

平成25年度 戦略的基盤技術高度化支援事業

「新型 MEMS 気圧センサの広帯域化の研究開発」

研究開発成果等報告書

平成26年3月

委託者 東北経済産業局

委託先 公益財団法人福島県産業振興センター

目 次

第1章 研究開発の概要

- 1.1 研究開発の背景・研究目的及び目標
 - 1.1.1 背景
 - 1.1.2 研究目的及び目標
- 1.2 研究体制
- 1.3 成果概要
- 1.4 当該プロジェクト連絡窓口

第2章 本論

- 2.1 高真空域でのゼロ位法による広帯域化の研究開発
 - 2.1.1 MEMS 真空・気圧センサチップの開発
 - 2.1.2 ゼロ位法に基づく微小信号の高 S/N 比の増幅回路の開発
 - 2.1.3 ゼーベック電流積分による温度差検出の高感度化の確立
- 2.2 低真空域（1 気圧付近）での強制冷却による広帯域化の研究開発
 - 2.2.1 強制振動用加熱パワーと感度との関連の評価
 - 2.2.2 ピークホールド・ゼーベック電流積分回路を含む増幅回路の開発
- 2.3 MEMS 広帯域真空・気圧計のモジュール化の研究開発
 - 2.3.1 MEMS 広帯域真空・気圧センサモジュールの開発
 - 2.3.2 モジュールでの特性評価
- 2.4 超小型気圧センサの研究開発
 - 2.4.1 超小型気圧センサチップの開発
 - 2.4.2 超小型気圧センサパッケージの開発
 - 2.4.3 超小型気圧センサの隔膜真空計の標準圧室モデルでの特性評価
- 2.5 周囲環境補正の研究開発
 - 2.5.1 周囲環境補正ポート付き気圧センサチップの開発
 - 2.5.2 周囲環境温度補正方法の確立

第3章 全体総括

- 3.1 研究開発成果
- 3.2 研究開発後の課題・事業化展開

第1章 研究開発の概要

1.1 研究開発の背景・研究目的及び目標

1.1.1 研究開発の背景・研究目的

MOCVD 装置、プラズマ CVD 装置、LP CVD 装置、RIE 装置、スパッタリング装置などの真空・気圧装置において、従来、低真空域計測用にピラニ真空計やダイヤフラム（隔膜）型真空計があり、高真空域用には、電離真空計が用いられる。川下企業によれば、これらの装置では、背圧 5×10^{-4} Pa 以下まで真空引きし（電離真空計で計測）、多くの場合、その後、1 気圧（ 1×10^5 Pa）以上の気圧の純ガスや混合ガスを導入し、所定の真空域（例えば、1 Torr や 10 Torr）について数個の高価な隔膜型真空計を参照しながら CVD ガス制御をする。上記の半導体製造装置では、高いスループットを得るために、半導体ウエーハの処理前、処理後に、反応室と同一の真空にさせておく予備室となるロードロック室が用意されているが、この反応室とロードロック室は、高真空から 1 気圧以上まで真空度監視する必要があるが、電離真空計では測定域が狭く、実際には数個の隔膜型真空計が使用されているのが現状である。川下企業はこれが 1 個の安価な気圧センサに置換えられることを期待している。

ピラニ真空計や電離真空計は比較的安価ではあるが、フィラメントが切れやすい問題がある。しかも、高真空領域では、電離真空計しか利用できなかった。また、ピラニ真空計は、加熱フィラメントの抵抗値により真空度を計測することから経時変化の問題、 1×10^{-2} Pa から 1×10^4 Pa 程度までの狭い領域しか計測できず、1 気圧では、ほとんど感度を有しないという問題があり、比較的安価で大気圧近傍の計測も可能な広帯域センサが望まれている。

また、腐食性ガス環境下では、腐食対策やガス種依存性の問題があるため、現在はバロトロンなどの高価な隔膜型真空計が使用されていることが多いが、隔膜式の圧力計の場合、基準圧は封止されている製造時の基準圧室の気圧を一定と仮定して利用しており、これが経時変化を起こすことにより、半導体基板の性能バラツキに影響を及ぼしている。そのため、基準圧が不要、もしくは、校正できるようにしたいというニーズがあった。特に、高真空側の隔壁型真空計（静電容量型、ひずみゲージ型）の製造が、隔膜の熱膨張やヒステリシスなどの変形や基準圧室の微量のアウトガスによる誤差の対策など、異なる原理の真空計が望まれている。

このようなニーズに答えるべく、東北学院大学のシーズである熱伝導型のセンサの技術を用いて、高真空域から大気圧以上の広帯域を一つのセンサでカバーできる MEMS センサチップを開発し、モジュール化・パッケージ化の商品化を図るものである。この熱伝導型のセンサは、1 個のセンシングカンチレバに同一の SOI 層を共有する 2 個の薄膜熱電対を搭載し、それらの温度差を計測する構成にして、ゼロ位法が適用でき、更にゼーベック電流増幅を用いて高真空域の測定が可能である。また、カンチレバによる加熱励振による強制冷却効果により大気圧近傍および大気圧以上の測定も可能であることが特徴である。

1.1.2 研究目的及び目標

（1）研究目的

現在、CVD 装置やスパッタリング装置などの半導体製造装置におけるロードロック室では、 5×10^{-4} Pa 程度の高真空から 1 気圧（ 1×10^5 Pa）程度の広帯域の気圧を計測するのに、高真空用の電離真空計や低真空用のサーモカップル真空計などの複数の気圧計を使用している。本研究ではこれらを 1 個の気圧計で計測可能な MEMS センサチップの開発を行う。さらに同チップを用い、

20 気圧程度までの高圧の純ガス気圧についても計測可能な、MEMS 広帯域真空・気圧計を開発する。

また、腐食性ガスを取り扱う半導体製造装置の反応室においては、腐食性ガスに対する耐性に優れる隔膜式絶対圧真空計が主として使用されているが、封止された標準圧室の気圧は、経時変化やゼロドリフトの問題が生じている。本研究では、MEMS センサチップを 1 mm 角程度の超小型サイズへと研究を進め、パッケージ化を図り、隔膜式真空計の標準圧室内部へ搭載することで標準圧室の常時モニタリングを可能とし、より信頼性の高い新型真空・気圧計の実現を図る。

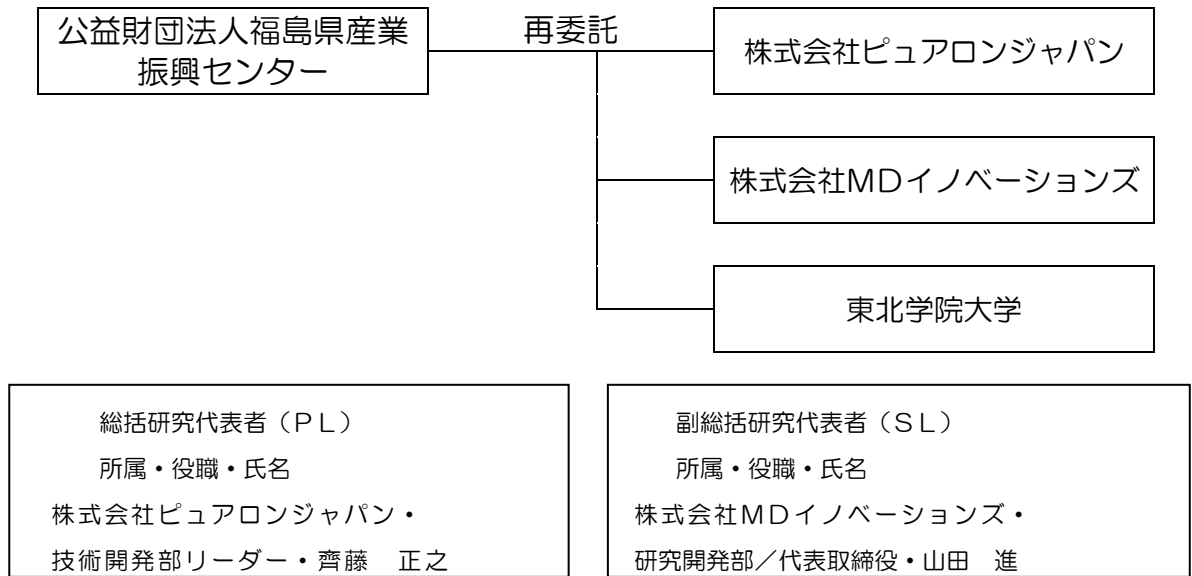
(2) 研究目標

- ① 高真空域でのゼロ位法による広帯域化の研究開発
 - ・高真空域でゼロ位法が適用可能な小型 MEMS センサチップを開発する。
チップサイズは 3mm 角程度とし、 10^{-3} Pa 台の気圧測定を可能とする。
 - ・高真空域での微小信号の S/N 比向上を図るため、ゼーベック積分回路を含む増幅回路を試作し、その有効性を確認する。
- ② 低真空域（1 気圧付近）での強制冷却による広帯域化の研究開発
 - ・低真空域の感度向上に有効なセンシングカンチレバの振動幅を大きくするための設計と測定条件の最適化により大気圧近傍から 20 気圧までの測定を可能とする。
 - ・微小信号の S/N 比向上を図るため、ピークホールド回路・ゼーベック積分回路を含む増幅回路を試作し、その有効性を確認する。
- ③ MEMS 広帯域真空・気圧計のモジュール化の研究開発
 - ・製品化をイメージした小型のモジュールを開発する。測定帯域は 10^{-3} Pa 台から 2×10^6 （20 気圧）までの連続測定を可能とする。
- ④ 超小型 MEMS 気圧センサの研究開発
 - ・狭い空間に実装可能な MEMS 気圧センサチップの開発と製品化に向けたパッケージの開発を行う。
 - ・気圧帯域 1torr(0.133kPa), 10torr(1.33kPa) 760torr(100kPa) での出力値が長時間安定であることを確認する。
- ⑤ 周囲環境補正の研究開発
 - ・環境補正ポート付の MEMS センサチップを開発し、ガス種の違いによる出力値補正が可能か検証する。
 - ・周囲環境温度変化による出力値のドリフトを補正するためセンサ基板に pn 接合ダイオードを形成し、その出力値を用いた周囲温度補正方法を確立する。

1.2 研究体制

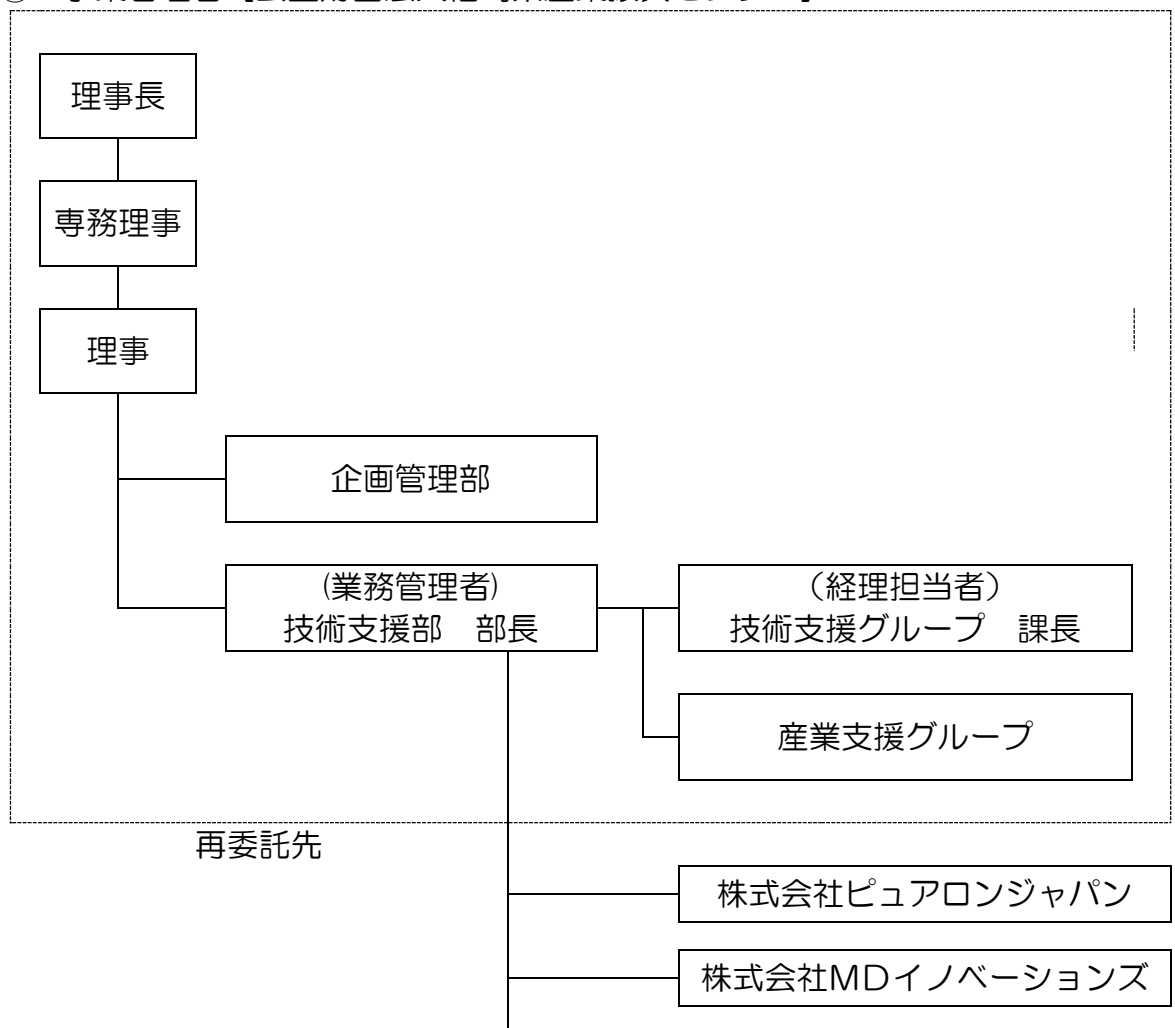
(1) 研究組織及び管理体制

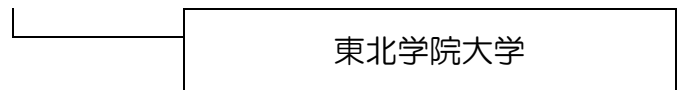
1) 研究組織（全体）



2) 管理体制

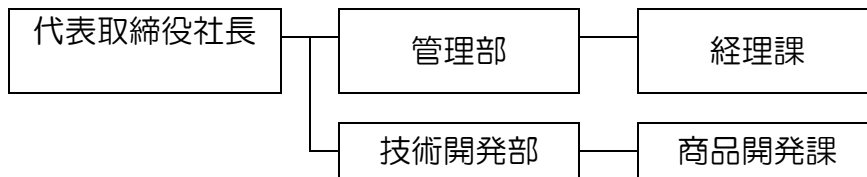
① 事業管理者〔公益財団法人福島県産業振興センター〕



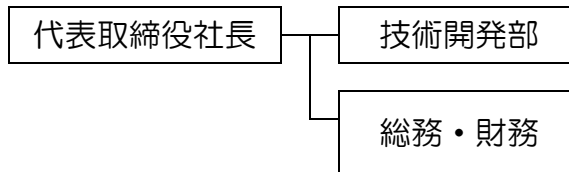


② 再委託先

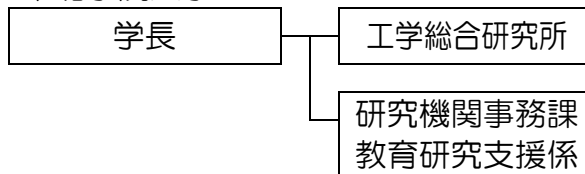
株式会社ピュアロンジャパン



株式会社MDイノベーションズ



東北学院大学



(2) 研究員及び管理員（役職・実施内容別担当）

【事業管理者】公益財団法人福島県産業振興センター技術支援部

①管理員

氏名	所属・役職
山崎 智史	技術支援部技術振興課 課長

【再委託先（研究員）】

株式会社ピュアロンジャパン

氏名	所属・役職
齊藤 正之	技術開発部 リーダー
久保木 秀人	技術開発部 商品開発課 リーダー
田口 廣治	技術開発部 商品開発課 リーダー
阿部 康弘	技術開発部 研究員
吉尾 進吾	技術開発部 研究員

