画像処理によるクリーンルーム内の気流解析*

井上正憲**, 白井琢也**, 吉田隆紀**, 岡田孝夫***

Analysis of Airflow Pattern by Image Processing in Clean Room

Masanori INOUE, Takuya SHIRAI,
Takanori YOSHIDA and Takao OKADA

ABSTRACT

A simplified visualization system for measuring airflow patterns in clean rooms was developed. A tracer of distilled-water droplets with several micron diameter was radiated by a red-colored fluorescent light. The scattered light by the tracer was separated from all lights. And the scattered light was amplified and recorded by a video camera built-in real-time image processing. And this system enables us to visualize the airflow patterns in which there was an obscure contrast between the tracer and the background illumination.

The two-dimensional visualized images were converted into digital image-data, and processed numerically with an image pattern tracking method. The accuracy of the calculated vectors was influenced by the image-contrast. The effect of image-contrast on the accuracy was investigated by processing several images of different contrast. And the air-velocity measured with the image processing was compared with that measured with a laser doppler velocimeter.

From these analyzed results, it was concluded that the image of emphasized contrast enables to calculate exact vectors, air-velocity measured with image processing almost agreed with that measured with a laser doppler velocimeter, and the method was very useful for quantitative evaluation of various airflow patterns in clean rooms.

Key words : Air Stream Analysis, Measuring Technology, Clean Room, Flow Visualization, Image Processing

1. はじめに

クリーンルーム内の気流形状は、室内の清浄度や汚染の広がりや密接に関係しており、その把握はコンタミネーションコントロールの観点から重

要である。気流形状を把握する有効な手法としては、従来より煙などのトレーサを用いた可視化法があるが、良好な可視化画像を得るために、背景を暗くしたり、室内の照度を低下させるなどの、特別な準備が必要であるという問題点がある。しかし、実際の工場内で気流を観察する場合、このような背景の処理を行うことが極めて困難な場合が多い。その結果、背景の輝度が高い状況下で可

*原稿受付 1993年7月29日

**高砂熱学工業(株)総合研究所

***正会員 高砂熱学工業(株)総合研究所

視化を行わなければならない、良好な可視化画像を得ることが困難になる。さらに得られた可視化画像からは気流形状の定性的な情報しか得られない。

本研究では、まず従来の可視化法で必要とされた、可視化のための特別な準備を必要とせず、背景が明るい室内でも容易に良質な気流の可視化画像を得ることが可能な可視化手法¹⁾を考案し、その有効性を確認した。つぎに、この手法で得られたクリーンルーム内気流の可視化画像を、近年急速に進歩しているデジタル画像処理技術を用いて処理し、画像データから速度分布(速度ベクトル)を定量的に解析するためのパターン追跡法^{2),3)}の概要、および解析結果の特性・解析例について報告する。

2. 可視化手法

2.1 可視化用光源

可視化用の光源には、赤系統の波長を照射でき、安価で比較的容易に入手できる赤色蛍光灯を用いた。光源は気流観察方向の側方に設置し、両側からトレーサに照射している。一般的な半導体用クリーンルームの照明に含まれている光の分光強度を比較すると、この赤系統の波長域の分光強度の割合は比較的少ない。このため、背景の照明光と可視化用の赤色光は、後述するように、光学的に容易に分離可能である。

Fig. 1 に可視化用光源(赤色蛍光灯)および

Fig. 1 Relative spectral energy distributions of fluorescent lamps

半導体工場内照明(昼白色、黄色蛍光灯)の分光エネルギー分布の測定結果を示す。測定は、分光分析器(大塚電子:MCPD 1000)を用いて、各蛍光灯の中心より550 mm離れた点で、220~800 nmの範囲の波長について行った。図中に示されるように赤色蛍光灯のピーク波長は650 nm付近にあり、室内照明のピーク波長とは、ずれていることがわかる。

