

JAERI-Tech  
99-014



JP9950184



冷減速材内流動特性の研究  
第1報 流動パターンの測定と流動解析

1999年3月

麻生智一・神永雅紀・寺田敦彦・日野竜太郎

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、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 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（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費領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 Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1999

編集兼発行 日本原子力研究所

冷減速材内流動特性の研究  
第1報 流動パターンの測定と流動解析

日本原子力研究所東海研究所中性子科学研究中心  
麻生 智一・神永 雅紀・寺田 敦彦・日野竜太郎

(1999年1月26日受理)

原研では5MW規模の核破碎ターゲットシステムの開発を中性子科学研究中心計画の下で進めており、超臨界水素を用いた冷減速材は中性子強度やパルス性能などの中性子性能に影響する重要な機器である。特に減速材容器内における水素温度の上昇が中性子収率に影響を与えるため、減速材容器の設計では再循環流や停滞流の発生を抑制して水素をスムーズに流動させる必要がある。そこで、減速材容器の概念設計に反映させるため、減速材容器を模擬した試験体を用いて、減速材入口管からの噴流による流動状況を明らかにするために水による予備的な流動実験を行った。実験は入口管出口の噴流流速を0.5~3m/sまで変えて行った。このときのレイノルズ数は14,000~84,000で、実機（超臨界水素）のレイノルズ数は約 $5 \times 10^5$ である。実験の結果、噴流によって大きな再循環流が発生していることが確認でき、STAR-CDコードによる流動解析結果とよく一致した。これらの結果を基に、減速材容器構造の概念設計をさらに推進させ最適な容器構造を明らかにするために、今後の熱流動実験計画を立案した。

Study on Flow Characteristics in Cold Source Moderator

I. Flow Pattern Measurement and Hydraulic Analysis

Tomokazu ASO, Masanori KAMINAGA, Atsuhiro TERADA and Ryutaro HINO

Center for Neutron Science  
Tokai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received January 26, 1999)

The Japan Atomic Energy Research Institute is developing a 5MW spallation target system under the Neutron Science Project. A cold source moderator using supercritical hydrogen is one of the key components in the target system, which affects the neutronic performance both in high levels of intensity and in sharpness. Since a hydrogen temperature rise affects the neutronic performance, it is especially necessary to design a moderator structure that permits the flow of hydrogen as smooth as possible without stagnant or recirculation flows. In order to contribute the conceptual design of the moderator structure in progress, water flow experiments with a simplified moderator model were carried out preliminarily to clarify the flow patterns resulting from the jet flow from the inlet pipe of the moderator. In the experiments, the velocity of the jet flow was changed from 0.5 to 3m/s, where the Reynolds number ranged from 14000 to 84000, while the Reynolds number under the supercritical hydrogen condition was around  $5 \times 10^5$ . Experimental results revealed that the recirculation flow resulted from the jet flow on a large scale, which agreed well with hydraulic analytical results obtained with the STAR-CD code. Based on these results, we have constructed a thermal-hydraulic test plan under water flow conditions accompanied by the verification of analytical results in order to promote the conceptual design of the moderator structure.

Keywords : Spallation Target System, Neutron Science Project, Cold Source Moderator, Supercritical Hydrogen, Temperature Rise, Water Flow Experiments, Flow Pattern, Jet Flow, Recirculation Flow, Hydraulic Analysis, Test Plan

## 目 次

1. 概 要 .....	1
2. 実験装置と計測システム .....	2
2.1 実験装置の概要 .....	2
2.2 PIV計測システムの概要 .....	4
3. 予備実験 .....	11
3.1 PIV用シーディング粒子の選定 .....	11
3.2 レーザー照射位置の検討 .....	13
4. 基礎流動実験結果 .....	28
4.1 軸方向の流動状況 .....	28
4.1.1 実験条件 .....	28
4.1.2 流動状況の時間平均的特性 .....	28
4.1.3 流れ場の数値解析結果 .....	30
4.1.4 瞬間的な流動状況 .....	31
4.2 水平方向の流動状況 .....	31
4.2.1 実験条件 .....	31
4.2.2 実験結果 .....	31
4.2.3 瞬間的な流動状況 .....	33
5. 今後の計画 .....	109
6. あとがき .....	112
謝 辞 .....	112
参考文献 .....	113

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Experimental Apparatus and Measurement System .....	2
2.1 Outline of Experimental Apparatus .....	2
2.2 Outline of PIV System .....	4
3. Preliminary Experiments .....	11
3.1 Selection of Seeding Particle for PIV.....	11
3.2 Estimation of Laser Position .....	13
4. Measured Flow Patterns and Analytical Estimation .....	28
4.1 Flow Patterns along Axial Direction .....	28
4.1.1 Experimental Conditions .....	28
4.1.2 Time Averaged Characteristic .....	28
4.1.3 Numerical Analysis Results .....	30
4.1.4 Instantaneous Flow Situation .....	31
4.2 Flow Patterns along Horizontal Direction .....	31
4.2.1 Experimental Conditions .....	31
4.2.2 Experimental Results .....	31
4.2.3 Instantaneous Flow Patterns .....	33
5. Future Plan .....	109
6. Concluding Remarks .....	112
Acknowledgment .....	112
References .....	113

## 1. 概 要

日本原子力研究所（原研）では、1.5GeV-5.3mA級（出力8MW）の大強度陽子加速器を用いた中性子科学研究計画<sup>(1)(2)</sup>の下で、最初に建設する施設として中性子散乱施設（5MW）を予定している<sup>(3)</sup>。本施設の中性子源となる核破碎ターゲットシステム概念を構築するために、平成9年度から設計研究及びR&Dに着手した<sup>(4)</sup>。核破碎ターゲットシステムでは、ターゲットで発生する大強度高エネルギー中性子を実験に応じたエネルギーレベルに減速する減速材の開発が重要である<sup>(5)(6)</sup>。特に、冷・熱中性子領域で使用する超臨界水素減速材（以後、冷減速材と呼ぶ）は、高い中性子パルス性能、中性子収率等を確保するために、コンパクトな薄肉・扁平構造にし、水素温度の上昇を3K以内に抑制する必要がある<sup>(7)</sup>。このような構造を実現させるためには、超臨界水素条件（1.5MPa, 20K）に耐える構造設計とともに、局所的な水素温度上昇を防止するために冷減速材容器内の流動を最適化する必要がある。

構造設計では、中性子透過性能が高く、強度的に優れたアルミニウム合金の探索とともに、応力集中などを緩和する構造の検討を進めているが、熱流力設計では、中性子収率に大きく影響する水素温度上昇を3K以内に抑制するための流動挙動の最適化が重要な課題になっている。中性子科学研究計画ではターゲット、減速材及び反射体の配置など既存の施設や現在計画中の施設を参考に概念設計を進めており、冷減速材については中性子収率やハンドリングの面で有効な構造である ISIS 又は SNS 計画と同型式の冷減速材構造<sup>(8)(9)</sup>を採用する予定である。この場合、噴流状態で液体水素が容器内に流入するため、噴流と容器底面で衝突流が同時に生じている冷減速材容器内の流れ場の挙動を明確にして、水素の再循環・滞留を防ぐための工学因子を明らかにし、構造設計に早急に反映する必要がある。

そこで、第一段階として減速材容器内における流動状況、特に噴流の2次元挙動に注目した水による基礎流動実験研究と解析評価を実施した。本報告書では、減速材容器を2次元的に模擬した二重管噴流試験体を組み込んだ実験装置、流れ場の速度分布を高精度に計測するための PIV(Particle Image Velocimetry)計測システムの概要、PIV計測に使用する粒子の選定、レーザーシートの照射位置を検討するための予備実験結果について述べ、さらに、流速を変化させたときの基礎流動実験結果について報告する。

## 2. 実験装置と計測システム

### 2.1 実験装置の概要

(1) 高い中性子収率を維持するには減速材（ここでは水素）の温度上昇を3K程度に抑える必要がある<sup>(7)</sup>が、容器内発熱に対し容器出入口温度差を3K以内となるように水素流量を確保した場合でも、減速材容器内部において流れの再循環・滞留を生じると減速材温度が局所的に3K以上に上昇する可能性が極めて高い。減速材容器には衝突噴流の状態で水素が流入するため、容器内で反転する噴流により再循環流や流れの滞留が生じやすいと考えられる。このような流れ場の挙動を明らかにし、再循環流や流れの滞留を抑制する工学因子を抽出して構造設計に反映するため、流速分布等の流動データを取得し、容器内の流動状況を定量的に評価する実験計画を立案した。計画の概要是5章で述べる。この第一段階として減速材容器内における流動状況を把握し、解析コードの検証を目的に、水を用いた減速材基礎流動実験装置を製作した。装置には、特に衝突噴流の挙動を2次元的に把握可能な二重円筒から成る試験体を組み込み、PIVシステムによって流動状況が可視化できるようにした。PIVシステムについては次節において述べる。減速材基礎流動実験装置はタンクから、ポンプ、流量計、減速材模擬試験体を通して再びタンクへ戻る一般的な水の閉ループ構成である。以下に減速材模擬試験体及びループ機器の主な仕様を記す。

### (2) 機器仕様

機器の主な仕様は以下の通りである。

#### ①減速材模擬試験体

試験体は、衝突噴流とそれに伴う流動状況を2次元的に観測できるように、アクリル製の二重円筒を用いた。また、二重円筒の外管底面と内管下端との距離が重要なパラメータになるので、その距離を変更できるように内管を可動とした。計測に当たっては、試験体を次に示す②のアクリル製の水槽中に設置して、円管のえん曲面の屈折率がPIV測定に影響しないように考慮した。

寸 法 : Fig.2.1.1 のとおり

材 質 : アクリル

設計圧力 : 0.2MPa

数 量 : 1体

付 属 品 ・ 試験体台（鋼製アングル架台）……1式

#### ②水槽（えん曲面の撮影用）

寸 法 : 約 200×200×500mm（減速材模擬試験体用）

材 質 : アクリル

数 量 : 1式

水槽内の水の置換用にドレン口（3/8B）を設置。

③ポンプ

型 式 : たて型多段うず巻ポンプ DPL-32SASB-02-30C-5 (イワキ製)

流 量 : ~32 m<sup>3</sup>/hr (533 l/min)

本体材質 : SUS316

ベアリング材質 : セラミックス

エニカルシル材質 : SiC/SiC

接 続 : フランジタイプ (鋳鉄製)

インペラ段数 : 2段

モータ出力 : 3 kW

モータ種類 : 全閉外扇屋内型

数 量 : 1台

付 属 品: 東芝小型インバータ TOSVERT VF-SX 3相標準 200V 3.7kW

④タンク

型 式 : スイコー大型タンク 500

容 量 : 500 l

寸 法 : 外径 1000mm、高さ 1425mm、肉厚 20mm

材 質 : ポリエチレン製タンク

数 量 : 1基

付 属 品 : 入口、出口配管 (1 B)

・バイパス戻り配管 (1 B)

・鋼製架台

⑤電磁流量計

型 式 : MagneW 3000 (山武ハネウエル(株)製)

変換器型式 : KIX20B-I12×2TV-XXX

検出器型式 : KID10BY-0025PL11SV-XX

主 電 源 : AC220V、60Hz

消費電力 : 14W(22VA) 検出器と変換器を含む

電流出力 : DC4~20mA、負荷抵抗 0~600Ω

流速レンジ : 0~0.1m/s から 0~10m/s

周囲温度範囲 : -10~+50°C

数 量 : 1台

⑥撮影用スクリーン

計測時、レーザーや CCD カメラの背景として、試験体の背面に非反射性のスクリーンを設置した。スクリーンは、試験体を支持しているキャスター付きアングル架台

に貼り付けてある。

寸 法 : 約 1300×1600mm  
 材 質 : 黒色プラスチック板（写真撮影用黒布の相当品）  
 数 量 : 1 式

#### ⑦配 管

型 式 : 耐圧ビニール管 トヨロンスプリングホース  
 内 径 : 25 mm  
 外 径 : 33 mm  
 常用圧力 : 0.4 MPa  
 破壊圧力 : 1.6 MPa

#### (3) ループ組立

ループ構成の概要を Fig.2.1.2 に、組み立て完成後の写真を Fig.2.1.3 に示す。ループは HENDEL 大実験室内に設置されている既設の装置（PWC 試験装置架台）を利用して組み立てた。組み立ては以下の点に留意して行った。

- (a) タンクはタンク支持台に固定し、支持台は PWC 試験装置架台に固定した。また、既設の給水口を分岐してタンクへの給水を行うようにした。
- (b) ポンプ、流量計及びこれら付属機器（インバータ等）はポンプ・流量計台（キャスター付き架台）上に固定し、耐圧フレキシブルホースで配管接続を行った。なお、ポンプ入口にドレンライン、ポンプ出口にバイパスライン（1B バルブ（塩化ビニル）付き）を設けた。

## 2.2 PIV 計測システムの概要

現在、流体の流速計測システムとして、熱線流速計システム、レーザードップラーフロー計（LDV）システム、位相ドップラーパーティクル計測(PDA)システム、PIV システム等が用いられている。

熱線流速計システムは、流体中に置いた熱線の温度が流れによって変化し、結果として熱線の抵抗値が変化するという熱損失を利用した熱線流速計を用いたものである。他のシステムに比べて省スペースで、熱線プローブを交換することにより気体、液体の計測ができる。しかし、温度補償・校正が不可欠であり、これらは相当な熟練を要する。また、小さいとはいえプローブを流体中に置くため流れ場を乱さないように装置及び測定系に工夫を施す必要がある。

一方、LDV システムは、流れとともに運動する微粒子にレーザー光をあててその散乱光の周波数がシフトすること（ドップラー効果）を利用したレーザードップラーフロー計を用いたものである。熱線流速計とは異なり、流れの中にプローブを挿入する必要がないため

に流れを乱すことがなく、また、測定可能な速度範囲が広い、空間的分解能がよい等の特色を持っている。また、最近のものは信号処理、光学系の調整が極めて簡便になり、ポイント計測に優れたシステムである。

PDA システムは、2ヶ所以上で取り込んだドップラー信号の位相差が粒子の径に比例する原理から、速度だけでなく粒子の大きさや数密度等も測定でき、LDV システムと同様の特色をもつ。

PIV システムは、流れ場の粒子にレーザーシート光をパルス照射し、カメラで捕らえた連続粒子画像から速度ベクトルを計算する測定法（PIV）を用いている。LDV システムと同様に非接触測定で流れを乱すことがなく、広い速度範囲の測定が可能で、LDV システムでは不可能な流れ場の瞬時計測を簡便に実施することができる。ただし、測定精度は解析の元になる粒子画像の鮮明さに大きく依存する。

本実験における衝突噴流の計測には、可視化によって流れ場全体を定性的にとらえ、さらに流速等の定量的なデータの取得が必要である。したがって、ポイント計測では得ることが困難な、非定常状態の瞬時の流れ場の構造をベクトル図や流線図、渦度等で知ることができ、複数のデータを平均化して平均流速や乱れの分布を得ることができる PIV システムを採用することとした。

### （1）PIV システムの基本原理

PIV は、ダブルパルスレーザーにより粒子（シーディング粒子と呼ぶ）の移動距離を計測して、速度を計算する Time-of-flight の代表的な計測法である。レーザーパルスをシート光にして流れ場に照射し、シート光面内のシーディング粒子の位置を記録する。次に微小な時間をおいて2回目のレーザーパルスを同一面に照射し、それぞれの粒子の2番目の画像を記録する。こうして微小時間差をもって記録された2つの画像の差、すなわち粒子の微小な移動量から、数百点または数千点に及ぶ局所的な速度情報を高速、高精度に計算して、ベクトルマップを作成する。このように PIV は瞬時の流れ場の2次元流速ベクトルマップを計測する方法であり、その原理は  $\langle \text{距離} \rangle = \langle \text{速度} \rangle \times \langle \text{時間} \rangle$  の式に基づいている。

以下に PIV 計測のプロセスを簡単に示す。

#### 1. シーディング

流れに追従し、撮影に十分な散乱光が得られるシーディング粒子を入れる。

#### 2. イルミネーション

記録する断面を規定し、流れ中の粒子から散乱光を得るために高出力パルスレーザーによるシート光をストロボ的に照射する。

#### 3. 記録

高画素の CCD カメラを用いて、粒子画像を撮影する。

#### 4. ベクトルプロセス

得られた画像を解析し、流れ場のベクトルマップを求める。

## (2) PIV システム構成機器

本実験では、世界最速の PIV システムである DANTEC 社製の PIV システムを用いた。PIV システムは、YAG レーザー、CCD カメラを中心としたレーザー流速分布計測システムと、PIV2000 プロセッサーメインフレームで構成される流速分布データ処理システム、及び、メインフレームからのデータをパソコン上で処理するソフトウェアから成る。これらを構成する主要機器を以下に記す。また、Fig.2.2.1 にシステム構成の概略を示す。

### (i) レーザー流速分布計測システム

- ・ New Wave ミニ YAG レーザー、50mJ、15Hz
- ・ コダックメガプラスカメラモデル ES1.0 クラス 1 マクロレンズ (F-C アダプター付)
- ・ ニコンレンズ用干渉フィルター
- ・ ES1.0 カメラ用パーソナリティモジュール
- ・ 入力バッファー
- ・ New Wave レーザー用ライトシート光学系(10° )
- ・ レーザ制御用ケーブル、他

### (ii) 流速分布データ処理システム – PIV2000 プロセッサーメインフレーム

- ・ Flow Map 相関処理器
- ・ 16M ピクセルメモリーブロック、他

### (iii) ソフトウェア

流速分布データ処理システムで解析処理されたデータを基にビットマップ、オンラインベクトル図などを作成するソフトウェアとして FlowManager を用いた。

FlowManager は Windows の環境下で使用し、以下の機能を有している。

- ・ 幅広い流れ場と各点での検証オプションにより、測定データ中のエラー等の情報を自動的に除去。
- ・ 流れ場の静的特性、渦度センター、流線などを評価し、ベクトル図、渦度センターなどを出力。
- ・ Windows ベースの一般評価プログラム (EXCEL 等) へのベクトル図や渦度センターを出力。

FlowManager を用いることにより、流れ場の情報が即座にコンピュータの CRT 上に表示されるため、実験条件の妥当性などの検討が現場で隨時行うことができる。これにより、一連の実験を従来のレーザードップラー計測法よりも短時間で、かつ、効率的に実施することができる。

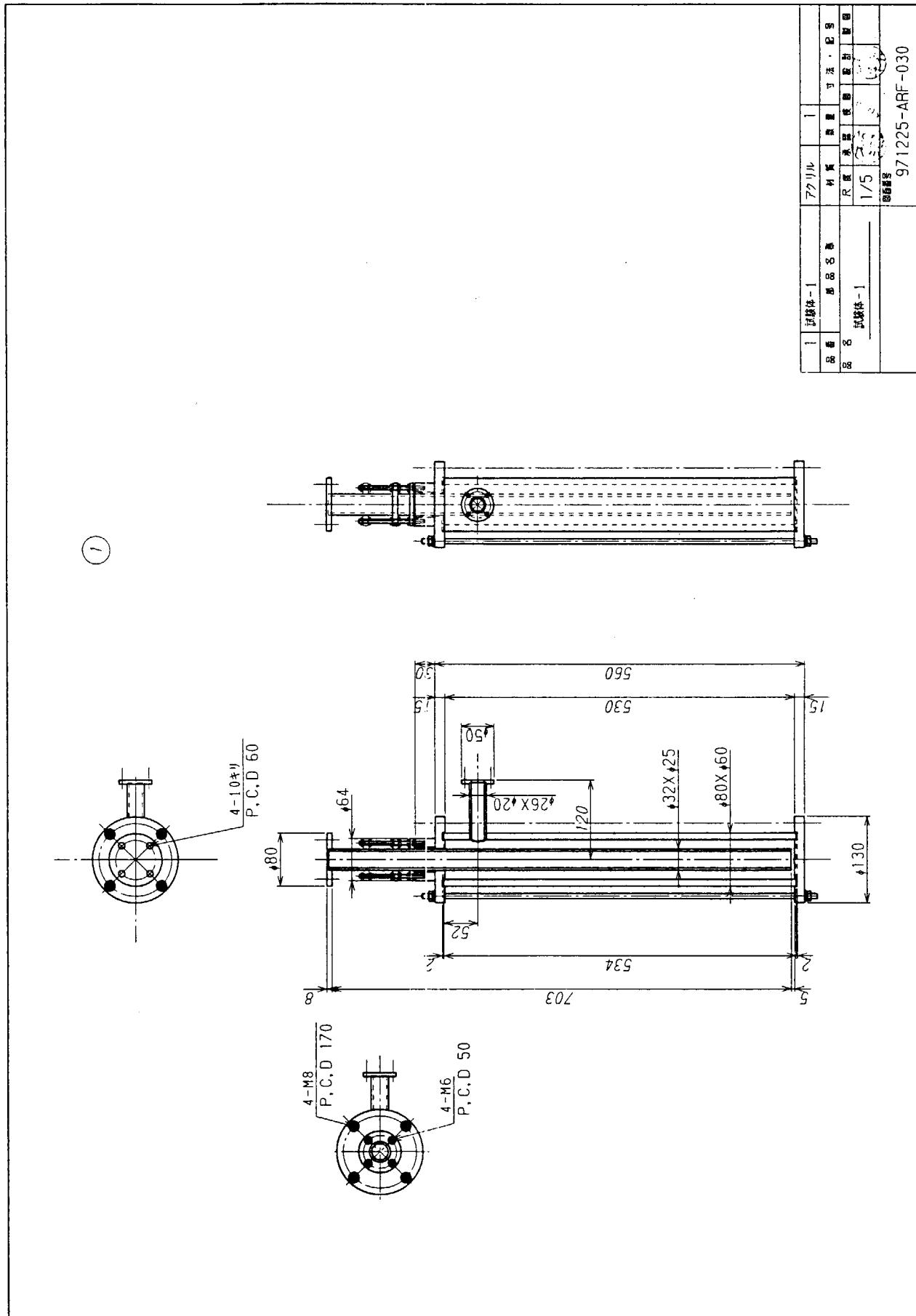


Fig.2.1.1 減速材模擬試驗體

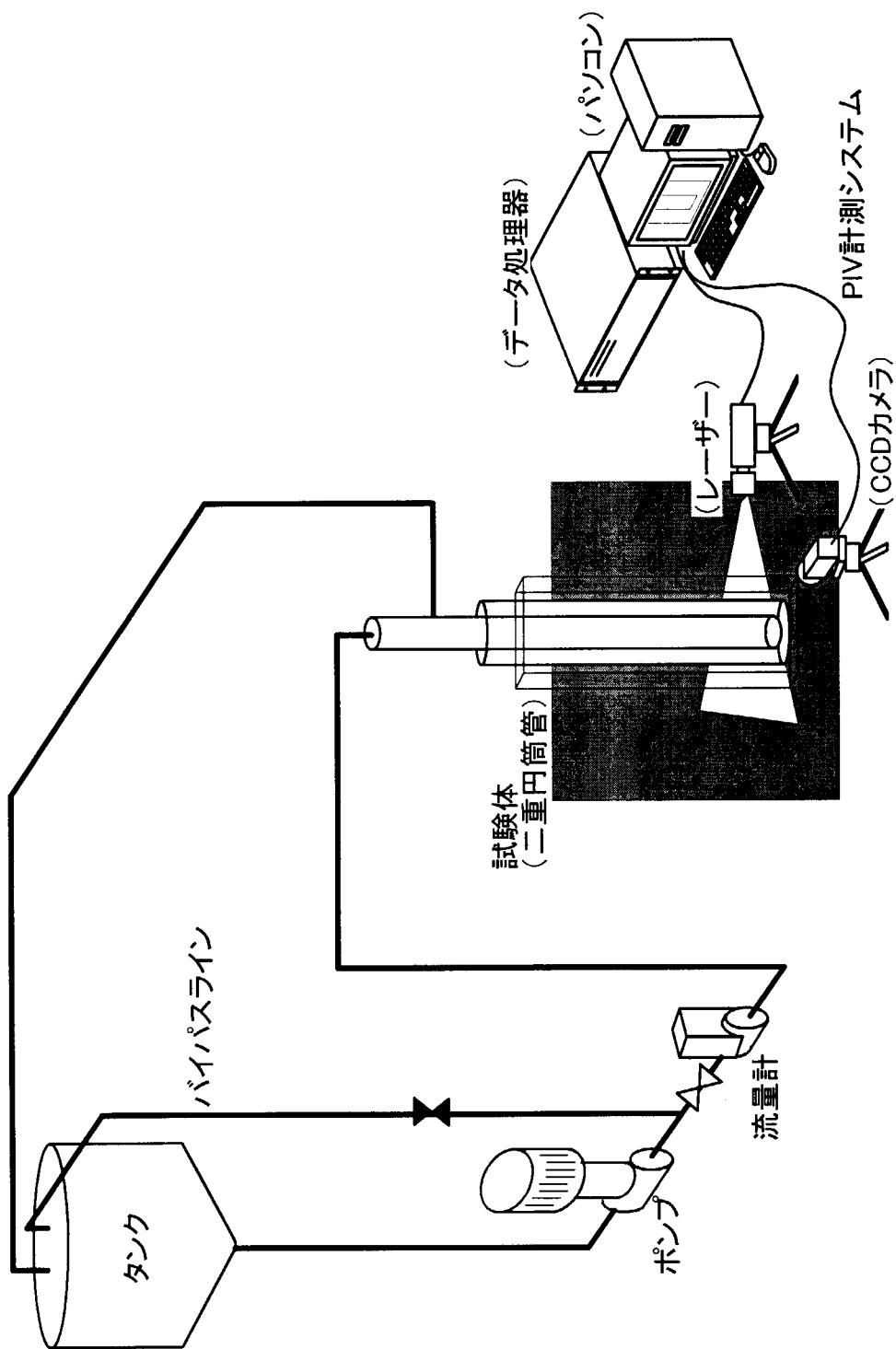


Fig.2.1.2 減速材基礎流動実験装置の概要

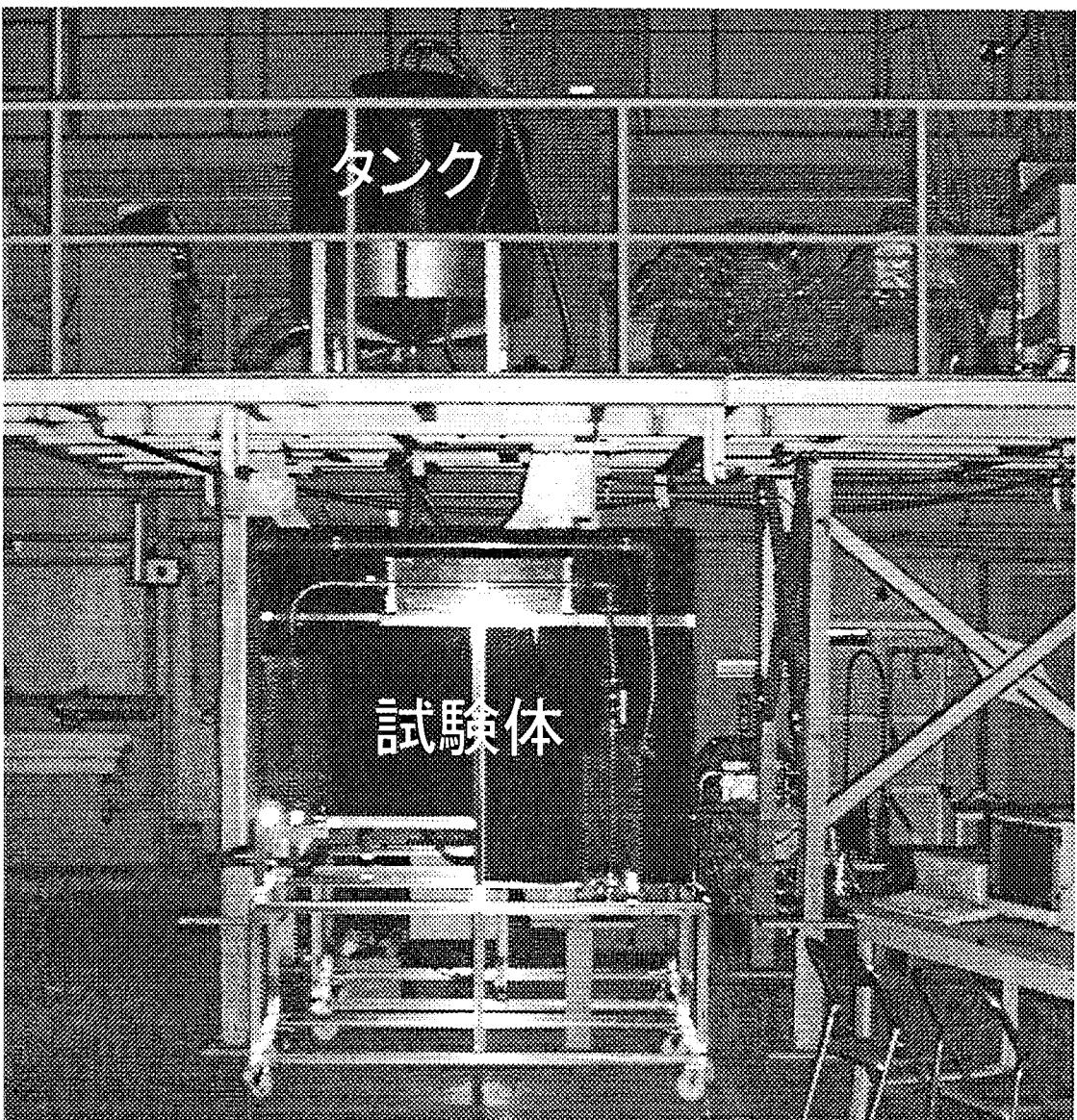


Fig.2.1.3 基礎流動実験装置(タンクと試験体)

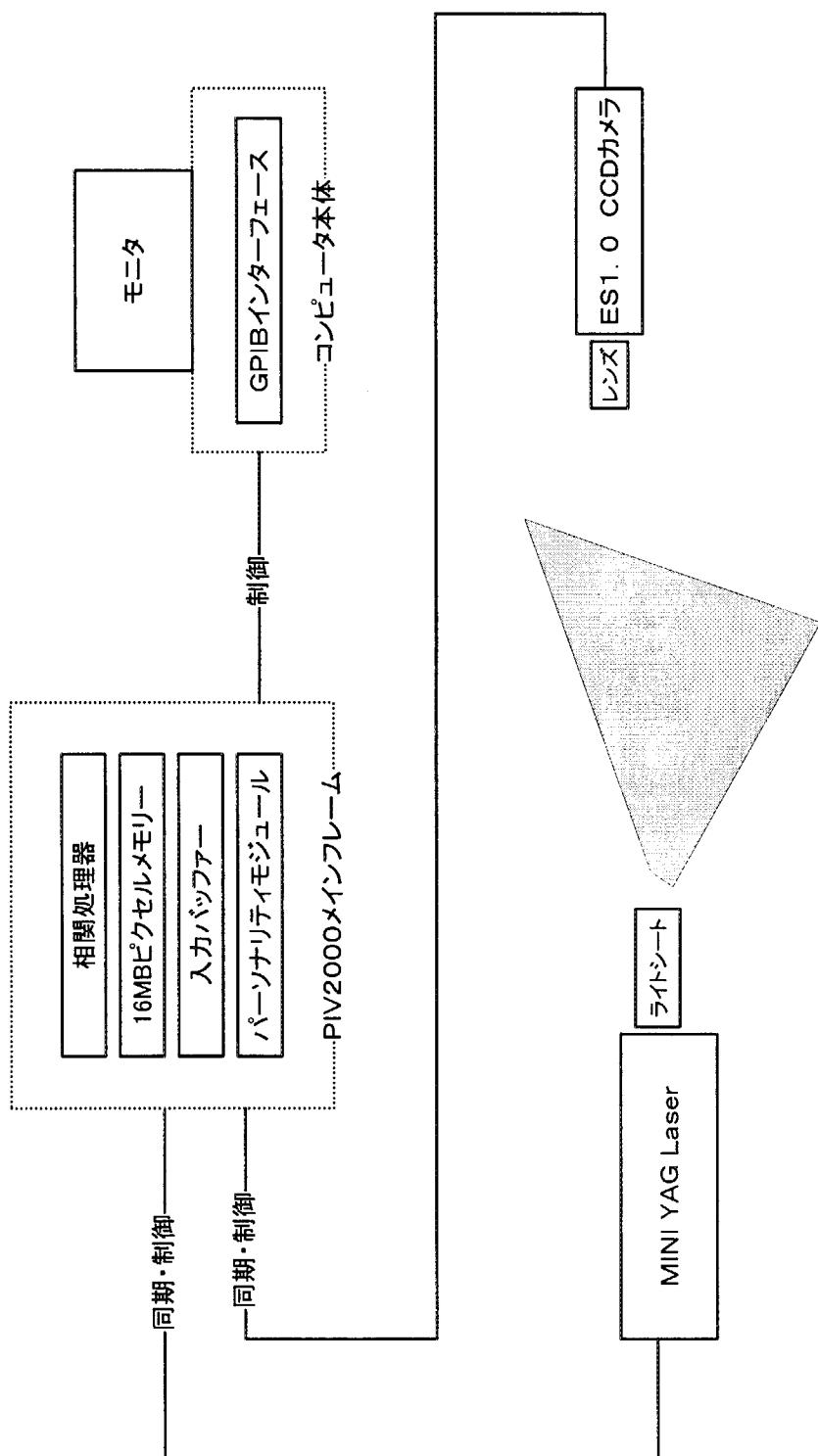


Fig.2.2.1 PIVシステム構成の概略

### 3. 予備実験

#### 3.1 PIV 用シーディング粒子の選定

(1) PIV による速度場計測の精度は、PIV に適した良好な粒子画像の撮影にかかっている。良好な画像を得るためにには、シーディング粒子の大きさ及び濃度、カメラ及びレーザーのタイミング、レーザー光強度、パルス光発光間隔、測定領域、カメラの分解能や使用するレンズ等を調整、セットアップする必要がある。また、画像から流速を算出する際に粒子移動距離の相互相関の精度を向上させるためには、流速範囲、測定領域内の粒子数、CCD 上の散乱粒子像の大きさ、測定領域の大きさ及び領域内の速度勾配等も考慮しなければならない。本節では、特に重要なパラメータであるシーディング粒子について、代表的な数種類のサンプルを用いた簡単な予備実験により、本実験に適する粒子を選定した結果について述べる。