株式会社MDイノベーションズ

氏名	役職・所属
山田 進	代表取締役

東北学院大学

氏名	役職・所属
木村 光照	工学総合研究所 客員教授

(3) 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

【事業管理者】

公益財団法人福島県産業振興センター技術支援部

(経理担当者) 技術支援部 技術支援グループ 課長 鹿目 敦夫

(業務管理者) 技術支援部 部長 藤井 正沸

【再委託先】

株式会社ピュアロンジャパン

(経理担当者) 管理部 リーダー 鯨岡 寿仁

(業務管理者) 代表取締役社長 中島 秀敏

株式会社 MD イノベーションズ

(経理担当者) 総務・財務 田中 幸長

(業務管理者) 代表取締役社長 山田 進

東北学院大学

(経理担当者) 研究機関事務課 教育研究支援係長 原 義博

(業務管理者) 工学部 学部長 伊達 秀文

(4) 他からの指導・協力者名及び指導・協力事項

研究推進会議 委員

氏名	所属・役職	備考
齊藤 正之	(株)ピュアロンジャパン 技術開発部リーダー	PL ☐
山田 進	株式会社 MD イノベーションズ 代表取締役社長	SL ☐
中島 秀敏	株式会社ピュアロンジャパン 代表取締役社長	
久保木秀人	株式会社ピュアロンジャパン 商品開発課リーダー	☐
阿部 康弘	株式会社 MD イノベーションズ 開発部部長	☐
木村 光照	私立大学法人東北学院大学 工学総合研究所 客員教授	☐
高宮 祐二	大亜真空株式会社 計測器部 部長代理	アドバイザー
松山 岳之	大同エアプロダクツエレクトロニクス株式会社 代表取締役社長	アドバイザー
佐藤 忠行	私立大学法人東北学院大学 産学連携推進センター	アドバイザー
湯浅 珠樹	東京エレクトロン株式会社 TEL テクノロジーセンター仙台 要素開発グループ	アドバイザー

アドバイザー 氏 名	主な指導・協力事項
高宮 祐二	隔壁真空計および真空装置の技術
松山 岳之	高圧装置、ガス種の管理技術
佐藤 忠行	産学連携アドバイス、研究開発アドバイス
湯浅 珠樹	半導体製造装置の技術

1.3 成果概要

本事業における成果の概要を以下に示す。

- ① 高真空域でのゼロ位法による広帯域化の研究開発においては、シミュレーション結果を踏まえて 4 種類の 2.5mm角センサチップを作成し、素子の形状・配置位置の最適化を図った。さらに高真空域の感度上げるためカンチレバサイズを大きくした 2.5×3mm 角センサチップを製作した。
また、ヒータ ON 時の出力波形を積分（ゼーベック積分回路）することによりセンサ出力の S/N 比の向上が図れ 10^{-3} Pa 台の感度が確認できた。
- ② 低真空域での強制冷却による広帯域化の研究開発においては、カンチレバおよび測定条件の最適化し、ヒータ OFF 時の出力波形をピークホールドもしくは積分する回路により S/N の向上が図れ、大気圧近傍から 20 気圧までの感度が確認できた。
- ③ MEMS 広帯域真空・気圧計のモジュール化の研究開発においては、小型センサチップサイズの有利性を活かすため専用ハーメチックシールを製作し、従来製品よりもさらに小型のモジュールを作成することができた。
測定帯域については大気圧近傍において、ピラニー真空計よりも高感度であること、大気圧以上の気圧も連続で測定可能であることが確認できた。しかし、電離真空計の測定領域である高真空域での測定はできなかった。これは、センサ出力としてヒータ OFF 時の出力波形を用いたことによるもので、上記①項のヒータ ON 時の出力波形と複合したモジュールの開発が課題として残った。
- ④ 超小型 MEMS 気圧センサーの研究開発においては、パッケージを試作し、特定気圧域での長時間安定性の確認ができた。しかしサイズの目標より大きくなってしまったため、更なる小型化と量産化に適した使いやすいパッケージ設計が課題として残った。
- ⑤ 周囲環境補正の研究開発では、センサチップ基板の温度を測定し、センサ出力値に補正することで、測定雰囲気温度変化によるセンサ出力値の変動をキャンセルできることが確認できた。
また、ガス種が異なっても正確な気圧測定が可能な方法を見出した。

1.4 当該プロジェクト連絡窓口

① 事業管理者

公益財団法人福島県産業振興センター 技術支援部

（最寄り駅：JR 東日本磐越西線喜久田駅）

〒963-0215 福島県郡山市待池台 1 丁目 12 番地

② 研究実施場所

株式会社ピュアロンジャパン （JR 東日本鉄道常磐線いわき駅）

〒970-1144 福島県いわき市内郷高坂町四方木田 1 4 5 番 1

株式会社MDイノベーションズ（最寄り駅：JR 東日本鉄道 総武線 市ヶ谷駅）

〒102-0074 東京都千代田区九段南四丁目 5 番地 1 1 号 富士ビル 2 階

学校法人東北学院大学工学部 （最寄り駅：R 東日本鉄道仙石線多賀城駅）

〒985-8537 宮城県多賀城市中央一丁目 1 3-1

Tel. 022-368-1337

第2章 本論

2.1 高真空域でのゼロ位法による広帯域化の研究開発

本センサは SOI 基板に形成されたカンチレバ上に2個の熱電対（温接点 A,B）を形成し、その出力差が高真空ではゼロになることを利用するものである(ゼロ位法)。センサチップの設計ではカンチレバ形状、温接点 A とヒータとの間隔、2個の熱電対の間隔、および熱電対間に形成するスリット（熱抵抗部）の最適化が重要となる。そのため熱解析シミュレーションをまず行い、その解析結果を踏まえてセンサチップの試作・開発を行った。

2.1.1 MEMS 真空・気圧センサチップの開発

（1）熱解析ソフト（Phoenix）による MEMS 広帯域気圧センサの熱解析

SOI 基板を用いた MEMS 広帯域気圧センサを単純な構造にモデル化して、熱解析ソフト（Phoenix）の熱解析を実行した。

一例として図 2.1.1 に、その解析のための構造モデルを、図 2.1.2 にはその高真空域での薄膜ヒータに、電力密度 $4.4 \times 10^7 \text{ W/mm}^2$ の場合の実施例で、SOI カンチレバを加熱した時の温度分布を示している。

ここでは示さないが、この他、高真空側の気圧と 1 気圧付近での気圧におけるセンシングカンチレバ（SOI カンチレバ）の温度分布のシミュレーションを行い、実際に試作した気圧センサでの温度分布の傾向と一致することも確認した。

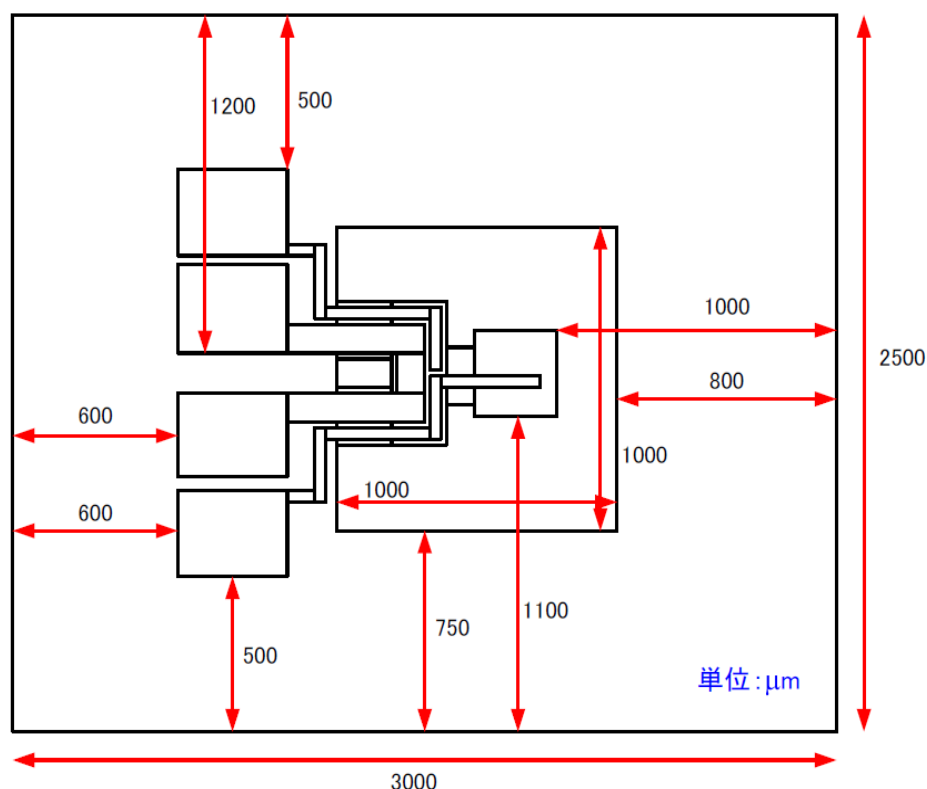


図 2.1.1 MEMS 広帯域気圧センサの熱解析用構造モデル

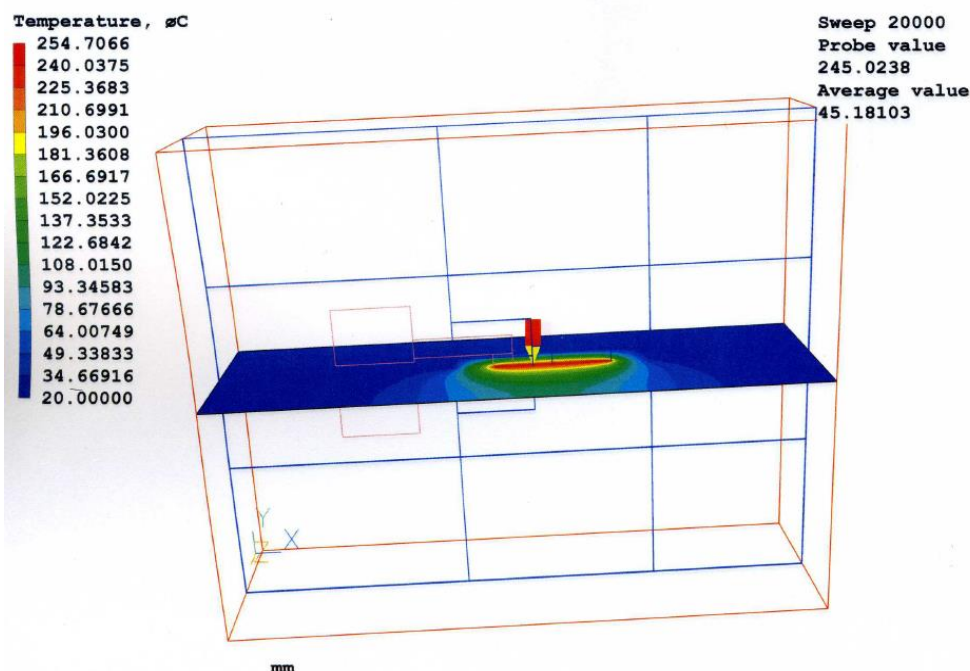


図 2.1.2 MEMS 広帯域気圧センサの熱解析例（高真空域）

（２）新型気圧センサの設計・試作

SOI 基板を用いたセンシングカンチレバの形状と薄膜熱電対の材料と熱特性、特に、ゼロ位法が適用可能とした熱電対の熱抵抗部を挟んだ温接点 A と温接点 B の間隔と、カンチレバ形状が異なる４種類（形状①－④）の 2.5mm 角のセンサチップの設計と試作および評価を行った。

図 2.1.3 には、熱的シミュレーションでも予想された最も良好なセンシングカンチレバの寸法のセンサチップ④形状の写真を示す。

図 2.1.4 には、上記④の形状の熱電対の温接点 A と B との差の出力 $P1AB$ と気圧 P との特性を示す。

周囲環境温度補正をしていないが、 10^{-3} Pa 域の気圧も計測できていることが確認できた。



図 2.1.3 ④形状のセンサ

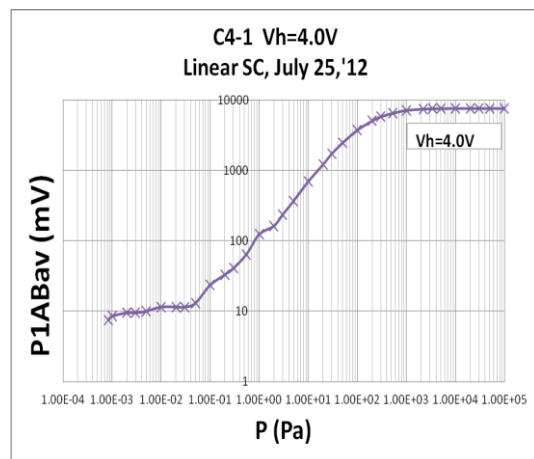
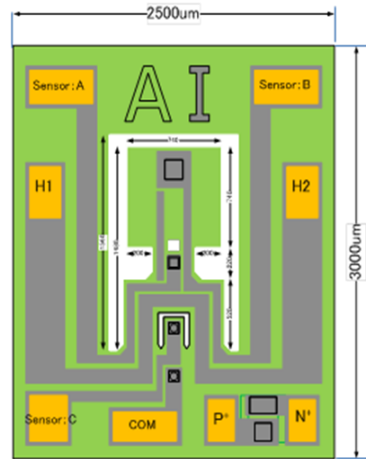


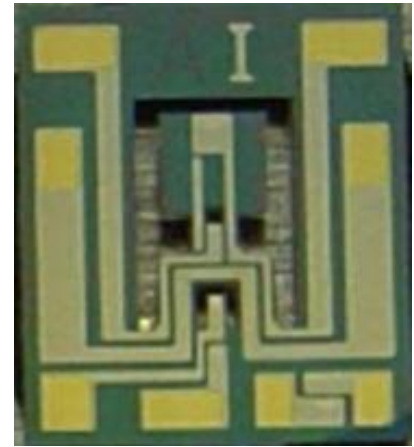
図 2.1.4 ④形状の気圧センサチップの $P1AB-P$ 特性

(3) ④の改良型気圧センサ（A型）の設計・試作

高真空域での乏しくなった気体分子との衝突確率の増大と低真空での振動振幅の増大を目指し、上述の④形状のMEMS気圧センサチップの形状のうち、センシングカンチレバの長さの増加と先端部薄膜（温接点Bが存在するB領域の薄膜）のサイズの増大を図るために、図 2.1.5 に示すように、設計・試作し評価した。これらの新パターンでは、基板温度を計測するためのpn接合ダイオードをセンシングカンチレバに形成してある3つの薄膜熱電対（温接点A、温接点B、温接点C）の共通冷接点（端子は、COM）の近くに形成してある。



(a) A型センサのパターン



(b) A型センサの写真

図 2.1.5 ④形状の改良型MEMS気圧センサのA型形状

2.1.2 ゼロ位法に基づく微小信号の高S/N比の増幅回路の開発

(1) 高真空域における温接点Bが温接点Aより温度が高く見える温度逆転現象

高真空域での周囲ガスの密度が極端に小さくなることにより、顔を出した事項として、高真空域では、温接点Aよりセンシングカンチレバの先端部にあり、ヒータからより離れているにも拘わらず温接点Bの温度が温接点Aの温度よりも高くなって出力されてしまうという、温度逆転という実験事実が観測された。

