

# 可視化画像による流速測定技術の開発

## — ノイズ処理法を用いた計測精度の向上 —

1999年10月

核燃料サイクル開発機構  
大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松 4 番地49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :

Technical Cooperation Section,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1194

Japan.

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)

1999

可視化画像による流速測定技術の開発  
—ノイズ処理手法を用いた計測精度の向上—

木村 暢之<sup>1</sup>、三宅 康洋<sup>2</sup>、西村 元彦<sup>1</sup>、上出 英樹<sup>1</sup>、菱田 公一<sup>3</sup>

要旨

高速炉設計において、炉内熱流動現象を定量的に把握するための速度場の計測手法として、瞬時2次元空間の速度ベクトルを時々刻々と測定できる粒子画像流速測定法(PIV)が活用されている。PIVは、流動場に混入された粒子にレーザー等でシート状のパルス光を照射して、カメラ等で粒子群を微小時間間隔で2枚撮影し、この2枚の画像の空間相関を求めるにより流速を定量化する手法である。本手法により正確な流速を得るためにには流れと共に移動している粒子のみを画像に収録する必要がある。しかしながら実際には、構造物や撮影窓上のゴミ等(以下、ノイズとする)が画像中に存在し、流速計測の精度低下の原因となっている。そこで、PIVによる計測精度向上を図るため、ノイズ除去手法の開発、および誤差評価を実施した。

開発したノイズ処理法は、時間的に連続する画像の各ピクセルの時間平均した輝度値を各時刻の画像から減算する時間平均輝度減算法(TIS法)と、連続画像の各ピクセルの最小輝度値を各時刻の画像から減算する最小輝度減算法(MIS法)の2種類である。

本ノイズ処理手法による計測精度評価は、数値解析を基に作られた標準画像に模擬ノイズを付加した画像を用いて実施した。

流速計測精度に関して、ノイズ処理前の画像から求めた流速は、誤差1ピクセル以上の頻度が全体の90%程度であるのに対し、ノイズ処理を施した結果、同程度の誤差の頻度は5%以下に低減した。また、ノイズ処理後は全体の50%以上が0.2ピクセル以内の誤差に収まることが確認された。不確かさ解析を行った結果、計測精度はノイズ処理により3~12倍向上し、MIS法を用いた場合は、TIS法と比べ、計測精度が1.1~2.1倍向上することが確認された。

本ノイズ処理手法を実際の試験に適用した結果、複雑な体系内での流況把握や構造物近傍での流速測定が可能となることを確認した。

1 大洗工学センター ナトリウム・安全工学試験部 原子炉工学Gr.

2 株式会社 エヌデーター

3 大洗工学センター ナトリウム・安全工学試験部 原子炉工学Gr.  
客員研究員(慶應義塾大学理工学部)

**Development of Flow Velocity Measurement Techniques in Visible Images**  
**- Improvement of Particle Image Velocimetry Techniques on Image Process -**

Nobuyuki KIMURA<sup>1</sup>, Yasuhiro MIYAKE<sup>2</sup>, Motohiko NISHIMURA<sup>1</sup>,  
Hideki KAMIDE<sup>1</sup> and Koichi HISHIDA<sup>3</sup>

**ABSTRACT**

Noise reduction system was developed to improve applicability of Particle Image Velocimetry (PIV) to complicated configures bounded flows. For fast reactor safety and thermal hydraulic studies, experiments are performed in scale models which usually have rather complicated geometry and structures such as fuel subassemblies, heat exchangers, etc. The structures and stuck dusts on the view window of the models obscure the particle image. Thus the image except the moving particles can be regarded as a noise.

In the present study, two noise reduction techniques are proposed. The one is the Time-averaged Light Intensity Subtraction method (TIS) which subtracts the time-averaged light intensity of each pixel in the sequential images from the each corresponding pixel. The other one is the Minimum Light Intensity Subtraction method (MIS) which subtracts the minimum light intensity of each pixel in the sequential images from the each corresponding pixel.

Both methods are examined on their capabilities of noise reduction. As for the original "bench mark" image, the image made from Large Eddy Simulation was used. To the bench mark image, noises are added which are referred as sample images.

Both methods reduce the rate of vector with the error of more than one pixel from 90% to less than 5%. Also, more than 50% of the vectors have the error of less than 0.2 pixel.

The analysis of uncertainty shows that these methods enhances the accuracy of vector measurement 3 ~ 12 times if the image with noise were processed, and the TIS method has 1.1 ~ 2.1 times accuracy compared to the MIS.

Thus the present noise reduction methods are quite efficient to enhance the accuracy of flow velocity fields measured with particle images including structures and deposits on the view window.

---

1 Reactor Engineering Group, Sodium and Safety Engineering Division, O-arai Engineering Center

2 NDD Corporation

3 Visiting Researcher, Reactor Engineering Group, Sodium and Safety Engineering Division,  
O-arai Engineering Center  
(Dept. of Mech. Eng., Keio Univ.)

## 目次

1. 緒言 .....	1
2. 可視化画像内ノイズ除去手法の原理 .....	3
2. 1 粒子画像流速測定法(PIV)について .....	3
2. 2 ノイズ処理法について .....	4
2. 2. 1 輝度の時間平均値を用いたノイズ除去手法 .....	5
2. 2. 2 輝度の最小値を用いたノイズ除去手法 .....	6
3. ノイズ除去による原画像の再現性 .....	8
4. PIVに対するノイズ除去処理の効果 .....	11
5. 結論 .....	15
謝辞 .....	16
参考文献 .....	17
付録1 ノイズ除去領域の特定手法 .....	A-1

## 表リスト

表 4.1 ノイズ処理前後の流速計測結果の比較

## 図リスト

- 図 2.1 PIV の原理
- 図 2.2 時間平均輝度減算法の原理
- 図 2.3 最小輝度減算法による原理
- 図 3.1 点状ノイズを付加した場合の処理結果
- 図 3.2 点状ノイズを付加した場合の画像輝度ヒストグラム
- 図 3.3 縞状ノイズを付加した場合の処理結果
- 図 3.4 縞状ノイズを付加した場合の画像輝度ヒストグラム
- 図 4.1 ノイズ処理によるベクトルの相違
- 図 4.2 ノイズ処理前後の流速成分の比較（点状ノイズ）
- 図 4.3 ノイズ処理前後の流速成分の比較（縞状ノイズ）
- 図 4.4 ノイズ処理前後の流速誤差の比較（点状ノイズ）
- 図 4.5 ノイズ処理前後の流速誤差の比較（縞状ノイズ）
- 図 4.6 ノイズ処理による PIV の計測精度の比較（点状ノイズ）
- 図 4.7 ノイズ処理による PIV の計測精度の比較（縞状ノイズ）
- 図 4.8 ノイズ処理の適用例
  
- 図 A-1 ノイズ除去による輝度変動
- 図 A-2 ノイズ除去による画像

## 記号リスト

$E$ :	誤差
$LA, LB, Li, L$ :	輝度値
$LA', LB'$ :	輝度変動値（輝度値－輝度平均値）
$N$ :	ピクセル数
$R$ :	相関係数
$U_{rss}$ :	95%包括度不確かさ
$V$ :	計測値

### 上添字

$B$ :	かたより誤差
$m$ :	計測平均値
$S$ :	偶然誤差
$t$ :	真値

### 下添字

$avg$ :	平均値
$b$ :	背景輝度値
$k$ :	あるピクセルを表す
$min$ :	輝度の最小値
$n$ :	ノイズの輝度値
$p$ :	粒子が存在している場合の輝度値
$rms$ :	変動の二乗平均値
$s$ :	空間
$t$ :	時間

## 1. 緒言

高速炉設計において、原子炉の安全性を担保した上で経済性を向上するためには、種々の実験および解析により炉内熱流動現象を定量的に把握することが必要である。試験装置において、実機の熱流動現象の模擬性を考慮すると、作動流体はナトリウムを用いることが望ましい。しかしながら、ナトリウム試験装置は高価であり、形状をパラメータとした試験等を実施することは困難である。また、ナトリウムを作動流体とした試験では、小型のプローブ式電磁流速計などが開発されているものの速度場の詳細なデータを取得することは困難である。そこで、ナトリウムと流動特性の類似している水を作動流体とした試験を実施することにより、詳細な速度場情報の取得が代替手法として用いられる。

速度場を定量的に把握する手法としては、レーザードップラーフロー流速測定法 (Laser Doppler Velocimetry; LDV) 、熱線流速測定法、超音波ドップラーフロー流速測定法 (Ultrasound Doppler Velocimetry; UDV) <sup>[1]</sup> 、および粒子画像流速測定法 (Particle Image Velocimetry; PIV) <sup>[2]</sup> 等がある。この中で、PIV は一定時間間隔で撮影された粒子を含む画像を 2 枚 1 組で撮影し、その 2 枚の空間相関を取ることにより、流速を求める手法である。PIV では、2 次元平面で瞬時の流速が時々刻々求められることから、多くの計測点のデータを取得する場合、非常に有効な手法である。このような背景から、大学等の研究機関では、比較的単純な体系に対して PIV が開発・適用され、その有効性が示されてきた。しかし、高速炉の模擬試験では、体系が複雑であるため、構造物や撮影窓上のごみやレーザーシートの構造物からの反射光 (ハレーション) など (以下、ノイズとする) が画像中に存在し、誤流速を算出する原因となる。画像中のノイズ除去は、主に医学、気象学、天文学等の画像解析を行う分野、あるいは放送分野で研究が進められている。<sup>[3]-[7]</sup>

ノイズを除去する方法としては、色の波長からノイズ波長のみを除去する手法<sup>[3]</sup>、ノイズのみが撮影された画像 (例えば、流体中に粒子を混合する前) と対象物とノイズが撮影された画像の差分によってノイズを除去する手法<sup>[4][5]</sup>、画像中の各画素に対して周辺の画素との平均・および微分処理 (膨張・収縮処理) を施すことによりノイズを除去する手法<sup>[5][6]</sup>、画像を 2 次元周波数領域に変換し、ノイズ周波数帯のみを除去する手法<sup>[7]</sup>、等が検討されている。また、PIV 用画像に対しても、いくつかノイズ処理手法について検討されている。<sup>[8][9]</sup>

現在、大洗工学センター原子炉工学グループでは、高速炉の自然循環崩壊熱除去研究の一環として、冷却材が燃料集合体間を自然対流することにより、炉心最高温度低減の可能性を持ったインターラッパーフロー現象について、水を作動流体とした試験を実施している。<sup>[10]</sup> 本試験では、PIV を用いて集合体間ギ

ヤップの流速を計測し、現象の定量的評価を行っている。PIV を行うためには、模擬炉内構造物、試験容器表面のごみおよびハレーション等のノイズを画像から除去することにより、本来の信号である粒子の輝度分布への影響を最低限に抑える必要がある。

本報では、PIV による流速計測精度向上を図るため、画像中のノイズを除去する手法の開発を行い、ノイズ処理前後の PIV 精度の検証を実施したことについて報告する。本ノイズ処理の検証には、東京大学原子力工学研究施設岡本孝司助教授が可視化情報学会共同研究「PIV 標準化・実用化研究会」に提供されておられる標準画像（Large Eddy Simulation 解析結果を基に作成したもの）を用いた。<sup>[11][12]</sup>

## 2. 可視化画像内ノイズ除去手法の原理

### 2. 1 粒子画像流速測定法(PIV)について

PIV は、流体の可視化画像を解析することにより流速を得る非接触光学計測手法であり、従来のレーザードップラー流速計や熱線流速計等の計測手法では得ることができない瞬時の 2 次元断面速度場情報を得ることが可能である。

図 2.1 にここで用いた輝度相関法に基づく PIV の基本的原理を示す。流動場に混入された流れに十分追従する粒子（トレーサ粒子）にレーザー等でシート状のパルス光（レーザーシート）を照射し、写真フィルムやビデオカメラ等でトレーサ群を微小時間間隔  $\tau$  で 2 枚撮影する。次に、2 枚目画像において、1 枚目の参照領域 A と同じパターンの領域を探索する。探索する手法として、2 枚の画像領域間の空間相互相関処理を用いている。

参照領域 A のピクセル数を  $N_s$ 、各位置の輝度を  $LA(k)$ 、2 枚目画像内の探索領域 B-x ( $x$  は探索領域の数) のピクセル数を  $N_s$ 、各位置の輝度を  $LB(k)$  とする。領域 A,B-x の輝度値の空間平均値を  $LA_{s,avg}$ ,  $LB_{s,avg}$  とすると、

$$LA_{s,avg} = \frac{\sum_{k=1}^{N_s} LA(k)}{N_s} \quad (式 2. 1)$$

$$LB_{s,avg} = \frac{\sum_{k=1}^{N_s} LB(k)}{N_s}$$

となる。また、領域 A,B-x の輝度変動値を

$$LA'(k) = LA(k) - LA_{s,avg} \quad (式 2. 2)$$

$$LB'(k) = LB(k) - LB_{s,avg}$$

とすると、輝度変動の空間平均値(RMS 値)  $LA_{s,rms}$ ,  $LB_{s,rms}$  は、

$$LA_{s,rms} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{N_s} (LA(k) - LA_{s,avg})^2}{N_s}} \quad (式 2. 3)$$

$$LB_{s,rms} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{N_s} (LB(k) - LB_{s,avg})^2}{N_s}}$$

となる。

これらの値により、相互相関係数  $R$  は、以下のように定義される。

$$R = \frac{\frac{1}{N_s} \sum_{k=1}^{N_s} LA'(k) LB'(k)}{LA_{s,rms} LB_{s,rms}} \quad (\text{式2. 4})$$

この相互相関係数は、輝度変動の空間平均値で規格化していることにより、全く同じ画像で1、輝度が反転している画像（ネガ・ポジ画像間など）では-1、完全に相關のない画像では0となる。

1枚目の参照領域 A に対して、探索領域 B-x を2枚目の画像の中で移動させることにより、相互相関係数の最大となる位置を探索する。その位置の差が参照領域 A 内の粒子パターンの移動したピクセル単位の距離 D である。図 2.1においては、参照領域 A と探索領域 B-2 が最大相関係数をとる位置となっている。

