

# サファイア高温隔膜真空計の開発

## Development of a High-Temperature Sapphire Capacitance Diaphragm Gauge

株式会社 山武  
アドバンスオートメーションカンパニー 吉川 康秀  
Yasuhide Yoshikawa

株式会社 山武  
アドバンスオートメーションカンパニー 原田 英史  
Hidefumi Harada

株式会社 山武  
アドバンスオートメーションカンパニー 市原 純  
Jun Ichihara

株式会社 山武  
アドバンスオートメーションカンパニー 長田 光彦  
Mitsuhiko Nagata

株式会社 山武  
山口 徹  
Toru Yamaguchi

### キーワード

サファイア, 隔膜真空計, 静電容量式, 圧力センサ, 高耐食, 高耐熱, 単結晶

センサ材料として単結晶サファイアを使用し高精度, 高信頼性, 小形, 軽量を実現した主に半導体製造プロセス用途向けの自己加熱タイプの静電容量式 COVAC™ サファイア高温隔膜真空計を開発したので報告する。単結晶サファイアは極めて高い耐食性, 耐熱性を有し, また優れた機械的特性も有しているため, 腐食性ガスや高い温度の苛酷な環境下でも高精度であり長期安定性の優れた真空計を実現した。またマイクロプロセッサを用いた信号処理により, 直線性に優れ温度特性の少ない高精度な計測を実現した。

Using single-crystal sapphire as the sensor material, we have developed the self-heating COVAC™ High-Temperature Sapphire Capacitance Diaphragm Gauge, which is high-precision, highly-reliable, small-sized, lightweight, and intended to be used mainly in semiconductor manufacturing processes. Single-crystal sapphire possesses extremely high corrosion resistance and heat resistance and also possesses excellent mechanical characteristics, so that it provides high precision even in harsh environments such as corrosive atmospheres or high temperatures, allowing us to succeed in realizing a long-term stable vacuum gauge. We have also realized high-precision measurement with high linearity and high tolerance for temperature changes, by means of signal processing using a microprocessor.

### 1. はじめに

半導体デバイスを製作するプロセスのエッチング工程や成膜工程では, 各種の材料ガスが使用され, その圧力を正確に計測し制御する必要がある。これらの材料ガスは腐食性ガスである場合が多い。また反応ガスの固化による堆積を防ぐために多くの場合は, 高温に加熱しておく必要がある。半導体製造プロセス用途向けの隔膜真空計はこれらの過酷な環境下においても正確な計測が要求される。

当社ではこれらの要求を満足させるために, センサ材料として高耐食, 高耐熱である単結晶サファイアを使用し高精度, 高信頼性, 小形, 軽量を実現した自己加熱タイプの静電容量式 COVAC サファイア高温隔膜真空計を開発したので報告する。

主な仕様を以下に示す。

圧力レンジ: 0 - 100 Pa abs ~ 0 - 133.32 kPa abs

自己加熱温度: 125 °C ~ 200 °C

精度: 0.25 % Reading ~ 0.5 % Reading

図1に開発した製品の外観を示す。



図1. COVAC サファイア高温隔膜真空計外観

## 2. サファイアセンサチップ及びパッケージ構造

サファイアは結晶構造の分類がコランダム構造をとる、無色透明な  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  の単結晶のことを言う。サファイアは耐酸、耐アルカリ性に優れ、高温使用にも耐えられる優れた材料であり、また単結晶であることから機械的特性にも優れており、過酷な環境で使用される圧力センサには最適な材料である。

しかしながら丈夫である材料ということは、その反面加工することが非常に難しい材料である。そのため圧力センサとして実用化することは困難であった。しかし当社ではサファイアをエッチングする技術や、耐食性や耐熱性を落とさずにサファイア同士、及びサファイアと金属を接合する技術を開発することに成功した。そのため実用レベルの商品を開発することができた。

サファイアの加工技術や構造の詳細については本稿と同時に azbil Technical Review に掲載される、参考文献(1)を参照願いたい。

### 2.1 サファイアセンサチップ

図2にサファイアセンサチップの外観を、図3にその模式断面図を示す。

センサチップは感圧ダイアフラムと、コンデンサを形成するためのキャビティをもつベースで構成され、どちらもサファイアを構成材料としている。キャビティはドライエッチングで形成され、ダイアフラムとベースのサファイア同士の接合は耐食性、耐熱性を落とさない直接接合により接合されている。センサの大きさは約 10 mm $\square$ 、ダイアフラムの直径は約 8 mm である。

ダイアフラムとベースには対向した金属電極が形成されており、感圧容量  $C_x$  と参照容量  $C_R$  の2つの容量を構成している。感圧容量はダイアフラムの内側に形成され圧力により容量値が変化する。参照容量はダイアフラムの外側に形成され、圧力により変化しにくく補正のために用いられる。感圧容量と参照容量について式(1)の計測をすることにより、材料の熱膨張による温度特性を抑えることができ、誤差の少ない圧力計測ができる。

