

研究の課題名

動特性補償型マイクロフルードセンサの開発と その応用に関する研究

東京工業大学精密工学研究所 助手

報告者 船 木 達 也

報告日 2006 年（平成 18 年）6 月 26 日

1. 本研究の意義、特色

現在、燃料電池の流量管理や半導体製造装置の高精度制御、呼吸吸気管理の医療分野などにおいて非定常流量計測は非常に重要となっている。本研究では、近年、急速に発展している微細加工技術を応用した MEMS デバイスを做い、構造を独自に簡易化し設計を行った熱式流量センサ、「マイクロフルードセンサ」を開発し、製造プロセスの検討や開発したセンサの静特性・動特性評価を行った。さらにその結果を踏まえたセンサパターンの更新や流路設計について検討を行い、市場ニーズを意識した新しいセンサの開発および校正手法などの提案に大きな特色を有している。

2. 実施した研究の具体的内容、結果

一般に熱式流量計は、その計測手法によって二種類に大別される。一つが流量計の中の加熱部に与えられる電力を一定に保ち、加熱部周辺の温度分布の変化から流量を測定する定電力駆動方式である。この方式はこれまで開発されてきた微細熱式流量計において多く取り入れられている手法である。一方、加熱部が流体と一定温度差を保つように供給電力をコントロールし、その消費電力から流量を計測する方法を定温度駆動方式という。この定温度駆動方式では、センサを構成する要素数を少なくできるため微細化を実現が容易である。また微細化できれば、消費電力の低減、応答性の向上などが期待できることから、本研究では定温度駆動方式を採用し、マイクロフルードセンサの開発を行った。開発したセンサの概略図を Fig.1 に、駆動電気回路図を Fig.2 にそれぞれ示す。

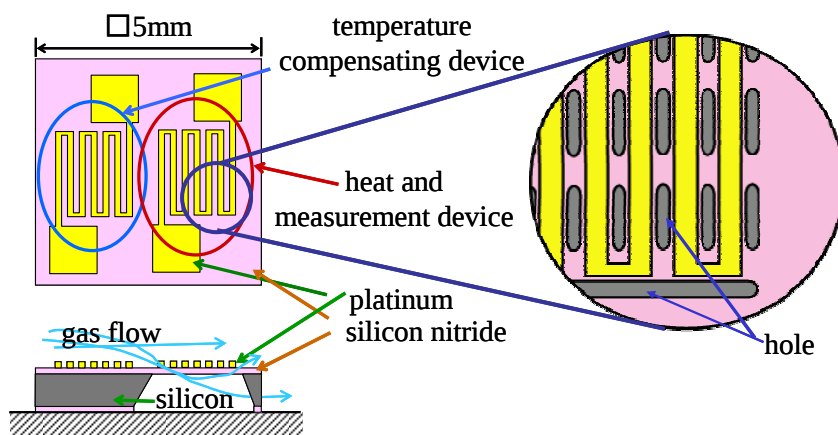


Fig.1 Schematic diagram of the developed sensor

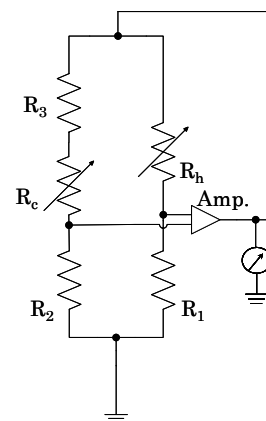


Fig.2 Operated electric circuit

次に、開発したセンサの駆動原理を説明する。一般に、加熱された物体を流体中に放置すると熱拡散によって冷却される。この冷却と流速の関係はキングの法則と呼ばれ、熱線風速計もこの原理に基づいている。（詳細は別資料 4 を参照）前述のとおり、定温度駆動方式は、拡散熱量に対し同量の熱量をセンサの熱線に供給するものであり、拡散熱量と供給熱量との間には常に平衡状態が実現される。このことから平衡状態での加熱阻止に供給する熱量と供給熱量が等しいとして関係式を導出できる。

$$E^2 = \left(L + M (\rho U)^{\frac{1}{n}} \right) (\theta - \theta_a) R_h(\theta)$$

