

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

|                   |                                                                                                                                                                                            |
|-------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 題目(和文)            | 微細加工技術を用いた気体用センサの開発                                                                                                                                                                        |
| Title(English)    | Development of micro fabricated gas sensors                                                                                                                                                |
| 著者(和文)            | 五十嵐康一                                                                                                                                                                                      |
| Author(English)   | Koichi Igarashi                                                                                                                                                                            |
| 出典(和文)            | 学位:博士(工学),<br>学位授与機関:東京工業大学,<br>報告番号:甲第6907号,<br>授与年月日:2007年3月26日,<br>学位の種別:課程博士,<br>審査員:                                                                                                  |
| Citation(English) | Degree:Doctor of Engineering,<br>Conferring organization: Tokyo Institute of Technology,<br>Report number:甲第6907号,<br>Conferred date:2007/3/26,<br>Degree Type:Course doctor,<br>Examiner: |
| 学位種別(和文)          | 博士論文                                                                                                                                                                                       |
| Type(English)     | Doctoral Thesis                                                                                                                                                                            |

2006 年度 博士（工学）論文

微細加工技術を用いた  
気体用センサの開発

Development of Micro Fabricated Gas Sensors

五十嵐 康一  
東京工業大学

# 論文要旨

流体は身近に存在し、その挙動、特徴を表す量として、流量、密度、粘度、熱伝導率など様々なものがあり、それぞれがお互いに密接な関係にある。そのため、これらの量を計測することは重要である。しかし、気体はその圧縮性から温度、圧力の変化によってそれぞれの物理量が変化するためその計測は容易ではない。

流量計測技術は近年の微細加工技術の発展に伴い、MEMS デバイス化が急速に発達してきた。特に熱式流量計は素材、加工方法、駆動方法などについて様々な研究、開発が行われている。しかしこれらの先行研究では、微細加工技術で製作した計測素子を流量、流速の計測にしか応用していない。一方、従来の気体の密度、粘度計測は計測に時間がかかる、大量の気体を必要とするといった問題点があり、また MEMS デバイスとしての研究はされていない。

本研究では微細加工技術を用いて単純な構造の熱式流速計を製作し、流体量計測に適用するものである。まず、製作した微細熱式流速計を流量計測に用いたときの特性を明らかにする。さらに質量流量を計測できるという特長を生かし、圧力微分計測、密度、粘度計測への応用を行う。

本論文は次の 6 章から成り、各章の要約を以下にまとめる。

第 1 章「緒論」では、流体に関係のある物理量である流量、密度、粘度などがお互いに密接な関係にあることから、計測の必要性を説明する。また、近年の微細加工技術の発展に伴う MEMS 研究開発動向から、MEMS 熱式流量計に着目し、その分類と研究例を示す。また、気体の密度、粘度計測方法の現状から短時間で密度、粘度の同時計測が必要であることを示し、本論文の目的及び論文の構成を示す。

第 2 章「微細熱式流速計の製作」では、一般的な熱式流速センサの計測原理を示すとともに、微細加工技術を用いて、非常に簡易な構造の微細熱式流速計を製作するプロセスを示した。また、各プロセスにおける加工条件を実験的に選定し、微細熱式流速計における最も重要な素子である白金抵抗線を形状、装置での配置などを変えてス

パタリングを行い、その抵抗特性を実験的に明らかにした。それらの実験結果を踏まえ、大きさ、形状などを変えた種々の微細熱式流速計を製作した。最後に、3 mm 四方のシリコン基板に線幅 5  $\mu\text{m}$ 、長さ 1.3 mm の白金抵抗線を蒸着する微細熱式流速計を第 3 章以降で用いる最適形状とした。

第 3 章「微細熱式流速計を用いた流量計測」では、微細熱式流速計を任意の流路に挿入して流量計測を行うための駆動回路を示し、その設計方法について述べ、実際に回路を製作した。駆動原理としては、微細熱式流速計の白金線温度を一定に保つ定温度駆動原理を用いた。その駆動回路を用いて定常流量計測を行い、理論と一致することを確かめる。また、微細熱式流速計の動特性を明らかにするため、非定常流量発生装置を用いて振動流計測を行った。円管内流速分布の数値解析から、上流側整流格子からセンサまでの距離及び、センサの壁面からの距離が動特性に影響を与えることを明らかにし、実験によって数値解析の妥当性を確認した。また、微細熱式流速計内部エネルギーの変化速度も動特性を支配する大きな要因であることを解析により明らかにし、実際の微細熱式流速計を用いた振動流量計測結果より、解析の妥当性を示した。

第 4 章「微細加工技術を応用した圧力微分計」では、圧力微分計の小型化、高速応答化を実現するために遮断周波数、助走区間比率を考慮した MEMS 流路チップを微細加工技術によって製作し、圧力微分計の層流抵抗流路として使用した。MEMS 流路チップを組み込んだ圧力微分計は全体が小型化でき、また空容器を用いた圧力微分計との比較から体積が小さくとも、等温化することが重要であることを確認した。さらに、従来までの圧力微分計は圧力計、微差圧計の二つの計測素子を使用していたが、これに変わる計測素子として微細熱式流速計を用い、二重円筒すきま流路を層流抵抗管とした圧力微分計を設計、製作した。圧力充填実験において微細熱式流速計を用いる計測手法の妥当性を示すとともに、加圧下における計測での優位性を示した。

第 5 章「密度・粘度同時計測センサ」では、密度、粘度の同時計測を行うため、二重円筒型すきま流路に微細熱式流速計を配置した複合型センサを提案した。二重円筒型層流流量計ではポアズイユの法則に加え、助走区間における圧力損失を考慮する必要があることを明らかにした。さらに、複合型センサと小型の等温化圧力容器を組み合わせることにより、小流量の気体の体積流量、密度、粘度の瞬時、同時計測が可能できるシステムを提案した。提案したシステムは、測定時間内の値を平均して求めた密度、粘度が理論値に対して 3 % 以内に収まることを実験で確認した。さらに、本システムの誤差要因について検討し、他の密度、粘度計測の研究との比較を行うことで、本研究の有効性を確認した。

第 6 章「結論」では、本論文により得られた成果を総括し、今後の課題を示す。

# 目次

|                            |    |
|----------------------------|----|
| 目次                         | I  |
| 記号表                        | IV |
| 第1章 緒論                     | 1  |
| 1.1 研究の背景                  | 1  |
| 1.1.1 流体量の計測               | 1  |
| 1.1.2 流量と流量計               | 1  |
| 1.1.3 MEMS の歴史と MEMS 流量センサ | 3  |
| 1.1.4 MEMS 熱式流量センサの種類      | 7  |
| 1.1.5 非定常流量の計測             | 8  |
| 1.1.6 密度測定                 | 8  |
| 1.1.7 粘度測定                 | 10 |
| 1.2 研究の目的                  | 13 |
| 1.3 論文の構成                  | 13 |
| 第2章 微細熱式流速計の製作             | 16 |
| 2.1 はじめに                   | 16 |
| 2.2 微細熱式流速計の駆動原理           | 16 |
| 2.3 微細熱式流速計の製作プロセス         | 19 |
| 2.3.1 製作プロセス               | 19 |
| 2.3.2 リソグラフィープロセス          | 21 |
| 2.3.3 スパッタリング              | 22 |
| 2.3.4 反応性イオンエッチング (RIE)    | 24 |
| 2.3.5 ウェットエッチング            | 26 |
| 2.4 白金薄膜の基礎特性              | 27 |
| 2.5 微細熱式流速計チップの製作          | 33 |
| 2.6 まとめ                    | 36 |

|            |                                    |           |
|------------|------------------------------------|-----------|
| <b>第3章</b> | <b>微細熱式流速計を用いた流量計測</b>             | <b>37</b> |
| 3.1        | はじめに . . . . .                     | 37        |
| 3.2        | 駆動回路設計, 製作 . . . . .               | 37        |
| 3.2.1      | 駆動回路 . . . . .                     | 37        |
| 3.2.2      | 回路設計用予備実験 . . . . .                | 40        |
| 3.3        | 微細熱式流速計の定常特性実験 . . . . .           | 43        |
| 3.4        | 非定常流量計測の実験装置, 実験方法 . . . . .       | 45        |
| 3.4.1      | 等温化圧力容器 . . . . .                  | 45        |
| 3.4.2      | 非定常流量発生装置 . . . . .                | 46        |
| 3.4.3      | 実験方法 . . . . .                     | 47        |
| 3.5        | 流速分布の動的評価 . . . . .                | 48        |
| 3.5.1      | 数値解析 . . . . .                     | 48        |
| 3.5.2      | 実験による検証 . . . . .                  | 51        |
| 3.6        | 微細熱式流速計の内部エネルギー変化の動特性の影響 . . . . . | 54        |
| 3.6.1      | 数値解析 . . . . .                     | 54        |
| 3.6.2      | 実験による検証 . . . . .                  | 56        |
| 3.7        | まとめ . . . . .                      | 60        |
| <b>第4章</b> | <b>微細加工技術を応用した圧力微分計</b>            | <b>61</b> |
| 4.1        | はじめに . . . . .                     | 61        |
| 4.2        | 等温化圧力容器を用いた圧力微分計の計測原理 . . . . .    | 61        |
| 4.3        | MEMS 流路チップを用いた圧力微分計 . . . . .      | 64        |
| 4.3.1      | MEMS 流路チップの設計 . . . . .            | 64        |
| 4.3.2      | MEMS 流路チップの製作 . . . . .            | 70        |
| 4.3.3      | 充填・放出実験 . . . . .                  | 74        |
| 4.4        | 微細熱式流速計を用いた圧力微分計 . . . . .         | 78        |
| 4.4.1      | 微細熱式流速計を用いた圧力微分計の計測原理 . . . . .    | 78        |
| 4.4.2      | 微細熱式流速計を用いた圧力微分計の設計・試作 . . . . .   | 80        |
| 4.4.3      | 充填実験 . . . . .                     | 84        |
| 4.5        | まとめ . . . . .                      | 89        |
| <b>第5章</b> | <b>密度・粘度同時計測センサ</b>                | <b>90</b> |
| 5.1        | はじめに . . . . .                     | 90        |
| 5.2        | 計測原理 . . . . .                     | 90        |

|              |                                       |            |
|--------------|---------------------------------------|------------|
| 5.2.1        | 微細熱式流速計を用いた密度計測 . . . . .             | 90         |
| 5.2.2        | 層流式流量計を用いた粘度計測 . . . . .              | 91         |
| 5.2.3        | 等温化圧力容器を用いたモル流量計測 . . . . .           | 91         |
| 5.3          | 複合型センサ . . . . .                      | 93         |
| 5.3.1        | 複合型センサの基礎特性 . . . . .                 | 93         |
| 5.3.2        | 計測不確かさ，誤差に関する考察 . . . . .             | 93         |
| 5.4          | 密度・年度同時計測実験 . . . . .                 | 97         |
| 5.4.1        | 実験装置および実験方法 . . . . .                 | 97         |
| 5.4.2        | 空気の密度・粘度計測 . . . . .                  | 97         |
| 5.4.3        | 二酸化炭素の物性値推定 . . . . .                 | 104        |
| 5.5          | 計測不確かさの検討 . . . . .                   | 107        |
| 5.5.1        | 等温化圧力容器を用いた体積流量計測の不確かさ . . . . .      | 107        |
| 5.5.2        | 密度計測の不確かさ . . . . .                   | 108        |
| 5.5.3        | 粘度計測の不確かさ . . . . .                   | 108        |
| 5.5.4        | 理想気体と現実気体の差による不確かさ . . . . .          | 109        |
| 5.6          | 他の先行研究との比較 . . . . .                  | 110        |
| 5.7          | まとめ . . . . .                         | 112        |
| <b>第 6 章</b> | <b>結論</b>                             | <b>113</b> |
| 6.1          | 本研究の成果 . . . . .                      | 113        |
| 6.2          | 今後の課題 . . . . .                       | 114        |
| <b>付 録 A</b> | <b>本論文中で用いた離散系の式</b>                  | <b>115</b> |
| A.1          | 標準 $z$ 変換を用いた離散系における擬似微分の導出 . . . . . | 115        |
| A.2          | 離散化したローパスフィルタの導出 . . . . .            | 116        |
| <b>参考文献</b>  |                                       | <b>118</b> |
| <b>論文リスト</b> |                                       | <b>125</b> |
| <b>謝辞</b>    |                                       | <b>126</b> |

# 記号表

|                   |                       |                                        |
|-------------------|-----------------------|----------------------------------------|
| $a$               | 温度伝導率                 | $[\text{m}^2/\text{s}]$                |
| $A$               | 断面積                   | $[\text{m}^2]$                         |
| $B$               | 管入り口での流速の正弦波振幅と平均値との比 | $[-]$                                  |
| $c$               | 比熱容量                  | $[\text{J}/(\text{K}\cdot\text{kg})]$  |
| $C$               | 音速                    | $[\text{m}/\text{s}]$                  |
| $d$               | 距離                    | $[\text{m}]$                           |
| $dr$              | 二重円筒隙間流路の高さ           | $[\text{m}]$                           |
| $D$               | ずり速度                  | $[\text{m}/\text{s}]$                  |
| $E$               | 電圧                    | $[\text{V}]$                           |
| $E_{\text{bias}}$ | 駆動回路バイアス電圧            | $[\text{V}]$                           |
| $E_{\text{out}}$  | 駆動回路出力電圧              | $[\text{V}]$                           |
| $f_c$             | 遮断周波数                 | $[\text{Hz}]$                          |
| $F_f$             | 粘性力                   | $[\text{N}]$                           |
| $F_g$             | 重力                    | $[\text{N}]$                           |
| $F_i$             | 慣性力                   | $[\text{N}]$                           |
| $F_p$             | 圧力によって受ける力            | $[\text{N}]$                           |
| $g$               | 重力加速度                 | $[\text{m}^2/\text{s}]$                |
| $G$               | 質量流量                  | $[\text{kg}/\text{s}]$                 |
| $h$               | 熱伝達率                  | $[\text{W}/(\text{K}\cdot\text{m}^2)]$ |
| $H$               | 相対湿度                  | $[\%]$                                 |
| $H_f$             | 流れによって奪われる拡散熱量        | $[\text{W}]$                           |
| $H_s$             | 供給熱量                  | $[\text{W}]$                           |
| $I$               | 電流                    | $[\text{A}]$                           |
| $J_n$             | $n$ 次の第 1 種ベッセル関数     | $[-]$                                  |
| $k_{\text{MEMS}}$ | 熱線式流量計の変換係数           | $[\text{kg}/(\text{s}\cdot\text{V})]$  |
| $k_N$             | モル流量から体積流量への変換係数      | $[\text{m}^3/\text{mol}]$              |
| $K_{\text{amp}}$  | 電気回路増幅率               | $[-]$                                  |
| $l$               | 流路長さ                  | $[\text{m}]$                           |
| $l_e$             | 助走区間長さ                | $[\text{m}]$                           |
| $L$               | 代表長さ                  | $[\text{m}]$                           |
| $m$               | 質量                    | $[\text{kg}]$                          |
| $n$               | 流路の数                  | $[-]$                                  |
| $N$               | 分子の数                  | $\text{mol}$                           |
| $P$               | 圧力                    | $[\text{Pa}]$                          |

|                |                           |                                        |
|----------------|---------------------------|----------------------------------------|
| $P_c$          | 圧力微分計の等温化压力容器内の圧力         | [Pa]                                   |
| $P_j$          | 圧力微分計の出力                  | [Pa]                                   |
| $P_s$          | 供給圧力                      | [Pa]                                   |
| $q_c$          | 熱伝導による熱量                  | [W]                                    |
| $q_t$          | 熱伝達による熱量                  | [W]                                    |
| $Q$            | 体積流量                      | [m <sup>3</sup> /s]                    |
| $Q_{LFS}$      | 層流流量計によって求めた体積流量          | [m <sup>3</sup> /s]                    |
| $Q_{MEMS}$     | 微細熱式流量計によって求めた体積流量        | [m <sup>3</sup> /s]                    |
| $Q_{ref}$      | 基準体積流量                    | [m <sup>3</sup> /s]                    |
| $r$            | 半径方向座標                    | [-]                                    |
| $r_c$          | 管半径                       | [m]                                    |
| $r^*$          | 無次元半径方向座標                 | [-]                                    |
| $r_1$          | 外側円筒の内半径                  | [m]                                    |
| $r_2$          | 内側円筒の外半径                  | [m]                                    |
| $r_s$          | 層流抵抗管の抵抗係数                | [kg/(m <sup>2</sup> ·s <sup>3</sup> )] |
| $R$            | 抵抗値                       | [Ω]                                    |
| $R^*$          | 正規化した抵抗値                  | [-]                                    |
| $R_{air}$      | 空気の気体定数                   | [J/(K·kg)]                             |
| $R_j$          | 差圧計の分解能                   | [Pa/V]                                 |
| $R_{mol}$      | 気体定数                      | [J/(K·mol)]                            |
| $R_p$          | 圧力微分計の分解能                 | [Pa/V]                                 |
| $R_1 \sim R_3$ | ブリッジ構成抵抗の抵抗値              | [Ω]                                    |
| $Re$           | レイノルズ数                    | [-]                                    |
| $s$            | ラプラス演算子                   | [1/s]                                  |
| $S$            | 面積                        | [m <sup>2</sup> ]                      |
| $t$            | 時間                        | [s]                                    |
| $t^*$          | 無時限時間                     | [-]                                    |
| $T$            | 温度平衡時定数                   | [s]                                    |
| $T_d$          | 擬似微分時定数                   | [s]                                    |
| $T_s$          | サンプリング周期                  | [s]                                    |
| $U$            | 代表流速                      | [m/s]                                  |
| $U_h$          | 発熱体内部エネルギー変化              | [W]                                    |
| $u$            | 流速                        | [m/s]                                  |
| $\bar{u}$      | 管路入り口における時間，空間平均流速        | [m/s]                                  |
| $u_e$          | 管路入り口部における流速              | [m/s]                                  |
| $V$            | 体積                        | [m <sup>3</sup> ]                      |
| $w$            | 幅                         | [m]                                    |
| $W$            | 容器内の気体の質量                 | [kg]                                   |
| $x$            | 軸方向座標                     | [-]                                    |
| $x^*$          | 無次元軸向座標                   | [-]                                    |
| $z$            | スリット流路幅                   | [m]                                    |
| $\alpha_i$     | $J_2(\alpha)$ の $i$ 番目の零点 | [-]                                    |

|                |                     |                      |
|----------------|---------------------|----------------------|
| $\delta\theta$ | 温度差                 | [K]                  |
| $\delta_{293}$ | 293 K における二次の抵抗温度係数 | [1/K]                |
| $\Delta E$     | 電位差                 | [V]                  |
| $\Delta P$     | 差圧                  | [Pa]                 |
| $\gamma_{293}$ | 293 K における一次の抵抗温度係数 | [1/K]                |
| $\zeta$        | 圧力損失係数              | [-]                  |
| $\eta$         | 隙間流路高さ              | [m]                  |
| $\kappa$       | 比熱比                 | [-]                  |
| $\lambda$      | 熱伝達率                | [W/(m·K)]            |
| $\mu$          | 粘度                  | [Pa·s]               |
| $\mu_0$        | 標準状態における粘度          | [Pa·s]               |
| $\nu$          | 動粘性係数               | [m <sup>2</sup> /s]  |
| $\bar{\theta}$ | 容器内空間平均温度           | [K]                  |
| $\theta$       | 温度                  | [K]                  |
| $\rho$         | 密度                  | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| $\rho_c$       | 圧力微分計の等温化圧力容器内空気の密度 | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| $\sigma$       | ずり応力                | [N]                  |
| $\tau$         | 厚さ                  | [m]                  |
| $\phi$         | 流れに対するセンサの角度        | [rad]                |
| $\omega$       | 角周波数                | [rad/s]              |
| $\omega^*$     | 無次元角周波数             | [-]                  |

## 添え字

|    |      |
|----|------|
| a  | 大気状態 |
| h  | 加熱体  |
| Pt | 白金   |
| Si | シリコン |

# 第1章 緒論

## 1.1 研究の背景

### 1.1.1 流体量の計測

「流体」とは「気体」、「液体」を総称する（近年ではこれに「プラズマ」を加える）ものであり、空気や水といった形で我々の身近に存在するが、「固体」に対して著しく違う点は、それを入れる容器に従って形を変えるという点である。言い換えれば「流体」は形が変化するために「流れ」る事ができ、これが「流体」の一番特徴的な性質である。

流体に関係した量を考えると非常に多いことに気づく [1]。たとえば密度、熱伝導率、熱膨張率、粘度、圧力などがある。密度、熱伝導率、熱膨張率などは固体も同様に物質による性質として固有の値を有する物理量であり、比較的容易にそれらの値を計測する手法が定められているが、流体においてはその性質上、固体と同じ測定方法や測定装置とは全く違った方法、装置を用いる必要がある。また、粘度や圧力は流体の流れに関係の深い物理量でありこれらを厳密に測定することは流れを測定、把握する上でも非常に重要となる [2]。

### 1.1.2 流量と流量計

流体を取り扱う場合に最も必要とされる情報が流れの量、すなわち流量である。我々の身近なところでは、上水、下水の使用量やガス使用量の計測、ガソリンや灯油の計量、飲料水の計量などで [3]、また、産業界においては製品の計量、流体やエネルギーの取引、プラントの効率向上や運転管理などにおいて流量計測は非常に重要な技術として欠かせないものである。

本研究では管路を流れる流動を基本に考えることとする。管路などにおける流量計測では、測定量として体積流量、質量流量、積算体積流量、積算質量流量に分けることができる。また、これら流量を測定する機器を流量計と呼ぶ [4]。体積流量は単位時間あたりに管路を流れる流体の体積を、質量流量は単位時間あたりに管路を流れる流体の質量を、積算の接頭語がついた場合には、流量計の指示値に関して過去のある時

点から現在までの間にその管路を流れた流体の量を表し定義されている [5]。この積算流量と対比して体積流量や質量流量は瞬時流量とも呼ぶ。

この流量を測る取り組みは非常に古くから行われてきた [6-8]。紀元前後より灌漑などの治水に用いられてきた流量計が開きよ（せき式）流量計である。次に登場したのが 1728 年の Pitot によるピトー管である。ピトー管は動圧から流速を求める方式の流速計であり、最初は船舶の速度計測に用いられた。その後、任意の流路形状と合わせるなどして流量計測実現に向けた工夫がなされた。容積式流量計は 1815 年にイギリス人の Samuel Clegg によって製作された湿式ガスメータが最初のものといわれる。イギリスでは都市ガス事業が 18 世紀に勃興し、石炭乾溜燈用ガスの供給を行う装置に組み込まれていた。容積式流量計は積算体積流量計に分類されるが、精度が非常に高く、今までガスメータ検定用基準器として用いられてきた。

1783 年に Bernoulli が「ベルヌーイの定理」を確立し、管路中の絞りからの流出量に関する理論が確立すると、しばらくして絞り流量計が登場する。18 世紀後半にヴェンチュリ・メータ [9] が登場し、以降 1900 年前後に音速ノズル [10,11]、オリフィス [12]、ノズル [13]、面積式といった圧力にかかわる計測機器が多く登場する。

このような流量計測技術の発展の背景に、流れについて層流と乱流の観察実験を行い、相似則を確立した Reynolds の存在がある。流体中を運動する物体の代表速度を  $U$ 、物体の代表長さを  $L$ 、流体の動粘性係数を  $\nu$  とすると、

$$\text{Re} = \frac{U \cdot L}{\nu} \quad (1.1)$$

で示す無次元数レイノルズ数が定義される。レイノルズ数はその流動状態を表すことができる指標であり、流体解析には重要なパラメータである。現在の流量計測においても、特に差圧式やカルマン渦式の流量計では欠かせないパラメータとなっている。

これら絞り流量計 [14, 15]、面積式流量計 [16]、容積式流量計 [4] に加え、19 世紀末に登場した流体中に設置した羽根車に働く力により回転運動を生み測定するタービン流量計 [17, 18]、1950 年以降に登場したカルマン渦を利用した渦流量計 [19] などは、流れの中に何らかの障害物を入れ、流体のエネルギー損失をおこさせ、圧力、変位といった測定可能量に変換して流量を測る方法としてまとめることができる。これらの流量計は測定する物理量が圧力、変位、回転数など比較的安定しているので測定システムとしては簡便なものとなり、流体の種類を問わないと言った特徴がある。しかし流体中に障害物を設置することは、流れの挙動を乱してしまうという問題点があるため、流量や圧力が微小なシステムにおいてはあまり有効な手法ではない。

これに対してコリオリ力を利用して質量流量を測定する流量計 [20, 21]、ファラデーの電磁誘導の法則を利用した電磁流量計 [22, 23]、ドップラ効果を利用する超音波式流

量計 [24]，加熱体の冷却率と流速の関係を利用した熱式流量計 [25] などは，外部から何らかのエネルギーを加え，そのエネルギーと流れとの相互作用で流量を測定する方法といえる．これらは流体に対する障害がないため，測定においてエネルギー損失がほとんどないという特徴がある．加えて，流体との相互作用に物理現象を利用しており，原理的に精度の安定性が得やすい一方，加えるエネルギーの自由な制御，物理量の正確な測定，演算が必要である．そのため，1980 年以降のマイクロプロセッサの発展とともに，これらの流量計が大きく発展してきている．

特に近年では，半導体製造プロセスにおけるガス流量計測制御などにおいて流量センサの高速応答性，安価，高精度などの要求から，流量センサの小型化が必要とされている [26]．流量センサの小型化において，先にあげた後者に分類される流量計は流体のエネルギー損失がほぼないため，取り扱う流量自体が微小になるシステムにおいてはより有効的な手法となる．近年，半導体プロセスを用いて製作した流量センサの研究，開発が盛んに行われている [27]．

### 1.1.3 MEMS の歴史と MEMS 流量センサ

ここで MEMS の歴史について説明する．近年半導体 IC，LSI プロセスに用いられるフォトファブリケーション技術を中心にした微細加工技術の発展などにもとない，成膜技術，エッチング技術および陽極接合技術などを組み合わせることで，シリコンの基板上に微細なメカニズムの構造体を形成することが可能となり，従来の機械や人間の入り込むことができない微小領域において作業などを行うことができるマイクロマシンの実現が期待されており，工学の各分野において研究が活発に行われている [28–31]．

単にマイクロマシンというと超小型機械要素全般を指し，大きさの定義は mm オーダーのものから  $\mu\text{m}$  オーダーのものまで様々であるうえ，従来の機械加工技術によって製作されたものまで含まれるため，特に前述したような半導体技術を応用し，基板上に電気要素，機械要素を組み込んだセンサ，アクチュエータなどのデバイス/システムを MEMS (Micro Electro Mechanical Systems の略) と呼び，マイクロマシンと分けて扱う．

マイクロマシンおよびその基盤技術は，産業分野への応用にとどまらず，医療福祉分野などを含む人間社会に大きな影響をもたらす可能性があるとして，世界各国で研究開発が推進されてきた．日本においても 1991 から 2000 年までの 10 年間，当時の通商産業省工業技術院の産業科学技術研究開発制度のもと，「マイクロマシン技術の研究開発」プロジェクトが推進された．

このような背景のもと 1995 年頃からは MEMS 応用製品が身の回りの製品にも使わ

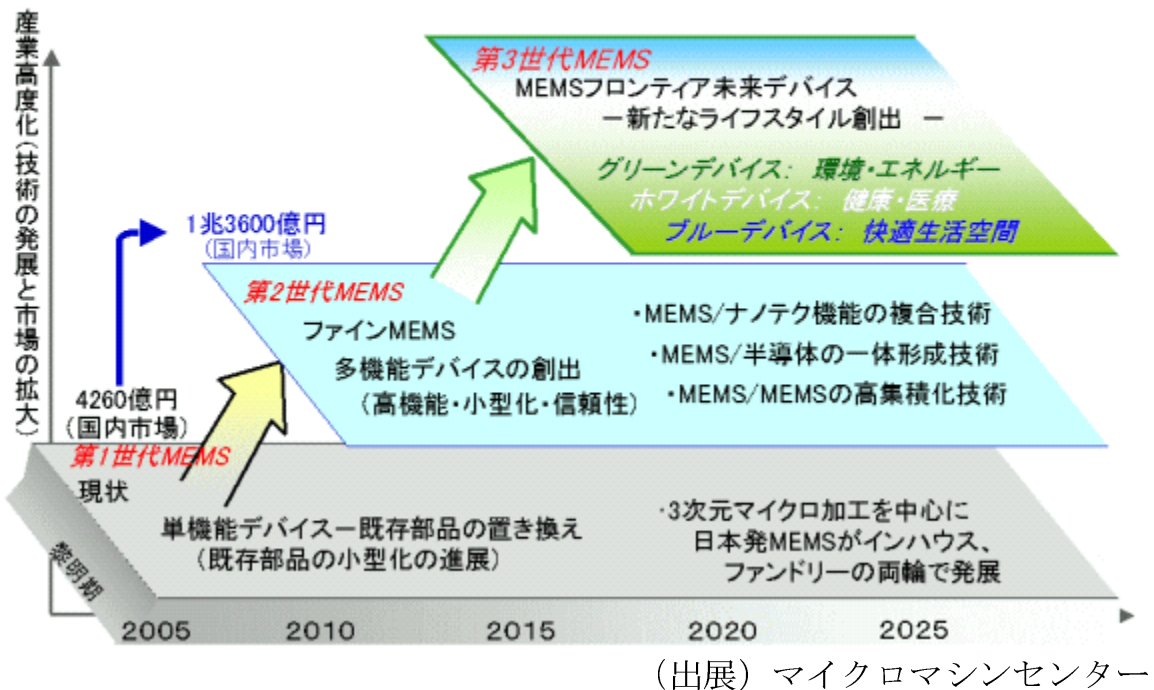


Fig 1.1: Road map of micromachine development

れ始めた．具体的にはディスプレイ用デジタルミラーデバイス [32]，自動車用加速度センサ [33]，インクジェットプリンタのヘッド [34] などである．このころから MEMS 研究動向の変化は「驚きの時代」から「働きの時代」へ移行していったと言われる [35]．

「働きの時代」と言われて以降日本では更に MEMS 開発を促進するため，経済産業省／独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）のプロジェクトとして「マイクロ分析・生産システム」プロジェクト（通称 MEMS プロジェクト：2003 年から 2005 年）「MEMS 用設計・解析支援システム開発」プロジェクト（通称 MEMS-ONE プロジェクト：2004 年から 2006 年）「高集積・複合 MEMS 製造技術開発事業」プロジェクト（通称ファイン MEMS プロジェクト：2006 年から 2008 年）などが立ち上げられ，MEMS の発展に継続的に力が注がれている（Fig. 1.1 参照）．

このように MEMS の技術的な発展とともに産業化も急速に進んできている．マイクロマシンセンターの調査によれば 2002 年における国内の MEMS 関連市場の総額はおよそ 4300 億円である [36]．Fig. 1.2 に示すように製品分野で見ると，情報通信機器，自動車関連，精密機械分野が大半を占めており，具体的には MEMS の小型化の利点を生かして既存部品を置き換える，単機能デバイスを中心としたいわゆる第 1 世代 MEMS が発展している．

今後は，安全・安心，環境，医療福祉などの分野におけるニーズに対応し，超小型・

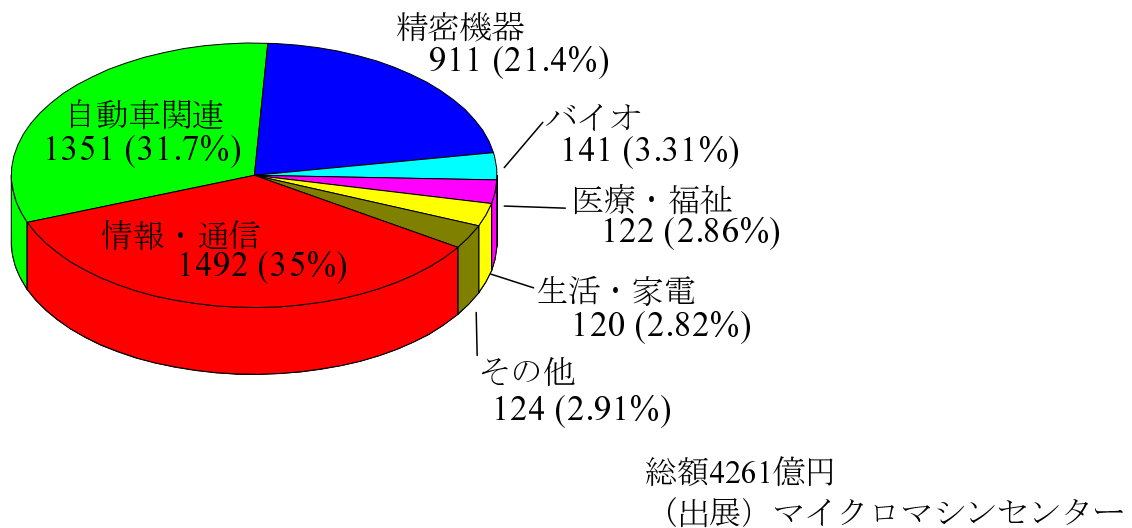


Fig 1.2: MEMS sales in Japan (2002)

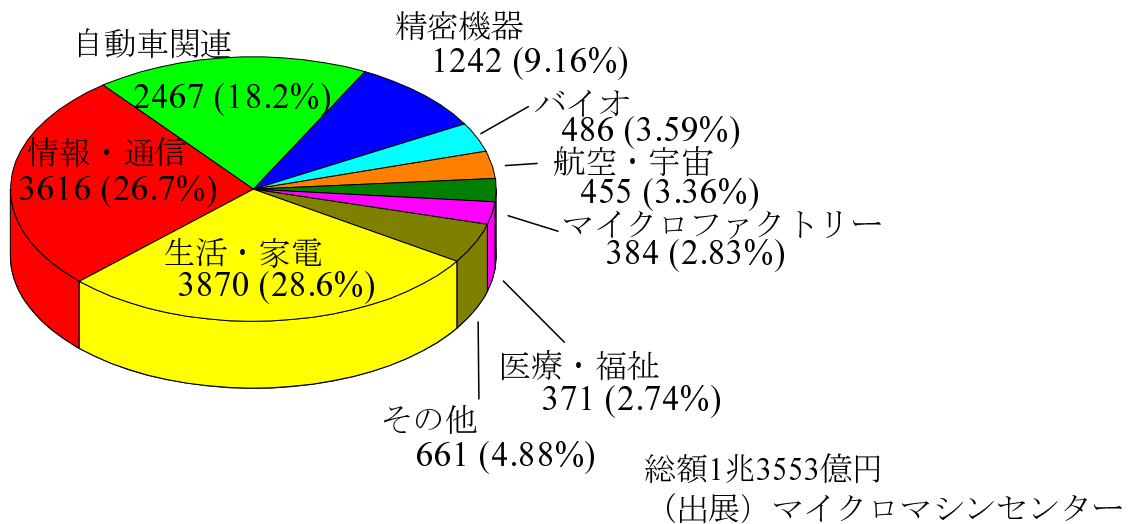


Fig 1.3: MEMS sales prediction in Japan (2010)

高機能・高信頼性を有する第2世代の多機能MEMSデバイス（ファインMEMS）の創出が求められており，先に述べた経済産業省／NEDO技術開発機構のファインMEMSプロジェクトではナノテク機能の複合技術，半導体の一体形成技術，MEMSの高集積化技術などが主な研究項目として挙げられている[37]．その反面，単一デバイスの高機能化という点での研究は少ないといえる．

このようにMEMS技術は過去数十年の間に大きく発展し，また将来的な発展も見込まれている (Fig. 1.3) が，これはMEMS技術は加工精度が高い，大量生産に向く，組み立てや調整なしに立体的なマイクロ構造を複雑に組み合わせたマイクロシステムを一括して製作できる，従来の半導体プロセス設備を利用できる，マクロの世界では実

Table 1.1: Scale effect

| parameter             | symbol | rational expression         | scale effect | remarks              |
|-----------------------|--------|-----------------------------|--------------|----------------------|
| Characteristic Length | $L$    | $L$                         | $L$          |                      |
| Surface Area          | $S$    | $\propto L^2$               | $L^2$        |                      |
| Volume                | $V$    | $\propto L^3$               | $L^3$        |                      |
| Mass                  | $m$    | $\rho V$                    | $L^3$        |                      |
| Pressure              | $F_p$  | $SP$                        | $L^2$        |                      |
| Gravity force         | $F_g$  | $mg$                        | $L^3$        |                      |
| Inertial force        | $F_i$  | $m \frac{d^2 x}{dt^2}$      | $L^4$        |                      |
| Viscous force         | $F_f$  | $\mu \frac{S dx}{d dt}$     | $L^2$        | $d$ : distance       |
| Reynolds number       | Re     | $F_i/F_f$                   | $L^2$        |                      |
| Heat conduction       | $q_c$  | $\lambda \delta \theta A/d$ | $L$          | $A$ : sectional area |
| Heat transfer         | $q_t$  | $h \delta \theta S$         | $L^2$        |                      |

現し得なかった物理則を利用した機構が可能になるなど様々な利点があるためである。

ここで、「マクロの世界で実現しなかった物理則」について詳しく説明する。いわゆる量子効果が生ずるナノメートル領域まで小さくない寸法では、機械の運動や動作を支配する方程式は変化せず、古典的なニュートン力学の世界であると考えることができる。しかし、その支配方程式中に現れるいくつかの項のうち何が支配的な要素であるかが、マクロの世界とミクロの世界では大きく異なってくる。Table 1.1 に様々な物理量が寸法の何乗に比例するかを示した。これは参考文献 [28] の表 2.1 を参考にまとめたものである。このような関係を寸法効果と呼んでいる。

この寸法効果を十分に利用し、MEMS の中でも特に早くから研究開発が盛んに行われ、実用に至っているものが各種センサ類である [38]。先に述べた加速度センサの他にも、位置センサ [39]、圧力センサ [40]、角速度センサ（ジャイロセンサ）[41]、力センサ [42, 43]、流量センサ [44, 45]、赤外線センサ [46, 47] などがある。

特に流量センサはこのようなミクロの世界の特殊性を生かして、超小型、高速、高機能、高性能のマイクロ化学システムをつくる可能性があり、化学工業や医療工学に応用するための流体用 MEMS [48–50] の要素としてマイクロバルブやマイクロポンプ、マイクロ流路などとともに MEMS 研究の中でも取り分けよく研究されてきた。

MEMS 流量計は大きく分けると熱式、非熱式に分類される [51]。ここで、主な非熱式 MEMS 流量計について簡単に紹介する。非熱式流量計には微小流路と絞り機構による差圧から流量を求めるもの [52, 53]、流体中に半導体プロセスによって作った微小素子をおき、その根元にかかる抵抗力を利用するもの [54, 55]、同様に流体中の微小素

子に加わる揚力を利用するもの [56, 57]，微小構造体内部を流れる流体のコリオリ力を利用するもの [58, 59]，小型のプラントル管タイプのもの [60] などがある．これら非熱式 MEMS 流量センサに共通することとして，3 次元的な複雑な構造と微小ながらも変形する部分が必要である．さらに差圧計や力センサといった別の計測素子とあわせて設計が必要となる．

#### 1.1.4 MEMS 熱式流量センサの種類

一方，従来までに開発されてきた小型熱式流量センサは基本的に加熱体といくつかの温度測定素子によって構成されている．熱式流量センサは熱伝達によって生じる現象を評価する方法によっていくつかの種類に分類することができる．まず加熱体の駆動方法として大きく二つの方法がある．供給電力を一定に制御する定電力型，加熱体温度が一定になるように制御する定温度型の二つである．また，熱式流量計の直接計測である流速を求める方法としては，加熱電力から求める方法，加熱体温度から求める方法，加熱体温度と流体との温度差から求める方法，および熱パルスの飛行時間から求める方法などがある．これらを整理すると Table 1.2 に示すように大きく 6 種類に分類される．

他者の先行研究においては熱量タイプと分類した，加熱体周りの温度分布から流量を計測する物が多く研究されている．この計測方法によるセンサは加熱体周りの温度を計測する温度センサの種類や，数，素材またはセンサ基板素材，加工方法などを変えたさまざまなものが存在する [61–67]．

また，飛行時間タイプと分類したものは加熱体駆動方法による違いは特になく，他者の研究においてその部分についてはあまり詳しく書かれていない [68, 69]．というのも，飛行時間タイプは加熱体への電力供給を短時間の間に行い，その熱の伝播を下流側温度センサによって検知するため，加熱体への電力供給方法はあまり注目する必要がないためである．また，流速が遅い場合には流れ方向への温度分布が進み，流量検出が困難となるため，小流量計測には熱量タイプの原理を用いるといった工夫もされている [69]．

さらに，熱線タイプは加熱体温度を一定にするのか，加熱体供給電圧または電流を一定にするのかの違いであり，構造は同じであるため同一の素子を用いて駆動法を変える研究がある [70, 71]．この熱線タイプを使った研究では駆動回路の観点から，ステップ応答の特性評価などが行われている [72]．

このように小型熱式流量計の研究は非常に多く行われている．にもかかわらず，これらのセンサの性能を評価する上で非定常特性について詳しく研究されている例は非

Table 1.2: Operation modes of thermal mass flow sensors

| 加熱体制御法 | 定電力型             |       | 定温度型             |       |
|--------|------------------|-------|------------------|-------|
| 計測法    | 加熱体温度            | 温度差   | 加熱電力             | 温度差   |
| 分類     | 熱線タイプ<br>飛行時間タイプ | 熱量タイプ | 熱線タイプ<br>飛行時間タイプ | 熱量タイプ |

常に少ない．この原因として最も大きい要素が，非定常特性を計測するための基準が定まっていないという点である．

### 1.1.5 非定常流量の計測

液体に対しての非定常流量の有効な測定法はいくつか提案がなされている．たとえば円筒絞りをを用いて絞りの差圧流量の動特性を利用する方法 [73]，円管内の流速をレーザドップラ流速計で測定し，流速分布を求める，あるいは推定して流量を算出する方法 [74] 管路の圧力-流量間の動特性を利用する方法 [75] などがある．

ところが圧縮性流体である気体の非定常流量は有効な測定方法が確立していなかった．その理由は気体は圧力のみならず，温度によってもその体積が大きく変化することにある．よって気体において管路内の動特性を求めることは大変困難であるし，レーザドップラ流速計などで流速分布を測定しても，流量を求めるには気体の密度が必要となり，応答よく温度を測定することが困難なことから密度が正確に把握できない．つまり液体における非定常流量計測方法は気体においては必ずしも有効でない．

このように，そもそも気体の非定常流量計測が困難であったため，流量計の非定常特性を評価しようにも，基準流量を正しく管理すること，つまり気体用流量計の動特性を試験する有効な方法がなかったといえる．そこで，気体の膨張，圧縮時に伴う温度変化をほぼ等温化できる圧力容器を用いた非定常流量発生装置が開発され，流量計の動特性試験装置として提案されている [76]．

### 1.1.6 密度測定

密度とは単位体積あたりの質量のことであり，流体の密度は流体の物性と密接な関係がある．そのため流速，流量の測定の際にも重要である．密度の絶対測定を行うには体積の分かった流体の質量を測定すればよい．しかし，流体，特に気体は温度によって体積が変化するために温度管理が必要である．

Table 1.3: Measurement method of gas density

| 中分類 | 小分類              | 方法                                                  | 対象           |
|-----|------------------|-----------------------------------------------------|--------------|
| 浮力法 | ガス天秤             | 気体によるフロートに働く浮力をフロートを平衡させる気体の圧力から求める<br>操作性良好・簡便     | 燃料ガス         |
| 体積法 | 比重瓶              | 一定体積の容器に満たした空気と気体の質量とから比重を得る・操作が面倒・                 | 燃料ガス         |
| 流出法 | ブンゼン-シリング<br>比重計 | Graham の法則を利用・構造簡単・封液に用いる水（湿度）の影響あり                 | 燃料ガス         |
| 振動法 | 振動密度計            | 空気中（真空中）での振動数と気体が存在したときの振動数の相違から密度を求める・連続測定，遠隔操作が可能 | 気体全般         |
| その他 | トルク比<br>放射線式     | 羽根車のトルク比からもとめる・<br>気体中を通る放射線の吸収量を測定して密度を求める・非接触測定・  | 気体全般<br>気体全般 |
|     | 成分分析計            | ガスクロマトグラフなどを用い気体の成分分析を行い，比重を知る・                     | 燃焼ガス         |

液体の密度計測方法は気体に比べて多くの方法が提案されている．大まかに分類すると，浮力法，振動法，体積法，流量法，差圧法，放射線法などがある [77–79]．浮力法の一つである浮ひょうを使った計測方法は JIS，ISO で規格化されているが，操作方法が非常に簡単である点が大きな特徴である [80,81]．また，コリオリ質量流量計の規格の中にも密度計測方法の記述がある [20,21]．この方法は体積流量を他の計測で測定し，コリオリメータの出力と合わせて計算する手法である．

また，試料の質量と同体積の標準物質の質量との比を表す比重も密度に関係が深い量であるが，液体や固体の場合は水が標準物質とされている．液体の比重の測定方法として，浮ひょうを用いる方法および比重瓶を用いる方法が規格化されている [82]．

一方，気体の密度測定は原理的に液体の密度測定と共通している場合が多い．しかし，気体は温度に加え，圧力による密度変化が液体に比較して大きいこと，さらに気体の密度そのものも液体より小さいことから，測定精度は液体の場合より劣る傾向にある．現在までに提案されている気体の密度測定方法を Table 1.3 に示す．

燃焼ガスの密度計測手法のうち比重瓶法，流出法は JIS，ISO によって規格化されている [83,84] が，いずれの測定方法においても，計測に要する時間が長い．また，原理的に連続測定には不向きである．振動密度計は連続測定が可能であるとされているが，装置定数の校正に密度が既知の 2 種類の流体を必要とするなど，使用の上で若干

のわずらわしさがある．このため，液体の密度計測でコリオリ式流量計を用いる方法のように，簡単に密度の連続測定ができる密度計が求められる．

### 1.1.7 粘度測定

粘度とは端的に言えば，流体の粘さを表す量である．厳密な定義としては次のようになる．平面板間に満たされた流体において片方の平板に一定力を加えたとき，平板間の流体には流れと直角の方向に速度勾配が生じる．このとき，その速度勾配は  $dv/dy$  であたえられ，一方，その流体の速度の変化方向に垂直な面において，その単位面積あたりに作用する粘性力，すなわちずり応力  $\sigma$  は次式のように表すことができる．

$$\sigma = \mu \frac{dv}{dy} = \mu D \quad (1.2)$$

ここに， $dv/dy = D$  で， $D$  はずり速度ともいう．この比例定数  $\mu$  が「粘度」である．また，粘度  $\mu$  をその状態における流体の密度で除した値を「動粘度」といい，

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1.3)$$

で表され，流体の運動を論ずる場合や，実際の粘度管理上，しばしば用いられる．

また，式 (1.2) から分かるとおり，一般の流体においては温度一定の条件下においてずり応力とずり速度は線形関係にある．この線形関係を満たす流体を一般的にニュートン流体と呼ぶ．一方，合成樹脂，分散系流体の多くはこの線形関係を満たさない．これらを非ニュートン流体という．基本的に標準状態近くの気体はニュートン流体の挙動を示す．

粘度の一次基準は粘度が絶対測定された流体によって実現される．現在，国際的に承認されている粘度の一次基準は 1 気圧，20℃ における蒸留水の粘度である [85]．液体の粘度はこの値を基準に粘度測定を行うことが規格化されている [86, 87]．さらに，粘度が水と大きく異なるような液体の粘度計測の校正用に，2.0 mPa·s から 140 Pa·s の 13 種類の粘度計校正標準液が定められている [88]．

ここで，主な粘度計の分類，特徴を Table 1.4 にまとめる．JIS Z 8803 [87] によれば，毛細管粘度計，落球粘度計はニュートン流体に，回転粘度計はニュートン流体，非ニュートン流体に適用する．また，毛細管粘度計は動粘度，落球粘度計は粘度の絶対測定が，回転粘度計が求められる．また，JIS K 8809 [89] においては毛細管粘度計を使用することを定めている．

一方，気体は液体に比べて粘度が小さいために一次標準，計測方法に明確な規格は存在していない．研究例としては振動粘度計が用いられることが多い [90]．この方法

は応答性は高いものの、振動数の減衰を測らなくてはならないために計測には時間がかかる。また、直接計測量は粘度×密度であるため、気体に応用するには圧力、温度を精度よく測定し、理論式から密度を計算する必要がある。