2.2 受光系装置

受光系は、可視波長領域に高い分光感度を持った撮像管を内蔵したTVカメラに、約620 nm以上の波長領域に高い透過特性を持った光学フィルタを組み合わせて、可視化用光源(赤色蛍光灯)から照射される光に含まれる波長だけを選択的に取り込めるようにした。Fig. 2 に受光系に用いたTVカメラの撮像管の分光感度⁴⁾、および光学フィルタの分光透過率⁵⁾を示す。これらの光学系により、トレーサに照射されて散乱した650 nm付近の波長の光が、他の波長の光に比べて多く取り込まれ、トレーサと背景のコントラストの向上が図られる。Fig. 3 に昼白色蛍光灯と赤色蛍光灯を並べて同時に点灯させた場合の、照射される光の分光エネルギー分布と、同じ条件で可視化実験に用いた光学フィルタを通した場合の分光エネルギー分布とその内訳を示す。光学フィルタを使用しない場合は、2種類の蛍光灯から照射される光を合成した分光エネルギー分布となっているが、光学フィルタを使用することで赤色の波長域の光だけを選択的に取り込み、トレーサのコントラストを低下させる原因となる室内照明(昼白色

Fig. 2 Spectral sensitivity distributions of the image pickup tube and spectral transmission factor of the optical filter

Fig. 3 Comparison between relative spectral energy distributions of fluorescent light through the optical filter and that of the direct light without optical filter

蛍光灯) 光の割合が減少していることがわかる。

2.3 トレーサ

クリーンルーム内気流を可視化するためのトレーサ粒子は、表面汚染防止の観点上限定される。本研究では、純水ミスト⁶⁾を使用している。このミストは、液体窒素と純水の蒸気とを直接接触させることにより発生し、ノズルでクリーンルーム気流中に供給している。またミストの温度は、供給前にクリーンルーム吹出し空気温度とほぼ等しくなるように調整している。

供給直後のミストの空気力学的平均粒子径は、2~3 μm 程度である。赤色光に対するこれらの大きさのトレーサ粒子の散乱特性は、前方散乱が主体となっている。可視化を行う際に取り込んでいるのはトレーサ粒子の側方散乱光であり、その強度は前方散乱光の約 100分の1 またはそれ以下となる⁷⁾。このように可視化に際してはかなり厳しい条件となっている。

2.4 コントラスト強調

2.2で述べたような受光系の改良で、トレーサからの散乱光のみを分離し TV カメラに取り込んでも、前述したトレーサ自体の散乱特性により画質の大幅な向上は期待できない。そこで TV カメラにより撮影された可視化画像信号を、リアルタイム微分機能を持つコントラスト増強装置を通すことによりコントラストを増強させた後に、

VTR にて記録する。この操作により、目視ではほとんど観察されないようなトレーサの動きも、画像データとして記録したり、モニタで観察することが可能となっている。

以上に述べたように、筆者らの手法は、まずトレーサに照射した特定波長帯の光だけを光学フィルタにより分離し選択的にカメラに取り込むことにより、トレーサのコントラストの低下を光学的に防止し、さらに、得られた画像信号を微分処理することによりトレーサ部分の信号を強調しているところに特徴がある。その結果、トレーサを用いた気流の可視化画像の画質を、従来よりも大幅に向上させることが可能となった。

3. 画像処理システム

3.1 システム構成

可視化および画像処理システムの構成を Fig. 4 に示す。前述のような手法で、ビデオテープに記録された可視化画像より、まず速度ベクトル抽出の対象となる画像を選び出す。この画像データを、汎用画像処理装置により A-D 変換を行い、計算用画像データとして光磁気ディスクに記録する。気流の速度ベクトルを得るための画像解析は、連続した2画面を1組として、数組の画面を処理している。つまり瞬間的なトレーサの動きを各々解析し、その平均速度分布を求めることになる。計算用画像データの画面数(組数)は、多いほど原理的に精度が向上するが、計算時間が長くなるため適度な画面数にとどめる。