距離 D を画像中においたスケール等との比較により有次元の距離に変換し、これを2枚の画像収録間隔  $\tau$  で割ることにより、流速を求めることができる。

参照領域 A の位置をずらして同様の計算を行うことによって、画像内各位置の流速を求める。参照領域の大きさは測定精度・分解能に影響があるが、640×480 ピクセルの画像に対して 20×20 ピクセル程度の領域を設定することが多い。

ここで、画像の最小構成要素はピクセルであるから、上記の手法のみでは、距離 D の最小分解精度は、ピクセルの大きさ（ピクセル精度）である。この場合は流速に対する計測誤差が大きくなる（例えば、10 ピクセルの移動量に対して、1 ピクセルの誤差が生じることから、10%の誤差となる）。そこで、相関係数のピクセル単位での空間分布から最大相関係数をもつ位置を内挿することにより、精度を向上させる手法が用いられている（サブピクセル法）。

サブピクセル法は、ピクセル精度により求められた最大相関係数とその周囲ピクセルの相関係数を用い、Gauss 分布に当てはめることにより、実際の最大相関係数をもつ位置を内挿するものである。本手法により、計測精度は、0.2 ピクセル程度となる。この場合にも、画像内の輝度値が 0, 1 しか持たないような2値化画像では相互相関係数分布が Gauss 分布をもたないため、サブピクセル法を用いても大きく精度向上を図ることはできない。サブピクセル法を適用するためには、個々の粒子単体での輝度分布が Gauss 分布となる程度の粒子径があり（3×3 ピクセル以上）、画像の空間輝度分布が最小値から最大値までなめらかな分布をもつことが望ましい。

## 2. 2 ノイズ処理法について

PIV の原理については前節にて示したが、実際に PIV を用いる上で、種々の問題が存在する。

構造が単純な試験装置では、画像中に構造物が撮影されることは少なく、ま

た、アクリル窓等の撮影窓にごみ等などが付着した場合においても、メンテナンスが容易に行えることが多い。しかし、実機模擬するために複雑な形状の模型試験や構造物近傍の流動場を対象とする場合、流体中に存在する構造物がトレーサ粒子と共に画像中に撮影される。また、構造が複雑な大規模試験装置では、頻繁に試験装置のメンテナンスを行うことができず、撮影窓に付着したごみが、画像中にトレーサ粒子と共に撮影されてしまうという問題が生じる。これらの構造物や撮影窓のごみ、レーザー光が構造物に反射するハレーション（ノイズ）は、PIVの妨げとなり、収録データの信頼性を低下させる原因となる。

よって、収録した画像データから、信頼性の高い流速データを得るために、このようなノイズを除去し、流れている粒子のみの画像を得る必要がある。

撮影画像中で、トレーサ粒子は時間経過と共に移動しているため、撮影時刻が異なる画像では、画像内の同一ピクセル（位置）の輝度値は、トレーサ粒子の存在の有無によって時間的に大きく変動する。一方、ノイズは時刻の異なる画像においても常に同位置に撮影されているため、輝度値の時間変動はほとんどない。この特徴から、時系列画像データにおいて、輝度値が時間変動しない箇所は、ノイズであると考えられる。トレーサ粒子による信号とノイズの輝度値の時間変動が異なる特性を利用し、以下に示す2種類のノイズ除去手法を開発した。

## 2. 2. 1 輝度の時間平均値を用いたノイズ除去手法

本手法は、時間的に連続する画像の各ピクセルの輝度を時間平均し、各時刻の輝度から時間平均輝度を減算することにより、ノイズを除去するものである。本手法は、塩崎ら<sup>[8]</sup>によって検討されている。

時間的に連続する画像の各ピクセルの輝度値を  $L_t(k)$ 、時間的に連続する画像の枚数を  $N_t$  とすると、各ピクセルの時間平均輝度  $L_{t,\text{avg}}(k)$  は以下の式で求められる。

$$L_{t,\text{avg}}(k) = \frac{1}{N_t} \sum_{t=1}^{N_t} L_t(k) \quad (\text{式2. 5})$$

ノイズの存在するピクセルは、照明強度一定の条件下において、輝度値の時間変動はないと考えられるので、（式2. 5）は、以下のようになる。

$$L_{t,\text{avg}}(k) = \frac{1}{N_t} \sum_{t=1}^{N_t} L_t(k) = \frac{1}{N_t} L_t(k) \times N_t = L_n(k) \quad (\text{式2. 6})$$

ここで、 $L_n(k)$  はノイズの輝度値である。

一方、ノイズがないピクセルは、トレーサ粒子がある時刻とない時刻がある。そこで、トレーサ粒子の存在する時刻の輝度値を  $L_p(k)$ 、存在しない時刻の輝度

値（背景輝度値）を  $L_b(k)$  とすると、(式2. 5) は、以下のようになる。

$$L_{t,\text{avg}}(k) = \frac{1}{N_t} [L_p(k) \times N_p + L_b(k) \times N_b] \quad (\text{式2. 7})$$

ここで、 $N_p$  はピクセルに粒子の存在する画像の枚数、 $N_b$  は粒子が存在しない画像の枚数であり、 $N_t = N_p + N_b$  が成り立つ。

時系列画像の枚数が多く ( $N_t$  が大) 、各ピクセルにトレーサ粒子がある時刻の頻度が少ない場合 ( $N_p \ll N_t$ ) 、以下の近似が成り立つと仮定する。

$$N_b/N_t \approx 1, \quad N_p/N_t \approx 0 \quad (\text{式2. 8})$$

これにより、(式2. 7) は以下のようになる。

$$L_{t,\text{avg}}(k) \approx L_b(k) \quad (\text{式2. 9})$$

また、ノイズとトレーサ粒子が重なっている箇所に関しては、(式2. 9) より、 $L_b(k) = L_n(k)$  となるので、

$$L_{t,\text{avg}}(k) = L_n(k) \quad (\text{式2. 10})$$

が成り立つ。

すなわち時間平均輝度は、ノイズの輝度あるいは背景輝度となり、各時刻の画像からこれを減算することにより、ノイズを除去できる。

図2.2に本手法によるノイズ除去結果の一例を示す。横軸にフレーム数（時間軸と等価）、縦軸に輝度値（ここで用いたシステムでは8bitのデータであり、0～255の値をもつ）を示す。ノイズピクセルの輝度値は、時間平均輝度を減算することにより0近傍の値となることから、ノイズが除去できていることがわかる（図2.2(a)）。一方、トレーサ粒子が撮影されているピクセルの輝度値は、時間平均輝度を減算しているために輝度が低下するが、トレーサ粒子の通過によるピークは再現されている（図2.2(b)）。減算した結果の輝度が0未満である場合、輝度値を0に置き換えている。そのため、トレーサ粒子周りの微小な輝度分布や輝度値の小さいトレーサ粒子はノイズと共に除去され、画像は2値化画像に近くなる。

## 2. 2. 2 輝度の最小値を用いたノイズ除去手法

前節の時間平均輝度を用いたノイズ除去手法では、トレーサ粒子周りの微小な輝度分布や輝度値の小さいトレーサ粒子を再現することができなかった。そこで、ノイズを相互相関処理に与える影響がないレベルまで低下させた上で、輝度値情報の損失を最低限にするために、時系列画像から各ピクセルの時系列における最小輝度を減算するノイズ処理手法を開発した。

時系列画像の各ピクセル毎の最小輝度値は、以下の式で求められる。

$$L_{\min}(k) = \text{MIN}[L_t(k), t=1 \sim N_t] \quad (\text{式2. 11})$$

ノイズピクセルは、時系列画像において一定の輝度値、あるいはトレーサ粒子が重なった場合に輝度値が大きくなる。よって、

$$L_{min}(k) \doteq L_n(k) \quad (\text{式2. 1 2})$$

一方、トレーサ粒子が撮影されているピクセルでの最小輝度は、背景輝度と同じになる。

$$L_{min}(k) = L_b(k) \quad (\text{式2. 1 3})$$

求めた最小輝度値を時系列画像の輝度値から減算することにより、ノイズを除去した画像を作成する。

図 2.3 に本手法によるノイズ除去処理結果の一例を示す。グラフの座標系は図 2.2 と同じである。ノイズピクセルの場合、時系列画像から各ピクセルの最小輝度値を減算すると、輝度値は 0 近傍の値となり、ノイズが除去されていることがわかる（図 2.3(a)）。トレーサ粒子が通過するピクセルの場合、ノイズ除去により背景輝度が 0 程度に低下する。そのため、全体の輝度値は背景輝度分低下するが、最小輝度を減算することにより、失われた情報はなく、トレーサ粒子通過前後の微小な輝度変化も再現されている（図 2.3(b)）。

のことから、最小輝度を減算する手法の方が、時間平均輝度を減算する手法より画像中の輝度を良く再現しており、サブピクセル法を用いた画像処理に適していると考えられる。

ここで、本ノイズ処理が粒子輝度分布を大きく変化させないことが重要である。そこで、ノイズがない画像（原画像）と原画像にノイズを付加し、本ノイズ処理を施した結果の画像の輝度分布を比較することにより、原画像の再現性を確認する必要がある。

前述の時間平均輝度減算ノイズ除去法（Time-Averaged Light Intensity Subtraction method; TIS 法）と最小輝度減算ノイズ除去法（Minimum Light Intensity Subtraction method; MIS 法）による原画像の再現性と流速計測データの検証は、次章以降に示す。

### 3. ノイズ除去による原画像の再現性

前章にて示した2種類のノイズ除去手法について、原画像の再現性を評価するため、模擬ノイズを加えた画像に対してノイズ除去を行った結果の比較を行った。

図3.1と図3.2に2種類の模擬ノイズを加え、TIS法とMIS法によりノイズを除去した結果を示す。各画像は白黒反転画像（輝度値大一黒、輝度値小一白）として示した。原画像は、(社)可視化情報学会協力研究、PIVの実用化・標準化研究会によって提供された標準画像（ $256 \times 256$ ピクセル）<sup>[11][12]</sup>を $640 \times 480$ ピクセルにサイズを変えて使用した。本標準画像は、LESによる解析を基に得られた画像であり、正解値（真値）が明らかである。画像中の粒子数は10000、画像枚数は50枚である。

図3.1は、撮影窓に付着したごみを模擬した点状ノイズを付加し、2種類のノイズ除去法を施した結果である。左上の原画像(1)に対して、右上のノイズ(2)を付加した画像が、(3)の画像である。(3)に対して、TIS法とMIS法を施す。両手法により求めた減算すべきノイズ画像を(4)に示す。TIS法により得られたノイズ画像は、各画像の輝度を平均化しているために、粒子の軌跡が僅かに残っている。一方、MIS法により得られたノイズ画像は、ほぼ完全に付加したノイズ画像(2)を再現していることがわかる。ノイズ付加画像(3)から2種類のノイズ除去法により抽出したノイズ画像(4)を減算することにより復元した画像を(5)に示す。TIS法では、原画像(1)と比べ、全体に白くなってしまっており、輝度変動情報が失われていることがわかる。一方、MIS法では、原画像(1)と復元画像(5)では、ほぼ同じ画像となり、本ノイズ処理により原画像の再現が可能であることがわかる。

図3.2に、原画像、点状ノイズ付加画像およびノイズ除去画像の輝度のヒストグラム（ $640 \times 480$ ピクセルの輝度について輝度値毎にヒストグラム化したもの）を示す。このヒストグラムを比較することにより、本ノイズ処理による原画像の再現性を定量的に評価することが可能であると考えられる。

原画像は、輝度値0で最も頻度（対応する輝度値を持つピクセル数）が高く、輝度値が大きくなるにつれて指数関数的に頻度が低下している。輝度値分布を持つ点状ノイズを付加した場合、ノイズにより輝度値が上昇するため、低輝度（50以下）の頻度が低下し、その分輝度値50の頻度が上昇している。同様に局所的に頻度の高い輝度値がノイズの輝度値に対応して数カ所見られるとともに、高輝度（150以上）の頻度が、高くなっていることがわかる。

ノイズ付加画像にTIS法によるノイズ除去を施した場合、ノイズに対応して局所的に頻度が上昇している箇所は、ほぼ完全に除去されたが、全体の分布形状は、原画像とは異なっていることがわかる。一方、最小輝度減算ノイズ除去

法では、局所的に高頻度となる輝度値は残るが、その頻度はノイズ付加画像と比べ、 $1/3$ 以下に低下している。また、全体の分布形状は、原画像を良く再現していることがわかる。

図3.3は、画像の背景として構造物やレーザーシートの輝度むら、構造物からの反射によるハレーションを模擬した縞状ノイズを付加し、ノイズ処理を行った結果である。図3.1と同様に、左上の原画像(1)に対して、右上のノイズ(2)を付加した画像が、(3)の画像である。ノイズ付加画像(3)に2種類のノイズ除去法を施すことにより得られた、減算すべきノイズ画像を(4)に示す。ノイズ付加画像(3)から抽出したノイズ画像(4)は、MIS法による画像の方が、TIS法による結果と比べ、付加ノイズ(2)を良く再現していることがわかる。ノイズ画像(4)をノイズ付加画像(3)から減算することによって復元した画像を(5)に示す。MIS法による処理の方が、TIS法による処理に比べ、原画像(1)の再現性は高い。しかしながら、MIS法によるノイズ処理を行った場合においても、付加ノイズの輝度値が高い位置（ノイズ画像(2)の黒い領域）で、復元画像(5)は、原画像(1)と比べ、輝度変動情報が大きく欠落していることがわかる。

図3.4に原画像、縞状ノイズ付加画像およびノイズ除去画像の輝度のヒストグラムを示す。

縞状ノイズを付加した画像では、合成したノイズに対応して輝度値70、220付近の縞の頻度が非常に大きくなっていることがわかる。TIS法によるノイズ処理を施した場合、縞状ノイズによる局所的に輝度値の頻度が高い領域は消去されたが、ヒストグラム全体が輝度値の小さい側へシフトし、原画像のヒストグラムを再現できていない。一方、MIS法によるノイズ除去を施した場合、縞状ノイズによる局所的に高頻度を示す輝度値は残るもの、輝度値30以下では、原画像のヒストグラムを再現しており、高輝度値においても、TIS法と比較して、原画像を良く再現していると考えられる。付加ノイズの輝度が大きい場合は、輝度値が飽和することにより輝度変動情報が欠落しているため、MIS法を用いた場合においても、完全に原画像を再現することは不可能である。

