

JAERI-Tech  
96-012



核融合炉真空容器破断事象(LOVA)時の  
置換流量計測のための可視化技術の  
開発と予備可視化試験の結果

1996年3月

功刀資彰・高瀬和之・小川益郎・柴田光彦

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問合せは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

---

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1996

編集兼発行 日本原子力研究所

印 刷 株原子力資料サービス

核融合炉真空容器破断事象（L O V A）時の置換流量計測の  
ための可視化技術の開発と予備可視化試験の結果

日本原子力研究所東海研究所高温工学部

功刀 資彰・高瀬 和之・小川 益郎<sup>+</sup>

柴田 光彦

(1996年2月21日受理)

核融合炉で真空容器破断事象（L O V A）が発生すると、真空容器内外の温度差のために破断口部に密度差駆動による置換流が形成される。この置換流は、破断口を通って容器外部から内部に流入する一方、トリチウムや放射化ダストを伴って容器内部から外部へと流出する。したがって、核融合炉の安全性の観点からこれら放射化物質を伴う置換流の流動挙動を定量的に評価することが極めて重要である。

そこで、破断口部に生ずる置換流量を定量的に評価する新技術を開発するため、可視化計測による評価手法の可能性を検討した。その結果、L O V A条件下では相関法が最も有効であるとの結論を得た。

この結論をもとに、小型の真空容器を使って破断口部を通る置換流の可視化実験を行い、その流動挙動を観察した。また、相関法による画像解析を行って置換流の局所流速分布を求め、さらにこの値を使って平均の置換流量を算出した。可視化実験から得られた置換流量は、精密電子天秤による置換流量測定値に比較的よく一致した。本研究は、L O V A条件下における破断口部の置換流量が可視化計測によって定量的に評価できることを明らかにしたものである。

Development of Flow Visualization Technique for Measurement of  
Exchange Flow Rates under the LOVA Condition and Results of  
the Preliminary Flow Visualization Experiment

Tomoaki KUNUGI, Kazuyuki TAKASE, Masuro OGAWA +  
and Mitsuhiko SHIBATA

Department of High Temperature Engineering  
Tokai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received February 21, 1996)

When a loss of vacuum event (LOVA) would occur in a fusion reactor, a buoyancy-driven exchange flow takes place through breaches on a vacuum vessel due to a temperature difference between the inside and outside of the vacuum vessel. The exchange flow through the breaches may occur not only from the outside of the vacuum vessel into the inside but also from the inside to the outside conveying tritium and radioactivated materials. Therefore, it is very important to estimate quantitatively the exchange flow behavior under the LOVA condition from the viewpoint of the fusion reactor safety.

In order to develop a new technique for quantitative estimation on the exchange flow rates through the breaches, a flow visualization procedure was investigated. It was concluded from the investigation that the correlation method was the most effective procedure under the LOVA condition. In addition, the flow visualization experiments were carried out using a small vacuum vessel to estimate the exchange flow rates through the breaches. As the result, the exchange flow behavior was observed and the local velocity distribution was obtained from the image analysis results by the correlation method. Furthermore, an average exchange flow rate was calculated using the local velocities. The exchange flow rates estimated by the flow visualization experiments agreed well

---

+ Office of Planning

with the measured exchange flow rates by the electric balance. It was clarified that the exchange flow rates through the breaches under the LOVA condition can be determined quantitatively by means of the flow visualization measurements.

Keywords: Fusion Reactors, Safety Tests, LOVA, Breaches, Exchange Flow, Experimental Study, Flow Visualization Technique, Correlation Method, Quantitative Measurement

## 目 次

1. 序	1
2. 画像計測システムの基本構成	2
2.1 撮影部	2
2.2 照明部	2
2.3 記録部	3
2.4 処理部	3
3. 可視化計測手法	4
3.1 2次元PTV	4
3.2 3次元PTV	5
3.3 スペックル法	6
3.4 相関法	7
3.5 流跡線解析法	8
3.6 レーザ誘起蛍光法	9
3.7 シュリーレン法	11
3.8 レーザホログラフィ干渉法	11
4. 置換流計測への適用検討及び今後の展望	13
4.1 置換流計測への適用検討	13
4.2 トレーサの選定	13
4.3 計測手法の選定	13
4.4 システムの選定	13
4.5 今後の展望	14
5. 可視化計測実験	16
5.1 はじめに	16
5.2 可視化計測実験装置による試験	16
5.3 密閉容器内自然対流可視化実験	21
6. 結言	23
参考文献	24
付録1 相関法画像処理プログラム プログラム説明	71
付録2 ベクトル表示プログラム 入力マニュアル	86

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Basic Compositions of Picture Measuring System .....	2
2.1 Photographing .....	2
2.2 Lighting .....	2
2.3 Recording .....	3
2.4 Managing .....	3
3. Measuring Procedures due to Flow Visualization .....	4
3.1 2-Dimensional PTV .....	4
3.2 3-Dimensional PTV .....	5
3.3 Laser Spekle Method .....	6
3.4 Correlation Method .....	7
3.5 Analysis Method .....	8
3.6 Laser-Induced Fluorescence Method .....	9
3.7 Schlieren Method .....	11
3.8 Laser-Horography interferometry .....	11
4. Investigation for Applying to Buoyancy-Driven Exchange Flows and Future Prospects .....	13
4.1 Investigation for Applying to Buoyancy-Driven Exchange Flows .....	13
4.2 Definition of Tracer .....	13
4.3 Definition of Measuring Procedure .....	13
4.4 Definition of Measuring System .....	13
4.5 Future Prospects .....	14
5. Flow Visualization Experiments .....	16
5.1 Introduction .....	16
5.2 Experiments by a Flow Visualization Experimental Apparatus .....	16
5.3 Flow Visualization Experiments of Natural Convection in an Enclosure .....	21
6. Conclusions .....	23
References .....	24
Appendix 1 Explanation of Analysis Program for the Correlation Method .....	71
Appendix 2 Input Manual for a Program to Calculate Flow Vector .....	86

## [図表リスト]

表1 主な可視化計測手法(その1、その2)

- 図1 可視化画像計測システムの基本構成<sup>[1]</sup>
- 図2 3時刻パターンマッチング法の原理<sup>[1]</sup>  
(上) 第1-第2 時刻追跡、(下) 第2-第3 時刻追跡
- 図3 2次元P T Vシステムの構成<sup>[1]</sup>
- 図4 軸対称衝突噴流の流れ場<sup>[1]</sup>
- 図5 軸対称衝突噴流の瞬時速度ベクトル分布<sup>[1]</sup>
- 図6 壁面噴流領域の平均速度分布<sup>[1]</sup>
- 図7 3次元P T Vのトレーサ絶対座標の算出<sup>[2]</sup>
- 図8 3次元P T Vによる空気乱流境界層の測定装置<sup>[1]</sup>
- 図9 3次元P T Vによる空気乱流境界層の平均速度3成分の測定結果<sup>[1]</sup>
- 図10 スペックルグラムの光処理光学系<sup>[2]</sup>  
(a) フーリエ変換光学系 (b) 強度分布フーリエ変換光学系
- 図11 光処理プロセス<sup>[2]</sup>
- 図12 スペックル法によるT字合流ダクト実験装置概略図<sup>[2]</sup>
- 図13 スペックルグラムおよびベクトル線図<sup>[2]</sup>
- 図14 相関法の原理<sup>[2]</sup>
- 図15 相関法による円柱後流渦の測定装置概略図<sup>[3]</sup>
- 図16 相関法による速度ベクトル分布の時刻歴<sup>[3]</sup>
- 図17 流跡線解析法における濃度情報の付加による流れ方向の決定<sup>[2]</sup>
- 図18 分子のエネルギー準位<sup>[4]</sup>  
 $E_1$ :基底状態、 $E_2$ :励起状態
- 図19 レーザ誘起蛍光染料を用いた温度-速度同時計測システム<sup>[1]</sup>
- 図20 温度成層流乱流の温度-速度分布の時系列変化<sup>[1]</sup>
- 図21 L I Fによる希薄気体流の可視化および計測実験装置<sup>[5]</sup>
- 図22 温度場の疑似カラー表示<sup>[5]</sup>
- 図23 シュリーレン法の基本的構成<sup>[6]</sup>

- 図24 シュリーレン法により得られたCO<sub>2</sub>ガスの密度分布<sup>[7]</sup>
- 図25 ホログラフィの原理<sup>[8]</sup>  
(a) ホログラムの記録 (b) ホログラムの再生
- 図26 二波長レーザホログラフィ干渉計の概略図<sup>[5]</sup>  
( $\lambda_k = 632.8\text{nm}$ 、 $\lambda_j = 457.9\text{nm}$ )
- 図27 ナフタリン被覆された平板まわりの層流境界層内の温度θと濃度C<sup>[5]</sup>
- 図28 3次元時空間相関法の計測原理及び計測システム<sup>[9]</sup>
- 図29 3次元流速ベクトルの結果<sup>[9]</sup>
- 図30 平面レーザ誘起蛍光法の計測システム例<sup>[10]</sup>
- 図31 多方向レーザホログラフィ干渉法<sup>[11]</sup>
- 図32 実験装置及び可視化計測系
- 図33 試験ケース毎の破断口位置
- 図34 計測システムの構成(相関法)
- 図35 計測システムの写真(相関法)
- 図36 計測システムの構成(粒子追跡法)
- 図37 計測システムの写真(粒子追跡法)
- 図38 精密電子天秤による計測実験
- 図39-a 可視化計測実験(キセノン光源使用)
- 図39-b 可視化計測実験(Ar<sup>+</sup>レーザ光源使用)
- 図40 フルード数の時刻歴(aのケース)  
(○:本実験、それ以外は小川ら)
- 図41 フルード数の時刻歴(bのケース)  
(○、●:本実験、それ以外は小川ら)
- 図42 フルード数の時刻歴(cのケース)  
(○、●:本実験、それ以外は小川ら)
- 図43 ケース(a-2)の流動状況の可視化(約35秒後)  
(a) 垂直断面  
(b) 横断面(内:ステアリン酸亜鉛、外:煙)

図44 ケース(a-2) の流動状況の可視化(F1.6、カラーCCD)

(トレーサ：ステアリン酸亜鉛)

(a) 垂直断面(約240秒後)

(b) 垂直断面(蓋開放直後)

図45 ケース(a-3) の流動状況の可視化(約5秒後)

(a) 垂直断面(流入側付近)

(b) 横断面(内：ステアリン酸亜鉛、外：煙)

図46 ケース(b-2) の流動状況の可視化(約80秒後、垂直断面)

図47 ケース(c-2) の流動状況の可視化(約190秒後)

(a) 垂直断面

(b) 横断面(内：ステアリン酸亜鉛、外：煙)

図48-a 自然対流の可視化(トレーサ：ステアリン酸亜鉛)

図48-b PTV法による速度ベクトル

図49-a 自然対流の可視化(フィールド蓄積モード)

図49-b 相関法による速度ベクトル

## 1 . 序

核融合実験炉の真空容器における破断事故時には、破断初期においては炉外の気体(空気または不活性ガス)が真空容器内に浸入し炉壁の冷却に寄与すると考えられる。しかし、その際浸入した気体は容器内部に沈積した放射化ダストを巻き込んだ状態となり、容器内外圧力が等しくなった後、破断口から流出する。この際、放射化ダストを含んだ流出ガスは高温の炉壁で加熱された浮力流を形成しているが、外部は低温の気体であるため破断口をとおしての外部気体の流入も同時に起こるものと考えられる。このような破断口を通過する浮力駆動の置換流の挙動およびこの置換流に同伴される放射化ダスト量を定量することは核融合炉の安全性を検討する上で極めて重要である。

そこで、自然対流に起因する破断口におけるガスの置換流量を評価するために、模擬試験装置を製作し、破断口の位置の違いや破断口数の違いによる置換流の流動特性を把握するための真空破断予備実験を計画している。

破断口における置換流量の定量的計測方法としては、従来より容器内外気体の密度差による重量変化に着目した精密天秤測定が行われてきた。この方法では、確かに置換流量の大小を表す無次元数であるフルード数を求ることは可能であるが、ここで求まるフルード数は、置換流の平均的特性を示しており、破断口の位置や破断口数の違いによって置換流の流況がどのように変化するのか、また流れの詳細な構造がどのようにになっているのか等、まだ明らかになっていない問題が多く残っている。

そこで、最近著しい発展を遂げている流れの可視化計測技術を適用することによって、置換流の流動特性を明らかにし、上述の問題を解決することとした。

ここではまず、破断口部分における置換流量の定量的計測評価技術を開発するためには、自然対流の流動挙動に関する種々の測定量に対する可視化計測手法の調査を行い、置換流量計測への適用可能性を検討する。

真空破断予備実験において測定量として最も望ましいものは、破断口における質量流量である。そのために、破断口における流速分布および密度分布を測定しなければならない。ここで密度は、温度および濃度に依存するので、破断口における流速分布、温度分布および濃度分布を測定することにより質量流量が求まることになる。

このような観点から、計測手法を主に流速、濃度および温度に着目して分類した。

ここでは、速度を測定する計測手法として、

- (1) 2次元粒子追跡法(2D Particle Tracking Velocimetry:2D PTV)
- (2) 3次元粒子追跡法(3D Particle Tracking Velocimetry:3D PTV)
- (3) レーザスペックル法
- (4) 相関法
- (5) 流跡線解析法

また、濃度および温度を測定する計測手法として、

- (6) レーザ誘起蛍光法(Laser Induced Fluorescence:LIF)
- (7) シュリーレン法
- (8) レーザホログラフィ干渉法

を取り上げ、これらの手法の概略およびその特徴・欠点、技術レベル、可視化トレーサ、測定量、計測システムの構成、置換流への適用性等につき調査・検討した。表1に主な可視化計測手法の一覧を示す。詳細については、第3章に記述する。

## 2. 画像計測システムの基本構成

いずれの可視化画像計測システムでも、図1に示すように撮影部、照明部、記録部および処理部から構成されている。従って、測定対象に応じて適当な機能を持った機器を予算の範囲内で選択し、それらを組み合わせてシステムを構築しなければならない。

### 2.1 撮影部

撮影部には、テレビカメラ、スチルカメラ、モーションカメラがよく用いられる。後二者は、フィルム現像を必要とするので、オンライン化できないという欠点を有する。しかし、35mmフィルムは解像度が高く、高分解能が要求される測定では、威力を発揮する。デジタル画像計測で頻繁に用いられているのがCCD(Charge Coupled Device)カメラである。光を電荷に変えて蓄積し転送する構造となっているが、1/30secごとに電荷を蓄積するフレーム蓄積モードと、1/60secごとに電荷を蓄積するフィールド蓄積モードがある。電荷蓄積の期間中に撮影対象が移動すれば、像の流れを生じる。これを防ぐために、蓄積時間を短縮するための電子シャッター機能を使用するか、ストロボ光のようなパルス照明を当てることとなる。

### 2.2 照明部

照明部の選択は、使用するトレーサの特性などに依存するため経験的に行わざるを得ないことが多い。非定常現象を撮影する場合、ストロボ装置がよく用いられる。これは一回の発光あたりの強度が強く有効であるが、スリット光にすると強度が弱くなるという性質がある。また連続光であるレーザ光源では、強度を強くしなければならず、現状では4WのArイオンレーザが広く用いられている。また、He-Ne レーザやArイオンレーザの照射時間を任意に制御できるAOM(Acoustic Optical Modulator)が市販されておりこれを用いることにより像の流れを防ぐことができる。照明部は、撮影部と対に考えるべきもので、連続光源を利用する場合はカメラはシャッター機能を有するものとするのが通常である。

また、濃度および温度を測定する計測手法として、

- (6) レーザ誘起蛍光法(Laser Induced Fluorescence:LIF)
- (7) シュリーレン法
- (8) レーザホログラフィ干渉法

を取り上げ、これらの手法の概略およびその特徴・欠点、技術レベル、可視化トレーサ、測定量、計測システムの構成、置換流への適用性等につき調査・検討した。表1に主な可視化計測手法の一覧を示す。詳細については、第3章に記述する。

## 2. 画像計測システムの基本構成

いずれの可視化画像計測システムでも、図1に示すように撮影部、照明部、記録部および処理部から構成されている。従って、測定対象に応じて適当な機能を持った機器を予算の範囲内で選択し、それらを組み合わせてシステムを構築しなければならない。

### 2.1 撮影部

撮影部には、テレビカメラ、スチルカメラ、モーションカメラがよく用いられる。後二者は、フィルム現像を必要とするので、オンライン化できないという欠点を有する。しかし、35mmフィルムは解像度が高く、高分解能が要求される測定では、威力を発揮する。デジタル画像計測で頻繁に用いられているのがCCD(Charge Coupled Device)カメラである。光を電荷に変えて蓄積し転送する構造となっているが、1/30secごとに電荷を蓄積するフレーム蓄積モードと、1/60secごとに電荷を蓄積するフィールド蓄積モードがある。電荷蓄積の期間中に撮影対象が移動すれば、像の流れを生じる。これを防ぐために、蓄積時間を短縮するための電子シャッター機能を使用するか、ストロボ光のようなパルス照明を当てることとなる。

### 2.2 照明部

照明部の選択は、使用するトレーサの特性などに依存するため経験的に行わざるを得ないことが多い。非定常現象を撮影する場合、ストロボ装置がよく用いられる。これは一回の発光あたりの強度が強く有効であるが、スリット光にすると強度が弱くなるという性質がある。また連続光であるレーザ光源では、強度を強くしなければならず、現状では4WのArイオンレーザが広く用いられている。また、He-Ne レーザやArイオンレーザの照射時間を任意に制御できるAOM(Acoustic Optical Modulator)が市販されておりこれを用いることにより像の流れを防ぐことができる。照明部は、撮影部と対に考えるべきもので、連続光源を利用する場合はカメラはシャッター機能を有するものとするのが通常である。

### 2.3 記録部

記録部には、VTR、光ディスクレコーダ、スチルビデオレコーダ等が用いられる。VTRには、家庭用1/2インチ、業務用2/3インチ、放送用1インチなどの規格があり、この順に価格、性能とも高くなる。画像計測に要求される仕様は、画質と操作性であり、特定のコマが確実に取り出せる機能が不可欠である。家庭用VTRは安価で入手しやすいが、正確なコマ送り精度が保証されておらず、また静止画再生では画質が極端に低下する。業務用VTR、放送用VTR、光ディスクレコーダは高価であるが、画質、操作性とも優れ、正確なコマ送り精度も保証されている。

### 2.4 処理部

処理部は、パソコンに画像処理ボードを装着したものから、汎用画像処理装置をワークステーションで制御するものまで様々である。熱流動の画像計測では、大量の画像データを処理する必要が生じ、処理速度やメモリ容量を考慮に入れた選択が重要である。

関関法により画像を処理する装置である市販品Quick Vector（応用計測研究所製）はその処理をDSP(Digital Signal Processor)というハードで対応しており、計算速度が速い。また、PTV法により画像を処理する装置である市販品Nexus PTV（ネクサス製）、市販品Current（カノマックス製）及び市販品ピアス（ピアス製）はその処理をソフトで対応している。

### 3. 可視化計測手法

ここでは、最新の流れの可視化計測技術について、

- 1)流れの可視化ハンドブック、流れの可視化学会編、朝倉書店(1986)
- 2)Handbook of Flow Visualization, Wei Jei Yang, Hemisphere(1989)
- 3)伝熱研究、日本伝熱研究会、Vol.30, No.117(1991)
- 4)日本機械学会講習会資料

No.930-19:画像解析技術を利用した流動解析

No.930-22:希薄気体力学とその先端技術への応用

No.930-31:熱・流動の計測からビジュアル化までの実際

の文献を中心に、手法の概略およびその特徴・欠点、技術レベル、可視化トレーサ、測定量、計測システムの構成、置換流への適用等について調査を行い、以下にまとめた。

#### 3.1 2次元PTV

##### (1)概略および特徴・欠点

2次元PTVとは、適当なスリット光源をある時間間隔で点滅させ、トレーサ粒子を投入した流れ場の2次元断面を可視化する。個々のトレーサ粒子の画面上での位置座標を求め、連続する画像の位置座標より、トレーサ粒子の移動量を計算する手法である。

ここで、対応する同一のトレーサ粒子を自動的に追跡するためのアルゴリズムとして、多時刻追跡法および3時刻パターンマッチング法がある。多時刻追跡法として最も有名なものが4時刻追跡法である。連続する4時刻にわたってトレーサ粒子を追跡するアルゴリズムである。そこに用いられている仮定は、流速分布が空間的・時間的に急激に変化せず、したがって粒子運動が滑らかに連続することである。通常、移動距離と移動方向の変化が最小となる追跡ペアを選択する。

粒子分布の相似性という空間情報を用いた相関法と粒子移動の滑らかさという時間情報を用いた多時刻追跡法それぞれの相互補完する性質を利用した方法が3時刻パターンマッチング法である。図2に、3時刻パターンマッチング法の原理を示す。第1-第2時刻の追跡は相関法に似た粒子パターンの類似性を用いて行われ、第2-第3時刻の追跡ではその類似性に加えて多時刻追跡法に似た粒子移動の連続性が利用される。

2次元PTVは最も一般的に用いられている手法であり、高速流(4m/s程度)への対応も可能である。また、乱流成分の測定も可能であり、精密に流れ場の計測ができる。

しかしながら、粒子の混入密度が高い場合や、測定時刻間隔が長い場合、粒子の対応付けに誤りが生じる。また、粒子の隨伴性の問題や、粒子が存在する位置でしか測定できないという欠点もある。

西野ら<sup>[1]</sup>は、図3の計測システムを用いて、図4に示した軸対称衝突噴流の流れ場を測定した。図4の装置では、直径40mmの円形ノズルから270mm/sの一様な水流が噴出し、236mm上方のガラス平板に垂直に衝突する。軸対称性を確実にするため、直径950mmの円筒形側壁が設けられており、水流はノズル出口板外周と円筒形側壁とのリング状の隙間から流出する。測定では上方からスリット光をガラス平板に垂直に照射し、横方向からCCDカメラで撮影した。トレーサには直径90μmのナイロン12粒子を使用している。測定領域は幅60mm×高さ80mmで、それを半径方向と深さ方向にトラバースすることによって流れ場全体を測定している。図5は得られた瞬時速度ベクトルの一例で、ガラス平板に沿った壁面噴流領域（半径位置=155mm）での結果である。このような瞬時速度ベクトル分布を多数求め、それらのアンサンブル平均をとれば、図6に示したような平均速度分布が得られる。ここでUは半径方向の平均速度、Zはガラス平板から下向き（深さ方向）にとった距離である。半径方向への流れ場の広がりのため、速度分布が急速に減衰する様子がとらえられている。

## (2)置換流計測への適用性

本計測手法は、測定誤差が0.5画素程度と非常に精度が高く、乱流変動成分の測定も可能であるという特徴がある。しかし、トレーサ粒子の供給量が多過ぎると対応付けに誤りが生じ、少な過ぎると得られる流速ベクトルが少なくなり、供給量の調整が試行錯誤的であるという欠点を有する。

また、破断口における置換流は気体であるため、作動流体の比重は小さく、また、置換流を数十分間測定するので粒子の沈降速度、滞在時間を考慮すると、粒子径は数μm程度にしなければならない。そのため測定領域である破断口径100mmを1画面で撮影すると1画素が実寸法の200μmに相当し、数μmの粒子は撮影することができない。数μmの粒子を撮影するためには測定領域を幾つかに分割し、カメラをトラバースしなければならず、測定領域全体での同時刻性を保つことができなくなる。置換流のような非定常かつ3次元性を有する流れの場合には、同時刻性・立体性を保つことが非常に重要であるため、測定領域ごとに別のカメラを利用して原理的に対応は可能である。ただし、カメラを何台も用いなければならず、カメラ操作・校正が非常に煩雑になるという欠点があり、実際の適用には無理と考えられる。

## 3.2 3次元PTV

### (1)概略および特徴・欠点

複雑な空間挙動を示す流れ（特に乱流）を調べるために、2次元断面内の流速分布だけでなく、流れ場全体の3次元的な速度分布を知りたいとの要望が生じる。それに応えるべく開発されたのが3次元PTVである。

流れ場にトレーサ粒子を注入し、3台のカメラで異なる視野方向から同時刻の粒子像を撮影する。得られた3枚の同時刻の画像よりトレーサ粒子の3次元位置を求め、

ある時間間隔後の画像より移動量を計算し流速を求める手法である。図7に3枚の画像よりトレーサ絶対座標を算出する方法を示す。

3次元空間での瞬時流速分布が得られるため、3次元性を有する流れに利用可能である。また、乱流構造の空間特性を解析できる点も本手法の特徴である。

トレーサ粒子の3次元位置を求める場合に、あらかじめカメラの方向、距離、倍率等を測定するというカメラ校正の手続きが煩雑となる欠点がある。

西野ら<sup>[1]</sup>は、本計測手法を用いて主流速度4m/sの空気乱流境界層を測定した。図8にその実験装置を示す。流れの上流に設けられたトリッピングワイヤにより、ダクト下壁側に圧力勾配のない乱流境界層が発達している。使用したトレーサ粒子は直径約50μmの中空プラスチック粒子（マイクロバルーン）で、タンクの中でよく攪拌された後、上流から窒素ガスによって流れ場に投入される。測定領域の大きさは25×25×25mm<sup>3</sup>である。照明は3台のストロボランプで行われ、1フレームの画面蓄積間に3回の発光を行う。発光時間間隔は第1—第2発光で100μs、第2—第3発光で400μsと非常に短く、高速な流れに対応できるようにした。

測定された平均速度分布を図9に示す。横軸は壁からの距離を摩擦速度と動粘性係数で無次元化したもので、縦軸は平均速度3成分（u:主流方向、v:壁垂直方向、w:スパン方向）を摩擦速度で無次元化したものである。主流方向成分は壁法則と妥当に一致しており、壁垂直方向成分は境界層の発達に対応した分布を示している。またスパン方向成分は全域で零であり流れ場の2次元性と整合する。

## (2)置換流計測への適用性

本計測手法は、3次元空間での瞬時流速分布を測定できるという点において、置換流の計測には大変有効な手段であり、乱流構造の空間特性を解析できるという特徴がある。

しかし、前述の2次元PTVと同様に真空破断予備実験での測定領域の大きさを考慮すると、破断口全体をカバーするためのトラバース機構が必要となり、カメラの操作、校正が煩雑となる欠点があり、実際の適用には無理と考えられる。

## 3.3 スペックル法

### (1)概略および特徴・欠点

微細なシーディング粒子が懸濁された流体をレーザシート光により照明して光拡散面を形成する。散乱光の干渉によりスペックルを生じさせる。このとき、シート光をパルス光として短い時間間隔で2回照射して異なる2時刻におけるスペックルパターンを同一フィルム上に二重露光記録する。その微小領域パターンの自己相関を求めて、二重露光間の変位の大きさと方向を求めるものである。

流速計測において得られる二重露光スペックルグラムには、光拡散面内の粒子変位の時間および空間情報が記録されている。スペックル法では、この時間および空間情

報を光フーリエ変換処理により抽出する。図10(a)は局所フーリエ変換光学系である。一様変位の二重露光パターンのフーリエ変換強度分布はヤング縞と呼ばれる等間隔縞像となる。この間隔は変位量に反比例し、縞の方向と変位の方向が一致する。この強度分布像を図10(b)に示す光学系で光処理すると自己相関像が得られ、明点の並びの方向が変位の方向を示し、中心の明点と次の明点との間隔が変位に比例する。これらの関係を図11に示す。

スペックル法では速度ベクトルが規則的な格子上で得られるので、流れ関数や渦度といった物理量の算出も容易で、流れ場の理解に有利である。また、フーリエ変換光学系を用いてアナログ処理できるため、計算機負荷が他の手法に比べて小さくなるという長所がある。

一方、本計測法の欠点として、速度ベクトルの向きの不確定性、高解像度のフィルムが必要なこと（スペックルパターンを記録するには、スペックルのサイズが通常數 $\mu\text{m}$ ～10數 $\mu\text{m}$ であるため、少なくとも100本/ $\text{mm}$ 以上の解像度が必要）及び写真を現像しなければならないという点がある。

川橋ら<sup>[2]</sup>は、本計測手法を用いて比較的高速な気流計測へ適用している。計測対象は、T字ダクト合流部流れであり、二重露光スペックルグラムを得て瞬時2次元流速分布を計測している。実験装置の概略を図12に示す。Arイオンレーザからの出力ビームを、50%～50%のビームスプリッターで二本に分離し、ミラーを介して両者をポリゴンミラービームスキャナ同一面上のほぼ同一点に入射させる。これらのビームは、観測面内をわずかな時間差で連続スイープ照明する。主ダクト断面平均流速は2.5m/s、光散乱トレーサにはベビーパウダを使用している。照明時間は約 $25\mu\text{s}$ 、照明時間間隔は $480\mu\text{s}$ である。図13に、分岐部近傍のスペックル写真及び流速ベクトル線図を示す。流速ベクトル線図における流速ベクトルが、規則的な格子状に得られている様子が分かる。

## (2)置換流計測への適用性

川橋ら<sup>[2]</sup>は、また本計測手法を用いてヘリウムー空気置換流を可視化し速度分布を測定しており、置換流計測への適用は可能と考えられる。但し、高輝度光源を対象とする流れに照射するために、シート光ではなく掃引可能な強力なレーザビーム光を必要とすることやフィルム使用により置換流のような非定常性の強い流れを画像処理するには長時間を要する欠点がある。

## 3.4 相関法

### (1)概略および特徴・欠点

図14に相関法の原理を示す。対象とする流れ場にトレーサを投入し、CCDカメラで撮影する。一定時間間隔をもつ二つのトレーサ画像を小領域に分割し、それぞれの領域における濃度パターンの相互相関関数を計算する。その最大値の空間的位置からト

トレーサ粒子群の移動距離および方向を求め、速度ベクトルを求める方法である。

投入する粒子の密度が空間的に高い場合でも計測が可能である。つまり、個々の粒子を識別することができなくても、濃度のパターンとして認識できれば良いという特徴がある。

一方、分割すべき小領域（相関マトリクス）の大きさの選定が試行錯誤的であること、発生する過誤ベクトルの処理、計算時間が長いこと及び3次元対応が困難であるという欠点がある。計算速度については、最近開発された高速に信号処理可能な専用ボードをもつQuick Vector（応用計測研究所製）を利用するとリアルタイム計測が可能である。

木村ら<sup>[3]</sup>は、この計測手法を、逆流を含む非定常流れである円柱後流渦へ適用している。作動流体は水を使用している。図15に実験装置の概要を示す。開水路の中央部に直径38mmの円柱を設置している。流量は8 l/min一定、レイノルズ数Re=2100とし、水面高さは堰で50mm一定に保った。可視化手法としては表面浮遊法を採用し、トレーサには平均粒子径約80μmのオガクズを使用している。これにより、非定常流の速度ベクトル分布の時間的变化を測定している。図16に0.3秒間隔で計測した速度ベクトル分布を示す。渦の成長に注目してみるとt=0sでは円柱のすぐ後ろの上側に円柱からのはく離による小さな渦が見られる。この渦が時間とともに流れ方向に移動しながら、徐々に大きく成長していく様子が明瞭に認められる。

