

画像処理手法による 2 次元平面内の流速計測手法

牛 島 省*
宮 永 一**
竹 田 浩 文***

画像処理手法による2次元平面内の流速計測手法

牛 島 省*
 宮 永 一**
 竹 田 浩 文***

1. はじめに

流体中に流れに追従するトレーサーが存在する場合、その動きを時間とともに捉えることにより、流れの状況を知ることができる。このような原理に基づく流速測定方法には数多くのものであり、流体中に水素気泡を発生させたり、染料やアルミ粉、パーティクル等を混入させることによって流れを可視化し、写真やビデオ画像として記録して、これを解析する方法などがある¹⁾。

流体中に混入させたパーティクルの動きを解析する方法に関しては、過去においては、パーティクルの動きを記録したスチール写真からデジタイザー等を用いた作業を経て流速が求められていたが²⁾、画像処理装置やパーソナルコンピュータ等の処理機器の発達により、従来よりはるかに容易に流速が算定されるようになった。

このようなハードウェアの発展に伴い、ビデオテープに記録したパーティクルの画像をデジタルデータに変換し、計算機を用いてその解析を行って流速ベクトルを求めようとする方法が一般的なものとなりつつある。そして、現在行われている多くの研究では、いかに現場のパーソナルコンピュータのレベルで短時間に結果が得られるかという点に焦点が絞られているように思われる。本報では、これとはやや異なった視点から画像処理に基づく流速測定方法を検討した。すなわち、画像処理装置とパーソナルコンピュータは、ビデオ画像のデジタルデータを作成するためだけに用い、その後の計算処理には大型計算機を利用する。このことにより、実験室レベルで流速の算定を行うことはできなくなるが、多数の画像データ

を大型計算機により短時間に処理することができるため、時間平均的な流速ベクトルの算定等が可能となる。本報ではこのような方法を自然循環流れに用い、その適用性について検討を加えた。

2. 流速ベクトル算出の原理

本手法は、水流中に混入したパーティクルの動きをビデオカメラで撮影し、その画像をデジタルデータに変換した後、計算処理を行い、流速ベクトルを求めるものである。適切な条件下で記録されたパーティクルの動きを示すビデオ映像の各画面は、各時刻におけるパーティクルの位置を表す画像となっている。ある時刻の画面上におけるパーティクルに対し、この画面より一定時間後の画面上に存在するあるパーティクルが、これと同一のものであるという対応づけがなされれば、パーティクルが流れに追従するものであると仮定して流速ベクトルを求めることができる。このパーティクルの対応づけを容易

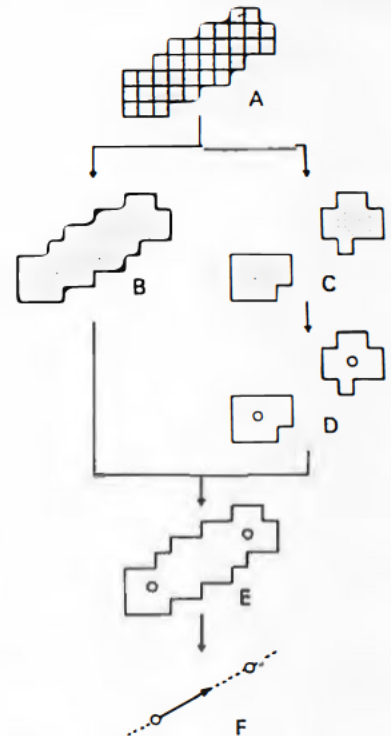


図-1 流速ベクトルの算出方法



牛島 省



宮永洋一



竹田浩文

* (財)電力中央研究所 我孫子研究所 水理部 構造水理研究室 担当研究員
 ** 〃 〃 〃 〃 〃 主査研究員 会員
 *** 〃 〃 〃 〃 〃 研究員

にしかもなるべく正確に行うために、パーティクルの流跡の画像を利用する方法がある²⁾。ビデオ画像を利用する場合には、パーティクルの流跡の画像は画像処理装置を用いて、連続するかあるいは時間間隔の比較的短い複数の画面を合成することにより得られる。これらの画像を用いた流速ベクトル算出の概要を図-1に示した。

図-1の流跡の画像Aは、複数の画面を合成することにより得られた流跡全体の領域を示す画像Bにより示されるが、これは同時に流跡の画像を得るために合成した最初と最後の画面上に存在している、流跡の始点と終点に相当する同一のパーティクルの画像Cを含んだものと考えられる。従って、流跡の画像を用いることにより、異なる画面上に存在する2個のパーティクルの画像Cが、同一のパーティクルのものであるという判別がなされる。実際の画像データは以下の手順で処理される。

①まず流跡全体の領域を表す画像Bと流跡の画像を得るために用いた最初と最後の画面上のパーティクルの画像Cの画像データを取得する。

②画像Cより、Dに示すように、流跡の始点と終点を表すパーティクルの画像の重心点の座標を求める。

③これらの始点と終点の重心点が、Eに示したように流跡を表す画像Bの中に1つずつ含まれているかどうかを確認する。

④この条件が満たされた場合に、画像Cの2つのパーティクルの画像が同一パーティクルのものであると判断し、これらの重心点を結ぶことにより流速ベクトルの方向が求められる。また、流速ベクトルの大きさは、画像のスケールと画面間の時間間隔から求められる。

以上のように、パーティクルの流跡のデータを用いることにより、始点と終点のパーティクルの対応づけが容易になり、流跡のみのデータでは判別できない流れの方向をも知ることができる。なお、上記の方法では、流れの中のパーティクルの数が非常に多い場合などに、異なる流跡が接触したりあるいは交差したりすることがあり、この場合には流速ベクトルの算出が困難になるが、これを分離する手法もいくつか提案されている³⁾⁴⁾。最近、この原理を利用して、複数のビデオカメラを用いて流速の3次元計測を行ったり⁵⁾⁶⁾、また感温液晶粒子をパーティクルとして用いて温度場の計測をも同時に行おうという試みもなされている⁷⁾。

3. 画像処理システム

前節で述べた原理に基づいて、画像処理の一連の操作が比較的容易に行えるようなシステムを作成した。データ処理のフローを図-2に示す。本手法では時間平均された流速ベクトルの分布を得ることも1つの目的としているため、パーティクルの流跡、その始点および終点を