この原因は、以下のためであると考えられる。

各ピクセルの輝度値は、1バイト整数(0~255)で与えられる。疑似ノイズ画像(3)は、原画像の輝度にノイズの輝度を加算することにより求めたが、各ピクセルの輝度値は、255を越えることができないので、輝度値が255以上となるピクセルは255とした。そのために、付加ノイズ(2)の輝度値が大きい領域（黒い領域）と粒子が重なると、粒子の輝度変動情報が大きく失われることが疑似ノイズ画像(3)よりわかる。一度、失った輝度情報は、再現することは不可能である。粒子のみを的確に抽出する手法として、ピクセル毎の輝度時間変動値の標

準偏差をしきい値として、ノイズ処理を施す領域を特定する手法も開発したが、この手法では粒子周りの輝度分布を変形させるため、本報では、オプションとして付録 1 に示す。本手法は、輝度の空間分布がノイズ処理により変化するために、輝度値相関法による PIV には不適であるが、粒子の位置が明確に特定できるため、粒子追跡流速測定法（PTV）や 2 値化相関法による PIV には有効な手法である。

次章にて、本ノイズ処理を用い、図 3.1、図 3.3 で示したノイズ付加画像に対する輝度値相関法 PIV の計測精度の定量的な評価を実施した。

#### 4. PIVに対するノイズ除去処理の効果

前章にて、MIS 法を用いたノイズ除去により、原画像の再現性が向上することを示したが、実際にノイズ処理と PIV を実施する上では、ノイズ処理後の画像から得られた流速の信頼性を定量的に評価しておく必要がある。

本章では、図 3.1、図 3.3 に示した画像群に対し輝度相互関係 PIV を適用して得られた流速を真値 (LES の結果) と比較することにより、本ノイズ処理法の定量的な評価を行った。

本評価で使用した輝度相互関係 PIV は、サブピクセル法の導入により、1 ピクセル以下の画像解析精度を有し、周辺の移動量との比較により上位 3 つの相関係数との入れ替えを行う手法である。<sup>[13][14]</sup> 輝度相互関係は参照領域内の空間平均輝度からの変動成分により計算しているため、相互関係導出時に背景輝度の影響が除去される。本処理において、参照領域サイズは  $640 \times 480$  ピクセルの画像に対して  $22 \times 22$  ピクセルとした。

図 4.1 に PIV により得られた流速ベクトルを示す。図 4.1(1)は、図 3.1 の点状ノイズを加えた場合、図 4.1(2)は、図 3.3 の縞状ノイズを加えた場合である。

ノイズを付加した画像のベクトル (赤) は、点状ノイズ、縞状ノイズとも真値 (黒) とは大きく異なっていることがわかる。点状ノイズの場合は、粒子とノイズが共に点状であり、ノイズは二枚の画像間で移動していないため、ノイズ付加画像の流速は、真値と比較して小さくなる傾向がある。一方、縞状ノイズの場合は、図 3.3 で示すように縦縞ノイズであるため、縞に沿う方向の流速が求められていることがわかる。

ノイズ付加画像に MIS 法によるノイズ処理を施して得られた画像から求めた流速 (青) は、縞状ノイズ(2)の場合は真値と一致していない箇所はあるが、縦縞のノイズに沿う誤流速がほぼ除去されていることがわかる。点状ノイズの場合は、ノイズ除去によりほぼ真値の流速を再現できていることがわかる。

図 4.2 に、図 4.1(1)中の四角内の流速を比較した結果を示す。真値と原画像 PIV による流速は、ほぼ一致していることがわかる。ノイズを付加した場合、水平方向流速、垂直方向流速とも真値とは大きく異なった分布を示している。このノイズ付加画像に対し 2 種類のノイズ除去処理 (TIS 法、MIS 法) を施した画像から得られた流速は、ほぼ真値の流速と一致していることがわかる。

この図からは、ノイズ除去法による流速の相違は確認できないが、後に示す不確かさ解析により検討する。

図 4.3 に、図 4.1(2)中の四角内の流速を比較した結果を示す。図 4.2 と同様に、真値と原画像 PIV による流速は、ほぼ一致している。ノイズを付加した場合、縦縞のノイズに影響されるため、水平方向の流速が 0 に近い値となっている点

が多いことがわかる。垂直方向流速においても、ノイズ付加画像から得られた流速は、真値と異なっている。一方、ノイズ除去済の画像から得られた流速は、ほぼ真値と一致していることがわかる。

本ノイズ処理手法による流速計測の誤差を定量化するために、真値と 50 枚の画像の相関から得られた流速（49 組、一組に  $30 \times 30$  の計測点）の比較を行った。

図 4.4 に点状ノイズを加えた場合の流速誤差を示す。縦軸は、全計測点 ( $30 \times 30 \times 49 = 44100$ ) に対する頻度割合、横軸は PIV により算出した各計測点での移動量に対する誤差（ピクセル値）とした。例えば、誤差 0.1 の場合、誤差は 0 ~ 0.1 の範囲を示す。誤差が 1 ピクセル以上の場合は、次の級として一括して示した。原画像の PIV 処理結果と真値との誤差は、全流速計測点の 80%以上において 0.2 ピクセル以内となっている。ノイズ付加画像では、水平方向流速で 90% 以上、垂直方向流速で 20%程度の計測点において 1 ピクセル以上の誤差となっており、ノイズの影響により、画像の相関関係が正しく得られていないことがわかる。一方、TIS 法と MIS 法によるノイズ処理を行った場合、原画像ほどの計測精度は得られていないが、1 ピクセル以上の誤差をもつ計測点は 5%以下となり、0.2 ピクセル誤差範囲内に、水平方向流速の 50%以上、垂直方向流速の 75% 以上が収まっていることがわかる。すなわち、ピクセル精度以上の流速計測は行われていることがわかる。この図から、ノイズ処理法による相違は確認できない。

図 4.5 に縞状ノイズを加え、除去を行った場合の流速計測誤差を示す。縦軸と横軸は、図 4.4 と同じである。ノイズ付加画像では、1 ピクセル以上の流速誤差をもつ頻度が高くなっているのに対し、ノイズ処理画像から得られた流速誤差の頻度割合は、原画像に近づいていることがわかる。また、縞状ノイズに対しては、MIS 法によるノイズ除去は、TIS 法によるものより、精度が向上していることがわかる。

図 4.6 に図 4.4（点状ノイズ）を基にして得られた流速誤差の累積頻度割合を示す。横軸は流速誤差ピクセル値、縦軸は累積頻度割合である。累積頻度割合は、ある流速誤差以下になっている計測点が、全計測点に占める割合である。水平方向流速、垂直方向流速とも、ノイズ処理により流速の計測精度が大きく向上していることがわかる。

図 4.7 に図 4.5（縞状ノイズ）から得られた流速誤差の累積頻度割合を示す。前図と同様に、ノイズ処理により計測誤差が大きく低減していることがわかる。

今回、開発したノイズ除去手法による PIV 流速計測精度の向上度合を定量的に評価するために、ANSI/ASME PTC19.1<sup>[15]</sup>の手法を用いて不確かさ解析を行っ

た。

計測誤差は計測値から真値を引いた差として定義される。計測による誤差は、計測値の平均値から真値を差し引くことによって求められるかたより誤差と、各計測値のばらつきである偶然誤差に分けられる。本評価では、真値が既知であるため、かたより誤差  $E^B$  として真値と計測値の差の平均、偶然誤差  $E^S$  として真値と計測値の差（誤差）の標準偏差を用いた。

$$E^B = \frac{\sum_{l=1}^N (V_l^m - V_l^t)}{N} \quad (\text{式4. 1})$$

$$E^S = \sqrt{\frac{\sum_{l=1}^N \{(V_l^m - V_l^t) - E^B\}^2}{N}} \quad (\text{式4. 2})$$

よって、 $E^B$  と  $E^S$  から 95% 包括度不確かさ  $U_{rss}$  は、

$$U_{rss} = \sqrt{(E^B)^2 + (2E^S)^2} \quad (\text{式4. 3})$$

として求められる。

表 4.1 に (式4. 1) ~ (式4. 3) により求められた不確かさ  $U_{rss}$  を用いて、ノイズ除去の効果を評価した結果を示す。原画像の対真値に対する不確かさは、画像関連処理手法そのものによる誤差であると考えられる。

点状ノイズを付加した場合、本ノイズ除去法により、不確かさが、1/3 以下（最大 1/12 以下）に減少したことがわかる。また、今回新たに開発した MIS 法を用いたノイズ除去による不確かさは、TIS 法によるノイズ除去と比較し、1/1.1~1/2.1 に減少していることがわかる。

このことから、本ノイズ処理により、計測精度は 3~12 倍向上することがわかった。また、MIS 法によるノイズ処理は、TIS 法と比較し、1.1~2.1 倍、精度が向上することがわかった。

図 4.8 にインターラッパーフロー水試験<sup>[10]</sup>にここで開発したノイズ処理を含む PIV を適用した例を示す。原画像の上部で、白く光っている部分は集合体間隔を維持するために設置されているボタンパッドにレーザー光が反射してハレーションをおこしている部分である。目視により、流体は左上方に流れていることが確認されている。原画像による PIV では、ボタンパッド近傍の流速が、ボタンパッドによるハレーションノイズに引きずられていることがわかる。一方、ノイズ処理を施した結果では、ボタンパッド近傍の流速は左上方に向かう流れとなっており、目視による観測結果と一致する。この結果から、本ノイズ処理により構造物近傍の流れを捉えることが可能であると考えられる。

本報のノイズ除去手法は、PIV による流速計測精度の向上に大きく寄与することがわかった。また、本ノイズ除去手法は、構造物や構造物からの反射光ノイ

ズ等を画像から除去できることから、構造物近傍での流速測定や複雑な体系内の流況把握を可能とする。PIVによる瞬時2次元流速分布測定を広い分野に適用することができる。

## 5. 結論

サブピクセル精度を有する輝度相関法を用いた粒子画像流速測定法（PIV）による流速計測精度向上を図るために、画像中のノイズを除去する手法を開発した。また、今回開発したノイズ除去手法について、流速計測精度の定量的な評価を実施した。以下にその結果を示す。

- 時間的に連続する画像の各ピクセルの時間平均した輝度値を各時刻の画像から減算する時間平均輝度減算法と、連続画像の各ピクセルの最小輝度値を各時刻の画像から減算する最小輝度減算法の2種類のノイズ除去法を開発した。
- 最小輝度減算法によるノイズ処理は、時間平均輝度減算法を用いた場合と比べ、原画像の再現性が高いことがわかった。
- Large Eddy Simulationによる解析結果（真値）に基づき合成した粒子画像に対して、疑似ノイズを付加し、本手法によるノイズ除去手法の有効性を確認した。その結果、PIVにより求めた流速をノイズ処理前後で比較すると、ノイズ処理前の画像では、真値に対して1ピクセル以上の誤差となる頻度が全体の90%以上であるのに対し、上記の2種類のノイズ処理を施した結果、同程度の誤差となる頻度は5%以下に低減された。また、ノイズ処理後は、0.2ピクセル以下の誤差範囲に50%以上が収まることが確認された。
- 不確かさ解析を行った結果、ノイズ処理により計測精度は3～12倍に向上することがわかった。また、最小輝度減算法は、時間平均輝度減算法と比較し、1.1～2.1倍高い精度をもつことが確認された。

本ノイズ処理手法は、PIVによる複雑な体系内での流況把握や構造物近傍での流速測定への適用を可能とすることがわかった。

## 謝辞

本研究にあたり、「PIV の実用化・標準化研究会」を通して標準画像をご提供いただきました。ここに感謝いたします。また、本研究のきっかけとなるインターラッパー水試験を実施して頂いた大洗工学センター、ナトリウム・安全工学試験部、原子炉工学 Gr. の安田明洋氏、および常陽産業（株）の伊藤真美氏、小沼英良氏、関根正氏に感謝いたします。

## 参考文献

- [1] Takeda Y., Development of an ultrasound velocity profile monitor, Nucl. Eng. Design, Vol. 126, 277-284, 1990.
- [2] Adrian R. J., "Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics", Ann. Rev. Fluid Mech., Vol. 23, 261, 1991.
- [3] 後藤貴志、福島甫、虎谷充浩, “海色画像におけるサブピクセルクラウドの影響の検討”, 日本リモートセンシング学会第 19 回学術講演会論文集, P16, 223-224, 1995.
- [4] 許 博程、原島博, “動き、色、位置のクラスタリングに基づく動画像の領域分割と領域追跡”, 信学技法, PRU94-152, 51-58, 1995.
- [5] 曽山 豊、安田 孝美、横井 茂樹、鳥脇 純一郎, “相関法に基づく高精細オペティカルフロー抽出”, 信学技法, PRU92-30, 41-48, 1992.
- [6] 大谷雅男、海老澤嘉伸, “2 光源と画像差分法による瞳孔検出法に基づく注視点検出”, 1995 年電子情報通信学会情報・システムソサイエティ大会講演論文集, 287-288, 1995.
- [7] Hirai Anil N., Totsuka T., “高速なインタラクティブ画像ノイズ除去のための頻度と空間領域情報の結合”, Computer Graphics Proc., Annual Conference Series, 269-276, 1996.
- [8] 塩崎孝壽, “ノイズを含む画像からの粒子像抽出と 2 重露光粒子画像からの輝度差累積法による速度情報の算出”, 粒子画像流速測定法研究会(III)報告書 東京大学工学部付属原子力工学研究施設 UTNL-R-0329, 47, 1995.
- [9] 斎藤隆之, “低純度二酸化炭素ガスの海洋貯留システム”, 第 69 回筑波混相流・エネルギー談話会資料 No.69, 15-20, 1999.
- [10] 安田明洋、宮越博幸、他, “インターラッパーフロー自然循環水流動可視化実験 –ボタン型ラッパー管パッド形状における試験および解析結果–”, JNC 公開成果報告書 JNC TN9400 99-072, 1999.
- [11] PIV の実用化・標準化研究会中間報告 II, (社) 可視化情報学会, 1998.
- [12] Okamoto, K., Kobayashi, T., Saga, T. and Nishio, S., "Particle imaging velocimetry standard images for transient three-dimensional flow", Proc. 9<sup>th</sup> Int. Symp. Application of Laser Tech. to Fluid Mech., Lisbon, pp.13.4.1-13.4..6, 1998.
- [13] 植原潤、菱田公一、前田昌信, “二次元衝突噴流よどみ域における渦構造と熱伝達 (DPIV と LIF による速度・温度場の同時計測) ”, 日本機械学会論文集 (B 編) 60-573, 1994.
- [14] 植原潤、菱田公一、前田昌信, “画像処理による流動場の速度・温度同時計測法”, Thermal Science & Eng., 2-4, p1-9, 1994.
- [15] 日本機械学会訳, アメリカ機械学会性能試験規約「計測の不確かさ」, 丸善, 1987.