デジタル化された画像データは、パソコンか

Fig. 4 Schematic diagram of the image processing system

らワークステーションに転送後、パターン追跡法（相関法）による画像解析アルゴリズムで処理する。パターン追跡法の詳細については後述する。解析後、得られたベクトルデータ群は、ワークステーションにて統計処理を行い不良なベクトルを削除し、残ったベクトルを平均して1画面のベクトルデータを作成する。このデータはパソコン側に返送され、再度不良なベクトルを削除⁹⁾する。不良なベクトルが削除されたポイントについては、廻りの良好なベクトルデータより内挿を行う。

3.2 パターン追跡法（相関法）

パターン追跡法（相関法）とは、Fig. 5 に示すような、異なった時刻の2画像中のある小領域の輝度分布の類似性を解析し、輝度分布パターンの移動方向と移動速度から速度ベクトルを抽出する手法である。この手法は、点 a を中心とする画像小領域（ $n \times n$ 画素：以下“基準マトリクス”と記す）の輝度分布パターンと、候補点 b を中心とする画像小領域（以下“候補マトリクス”と記す）の輝度分布パターンの類似性の指標を、移動する可能性のあるすべての範囲について計算し、最も可能性の高い候補点 b を探し出すことである。一般的には、Fig. 6 に示されるような $n \times n$ の基準マトリクスと候補マトリクス内のすべての点に関して、式(1)に示される2画像間の相互相

関係数⁹⁾を計算し類似性の指標としている。

$$R_{fg}(x, y) = \frac{\sum_{i=0}^k (f_i - \bar{f}_i) \cdot (g_i - \bar{g}_i)}{\left\{ \sum_{i=0}^k (f_i - \bar{f}_i)^2 \cdot \sum_{i=0}^k (g_i - \bar{g}_i)^2 \right\}^{0.5}} \quad (1)$$

ここで、 $k = n^2 - 1$

しかし、本研究で用いる手法は、計算時間を短縮するために考案された「輝度差の累積法」^{2), 9)}と呼ばれるもので、式(2)に示される基準マトリクスと候補マトリクス間で、対応する位置の画素の輝度差の累積値を計算する。累積計算は、輝度の差の累積値 D_a があるしきい値 D_c を越えるまで行い、そのときの累積回数 N_c を類似性の指標としている。つまり、 N_c が最大となる候補マトリクスの中心点が、パターン追跡法で求めたベクトルの終点となる。この手法では、輝度差の累積値がすばやく増加するもの、つまりパターンが類似していないものに対する計算は速い時点で打ち切られるので、結果的に計算時間は大幅に短縮される。

$$D_a = \sum_{i=0}^m |f_i - g_i| \quad (2)$$

ここで、 $m = N_c - 1$

3.3 速度計測の分解能

最終的に得られるトレーサの速度 V_R は、式(3)に示すように、画像上の移動速度を、実際の空間での移動速度に換算して求める。

$$V_R = \frac{(P_X^2 + P_Y^2)^{0.5}}{S \cdot \Delta t} \quad (3)$$

ここで、

P_X, P_Y : 連続画像間の X, Y 方向の移動画素数 (pixels)

S : 実空間と画像上の距離の換算値 (pixels/mm)

Δt : 連続画像間のサンプリング間隔 (sec)

また、計測の分解能 R_e は実際の空間での速度 V_R を移動画素数で除したもので、式(4)で示される。

$$R_e = \frac{V_R}{(P_X^2 + P_Y^2)^{0.5}} = \frac{1}{S \cdot \Delta t} \quad (4)$$

ここで、 S は可視化空間の面積に関するパラメータであり、面積を広くとると S は小さくなり

Fig. 5 Identified image fragments at the different times

Fig. 6 Pixels in the corresponding image fragments

分解能は低下する。逆に、 Δt を大きくすると移動画素数も大きくなり分解能は向上するが、 Δt を大きくとりすぎると連続画像間でのトレーサの形状が変化し、計測精度が著しく低下する。

