新検出方式を適用した高性能MEMS流量センサ

正員 有吉 雄二* 非会員 仲村 恵右*

正員 番 政広* 正員 武田 宗久*

A High Performance MEMS Flow Sensor Based on a New Sensing Method

Yuji Ariyoshi*, Member, Keisuke Nakamura*, Non-member, Masahiro Tsugai*, Member,

Munehisa Takeda*, Member, Koji Tanimoto*, Member

This paper presents a new type of bidirectional thermal flow sensor which has a wide dynamic range and excellent temperature characteristics. This sensor has a pair of heaters and a temperature sensor on a diaphragm. The heaters are located on opposite sides to each other. A single bridge circuit provides an adequate heating current to the upper stream heater so as to keep the voltages supplied to each heater balanced. The heating current, which represents the required sensor output, increases as the flow rate increases. A reverse flow can be also detected since the current decreases when the flow is reversed. A wide dynamic range of 500 and excellent temperature characteristics of less than $\pm 3\%$ of the reading value of flow rate (from 0 to 50°C) were obtained. This sensor responded to a step change of flow rate from 40 to 137 L/min within 0.5 sec.

キーワード：流量，流量センサ，マイクロヒーター，伝熱，MEMS

Keyword：flow rate, flow sensor, micro heater, heat transfer, MEMS

1. まえがき

シリコンのマイクロマシニング技術を利用して数 μm の薄膜構造を形成し，この薄膜部を検出部として用いる熱式流量センサの研究が盛んに行われ，一部は既に実用化されている。これらの熱式流量センサにおいては，流体とヒーターとの温度差を常に一定に保つよう制御し(CTA：Constant Temperature Anemometry)，そのために必要な電力が流体の質量流量の関数となることを利用して流量検出を行う方法が一般的である^{(1)~(4)}。また，CTAの持つ小流量域の感度が低く，逆流検出も不可能であるという欠点を克服するため，ヒーターの上下流に形成された温度センサの温度差が流量に依存することを利用して流量計測を行う方法(DTA：Differential Temperature Anemometry)も広く用いられている^{(5)~(7)}。しかし，DTAは逆に大流量域での感度が低下し，しかもヒーター制御用のブリッジ回路とは別に，温度差検出用のブリッジ回路が必要となり，回路規模が大きくなるというデメリットを有する。そこで，筆者らはこれらの問題を全て解決できる新しい制御方式の熱式流量センサを開発した。この流量センサは，逆流検出，広ダ

イナミックレンジ，良好な温度特性を比較的単純な回路で実現できるという特徴を有する。

本稿ではまずこの流量センサの基本原理，特徴について述べ，試作品の基本評価結果を報告する。さらにこの基本評価結果を基に回路に改良を加え，流量特性，温度特性，応答性について評価を行ったので報告する。

2. 原 理

図1に本流量センサの基本回路を示す。

図1において，

R_{hu} ：上流ヒーター

R_{hd} ：下流ヒーター

R_s ：温度センサ

R ：固定抵抗

V_b ：ブリッジ印加電圧

V_h ：ヒーター接続点の電圧

V_s ：固定抵抗接続点の電圧($=V_b/2$)

I_{hu} ： R_{hu} に流れる電流

I_{hd} ： R_{hd} に流れる電流

V_{out} ：センサ出力電圧

* 三菱電機(株)先端技術総合研究所
〒661-8661 兵庫県尼崎市塚口本町8-1-1
Advanced Technology R&D Center Mitsubishi Electric Co.
8-1-1 Tsukaguchi-honmachi Amagasaki 661-8661

である。流れが順流の場合，上流ヒーター R_{hu} は下流ヒーター R_{hd} に対して流れの上流側に位置し，両者は同じ温度にお

図1 基本回路
Fig. 1. Basic circuit.

