

触れずに測る！ マイクロ流体デバイス圧力計測の 新時代

～無侵襲センシングで拓く次世代マイクロデバイス～

圧力センサ不要

非接触

リアルタイム

低コスト

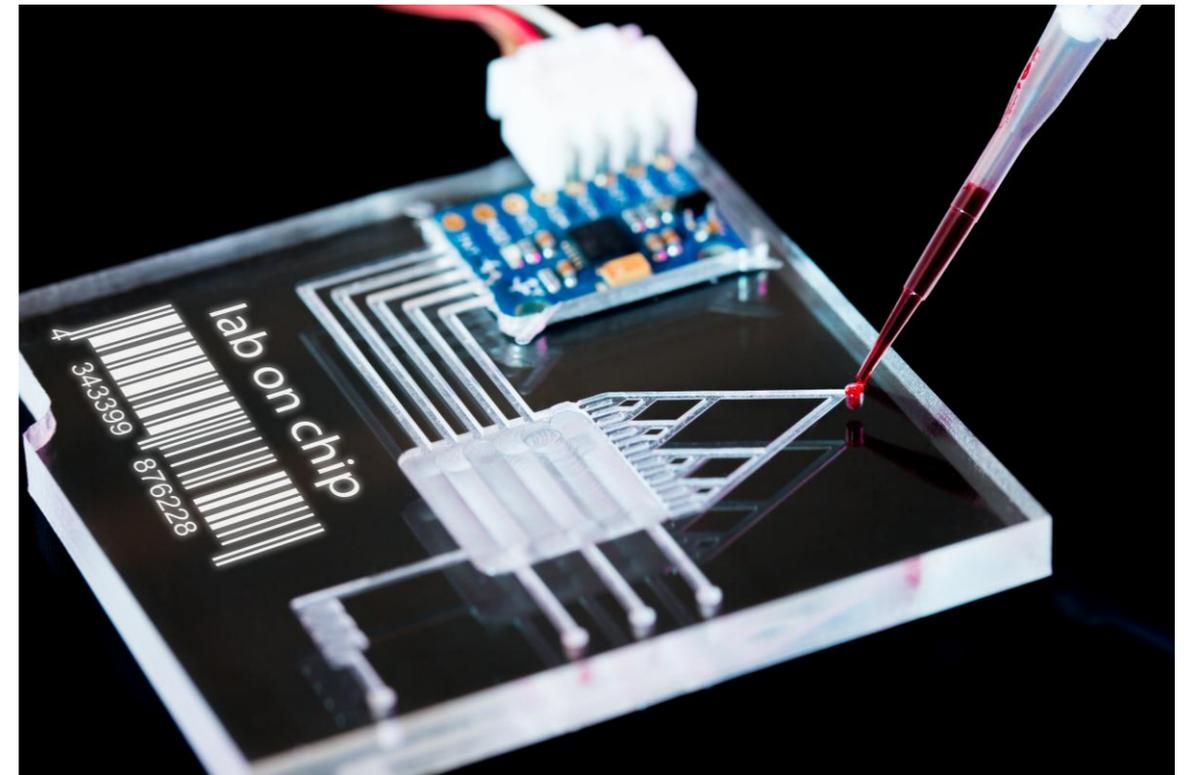
熊本大学 大学院先端科学研究部 産業基盤部門

教授 森田 康之

2025年11月6日