気体の粘度計測方法として、計測時間が短く、連続測定可能、粘度の絶対測定が可能なシステムが求められている。

Table 1.4: Measurement method of viscosity

| 粘度計の種類                                                              | 特徴など                                                                                                                                                                          |
|---------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| I．細管粘度計：流体の細管を通しての流れを利用する<br>基本的にハーゲンポアズイユの法則が適用できる                 |                                                                                                                                                                               |
| ガラス製毛细管粘度計<br><br>短管粘度計<br><br>細管式連続粘度計                             | 石油製品の動粘度測定など，広く使われる．<br>ISO や JIS の規格にも採用されている．製品例が多い．<br>石油，タール，塗料などの動粘度の簡易測定用．動粘度は，試料の流出時間をもとに動粘度との換算表からもとめる．製品例が多い．<br>プロセス用．定流量方式と定圧力方式とがある．<br>気体にも使える．                  |
| II．回転粘度計：流体中に置かれた円筒などを回転させる時のトルクが<br>粘度と一定関係にある事を利用する．              |                                                                                                                                                                               |
| 共軸二重円筒回転粘度計<br><br>単一円筒回転粘度計<br>円板回転粘度計                             | 内筒回転，外筒回転の二方式がある．また，回転速度を一定にした時のトルクの測定から求めるものと，一定トルクを与えたときの回転速度から粘度を求める二つの方法があるが，前者のほうが多く採用されている<br>ポータブルな構造形式のものが多く，現場向き．<br>二円板と単一円板の二方式がある．後者は単一円筒回転粘度計との本体部を共通に利用する場合が多い． |
| III．落体粘度計：流体中で物体を重力を利用して緩やかな速度で運動させた時の<br>速度が流体の粘度に一定の関係にあることを利用する． |                                                                                                                                                                               |
| 落球粘度計<br><br>転落球粘度計                                                 | 球を自由落下させる円筒管と球の組み合わせによる簡単な構造が，精度は高い．<br>円筒間を傾斜させて球を点落下させる．                                                                                                                    |
| IV．振動粘度計：流体中で物体を振動させたときの振動の減衰がその流体の<br>粘度または粘度と密度の積に関係することを利用する．    |                                                                                                                                                                               |
| 回転振動粘度計<br><br>振動片粘度計<br><br>振動弦粘度計                                 | 振動物体には，円筒，円板，球，球殻などが使われる<br>気体の粘度測定には，円板方式が利用されている．<br>応答性に優れる．高い振動数で駆動させるので超音波粘度計と呼ばれる場合もある．<br>振動体に金属細線を用いる．研究室向き．液体ヘリウムの粘度測定に利用されている．                                      |
| V．平行平板粘度計：平行平板間に挟まれた流体の流れを利用する                                      |                                                                                                                                                                               |
| 平行平板粘度計<br><br>板状粘度計                                                | 平板に一定の力を加えたときの平板間内の流体の流体の時間による厚さの変化を利用する．塑性流体を含む高粘度物質の流動特性の測定に適する．<br>一定の力を加えて，一方の平板を移動させたときの移動速度を利用する．現場向き                                                                   |

## 1.2 研究の目的

本研究では速応性により優れた流速計として、微細加工技術を用いて構造を簡易化した微細熱式流速計を提案、製作する。製作した微細熱式流速計を用いて流量計測を行うための回路の設計・製作を行い、定常流量計測における特性を明らかにする。また、微細熱式流速計を用いた振動流量計測を行い、定常流量計測の結果を元に微細熱式流速計出力から流量を推定する際にどのような特性になるか、センサの配置や構造がどのような影響を与えるかを明らかにする。

ついで、微細加工技術を応用した新たな気体用センサの創出を行う。まず、容器内圧力の気体の圧力変化を計測することができる圧力微分計の性能向上のため、微細加工技術を応用したスリット流路を製作し、実際に圧力微分計に組み込んで、特性を評価する。また、製作、特性評価を行った微細熱式流速計を圧力微分計の計測用素子として用いることで、圧力微分計の特性を向上する。

さらに、微細熱式流速計の応用として、二重円筒型層流流量計と組み合わせた複合型センサを提案、試作する。この複合型センサと等温化圧力容器と組み合わせることで気体の密度と粘度の同時計測が可能になる。実際に空気及び二酸化炭素を用いて実験を行い、有効性を確認する。

## 1.3 論文の構成

本論文の構成を Fig. 1.4 に示す。本論文は計 6 章より成り、各章の内容を要約すると次のようになる。

第 1 章では、研究の背景について説明し、本論文の目的および構成を示す。

第 2 章では、微細加工技術を用いて製作する熱線式流速計の計測原理を示す。さらにその熱線式流速計（本論文では微細熱式流速計と呼ぶ）の製作プロセスを示すとともに、微細熱式流速計における主要素となる白金細線の抵抗特性について実験的に特性を明らかにする。最後に大きさ、形状を変えた微細熱式流速計チップをいくつか試作する。

第 3 章では、第 2 章で製作した微細熱式流速計を用いて流量計測を行うため、まず駆動回路の設計方法について説明する。ついで、定常流量を計測しセンサ特性と理論の整合性について検証を行う。さらに、非定常流量発生装置によって発生する振動流量を計測する。振動流計測において微細熱式流速計の特性に寄与する要因として、円管内流速分布、微細熱式流速計内部エネルギー変化を考え、それぞれ数値解析及び実験を行う。解析及び実験結果に基づき、微細熱式流速計を用いて振動流計測を精度よ

く計測するために必要な条件を示す．

第 4 章では微細加工技術を応用した圧力微分計について説明する．まず，圧力微分計の層流流路として利用することにより，圧力微分計全体の小型化，高速応答化を図る．さらに，微細熱式流速計を計測素子とした圧力微分計を製作し，更なる高速応答化，高精度化を実現する．

第 5 章では，微細熱式流速計を二重円筒型層流流路に取り付け，等温化圧力容器と組み合わせることで，密度，粘度，体積流量が同時かつ連続的計測可能なシステムを提案する．空気及び二酸化炭素を作動流体とした実験によりその有効性を確かめるとともに，予想誤差を検討する．また，他の密度計測，粘度計測手法と比較することにより，本研究の有効性を示す．

最後に，第 6 章において，本研究において得られた成果をまとめるとともに，今後の課題を示す．

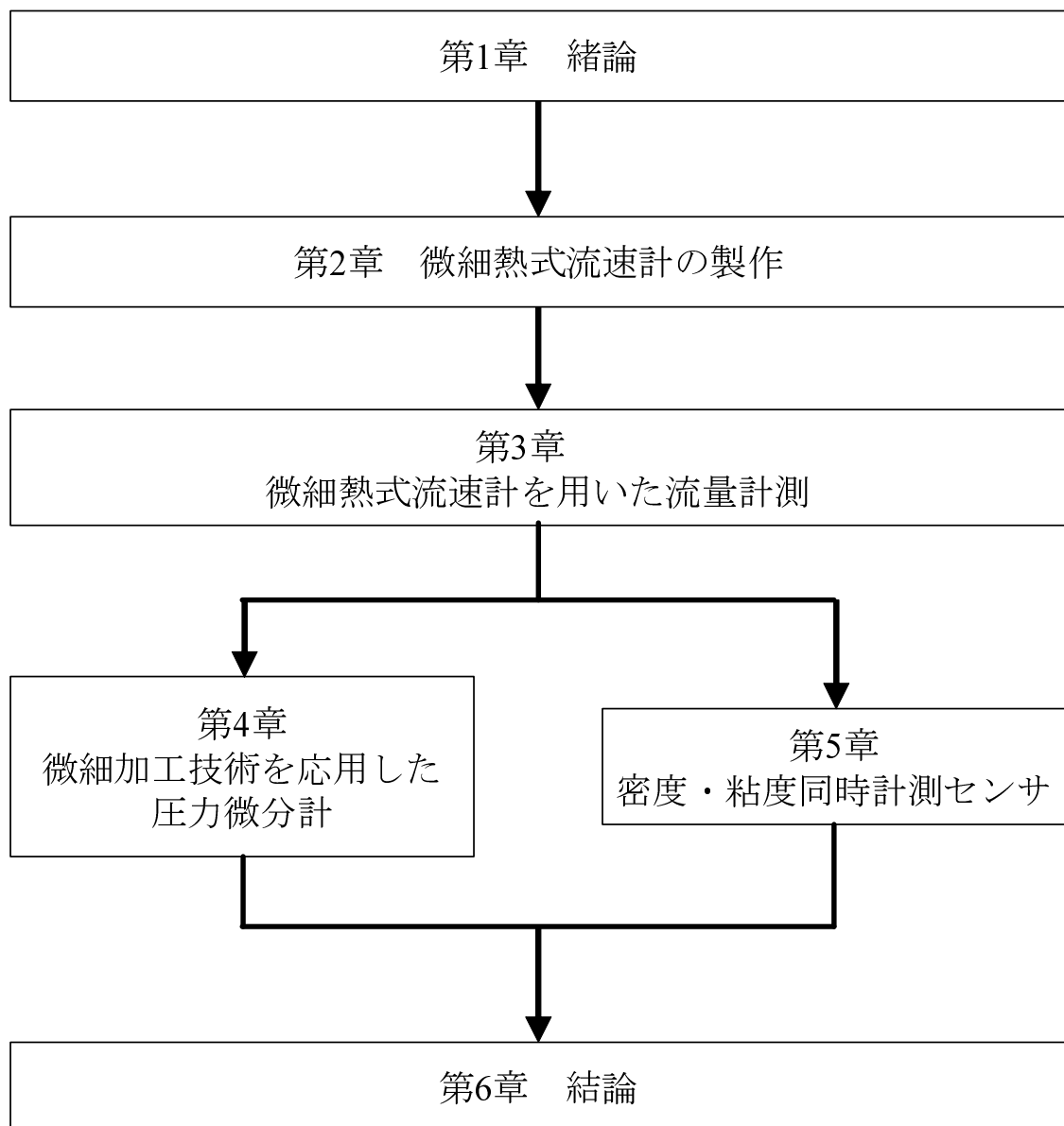


Fig 1.4: Schematic configuration of this research

## 第2章 微細熱式流速計の製作

### 2.1 はじめに

流量計測は我々の生活，産業と密接に結びついており，欠かすことのできない技術である．熱式流量センサは構造が簡単で小型化しやすいこと，小型化に伴って寸法効果によって応答速度の向上が見込まれること，基板の熱容量を小さくすることができ，高速応答化が期待できることから，近年急速に発達してきた微細加工技術を用いた，MEMS センサとして開発が盛んに行われている．

しかし気体の非定常流量評価基準が明確でないために，従来の研究では動特性とセンサ構造などの関係について明らかにしている例は少ない．そこで本研究では熱式流量計の中でも特に構造が簡単で，応答性に優れるといわれる定温度駆動型熱式流量計を研究対象とし，実際に微細加工技術を用いて微細熱式流速計を試作，特性の評価を行う．

本章ではまず熱式流速計の計測原理を説明し，本研究で製作する微細熱式流速計の駆動原理について説明する．ついで，微細熱式流速計を製作する上で必要な微細加工技術について説明する．また，一番重要な要素となる白金抵抗線を実際に形成し，その抵抗特性を実験的に調べることで微細熱式流速計の駆動回路試作に役立てる．最後に製作した微細熱式流速計を示す．

### 2.2 微細熱式流速計の駆動原理

本研究で提案する微細熱式流速計の概略図を Fig. 2.1 に，駆動回路を Fig. 2.2 に示す．微細熱式流速計は立体加工されたシリコン基板上に成膜された二組の白金線が基本的な構成である．二組の白金線のうち一方は加熱測定用の素子であり，この白金線に電力を供給することで流体よりも高温の状態に保つ．もう一方の白金線は流体の温度を計測し，温度補償を行うための素子である．

加熱測定用素子の下部はシリコンをエッチングによって除去し，白金線から下部基板への流出熱量を抑えるようになっている．さらに白金線の間を縫うようにダイアフラムを貫通する穴を形成するようにも部分的にエッチングすることで，加熱測定用素

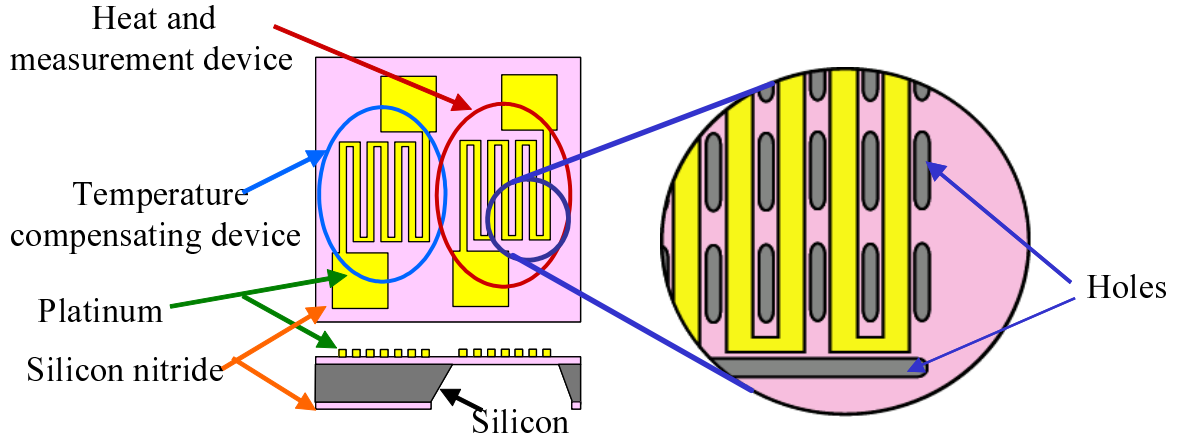


Fig 2.1: Schematic diagram of large size model of micro hot wire anemometer

子が作動流体にさらされるような構造になっている。

一般的に、加熱された物体を流体中に放置すると熱拡散によって冷却される。この冷却と流速の関係を King の法則といい、以下のように書き表される。

$$H_f = (1 + m(\rho U)^{1/n})(\theta - \theta_a) \quad (2.1)$$

このとき、 $l, m, n$  は流体の種類や物体形状などによって決まる定数である。

第 1 章で簡単に説明したように、定温度駆動方式はこの拡散熱量に対し同量の熱量をセンサの熱線に供給するもので、拡散熱量と供給熱量は常に平衡状態になるようにする。平衡状態において回路が加熱素子に供給する熱量は、

$$H_s = I_h^2 R_h(\theta) = E_h^2 / R_h(\theta) \quad (2.2)$$

となる。 $H_s$  は供給熱量、 $I_h$  は加熱部抵抗に流れる電流、 $R_h(\theta)$  は加熱部抵抗の  $\theta$  K における抵抗値、 $E_h$  は加熱部抵抗にかかる電圧である。

ここで、Fig. 2.2 に示した微細熱式流速計の駆動回路は、加算回路、ホイートストンブリッジ、差動増幅器からなる。

この時、ブリッジ回路全体にかかる電圧  $E_{out}$  について考えると、 $K = (R_h(\theta) + R_1) / R_h(\theta)$  を用いて、

$$\begin{aligned} E_{out} &= I_h \cdot (R_h(\theta) + R_1) \\ &= E_h \cdot (R_h(\theta) + R_1) / R_h(\theta) \\ &= K E_h \end{aligned} \quad (2.3)$$

と書ける。式 (2.2)、(2.3) をまとめると、供給熱量  $H_s$  は

$$H_s = E_{out}^2 / (K^2 R_h(\theta)) \quad (2.4)$$

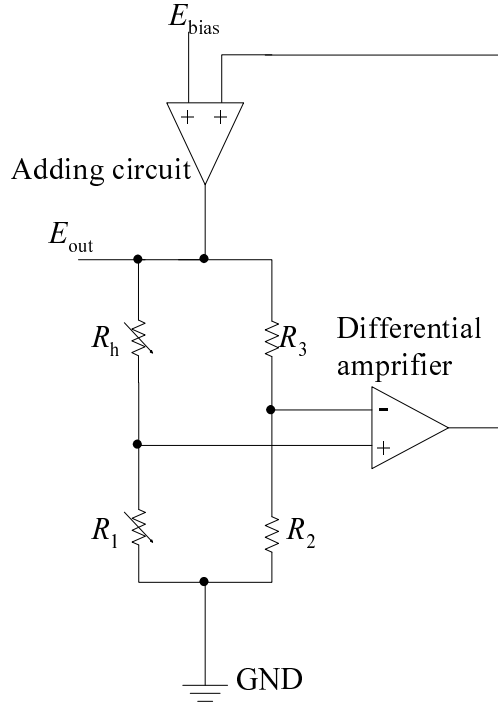


Fig 2.2: Operational electric circuit

とまとめられる．ここで，拡散熱量と供給熱量は等しくなるため，式 (2.1)，(2.4) から

$$E_{\text{out}}^2 / K^2 R_h(\theta) = (l + m(\rho U)^{1/n})(\theta - \theta_a) \quad (2.5)$$

$$E_{\text{out}}^2 = (L + M(\rho U)^{1/n})(\theta - \theta_a) R_h(\theta) \quad (2.6)$$

という関係式を導くことができる．ここで， $L, M$  もまた定数であり，この式 (2.6) から分かるように回路中で消費される電力が  $\rho U$  と関係を持つことから，流速，流量を求めることができる．また流体温度が変化すると，流量が一定であっても出力が変化してしまうため，温度補償を必要とする．本研究においては温度補償素子を加熱測定素子と同じ形状のもの，形状を変えたもの，同一チップ上には設けないものなどを製作した．温度補償素子は Fig. 2.2 におけるブリッジ回路の  $R_3$  の抵抗として用いることで，流体温度が変化しても出力が変化しない．

## 2.3 微細熱式流速計の製作プロセス

試作するセンサの構造は、 $\text{Si}_3\text{N}_4$  膜が付いたシリコンチップ上に白金抵抗線を成膜するという非常に簡易化されたものである。この白金線に電力を供給することで、流体よりも高温の状態に保つ。

加熱測定用素子の下部はシリコンをエッチングによって除去し、白金線から下部基板への流出熱量を抑えるようにした。さらに白金線の周りの  $\text{Si}_3\text{N}_4$  膜も部分的にエッチングして穴を開けることによって、加熱測定用素子が作動流体にさらされるような構造をとった。一般的に微細加工で用いるシリコンウェハは、 $\text{SiO}_2$  膜付きのものである。しかし、 $\text{Si}_3\text{N}_4$  はウェットエッチングにおける耐性が  $\text{SiO}_2$  よりも優れており、 $100\text{ }\mu\text{m}$  程度のエッチングをするには  $\text{Si}_3\text{N}_4$  のほうが安全である。また、薄膜状態で流体にさらされていることを考えると、引っ張り応力も必要になるが、このような力学的特性も  $\text{Si}_3\text{N}_4$  膜の方が優れている [91]。このため、本研究においては  $\text{Si}_3\text{N}_4$  膜を選択している。

### 2.3.1 製作プロセス

微細熱式流速計の製作に必要な技術は露光技術、薄膜形成技術、エッチング技術が主なものである。まずそれぞれの技術について簡単に説明する。

露光技術は薄膜形成やエッチングにおけるパターニングにおいて必要となり、ここでの寸法精度が最終的なセンサにおける精度に関わるので非常に重要である。具体的にはフォトリソと呼ばれる感光性樹脂に部分的にビームを照射した後、現像することにより、ビームがあたった部分の感光性樹脂だけが硬化または溶解する。これを踏まえ、シリコンウェハ上にレジストを塗布して、露光、現像することによりマスクを形成する工程をリソグラフィと呼ぶ。レジストには光照射部分が溶媒に溶けやすくなるポジ型と、溶けにくくなるネガ型がある。露光技術としては、微細パターンマスクに光を通す方法（マスク法）と微小径に集束させる方法（集束法）の二つがある [92]。

次に薄膜形成技術としては、大きく分けて物理蒸着法（PVD）と化学蒸着法（CVD）がある [93, 94]。PVD は薄膜材料を真空中で気化して基板上に膜として堆積させる方法であるのに対し、CVD は、薄膜の構成原子を含む化合物ガスを反応容器に導入し、化学反応を利用して目的の組成の薄膜を製作する方法である。このような原理のため、純金属の成膜には PVD が適しており、CVD はシリコンの化合物の成膜によく使われる。本研究で行う白金線の形成は PVD の一つであるスパッタリングによって行う。

エッチング技術にはウェハを化学薬液（エッチャント）の中に入れ、結晶を溶解さ

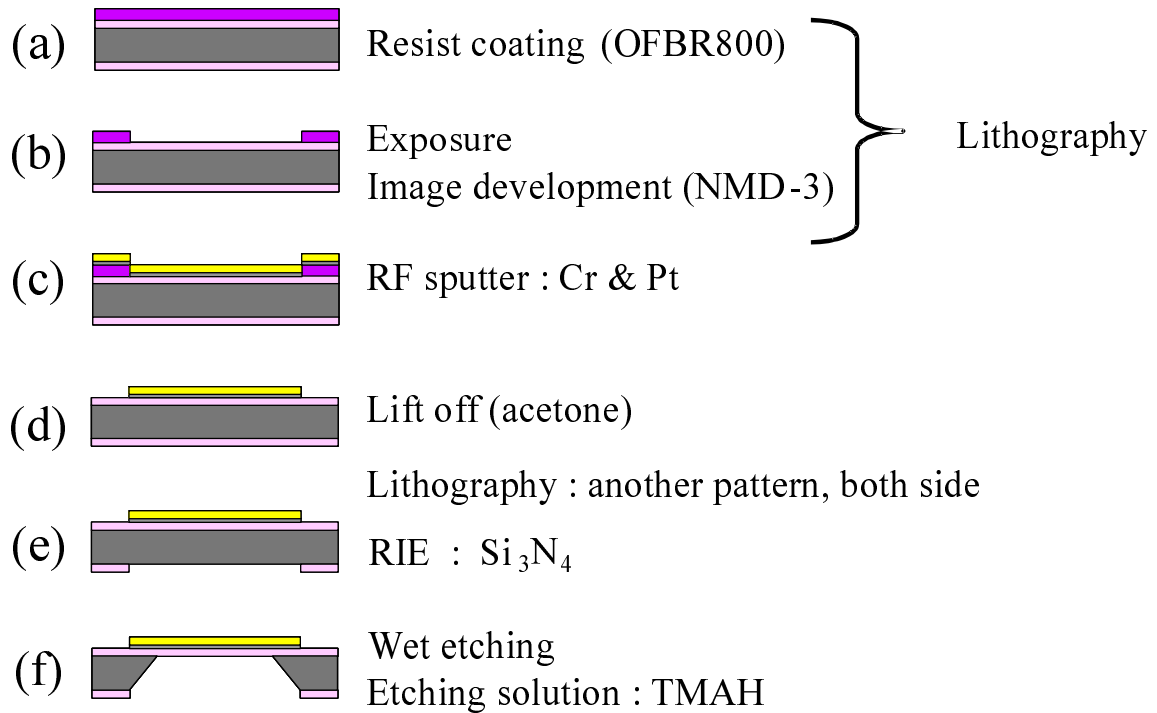


Fig 2.3: Fabrication process of micro hot wire anemometer

せていくウェットエッチングと、薬液を使わずに真空炉内でガスを用いて行うドライエッチングがある [28,93]。ドライエッチングにも化学的反応を用いるものから物理的にエッチングを行うものまで様々な技術がある。本研究では化学反応を用いるドライエッチングの一つである反応性イオンエッチング (RIE) によってチツ化膜のエッチングを行い、シリコンのエッチングはウェットエッチングによって行う。

以上の技術を用いた微細熱式流速計の製作プロセスはFig. 2.3 に示すとおりである。使用するウェハは、3 インチの  $\text{Si}_3\text{N}_4$  膜付シリコンウェハで、厚さは Si 部分が  $200 \pm 25 \mu\text{m}$  ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$  膜厚さが  $1 \mu\text{m}$  のものである。 $\text{Si}_3\text{N}_4$  膜は CVD や PVD を用いて成膜することもできるが、装置の都合上 CVD では成膜ができず、PVD では内部応力の制御や均一な成膜が困難であるため、あらかじめ  $\text{Si}_3\text{N}_4$  膜がついているウェハを使用することにした。まずダイシング装置によってウェハを 15 mm 四方の大きさに切り出し、これを一単位として製作を行っていく。次に切り出した  $\text{Si}_3\text{N}_4$  膜付シリコンチップ上に白金線パターンを露光し、スパッタリングによって白金線を一様に蒸着する。その後、不要部分はレジストごと除去するリフトオフという方法によって白金線を形成する。続いてチツ化膜を除去するパターンを露光したあと、RIE によって任意部位の  $\text{Si}_3\text{N}_4$  膜を除去する。このときレジストのない部分のみの  $\text{Si}_3\text{N}_4$  膜が除去されて、シリコンが露出した状態になる。センサ上面は白金線の間  $\text{Si}_3\text{N}_4$  膜を部分的に除去するために、位

置合わせが重要であるが，センサ下部は大きめに除去範囲を取っているために，精密な位置合わせは必要でない．センサ両面に対して RIE を行った後，ウェットエッチングによってシリコンをエッチングする．これによって加熱測定用素子側のダイアフラム構造が形成される．同時にチップをダイシングによってセンサごとの大きさに切り出すか，ウェットエッチングによってダイアフラム構造を作るのと同時にチップサイズに周囲をエッチングすることで微細熱式流速計チップが完成する．

以下に各プロセスにおける具体的な使用機器や注意点を挙げる．

### 2.3.2 リソグラフィープロセス

露光技術には大きく二つの方法があることは既に示したが，本研究においては用途に合わせて両方の方法を使い分けている．

マスク法の代表的な方法には光露光がある．光は可視光から紫外線までフォトリソストによって使用するものが変わるが，あらかじめ製作したフォトマスクを通してレジストに照射するという点では変わらない．光を使ったリソグラフィーを特にフォトリソグラフィーという．一回の露光に要する時間は 1 分以下といったものがほとんどで，一括して広範囲の露光をすることもできるため非常に有用性が高い．そのため，微細加工プロセスではほとんどがこの技術を用いている．パターンが細くなった場合に光で細かく切る微細加工の限界は光源の波長によって決まり，集束法の方がより微細なパターンニングが可能であるが，本研究においては光露光で可能な程度の寸法精度で十分なため，光露光を用いる．

一方，集束法の代表的な方法には電子ビーム露光がある．電子ビーム露光技術は，焦点深度が 10  $\mu\text{m}$  以上と大きく，0.1  $\mu\text{m}$  以下の微細パターンも比較的安定して描ける．Fig. 2.4 に電子ビーム露光装置の概略図を示す．ビームブランキングは次のパターンに行くまでビームを横に振りながら，電子ビームの ON-OFF を行う電極である．シリコンウェハに電子ビーム用レジストを塗布し，低電圧で微小電流の電子ビームを照射する．ビームを走査させることによりマスクなしで任意のパターンを描くことができる．X-Y ステージと電磁的なビームの偏向を組み合わせることにより加工したいマスクパターンを PC に読み込ませ，制御することで広範囲の描画も可能である．しかしながら電子ビーム露光ではその性質上一括転写が難しく，一筆書きでパターンを描くために描画速度が劣るという欠点がある．そのため，光露光用のマスクやレチクルの製作，それに先行する開発のテストサンプル作成に使用されている [93]．本研究で利用できる装置として，日本電子製の走査型電子顕微鏡（SEM）に東京テクノロジー製のビームドロワーを付加した装置があり，これによって電子線描画を行うことができる．本研

究においてはこれを用いてテストパターンや光露光用フォトマスクの製作を行った。

### 2.3.3 スパッタリング

スパッタリングは、加速された高エネルギーの原子や分子を固体に衝突させ、固体表面からその構成原子を叩き出し、基板上に成膜する技術である。このスパッタされる固体のことをターゲットといい、ターゲットはスパッタによって加熱されるため、水による冷却機構がついている。スパッタリングを用いる利点としては、作成した薄膜の組成が変わらないことや、高融点の物質の成膜が可能であることなどが挙げられる [35]。

本研究においてはサンヨー電子製の SVC-700RFII を用いた。本装置はスパッタリングの中でもマグネトロン・スパッタリングが可能であり、これによってスパッタ速度が速く、放電電圧を低く、かつ Ar ガス圧力を比較的高めに設定しても成膜が可能である。装置の概略は Fig. 2.5 に示すとおりであり、低圧の Ar ガスが放電によって Ar イオンとなってターゲットに衝突することで基板上に成膜をする。

微細熱式流速計の計測素子はこのスパッタリングによって成膜される白金薄膜が重要となるので、Ar ガス流量、真空度、スパッタ電力、スパッタ時間を種々変化させながら成膜状態を観察し、条件を選定した。白金のみをスパッタリングで  $\text{Si}_3\text{N}_4$  膜上に

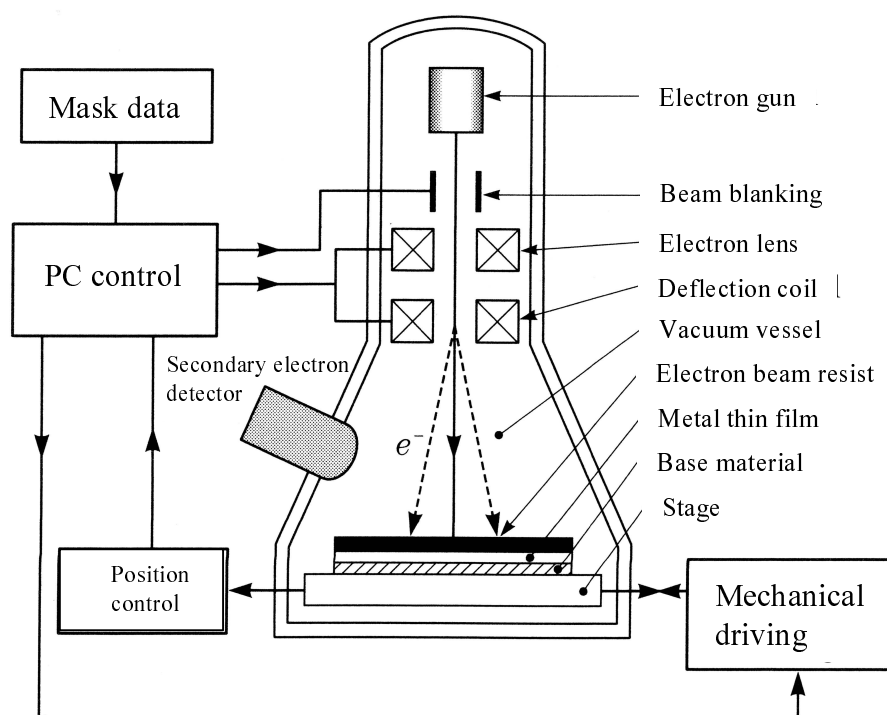


Fig 2.4: Schematic diagram of electron beam photolithography machine

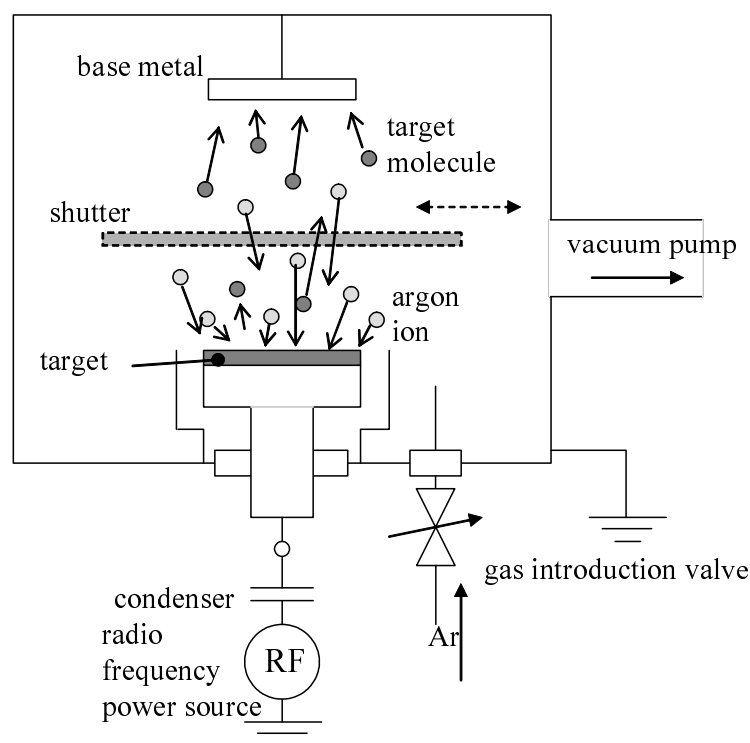


Fig 2.5: Schematic diagram of radio frequency magnetron sputtering machine

成膜しようとするとき、剥離がおきやすく不安定であったため、接着層としてクロムを少量スパッタし、その後白金をスパッタすることとした。接着層としてのクロムはできる限り少量にするほうが白金の電気的特性に影響を与えない。実験によって、剥離が生じない範囲内での最も薄いクロムのスパッタ条件はArガス流量 100 sccm，反応容器内圧力 0.8 Pa，スパッタ電力 50 W，スパッタ時間 2 min であった。また、白金のスパッタ条件はArガス流量 100 sccm，反応容器内圧力 1.0 Pa，スパッタ電力 100 W で、スパッタ時間を調節することによって膜厚を変え、基礎抵抗値を調節することとした。

### 2.3.4 反応性イオンエッチング (RIE)

先にも述べたように本研究においては  $\text{Si}_3\text{N}_4$  のエッチングを RIE によって行った。 $\text{Si}_3\text{N}_4$  は  $\text{SiO}_2$  をマスクとしてエッチャントに 180℃ まで加熱した熱リン酸 (hot  $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) を用いれば次に述べるウェットエッチングによってエッチング可能である [28] が、装置として実現するのが難しく、本研究では RIE でも十分な精度しか求めていないため、RIE を用いることとした。

イオンエッチング装置の概略図を Fig. 2.6 に示す。エッチングされる基板がプラズマよりも負になるように電圧を印加することで、基板に正イオンを加速してエッチングを行う。この方法では表面から垂直な方向に異方性エッチングをすることができる。このため、基板の面方位に依存しない方向性エッチングが可能である。この装置において活性ガスを使用し、活性イオンによる化学的な作用と物理的な作用によって、エッチング速度を上げたり選択的なエッチングを行う方法が RIE である。

RIE におけるエッチング対象の材料と反応性ガスについて参考文献 [28] の表 1.7 をもとに Table 2.1 にまとめた。本研究で用いるサムコインターナショナル研究所製の RIE-101L では  $\text{SF}_6$ 、 $\text{CHF}_3$ 、 $\text{O}_2$  を加工ガスとして常備している。そのため、本研究では  $\text{Si}_3\text{N}_4$  膜のエッチングには  $\text{CHF}_3$  を使用した。エッチング条件としては RF 電力、加工ガス流量、加工時間があり、これらの条件を変えながら実験を繰り返した。十分に  $\text{Si}_3\text{N}_4$  がエッチングされる条件として電力 100 W、ガス流量 20 sccm、加工時間 5 min とした。また、エッチングマスクであるレジストの除去には  $\text{O}_2$  を反応ガスとし、電力、ガス流量は同じ、加工時間を 2 min として加工することによってほぼ完全に除去できる。

Table 2.1: Gases used for reactive ion etching

| Material                       | Isotropy    | Gas                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|--------------------------------|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Si                             | isotropic   | CF <sub>4</sub> (+O <sub>2</sub> ) , SF <sub>6</sub> (+O <sub>2</sub> ) , NF <sub>3</sub> , XeF <sub>2</sub> , F <sub>2</sub> /He<br>SiF <sub>4</sub> (+O <sub>2</sub> ) , CClF <sub>3</sub>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|                                | anisotropic | CF <sub>4</sub> , CF <sub>3</sub> Cl , CF <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> , CFCl <sub>3</sub> , CF <sub>3</sub> Br , CCl <sub>4</sub> (+O <sub>2</sub> ) , C <sub>2</sub> F <sub>5</sub> Cl<br>CF <sub>4</sub> +H <sub>2</sub> , (CF <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> F <sub>6</sub> , SiF <sub>4</sub> , CF <sub>3</sub> Br)+(Cl <sub>2</sub> , Br <sub>2</sub> ) , Cl <sub>2</sub> (+H <sub>2</sub> )<br>SiCl <sub>4</sub> , Br <sub>2</sub> , I <sub>2</sub> , Cl <sub>2</sub> +Ar , SF <sub>6</sub> (+O <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> ) , HBr , HI |
| SiO <sub>2</sub>               | isotropic   | CF <sub>4</sub> (+O <sub>2</sub> )                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|                                | anisotropic | CF <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> F <sub>6</sub> , C <sub>3</sub> F <sub>8</sub> , CHF <sub>3</sub> (+N <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> )<br>(CF <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> F <sub>6</sub> , C <sub>3</sub> F <sub>8</sub> )+(H <sub>2</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> F <sub>4</sub> )                                                                                                                                                                                                                                   |
| Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> | isotropic   | CF <sub>4</sub> (+O <sub>2</sub> ) , CF <sub>4</sub> +O <sub>2</sub> +H <sub>2</sub> , SiF <sub>4</sub> (O <sub>2</sub> ) , NF <sub>3</sub> (O <sub>2</sub> )                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|                                | anisotropic | CF <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> F <sub>6</sub> , C <sub>3</sub> F <sub>8</sub> , CHF <sub>3</sub><br>(CF <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> F <sub>6</sub> , C <sub>3</sub> F <sub>8</sub> )+H <sub>2</sub> , CH <sub>2</sub> F <sub>2</sub> , CH <sub>3</sub> F , CF <sub>3</sub> Br+N <sub>2</sub>                                                                                                                                                                                                                                                 |
| resist                         | isotropic   | O <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> +CF <sub>4</sub>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|                                | anisotropic | O <sub>2</sub> +CH <sub>4</sub> , Ar , N <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> +O <sub>2</sub>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |

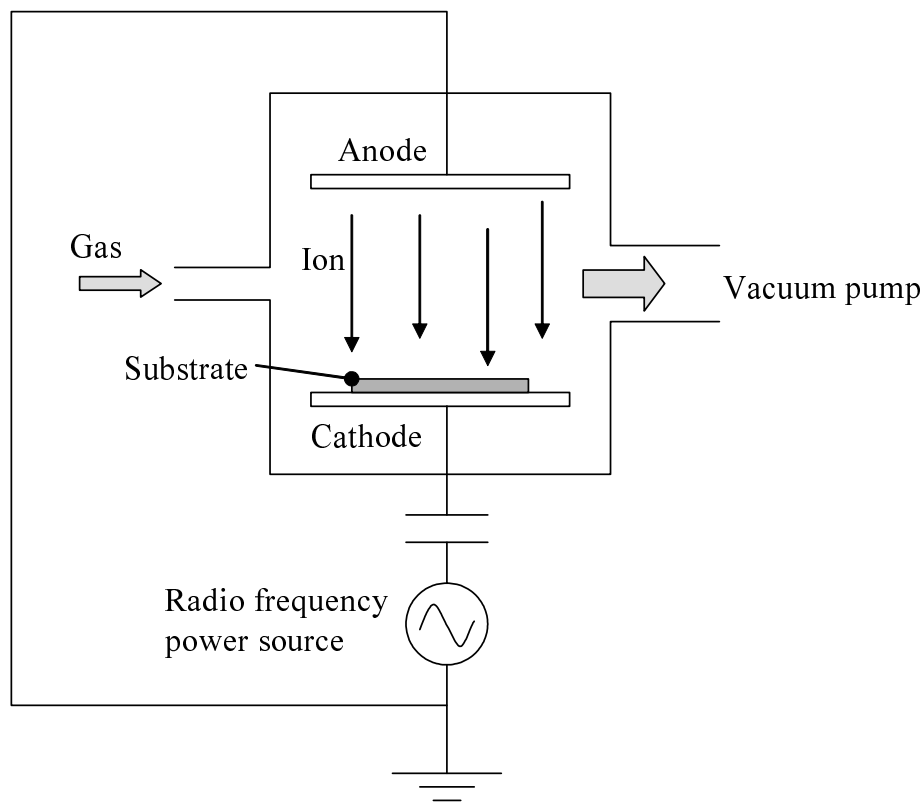


Fig 2.6: Schematic diagram of reactive ion etching machine

### 2.3.5 ウェットエッチング

エッチャントと呼ばれる薬液を使って材料を選択的に溶解除去する加工をウェットエッチングというが、一般的にはエッチャントの温度や成分を一定に保ち、同時に攪拌を行うため、Fig. 2.7のように温度コントローラ、還流器およびスターラなどの付属した装置を使用する。

ウェットエッチングには結晶構造に依存せず、露出した面がほぼ等速度でエッチングされる等方性エッチングと、結晶面でエッチング速度が大きく異なる性質を利用する異方性エッチングがある。本研究ではSi基板をエッチングしてダイアフラム構造を作るため、異方性エッチングを行う。

Siの異方性エッチングに用いられるエッチング液はアルカリ系で、KOH、ヒドラジン、EPW（エチレンジアミン - ピロカテコール - 水）あるいはTMAH（水酸化テトラメチルアンモニウム溶液）などが用いられる。通常は $\text{SiO}_2$ をマスクにすることが多いが、 $\text{Si}_3\text{N}_4$ のほうが高い耐薬性をもつので長時間のエッチングには適している。

先にあげたエッチング溶液の中でTMAHは毒性や半導体プロセスへの汚染の危険性が少なく、扱いやすいため本研究ではTMAHを使用することとした。実際の加工においては液温を80～85℃に保ちながら、およそ100 minほどエッチングを行っている。

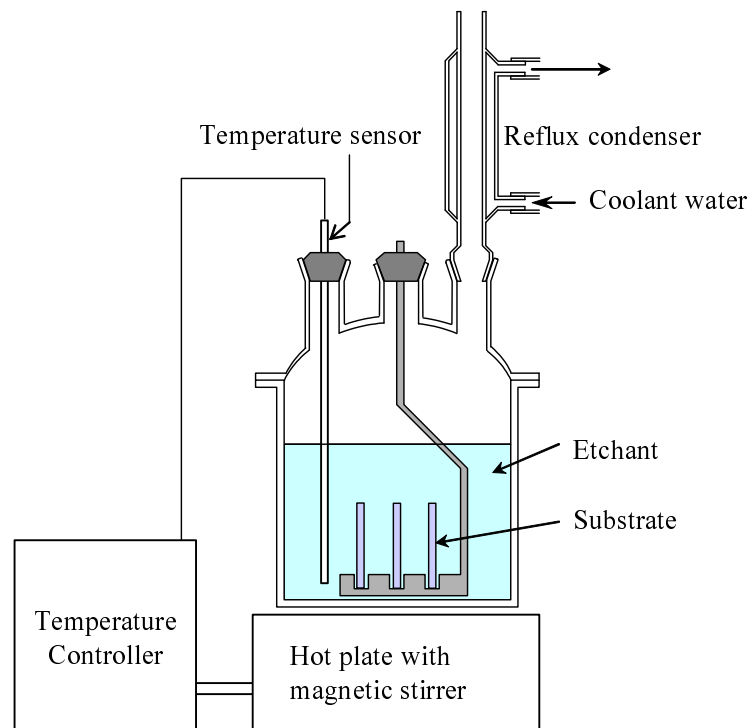


Fig 2.7: Experimental apparatus for wet etching

## 2.4 白金薄膜の基礎特性

スパッタリング工程によって成膜された白金抵抗体がどのような特性を有しているか実験的に確かめた．先に述べたように，微細熱式流速計においては抵抗温度係数の大きい金属抵抗線が必要となり，金属線の抵抗特性を把握しておくことは重要となる．白金は抵抗温度係数が大きい代表的な金属であるため本研究でも用いているが，純白金細線とはその生成方法が異なるために特性も変わることが考えられる．

Fig. 2.8 に形成した白金線の形状について示す．複数回の折れ曲がりと配線用部分である矩形部を持つような形とした．

まず，試作に成功した白金線パターン一つの温度と抵抗値の関係を調べた．実験方法は Fig. 2.9 に示すように白金線をスパッタしたチップごとホットプレートによって設定温度まで加熱する．十分に時間が経過し，チップ全体が設定温度になったあと白金線の抵抗値をデジタルテスタによって計測する．さらにチップへの加熱，冷却を繰り返し行い，ヒステリシスについても調べた．

結果は Fig. 2.10 に示す．温度の上昇に伴って抵抗値も大きくなっており，抵抗温度係数の高い白金線が形成できたといえる．また，目立ったヒステリシスもないことが分かる．

次に，白金抵抗線の形状とその抵抗値特性の変化について実験的に調べた．Fig. 2.11 に示すように線幅及び全線長を変えた白金線を同一チップ上に形成し，その抵抗値特性を上記と同じ方法によって実験を行った．詳しい形状については Table 2.2 にまとめる．前の実験でヒステリシスがないことが分かったので，各温度について過熱時と冷却時の複数回測定による平均値をプロットした結果を Fig. 2.12 に示す．形状が異なる

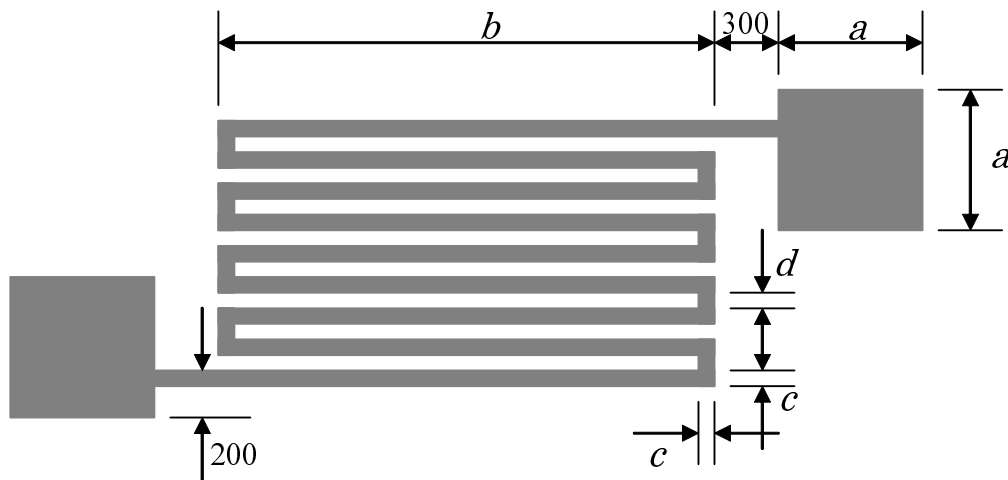


Fig 2.8: Sputtered Pt pattern (unit:  $\mu\text{m}$ )

