

研究プロジェクト「マイクロ／ナノスケール計測制御テクノセンター」活動報告

**Report on the Activities of Research Project
“Techno Center for Micro/Nano-Scale Control and Measurement”**

水野 毅*, 川橋 正昭*, 大八木 重治*, 加藤 寛*, 佐藤 勇一*, 堀尾 健一郎*
豊岡 了**, 荒居 善雄*, 綿貫 啓一*, 池野 順一***, 小原 哲郎*, 高崎 正也*

Takeshi MIZUNO, Masaaki KAWAHASHI, Shigeharu OYAGI, Hiroshi KATO, Yuichi SATO,
Ken-ichiro HORIO, Satoru TOYOOKA, Yoshio ARAI, Keiichi WATANUKI,
Jun-ichi IKENO, Testuro OBARA and Masaya TAKASAKI

This report describes the outline and activities of the research project entitled by “Techno Center for Micro/Nano-Scale Control and Measurement”. The research group consists of twelve members, most of which belong to the Department of Mechanical Engineering, Saitama University. The research topics of each member are presented, followed by two articles on micro-scale fluid measurement and high-precision vibration isolation system.

Keywords: Micro technology, Nano technology, Measurement, Control, Mechanical Engineering

1. プロジェクトの概要**1.1 目 的**

従来、計測制御技術はそれぞれの個別分野で必要に応じて発展してきたが、様々な極限技術に対応する計測制御手法の共通性、関連デバイスの高機能化、信号処理及び画像処理能力の飛躍的向上により、先端的計測制御技術が技術開発の中心的役割を担うようになってきている。特に、次世代技術としての機能素子の高

*埼玉大学 工学部 機械工学科

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Saitama University, 255 Shimo-Okubo, Sakura-ku, Saitama, 338-8570, Japan.

**埼玉大学大学院理工学研究科環境制御工学専攻

Department of Environmental Science and Human Engineering, Graduate School of Science and Engineering, Saitama University.

***埼玉大学大学院理工学研究科生産科学専攻

Department of Production Sciences, Graduate School of Science and Engineering, Saitama University.

密度化に伴って、マイクロ／ナノ領域における計測制御の必要性が高まってきている。本プロジェクトでは、計測制御分野で高い業績を挙げている研究者集団により、マイクロ／ナノスケールモデルに対応する計測制御技術を総合的に研究・開発するための拠点形成を目指す。特に、マイクロ／ナノスケール計測基盤技術の確立、高時空間分解能多次元マイクロ／ナノスケール計測制御技術の開発、マイクロ／ナノスケールビジュアライゼーション技術の確立を図るとともに、各技術の高度化と精錬化を行っていく。さらに、将来的には、これらの計測制御技術の集約し、世界初となる高速移動現象ナノスケール計測システムなどの構築を目指す。

1.2 特 色

マイクロ／ナノスケール計測制御技術の発展は国内外において目覚ましいものがある。しかし、計測精度の評価、計測精度向上のための極限環境の実現、計測システム構成及びその制御方法、制御要素開発などにおいて多くの問題を残しており、それらを戦略的に集約して新技術に対応する体制は十分でない。これに対し、

本プロジェクトでは、極限環境メカトロニクスや分子操作制御などのマイクロ/ナノスケール計測制御の基盤技術は勿論のこと、マイクロ/ナノスケール計測制御技術における不確定性問題などの基礎理論、熱流体・材料・加工の各分野におけるマイクロ/ナノスケール可視化技術、さらには高時空間分解能多次元計測制御システム構築などの実用化技術に至るまで、独自の視点から研究・技術開発を行っていく。そして、これらの技術を有機的に組み合わせて世界初となる新しいマイクロ/ナノスケール計測制御システムを構築していく点に特色がある。

1.3 研究組織

本プロジェクトは、21世紀COEプログラムとしての採択を目指して組織されたものである。2005年4月現在の研究組織を表1に示す。

1.4 学内における活動

本プロジェクトは、2003年度に学内改革等特別経費の配分を受け、研究ポテンシャルの向上を図った。2004年7月からは、総合研究機構の管理する総合研究棟全学プロジェクト室を借用し、共同プロジェクトの推進を図っている。また、2005年3月には、構成員が中心となって、総合研究機構「重点研究テーマ」とし

