

高精度・高感度の水位検出用MEMS微小圧力センサ

High-Accuracy High-Sensitivity MEMS Low Pressure Sensor for Water Level Detection

新村 雄一* ・ 砂田 卓也* ・ 木村 沙知子* ・ 斉藤 誠** ・ 西村 和晃*** ・ 西川 英男****
 Yuichi Niimura Takuya Sunada Sachiko Kimura Makoto Saito Kazuaki Nishimura Hideo Nishikawa

洗濯機などの水位検出用微小圧力センサにおいて、高精度・高感度 MEMS 応用センサチップと応力絶縁実装構造の開発によって、従来品の 4 倍の感度を有する半導体ピエゾ抵抗式微小圧力センサを実現した。このセンサは、高感度化に伴う熱応力によるセンサチップの周囲温度特性の悪化に対してはガラス台座を用いないセンサチップ構造で、実装基板やセンサパッケージからの外乱応力による周囲温度特性の悪化に対してはダイボンドの材料や塗布仕様で解消しており、総合精度 $\pm 2.5\%$ FS 以下 ($0 \sim +70^\circ\text{C}$ 、耐環境性試験による特性変動を含む) という高精度・高信頼性を維持しながら、 0.667 V/kPa という高感度も実現している。

In the low pressure sensor for water level detection in a washing machine etc, a piezoresistive silicon low pressure sensor with a sensitivity four times that of the previous sensor have been achieved by developing a high-accuracy high-sensitivity MEMS based sensor chip and stress-isolated structure. The glass supportless sensor chip structure eliminates the deterioration of ambient temperature characteristics caused by thermal stress, and the adopted new die-bonding material and optimized its thickness eliminates the deterioration of ambient temperature characteristics by externally applied stress from the printed circuit board and sensor package when increasing sensitivity. As a result, the sensor provides a high sensitivity of 0.667 V/kPa , while maintaining a high reliability and high overall accuracy of $\pm 2.5\%$ FS or smaller ($0 \sim +70^\circ\text{C}$, including a change of characteristics by an environmental test).

1. ま え が き

近年普及している家庭用全自動洗濯機では、洗濯槽内の水位を検出し注排水を制御するため、微小圧力センサが必要不可欠となっている。このセンサは図 1 に示すように洗濯槽に接続されたエアトラップに取り付けられ、洗濯水の水圧により加圧されたエアトラップ内の空気圧を検知し水位を算出する。

しかし、現在普及しているゴムダイアフラム式圧力センサは外形が大きく、外部に発振回路を必要とするなど問題が多い。また原理上、圧力に対する出力の直線性が低い。そのため高精度な水位検出が難しい。さらに洗濯機においては、水量を厳密に管理してモータなどを効率良く制御することにより消費電力を低減することが求められている。このように家電製品にも省エネルギー・省資源が求められる現状

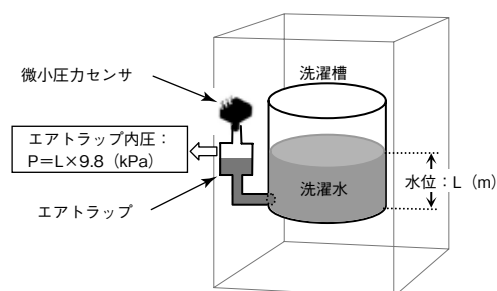


図1 水位検出の原理

では、従来のゴムダイアフラム式圧力センサでは市場ニーズを満たすことが困難になってきている。

当社はこれまでも高精度な半導体ピエゾ抵抗式圧力センサを開発してきたが、このような圧力センサの高感度化においては、①センサチップ特性の悪化、②熱応力など外乱

* 制御機器本部 制御技術応用研究所 Automation Controls Technology Application Development Laboratory, Automation Controls Business Unit

