

## 濃度パターン画像解析法を利用した流動解析と羽根車内流れへの適用

速水, 洋  
九州大学機能物質科学研究所

陳, 徳新  
中国華北水利水電学院

高曾, 徹  
九州大学機能物質科学研究所

<https://doi.org/10.15017/6655>

---

出版情報 : 九州大学機能物質科学研究所報告. 8 (1), pp.175-184, 1994-11-10. 九州大学機能物質科学研究所  
バージョン :  
権利関係 :



## 濃度パターン画像解析法を利用した流動解析 と羽根車内流れへの適用

速 水 洋・陳 徳新\*・高 曾 徹

### Pattern Image Processing Measurements and Application to the Flow in a Rotating Impeller

Hiroshi HAYAMI, Dexin CHEN, Toru KOSO

Fluid flow in a small model of a Francis-type pump turbine was visualized by means of a tracer method and was pictured using a video camera rotating with the runner. Several kinds of pattern image processing measurements are reviewed and one method based on a correlation method is applied to get the relative velocity vectors of the fluid flow in a rotating impeller from the video images. The problems which occur in the image processing measurement and the countermeasures are discussed.

#### 1. はじめに

風の存在は木の葉の動きでわかるが、空気の流れの様子はわからない。青空に浮かぶ雲の動きや川面に浮かぶ木の葉の様など、流れと共に移動する何かが目に見えれば流れの様子を把握することが可能となる。すなわちこれが流れの可視化であり、これまでにいろいろな手法が開発されてきた。元来、この種の可視化法は流れの定性的な理解を助けるものであったが、最近、可視化画像のデジタル画像処理による流動解析が盛んである。例えば、雲の塊を一個の粒子と見なして、個々の粒子（雲）を追いかけることによって上空の流れを知ることができる。では曇空の場合はどうであろうか。独立した雲がなくても、雲の濃淡模様（濃度パターン）

に着目することによって雲の動きがわかる。ターボ機械の羽根車にビデオカメラを取り付けて羽根車と一緒に回転させて撮影すれば、羽根車内の相対流れの動画が得られる。ここでは、トレーサ法による流れの可視化ビデオ画像におけるトレーサ粒子の空間的濃度パターンの時間的変化より速度ベクトルを求める方法の基礎を述べるとともに、フランシス型ポンプ水車模型の羽根車内流れの相対速度ベクトルの計測例を紹介する。

#### 2. 研究の背景

回転する羽根車の中の流れは一体どのようなようになっているであろうか。直径約2mの遠心送風機の羽根車のハブに人が乗って熱線プローブをトラバースして内部流れを計測した<sup>(1)</sup>のは、およそ四半世紀前である。大変な労力であったと思われる。羽根車の流路断面内の速度分布は極めて複雑でいわゆるポテンシャル流れとはおよそかけはなれていること、さらに二次流れの存在

受理日 1994年7月18日

本論文を名誉教授 藤井 哲先生に献呈する。

\* 中国華北水利水電学院（機能物質科学研究所訪問教授として滞在）

が無視できないなど貴重なデータを提供し計測の重要性を示した。その後、センサ技術、エレクトロニクス、コンピュータの発達によって、ピトー管、熱線、レーザ流速計の実用化への進歩は著しく、これらを用いた羽根車内流れの計測例は質・量共に年々向上している<sup>(2)</sup>。特に、レーザ流速計の出現はまさに画期的であった。ターボ機械へのレーザ流速計の適用は、WislerとMossey (1973)<sup>(9)</sup>が、軸流圧縮機動翼内流れ計測にLDVを適用したのが最初である。L2FはSchodl (1974)<sup>(4)</sup>の開発によって現在の形となったが、これをEckardt (1976)<sup>(5)</sup>が遠心羽根車に適用して、羽根車出口のいわゆるジェット/ウェーク流れ状態を見事に捉えたのが実用化への第一歩といえる<sup>(6)</sup>。

他方、複雑な羽根車内の流れの様子を知るには、あらかじめ測定点を定めて速度分布を精密に計測するよりも、流れを可視化してその全貌を観察し、必要があれば観察結果に基づいて選ばれた測定点において速度分布を定量的に計測するほうが有利なことがある<sup>(7)</sup>。

回転する羽根車内の流れの可視化法も多彩である<sup>(8)</sup>。静止座標軸からは絶対流れを見ることになるが、フラッシュ光源などを用いた瞬間画像では絶対流れが相対流れと同一になるとして取り扱う場合も多い。一方、羽根車と一緒に回転するカメラを用いて観察すれば相対流れを直接捉えることができる。台形プリズムを利用した回転像静止装置を用いて、比較的高速回転の遠心羽根車内の相対流れを火花追跡法で観察した例<sup>(9)-(11)</sup>もある。

妹尾・山口 (1967)<sup>(12)</sup>は、半開放型遠心圧縮機内の流れを観察するために水を使った模型を採用し、染料を連続的に供給することによって翼間の三次元流れを捉えた。この場合、羽根車と共に回転する座標系で見る

ことによって、羽根車内の流れは定常流れとなり染料によって描かれる流脈は流跡および流線と一致する。一方、非定常の場合には流脈、流跡、流線は互いに一致しないので流脈だけを観察したのでは不十分である。妹尾ら (1975)<sup>(7)</sup>は、遠心ポンプ羽根車の出口において染料を断続的に供給して、非定常流れにおける速度変化を捉えている。また染料の形状の変化からも流れの様子を判断する手がかりが得られることを示している。

