カルマンフィルタ型 PIV の粒子追跡性能向上 に関する基礎的研究*

家合克典^{*1}, 小河原加久治^{*2}, 飯田誠一^{*2}

Analysis Improving Particle Trackability for the Kalman Filter PIV

Katsunori YAGOH, Kakuji OGAWARA and Sei-ichi IIDA

A new algorithm for particle tracking has been developed in order to improve its trackability for flows in which considerable acceleration acts locally. This algorithm consists of two main stages. At the first stage, the particle tracking method using the Kalman filter "type P" is applied in order to estimate individual particle states; then the measuring region is divided into subregions for the purpose of evaluating local statistics of the particle velocity and acceleration. At the second stage, a new type of Kalman filter which can take account of the local acceleration statistics is applied to tracking particles. Numerical simulations using a 2-D cavity flow are performed for accuracy tests of the present algorithm. As a result, it is proved that the present method achieves measurements with sufficient precision even when the flow direction changes rapidly due to the effect of large acceleration.

Key Words: Digital Image Processing, Flow Measurements, Kalman Filter, Particle Tracking, Flow Visualization

1. 緒言

PIV (Particle Imaging Velocimetry) もしくは PTV (Particle Tracking Velocimetry) は、現在有効な流体計測手法として一般に認識されている。この計測手法は既に乱流統計量の測定⁽¹⁾や船舶の伴流分布の計測⁽²⁾など、様々な流れの解析に適用されており、多くの有益な情報が得られている。PIV は広範囲に渡る瞬時の流れ場情報を非接触で計測できるという極めて大きな計測上の利点を有する。したがって、今後、流れに現れるカオスの現象の解明や応用⁽³⁾⁽⁴⁾に関する実験的研究など、熱線流速計や LDV に代表される従来の計測法では解析が困難あるいは不十分な分野において、その有効性が発揮されることが期待される。しかしながら、PIV は流体計測手法としてまだ完全に確立されている訳ではなく、解決が急がれている問題も少なくない⁽⁵⁾。

PIV における粒子追跡性能の向上は、その実用性を

高めるために重要な課題の一つである。著者らは既報⁽⁶⁾において、粒子追跡および速度計測アルゴリズムにカルマンフィルタを適用した高性能の粒子追跡手法を開発した。また、画像上の粒子の軌跡などから粒子速度の大きさを見積れる場合には、座標・速度観測型カルマンフィルタ⁽⁷⁾を用いて速度情報を考慮することによって粒子追跡の性能が高まり、その結果、計測可能な速度の精度およびダイナミックレンジが向上することを示した。

しかしながら、流れ場に大きな加速度が局所的に作用し、流れの方向がその領域で急激に変化するような場合は、これらの粒子追跡法によっても十分な追跡精度が得られないことがある。このような流れに対しても高水準の追跡性能を維持するためには、測定領域内で空間的に変化する加速度を考慮した粒子追跡を行うことが必要である。そこで本研究ではこのような問題の解決をはかるため、空間的な加速度の変化に適応した粒子追跡が行える加速度対応型カルマンフィルタによる粒子追跡法を開発する。これは、測定空間を細分化して速度・加速度に関する部分的な統計量を求め、これらの局所的な情報を粒子追跡に反映させる新たな粒子

* 平成4年8月27日 流体工学部門講演会において講演、原稿受付 平成4年7月16日。

^{*1} 正員、北海道大学大学院 (〒060 札幌市北区北13条西8丁目)。

^{*2} 正員、北海道大学工学部。

追跡アルゴリズムである。さらに本研究では、二次元キャビティ流れの数値解を用いた追跡性能評価シミュレーションを行い、加速度対応型カルマンフィルタによる粒子追跡法を適用することで得られる効果やその限界について検討する。

2. 粒子追跡手法

2.1 加速度対応型カルマンフィルタの構成

ここでは、細分化された測定空間内の個々の領域における統計量、すなわち、それぞれの領域における粒子の平均加速度とそれに対する分散が既知であるものとする。これらの量を求める方法については後述する。また、本研究では時間的に各小領域の統計量が変化しない定常な流れについて考えるが、非定常な流れに対しても、各時刻においてフィルタ方程式を更新することにより同様の粒子追跡アルゴリズムが適用できる。

