

PIV の標準化, 実用化に関する研究

—第1報 標準画像による濃度相関法の評価—

Research on PIV Standardization and Generalization

1st Report: Evaluation of Cross Correlation Method by Using Standard Images

小 林 敏 雄*・佐 賀 徹 雄*・胡 暉*

Toshio KOBAYASHI, Testuo SAGA and Hui HU

1. はじめに

粒子画像速度計測法 (Particle Imaging Velocimetry; PIV) は流れに微細なトレーサ粒子を混入し, この可視化画像を解析して流れの速度分布を計測する方法である¹⁾. 従来よりの熱線流速計やレーザドップラー流速計などによる点計測に比べ, 流れ空間の瞬時のしかも多点の速度分布を計測できるという特徴を持ち, 新たな流れ計測手法として急速に発展, 普及している. ところが, この PIV はさまざまな研究者により研究がすすめられ, それらの評価も各開発者独自で行われている. PIV を定量的に評価する指標の制定が望まれている²⁾. 現在, この PIV を工学的な手法として確立するための「PIV の標準化, 実用化」のプロジェクト (<http://www.vsj.or.jp/piv>, (社)可視化情報学会, 協力研究, 主査:小林敏雄) が設定され, 以下のような課題のもとに標準化作業がすすめられている.

- ・標準画像の作成と PIV 画像解析アルゴリズムの評価
- ・標準問題の設定と PIV の評価
- ・評価指標の設定とデータベースの構築

本研究は, この PIV の標準化, 実用化研究の一環として実行されているもので, 第1報では標準画像を用いた濃度相関法の評価について, 第2報では標準実験装置を用いた PIV 手法の評価について, その一例を報告する.

2. PIV 標準画像³⁾

標準画像は, Large Eddy Simulation (LES) により3次元に数値解析された衝突噴流の流れ場⁴⁾をもとにして, 生成されている. 図1に示すように, 二次元噴流が平板に衝突する流れ場で, 流れの細かなスケールから大きなスケールまでの複雑な運動がこの対象流れ場には含まれている. LES の瞬時の速度分布をベースに, トレーサ粒子による擬似的な可視化画像が, 解像度 256×256 画素, 256 階

*東京大学生産技術研究所 第2部

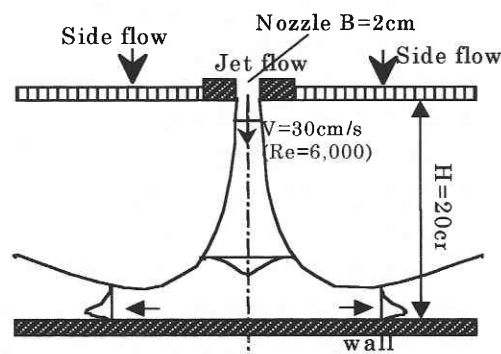


Fig. 1 Schematic of target of flow field

調 (8 bit) で生成されている. 画像の生成にあたっては, PIV で最も多用されるレーザライトシートによる粒子の投影を模擬している. すなわち, トレーサ粒子の輝度 (x_p, y_p) を以下のように設定する.

$$I(x, y) = I_0 \exp \left(-\frac{(x-x_p)^2 + (y-y_p)^2}{(d_p/2)^2} \right) \dots \dots \dots (1)$$

このとき, レーザの照明強度がシート幅 $2\sigma_l$ 内でガウス分布すると仮定して, 粒子の最大輝度 I_0 を粒子の三次元位置から決定する.

$$I_0 = 240 \exp \left(-\frac{z_p^2}{\sigma_l^2} \right) \dots \dots \dots (2)$$

粒子の三次元位置 (x_p, y_p, z_p) と粒子径 (d_p) が決定されれば, (1), (2) 式から擬似的な可視化画像が生成される. 初期条件として乱数により領域内に一様に粒子を発生させ, 粒子の三次元位置により, その位置の流体速度を LES データより算出し, その速度をもとに粒子を移動させて, 連続的に画像が生成される. このとき, 粒子運動は流れに完全に追従するものとしている. 画像上の代表長さは画素