#### (2) 実験方法

アクリル容器(10×10×10cm)に水を入れ、マグネットックスターーラーによって水流を起こす。この中にシーディング粒子を入れ、PIV システムによって流速分布の測定を行った。実験の概要を Fig.3.1.1 に示す。シーディング粒子には代表的な以下の粒子を用いた。各粒子のデータを Table 3.1.1 に示す。

- (a) ゴッドボール B-25C
- (b) ゴッドボール B-6C
- (c) バルーン状酸化チタン NST-B1
- (d) ガラスバルーン
- (e) タルク ( $\text{SiO}_2, \text{MgO}$  ケイ酸マグネシウム)
- (f) エクスパンセル DU#461

#### (3) 実験結果

##### (a) ゴッドボール B-25C

ゴッドボールシリーズの中でも比較的粒子径が大きく、中空多孔質シリカ球形粒子である。Fig.3.1.2 のようにレーザー出力が「低」では粒子からの散乱光が非常に弱く、全体的に暗い画像となって粒子をとらえにくい。レーザー出力を「高」にすると、Fig.3.1.3 のように粒子がはっきりしてくるが、全体にもやがかった状態になる。しかし、ベクトルマップは Fig.3.1.4 に示すように過誤ベクトルは少なく、比較的良好なデータを得ることができた。

## (b) ゴッドボール B-6C

ゴッドボール B-25C と同様に中空多孔質シリカ球形粒子で、B-25C より小さい粒子径である。B-25C と同様にレーザー出力が「低」では粒子からの散乱光が非常に弱く、全体的に暗い画像となって粒子をとらえにくい (Fig.3.1.5)。粒子径が小さいためか、ここではレーザー出力を「高」にしても粒子をとらえにくい (Fig.3.1.6)。このため、Fig.3.1.7 に示すように過誤ベクトルが多く現れるベクトルマップになり、良好なデータを得ることは難しい。

## (c) バルーン状酸化チタン NST-B1

今回のサンプルの中で最も粒子径が大きい粒子である。粒子からの散乱光が強く、Fig.3.1.8 のようにレーザー出力が「低」でも十分粒子を確認できる。Fig.3.1.8 には粒子が疎の部分と密の部分が存在しているように見えるが、Fig.3.1.9 のベクトルマップは良好なデータを示しており、使用可能と考えてよい。

## (d) ガラスバルーン

粒子のデータが無かったが Fig.3.1.10 の画像から前の NST-B1 と同等の粒子径と思われる。また、NST-B1 同様にレーザー出力が「低」でも十分粒子を確認でき、粒子が一様に分散していることが分かる。したがって、Fig.3.1.11 に示すベクトルマップもよく流れの状況を表しているが、マグネットスターを停止すると直ちに沈殿したので、この使用は避けた方がよい。

(e) タルク ( $\text{SiO}_2\text{-MgO}$  ケイ酸マグネシウム)

いわゆる市販のベビーパウダーである。粒子径の詳細なデータは無いが、他のものと同程度と考えられる。NST-B1 と似て、粒子からの散乱光が強く、レーザー出力が「低」でも十分粒子を確認できる (Fig.3.1.12)。また、明と暗 (疎と密) の部分が NST-B1 の場合と同様に見られるが、ベクトルマップは良好なデータを示しており (Fig.3.1.13)、使用可能と考えてよい。

## (f) エクスパンセル DU#461

塩化ビニリデン／アクリロニトリルのコーポリマーを殻とし、発泡剤としてイソブタンを内包・カプセル化した、熱膨張性マイクロカプセルである。本実験のように使用温度が十分に低い場合には、「熱膨張」といった性質は関係ない。粒子径は他の粒子と同程度である。Fig.3.1.14 からレーザー出力が「低」でも十分粒子を確認でき、一様に分散していることが分かる。比重も比較的水に近いことから、ガラスバルーンのように直ぐに沈殿することではなく、ベクトルマップも良好なデータを示している (Fig.3.1.15)。

以上の結果から、本実験には PIV 用シーディング粒子としてエクスパンセル DU#461 を使用することとした。

### 3.2 レーザー照射位置の検討

エクスパンセル DU#461 を減速材基礎流動実験装置に混入し、噴流状況を測定する縦断面に正面からレーザーパルス光を照射して PIV 計測システムで PIV 画像を撮影したところ、円管の曲面部からの散乱光が予想以上に現れた。光の屈折による流速測定の影響ができるだけ抑制するために、試験体は水槽に浸してあるが、曲面での光の散乱に対しては抑制効果は小さい。そこで、より良好な粒子画像を得るためにレーザーパルス光の照射位置を変えて PIV 画像を撮影し、最も適した照射位置を決定することとした。Fig.3.2.1 にレーザーの照射位置を、各位置において得られた画像を Fig.3.2.2～Fig.3.2.9 にそれぞれ示す。

Fig.3.2.2 (①) は斜め上方の位置から照射した場合の画像である。円管からの散乱光が比較的少なく全体的によい画像といえるが、矢印に示すように内管の先端から 2 本の影が伸びており、この部分で粒子の視認性が劣ることになる。Fig.3.2.3 (②) は①の位置より少し下げた、やや斜め上方からの画像である。円管からの散乱光が①に比べ多くなり、矢印に示すように影も生じている。Fig.3.2.4 (③) は真横から照射した場合の画像である。今回の中で最も散乱光が多く、また影も生じているので真横からのレーザー照射は避けた方がよい。Fig.3.2.5 (④) はやや斜め下方の位置から照射した場合の画像である。散乱光は比較的少ないが、試験体の底面が厚いために非常に大きな影が生じ、PIV 画像に適さない。Fig.3.2.6 (⑤) は④よりもさらに下げた、斜め下方からの照射の場合である。④と同様に大きな影が生じ、また試験体の構造上距離が離せないためレーザーシートが広がりきらず測定領域の一部しか照らされていない。残りの⑥⑦⑧はいずれも真下からレーザーを照射した場合である。⑥は試験体との距離が近い場合で、⑦⑧は可能な限り離した場合である。Fig.3.2.7 (⑥) は散乱光が非常に少ないが、距離が近すぎるためにレーザーシートが広がりきらず測定領域の約半分しか照らされていない。Fig.3.2.8 (⑦) は散乱光が非常に少ないが、底板が厚いため全体的に暗い画像となり粒子の視認性が劣る。そこで、この状態のままレーザーの出力を「高」にしたのが Fig.3.2.9 (⑧) である。散乱光は先程の⑦に比べて多くなるが①と同程度で、粒子の視認性という点で比較的よい画像と考える。

以上の結果から、本実験ではレーザーの照射位置を真下からとし、レーザー出力「高」で計測を行うこととした。

Table 3.1.1 粒子データ

名称	型番	粒子径(μm)	材質	真密度(g/cm <sup>3</sup> )	かさ密度(g/cm <sup>3</sup> )	備考
ゴッドボール	B-6C	0.5~6.0、平均2.0~2.5	SiO <sub>2</sub>	2.10	0.18~0.20	中空多孔質シリカ球形粒子
	B-25C	0.5~25.0、平均12.0~14.0		2.10	0.22~0.40	
ナバーン状酸化チタン	NST-B1	20~100	TiO <sub>2</sub>	—	0.01~0.04	—
ガラスバーレーン	—	—	ガラス	—	—	仕様不明
タルク	—	5~、平均14	SiO <sub>2</sub> ,MgO	—	—	ペビーハウダー
EXPANCEL	DU#461	5~30、平均10~16	塩化ビニリデン／アクリロニトリル	1.3	0.7	熱膨張性マイクロカプセル

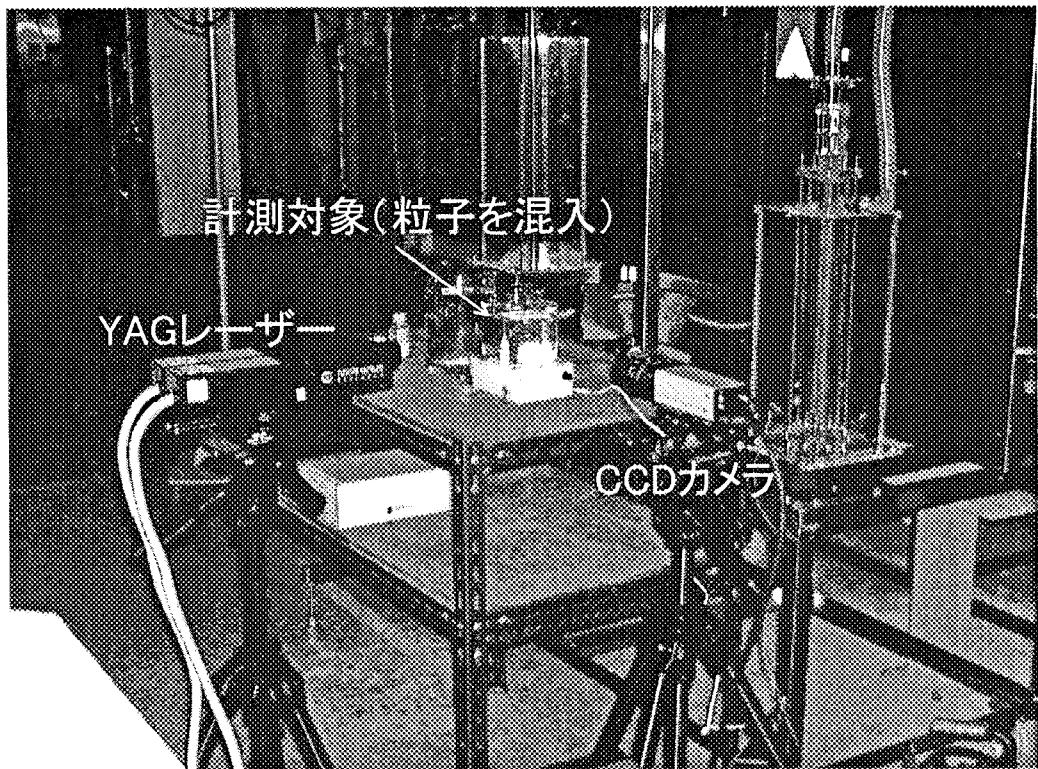
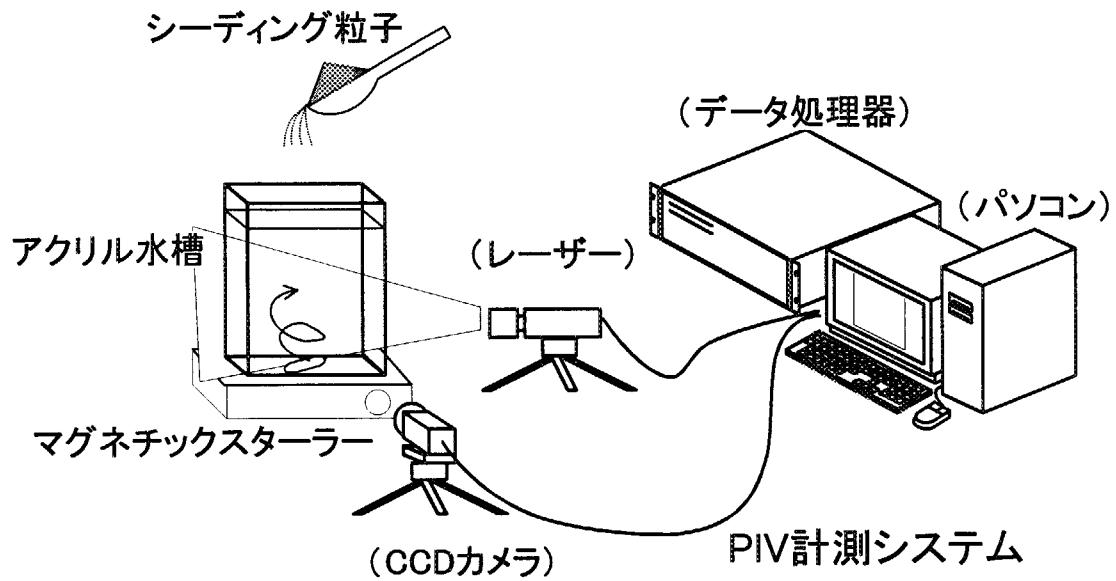


Fig.3.1.1 予備(粒子選定)実験の概要

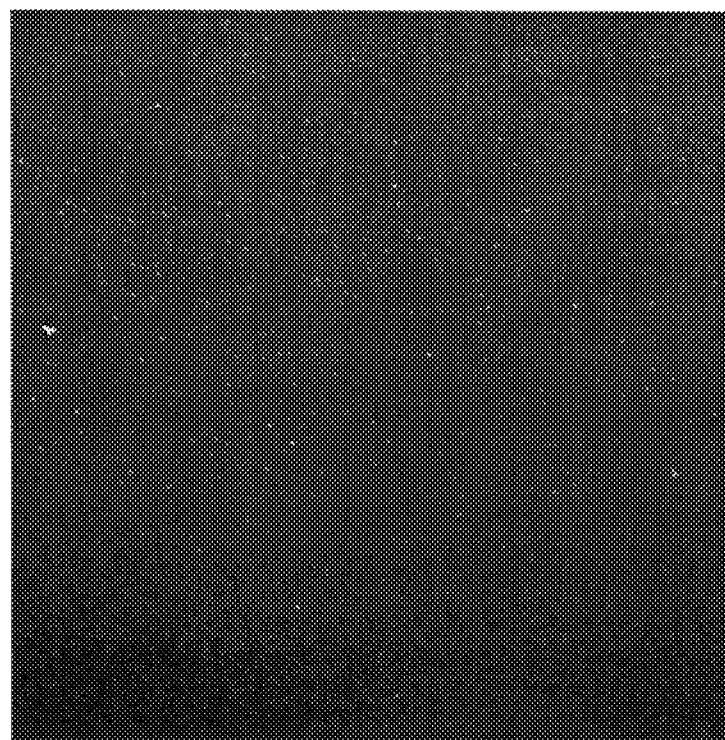


Fig.3.1.2 ゴッドボール B-25C の粒子画像(レーザー出力:低)

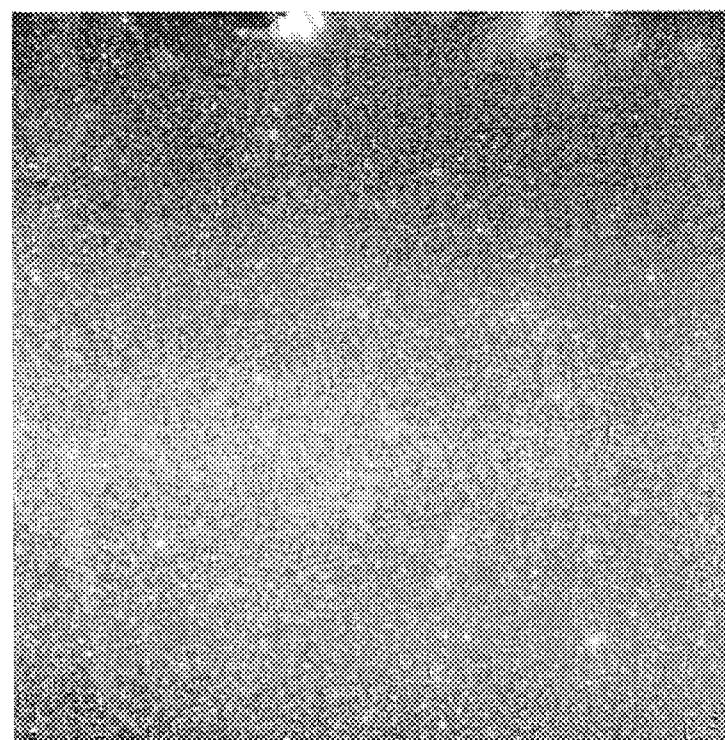


Fig.3.1.3 ゴッドボール B-25C の粒子画像(レーザー出力:高)

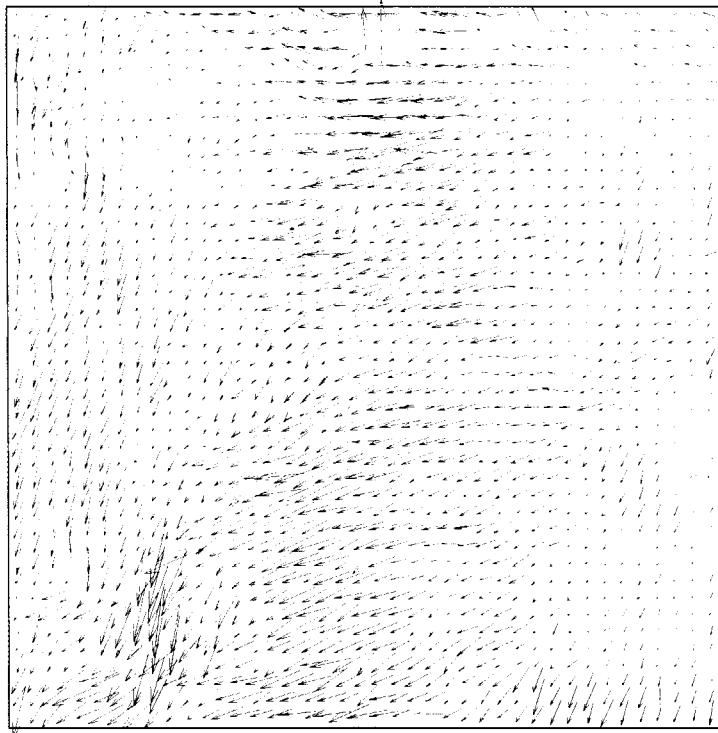


Fig.3.1.4 ゴッドボール B-25C のベクトルマップ



Fig.3.1.5 ゴッドボール B-6C の粒子画像(レーザー出力:低)

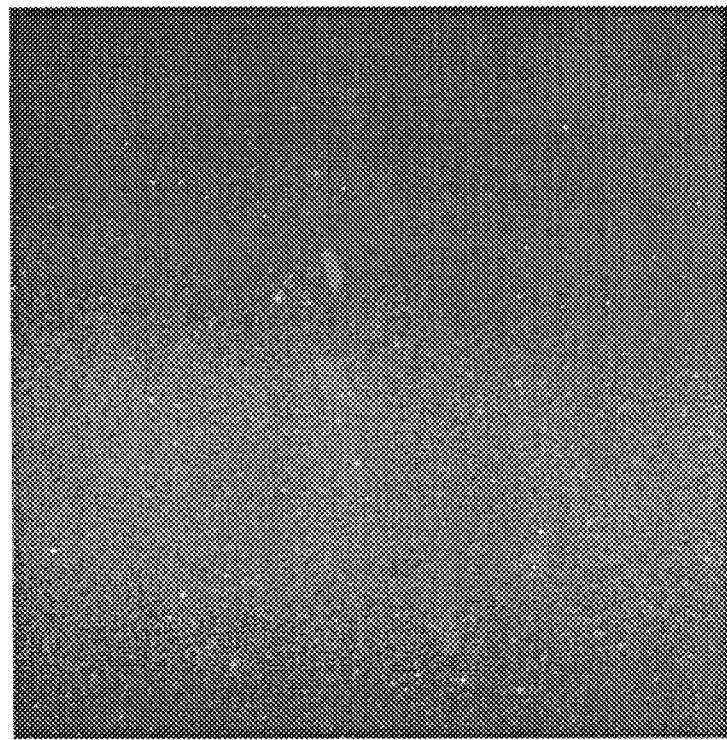


Fig.3.1.6 ゴッドボール B-6C の粒子画像(レーザー出力:高)

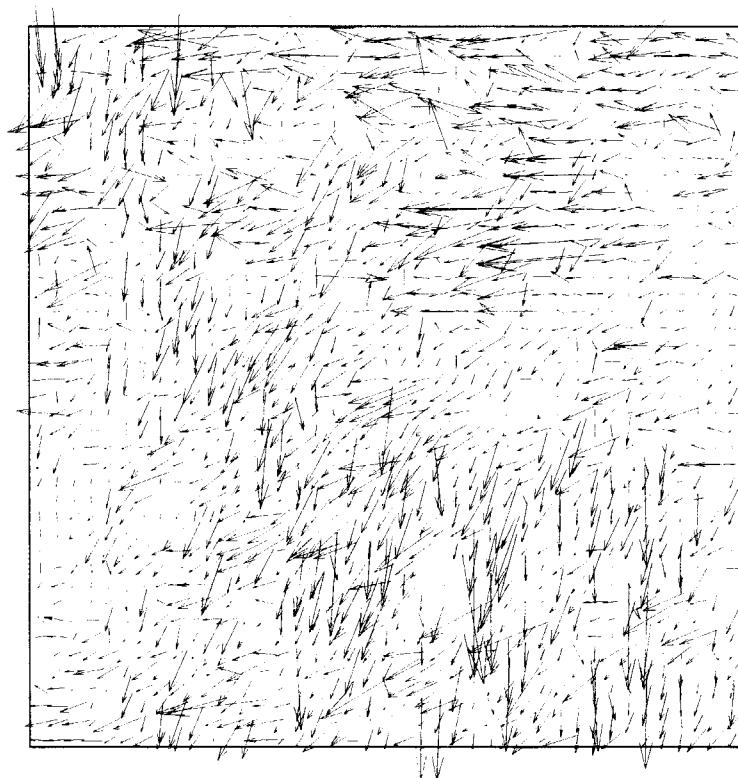


Fig.3.1.7 ゴッドボール B-6C のベクトルマップ

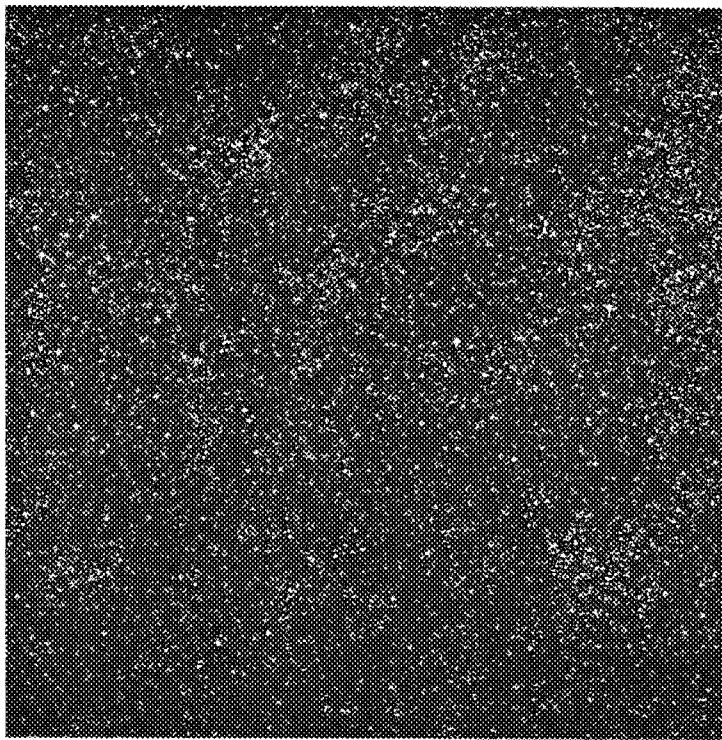


Fig.3.1.8 バルーン状酸化チタン NST-B1 の粒子画像(レーザー出力:低)

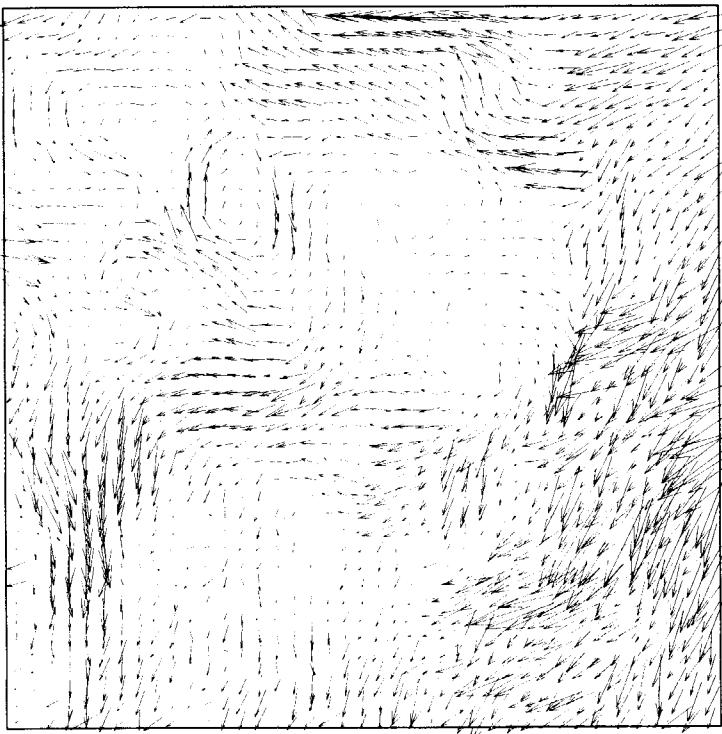


Fig.3.1.9 バルーン状酸化チタン NST-B1 のベクトルマップ

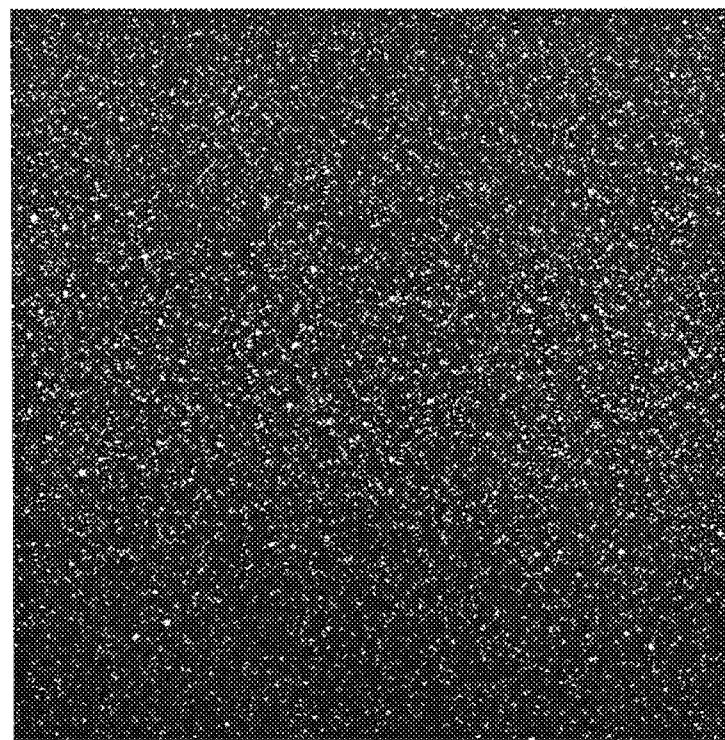


Fig.3.1.10 ガラスバルーンの粒子画像(レーザー出力:低)

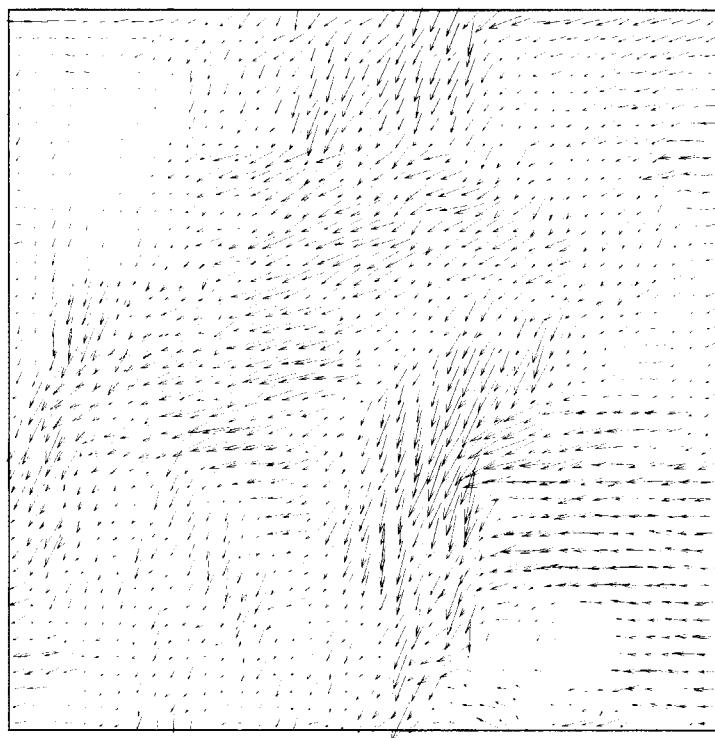


Fig.3.1.11 ガラスバルーンのベクトルマップ

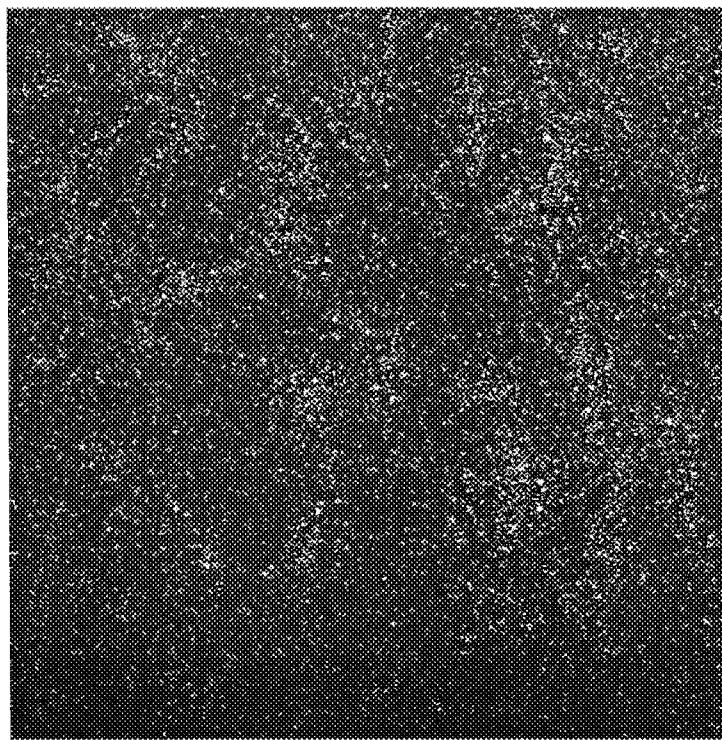


Fig.3.1.12 タルク(ベビーパウダー)の粒子画像(レーザー出力:低)

