

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 31 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2015

課題番号：15K13912

研究課題名(和文) On-Chip隔壁型マイクロ圧力センサの着想

研究課題名(英文) Challenge of On-Chip Isolationed Micro Pressure Sensor

研究代表者

金子 真 (KANEKO, MAKOTO)

大阪大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：70224607

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：圧力変化を圧力伝達器の体積変化に変換する圧力伝達器をメイン流路のそばに配置したマイクロチップ内蔵型のOn-Chip隔壁型圧力センサの概念設計を行うとともに、有限要素シミュレーションにより圧力伝達器の幾何学的パラメータを決定した。さらにOn-Chip隔壁型マイクロ圧力センサ内蔵のマイクロ流路を試作した。メイン流路の圧力が変化した場合に圧力伝達器の体積変化をとらえる方法として、カラー着色した流体を用いて、体積変化による流体の色の濃淡変化を実時間高速ビジョンでとらえる方法により、最終的に、既存の圧力センサとも良好な出力相関を得ることができた。さらに6Hzまで良好な動特性が得られることがわかった。

研究成果の概要(英文)：First, a conceptual design of On-Chip isolated type pressure sensor was shown by focusing on the elasticity of sensor material. Second, the concrete specification of the sensor was designed through the simulation based on the finite element method. Finally, a real sensor was manufactured by PDMS material though micro manufacturing technique. A colored fluid is filled in the pressure transfer vessel. The depth of pressure vessel changes depending upon the change of the pressure in main channel. Due to this, the density of color also changes according to the pressure and this color change is measured by an online vision system. Through experiments, a nice correlation between the developed sensor and the conventional sensor is observed with the dynamic response of 6Hz. This sensor will be available for on-chip micro fluidic channel.

研究分野：メカトロニクス

キーワード：On-Chip センサ 圧力センサ マイクロ流路 マイクロ流路用圧力センサ 実時間ビジョン

1. 研究開始当初の背景

(1) マイクロ流路を用いた細胞マニピュレーションでは、流路出入口の圧力差によって流路内の流体を駆動し、流れとともに移動する細胞の速度が決まる。マイクロ流路内の流れは例外なく層流となるため、流速はマイクロ流路出入口の圧力差によってほぼ完全に規定されるものの、出入口の正確な圧力計測はスペースの関係できわめてむづかしい。これまで手軽に行われてきた方法は、図1のようにマイクロチップ出入口にチューブを取り付け、その先に圧力センサを取り付け、図2に示されるマイクロ流路内の流路内圧力が計測されていた。

伝達器の幾何学的形状の最適パラメータを決定する。なお圧力伝達器の形状はシンプルな長方形と多少複雑な楕形の二種類を想定する。

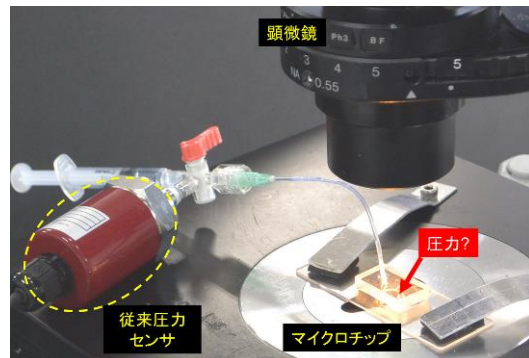


図1 従来方式

(2) 図1の方式では、どんなに高応答の圧力センサを設置したとしてもチューブに内在する弾性要素により圧力伝搬応答特性が下がり、定常状態まで至るのに数秒~数分かってしまうという問題が発生し、On-Chip できかもメイン流路の流れに影響を与えにくい高応答マイクロ圧力センサの開発が強く望まれていた。このようなニーズを踏まえた上で、細胞変形能試験でマイクロ流路内の細胞の動きを観察している際、アクチュエータの動きに応じてメイン流路から隔離された圧力伝達器内の微小物が内封された流体とともに数 $\mu\text{m}$  移動している様子が観察された。これはメイン流路内の圧力変化が隔壁で分けられた圧力伝達器内の流体の動きとしてとらえることができることを示唆している。

