



技術解説

画像解析による流場計測

鈴木敏夫*

1. はじめに

流れ場を計測することは余り簡単ではないと言うと多くの方々からお叱りを受けるかも知れない。事実橋の上から流れを見ても簡単に分かるではないか、天気図でも風速が分かっているし、海峡の潮の流れも分かっている。また、実験室では日常茶飯事として計測を行っている。しかしもう一度考えてみると、水や空気のように直接見ることはできないものをどうして測るのかという問題に気付く。そこで、ゴミや微小粒子を混入して流れの見える状態にしたり（流れの可視化）、速度を検出するための装置（検出器）を置く必要がある。つまり初めの川の問題はゴミの動きを見ながら早さを読んでいるのであり、風速、潮流等は検出器による点の計測である。言い替えると、前者ではゴミの数が多ければ水面全体の速度分布を知ることが出来るが、後者では検出器の数に制限があり同時に全体を知ることができない。このように可視化された流場の画像解析による計測法は検出器による計測法とは基本的に異なるところがある。つまり同一時間に広い範囲を同時計測できるという点である。ここでは流れの可視化学会（本年4月より（社）可視化情報学会と改名）において多用されている画像解析による流場計測法の概略を述べる。

2. 流場の画像計測

流れの中に混入された微小粒子（トレーサ）により流れを可視化し、さらにトレーサ粒子の動きを画像処理することにより流れの速度場を定量

的に測定する方法は種々提案されている¹⁾⁻²⁾

その主なものは、

- 1) 個々のトレーサ粒子の動きを時間と共に追跡する方法（粒子追跡法）
- 2) 比較的長時間露光された間に動いたトレーサ粒子像（流跡線という）の長さから速度ベクトルを求める方法。（流跡線追跡法）
- 3) 適当な時間差をおいた2枚以上の画像において、粒子または粒子群の移動距離と方向をそれらの図の相関から求める方法。（相関法）
- 4) 微少時間内での2重または多重露光写真より光の干渉やフーリエ変換等を利用して移動距離と方向を求める方法（スペックル写真法フーリエ変換法）等である。

なお、ここで用いられるトレーサ粒子の大きさは場合により大小様々で、ミルクや墨汁のように目視で粒子を判別できない数 μmm のものから1mm以上数センチまでいろいろある。

また、可視化された画像にも2種類ある。その1は、流跡線と言われ適当な大きさの粒子が流れに乗って移動した軌跡を示すものである（図1）。これは川の表面のゴミを少し長いシャッター速度で写した写真の画像に相当する。他の1つは、流脈線と言われある一定の点から連続的

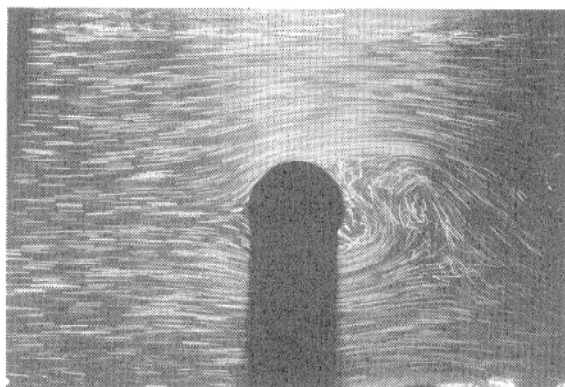


図1 流れの可視化写真(流跡線)

*鈴木敏夫(Toshio SUZUKI), 大阪大学工学部, 船舶海洋工学科, 教授, 工学博士, 造船学

に放出された色素等が空間に描く線で、煙突の煙などが対応する。両者とも流れの場を可視化したものとしてよく利用されるが、その違いについては注意が必要である。画像計測には流跡線がよく用いられる。

これらとは別に、流場を表すものとして流線がある。これはある時間に於ける速度の方向を連ねたもので、可視化写真とは一致するときと一致しないときがある。流れが時間的に変化しなければ3者は一致するが、時間的に変動しているときは一致しない。

また、流れは3次元であることが多いが、可視化写真ではある断面内をスリット光線で照らし面内の流れを取り込むことが多い。2台以上のカメラを用い3次元の流速ベクトルを求める手法^{3),4)}も開発されているがここでは2次元の解析法を主体に解説する。

