マイクロセンサ周りの熱と流れの挙動*
(拡大模型実験と数値解析)中嶋 秀成^{*1}, 井上 厚助^{*2}, 中島 祐介^{*3}
上運天 昭司^{*4}, 山本 誠^{*5}, 本阿弥 眞治^{*6}Behavior of Thermal and Fluid Flow around a Micro-Sensor
(The Experiment by Enlarged Model and Numerical Analysis)Hideaki NAKAJIMA, Kosuke INOUE, Yusuke NAKASHIMA,
Shoji KAMIUNTEN, Makoto YAMAMOTO and Shinji HONAMI^{*6}^{*6} Department of Mechanical Engineering, Science University of Tokyo,
1-3 Kagurazaka, Shinjuku-ku, Tokyo, 162-8601 Japan

Micro-Flow-Sensor (MFS) equipped with a heater at its center can measure temperature difference up and downstream of the heater. MFS is a suitable sensor for determining separation point, since it can detect flow speed and direction near the wall. The sensor is so small that it is difficult to measure directly heat and fluid flow around it by other instruments. In the stage of micro sensor development the mutual guarantee is needed between the experiment of an enlarged sensor model and its numerical analysis. In this paper, a problem of micro sensor is described from a point of micro experimental fluid dynamics by numerical analysis with convection heat transfer around the micro sensor and experiment of the enlarged MFS model.

Key Words: Flow Measurements, Current Meter, Heat Transfer, Numerical Analysis, Micro Sensor

1. 緒 言

半導体製造技術を応用した熱流体計測用マイクロセンサの開発・実用化が進められている。マイクロフローセンサ(以下MFS)もそのようなセンサの一つであり、従来の熱流体計測だけではなく、近年関心が高まっているはく離制御のためのMEMS応用という観点からも期待が寄せられているものである。MFSは、センサ中央にヒータを設け、ヒータ両サイドにある二つの温度センサの温度差出力電圧を測定することにより、壁面近傍における流体の流速と方向を同時計測できるように設計されている。MFSの開発は、センササイズが1mmオーダと非常に小さいため、試作と実験の繰返しにより経験的に行われてきたが、センサ特性の改善および詳細な把握と開発、効率化のために、MFS周りの熱流動の挙動説明が急務となっている⁽¹⁾⁽²⁾。

本研究では、MFSのチップ高さによる段差の影響、ヒータ下部に設けられたキャビティの影響、MFSの主流方向に対する設置形態の影響を明らかにすることを目的として行われたものである。段差およびキャビティの影響に関しては、二次元拡大模型実験と、センサ周りの対流熱伝達およびセンサ内部の熱伝導を考慮した二次元数値解析が、設置形態の影響に関しては三次元拡大模型実験が実施された。本研究により、マイクロセンサ周りの熱と流れの挙動が初めて明らかにされる。

2. 実験装置および実験方法

2.1 二次元拡大模型 図1に示すように流路測定部は高さ20mm、幅400mmの矩形断面でアスペクト比20である。

MFS拡大模型は、スパン方向長さ360mm、流れ方向長さ45mmのベークライト積層板に、熱伝導の影響を少なくするため、スパン方向長さ220mm、流れ方向長さ38.8mmのポリプロピレンフォーム[熱伝導率0.05W/(m・K)、古河電工製]を組み込み、流路に埋め込まれている。ポリプロピレンフォーム上には中心から2.5mm間隔に15個の熱電対が埋め込まれ、模型中央に幅0.4mm、厚さ0.05mm、抵抗率59.5

* 原稿受付 2000年5月19日。

^{*1} 学生員, 東京理科大学大学院 (〒162-8601 東京都新宿区神楽坂1-3)。^{*2} 東京理科大学大学院。^{*3} 東京理科大学。^{*4} 正員, (株)山武 (〒251-8522 藤沢市川名1-12-2)。^{*5} 正員, 東京理科大学工学部。

E-mail: honamis@rs.kagu.sut.ac.jp

Fig. 1 Experimental setup for two-dimensional inspection (Dimensions in mm)

Fig. 2 Enlarged model of MFS for three-dimensional inspection (Dimensions in mm)

Ω/m のニクロムヒータを張り付けている。ヒータ温度は流体温度より一定温度 (40°C) だけ高くなるように設定され、拡大模型と壁面との段差 h が 0, 1, 2, 3 mm について実験を行った。

