振動膜形真空計の特性*

田 中 猛 夫**

(昭和47年1月10日受理)

On the Characteristics of the Vibrating Diaphragm Vacuum gauge

Takeo TANAKA

(Central Research Laboratory Fuji Electric Co. Ltd. Yokosuka, Kanagawa)

(Received. Jan. 10, 1972)

A vibrating-diaphragm vacuum gauge has been developed that is available for continuous measurement of the pressure ranging from 10^{-3} to 20 Torr. The Pressure measurements have been made by two methods. One method is based on the fact that the amplitude of vibrating-diaphragm depends on the gas pressure. Following characteristics have been obtained by this method: (1) The response time is 0.06 sec at 0.2 Torr; (2) The temperature dependence of sensitivity is $0.08\%/^{\circ}\text{C}$ at 0.2 Torr and $-0.2\%/^{\circ}\text{C}$ at 10 Torr; and (3) The repeatability at room temperature is less than 0.7%. The other method is on the basis of the fact that the resonance frequency of diaphragm depends on the gas pressure. The outstanding characteristics obtained by this method is that the gas dependence of sensitivity is a little. For example, the difference of sensitivity for air and helium gases is 4% at 10 Torr.

1. 緒 言

中低真空領域で利用できる真空計には色々なものがあるがもっとも良く使われているのはマクラウド真空計と熱伝導形真空計であろう。その特徴として前者は絶対測定を行なうことができるが、手動操作であり連続測定ができない。後者は小形で簡便であるが温度依存性が大きく、圧力と指示値の関係が複雑で精度が上らない。

この他の形式では隔膜形真空計、放射線を応用したもの、油マノメーター、粘性真空計等がある。隔膜形真空計は絶対測定ができ、精度の良いものが作られているが差圧を利用しているため常に基準圧力が必要である。その他のものは一般にはあまり使用されていない。

振動膜形真空計は金属膜を電気力によって強制振動させてその周辺の気体と振動の相互作用を応用して真空度を測定するもので John Dimeff¹⁾ らによって発展させられた理論によるものである。この方式によると連続測定ができる、基準圧力の必要がない、精度が良い等の利点が報告されている。この方式の真空計の有用性を検討するために、我々は振動膜形真空計の検出端および半導体化した制御回路を試作して、感度特性、応答時間、精

Fig. 1 Schematic diagram of vibrating-diaphragm vacuum gauge sensor.

度等を実験的に調べた。Dimeff らの方法の他に、同じ検出端を使って膜の共鳴振動数の変化によっても真空度を測定することができて、しかもこの方法によれば感度の気体の種類による差が非常に小さいことを見出した。

2. 基本原理

2.1 振動の振幅を応用する方法

Fig. 1 に振動膜形真空計の検出端の原理図を示す。中央の薄い金属膜を一つの電極としてその両側に近接しておかれた2個の固定電極との間に直流電圧 V_s を印加する。駆動電極と名づける方の固定電極に前記直流電圧に

* 昭和46年4月1日 第18回応用物理学関係連合講演会で講演。

** 富士電機中央研究所(横須賀市長坂2の2の1)

重畳して交流電圧を印加するとクーロン力により膜は強制振動させられる。交流電圧の周波数がちょうど膜の基本の固有振動数に一致すると膜は大きな振幅で共振する。振動する膜と電極の間の気体の圧力と種類に応じて膜振動はある抵抗力を受ける。駆動電圧が一定のときは抵抗力に応じた振幅で振動する。逆に膜を一定の振幅で振動させるためには消費される運動エネルギーを補うために駆動電圧を抵抗力に応じて変化させる必要がある。

膜振動と気体の相互作用については Dimeff¹⁾ らが行なった解析によると、膜と駆動電極の間に、 $V = V_s + V_1 \sin \omega t$ 、膜と検出電極の間に V_s を印加したときの膜の単位面積に働く実効的なクーロン力 F_e は次のようになる。

$$F_e = \frac{\epsilon}{2} \left\{ \left(\frac{V_s + V_1 \sin \omega t}{X_{P1}} \right)^2 - \left(\frac{V_s}{X_{P2}} \right)^2 \right\} \\ = \frac{\epsilon}{2} \left\{ \frac{V_s^2}{X_{P1}^2} - \frac{V_s^2}{X_{P2}^2} + \frac{V_1^2}{2X_{P1}^2} + \frac{2V_s V_1}{X_{P1}^2} \sin \omega t - \frac{V_1^2}{2X_{P1}^2} \cos 2\omega t \right\} \quad (1)$$

