

水晶摩擦真空計の高精度・高機能化

データ処理の研究*

小林 太吉**・北條 久男**

(受理1993年9月16日, 掲載決定1994年3月5日)

Digital Data Processing for Quartz Friction Vacuum Gauge

Takichi KOBAYASHI and Hisao HOJO

(Vacuum Products Corporation, 1-1 Honcho 4-chome, Koganei-shi, Tokyo 184, Japan)

(Received September 16, 1993, Accepted March 5, 1994)

The pressure dependence of resonance impedance of a wristwatch oscillator made it possible to estimate ambient gas pressures from 1 atm to 1 Pa. A thermometer-type oscillator provides a practical basis for compensating thermal variation of the intrinsic impedance and lowers the minimum detectable pressure to 10 mPa. Based on the theory of the gauge, a digital data processing method was developed for an 8-bit microprocessor to realize automatic pressure indication with errors of less than around 10% in a full pressure range for any gas with given values of mass and viscosity constant. By utilizing the pressure dependence of the resonance frequency and the impedance, automatic discrimination of hydrogen from air was successfully demonstrated.

1. はじめに

我々は、水晶振動子の共振インピーダンスが気体の摩擦による抗力によって、分子流領域では圧力の1乗に比例し、粘性流領域では圧力の1/2乗に比例する特性が理論的に裏付けされていることに着目し³⁾、高感度高機能真空計の開発を進めてきた^{2,3)}。そして、腕時計用の小型水晶振動子に代えて、ほぼ同じ形状で結晶方位の異なる新しいタイプの振動子を用いて、その周波数変化から振動子自体の温度を計測して、固有インピーダンスの温度変化を補償すれば、実効的な可測圧力の下限を約1 Paから 1×10^{-2} Paへと改善できることを実証した⁴⁾。

本研究では、圧力による共振インピーダンス変化の気体種依存性を理論式に基づいて計算するマイクロプロセッサ用データ処理法、並びに、固有インピーダンスの温度変化に対応する自動補正法を開発した。これらによ

り、分子量と粘性係数を与えれば原理的にはいかなる気体種に対しても大気圧から 1×10^{-2} Paまでの実効圧力を表示できる実用真空計の基本となる技術が確立した。さらに、この真空計では、原理的に感度の低い軽質量気体の真空装置への導入時に起きうる過圧を未然に防ぐ機能の付加にも成功した。

2. 真空計の構成

Fig. 1は音叉型水晶振動子の構造模式図、Fig. 2は本真空計の電気回路構成を示す図である。電流電圧変換器、電圧制御減衰器、1/10減衰器および比較器とによって定電圧駆動形の自励発振回路を構成し、水晶振動子を100 mVピーク値の一定電圧で駆動している。電流電圧変換器の出力振幅は水晶振動子の共振インピーダンス(Z)に反比例する。これを直流として16 bit分解能のA/D変換器でデジタル値に変換し、CPUに取りこむ。そして演算によって共振インピーダンス(Z)とインピーダンス変化量 $\Delta Z (= Z - Z_0)$ とを求めている。ここで Z_0 は振動子自身の固有インピーダンスである。水晶振

* 平成4年10月30日 第33回 真空に関する連合講演で講演

** バキュームプロダクツ株式会社 (〒184 東京都小金井市本町4-1-1)

動子の共振周波数は周波数カウンターによって計数され、CPUに取りこまれる。そしてメモリーに記録してある周波数と温度との対照表を用いた演算によってセンサー温度が求められ、その温度の値から Z_0 の補正量が計算され、センサー温度変化に対する補正がおこなわれる。

3. 新しい圧力センサー

腕時計用の振動子を用いたこれまでの水晶真空計は感

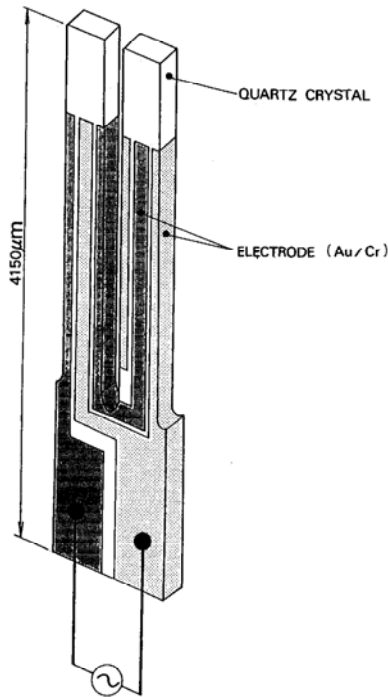


Fig. 1. Configuration of the thermometer-type oscillator.

