

入門講座

計測・制御技術入門 計測技術-5

可視化情報計測

Quantitative Flow Visualization

木村一郎
Ichiro Kimura

大阪電気通信大学
工学部電子機械工学科 教授

1 はじめに

当初、流れの可視化技術は流動現象を定性的に観察する手法であったが、20数年前にそのような可視化画像にデジタル画像処理を適用し、定量的な情報を抽出しようとする研究が始められた¹⁾。現在では、特に速度ベクトル場を計測する手法はPIV (particle image velocimetry)²⁾と呼ばれ、原理的に瞬間の流れ場全域の速度ベクトル分布が得られるため流体計測の画期的手法として注目され、様々な流れ現象を解析するために利用されつつある。

流れの可視化画像の中には速度、温度、圧力、密度などの様々な情報が含まれており、濃度レベルが何らかの物理情報を持つ比較的単純なモノクロ画像、また色が物理的情報を含んでいるカラー画像もあり、さらに速度などの情報を得るためには計測対象の時間的移動を追跡できる時系列画像が必要となる。このような可視化画像から2次元ならびに3次元の速度ベクトル分布や温度分布などの場全体の物理量を求める手法が可視化情報計測¹⁾で、本稿ではその基本原理を中心に概説する。

2 速度ベクトル分布計測

一般に、画像計測技術を用いて流れの速度場を計測するためには可視化手法として流れ場の中に微小のトレーサ粒子を混入するトレーサ注入法が用いられる。その基本原理は、2枚以上の時系列画像において個々のトレーサ粒子を追跡するか、画像中の小領域の粒子パターンの移動または変化を捉えるかの2つである。

2.1 粒子追跡法

トレーサ粒子を時間的に追跡することは時系列の画像での粒子の同定を行うことである。画像中に一つの粒子しか存在

しないならば、その同定は容易いが、可視化画像中にはきわめて多くの同じ形、色、大きさのトレーサ粒子が存在するし、画像間で粒子の消滅もある。最もプリミティブなアルゴリズムは多時刻追跡法³⁾で、ある時刻で一つの粒子に注目し、次の時刻にその粒子の移動が予想される領域内の一つの粒子を同じ粒子だと仮定し、その仮定移動ベクトルからさらに次の時刻の移動領域を予測し、その領域内に粒子が存在しなければ、そのルートは間違いで棄却し、存在すれば同様の操作を4時刻程度追いかける。

2時刻間で粒子を同定するアルゴリズムは注目する粒子だけでなく近傍の粒子との粒子群の空間的パターンの類似度を用いるものである。これは微小時間内での空間分布の連続性を利用している。この場合、粒子群の配置パターンを検出すれば良いため、2値画像の相関係数を用いてパターンマッチングを行うアルゴリズムが2値画像相関法⁴⁾で、高速に処理できる。また、粒子同士を仮想的なバネで結び付け、2時刻間での粒子クラスターの平均荷重を計算し、その最小値の組み合わせを正しい対応付けとするアルゴリズムがバネモデル法⁵⁾であり、小さな変形にも対応できる特長を持つ。

2値画像相関法もバネモデル法も局所的なパターン類似を調べている。したがって、粒子分布が疎な領域では対応の誤りが生じる危険性を伴う。そこで、粒子の対応付けを局所的にではなく流れ場全域を考慮する手法が遺伝的アルゴリズムを用いる方法⁶⁾である。遺伝的アルゴリズム (Genetic algorithms : GA) は生物進化のモデルで最適化問題などに威力を発揮しており、粒子対応付けにも非常に有効なアルゴリズムで、ここでは簡単にこの手法について述べる。GAを適用するためには、まず問題空間をGA空間に対応付けしなければならない。これをコード化と呼ぶ。図1に示すような一定時間間隔の2枚のトレーサ画像間のトレーサ粒子対応の組み合わせをGAにおける1個体とする。したがって、図(c)は一つの組み合わせ、すなわち1個体で、この場合第1画像中

の粒子列 $\{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ にそれぞれ対応する第2画像中の粒子列 $\{b_5, b_2, b_3, b_7, \dots, b_l\}$ を数値のみで表した $\{5, 2, 3, 7, \dots, l\}$ がこの個体の染色体となる。このような個体群をランダムに生成し、すべてのトレーサ粒子の局所的な粒子パターンマッチングの総和を適応度とし、選択・淘汰、交叉、突然変異などの遺伝的操作を繰り返すことにより、最終世代で最適な粒子対応組み合わせを得ることになる。このアルゴリズムを図2のトレーサ粒子画像に適用した結果を図3に示す。得られた速度ベクトル分布には対応の誤りはみられない。