2.2 三次元拡大模型 MFS 拡大模型は、一辺 $L=30\text{ mm}$ 、厚さ 3 mm の正方形ポリプロピレンフォームに感温液晶を塗布し、設置される。模型上には中心から流れ方向 2.5 mm 間隔に 11 個の熱電対が埋め込まれ、模型中央に幅 0.4 mm、厚さ 0.05 mm、長さ 20 mm のニクロムヒータが設置してある。ヒータ温度は流体温度より一定温度 (40°C) だけ高くなるようにヒータコントローラで PID 制御される。図 2 のように模型を流れに対し正方形とひし形に設置した場合について実験を行い、設置形態の違いによる流れ場の変化を調べる。なお、ニクロムヒータをつねにスパン方向に設置する。

感温液晶による色相変化が、CCD カメラを用いてビデオに録画され、画像はフレームグラバボード (Sony, MPU-F 100 A) を用いて RGB データとして記録される。またデータ取込み時のノイズを除去するため、メディアンフィルタ処理を施す。照明には防熱フィルタ内蔵のリングライトを用い、照明による熱の影響を防いでいる。

2.3 ニューラルネットワークによる色相-温度変換

感温液晶の色相変化を定量的に温度に変換するためにニューラルネットワークを用いた⁽³⁾。壁面の熱電対の温度を評価基準温度 T_R とし、RGB データと壁面

Fig. 3 Neural Network Structure

Fig. 4 Network output T_N versus temperature

温度との対応をニューラルネットワークにより行う。RGB 値の入力には色相の情報のみを利用するため、次式により求めた無次元の rgb 規格値とした。

$$r = R/(R+G+B), \quad g = G/(R+G+B), \\ b = B/(R+G+B) \quad \dots\dots\dots (1)$$

図 3 に、本研究のニューラルネットワークの構造を示す。ニューロンの入力応答関数 f にシグモイド関数を採用する。

$$\xi_j = f(s_j) = \frac{1}{1 + \exp(-as_j)}, \quad s_j = \sum_{i=1}^3 W_{ji}x_i + c_j \\ \dots\dots\dots (2)$$

本研究では評価基準温度 T_R の範囲を $27 \sim 39.5^\circ\text{C}$ に限り、 0.5°C 間隔で与えた。教師信号 T_R に対するネットワーク出力信号 T_N の二乗誤差が最小になるようバックプロパゲーション法により 50 000 回学習を行った。その結果を図 4 に示す。本研究では正方形とひし形とも平均誤差 0.1°C の精度まで一致させた。

3. 数値解析

二次元非圧縮性層流を仮定し、支配方程式として連続の式 (3)、ナビエ-ストークス方程式 (4) (5)、エネルギー式 (6) を使用した。ここで、 U, V はそれぞれ x, y 方向速度、 P は圧力、 T は温度、 ν は動粘性係数、 β は体膨張係数、 α は熱拡散率を表す。MAC 法により数値計算を行い、対流項には三次精度風上差分の河村スキーム、その他の項に二次精度中心差分を用いた。温度差による浮力を伴うため、ナビエ-ストークス方程式の浮力項については Boussinesq 近似を用い

Fig. 5 Computational domain for height difference inspection

(a) All domain

(b) Computational MFS shape with cavity

Fig. 6 Computational domain for cavity inspection

る。無次元温度は式(7)で定義し、 T_h をヒータ温度、 T_0 を流入温度とする。

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{DU}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right) \quad (4)$$

$$\frac{DV}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right) + g\beta(T - T_0) \quad (5)$$

$$\frac{DT}{Dt} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (6)$$

$$T^* = \frac{T - T_0}{T_h - T_0} \quad (7)$$

さらに、MFS内部の熱伝導を考慮するため二次元熱伝導方程式を用いる。境界条件は壁面上で滑りなし、温度については、MFS部と流体との境界で熱の移動を考慮し、熱流束を一致させる。それ以外は断熱壁とした。段差の影響を検証するために用いた計算領域を図5に示す。格子数は流れ方向に133、高さ方向に66用いる。ヒータ部は点熱源1点で温度一定とする。またキャビティの影響を検証する際の全計算領域を図6(a)に、MFS部を図6(b)に示す。キャビティ部と主流部をつなぐためのスリットが4箇所ある。これは実寸MFSに対し高さ方向に6倍、流れ方向に12.5倍の拡大率である。格子数は流れ方向に287、高さ方向に140用いる。その際ヒータ部は幅0.4mm、厚さ0.05mmを点熱源5×4点で温度一定としている。レイノルズ数は、代表長さを段差3mm、代表速度を流

Fig. 7 Effect of height difference ($X/L=0.06, -0.06$ Experiment) Fig. 8 Effect of distance between heater and thermocouple ($h/H=0$ Experiment)