なぜ「無侵襲計測」が今、求められるのか

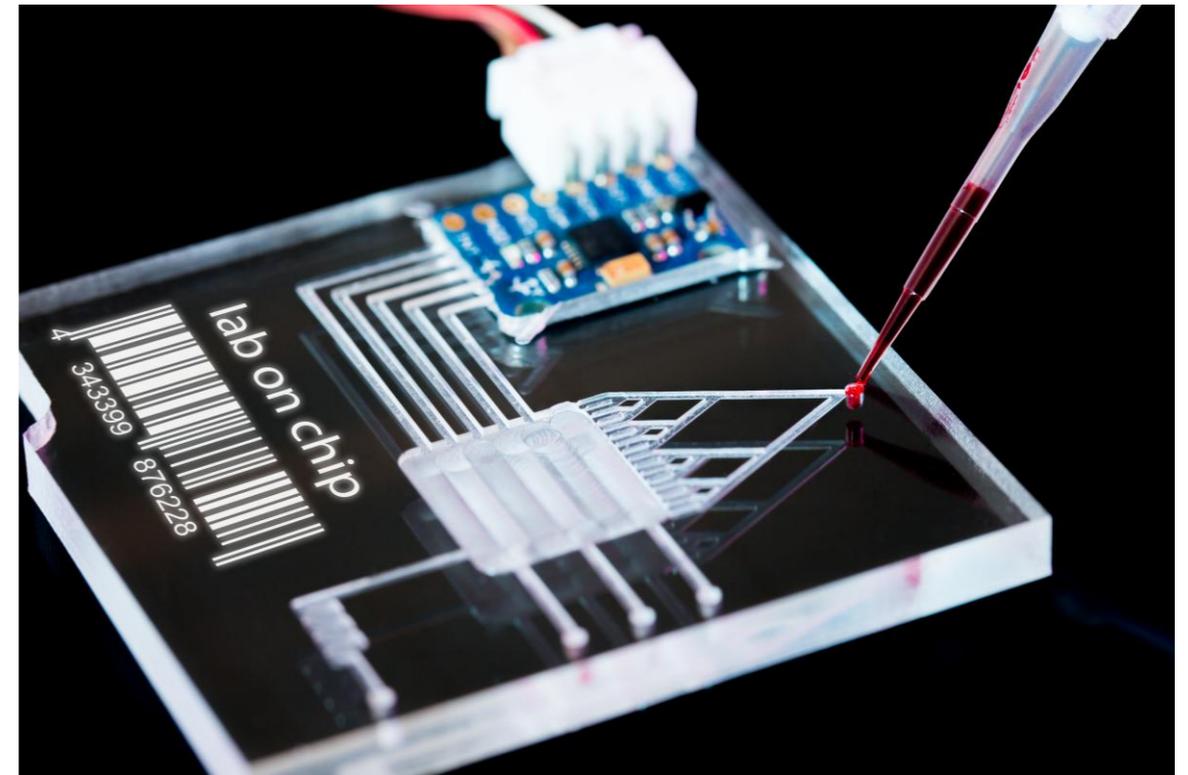
- マイクロ流体デバイス**市場の拡大**
(医療・創薬・環境・半導体)
- 検体(液体or気体)挙動の把握が**高精度化, 信頼性向上**に不可欠
- 既存センサ方式では**小型化・コスト・精度**に限界