以下で加速度対応型カルマンフィルタを構成するが、その手順は全ての座標軸方向について同一である。よってここでは重複を避けるため、X 軸方向についてのみ述べる。

はじめに、粒子の状態量に座標 ξ と速度 $\dot{\xi}$ を考え、状態方程式を次式のように設定する。

$$\left. \begin{aligned} \xi_k &= A\xi_{k-1} + B\alpha_{k-1}, \\ \xi_k &= \begin{bmatrix} \xi_k \\ \dot{\xi}_k \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} \Delta t^2/2 \\ \Delta t \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここに、 k は時間ステップ、 Δt はサンプリング時間間隔、 α は粒子に作用する加速度である。

次に観測方程式の設定を行う。これには簡単で実用的なものとして、座標だけを観測するもの（式(2)）と座標と速度を両方観測するもの（式(3)）が考えられる。ただし、どちらの場合も最終的には同様のフィルタ方程式に帰着する。

$$x_k = C_p \xi_k + \beta_k, \quad C_p = [1 \quad 0] \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\begin{bmatrix} x_k \\ \dot{x}_k \end{bmatrix} = C_{pv} \xi_k + \begin{bmatrix} \beta_k \\ \gamma_k \end{bmatrix}, \quad C_{pv} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 x , $\dot{x}$ はそれぞれ粒子の座標、速度の X 方向観測値であり、 β , γ はそれぞれ座標、速度に混入するノイズである。

本研究では、加速度情報を粒子追跡に用いることの効果を調べることが目的であるので、観測方程式には考慮すべきパラメータ（観測ノイズの統計量）が少ない式(2)の座標観測型を採用する。

i 番目の小領域において粒子に作用する加速度、そし

て粒子座標の観測値に含まれる誤差の統計的性質には、以下の性質をもつガウス性定常確率過程を仮定する。ただし、 E および $(\cdot)$ は平均を表す。

$$\left. \begin{aligned} E\{\alpha_{ik}\} &= \bar{\alpha}_{ik} = \bar{\alpha}_i \\ E\{(\alpha_{ik} - \bar{\alpha}_i)^2\} &= \sigma_{\alpha ik}^2 = \sigma_{\alpha i}^2 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\left. \begin{aligned} E\{\beta_k\} &= \bar{\beta}_k = 0 \\ E\{\beta_k^2\} &= \sigma_{\beta k}^2 = \sigma_{\beta}^2 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (5)$$

さらに、 α と β は互いに独立であるとする。

加速度の分散は各小領域によって異なるため、それぞれの小領域に対するカルマンゲインが必要となる。そこで、 i 番目の小領域に対するカルマンゲイン K_i は式(6)のリカチ式の収束解 P_i を用いて式(7)によって求める。ただし各小領域における推定誤差共分散行列の初期値 P_{i0} は 0 とする。

$$\begin{aligned} P_{ik+1} &= B\sigma_{\alpha i}^2 B^T \\ &+ A\{P_{ik} - P_{ik}C_p^T(C_pP_{ik}C_p^T + \sigma_{\beta}^2)^{-1}C_pP_{ik}\}A^T \quad \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

$$K_i = P_iC_p^T\{C_pP_iC_p^T + \sigma_{\beta}^2\}^{-1} \quad \dots\dots\dots (7)$$

このときフィルタ方程式は、 $\hat{\xi}$ を最適推定量、 $\tilde{\xi}$ をその予測値として次のように表される。

$$\hat{\xi}_k = \tilde{\xi}_k + K_i\{x_k - C_p\tilde{\xi}_k\} \quad \dots\dots\dots (8a)$$

$$\tilde{\xi}_k = A\tilde{\xi}_{k-1} + B\bar{\alpha}_i, \quad \tilde{\xi}_0 = \tilde{\xi}_0 \quad \dots\dots\dots (8b)$$

式(8b)を見て分かるように、フィルタ方程式の時間更新部分には粒子に作用する平均加速度が含まれている。さらに式(1)から、この平均的な加速度による時間 Δt 内の粒子の移動量が予測値に考慮された形になっていることが分かる。したがって、注目粒子の存在領域を判断し、その領域における平均加速度を式(8b)に入力することにより、その加速度に応じた次時刻の予測を行うことができる。よって、局所的に大きな加速度が作用することで急激に速度が変化する場合においても予測の信頼性を維持することが可能である。カルマンフィルタによる粒子追跡法ではこの予測値を用いて追跡を行うので、予測の精度を高めることは粒子追跡の性能向上に直結する。

