

サーモパイル式 MEMS フローセンサの特性とそれを用いた流量計の開発

小田 清志*, 岡本 康広*, 山浦 路明**

Characteristics of MEMS Flow-sensor with Thermopiles and Development of Flow-Meters Using the Flow-sensor.

Seiji ODA*, Yasuhiro OKAMOTO* and Michiaki YAMAURA**

Abstract:

A MEMS flow sensor with thermopiles as temperature sensor is developed. The sensor has the characteristics of a thermopile in that it does not generate heat itself and the temperature can be measured in straight lines. Short response time is achieved by placing the hot junctions of the thermopiles close to the heater. Using characteristic, the development of an instantaneous flow meter is realized. A high accuracy flow meter is realized despite the simple constant voltage heater drive, using normalization from outputs of two thermopiles arranged perpendicular to the direction of flow. This flow meter can also be used as a mass flow meter when measuring natural gas.

Keywords: MEMS, thermopile, flow-sensor, flow-meter, normalization

1. 背景

昨今 MEMS センサの産業応用は目覚ましいものがある。MEMS フローセンサの産業応用で言えば、風向計¹⁾や質量流量計²⁾等の応用が実現している。これらの用途では、単に小型化・低価格化を実現しているだけではなく、従来品よりも高機能・多機能を実現している。たとえば流量計応用で言えば、従来の熱線式流量計では風向に無関係に流速を計測していたため、配管内の流量を計測する時には脈動などの影響で計測精度に問題があった。MEMS フローセンサを用いると風向までとらえることができるようになるため、低流量、あるいは流量0付近の流量を正確に計測できるなどのメリットがある^{3)~5)}。また、センシングの有効距離が短い⁶⁾ため、従来のマスフローメータと比較すると高速応答性の面で良好になっている^{3)~5)}。このように MEMS 化するメリットは小型化・低価格化だけではなく、高付加価値化の要素も含まれている。

一方で、流量計測技術では、数多くの課題があるのが現状である。たとえば、圧縮機前後などのガス配管での脈動は、流量制御に影響を与えるため、精度の良い燃焼や混合に問題

を与える。現状では圧力脈動を計測し対策するのが通常だが、流量脈動を計測・解析するほうがより良いことは明白である。応答速度の速い流量計はこのような応用に役立つものと考えている。また、燃料にガスを使う場合、稼働変動などによりガスの組成が変化する場合もある。そのような場合には加熱制御に影響を与える。天然ガスの場合、質量と発熱熱量とに比例関係があることがわかっており⁶⁾、ガス種に依存しない純粋な質量流量計で計測・制御できれば、プラントでの加熱制御に十分使えるはずである。同じ質量流量計であるコリオリメータも同様な特長を持つが、数 MPa 以上の高密度ガス以外では使用できない。

著者らは、サーモパイル式 MEMS フローセンサを提案しており、このセンサが上述のガス流量計測応用に有効であることを確認してきている⁵⁾⁷⁾⁸⁾。本論分では、サーモパイル式 MEMS フローセンサを紹介し、その応用開発の状況について説明する。

* 矢崎総業(株) 技術開発センター

** 矢崎計器(株) 都市ガス事業部

* YAZAKI Technology Center, YAZAKI Corporation

** City Gas Division, YAZAKI Meter Corporation

(Received February 23, 2004)

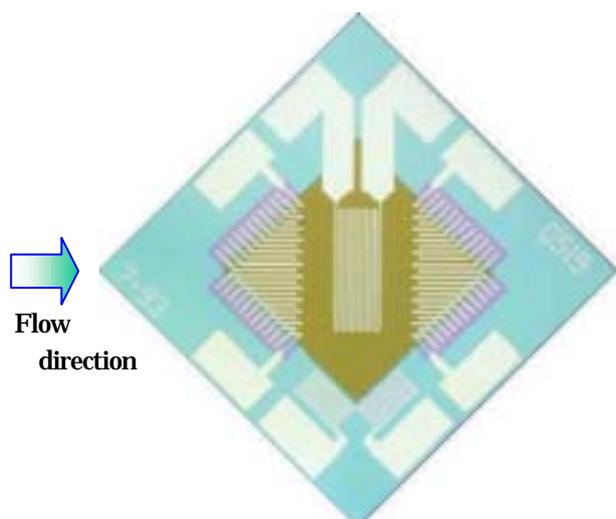


Photo1 The photograph of the MEMS flow sensor using thermopiles. This is a basic layout type.

