

低電圧駆動ワンチップ集積化圧力センサ

機器電材事業部 蓬田 拓^{*1}・伊藤 達也^{*2}
株式会社東北フジクラ 伊藤 清成

One-chip Integrated Pressure Sensor of Low Voltage Excitation

T. Yomogida, T. Ito & K. Ito

当社はチップ上で信号調整された、高出力で、温度特性補償、調整機能を持った低電圧駆動集積化圧力センサを開発した。このセンサチップは piezo抵抗ゲージを持つダイヤフラムとバイポーラリニアIC、レーザートリマされた薄膜抵抗で構成され、同一のシリコンチップ上にすべて集積化されて搭載されている。この圧力センサは直流3Vの定電圧で駆動可能であり、バッテリー駆動携帯製品に適している。

We have successfully developed one-chip integrated pressure sensor of low voltage excitation. The developed sensor has on-chip signal conditioned, high level output, and temperature characteristics compensated and calibrated. A chip of the sensor is composed of a diaphragm with piezo-resistive gages, bipolar linear IC and laser-trimmed thin film resistors. Those components are integrated on a same small chip made of silicon. The above-mentioned sensor is suitable for various batteries driven and portable goods because of being able to operate at 3 V constant voltage excitation.

1. ま え が き

半導体圧力センサ¹⁾²⁾は、シリコン単結晶基板上に半導体プレーナ技術を用いて拡散歪ゲージを形成し、シリコン拡散層の抵抗値が応力によって変化する現象（piezo抵抗効果）を利用している。piezo抵抗型半導体圧力センサは小型、高感度、高信頼性の優れた特徴を持ち、一般家電製品から医療機器、自動車用部品、玩具など幅広い分野で使用され、その用途はますます広がってきている。

しかしながら、出力電圧が数mV～数十mV程度と比較的小さく、また、基準圧力値（圧力無印加時）での出力値（オフセット）や印加圧力に対する出力値の感度（出力感度）特性にばらつきが存在し、さらにそれらは、温度特性を持っている。そのため、piezo抵抗型半導体圧力センサの使用には、図1に示すように、増幅回路、出力感度およびオフセット調整回路、温度補償回路、さらにセンサを定電流で駆動するための定電流回路の周辺回路が必要となる。

半導体圧力センサは集積回路（IC）と同じ単結晶シリコンを用い、ICと同様の製造プロセスで製造するため、

周辺回路をバイポーラリニアICとして半導体圧力センサと同一チップ内に搭載したワンチップ集積化圧力センサ³⁾⁴⁾⁵⁾とすることが可能である。ワンチップ集積化圧力センサの利点として以下のものがあげられる。

- (1) IC化された周辺回路を内蔵
周辺回路に使用する電子部品、回路基板が不要になり、低価格化、小型化が可能になる
- (2) 出力の調整および温度補償がされているため、ユーザでの使用が容易である。

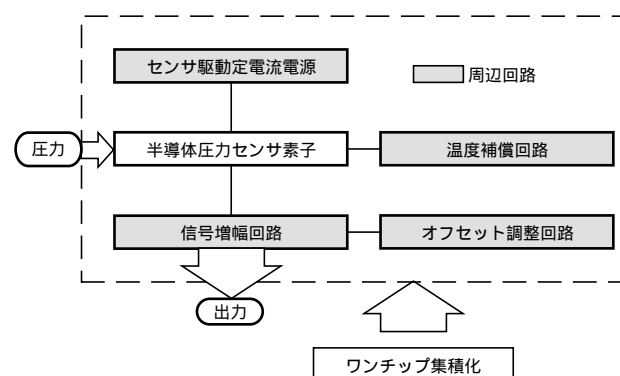


図1 半導体圧力センサ素子と周辺回路の関係
Schematic diagram of relation between pressure sensor and signal-conditioning circuit

