図 7 瞬時速度ベクトル分布	6
図 8 タイミングチャート	7
図 9 鉛直断面内流速分布 (ベクトル図)	8
図 10 下降流速分布	9
図 11 水平断面内流速分布 (ベクトル図)	9
図 12 座標系と流速抽出点 (Top View)	10
図 13(a) 時刻($t=6.66s$)における計測結果 (フィルターなし)	11
図 13(b) 時刻($t=6.66s$)における計測結果 (空間フィルター有)	12
図 14(a) 時刻($t=23.0s$)における計測結果 (フィルターなし)	13
図 14(b) 時刻($t=23.0s$)における計測結果 (空間フィルター有)	14
図 15(a) 角柱直後と吸込管周辺の流速変動 (空間フィルターなし)	15
図 15(b) 流速変動のパワースペクトル(空間フィルターなし)	16
図 16(a) 角柱直後と吸込管周辺の流速変動 (空間フィルター有)	17
図 16 (b) 流速変動のパワースペクトル(空間フィルター有)	18

第1章 緒言

高速炉の実用化概念として、経済性の向上のために原子炉容器をコンパクト化した炉型が検討されている。コンパクト化された原子炉容器では冷却材流速が増大することから、自由界面からのガスの巻き込みの判定は、設計成立性の観点から重要な評価項目となっている。設計で遵守すべきガス巻き込みの判断基準を策定することを目的に共同研究を実施する。

本研究では、ガス巻き込み発生に大きく影響するくぼみ渦について、現象を渦の生成、発達（成長、減衰）、気泡の巻き込みの段階に分け、特にくぼみ渦の発達段階について、実験研究を実施する。これにより、ガス巻き込み現象の解明、及びガス巻き込み判定手法策定に必要なデータを取得する。

本研究は平成15年度から3年間の計画で実施している。ガス巻き込み現象は自由液面近傍に循環（渦）が発達するとともにその下方に下降流が存在するとき、くぼみを伴った渦が形成され、渦と下降流の相互作用の中で渦が発達し、くぼみの先端で気泡が液中に離脱すると考えられている。本研究では、このようなガス巻き込み現象の中で、渦がどのように発達するか、下降流との間に過渡的な現象として何が起こるのかを定量的に明らかにするものである。これまでの他の研究では、定常的な渦を強制的に作り、循環や下降流速の強さをパラメータとして気泡の離脱条件を把握することが行われてきた。本研究では、ガス巻き込み現象が過渡現象であることに着目し、渦の発達という側面から新しい知見を得ようとするものである。水を作動流体とし、渦と下降流を生成できる試験装置を作成する。解析評価することを考え、できるだけシンプルな体系とする。パルスレーザーと画像解析を組み合わせた最新の粒子画像流速測定法などを適用し、瞬時の空間速度分布を時々刻々捉えることで、渦の成長・減衰、下降流との過渡的な相互作用の計測実施した。

本年度は、第2年度目の研究として、渦の循環量と、下降流速分布の同時計測手法を開発し、そのデータを取得した。合わせて、ガス巻き込みの発生する場について情報を取得した。

第2章 試験装置

実験装置は、自由液面を持つ回流水槽である。図1に試験装置の概略図を、図2に試験装置の写真を示す。流路形状は幅200mm、高さ300mmの亚克力製であり、亚克力構造物を挿入することで任意形状の流路を形成できる。この流路にはインバータ付のポンプが接続されており、任意の流量を流すことが可能である。このような透明回流水槽に水を循環させるとともに、1辺10mmの正方形をした吸い込み管を流路下部に設置した。この吸い込み管は、亚克力製であるが、正方形をしているため、吸い込み管による画像のひずみなどは生じない。なお、ガス巻き込みを発生しやすくするため、上流側に角柱を設置し、その下流側に吸い込み管を設置している。図3に角柱と吸い込み管の位置関係を示すが、辺がちょうど間の中央となるように設置している。図中には、計測領域を薄く示している。

本研究では、旋回渦が発達しガス巻き込み現象に至る様子を鮮明に調べるためダイナミックPIVによって定量化を行った。カメラは2000fps、100万画素で記録できる。レーザ発振機はダブルパルスレーザを2~10000Hzで照射でき、最大出力は10mJ、波長は527nm、ビーム径は1.5mmである。蛍光粒子は直径 $\sim 60\mu\text{m}$ のダイアイオンにローダミンBを付着させたものを用いた。ローダミンBは緑の光を吸収し、オレンジの光を発光するため、緑色光（波長527nm）をシート光として照射し、同期した高速度カメラで撮影を行った。