** 微細プロセス開発センター Micro Fabrication Process Development Center

*** 制御機器本部 スイッチングデバイス事業部 Switching Device Division, Automation Controls Business Unit

**** パナソニック電工アジアパシフィック株式会社 Panasonic Electric Works Asia Pacific Pte Ltd.

応力による特性の不安定化などの問題があり高精度との両立が難しく洗濯槽内の水位検出に対応できる高感度な製品はなかった。

筆者らは、これらの問題を解決するためにセンサチップ構造の見直しや応力絶縁実装構造の開発を行い、総合精度 $\pm 2.5\%$ FS 以内という高精度と 0.667 V/kPa という高感度を両立した微小圧力センサを開発したので以下にその内容について報告する。

2. デバイス概要

2.1 全体構造

図2に開発した微小圧力センサの構造を示す。

センサチップはベアシリコンウェハ上にpiezo抵抗とダイアフラムを形成した半導体piezo抵抗式微小圧力センサである。このセンサチップにより圧力を電圧に変換し、信号処理用ASIC (Application Specific Integrated Circuit) へと出力する。ASICはセンサチップからの電圧信号を増幅、調整し、リード端子を介して外部回路へ出力する。センサチップとASICはリード端子を同時成形した樹脂パッケージに接着固定され、測定気中に含まれる水分などから保護するため、ゲル材でコーティングされている。センサチップは計測圧力導入口を通して導入された測定気と、大気導入口を通して導入された大気との圧力差を検出する。

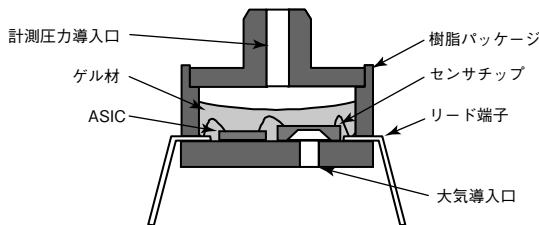


図2 微小圧力センサの構造

2.2 センサチップの構造と検出原理

図3に一般的な半導体piezo抵抗式圧力センサチップの構造を示す。センサチップはシリコンチップ中央部にMEMSプロセスによりダイアフラムを形成し、その上に半導体プロセスによりpiezo抵抗を配置した構造になっている。またセンサチップ下面には外部からセンサチップに応力が伝わるのを防ぐため、ガラス台座が接合されている。

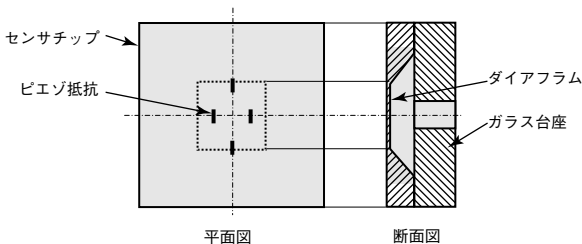


図3 従来のpiezo抵抗式圧力センサチップ

ダイアフラム上のpiezo抵抗は図4に示すように、ホイートストンブリッジを形成するよう配置されており、ダイアフラムに圧力が加わるとこれが歪み、piezo抵抗に応力が発生する。piezo抵抗はこの応力を受けてpiezo抵抗効果により抵抗値が変化し、ホイートストンブリッジの抵抗バランスが崩れ、ダイアフラムに加わった圧力に比例した電位差がVout1とVout2の間に生じる。

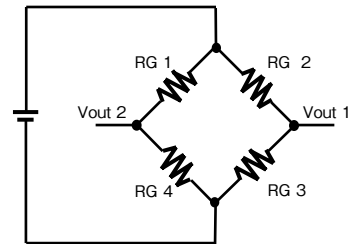


図4 センサチップ回路図

2.3 目標仕様の設定

洗濯機などの水位検出に対応するため、開発する微小圧力センサの目標仕様を表1のように設定する。

- (1) 感度は一般的な家庭用洗濯機の洗濯槽の最大水位(約0.6 m)時にエアトラップ(図1)内に生じる約6 kPaの圧力を検出する必要があるため、圧力0 kPa時に0.5 V、6 kPa時に4.5 Vを出力するように感度は 0.667 V/kPa とする。
- (2) 温水での洗濯を考慮して、ASICにより周囲温度特性を補正し、 $0\sim 70^\circ\text{C}$ の温度範囲で精度補償する。
- (3) 洗濯機での実使用条件を考慮し、熱衝撃試験および圧力サイクル試験の複合ストレス試験実施後の総合精度 $\pm 2.5\%$ FS以内とする。なお総合精度とはセンサ出力の理想値に対し、周囲温度特性やヒステリシス、非直線性などの誤差を含んだ実際のセンサ出力の最大誤差を意味する。

