Coupled Electro-Thermal Analysis of the Micro Flow Sensor with Control Circuit using SPICE

Shoji Kamiunten Member (Tokyo University of Science and Yamatake Corp., kamiunten-shoji@jp.yamatake.com)

Hidetomo Nagayo Non-member (Tokyo University of Science)

Masahiro Motosuke Non-member (Tokyo University of Science)

Shinji Honami Non-member (Tokyo University of Science, honamis@rs.kagu.tus.ac.jp)

Keywords : flow sensor, MEMS, modeling, SPICE, equivalent thermal circuit, heat transfer

This paper reports an electro-thermal analysis of two-element Micro Flow Sensor (MFS) as shown in Fig.1. MFS is a thermal type fluid mass flow sensor fabricated by utilizing MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) technology. Since MFS has outstanding features such as high sensitivity and rapid response, their applications are increasing with each decade. The measurement principle was investigated for two-element MFS. The output is defined as a temperature difference between upstream and downstream part of electrically connected two heating-sensing elements. The two elements were controlled at constant temperature which is higher than the ambient one by the circuit (see Fig.2). The two-heater MFS, the thermal fluid flow around MFS and the electric circuit were modeled together using a commercial general-purpose circuit simulator based on SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis). The model has a partial three-dimensional lumped thermal network model involved in a two-dimensional one (see Fig.3). Two-dimensional laminar Poiseuille channel flow was assumed as the flow field in the model, and the forced convective heat transfer was calculated by energy balance at each node in the fluid flow.

Fig. 1. Top view of the two-element MFS

R_u : Upstream heating and sensing element

R_d : Downstream heating and sensing element

Fig. 2. Control circuit of the two-element MFS

The tendency on the sensor characteristics was in good agreement between the simulation and experiment as shown in Fig.4, and the complex thermal and electrical behaviors of the MFS were predicted precisely. The calculated temperature distributions around MFS is shown in Fig.5. This simulation can be used as a powerful tool for developing sensor applications and optimization of the sensor design.

Fig. 3. Part of equivalent thermal circuit on Simulator

Fig. 4. Characteristics of sensor output (V_{out})

Fig. 5. Temperature distribution around the two-element MFS

マイクロフローセンサと制御回路の SPICE を用いた 電気-熱 連成解析

正 員 上運天昭司^{*,**} 非会員 永代 秀友^{*}
非会員 元祐 昌廣^{*} 非会員 本阿弥眞治^{*}

Coupled Electro-Thermal Analysis of the Micro Flow Sensor with Control Circuit using SPICE

Shoji Kamiunten^{*,**}, Member, Hidetomo Nagayo^{*}, Non-member,
Masahiro Motosuke^{*}, Non-member, Shinji Honami^{*}, Non-member

This paper reports an electro-thermal analysis of two-element Micro Flow Sensor (MFS). The measurement principle is based on temperature difference between upstream and downstream part of electrically connected heating-sensing elements. The two-heater MFS, the thermal fluid flow around MFS and the electric circuit were modeled together using a commercial general-purpose circuit simulator based on SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis). The model has a partial three-dimensional lumped thermal network model involved in a two-dimensional one. Two-dimensional laminar Poiseuille channel flow was assumed as the flow field in the model, and the forced convective heat transfer was calculated by energy balance at each node in the fluid flow. The tendency on the sensor characteristics was in good agreement between the simulation and experiment.

キーワード：フローセンサ，MEMS，モデル化，SPICE，熱等価回路，伝熱

Keywords : flow sensor, MEMS, modeling, SPICE, equivalent thermal circuit, heat transfer

1. はじめに

現在，様々な種類の流量計が使用されているが，そのほとんどが長い歴史を持つものであり，新しい種類の流量計が登場し市場に定着することは少ない。そういう中で，MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術によって製作されたマイクロフローセンサ（以下，MFS）を用いた気体用流量計は，フィールドでの 10 年以上の実績を経て，燃焼制御，ガス供給管理，医療，省エネ，燃料電池，など様々な分野でその有用性が確認され地位を確立しつつある⁽¹⁾⁽²⁾。この種類の流量計は，高感度，高速応答，小型，低消費電力など MEMS 特有の特長に加え，熱式の計測原理のため質量流量を直接計測できることが大きな強みになっている。ほとんどの流量計が体積流量計測であるのに対し，エネルギー効率に直接関係する質量流量を計測できることは上述