過大圧力が印加されたときは、ダイアフラムが対向するベースにぶつかり破壊されることが防止されるため高い耐圧性能を保有している。キャビティは参照圧力室と導通している。

$$\frac{C_x - C_R}{C_x} = \frac{\varepsilon \cdot F \cdot \frac{S}{d \cdot (1 - \alpha \cdot P)} - \varepsilon \cdot F \cdot \frac{S}{d}}{\varepsilon \cdot F \cdot \frac{S}{d \cdot (1 - \alpha \cdot P)}} = \alpha \cdot P \quad \text{式(1)}$$

$\varepsilon$  : Permittivity in Cavity

F : Thermal expansion coefficient of sensor material

S : Area of electrode

d : Distance between electrodes

$\alpha$  : Deflections coefficient of diaphragm

P : Applied pressure

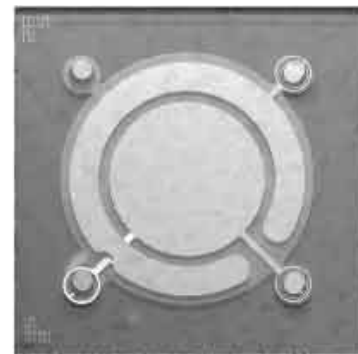


図2. サファイアセンサチップ 外観

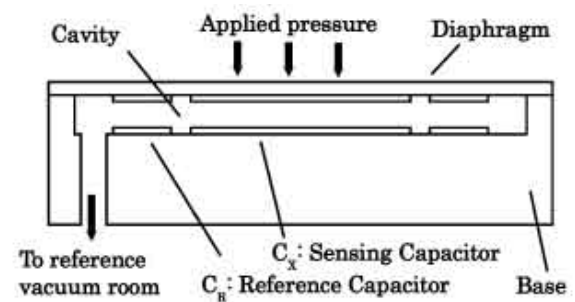


図3. サファイアセンサチップ 模式断面図

### 2.2 パッケージ構造

図4にパッケージ構造模式断面図を示す。

センサチップは機械的ストレスを軽減するため、一旦チップと同じ材料のサファイア円板で受けて、さらにその円板を金属薄板を介して金属筐体に接続している。チップとサファイア円板のサファイア同士の接合、及びサファイア円板と金属薄板の接合は耐食性、耐熱性を落とさない接合技術にて接合されている。

絶対圧力を計測するため、ケミカルゲッターポンプにより参照圧力室は高真空に保持されている。

固形物のセンサチップへの直接の衝突を避けるため配管にはバッフル板が設置されている。

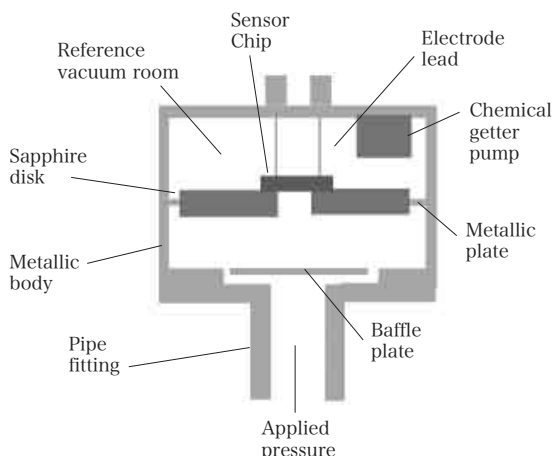


図4. パッケージ構造模式断面図

### 3. 検出回路

#### 3.1 検出回路要求事項

開発したセンサは表1に示されるように、微小圧力の0 Pa ~ 100 Paレンジにおいては、約40 pFのベースキャパシタンスに対して、フルスケール圧力印加によって1 pF程度の微小容量変化しか発生しない。よって製品要求性能の±0.25 % Reading以内を満たすためには±0.1 fF以内の容量変化を正確に計測する回路が要求される。そのため寄生容量や様々な外乱要因に影響されず微小容量が安定して測定できる回路が必要になる。応答速度は63 %応答にて20 msの高速応答が要求されるため安定した微小容量を高速に計測する必要がある。

またセンサはヒーターにより高温に加熱されているため、検出回路をセンサ近傍には配置できない。そのためセンサと回路の距離が離れた状態でそれを実現する必要がある。

#### 3.2 開発した検出回路の動作原理と特長

外乱要因に影響されず、安定した微小容量を高速に検出するために、いくつかの技術開発を検討しそれを実現した。以下にその概要について記載する。

開発した検出回路のブロック図を図5に示す。図5はCx - CRを計測するブロックを示している。

- ・センサ容量のCx, CRの片側の端子には正弦波波形の電圧を印加している。正弦波波形はCPUで演算されたΔΣ方式で生成したコードをD/Aコンバータに出力することにより、高調波歪の少ない信号を形成している。さらにその信号はバンドパスフィルタにて、よりノイズの少ない信号をセンサに供給することにより、安定したセンサ出力を得られるようにしている。
- ・Cx, CRのもう片側の端子は電荷増幅器に接続されている。その信号ラインは電荷増幅器により仮想接地となる構造をとっており、接地電位での静電シールドを有効にし、寄生容量の影響を受けないようにしている。
- ・電荷増幅器はCx, CRに流れる電流を電圧に変換し、