*1 センサ技術部秋田分室

*2 センサ技術部秋田分室長

以上のような特長を持つワンチップ集積化圧力センサを当社では1995年から製造販売しており、掃除機、高度計、血圧計、圧力スイッチ等に幅広く使用されている。集積化圧力センサはIC技術とマイクロマシニング技術を組み合わせる高度技術製品であり、これを実用化しているメーカは世界に数えるほどしかなく、どのメーカの製品も電源電圧は5Vである。

近年、マイクロプロセッサ等ICの低電圧駆動化が進み、また製品の小型化・携帯化が盛んに行われることなどにより、乾電池2個、すなわち3Vで駆動可能な低電圧駆動集積化圧力センサが要求されはじめた。われわれは、この要求を満たす低電圧駆動ワンチップ集積化圧力センサを開発商品化したので報告する。

2. ワンチップ集積化圧力センサ

従来型の半導体圧力センサとワンチップ集積化圧力センサの断面模式図を図2に示す。半導体圧力センサは、シリコン単結晶基板上に感圧ゲージ部分とダイヤフラムで構成されている。集積化圧力センサは、圧力センサ部分以外に複数のトランジスタにより構成されるバイポーラ

リニアICや、特性調整用の薄膜抵抗が同一のシリコンチップ上に形成されている。

当社の集積化圧力センサは以下のような構成である。

- (1) アナログ処理
- (2) バイポーラリニアICをセンサチップ内に作製
- (3) 薄膜抵抗を形成し、個々のセンサの特性ばらつきに合わせ、レーザーリミングで1対1に調整

ワンチップ集積化圧力センサを圧力センサ素子部とバイポーラリニアICの大きく2つに分けて説明する。

2.1 圧力センサ素子部

圧力センサ素子部は表面中央部分に選択拡散により形成された4個のピエゾ抵抗ゲージのブリッジと、その裏面のマイクロマシニング技術により形成されたダイヤフラムで構成される。基板には面方位(110)面のシリコン単結晶基板が用いられ、4個のゲージは<110>方向と平行に中央に2個、端部に2個配置している。また、各ゲージの抵抗値は約1kΩである。

2.2 バイポーラリニアIC

ワンチップ集積化圧力センサの回路図を図3に示す。4台のOPアンプを使用している。バイポーラリニアICは、

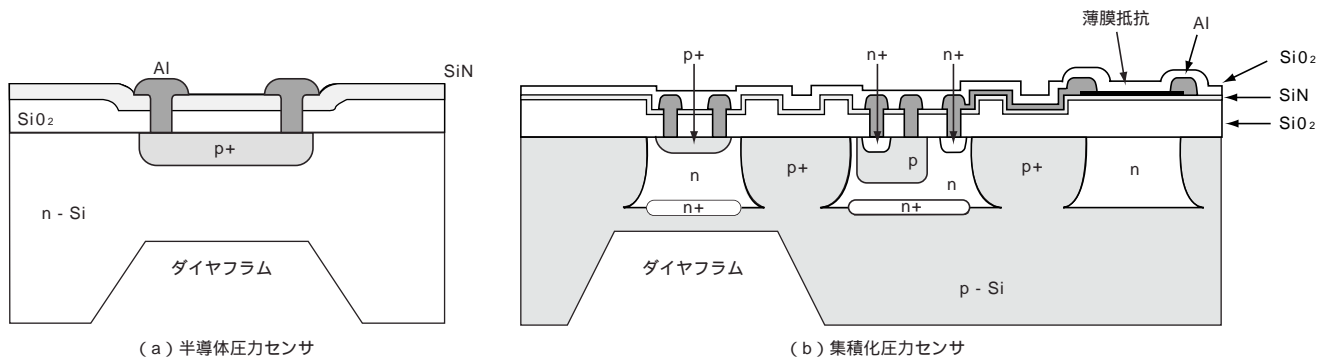


図2 半導体圧力センサとワンチップ集積化圧力センサの断面模式図

Cross-sectional view of conventional pressure sensor and one-chip integrated one made of silicon

