シリコンレゾナント気圧センサの高分解能化

Development of High-resolution Silicon Resonant Atmospheric Pressure Sensor

野田 隆一郎 *1 Ryuichiro Noda
松尾 雄祐 *1 Yusuke Matsuo
渡辺 哲也 *1 Tetsuya Watanabe
吉田 隆司 *1 Takashi Yoshida

近年 IoT（Internet of Things）や環境計測の分野で高精度の気圧センサのニーズが高まっている。気圧センサは IoT の分野では高度計や気圧計として，環境計測の分野では地震や津波の発生などに起因するインフラサウンドと呼ばれる微小且つ低周波の圧力変動を検知する気圧計などの用途で用いることができる。横河電機は 1980 年代からシリコンレゾナント圧力センサの開発を続けており，このセンサが搭載された差圧伝送器 DPharp は長年にわたって多くのお客様に使用されている。我々はこれまで培ったシリコンレゾナントセンサの技術を応用し，上述したニーズに応えるため，差圧伝送器や圧力センサ以外にも応用が可能な新しいセンサを開発している。今回試作した気圧センサは，使用した圧力標準器の仕様 2.5 Pa と同等の精度を持ち，分解能は 0.1 Pa を達成する見込みを得ることができた。

There is an increasing need for high-accuracy, high-resolution atmospheric pressure sensors in the fields of the Internet of Things (IoT) and environmental measurement. Concerning the IoT, atmospheric pressure sensors are used as an altimeter or barometer, while for environmental measurement they are used as a barometer to detect extremely small and low-frequency pressure fluctuations, called infrasound, which are caused by earthquakes and tsunamis. Yokogawa has been offering silicon resonant pressure sensors since the 1980s, and its DPharp series differential pressure/pressure transmitters are widely used by many customers. In response to the increasing demand, Yokogawa decided to apply the technologies of silicon resonant sensors to the development of new atmospheric pressure sensors. This paper describes a prototype which achieves a high accuracy of 2.5 Pa and a high resolution of 0.1 Pa, equivalent to the accuracy of existing pressure standards.

1. はじめに

近年 IoT（Internet of Things）や環境計測の分野で様々なセンサのニーズが高まってきており，この中で高精度な気圧センサの用途が広がっている。気圧センサは環境の絶対圧力を測定することで，高度や大気圧測定，航空機の速度計などに応用されてきた。それらの物理量を計測する際に，気圧センサの精度や分解能を上げることができれば，これまで検知することが難しかった現象を検知することができる。例えば，日本では災害の増加に伴い，津波や地震などによって生じる微少な圧力を検知し，防災に役立てる取り組みが行われている。

本論文では上述したニーズに応えるため，当社で開発した差圧伝送器 DPharp に用いられているシリコンレゾナント技術 (1) を応用した新しい気圧センサの開発について報告する。試作した気圧センサの精度は，使用した高精度の校正器の仕様 2.5 Pa と同等であり，分解能は 0.1 Pa を達成できる見込みを得ることができた。

2. 開発の狙い

シリコンレゾナントセンサは，高い安定性と精度を有しており，産業計測の分野で広く用いられてきた。従来のシリコンレゾナントセンサに用いられる振動子は，電磁気力で駆動するため，磁石が必要であった。一方，開発中のシリコンレゾナントセンサの振動子は，静電気力によって駆動するため，磁石が不要である。これにより小型化及び高温での使用が可能となることで，様々なアプリケーションへの応用が可能となった (2)。適用が可能なアプリケーションとしては，気圧センサ・圧力センサ・歪みセンサ・加速度センサなどが挙げられる。気圧センサは気圧のみならず，前述したように高度や速度計測などにも応用することができる。

我々はシリコンレゾナントセンサを用いて，精度

*1 IA プロダクト＆サービス事業本部 半導体応用開発センター

2.5 Pa，分解能 0.1 Pa 以上の性能を持った気圧センサを実現することを目標とした。

3. 基本構造及び動作原理

図 1 に試作した圧力センサの断面モデルを，**図 2** にシリコン振動子部の断面像を示す。振動子はダイヤフラム上に形成され，ダイヤフラムの直下に圧力の基準となる真空室が形成されている。振動子はその両側の真空ギャップを介して 2 つの電極に挟まれ，一方の駆動電極との間の交流の静電気力によって，電極と垂直方向に励振される。同時に，他方の信号検出電極との間の静電容量の変化によって，周波数に応じた交流電流を出力する。