表 4.1 ノイズ処理前後の流速計測結果の比較

流速成分	画像	不確かさ $U_{rss}$ (ピクセル)	
		点状ノイズ	縞状ノイズ
水平方向流速	原画像	0.38	0.38
	ノイズ付加画像	5.58	4.31
	時間平均輝度減算法	1.00	1.45
	最小輝度減算法	0.88	1.18
垂直方向流速	原画像	0.22	0.22
	ノイズ付加画像	1.36	1.65
	時間平均輝度減算法	0.44	0.47
	最小輝度減算法	0.39	0.34

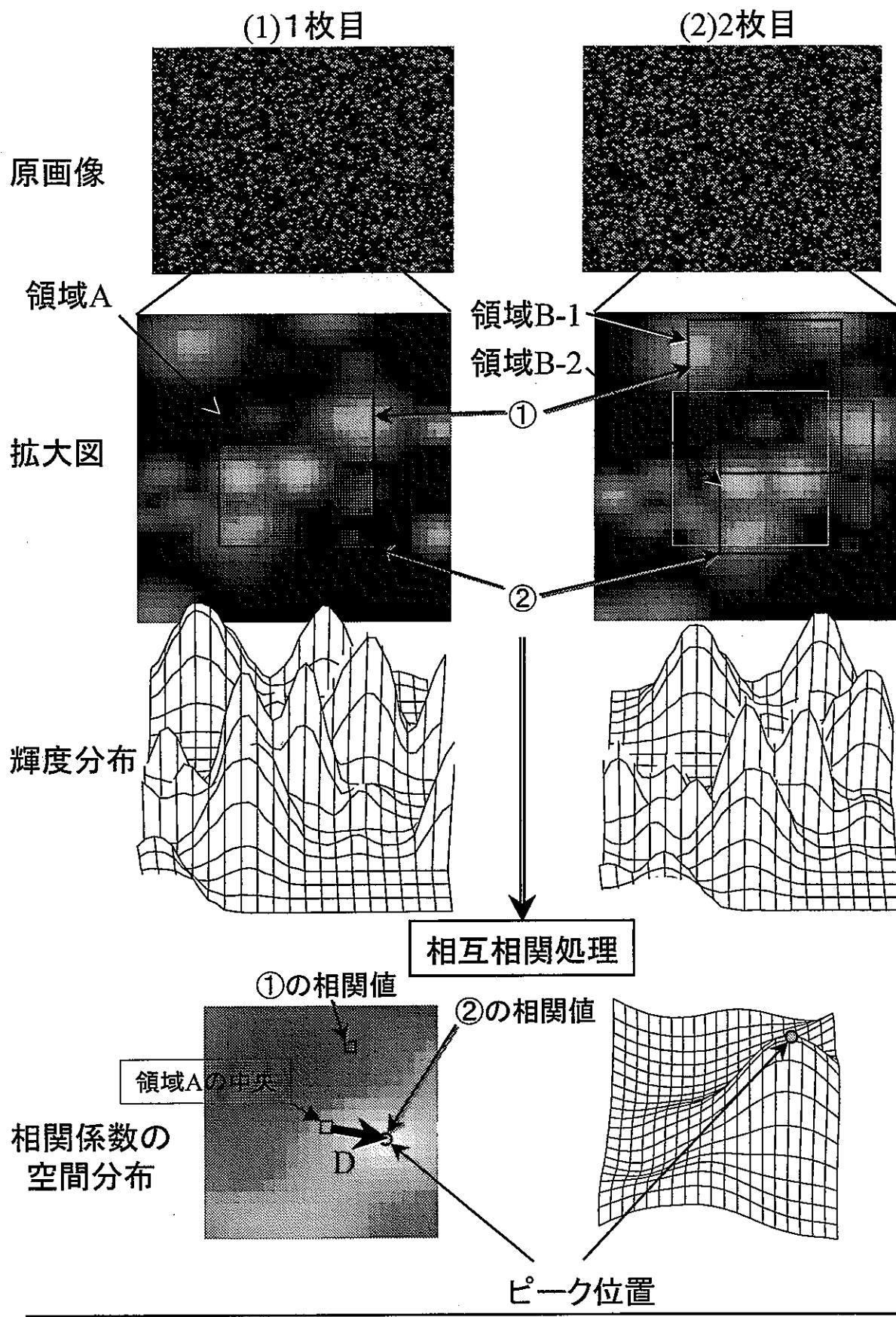
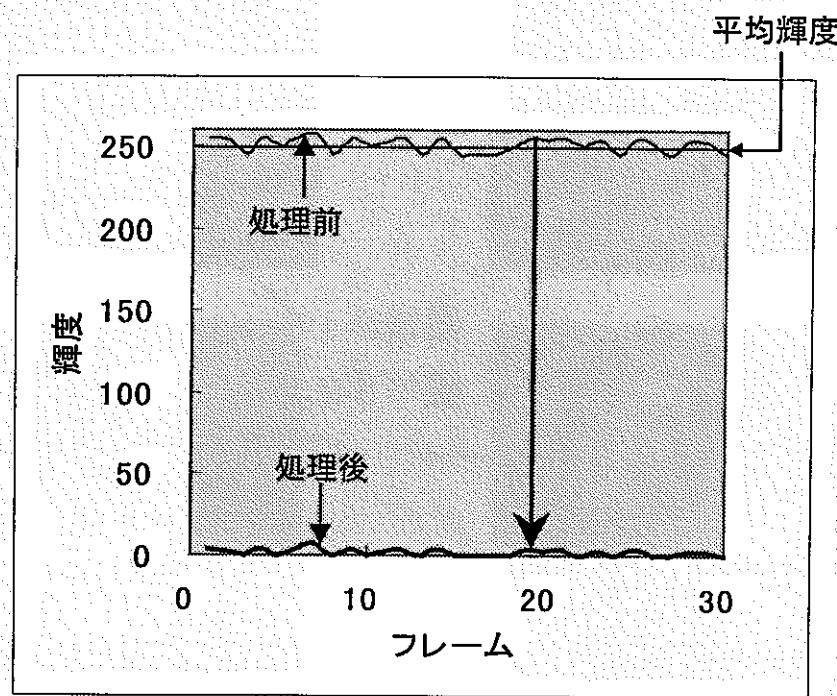
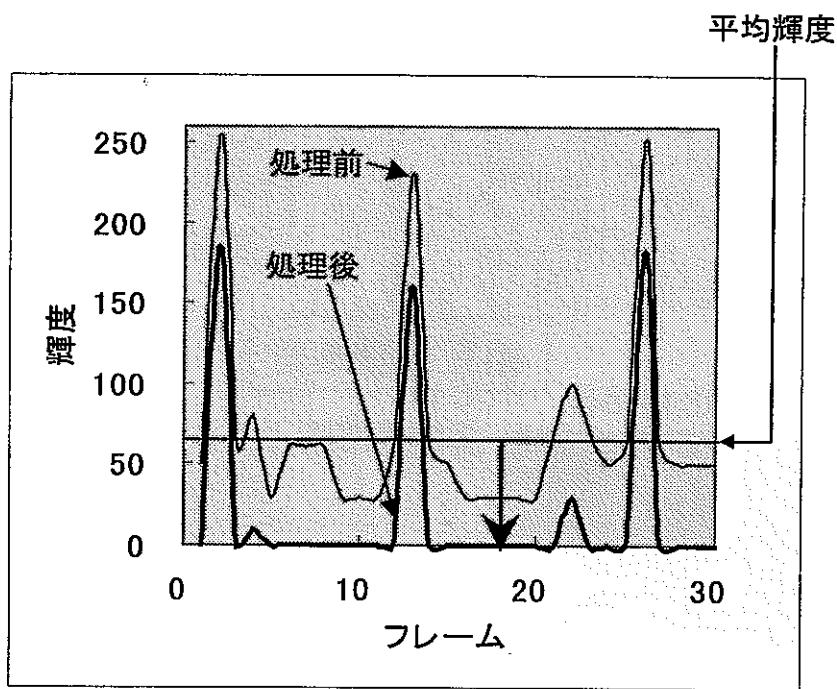