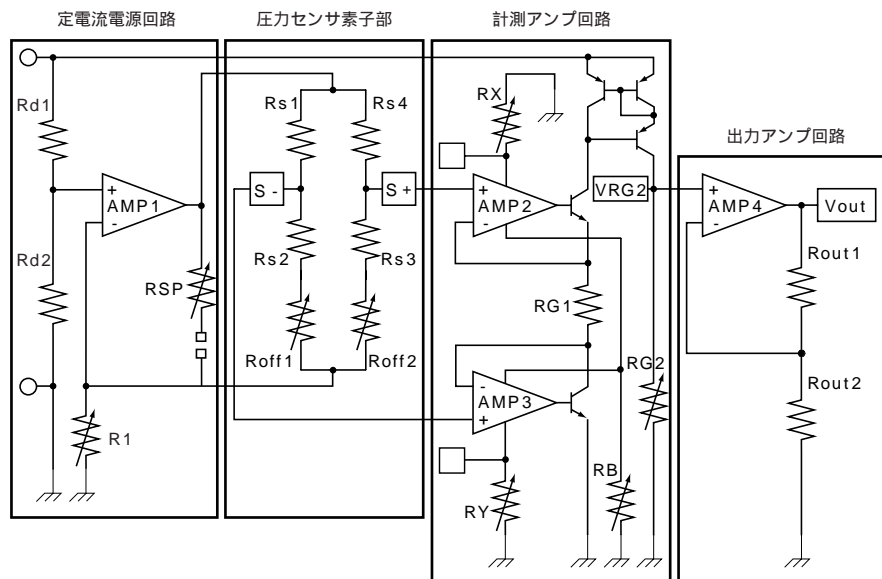


図3 集積化圧力センサの回路図

Circuit of one-chip integrated pressure sensor

以下の3種類の回路に分類される。

- (1) 定電流駆動回路：圧力センサ素子部のピエゾ抵抗ゲージブリッジを定電流駆動するため、OPアンプ1個を使用している。
- (2) 計測アンプ回路：OPアンプ2台を使用した計測アンプは、ハイインピーダンス入力でセンサと回路の干渉を防いでいる。また、出力は電流出力型であり、出力のシングルエンド変換にウィルソンカレントミラー回路を使用することにより、一般的な計測アンプ構成よりOPアンプを1台省いている。
- (3) 出力アンプ回路：OPアンプ1台を使用し、出力電圧がほぼグランドから電源電圧近傍まで得られる構造で、増幅回路全体として幅広い出力範囲が得られるようになっている。

2.3 温度特性と温度補償

半導体圧力センサ素子は感歪抵抗値とピエゾ抵抗係数に温度特性があるため、出力値は温度依存性をもっている。その結果、幅広い温度で使用するためには温度補償が必要となる。集積化圧力センサでは、計測アンプに使用しているOPアンプの温度ドリフト特性を制御し、センサのオフセット温度特性と逆方向の温度特性を持たせることでオフセット温度補償を行っている。また、感度温度補償は、センサを定電流駆動し、さらにブリッジと並列に所定値の抵抗を挿入することで行っている。

2.4 特性調整

種々の特性は、特性調整用の薄膜抵抗をレーザトリミングし、抵抗値を調整することで行われている。図4に薄膜抵抗のレーザトリミングによる特性調整フローを示す。

2.5 製造プロセス

ワンチップ集積化圧力センサのウェハ工程は、バイポーラリニアICのウェハ工程に感歪ゲージ拡散と薄膜抵抗作製とダイヤフラム形成の3つの特殊工程を合わせた工程となっている。組立・調整工程は、半導体圧力センサ工程に特性調整のためのレーザトリミング工程を加えている。

