

微小流量向け熱式流量センサの開発

Development of a Micro Thermal Flow Sensor with a Microchannel

株式会社 山武

池 信一
Shinichi Ike

キーワード

マイクロフローセンサ, 微小流量, 質量流量, 熱式, 微小流路, MEMS

当社で開発に成功した熱式マイクロフローセンサ™は様々な質量流量計製品に搭載され顧客への価値提供を行っている。今回センサチップ上に微小な流路を形成する流路一体構造を実現することによって、これまで課題となっていた5cc/min以下の微小流量域においても、高精度に安定した計測が可能な熱式流量センサの開発に成功したので報告する。

Previously we have developed micro thermal flow sensors which are being used by many customers in various types of mass flow meter products. More recently, by integrating a microchannel onto a sensor chip, we have succeeded in developing a thermal flow sensor characterized by high-precision and stable measurement even in a flow range from 0 to 5 cc/min, which had been regarded as a challenge. This paper describes the development of this sensor.

1. はじめに

近年、地球環境保全のために各種の施策が推し進められている中で、CO₂排出量削減などを目的とした省エネルギーの必要性が一段と高まっており、その1つの手段として燃料、動力、熱交換の媒体及び原料などとして使用されている種々の流体の流量管理がますます重要になっている。ところが、流量の計測は温度や圧力の計測に比べて手間やコストがかかり、測定対象や流量レンジなどの点で汎用性が少ないものが多い。さらに、流量計の選定や設置には専門の知識やノウハウが必要であるため、流量計測が満足に行われていないことも多く、高精度で簡便に流量計測を行いたいというニーズがますます増加している。

また、流量の計測方法としては一般的なものだけでも10種類以上のものがあるが、そのほとんどが体積流量を計測するものであり⁽¹⁾、真にエネルギー効率に関係する質量流量を計測している例は意外に少ない。

そのような状況の中、当社ではMEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術で製作した微細構造の気体用熱式流量センサである「マイクロフローセンサ」を開発し、それをを用いた流量計、流量制御装置を製品化し、様々な現場でお客様の課題解決に貢献してきた⁽²⁾⁻⁽⁴⁾。図1に当社におけるマイクロフローの製

品群を示す。近年、気体流量計測へのニーズはますます多様化しており、流量レンジもさらに拡大し、高精度な計測が要求されている。MEMS技術を応用し製作された熱式流量センサの開発事例は多数報告されているが⁽⁵⁾、微小流量域を高精度に計測できる流量計を実現した例は少なく、MEMSセンサの特長の1つである高感度な特性を十分活かしてきれていないのが現状である。

このような課題を解決すべく、流路の形成方法を工夫し、微小な流路を一体化した新たな熱式流量センサを開発したので報告する。



図1. マイクロフローセンサ製品群

2. マイクロフローセンサの概要

まず MEMS 技術を応用した熱式流量センサの構造と特長、動作原理について、当社で開発したマイクロフローセンサを例にあげ説明する。

2.1 マイクロフローセンサの構造と特長

マイクロフローセンサは、シリコンマイクロマシニング技術と薄膜技術により製作された1辺が1.7mm、厚さ0.5mmの高感度、高速応答、小型、低消費電力などの特長を有する気体用熱式フローセンサである。図2にその基本構造の概略を、図3にセンサチップ上面の拡大写真を示す。

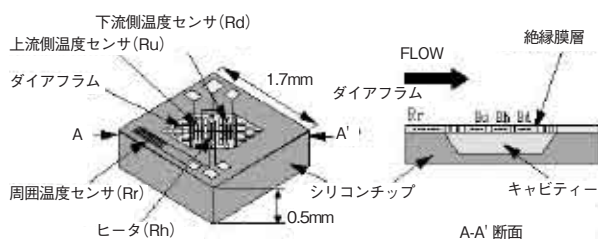


図 2. マイクロフローセンサの基本構造

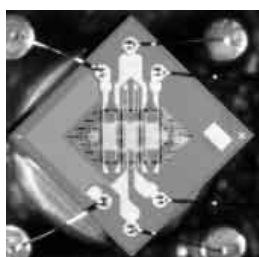


図 3. センサ拡大写真

シリコン基台中央の深さ約 $200\mu\text{m}$ のキャビティ(空洞)上には、窒化シリコンでできた厚さ約 $1\mu\text{m}$ のダイアフラムが作られており、その中央にヒータ、ヒータの両側に温度センサが形成されている。また、シリコン基台上には周囲温度センサが形成されている。ヒータ、温度センサ及び周囲温度センサは、測温抵抗体として信頼性が高い白金薄膜で形成され、その抵抗値から温度を知ることができる。