マイクロ流体デバイス

新技術の概要

マイクロ流体デバイス内の圧力を，基材に分散した蛍光粒子の微小な動きを画像解析で捉えることで，**センサや流路加工を一切用いずに無侵襲で測定**する技術である。



マイクロ流体デバイス

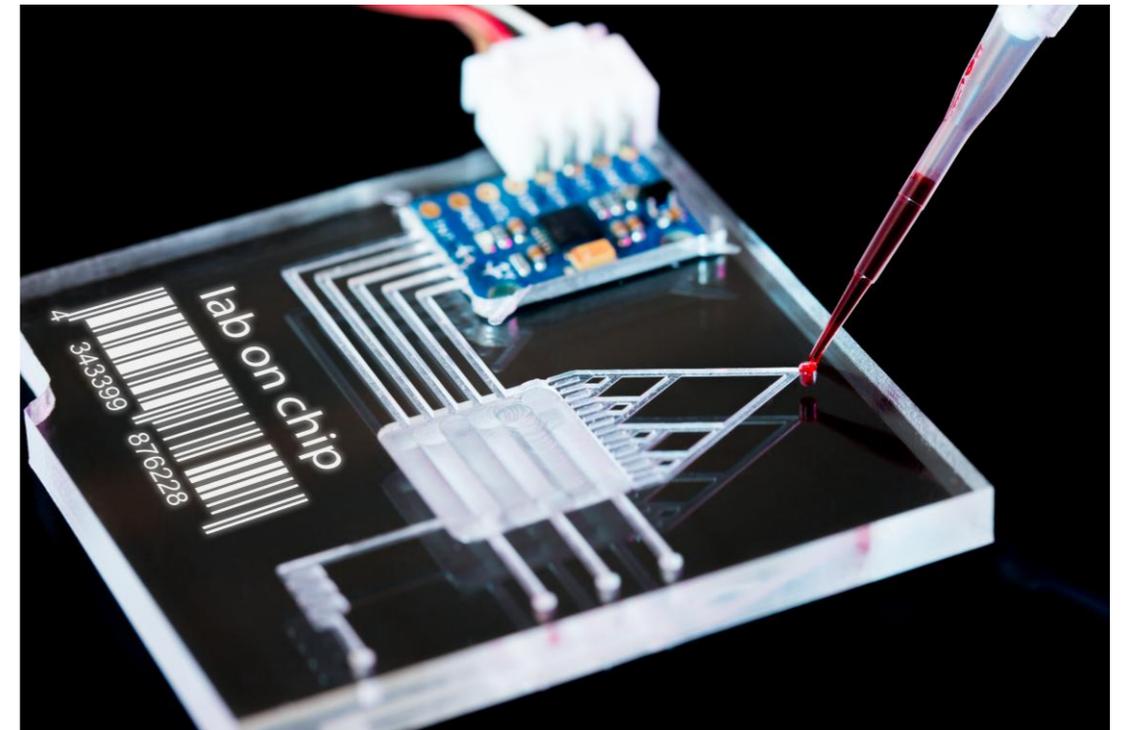
マイクロ流体デバイス

髪の毛ほどの細い流路(マイクロ流路)を持つ小さなチップの中で、液体or気体の流れや混合を精密に制御する装置である。微量の試料で化学反応や細胞の操作を高精度に行うことができる。

別称

- マイクロ流体チップ
- マイクロ流体システム
- マイクロTAS
- ラボオンチップ ~Lab-on-a-Chip(LOC) ~
- バイオチップ
- 臓器チップ
- セルチップ etc...

多様な別称の存在は、その応用範囲の広さを示している。



マイクロ流体デバイス

マイクロ流体デバイスに求められていること

「チップ上で実験室機能を完結させる」という観点からは，“統合化”や“高機能化”が理念として求められている。一方で、それを実現する手段の一つとして、常に**“短小軽薄化”**が追及されている。



求められる短小軽薄化

	現状	今後
マイクロ流路(直径)	数mm～数百 μm	数十 μm ～数百nm
デバイスサイズ	手のひら	指先

検体(液体, 気体)の極微量化

マイクロ流体デバイスを開発・利用するとき

マイクロ流路内を流れる**検体（液体や気体）の物理状態を正確に把握しておくことが重要**である。すなわち、流体挙動そのものを支配し、かつ装置設計や解析に必須となる物理的状態量を正確に評価することが不可欠である。



三大物理的状態パラメータ

流速	温度	圧力
ナビエ-ストークス方程式およびエネルギー方程式の主要変数であり、流体挙動の基礎を構成		
無侵襲計測	無侵襲計測	侵襲計測

マイクロ流路内の既存の圧力測定法

- マノメータ

液柱の高さ差を利用し、圧力を静水圧のつり合いとして求める方法.

- ダイアフラム法

圧力により薄膜(ダイアフラム)がたわむ変位量を検出し、それを電気信号(静電容量や抵抗変化)に変換する方法.

- 圧電振動子法

圧力によって圧電素子(例:PZT結晶)に電荷が誘起される現象を利用して電圧信号として検出する方法.

