51 流跡線画像処理および粒子追跡画像処理による比較測定実験

大阪産大工 近江和生[○] 阪大基礎工 植村知正
福井大工 山本富士夫

Comparative Measurement Between Particle-Streak and Particle-Tracking Velocimetry

Kazuo OHMI[△], Tomomasa UEMURA^{**}, Fujio YAMAMOTO⁺

Two types of image-processing velocimetry are tested and compared on the basis of two-dimensional wakes behind a cylindrical body. Both methods make use of tracer particles suspended in water and aim to estimate quasi instantaneous distribution of velocity. However the first one is particle-streak velocimetry which determines velocity vectors from the length and the gradient of particle streaks traced during a given time of exposure, and the second one is particle-tracking velocimetry in which the velocity is determined by a particle pursuit program operating between two sequential image frames. From among a number of pursuit algorithms required for the second velocimetry, the binary correlation method developed by the authors is employed in the present study.

1. ま え が き

画像処理流速計は昨今、流体計測における重要な技法として定着しつつあるが、その性能・効率面には依然として改善の余地が残されている。本研究では代表的な二種類の画像処理測定系である流跡線撮影型および粒子追跡型の流速計をとりあげ、二次元物体背後の非定常後流における測定を例として、両者の比較を主として粒子追跡型流速計の信頼性に的を絞って試みる。言うまでもなく流跡線型の画像処理流速計は、有限露光時間における粒子トレーサの軌跡像を用いて、その長さや傾きから速度を評価する手法であり、速度場の実体が可視化されるために処理のアルゴリズムが単純明快等のメリットを有するが、一方で複数の軌跡線の交差や重なりを分離・除去するため、またベクトルの方向を判定するために技法上の工夫が必要というデメリットも無視できない。これに対して粒子追跡型の画像処理流速計は、短時間差で撮影された粒子トレーサの瞬時像を分析して同一粒子の対応付けを行うことで速度を評価する手法であり、その特徴はすべて流跡線型の裏返しで表される。

ここで指摘すべき点は、流れ中の粒子トレーサの動きが同一の条件で可視化されるとして、流跡線型の画像処理流速計で認識されるベクトルの（画像中に存する全ベクトルに対する）割合は、粒子追跡型の流速計で認識されるベクトルの割合とは、やや異なる意味合いを持つことである。すなわち粒子の流れに対する追従性を前提にすれば、前者の流速計で認識されるベクトルは、その数の割合がいかに小さくとも自己完結的な有効データであるのに対し、後者の流速計においては、時間経過に伴う画面周辺での粒子の出没を別にすれば、原則として二画面間での全粒子の unique な対応付けが達成されることが、データの有効性と深く関連している点である。もし 100% の対応付けができない場合には何等かの規範データに基づいて、対応付けから除外された粒子が対応付けされた粒子のいずれとも結びつかないことを明確に示す必要があるが、現実問題として一般の非定常流、特に大小の乱れを伴う流れの計測においてこれを行うことは困難である。

* Osaka Sangyo University, Faculty of Engineering, 3-1-1 Nakagaito, Daito 574, JAPAN

** Osaka University, Faculty of Engineering Science, 1 Machikaneyama, Toyonaka 560, JAPAN

+ Fukui University, Faculty of Engineering, 3-9-1 Bunkyo, Fukui 910, JAPAN

そこで本研究では、流跡線型の流速計で得られる速度場の情報を規範データとして、そこから粒子追跡型の流速計で必要となる粒子の瞬時画像を人為的に生成して、後者における対応付けの信頼性を検討することを考えた。このような既知の速度データを利用した粒子追跡型流速計の性能検定は、すでに植村ら⁽¹⁾や山本ら⁽²⁾が試みているが、これらの実験の大半では、速度場に関する理論数値解から乱数的に粒子の瞬時画像を生成しており、実際の流れ場における粒子トレーサの分布や移動傾向との関係は必ずしも明白でない。これに対して本研究の比較実験では、実際の流れ場における粒子挙動に即して流速測定の評価が行われる点が重要である。なおここで検討する粒子追跡型流速計は二値化相関法のアルゴリズム⁽³⁾に基づくもので、高速かつ高精度である。また 同じ流れに対して二種の画像処理流速計を同時に適用しないのは、画素分解能等の特性値が両者間でかなり異なるためである。