キャビティはシリコンの異方性エッチング技術により形成されており、ダイアフラムには多数のスリットが形成されている。これは、製作上エッチング液を導入する必要があるためであり、性能上の理由としては、圧力特性のキャンセルと熱絶縁のために設けられている。

熱式センサの性能向上には、MEMS 技術によるマイクロ化が必要不可欠であり、検出部の熱容量を非常に小さくできるため、感度、応答性、省電力性などが飛躍的に向上する。また、一度に多数の微細構造を高精度で製作することができるため、性能のばらつきも小さくなる。

しかし、このセンサの高性能を生み出している要因

は単に精密に小さく作ったからということだけではなく、熱伝導率が約 150W/mK と高いシリコンをヒートシンクとして基台に使用し、キャビティ上で計測部を支持するダイアフラムの熱伝導率がシリコンのおよそ10分の1程度と低い上に $1\mu\text{m}$ という薄さであり、しかも多数の熱絶縁用スリット付きの窒化シリコンを使用しているところにある。この構造により、温度変化する部分をダイアフラム部のみに限定することができ、ダイアフラム中央とシリコン基台間のわずかに数百 μm の距離において、数十～数百度の温度差を数 mW の電力で瞬時に作るができる。

2.2 動作原理

一般的な動作方法は、図4(a)のようなヒータ定温度制御回路を用いてヒータを周囲温度センサで検出される流体温度よりある一定温度(例えば 60°C 程度)高く制御し、そのときの上下流温度センサの抵抗値差を図4(b)のような抵抗ブリッジからなるセンサ出力回路により電圧差として取り出すというものである。

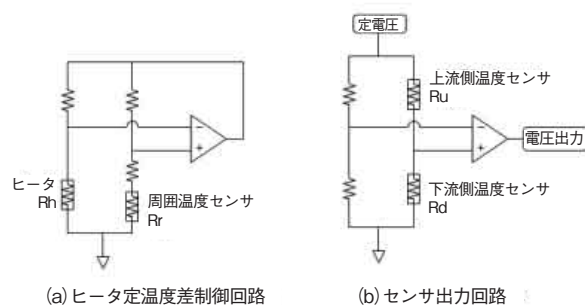


図 4. 基本的な動作回路

流れが無いときは、図5(a)のようにヒータの上流側・下流側に均一な温度分布ができていますが、流れがあるとヒータの上流側・下流側の温度分布の対称性が崩れ、図5(b)のように上流側が下流側より低い温度分布になる。このときの上下流温度センサの温度差(抵抗値差)が、センサ上面を流れる気体の質量流速(流速 $U \times$ 密度 ρ と定義する)の関数となる。

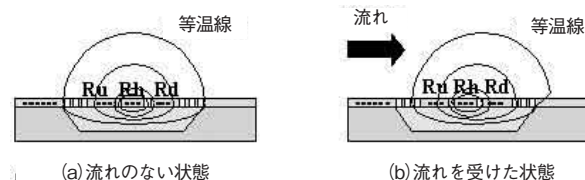


図 5. 動作原理 (概念図)

なお、ヒータの両端電圧を出力とすることにより、熱線流速計のように1素子型のフローセンサとして使用することも可能であり、より高流速までの計測が可能である。しかし、1素子型は外乱や製造のばらつきの影響をそのまま受けてしまうので、流速ゼロのときの出力変化が大きく、精度・再現性などの点で問題が