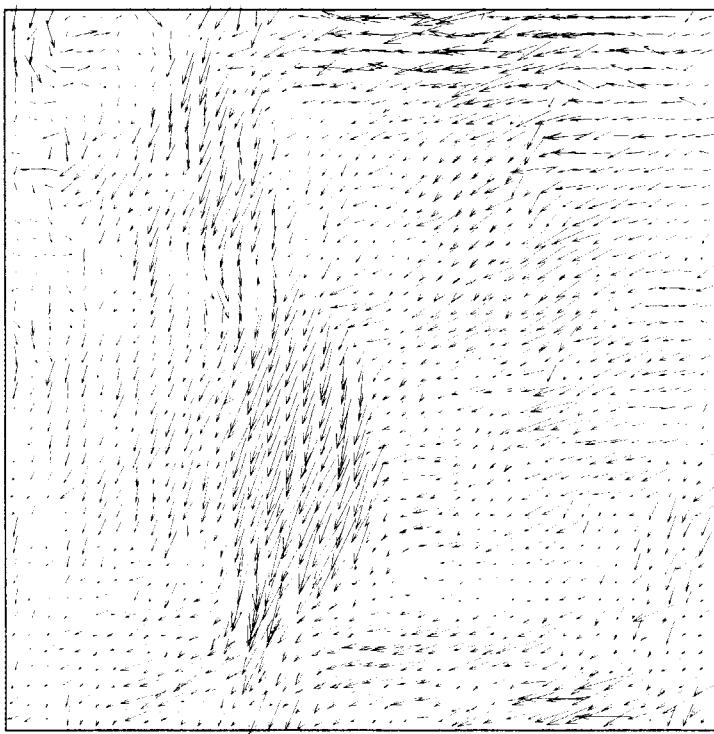


Fig.3.1.13 タルク(ベビーパウダー)のベクトルマップ

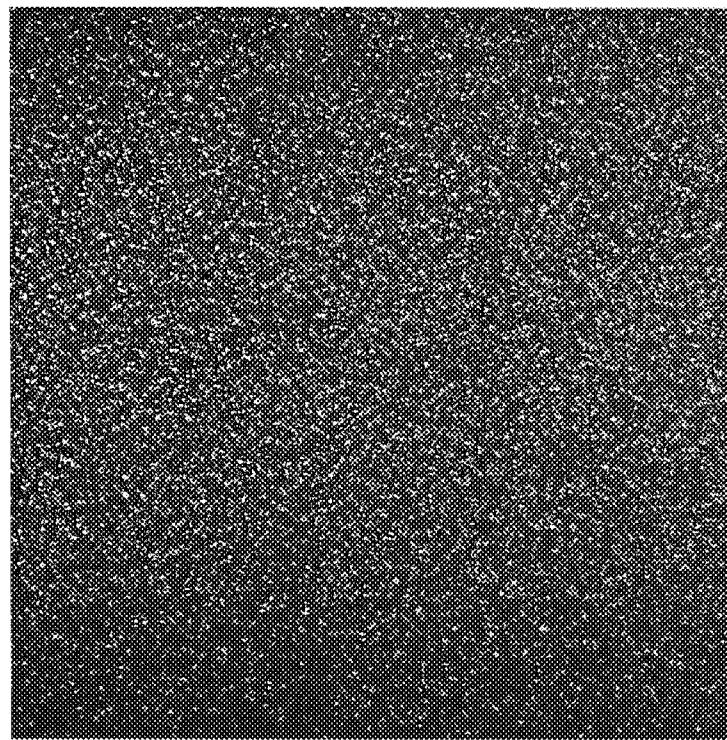


Fig.3.1.14 エクスパンセル DU#461 の粒子画像(レーザー出力:低)

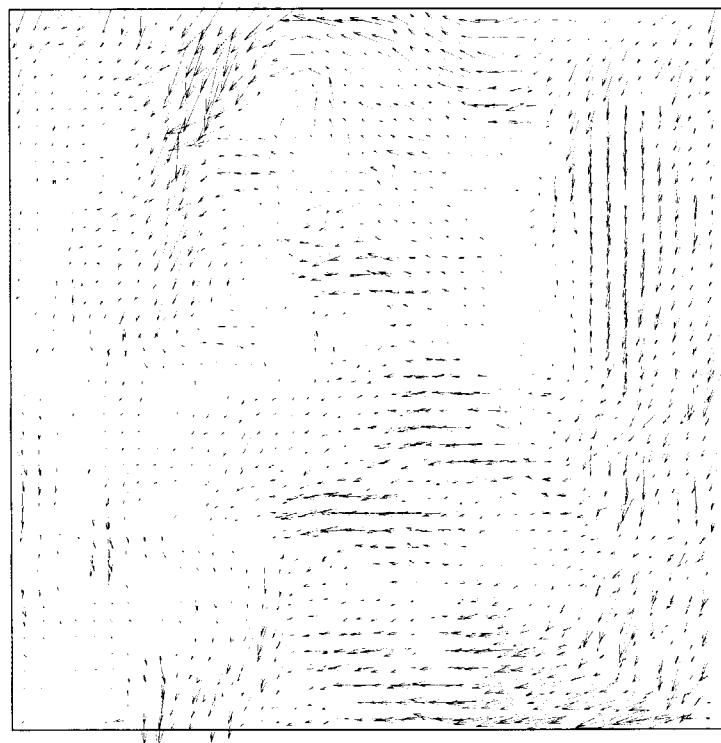


Fig.3.1.15 エクスパンセル DU#461 のベクトルマップ

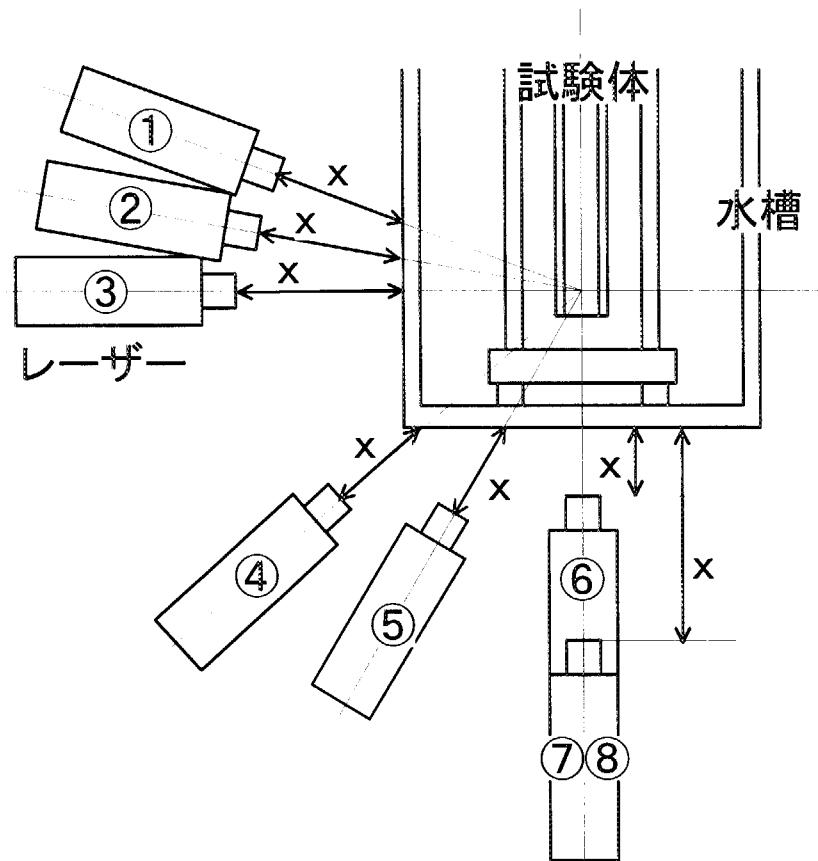


Fig.3.2.1 レーザーの照射位置

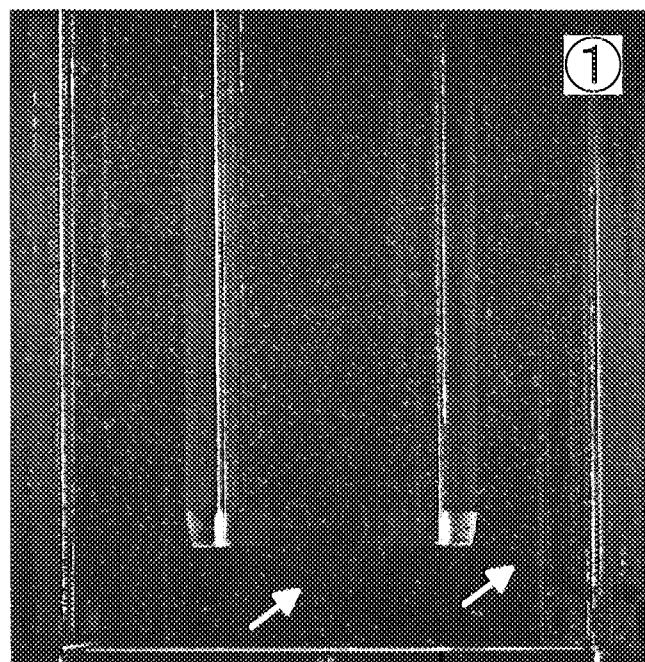


Fig.3.2.2 画像①: 斜め上方から照射( $x=46\text{cm}$ )

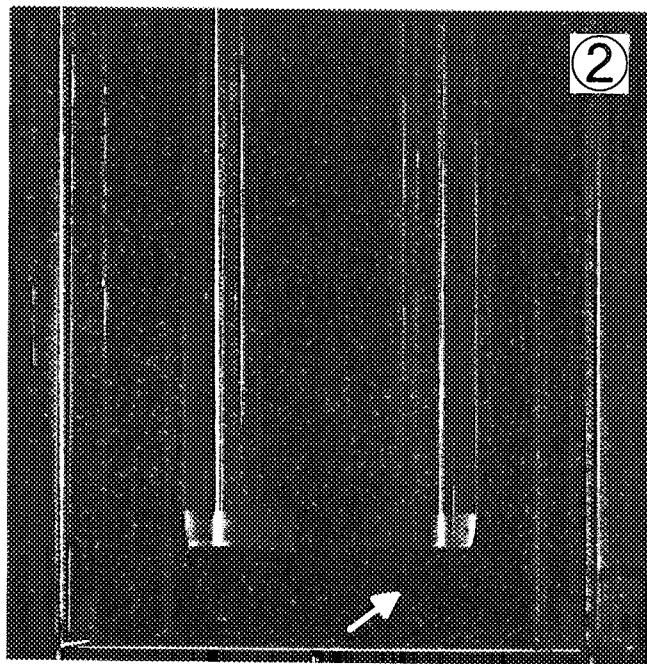


Fig.3.2.3 画像②: やや斜め上方から照射( $x=48\text{cm}$ )

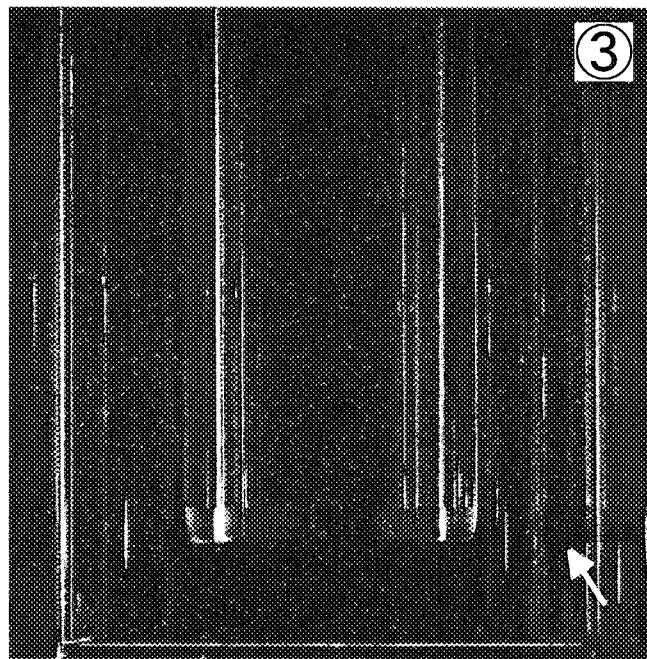


Fig.3.2.4 画像③: 真横から照射( $x=50\text{cm}$ )

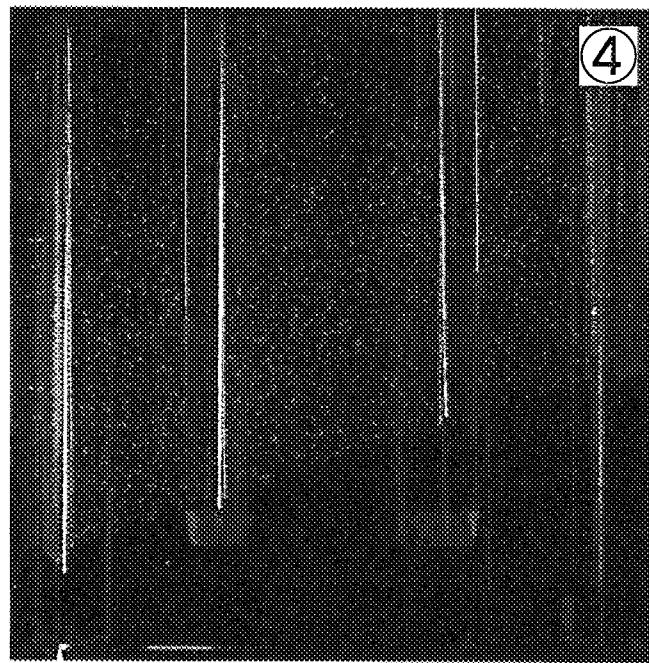


Fig.3.2.5 画像④: やや斜め下方から照射( $x=30\text{cm}$ )

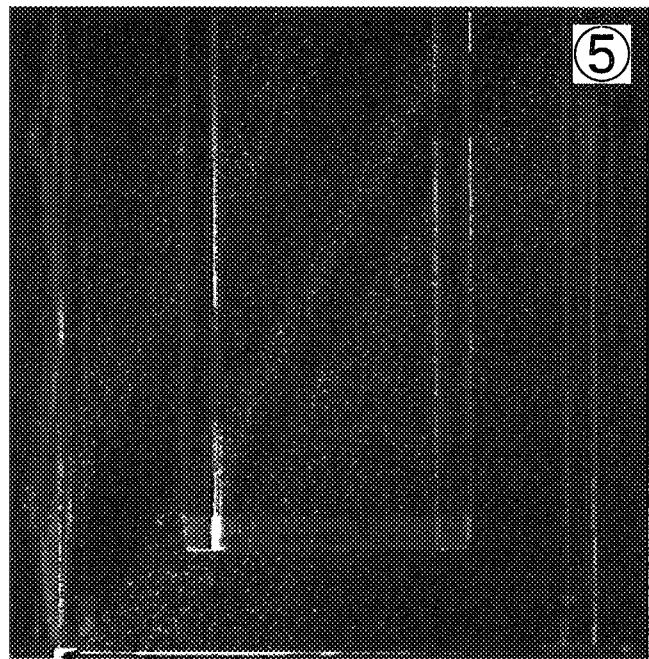


Fig.3.2.6 画像⑤: 斜め下方から照射( $x=18\text{cm}$ )

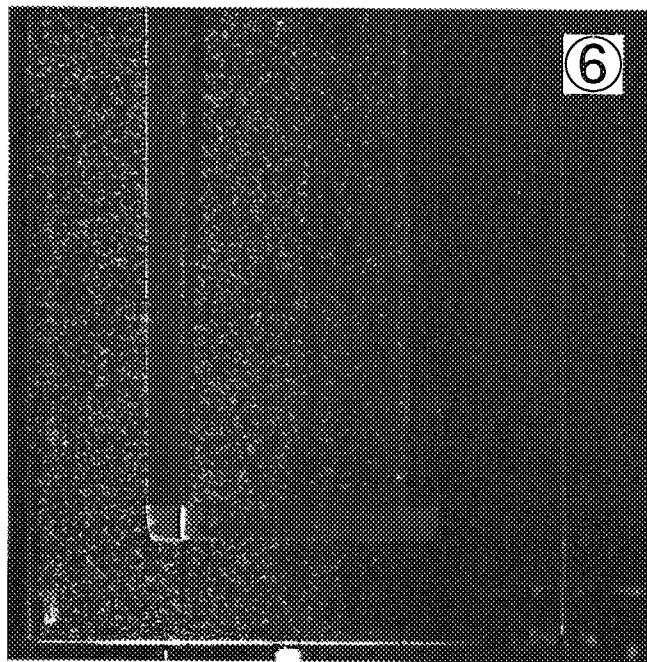


Fig.3.2.7 画像⑥: 真下から照射( $x=22\text{cm}$ )

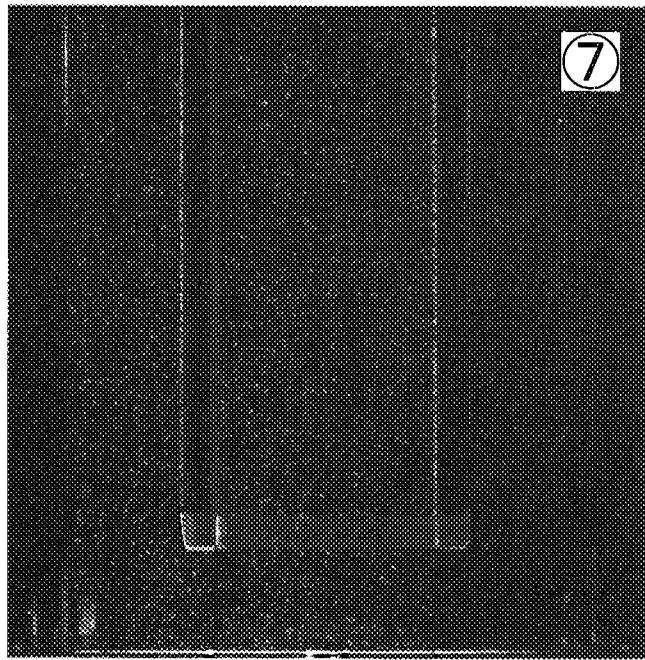


Fig.3.2.8 画像⑦: 真下から照射( $x=32\text{cm}$ )

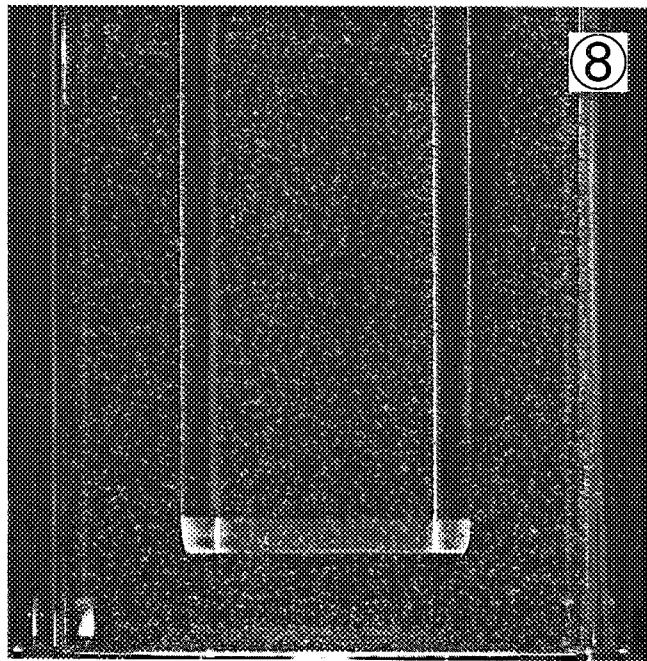


Fig.3.2.9 画像⑧: 真下から照射( $x=32\text{cm}$ )  
レーザー出力「低」→「高」

## 4. 基礎流動実験結果

### 4.1 軸方向の流動状況

#### 4.1.1 実験条件

容器内における衝突噴流とそれに伴う流れ場の状況が、噴流速度に対してどのように変化するかを把握するために軸方向の流速分布を測定した。測定に先立ち、試験体入口流速を所定の値に設定するために、実験装置の電磁流量計読み値(%)と PIV によるベクトルマップ上の入口流速(m/s)の関係について調べた結果を Fig.4.1.1 に示す。配管直径(25mm)から計算した流量と流速の関係と一致したので、Table 4.1.1 に示した流量計指示値に合わせることによって目標の入口流速に設定できる。これを基に、水流速を約 3m/s、2.5m/s、2m/s、1.5m/s、1m/s、0.5m/s と設定して測定を行った。このときの噴き出しレイノルズ数(代表長さ=内管径)は、それぞれ約  $8.4 \times 10^4$ 、 $7.0 \times 10^4$ 、 $5.6 \times 10^4$ 、 $4.2 \times 10^4$ 、 $2.8 \times 10^4$ 、 $1.4 \times 10^4$  である。実機におけるレイノルズ数の例として、例えば米国 SNS 計画における冷減速材容器の設計では容器入口において約  $4.6 \times 10^5$ (噴き出し口径=13mm、液体水素流速約 6m/s)<sup>(10)</sup>である。測定に当たっては、試験体の外管底面と内管下端との隙間を実機の設計と同じ 10mm とし、流入する水はほぼ大気圧で常温である。また、PIV システムによる計測は以下の条件で行った。

撮影画像数 : 100 (1 秒間隔)

カメラ画素 : 横 1008pixels、縦 1018pixels

1 画像撮影時のレーザーパルス光 :  $120 \mu\text{s}$  間隔で 2 ショット

上記条件の下で水流速が 2m/s の場合の CCD カメラによる画像、すなわち計測画像を Fig.4.1.2 に示す。

#### 4.1.2 流動状況の時間平均的特性

PIV システムでそれぞれの流速に対して 100 枚の流速ベクトルのマップデータを得た。このデータを前述の FlowManager で以下のように処理した。

- ① FlowManager 上で各ベクトルマップ毎に「Peak Validation」を行い、相関性の低いデータを過誤ベクトルとする。(例 Fig.4.1.3)
- ② FlowManager 上で各ベクトルマップ毎に「Range Validation」を行い、流速範囲(0 ~7m/s) を設定し範囲外のベクトルを過誤ベクトルとする。(例 Fig.4.1.4)
- ③ FlowManager 上で各ベクトルマップ毎に「Average Filter」を行い、過誤ベクトルを周辺ベクトルにより補完する。(例 Fig.4.1.5)
- ④ ③で処理されたベクトルマップ 100 枚を EXCEL に入力し、100 枚のベクトルマップを重ね合わせて平均化する。
- ⑤ 100 枚のベクトルマップを平均化した結果、すなわち約 100 秒間の平均流速分布

をグラフソフトによって表示する。

なお、今回使用したグラフソフトの DeltaGraph は、計測領域内の位置情報（x 軸、y 軸の数値）を示すことができる反面、ベクトルの流速情報を明確に示せないために MicroAVS で表示した結果も同時に示した。なお、MicroAVS で計測領域内の位置情報を示すことは困難なため、これら 2 つのソフトを用いることとした。

このようにして得られた平均流速分布について以下に述べる。

#### (1) 試験体入口流速が 3.0m/s の場合

Fig.4.1.6 に DeltaGraph によるベクトル図、Fig.4.1.7 に MicroAVS によるベクトル図を示す。内管から噴き出した水流は外管底面に衝突して両サイドに分かれ、外管壁に沿った上向き流れと内側に向かって下向き流れを引き起こす再循環流の発生が顕著に見られる。Fig.4.1.6 を見ると、再循環流の境界である上向きの流れと下向きの流れの境界は底面から約 51mm である。以後、本報ではこの高さを再循環流高さと呼ぶ。Fig.4.1.7 から分かるように、内管から噴き出した水流は底面及び外管壁に沿った領域で速く、再循環流の中心付近では非常に遅くなっている。また、噴き出した水（噴流）が衝突する外管底面の中心部にも流速の遅くなる領域が存在している。このような様相は他の流速の場合においても同様に見られた。

#### (2) 試験体入口流速が 2.5m/s の場合

Fig.4.1.8 に DeltaGraph によるベクトル図、Fig.4.1.9 に MicroAVS によるベクトル図を示す。再循環流高さは約 52mm である。

#### (3) 試験体入口流速が 2.0m/s の場合

Fig.4.1.10 に DeltaGraph によるベクトル図、Fig.4.1.11 に MicroAVS によるベクトル図を示す。再循環流高さは約 54mm である。

#### (4) 試験体入口流速が 1.5m/s の場合

Fig.4.1.12 に DeltaGraph によるベクトル図、Fig.4.1.13 に MicroAVS によるベクトル図を示す。再循環流高さは約 52mm である。

#### (5) 試験体入口流速が 1.0m/s の場合

Fig.4.1.14 に DeltaGraph によるベクトル図、Fig.4.1.15 に MicroAVS によるベクトル図を示す。再循環流高さは約 51mm である。

#### (6) 試験体入口流速が 0.5m/s の場合

Fig.4.1.16 に DeltaGraph によるベクトル図、Fig.4.1.17 に MicroAVS によるベクト

ル図を示す。再循環流高さは約 48mm である。

再循環流高さと流速との関係を Fig.4.1.18 に示す。図中には後述する解析結果も示してある。図に示すように流速 2.0m/s で最高となり、0.5m/s で最も低くなつたが数 mm 程度の差であり、サーベイした流速範囲内ではほぼ同じ高さと見なしてよいものと考える。

このように、時間平均的な流動パターンから、再循環流の顕著な発生が確認できた。この再循環流領域では、水素温度が大きく上昇して中性子収率の悪化や蒸気泡の生成などによる不安定流動などを引き起こす可能性が高い。今後は、ニュートロニクス解析で実施中の発熱密度分布解析の結果が得られ次第、熱流動解析及びその検証実験を行う予定である。

#### 4.1.3 流れ場の数値解析結果

上記の実験結果を基にして、流動解析コードを検証するために流れ場の数値解析を行った。解析には、非構造格子・有限体積法による汎用 3 次元熱流体解析コードである STAR-CD を使用した。Fig.4.1.19(1)及び(2)に解析モデルを示す。解析に当たっては、以下の物性値を使用した。

##### 水 (298K) の物性値<sup>(11)</sup>

- ・密度       $\rho$  : 997.1 kg/m<sup>3</sup>
- ・粘性係数     $\eta$  : 891  $\mu$ Pa·s
- ・比熱      Cp : 4174 J/kg·K
- ・熱伝導率     $\lambda$  : 0.61 W/m·K

試験体入口流速 3.0m/s の解析結果を Fig.4.1.20 に示す。Fig.4.1.21 は Fig.4.1.20 の衝突噴流部を拡大して示したものである。また、試験体入口流速が 0.5m/s の解析結果を Fig.4.1.22、衝突噴流部を拡大したものを Fig.4.1.23 に示す。流動状況は両者ともに、内管から噴き出した水は外管底面に衝突して両サイドに分かれ、外管壁に沿った上向き流れと内側に向かって下向きに流れを引き起こす再循環流の発生を明確に示している。流速の分布も、噴き出してから底面、外管の壁に沿った領域では速く、再循環流の中心付近では遅くなつておらず、噴き出し口真下の噴流が衝突する底面の中心部において流速の遅くなる領域が見られる。再循環流高さは 2 つのケースともに約 46mm であり、測定結果の方が多少大きい。これらの違いについての検討は、実験における PIV 測定の分解能及び解析における試験体のモデル条件の両面から検討を進めているところである。このように予備的に行った解析の結果は実験結果をよく再現しており、STAR-CD で減速材容器内の流動解析を精度良く行える目処を得た。

#### 4.1.4 瞬間的な流動状況

4.1.2 で述べた流動状況は衝突噴流場の時間平均特性である。Fig.4.1.24(1)及び(2)に100枚のベクトルマップのうちの1枚を示す。時間平均化された Fig.4.1.6 や Fig.4.1.7 等は大きな楕円を伸ばしたような定常的な再循環流領域を表しているのに対して、瞬時の流動状況を示す Fig.4.1.24 では幾つかの小さな円を描くような渦が発生している。計測画面を注視していると、再循環流領域においては、これらの衝突噴流に随伴して発生する渦が上方または三次元方向に揺らいで流れながら消滅していく様子が見られる。再循環流領域では、前述したように過大な水素温度上昇を引き起こす可能性があるので、領域の範囲をできるだけ抑制することが望ましい。そのためには、再循環流領域に内管からの吹き出し流などで強制的に流れを付加し、発生する渦をさらに小さく分裂させて消滅しやすくするなどの工夫が考えられる。また、前述したように噴き出し口真下の底面には噴流によって滞留域の発生が見られるが、この領域から境界層が発達していくために停滞域では熱伝達率は一般的に高い。ターゲットに最も近い容器底面の発熱密度は容器内部よりも高くなると考えられるので、再循環流領域に内管からの吹き出し流で強制的に流れを付加する際は、衝突噴流の流量低下によって容器底面での熱伝達率が低下しないように考慮する必要がある。

### 4.2 水平方向の流動状況

#### 4.2.1 実験条件

本節では、衝突噴流に伴う流れ場の水平方向の状況を PIV システムで測定した結果について述べる。実験は、外管底面と内管下端との隙間が 4.1 節と同じ 10mm の条件で、試験体入口流速が 2m/s の場合について行った。PIV システムによる測定は、撮影画像数を 50 枚（1 秒間隔）とした他は 4.1 節の条件と同じである。このとき、カメラは試験体の真下に設置し、レーザーは Fig.4.2.1 に示すように試験体真横から照射した。レーザーの照射位置は次の通りである。

ケース 1 (衝突面)	: 底面より約 1mm 高さ
ケース 2 (衝突面と噴き出し口の間)	: " 約 5mm "
ケース 3 (噴き出し口)	: " 約 10mm "
ケース 4 (衝突面と再循環流終局高さの間)	: " 約 25mm "
ケース 5 (再循環流終局高さ付近)	: " 約 50mm "

計測した画像を Fig.4.2.2～Fig.4.2.6 に示す。

#### 4.2.2 実験結果

各ケースについて 50 枚の流速ベクトルのマップデータを得、4.1.2 項と同じ方法で時間平均化処理を行った。以下に、水平方向流れ場の時間平均的な測定結果について述べる。

### (1) ケース 1 (衝突面) の場合

Fig.4.2.7 に DeltaGragh によるベクトル図、Fig.4.2.8 に MicroAVS によるベクトル図を示す。中心から外に向う放射状の流れが観察できる。中心部では流速の遅い領域(水平方向成分が小の領域)があり、これは 4.1.2 項で述べた衝突噴流の滞留域である。中心から外に向かうに従い流速は次第に速くなり、外管の壁付近では流速ベクトルの反転や外管壁の周方向の流れなどが見られ、外管壁近傍で滞留的な渦領域を生じているものと考えられる。

### (2) ケース 2 (衝突面と噴き出し口の間) の場合

Fig.4.2.9 に DeltaGragh によるベクトル図、Fig.4.2.10 に MicroAVS によるベクトル図を示す。中心部には流速の遅い領域、すなわち水平方向の流れ成分がほとんどない領域が存在し、また、中心から外に向かって放射状に流れが広がるに従い速度が増大している。ただし、軸方向の流れ場で観測された再循環流領域では若干流速の低下が見られるが、上述の Fig.4.2.7 で見られた外管壁近傍での不規則な流速ベクトルはほとんど見られず、流れ場が安定している様子がうかがえる。

### (3) ケース 3 (噴き出し口) の場合

Fig.4.2.11 に DeltaGragh によるベクトル図、Fig.4.2.12 に MicroAVS によるベクトル図を示す。これ以降は、軸方向の流れが強くなるため、水平方向の最高流速はケース 1 及び 2 よりも低くなっている。ただし、内管での水流には管の曲がり等の影響によって右回りの旋回流を生じており、その影響のために外管の流れも右回りに旋回する傾向を示している。

### (4) ケース 4 (衝突面と再循環流終局高さの間) の場合

Fig.4.2.13 に DeltaGragh によるベクトル図、Fig.4.2.14 に MicroAVS によるベクトル図を示す。水平方向の最高流速はさらに低下し、全体的に右回りに旋回している様子がうかがえる。

### (5) ケース 5 (再循環流終局高さの間) の場合

Fig.4.2.15 に DeltaGragh によるベクトル図、Fig.4.2.16 に MicroAVS によるベクトル図を示す。水平方向の最高流速はケース 4 よりも若干低下しているものの、傾向はケース 4 とほぼ同じである。

以上の結果から、噴流が衝突する中心部には速度の遅い滞留域が見られるが、その他に外管壁近傍の底面においても流速が大きく減少する領域が観測された。また、外管の底面から 10mm 以上の領域の測定から、右回りの旋回流が観測されたが、旋回流の発生は流

れの混合、すなわち発生する渦の微細化に役立つため、積極的に旋回流の発生を促す方法を採用すれば、4.1節で述べた再循環流領域の抑制に寄与できるものと考えられる。

#### 4.2.3 瞬間的な流動状況

4.2.2節では時間平均的な流動状況について述べたが、本節では局所的な流動状況について述べる。ケース1及び2については、瞬間的な状況と時間平均的な特性に大きな差は見られなかった。ケース3については、50枚のベクトルマップのうちの1枚をFig.4.2.17に、これを渦度解析処理した結果をFig.4.2.18に示す。同様に、ケース4のベクトルマップ及び渦度センターをFig.4.2.19、Fig.4.2.20に、ケース5についてFig.4.2.21、Fig.4.2.22にそれぞれ示す。いずれも、時間平均化処理したものからは見ることができなかつ小さな渦が多数確認できる。渦度センターはここでは赤色が濃くなるほど正(反時計回り)の渦度が大きく、青色が濃くなるほど反対に負(時計回り)の渦度が大きいことを表し、全体的に正負両方の渦が混在した複雑な様相を示している。ケース3のFig.4.2.17では外管近傍に渦列が形成され、ケース4のFig.4.2.19ではそれらの渦が成長している様子が見られる。この傾向はFig.4.2.18とFig.4.2.20の渦度センターの強度が増大していることからも明らかである。ケース5のFig.4.2.21は渦が消滅し始めている様子がうかがえ、Fig.4.2.22の渦度センターでも強度が低下していることから、噴き出し口付近、壁面に沿って発生した小さな渦が次第に発達し、かつ、正負の渦が干渉し合いながら上方に流れ、上方では渦度を弱めながら拡散していくといった一連の過程が考えられる。ケース5までは4.1項で述べた再循環流領域にあることから、内管からの吹き出し流などで強制的に流れを付加し、かつ、前述した旋回流の強さを増すなどして、発生する渦を微細化することで再循環流領域を抑制できるものと考えられる。