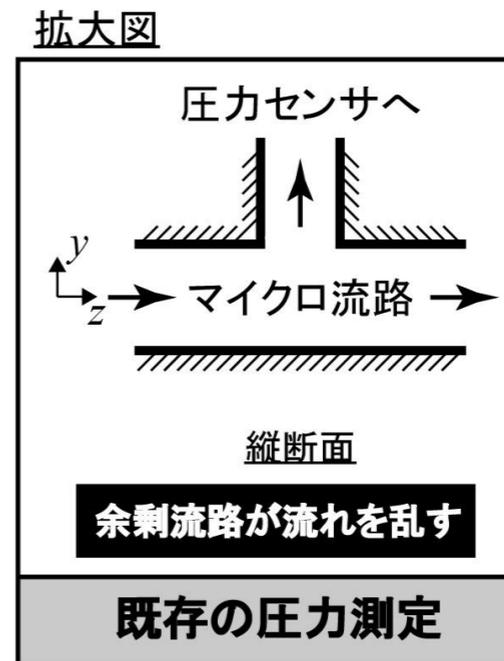
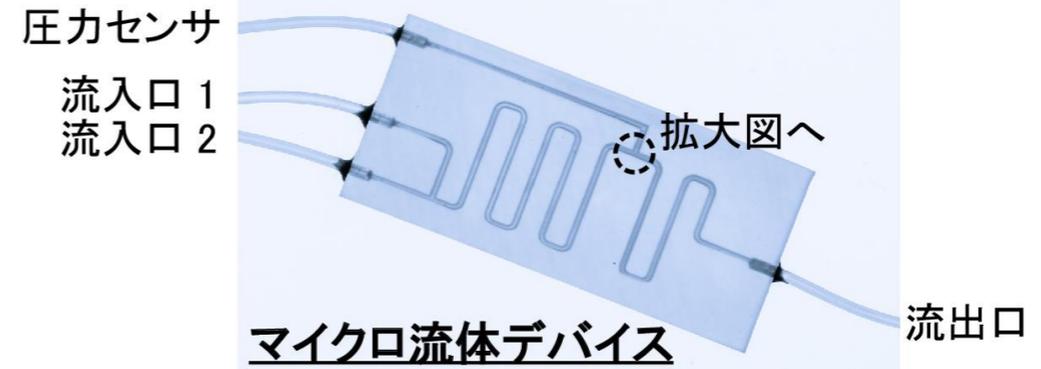
- 光学式圧力測定法

圧力で変形する膜や屈折率変化を光干渉・反射・蛍光強度として検出する方法.

既存の圧力測定法の問題点

- 侵襲型計測である
- プローブ挿入孔や余剰流路の設計・製作が必要である。
- 測定孔のある箇所での圧力しか測定できない。

設計・製作コストの増加に加え、短小軽薄化が進むことで、余剰流路や計測プローブの存在による流れの予期せぬ乱れがより顕著になる。



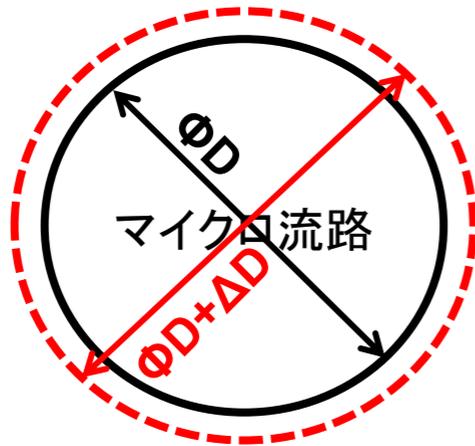
これからの圧力測定法に求められること

- 短小軽薄化が進んでも適用可能であること
- 測定そのものが外乱とならず，流れ場を乱さないこと
- 設計および製作コストが抑えられること
- マイクロ流路全体にわたって圧力分布を取得できること（局所測定にとどまらず圧力損失を評価できること）