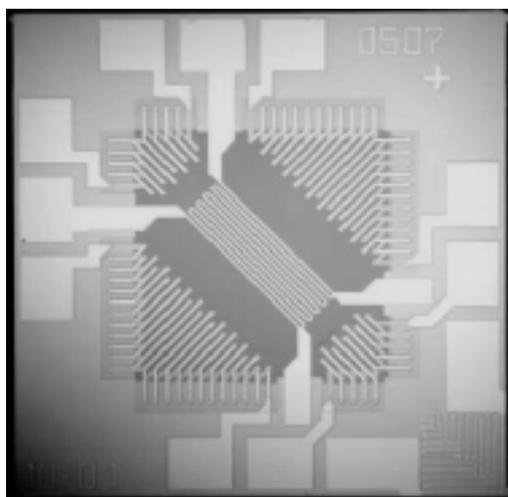


Photo2 The photograph of the MEMS flow sensor using four thermopiles as a flow rate monitor and a temperature distribution monitor.

2. サーマパイル式フローセンサの構造的長

Photo 1 と Photo 2 にわれわれが開発したフローセンサの顕微鏡写真を示す。センサチップの大きさは $2\text{mm} \times 2\text{mm}$ である。どちらも中央にマイクロヒータがあり、そのヒータに対し上流と下流にサーモパイルの温接点アレイが対称に配置してある。ヒータと温接点は Si 酸化膜と Si 窒化膜で形成されたおよそ $1\ \mu\text{m}$ のダイアフラム上に形成している。サーモパイルの冷接点は Si の肉厚部に埋め込まれており壁面温度（周囲温度）を計測する。すなわち、サーモパイルは周囲温度との温度差を計測しており、温度そのものは計測していない。中央のヒータを $10 \sim 100$ 程度加温することにより、各

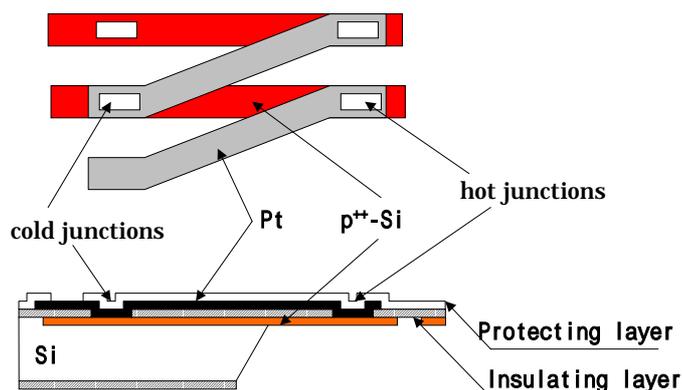


Fig.1 The schematic layout of the thermopiles used as thermal sensor of the MEMS flow sensor.

サーモパイルは数～数十 mV を出力する。下流と上流のサーモパイルの出力差がこのセンサの出力となる。温度を計測する際に自己発熱などがなく、ヒータと平行にほぼ一列に温接点があるため、比較的精度のよい計測ができていているものと思われる。

サーモパイルの構成模式図を Fig. 1 に示す。ダイアフラム膜を挟んで上面に Pt 配線、下面に B を高濃度にドーピングした Si 配線でサーモパイルを構成している。Si 酸化膜と窒化膜は熱伝導を抑えるだけでなく、電気的な絶縁膜の役割も果たしている。温度感度部である温接点・冷接点部ではダイアフラムに穴を開けることでコンタクトを取っている。

ダイアフラム形成は Si ウェハの裏面より異方性エッチングで形成するが、B 高ドーピング Si はエッチング速度が遅く、配線として残すことができる。また、B 高ドーピング Si はノンドーピング Si より抵抗が極端に低いいため、冷接点を Si 肉厚部に形成することができる。ただし、ノンドーピング Si 内に埋め込まれている B ドーピング Si 配線間は、拡散分布があるためにある程度の距離を保つ必要がある。

ヒータに対し上流下流のサーモパイル温接点アレイは、長方形のヒータと平行した方向にほぼ一列に配置しており、その離間距離は $200\ \mu\text{m}$ である。従来のマスフローなどと比較して非常に距離が近いことから、低流速感度が高く、応答性が高いと考えられる。

Photo 2 のセンサは、ヒータに対し流れと垂直な方向にも 2 対サーモパイルを配置している。これは、ガス組成の違いや温度・圧力の違いによる熱伝導の違いを補正するために設けられた。この補正によりヒータ駆動は単純で安定した回路（定電圧回路）で駆動できるようになった⁸⁾。このセンサを利用することで都市ガスなどの場合には組成変化による影響を受けずに質量流量計量ができることを確認した。



Photo3 The photograph of the instantaneous flow meter using the MEMS flow sensor.