ここに X_{P1} 、 X_{P2} は静止時の膜と両電極の間隙、 ϵ は気体の誘電率である。右辺第 1, 2, 3 項は膜の変位が X_{Pi} に比べて小さい時は一定力となり振動力にはならない。第 5 項は交流電圧の 2 倍の周期の振動力であるが、 $V_s > V_0$ であり ω なる角振動数で膜が共振しているときはこれを無視できる。したがって (1) 式は次のように近似できる。

$$F_e = \frac{\epsilon V_s V_1}{X_{P1}^2} \sin \omega t \quad (2)$$

振動が共振状態にあるとき変位 a は駆動力に比べて位相が $\frac{\pi}{2}$ 遅れている。変位した膜面を 2 次放物面で近似すると a は次のようにあらわすことができる。

$$a(r, t) = a_m \left(1 - \frac{r^2}{R_0^2} \right) \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) \quad (3)$$

ここに R_0 : 膜半径、 r : 膜面の位置をあらわす中心からの距離である。

したがって電気力が単位時間に膜全体になす仕事 W_e は次のようになる。

$$W_e = \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{r_p} \int_0^{2\pi} F_e \frac{da}{dt} 2\pi r \cdot dr \cdot dt \\ = \frac{\pi \epsilon V_s V_1 r_p a_m}{4 X_{P1}^2} \omega \quad (4)$$

ここで、 r_p は電極半径。

気体中の膜振動により消費される振動エネルギーを求めるためにまず狭い間隙中の気体の圧力変動分 ΔP_0 を求めると次のようになる。

$$\Delta P_0 = \frac{P_0 a_m}{X_{P1}} \left\{ \left(1 - \frac{r^2}{R_0^2} \right) - \frac{4P_0}{\omega K R_0^2} \right. \\ \times \left(\frac{\text{ber } \alpha r \times \text{bei } \alpha R_0 - \text{bei } \alpha r \times \text{ber } \alpha R_0}{\text{ber}^2 \alpha R_0 + \text{bei}^2 \alpha R_0} \right) \Big\} \cos \omega t \\ - \frac{4P_0^2 a_m}{\omega K R_0^2 X_{P1}} \\ \times \left(1 - \frac{\text{bei } \alpha r \times \text{bei } \alpha R_0 + \text{ber } \alpha r \times \text{ber } \alpha R_0}{\text{ber}^2 \alpha R_0 + \text{bei}^2 \alpha R_0} \right) \\ \times \sin \omega t \quad (4)$$

ここに P_0 : 被測定圧力、 K : 気体の抵抗係数、 $\alpha = \sqrt{\omega K / P_0}$ 、 bei 、 ber は Kelvin 函数である。

膜が ΔP_0 にさらって単位時間に気体になす仕事 W_0 は次のようになる。

$$W_0 = \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{R_0} \int_0^{2\pi} \Delta P_0 \times \frac{da(r, t)}{dt} 2\pi r \cdot dr \cdot dt \\ = \frac{\pi a_m^2 P_0^2}{K X_{P1}} \left\{ 1 - \frac{16}{\alpha^3 R_0^3} \right. \\ \times \left(\frac{\text{ber}' \alpha R_0 \times \text{ber } \alpha R_0 + \text{bei}' \alpha R_0 \times \text{bei } \alpha R_0}{\text{ber}^2 \alpha R_0 + \text{bei}^2 \alpha R_0} \right) \Big\} \quad (5)$$

Dimeff¹⁾ は K の値として次の値を採用している。

$$K = \frac{\rho c}{6\beta X_{P1}} \quad \lambda > X_{P1} \quad (6)$$

$$K = \frac{9\mu}{X_{P1}^2} \quad \lambda < X_{P1} \quad (7)$$

ここに ρ : 気体の密度、 c : 気体の分子速度、 β : 運動量伝達適応係数、 μ : 粘性係数、 λ は平均自由行程である。したがって W_0 は次のように書き直すことができる。ただし Kelvin 函数部分は Y_0 で置きかえたものである。

$$W_0 = 2\pi \beta c a_m^2 \left(1 - \frac{16}{\alpha^3 R_0^3} Y_0 \right) \quad \lambda > X_{P1} \quad (8)$$

$$W_0 = \frac{\pi a_m^2 X_{P1}}{9\mu} \left(1 - \frac{16}{\alpha^3 R_0^3} Y_0 \right) \quad \lambda < X_{P1} \quad (9)$$