したような様々な分野に適しており，特に従来の流量計では実現が困難であった新規用途への応用例が多くなり，流量最適制御の面などから CO₂ 排出量削減にも貢献すると考えられる。

そこで，今後も期待されるさらに多くの新たなアプリケーション開発を実施する際，例えば，事前の可能性評価，開発・評価方針の設定，回路や流路設計，実施困難な実験の補間，センサデザインの改良などを効率良く行なうために，精度の高い実用的なシミュレータの実現が望まれている。過去にも数値計算による多くの解析例が報告されているが^{(3)~(5)}，実際の回路の動作を含めた電気出力が得られるものではなく，マイクロデバイスの開発初期段階での基礎研究的なものが多い。一方，SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) を用いた電気-熱の連成解析モデルによるシミュレーションが提案され，電気的特性を含めた情報を得られることが報告されている⁽⁶⁾⁽⁷⁾。しかし，これらもセンサの開発の初期段階に関するものであり，センサ周りの流体の熱的挙動を詳細に求めるまでには至っていない。

本稿では 2 素子型の MFS を例題に選び，SPICE をベースとした市販の電気回路シミュレータ内に，MFS，制御回路，

* 東京理科大学 大学院 工学研究科
〒102-0073 東京都千代田区九段北 1-14-6
Tokyo University of Science, Department of Mechanical Engineering

1-14-6 Kudankita, Chiyodaku, Tokyo 102-0073
** (株) 山武 マイクロデバイス部
〒251-8522 神奈川県藤沢市川名 1-12-2
Yamatake Corporation, Micro Device Department
1-12-2 Kawana, Fujisawa, Kanagawa 251-8522

流体についての電気-熱の連成解析モデルを構築し、実験データと比較してその実用性を確認したので報告する。

2. 電気-熱等価回路モデル

〈2・1〉 2 素子型 MFS

(1) 構造 図1に本研究で使用した2素子型MFSのセンサチップ上面の拡大写真を示す。チップサイズは、1辺が1.7mm、厚さ0.5mmである。シリコン基台中央の深さ約200 μ 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 μ mのダイアフラムが作られており、その中央のスリットの両側にそれぞれヒータ兼温度センサが対称に配置され、シリコン基台外周上には周囲温度センサが形成されている。ヒータ兼温度センサおよび周囲温度センサは白金薄膜であり、その抵抗値から温度を測定できる。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、ダイアフラムの多数のスリットは、エッチング液を導入するため、熱絶縁のために設けられている。

(2) 動作方式 2素子型MFSの動作方式としては、一般的に以下の2種類が知られている。その1つは、それぞれのヒータ兼温度センサを別々に、周囲温度センサで測定された周囲温度より一定温度高く制御し、そのとき必要な電力の差を出力とするタイプである。流れが無いとき各電力はほぼ同じになるが、流れに応じて上流側のヒータ兼温度センサの電力が下流側よりも大きくなる。他方は、図2に示すように2つのヒータ兼温度センサを電気的に接続し、1つのヒータ兼温度センサとして周囲温度センサで測定された周囲温度よりある一定温度高く制御し、そのときの上下流側・下流側ヒータ兼温度センサの電圧差（ $\propto$ 温度差 $\propto$ 抵

抗値差）を出力とするタイプである。本稿では、後者の動作方式について検討した。センサ出力 V_{out} は、(1)式で表される。

$$V_{out} = V_d - \frac{(V_u + V_d)}{2} \dots\dots\dots (1)$$

〈2・2〉 熱等価回路モデル（MFS と流体）

電気と熱の間には表1に示すアナロジーが知られており、従来から種々の解析に利用されている。また、熱等価回路のモデル化では系をいくつかの要素に分け、その要素の中心にノードを配置し、ノード間を熱抵抗で接続した抵抗ネットワークモデルと、ノードに要素全体の熱容量を持たせる集中熱容量法が使用され、本研究でもこれらの手法を採用した。

