可視化の画像の数値的处理*

(続報, 画像処理技術を適用した非定常静圧分布の測定)

近江和生*¹, 今市憲作*²Numerical Processing of Flow Visualization Pictures
(2nd Report, Digital Image Processing Applied to
the Measurement of Unsteady Pressure Fields)

Kazuo OHMI and Kensaku IMAICHI

The digital image processing technique is applied to quantify flow visualization pictures showing unsteady 2-D wakes past a circular cylinder at $Re=100$. A combined use of suitable image input devices and newly developed computer programs makes it possible to automatically obtain instantaneous velocity fields from the corresponding streak line photographs. The resulting local velocity vectors are rearranged as Cartesian mesh points with a view to facilitating the following numerical processing. The estimation of the unsteady pressure field is done through iterating finite-difference calculation of 2-D Navier-Stokes equations, in which the unsteady terms are estimated from 3 slightly delayed continuous photographs. It turns out that the order of the unsteady terms is often larger than that of the viscous terms, or even of the inertial terms, in vortical regions, and that the introduction of the unsteady terms brings remarkable improvement in the precision of the pressure calculation.

Key Words: Flow Visualization, 2-D Flow, Streak Line Photograph, Digital Image Processing, Unsteady Pressure Field

1. 緒 言

流跡線法による流れの可視化写真の画像処理、ならびに定量結果の数値的处理について、筆者らはすでに前報⁽¹⁾でその基本的な考え方を報告した。同報で残された検討課題として、画像処理の範域では、可視化画像の自動読取りとそれに付随する画像処理ソフトウェアの開発、数値処理の領域では、基礎式における非定常項の評価があげられる。このうち前者の問題については、その後、筆者ら^{(2)・(3)}を始め多くの研究成果が発表されて、有効性の高いアルゴリズムが次第に確立されつつあり、さらに最近ではVTR等の瞬時画像記録装置を利用した、トレーサ粒子の逐時追跡による速度場のラグランジュ的な測定も試みられている^{(4)・(5)}。これに対して、後者の問題は前者における技術的発展の帰結的目標として重要な意義を持つにもかかわらず、実際の適用例は極めて少ない。

そこで本報では、これら二つの問題に対処すべく、筆者ら自身の方法論による処理手順を新たに開発し、二次元円柱後流に関する具体的な処理例をあげながら、その有効性の確認を試みる。ここで前者の問題に対する筆者らの立場は原則として、有限露出時間の流跡線写真を自動処理して準瞬時の速度場を得ることが目標であり、後者の問題については、運動方程式の非定常項を考慮することで、圧力分布の数値評価を適正化することが目的である。一般に圧力変換器等を用いた直接測定法では、低レイノルズ数の非定常流れにおける瞬時静圧分布を、二次元・三次元の場の形で評価するには困難を伴うが、本報に示す処理はそれに対する有効な解決法の一つと考えられる。

2. 実験装置と画像処理

2.1 流れの可視化 可視化の実験は前報⁽¹⁾で述べた、大阪大学基礎工学部機械工学科のえい航式水槽(250×30×30 cm³)を使用して行った。直径 20 mm のアクリル製円柱をレイノルズ数 100 でえい航し、背後に形成されるカルマン型のうず流れを流跡線法に

* 平成元年 4 月 5 日 第 66 期通常総会講演会において講演、原稿受付 昭和 63 年 9 月 12 日。

*¹ 大阪大学言語文化部 (〒560 豊中市待兼山 1-1)。

*² (株)大阪補機製作所 (〒553 大阪市福島区福島 6-2-6)。

(a) 流跡線写真

(b) 二値化画像

図1 二次元円柱後流の可視化の例 (円柱直径 20 mm, 主流速度 4.38 mm/s, レイノルズ数 100)

図2 画像処理における処理の流れ

より可視化し、その進展の模様を写真撮影した。使用したトレーサは、前報と同様アルミニウムの箔製粉末 (最大径 10~30 μm 程度) で、数回の選別・分留のち水中に懸濁した。照明は水槽内に厚さ 5 mm の強力な平面光を導入して行い、円柱のスパン中央部の垂直断面を二次元的に光切断した。撮影は円柱とともに移動する 35mm スチール・カメラで行い、適当な露光時間により準定常の流跡線画像を得た。

