

微小部位の高速気流における可視化計測および数値計算を用いた吸着ノズルの最適設計手法

Optimal Design Approach for Suction Nozzles with Numerical Calculation and Visualization Techniques under High-Speed Airflow in Minute Spaces

姫野 素志 仲道 正恭
Motoshi Himeno Masayasu Nakamichi

要 旨

電子部品実装機においては、実装品質保証のために微小部品吸着時姿勢の安定化が求められる。設計初期段階より吸着システムの最適設計を行うためには、吸着時の気流により部品上に作用する揚力を定量的に求めることが必要とされるが、吸着ノズル先端においては微小吸入口に高速気流が発生しており、この解析と計測は難易度が高いとされる。従来手法においては、吸着時の高速度撮影による定性解析と改善設計を繰り返す実証的手段により吸着姿勢の安定化を行ってきた。本稿では、数値解析による計算的手法および流体可視化による計測的手法を用い、微小領域かつ高速流速の条件下で両手法による解析とその結果対比を行い、吸着時における気流の最適条件を求めるための評価方法を確立する。

Abstract

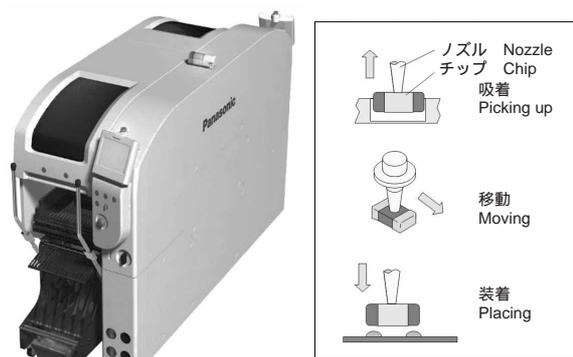
Quality assurance in placement requires stable picking position in the Chip Mounter. Conventional methods for the stable picking process have been to develop design according to high-speed movies of the picking process as an empirical approach. Quantitative lift force for the chip is required to optimize picking process design in the initial design phase. Occurrence of high-speed suction stream in minute space makes it difficult to analysis and measure at the end of the picking nozzle. This paper describes analysis of high-speed streams in minute spaces with both numerical calculation and visualization methods.

1. はじめに

モノづくりの自動化は生産技術における重要なテーマであり、その自動化のための要素技術の1つとして部品の移動がある。移動の手段としては、摩擦力、機械的把持、電磁的吸引などがあるが、大気圧に対する相対的圧力すなわち真空圧を制御する方法も各分野で多用される。

電子部品実装機は、電子回路基板（以下、基板と記す）に半導体集積回路部品ならびに抵抗やコンデンサなどの電子部品を高速かつ高精度に搭載する生産設備であるが、真空圧制御は、その設備においても電子部品のピックアップブレース（以下、吸着、装着と記す）の手段として用いられる。この設備は、基板の搬送および保持部、搭載する電子部品の供給部、部品を搭載するための真空手段を有したノズルを保持するヘッド部、そのヘッド部を部品供給部および基板上の搭載位置へ移動させる手段となるXY直行ロボット部、および部品の搭載位置補正のための部品認識部などより構成される。ノズルは、真空圧発生時に先端部に生じるサクシオン気流により、キャリアテープなどで供給された電子部品を吸い上げ、吸着、保持し、基板上の所定搭載位置に移動し装着を行う。装着後は真空経路内の真空力を消失させ、ノズルが離れることで部品搭載を完了する（第1図）。

基板の実装品質すなわち装着位置精度や装着率などを向上させるには、ノズルに搭載部品を吸着する際の吸着姿勢の安定が重要とされる。吸着時において、ノズルのサクシオン穴への気流によりノズル先端と部品上面の空