て「先進マイクロ/ナノスケール計測制御システム創成」という研究テーマの提案を行った。

2. 研究の概要

本プロジェクトは、1.3節で示したように、工学部機械工学科所属教員を中心とした12人の構成員によって推進されている。各構成員の研究内容の概要を以下に記す。

水野 毅：マイクロ/ナノスケール計測制御基盤技術の開発。 マイクロ/ナノスケールでの計測制御に不可欠な精密除振装置や、超清浄空間、超高真空など特殊環境におけるメカトロニクスに関する研究を行っている。

川橋正昭：マイクロスケール流体計測。 定量的マイクロ/ナノビジュアライゼーション技術の手法の確立を行っている。

加藤 寛：マイクロ材料計測。 超音波を用いた計測・制御技術に関して研究を進めている。現在は、材質劣化評価の転位構造変化を通じた超音波評価、超音波顕微鏡による材料内部のミクロ組織の可視化、超音波干渉を利用した異材境界形状の高精度計測・ナノ粒子の制御などを行なっている。

大八木重治：マイクロフレームの研究。 モバイル機

表1 研究組織

氏 名	所属・職名	専門分野	役割分担
水野 毅	工学部機械工学科・教授	メカトロニクス・制御工学	研究統括
川橋 正昭	工学部機械工学科・教授	流体工学	マイクロチャンネル流解析
大八木重治	工学部機械工学科・教授	熱工学	マイクロ/ナノ熱計測
加藤 寛	工学部機械工学科・教授	材料工学	ナノ/マイクロ材料欠陥解析
佐藤 勇一	工学部機械工学科・教授	機械力学	マイクロメカニクス
堀尾健一郎	工学部機械工学科・教授	精密加工	マイクロ/ナノ加工
豊岡 了	環境制御工学専攻・教授	光学計測	ナノ光学計測
荒居 善雄	工学部機械工学科・助教授	材料力学	マイクロ応力・疲労解析
綿貫 啓一	工学部機械工学科・助教授	設計工学	マイクロ/ナノシステム設計
池野 順一	生産科学専攻・助教授	精密加工	マイクロマニピュレーション
小原 哲郎	工学部機械工学科・助教授	熱工学	マイクロ/ナノ熱計測
高崎 正也	工学部機械工学科・助教授	メカトロニクス	マイクロメカトロニクス

器等の微小エネルギー源として極小火炎の研究が注目されている。また、動力源としてもタービン径数ミリのマイクロガスタービンの開発も盛んに行われている。そこで、微小空間における火炎の挙動について実験および数値解析によって明らかにする研究を行っている。

佐藤勇一：制振・振動利用。 ミクロンオーダーの振動を回転運動に変換する、制振技術、振動エネルギー回生について研究している。

堀尾健一郎：ナノスケール表面の形成メカニズム。 研磨加工により平滑面が形成されていく過程について研究している。ナノメートルオーダーの表面を得るのに必要な条件を明らかにすることが目的である。

豊岡 了：マイクロ／ナノ光センシング。 干渉計測分野で、独自に開発した位相解析法によるサブミクロンスケールの時空間変形解析と MEMS 動作解析への応用、および独自に開発した統計干渉法によるサブナノメートルスケールの動的変形計測について研究している。

森田真史：イオンデポジット法による生体材料の表面改質と耐食性、生体親和性の改善。 生体金属材料の毒性は溶出する金属イオンの種類と量に依存する。イオンデポジット法によりアモルファス薄膜層を表面に形成することで耐食性の改善をはかり、生体親和性を維持する技術の開発を行っている。

荒居善雄：マイクロ／ナノ材料力学。 半導体量子ドットを有する材料の歪解析とナノインデンテーション／発光測定試験を行い、ナノスケールの空間分解能を有する歪測定法の開発のための基礎研究を実施している。

綿貫啓一：マイクロメカトロニクスシステム設計。 バーチャルリアリティ空間における 3 次元立体視技術や力覚呈示技術を融合した没入型仮想共有環境システムを構築し、現実に見たり触ったりすることが困難なマイクロメカトロニクスシステムのデザインレビュー法について研究を行っている。