入速度とする。

4. 結果および考察

4.1 二次元拡大模型

4.1.1 段差の影響 実験結果を図7から図9、数値解析結果を図10、11に示す。段差の影響を図7に示す。ヒータから $X/L=0.06$ 離れた位置の上流側、下流側における温度差の特性曲線を表す。全体的に、レイノルズ数が増すにつれ、式(7)の無次元温度差 ΔT^* は増加するが、途中から減少に転じる。温度差 ΔT^* の減少が起こり始めるレイノルズ数は段差により異なり、段差が低くなるにつれ、より高レイノルズ数まで温度差 ΔT^* の減少が起こらず、センサとしての使用範囲が広がることが明らかとなった。

図8に $h/H=0$ での熱電対の位置を変えた場合の特性曲線を示す。ヒータに最も近い $X/L=0.06$ では $Re=940$ 付近で温度差 ΔT^* が減少し始めるのに対し、 $X/L=0.11$ では $Re=560$ 付近で減少し始める。これは段差零の結果なので、段差によるステップ前縁コーナー部のはく離の影響ではなく別の原因と思われる。

図9に $h/H=0$ でのヒータ上流側と下流側の温度

分布を示す。レイノルズ数の増加に伴って拡大模型表面が冷却されるため、温度が低くなり、ヒータに近いほうが熱の供給が多いため冷却しにくくなり、上流側と下流側とでは上流側のほうが早く冷却される。上流側の温度は、より高レイノルズ数になるほど、冷却されにくくなり、一定値へ漸近する傾向となる。それに対し、下流側の温度はいつそう冷却されるため、下流側と上流側の温度差は減少する。つまり温度差の減少の原因は、上流側の冷却によるものと考えられる。温度センサがヒータから離れるほど上流側に熱の供給が少なくなり、より低レイノルズ数で温度差の減少が起こる。段差零でも温度差の減少が生じるのはこのためである。また、段差が高くなるとより低レイノルズ数で温度差が減少するが、これは段差が高くなるほど、閉そく効果が強くなり、MFS 上面付近の流速が増し、冷却がより進むためと思われる。

図 10 に数値解析における等温線図を示す。MFS

Fig. 9 Temperature distribution on enlarged model of MFS ($h/H=0$ Experiment)

Fig. 10 Temperature contours per non-dimensional 0.03 ($Re=560$)

Fig. 11 Effect of distance between heater and thermocouple ($h/H=0.15$ Calculation)

内部の熱伝導を考慮しているため、拡大模型内部まで熱が伝わる。MFS 前縁コーナ部に発生するはく離と、 ΔT^* との関連を検討するため、数値解析によって得られた $h/H=0.15$ における特性曲線を図 11 に示す。前縁コーナ部でははく離は計算上 $Re=560$ 以降で発生したが、図 11 から、それとは無関係に $X/L=0.03$ では $Re=740$, $X/L=0.07$ では $Re=360$, $X/L=0.10$ では $Re=50$ で温度差の減少が生じている。つまり温度差の減少と前縁コーナ部のはく離とは直接関係しないことがわかる。

4.1.2 キャビティの影響 図 12 に数値解析による速度ベクトル、キャビティ内速度ベクトル、等温線分布をそれぞれ示す。図 12(a) からわかるようにキャビティ内の速度は非常に小さく、最大でも主流の 0.05% である。また等温線図から、キャビティ内は流速が遅いため対流の影響をあまり受けていないことがわかる。

本数値解析は、拡大模型のヒータ部を 1 点の点熱源としたため、加える熱量が実験より小さいが、実験の傾向と一致している。

図 13 に壁面せん断応力分布を示す。実験値は式 (8) から、計算値は式 (9) から求めた値である。

$$\tau_w = -\frac{H}{2} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (8)$$

$$\tau_w = \mu \frac{\partial u}{\partial y} \quad (9)$$

壁面せん断応力は拡大模型に近づくにつれ減少し、コーナ渦の逆流により負になり、前後縁コーナ、スリット部で高く、下流では再付着による逆流のため再び負

(a) Velocity vectors

(b) Velocity vectors in cavity

(c) Temperature contours per non-dimensional 0.03

Fig. 12 Flow field around MFS ($Re=135$ Calculation)

Fig. 13 Shear stress ($Re=506$)