Table 4.1.1 流速設定データ

目標流速(m/s)	流量計指示値(%)	ポンプ運転周波数(Hz)	温度(℃)
2.0	35.2	29.4	23.3
1.5	26.5	22.5	23.4
1.0	17.7	15.6	23.4
0.5	8.8	9.0	23.4
2.5	44.2	36.5	23.5
3.0	53.0	43.1	23.7

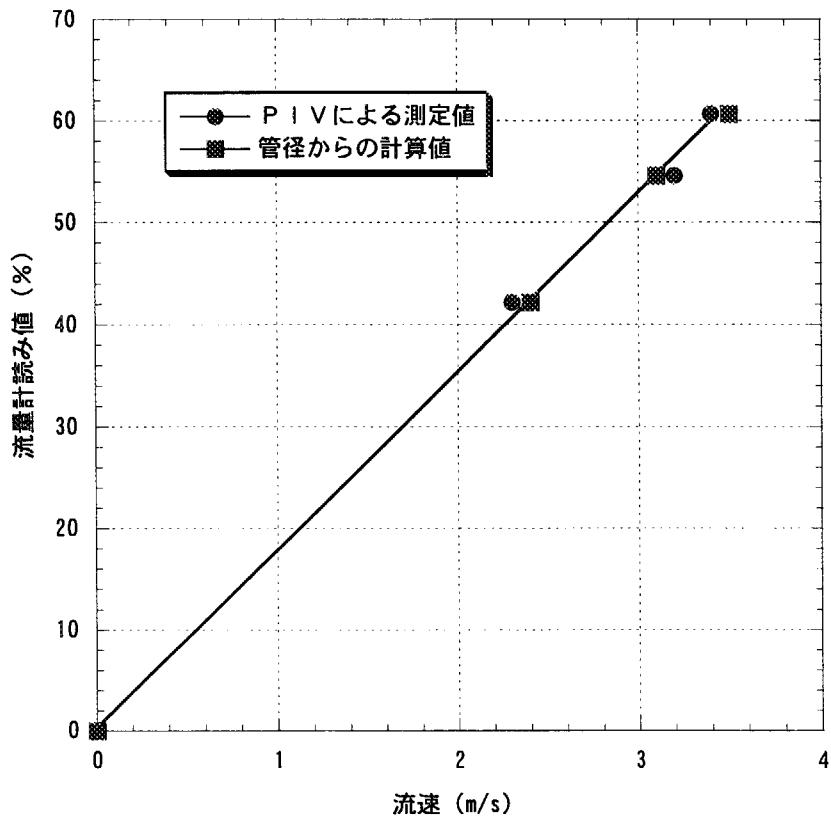


Fig.4.1.1 流量計読み値と流速の関係

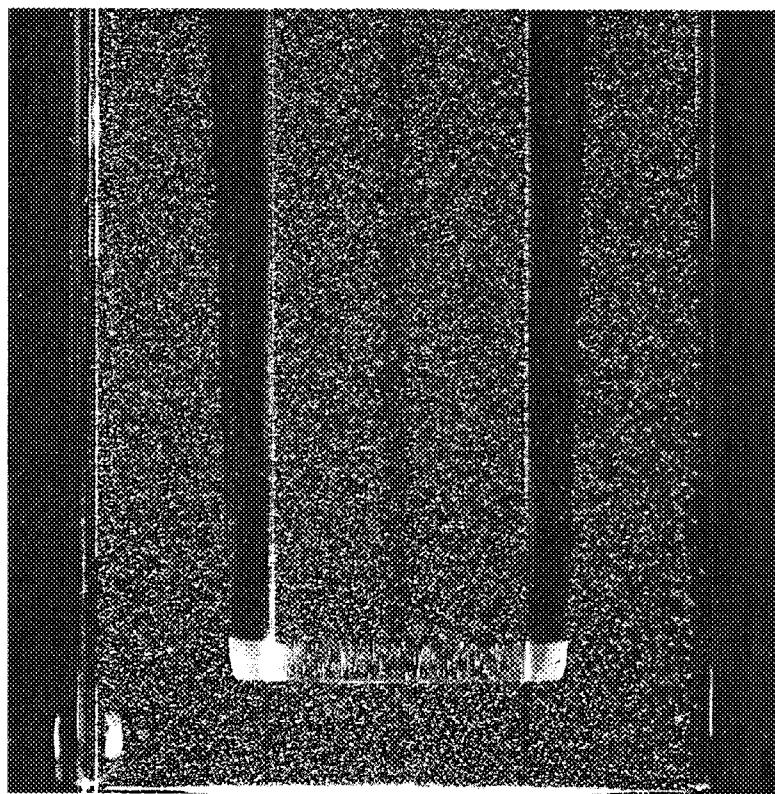


Fig.4.1.2 計測画像

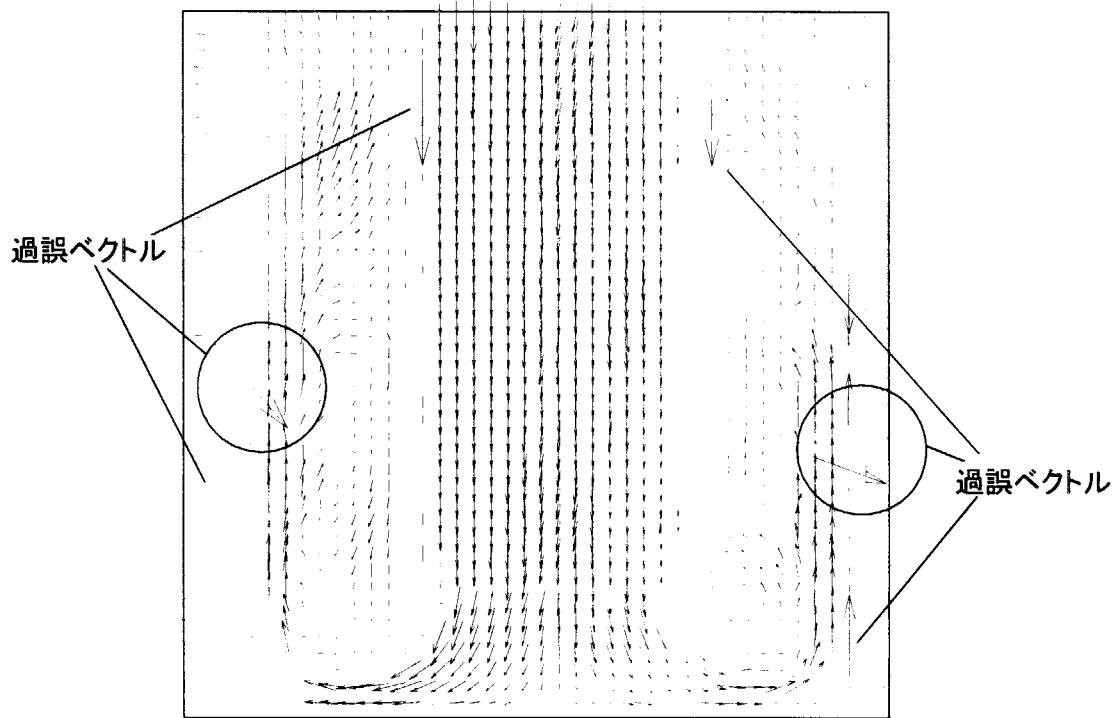


Fig.4.1.3 Peak Validation後のベクトルマップ

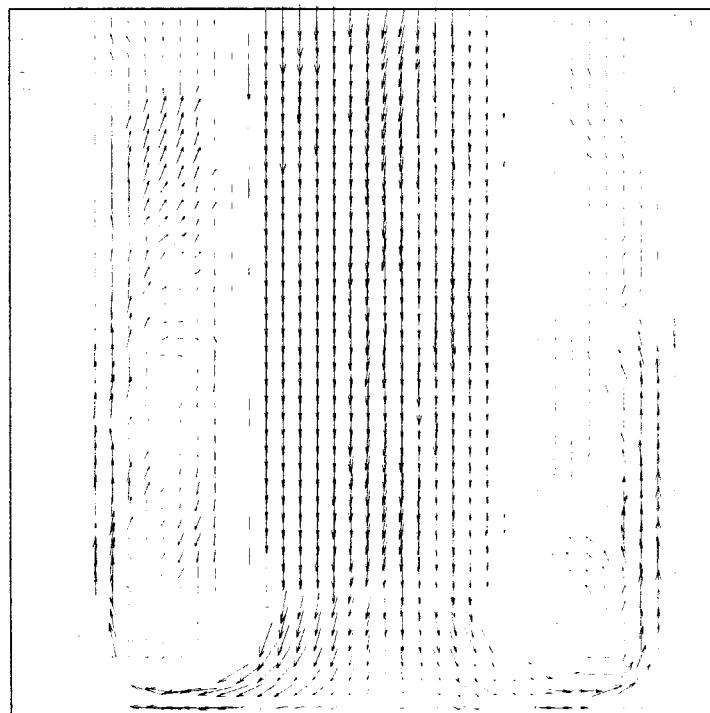


Fig.4.1.4 Range Validation後のベクトルマップ

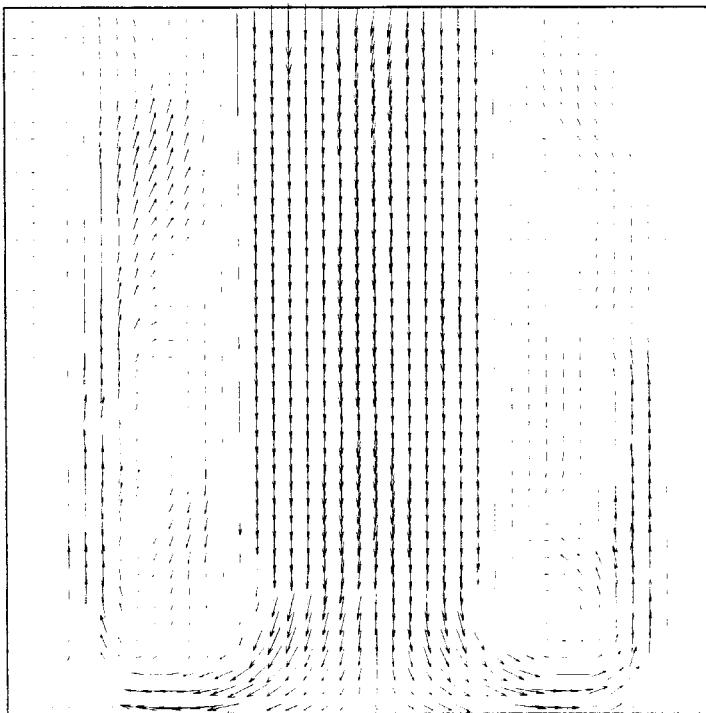


Fig.4.1.5 Average Filter後のベクトルマップ

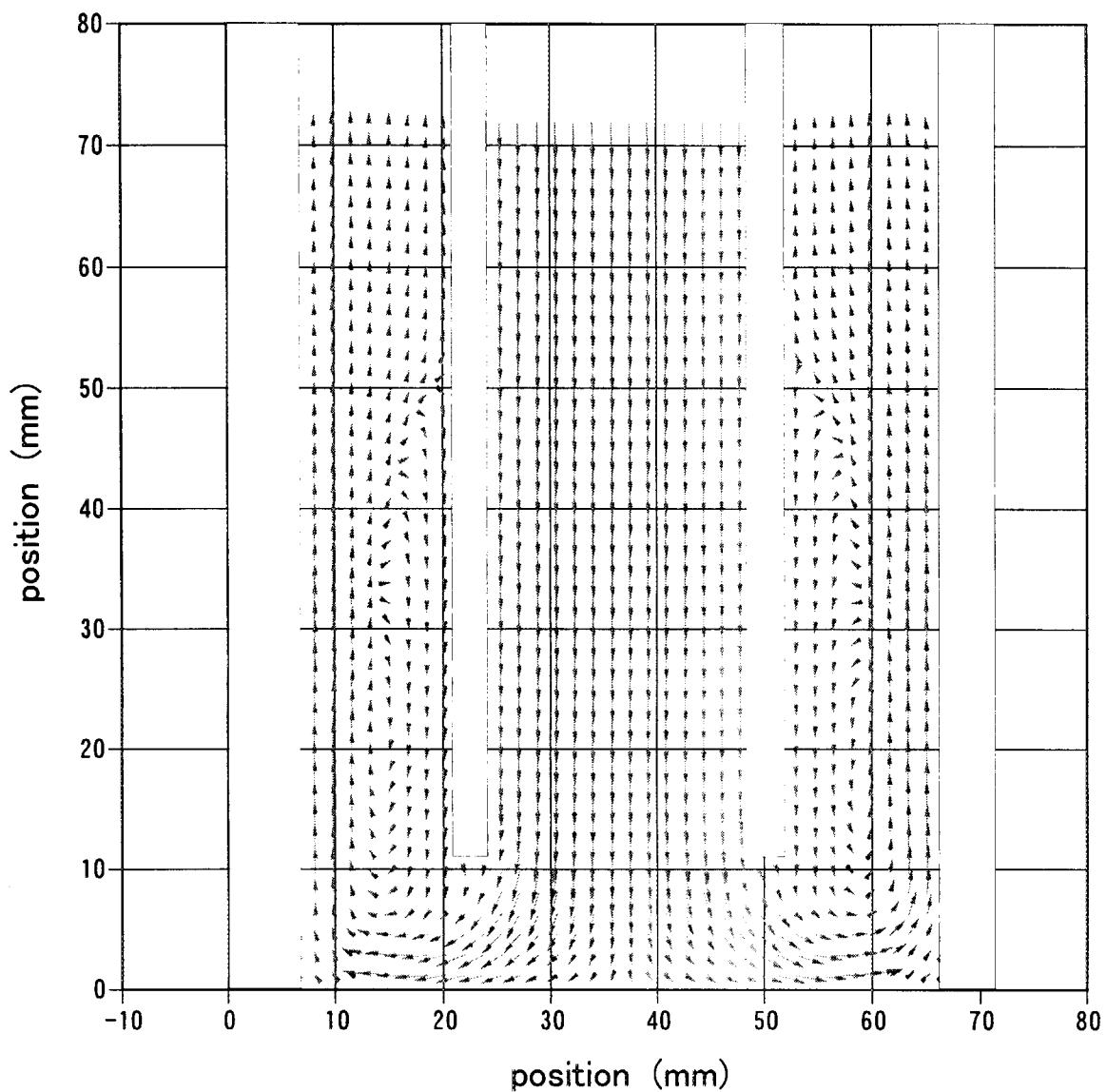


Fig.4.1.6 流速3.0m/sのベクトルマップ(DeltaGraph)

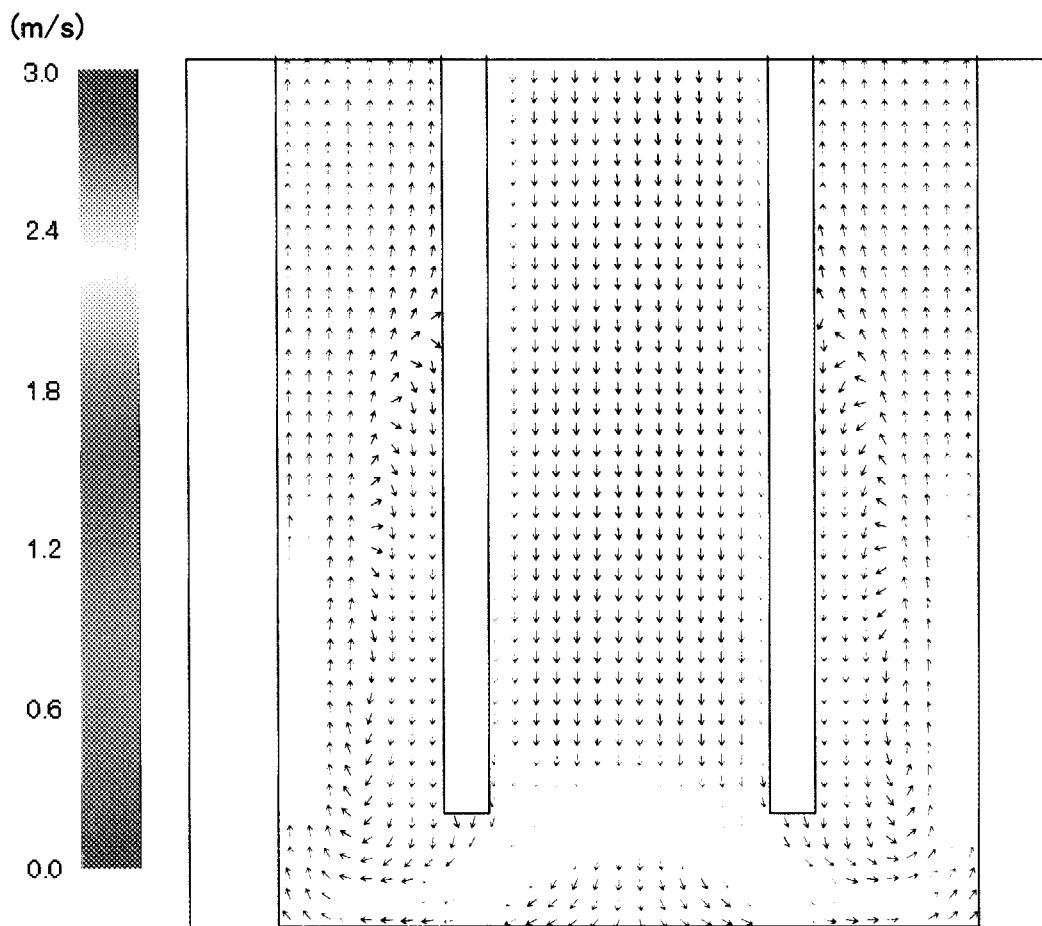


Fig.4.1.7 流速3.0m/sのベクトルマップ(MicroAVS)

This is a blank page.

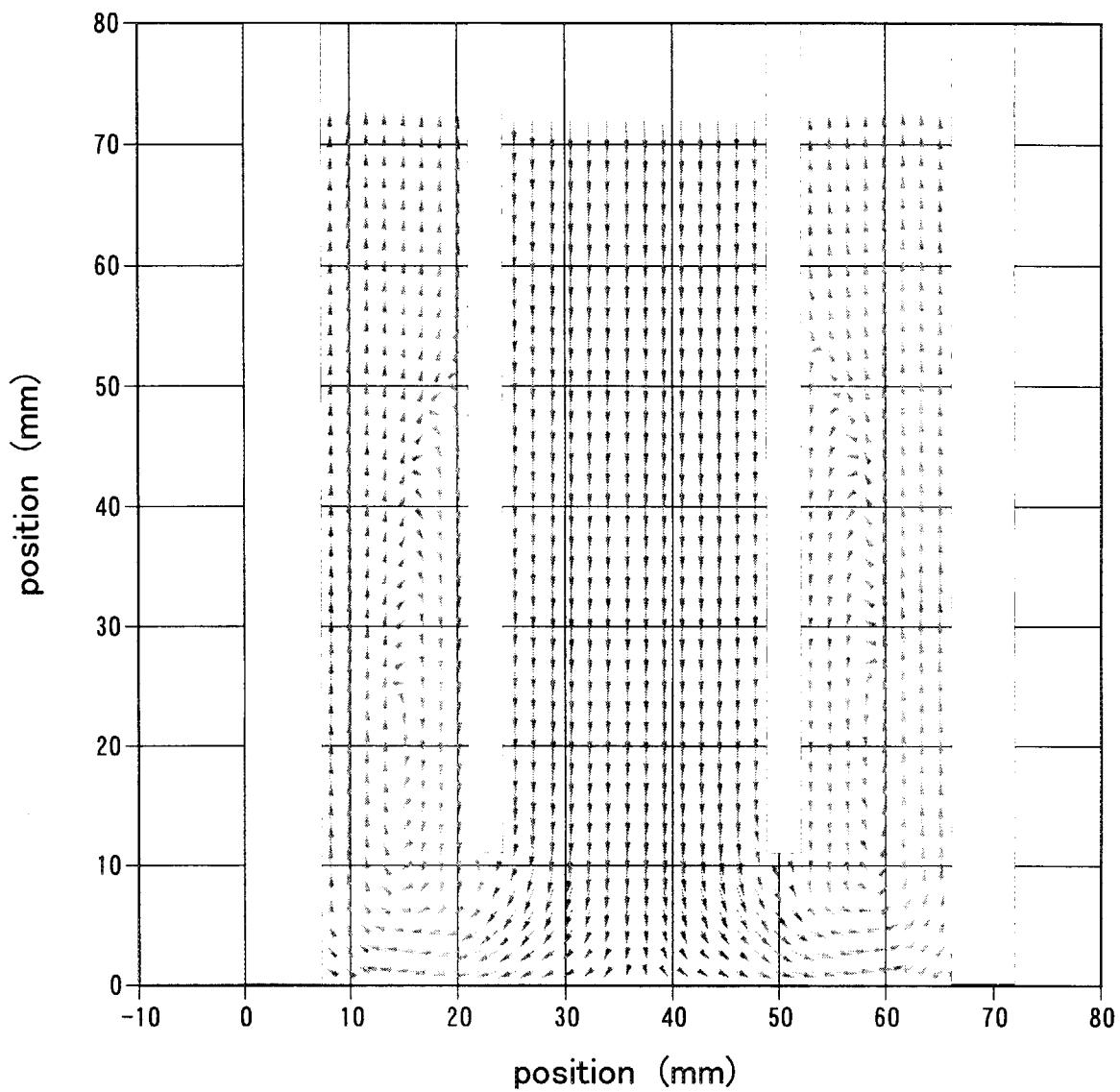


Fig.4.1.8 流速2.5m/sのベクトルマップ(DeltaGraph)

This is a blank page.

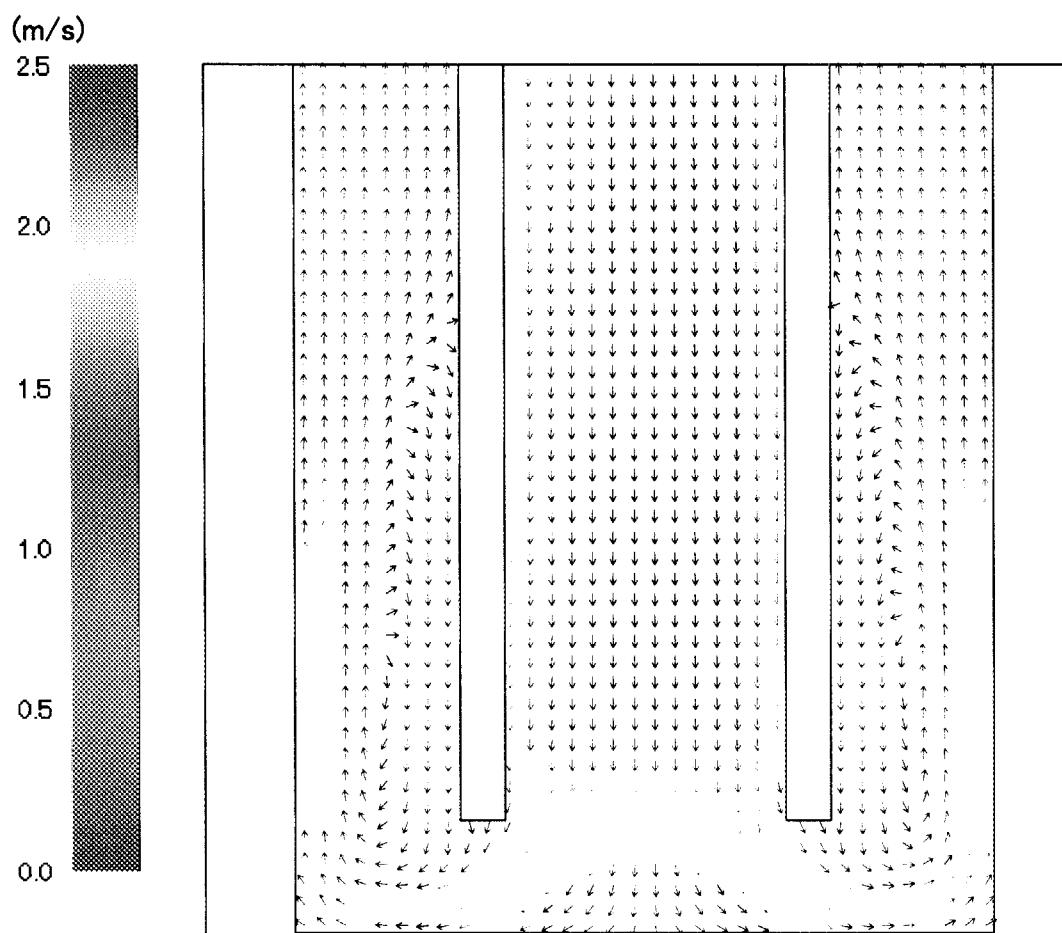


Fig.4.1.9 流速2.5m/sのベクトルマップ(MicroAVS)

This is a blank page.

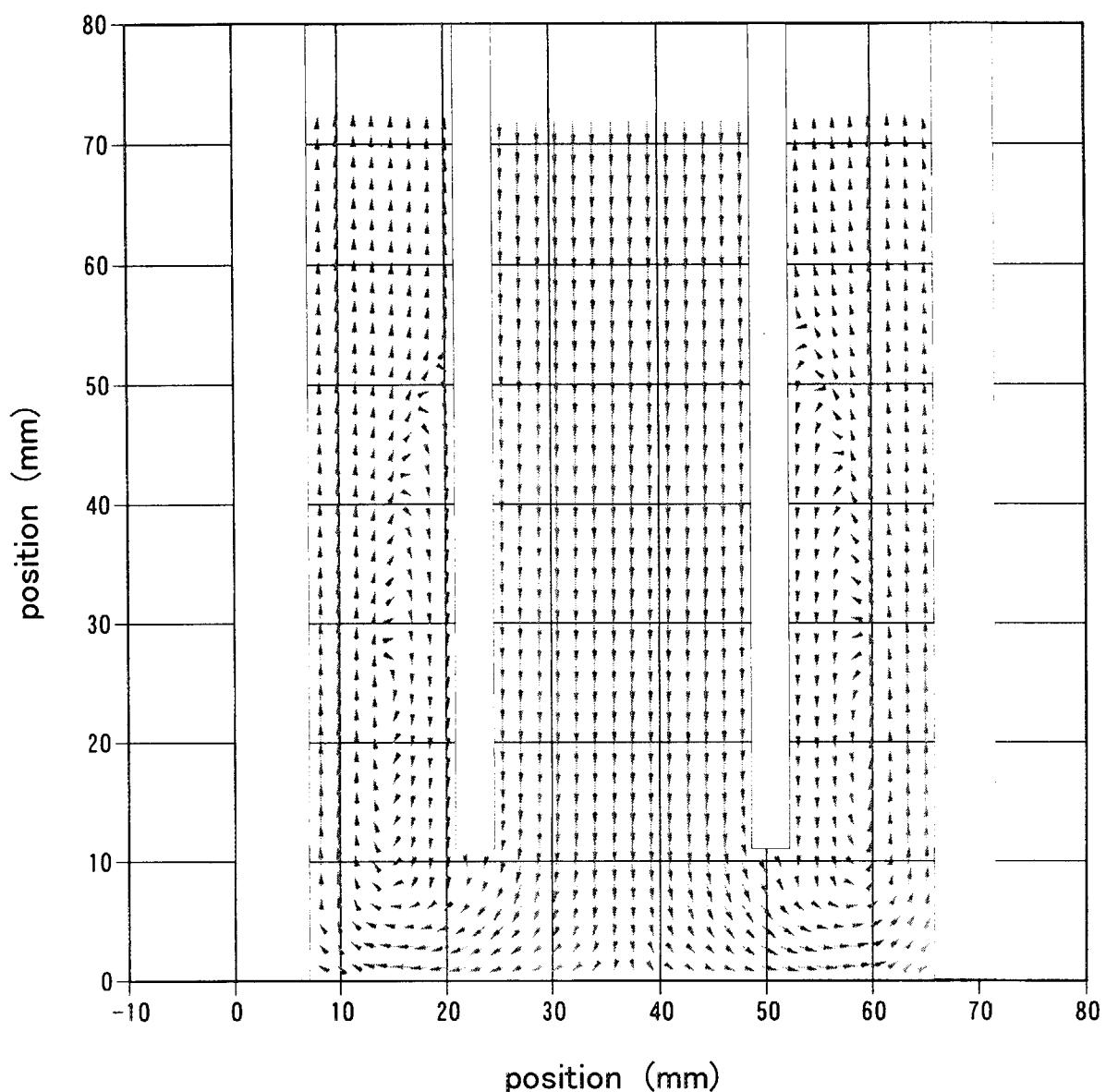


Fig.4.1.10 流速2.0m/sのベクトルマップ(DeltaGraph)

This is a blank page.

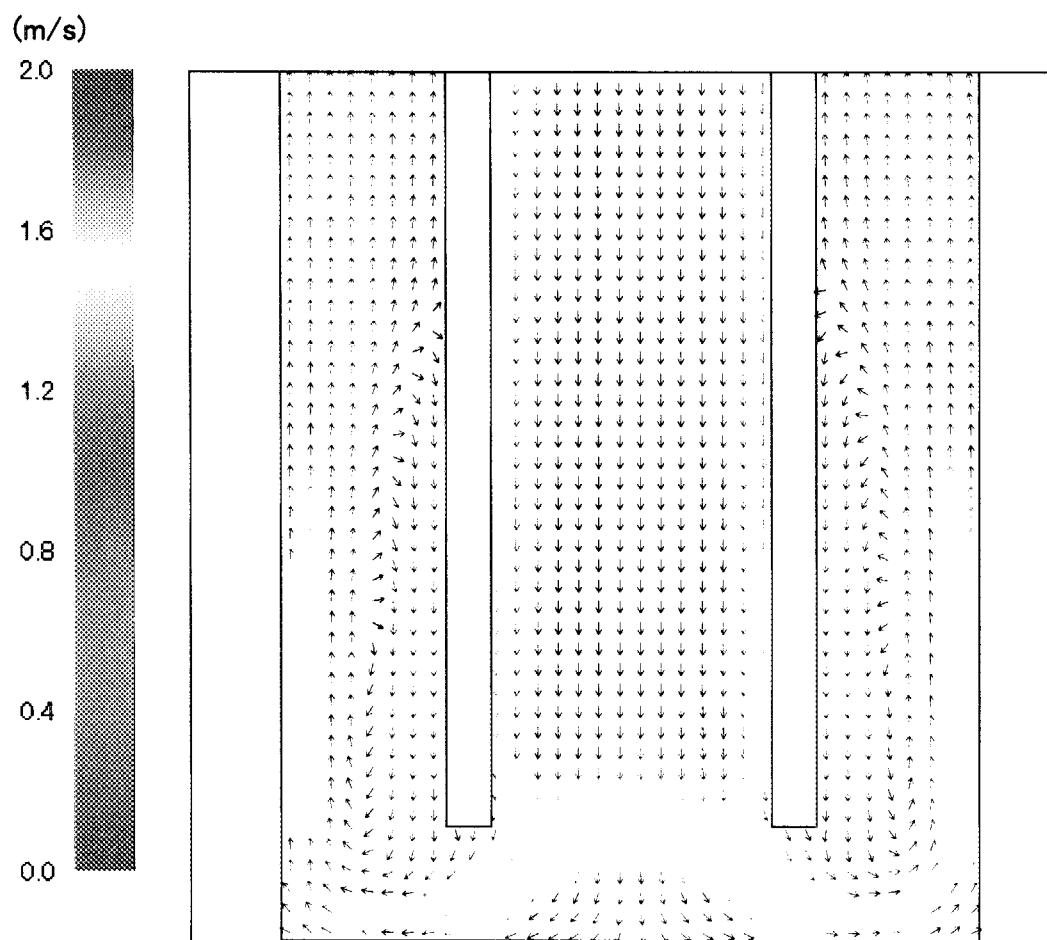


Fig.4.1.11 流速2.0m/sのベクトルマップ(MicroAVS)

This is a blank page.