粒子追跡法を用いて3次元速度ベクトル分布を計測するためには、一般には2台以上のカメラを用いて撮影し、ステレオ写真法により画像間の各トレーサ粒子を同定し（空間的対応付け）、各トレーサ粒子の3次元位置を測定した後、上述のアルゴリズムにより粒子の時間的対応付けを行えばよい⁷⁾。

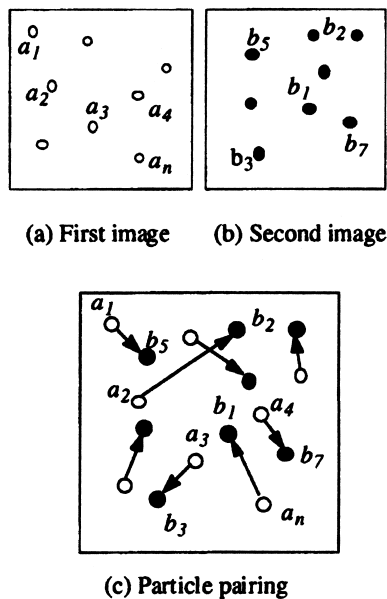


図1 粒子対応付けのコード化

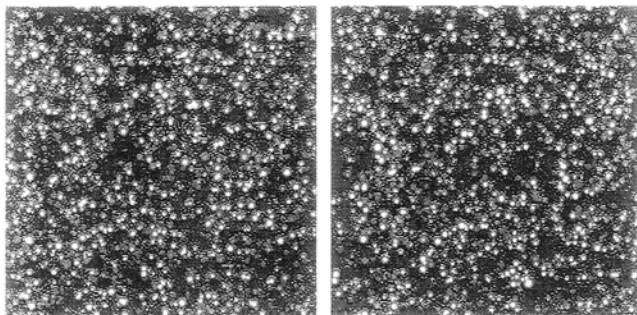


図2 トレーサ粒子画像

2.2 相関法

この節では、個々のトレーサ粒子でなく小さな領域の濃度パターンに注目し、時系列画像中の濃度パターンの移動から速度ベクトルを求める方法を紹介する。図4に相関法⁸⁾の原理を示す。ある時間 $t=t_0$ と、それより τ 秒後の2つのトレーサ画像が得られたとする。これらのトレーサ画像は空間的濃度パターンをもっており、そのパターンは時間とともに移動していると考えられる。いま、 $t=t_0$ で点 p の画像を中心とする $n \times n$ 画素マトリクスの小領域を考える。それを基準画素マトリクスとして、 $t=t_0+\tau$ での点 $p(0,0)$ の任意の近傍 (k,l) を中心画素位置とする $n \times n$ 画素マトリクスの小領域（破線で囲まれた領域）との濃度パターンの規準化した相互相関関数 $R_{fg}(k,l)$ を計算する。図5に示すように両画素マトリクスの濃度レベルを $f_i(0,0)$ 、 $g_i(k,l)$ とすると、