2.2 画像の計算機入力 流跡線の可視化写真をデジタル画像処理して、流れの速度場を自動化された手順により求めた。今回の処理の概要は、画像の入力部分をパソコンで、画像処理の主部ならびに結果の出力を汎用大型計算機で行うものである。

画像入力装置は、自走式イメージ・スキャナを接続した 8 ビットパソコン (FM-8) であり、画素の濃淡を 256 階調で読み取ることができる。入力用の画像は四切印画紙にプリントした写真の陽画であり、それを縦横両方向とも 1 mm あたり 5 本の線密度で走査した。設定した画素マトリクスの大きさは 1500×1110 であり、画像の記録は 1 画素あたり 8 ビットで行った。この画像データを、8 インチフロッピーを仲介にして、汎用大型計算機 (FACOM M-150F) に転送した。入力画像のコントラストや S/N 比は良好で、いわゆる画像補正用の前処理は一切行っていない。図 1 に円柱後流の可視化写真の一例と、これをイメージ・スキャナで入力し、二値化出力した結果を示す。

2.3 画像処理 画像処理主部のアルゴリズムは、文献^{(2)・(3)}で述べた筆者らの手法に一部改良を加えたもので、処理の流れを図示すると図 2 の通りになる。一連のプログラムはすべて FORTRAN 77 で書かれ、途中 4 箇所でオペレータによる対話型の処理が含まれる。図 2 中 [] を付した処理がそれに対応する。

「二値化」では、入力画像全画素の濃淡レベルをヒストグラムで表わし、その分布よりしきい値を概算した後、その前後のしきい値による二値化画像の出力を詳細に比較・検討して、最適の値を決定した。

「線素の認識」では、二値化画像のマトリクスを順次プログラムで走査して流跡線を探査した。各線素の輪郭線および内部画素をいわゆる 8 隣接点法により追跡して、全画素の座標、画素数、平均濃淡レベルを一時記憶に格納した。その際、画像マトリクスの周端部に接触する線素は、すべて不完全なものと見なして除去した。また画素数 800 以上 (円柱部分に対応)、および 4 以下 (雑音成分) の線素、ならびに円柱内部で

図3 図1の可視化画像より得られる準瞬時の速度分布

認識された線素も同様に除去した。また粘性効果の小さい一様流の領域では、写真上での実測結果に基づき、長さが主流速度の0.75倍以下の線素も除去した。

「線素の跡切れ・傷の修復」では、背景とのコントラストが小さい流跡線の、読み取り時の傷を救済するために、初回のしきい値より8レベル黒よりの第二のしきい値を設定して、上述の線素の認識を再実行した。その際、すでに認識したコントラストの高い流跡線画素は、あらかじめ背景と同じ黒レベルに変換しておいた。この手順により、初回の認識で跡切れを生じた線素の多くが修復され、輪郭の不自然な凹凸が減少した。

「重なり線素・線素片の除去」では、まず認識線素の長さおよび幅をチェックして、重なり線素を除去した。今回の例では実写真との対応により、長さが主流速度の1.25倍以上のもの、および最大幅が8画素以上のものを複数の流跡線の重なりと見なした。次に、流跡画素数の局所分布に基づくフィルタリングを行って、微妙な重なり線素や線素片を除去した。処理画像を $30 \times 23 = 690$ 個の正方格子領域に分割し、互に隣接する4個の領域内に分布する流跡線について、その画素数の統計分布から、試行錯誤的に信頼区間を設定して、それを越える線素のデータを消去した。ただしこの処理を経ても、なお3~4%の認識線素は不完全な流跡線に対応しており、これらは後述の格子点速度の補間時に、再度フィルタリングされる。

認識した流跡線の画素座標データから、最小自乗法により線素の傾きを求め、さらに線素を傾き方向と直角にスライスしてその平均幅を求めた。次に線素の総面積を平均幅で除して流跡線の長さを求め、1平均幅分の長さを差し引き、露光時間を考慮して速度を求めた。流跡の平均位置には、長さ方向の midpoint を対応させた。