表1 微小圧力センサの目標仕様

項目	目標値
定格圧力	6 kPa
感度	0.667 V/kPa
温度補償範囲	$0\sim 70^\circ\text{C}$
総合精度	$\pm 2.5\%$ FS

3. 開発課題

開発した微小圧力センサにおいて、表1の感度を得るための手段として増幅回路のゲインを高くする方法も考えられるが、実際にはセンサチップ出力のSN比が悪化するため実用的ではない。そこで、増幅回路のゲインを上げることなく目標の感度を得るためには、従来製品比4倍というセンサチップ自体の大幅な感度アップが必要となる。

しかしこの感度アップに際しては、①バルーン効果による非直線性の発生、②周囲温度特性の悪化、および③外乱応力による特性低下という三つの問題が考えられる。

3.1 バルーン効果による非直線性の発生

センサチップは圧力によるダイアフラムのたわみによって発生する応力を検出している。しかしダイアフラムの4辺はシリコンチップに拘束されているため、たわみ量が大きくなるに従いダイアフラム自体の張力が増大し、次第にたわみにくくなるバルーン効果と呼ばれる現象が発生する。この現象が発生すると、ダイアフラムに加わる圧力とそれにより生じるダイアフラムのたわみが比例しなくなり、結果として圧力と出力電圧の関数に非直線性が生じる。

したがって、ダイアフラム面積を大きく取り高感度化するとたわみ量が大きくなり、バルーン効果による非直線性が顕著になる。このように高感度化と非直線性の低減は相反するものであり、ダイアフラムの設計の最適化が重要である。

3.2 周囲温度の影響

半導体ピエゾ抵抗式圧力センサでは、圧力によるダイアフラムのたわみにより生じる応力がピエゾ抵抗の抵抗値を変化させてセンサ出力が変化する。このため、圧力以外の要因で発生する応力がセンサチップに加わった場合でも抵抗値が変化し、発生する出力電圧変化がセンサ出力に重畳してセンサチップの精度を悪化させる原因となる。

微小圧力センサの場合、外部の応力からセンサチップを保護する目的のガラス台座とシリコンチップの線膨張係数が異なることにより生じる熱応力が、センサチップの周囲温度特性に悪影響を及ぼし、センサ出力の精度低下の原因となっている。このためセンサチップ自体が熱応力を生じにくい構造の開発が必要である。

3.3 外乱応力の影響

半導体ピエゾ抵抗式圧力センサは前節と同様の理由で、センサ外部からの応力の影響も受けやすい。周囲温度の変化やプリント基板などへの実装により生じるセンサパッケージの変形がセンサチップに伝わり、ダイアフラムにたわみを生じさせ、精度低下につながる。このため、センサ外部の応力をセンサチップへ伝えない構造の開発が必要である。

4. 開発内容

前述の課題を解決するため、①ダイアフラム形状の最適化、②センサチップ構造の検討、および③ダイボンド材の検討を行う。

4.1 ダイアフラム形状

感度および非直線性はダイアフラムの面積と厚みの関数になるが、MEMSプロセスによるダイアフラム形成では面積や厚みの加工ばらつきが発生するため、この点を考慮して開発を行うことが必要である。

4.1.1 感度計算

微小圧力センサに必要な感度を得るためのダイアフラムの面積を線形応力解析により求める。ダイアフラム面積とダイアフラム厚みに関して、それぞれ $\pm 10\%$ の加工誤差を見込んで解析を行う。図5(a)に解析結果の一例を示す。図中で色の濃い部分ほど大きい応力が発生していることを示している。この応力値から算出した感度を図5(b)に示す¹⁾。この結果から微小圧力センサに必要な感度を得るためのダイアフラム寸法を決定する。