<対策と結果>

薄膜熱電対の内部抵抗を無視した回路構成であったためであることが判明し、各薄膜熱電対の出力にバッファ回路を挿入して、インピーダンス変換をすることで解決した。

(2) 高真空域における放射冷却効果の考慮

高真空域である 10^{-3} Paの真空域では、当初無視していたヒータ加熱による放射冷却によるメインのセンシングカンチレバ上の温接点Aと温接点Bとに温度差が生じてしまい、そのままではゼロ位法が使用できないことが判明した。

<対策と結果>

この効果は、高真空域でセンシングカンチレバの形状が定まり、ヒータの形状や加熱パワーが定まれば、ヒータの加熱温度が定まるので、ステファン・ボルツマン則に従い、一定値になることが理論的に明らかで、また、基板から独立に形成してある環境補正ポートの温接点Cの温度計測からも実証されているので、その分を差し引くことにより、予定していたゼロ位法が適用できることが判明した。

2.1.3 ゼーベック電流積分による温度差検出の高感度化の確立

高真空域でのセンシングカンチレバ上にある温接点 A と温接点 B との温度差出力 P1AB を、これまで、ヒータの加熱・冷却サイクルの中の加熱サイクルの終点（ヒータ加熱の停止直前）での一点のデータをピークホールド回路で計測していた。しかしながら、この一点だけでは、この時点でノイズが入ると出力に大きな変動をきたし、不安定な出力となることが判明した。そこで、加熱サイクルの終点だけでなく、加熱サイクルの終点に近くなったある所定の時間幅で出力の時間積分をすることにより、平均化してさらに積分による出力アップを狙い、温接点 A と温接点 B との温度差出力 P1AB を時間積分（熱起電力によるゼーベック電流を時間積分するので、ゼーベック積分と呼ぶことにする）することにした。

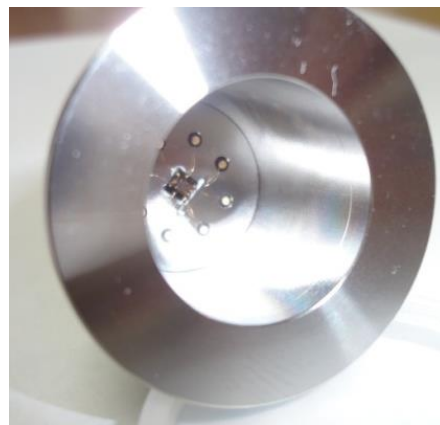


図 2.1.6 気圧センサをマウントした金属ハーメチック端子

また、これらの MEMS 気圧センサチップの測定は、図 2.1.6 に示す熱容量を大きくした金属のハーメチック端子に取り付けて行った。

このゼーベック積分回路を利用して、④の改良試作した MEMS 気圧センサ(A 型)の高真空域での気圧のセンシング特性を図 2.1.7 に示す。

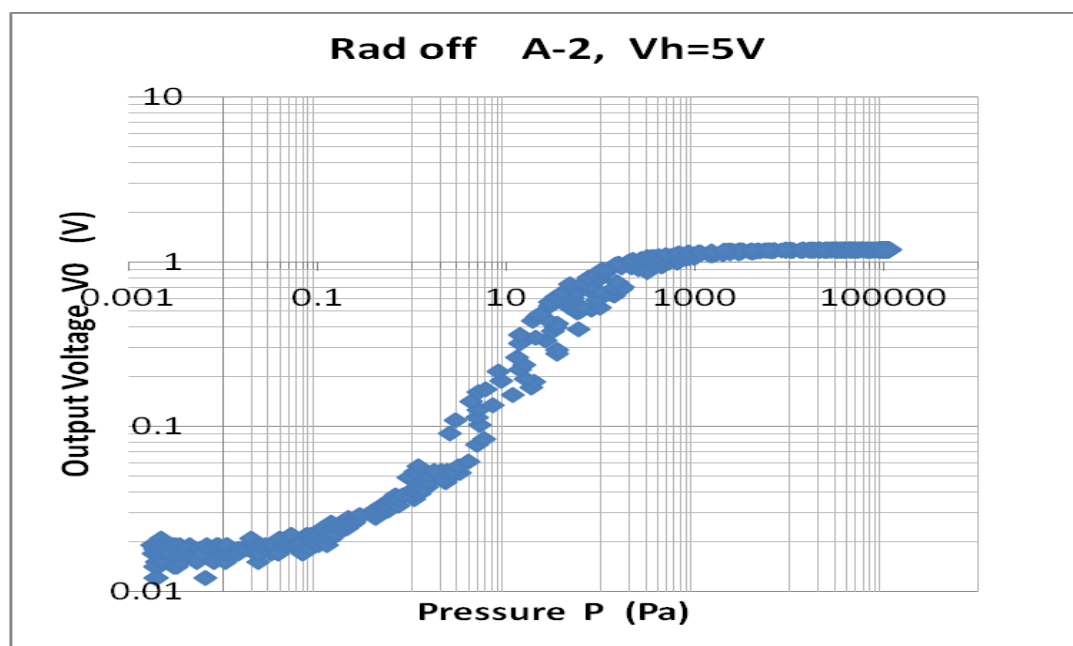


図 2.1.7 改良型MEMS気圧センサ（A 型形状）の高真空域の特性

これらの結果から、 1×10^{-3} Pa 付近まで、計測可能域が延びている特性が確認できた。特性上のプロット点のバラツキが大きいのが、これは、基準としている広帯域真空計のバラツキに基づくものであることが、実験事実として確かめられている。

2.2 低真空域（1 気圧付近）での強制冷却による広帯域化の研究開発

低真空域（0.1–1 気圧付近の真空域）と 1 気圧以上の気圧では、従来のピラニ真空計は、単なるフィラメントの熱放散だけに頼っているために、本質的に計測が困難な領域である。これに対し、本開発中の MEMS 気圧センサは、この気圧領域では、センシングカンチレバが、SOI 層（単結晶 Si 薄膜）とその下に密着形成されている SiO₂ 薄膜（石英薄膜）との熱膨張係数の異なる二重層構造（バイメタル構造）になっていることを利用し、ヒータ加熱による熱膨張に基づくバイモルフ振動でのセンシングカンチレバの強制冷却効果を利用しているために、高感度に計測できることを利用したものである。そして、1 気圧以上でも 20 気圧程度までは、計測できると想定して、これを実証するものである。

まずは、センシングカンチレバの熱的シミュレーションとこれに伴う構造的な変形を求める構造シミュレーションを実施し、その基本振動や振動姿態を調べた。

また、センシングカンチレバの加熱時間と冷却時間の最適条件を実験的に調べ、更に、その条件下での低真空域および 1 気圧以上の気圧域の感度特性を実験的に調べ、20 気圧までは感度があることが実証された。

2.2.1 強制振動用加熱パワーと感度との関連の評価

（1）熱解析・構造解析ソフトによるシミュレーション

<熱解析ソフト（Phoenix）による MEMS 気圧センサの熱解析>

まず、上述の図 2.1.6 に示した A 型 MEMS 気圧センサを解析用にモデル化した。このモデル化した寸法等を図 2.2.1 に示す。ここでは、2 層構造（10 μ m 厚の SOI 層と 1 μ m 厚の SiO₂ 層）としている

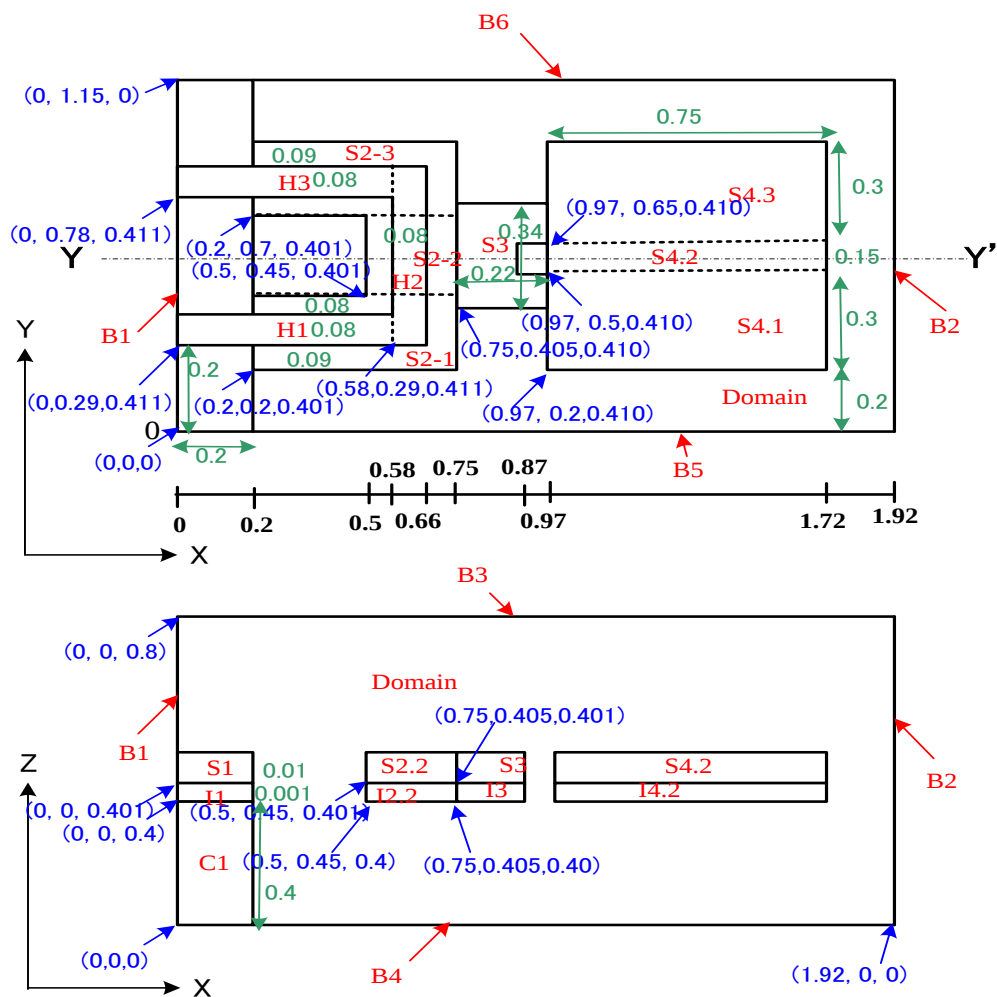


図 2.2.1 A 型 MEMS 気圧センサのシミュレーション用モデル化(ドメイン)

また、これを熱解析ソフト（Phoenics）によりシミュレーションした結果の一例を図 2.2.2 に示す。

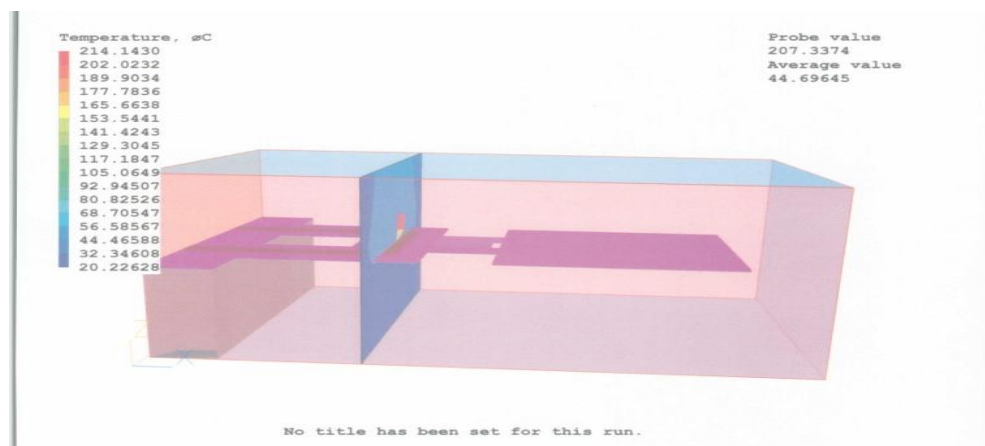


図 2.2.2 A 型 MEMS 気圧センサの熱解析シミュレーションの一例

さらに、このカンチレバの支持部をゼロ基準とした長さ X 方向の温度分布を、2 つのヒータ加熱電力において示した。解析条件として、1 気圧で室温が 20℃での輻射（放射）、対流、重力効果を考慮しており、その結果を図 2.2.3 に示す。

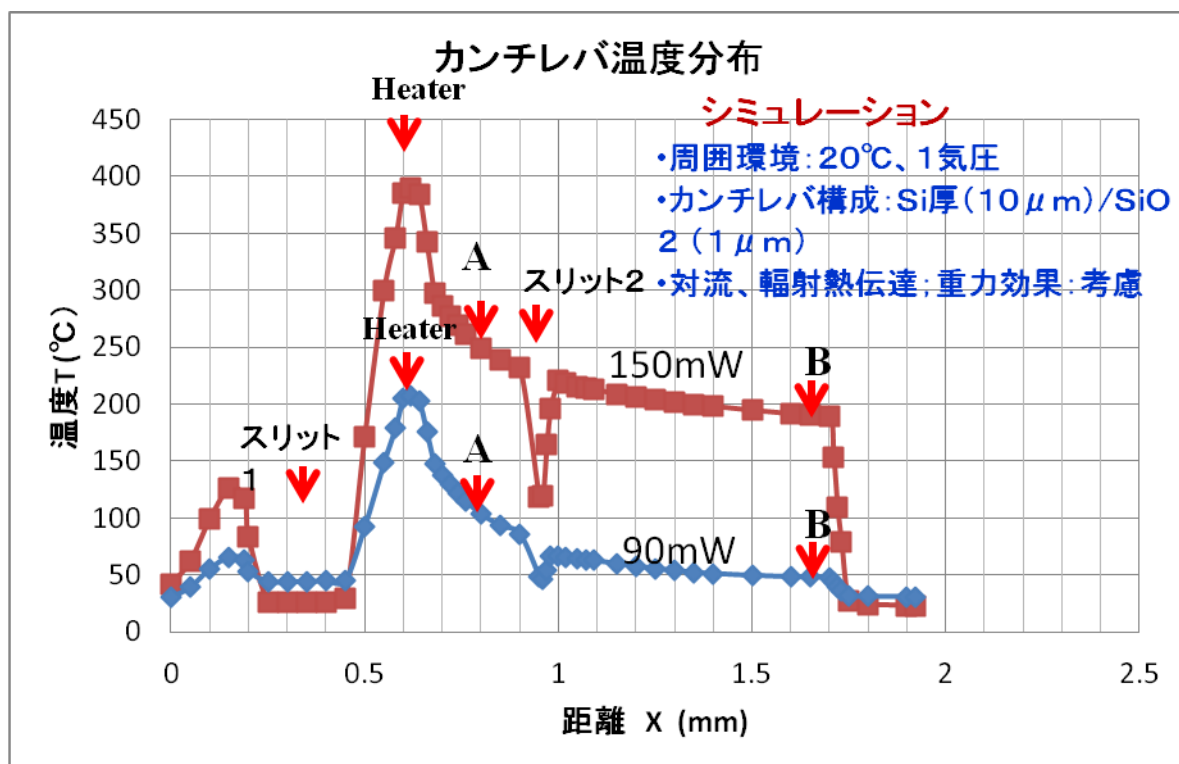


図 2.2.3 A 型 MEMS 気圧センサの熱解析シミュレーションによるセンシングカンチレバの温度分布の例

<結果>

この図 2.2.3 に示すように、ヒータの位置では非常に温度が高く、その他のセンシングカンチレバ領域では、緩やかな温度分布となっており、またスリットの位置では、急に温度が下がっていることが分かる。ただ、スリットの位置で、加熱電力が大きい方が低い温度になっているが、これは、空気の対流の効果と考えられる。