図4 図3(b)に基づく格子点速度の補間

「速度ベクトルの方向設定」では、対話型処理により端末の画面上でベクトル群の方向付けを行った。グラフィック端末のCRT上に認識した速度ベクトルを表示し、オペレータの物理的判断により複数の逆流域を定め、ベクトルの正負を反転すべき領域の輪郭をグラフィックカーソルで描いていく。輪郭が閉じると反転が自動的に行われ、正しい速度分布が得られる。

以上の手順により、図1の写真画像をデジタル処理して得た準瞬時の速度分布を図3に示す。同図のaとbは、不要な線素を除去する前後の二種のベクトル分布に対応している。両者に分布するベクトル数はそれぞれ1691および729である。なおbの分布図には、後述する数値処理用の格子を重ねて表示した。

3. 数値処理と実験結果

3.1 数値処理 前報と同様にして、図3bに示す任意分布の速度ベクトルから、格子点の速度を二次元線形回帰法により補間した。その結果を図4に示す。このようにして求めた格子点速度を、空間積分・

図5 時間的に連続する円柱後流における流れ関数の瞬時分布 (図1, 3, 4 は中央時刻の流線に対応)

図6 図5に対応するうず度の瞬時分布

(a) 非定常項を考慮しない場合

(b) 非定常項を考慮した場合

図7 図5の中央時刻に対応する静圧の瞬時分布

微分して流れ関数・うず度の瞬時分布を計算するとともに、差分した二次元非定常ナビエ・ストークス方程式により、瞬時静圧分布を求めた。同式における非定常項の大きさを求めるために、3枚の時間的に連続する流跡線写真を処理し、円柱に対する格子の相対位置を等しくして、各格子点での速度の時間変化率を求めた。図1, 3, 4に示した結果は、これら3枚のうち中間の時刻における写真、および対応する瞬時速度分布である。なお上述の数値計算の結果は、すべて前報と同じ無次元化を行って、等高線の形で出力した。

3.2 実験結果 3枚の流跡線写真を画像処理して数値的に求めた流れ関数、うず度の瞬時分布を図5, 6に示す。ここで流れ関数は、格子領域中央での値を1とした場合の相対値である。一方図7は、以上3枚のうち、中間時刻に対応する静圧分布の計算結果であり、a, b二種類の分布はそれぞれ非定常項を考慮しない場合、した場合を示している。同図の静圧の値は、格子領域中央での値を1とした場合の相対値である。また無次元化の基準圧力は ρU_{∞}^2 である。

(a) 非定常項：慣性項の絶対値

(b) 非定常項：粘性項の絶対値

図8 N-S方程式補足計算の結果

図7の静圧分布を図6の対応するうず度分布と比較すると、非定常項を考慮した場合には、形成うずの中心部が静圧の低い部分に良好に対応し、外周部では圧力が次第に上昇している。一方下側のうずの分断点付近では静圧分布が極大値を示しており、流れの物理的な認識に合致している。これに対して非定常項を無視した場合には、形成うずのうず度中心はむしろ静圧場の稜線部に対応しており、同心円状の圧力上昇は見られない。またうずの分断点は、先の場合とは逆に、静圧分布における極小値の部分に対応している。

図8は静圧分布の計算に際して補足的に求めた、非

定常項：慣性項、および非定常項：粘性項の比の絶対値を等高線分布で示した結果である。一般的傾向として、前者の比はうず形成領域の中心部で大きく、後者の比は周辺部で大きい値を示す。今回の供試流れにおける非定常項の大きさは平均して、慣性項の 1.1 倍、粘性項の 12 倍であり、図 8 で見るようにうず形成領域では、平均値のさらに 6~7 倍になる場合がある。したがって本例の静圧評価において、非定常項は計算精度上最も重要な要素であることが明らかである。

次に今回の測定結果をさらに検討するため、他の実験結果との比較を行う。田中ら^{(7)・(8)}は、風洞実験により二次元円柱後流 ($Re = 3.7 \times 10^4$, $St = 0.19$) の流速・静圧分布を熱線・静圧プローブの二次元トラバースにより測定し、その出力信号を計算機援用により再構成して、うず度・静圧の瞬時場を可視化している。この研究では、うず度分布におけるうず中心が静圧分布の極小部に対応、放とうずの接触部に高圧部が出現、後流内の負圧の極値が円柱直後の死水域で最も大きいなど、本研究の結果と一致する報告がいくつかなされている。しかしその一方、放とうずのうず中心における負圧係数の極値が、最大(最低)でも円柱後縁でのその 1/2 程度という結果が示され、本研究の静圧分布と相違する部分も認められる。