度、振動子固有のノイズ、そして周囲温度によるインピーダンス変化等の影響のため、圧力測定下限は約1 Pa (恒温槽型で0.1 Pa) が限界であった^{5,6)}。

測定圧力範囲のより低圧側への拡張と高精度化、および温度補償を精度良く行う目的で新しいセンサーを使用した。

高感度、高精度化には、振動子自身の電氣的、機械的損失の低減、振動子の寸法あるいは気体の摩擦効果によるインピーダンス変化の大きい結晶方位の選択等が考えられる。インピーダンス変化に及ぼす振動子の形状の影響については、振動部を細長くすることで測定圧力下限をより低圧側に拡張できることはすでに報告されている^{3,7,8)}。しかし、振動部を細長くすることにより測定時定数が長くなることや外部振動の影響を受けやすいなど実用的には問題がある。

今回使用した振動子のサイズは、測定時定数や外部振動の影響を考慮して時計用とはほぼ同じであるが、Z板を基準として、X軸を回転軸として結晶方位を $-15^\circ \sim -30^\circ$ 回転した水晶板から形成したものである。

Fig. 3は温度に対する振動子の共振インピーダンス(Z_0)と共振周波数(f)の関係を示す測定データであり、 f が温度に対して比例(腕時計用は2次曲線特性)する温度センサーの機能をもっていることが解る。

Fig. 4は圧力 $< 1 \times 10^{-4}$ Paで、温度 $20 \pm 0.1^\circ\text{C}$ における振動子自身のインピーダンス Z_0 の変動を記録した結果を示し、 Z_0 の変動は圧力換算で 1×10^{-3} Pa程度となり時計用に比べて約1/50ノイズレベルを低減できた。

Fig. 5はインピーダンス変化量 $\Delta Z (= Z - Z_0)$ と圧力の関係を示す。 ΔZ はいずれの気体についても低圧で圧力に比例し、大気圧付近では圧力の1/2乗で増加し、中間の圧力で圧力依存性が徐々に小さくなる特性を示して

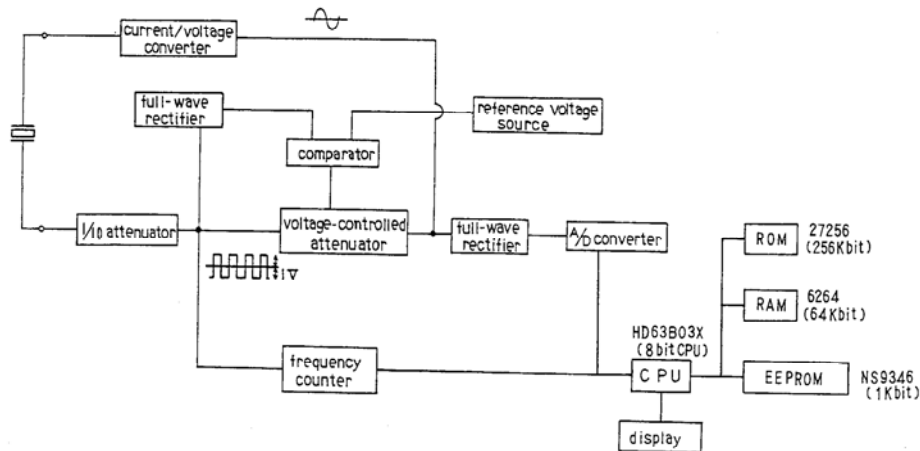


Fig. 2. Circuit diagram of the quartz friction vacuum gauge.

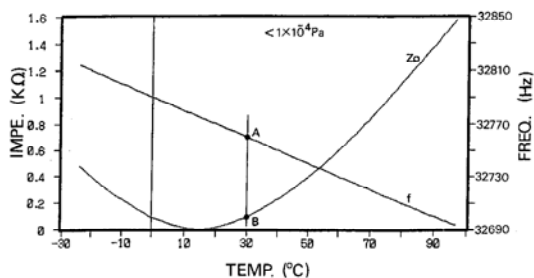


Fig. 3. Temperature dependence of the intrinsic impedance Z_0 and resonance frequency measured for the thermometer-type oscillator.