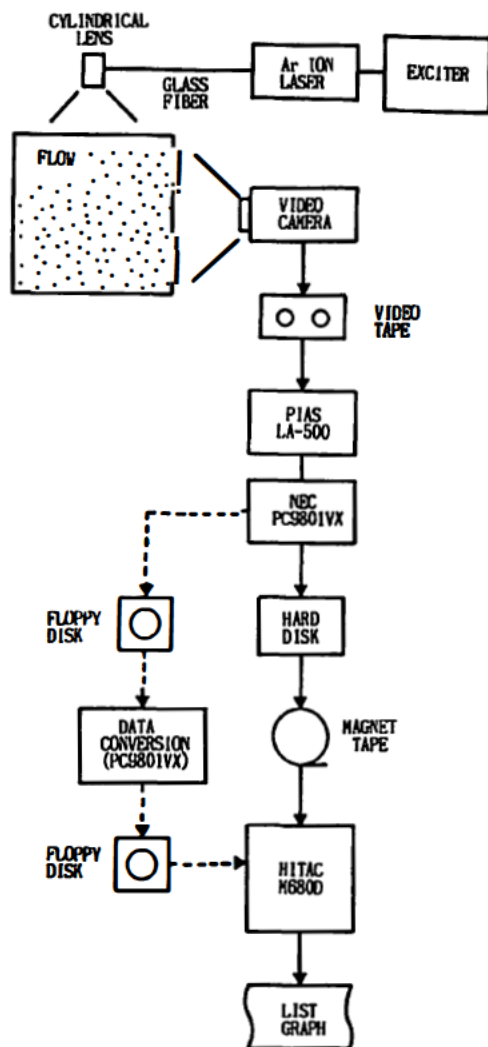


図-2 画像処理システム

表す3画面一組の画像データだけでなく、それらの複数組の画像データをまとめて処理できるところに特徴がある。

このように大量のデータを処理する場合には、図-2の実線で示したフローに従うものとなる。流速ベクトルの算出は、高速処理が可能な大型計算機(HITAC M680D)により行う。これらの一連の流速測定手法は、大きく分けて次の3つの要素により構成されている。

①パーティクルを用いた流れの可視化とビデオカメラによる撮影

②画像処理装置によるビデオ画像のデジタルデータ化と媒体(フロッピーディスク、マグネットテープ等)間でのデータ変換

③大型計算機上での流速ベクトルの算出

これらの要素のうち、まず最初に重要となるのが上記①で示した可視化された流れの画像データの取得である。この段階で、可能な限り良好なビデオ画像を記録することが重要で、最終的に得られる流速ベクトルの分布の偏りや全体の数、また結果の正確度が、ここでほぼ決定されてしまうとと言っても過言ではない。このためには

流れの状況に応じた適切な可視化手法を用いることが重要である。流れの中に投入するパーティクルに関しては、流体と比重がなるべく近く、スリット光等に対して発光しやすいもので、適当な大きさを持つものが望まれる。

パーティクルの大きさは、小さい方が流れに対する追従性が良いが、画像データとしたときにパーティクルとして認識しにくくなり、また流跡の画像が劣化することも考えられるので、ある程度の大きさを有するものが適している。さらに、本手法ではある一定時間内パーティクルの画像が存在していることが必要であるため、発光する時間が瞬時的であるアルミ粉のような鱗片状のものは不適切で、球状のものが良いと思われる。

また、光源に関しては、本手法では2次元平面内の流速ベクトルの分布を求めるため、スリット状の光を用いて可視化を行う。このためには光度が強く、光の拡散の少ないレーザーライトシートが適切である。また、状況に応じて水槽の内面には、光度を増すために平面鏡を設けたり、また逆に光の乱反射によるスリット光幅の増大を防ぐために光を吸収する材料を置いたりする方法が有効な場合もある。

撮影するビデオカメラは、微弱な光に対して感度の高い高感度ビデオが適している。また、流速が比較的大きい流れでは、(a)露光時間が長いと画面内の始点あるは終点を表すパーティクルの画像が粗い流跡状のものとなってしまい、(b)連続するビデオ画面を合成しても各画面で同一パーティクルの位置が大きく異なるため流跡を形成しない、といった問題が生ずる可能性がある。

これらの問題は、データ処理の段階である程度まで解決することが可能であるが、前述したように良好なビデオ画像を最初に取得することが重要である。この場合には、高速ビデオカメラを用いたり、あるいはCCDカメラを利用する方法が考えられる³⁾。

なお、本手法は流れの自由表面の表層流速の測定にも適用できる。その際には、上記の限りではなく、パーティクルや光源の種類をこれに適したものにすべきであろう。

次に、上記②で示したようにビデオテープ上に記録したデータをデジタルデータとし、これを大型計算機で直接処理できる形とする作業が必要である。ビデオ画像のデジタルデータ化には、画像処理装置(PIAS LA 500)を利用する。画像のデータとしては、前述したように、パーティクルの流跡の画像とその始点、終点の画像が必要であるが、この画像処理装置では、最高4画面までの画像を重ね合わせた画像を作成することができるため、パーティクルの流跡の画像としてはこのような重ね合わせによる画像を利用している。画像処理装置を利用することにより、1画面の画像は縦横512×512個の画素のデータとしてフロッピーディスクあるいはハード

ディスクに記録される。

1画素は0~255の輝度階調を有する1バイトのデータとして表現される。画像処理装置では、2値化操作を行うことができ、これによってデータ量の減少を図ることが可能であるが、2値化を行う際のしきい値の設定等は、最終的に得られる結果と比較しながら決定することが望ましいため、ここではなるべく生データに近い形で大型計算機にデータを送ることとしている。

次に画像処理装置によりデジタル化された画像データを大型計算機で処理できる形とするために、データの変換作業が必要となる。この作業は、(a)データの形式を変換すること、(b)大量のデータを扱う場合には媒体の変換を行うこと、の2つの内容から成っている。ここで用いる画像処理装置では、1画面の画像データが512×512バイト(約0.26メガバイト)のアスキーコードに従うデータとなる。

本手法では図-2の実線で示したデータ変換が可能なものとした。この方法では、まず画像のデジタル化されたデータを、ハードディスク(容量40メガバイト)に記録する。その後、ハードディスク内にある複数のデータを一括してマグネットテープ上へ転送する。その際に、アスキーコードに従うデータは、1画素が2バイトの16進法に従う数値データに変換される。このデータ転送の作業は、パーソナルコンピュータで行い、データ転送にはGPIBインターフェースを利用している。一方、マグネットテープに記録されたデータは容易に大型計算機内のメモリ上に転送することができ、これよりただちに計算処理を開始することが可能である。