池野順一：マイクロ／ナノ加工計測。 光放射圧から生じる微粒子の高速回転現象を利用したサブ Å の変位計測原理の研究、および光放射圧と定在波の組み合わせで発生する振動現象を利用したナノ変位形状計測原理の研究など非接触精密計測に関する研究を行っている。

小原哲郎：マイクロフレームの伝播メカニズム。 可燃性の予混合気体で満たされたミリサイズの領域内を伝ばする火炎（マイクロフレーム）の挙動について研究している。

高崎正也：超精密アクチュエータ。 無限ストロークを実現しつつマイクロ／ナノスケールでの位置決め制御を達成するために、複数の駆動モードを持つ超音波アクチュエータの開発を行っている。

3. 代表的な研究成果

本章では、前章で紹介した研究の中から 2 つのテーマを取り上げて、研究成果を示す。

3.1 マイクロスケール流体計測

環境、バイオ、医療、省エネルギー等の分野における技術開発や新産業創生において、流体に関連したマイクロ／ナノテクノロジーの発展に対する期待は益々高まっている。マイクロ／ナノテクノロジー適用の関連分野は極めて広範囲であり、その例としては、バイオテクノロジーや医療に関連した生化学分析、化学分析、新薬・試薬開発、さらに高度医療技術などの基礎となるマイクロチャネルフロー、電気浸透流、マイクロミキシング、マイクロ循環、マイクロポンプ、マイクロマシンにおける現象解析、環境・省エネルギーに対応する MEMS 応用のセンシングや制御、マイクロマシン、マイクロ流体素子、マイクロスケール熱交換器、燃料電池、逆浸透膜淡水化における現象解析などが挙げられる。より具体的な例としては、脳血管障害・心臓病・高血圧などに代表される循環器系疾患の増加に伴い、微小な血管内の流れ場を把握することが重要な課題となっている。また、スケール効果を利用した高付加価値の熱交換器などのマイクロマシン技術を応用した熱流体デバイスが注目され、省エネルギーの観点からも小型加工物の効率的生産システムも求められるようになっており、より効率的で微小な機械システムの開発が期待されている。化学反応を用いた DNA や血液などの分析機器においても、サンプル量の微小化や解析時間の短縮化のためにも、微小流動を利用したデバイ

スが提案されている。

マイクロ/ナノテクノロジーにおいてその鍵となるものは、マイクロ/ナノ計測技術であり、その確立なしにはマイクロ/ナノテクノロジーの発展は望めない。中でも、定量的マイクロ/ナノビジュアライゼーション技術は最も有用かつ有効な計測技術であり、その手法の確立は今後の技術展開における主要な要素となっている。マイクロスケールの流れ場は低レイノルズ流れであるが、解析的・数値的に求めることが難しい。なぜなら、マクロなスケールでの流れでは、慣性力や浮力などの体積力が支配的であるのに対し、ミクロな流れ場では、粘性力や界面張力などの表面力の影響が増大し、静電気力や分子間力などの様々な力の影響を受けるためである。マイクロスケールの流れ場の計測では、そのサイズが微小であるため、従来の計測・解析手法では、プローブの大きさの制限から計測が困難であり、空間分解能が不足するなどの問題がある。

ここでは、マイクロスケール流れの詳細を実験的に解析した例として、マイクロチャンネル内振動気流のマイクロ PIV 計測例を示す。対象としたマイクロチャンネル内流れは、図 1 に示すような人間の肺における