3. 低電圧駆動設計目標および設計コンセプト

3.1 開発目標と設計コンセプト

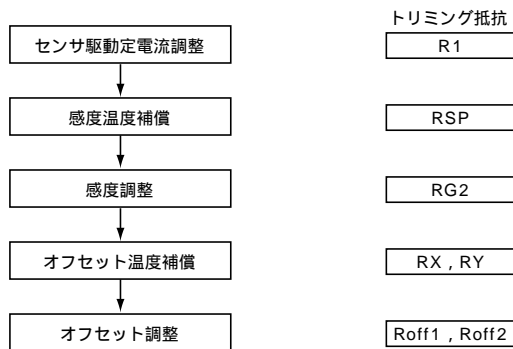


図4 集積化圧力センサにおける特性調整のフロー Adjustment flow for output characteristics of one-chip integrated pressure sensor

(1) 3.0V駆動が可能なこと

これによりユーザは乾電池2本でのバッテリー駆動が可能となる。

(2) 携帯用大気圧モニタの要求仕様を満足すること

携帯用大気圧モニタの要求仕様例を表1に示す。

(3) 従来型集積化圧力センサとの基本設計の共有化

実績のある従来型集積化圧力センサをベースとすることで設備・治具を共有化でき、開発期間の短縮、開発費用の削減をはかる。ICの基本ブロックと特性調整フローを5V用と共通とし、同じラインで生産できるようにした。

4. 低電圧駆動化の課題と設計

バイポーラリニアICを低電圧で駆動する場合、バイポーラトランジスタの基本特性が問題となる。図5に一般的なトランジスタのベース - エミッタ間電圧の特性を示す。バイポーラトランジスタ1個の駆動には、0.6~0.8Vのベース - エミッタ間電圧が基本的に必要であり、トランジスタを直列にすれば、その分の電圧が必要となる。集積化圧力センサの場合、以下の2点が問題となる。

(1) トランジスタのベース - エミッタ間電圧による回路制限

(2) 圧力センサ素子部出力と計測アンプ部入力の整合性

4.1 ベース - エミッタ間電圧による回路制限

図6に示した回路のように、ベース - エミッタ間電圧が直列に接続されたとき、その和が電源電圧に満たないとトランジスタの動作が不安定となる。従来の集積化圧力センサはベース - エミッタ間電圧を最大4個の直列にして

表1 携帯用大気圧モニタに適用されるセンサの仕様例 Typical specification of sensor for portable atmospheric pressure monitor

圧力レンジ	400 ~ 1,100hPa
電源電圧	3VDC
出力	1.0V以上
精度	3.0%以内
使用温度	0 ~ 50
保存温度	20 ~ 100

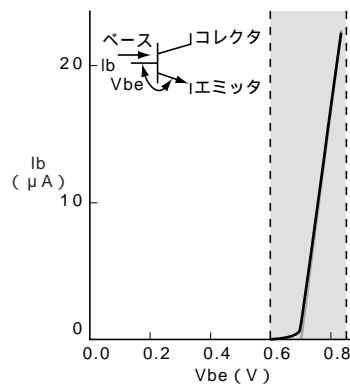


図5 典型的なバイポーラトランジスタのIb - Vbe特性 Characteristic of Ib-Vbe in case of a typical bipolar transistor