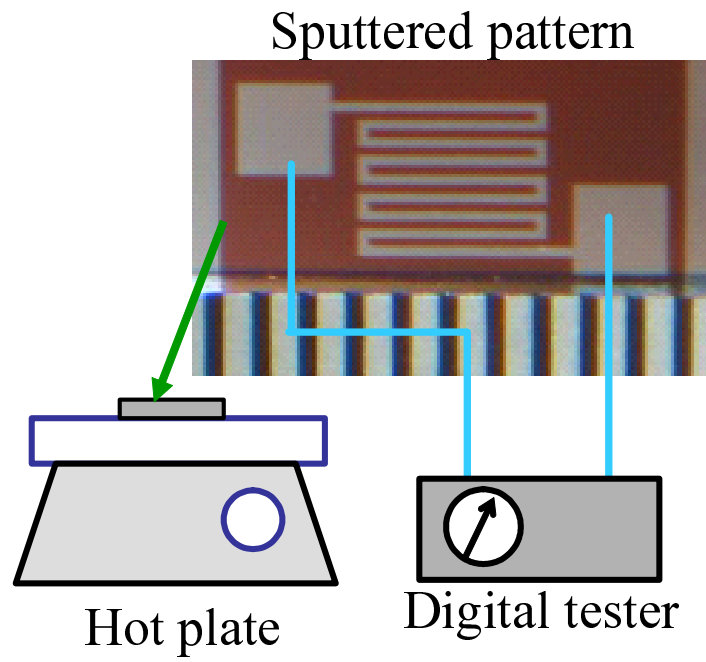


Fig 2.9: Experimental apparatus of measuring Pt characteristics

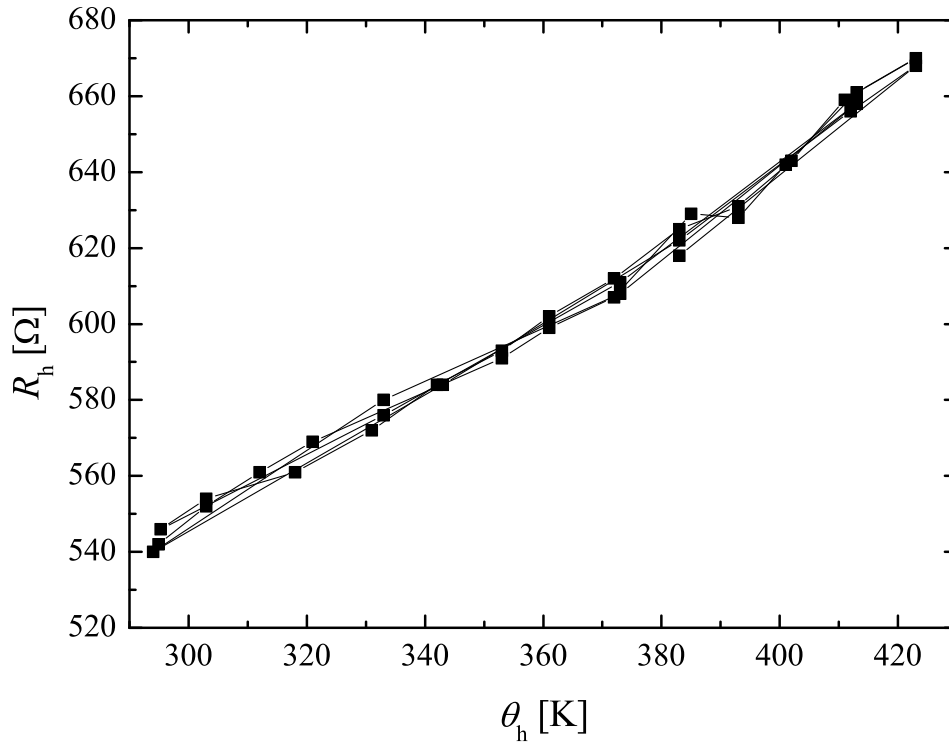


Fig 2.10: Experimental result of resistance vs. temperature

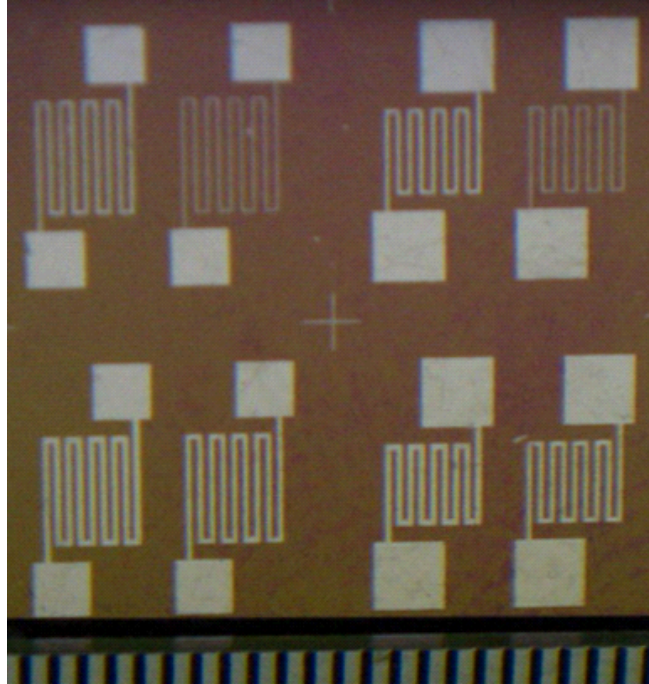


Fig 2.11: Photograph of tested Pt line pattern

Table 2.2: Sizes of sputtered Pt lines (unit:  $\mu\text{m}$ )

| Pattern | $a$  | $b$  | $c$ | $d$ |
|---------|------|------|-----|-----|
| A       | 1250 | 1500 | 20  | 260 |
| B       | 1250 | 1500 | 50  | 200 |
| C       | 1250 | 1500 | 80  | 140 |
| D       | 1250 | 1500 | 100 | 100 |
| E       | 1000 | 2000 | 20  | 260 |
| F       | 1000 | 2000 | 50  | 200 |
| G       | 1000 | 2000 | 80  | 140 |
| H       | 1000 | 2000 | 100 | 100 |

ため、各温度点でそれぞれの抵抗値は異なる値となったが、それぞれの抵抗線がいずれも温度の上昇に伴って抵抗値も上昇していることを確認した。ここで各温度での抵抗値を室温でのそれぞれの抵抗値で割った、抵抗値の上昇割合と室温からの温度差で比較した結果を Fig. 2.13 に示す。これによって抵抗温度係数の比較をすることができ、8通りの形状において抵抗温度係数に大きな差はないということが分かった。つまり抵抗温度係数に白金線の形状は影響していないことが確認できた。

また、本研究で用いているスパッタリング装置は、15 mm 四方のチップを同時に5枚設置することができる。そこで、上記の実験で製作したのと同様なチップを同時にスパッタリングし、スパッタリング装置の位置で、抵抗値に差が生じるかを確認した。同条件で同時にスパッタした白金線の抵抗特性が一致すれば、使用する装置においてスパッタ条件と抵抗値特性の関係が明らかになる。その結果を Fig. 2.14 に示す。抵抗値にかなりのばらつきが見られる。別の形状の抵抗値を比較しても同様の結果になった。白金線の形状は線幅、線長さを同じとしていることから、この抵抗値の差は膜厚の差による影響だと考えられる。これは、RF マグネトロンスパッタリング装置の特徴であるターゲット背面に設置された磁石の影響で放電強度に差異が生じ、ターゲットのスパッタされる部分に偏りがあり、結果として薄膜厚さの微妙な差が抵抗値のばらつきとして現れたと考える。また、Fig. 2.13 と同様に抵抗温度係数を比較したものが Fig. 2.15 になる。やはり、抵抗温度係数に差は生じておらず、膜厚の違いも抵抗温度係数に影響しないということが分かる。

以上の結果からスパッタ条件によって抵抗値を管理することは困難であるが、どのような形状、膜厚に対しても一定の抵抗温度係数をもつ白金抵抗線を形成可能であることが分かった。本研究ではこの抵抗温度係数を駆動回路設計に反映させた。

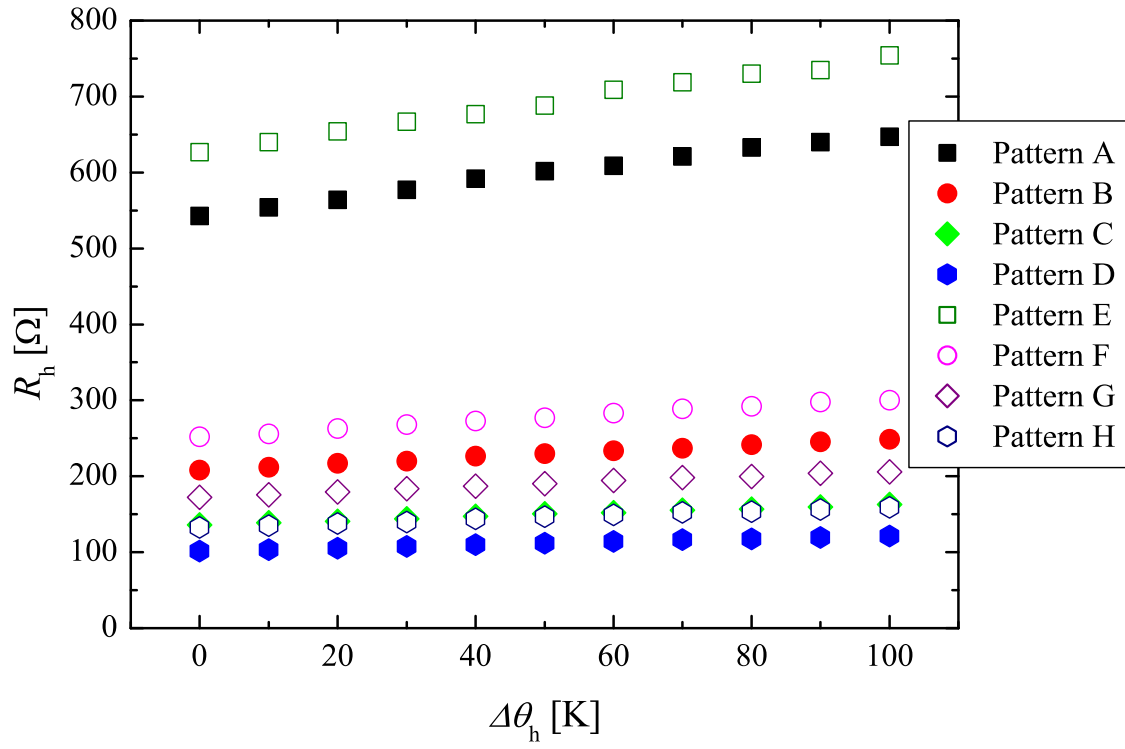


Fig 2.12: Resistance change by temperature (8 patterns on 1 chip)

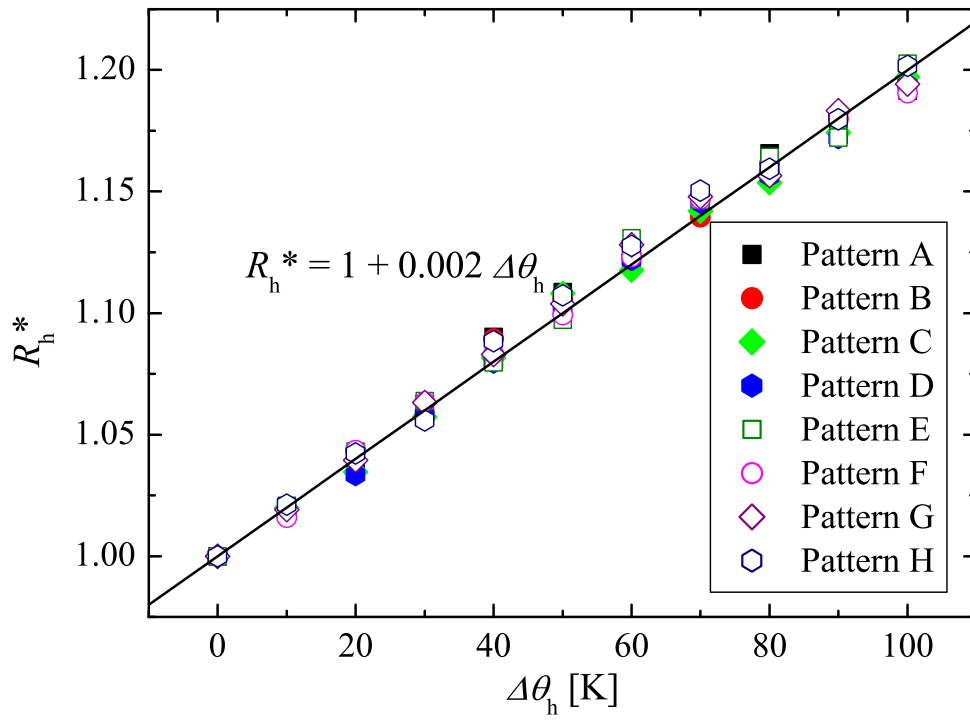


Fig 2.13: Temperature coefficient ratio of 8 patterns Pt lines on 1 chip

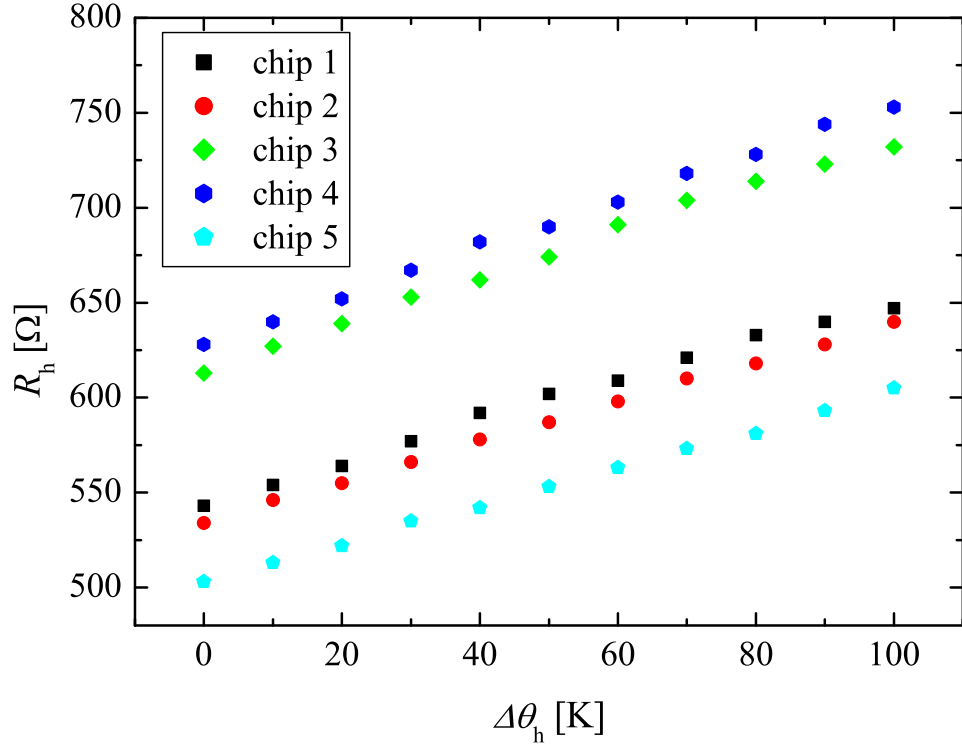


Fig 2.14: Resistance change of Pt lines on 5 chips with pattern A

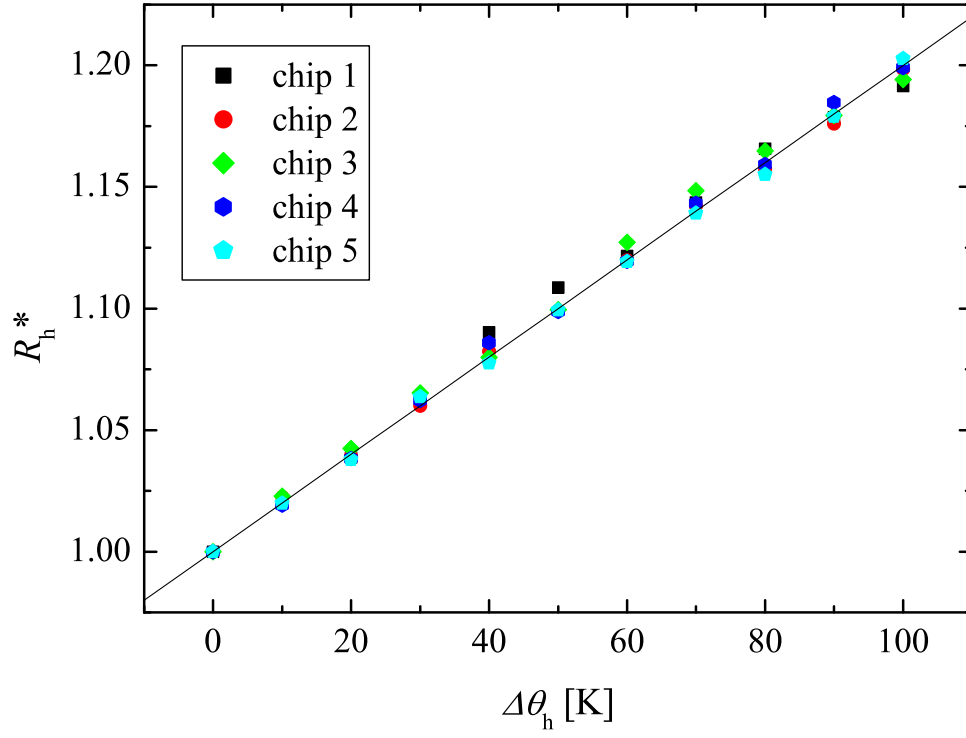


Fig 2.15: Temperature coefficient ratio of lines with pattern A on 5 chips

## 2.5 微細熱式流速計チップの製作

前節までに，センサ製作プロセスで提示した各行程それぞれの条件選定や，試作条件の提示を行った．主な加工条件を Table 2.3 にまとめる．Pt のスパッタリング時間は製作するセンサによって変え，実験を行った．微細熱式流速計のチップパターンは白金抵抗線の長さ，幅，センサ全体の大きさなどを変えていくつか製作した．主なものについて Table 2.4 にまとめ，以下に説明する．

Fig. 2.16 に示す微細熱式流速計チップは Fig. 2.1 に示した概略図通りに製作したものである．白金線形状は加熱測定素子，温度補償素子ともに，Table 2.2 におけるパターン A と同じ形状となっている．Fig. 2.17 に示す微細熱式流速計チップは加熱測定素子，温度補償素子は No.1 のチップと同じであり，また，加熱測定素子下部基板もエッチングして，ダイアフラム形状としている．ただし，加熱測定素子周りの貫通穴加工をしていない．

Fig. 2.18 に示す微細熱式流速計チップは加熱測定素子と温度補償素子の長さを変えている．配線パッドを除いた白金線の長さが 1:10 となるようにマスクを製作し，センサの製作を行った．実際に製作したセンサの抵抗値を計測したところ，おおむね抵抗比は 1:9 となっていた．2.4 節で実験によって確認したとおり，同一条件でスパッタした加熱素子と温度補償素子は形状の差は大きくなっても，抵抗温度係数はほぼ一緒になっていることを確認した．

Table 2.3: Condition of fabricating prototype sensor

| Parameter items               | Condition                     |
|-------------------------------|-------------------------------|
| Pt line pattern               | A (See Table 2.2 , Fig. 2.16) |
| Cr sputter power              | 50 W                          |
| Cr sputter time               | 2 min                         |
| Chamber pressure (Cr sputter) | 0.8 Pa                        |
| Pt sputter power              | 150 W                         |
| Pt sputter time               | 2 ~ 7 min                     |
| chamber pressure (Pt sputter) | 1.0 Pa                        |
| Ar flow rate (sputtering)     | 100 sccm                      |
| RIE RF power                  | 100 W                         |
| RIE gas                       | CHF <sub>3</sub>              |
| RIE Ar flow rate              | 20 sccm                       |
| RIE chamber pressure          | 20 mTorr                      |
| RF time                       | 5 min                         |

Table 2.4: Parameters of fabricated micro hot wire anemometer chips

| No. | Size of chip        | under heater | holes at diaphragm | temperature compensator     |
|-----|---------------------|--------------|--------------------|-----------------------------|
| 1   | 5×5 mm <sup>2</sup> | diaphragm    | exist              | same size of heater         |
| 2   | 5×5 mm <sup>2</sup> | diaphragm    | not exist          | same size of heater         |
| 3   | 5×5 mm <sup>2</sup> | diaphragm    | exist              | 10 times longer than heater |
| 4   | 3×3 mm <sup>2</sup> | diaphragm    | exist              | not exist on same chip      |
| 5   | 3×3 mm <sup>2</sup> | bulk         | —                  | not exist on same chip      |

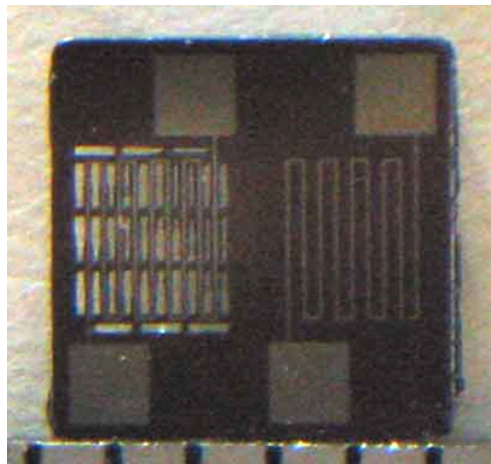


Fig 2.16: Photograph of the micro hot wire anemometer (No.1)

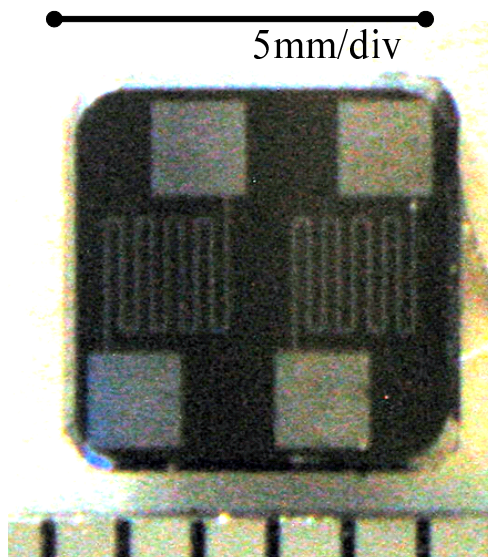


Fig 2.17: Photograph of the micro hot wire anemometer (No.2)

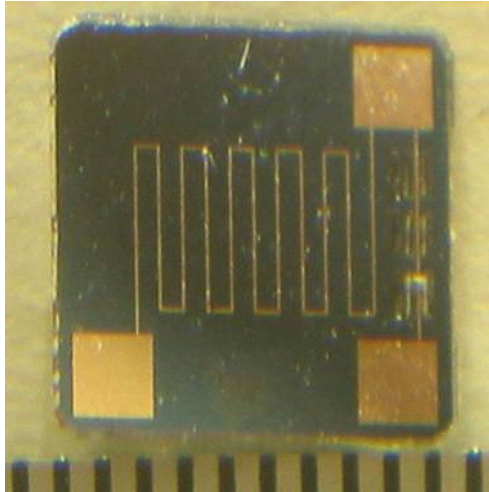


Fig 2.18: Photograph of the micro hot wire anemometer (No.3)

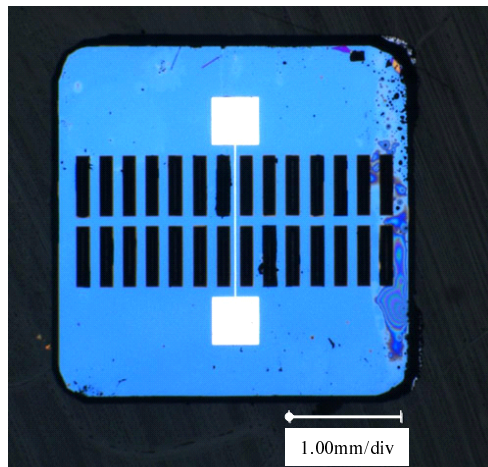


Fig 2.19: Photograph of the micro hot wire anemometer (No.4)

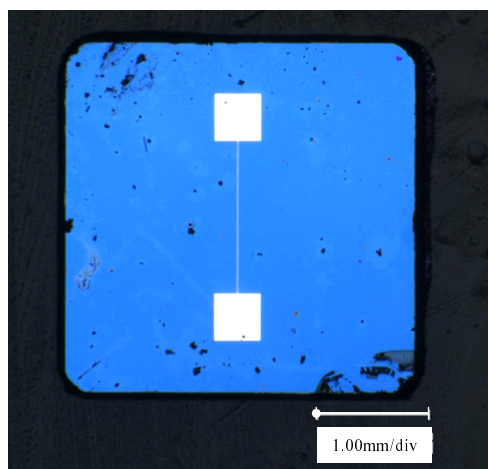


Fig 2.20: Photograph of the micro hot wire anemometer (No.5)

Fig. 2.19, 2.20 に特性計測に用いた微細熱式流速計チップを示す．これらのチップは全体の大きさを 3 mm 四方とし，白金線の線幅は装置の限界の 5  $\mu\text{m}$ ，長さは 1300  $\mu\text{m}$  である．また，厚さは先にも述べたとおり不均一となるが，およそ 1  $\mu\text{m}$  となった．また，Fig. 2.19 は加熱体下部をダイアフラム形状として，ダイアフラム上に穴も開けているのに対し，Fig. 2.20 は下部基板を全くエッチングしないバルク構造としている．チップが 3 mm 四方と小さく，ダイシングによる切り出しを行うとチップ自体が破損する事が多くなったことから，ウェットエッチングによる切り出しを行っている．

配線用の矩形部分から駆動回路への配線ははんだ付けをしようと試みたが，はんだごての熱でチッ化膜の変質や，白金線の断線，剥離などが起こったため不可能であった．また，導電性エポキシ接着剤を用いた接着による配線では，矩形部以外に接着剤が溢れ出して短絡を起こす，作業中に負荷をかけてセンサを破壊するなどして，非常に歩留まりが悪かった．そこで，ワイヤボンディング装置を用いて配線部から金の細線を延ばし，これを電極として導電性エポキシを用いて外部へ配線するようにした，また，3 mm チップでは金メッキピンを電極としてチップ近くに配し，チップ上電極とワイヤボンディングによって配線するようにした．

これらの製作した微細熱式流速計についてそれぞれ特性を計測したが，第 3 章以降においてはより構造を簡略化し，小型化した 3 mm 四方サイズの微細熱式流速計（No. 4 および No. 5）を用いることとした．これは，本論文においては微細熱式流速計の流速計測以外の応用を主たる目的としており，実験環境として急激な温度変化のない室温程度の気体を作動流体とすることを想定し，温度補償素子の代わりに可変抵抗を用い，実験時に調節することで十分な計測精度が得られるためである．

## 2.6 まとめ

本章ではまず微細熱式流速計の駆動原理について説明した．次に製作プロセスを示し，プロセスにおいて必要な各技術を示すとともに，加工条件の選択を実験的に行った．微細熱式流速計において一番重要な素子となる，スパッタリングによる白金抵抗線形成については，8 通りの形状の抵抗線をスパッタし，その特性を実験的に調べた．これにより，形状，膜厚による抵抗温度係数に差がないことを確かめた．また，装置の特性により，加工時間が同じで同形状のスパッタされた白金線でも，同じ抵抗値にならないことを確認し，回路製作においてこれらの特性を反映させる必要があることを確認した．最後に，形状を種々に変えた微細熱式流速計の製作例を示すとともに，次章以降で用いる微細熱式流速計の最適形状として 3 mm 四方のシリコン基板上に線幅 5  $\mu\text{m}$ ，長さ 1.3 mm の白金を蒸着したものとした．

## 第3章 微細熱式流速計を用いた流量計測

### 3.1 はじめに

本章では第2章で製作した3 mm 四方サイズの微細熱式流速計を用いて、流量計測を行い、特性を評価する。まず、微細熱式流速計を駆動する回路の設計方法について定常流量計測装置とともに説明する。また、定常流量計測実験を行い計測理論との整合性を確認する。

さらに、定常流量計測実験で得られた特性をもとに、非定常流量発生装置を用いて振動的な流れの計測および解析を行う。微細熱式流速計の動特性を支配する要因として管路内流速分布、微細熱式流速計内部エネルギー変化に着目し、それぞれ数値解析、実験によってそれぞれがどの程度特性に影響するかを明らかにする。

### 3.2 駆動回路設計，製作

本研究においてこのセンサはセンサ内の白金線をブリッジ回路内に組み込み、加熱測定用の白金線の温度を一定に保つようなフィードバック回路を付加する。ここでは、この駆動用付加回路の具体的な設計、製作方法について述べる。

#### 3.2.1 駆動回路

駆動回路は Fig. 2.2 に示したとおり、ブリッジ回路と差動増幅回路、加算回路によって構成されている。

まず、ブリッジ回路の平衡について考える。対象とするブリッジ回路を Fig. 3.1 に示す。このときブリッジの一部として用いる白金抵抗線の抵抗特性は次のように書き表せる。

$$R(\theta) = R(293) \left( 1 + \gamma_{293}(\theta - 293) + \delta_{293}(\theta - 293)^2 \right) \quad (3.1)$$

2.4 節で実験的な計測を行った結果、 $\gamma_{293} = 2000 \text{ ppm/K}$ 、 $\delta_{293}$  はほぼ無視できることが分かった。

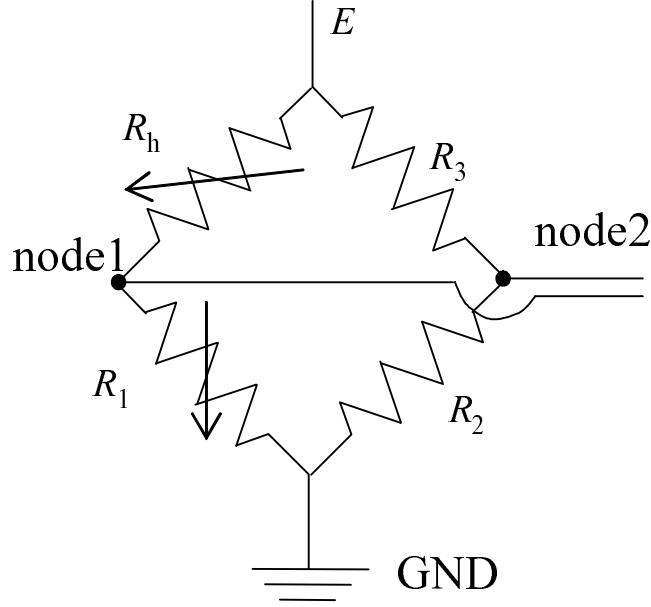


Fig 3.1: Bridge circuit

本センサは駆動時に加熱測定用素子を流体の温度よりも常に  $\Delta\theta$  K 高くなるようにコントロールする．すなわち，センサ駆動時に加熱測定用素子の抵抗値は，次の式で求められる．

$$R_h(\theta) = R_h(293)(1 + \gamma_{293}(\theta - 293)) \quad (3.2)$$

本研究においては温度補償を行わない単純な構成とした．ブリッジ回路における各抵抗のバランス条件としてまず次式が成立する．

$$\frac{R_h(\theta)}{R_1} = \frac{R_3}{R_2} \quad (3.3)$$

また，ブリッジ全体に流れる電流のうち加熱測定素子を含む側の回路へ流れる電流の割合を大きくするため，

$$R_h(\theta) : R_3 = 1 : 10 \quad (3.4)$$

とした．さらに，

$$R_h(\theta) : R_1 = 10 : 1 \quad (3.5)$$

程度とすることで，加熱測定素子における電力消費がブリッジ回路中で一番大きくなり，回路効率をあげることができる．

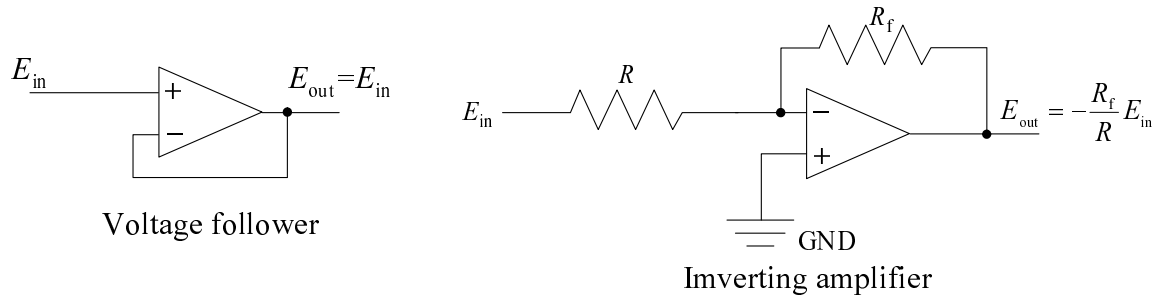


Fig 3.2: Circuit diagram of voltage follower and inverting amplifier

ただし，ブリッジが完全にバランスすると，node1 と node2 における電位差が全くなり駆動回路が動作するきっかけを失ってしまう．そこで実際にはまず  $R_3$  を  $R_h(\theta)$  の 10 倍程度の精密固定抵抗で決定し，ついで  $R_2$  をその 1/10 の精密固定抵抗とする． $R_1$  は可変抵抗とし，駆動状況に応じて微調整することとした．

次に増幅回路について考える．

駆動時の状態を考えると加熱測定素子の抵抗値は，流体の流れがない状態に比べて流れがある状態のときに下がっていく．このとき Fig. 2.2 のブリッジのバランスが崩れる，node1 における電圧の方が node2 よりも電位が高い状態になる．ここで供給電力を増やしたいので，増幅回路の働きは，

$$E = K_{amp} (E_{node1} - E_{node2}) \quad (3.6)$$

となるべきである．

本研究では，node1 からの出力を OP アンプを用いたボルテージフォロワに，node2 からの出力を OP アンプを用いた増幅率 1 の反転増幅器に入力後，ボルテージフォロワに入力する．ボルテージフォロワと反転増幅器は Fig. 3.2 に示す．

これによってブリッジ回路と増幅回路までの間がイマジナリーショートになり，ブリッジ側への逆電流流入防止になる．それぞれボルテージフォロワ，反転増幅器を介した後 OP アンプを使った加算回路に入力することで加算回路の出力は  $E_{node2} - E_{node1}$  となる．加算回路の回路図は Fig. 3.3 に示す．さらにこれを反転増幅回路に入力し電位差を増幅する．増幅後再びボルテージフォロワを通してバイアス電圧との加算回路に接続する．

OP アンプの一般的な差動増幅回路は，入力する電圧それぞれ独立した増幅率を個別の抵抗の組み合わせによって決定できる [95] ため，差動増幅率を共通に決めたいときには不都合となる．そのため，上記のような組み合わせにすることで可変抵抗によって一意に増幅率が決められる仕様にした．

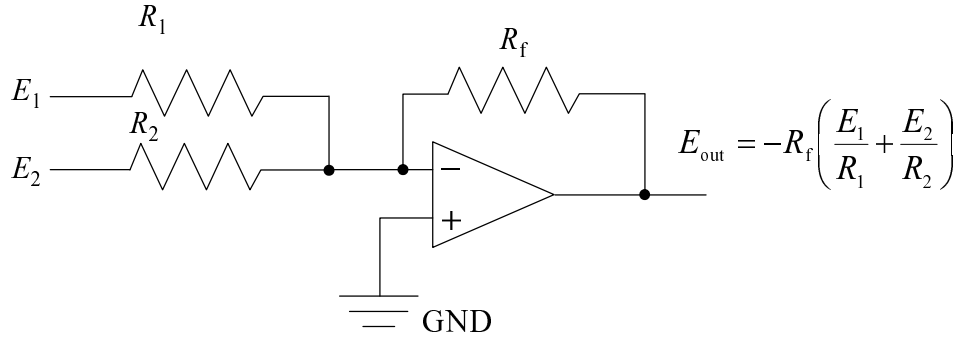


Fig 3.3: Adding circuit using operational amplifier

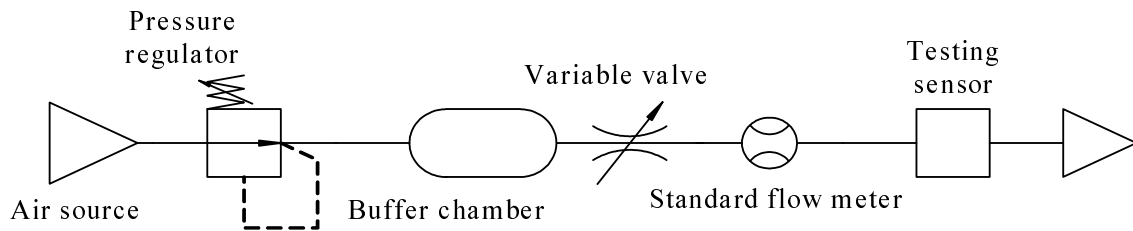


Fig 3.4: Experimental apparatus for measurement of static flow characteristics

### 3.2.2 回路設計用予備実験

実験装置の概略図は Fig. 3.4 に示すとおりである．空気圧供給源から減圧弁によって減圧された後，圧力補償容器に充填される．圧力補償容器からは可変絞りによって調節された流量が流出する．可変絞りの下流には校正用流量計と，試作したセンサが順に接続され，試作センサを設置した流路を通過したあと，大気解放となる．

試作したセンサを設置するための流路の概略図および写真は Fig. 3.5，Fig. 3.6 に示す．センサ表面にある白金線配線部から外部の回路に接続する必要がある．このためセンサを外径 8 mm，内径 6 mm の中空円管末端部に接着し，配線は中空管内を通して外部回路に接続できるようにしている．中空管であるため空気が内部を通過して漏れないように配線を通したあとは内部を接着剤で封入している．また，センサ設置点の上流側には整流格子として #120 の金属メッシュを複数枚重ねて設置している．

実験方法は，以下のとおりである．まず，可変絞りを調節することによって任意の流量に調整する．十分時間を置いて流量が安定した状態で，Fig. 2.2 におけるブリッジ全体印加電圧を変えながら，各 node の電位差を計測した．ただし，電位差  $\Delta E$  は非常に微小であるため，あらかじめ構成した差動増幅器によって 100 倍まで増幅した値を計測している．

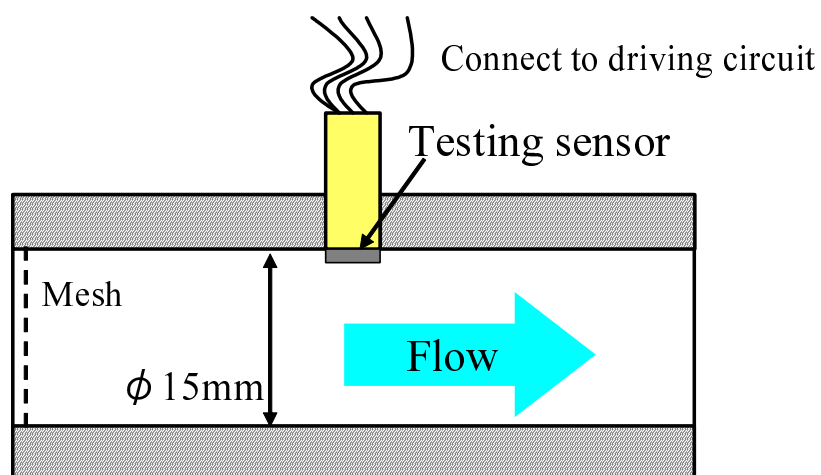


Fig 3.5: Schematic diagram of flow channel with the developed sensor

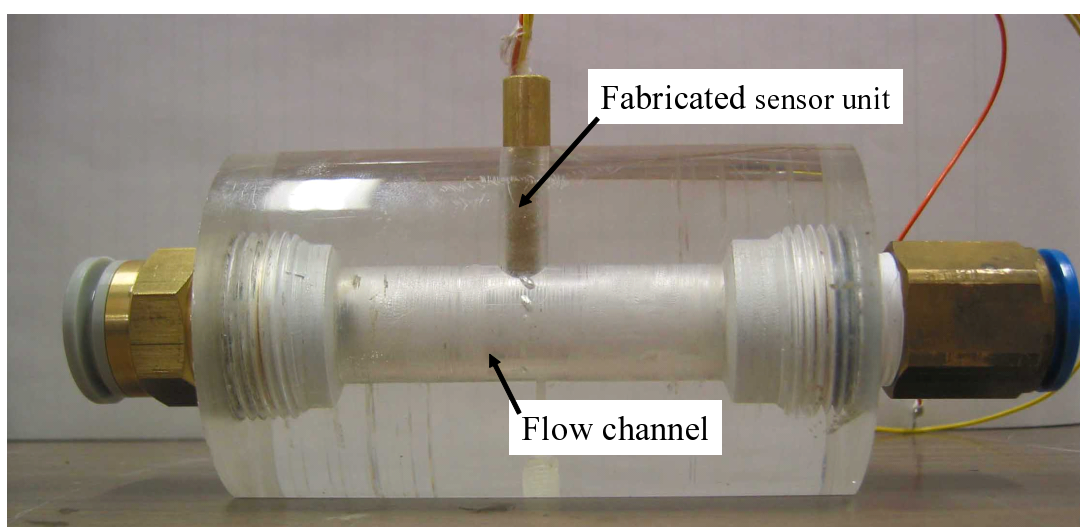


Fig 3.6: Photograph of flow channel with developed sensor

実験結果は Fig. 3.7 に示す．全体印加電圧が小さいうちは流量による電位差の違いは見られないが印加電圧の増加に伴って白金抵抗線が発熱し抵抗値が減少するため，電位差の変化量が減少する．さらに電圧を上げていくと流量によって電位差の変化量に差が生じる．このとき，Fig. 3.7 中の黒の一点鎖線のように線を引くとき，この線と各計測点の交点が駆動回路の動作点となる．また， $x$  軸との交点がバイアス電圧，傾きからゲインを求めることができる．

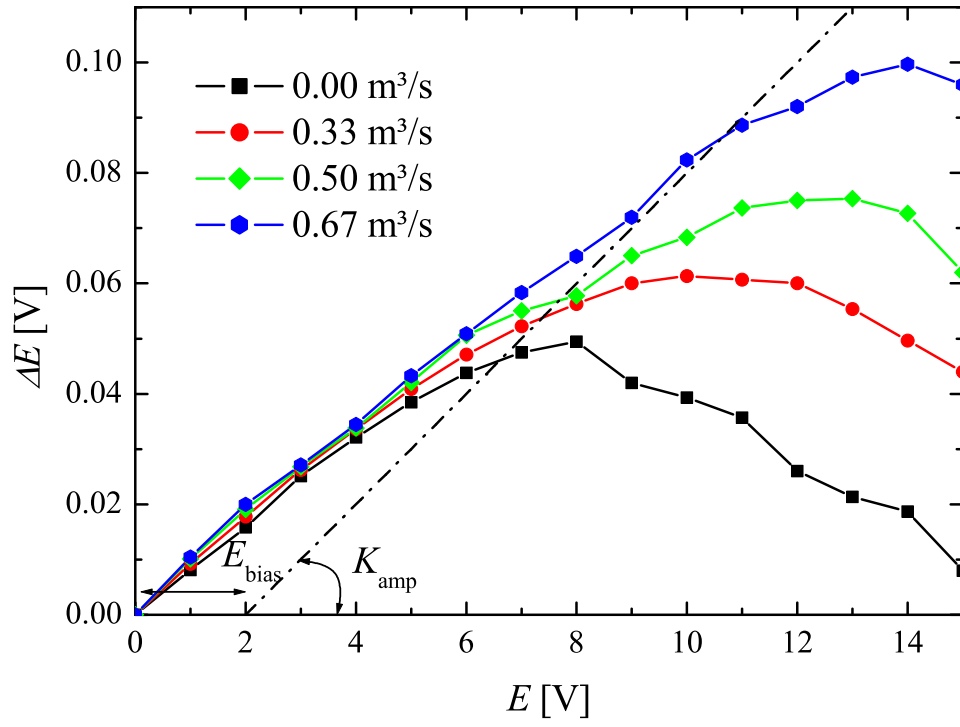


Fig 3.7: Experimental results of set electric circuit

### 3.3 微細熱式流速計の定常特性実験

製作した微細熱式流速計の静特性として、定常流に対する出力特性を校正用流量センサを用いて実験的に調べた。実験装置は Fig. 3.4 に示したものと同一であり、校正用流量センサのところに音速ノズルを用いている。

校正用流量計として用いている音速ノズルは平井社製の MR Series の MRS-103 である。MRS-103 には超精密加工音速ノズルの他に、ノズル下流側圧力センサ（ストレーン・ゲージ型）、ノズル上流側測温抵抗体（Pt-100  $\Omega$ ，JIS-A，4Wire）および、圧力温度測定用電子回路が内蔵されている。測定流量範囲は 18～45 SLM であり、計測不確かさは  $\pm 0.2\%$  以下である。また、このセンサ・ユニットと接続することで正確に質量流量を表示することができるディスプレイ・ユニット (MR-D) をあわせて使用した。MR-D にはノズル上流側圧力センサ（YEW 社製、特注品）、演算回路、ディスプレイなどが搭載されている。

駆動回路ゲイン、バイアス電圧を変えて実験を何回か行った。ゲイン 100 及び、200 のときの実験結果を Fig. 3.8 に示す。バイアス電圧は 1.5 V で共通である。流量を単調増加・減少させながらヒステリシスについても調べたが、流量とセンサ出力電圧との間には一定の関係が成り立ち、ヒステリシスほぼなく、繰り返し実験においても出力値変動は  $\pm 0.05$  V 以内に収まっていることを確認している。

ここで、実験計測点と理論式との整合性を確認する。式 (2.6) において一般的に  $n=2$  であるから、定数  $K_1$ ， $K_2$  を用いて簡単に書き直すと、

$$E = \sqrt{K_1 + K_2 (\rho u)^{1/2}} \quad (3.7)$$

となる。

Gain=100 の時の結果が式 (3.7) に一致するように  $K_1$  と  $K_2$  を求めた。結果は Fig. 3.9 に示すとおりであり、実験結果はおおむね理論と一致していることを確認した。同様に Gain=200 の場合にも適切に  $K_1$ ， $K_2$  をとることによって、4 乗根の曲線に一致することを確認している。

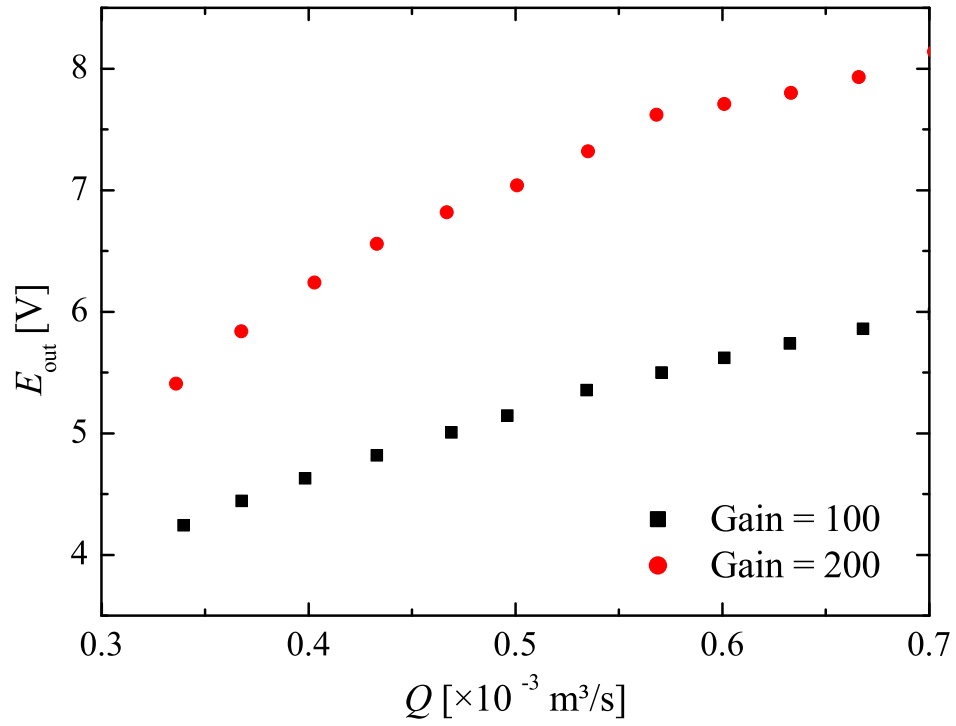


Fig 3.8: Experimental results of measuring static flow rate using micro hot wire anemometer

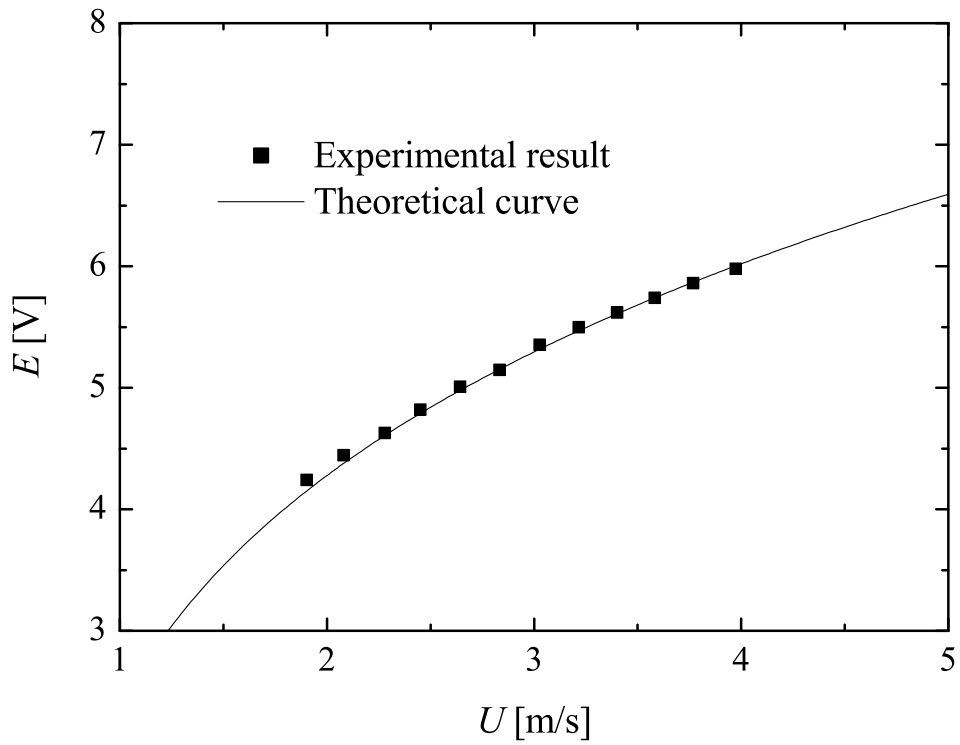


Fig 3.9: Static characteristic of output voltage vs. mean velocity

### 3.4 非定常流量計測の実験装置，実験方法

本節では，微細熱式流速計を用いた流量計測における周波数特性を調べるための実験装置として使用した，非定常流量発生装置について述べる．

#### 3.4.1 等温化圧力容器

加圧した気体を通常の圧力容器から放出する場合，急激な膨張に伴って気体の温度は著しく低下してしまう．そのため，圧力から放出流量を測定する方法は通常の圧力容器を用いると圧力応答に温度変化の影響が密接に関連し，正確な流量の測定が困難であるという問題点がある．

この問題を解決するため，本研究室では放出時における容器内気体の状態変化を等温変化とすることができる等温化圧力容器を提案し，圧縮性流体の流量計測を行う手法を提案してきた [96–99]．