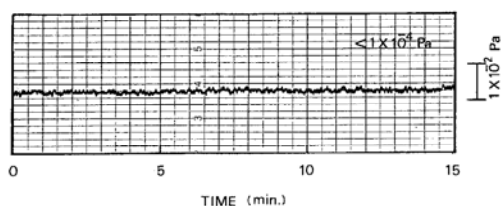


Fig. 4. Fluctuation of the intrinsic impedance Z_0 at constant temperature under a pressure of less than 1×10^{-4} Pa.

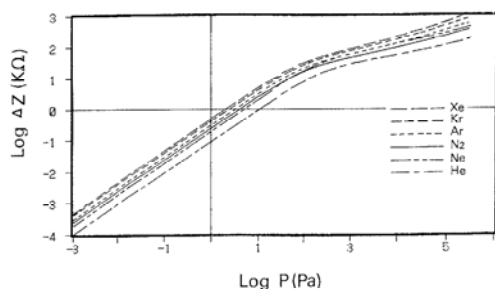


Fig. 5. Pressure dependence of the impedance increment ΔZ for six gases.

おり従来の時計用と同じ特性である。

4. 温度補償

振動子の共振インピーダンス Z_0 の温度特性は Fig. 3 の如く 15°C 前後で最小値となる 2 次曲線となり、広い温度範囲で $\pm 1 \text{ k}\Omega$ 程度変化する。従って Fig. 5 の 1 Pa 以下 (ΔZ が 100Ω 以下) では温度によるインピーダンス変化が測定値に大きく影響する。

Z_0 の温度による変化を小さくするために振動子をヒーター、温度センサーとともにアルミニウムに埋め込み振動子を一定温度 ($\sim 50^\circ\text{C}$) に保持できるようにした測定子が報告され実用化されてる⁵⁾。しかしながら、こ

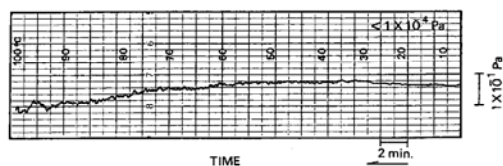


Fig. 6. Change in the intrinsic impedance Z_0 with thermal compensation during temperature variation from 10 to 60°C .

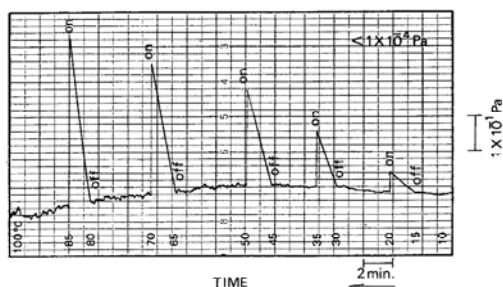


Fig. 7. Variation of the intrinsic impedance Z_0 due to switching of the thermal compensation function. The pressure and temperature are the same as in Fig. 6.

の方式では温度変化に対する応答が遅く、またヒーター温度を一定に保つための制御回路が必要となる。

本真空計では Fig. 3 の共振周波数特性を利用して振動子自身の温度 (例えば、Fig. 3 A 点に対応する温度) を正確に検出し、その時の温度による共振インピーダンスの変化分 (Fig. 3 B 点の値) を用いて測定値を補正する事によって温度補償を行う方式とした。センサー発振周波数を計数する事により毎秒 1 回センサー温度を 0.03°C の分解能で計算し、 Z_0 を 0.2Ω 程度の分解能で補償する。これは N_2 に対して約 $1 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ の圧力分解能での補償が可能になる。

チャンパー内圧力を $1 \times 10^{-4} \text{ Pa}$ 以下に保ち、センサー温度を $10^\circ\text{C} \sim 100^\circ\text{C}$ まで連続的に変化させた時の本真空計圧力指示変化を Fig. 6 に示す。同じような連続的温度変化時に温度補償機能を入切した時の圧力変化を Fig. 7 に示す。

Fig. 6 において振動子温度の 10°C から 60°C への変化に対する圧力指示値の変化は $2 \times 10^{-2} \text{ Pa}$ である。温度補償なしではこの温度変化によって測定される振動子共振インピーダンスが $0.6 \text{ k}\Omega$ 程度変わるので圧力指示は 4 Pa 程度まで上昇してしまう。従って、本真空計で用いた温度補償によって温度ドリフトが $1/100$ 以下に小さくなった事になる。振動子温度が 70°C を超えると温度補

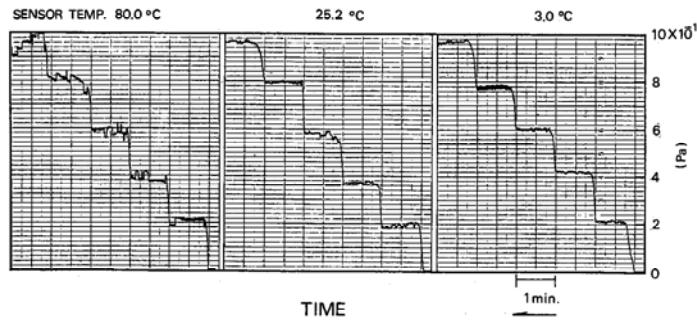


Fig. 8. Variation of the pressure indication during stepwise pumping down for different gauge temperatures.