これら熱解析シミュレーション結果を利用して、カンチレバ上の温度接点 A と B との位置関係、ヒータ位置と A 点の位置との間隔の決定をした。

<構造解析ソフト (FEMAP) による構造解析>

構造解析ソフトにおいては、熱膨張によるバイモルフ振動を問題にするので、より厚み方向の精度を持つ構造解析が必要である。このために、実情を考慮し、SOI 層の上に、更に、0.3 μm 厚の SiO₂ 膜がある状態の 3 重層構造にして解析した。その時のカンチレバ形状を図 2.2.4 に示すようにモデル化して解析した。

その結果、基本振動周波数 f が、 $f=6479\text{Hz}$ の振動周波数となり、この他に、各種の振動モードであるカンチレバ先端部のねじれ振動や熱抵抗部となるスリット 2 を支点とする屈曲振動など、多くの振動モードが観測された（ここでは、省略する）。

ここでは、基本波となる $f=6479\text{Hz}$ の振動モード（基本モード）についての解

析結果のみを以下に示す。

図 2.2.4 は、A 型 MEMS 気圧センサの構造解析シミュレーション用のモデル化した 3 重層 ($\text{SiO}_2(0.3\mu\text{m})/\text{Si}(10\mu\text{m})/\text{SiO}_2(1\mu\text{m})$) の場合である。また、図 2.2.5 は、解析している基本モード振動の振幅の色別表示であり、図 2.2.6 は、基本モードの上方最大振幅時の例であり、図 2.2.7 は、基本モードの下方最大振幅時の例で、実際には、先端部で数マイクロメートルの振動振幅であるが、強調して表現している。

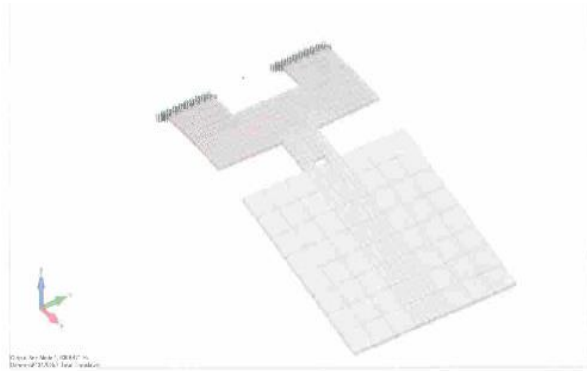


図 2.2.4 A 型 MEMS 気圧センサの構造解析シミュレーション用のモデル化

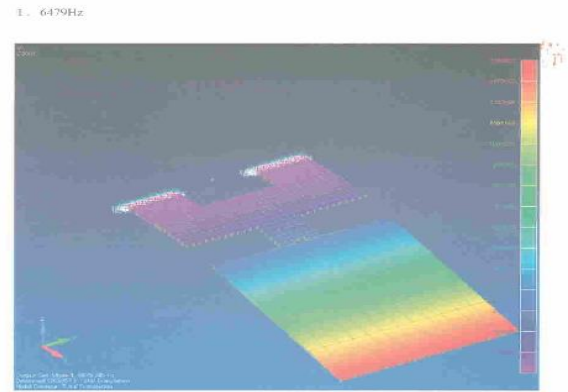


図 2.2.5 A 型 MEMS 気圧センサ基本モード

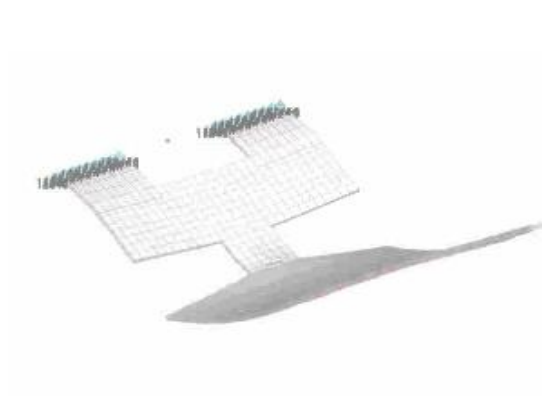


図 2.2.6 基本モードの上方最大振幅時（強調）

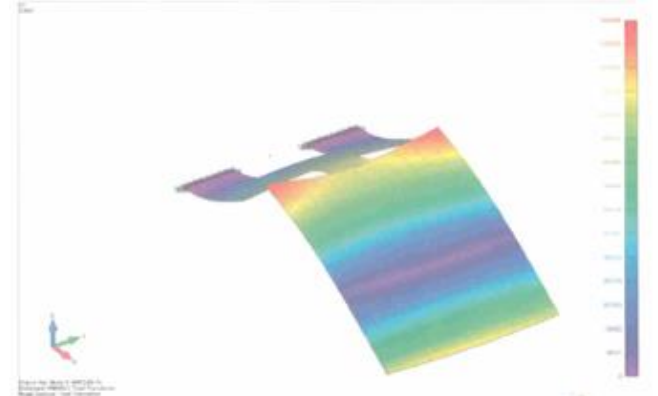


図 2.2.7 基本モードの下方最大振幅時（強調）

＜結果＞

構造解析シミュレーション結果を利用して、センシングカンチレバの最適設計までにはゆかなかったが、構造解析シミュレーション結果を利用して、カンチレバの基本屈曲モードの周波数と先端部の振幅との関係を明らかにし、カンチレバの寸法の決定に役立てた。

(2) ④試料 (図 2.1.1 参照) による 1 気圧以上高気圧までのテスト

センサ基板の温度上昇を防ぐために熱容量が大きく、熱伝導率が高い金属性のハーメチック端子にマウントした④試料を用いて、低真空域から 15 気圧までの空気（真空域）と窒素ガス（1 気圧以上）中の気圧に対する MEMS 気圧センサのテストを実施した。

計測は、ヒータ加熱停止後に行われ、ヒータ停止後は、センシングカンチレバが金属

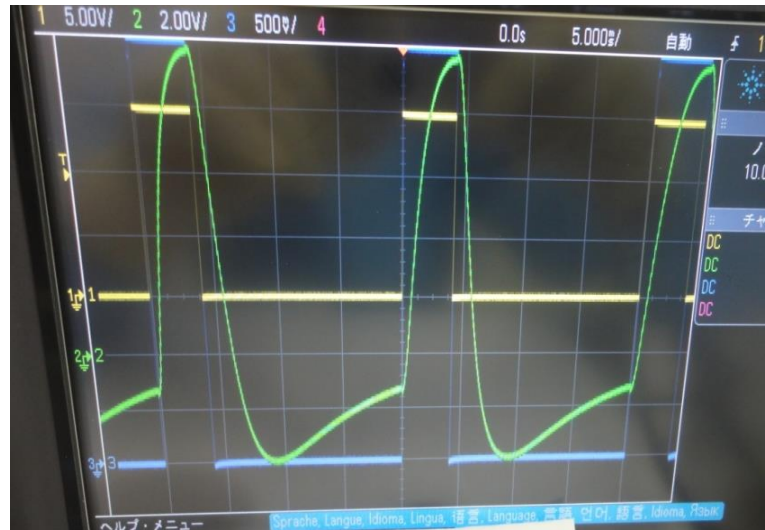


図 2.2.8 加熱・冷却時の印加電圧波形

並みの熱伝導率を有する Si を通して、基板側に熱伝導によって失われる熱が多いので、温接点 A が温接点 B よりも先に冷えるようになり、温接点 A の温度から温接点 B の温度を差し引く出力にすると、出力は負の電圧になり、負のピークを経由したのち、温度差がゼロに近づくので出力もゼロに近づくようになる。

この場合も、S/N を大きくするために、ヒータ停止後の出力電圧の時間的積分を行い、P2AB として取り出すようにしている。

その結果として、ヒータ印加電圧波形を図 2.2.8 に、低真空域から 15 気圧までの P2AB 出力特性を図 2.2.9 に示す。

<結果>

ここでは、ピラニ真空計では得られない 0.1 気圧以上 15 気圧までスムーズな気圧に対する出力感度が充分あることが確認された。また、モジュール化した MEMS 気圧センサでは、20 気圧まで感度があることを確認した。また、このような駆動方式での P2AB 出力は、加熱時の計測である P1AB 出力に近い高真空域 (10^{-2}

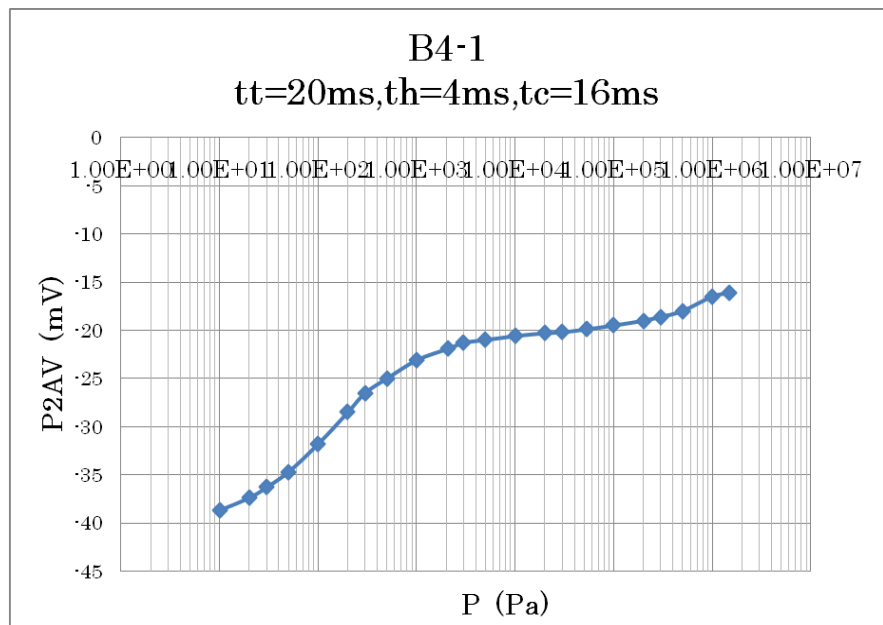


図 2.2.9 ④試料の加熱時間 4 ms、冷却時間 16 ms 時駆動による高圧までの特性

Pa 程度)まで計測できることも確認した。

2.2.2 ゼーバック電流積分回路を含む増幅回路と出力回路の開発

MEMS 気圧センサの低真空域から 1 気圧以上までの気圧計測において、ヒータの加熱と冷却に伴う熱膨張でのバイモルフ振動を利用して強制対流によるセンシングカンチレバの強制冷却を行う回路を製作し、更に、上述のように、S/N を大きくするために、ヒータ停止後の出力電圧の時間的積分を行い、増幅率も大きくさせて P2AB として取り出すようにした。

(1) ヒータの加熱・冷却サイクルの最適条件

A 型センサ(図 2.1.5 参照)を用いて、ヒータ加熱時間 t_h と冷却時間 t_c とを変化させた時の低真空域以上の気圧域での高感度化条件を実験的に探した。

まず、冷却時間 $t_c = 20\text{ms}$ 一定とし、ヒータ電圧 $V_h = 5.0\text{V}$ 一定でヒータ加熱時間 t_h を種々変えた時の 1 気圧付近で最も高感度な P2AB の大きな出力変化が得られる条件を求めた。

また、その最も高感度になる条件下で、 $2 \times 10^2\text{Pa}$ の真空から 5 気圧 ($5 \times 10^5\text{Pa}$) までの P2AB の出力特性を実験的に調べた。

<結果>

図 2.2.10 に、上述の条件下で計測した P2AB の出力変化分の特性を示す。この特性から分かるように、 $1 \times 10^4\text{Pa}$ から $2 \times 10^5\text{Pa}$ までの間の変化分 (ΔV_{13}) でも、また、 $1 \times 10^4\text{Pa}$ から $1 \times 10^5\text{Pa}$ までの間の変化分 (ΔV_{23}) でも、同様に加熱時間 t_h が、ほぼ 15ms 当たりでピークを有する、すなわち、最も高感度となることを確認した。

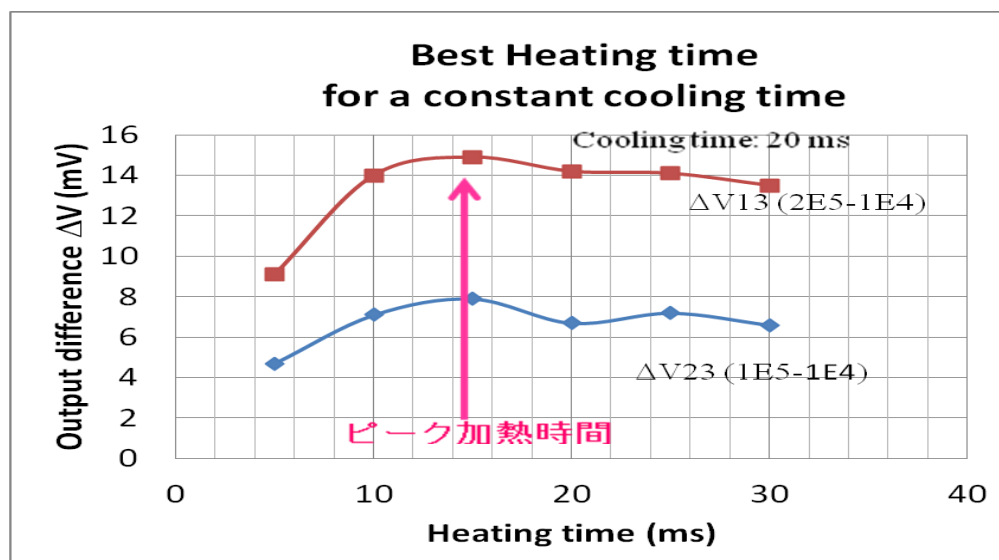


図 2.2.10 A 型 MEMS 気圧センサの P2AB の出力変化分の特性

(2) 最適加熱サイクルにおける新 MEMS 気圧センサの出力特性

この $T_h=15\text{ms}$ 、 $T_c=20\text{ms}$ のヒータ駆動時間で、 $V_h=5.0\text{ V}$ での P2AB の出力特性を図 2.2.11 に示す。大気圧近傍および大気圧以上での感度が確認できた。

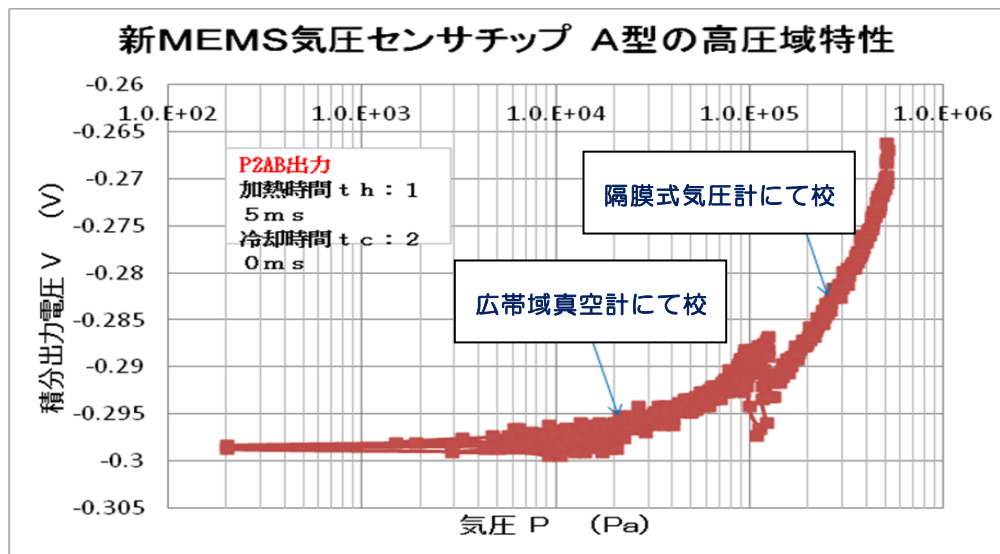


図 2.2.11 A 型 MEMS 気圧センサでの最適加熱サイクルでの P2AB 出力特性

2.3 MEMS 広帯域真空・気圧計のモジュール化の研究開発

2.3.1 MEMS 広帯域真空・気圧センサモジュールの開発

(1) センサモジュールおよび外部アンプの仕様

広帯域気圧センサの標準的な製品モデルとして、MEMS センサチップおよび必要最小限のアナログ回路基板(センサ基板)を搭載したセンサモジュールと、センサモジュールのコントロールおよび信号処理・気圧表示を行う外部アンプの構成で開発を行った。また、目標とする測定帯域は 10^{-2}Pa 台 $\sim 1\times 10^6\text{Pa}$ (10 気圧)とした。