等温化圧力容器は空気などの熱容量に比べて，鉄や銅などの金属類の熱容量が非常に大きいことを利用する．すなわち Fig. 3.10 のように容器内に線径の細い金属綿を封入することにより伝熱面積を大きくし，熱容量の大きな金属綿によって気体の温度降下を補完し，容器内における状態変化をほぼ等温変化とすることができる．ここで，容器内から放出される流量を求める方法について以下に示す．まず一般に圧縮性流体は飽和状態を除き，理想気体と仮定され，容器内において気体の状態方程式が成立する．

$$PV = WR_{\text{air}}\bar{\theta} \quad (3.8)$$

ここで圧力容器内の状態を考えるので時間的容積変化がないことから，式 (3.8) の両辺を微分することで，次式が得られる．

$$V \frac{dP}{dt} = GR_{\text{air}}\bar{\theta} + WR_{\text{air}} \frac{d\theta}{dt} \quad (3.9)$$

ここで放出時の容器内の状態変化を等温であると仮定することにより次のように整理できる．

$$G = \frac{V}{R_{\text{air}}\theta_a} \frac{dP}{dt} \quad (3.10)$$

つまり，等温化圧力容器の容積  $V$  と室温  $\theta_a$  が既知であれば，容器からの瞬時放出流量は圧力応答のみによって求められる．この原理を用いることで等温化圧力容器内の圧力を逐次測定することにより放出流量を算出することができる．また，ここで質量流量  $G$  は変換係数  $k$  を用いて標準状態の体積流量  $Q$  に換算できる．

$$Q = kG \quad (3.11)$$

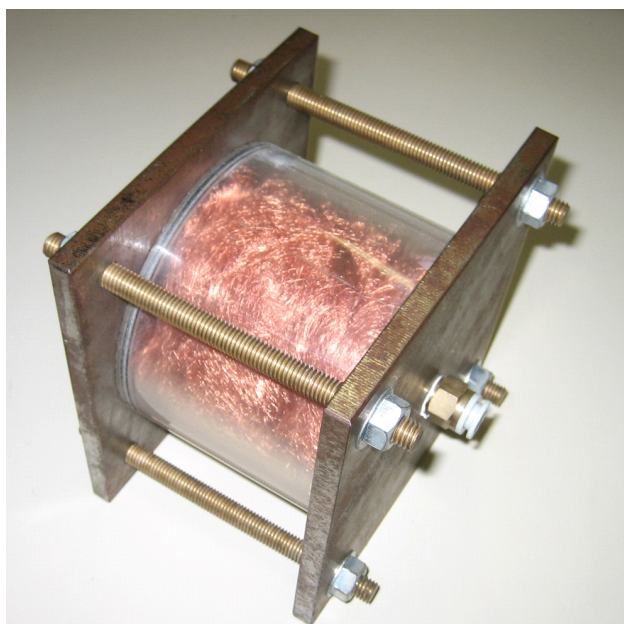


Fig 3.10: Photograph of an isothermal chamber

### 3.4.2 非定常流量発生装置

前項で説明したとおり，等温化压力容器を用いると容器からの放出流量は容器内圧力変化から求めることができる．これを利用して任意の非定常流量を発生可能にした装置が非定常流量発生装置 [76] である．本装置は 50 Hz までの振動流に対して不確かさ 5%を補償している．

非定常流量発生装置の概略図は Fig. 3.11 に示すとおりであり，装置は等温化压力容器，圧力計，減圧弁，サーボ弁，手動弁および A/D，D/A 変換機を搭載した PC から構成されている．この装置に用いるサーボ弁は 100 Hz までの動特性を補償している．

空気圧供給源より供給される空気は減圧弁によって必要な圧力まで減圧され，手動弁を開くことによって等温化压力容器内に導入される．十分充填された後手動弁を閉じる．この压力容器内の圧力は半導体式圧力センサによって測定し，A/D 変換器を通して PC へと取り込む．一方，サーボ弁には D/A 変換器を通して所定の流量を発生させるための制御電圧が送出される．このとき，PC 内では等温化压力容器内の圧力測定結果から非定常流量を発生させるための演算を行い，PI 制御によってサーボ弁の開度を制御している．演算の基礎式は式 (3.9)～式 (3.11) を用いている．また，微細熱式流速計の出力も A/D 変換器を用いて PC に取り込むことができる．

### 3.4.3 実験方法

実験では測定する振動流を，前章で測定した流量範囲を中心に平均流量，振幅流量をそれぞれ  $0.50 \text{ m}^3/\text{s}$ ， $1/6 \text{ m}^3/\text{s}$  とした．発生流量は前項で述べたとおり，等温化压力容器内の圧力変化から計算して求めており，微細熱式流速計の指示流量は定常流量を計測した時の校正式から算出している．

発生流量，微細熱式流速計の指示流量ともにノイズ成分が強いため，測定データを収集後オフラインで発生周波数の2倍を遮断周波数としたローパスフィルタを施した．離散系のローパスフィルタとして付録 A.2 に示す3次のバターワース型ローパスフィルタを使用した．フィルタリングによる位相遅れを補償するために，前進フィルタリングと後進フィルタリングを併用している．

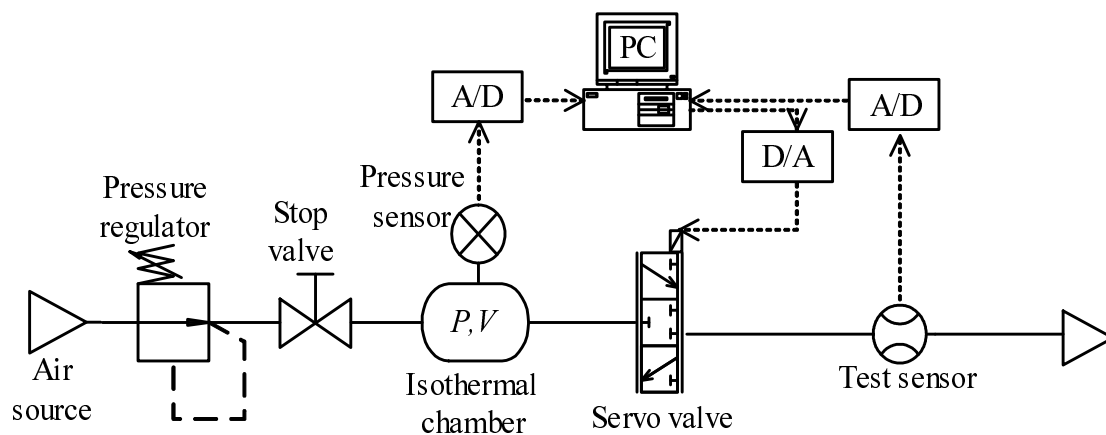


Fig 3.11: Schematic diagram of unsteady flow generator

### 3.5 流速分布の動的評価

前章では微細熱式流速計を用いた定常流量計測を行ったが，そもそも微細熱式流速計の直接計測量は流速である．このため，管内の流速分布を知ることはセンサの配置位置を考える上で非常に重要となる．そこで本節では Fig. 3.12 に示す解析モデルを用いて流速分布の数値解析を行う．また，数値解析の妥当性を実験によって確認する．

#### 3.5.1 数値解析

円管内の非圧縮性流体の流速分布は，円筒座標系のナビエーストークス方程式を解くことによって求めることができる．圧縮性については，定常的には，流速  $v$  が流体中の音速  $C$  に比して十分小さい場合に無視することができる．空気中の音速は次式で与えられる．

$$C = \sqrt{\frac{\kappa P}{\rho}} \quad (3.12)$$

本研究で対照とする流量域と実験に使用している流路を考慮すると，平均流速は最大で 4 m/s である．また，センサ下流が開放端としていることからセンサ配置位置における圧力はほぼ大気圧とみなすことができるので，20℃における音速はおよそ 340 m/s となり，定常流において圧縮性はほとんど無視できる．

また非定常状態では，管路長を  $l$  とし，そこを圧力変化が伝わるのに要する時間  $l/C$  が振動流の周期  $T$  に対して十分小さければ，管内の流速変化に対して，管内の波動伝播に

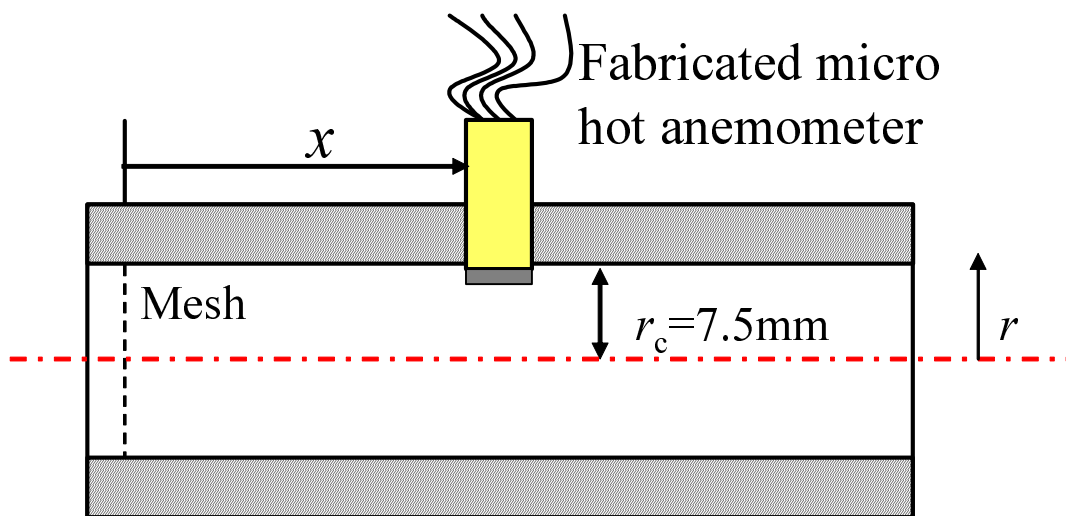


Fig 3.12: Simulation model of velocity profile

要する無駄時間が無視でき、圧縮性を無視しえる。本実験装置を考慮すると、 $T=0.02$  s 程度までならば波動伝播の方が十分速いため、圧縮性を無視してよいと考える。

さらに以下の仮定を置く。(1) 流れは軸対象層流とし、円周方向の速度成分を零とする。(2) 半径方向の速度成分は軸方向の速度成分  $u$  に比べて十分小さい。(3) 入り口での流速  $u_e$  は断面全体にわたり一様で、ある時間平均流速  $\bar{u}$  を中心に正弦状に振動しているものとする。(4) 慣性項中の対流項を  $\bar{u}\partial u/\partial x$  で近似する。

これらの仮定により、管軸方向流速  $u$  に対する基礎方程式は次の形で与えられる。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right) \quad (3.13)$$

入り口部分での一様流はセンサ上流に設置された整流格子によって実現されたと考え、整流格子から軸方向の距離を  $x$  とする。 $x=0$ 、すなわち整流格子の位置において流速  $u_e = \bar{u}(1 + B \sin(\omega t))$  が与えられたとき、境界条件として、 $r=r_c$  において  $u=0$ 、 $r=0$  において  $\partial u/\partial r=0$  として、式 (3.13) を解くことにより、助走区間内での流速分布を次の式で書くことができる [100]。

$$u(x^*, t^*, r^*) = 2\bar{u}(1 - r^{*2})[1 + B \sin(\omega^* t^*)] + \sum_{i=0}^{\infty} \frac{4\bar{u}}{\alpha_i^2} \left( \frac{J_0(\alpha_i r^*)}{J_0(\alpha_i)} - 1 \right) \left\{ [1 + B \sin \omega^*(t^* - x^*)] e^{-\alpha_i^2 x^*} + \frac{B\omega^* \alpha_i^2}{\alpha_i^4 + \omega^{*2}} \left[ \cos \omega^* t^* + \frac{\omega^*}{\alpha_i^2} \sin \omega^* t^* - \left( \cos \omega^*(t^* - x^*) + \frac{\omega^*}{\alpha_i^2} \sin \omega^*(t^* - x^*) \right) e^{-\alpha_i^2 x^*} \right] \right\} \quad (3.14)$$

ここに、 $r^* = r/r_c$ 、 $t^* = t\nu/r_c^2$ 、 $x^* = x\nu/r_c^2 u_0$ 、 $\omega^* = r_c^2 \omega/\nu$  とする。

また、 $x=0$  における流速を  $\bar{u}$  で一定と与えることによって定常流における解が次式の形で求められる [101]。

$$u(x^*, r^*) = 2u_0(1 - r^{*2}) + \sum_{i=0}^{\infty} \frac{4\bar{u}}{\alpha_i^2} \left( \frac{J_0(\alpha_i r^*)}{J_0(\alpha_i)} \right) e^{-\alpha_i^2 x^*} \quad (3.15)$$

式 (3.14) および式 (3.15) において  $\alpha_i$  は  $J_2(\alpha)$  の  $i$  番目の零点である。安定解を得るためには、 $i=50$  まで繰り返し計算を行えば十分であることを確認した。

条件として、振動流の流入条件  $Q = 0.5 + 1/6 \sin(\omega t)$  m<sup>3</sup>/s から求められる非定常流入流速条件と、その流速条件における最大値と最小値を定常流入流速条件として解析を行った。解析結果を Fig. 3.13 に示す。

Fig. 3.13 中において実線が定常流、破線が振動流を表している。またそれぞれの値は、 $Q = 0.5$  m<sup>3</sup>/s のときの入り口平均流速で無次元している。まず、整流格子からの距離が大きくなるほど流速分布が発達し、放物線分布に近づいていることが分かる。さ

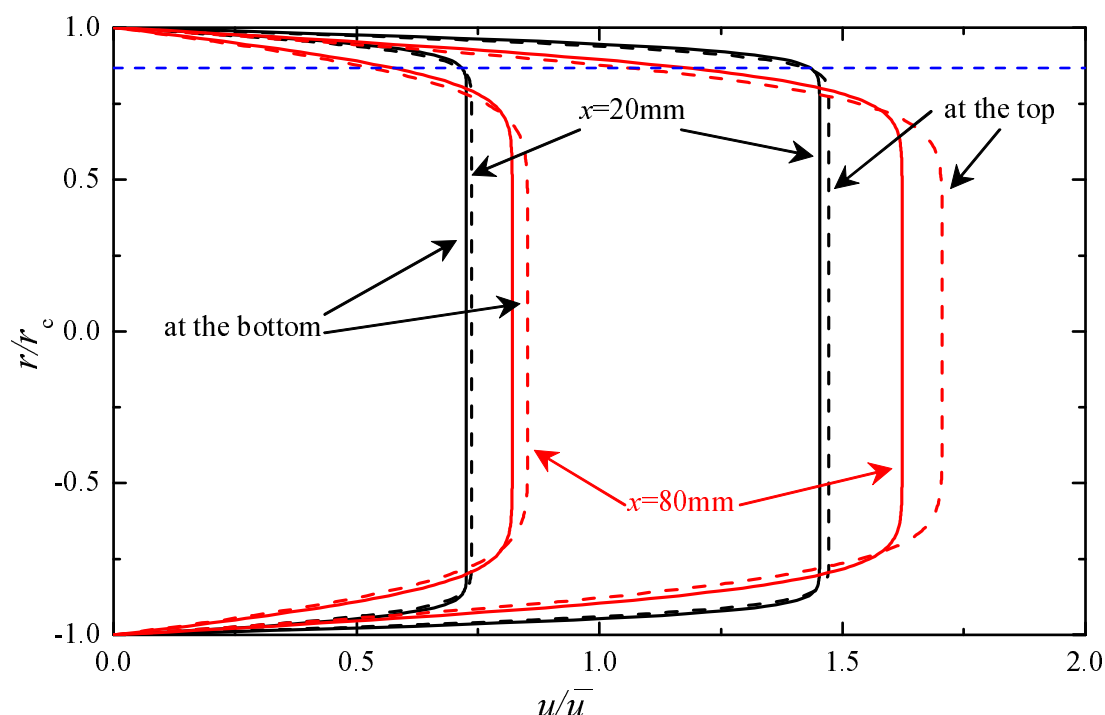


Fig 3.13: Simulation result for flow velocity profile (solid line shows static flow, broken line shows sinusoidal flow)

らに，振動流のほうが定常流に比べて流速分布の発達が進んでおり，振動流と定常流の流速分布の差は，整流格子からの距離が離れるほど大きくなることから，このことから，微細熱式流速計の位置によっては振動流と定常流の流速分布の差を大きく受けることが明らかとなった．

$x=80\text{ mm}$  においては流速分布の発達が進んでおり，流量によって境界層厚さに差異が生じ，振動流と定常流において流速が一致する点は半径方向による差がある．一方， $x=20\text{ mm}$  の場合には，図中の青は線で示した位置であれば，流量によらず振動流と定常流における流速がほぼ一致するといえる．本研究では流速から流量を求めているため，このように微細熱式流速計の整流格子からの距離及び，流路壁面からの距離が特性に大きく影響することが明らかとなった．微細熱式流速計は実際には円管外部から挿入しているため，管路内壁は円弧であるのに対しセンサ表面は平面であるため，センサが最も円管中心に近づく点を Fig. 3.13 の青破線的位置に来るように設置することとした．実験で用いた流路においては壁面から  $1\text{ mm}$  の位置となる．このように壁面近傍に微細熱式流速計を設置することによって，障害物として流れを乱す影響も低く抑えられると考えられる．

振動流量計測の実験では壁面からの位置を固定し，数値解析結果に示したように整

流格子からの位置を 20 mm , 80 mm それぞれの位置に微細熱式流速計を設置し , 実験を行った .

### 3.5.2 実験による検証

微細熱式流速計の整流格子からの位置の改善が実際に動特性の向上への有効性を確認するため , 非定常流量発生装置を用いた実験を行った . 実験結果を解析結果と合わせて Fig. 3.14 , Fig. 3.15 に示す .

数値解析の方法について以下に説明する . まず , 式 (3.15) において  $x^*$  ,  $r^*$  を実験条件と同じ値とし ,  $\bar{u}$  を変数にとることで任意の管内一点の流速から , 管内平均流速求める関係式を得る . 次に非定常方程式 (3.14) から求めた管内一点流速の時間変動を , 定常方程式 (3.15) から求めた校正式によって平均流速の時間関数に換算することで得られる関数を , 解析解とする .

$x=80$  の時 , 計測値は発生流量に比べると位相が若干遅れ , ゲインの減少も見られる . しかし , 数値解も計測値と同様に位相の遅れ , ゲイン減少がみられ , 数値解と計測値はほぼ一致している .

$x=20$  とした場合 , 計測値は流量振動の最大値で発生流量に比べて若干小さい値となったが , 位相や最小値での流量はほぼ一致しており , 流量計測という点では動特性が向上したように見える . 数値解と比較してもいい一致を見せている .

Fig. 3.16 , Fig. 3.17 にはピーク値付近における発生流量 , 計測値 , 数値解析解を拡大したものを示している .  $x=80$  の場合 ,  $x=20$  の場合ともに計測値と解析解は 3 % 以内のずれしか生じていない . このことから , ナビエストークス方程式の近似解によって流速分布の解析を行うことは , 微細熱式流速計を流量計測に利用する際の動特性向上に有効であることが確認された .

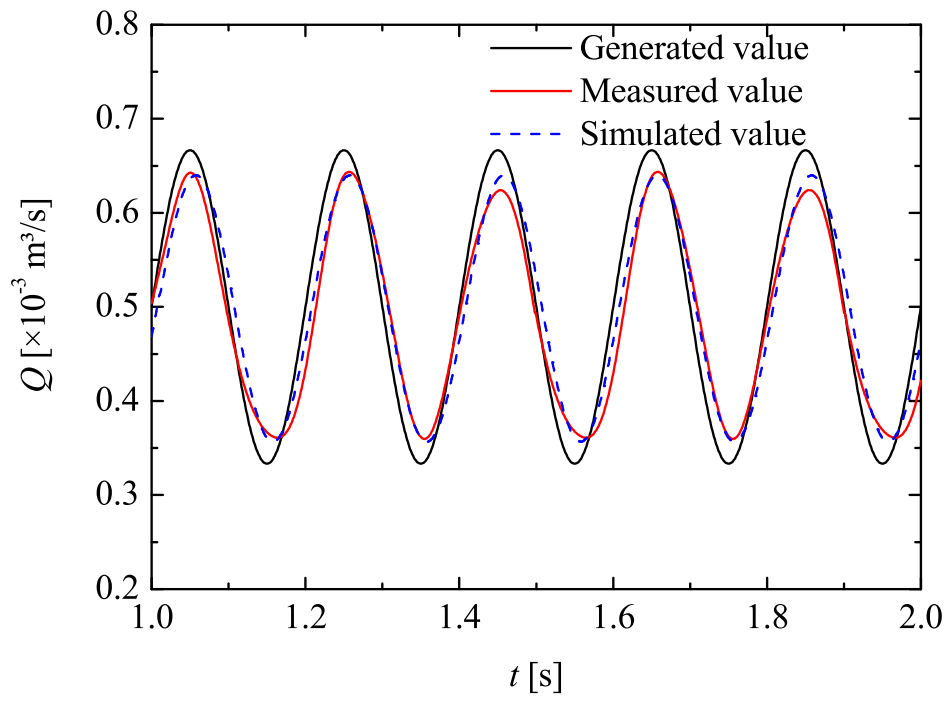


Fig 3.14: Dynamic response of micro hot wire anemometer ( $x=80$  mm)

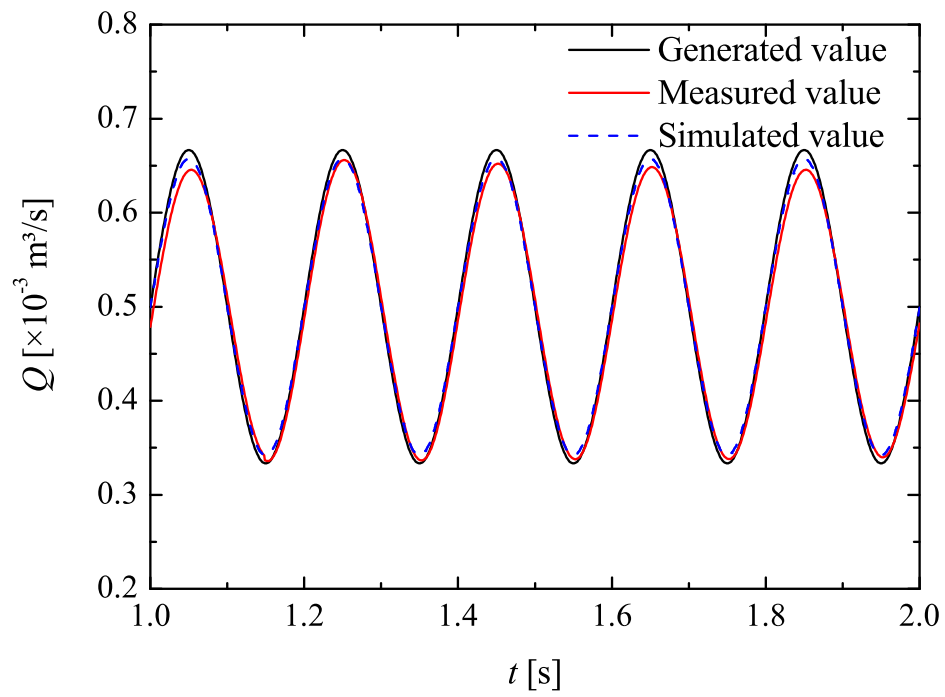


Fig 3.15: Dynamic response of micro hot wire anemometer ( $x=20$  mm)

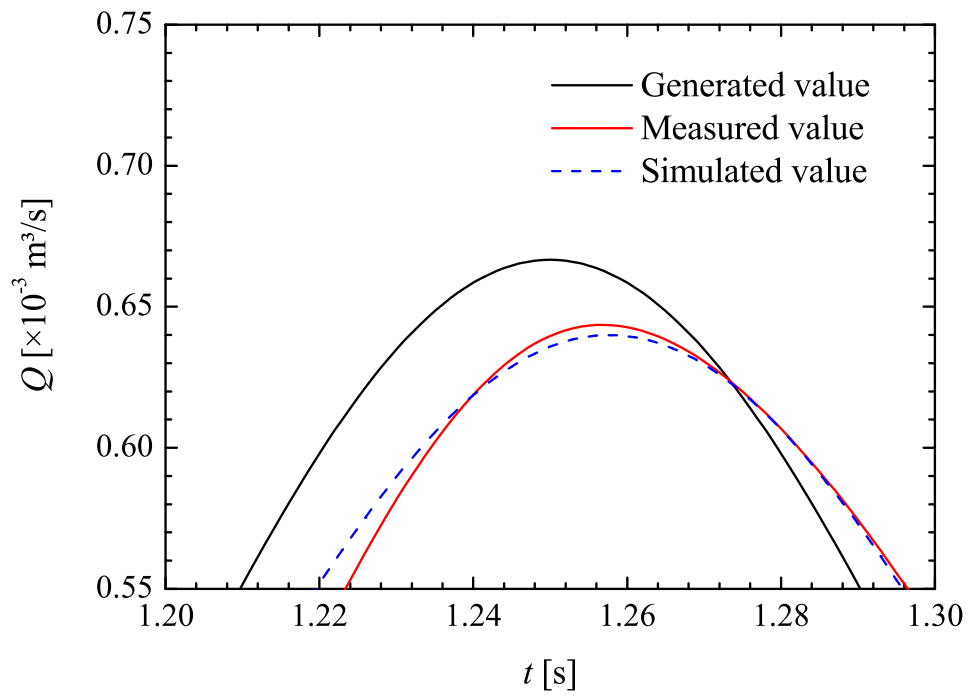


Fig 3.16: Dynamic response of micro hot wire anemometer ( $x=80$  mm) close up

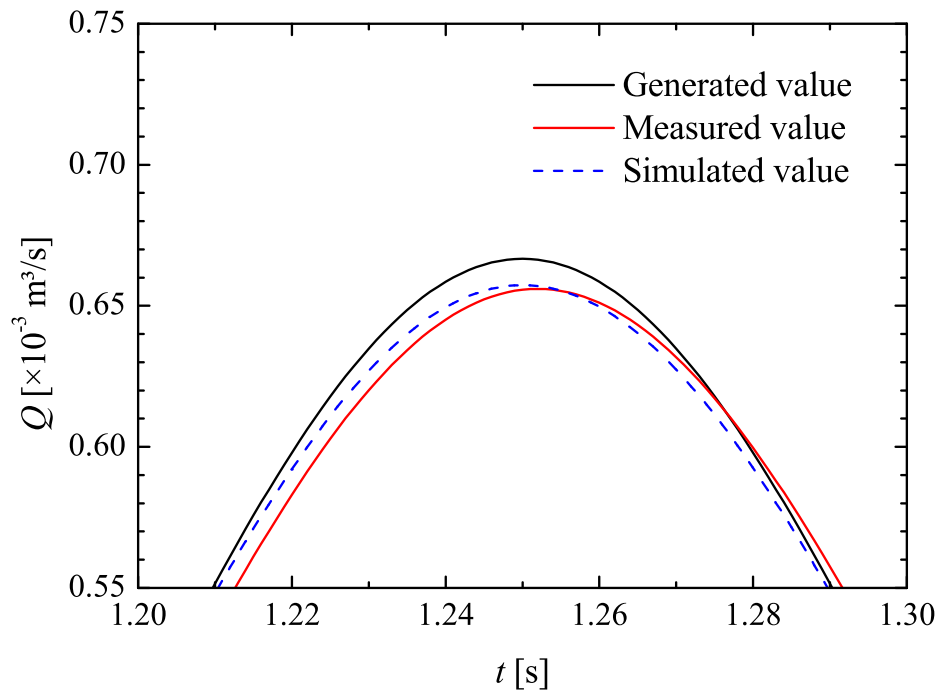


Fig 3.17: Dynamic response of micro hot wire anemometer ( $x=20$  mm) close up

### 3.6 微細熱式流速計の内部エネルギー変化の動特性の影響

定常流量計測においては流量が一定に保たれるため、流体中に放出される熱量、電気回路から供給される電力、微細熱式流速計内の温度分布などはすべて定常状態で平衡しているため、伝熱学的な立場にたつての考察は必要なかった。しかし、本研究で製作した駆動回路は、厳密には白金線温度の微小変化に伴う抵抗値の微小変化をもとに駆動している。そのため、流量の動的変化に対しては微細熱式流速計内部の温度分布が変化する。これがどの程度流量計測としての動特性に影響するか、数値解析と実験を合わせて行った。

#### 3.6.1 数値解析

第2章で計測原理の説明をしたとおり、微細熱式流速計が理想的に応答する場合、電力供給される熱量と流体の挙動によって奪われる熱量が等しくなる。しかし、流量が時間変化することになると電力供給量が変化するため、微細熱式流速計内で内部エネルギー変化が生じ、内部での熱伝導の影響がセンサとしての動特性に影響を与えると考えられる。すなわち、加熱体のエネルギー方程式は次式によって表すことができる。

$$H_s = H_f + U_h \quad (3.16)$$

ここで、 $H_s$  は電力によって供給されるエネルギー、 $H_f$  は流れによって奪われるエネルギー、 $U_h$  は内部エネルギー変化であり、

$$U_h = c\rho V_h \frac{d\theta_h(t)}{dt} \quad (3.17)$$

と表される。すなわち、加熱体温度分布の時間変化が微細熱式流速計の動特性に影響することになる。

ここで、加熱体の温度平衡について考える。仮定として以下の状態を考える。1) 白金抵抗線が配線部分でのみ基板から支持され、実際に発熱する部分は完全に流体中にさらされる。2) 白金抵抗線の形状は断面が半径  $r_{Pt}$  の円柱。3) ジュール熱は白金抵抗線の断面中心点のみで発生する。この仮定の下での白金内部の温度変化は熱伝導方程式によって次のように与えられる。

$$\frac{\lambda}{r_{Pt}} \frac{\partial}{\partial r_{Pt}} \left[ r_{Pt} \frac{\partial \theta}{\partial r} \right] = c\rho \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (3.18)$$

この熱伝導方程式により白金内部の温度変化は、時定数

$$T = \frac{r_{Pt}^2 \lambda}{4c\rho} = \frac{r_{Pt}^2}{4a} \quad (3.19)$$

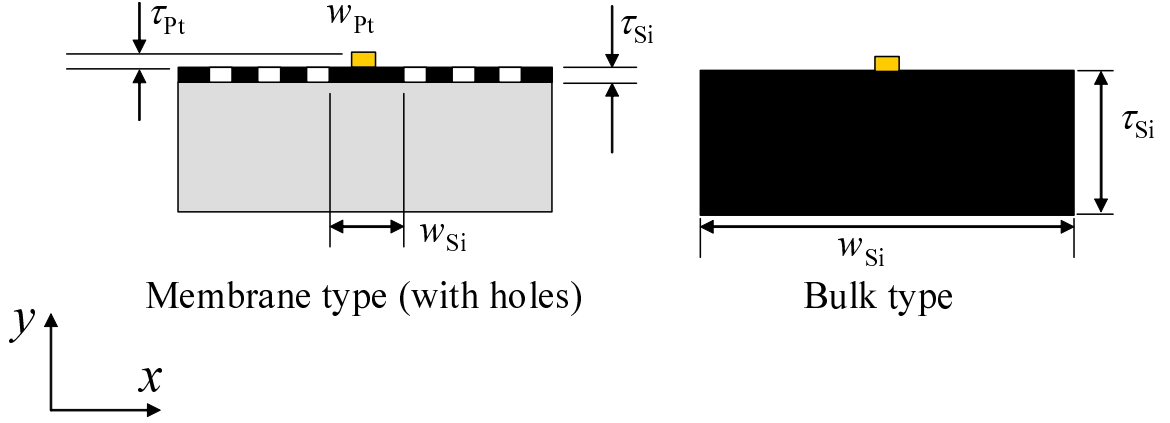


Fig 3.18: Simlation model of micro hot wire anemometer

の速度で定常状態に移行していく． $r_{Pt}=1\text{ }\mu\text{m}$  とすると，白金の温度伝導率  $a$  はおよそ  $2.55\times 10^{-5}\text{ m}^2/\text{s}$  であるから，温度平衡時定数は  $9.8\text{ ns}$  となり，流量変化に対して十分に速い応答をすることが分かる．

しかし，本研究で実際に製作した微細熱式流速計はシリコン基板上に白金を成膜しているため，白金支持部分の温度平衡を考慮する必要がある．また，熱解析を行うモデルとして，ダイアフラム上に白金を成膜し，さらにダイアフラム上に貫通穴をあけた形状と，白金下部がバルク状の二つの微細熱式流速計について考える．

Fig. 3.18 に示すように白金抵抗線の形状を幅  $w_{Pt}$ ，厚さ  $\tau_{Pt}$  とすると，白金内部の熱伝導方程式は

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial \theta}{\partial y^2} = \frac{c\rho}{\lambda} \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (3.20)$$

となる．今，解析の対象としている白金断面は矩形であるため，熱平衡時定数は次式で表される．

$$T_{Pt} = \frac{c\rho}{\lambda} \frac{(w_{Pt}/2)^2 + (\tau_{Pt}/2)^2}{4} = \frac{w_{Pt}^2 + \tau_{Pt}^2}{16a} \quad (3.21)$$

第2章で製作した， $3\text{ mm}$  四方のセンサを考えると，白金線形状は  $w_{Pt}=5\text{ }\mu\text{m}$ ， $\tau_{Pt}\cong 1\text{ }\mu\text{m}$  程度であることから時定数はおよそ  $63\text{ ns}$  となる．このため，製作した微細熱式流速計の白金の印加電圧変化に伴う温度平衡も，十分速く定常状態に到達すると考えてよい．

次にこの白金抵抗線の下部基板の熱伝導時定数を見積もる．まず，接着層の Cr およびシリコン表面に一様に成膜されている  $\text{Si}_3\text{N}_4$  膜は，膜厚が  $0.1\text{ }\mu\text{m}$  程度であることから，シリコン層の厚さに比べて非常に薄いので無視することができる．

シリコンダイアフラムの厚さの測定は，次のように行った．白金抵抗線周りの貫通穴の表面側の幅と下面側の幅を顕微鏡で測定する．本研究では異方性ウェットエッチ

ングにより貫通穴を形成しているため，結晶方位面のエッチング速度の差から貫通穴の壁面は{111}面が露出していることになる．よって，結晶構造から壁面の角度は約55°となる．上面穴幅を  $w_{h1}$ ，下面穴幅を  $w_{h2}$  とすると，ダイアフラム厚さ  $\tau_{Si}$  は

$$\tau_{Si} = \frac{w_{h1} - w_{h2}}{2} \tan 0.960 \quad (3.22)$$

と求められる．

また，本研究では第2章で示したようにダイアフラム強度を維持するため白金線に沿う穴は二つに分割されており，その穴を分けている部分はシリコン基板の支持構造である．この部分は全体の白金線長さに比べると十分小さいと考え，今回は考慮しない．以上より，白金線下部の単結晶シリコン断面形状を，厚さ  $\tau_{Si}=35.7 \mu\text{m}$ ，上面幅  $w_{Si1}=100 \mu\text{m}$ ，下面幅  $w_{Si2}=150 \mu\text{m}$  の台形とする．また，加熱点を上面の中心として熱平衡時定数を求めると次式になる．

$$T_{Si} = \frac{(w_{Si2}/2)^2 + \tau_{Si}^2}{4a} \quad (3.23)$$

単結晶シリコンの温度伝導率  $a=9.28 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$  であるから，支持部分の温度平衡時定数は  $67.6 \mu\text{s}$  となる．これは白金抵抗線や  $\text{S}_3\text{N}_4$  膜に比べると大きいものではあるが，流速の振動周波数が最大数 10 Hz 程度であれば，十分速い応答性が補償されと考えられる．

一方バルク構造になると，下部基板の温度平衡時定数は 22.4 ms と計算され，遮断周波数はおよそ 7.1 Hz となり非常に応答に時間がかかってしまうことが分かる．

### 3.6.2 実験による検証

第2章で製作した二種類の 3 mm 四方センサを使用して実験を行った．従来までの動特性試験と同様に内径 15 mm の流路に設置し，それぞれ非定常流量発生装置を用いて動特性試験を行った．前節の結果を踏まえて，整流格子からセンサまでの位置は 20 mm，壁面からの距離は 1 mm としている．

周波数を 5 Hz としたときの結果を Fig. 3.19 に示す．ダイアフラム型の微細熱式流速計は発生流量に対しておおむねよい一致を示している．前節の流速分布の影響を考えれば，ほぼ理論どおりの追従をしていると考えられる．一方，バルク構造の方は，ゲイン，位相ともに減衰，遅れが大きく，流量を正しく計測できていない．

一方，Fig. 3.20 は周波数を 10 Hz としたときの結果である．ダイアフラム型微細熱式流速計はピーク値でのずれが少し見えているものの，まだ全体としては非常によく流量を計測できている．バルク構造では 5 Hz の時と比べさらにゲインが減衰し，およそ 90° の位相遅れが生じてしまっている．

また、各センサの周波数特性として、20 Hz までの周波数に対して実験を行った結果を熱解析の理論曲線とともに Fig. 3.21 に示す。ダイアフラム型センサの結果を見ると、低周波数では理論曲線と実験値はほぼ一致している。しかし、周波数があがるにつれてゲイン、位相ともに減衰、遅れが生じてきている。この理論曲線とのずれは前節で述べた流速分布特性によるためだと考える。また、バルク型センサの結果を見るとゲイン、位相ともに理論曲線よりも早く減衰、遅れが生じている。この原因としては、熱解析のモデル化誤差が考えられる。

モデル化誤差として考えられる事として、今回の解析は白金線周りの断面内の温度分布をもとにしているという点がある。白金線や流れ場が無限遠ならば Fig. 3.18 における奥行き方向は考えなくて良いが、実際の微細熱式流速計では白金線長さが 1.3 mm であり、バルク型の解析モデルにおける  $\tau_{Si}$  よりも大きい。また、ダイアフラム型においても、一部の支持構造などを無視している。さらに、シリコン基板と流体、組み立て基板などの接触面を等温としているが、センサをとりつけている治具などの周囲部材との熱交換を考慮する必要がある。

本節で行った熱解析により、白金線周りの支持構造が振動流量計測における動特性に影響していることを明らかにし、実験によってそれを確認することができた。

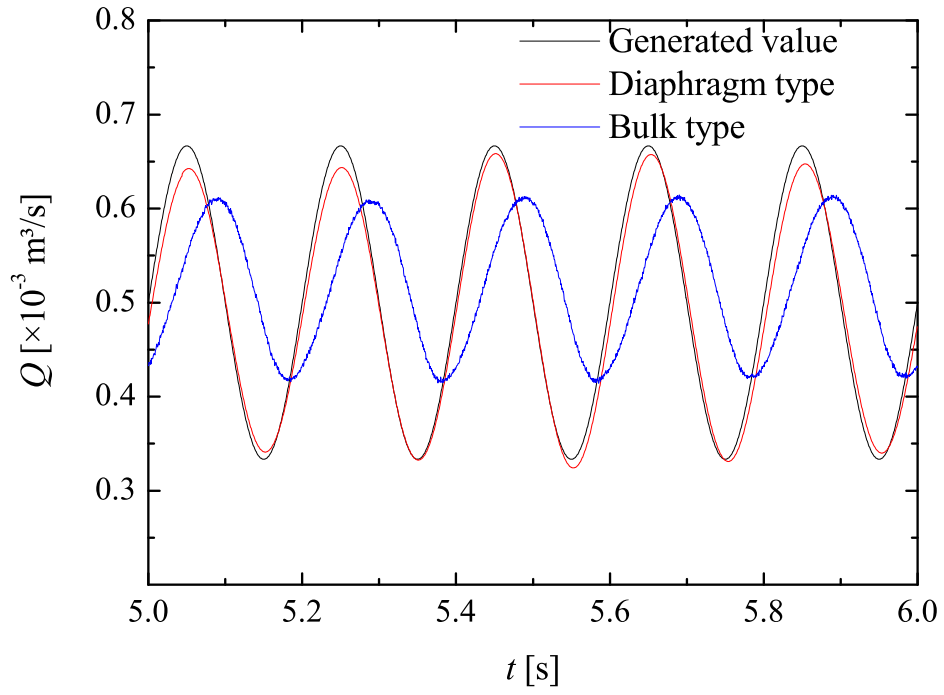


Fig 3.19: Experimental results ( $f=5$  Hz)

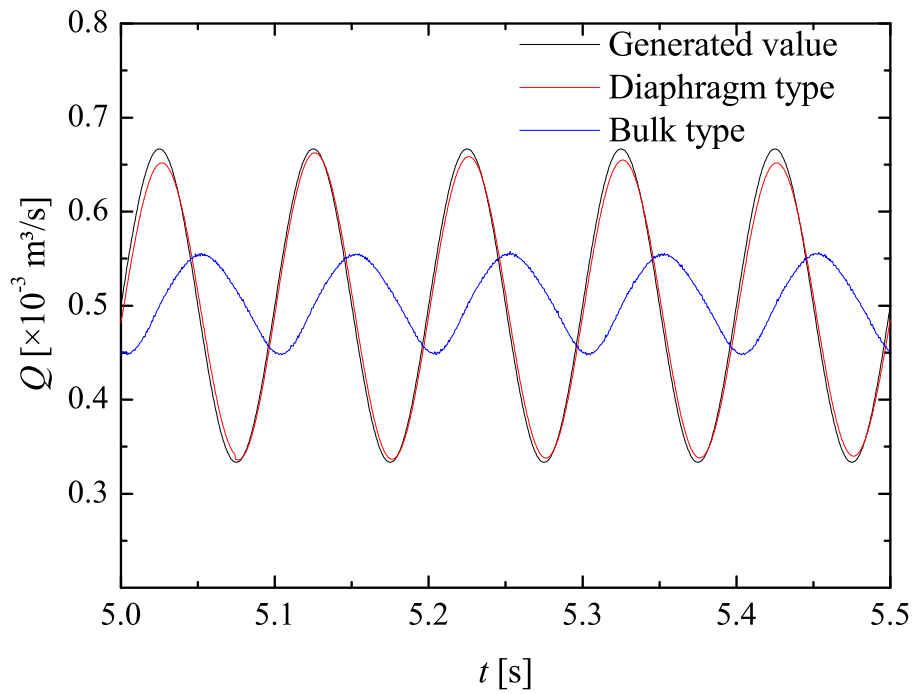


Fig 3.20: Experimental results ( $f=10$  Hz)

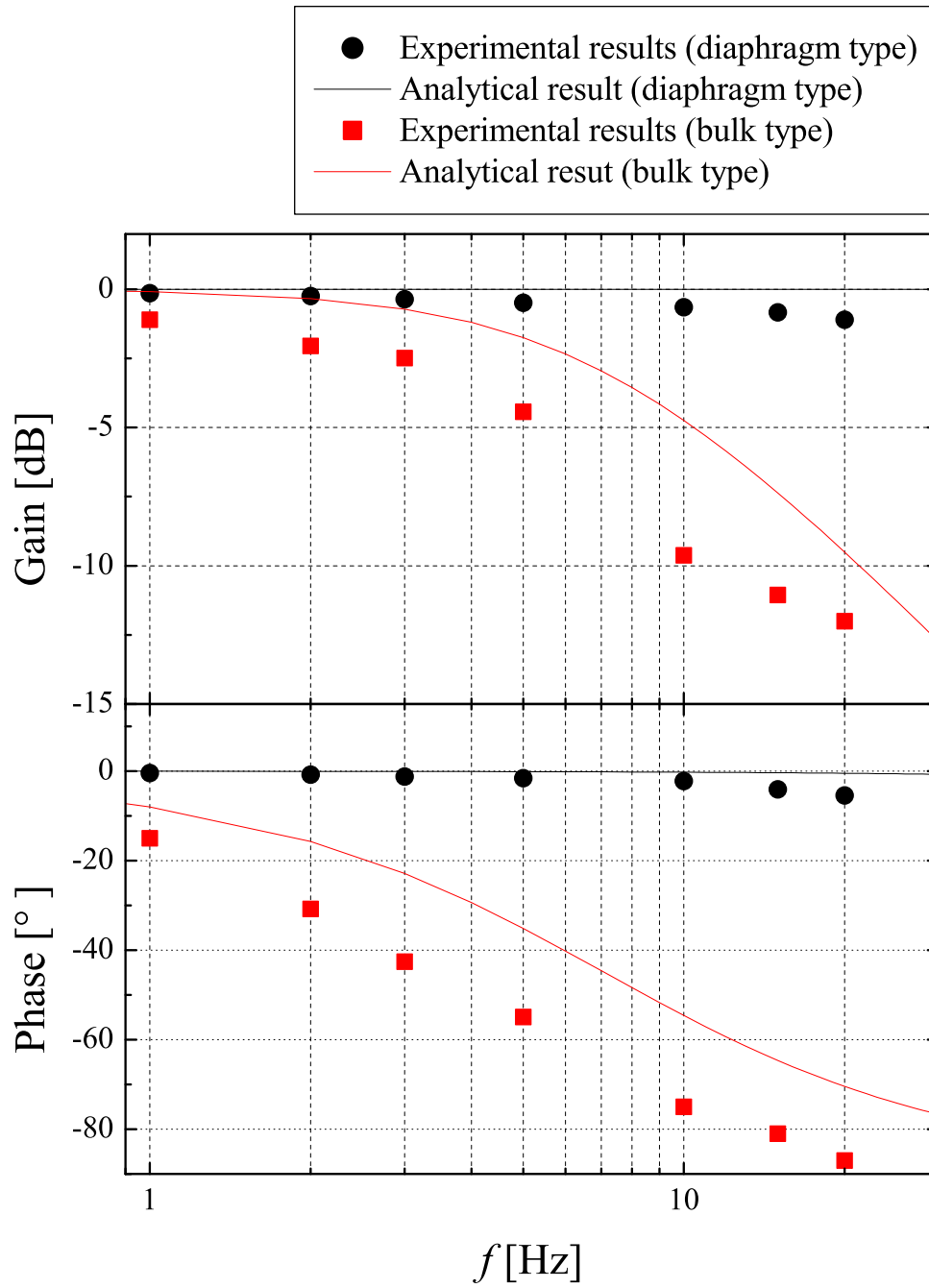


Fig 3.21: Bode diagram of micro hot wire anemometer

### 3.7 まとめ

本章では，第2章で製作した微細熱式流速計を用いて流量計測を行った．

まず流量計測を行うための駆動回路を示し，実際に流体を流しながらパラメータを設定する設計方法について述べた．その駆動回路を用いて定常流量を計測した．実験結果から第2章において説明した駆動原理の理論式と合致することを確認した．

次に，非定常流量発生装置を用いた振動流計測を行った．微細熱式流速計は直接計測量が流速であるため，管内流速分布は流量計測特性に関係がある．そこで，円管流れのナビエストークス方程式を解くことで流速分布の近似解を求めた．数値解析によって，定常流と振動流では流速分布が異なることを明らかにした．また，流速分布の差は流れ方向に進むにつれと大きくなるため，微細熱式流速計を用いて流量計測を行うには，整流格子に近い位置に微細熱式流速計を設置すべきということを明らかにした．また，壁面からの距離を速度境界層内ぎりぎりの位置にすることで，定常流と振動流での流速差がほぼなくなることを確認した．

さらに，振動流を発生することができる非定常流量発生装置を用い，微細熱式流速計で流量計測を行った．センサと整流格子の位置関係を数値解析と同じにした実験により，数値解析の妥当性を確認した．また，解析により最適とした位置に微細熱式流速計を設置することで振動流量を精度よく計測することができた．

また，流量が振動するときの微細熱式流速計内部エネルギーの変化に着目し，熱解析を行った．実際の微細熱式流速計をもとに幾何学モデルを想定した熱伝導方程式を考え，ダイアフラム構造の微細熱式流速計は内部エネルギー変化が十分速く応答するが，バルク構造では7 Hz程度の応答性しか有しないことを明らかとした．ついで，3 mm四方の微細熱式流速計を用いた実験と解析結果を比較した．ダイアフラム型センサでは実験結果と解析結果はおおむねよく一致しているが，バルク型センサでは実験結果の方がゲインの減衰，位相遅れが低い周波数から生じていた．この原因として流れ方向の大きさを無視している，センサ基板壁面をすべて等温面としているなどのモデル化誤差であると考えた．これらの結果から微細熱式流速計の白金抵抗線を熱的に独立した構造とすることで，内部エネルギー変化による動特性の低下を抑えることができることが明らかになった．

## 第4章 微細加工技術を応用した圧力微分計

### 4.1 はじめに

空気圧サーボシステムは発熱がほとんどなく、磁場の発生もないことから、半導体製造装置用の超精密除振台や超精密位置決め機構などに用いられている。これらの空気圧サーボシステムにおいて、圧力の計測は制御性の向上のために非常に重要となる [102, 103]。特にごく微小な圧力変動を対象とする制御系において、圧力値を数値微分するのではなく、圧力の微分値が直接計測できればより精密、高速な制御を実現できる。しかし、圧力センサの分解能の影響で数値微分を用いた制御では不十分な場合がある。よって、圧力の微分値を直接計測できるセンサがあれば有効な制御が期待できる。