ここで、 L 、 M は定数、 ρ は密度、 U は流速、 E は電圧、 θ はヒーター温度、 θ_a は流体温度、 $R_h(\theta)$ は抵抗値をそれぞれ示す。この結果、消費される電力は ρU と関係を持つので流量計測が可能となる。なお、流体温度が変化すると流量が一定であっても出力が変化してしまうため、センサに測温抵抗体を配置し、流体温度を測定して補償を行った。

流量センサの製作工程を説明する。センサチップには、N タイプ(100)のシリコンウェハ、厚さ 200 μm 、両面にはあらかじめシリコン窒化膜が蒸着したものをを用いた。このシリコン窒化膜は強度に優れ、残留引張応力が少なく、熱伝達も小さいことからダイアフラム構造を形成するのに適したものである。具体的なプロセス工程を Fig.3 に示す。はじめにリソグラフィープロセスによりチップ上任意の形状のレジストマスクを形成し、接着層としての Cr とセンサ素子となる Pt をそれぞれスパッタ装置によりチップ上に一様に蒸着する。不要な部分はレジストをアセトンにより溶解し同時に除去するリフトオフという手法をとった。この結果、抵抗値誤差は生じるものの、測定時に重要となる抵抗温度係数は製造したセンサチップの個体差がないことを確認している。

再びリソグラフィープロセスによってダイアフラム構造を形成するマスクパターンを転写後、不要なシリコン窒化膜を RIE によって除去し、最後にシリコン層をウェットエッチングによってエッチングし完成となる。センサ構造が簡易であるため、製造プロセスも複雑ではなくシンプルなものとなった。この結果、試作したセンサでは加熱素子側がダイアフラム構造を有している。これは加熱素子側の基板の熱容量を小さくし、温度補償素子側に熱の影響を与えないようにするためである。最終的に製作したセンサは 5mm 四方で、写真を Fig.4 に示す。