センサチップは 2.1.1 項に記載した A 型(2.5×3mm)を使用した。気圧表示はセンサモジュールから出力される AB 波形電圧を、外部アンプに実装したピークホールド回路で測定した値を電圧-気圧変換テーブルを用いて行った。測定値はヒータ OFF 直後に発生するピーク値(P2 ピーク)を用いた。また、周囲温度変化による出力値のドリフトは、測温体(pn ダイオード)の電圧により外部アンプ内で補正換算した(補正方法については 5.2.5 項に記載)。概略の仕様を図 2.3.1 に示す。

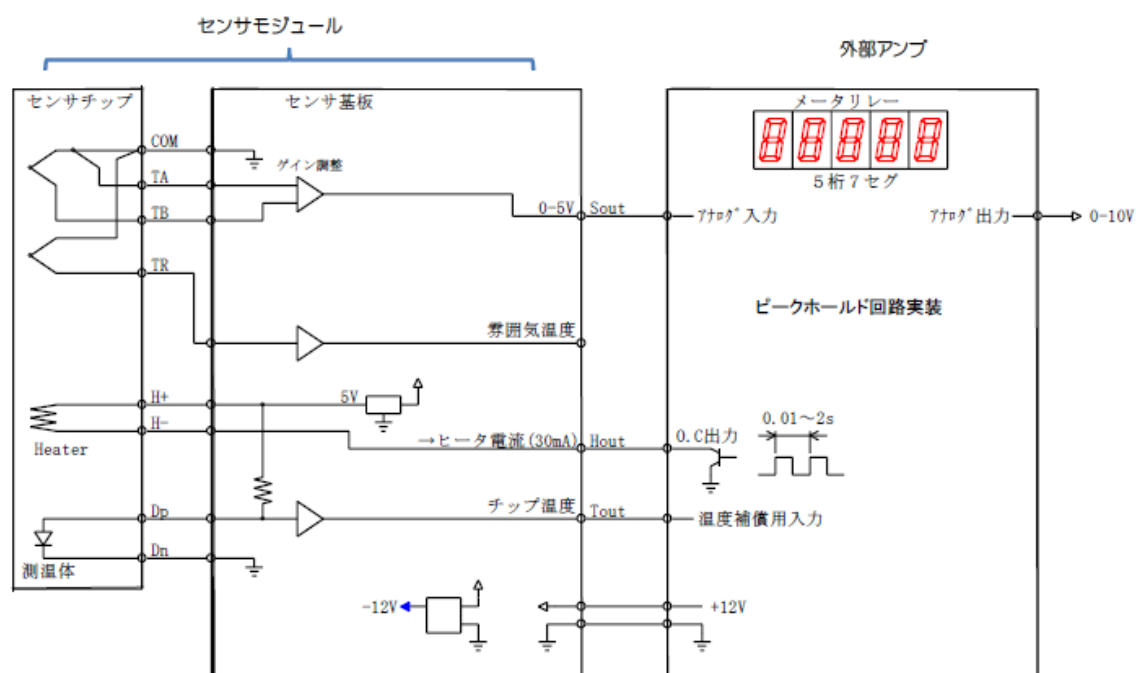


図 2.3.1 モジュール概略仕様

(2) センサモジュールの開発

モジュールは接続用のフランジと、これに溶接されたハーメチックシール、センサ基板、筐体で構成される。ハーメチックシールは4ピン2列平行配列のものを新規に設計し、モジュールの小型化を図った。またセンサチップはハーメチックに熱伝導性の良好な樹脂接着とし、各々の端子間を金ボールボンディングにより結線した。結果として図 2.3.2、図 2.3.3 に示すような小型モジュールの開発ができた。

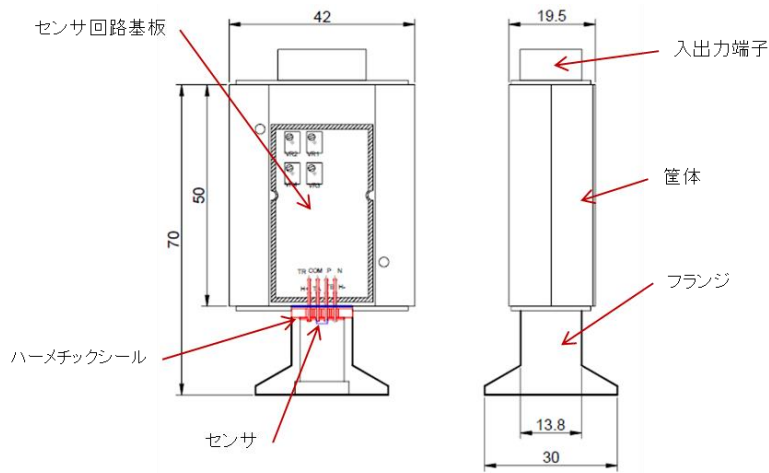


図 2.3.2 センサモジュール外形図



(a) センサモジュール外観



(b) ハーメチックシールとセンサ

図 2.3.3 センサモジュール写真

2.3.2 モジュールでの特性評価

開発したモジュールの評価結果を図 2.3.4 に示す(図の縦軸の値は開発したモジュールの出力値、横軸は基準とした真空計の出力値)。結果として周囲温度変化補正の有効性と大気圧近傍および大気圧以上で良好な出力特性が確認できた。しかし真空側は $5 \times 10^{-1} \text{Pa}$ までの出力特性にとどまった。

今回測定値と用いたヒータ OFF 時の出力である P2 ピーク値は大気圧近傍の感度が良い。また、高真空側はヒータ ON 時の P1 出力値の感度が良好であることがセンサチップ単体の評価で判明している。 10^{-2}Pa 台や最終目標である 10^{-3}Pa 台の良好な特性を得るためには、P1, P2 両方の出力値を気圧帯域によって使い分ける複合処理が可能なモジュールの開発が課題として残った。

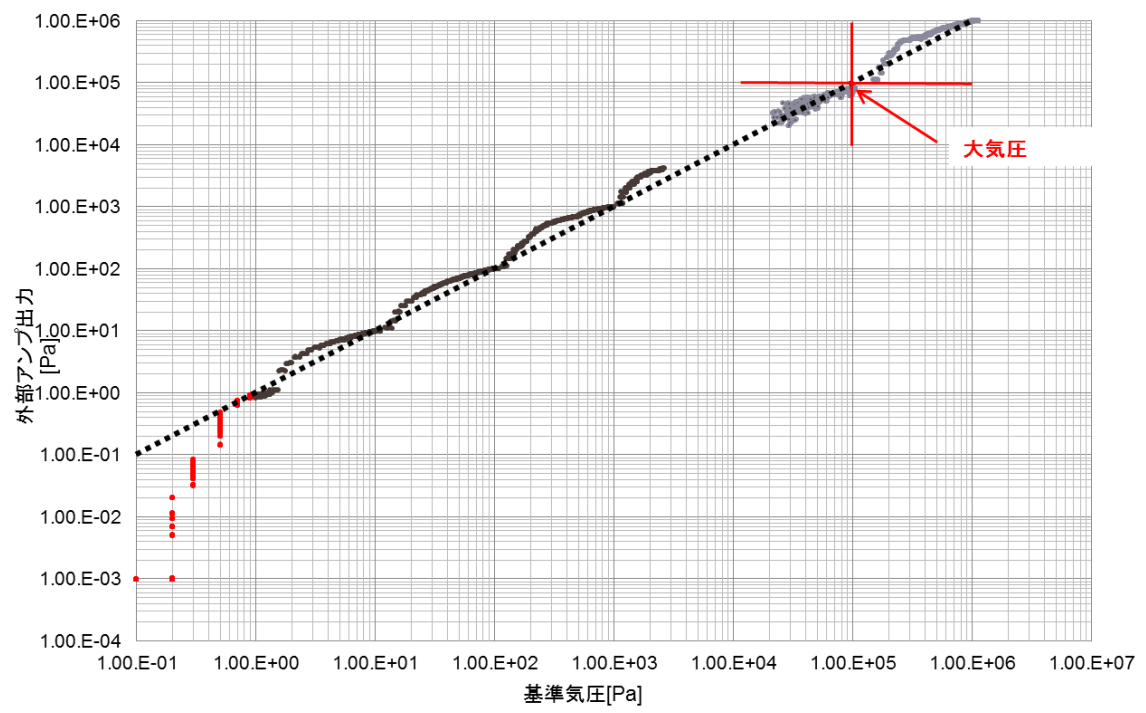


図 2.3.4 モジュール評価結果(基準気圧計との相関)

2.4 超小型気圧センサの研究開発

2.4.1 超小型気圧センサチップの開発

隔膜式絶対圧真空計の「基準圧室」の管理を、MEMS 気圧センサの更なる小型化にて行うことを主目的として、当初 1mm 角程度の超小型 MEMS 気圧センサを試作したが、pn 接合ダイオードの特性が不良で、確実に製作できる 2.5mm 角の超小型 MEMS 気圧センサに変更して実験を行った(図 2.4.1)。

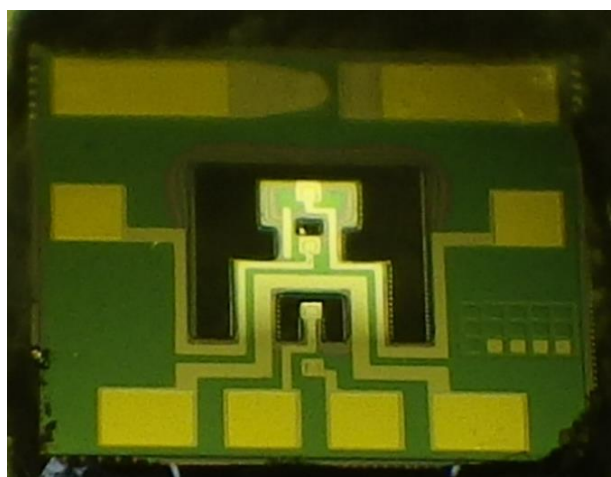


図 2.4.1 超小型 MEMS 気圧センサチップ
(2.5mm 角)

2.4.2 超小型気圧センサチップのパッケージの開発

超小型 MEMS 気圧センサチップは極めて小さいので、その取扱いが困難である。そのためには、真空計測に相応しい形状の保護カバーやリード線の取り出し方を含めたパッケージの設計に工夫が必要となる。

これらのことを考慮して設計した保護カバーを図 2.4.2 に、また、試作した Si 保護カバーを図 2.4.3 に示す。保護カバーの中央部付近にスリットを入れて、気体の流入がしやすくしてあり、電極も形成して有る。Si の(100)面を使用する異方性エッチング技術による製作を意図した設計である。

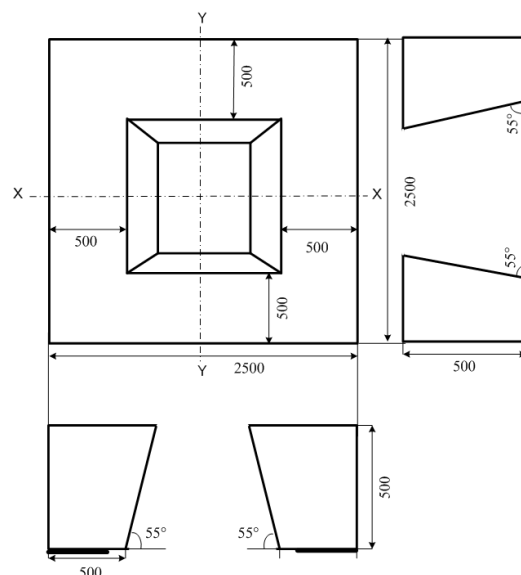


図 2.4.2 保護カバー

(1)当初予定していた超小型気圧センサパッケージ

リン青銅薄膜(50 μm 厚)から成るリードフレームをフォトリソグラフィにより製作した。そのリードフレームを、図 2.4.1 に示す超小型 MEMS 気圧センサチップに半田付けして取り付け、更に、図 2.4.3 に示す保護カバーをポリイミド系の接着剤で接合してした。この時の写真を図 2.4.4 に示す。リードフレームのリードは、その後に切断して、図 2.4.5 に示すように端子として使用できるようにした。

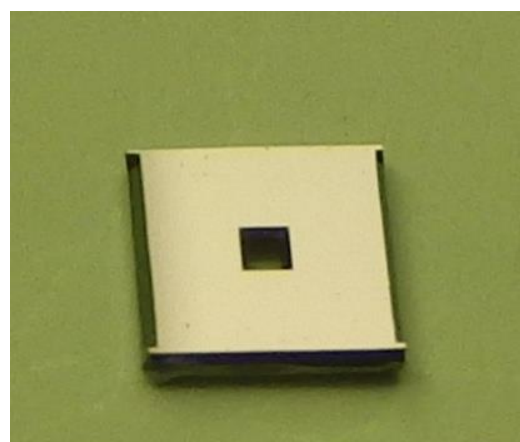


図 2.4.3 Si 基板による試作保護カバー

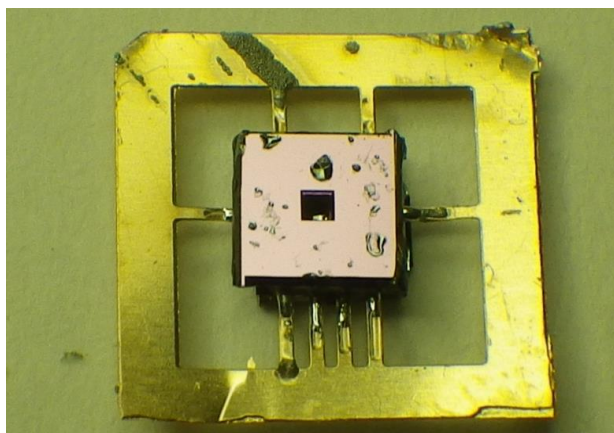


図 2.4.4 フレーム取り付け後の超小型 MEMS 気圧センサパッケージ

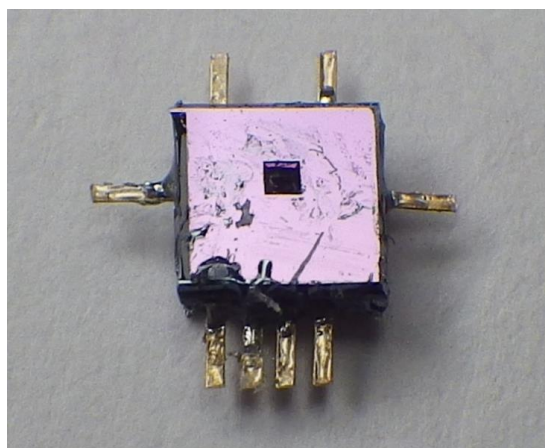


図 2.4.5 フレーム切断後の超小型 MEMS 気圧センサパッケージ

(2)実際に実験に使用した超小型気圧センサパッケージ

当初予定して、設計試作した図 2.4.5 の超小型 MEMS 気圧センサパッケージは、実際の隔膜真空計への取り付けが困難であったために、急遽、セラミック基板（京セラ製）に 2.5mm 角の超小型 MEMS 気圧センサチップをマウントし、更に、試作したプリント基板に取り付けて実験を行った。図 2.4.6 には、このセラミック基板の写真を、図 2.4.7 には、超小型 MEMS 気圧センサチップをセラミック基板にマウントして、更にプリント基板にマウントした超小型 MEMS 気圧センサのパッケージの写真を示す。