2.1 粒子追跡法

流れの中にある粒子やゴミの動きを時々刻々追跡しその移動量と方向を知れば簡単に速度が求められるはずである。しかし、機械にはランダムに分布し移動する粒子の動きを一つずつ対

応をつけながら追跡するのは大変難しいようである。図2は疎らな粒子密度の場合について篁⁵⁾が行った結果である。ここでは簡単な流れ以外への応用は難しいと述べているが、その後、笠木ら³⁾、西野ら⁴⁾はカメラを2~3台設置して粒子密度の高い場合について3次元流場の解析に応用し、乱動を含め有用なデータを得ている。また、小村ら⁶⁾は実船のプロペラ直前の流場計測にも応用を試みている。コンピュータ並びに解析手法の発展には目を見張られるものがある。

2.2 流跡線追跡法

適当な時間露光した流跡線写真(図1)から流跡線の長さや方向を求めると、その点に於ける速度ベクトルを求めることが出来る。原理的には写真を引き延ばし物差しと分度器で距離と方向を計り計算すればよい。少し慣れると直感的に速度分布を知ることは容易であるが、これを計算機に代行させるにはいろいろ問題が生じる。太さのある流跡線写真から粒子の径を差し引いた両端を求めるところに種々の工夫がなされている。特に流跡線が一部重なったりした場合の分離など人間には易しいが機械にはなかなか難しい。植村⁷⁾はデジタイザを用い人間が入力した。小林ら⁸⁾はかなり大きな計算機システムを用い複数の写真から流跡線の始点と終点を判別し、逆流域にも適用出来るようにしている。原画像と解析結果の1例を図3, 4に示す。また、茂里ら⁹⁾はこの手法を拡張して3次元流場への適用を考えている。

通常解析法では流跡線を1本ずつ分離し両端を求めているが、平工ら¹⁰⁾は流跡線の分離を行わずに長さや方向を求める手法を示した。この手法については最後に少し詳しく述べる。

2.3 相関法

ランダムな形状の雲の衛星写真などにおいて少し時間差のある2枚の画像を比較すると部分的に雲の動いた距離が分かる。これは2枚の画像のある部分を考えたときにその間に強い相関(相互相関)があることを示している。篁¹¹⁾はこの考えを多数のトレーサ粒子を含む画像に適用した。つまり、1枚目の画像をいくつかの小領域に分けその領域内の濃度分布が2枚目の

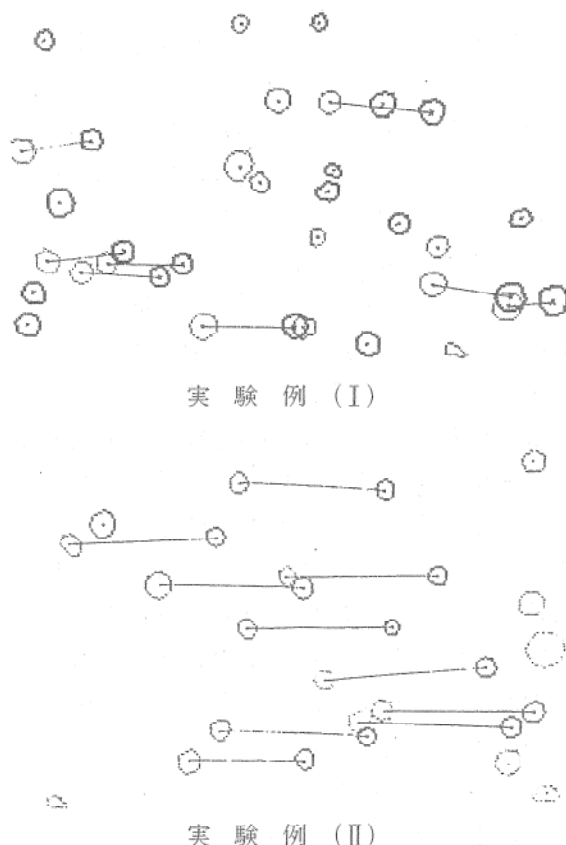


図2 粒子追跡法解析結果(篁⁵⁾)

