

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 1 日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25390047

研究課題名(和文)非定常熱流体解析に基づいた熱流体を利用した3軸方向加速度センサーの設計開発

研究課題名(英文) Design and development of MEMS-based thermal triple-axis accelerometer by computer simulation of unsteady thermofluid motion

研究代表者

大上 芳文(Ogami, Yoshifumi)

立命館大学・理工学部・教授

研究者番号：30203722

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：熱流体の慣性を利用して3軸方向の加速度を検知する加速度センサーの設計開発を行った。まず3軸方向の加速度が干渉しないで測定出来る温度センサーの位置を明らかにした。次にヒーターの形状を円形、4分割型、点型とし、それぞれの測定性能を明らかにした。マクロスケールでの解析、およびサイズを20倍にした装置を作成し、加速度に比例する温度差を検知することができ作動原理の正しさが確認された。最後に非定常状態の応答性を解析し、実用的な測定を行うための周波数の上限を明らかにすることができた。

以上のように3軸方向加速度センサーの設計は行えたので、次はMEMS技術を用いて製作、実験を行う段階に到達したと言える。

研究成果の概要(英文)：A microelectromechanical system-based thermal triple-axis accelerometer, which can detect triaxial accelerations by utilizing the buoyancy of thermofluid, was developed via computer simulations.

First, the optimal positions of thermometers were determined. Second, the measurement performances of a ring heater, arc heater, and point heater were examined. Third, using macroscale analysis, similarity of the flow about accelerometers of different sizes was realized by employing the same value of the Grashof number. An accelerometer 20 times larger was built and tested. The output was proportional to the acceleration, thereby confirming the operating principle of the device. Fourth, the output response from the thermal triple-axis accelerometer in unsteady state was studied. The amplitude and the phase lag of the output were analyzed by varying the acceleration input from 0 Hz to 5000 Hz. The upper limit of the frequency for practical measurement was determined.

研究分野：流体工学，数値流体力学

キーワード：ナノマイクロセンサー 加速度センサー MEMS 数値流体力学

1. 研究開始当初の背景

本申請者等は平成22～24年度科学研究補助金基盤研究(C)にて「マイクロ分析装置の省エネ化, 効率化, 小型化のための多機能マイクロポンプの開発研究」を行った. その中で本装置には姿勢, 運動, 位置を検知するための加速度センサーの装備が必要となるが, 市販の加速度センサーでは精度が良くない, 壊れやすい, MEMS技術での作製が容易ではなく価格が高い, などの問題がある.

そこでこれらの問題を解決する画期的な方法として, 流体の動きを検知することで加速度を検出するセンサーの設計開発を行うことにした. 本研究は, 基盤研究(C)で明らかになった問題点を解決すべく, 高精度で強靱性を持ち, 容易にMEMS技術での製作が可能となる3軸方向の加速度センサーを, 非正常場での熱流体解析により設計開発するものである.

2. 研究の目的

研究の目的は以下のようなものである.

- (1) ヒーターとセンサー位置の最適化
- (2) 加速度と出力の関係, 干渉度の把握と減少化
- (3) 3軸加速度センサーの検証実験

3. 研究の方法

おもに熱流体解析ソフト fluent を用いて, 様々なパラメーターの元にコンピューターシミュレーションを行い, 目的を果たす.

4. 研究成果

(1) ヒーターの形状の影響

図1に3軸加速度センサーの断面図を示す. 赤い部分がヒーターの断面を表し, ここで熱塊を生成する. 加速度センサーに加速度が与えられると, 熱塊が移動し, その結果, 生じる温度変化を黒い点で表される温度センサーが測定する. T_{x1}, T_{x2} が x 方向の加速度を測定し T_{z1}, T_{z2} が z 方向を測定する.

図2, 3に上から見た二種類のヒーターの様子を示す. 一つは円型, もう一つは円弧型である.