図2.1 PIVの原理

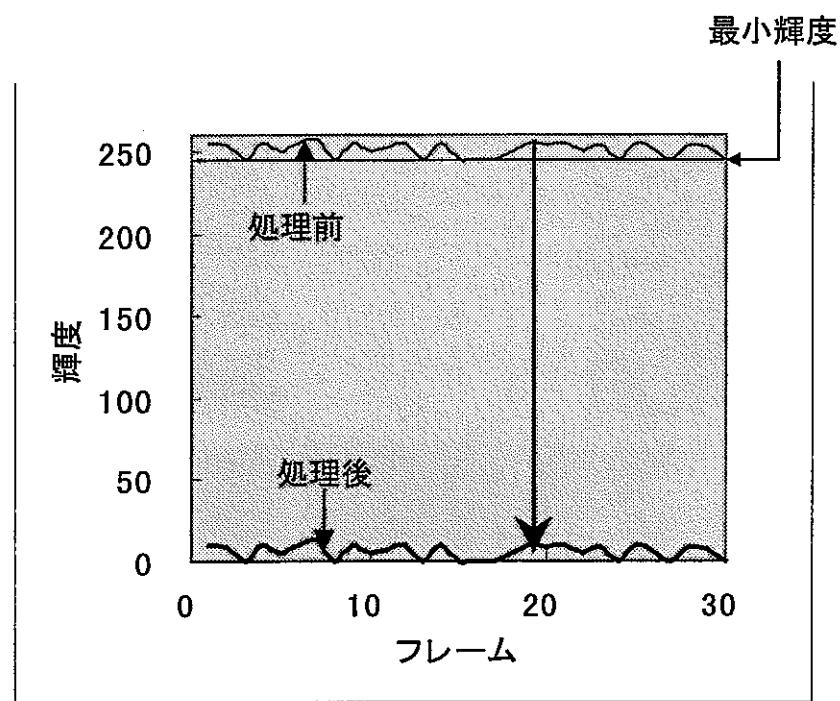


(a)ノイズピクセル

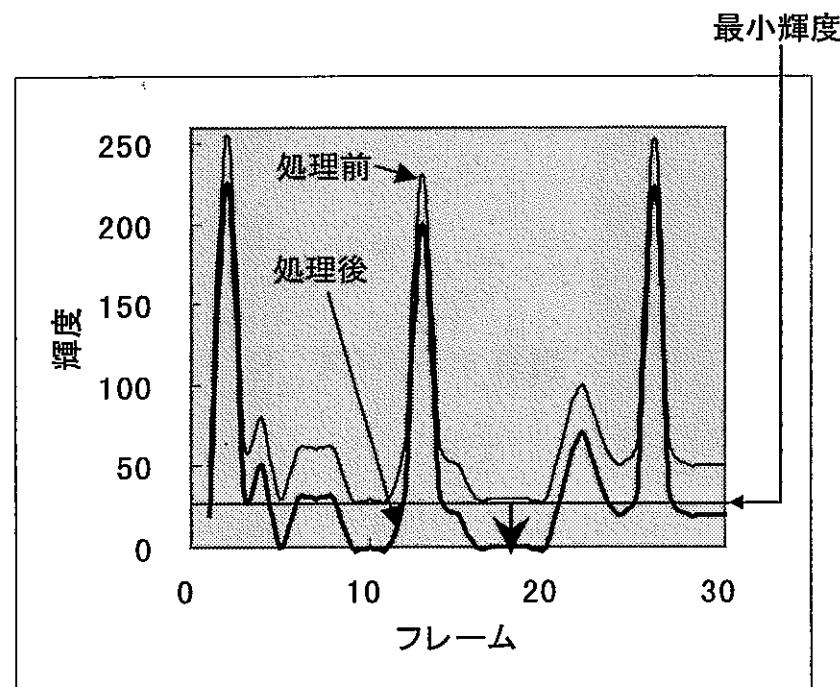


(b)粒子ピクセル

図2.2 時間平均輝度減算の原理



(a)ノイズピクセル



(b)粒子ピクセル

図2.3 最小輝度減算法の原理

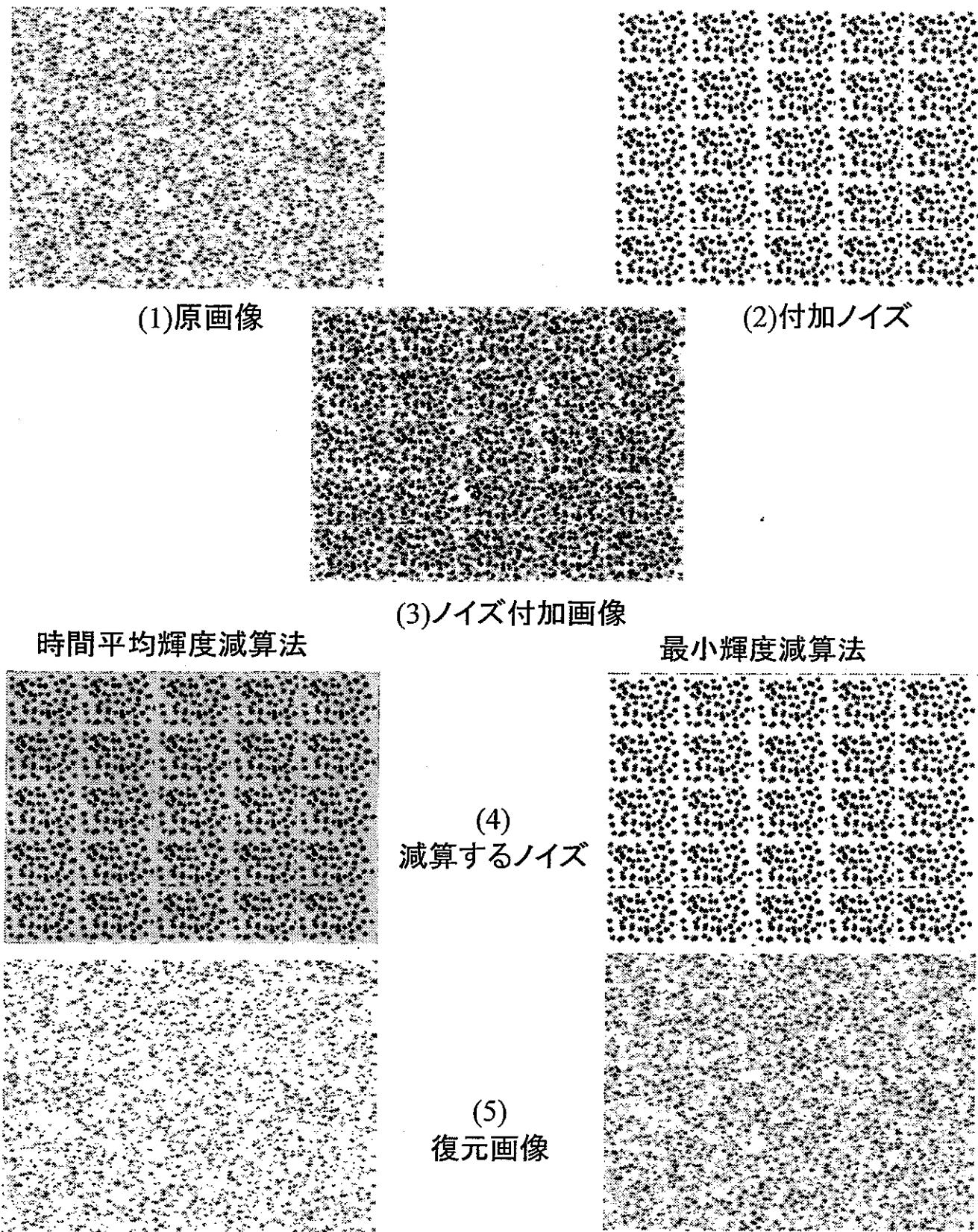


図3.1 点状ノイズを付加した場合の処理結果

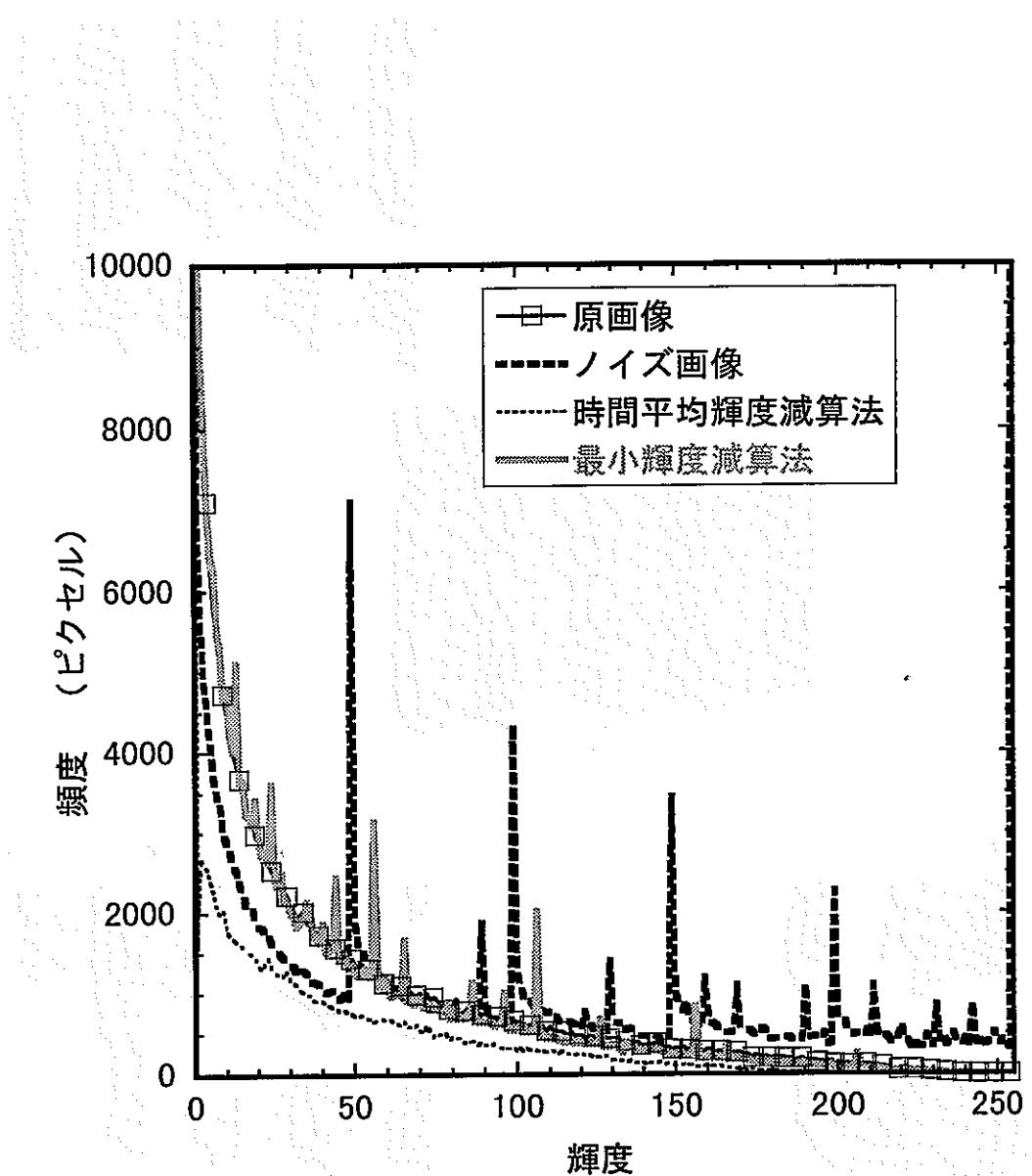


図3.2 点状ノイズを付加した場合の画像輝度ヒストグラム

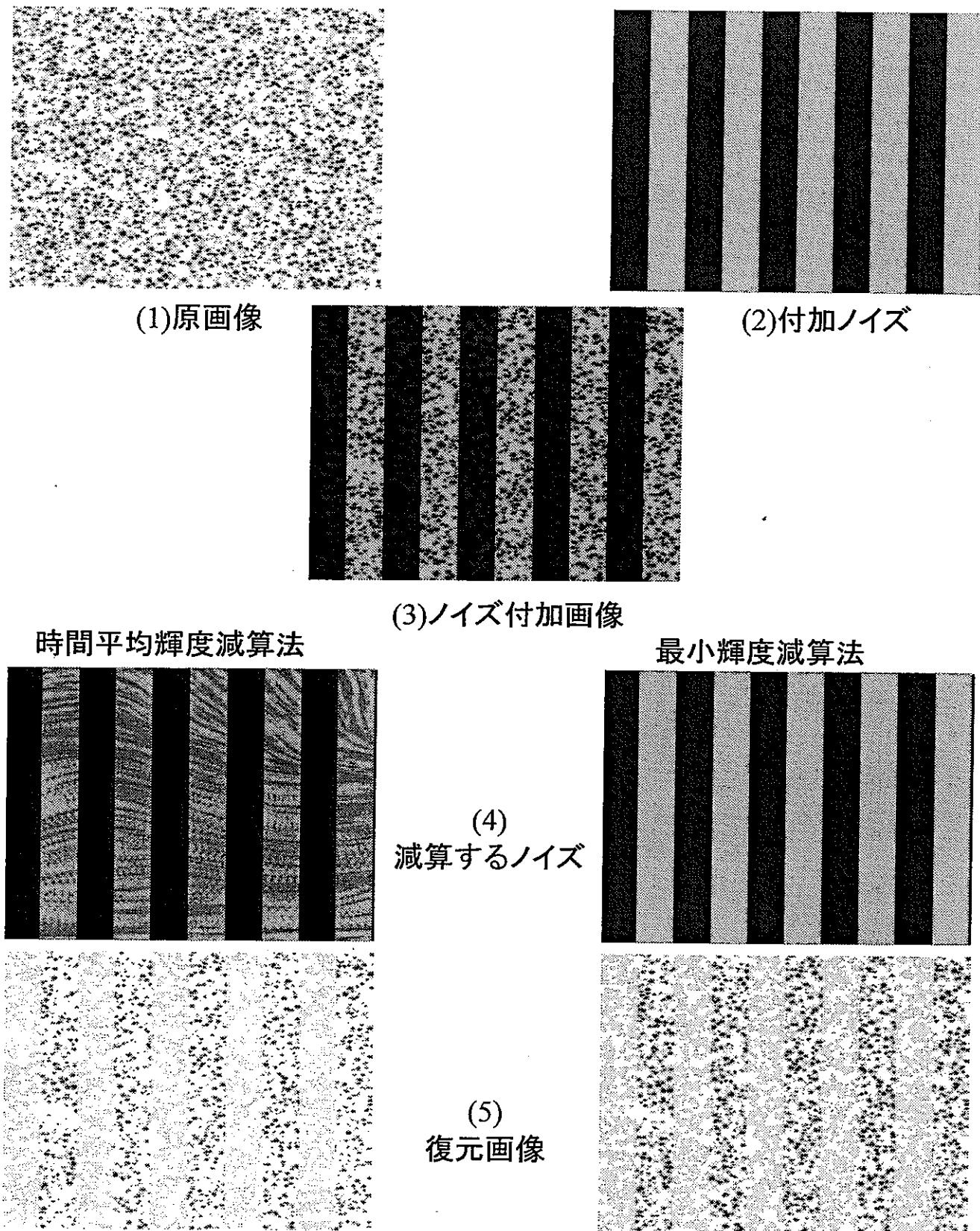


図3.3 縞状ノイズを付加した場合の処理結果

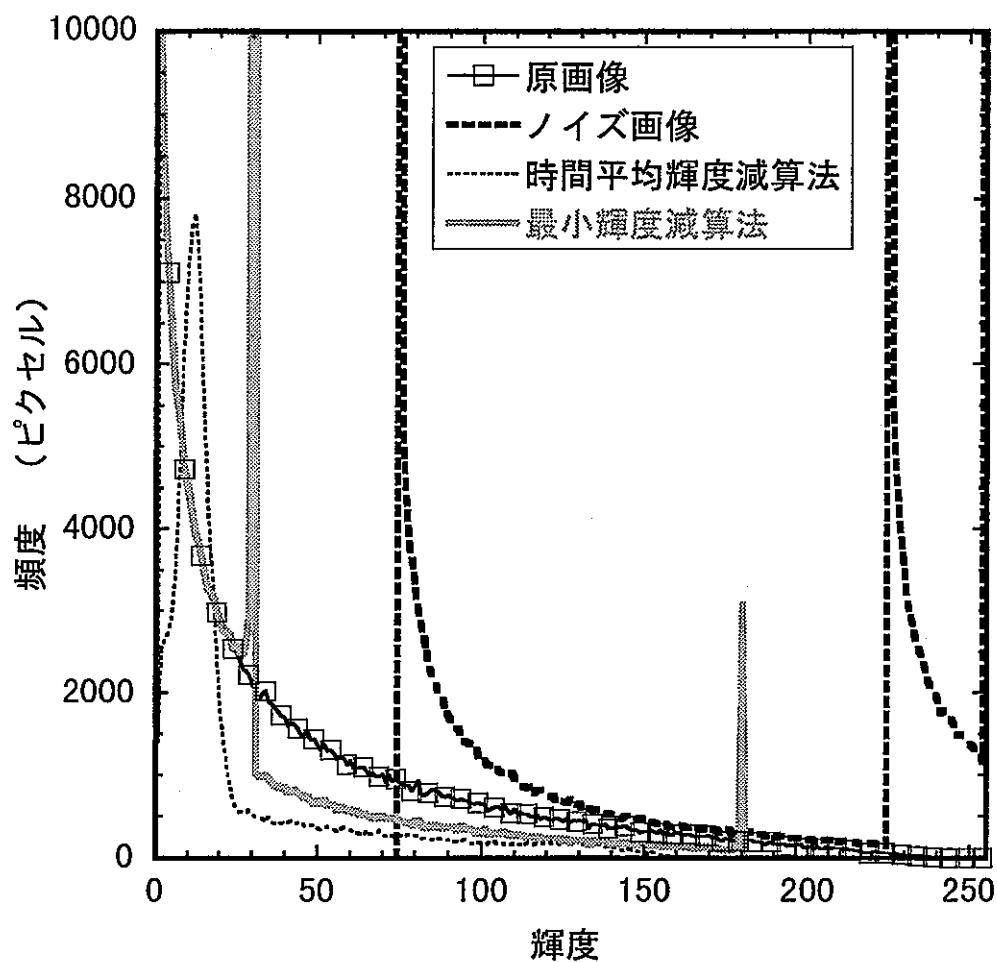