償の誤差, すなわち振動子共振インピーダンス変化と測定した共振周波数から計算した真空計の自動補償の差が大きくなり90°Cでは30°Cのときの値に対して 8×10^{-2} Pa程度圧力指示が低下する。これは温度に対する振動子共振インピーダンス特性 (Fig. 3 Z_0) が70°C以上で振動子間の特性のバラツキが大きいためである。

Fig. 7において温度補償を切った時急に圧力指示値が上昇しているが, これはFig. 3の共振インピーダンスの温度変化がそのまま圧力指示値に反映している事になる。本真空計では温度補償を切った時も補償量は記憶されているので補償が入れば元の圧力値に戻る。

センサー温度3.0°C, 25.2°C, 80.0°Cのときチャンパー内圧力を 2×10^{-1} Paステップで変化させたときの真空計の圧力指示値の変化をFig. 8に示す。80.0°Cにおける圧力指示値の段階的变化は本温度補償の温度測定分解能が0.03°Cである事による。すなわち, より低い温度に比較して, 80°Cでは, 1°C当たりの補償インピーダンス値が大きく, 25°Cでは18 $\Omega/^\circ\text{C}$ 程度であるのに対し, 80°Cでは約2倍の40 $\Omega/^\circ\text{C}$ と大きくなるためである。これに対してはメモリ容量の増大などによる計算精度の向上によって改善することは可能であるが, 実用真空計としては価格対性能比を考慮して現状の特性とした。本温度補償機能によりセンサー温度10°Cから60°Cの範囲内では圧力測定下限が 1×10^{-2} Paまで拡大された事を実験的に確認することができた。

5. 各種気体に対する感度校正

水晶振動子の圧力と共振インピーダンスの関係は理論的に確立されており, 全圧力領域における共振インピーダンス変化量 ΔZ と圧力との関係は次の統一式で記述される¹⁾。

$$\Delta Z = C(6\pi\eta'R + 3\pi R^2 \sqrt{Z \cdot \eta' \rho \omega}) \quad (1)$$

ここで

$$\eta' = \eta \frac{1}{1 + \frac{\zeta}{\varepsilon R}}, \quad \zeta = \frac{\eta}{P} \sqrt{\frac{\pi R_0 T}{2M}} \quad (2)$$

η' : 見かけの粘性率 η : 粘性率
 ε : 数因子 ζ : すべり係数
 R : 振動子の厚み ρ : 密度
 ω : 共振周波数 C : 比例定数

今回使用した振動子も(1)式と実験値とが非常に良く一致する。

我々は実用的な真空計に適用するために真空計で測定している ΔZ から圧力値を, 通常使用するのに十分な計算速度で求めるために(1)式を $P=f(\Delta Z)$ の形に変形するとともに, 分子流・中間流と粘性流との2つの領域での圧力値を連続的に接続することを試みた。

5.1 分子流・中間流領域

この領域では, (1)式右辺第2項は第1項と比べて小さく, 無視できるので同式は(3)式とみなせる。

$$\Delta Z = C \cdot 6\pi\eta \frac{1}{1 + \frac{\zeta}{\varepsilon R}} R \quad (3)$$

この(3)式を $P=f(\Delta Z)$ の形に変形すると(4)式となる。

$$P = K_3 \frac{\Delta Z}{1 - K_4 \Delta Z} \quad (4)$$

ここで

$$K_3 = \frac{1}{C \cdot 6\pi R^2 \cdot \varepsilon} \sqrt{\frac{\pi R_0 T}{2M}} \quad (5)$$

$$K_4 = \frac{1}{C \cdot 6\pi R \eta} \quad (6)$$

K_3 は $1/(M)^{1/2}$ に比例し, また K_4 は $1/\eta$ に比例する値である。

5.2 粘性流領域

圧力の高い粘性流領域では η' と η は一致する。従って(1)式の η' を一定値 η で置き換えることができるので

(7)式となる.

$$\Delta Z = C(6\pi\eta R + 3\pi R^2 \sqrt{2\eta\rho\omega}) \quad (7)$$

ここで

$$\rho = \frac{M}{R_0 T} \quad (8)$$

$P=f(\Delta Z)$ の形に変形すると(9)式となる.

$$P = \left(\frac{\Delta Z - K_1}{K_2} \right)^2 \quad (9)$$

ここで

$$K_1 = C \cdot 6\pi\eta R \quad (10)$$

$$K_2 = \sqrt{\frac{2\eta M \omega}{R_0 T}} 3\pi R^2 \cdot C \quad (11)$$

K_1 は η に比例し, K_2 は $(\eta \cdot M)^{1/2}$ に比例する値である.

