

熱式 MEMS フローセンサの開発

野添 悟史* 藤原 敏光* 栗林 秀成** 上田 直亜* 谷口 勤*

Development of Thermal MEMS Flow Sensor

Satoshi NOZOE, Toshimitsu FUJIWARA, Hidenari KURIBAYASHI, Naotsugu UEDA and Tsutomu TANIGUCHI.

Recently, environmental preservation and energy saving came to be required. Therefore, measurement and control of flow rate have been needed in the energy consumption apparatus that use various fuel gases, such as combustion equipment, fuel cell and other alternative energy apparatuses. In the case of such apparatus, a diaphragm pump is used in many cases as a source of gas flowing. It is known that the periodic pulsating flow will be generated according to the motion of the diaphragm of a pump. In the existing flow sensor, measurement is not stabilized in such pulsating flow.

We clarified the flow sensor output characteristic in pulsating flow for developing of new flow sensor measurable stably and correctly also in such conditions. The orifice set to the down-stream of a sensor to keep narrow flow can control the output change by the pulsating flow. This report introduces the mass flow meter which is applied this effect.

Key words: MEMS, sensor, thermal flow sensor, pulsating flow, steady flow

1. 結 言

近年、環境保全や省エネが取りざたされる中、燃料電池などの新エネルギー機器や燃焼装置など各種気体を使用する機器において、その効率化のため気体の流量を計測制御するニーズが高まっており、小型化とローコストのニーズも加わって簡便で安価なフローセンサが求められていた。更にこのような機器では、気体の流入源としてダイヤフラム方式のポンプを使用することも多く、この場合の流れは、ダイヤフラムの動きに応じ流量が周期的に変化する脈流となることが知られている。既存のフローセンサにおいては、このような脈流では計測値が安定せず、正確な流量計測ができなかった。

我々は、脈流においても安定して正確に流量計測ができるフローセンサを開発することを主な目的とし、脈流における流路構造とフローセンサの出力特性の関係を評価した。その結果、センサ部の下流側に流れが極めて狭くなるような開口部（オリフィス）を設けることで、脈流の影響による出力の不安定を抑制することが可能であることがわかった。本報ではこの効果を適用したフローセンサを紹介する。

2. 熱式 MEMS フローセンサ

2.1 センサの構成

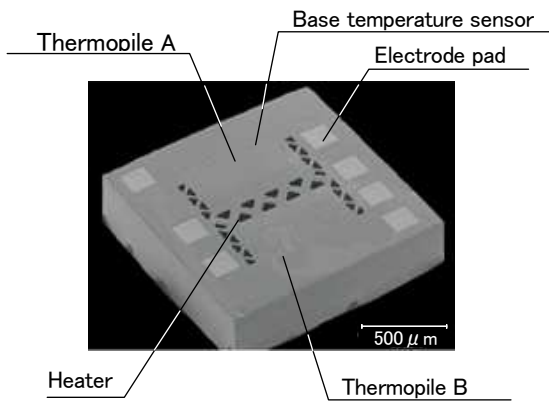
Fig. 1 にフローセンサの外観図を示す。熱可塑性樹脂を筐体とする樹脂筐体タイプとアルミニウム合金を筐体とする金属筐体タイプがあり、金属筐体タイプは都市ガスや LPG などの可燃性気体にも対応している。樹脂筐体タイプは空気フルスケール流量で 1L/min. と 2L/min. 相当の 2 種あり、金属筐体タイプは都市ガス (13A) フルスケール流量で 5L/min. 相当となっている。

Fig. 2 に当該フローセンサに使われる熱式半導体センサ素子の外観図を示す。このセンサ素子は、一般に MEMS (Micro Electro Mechanical Systems の略) と呼ばれる半導体製造技術を応用した微細加工技術によって得られるもので、薄膜下シリコンエッチングにおいて異方性エッチング技術を採用しセンサ素子内に逆台形状の凹部を形成し、この凹部の上下において流れを導入する構造となっている。表面薄膜中央にヒータと、その上下流側には熱電対からなる測温体とが設けられ、さらに基板測温体をなす抵抗体が形成されている。これらの要素は制御回路や出力回路に結線される。フローセンサ内部には、導入口からの気体がこのセンサ素子に暴露されるよう流路が形成されており、その流路には上流側に整流器が、下流側にはオリフィスが設けられる構造となっている。¹⁾