第1図 電子部品実装機

Fig. 1 Chip mounter

隙に生じた流速変化は、運動量の保存則より部品表面に作用する圧力を変化させ、部品に対する揚力を発生させる。したがって、吸着姿勢を安定させるためには、吸着時の気流を、吸着部品上面およびノズルのサクシオン穴に応じて、最適となるように制御する必要があり、そのためにはサクシオン気流そのものを定量的に正しく知ることが重要となる。しかしながら、吸着時の部品挙動を高速度カメラで動画撮像するといった実証的手段による解析はよく行われているところであるが、その吸着現象の本質であるサクシオン気流そのものについて定量的に解析した事例は報告されていない。

本稿では、ノズル先端に生じるサクシオン気流について、粒子画像流速測定（Particle Image Velocimetry 以下、PIVと記す）および数値流体力学（Computer Fluid

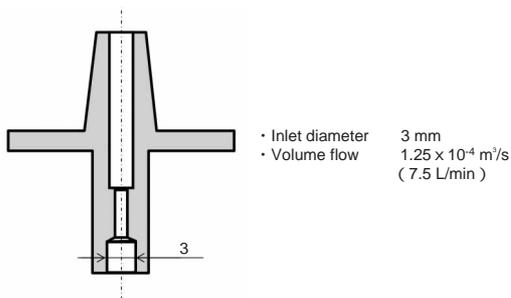
Dynamics 以下、CFDと記す)による数値計算の両方法による結果について報告することで、吸着ノズルの最適化設計における新たな評価技術確立に向けた取り組み、および気流解析の有用性を述べる。

2. サクション気流解析の課題

携帯電話、デジタルAV機器などに代表される電子機器の小型化を実現するために、機器に組み込む回路基板はもとより回路基板に搭載する電子部品についても小型化が求められる。近年の抵抗、コンデンサのチップ部品サイズにおいて、回路基板上の投影寸法で、 $0.6\text{ mm} \times 0.3\text{ mm}$ のサイズ(以下、0603チップと記す)が主流となりつつあり、また $0.4\text{ mm} \times 0.2\text{ mm}$ のサイズも実用化が進んでいる¹⁾。したがって、吸着ノズルにおけるサクション穴のサイズにおいても部品サイズに対応した微小化が求められる。この微小化したノズルにおいて、吸着する際の流速は、体積流量測定結果を質量保存の式に適用すれば、たとえば0603チップでは最大流速 100 m/s に達すると考えられる。

生産設備におけるスループット向上の観点より高速化も求められる。そのためには、吸着および装着における動作時間を短縮することが必要とされ、結果 1 ms の時間単位での真空力制御が行われる。また、部品の吸着は、サクション気流の立ち上がりから定常流状態にいたるまでの過渡領域の、しかも立ち上がりから極めて短い時間(10 ms 以下)に行われる。したがって、本稿の気流解析は、このような微小領域における高速気流について、過渡現象として解析を行うことを特徴とし、そのための計測および数値計算のシステムが必要とされる。

今回のPIVおよびCFDに供したノズルの形状を示す(第2図)。このノズルの形状において、サクション気流の速度で 10 m/s 程度、先端の撮像範囲として数 $10\text{ mm} \cdot$ 数 10 mm の領域が必要とされる。この時間分解能および空間分解能に適合し、かつ 1 ms レベルでの過渡状態に対応した