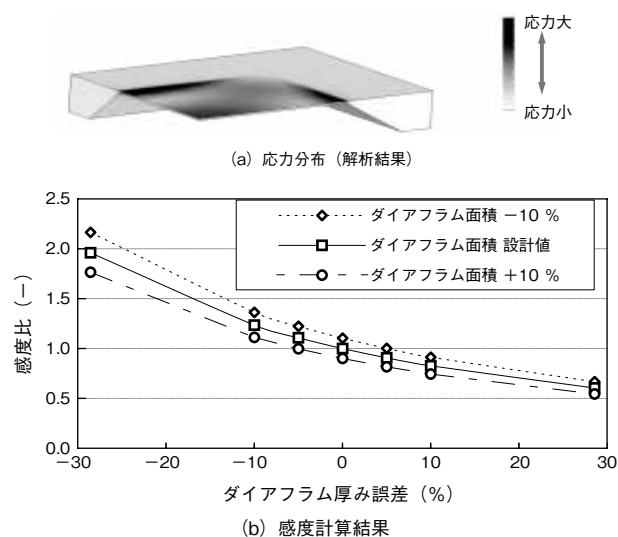


図5 感度計算

4.1.2 非直線性の解析

次に、前項で決定したダイアフラム面積において、非直線性の評価を行う。図5(a)と同様の解析モデルを用いて非線形応力解析によって0 kPa、3 kPa、6 kPaの各圧力を加えた場合のダイアフラム上に発生する応力値を求め、圧力に対する出力電圧の非直線性を算出する。この結果とダイアフラム厚み誤差との相関を図6に示す。この図から

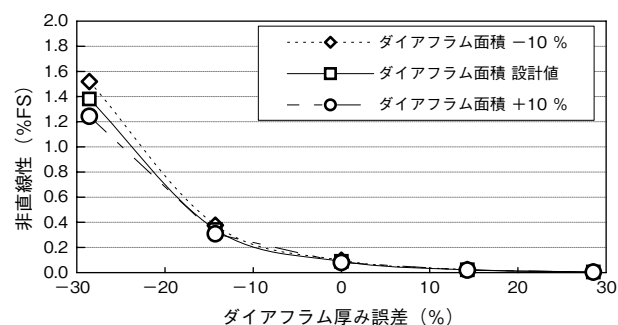


図6 非直線性とダイアフラム厚みの相関

わかるように、ダイアフラム面積の変化に対しては非直線性の増加は少ないものの、ダイアフラム厚み誤差が設計値に対し 15 % 以上薄くなった場合、急激に非直線性が増大する。このことから前項で設定したダイアフラム厚みが妥当であることがわかる。

4.2 センサチップ構造の検討

半導体ピエゾ抵抗式圧力センサは一般的に周囲温度が上昇すると感度が低下する性質がある²⁾ため、センサチップの精度を表す特性の一つである感度の周囲温度特性 (Temperature Coefficient of Sensitivity: 以下、TCS と記す) という項目が重視される。図 7 の点線で示すような周囲温度と感度の関係が直線的に変化する理想的な場合には ASIC により TCS を補正することが可能であるが、図 3 に示した従来構造で微小圧力センサ用のセンサチップを構成した場合、実線で示すように両者の関係に約 1.0 % FS 程度の TCS の非直線性が生じるためセンサの精度が低下していることがわかる。したがって、総合精度の目標値 ± 2.5 % FS を達成するためには TCS の非直線性を ± 0.5 % FS 以内に低減する必要がある。