以上のような作業を経て、最終的に④で示した大型計算機による流速ベクトルの算出を行う。流速ベクトルを求めるための基本的な原理は前述したとおりである。流速ベクトルを求めるためのソフトウェアは、本研究で開発したADAM(ver.1.0)とEVE(ver.1.0)の2本のプログラムから成る。解析プログラムADAMは1ないし複数の画素から構成されるパーティクルの画像の重心点を求めるものである。このプログラムは画像データのノイズの除去を行った後、パーティクルを表す一群の画素ごとのナンバリングを行う。そして、ある一定の大きさ以上の画素群を除去するなどのフィルタリングを施して、最終的に各パーティクルの重心点の座標を大型計算機内のメモリ上に記録し、また各重心点の分布の図形出力を行うものとなっている。

前述したように1画面のデータ数が512×512個と数多く、解析プログラム中での配列宣言が大きくなるため、各画面の処理を終了するごとに結果をメモリ上に書き込んでゆく形とした。解析プログラムADAMで一連の画像の始点と終点の重心点を求めた後、他の解析プログラムEVEで流速ベクトルを算出する。この解析プログラ

ムでは、ノイズの除去等を行った後、パーティクルの流跡を表す画像データを利用して、1つの流跡画像内にパーティクルの始点と終点がそれぞれ1個ずつ含まれる場合だけを有効なデータとして、その場合に始点と終点を結ぶことにより流速ベクトルを求めている。

EVEではADAMにより求められた一連のパーティクルの重心点のデータを読み出しながら上記のような方法で流速ベクトルを求め、これを再び大型計算機のメモリ内へ記録してゆく。このようにして、複数画面の流速ベクトルの分布が得られる。

以上のデータ処理によって得られた流速ベクトルは、パーティクルの存在する位置に依存し、空間的に不規則にばらついた分布として得られる。このため、結果を見やすくし、あるいは流速値を利用した他の解析(渦度の算出等)を行いやすくするために、一定間隔の格

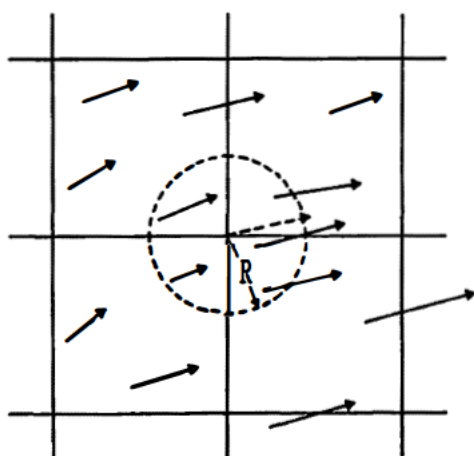


図-3 格子点上における平均化

子点上で流速ベクトルが得られるのが望ましい。このための空間平均を行う解析プログラムがBABY(ver.1.0)である。BABYでは、図-3に示すように、入力した任意の格子点に対して、各格子点を中心とした一定半径の円を描き、その中に含まれる流速ベクトルを平均して格子点上の流速ベクトルを求める。その際に、対象とする格子点からの距離に応じて重み付きの平均操作を施している。

EVEにより得られた流速ベクトルの結果の中には、これまでの操作では除去できなかった過大・過小な誤った流速ベクトル成分がまれに含まれることがある。このような流速ベクトルは、まず上述した平均操作を行った後、平均流速ベクトルとの大小の比較を行うことによって除去される。そして、この誤った流速ベクトルが取り除かれた状態で、再びもとの流速ベクトルに対して平均操作を行って、一定間隔の格子点上における流速ベクトルが最終的に求められる。これらのBABYの平均化操作は、EVEにより得られた流速ベクトルの質、量に応じて最適なものとする必要がある。このため、いくつかの平均化操作に関するパラメータを入力変更して、あ

らかじめ結果の吟味を行っておくことが望ましい。

また、BABYでは、ある一定時間内の平均化された流速ベクトルの分布を求めることができる。この場合には、EVEにより得られた複数画面の流速ベクトルの分布を大型計算機のメモリから読み出してこれらを合成し、上述の平均操作を行って時間平均流速ベクトルを求める。対象とする流れ場が定常流に近く、画面数が十分に多ければ、この操作により、信頼性の高い時間平均流速ベクトルの分布を求めることができる。

次に、実際に本手法を用いて流速ベクトルを求めた具体例について述べる。

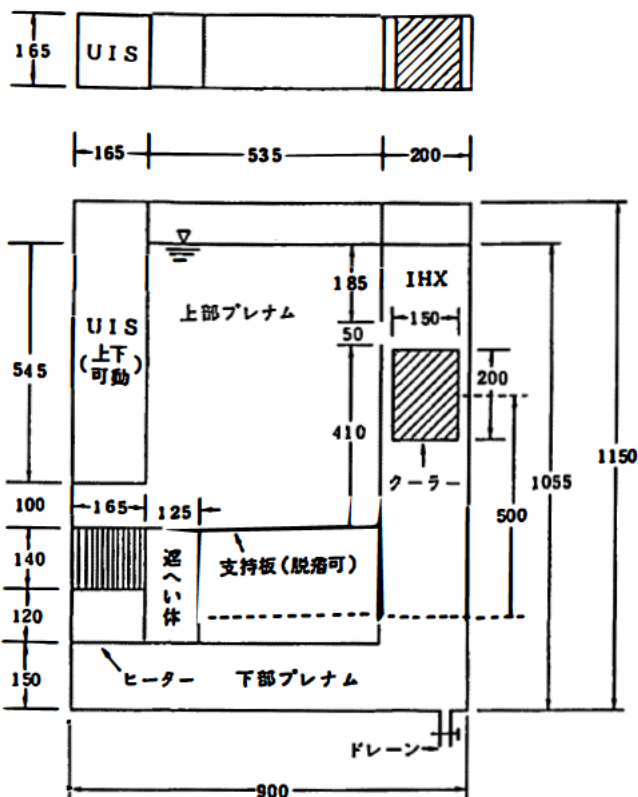


図-4 自然循環実験水槽

4. 流速ベクトルの算出例

(1) 実験の概要

これまでに示した画像処理システムを用いて、実際に流速ベクトルの分布を求めた結果について述べる。対象とした流れはFBR実証炉研究の一環として昭和62年度より電力中央研究所で検討を加えている自然循環流れである⁸⁾。実験水槽を図-4に示す。

この自然循環流れでは、ポンプ等の強制循環装置は使用されず、ヒーターおよびクーラーによって生じた温度差により循環流が発生する。このため、全般的に水槽内の流れは低流速であり、小型プロペラ流速計やレーザードップラー流速計等でも計測は比較的難しいと予想される。また、温度が不均一な流れであるため、熱線流速計も適用が困難である。従って、このような流れに対して