Cx, CRに比例した振幅の信号を出力する。

- ・電荷増幅器の出力は差動増幅器に接続されCx - CRの信号をとりだすとともに、静電シールドでもシールドしきれない寄生容量を介して侵入してくるノイズをキャンセルしている。
- ・差動増幅器の出力はバンドパスフィルタでさらにノイズを除去している。
- ・バンドパスフィルタの出力は、正弦波波形で同期された同期検波回路に接続され、整流された後にローパスフィルタでDC信号に変換される。

同期検波回路では信号を整流するとともにノイズ成分をキャンセルしている。

- ・ローパスフィルタの出力は1 ms高速サンプリングの24 bit A/Dコンバータにてデジタル信号に変換し、マイクロプロセッサに入力している。
- ・CxについてもCx - CRと同様に計測されマイクロプロセッサにて(Cx - CR)/Cxが演算される。
- ・さらにマイクロプロセッサでは、デジタルフィルタによりノイズを除去するとともに、式(2)に示す多項式演算によりセンサの直線性、センサの温度特性、回路の温度特性を補正している。
- ・多項式演算式の演算処理には特殊な浮動小数点を使用することにより、高精度かつ高速応答の補正演算を実現している。

表1. 0Pa ~ 100 Paレンジのセンサチップ特性及び製品要求性能

Cx, CR Base Capacitance	40 pF
Cx Pressure Sensitivity	Δ 1 pF / 100 Pa
Product accuracy	0.25 % Reading at 125 °C
	0.5 % Reading at 200 °C
Response speed	20 ms / 63 %
Self heating temperature	125 °C ~ 200 °C

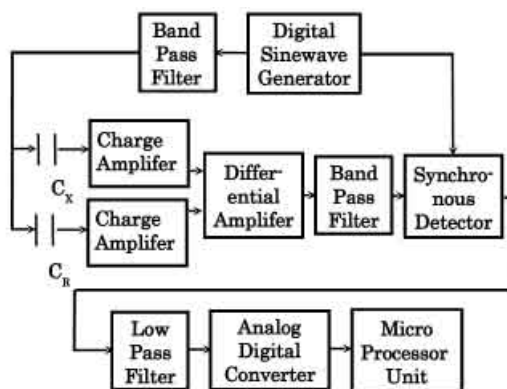


図5. 検出回路ブロック図

$$P = \sum_{i=0}^l \sum_{j=0}^m \sum_{k=0}^n A_{ijk} \cdot V_o^i \cdot V_s^j \cdot V_c^k \quad \text{式 (2)}$$

$P$  : Pressure Value  
 $A_{ijk}$  : Coefficient  
 $V_o$  :  $(C_x - C_R) / C_x$  Value  
 $V_s$  : Sensor Temperature  
 $V_c$  : Circuit Temperature

### 3.3 性能確認

図6に圧力特性の評価結果を示す。微小圧力の0 Pa ~ 100 Pa レンジにおいて、自己加熱200℃の高温環境下で、読み値の精度である[% Reading]値にて±0.1%以内の良好な性能が確認できた。

図7に周囲温度特性の評価結果、図8には自己加熱温度特性の評価結果を示す。こちらも微小圧力の0 Pa ~ 100 Pa レンジにおいて、周囲温度や自己加熱温度を変化させても、ゼロ点、スパン(圧力感度)ともに±0.1%以内の変化であり良好な性能が確認できた。

図9に応答速度の評価結果を示す。ステップ入力の圧力印加はできないため、応答速度20 msの基準真空計との比較評価を行った。63%応答にて基準真空計より5 ms 速い結果であったので、応答速度20 ms 以下の高速応答が実施できていることが確認できた。