いては同じ抵抗値を有している。温度センサ R_s は R_{hu} , R_{hd} の近傍に形成されている。ブリッジ回路両辺の接続点電圧 V_h と V_s はオペアンプに入力され、その出力が温度センサ R_s を介してヒーター接続点にフィードバックされている。 R_s には I_{hu} と I_{hd} の差分電流が流れる。この回路では、ヒーターの接続点電圧 V_b が常に $V_b/2$ となるようにオペアンプ出力からヒーター接続点へ電流が供給される。つまり、2つのヒーターに印加される電圧が常に $V_b/2$ でバランスする。このオペアンプの出力がセンサの出力電圧 V_{out} となる。例えば、流量0の場合には2つのヒーターの温度（抵抗値）は等しいので、オペアンプ出力から電流供給をしなくても V_h は $V_b/2$ に等しくなる。よって出力電圧 V_{out} も $V_b/2$ となる。順流が発生すると、上流側にある R_{hu} の方が下流側にある R_{hd} よりも冷却されやすいため、 V_h は $V_b/2$ よりも低くなる。これを $V_b/2$ に保つためには、上流側ヒーター R_{hu} に下流側ヒーター R_{hd} よりも多くの電流を供給しなければならない。よってオペアンプの出力端子からヒーター接続点に電流が流れ込み、 V_h の低下を阻止する。これにより、出力電圧 V_{out} は上昇する。逆流時にはヒーター接続点からオペアンプに電流が吸い出され、 R_{hd} よりも R_{hu} の方により少ない電流が流れ、 V_h の上昇を阻止する。このとき出力電圧 V_{out} は低下する。以上の動作により出力電圧 V_{out} は図2に示すような流量依存性を持ち、逆流も含めた流量計測が可能となる。

次にこの方式の動作式を導出する。図1の回路における出力電圧 V_{out} は次式で表される。

$$V_{out} = \frac{V_b}{2} + R_s (I_{hu} - I_{hd}) \quad (1)$$

また、熱平衡状態においては次式が成り立つ。

$$R_{hu} \cdot I_{hu}^2 = H_u \cdot \Delta T_{hu} \quad (2)$$

図2 出力電圧の流量依存性
Fig. 2. Flow dependence of output voltage.

$$R_{hd} \cdot I_{hd}^2 = H_d \cdot \Delta T_{hd} \quad (3)$$

ここで、 H_u , H_d はそれぞれ上流ヒーター、下流ヒーターにおける熱放散係数、 ΔT_{hu} , ΔT_{hd} はそれぞれ上流ヒーター、下流ヒーターと流体との温度差。

(2),(3)式を(1)式に代入すると(4)式が得られる。

$$V_{out} = \frac{V_b}{2} + R_s \left(\sqrt{\frac{H_u \cdot \Delta T_{hu}}{R_{hu}}} - \sqrt{\frac{H_d \cdot \Delta T_{hd}}{R_{hd}}} \right) \quad (4)$$

(4)式から判るように、このセンサの出力は上流と下流の熱放散係数の平方根の差に依存する。順流の場合、 H_u が H_d よりも大きくなるので、(4)式第2項の括弧内は正値となり、 V_{out} は $V_b/2$ より大きくなる。一方、逆流の場合は、 H_u が H_d よりも小さくなるので、第2項の括弧内は負値となり、 V_{out} は $V_b/2$ より小さくなる。無風時には $\Delta T_{hu} = \Delta T_{hd}$, $R_{hu} = R_{hd}$ となるので、第2項括弧内は0となり、 V_{out} は $V_b/2$ と等しくなる。図2に示したように、逆流も含めた流量計測が可能なが(4)式からも判る。

また、(1)式を変形すると(5)式が得られる。

$$V_{out} = \frac{V_b}{2} + \frac{V_b}{2} \left(\frac{R_s}{R_{hu}} - \frac{R_s}{R_{hd}} \right) \quad (5)$$

(5)式から判るように、 V_{out} は R_s と R_{hu} , R_{hd} の比率の差に依存する。次章で述べるように、 R_s は R_{hu} , R_{hd} と同一材料で形成されているため、ほぼ同一の抵抗温度係数を有する。よって、 R_s と R_{hu} , R_{hd} の温度依存性が分母分子でキャンセルされ、温度による V_{out} の変動が小さくなって、原理的に優れた温度特性が得られることが推測される。

3. センサの構造

図3にセンサチップの写真と断面図を示す。チップサイズは $3 \times 11 \text{ mm}^2$ で、ダイアフラムサイズは $0.6 \times 1 \text{ mm}^2$ で厚さは $6 \mu\text{m}$ である。ダイアフラム上中央に温度センサ (R_s) が形成され、その両側にヒーター (R_{hu} , R_{hd}) が形成されてい

(a) photos of the sensor chip

(b) schematic cross section at A-A line

図3 センサチップ写真(a)と断面図(b)

Fig. 3. Photos of chip(a) and schematic cross section(b).

表1 抵抗温度特性

Table 1. Resistances and TCR.