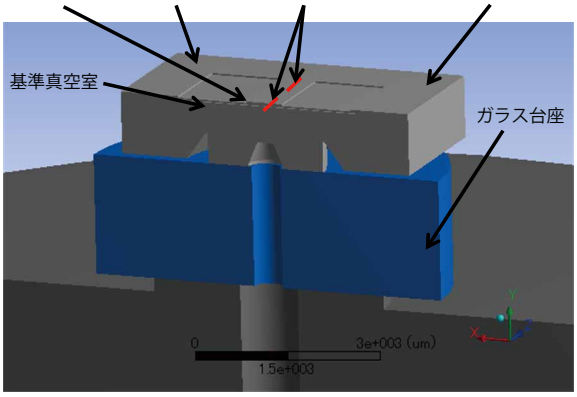

図 1 気圧センサの断面モデル

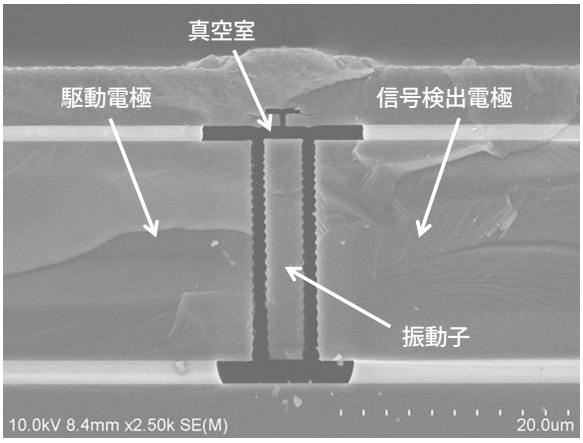

図 2 振動子部の断面像

ここで外部からセンサ上面に圧力が印加されると，ダイヤフラムが撓(たわ)み，振動子の軸方向に応力が加わることで，圧力に応じた共振周波数の変化が生じる。この現象を利用して，共振周波数を測定することによって，印加された圧力の大きさを測定することができる。振動子は従来のシリコンレゾナントセンサと同様にダイヤフラム上の 2 か所に配置され，それぞれの共振周波数の差によって，ダイヤフラム直下の真空室の圧力と，センサ上部に印加される圧力の差圧である絶対圧を検出することができる [1]。また，センサチップ上にダイオードを用いた温度計が形成されており，これにより温度補償を行っている。

4. 作製プロセス

気圧センサは，振動子とダイヤフラムが形成されたデバイスチップに振動子がガラス台座から受ける歪みを低減するためのベースチップが接合されている。デバイスチップは，MEMS 製造プロセスを用いて製作した [3]。製作したデバイスチップの裏面には，Deep RIE (Deep Reactive Ion Etching) を用いて，**図 3** に示すギャップを形成した。一方，ベースチップには，サンドブラスト加工によって溝を形成した。

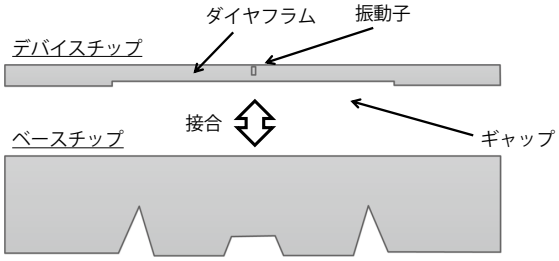

図 3 レゾナントチップとベースチップの接合前の断面模式図

このように製作したデバイスチップとベースチップを，**図 3** のように，ウエハ常温直接接合により高真空下で接合した。このとき，ギャップは接合装置内で高真空（10^{-6} Pa）に保たれたまま封じられ，これにより安定した圧力基準真空室を形成することができた。**図 4** に，製作したセンサチップの断面写真を示す。

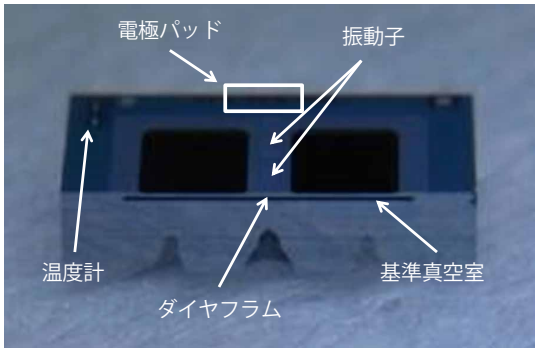

図 4 センサチップの断面写真

最後にセンサチップを**図 5** に示すように，ハーメチックシールに接合されたガラスの台座の上に接合した。センサチップの電極パッドとハーメチックシールの電極の間はワイヤボンドで接続され，この電極を通して振動子の駆動・検出を行っている。

