

## マイクロ・ナノ熱流体複合センシングと界面制御デバイスの開発 Development of Micro/Nanoscale Thermofluid Multiple Sensing and Interface-Controlled Device

菱田 公一 (HISHIDA KOICHI)

慶應義塾大学・理工学部・教授



### 研究の概要

マイクロ・ナノ基盤要素技術のシステム統合化を目指して、マイクロ・ナノ熱流体複合センシング技術および熱流動界面制御デバイスの開発研究を行う。デバイスの個々の機能の要素分析と統合化をより普遍的にするために、力学的、電気化学的、そして有機化学的観点に立脚した異相界面制御デバイス開発パラメータの提案を行う。

研究分野：工学

科研費の分科・細目：熱工学

キーワード：マイクロ・ナノスケール伝熱、対流、物質輸送

### 1. 研究開始当初の背景

マイクロ TAS 分野を担う次世代のハードウェアである異相界面熱流動制御デバイスの実現のためには、マイクロ・ナノ基盤要素技術（熱流体工学、MEMS・NEMS、超精密加工、ポリマー組成・物性）の巧みな統合化が必要不可欠である。更にマイクロ・ナノスケール界面熱流動現象解明による新たなダイナミクス理論の体系化のためには、表面張力や対流・拡散等の力学的因子ばかりではなく、ゼータ電位や界面電位等の電気化学的因子、そしてポリマー組成や物性等の有機化学的因子との相互作用を明らかにすることが、学術的観点から最重要事項である。

### 2. 研究の目的

マイクロ・ナノ基盤要素技術のシステム統合化を目指して、マイクロ・ナノ熱流体複合センシング技術および熱流動界面制御デバイスの開発研究を行う。MEMS・NEMS 技術に新たにマイクロ・ナノ切削加工技術を融合し、液体・固体、液体・液体、気体・液体、そして気体・固体界面をチャンネル内に形成させ、レーザー光励起による蛍光複合センシング技術を用いて異相界面における熱移動現象の解明を行う。本研究では世界に先駆けて、界面極近傍における熱流動センシング技術の開発、そしてデバイス材質としてポリマーを選定し、ポリマーへの気体の選択的吸収を実現する固体・気体界面制御技術の確立を行う。

### 3. 研究の方法

最終年度に異相界面熱流動制御デバイスを提案するために、

- ①安定した異相界面形成のため、ラプラス圧、粘性や流量等を考慮して、MEMS・NEMS によるチャンネル壁面性状および超精密加工によるチャンネル微細形状の最適化パラメータの抽出および提案を行う。
- ②液体・液体界面に全反射によるエバネッセント波を照射し、低屈折率側流体に混入した蛍光粒子および蛍光色素（液体・液体界面）、の撮像情報、更にレーザー放射圧によって補足された高屈折率側流体中の蛍光粒子に作用する力のセンシング結果より、界面極近傍における速度、温度、pH や界面電位等の物理量を求め界面熱流動構造の解明を行う。
- ③デバイス材質として気体選択的吸収性ポリマーを選定し、気体・液体界面における表面張力等の力学的因子を制御することによる、気体・固体界面を介するポリマーへの気体吸収メカニズムの解明を行う。

### 4. これまでの成果

- ①気体・液体界面における熱流動制御  
気体・液体界面熱流動制御デバイス開発を目指して、世界に先駆けて液体窒素下ナノ・マイクロ切削加工法の開発を行った。マイクロコンタクトプリント法により局所的に自己組織単分子膜を成膜し、表面エネルギー制御を可能とした。パターンニング精

度は、スタンプとインクの相互作用、スタンプの機械的特性およびスタンププロセスに依存する。上述の開発した手法によりデバイス内に安定した気体・液体界面を形成し、マイクロ PIV (Particle Image Velocimetry) およびマイクロ LIF (Laser Induced Fluorescence) を統合したマイクロ熱流動多変量センシング法を用いて、界面熱流動現象を明らかにした。