ある。それに対し、上記の方式では均一に作られた2つの温度センサの差動出力をとっているため、流速以外の外乱(温度・圧力変化, 自然対流, 電気的ノイズなど)や製造のばらつき, 及び素子の経時変化の影響がキャンセルされ、流速ゼロのときの出力が安定し、非常に高精度で再現性の良い計測ができる。このことにより、1mm/s という超低流速の検出も可能となる。また、対称構造のため、逆流の計測も可能である。

3. 流量計測方法と課題

3.1 従来の流路構造とセンサ取付け方法

マイクロフローセンサを流量計として構成するためには、その目的に合わせた以下の機能を持つ流路が必要となる⁽²⁾。

- (1) 測定する気体の流れ方向とマイクロフローセンサの計測方向を合わせて、マイクロフローセンサを機械的に固定する。
- (2) 流量計測範囲に応じて流路の直径(断面積)を決め、流路内の平均流速をマイクロフローセンサの流速計測範囲に合わせる。
- (3) 流れの乱れを小さくし、流速分布の偏りを矯正することによって流れを整流する。
- (4) マイクロフローセンサの直前で流路内壁面の速度境界層を排除し、流速分布をフラットに近づけ、センサが常に層流境界層内(境界層発達の初期段階)に位置するようにする。

(1) ~ (4) に示したような、用途に合わせたフローチャンネルにマイクロフローセンサを設置することにより、流路内の平均流速、流路径、整流機構、流体の種類などによって決まるセンサ近傍の流速勾配が、非常に高い再現性で流量の関数になる。よって、流量とセンサ出力の関係を調べておくことにより、上流・下流側配管の条件及び配管内の流れの遷移(層流⇔乱流)に関係なく高精度で広いレンジアビリティの流量計測が可能になる。図6に従来から製品に適用されている基本的な流路構造を示す。

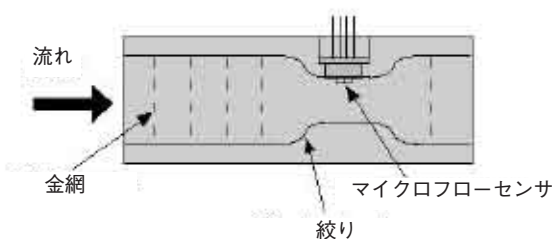


図6. 基本流路構造

3.2 微量流量計測における課題と解決策⁽⁶⁾

上述したようにマイクロフローセンサはセンサ上を流れる流体の流速に応じた出力が得られる。高精度な流量計測を行う場合、適切な流速を確保し、センサ出力に対する振動等の外乱の影響を極力低減する必要がある。3.1で述べたセンサを流路に挿入する従来の方式においても、流路の断面積を小さくしていくことで数百 ml/min 程度の流量レンジまでは適切な流速が確保でき、高精度な計測は可能であった。しかしながら、数十 ml/min さらにはそれ以下の微量流量域でも適切な流速が確保できるように流路断面積を小さくすると、計算上目標とする流路は現行の1/240程度にする必要があり、センサ自身の大きさよりも小さくなってしまいうため、従来のセンサ挿入型は構造上不可能である。したがって、劇的に流路断面積を小さくし、微量流量域でも高精度な計測を達成するためには、抜本的に流路の形成方法を変更する必要がある。

そこで、本開発ではセンサ上の流路断面積を小さくする方法としてMEMS技術によって微細な流路を製作し、その流路をセンサ上に一体化する方式を考案した。以下、その具体的な構造と製作方法について説明する。

4. 微小流路の構造と製作方法

図7(a)に微小流路の構造図を示す。長さ10mm, 幅5mm, 厚さ1.5mmの長方形の板の左右に直径1mmの流体流入, 流出用の貫通穴が形成されている。2つの貫通穴をつなぐように図7(b)に示すような断面形状が0.5mm × 1.0mmの矩形の流路が形成されている。

本開発において流量レンジの仕様は5ml/minと20ml/minの2つを目標としたが、微小流路は上記1種類の寸法で双方のレンジに対応できるように設計を行っている。