カメラの撮影速度は流跡撮影に必要な露光時間により制限されるので、変動が速い流れの変化の追跡を断片的な写真から推察することは困難である。最近のビデオカメラの小型軽量化はめざましく、山口・速水 (1990)<sup>(13)</sup>はポンプ水車模型内流れをトレーサ法を用いて可視化し、画像をビデオカメラを用いて撮影している。その結果、翼間通路内の死水域や渦の移動さらには翼面境界層内の微弱な流れを知る手段としてVTRが有用であることを示している。

可視化法は本来定性的なアプローチであったが、最近の計算機・画像処理装置の発達とともに、これらの可視化画像をデジタル処理して定量化する試み、いわゆる画像処理法が盛んになった。粒子画像における問題点の一つは、時間、空間の粒子対応である。その精度や処理速度の向上をめざして種々の解析法が開発されている。粒子画像解析法の代表的なものには、個々の粒子を追いかける粒子追跡法<sup>(14)-(20)</sup>と濃度パターン解析法がある。粒子追跡法については、一つの流跡線による方法<sup>(14)</sup>、始点と終点による追跡法<sup>(15)</sup>、連続4画面による追跡法<sup>(16)</sup>、始点強調撮影法<sup>(17)</sup>、始点、終点、および流跡線を用いた追跡法<sup>(18)</sup>、さらに三次元追跡法<sup>(19)</sup>、さらに2値化相関法<sup>(20)</sup>など、手法は多彩である。以下、濃度パターン解析法について述べる。

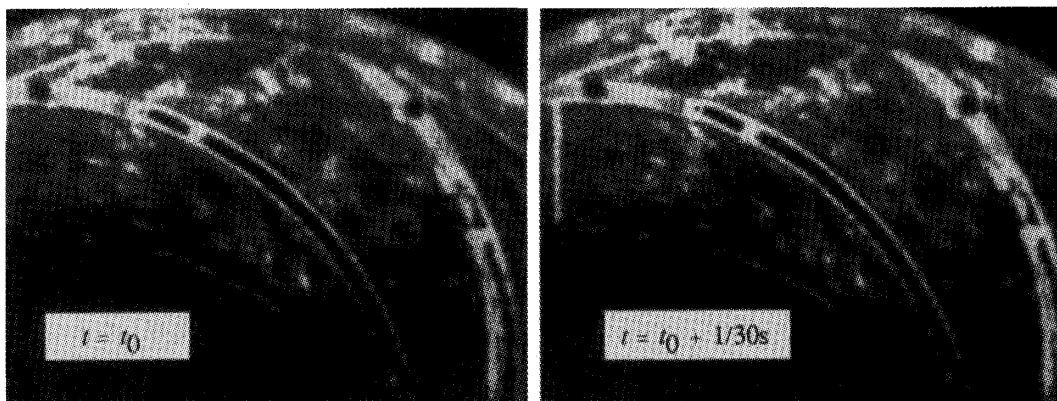


Fig. 1 Example of flow visualization image

### 3. 濃度パターン解析法

#### 3.1 濃度パターン

流れの可視化画像の一例を図1に示す。模型ポンプ水車の羽根車内の相対流れをトレーサ法で可視化したもので、トレーサとして水にはアルミ粉末を混入してある。一個一個の粒子の識別は不可能であるが、アルミ粉末は鱗片状をなしているの、その向きによって明暗が生じ雲状のトレーサ群を形成する。このような明暗のパターンを濃度パターンあるいは輝度パターンとよぶ。図1は濃度(輝度)レベルを64階調でデジタル化したものである。使用するトレーサ粒子の種類や粒子密度にもよるが、通常トレーサ法による可視化画像は空間的濃度パターンを形成する。

#### 3.2 相関法の原理

図1の2枚の画像は1/30秒間隔の連続する2画像である。この2画像間での濃度パターンの移動量を算出できれば局所的な速度ベクトル(画像内成分)が求まるはずである。ここでは相関法<sup>(21)-(25)</sup>を用いた解析法について説明する。図2(a)に相関法の原理を示す。時刻  $t=t_0$  における画像1と  $t=t_0+\Delta t$  における画像2の二つの画像を考える。いま、画像1の上の点  $p(x_0, y_0)$  に着目し、点  $p$  を中心とする  $n \times n$  マトリックスの小

領域((基準)相関マトリックス)を考える。このマトリックス内の濃度レベルを各セル(画素あるいはピクセルとよぶ)ごとに  $f_1, f_2, \dots, f_i, \dots, f_{n^2}$  と表す。一方、画像2上のわずかに離れた点  $q(x=x_0+\Delta x, y=y_0+\Delta y)$  を中心とする同じ大きさの  $n \times n$  マトリックスの小領域(相関マトリックス)を取る。この相関マトリックス内の濃度レベルを  $g_1, g_2, \dots, g_i, \dots, g_{n^2}$  と添字が基準マトリックスに対応するように表わす。図2(b)に濃度分布例を示す。二つの相関マトリックス間の濃度レベル  $f, g$  についての相関係数(規準化相互相関関数)は次式となる。

$$\rho_{fg}(\Delta x, \Delta y) = \frac{\sum_{i=1}^{n^2} (f_i - \bar{f}_i)(g_i - \bar{g}_i)}{\left[ \sum_{i=1}^{n^2} (f_i - \bar{f}_i)^2 \sum_{i=1}^{n^2} (g_i - \bar{g}_i)^2 \right]^{1/2}} \quad \dots\dots(1)$$

ここで、 $\bar{f}_i, \bar{g}_i$  は  $f_i, g_i$  それぞれの相関マトリックス内の平均値である。なお、 $-1 \leq \rho_{fg} \leq 1$  である。