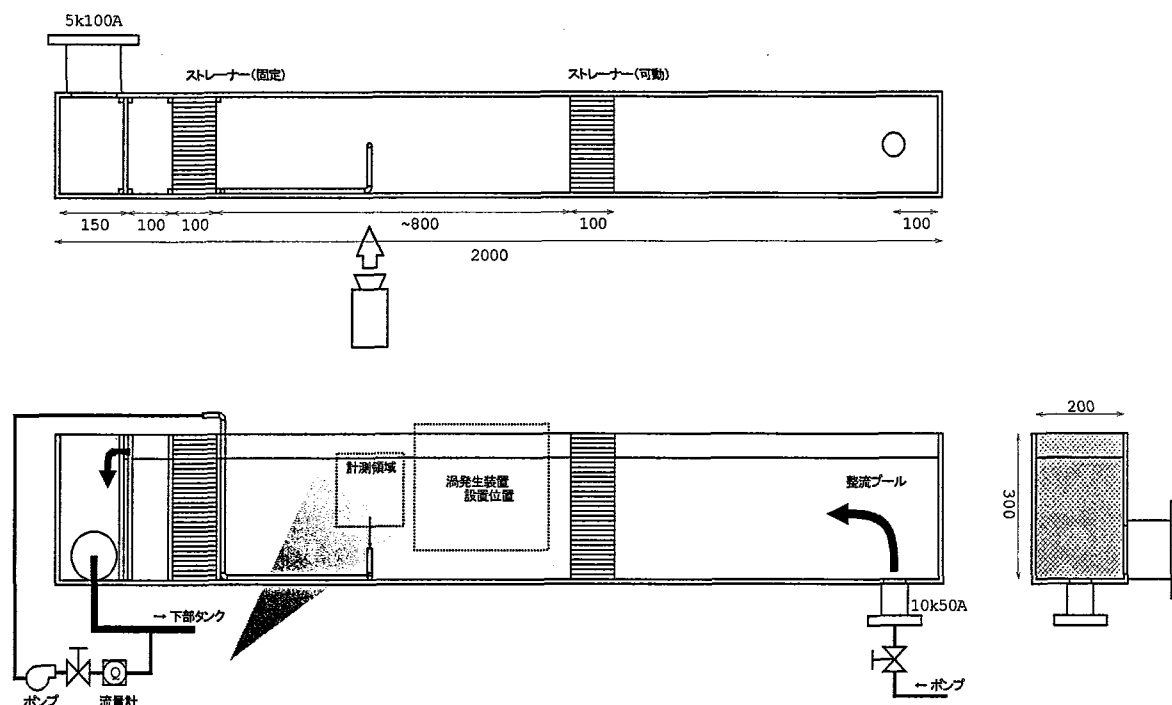


図1 試験装置

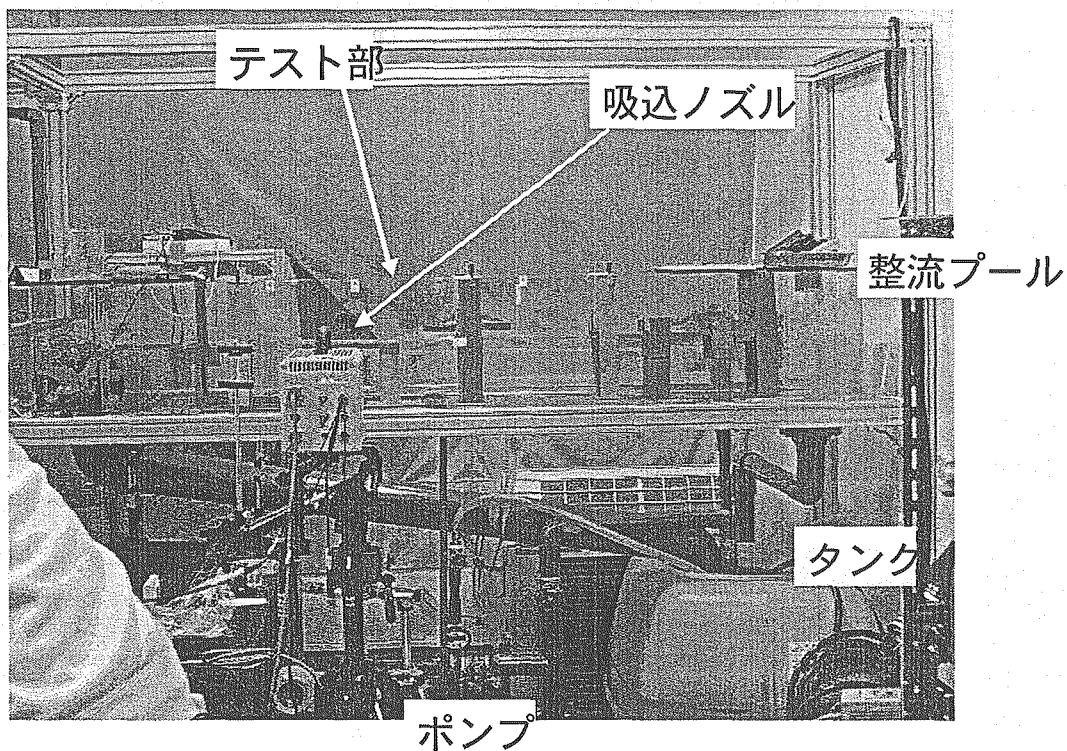


図2 試験装置写真

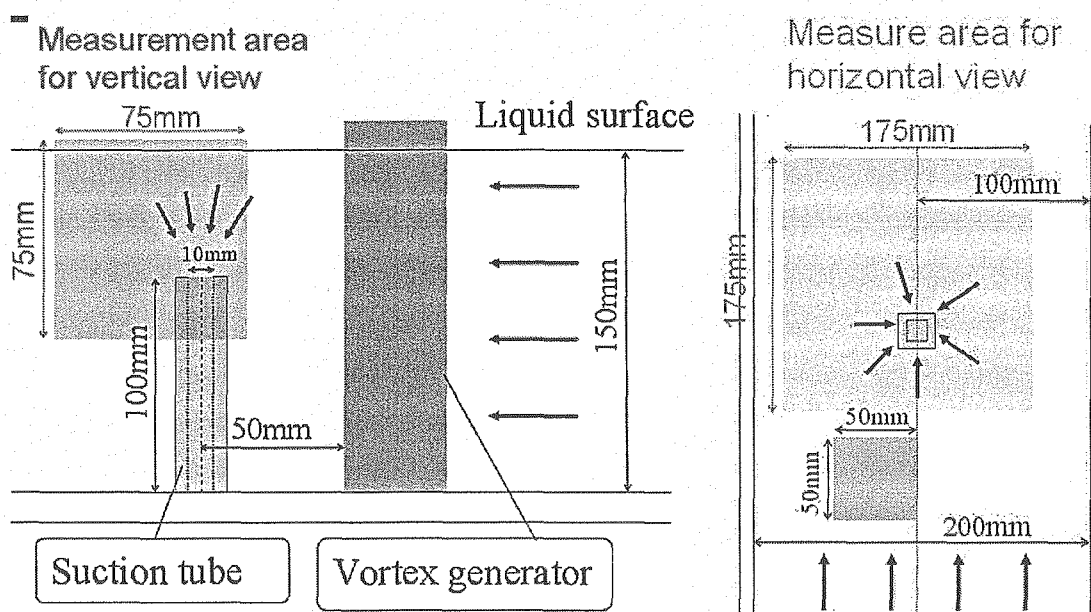


図3 計測断面

第3章 水平・垂直面同時計測

レーザをハーフミラーで2つに分割し、シリンドリカルレンズを用いて、水平面、垂直面にシート光を照射し、それぞれカメラで撮影し記録する。図4に同時計測の照射シート面をポンチ絵で示す。レーザは0.2msの時間間隔のダブルパルスレーザを250Hzで発振させ、それに同期して高速度カメラを500fpsで動かす。用いたカメラは、2000fps、100万画素(1024x1024)のPhotron MAXである。水平面、垂直面を同時に計測することにより、渦生成時における下降流速、循環の分布を知ることができる。図5に同時にレーザーシートを照射した条件における写真を示す。右側から左に流れ、角柱が移っていることが見て取れる。また、図6は渦生成時の垂直断面画像であり、液面、くぼみ渦、吸い込み口が見える。なお、同時に照明している水平面へのレーザーシート光も写っている。実際にこの画像を解析する時には水平面へのレーザーシート光がノイズとなり、誤ベクトル発生の原因となる。このため画像処理によりシート光の部分除去する技術が必要である。渦がガス巻き込みに成長する条件と、減衰してガス巻き込みに至らない条件の断面画像を比較すると、この写真からだけでは、ガス巻き込みに対する定量的な考察はできない。これらの連続画像から、PIV解析を行い、各断面における速度分布を図7に示す。下降流速は自由液面付近では大きな変化はみられず、吸い込み口に近づくにつれ急激に速度を増しているのがわかる。一方ガス巻き込みに至らない条件では、渦の先端部分ではほとんど下降流速成分が無いことがわかる。一方水平断面画像からは、渦の様子がはっきりと捉えられている。この図からこの渦の循環は約 $200\text{mm}^2/\text{s}$ と推定される。ガス巻き込みに至る条件のほうが循環が大きくなっていることも定量的に計測できる。また、ガス巻き込みに至らない条件では、渦の中心が吸い込み渦の中心からずれていることもわかる。この同時計測手法を用いることにより、くぼみ渦の発生時における下降流速、循環が同時に得られる。また、各断面の速度分布の状況がはっきりとわかるようになった。

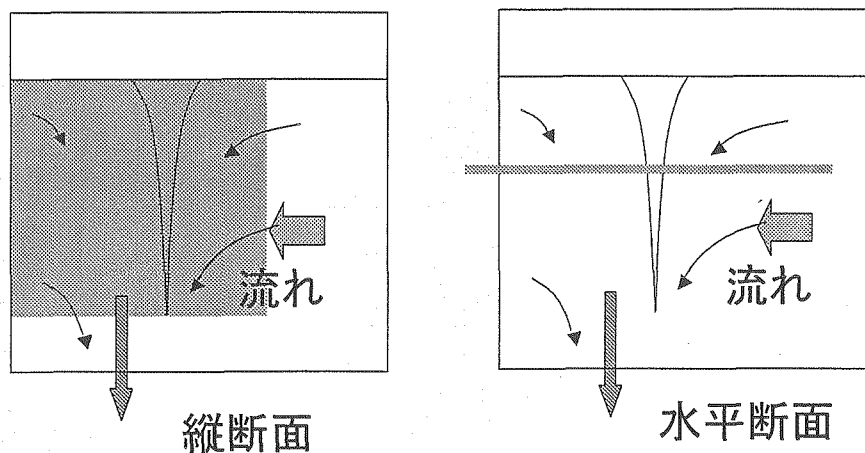


図4 レーザーシートによる縦横同時照射

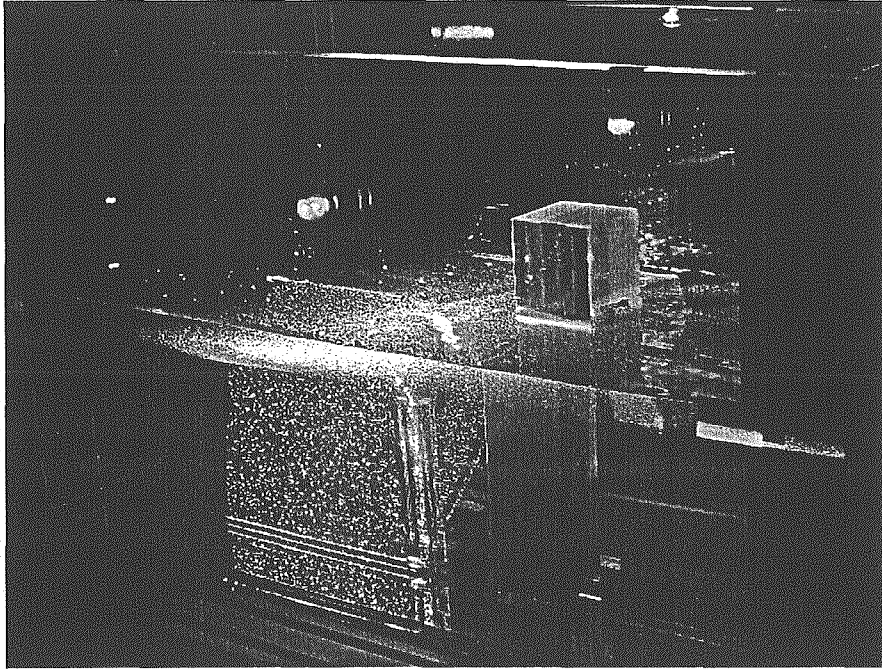
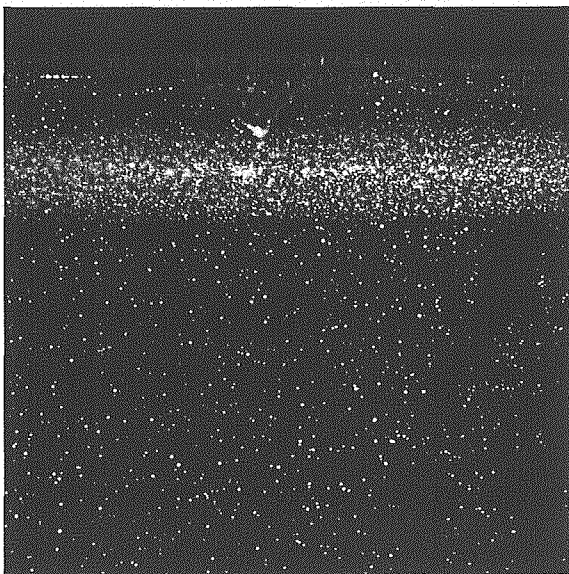
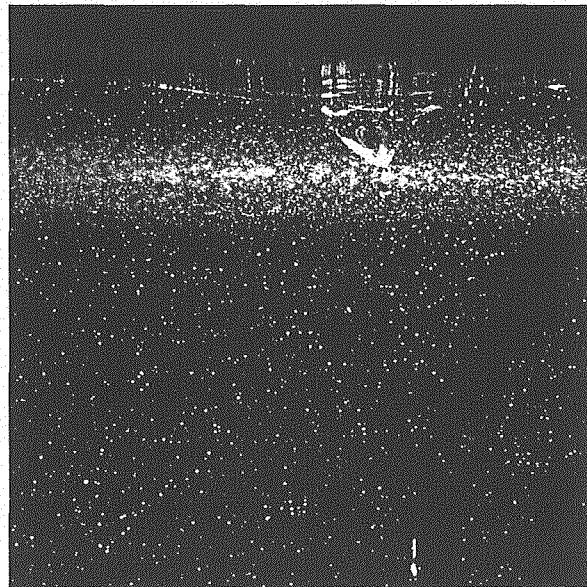