5.3 全圧力領域

分子流・中間流領域及び粘性流領域において, 共振インピーダンス ΔZ から圧力値 P を求める近似式を導出したが近似が粗いので, K_1, K_2, K_3, K_4 に(1)式と同じ数値を導入しても中間流領域で2つの領域の式(4), (9)が接続しない. Fig. 9 は Xe と Ne の場合を示す. このような不連続の問題を解消するために我々は分子流領域及び粘性流領域では(4), (9)式と実験値が非常に良く一致することに立脚して中間流領域のみに影響する(4)式の K_4 を変化させ, (4), (9)式を連続させることを試みた. (4)式と(9)式が連続するとすれば, 両式の接続点で次式が成立する.

$$\frac{K_3 \cdot \Delta Z}{1 - K_4 \cdot \Delta Z} = \left(\frac{\Delta Z - K_1}{K_2} \right)^2 \quad (12)$$

整理すると

$$\Delta Z^3 + 3b\Delta Z^2 + c\Delta Z + d = 0 \quad (13)$$

ここで

$$b = -\frac{1 + 2K_1 \cdot K_4}{3K_2}$$

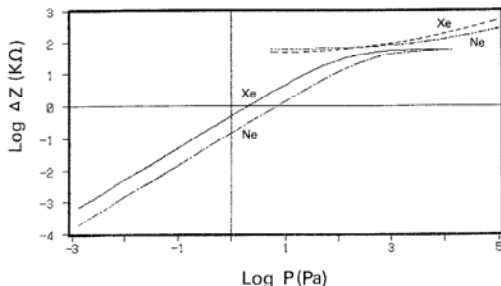


Fig. 9. Pressure dependence of the impedance increment ΔZ for Xe and Ne calculated using equations (4) and (9).

$$C = \frac{2K_1 + K_1^2 K_4 + K_2^2 K_3}{K_4}$$

$$d = -\frac{K_1^2}{K_4}$$

3次方程式における cardano の公式により

$$y = b^2 - C/3$$

とおくと

$$q = \frac{bC - 3b^2 - d}{2}$$

$$q^2 - y^3 < 0 \quad \text{実数解}$$

$$q^2 - y^3 = 0 \quad \text{重解}$$

$$q^2 - y^3 > 0 \quad \text{解なし}$$

Fig. 10 にこの関係を図示した. ここで a は $q^2 - y^3 > 0$ に対応する曲線, b は $q^2 - y^3 = 0$ に対応する曲線 c は $q^2 - y^3 < 0$ に対応する曲線である. 分子流領域のカーブと粘性流領域のカーブが接しない場合は曲線 a に対応する. 従って $q^2 - y^3 = 0$ となるような K_4 を求めれば分子流領域の曲線と粘性流領域の曲線とが接して連続性を確保できる. $q^2 - y^3 = 0$ の条件を満たす K_4 を求める場合, $q^2 - y^3 = 0$ の式で直接演算する方法と $q^2 - y^3 < 0$ で $q^2 - y^3$ を 0 に収束させて K_4 を求める方法とが可能である.

$q^2 - y^3 = 0$ の式で直接演算する場合, K_4 の 6次方程式を解くことになり実用的でないので, $q^2 - y^3$ を 0 に収束させて求める方法を用いた.

分子量 M , 粘性率 η から求めた K_1, K_2, K_3, K_4 について $q^2 - y^3$ を求め $q^2 - y^3 > 0$ なら K_4 減少, $q^2 - y^3 < 0$ なら K_4 を増加させる方法で K_4 を修正し, $q^2 - y^3 < 0$ で 0 にできるだけ近づける方法をとった. つぎに式(4), 式(9)の接続点 $\Delta Z = X_3$ は, $q^2 - y^3$ が零になれば cardano の式が適用できるが, そうはならないので newton 法で求める方式とした.