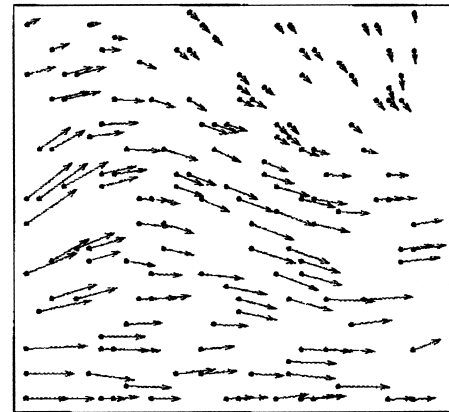


図3 2次元速度ベクトル分布

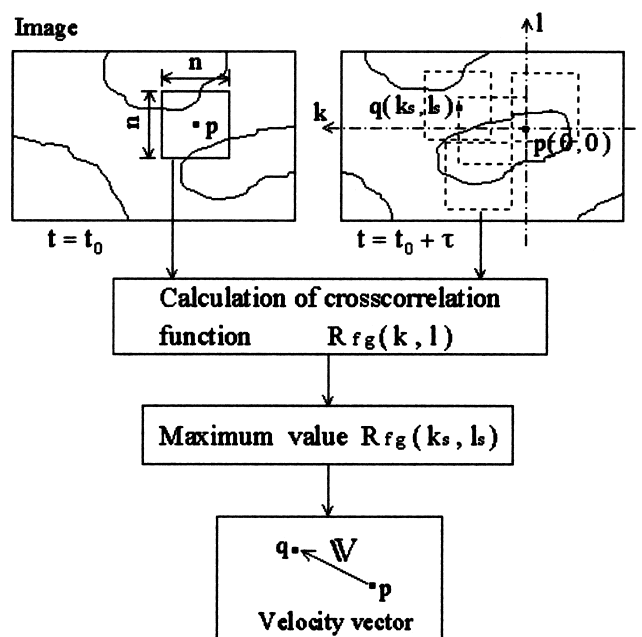


図4 相関法の原理

$R_{fg}(k, l)$ は

$$R_{fg}(k, l) = \frac{\sum_{i=0}^{n^2-1} (f_i - \bar{f}_i) (g_i - \bar{g}_i)}{\sqrt{\sum_{i=0}^{n^2-1} (f_i - \bar{f}_i)^2 \sum_{i=0}^{n^2-1} (g_i - \bar{g}_i)^2}} \dots\dots\dots (1)$$

となる。

ただし、 $\bar{f}_i, \bar{g}_i$ は平均値である。

ここで、基準マトリクスと点 $q(k_s, l_s)$ を中心画素とするマトリクスとの $R_{fg}(k_s, l_s)$ が最大値をとるならば、 $t=t_0$ の点 p を中心とする小領域のトレーサ粒子群が、 $t=t_0+\tau$ で点 q を中心とする小領域へ移動したと考えられる。したがって、図4に示すような速度ベクトル $\mathbf{V}$ が得られる。その大きさは

$$|\mathbf{V}| = \frac{\bar{pq}}{\tau} \dots\dots\dots (2)$$

となる。画像の濃度パターンを比較するのに必ずしも (1) 式の相互相関関数を計算する必要がなく、輝度差累積法⁹⁾で

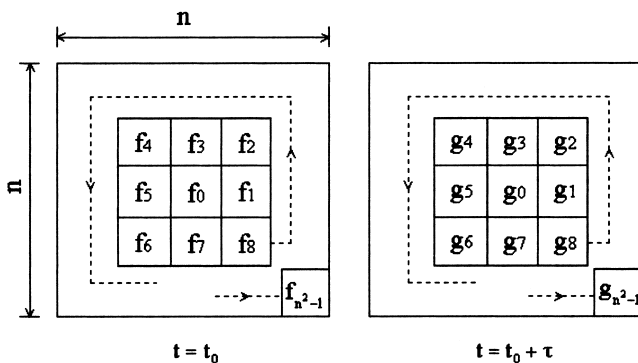


図5 $n \times n$ 画素マトリクス

は濃度レベルの差の絶対値の総和を用いている。

相関法はもっとも広く利用されている方法で、欧米の市販 PIV システムでは上述のように直接相互相関関数を求めるのではなく、トレーサ画像を高速フーリエ変換 (FFT) を用いて空間周波数領域に変換し、相互相関の計算を実行し、さらに逆フーリエ変換で2次元空間領域の相関分布に戻し、そのピークを検出することにより速度ベクトルを求める方法を採用している。また、相関法により得られる速度ベクトルの空間分解能は相関計算を実行する画素マトリクスの大きさに依存する。しかし、そのサイズを小さくすれば対応の誤りに起因する過誤ベクトルが多く発生する。そのため最初はマトリクスサイズを大きくとり過誤ベクトルの発生を抑え、つぎに得られた速度ベクトル候補の情報を基に相関計算の探索領域を小さくとり、マトリクスサイズを小さくし再度相関計算を実行し速度ベクトルを求める。この処理を繰り返すことにより、空間分解能の高い速度ベクトル分布が得られる。これが再帰的相関法¹⁰⁾である。

ステレオ PIV と呼ばれる3次元計測法は相関法を用いている。ステレオ配置された2台のカメラを用いてレーザーシートで照射されたトレーサ粒子群を撮影し、それぞれ相関法により2次元速度ベクトルを得る。対応する一対の2次元ベクトルから3次元速度ベクトルを計算することができる。したがって、この方法では2次元断面における3次元速度ベクトル分布を計測できる。