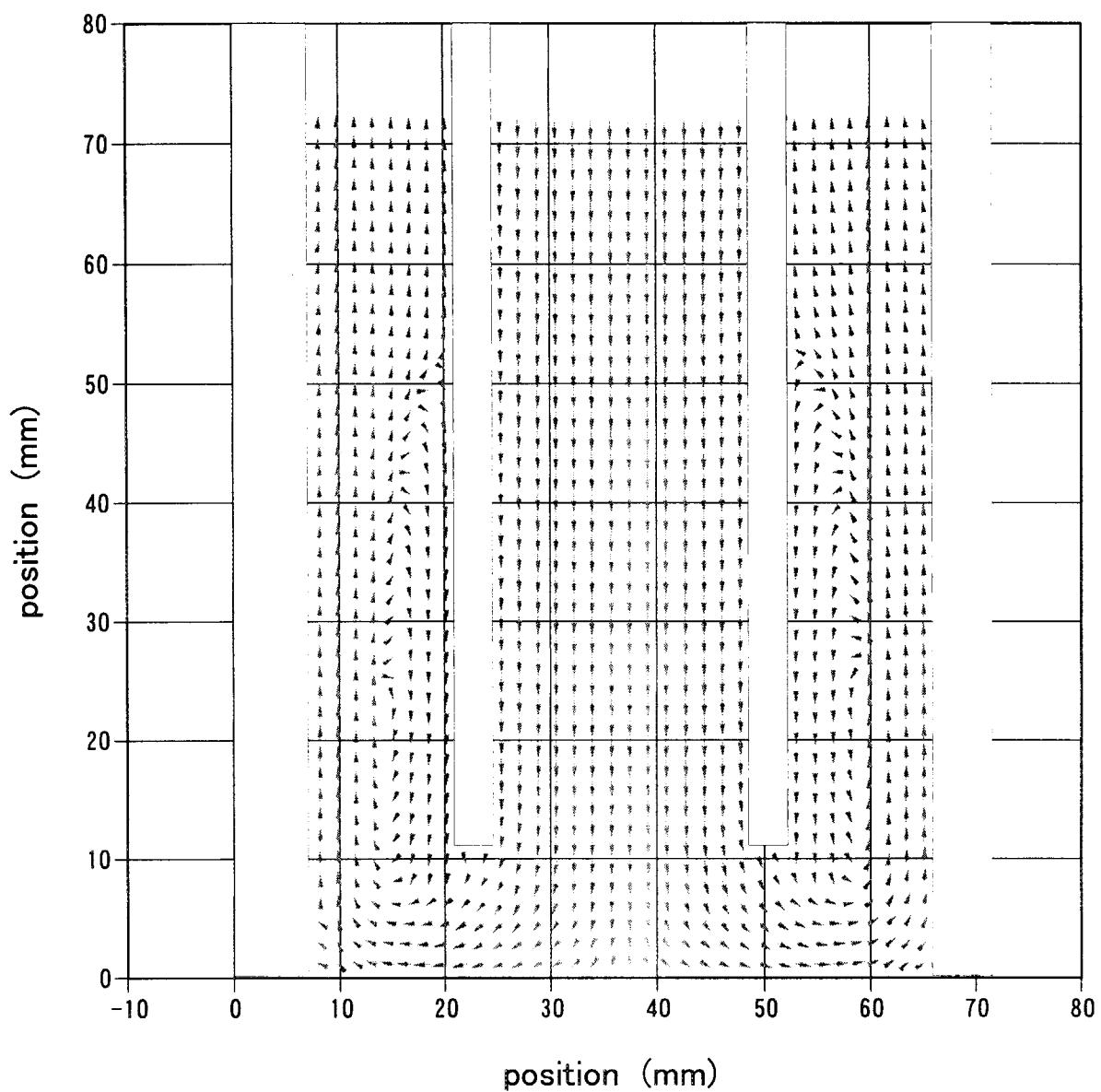


Fig.4.1.12 流速1.5m/sのベクトルマップ(DeltaGraph)

This is a blank page.

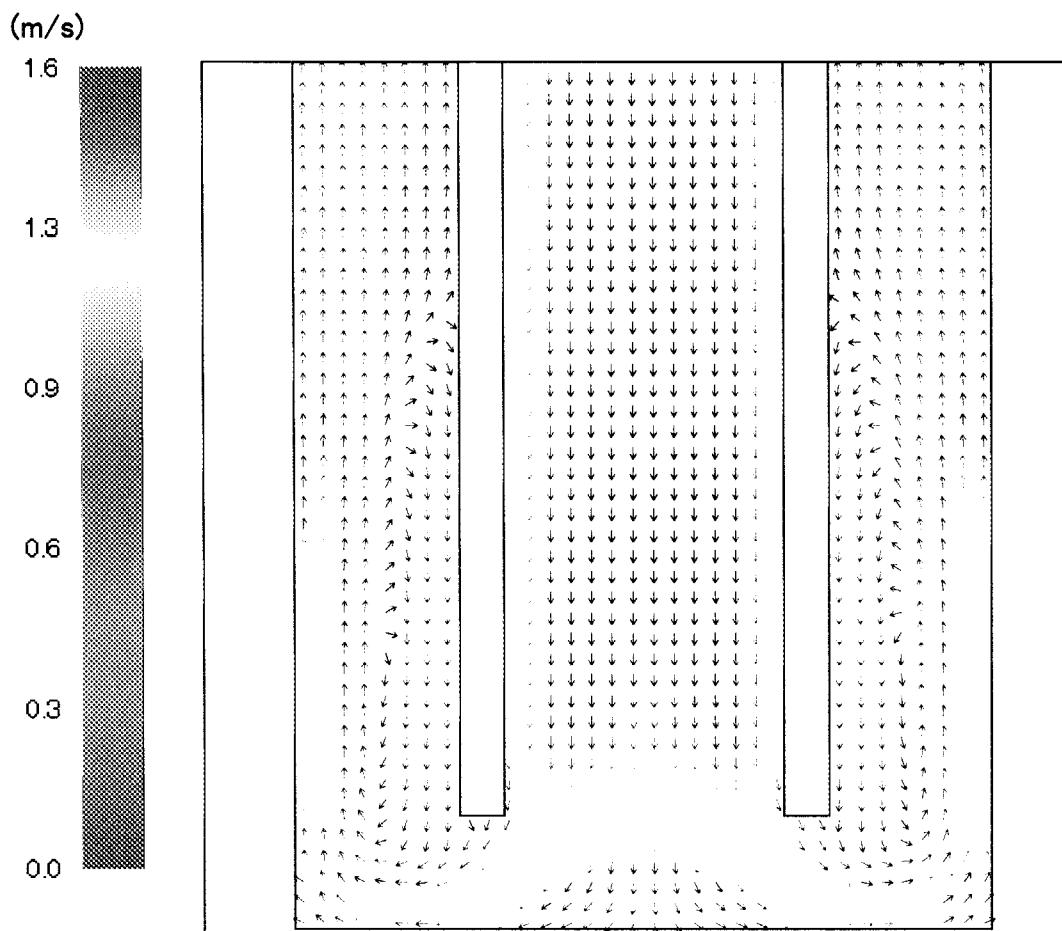


Fig.4.1.13 流速1.5m/sのベクトルレマップ(MicroAVS)

This is a blank page.

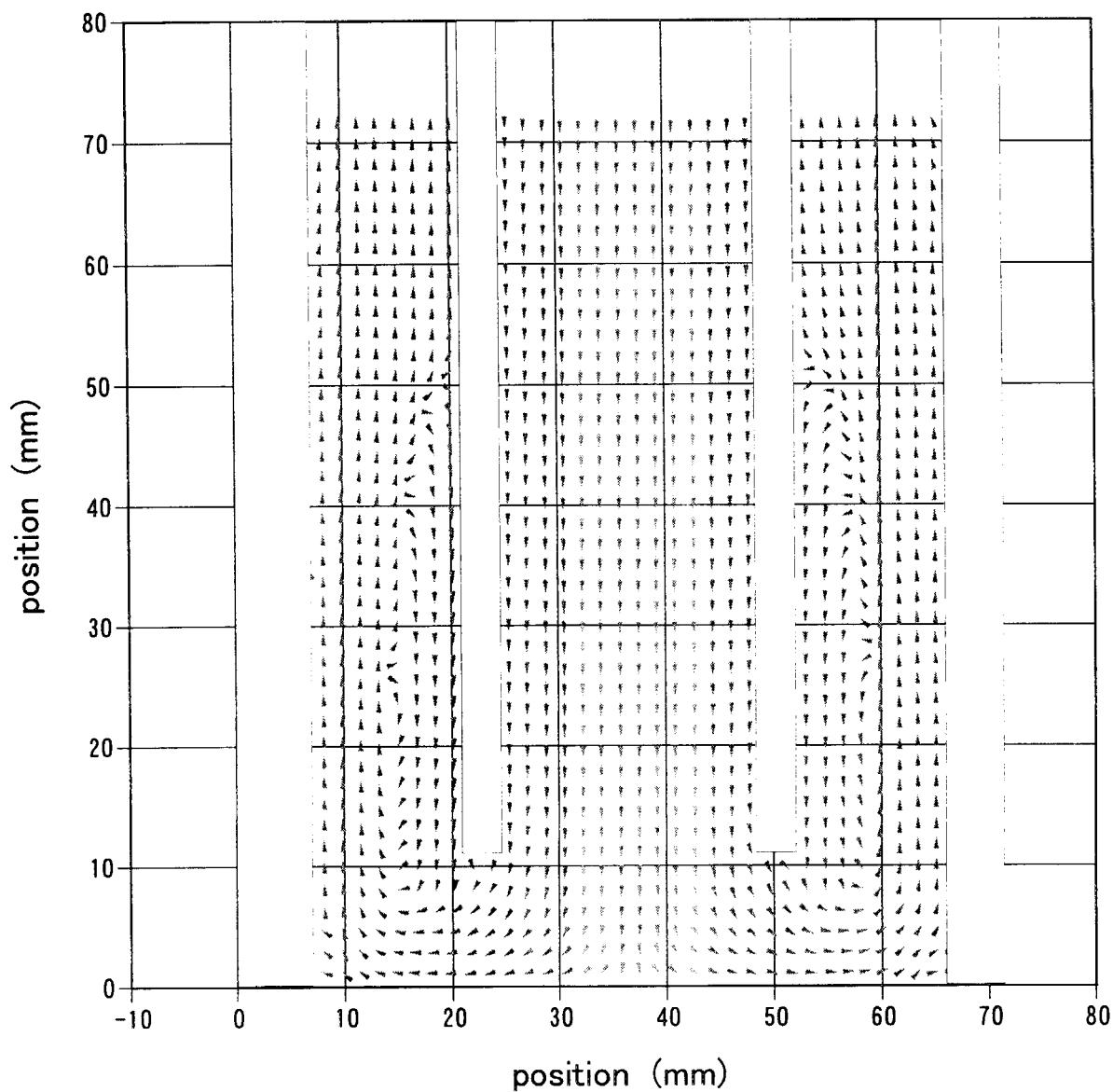


Fig.4.1.14 流速1.0m/sのベクトルマップ(DeltaGraph)

This is a blank page.

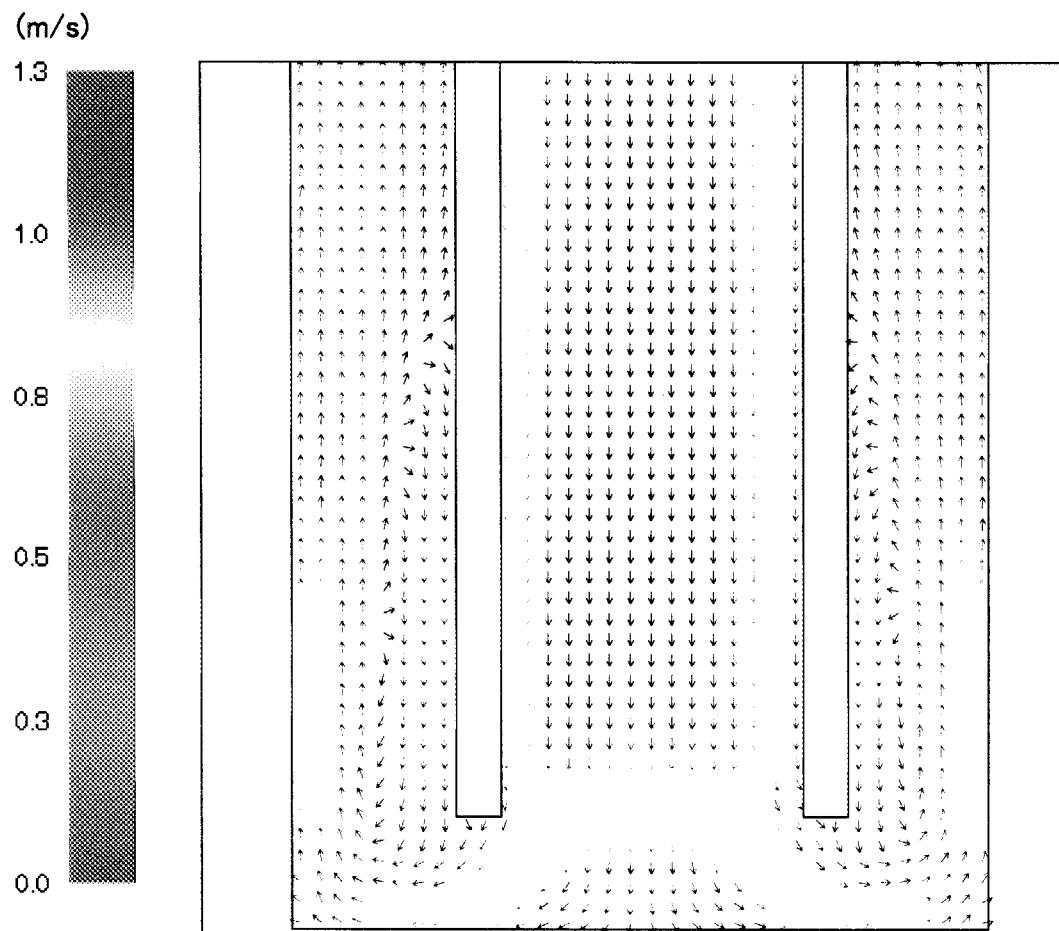


Fig.4.1.15 流速1.0m/sのベクトルレマップ(MicroAVS)

This is a blank page.

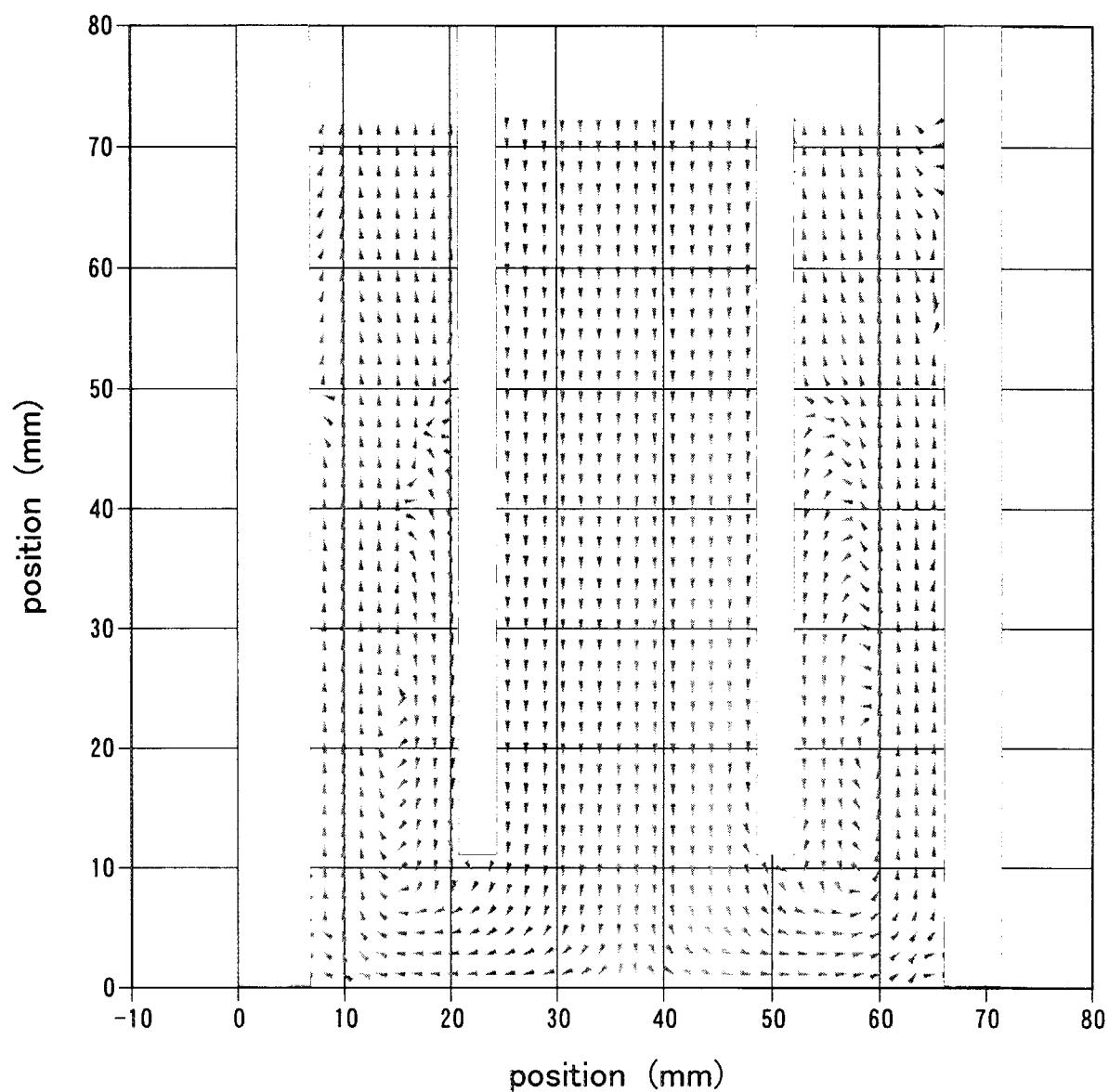


Fig.4.1.16 流速0.5m/sのベクトルマップ(DeltaGraph)

This is a blank page.

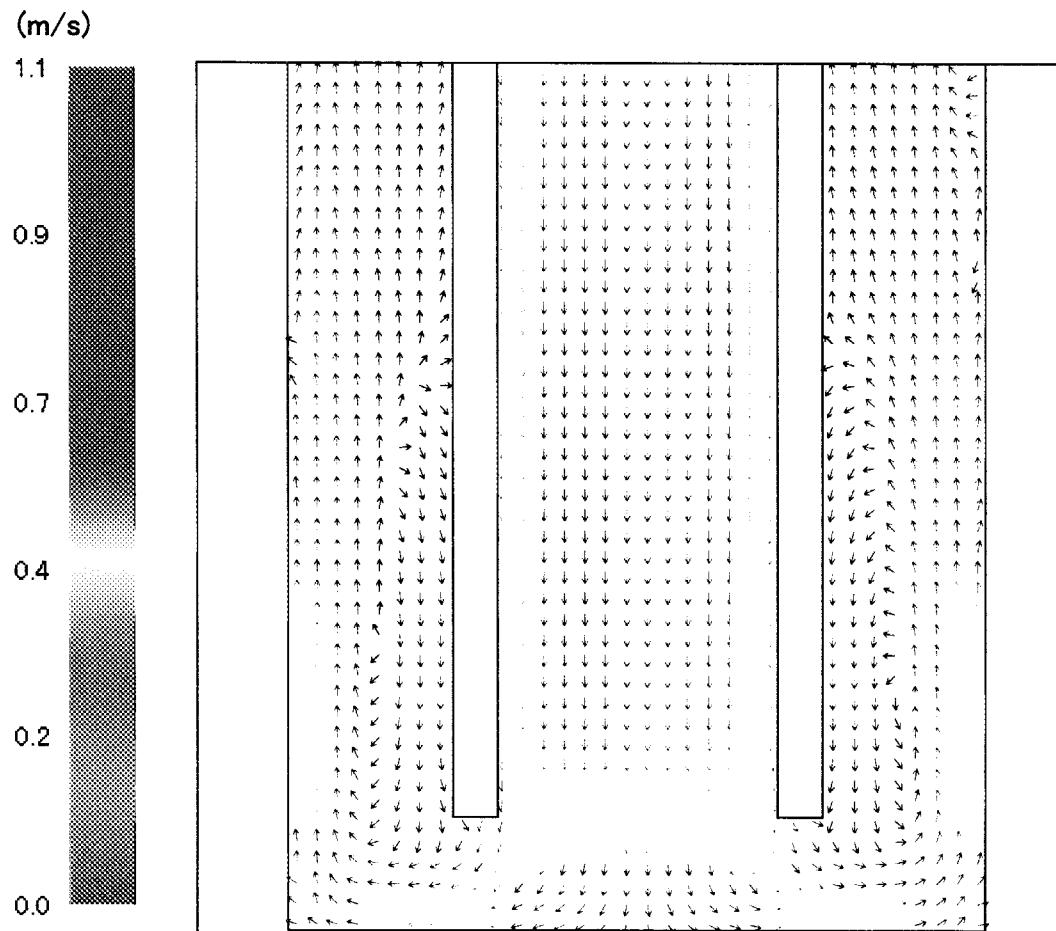


Fig.4.1.17 流速0.5m/sのベクトルマップ(MicroAVS)

This is a blank page.

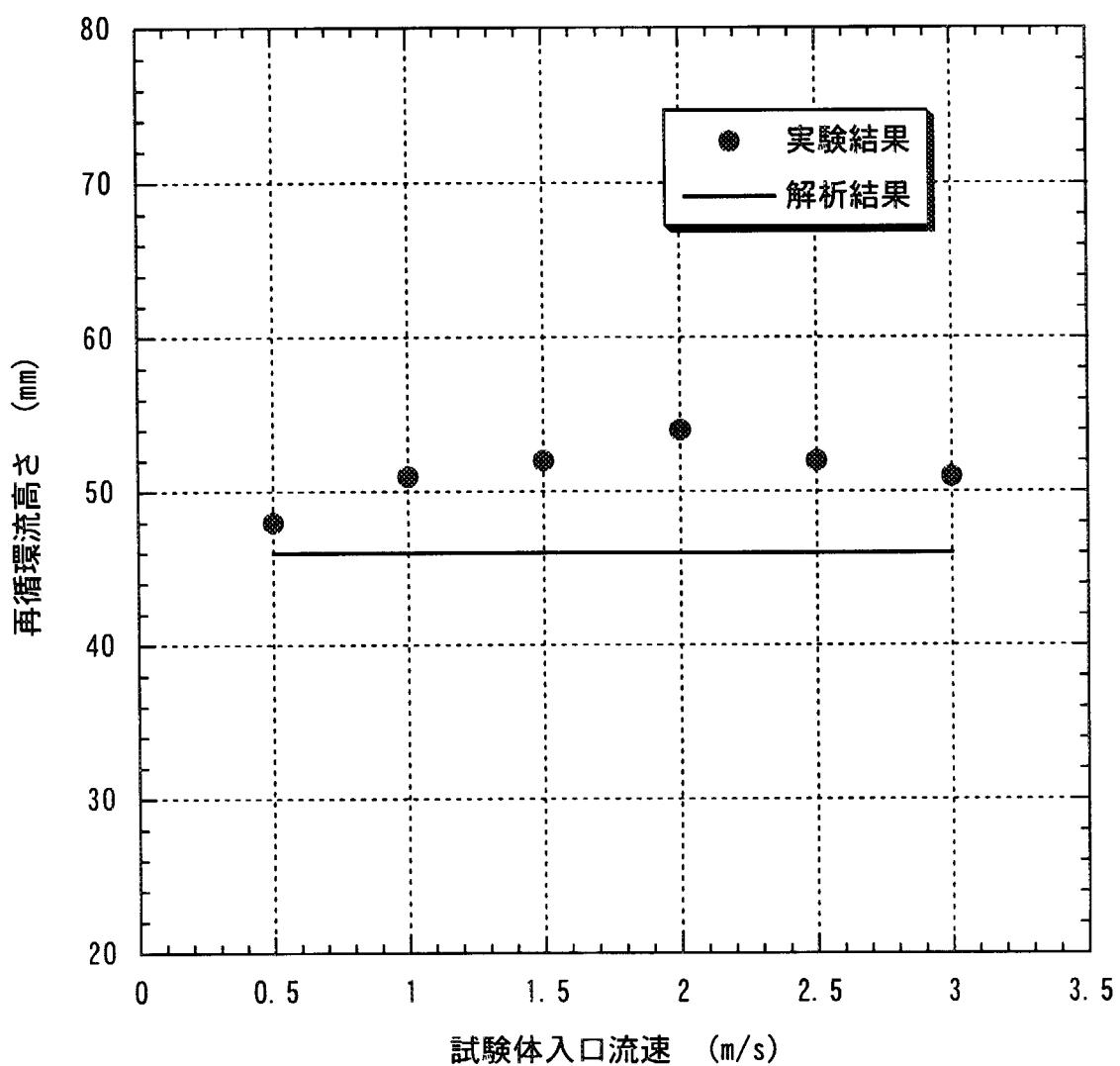


Fig. 4.1.18 流速と再循環流高さの関係

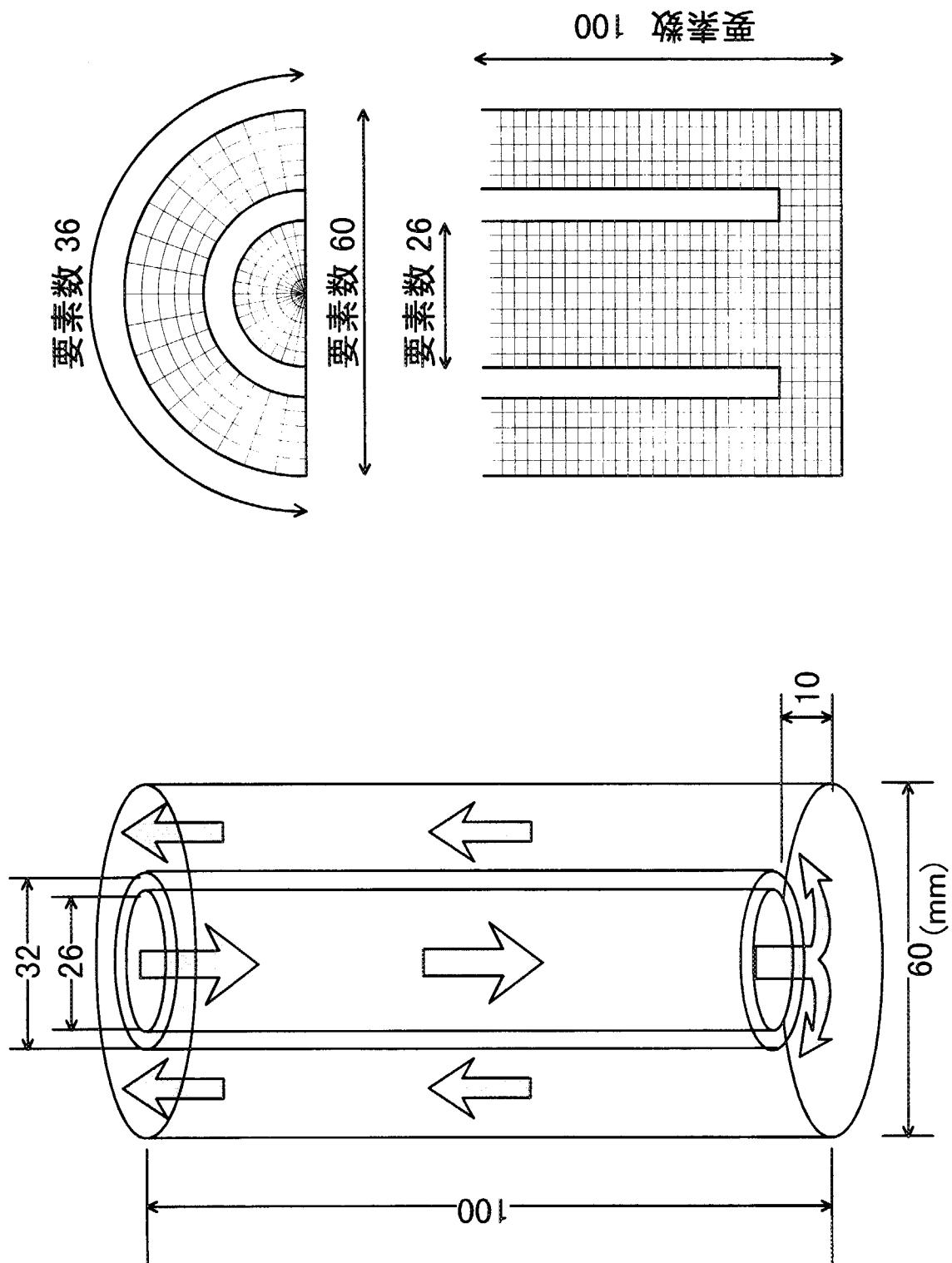


Fig.4.1.19(1) 解析モデル(形状寸法と要素分割)

STAR  
**D**  
PROSTAR 3.00

14-JUL-98  
VIEW  
-1.000  
-0.911  
0.676  
ANGLE  
30.000  
DISTANCE  
55.219  
CENTER  
-0.075  
8.463  
53.491  
HIDDEN PLOT  
BOUNDARIES

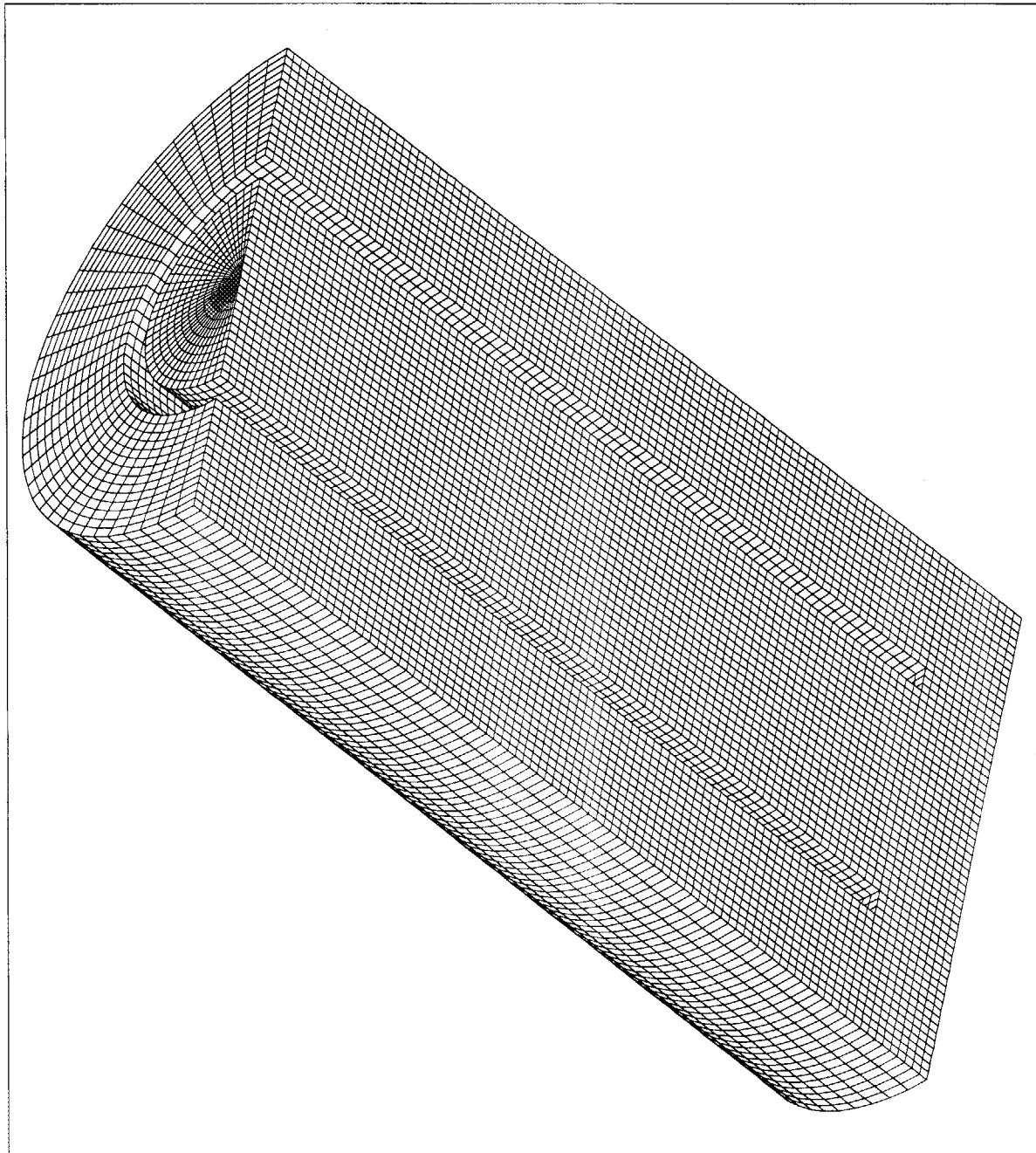
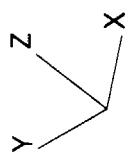


Fig.4.1.19(2) 解析モードル(STAR-CD画像)

This is a blank page.