以上の方法によって任意の気体の分子量 M と粘性率

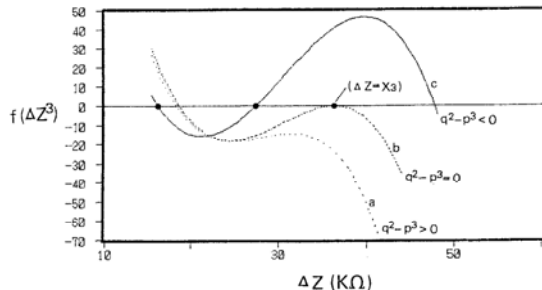


Fig. 10. Relationship between approximation function $f(\Delta Z)$ corresponding to pressure and ΔZ for different Cardano formula conditions.

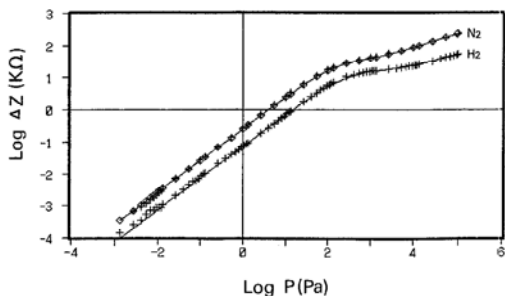


Fig. 11. Comparison of the calculated and measured values of the impedance increment ΔZ as a function of the pressure. Solid lines are given by calculation, and the plots by measured values.

η を入力することによって K_1, K_2, K_3, K_4 の値を決定出来ると共に分子流領域の(4)式と粘性流領域の(9)式の接続点 X_3 が決定される。

X_3 は測定した共振インピーダンス Z と固有インピーダンス Z_0 の差 ΔZ に対する値であるから、測定で求めた ΔZ の値と上記で求めた接続点 X_3 の値の大小判定を行い、 $\Delta Z \leq X_3$ の場合は測定している圧力の領域は分子流および中間流領域にあることを意味するので(4)式から圧力 P を演算する。 $\Delta Z > X_3$ の場合は測定している圧力が粘性流領域にあることを意味するので(9)式から圧力 P を演算する。これにより分子流から粘性流領域までを連続して近似できることになる。

以上を整理すると、分子量 M 、粘性係数 η が入力された時点で(5), (6), (10), (11)式より $K_1 \sim K_4$ を求め、(4), (9)両式が接続できるよう修正し、両式の接続点 $\Delta Z = X_3$ を求めることになる。これによって分子流から粘性流まで連続した近似ができた。この計算に 8 bit マイクロプロセッサ HD6303 で約 700 msec を要した。通常の圧力計算は 10 msec 程度で終了し、実用的な計算速度が達成された。

Fig. 11, Fig. 12 は N_2 と H_2 に対して今回の方式で算出した校正曲線(実線)と実測値(\diamond , $+$ 印)ならびに圧力計算値の実験値に対する誤差を示した。 10^{-2} Pa 以上の圧力では 10% 以内で一致している。 H_2 や Xe のような校正曲線が大きく異なる気体でも 20% 以内の誤差で校正曲線が計算によって求めることができた。

6. 水素の自動判定

水晶振動子共振周波数は、分子流領域では殆ど変化がないが、粘性流領域での圧力依存性としては次の(14)式が成立する¹⁾。

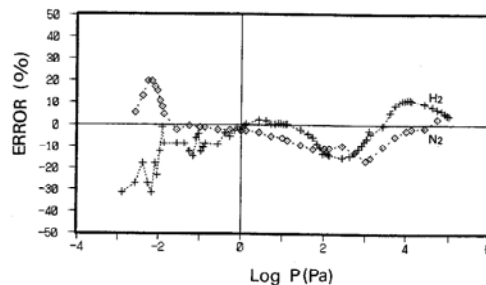


Fig. 12. Error in pressure estimation vs pressure.

$$\Delta\omega/\omega_0 = -\frac{1}{2m} \left(3\pi R^2 \sqrt{\frac{2\eta\rho}{\omega}} + \frac{2}{3} \pi R^3 \rho \right) \quad (14)$$

特に大気圧近傍では括弧内第 2 項が支配的であり、共振周波数の変化分はほぼ圧力に比例することが実験と理論の両面から確かめられている。

一方大気圧近傍における共振周波数の気体種依存性は(14)式より

$$\begin{aligned} \Delta\omega/\omega_0 &= -\frac{1}{2m} \left(\frac{2}{3} \pi R^3 \rho \right) \\ &= -\frac{1}{4} \frac{\rho}{\rho_0} \end{aligned} \quad (15)$$