3次元計測の実例¹¹⁾として、図6に3次元速度ベクトル分布を計測するためのステレオ PIV システムを示す。特に、このシステムでは偏向角が90度異なる垂直偏光と水平偏光のレーザーライトシートで照明し、垂直・水平偏光の散乱光は偏光ビームで分離することにより、2断面の同時刻の3次元計

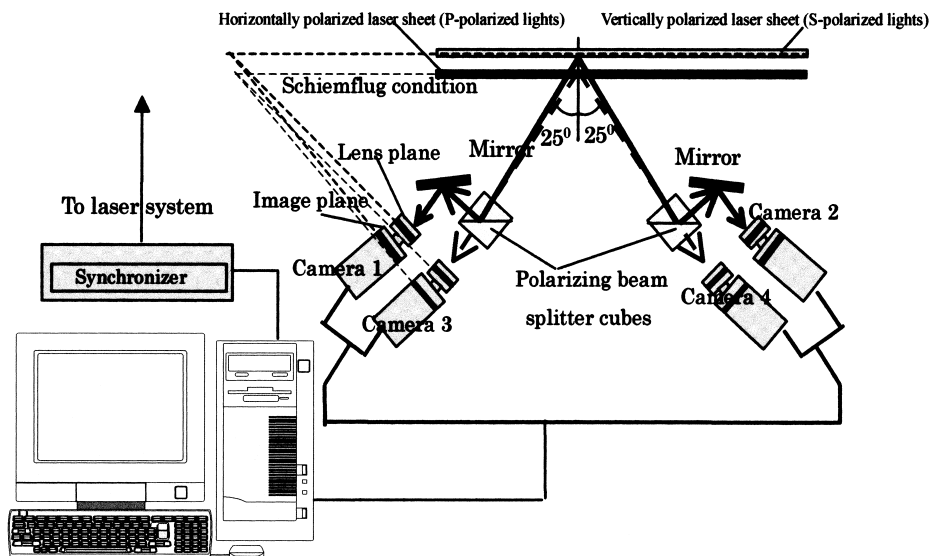


図6 デュアルプレーン・ステレオ PIV システムの構成 (東京大学生産技術研究所・佐賀徹雄先生提供)

測を可能にしている。このシステムを拡散混合を促進するロブノズル出口下流の2箇所の噴流断面に適用した例を図7に示す。近接した2断面の詳細な3次元計測が実現されている。

2.3 勾配法 (時空間微分法)

この節では、時系列画像中の濃度パターンの変化から速度ベクトルを求める方法を紹介する。図8は勾配法の計測原理¹²⁾を示す。可視化画像中の点 (x, y) の近傍の濃度パターン $f(x, y, t)$ が微小時間 Δt の間にパターンの変化なく点 $(x + \Delta x, y + \Delta y)$ へ移動したと仮定すると、局所的につぎの関係が得られる。

$$f(x, y, t) = f(x + \Delta x, y + \Delta y, t + \Delta t) \quad \dots\dots\dots (3)$$

上式の右辺をテイラー展開すると

$$\begin{aligned} f(x + \Delta x, y + \Delta y, t + \Delta t) &= f(x, y, t) \\ &+ \frac{\partial f}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial f}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial f}{\partial t} \Delta t + O(\Delta x, \Delta y, \Delta t) \\ &\dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

となる。 $O(\Delta x, \Delta y, \Delta t)$ は微小項の高次の項であるので省略でき、(3)、(4) 式からつぎの関係が求められる。

$$\frac{\partial f}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial f}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial f}{\partial t} \Delta t = 0 \quad \dots\dots\dots (5)$$

上式を Δt で割ると

$$\frac{\partial f}{\partial x} \frac{\Delta x}{\Delta t} + \frac{\partial f}{\partial y} \frac{\Delta y}{\Delta t} + \frac{\partial f}{\partial t} = 0 \quad \dots\dots\dots (6)$$

となる。 $\Delta t \rightarrow 0$ を考慮すると、勾配法の支配方程式はつぎのように与えられる。

$$\frac{\partial f}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial f}{\partial y} \frac{dy}{dt} + \frac{\partial f}{\partial t} = 0 \quad \dots\dots\dots (7)$$

