

# 拡張ナノ空間の特異輸送現象を 活用した新機能デバイス ー分析デバイスとエネルギーデバイスー

研究代表者

北森 武彦

Takehiko Kitamori

東京大学大学院工学系研究科 教授



## はじめに

エレクトロニクスや材料の分野では数nm前後のナノテクが、数μm以上の空間ではマイクロチップに化学やバイオの実験装置を集積するマイクロ化学やMEMSの研究が発展した。一方、数10-数100nmの拡張ナノ空間はナノからマイクロへの過渡領域に位置するため様々な特異性が予想される。しかし、拡張ナノ空間はトップダウンとボトムアップ加工の境界領域に存在し、機械的機構による流体操作や化学反応の制御が極めて困難である上、単一分子検出などの極限技術が要求されるため、学術的に未開拓の領域となっていた。

一方我々は、図1に示すようにマイクロ流路内において様々な化学単位操作を実現し、これらを集積化回路の内部集積部品に相当するものと捉えることでマイクロ化学のための独自の方法論を構築した。その結果、様々な分析、合成などを桁違いに微量化、高速化、高機能化し、化学やバイオ、医療等へ応用展開することに成功した。加えて、これらの研究で培ったトップダウン微細加工技術を更に発展させることによって、拡張ナノ空間の様々な特異性を発見してきた。

以上を踏まえ、我々がこれまでに構築してきたトップダウン加工とボトムアップ加工を融合し、集積化方法論を拡張ナノ空間へ展開すれば特異輸送現象を活用した新機能



図1 マイクロ・拡張ナノ空間の位置づけ

デバイスを創出できると着想した。具体的な研究項目として、拡張ナノ基盤技術(研究項目1)、分析デバイスとして単一細胞・単一分子分析デバイス(研究項目A-1)およびスーパークロマトグラフィ(研究項目A-2)、エネルギーデバイスとして無電力冷却デバイス(研究項目B-1)および光燃料電池(研究項目B-2)を開発する。本講演では、これらの革新的デバイス開発の現状について報告する。

## 研究項目1: 共通基盤技術の開発

拡張ナノ空間に化学的機能を付与するためには、ガラス基板に拡張ナノ流路をトップダウン加工した後にボトムアップ加工により機能性物質をパターニングし、もう一枚の基板と接合する必要がある。しかし、これまで我々が用いていた熱融着による接合法は1080℃と非常に高温のプロセスであるため機能性物質が焼失するという問題があった。そこで、図2に示す低温接合法を用いたデバイス作製法を新たに開発することにより、トップダウンとボトムアップの融合を実現した。

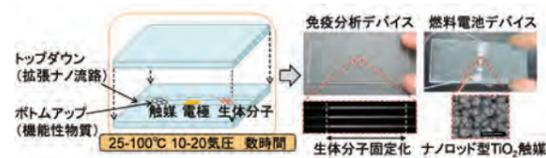


図2 低温接合法によるデバイス作製法

## 研究項目A-1: 単一細胞・単一分子分析システム

近年の細胞生物学的研究の進展に伴い発生・分化・発現などの生命機能が単一細胞毎に異なることが指摘され、単一細胞レベルの分析手法が要求されている。そこで本項目では、細胞体積(pL)よりも極めて小さい拡張ナノ空間(fl-aL)を活用し単一分子の捕捉と免疫分析を実現することを目的とした。図3に示すように、サイズインターフェイスを用いて単一細胞試料を無駄なく拡張ナノ流路に導入することに成功し、研究項目1で開発したパターニング法を応用して流路表面における分子捕捉操作の実証に成功した。

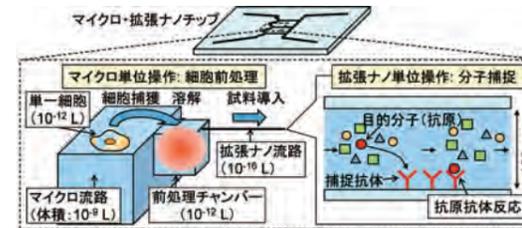


図3 単一細胞・単一分子分析デバイスの構想

## 研究項目A-2: スーパークロマトグラフィ

物質を分離・精製するクロマトグラフィは化学に不可欠な手法であるが、従来の手法は図4に示すように粒子充填構造に由来する分離性能の原理的限界が存在する。そこで本項目では、分離に必要な粒子間隙の数100nm空間のみを拡張ナノ流路に集積することで、分離効率の限界を突破することを目的とした。これまで、拡張ナノ流路表面の濡れ性を高度に制御する表面修飾法を確立し、クロマトグラフィで主に用いられる3つの分離モードを実現した。また、分離効率が従来に比べ2桁向上していることを理論的に検証し、我々の独自技術である微分干渉熱レンズ顕微鏡と組み合わせることで本手法が非蛍光分子に対して適用できることも証明した。

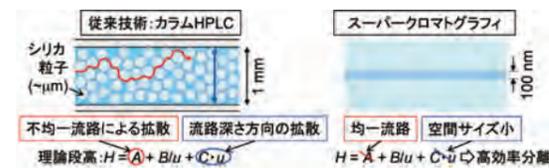


図4 スーパークロマトグラフィの構想

## 研究項目B-1: 無電力冷却デバイスの開発

LSIの発熱量の飛躍的増加に伴い、効率的な冷却デバイスが要求されている。そこで本項目では、図5に示すような拡張ナノ空間内の蒸気圧低下による毛管凝縮の加速を利用した、無電力ながら桁違いに高効率なヒートパイプの開発を目的とした。これまでにナノピラー構造を用いて凝縮を加速することに成功している。



図5 拡張ナノヒートパイプの構想

## 研究項目B-2: 光燃料電池の開発

近年モバイル向けの大容量エネルギー源としてマイクロ燃料電池が注目されているが、既存の燃料電池は外部からの燃料供給を必要とするほかプロトン交換膜の機械的強度が低いため耐久性の向上が課題となっている。そこで本項目では、図6に示すような光触媒反応による燃料生成と拡張ナノ空間の特異プロトン輸送を組み合わせ、光と水のみで駆動する燃料電池の開発を目的とした。これまでに拡張ナノ空間内のプロトン移動度がバルク値の約10倍に上昇し、拡張ナノ流路が既存のプロトン交換膜よりも優れていることを明らかにしたほか、研究項目1で開発した触媒のパターニング法を用いて燃料生成デバイスを試作し、安定して動作することを確認した。

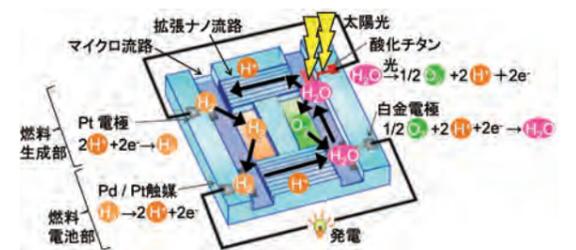


図6 光燃料電池の構想

## おわりに

トップダウン加工とボトムアップ加工を融合した基盤技術により、世界ではじめて拡張ナノ空間に化学機能を集積化することに成功した。今後は、これらの単位操作を集積化しデバイスとしての機能発現を目指していく。また、研究項目Aを単一細胞分析ステーションとして発展させ、バイオ・医学の研究者の利用を募るといった構想も生まれた。このような学際交流が拡張ナノ空間という領域における新たな学術の創成に繋がると期待している。