($m = (4/3)\pi R^3 \rho_0$, ρ_0 は水晶の密度)

ここで、気体密度 ρ は分子量に比例するので

$$\Delta\omega/\omega_0 \propto M \quad (16)$$

が成立する。

従って、大気圧近傍では水晶振動子の共振インピーダンスと共振周波数の変化を計測することによって気体種の特定が可能である。

本真空計は軽質量気体の感度が低いので N_2 や空気に対する圧力表示の状態では H_2 を導入するとき、表示は大気圧にも拘らず容器内は十気圧以上に達する可能性がある。我々はこの過圧を未然に防ぐために共振周波数の圧力依存の特性を H_2 の自動判定機能に利用することとした。

共振周波数の温度依存性はすでにセンサー温度の検出に使用し、温度変化による共振インピーダンスの補正に利用しているが、温度の変化による共振インピーダンス変化が圧力測定に影響を与える圧力領域は 10 Pa 以下であり、10 Pa 以上の圧力領域では温度補償の必要はない。従って共振周波数の変化は 10 Pa 以下の圧力領域では温度補償のための温度検出、10 Pa 以上の圧力領域では気体種 (H_2) の特定に用いた。

H_2 の自動判定機能は水晶振動子の ΔZ を測定すると同時に水晶振動子の共振周波数 f の変化 $\Delta f (= f - f_0)$ ⁹⁾ を測定し、両者の相関を調べることによって、被測定気体

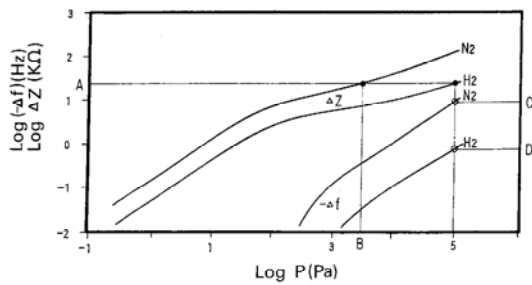


Fig. 13. Pressure dependence of resonant frequency f and increment ΔZ of resonant impedance for nitrogen and hydrogen gases.

が H_2 であると判定された場合には、自動的に分子量 M と粘性率 η を水素の値に変更する。(ここで f は任意の圧力での共振周波数、 f_0 は圧力が 1 Pa 以下の共振周波数) すなわち、Fig. 13 のように H_2 の場合、圧力 1×10^5 Pa でのインピーダンス ΔZ は 22.3 k Ω (A 点)、 N_2 の場合は同じ ΔZ での圧力表示は 2.5×10^3 Pa (B 点) となる。一方、圧力上昇前の水晶振動子共振周波数との差 Δf は N_2 の場合、 -0.75 Hz (C 点)、 H_2 の場合、 -0.33 Hz (D 点) となる。従って、 N_2 表示のまま H_2 を真空容器に導入した場合でも ΔZ が 22.3 k Ω の Δf を測定することにより、 H_2 か否かの判定が可能になった。

Fig. 14 に本真空計が H_2 気体を自動的に検知し H_2 を 1×10^5 Pa まで導入した例を示す。

本真空計を真空容器に取付け、容器を 1×10^{-4} Pa 以下に排気した後、排気系を切り離し容器に H_2 を導入した時の真空計の表示 (P)、周波数 (f)、そしてインピーダンス変化量 (ΔZ) を時間経過で示した。 H_2 導入によって ΔZ が 0.1 Ω から増加、それに伴い表示も 0.01×10^{-1} Pa から増加し、表示が約 1×10^2 Pa で f も 32382.4 Hz から減少する。そして ΔZ が約 48.5 k Ω 、 f が 32382.0 Hz の時点で導入している気体が H_2 であることを判定し、分子量 M と粘性率 η の値を H_2 の値に修正することによって N_2 表示 2.7×10^2 Pa から H_2 表示 6.7×10^4 Pa となり過圧することなしに 1×10^5 Pa まで H_2 を導入することができた。

つぎに圧力・ガス種共に未知の真空装置に本真空計を取り付けて作動した場合の圧力表示及びセンサー温度表示は、共振インピーダンス変化からガス種を N_2 と仮定し圧力を計算、10 Pa 以下の領域では共振周波数からセンサー温度を計算しそれぞれ表示することができる。

ここで未知ガスが最も感度の低い H_2 でも、 N_2 仮定で 10 Pa 以下であれば H_2 圧力として約 1 Pa 以下の圧力となり、圧力による周波数の変化がない領域でありセンサー温度は正確に求まる。圧力が大気圧近傍では圧力によ