第2図 PIV計測ノズル

Fig. 2 Nozzle and inlet pressure response

PIV計測およびCFD計算を行う。

3. サクション気流の可視化

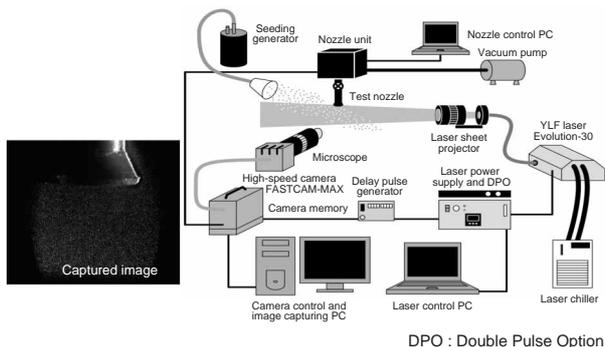
流れの可視化については、古くから種々の方法で実施されているが、流れ場を乱すことなく測定でき、かつ近年の高速デジタル記録および計算、画像処理技術ならびにレーザー技術に支えられ、現象を動的にかつ定量的に計測する手段として確立されつつあるPIVを用いる²⁾。PIVシステムは、トレーサ粒子をマーカとし、そのマーカに特殊光を与えたものを高速度カメラにより得られた撮像画面にデジタル画像処理を施すことを特徴とする。また、CFD結果との直接対比比較のために、相似拡大モデルによる計測は行わず、計測の難易度は高くなるものの実寸法による計測を行う。

3.1 PIV計測原理と計測システム

本計測における可視化は、微小領域におけるしかも高速気流の計測のため、計測システムに種々の工夫が必要となる。空間分解能の小さい撮像フレーム枠 10 mm 程度の狭小領域の現象を撮影するためには、微細なレーザー光と微小トレーサ粒子により、肉眼で捉えることのできない気流を可視化させる。直径 3 mm のサクション穴に対応させるため、撮像範囲を $20\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ とし、高速度カメラの空間分解能は $27\text{ }\mu\text{m}$ とする。気流の観察においては、粒子の散乱性および追従性が重要な要素とされる。トレーサ粒子は環境に配慮したセバシン酸系溶剤を用い、粒子径は $1\text{ }\mu\text{m}$ とサクション部寸法に対して十分小さくする。トレーサ粒子にレーザー光にて瞬時の露光を連続的に与えることにより、撮影する高速度カメラの各素子からの信号応答出力を得る。レーザー光は、スリットを介してシート光とし、サクション口径に対して細い光とする。

気流が高速なため、高速度カメラのフレームレート(2000 fps)での撮像では、トレーサ粒子の移動画素数が大きくなり、2時刻間の移動量が高速度カメラ保有の画素数より大きくなる課題がある。この課題に対しては、有効な解決手法であるフレームストラドリング手法³⁾にて対応し、 $1.3\text{ }\mu\text{s}$ の間隔での撮像を可能とする。この技術は、前後フレーム間の継ぎ目の近くで露光することにより、カメラのフレームレートより短い間隔の撮像を可能にする。

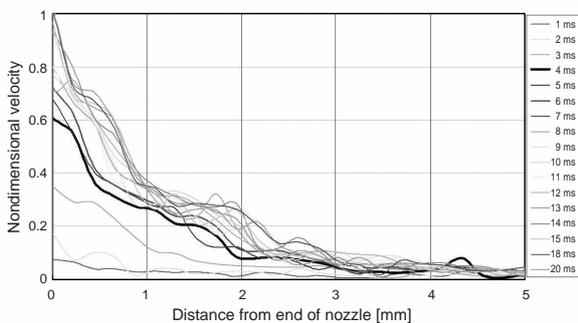
これらの計測機器構成と撮影画像を示す(第3図)。



第3図 PIV計測機器構成
Fig. 3 Configuration of PIV measuring system

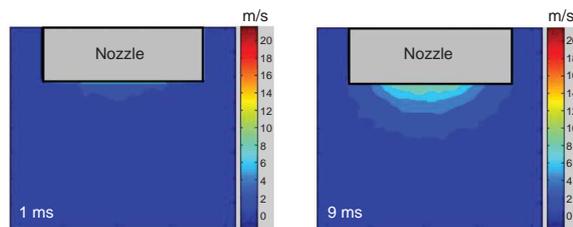
3.2 PIVによる可視化計測結果

撮像した高速度カメラの画像より、ノズル先端のトレーサ粒子の動きを画像処理技術にて解析する。サクシオン穴中心線上において時間領域をパラメータとし、流速に対するノズル先端からの位置の関係を示す。縦軸は、応答速度を到達最高速度で除した無次元速度である（第4図）。