圧力分布の無侵襲測定の開発が求められている。

原始的な無侵襲圧力測定法

マイクロ流路は、内部を流れる検体の圧力によりわずかに膨張する。その直径変化を捉えることで、流体内部の圧力を推定することができる。



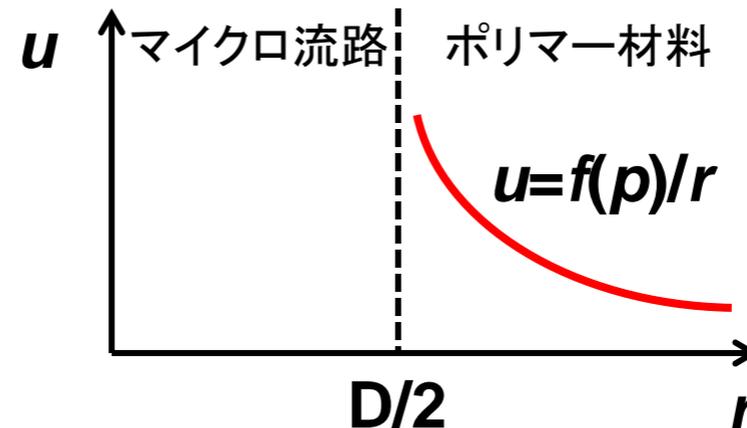
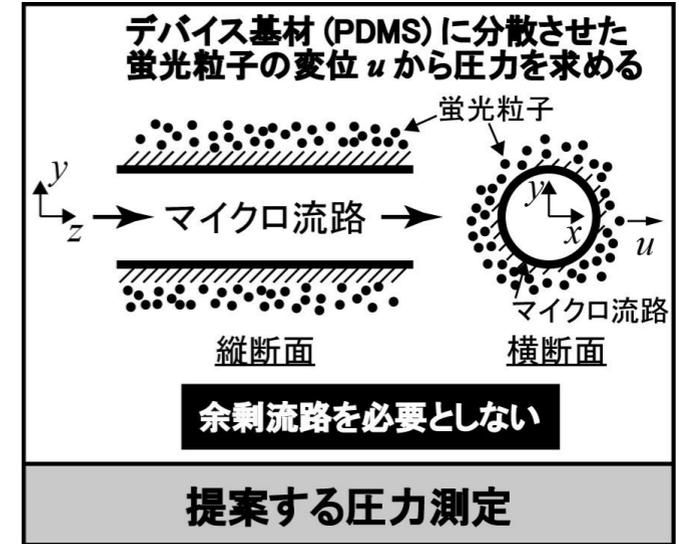
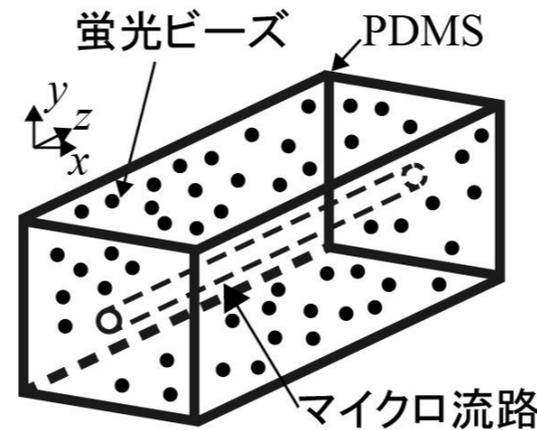
$$\Delta D \approx D/100 \sim D/1000$$

※ $D=100\mu\text{m}$ とすると

$$\Delta D \approx 1\mu\text{m} \sim 100\text{nm}$$

提案する無侵襲圧力測定法

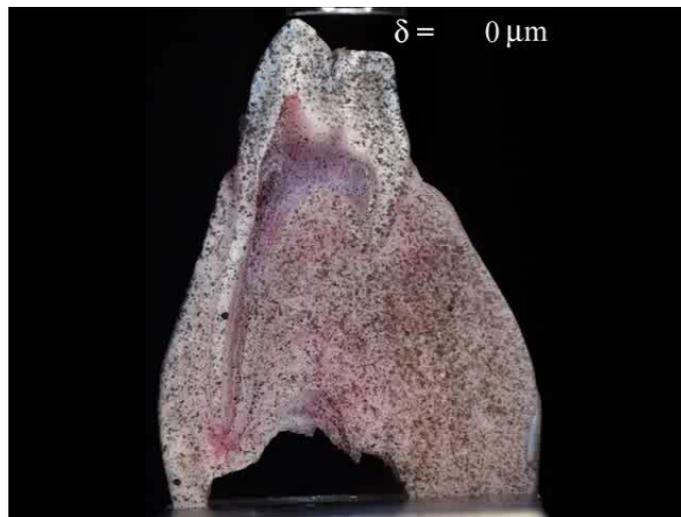
マイクロ流体デバイスの基材（ポリマー材料）に蛍光粒子を分散させ、マイクロ流路内を流れる検体の圧力によって生じる基材の微小変形を、**蛍光ビーズの移動**として画像取得する。得られた画像を**デジタル画像相関法（DIC法）**で解析することにより、基材の変形量を定量化し、その結果から流体内部の圧力を推定することができる。