4. 速度分布計測

4.1 実験方法

画像上のパターン追跡による速度分布計測を実際のクリーンルームに応用する際に、速度ベクトルデータの特性や算出精度をあらかじめ評価することが必要である。そこで実規模のクリーンルーム（天井高 2700 mm）で気流の可視化を行い、可視化画像を得た。可視化実験は、Fig. 7 に示す装置で行い、トレーサとして前述の純水ミストを用いた。クリーンルーム内の気流は、天井吹き出し床吸い込み方式の一方向流であり、温湿度条件は $23 \pm 0.5^\circ\text{C}$, $45 \pm 5\%$ (RH) にそれぞれ設定されている。可視化は、クリーンルーム内の照明をすべて点灯し、背景はアイボリーホワイト調の壁とした。壁面の照度は $400 \sim 450$ ルクス (lx) 程度であり、純水ミストのトレーサを流した場合に非常にコントラストがつきにくい背景で行った。

また、画像上のパターン追跡によって算出されたトレーサの移動速度の算出精度を検証するために、レーザドップラ流速計¹⁰⁾ (KANOMAX: SYSTEM 8800) によるトレーサ（純水ミスト）

の個々の移動速度の同時計測を行った。

4.2 可視化画像の画質（コントラスト）

最初に、可視化画像の画質（コントラスト）が画像上のパターン追跡による速度ベクトルの算出結果におよぼす影響を解析した。気流形状および実際のトレーサ濃度が同じ空間の気流を、3 種類の手法によって可視化した。そして得られた各画像について解析を行った。第 1 の画像は筆者らが提案している手法、つまり赤色蛍光灯を可視化光源とし、光学フィルタ分離と画像データの微分処理によるものである。第 2 の画像は赤色蛍光灯を可視化光源とし光学フィルタ分離による手法（微分処理は行っていない）、第 3 の画像は昼白色蛍光灯を可視化光源とした手法（光学フィルタ分離と微分処理は行っていない）によって得られた可視化画像である。

Fig. 8 に解析を行った第 1 の画像を示す。Fig.

Fig. 8 Original image obtained with present visualization method

Fig. 7 Schematic diagram of airflow visualization system in a clean room

Fig. 9 Comparison of gray levels in the conventional and present visualization method

8 の画像中のライン上の輝度分布(a)と第 2, 第 3 の画像中の同一ライン上の輝度分布(b), (c)を **Fig. 9** に示す。輝度レベルは、黒を 0, 白を 255 とし 256 のレベルに分割されている。**Fig. 9** 中の山部がトレーサの部分で、谷部が背景の部分であり、山部と谷部の差が大きい程、画質（コントラスト）が良好となる。第 1～第 3 の画像において、トレーサと背景の輝度差は、それぞれ 50～70, 20～30, 10～20 程度となっている。

このような画質（コントラスト）が異なる 3 種類の画像上でパターン追跡（輝度差の累積法）を行った場合の、過誤ベクトルの出現割合と画質（コントラスト）の関係を **Fig. 10** に示す。画質（コントラスト）を表すパラメータとして、画像上の隣接した各画素間（ x, y 方向）の輝度差の平均値を用いている。鮮明な画像ほど輝度差の平均値は高くなる。この結果より、可視化画像の画質（コントラスト）は、画像上のパターン追跡による速度ベクトルの算出能力に大きく影響していることがわかる。さらに、本報で提案している可視化手法によって、速度ベクトルの算出精度の大幅な向上が図れることも明らかになった。

4.3 速度計測データの分布

各画像の組から得られる速度分布は、3.1 で述べたようにある瞬間の速度分布となる。そこで、速度計測データがどのような分布をとるかを調べ

Fig. 10 Relationship between mistracking ratio of vectors and average difference of gray level between next pixels

た。

まず、可視化領域の任意の位置のトレーサ粒子の水平（ x ）・垂直（ y ）方向の移動速度を、レーザードップラ流速計で測定した。測定は、約 1000 個の純水ミストについて行った。