図5 レーザーシート

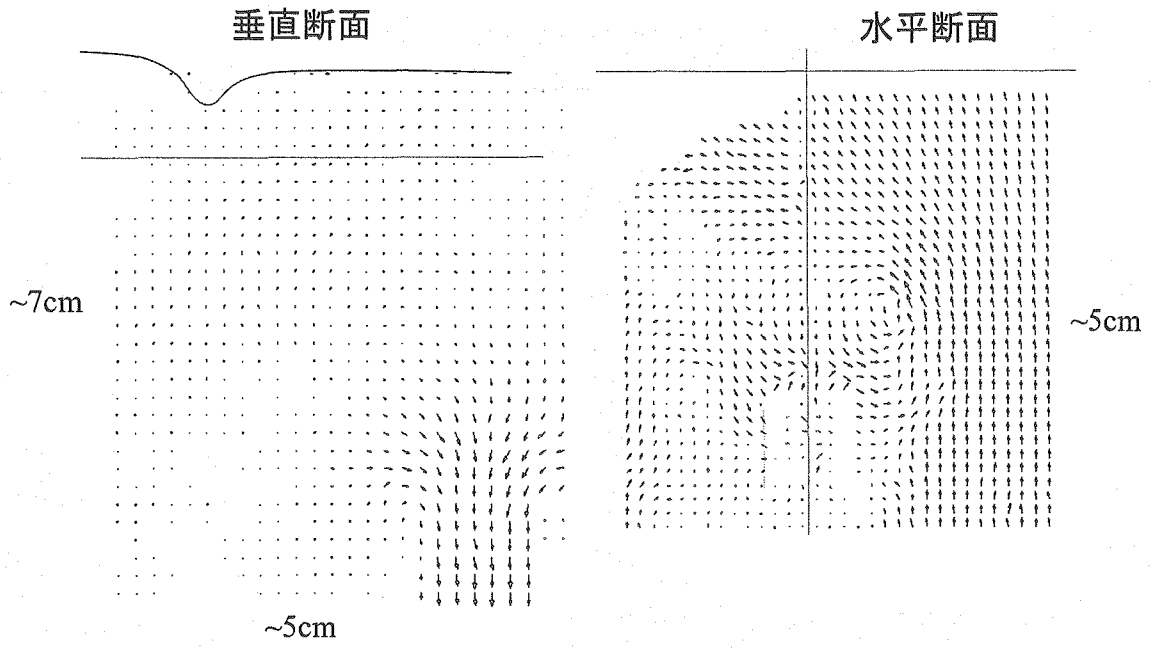


(a) ガス巻き込み無し条件

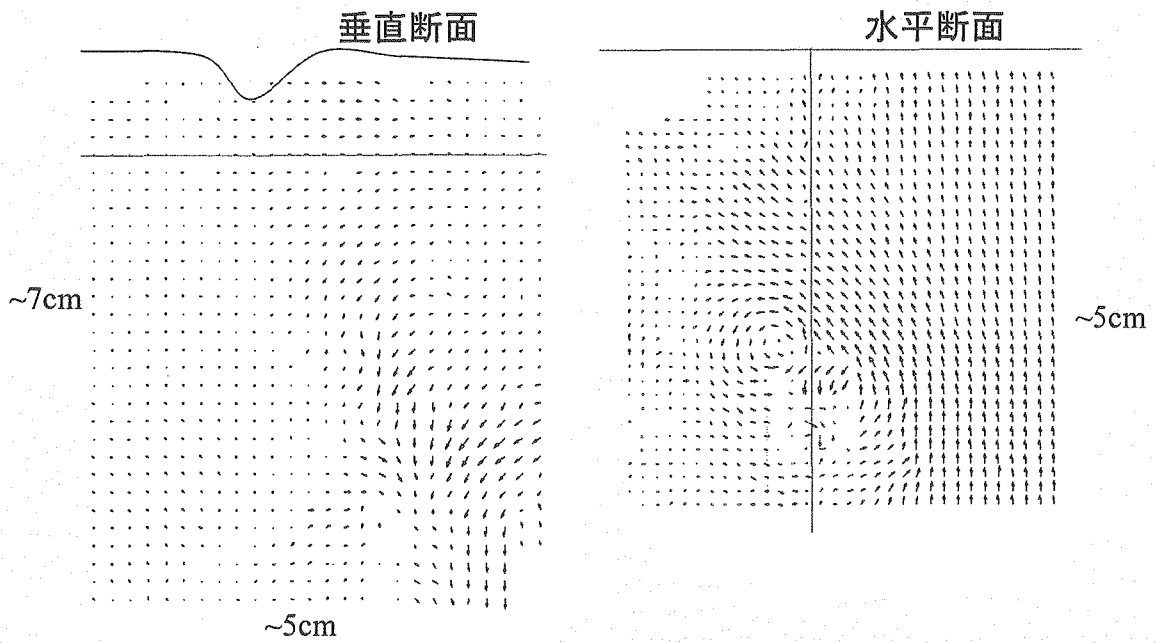


(b) ガス巻き込みにいたる条件

図6 縦断面計測画像例



(a) ガス巻き込みに至らない条件



(b) ガス巻き込みにいたる条件

図7 瞬時速度ベクトル分布

第4章 ガルバノミラーによる水平・垂直同時計測

前章では、ハーフミラーを用いてパルスレーザを分離したが、水平面、垂直面へ同時に照射されたレーザシートは互いの面に映りこむことで画像上のノイズとなり、解析時に誤ベクトル発生の原因となるという問題が生じた。本研究ではこれを回避する手段としてハーフミラーの代わりにガルバノミラーを用いた。ガルバノミラーとはミラーに軸を付け、電気信号に応じて任意の周波数、振幅でミラーの回転角を変えられるようにした偏向器である。非共振型の偏向器なので、のこぎり波形型の電気信号やランダムな信号で駆動できる。ミラーを利用した偏向器ではポリゴンミラーが多用されるが、ポリゴンミラーは複数のミラーを回転させるため、再現性よくスキャンさせるにはいわゆる「面倒れ補正」が必要になる。一方、ガルバノミラーは単一のミラーを振動させるため「面倒れ補正」をしなくても再現性のよいスキャンができるのが特長である。本研究では、このガルバノミラーを用いてパルスレーザをパルスごとに2方向に分離し、垂直方向、水平方向のレーザシートを作る。ガルバノミラーを用いたタイミングチャートを図8に示す。フレームストロドリングを行わず、垂直方向、水平方向ともに一定の間隔で画像を取得した場合のパルスレーザ1、パルスレーザ2、カメラ1、カメラ2、ガルバノミラーのタイミングチャートである。横軸は時間軸、三角形の印はパルスレーザを打つタイミング、長方形はカメラのシャッターが開いていることを示す。ガルバノミラーは矩形波が直線より下にある場合は垂直方向、上にある場合は水平方向を向いていることを示す。このタイミングチャートでは、パルスレーザ1と2がそれぞれ交互に水平方向、垂直方向へ向かい、パルスレーザ1はカメラ2のデッドタイムに、パルスレーザ2はカメラ1のデッドタイムに打ち込まれているのがわかる。

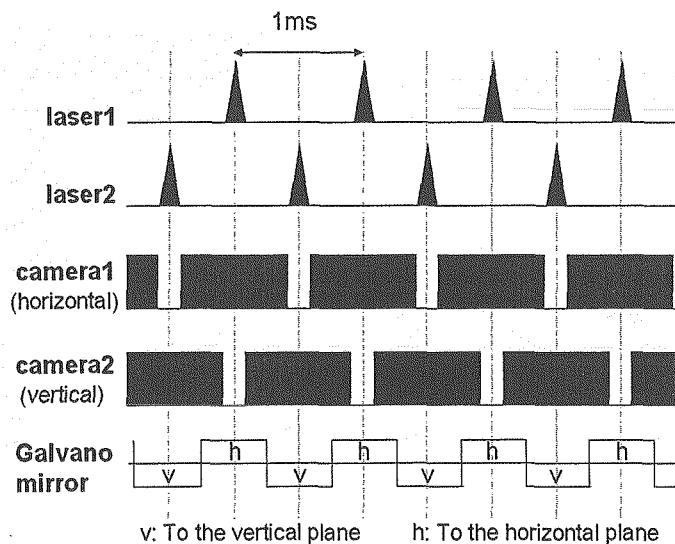


図8. Timing chart

ガス巻き込み現象には、液面に1~2mm程度のくぼみ渦が発達し、(a)その後ガス巻き込みに至る場合と、(b)それ以上発達せずに減衰し消えて行く場合がある。ここではその2パターンについてそれぞれ下降流速分布、循環の値を示し比較を行う。図9にくぼみ渦が一定程度まで発達した瞬間の垂直面における速度ベクトルマップをそれぞれ示す。

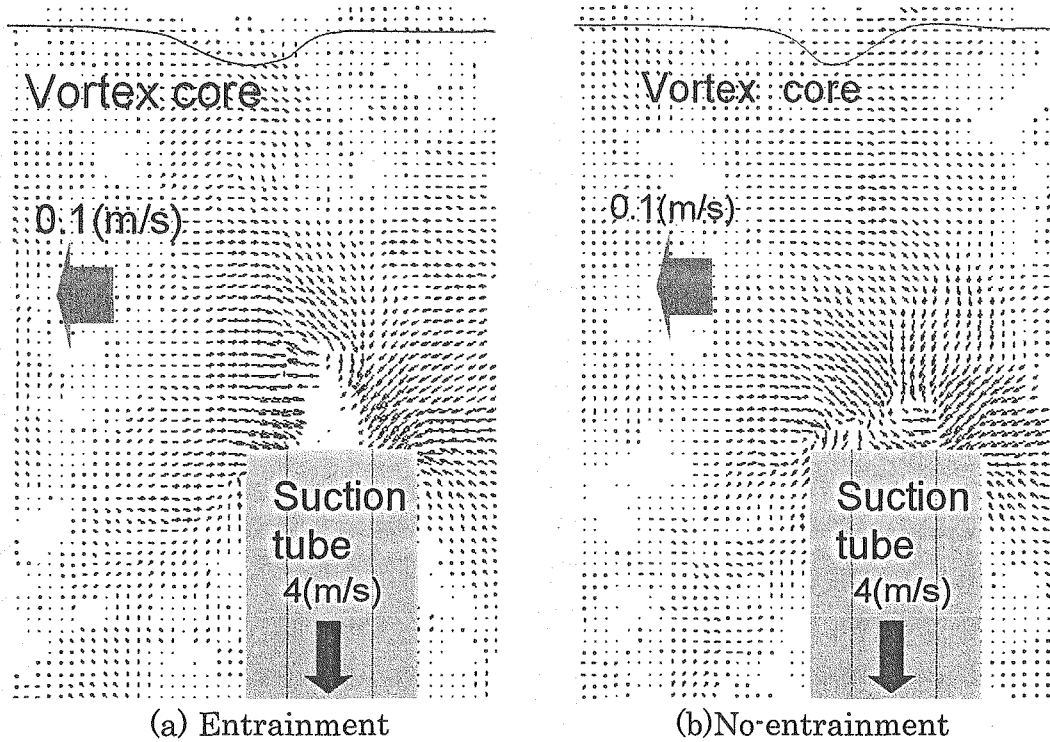


図9. Velocity vector distribution (vertical)