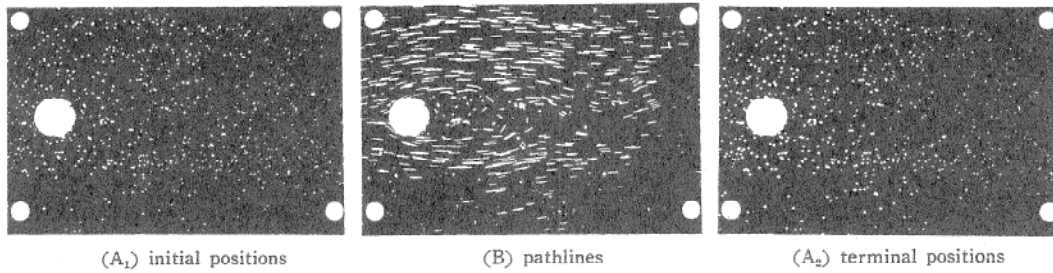


図3 流跡線解析用写真(小林ほか⁸⁾)

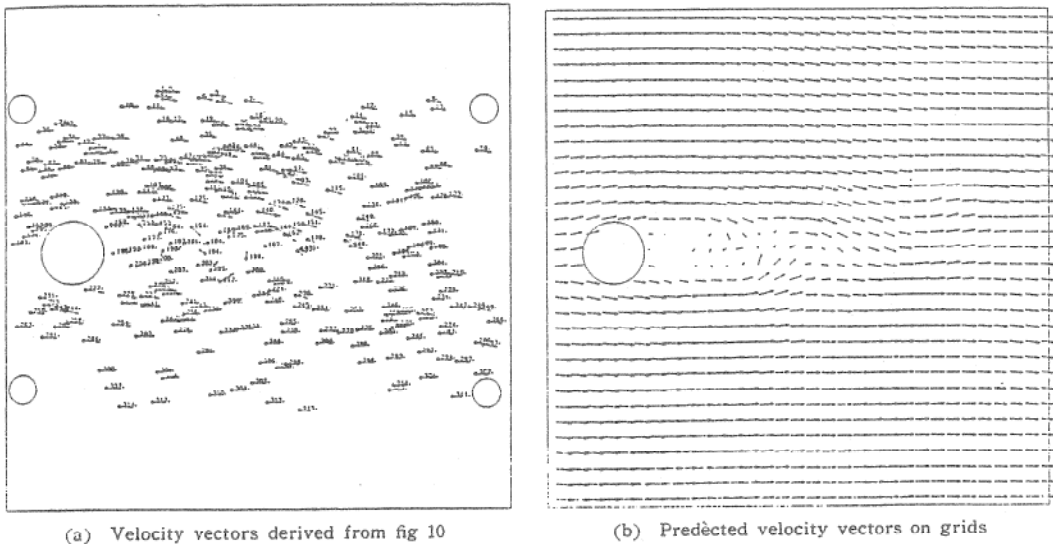


図4 流跡線解析結果(小林ほか⁸⁾)

画像のどの辺りと相関が強いかを調べ移動距離と方向を算出した。この方法の特色は、個々の粒子や軌跡を追跡せずに粒子による画像をパターンとして捕らえその動きから移動距離等を求めるところにある。計測の分解能は余り小さく出来ないが解析のアルゴリズムが簡単であり、逆流域にも適用できるなど利点が多いため数多く利用されている。植村ら^{12, 13)}は粒子による画像を2値化すると相関係数の計算を簡略化出来ることを示し、パーソナル計算機でも実時間解析の出来ることを示している。

2.4 フーリエ変換法

画像パターンの変化を相関関数により表現できると言うことは数学的にみるとフーリエ変換によっても表現できることを示している。奥野¹⁴⁾はこの手法を流場計測に適用した。この方法も画像の濃度分布を利用するため粒子ひとつひとつが鮮明に写っている必要はない。解析時間は相関法等に比べかなり長くなるが、空間周波数フィルターの適用や乱動解析等種々の可能性が考えられ、興味ある手法の1つである。

2.5 時空間微分法

時間差のある2枚の画像から速度を求めるもう一つの手法に時空間微分法がある。この手法は元々TV画面上の微小移動の検出に用いられ、吹抜¹⁵⁾、安藤¹⁶⁾によって流場計測の応用が試みられている。この手法の原理は次のようである。いま、微小時間 δt の間隔で2枚の画像が得られたとする。このとき2枚の画像間のずれが小さいとして、写真の濃度分布関数をテイラー展開すると2枚の画像の差が1枚の画像の空間的偏微分係数と時間差 δt を係数とし、速度 u, v を未知数とする線形方程式として表される。従って最小2点のデータがあれば u, v を連立方程式の解として求めることが出来る。しかし、画像の微分値と差を用いるため、雑音の影響を受け易い。安藤¹⁶⁾はある程度の大きさをもつ領域の画像データを用い、最小2乗法を適用する実用的な手法を開発した。

