

近畿大学理工学部 正員 竹原幸生
 University of Illinois R. J. Adrian
 近畿大学理工学部 正員 江藤剛治

1.はじめに 粒子画像速度計測法(Particle Image Velocimetry, PIV)は、瞬時の2次元場、3次元場の流速分布を得ることができるという利点を有している。ビデオカメラにより撮影された連続画像を解析すれば、空間流速分布の時系列データを得ることができる。これらのデータは、LES等の数値シミュレーションにおけるモデル化やモデルの検証等に非常に有効なものとなる。また、混相流や移動界面を持つ流れ等、これまでの点計測法では計測困難であった現象もトレーサ粒子を撮影できれば、計測が可能となる。

PIVには大きく分けて2つの方法がある。1つ方法は、トレーサ粒子の分布パターンの移動を求めるPMV(Pattern Matching Velocimetry)であり、もう1つは、各トレーサ粒子を追跡するPTV(Particle Tracking Velocimetry)である。PMVの長所の1つは、2時刻間の画像から流速を求めることができることであるが、短所として、PTVに比べて空間解像度が低いことが上げられる。PTVの長所として、解像度が高いことが上げられるが、短所として解析に必要な時刻数がPMVより多いことである。

Keaneら¹⁾は、それぞれの長所を組み合わせたSuper-Resolution PIV法を提案している。Super-Resolution PIV法では、まずPMVにより粗い格子点上の流速ベクトルを求め、その格子点の速度情報を元に各粒子に速度を内挿し、PTVで2時刻間の同一粒子の同定を行う。これにより、2時刻間で粒子を追跡することができ、解像度の高い流速場の計測が可能となる。

Keaneら¹⁾の方法では、後述のように、PTVの粒子同定のアルゴリズムに不完全な部分があり、変形の大きな流れ場や検索領域内に2個以上の候補粒子がある場合、同一粒子の対応付けができない。

本研究では、第1.3著者が提案しているカルマンフィルタと χ^2 検定を用いたPTVアルゴリズム(KC法)²⁾をSuper-Resolution法のPTV部分に適用することにより、Super-Resolution法の改良を行った。

2. Super-Resolution法のアルゴリズム まず、Keaneらの提案したSuper-Resolution法の手順を示す。

- ① 2時刻の粒子画像(Double-Pulse/Single-Frame, DP/SFもしくはSingle-Pulse/Double-Frame, SP/DF)に対して、標準の相関法により、粗な格子点上の流速を求める。DP/SFの場合、検索画像領域内の自己相関値からトレーサ粒子群の移動量を求め、SP/DFの場合は第1画像内と第2画像内の検索画像領域との相互相関値からトレーサ粒子群の移動量を求める。
- ② 第1時刻の画像上から各粒子画像をピックアップし、求めた格子点の流速を元に各粒子の速度を内挿する。
- ③ 各粒子の内挿された速度から、第2時刻の粒子位置を推定する。
- ④ 第1時刻の粒子画像周りに粒子サイズと同等の検索画像領域を設定し、その粒子画像に対応する第2時刻の粒子画像の周りにも同じサイズの検索画像領域を設け、相互相関値を計算する。
- ⑤ 相互相関値のピーク位置から各粒子の移動距離を求める。

彼らのSuper-Resolution法のPTV部分(手順④)には以下のような問題点がある。

- (1) PIVにおける検索画像領域が小さいため、粗い格子点での流速を求めるとき(PMV, 手順①)の検索画像領域内での変形が粒子サイズ程度以上になると計測できない。
- (2) 各粒子の対応付けの検索画像領域内に2つ以上の候補粒子がある場合に、同一粒子を識別できない。

問題点(1)および(2)は、それぞれトレードオフの関係にある。問題点(1)でPTVにおける第2時刻の検索画像領域を大きくすれば、大きな流体変形に対しても計測可能となる。しかし、第2時刻の検索画像領域を大きくすればするほど、その領域内に複数の粒子が含まれるようになり、問題点(2)が顕在化してくる。

3. KC法の適用による Super-Resolution法の改良 KC法はPTVのためのアルゴリズムとして提案された²⁾。カルマンフィルタにより、ある時刻の粒子情報(粒子位置、速度ベクトル、粒子画像サイズ、粒子画像中心輝度、等)をもとに、次時刻の粒子情報を予測する。予測された粒子位置周りに検索領域を設け、その中に含まれる実測粒子との対応付けを行う。予測された粒子情報と検索領域内の数個の実測された粒子の情報