次に図10に下降流速分布を示す。Y方向の速度成分の分布を-0.3(m/s)から+0.3(m/s)の範囲で色分けして表している。赤色に近いほど下向きの速度成分が強く、青色に近いほど上向きの速度成分が強い。吸い込み口上方部分は流速が速すぎて相関がとれない。くぼみ渦はその先端部分に下降流速を有しており、くぼみ渦の発達に伴い下降流速は大きくなり、ある境界条件を超えた時点でガス巻き込みに至る。Fig5の両者を比較してみると(a)はくぼみ渦先端付近に比較的大きな下降流速分布が見られ、吸い込み口まで続いている。それに対し、(b)ではくぼみ渦先端付近に、目立って大きな下降流速分布は見られず、大きな下降流速分布が見られるのは吸い込み口付近のみである。

図11に、2つの垂直断面と同時刻における水平面の速度ベクトルマップをそれぞれ示す。双方とも吸い込み口付近に渦が見られる。これらは垂直断面で計測されたくぼみ渦である。

渦の中心から半径1cm以内に入る格子点上で(1)式に従って循環を与えた。rは渦中心からの距離、vは接線方向の速度である。

$$\Gamma = rv \quad (1)$$

それぞれ格子点上の循環の平均値を算出した結果、ガス巻き込みに至る場合は、 $\Gamma = 2.2 \times 10^{-3} \text{ (m}^2/\text{s)}$ 、ガス巻き込みに至らない場合は $\Gamma = 1.4 \times 10^{-3} \text{ (m}^2/\text{s)}$ であり、ガス巻き込みに至る場合は、至らない場合に比べて循環の平均値が大きいことがわかる。

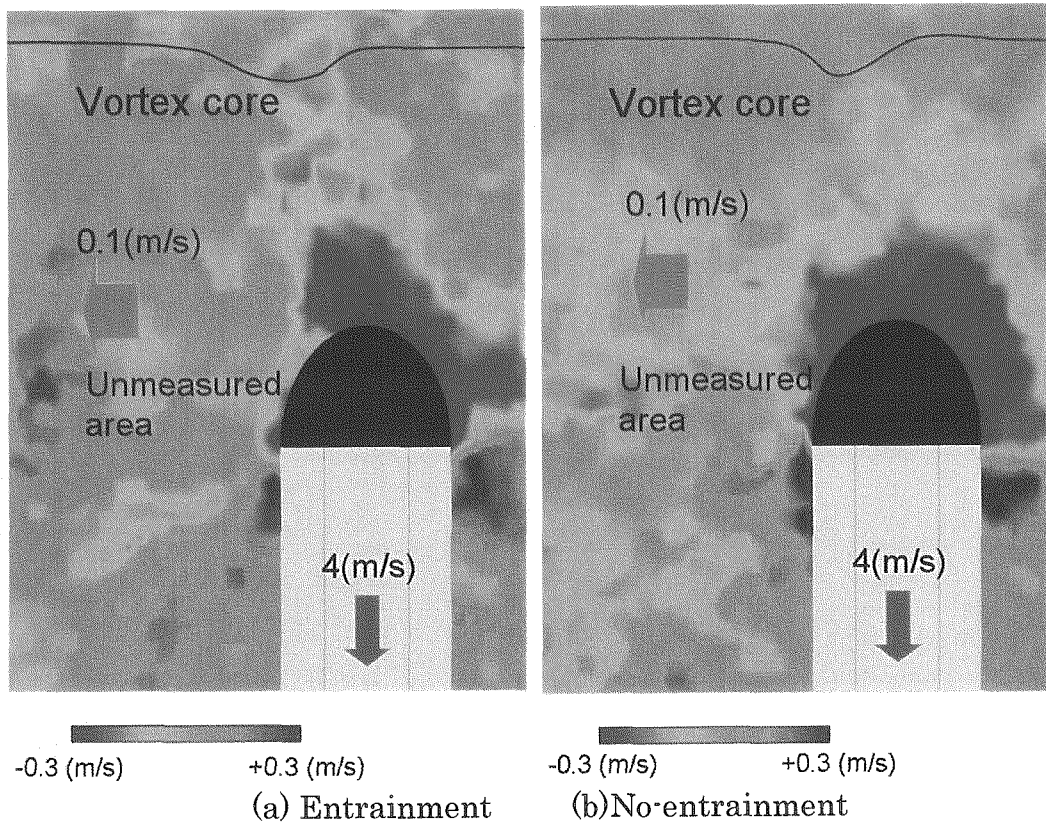


図10 下降流速分布

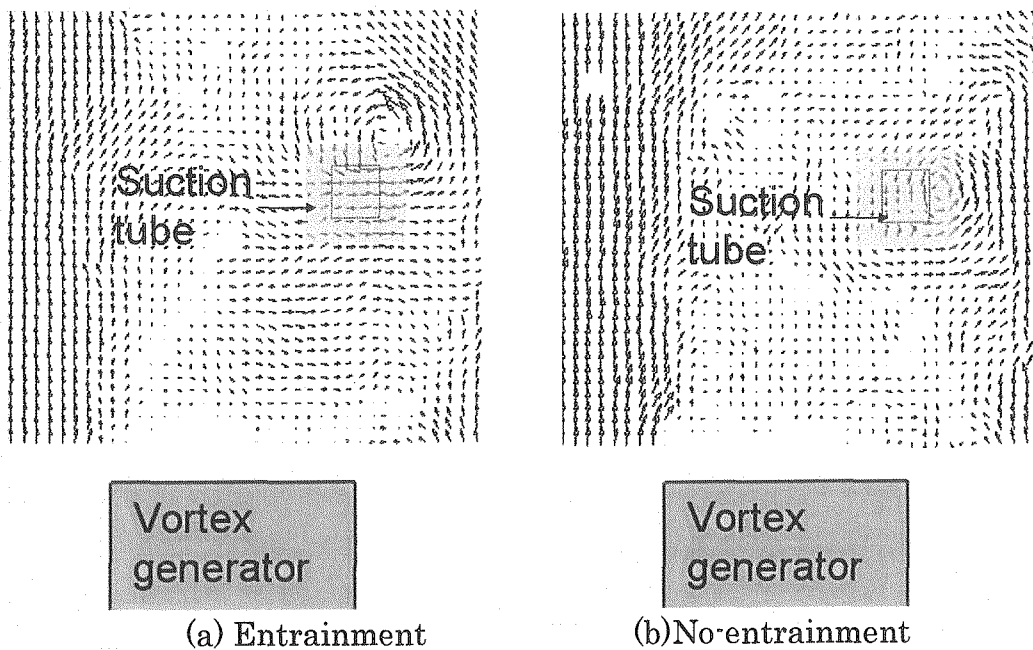


図11 水平断面内流速分布 (ベクトル図)

第5章 長時間計測データベース

ダイナミックPIVでは、瞬時の速度変動を明確に捉えることができるが、カルマン渦などの比較的長期的な変動を捉えるため、長時間計測データベースを構築した。計測条件を表1に示す。

表1：計測条件

撮影方向	水平断面を流路底から撮影
断面位置	流路底から125mm
平均流速	100mm/s
吸込み	あり，吸込管入口で平均流速4m/s
計測周期	30Hz
計測回数	1024回
PIV画像間隔	5ms
画像解像度	1024×1024pixel
実寸との対応	1024pixel ≡ 207.3mm
流速計算点	8pixel間隔，127×127点

流速と第2不変量

吸込管への巻き込みによる渦の成長が見られる，時刻 6.66[s]と23.0[s]について，流速分布と第2不変量分布を示した．（第2不変量分布はStreamViewerで作成）この結果を図13,14にまとめる．なお、PIV計測の誤差を低減するため、波長が約5mm程度となるように空間フィルタを施し、実施した結果も合わせて示した。

流速変動とパワースペクトル

角柱直後・吸込管周囲の以下の3点について，時系列的に流速を抽出した．図12に具体的な計測点を示す。

- A (75, 0, 125)
- B (75, -25, 125)
- C (120, 0, 125)