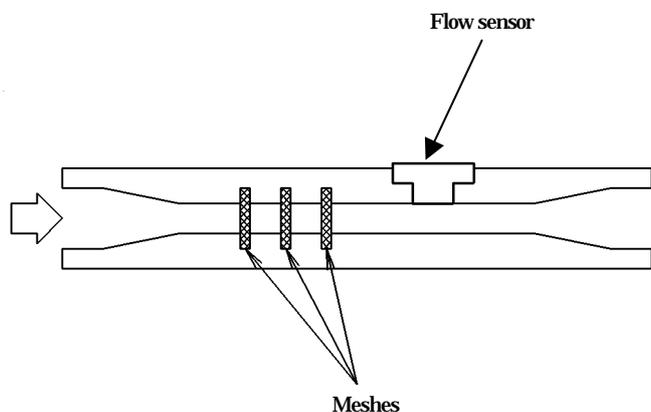


Fig.2 The schematic sectional view of the fluid gas tube in the instantaneous gas flow meter.

3. 瞬時流量計としての応用

まず、Photo 1 のフローセンサの応用例について説明する。Photo 3 に試作した瞬時流量計の写真を示す。Fig. 2 にはフローセンサを配置する流路の構造図を示す。正流のみを想定しているため、フローセンサの上流側にのみ金属メッシュを3枚入れ、流れの偏りを防いでいる。逆流も想定される場合には、下流側にも同等に金属メッシュを入れるほうが良いようである。フローセンサが配置されている個所の流路は18mm×18mmの矩形になっている。フローセンサはその矩形流路の上側壁面の中央に配置されている。図示していないが、流路内に圧力取出し穴を設けており、高速応答の圧力センサ(共和電気: PDV-50GA)を取り付けて、圧力脈動も計測できるようにしている。

Fig.3 には、実験的に脈動を観測した結果を示す。実験は、瞬時流量計を本管内に、脈動発生源を瞬時流量計の上流側の枝管に配置している。

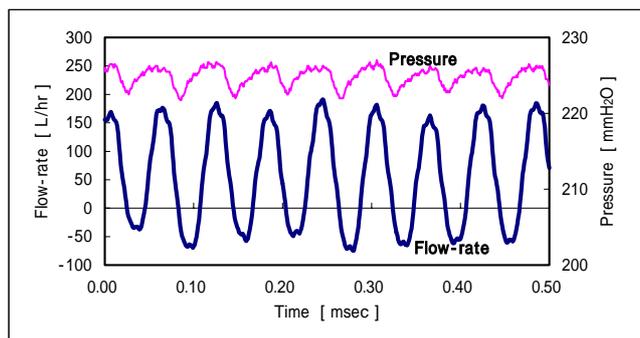


Fig.3 The flow and pressure waveforms measured pulsating flow using the instantaneous gas flow meter.

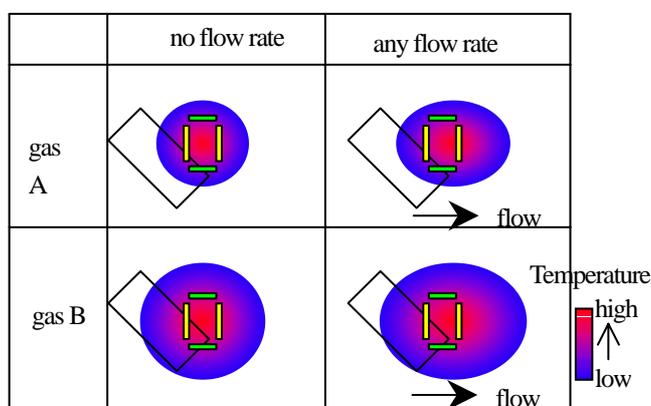


Fig.4 The explanation of the normalization effect using TP3 and TP4 as the temperature distribution monitor.