これに対して Schwabe⁽⁹⁾は、水槽実験により円柱後流 ($Re = 560, 735$) を可視化し、その撮影写真から双うず、ならびに非対称うずの流速分布を目視作業により読み取り、その結果に流線とそれに直交する曲線群から成る座標系を適用して、静圧の瞬時分布を数値的に求めている。この測定結果によれば、円柱直後の付着うず中心の負圧極値は、円柱後縁での負圧係数の 1.5~2 倍に達している。本研究の測定による静圧分布は上述の通り相対値で表示され、形成うずの負圧極値と後縁の負圧係数との絶対的な関係は明らかでないが、Schwabe の非対称うず流れに関する測定値(後縁の瞬時圧力係数が -1.0 ± 0.3) を適用すれば、図 6、図 7 b に見る上側の付着うずの負圧極値は -1.4 ± 0.3 となって、両者の静圧分布は同一の傾向を示していることがわかる。

本研究における後流の静圧分布が Schwabe の測定結果に定量的な類似性を見出すのは、主としてレイノルズ数の近似性、ならびにそれに関連する形成うずの強さの影響によるものと考えられる。本実験や Schwabe の実験レイノルズ数において生成されるうずは層流うずであり、その強さは最大である。これに対して田中らの実験レイノルズ数は、乱流うずが増大し、いわゆるうず形成領域の長さが急減し始める領域に属してお

り⁽¹⁰⁾、放とうずの強さはかなり減少する。事実、田中ら⁽⁷⁾の測定では、放とうずの無次元循環量は円柱下流 4 直径の位置で 2.1 程度であるが、本報 図 6 のうず度分布を面積分して得られる同位置のうずの循環量は、少なくとも 2.8 程度になる。またうず中心部でのうず度極値の絶対値についても、田中らの実験では 1.1 程度であるのに対し、本報の測定では 1.6 に達する。したがって前者の場合、個々の形成うずの角運動量が小さいことから中心部での圧力低下が抑制され、負圧極値が相対的に減少するものと考えられる。

4. 結 論

(1) 通常のアルミ粉末をトレーサとする流跡線写真をデジタル画像処理して、二次元流れの速度場を自動的に評価する手法を開発した。

(2) 得られた任意の速度場から格子点速度を補間し、それより流れ関数、うず度および静圧の分布を迅速かつ精度よく計算する処理系を、あわせて開発した。

(3) ナビエ・ストークス方程式による静圧分布の評価では、時間的に連続する流跡線写真より非定常項の大きさを計算して、評価精度を著しく向上させた。

(4) この非定常項の大きさは平均して慣性項と同程度、粘性項の十倍以上であり、静圧計算の精度上最も重要な要因であることを明らかにした。

(5) 低レイノルズ数の円柱後流において、円柱付近の形成うずの負圧極値は、円柱後縁での負圧係数と同等またはそれ以上であることを数値的に示した。

なおこの研究の遂行にあたり協力された、阪大基礎工学部生(当時)の辻村一郎氏に感謝の意を表します。

文 献

- (1) 今市・近江, 機論, 48-436, B (昭57), 2449.
- (2) Imaichi, K. and Ohmi, K., Flow Visualization III, Hemisphere (1984), 301.
- (3) 近江, 流れの可視化, 6-20 (昭61), 19.
- (4) 小林ほか2名, 流れの可視化, 7-26 (昭62), 289.
- (5) 植村・長谷川, 流れの可視化, 8-30 (昭63), 273.
- (6) Racca, R.G. et al., Experiments in Fluids, 6 (1988), 25.
- (7) 田中・村田, 機論, 51-469, B (昭60), 2838.
- (8) 田中・村田, 機論, 52-478, B (昭61), 2323.
- (9) Schwabe, M., Ingenieur Archiv, 6 (1935), 34.
- (10) Bloor, M.S., J. Fluid Mech., 19 (1964), 290