モデル化する領域は、図3に示すようなヒータ兼温度センサとその上流下流側の部分のみに限定し、そのZ方向外側の部分は除外した。また、ダイアフラムの上流下流端部は矩形に簡略化している。なお、X、Y、Zはそれぞれ、流体の流れ方向、流路の高さ方向、スパン方向と定義する。セグメントのZ方向は図4に示すように分割せず、ヒータ兼温度センサの長さ280 μ mに合わせ、モデル化領域内のZ方向温度分布は平均化して取り扱った。X方向については、ヒータ兼温度センサ部分は抵抗パターン2本分を1組として

表1 電気と熱のアナロジー

Table 1. Analogies between electrical and thermal parameter

Electrical parameter	Thermal parameter
Voltage (V)	Temperature difference (K)
Current (A)	Heat flow (W)
Resistance (Ω)	Thermal resistance (K/W)
Capacitance (F)	Thermal capacitance (J/K)

図1 2素子型マイクロフローセンサ
Fig. 1. Top view of the two-element MFS

R_u : Upstream heating and sensing element
 R_d : Downstream heating and sensing element

図2 2素子型MFSの制御回路
Fig. 2. Control circuit of the two-element MFS

図3 ダイアフラムのモデル化領域
Fig. 3. Modeling region of the diaphragm

図4 ダイアフラムのセグメント
Fig. 4. Segments on diaphragm

約 $30\mu\text{m}$ ずつ 5 つのセグメントに分割し、その他の部分もそれとほぼ同じサイズでできるだけ均等になるように分割した。また、流体部分も図 5 に示すように X - Z 方向はダイアフラムのセグメントサイズに合わせ、 Y 方向はダイアフラム近傍では細くなるように分割した。セグメント中央にはノードを配置して、各ノードは(2)式で表される熱抵抗 R_t で接続し、(3)式で表される各セグメントの熱容量 C_t をまとめてノードに与えた。ダイアフラムの熱抵抗は、その部分の構成材質の熱抵抗を構造に合わせて直列・並列に合成して求めた。熱容量も同様にその部分の材質の熱容量を合成した。なお、ダイアフラムの厚さは約 $1\mu\text{m}$ であり、厚さ方向 (Y 方向) の温度勾配は無視でき、一定温度とみなせるため、厚さ方向熱抵抗は省略した。ダイアフラムの Z 方向への熱伝導の影響は大きいため、ダイアフラムの各ノードと室温になると予想される Z 方向にあるスリットの位置と熱抵抗で接続した。流体部分の Z 方向への熱伝導の影響は小さく無視できると考えられるため、熱抵抗を設けず断熱とした。

$$R_t = \frac{(T_2 - T_1)}{Q_{cond}} = \frac{L}{\lambda \cdot S} \quad (2)$$

$$C_t = \rho \cdot C_p \cdot V_m \quad (3)$$

ここで、 T_2 はノード n_2 における温度、 T_1 はノード n_2 の上流側のノード n_1 における温度、 Q_{cond} は n_1 - n_2 間の熱伝導による熱流、 L は n_1 - n_2 間の距離、 λ は熱伝導率、 S はセグメントの n_1 - n_2 方向に垂直な面の断面積、 ρ 密度、 C_p は定圧比熱、 V_m はセグメントの体積である。

流体として空気を選択し、膜温度（発熱部温度と周囲温度の平均値）における熱物性値を使用した。また、窒化シリコンや白金の薄膜の熱物性値は、膜厚やプロセス等に依存することもあり文献から得ることは難しいため、バルクの値を使用した。なお、窒化シリコンの熱伝導率に関してはバルクでも色々な値になり、さらに薄膜に関しては近年盛んに研究されているが、バルク値より 1 桁程度小さいことが報告されている^{(8)~(10)}。窒化シリコンの熱伝導率は、シミュレーション結果への影響が大きい最も重要なパラメー