一方金属膜の内部摩擦によっても運動エネルギーは消費される。内部摩擦については定量的に説明できないところが多いが、一般に金属の内部摩擦による振幅の対数減衰率 δ は周波数依存性が小さいこと、小振幅では振幅依存性が小さいこと、ならびに温度とともに多少減少する傾向があることが知られている。ここでは δ を定数と考える振動の一周期の間の振幅の減少を Δa とすると定義から $\delta = \Delta a / a$ であらわされる。したがって一周期の間の運動エネルギーの減少 ΔW_F は次のようになる。

$$\Delta W_F \propto (\Delta a)^2 = \delta^2 a^2 \quad (10)$$

比例定数 γ を用いると単位時間あたり振動エネルギーの減少 W_F は次のようになる。

$$W_F = \gamma \frac{\omega}{2\pi} \delta^2 a^2 \quad \dots\dots\dots (11)$$

電気が単位時間になした仕事は振動膜が気体になした仕事 W_0 と膜内部になした仕事 W_F に等しいと考えることができる。

$$W_e = W_F + W_0 \quad \dots\dots\dots (12)$$

コンデンサマイクロフォンの形で膜の変位に比例した交流電圧 V_0 を検出電極から取り出すことができるがこの時の関係式は次のようになる。

$$\frac{a_0}{X_{P2}} = \frac{V_0}{V_s} \quad \dots\dots\dots (13)$$

(3)(8)(9)(10)(12)(13)の各式から次の関係式が求まる。

$$V_1 = \frac{X_{P1}^2 X_{P2} V_0}{V_s^2 r_p^2 \varepsilon} \left\{ \frac{16\beta c}{\omega} \left(1 - \frac{16}{\alpha^3 R_0^3} Y_0 \right) P_0 + \frac{\gamma}{\pi} \delta^2 \right\} \quad \lambda > X_p \quad \dots\dots\dots (14)$$

$$V_1 = \frac{X_{P1}^2 X_{P2} V_0}{V_s^2 r_p^2 \varepsilon} \left\{ \frac{4(X_{P1} + X_{P2})}{9\mu\omega} \left(1 - \frac{16}{\alpha^3 R_0^3} Y_0 \right) \times P_0^2 + \frac{\gamma}{\pi} \delta^2 \right\} \quad \lambda < X_p \quad \dots\dots\dots (15)$$

なお Kelvin 函数を含んだ項に数字を代入すると大体次の値になる。

$$X_p = 0.1 \text{ mm} \quad f = 2800 \text{ Hz} \quad 0.1 \text{ Torr で}$$

$$\frac{16}{\alpha^3 R_0^3} Y_0 = 0.044$$

$$X_p = 0.1 \text{ mm} \quad f = 3000 \text{ Hz} \quad 1 \text{ Torr で}$$

$$\frac{16}{\alpha^3 R_0^3} Y_0 = 0.038$$

$$X_p = 0.1 \text{ mm} \quad f = 4700 \text{ Hz} \quad 10 \text{ Torr で}$$

$$\frac{16}{\alpha^3 R_0^3} Y_0 = 0.01$$

即ちこれは充分小さく無視することができてその結果、低圧では $V_1 \propto P_0$ 、高圧では $V_1 \propto P_0^2$ の形であらわされる。

2.2 共鳴振動数を応用する方法

振動膜の共鳴振動数は圧力によって変化し、これによって圧力を測定することができる。

(4)式であらわされる圧力の変動分の膜面全体の平均値を求める。なお膜の両側での圧力変動の位相は π だけ異なるため、膜に作用する単位面積あたりの平均の力を F とすると次のようになる。

$$\begin{aligned} F &= 2\overline{\Delta P_0} = \frac{2}{\pi R_0^2} \int_0^{R_0} \Delta P_0 2\pi r dr \\ &= \frac{P_0 a_m}{X_p} \left(1 - \frac{16P_0}{K\omega R_0^3} Y_0 \right) \cos \omega t \\ &\quad - \frac{8P_0^2 a_m}{\omega K R_0^2 X_p} \left(1 + \frac{2}{R_0} Y_1 \right) \sin \omega t \quad \dots\dots\dots (16) \end{aligned}$$

$$\text{ここに } Y_1 = \frac{\text{ber}' \alpha R_0 \times \text{dei} \alpha R_0 - \text{bei}' \alpha R_0 \times \text{ber} \alpha R_0}{\text{ber}^2 \alpha R_0 + \text{ber}^2 \alpha R_0}$$