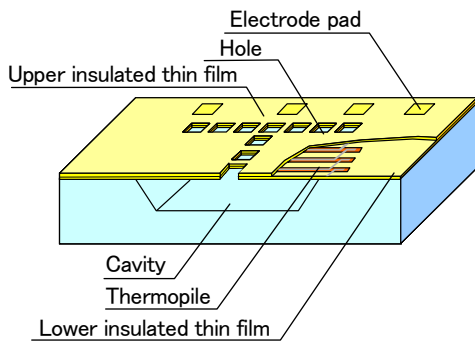
オムロン株式会社エレクトロニクスコンポーネンツビジネスカンパニー
*エンジンニアリングセンタ商品開発部
〒525-0035 滋賀県草津市西草津 2 丁目 2-1
**コネクタ商品部マーケティング課
〒213-0012 川崎市高津区坂戸 3-2-1
(Received May 6, 2004)



Fig.1 Appearance of flow sensors



(a) Appearance photograph



(b) Cross-sectional of perspective diagram

Fig.2 Silicon thermal sensor

2.2 センサの計測原理²⁾

Fig. 3 (a)に示すように、重力などの加速度を無視し、気体の濃度差のない均一な空間において、気体の流れがない場合は、ヒータによって熱せられた気体の温度分布はヒータを中心として上流と下流で対称となる。しかし Fig. 3 (b)に示すように、流れのある状態ではヒータの上流側の温度が低く、下流側が高くなるように温度平衡状態が崩れる。この上流と下流の温度差 ΔT は、熱電対 A と熱電対 B の起電力の差として現れるため、これらを信号処理することで流速を知ることができる。

ここで流速 V_f と温度差 ΔT の関係はおおむね以下の式で表される。

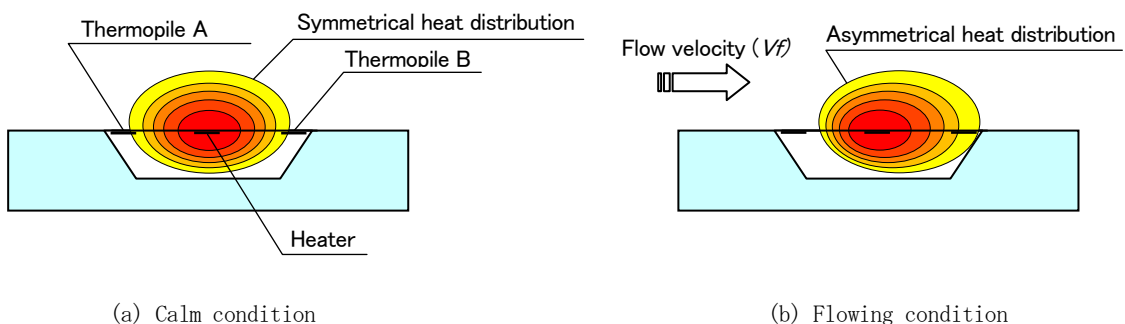
$$\Delta T = A (T_h - T_a) \sqrt{V_f} = B \cdot Q \sqrt{V_f} \quad (1)$$

A, B は定数、 T_h はヒータの温度、 T_a は気体の温度 (ただしヒータから十分に離れたところの気体の温度)、 Q は発熱に要した電力、 V_f は流速を表し、 ΔT はヒータ周辺の温度差を示している。

また、流速 V_f とセンサ出力 V_{out} の関係は概ね以下の式で表される。

$$V_{out} = C \cdot \Delta T = B \cdot C \cdot Q \sqrt{V_f} \quad (2)$$

ここで C は定数であり、温度差 ΔT から電気信号を得る過程を示している。



(a) Calm condition

(b) Flowing condition

Fig.3 Outline of a measurement principle

流路の形状が定められ、あらかじめ流速と流量の関係がわかっている場合は流速から流量を換算することができるが、実際の流量計測では、上流から導入される流れが乱されると、センサ素子付近での流路内の流速分布が不均一になる場合があり、この影響が無視できず流速から流量に換算する過程で誤差を生じる。そのために流路に整流器を設けるなどによって流速分布の均一化を図るなど、流路設計における最適化を行う必要がある。

3. 実験方法

3.1 試供材

Fig. 4 は試供材の分解斜視図および断面図を示している。熱式半導体センサ素子は、電気回路基板の裏側に設置されており、ベース内流路に突出するように取り付けられている。流路には上流部には整流器として金網（線径 0.1mm, 100 メッシュ）が総計 8 枚一定の間隔で搭載できるようになっている。下流側には概中央に穴が設けられた円板状体を搭載できるようになっており、この円板状体がオリフィスを有し、このオリフィスの形状や搭載位置が任意に設定できる構造となっている。