図 5 X - Y 面のセグメント

Fig. 5. Segments on X , Y -direction

タであると考えられるため、流れの速度が零の時に計算結果が実験結果と一致するように決定した。

流体中の伝熱は、以下のように定義した。まず、ヒータ兼温度センサの温度は、通常の使用状態では 150°C 程度以下なので、熱放射は無視できる。また、MFS の寸法は非常に小さくグラスホフ数 Gr とプラントル数 Pr の積であるレイリー数 $Ra (=Gr \cdot Pr)$ は 0.2 程度であり、自然対流が発生する目安である 1700 よりも 4 桁も小さいため、自然対流は無視できる。さらに、キャビティ内に流れが入り込まないようにダイアフラムのスリットを細くしてあるため、キャビティ内の流れは無視できる⁽¹¹⁾。よって、流体中の伝熱は、流路内流体部分では熱伝導と強制対流熱伝達、キャビティ内流体部分では熱伝導のみになる。2 次元平行平板間の層流 (2 次元ポワズイユ流れ) において、 X 方向は熱伝導と強制対流熱伝達、 Y 方向は熱伝導のみ、ダイアフラム表面と流体間の伝熱は熱伝導、各ノードにおける流速は(5)式⁽¹²⁾で与えられる。前述した仮定のもとで、強制対流熱伝達 Q_{conv} は各ノードにおけるエネルギー収支から(4)式で表される。

$$Q_{conv} = U \cdot S_{YZ} \cdot \rho \cdot C_p \cdot (T_2 - T_1) \quad (4)$$

ここで、 U はノードにおける流速、 S_{YZ} はセグメントの Y - Z 面の断面積である。

図 6 シミュレータに作成した熱等価回路の一部

Fig. 6. Part of equivalent thermal circuit on Simulator

図 7 ヒータ兼温度センサの電気回路モデル

Fig. 7. Heating and sensing element model for electrical circuit

$$U = 6 \cdot U_m \cdot \left(\frac{y}{h} - \left(\frac{y}{h} \right)^2 \right) \cdot \frac{1}{C_z} \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 U_m は流路断面の平均流速、 y はダイアフラムからの Y 方向距離、 h は流路高さ、 C_z は流路の2次元性からのずれを補正するための係数であり、(6)式で表せる⁽¹³⁾。

$$C_z = \left[1 - \frac{192 \cdot h}{\pi^5 \cdot z} \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \frac{1}{n^5} \tanh \left(\frac{n \cdot \pi \cdot z}{2 \cdot h} \right) \right] \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 h は流路高さ、 z は流路の幅である。

図6にシミュレータの編集画面上で作成した熱等価回路の一部を示す。強制対流熱伝達は、(4)式を代入した非線形従属電流源で表される。また、分割されたヒータ兼温度センサの発熱も、発生する電力の式を代入した非線形従属電流源で表される。

〈2・3〉 電気回路モデル（制御回路） 電気回路は、実験で使用した図2の制御回路をそのままシミュレータに移植し、それぞれ5つに分割されたヒータ兼温度センサ $R_{u1} \sim R_{u5}, R_{d1} \sim R_{d5}$ とそのリード部分 R_{uL}, R_{dL} （非発熱部、熱等価回路ではモデル領域外）は、図7に示すようにベース抵抗 R_{20} と非線形従属電圧源 V_i からなる等価回路で表した。ベース抵抗 R_{20} は分割された各抵抗の20℃における抵抗値、 V_i は R_{20} の温度依存抵抗分を表す等価電圧であり(7)式が代入された非線形従属電圧源で表される。なお、周囲温度センサ R_r も同様に R_{20} と V_i で表されている。

$$V_i = R_{20} \cdot \left(\alpha \cdot (T - 20) + \beta \cdot (T - 20)^2 \right) \cdot I \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 α, β はそれぞれ1次および2次抵抗温度係数、 T はノードの温度、 I は R_{20} に流れる電流である。

3. 実験装置

2素子型MFSの測定は、図8に示す長さ200mm、幅30mm、高さ2mmのマイクロセンシング風洞で行われた。流路幅と高さの比は15 ($C_z=0.96$)であり、2次元平行平板間の十分

図8 実験用小型風洞
Fig. 8. Schematic view of wind tunnel

発達した層流（2次元ポワズイユ流れ）が得られている。また、MFSチップの上面が、流路壁面と同じ位置に段差無く取り付けられるようにした。

4. 結果と考察

上述したモデルによる計算および実験は、周囲温度25℃で、ヒータ兼温度センサの平均温度が周囲温度より60℃高くなるように制御した状態で実施した。まず、流れがない状態におけるヒータ兼温度センサの電力の計算値が実験値と一致するように、ダイアフラムの材質である窒化シリコンの熱伝導率を4.1W/m・Kに決定した。