$R[\Omega]$		R_{hu}	R_{hd}	R_s
TCR[ppm/°C.]		4200	4200	4210
	α	4200	4200	4210
	β	1445	1445	1443

 R_0 : resistance at 0 °C $R=R_0[1+\alpha(1+\beta/T)]$

る。温度センサとヒーターはNiで形成され、SiNによるサンドイッチ構造となっている。ダイヤフラムは裏面からシリコンを異方性エッチングして作製される。温度センサとヒーターの抵抗とTCR(抵抗温度係数)を表1に示す。

4. 実測結果

(4・1) 流量特性

1) 基本回路による特性

図1の回路を用いて測定した流量特性を図4に示す。流

図4 基本回路による流量特性

Fig. 4. Flow characteristic with the basic circuit.

図5 ΔT_{hu} と ΔT_{hd} の流量依存性(基本回路)

Fig. 5. Heater temperature as a function of the flow rate with the basic circuit.

路にはφ15mmの直管を使用し、センサチップを流れと平行になるように挿入した。また、整流素子としてメッシュ100のネットを用いた。横軸は1気圧換算の体積流量である。図5には ΔT_{hu} と ΔT_{hd} の流量依存性を示す。 ΔT_{hu} と ΔT_{hd} はブリッジ電圧 V_b により調整できるが、今回は $V_b=4.2V$ とし、無風時では $\Delta T_{hu}=\Delta T_{hd}=175^\circ\text{C}$ となった。

図4の結果から、順流における出力電圧は200L/min以上の流量で飽和し、300L/min以上では低下していることが判る。これは図5に示す ΔT_{hu} と ΔT_{hd} の流量依存性に起因する。 ΔT_{hu} と ΔT_{hd} の差は200L/minまでは増加しているが、それ以上の流量では減少している。上流側に位置する R_{hu} は R_{hd} よりも冷却されやすいため、小流量域での R_{hu} の温度降下は R_{hd} のそれより大きくなる。しかし、ある程度温度が下がってくると R_{hu} の温度降下は緩慢になり、大流量域では R_{hu} と R_{hd} の温度が近づいてくる。これにより、(5)式括弧内の R_{hu} と R_{hd} の差が大流量域で減少するため、 V_{out} も大流量域で減少すると考えられる。以上のことから、大流量域での感度を向上するためには、ヒーターの温度低下を抑制することが必要であると推測される。次章ではこの点に鑑み、改善策を施した結果について報告する。

2) 回路改良による特性改善

基本回路による出力飽和現象を改善し、大流量域での感

図6 改良回路

Fig. 6. Improved circuit.

度アップを図るため、図6に示すように制御回路に2つの改良を加えた。

図1の基本回路との相違点は以下の2点である。

(i) オペアンプの出力を抵抗 R_f を介して非反転入力端子にフィードバックしている。これにより、流量が増大して V_{out} が大きくなると、オペアンプ出力からブリッジ回路の固定抵抗接続点 (V_s) に電流が流れ込み、電圧 V_s が大きくなる。 V_s と V_{out} の関係は次式で表される。

$$V_s = \frac{R_f \cdot V_b + R_l \cdot V_{out}}{2 \cdot R_f + R_l} \quad (6)$$

V_s の流量依存性は R_f により調整できる。 V_h と V_s は同じ電圧になるように制御されるため、 V_s の上昇に伴い、 V_h をさらに上昇させなければならない、 V_{out} もさらに上昇する。よって流量による V_{out} の変化量が大きくなり感度が向上する。

(ii) 流量が大きくなるにつれてブリッジに印加される電圧 V_b も大きくなるように、 V_{out} を固定抵抗 R_b を介してブリッジ回路にフィードバックしている。ブリッジ電圧 V_b と出力電圧 V_{out} の関係は次式で表される。

$$V_b = \frac{2(R_b \cdot V_c + R_2 \cdot V_{out})}{2 \cdot R_b + R_2} \quad (7)$$

V_b の流量依存性は R_b により調整できる。ブリッジ電圧 V_b を大きくすると、 R_{hu} 、 R_{hd} に流れる電流が大きくなり発熱量が増大する。これにより、大流量域でのヒーター温度の低下を抑制でき、大流量域での感度アップに繋がる。上記(i)，(ii)で述べたように、 V_b 、 V_s の流量依存性を考慮すると、図6の回路における出力電圧 V_{out} は次式で表される。

$$V_{out} = \frac{V_b}{2} + R_s \left(\frac{V_s}{R_{hu}} - \frac{V_b - V_s}{R_{hd}} \right) \quad (8)$$

無風時の V_{out} は基本回路の場合と同様に $V_b/2$ となる。

図6に示す改良回路を用いてセンサの流量特性を測定した結果を図7に示す。比較用として基本回路の特性も併せて記載した。1～500L/min の範囲で出力電圧が単調増加性

図7 改良回路による流量特性

Fig. 7. Flow characteristic with the improved circuit.