2.6 レーザスペckル写真法

この手法はレーザで照射された物体または懸濁液による反射光が、照射面の微妙な凹凸によ

り干渉して描くスペックル模様といわれる斑点模様を積極的に利用するものである。微小時間差を置いて2重写しされたスペックル模様は一種の干渉格子と考えられ、レーザ光を当てるとこの干渉格子の間隔に反比例した干渉縞（ヤング縞）が表れることを利用する。

この手法を流場計測に応用した例^{17,18)}もあるが、高出力のレーザ光源が必要とされるなど手軽に使える技術にはなっていない。奥野が回転円盤について試験的に行った結果を図5に示す。他方、微小粒子の像を疑似的なスペックル模様と考えることが可能な場合はPIV (Particle Imaging Velocimetry) と呼ばれる実用的な流場計測法が確立されている。川橋¹⁹⁾らは、光源にストロボ光を用いるいわゆる白色光スペックル写真法を開発した。切田²⁰⁾はPIVにおけるヤング縞の高速解析法を開発し、ほぼ実時間の解析を可能にした。

2.7 流跡線の非分離解析法

2.2で述べたように一般に流跡線の長さを求めるには適当な画像処理により流跡線の前後端を見付け、その長さを測定する必要がある。ここでは1つ1つの流跡線を分離することなくその速度場を求める手法について述べる¹⁹⁾

1) トレーサの移動方向について

図6(a)に示すような一定時間内に移動したトレーサの流跡線写真よりそのトレーサの移動方

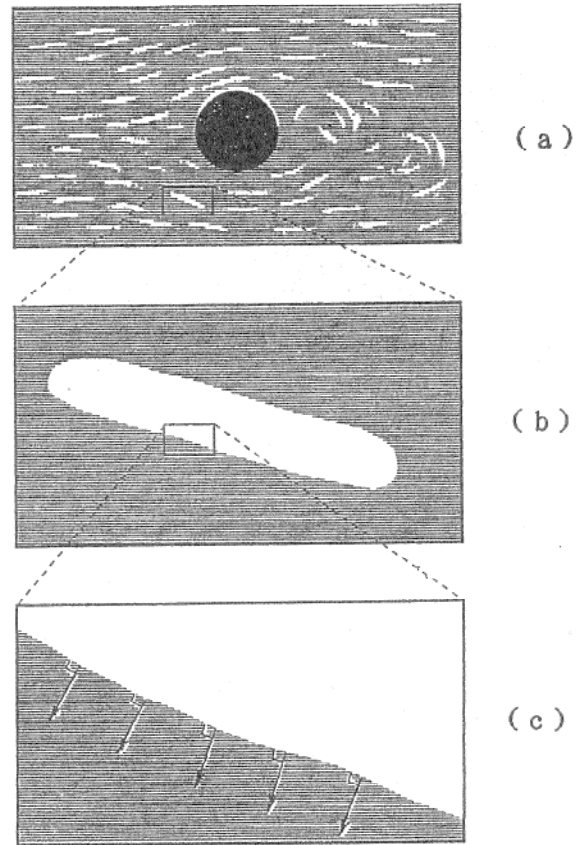


図6 流跡線輝度勾配ベクトル概念図

向を算出する。まず、流跡線写真の輝度分布の勾配ベクトル (\vec{g} と書く) を考える。このとき \vec{g} は図6(c)のように流跡線の輪郭上で大きな値を持ちその方向はトレーサの移動方向に垂直である。

したがって、適当な領域を考えその空間的平均値を考えると、その垂直方向がトレーサの移動方向であると考えられる。しかし図6(b)のように流跡線全体を考えると、 \vec{g} は流跡線平行部の両側で逆の方向を示し、その平均は意味をもたなくなる。そこで \vec{g} を絶対値 r と方向 θ で表し、さらに方向 θ を2倍した ($\lambda = 2\theta$ とする) ベクトル \vec{h} を考える。このとき、 θ で180度離れた方向は λ では方向となるため、 \vec{g} では逆方向であった流跡線の平行部に沿った輝度勾配ベクトルが \vec{h} では同方向となる。その空間的平均ベクトル \vec{h} を考えると、絶対値の平均 \bar{r} と方向の平均値 $\bar{\theta} = 0.5\lambda$ が得られる。