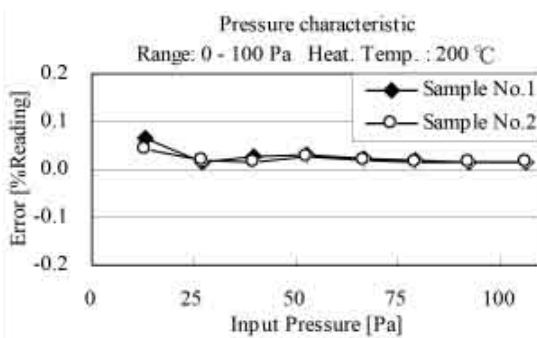


図6. 圧力特性評価データ

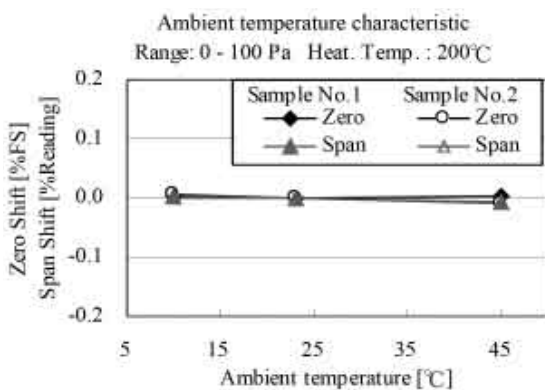


図7. 周囲温度特性 評価データ

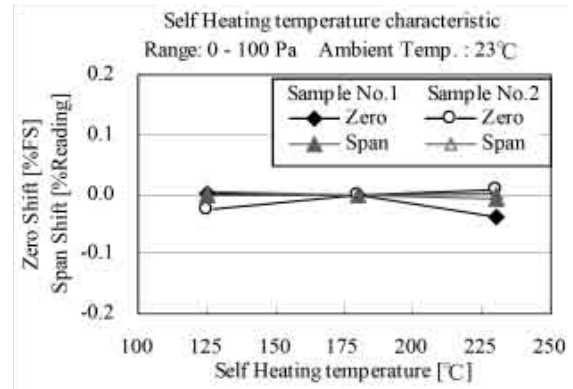


図8. 自己加熱温度特性 評価データ

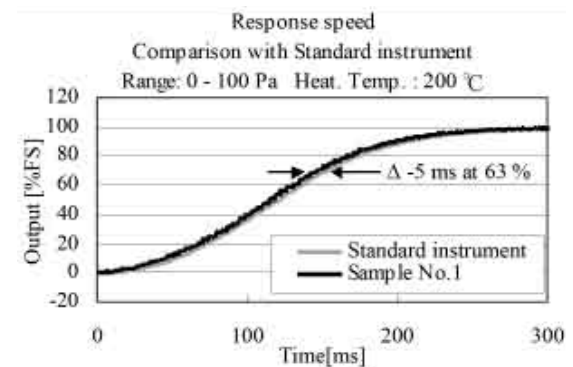


図9. 応答速度 評価データ

## 4. 自己加熱機能

半導体製造プロセスにおいては、反応ガスの固化による堆積を防ぐために多くの場合は装置を高温に加熱しておく必要がある。そのため隔膜真空計の内部においても堆積を防ぐためにヒーターを内蔵し、センサを高温に加熱する自己加熱機能を有している。その温度はガスの種類やプロセス条件によって異なるので用途に合わせた加熱温度設定が必要である。

### 4.1. 自己加熱構造

圧力センサには温度特性があるため、温度センサで温度を計測し、前項で述べたように圧力センサの温度補正を実施している。それにより温度によらず正確な計測を実現している。

しかしながら温度特性の要因はセンサチップのみならず、パッケージ部にもあるため、ある程度の広い範囲の温度分布が一定でないと正確な温度補正は実施できない。よって温度分布が一定となる自己加熱構造が必要となり、なおかつそれは外乱があっても均熱が維持される必要がある。特に大きな外乱としてユーザーが配管継手部を加熱する場合があります、それによっても均熱が保たれることが必要である。

図10に自己加熱構造を示す。

パッケージの回りに空間を設け、その回りに熱伝導の良い黄銅の恒温ケースを設け、そのケースにヒーターを取付け、パッケージの加熱を間接的に行う構造を採用

した。その結果パッケージ全体が均熱になり易い構造を実現している。

図11及び表2に熱シミュレーターにより配管継手部を加熱した場合の温度分布をシミュレーションした結果を示す。配管継手の加熱がない場合も、配管継手を200℃で加熱した場合も、温度特性に影響のある、センサチップ、サファイア円板、金属薄板の温度分布は±0.1℃以内のわずかなものであり、良好な均熱特性が得られることが確認できた。

図12に実際に配管を加熱し製品の特性を評価した結果を示す。微小圧力の0 Pa ~ 100 Paレンジにおいて、ゼロ点及びスパン(圧力感度)ともに、±0.1%以内の変化であり良好な性能が確認できた。