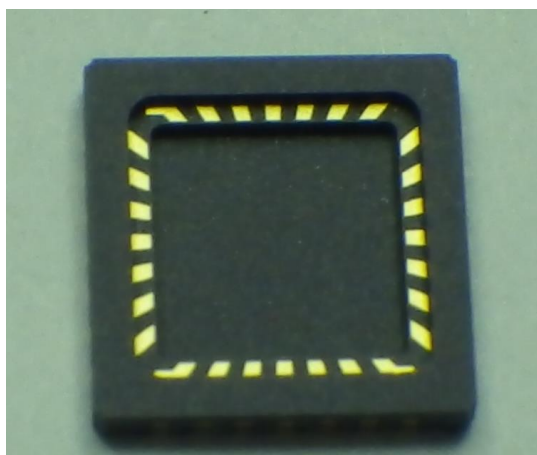


図 2.4.6 セラミックパッケージ

2.4.3 超小型気圧センサの隔膜真空計の標準圧室モデルでの特性評価

腐食性ガスを取り扱う半導体製造装置の反応室においては、腐食性ガスに対する耐性に優れる隔膜式絶対圧真空計が主として使用されているが、封止された標準圧室の気圧は、経時変化やゼロドリフトの問題が生じ、定期的な補正などが必要となる。このため MEMS センサチップを小型パッケージ化し、隔膜式真空計の標準圧室内部へと搭載することで標準圧室の常時モニタリングの可能性を評価するため、所定気圧での長期安定性の確認を行った。図 2.4.8 に評価に用いた隔膜真空計の擬似標準圧室チャンバ内に取り付けた超小型 MEMS 気圧センサの様子を示す。

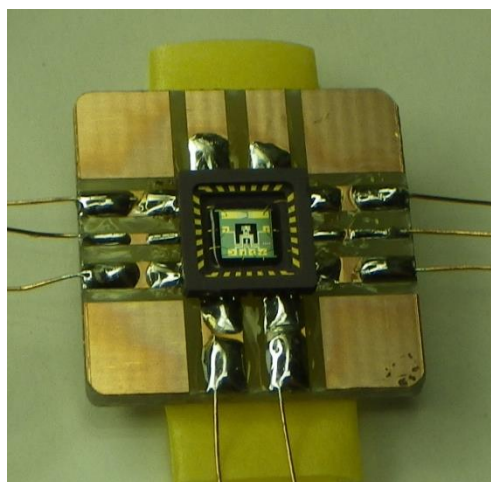


図 2.4.7 プリント基板にマウントした超小型 MEMS 気圧センサパッケージ

評価はこの2.5mm角の超小型 MEMS 気圧センサのパッケージを用い、気圧域 1Torr (0.133kPa)、10Torr (1.33kPa)、760Torr (100kPa)での出力値の長時間安定性を確認した。また、図 2.4.9 には、そのデータ取得測定系の全体の写真を示す。

標準の真空計には、ピラニ真空計を用いた。

また、測定条件は、ヒータ電圧 V_h (矩形波 : 3.5V) ; 加熱時間 : 100ms; 冷却時間 : 100ms (周期 : 200ms) ; 室温 T_r : 約 20 °C である。測定は、主に、12 分間の計測である。

センサ基板温度の計測は、センサ基板に製作してある p n 接合ダイオードを用いて行った。

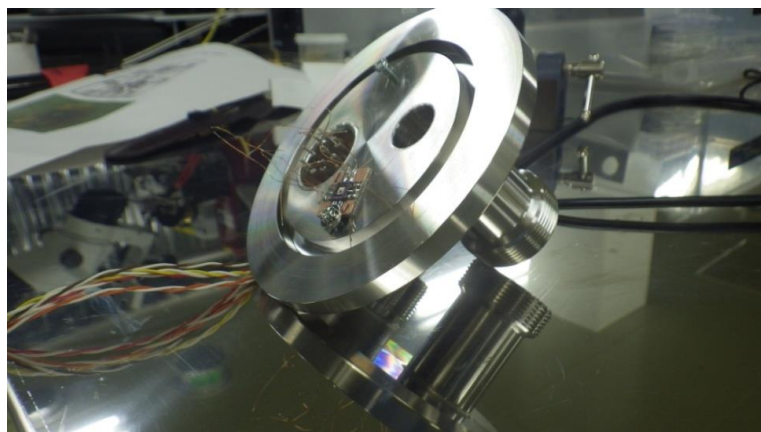


図 2.4.9

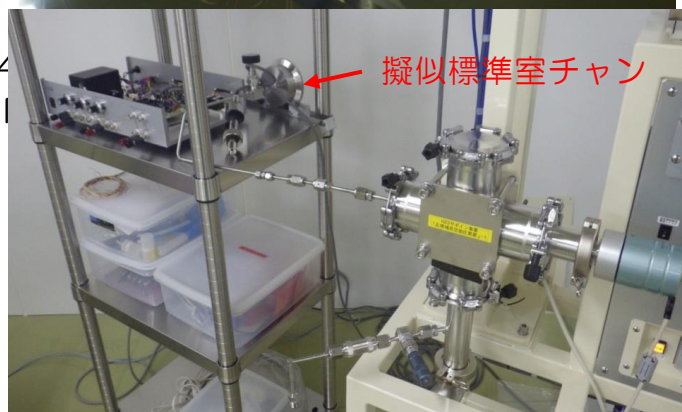


図 2.4.9 データ取得測定系全体写真

図 2.4.10 には、ヒータの加熱・冷却過程における (A-B) 温度差の波形及び計測点である P 1 (P1AB) と P 2 (P2AB) との関係を示し、図 2.4.11 には、超小型 MEMS 気圧センサのセンシングカンチレバ上の 2 つの熱電対の温接点 A 及び B の位置を示す。なお、P 1 (P1AB) とは、加熱サイクルの停止直前の出力の所定の短時間積分値であり、P 2 (P2AB) は、冷却直後からの出力の積分値である。

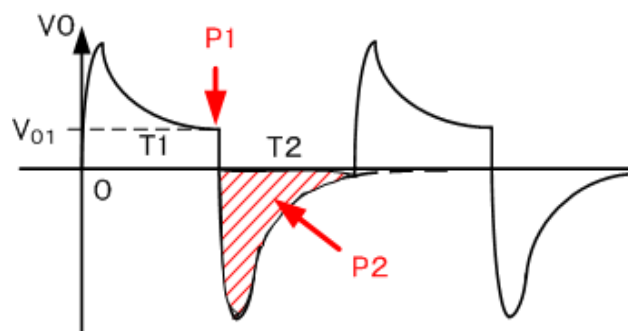


図 2.4.10 ヒータの加熱・冷却過程における (A-B) 温度差の波形及び、P 1 (P1AB) と P 2 (P2AB)

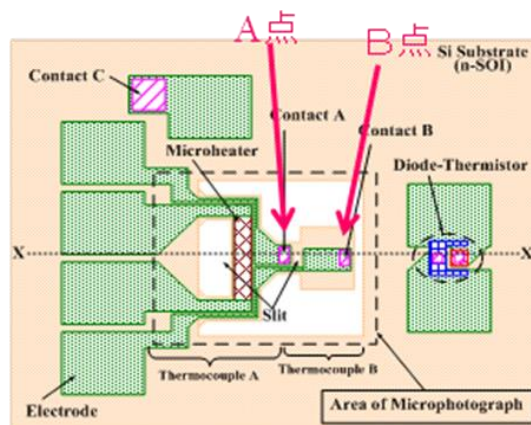


図 2.4.11 超小型 MEMS 気圧センサチップ

<結果>

図 2.4.12 には、760 Torr (100 kPa) での計測結果、図 2.4.13 には、10 Torr (1.33 kPa) での計測結果、そして。図 2.4.14 には、1 Torr (0.133 kPa) での計測結果を示す。

特性グラフの中で、青線は、標準となるピラニ真空計の出力、紫線は、P2AB の出力、赤線は、P1AB の出力、黒線は、基板温度に比例する特性で、pnダイオードの出力である。

なお、標準気圧となるピラニ真空計は、周囲温度補償がなされているが、他の特性は、生のデータで有り、pnダイオードの出力を利用して温度補償がなされるものである。

(1) P1AB の出力特性

ここでの実験結果は、熱伝導度の悪いプリント基板を用いているので、高感度である P1AB が時間的にドリフトしている。これは、例えば、図 2.4.15 に示すように、16 時間にわたる金属ハーメチックにマウントした小型 MEMS 気圧センサの P1AB の 760 Torr (100kPa) での計測結果（16 時間の計測）のように、熱伝導度が大きく熱容量の大きな金属ハーメチックにマウントした場合は、極めて安定な特性になっていることから頷ける。しかし、この時の特性では、pn接合ダイオードが不良

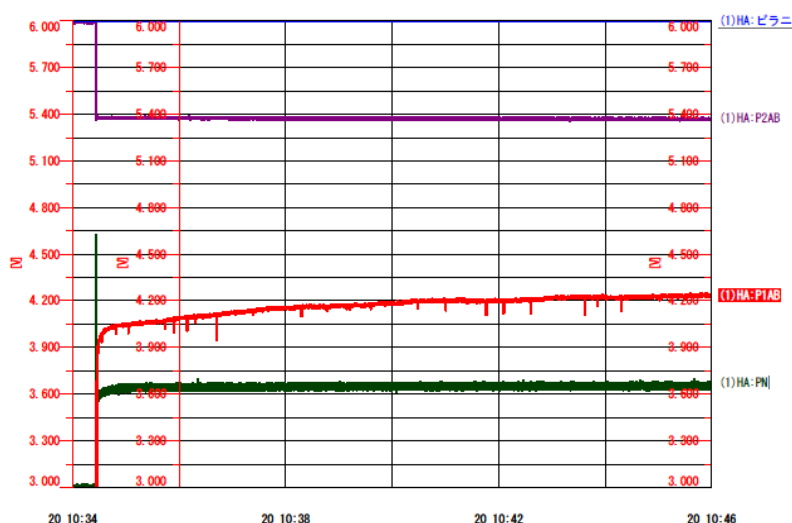


図 2.4.12 760 Torr (100kPa) での計測結果
(ピラニ真空計では、計測範囲外)

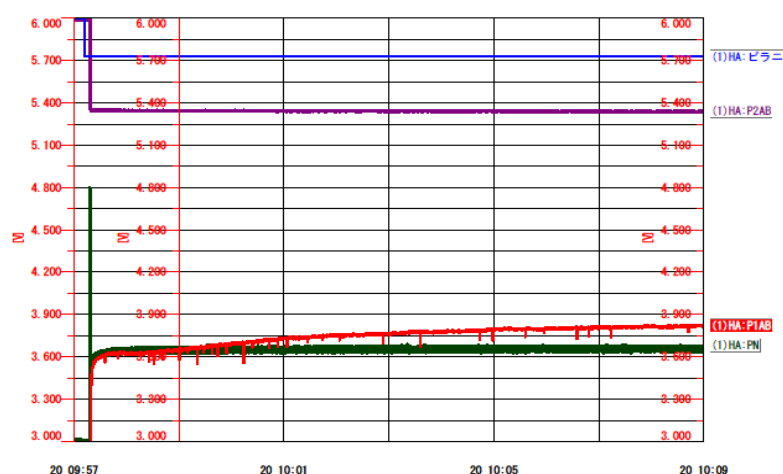


図 2.4.13 10 Torr (1.33 kPa) での計測結果

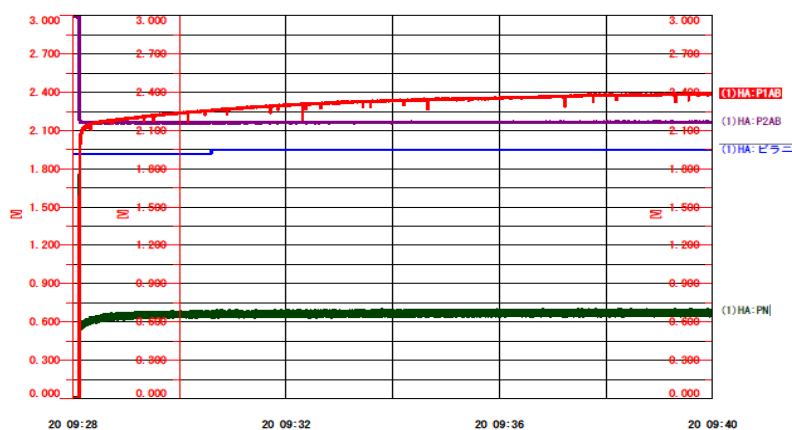


図 2.4.14 1 Torr (0.133 kPa) での計測結果

のために基板温度の変化が計測できないでいた。

(2) P2AB の出力特性

3 つの気圧 (760 Torr, 10 Torr, 1 Torr) のいずれの気圧においても、時間的に安定でほぼ一定の特性が得られている。

P2AB の出力特性は、加熱終了直後のセンシングカンチレバが、バイメタル作用で、加熱により下方に大きく曲がっていた状態から、冷却により上方に振れる時に風を発生させる時の時間変化出力電圧の積分を計測しているもので、熱の籠りをリフレッシュさせるためと推定される。

従って、これらの 3 つの気圧 (760 Torr, 10 Torr, 1 Torr) での隔膜真空計としての動作は、この P2AB の出力特性を利用することが推奨される。

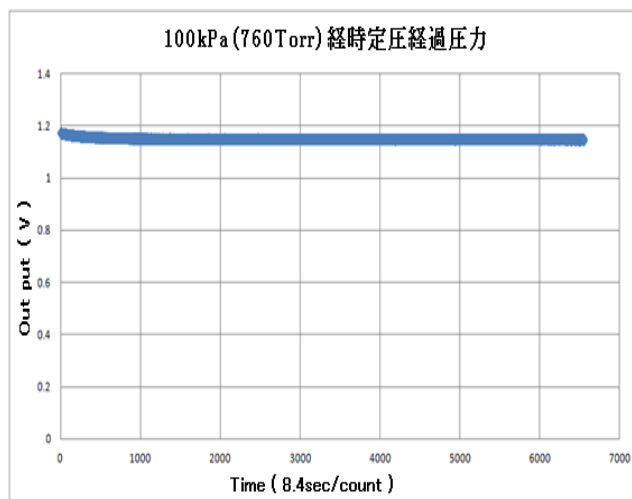


図 2.4.15 金属ハーメチックにマウントした超小型 MEMS 気圧センサの P1AB の 760 Torr (100kPa) での計測結果 (16 時間の計測)

(3) p n ダイオード出力 (基板温度計測用)

3 つの気圧 (760 Torr, 10 Torr, 1 Torr) のいずれの気圧においても、初期の 1 分程度の期間、基板温度上昇が見られるが、その後、ほぼ一定になることが判明した。

2.5 周囲環境補正の研究開発

2.5.1 環境補正ポート付き気圧センサチップの開発

MEMS 気圧センサでは、高真空域での計測に際して、放射 (輻射) 冷却による温接点 A と温接点 B との間に、ヒータ加熱温度に依存する温度差が残り、この分を差し引くことにより、高精