2. 実験方法

今回の測定実験における供試流れは、いずれも二次元物体背後の層流状態の渦後流であり、Fig. 1 (A)~(C) に示す順にそれぞれ $Re = 100$ の円柱後流⁽⁴⁾、 $Re = 3000$ の静止翼流れ⁽⁵⁾、同じ Re 数でのピッチ振動翼の流れ⁽⁵⁾である。各々の流れは水槽実験により、アルミ粉末やナイロン微粒等の粒子トレーサを用いて可視化され、露光 $1/4 \sim 1/1$ 秒に対する粒子の軌跡像として写真撮影される。その写真を流跡線型の流速計⁽⁴⁾⁽⁶⁾で処理して速度場を数値化するが、そこで得られる速度ベクトルは流跡線の微妙な交差や重なりによるものが一部残存しており、そのままでは規範データとして適さない。そのため今回の実験に限って、原

Fig.1 Flow visualization pictures and velocity vectors.

写真を対話処理によって除去し 速度場の規範値を得た (Fig. 1 右図)。ここで得られるベクトルの数は $800 \sim 1500$ と粒子追跡型の流速計⁽³⁾にとって大きすぎるため、処理の領域を Fig. 1 右図中の正方領域に限定してベクトル数を $100 \sim 300$ 程度とした。また流跡線型流速計では正方領域部分の画素数が $340^2 \sim 760^2$ であるのに対し、粒子追跡型の画素分解能は 256^2 (pix) であるため、各正方領域のベクトルデータを 256×256 の画素マトリクスに換算して再配置した。さらに流跡線型流速計で得られる速度ベクトルの始点・終点は、粒子追跡型の計測には時間差が大きすぎるため、ベクトル長さを原データの $1/10 \sim 3/10$ に短縮し、その始点・終点に粒子の瞬時像を配置した。なおこの瞬時像の粒子径に関しては、ここで扱う粒子追跡型流速計での処理の効率上、粒子径の規格化が事前に行われる⁽⁷⁾ので、原画像における流跡線の幅に関係なく一定の大きさ (3×3 pix の正方粒子)とした。

3. 実験結果と検討

Fig. 1 (A) における正方領域内の速度場について、ベクトルの原データおよび粒子追跡型流速計による計測結果を示したものが Fig. 2 である。この図において縦列に共通の記号 a~c は、Fig. 1 (A) の三種の正方領域を小さい順に示し、横列に共通の数字は 0 がベクトルの原データ、1~3 が原写真の露光時間のそれぞれ 1/10, 2/10, 3/10 に相当する時間差で瞬時画像を生成した場合の粒子追跡型の計測結果を表す。なお後者の 1~3 のベクトル図では原データとの直接比較を行なうため、計測後のベクトル長さを再度逆数倍して表示している。一方、ここでの計測結果に関する数値的なデータは Table 1 に示されている。この表において (A) 欄は原データにおける流跡線数を、(B) 欄は二面の瞬時画像間で出沒することのない完全な粒子ペアの組数、(C) 欄は粒子追跡型流速計で対応付られた粒子ペアの組数、(D) 欄は (C) 欄の粒子ペアのうち正対応の数を表す。

Fig. 2 の計測結果を一見すると、最短時間差の瞬時画像を処理した場合 (a-1, b-1, c-1)、少なからぬ数の誤ベクトルが一樣流れの領域で発生すると判断されるが、原データと対照すると、実際にはほぼ全数のベクトルが二画面間の正しい粒子対応の結果であることが分かる。描かれたベクトルの長さや方向がかなり不規則であるのは、画像処理における量子化誤差が、ベクトルの引伸ばし操作により顕著化した結果であると理解される。二画面間の時間差が長くなれば、以下の図に示すようにこの誤差の影響は減少する。一方、この円柱後流の例では Table 1 の結果が示すように、粒子の認識数 C や正対応率 D/C は時間差の増大に対してほとんど低下しない。したがって長時間差の瞬時画像処理が有利とも考えられる。ただしここでは粒子数（すなわち粒子の分布密度）が増大した場合、粒子ペアの認識率 C/B が明らかに低下する。

Fig. 2 Measurement results in the square regions of Fig. 1(A).