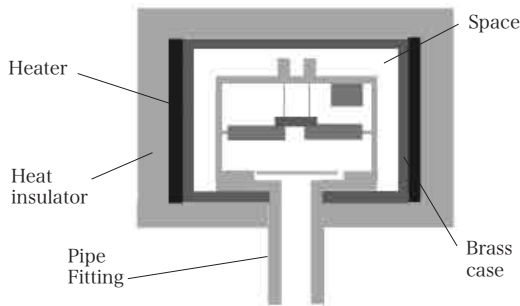


図10. 自己加熱構造

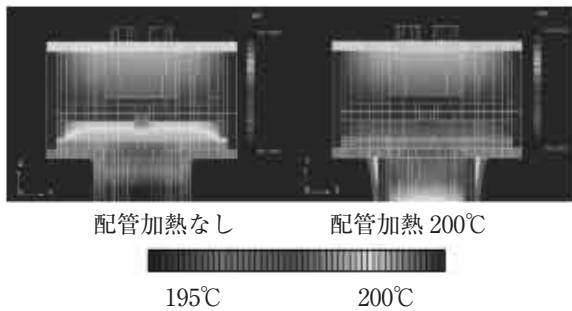


図11. 配管継手加熱シミュレーション図

表2. 配管継手加熱シミュレーション結果

自己加熱温度 設定温度	配管加熱 温度	センサチップ, サファイア円 板, 金属薄板部温度分布
200℃	加熱なし	199.9℃ ~ 200.0℃
200℃	200℃	199.9℃ ~ 200.0℃

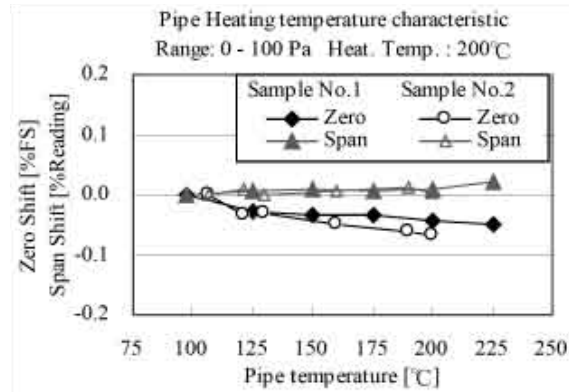


図12. 配管継手加熱特性 評価データ

#### 4.2. 温度制御

自己加熱温度制御は次のような性能が要求される。

- ・自己加熱温度構造を工夫しても、温度制御が不安定であると、均熱性を保つことはできず、正確な温度補正を実施できない。よって安定した温度制御が必要となる。
- ・電源投入後に安定するまでの時間がかかりすぎると、装置の稼働率を高くすることができないため、速いウォームアップが必要となる。
- ・電源電流により装置側の計測に影響を与えないために、フィルタでヒーター電流が平滑できる高速な時間比例制御周期が必要となる。

安定した温度制御でかつ速いウォームアップを実現するために、自己加熱温度制御はマイクロプロセッサでのデジタルPID演算による時間比例制御を行っている。デジタルPID演算の各常数は電源電圧や加熱温度設定値に連動し自動的に変更され、外乱に影響されず安定した温度制御を実施できるようにしている。また時間比例制御はマイクロプロセッサ内蔵のハードウェアによるPWM(Pulse Width Modulation)とファームウェアによるPWMを組み合わせた2重PWM方式を採用し、約100kHzの高速の時間比例周期で、かつ約4,000分の1の制御出力分解能を持つ時間比例制御を実施し、高速かつ安定した温度制御を実現した。

図13に電源投入後の自己加熱温度のウォームアップを測定したデータを示す。オーバーシュートもなく30分以内の速いウォームアップを確認できた。またウォームアップ後は±0.1℃以内の安定した温度制御が実現できていることが確認できた。

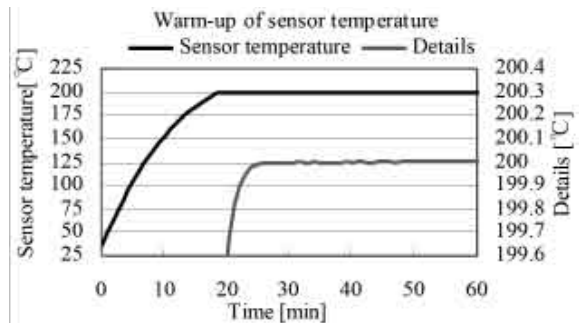


図13. 自己加熱温度の立上げ特性 評価結果

## 5. 真空標準

サファイア隔膜真空計が計測している真空の範囲は 1 Pa ~ 133 kPa である。しかしながら 1 Pa ~ 5,000 Pa の真空領域では、測定原理や測定系（配管の長さや温度分布など）に測定結果が影響されるため、計測のトレーサビリティを高精度で確保することが難しい。

よって当社では、先進国の国家計量標準供給機関の真空領域の標準器と同じ原理【膨張法】の装置を製作し、真空標準のトレーサビリティを確立した。

図 14 に製作した膨張法装置の外観図を、図 15 に膨張法の原理図を示す。

膨張法の基本原理は Boyle-Mariotte の法則を利用したものである。図 15 に示すように、体積比が既知の大小の 2 つの容器にバルブを介して連結されている容器 1 と容器 2 がある。

- ① 容器 1 に既知の圧力を導入する。
- ② 容器 2 は真空ポンプで真空引きしておく。
- ③ 容器 1 の入口と容器 2 の出口のバルブを閉じる。
- ④ 容器 1 と容器 2 を接続しているバルブを開き、容器 1 内の気体を容器 2 に膨張させる。