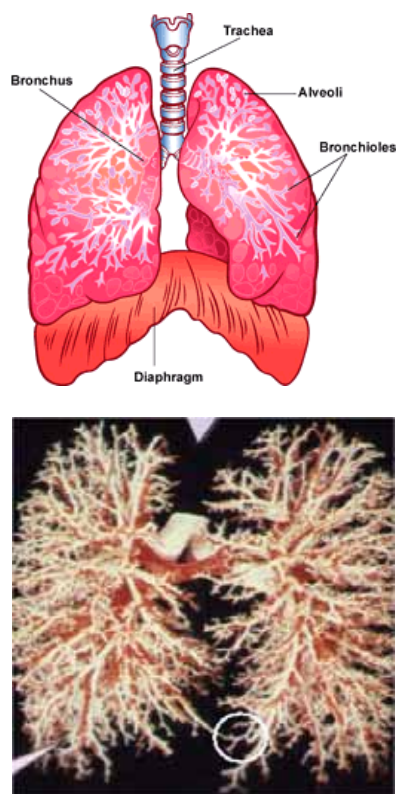
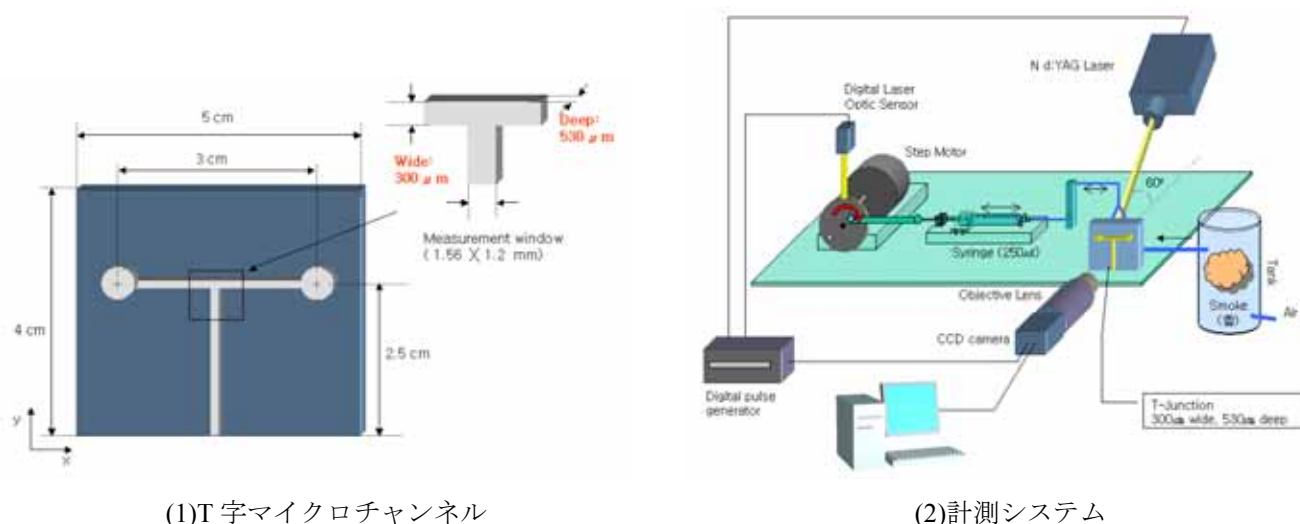


図 1 肺および気管支組織図

呼吸作用による呼吸細気管支から肺胞にいたる領域でのマイクロスケールガス交換メカニズムの詳細を明らかにすることを目的として、マイクロスケール細気管支内の振動流の実験解析技術を確立するための基礎となる T 字マイクロチャンネル内振動気流である。

マイクロスケール流速場の実験的解析法として有用なマイクロ PIV については、マイクروسコープを用いた基本光学系や計測上の問題点などについて、すでに多くの報告がある。この手法を適用した計測例も数多く報告されている。一方、比較的長い観察距離を確保できるマクロレンズ系を用いたマイクロ PIV システムも提案されており、その適用例についての報告もある。PIV では、通常パルス状シート光で照明された面内の 2 次元流速成分の計測がなされるが、マイクロスケール流れに適用するときは、シート光厚さの限界から、計測対象流れ場全体が照明される場合が多い。そのとき、計測領域の奥行き方向空間解像度はレンズの焦点深度に依存する。したがって、マイクロ PIV では光学系の構成が重要となる。また、照明光学系の構成の影響により、照明光によるトレーサ散乱光の画像記録で生じる問題点を避けるため、トレーサに蛍光粒子を用いて、蛍光による画像を記録することが多い。しかし、マイクロチャンネル内振動気流計測に適した蛍光粒子の入手あるいは作成は困難である。したがって、ここではマクロレンズを用いた光学系を用いて、トレーサ粒子からの照明光直接散乱光を検出記録するマイクロ PIV システムを構成して計測した例を示す。