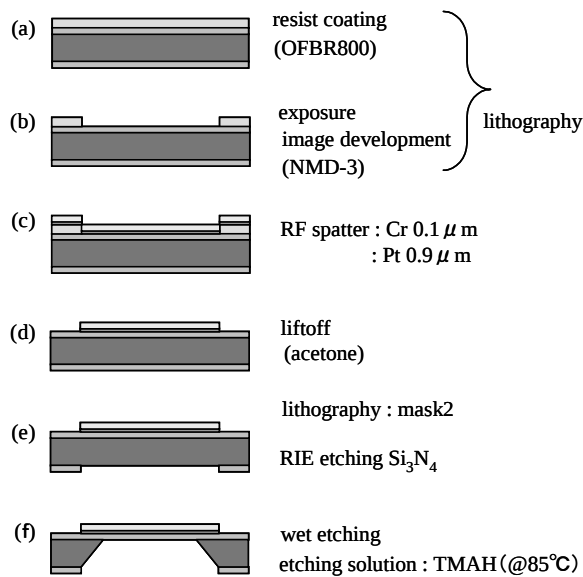


Fig.3 Fabrication process

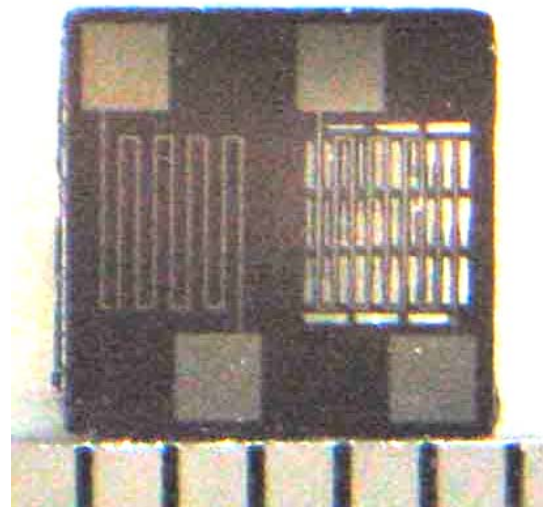


Fig.4 Photograph of fabricated sensor

続いて、試作したセンサの静特性実験を行った。実験装置を Fig.5 に示す。圧縮空気源より減圧弁にて減圧を行い、圧力容器に充填する。その下流側に、速度制御弁を設置し、試験する流量計への通過流量を調節する。供試流量計の前には音速ノズルによる基準流量計を設置し、校正用の基準流量計として用いた。また製作した流量センサは、整流格子を設置した流路の壁面近傍に設置し、通過流量に対する出力電圧を測定し、静特性を調べた。その結果を Fig.6 に示す。この結果より、基準流量に対してセンサの出力電圧はほぼ線形的となっていることが分かる。また、ヒステリシスも少ないことが確認できた。さらに、センサの取り付け角度を変更した場合に、どのような影響があるかを実験的に考察した。取り付け角度とセンサ出力の関係を Fig.7 に示す。この結果より、加熱素子が上流側に配置される場合、センサ出力電圧が大きくなることが確認できた。これは加熱素子で生じた熱が流体によって下流側の温度補償素子へ運ばれ、流体の温度を本来よりも高く計測してしまったために生じたと考えられる。