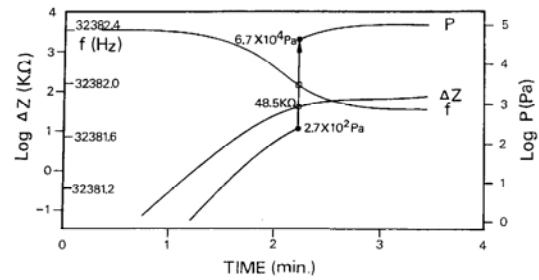


Fig. 14. Variation of the frequency, impedance and pressure indication during introduction of hydrogen after evacuation.

って周波数が変化するため、センサー温度は正確に求められない。(N_2 で数 $^{\circ}$ C の誤差となる)

今回実用的にも有益で、 N_2 と比較して周波数の変化の差が最も大きい H_2 について試みたが、原理的には周波数の計測精度を向上することによって他の気体についても H_2 同様の判定が可能である。

7. むすび

水晶振動子の共振インピーダンスと周波数の気体の圧力に対する変化の特性が理論的に解明されていることに着目して、高感度、高機能水晶真空計の開発を進めた。

温度センサー機能を有する高感度、低ノイズの水晶振動子採用により、振動子自身の温度を 0.03° C 分解能で測定し、温度変化による Z_0 を約 0.2Ω の分解能で補償することによって圧力測定下限を 1×10^{-3} Pa まで拡張し、 10^{-2} Pa 領域の圧力を安定に測定できた。また、圧力による共振インピーダンス変化の気体種依存性を理論式に基づいて計算するマイクロプロセッサ用データ処理法を開発し、圧力 P を測定した ΔZ から 8 bit マイクロプロセッサを用いて計算するのに約 10 msec という実用的演算時間を達成することができた。

気体種に対する感度補正に関しては、測定気体の分子量 (M) と粘性係数 (η) とを入力することにより、その気体の圧力を直接表示から読み取ることが可能になった。さらに、共振インピーダンスと共振周波数の気体種依存性を利用する大気圧近傍での H_2 の自動判定機能の付加によって、真空装置への導入時に起こりうる過圧を未然に防ぐことも可能となった。

水晶真空計は各種気体圧力を広い圧力範囲で、実用的な精度で測定できることから、低中真空領域の真空計として有用である。さらに、小型で低消費電力であることと温度変化に対する自動補正法を開発したことにより、B-A ゲージのような熱陰極を持つ電離真空計球の中に水晶真空計を組み込み、1つの真空計球で大気圧から超

高真空領域まで測定できる真空計の実現も可能となった。

尚、ここに報告した高感度、高機能水晶真空計の技術は現在製品化がほぼ完了している。

終りに、本真空計開発に際して御助言をいただいた電子技術総合研究所の国分清秀氏、東北工業技術研究所の小野雅敏氏に深く感謝いたします。

〔文 献〕

- 1) 国分清秀, 平田正紘, 小野雅敏, 村上 寛, 戸田義継: 真空 29 (1986) 101.
- 2) 小林太吉, 北條久男, 永井 充: 第33回真空に関する連合講演会講演予稿集 (1992. 日本真空協会).
- 3) M. Ono, M. Hirata, K. Kokubun, H. Murakami, H.

Hojo, H. Kawashima and H. Kyogoku: J. Vac. Sci. Technol. **A4** (1986) 1728.

- 4) T. Kobayashi, H. Hojo and M. Ono, Vacuum, **44** (1993) 613.
- 5) M. Hirata, M. Ono, K. Kokubun, M. Abe, N. Maruno, K. Shimizu and T. Ogawa: J. Vac. Sci. Technol. **A5** (1987) 2393.
- 6) M. Ono, M. Hirata, K. Kokubun, H. Murakami, F. Tamura, H. Hojo, H. Kawashima and H. Kyogoku: J. Vac. Sci. Technol. **A3** (1985) 1746.
- 7) M. Hirata, K. Kokubun, M. Ono and K. Nakayama: J. Vac. Sci. Technol. **A3** (1985) 1742.
- 8) K. Kokubun, M. Hirata, M. Ono, H. Tanaka, R. Aida and A. Nagata: Vacuum **40** (1990) 521.
- 9) K. Kokubun, M. Hirata, M. Ono, H. Murakami and Y. Toda: J. Vac. Sci. Technol. **A3** (1985) 2184.