表-1 実験条件

Run No	初期温度	ヒーター出力	クーラー性能		遮へい体
	T_0 (°C)	H (kW)	T_{in} (°C)	Q (ℓ/mm)	d (mm)
CASE 1	24.5	2.0	5	25	5
CASE 2	24.4	2.0	10	25	2

は画像処理法を用いた流速計測は有効であり、点計測でなく2次元鉛直平面内の流速ベクトルが一度に比較的簡単に得られることも大きな利点となる。

対象とした流れの実験条件を表-1に示した。表中でQはクーラーによる除熱を行うための2次側の冷水流量であり、dは図-4の実験装置中に設けられている遮へい体にあけられた穴の直径である。クーラーにより除熱された水は浮力効果により下方へ向かって流れ、その後ヒーター部分と遮へい体部分の2ヵ所から浮力と慣性力の作用により上昇して上部プレナム内へ流入する。遮へい体の穴の直径dを小さくすることにより、遮へい体部分の圧力損失が増大し、ヒーター部分と遮へい体部分を流れる水の流量の配分が変化する。

パーティクルとしては、蛍光染料を混入して作られたエスレンの粒子を用いた。このエスレン粒子は、比重が約1.03と水よりやや大きいため、水槽内の水に食塩を加えることによって、粒子が中性浮力を保つようにしている。エスレン粒子の平均粒径は約0.4mmであるが、画像データとなるとときに実際より大きく記録されるため、今回の計測例では1つの粒子が約9画素から成る画像として表わされる。撮影に用いたビデオカメラは、撮像管にカルニニンを用いた高感度ビデオであり、流況はモノラル画像としてVHSビデオテープに録画される。各画像は1/30秒の露光時間で連続的に撮影されている。スリット光源には最大出力5WのA r イオンレーザーを用

いた。このレーザー光を光ファイバーで水槽上面まで送り、そこでシリンジカルレンズによりシート状に光を広げ、このレーザーライトシートを上部から水槽内へ入射させた。

(2) 画像処理手法の適用

図-5は、CASE 1の実験開始2分後のパーティクルの画像のデジタルデータをADAMで解析し、パーティクルの重心点を求めた結果を示すものである。一方、図-6は図-5に示したもののより1.5秒後の時刻における同様の結果を示したものである。また、図-7は、図-5と図-6のものと画像およびその間の2つの画像の計4枚の画像を全て重ね合わせたものである。

4枚の画像を重ね合わせることにより、図-7に示されるようなパーティクルの流跡の画像が得られる。また、図-5および図-6に示される結果は、それぞれの流跡の始点と終点に関連するデータとなっている。これらの重心点のデータと図-7に示される流跡の画像データに対してEVEを用いて流速ベクトルを求めたものが図-8である。

本報で示した画像処理手法による流速ベクトルの算出方法では、デジタル化された画像の解析を大型計算機を用いて行っている。このため、複数の画面から得られた流速ベクトルを重ね合わせることによって、時間平均的な流速ベクトルの分布を求めることも比較的容易に行うことができる。図-9に示した流速ベクトルは、実験開始2分後から約1分間にわたる10画面分の流速ベクトルを重ね合わせたものである。この図中には、これまでの段階で処理できなかった、ノイズ等が原因で生じた無効な流速ベクトルも存在しているが、これらを含めて約2,500個の流速ベクトルが示されている。