実験で使用した T 字マイクロチャンネルの基本形状とその寸法、および実験計測システムが、図 2 に示されている。マイクロチャンネルは、厚さ $500\mu\text{m}$ の真ちゅう板を用いて機械加工により製作されている。マイクロチャンネル内の振動空気流は、ピストン駆動によるシリンジポンプにより駆動される。トレーサ粒子には線香の煙が用いられ、計測領域が発行時間 20ns 、発光間隔 10ms のダブルパルスレーザで照明されて、画面倍率 500 倍のマクロレンズが取り付けられた高解像度 CCD カメラにより瞬時 2 次元画像が取得され、PIV アルゴリズムにより速度分布が回復される。さらに、振動流の同一位相での複数画像取得により、位相



(1) T 字マイクロチャンネル

(2) 計測システム

図2 マイクロチャンネルおよびマイクロ PIV 計測システム

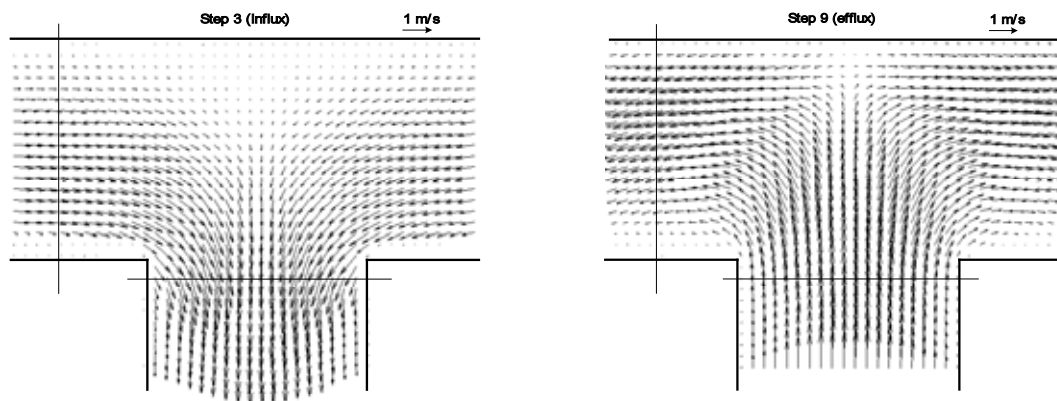


図3 マイクロチャンネル内振動空気流の位相平均流速分布計測例

平均流速分布が計測され、振動流についての時系列特性が解析される。駆動周波数を 1Hz としたときの、得られたマイクロチャンネル内の瞬時流速分布計測例が、図3に示されている。これらの結果より、空気流を時間的トレースして、合流部で生じる流速分布パターンの変化より混合の影響を抽出し、呼吸作用におけるガス交換のメカニズムを解析することが可能となる。また得られた結果は、マイクロチャンネル内振動空気流の流速分布の特性をよく表しており、今後の実際の呼吸細気管支の形状に近いモデルを用いた実験解析へのマイクロ PIV の有用性を示している。

3.2 精密除振装置の開発

近年、先端の半導体製造システムや極微小領域計測システムでは、振動などの外乱を除去する除振装置の重要性がますます増大している。除振装置で除去すべ

き外乱は、設置床の振動に起因する地動外乱と装置のばね上に入力される直動外乱とに大別でき、前者には低剛性、後者には高剛性の支持機構が適している。従来のパッシブな除振装置では、これらの相反する要求を十分に満足することが原理的に困難である。

本研究では、従来の除振装置とは全く異なるアプローチによって、地動外乱に対する振動絶縁と直動外乱に対する制振との両立を図っている¹⁾。具体的には、図4に示すように、正の剛性を持つばねと負の剛性を持つゼロパワー磁気浮上系とを中間台を介して直列に接続し、それぞれの剛性は低くすることによって振動絶縁特性を確保し、両者の大きさ（絶対値）を一致させることによって直動外乱に対する剛性を無限大とする。