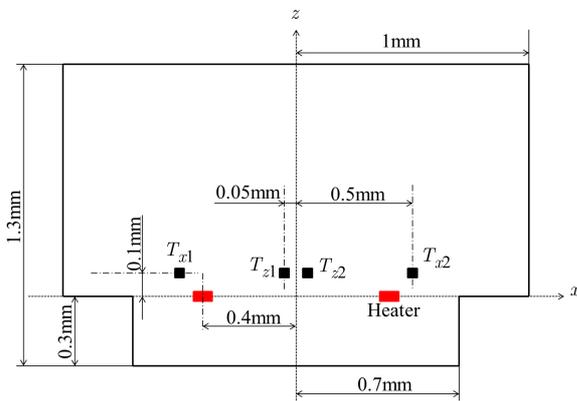


図1 3軸加速度センサーの断面図

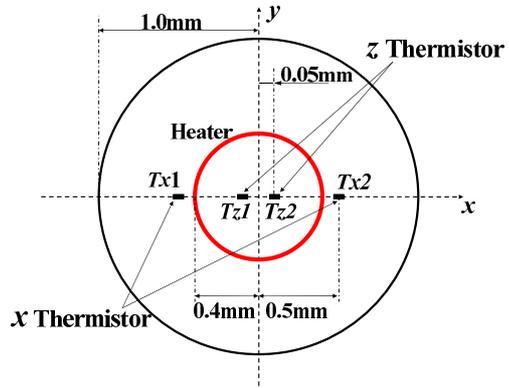


図2 円型ヒーター

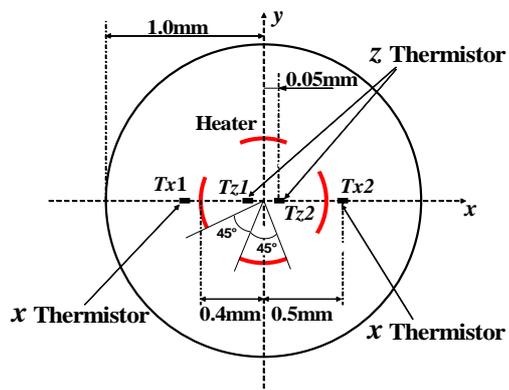


図3 円弧型ヒーター

温度センサーの位置に関して, 最も精度良く測定出来る座標を, 一連のコンピューター解析により見出しており, x, y 温度センサーの位置は $l_x = 500 \times 10^{-6}$ [m], $h_x = 100 \times 10^{-6}$ [m], z 温度センサーの位置は $l_z = 50 \times 10^{-6}$ [m], $h_z = 100 \times 10^{-6}$ [m] となる.

図4, 5に x 方向の加速度 ($0 \sim 10g$) を加速度センサーに与えた場合の温度変化を示す. このとき同時に z 方向にも ($1 \sim 10g$) を加えており, それら 10本のグラフを重ねている.

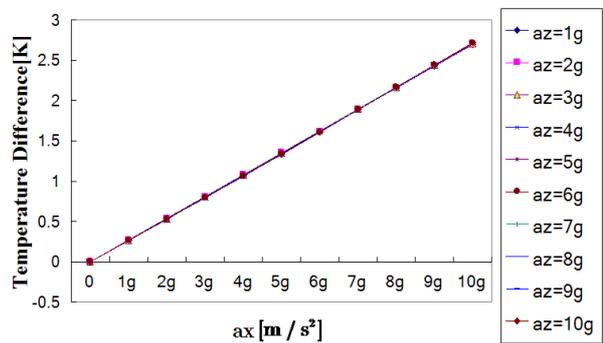


図4 x 方向の加速度 a_x とその温度変化(円型ヒーター)

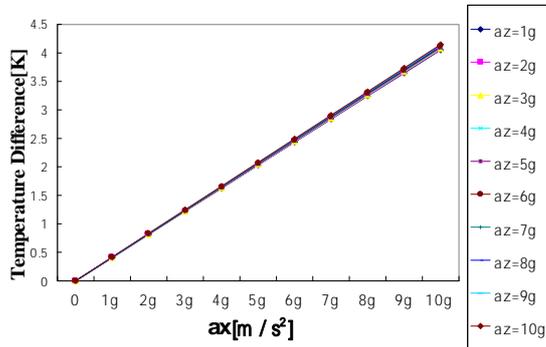


図5 x方向の加速度 a_x とその温度変化(4分割型ヒーター)

図から明らかなように、 z 方向の加速度は x 方向の温度変化に干渉せず、ほぼ1本の直線に乗ることが分かる。また、円型ヒーターより円弧型の方が1.5倍程度、温度変化が大きく、高性能、高感度であることが分かる。

(2) マクロスケールの解析

本来、加速度センサーの大きさは数ミリ程度であるが、実際のMEMS技術を用いた加工費は本研究の予算を超えることが明らかとなった。そのために、大きさを数センチ程度に拡大し、MEMS技術は用いずに、実験用加速度センサーを研究対象にした。