3.2 評価方法

コンプレッサより得られた圧縮空気がタンクを介して安定化され、その後マスフローコントローラ（SEC-F740：エステック製）にてフローセンサへ導入する。この場合の流

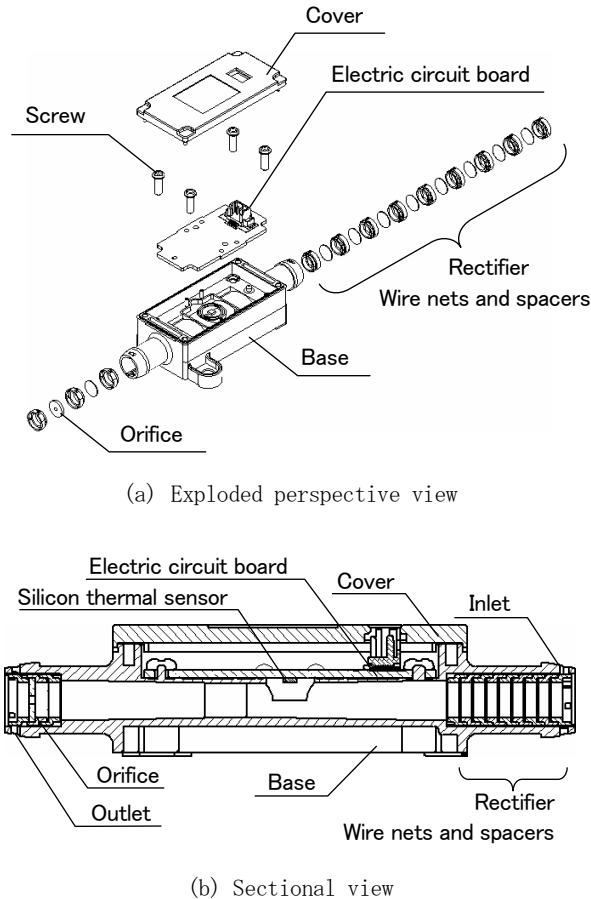


Fig. 4 Flow sensor sample for examination.

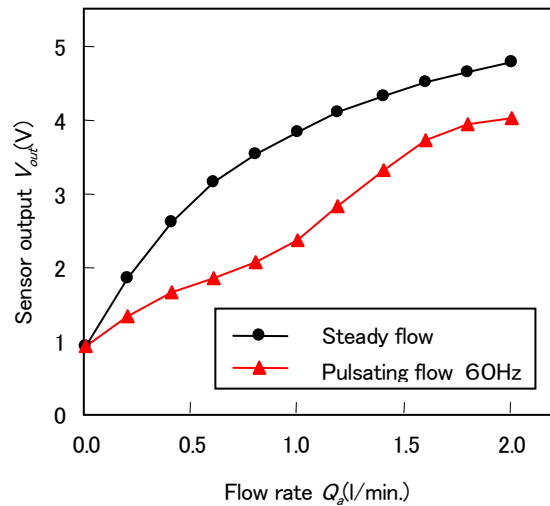
れは時間による流量変動のない定常流となる。この場合はマスフローコントローラにて流量が任意に設定できる。

脈流の場合は、ダイヤフラム式ポンプ（電磁誘導方式 C-5BN：株式会社高槻製）へ印加する電源の交流周波数を 60Hz の一定とし、変圧器によって印加電圧を変化させることでポンプ内のダイヤフラム変位量を変化させ流量を調節した。両者ともに、フローセンサの直後に配管された湿式流量計（W-NKDa-1A：シナガワ製）を用いて流量を測定した。実験は圧力、気温は一定下にて行った。