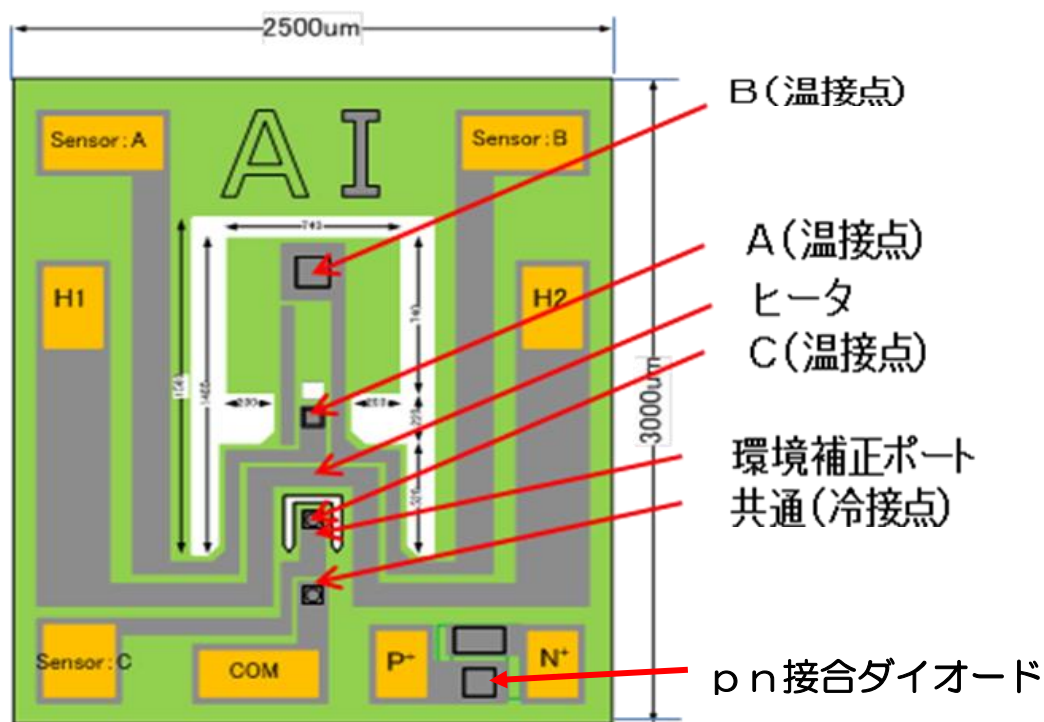


図 2.5.1 環境補正ポート付き MEMS 気圧センサの代表的な構成

度計測であるゼロ位法が適用できることを前記した。また、1 気圧付近では、周囲気体の熱伝導率の大きさ（気体の種類に依存する）により、真空度を含む気圧の表示に影響を与えるために、この補正が必要になる。

これらの補正のために、本開発 MEMS 気圧センサでは、センシングカンチレバとは別に、環境補正ポートとして、基板からヒータ近くまで延びるカンチレバを形成し、その先端部にも薄膜熱電対の温接点 C を形成し、他の温接点 A と温接点 B と共有する共通冷接点（その電極端子：COM）を Si 基板に形成している。

この構造図を図 2.5.1 に示す。

<環境補正ポートによる放射熱伝達と周囲気体を通した熱伝導の測定>

環境補正ポートの薄膜熱電対（温接点 C）によるカンチレバ先端部の温度上昇の計測結果を図 2.5.2 に示す。ただし、ヒータ供給電圧 $V_h=4.0V$ の場合である。

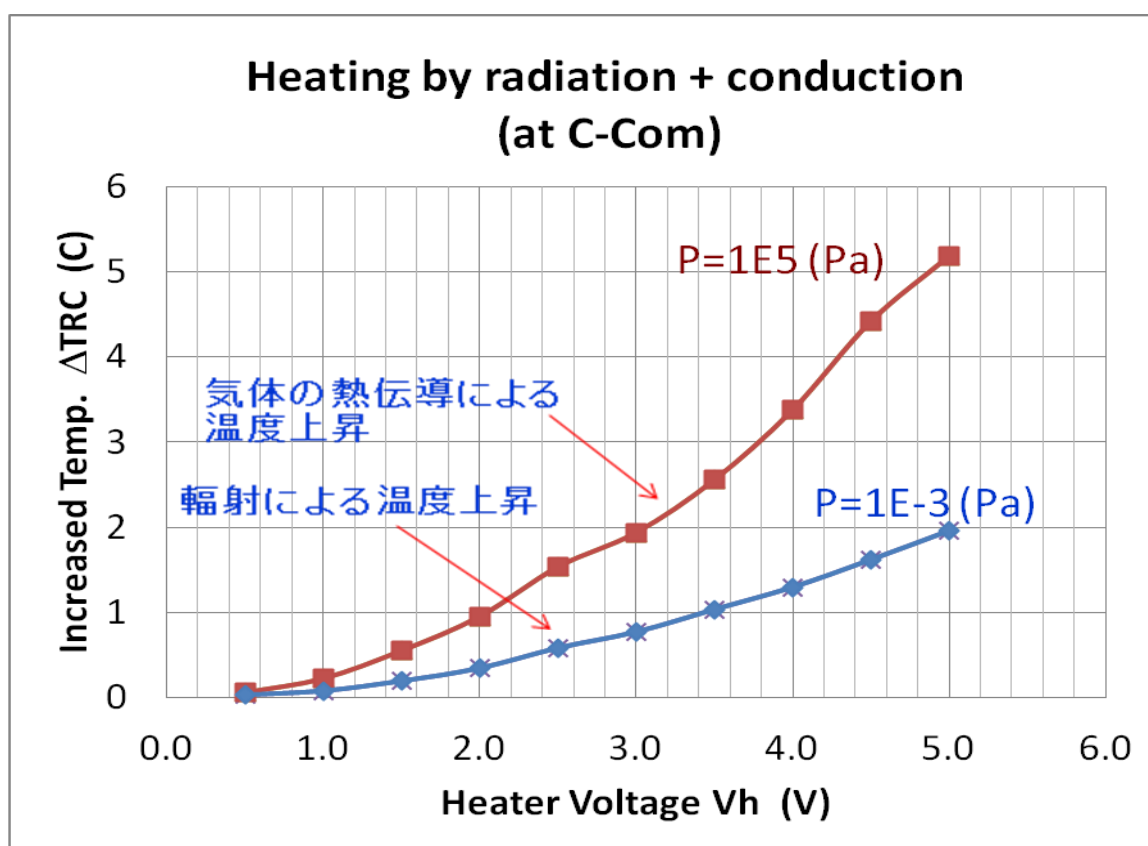


図 2.5.2 環境補正ポートの薄膜熱電対による温度上昇計測 ($V_h=4.0V$)

本実験結果から、高真空 ($1 \times 10^{-3} \text{Pa}$) においては、近接配置のヒータ加熱からの放射（輻射）により、環境補正ポートが熱せられて、印加電圧 V_h の上昇と共に環境補正ポートであるカンチレバが温度上昇する様子が確認された。この温度上昇は、ステファン・ボルツマン則に従い、ヒータ温度 T （絶対温度）の4乗に比例して温度上昇する。ヒータの印加電圧 V_h の二乗に比例してジュール熱によるヒータ温度 T は温度上昇する。

また、1 気圧 ($1 \times 10^5 \text{Pa}$) における実験結果から、周囲環境ガス（ここでは空気）を通して環境補正ポートが温度上昇する様子が分かる。各種の異なる気体の下でのデータを用意することにより、それぞれの気体を特定することができることも判明した。

2.5.2 周囲環境温度補正方法の確立

MEMS 気圧センサの基板絶対温度を計測するために、前述の図 2.4.6 に示したように、Si 基板に p n 接合ダイオードを形成している。また、メインのセンシングカンチレバに形成している温接点 A や温接点 B も薄膜熱電対の温接点であり、環境補正ポートのカンチレバにも、前記したように温接点 C が形成されている。

薄膜熱電対は、Si 基板に形成して有る共通の冷接点を基準に各温接点の温度を温度差として計測するものであり、実際の各温接点の絶対温度は、Si 基板絶対温度に各温接点の温度差を加算した温度で表示される。

（１）p n 接合ダイオードと熱電対出力の組み合わせ出力回路

Si 基板に形成した p n 接合ダイオードを用いた絶対温度センサとして、ダイオードの順方向電流を約 1 mA 一定に保持した時の順方向電圧（順電圧）の大きさから求める、所謂、サーモダイオードと、センシングカンチレバに形成してある 2 個の熱電対（温接点：A、B；冷接点：Si 基板）とを組み合わせ回路を設計、試作した。この回路を用いることにより、Si 基板温度（周囲環境温度の代表値として使用）とカンチレバの温度上昇分の計測、更に、センシングカンチレバの各温接点（A、B）の絶対温度を計測できる。その回路構成図を図 2.5.3 に示す。

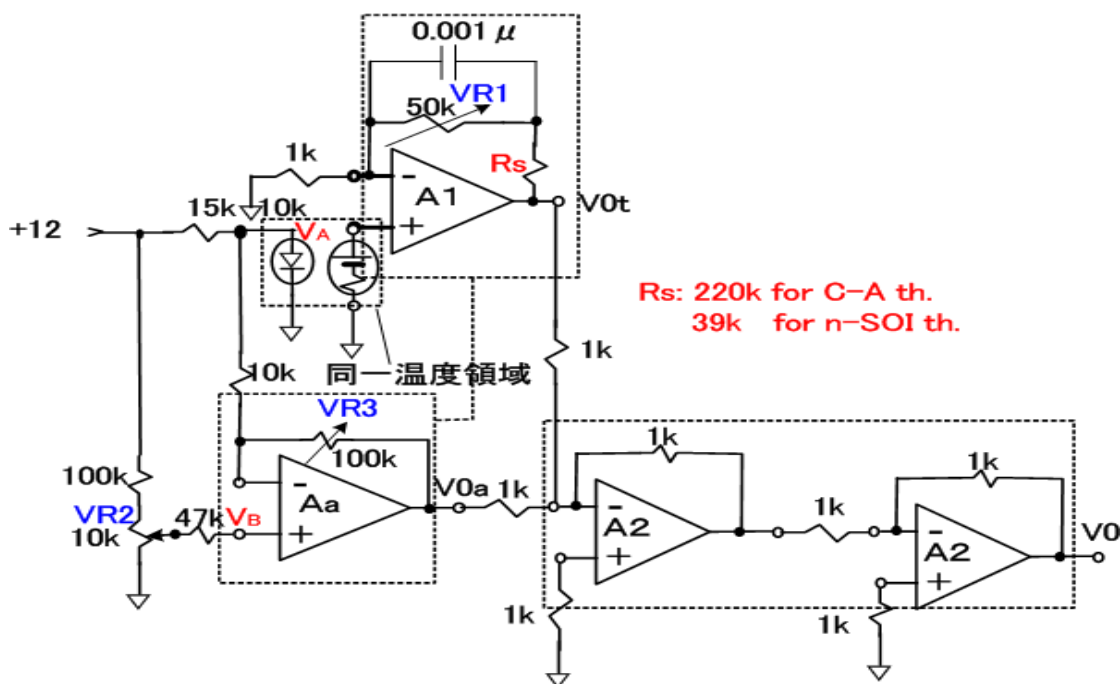


図 2.5.3 p n 接合ダイオードと熱電対出力の組み合わせ出力回路

(2) pn接合ダイオードを用いた Si 基板絶対温度測定と検証

上記の図 2.5.3 における試作したサーモダイオードとしての絶対温度測定回路を用いて、市販のpn接合ダイオードを用いた場合と、MEMS 気圧センサの Si 基板に形成したpn接合ダイオードを用いた場合の両方の絶対温度 T と出力 V_o との関係を図 2.5.4 に示す。なお、環境温度は、pn接合ダイオードと K 熱電対とを一体化させて恒温層の中に設置して計測したものである。

図 2.5.4 に示すように、市販のpn接合ダイオードと Si 基板に環境温度モニター用に形成したpn接合ダイオードとは、ほぼきれいな予想通りの直線性の良い出力特性を有していることが分かる。

センシングカンチレバの熱電対 (N型 Si : 0.01 $\Omega \text{ cm}$) とスパッタリング堆積したニクロム薄膜から成っている) の温度係数 (ゼーベック係数) は、0.137 mV/K という値になることが判明し、100℃以上までほぼ直線的になっていることが計測の結果、明らかになった。なお、起電力の温度基準は、K 熱電対 (0.3mm 径) を用いて計測した。

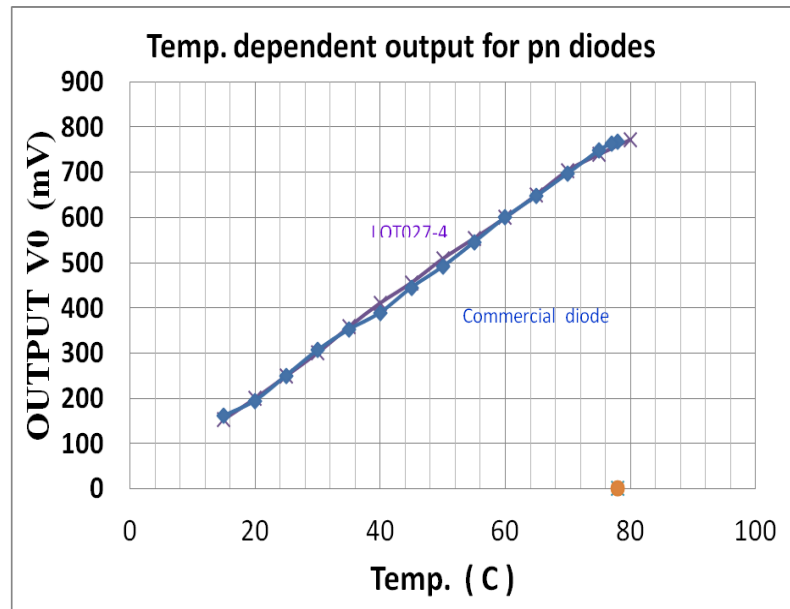


図 2.5.4 市販pn接合ダイオードと気圧センサ搭載pn接合ダイオードの温度と出力との関係

(3) MEMS気圧センサの各気圧域における温度補正モデル

本研究開発では、高真空側 (極めて低気圧側) で高感度である上述の P1AB (P1) と低真空 (1 気圧付近の高気圧側) で高感度となる上述の P2 AB (P2) との測定法がある。これらの各気圧 P における温度係数である傾き a を実験的に計測した結果、図 2.5.5 (P1) と、図 2.5.6 (P2) のようになり、それぞれ 6 つの直線近似

($a_0, a_{1d}, a_{2d}, a_{3d}, a_{4d}, a_{5d}$)