本研究では以下、式(8)のフィルタ方程式で表されるカルマンフィルタアルゴリズムを加速度対応型カルマンフィルタあるいは type PA と呼ぶ。

2.2 加速度対応型カルマンフィルタによる粒子追跡アルゴリズム 加速度対応型カルマンフィルタによる粒子追跡アルゴリズムは次のように二段階に分かれている。

[1] 従来型のカルマンフィルタによる粒子追跡手法⁽⁶⁾⁽⁷⁾を用いて第一段階の状態推定を行う。次に、測定空間を仮想的な複数の小領域に分割し、各小領域内に含まれる粒子群の速度と加速度について平均・分散を算出する。

[2] 各小領域における粒子加速度の分散に対するカルマンゲインを全て求める。そして次に、加速度対応型カルマンフィルタを用いて粒子追跡を行い、新たに個々の粒子を状態推定する。

本研究では第一段階の粒子追跡において、加速度対応型と同じく座標だけを観測する座標観測型⁽⁶⁾カルマンフィルタ (type P とする) を用いる。ただし、従来型のこの手法は流れ方向の急激な変化に十分に対応できないため、対応付け候補粒子の探索領域を制限するしきい値を大きく設定する必要がある。本研究では試行の結果から、この値を測定領域代表長さの 1.5% に固定した。

測定空間の分割方法は単純な等間隔格子による正方形領域分割とする。各小領域における粒子の速度・加速度の統計量は、流れが定常であるので時間的に変化しない。よってデータのサンプル数を増やすため、第一段階の追跡で求められた全時刻の粒子の速度・加速度を領域ごとに総合してこれらの統計量を算出する。ただし、各小領域内では、粒子速度・加速度の平均および分散は変化しないものとする。

第二段階で適用される加速度対応型カルマンフィルタを用いた粒子追跡は以下に行われる。まず、時刻 k における注目粒子の状態量をもとに、次の時刻 $k+1$ での注目粒子の状態を予測する。次に、時刻 $k+1$ において、予測位置近傍の探索領域内に存在する粒子を対応付けの候補として抽出し、それぞれの候補に対して状態推定を行う。この処理は連続する四時刻に渡って式 (8) を用いて行われる。そして四時刻全ての対応が取れた粒子の組み合わせの中から、予測位置と推定位置との差の総和が最小なものを選ぶ。

ただし、この四時刻対応における第一時刻目の状態が未知な粒子については適当な初期値を与える必要がある。この場合には次のように考える。

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \hat{\mathbf{x}}_k = \begin{bmatrix} x_k \\ \bar{u}_i \end{bmatrix} \cdots \cdots \cdots (9)$$

ここに、 $\bar{u}_i$ はその粒子が存在する領域 i の平均粒子速度である。

また、予測位置近傍の探索領域を制限するためのしきい値 D_x については次のように考える。粒子速度の分

散が大きい領域に存在する粒子の次時刻の状態を予測する場合、予測した粒子座標と実際の値との差が大きくなる可能性が高い。ところが、このことに対処するためにしきい値を大きく固定すると、全ての粒子に対して対応付け候補が増え、誤対応の確率が高くなる。よってこのしきい値 D_x についても、式 (10) のように粒子が存在する領域 i に応じて可変とする。

$$D_x = s(\sigma_{u_i} \Delta t + \sigma_\beta) \cdots \cdots \cdots (10)$$

ただし、 σ_{u_i} は領域 i における X 方向粒子速度の標準偏差であり、 s は適当な係数である。各小領域内の粒子速度分布に正規性を仮定すると、平均速度を中心としてその標準偏差の ± 3 倍の範囲に粒子の速度が含まれる確率はほぼ 100% である。本研究ではこのようなことも考慮して、係数 s を 3.0 に設定した。

3. 追跡性能評価シミュレーション

本研究の目的は、局所的に大きな加速度が加わるような流れ、すなわち流れ場に投入された粒子の軌跡が大きく曲げられたり急激に加減速されるような場合においても、高い追跡精度を維持できる粒子追跡アルゴリズムを構築することである。そこで、本研究で開発した加速度対応型カルマンフィルタによる粒子追跡アルゴリズムが、このような流れに対してどの程度の追跡性能を有するかを、追跡性能評価シミュレーションを行って定性・定量的に検討する。これは、数値計算で求めた流れ場内の粒子の状態量に統計的性質が既知のノイズを加えて疑似的な実験データを作成し、このデータを観測値として粒子追跡を行うものである。