次に Fig. 1 (B) の正方領域の速度場を 粒子追跡型流速計で処理した場合の結果を検討する。前例と同じ手順で $3 \times 3 = 9$ 種のベクトルプロット図(掲載省略)を比較すると、やはり最短時間差の画像処理において、一様流れのベクトル長さや方向にかなりの不規則性(粒子対応自体は正しい)が見られた。この不規則性は先と同様、二画面間の時間差増大によって目立たなくなる。しかしここでの翼周りの流れの場合、時間差増大によって粒子の認識数 C が低下するのに対し(以下 Table 1 参照)、正対応率 D/C はほとんど低下しない。この傾向は粒子の分布密度が低下した場合、より一層顕著となる。一方粒子の分布密度自体の影響については、粒子ペアの認識率 C/B が a→b 列間で低下せず、b→c 列間でかなり低下するのに対し、正対応率 D/C にはこのような分布密度の影響が見られない。すなわちこの例から言えることは、粒子の分布密度に一定の限度があるという点である。

最後に Fig. 1 (C) の正方領域に対する測定結果

を検討する(ベクトル図は掲載省略)。この例では、Table 1 の数値データからも明かなように二画面間の時間差増大によって粒子ペアの認識率 C/B

が大きく低下するのが重要な特色である。加えて時間差の増大は、いかなる粒子の分布密度においても正対応率 D/C を微減させる点が指摘される。前例で見たような粒子分布密度のペア認識率 C/B に対する影響はあまり目立たないが、傾向自体はここでも認められる。その理由は供試流れにおける乱れの増加により、C/B の値自体が全般に低下していること(特に a 列 b 列で)であると考えられる。とはいえ正対応率 D/C はここでも粒子分布密度にはほとんど影響されない。

4. 結 言

今回の実験では、流跡線型の画像処理流速計で求められた二次元速度場を粒子追跡型の流速計で再測定し、後者の流速計における対応付けの信頼性という問題に的を絞って検討を行なった。種々の比較実験における第一の観察事項は、粒子の分布密度増大による粒子ペア認識率の減少であり、これは今回の処理例の中で最も乱れの少ない円柱後流においても認められた。次なる観察事項は、画面間の時間差増大による粒子ペア認識率の減少であり、これは乱れの影響がやや増大した静止翼の流れにおいて明らかになった。乱れの影響がさらに増大すると(ピッチ振動翼の場合)、粒子ペアの認識数そのものが減少し、加えて画面間の時間差増大による粒子の正対応率減少も観察され始める。

したがって粒子追跡型の流速計を用いて種々の流体計測を行なう最良の方法は、画面間の時間差を適度に短くし、かつ粒子の分布密度について一定限度を越えないことであると判断される。ところが画面間の時間差が短いと、先述の量子化誤差の影響が顕著になるので、打開策として流速測定を短い時間差画面で時系列的に運用して、速度の評価には時間平均値を用いるという方法が考えられる。

参考文献

- (1) 植村ら, 可情, 10-Suppl. No. 1 (1990), 155.
- (2) 山本ら, 可情, 10-Suppl. No. 1 (1990), 91.
- (3) 植村ら, 可情, 10-38 (1990), 196.
- (4) 近江, 流れの可視化, 6-20 (1986), 19.
- (5) 近江ら, 流れの可視化, 8-Suppl. (1988), 127.
- (6) 近江・今市, 機論 B, 55-515 (1989), 1970.
- (7) 植村・山本, 流れの可視化, 9-Suppl. (1989), 45.