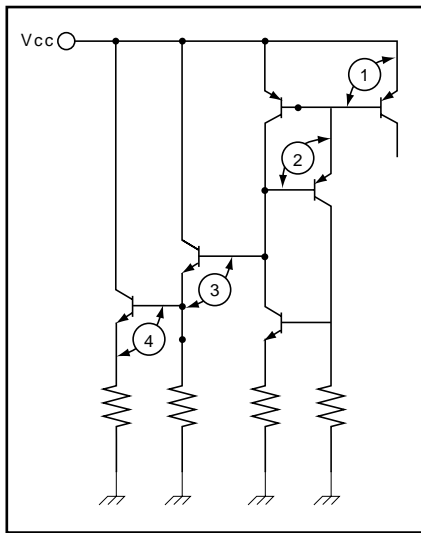


図6 バイポーラリニアIC回路の代表的な例
Typical part of bipolar linear circuit

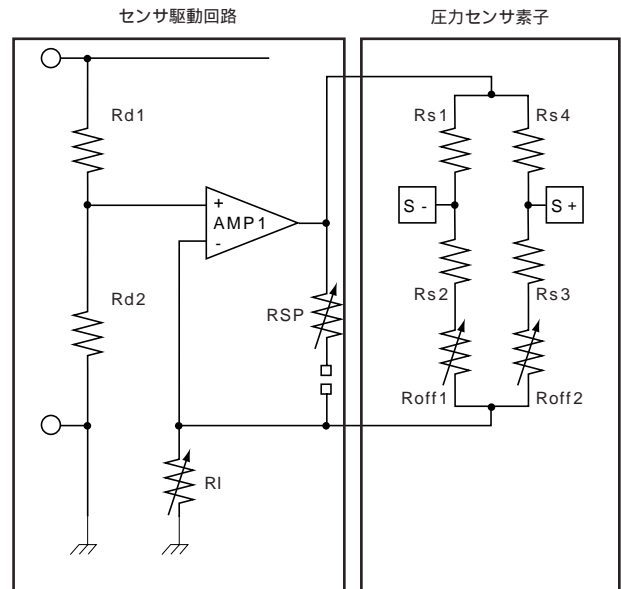


図8 圧力センサ素子部およびその駆動部の回路
Diagram of pressure sensor and its driving circuits

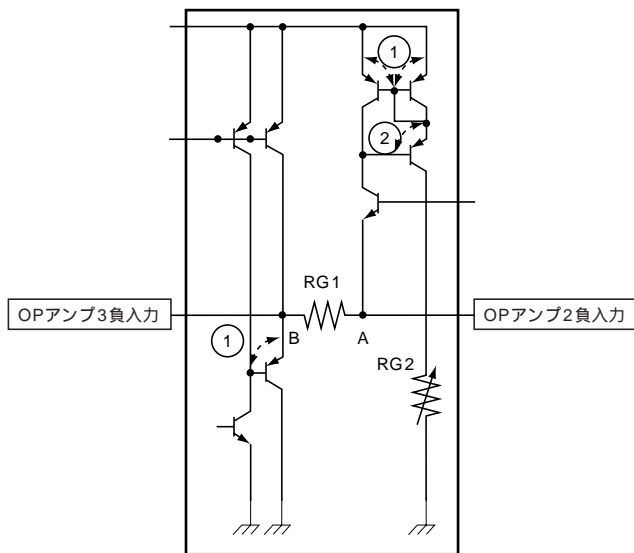


図7 差動増幅回路の出力段

Circuit diagram of output interface of the instrumentation amplifier

おり、5V駆動では問題無く動作するが、3V駆動ではベース - エミッタ間電圧の和が駆動電圧を超える場合があり、不安定な動作になる。ベース - エミッタ間電圧による回路の制限に対してトランジスタの直列接続数を最大4個から3個に減少させることにした。

4.2 圧力センサ素子部出力と計測アンプ部入力の整合性

図7に計測アンプ入出力部周辺の回路図を示す。計測アンプに使用している2つのOPアンプの入力は、その周辺回路部のトランジスタのベース - エミッタ電圧により制限されている。図7のA点は、駆動電圧からベース - エミッタ間電圧2個分を引いた電位以下、B点はグランドからベース - エミッタ間電圧が上がった電位以上に制限される。A点とB点は、センサ素子部からの出力電位と同じ電位になるように設計されているが、センサ素子部の出力

がA点、B点の条件を満たさないと計測アンプは動作しない。調査の結果、駆動電圧3.0V以下では計測アンプの動作可能入力範囲は圧力センサ素子部出力とは重ならず、圧力センサ素子部の出力を検知できなくなることがわかった。

圧力センサ素子部の出力電位を計測アンプの動作可能入力範囲に合わせることにした。図8に定電流電源回路と圧力センサ素子部の回路図を示す。圧力センサ素子部の出力電位は、定電流駆動回路部を変更することで実現する。変更点は以下の2点である。値は電子回路シミュレーションにより求めた。