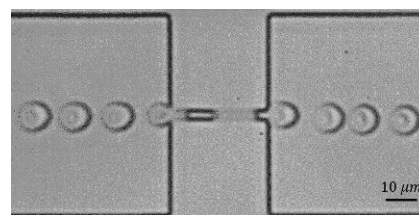


図2 マイクロ流路内の細胞の動き

2. 研究の目的

(1) メイン流路内部圧力変化に応じて体積が変化するPDMS (ポリマー樹脂) チップの弾性特性に着目し、圧力伝達器の変形に伴って発生するセンシング領域内の流体の動きをカメラで可視化し、チップ内電気線フリーでメイン流路内圧力計測が可能な高応答 On-Chip 隔壁型マイクロ圧力センサを提案する。

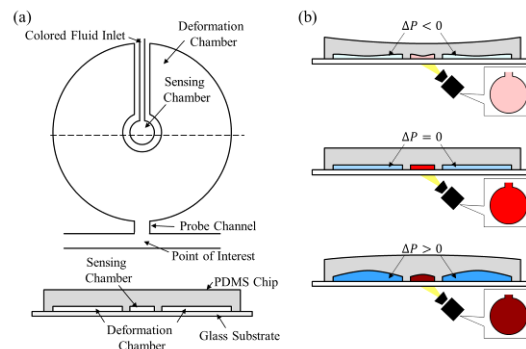


図3 On-Chip 隔壁型マイクロ圧力センサ

(2) センサの基本原理に基づいて、On-Chip 隔壁型マイクロ圧力センサの寸法を決めるため、材料力学的視点でシミュレーションを行うとともに、On-Chip 隔壁型マイクロ圧力センサを試作し、その静特性、動特性を調べるとともに、細胞変形能特性試験に応用し、その有効性を確認する。

(2) センシングエリアの設計：圧力伝達器で発生する体積変化はセンシングエリアにも影響を与え、結果的にセンシングエリア内の深さが図3のように変化する。このように他端が密封されたセンシングエリアに流体が流入するためには、センシングエリア内の体積も弾性変形する必要がある。つまりセンシングエリア部の幾何学的パラメータを決定するためには、材料力学的シミュレーションだけでは不十分で、厳密には流れ問題と弾性変形問題の連成問題を解く必要があるが、本研究では連成問題にまでは踏み込まない。

3. 研究の方法

(1) 圧力伝達器の設計：図3はここで対象にしている On-Chip 隔壁型マイクロ圧力センサの概念図を示す。圧力センサの感度はメイン流路内の圧力変化 $\Delta P$ に対する圧力伝達器容積の変化 $\Delta V$ で決まる。つまり $\Delta V/\Delta P$ は圧力伝達器の感度と見なせる。例えば $\Delta V/\Delta P$ が上がれば、単位圧力上昇に対する圧力伝達器からの流体量が増加する。結果的に圧力センサの分解能も上がる。材料力学的シミュレーションを行い、 $\Delta V/\Delta P$ が大きくなる圧力

(3) On-Chip 隔壁型マイクロ圧力センサ内蔵のマイクロ流路の試作：圧力伝達器とセンシングエリアの最適パラメータに基づき、PDMSを用いて On-Chip 隔壁型マイクロ圧力センサ内蔵のマイクロ流路を試作する。圧力伝達器、センシングエリア部に着色済み生

理食塩水を入れ、挿入口を高温で熔融させた PDMS で塞ぎ、圧力伝達器、誘導流路、センシングエリアを含んだ系を完全に密閉する。この密閉によって理想的には中心線に対して対称パターンを作り出すことができ、画像処理が簡単になる。

(4) センサ評価：実際に使用する実験装置は大きく、顕微鏡、On-Chip 隔壁型マイクロ圧力センサ内蔵の PDMS 製マイクロチップ、キャリブレーション用圧力センサ、内圧を加えるためのシリンジポンプ、センシングエリア内着色流体観察用のカメラにより構成される。

(5) 細胞変形能評価実験：On-Chip 隔壁型マイクロ圧力センサ内蔵マイクロチップを使って、細胞変形能試験を行う。その際、テスト流路出入り口に On-Chip 隔壁型マイクロ圧力センサを取り付け、圧力フィードバックによる細胞制御を行った際に、従来圧力センサを用いた場合に比べどれくらい制御性が改善されるのか、改善度合いを定量的に評価する。

#### 4. 研究成果

(1) 図 4 はセンサの基本的な寸法を決めるために行ったシミュレーションの一例である。圧力変化に応じて圧力伝達器が変形している様子が色の変化としてとらえられているのがわかる。このシミュレーションを通じて最終的なセンサ寸法を決定した。