実験結果を見ると、流速脈動と圧力脈動は、大きな周波数が一致している以外は、お互いに追従しているような波形にはなっていない。いろいろな試験をした結果では、圧力脈動の振幅と流速脈動の振幅は、一概に相関があるとは言えない。これらの結果は、圧力脈動と流速脈動との腹と節とが逆になっていることと、脈動の高調波成分や、曲がり配管などによる共振振動などの状況が非常に複雑に現れるためではないかと推察している。圧力脈動を計測することは比較的容易ではあるが、実際に脈動として問題になるのは流速脈動である。ガスバーナーなどの噴出部で圧力脈動はなくても流速脈動があれば炎は不安定になることは容易に類推できる。このような場合には圧力センサではなく、このような瞬時流量計で流れを解析するほうが良いと思われる。

4. 規格化補正

前章で述べた瞬時流量計はPhoto 1 のセンサを用いているため、ヒータ駆動法により出力が変化する。定電圧駆動など

でも一応の出力は得られるが、安定した出力を得るためには、環境温度に対して一定温度差でヒータ駆動するなどの工夫が必要である。この瞬時流量計は一定温度差駆動を行っている。そのような駆動回路は古くから知られており、回路そのものは難しくはないが、温度環境などの使用条件により回路発振する事があり、使用環境範囲が広い場合などには対応が難しい。また、そうした駆動をしても温度依存性はあり、さらに補正をかける必要もある。Photo 2 のセンサは駆動方法を単純化し、得られる出力を規格化補正することで安定した計測ができる方法を提案したものである。Fig. 4 でその計測原理の概略を説明する。

このセンサはヒータの上流と下流の温度分布の違いを上流と下流の温度センサ（サーモパイル）で計測している。しかし、ガス種が変わるなどで熱伝導度が変わると、温度分布が変化し、同じ流速であるにもかかわらず異なった出力が得られてしまう。そこで、流れとは無関係な方向に温度分布をモニターする温度センサ（サーモパイル）を設けた。こちら側のサーモパイルを TP3, TP4 と名づける。上流側と下流側のサーモパイルをそれぞれ UTP, DTP とすると、出力として使うのは、DTP と UTP の差出力 V_1 と TP3 と TP4 の和出力 V_2 である。

実際にセンサ出力とする値は、 V_1 / V_2 の値である。この

規格化出力をドライエアーに対して詳細に調べた結果、ヒータパワー依存性が小さく定電圧駆動でも遜色なく利用できる、レンジアビリティが広がる、センサ個体差が小さくなる、圧力依存性がない、オフセットドリフトを小さくできる、などの特徴があることがわかった⁸⁾。

5. ガス組成に対する補正

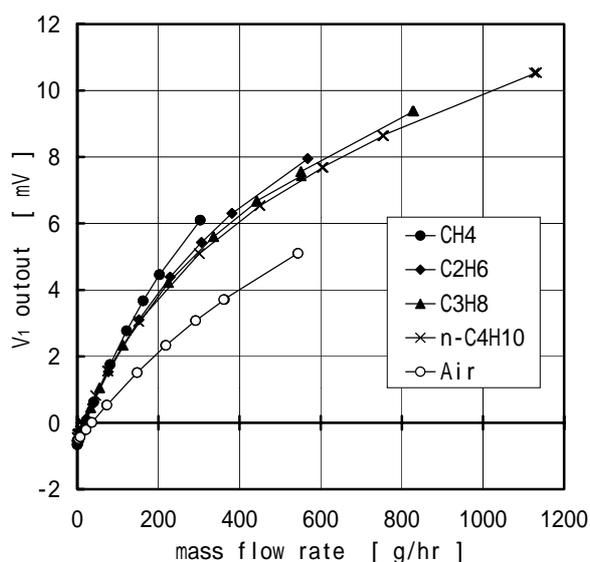
ガス種による違いを調べるため、天然ガスの成分である CH_4 , C_2H_6 , C_3H_8 , $n-C_4H_{10}$, Table 1 の試験ガス 13A-0,1,2, およびドライエアーで流量計測特性を調べた。

Fig.5 は天然ガスの各成分ガスでの流量計測特性を調べた結果である。流量計測特性のガス種依存性をみると、非規格化出力と規格化出力とに差があるとはいえない。ヒータを環境温度に対しての定温度差で駆動したため、センサ出力に規格化の効果があったためであろう。実際、定電圧駆動の場合、非規格化出力の流量計測特性はガス種依存が大きくなるが、規格化出力のそれは変化がない。また、流量 0 での出力を詳細に見ると、非規格化出力より規格化出力のほうがガス種依存が小さくなっているのがわかる。