抽出した水平2方向の流速変動について，FFTによりパワースペクトルを求めたものを図15,16にまとめる。

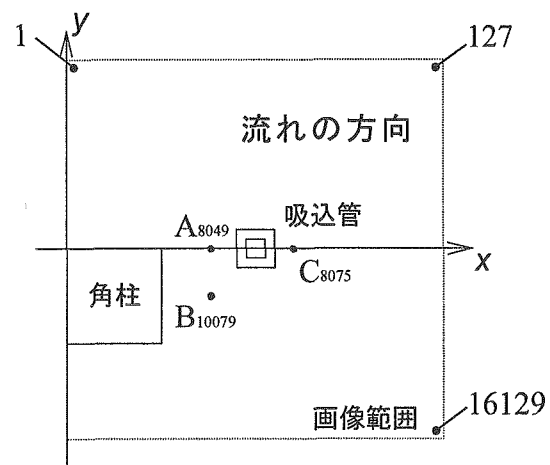
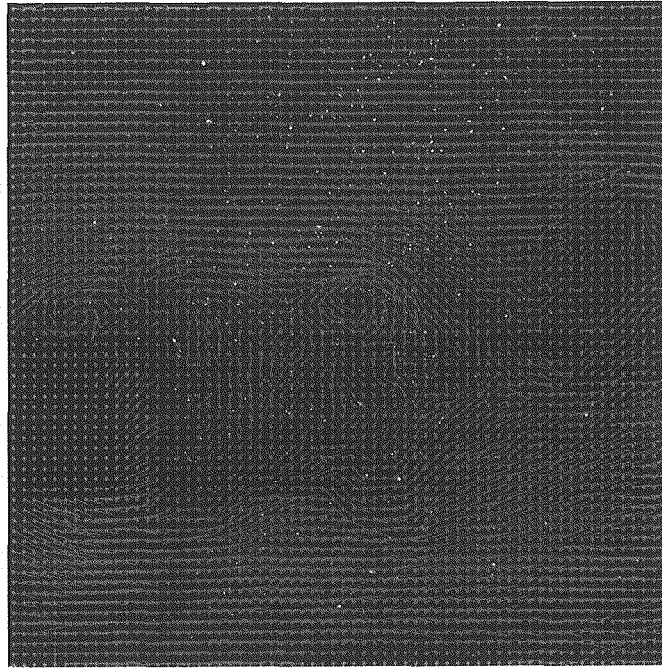
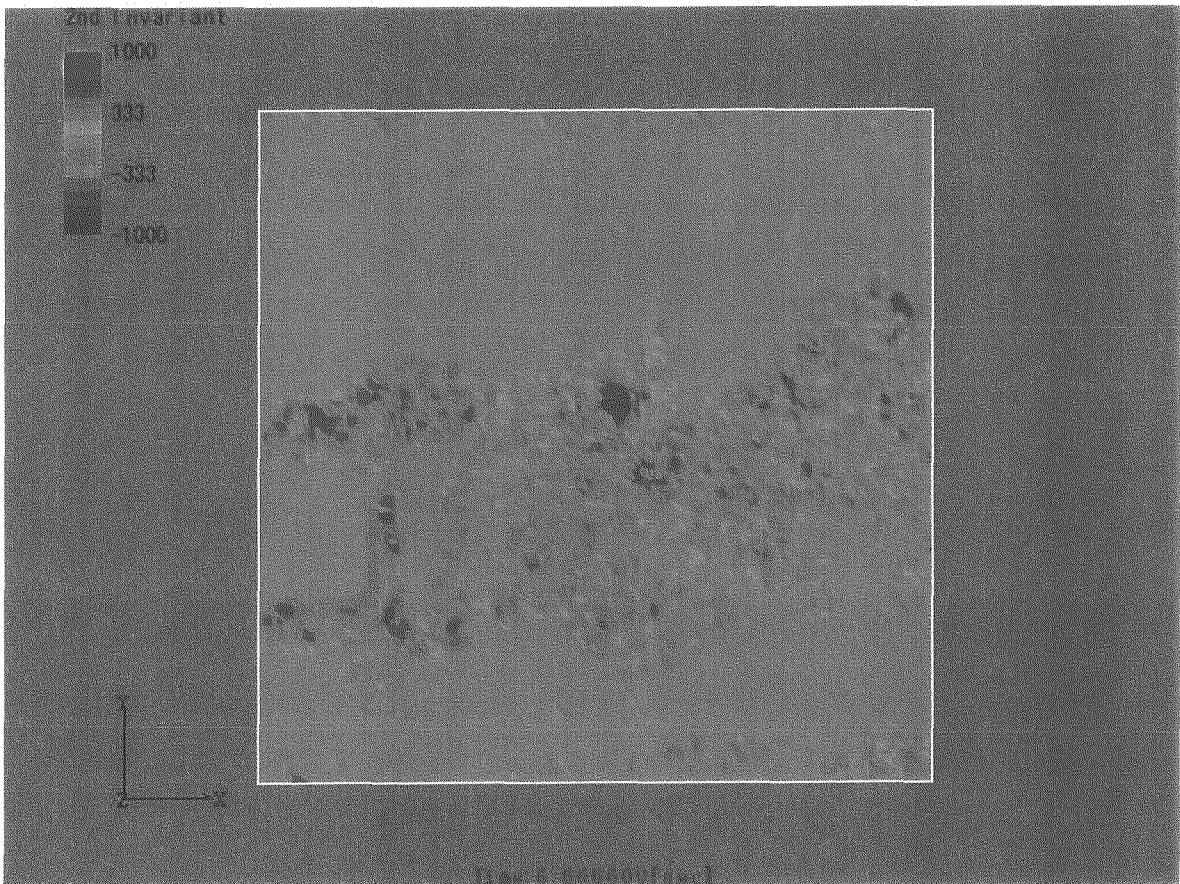


図12 座標系と流速抽出点 (Top View)

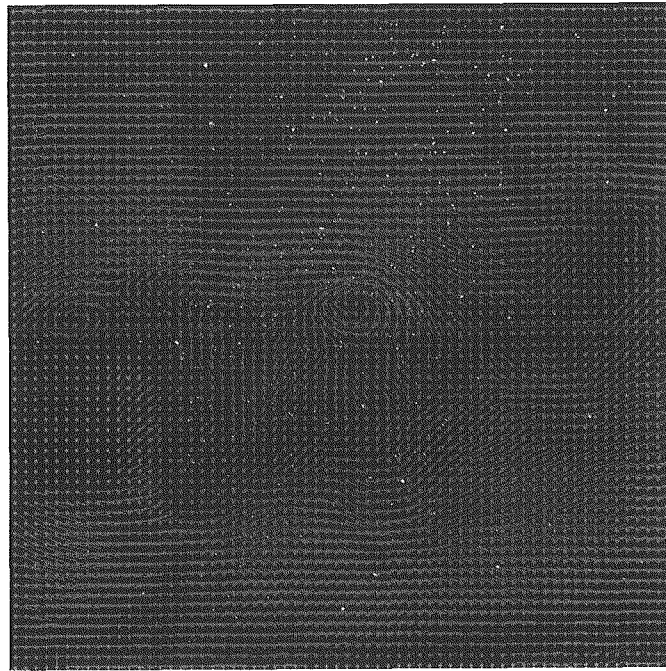


流速分布 (t=6.66[s])

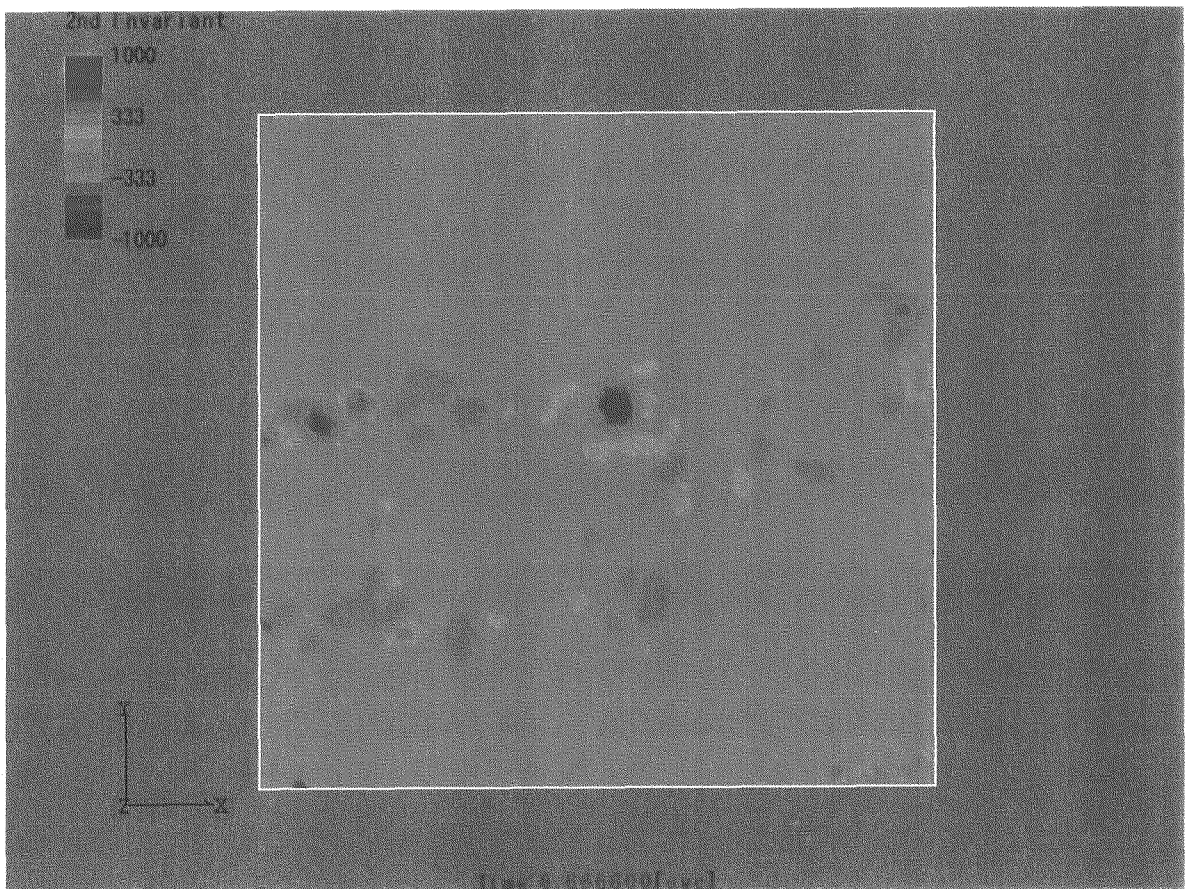


第2不変量分布 (t=6.66[s])

図13(a) 時刻(t=6.66s)における計測結果 (フィルターなし)

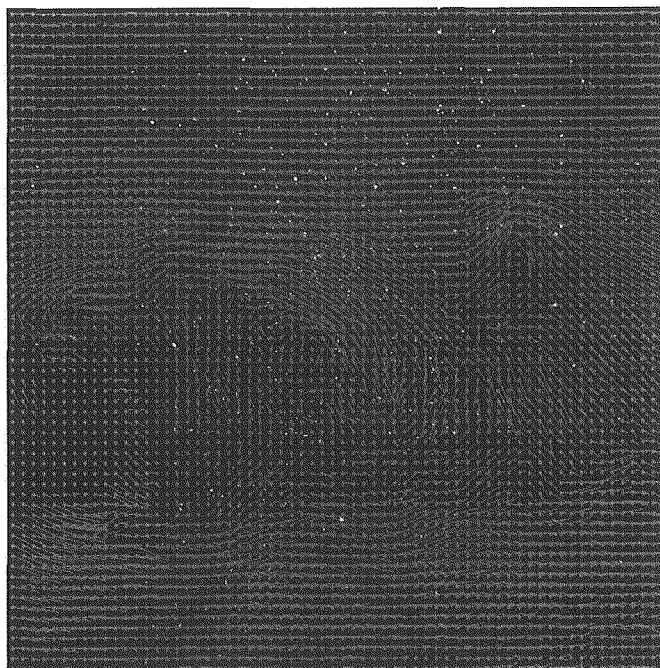


流速分布 (t=6.66[s])