第4図 PIVによる気流速度応答の計測結果
Fig. 4 Stream velocity response measured by PIV

サクシオン穴中心線上の流速は、立ち上がりから6 ms程度で定常流速の70%に達する。特に、立ち上がり後4 msまでの流速応答が顕著であり、吸着姿勢の最適化を検討するにあたり、この時間領域における気流を解明することの重要性がわかる。中心線上と同様に領域における流速計測を行うことで、撮像面におけるサクシオン流速のコンターを得る（第5図）。ノズル先端のサクシオン穴中心より、同心円状に流速が時刻暦で応答することがわかる。



第5図 PIVによるノズル先端流速分布（コンター）計測結果
Fig. 5 Velocity contours around end of nozzle by PIV

4. サクシオン気流の数値計算

数値計算手法には、気流と圧力を同時にかつ計算要素ごとに求めることができる利便性がある。しかしながら、計算モデルの設定、計算法および境界条件や初期条件の設定により、導かれる結果が大きく異なるといった課題が包含されている。この課題に対しては、PIV計測と同一のノズルにてCFDを実施し、結果を比較検証することで、モデルおよび計算法の有効性を確認する。さらに、その確認結果を踏まえた上で、計測が困難な0603チップ用ノズルについても同様にモデル化し計算を実施する。

実際の計算においては、汎用熱流体解析ソフトウェアとしてよく知られかつ使用実績の多いFLUENT[®]（注）を用いる。FLUENT[®]は、適用範囲が非圧縮性のみならず、低圧縮性（遷音速）および高圧縮（超音速、極超音速）と適用範囲が広く、また有限体積法による非構造格子にも対応可能なことを特徴とする。

吸着力すなわちチップ部品サクシオン時に作用する揚力の算出は、チップ側面の摩擦せん断力が微小なため、これを無視して、上下面の面圧からくる力の差を吸着力として評価している。

$$F_z = \sum p_{Li,j} A_{Li,j} - \sum p_{Ui,j} A_{Ui,j} \dots \dots \dots (1)$$

- F_z : チップに作用する揚力
- $p_{Li,j}$: チップ下表面の各要素に作用する圧力
- $p_{Ui,j}$: チップ上表面の各要素に作用する圧力
- $A_{Li,j}$: チップ下表面の各要素の面積
- $A_{Ui,j}$: チップ上表面の各要素の面積

4.1 計算領域の検討

サクシオン気流の計算にあたり、流体の基礎方程式 Navier-Stokes 方程式にて取り扱える領域、すなわち流れ

（注）米国 Fluent Inc. の登録商標

場を連続体として取り扱うことができる領域であるか、その可否についてクヌーゼン数 (Kn) を求め判断する。

連続場として、Navier-Stokes 方程式の適用が可能のためには、 $Kn < 0.1$ の必要があり、 $Kn > 0.1$ の場合は、希薄流としてボルツマン方程式により取り扱う必要がある。

計算の結果、 $Kn = 0.62 \times 10^{-3} < 0.1$ となり、本稿における気流の計算は連続流として取り扱う。

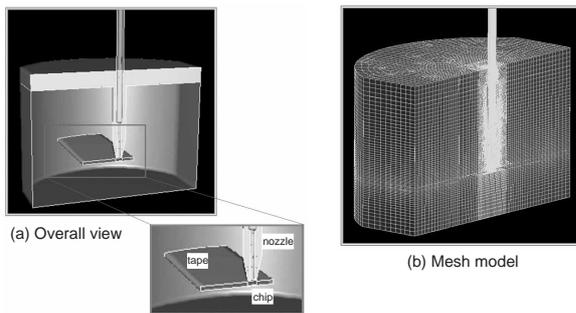
4.2 数値計算モデル

〔1〕モデル化の課題と対策

解析対象のモデルは、注目部であるサクシオン穴の直径が、全解析領域の100分の1以下とスケールギャップが大きく、また最大流速も100 m/s以上に達する。よって、計算要素の構成方法のいかんで、計算品質に対し大きく影響を及ぼすことが想定される。また、要素微細化に伴う要素数の増大は、計算時間の膨大化につながる。領域分割、局所細分化およびスムージングなどの手法は、これら課題を解決する有力な手法であり、必要な計算精度を維持しつつ総要素数を抑制することで、計算品質の維持を行う。