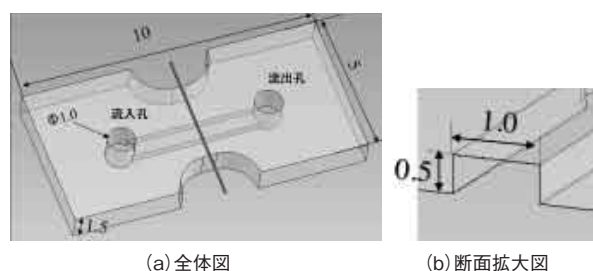


図7. 微小流路構造

具体的な製作方法は以下の通りである。流路はSiとホウ珪酸ガラスの2ピース構造から成り立っている。まず図8(a)に示すようにSi基板に楕円形の貫通長穴を形成する。この貫通穴はICP-RIEエッチングによって形成されており、Siに対して垂直性の高い、高アスペクト比の形状を精度良く加工することが可能である。流路断面積の形状ばらつきが大きいと、流れる流量がセンサ間によってばらつくこととなり、器差増大の原因となってしまいう。したがって、流路断面積の形状を

寸法精度良く加工することは非常に重要である。

一方、ホウ珪酸ガラス基板には、サンドブラスト加工によって図8(b)に示すような流入-流出口を形成しておく。図8(c)に示すように、この2つの基板を陽極接合することで微小な流路構造を実現している。なお、すべての製作プロセスをウエハレベルで一括製作し、最後に個片に分割する方式をとることによってコストの削減を行っている。

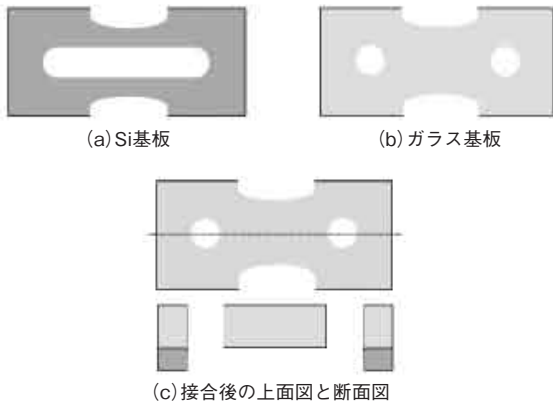


図 8. 微小流路製作方法

5. 流路一体化の方法

先に述べた微小流路と流速センサとの一体化の方法について説明する。流速センサはチップ中央に2.1で述べた従来センサの構造・形状を踏襲したダイアフラムが存在し、ヒータと上下流2つの温度センサからなる流速検出部が配置してある。微小流路との接合部を確保するために流路形状に合わせ周辺のSi基台部分を拡張した長方形形状となっている。図9に流速センサ外観図を示す。



図 9. 流速センサ

微小流路と流速センサを接合する方法として、陽極接合など種々の方法が考えられる。今回の開発ではパターン段差の埋め込みが可能で、アウトガスの発生が無い材料を選定した結果、低融点ガラスを用いた接合方法を採用している。図10に流路一体化後のセンサ外観図を示す。



図 10. 微小流路一体化センサ

接合部に十分な強度、気密性があるか確認を行った結果、破壊圧力は20MPa以上、Heリーク検査による気密性は $1 \times 10^{-8} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{sec}$ 以下と、流量計として使用する上で十分な強度と気密性を実現できていることを確認できた。

6. 評価結果

製作したセンサの流量特性を図11に示す。横軸が流量(ml/min)、縦軸がセンサ出力(V)である。グラフから数 ml/min 以下の微小流量域から 20ml/min を超える流量域までセンサ出力が飽和することなく十分な感度が得られ、広範囲な測定が可能であることを確認できた。