PROSTAR 3.00

29-JUN-98  
VELOCITY MAGNITUDE  
M/S  
ITER = 264  
LOCAL MX= 3.487  
LOCAL MN= 0.1151E-01

3.487
3.239
2.990
2.742
2.494
2.246
1.997
1.749
1.501
1.253
1.004
0.7562
0.5080
0.2597
0.1151E-01

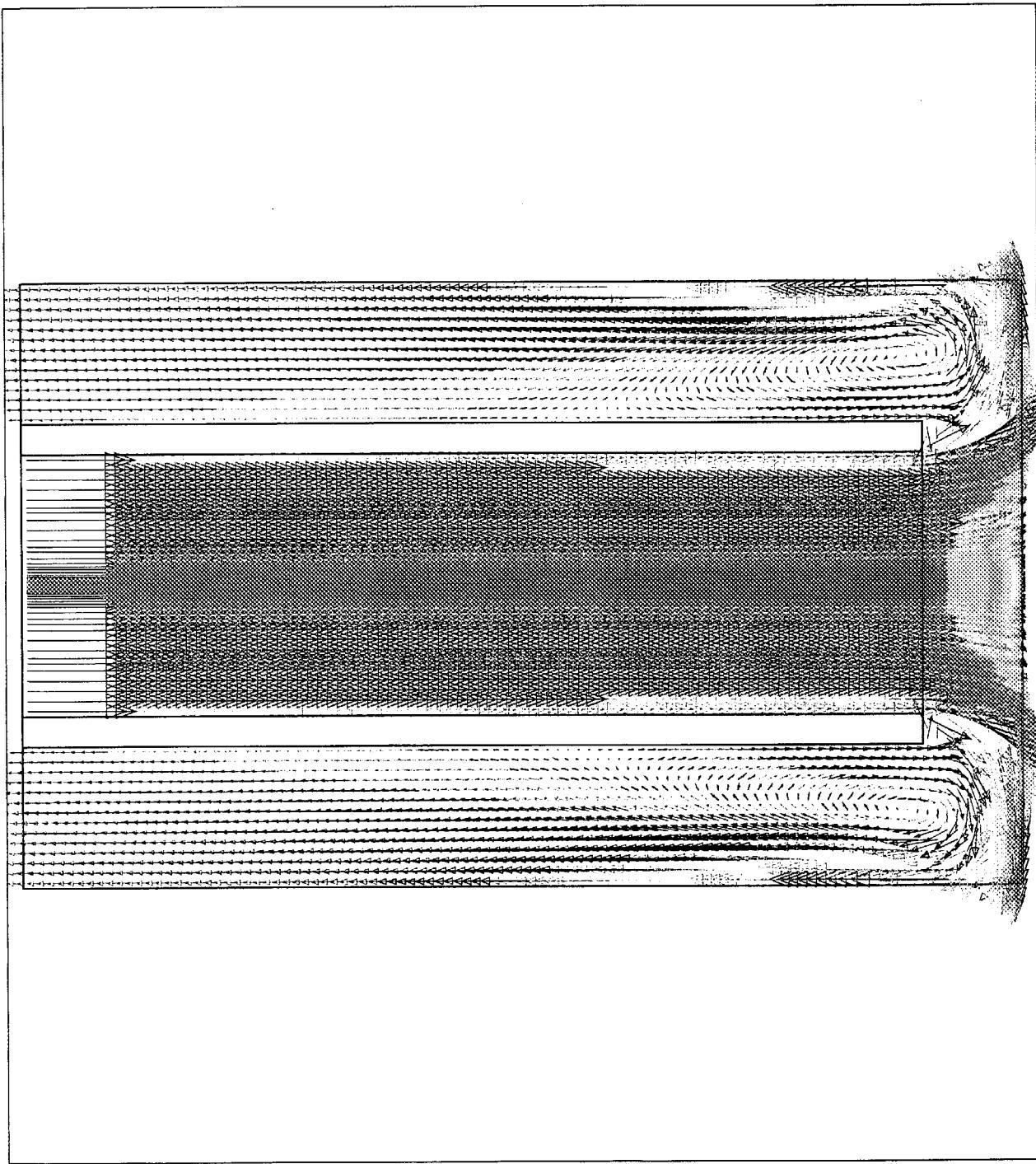
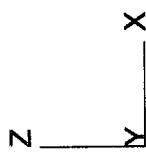


Fig.4.1.20 試験体入口流速3.0m/sの場合の解析結果

This is a blank page.



PROSTAR 3.00

29-JUN-98  
VELOCITY MAGNITUDEM/S  
ITER = 264

LOCAL MX= 3.487

LOCAL MN= 0.1151E-01

	3.487
	3.239
	2.990
	2.742
	2.494
	2.246
	1.997
	1.749
	1.501
	1.253
	1.004
	0.7562
	0.5080
	0.2597
	0.1151E-01

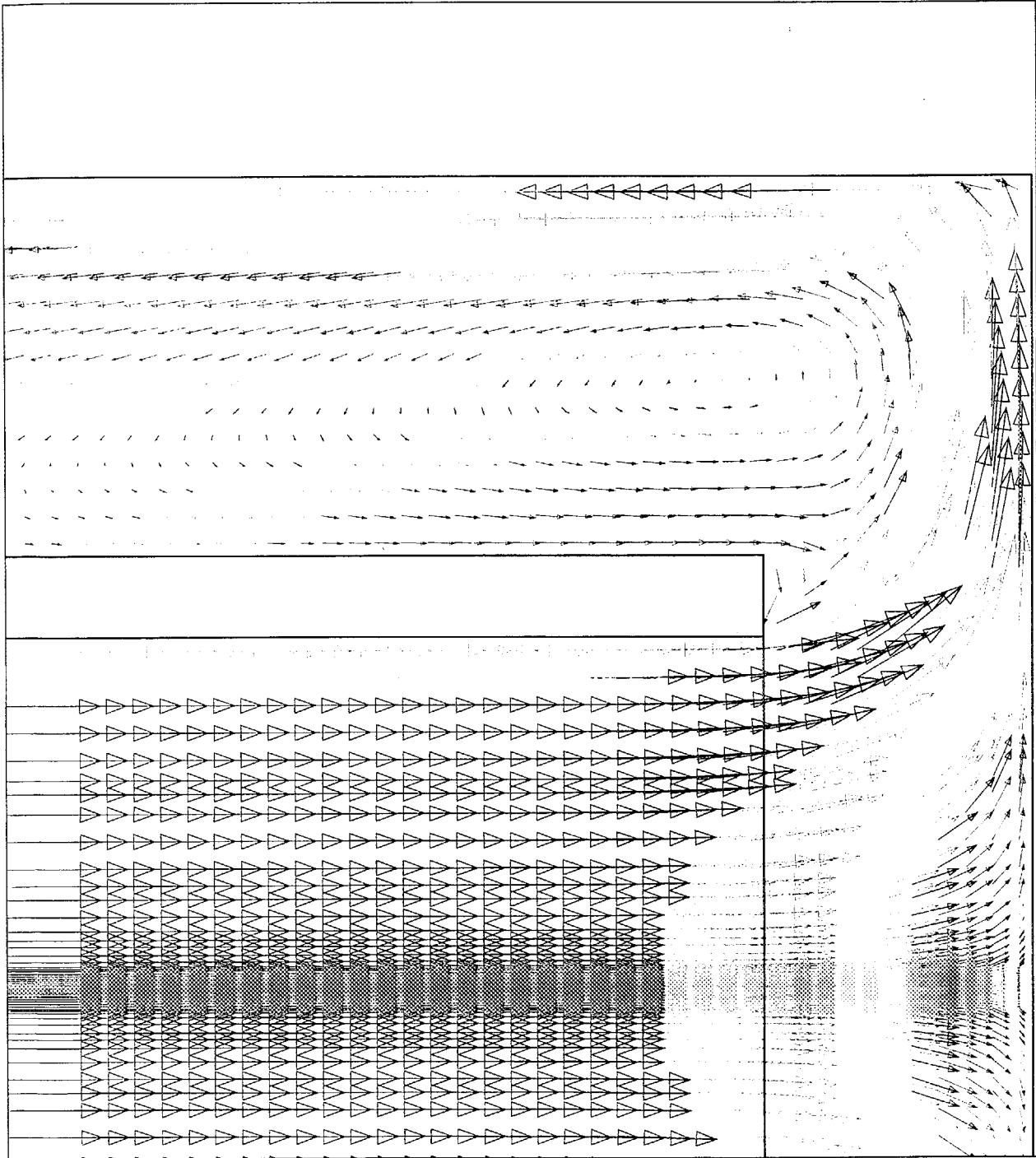


Fig.4.1.21 試験体入口流速3.0m/sの場合の解析結果(拡大図)

This is a blank page.

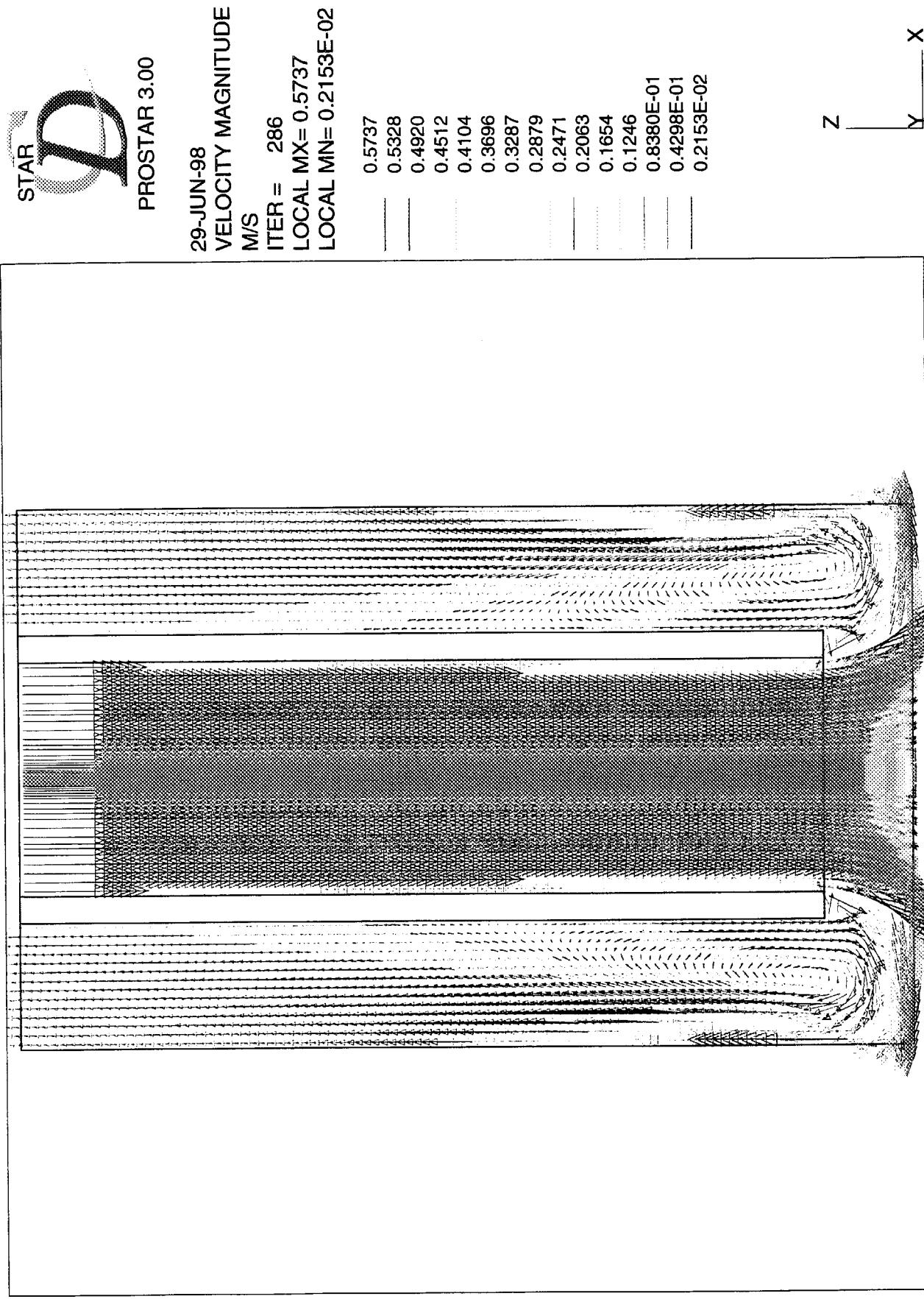


Fig.4.1.22 試験体入口流速0.5m/sの場合の解析結果

This is a blank page.

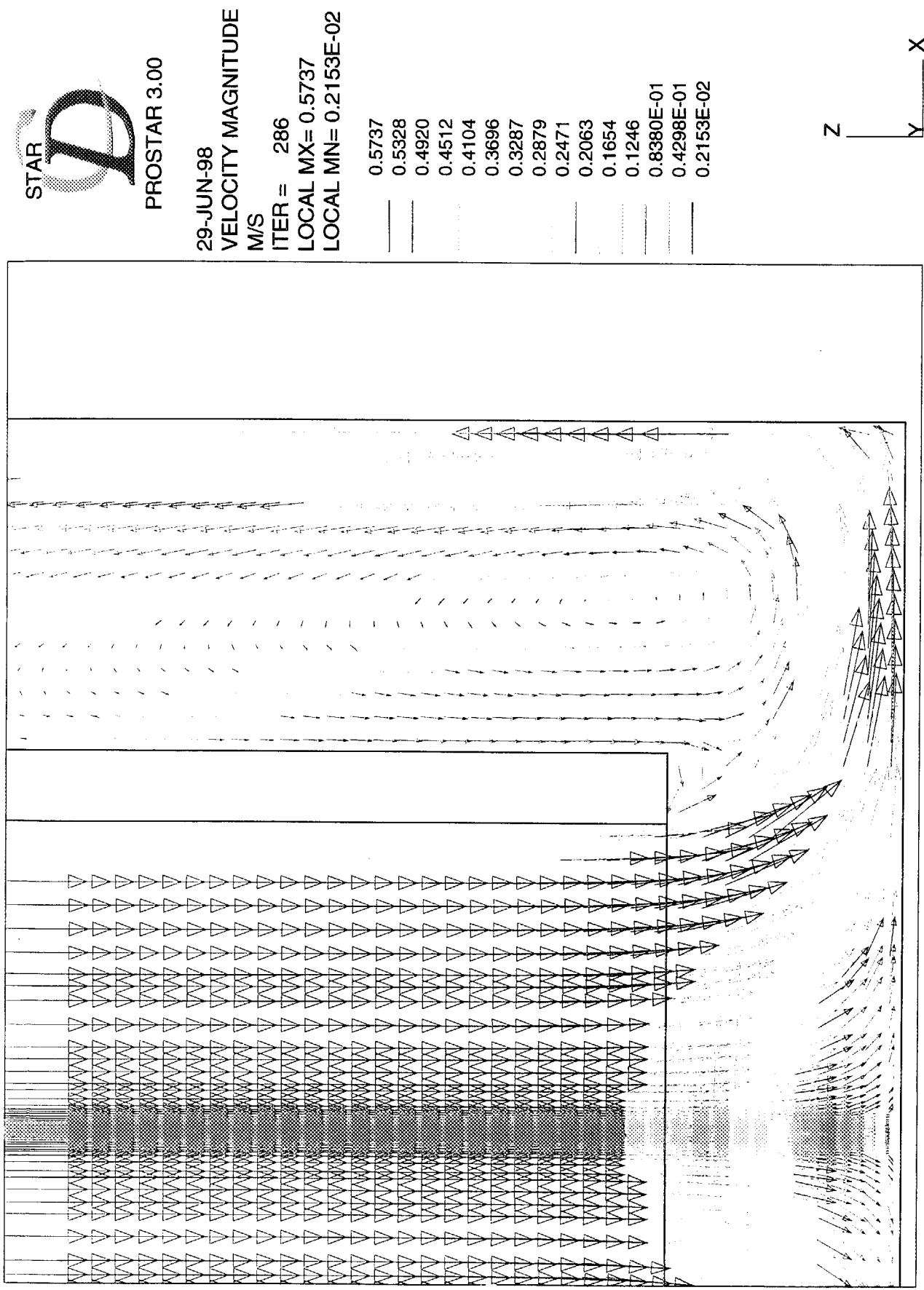


Fig.4.1.23 試験体入口流速0.5m/sの場合の解析結果(拡大図)

This is a blank page.

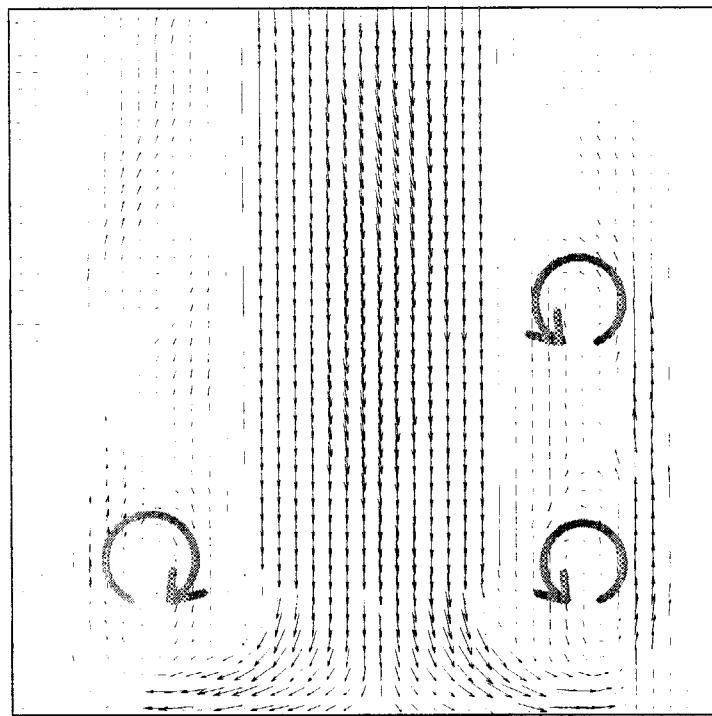


Fig.4.1.24(1) ある瞬間のベクトルマップ (53/100)  
(試験体入口流速3.0m/sのデータ)

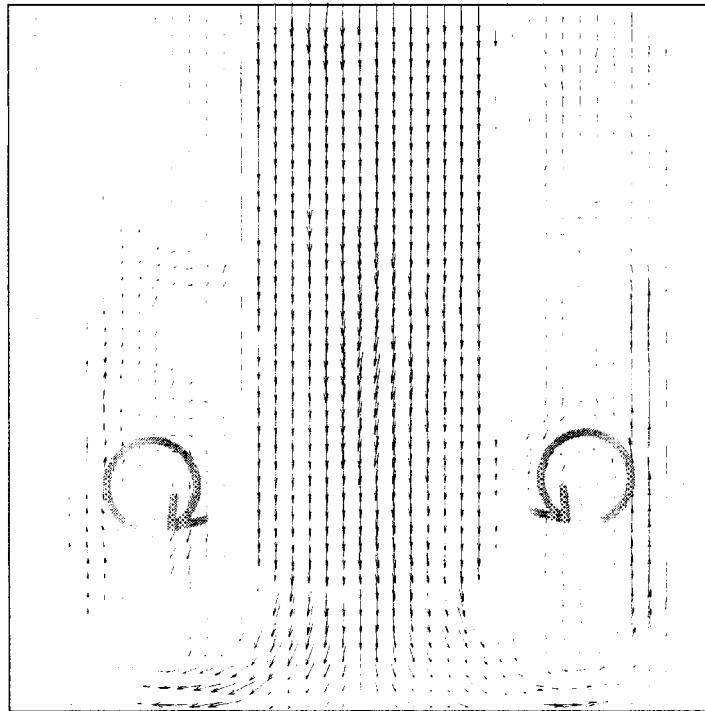


Fig.4.1.24(2) ある瞬間のベクトルマップ (92/100)  
(試験体入口流速3.0m/sのデータ)

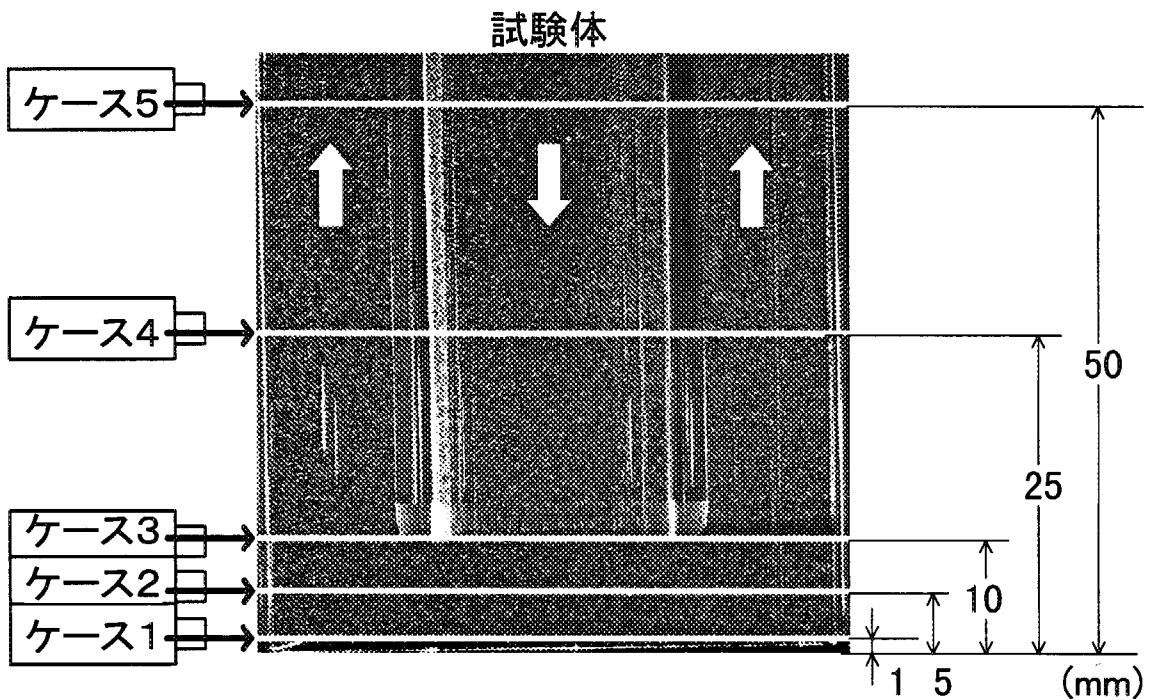


Fig.4.2.1 レーザー照射位置

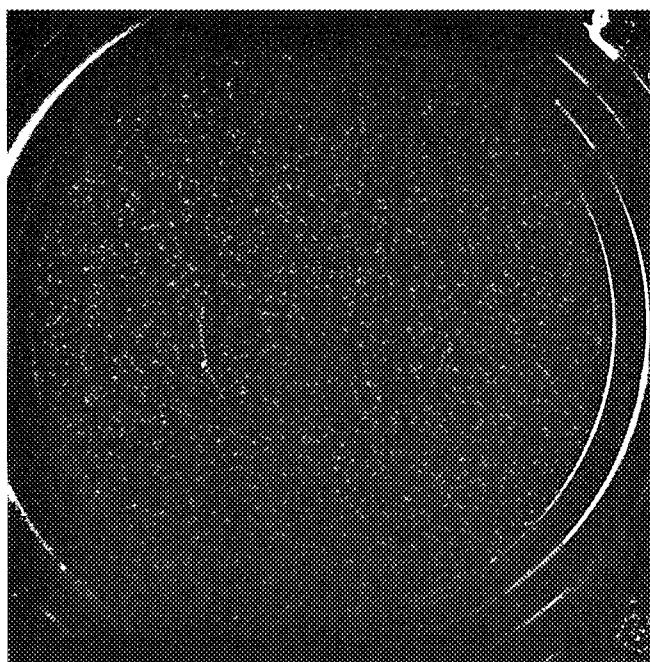


Fig.4.2.2 ケース1の計測画像

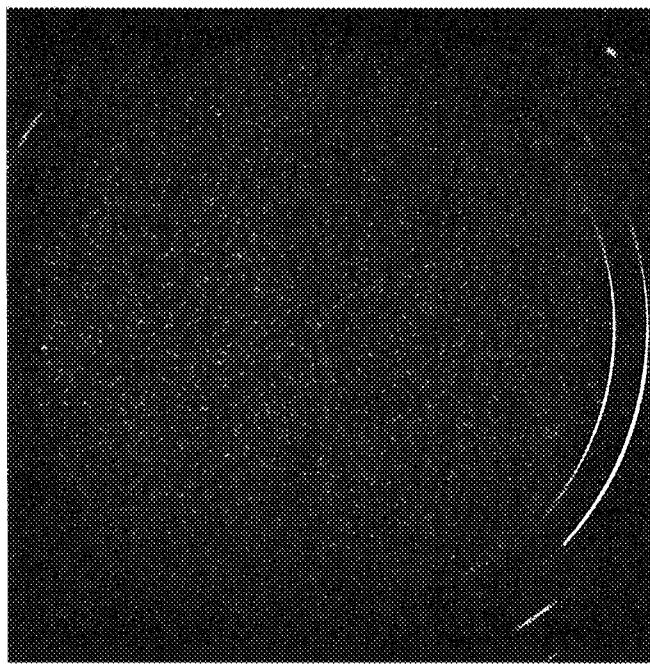


Fig.4.2.3 ケース2の計測画像

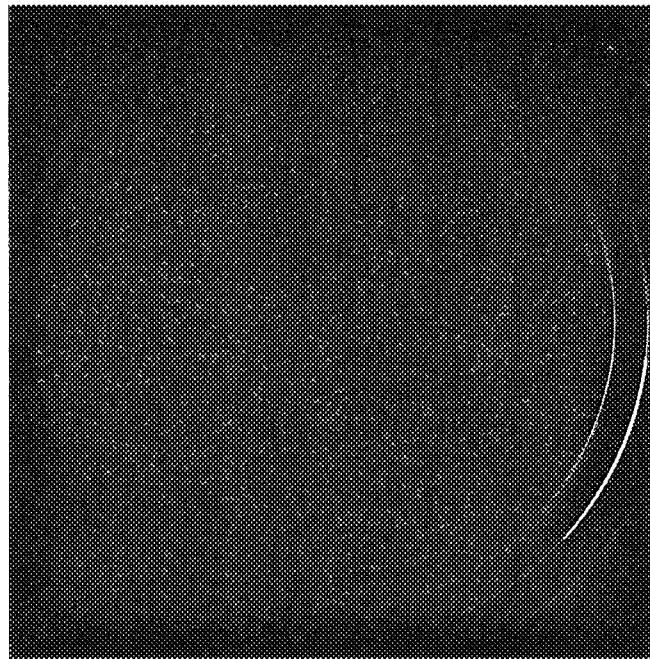


Fig.4.2.4 ケース3の計測画像

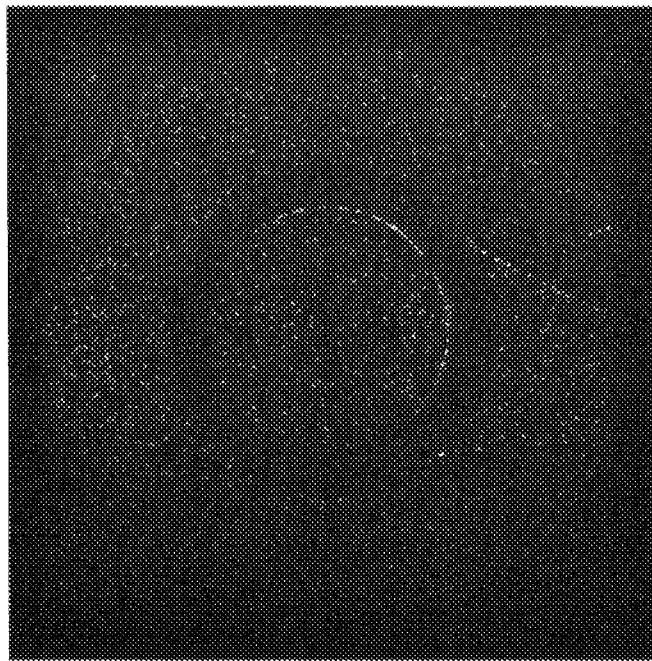


Fig.4.2.5 ケース4の計測画像

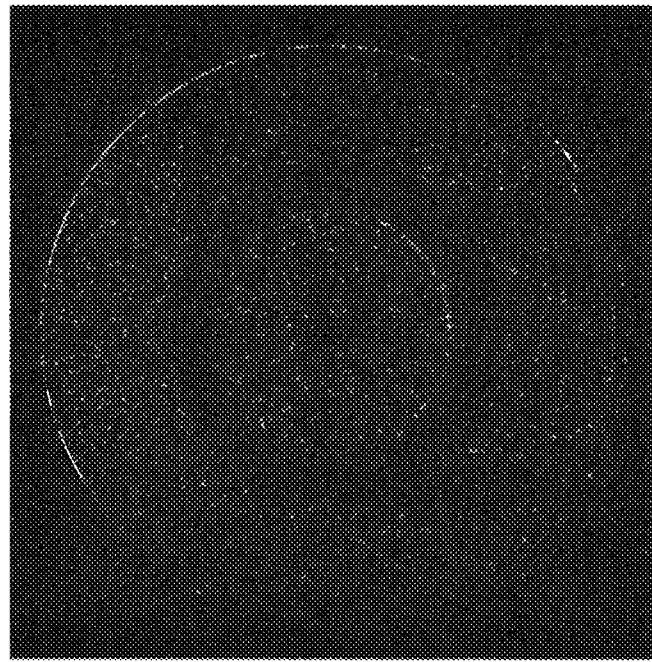


Fig.4.2.6 ケース5の計測画像

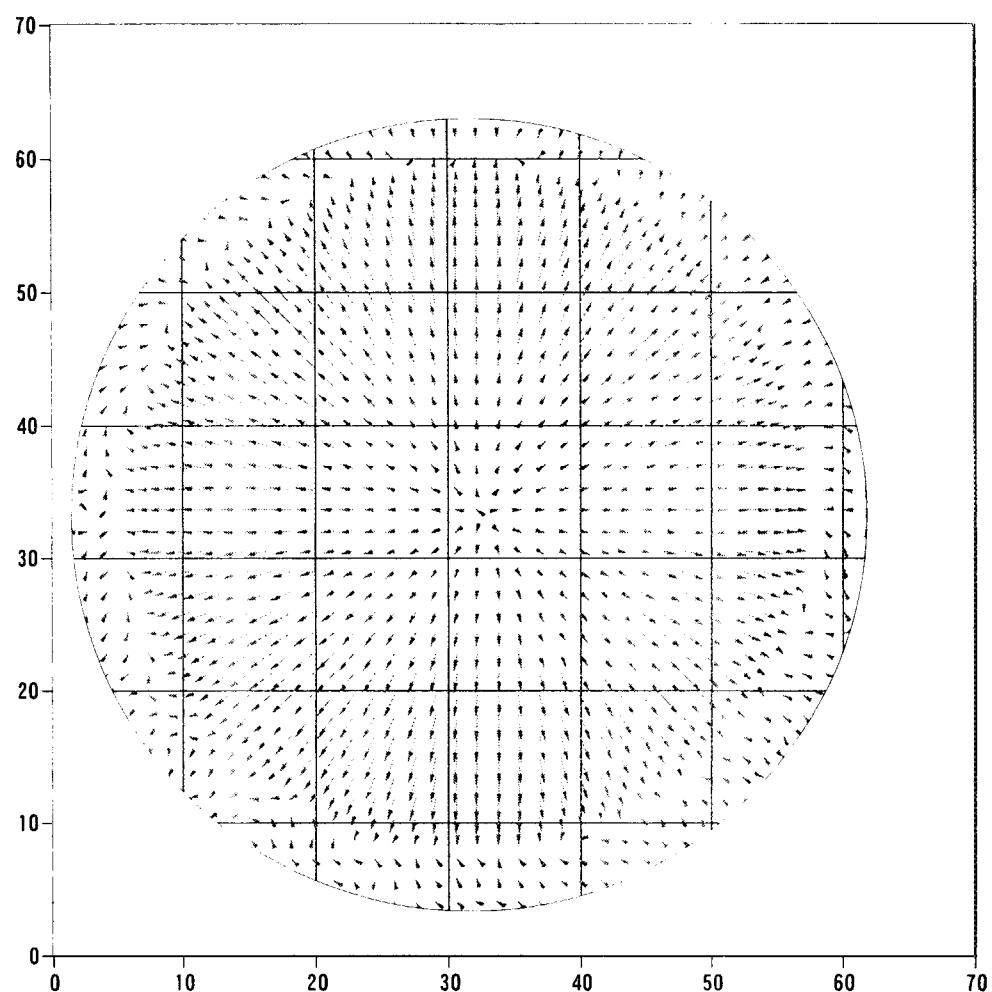


Fig.4.2.7 ケース1のベクトルマップ (DeltaGraph)

This is a blank page.

