

## 低レイノルズ数における翼面上の圧力測定用センサーの開発

Development of Sensor for Pressure Measurement of Wing at Low Reynolds Number

○殿塚 勇太<sup>1</sup> 岡村 陽平<sup>1</sup> 服部 宏史<sup>2</sup> 関谷 直樹<sup>3</sup> 松本 彰<sup>3</sup>Yuta Tonotsuka<sup>1</sup> Yohei Okamura<sup>1</sup> Hirochika Hattori<sup>2</sup> Naoki Sekiya<sup>3</sup> Akira Matsumoto<sup>3</sup>

Recently, the study on the flow around a wing at low Reynolds number has been carried out actively. It was also desired to measure the minute pressure on the wing surface with good accuracy. However, the commercial sensors were not suitable for the small pressure and their sizes were too large to put them on the wing surface. Thus, we devised the manufacturing process of a semiconductor-type sensor for the pressure measurement within the range of several Pa using MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) technology. We evaluated static and dynamic characteristics of the sensor for mounting on the wing

## 1. はじめに

近年、低レイノルズ数領域における翼周りの流れの研究が盛んに行われている。低レイノルズ数域での研究方法としては、主として可視化実験、熱線風速計を用いた伴流を含む翼周りの速度場の計測および数値計算などがある。しかし、これらの多くは翼周りの速度分布を調べたものであり、そのほとんどが間接的な計測であるため直接的に翼に働く圧力に関する報告は少ない。そこで低レイノルズ数域における微小な圧力の変化を計測することを目的としているが、今現在この領域での研究では圧力センサーを使って表面の圧力変化を測定したという事例はない。この理由は、物体表面の圧力を精度よく測定することが重要ではあるが、市販の圧力センサーではフルスケールや形状の問題から翼模型への表面実装が困難であることなど問題が多いためである。そこで我々は、近年注目されている MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術を利用し、圧力の測定範囲が数[Pa]でかつ、平板翼の表面に実装可能な半導体式微差圧センサーを試作し、これを用いて平板翼の圧力分布測定を考えている。

今回の報告は、Fig1 に示す厚さ 0.5[mm]、長さ 13[mm]、幅 5[mm]そしてダイアフラム直径 3.5[mm]の翼実装に向けて試作した最終段階のセンサーの静的および動的出力特性の実験結果である。

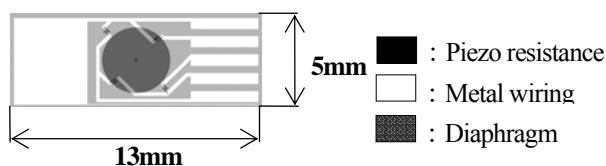


Fig.1 Pressure sensor for mounting on the wing

## 2. 半導体式微小圧力センサーの原理

半導体式微小圧力センサーはピエゾ抵抗効果を利用

したものである。MEMS 技術を用いてシリコン上に製作する。センサー部を拡散型半導体歪ゲージとし、抵抗体の形状に高温下で不純物を選択拡散させることで形成する。ダイアフラム上の応力が生じる位置にピエゾ抵抗を配置し、検出回路は温度保障も兼ねた 4 ゲージ法のホイートストンブリッジ回路を用いる。

## 3. 実験方法

## 3.1 静特性実験方法

静特性実験では圧力を一定に保ち、センサーの DC 出力を測定して、直線性とヒステリシスの有無を調べた。センサーに一定の差圧をあたえるために圧力較正器を用意し、アクリル製カップを用いてセンサーの上下面を密封する。そして、センサーと圧力較正器 (Halstrup 製) をシリコンチューブでつなぎ加圧する。センサーのブリッジに 10[mA] の定電流を流し、その出力を測定した。

今回は Fig2 に示す抵抗配置が異なる 2 種類のセンサー M-90, I-90 を製作した。それぞれ感度の違いから M-90 では出力ゲインを 1 万倍、I-90 では 5 万倍に設定した。また、翼表面に加わる圧力を想定し、M-90 では最大  $\pm 5$ [Pa] の差圧を 0.5[Pa] ずつ、I-90 では最大  $\pm 20$ [Pa] の差圧を 2[Pa] ずつ加えていく。

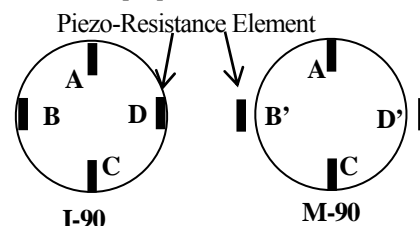


Fig.2 Influence of piezo-resistance layout

## 3.2 動特性の実験方法

センサー出力の周波数特性は、正弦波交流電圧を入力したラウドスピーカーの音圧変動をセンサーに加

えることによって調べた。また、スピーカーの使用限界である 100[Hz]以下の低周波数の特性を補うため、加振器(SHOWA 製)を用いて測定を行った。測定には静圧感度が良好であった M-90 のセンサーを使用した。