## (2) 置換流計測への適用性

個々の粒子を識別せず、粒子群の濃度パターンとして識別すれば良いという本計測手法は、測定領域を大きくとれるため真空破断予備実験で対象とする100×100mmの領域を1画面で撮影できるという特徴がある。ガス中の粒子の随伴性等を考慮すると本実験では可視化トレーサの直径は数μm程度となるため個々の粒子の識別を必要としない本手法は最も適していると考えられる。

一方、相関法は基本的に2次元断面測定であるが、例えば時空間相関法<sup>[9]</sup>（第4章で記述）のような方法を採用すれば、3次元性を有する置換流へ適用可能である。

## 3.5 流跡線解析法

### (1) 概略および特徴・欠点

流れ場にトレーサ粒子を注入し、適当な露光時間で撮影してトレーサ粒子の運動軌跡を流跡線として画像上に記録する。その流跡線の長さと傾きを計測して流れ場の流速を求める方法である。したがって、流速の測定は、空間的にランダムに分布する個々の流跡位置で行われることになる。

流跡画像は、個々のトレーサ粒子の運動履歴に関する情報が画像上に残存するという、画像解析にとっては極めて有用な特徴を持つ。

流れに注入するトレーサ粒子の空間密度を高くすると流跡に重なり合いが生じ、そ

の分離が困難になるので、あらかじめトレーサ粒子の注入密度を調整しておく必要がある。

従来の処理方法では速度の大きさは計測されるが、流れの方向に関する情報を得ることができなかった。そこで、流跡の始点あるいは終点に濃度差の情報を瞬間に与えて、これを画像解析して流れの方向を決定する方法が試みられている。図17にこの方法による画像処理例<sup>[2]</sup>を示す。

トレーサ粒子に連続光をあてながら、撮影のタイミングと同期させたストロボ発光を行い、画像上の流跡部と始点あるいは終点付近の画素に濃度差を与えるものである。ストロボの発光を軌跡の始点部で行うと、流跡の輪郭は図12(a)のようになる。次に、流跡端部を構成する輪郭点を円近似する(図12(b))。この二つの近似円の大きさからは流跡の流れ方向が、またその中心間距離と露光時間からは速度と傾きが算出される(図12(c))。

## (2) 置換流計測への適用性

本計測手法も原理的には2次元PTVと同様であり、トレーサ粒子の瞬間的な像を撮影するか、あるいは流跡を撮影するかの違いだけである。したがって、今回の計測への適用性についてもPTVと同様な問題点があり、本計測手法の適用は難しいと考えられる。

## 3.6 レーザー誘起蛍光法(Laser Induced Fluorescence:LIF)

### (1) 概略および特徴・欠点

分子は原子核とそれをとりまく電子から成り立ち、光を吸収する前の分子の電子は、その分子として最も安定なエネルギー状態に配置されていて、この状態を分子の基底状態という。図18に分子のエネルギー準位を示す。基底状態のエネルギー準位E1にある分子が光を吸収してより高いエネルギー準位E2である励起状態へ移ることを励起という。このエネルギーの増加量 $\Delta E$ は吸収した光のエネルギー、すなわち光子によるエネルギーの増加を意味する。

レーザ誘起蛍光法は、この性質を利用して蛍光物質(分子)をトレーサとして作動流体中に混入し、これにレーザ光を照射して蛍光物質を励起し、これが安定化し基底状態に遷移する時に発する蛍光を写真などに撮影する方法である。

この方法は、空間分子密度が低く、蛍光が吸収されにくい希薄気体流に非常に有効である。希薄気体流のLIF法を用いた可視化および計測には、ヨウ素(I<sub>2</sub>)が多く用いられている。これは、ヨウ素が適当な蒸気圧を有していること、Arイオンレーザ(波長514.5nm)の照射により容易に強い蛍光を発すること、比較的広い圧力範囲にわたって可視化に利用できること、ヨウ素に関する分光学的な性質が詳細に調査されていることによっている。但し、ヨウ素は非常に腐食性の強い物質であるため注意が必要である。

通常の連続体流れに適用すると、蛍光物質が発した蛍光が、周囲の流体に吸収されてしまい、蛍光強度が測定できないという欠点がある。

蛍光染料は、その濃度と温度に依存して蛍光強度が変化する。したがって、濃度が均一になるように流れ場に注入すれば、蛍光強度の違いによって温度を知ることも可能である。

榎原ら<sup>[1]</sup>は、この方法を用いて円管内の温度成層流乱流の温度分布と流速分布の時間変化を測定している。図19に温度ー流速の同時計測システムを示す。円管直径は60mmで、仕切板により水平に2分された高温低速水流（上側、約43°C、100mm/s）と低温高速水流（下側、約21°C、140mm/s）の乱流混合を調べたものである。使用した蛍光染料はローダミンBで、300Kでの蛍光強度の変化率が約2%/Kである。照明は、4WのArイオンレーザで行われ、パルス照射のためにAOMが用いられている。

流速測定には、直径5μm程度のポリエチレン粒子をトレーサとして用い、相関法によって粒子画像から流速分布を求めている。図20に温度成層流乱流の温度ー速度分布の時系列変化を示す。流速は1/30sec間隔で測定されている。成層界面での複雑な流体運動と温度場とが定量的にとらえられている。

希薄気体流の計測例として、新美ら<sup>[4]</sup>はPLIF (Planar Laser-Induced Fluorescence : 平面レーザ誘起蛍光) 法を用いて、超音速自由噴流の流れ場における2次元温度分布を測定している。この測定に用いられた実験装置の概略を図21に示す。この研究では試料気体としてArが用いられている。試料気体は、可変リークバルブを通して貯気室へ導かれ、ここでトレーサとして用いる気化したヨウ素（20±1°Cで蒸気圧26.6Pa）と混合する。この混合気体は、膨張室内のオリフィス（直径D=0.506mm）を通して噴出し、自由噴流を形成する。使用したレーザは、発振波長の可変な色素レーザとその励起用光源のエキシマレーザである。レーザ光は、光ファイバを通して真空槽まで伝送され、ビームコリメータを用いて直径35mmの平行光にされたあと円筒面レンズによりシート状にされる。このレーザシートの幅は約10mm、厚さは約0.3mmである。流れ場は、レーザシート面に垂直に設置された高感度ビジコンカメラによって撮像される。画像データの1画素当たりの実長は、鉛直方向が0.0299mm、水平方向が0.0322mmであり、ビジコンカメラのデータ処理可能な画素数は512×512である。図22に超音速自由噴流の温度場を擬似カラー表示によって可視化した結果を示す。この図から、衝撃波の位置で温度が急激に上昇することが確認できる。また、衝撃波によって囲まれたセル内の等温度線がオリフィス出口を中心とした放射状を呈することが分かる。

## (2)置換流計測への適用性

濃度あるいは温度分布を計測できる非常に魅力的手法であるが、現状では適用対象が希薄気体またはローダミンB水溶液等に限られている。その原因是、圧力が高くなつた場合の衝突失活や不純物により発光強度が低下し定量化が難しいためである。ほ

ぼ常圧で気体である本置換流への適用は現状では難しいが、最近特定の気体分子あるいはラジカル基を選択的に励起して発光させる手法が開発されており、この手法を応用すれば、前述した相関法との組み合わせにより、置換流の速度と濃度または温度同時測定が可能となる。

### 3.7 シュリーレン法

#### (1)概略および特徴・欠点

シュリーレン法は、現在も幅広く用いられている可視化技術のひとつであるが、一般には定性的な解析に用いられているに過ぎない。しかし、近年におけるコンピュータや画像解析装置の発展により、その定量解析も不可能ではなくなってきた。

図23にシュリーレン法の基本的構成を示す。本計測手法は、光源からの平行光線を密度差のある流れ場を通して屈折させ、屈折光をナイフエッジ切断して前方のスクリーンまたはフィルム上の明暗から流体の密度勾配を求めて、流れの状態を調べる方法である。高速気流や密度差のある流れに広く適用される。

衝撃波、境界層など密度勾配の大きな流れ場に効果があり、また、装置や取扱が簡単であるという特徴をもつ。

一方、非定常性・3次元性を有する流れの定量計測、写真撮影を行う場合などには、直接的な測定は非常に困難である。

近久ら<sup>[7]</sup>は、スリット状ノズルからCO<sub>2</sub>ガスを空気中に噴射した2次元自由噴流における密度分布を測定している。シュリーレン光学系は直径250mm、焦点距離2500mmの一対の凹面鏡により構成されている。また、光源にはタンクステン球を用い、光源部のスリット幅は1mmとしている。

この測定により得たれたCO<sub>2</sub>ガスの密度分布を図24に示す。得られた画像データをパソコンを用いて積分処理を行い、その結果を理論値と比較することにより解析精度を検討している。比較的良好な解析結果が得られていることが分かる。

#### (2)置換流計測への適用性

この手法では測定領域を透過する光を利用しているため、測定空間の平均的な変化しか求められず、本置換流のような非定常性・3次元性を有する流れの定量的測定は非常に難しい。

### 3.8 レーザホログラフィ干渉法

#### (1)概略および特徴・欠点

図25にホログラフィの原理を示す。レーザビームを二つに分割し、一方を参照光とし、他方を試験光として感光板上で干渉させて記録し、同じレーザ光（再生光）で再生することにより、等密度干渉縞などを得る方法である。レーザホログラフィ干渉法には、実時間干渉法と二重露光干渉法がある。

実時間干渉法においては、干渉縞を実時間で観測することができる。物体のホログラムを記録し、現像した後、正確にもとの位置に戻す。このホログラムを元の露光中に使用した参照光で再生すると、物体と正確に同じ位置に虚像が見られる。ここで物体に変位を加えると干渉縞の集まりが見える。この場合の干渉縞のパターンは、物体のひずみが実際に起こっている通りの変化を示す。

また、二重露光干渉法では、物体の非常に小さな変位やひずみを測定することが可能である。まず、測定対象をホログラムとして記録する。次に、写真乾板を現像する前に測定対象に変位を加え、同一の乾板に2回目の露光を行う。現像処理した乾板を元の参照光で照射すると、変位が加えられていない状態、及び変位が加えられた状態の像が再生される。このようにして二つの光波群の干渉縞を観測することができる。

レーザホログラフィ干渉法は、再生光の視角を変えて再生することにより、流れの3次元構造を観察できる特徴がある。また、温度、濃度分布の同時計測が可能である。

しかしながら、光学系の調整が複雑であり、また、実時間での測定には熟練を要する欠点がある。

多成分の物質が濃度と温度の勾配をもちらながら流動している場合には、屈折率は両者の関数となり単波長の干渉系では分離できない。そこで、同時に異なる波長を用いて、各成分の屈折率の波長依存性を利用する二波長干渉法が考えられている。

図26に二波長干渉計の構成図<sup>[5]</sup>を示す。ArイオンレーザとHe-Ne レーザを用い、ビームスプリッタで重ね合わせて測定部へと導く。他方のビームは参照光として乾板上に結ばせる。二波長干渉法により、ナフタリン被覆された加熱平板における自然対流の層流境界層の濃度分布と温度分布が測定されている。

図27に平板まわりの層流境界層内の温度と濃度を示す。この例で二波長の差を大きくしているのは屈折率の差が大きく精度も向上するためで、Arイオンレーザでは一番波長の短い457.9nm が用いられている。

## (2)置換流計測への適用性

本計測手法は、3次元構造を計測することができ、また、温度、濃度分布の同時計測が可能であるという長所により、本置換流の測定に適していると考えられる。しかし、非定常性を有する流れには、二重露光法や、現像後のホログラフィ乾板を正確に元の位置に戻さなければならないという困難さをもつ実時間法はリアルタイム測定という観点より適さない。この場合には、サーモプラスチックのような現像処理を必要としない記録材料を用いれば、流れの非定常性を観察できるが写真乾板に比べると分解能は落ちる。

## 4. 置換流計測への適用検討及び今後の展望

### 4.1 置換流計測への適用検討

真空破断予備実験において測定量として最も望ましいものは、破断口における質量流量である。そのため、密度と流速の二つの量を測定しなければならない。この実験では、内部加熱ガスの温度分布による密度差及び内部に密度の軽いヘリウムガスを封入し、外部の密度の重い空気との濃度差による置換流を生じさせる。これまでに分かっている置換流の流動特性としては、破断口部において密度、流速に3次元性・非定常性を有することである。しかも、内部ガスを加熱した場合には、密度、流速分布に、温度分布の3次元性・非定常性も考慮に入れなければならない。

現状の可視化計測手法では、今回調査した範囲内で、非一様温度分布を有するヘリウム-空気混合ガスの密度分布を精度良く測定することは難しいが、2次元流速分布については工学的に十分な精度で測定できる手法があった。この流速分布を用いると、質量流量の代替として体積流量を算出することが可能となる。

### 4.2 トレーサの選定

可視化計測ではトレーサの選定も重要な要素である。作動流体が密度の軽いヘリウムガスということを考慮すると、空間での滞在時間、随伴性、散乱光強度等からその種類は限られている。粒径については数 $\mu\text{m}$ 以下、比重についてもできるかぎりガスに近いものが望ましい。これらを満足するものとして、ベビーパウダ、ステアリン酸亜鉛及び線香の煙等が挙げられる。

### 4.3 計測手法の選定

可視化による流速分布計測手法のうち、真空破断予備実験へ適用可能なものとして、置換流の特徴及びトレーサの粒径や2.章での実験結果も参考にして相関法が現状最も有力な手法と結論される。しかも、最近開発された高速信号処理できる専用ボードをもつ製品を利用すると、流速分布の時刻歴を計測することも可能である。

### 4.4 システムの選定

以上の可視化計測手法の現状調査及び置換流計測への適用性検討に基づき、真空破断予備実験装置では、以下のシステムを選定した。

- a)光源部 : 500Wキセノンスリット光源
- b)受光部 : モノクロCCDカメラ  
画素数 768×512  
レンズF2.8
- c)記録部 : VTR

- d)処理部 : 1.計測手法 ..... 相関法（2次元）  
 ..... リアルタイム相関法（2次元）  
 2.画像解析装置 ..... Quick Vector（応用計測研究所製）  
 ..... A/D コンバータ、イメージメモリ、画像処理  
 ソフトはパソコンPC9801BX上で動作
- e)計測対象： 気体の流速  
 f)トレーサ： 煙

#### 4.5 今後の展望

相関法は、基本的には2次元断面測定という欠点をもっている。したがって、3次元性流れへの対策として、最近開発された木村ら<sup>[9]</sup>の手法を取り入れる必要がある。木村らは時空間相関法という手法を用いて流れ場の3次元速度ベクトルを計測している。

図28に時空間相関法による3次元速度ベクトル測定の原理を示す。矢印は流れの主方向で、これに垂直な実線の四角形は、時刻  $t$ における流れの主方向に垂直な二つのスリット位置での断面トレーサ画像を示している。トレーサ画像  $f(x, y, t)$ ,  $g(x, y, t)$  はそれぞれ上流側と下流側の断面画像である。破線の四角形はそれぞれの断面の画像時系列を示す。いま、画像  $f(x, y, t)$  に点  $(x_0, y_0, t)$  を中心画素とする大きさ  $n \times n$  の基準画素マトリクスの小領域を設け、同様に画像  $g(x, y, t)$  上で時間と空間位置をずらした点  $(x_0 + \Delta x, y_0 + \Delta y, t + \tau)$  を中心画素とする大きさ  $n \times n$  の画素マトリクスの小領域を設定する。この二つの画素マトリクスの濃度レベルの規準化した相互相関関数  $R_{f,g}(\Delta x, \Delta y, \tau)$  を計算する。ここで  $R_{f,g}(\Delta x_m, \Delta y_m, \tau_m)$  が最大値をとるならば、 $\Delta x_m$ ,  $\Delta y_m$ ,  $\tau_m$  はそれぞれ基準マトリクスの小領域のトレーサ粒子群の  $x$ ,  $y$  方向への空間移動量、及びスリット間隔  $d$  をそのトレーサ粒子群が移動するに要する時間であると考えられ、したがって、点  $(x_0, y_0, t)$  における3次元速度ベクトルが求められる。

木村らは、本計測手法を用いて矩形水路流れへ適用している。トレーサ粒子として比重がほぼ1.0で平均粒子径0.50mmのポリスチレン粒子を用いている。カラースリット光は、スライドプロジェクトからの光をシリンドリカルレンズにより平行光線とし、それを赤と青のフィルタを張りつけた流水層側面の二つのスリットに照射することにより得ている。各スリットの幅は3.0mm、上流側と下流側のスリットの間隔は17.0mmとしている。ここでは本計測システムの有用性を評価しやすくするために流れの状態が明白な矩形水路内の定常流れを測定対象としている。流れの平均速度はほぼ50mm/sになっている。

図29に3次元速度ベクトル分布の計測結果を示す。ここでは速度が一定であると考えられる矩形水路のほぼ中央部の  $5 \times 5$  の格子点（格子間隔縦横  $10 \times 10 \text{ mm}^2$ ）を選び3次元速度ベクトル分布を得ている。測定領域での3次元速度ベクトルは多少のばら

つきはあるが流れ方向に一致し、その大きさもほぼ一定であり、時間的にもほぼ定常であることが分かる。この傾向は本計測システムの有用性を示している。

また、今後の測定項目として当然、温度・濃度（密度）分布の計測手法を開発していく必要がある。ここでの調査結果より、これらの量を計測する有望な手法として平面レーザ誘起蛍光法(PLIF)あるいはレーザホログラフィー干渉法等が挙げられる。

前者は信号強度が強くppmオーダの計測も十分可能であり、後者は流れ場の情報記録密度が従来法に比べて格段に高いという特徴を持っている。しかも、これらの方法は、非接触・3次元性に優れており、濃度・温度の空間分布の同時測定も可能である。PLIFでは、可視化物質としてOH, CH, NO等の化学物質が挙げられ、それらの成分に応じた固有の波長のレーザ光を照射して可視化が出来る。置換流の計測システムとしては、図30に示すものが考えられる<sup>[10]</sup>。光源としてはエキシマレーザあるいはYAG レーザを用い、受光部にはイメージインテンシファイア付きの高感度CCD カメラを利用する。3次元への拡張はレーザシート照射面の高速スキャニング設備又は実験装置の回転設備が必要であるが、これは現在のCT技術の応用であり、レーザホログラフィ干渉法にも共通のものである。図31に、佐藤ら<sup>[11]</sup>がバーナ火炎の3次元温度分布計測に使用したレーザホログラフィ光学系を示す。この方法を以下に簡単に説明する。気体の屈折率は密度の関数であり、密度はガス組成、温度、圧力によって変化するため、温度を求めるにはガス組成と圧力が必要となる。先ず、対象物体の投影データをCTの再構成計算により屈折率を求め、これとグラッドストンーデールの式及び気体の状態方程式を用いて温度を算出している。撮影可能な範囲は、角度168 度、縦、横80mmであった。従って、同程度の光学設備で真空予備実験破断口のほぼ全領域を測定することができる。なお、レーザホログラフィの場合、光源としては波長安定性の優れたパルスレーザを用い、受光部に当たるものは現像が必要な感光材料よりもサーモプラスチック記録装置を利用すべきである。

## 5. 可視化計測実験

### 5.1 はじめに

核融合実験炉の真空容器が何らかの原因で破断した場合、外気が真空容器内へ流入した後、内部の気体は熱せられ容器外部に比べ高温となる。この温度差及び容器内の化学反応による濃度差に起因した自然対流により、破断口を通して置換流が生じ、これによって放射性物質が真空容器外へ流出する恐れがある。従って、真空破断事象発生時の自然対流に起因する破断口からの放射性物質等の流出量を正確に評価することが安全設計上極めて重要である。

従来、温度差のみあるいは物質差のみに起因した置換流の実験が幾つか報告されているが、上述したような温度差、物質差に起因する破断口を通じた置換流の流動特性を取り扱った報告例はこれまでほとんどない。

そのため、外径約850mmの、内径約260mmの、高さ約850mmのステンレス製縦型2重円筒容器形状の真空破断予備実験装置を作成し、真空容器の様々な位置の二つの破断口における置換流の流動特性実験を行い、破断口からの放射性物質流出量に関する評価手法を確立することを計画している。この実験における測定量として最も望ましいものは、破断口における質量流量である。そのためには、密度と流速の二つの量を測定しなければならない。しかしながら、破断口部においては、密度、温度及び流速は3次元的空間分布を有し、しかも時間的に変動する量と予測されるため、破断口断面内全領域での時系列データを測定する必要がある。

現状の計測手法では、非一様な温度分布を有するガスの密度分布を精度良く測定することは非常に困難を伴うが、流速分布については、最近目覚ましい発展を遂げている可視化による画像解析手法を利用することで工学的に十分な精度で測定が可能となっている。従って、次善の対策ではあるが、質量流量に変わるものとして、可視化計測による流速分布から算出される体積流量の検討や流れを目視観察することで、破断口での置換流の挙動をある程度把握できるものと考えられる。

ここでは、先ず、小型の模擬真空容器を用いた流れの可視化計測実験を行い、真空破断予備実験装置に適用可能な置換流の可視化計測技術を開発すること及び破断口における流出特性を明らかにする。

### 5.2 可視化計測実験装置による試験

本実験装置は、図32に示すように真空容器を模擬した縦型2重円筒容器、精密電子天秤及び可視化計測系（スリット光源、カメラ、画像解析装置）より構成される。

#### (1) 試験装置

##### 1) 容器

型式 : 縦型二重同心円筒形状  
材質 : アクリル材

寸法 : 外径；約290mm、 内径；約100mm、 高さ約200mm  
 重量 : 容器本体 約2300g  
         蓋 約90g/個  
         ゴム栓 約 5g/個

## 2)破断口

材質 : アクリル材  
 形状 : 円筒管  
 口径 : 約14mm  
 高さ : 約10mm  
 個数 : 4個 (図32中A~D)

## (2)試験内容

可視化トレーサを含んだヘリウムガスを容器内に充填し、破断口部蓋を開放した後、破断口での可視化計測を実施し、流況の観察を行うとともに、VTRに録画し、画像解析装置により流速分布（体積流量）を算出する。同時に精密電子天秤により容器質量の時間的変化を測定し、両者を比較する。また、破断箇所の違いによる置換流量の時刻歴を取得する。

## (3)試験条件

- 1)作動流体 : ヘリウムガス（容器内）、空気（外部）
- 2)試験圧力 : 大気圧
- 3)試験温度 : 常温
- 4)破断口数 : 1か所又は2か所とする（図33参照）
- 5)試験ケース : 図33のa-2, a-3, b-2, c-2  
                   2次元断面の測定（垂直断面及び横断面）  
                   同一条件で3回測定を行う

## (4)可視化計測系

本可視化計測系は、模擬破断口部における置換流を可視化トレーサにより可視化し、流速等を計測するためのものであり、光源、画像入力装置及び画像解析装置等により構成される。模擬真空容器内に注入された可視化トレーサが流れに随伴して破断口より流出する部分にシート上の光線をあてて、その散乱光をビデオ画像等の可視化画像として取り込んだ後、数値化してイメージメモリに取り込み、画像解析を行う。この画像解析により模擬真空容器内部からの気体の流速等を算出する。

### 1)計測手法

第3章でも述べたように、計測手法として現在最も広く利用され、かつ信頼性の高い相関法と粒子追跡法（PTV法）の2手法を取り上げる。

①QV相関法<sup>\*)</sup>

## ②粒子追跡法（PTV法）

<sup>\*)</sup> 相関法とはQuick Vectorのようにある一点でのリアルタイム相関による流速算出法と2つの異なる時間での画面を小マトリクスに分割して相互相関をとり画面全体の流速分布を算出する方法（これが通常）の2通りある。ここでは、前者をQV相関法、後者を相関法と呼んで区別する。

## 2)可視化トレーサ

トレーサ注入方法 ヘリウム中に混入

トレーサの種類 線香の煙（容器外部）

ベビーパウダ又はステアリン酸亜鉛（容器内部）

## 3)測定量

破断口での流況の時間変化の可視化観察

流速分布及び定点流速の時刻歴の測定

置換流量の時刻歴

## 4)測定領域

2次元断面の測定：破断口の中央断面を通る垂直断面(100mm×100mm)

破断口上部横断面(14mmφ)

## 5)計測システムの構成

## ①QV相関法

a)光源部 : 500Wキセノンスリット光源  
4W Ar<sup>+</sup>レーザライトシート

b)受光部 : モノクロCCD カメラ  
画素数 768×512  
レンズ F2.8

c)記録部 : VTR

d)画像解析装置 : Quick Vector（応用計測研究所製）  
A/D コンバータ、イメージメモリを含む  
画像処理ソフトはパソコンPC9801BX上で動作

図34、図35に、システムの構成を示す。

## ②PTV法

a)光源部 : 4W Ar<sup>+</sup>レーザライトシート

b)受光部 : 高感度撮像管（スーパーアイ）  
画素数 512×480  
レンズ F2.8

c)記録部 : 光ディスク

d)画像解析装置 : Nexus PTV（ネクサス製）、パソコンPC9801BX

図36、図37に、システムの構成を示す。

## (5) 計測結果とその考察

精密電子天秤による計測及び可視化計測の例を、図38、図39に示す。

精密電子天秤による計測については、既に小川らによって報告(Fusion Technology Vol.21,p2036(1992))されているが、ここではその再現性を確認するために行った。

天秤計測に当たっては、いずれのケースでも容器内がヘリウムガスで十分満たされるようにし、容器上部の蓋を開放した後、直ちに重量の変化を計測する。なお、開放後十分時間を経た後の容器重量の増加が、完全に容器内が空気とヘリウムで置換された場合の重量増加(約11.5g)に対応することを確認した。

図40～図42に本計測結果を以下に示すフルード数Fr、

$$Fr = \frac{Q}{(gd^5 \Delta \rho / \rho_m)^{1/2}}$$

$$Q = \frac{1}{\Delta \rho} \cdot \frac{dm}{dt}$$

$$\Delta \rho = \rho_H - \rho_L, \quad \rho_m = (\rho_H + \rho_L)/2$$

$\rho$  : 密度(H:air, L:helium)

d : 破断口直径

g : 重力加速度

で整理して、図中に○で示した。いずれの場合でもほぼ小川らの結果を再現していることが分かる。

以上の結果をもとに、暗幕( $3.6 \times 3 \times 2.5m$ )で完全に隔離された暗室内において可視化計測を行い、フルード数の時間的変化と流況との対応付けをすることとした。この場合、精密天秤計測と可視化計測とを同時にを行うことが望ましいが、光源とカメラの位置設定やトレーサ注入による容器総重量の変動、また計測機器の操作上の問題等から別々に行つた。

可視化トレーサは、ヘリウムを容器へ注入する前に攪拌器に導き、十分攪拌させた後に注入した。トレーサの種類としては、ベビーパウダ、ステアリン酸亜鉛及び線香の煙を予備的に使用した。その結果、反射光の強さ、ガス中の滞在時間等からステアリン酸亜鉛または線香の煙が適していることが分かったので、以後の試験では全てステアリン酸亜鉛または線香の煙を使用した。ただし、煙を使用した場合、容器がヤニで変色するため容器内部には注入しなかった。結果的には煙を使用しなくとも破断口出口付近に浮かんでいる少量のステアリン酸亜鉛で外部の流動状況を十分観察できることが分かった。

実験では、トレーサを含んだヘリウムガスを十分容器へ注入した後、内部の微粒子がガス中で静止したことを確認した後上部蓋を開放した。

いずれのケースでも数十分にわたって置換流を可視化できた。ここで、取り込む画像の質は、光源と受光部の能力による。本実験に使用している光源は強力で、しかもカメラは微弱な光でも捕えることが出来るが、受光部のレンズが絞り2.8であるためカメラを通した映像としては、長時間にわたって鮮明な画像が得られないケースもあった。

図43、図44に、ケース(a-2)の流動状況の可視化写真を示す。VTRに記録した映像を観察した結果、ケース(a-2)では、破断口のほぼ中央部を三日月状にヘリウムガスが流出し、そのくぼんだ部分より空気が流入する傾向が見られた。しかも、三日月状に流出する領域は破断口断面内で時間的に絶えず移動していた。図44からも分かるように、破断口を含む容器内垂直断面の可視化により、流入するきのこ状の空気プリュームが明瞭に観察された。蓋開放直後のプリュームの流入速度は極めて大きくすぐに容器底部に達し、左右にほぼ対称に分かれる。その後ゆるやかに帯状のプリュームとなって上昇していき、破断口直下で流入する空気に巻きこまれていく。なお、図44の写真は、絞り1.6で撮影したものである。

図45に、ケース(a-3)の流動状況の可視化写真を示す。ケース(a-3)では、上部に2つの破断口があるため出来るだけ容器を水平に保った。蓋開放直後にいずれの破断口が流入・流出となるかは、2つの破断口の高さや直径が多少違うため圧損が多少異なることで決まることも考えられるほか、蓋を取るタイミングに依存する。少しでも早く開放された方が流出口となる。容器を水平に保った状態から、空気が流入する破断口側が高くなるように傾けていくと2~3度傾けた時点で流入・流出口が逆転する。一旦、一方の破断口が流出状態になると、元の状態(水平位置)に戻しても流入・流出口が元の状態に復帰することはない。元の状態にするためには、また反対方向に2~3度傾ける必要がある。なお、2つの破断口中心間距離は、約200mmとなっている。

図46、図47に、ケース(b-2)及び(c-2)の流動状況の可視化写真を示す。両ケースとも、蓋開放直後には旋回流が生じるが数分後には軸対称に近い安定した流れに移行した。開放直後には、置換流の散乱光は非常に強いが時間が経つに伴い、弱くなっていく。これはフルード数の時間的変化に対応しているものと考えられる。また、ケース(b-2)のほうが(c-2)よりも当然散乱光の強度は強かった。

次に、ケース(b-2)と(c-2)について、破断口より流出するヘリウムの速度を算出するため、QV関連法とPTV法との2通りについて比較した。その結果、破断口より流出するトレーサの粒径が非常に小さいため、一個一個の粒子を正確に認識できず、PTV法を適用した場合画面中央部に速度ベクトルが現われない領域が生じた。一方、QV関連法を適用した場合、画像の変化を濃度パターンの変化として捕らえるため、流出領域でも速度ベクトルを算出することができた。そこで、試みとして、Quick Vectorを使用して破断口上部約50mmの位置に流出領域を含む適当な大きさの計測窓を1つ設定し、そこでの流速の時刻歴を求めた。蓋開放後約50秒と約100秒での流速を破断口の平均流速と置いて体積流量を算出し、前述のフルード数を求め、図41及び図42

に●で示した。精密電子天秤の計測結果と比較したところ、まだ十分な精度でフルード数を算出できていないが、この理由としては以下のことが考えられる。

- 1) いずれのケースでも、径方向、円周方向の流速分布があるため、1断面でのしかも1計測窓での流速を平均流速として代表することに無理がある。ある程度時間を経た流れでは、軸対称に近い流れが生じており、1断面の流速分布からでもより正確な結果が得られると推測される。
- 2) ケース(b-2)では、約50秒後のフルード数が非常に小さくなるのは、流出するトレーサの量が多く、輝度がほぼ一定で変化がないため、流速が小さくなつたと考えられる。これには、トレーサの注入量を制限する等して輝度差が出る対策を講じる必要がある。
- 3) 計測窓の大きさに任意性があること、Quick Vectorでは2値化相関を用いているため2値化の閾値に任意性があること。このため、計測窓の大きさや2値化の閾値はケース毎に幾通りか設定し、流速がほぼ等しく流況とも一致が良いものを用意しておくことが必要である。