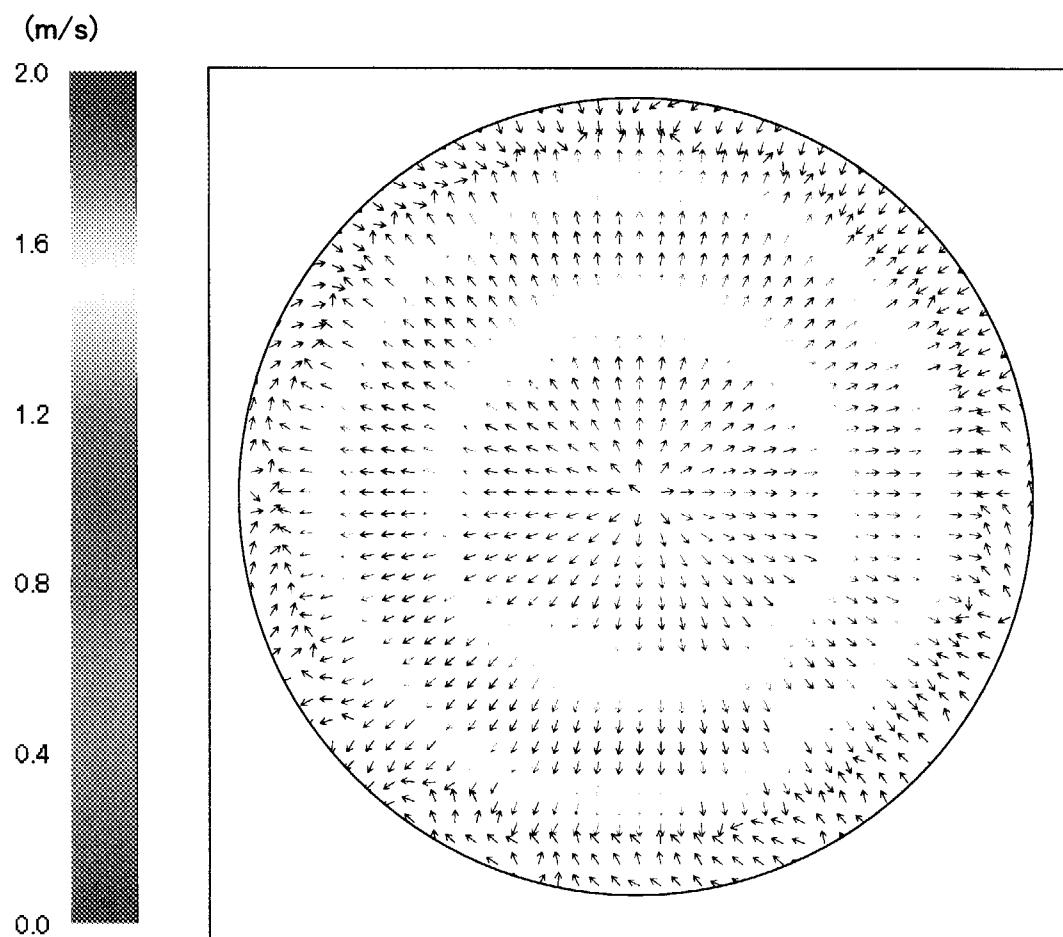


Fig.4.2.8 ケース1のベクトルマップ(MicroAVS)

This is a blank page.

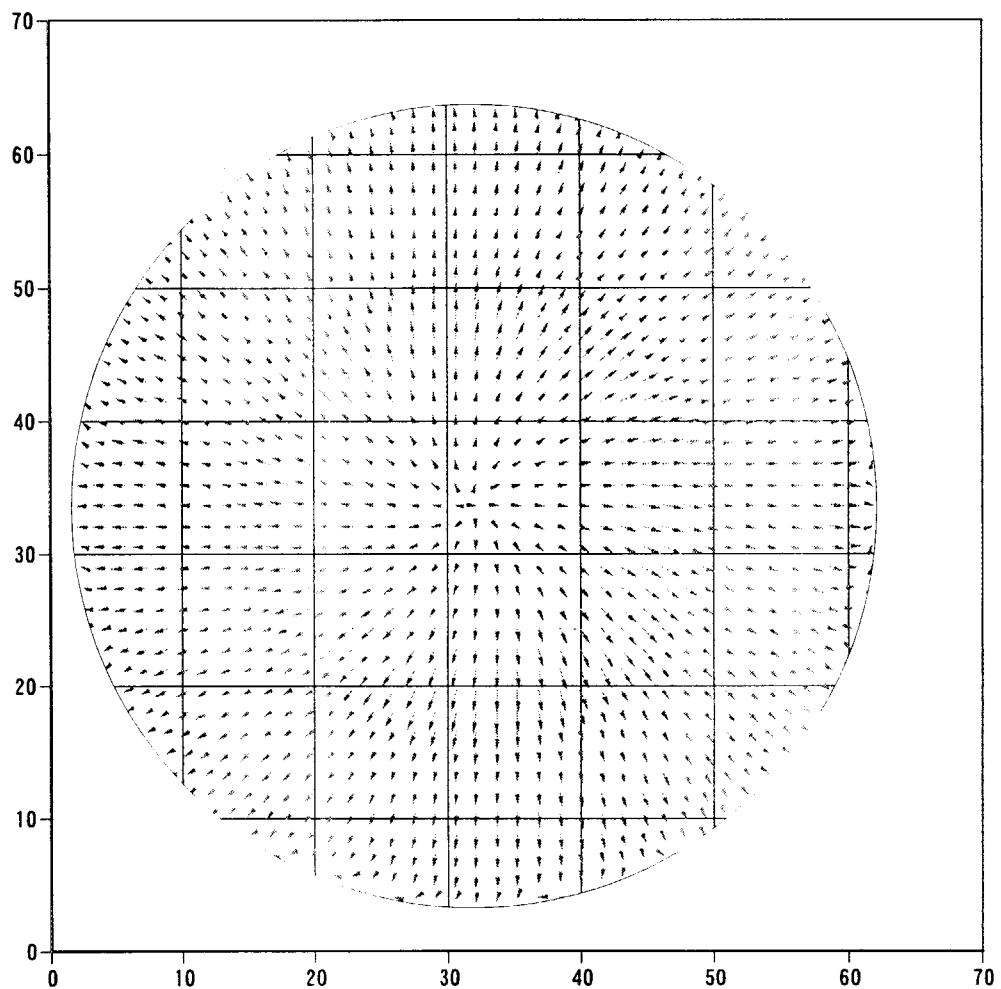


Fig.4.2.9 ケース2のベクトルマップ (DeltaGraph)

This is a blank page.

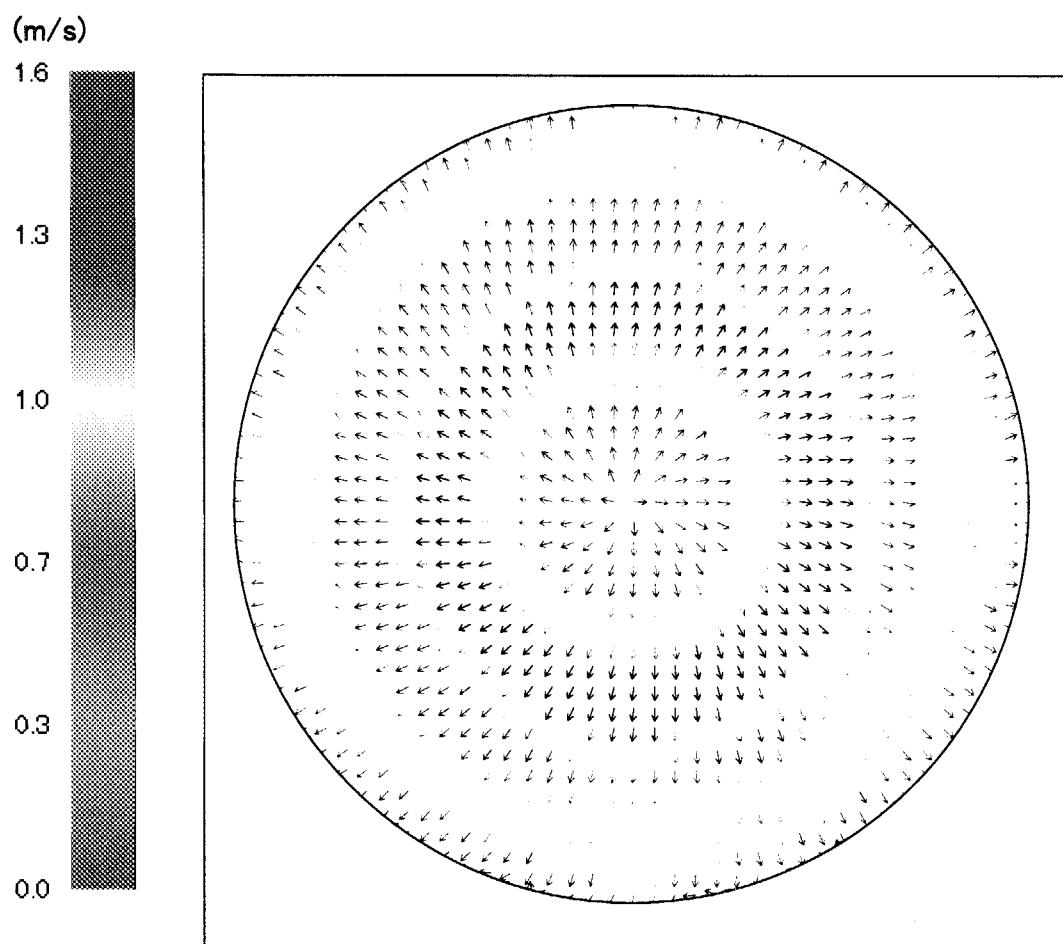


Fig.4.2.10 ケース2のベクトルマップ(MicroAVS)

This is a blank page.

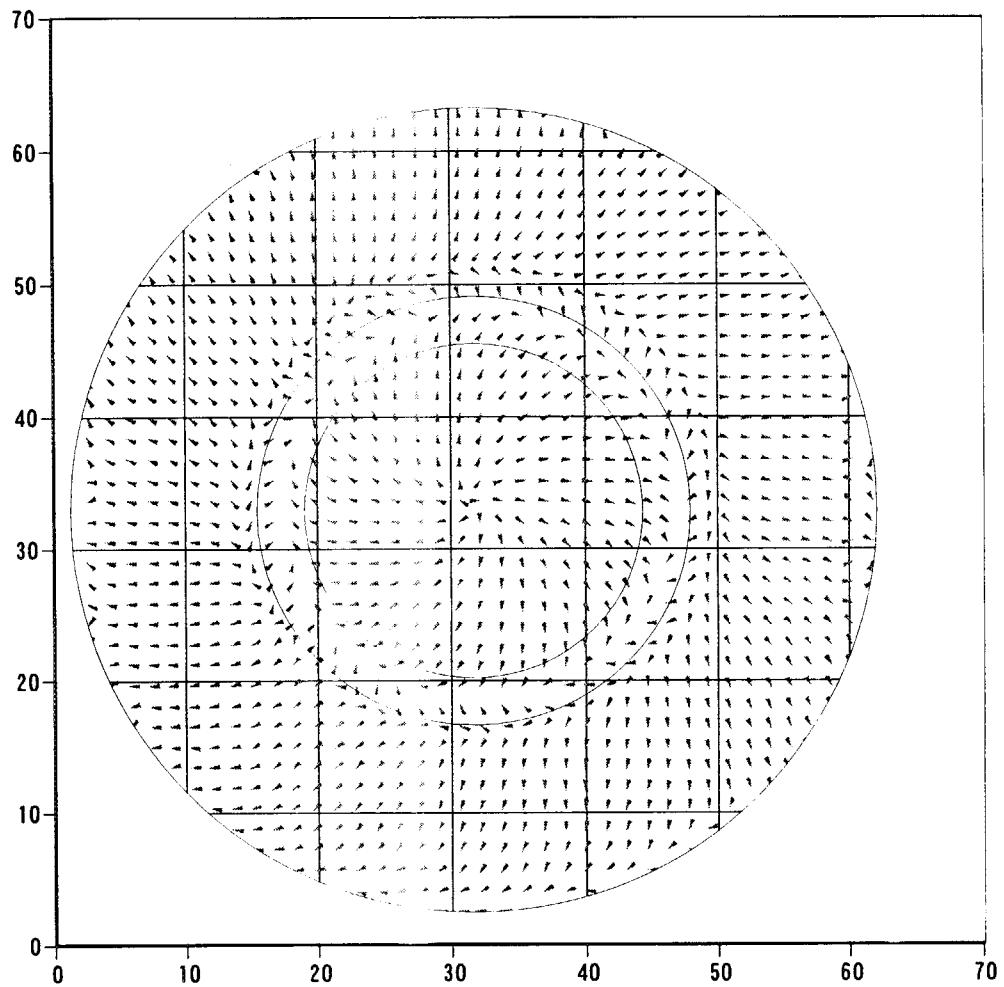


Fig.4.2.11 ケース3のベクトルマップ (DeltaGraph)

This is a blank page.

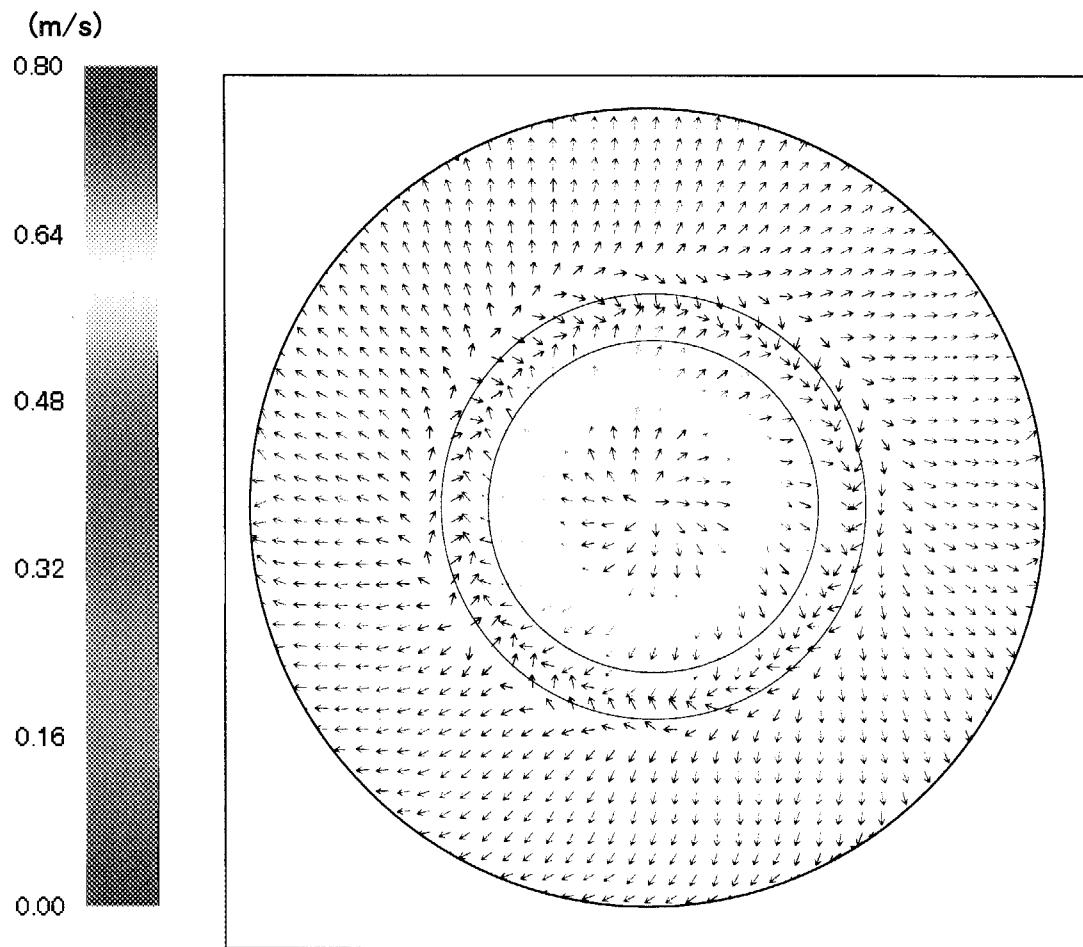


Fig.4.2.12 ケース3のベクトルマップ(MicroAVS)

This is a blank page.

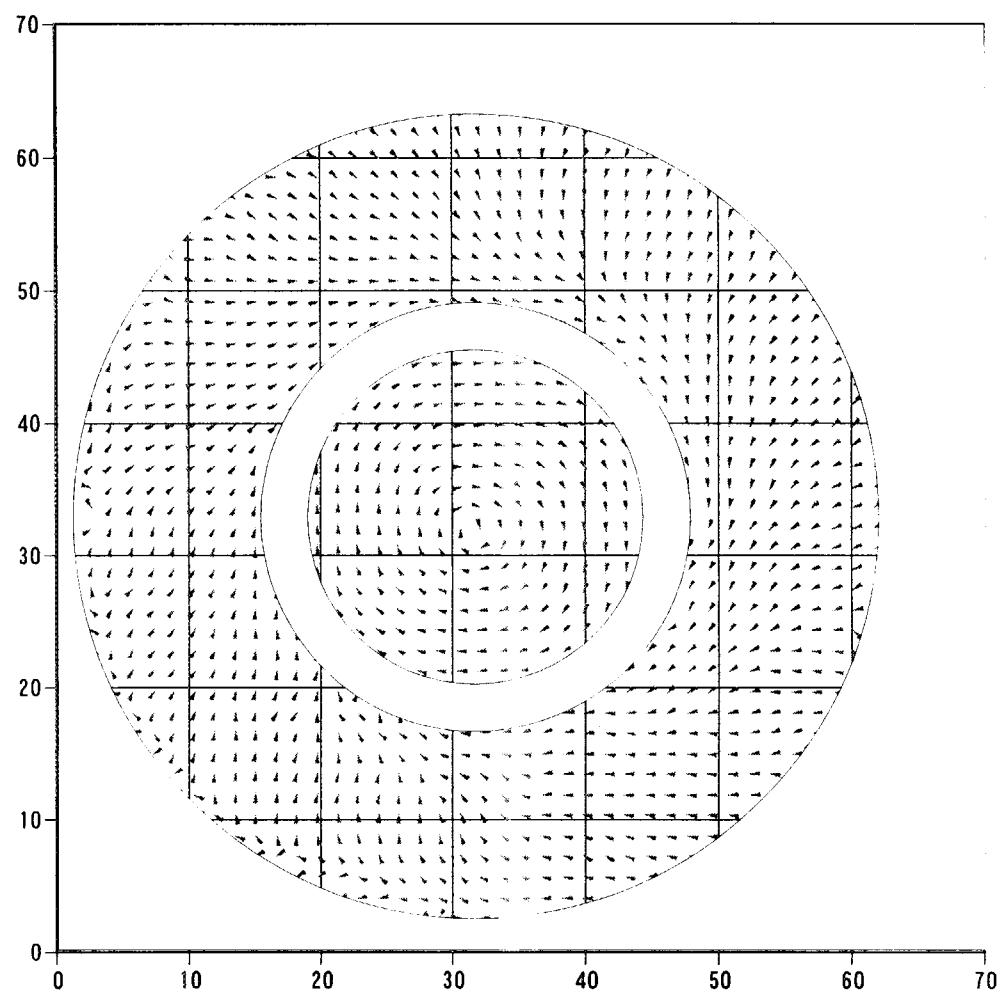


Fig.4.2.13 ケース4のベクトルマップ (DeltaGraph)

This is a blank page.

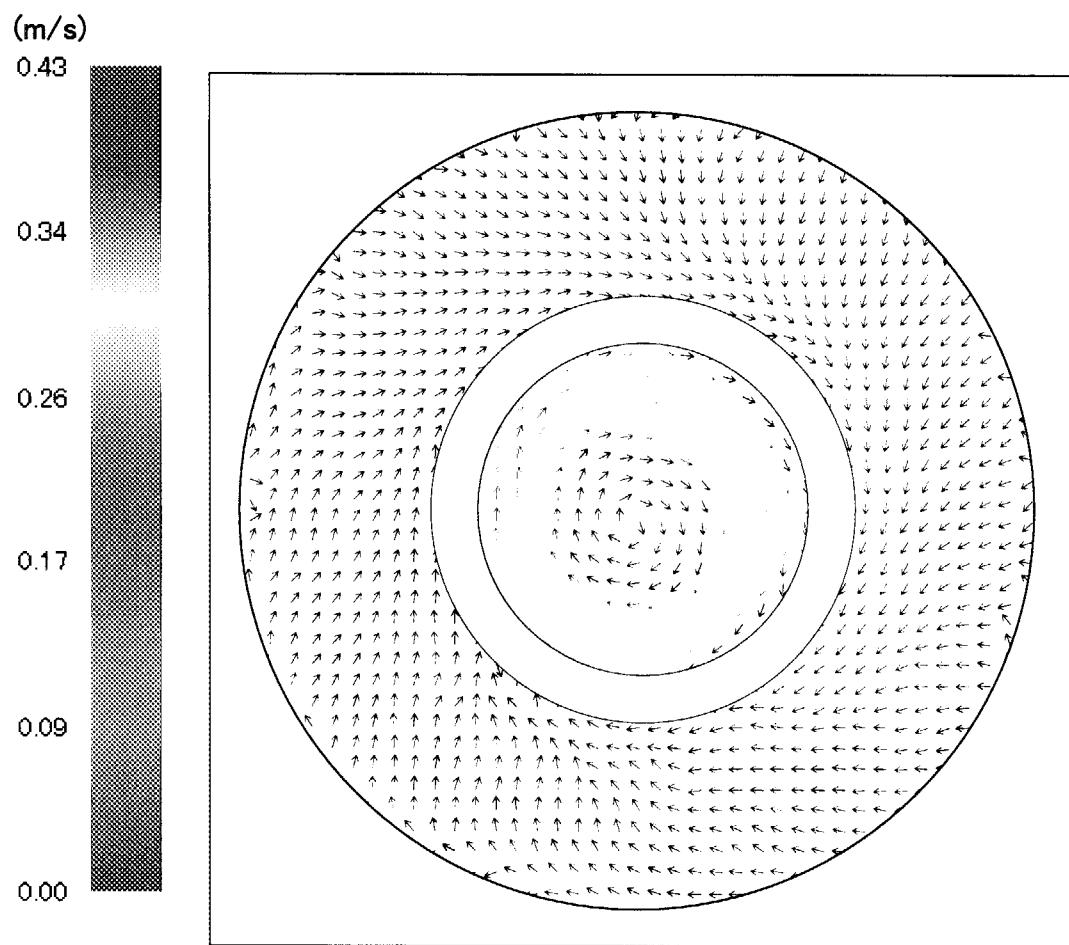


Fig.4.2.14 ケース4のベクトルマップ(MicroAVS)

This is a blank page.

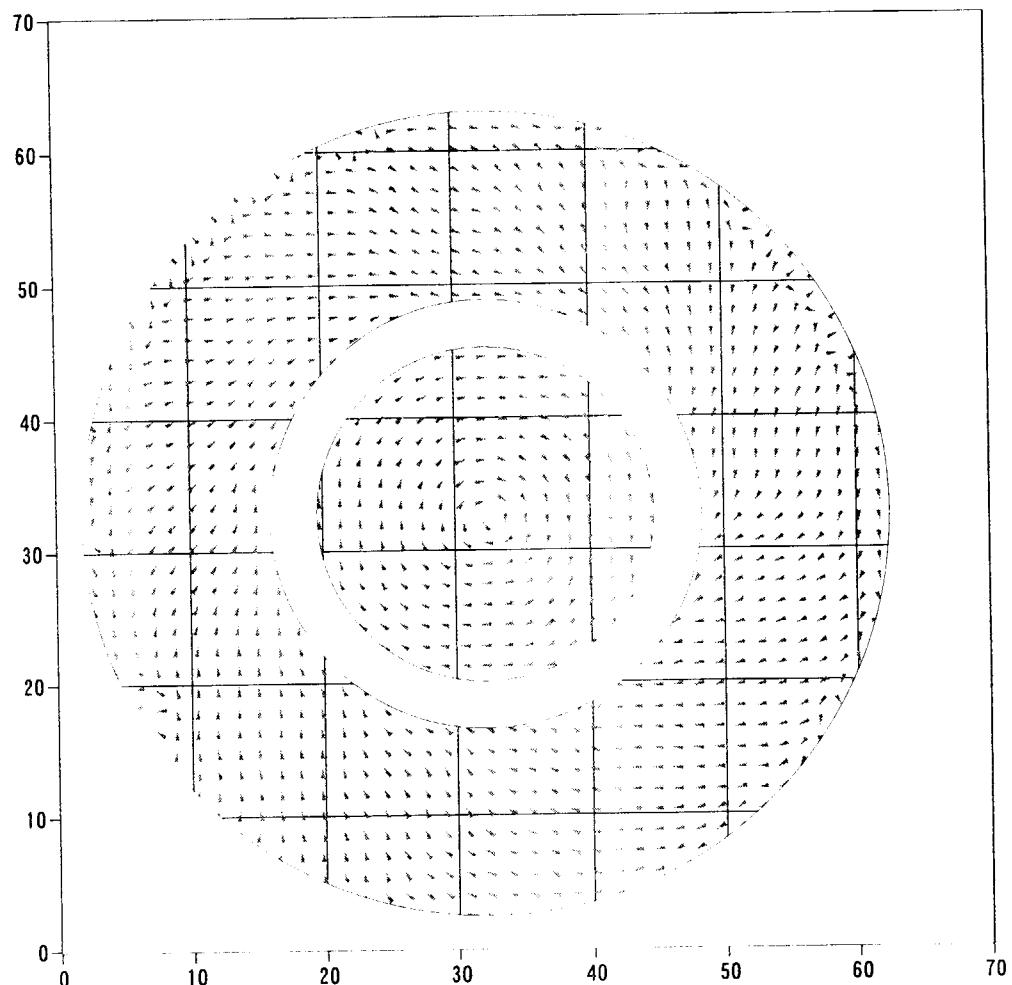


Fig.4.2.15 ケース5のベクトルマップ (DeltaGraph)

This is a blank page.

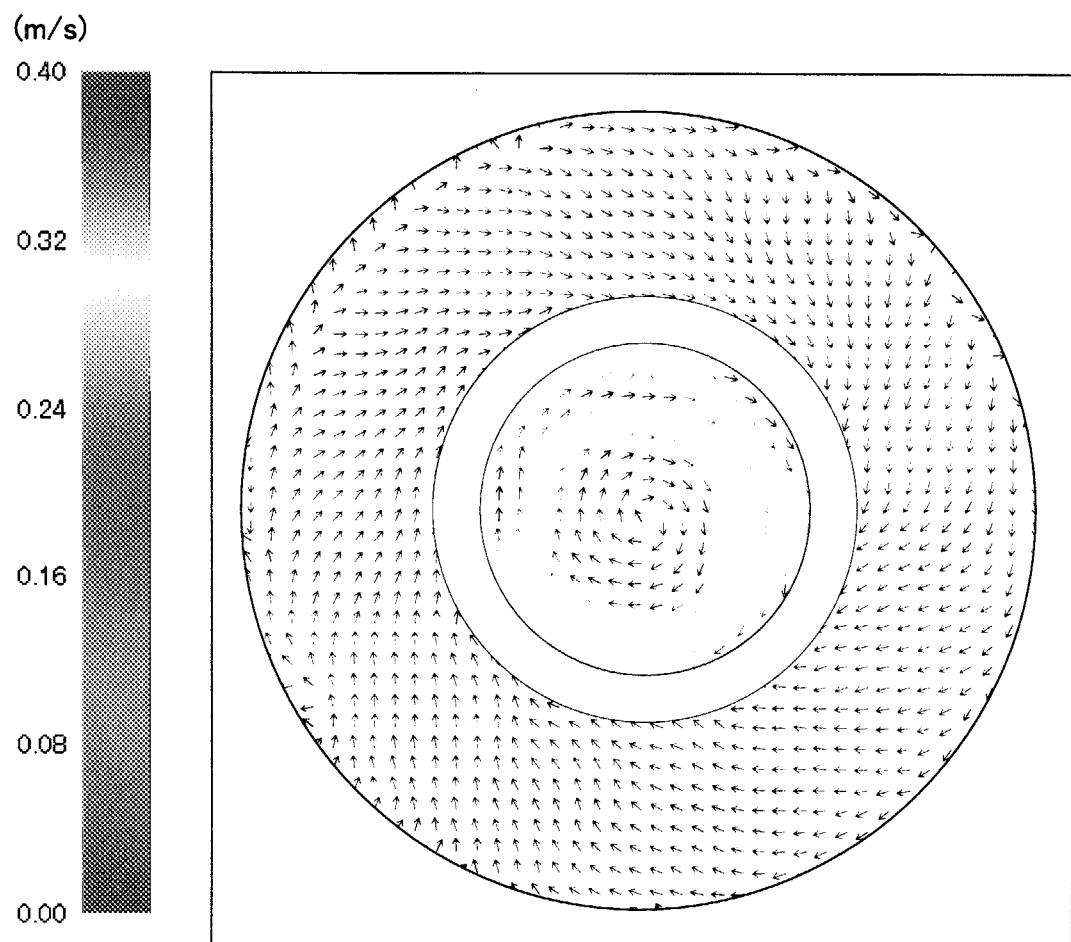


Fig.4.2.16 ケース5のベクトルマップ(MicroAVS)

This is a blank page.

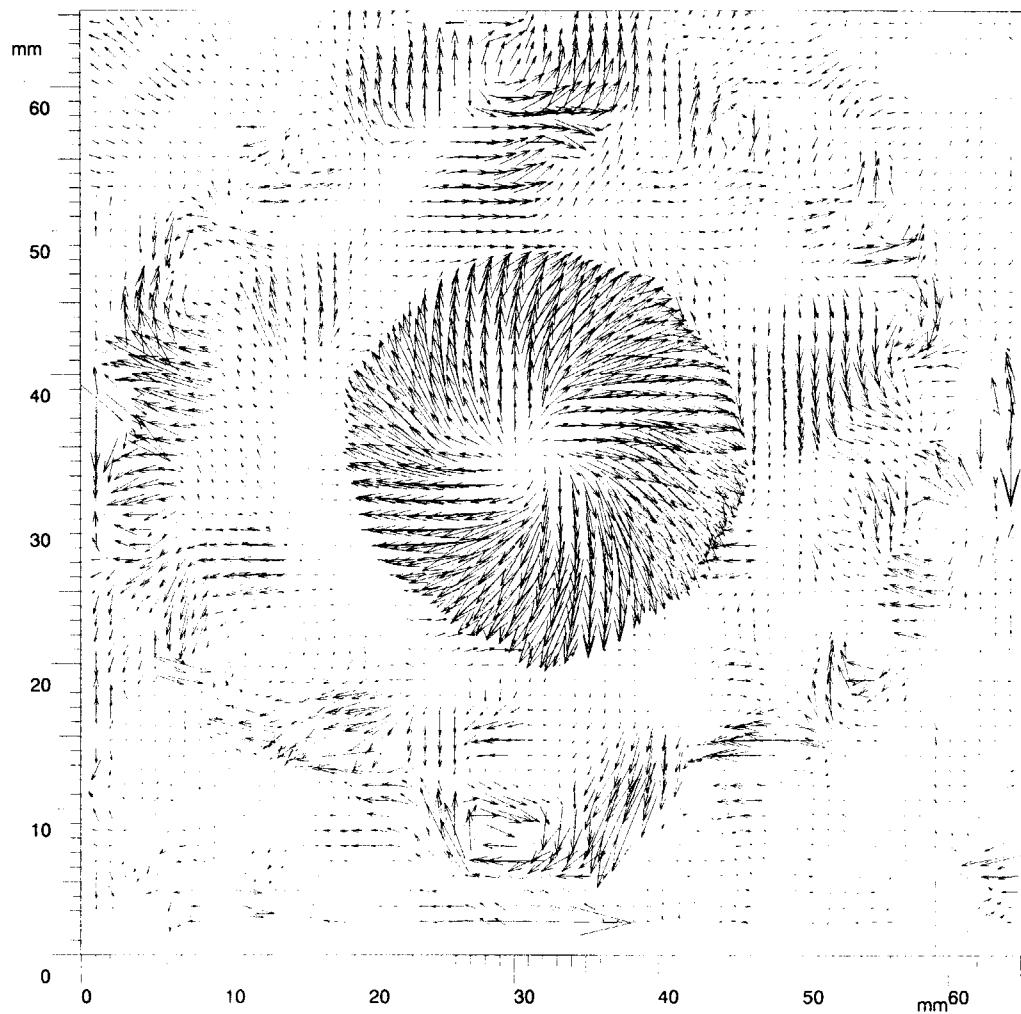


Fig.4.2.17 ケース3のある瞬間のベクトルマップ (44/50)

This is a blank page.