上式は2次元速度ベクトル $(u, v) = (dx/dt, dy/dt)$ と時系列画像の濃度レベルの時空間微分 $\partial f / \partial x, \partial f / \partial y, \partial f / \partial t$ の関係を示す。(7) 式を解き2つの未知速度成分 (u, v) を求めるには制約条件が必要となる。一般的には近傍の速度は同じとして、計測点近傍の画像微分データに最小二乗法を適用して (u, v) が求められる。勾配法を用いても、原理的に相関法で述べた方法と同様に、カメラをステレオ配置することにより3次元計測が可能であるが実例は報告されていない。

この手法は、原理的に2画素の画像微分データが得られれば(7) 式を解くことができるため、得られる速度ベクトルの空間分解能は高いが、画像微分を用いるためパターンの移動量が1画素以内であることが必要で、PIVでは実用的でないとされていた。しかし、最近、その高い空間分解能を生かすため相関法と併用する手法¹³⁾が報告されている。また、(7) 式を解くための制約条件を必要とせず、勾配法の原理に基づき画像微分データからニューラルネットワークを用いて流れ場のモデルリングを行い速度ベクトル分布を求めるアルゴリズム¹⁴⁾が報告されている。この手法の特長は流れ場全

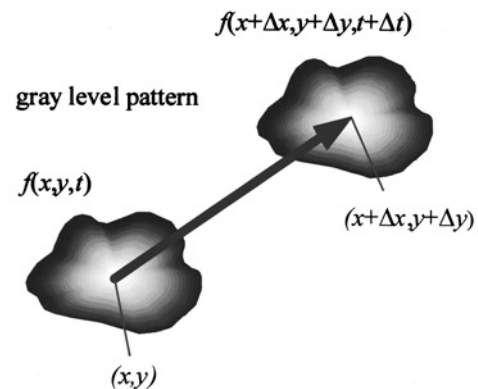


図8 勾配法の原理

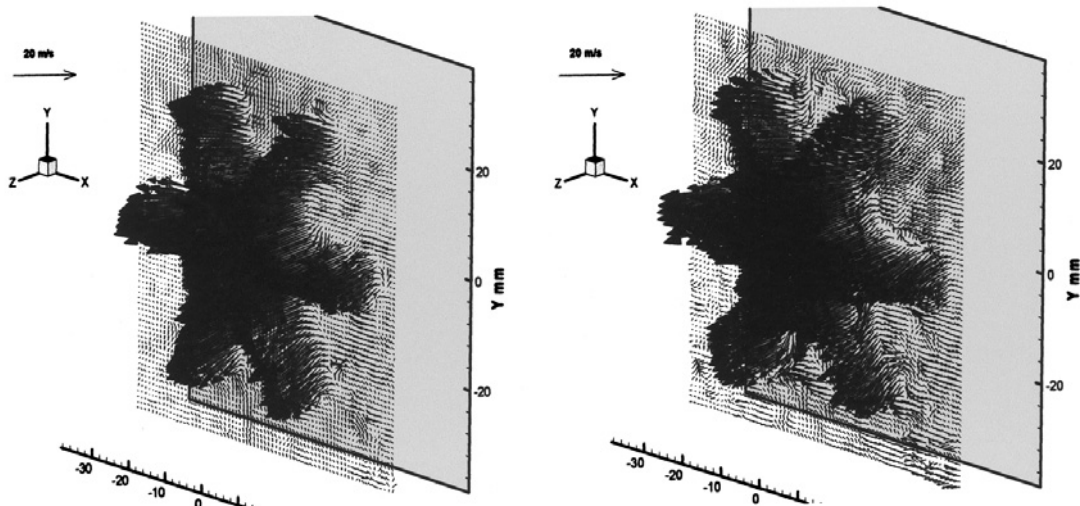


図7 2断面での瞬時3次元速度ベクトル分布 (東京大学生産技術研究所・佐賀徹雄先生提供)

域での画像情報を必ずしも必要としないことである。図9は人工的に作った2次元渦流れの擬似煙画像で、50%の画像情報は欠落している（黒い部分は画像情報がない）。この画像に本手法を適用した結果を図10に示す。場全体の速度分布が精度良く計測されている。