図3.4 縞状ノイズを付加した場合の画像輝度ヒストグラム

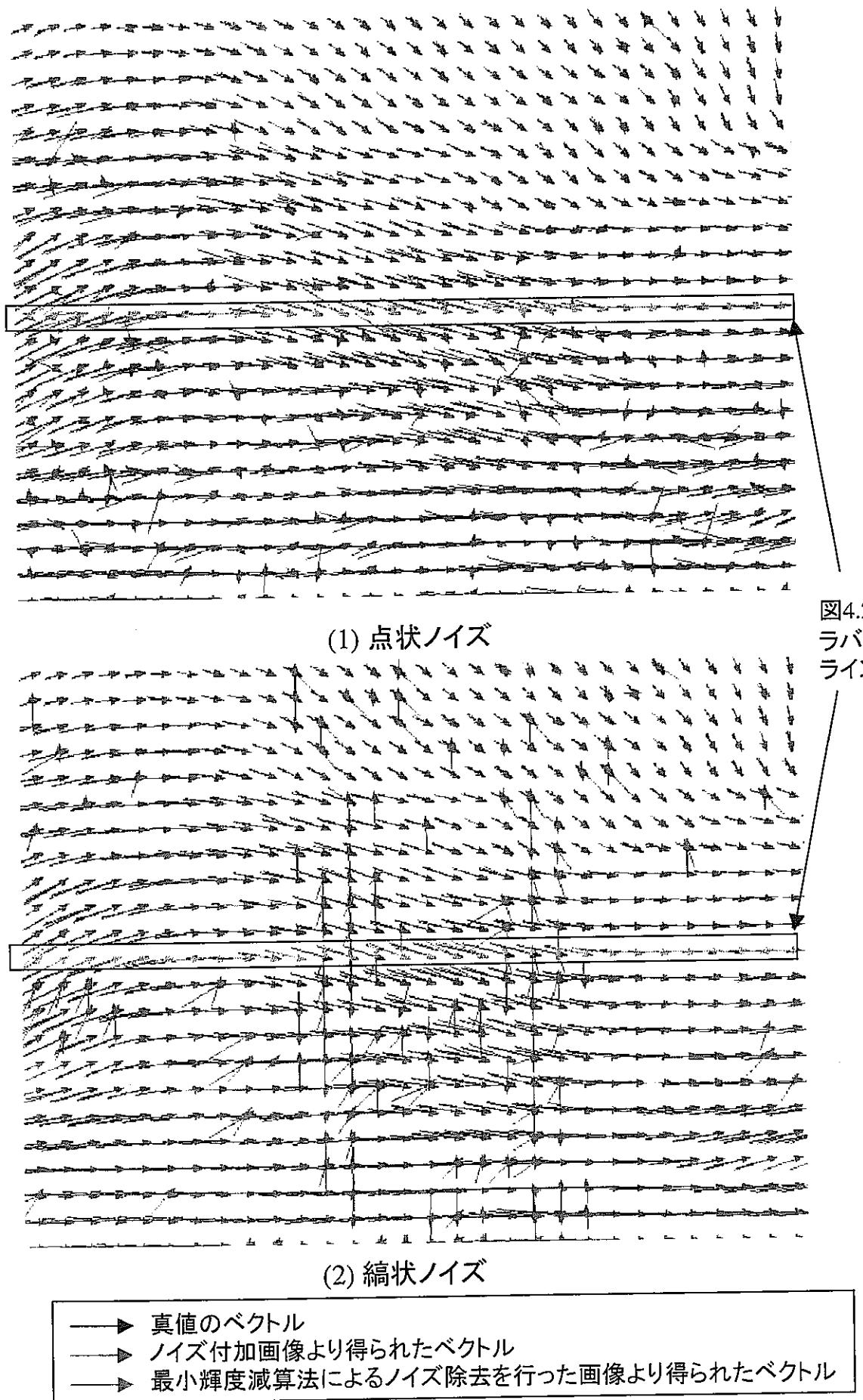
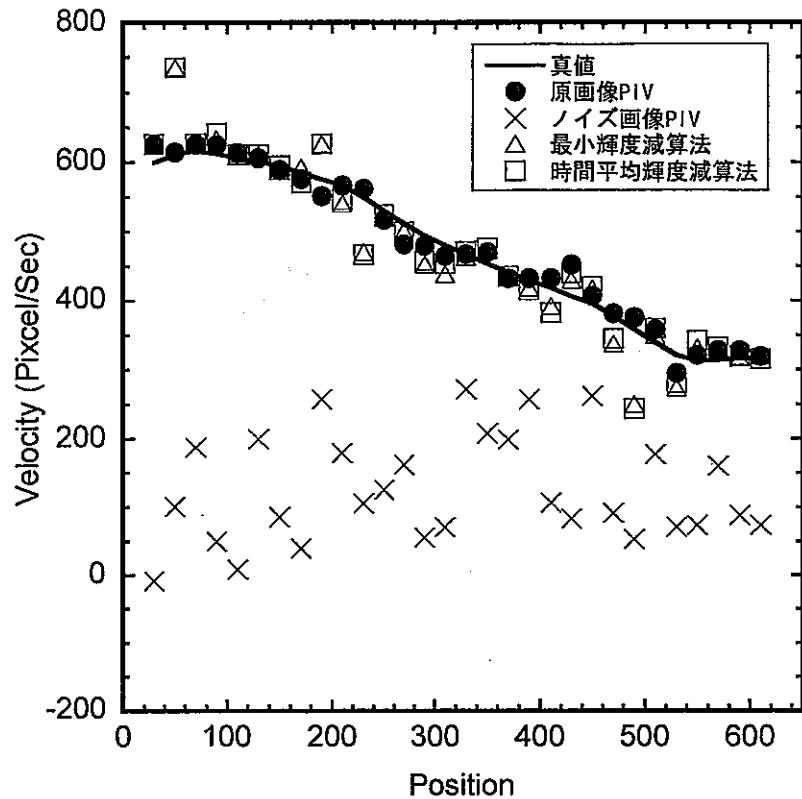
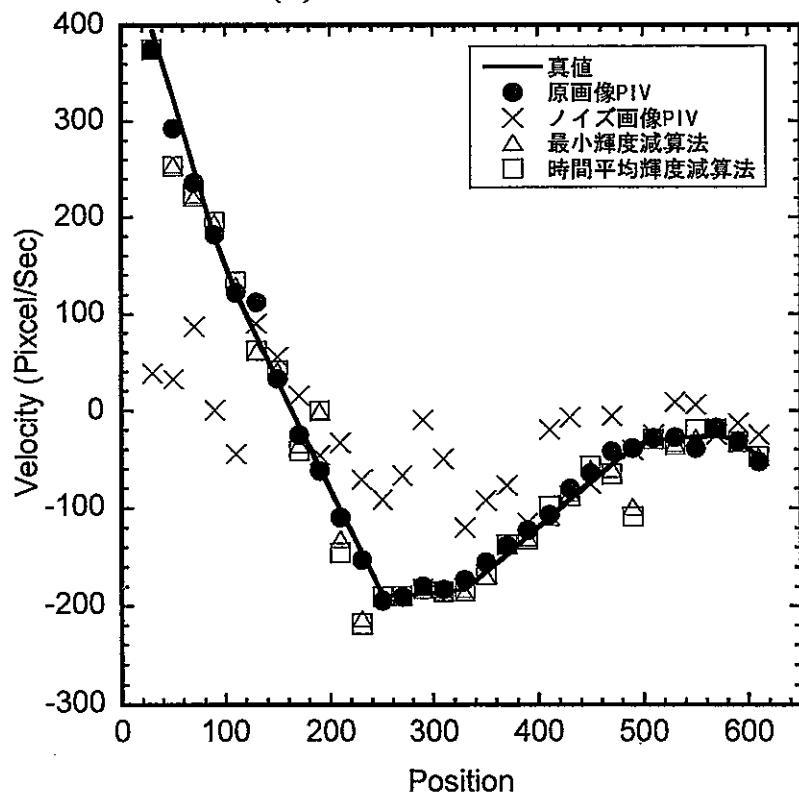


図4.1 ノイズ処理によるベクトルの相違

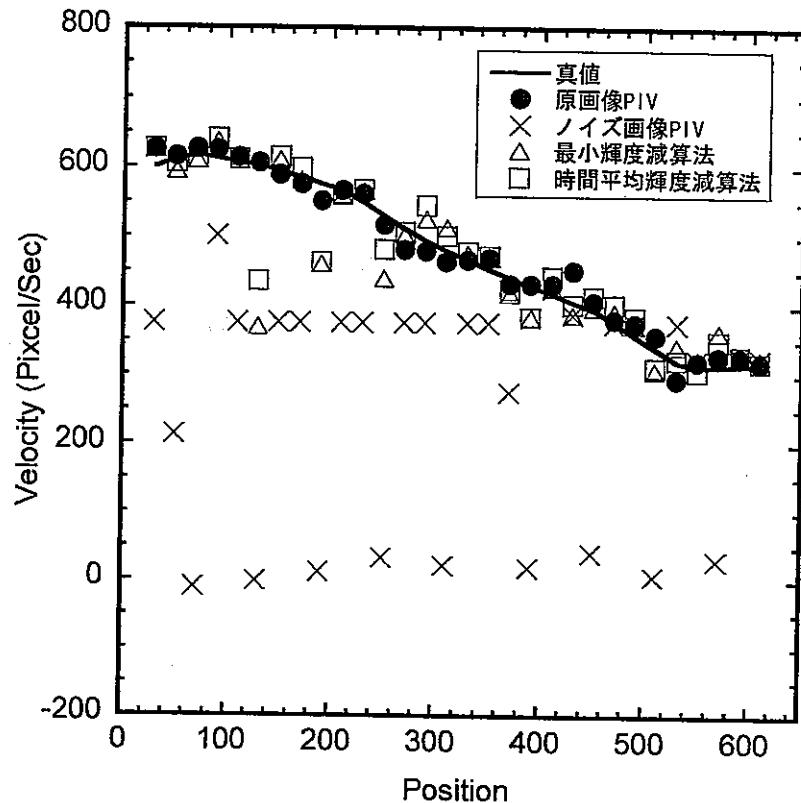


(1) 水平方向流速

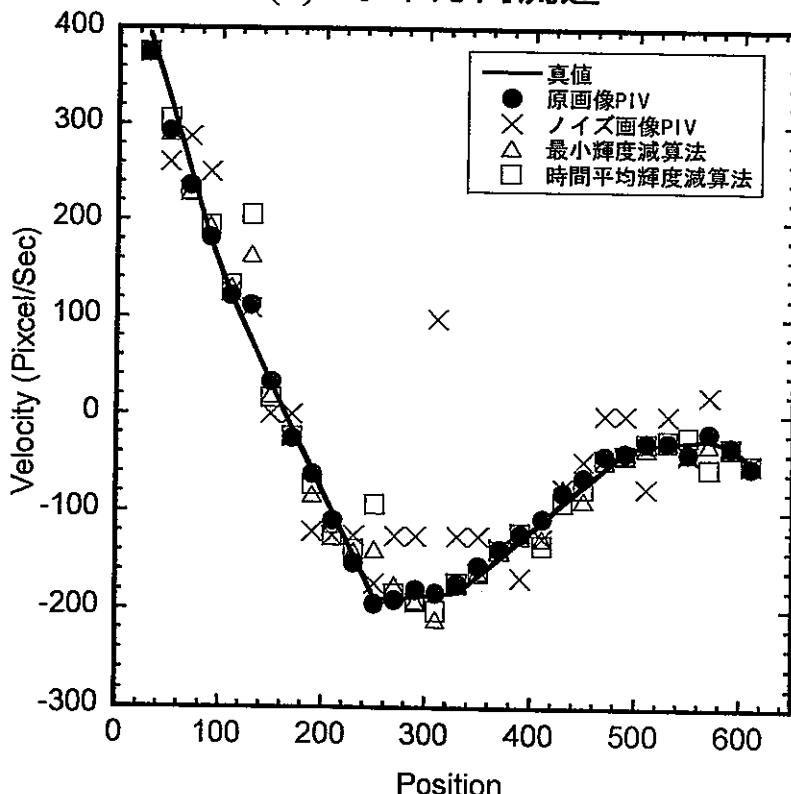


(2) 垂直方向流速

図4.2 ノイズ処理法前後の流速成分の比較  
(点状ノイズ)

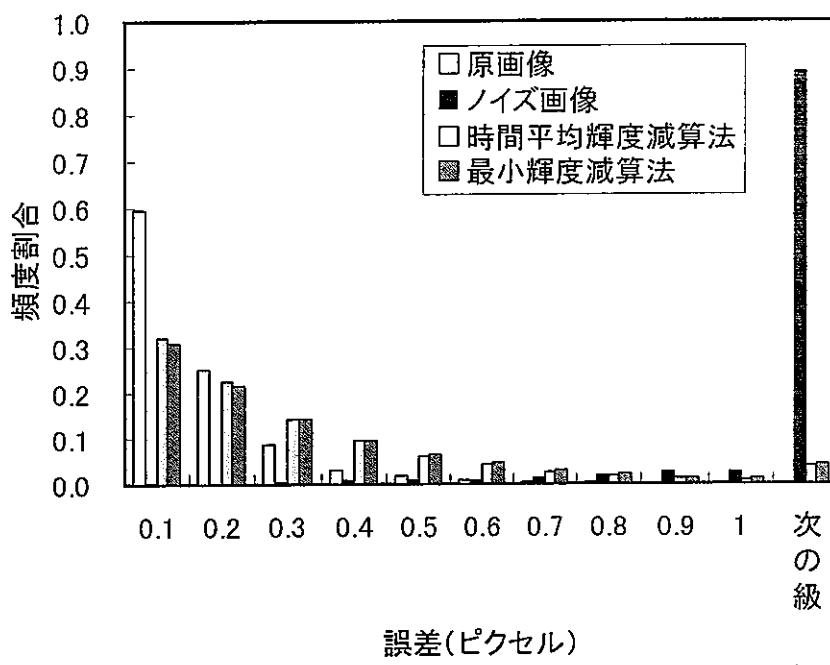


(1) 水平方向流速

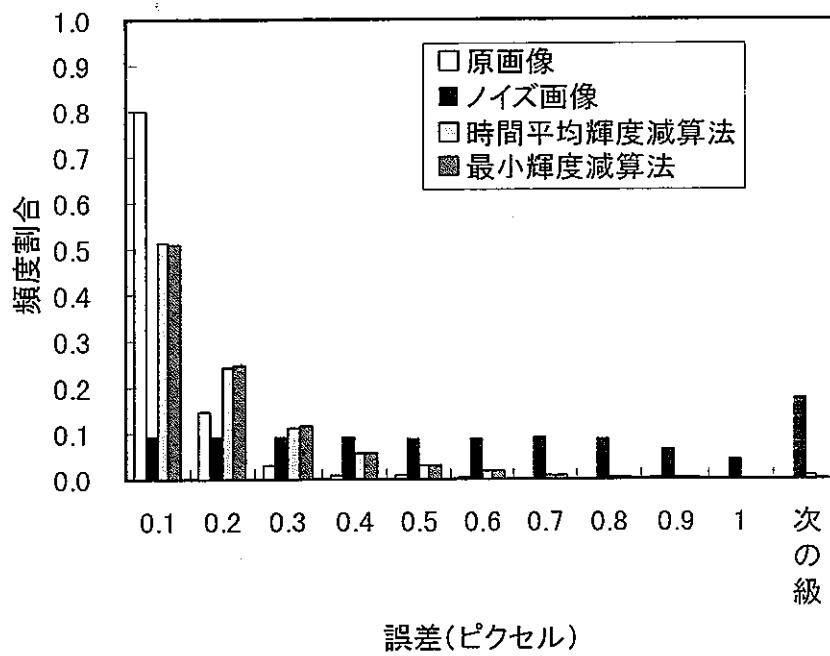


(2) 垂直方向流速

図4.3 ノイズ処理前後の流速成分の比較  
(縞状ノイズ)