図9には、流路断面積で平均した流速（以下平均流速と表現する）に対する上流下流のヒータ兼温度センサの合計電力についての計算値と実験値の比較を示す。図10には、平均流速に対する上流下流のヒータ兼温度センサの電圧についての計算値と実験値の比較を示す。図11には、平均流速に対するセンサ出力電圧 V_{out} の計算値と実験値の比較を示す。図12には、平均流速に対する上流下流のヒータ兼温度センサの、抵抗値から算出された平均温度の変化についての計算値と実験値の比較を示す。図13には、平均流速に対するダイアフラムの X 方向温度分布の変化についての計算値を示す。図14は図13において、ダイアフラム中央部の上流下流ヒータ兼温度センサ部分を拡大したものを示す。図15には、平均流速0, 0.5, 5m/sにおける流体の温度

図9 R_u, R_d 合計電力の流速特性
Fig. 9. Characteristics of total heating power on R_u and R_d

図10 V_u, V_d の流速特性
Fig. 10. Characteristics of V_u and V_d

図 11 センサ出力 V_{out} の流速特性
Fig. 11. Characteristics of sensor output (V_{out})

図 12 流速に対する R_u , R_d 平均温度変化
Fig. 12. Temperature variation of R_u and R_d vs. Mean velocity

図 13 流速に対するダイアフラム X 方向の温度分布変化
Fig. 13. Temperature distribution of diaphragm vs. Mean velocity

分布についての計算値を示す。なお、図 9～図 15 のグラフデータの計算時間は、Pentium4 (2.53GHz) クラスの PC でいずれも 1～2 分程度以下である。

本研究で採用した窒化シリコンの熱伝導率 $4.1\text{W/m}\cdot\text{K}$ という数値は、熱物性データベース⁽¹⁰⁾に収録されている薄膜のデータ $1\sim 3\text{W/m}\cdot\text{K}$ と比べて妥当であると考えられ、大胆な簡素化を行なったにもかかわらず本モデルの熱抵抗回路

図 14 流速に対する R_u , R_d 部の温度分布変化
Fig. 14. Temperature distribution of R_u and R_d area vs. Mean velocity

(a) $U_m = 0$ [m/s]

(b) $U_m = 0.5$ [m/s]

(c) $U_m = 5.0$ [m/s]

図 15 2 素子型 MFS 周りの温度分布

Fig. 15. Temperature distribution around the two-element

がほぼ適切に構成されていることが分かる。ただし、上記熱物性データベース⁽¹⁰⁾に収録されている窒化シリコン薄膜の熱伝導率は、膜厚方向の測定値であるため、更なる調査

が必要である。

図9～図12の結果でも、計算値と実験値の傾向がほぼ一致しており、充分実用レベルに達していると思われるが、計算値の方が低流速での出力が高く、高流速で低くなっている点は今後検討すべき課題である。MFS周りのわずかな数百 μm の範囲の気体中では約70℃以上の温度差が存在し、空気の熱伝導率 λ 、密度 ρ 、粘性係数 μ はそれぞれ20%程度変化する。 λ 、 ρ の温度依存性によるセンサ出力への影響については無視できることを確認済みであるが、壁面流速勾配への影響が考えられる ρ 、 μ の温度依存性については、特に低流速時に高温部で壁面流速勾配が緩やかになりセンサ出力の低下が予想されるため、今後の調査が必要である。

図13でX軸の0.7mmと1.1mm付近で温度が急激に下がっているのは、ダイアフラムのそれらの位置にスリット、つまり、空気層があるためであり、この断熱構造が有効に機能していることが分かる。

5. まとめ

2素子型MFSの制御回路、流体を含めた電気・熱の連成解析モデルを電気回路シミュレータ内に構築して計算値と実験値の比較を行なった結果、その傾向に非常に良い一致が得られた。また、電気的な特性やセンサ周りの流体温度などに関する詳細な情報を得られることも確認できた。このモデル化およびシミュレーション手法は、3素子型MFSや他のMEMSデバイスの解析へも応用可能であり、動特性や他の流体についての解析も可能である。今後、このツールによりMFSやその他のMEMSデバイスに関する研究開発をさらに効率良く進めることが可能と思われる。

(平成19年4月25日受付、平成19年9月3日再受付)