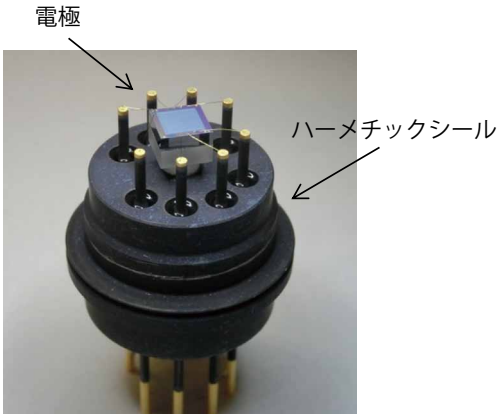

図 5 ハーメチックシールに接合されたセンサチップ

5. 評価結果

試作した気圧センサについて，各種評価を行った結果を以下に示す。

5.1 圧力による共振周波数変化

気圧センサに 75 kPa から 110 kPa の絶対圧力を印加した時の 2 本の振動子の共振周波数 (fc, fr) の変化率と圧力の関係は，**図 6** のようになる。従来のシリコンレゾナント [1] と同様に，圧力の印加に伴って共振周波数が変化している。

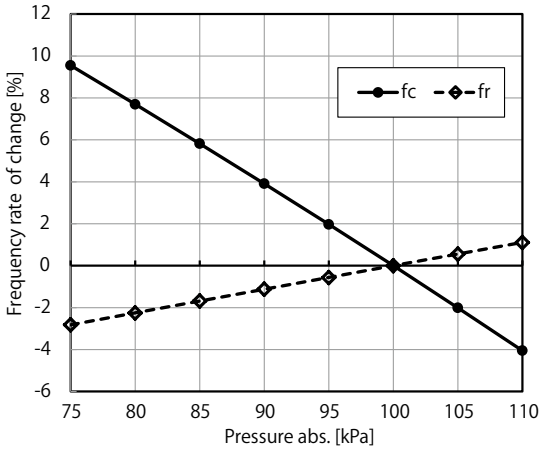

図 6 印加圧力と共振周波数の関係

5.2 温度圧力印加評価結果

試作した気圧センサに，−10 ℃から 60 ℃の温度範囲で，圧力標準器を用いて 75 kPa から 110 kPa までの絶対圧力を印加しながら，センサの共振周波数と温度計の出力を測定して校正式を作成した。その校正の結果を**図 7** に示す。全測定条件における誤差の最大値は 2.1 Pa であり，この値は使用した標準器の精度 2.5 Pa の範囲内であった。標準器は，GE 製圧力校正器 PACE6000 CM2 を用いた。

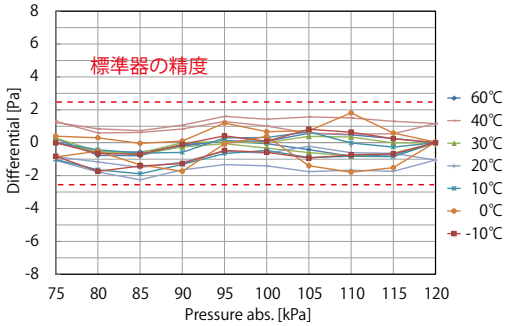

図 7 −10 ℃から 60 ℃の温度範囲における各印加圧力に対する測定誤差

5.3 繰り返し圧力印加評価結果

図 8 に，試作した気圧センサに，75 kPa から 110 kPa までの絶対圧力を繰り返し印加したときの測定結果を示す。誤差の最大値は 2.1 Pa であり，この値は使用した標準器の精度 2.5 Pa の範囲内であった。