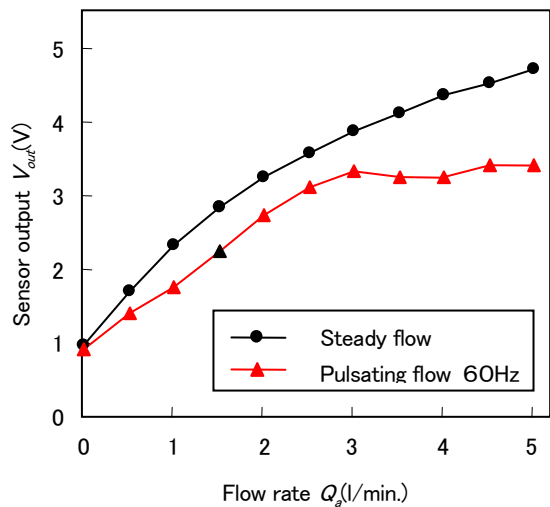
これらを用いて、フローセンサ内にオリフィスを内蔵した場合のそれぞれ定常流、脈流での出力特性を評価した。

4. 実験結果および考察

4.1 オリフィスがない場合の脈流による特性変動



(a) Thermoplastic resin case type.
Full-scale flow rate is air 2L/min.



(b) Aluminum alloy case type.
Full-scale flow rate is air 5L/min.

Fig. 5 Relation between flow rate and sensor output.

Fig. 5は、それぞれ樹脂管体タイプの空気フルスケール流量 2l/min. と金属管体タイプの空気フルスケール流量 5l/min. の流量とセンサ出力の関係を示している。この場合のセンサ内流路にはオリフィスが搭載されていない。横軸はセンサ内を通過した気体の平均流量 Q_a (l/min.) を、縦軸にセンサの出力電圧 V_{out} (V) を示しており、実線●印で示した曲線は定常流を導入した場合を、実線▲印で示した曲線はダイアフラムポンプ 60Hz による脈流を導入した場合を示している。

Fig. 5 (a), (b)ともに、脈流の曲線は定常流の曲線の下側に推移している。このように定常流と脈流では、センサの出力の傾向に違いがある。脈流の場合では、流路内に出口から入口に向かう流れが、センサ素子付近に発生していると考えている。

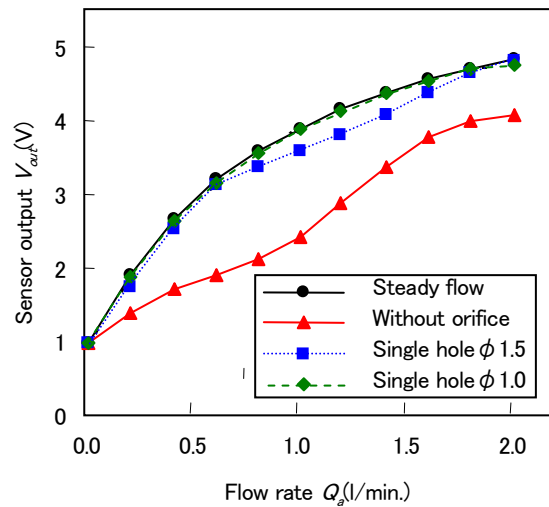
4.2 オリフィスの大きさによる影響

Fig. 6は、Fig. 5同様にそれぞれ樹脂管体タイプ、金属管体タイプの流量とセンサ出力の関係を示している。

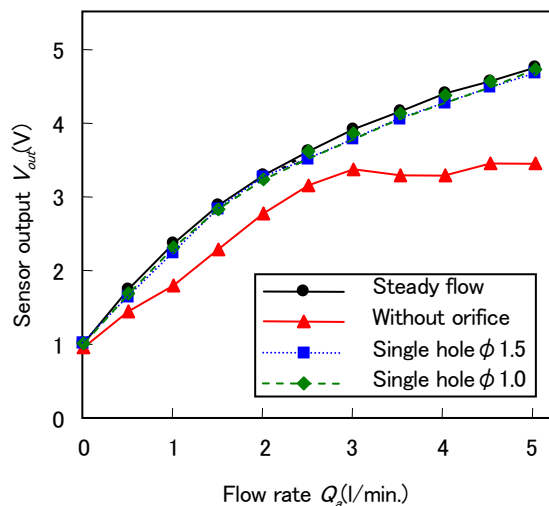
実線●印で示した曲線は定常流を導入した場合の曲線を示しており、実線▲印で示した曲線は、流路内にオリフィスがない試供材に 60Hz の脈流を導入した場合 (Fig. 5 同様) を、破線■印で示した曲線は、センサ流路の下流側に $\phi 1.5$ mm の単一穴オリフィスを設けた試供材に 60Hz の脈流を導入した場合を、破線◆印で示した曲線は、 $\phi 1.0$ mm 単一穴オリフィスを設けた試供材に 60Hz の脈流を導入した場合を示している。