文 献

- (1) 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，Vol.42, No.12, pp.998-1004 (2003)
- (2) K. Otakane, K. Sakai, and M. Seto : "Development of the Thermal Flow Meter", SICE Annual conference, Fukui, pp.2031-2034 (2003)
- (3) F. Mayer, G. Salis, J. Funk, O. Paul, and H. Baltes : "Scaling of Thermal CMOS Gas Flow Microsensors", Proc. IEEE MEMS, pp.126-131 (1996)
- (4) T. Yoshino, Y. Suzuki, N. Kasagi, and S. Kamiunten : "Optimum Design of Micro Thermal Flow Sensor and Its Evaluation in Wall Shear Stress Measurement", Proc. IEEE MEMS, Kyoto, pp.193-196 (2003)
- (5) M. Yoshida, K. Toda, M. Yamamoto, S. Kamiunten, and S. Honami : "Numerical Study on Thermal and Fluid Flow Around the New Type of Micro Flow Sensor", FEDSM2003-45068, Proc. ASME-JSME Fluids Engineering Division Summer Meeting, Honolulu (2003)
- (6) F. J. Auerbach, G. Meindres, R. Muller, and G. J. E. Scheller : "Simulation of the thermal behavior of thermal flow sensors by equivalent electrical circuits", Sensors and Actuators A, Vol.41-42, No.1, pp.275-278 (1994)
- (7) N. R. Swart and A. Nathan : "Coupled Electrothermal Modeling of Microheaters Using SPICE", IEEE Trans. Electron Devices, Vol.41 No.6, pp.920-925 (1994)
- (8) S. -M. Lee and D. G. Cahill : "Heat transport in thin dielectric films", J. Appl. Phys., Vol.81, No.6, pp.2590-2595 (1997)
- (9) B. L. Zink, B. Revaz, J. J. Cherry, and F. Hellman : "Measurement of thermal conductivity of thin films with a Si-N membrane-based microcalorimeter", Rev. Sci. Instrum., Vol.76, 024901 (2005)
- (10) The database on NMIJ (National Metrology Institute of Japan) website: http://www.nmij.jp/kosei/database_en.html
- (11) H. Nakajima, K. Inoue, Y. Nakashima, S. Kamiunten, M. Yamamoto, and S. Honami : "Behavior of Thermal and Fluid Flow around a Micro-Sensor", Trans. JSME, pp.589-594 (2001-3) (in Japanese)
中嶋秀成・井上厚助・中島祐介・上運天昭司・山本 誠・本阿弥眞治：「マイクロセンサ周りの熱と流れの挙動」，日本機械学会論文集 (B 編), 67, 655, pp.589-594 (2001-3)
- (12) 須藤浩三・長谷川富市・白樫正高：「流体の力学」，p.81，コロナ社 (2001)
- (13) JSME Mechanical Engineers' Handbook, A. Fundamentals, A5 Fluid Mechanics, p.76 (in Japanese)
日本機械学会編 機械工学便覧 基礎編 A5 流体工学, p.76

上運天 昭 司

(正員) 1984年3月電気通信大学電気通信学部材料科学科卒業。同年、山武ハネウエル(株)(現在、(株)山武)入社。流体に関するMEMSセンサ、流体計測、流量計等の研究開発に従事。現在、マイクロデバイス部研究開発グループ主任研究員。2005年4月から東京理科大学大学院工学研究科機械工学専攻博士後期課程に在籍。日本機械学会の会員。

永 代 秀 友

(非会員) 2007年3月東京理科大学工学部機械工学科卒業。同年4月、同大学大学院工学研究科機械工学専攻修士課程入学。現在マイクロデバイスの熱流体特性の評価に関する研究に従事。

元 祐 昌 廣

(非会員) 2001年3月慶應義塾大学理工学部システムデザイン工学科卒業。2006年3月同大学大学院理工学研究科総合デザイン工学専攻修了。博士(工学)。同年4月東京理科大学工学部助手、2007年4月より助教。マイクロ熱流体工学、主に光センシング技術開発に従事。日本機械学会、日本熱物性学会員。

本阿弥 眞 治

(非会員) 1967年3月慶應義塾大学工学部機械工学科卒業、同大学院工学研究科修士課程、博士課程を経て、1974年4月東京理科大学工学部専任講師、1987年4月教授。ガスタービンエンジン要素ならびにマイクロ熱流体工学の研究に従事。工学博士。日本機械学会フェロー、米国機械学会、米国航空宇宙学会会員。