### 5.3 密閉容器内自然対流可視化実験

ここでは、外部を水で冷却されたアクリル製密閉容器と内部に電気ヒータによって加熱された24個の正方格子で囲まれた複雑な形状を有する流れの可視化を行う。この実験を取り上げた理由は、5.2において適用できなかったPTV法が有効である例を示すためである。

#### (1) 試験装置

- 1) ヒータ加熱部一辺の長さ : 45mm
- 2) ギャップ幅 : 約8mm
- 3) アクリル内径 : 331.6mm、厚さ : 5mm

#### (2) 試験内容

複雑な形状を有する密閉容器内の自然対流を適当なトレーサを使用して可視化し、流動状況を観察する。

#### (3) 試験条件

- 1) 作動流体 : 空気
- 2) 試験圧力 : 大気圧
- 3) 試験温度 : 常温～120°C

## (4)可視化計測系

## 1)画像処理

PTV法、相関法

## 2)可視化トレーサ

トレーサの種類 ステアリン酸亜鉛

## 3)測定量

2次元断面内の流況の可視化観察

流速分布の測定

## 4)測定領域

2次元断面の測定

## 5)計測システムの構成

- a)光源部 : 100Wストロボスリット光源  
4W Ar<sup>+</sup>レーザライトシート(流況観察のみ)
- b)受光部 : 高感度撮像管(スーパーアイ)  
画素数 512×480  
レンズ F2.8
- c)記録部 : 光ディスク
- d)画像解析装置 : Nexus PTV (ネクサス製)、パソコンPC9801BX

図36、図37に、計測システムの構成を示す。

## (5)計測結果とその考察

図48に、レーリ数Raが約 $6 \times 10^7$ の条件での上部の可視化領域での流動状況とPTV法による速度ベクトルの計算結果を示す。この場合のRa数は、

$$Ra = \frac{\rho^2 g \beta c_p \Delta T \cdot D^3}{\lambda \cdot \mu}$$

で定義した。 $\Delta T$ としては、ヒータ表面の平均温度とアクリル内壁の平均温度の差を取った。また、Dとしてはアクリル内径とした。相関法では、フィールドモードで計算したため1画像が垂直方向1/2になっている。

一方、図49には、相関法による速度ベクトルの計算結果を示す。ここで用いた相関法の処理プログラムの詳細は、付属書類に示す。相関マトリクスの大きさは、 $16 \times 16$ とした。

両者の計測手法の比較をした場合、PTV法がほぼ妥当な流況を表わしているのにに対して、相関法では過誤ベクトルが発生している上に流況も異なっていることが分かる。

## 6. 結 言

小型の模擬真空容器を用いた置換流の可視化計測を実施し、流況の観察を行うとともにVTRに録画し、画像解析装置により流速分布を算出した。同時に精密電子天秤により容器質量の時間的変化を測定し、両者を比較した。また、破断箇所の違いによる置換流の挙動についても把握した。その結果、以下のことが結論された。

- (1) いずれのケースでも数十分にわたって置換流を可視化できた。可視化トレーサとしては、ステアリン酸亜鉛又は煙で十分であった。
- (2) 破断口の位置、個数の違いにより、置換流の流況の違いがはっきりと観察された。
- (3) 計測手法としては、相関法と粒子追跡法の2つを取り上げた。その結果、破断口より流出するトレーサの粒径が非常に小さいため相関法が適用できることが分かった。ただし、定量化にはまだ検討の余地があった。

以上のことより、真空破断予備実験において、置換流の流動特性は可視化による画像解析から十分評価できるものと考えられる。

## 参考文献

- [1] 日本機械学会、No. 930-31. 講演要旨集、1993. 6. 23, 24. 千葉、第3回DEP 熱・流動の計測からビジュアル化までの実際
- [2] 日本機械学会、No. 930-19. 講習会教材、1993、画像解析技術を利用した流動解析
- [3] 木村・高森・井上、1987、相関を利用した流れ場の速度ベクトル分布の画像計測、計測自動制御学会論文集、Vol. 23, No. 2, pp. 101-107.
- [4] 日本機械学会、No. 930-22. 講習会教材、1993、希薄気体力学とその先端技術への応用、pp. 25-43.
- [5] 日本伝熱研究会、伝熱研究、Vol. 30, No. 117, April, 1991, pp. 118-136
- [6] 流れの可視化学会、流れの可視化ハンドブック、朝倉書店、pp. 312-318
- [7] 近久・大内・村山、1987、シュリーレン法による二次元密度場の定量化画像処理、流れの可視化、Vol. 7 Suppl. pp. 7-10.
- [8] レーザ入門、清水忠雄監訳、森北出版株式会社 pp. 189-217
- [9] 木村その他、時空間相関法に基づく流れ場の3次元速度ベクトル計測、計測自動制御学会論文集、Vol. 27, No. 5, p497(1991)
- [10] 佐藤、可視化情報、Vol. 10, No. 38(1990), p1
- [11] 佐藤、日本機械学会論文集 B, 55-511(1989), p841
- [12] 佐藤ほか2名、日本機械学会論文集 B, 53-490(1987), p1852

表 1 主な可視化計測手法

その1

可視化計測手法名	可視化計測手法の概略及びその特徴・欠点	可視化計測手法の現在のレベル	可視化トーサ名	測定量	計測システムの構成	費用概略(千円)
2次元PTV	適当なスリット光源を用いて流れ場の2次元断面を可視化し、その中の個々のトーサ粒子の時々刻々の運動を追跡する手法。 最も一般的に用いられている手法であり高流速への対応も可能な手法。 粒子の混入密度が高い場合や、測定時刻間隔が長い場合、粒子の対応付けに誤りが現れる。	軸対象衝突噴流の乱流構造の測定 水、ナイロン12粒子 (90 $\mu\text{m}$ ) 測定領域 幅60mm × 高さ80mm 測定時間間隔 1/30sec 空間分解能 約0.15mm	ステアリン酸亜鉛 ナイロン12等	流速分布 乱れ成分	高感度映像管 ストロボ、パソコン、モニタ 画像処理装置 光デイクリオーダ	1000 1000 500 5000 2000
3次元PTV	3台のCCDカメラで、異なる視野方向から同時刻の粒子像を撮影する。得られた3枚の画像よりトーサ粒子の3次元位置を求め、時々刻々の運動を追跡する手法。 3次元空間での流速分布が得られるため、3次元性を有する流れに利用可能であるが、カメラ校正の手続きが煩雑となる欠点がある。	主流速度4m/sの空気乱流境界層の測定 空気、マイクロバーン (50 $\mu\text{m}$ ) 測定領域 25 × 25 × 25mm <sup>3</sup> 測定時間間隔 100 $\mu\text{sec}$ 空間分解能 約0.05mm	ナイロン12 マイクロバーン等	流速分布 乱れ成分	CCDカメラ (3台) ストロボ、RGBアダプタ パソコン、モニタ 画像処理装置 光デイクリオーダ	500 × 3 1000 500 5000 2000
レーザスペックル法	異なる2時刻におけるスペックルパターンを同一フィルム上に二重露光記録し、その微少領域パターンの自己相関を求めて、二重露光間の変位の大きさと方向を求めるものである。 調整が簡単であり、時間的分解能が大きい。信号処理が容易である。 写真を現像する必要があり、また鮮明な画像を得るのに熟練を有する。	T字ダクト合流部流れの瞬時2次元流速 空気、タルクハウダ 測定時間間隔 480 $\mu\text{sec}$	エアロゾル タルクハウダ ガラス球等	流速分布	35mmスチールカメラ Arイオンレーザライトシート ボリコミテ 光学系 パソコン、モニタ	500 6000 500 1000 500
相関法	一定時間間隔を持つ二つのトーサ画像を小領域に分割し、それぞれの領域における濃度バーンの相互相關数を計算し、その最大値の空間的位置からトーサ粒子群の移動距離及び方向を求める、速度ベクトルを求める方法。 空間的に高い粒子密度での計測が可能であるが、相関マトリクスの大きさの選定が試行錯誤的であること、発生する誤べクトルの処理、3次元対応が困難等の欠点がある。	逆流を含む非定常流れである円柱後流渦 水、オガクズ (80 $\mu\text{m}$ ) 測定領域 160 × 80mm <sup>2</sup> 測定時間間隔 0.3sec	線香の煙 オガクズ等	流速分布	CCDカメラ セリカルト光源 パソコン、モニタ 画像処理装置 VTR	300 2000 500 5200 600
流跡線解析法	トーサ粒子の短時間内の動きを流跡線として画像上に記録し、流跡線の長さと傾きを計測して速度情報を変換する方法。 流跡線が画像上に残っており、そのままトラッキング情報としても用いることが出来る。流れの方向の決定や、粒子接触あるいは流跡線の重複の処理の問題が欠点である。	自由空間における剪断流の平均流速分布 の測定	ボリスチレン ナイロン12 シャボン玉等	流速分布	TVカメラ Arイオンレーザライトシート パソコン、モニタ	1000 6000 500
レーザ誘起蛍光法 (LIF)	蛍光物質 (分子) をトーサとして作動流体中に混入し、これにレーザ光を照射して蛍光物質を励起し、これが基底状態に失活するときに発する蛍光を写真などに撮影する方法。 高分解能計測、低濃度測定に有効である。 発生した蛍光が周囲の流体に吸収されたため、高濃度測定には適していない。	円管内の温度成層流乱流の温度分布測定 水、ローダミンB 測定領域 約40 × 40mm <sup>2</sup> ミクロ超音速自由噴流の可視化 アルゴンガス、ヨウ素分子 空間分解能 約0.03mm	ローダミンB ヨウ素分子	濃度 温度	ビデオカメラ Arイオンレーザライトシート VTR パネルプロジェクター 光学系	1000 6000 600 1000
ショーレン法	平行光線を密度差の流れ場を通して屈折させ、屈折光をナイフエッジ切断して前方のスクリーンまたはフィルム上の明暗から流体の密度勾配を求めて、流れの状態を求める方法。 衝撃波、境界層など密度勾配の大きな場に効果が大きい。流れが非定常性を有したり、写真撮影を行う場合には、直接的な測定は非常に困難である。	スリット状ノズルからCO <sub>2</sub> ガスを空気中 に噴射した2次元自由噴流における密度 分布の測定 光源 タングステン球 測定領域 約250 × 250mm <sup>2</sup>	-----	密度 温度	各種レーザ 35mmスチールカメラ 光学系	350 1000
レーザホログラフィ干渉法	レーザによる参照光と試験光を感光板上で干渉させて記録し、同じレーザ光で再生することにより、等密度干渉縞などを得る方法。 再生光の視角を変えて再生することにより、流れの3次元構造を観察できる。 温度、成分濃度分布の測定精度 ±1 $\mu\text{m}$	ナフタリンに被覆された加熱平板の自然対流の層流境界層における温度、濃度の測定 干渉縞の測定精度 ±1 $\mu\text{m}$	-----	濃度分布 温度分布 流速分布	He-Neレーザ CCDカメラ 光学系	300 1000

## その 2

可視化計測手法名	置換流への適応性
2次元 P T V	測定領域である破断口径100mm を1画面で撮影すると1画素が実寸法の200μmに相当し、数μm の粒子は撮影できない。撮影するためには、測定領域を分割し、カメラをトラバースしなければならず、同時刻性を保つことが出来なくなる。同時刻性を保つためには何台ものカメラを用いなければならず、カメラ校正が煩雑になってしまう。よって本計測手法の適用は難しい。
3次元 P T V	3次元性を有する置換流の計測には、3次元空間での瞬時流速分布を測定できる本計測手法は大変有効であるが、2次元 P T Vと同様に破断口全体をカバーするためのトラバース機構が必要となり、カメラ校正等が煩雑となる問題が生じる。よって、本計測手法の適用は難しい。
レーザスペックル法	本計測手法は、流速分布の2次元計測ではあるが、すでに川橋らによって、ヘリウム-空気の置換流への計測に適用されている。よって、本計測手法の置換流への適用は可能である。
相関法	個々の粒子を識別せず、粒子群の移動をとらえる本手法は、測定領域を大きく取ることができ有効である。また、時空間相関法を用いることにより、3次元計測が可能であり、3次元性を有する置換流への適用性は本手法が最も優れていると考えられる。
流跡線解析法	本計測手法も原理的には2次元 P T Vと同様であり真空破断予備実験での測定領域の大きさの問題により、個々の粒子を撮影することができない。したがって、本計測手法の適用は難しい。
レーザ誘起蛍光法 (L I F)	濃度あるいは温度分布を計測できる非常に魅力的な手法である。しかし、現状では圧力が高くなった場合の蛍光強度の問題がある。したがって、この点が解決されるならば、相関法との組み合わせにより、置換流の速度と濃度または温度同時計測が可能となり、置換流へ適用できると考えられる。
シリーレン法	本手法は、測定領域を透過する光の屈折を利用して測定しているため、測定領域の平均的な変化しか求まらない。したがって、3次元性を・非定常性を有する置換流への適用性は難しい。
レーザホログラフィ干渉法	本手法は、3次元構造を計測することができ、また、温度・濃度の同時計測が可能であるという点より、置換流の測定に適していると考えられる。また、現像処理を必要としない記録材料を用いて実時間干渉法で計測することにより、流れ場の非定常性を観察できる。したがって、置換流への適用は可能である。

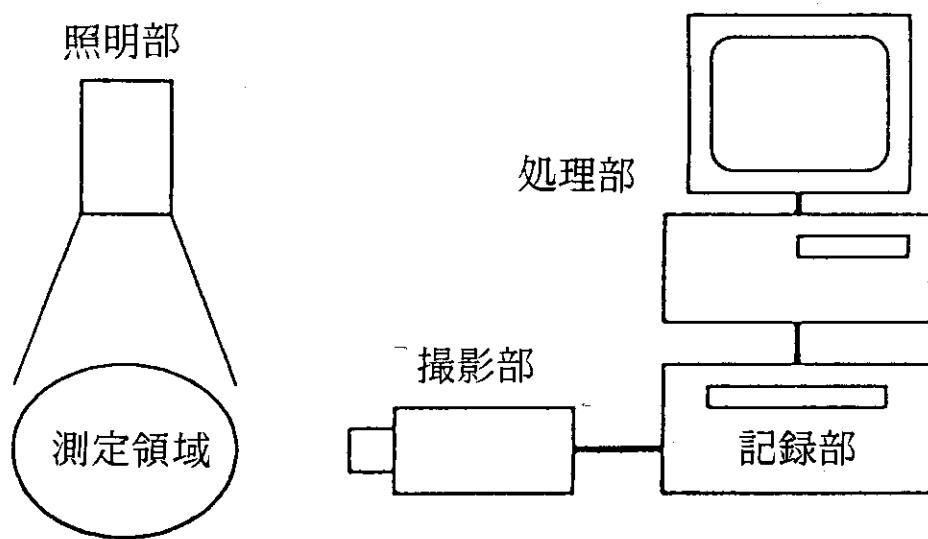


図1 可視化画像計測システムの基本構成<sup>[1]</sup>

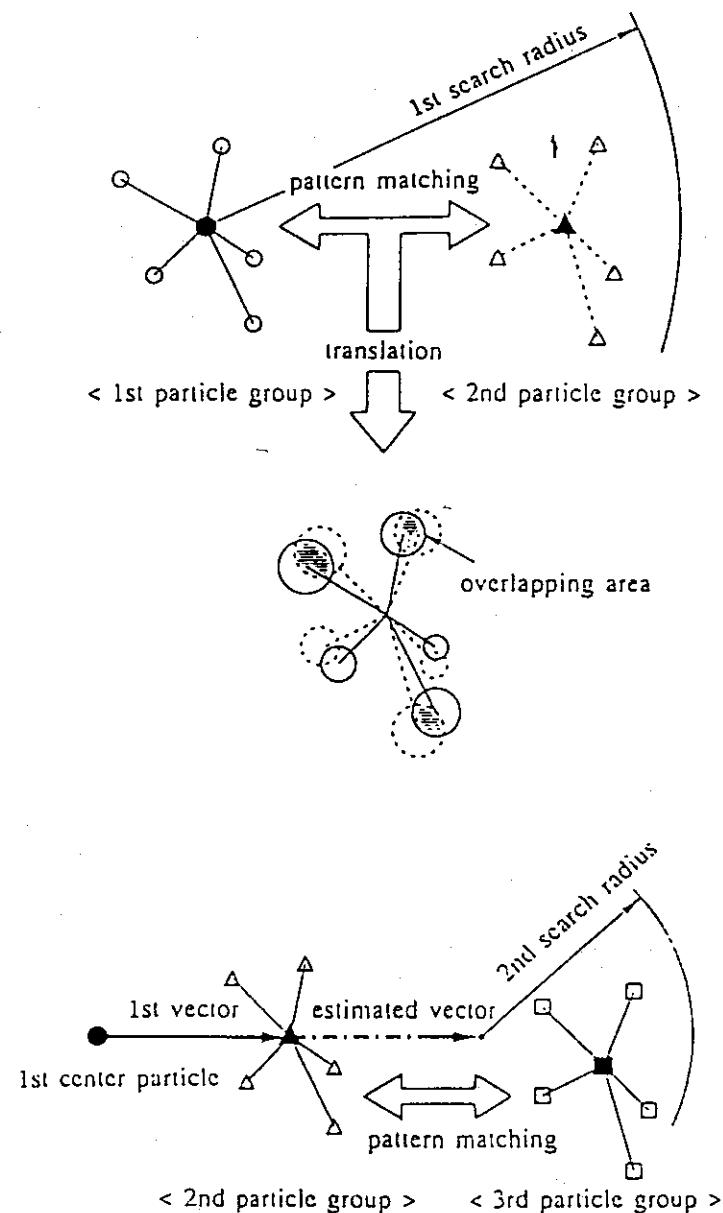


図2 3時刻パターンマッチング法の原理<sup>[1]</sup>  
 (上) 第1-第2 時刻追跡、(下) 第2-第3 時刻追跡

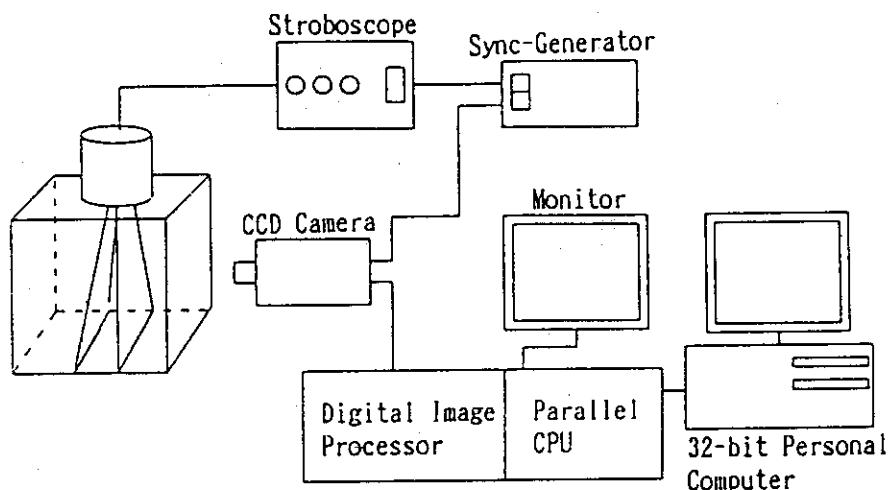


図3 2次元P T Vシステムの構成<sup>[1]</sup>

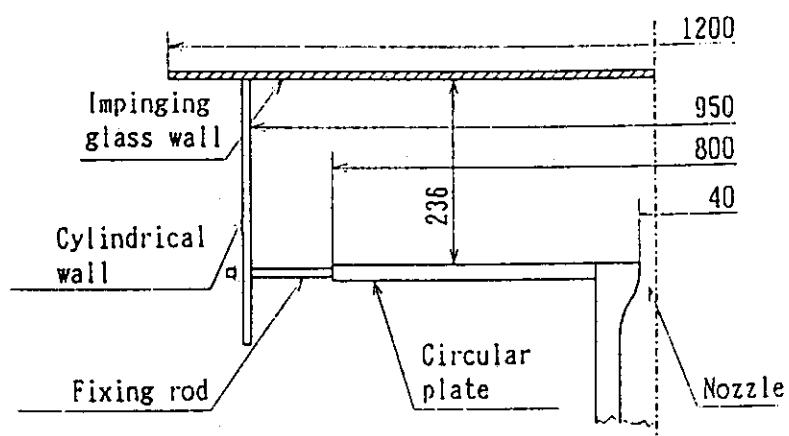
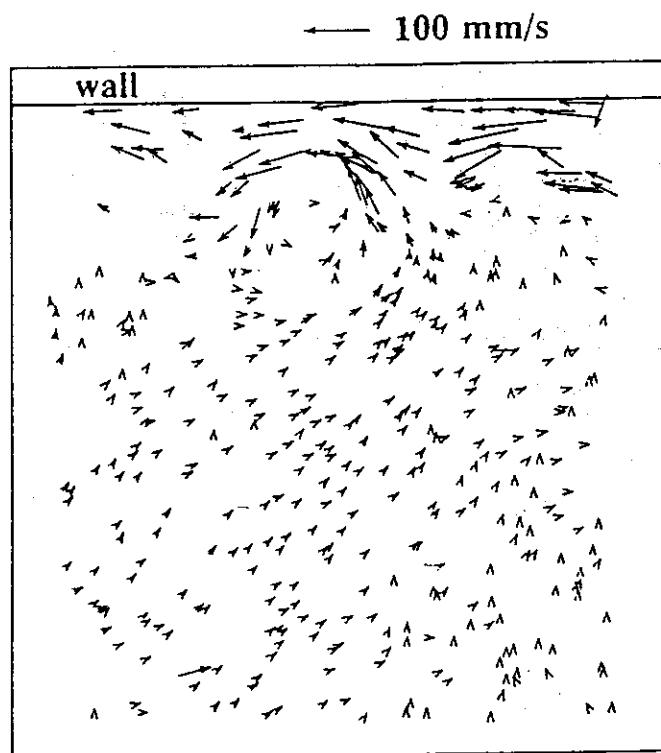
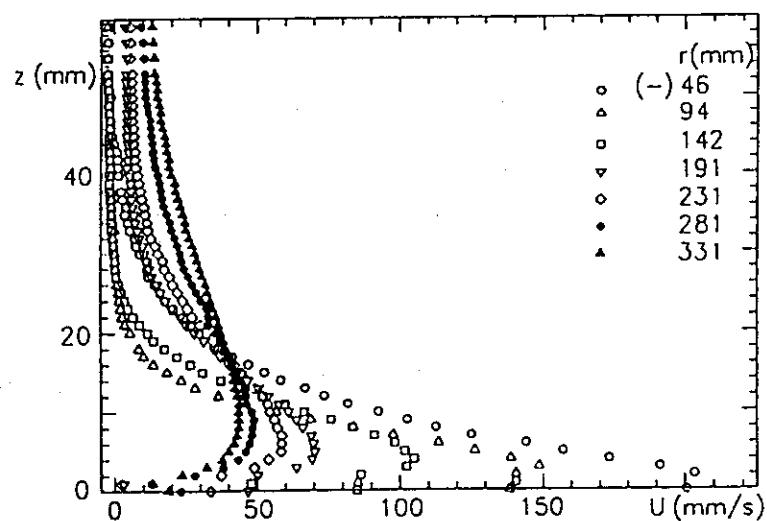


図4 軸対称衝突噴流の流れ場<sup>[1]</sup>

図5 軸対称衝突噴流の瞬時速度ベクトル分布<sup>[1]</sup>図6 壁面噴流領域の平均速度分布<sup>[1]</sup>

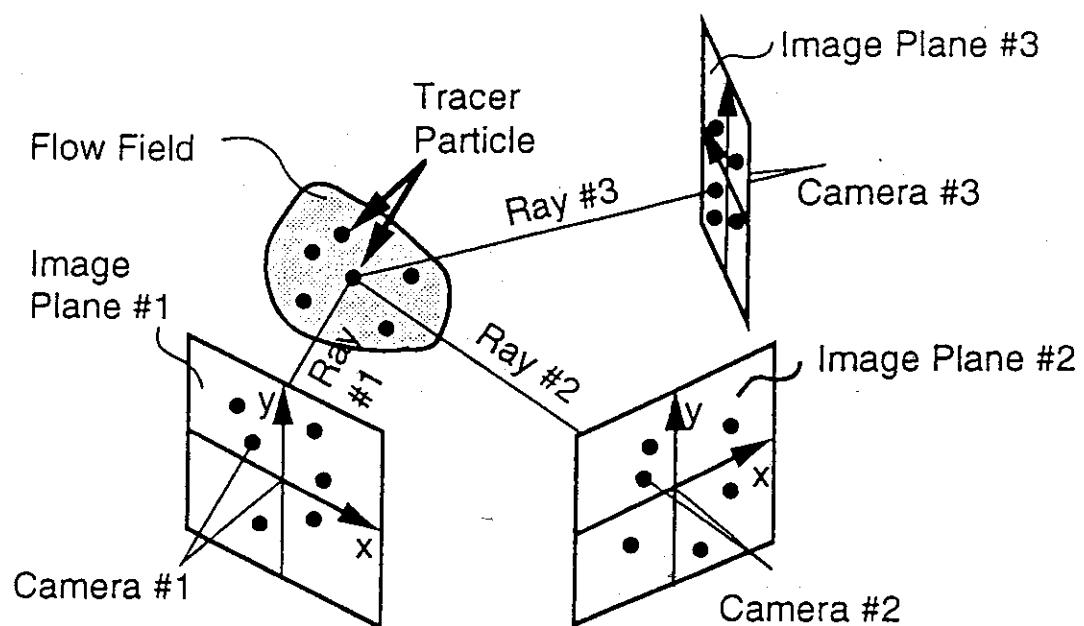


図7 3次元PTVのトレーサ絶対座標の算出<sup>[2]</sup>

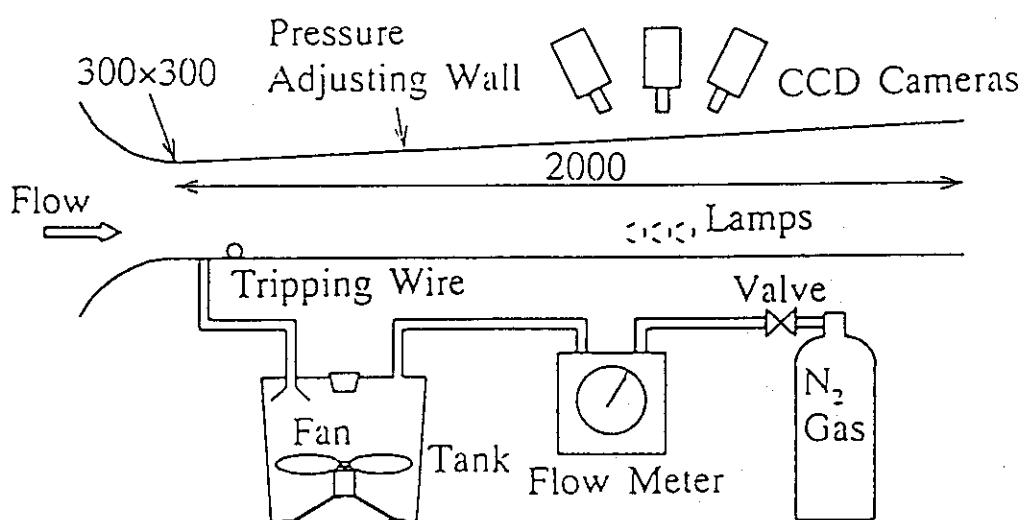


図8 3次元PTVによる空気乱流境界層の測定装置<sup>[1]</sup>

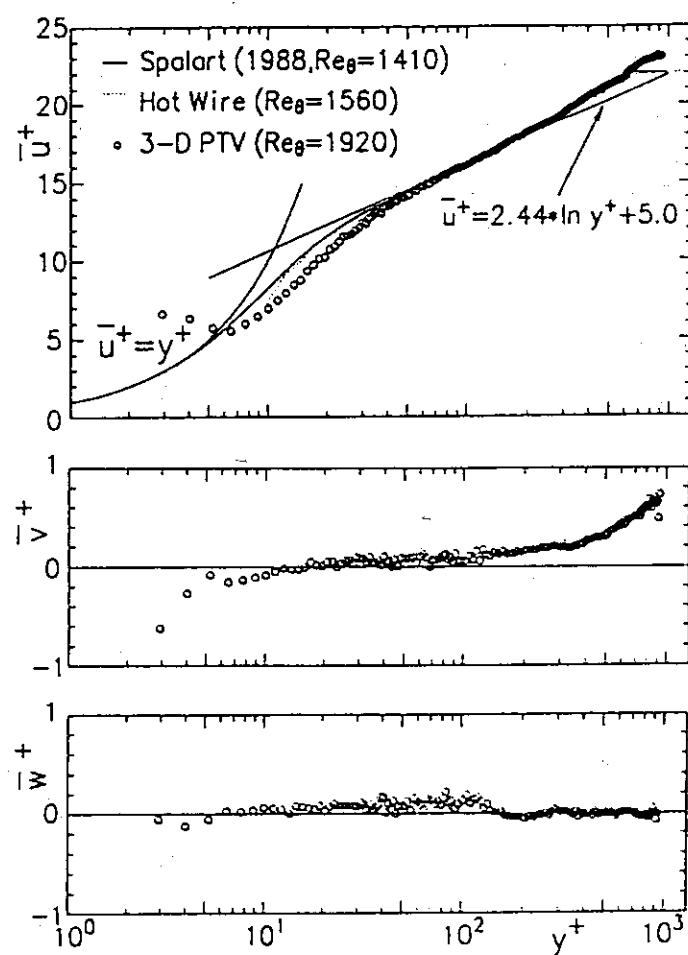
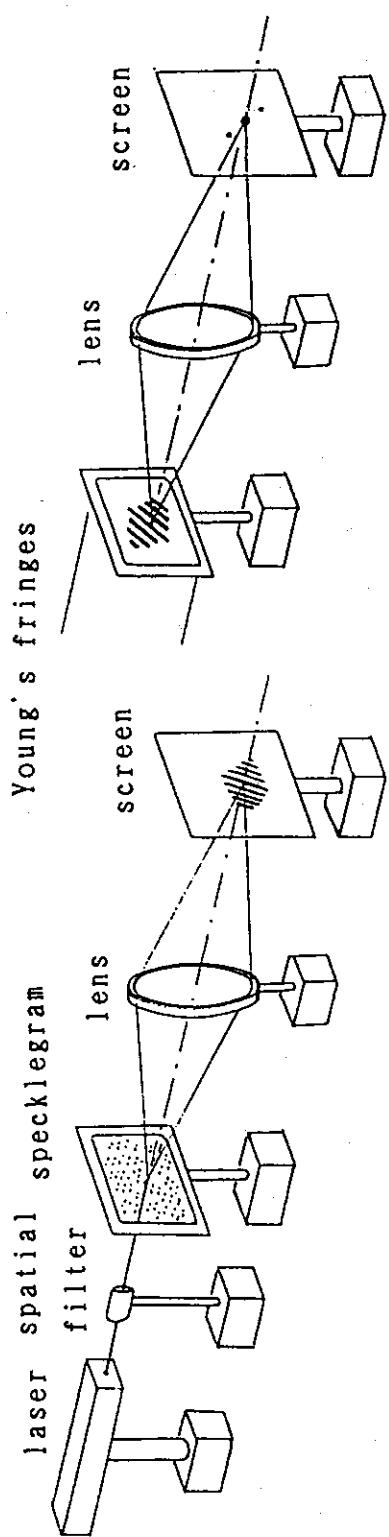