- (1) 圧力センサ部全体の電位を上げるため、分圧抵抗のRd1とRd2の比を変更した。
- (2) 上記(1)の変更のため、定電流調整抵抗RIの値を変更した。

この2点の変更により計測アンプを安定に動作させることが可能となる。

5. 試作

5.1 試作・調整

作製したワンチップ集積化圧力センサのチップ写真を図9に示す。チップサイズは、従来型の集積化圧力センサと同サイズの3mm x 3mmであり、中央部に圧力センサ素子部が、またその周辺部にOPアンプ4個で構成されたバイポーラリニアICがある。このチップを用いて集積化圧力センサの絶対圧モデルXFAMをベースに低電圧駆動ワンチップ集積化圧力センサの試作を行った。組立て後、駆動電圧3V、400hPa、750hPa、1,100hPaの圧力3点、0、25、50の温度3点で1回測定を行い、ここでのデータを元に出力調整、温度補償を行った。集積化駆動電圧3Vでの出力値はオフセット電圧0.5V、フルスケール電圧2.0Vに調整した。

5.2 評価

5.2.1 駆動試験

出力調整後の出力例を図10に示す。駆動電圧3Vでの出力値はオフセット電圧0.5V、フルスケール電圧2.0Vに調

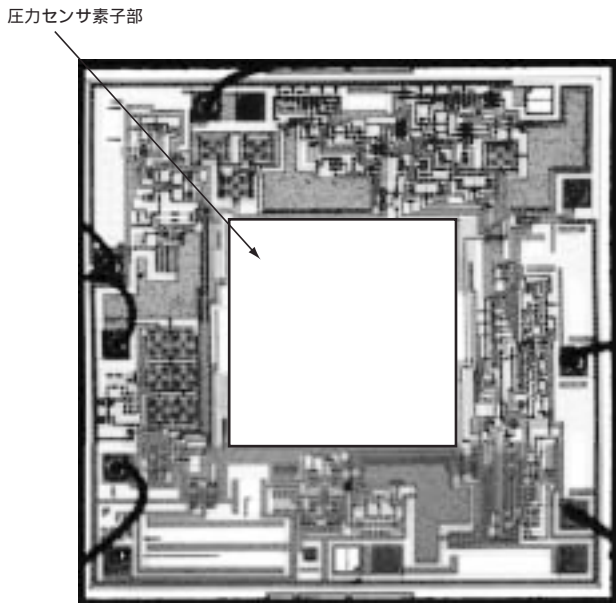


図9 ワンチップ集積化圧力センサ素子の写真
Photograph of the one-chip integrated pressure sensor

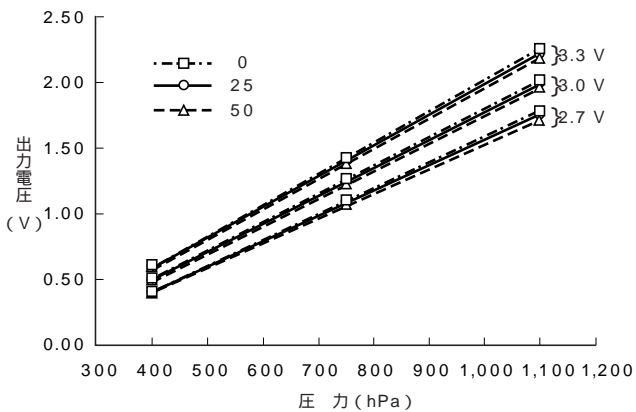


図10 低電圧駆動集積化圧力センサの出力特性
Output characteristics of the low voltage excitation and one-chip integrated pressure sensor

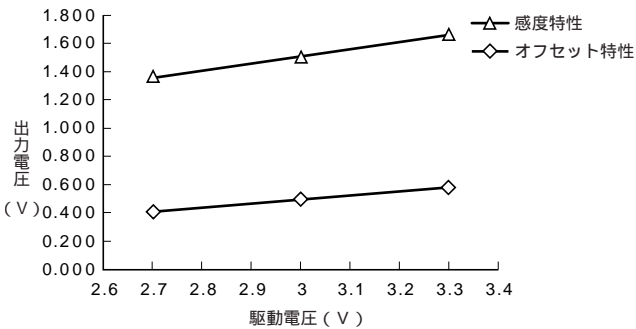


図11 低電圧駆動集積化圧力センサの駆動電圧 出力特性
Output characteristics as a function of driving voltage in the case of the low voltage excitation and one-chip integrated pressure sensor