上記の①～④の操作によって膨張させた圧力は、既知である体積比、初期に導入した圧力値及び容器内の温度により、式(3)で求められる。

$$P_2 = P_1 \frac{V_1}{V_1 + V_2} \cdot \frac{T_2}{T_1} \quad \text{式(3)}$$

さらに④の状態から容器 1 と容器 2 の間のバルブを閉じて、②～④の作業により膨張が繰り返えされ正確な圧力(真空)を発生することができる。

しかしながら、容器の微小なリーク、容器の放出ガス等の様々な要因により、誤差が発生してしまう。特に温度変化については微小な温度変化(分布)が大きな誤差となってしまう。

当社では、その誤差を極力少なくするために、微小リークや放出ガスが少ない装置を製作した。また容器内の温度分布が発生しないように工夫するとともに、容器内に複数の温度計を取り付けて温度補正ができるように改善した。またこの温度計と初期に導入する圧力を正確に測定する圧力計の信頼性が、④の状態（真空の値）を特定するのに非常に重要になってくる。それを実現するためには、正確に校正された温度計及び圧力計を使用することが必要となるが、当社の計測標準センターは、計量法に基づく校正事業者登録制度による登録事業者であり、そこで温度計及び圧力計を高いレベルで正確に校正することが可能である。それらの計測技術を駆使することにより正確な真空標準を実現することができた。

図 16 には製作した膨張法で校正した 0 Pa ~ 100 Pa レンジのサファイア真空計を用いて、産業技術総合研究所の真空標準と比較校正した結果を示す。その差異は

± 0.06 % Reading 以内で一致しており、膨張法において正確な真空標準が実現できている事実を確認することができた。

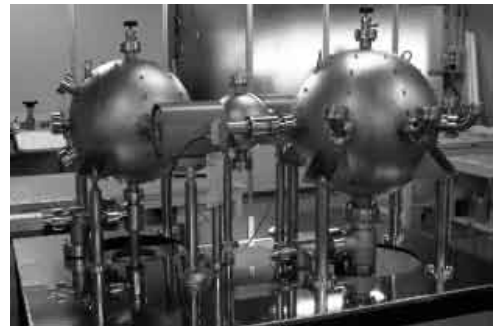


図 14. 膨張法装置 外観

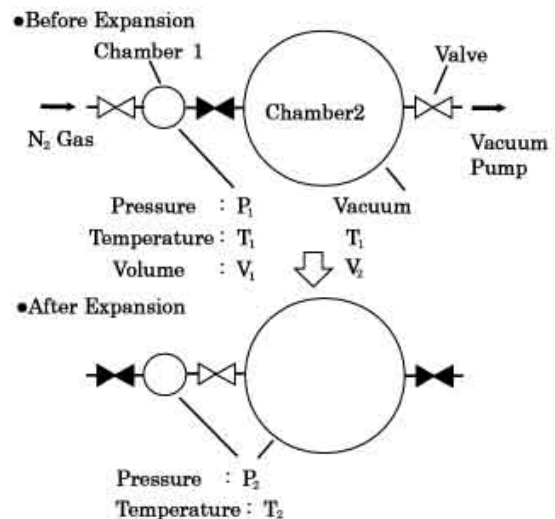


図 15. 膨張法原理図

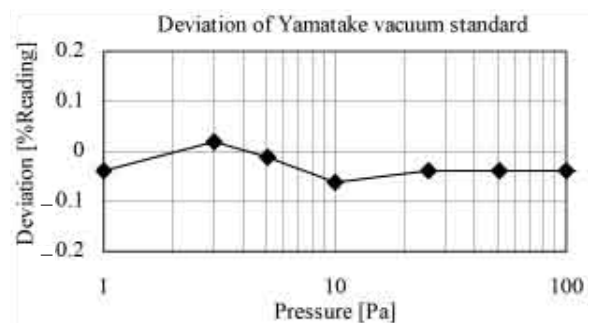


図 16. 産業技術総合研究所との比較校正結果

## 6. 熱遷移

真空領域の圧力計測において注意すべきものとして熱遷移現象がある。

図 17 に示すように、2 つの容器を管で繋いだ場合、大気圧付近の粘性流領域においては、気体分子は運動

量で平衡状態にあるため、2つの容器間に温度差があっても式(4)に示すように圧力は等しい。しかし、圧力が下がり分子流領域になると、力を伝える物質が少なくなる。そのため運動量が制限され、部分的に熱的な平衡状態には達するが、運動量としては非平衡状態となる。そのため、2つの容器間に温度差があった場合は、式(5)で表せる圧力差が生じることになる。

さらに粘性流領域と分子流領域の間にあたる中間流領域においては、式(6)に示すように、容器間を接続する管の直径やガスの種類によって圧力(真空)の値が影響される複雑な式となる。このため自己加熱型の隔膜真空計は、センサ部が加熱されていることから、被測定容器との温度差が発生した場合、被測定容器とセンサ部に圧力差が生じることとなる。