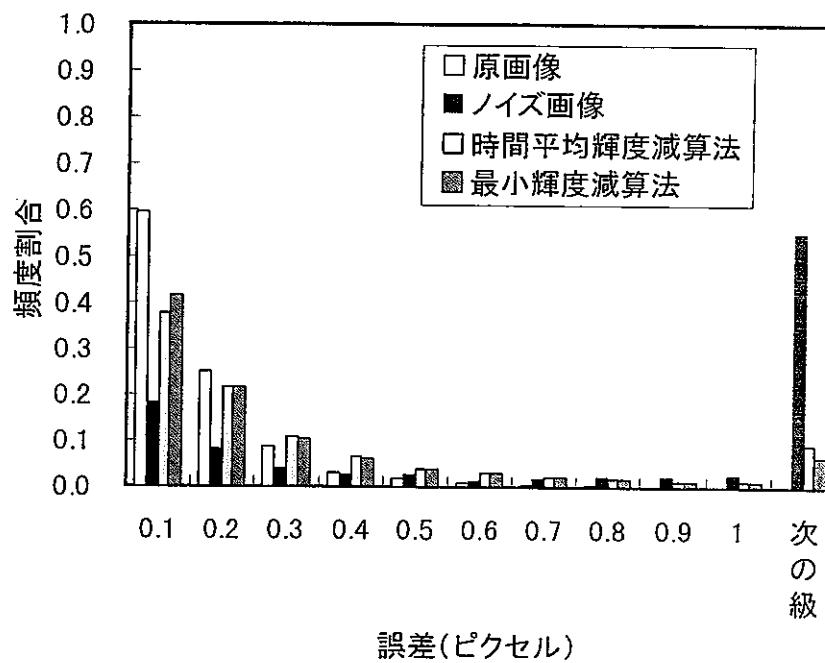


(1) 水平方向流速

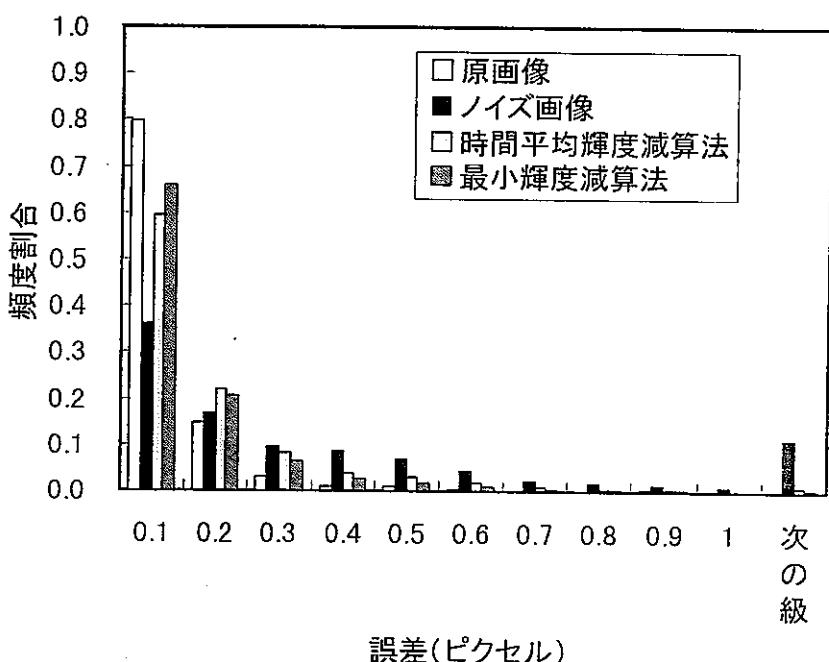


(2) 垂直方向流速

図4.4 ノイズ処理前後の流速誤差の比較  
(点状ノイズ)

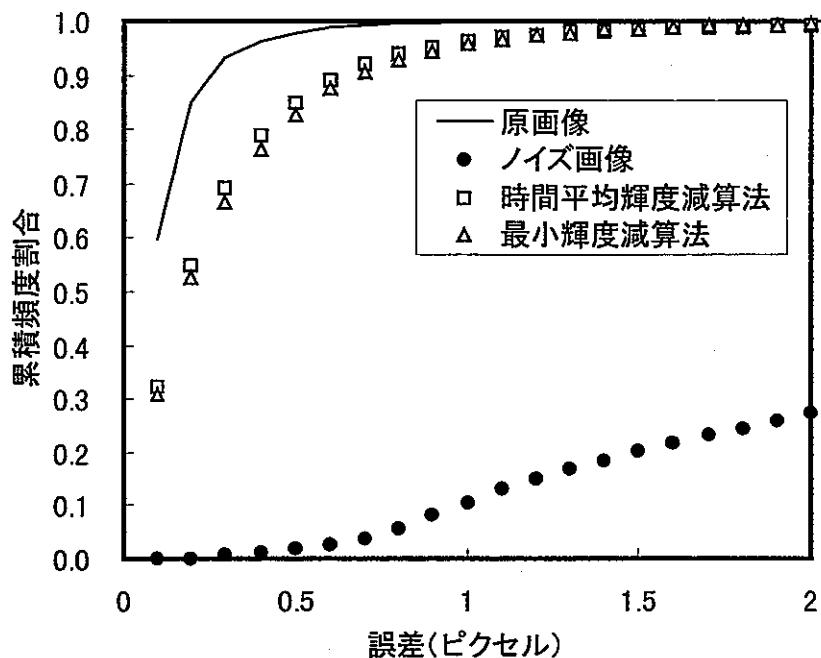


(1) 水平方向流速

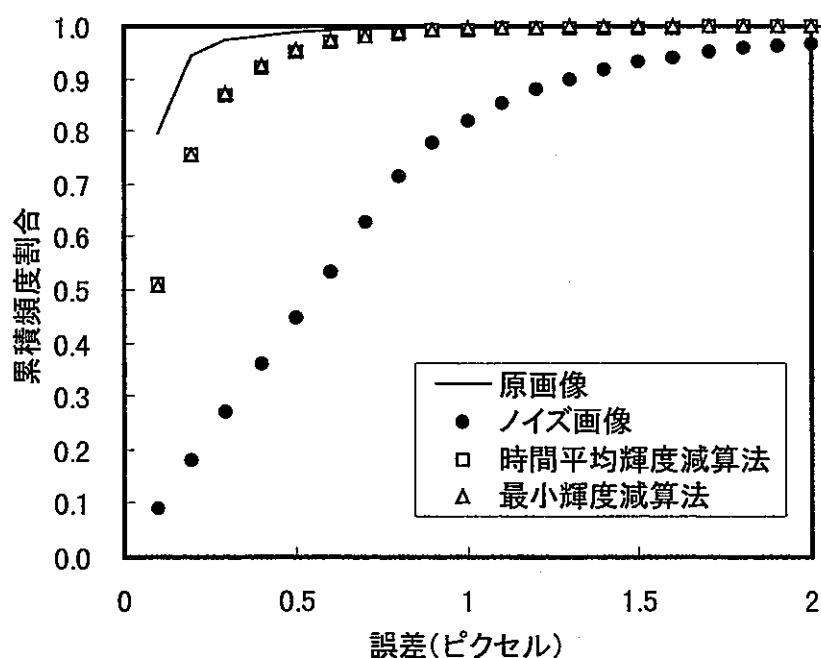


(2) 垂直方向流速

図4.5 ノイズ処理前後の流速誤差の比較  
(縞状ノイズ)

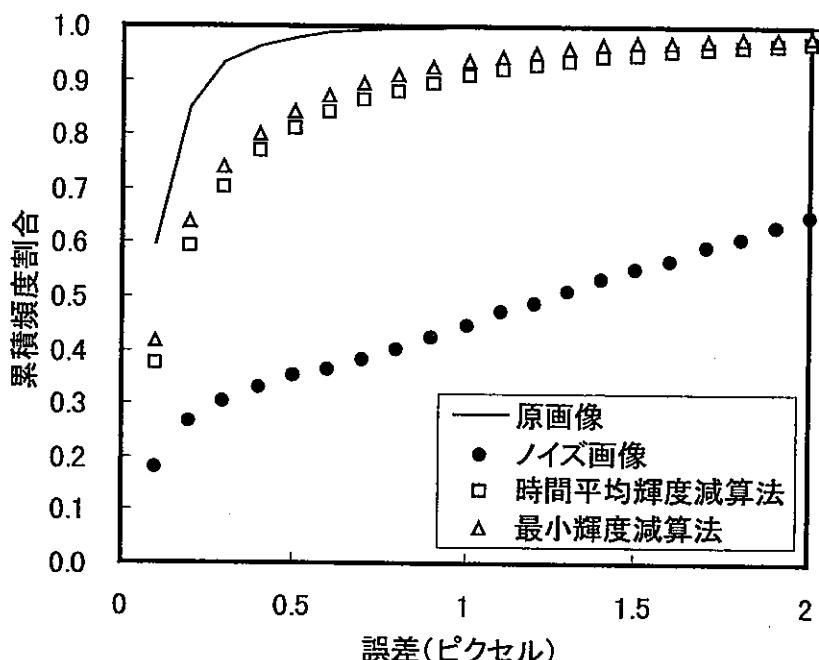


(1) 水平方向流速

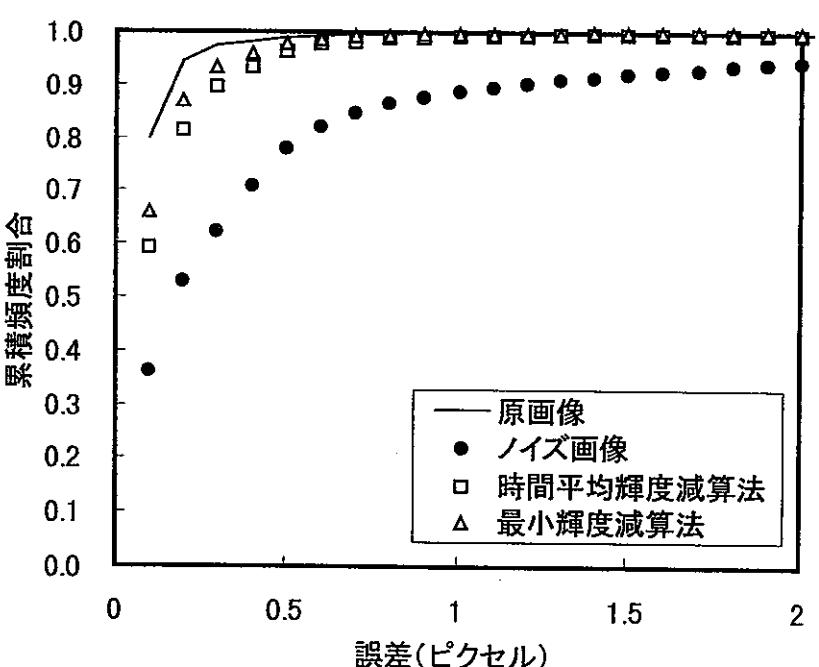


(2) 垂直方向流速

図4.6 ノイズ処理によるPIVの計測精度の比較  
(点状ノイズ)