3 温度分布計測

巨大な熱交換器や原子炉等の中で生じているような熱と流動の複合した伝熱現象の動的挙動をモデル実験等で解明するためには、前章の速度情報だけでなく温度場の定量的情報が必要となる。このような熱流体の場を可視化する手法の一つに感温液晶懸濁法¹⁵⁾がある。少量のマイクロカプセル化された感温液晶粒子を流体中に懸濁させることにより熱流体場を可視化することができる。一般的に感温液晶は温度の上昇とともに赤橙黄緑青藍紫と波長の長い領域から短い領域へと変化する。したがって、可視化画像の中の色情報から温度情報を得ることができる。この方法を用いると、色によって温

度場を、粒子の移動によって速度場を同時に可視化することができ、カラー画像処理技術との結合により定量的な情報が得られる。

3.1 色から温度への変換

カラー画像処理を行うためには、色の識別あるいは計測が必要となる。一つのカラー画像はR、G、Bの3つの画面に色分解される。それゆえ1画素につきR、G、Bの3つの値の情報がおり、簡単にRGB色空間から色知覚の3属性である明度、彩度、色相へ変換できる。一般に、感温液晶の色/温度変換には色相が用いられるが、非線形性が強いので図11に示す階層型のニューラルネットワークを用いる方が良い結果が得られる^{16,17)}。すなわち、校正実験における可視化画像のR、G、B値の規準化した値 r, g, b を入力とし、対応する熱電対で測定した温度を教師信号としてネットワークを学習させると、図12に示す関係が得られる。学習後のネットワークに本実験での r, g, b 値を入力すると対応する温度を出力する。