〔2〕計算モデル

計算領域境界面に圧力条件を用い、境界条件として、ノズル上面に体積流量の実測値より算出した平均流速を用いる。流れ場については、ノズル中心線に対する対称性があるものとみなし、1/2モデルにて計算を行う(第6図)。



第6図 CFD計算モデル

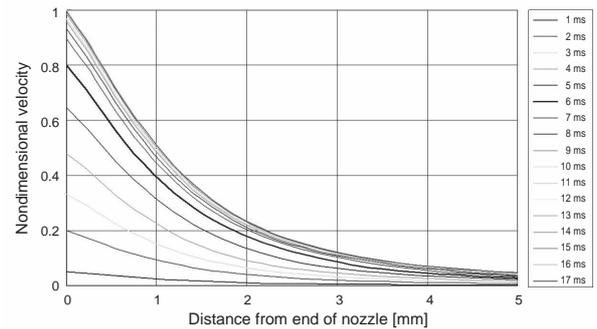
Fig. 6 CFD model

4.3 数値計算結果の検証

解析結果の有効性を確認するため、PIV実験と同一ノズルでの数値計算を行う。ここにおける計算条件は、PIV計測と同様に吸着ノズル先端の空間を解放した状態の条件とする。

〔1〕PIV結果との対比

CFDにて得られたノズル中心線上における気流流速の時間領域における応答結果を示す(第7図)。



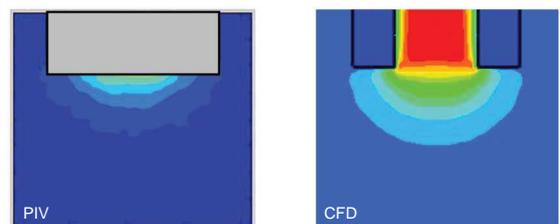
第7図 CFDによる気流速度応答の計算結果

Fig. 7 Stream velocity response calculated by CFD

CFDのノズル中心線状の流速応答の結果は、PIVによる結果と類似の応答曲線を示しており、ともに時定数が約6 msの1次遅れ系の現象とすることができ、過渡状態における両法の結果において一致を見ることができる。

到達流速について、CFD結果はPIV結果と比して2.5倍の値が得られた。体積流量と断面積より質量保存として求めるCFDの計算値のほうが実際に反映している可能性が高い。PIVにおける差異発生理由として、真空量の影響、PIVにおけるトレーサ粒子の追従性、シーディングによる密度の影響などを検討する余地がある。

立ち上がりから9 ms後におけるPIVおよび数値計算の流速分布のコンターをそれぞれ示す。周辺領域の流速コンターにおいても、PIVおよびCFDで類似の分布場となることわかる(第8図)。



第8図 ノズル先端 流速分布(コンター)の比較

Fig. 8 Comparison of velocity contours around end of nozzle

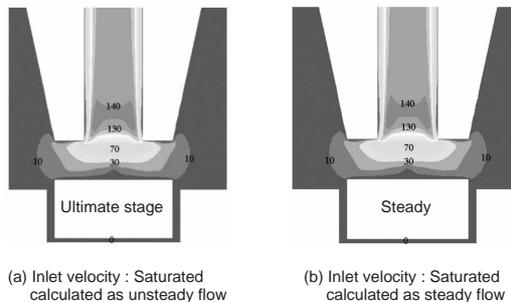
本計算結果については、応答時間挙動においてPIVと同様の結果がCFDで得られ、また気流の速度場の状況もPIV計測結果と定性的に一致した。これより、CFD計算モデルについて、PIV計測結果とモデル同定を実用レベルで行えたとし、0603について検証を行う。