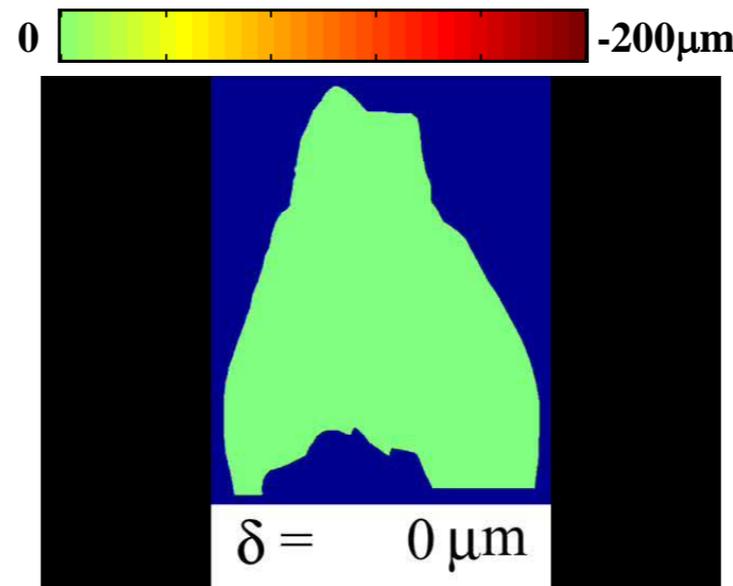
ポリマー材料の変形分布を測定すれば、圧力がわかる

デジタル画像相関法 (DIC・DVC法)

物体の変形や移動を画像から測定する方法である。試料表面や内部にある模様や粒子のパターンを撮影し、変形前後の画像をコンピュータで比較する。その対応する部分のずれ(相関)を解析することで、各点の変位やひずみを非接触で高精度に求めることができる。材料試験や流体・生体の変形計測などに広く使われている。



ブタの歯周組織の咬合試験



DIC法による変形解析

DIC法の特徴

λ (光の波長)/50 ~ λ /100
の変位分解能をもつ

マイクロ流路の膨張も測定可

既存の圧力測定技術との比較

手法	測定方式	侵襲性	適用範囲	コスト	備考
マノメータ	接触式	有	局所	中	古典的手法
圧電センサ	接触式	有	局所	高	組込困難
光学的手法	半接触式	有	局所	高	光学調整困難
提案技術	非接触式	無	全領域	低	量産対応可