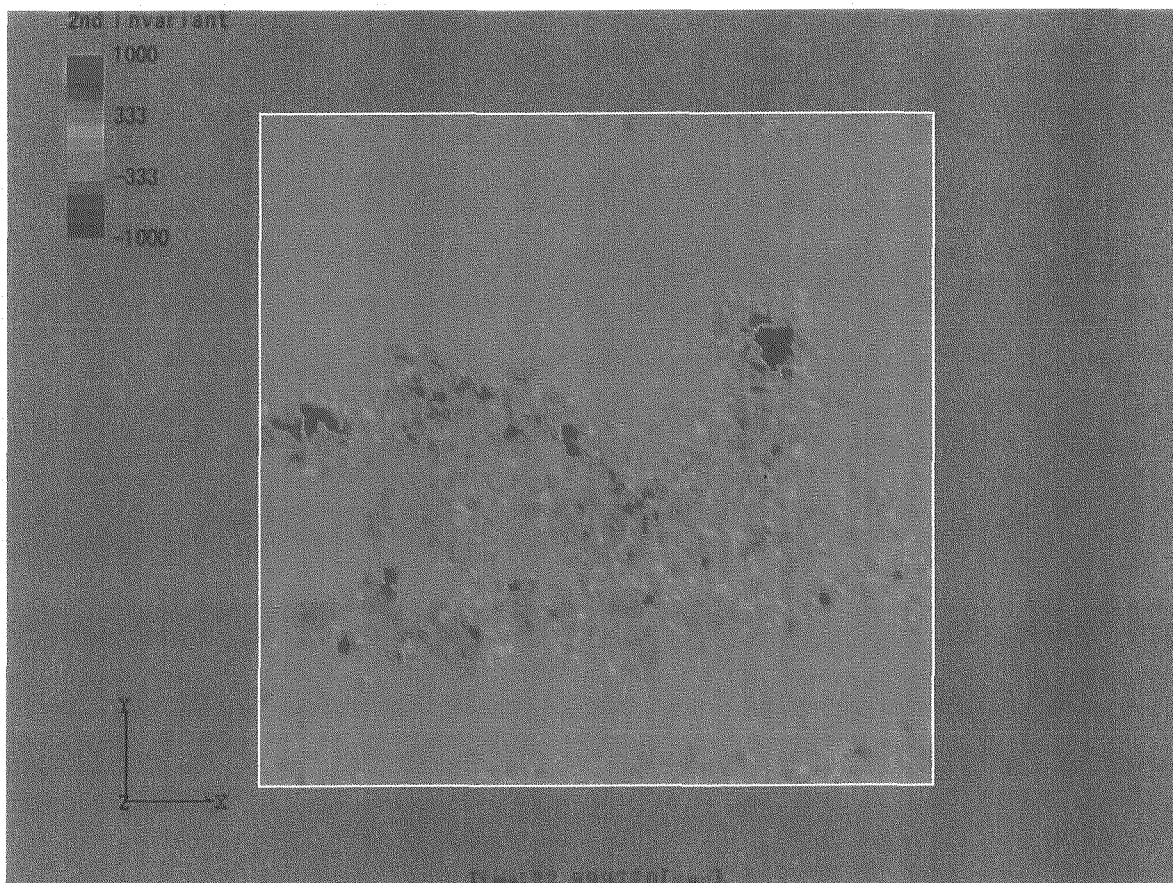


第2不変量分布 (t=6.66[s])

図13(b) 時刻(t=6.66s)における計測結果 (空間フィルター有)

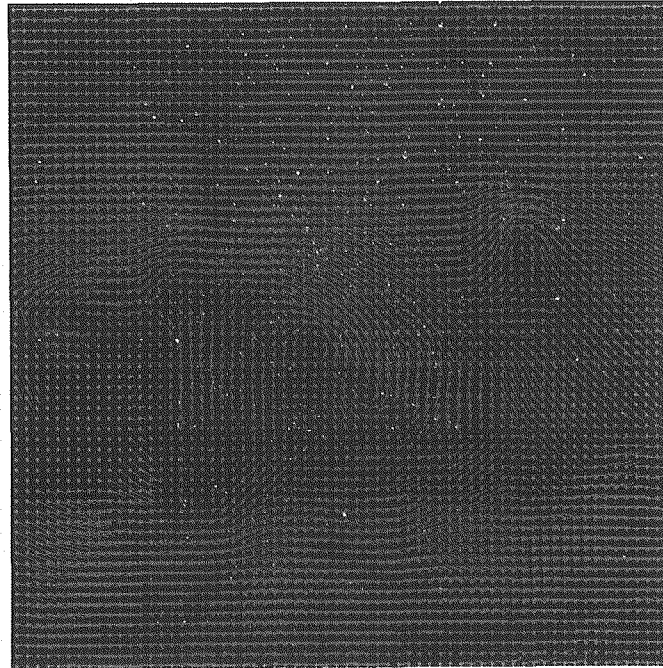


流速分布 (t=23.0[s])

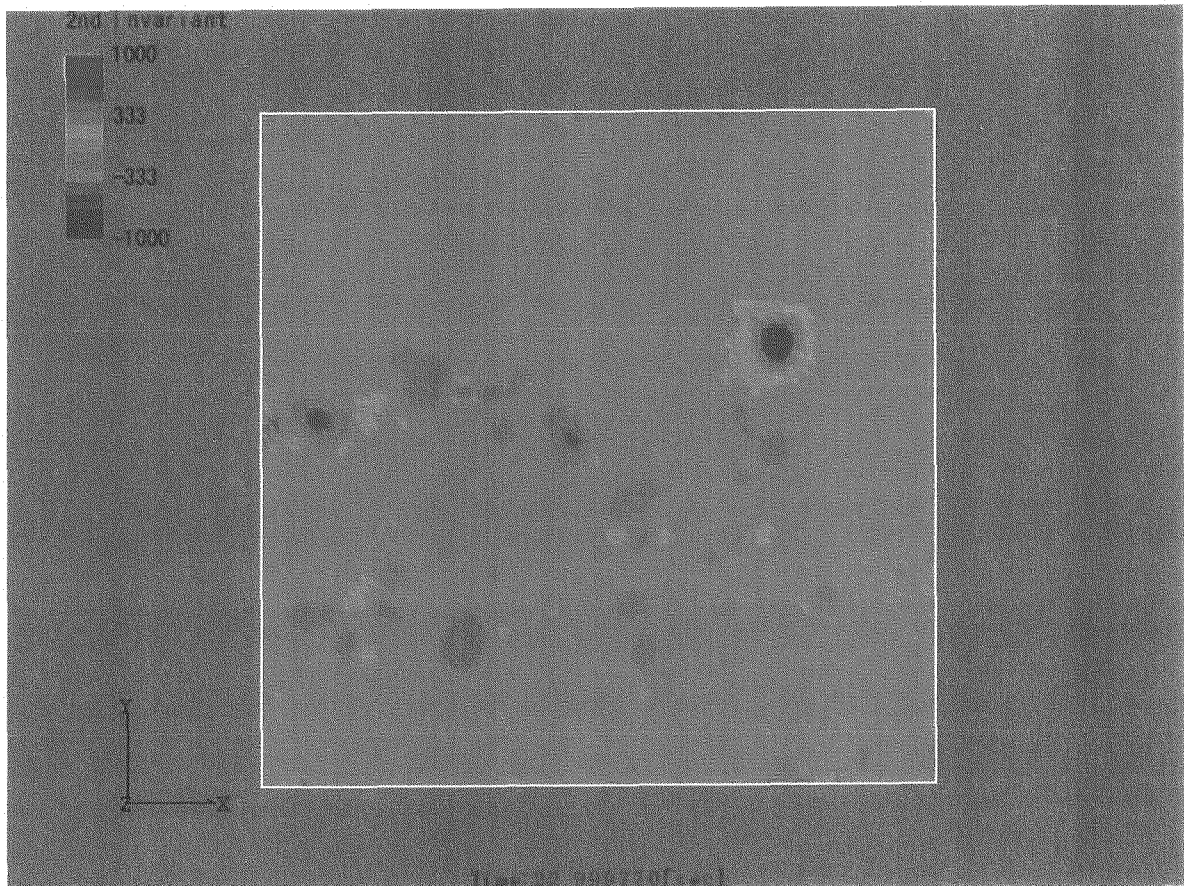


第2不変量分布 (t=23.0[s])

図14(a) 時刻(t=23.0s)における計測結果 (フィルターなし)

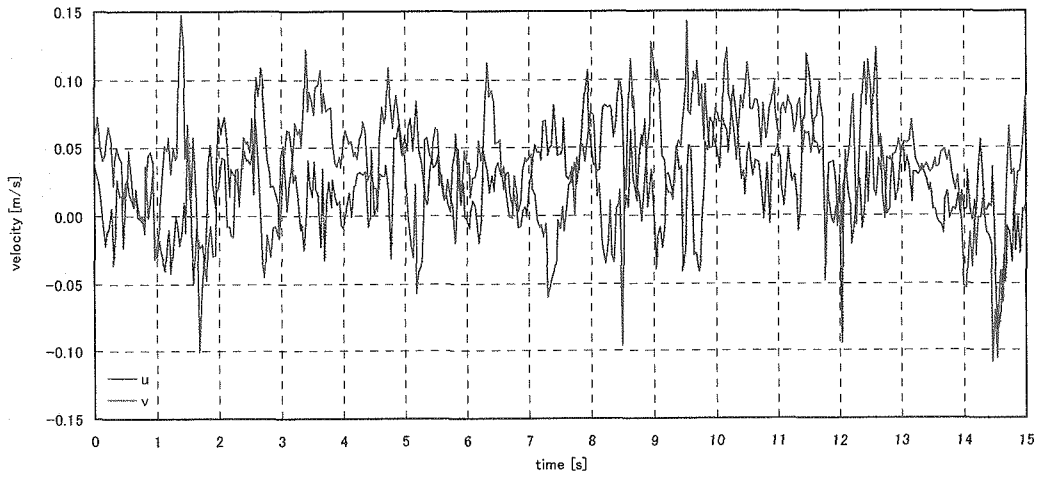


流速分布 (t=23.0[s])