点  $p$  を中心とする  $m \times m$  マトリックス(捜査マトリックス)内のセルに相関マトリックスを平行に移動しながらその中心を合わせ、各セルごとにこの計算を行う。計算結果例を図2(c)に示す。相関係数のピークが図のように捜査マトリックス内に現れば、そのピークの位置、点  $q_m(x_m=x_0+\Delta x_m, y_m=y_0+\Delta y_m)$  が点  $p$  を

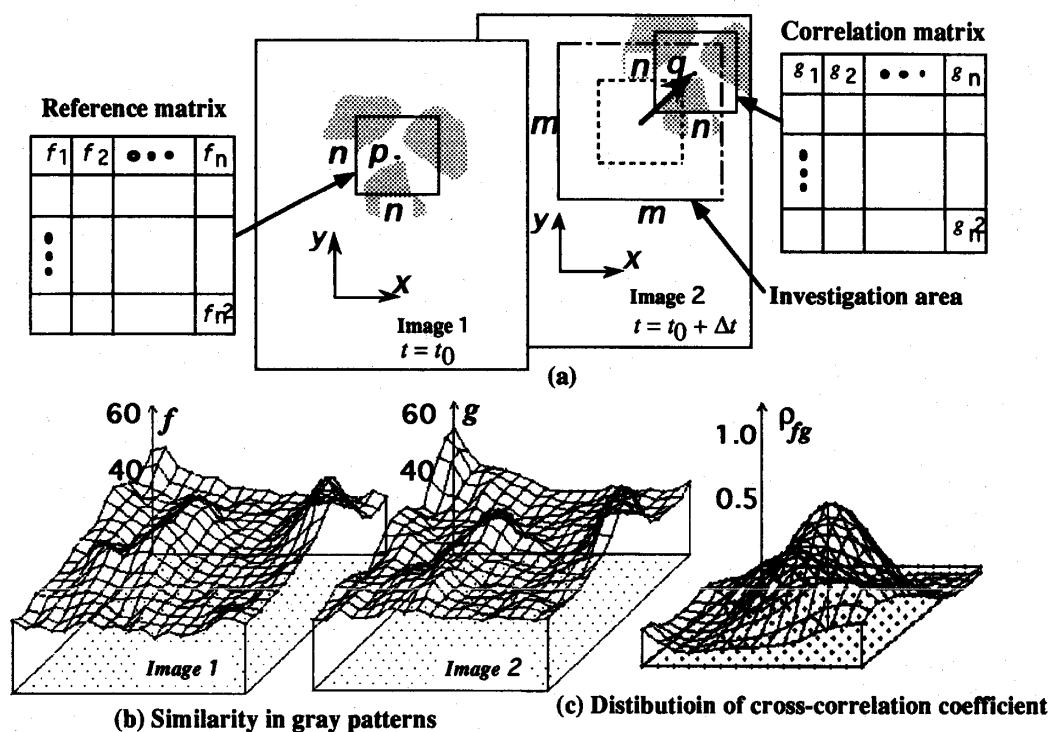
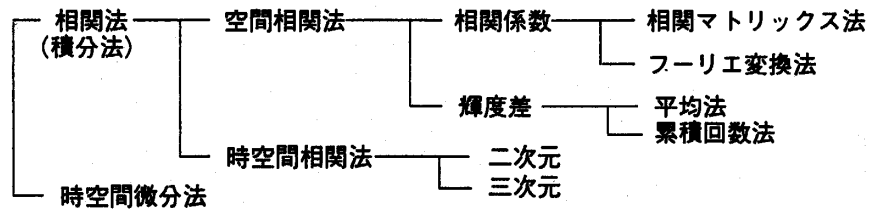


Fig. 2 Fundamentals of correlation method

表1 濃度パターン解析法



始点とするトレーサ粒子の終点と対応する。すなわち、点  $p$  における画像面内の二次元速度ベクトル  $V(V_x = \Delta x_m / \Delta t, V_y = \Delta y_m / \Delta t)$  が求まる。図 2 (b) の右図は点  $q_m$  を中心とする相関マトリックスの濃度分布であり、左図の基準マトリックスの濃度分布との類似性は高い。

### 3. 3 各種の解析法と適用例

表 1 は濃度パターン解析法を系統的に表わしたもので、前節の相関法は相関マトリックス法に対応する。この手法の特徴は計算アルゴリズムが極めて簡単であり広範に利用されている<sup>(21)-(30)</sup>点である。一方、画素ごとの濃度データをかけ合わせてたみこみ積分を行うため計算時間が膨大となる。計算時間の短縮化に加えて、空間分解能の向上あるいは三次元計測への拡張をめざして表 1 に示す種々の方法が開発されている。

画像に対して空間波数域(時間の代りに長さが基準)で解析するフーリエ変換法を用いて相関係数を求める方法<sup>(31)-(33)</sup>やパターン類似性の評価関数として輝度差を用いる方法<sup>(34)-(36)</sup>は本質的には相関マトリックス法と同一である<sup>(32)</sup>。輝度差の平均法は係数  $D_{fg}(\Delta x, \Delta y) = \sum |f_i - g_i| / n^2$  が最小となる点を終点とする方法、一方、累積回数法は係数  $D_{fg}$  の累積中間値があるしきい値を越えるまでの累積回数が最大となる点を終点とする方法であり、いずれも相関マトリックス法に比べて計算時間の短縮化を実現している<sup>(35)</sup>。さらに、累積回数法の改良アルゴリズムとして、累積値がその最小値に比べて有意に大きいものを逐次棄却する方法<sup>(36)</sup>が提唱されている。