これらの流速ベクトルは、それぞれ不規則的な位置で得られているが、これを等間隔の格子点上におけるもの

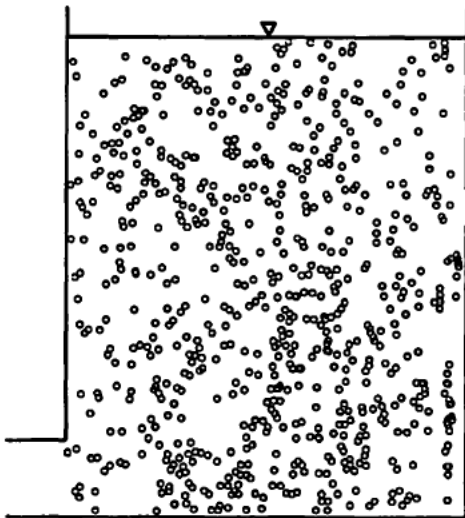


図-5 始点のパーティクルの重心点の分布

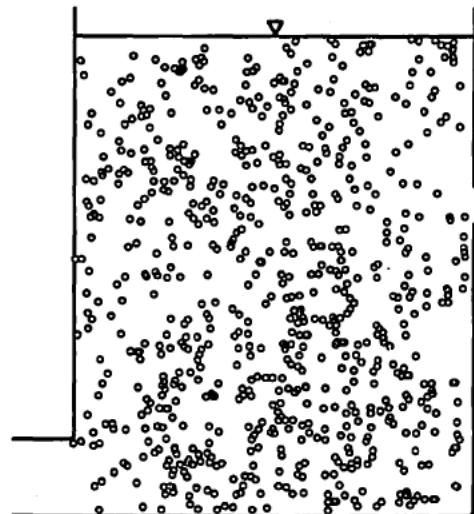


図-6 終点のパーティクルの重心点の分布

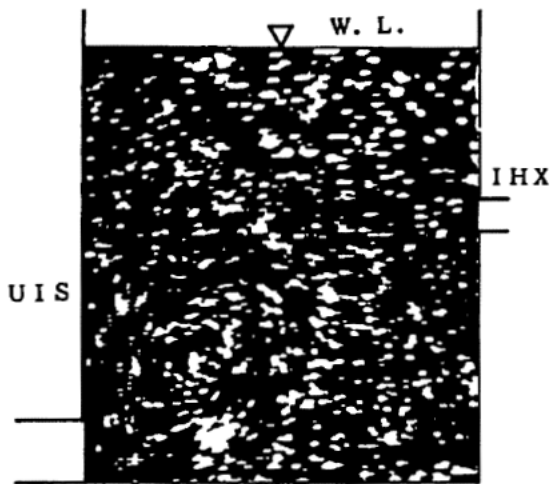


図-7 パーティクルの流跡画像

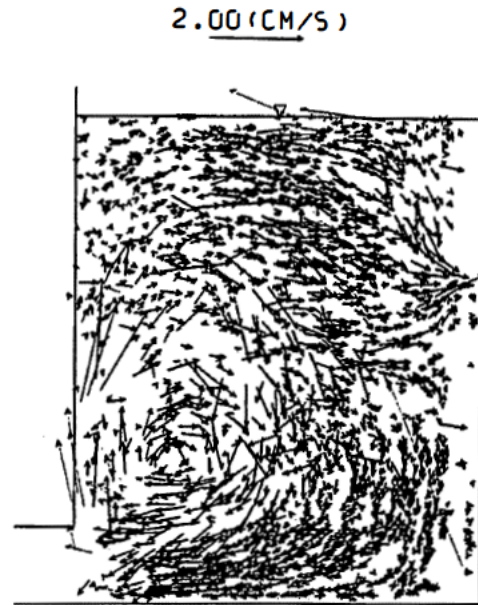


図-9 重ね合わせたベクトルの分布

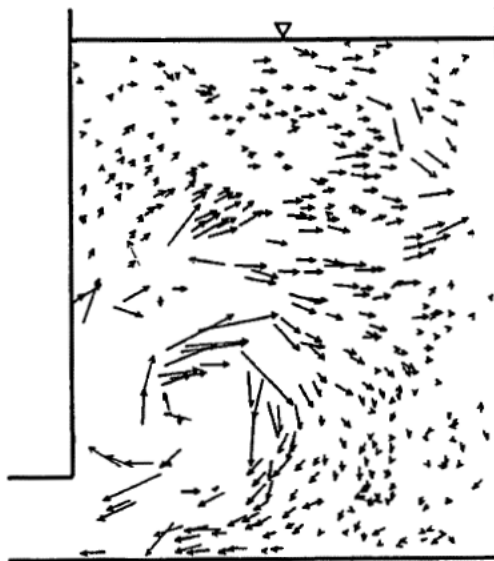


図-8 流速ベクトルの分布

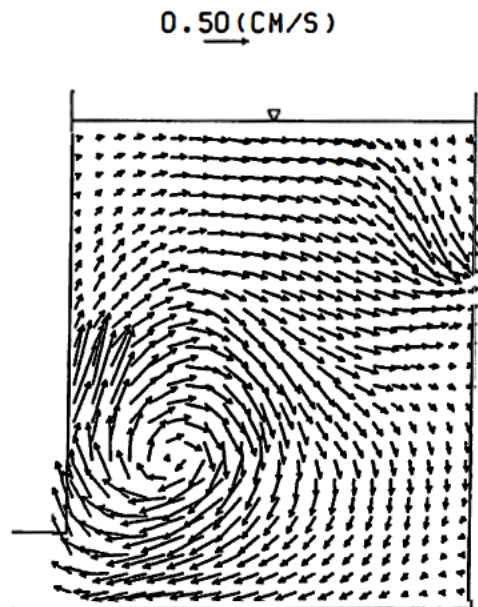


図-10 格子点上で求めた流速ベクトルの分布

として示したのが図-10である。図-10では、格子点の間隔は縦横16画素であり、流速ベクトルは、前述したように、各格子点から半径35画素の円を描いて、その内部に含まれる流速ベクトルの平均流速ベクトルとして求めたものである。平均化の際には、格子点に近い流速ベクトルの重みづけが高くなるように、ここでは図-11に示したような重み関数を用いた。重み w は、格子点からの距離 r を用いて次のように表される。

$$w = \frac{1}{1+r} \dots\dots\dots(1)$$

平均流速ベクトルの流速成分 \hat{U} 、 \hat{V} は、円内に含まれる流速ベクトルの流速成分 u_i 、 v_i と、格子点とベクトルの始点の間の距離 r_i を用いて(1)式より求められる重み w_i から、次式により求められる。

$$\hat{U} = \frac{\sum w_i u_i}{\sum w_i}, \quad \hat{V} = \frac{\sum w_i v_i}{\sum w_i} \dots\dots\dots(2)$$

また、図-12(a)、(b)は、格子点の間隔をそれぞれ10画素、32画素として、同様の平均操作により算出した流速

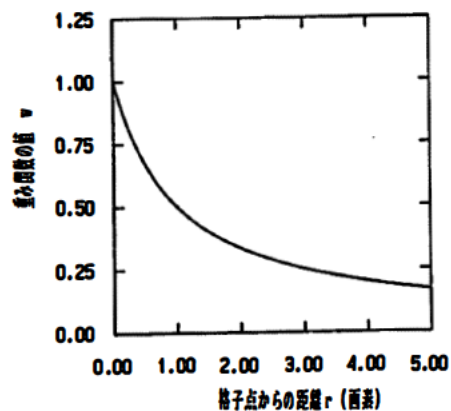


図-11 重み関数

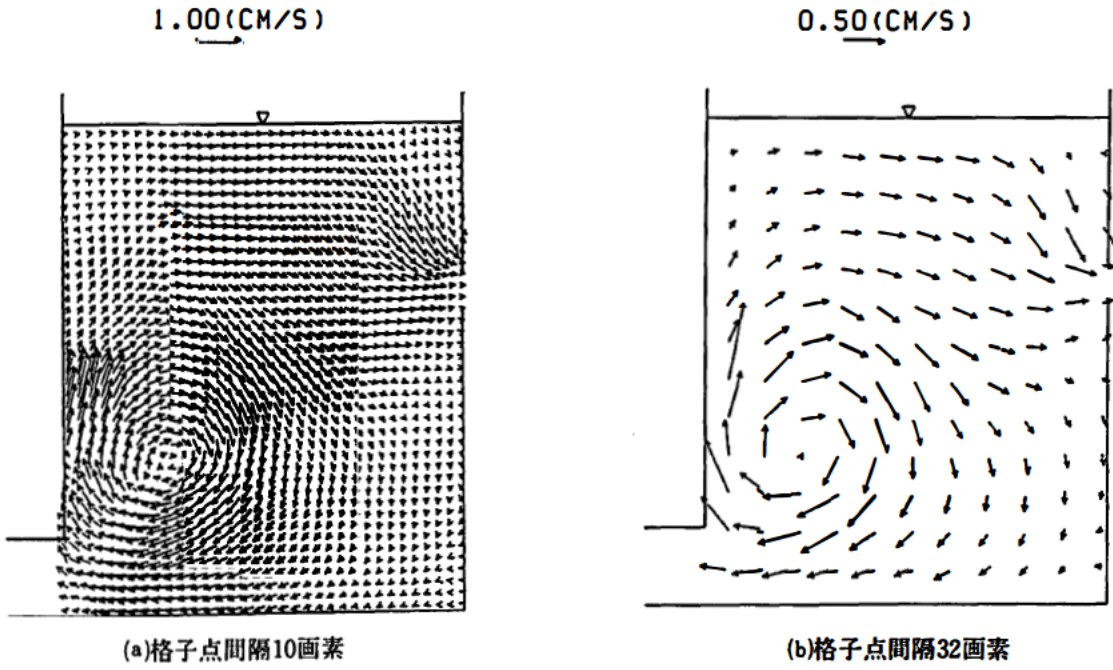


図-12 流速ベクトルの分布 (CASE 1 : 2分後)