図9 3次元PTVによる空気乱流境界層の平均速度3成分の測定結果<sup>[1]</sup>



(a) フーリエ変換光学系

(b) 強度分布フーリエ変換光学系

図10 スペックルグラムの光処理光学系<sup>[2]</sup>

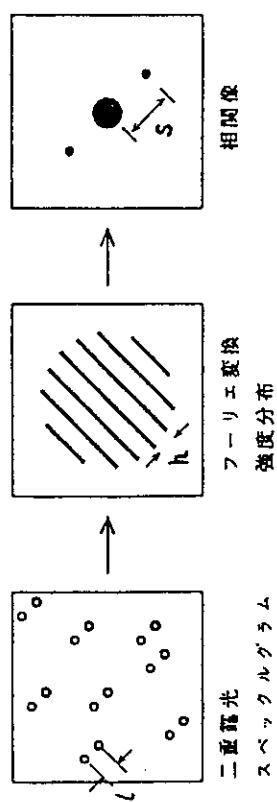


図11 光処理プロセス<sup>[2]</sup>

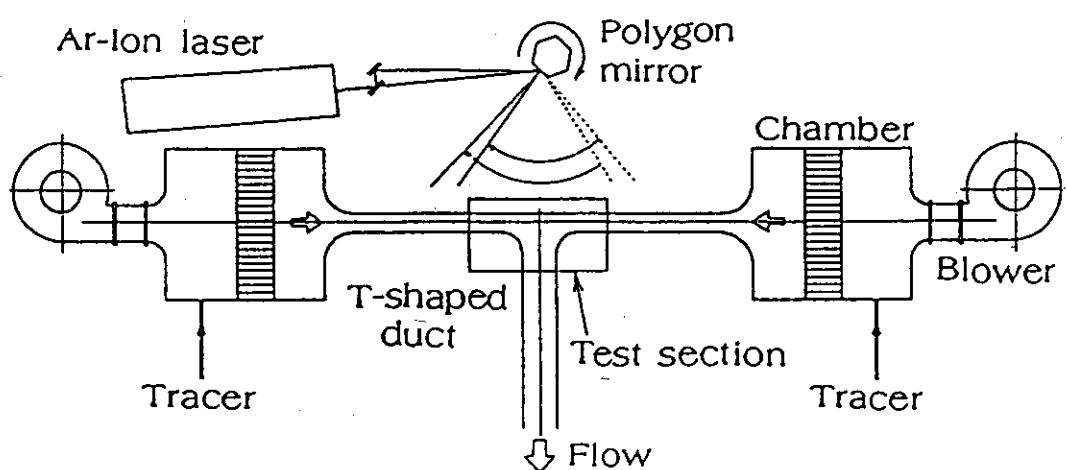


図12 スペックル法によるT字合流ダクト実験装置概略図<sup>[2]</sup>

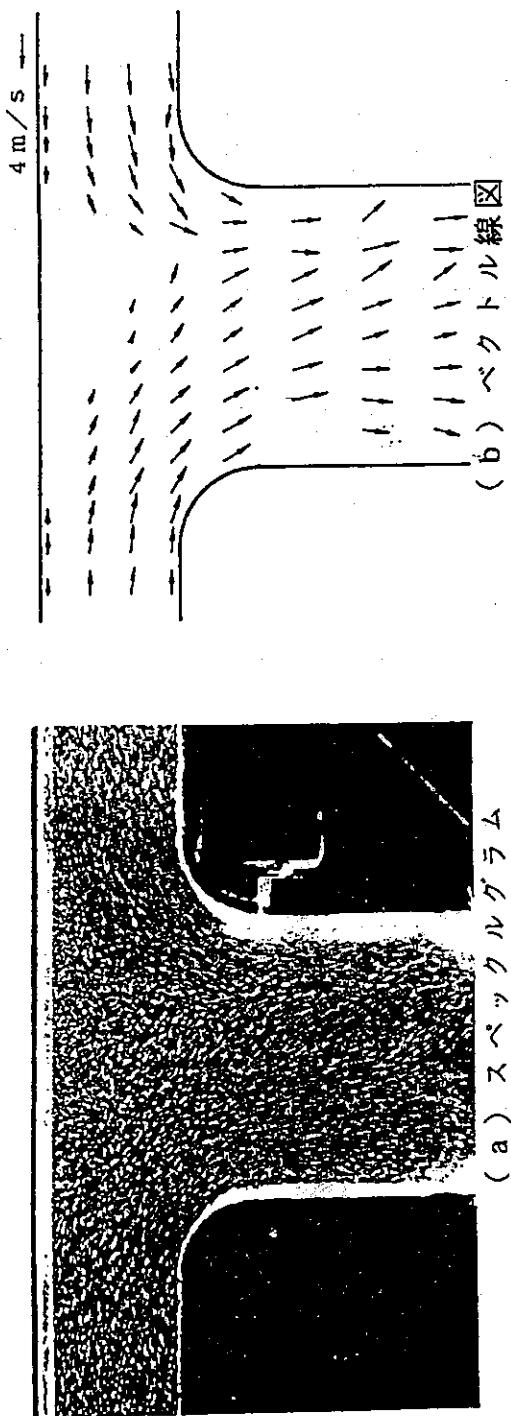
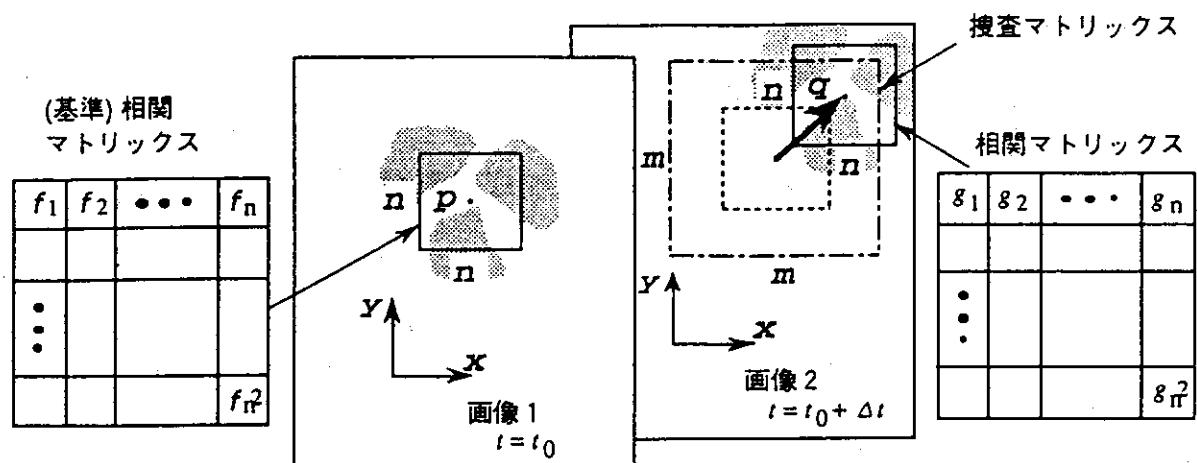
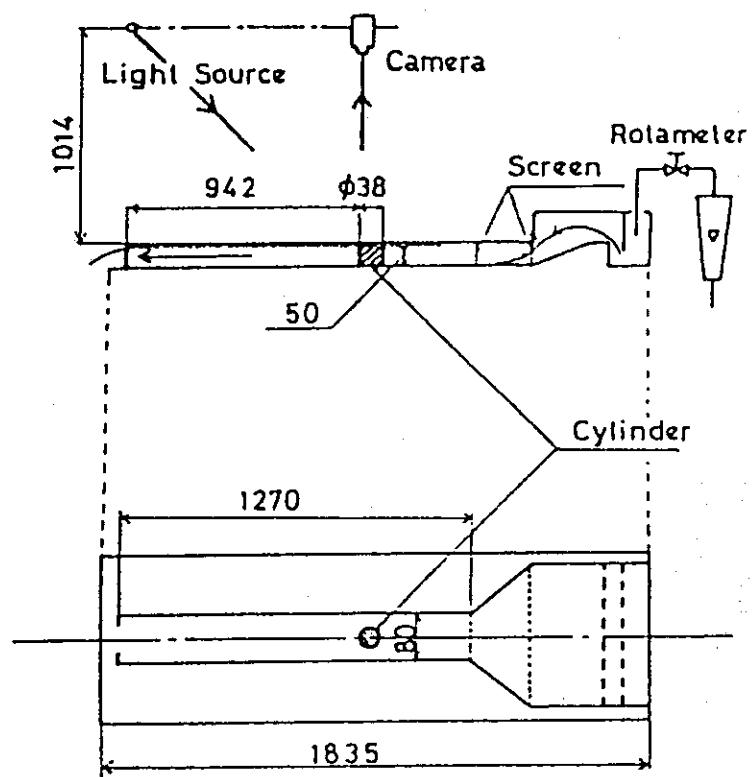


図13 スペックルグラムおよびベクトル線図<sup>[2]</sup>

図14 相関法の原理<sup>[2]</sup>図15 相関法による円柱後流渦の測定装置概略図<sup>[3]</sup>

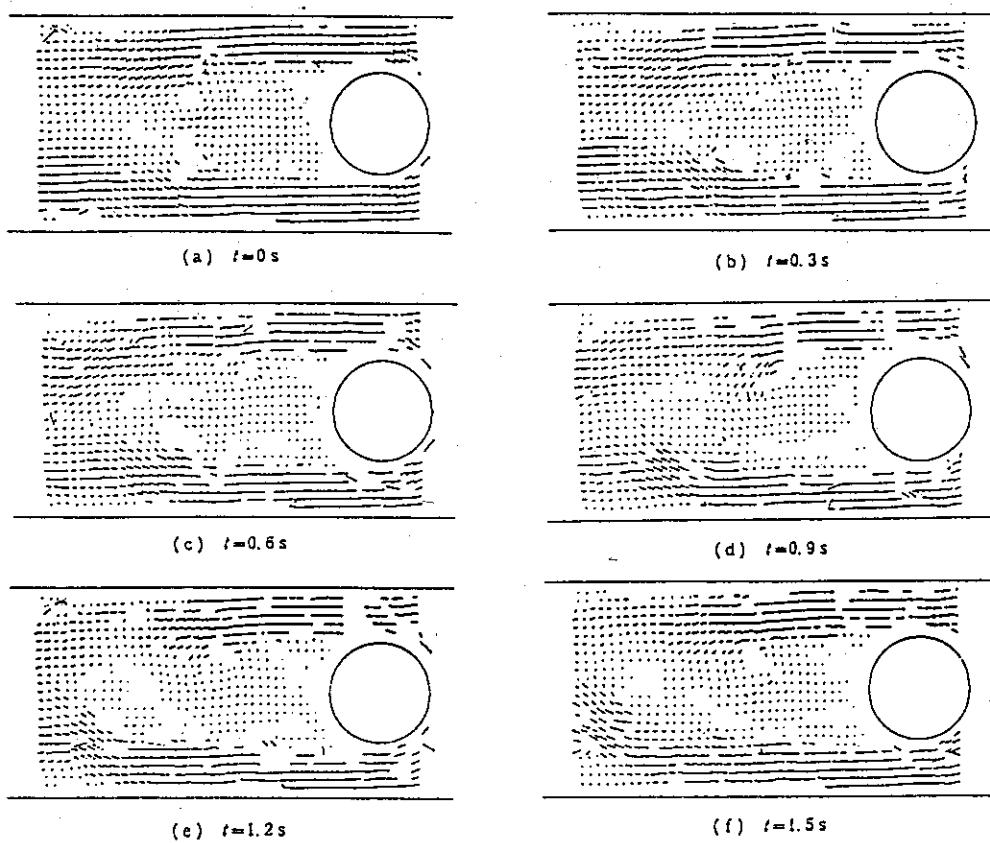


図16 相関法による速度ベクトル分布の時刻歴<sup>[3]</sup>

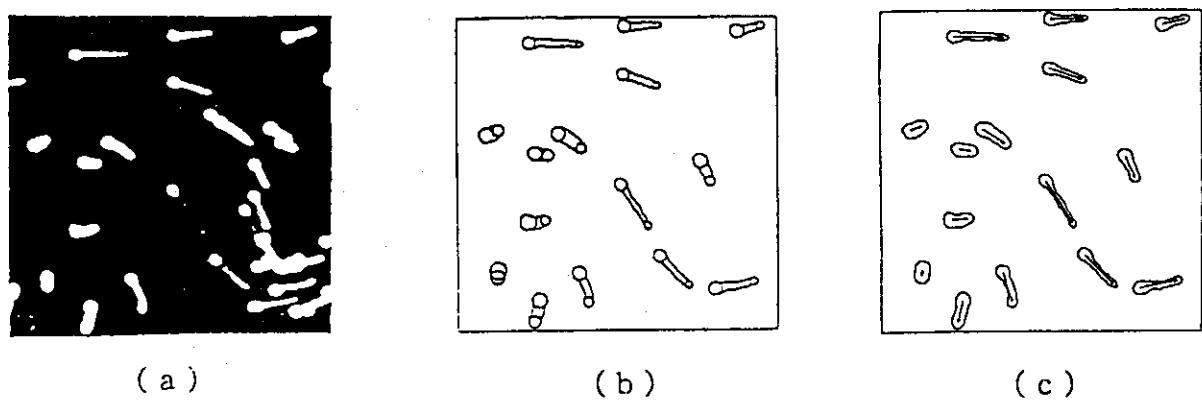


図17 流跡線解析法における濃度情報の付加による流れ方向の決定<sup>[2]</sup>

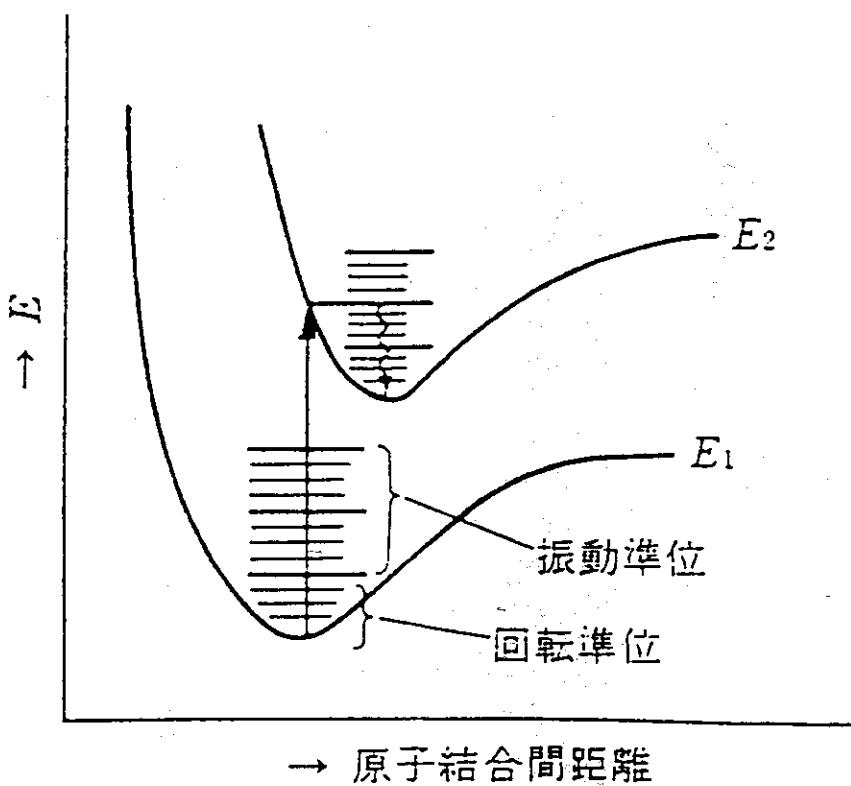


図18 分子のエネルギー準位<sup>[4]</sup>

E<sub>1</sub>:基底状態、E<sub>2</sub>:励起状態

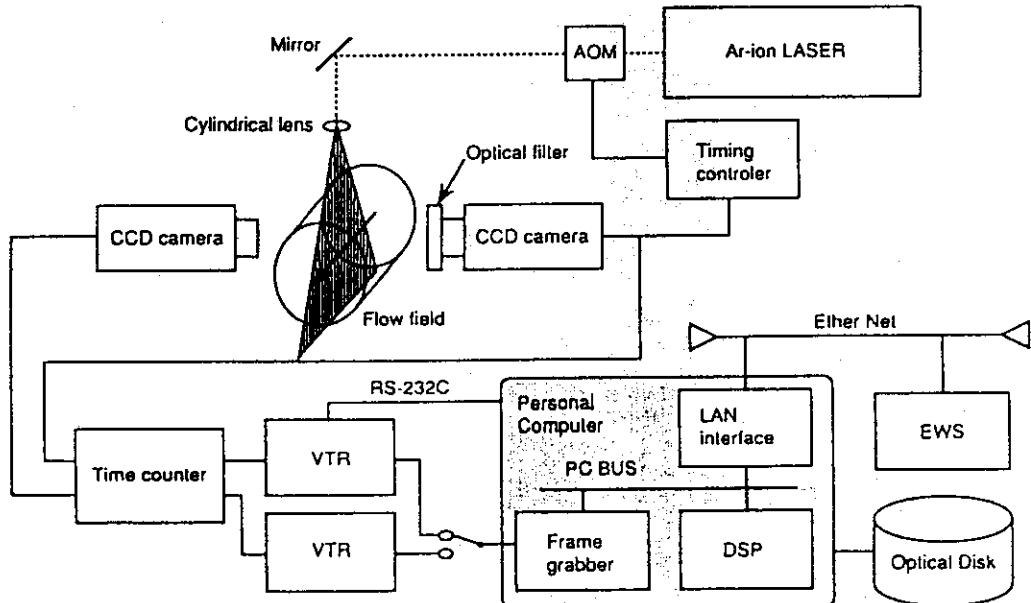


図19 レーザ誘起蛍光染料を用いた温度－速度同時計測システム<sup>[1]</sup>

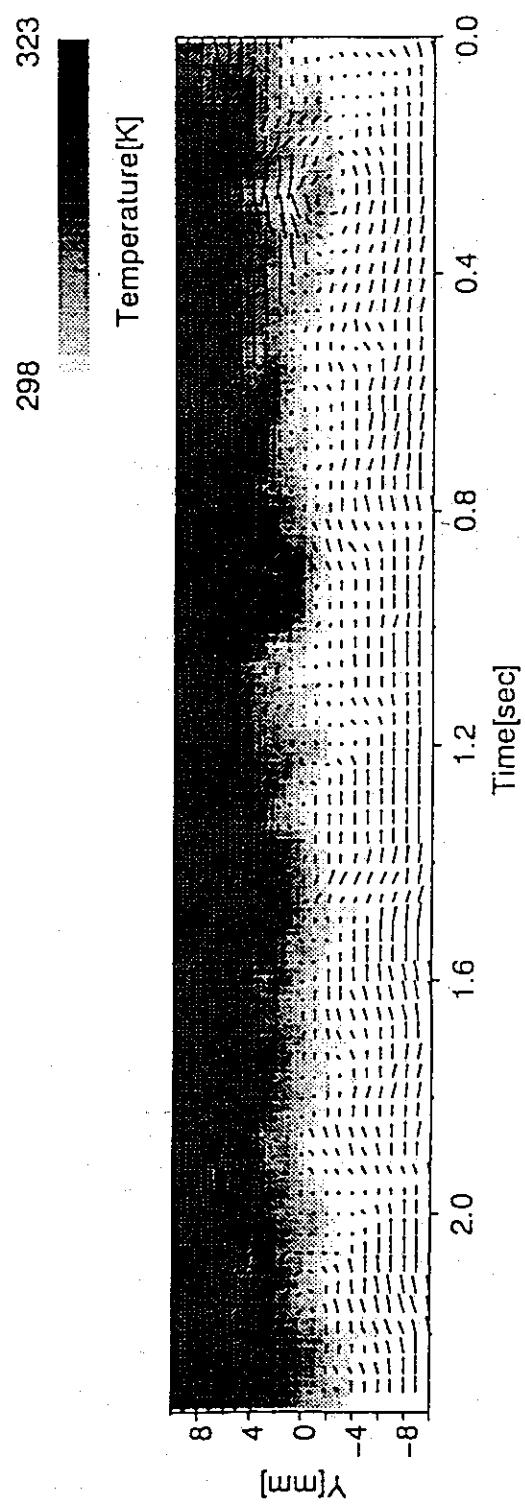
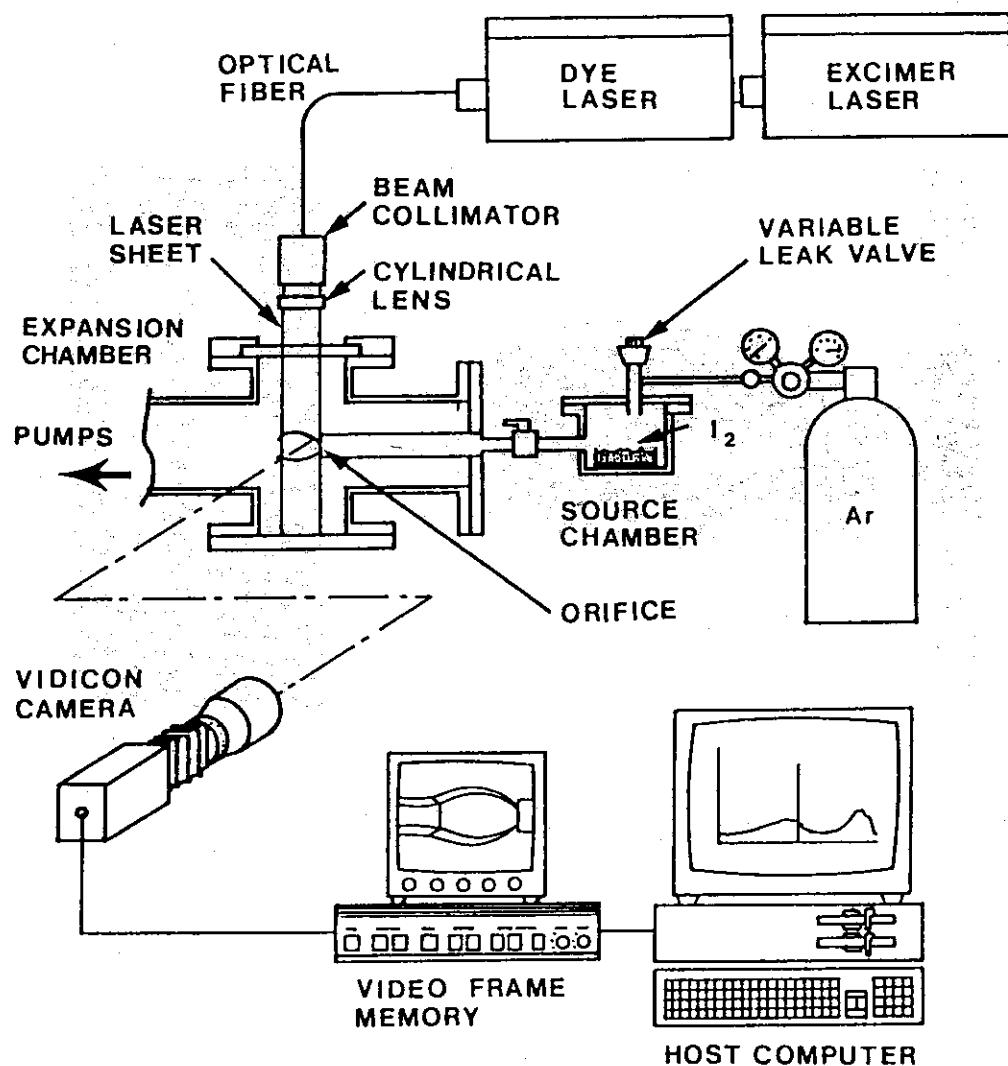


図20 溫度成層流乱流の温度－速度分布の時系列変化<sup>[1]</sup>

図21 LIFによる希薄気体流の可視化および計測実験装置<sup>[5]</sup>

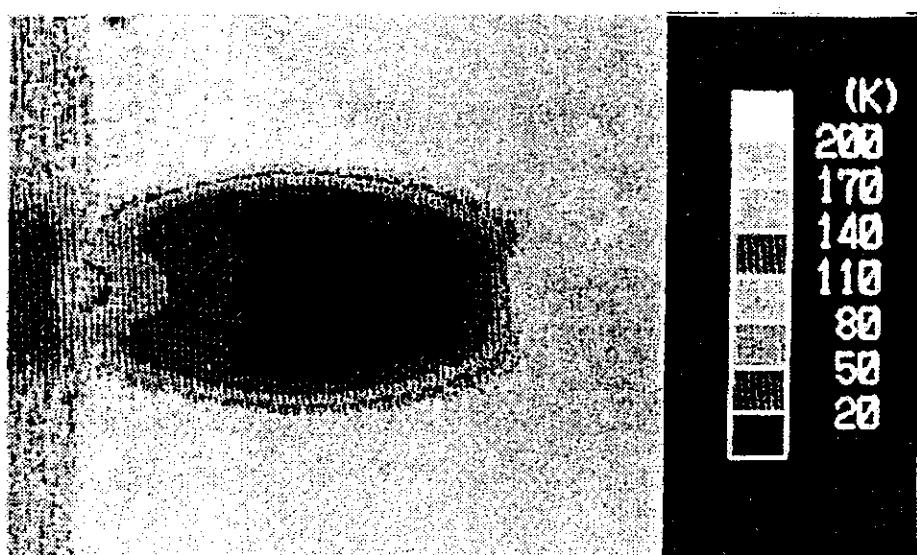
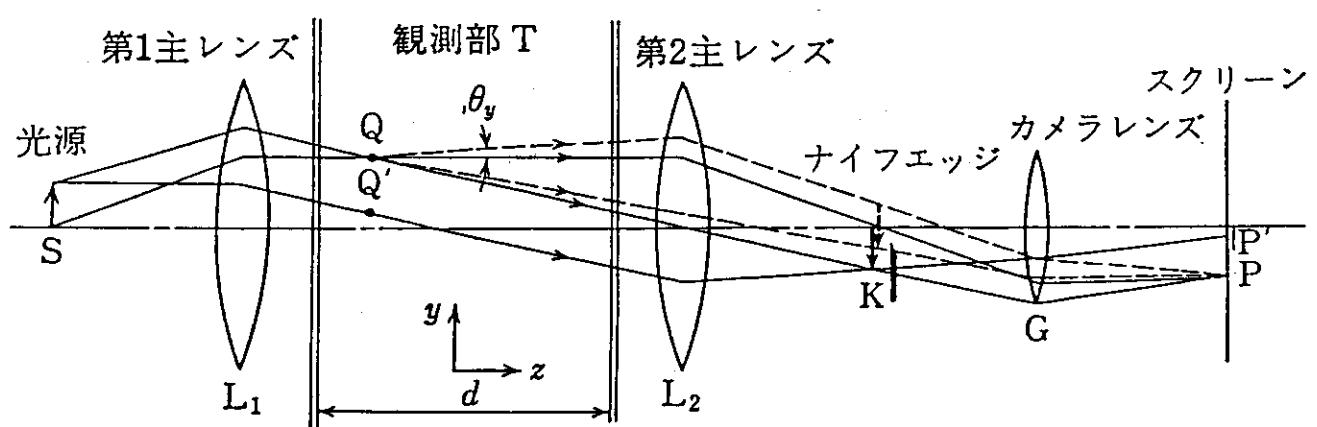
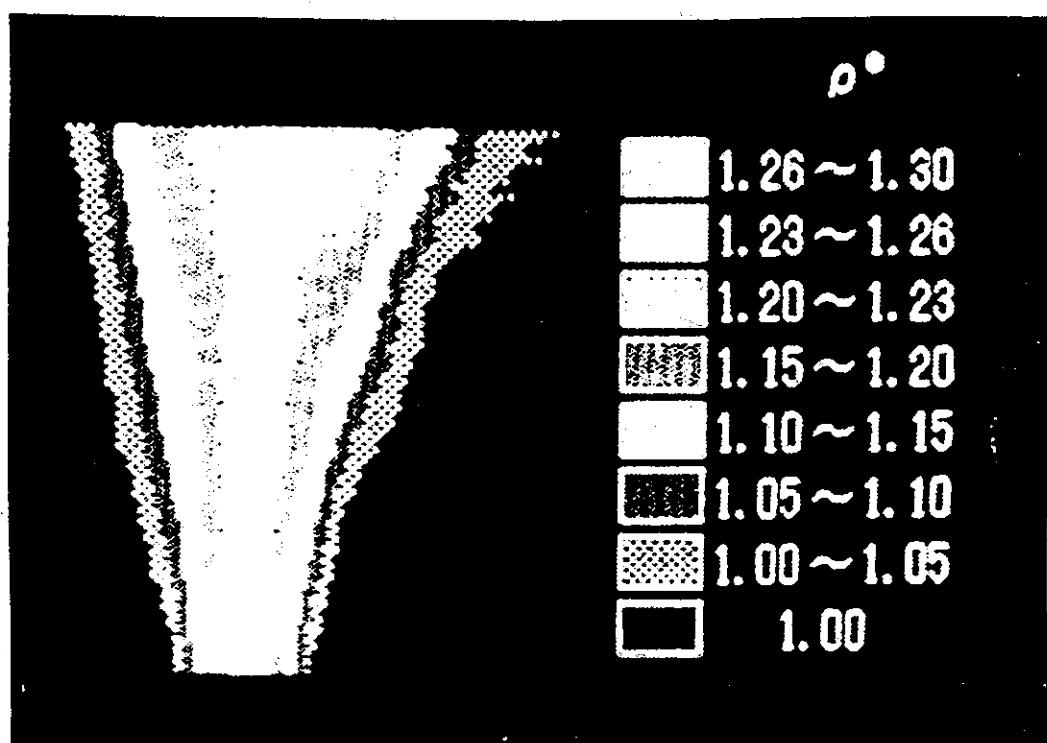