図8 ΔT_{hu} と ΔT_{hd} の流量依存性 (改良回路)

Fig. 8. Heater temperature as a function of the flow rate with the improved circuit.

を有しており、ダイナミックレンジ $D/R=500$ を実現できた。

一方、図8には ΔT_{hu} と ΔT_{hd} の流量依存性を示す。図8を見ると、200L/min までは ΔT_{hu} 、 ΔT_{hd} が上昇しており、 V_{out} を V_b にフィードバックし、 V_b に流量依存性を付与したことによる効果が確認できる。

また、 V_{out} を V_s にフィードバックしたことにより、 ΔT_{hu} と ΔT_{hd} の相対関係にも変化が生じている。小流量では ΔT_{hu} と ΔT_{hd} がほぼ同等で、大流量では図5とは逆に ΔT_{hu} の方が大きくなっている。 ΔT_{hu} と ΔT_{hd} の大小関係は R_f の値により調整できる。 R_f を小さくすると V_s へのフィードバック量が増大するため、これに伴って V_h も増大する。その結果 R_{hu} での発熱量が増大し、 ΔT_{hu} が上昇する。 R_f を小さくすればするほど、 ΔT_{hu} と ΔT_{hd} の逆転現象は顕著になる。今回は温度特性の観点から ΔT_{hu} と ΔT_{hd} がほぼ同等となるように R_f を調整した。この結果、全流量範囲で $R_{hu} \div R_{hd}$ となるが、流量とともに V_s が増大するため、(8)式における右辺括弧内の値は流量とともに増大する。基本回路とは違って、大流量においても R_{hu} と R_{hd} の差分値の減少が発生せず感度向上を実現できた。さらに、 V_b に流量依存性を付したことから、(8)式における右辺第1項も流量とともに

図9 温度特性

Fig. 9. Influence of the ambient temperature.

図10 ACゲイン回路

Fig. 10. AC gain circuit.

大きくなり、より一層の感度向上につながった。

〈4・2〉 温度特性 図6の回路を用いて温度特性を評価した結果を図9に示す。装置能力の限界のため、12～600L/minの範囲の流量でしか評価できなかったが、0～50°Cで流量誤差が±3%RD以下という良好な温度特性が得られた。流量誤差の単位の%RDは各流量におけるその流量値に対する誤差の割合を意味する。例えば、80L/minの時の流量誤差は-2%RDであるので、-1.6L/minの誤差が発生することになる。

図8で示したように、 R_{hu} と R_{hd} の温度は全流量範囲においてほぼ等しい。また、前述のように両者は同一材料で形成されているためほぼ同等の抵抗温度係数を有している。これらのことから R_{hu} と R_{hd} は流体の温度が変化した場合にほぼ同一の挙動を示す。近傍に形成された R_s と R_{hu} 、 R_{hd} の関係においても同様なことが言える。よって、(8)式から判るように、 R_s と R_{hu} 、 R_{hd} の温度特性のキャンセル効果が得られる。図9の結果から、本方式が原理的に良好な温度特性が得られる特徴を有することを確認できた。また、70～90L/minの間にエラーの不連続が発生しているが、これはこの流量範囲においてセンサチップ付近の流れに乱れが発生しているためであり、流体的な要因によるものであると思われる。整流構造を改善し、乱れの発生を低減できれば不連続な特性を回避できると考えている。

〈4・3〉 応答性 ステップ応答特性を評価した結果を以下に示す。図6の回路の演算増幅器OP1に図10に示すような抵抗とコンデンサ接続し、ACゲインを最適調整して

図11 ステップ応答特性（出力流量）

Fig. 11. Step response (actual flow rate).

図12 ステップ応答特性（変化割合）

Fig. 12. Step response (normalized flow rate).

評価した。

流量を40L/minから137L/minに急変させた時の応答性を図11と図12に示す。図11の縦軸はセンサ出力を流量換算した値を示し、図12の縦軸は流量変化幅を100%とした時の変化割合を示している。比較のため、熱線式の流量センサを用いて測定した応答波形も同時に示した。熱線式流量センサは非常に応答が速いので、実際の流量変化にほぼ追従していると考えて良い。

図12を見ると判るように、0.1secで90%、0.5secで100%に到達している。純粋な一次遅れ応答ではないため正確な時定数は算出できないが、70%程度に達するまでの応答波形は時定数が約15msecの一次遅れ応答とほぼ一致する。本センサは、MEMS技術を用いて作製した低熱容量薄膜ダイヤフラムを使用しているため、検出部の熱時定数を低減でき、サーミスタやバルクの白金抵抗を用いた流量センサに比べて良好な応答性を得ることができる。