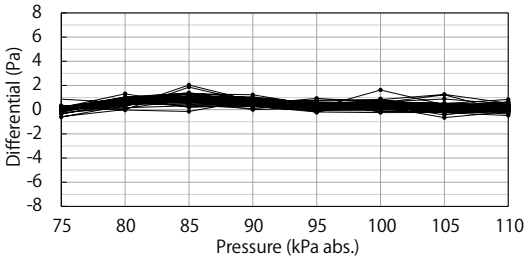

図 8 各印加圧力における，気圧センサの測定値と標準器との差

5.4 大気圧測定結果

試作した気圧センサ（Sample）と標準器（Reference）を用いて，一週間大気圧を測定した。**図 9** に両者による大気圧測定の結果，及び**図 10** に両者の差分を示す。これらの結果から，気圧センサと標準器の測定結果の差は約 ±1 Pa に収まっており，精度よく大気圧を測定できていることが確認された。

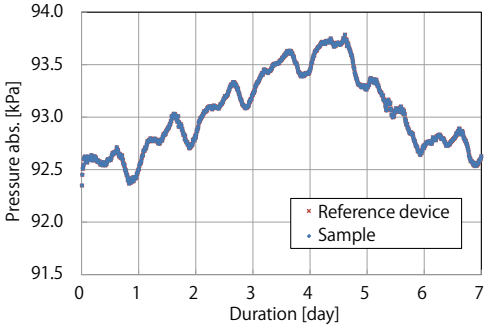

図 9 気圧センサ及び標準器による大気圧測定結果の比較

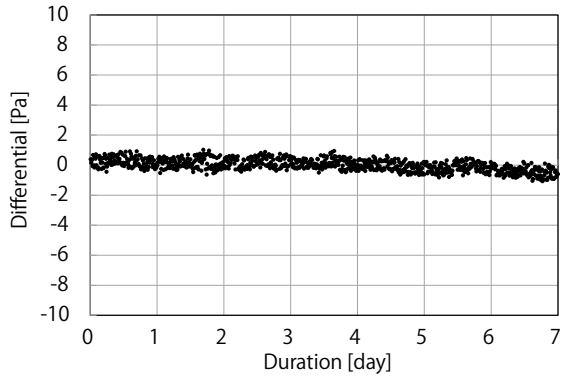

図 10 気圧センサによる大気圧測定結果の標準器との差分

5.5 分解能評価結果

図 11 に，試作した気圧センサを用いて，100 msec のゲート時間で大気圧を 5 秒間連続測定したときの測定値のアラン分散の値を示す。アラン分散の値は，0.1 Pa 以内に収まった。ここから，分解能は 0.1 Pa であると考えられる。

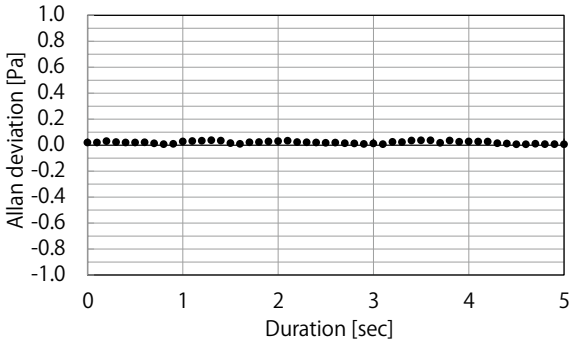

図 11 ゲート時間 100 msec で 50 回大気圧測定を行ったときのアラン分散

6. おわりに

我々は，従来のシリコンレゾナントセンサ技術を応用した新しい気圧センサを開発した。試作した気圧センサの誤差の最大値は 2.1 Pa であった。使用した標準器の精度は 2.5 Pa であり，試作したセンサは標準器と同等の特性と考えられる。また，このセンサは 110 kPa の測定レンジに対して，0.1 Pa の分解能で圧力を測定することができた。

これらの結果は，高精度な高度測定や環境計測の分野で新しいソリューションを提供することのできる高性能な気圧センサの実現に大きく貢献するものであると考えている。今後，さらに開発を進め，より詳細な評価を実施する。

参考文献

(1) 三枝徳治，後藤茂，他，“Dpharp 電子式差圧伝送器 ”，横河技報，Vol. 36，No. 1，1992，p. 21-28
(2) 野田隆一郎，吉田勇作，他，“200M Pa の圧力を測定可能なシリコンレゾナント圧力センサの開発 ”，第 33 回センサ・マイクロマシンと応用システムシンポジウム論文集，Vol. 33，2016
(3) 野田隆一郎，岩井滋人，他，“ シリコンレゾナント圧力センサの高耐圧化 ”，第 32 回センサ・マイクロマシンと応用システムシンポジウム論文集，Vol. 32，2015

* DPharp は，横河電機株式会社の登録商標です。