図22 温度場の疑似カラー表示<sup>[5]</sup>

図23 シュリーレン法の基本的構成<sup>[6]</sup>図24 シュリーレン法により得られたCO2ガスの密度分布<sup>[7]</sup>

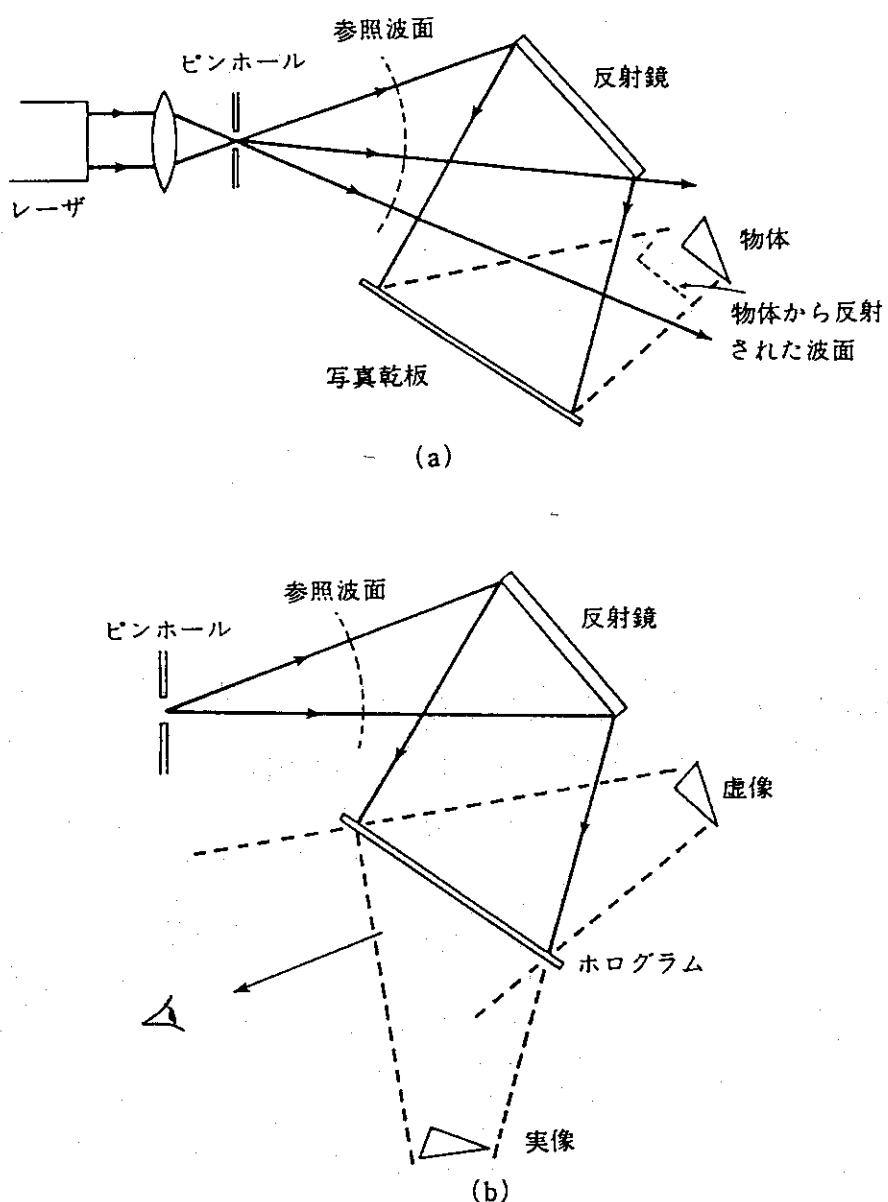


図25 ホログラフィの原理<sup>[8]</sup>

(a) ホログラムの記録 (b) ホログラムの再生

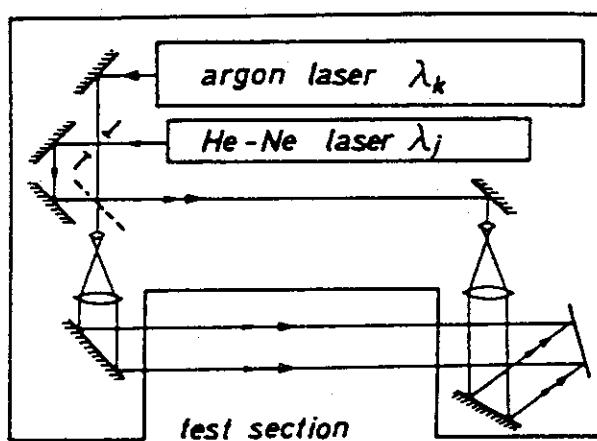


図26 二波長レーザホログラフィ干渉計の概略図<sup>[5]</sup>  
( $\lambda_k = 632.8\text{nm}$ 、 $\lambda_j = 457.9\text{nm}$ )

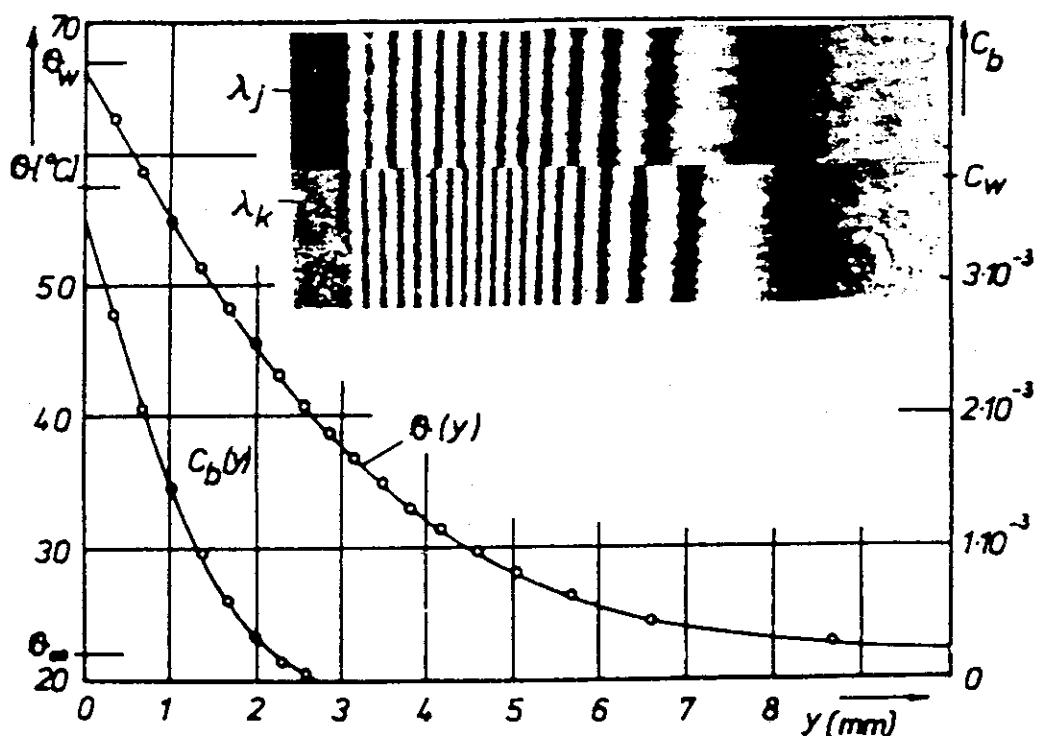


図27 ナフタリン被覆された平板まわりの層流境界層内の温度θと濃度C<sup>[5]</sup>

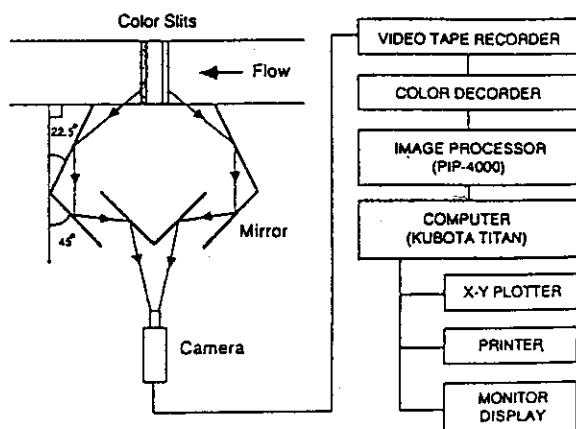


Fig. 1 Measurement system of three-dimensional flow velocity vectors

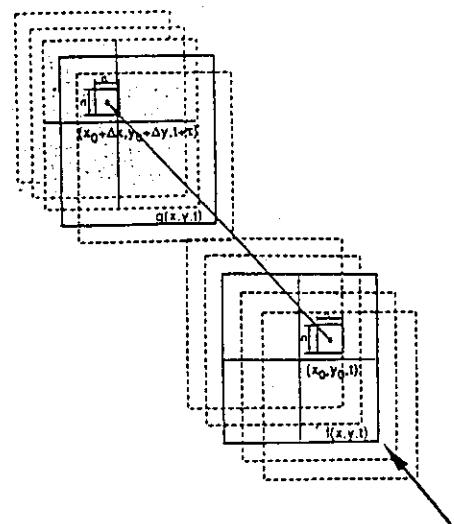


Fig. 2 Principle of spatio-temporal correlation method

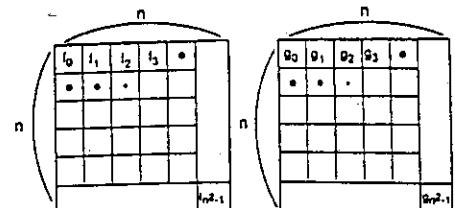


Fig. 3  $n \times n$  pixel matrices for correlation

図28 3次元時空間相関法の計測原理及び計測システム<sup>[9]</sup>

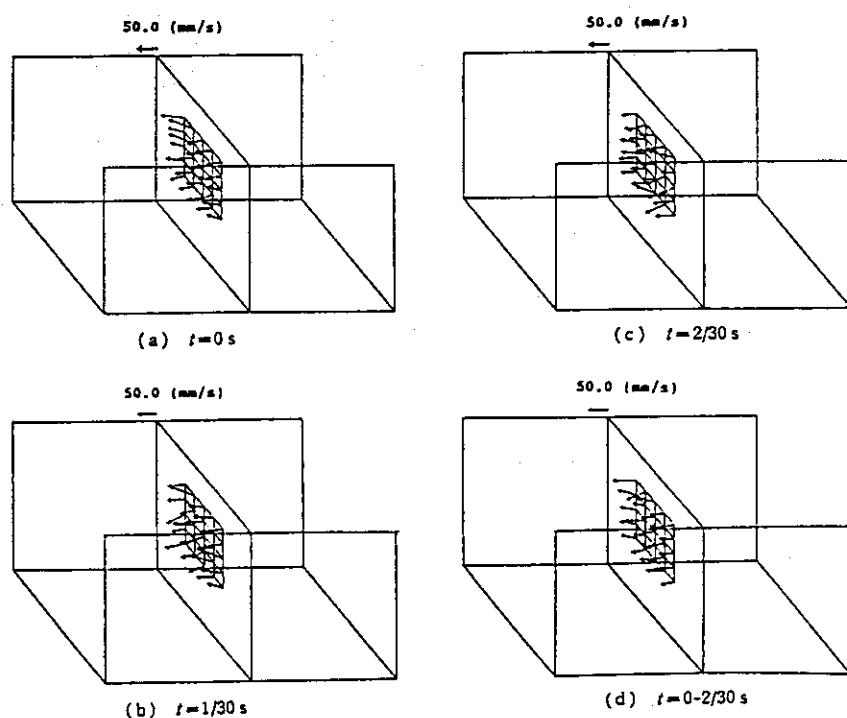


図29 3次元流速ベクトルの結果<sup>[9]</sup>

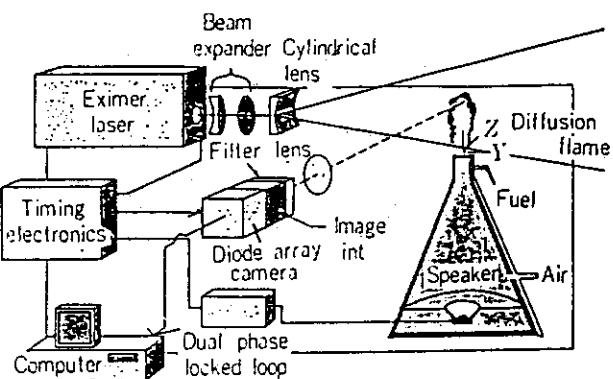


図30 平面レーザ誘起蛍光法の計測システム例<sup>[10]</sup>

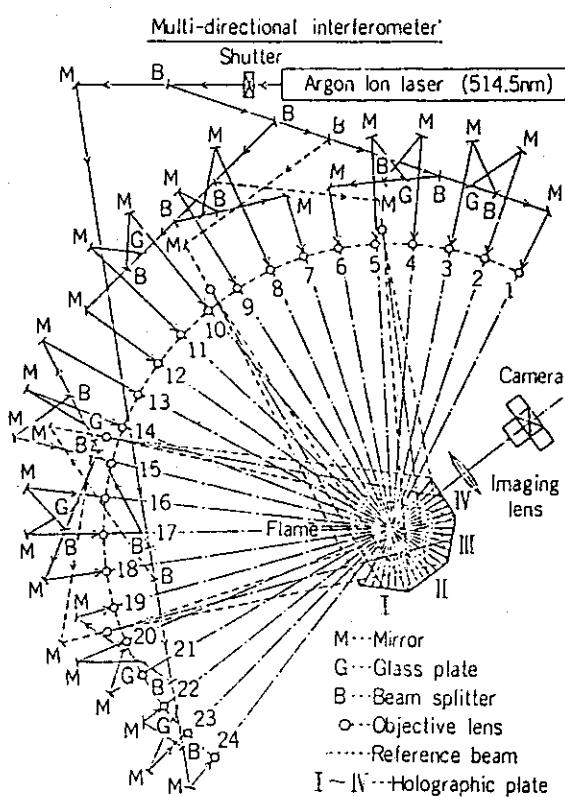


図31 多方向レーザホログラフィ干渉法<sup>[11]</sup>

可視化計測システム

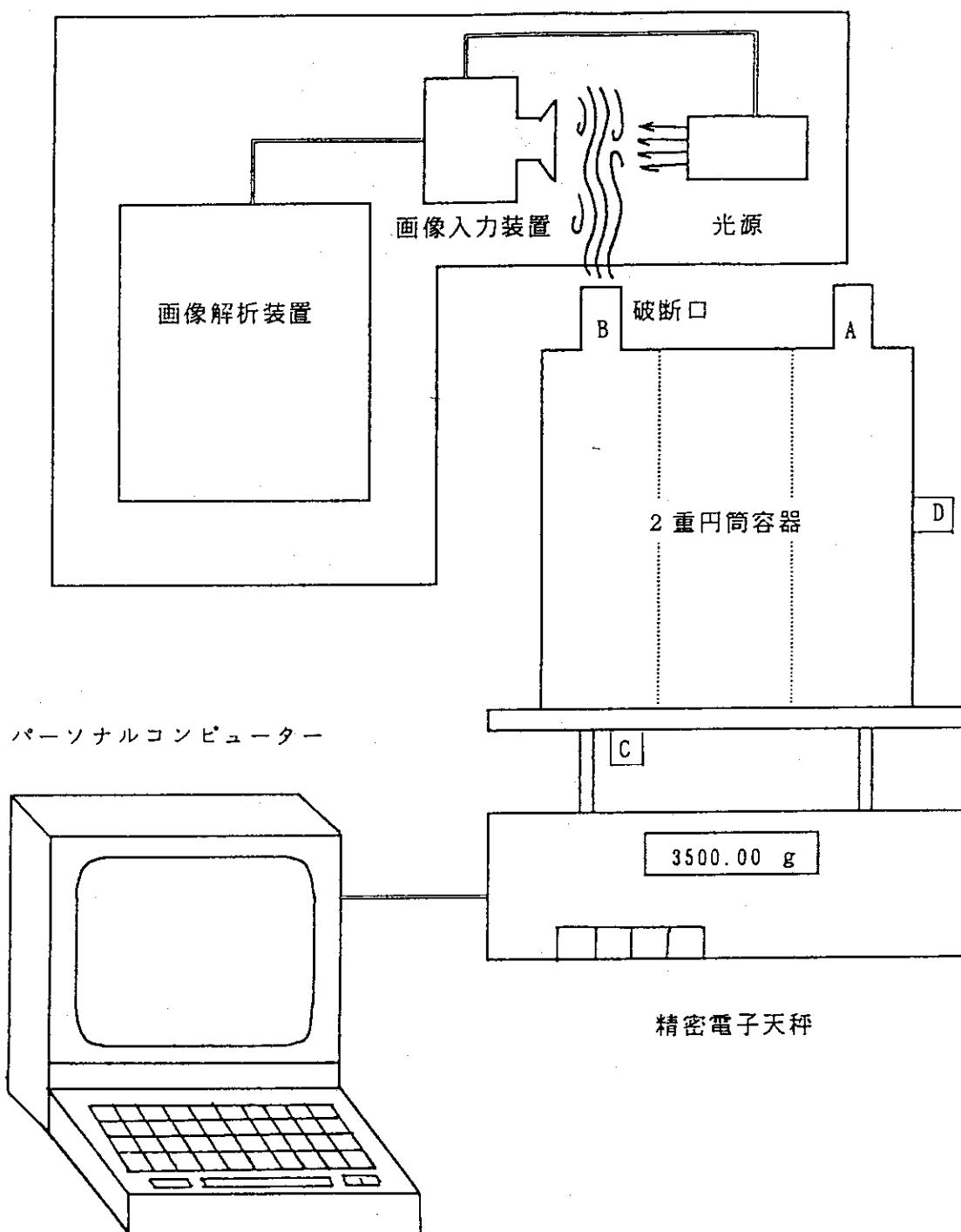


図32 実験装置及び可視化計測系

[試験ケース]