加速度センサーのスケールが異なる場合、その中の熱流動も異なり、これまでの数値シミュレーションの結果がそのまま使えるとは限らない。スケールを変更しても従来の温度分布が維持されるようにヒーター温度などを調整することとし、まず、スケールと温度の関係を明らかにする数値シミュレーションを行った。その結果、グラフホフ数を一致させることで同じ温度分布が得ることが確認された。

しかし、このグラフホフ数を維持した状態でセンチメートル程度の大きさの加速度センサーを制作すると、ヒーターと外壁の温度差が1[K]未満になってしまうため、対流が支配的でない範囲内でのグラフホフ数の変更などを行わなければならないことが新たな問題となることも明らかとなった。

そこで、加速度センサーの外壁温度と内部の気体の関係を、数値シミュレーションによって解析した。その結果、外壁温度が上昇した場合、内部の気体の温度分布は対流の影響が小さくなる方向に変遷して行くことが明らかとなった。

最後に、実験用加速度センサーの作成に向けた解析モデルの検討を行った。代表長さを $L = 0.02[m]$ 、ヒーターからの発熱量16[mW]、外壁温度300[K]、体膨張係数とした。 z 軸方向の加速度を $-1g$ で一定とし、 x 軸方向の加速度を $0.1g, 0.2g, 0.3g$ と $0.1g$ ずつ増加させ、 $1g$ までの10パターンについて定常計算で数値計算を行い、得られたデータを実験に資することとした。

(3) マクロスケールの実験

図1のセンサーを20倍に拡大した装置を作成し、半径25cmの回転台に置くことで、センサーに加速度を与える実験を行った(図7)。ヒーターに与える電圧は1.5V、ヒーターの抵抗は1.73Ω、サンプリング周期は0.5sとした。図7にデータの一部を示す。時刻0では回転台は静止させておき、ヒーターの発熱量も0Wとしておく。時刻約20sで回転台は静止のまま、ヒーターのスイッチをONにする。時刻約160sで回転台の回転開始する。

回転台の速度の上昇と共に加速度も大きくなり、それに伴い温度センサー T_{z1} (赤)、 T_{z2} (青)の出力も上昇する様子が分かる。その結果、加速度に比例する温度差を検知することができ、作動原理の正しさが確認された。

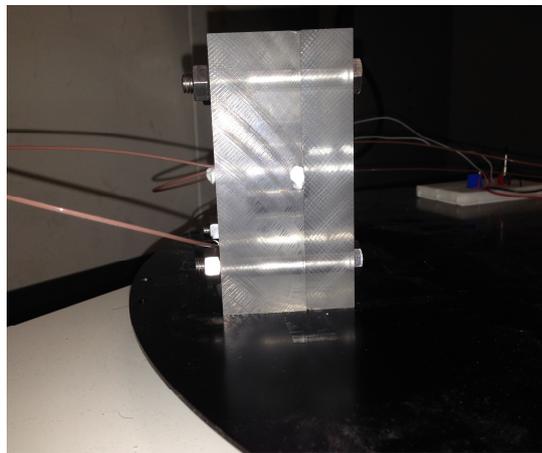


図7 マクロスケールの実験装置

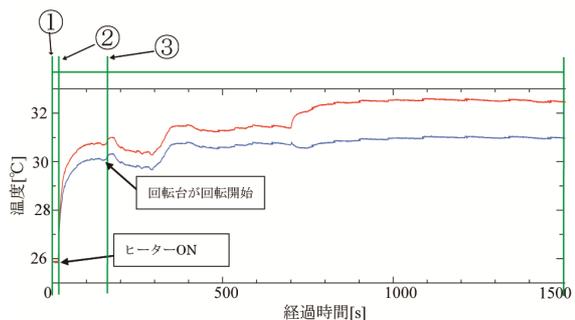


図6 実験データの一部

(4) 点型ヒーターの解析

加速度センサーの性能を向上させるために、円型のヒーターを点型に置き換え、数値解析によりその性能を比較し、利点、欠点を明らかにした。点型のヒーター上に作られる熱塊は、円型のそれよりも細長くなるため、同じ加速度に対して熱塊の動きがより敏感になると考えた。

その結果、例えば x 方向に $5g$ の加速度をセンサーに与えたとき、円型ヒーターが温度センサー部に生み出す温度変化は 0.784 度であり、点型ヒーターでは 4.208 度と 5.36 倍にもなり、その感度の良さが明らかとなった。なお、ヒーターの発熱量は $0.015W$ とした。しかし、円型ヒーターに生じる温度の最大値は $482K$ に