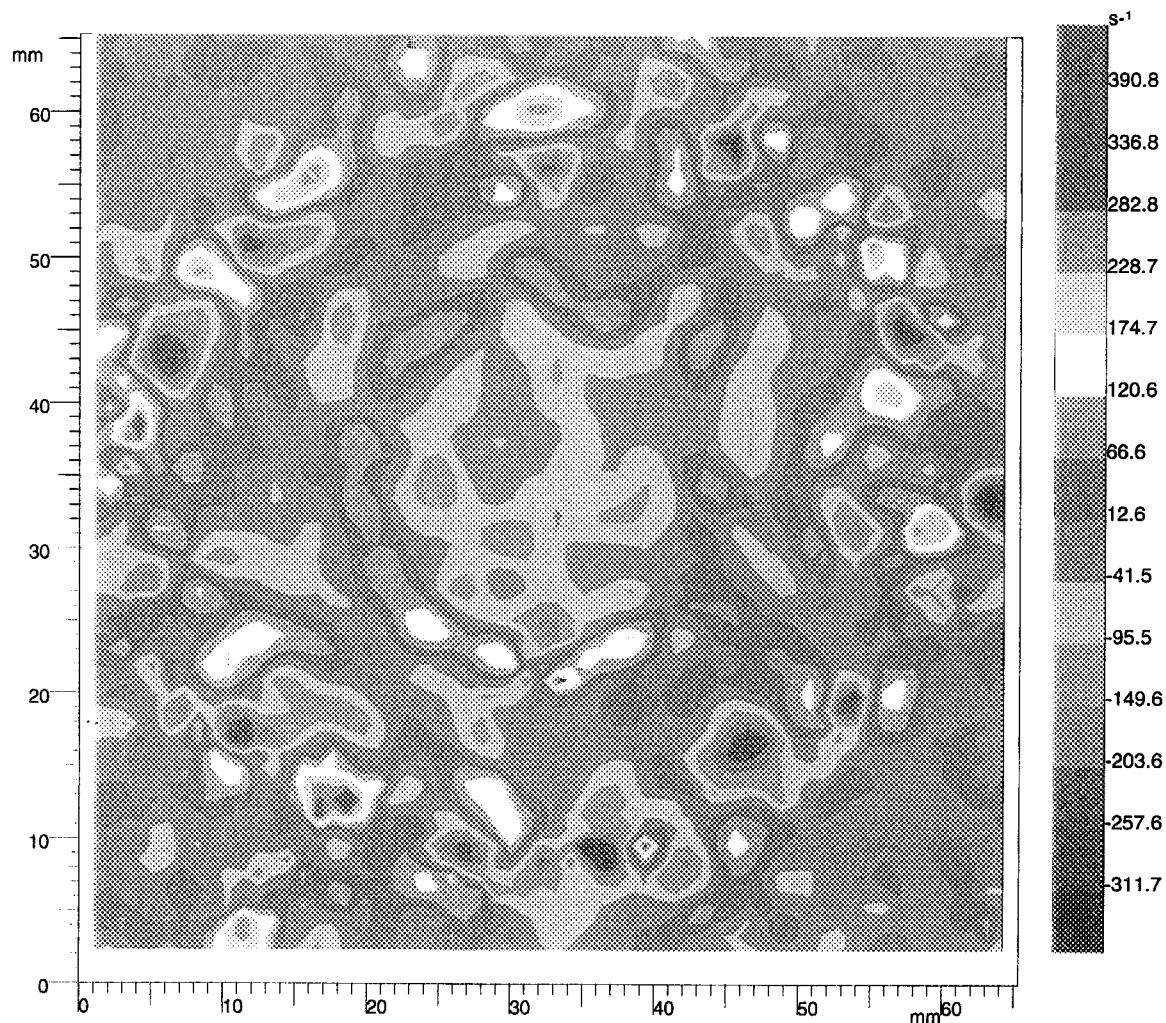


Fig.4.2.18 Fig.4.2.17のコンターマップ

This is a blank page.

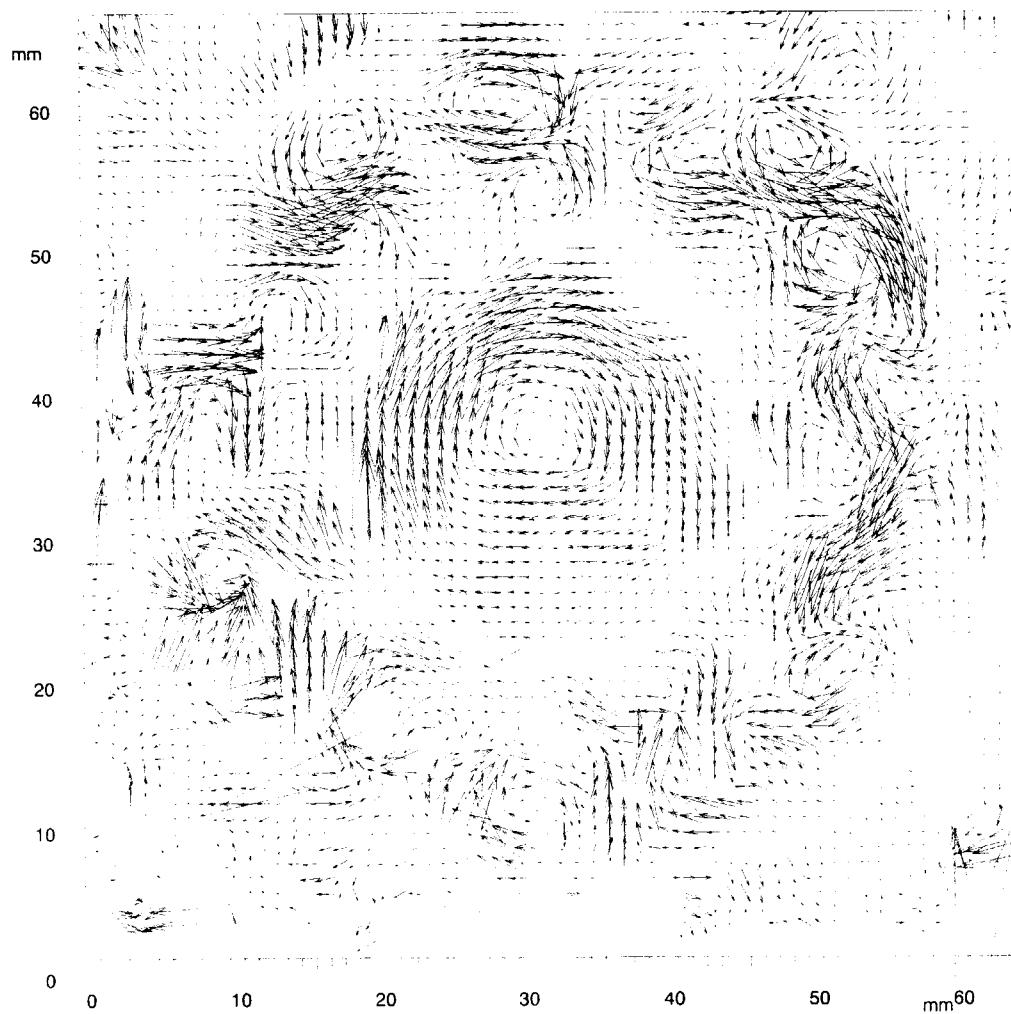


Fig.4.2.19 ケース4のある瞬間のベクトルマップ (35/50)

This is a blank page.

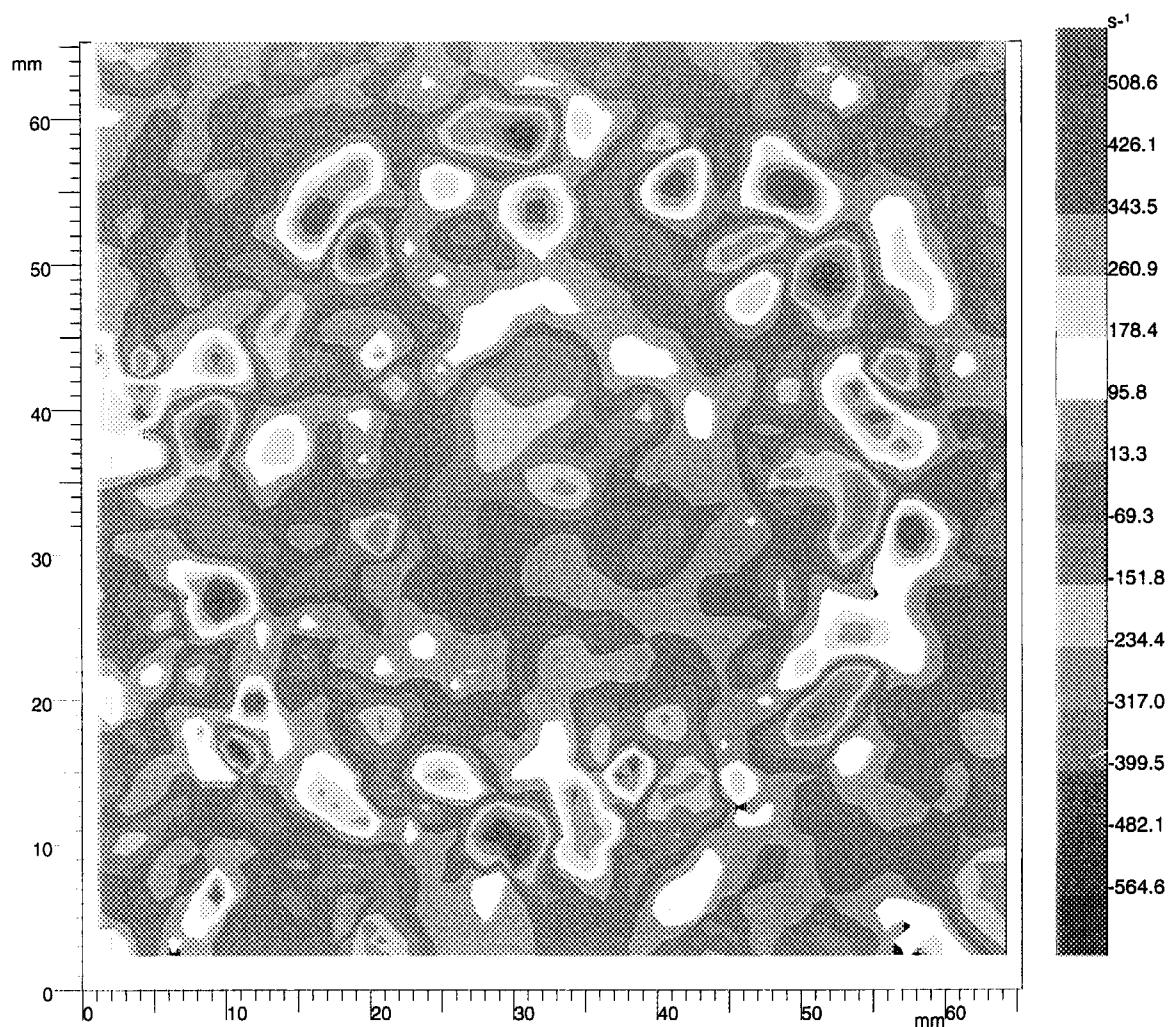


Fig.4.2.20 Fig.4.2.19のコンターマップ

This is a blank page.

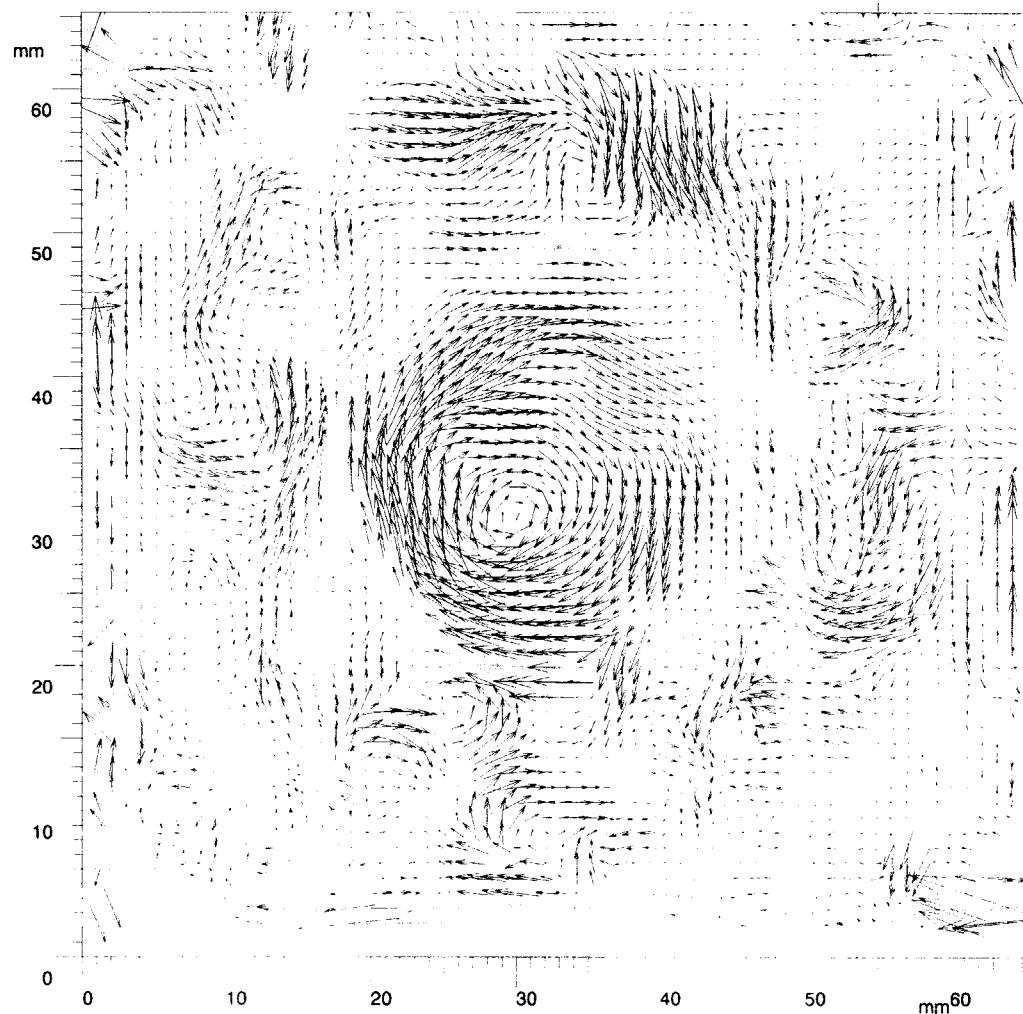


Fig.4.2.21 ケース5のある瞬間のベクトルマップ (24/50)

This is a blank page.

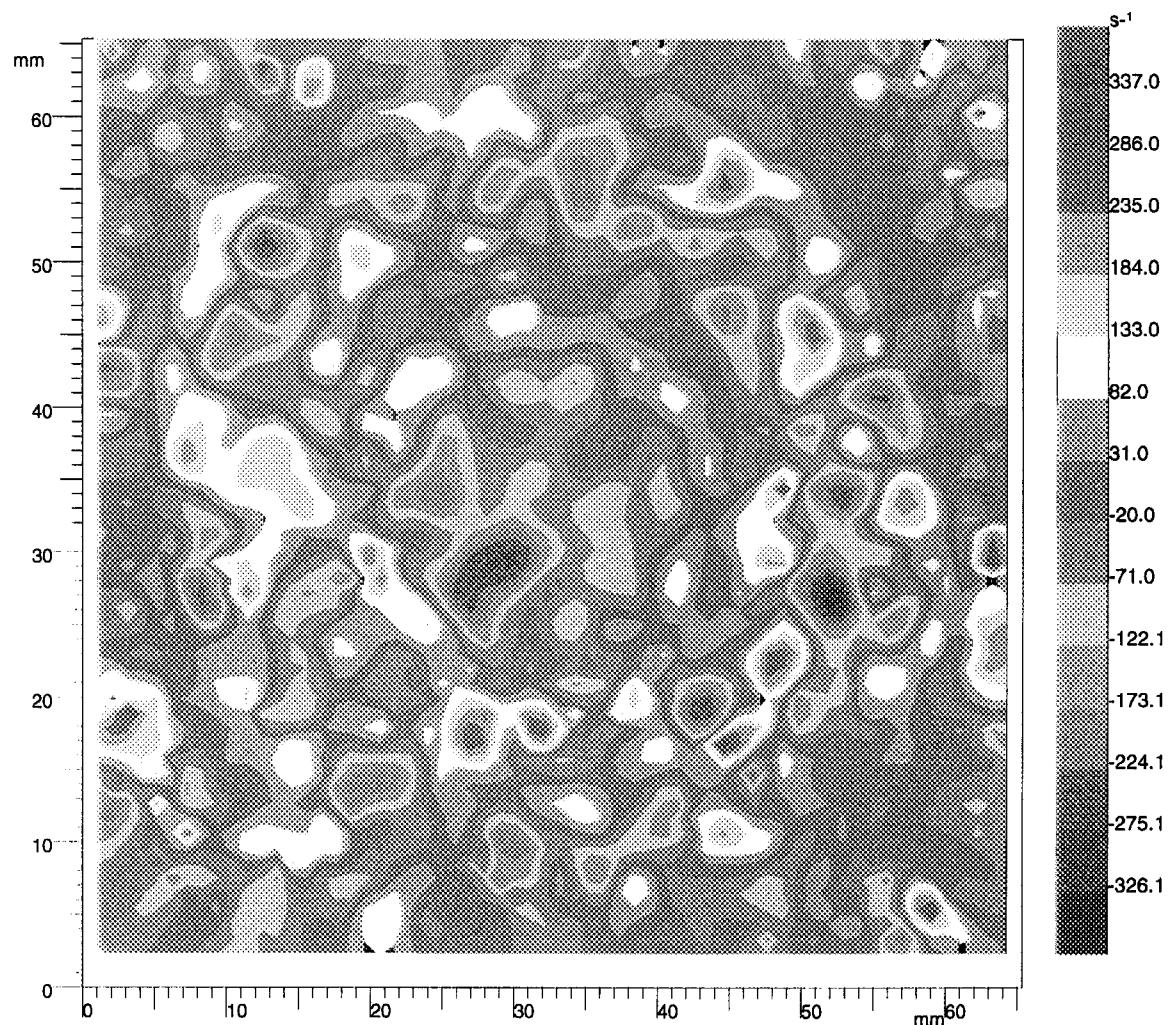


Fig.4.2.22 Fig.4.2.21のコンターマップ

This is a blank page.

## 5. 今後の計画

これまでの実験スケジュールを Fig.5.1 に、平成 12 年度までの実験スケジュール（案）を Fig.5.2 に示す。今回、計画どおりに計測システムの調整（粒子の選定等）を行い、衝突噴流の流動計測実験において流速を変化させた場合の実験を実施した。さらに、外管底面と内管下端との隙間を変化させた場合の衝突噴流の流動計測実験を前述同様流速を変えて行い、現在データ処理中である。今後、Fig.5.2 に示すように、基本的な衝突噴流の流動計測（ここで使用した試験体を減速材模擬試験体 I とする）を行った後、検討中の減速材容器形状を正確に模擬した試験体 II の設計・製作を始めることとする。同時に、解析等による容器形状改良の検討も始める。また、冷減速材システム試験装置の設計検討を行い、製作に着手する。本装置は、冷減速材システムの動特性を試験し、システム制御系や安全保護系の開発を行うとともにシステム構成機器を開発するため、超臨界水素による冷減速材システムを液体窒素で模擬する試験装置である。

平成 11 年度には、製作した減速材模擬試験体 II による流動実験を実施し、減速材容器内の流動状況を把握して解析結果の検証等を行い、熱流動解析のための基礎データとする。冷減速材システム試験装置は製作及び組み立てを行う。また、衝突噴流及び再循環領域の熱伝達率を把握するため、減速材基礎流動実験装置を基に改造又は更新する熱流動実験装置の設計検討を開始する。

平成 12 年度は、完成した冷減速材システム試験装置を用いて、減速材システムの起動・停止を含めた定格運転時の熱流動特性、制御性試験を行い、その後、流量、圧力等の過渡時の熱流動試験を実施して安全解析コードによる解析結果を検証するためのデータ、安全設計に必要なデータを取得する。熱流動実験装置については引き続き設計・製作を行い、実験に取りかかる予定である。

ここで、次期減速材模擬試験体 II は検討中の減速材容器形状を正確に模擬したものを作成する予定であるが、試験体 I を改造したものを適宜使用して、最適な流動条件を探求する実験を行うことも検討している。例えば、試験体 I の入口内管にスパイラルテープを取り付けて予備実験を実施している。これは、強制的な旋回流を発生させ、流体流出を促進させることによる流れの滞留域縮小を狙ったもので、得られた結果は熱流体設計の基礎データのひとつとなる。

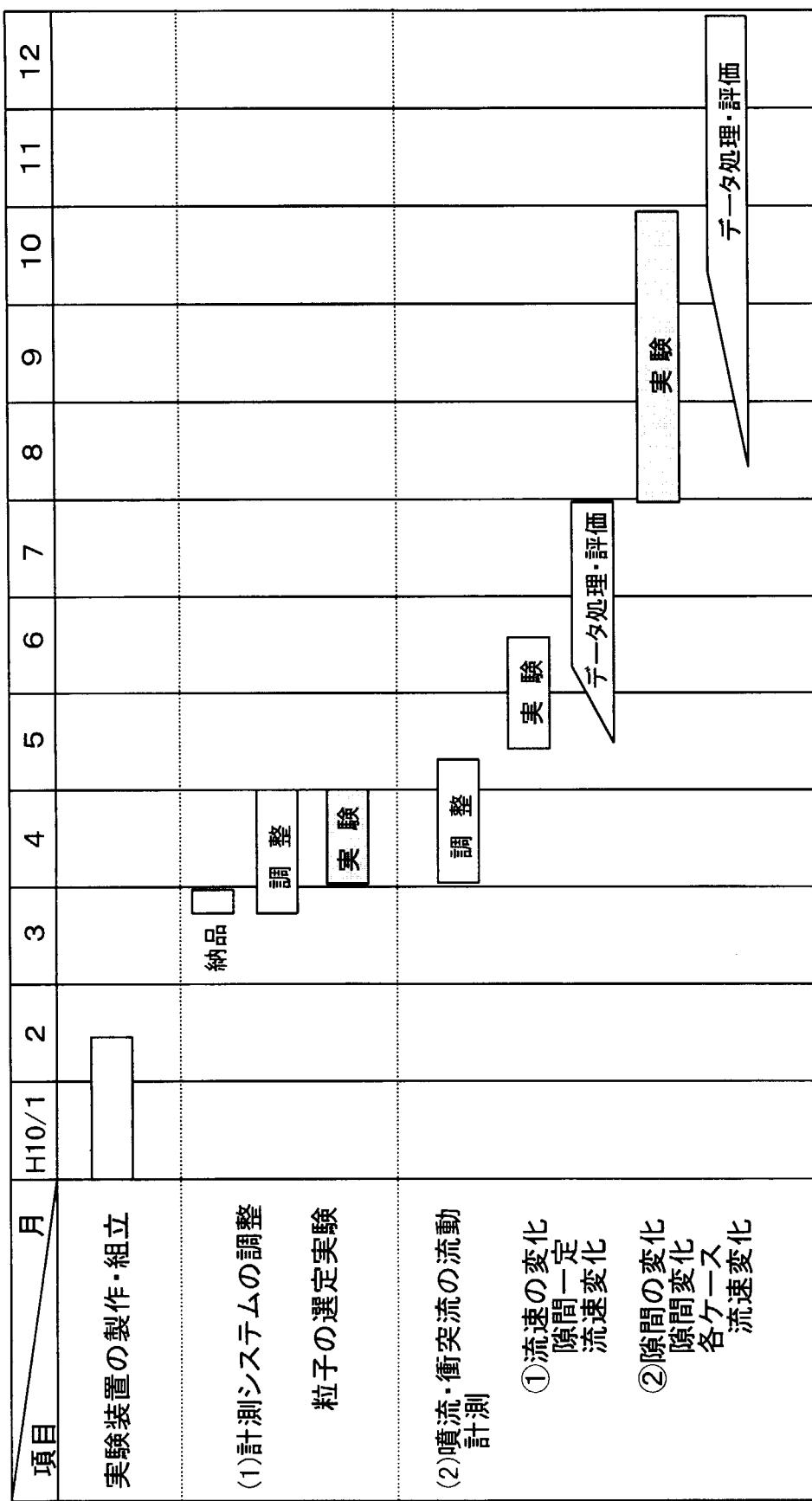


Fig.5.1 これまでの実験スケジュール

項目	年 月	平成 10 年 度											
		4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3
○衝突噴流の流動計測 (減速材模擬試験体 I)													
○減速材模擬試験体 II の 設計・製作													
○冷減速材システム試験 装置の設計・製作													
項目	年 月	平成 11 年 度											
		4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3
○減速材容器内の流動計測 (減速材模擬試験体 II)													
○冷減速材システム試験 装置の設計・製作													
○熱流動実験装置の設計・ 製作													
項目	年 月	平成 12 年 度											
		4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3
○冷減速材試験													
○衝突噴流の熱伝達測定 (熱流動実験装置)													

Fig.5.2 平成 12 年度までの実験スケジュール(案)

## 6. あとがき

冷減速材に適した液体水素を用いた減速材システムの重要な設計課題である温度上昇の抑制を実現するために、第一段階として水による衝突噴流による流動状況の把握を目的とした基礎流動実験計画を立案した。この計画に沿って、計測システム調整のための予備実験を行い、粒子及びレーザー照射位置を決定した。これらの予備実験結果に基づいた衝突噴流の流動計測実験においては、流速変化に対する基礎流動実験を実施し流動状況を示すベクトルマップを平均化した結果、流れの再循環領域を可視化することができた。今回実験した流速範囲（0.5～3.0m/s）では状況の変化に大きな差は見られず、流動解析結果とよく一致することを明らかにした。また、実験では局所的に小さな渦が発生して流出している状況が測定され、水平方向の流動状況を測定した実験によっても同様に渦の発生を確認した。

今後は、衝突噴流に関する基礎データをさらに蓄積して、解析コードの検証を行うとともに、これらの結果を基にして最適な流動経路を有する冷減速材容器構造の設計を進める予定である。

## 謝 辞

本報告をまとめるに当たり、核熱利用研究部高温機器開発試験室の稻垣嘉之氏に貴重な助言をいただいた。ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- (1)向山武彦, “中性子科学研究計画－(1)概要”, 日本原子力学会「1998 春の年会」D21 (1998)
- (2) T. Mukaiyama, et al., “Neutron Science Project at JAERI,” ANS Topical Meeting on Nuclear Applications of Accelerator Technology (ACCAPP'97), Nov. 16-20 (1997)
- (3)大山幸夫、他, “中性子科学研究計画－(2)研究施設設計”, 日本原子力学会「1998 春の年会」 D22 (1998)
- (4)日野竜太郎、他, “中性子科学研究計画－(4)ターゲット開発”, 日本原子力学会「1998 春の年会」 D24 (1998)
- (5) N. Watanabe, et al., “A Target-Moderator-Reflector Concept of the JAERI 5MW Pulsed Spallation Neutron Source,” JAERI-Tech 98-011 (1998)
- (6)勅使河原誠、他, “JAERI 5MW スポレーションパルス中性子源における中性子特性およびターゲット、冷モデレータの核発熱”, 日本原子力学会「1998 春の年会」 D30 (1998)
- (7) T. Aso, et al., “Structural and Hydraulic Study on Cold Source Moderator,” 14<sup>th</sup> Meeting of Int. Collaboration on Advanced Neutron Source, Utica (1998)
- (8) T. A. Broome, “Prospects for Targets and Methane Moderators at ISIS,” 13<sup>th</sup> Meeting of Int. Collaboration on Advanced Neutron Source, pp.632-643, Villigen PSI (1995)
- (9) National Spallation Neutron Source Conceptual Design Report Volume 1, The NSNS Collaboration, Oak Ridge National Laboratory, p.5-27-p.5-41 (1997)
- (10) A. Trevor Lucas (Oak Ridge National Laboratory) 私信
- (11)日本機械学会, “技術資料 流体の熱物性値集” (1983)

This is a blank page.

## 国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s <sup>-1</sup>
压力、応力	ニュートン	N	m·kg/s <sup>2</sup>
エネルギー、仕事、熱量	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>
功率、放射束	ジュール	J	N·m
電気量、電荷	ワット	W	J/s
電位、電圧、起電力	クロン	C	A·s
静電容量	ボルト	V	W/A
電気抵抗	アーティム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束度	ルーメン	lm	cd·sr
照度	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>
放射能	ベクレル	Bq	s <sup>-1</sup>
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名 称	記 号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ', "
リットル	L, l
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 <sup>18</sup>	エクサ	E
10 <sup>15</sup>	ペタ	P
10 <sup>12</sup>	テラ	T
10 <sup>9</sup>	ギガ	G
10 <sup>6</sup>	メガ	M
10 <sup>3</sup>	キロ	k
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h
10 <sup>1</sup>	デカ	da
10 <sup>-1</sup>	デシ	d
10 <sup>-2</sup>	センチ	c
10 <sup>-3</sup>	ミリ	m
10 <sup>-6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>-9</sup>	ナノ	n
10 <sup>-12</sup>	ピコ	p
10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>-18</sup>	アト	a

(注)

1. 表1~5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。

2. 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。

3. barは、JISでは液体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。

4. EC閣僚理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

### 換 算 表

力	N(=10 <sup>5</sup> dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
9.80665	1	2.20462	
4.44822	0.453592	1	

粘度 1 Pa·s(N·s/m<sup>2</sup>)=10 P(ボアズ)(g/(cm·s))

動粘度 1 m<sup>2</sup>/s=10<sup>4</sup>St(ストークス)(cm<sup>2</sup>/s)

圧力	MPa(=10 bar)	kgf/cm <sup>2</sup>	atm	mmHg(Torr)	lbf/in <sup>2</sup> (psi)
力	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 <sup>3</sup>	145.038
0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233	
0.101325	1.03323	1	760	14.6959	
1.33322 × 10 <sup>-4</sup>	1.35951 × 10 <sup>-3</sup>	1.31579 × 10 <sup>-3</sup>	1	1.93368 × 10 <sup>-2</sup>	
6.89476 × 10 <sup>-3</sup>	7.03070 × 10 <sup>-2</sup>	6.80460 × 10 <sup>-2</sup>	51.7149	1	

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 <sup>7</sup> erg)	kgf·m		kW·h		cal(計量法)	Btu	ft · lbf	eV	1 cal = 4.18605 J(計量法)	
		1	0.101972	2.77778 × 10 <sup>-7</sup>	0.238889					= 4.184 J(熱化学)	
9.80665		1	2.72407 × 10 <sup>-6</sup>	2.34270	9.29487 × 10 <sup>-3</sup>	7.23301	6.12082 × 10 <sup>19</sup>			= 4.1855 J(15 °C)	
3.6 × 10 <sup>6</sup>	3.67098 × 10 <sup>5</sup>	1	8.59999 × 10 <sup>5</sup>	3412.13	2.65522 × 10 <sup>6</sup>	2.24694 × 10 <sup>26</sup>				= 4.1868 J(国際蒸気表)	
4.18605	0.426858	1.16279 × 10 <sup>-6</sup>	1	3.96759 × 10 <sup>-3</sup>	3.08747	2.61272 × 10 <sup>19</sup>				仕事率 1 PS(仏馬力)	
1055.06	107.586	2.93072 × 10 <sup>-4</sup>	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 <sup>21</sup>				= 75 kgf·m/s	
1.35582	0.138255	3.76616 × 10 <sup>-7</sup>	0.323890	1.28506 × 10 <sup>-3</sup>	1	8.46233 × 10 <sup>18</sup>				= 735.499 W	
1.60218 × 10 <sup>-19</sup>	1.63377 × 10 <sup>-20</sup>	4.45050 × 10 <sup>-26</sup>	3.82743 × 10 <sup>-20</sup>	1.51857 × 10 <sup>-22</sup>	1.18171 × 10 <sup>-19</sup>	1					

放射能	Bq	Ci	吸収線量	Gy	rad
	1	2.70270 × 10 <sup>-11</sup>		1	100
	3.7 × 10 <sup>-10</sup>	1	0.01	1	

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 <sup>-4</sup>	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