圧力微分計として過去に提唱されたものは容器内の空気の状態変化を無視しており、出力を制御信号に用いるには精度に問題があった [4, 104]。その問題を解決するため、容器内の状態変化をほぼ等温にできる等温化圧力容器 [96] を応用した圧力微分値を直接計測できる圧力微分計が提案され、その有効性が示された [105]。この圧力微分計は金属綿が充填された等温化圧力容器、ダイヤフラム式差圧計と層流抵抗管によって構成される。圧力微分計の動特性の向上には、差圧を発生する流路において代表長さを小さくすることが重要である。しかし、層流抵抗管の流路では動特性の向上、センサの小型化に適していない。

本章では微細加工技術によって製作した流路チップを用いて圧力微分計の小型化、動特性の向上を図る。また、第2章で製作した3 mm 四方の微細熱式流速計を用いた圧力微分計を製作する。

### 4.2 等温化圧力容器を用いた圧力微分計の計測原理

過去に提案された等温化圧力容器を用いた圧力微分計を Fig. 4.1 に示す。圧力微分計は等温化圧力容器、ダイヤフラム式差圧センサ、圧力センサ、および層流抵抗流路から構成されている。計測対象である下部の容器内圧力  $P_s$  が変化すると、層流抵抗流

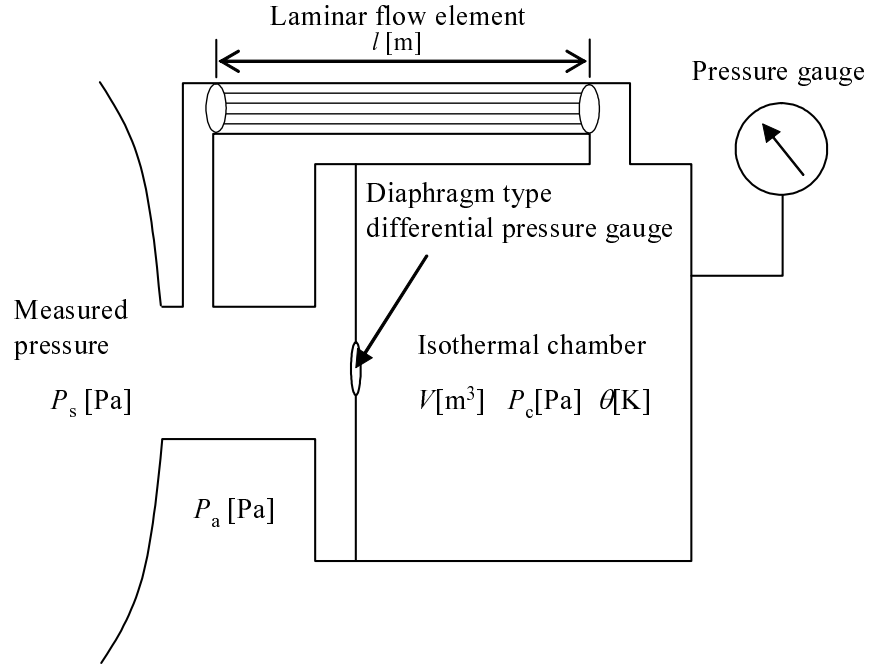


Fig 4.1: Schemetaic diagram of pressure differentiator using laminar flow elements

路である細管を通過して等温化圧力容器内の圧力  $P_c$  がわずかに遅れて変化し，そのときの差圧  $P_j = P_s - P_c$  をダイアフラム式差圧計で計測することにより， $P_s$  の微分値を求めることが可能となるものである．

以下に測定原理を説明する．層流抵抗流路内の流れを層流と仮定し，ハーゲンポアズイユの法則より，被測定圧力  $P_s$  の変化とダイアフラム式差圧計との関係式を求めると以下ようになる．

第3章でも示したとおり，等温化圧力容器に出入りする質量流量に関しては次式が成立する．

$$G = \frac{V}{R_{\text{air}} \theta_a} \frac{dP_c}{dt} \quad (4.1)$$

すなわち，外気温度  $\theta_a$  と容器容量  $V$  が既知であれば  $P_c$  の変化速度と  $G$  は比例関係になる．

半径  $r_c$ ，長さ  $l$  の細管  $n$  本から構成される層流抵抗流路を通過して容器内に流入する体積流量  $Q$  は，流れが層流の場合にはハーゲンポアズイユの式より，

$$Q = \frac{\pi n r_c^4}{8 \mu l} (P_s - P_c) \quad (4.2)$$

である．大気圧下での空気の密度  $\rho_a$  と容器内の圧力  $P_c$  を考慮すると，質量流量  $G$  は

$$G = \rho_a \frac{P_c}{P_a} Q = \frac{\rho_a P_c \pi n r_c^4}{8 P_a \mu l} (P_s - P_c) \quad (4.3)$$

となる．ここで，管路の流量抵抗係数として

$$r_s = \frac{8P_a\mu l}{\rho_a\pi n r_c^4} \quad (4.4)$$

と置くと，式 (4.3) は

$$G = \frac{P_c}{r_s} (P_s - P_c) \quad (4.5)$$

と表せる．差圧計の出力は

$$P_j = P_s - P_c \quad (4.6)$$

と書くことができ，

$$P_c = P_s - P_j \quad (4.7)$$

となる．式 (4.1)，式 (4.5) と式 (4.7) より，

$$\frac{d}{dt} (P_s - P_j) = \frac{P_c P_j}{r_s} \frac{R_{air}\theta}{V} \quad (4.8)$$

と求められる．ここで， $\frac{1}{K} = \frac{R_{air}\theta}{r_s V}$  と置き，差圧ゼロの平衡状態からの微小変動を仮定して式 (4.8) をラプラス変換すると，

$$sP_s - P_s(0) - sP_j + P_j(0) = \frac{1}{K} P_j P_c \quad (4.9)$$

と求められる． $P_j(0) = 0$  であり順次式変形していくと，

$$P_j = \frac{\frac{K}{P_c}}{1 + \left(\frac{K}{P_c}\right)s} \{sP_s - P_s(0)\} \quad (4.10)$$

となる． $sP_s - P_s(0) = \mathcal{L}\left(\frac{dP_s}{dt}\right)$  であり， $P_c(t)$  は圧力計により測定可能であるので， $P_c(t)$  による補正をすることにより，圧力微分計の出力  $P_{do}$  は，

$$P_{do} = P_c P_j = \frac{K}{1 + \left(\frac{K}{P_c}\right)s} \mathcal{L}\left(\frac{dP_s}{dt}\right) \quad (4.11)$$

となる．式 (4.11) より， $P_{do}$  と被測定圧力  $P_s$  の微分値の間には，一次遅れの関係が成立する．

容器内が等温であることを仮定した場合，圧力微分計の出力ゲイン係数

$$K = \frac{8P_a\mu l V}{\rho_a\pi n r_c^4 R_{air}\theta} \quad (4.12)$$

は定数となり，微分計の時定数は

$$T = \frac{K}{P_c} = \frac{8P_a\mu l V}{P_c \rho_a\pi n r_c^4 R_{air}\theta} \quad (4.13)$$

で表される．

### 4.3 MEMS 流路チップを用いた圧力微分計

前節で原理を説明したとおり，圧力微分計において最も重要となる構成要素は層流抵抗管である．すなわち，層流抵抗管はそれを通る流体の状態を層流に保ち，助走区間の影響をなるべく受けないようにする必要がある．加えて，層流抵抗管の仕様は式 (4.13) を見ると分かるとおり，圧力微分計の時定数を決定する主要因でもある．

そこで，この差圧を実現するための流路に加工精度に優れ，小型化するのに適した微細加工技術を用いてスリット型流路チップ（MEMS 流路チップと呼ぶ）を製作し，利用することとした．この MEMS 流路チップを圧力微分計に用いることで，圧力微分計全体の小型化，高速応答化が期待できる．

#### 4.3.1 MEMS 流路チップの設計

MEMS 流路チップを組み込んだ圧力微分計の概略図を Fig. 4.2 に示す．

層流抵抗管を細管から断面が矩形となる MEMS 流路チップに変更すると，ハーゲンポアズイユの法則は次の関係式で与えられる．

$$Q = \frac{nz\eta^3}{12\mu l} (P_s - P_c) \quad (4.14)$$

すなわち，管路の流量抵抗係数  $r_s$  は

$$r_s = \frac{12P_a\mu l}{\rho_a n z \eta^3} \quad (4.15)$$

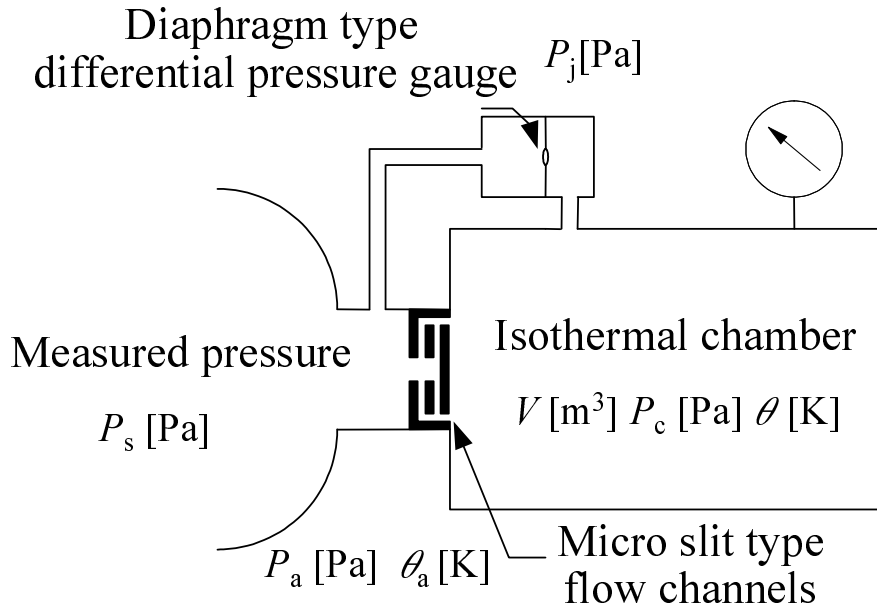


Fig 4.2: Schematic diagram of pressure differentiator using MEMS flow channel

となる．このことから，MEMS 流量チップを用いた圧力微分計の時定数  $T$  は

$$T = \frac{r_s V}{P_c R_{\text{air}} \theta_a} = \frac{12 P_a \mu l V}{P_c \rho_a n z \eta^3 R_{\text{air}} \theta_a} \quad (4.16)$$

と書ける．

MEMS 流路チップの構造図を Fig. 4.3 に示す．上図が上面図，下図が断面図を示している．仮に下面側圧力が高い場合，空気の流れは下面の穴から入り，高さ  $\eta$ ，長さ  $l$ ，幅  $z$  の  $n = 8$  本の流路を通して上面の 4 つの穴から出て行く構造としている．以下に圧力微分計の構造パラメータの設計方法について述べる．

まず圧力微分計の測定範囲を考える．空気圧制御系における圧力微分値としては最大 200 kPa/s まで測定可能であれば十分であると考える．この圧力変化に対し，実際に等温変化を実現することが重要となる．過去の研究において，等温化圧力容器の特性を実験および数値解析で明らかにしており，平均素線径が 25  $\mu\text{m}$  の金属綿を封入した

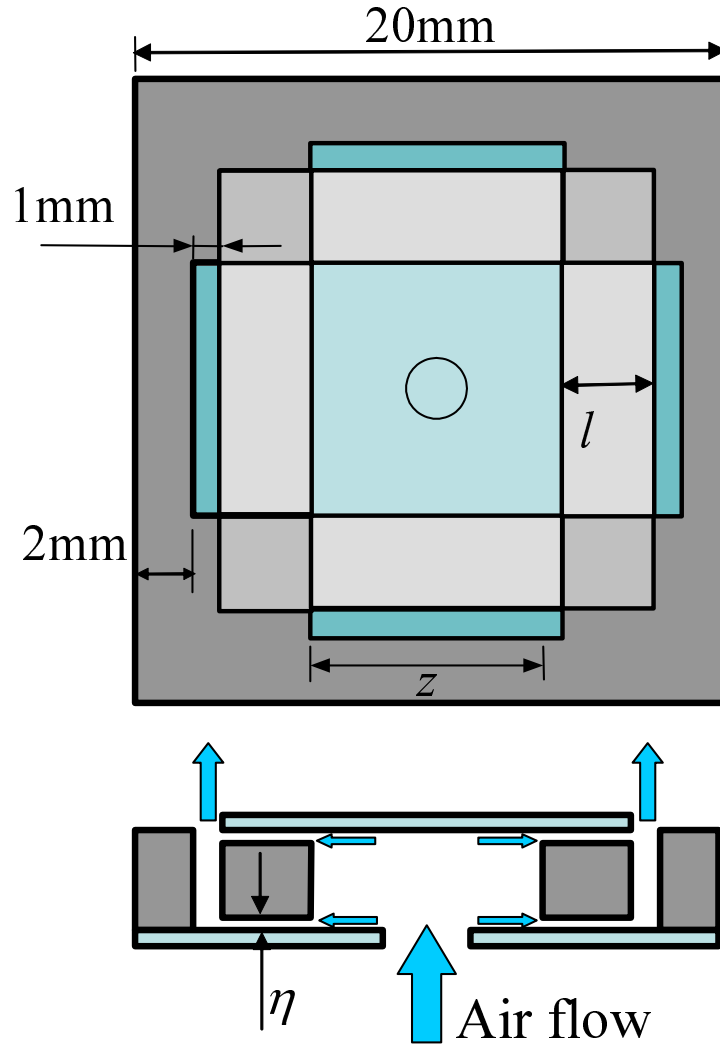


Fig 4.3: Structure of MEMS flow channel chip

場合，上記の圧力変化に対しては容器内の温度変化が 1 K 以内となり，ほぼ等温変化が実現できることが明らかにされている [96]．よって，式 (4.1) より，

$$\frac{dP_c}{dt} = \frac{GR_{\text{air}}\theta_a}{V} \leq 200 \text{ kPa/s} \quad (4.17)$$

の関係が与えられる．

次に圧力容器容積について考える．式 (4.16) より， $T$  を小さくするには容積  $V$  はできるだけ小さくすることが望ましい．しかし，Fig. 4.2 が示すように  $V$  は金属綿の封入が不可能であるダイアフラム式差圧計内の容積も考慮しなければならない．等温性を考慮して  $V$  全体に占める差圧計内の容積の割合を 10 % 以下にするため， $V$  はおよそ  $9.0 \times 10^{-6} \text{ m}^3$  とする．スリット流路内での平均流速  $\bar{u}$  と流量  $G$  の間は流路断面積が  $nzh$  で与えられることから， $G = nzh\rho_c\bar{u}$  の関係がある．よって，空気の気体定数  $R_{\text{air}} = 287.03 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$  および室温  $\theta_a = 293 \text{ K}$  から式 (4.17) は次のように変形できる．

$$G = nzh\rho_c\bar{u} \leq (200 \times 10^3) \frac{V}{R_{\text{air}}\theta} = 2.1 \times 10^{-5} \text{ kg/s} \quad (4.18)$$

一方，圧力微分計のカットオフ周波数  $f_c$  は

$$f_c = \frac{1}{2\pi T} = \frac{P_c R_{\text{air}} \theta_a}{2\pi r_s V} \quad (4.19)$$

となる．式 (4.19) より，圧力微分計を加圧下  $P_c \geq P_a$  で使用する場合には，容器内が加圧されるほど  $f_c$  が大きくなる．よって， $P_c = P_a$  の時に  $f_c$  は最小値をとる．また，流路前後に生じる差圧は式 (4.19) より次のように表すことができる．

$$P_j = \frac{r_s V}{P_c R_{\text{air}} \theta} \frac{dP_c}{dt} = \frac{1}{2\pi f_c} \frac{dP_c}{dt} \leq \frac{100 \times 10^3}{\pi f_c} \quad (4.20)$$

ここで  $dP_c/dt = 100 \text{ kPa/s}$  の場合の  $P_j$  と  $f_c$  の関係を Fig. 4.4 に示す．また，圧力微分計の分解能  $R_p$  は式 (4.20) から，差圧計の分解能  $R_j$  を用いて，次のように表すことができる．

$$R_p = \frac{R_j}{P_j} \frac{dP_c}{dt} = 2\pi f_c R_j \quad (4.21)$$

よって， $P_c = P_a$  の時  $R_p$  は最小となる．式 (4.19) ~ 式 (4.21) より，圧力微分計の測定レンジと差圧計の分解能が決定している場合， $f_c$ ， $P_j$ ， $R_p$  のうち一つの値が決定すれば残りの二つの値も一意に決定される．また，式 (4.15) より  $r_s$  は  $\eta$  の 3 乗に反比例するため， $f_c$  や分解能を所望の値に設計するためには，差圧計の測定レンジを考慮しながら  $\eta$  を調節すればよい．その  $\eta$  は式 (4.15) と式 (4.20) より次のように求められる．

$$\eta = \left( \frac{12P_a\mu l V}{P_j P_c \rho_a n z R_{\text{air}} \theta_a} \frac{dP_c}{dt} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (4.22)$$

本研究で使用する差圧計（長野計器製 KL-17）は測定レンジが  $\pm 200$  Pa，分解能が 0.2 Pa であるので，Fig. 4.4 より  $P_j = 200$  Pa に対応する遮断周波数は 160 Hz 程度であり，分解能は式 (4.21) から約 0.2 kPa/s と求めることができる．

ここで，この助走距離の影響を考慮するため，レイノルズ数を計算する．矩形流路の代表長さは等価直径  $L = 2z\eta/(z + \eta)$  であらわされるので，式 (4.17) を使って，レイノルズ数は次のように計算される．

$$\text{Re} = \frac{\rho_c \bar{u} L}{\mu} = \frac{2}{n(z + \eta)\mu} G \quad (4.23)$$

であるから， $z$  および  $\eta$  が 0.01 m 以下であれば，おおよそ層流の範囲内であると予想される．

一方，流路長さ  $l$  に占める流路内流れの助走距離は，平行隙間流れの場合には次式で表される [2]．

$$l_e = 0.02\eta \text{Re} \quad (4.24)$$

よって，全流路長に占める助走区間の割合はのよう表すことができる．

$$\frac{l_e}{l} = \frac{0.02\text{Re}\eta}{l} = \frac{0.04\eta G}{n(z + \eta)l\mu} \quad (4.25)$$

式 (4.25) より，助走距離の割合を小さくするためには  $z$ ， $l$  をできるだけ大きくすれば良いことが分かる．また，Fig. 4.2 のように今回製作するスリット型微細流路を，一辺の長さを 20 mm，上面の穴と縁の幅をそれぞれ 1 mm，2 mm とすると， $z$  と  $l$  を可能な限り大きくする場合，流路の長さ  $l$  は

$$l = \frac{0.014 - z}{2} \quad (4.26)$$

という関係になる．容器内温度が 293 K であると想定し，空気の密度  $\rho = 1.205$  kg/m<sup>3</sup>，粘度  $\mu = 1.82 \times 10^{-5}$  Pa·s，測定レンジを考慮して  $\frac{dP_c}{dt} = 200$  kPa/s， $P_j = 200$  Pa とした場合，式 (4.22)～式 (4.26) より導かれる関係を Fig. 4.5 に示す．Fig. 4.5 から  $z$  が 8～10 mm のあたりで助走距離の割合が最も小さくできることがわかる． $z = 8$  mm とした場合，助走距離の割合は 2.0 % 以下となり十分無視してかまわない長さである．

以上の設計方法より，パラメータを Table 4.1 に示す値に決定した．また， $\rho_c = \rho_a$  とすると式 (4.18) より 1 本の流路に流れる流速は最大で 2.7 m/s となる．よってレイノルズ数は  $\text{Re} \leq 36$  となることから，流れが層流状態を満たしていることは明らかである．

以前に開発された圧力微分計の仕様の比較を Table 4.2 に示す．ともに設計値ではあるが，今回新しく設計した圧力微分計の方がすべてにおいて優れていることが分かった．

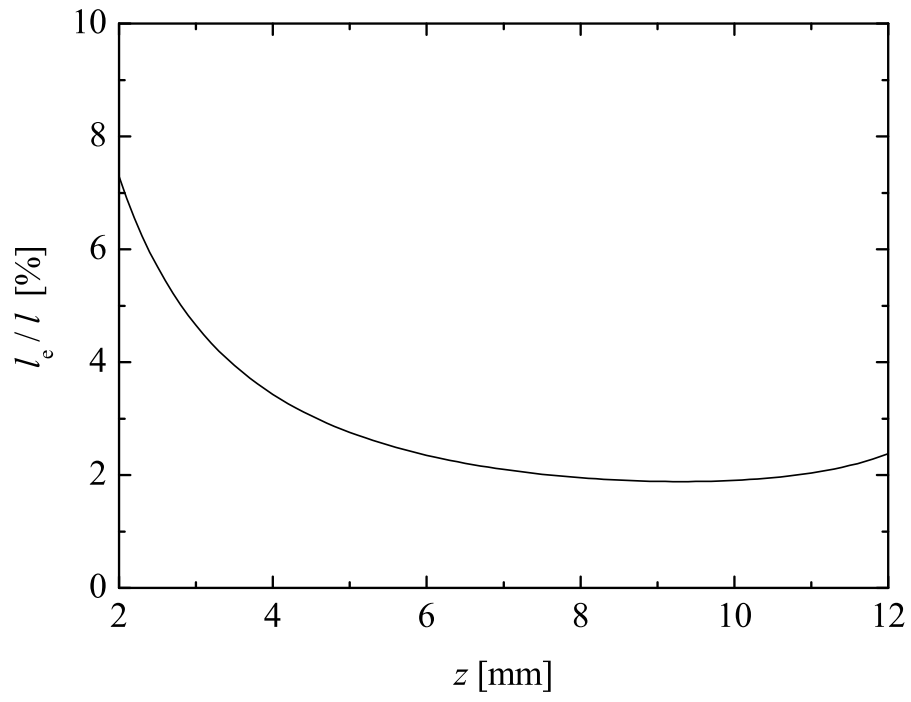


Fig 4.4: Profile of  $P_j$  vs.  $f_c$

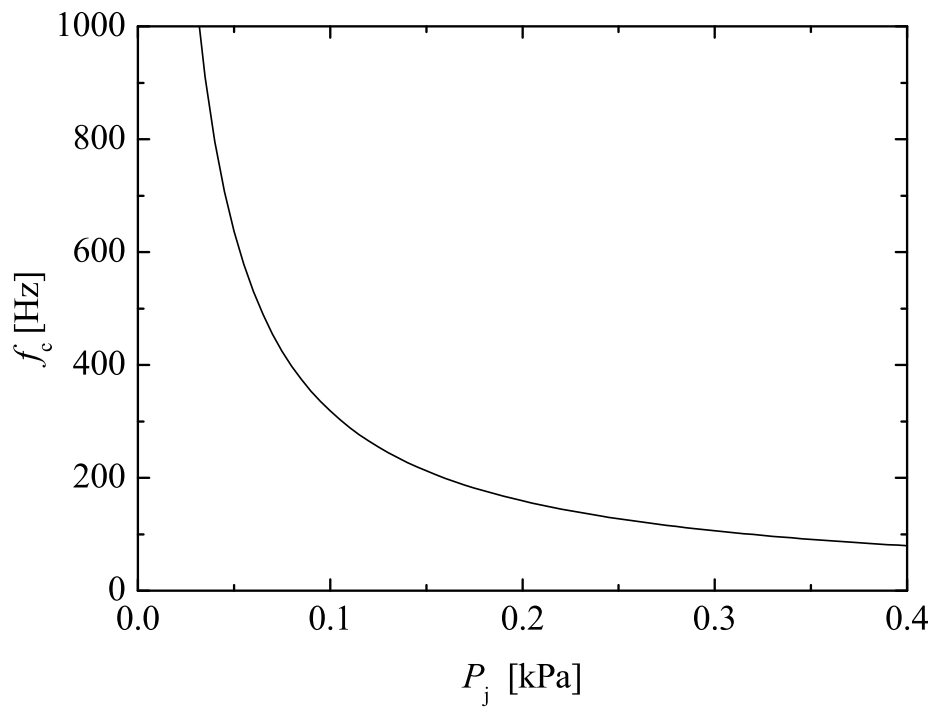


Fig 4.5: Profile of  $z$  vs.  $l_e/l$

Table 4.1: Parameters of Pressure differentiator using MEMS flow channel chip

| parameters | size                              |
|------------|-----------------------------------|
| $n$        | 8                                 |
| $\eta$     | 100 $\mu\text{m}$                 |
| $z$        | 8 mm                              |
| $l$        | 3 mm                              |
| $V$        | $8.85 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ |

Table 4.2: Comparison of specifications of designed pressure differentiator with Ref. [105]

| parameters | designed sensor                   | Ref. [105]                        |
|------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| $V$        | $8.85 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ | $39.3 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ |
| $f_c$      | $\geq 179 \text{ Hz}$             | $\geq 22.7 \text{ Hz}$            |
| $l_e/l$    | $\leq 2.0 \%$                     | $\leq 13.4 \%$                    |
| Re         | $\leq 36$                         | $\leq 370$                        |

### 4.3.2 MEMS 流路チップの製作

MEMS 流路チップの製作工程について以下に述べる．Fig. 4.6 に製作工程の断面概略図を示す．材料は加工の容易さなどから， $\text{SiO}_2$ （酸化シリコン）膜付きシリコン基板とパイレックスガラスを用いることとした．主な工程はリソグラフィ工程，ウェットエッチング工程，CVD（Chemical Vapor Deposition）工程，陽極接合工程の四工程に分けることができる．

リソグラフィ工程とウェットエッチング工程については第 2 章においてほとんど説明したが，今回使用した基板は  $\text{SiO}_2$  膜付きのシリコンウェハであるために若干工程が異なる．リソグラフィ工程によって任意パターンをシリコン基板に転写し，そのリソグラフィ工程において塗布したフォトリジストをエッチングマスクとしてまず  $\text{SiO}_2$  膜をエッチングする．用いたフォトリジストは OFBR800 であり，ウェットエッチングにおけるエッチング溶液は BHF（フッ酸緩衝液）である．BHF は反応性が高く，特に一般的なガラス製の実験器具を侵すうえ， $\text{SiO}_2$  厚さは  $0.02\text{ }\mu\text{m}$  程度であるため，第 2 章で示したような還流式のウェットエッチング装置は用いずに，フッ素樹脂製の実験器

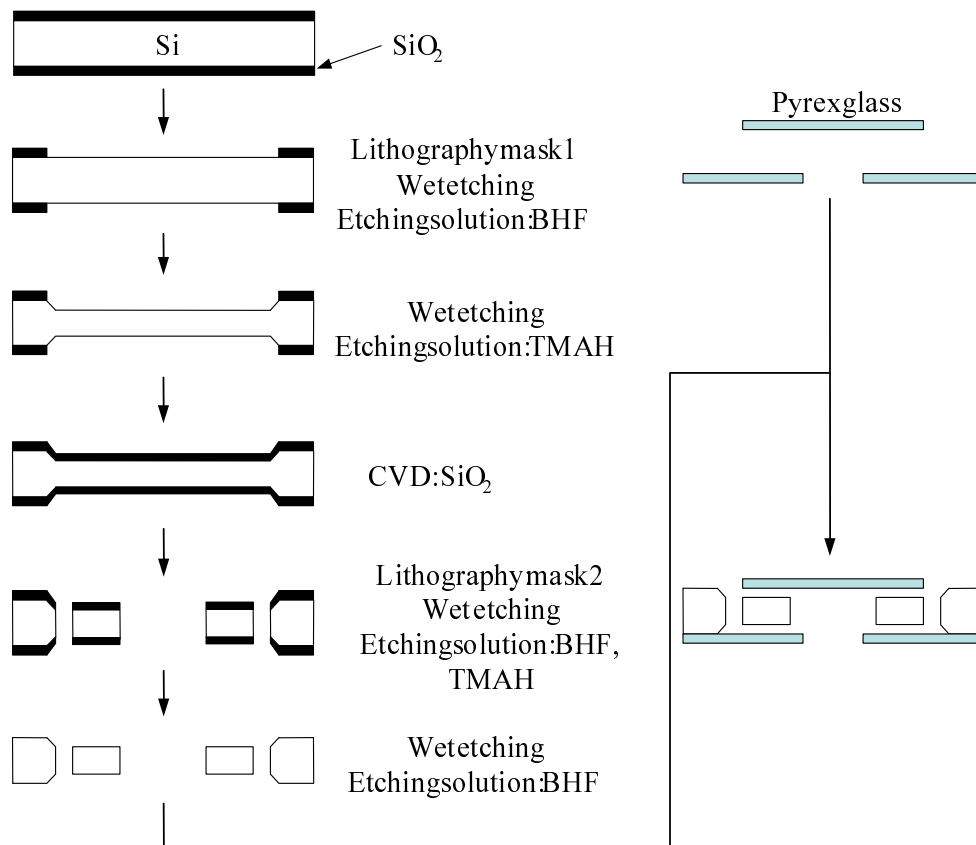


Fig 4.6: Fabrication process of MEMS flow channel chip

具を用いて、反応させたい場所に BHF を滴下して反応させる。

十分にエッチングが行われた後、フォトリソistをアセトンに溶解させて除去し、今度は  $\text{SiO}_2$  膜をエッチングマスクとして Si をエッチングする。エッチング溶液は TMAH であり、反応装置は Fig. 2.7 と同様のものを用いる。ただし、MEMS 流路チップの製作においては加工精度を厳密化するため、液温を 75 程度と微細熱式流速計を製作したときよりは低温に保つようにした。さらに、ある程度エッチングが進んだからは表面形状測定顕微鏡（KEYENCE 製 VF-7500）を用いて製作時のエッチングレートを算出し、できるだけ設定値どおりの形状寸法が得られるようにした。

次に、CVD 工程について説明する。CVD とは製膜技術の一つで、気相で供給されるガスを基板上で反応あるいは分解させ、その生成物を基板上に堆積する技術である [94]。CVD はいくつかに分類されるが、本研究ではプラズマ CVD を用いた。真空容器内で高周波放電によるプラズマによってガス分子（TEOS（テトラエトキシシラン）、 $\text{O}_2$ ）を励起させ、基板上に  $\text{SiO}_2$  膜を堆積させる。装置の概略図および反応模式図を Fig. 4.7 に示す。この  $\text{SiO}_2$  膜は 2 回目の TMAH エッチング工程のマスクとして用いる。このように CVD 工程を間に入れて二段階に分けてウェットエッチングを行うことによって、エッチング深さが二段階となる流路構造が容易に形成できる。

最後に陽極接合とは、シリコン基板とパイレックスガラスの平坦な面同士を重ね合わせ、400 ほどに加熱しながらシリコン基板側を陽極（+）、ガラス側を陰極（-）

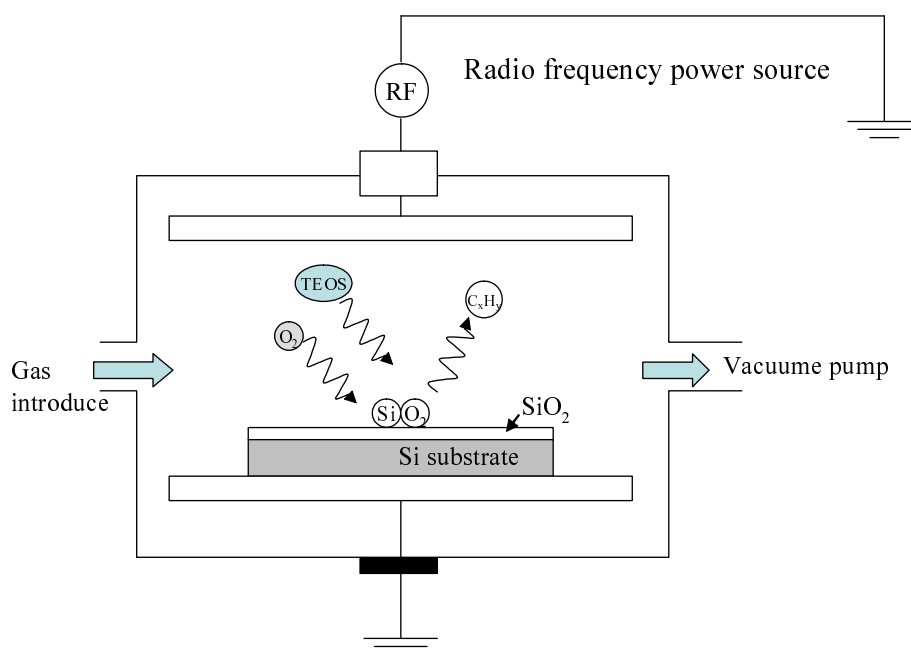


Fig 4.7: Schematic diagram of chemical vapor deposition machine

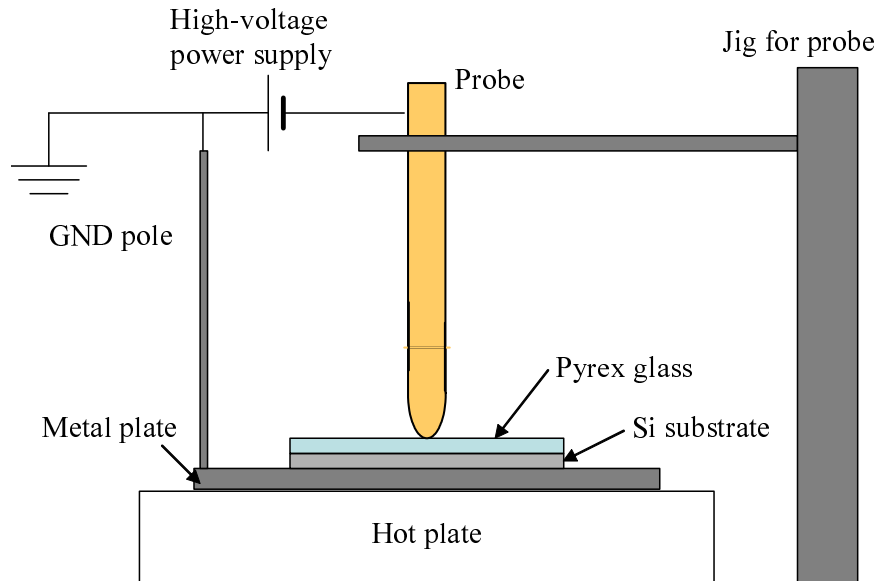


Fig 4.8: Schematic diagram of anodic bonding equipment

として 500 ~ 1000 V の電圧を印加することにより界面で発生する大きな静電引力を利用して接合する技術である [106] . 陽極接合装置の概略図を Fig. 4.8 に , 写真を Fig. 4.9 に示す . 本研究では接合時にパイレックスガラス基板とシリコン基板の中心を合わせるために治具を用いた . また , 下面に接合するガラスには空気流入口としてあらかじめ機械加工によって直径 3 mm の通し穴をガラス基板中央に設けている . 陽極接合は接合力に優れているため , 気体でも漏れを生じない流路を製作することができる .

以上の工程によって製作した MEMS 流路チップの写真を Fig. 4.10 に示す . 製作した流路の寸法は表面形状測定顕微鏡を用いて調べた . その結果 , 誤差は  $3\text{ }\mu\text{m}$  以内であることが確認された . よって , 流路幅  $z$  と長さ  $l$  に対しての誤差は無視できるほど小さい . しかし , 高さ  $\eta$  に対しては 3 % 以内の誤差となることが明らかとなった .

製作した MEMS 流路チップの流量 - 差圧特性を実験的に調べた結果を Fig. 4.11 に示す . 同流量において実験値は理論値に対して最大 10 % 程度大きく差圧が生じている . この主要因は助走区間における圧力損失分によって流路全体で生じる圧力損失が増加するためだと考えることができる . また , 空気がチップを通過する方向によって生じる圧力差に最大 3 % ほどの誤差が生じてしまっているが , これは流入口と流出口の形状が大きく異なるために助走区間の圧力損失係数が異なるためだと考えられる . この MEMS 流路チップを圧力微分計に用いる際には , この実験結果から求めた係数を用いて圧力微分値を計算することとした . よって , 圧力微分計として用いる場合にはほとんど問題ないといえる .

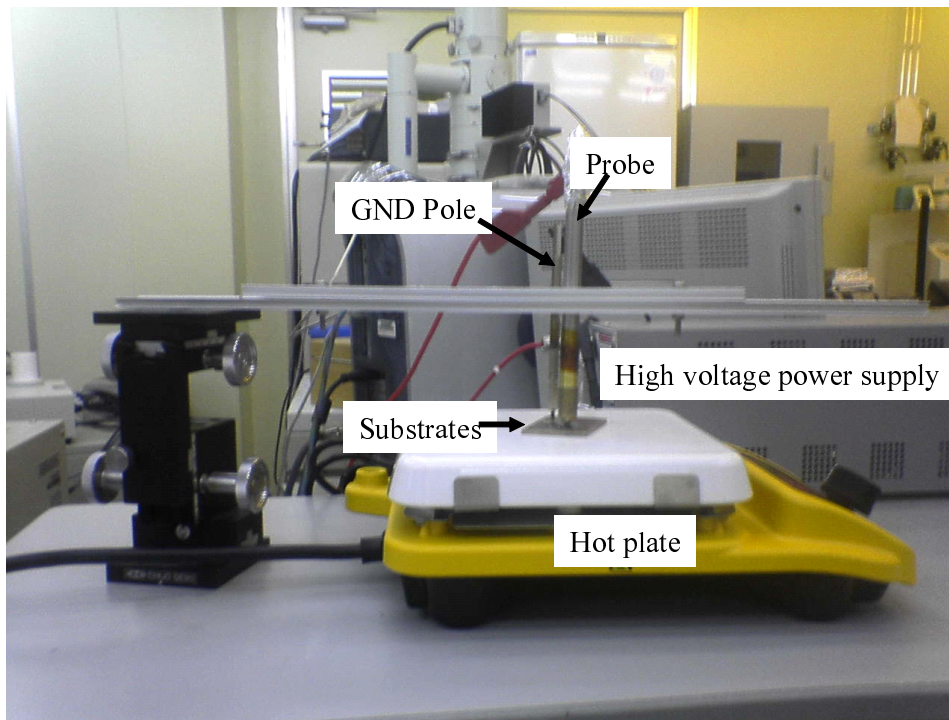


Fig 4.9: Photograph of anodic bonding equipment

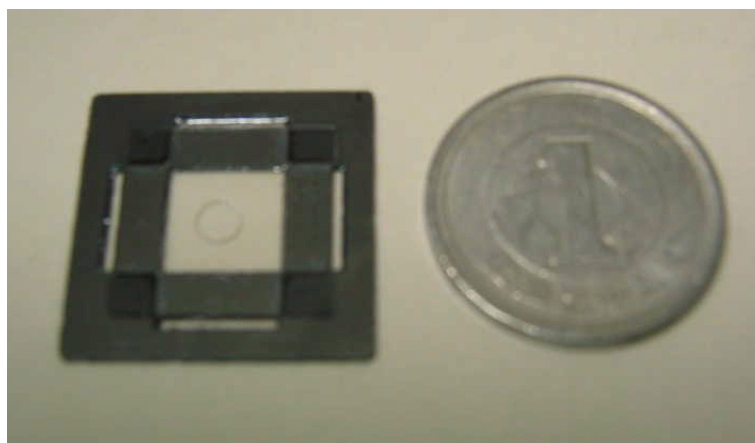


Fig 4.10: Photograph of fabricated MEMS flow channel chip

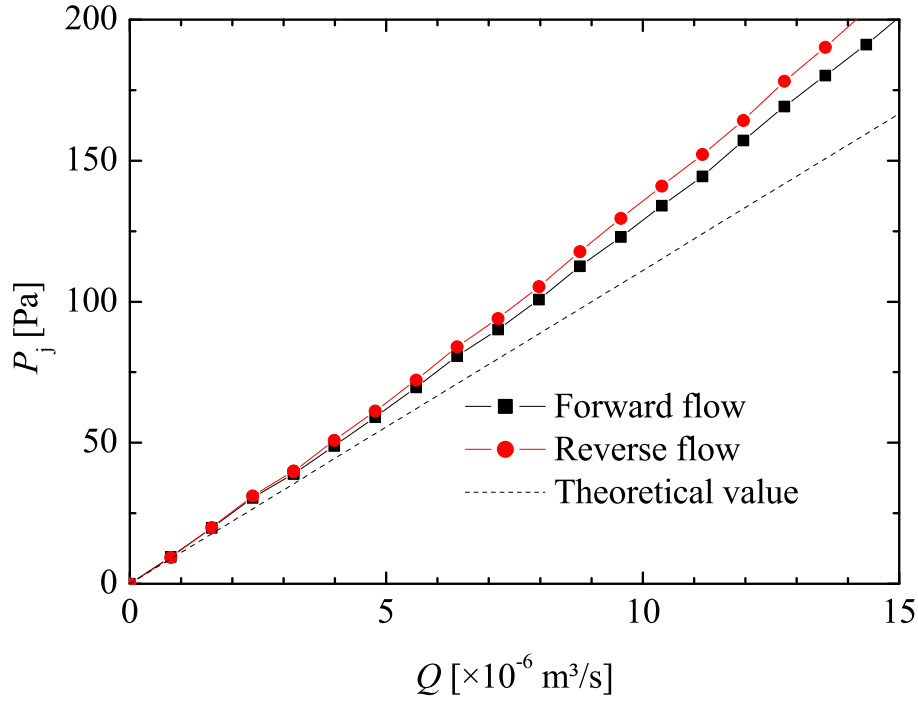


Fig 4.11:  $Q$  vs.  $P_j$  characteristic of MEMS flow channel chip

### 4.3.3 充填・放出実験

製作した MEMS 流路チップを組み込んだ圧力微分計の写真を Fig. 4.12 に示す．構造パラメータは Table 4.1 に示した値をとっている．また， $P_s$ ， $P_c$  を測定する圧力センサは豊田工機製 PD64S，等温化充填材は線径 25  $\mu\text{m}$  の銅線を 4.5 g（体積比 5.4 %）を用いた．これによって以前試作した圧力微分計 [105] に対して容積で 1/3 以下を実現している．

試作した圧力微分計を用いて空気を容器内に充填した場合と放出した場合の容器内の圧力微分値を計測する．以下にその実験手順について説明する．Fig. 4.13 に実験装置図を示す．被測定圧力  $P_s$  は容積  $3.5 \times 10^{-4} \text{ m}^3$  の等温化圧力容器内の圧力とし，3 ポートノズルフラップ型サーボ弁によって容器内圧力に変動を与え，そのときの  $P_s$  の微分値を計測した．本実験では，圧力計で  $P_s$  を測定しその値を不完全微分した値，圧力微分計の圧力容器に金属綿を詰めずに空容器を用いた場合の圧力微分計の出力信号，今回製作した圧力微分計の出力信号の 3 種類の場合について実験結果を比較した．なお，圧力計で  $P_s$  の不完全微分値を求める際には式 (4.27) を用いた．式の導出の詳細については付録 A.1 節に示す．

$$\frac{dP_s}{dt}[i] = \frac{P_s[i] - P_s[i-1]}{T_d} + \exp\left(-\frac{T_s}{T_d}\right) \frac{dP_s}{dt}[i-1] \quad (4.27)$$

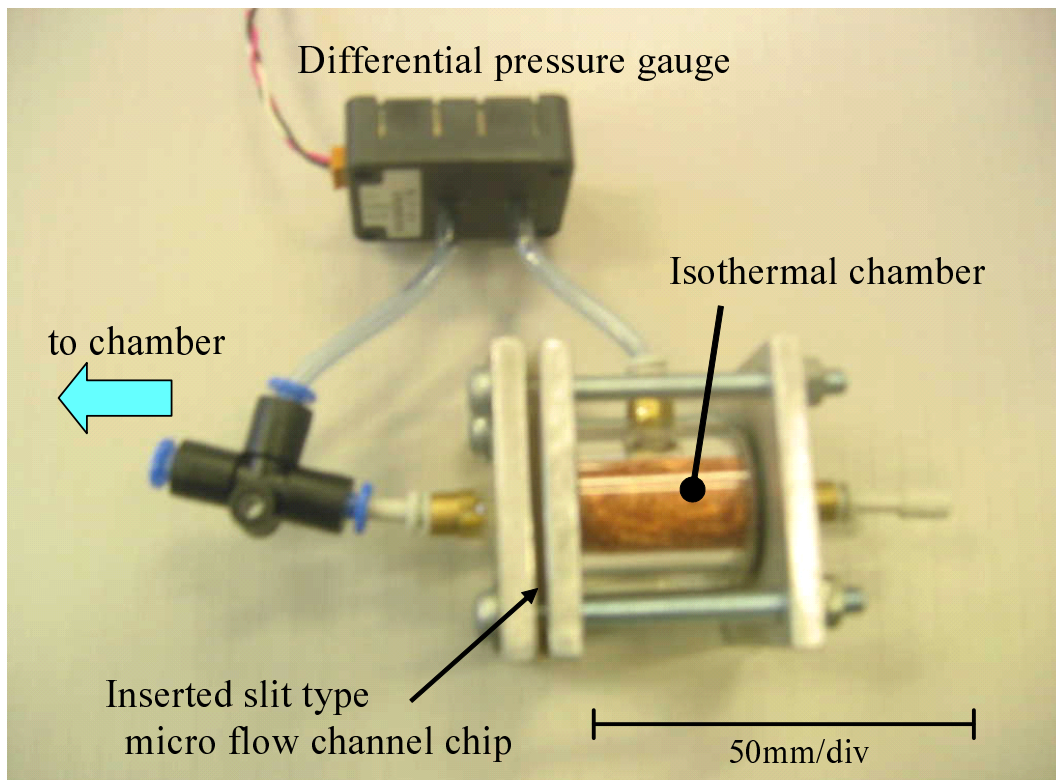


Fig 4.12: Photograph of developed pressure differentiator using MEMS flow channel

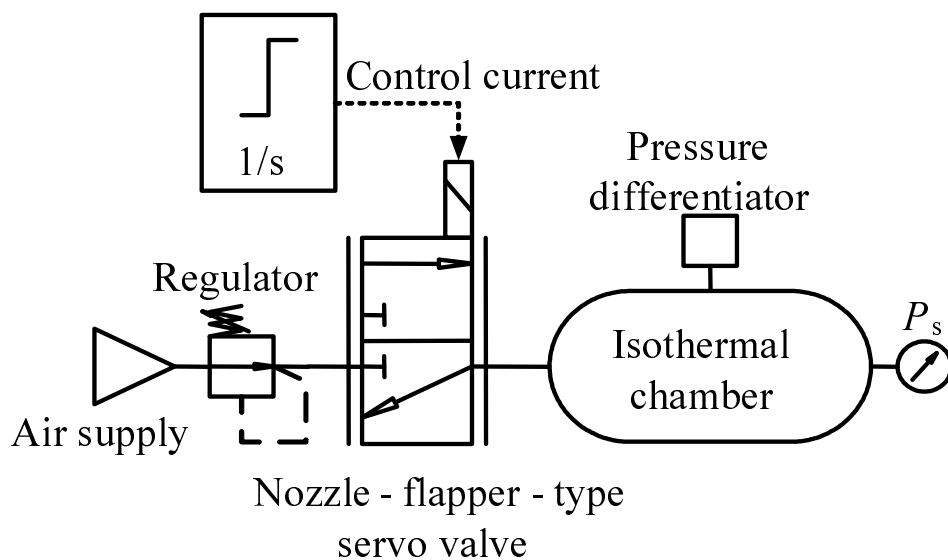


Fig 4.13: Experimental apparatus for pressure differentiation

ただし本実験では  $T_s = 0.0005 \text{ s}$  ,  $T_d = 0.0016 \text{ s}$  とする .

本実験の結果を Fig. 4.14 , Fig. 4.15 に示す . 今回製作した圧力微分計により計測された値が ,  $P_s$  の不完全微分値とよく一致していることが分かる . 一方 , 空容器の場合は容器内の温度変化の影響によりピーク値が若干小さくなってしまっている . 容器容積  $V$  が  $8.85 \times 10^{-6} \text{ m}^3$  と小さくても , 温度の影響が立ち上がりのピーク値に大きく影響していることがわかった . また , 圧力微分計の出力信号は不完全微分値よりノイズ成分が少ないため , 圧力微分値を高分解能で精度よく検出可能であることが確認できる .