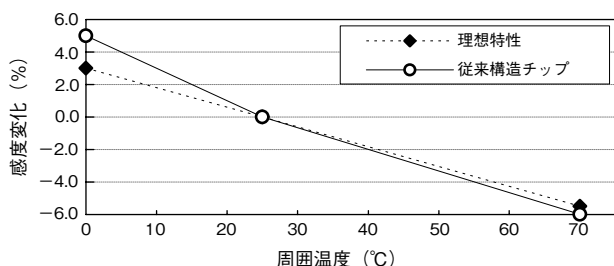


図 7 TCS の非直線性

4.2.1 対策

TCS の非直線性が発生する原因を解明するため、センサチップとガラス台座を接合した従来構造のセンサチップをモデル化し、周囲温度が上昇した場合に生じるセンサチップ各部の応力を熱応力解析により求める。

解析結果を図 8 に示す。図中の濃色部ほど大きい圧縮応力が生じていることを示しており、センサチップのダイアフラム部に圧縮応力が生じていることがわかる。周囲温度が上昇すると、センサチップとガラス台座の線膨張係数の

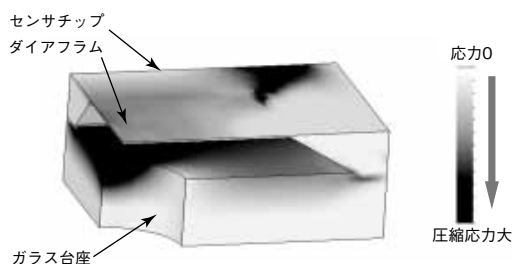


図 8 熱応力解析

差によりダイアフラム部にたわみが生じてダイアフラムの剛性が低下するため感度が上がり、高温側では理想的な特性に対して実測感度が大きくなることから TCS の非直線性が悪化していると推測される。

以上のことから、TCS の非直線性を低減する方策としてガラス台座を使用しない構造を検討し、試作モデルによりその効果を確認する。従来構造とガラス台座なしの構造における TCS の非直線性の比較を図 9 に示す。この図では TCS の非直線性の値は -0.5 % FS 以内に改善していることから新構造の有効性が確認できる。

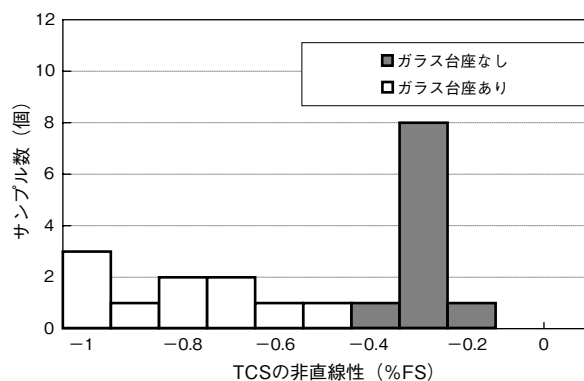


図 9 TCS の非直線性の比較

4.3 ダイボンドの検討

前節においてガラス台座を使用しないことでセンサチップ単体の精度は向上することが確認されているが、その反面ガラス台座がなくなることでパッケージやセンサ外部からの応力を遮断できなくなりセンサ全体としての精度が低下する。

そこで、外部応力をセンサチップへ伝えないような応力絶縁機能をもつダイボンドの選定を行う。

4.3.1 ダイボンド選定

応力絶縁に必要なダイボンドの性質を推定するため解析を行う。樹脂パッケージ上にダイボンドによりセンサチップが実装されている解析モデルを用い、周囲温度が変化した場合にセンサチップのダイアフラム部が受ける応力を求める。この際、JIS-A 硬度で 10 と 20 の 2 種類のダイボンドを仮想しその厚みをパラメータとする。

この解析により得られたセンサチップが受ける応力のダイボンド厚み依存性を図 10 に示す。この図からわかるように、センサチップ部が受ける応力はダイボンド厚みが薄い領域では非常に大きく、厚くなるに従い急激に小さくなる。また、ダイボンド厚みが厚くなると、ダイボンドの硬度による応力の差が小さくなることがわかる。