4 ケース

a - 2 , a - 3 , b - 2 , c - 2

2 次元断面の測定（垂直断面及び横断面）

同一条件で 3 回測定を行う。

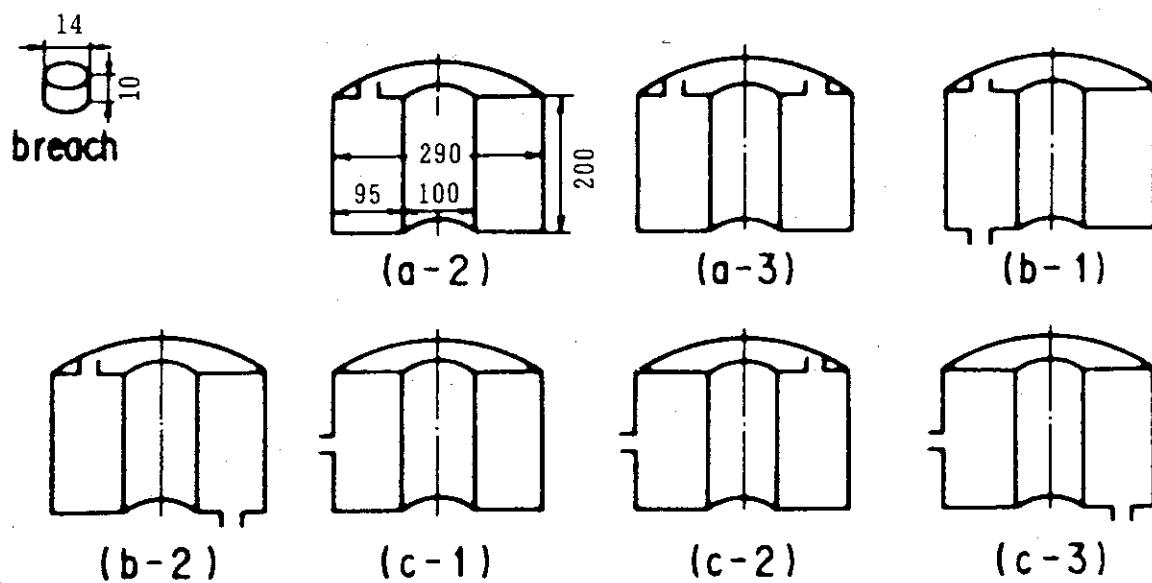


図33 試験ケース毎の破断口位置

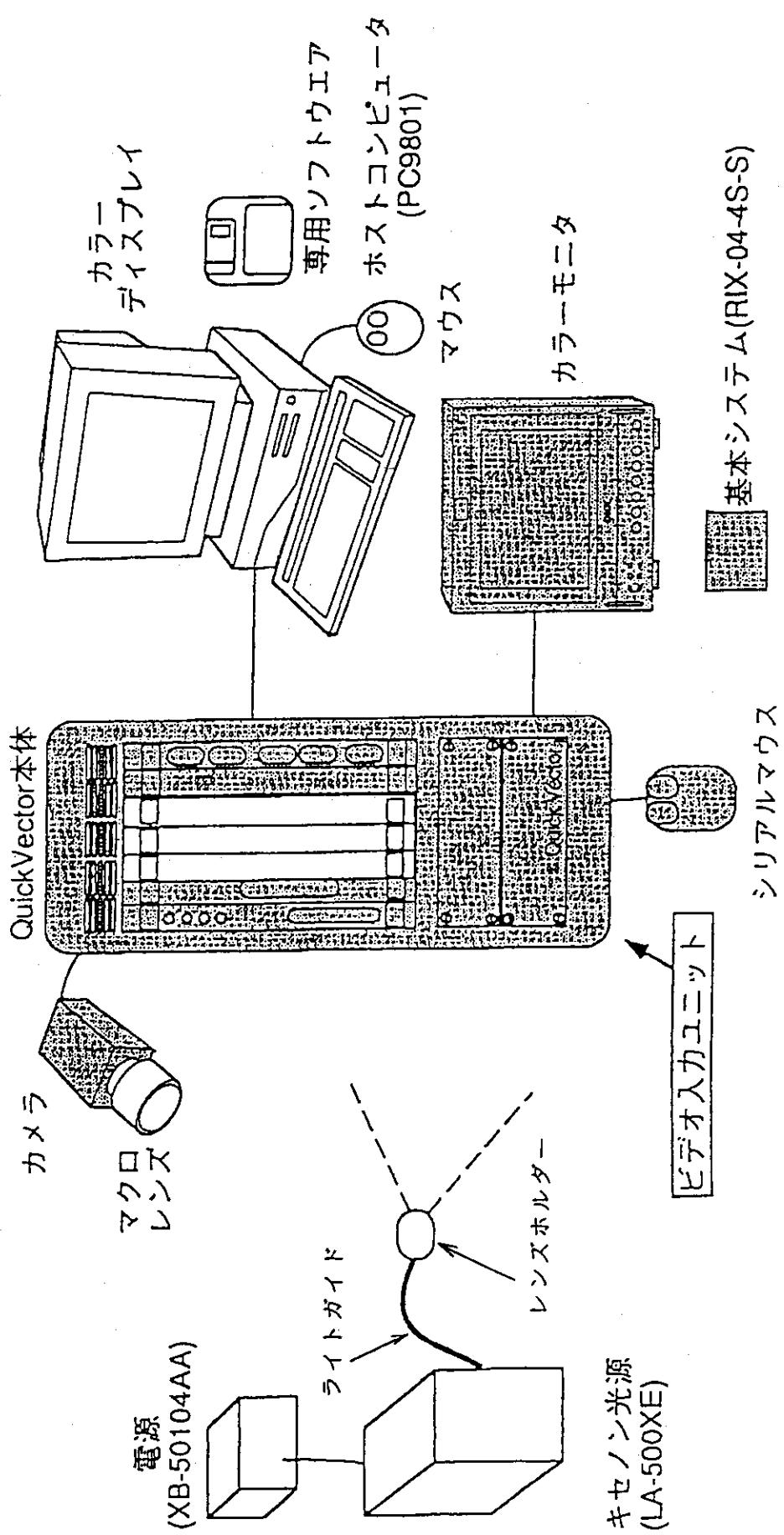


図34 計測システムの構成（相関法）

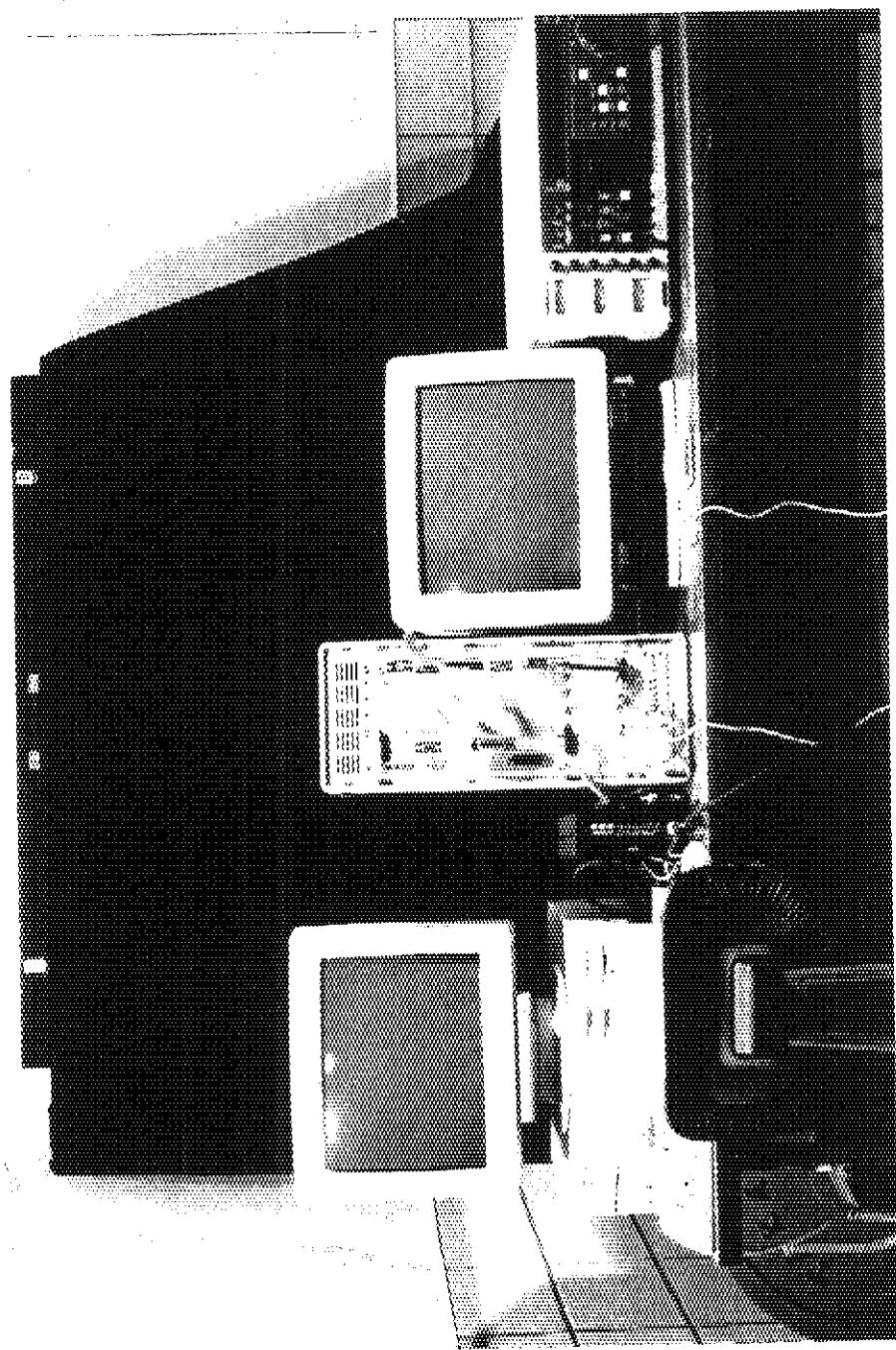


図35 計測システムの写真（相関法）

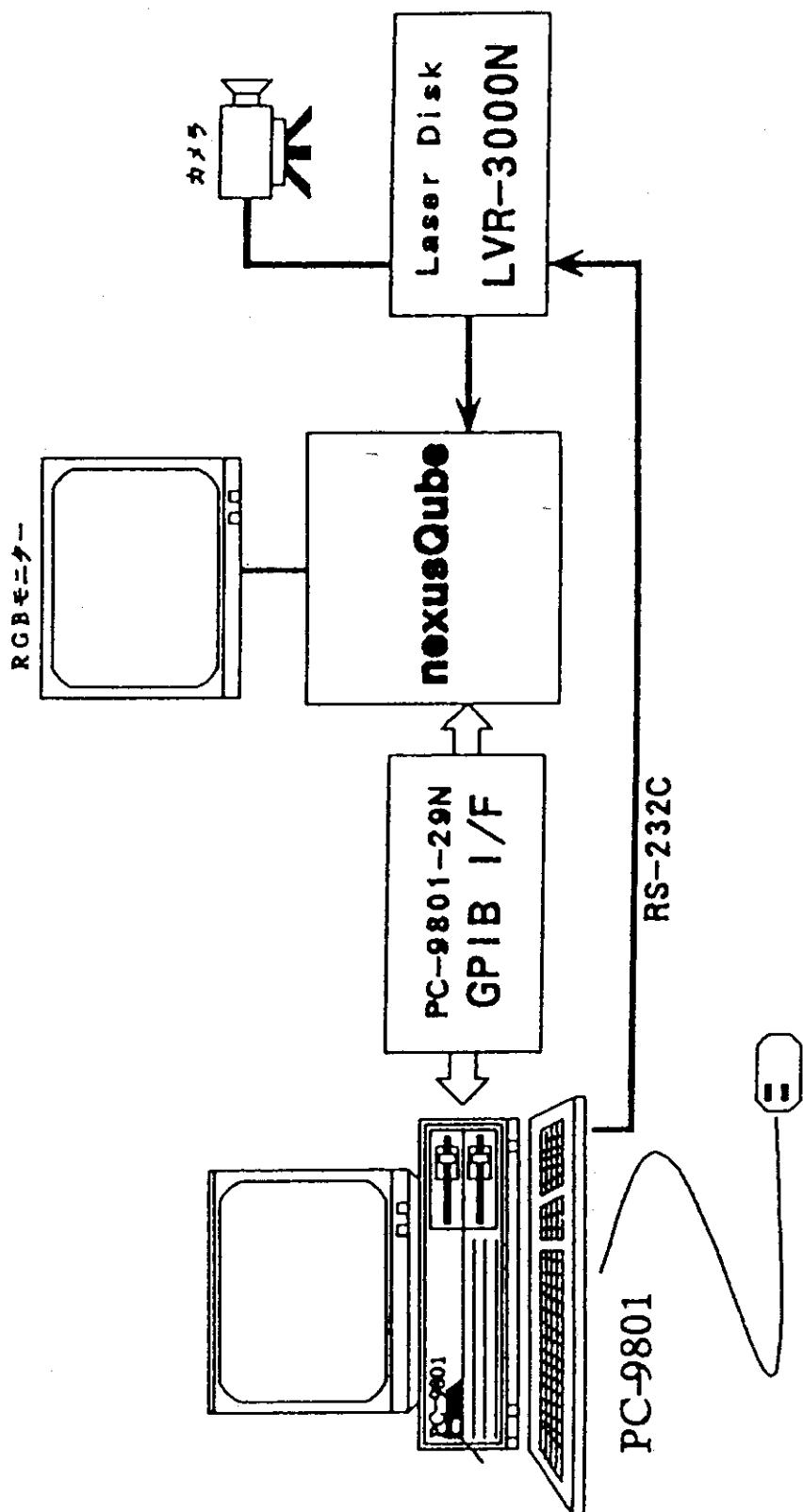


図36 計測システムの構成（粒子追跡法）

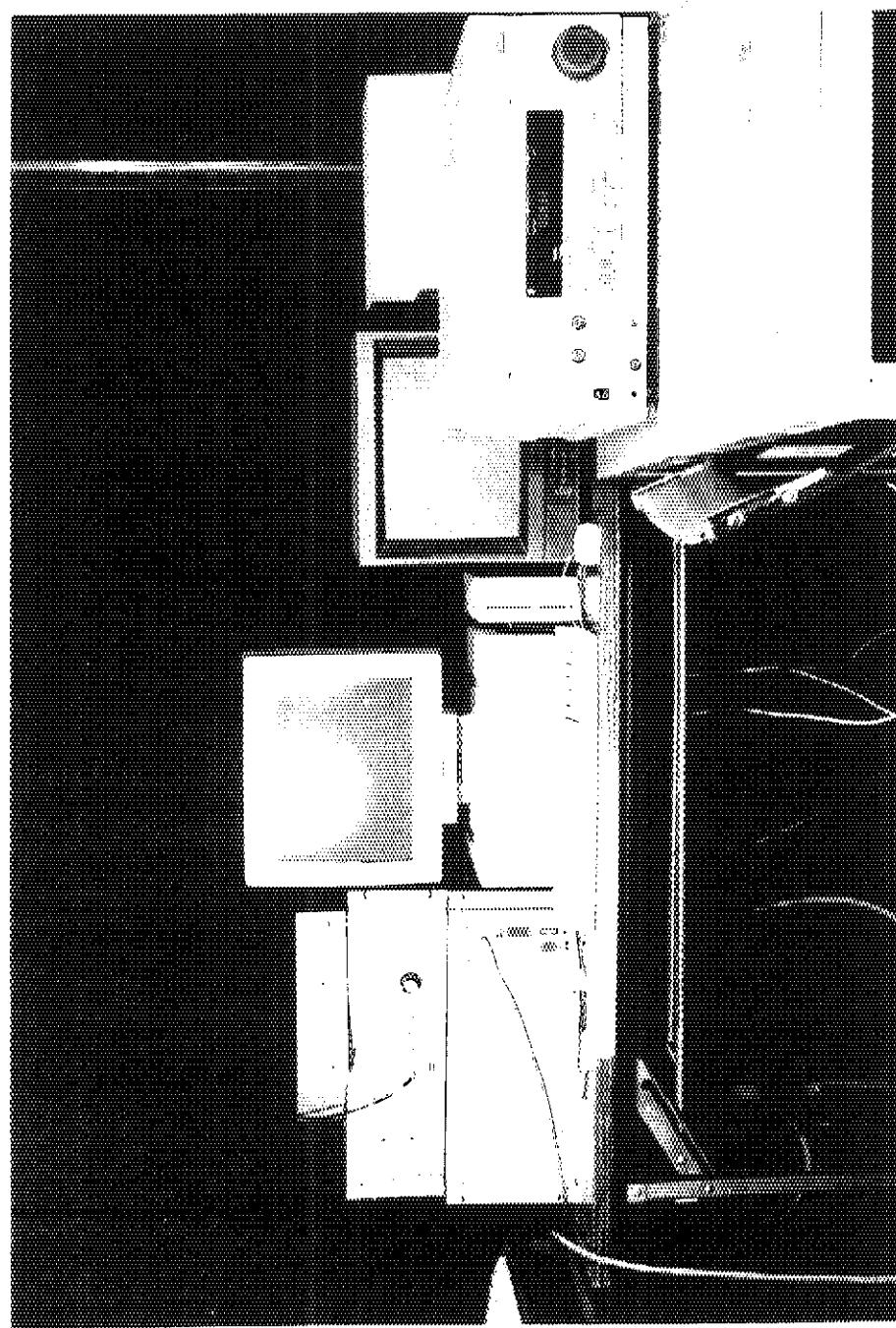


図37 計測システムの写真（粒子追跡法）

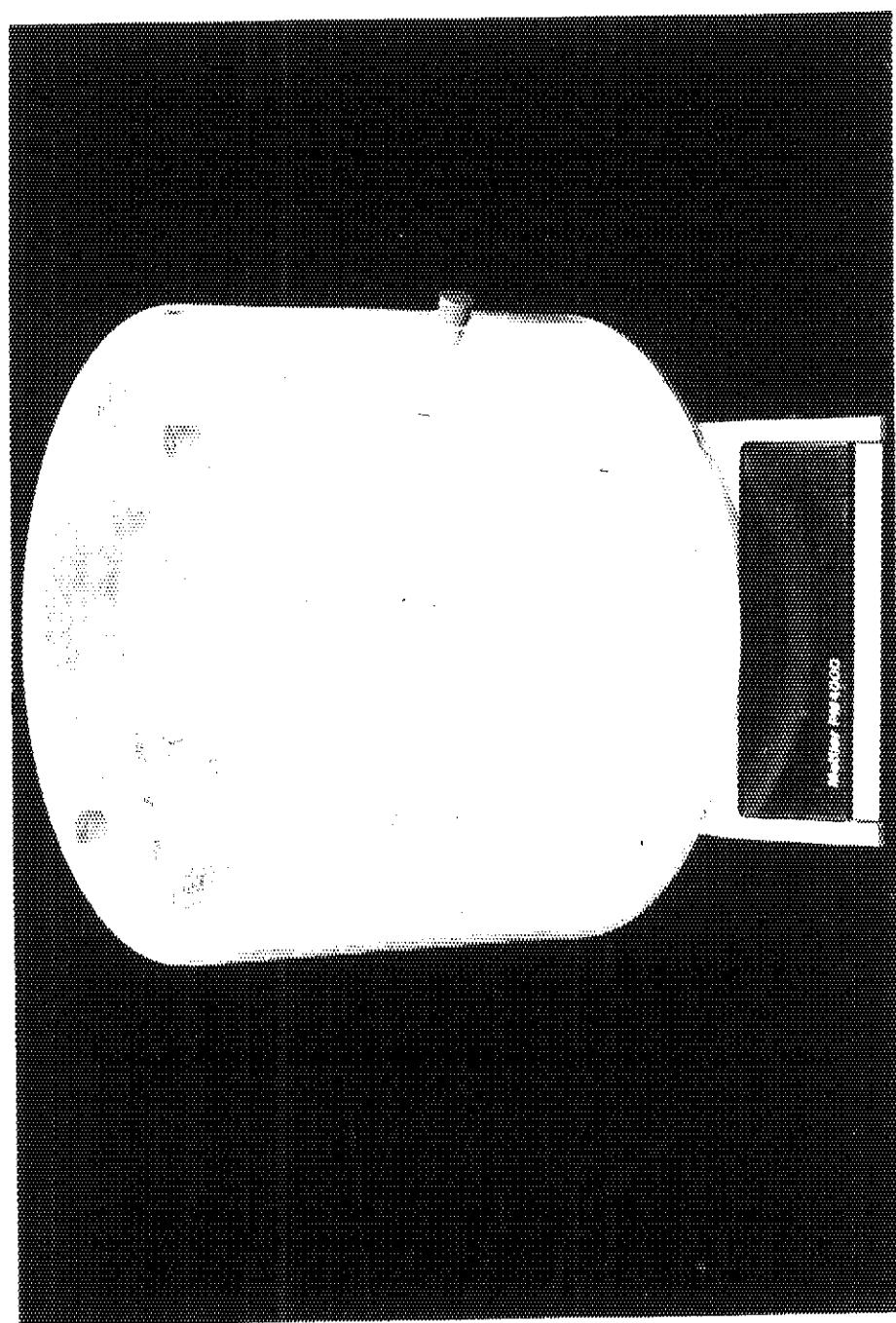


図38 精密電子天秤による計測実験

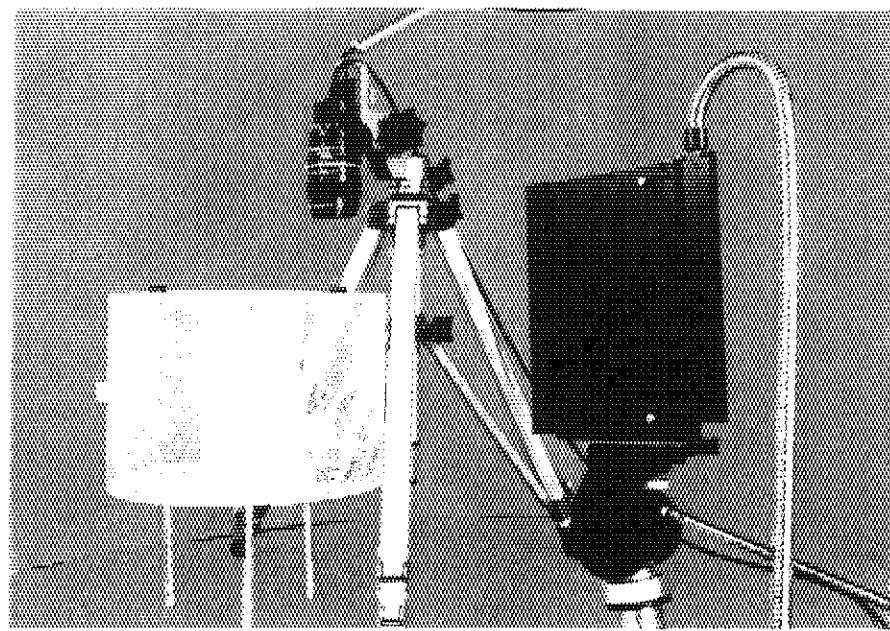


図39-a 可視化計測実験（キセノン光源使用）

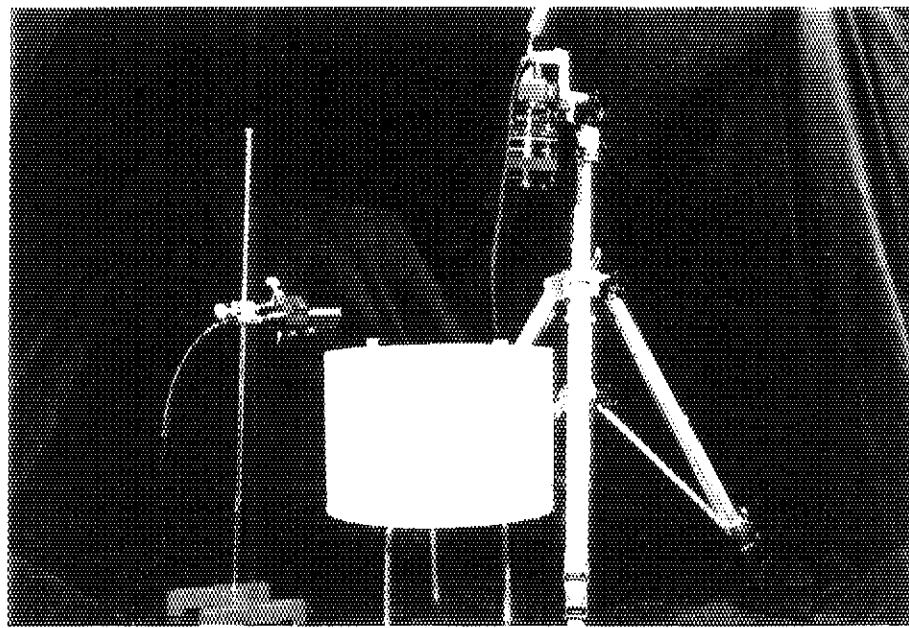


図39-b 可視化計測実験（ $\text{Ar}^+$ レーザ光源使用）

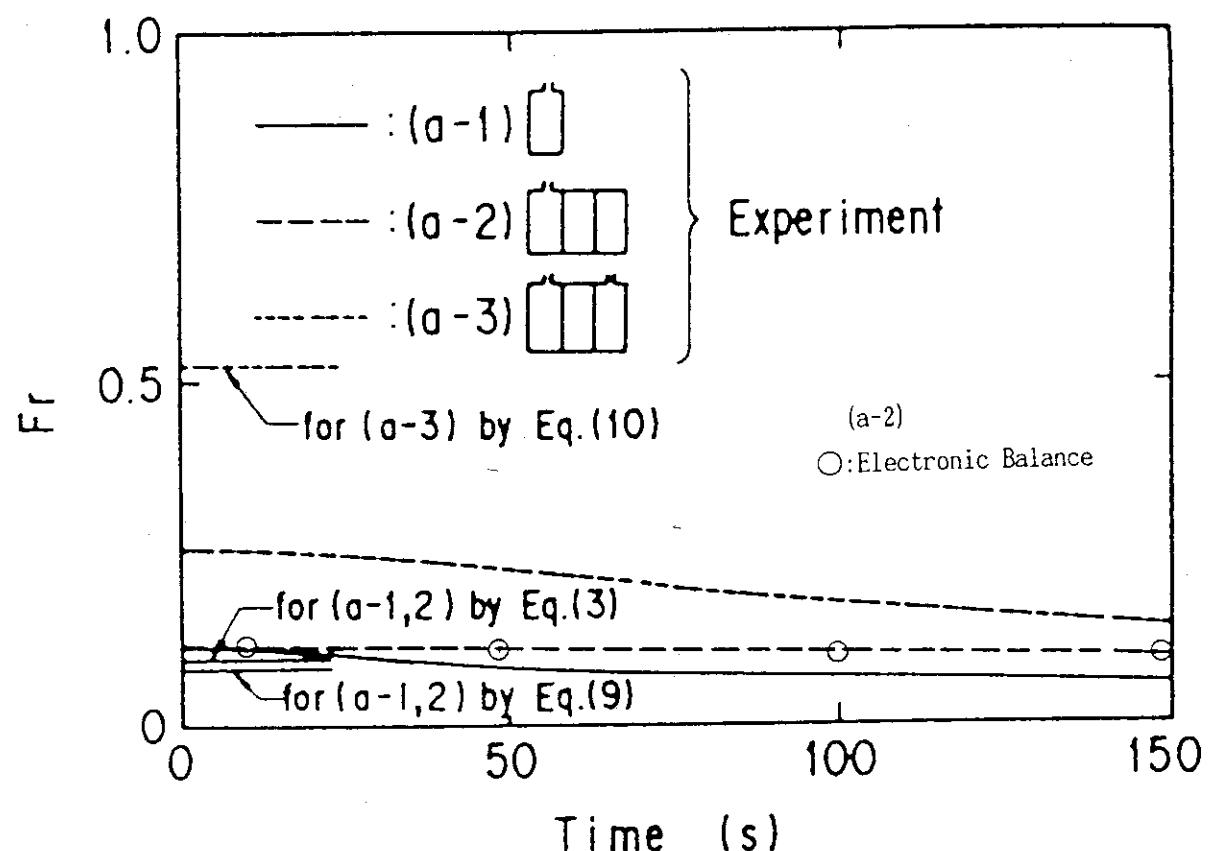


図40 フルード数の時刻歴 (aのケース)

(○: 本実験、それ以外は小川ら)

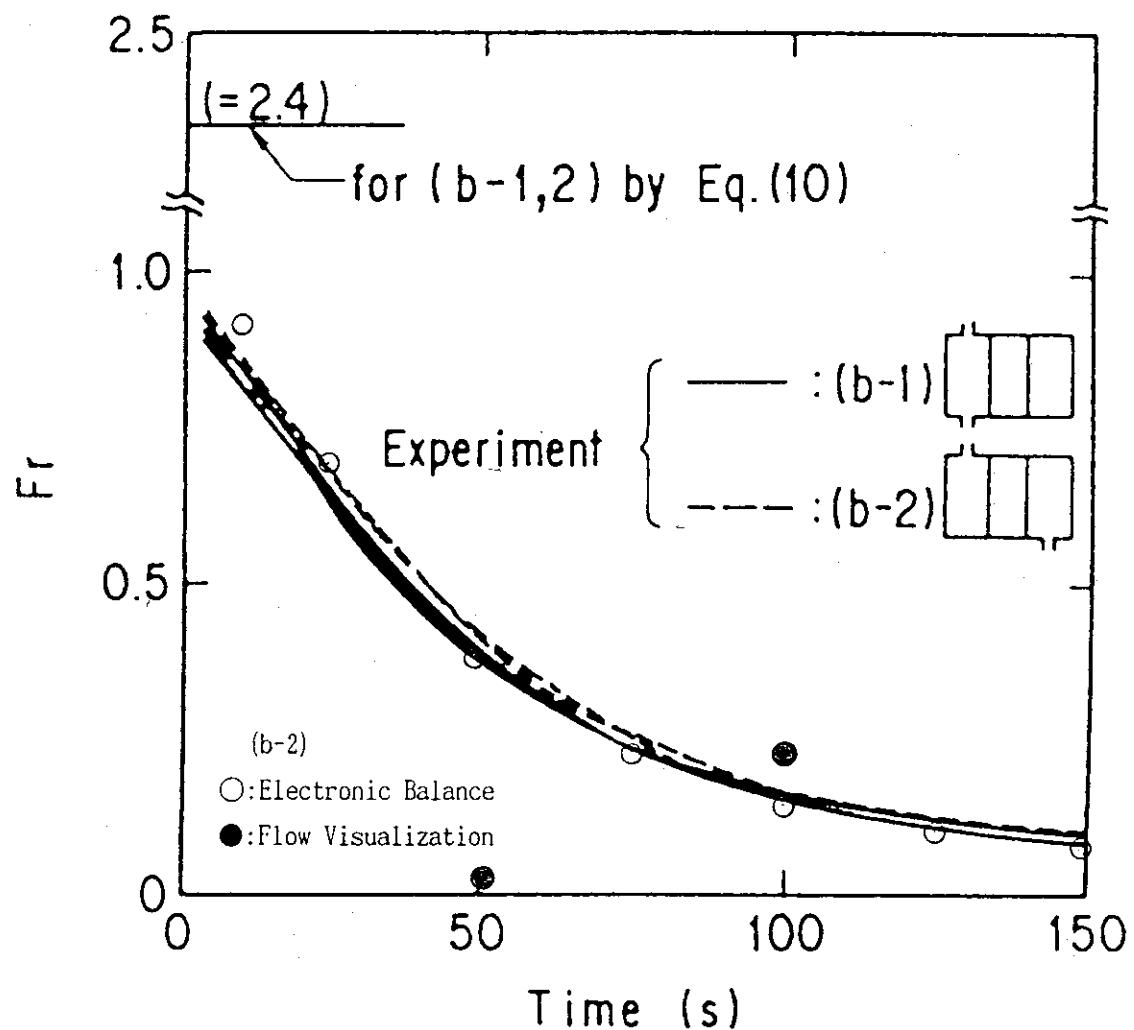


図41 フルード数の時刻歴 (bのケース)

(○、●: 本実験、それ以外は小川ら)

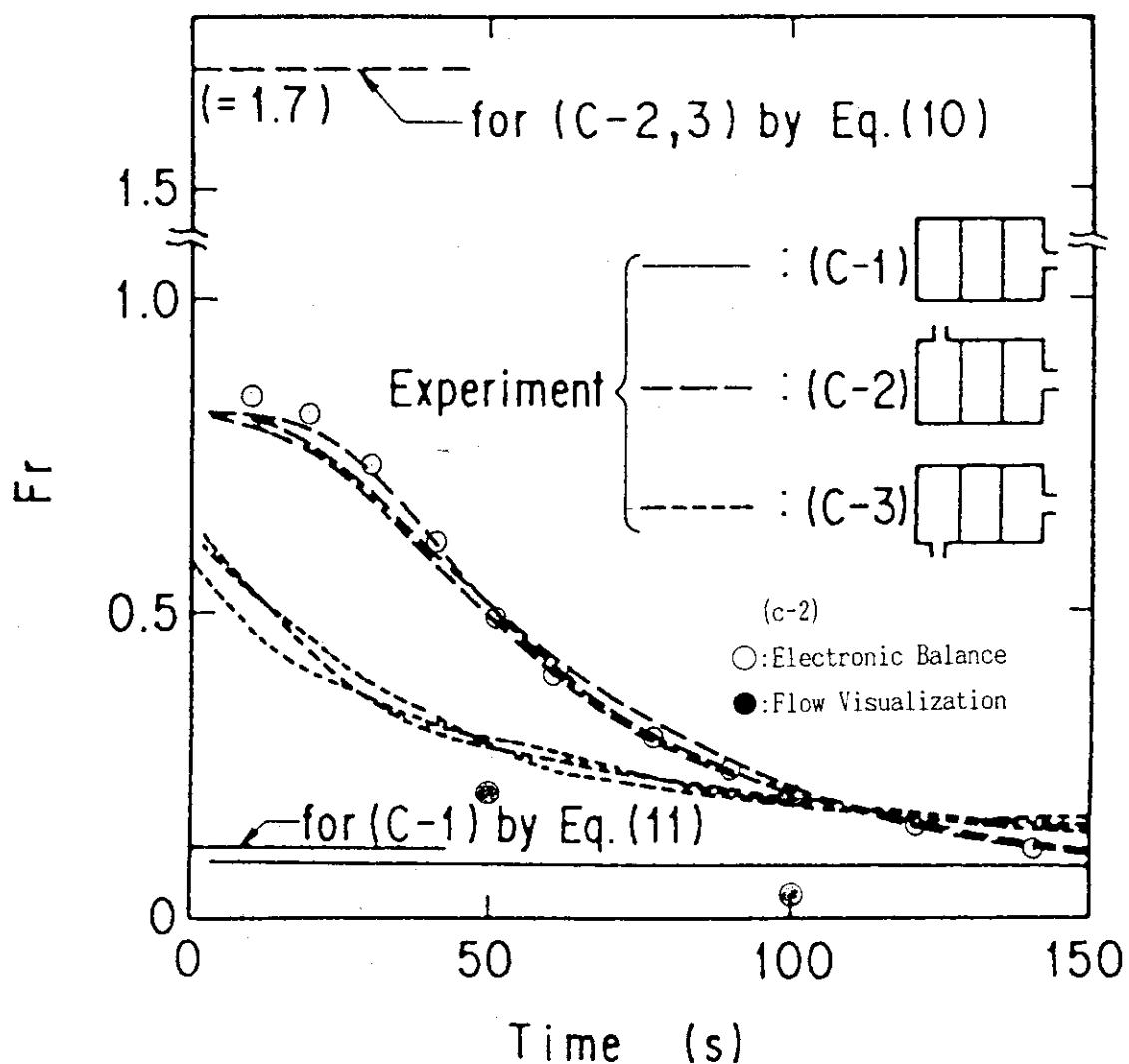
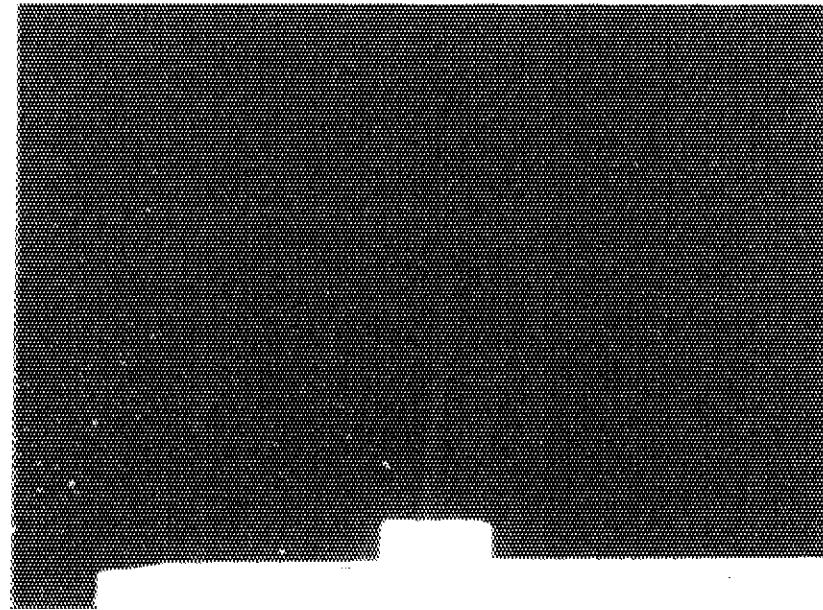
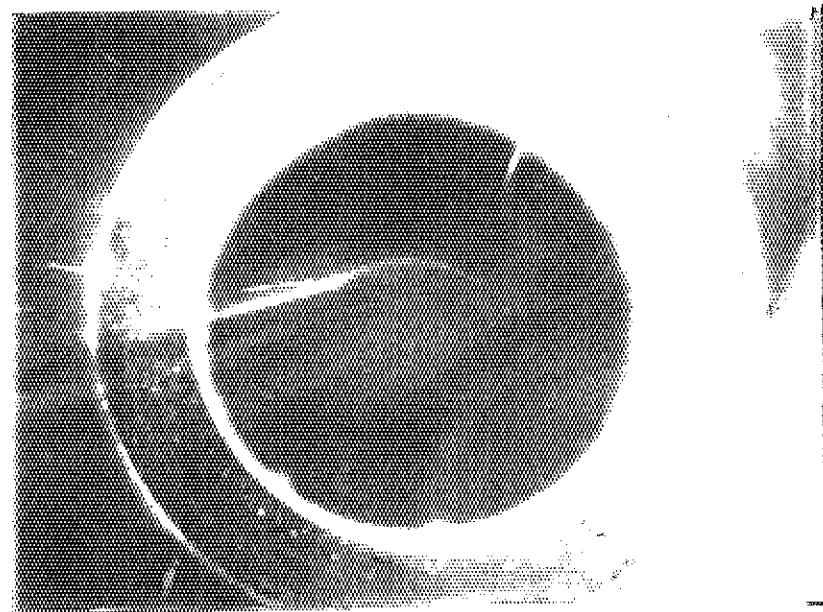


図42 フルード数の時刻歴 (cのケース)

(○、●：本実験、それ以外は小川ら)

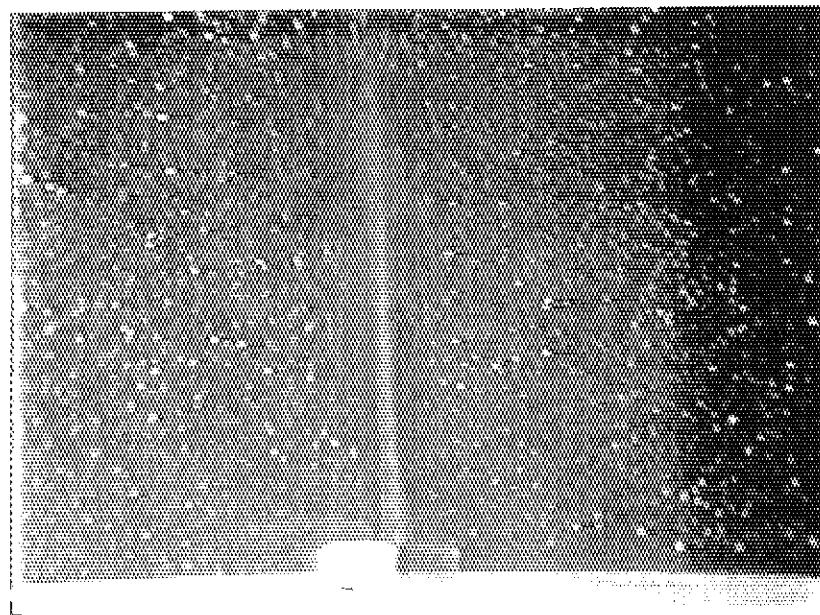


(a) 垂直断面

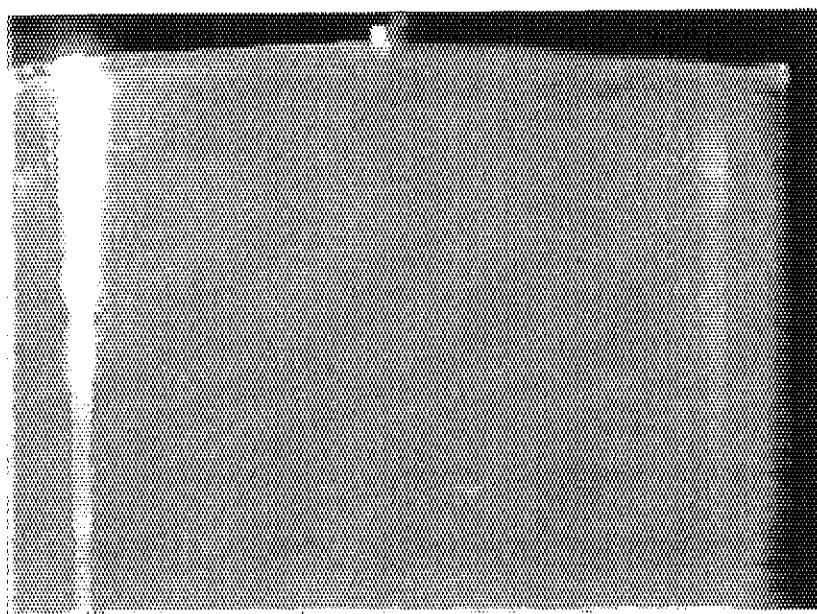


(b) 横断面（内：ステアリン酸亜鉛、外：煙）

図43 ケース(a-2) の流動状況の可視化（約35秒後）

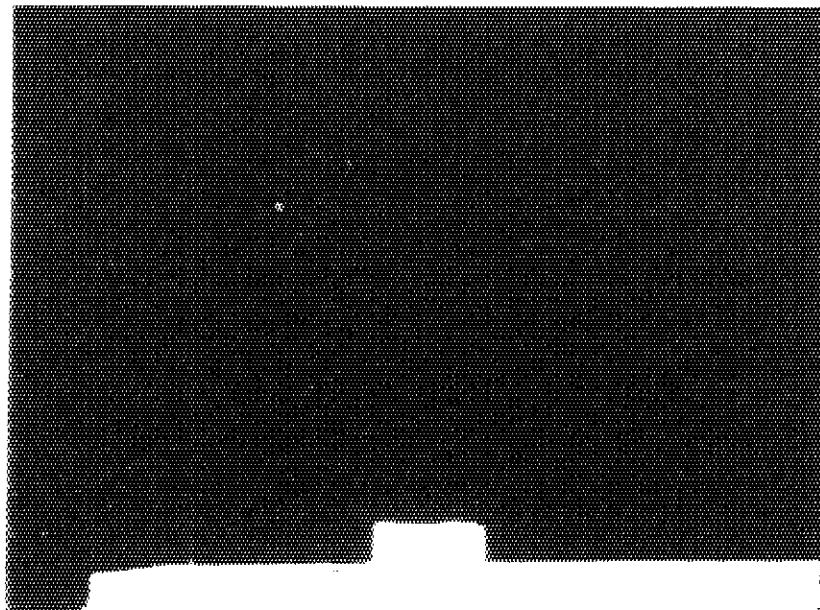


(a) 垂直断面（約240 秒後）



(b) 垂直断面（蓋開放直後）

図44 ケース(a-2) の流動状況の可視化(F1.6、カラーCCD)  
(トレーサ : ステアリン酸亜鉛)