〔2〕定常流れ・非定常流れの検討

実際の吸着は、流量が最大に達する前、すなわち流速

が増加していく過渡過程で行われる。したがって、厳密に計算を行うためには、数値計算においても非定常流として扱い過渡過程を計算していくことが望ましいが、その場合、計算量が膨大化する課題がある。

流速が飽和状態に達するまでの計算を、非定常および定常の2条件で計算し比較する(第9図)。この計算結果に一致が見られたことにより、定常流として評価を行う。また、吸着時においては、本来、過渡状態における流量で評価を行う必要があるが、実現象では短時間内のノズルの水平および上下の移動を伴うため、流れ場を特定することは困難である。したがって、今回、この定常に達した流量すなわち定常流を用いて、ノズル固定時のチップ吸着安定性を評価する。



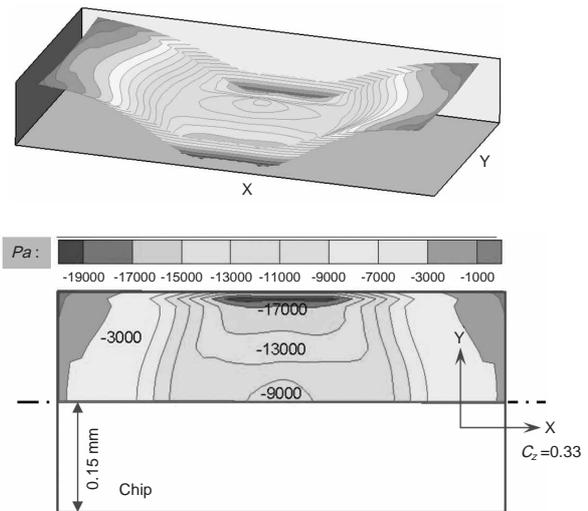
第9図 計算結果の比較：非定常流れ / 定常流れ
Fig. 9 Comparison of calculation result

4.4 0603チップ用ノズルへの数値計算適用結果

前述のPIVとCFDの比較検証の成果に基づき、微小サイズ部品0603チップの吸着時の計算を行う。チップの表面圧力場への影響因子としては、ノズル先端とチップ上面の間のすきま、すなわち空隙量が挙げられる。空隙量による気流の流速変化により、チップ表面の真空圧が変化し、揚力も変化することとなる。本計算においては、その空隙量をノズル穴直径に対する無次元数 C_z とし、0.33, 0.5, 0.67および0.85の4水準にて計算を行うことで、チップ部品表面の圧力分布および吸着時に作用する揚力を求める。

〔1〕チップ表面圧力分布

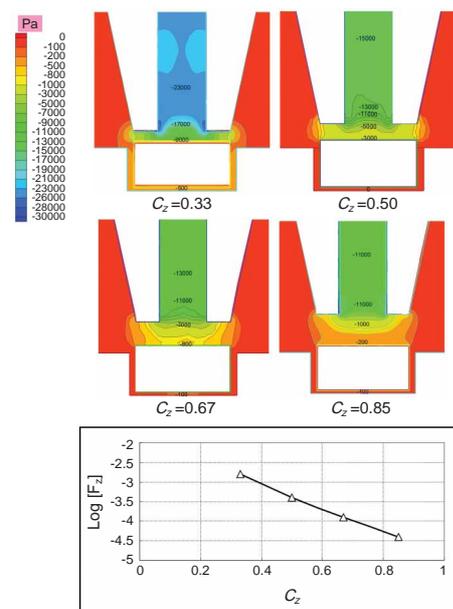
計算結果より、高負圧となる領域は、チップ表面中央部ではなく端部に形成されることがわかる(第10図)。このことは、吸着時にノズル中心位置がある誤差をもった状態、すなわちオフセットした状態でサクション気流を発生させると、チップに作用する揚力において、対称性が崩れたアンバランスな状態での吸着となり、吸着姿勢が安定しないことを示唆する。