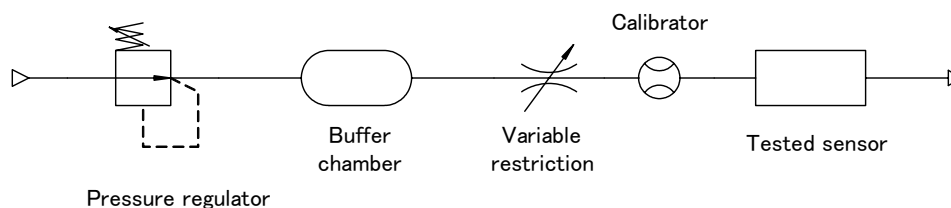


Fig.5 Schematic diagram of experimental apparatus

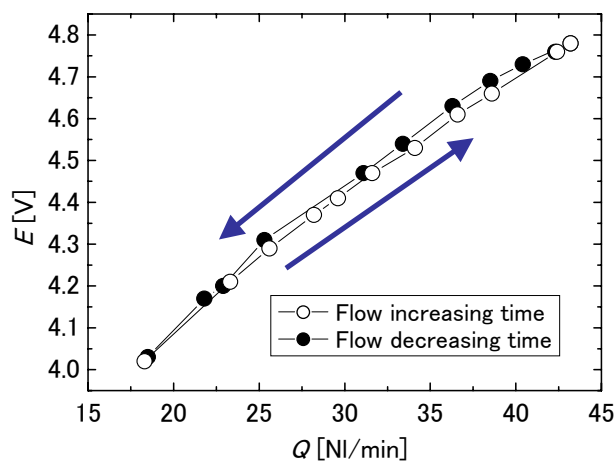


Fig.6 Static characteristics of the tested sensor

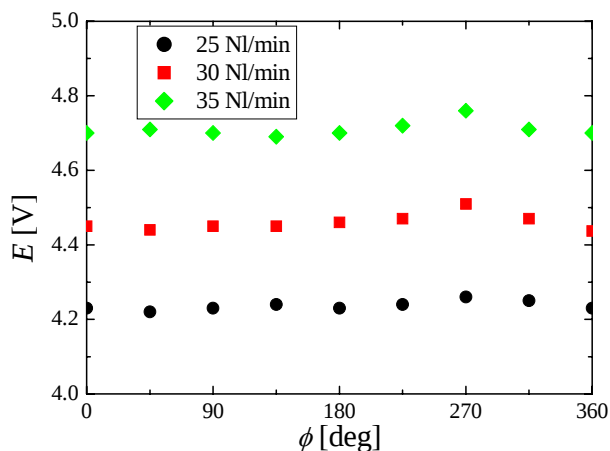


Fig.7 Experimental results

以上の結果より、温度補償素子はセンサ出力に大きな影響を有していることが確認できた。そのため、形状や配置などについてはより詳細な熟慮が必要といえる。現在、この点を考慮し新しいセンサパターンを製作、その特性評価を実施している。これは、前述の加熱素子側の発生熱の影響を低減と感度の向上、温度補償素子そのものの発熱低減による省電力化の実現を目指し開発したものである。その構造図を Fig.8 に示す。特徴としては、加熱素子の抵抗線長を短く、温度補償素子の抵抗線を長くし、抵抗率の割合を変更した点である。これにより、前述で問題となった点を解決できると現在考えられる。

次に、センサの動特性試験を行った結果についてまとめる。センサの動特性試験にはわれわれの研究グループで開発している等温化压力容器を用いた非定常流量発生装置を活用した。装置構成は、減圧弁、手動弁、等温化压力容器、サーボ弁および高精度の半導体式圧力センサ、PC などから構成される。本装置は、圧縮空気の充填・放出時に生じる容器内気体の温度変化をほぼ等温に実現した等温化压力容器を利用している。この等温化压力容器により、容器内から充填・放出される瞬時質量流量は容器内の圧力変化に比例し、容器内圧力応答の計測のみで流量計測が可能な原理となっている。ここで、等温化压力容器の下流側に流量通過面積を調節できるサーボ弁を配置し、これを制御することで任意の振動流を発生できる装置である。この装置により、発生する振動流を厳密に計測できるため、校正用の基準器として用い、製作した流量センサの動特性検証を実施した。その結果の一例を示す。Fig.9 は振動流の周波数を 1[Hz]、平均流量 30[Nl/min]、振幅流量 10[Nl/min]とした際の結果である。これにより、製作したセンサは 1[Hz]の振動流を精度よく計測できていることが確認できた。次に周波数を 5[Hz]とした場合の結果を Fig.10 に示す。この結果より、センサにより計測した流量波形は、位相のずれはほとんどないもののゲインが一致しない結果となった。

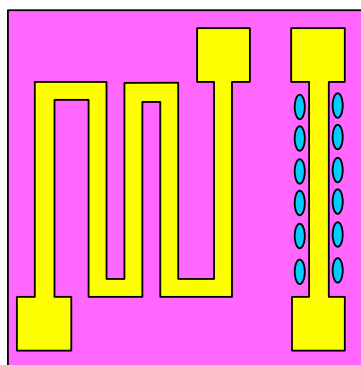


Fig.8 Schematic design of New designed micro fluid sensor

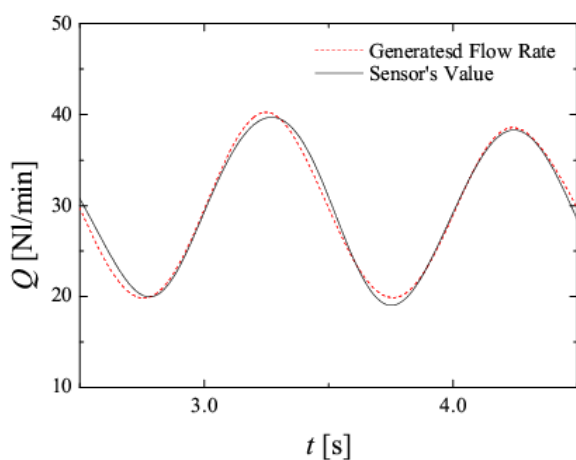


Fig.9 Oscillatory flow measured by the tested sensor (1[Hz])