速度  $V$  は、 $\Delta s$  を移動距離、 $\Delta t$  を時間間隔とすれば、 $V = \Delta s / \Delta t$  で定義される。前述の相関法は  $\Delta t$  が予めわかっている二つの画像からトレーサ粒子の移動距離  $\Delta s$  を求める方法であり、空間相関法ともよばれる。一方、二点間の距離  $\Delta s$  を予め定め、トレーサ粒子がこの二点間を通過するのに要する時間  $\Delta t$  を求めてもよいわけで、これが時間相関法である。ただし、流れの方向が未知だから、空間的に複数の点との相関計算が必要となる。基準の点を中心に他の一点を回転させる

方法<sup>(37)</sup>および基準の点を中心にその周辺の 8 点(画素)を対象とする方法<sup>(38)</sup>が提案されている。さらに、わずかに離れた互いに平行な二つの断面(間隔  $d$ ) における時系列画像データを用いて、空間相関と時間相関を組み合わせることによって三次元速度ベクトルの計測が可能となる<sup>(39)(40)</sup>。この場合には、二枚の平行なカラーシート光を主流に対して直角に照射する(二次元計測の場合には主流に対して平行に照射する)。画像 1 の基準点を  $p(x_0, y_0, t_0)$  として、時間、空間位置をわずかにずらした画像 2 の点  $q(x_0 + \Delta x, y_0 + \Delta y, t_0 + \Delta t)$  との相関係数が最大となる  $\Delta x_m, \Delta y_m, \Delta t_m$  を求めることによって、三次元速度ベクトル  $V(V_x = \Delta x_m / \Delta t_m, V_y = \Delta y_m / \Delta t_m, V_z = d / \Delta t_m)$  が得られる。

画像濃度データの空間微分と 2 枚の画像間から求める時間微分を用いて画像の移動量を求めるのが時空間微分法<sup>(41)(42)</sup>であり、高い空間分解能が期待できる。

国内における濃度パターン解析法の適用例を表 2 に示す。対象となる流れ場、可視化法、画像処理法、解析法いずれも多種多様である。

## 4. ポンプ水車羽根車内流れへの適用

### 4. 1 可視化法

図 3 に実験装置<sup>(13)</sup>の主要部を示す。装置は立型とし、撮影効果を上げるために上部ケーシングを省き、主要部には透明アクリル材を使用した。なお羽根車はモータによって駆動し、可視化は 18~30rpm で行った。水には重量比 5 ppm のアルミ粉末をトレーサとして混入し可視化した。羽根車入口深さ ( $b_1 = 18\text{mm}$ ) の中央断面に幅 2 mm のスリット光を全周から照射して、羽根車とともに回転するビデオカメラ(回転軸に固定)を用い、通常の 30コマ/秒で撮影した。

### 4. 2 画像処理

画像処理システムのハード構成を図 4 に示す。撮影にはビデオカメラ(National NV-MC15)を用い、VTR に記録した。記録された画像データは画像処理

表2 濃度パターン解析法の適用例

No.	解析法	著者(年)	対象,可視化法	画像処理装置	解析装置等	備考
1	相関法 (マトリクス法)	木村ほか (1986) (1987)	円柱後流渦, 水, 80 $\mu\text{m}$ カクス, 自由表面	TVカメラ, イメージフレームメモリ-256階調, 対象270*140画素	ミニコン $\Delta t=1/15\text{s}$ $n=11, m=31$	非定常計測 8近傍判定法 $n$ 検討 $n<23$
2	相関法 (マトリクス法)	大場ほか (1989)	半円柱後流, 水, アルミ粉末, 自由表面	CCDカメラ(National M21) フォト(ADM98-4) NEC PC9801	$\Delta t=1/15\text{s}$ $n=15, m=35$	時間感度補正 空間感度補正 1/1000sシャッタ
3	相関法 (マトリクス法)	榎原ほか (1991)	円管内温度成層流, 水, 5 $\mu\text{m}$ カクスリソレン粒子, 7mm幅レーザーシート, 100-140mm/s	CCDカメラ(SONY XC- 77RR) 三谷商事(IBM-512SL8) 256階調, 512*512画素 NEC PC9801RS +DSP	$n=26$	時系列計測 LDVとの比較 2msシャッタ
4	相関法 (マトリクス法)	木村ほか (1991)	自然対流,シリコン油, 10-20 $\mu\text{m}$ 感温液晶, 2mm 幅レーザーシート, <1mm/s	カラーTVカメラ ADS PIP-4000 分解能0.25mm	SONY NEWS $n=27$	温度場同時測定 8近傍判定法 不確かさ解析
5	相関法 (マトリクス法)	速水ほか (1992)	羽根車内流れ, 水, アルミ粉末, 2mm幅レーザーシート	CCDカメラ(National NV- MC15), フォト(ADM98-4) 64階調, 256*256画素 EPSON PC-286V	HP-9000 M320 $\Delta t=1/30\text{s}$ $n=19, m=13$	非定常計測 輝度むら改善 $n$ 検討 $n<23$
6	相関法 (マトリクス法)	塩路ほか (1988)	ティンセル火炎, 空気, 火炎およびすす	高速度カメラ, トラムスキャナ 256階調, 分解能50 $\mu\text{m}$	大型計算機	乱れ強さの推定
7	フーリエ変換法	奥野 (1988)	円柱前方流れ, 水, アルミ粉末, 自由表面, 5 mm/s	35mmカメラ 簡易画像読み取り装置 16階調, 512*256画素	$\Delta t=1/5\text{s}$ $n=64$	FFT
8	フーリエ変換法	奥野ほか (1990)	船首首飾り渦, 水, 50 $\mu\text{m}$ マイロン粒子, Arレーザーシート	CCDカメラ(SONY V88) ALTEC(RLT 512-DMA) 256階調, 256*256画素 NEC PC-9800XL	$n=32$	FFT
9	輝度差法 (平均法)	幸ほか (1988)	平行2平板衝突流	CCDカメラ 256階調, 512*512画素	大型計算機 $\Delta t=1/30\text{s}$ $n=11, 21,$ $m=21$	8近傍判定法 輝度むら判定法
10	輝度差法 (累積回数法)	加賀 (1991)	角柱前方流れ, 空気, 煙, 50-70cm/s	ハソコン		
11	時空間相関法 (二次元)	犬丸ほか (1989)	軸対称乱流噴流・衝突噴流 水, 50 $\mu\text{m}$ 中空カクス微粒 子, <3m/s, 7mm幅レーザー シート	高速ビデオカメラ 100コマ/s NEXUS 6400	HP9000 Model 840 $\Delta t=1/100\text{s}$	2点間距離 $L=30-40\text{mm}$ 角度刻み $\Delta\theta$ $=3^\circ$
12	時空間相関法 (二次元)	山田ほか (1992)	円柱後流, 水, 360 $\mu\text{m}$ マイロン12粒子, 5mm幅レーザーシート	CCDカメラ マイクロテカ(MT9801FMM) 160*128画素リアルタイム EPSON PC-286VJ	$\Delta t=1/30\text{s}$	8近傍との相関
13	時空間相関法 (三次元)	木村ほか (1991)	矩形開水路, 水, 0.5mmカクスリソレン粒子, 50 mm/s, 3mm幅・間隔17 mm平行レーザーシート光 (スライフトランスジェクタ)	カラーCCDカメラ PIP-4000 256階調, 580*480画素 KUBOTA TITAN	$\Delta t=1/30\text{s},$ 6画面 $n=17$	不確かさ解析
14	時空間相関法 (三次元)	木村ほか (1992)	矩形オリフィス水路, 水, 1.2mmトレサ, 30 mm/s, 3mm幅・間隔7 mm平行レーザーシート光	カラーCCDカメラ PIP-4000 256階調, 580*480画素 KUBOTA TITAN	$\Delta t=1/30\text{s},$ 7画面 $n\leq 35$	逆流への拡張 ニューラルネットワーク判 定法
15	時空間微分法	奥野ほか (1991)	船首首飾り渦, 水, 50 $\mu\text{m}$ マイロン粒子, 50mm/s, Arレーザーシート 波浪中円柱周り, 水, 200 - 300 $\mu\text{m}$ カクスリソレン粒子	CCDカメラ(SONY V88) ALTEC(RLT 512-DMA) 256階調, 256*256画素 NEC PC-9800XL		カメラ2台方式 (高速流対応)