これらのことから、センサチップに対する応力絶縁に必要な条件としては、ダイボンドの硬度を下げることでダイボンドの厚みを厚くすることが有効であるといえる。

この点を考慮し、十分な厚みに塗布することが可能なダ

イボンド材，具体的には硬化前の粘度とチクソ性が高く，塗布厚みを厚くしやすく，かつ硬化後硬度の低いものを選定する。

従来品に使用しているダイボンドと，今回選定したものの性状比較を表2に示す。なお粘度，硬度に関しては従来品との比率で表している。

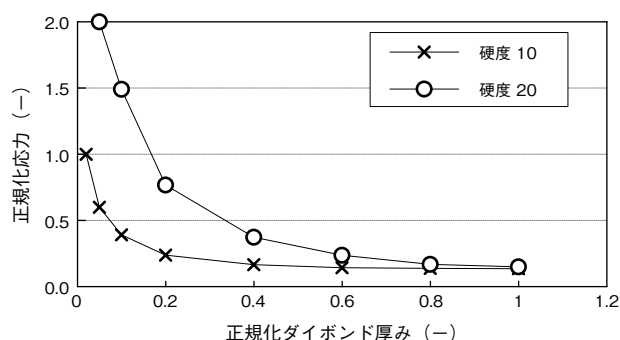


図10 ダイボンドの厚みと応力

表2 ダイボンドの性状比較

	従来品	選定品
粘度	1	15.7
チクソ性	低	高
硬度	1	2.0

4.3.2 評価

前述のダイボンドについて，センサチップを実装してセンサ特性の評価を実施する。

評価結果を表3に示す。この結果から選定品を用いて実装したサンプルは各特性の2乗平均により算出される精度が高く，応力絶縁効果が大いことがわかる。

表3 ダイボンドの評価結果

	従来品	選定品
TCS非直線性	-0.637 %FS	-0.319 %FS
熱ヒステリシス	0.393 %FS	-0.027 %FS
圧力ヒステリシス	0.010 %FS	-0.001 %FS
精度	0.930 %FS	0.337 %FS

平均値，サンプル数5

5. 試作評価

5.1 初期特性評価

以上の開発経過に基づき試作した微小圧力センサ（図11）の圧力—出力電圧特性と周囲温度特性を図12，図13に示す。

図12は常温（25℃）における圧力と出力電圧の特性を示す。測定サンプル数は5個である。圧力は0 kPa，3 kPa，6 kPaで，6 kPa加圧後に0 kPaに戻して再度測定した出力電圧も示している。この図から，圧力に対して非常に直

線性の高いセンサ出力が得られていることがわかる。なお5個のサンプル内で差は認められない。

図13は6 kPa加圧時の出力電圧の周囲温度特性を示す。測定サンプル数は5個である。出力電圧は周囲温度を25℃，0℃，70℃の順に設定して測定し，70℃の測定後に25℃に戻して再度測定した結果も示している。この図から，使用温度範囲の全域において良好な精度が得られていることがわかる。なお5個のサンプル内で差は認められない。



図11 微小圧力センサ（試作品）

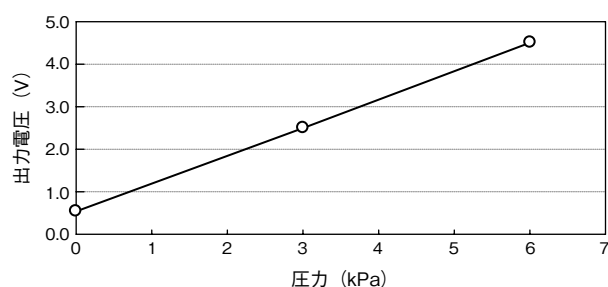


図12 圧力—出力電圧特性

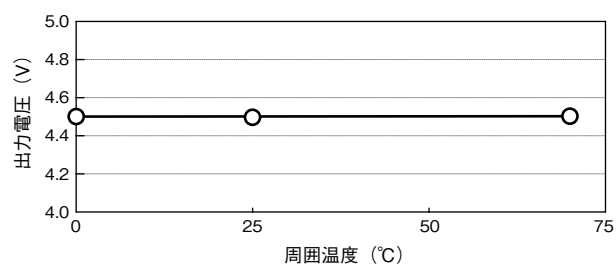


図13 周囲温度特性

5.2 信頼性評価

試作品の信頼性評価を行い，すべての評価項目において目標仕様を満足する結果を得ている。試験項目と評価結果を表4に示す。

図14にTHB試験，図15に熱衝撃試験後に圧力サイクル試験を行う複合ストレス試験の結果を示す（サンプル数5個）。この図から試験実施後も目標仕様の±2.5 % FSの精度を確保していることがわかる。