- ②液体・液体界面における熱流動制御  
液体・液体界面熱流動制御デバイス開発を目指して、世界に先駆けて液体・液体界面へのエバネッセント波照射技術を開発し、ナノ PIV およびナノ LIF による流動現象および界面形成メカニズム解明に成功した。電気浸透流による液体・液体界面流動現象を、ナノ PIV を用いて実験的解明を行った。
- ③液体・固体界面におけるゼータ電位制御  
マイクロチャンネル壁面と液体との界面に形成されるゼータ電位時空間分布がデバイス性能に直接的に影響を及ぼすため、フッ酸によるウェットエッチングおよび、NLD (Neutral Loop Discharge) プラズマドライエッチングによる加工をホウケイ酸ガラス表面に施し、ゼータ電位変化の計測を行った。更に、液体窒素下切削加工法による PDMS 表面粗さとゼータ電位との関係を実験的に明らかにした。
- ④気体・固体界面における気体透過性制御  
気体高透過性デバイス開発を目指して、ポリマー材料の気体透過・分離性評価、並びに実用化を目指した耐久性評価を行った。両者において材料の微細化技術は重要であり、前者においては特に表面性状を制御することが重要である。更に、液体窒素下加工の加工条件を調節して PDMS 基板に表面粗さの異なるチャンネルを作製し、マイクロ熱流動多変量センシング法によって計測を行い、気体透過性制御が可能となった。

## 5. 今後の計画

高速度共焦点スキャナ導入により異相界面熱流体蛍光複合センシング技術を確立し、バルク熱流動現象の力学的および電気化学的相互干渉メカニズムの解明を行う。液体窒素下での超精密加工により作製したマイクロチャンネル壁面表層は、材料の物理的特性と化学的特性が変化し、相互干渉を誘起する可能性がある。加工面のサブサーフェスダメージに関しては、ナノインデンテーション試験および XPS による非破壊試験を行う計画である。更に、界面制御デバイスを本手法で作製する際、気体透過性への影響およびゼータ電位に及ぼす影響を定量的に評価する必要がある。材料特性に変化が生じている場合、低侵襲で加工する手法の検討および加工面

を修復する手法の開発が必要不可欠である。一方、加工方法によるガラス表面性状評価においては、今後機械加工を含めて評価を行う。機械加工においては、表面粗さとともに、ガラス表面近傍に残留応力を付与することが予想されており、ゼータ電位においても、ウェットエッチングとドライエッチングとは異なる特性を示す可能性を有する。マイクロコンタクトプリント法においては、最適プロセスを導出し、これを用いた表面性状制御、ならびに、局所的表面性状制御を生かした高機能デバイスの開発を行う。ポリマー材料開発に関しては、微細表面構築の手法はさらに広げて実施する必要性があり、例えば、近年報告された微細化技術を参考にして SiO<sub>x</sub> 膜を伸張下のポリマーにコーティングし微細表面起伏形状を導入することや、ショットピーニングなど他の表面処理技術を取り入れた表面形状構築を検討し、定量的に力学物性評価とガス透過性評価を進めていく。そして、最終年度に統合化計画法による異相界面熱流動デバイスの開発を試み、力学的、電気化学的、そして有機化学的観点に立脚したパラメータの抽出を行う予定である。

6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)  
Hishida, K., Ichianagi, M., Kazoe, Y. & Sato, Y., "Combined Laser-Based Measurements for Micro- and Nano-Scale Transport Phenomena", *Heat Transfer Engineering*, 掲載決定 (2012).

Nakano A., Miki N., Hishida K., & Hotta A., "Gas Permeability and Mechanical Properties of PDMS Mixed with PMPS Nanofibers Produced by Electrospinning", *MRS Proceedings*, 1410, mrsf11-1410-dd04-14 doi:10.1557/opl.2012.663 (2012).

Kano, T., Suito, E., Hishida, K. & Miki, N., "Effect of Microscale Surface Geometry of Electrodes on Performance of Microbial Fuel Cells", *Japanese Journal of Applied Physics*, 掲載決定 (2012).

Kakinuma, Y., Kidani, S. & Aoyama, T., "Ultra-precision Cryogenic Machining of Viscoelastic Polymers", *CIRP Annals*, Vol. 61, No. 1, 掲載決定 (2012).

Ichianagi, M., Tsutsui, I., Kakinuma, Y., Sato, Y. & Hishida, K., "Three-Dimensional Measurement of Gas Dissolution Process in Gas-Liquid Microchannel Flow", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 55, pp. 2872-2878 (2012).

ホームページ等

<http://www.tfe.sd.keio.ac.jp/>