研 究 速 報

(pixel) の大きさを、代表時間としては連続する 2 画像間の時間間隔 Δt (interval) をとっている。この 2 つの代表量で画像内の流れ場が表現されている。この標準画像はインターネットを通じて一般に公開され、その利用が可能である (<http://www.vsj.or.jp>)。標準画像のパラメータは多岐にわたるため、いくつかの重要なパラメータを利用者が設定できる、カスタムメイド画像の生成と利用が可能である³⁾。

図 2 に LES で数値計算された速度分布およびこの速度データを基に生成された標準画像の一例を示す。

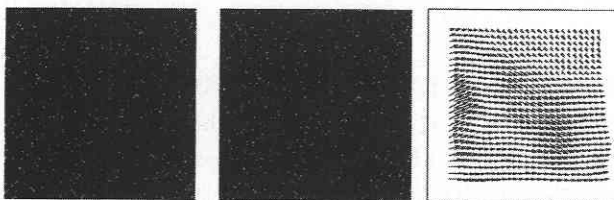
3. 標準画像による濃度相関法の評価

トレーサ粒子で可視化された流れ画像は濃淡分布をもっていて、この濃淡分布が流体の運動とともに輸送される。従って、画像の微小領域中の濃度分布の移動先がわかれば、その微小領域中の流体塊の平均的な流速ベクトルが求められる。すなわち、2 時刻の画像間での、局所的な濃度分布の類似性を濃度の相互相関によって求め、そのピーク位置から微小領域の流体の移動量を決定する手法である。図 3 に示すように、時刻 T と時刻 T + Δt の 2 時刻の画像中に微小な検査窓 (Interrogation Window) S を設定し、それぞれの検査窓での輝度を $f(x, y)$, $p(x, y)$, その平均値を \bar{f} , \bar{g} とするとき、相互相関係数は次式で計算される。

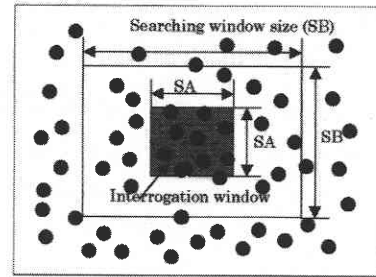
$$R(p, q) = \frac{\int [f(x, y) - \bar{f}][g(x, y) - \bar{g}] dv}{\sqrt{\int [f(x, y) - \bar{f}]^2 dv \int [g(x, y) - \bar{g}]^2 dv}} \dots\dots (3)$$

そして、相関係数の最も大きい場所、すなわち濃度分布が最も類似する場所が第 1 時刻の検査窓の移動先とする。

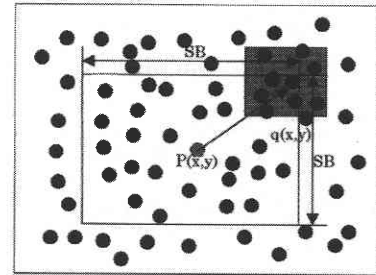
濃度相関法は計測点の設定が任意に行えること、空間的に多くの速度情報が得られることから、現在、PIV で最も多用される画像解析手法である。この手法の適用にあたっては、検査窓のサイズの設定と 2 時刻間の画像の時間間隔の設定が測定結果に影響を与える重要なパラメータであ



(a) PIV image at time T (b) PIV image at time T + Δt . (c) calculated result by LES
Fig. 2 Standard images and corresponding accurate velocity field in "PIV-STD" Project.



(a) at time T



(b) at time T + Δt

Fig. 3 A pair of PIV image frames.

る。本研究では、標準画像を用いてこの 2 つパラメータを定量的に評価した。

濃度相関法による解析結果と LES による数値計算結果との相関係数は以下のように定義した。

$$CR-U = \frac{\sum_i^M (U_i - \bar{U})(U_i^* - \bar{U}^*)}{\sqrt{\sum_i^M (U_i - \bar{U})^2 \sum_i^M (U_i^* - \bar{U}^*)^2}} \dots\dots\dots (4)$$

$$CR-V = \frac{\sum_i^M (V_i - \bar{V})(V_i^* - \bar{V}^*)}{\sqrt{\sum_i^M (V_i - \bar{V})^2 \sum_i^M (V_i^* - \bar{V}^*)^2}} \dots\dots\dots (5)$$