図18に被測定容器が23℃、自己加熱温度が125℃と200℃の場合に発生する圧力差を示す。これによると10 Pa以下では1% Reading以上の大きな圧力差が発生することがわかる。

そのため、隔膜真空計を校正する際には、被測定容器の温度は自己加熱温度と同じ温度にてして圧力差が発生していない状態で校正を実施する必要がある。

しかしながら生産ラインにおいては様々な自己加熱温度の機種を校正する必要があり、機種ごとに被測定容器の温度を変更していると多くの時間がかかり、非常に生産効率が悪くなってしまう。

よって当社の生産ラインでは自己加熱温度の機種によらず、容器の温度は23℃とし、容器の温度を正確に測定し熱遷移で発生する圧力差を補正し校正を実施している。

当社が実施するこの校正方法の妥当性を確認するため、図19に被測定容器の温度が23℃にて熱遷移補正をして校正した製品と同じものを使って、理想的な校正条件【被測定容器を自己加熱温度と同じ温度にして熱遷移による圧力差が発生していない状態】で値を比較検証した結果を示す。

製品の仕様である125℃において±0.25% Reading及び200℃において±0.5% Readingを十分満足している結果となっており、正しく熱遷移の補正ができていることが確認できた。

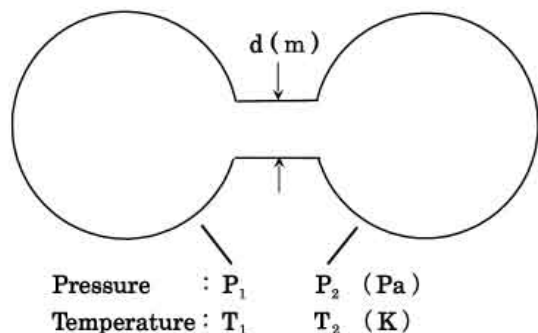


図17. 熱遷移説明図

$$\text{粘性流領域} : \frac{P_2}{P_1} \cong 1 \quad \text{式(4)}$$

$$\text{分子流領域} : \frac{P_2}{P_1} \cong \sqrt{\frac{T_2}{T_1}} \quad \text{式(5)}$$

中間流領域 :

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{A \cdot X^2 + B \cdot X + C \cdot \sqrt{X} + \sqrt{T_2/T_1}}{1 + A \cdot X^2 + B \cdot X + C \cdot \sqrt{X}} \quad \text{式(6)}$$

$$X = 7.5 \cdot P_2 \cdot d$$

A, B, C : ガス種, 温度による係数

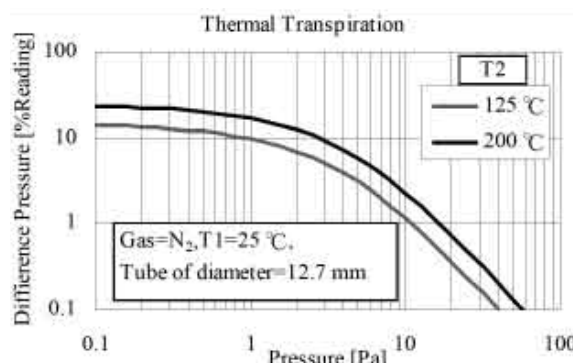


図18. 隔膜真空計における熱遷移による圧力差

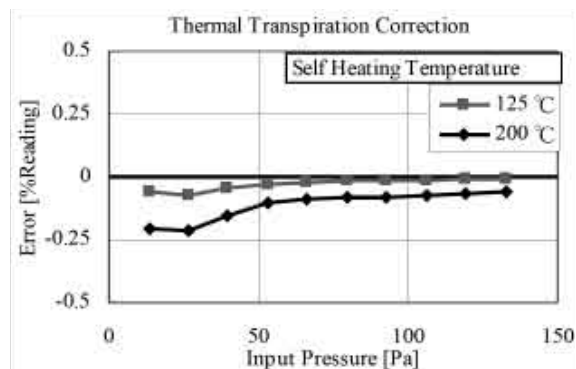


図19. 熱遷移補正の検証結果

## 7. 付加機能

### 7.1 ゼロ調整機能

図20に製品の上面図を示す。2つのゼロ調整方式が実施できるスイッチを製品上面に配置し、ユーザーの使用法に合わせてゼロ調整を実施できるようにし利便性を向上させた。

#### ・ Auto ゼロ調整方式

Auto ゼロ調整スイッチを押すと自動的にその時の値をゼロに合わせるので、簡単にゼロ調整が実施できる。

#### ・ アップダウンゼロ調整方式

Up スイッチ及び Down スイッチを押すと出力が変化するので、トリマーで調整する方法と同じような調整ができ、下記のような Auto ゼロ調整が使用できない場合に使用できる。