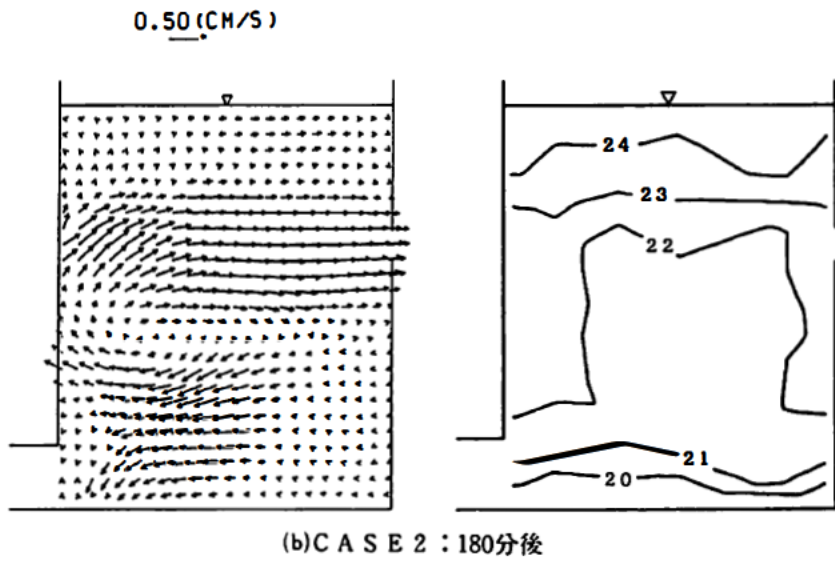
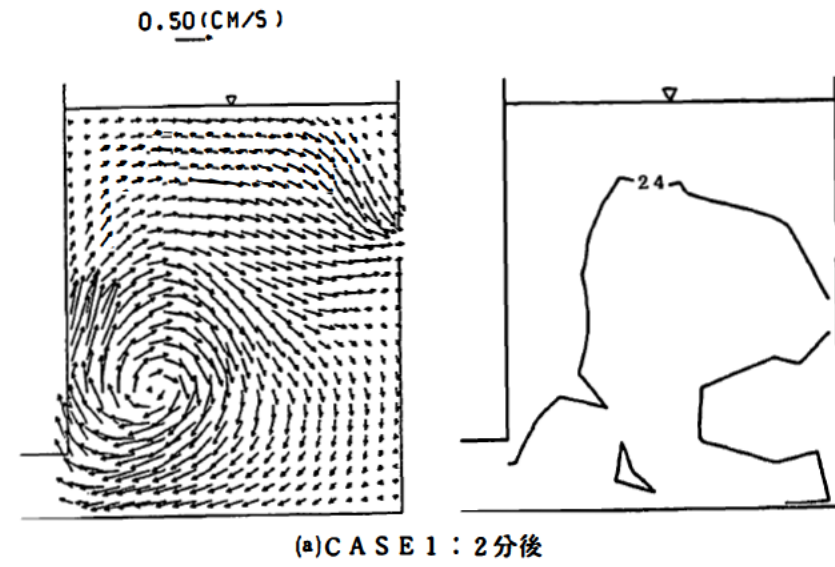
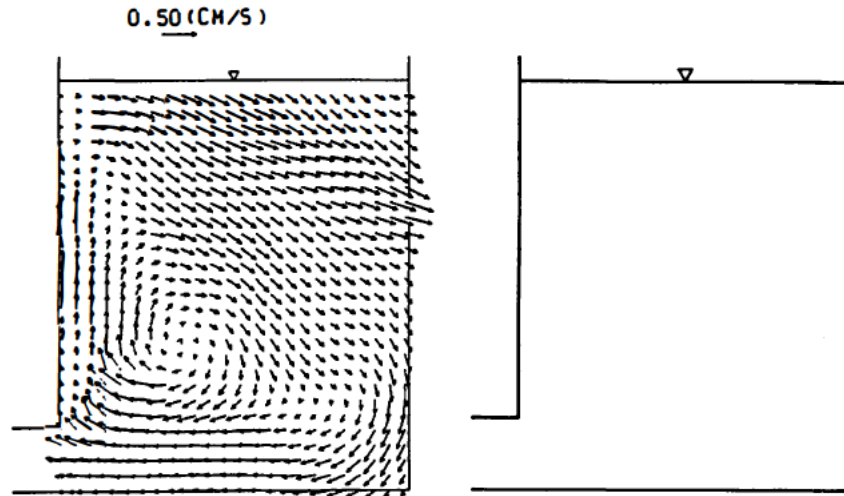
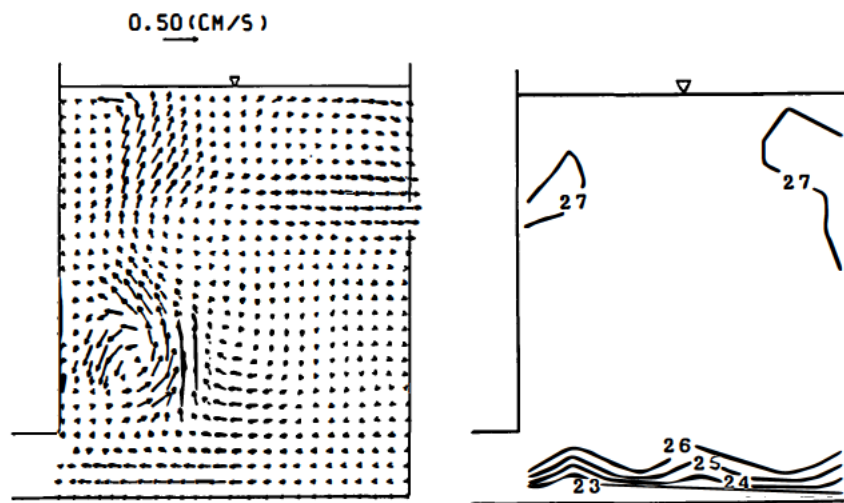