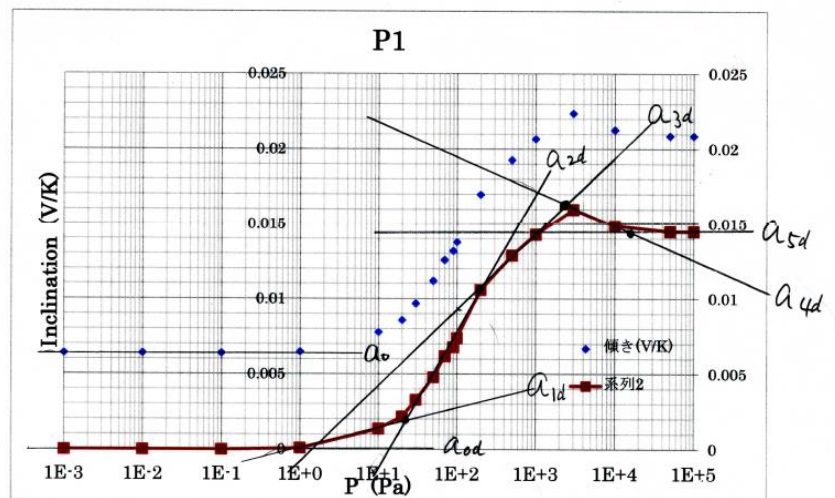


図 2.5.5 P1 における傾き a と、各領域の直線近似

ができることが判明した。これらのグラフでの直線近似は、平坦な a_0 を差し引くことでゼロ点として、残りの分を直線近似した。

このことは、傾き a の気圧 P に対する変化は、 $X = \log_{10} P$ として直線関係になるということである。

（４）気圧 P 領域の傾き直線範囲の分割と周囲温度補正法

MEMS 気圧センサの室温補正法には、種々のやり方があり得るが、ここでは、第 1 案の基本的な補正方法を記述する。

図 2.5.7 には、測定法 P1AB(P1)で計測した時の気圧 P と P1AB (P1) の出力電圧 V_0 との関係を、標準温度 20°C の時と、異なる温度、例えば、 30°C であるときの特性を示している。

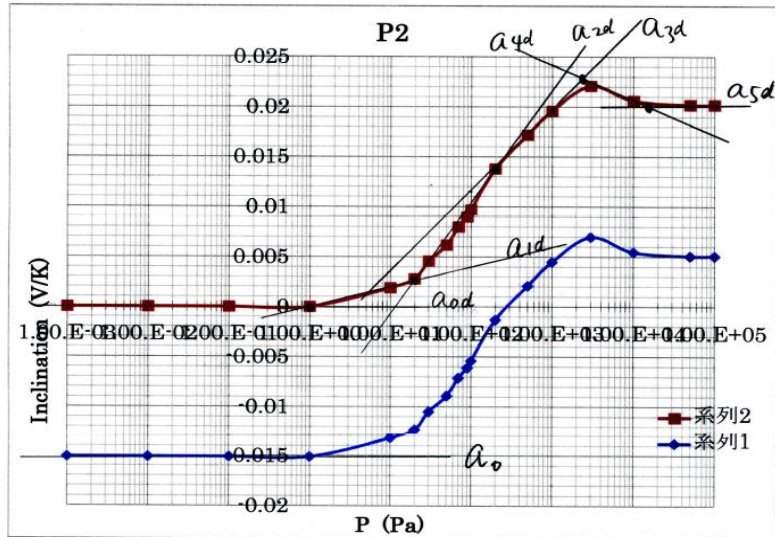


図 2.5.6 P2 における傾き a と、各領域の直線近似

$n=10$; $\Delta T_n=10^\circ\text{C}$; $T_r=30^\circ\text{C}$;

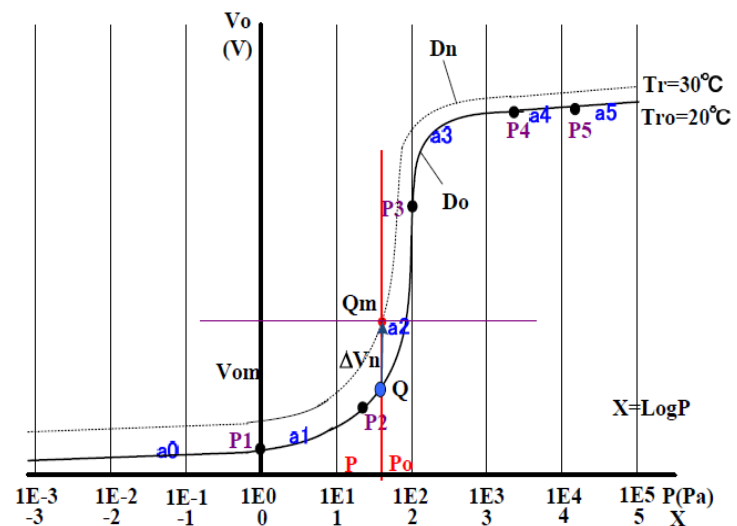


図 2.5.7 P1 計測時の気圧 P と出力 V_0 との関係

< 特性 P1 での直線近似 >

気圧域 P : $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$ (6 分割)

■ $a_0 = \text{const} = 0.0064 (1/\text{K})$;

■ $a_{1d} = g_1 X + h_1$ $g_1 = \Delta a_{1d} / \Delta X = 0.0015 (1/\text{K}/\text{dec})$; $h_1 = 0$

$$\therefore a1d=0.0015 \text{ X } (1/\text{K})$$

$$\blacksquare a2d=g2X+h2 \quad g2=\Delta a2d/\Delta X =0.0169-0.0079 =0.0090(1/\text{K/dec});$$

$$h2=a2d- g2 X =0.0169-0.0090*3=-0.0101(1/\text{K});$$

$$\therefore a2d=0.0090 \text{ X}-0.0101 (1/\text{K})$$

$$\blacksquare a3d=g3X+h3 \quad g3=\Delta a3d/\Delta X =0.0144-0.0092=0.0052(1/\text{K/dec}) ;$$

$$h3=a3d- g3 X =0.0144-0.0052*3=-0.0012(1/\text{K});$$

$$\therefore a3d=0.0052 \text{ X}-0.0012 (1/\text{K})$$

$$\blacksquare a4d=g4X+h4 \quad g4=\Delta a4d/\Delta X =0.0149-0.0171=-0.0022 (1/\text{K/dec}) ;$$

$$h4=a4d- g4 X =0.0171+0.0022*3=0.0237(1/\text{K});$$

$$\therefore a4d=-0.0022 \text{ X}+0.0237 (1/\text{K})$$

$$\blacksquare a5d=g5X+h5 \quad g5=0 (1/\text{K/dec}); \quad h5=0 (1/\text{K})$$

$$\therefore a5d=0.0145 (1/\text{K})$$

気圧域P：a0, a1, a2, a3, a4, a5 (6分割)

<特性P2での直線近似>

上述の特性P1での直線近似と全く同様に直線近似することができる。(ここでは詳細を省略する)

この他、温度依存性のデータを例えば、標準温度 20℃を基準に、温度 1℃毎に、データを取得し、マッピング化する第2案の提案も行った。

(5) ヒータの直流駆動を用いた超小型気圧センサの周囲温度補正の実証

上述のヒータの駆動法は、加熱と冷却とのサイクルを繰り返して、二つの熱電対の温接点 A(ヒータ側)と熱抵後部を挟んだ温接点 B(カンチレバ先端側)との出力差(A-B)の出力電圧を計測するが、加熱終了時点の出力差(A-B)を P1AB(P1)(実際は、所定の時間の積分出力)とし、冷却時の反転ピーク P2 点付近の積分値を P2AB(P2)としていた。

高真空域では、特に P1AB による計測

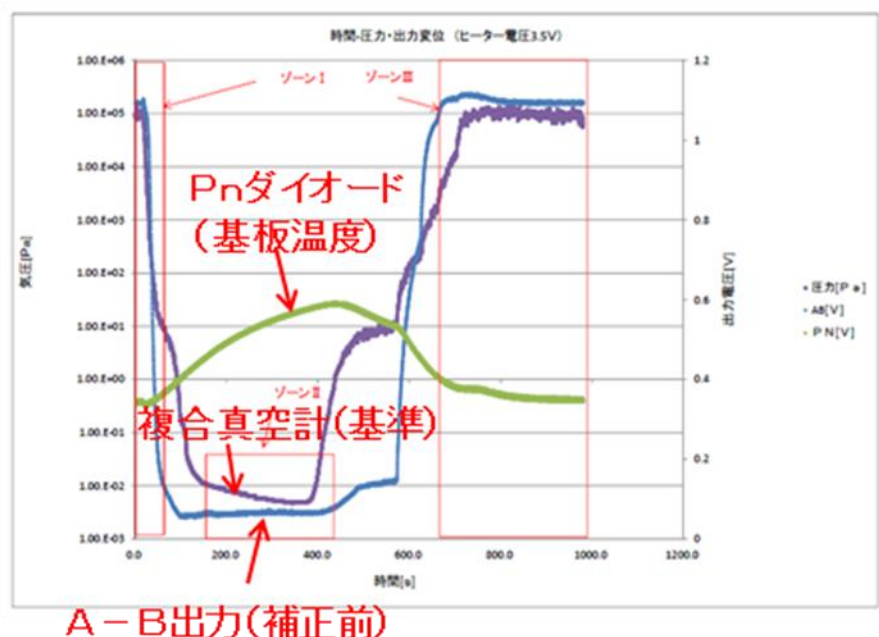


図 2.5.8 ヒータ直流駆動時の真空排気時の各特性

法を使用していた。

気圧センサチップのSi基板に形成したpn接合ダイオードを用いれば、基板温度、すなわち、ヒータ加熱による影響も含めた基板の絶対温度が計測できるので、この出力を利用して周囲環境温度補正が可能となる。

図 2.5.8 には、超小型センサチップ（熱伝導が悪いプリント基板にマウント）を用いて、大気圧(1気圧)から高真空域 (10^{-3} Pa 域) まで真空引きした後、再び、1 気圧の戻した時の複合真空計による出力特性（温度補償済み）、pn接合ダイオードの出力特性、(A-B) 出力特性を、3.5V のヒータ電圧直流駆動した時の各特性を示している。この特性から分かるように、温度補正してある市販の基準となる複合真空計の出力は、高真空域（ゾーン III）で右下がりであるのに対して、温度補正していない (A-B) 出力は、逆に右上がりになっていることが分かる。しかし、pn（接合）ダイオードの出力は、ヒータ加熱のために基板が温度上昇していることを示している。

このようなことから、前述の（4）気圧P領域の傾き直線範囲の分割と周囲温度補正法 <特性P1での直線近似>における高真空域の一定の傾き a_0 を用いて、周囲温度補正を行った。その結果を、図 2.5.9 に示す。この特性は、ほぼ温度補正をしてある複合真空計（基準）と比例関係にあり、基板の温度を用いて、気圧計測で温度補正が可能であることが実証された。

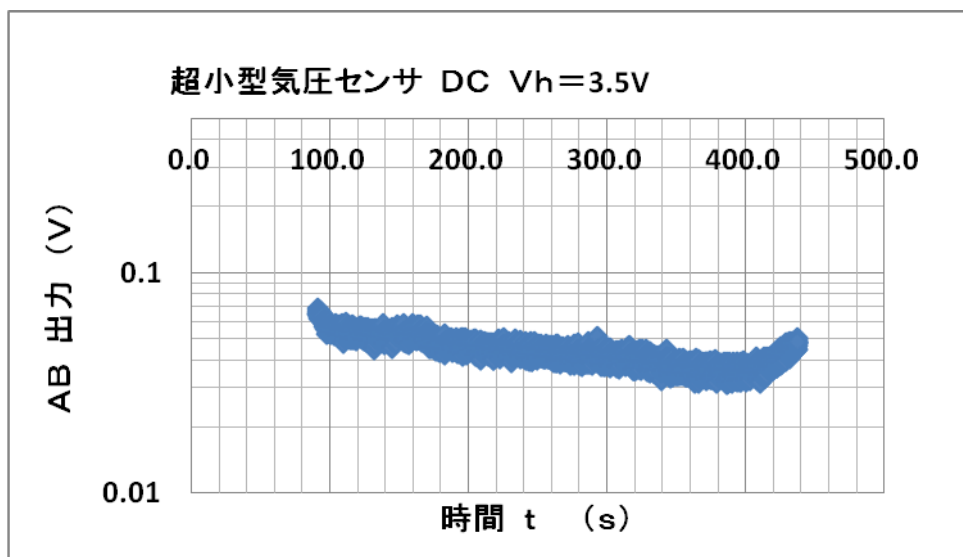


図 2.5.9 気圧センサの Si 基板の絶対温度により温度補正した時の高真空域の温度補正（図 2.5.8 のゾーン III 領域）

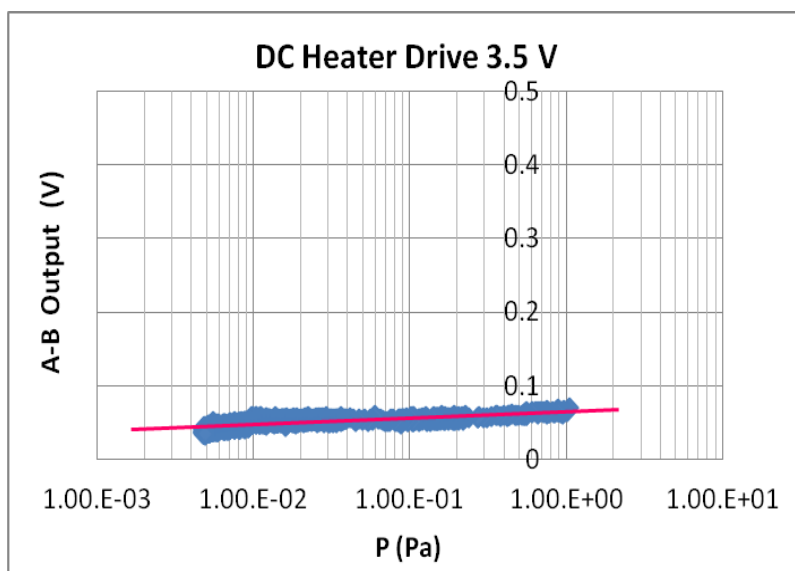


図 2.5.10 ゾーン III における温度補正した図 2.5.9 の横軸を気圧 P とした場合の特性

また、横軸に気圧 P をとったときの特性を図 2.5.10 に示す。

ヒータが直流駆動でも、MEMS 気圧センサの基板温度の計測により温度補正が可能であり、高真空域 (10^{-3}Pa) まで計測できることが明らかになった。

第3章 全体総括

3-1 研究開発成果

川下企業のニーズである、電離真空計の測定域である高真空域からピラニ真空計では精度的に問題がある大気圧近傍（大気圧以上を含む）まで、一つのセンサで測定可能な広帯域真空・気圧計を実現すべく開発を進めてきた。

各要素技術の開発により、高真空、大気圧近傍では

- ① 高真空域では 10^{-3}Pa 台の気圧が検知可能であることを確認した。
- ② 大気圧近傍ではピラニ真空計よりも高精度で測定ができ、さらに大気圧以上まで連続で気圧検知が可能であることを確認した。

と、ほぼ当初の目標を達成することができた。

さらに、実際の商品化を目指してモジュール化およびパッケージ化の開発を行った。

- ③ モジュール化では既存製品よりも小型のモジュールを開発することができた。
しかし測定帯域では、モジュール化に当たり②の要素技術を主体に開発したため、大気圧近傍の気圧測定は目標を達成したが、高真空域での感度に問題があった。上記①、②の要素を複合したモジュール化が課題として残った。
- ④ パッケージ化の開発を行い、所定の気圧帯域での長時間安定性に問題の無いことを確認した。しかし、目標に対してサイズが大きくなり、狭い空間に実装するためには更なる小型化が必要である。

更に測定精度の向上を図るため、周囲温度変化補正、ガス種補正の開発を行った。

- ⑤ 周囲温度変化による出力変動をキャンセルするためには、センサ基板温度を測定してセンサ出力値に補正をかけることが有効であることを確認した。
- ⑥ ガス種補正の可能性についての知見を得ることができた。

3-2 研究開発後の課題・事業展開

本事業において開発目標性能はほぼ達成することができた。しかし、市場での優位性を確実にするには 3-1 項の成果③でも記載したように、モジュールでの広帯域測定を可能にする必要がある。パッケージの実用化のためには更なる小型化と低コスト化を目指した開発が必要である。今後は今回本事業に参加頂いたアドバイザ企業を含めた関連企業および大学との連携をとりながら、上記課題を解決したい。