- 計測器のズレも含めて、指示値をゼロに合わせたい場合。
- 高真空のゼロの環境ができないため、比較する標準器の値に合わせることでゼロ調整を実施する場合。
- ゼロにバイアスをかけたい場合。

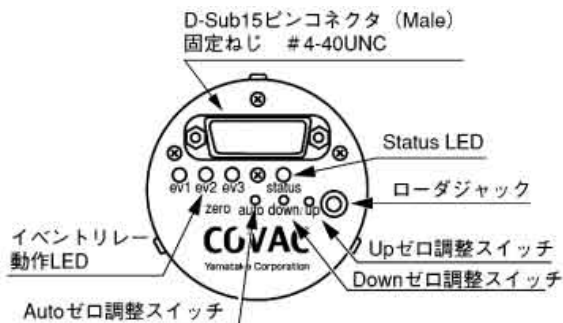


図 20. 製品上面図

またゼロ調整を実施した際に、ゼロ調整の状態をステータス LED で視認できるようにした。

- ・ 緑点滅  
ゼロ調整が正常に実施できた場合。
- ・ 橙点滅  
ゼロ調整が正常に実施できたが、調整できる限界に近づいている場合。この橙点滅は事前に交換時期を知らせる役割としても使用できる。
- ・ 赤点滅  
ゼロ調整ができる範囲を超えてしまった場合。この赤点滅は、ゼロ調整ができず交換が必要となる。
- ・ 赤橙交互点灯  
ウォームアップが完了していない、印加されている圧力が計測範囲外など、ゼロ調整の実施条件が整っていない場合。これにより誤ってゼロ調整を実施してしまうことを防止できる。

## 7.2 自己診断機能

マイクロプロセッサで下記に示す自己診断を実施しており、異常があった場合は、ステータス LED で異常を表示するとともに、イベントリレーでアラームを出力することができる。これによりユーザー装置の安全な稼動に寄与できる。

- ・ 警報状態 (使用環境が正常でない可能性がある)
  - 温度異常 (電子回路, センサ, ヒーター温度)
  - 自己加熱制御温度異常, 電源電圧異常
- ・ 故障状態 (製品が故障している可能性がある)
  - ヒーター断線, センサ断線
  - 電子回路異常, メモリ故障

## 8. おわりに

当社では、サファイア加工技術、微小容量検出技術、信号処理技術、温度制御技術、真空計測技術、を開発す

ることにより、高耐食性、高耐熱性、高再現性、高精度のサファイア高温隔膜真空計を商品化することができた。

現在、より高い自己加熱温度の製品や、より低圧力レンジの製品等々を開発中である。それらの開発中の製品も含め、今後はさらにユーザーの価値を提供するためより良い商品を開発していきたい。

### <参考文献>

- (1) 関根, 差波, 石原, 谷: サファイア高温隔膜真空計のセンサ素子・パッケージ開発, azbil Technical Review (2011), pp.28-33, 株式会社 山武
- (2) 添田, 石倉, 増田, 木村, 長田: サファイアを用いた高耐食性静電容量式圧力センサ, Savemation Review(2001), Vol.19, No.2, pp.36-43, 株式会社 山武
- (3) 石原, 長田: 高温型サファイア隔膜真空計の開発 (2006), 第23回センシングフォーラム, pp.130-135
- (4) Y.Yoshikawa, S.Kimura, Y.Ishikura, T. Kataoka, M.Soeda, M.Nagata, T Masuda: Low Capacitance Measurement Circuit for Sapphire Based Capacitive Pressure Sensor, PROCEEDINGS OF THE 20TH SENSOR SYMPOSIUM(2003), pp.127 ~ 130
- (5) 米永: 低圧力の計測標準に関する調査研究, 計量研究所報告 1999年第48巻 第2号 (第200号) 別冊
- (6) 平田: 真空標準とトレーサビリティ, 真空 41-3(1998) 347
- (7) T.Takaisi and Y.Sensui: Thermal Transpiration Effect of Hydrogen, Rare Gases and Methane, Trans. Faraday Soc., 59(1963)2503
- (8) K.F.Poulter, M.J.Rodgers, P.J.Nash, T.J.Thompson and M.P.Perkin: Thermal transpiration correction in capacitance manometers, Vacuum 33-6(1983) 311-316

### <商標>

COVAC は、株式会社 山武の登録商標です。

### <著者所属>

- |       |                                  |
|-------|----------------------------------|
| 吉川 康秀 | アドバンスオートメーションカンパニー<br>開発部開発7グループ |
| 原田 英史 | アドバンスオートメーションカンパニー<br>開発部開発7グループ |
| 市原 純  | アドバンスオートメーションカンパニー<br>開発部開発7グループ |
| 長田 光彦 | アドバンスオートメーションカンパニー<br>開発部        |
| 山口 徹  | 環境・標準化推進部計測標準センター                |