提案技術の強み

- 完全無侵襲・高精度

センサや余分な流路が不要で、ナノメートルレベルの微小変形を検出し、流路全体の圧力分布をリアルタイムに測定可能である。

- デバイス性能の向上

余分な構造を取り除くことで流れの乱れを防ぎ、短小軽薄化や設計自由度の向上に貢献できる。幅広い分野(医療・化学・環境)で活躍が可能である。

- 実用化メリット

追加部品不要でコスト削減につながり、既存材料で量産しやすい。臨床検査や診断市場など成長分野での需要が期待される。

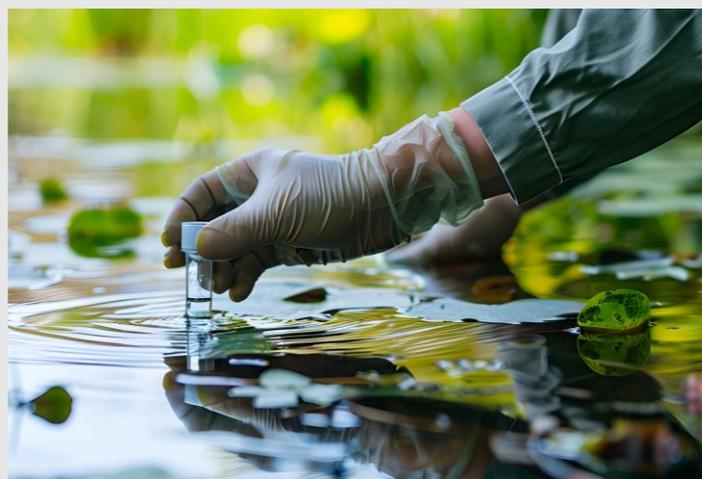
広がる応用分野 -from Lab to Industry-

医療・創薬分野



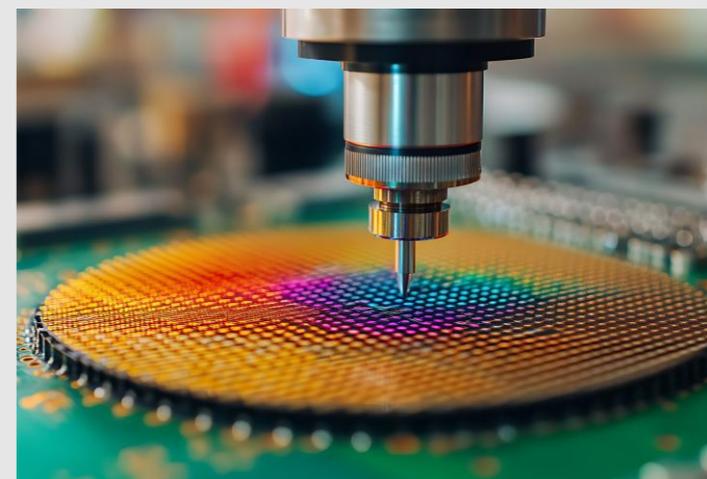
臨床診断チップや臓器チップにおいて、流路内の圧力分布を非侵襲的に可視化。検査精度や再現性を高め、薬剤応答の力学的指標取得にも応用可能。

環境・化学計測



水質やガス分析用マイクロ流体センサで、流れの安定性や反応制御をリアルタイム監視。センサの信頼性向上とプロセスの最適化に寄与。

半導体・材料プロセス



洗浄・塗布・封止など微小流体制御工程における圧力変動を可視化。プロセス制御の高精度化と装置の小型化・高信頼化を実現。

提案技術の現状の弱点

現状，ガラスを基材とするマイクロ流体デバイスへの応用は難しいが，原理的には可能である。

マイクロ流体デバイスの基材	ポリマー材料 (PDMS, 熱可塑)	ガラス材料
特徴	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 汎用性が高い(研究開発) ✓ 大量生産 ✓ 安価 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 耐薬品性に優れる ✓ 耐熱性に優れる ✓ 電気特性が良い
シェア	80%	20%
提案技術の適用	◎	△ (提案技術の高度化が求められる。共同研究で克服できる領域)

企業への期待

マイクロ流体デバイスの応用分野は、医療・創薬・環境計測・半導体製造など、極めて広範囲にわたる。本技術は、これらの分野で共通して求められる「非侵襲・高精度なプロセスモニタリング」を実現するものであり、企業における**製品開発の高信頼化**、**製造プロセスの最適化**、**新規市場の創出**に寄与できると期待している。

今後は、企業の持つ**デバイス製造技術・センシング回路設計・AI解析技術**などとの連携により、本技術の実装・量産化を通じて**次世代マイクロ流体プラットフォームの共同創出**を目指したいと考えている。

企業へのPRポイント

マイクロ流体デバイスの高機能化・高集積化が加速するなかで、流路内部を流れる検体の物理的状態量を正確かつ無侵襲的に計測する技術の重要性が高まっている。本技術は、これまで困難とされてきたナノ・マイクロスケールでの圧力の無侵襲計測を実現するものであり、デバイス内部で起こる現象をリアルタイムかつ高精度に可視化することを可能にする。

これにより、マイクロ流体デバイスの統合化・短小軽薄化・高信頼化を同時に推進でき、次世代ラボオンチップや医療診断デバイス、創薬支援プラットフォームなど幅広い分野への展開が期待される。本技術は、マイクロ流体デバイスの性能と価値を従来の限界を超えて拡張するキーテクノロジーとして、企業の研究開発・製品化戦略において極めて有効であると考えている。

本技術に関する知的財産権

- 発明の名称 : 微小経路構造体の非侵襲的測定機構、
微小経路構造体の非侵襲的測定装置
及び非侵襲的測定方法
- 出願番号 : 特願2025-130814
- 出願人 : 国立大学法人熊本大学
- 発明者 : 森田 康之、小俣 誠二、顧 少杰

お問い合わせ先

熊本大学

研究開発戦略本部 イノベーション推進部門

T E L 096-342-3145

e-mail liaison@jim.kumamoto-u.ac.jp