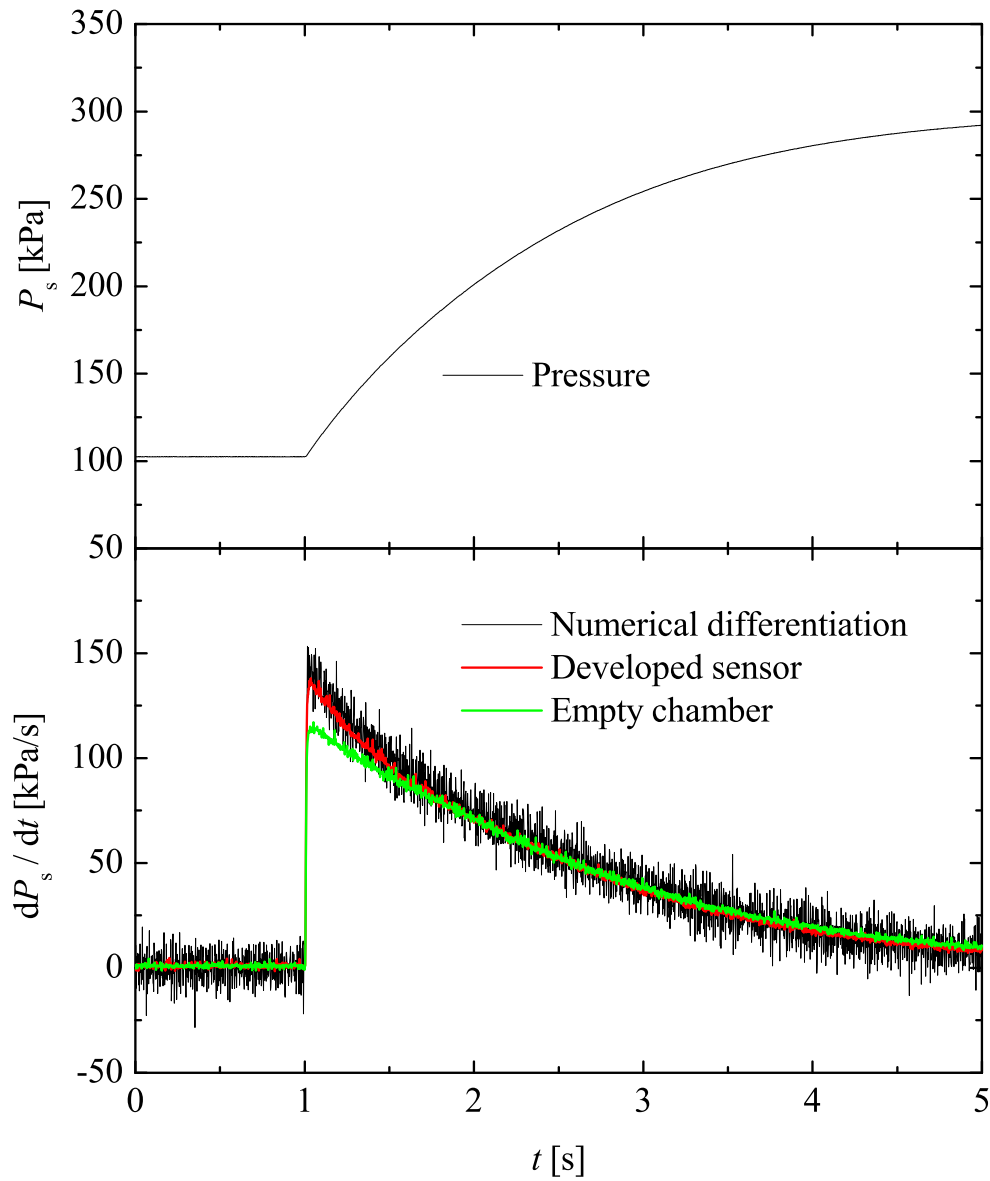


Fig 4.14: Experimental results (charge process)

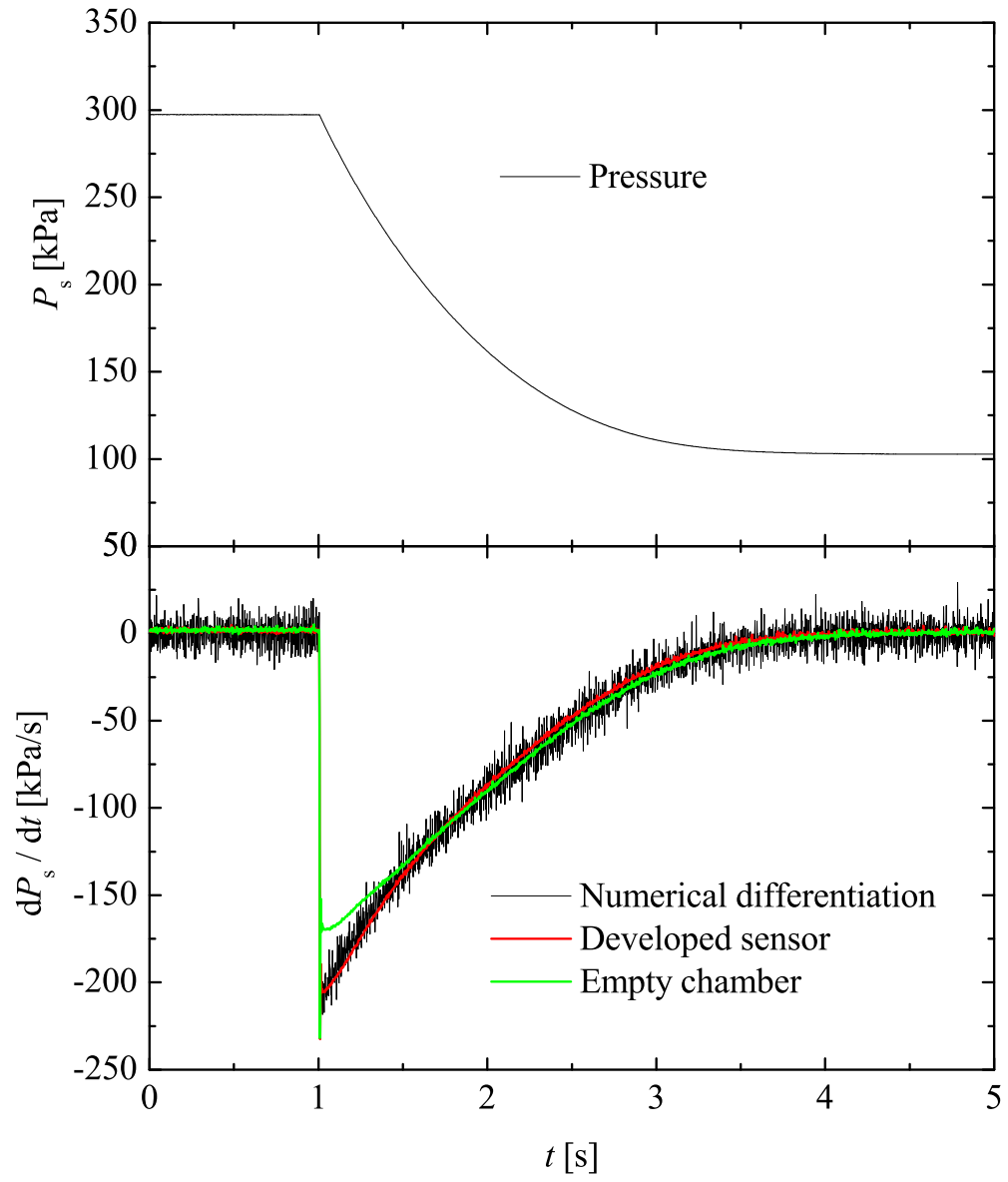


Fig 4.15: Experimental results (discharge process)

## 4.4 微細熱式流速計を用いた圧力微分計

これまでに扱ってきた圧力微分計は計測素子としてダイヤフラム式差圧計と圧力計を用い、二つの出力信号から圧力微分値を求めるものであった。しかし、ダイヤフラム式差圧計は加圧下においてゼロ点ドリフトが生じてしまう問題がある。また、層流素子の差圧計測においては助走距離の影響があり、小型化に限界がある。さらに、一つの状態量を計測するのに二種類の計測素子を用いなければならないのは非常に効率が悪い。

そこで、質量流量を計測することができる微細熱式流速計を用いることで、微細熱式流速計からの出力のみで圧力の微分値を求めることができる新たな圧力微分計を製作し、評価を行う。

### 4.4.1 微細熱式流速計を用いた圧力微分計の計測原理

4.2 節で測定原理を説明したとおり、圧力微分計は測定対象圧力容器と圧力微分計内の等温化圧力容器の間を、層流を発生させる流路でつなぎ、その前後に発生する差圧と流量の関係を利用して計測を行う。ここで、その流路を流れる流量  $Q$  と圧力微分計内等温化圧力容器の圧力を一度に計測することができれば、差圧計、圧力計の組み合わせに代わって圧力微分計の計測素子として使うことができることになる。

微細熱式流速計は質量流量を計測することができる素子であるから、この計測素子として使うことができる。前節までに示した MEMS 流路チップに微細熱式流速計を組み込むことはより複雑なプロセスを必要とする。さらに、MEMS 流路チップ単体は非常に良い特性を有していても、その流路チップを一般的に市販されている空気圧継ぎ手や、製作した等温化圧力容器と組み合わせる部分での空気もれが生じやすいなどの問題があり、さらに微細熱式流速計と組み合わせることは困難を伴う。そこで、新たに二重円管隙間流路を層流を発生させる流路として使い、その流路に外部から微細熱式流速計を挿入する圧力微分計を提案する。提案する圧力微分計の概略図は Fig. 4.16 に示す。

まず、この二重円管隙間流路を通して容器内に流入する体積流量  $Q$  について考える。流れが層流の場合、ハーゲンポアズイユの法則によって次の式に表すことができる。

$$Q \cong \frac{2\pi r_2(r_1 - r_2)^3}{12\mu l}(P_s - P_c) \quad (4.28)$$

また、平均流速と流路断面積の関係から、次のようにも表すことができる。

$$Q = \bar{u} \cdot \pi(r_1^2 - r_2^2) \cong 2\pi r_2 d r \bar{u} \quad (4.29)$$

式 (4.28) , 式 (4.29) より差圧と流速の関係は

$$\bar{u} = \frac{dr^2}{12\mu l}(P_s - P_c) \quad (4.30)$$

となる．ここで管路の流量抵抗係数  $r_s$  として

$$r_s = \frac{P_a}{2\pi\rho_a r_2 dr} \quad (4.31)$$

とおくと ,  $P_s \gg P_s - P_c$  であるから , 等温化圧力容器に流入する質量流量  $G$  は

$$G = \frac{P_c}{r_s} \bar{u} \quad (4.32)$$

と表せる．ここで ,  $K_1 = r_s V / R\theta_a$  と置くと , 式 (4.1) , 式 (4.32) より , 等温化圧力容器の圧力変化は次のように書ける．

$$\frac{dP_c}{dt} = \frac{P_c \cdot \bar{u} R_{air} \theta_a}{r_s V} = \frac{1}{K_1} P_c \bar{u} \quad (4.33)$$

ここで ,  $K_2 = 12\mu l / dr^2$  と置き ,  $P_c$  を平衡点近傍であると仮定して式 (4.33) をラプラス変換すると ,  $\bar{u}(0) = 0$  より ,

$$sP_c - P_c(0) = sP_s - P_s(0) - sK_2 \bar{u} = \frac{1}{K_1} P_c \bar{u} \quad (4.34)$$

となる．これを整理して ,  $sP_s - P_s(0) = \mathcal{L}\left(\frac{dP_s}{dt}\right)$  であることを用いると ,

$$\bar{u} = \left( \frac{K_1}{P_c + K_1 K_2 s} \right) \mathcal{L}\left(\frac{dP_s}{dt}\right) \quad (4.35)$$

また ,

$$T = \frac{K_1 K_2}{P_c} = \frac{6P_a \mu l V}{P_c \rho_a \pi r_2 dr^3 R_{air} \theta_a} \quad (4.36)$$

と定義すると , (4.36) 式は

$$\bar{u} = \frac{T/K_2}{1 + Ts} \mathcal{L}\left(\frac{dP_s}{dt}\right) \quad (4.37)$$

となり ,  $\bar{u}$  と被測定圧力の微分値  $\frac{dP_s}{dt}$  との間には一次遅れの関係が成立する．すなわち  $\bar{u}$  は  $P_s$  の不完全微分値を表すことができる．そこで , (4.37) 式の両辺に  $\rho_c$  をかけて整理すると , 以下のようになる．

$$\frac{R_{air} \theta_a}{V} G = \frac{1}{1 + Ts} \mathcal{L}\left(\frac{dP_s}{dt}\right) \quad (4.38)$$

すなわち微細熱式流速計を用いることによって質量流量を瞬時計測することができれば , 圧力の微分値を計測することができる．

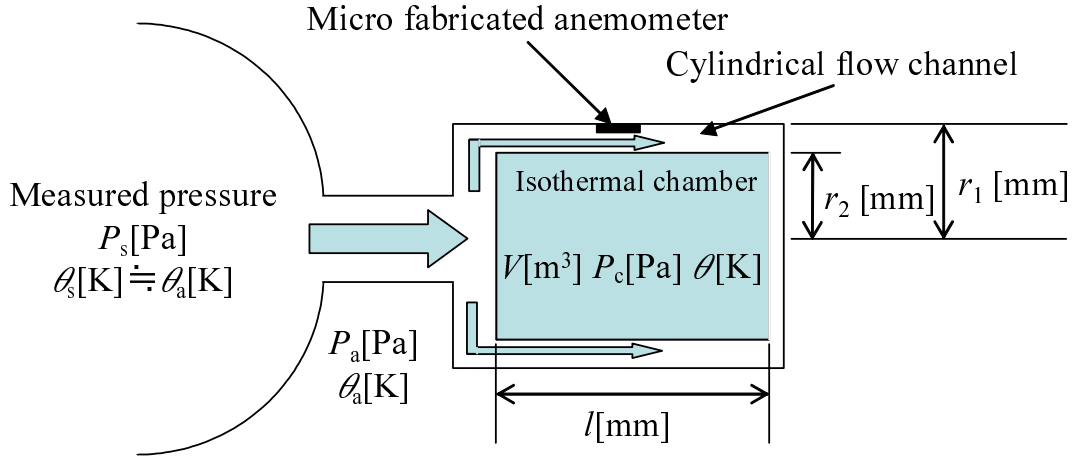


Fig 4.16: Schematic diagram of pressure differentiator using micro hot wire anemometer

#### 4.4.2 微細熱式流速計を用いた圧力微分計の設計・試作

MEMS 流路チップの設計のときと同様に，まず圧力微分計の測定範囲を考える．圧力微分計の測定可能な最大圧力微分値を 200 kPa/s と設定すると，式 (4.1) より，

$$\frac{dP_c}{dt} = \frac{GR_{air}\theta_a}{V} \leq 200 \text{ kPa/s} \quad (4.39)$$

の関係が与えられる．

次に重要となるのが隙間流路流れについて層流が保たれることである．隙間流路の代表長さを  $2dr$  として  $Re$  を計算すると，

$$Re = \frac{2\rho\bar{u}dr}{\mu} = \frac{G}{\pi r_2 \mu} \quad (4.40)$$

となる．よって，式 (4.39)，式 (4.40) を整理して， $Re$  についてまとめると，

$$Re \leq (200 \times 10^3) \frac{1}{\pi r_2 \mu} \frac{V}{R_{air}\theta_a} \quad (4.41)$$

とあらわせる．これを元に助走区間の割合を計算すると，

$$\frac{l_e}{l} = \frac{0.02Redr}{l} \leq (4 \times 10^3) \frac{dr}{\pi r_2 \mu l} \frac{V}{R_{air}\theta_a} \quad (4.42)$$

となる．

さらに圧力微分計の仕様として重要なことは，カットオフ周波数  $f_c$  を高く設定することであるが， $f_c$  は次の式で表される．

$$f_c = \frac{1}{2\pi T} = \frac{P_c \rho_a r_2 dr^3 R_{air} \theta_a}{12 P_a \mu l V} \quad (4.43)$$

Table 4.3: Parameters of pressure differentiator

| Symbol | Value                             |
|--------|-----------------------------------|
| $r_1$  | 10.0 mm                           |
| $r_2$  | 9.6 mm                            |
| $l$    | 25 mm                             |
| $V$    | $7.66 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ |

Table 4.4: Comparison of specifications of designed pressure differentiators

| parameters         | designed sensor                       | with MEMS flow channel chip                      | Ref. [105]                                       |
|--------------------|---------------------------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| measurement device | micro thermal flowmeter               | pressure sensor and differential pressure sensor | pressure sensor and differential pressure sensor |
| output             | absolute value                        | original value                                   | original value                                   |
| $V$                | $7.66 \times 10^{-6} \text{ m}^3$     | $8.85 \times 10^{-6} \text{ m}^3$                | $39.3 \times 10^{-6} \text{ m}^3$                |
| $f_c$              | $\geq 1500 \text{ Hz}$                | $\geq 179 \text{ Hz}$                            | $\geq 22.7 \text{ Hz}$                           |
| $l_e/l$            | $\leq 1.1 \%$                         | $\leq 2.0 \%$                                    | $\leq 13.4 \%$                                   |
| Re                 | $\leq 34$                             | $\leq 36$                                        | $\leq 70$                                        |
| whole size         | $30 \times 35 \times 50 \text{ mm}^3$ | $50 \times 50 \times 55 \text{ mm}^3$            | $100 \times 100 \times 140 \text{ mm}^3$         |

ここで、圧力変動の中で  $f_c$  が最小となる条件は  $P_c = P_a$  のときであり、また  $f_c$  は  $dr$  の値に大きく影響される。以上より、層流を保ちつつ、 $f_c$  を大きくするには圧力微分計内容器体積  $V$  を小さく、 $dr$  を大きくとることが有効である。

これらを考慮して本研究では圧力微分計の構造パラメータを Table 4.3 に示すような値とした。また、従来までに開発した圧力微分計との設計値の比較を Table 4.4 に示す。

次に、この構造パラメータに従って製作した二重円筒流路を用いて微細熱式流速計の校正を行った。微細熱式流速計と二重円筒流路の概略図は Fig. 4.17 に示す。流路構造としては半径 10 mm の円筒型にくりぬいたブロック内に、外径  $\phi 19.2 \text{ mm}$ 、内径  $\phi 17.2 \text{ mm}$  の金属性パイプが同軸になるように設置されている。内部の金属性パイプおよびそのパイプを固定するための治具には複数の穴が切られており、空気が通過できる構造である。試作したセンサを固定した治具は、流路外部から挿入固定できるようにした。発熱体が流れに対して垂直に当たるように配置されている。治具に固定し、配線した微細熱式流速計の写真を Fig. 4.18 に示す。

実験装置を Fig. 4.19 に示す。試作したセンサの上流および下流につけた可変絞りを調節し、センサ設置点にかかる圧力を変化させながらセンサの出力と流量の関係を計測した。センサ設置点の圧力の計測には前節の実験でも用いた豊田工機製のものを使用した。流量計測の基準器として、湿式校正用ガスメータ（シナガワ製 W-NK0.5、不

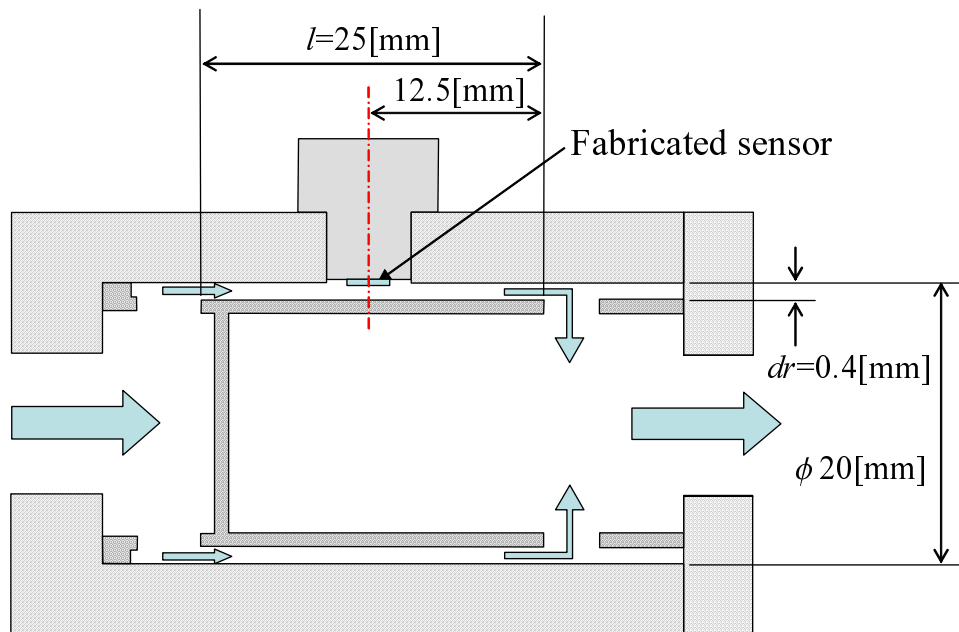


Fig 4.17: Schematic diagram of bycylindrical flow channel with MEMS chip

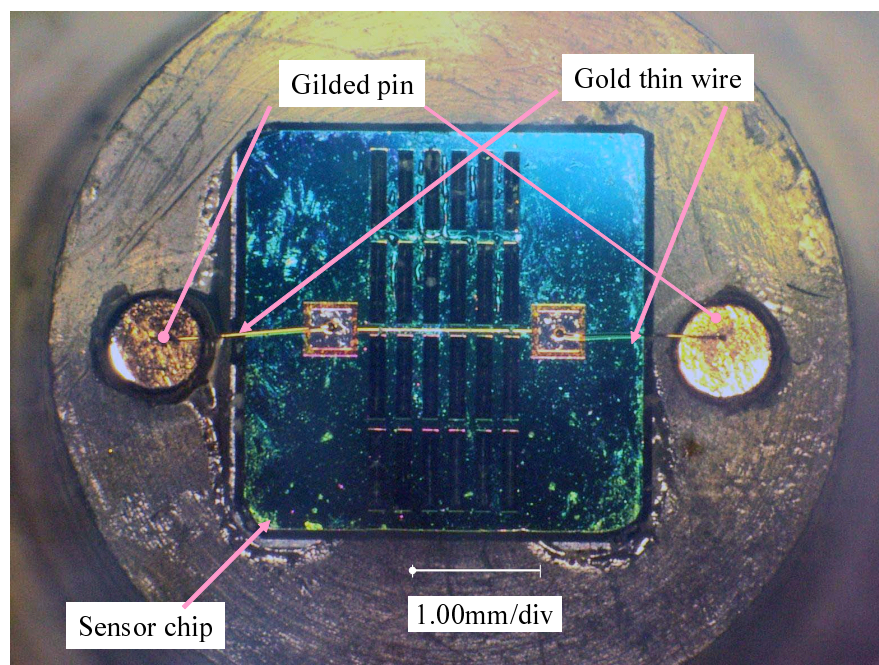


Fig 4.18: Photograph of MEMS hot wire anemometer chip

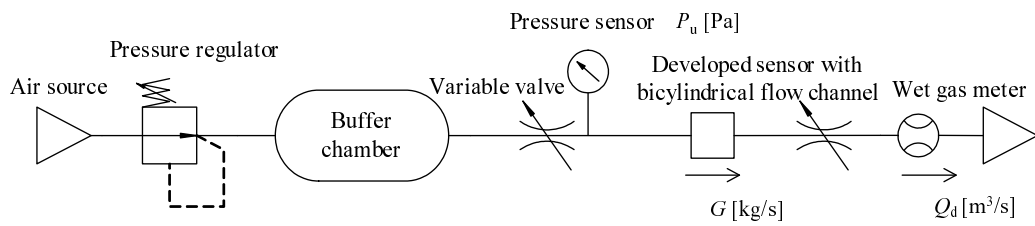


Fig 4.19: Experimental apparatus for static characteristic of newly developed pressure differentiator

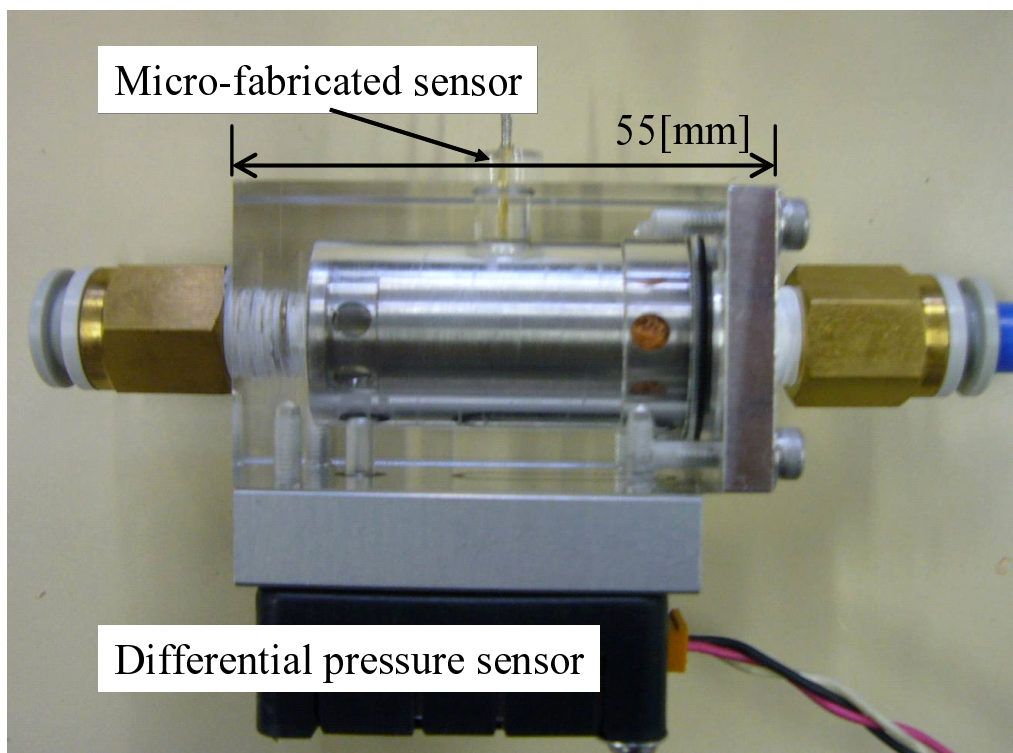


Fig 4.20: Photograph of new developed pressure differentiator with micro hot wire anemometer

確かさ 0.15 %以下) を試作したセンサの下流側に設置しているため, センサ設置流路における質量流量  $G$  と, 湿式流量計で計測できる体積流量  $Q_d$  との間には連続の式が成り立ち, 以下のようにかける.

$$G = \rho_a \frac{P_u}{P_a} Q_u = \rho_a Q_d \quad (4.44)$$

ここで,  $P_u$  はセンサ設置点での絶対圧力であり,  $Q_u$  は同点での体積流量を表す. (4.44) 式によれば, 下流側体積流量と任意点での質量流量は比例関係となる. 測定流量範囲は先ほどの設計指針の中で定めた最大圧力変化  $\frac{dP_c}{dt} \leq 200 \text{ kPa/s}$  が大気圧状態から生じることを想定し, その際に流れる体積流量の二倍の範囲まで測定することとした.

実験結果は Fig. 4.21 に示すとおりである. センサ設置点での圧力によらず, センサの出力電位差  $\Delta E$  は  $Q_d$  に比例することが確かめられた. つまり試作したセンサはセンサ設置点での圧力にかかわらず,  $G$  を計測できることが確認され, 式 (4.38) よりこのセンサの出力のみで圧力微分値を計測することができるといえる.

実際に製作した圧力微分計の写真を Fig. 4.20 に示す. 以前製作した差圧計を使用した圧力微分計との比較を行うため, 微細熱式流速計の反対側にダイアフラム式差圧計 (前節の実験で用いたものと同等のもの) を設置している. この差圧計の測定レンジは  $\pm 200 \text{ Pa}$ , 分解能は  $0.2 \text{ Pa}$  である. 差圧計を用いる方法では, 式 (4.28), 式 (4.30), 式 (4.38) 式および差圧計の出力  $P_j = P_s - P_c$  の関係より, 次式で表すことができる.

$$P_j = \frac{T}{1 + T_s} \mathcal{L} \left( \frac{dP_s}{dt} \right) \quad (4.45)$$

よって微細熱式流速計を用いる場合と, 圧力計と差圧計を用いる場合でそれぞれ一次遅れ系の時定数  $T$  は等しくなる.

また実験の際に  $P_s$  を測定する圧力センサは微細熱式流速計の特性を計測する際に使用したものと同一ものとした.

#### 4.4.3 充填実験

製作したセンサを用いて, 空気を容器内に充填する時の容器内の圧力微分値を計測する実験を行った. 実験手順については以下に説明する. Fig. 4.22 に実験装置図を示す. 被測定圧力  $P_s$  は容積  $3.5 \times 10^{-4} \text{ m}^3$  の等温化圧力容器内の圧力とし, サーボ弁によって容器内圧力に変動を与え, そのときの  $P_s$  の微分値を計測した. サーボ弁への制御信号として, 圧力微分値の最大値がおおよそ  $200 \text{ kPa/s}$  で, 1 秒程度で圧力が静定するような信号を与えた.

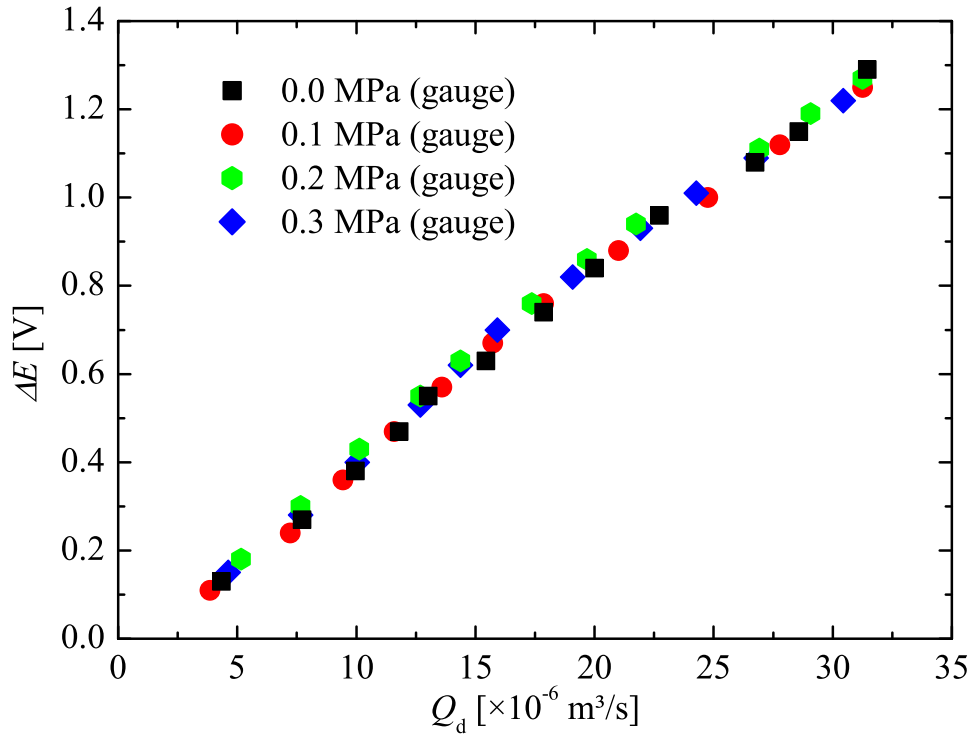


Fig 4.21: Static characteristics of micro hot wire anemometer under pressure

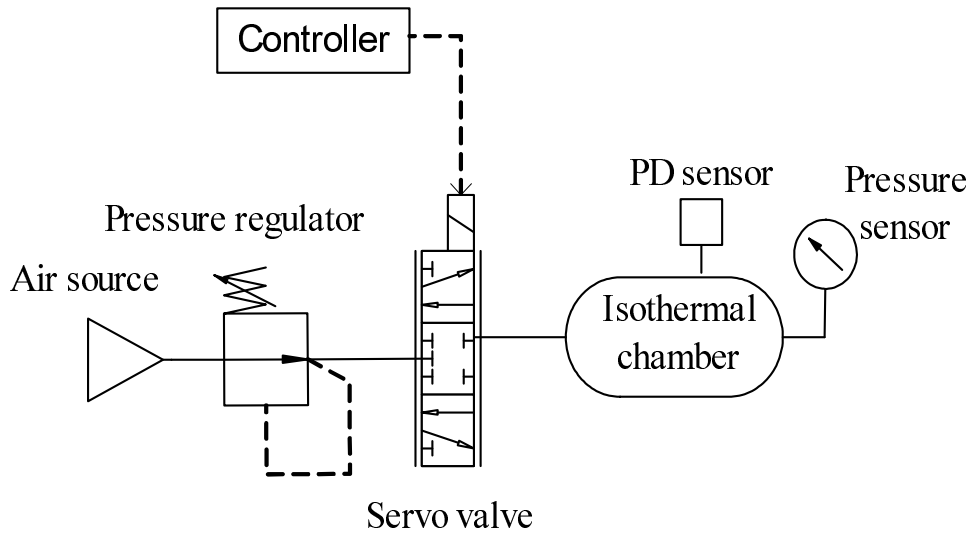


Fig 4.22: Experimental apparatus for pressure differentiation

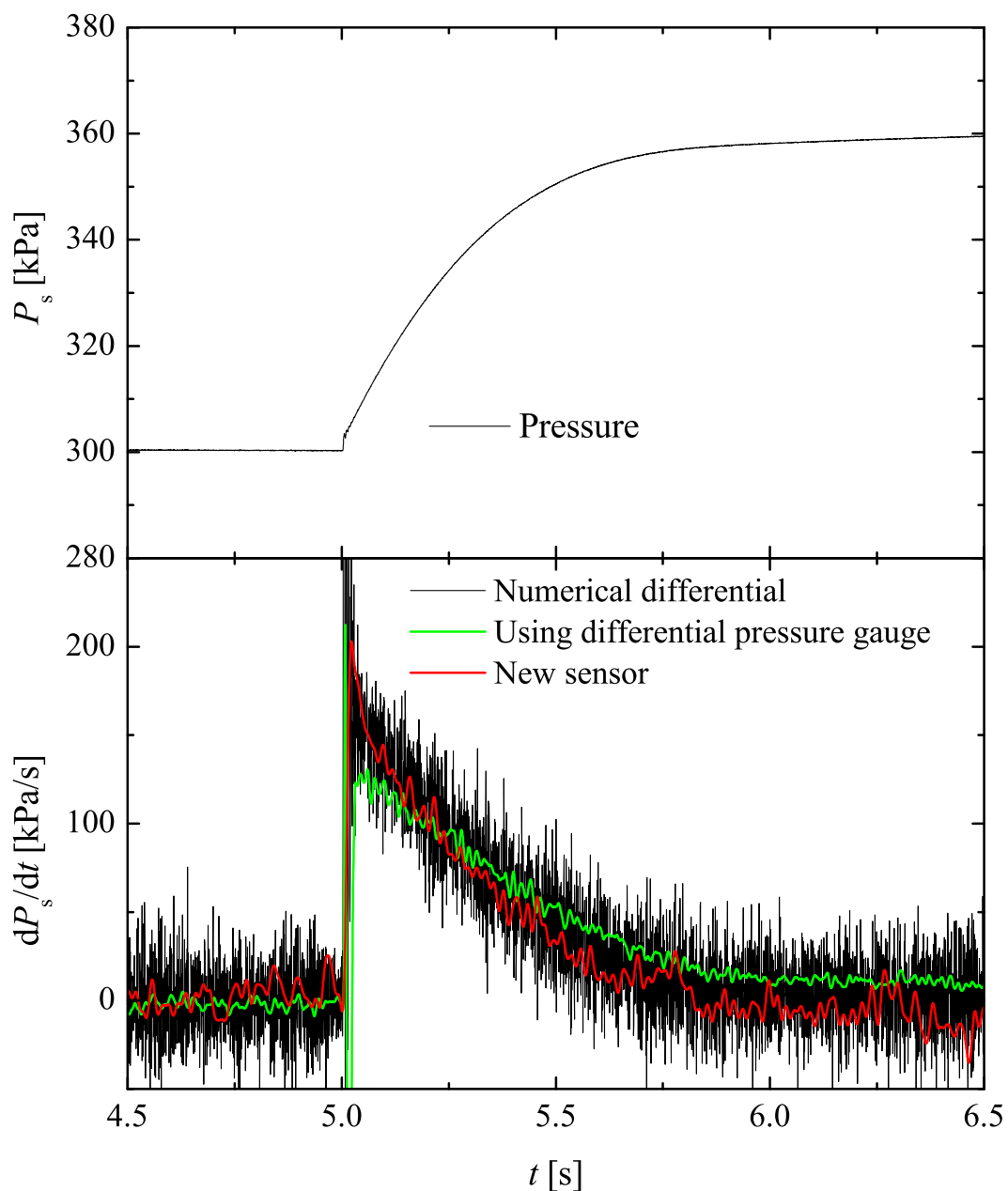


Fig 4.23: Experimental results of Pressure differentiation over 300 kPa

本実験では，圧力計で  $P_s$  を測定しその値を不完全微分した値，従来どおりダイヤフラム式微差圧計と圧力計の出力信号を計測し，計算によって求められる値，今回提案する微細熱式流速計を用いて計算した値の3種類について実験結果を比較した．

本実験の結果を Fig. 4.23 および Fig. 4.24 に示す．それぞれ上のグラフが被測定空気の絶対圧力の変化を，下のグラフが3種の方法で求めた圧力微分値の変化を表している．それぞれ初期圧力は Fig. 4.23 の時 300 kPa，Fig. 4.24 の時 400 kPa としている．

また，差圧計を用いた信号および，微細熱式流量計を用いた信号にはともに 50 Hz

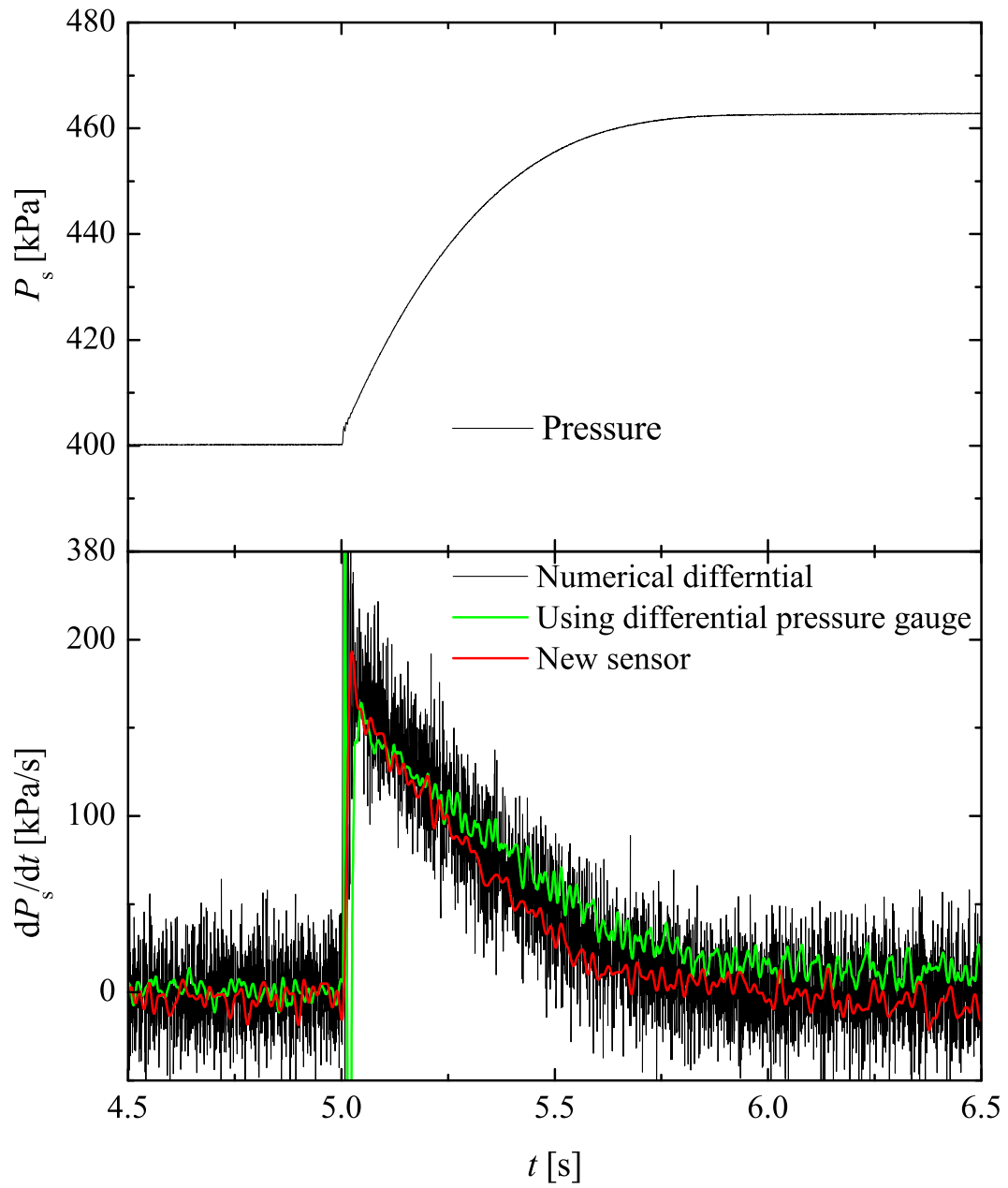


Fig 4.24: Experimental results of Pressure differentiation over 400 kPa

のローパスフィルタを施している。

実験結果を比較すると、今回製作した圧力微分計によって計測された値は  $P_s$  の不完全微分値と全体の傾向がよく一致しており、提案した圧力微分計の妥当性が示された。さらに、不完全微分値に比べるとノイズ成分が少ないため、圧力微分値を高分解能で精度よく検出可能であるといえる。

また、微差圧計の出力信号によって求めた値では、立ち上がり直後にマイナス側へのオーバーシュートが見られる。これは実験に用いた微差圧計がダイアフラム式であるため、急峻な圧力変化の時にはダイアフラム自体が振動してしまい、正しい差圧を測定できないためだと考えられる。さらに圧力静定後にはわずかではあるが偏差が残っている。特に、Fig. 4.24 に示す平均圧力が高いほうがその傾向は強くなる。これは新しい圧力微分計では  $T$  を従来に比べて小さくなる様に設計したため、圧力微分値を計算する際に微差圧計の出力に乗ずる係数が大きくなっており、結果としてごく微小な零点ドリフトが強調されてしまったためだと考えられる。さらに、本研究に用いた微差圧計の周波数特性は大気圧下においては、50 Hz まで保証されているが、0.6 MPa(abs.) の加圧下における特性を実験的に調べたところ、10 Hz 程度までしか十分な応答が得られず、出力が非常に振動的になることが確認されている。以上から、加圧下の圧力微分値の検出には微差圧計は不向きであるといえる。

一方、微細熱式流速計の出力信号によって求めた値では、信号の振動が若干見られるものの、圧力静定時の収束状態は微差圧計を用いるものよりも優れている。さらに立ち上がりにおいては、非常に鋭い立ち上がり反応をしており、 $T$  を小さくした新しい圧力微分計の設計仕様の優位性が示された。

以上の結果から、微細熱式流速計を用いた圧力微分計は新しく設計した圧力微分計において、微差圧計を用いる従来のものよりも有効であることが明らかとなった。

## 4.5 まとめ

本章では，容器内圧力変化を直接計測できる圧力微分計に，MEMS デバイスを用いることによって高速，高精度化を図った．得られた成果を以下にまとめる．

1. 圧力微分計の層流抵抗管としてシリコン基板を用いた微細流路チップを用いる方法を提案し，その測定原理を示した．圧力微分計の仕様から微細流路チップ形状の設計を行い，流路チップを用いることで構成の科が期待できることを示した．
2. シリコン基板およびパイレックスガラスを素材とし，リソグラフィー，ウェットエッチング，CVD，陽極接合の各技術を用いて微細流路チップを製作し，圧力微分計の要素として十分使えることを実験的に確認した．
3. MEMS 流路チップを組み込んだ圧力微分計を製作し，容器への空気の充填・放出実験を行い，非常に良い精度かつ高速で圧力微分値を計測できることを確認した．また，空容器を用いた場合との比較を行い，体積が小さくても等温化することが非常に有効であることを確認した．
4. 従来までの圧力微分計ではダイヤフラム式微差圧計の特性により，加圧下において出力特性が低下することから，計測素子を圧力計と微差圧計としていたものを，微細熱式流速計のみとする新しい圧力微分計を提案し，設計から微細熱式流速計を用いる方法の有効性を示した．
5. 層流抵抗管を二重円管流路としその流路中に微細熱式流速計を配置した新しい圧力微分計を製作し，流量計測実験を行った．実験により試作した微細熱式流速計が圧力微分計の計測素子として有効であることを明らかにした．また，容器への空気充填実験を行い，微細熱式流速計を用いる計測手法の妥当性を示すとともに，加圧下における計測での優位性を示した．

## 第5章 密度・粘度同時計測センサ

### 5.1 はじめに

前章までは計測対象の気体を空気として研究を行った．しかし，気体の種類が変わると気体定数，密度，粘度が変わってしまう．微細熱式流速計を用いた質量流量計測においても密度が変化するとセンサ出力が変化してしまう．また，等温化圧力容器を用いた流量計測においても気体固有の気体定数を用いていた．

このように気体の種類が変化した場合には，気体固有の物性値をあらかじめ既知であれば，それを用いて出力を補正することができる．しかし，未知の気体を計測する場合や，混合比が分からない流体の流量計測をする場合などは，あらかじめ物性値を計測把握する必要がある．

密度・粘度計測の現状については第1章において説明したとおり，液体の計測方法に比べて気体の計測方法は研究例が少ないうえ，計測に時間がかかるという問題がある．

そこで本章では，気体の種類によらない物理則を用い，複数の流量計測原理を組み合わせることで気体の密度，粘度を短時間に同時に計測する手法を提案し，二酸化炭素を用いた実験によりその有効性を示す．さらに密度計測，粘度計測それぞれの先行研究と比較し，優位性を示す．

### 5.2 計測原理

ここでは本研究に用いる流量計測原理についてまとめる．本研究では微細熱式流速計，層流流用計，等温化圧力容器を用いる．

#### 5.2.1 微細熱式流速計を用いた密度計測

熱式流量計は質量流量を計測することができることは一般的に知られており，本研究で製作した微細熱式流速計を用いて体積流量を計測できることは既に 4.4.2 節において確認している．すなわち

$$G = k_{\text{MEMS}} \Delta E \quad (5.1)$$

と書くことができ、これは気体の種類によらず普遍である。

一方、体積流量と質量流量の関係は

$$G = \rho Q \quad (5.2)$$

である。すなわち、微細熱式流速計を用いて計測した質量流量値を体積流量で割ることによって密度を求めることができる。

### 5.2.2 層流式流量計を用いた粘度計測

本研究で用いる層流式流量計は、第 4 章で使用した二重円管型スリット流路と差圧計を組み合わせたものを想定する。この隙間流路を流れる流量はハーゲンポアズイユの法則より

$$Q = \frac{\pi r_2 dr^3}{12\mu l} \Delta P \quad (5.3)$$

と書ける。これは、二重円管の寸法が決まっていれば差圧と体積流量、粘度の関係が一意に決まることを意味する。すなわち、体積流量、差圧を計測することで、粘度が求められる。

### 5.2.3 等温化圧力容器を用いたモル流量計測

以上の二節で体積流量さえ求められれば、密度、粘度を計測可能であることを示した。しかし、期待の種類が分からないと瞬時体積流量を求めることも困難となる。そこで、本研究では等温化圧力容器の流出流量を一般化した気体状態方程式から求める。

等温化圧力容器を用いた流量計測は、容器内の気体の状態方程式をもとに等温状態を仮定することで容器内に流出入する質量流量を求められるというものであった。ここで、より一般化するために気体の種類に依存しない気体定数  $R_{\text{mol}}$  を用いて状態方程式を書き直す。

$$PV = NR_{\text{mol}}\theta \quad (5.4)$$

この式を全微分し、体積一定、温度一定とすると次式が得られる。

$$\frac{dN}{dt} = \frac{V}{R_{\text{mol}}\theta} \frac{dP}{dt} \quad (5.5)$$

ここで得られる  $\frac{dN}{dt}$  とは単位時間あたりに何個の分子が流れるかというモル流量であり、単位は mol/s となる。標準状態では 1 mol の理想気体の体積は  $22.4 \times 10^{-3} \text{ m}^3$  で

あるので，モル流量に関する係数を  $k_N$  とすると，容器内部の温度での体積流量  $Q_N$  は次式で表すことができる．

$$Q_N = k_N \frac{dN}{dt} = \frac{k_N V}{R_{\text{mol}} \theta} \frac{dP}{dt} \quad (5.6)$$

つまり，容器体積，容器内の気体の温度が既知であれば，圧力変化を測定することで標準状態の体積流量の瞬時値を得ることができる．

また，容器内の気体温度で補正すると，次式に書き直すことができる．

$$Q = k_N \frac{\theta}{\theta_0} \frac{dN}{dt} = \frac{k_N V}{R_{\text{mol}} \theta_0} \frac{dP}{dt} \quad (5.7)$$

以上より，容器内の温度が分からなくても容器内部の温度と流れる気体の温度が等しければ，その温度での体積流量が求められる．またこのことから，熱式流量計，層流流量計，及び等温化圧力容器を組み合わせることによって密度，粘度の同時計測が可能となる．