一方膜の変位の平均値を $\bar{a}$ とおいて膜振動を $\bar{a}$ の一次元の方程式であらわすと次のようになる。

$$m \frac{d^2 \bar{a}}{dt^2} + F + T \bar{a} = f(\omega t) \quad \dots\dots\dots (17)$$

ここに T は膜の張力に依存する弾性係数、 $f(\omega t)$ は角振動数 ω の強制振動項をあらわす。一方 $\frac{d\bar{a}}{dt}$

$-(\omega a_m/2) \sin \omega t$ であることを用いると(16)式の F は $\bar{a}$ に比例した項と $d\bar{a}$ に比例した項を含むことになる。これらを代入すると(17)式は次のように書き直すことができる。

$$m \frac{d^2 \bar{a}}{dt^2} + \xi \frac{d\bar{a}}{dt} + k \bar{a} = i(\omega t) \quad \dots\dots\dots (18)$$

$$\xi = \frac{16P_0^2}{\omega^2 K R_0^2 X_{P1}} \left(1 + \frac{2}{R_0} Y_1 \right)$$

$$k = T + \frac{2P_0}{X_p} \left(1 - \frac{16P_0}{K\omega R_0^3} Y_0 \right)$$

一般に (18)式であらわされる振動系の共振角振動数 ω は次のようになる。

$$\begin{aligned} \omega^2 &= \frac{k}{m} - \left(\frac{\xi}{2m} \right)^2 \\ &= \frac{1}{m} \left\{ T + \frac{2P_0}{X_{P1}} \left(1 - \frac{16P_0}{K\omega R_0^3} Y_0 \right) \right\} \\ &\quad - \left(\frac{1}{2m} \cdot \frac{16P_0^2}{\omega^2 K R_0^2 X_p} \right)^2 \left(1 + \frac{2}{R_0} Y_1 \right)^2 \quad \dots\dots\dots (19) \end{aligned}$$

(19)式によると K , ω , R_0 が充分大きくしかも金属膜の質量に比較して気体の質量を無視できる場合には

$$\omega \div \left\{ \frac{1}{m} \left(T + \frac{2P_0}{X_p} \right) \right\}^{\frac{1}{2}} \quad \dots\dots\dots (20)$$

となつて ω は圧力にのみ関係し気体の種類に依存しなくなる。

3. 制御機構

一般に共振状態にある振動体は周期的外力よりも約 $\pi/2$ だけ位相の遅れた振動を行なう。Fig. 1 の構造では出力信号 V_0 は膜の変位と同相で、駆動電圧 V_1 に比べて位相が $\pi/2$ だけ遅れている。したがって V_0 を増幅し $\pi/2$ だけ位相を進めて駆動電極に帰還することにより、検出端および電気回路を含めて膜の共鳴振動数で発振する自励発振系にすることができる。このように自励発振状態にある検出端の出力 V_0 を一定にするようにすれば入力電圧 V_1 は(14), (15)式で圧力 P_0 と関係づけることができる。

Fig. 2 は試作した真空計のブロックダイアグラムであ

Fig. 2 Block diagram of vibrating-diaphragm vacuum gauge.

Fig. 3 Outer view of vibrating diaphragm vacuum gauge.

Fig. 4 Input and output voltage of sensor.
Rectangular signal : input voltage, 0.5V/div, 0.1ms/div,
 $V_s = 18.3 \text{ V}$, 0.05 Torr, 2590 Hz,

る。検出端からの出力信号は前置増幅器でインピーダンス変換された後、主増幅器で増幅される。この後2つに分れて、一方は直流に変換されて負の基準電圧 V_r との和の形で演算増幅器に導かれる。その結果演算増幅器は出力は信号 V_2 と V_r を加えて増幅し符号を反転させたものである。主増幅器からのもう一方の信号は微分回路で 90° 位相を進めた後、矩形波に整形する。この矩形波でトランジスタチョッパを駆動して前記演算増幅器の

出力を矩形波（交流）に変える。この交流電圧を検出端の駆動電極に帰還することによって全体は自励発振回路になるとともに検出端出力を一定にするサーボ回路になる (Fig. 4)。