ここに、U, V は濃度相関法による x, y 方向の速度、U*, V* は LES による x, y 方向の速度である。M は速度ベクトルの数で、ここでは M = 576 に設定している。

また、濃度相関法の誤差 Err_i および測定空間内の平均誤差 Ave-Err を次式のように定義した。

$$Err_i = \frac{\sqrt{(U_i - U_i^*)^2 + (V_i - V_i^*)^2}}{\sqrt{U_i^{*2} + V_i^{*2}}} \dots\dots\dots (6)$$

$$Ave-Err = \frac{\sum_{i=1}^M Err_i}{M} \dots\dots\dots (7)$$

4. 解析結果

表 1 に本研究で用いた標準画像と評価結果の一覧を示す。表の下には標準画像で設定されるパラメータを付記する。ここではケース A を基準として、いくつかのパラメータについて解析を行った。

4.1 検査窓の影響

表 1 のケース A を基準的な画像として選定し、検査窓の影響を調べた。図 4 に検査窓のサイズ (一辺の長さ SA) を変化させたときの濃度相関法の評価結果を、図 5 には検査窓を 3 種類に変化させたときの速度分布を示す。図からわかるように検査窓の大きさにより誤差が変化することがわかる。すなわち、検査窓のサイズが小さすぎる場合 (例えば SA < 9 画素)、領域に含まれる粒子数が減少するため領域内の濃度情報が不足して、誤差が増大する。また検

査窓を大きく設定しすぎると (例えば SA > 27 画素) 領域内にさまざまなスケールの乱れが含まれ、粒子挙動の相関が減少して誤差が増大している。ここでは相関値 R (p, q) のしきい値を 0.5 に設定し、しきい値以下の相関値の速度ベクトルは算出していない。

本解析結果からは、検査窓の一辺のサイズ SA を 13 から 23 程度に設定することが適当であり、これらの設定での平均誤差は約 7.12 % 程度である (誤差に相当する画素数は約 0.48)。画像に含まれる粒子個数 N は 4000 個で、検査窓に含まれる平均粒子個数は 10 から 32 程度である。Keane ら⁵⁾が提唱する検査窓内の必要最小粒子個数の N > 7 よりやや大きい値での検証結果である。

表 1 のケース B は、ケース A で粒子個数を 10,000 個に増加させた場合であるが、粒子の増加に伴い誤差が 7.12 % から 6.37 % へ減少としている。

4.2 画像入力時間間隔の影響

図 6 に画像入力時間間隔 Δt の設定と誤差との関係を示す。検査窓の大きさは、上述の解析で誤差が最小になった SA = 17 画素の設定している。Δt が短すぎる場合 (例えば Δt = 11 ms)、PIV の結果は、CR-U = 0.951, CR-V = 0.917 と比較的高い計算値との相関を示すが、平均誤差 Ave-Err は 18.9 % (0.38 画素) と大きくなる。平均移動距離が約 2.5 画素と小さいため、画像の分解能の影響が大きくなる。一方、Δt を大きく設定しすぎた場合には (例えば Δt = 99 ms)、CR-U, CR-V は大きく低下し、Ave-Err は 55.4 % と急増する。容易に推定されるが、流れの乱れ成分により時間経過とともに検査窓内の粒子配列パターンの類似性が低下していくこと、および面外速度によりシート内へ粒子が出入りして、同様に粒子配列パターンの類似性が低下することなどが原因である。

4.3 サブピクセル補間の影響

前節で示したように、濃度相関法では平均移動距離が小さい領域では画像解像度の不足により誤差が増大する。この問題に対処するため、図 7 に示すように、相関最大値を中心として相関関数に正規分布⁶⁾ (8 式) あるいは二次曲線⁷⁾ (9 式) などをあてはめ、サブピクセルの精度で最大