この $\bar{\theta}$ を θ の平均値、 \bar{r} を平均輝度勾配とする。このようなベクトル \vec{h} を考えることにより、もとのベクトル \vec{g} では反対方向 (180度) を向い

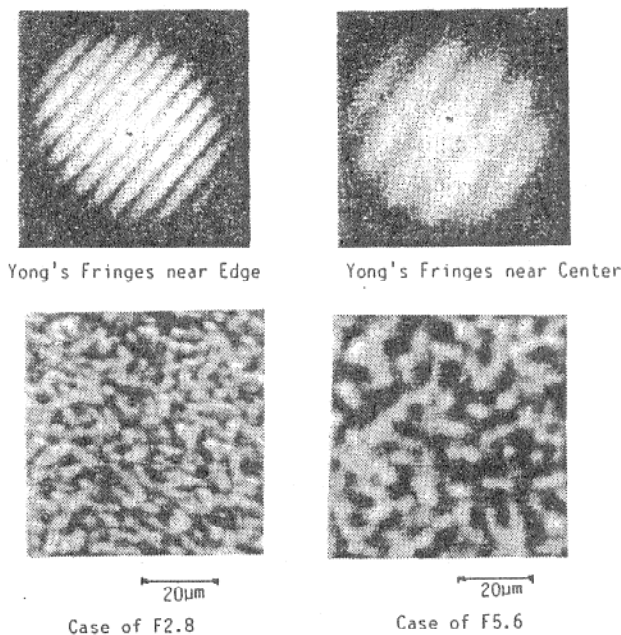


図5 スペックル写真法 (奥野¹⁸⁾)

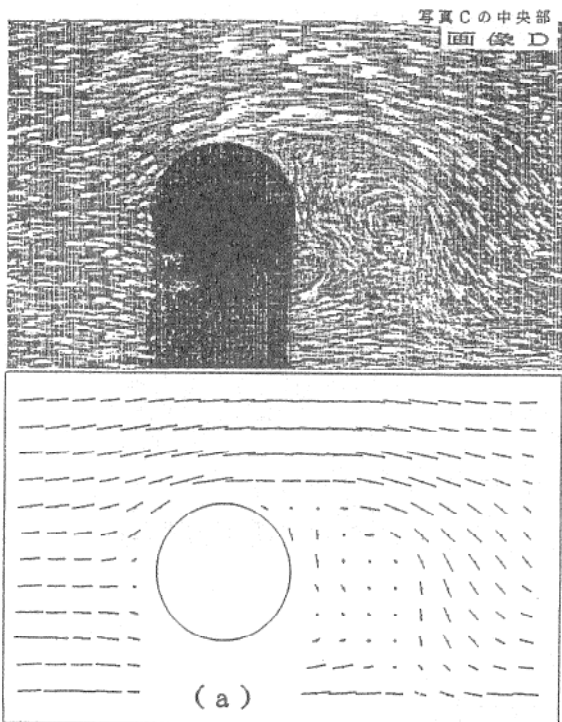


図7 円柱周りの流場解析結果(平工¹⁰⁾)

ていたものが強調し合い、垂直方向(90度)のベクトルは打ち消し合うことになる。したがって停止した球形のトレーサ画像や流跡線の両端部分の輝度勾配ベクトルは打ち消し合い、トレーサが移動した平行部分の輝度勾配ベクトルの平均値のみが残り、その移動方向を決定することができる。

また、流跡線が重なったような場合でも、輝度の加算が行われている場合は、その移動方向を決定できる。

2) トレーサの移動距離について

次にトレーサの移動距離を算出する手法を示す。各点の輝度勾配の絶対値 r の適当な領域内(画素数 n)での単純な和 Σr を用い、次のような無次元数 \tilde{r} を定義する。