つぎに、レーザードップラ流速計の測定ポイントを中心とした $35 \text{ mm} \times 35 \text{ mm}$ （実空間）の範囲における可視化画像を用いパターン追跡法により解析した。各可視化画像は 4 分間撮影されており、約 5 秒間隔で 1 組（連続した 2 画面）ずつサンプリング（合計 49 組）をした。レーザードップラ流速計による測定および画像上のパターン追跡により得られた速度ベクトルデータの水平（ x ）・垂直（ y ）成分のデータの分布を **Fig. 11** (a), (b) に示す。図中の V_d, V_i は、各々レーザードップラ流速計、画像上のパターン追跡による結果である。

レーザードップラ流速計と画像上のパターン追跡による速度分布を比べてみると、速度の水平・垂

Fig. 11 Velocity distributions measured with a laser doppler velocimeter (V_d) and the image processing (V_i) in a down flow clean room

直成分とも平均値付近をピークに両側に広がる、一山型となっており、各々よく類似した分布となっている。このことより、画像上のパターン追跡によって得られたベクトルデータは、トレーサの移動速度分布をよく解析できていることがわかる。また、画像上のパターン追跡による速度分布が離散的な値となっているのは分解能（1画素分）に起因するものである。

4.4 計測精度

クリーンルーム気流の可視化画像上でのパターン追跡による速度計測の精度を調べるために、レーザドップラ流速計の計測結果との比較を行った。画像上のパターン追跡の精度に対するマトリクスサイズや画像間の時間間隔の影響については、既往の研究等¹¹⁾で検討がなされている。そしてこれらの条件の最適値は、流れの速度や乱れの大きさ、トレーサの濃度分布パターン等によって異なる。ここでは、マトリクスサイズ 25×25 画素、画像間の時間間隔は $1/30$ 秒とし移動画素数が低速部で10画素以上となるように設定した。そして、これらの条件は固定とした。

可視化とレーザドップラ流速計の計測は、測定条件を揃えるために同時に行った。また、計測空間は乱れの比較的小さい一様流の部分とした。画像上のパターン追跡による速度の算出は、レーザドップラ流速計の計測ポイント近傍5点のデータの平均値である。また、各点での速度の算出に

は、20組の画像を用い、得られた速度ベクトルデータ群を統計処理した。なお、計測は垂直成分 (y) のみについて行った。

Fig. 12 に計測結果を示す。横軸に、レーザドップラ流速計で計測した平均速度 V_d を、縦軸に画像上のパターン追跡で求めた平均速度 V_i を示す。画像上のパターン追跡による平均速度 V_i は、レーザドップラ流速計で計測した平均速度 V_d とほぼ一致しており、良好な結果が得られた。レーザドップラ流速計を基準とした偏差率 ($|V_i - V_d| / |V_d|$) は、最大で10.7%、平均で5.0%となっている。また、画像上のパターン追跡による速度計測分解能は、式(4)より 28.6 mm/sec であり、**Fig. 12** 中の点線で示した幅である。しかし、速度分布が **Fig. 11(a), (b)** に示すような画像上のパターン追跡の計測分解能の数倍の分布幅を持っている場合（本実験の条件では、計測分解能 $= 0.61\sigma_d \sim 2.22\sigma_d$ (σ_d : レーザドップラ流速計で得られた速度分布データの標準偏差) となっている。) には、画像上のパターン追跡による速度計測に用いる画像組数を大きくして統計処理を行うことにより、分解能による誤差を無視できる程度に減少させることができる¹²⁾。したがって、本計測で生じた誤差には、分解能に起因するものは極めて少ないと考えられる。これらの誤差の多くは、画像上のパターン追跡時のトレーサのパターンの崩れ・変形等によって、パターン追跡の精度が低下したことによると考えられる。