Fig. 14 Shear stress with Reynolds number

になり、再付着点以降で正に戻る。しかし、キャビティの有無による違いはほとんど認められなかった。

図 14 にレイノルズ数に対する壁面せん断応力を示す。基準部と MFS 上部の壁面せん断応力は、レイノルズ数の増加にほぼ比例することがわかる。MFS は使用する際には必ず検定を行わなければならない。図 14 からわかるように、検定に用いる基準部の壁面せん断応力と MFS 上の壁面せん断応力とはほぼ比例関係にあるので、妥当な検定方法であるといえる。

拡大模型上のヌッセルト数分布を図 15 に示す。ヌッセルト数は代表長さを段差 $h=3\text{ mm}$ とし基準温度を流入温度 T_0 とした。

$$Nu = - \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_w \frac{h}{T_w - T_0} \dots\dots\dots (10)$$

符号は拡大模型から熱が出る場合を正、拡大模型に熱が入る場合を負とする。コーナ部とスリット部では壁面せん断応力が大きいので温度こう配が大きくなり、ヌッセルト数も大きくなる。またヌッセルト数が零の場合は、断熱を意味するので、キャビティありはなしよりキャビティ上部でヌッセルト数が小さく、断熱に

Fig. 15 Nusselt number ($Re=135$)

Fig. 16 Characteristic curve ($X/L=0.083, -0.083$)

近くなり、熱が逃げにくく、流体温度を反映しやすいことがわかる。

図 16 に温度差の特性曲線を示す。実験、数値解析のキャビティの有無にかかわらず、定性的に同様な特性曲線を示す。キャビティをもたない本実験の拡大模型でも実寸 MFS の静特性を把握することが可能である。

キャビティなしと実験値が異なるのは、ヒータを点熱源としているので、熱量が異なるためである。キャビティありでは断熱効度により温度差が大きくなり、また、熱伝導による熱の移動が起りにくいので、応答性は向上することが考えられる。

4・2 三次元模型による設置の影響の検証

図 17 に感温液晶による拡大模型上の温度分布を正方形、ひし形それぞれについて示す。数値の表示は無次元温度を示す。流れがない場合には上流、下流でほぼ対称となっており、レイノルズ数が増加するにつれ上流側の冷却がとらえられている。また、ひし形の上流側の一部が、正方形の上流側より温度が低く、ヒータ近傍で

Fig. 17 Temperature of enlarged model by liquid crystal

Fig. 18 Electric power supplied to MFS

は上流側で正方形よりひし形の温度が高くなる。これは正方形とひし形では流れ場が異なり、ひし形前縁で速度こう配が急になり熱が逃げ、冷却されるためであると思われる。しかしコントローラにより温度差が流体温度より 40°C 高くなるよう制御されているため、失われた熱を補うように電力が供給される。供給電力を図 18 に示す。レイノルズ数の増加とともに冷却されるため、正方形、ひし形とも供給電力が増加するが、ひし形のほうが約 20% 大きい。このためヒータ近傍

Fig. 19 Characteristic curve ($X/L=0.083, -0.083$)

では正方形よりひし形のほうの温度が高くなっていると考えられる。よって、ひし形の上流側では、先端近くで温度が低く、ヒータ近傍で温度が高い温度こう配の急な温度場となっている。

また本研究は、拡大模型上の温度場を面情報として把握しているの、将来、実寸 MFS に対し周囲温度センサの設置位置や温度センサの固定位置の最適化などへの利用が可能である。

図 19 に温度差の特性曲線を示す。レイノルズ数の増加に伴い温度差が増加している。正方形、ひし形では温度場、速度場が異なるが、本研究のレイノルズ数範囲内ではほぼ同様な傾向を示していることがわかる。

5. 結 言

本研究により以下のような結論を得た。

- (1) 温度差 ΔT^* の減少は MFS 前縁コーナ部のはく離と直接的な関連がない。
- (2) MFS の温度センサがヒータに近いほうが、より高レイノルズ数まで温度差の減少が起こらないため、測定可能なレイノルズ数範囲が広がる。
- (3) 拡大模型実験、数値解析は、キャビティの有無にかかわらず、静特性として定性的に同様な特性曲線を与える。したがって、キャビティをもたない拡大模型でも、実寸 MFS の静特性を把握することが十分可能である。
- (4) ニューラルネットワークによる感温液晶の色相-温度変換を行い、拡大模型上の温度場を定量的に把握できた。

文 献

- (1) 太田照和・ほか 2 名, 機論, 64-617, B (1998), 226-231.
- (2) Thomas, T., ほか 6 名, *Transducers. Natl. Conf.*, (1997), 315-318.
- (3) 中部主敬・ほか 5 名, 機論, 64-619, B (1998), 829-836.