これらの回路および検出端の動作特性は次のようになる。

検出端で

$$V_1 = \left(\frac{a_1}{\omega} P_0 + b_1 \right) V_0 \text{ or } \left(\frac{a_1'}{\omega} P_0^2 + b_1 \right) V_0 \dots (21)$$

増幅器および整流器

$$V_2 = a_2 V_0 \dots (22)$$

演算増幅器で

$$V_3 = -a_3 (V_2 + V_r) \dots (23)$$

帰還の割合

$$V_1 = a_4 V_3 \dots (24)$$

(21), (22), (23), (24) の連立方程式を V_0 および V_3 について解くと次のようになる。

$$V_0 = \frac{-a_3 a_4 V_r}{a_2 a_3 a_4 + b_1 + \frac{a_1}{\omega} P_0} \dots (25)$$

$$V_3 = \frac{-a_3 V_r \left(b_1 + \frac{a_1}{\omega} P_0 \right)}{a_2 a_3 a_4 + b_1 + \frac{a_1}{\omega} P_0} \dots (26)$$

$a_2 a_3 a_4 \gg b_1 + \frac{a_1}{\omega} P_0$ がなりたつ時は (25), (26) 式は次のようになる。

$$V_0 = \frac{-V_r}{a_2} = \text{const} \dots (27)$$

$$V_3 = \frac{-V_r \left(b_1 + \frac{a_1}{\omega} P_0 \right)}{a_2 a_4} \dots (28)$$

演算増幅器の増幅率 a_3 を 25 倍にすると V_3 が最大の 10V のとき $b_1 + a_1 P_0 / \omega \div 20$, $a_2 a_3 a_4 \div 600$ となり上記の近似は妥当である。

Fig. 5 Schematic diagram of experimental apparatus.

V. P : Oil Diffusion pump. T : Gas reservoir.

C₁₋₅ : Glass valve. C₆ : Variable leak valve.

M₁ : Diaphragm manometer. M₂ : Ionization gauge. M₃ : Pirani gauge. M₄ : Vibrating vacuum gauge.

Fig. 6 V_3 Voltage against pressure for dry air.

(4), (5)式から明らかなように V_0 電圧は直流印加電圧 V_s の2乗に反比例する。したがって被測定ガスの圧力範囲に応じて V_s 電圧を切換えることにより、広い領域の圧力を測定することができる。実際には 0~0.2, 0~2, 0~10Torr の圧力範囲に応じて各々 V_s 電圧を20V, 60V, 180V にすることにより V_3 電圧を10V以下の電圧におさめることができる。

この真空計を比較的高い圧力で始動した時膜が振動を始めないときがある。また測定領域以上に圧力を上げる

と膜の振動は停止してしまう。再度測定領域に圧力が下がった時必ずしも膜は振動を始めない。これに対処するために、 V_3 電圧がある値を越えると発信器のスイッチが入って発振を始め、その出力で常に膜を刺激して膜の振動の開始を容易にする回路を採用することにより確実な動作を行なうことができるようにしてある。

4. 検出端

試作した検出端は厚み 5μ のステンレス膜を同材質の膜固定具で固定したもので、適当な基本固有振動数になるように膜の張力を調節してある。電極はセラミック板に固定したものを膜の両側から設置する構造になっている。

次に示す仕様は試作した検出端の一例である。

金属膜	SUS 27	厚み 5μ
電極面積		30mm ϕ
膜の振動部分		35mm ϕ
膜、電極間電気容量	$C_{XP1}=69.8pF$	$C_{XP2}=74.4pF$
基本共鳴振動数	2560Hz(於 $V_s=18.3V, 10^{-4}Torr$)	

5. 実験装置

Fig. 5 は振動膜形真空計の各種特性を測定するために用いた装置の概略図である。

油拡散ポンプ (V.P.) で容積 3l のリザーバー (T) を排気する。バリアブルリークバルブ

Fig. 7 (1) $V_3 - V_b$ against pressure. (2) $(V_3 - V_b)/\omega$ against pressure. (3) $(V_3 - V_b) \cdot \omega$ against pressure.

Fig. 8 V_s voltage against pressure for various gases. $V_s=20V$.

Fig. 9 V_s voltage against pressure for various gases. $V_s=60V$.