4.5 装置廻りの速度分布の計測

Fig. 7 に示したような実規模のクリーンルーム内に装置模型を設置し、その廻りの気流の可視化を行った。そして得られた可視化画像を用いて画像上のパターン追跡により平均速度分布を求めた。なお、装置模型としては、床置きの場合だけでなく、空中に浮いた状態のロボットアームのような障害物も想定した。画像上のパターン追跡を行うために使用した画像データの画面数は、合計14組（28画面）であり、すべて等時間間隔でサンプリングされており、連続した2画面を1組としている。

Fig. 13 は、床上に置かれ、装置上面に段差のある装置模型の廻りの解析結果である。装置によ

Fig. 12 Comparison between the vertical velocity component measured with the image processing (V_i) and that measured with a laser doppler velocimeter (V_d)

り気流が遮られ、装置上方で左右に分かれて流れ、さらに段差の部分で小さな渦の発生が確認できる。また、装置上方で流れが停滞している様子

Fig. 13 Airflow pattern around the model device with a stepwise outline

Fig. 14 Detailed the vortex in Fig. 13

もわかる。

Fig. 14 は、Fig. 13 の装置上面の段差部分を拡大して解析した結果であり、拡大したことにより、段差部分で生じた渦の様子が良く解析されている。

Fig. 15 は、円形断面を持つロボットアームの装置模型廻りについて、解析を行った結果である。アームに沿った気流の様子や、アーム下方での乱れが良く解析されている。ただし、アーム直下にはトレーサが回り込まないために、この部分の解析はできていない。

5. おわりに

従来の可視化法で必要とされた、可視化のための特別な準備、たとえば、背景を暗くしたり、照明を落としたりすることを必要としない可視化システムを開発した。さらに、画像上でのパターン追跡（輝度差の累積法）により、速度ベクトルを算出する場合の、算出精度に対する可視化画像の画質（コントラスト）の影響や、算出された速度分布の特徴および算出精度について明らかにした。そして、本可視化システムによる画像で、大

Fig. 15 Airflow pattern around a circular cylinder

幅なパターン追跡精度の向上を図れることを確認できた。

このような手法を用いて, クリーンルーム内の装置模型廻りの代表的な気流の可視化を行い, 良好な可視化画像を得ることができた。さらに画像上のパターン追跡を行い速度分布を算出した結果, 流れの特性が良く解析されており, クリーンルーム内低速気流の平均速度分布を定量的に把握する手法としては, 有効であることが確認された。また, 画像上のパターン追跡による速度分布の算出条件に関しては, 流れの状態により異なるため, 可視化画像よりある程度推定した上で, 解析を進めていくことが重要である。

参考文献

1) 井上ほか: クリーンルーム内装置廻りの気流に関する研

- 究, 日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集, No. 920-68 (1992) 349-351
- 2) 幸ほか: 簡易相関処理による煙可視化像からの気流速度の計測, 流れの可視化, 8-30 (1988) 293-296
- 3) 加賀昭和: 輝度差の累積法, 可視化情報学会第3回手法別講習会教材 (1991) 18-22
- 4) 浜松ホトニクス㈱: 高性能・多機能ビデオカメラカタログ
- 5) 備ケンコー: カラーフィルターガラスカタログ
- 6) 杉田ほか: クリーンルーム気流可視化用トレーサー, 第6回エアロゾル科学・技術研究討論会 (1988) 22-25
- 7) William C. Hinds (早川一也訳): エアロゾルテクノロジー (1985) 315, 井上書院
- 8) 木村ほか: ニューラルネットワークによる過誤ベクトルの判定, 日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集, No. 920-68 (1992) 310-312
- 9) 木村ほか, 相関を利用した流れの画像計測, 流れの可視化, 6-22 (1986) 269-272
- 10) 日本機化学会編: 技術資料 流体計測法 (1985) 142-149
- 11) 加賀: 画像処理を用いる速度計測システムの開発に関する研究, 文部省科学研究費補助金 (一般研究C) 研究成果報告書 (1990)
- 12) 吉澤康和: 新しい誤差論 (1989) 110-118, 共立出版