 $\Delta t$ : 時間間隔,  $n$ : 相関マトリクスの大きさ,  $m$ : 捜査マトリクスの大きさ

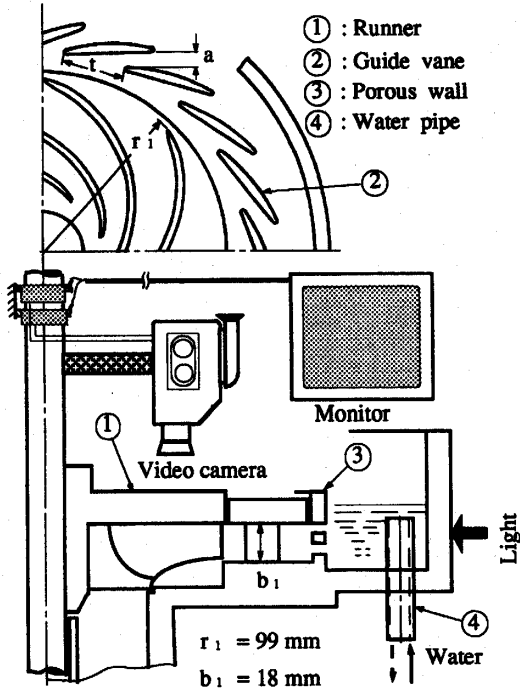


Fig. 3 Experimental apparatus

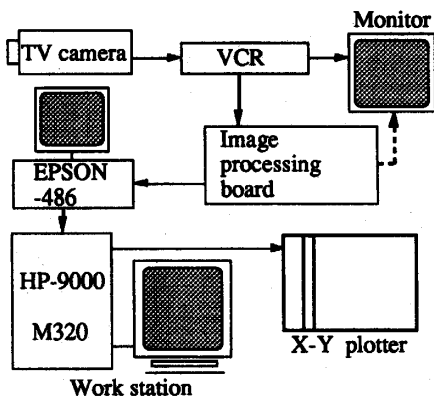


Fig. 4 Image processing system

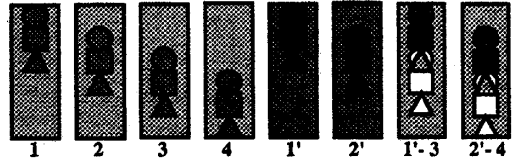


Fig. 5 Process of image improvement

ボード (Photoron 製 FDM98-4) でデジタル化して、階調変換や画像間の演算など前処理を行った後にパソコン (EPSON PC286V) に取り込み、フロッピーディスクに記録した。画像処理ボードは一画像256×256の画素数で、64階調の輝度分解能を有する。ワークステーション (HP-9000M320) にデータを転送し、相関法を用いて速度ベクトルの計算を行った。

図1の例では、トレーサによる遮光などのために輝度パターンの分布は均一でない。特に中心部 (図の下側) では輝度が低く、そのままでは相関法の適用が困難である。本画像の場合、コントラスト強調と画像間演算処理を併用する方法で画質を改善した。図5に画質改善処理手順の概略を示す。まずVTRから連続する4画像をフリーズする (図5 (1~4))。最初の2画像を同じレベルでそれぞれコントラスト強調を行う (1', 2')。輝度むらを減少するために、各々の強調画像から後半の2画像をそれぞれ差し引いて、得られる2画像をそれぞれ始点画像 (1'-3) および終点画像 (2'-4) として相互相関を計算した。図6は(a)原画像を用いて解析した場合と(b)上記の改善画質を用いて解析した場合に得られた速度ベクトル線図の比較例であり、画質改善の効果は大きい。