Key Words: Super-Resolution PIV, KC method

連絡先 : 〒577-8502 東大阪市小若江3-4-1, Tel. 06-6721-2332, Fax. 0729-95-5192

から、 χ^2 検定を用いて同一粒子の検定を行う。

KC法は、KeaneらのPTV法と違い、はじめから検索領域内に多数の候補粒子が存在した場合を想定して組み立てられている。KC法では、同一粒子の対応付けを予測粒子位置と実測粒子位置のみの関係で判断するのではなく、粒子画像サイズや中心輝度等の粒子情報の予測値と実測値との関係も含めて、客観的に判断する。KC法をSuper-Resolution法のPTV部分に適用することにより、Keaneらの方法で問題となった点を解消することができる。

以下に、KC法を用いたSuper-Resolution法の手順を箇条書きで示す。

- ① 2時刻の画像より、標準相関法を用いて粗な格子点上の流速ベクトルを求める。
- ② 画像より粒子画像のみをピックアップする。
- ③ ピックアップされた粒子の流速を、①で求めた格子点上の流速ベクトルから内挿する。
- ④ 内挿された情報を元に、第1時刻と第2時刻間の同一粒子の対応付けをKC法により行う。
- ⑤ KC法による同一粒子の対応付け(④)を、対応付け個数が最大になるまで繰り返す。

4.適用例 Rushton turbine 内の流れの画像解析を行った。解析に用いた画像はSharpら³⁾によって計測されたものである。計測には1k×1kのコリレーションカメラ(TSI製)を用い、SP/DFの画像を撮影した。照明には、ダブルパルスのNd:Yagレーザーを用い、シート光に広げ、2次元的に照明された。撮影された画像はパーソナルコンピュータにデジタル画像として取り込まれ、処理された。標準相関法はTSI製のソフトを用い、50%重なりでスキヤニングし、格子点の流速場を計測している。

図-1に計測結果を示す。図-1a)は標準相関法により得られた格子点上のベクトル分布図である。図-1b)に今回改良されたSuper-Resolution法を用いて計測した結果を示す。図中の上部に空白部はタービン翼の部分である。標準相関法により得られた格子点流速ベクトルの数は3067であり、今回改良したSuper-Resolution法により得られたベクトル数は9204であった。図からわかるように、標準の相関法の計測結果に比べ、Super-Resolution法による計測結果の方が小さな渦構造を計測できているのがわかる。

今回解析を行ったRushton turbine内の流れは3次元性の強い流れであり、シート光を出入りする粒子が多くある。2次元性の強い流れ場の計測では、より解像度の高い計測が期待される。

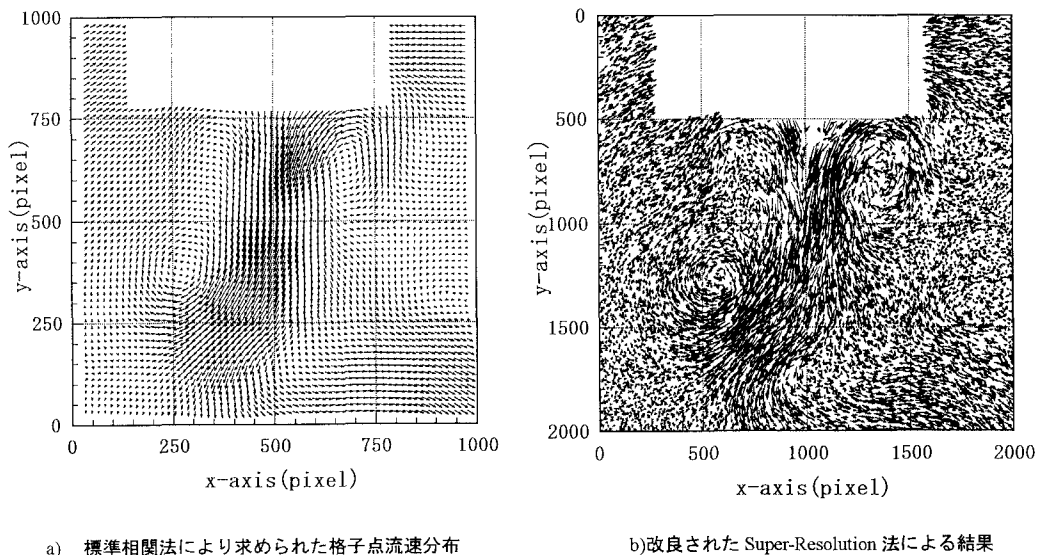


図-1 Rushton turbine 内の流れの計測結果

[参考文献]1) Keane, R.D., Adrian, R.J. and Zhang, Y.: Meas. Sci. Technol., 6, pp. 754-768, 1995. 2) 江藤・竹原: 水工学論文集, Vol.34, pp.689-694, 1990. 3) Sharp, K.V., Kim, K.C. and Adrian, R.J.: Proc. of the 9th Intl. Symp. on Application of Laser Technique to Fluid Mech. 1998.