このシミュレーションにおいては、既報⁽⁷⁾でも用いた上壁が移動する二次元正方キャビティ内流れを適用する。流れの計算に関与する量は全て無次元化されている。キャビティの辺長 (代表長さ) は 1.0、上壁の移動速度 (代表速度) は右方向に 1.0 である。レイノルズ数は 50 とした。ここで、キャビティ内を 6×6 の正方形領域に分割した場合、各領域内の粒子の平均速度ベクトルは図 1(a)、平均加速度ベクトルは図 1(b) のようになる。ベクトル先端の長方形は、それぞれのベクトルの X および Y 方向成分の標準偏差を表している。この図を見て分かるように、キャビティ上部の移動壁両端付近で大きな加速度が流れに加わり、速度が急激に変化している。またこの部分では、分割された小領域の内部においても粒子速度・加速度の変化が大きいことが分かる。このように、この流れは空間的な速度・加速度の変化が顕著であり、本シミュレーションの計測対象に適していると言える。

図1 二次元キャビティを等間隔正方形領域で 6×6 に細分化した場合の各小領域における統計的粒子状態量のベクトル表示 (oはベクトルの始点を表す)

(a) 領域内平均粒子速度ベクトル, (b) 領域内平均粒子加速度ベクトル

粒子追跡に用いる観測データは次のように作成する。まず、200個の粒子をキャビティ流れ内にランダムに配置する。そして一定のサンプリング間隔で個々の粒子座標を抽出し、それぞれの座標に平均0のガウス性ノイズを付加する。ノイズの標準偏差はX, Y方向にそれぞれ0.001とした。これは測定領域代表長さの0.1%である。以上の手順を400回繰り返し、400時間ステップの粒子座標観測データとする。

一般に、粒子追跡はサンプリング時間間隔 Δt 内の粒子移動量が大きくなる程困難になる。本研究ではキャビティ上壁の移動速度が1.0で固定であるため、 Δt をパラメータとしてサンプリング時間間隔内の粒子移動量を変化させ、それが本方法の粒子追跡性能に対してどのように影響するかを調べる。ただし、本研究では次のように Δt を設定した。まず、 Δt 決定のための目安として、 Δt 内の最大粒子移動量が測定空間内の平均的な粒子間距離を越えないという次式のような条件が考えられる。

$$u_{max}\Delta t < \sqrt{\frac{L^2}{P_n}} \dots\dots\dots (11)$$

ここに、 L はキャビティの辺長、 P_n はキャビティ内の粒子の個数である。本研究において式(11)を満たす Δt は $\Delta t \leq 0.07$ である。そこでこの値を基準とし、 Δt がこれより大きい場合と小さい場合、すなわち $\Delta t = 0.03, 0.06, 0.09, 0.12$ の四種類の Δt を選択した。

また本方法の粒子追跡性能は、測定空間分割時の領域局所化サイズによっても変化する。測定領域の局所

化は等間隔正方形領域分割によって行われるので、測定領域分割数が局所化パラメータとなる。よって本研究では、測定領域分割数をもう一つのパラメータとして本方法の追跡性能を評価する。

4. 結果および考察

以下に示す結果はその特徴を見やすくするため、400回の追跡ステップのうちはじめの100ステップ間の粒子追跡結果についてまとめたものである。

4.1 加速度対応型の適用による効果

はじめに、第一段階の座標観測型カルマンフィルタによる粒子追跡で得られた結果の一例を図2に示す。このときの観測データサンプリング時間間隔は0.09である。図2(a)は100時間ステップにわたる粒子の軌跡を全てプロットしたものである。図2(a)を見ると、キャビティの移動壁両端付近で粒子の軌跡が途切れていることが分かる。この部分は図1(b)に見るように、流れに大きな加速度が加わり、流れ方向が壁によって急激に変えられる領域である。座標観測型ではこの図のように、流れ方向の急激な変化に十分な対応ができず、追跡中の粒子を見失う可能性が高い。図2(b)はこのような状況を把握しやすくするため、100ステップの粒子追跡の間に誤対応がなく、かつ途中で追跡が途切れることもなかった完全な軌跡だけを抽出したものである。図2(b)を見ると、移動壁両端付近を通る粒子の軌跡は抽出されておらず、この部分で座標観測型による粒子追跡が失敗しやすいことがわかる。第一段階の粒子追跡においては、このように完全な軌跡が得られる粒子の割合は60.5%であ