$$\tilde{r} = \frac{n \cdot \bar{r}}{\Sigma r} \quad (2.1)$$

このとき、 r は流跡線の輪郭上で値を持つので、 Σr は流跡線の周長さに比例し、 \bar{r} は流跡線の平行部の長さに比例している。

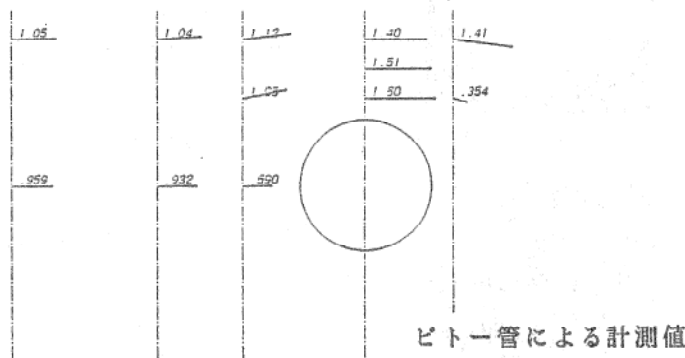
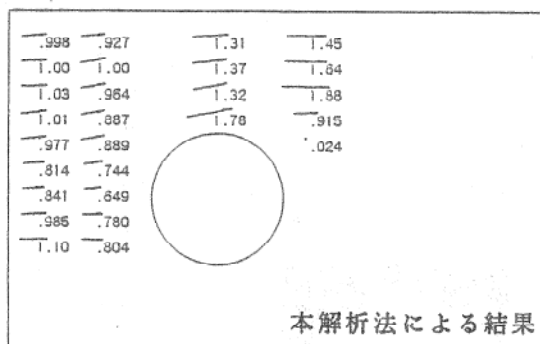


図8 円柱周りの流場解析結果(平工¹⁰⁾)(ピトー管計測値との比較)

従って一様流における \tilde{r} を \tilde{r}_0 、任意の点における \tilde{r} を \tilde{r}_x とすると、その点における無次元速度 \tilde{u} は次式のように求まる。

$$\tilde{u} = \frac{\tilde{r}_x}{\tilde{r}_0} \cdot \frac{1 - \tilde{r}_0}{1 - \tilde{r}_x} \quad (2.2)$$

3) 計測結果

まず一様流について計測を行った。一様流中の各点で求めた流速は、平均化領域として 31×31 画素の領域を抽出した場合は7%程度の標準偏差が現れているが、 51×51 画素では5%以下となり、さらに 81×81 画素を抽出した場合は、2%以下という値が得られている。ほぼ満足できる結果である。

図7の画像(D)はシャッタースピード1/125、一様流速0.523m/secの中に置かれた円柱回りの流場可視化写真を 320×200 画素、256階調で取り込んだものである。

図7(a)は流速ベクトルによる表示である。一様流速を・と・の間の長さで等しく表示している。但し、本解析法では流れの方向は得られないため、矢印はつけていない。なお、平均化のための領域は 31×31 画素である。

図8(a, b)は円柱回りの流場のピトー管による測定値と本解析法による結果との比較である。a, b両図の比較によると、本解析法による結果は10%程低目の値を示しているが、かなり信頼性の高い値が得られたものと考えられる。

最後に、円柱後方の非定常流れを連続的に写した写真の解析結果を図9に示す。これらの図のみからでは、流場が正しく計測されているか否かは明らかでないが、定性的にはかなり信頼できるものと考えられる。

3. 結 び

画像処理による流体計測法は、流れの可視化により流れ場全体を直感的に知ることができると共に定量的な計測が可能であるため、今後ますます利用する機会が増加する分野と思われる。この拙文が会員各位の画像解析による流場計測法についての興味を引き出す一助となれば幸いである。