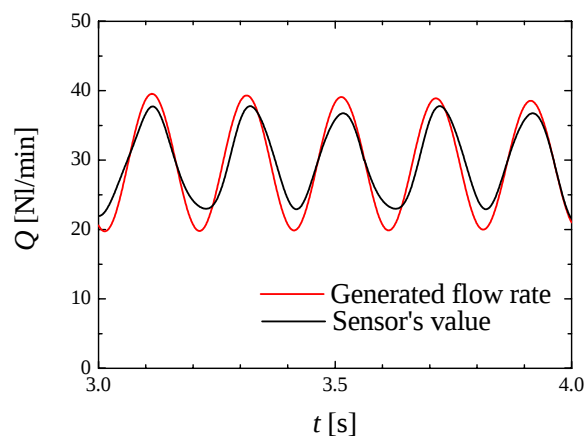


Fig.10 Oscillatory flow measured by the tested sensor (5[Hz])

そこで、センサを設置する流路を見直し、整流格子のより近くにセンサを設置して再度実験を行った。流路内の構造を Fig.11 に示し、5[Hz]の振動流の計測結果を Fig.12 に示す。この結果、前述の Fig.10 と異なり、5[Hz]の振動流でも、発生流量とよく一致し、非常により応答性を確保できていることが確認できた。現在、さらなる高周波数への対応を模索しており、今後の研究においてその点を理論的および実験的に証明することができる予定である。

最後に、本研究の成果についてまとめる。微細化技術の応用ならびに動特性補償を目的とし、センサパターンを簡便化したマイクロフルードセンサを開発し、その特性評価を実施した。その結果、静特性ではヒステリシスの非常に少なく線形性の高い出力特性が得られた。また、動特性では流路構造を工夫することで 5[Hz]までの振動流を安定して計測可能であることを確認した。さらに、それらの結果を踏まえ、製造プロセスでのノウハウの蓄積や、新しいセンサパターンへの足がかりをつかむとともに、今後、このセンサの産業技術への適用を進めていきたい。