図2 座標観測型カルマンフィルタを用いた第一段階の粒子追跡で得られた粒子の軌跡 ($\Delta t = 0.09$)
 (a) 計測された100-時間ステップ間の粒子の軌跡
 (b) 100-時間ステップ誤対応なく連続追跡された粒子の軌跡

図3 加速度対応型カルマンフィルタによる第二段階の粒子追跡で得られた完全な粒子の軌跡

た。ただし、連続する二時刻間の正対応率は極めて高く、100-時間ステップに渡ってこれを平均すると98.5%に達した。

次に、第一段階で得られた上の結果をもとに、加速度対応型カルマンフィルタを粒子追跡の第二段階に適用する。測定領域分割数を 6×6 とした場合、得られる粒子の完全な軌跡は図3に示すようになる。図3と図2(b)を比べると明かなように、加速度対応型ではキャビティの移動壁両端付近を通る粒子の軌跡も数多く再現されている。この場合、完全な軌跡が得られる割合 R_c は90.5%であり、追跡性能の大幅な向上が認められる。また、二時刻間平均正対応率 R_m も99.9%に改善された。このように、加速度対応型を用いて空間的な加

速度の変化を考慮した粒子追跡を行うことにより、急激な流れ方向の変化に対しても高い追跡精度が維持できる。

4.2 加速度対応型の粒子追跡性能に対するサンプリング時間間隔と測定領域分割サイズの影響 ここで、領域分割に対する定量的な指標を与えるため、観測データのサンプリング時間間隔 Δt と測定領域分割数 N^2 の二つのパラメータを用いた以下の無次元パラメータ C を新たに導入する。

$$C = \frac{u_{max} \Delta t}{L/N} \quad \dots \dots \dots (12)$$

C は Δt 内の最大粒子移動量と局所領域サイズとの比を表している。また、 C は流れの数値計算に用いられるクーラン数と同じ形になっている。よって指標 C に基づく領域分割においては、数値計算におけるクーラン数の制約と似た制限が存在することが予想される。

図4は、 Δt と測定領域分割数 N^2 およびそのときの C に対する粒子追跡性能をまとめたものである。ただし、測定領域分割数が多くなると統計量算出のためのサンプル粒子数が不足する領域ができるため、本研究では各小領域内粒子数が10以上となるように領域分割数を制限した。図4中の鎖線および破線表示は、第一段階における座標観測型の粒子追跡性能である。一方、二種類のマーク表示は第二段階で加速度対応型を適用して得られた結果である。

はじめに図4(a)を見ると、座標観測型の R_m については99.2%と非常に良好であるが、 R_c は65.5%と低い。

図4 加速度対応型の粒子追跡性能に対する観測データサンプリング間隔と測定領域分割数およびパラメータ C の影響

これは、図2に示した $\Delta t = 0.09$ の場合と同様に、流れ方向が急激に変化するキャビティー移動壁両端付近で粒子追跡の失敗が多いことが主な原因である。一方、加速度対応型の二次刻間平均正対応率 R_m および完全な軌跡が得られる割合 R_c は、領域分割数 3×3 ($R_m = 100.0\%$, $R_c = 99.0\%$) をピークに極めて高い水準にある。このような加速度観測型による優れた効果は $\Delta t = 0.06$ においても同様に認められる。図4(b)に見るように、 $\Delta t = 0.06$ の場合は領域分割数 4×4 で最も追跡性能が高い。このとき、座標観測型の R_m は 99.5% 、 R_c については 73.5% であるが、加速度対応型を用いることにより R_m は 99.9% 、 R_c は 97.0% に改善されている。また、図4(a), (b) を見て分かるように、サンプリング時間間隔が比較的小さい場合は、領域分割数を増やして空間解像度を高めても加速度対応型の追跡性能はほとんど変化しない。これは、加速度による粒子の移動量が Δt 内で小さいためである。よって本方法は、サンプ

リング時間間隔を小さく取れる場合、少ない測定領域分割数でも十分な効果が期待できる。なお、 $\Delta t = 0.03$ における座標観測型の追跡性能が $\Delta t = 0.06$ に比べて低下しているのは、 Δt が小さい程 Δt 内の粒子移動量も小さくなり、粒子座標に含まれる誤差の影響を受けやすいためである。