## 5.3 複合型センサ

密度・粘度を同時計測するため，層流流量計の流路内に微細熱式流速計を取り付けたセンサを用いて計測を行う．これを複合型センサと呼ぶ．複合型センサは 4.4 節で試作した二重円筒型流路に微細熱式流速計と差圧計をつけたものを利用する．Fig. 4.17 が概略図，Fig. 4.20 が実際の写真になる．この複合型センサの基礎特性について実験によって確認し，同時にセンサの計測不確かさ，誤差要因について考察する．

### 5.3.1 複合型センサの基礎特性

本研究で用いる複合型センサの特性を校正するため，Fig. 5.1 に示す実験装置を用いて空気を作動流体として， $\Delta E - Q$  特性， $\Delta P - Q$  特性を計測した．基準流量は音速ノズル（平井製 MRS-101）を用いて校正した湿式流量（シナガワ製 W-NK0.5）を用いている．また，差圧の計測には長野計器製 KL-17（測定レンジ  $\pm 200$  Pa）を使用した．実際に， $\Delta E$ ， $\Delta P$  を計測する際には湿式流量計をはずし，本来の目的である物性値測定を行うときと同じ環境になるようにしている．

微細熱式流速計の実験結果は Fig. 5.2 に示す．非常に線形性が高い結果が得られている．この結果と実験時の室温から求めた空気の密度により， $k_{\text{MEMS}}=0.87$  と求められた．

一方，二重円管型層流流量計の実験結果を Fig. 5.3 のプロット点に示す．この結果から， $\Delta P$  は  $Q$  はほぼ線形関係にあるとみなすことができる．

### 5.3.2 計測不確かさ，誤差に関する考察

それぞれの計測手法による不確かさを求めるため，湿式流量計から求められる基準流量  $Q_{\text{ref}}$  と各実験点との比較を行った．

まず，微細熱式流速計は，先ほどの実験結果から求めた流量計の校正式を用いてそれぞれ計測した  $\Delta E$  から流量  $Q_{\text{MEMS}}$  を求め， $Q_{\text{ref}}$  との比結果を Fig. 5.4 に示す．この

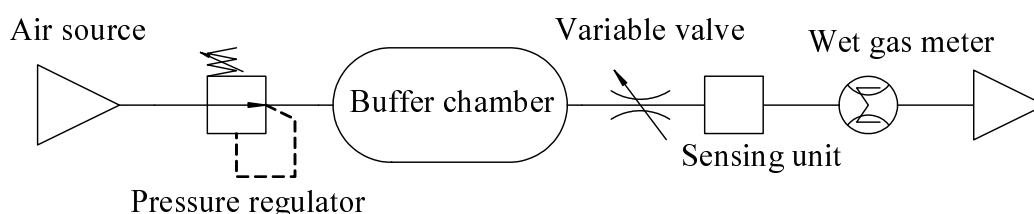


Fig 5.1: Experimental apparatus for static characteristic measurement

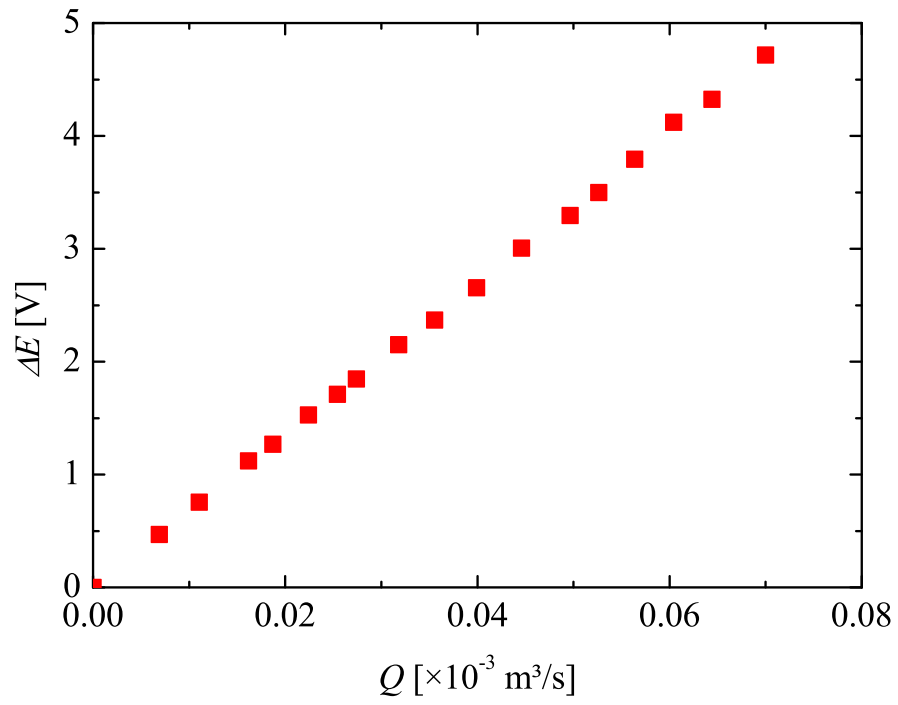


Fig 5.2: Static characteristic of micro hot wire anemometer

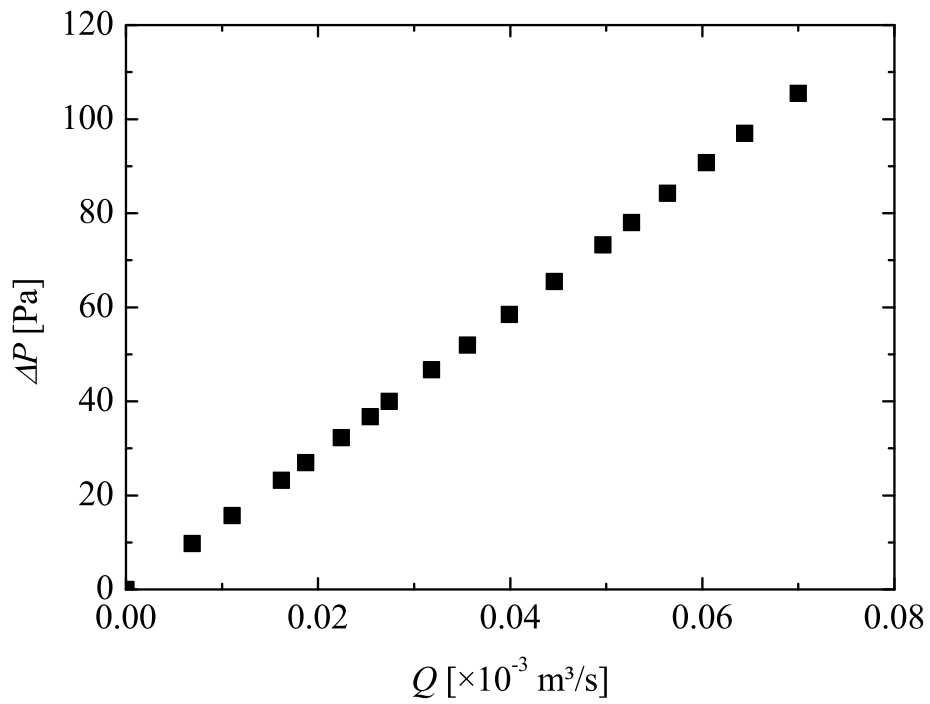


Fig 5.3: Experimental result of laminar flow sensor

結果から，微細熱式流速計をこの流量域で使う時の不確かさは $\pm 3\%$ 以内であるといえる．

一方，二重円管型層流流量計の結果も微細熱式流速計と同様に基準流量計と式 (5.3) によって計算される流量の比を取った結果を，Fig. 5.5 に示す．計測不確かさは右肩上がりに増えて行き，最大でおよそ7%にもなっている．

この要因として助走区間の影響を考える．実験で確認した範囲での最高流量  $Q_{\max}$  は  $0.7 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$  であり，このときの管路内平均流速  $\bar{u}$  は

$$\bar{u} = \frac{Q_{\max}}{2\pi r_2 dr} \quad (5.8)$$

より，およそ  $2.9 \text{ m/s}$  と求められる．流路幅  $b$  が流路高さ  $\eta$  に対して十分に長いときには，代表長さ  $L$  が  $2\eta$  で与えられることに注意してレイノルズ数を計算すると，およそ 165 と求められる．ここで平行すきまにおける助走距離は次式で与えられる．

$$l_e = 0.02\eta Re \quad (5.9)$$

すなわち，最大で助走距離は差圧取得区間の  $5\%$  以上を占めるため，完全に無視することはできない．

助走区間を考慮した差圧の関係式は

$$\Delta P = \frac{12\mu l}{z\eta^3} Q + \zeta \frac{\rho \bar{u}^2}{2} \quad (5.10)$$

となる．ここで  $\zeta$  は損失係数と言われるが，流路形状などによって決まる値であり半実験的に求められるが， $\zeta > 1$  である．流速  $2.9 \text{ m/s}$  のときの  $\zeta$  を無視した損失項  $\rho \bar{u}^2 / 2$  はおよそ  $5.4 \text{ Pa}$  となり， $\Delta P$  に対して助走区間による損失は  $5\%$  以上となるため，層流流量計の計測不確かさの主要因は助走区間の影響が主であると分かる．

$\zeta$  は流路固有の値であるから，実験結果を用いて妥当な値を与えることとした．その結果， $\zeta = 1.2$  の時 Fig. 5.5 に示すように，計測結果のばらつきは  $\pm 1\%$  以内に収まるようになる．実際に，密度も粘度も未知の気体にこの圧力損失の補正を行う場合，損失項の計算には密度の測定が必要となるが，これは微細熱式流速計によって計測できるため，問題とならない．

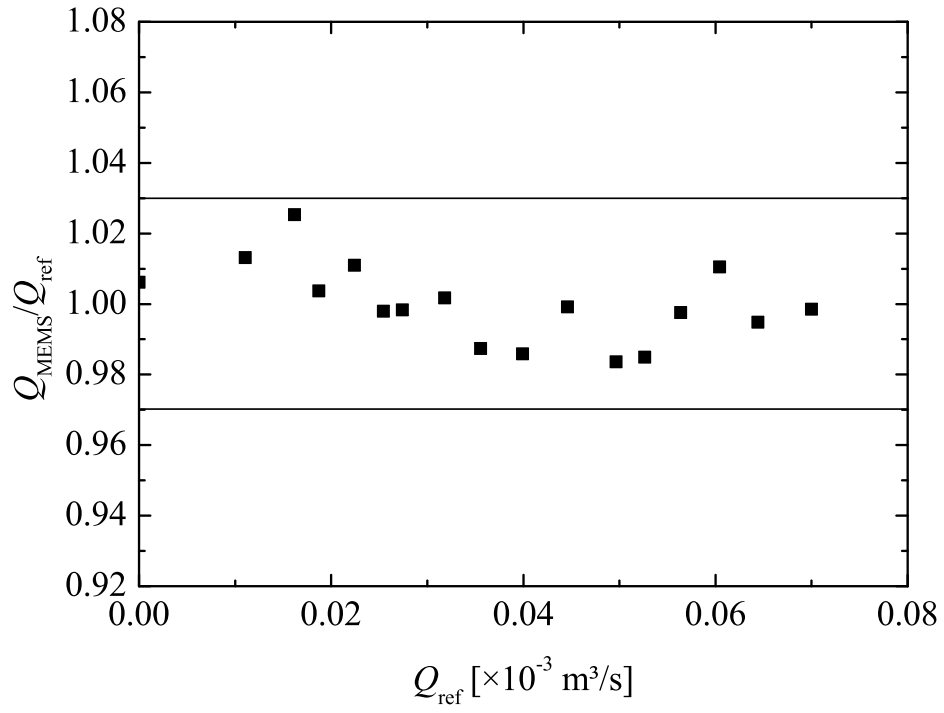


Fig 5.4: Uncertainty of micro hot wire anemometer

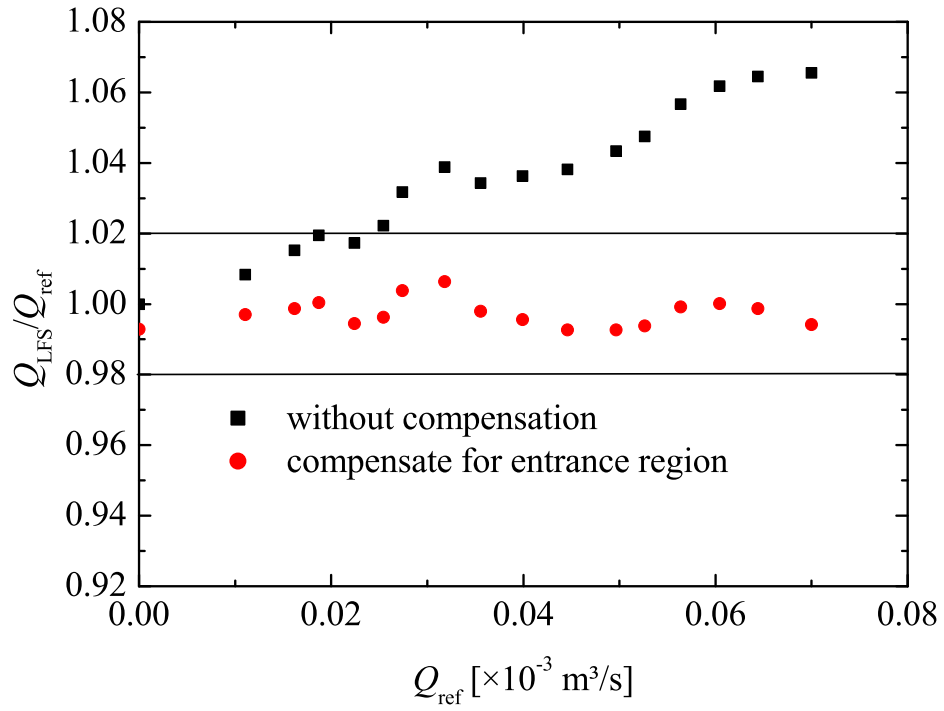


Fig 5.5: Uncertainty of laminar flow sensor and compensate for entrance region

## 5.4 密度・年度同時計測実験

前節までに行った検討から，等温化压力容器および複合型センサを使うことによって，気体の密度，粘度，体積流量を計測できると予測される．ここでは，空気および二酸化炭素を作動流体としてそれぞれの値を計測する実験を行う．

### 5.4.1 実験装置および実験方法

本実験に用いる実験装置を Fig. 5.6 に示す．気体の供給源から減圧弁を介し，等温化压力容器，流体マルチセンサの順に気体が通過する．等温化压力容器内の圧力は豊田工機製 PD64S を用いて計測し，複合型センサの出力値とともに分解能 16 bit の AD 変換機を通して PC でデータを収集した．また，アルコール式温度計を用いて室温を  $1/10$  単位で計測し，流量算出式 (5.7) における気体の温度  $\theta_0$  はこれに等しいとしている．

等温化压力容器は内容積  $0.2 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ ， $0.05 \times 10^{-3} \text{ m}^3$  の二種類を使用した．等温化压力容器の前後の止め弁はできる限り短くつなぐように装置を構成した．等温化压力容器の前後配管の体積は，式 (5.4) における  $V$  に含まれる．このため配管が長くなると，等温化压力容器体積が見かけ上大きくなってしまい，压力容器の等温変化が補償されず，基準となる体積流量が正確に測れなくなるためである．

実験方法は以下のとおりである．下流側止め弁を閉じ，等温化压力容器に気体を充填する．十分に充填された後，上流側止め弁を閉じ，下流側止め弁を開放すると同時に記録を開始する．下流側可変バルブの開度はあらかじめ適切な流量が流れるように調節しておく．空気以外の気体を作動流体とする場合には，等温化压力容器内の気体が完全に入れ替わるように何度か充填・放出を繰り返した後に実際の測定を行う．

### 5.4.2 空気の密度・粘度計測

まず，作動流体を空気として実験を行った．Fig. 5.7 に  $V = 0.2 \times 10^{-3} \text{ m}^3$  の等温化压力容器を用いたときの容器内圧力および，それによって求めた放出流量の推定値結果を示す．圧力計の出力はノイズが多く，そのまま数値微分をすると流量が厳密に定まらないため，まず圧力計出力結果をオフラインでローパスフィルタ（付録 A.2: 遮断周波数 5 Hz）を施し，その値を元に数値微分を行っている．さらに，容器容積  $V$  は配管などによるデッドボリュームを加味して  $V = 0.202 \times 10^{-3} \text{ m}^3$  として計算している．ローパスフィルタを施す影響で計測開始から約 1 秒までのデータは信頼性がないので，密度，粘度測定には使用できないので省いている．

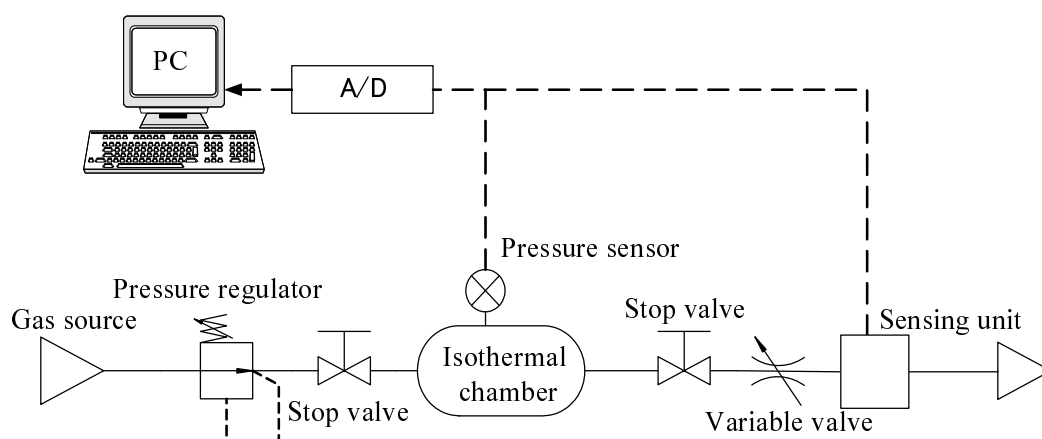


Fig 5.6: Experimental apparatus for simultaneous density and viscosity measurement

Fig. 5.7 を見ると分かるとおり，流量が振動しながら減少している．実験中下流の可変絞りは開口面積が固定されているため，流量は単調減少するはずであるが，圧力計の分解能が数値微分に影響してこのような結果になったと考えられる．参考文献 [107] によれば定常流量を同定するために必要な圧力変化は最低 18 kPa/s とされているが，本実験では 25 kPa/s 以上の圧力変化をしているが，それでも不十分である．[107] ではローパスフィルタの遮断周波数が明記されていないため，この差によると考えられる．

Fig. 5.8 は微細熱式流速計の出力と Fig. 5.7 によって求めた流量から計算によって求められた密度の結果である．本実験においては等温化圧力容器からの放出であるため，密度は時間変化しないと考えて問題ない．実験結果では放出流量の推定値の振動成分がそのまま密度計測値に影響を及ぼして振動的になってしまっているが，平均値はおおむね文献値 [108] と一致しているといえる．

さらに Fig. 5.9 に粘度計測の結果を示す．5.3 節で示したように本実験に用いた層流式流量計は助走区間の影響が大きいことが分かっている．そこで，助走区間の影響を考慮した式 (5.10) を元に計算した結果と，式 (5.3) による考慮しない結果を併せて示した．なお損失係数  $\zeta$  は前節で求めた値を用いている．粘度の計算においても流量推定値の振動の影響を強く受けていることが分かる．また，助走区間の影響による補正を加えることによって粘度推定はおおむね良く一致することが分かった．

次に，同流量を放出したときに圧力変化がより大きく生じ，安定した流量が計算されるように，等温化圧力容器容積を  $0.05 \times 10^{-3} \text{ m}^3$  に変えて同様の実験を行った．容器内圧力変化と計算された流量の結果を Fig. 5.10 に示す．計算時には先ほどと同様にデッドボリュームを加味して  $V = 0.052 \times 10^{-3} \text{ m}^3$  としている．Fig. 5.7 と同様に出力結果に 5 Hz のローパスフィルタを施した後，数値微分を行い流量を求めている．容器体積

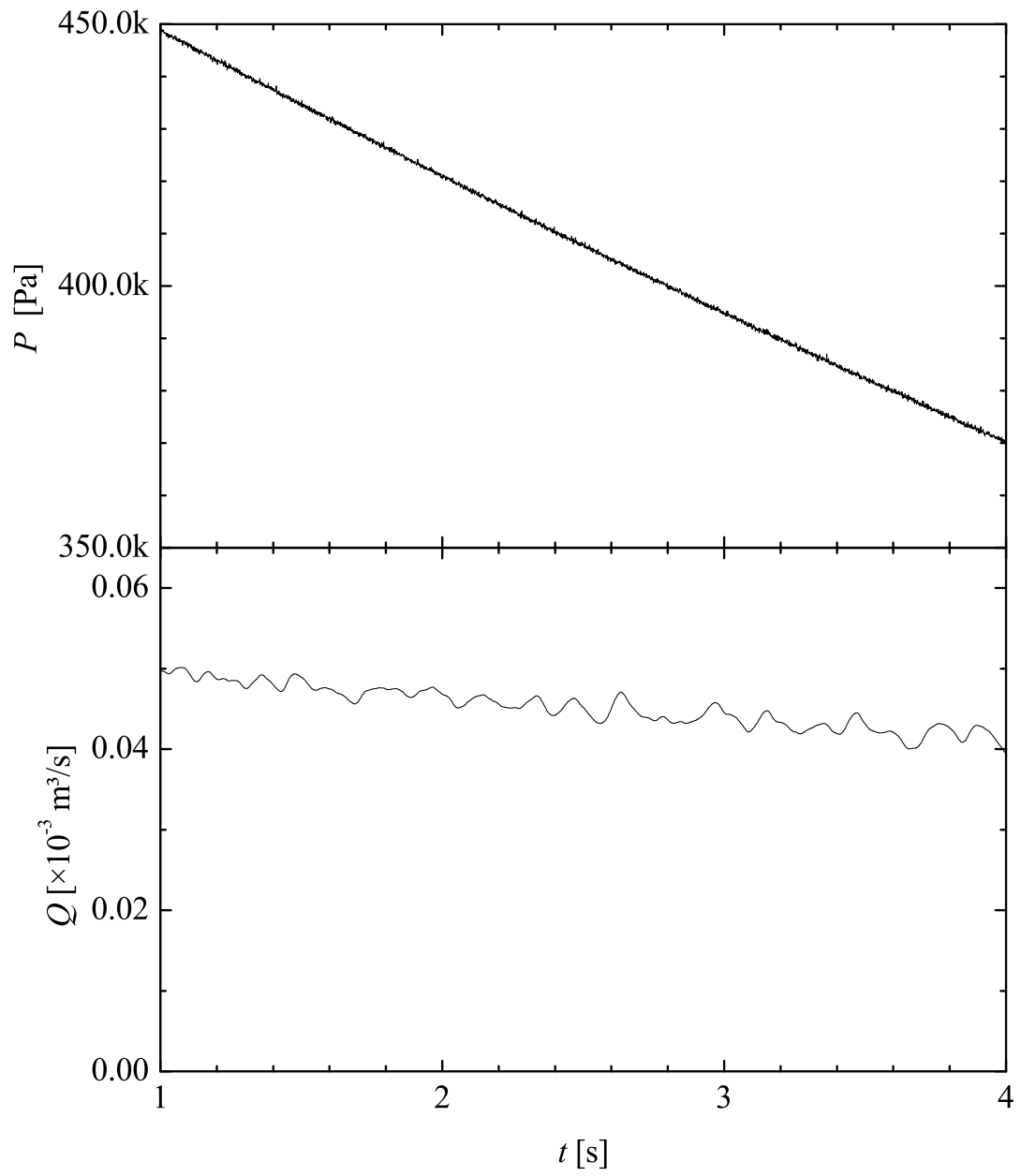


Fig 5.7: Flow rate determined by isothermal chamber ( $V=0.202 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ )

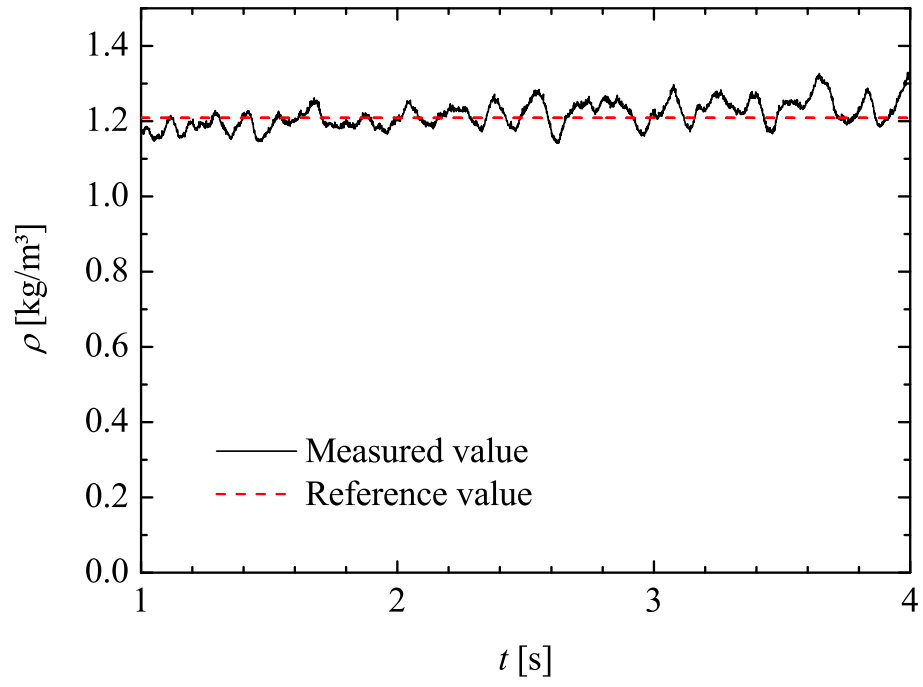


Fig 5.8: Calculated density of air by micro hot wire anemometer

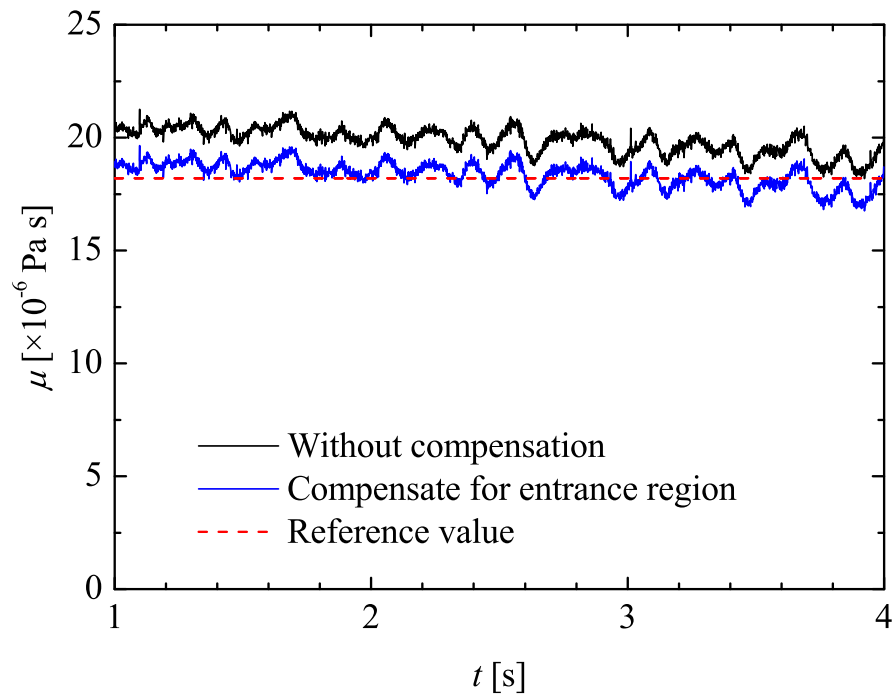


Fig 5.9: Calculated viscosity of air by laminar flow sensor

を 1/4 にしたことによって同流量における圧力変化は 4 倍に増加し，推定流量値の振動幅は大幅に減少することができた．

Fig. 5.11 には密度推定結果を，Fig. 5.12 には粘度推定結果をそれぞれ示す．粘度推定においては助走区間の補正を行った値を示している．流量推定値の振動がほぼなくなったため，非常に良い結果が得られていることが分かる．密度，粘度ともに平均値と文献値を比較すると誤差は 1 % 未満である．また，密度の瞬時推定値の最大誤差は平均値に対して  $\pm 4$  % 程度，粘度の瞬時推定値の最大誤差は平均値に対して  $\pm 10$  % 程度で変動している．粘度の推定において瞬時値の誤差が大きくなった要因としては差圧計のノイズがおもな原因だと考える．本実験において差圧計の出力信号にはフィルタ処理を行っていない生データを使用しているため，適切な信号処理を行えば問題にならないと考えられる．

最後に，実験日及び可変絞りを变えることで実験条件を変更し，何度か粘度，密度の推定を行った結果を Table 5.1 に示す．密度，粘度の値は放出開始後 1 s から 4 s の時間平均を取っている．また，誤差はその温度における密度，粘度の理論値を計算し，実験値との差をとったものである．

密度の理論式は次式で表される．

$$\rho = \rho_0 \times \frac{273.15}{273.15 + \theta} \times \frac{P - 0.378 \times H \times P_w}{P_a} \quad (5.11)$$

$H$  は相対湿度， $P_w$  は飽和水蒸気圧であるが，本研究において空気の供給源はドライヤー付きの大型コンプレッサーを用いるため無視することができる．また装置は大気開放であり，二重円管による発生する差圧は大気圧に比べて非常に小さいため，圧力に関する項も無視することができる．

また，粘度の理論式は次に示す Sutherland の式で書き表せる．

$$\mu = \mu_0 \frac{273 + C}{\theta + C} \left( \frac{\theta}{273} \right)^{3/2} \quad (5.12)$$

ここで  $C$  はサザランドの定数といわれる気体の種類による固有の定数であり，半実験的に各気体の定数が求められている．空気のサザランド定数は 117 である．

Table 5.1 の結果から，密度，粘度ともに非常に良い精度で計測できていることが分かった．この結果から流量条件をある程度変えても密度・粘度はよく計測できていると考えられる．

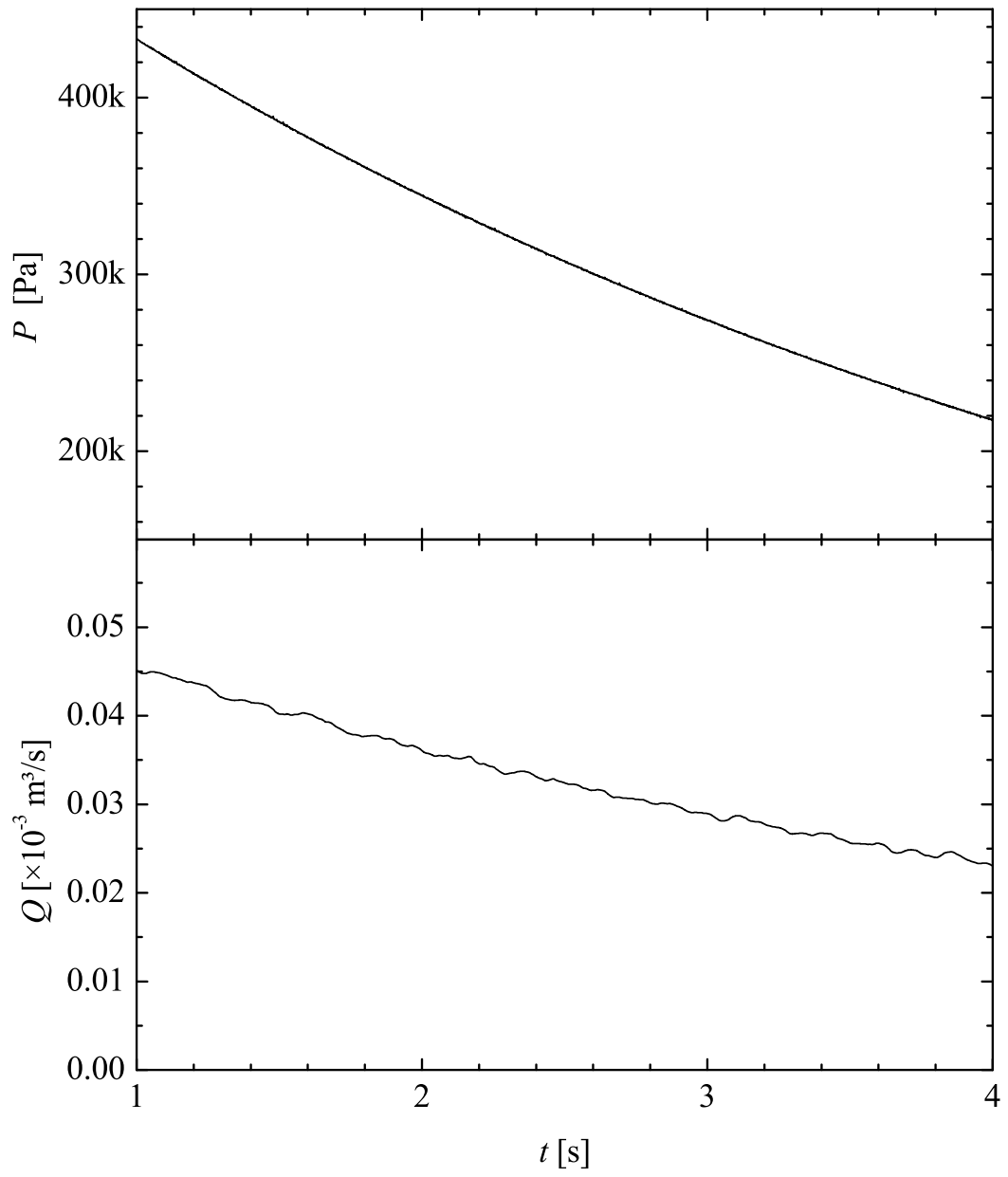


Fig 5.10: Flow rate determined by isothermal chamber ( $V=0.052 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ )

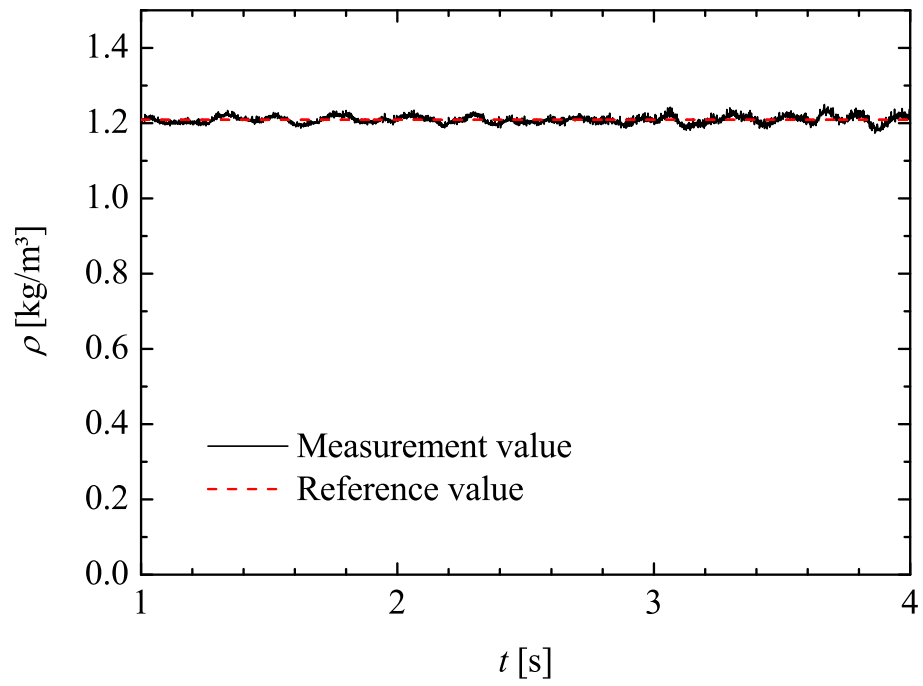


Fig 5.11: Calculated density of air by micro hot wire anemometer

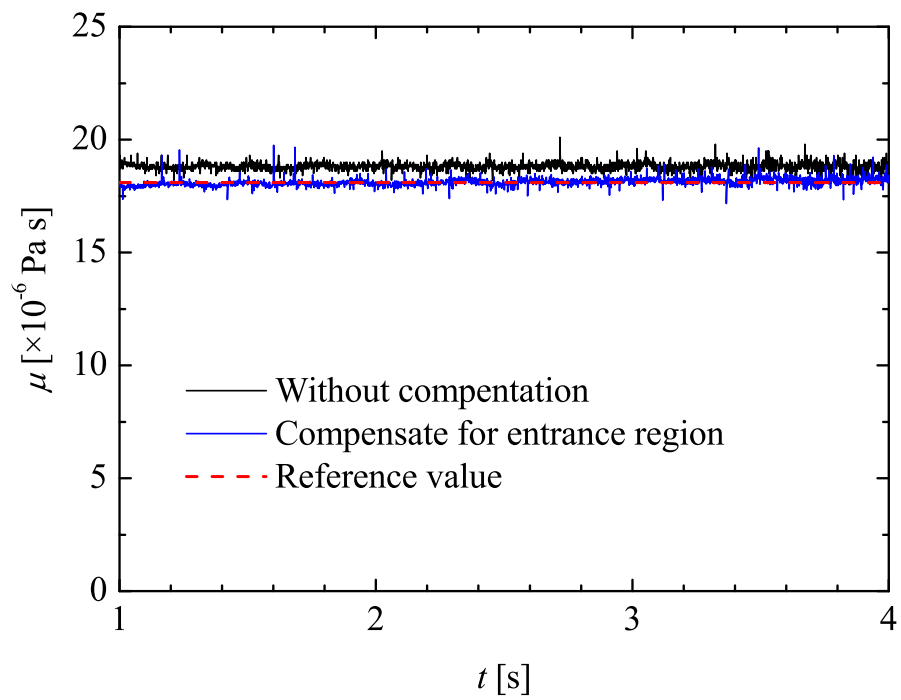


Fig 5.12: Calculated viscosity of air by laminar flow sensor

Table 5.1: Experimental results by present measurement method (gas: air)

| Q [ $\times 10^{-5}$ m <sup>3</sup> /s] |          | $\theta_a$ [K] | $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ] | error [%] | $\mu$ [ $\times 10^{-6}$ Pa·s] | error [%] |
|-----------------------------------------|----------|----------------|-----------------------------|-----------|--------------------------------|-----------|
| at 1 [s]                                | at 4 [s] |                |                             |           |                                |           |
| 4.53                                    | 2.38     | 291.2          | 1.209                       | -0.25     | 18.25                          | 0.65      |
| 4.47                                    | 2.28     | 293.4          | 1.205                       | 0.16      | 18.25                          | 0.06      |
| 9.15                                    | 1.80     | 296.4          | 1.212                       | 1.78      | 18.67                          | 1.56      |
| 5.22                                    | 2.30     | 286.2          | 1.224                       | -0.75     | 17.92                          | 0.17      |
| 4.88                                    | 2.43     | 292.7          | 1.209                       | 0.26      | 18.19                          | -0.08     |
| 6.32                                    | 2.50     | 288.2          | 1.241                       | 1.33      | 18.30                          | 1.74      |

### 5.4.3 二酸化炭素の物性値推定

次に作動流体を二酸化炭素に変更して同様の実験を行った．空気での実験結果を踏まえ，使用する压力容器は  $0.05 \times 10^{-3}$  m<sup>3</sup> のものとした．実験結果の一例を Fig. 5.13 から Fig. 5.15 に示す．

圧力変化から流量の推定結果は Fig. 5.13 に示すが，空気と同様単調減少でほぼ振動のない瞬時体積流量が求められている事が分かる．密度計算結果は Fig. 5.14 に示すが，これも文献値に非常に近い値が求められており，平均値と文献値との誤差は 0.5 % 程度，瞬時値の誤差は最大  $\pm 4$  % 以内となった．

また，密度計算結果は Fig. 5.15 に示す．圧力損失補正をするものと，しないものの両方を載せている．圧力損失補正をしない場合には文献値からおよそ  $0.18 \times 10^{-5}$  Pa·s ほどずれた値が求まった．これは真値の 10 % 以上であり無視できない．一方，圧力損失補正には式 (5.10) を用い，圧力損失係数  $\zeta$  は空気の実験から求めた 1.2 を用いている．圧力損失補正をすることで非常に真値に近い値が計算されていることが分かる．このことから，本実験装置における圧力損失係数は形状によって決まっている部分が大きいといえる．この補正を行った値で求めた粘度は文献値と比べて平均値でおよそ 0.5 % のずれ，瞬時値の誤差は最大  $\pm 10$  % 程度である．

複数回実験を行った結果を Table 5.2 にまとめた．二酸化炭素のサザランド定数は 240 である．また，二酸化炭素の供給源は高圧ガスボンベであるため，式 (5.11) における湿度，圧力に関する項は無視する．二酸化炭素は空気に比べて密度が大きいため，微細熱式流速計の出力電圧が飽和しないように，空気よりも流す流量が少ない条件で実験している．このように少ない体積流量でも十分良い結果が得られていることが分かる．

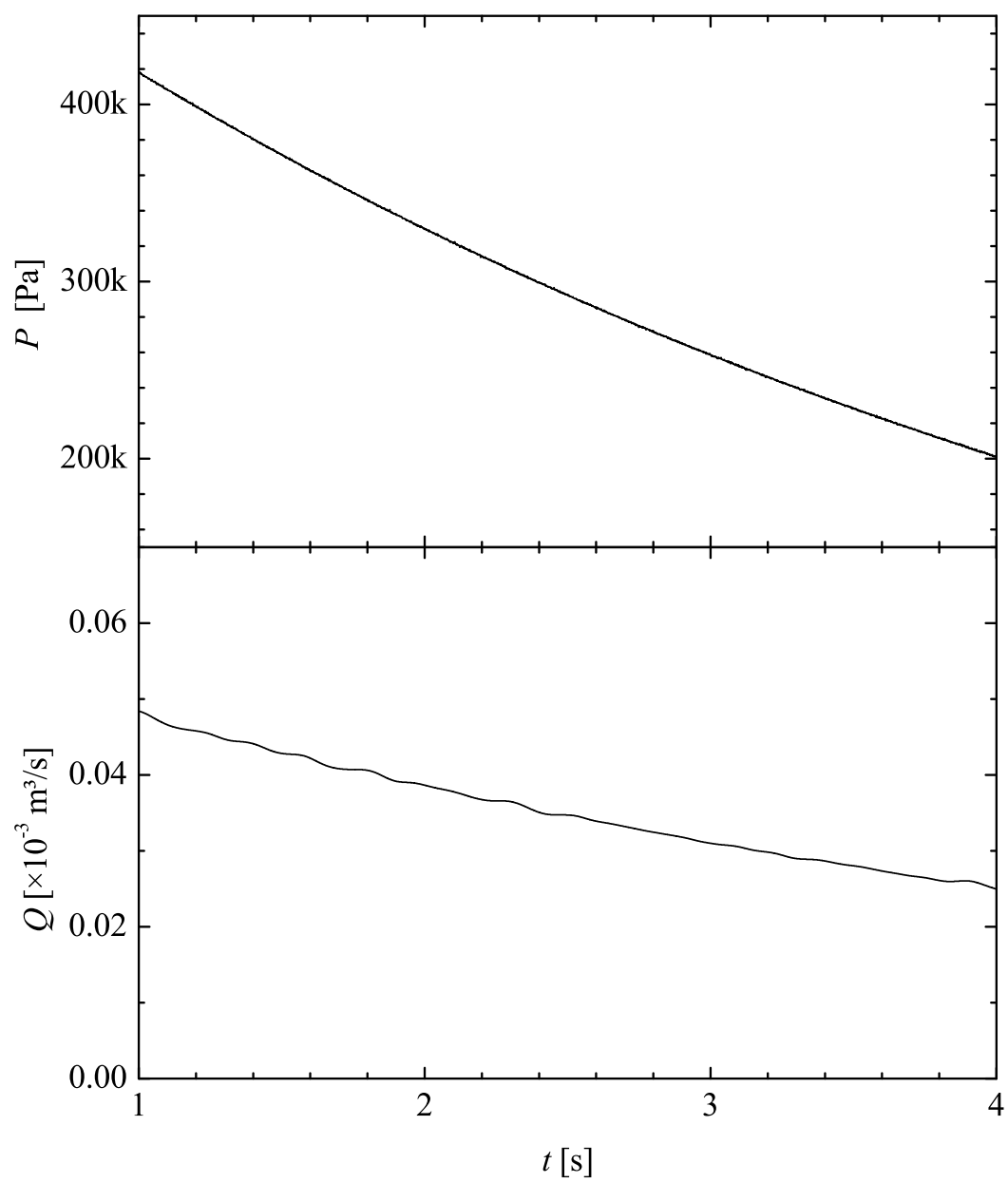


Fig 5.13: Flow rate detamined by isothermal chamber

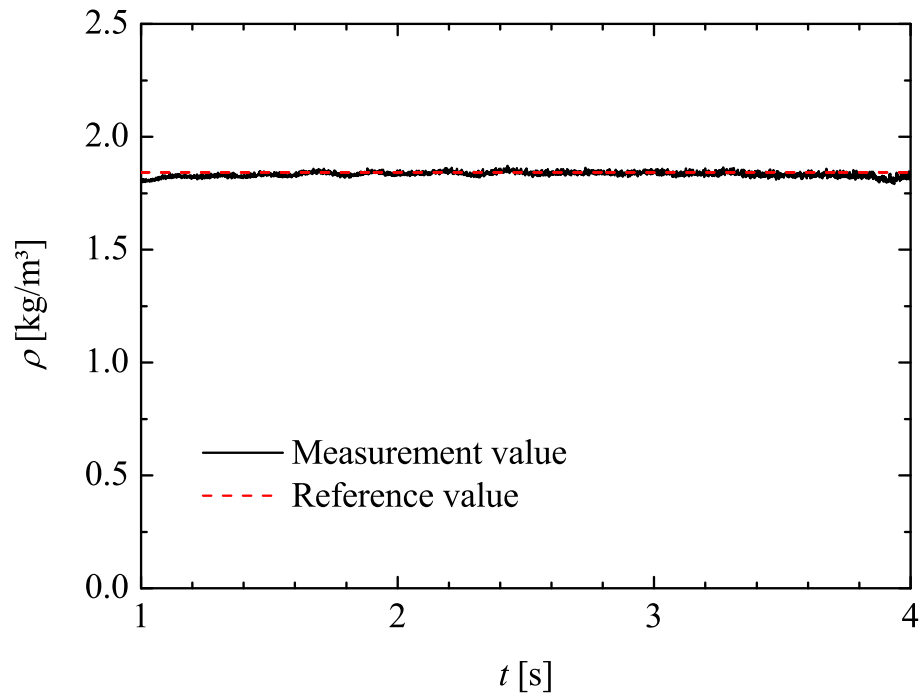


Fig 5.14: Calculated density of carbon dioxide by micro hot wire anemometer

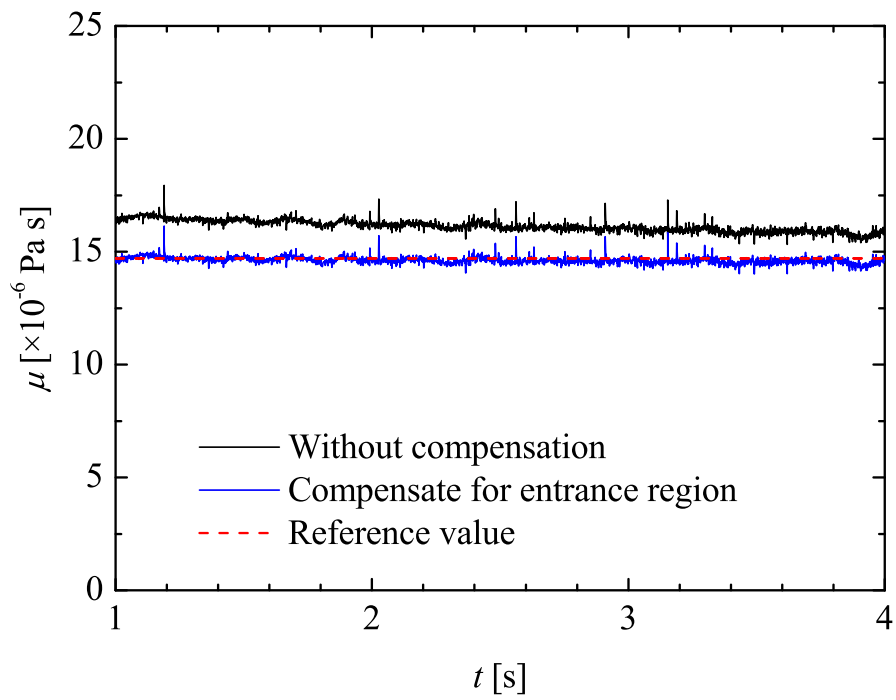


Fig 5.15: Calculated viscosity of carbon by laminar flow sensor

Table 5.2: Experimental results by present measurement method (gas: CO<sub>2</sub>)

| Q [ $\times 10^{-5}$ m <sup>3</sup> /s] |          | $\theta_a$ [K] | $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ] | error [%] | $\mu$ [ $\times 10^{-6}$ Pa·s] | error [%] |
|-----------------------------------------|----------|----------------|-----------------------------|-----------|--------------------------------|-----------|
| at 1 [s]                                | at 4 [s] |                |                             |           |                                |           |
| 4.83                                    | 2.50     | 293.3          | 1.834                       | -0.34     | 14.62                          | -0.52     |
| 4.27                                    | 2.22     | 291.4          | 1.842                       | -0.54     | 14.56                          | -0.31     |
| 4.85                                    | 2.52     | 287.4          | 1.867                       | 1.05      | 14.76                          | 2.46      |
| 2.93                                    | 1.97     | 294.2          | 1.812                       | -1.22     | 14.45                          | -1.97     |
| 3.18                                    | 2.12     | 292.7          | 1.826                       | -0.97     | 14.43                          | -1.62     |
| 3.58                                    | 2.18     | 288.6          | 1.853                       | 0.84      | 14.71                          | 1.64      |