(a) 垂直断面（流入側付近）



(b) 横断面（内：ステアリン酸亜鉛、外：煙）

図45 ケース(a-3) の流動状況の可視化（約5秒後）

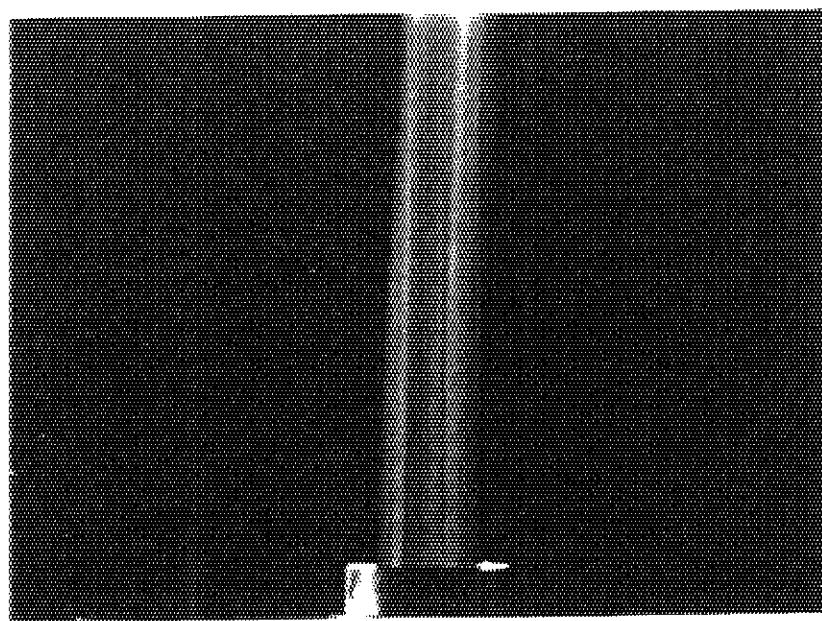
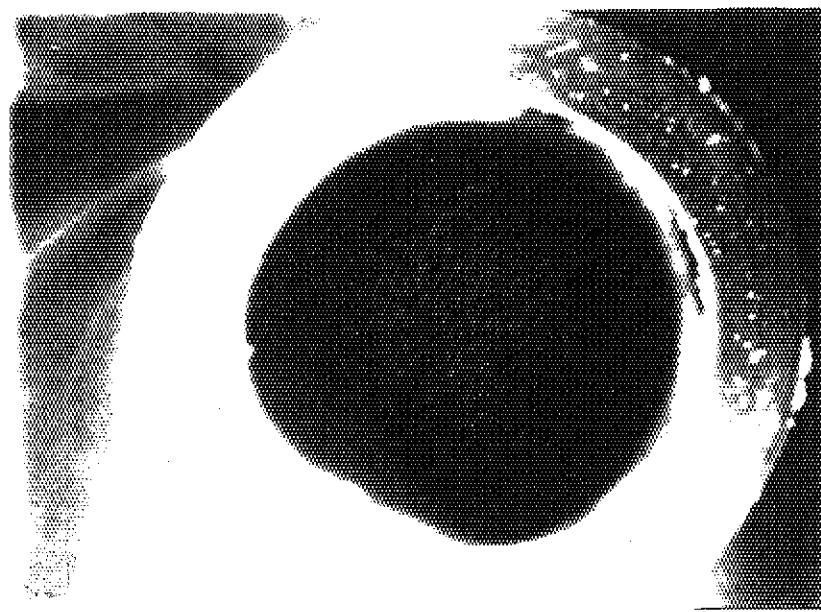


図46 ケース(b-2) の流動状況の可視化 (約80秒後、垂直断面)



(a) 垂直断面



(b) 横断面（内：ステアリン酸亜鉛、外：煙）

図47 ケース(c-2)の流動状況の可視化（約190秒後）

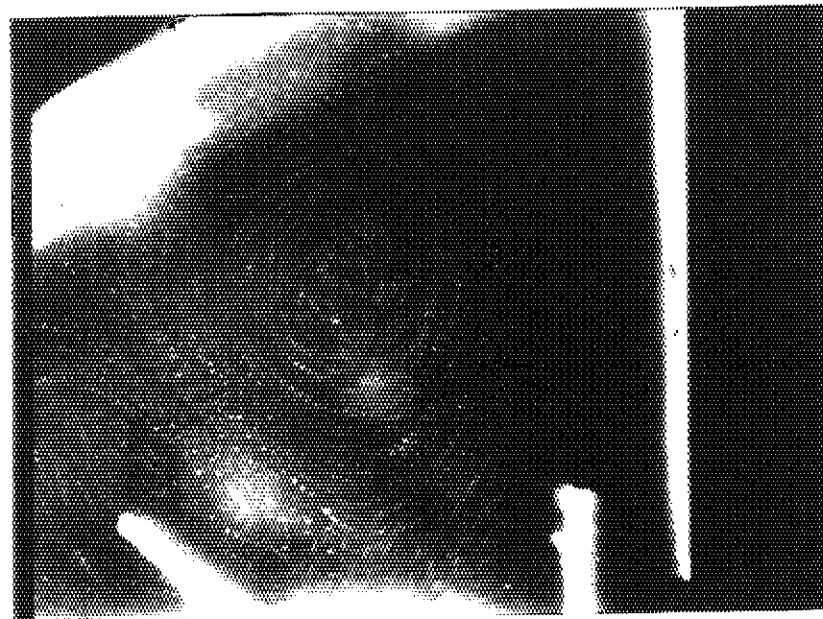


図48-a 自然対流の可視化（トレーサ：ステアリン酸亜鉛）

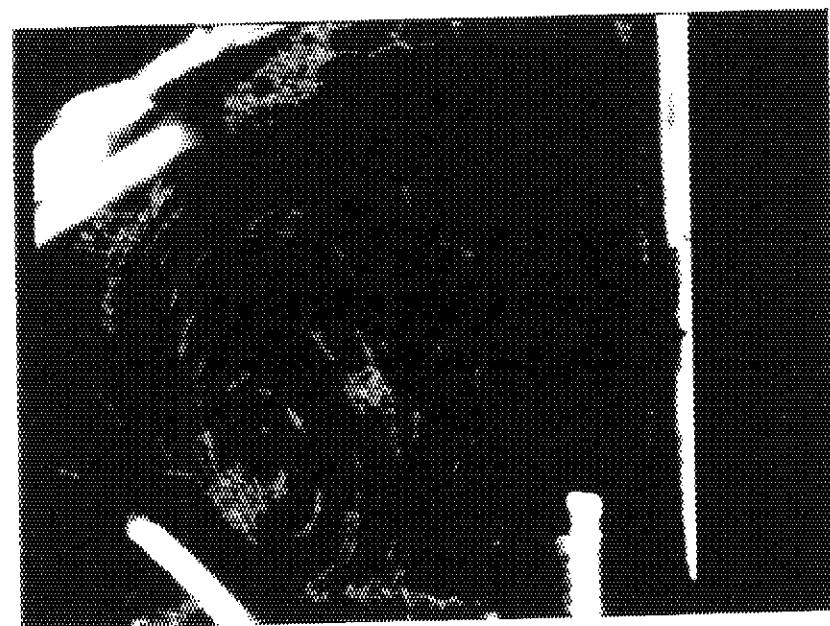


図48-b PTV法による速度ベクトル

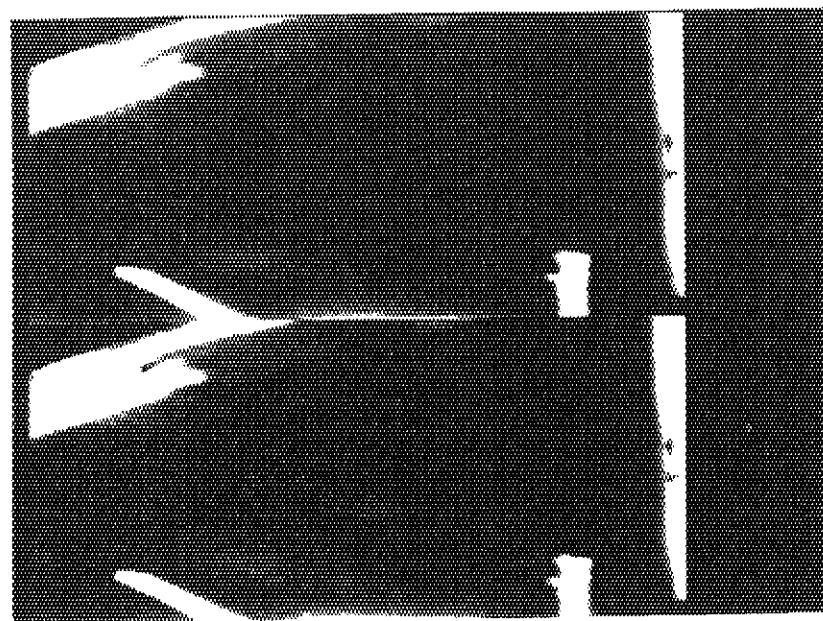


図49-a 自然対流の可視化（フィールド蓄積モード）

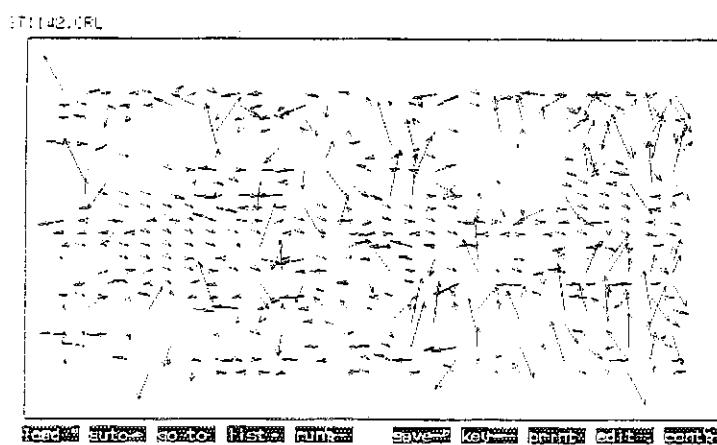


図49-b 相関法による速度ベクトル

## 付録 1 相関法画像処理プログラム

### プログラム説明

## 1. 概 要

横浜国立大学西野教授による相関法画像処理プログラムを改造し、処理範囲、分解能等を入力指定できるようにした。また、菱田らが提案した1画素おきに相関を計算する方法<sup>(1)</sup>を利用できるようにし、計算時間の短縮を実現した。

## 2. 相関法による画像処理の方法<sup>(2), (3)</sup>

2時刻の画像データにおいて、 $t = t_0$ のトレーサー濃度、あるいはその輝度信号を $f$ 、 $t = t_0 + \tau$ における当該信号を $g$ とし、両者の相互相関係数をCRとする。相関法では、このCRの大小により2時刻の画像データの対応付けを以下の手順で行う。

(図1参照)。

- ①  $t=t_0$ の画像フレーム内に $NWX \times NWY$ 画素からなる速度ベクトルの起点マトリクスを設け、マトリクス内の平均輝度 $\bar{f}_{i,j}$ を求める。即ち、

$$\bar{f}_{i,j} = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} \bar{f}_{i,j}}{n}, n = NWX \times NWY \quad (2,1)$$

本マトリクスの中心がベクトルの起点となる。

- ②  $t=t_0 + \tau$ の画像フレーム内に $NWX \times NWY$ 画素からなる速度ベクトルの終点サーチマトリクスを設け、マトリクス内の平均輝度 $\bar{g}_{i,k}$ を求める。即ち、

$$\bar{g}_{i,k} = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} g_{i,k}}{n}, n = NWX \times NWY \quad (2,2)$$

ここで、添字 $h$ は終点サーチマトリクスの原点最寄座標 $JX, JY$ に対応するインデックスである。 $k=1$ に対する $JX, JY$ は、図1中に一点鎖線で示した終点サーチ範囲の原点最寄座標に当たる。

- ③ 起点マトリクス $j$ と終点サーチマトリクス $k$ の相互相関係数 $CR_{j,k}$ を求める。

$$CR_{j,k} = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} (f_{i,j} - \bar{f}_{i,j}) \cdot (g_{i,k} - \bar{g}_{i,k})}{\sqrt{\sum_{i=0}^{n-1} (f_{i,j} - \bar{f}_{i,j})^2 \cdot \sum_{i=0}^{n-1} (g_{i,k} - \bar{g}_{i,k})^2}} \quad (2,3)$$

- ④  $k=k+1$ の相互相関係数 $CR_{j,k+1}$ を求めるために、終点サーチマトリクスを1画素移動し、②～③の計算を行う(②へ戻る)。終点サーチ範囲(図1中の一点鎖線)全域について相互相関係数を求めたら次のステップ⑤へ進む。

⑤ 起点マトリクス  $j$  に対する最大の相互通関係数  $CR_{j, k} |_{max}$ 、および 2 番目、3 番目に大きな相互通関係数  $CR_{j, k} |_2$ 、 $CR_{j, k} |_3$  を求める。

$CR_{j, k} |_{max}$  に対応する終点サーチマトリクス  $k_{max}$  の中心がベクトルの終点となる。

⑥ 起点マトリクスを NTX 画素あるいは NTY 画素に移動し、 $j=j+1$  に対する処理として、①～⑤を行なう。画像の処理範囲（図 1 中の二点鎖線）全域について相互通関係数を求めたら次のステップ⑦へ進む。

⑦ ベクトル作画用のデータとして全起点マトリクスに対する起点座標、およびベクトルの X, Y 方向成分を相互通関係数が大きい順に出力する。

⑧ 終了

本プログラムでは、座標は画素単位とした。また、菱田らの計算方法では、図 1 下側の図に示した斜線の画素に対して処理①～③を実施する。これにより処理①～③に要する計算時間は 1/4 程度に低減できる。

### 3. プログラムの概要

#### （1）サブルーチン構成

メインプログラムおよびサブプログラムの役割を示す。

##### ① MAIN

- ・ DIMENSION サイズの設定
- ・ 入力データファイル INPUT.DAT の OPEN
- ・ 入力画像データファイル名の読み込み
- ・ 計算の制御

##### ② BLOCK DATA DEFLT

- ・ デフォルト値の設定

##### ③ SUBROUTINE INPUT

- ・ 入力データの読み込み
- ・ NRX, NRY(表 1 参照)の算出

##### ④ SUBROUTINE PARAM

- ・ デフォルト入出力ファイル名の設定

⑤ SUBROUTINE IMAGE

- ・画像データの読み込み

⑥ SUBROUTINE MAINC

- ・相関係数を計算し、速度ベクトルを求める。
- ・出力リストに計算結果を印字する。

⑦ SUBROUTINE OUTPUT

- ・計算結果を出力ファイルに印字する。

(2) プログラムのツリー構造

図2にプログラムのツリー構造を示す。

4. 入力データ

入力データはNAMELIST文で読み込まれ、デフォルト値が設定されている。以下に読み込まれる順にNAMELIST文を示す。

SUBROUTINE INPUT

```
NAMELIST/MATSET/NWX,NWY,NST,NNX,npX,NNY,npY,NTX,NTY  
NAMELIST/RYOIKI/IXB,IXE,IYB,IYE  
NAMELIST/BYRITU/SX,SY,OX,OY,DT
```

MAIN

```
NAMELIST/FILES/FILE1,FILE2,FILE3
```

入力変数の意味は、表1のアンダーラインの変数を参照のこと。

デフォルト値は、FILE1,FILE2 およびFILE3 についてはSUBROUTINE PARM で、他の変数はBLOCK DATA DEFLTで設定している。

添付1にサンプル入力データを示す。

5. 出力データ

添付2にサンプル出力データを示す。出力データには、画像データの入力ファイル名、出力データファイル名、座標原点、スケール、画像処理マトリクスの制御パラメータ変数の値、および画像処理結果が記録される。

－ 参考文献 －

- (1) 植原、高田、小林、菱田、前田、相関法による円管内温度成層流の2次元・時系列計測、流れの可視化、vol.11 No.1、PP.157-160、(1991)
- (2) 木村、高森、井上、相関法を利用した流れの画像計測、流れの可視化、vol.6 No.22、PP.105-108、(1986)
- (3) 木村、高森、井上、相関を利用した流れ場の速度ベクトル分布の画像計測、計測自動制御学会論文集、vol.23 No.2、PP.1-7、(1987)

表1 主要変数の意味

その1

変数名	意味		
<u>IXB</u> *	1 フレームにおける画像処理範囲の X方向処理開始座標		
<u>IXE</u>	//	X方向処理終了座標	
<u>IYB</u>	//	Y方向処理開始座標	
<u>IYE</u>	//	Y方向処理終了座標	
NX	1 フレームの X方向画素数		
NY	// Y方向画素数		
<u>NWX</u>	起点および終点サーチマトリクスの X方向画素数		
<u>NWY</u>	// Y //		
<u>NNX</u>	終点サーチマトリクスの X負方向サーチ範囲画素数		
<u>NNY</u>	// Y負方向 //		
<u>NPX</u>	// X正方向 //		
<u>NPY</u>	// Y正方向 //		
<u>NTX</u>	起点マトリクスの X方向移動量		
<u>NTY</u>	// Y方向移動量		
NRX	ベクトルの X方向の本数		
NRY	// の Y方向 //		
<u>NST</u>	起点および終点サーチマトリクス内でのデータ処理ピクセルの移動ステップ (図1下図参照)		
<u>DT</u>	画像データ 2 フレームの時間間隔		
<u>OX</u>	ベクトル描画時の X軸原点座標		
<u>OY</u>	// Y軸 //		

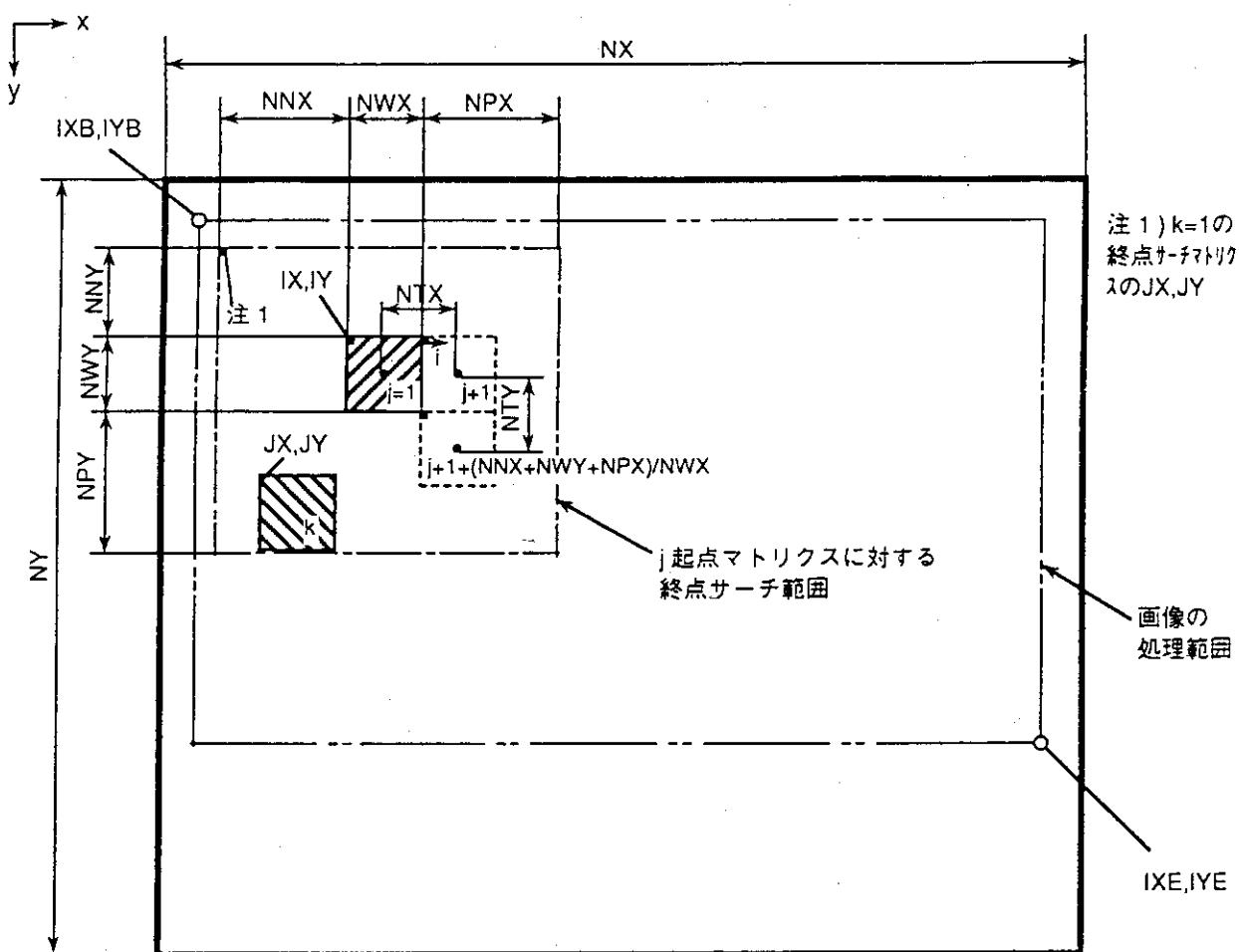
\*アンダーラインは入力変数であることを示す。

表1 主要変数の意味

その2

変数名	意味
<u>SX</u> *	ベクトル描画時の X方向スケール
<u>SY</u>	// Y方向 //
<u>FILE1</u>	1フレーム目の画像データファイル名
<u>FILE2</u>	2フレーム目 //
<u>FILE3</u>	データ処理結果の出力ファイル名
IX	速度ベクトルデータの X方向番号
IY	// Y方向番号
XX	速度ベクトルの X方向始点座標
YY	// Y方向 //
PX	速度ベクトルの X方向成分
PY	// Y方向成分
PC	相関係数
CR	(2,3) 式の $CR_{j,k}$
FA	(2,1) 式の $\bar{f}_{i,j}$
GA	(2,2) 式の $\bar{g}_{i,j}$

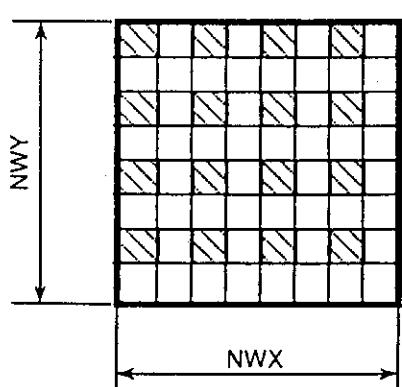
\*アンダーラインは入力変数であることを示す。



:ベクトルの起点マトリクス



:ベクトルの終点サーチマトリクス



NST=1: 空白およびハッディングの全ピクセルについて祖関を計算

NST=2: ハッディングのピクセルのみについて相関を計算

図 1 変数の定義

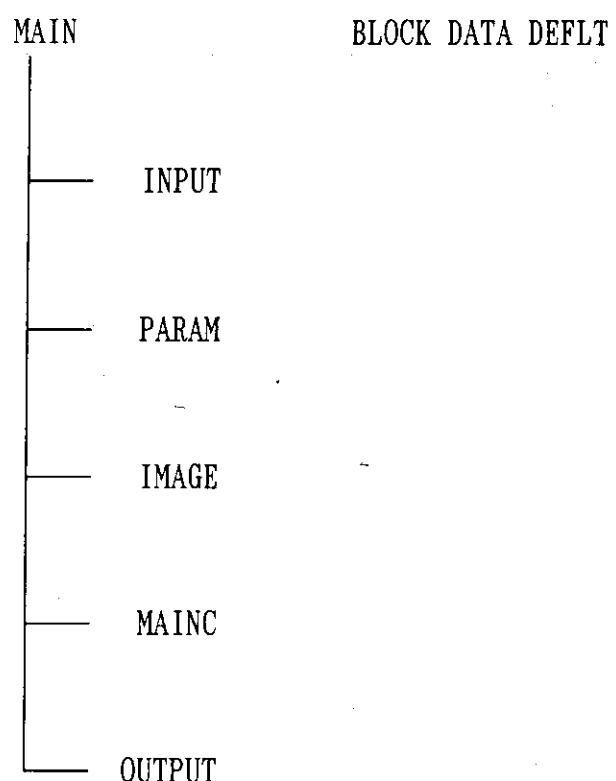


図2 プログラムのツリー構造

```
&MATSET NWX=16, NWY=16, NTX=16, NTY=16, NST=2,  
NNX=20, NNX=20, NNY=60, NPY=20,/  
&RYOIKI IXB = 20, IYE = 476, IYB = 200, IYE = 232/  
&BYRITU  
&FILES FILE2='siba2_o.txt'/
```

添付 1

nis\_e.txt (FILE1)  
 siba2\_o.txt (FILE2)  
 nis.dat (FILE3)

512 480 (NX, NY)  
 0.2400E+00 -0.2000E-01 0.0000E+00 0.4800E+03 0.1667E-01 (SX, SY, OX, OY, DT)  
 16 16 2 20 20 60 20 16 16 29 3 (NWS, NWY, NST, NNX, NPX, NNY, NPY, NTX, NTY, NRX, NRY)  
 1 1 0.2650E+02 0.2065E+03 0.2000E+01 -0.5000E+02 0.4794E+00 (IX, IY, XX, YY, PX, PY, PC) ← PC最大値  
 1 1 0.2650E+02 0.2065E+03 0.3000E+01 -0.5300E+02 0.3720E+00 ← 2番目に大きな値  
 1 1 0.2650E+02 0.2065E+03 0.3000E+01 -0.5400E+02 0.3573E+00 ← 3番目に大きな値  
 2 1 0.4250E+02 0.2065E+03 0.2000E+01 0.1200E+02 0.4751E+00  
 2 1 0.4250E+02 0.2065E+03 0.7000E+01 0.8000E+01 0.4652E+00  
 2 1 0.4250E+02 0.2065E+03 -0.5000E+01 -0.4400E+02 0.4352E+00  
 3 1 0.5850E+02 0.2065E+03 -0.1500E+02 -0.2000E+01 0.4835E+00  
 3 1 0.5850E+02 0.2065E+03 -0.3000E+01 -0.3900E+02 0.4727E+00  
 3 1 0.5850E+02 0.2065E+03 -0.9000E+01 -0.4200E+02 0.3813E+00  
 4 1 0.7450E+02 0.2065E+03 -0.3000E+01 0.2000E+01 0.9921E+00  
 4 1 0.7450E+02 0.2065E+03 -0.3000E+01 0.1000E+01 0.9911E+00  
 4 1 0.7450E+02 0.2065E+03 -0.3000E+01 0.0000E+00 0.9905E+00  
 5 1 0.9050E+02 0.2065E+03 0.6000E+01 -0.3200E+02 0.8575E+00  
 5 1 0.9050E+02 0.2065E+03 0.6000E+01 -0.3300E+02 0.7958E+00  
 5 1 0.9050E+02 0.2065E+03 0.6000E+01 -0.3400E+02 0.7620E+00  
 6 1 0.1065E+03 0.2065E+03 0.1000E+01 -0.7000E+01 0.8936E+00  
 6 1 0.1065E+03 0.2065E+03 0.1000E+01 -0.8000E+01 0.8884E+00  
 6 1 0.1065E+03 0.2065E+03 0.0000E+00 -0.8000E+01 0.8728E+00  
 7 1 0.1225E+03 0.2065E+03 -0.1200E+02 -0.6000E+02 0.7704E+00  
 7 1 0.1225E+03 0.2065E+03 -0.1300E+02 -0.6000E+02 0.5690E+00  
 7 1 0.1225E+03 0.2065E+03 -0.1900E+02 -0.6000E+02 0.1621E+00  
 8 1 0.1385E+03 0.2065E+03 -0.5000E+01 -0.5600E+02 0.8652E+00  
 8 1 0.1385E+03 0.2065E+03 -0.5000E+01 -0.5700E+02 0.8537E+00  
 8 1 0.1385E+03 0.2065E+03 -0.5000E+01 -0.5800E+02 0.8413E+00  
 9 1 0.1545E+03 0.2065E+03 0.1600E+02 -0.3000E+02 0.6616E+00  
 9 1 0.1545E+03 0.2065E+03 0.1600E+02 -0.3200E+02 0.6466E+00  
 9 1 0.1545E+03 0.2065E+03 0.1500E+02 -0.3200E+02 0.6284E+00  
 10 1 0.1705E+03 0.2065E+03 0.1000E+01 0.1000E+02 0.7524E+00  
 10 1 0.1705E+03 0.2065E+03 0.1000E+01 0.8000E+01 0.7298E+00  
 10 1 0.1705E+03 0.2065E+03 0.2000E+01 -0.3800E+02 0.7059E+00  
 11 1 0.1865E+03 0.2065E+03 -0.1000E+01 0.4000E+01 0.8605E+00  
 11 1 0.1865E+03 0.2065E+03 -0.1000E+01 0.2000E+01 0.8575E+00  
 11 1 0.1865E+03 0.2065E+03 0.1000E+01 -0.1800E+02 0.8571E+00  
 12 1 0.2025E+03 0.2065E+03 -0.2000E+01 -0.5000E+01 0.8035E+00  
 12 1 0.2025E+03 0.2065E+03 -0.2000E+01 -0.6000E+01 0.7865E+00  
 12 1 0.2025E+03 0.2065E+03 -0.1000E+01 -0.7000E+01 0.7393E+00  
 13 1 0.2185E+03 0.2065E+03 -0.9000E+01 -0.2700E+02 0.7591E+00  
 13 1 0.2185E+03 0.2065E+03 -0.9000E+01 -0.2800E+02 0.6643E+00  
 13 1 0.2185E+03 0.2065E+03 -0.1200E+02 -0.4100E+02 0.6482E+00  
 14 1 0.2345E+03 0.2065E+03 0.1500E+02 -0.4600E+02 0.6467E+00  
 14 1 0.2345E+03 0.2065E+03 0.1500E+02 -0.4700E+02 0.5979E+00  
 14 1 0.2345E+03 0.2065E+03 0.1900E+02 -0.4800E+02 0.5966E+00  
 15 1 0.2505E+03 0.2065E+03 0.1400E+02 -0.5400E+02 0.7489E+00  
 15 1 0.2505E+03 0.2065E+03 0.1300E+02 -0.5600E+02 0.7186E+00  
 15 1 0.2505E+03 0.2065E+03 0.1300E+02 -0.6000E+02 0.7176E+00  
 16 1 0.2665E+03 0.2065E+03 -0.1300E+02 -0.3700E+02 0.7937E+00  
 16 1 0.2665E+03 0.2065E+03 -0.1000E+02 -0.5000E+02 0.7903E+00  
 16 1 0.2665E+03 0.2065E+03 -0.1000E+02 -0.5200E+02 0.7756E+00  
 17 1 0.2825E+03 0.2065E+03 0.8000E+01 -0.5400E+02 0.8787E+00  
 17 1 0.2825E+03 0.2065E+03 0.8000E+01 -0.5500E+02 0.8251E+00  
 17 1 0.2825E+03 0.2065E+03 0.9000E+01 -0.5800E+02 0.8174E+00  
 18 1 0.2985E+03 0.2065E+03 -0.1200E+02 -0.5900E+02 0.6436E+00  
 18 1 0.2985E+03 0.2065E+03 -0.1200E+02 -0.6000E+02 0.6297E+00  
 18 1 0.2985E+03 0.2065E+03 -0.1300E+02 -0.6000E+02 0.3253E+00  
 19 1 0.3145E+03 0.2065E+03 0.1000E+02 -0.5800E+02 0.9346E+00  
 19 1 0.3145E+03 0.2065E+03 0.1000E+02 -0.6000E+02 0.9130E+00  
 19 1 0.3145E+03 0.2065E+03 0.9000E+01 -0.6000E+02 0.7603E+00  
 20 1 0.3305E+03 0.2065E+03 0.2000E+01 0.2000E+02 0.9302E+00  
 20 1 0.3305E+03 0.2065E+03 0.2000E+01 0.1900E+02 0.9214E+00  
 20 1 0.3305E+03 0.2065E+03 0.8000E+01 -0.5200E+02 0.9161E+00