5. 結 論

新しい方式の熱式流量センサを提案し、その試作評価を行った。本論文を要約すると以下になる。

- (1) このセンサは MEMS 技術により作製され、1つの

ダイヤフラム上に形成された2つのヒーターと1つのセンサから構成される。また、単一のブリッジ回路により制御され、逆流検出も可能である。

(2) 基本回路構成ではダイナミックレンジ 200 が得られた。

(3) 回路構成を改良することにより、ダイナミックレンジを 500 まで拡大することができた。この改良回路では2つのポジティブフィードバックにより、大流量域でのヒーター温度低下を抑制し、大流量域での感度アップを図っている。

(4) 本回路ではヒーターの温度係数をセンサの温度係数が効果的に相殺する出力構成となっているため、0~50℃で±3%RDの温度特性が得られた。

(5) ステップ応答特性を評価した結果、40→137L/minの流量変化時に0.1secで90%、0.5secで100%に到達し、また、立ち上がり直後の応答波形は時定数15msecに相当した。本センサではMEMS技術を用いて作製した薄膜ダイヤフラムを採用し、熱時定数を低減できたため、良好な応答特性が得られた。

(平成17年2月17日受付,平成17年5月11日再受付)

文 献

- (1) O.Tabata, H.Inagaki, I.Igarashi, and T.Kitano: "Fast Response Silicon Flow Sensor with a Thermal Isolation Structure", Proceeding of the 5th Sensor Symposium, The Institute of Electrical Engineers of Japan, pp.207-211 (1985)
- (2) Y.C.Tai and R.S.Muller: "Lightly-Doped Polysilicon Bridge as a Flow Meter", *Sensors and Actuators A*, Vol.15, pp.63-75 (1988)
- (3) T.Neda, K.Nakamura, and T.Takumi: "A polysilicon Flow Sensor for Gas Flow Meters", *Sensors and Actuators A*, Vol.54, pp.626-631 (1996)
- (4) C.H.Stephani and M.Zanini: "A Micromachined Silicon Mass-Air-Flow Sensor", *SAE*, pp.17-23 (1992)
- (5) L. Qiu, E.Obermeier, and A.Schubert: "A Microsensor with Integrated heat Sink and Flow Guide for Gas Flow Sensing Applications", *Transducers'95/Eurosensors IX*, pp.520-523 (1995)
- (6) M.Nagata, S.kamiunten, N.honda, T.Itoh, and A.Honami: "innovative Surface Micro-Machined Membrane Flow Sensor", Proce. of the 3rd ASME/JSME Joint Fluids Engineering

Conference, pp.647-654 (1999)

- (7) T.R.Ohstein, R.G.Jonson, R.E.higashi, D.W.Bruns, J.O.Holemn, E.A.Satren, and G.M.Jonson: "Environmentally Rugged, Wide Dynamic Range Microstructure Airflow Sensor", *Trans. IEEE. Solid State Sensors and Actuators Workshop*, pp.158-160 (1990)

有 吉 雄 二

(正員) 1966年5月4日生。1989年九州大学工学部電子工学科卒業。同年三菱電機(株)入社。主に車載用熱式空気流量センサの開発に従事。現在、先端技術総合研究所 専任。

仲 村 恵 右

(非会員) 1968年11月22日生。1994年3月京都大学大学院理学研究科物理第一専攻修士課程修了。同年4月三菱電機(株)入社。現在、マイクロマシン、MEMSの研究開発に従事。現在、先端技術総合研究所 専任 応用物理学会会員。

番 政 広

(正員) 1959年2月2日生。1984年東京大学大学院工学研究科修士課程機械工学専攻修了。同年3月三菱電機(株)入社。現在、先端技術総合研究所勤務。主として半導体圧力センサ、加速度センサの開発に従事。1992年~1993年アメリカ、ケースウェスタンリザーブ大学客員研究員。

武 田 宗 久

(正員) 1957年3月6日生。1981年3月京都大学大学院工学研究科精密工学専攻修士課程修了。同年三菱電機(株)入社。主として、マイクロマシン、MEMSの研究開発に従事。2003年10月より先端技術総合研究所センシング技術部長。IEEE SMC THE FRANKLIN V. TAYLOR AWARD, 日本機械学会関西支部研究賞等受賞。日本機械学会, 日本ロボット学会会員。