図-13 流速ベクトルと等温線の分布



(a) CASE 1 : 2分後



(b) CASE 2 : 180分後

図-14 流速ベクトルと等温線の分布

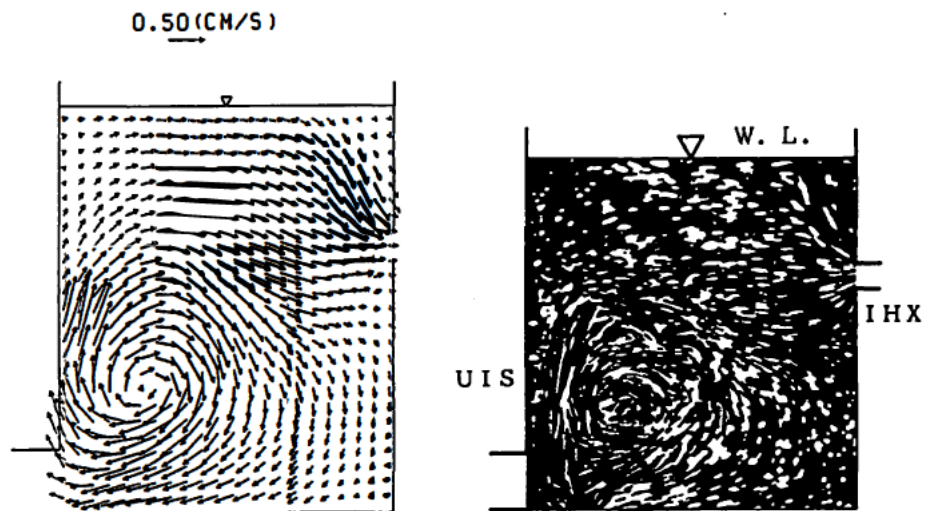


図-15 流速ベクトルの分布と流跡の写真 (CASE 1 : 2分後)

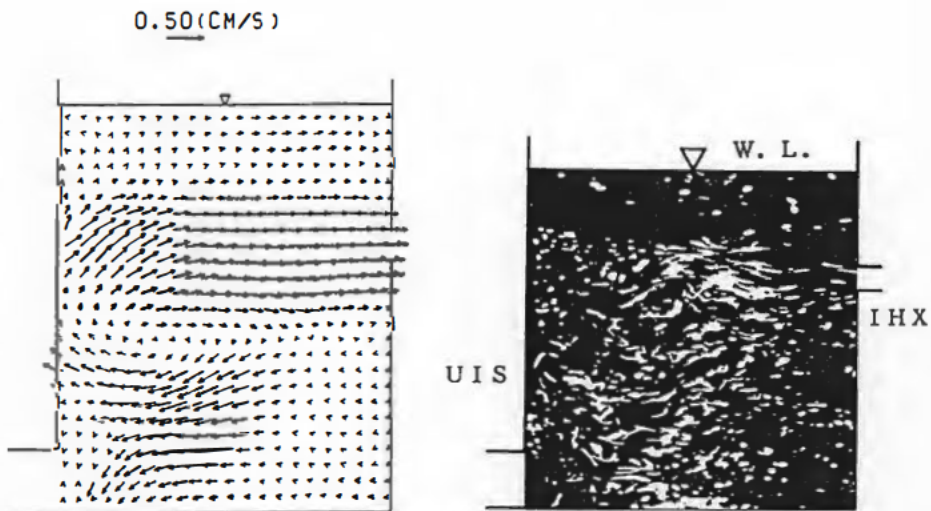


図-16 流速ベクトルの分布と流跡の写真 (CASE 1 : 180分後)

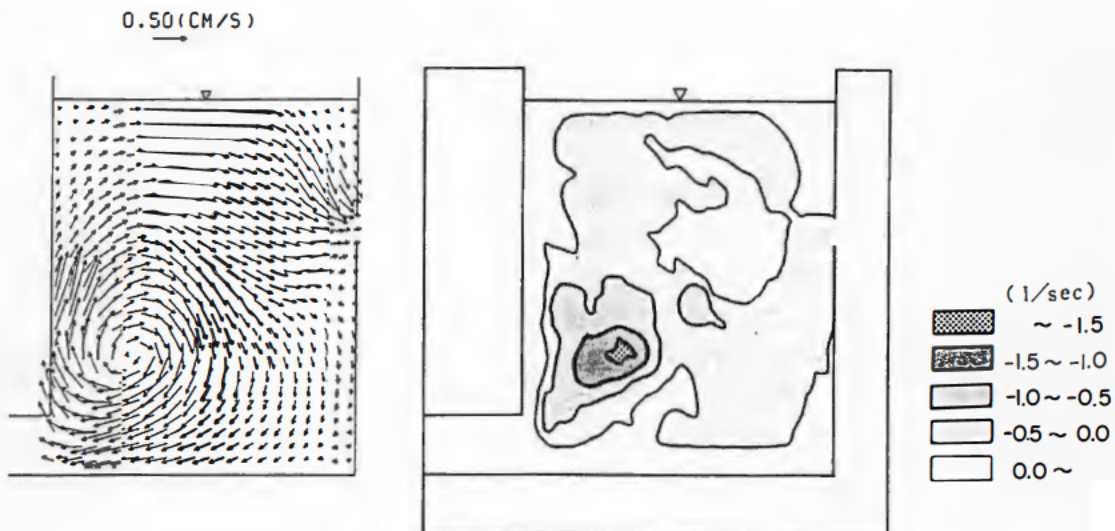


図-17 流速ベクトルと温度の等高線の分布 (CASE 1 : 2分後)

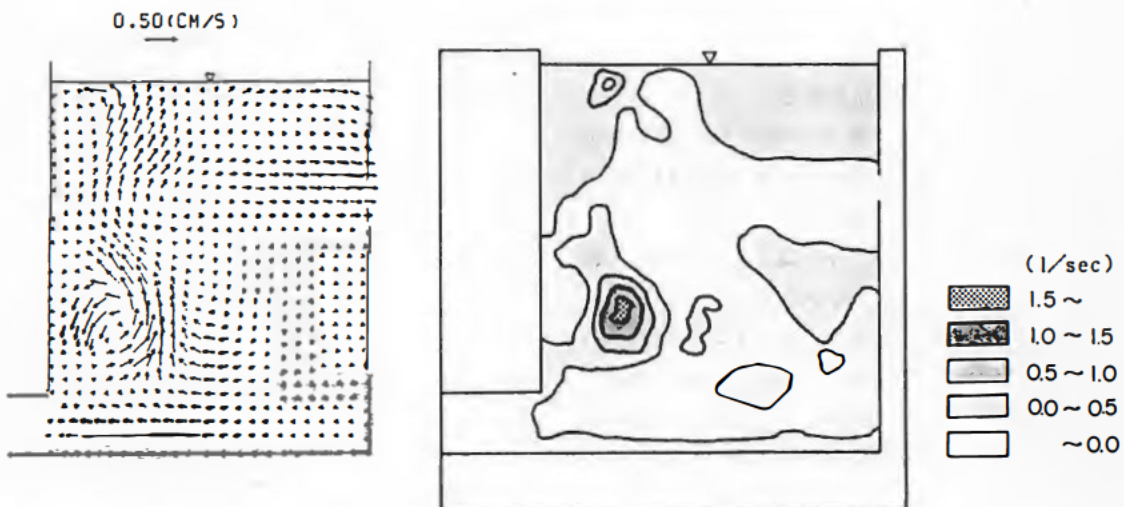


図-18 流速ベクトルと温度の等高線の分布 (CASE 2 : 180分後)