(2) 図 5 左の写真は実験装置の概観である。実験装置は大きく、顕微鏡、On-Chip 隔壁型マイクロ圧力センサ内蔵の PDMS 製マイクロチップ、キャリブレーション用圧力センサ、内圧を加えるためのシリンジポンプ、ビーズ観察用のカメラにより構成されている。図 5 右の写真は On-Chip 隔壁型マイクロ圧力センサである。上部から着色流体を挿入し、下部に配置されたシリンジポンプによって On-Chip 隔壁型マイクロ圧力センサ内の圧力が自由に変えられるようになっている。

(3) 圧力伝達器内の圧力を変化させると、図 3 のように容器上面が変形するため、結果的にセンシング領域内の深さも変化し、センシング領域下面あるいは上面から着色流体を観察すると深さの変化に伴う色変化が起こる。図 6 (a) は、圧力伝達器内の圧力を変化させたときのセンシング領域内着色流体の色変化を観察した一例である。図 3 の原理図からもわかるように圧力伝達器内の圧力が上昇すると、圧力伝達器は膨らみ、結果的に中心部に配置されたセンシング領域も引きつられて膨らむ。そのためセンシング領域の深さが増し、着色流体は濃く見える。図 6 (a) から圧力 110Pa~195Pa において肉眼でも色の変化をとられることができる。

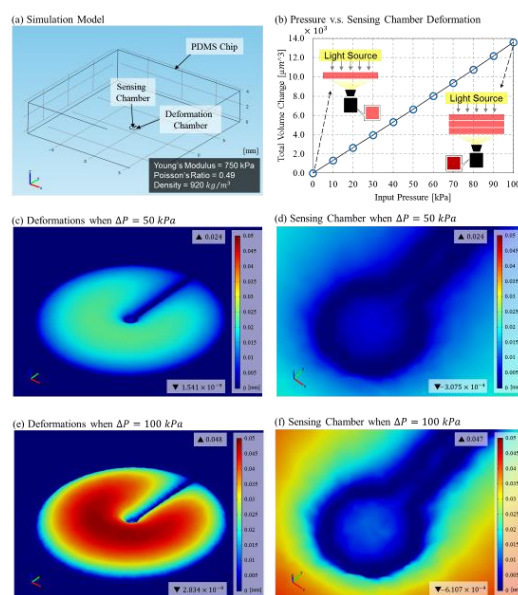


図 4 材料力学的シミュレーション

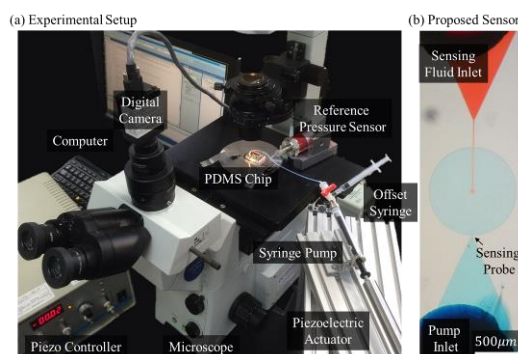


図 5 実験装置

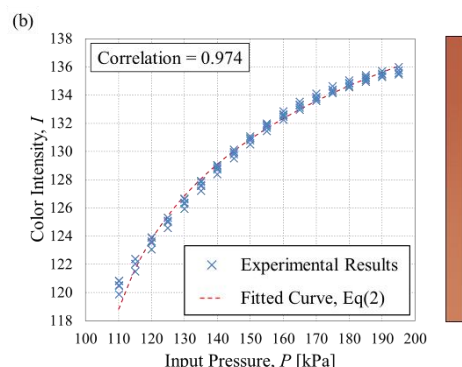
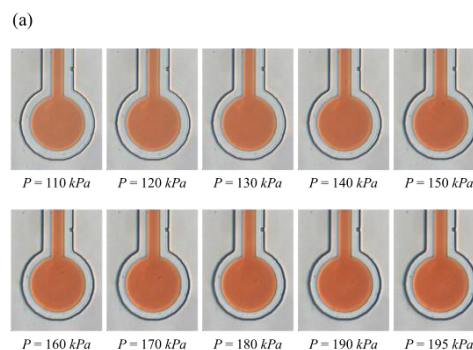