#### 4. 3 非定常流れの例

図7の翼間速度ベクトル線図は1秒毎 (約半回転毎) の流れの変化の様子を示したものである。図中のベク

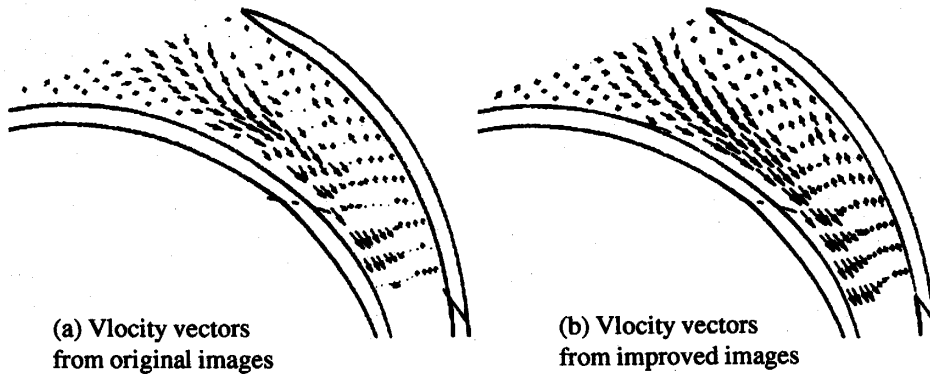


Fig. 6 Effect of image improvement

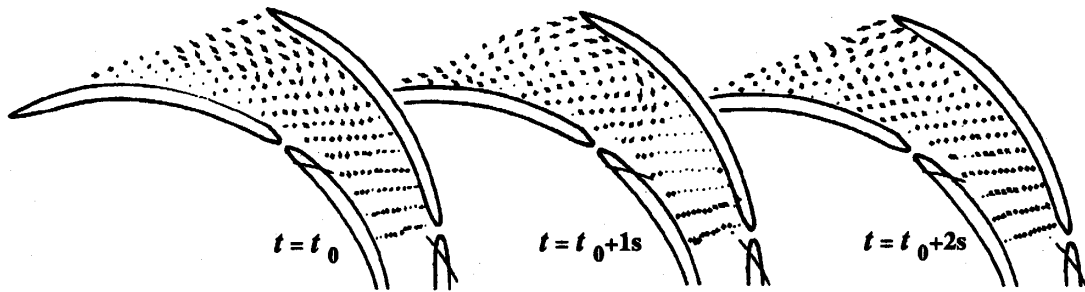


Fig. 7 Example of unsteady flow

トルの長さは1/30秒間の移動距離を表す。渦の有無や、通り抜け流れの方向変化など三者三様であり、流れの様子は大きく異なっている。すなわち、相関法によって非定常な流れの様子を定量化できることを示している。

## 5. 問題点と対策

濃度パターン法の特徴の一つは、粒子一個一個の認識が不要なので、トレーサ粒子の選択の幅が広いことである(表2参照)。それでも濃度に関する空間情報を的確に把握できることが成否の鍵であり、可視化技術によるところは大である。最大の問題点は時間的・空間的濃度パターンの対応であり、いわゆる過誤ベクトルの問題は避けられない。

### 5.1 過誤ベクトル

相関法の原理は極めて簡単であるが、相関係数が最大となる位置が必ずしも対応する正しいデータとは限らず、対応の誤った過誤ベクトルの可能性もある。流れの状態や画像の質などが原因として挙げられる。相関法は、基本的には流れの変化が大きくなく、着目する点の近傍で流れが平行に移動することを前提としており、流れにせん断ひずみや回転あるいは乱れなどがある場合には濃度パターンが変形して類似性が崩れ、相関係数は低下する。その結果、過誤ベクトル出現の可能性が高くなる。他方、乱れ強さの増大と相関係数の単調減少との関係を用いた乱れ強さの推定法が提唱されている<sup>(30)</sup>。

濃度パターン解析法はパターン認識を前提としているので、相関マトリックス内の濃度情報にはなんらかの特徴があることが必要となる。すなわち、濃度に関して空間波数が高いこと(濃度パターンの緻密さとランダム性)が重要である。はじめから相関マトリッ

ス内にトレーサが存在しない場合は別にして、トレーサがあっても輝度が十分でない場合には、画像間演算処理などによる画質改善は過誤ベクトルの減少に効果的である<sup>(29)</sup>。また、ノイズを除去したり弱めたりする平滑化による画質改善処理も有効と思われる。

原理的に過誤ベクトルを零にするのは困難である。過誤ベクトルか正しいベクトルかを判定する方法として、ある点における速度ベクトルの先端が、その周辺8格子点(速度ベクトル計算格子で画素ではない)における速度ベクトルの先端が形成する8角形の中に入っているかないかを判定する8近傍判定法が提唱されており<sup>(24)(28)(34)</sup>、入っていない場合には棄却、平滑化あるいは再処理を行う。またニューラルネットワークを用いることにより速度場全体から過誤ベクトルを判定する方法が提唱されており<sup>(43)</sup>、この方法はさらに三次元流れ場にも適用されている<sup>(40)</sup>。