注) カッコ内は変数名 添付 2

21	1	0.3465E+03	0.2065E+03	0.2000E+01	-0.4800E+02	0.9816E+00
21	1	0.3465E+03	0.2065E+03	0.2000E+01	-0.5000E+02	0.9802E+00
21	1	0.3465E+03	0.2065E+03	0.2000E+01	-0.5100E+02	0.9787E+00
22	1	0.3625E+03	0.2065E+03	0.1800E+02	0.2000E+01	0.5294E+00
22	1	0.3625E+03	0.2065E+03	-0.7000E+01	-0.5000E+01	0.4836E+00
22	1	0.3625E+03	0.2065E+03	-0.1000E+01	-0.3000E+02	0.4836E+00
23	1	0.3785E+03	0.2065E+03	0.1800E+02	-0.3000E+02	0.5639E+00
23	1	0.3785E+03	0.2065E+03	0.1800E+02	-0.3200E+02	0.5526E+00
23	1	0.3785E+03	0.2065E+03	-0.3000E+01	-0.3200E+02	0.5497E+00
24	1	0.3945E+03	0.2065E+03	-0.1700E+02	-0.1600E+02	0.5408E+00
24	1	0.3945E+03	0.2065E+03	-0.1100E+02	-0.6000E+02	0.5244E+00
24	1	0.3945E+03	0.2065E+03	-0.1200E+02	-0.6000E+02	0.4704E+00
25	1	0.4105E+03	0.2065E+03	-0.1400E+02	-0.4600E+02	0.6343E+00
25	1	0.4105E+03	0.2065E+03	-0.1400E+02	-0.4800E+02	0.5758E+00
25	1	0.4105E+03	0.2065E+03	-0.2000E+02	-0.4800E+02	0.4868E+00
26	1	0.4265E+03	0.2065E+03	0.6000E+01	-0.3000E+02	0.6078E+00
26	1	0.4265E+03	0.2065E+03	-0.2000E+02	-0.3500E+02	0.5674E+00
26	1	0.4265E+03	0.2065E+03	0.6000E+01	-0.4900E+02	0.4979E+00
27	1	0.4425E+03	0.2065E+03	-0.9000E+01	-0.6000E+01	0.5811E+00
27	1	0.4425E+03	0.2065E+03	0.1700E+02	-0.1900E+02	0.5677E+00
27	1	0.4425E+03	0.2065E+03	-0.1000E+02	-0.4900E+02	0.5657E+00
28	1	0.4585E+03	0.2065E+03	-0.3000E+01	-0.8000E+01	0.6029E+00
28	1	0.4585E+03	0.2065E+03	0.3000E+01	-0.1400E+02	0.6011E+00
28	1	0.4585E+03	0.2065E+03	-0.3000E+01	-0.5600E+02	0.5533E+00
29	1	0.4745E+03	0.2065E+03	0.1200E+02	-0.3200E+02	0.5736E+00
29	1	0.4745E+03	0.2065E+03	-0.1300E+02	-0.5600E+02	0.5113E+00
29	1	0.4745E+03	0.2065E+03	-0.1500E+02	-0.5800E+02	0.4887E+00
1	2	0.2650E+02	0.2225E+03	0.1100E+02	-0.5300E+02	0.4459E+00
1	2	0.2650E+02	0.2225E+03	0.1100E+02	-0.5400E+02	0.4312E+00
1	2	0.2650E+02	0.2225E+03	0.1000E+01	-0.5400E+02	0.3545E+00
2	2	0.4250E+02	0.2225E+03	0.1900E+02	0.6000E+01	0.5034E+00
2	2	0.4250E+02	0.2225E+03	0.1700E+02	-0.4000E+01	0.4966E+00
2	2	0.4250E+02	0.2225E+03	0.1800E+02	-0.5000E+01	0.4745E+00
3	2	0.5850E+02	0.2225E+03	-0.3000E+01	-0.1500E+02	0.4957E+00
3	2	0.5850E+02	0.2225E+03	-0.9000E+01	-0.2200E+02	0.4590E+00
3	2	0.5850E+02	0.2225E+03	-0.3000E+01	-0.5200E+02	0.4457E+00
4	2	0.7450E+02	0.2225E+03	-0.3000E+01	-0.6000E+01	0.9924E+00
4	2	0.7450E+02	0.2225E+03	-0.3000E+01	-0.8000E+01	0.9921E+00
4	2	0.7450E+02	0.2225E+03	-0.4000E+01	-0.1400E+02	0.9890E+00
5	2	0.9050E+02	0.2225E+03	0.9000E+01	0.2000E+01	0.9070E+00
5	2	0.9050E+02	0.2225E+03	0.4000E+01	-0.4000E+01	0.8844E+00
5	2	0.9050E+02	0.2225E+03	0.4000E+01	-0.5000E+01	0.8770E+00
6	2	0.1065E+03	0.2225E+03	0.1000E+01	-0.2400E+02	0.9203E+00
6	2	0.1065E+03	0.2225E+03	0.0000E+00	-0.2400E+02	0.9189E+00
6	2	0.1065E+03	0.2225E+03	0.1000E+01	-0.2500E+02	0.8998E+00
7	2	0.1225E+03	0.2225E+03	0.3000E+01	0.0000E+00	0.6526E+00
7	2	0.1225E+03	0.2225E+03	0.2000E+01	-0.1000E+01	0.5943E+00
7	2	0.1225E+03	0.2225E+03	-0.3000E+01	-0.3300E+02	0.5505E+00
8	2	0.1385E+03	0.2225E+03	-0.5000E+01	-0.5800E+02	0.9046E+00
8	2	0.1385E+03	0.2225E+03	-0.6000E+01	-0.5800E+02	0.8681E+00
8	2	0.1385E+03	0.2225E+03	-0.5000E+01	-0.5900E+02	0.8676E+00
9	2	0.1545E+03	0.2225E+03	-0.5000E+01	-0.4900E+02	0.8544E+00
9	2	0.1545E+03	0.2225E+03	-0.5000E+01	-0.5000E+02	0.5898E+00
9	2	0.1545E+03	0.2225E+03	-0.1600E+02	-0.5300E+02	0.4726E+00
10	2	0.1705E+03	0.2225E+03	0.2000E+02	-0.1100E+02	0.8205E+00
10	2	0.1705E+03	0.2225E+03	0.2000E+02	-0.1200E+02	0.8094E+00
10	2	0.1705E+03	0.2225E+03	0.2000E+02	-0.1300E+02	0.7880E+00
11	2	0.1865E+03	0.2225E+03	0.2000E+01	-0.3400E+02	0.8520E+00
11	2	0.1865E+03	0.2225E+03	-0.1900E+02	-0.3700E+02	0.8359E+00
11	2	0.1865E+03	0.2225E+03	-0.1900E+02	-0.3800E+02	0.8196E+00
12	2	0.2025E+03	0.2225E+03	0.1300E+02	-0.4900E+02	0.9234E+00
12	2	0.2025E+03	0.2225E+03	0.1300E+02	-0.5000E+02	0.7919E+00
12	2	0.2025E+03	0.2225E+03	-0.1900E+02	-0.6000E+02	0.5939E+00
13	2	0.2185E+03	0.2225E+03	-0.7000E+01	-0.2900E+02	0.6012E+00
13	2	0.2185E+03	0.2225E+03	0.7000E+01	-0.4000E+02	0.5811E+00

14	2	0.2345E+03	0.2225E+03	0.1000E+02	-0.6000E+01	0.6757E+00
14	2	0.2345E+03	0.2225E+03	0.9000E+01	-0.7000E+01	0.6573E+00
14	2	0.2345E+03	0.2225E+03	0.6000E+01	-0.3900E+02	0.6511E+00
15	2	0.2505E+03	0.2225E+03	0.1100E+02	-0.5000E+02	0.5580E+00
15	2	0.2505E+03	0.2225E+03	0.1000E+02	-0.5000E+02	0.5273E+00
15	2	0.2505E+03	0.2225E+03	0.1200E+02	-0.5200E+02	0.5034E+00
16	2	0.2665E+03	0.2225E+03	0.7000E+01	-0.4000E+01	0.7487E+00
16	2	0.2665E+03	0.2225E+03	-0.1600E+02	-0.5300E+02	0.7343E+00
16	2	0.2665E+03	0.2225E+03	0.9000E+01	-0.6000E+02	0.6984E+00
17	2	0.2825E+03	0.2225E+03	0.0000E+00	-0.4000E+01	0.8820E+00
17	2	0.2825E+03	0.2225E+03	0.0000E+00	-0.5000E+01	0.8527E+00
17	2	0.2825E+03	0.2225E+03	0.0000E+00	-0.6000E+01	0.8421E+00
18	2	0.2985E+03	0.2225E+03	0.1500E+02	-0.1500E+02	0.7240E+00
18	2	0.2985E+03	0.2225E+03	0.1500E+02	-0.1600E+02	0.6876E+00
18	2	0.2985E+03	0.2225E+03	-0.1400E+02	-0.5700E+02	0.6697E+00
19	2	0.3145E+03	0.2225E+03	0.1000E+02	-0.6000E+02	0.8727E+00
19	2	0.3145E+03	0.2225E+03	0.9000E+01	-0.6000E+02	0.8164E+00
19	2	0.3145E+03	0.2225E+03	-0.4000E+01	-0.6000E+02	0.6483E+00
20	2	0.3305E+03	0.2225E+03	0.0000E+00	0.1200E+02	0.9560E+00
20	2	0.3305E+03	0.2225E+03	0.2000E+01	0.1000E+02	0.9508E+00
20	2	0.3305E+03	0.2225E+03	0.2000E+01	0.9000E+01	0.9476E+00
21	2	0.3465E+03	0.2225E+03	-0.1000E+01	0.1600E+02	0.8757E+00
21	2	0.3465E+03	0.2225E+03	0.4000E+01	-0.4000E+02	0.8755E+00
21	2	0.3465E+03	0.2225E+03	0.3000E+01	-0.4000E+02	0.8740E+00
22	2	0.3625E+03	0.2225E+03	0.1100E+02	-0.3900E+02	0.5067E+00
22	2	0.3625E+03	0.2225E+03	0.1800E+02	-0.5500E+02	0.4837E+00
22	2	0.3625E+03	0.2225E+03	0.1000E+02	-0.5500E+02	0.4549E+00
23	2	0.3785E+03	0.2225E+03	0.1800E+02	-0.5600E+02	0.5760E+00
23	2	0.3785E+03	0.2225E+03	0.1200E+02	-0.5600E+02	0.4036E+00
23	2	0.3785E+03	0.2225E+03	0.1200E+02	-0.5900E+02	0.3775E+00
24	2	0.3945E+03	0.2225E+03	0.1800E+02	-0.6000E+01	0.5640E+00
24	2	0.3945E+03	0.2225E+03	0.2000E+02	-0.5600E+02	0.5220E+00
24	2	0.3945E+03	0.2225E+03	0.2000E+02	-0.5700E+02	0.4150E+00
25	2	0.4105E+03	0.2225E+03	-0.9000E+01	-0.5000E+01	0.4594E+00
25	2	0.4105E+03	0.2225E+03	-0.9000E+01	-0.4000E+02	0.4248E+00
25	2	0.4105E+03	0.2225E+03	-0.2000E+01	-0.5600E+02	0.3590E+00
26	2	0.4265E+03	0.2225E+03	-0.9000E+01	-0.1900E+02	0.4604E+00
26	2	0.4265E+03	0.2225E+03	0.1800E+02	-0.5200E+02	0.4492E+00
26	2	0.4265E+03	0.2225E+03	0.7000E+01	-0.6000E+02	0.3915E+00
27	2	0.4425E+03	0.2225E+03	-0.6000E+01	-0.6000E+01	0.4925E+00
27	2	0.4425E+03	0.2225E+03	-0.1200E+02	-0.4000E+02	0.4845E+00
27	2	0.4425E+03	0.2225E+03	0.1000E+01	-0.4800E+02	0.4797E+00
28	2	0.4585E+03	0.2225E+03	0.1000E+02	-0.6000E+01	0.5385E+00
28	2	0.4585E+03	0.2225E+03	0.1700E+02	-0.4200E+02	0.4833E+00
28	2	0.4585E+03	0.2225E+03	0.1000E+01	-0.4300E+02	0.4265E+00
29	2	0.4745E+03	0.2225E+03	-0.3000E+01	-0.3300E+02	0.5676E+00
29	2	0.4745E+03	0.2225E+03	-0.1000E+02	-0.3800E+02	0.5335E+00
29	2	0.4745E+03	0.2225E+03	-0.1000E+02	-0.3900E+02	0.5013E+00
1	3	0.2650E+02	0.2385E+03	0.2000E+01	-0.5100E+02	0.5096E+00
1	3	0.2650E+02	0.2385E+03	0.2000E+01	-0.5200E+02	0.4933E+00
1	3	0.2650E+02	0.2385E+03	0.1800E+02	-0.5800E+02	0.4309E+00
2	3	0.4250E+02	0.2385E+03	0.1000E+02	0.2000E+02	0.3658E+00
2	3	0.4250E+02	0.2385E+03	0.1000E+02	0.1900E+02	0.3568E+00
2	3	0.4250E+02	0.2385E+03	-0.1200E+02	-0.1800E+02	0.3425E+00
3	3	0.5850E+02	0.2385E+03	-0.6000E+01	0.4000E+01	0.4174E+00
3	3	0.5850E+02	0.2385E+03	-0.1100E+02	0.2000E+01	0.3794E+00
3	3	0.5850E+02	0.2385E+03	-0.1700E+02	-0.1800E+02	0.3736E+00
4	3	0.7450E+02	0.2385E+03	-0.4000E+01	-0.1600E+02	0.9942E+00
4	3	0.7450E+02	0.2385E+03	-0.4000E+01	-0.1700E+02	0.9924E+00
4	3	0.7450E+02	0.2385E+03	-0.4000E+01	-0.1800E+02	0.9897E+00
5	3	0.9050E+02	0.2385E+03	0.6000E+01	-0.6000E+01	0.9265E+00
5	3	0.9050E+02	0.2385E+03	0.6000E+01	-0.8000E+01	0.9214E+00
5	3	0.9050E+02	0.2385E+03	0.1000E+01	-0.1600E+02	0.9149E+00
6	3	0.1065E+03	0.2385E+03	0.2000E+01	-0.8000E+01	0.9481E+00
6	3	0.1065E+03	0.2385E+03	0.5000E+01	-0.1600E+02	0.9432E+00

7	3	0.1225E+03	0.2385E+03	0.6000E+01	0.2000E+02	0.8691E+00
7	3	0.1225E+03	0.2385E+03	0.6000E+01	0.1800E+02	0.8018E+00
7	3	0.1225E+03	0.2385E+03	0.5000E+01	0.1000E+02	0.7841E+00
8	3	0.1385E+03	0.2385E+03	-0.4000E+01	-0.5600E+02	0.8579E+00
8	3	0.1385E+03	0.2385E+03	-0.3000E+01	-0.6000E+02	0.8515E+00
8	3	0.1385E+03	0.2385E+03	-0.4000E+01	-0.6000E+02	0.8380E+00
9	3	0.1545E+03	0.2385E+03	0.1200E+02	-0.2800E+02	0.7671E+00
9	3	0.1545E+03	0.2385E+03	0.1200E+02	-0.2900E+02	0.7578E+00
9	3	0.1545E+03	0.2385E+03	0.1100E+02	-0.2900E+02	0.7277E+00
10	3	0.1705E+03	0.2385E+03	-0.7000E+01	-0.3800E+02	0.7246E+00
10	3	0.1705E+03	0.2385E+03	0.2000E+01	-0.5200E+02	0.6233E+00
10	3	0.1705E+03	0.2385E+03	0.2000E+01	-0.5300E+02	0.6159E+00
11	3	0.1865E+03	0.2385E+03	0.3000E+01	-0.3800E+02	0.9304E+00
11	3	0.1865E+03	0.2385E+03	0.3000E+01	-0.4000E+02	0.9299E+00
11	3	0.1865E+03	0.2385E+03	0.3000E+01	-0.4100E+02	0.9208E+00
12	3	0.2025E+03	0.2385E+03	0.8000E+01	0.9000E+01	0.6608E+00
12	3	0.2025E+03	0.2385E+03	0.2000E+02	-0.1100E+02	0.6528E+00
12	3	0.2025E+03	0.2385E+03	0.8000E+01	-0.2000E+02	0.6086E+00
13	3	0.2185E+03	0.2385E+03	-0.1100E+02	0.2000E+02	0.5977E+00
13	3	0.2185E+03	0.2385E+03	0.9000E+01	-0.1700E+02	0.5894E+00
13	3	0.2185E+03	0.2385E+03	0.8000E+01	-0.1700E+02	0.5800E+00
14	3	0.2345E+03	0.2385E+03	0.9000E+01	-0.5000E+02	0.7308E+00
14	3	0.2345E+03	0.2385E+03	0.9000E+01	-0.5100E+02	0.6804E+00
14	3	0.2345E+03	0.2385E+03	0.8000E+01	-0.5100E+02	0.6307E+00
15	3	0.2505E+03	0.2385E+03	-0.1500E+02	-0.5000E+02	0.8261E+00
15	3	0.2505E+03	0.2385E+03	-0.1600E+02	-0.5000E+02	0.7772E+00
15	3	0.2505E+03	0.2385E+03	-0.1500E+02	-0.5100E+02	0.7588E+00
16	3	0.2665E+03	0.2385E+03	-0.1000E+02	-0.8000E+01	0.7799E+00
16	3	0.2665E+03	0.2385E+03	0.9000E+01	-0.1200E+02	0.7337E+00
16	3	0.2665E+03	0.2385E+03	0.9000E+01	-0.1400E+02	0.7274E+00
17	3	0.2825E+03	0.2385E+03	0.8000E+01	-0.4300E+02	0.7823E+00
17	3	0.2825E+03	0.2385E+03	0.8000E+01	-0.4400E+02	0.7679E+00
17	3	0.2825E+03	0.2385E+03	0.1100E+02	-0.5400E+02	0.6060E+00
18	3	0.2985E+03	0.2385E+03	-0.2000E+02	-0.4100E+02	0.7615E+00
18	3	0.2985E+03	0.2385E+03	-0.2000E+02	-0.4200E+02	0.7227E+00
18	3	0.2985E+03	0.2385E+03	-0.2000E+02	-0.4300E+02	0.5124E+00
19	3	0.3145E+03	0.2385E+03	0.9000E+01	-0.4300E+02	0.8054E+00
19	3	0.3145E+03	0.2385E+03	0.9000E+01	-0.4400E+02	0.7346E+00
19	3	0.3145E+03	0.2385E+03	0.8000E+01	-0.4400E+02	0.6358E+00
20	3	0.3305E+03	0.2385E+03	0.2000E+01	-0.4000E+01	0.9862E+00
20	3	0.3305E+03	0.2385E+03	0.2000E+01	-0.6000E+01	0.9853E+00
20	3	0.3305E+03	0.2385E+03	0.2000E+01	-0.8000E+01	0.9795E+00
21	3	0.3465E+03	0.2385E+03	0.0000E+00	0.1400E+02	0.6365E+00
21	3	0.3465E+03	0.2385E+03	0.0000E+00	0.8000E+01	0.6311E+00
21	3	0.3465E+03	0.2385E+03	0.6000E+01	-0.5000E+02	0.5902E+00
22	3	0.3625E+03	0.2385E+03	0.2000E+02	-0.3800E+02	0.4993E+00
22	3	0.3625E+03	0.2385E+03	0.5000E+01	-0.4100E+02	0.4928E+00
22	3	0.3625E+03	0.2385E+03	-0.2000E+02	-0.6000E+02	0.3938E+00
23	3	0.3785E+03	0.2385E+03	-0.1100E+02	-0.1600E+02	0.4176E+00
23	3	0.3785E+03	0.2385E+03	-0.1400E+02	-0.3000E+02	0.3894E+00
23	3	0.3785E+03	0.2385E+03	-0.1600E+02	-0.4600E+02	0.3887E+00
24	3	0.3945E+03	0.2385E+03	0.1800E+02	-0.4200E+02	0.5508E+00
24	3	0.3945E+03	0.2385E+03	0.1800E+02	-0.4400E+02	0.5098E+00
24	3	0.3945E+03	0.2385E+03	0.1200E+02	-0.4400E+02	0.4947E+00
25	3	0.4105E+03	0.2385E+03	-0.1900E+02	0.1600E+02	0.4760E+00
25	3	0.4105E+03	0.2385E+03	-0.1800E+02	0.1500E+02	0.4299E+00
25	3	0.4105E+03	0.2385E+03	-0.1900E+02	0.1500E+02	0.4269E+00
26	3	0.4265E+03	0.2385E+03	0.6000E+01	-0.1200E+02	0.4426E+00
26	3	0.4265E+03	0.2385E+03	-0.3000E+01	-0.2700E+02	0.3956E+00
26	3	0.4265E+03	0.2385E+03	0.1200E+02	-0.5900E+02	0.3642E+00
27	3	0.4425E+03	0.2385E+03	0.1700E+02	0.1600E+02	0.4653E+00
27	3	0.4425E+03	0.2385E+03	-0.1600E+02	-0.6000E+01	0.4283E+00
27	3	0.4425E+03	0.2385E+03	0.0000E+00	-0.9000E+01	0.3734E+00
28	3	0.4585E+03	0.2385E+03	-0.1600E+02	-0.2000E+02	0.4821E+00
28	3	0.4585E+03	0.2385E+03	0.7000E+01	-0.5100E+02	0.4425E+00
28	3	0.4585E+03	0.2385E+03	0.1700E+02	-0.6000E+02	0.3989E+00

29	3	0.4745E+03	0.2385E+03	0.0000E+00	-0.4000E+01	0.5228E+00
29	3	0.4745E+03	0.2385E+03	0.2000E+02	-0.1400E+02	0.5221E+00
29	3	0.4745E+03	0.2385E+03	0.1700E+02	-0.2600E+02	0.4713E+00

付録2 ベクトル表示プログラム

入力マニュアル

## 1. 概要

西野による相関法画像処理プログラムの処理結果を、ベクトル図表示するプログラムの使用方法を記す。

## 2. 使用方法

本プログラムはBASICで表記されており、画面上で対話方式で入力パラメータを指定することによりベクトル図が描画される。

下表に画面上で入力する変数の意味を記す。

画面上の表示	変数名	意 味
Plot Data File Name ?	F\$	画像データ処理結果の入力ファイル名。
Vector Length Scale VSC ?	VSC	ベクトル表示長さのスケール、通常 1で良い。
Screen Scale : SX, SY. Screen Origin : OX, OY ?	SXR, SYR OXR, OYR	横および縦方向の作画スケール作画時の原点座標、絶対座標の原点は画面左上、通常は1,1,0,0を入力、また、SXR=0を指定すると、ファイルF\$にある値を踏襲する。

表1に主要変数の意味を、添付1にソースプログラムを、また添付2にサンプルアウトプットを示す。

表1 主要変数の意味

変数名	意味
C	相関係数
DT	画像データ2フレームの時間間隔
F\$	画像処理データ処理結果の入力ファイル名
IX	速度ベクトルデータの X方向番号
IY	// Y方向番号
NWX	起点および終点サーチマトリクスの X(横) 方向画素数
NWY	// Y(縦) //
NNX	終点サーチマトリクスの X負方向サーチ範囲画素数
NNY	// Y負方向 //
NPX	// X正方向 //
NPY	// Y正方向 //
NTX	起点マトリクスの X方向移動量
NTY	// Y方向移動量
NRX	ベクトルの X方向の本数
NRY	// の Y方向 //
NST	起点および終点サーチマトリクス内でのデータ処理ピクセルの移動ステップ (図1下図参照)
<u>OX</u> *	ベクトル描画時の X軸原点座標
<u>OY</u>	// Y軸 //
<u>SX</u>	ベクトル描画時の X方向スケール
<u>SY</u>	// Y方向 //
X	速度ベクトルの X方向始点座標
Y	// Y方向 //
U	速度ベクトルの X方向成分
V	// Y方向成分
<u>VSC</u>	ベクトル表示長さのスケール

\*アンダーラインは入力変数であることを示す。

添付 1

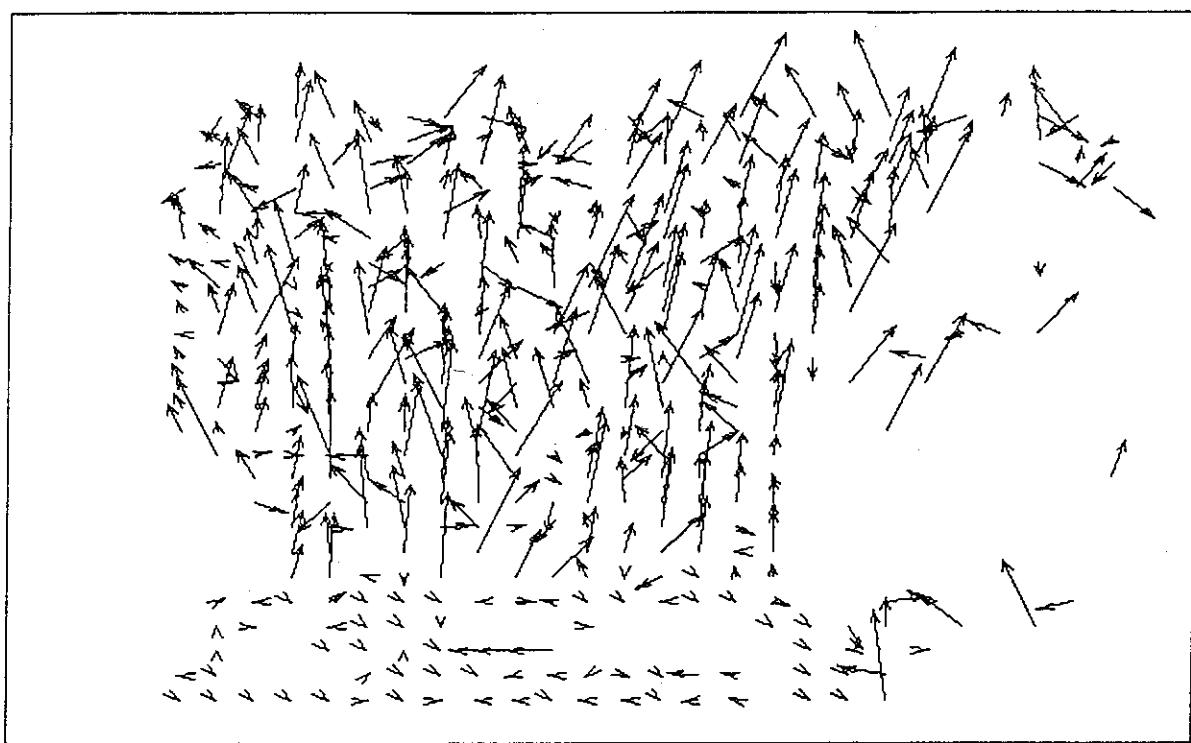
```

1000      save "DISP.BAS",A
1010
1020      DIM X(30,30),Y(30,30),U(30,30,3),V(30,30,3),C(30,30,3)
1030
1040      F$="e:M16S16.DAT"
1050      INPUT " Plot Data File Name ",F$
1060      OPEN F$ FOR INPUT AS #1
1070      INPUT #1, DUM$
1080      INPUT #1, DUM$
1090      INPUT #1, DUM$
1100      INPUT #1, NX,NY
1110      INPUT #1, SX,SY,OX,OY,DT
1120      INPUT " Vector Length Scale VSC ",VSC
1130      PRINT " Screen Scale : SX, SY. Scleen Origin OX, OY."SX,SY,OX,OY
1140      INPUT " SX, SY, OX, OY ",SXR,SYR,OXR,OYR
1150      IF SXR = 0 THEN GOTO 1170
1160      SX = SXR : SY = SYR : OX = OXR : OY = OYR
1170      INPUT #1, NWX,NWY,NST,NNX,NPX,NNY,NPY,NTX,NTY,NRX,NRY
1180      FOR IY=1 TO NRY
1190          FOR IX=1 TO NRX
1200              FOR IP= 1 TO 3
1210                  INPUT #1, IDUM, IDUM, X(IX,IY), Y(IX,IY), U(IX,IY,IP), V(IX,IY,IP), C
(IX,IY,IP)
1220                  NEXT IP
1230                  PRINT           X(IX,IY), Y(IX,IY), U(IX,IY,1), V(IX,IY,1), C(IX,IY,
1)
1240                  X(IX,IY)=X(IX,IY)/SX+OX
1250                  Y(IX,IY)=Y(IX,IY)/SY+OY
1260                  FOR IP= 1 TO 3
1270                      U(IX,IY,IP)=U(IX,IY,IP)/SX
1280                      V(IX,IY,IP)=V(IX,IY,IP)/SY
1290                  NEXT IP
1300                  NEXT IX
1310                  NEXT IY
1320                  CLOSE #1
1330
1340      THRESH=.6
1350      AL = 8
1360      HIRAKI = 15/180*3.14159
1370      CLS 3
1380      PRINT F$
1390      SCREEN 3,0,0,1
1400      WINDOW (-30,-30)-(541,509)
1410      LINE (0,0)-(511,479),,B
1420      FOR IY=1 TO NRY
1430          FOR IX=1 TO NRX
1440              IF ( C(IX,IY,1)<THRESH ) THEN 1630
1450                  X1=X(IX,IY)
1460                  Y1=Y(IX,IY)
1470                  X2=X(IX,IY)+U(IX,IY,1)
1480                  Y2=Y(IX,IY)+V(IX,IY,1)
1490                  X1=X2+VSC*(X1-X2)
1500                  Y1=Y2+VSC*(Y1-Y2)
1510      IF Y1<170 OR Y1 > 243 THEN GOTO 1580
1520          LINE (X1,Y1)-(X2,Y2)
1530      PLOTTING ALLOWHEAD
1540          X2P = X2-X1+.00001 : Y2P = Y2-Y1+.00001
1550          THETA = ATN( ABS( Y2P/X2P ) )
1560          AX1 = X1 + SGN(X2P)*( ABS(X2P)-AL*COS(THETA+HIRAKI) )
1570          AY1 = Y1 + SGN(Y2P)*( ABS(Y2P)-AL*SIN(THETA+HIRAKI) )
1580          AX2 = X1 + SGN(X2P)*( ABS(X2P)-AL*COS(THETA-HIRAKI) )
1590          AY2 = Y1 + SGN(Y2P)*( ABS(Y2P)-AL*SIN(THETA-HIRAKI) )
1600          LINE (AX1,AY1)-(X2,Y2)

```

```
1610      LINE (AX2,AY2)-(X2,Y2)
1620      CIRCLE (X2,Y2),1.5
1630      NEXT IX
1640      NEXT IY
1650
1660  K$=INKEY$:IF K$="" THEN 1680
1670  CLS 3
1680  STOP
1690  END
```

m16st2.dat ← 画像データ処理結果の入力ファイル名



load " auto go to list run save " key print edit . cont