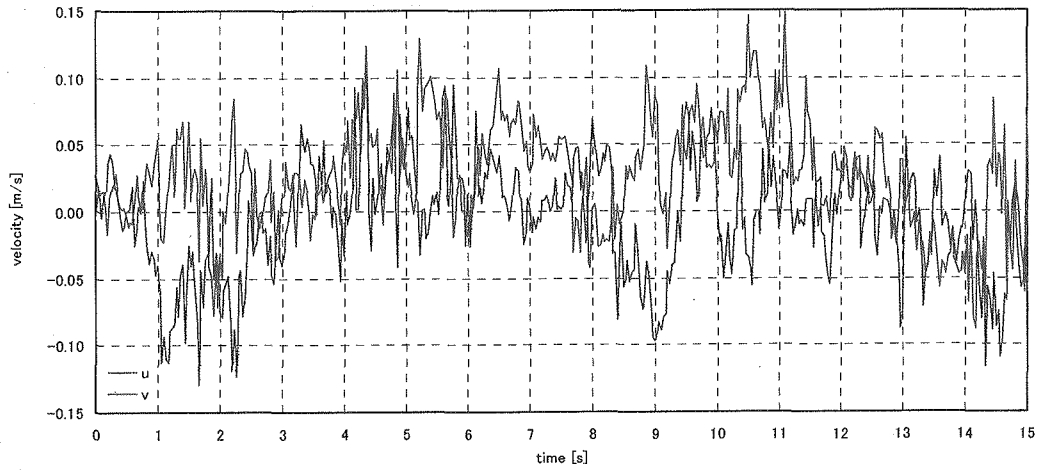


第2不変量分布 (t=23.0[s])

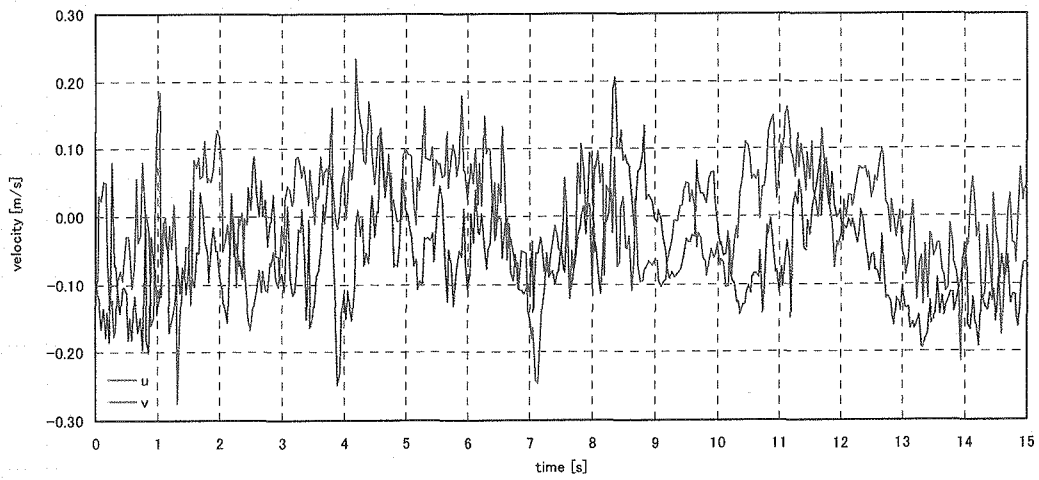
図14(b) 時刻(t=23.0s)における計測結果 (空間フィルター有)



流速変動 (点A)

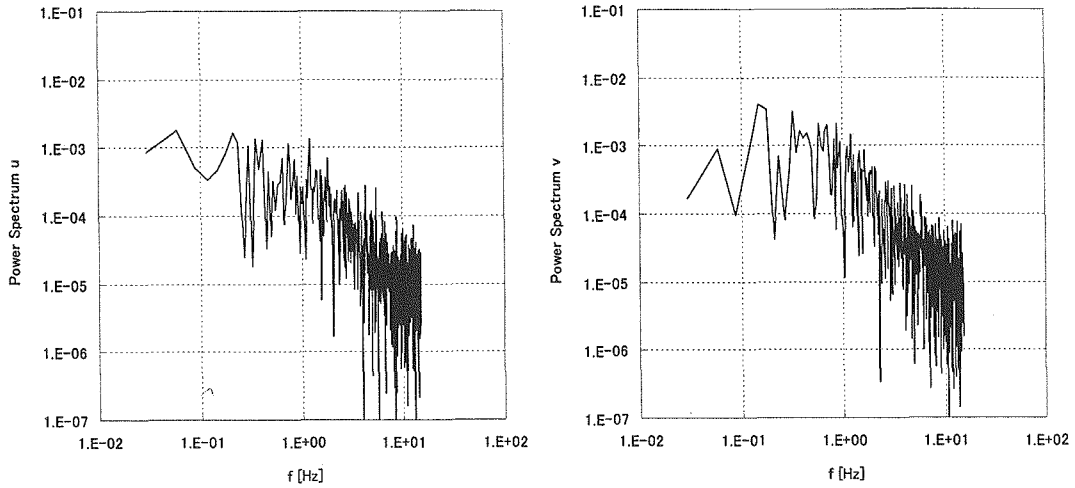


流速変動 (点B)

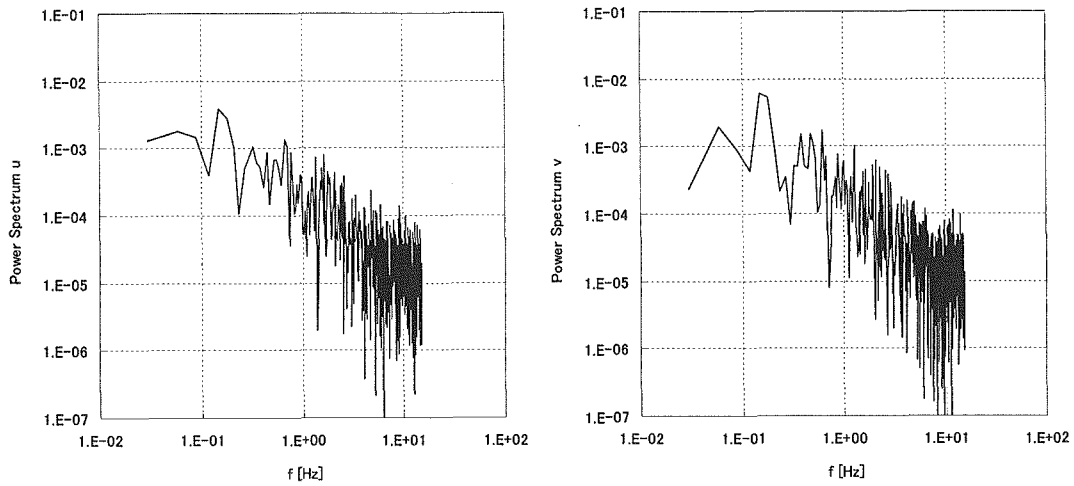


流速変動 (点C)

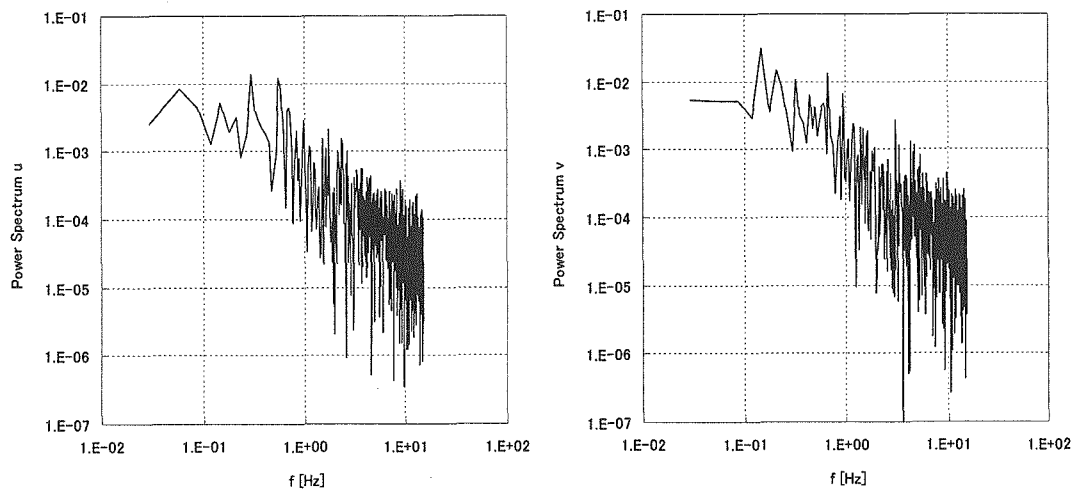
図15(a) 角柱直後と吸込管周辺の流速変動 (空間フィルターなし)