Fig. 6 (a)に示す実線●印と実線▲印を比較すると、実線▲印はどの流量域においても実線●印より小さな値にて推移しているのがわかる。これは先の Fig. 5 (a) で示した通りである。ここで、センサ流路の下流側に $\phi 1.5$ mm の単一穴オリフィスを設けた試供材に、60Hz の脈流を導入した場合の曲線 (破線■印) を見ると、実線▲印と比べて、実線●印の曲線に近くなっているのがわかる。さらに破線◆印の曲線で示した $\phi 1.0$ mm の単一穴オリフィスを設けた試供材に、60Hz の脈流を導入した場合は、実線●印の示す定常流の曲線にほぼ一致しているのがわかる。このように、オリフィス開口穴径が小さくなるほど、定常流の場合の出力特性に近づく傾向にあることが示された。

Fig. 6 (b)に示す実線●印と実線▲印を比較すると、実線▲印はどの流量域においても実線●印より小さな値にて推移しているのがわかる。これも先の Fig. 5 (b) で示した通りである。前述と同様に、センサ流路の下流側に $\phi 1.5$ mm の単一穴オリフィスを設けた試供材に、60Hz の脈流を導入した場合の曲線 (破線■印) と $\phi 1.0$ mm の単一穴のオリフィスを設けた試供材に、60Hz の脈流を導入した場合の曲線 (破線◆印) の両者は、ともに実線●印の曲線で示した定常流の出力特性に近づいていく傾向を示しているのがわかる。若干ではあるが、 $\phi 1.5$ mm の単一穴オリフィスの場合が、定常流の曲線との差が大きく、ここでも、オリフィス開口部穴径が小さくなるほど、定常流の場合の出力特性に近づく傾向にあることが示された。



(a) Thermoplastic resin case type.
Full-scale flow rate is air 2L/min.



(b) Aluminum alloy case type.
Full-scale flow rate is air 5L/min.

Fig. 6 Relation between flow rate and sensor output.

センサ素子下流に置かれたオリフィスにより脈動流が抑えられ、その結果、熱式フローセンサの流量特性が定常流の場合の出力に近づく。また、その一致の程度は、オリフィス開口部穴径の大きさに応じた傾向にあることが示された。

5. 結 言

本開発では、脈流においても安定した流量測定が可能なフローセンサを提供することを目的とし、脈流によるセンサ出力特性への影響を実験的に定量化した。センサ素子下流側流路にオリフィスを搭載することで、定常流と脈流による差がなくなる傾向にあり、このオリフィス開口部の径の大きさに応じて効果に差があることがわかった。これら

の効果を用いたフローセンサを提供することで、ダイヤフラムポンプを流入源とした機器システムでの流量測定を可能とすることができた。

今後は、これらオリフィスによる脈流の影響低減効果についての理論的考察が必要と考えており、等温化压力容器を用いた非定常流量発生装置³⁾を利用して、脈流の振幅および、周波数とセンサ出力の関係などセンサの動特性評価を行う予定にしている。

最後に、実験結果について様々なご知見、ご考察を頂きました東京工業大学精密工学研究所の香川教授、川嶋助教授、船木助手に厚くお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 流量測定装置；特願平 2003-101742
- 2) P. T. Lai・Baiyong Liu・Xueren Zheng・Bin Li・Shouyuan Zhang・Zhaohui Wu: Monolithic integrated spreading-resistance silicon flow sensor; Sensors and Actuators A 58, 85/88(1997)
- 3) 等温化压力容器を用いた空気の非定常流量発生装置；計測自動制御学会論文集, 34-12, 1773/1778 (1998)

[著 者 紹 介]

野添 悟史



1987年立命館大学電気工学科卒業
同年立石電機株式会社(現オムロン株式会社)入社。計測、制御関係の機器開発、設計に従事。

藤原 敏光 (正会員)



1994年広島大学工学部第I類(機械系)卒業
同年オムロン株式会社入社。電子機構部品の開発、設計に従事。計測自動制御学会、日本塑性加工学会などの会員

栗林 秀成



2001年同志社大学知識工学科卒業
同年オムロン株式会社入社。電子機構部品の企画、開発に従事

上田 直亜



2002年電気通信大学情報通信工学科卒業
同年オムロン株式会社入社。センサの開発、設計に従事。

谷口 勤



1977年芝浦工業大学通信工学科卒業
同年立石電機株式会社(現オムロン株式会社)入社。制御機器の商品開発、商品企画に従事。