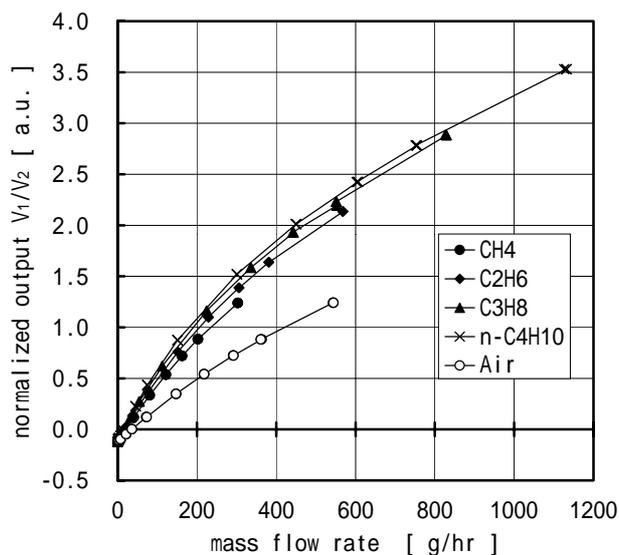
Fig. 6 は、Fig.5 の結果について流量軸をレイノルズ数に

Table 1 The consistence and the density of the various 13A.

	CH_4	C_2H_6	C_3H_8	H_2	Density
13A-0	-	-	-	-	0.8447 g/l
13A-1	85%	0%	15%	0%	0.9122 g/l
13A-2	55%	0%	15%	30%	0.6397 g/l



(a)



(b)

Fig.5 The comparison between the non-normalized and normalized output curves against the mass flow rate of the paraffin gases and air. (a) The non-normalized output V_1 curves. (b) The normalized output V_1/V_2 curves.

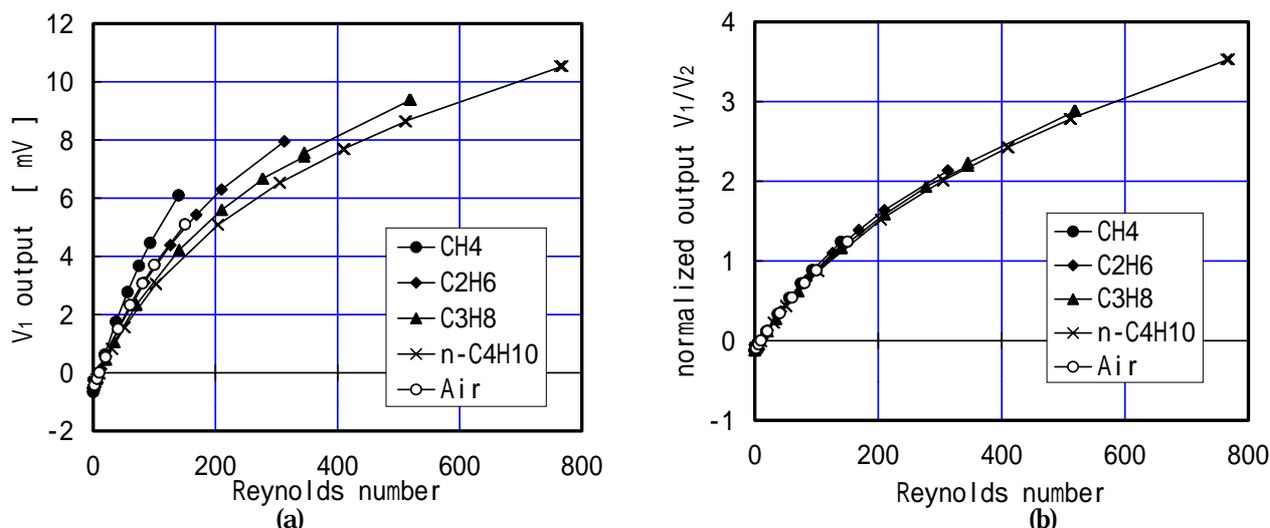


Fig.6 The comparison between the non-normalized and normalized output curves against the Reynolds number of the paraffin gases and air. (a) The non-normalized output V_1 curves. (b) The normalized output V_1/V_2 curves.