図4(c), 図4(d) はサンプリング時間間隔が大きい場合の結果である。両図を見て分かるように Δt が大きい場合でも加速度対応型を用いることによって粒子追跡性能は大幅に向上する。ただし、加速度対応型の粒子追跡性能は、測定領域分割数あるいは C による変化がやや大きい。図4(c) に示すように、 $\Delta t = 0.09$ では領域分割数 6×6 、 $C = 0.54$ における追跡性能が最も高い。このときに得られる具体的効果については4.1で詳しく述べた。ただし、加速度対応型の R_m が領域分割数にほとんど関係なく極めて高く保たれているのに比べ、 R_c については領域分割数が 6×6 から離れる程低下してい

ることが分かる．例えば，領域分割数 2×2 ， $C = 0.18$ の場合は $R_c = 77.5\%$ である．また領域分割数 10×10 ， $C = 0.90$ では $R_c = 82.0\%$ である．このような傾向は図 4(d) にも明瞭に現れている．図 4(d) は $\Delta t = 0.12$ の場合の結果であるが，領域分割数 4×4 ， $C = 0.48$ で加速度対応型の R_c が最大となっていることが分かる．このとき，座標観測型の $R_m = 96.5\%$ ， $R_c = 41.5\%$ に対し，加速度対応型の R_m は 99.1% ， R_c においては 70.5% まで向上している．しかし，領域分割数が 4×4 より少ない場合，あるいは逆に大きい場合は， $\Delta t = 0.09$ での結果と同じく R_c の低下が見られる．

ただし，図 4(c)，図 4(d) の結果を C に着目して見ると，加速度対応型の追跡性能が最も高いのはどちらにおいても $C = 0.5$ 付近である．また， C が 0.5 から離れるにしたがって追跡性能が低下することも共通である．このことは，サンプリング時間間隔が大きい場合，加速度対応型を適用するための最適な領域局所化サイズが存在することを意味する．さらに，その最適局所化サイズは，粒子の空間密度だけでなく，領域局所化サイズと最大速度およびサンプリング時間間隔で決定される C によっても制限されると考えられる．サンプリング時間間隔が大きいときに顕著に現れる以上のような加速度対応型の特徴は次のように理解できる．まず C が小さいとき，すなわち領域分割数が少ない場合は流れの空間解像度が低く，加速度の空間的变化が十分に捕らえられない．反対に C が大きいとき，つまり領域分割数が多い場合は個々の小領域のサイズが小さくなるため，一時間ステップ内の粒子の移動が複数の領域にまたがる確率が増える．ところが，粒子の状態予測に用いる領域内平均加速度は，一つ前の時刻にその粒子が存在していた領域の値のみである．よってこのような場合には加速度対応型の予測の精度が低下しやすい．このことは流れの数値計算におけるクーラン数の制約に良く似ているだけでなく，この量に基づいた領域分割が本方法にとって非常に有効であることを意味している．

5. 結 言

本研究は以下のようにまとめられる．

(1) 空間的な加速度の変化を考慮した粒子追跡が行える加速度対応型カルマンフィルタによる粒子追跡アルゴリズムを開発した．

(2) 本粒子追跡アルゴリズムは次の特長を持つ．

- ・粒子追跡のプロセスが二段階化されていること．
- ・局所的な平均加速度を用いた粒子の状態予測を行うこと．
- ・局所的な速度の分散に応じて粒子の探索範囲が設定されること．
- ・局所化されたカルマンゲインにより流れ場内の各領域に適応した粒子の状態推定が行えること．

(3) 本粒子追跡アルゴリズムは，従来型カルマンフィルタによる粒子追跡法では追跡困難であった局所的に加速度が大きく変化する流れにおいても，高水準の追跡性能が維持できることを二次元キャビティ流れを用いた粒子追跡性能評価シミュレーションにより定量的に確認した．

(4) 本粒子追跡アルゴリズムは，観測データのサンプリング時間間隔が大きい場合においても極めて有効である．このとき，測定領域の局所化における最適局所化サイズは，領域サイズと最大粒子速度およびサンプリング時間間隔で決まるパラメータ C によっても制限される．

文 献

- (1) 西野・笠木, 機論, **56**-525, B (1990), 1338.
- (2) 小村・ほか 2 名, 日本造船学会論文集, **170**, (1991), 33.
- (3) 小河源・ほか 2 名, 機論, **57**-541, B (1991), 2905.
- (4) 高崎・ほか 2 名, 機論, **58**-549, B (1992), 1367.
- (5) 小林, 機講論, **920**-17, D (1992), 482.
- (6) 家合・ほか 2 名, 機論, **57**-542, B (1991), 3622.
- (7) 家合・ほか 2 名, 機論, **58**-550, B (1992), 1702.