図 6 色変化とセンサ静特性

(4) 静特性: 図 6 (b) は On-Chip 隔壁型マイクロ圧力センサの静特性を示した図である。ここで横軸は図 1 の従来センサから得られた圧力信号であり、縦軸はカメラから得られた着色流体の色情報である。図 6 (b) より、以下の二点が明らかになった。一つは、両者の相関は 0.974 ときわめて高く、圧力情報を色情報としてしっかりとらえていることがわかる。もう一つは、両者の関係は線形ではなく飽和特性が現れていることがわかる。このことから、圧力が高くなるにつれて分解能は悪くなるものの、170Pa 程度までは分解能は十分保証されることがわかる。

(5) 動特性: 図 7 は On-Chip 隔壁型マイクロ圧力センサの動特性の試験方法と実験結果を示している。ピエゾアクチュエータと従来圧力センサを使って圧力サーボ系を構成し、On-Chip 隔壁型マイクロ圧力センサ内の圧力を制御する。入力信号周波数を変化させ、そのときの On-Chip 隔壁型マイクロ圧力センサ信号出力を取得し、入出力信号から動特性を調べる。図 7 (b), (c), (d) は実際の入出力信号を時間に対してプロットしたものである。これらの図から 8Hz 程度まで良好な動特性が確認できていることがわかる。

(6) 細胞変形能評価実験: メイン流路に近接させて隔壁型マイクロ圧力センサを配置したチップを作成して、細胞通過時の圧力変化を調べる実験を行ったが、細胞通過時の圧力変化が小さく、着色流体の色変化情報をとらえるには至らなかった。この点については今後の研究課題としたい。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① C. Tsai and M. Kaneko, On-chip pressure sensor using single-layer concentric chambers, *Biomicrofluidics*, 査読有, vol. 10, 2016, 024116.  
DOI: 10.1063/1.4945412

[学会発表] (計 3 件)

- ① C. Tsai and M. Kaneko, Pressure Transmitter for Local Pressure Sensing in a Microchannel, The 9th IEEE International Conference on Nano/Molecular Medicine and Engineering (NANOMED2015), Waikiki, USA, 2015. 11, pp19-22.
- ② On-Chip Micro Manometer, C. Tsai and M. Kaneko, the 19th International Conference on Miniaturized Systems for Chemistry and Life Sciences (MicroTAS15), Gyeongju, Korea, 2015. 10, pp1879-1881.

(a) Sinusoidal Pressure Input

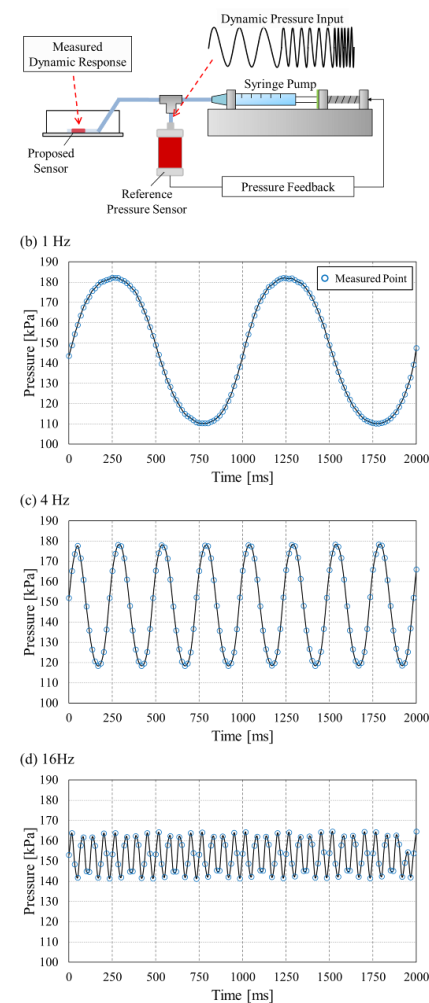


図 7 動特性

- ③ C. Tsai, T. Nakamura and M. Kaneko, An On-Chip, Electricity-Free and Single-Layer Pressure Sensor for Microfluidic Applications, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2015), Hamburg, Germany, 2015. 9-10, pp165-170.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

<http://www-hh.mech.eng.osaka-u.ac.jp/~mk/Index-j.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

金子 真 (KANEKO, Makoto)  
大阪大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号: 70224607