(C_6) から乾燥空気やその他の気体を任意量 リークさせることができ、他のバルブの操作とともにリザーバー内を任意の圧力にすることができる。リザーバーにはダイアフラム形差圧真空計 (M_1) (M. K. S 社製)、電離真空計 (M_2) (大亜真空製)、ピラニー真空計 (M_3) (日本真空製)、および振動膜形真空計が取付けてある。配管はすべて 15mmφ のガラス管により、接続部は真空用ゴム管による。

電圧の測定にはデジタルボルトメーター (タケダ Tr-6155M)、振動数の測定にはフリケンシカウンター (タケダ Tr-3715)、温度測定には 0~100°C の水銀温度計を使用した。

Table 1 Viscosity and mass number of various gases at 15°C.

gas	Viscosity(dyne sec/cm ²)	mass number
CO ₂	1448×10 ⁻⁷	44
Ar	2196	40
O ₂	2003	32
N ₂	1734	28
Air	1796	29
He	1943	4

Table 2 Response time of Vibrating-diaphragm Vacuum gage. (Pressure changed abruptly)

	Pressure (Torr)	Response time(sec)
10 Torr range	10.5 → 7.8	0.04
	8.7 → 10.5	0.04
2 Torr range	1.23 → 2.2	0.10
	1.32 → 1.45	0.09
0.2 Torr range	0.18 → 0.13	0.33
	0.14 → 0.22	0.21

(The feedback rate of forcing voltage changed abruptly)

	Pressure (Torr)	Response time(sec)
10 Torr range	9.0	0.012
	8.0	0.012
2 Torr range	1.5	0.03
	1.0	0.04
0.2 Torr range	0.2	0.06
	0.15	0.07

6. 感度曲線

Fig. 6 は振動膜形真空計の空気に対する感度曲線である。較正は、リザーバーを 10⁻⁴Torr まで排気した後 C_3 を閉じ、 C_6 から乾燥空気を必要量導入した後これを閉じ、内圧を平衡させてから隔膜形真空計 (M. K. S 社製 repeatability 0.05%)

の出力と振動膜形真空計の出力電圧をデジタルボルトメーターで読み取ることによって行なった。0~0.2, 2, 10Torr 各レンジの V_s 電圧は各々 18.3V, 56.2V, 187.0V である。リザーバー内が 10⁻⁴Torr と充分良い真空度でも、ある電圧 V_b があらわれる。たとえば 0.2Torr レンジの V_b は 0.35V である。このうち 0.05V はトランジスタチョッパの特性によるもので、のこり 0.3V は金属膜の内部摩擦や膜固定具のかど等による固体摩擦によるものと考えられ、これは約 0.008 Torr の真空度の空気の粘性に相当している。 V_b が存在することによって小さい指示値での安定性を増すが一方これが 0 点ドリフトの原因になりやすい。

Fig. 10 V_3 voltage against pressure for various gases. $V_s=180V$

感度曲線を $V_3 - V_b \propto P_0^n$ であらわして実験結果と比較すると約 1 Torr 以下では $n=0.74$, 1~10 Torr の範囲では $n=1.4$ であった。振動数の変化が感度に及ぼす影響を消去するために $(V_3 - V_b) \cdot \omega$ を求めるとこれは $P_0^{1.7}$ に比例する。この結果は Dimeff が求めた P_0^2 に比べると n が小さい。一方 $(V_3 - V_b)/\omega$ は $P_0^{1.0}$ に比例し感度を直線化する一つの方法として興味がある。Fig. 7 はこれらの関係を対数でプロットしたものである。

He, Ar, CO₂, O₂, Air の各気体に対する感度曲線を Fig. 8, 9, に示す。

圧力の低い領域では分子量の大きい気体ほど感度が悪く、圧力の高い領域では粘性係数の大きい気体ほど感度が悪い。一般に気体の粘性係数は分子量の平方根に比例するため高压で感度の悪い気体に対しては低压でも感度が悪い。Tadle 1 に示したように CO₂ は分子量に比べて粘性係数が小さいという性質があるため高压で感度が良く低压で感度が悪いという特性が良く説明できる。

7. 応答時間

振動膜形真空計の応答時間は検出端内の圧力が定常になる時間と膜の振動が定常になる時間および電気回路の応答時間によってきまる。ここでは次の 2 つの方法で応答時間を測定した。① Fig. 3 に於いてリザーバーと真空計を異なる圧力にしておいてその間にあるバルブ C_5 を急激に開けることにより圧力を変化させた場合、② 圧力は一定にしておいて駆動用の交流電圧の掃還率を % に変えた場合について指示電圧 V_3 の変化をシンクロスコープで観察し定常値の % に達する時間をもって応答時間とした。

Fig. 11 Temperature dependence of resonant frequency and V_3 voltage.