現在までに、提案する方式の3自由度アクティブ除振装置(図5)²⁾や6自由度アクティブ除振装置(図6)およびパラレルメカニズムを利用した6自由度アクテ

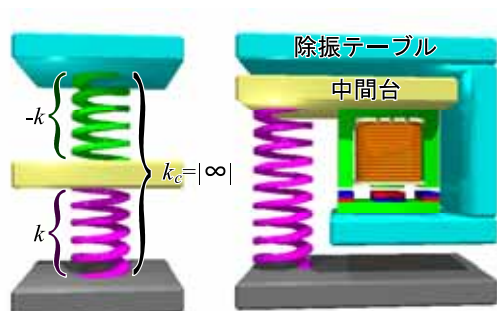


図4 除振装置の基本構成



図5 3自由度アクティブ除振装置

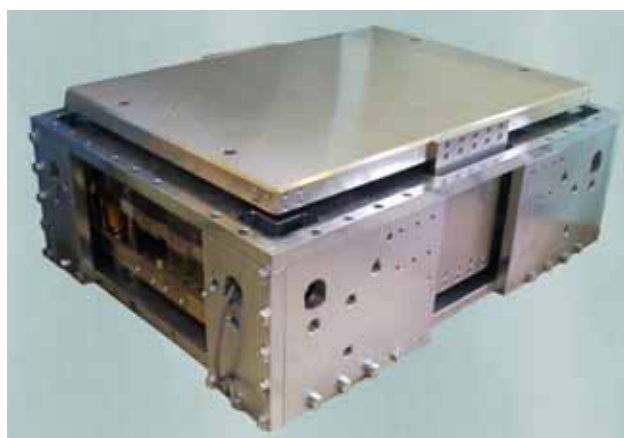


図6 6自由度アクティブ除振装置

イブ除振装置³⁾などを開発している。

図7は、開発したユニット型アクティブ除振装置において、除振テーブルの中央に重りを載せていくことによって静的な直動外乱を発生させ、これに対する特性を測定した結果を示している。この実験において、中間台を支持する正のばねの剛性の大きさは 14.6 [kN/m]と設定している。図からわかるように、直動外乱を加えても除振テーブルはほとんど変位していない。

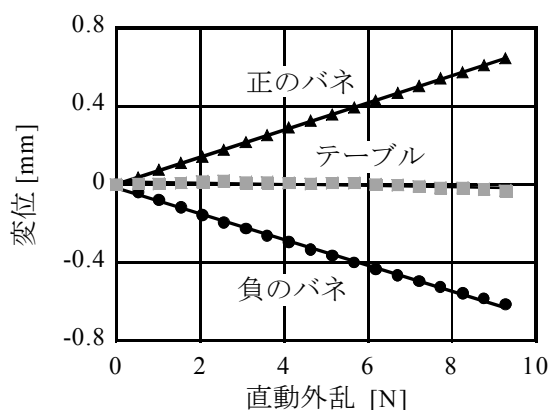


図7 実験結果

この結果から直動外乱に対する剛性を求めると 892 [kN/m]となり、正のばね単独での剛性の大きさの約 60 倍となっている。この実験によって、提案する方式の除振装置では、中間台を支持するばねのばね定数と電磁石の特性係数 (=力/変位) の大きさを等しく設定することによって、高い剛性を持つ除振装置が実現できることが実証された。

本研究で提案する方式を用いると、高性能な除振装置を低コストで実現できるので、マイクロ/ナノスケールでの計測制御を必要とする諸分野で広く用いられる可能性を持っている。

参考文献

- 1) 水野, 吉富: ゼロパワー磁気浮上を利用した除振装置の開発 (第1報: 基本原理と基礎実験), 日本機械学会論文集 (C編), 68 巻, 673 号, pp.2599-2604 (2002).
- 2) Mizuno, T., Takasaki, M., Suzuki, H. and Ishino, Y., Development of a Three-Axis Active Vibration Isolation System Using Zero-Power Magnetic Suspension, *Proc. 42nd IEEE Conf. on Decision and Control*, pp.4493-4498 (2003).
- 3) Ishigami, T., Takasaki, M., Ishino, Y., Hoque, M.E. and Mizuno, T., Proposal of an Active Vibration Isolation System with a Parallel Mechanism Using Zero-Power Magnetic Suspension, *Proc. 7th Int. Conf. on Motion and Vibration Control*, 134 (2004).