対し、点状ヒーターのそれは1700Kとなることが今後の課題となった。

(5) 非定常状態での応答性

加速度センサーの非定常状態での応答性を明らかにするために、正弦波状に変化する加速度を与え、その周波数と温度センサーの出力温度の関係を調べた。周波数を0から5000Hzまで変化させて、温度センサーの出力温度の振幅と位相遅れを数値解析により明らかにした。図7に加速度の振幅を10g、周波数を10Hzとしたときの、温度センサー T_{x1} 、 T_{x2} の出力を示す。黒線で示される加速度に対して、温度センサーの出力の位相のずれが分かる。図8は周波数を200Hzとしたが、明らかに出力の振幅が減少していることが分かる。

一連の計算結果、周波数が大きくなるほど位相遅れも大きくなり、5000Hzでは167.4度となった。また、そのときの振幅は、0Hzの0.33%となった。また、100Hzでは位相遅れは61.2度、振幅は52.73%である。その結果、実用的な測定を行うための周波数の上限を明らかにすることができた。

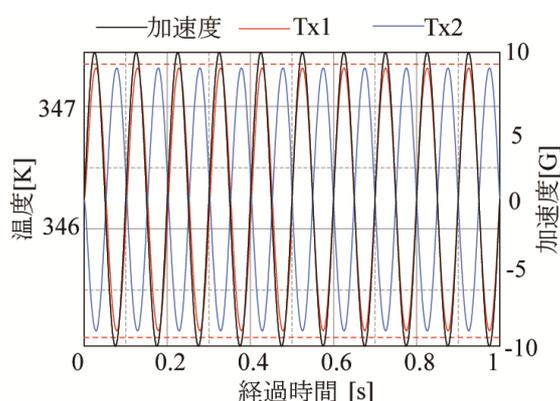


図7 最大加速度10g、周波数10Hzでの結果

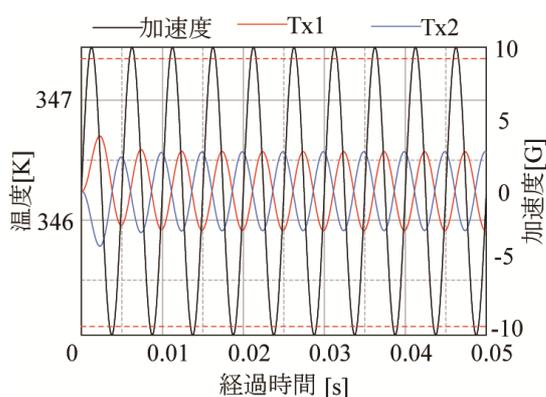


図8 最大加速度10g、周波数200Hzでの結果

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計0件)

[学会発表] (計9件)

N. Murakita, Y. Ogami and K. Fukudome, Analysis of MEMS-Based Thermal Triple-Axis Accelerometer, First Pacific Rim Thermal

Engineering Conference, PRETEC, 2016年03月16日, Hawaii's Big Island, USA

村北直哉, 竹田隼悟, 福留功二, 大上芳文, MEMS による熱検知型3軸加速度センサーの応答に関する解析, 日本機械学会関西支部第91期定時総会講演会, 2016年03月11日, 大阪電気通信大学 寝屋川キャンパス (大阪府寝屋川市)

N. Murakita, Y. Ogami and K. Fukudome, Development of MEMS-Based Thermal Triple-Axis Accelerometer, 12th International Conference on Flow Dynamics, 2015年10月28日, Sendai International Center (宮城県仙台市)

村北直哉, 福留功二, 大上芳文, MEMS による熱検知型3軸加速度センサーの設計と解析, 日本機械学会関西学生会学生員卒業研究発表講演会, 2015年03月14日, 京都大学 桂キャンパス (京都府)

Thien X. Dinh, Y. Ogami, Development of a Triple-Axis Acceleration Sensor, 10th Int. Conf. Flows Dynamics, 2013年11月25日, 仙台国際センター (宮城県)

Thien X. Dinh, Y. Ogami, Sensitivity and Response of a Triple-Axis Thermal MEMS-Based Acceleration Sensor, Int. Conf. Material for Transducers and Sensors, 2013年09月14日, Prague, Czech Republic

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大上 芳文 (OGAMI, Yoshifumi)
立命館大学・理工学部・教授
研究者番号: 30203722

(2) 研究分担者

デイン スワンチェン (DINH XuanThien)
立命館大学・理工学研究科・研究員
研究者番号: 40469200
削除: 平成26年7月8日

福留 功二 (FUKUDOME, Kouji)
立命館大学・理工学部・助教
研究者番号: 70710698
追加: 平成26年7月8日