$V_s=18.3V$ (1) Resonant frequency at 0.2 Torr (2) V_3 voltage at 0.2 Torr (3) V_b voltage which is equal to the V_3 voltage at 10^{-4} Torr.

Fig. 12 Temperature dependence. $V_s=56.2V$ (1) Resonant frequency at 2 Torr (2), (3) V_3 voltage at 2 Torr and 10^{-4} Torr, respectively.

得られた結果を Tadle 2 に示す。

①の方法に比べて②の場合は圧力が平衡する時間が含まれていないため応答時間は約 $1/3$ になっているものと考えられる。検出端を切放して電気回路の応答時間は V_3 電圧が 1 V 変化するのに約 6ms であった。②式において振動の振幅の過渡的な変化は $\exp(\pm \frac{\xi}{2m} t)$ であらわさ

Fig. 13 Temperature dependence. $V_s=167.0V$
 (1) Resonant frequency at 10 Torr
 (2), (3) V_s voltage at 10 Torr and 10^{-4} Torr, respectively.

Fig. 14 Variations of resonant frequency against pressure for various gases. $V_s=60V$

れる。 ξ は近似的に P_0^2/ω に比例するものと考ええると 0.2Torr に比べて 10 Torr での ξ は約 600 倍になり変化の早さも 600 倍になると考えられるが測定結果ではこれが 5 倍程度である。これは 10Torr 近辺では振動が平衡する時間に比べて前述した電気回路の応答時間の方が長くて支配的になってくるためと考えられる。

8. 温度特性

振動膜形真空計の指示値が温度に依存するファクター

として色々のものが考えられる。電気回路の温度依存性は別にして、(16), (17)式から検討すると、まず X_{P1} , X_{P2} , r_p 等の構造材料の熱膨張による幾何学的な形状変化によるものが考えられるが単純に熱膨張だけを考えると無視できる大きさである。適応係数 β に関しては電極および膜が金属製でありまたその間隙は小さいため気体とこれら金属の間の温度差はないと考えられる。このため β の温度依存性も小さいと考えることができる。気体の誘電率の温度変化も充分小さい。分子速度 $\bar{c}$ は気体の温度の平方根に比例するため低圧領域での指示値は温度の平方根に比例する変化をすると予想される。一方空気の粘性係数 μ は経験的に温度の 1.3 乗に比例することが報告されており、これによって高圧領域での指示値は温度の 1.3 乗に反比例することが予想される。その他に共鳴振動数の変化、内部摩擦係数の変化等も考えられる。

これらを総合した温度依存性を調べるために検出端を約 50cm の長さのガラス管でリザーバーに接続し検出端のみを温蔵庫に入れて、半月間庫内温度を 43.5°C と室温 ($\sim 23^\circ C$) の間で変化させて、それぞれの温度での感度、共鳴振動数および V_b を測定した。なお検出端内と庫内温度を平衡させるために温度を変えた 4 時間後に測定を行なった。

Fig. 11, Fig. 12, Fig. 13 は各々 0.2Torr, 2 Torr, 10 Torr レンジでの V_b 電圧、最高指示電圧、最高指示での共鳴振動数の温度依存性の測定結果である。

V_b 電圧が最大指示電圧に比較して一番大きな割合を占める 0.2Torr レンジでの V_b 電圧の温度係数は、絶対値および最大指示電圧の各々 0.2%/°C, 0.008%/°C であった。この結果から金属膜の内部摩擦および固体摩擦の温度依存性は充分小さいことがわかる。換算すると単に指示値を拡大するだけで 0.01 Torr レンジ (V_b 電圧が最大指示電圧の $\frac{1}{2}$ に相当する) で 0.2 %/°C の零点ドリフトに相当し、この領域の測定も可能である。0.2, 2, 10Torr レンジの最高