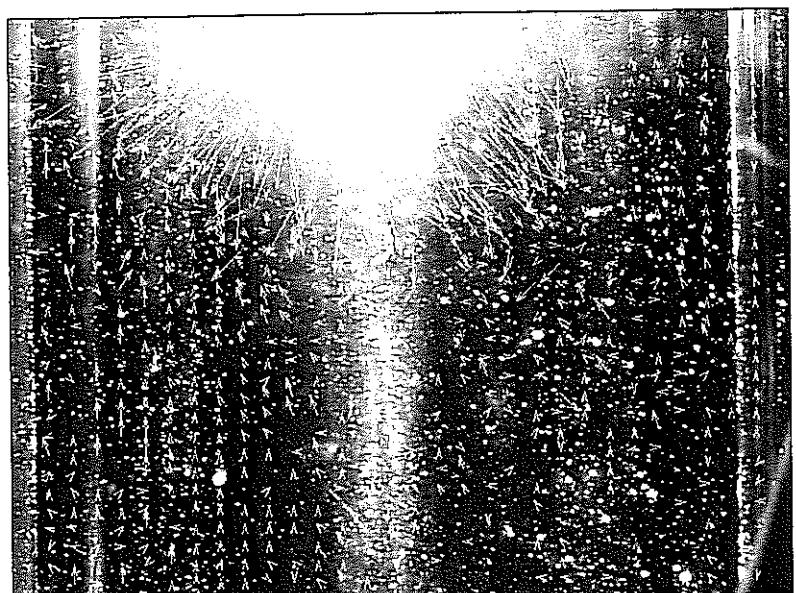
(1) 水平方向流速



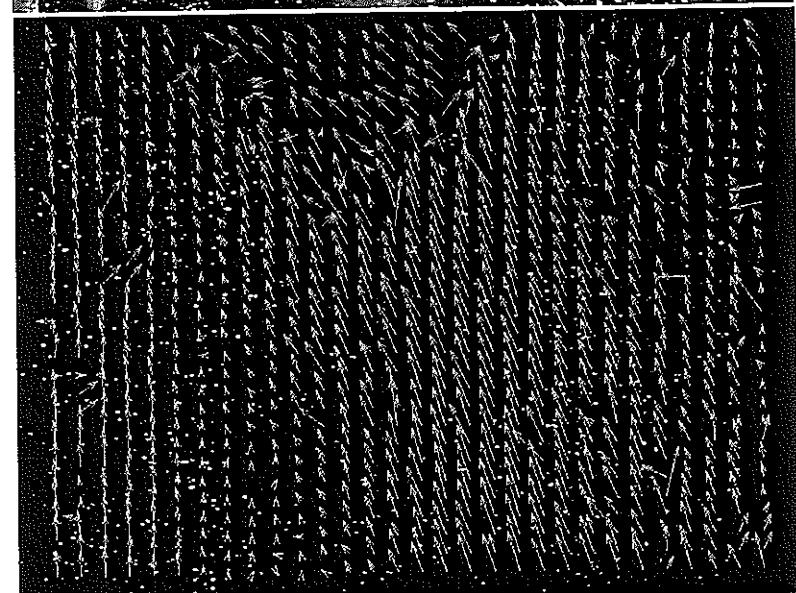
(2) 垂直方向流速

図4.7 ノイズ処理によるPIVの計測精度の比較  
(縞状ノイズ)

(1)原画像



(2)時間平均輝度  
減算法



(3)最小輝度  
減算法

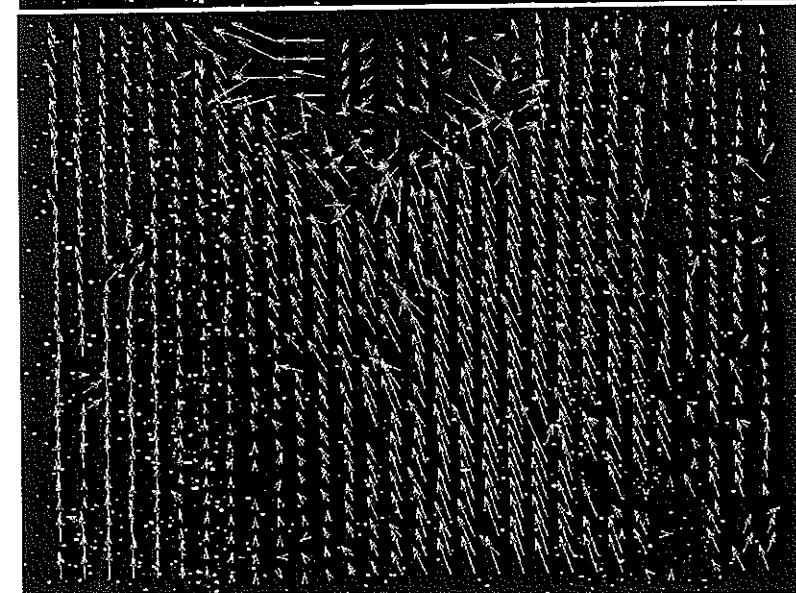


図4.8 ノイズ処理の適用例

## 付録1:ノイズ除去領域の特定手法

### 1. 目的

相互相関法を用いた PIV による流速測定において、構造物や可視窓のゴミ等（以下、ノイズ）が粒子とともに撮影された画像においても、時系列画像の時間平均輝度および最小輝度を用いたノイズ除去処理を施すことにより、信頼性の高い流速データを得ることが可能である。

しかし、粒子と輝度値が大きいノイズが重なる領域に対して、ノイズ除去処理を施すと、本文中に掲載した縞状ノイズ除去画像のように、ノイズ除去後の粒子の輝度が大幅に低下し、輝度変動情報が大きく失われてしまう。このような画像は、粒子追跡流速測定法(PTV)や2値化相関法によるPIVでは粒子輝度が大きく異なるため、正確な流速データを得ることは不可能である。

そこで、粒子の輝度を低下させることなくノイズを除去し、粒子のみを的確に抽出する方法として、ノイズ処理を施す領域を特定する手法を開発した。

### 2. ノイズ除去条件の設定

ノイズ除去を施す領域の条件抽出は、輝度の時間変動の標準偏差をしきい値として導入する。この条件抽出は、粒子が通過した時の輝度の変化が背景に比べて大きくなる点に着目したものである。

ノイズ除去を実行する条件式を下記に示す。

$$L_t < L_{avg} + THCUT \times \sigma \quad (\text{式A-1})$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{N \sum_{t=1}^N L_t^2(k) - \left( \sum_{t=1}^N L_t(k) \right)^2}{N^2}} \quad (\text{式A-2})$$

$L_t$ : 輝度,  $L_{avg}$ : 載度の平均値,  $\sigma$ : 標準偏差,

THCUT: 入力パラメータ,  $N$ : フレーム数

式A-1の条件を満たす場合にはノイズ除去を施すが、条件から外れる場合は元画像の輝度をそのまま保存する。

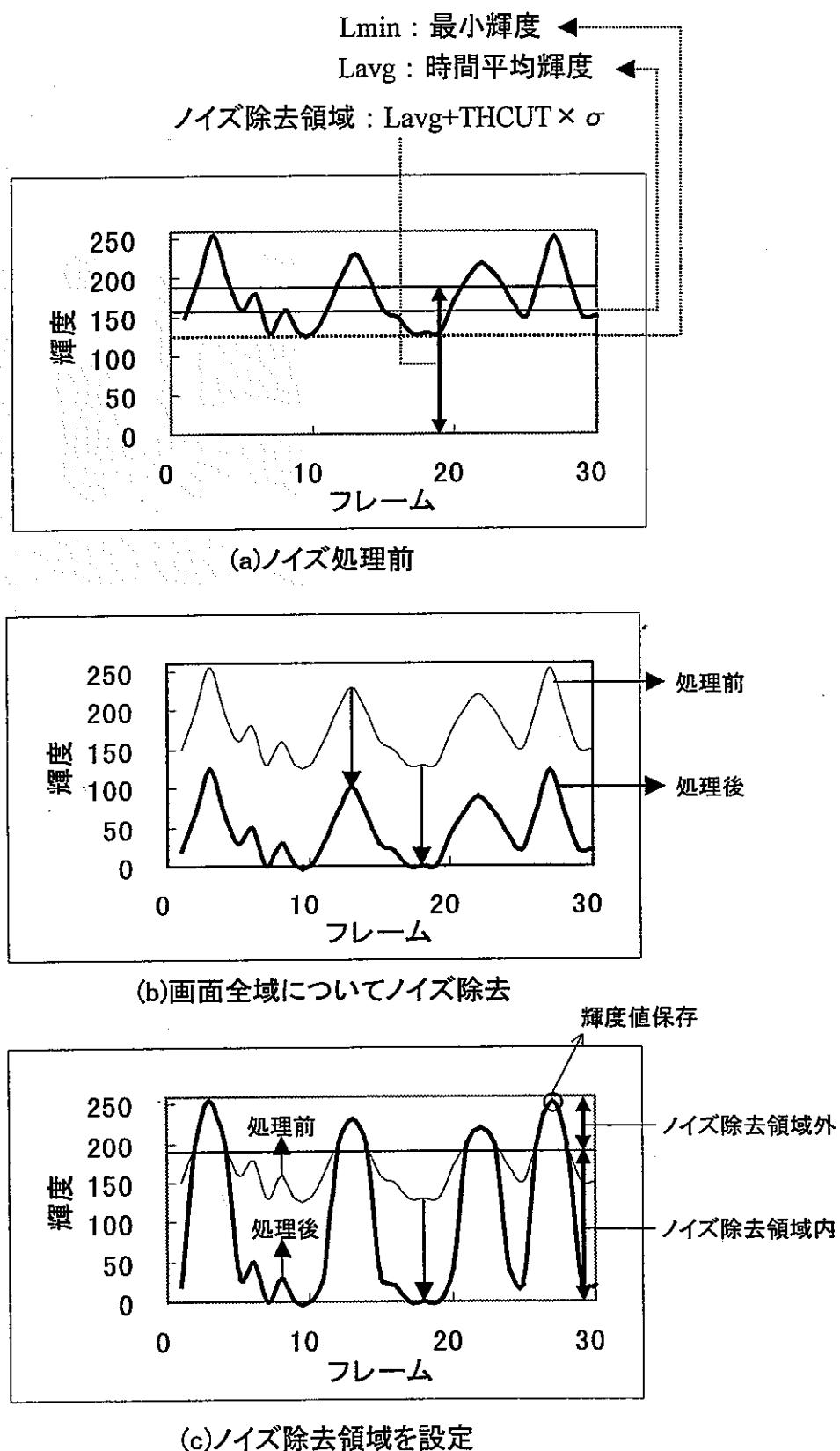
### 3. 効果

ノイズ除去領域を特定して処理を実施したときと、画像全域に対してノイズ除去を実施したときの輝度の時間変化を図Aに、処理後の画像を図Bに示す。

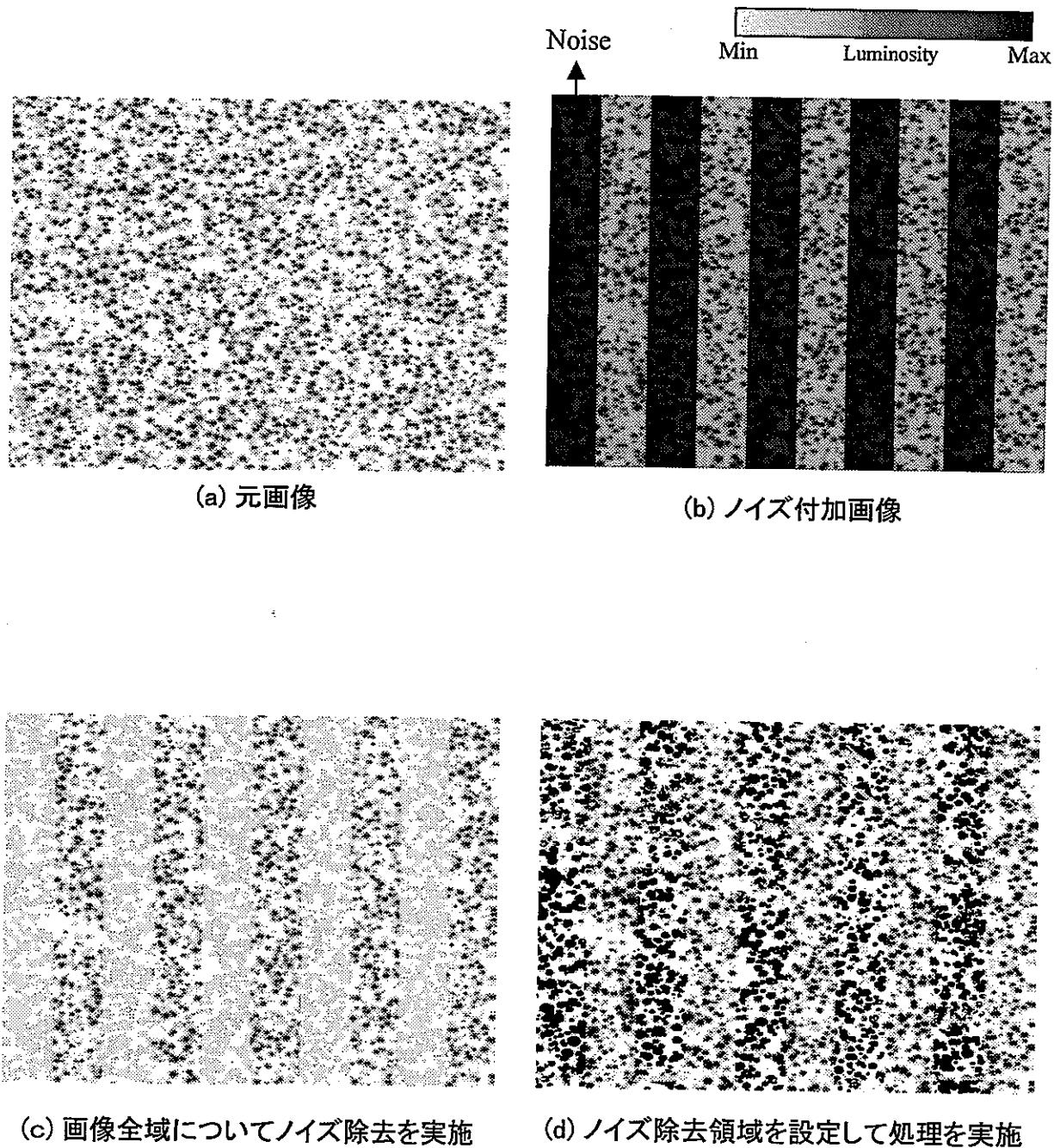
画像全域についてノイズ除去を施した場合、ノイズと粒子が重なっている領域では、粒子の輝度もノイズの最小輝度だけ減算されるため、輝度分布については保存されるが、粒

子自体の輝度は大幅に減少してしまう（図 A(b), 図 B(c)）。

これに対して、ノイズ除去領域を特定して処理を実施する場合は、輝度がノイズ除去領域内のときだけ処理が実施されるため、領域外に位置する粒子の輝度についてはそのまま保存される（図 A(c)）。このように生成された画像は粒子のみを抽出した画像となるが、輝度分布が変化し、2値化に近い画像となる（図 B(d)）。そのため、輝度相関法を用いたPIVには適さなくなるが、粒子追跡流速測定法（PTV）や2値化相関法によるPIVによる流速測定が可能になると考えられる。



図A-1 ノイズ除去による輝度変動



図A-2 ノイズ除去による画像