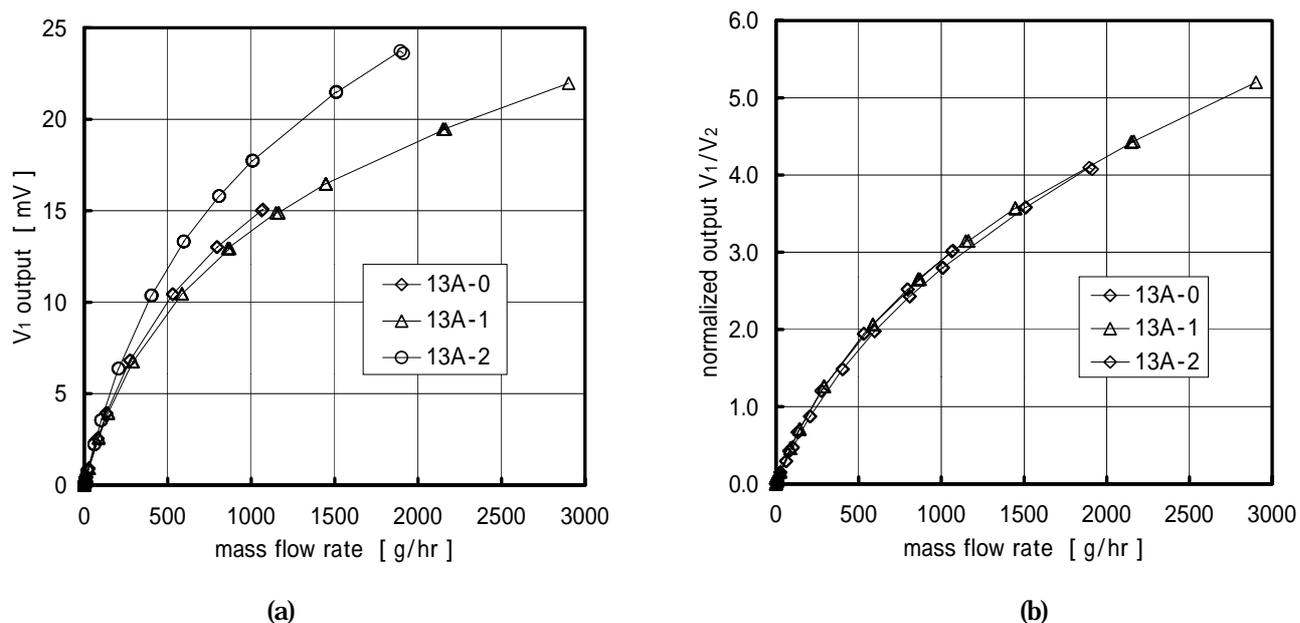


Fig.7 The comparison between the non-normalized and normalized output curves against the mass flow rate of the various 13A gases. (a) The non-normalized output V_1 curves. (b) The normalized output V_1/V_2 curves.

してまとめた結果である。質量流量としてよりもレイノルズ数流量を計測しているとしたほうがより良い結果となっていることがわかる。これはドライエアーの温度依存性の結果と同じである⁸⁾。また、レイノルズ数センサとしてみると、天然ガス系とドライエアーが同一の流量計測特性になっていることも確認された。

Fig.7 には、試験ガス 13A-0,1,2 の流量計測特性を調べた結果を示す。この計測でも定温度差駆動を行っているが、非

規格化出力の場合、H₂ が混入している 13A-2 で他の 2 つのガス 13A-0,1 と異なる流量計測特性を示していることがわかる。しかし、規格化出力では、同じ流量計測特性となっている。これは、熱伝導率の非常に高い H₂ による影響を、規格化により補正しているためと考えられる。厳密にはレイノルズ数で比較する必要があるだろうが、実用上、質量流量計として扱えるレベルであることは確認できた。純 H₂ の流量計測特性はまだ確認していないが、天然ガスとの混合ガスの範