### 5.2 相関マトリックスの大きさ

相関法を適用する場合、相関マトリックスの大きさの選定が問題となる。相関法で得られる速度ベクトルは相関マトリックス内の平均値であるから、空間分解能を向上するためには相関マトリックスが小さいことが望ましい。しかし、小さすぎる場合には濃度パターン情報が不足し、過誤ベクトルが生じやすいし、一方大きすぎる場合には流れの変化の様子をうまく捉えられなくなる。通常、相関マトリックスの大きさ  $n$  の値は試行錯誤で選定されており一般性はない。表2中の  $n$  の値は一応の目安となるが、実際には流れの状態に応じてマトリックスの大きさを選定する必要が生じる。また過誤ベクトルと判断される場合には相関マトリックスを大きく取り直す方法があるが、その分空間分解能は低下する。

### 5.3 時間・空間分解能

通常のビデオカメラでは30コマ/秒と一定であるの



で、対象となる流速範囲は限られる(表2参照)。また非定常流れ計測に適しているとはいえ、基本的には30 Hz以下(実際には5-6Hz程度)の変動に限られる。いずれも時間分解能の問題であるから、高速流あるいは高周波数の変動流に対しては高速ビデオカメラ<sup>(37)</sup>が必要となる。しかし高価である。他方、極低速の場合にはコマを落すことによって時間間隔を大きくできるので相関法の適用に問題はない。

例えばトレーサが10画素移動する( $m > 21$ )としても速度分解能は10%程度であるから、速度精度は必ずしも高いとは言えない。今後、不確かさ解析<sup>(24)</sup>も必要である。空間分解能を向上させるには画像処理ボード分解能の向上ならびに接写やズームによる拡大撮影なども効果的である。ただし、ビデオの走査線の数は一定であり、あまりボードによって空間分解能を高めてもノイズによる濃度むらが見れることになる。また空間分解能が高い時空間微分法は微分計算を必要とするのでノイズに弱くスムージング処理などを必要とする。もっとも過誤ベクトルの判断が容易となり重大な過ちは少なくなる<sup>(41)</sup>。

流れの速度変動を相関法で求めLDV計測結果と比較した例では両者良い一致を示しており<sup>(27)</sup>、低周波数域での相関法の適用は十分信頼できることを示している。

#### 5. 4 計算時間

相関マトリックス法はアルゴリズムは簡単でプログラミングもそれほど難しくないが、計算処理時間が膨大である。通常ワークステーションクラス以上の大容量・高速処理の計算機が必要である。一方、コストパフォーマンスの観点より、画像処理部分はパソコンに任せて、得られた画像データをワークステーションに転送して解析する方法もあるが、データの転送時間も無視できない。ハード面では、ワークステーションの高速高性能化・低価格化やパソコンの高速処理化などの急速な変化があり一概にどのシステムが最適かなどはいえないが、例えば、パソコンとDSPを組み合わせた方法も利用されている<sup>(27)</sup>。ソフト面では高速処理が可能で解析法やアルゴリズムの開発が望まれる。いずれの解析法においても現段階ではリアルタイム処理は不可能であるから、画像処理から出力まで総合的なシステム構築が大切であろう。

## 6. おわりに

時間・空間分解能の限度より対象となる流れ場は限定されるが、2枚の可視化画像から同一時刻における複数の点で速度ベクトルが求まることは魅力的である。また、流れの方向に応じてシート光を照射しなければならないので、可視化法には工夫を要するし実機への適用も容易ではない。それでも、逆流を含む複雑な流れの空間構造解析、流れ構造の非定常計測、三次元流れへの拡張など魅力も多い。要は、可視化法、画像処理法、濃度パターン解析法のそれぞれの原理や特徴を十分に理解し、それらの特徴を生かした適用が大切である。今後、技術の発展とともに、ハードおよびソフトの両面からさらに高精度化、高速処理化、実用化などが期待できる。

画像解析については、総合理工学研究科熱エネルギーシステム工学専攻の筒井 斉君(現東芝エンジニアリング)および荒巻森一朗君(修士2年)の協力を得た。なお、ここで用いたVTR画像は山口道照氏(平成3年3月退官)の撮影によるものである。また、本研究の一部は平成5年度財団法人原田記念財団研究助成金の援助を受けた。ここに記して謝意を表す。

## 参考文献

- (1) Fowler, H. S., The Distribution and Stability of Flow in a Rotating Channel, ASME J. Eng. Power, 90-3 (1968), 229.
- (2) 速水, 流体機械羽根車内部流れの計測, 機械の研究, 38-10 (1986), 1117.
- (3) Wisler, D. C., Mossey, P. W., Gas Velocity Measurements within a Compressor Rotor Passage Using the Laser Doppler Velocimeter, ASME J. Eng. Power, 95-2 (1973), 91.
- (4) Schodl, R., A Laser Dual-Beam Method for Flow Measurement in Turbo Machines, ASME Paper, 74-GT-157 (1974).
- (5) Eckardt, D., Detailed Flow Investigation within a High-speed Centrifugal Compressor Impeller, ASME J. Fluids Eng., 98-3 (1976), 390.
- (6) 速水, レーザ2焦点流速計の特性と適用例, 機械の研究, 42-5 (1990), 565および42-6 (1990), 143.
- (7) 妹尾・山口, 染料による羽根車内部流れの観察, ターボ機械, 3-3 (1975-5), 668.
- (8) 中山, 回転羽根車内の流れの可視化, ターボ機械,