ベクトルの分布を示したものである。このような平均操作に用いるパラメータは、対象とする流況に応じて適切なものに設定する必要がある。すなわち、平均する領域の大きさを表す円の半径、重みづけの関数等は、流れの状態や取得した画像データの質に基づいて決定する必要がある。

なお、本報では10画面分の流速ベクトルを平均することにより1分間の平均流速ベクトルを求めているが、この画面数が1分間の平均流況を得るのに十分であるかどうかについては、他の定量的な流速測定結果と比較して検討する必要があると考えられる。本手法では、さらに多くの画面の流速ベクトルを処理することが可能であるが、この点に関する検討は、本手法を用いた自然循環実験に関する研究の中で行うこととする。

図-13および図-14に、それぞれCASE 1とCASE 2の実験開始2分後と180分後に得られた流速ベクトルと等温線の分布を示した。なお、180分後の流速ベクトルは、約5分間にわたる10画面の流速ベクトルの平均値として求めたものである。図-13に示したCASE 1では、実験開始から約2分後に、右回りの大きな循環流が形成されている。

しかしながら、約180分後には水槽上部に緩い温度勾配を有する温度成層界面が形成され、水槽右上部にある出口に向かう流れが、成層界面下部に沿った水平な流れとなっていることがわかる。また、これらのベクトル図の中では、流体の連続性が満足されていない状態が観察されるが、これは流体運動が強い3次元性を伴うために、良好な画像データが得られないことが1つの原因となっているものと考えられる。この傾向は特にUIS下部付近で顕著であり、UIS下部から上昇してくる比較的流速の速い流れが不明瞭なものとなっている。このことにも、流れの3次元性が関与していると思われる。図-14に示したCASE 2では、実験条件が異なるために、実験開始から約2分後の流況はCASE 1とはやや異なったものとなっている。また、約180分後では、水槽内左下の領域に左回りの循環流が見られる。

図-15、図-16には、CASE 1の約2分後、180分後の平均流速ベクトル分布とパーティクルの流跡の写真を対応づけて示した。両者は良く一致したものになっている。図-17、図-18に示したものは、CASE 1の約2分後、CASE 2の約180分後の流速ベクトルと、次式で定義される渦度 ϕ の等値線を示したものである。

$$\phi = \frac{\partial U}{\partial y} - \frac{\partial V}{\partial x} \dots\dots\dots(3)$$

図-17のCASE 1では、流速ベクトルの分布に見られるように右回りの循環流の中心部付近で渦度が負で絶対値が大きい値を示している。一方、図-18のCASE 2では、逆方向の左回りの循環流が生じているため、渦度は循環流の中心付近で正の大きい値を示している。こ

のように、流速を規則正しい格子点上で求めることにより、流速以外の他の情報も得ることが可能となる³⁾。

5. おわりに

本報では、デジタル化された画像データの処理を大型計算機で行うことにより、時間平均的な流速ベクトルが算定できる画像処理システムを作成し、その適用性について検討した。この方法を比較的流速が遅い流れである自然循環流れに適用した結果、流況を撮影した写真と良く一致する流速ベクトルが求められることが示された。しかしながら、本報で用いた画像処理システムを、精度の十分高い流速ベクトルの計測手法としてゆくためには、さらに多くの検討が必要である。今後の主な検討課題としては、以下の事項が考えられる。

①画像データの転送速度を高めること

②微流速流速計やカウンター処理機を備えたレーザードップラー流速計システム等により、自然循環流れの精度の高い流速測定を行い、画像処理により算定した流速ベクトルが、どの程度の精度を有するのかを定量的に把握すること

③3次元性の強い流れ場でも、流速の2次元成分の計測が適切に行えるように工夫すること

これらの項目に対しては、本報で得られた画像処理システムを1つの計測手法として実際に用いる自然循環実験に関する研究の中で、検討を加えて行く予定である。

《謝 辞》

本研究を行うにあたり、御協力頂いた日本大学生産工学部助手の落合実氏、(株)CRSの菅野順一氏、並木正明氏、(株)電力計算センター(DCC)の宇田川有子氏に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 流れの可視化学会編集;新版流れの可視化ハンドブック, 朝倉書店, 1986.
- 2) 小林敏雄, 佐賀徹雄;流跡写真から如何にして速度情報を得るか, 流れの可視化, Vol.6, No.20, 1986.
- 3) 小林敏雄, 佐賀徹雄, 瀬川茂樹, 唐司茂樹;逆流を含む二次元流れ場の画像処理システムの開発, 流れの可視化, Vol.5, No.17, 1985.
- 4) 吉岡均, 村田滋, 串山正, 木瀬洋;Hough変換を用いた流跡線画像の分離同定, 流れの可視化, Vol.7, 1987.
- 5) 黒田成昭, 桑野郁祐, 須永直樹;三次元流れの画像処理による解析, 流れの可視化, Vol.6, No.22, 1986.
- 6) 山川正剛, 岩重健五, 小林敏雄;TVカメラを用いた三次元流速分布測定システムの開発, 流れの可視化, Vol.6, No.22, 1986.

- 7) 木村一郎, 高森年, 山内秀樹, 小澤守, 竹中信幸, 坂口忠司: カラー画像情報に基づく流れ場と温度の同時計測—感温液晶を用いた温度成層の可視化画像への適用—, 流れの可視化, Vol.8, No.30, 1988.
- 8) 宮永洋一, 竹田浩文, 渡辺収: 崩壊熱除去系の信頼性評価—自然循環時の炉内熱流動特性に関する基礎研究—, 日本原子力学会, 昭和63年, 秋の大会予稿集 (I 分冊), 1988.