第10図 0603チップ表面における圧力分布 ($C_z=0.33$)
Fig. 10 Pressure contours on top surface of 0603 chip ($C_z=0.33$)

〔2〕空隙量の影響

空隙無次元数の増加とともに、ノズル周囲に発生する流速の低下により、チップ表面上の圧力は上昇し、結果揚力は減少する。空隙無次元数の変化に伴う圧力分布変化より吸着力の変化を求めると、吸着力と空隙量の関係は、吸着力に対する空隙量の片対数の式として近似される。これより、吸着力に対する空隙量変化の感度が高く、空隙量を最適な条件にて維持することが、吸着力の安定に重要なことがわかる(第11図)。



第11図 0603吸着時におけるノズル断面圧力分布
Fig. 11 Pressure contours in section of 0603 nozzle and suction force

空隙量を一定に保つことの重要性は、実証的な検証により、これまでよく知られたところであるが、CFDによる計算結果は、その事象を定量的に説明している。

5. まとめ

高速かつ微小領域を特徴とする微小部品吸着時のサクシオン気流について、PIVおよびCFDの両技術を組み合わせることで、定量的に明らかにし、吸着部設計における新しい設計手法を確立することができた。特に、PIV可視化においては、実際の寸法で計測することにより、CFD結果と直接対比ができ、またCFDにおいては、0603チップ用ノズルにおける吸着時の速度場および圧力場を計算にて定量化した。このように、PIVとCFDを組み合わせることで、0603チップ吸着時における隙間問題を解明し、あわせてオフセット吸着時の課題を予見した。これらの手法を用いることで、ノズル開口部および先端空隙の最適設計において試作レスが可能となる。そのためには、さらなる微小化に対応した、PIV計測技術およびCFD計算技術の開発を行い、定量化結果の精度を向上させることが、今後の課題である。

PIVおよびCFDの両手法を活用することにより、電子部品実装機における吸着機能の本質を追求し、吸着システムを最適化し、さらには実装品質の向上へと導くことができる。

生産現場における高生産性かつ高品質な実装を実現するため、電子部品実装機の基本機能は、本稿内容に代表されるように機能の本質解明の技術が支えている。今後も、電子部品実装機に代表される自動化設備に、生産現場における諸課題を解決する技術を付加し、生産技術力の強化に貢献していく所存である。

本稿のPIVによる可視化において、九州大学大学院 総合理工学研究院の速水教授（当時）および荒巻助教より共同研究にて指導をいただいた。ここに感謝の意を表明する。本稿のCFDにおける実計算はパナソニック研究開発（蘇州）有限公司 上海研究所にて実施したことを付記する。

参考文献

- 1) 実装技術ロードマップ専門委員会編：2007年度版日本実装技術ロードマップ（電子情報技術産業協会）(2007).
- 2) 小林敏雄 他：PIVハンドブックノ（社）可視化情報学会（森北出版）(2002).
- 3) 速水洋 他：高速度PIVシステムの開発 可視化情報 23, No.1, pp.207-208 (2003).
- 4) 荒巻森一朗 他：ダイナミックPIVによる微小吸込みノズルの過渡流れ計測 可視化情報学会誌 27, No.2, pp.97-98 (2007).
- 5) G. K. Batchelor: An introduction to Fluid dynamics. Cambridge Univ. Press, Cambridge, England (1967).
- 6) S. V. Patankar: Numerical heat transfer and fluid flow. (Hemisphere Publication Corp.) (1980).
- 7) J. H. Ferziger, et al.: Computational methods for fluid dynamics. Springer, issue 3rd (2001).

著者紹介



姫野素志 Motoshi Himeno
パナソニック ファクトリーソリューションズ（株）
開発センター
Development Center, Panasonic Factory Solutions
Co., Ltd.



仲道正恭 Masayasu Nakamichi
パナソニック ファクトリーソリューションズ（株）
開発センター
Development Center, Panasonic Factory Solutions
Co., Ltd.