- 11-3 (1983), 173.
- (9)中山・山本・青木・太田, 遠心送風機羽根車内の相対速度分布の測定, 日本機械学会論文集, 51-461 (1985), 325.
- (10)山本・青木・太田・中山, ターボ機械の内部流れの可視化, 流れの可視化, 2-Suppl (1982), 19.
- (11)大木・吉永・堤, 回転している遠心羽根車内の流れ, 流れの可視化, 3-11 (1983), 230.
- (12)妹尾・山口・西, 遠心圧縮機三次元流れの写真による研究, 日本機械学会誌, 70-578 (1967), 365.
- (13)山口・速水, ポンプ水車羽根車内流れの可視化におけるVTRの利用, 可視化情報, 10-Suppl. 1 (1990), 143; 速水・山口, 水車の不安定領域におけるタンデム型羽根車内流れ, 可視化情報, 10 Suppl-1 (1990), 147.
- (14)小林・佐々木・石原・佐賀・上村, 可視化技術と画像処理技術の円柱まわりの流れの適用, 流れの可視化, 2-Suppl (1982), 41.
- (15)小林・佐賀・瀬川, 二次元流れ場の実時間画像計測の一例, 流れの可視化, 7-26 (1987), 289.
- (16)渡辺・加賀・井上・山口・吉川, VTRを用いたトレーサ追跡による流れ場の計測—二次元計測—, 流れの可視化, 7-26 (1987), 301.
- (17)小林・佐賀・瀬川, 画像処理による速度場自動計測とトレーサ粒子の追跡法, 流れの可視化, 8-30 (1988), 301.
- (18)小林・佐賀・瀬川・唐司, 逆流を含む二次元流れ場の画像処理システム, 流れの可視化, 5-17 (1985), 129.
- (19)笠木・平田・西野・二宮・小泉, 画像処理による流れ場の三次元計測, 流れの可視化, 7-26 (1987), 283.
- (20)植村・山本・幸川, 2値化相関法—粒子追跡法の高速度画像解析アルゴリズム, 可視化情報, 10-38 (1990), 58.
- (21)木村, 画像相関でなぜ速度が測れるか—パターン相関法—, 第3回手法別講習会教材, 可視化情報学会 (1992), 4.
- (22)篁, トレーサ画像の相関処理による流速計測, 流れの可視化, 3-10 (1983), 189-192.
- (23)木村・高森・井上, 相関を利用した流れの画像計測—非定常流れへの適用, 流れの可視化, 6-22 (1986), 269. [表2のNo. 1]
- (24)木村・木村・高森, 相関を利用した流れの画像計測—過誤の速度ベクトルの補正処理, 流れの可視化, 7-26 (1987), 297. [表2のNo. 1]
- (25)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—円柱後流の変動渦への適用, 計測自動制御学会論文集, 23-2 (1987), 101-107. [表2のNo. 1]
- (26)大場・石原・猪岡, 相関法を用いた二次元速度分布計測における過誤のベクトルの補正, 流れの可視化, 9-33 (1989), 145. [表2のNo. 2]
- (27)榊原・高田・小林・菱田・前田, 相関法による円管内温度成層流の二次元・時系列計測, 可視化情報, 11, Suppl. 1 (1991), 157-160. [表2のNo. 3]
- (28)木村・小澤・真鍋・竹中, 高森, 感温液晶を用いた温度場と速度場の同時計測, 計測自動制御学会論文集, 27-8 (1991), 870. [表2のNo. 4]
- (29)速水・陳・高曾・王, 画像処理法によるポンプ水車羽根車内流れ計測, 日本機械学会講演論文集, 920-17 (1992), 167; 日本機械学会論文集, 59-567 (1993), 3524; 羽根車内流れ計測への画像処理法の適用, 日本機械学会講演論文集, 920-68 (1992), 325. [表2のNo. 5]
- (30)塩路・紀本・岡本・池上, 画像処理によるディーゼル火炎の解析, 日本機械学会論文集, 54-504, B (1988), 12. [表2のNo. 6]
- (31)奥野, フーリエ変換を利用した画像解析による流場の画像計測, 関西造船協会誌, 208 (1988), 61. [表2のNo. 7]
- (32)奥野・阪本, 可視化画像のフーリエ変換による流場計測, 関西造船協会誌, 214 (1990), 49. [表2のNo. 8]
- (33)奥野, フーリエ変換法, 第3回手法別講習会教材, 可視化情報学会 (1992), 24.
- (34)幸・井上・加賀・山口・吉川, 簡易相関処理による煙可視化像からの気流速度の計測, 流れの可視化, 8-30 (1988), 293. [表2のNo. 9]
- (35)加賀, 輝度差の累積法 (パターン相関のバリエーション), 第3回手法別講習会教材, 可視化情報学会 (1992), 18. [表2のNo. 10]
- (36)加賀・井上・山口, 気流分布の画像計測のためのパターン追跡アルゴリズム, 可視化情報, 14-53 (1994), 108.
- (37)犬丸・原・浜松・安部, 高速VTRによる速度計測手法の開発, 流れの可視化, 9-34 (1989), 389. [表2のNo. 11]

#### 濃度パターン画像解析法

- (38)山田・小倉・三池・古賀・橋本・大坂, 時空間相関による円柱周りの速度場の画像計測, 日本機械学会講演論文集, 920-68 (1992), 304. [表2のNo. 12]
- (39)木村・河野・高森, 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, 27-5 (1991), 497. [表2のNo. 13]
- (40)木村・坂東, 時空間相関法を用いた流れ場の三次元速度ベクトル分布計測に関する研究, 日本機械学会講演論文集, 920-68 (1992), 313. [表2のNo. 14]
- (41)奥野・中岡, 可視化画像の時空間微分を利用した流れ場の画像計測, 関西造船協会誌, 215(1991), 69. 表2のNo. 15]
- (42)西尾, 時空間微分法の原理とその応用例, 第3回手法別講習会教材, 可視化情報学会 (1992), 66.
- (43)木村・山下・黒江, ニューラルネットワークによる過誤ベクトルの判定, 日本機械学会講演論文集, 920-68 (1992), 310.