Table 1 PIV standard images used in the present study

CASE	V _M	V _X	W _M	N	D _M	CR-U	CR-V	AVE-ERR
A	7.5	15.0	0.017	4,000	5.0	0.991	0.980	7.12%
B	7.5	15.0	0.017	10,000	5.0	0.993	0.986	6.37%
C	7.5	15.0	0.017	1,000	5.0	0.899	0.870	10.92%
D	7.5	15.0	0.017	4,000	2.5	0.916	0.871	9.05%
E	7.5	15.0	0.017	4,000	10.0	0.992	0.982	6.98%
F	7.5	15.0	0.17	4,000	5.0	0.698	0.748	13.75%
G	7.5	15.0	0.34	4,000	5.0	0.363	0.394	41.30%
H	7.5	15.0	1.70	4,000	5.0	-0.06	-0.05	132.1%
I	22.5	45.0	0.063	4,000	5.0	0.288	0.471	55.41%
J	2.5	5.0	0.006	4,000	5.0	0.951	0.917	18.94%
A*	7.5	15.0	0.017	4,000	5.0	0.996	0.993	4.13%
J*	2.5	5.0	0.006	4,000	5.0	0.993	0.988	4.23%
A**	7.5	15.0	0.017	4,000	5.0	0.996	0.992	4.30%
J**	2.5	5.0	0.006	4,000	5.0	0.991	0.982	6.39%

Note: V_M: average velocity (pixel/interval) V_X: maximum Velocity (pixel/interval)
 W_M: out of plane velocity (laser width/interval) N: tracer number
 D_M: tracer average diameter (pixel) Ave-Err: average error of PIV results
 CR-U, CR-V: correlation coefficients of obtained PIV result with accurate solution
 *: "sub-pixel interpolation" process by using interpolation function (8) (Fig.7)
 **: "sub-pixel interpolation" process by using interpolation function (9) (Fig.7)

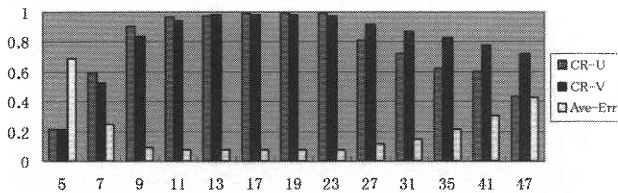


Fig. 4 The effect of the size of interrogation window (SB = 29)

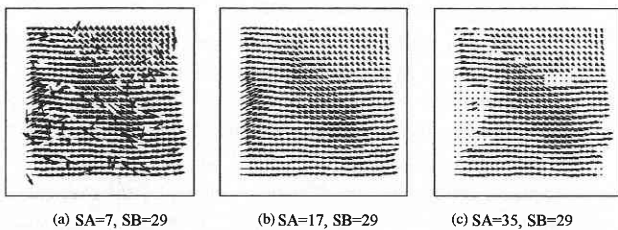


Fig. 5 Velocity vector profile of case A for different interrogation window sizes

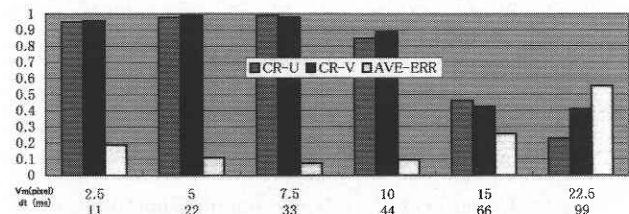


Fig. 6 The effect of the average image velocity or time interval of the two images (SA = 17)

研 究 速 報

位置を求める速度を算出する方法が提案されている。

ここでは、サブピクセル補間と誤差の関係をテーブル1のケースAとJについて評価した。表中、AとJに対応する二種類のサブピクセル補間の結果は、それぞれA*, A**, J*およびJ**として示してある。サブピクセル補間により誤差が減少することがわかる。特に、移動距離の少ないケースJではAve-Errが18.94%から4.13%(A*)へと大きく減少し、サブピクセル補間の効果が高いことがわかる。図8にケースAにおけるサブピクセル補間の有無の影響を示す。図中、誤差の大きさを等値線で示しているが、右の誤差の大きい領域がサブピクセル補間により誤差が減少している。Ave-Errは7.12%から4.13%へと減少している。