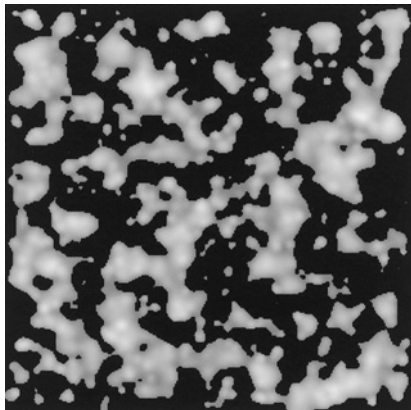


図9 擬似煙画像（50%画像情報欠落）

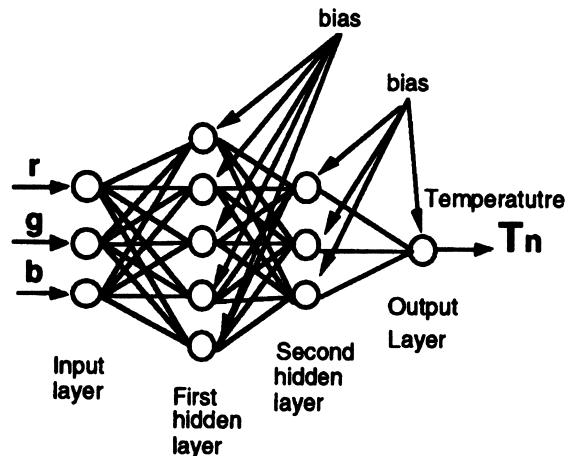


図11 階層型ニューラルネットワーク

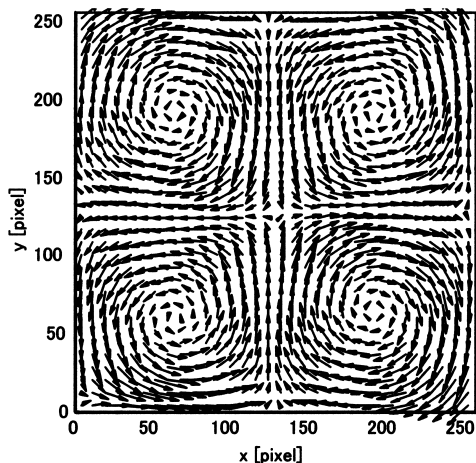


図10 2次元速度ベクトル分布

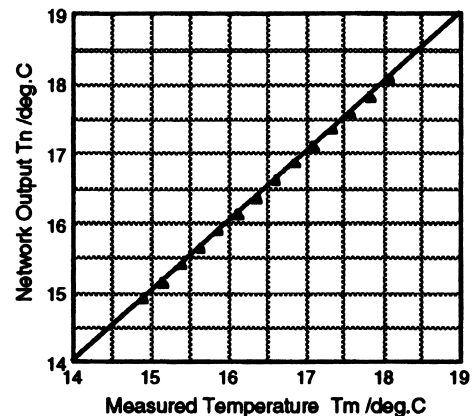


図12 ニューラルネットワーク出力と測定温度の関係

3.2 温度と速度の同時3次元計測

ここでは実例として、回転容器内の定常的な3次元自然対流現象を計測対象とした温度場と速度場の同時計測システム^{17, 18)}を紹介する。図13に可視化実験に用いた透明アクリル樹脂製の回転自然対流実験装置を示す。テスト空間である円筒容器の上下面に水槽を設け、一定温度の水を循環させることで上下面温度が設定される。このテスト空間をモータを用いて回転させることにより、回転自然対流を形成する。可視化手法としては感温液晶懸濁法を用い、色により温度場を感温液晶粒子の移動により速度場を計測できる。テスト空間の円筒容器の中心軸を通る垂直平面にハロゲンランプからのスリット光を照射し、この可視化断面に直交する方向から1回転あたり178枚の可視化画像を撮影する。温度場を計測するためには、あらかじめ感温液晶の呈色と温度の関係を校正実験より求めておく必要がある。テスト空間に温度成層を形成し、各測定点における熱電対による測定値と画像のR, G, B値から3.1節で述べた手法で色/温度変換を定式化する。図14に178枚の画像から再構成した3次元温度分布を示す。一方、速度場の計測は、計測対象が回転しているため、1回転前後のトレーサパターンを時空間的に探索する時空間相関法¹⁹⁾を用いる。さらに、過誤ベクトルを効率良く除去するため、ホップフィールドネットワークによる手法¹⁶⁾を適用