参 考 文 献

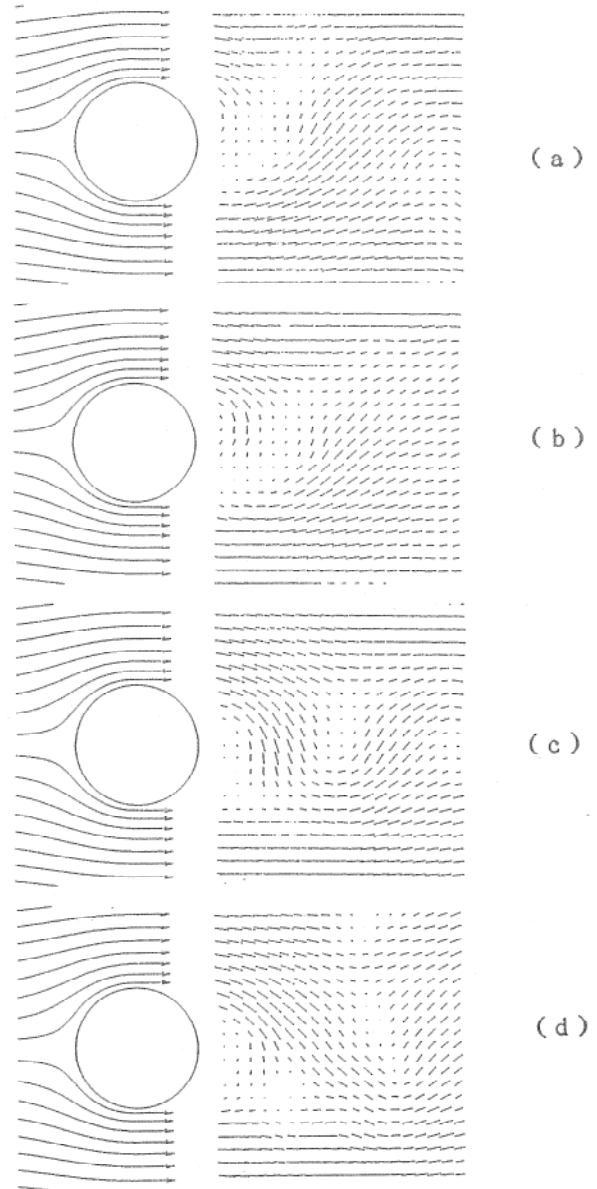


図9 円柱周りの流場解析結果(平工¹⁰⁾)
(連続写真解析結果)

- 1) 近江和生, 小林敏雄ほか: 流れの可視化と画像処理(展望, 論説), 流れの可視化, Vol. 6, No. 20, 1986.
- 2) 奥野武俊: 画像解析による流場計測(論説), 関西造船協会誌, 第210号, 昭和63.9
- 3) 笠木伸英ほか: 画像処理による流れの3次元計測, 流れの可視化, Vol. 7, No. 26, 1987.
- 4) 西野耕一ほか: 画像処理に基づく乱流3次元計測システムの開発, 流れの可視化, Vol. 8, No.30, 1988.
- 5) 篁 源亮: 画像処理の水路流速計測への応用, 流れの可視化, Vol. 2, Suppl, 1982.
- 6) 小村隆士ほか: 多点TV撮影による流速計測法に関する研究—第1報, 空気中での実験—, 日本造船学

- 会論文集, 第162号, 1987.
- 7) 植村知正: 画像処理の実際例, 流体計測とデータ処理に関するシンポジウム, 流れの計測懇談会, 1981.
 - 8) 小林敏雄ほか: 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.
 - 9) 茂里一紘ほか: 流れの可視化と画像処理を用いた流場の同時多量計測法の開発, 日本造船学会論文集, 第162号, 1987.
 - 10) 平工良三, 鈴木敏夫: トレーサ画像による流測計測の一手法, (第2報), 関西造船協会 平成2年度春季講演会発表予定, 1990. 5.
 - 11) 笹 源亮: トレーサ画像の相関処理による流速計測, 流れの可視化, Vol. 3, No. 10, 1983.
 - 12) 植村知正ほか: 速度分布測定のための流れの可視化画像の高速処理法の開発, 流れの可視化, Vol. 7, Suppl. 1987.
 - 13) 植村知正, 長谷川泰章: 画像相関を利用した2次元流れ場の準実時間計測法の開発, 流れの可視化, Vol. 8, No. 30, 1988.
 - 14) 奥野武俊: 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, No. 208, 1988.
 - 15) 吹抜敬彦: 画像信号による動物体の移動量—速度の測定—, 信学技報, No. IE78—67, 1978.
 - 16) 安藤 繁: 画像の時空間微分計算法を用いた速度ベクトル分布計測システム, 計測自動制御学会論文集, Vol. 22, No. 12, 1986.
 - 17) Arnold, W., et al.: Analysis of Nonstationary Flows by Evaluating the Fringe Visibility in Speckle Velocimetry, Proceedings of the 4th Int. Symp. on Flow Vis., 1986.
 - 18) 奥野武俊ほか: レーザスベック写真法による流速計測法について, 関西造船協会誌, No.210,1988.
 - 19) 川橋正昭ほか: 白色光スベックル写真法による流速分布計測, 流れの可視化, Vol.2, No.6, 1982.
 - 20) 切田 篤: Particle Image Velocimetryによる流速分布測定, 関西造船協会誌, 第210号, 1988.