ラウドスピーカーを用いた実験では、音圧の指向方向に向けてセンサーを据え付ける。ラウドスピーカーの出力である音圧変動を監視するために、小型コンデンサーマイク(小野測器製)をセンサーと同じ高さに置く。ラウドスピーカーはコーン直径 115[mm]でインピーダンス 8[Ω]を使用し、正弦波電圧をオシレーターで印加し、コンデンサーマイクの較正值をもとにスピーカーへの入力電圧を調整し、音圧変動を一定に保った。この方法によって、センサーが検知する圧力変動も一定になっていると仮定し、スピーカーの使用限界である 100[Hz]からフィルターで遮断される 1400[Hz]までのセンサーの rms 出力を測定した。

一方、加振器を用いた実験では、治具を介してセンサーを直接固定した。最大加速度を 5[m/s<sup>2</sup>]一定とし、強制振動を与えた時のセンサー出力の周波数特性を評価した。出力信号の評価は FFT アナライザーで解析し、出力周波数成分のうち、加えられた振動数成分での rms 出力を 20[Hz]から 500[Hz]まで 10[Hz]刻みで測定した。

#### 4. 実験結果および検討

##### 4.1 静特性実験結果

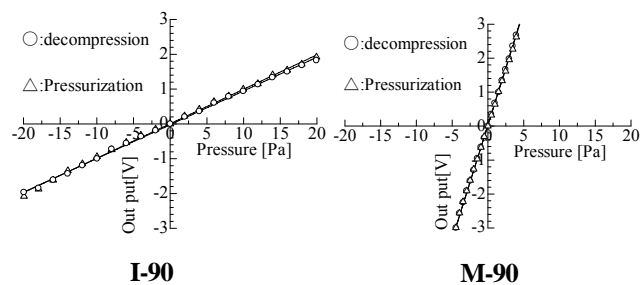


Fig.3 Static testing of pressure Sensor

センサーの出力感度は M-90 では 1[Pa]あたり約 690[mV], 一方、I-90 では、1[Pa]あたり約 90[mV]の感度が得られた。この結果から Fig2 において本来温度補償用として配置されている piezo抵抗 B, D をダイアフラム径の外側に配置することで感度が約 38 倍になることが分かった。また、センサー出力の直線性は  $\pm 2.56[\%FS] \pm 2.87[\%FS]$  とどちらも良好であり、ヒステリシスも見られなかった。

##### 4.2 動特性実験結果

Fig.4 はスピーカーによるセンサーの rms 出力電圧

(○), 加振器によるセンサーの rms 出力電圧(●)をそれぞれ 100[Hz]のときの rms 出力で規格化した値の周波数に対する変化を合わせて示したものである。

加振器を用いた周波数特性は、260[Hz]を越えるとセンサーの出力が徐々に上昇して行く傾向を示している。これは前野の報告<sup>(1)</sup>からセンサーの特性ではなく、センサー固定用の治具の共振であることがわかっている。この結果からスピーカーの使用限界から昨年度は測定することができなかった 100[Hz]以下の低周波の領域においてもセンサーの周波数特性は一定であることを示している。

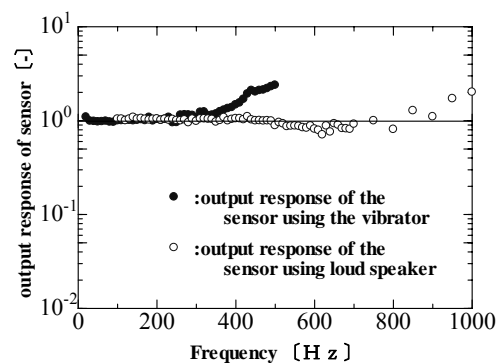


Fig.4 Dynamic testing of Pressure sensor

さらにスピーカーを用いた結果は、約 800[Hz]まではセンサー出力は較正用のマイク出力と同様に一定な特性を示す。800[Hz]を超える領域ではセンサーの出力は多少のばらつきを示している。このばらつきは、較正用のマイク出力が一定であることから判断して、センサー固有の特性と考えられる。

これらの結果から、研究対象とするレイノルズ数 1000 のオーダーの速度変動の周波数は 100[Hz]以下であると見積もることができるため、現在開発しているセンサーで十分追従することができると思われる。

#### 5. 結論・今後の課題

Fig.3 の結果から温度補償用に配置されている抵抗を応力の関係ないダイアフラム径の外に配置することでセンサーの静的感度を大きく向上させることができた。動特性に関しては、センサーそのものが約 800[Hz]まで平坦な特性を持つことが分かった。

実装用として十分な性能が得られたので今後は Fig.1 に示す翼実装用のセンサーを 3[mm]の平板翼の上下面に 8 枚ずつ装着し測定を行う予定である。

##### 参考文献

- (1). 前野優揮：平成 21 年度修士論文