なお、カーブフィットの方法に関しては、二次曲線に較

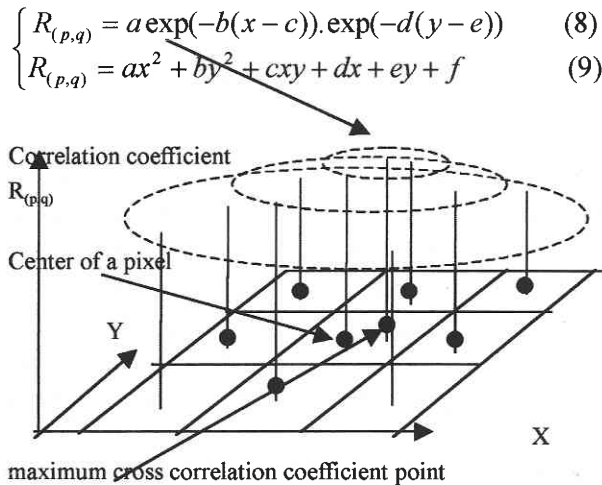


Fig. 7 The "sub-pixel interpolation" process

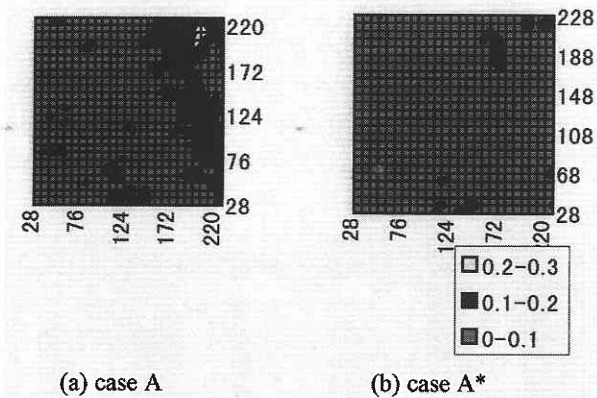


Fig. 8 The effect of the "sub-pixel interpolation" process

べ正規分布のあてはめの方が誤差が小さいことがわかった。

4.4 面外速度の影響

表1のG, Hには、面外速度成分 W_M (ライトシートと直行する速度成分。ここではシート厚さ $2\sigma_1$ で無次元化してある)の大きさと誤差との解析結果を示してある。 $W_M > 0.3$ では誤差が大きい。実際の計測にあたっては、ライトシートと面外速度の大きさの関係をよく考慮して設定する必要があることが解る。

5. ま と め

LESによる衝突噴流の数値解析データをもとに生成した標準画像で濃度相関法の性能を定量的に評価した。本研究で得られた結論は以下の通りである。

- (1) 検査窓は小さすぎても、大きすぎても誤差が増大する。本解析流れ場の場合、検査窓の一辺が流れの平均移動量の2倍程度に設定したときに誤差が最小になる。
- (2) 画像の入力時間間隔は、同様に設定が小さすぎても大き過ぎても誤差が増大する。
- (3) サブピクセル補間は計測精度の向上に有効である。
- (4) 面外速度 W_M の大きさとライトシートの厚みの関係は計測誤差に大きな影響を与える。 $W_M \ll 0.3$ になるような設定が必要である。

今後、画像ノイズの影響を含めたパラメータ解析を行う予定である。

(1999年2月12日受理)

参 考 文 献

- 1) Adrian R. J., "Particle -Imaging Techniques for Experimental Fluid Mechanics" Ann Rev. Fluid Mech. Vlo.23, (1991), pp 261-304.
- 2) 小林ら, "Particle Imaging Velocimetryの実用化に関する調査研究", (1992) 科研費(総B)成果報告書.
- 3) Okamoto K., Nishio S., Kobayshi T. and Saga T., "Standard Image for Particle Imaging Velocimetry" Proc. of the second International Workshop on PIV' 97, 1997, (Fukui), pp 229-236.
- 4) Tsubokura, M., Kobayashi, T. and Tanihuchi, N. 1997, "Visualization of 3-d Structures in a Plane Impinging jet Using Large Eddy Simulation", FLROME' 97.
- 5) Keane, R. D., Adrian R. J., "Theory of Cross Correlation Analysis of PIV images", Appl. Sci. Res. 49 (1992), pp 191-215.
- 6) Sakakibara, J., Hishida, K. and Meada, M., "Measurements of thermally Stratified Pipe Flow Using Image-Processing techniques", Experiments in Fluids, Vol. 16 (1993), pp 82-96.
- 7) Fujita, I. and Komura, S., "On the Accuracy of the Correlation Method", Proc. of Sixth Int. Sym. On Flow Visualization. (1992), pp 858-862.