## 5.5 計測不確かさの検討

本研究で提案した計測方法の誤差要因について検討する．誤差要因として考えられるものには次のものが考えられる [109]．

1. 長さ，体積など固定量の測定誤差
2. 圧力計の信号処理による誤差
3. 室温測定誤差
4. 理想気体と実在気体の差による誤差

以下ではそれぞれの要因が各測定値の不確かさに及ぼす影響について詳しく考える．

### 5.5.1 等温化圧力容器を用いた体積流量計測の不確かさ

まず，容積の誤差について考える．本容器で用いた容器の形状は円筒である．円筒容器の直径及び長さを測定し容器の容積を求め，圧力計および他の実験器具との接続によるデッドボリュームは，配管系及び長さを測定して加算する．また封入金属綿の体積は密度が既知であることから，その質量を電子天びんによって測定し，密度で割ることによって求めることができる．容器容積からスチールウールの体積を差し引いたものを等温化圧力容器の容積  $V$  とする．この容積の誤差を 0.5 % 以下と見積もる．

室温の計測にはアルコール式温度計を用いて 1/10 まで目測によって計測した．誤差は 0.1 % 以下と考える．

圧力計測に用いた半導体式の圧力計は分解能が 0.05 kPa であり，精度が 0.1 % の精密圧力計で校正して使用した．また，圧力の微分値の導出には離散系のローパスフィ

ルタと数値微分を行っており，これらの誤差 [110] を考慮すると圧力微分値としての誤差は 0.3 %以下と考える．

等温化圧力容器を用いた流量推定の予想誤差は，式 (5.7) から誤差伝播則を考慮して次式で与えられる [111] ．

$$\frac{\delta Q}{Q} = \sqrt{\left(\frac{\delta V}{V}\right)^2 + \left(\frac{\delta \theta_a}{\theta_a}\right)^2 + \left(\frac{\delta(dP/dt)}{dP/dt}\right)^2} \quad (5.13)$$

以上により，流量における不確かさはおよそ 0.55 %と見積もることができる．

### 5.5.2 密度計測の不確かさ

微細熱式流速計の出力不確かさは 5.3 節の実験結果から最大 3%とする．密度の導出式は

$$\rho = \frac{k_{\text{MEMS}} \Delta E}{Q} \quad (5.14)$$

であるので，誤差伝播則から

$$\frac{\delta \rho}{\rho} = \sqrt{\left(\frac{\delta Q}{Q}\right)^2 + \left(\frac{\delta \Delta E}{\Delta E}\right)^2} \quad (5.15)$$

となり，本研究で提案する密度測方法の不確かさは 3.05 %程度となる．すなわち，微細熱式流速計の不確かさが大きく影響している．Table 5.1 および 5.2 にまとめた結果もおおむねこの範囲で測定されている．

### 5.5.3 粘度計測の不確かさ

本研究の助走区間における圧力損失を考慮した粘度計算式は次のように書き表せる．

$$\begin{aligned} \mu &= \frac{\pi r_2 dr^3}{12lQ} \left( \Delta P - \zeta \frac{\rho u^2}{2} \right) \\ &= \frac{\pi r_2 dr^3}{12lQ} \Delta P - \zeta \frac{\rho Q dr}{96\pi r_2 l} \end{aligned} \quad (5.16)$$

このままでは，誤差伝播則の式は複雑になってしまうので，差圧計出力の項と，圧力損失分の項を分けて考える．

差圧計出力項の誤差伝播則の式は

$$\left( \frac{\delta \mu}{\mu} \right)_1 = \sqrt{\left( \frac{\delta r_2}{r_2} \right)^2 + 9 \left( \frac{\delta dr}{dr} \right)^2 + \left( \frac{\delta l}{l} \right)^2 + \left( \frac{\delta Q}{Q} \right)^2 + \left( \frac{\delta \Delta P}{\Delta P} \right)^2} \quad (5.17)$$

となる．差圧計の精度は F.S.2 %であることから不確かさを 4 %と見積もる．また， $r_2$ ， $l$  の不確かさは加工精度によると考え，加工精度を 10  $\mu\text{m}$  と見積もると，それぞれ，

0.10 % , 0.04 %以下と考えられる．また， $dr$  の不確かさも加工精度によるが，実際には  $dr = r_1 - r_2$  であり， $r_1$  の加工精度による不確かさは 0.10 %となるから， $dr$  の不確かさは 0.2 % 以下とする．これに先ほど計算した流量誤差を加味すると，全体としての誤差はおよそ 4.08 % となる．

また，圧力損失分の項は

$$\left(\frac{\delta\mu}{\mu}\right)_2 = \sqrt{\left(\frac{\delta\rho}{\rho}\right)^2 + \left(\frac{\delta Q}{Q}\right)^2 + \left(\frac{\delta dr}{dr}\right)^2 + \left(\frac{\delta r_2}{r_2}\right)^2 + \left(\frac{\delta l}{l}\right)^2} \quad (5.18)$$

で計算される．これを計算すると不確かさはおよそ 3.11 %となる．

以上から，粘度計測全体の不確かさ  $\frac{\delta\mu}{\mu}$  は次の式であらわされる [112] ．

$$\frac{\delta\mu}{\mu} = x \left(\frac{\delta\mu}{\mu}\right)_1 + (1 - x) \left(\frac{\delta\mu}{\mu}\right)_2 \quad (5.19)$$

すなわち，全測定量に占める差圧計出力と圧力損失の割合から全体の不確かさが求められる．これにより，粘度測定における最大誤差は 4.08 %以下となる．

実際の測定結果と比較すると予測不確かさと，実験結果の誤差は同程度とみなすことができ，計測不確かさの予測が正しいといえる．

#### 5.5.4 理想気体と現実気体の差による不確かさ

本研究においては理想気体の状態方程式 (5.4) をもとに体積流量を計算しているが，実在気体の状態方程式（ファンデルワールスの状態方程式）は気体分子の体積と分子による引力の補正を加えたもので，以下のように示される．

$$\left(P + \frac{an^2}{V^2}\right)(V - nb) = nR_{\text{mol}}\theta \quad (5.20)$$

このとき，定数  $a$  ,  $b$  は主に分子構造から定まる，気体の種類によって固有の定数である．空気の場合  $a = 0.135 \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{mol}^2$  ,  $b = 3.66 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{mol}$  , 二酸化炭素の場合  $a = 0.365 \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{mol}^2$  ,  $b = 4.28 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{mol}$  となる．これらの影響を考慮すると，実在気体では 1 mol あたりの体積，つまり式 (5.7) における係数  $k_N$  が変化する．

今回実験はしなかった他の気体も含めた  $k_N$  を Table 5.3 にまとめた．これによると，空気では 0.05 % ，二酸化炭素でも 0.7 % 程度の差しかなく，流量計測に大きな影響を及ぼしていないことが分かる．また Table 5.3 中の気体では最大でも 2 % 程度のずれしかないために密度，粘度の計測手法としては十分有効であると考えられる．

Table 5.3: volume of 1 mol real gas (standard condition)

| gas   | ideal gas | Air    | He     | H <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> | CO <sub>2</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> |
|-------|-----------|--------|--------|----------------|----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|
| $k_N$ | 22.414    | 22.404 | 22.424 | 22.449         | 22.404         | 22.262          | 22.259                        | 21.976                        |
| ratio | 1         | 0.9995 | 1.0004 | 1.0016         | 0.9995         | 0.9932          | 0.9931                        | 0.9805                        |

## 5.6 他の先行研究との比較

従来までに研究されてきた気体の密度計測，粘度計測手法と本研究で提案した手法を比較し，Table 5.4 および Table 5.5 にまとめた．

Table 5.4 において本研究の不確かさは先ほどおこなった誤差伝播則より計算された値であるが，比較したものの不確かさは文献中に不確かさの同定方法などが詳しく書かれていないため，一概に比較することはできないが，本研究の不確かさは他の研究に比べて大きくなってしまっている．この主要因は 5.5 節で検討したとおり，微細熱式流速計が持っている計測不確かさであるが，これは駆動回路や製作プロセスを精緻にすることで向上できると考える．計測時間を見ると，本研究で提案した手法は圧倒

Table 5.4: Comparision of densimeter for gases

| Principle         | Fluid                                    | Time          | Uncertainty | Reference     |
|-------------------|------------------------------------------|---------------|-------------|---------------|
| thermal mass flow | air,CO <sub>2</sub>                      | instantaneous | ≤ 3.05 %    | this research |
| buoyancy          | N <sub>2</sub> ,He,Ar,Kr,CH <sub>3</sub> | 10–15 min     | ≤ 0.05 %    | [113], [114]  |
| vibrating tube    | air,water                                | –             | –           | [115], [116]  |
| tuning fork       | SF <sub>6</sub>                          | –             | ≤ 1 %       | [117]         |
| Ramman spectra    | CO <sub>2</sub>                          | 2 min         | ≤ 2 %       | [118]         |

Table 5.5: Comparision of viscometer for gases

| principle           | Time          | Density      | Uncertainty | Reference     |
|---------------------|---------------|--------------|-------------|---------------|
| laminar flow        | instantaneous | simultaneous | ≤ 4.1 %     | this research |
| rotating cylinder   | 10–15 min     | simultaneous | ≤ 0.7 %     | [113] , [114] |
| Helmholtz resonator | 10 min        | theoretical  | ≤ 0.8 %     | [119]         |
| laminar flow        | 3 min         | theoretical  | –           | [120] , [121] |
| vibratig wire       | –             | theoretical  | ≤ 3 %       | [122]         |
| vibratig wire       | 15 min        | theoretical  | ≤ 0.2 %     | [123]         |
| capillary-flow      | 5 min         | not needed   | ≤ 3.1 %     | [124]         |

的に短時間で計測できている．明確に計測時間に関する記述がなかった [115–117] に関しても，計測手法から推定される計測時間は数分単位と考えることができ，本研究の優位性が示せたと言える．

また，Table 5.5 によるとやはり不確かさの点でほかの研究に比べて劣るものの，計測時間で優位性が確認できる．また，[119–123] においては粘度の導出式に密度が含まれているが，密度は文献の値を用いたり，圧力と温度から理論式によって計算していたりと，同時に計測していない．この点で，本研究および [113, 114] は二つの値を同時計測することができるので，未知の気体や混合比が不明な気体の物性値計測に応用できるといえる．

## 5.7 まとめ

本章では等温化压力容器，微細熱式流速計，二重円管型層流流量計を組み合わせた新しい流量，密度，粘度同時計測システムを提案した．等温化压力容器を用いることで瞬時流量を推定可能な本システムにおいては，短時間で密度，粘度を計測することができる．得られた成果を以下にまとめる．

1. 定常流量を流した校正実験において，二重円管型層流流量計はポアズイユ則に加えて， $\zeta=1.2$ とした助走区間における圧力損失の補正を考慮する必要がある事を明らかにした．
2. 提案する計測システムにおいて，等温化压力容器の圧力から流量を求めるのに十分な圧力変化を得るためには等温化压力容器の容積を  $0.05 \times 100^{-3} \text{m}^3$  の物を用いれば十分であることが分かった．
3. 二酸化炭素を用いた実験においても圧力補正係数  $\zeta=1.2$  で問題なく補正できることを確認した．
4. 空気の密度推定は，時間平均値と文献値の比較で 2 % 以下，瞬時値で最大 4 % 以下，粘度推定は，時間平均値と文献値の比較で 2 % 以下，瞬時値で最大 10 % 以下を，二酸化炭素の密度推定は，時間平均値と文献値の比較で 1.5 % 以下，瞬時値で最大 4 % 以下，粘度推定は，時間平均値と文献値の比較で 2.5 % 以下，瞬時値で最大 10 % 以下を確認した．また瞬時値の大きな誤差要因は計測器のノイズであり，適切な信号処理を施すことで問題にならない．
5. 本計測システムにおける誤差要因をあげ，それぞれの値の計測における不確かさがどの程度になるか検討した．
6. 本計測システムと，従来までの他者の研究との比較を行い，計測精度は改善の必要性があるものの，計測時間を大幅に短縮できる点で本研究の有効性を確認した．

## 第6章 結論

### 6.1 本研究の成果

本論文では，微細加工技術を応用して微細熱式流速計を製作し，センサ構造や，配置方法などが特性に与える影響を実験的に検討し，非定常流量計測に応用可能であることを明らかにした．また，製作した微細熱式流速計が，流量，流速計測以外に，圧力微分計や，密度，粘度計測に応用可能であることを明らかにした．

以下に本論文で得られた知見をまとめる．

第2章「微細熱式流速計の製作」では，一般的な熱式流速センサの計測原理を示すとともに，微細加工技術を用いて非常に簡易な構造の微細熱式流速計を製作するプロセスを示した．また，各プロセスにおける加工条件を実験的に選定した．さらに，微細熱式流速計における最も重要な素子である白金抵抗線を形状，装置での配置などを変えてスパッタリングを行い，その抵抗特性を実験的に明らかにした．最後形状，大きさを変えた微細熱式流速計を製作し，第3章以降で用いる微細熱式流速計を3 mm 四方サイズのものとすることを示した．

第3章「微細熱式流速計を用いた振動流量計測」では，微細熱式流速計を任意の流路に挿入して流量計測を行うための駆動回路を示し，その設計方法について述べた後，実際に回路を製作した．その駆動回路を用いて定常流量計測を行い，理論と一致することを確認した．また，微細熱式流速計の動特性を明らかにするため，非定常流量発生装置を用いて振動流計測を行った．円管内流速分布の数値解析をから，上流側整流格子からセンサまでの距離及び，センサの壁面からの距離が動特性に影響を与えることを明らかにし，実験によって数値解析の妥当性を確認した．また，微細熱式流速計内部エネルギーの変化速度も動特性を支配する大きな要因であることを解析により明らかにし，実際の微細熱式流速計を用いた振動流量計測結果より，解析の妥当性を示した．

第4章「微細加工技術を応用した圧力微分計」では，圧力微分計の小型化，高速応答

化を実現するためにカットオフ周波数，助走区間比率を考慮した MEMS 流路チップを微細加工技術によって製作し，圧力微分計の層流抵抗管として使用した．MEMS 流路チップを組み込んだ圧力微分計は全体が小型化でき，また空容器を用いた圧力微分計との比較から体積が小さくとも，等温化することが重要であることを確認した．さらに第 3 章までに製作，検討を行った微細熱式流速計を計測素子とし，二重円筒すきま流路を層流抵抗管とした圧力微分計を設計，製作した．圧力充填実験において微細熱式流速計を用いる計測手法の妥当性を示すとともに，加圧下における計測での優位性を示した．

第 5 章「密度・粘度同時計測センサ」では，二重円筒型すきま流路に微細熱式流速計を配置した複合型センサを提案した．二重円筒型層流流量計ではハーゲンポアズイユの法則に加え，助走区間における圧力損失を考慮する必要があることを明らかにした．また，この圧力損失係数は作動流体を二酸化炭素に変更しても，同じ値でよいことを実験により確かめた．

複合型センサと小型の等温化圧力容器を組み合わせることにより，小流量の気体の瞬時体積流量，密度，粘度の同時計測が可能できるシステムを提案した．提案したシステムは，測定時間内の値を平均して求めた密度，粘度が文献値に対して 3 % 以内に収まることを実験で確認した．さらに，本システムの誤差要因について検討し，他の研究との比較を行うことで，本研究の有効性を確認した．

## 6.2 今後の課題

今後の課題としては以下のことがあげられる．

1. 微細熱式流速計の組み立て技術の向上及び，それに伴う小型化．
2. 駆動回路設計方法の確立，及びノイズ対策などの導入による回路特性の改善による測定精度の向上
3. 圧力微分計に用いるための微細熱式流速計として，流れの方向判別機能の付加，さらには，3 次元ベクトルとして流速計則可能なセンサへの応用．

# 付 録 A 本論文中で用いた離散系の式

## A.1 標準 $z$ 変換を用いた離散系における擬似微分の導出

数値微分は微分要素  $s$  に時定数  $T_d$  の一次遅れを加えたものとして扱う．このときの擬似微分の伝達関数は

$$\frac{dU}{dX} = \frac{s}{1 + T_d s} X \quad (\text{A.1})$$

となる．ここで， $U$ ， $X$  はそれぞれ  $U(s) = \mathcal{L}[u(t)]$ ， $X(s) = \mathcal{L}[x(t)]$  を表すとする．

PC を用いた計測・制御に擬似微分を適用するには，式 (A.1) を離散化する必要がある．まず，標準  $z$  変換を用いた離散化について説明する．

標準  $z$  変換を用いる場合，ホールド回路の影響を考慮しなければならない．ホールド回路を式 (A.2) の 0 次ホールドとする．

$$G_h(s) = \frac{1 - \exp(-sT_s)}{s} \quad (\text{A.2})$$

したがって，離散化された擬似微分の伝達関数表現は

$$\begin{aligned} G_d(z) &= \left( \frac{1 - \exp(-sT_s)}{s} \frac{dU}{dX} \right) \Big|_{s \rightarrow z} \\ &= \frac{1 - \exp(-sT_s)}{1 + T_d s} \Big|_{s \rightarrow z} \\ &= \frac{1 - z^{-1}}{T_d (1 - \exp(-T_s/T_d)z^{-1})} \end{aligned} \quad (\text{A.3})$$

となる．

式 (A.3) より，漸化式表現を導出する．

$$\begin{aligned} \dot{x}(i) &= \frac{1 - z^{-1}}{T_d (1 - \exp(-T_s/T_d)z^{-1})} x(i) \\ (1 - \exp(-T_s/T_d)z^{-1}) \dot{x}(i) &= \frac{1}{T_d} (1 - z^{-1}) x(i) \\ \dot{x}(i) &= \frac{1}{T_d} x(i) - \frac{1}{T_d} x(i-1) + \exp(-T_s/T_d) \dot{x}(i-1) \end{aligned} \quad (\text{A.4})$$

式 (A.4) より，時刻  $i$  における  $\dot{x}$  は， $x$  および時刻  $i-1$  における  $x, \dot{x}$  から求められる．

## A.2 離散化したローパスフィルタの導出

本研究では断りのない限り，ローパスフィルタとして，3 次のバタワース型ローパスフィルタを使用した．導出について以下に説明する．

連続系の離散化には標準  $z$  変換の他に，双 1 次変換を用いる方法がある．

双 1 次変換は式 (A.5) で表される．

$$s = \frac{2}{T_s} \frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}} \quad (\text{A.5})$$

$N$  次のバタワース型フィルタとは  $-\pi < \Omega < \pi$  で正規化された周波数領域において，カットオフ周波数  $\Omega_c = 1$  で 3 dB の減衰特性を有するフィルタであり，最大平坦特性や無リプル，位相が線形に近いといった特性を有する．

$N$  次のバタワース型フィルタの周波数特性は式 (A.6) である．

$$|H(\Omega)|^2 = \frac{1}{1 + \Omega^{2N}} \quad (\text{A.6})$$

式 (A.6) は  $2N$  個の極  $\omega_k$  を持ち，その値は式 (A.7) となる．

$$\begin{aligned} \omega_k &= \exp\left(j \frac{k}{N} \pi\right) & N : \text{奇数} \\ &= \exp\left(j \frac{2k+1}{2N} \pi\right) & N : \text{偶数} \\ k &= 0, 1, \dots, 2N-1 \end{aligned} \quad (\text{A.7})$$

式 (A.7) から， $N$  個の安定な極  $p_l (l = 1, 2, \dots, N)$  を選ぶことで，連続系のバタワース型フィルタ  $H(s)$  が式 (A.8) のように得られる．

$$H(s) = \prod_{l=1}^N \frac{1}{s - p_k} \quad (\text{A.8})$$

本研究では  $N = 3$  としたので，極  $\omega_k$  は

$$\begin{aligned} \omega_k &= \exp\left(j \frac{k}{3} \pi\right) & k = 0, 1, 2, 3, 4, 5 \\ &= \pm 1, \frac{1}{2} \pm j \frac{\sqrt{3}}{2}, -\frac{1}{2} \pm j \frac{\sqrt{3}}{2} \end{aligned} \quad (\text{A.9})$$

である．

式 (A.9) での安定な極は  $-1, -1/2 \pm j \sqrt{3}/2$  である．したがって，式 (A.8) より，フィルタの伝達関数は式 (A.10) となる．

$$\begin{aligned} H(s) &= \frac{1}{s+1} \cdot \frac{1}{s + \frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2}} \cdot \frac{1}{s + \frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2}} \\ &= \frac{1}{s^3 + 2s^2 + 2s + 1} \end{aligned} \quad (\text{A.10})$$

次に式 (A.10) を式 (A.5) を用いて双 1 次変換を行う．しかし，双一時変換は近似変換であるため離散化の際に歪みを生じる．この影響を補償するために，式 (A.11) のようにプリワーピングを行う．

$$\omega_a = \tan(\omega_d T_s / 2) \quad (\text{A.11})$$

ここで， $\omega_d$  は一般周波数系におけるカットオフ周波数を示す．

式 (A.10) は正規化角周波数におけるフィルタであるため， $s \rightarrow s/\omega_a$  により，一般周波数系への写像とプリワーピングを行う．これより，フィルタは式 (A.12) となる．

$$H(s) = \frac{\omega_a^3}{s^3 + 2\omega_a s^2 + 2\omega_a^2 s + \omega_a^3} \quad (\text{A.12})$$

式 (A.12) と式 (A.5) から離散空間でのフィルタ  $H_d(z)$  を得ることができる．しかし，式 (A.5) の係数  $2/T_s$  は一般的な周波数領域での簡易プリワーピングなのでここでは用いない．

$$\begin{aligned} H_d(z) &= H(s) \Big|_{s \rightarrow \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}} \\ &= \frac{\omega_a^3 (1 + 3z^{-1} + 3z^{-2} + z^{-3})}{\alpha + \beta z^{-1} + \gamma z^{-2} + \delta z^{-3}} \\ \alpha &= 1 + 2\omega_a + 2\omega_a^2 + \omega_a^3 \\ \beta &= -3 - 2\omega_a + 2\omega_a^2 + 3\omega_a^3 \\ \gamma &= 3 - 2\omega_a - 2\omega_a^2 + 3\omega_a^3 \\ \delta &= -1 + 2\omega_a - 2\omega_a^2 + \omega_a^3 \end{aligned} \quad (\text{A.13})$$

最後に  $H(s)$  と  $H_d(z)$  では振幅特性が変化している可能性があるので，その確認を行う．ローパスフィルタであるので  $\omega = 0$  の時の振幅特性は 1 で無ければならない．式 (A.12), (A.13) より今回の場合はどちらも振幅特性は 1 となる．

式 (A.13) より，漸化式表現を導出する．

$$\begin{aligned} x_f(k) &= \frac{\omega_a^3 (1 + 3z^{-1} + 3z^{-2} + z^{-3})}{\alpha + \beta z^{-1} + \gamma z^{-2} + \delta z^{-3}} x(k) \\ (\alpha + \beta z^{-1} + \gamma z^{-2} + \delta z^{-3}) x_f(k) &= \omega_a^3 (1 + 3z^{-1} + 3z^{-2} + z^{-3}) x(k) \\ x_f(k) &= \frac{\omega_a^3}{\alpha} (x(k) + 3x(k-1) + 3x(k-2) + x(k-3)) \\ &\quad - \frac{1}{\alpha} (\beta x_f(k-1) + \gamma x_f(k-2) + \delta x_f(k-3)) \end{aligned} \quad (\text{A.14})$$

# 参考文献

- [1] 小宮勤一. 流体量の計測. 朝倉書店, (2005).
- [2] 日本油空圧学会 (編). 新版 油空圧便覧. オーム社, 新版, (1989).
- [3] D. W. Spitzer, editor. *Flow Measurement : Practical Guides for Measurement and Control*. The Instrumentation, Systems, and Automation Society, second edition, 9 2001.
- [4] 川田裕郎, 小宮勤一, 山崎弘郎. 流体計測ハンドブック. 日刊工業新聞社, (1979).
- [5] 松山裕. 実用 流量測定. 省エネルギーセンター, (1995).
- [6] 日本計量機器工業連合会 (編). 計装エンジニアのための流量計測 A to Z. 工業技術社, (1996).
- [7] 小川胖. 流れわざのシルクロード - 流量計測の歴史. 日本工業出版, (2006).
- [8] E. A. Spencer. 流量標準 過去と現在. NEL, (1985).
- [9] ISO 5167-4. *Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full - Part 4 : Venturi tubes*, (2003).
- [10] ISO 9300. *Measurement of gas flow by means of critical flow Venturi nozzles*, (2005).
- [11] JIS Z 8767. 臨界ベンチュリノズル (CFVN) による気体流量の測定方法, (2006).
- [12] ISO 5167-2. *Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full - Part 2 : Orifice plates*, (2003).
- [13] ISO 5167-3. *Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full - Part 3 : Nozzles and Venturi nozzles*, (2003).
- [14] ISO 5167-1. *Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full - Part1 : General principles and requirements*, (2003).
- [15] JIS Z 8762. 絞り機構による流量測定法, (1995).
- [16] JIS B 7551. フロート形面積流量計, (1999).
- [17] ISO 9951. *Measurement of gas flow in closed conduits - Turbine meters*, (1993).
- [18] JIS Z 8765. タービン流量計による流量測定方法, (1980).
- [19] JIS Z 8766. 渦流量計 - 流量測定方法, (2002).

- [20] ISO 10790. *Measurement of fluid flow in closed conduits - Guidance to the selection, installation and use of Coriolis meters (mass flow, density and volume flow measurements)*, (1999).
- [21] JIS B 7555. コリオリメータによる流量計測方法（質量流量，密度および体積流量計測），(2003).
- [22] ISO 6817. *Measurement of conductive liquid flow in closed conduits - Method using electromagnetic flowmeters*, (1992).
- [23] JIS B 7554. 電磁流量計, (1997).
- [24] JEMIS 032. 超音波流量計による流量測定方法, (1987).
- [25] ISO 14511. *Measurement of fluid flow in closed conduits - Thermal mass flowmeters*, (2001).
- [26] 藤田壽憲ほか. 特集「マイクロフルードパワー」. 日本フルードパワーシステム学会誌, Vol. 33, No. 3, (2002).
- [27] 鈴木勝正ほか. 特集「最新のフルードパワー計測技術」. 日本フルードパワーシステム学会誌, Vol. 36, No. 4, (2005).
- [28] 江刺正喜, 五十嵐伊勢美, 杉山進, 藤田博之. マイクロマシーニングとマイクロメカトロニクス. 培風館, (1992).
- [29] 藤田博之ほか. 特集「マイクロマシン実用化の現状と将来」. 電気学会誌, Vol. 120, No. 11, (2000).
- [30] 藤田博之ほか. 特集「マイクロマシン - 実用化とナノ領域への展開 - 」. 計測と制御, Vol. 42, No. 1, (2004).
- [31] 大坂典子ほか. メカライフ特集「すごく小さいもの」. 日本機械学会誌, Vol. 108, No. 1042, (2005).
- [32] P. F. v. Kessel, L. J. Hornbeck, R. Meier, and M. R. Douglass. A MEMS - Based Projection Display. *Proc. IEEE*, Vol. 86, pp. 1687–1704, (1998).
- [33] N. Yazdi, F. Ayazi, and K. Najafi. Micromachined inertial sensors. *Proceeding of IEEE*, Vol. 86, pp. 1640–1659, (1998).
- [34] J. Chen and K. D. Wise. A high-resolution silicon monolithic nozzle array for inkjet printing. *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. 44, No. 9, pp. 1401–1409, (1997).
- [35] 藤田博之. マイクロ・ナノマシン技術入門. 工業調査会, (2003).
- [36] 財団法人マイクロマシンセンター, (2004).
- [37]  $\mu$ M産業化研究会（編）. 進化するマイクロマシン. 日刊工業新聞社, (2004).
- [38] 高橋清, 佐々木昭夫（編）. アドバンストセンサーハンドブック. 培風館, (1994).
- [39] H. Nakajima, *et al.* Micro-optical distance sensor fabricated by the LIGA process. *Proceedings of SPIE*, Vol. 3513, pp. 106–112, (2004).

- [40] 添田将ほか. サファイアを用いた高耐食性静電容量式圧力センサ. *Savemation Review*, Vol. 19, No. 2, pp. 36–42, (2001).
- [41] S. E. Alper and T. Akin. Symmetrical and decoupled nickel microgyroscope on insulating substrate. *Sensors and Actuators A*, Vol. 115, pp. 336–350, (2004).
- [42] 番政広, 平田善明, 大谷浩, 荒木達. エアバッグ用容量式半導体化速度センサー. 三菱電機技報, Vol. 73, No. 8, pp. 64–67, (1999).
- [43] S. Holswade, *et al.* Optical readout of microaccelerometer code features. *Proceedings of SPIE*, Vol. 3878, pp. 245–252, (2003).
- [44] B. W. v. Oudheusden. Silicon flow sensors. *IEE Proceedings D*, Vol. 135, No. 5, pp. 373–380, (1988).
- [45] N. T. Nguyen. Micromachined flow sensors - a review. *Flow Meas. Instrum.*, Vol. 8, No. 1, pp. 7–16, (1997).
- [46] M. Ueno, *et al.* 640 x 480 pixel uncooled infrared fpa with soi diode detectors. *Proceedings of SPIE*, Vol. 5783, pp. 566–577, (2005).
- [47] M. Hirota. A high speed thermoelectric infrared sensor fabricated by cmos technology and micromachining. *IEEJ Transactions on Sensors and Micromachines*, Vol. 126, No. 8, pp. 393–396, (2006).
- [48] C. M. Ho and Y. C. Tai. Micro-electro-mechanical-systems (mems) and fluid flows. *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 30, pp. 579–612, (1998).
- [49] M. Koch, C. G. Schabmueller, A. G. Evans, and A. Brunnschweiler. Micromachined chemical reaction system. *Sensors and Actuators A*, Vol. 74, pp. 207–210, (1999).
- [50] H. Suzuki and R. Yoneyama. Integrated microfluidic system with electrochemically actuated on - chip pumps and valves. *Sensors and Actuators B*, Vol. 96, pp. 38–45, (2003).
- [51] N. T. Nguyen and S. T. Wereley. *Fundamentals and applications of microfluidics*, chapter 8. Artech House, Boston / London, second edition, (2006).
- [52] S. T. Cho and K. D. Wise. A high - performance microflow meter with built - in self test. *Sensors and Actuators A*, Vol. 36, pp. 47–56, (1993).
- [53] R. E. Oosterbroek, *et al.* A micromachined pressure / flow - sensor. *Sensors and Actuators A*, Vol. 77, pp. 167–177, (1999).
- [54] Y. Ozaki, T. Ohyama, T. Yasuda, and I. Shimoyama. An air flow sensor modeled on wind receptor hairs of insects. *Micro Electro Mechanical Systems, 2000. MEMS 2000. The Thirteenth Annual International Conference on*, pp. 531–536, (2000).
- [55] M. Richter, M. Wackerle, P. Woias, and B. Hillerich. A novel flow sensor with high time resolution based on differential pressure principle. In *MEMS '91*, pp. 118–123, (1999).
- [56] N. Svedin, E. Kälvesten, E. Stemme, and G. Stemme. A new silicon gas-flow sensor based on lift force. *Journal of Miroelectromechanical Systems*, Vol. 7, No. 3, pp. 303–308, (1998).

- [57] N. Svedin, E. Kälvesten, and G. Stemme. A new edge-detected lift force flow sensor. *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 12, No. 3, pp. 344–354, (2003).
- [58] P. Enoksson, G. Stemme, and E. Stemme. A silicon resonant sensor structure for coriolis mass-flow measurements. *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 6, No. 2, pp. 119–125, (1997).
- [59] D. Sparks, *et al.* A portable mems coriolis mass flow sensor. *Second International Conference on Sensors: IEEE Sensors 2003*, Vol. 1, pp. 337–339, (2003).
- [60] O. Berberig, *et al.* The prandtl micro flow sensor (pmfs) : a novel silicon diaphragm capacitive sensor for flow - velocity measurement. *Sensors and Actuators A*, Vol. 66, pp. 93–98, (1998).
- [61] N. Sabaté, *et al.* Multi - range silicon micromachined flow sensor. *Sensors and Actuators A*, Vol. 110, pp. 282–288, (2004).
- [62] P. Fürjes, *et al.* Thermal characterisation of a direction dependent flow sensor. *Sensor and Actuator A*, Vol. 115, pp. 417–423, (2004).
- [63] S. C. Roh, Y. M. Choi, and S. Y. Kim. Sensitivity enhancement of a silicon micro-machined thermal flow sensor. *Sensors and Actuators A*, Vol. 128, pp. 1–6, (2006).
- [64] 佐々木昌ほか. サーマパイルを用いた熱式 mems フローセンサの開発. 電気学会論文集 E, Vol. 126, No. 3, pp. 83–88, (2006).
- [65] 木村勝, 原和裕. マイクロブリッジ構造を用いた低消費電力ガスセンサの研究. 電気学会論文集 E, Vol. 124, No. 12, pp. 476–481, (2004).
- [66] 有吉雄二, 中村恵右, 番正広, 武田宗久. 新検出方式を適用した高性能 MEMS 流量センサ. 電気学会論文集 E, Vol. 125, pp. 387–392, (2005).
- [67] 小島多喜男ほか. マイクロヒータの信頼性評価と車載用センサへの応用. 電気学会論文集 E, Vol. 126, No. 8, pp. 397–402, (2006).
- [68] J. Wu and W. Sansen. Electrochemical time of flight flow sensor. *Sensors and Actuators A*, Vol. 97–98, pp. 68–74, (2002).
- [69] M. Shauer, *et al.* Thermal flow sensor for liquids and gases based on combinations of two principles. *Sensors and Actuators A*, Vol. 73, pp. 7–13, (1999).
- [70] T. Neda, K. Nakamura, and T. Takumi. A polysilicon flow sensor for gas flow meter. *Sensors and Actuators A*, Vol. 54, pp. 626–631, (1996).
- [71] S. T. Hung, S. C. Wong, and W. Fang. The development and application of microthermal sensors with a mesh - membrane supporting structure. *Sensors and Actuators A*, Vol. 84, pp. 70–75, (2000).
- [72] Y. Mo, Y. Okawa, K. Inoue, and K. Natukawa. Low-voltage and low-power optimization for micr-heater and its on-chip drive circuitry for gas sensor array. *Sensors and Actuators A*, Vol. 100, pp. 94–101, (2002).
- [73] 中野和夫, 横田眞一. 円筒形絞りの動特性を利用した瞬時流量. 油圧と空気圧, Vol. 17, No. 4, pp. 67–72, (1986).

- [74] 内山勝, 箱守京次郎. 円管内流速分布推定フィルタ. 計測自動制御学会論文集, Vol. 18, No. 7, pp. 653–660, (1982).
- [75] T. Zhao, A. Kitagawa, T. Kagawa, and T. Takenaka. A real time method of measuring unsteady flow rate and velocity employing differential pressure in a pipe. *JSME International Journal*, Vol. 30, No. 260, pp. 263–270, (1987).
- [76] K. KAWASHIMA and T. KAGAWA. Unsteady flow generator for gases using isothermal chamber. *Measurement*, Vol. 33, No. 4, pp. 333–340, (2003).
- [77] 内藤正 (編). 工業計測法ハンドブック. 朝倉書店, (1980).
- [78] 工業技術院計量研究所計量技術ハンドブック編集委員会 (編). 新版 計量技術ハンドブック. コロナ社, (1987).
- [79] 箕輪善蔵. 密度および濃度. 計量管理技術双書, No. 8. コロナ社, (2000).
- [80] ISO 649-1. *Laboratory glassware–Density hydrometers for general purpose - Part 1 : specification*, (1981).
- [81] JIS B 7525. 密度浮ひょう, (1997).
- [82] JIS Z 8804. 液体比重測定方法, (1994).
- [83] ISO 6976. *Natural gas–Calculation of calorific value, density and relative density*, (1983).
- [84] JIS K 2301. 燃焼ガス及び天然ガス - 分析・有効試験方法, (1992).
- [85] ISO 3666. *Viscosity of water*, (1998).
- [86] ISO 3105. *Glass capillary kinematic viscometers - Specification and operating instructions*, (1994).
- [87] JIS Z 8803. 液体の粘度 - 測定方法, (1991).
- [88] JIS Z 8809. 粘度計校正用標準液, (2000).
- [89] JIS K 2283. 原油及び石油製品 - 動粘度試験方法及び粘度指数算出方法, (2000).
- [90] 平井章, J. M. Goodwin. 振動弦法によるヘリウムの粘性率の測定. 日本物理学会誌, Vol. 39, No. 4, pp. 276–284, (1984).
- [91] K. E. Petersen. Silicon as a mechanical material. *Proceedings of the IEEE*, Vol. 70, No. 5, pp. 420–457, (1982).
- [92] 吉田善一. マイクロ加工の物理と応用. 裳華房, 第2版, (2001).
- [93] 日本真空工業会 (編). 初歩から学ぶ真空技術. 工業調査会, (2002).
- [94] 和佐清孝, 早川茂. 薄膜化技術. 共立出版, 第3版, (2002).
- [95] 岡村迪夫. 定本 OP アンプ回路の設計. CQ 出版, (1990).
- [96] 川嶋健嗣, 藤田壽憲, 香川利春. 容器内圧力変化による圧縮性流体の流量計測法. 計測自動制御学会論文集, Vol. 32, No. 11, pp. 1485–1492, (1996).

- [97] K. Kawashima, T. Kagawa, and T. Fujita. Instantaneous flow rate measurement of ideal gases. *Trans. ASME*, Vol. 122, No. 174–178, (2000).
- [98] K. Kawashima, T. Fujita, and T. Kagawa. Unsteady flow rate measurement of air using isothermal chamber. *Trans. of the Society of Instrument and Control Engineers*, Vol. 1–1, No. 32, pp. 246–251, (2001).
- [99] K. Kawashima, T. Fujita, and T. Kagawa. Flow rate measurement of compressible fluid using pressure change in the chamber. *Trans. of the Society of Instrument and Control Engineers*, Vol. 1–1, No. 32, pp. 252–258, (2001).
- [100] 横田眞一, 中野和夫. 円管内の助走区間における振動流 第2報 近似解析と非定常粘性抵抗係数. 油圧と空気圧, Vol. 11, No. 2, pp. 41–48, (1980).
- [101] 中野和夫, 横田眞一. 円管内の助走区間における振動流 第1報 数値解と実験結果. 油圧と空気圧, Vol. 10, No. 1, pp. 64–71, (1979).
- [102] S. Wakui. Incline compensation control using an air-spring type active isolated apparatus. *Precision Engineering*, Vol. 27, No. 2, pp. 170–174, (2003).
- [103] J. Wang, J. Pu, and P. Moore. A practical control strategy for servo - pneumatic actuator systems. *Control Engineering Practice*, Vol. 7, No. 12, pp. 1483–1488, (1999).
- [104] E. O. Doebelin. *Measurement systems: application and design*. McGraw-Hill, (1990).
- [105] 加藤友規, 川嶋健嗣, 香川利春. 等温化压力容器を応用した圧力微分計の提案. 計測自動制御学会論文集, Vol. 40, No. 6, pp. 642–647, (2004).
- [106] G. Willis and D. I. Pomerantz. Field assisted glass-metal sealing. *Journal of Applied Physics*, Vol. 40, pp. 3946–3949, (1969).
- [107] 川嶋健嗣. 等温化压力容器を用いた圧縮性流体の流量計測. PhD thesis, 東京工業大学, (1997).
- [108] 国立天文台. 理科年表 平成 19 年. 丸善, (2006).
- [109] 中尾晨一. 知っておきたい流量計測をより正確にするための知識. 日本工業出版社, (2004).
- [110] 南茂夫, 河田聡. 科学計測のためのデータ処理入門 - 科学技術分野における計測の基礎技術. CQ 出版, (2001).
- [111] 苅屋公明, 前田親良. 計測の科学と工学. 産業図書, (1993).
- [112] 今井秀孝. 測定の精度と不確かさ. 計測と制御, Vol. 45, No. 4, pp. 281–285, (2006).
- [113] A. Docter, H. W. Lösch, and W. Wagner. A new apparatus for combined measurements of the viscosity and density of fluids for temperatures from 233 to 523 K at pressures up to 30 MPa. *International Journal of Thermophysics*, Vol. 20, No. 2, pp. 485–505, (1999).

- [114] C. Evers, H. W. Lösch, and W. Wagner. An absolute viscometer-densimeter and measurements of the viscosity of nitrogen, methane, helium, neon, argon, and krypton over a wide range of density and temperature. *International Journal of Thermophysics*, Vol. 23, No. 6, pp. 1411–1439, (2002).
- [115] P. Enoksson, G. Stemme, and E. Stemme. Fluid density sensor based on resonance vibration. *Sensors and Actuators A*, Vol. 46–47, pp. 327–331, (1995).
- [116] P. Enoksson, G. Stemme, and E. Stemme. Vibration modes of a resonant silicon tube density sensor. *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 5, No. 1, pp. 39–44, (1996).
- [117] D. Zeisel, H. Menzi, and L. Ullrich. A precise and robust quartz sensor based on tuning fork technology for (sf<sub>6</sub>) - gas density control. *Sensors and Actuators A*, Vol. 80, pp. 233–236, (2000).
- [118] Y. Kawakami, J. Yamamoto, and H. Kagi. Micro - raman densimeter for co<sub>2</sub> inclusions in mantle - derived minerals. *Applied Spectroscopy*, Vol. 57, No. 11, pp. 1333–1339, (2003).
- [119] J. Wilhelm, K. A. Gillis, J. B. Mehl, and M. R. Moldover. An improved greenspan acoustic viscometer. *International Journal of Thermophysics*, Vol. 21, No. 5, pp. 983–997, (2000).
- [120] 小林良二. 差圧式二重管気体粘度計. 計測自動制御学会, Vol. 35, No. 8, pp. 1119–1121, (1999).
- [121] 小林良二. 定常流式二重管気体粘度計. 計測自動制御学会, Vol. 35, No. 10, pp. 1326–1328, (1999).
- [122] P. Schley, M. Jaeschke, C. Küchenmeister, and E. Vogel. Viscosity measurements and predictions for natural gas. *International Journal of Thermophysics*, Vol. 25, No. 6, pp. 1623–1652, (2004).
- [123] J. Willhelm, E. Vogel, J. K. Lehmann, and W. A. Wakeham. A vibrating-wire viscometer for dilute and dense gases. *International Journal of Thermo physics*, Vol. 19, No. 2, pp. 391–401, (1998).
- [124] G. P. Matthews, D. C. Dowdell, and I. Wells. The measurement and estimation of the low-pressure gas viscosity of the replacement ternary blend halo-alkane refrigerant mp-39. *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 30, No. 14, pp. 2012–2017, (1997).

# 論文リスト

## 公表論文

1. 川嶋健嗣, 五十嵐康一, 小玉亮太, 加藤友規, 香川利春: 微細加工技術によるスリット型流路を用いた圧力微分計の開発, 計測自動制御学会論文集, Vol. 41, No. 5, pp.405-410, (2005)
2. 五十嵐康一, 川嶋健嗣, 舩木達也, 香川利春: 微細熱式流速計を用いた圧力微分計の開発, 計測自動制御学会論文集 (2007 年 4 月掲載予定)

## 国際会議発表論文

1. Koichi IGARASHI, Tatsuya FUNAKI, Kenji KAWASHIMA, Toshiharu KAGAWA : Characteristics of Constant-Temperature Type Micro Thermal Flow Sensor, SICE 2004 Annual Conference in Sapporo Proceedings, (2004) p.1251-1256 (Sapporo, Japan)
2. Koichi Igarashi, Tatsuya Funaki, Kenji Kawashima, Toshiharu Kagawa : Instantaneous Flow Measurement Using Thermal Type Micro Machined Flow Sensor, IFPE 2005 Technical Conference, (2005) pp.755-764 (Las Vegas, America)
3. Koichi IGARASHI, Kenji KAWASHIMA, Toshiharu KAGAWA : Driving Circuit Design of Constant-Temperature Type Micro Thermal Flow Sensor, The 8th International Symposium on Fluid Control, Measurement and Visualization, (2005) CD-ROM (Chengdu, China)

## 国内口頭発表論文

1. 五十嵐康一, 舩木達也, 川嶋健嗣, 香川利春: 定温度型微細熱式流量計の開発: 計測自動制御学会 2003 年度産業応用部門大会 講演論文集, p.24-27 (2003)
2. 五十嵐康一, 舩木達也, 川嶋健嗣, 香川利春: 定温度型微細熱式流量計のセンサ構造の特性への影響: 第 21 回センシングフォーラム p11-16 (2004)
3. 小玉亮太, 五十嵐康一, 加藤友規, 川嶋健嗣, 香川利春: スリット型微細流路を用いた圧力微分計の開発: 計測自動制御学会 2004 年度産業応用部門大会 講演論文集, p.34-39, (2004)
4. 五十嵐康一, 川嶋健嗣, 香川利春: MEMS 流速センサを用いた圧力微分計の開発: 計測自動制御学会 2006 年度産業応用部門大会 講演論文集, p.27-32, (2006)

# 謝辞

本研究を遂行するにあたり、熱心な御指導、御鞭撻を賜りました東京工業大学精密工学研究所 川嶋 健嗣 助教授に心より深く感謝申し上げます。川嶋助教授には修士の頃より5年間御指導を頂き、日頃の研究方針のほか、学会発表や論文執筆において多大なる支援をいただきました。謹んでお礼申し上げます。

本研究をおこなうにあたり、貴重な御助言、御指導を賜りました東京工業大学精密工学研究所 香川 利春 教授に感謝いたします。研究に必要な資金確保や、国際会議での発表の場、企業との意見交換の場を御提供頂き、誠にありがとうございます。

本論文をまとめるにあたり、有益な御意見、御助言を賜りました東京工業大学精密工学研究所 横田 眞一 教授、初澤 毅 教授、吉田 和弘 助教授に感謝いたします。横田教授、吉田助教授には学部時代の研究の指導も頂き、研究生活における基礎的な技術、姿勢なども御指導いただきました。また、初澤教授には微細加工技術の御指導もいただきました。心より御礼申し上げます。

日頃から様々な御助言と御指導を頂き、また実験器具や資材の調達などもお世話になりました東京工業大学精密工学研究所 船木 達也 助手、王 涛 助手、北京航空航天大学 蔡 茂林 教授（旧東京工業大学精密工学研究所 助手）に感謝いたします。

本研究で数々の実験試作を行う際に使用した東京工業大学精密工学研究所メカノマイクロプロセス室における実験装置の取り扱い方や、微細加工の技術をご指導いただきました東京工業大学精密工学研究所 神谷 大輝 助手をはじめ、多くの職員の方々に感謝いたします。

さらに、本研究をおこなうにあたり、御助言および実験器具のご協力を賜りました東京メータ株式会社 山本 円朗 氏、小林 敏也 氏ほか社員の皆様に深く感謝いたします。

大学院修士時代からの同期の加藤 友規 氏（現東京都立産業技術高等専門学校）、佐々木 高宙 氏、宮島 隆至 氏に感謝いたします。同じ時間を共有する中でお互いに切磋琢磨しあい、ともに無事に博士修了を迎えることができました。また、他の同期の皆様とも修士卒業後も遊んだり、情報交換をしたりと良い関係を続けることができ、良い刺激をもち続けられました。今後もよろしくお願いします。

研究室後輩の小玉 亮太 氏（現スズキ株式会社）に感謝いたします。彼とともに過ごした研究内容は公表論文になり、計測自動制御学会の蓮沼賞を受賞することができました。これにより自分の研究に対する自信を深められました。

研究室生活を多方面から支えてくださいました東京工業大学精密研究所香川・川嶋研究室秘書の阿部 直子 様、美多 広子 様に感謝いたします。また、研究生活においてかかわった多くの先輩方、同期の方、後輩達にも様々な面でお世話になりました。ここに深く感謝申し上げます。

最後に長い学生生活を経済的、精神的に支えてくださった私の家族に深く感謝いたします。

平成 19 年 3 月