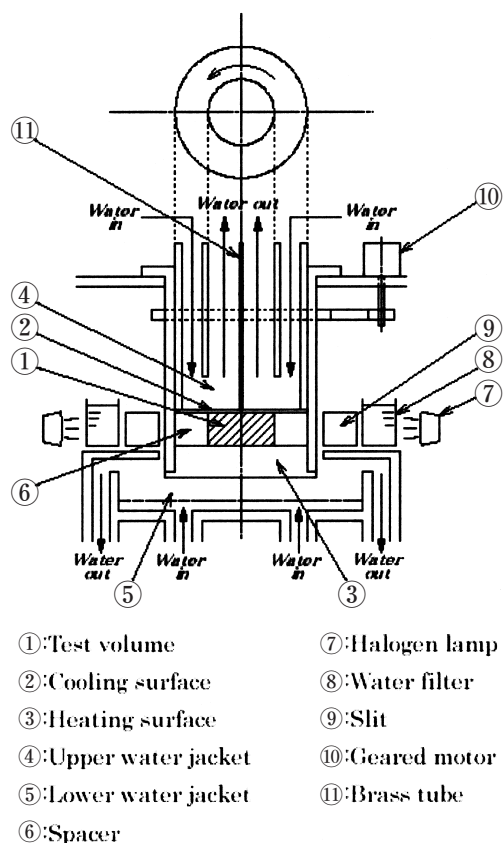


図13 回転自然対流実験装置の構成

している。図15に得られた3次元速度ベクトル分布を示す。このように温度場と速度場が同時に3次元計測できる。

4 おわりに

流れの可視化技術とデジタル画像計測の融合により、従来の点計測ではなく瞬時の非定常場全体の定量的な情報が得られることから、可視化情報計測技術は流体现象を実験的に解

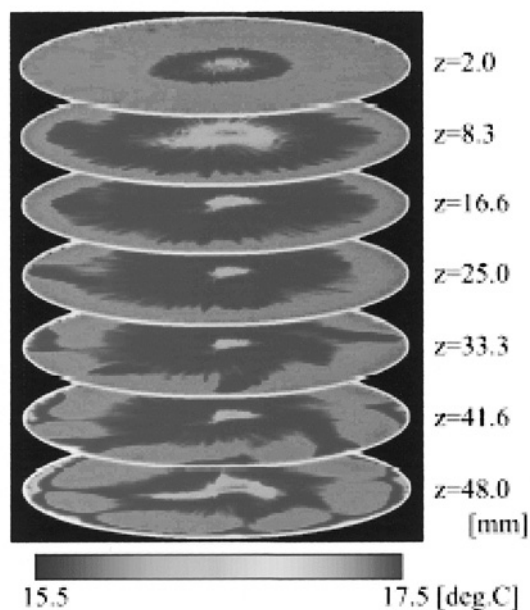


図14 3次元温度分布

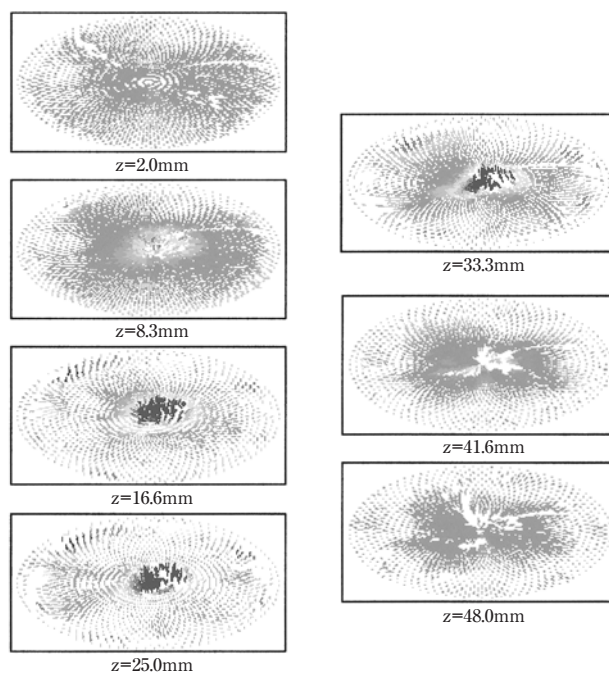


図15 3次元速度ベクトル分布

析するツールとして盛んに利用され始めている。当初は点計測に比べて時空間的に精度が低いという問題点があったが、ハード、ソフト両面の飛躍的な発展に伴い、この問題点も解消されつつある。市販のPIVシステムも数多く出回り、実用化の環境は整ってきているが、計測原理を理解しないで使用すると誤った情報を得る危険性もあるので注意を要する。近い将来、高精度計測が可能となり、流動現象が関係するすべての分野で画期的な計測技術になるであろう。

参考文献

- 1) 木村一郎, 植村知正, 奥野武俊: 可視化情報計測, 近代科学社, (2001)
- 2) 可視化情報学会編: PIVハンドブック, 森北出版, (2002)
- 3) 小林敏雄, 佐賀徹雄, 瀬川茂樹, 神田宏: 日本機械学会論文集 (B編), 55 (1989) 509, 107.
- 4) 植村知正, 山本富士夫, 幸川幸雄: 可視化情報, 10 (1990) 38, 196.
- 5) 岡本孝司: 可視化情報, 15-Suppli.2 (1995), 193.
- 6) I.Kimura, A.Hattori and M.Ueda: J. Visualization, 2 (2000) 3/4, 223.
- 7) 西野耕一, 笠木伸英, 平田賢, 佐田豊: 日本機械学会論文集 (B編), 55 (1989) 510, 404.
- 8) 木村一郎, 高森 年, 井上 隆: 計測自動制御学会論文集, 23 (1987) 2, 101.
- 9) 加賀昭和, 井上義雄, 山口克人: 可視化情報, 14 (1994) 53, 108.
- 10) D.P.Hart: J. Visualization, 3 (2000) 2, 187.
- 11) H.Hu, T.Saga, T.Kobayashi and N.Taniguchi: Physics of Fluids, 14 (2002) 7, 2128.
- 12) 三池秀敏, 古賀和利: パソコンによる動画画像処理, 森北出版, (1993), 139.
- 13) Y.Sugii, S.Nishio, T.Okuno and K.Okamoto: Meas. Sci. Tech., 11 (2000), 1666.
- 14) I.Kimura, Y.Susaki, R.Kiyohara, A.Kaga and Y.Kuroe: J. Visualization, 5 (2002) 34, 363.
- 15) 秋野詔夫: 流れの可視化, 7 (1987) 27, 42.
- 16) I.Kimura, Y.Kuroe and M.Ozawa: J. Flow Visualization and Image Processing, 1 (1993) 4, 261.
- 17) I.Kimura, T.Hyodo and M.Ozawa, J. Visualization, 1 (1998) 2, 145.
- 18) 篠木政利, 小澤守, 岡田年史, 木村一郎: 日本機械学会論文集 (B編), 66 (2000) 645, 1462.
- 19) 木村一郎, 河野吉晴, 高森 年: 計測自動制御学会論文集, 27 (1991) 5, 497.

(2003年11月4日受付)