指示電圧の温度係数は各々 +0.08, -0.03, -0.2%/°C であった。予想された低圧での分子速度による依存性 +0.17%/°C, 高圧での粘性係数による -0.4%/°C に比較して各々 $\frac{1}{2}$ の値になっている。しかしながら温度係数の符号が低圧と高圧で逆転していることから分子速度および粘性係数の温度依存性がこの真空計の温度係数の主な原因になっていることがわかる。共鳴振動数の温度依存性は各レンジ 0.02 %/°C 以下であって充分小さい。なお室温に於ける繰返し精度は 10 Torr, 2 Torr, 0.2

Torr で各々 $\pm 0.7\%$, $\pm 0.1\%$, $\pm 0.4\%$ であった。

9. 共鳴振動数による真空度測定

理想的に圧力が零での膜の共鳴振動数は膜の重さ、半径、張力および振動のモードによってきまる。膜の周辺に気体が存在すると Eq. (2) 式であらわされるようにその圧力および気体の種類に応じて共鳴振動数が変化し、これによって真空計として応用できる可能性がある。

Fig. 14, Fig. 15 は当真空計の共鳴振動数を圧力および気体の種類を変えて測定したものである。共鳴振動数と圧力との関係は電圧と圧力との関係と比較して気体の種類による差が非常に小さい。たとえば電圧で測定した場合感度差の大きいヘリウムと空気について 10Torr で 4% の差であった。これは Eq. (2) の関係が良い近似でなりたっていることを示す。なお He や CO_2 の粘性の小さい気体は同じ圧力でも振動数の変化が小さい。これは Eq. (3) の関係と一致している。即ち粘性係数の小さい気体ほど検出端の中心から半径方向への気体の逃散が多くて圧縮、膨張は小さくなり振動数の変化は小さくなる。

一般に振動数は不安定で特に温度の影響を受けやすいと考えられるが、Fig. 11, Fig. 12, Fig. 13 に示すように、10Torr, 2 Torr で各々 $1\text{Hz}/^\circ\text{C}$ $0.4\text{Hz}/^\circ\text{C}$ の温度依存性である。これを変化値の割合であらわすと、 $0.05\%/^\circ\text{C}$, $0.07\%/^\circ\text{C}$ であり温度依存性も電圧で測定するよりも良いことがわかる、ただし基本の振動数 2560Hz に対して 2 Torr で約 600 Hz の変化であるためさらに低圧領域での測定には適さない。

10 結 論

一般にこれまでの粘性真空計は動作が微妙で外部からの機械的振動に対して弱く、その上操作がやっかいである等の評価を受けて、あまり使用されていない。振動膜形真空計は粘性真空計の変形であると考えられるが、これらの評価はかならずしも適当でなくその特性は次のように要約できる。

(1) 圧力 $10^{-3}\sim 20\text{Torr}$ の領域で、1 Torr 以上および 1 Torr 以下では指示電圧は各々圧力の 1.4 乗および 0.7 乗に比例し、比較的簡単な関数である。(2) 応答時間は

Fig. 15 Variations of resonant frequency against pressure for various gases. $V_s=180\text{V}$.

0.2Torr で 0.06 秒, 9 Torr で 0.012 秒である。(3) 感度の温度特性は 0.2Torr で $0.08\%/^\circ\text{C}$, 10Torr で $-0.2\%/^\circ\text{C}$ である。(4) 金属膜の内部摩擦に原因すると考えられる零点のドリフトは 0.20 Torr で $0.08\%/^\circ\text{C}$, 0.01 Torr で $0.2\%/^\circ\text{C}$ で充分小さい。(5) 常温での繰返し精度は 0.7% であった。

共鳴振動数から真空度を測定する方式はマクラウド真空計の動作を連続化したものに近い。この方法によると気体の種類による感度の差は小さく、空気とヘリウムでは 10Torr で 4% の感度差があった。又この方式による感度の温度依存性は 2 Torr および 10 Torr で各々 $0.07\%/^\circ\text{C}$, $0.05\%/^\circ\text{C}$ であった。これは電圧で測定する場合よりも小さい。

またこの真空計の共鳴振動数を 2KHz 以上に設定しているため一般に存在する 1 KHz 以下の外部振動の影響はほとんど受けない。

以上の結果から振動膜形真空計は中低真空領域の真空計として有用であると考えられる。

〔文 献〕

- (1) John Dimeff, James W. Lane, and Grant W. W. Coon: Rev. sci. Instrum. 33 (1962) 808.
- (2) I. B. Crandall: Phy. Rev. 11 (1918) 449.
- (3) 石井博, 中山勝矢: 真空度測定 (日刊工業新聞社 1964)