整されている。駆動電圧3Vでの調整は、調整目標に対して±1.0%FS以内の精度で行われ、駆動電圧2.7～3.3Vの範囲で正常な動作が確認された。

5.2.2 温度特性評価

温度補償の効果を確かめるために、温度環境0～50℃、駆動電圧DC3.0Vにて温度特性の評価を行った。温度特性誤差は±1.5%FS以内であり、調整誤差を含めた総合精度は、0～50℃の範囲で±2.5%FS以内になった。

5.2.3 駆動電圧特性

図11に駆動電圧変動特性を示す。オフセット、出力感度ともに電源電圧に対しリニアな特性となっている。

その関係は、以下の(1)式で表される。

$$V_{out}(V_{cc}) = V_{out}(3.0) \times (V_{cc} - 1.2) / (3.0 - 1.2) \quad \dots\dots\dots(1)$$



図12 低電圧駆動集積化圧力センサの実装例
Photograph of packages for the low voltage excitation and one-chip integrated pressure sensor

表2 低電圧駆動ワンチップ集積化圧力センサの仕様例
Typical specification of the low voltage excitation and one-chip integrated pressure sensor

最大負荷圧力	220Pa abs
最大印可電圧	6VDC
補償温度範囲	0～50
使用温度	-10～85
保存温度	-20～100
測定圧力範囲	400～1,100hPa
圧力種類	絶対圧
圧力媒体	非腐食性ガス
駆動電圧	3.0±0.3V
消費電流	6mA以下
出力インピーダンス	10Ω以下
ソース電流	0.01mA以下
シンク電流	1mA以下
オフセット電圧	0.5±0.0375V
フルスケール電圧	2.0±0.0375V
出カスパン電圧	1.5V
総合精度	±5.0%FS
応答時間	2msec

6. 製品仕様

図12に低電圧駆動ワンチップ集積化圧力センサの実装例を示す。仕様例を表2に示す。駆動電圧はDC3V \pm 10%、出力電圧は0.5~2.0V、総合精度は2.5%FS、温度補償範囲は0~50である。測定圧力範囲は25kPaFS~1MPaFSまでのゲージ圧モデルと700hPaFS(400~1,100hPa)の絶対圧モデル等が可能である。この仕様は開発目標にあげた携帯用大気圧モニタの要求仕様を満足している。

低電圧駆動集積化圧力センサの主な用途として次のものがあげられる。

- (1) 携帯血圧計(ゲージ圧モデル)
- (2) 携帯天気予報モニタ(絶対圧モデル)
- (3) 携帯高度計(絶対圧モデル)
- (4) その他 電池駆動携帯機器

7. むすび

3V駆動が可能な低電圧駆動ワンチップ集積化圧力セン

サを開発した。3V駆動が可能になったことにより従来型ワンチップ集積化圧力センサでは対応できなかった各種電池駆動携帯製品への応用が可能となり、圧力センサの用途がさらに広がるものと考えている。

参考文献

- 1) 田中ほか：半導体圧力センサ，藤倉電線技報，第66号，pp.1-41，1983
- 2) 岡田ほか：半導体圧力センサの温度特性，藤倉電線技報，第69号，pp.41-57，1985
- 3) 伊藤ほか：ワンチップ集積化圧力センサ，フジクラ技報，第84号，pp.180-186，1993
- 4) J.M.Borky and K.D.Wise：IEEE.Trans.Electron Devices ED-26，pp.1,996-2,016，1979
- 5) R.E.Ricking, R.L.Johnson and D.B.Wamstad：SAE Tech. Pap. Ser. No. 810,376, p.4，1981