表4 信頼性評価結果

試験	条件	判定
高温通電	100 ℃, 5 VDC, 500 h	良
低温通電	-40 ℃, 5 VDC, 500 h	良
THB	85 ℃, 85 %RH, 5 VDC, 500 h	良
熱衝撃 圧力サイクル	-30 ℃ ⇄ +100 ℃, 1000 回 0 kPa ⇄ 6 kPa, 1500000 回	良

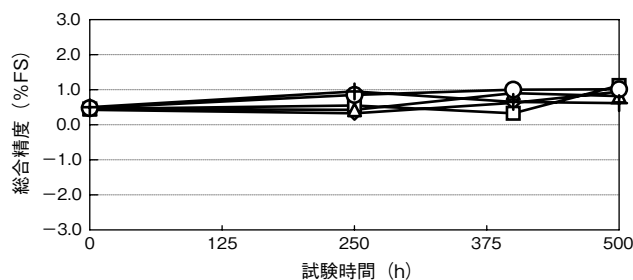


図14 THB試験結果

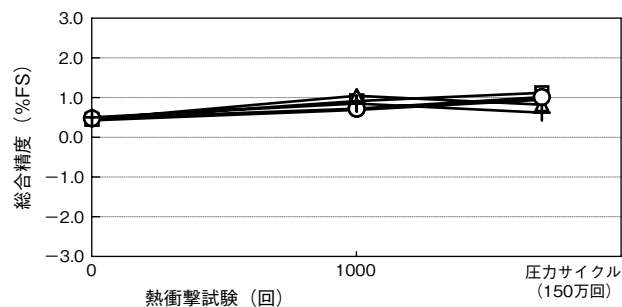


図15 熱衝撃試験+圧力サイクル試験結果

感度化に伴う熱応力によるセンサチップのTCSの悪化に対してはガラス台座を用いないセンサチップ構造で、実装基板やセンサパッケージからの外乱応力によるTCSの悪化に対してはダイボンドの材料や塗布仕様で解消しており、総合精度 $\pm 2.5\%$ FS以下(0 $\sim$ +70 ℃, 耐環境性試験による特性変動を含む)という高精度・高信頼性を維持しながら、0.667 V/kPaという高感度も実現した。

水位の正確な検知を可能とする本センサは省エネルギー・省資源に対して非常に有効であり、活用されるものと考えている。今後、さらにユーザーニーズに対応したバリエーション追加などの開発を進めていく予定である。

6. あとがき

洗濯機などの水位検出用微小圧力センサにおいて、高精度・高感度MEMS応用センサチップと応力絶縁実装構造の開発によって、従来品の4倍の感度を有する半導体ピエゾ抵抗式微小圧力センサを実現した。このセンサは、高

*参考文献

- 1) S. Sugiyama, T. Suzuki, K. Kawahata, K. Shimaoka, M. Takigawa, I. Igarashi : Micro-Diaphragm Pressure Sensor, Microsensors, IEEE Press, p. 130-133 (1991)
- 2) 杉山 進: シリコン集積化圧力センサ, 応用物理学会東海支部学術討論会予稿集, p. 7-8 (1989)

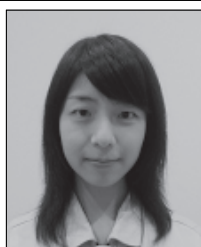
◆執筆者紹介



新村 雄一
制御技術応用研究所



砂田 卓也
制御技術応用研究所



木村 沙知子
制御技術応用研究所



斉藤 誠
微細プロセス開発センター



西村 和晃
スイッチングデバイス事業部



西川 英男
パナソニック電工アジア
パシフィック (株)