パワースペクトル (点A) , x方向とy方向

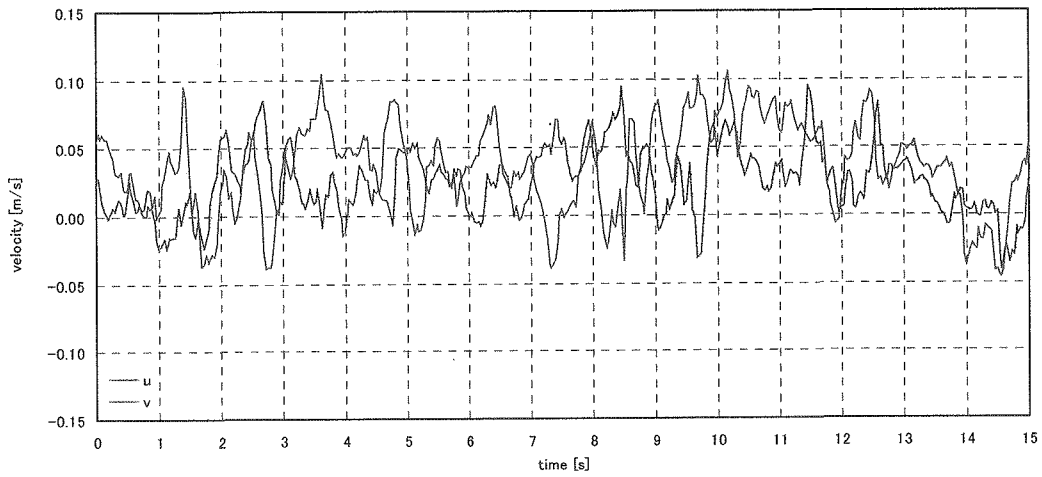


パワースペクトル (点B) , x方向とy方向

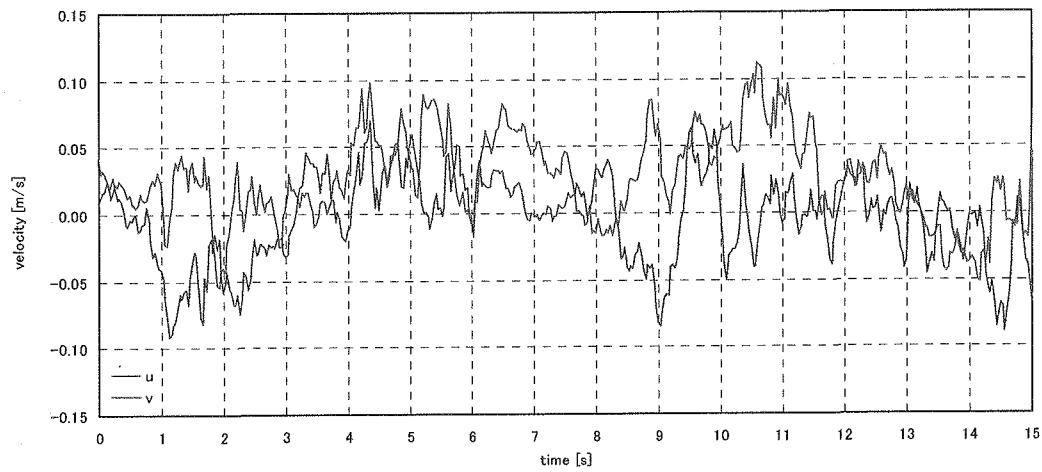


パワースペクトル (点C) , x方向とy方向

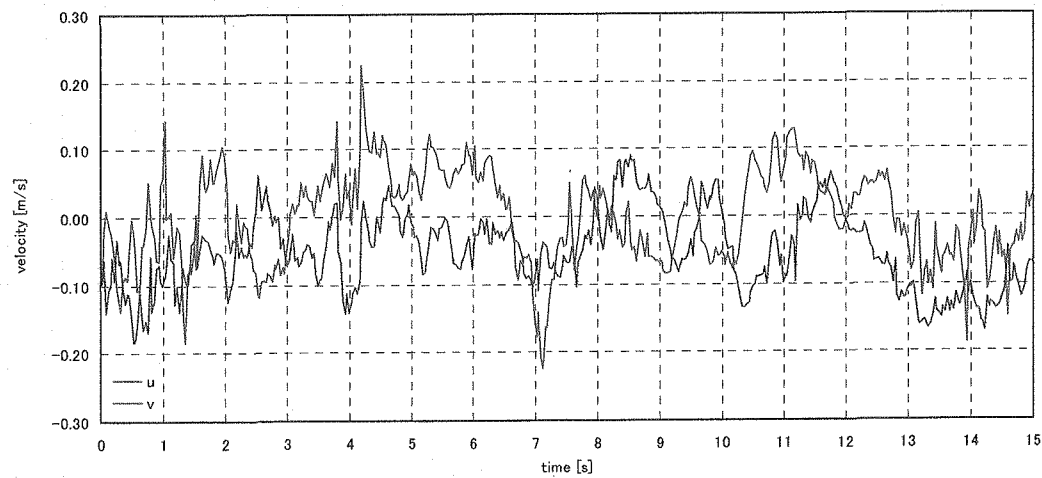
図15(b) 流速変動のパワースペクトル(空間フィルターなし)



流速変動 (点A)

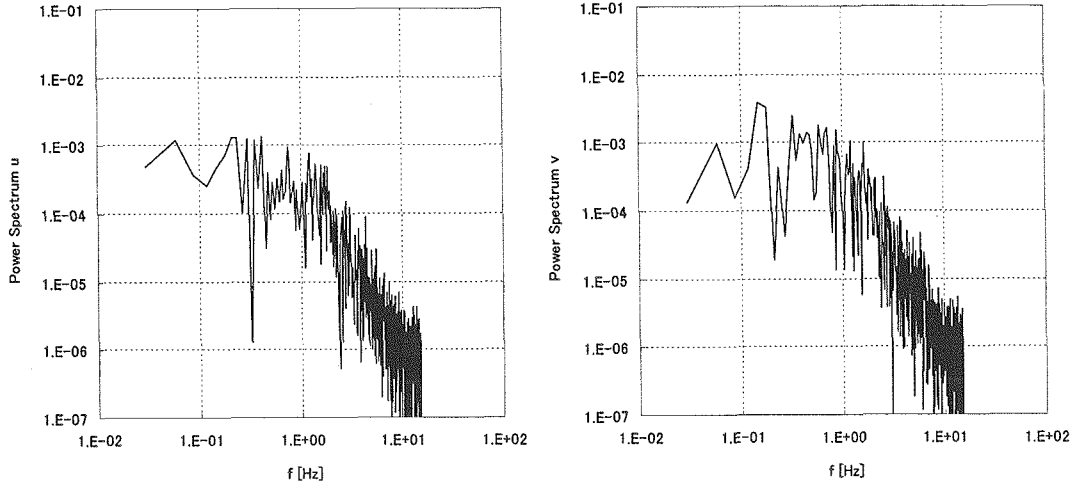


流速変動 (点B)

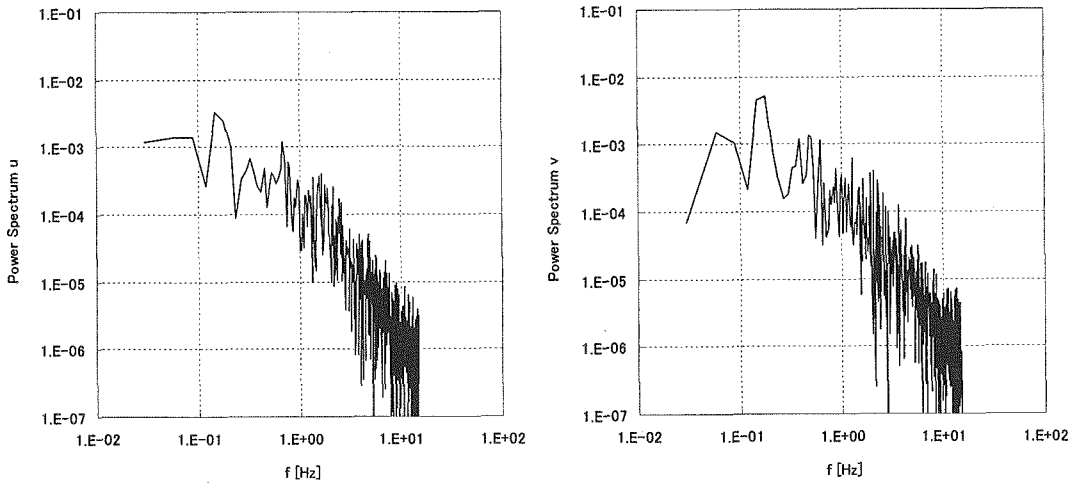


流速変動 (点C)

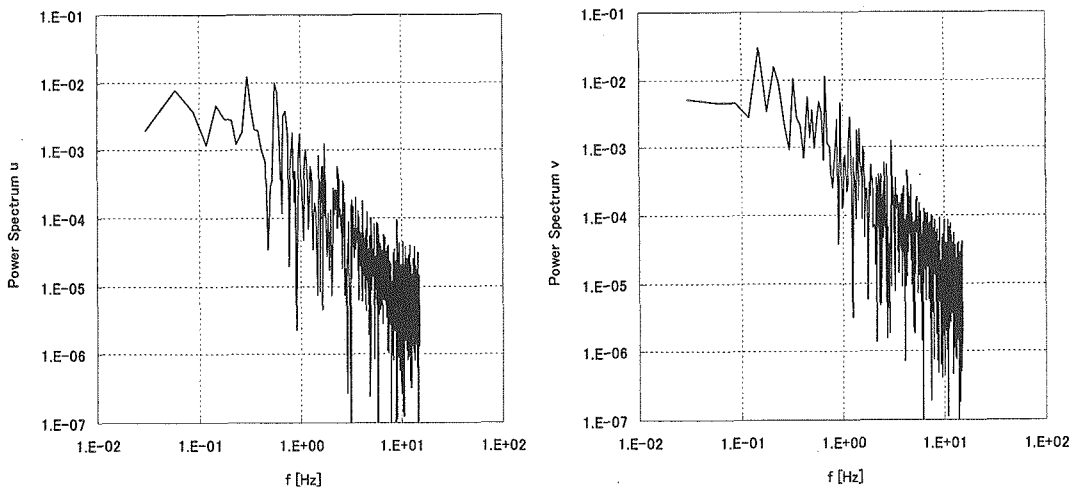
図16(a) 角柱直後と吸込管周辺の流速変動 (空間フィルター有)



パワースペクトル (点A), x方向とy方向



パワースペクトル (点B), x方向とy方向



パワースペクトル (点C), x方向とy方向

図16 (b) 流速変動のパワースペクトル(空間フィルター有)

第6章 結言

- ・ ガス巻き込みの過渡変動現象を取得するための計測装置の改良を行うとともにデータを取得した。
- ・ 水平垂直2断面同時計測を試み、下降流速分布と循環の同時計測に成功した。
- ・ 他断面の映り込みを防止するため、ガルバノミラーを用いた2断面同時計測手法を開発し、下降流速分布と循環をより高精度に計測できるようになった。
- ・ 現象理解のために、長時間計測データベースを構築し、時系列変動データを取得した。