アドバイスをいただきました。ここに深く感謝いたします。

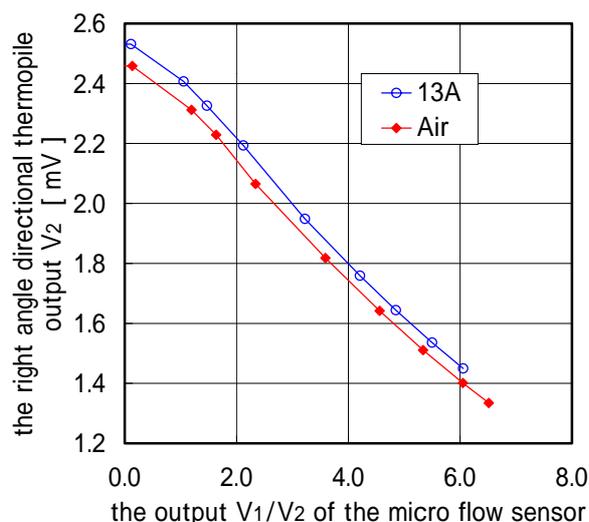


Fig.8 The relationship of the right angle directional thermopile output against the flow rate sensing.

囲では十分質量流量計としての応用は可能であると考えている。

Fig. 8 には、試験ガス 13A とドライエアーの識別の可能性を示している。X 軸にフローセンサの規格化出力を、Y 軸に TP3 の出力電圧を示している。これが、13A とドライエアーで交わらない関係が導かれているため、大雑把なガス種判定ならば可能ではないかと考えている。しかしながら、これらの曲線は温度や圧力に対し依存性があるため、実現には至っていない。ヒータ駆動方式などの検討が必要であると考えている。

6. まとめ

サーモパイル式 MEMS フローセンサを開発した。サーモパイルを温度センサとしているため、自己発熱しないなどの特長がある。MEMS 化したことにより、瞬時流量計を開発できた。さらに、温度分布モニター用にサーモパイルを追加配置し、天然ガスの範囲ではあるが多少の組成変動に依存しない質量流量計として用いることができることを確認した。

7. 謝辞

本発表は、第 1 回・第 2 回流体計測制御シンポジウムでの講演をまとめた内容であり、共同開発でお力添えをいただいた、東京ガス株の温井様、瀬戸様、小林様、田代様には紙面をお借りして感謝の意を表したく存じます。また、その他、試験にご協力いただいた方々にも感謝いたします。また、静岡大学電子工学研究所 渡辺健蔵教授には計測技術に関する

8. 参考文献

- 1) B. W. van Oudheusden and J. H. Huijsing: Integrated silicon flow-direction sensor, *Sensors and Actuators*, 16, 109/119 (1989)
- 2) M. Nagata: Flow sensors, *Meas. Contr.*, 31, 692/694 (1992)
- 3) K. A. A. Makinwa and J. H. Huijsing: Constant power operation of a two-dimensional flow sensor using thermal sigma-delta modulation techniques, in *Proc. IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conf.*, 2001, 1577/1580 (2001)
- 4) 上運天昭司: マイクロフローセンサとその応用, *計測と制御*, 42-12, 998/1004 (2003)
- 5) 山浦, 小田, 小林, 瀬戸: サーモパイル式マイクロフローセンサを用いた瞬時流量計, 第 1 回流体計測制御シンポジウム講演論文集, 21/24 (2000)
- 6) 梶尾, 武藤, 瀬戸: 熱伝導率を用いた都市ガス発熱量の測定, in *Proc. 5th Joint Symposium on Fluid Control and Measurement*, Tokyo, 19/24 (1995)
- 7) 小田, 岡本, 木村, 安齋, 植松, 瀬戸, 小林, 田代, 温井: サーモパイル式フローセンサ, 第 2 回流体計測制御シンポジウム講演論文集, 37/40 (2001)
- 8) S. Oda, M. Anzai, S. Uematsu and K. Watanabe: A Silicon Micromachined Flow Sensor Using Thermopiles for Heat Transfer Measurements, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 52, 1155/1159 (2003)

[著 者 紹 介]

小田 清志



1986 年東京理科大学理学部応用物理学学科卒業。同年東洋曹達株(現東ソー株)入社, セラミクス・個体レーザーシステムの研究開発に従事。93 年矢崎総業株入社, MEMS センサ開発に従事。主にフローセンサの解析, 流量計応用開発を担当。

岡本 康広



1993 年東京農工大学工学部物質生物工学学科大学院卒業。93 年矢崎総業株入社, MEMS センサ開発に従事。主にフローセンサの作製, 解析を担当。

山浦 路明



1990 年名城大学理工学部電気電子工学科卒業。同年矢崎計器(株)入社, ガスメータ開発に従事。主にガス流量の計測技術開発を担当。