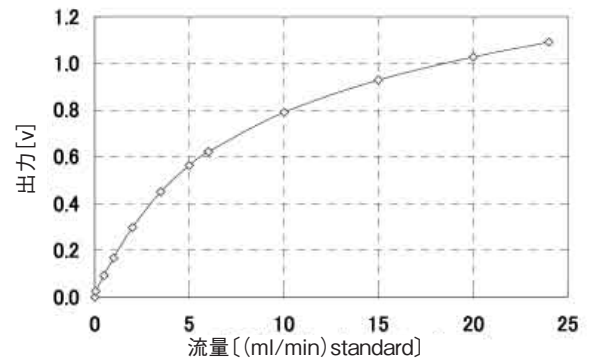
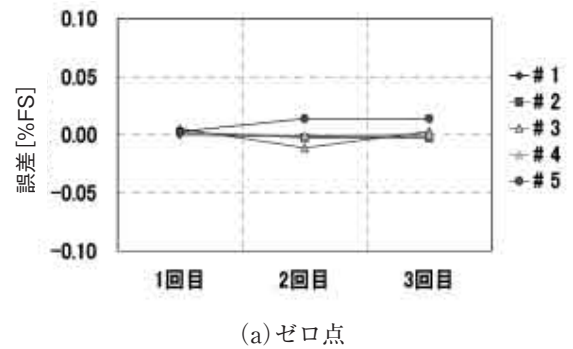
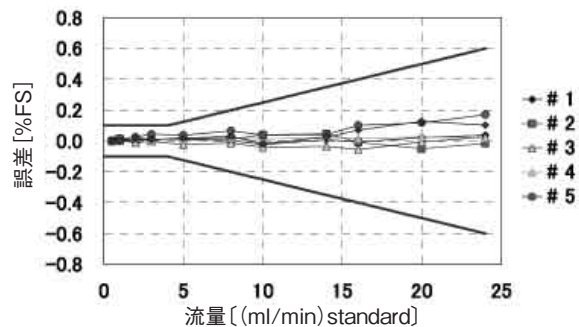


図 11. 流量特性測定結果

次に測定精度について評価した結果を示す。図12は電源ON/OFFをある一定期間内で繰り返した後、ゼロ点とスパンそれぞれについて測定再現性を確認したものである。



(a) ゼロ点



(b) スパン

図 12. 測定再現性の確認結果

図12(a)はゼロ点の測定再現性である。0.05% FS 以下の非常に安定した特性が常に得られていることが確認できる。図12(b)はスパンの測定再現性である。こちらも全流量域において0.2% FS 以下という良好な測定再現性が得られている。

以上の結果から、本開発のセンサが流量計として非常に高精度な測定が可能であることを確認できた。

7. 応用製品の紹介

当社ではこのセンサを搭載したマスフローコントローラ CMQ™-V シリーズ(図13)を用意しており、真空成膜装置、分析装置等における微量の計測制御が必要なアプリケーションで採用いただいている。製品の主な仕様を以下に示す。

CMQ-V 微量流量タイプ仕様

5ml/min, 20ml/min 【Air/O₂/N₂/Ar】
20ml/min, 50ml/min 【H₂, He】

- ・ 精度 ± 1% FS
- ・ 再現性 ± 0.5% FS
- ・ 制御性 500msec



図13. マスフローコントローラ CMQ-V シリーズ

8. おわりに

流速センサの性能を最大限に引き出す理想的な流路構造を考案し、その製作プロセスを開発した。さらに流路と流速センサを一体化する接合プロセスの開発も行った。その結果、微量流量を高精度に計測可能な流量センサを実現できた。MEMS 型の熱式流量センサとしては世界的にみても画期的な性能を達成できたと考えている。今後もあくなき追究を続け、様々な場面において顧客の課題解決に貢献していく所存である。

<参考文献>

- (1) 川田裕郎 ほか, 流量計測ハンドブック, 日刊工業新聞社, pp.7 ~ 11
- (2) 「マイクロフローセンサ」特集号, Savemation Review (2001), Vol.19, 株式会社 山武
- (3) 松山裕, 実用流量測定, 省エネルギーセンター, pp145 ~ 154
- (4) 植松時雄, 水力学 (第2版), 産業図書, pp52 ~ 56
- (5) N.T.Nguyen: Micromachined flow sensors-a review Flow Meas.Instrum., Vol.8, No.1, 1997
- (6) 中野正志他, 微小流路を一体化した熱式流量センサの開発, 第26回センシングフォーラム(2009), p177

<商標>

マイクロフローセンサは、株式会社 山武の商標です。
CMQ は、株式会社 山武の商標です。

<著者所属>

池 信一 技術開発本部
基幹技術開発部
センシング技術グループ