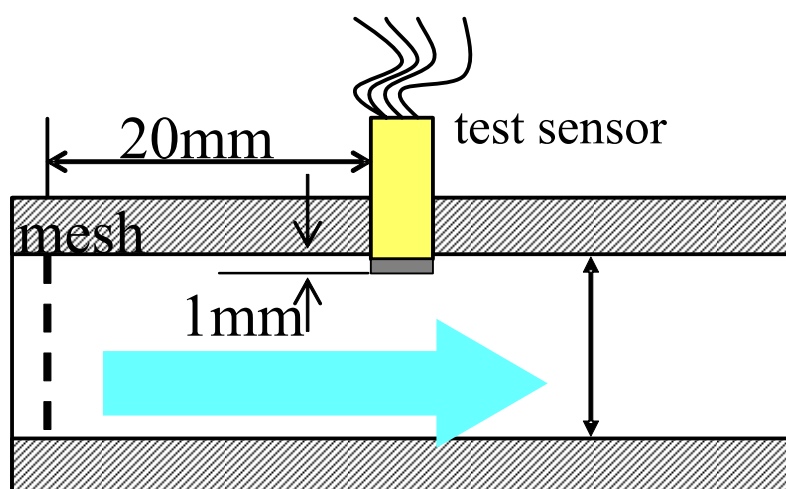


Fig.11 Schematic diagram of flow channel inserted the tested sensor

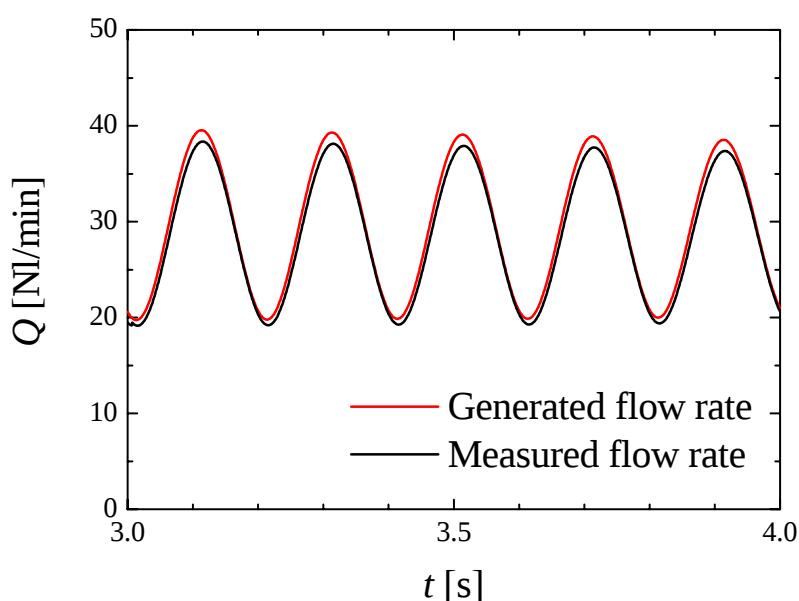


Fig.12 Oscillatory flow at the frequency of 5[Hz] when the flow channel is changed

3. 本研究を実施したグループに属するおもな研究者の氏名・役職名

船木	達也	東京工業大学精密工学研究所	助手
蔡	茂林	東京工業大学精密工学研究所	助手
川嶋	健嗣	東京工業大学精密工学研究所	助教授
香川	利春	東京工業大学精密工学研究所	教授
五十嵐	康一	東京工業大学大学院精密機械システム専攻博士課程学生	

4. 研究実施時期

平成 15 年 3 月 1 日から 16 年 7 月 31 日まで

5. 本研究に関連して発表した主な論文等

- (1) 五十嵐康一, 船木達也, 川嶋健嗣, 香川利春: 定温度型微細熱式流量計の開発, 第 4 回流体計測制御シンポジウム, 24-27 (2003)
- (2) Koichi Igarashi, Tatsuya Funaki, Kenji Kawashima, Toshiharu Kagawa: Characteristics of Constant-Temperature Type Micro Thermal Flow Sensor, SICE Annual Conference, CD-ROM (2004)
- (3) 五十嵐康一, 船木達也, 川嶋健嗣, 香川利春: 定温度型微細熱式流量計のセンサ構造の特性への影響, 第 21 回センシングフォーラム, pp.11-16 (2004)
- (4) Koichi Igarashi, Tatsuya Funaki, Kenji Kawashima, Toshiharu Kagawa: Instantaneous Flow Measurement Using Thermal Type Micro Machined Flow Sensor, IFPE 2005, pp.755-764 (2005)

6. 内外における関連研究の状況

昨今の MEMS 技術を用いた同様な熱式流量センサの開発は数多くなされている。しかしながら、前述の研究内容でも紹介したように、一般には国内外を問わず、定電力駆動方式を採用したセンサが多い。また、センサ製作のプロセス等の議論が多く、センシングデバイス評価にいたってはあまり見受けられない。本研究は、動特性補償に力点を置き、高速応答実現とセンサの小型化を容易にするため、センサ構造がシンプルな定温度駆動方式を採用している。この方式の研究もなされているようだが、動特性補償を十分に議論できる段階までにはいたっていない。それは、動特性校正手法が確立されていない点などが要因として考えられ、われわれの研究グループで開発した非定常流量発生装置により、この点の問題を解決し、実験的に動特性を補償した流量センサの開発が実現できている。

7. 今後の発展に対する希望

本研究では、熱式流量センサ、マイクロフルードセンサの開発ならびに静特性・動特性検証までを踏まえた一連の開発・評価プロセスを構築するに至った。今後は、このプロセスからより良い応答性実現のための工夫や、センサパターン製作へのフィードバックによる高速応答の熱式流量センサの開発が期待できる。その他に流量計測一般として、実験による様々な流量計の動特性補償が急務の課題となっている。現在、われわれの研究グループでは、電気ファンクションジェネレータに相当する、流体のファンクションジェネレータと呼べる連続型非定常流量発生装置を開発した。現在までに、周波数 60[Hz] までの任意の振動流発生を確認し、実用面での有効性を示している。また、発生時間の制約も解消し、流量計の動特性検証のみならず、流体の非定常現象確認などへの応用も期待できる。