到達圧力付近における真空排気系の動的バランスの測定*

寺田 啓子**・岡野 達雄**・辻 泰**

(昭和63年2月5日 受理)

Measurement of Gas Balance in Vacuum Systems in the Ultimate Pressure Region

Keiko TERADA**, Tatsuo OKANO** and Yutaka TUZI**

(Institute of Industrial Science, University of Tokyo, Minato-ku, Tokyo, Japan)

(Received February 5, 1988)

1. はじめに

真空装置の到達圧力は、真空容器内で放出される全気体放出速度とポンプの排気速度とのバランスで定まる。超高真空装置の到達圧力付近では、真空容器内壁（ここでは、容器内のすべての表面を含むものとする）からの全気体放出速度に対して、ポンプ自身から放出される気体の全放出速度が無視できなくなり、ポンプはその気体も合わせて排気しているため、ポンプ外からの気体に対する実効的な排気速度 (measured pumping speed¹⁾) が低下する。しかし、到達圧力付近では排気速度の測定が、困難なため、真空容器内壁やポンプからの気体放出速度を求めることも困難となり、到達圧力を決める要因を比較検討することも難しい。

筆者らは、既知のコンダクタンスを基準にしてポンプの排気速度を求めるコンダクタンス変調法²⁾に改良を加え、それが気体流量の少ない超高真空領域におけるポンプの排気速度測定に有効であることを示した³⁾。本研究では、この方法によって、超高真空装置が到達圧力に達した状態におけるポンプの実効的な排気速度を測定し、その結果を用いて真空容器内壁からの全気体放出速度を求め、それらの到達圧力への寄与を検討することを試みた。

2. 実験装置と測定原理

測定に使用した真空系の模式図を Fig. 1 に示す。同図の中の A と B は、同一真空系でオリフィス系をそれぞれ A または B の状態にした場合を示している。真空容器は450 mmφ×400 mm のステンレス鋼製で、コンダクタンスを真空装置の外から変えることができるオリフィス系を介して、同じ直径のスパッター・イオン・ポンプ (SIP) とチタン・ゲッター・ポンプ (TGP、液体室

Fig. 1 Schematic diagram of two state of conductance modulation:

A: High-conductance position.
B: Low-conductance Position.

* 昭和62年11月13日 第28回真空に関する連合講演会で講演 (13Ap-2)

** 東京大学生産技術研究所 東京都港区六本木7-22-1

Fig. 2 Change of the partial pressure of hydrogen in vacuum chamber correspond to the conversion of orifice system in the ultimate pressure region.

素冷却)により排気されている。真空容器には、全圧を測定するためのベアード・アルバート真空計 (IG) と分圧を測定するための四極子型分圧真空計 (QMS) が取り付けられており、250°C、8 時間の加熱脱ガス後の到達圧力は 3×10^{-11} Torr である。

コンダクタンス変調法では、真空容器に外部から導入する気体の流量を一定に保ち、可動オリフィスを A 状態から B (または B から A) に変え、各オリフィス系に対する容器内の圧力の比を求めることにより、ポンプの排気速度を得ることができる。本研究では、気体流量の絶対値が不要であるという特長を生かし、容器内壁からの気体放出速度が測定時間内で一定であると仮定して、それより圧力の決まる到達圧力状態でのポンプの実効的な排気速度の測定を行い、また、真空容器内の圧力の測定値から容器内壁からの全気体放出速度を求めた。測定は、超高真空系の到達圧力付近で最も主要な残留気体である水素 (QMS で測定) について行なった。

到達圧力付近でオリフィス系を A から B、B から A に変えると、容器内の水素分圧は Fig. 2 ように、それぞれ P_A から P_B 、 P_B から P_A に変わる。このような測定によってポンプ固有の排気速度 (intrinsic pumping speed¹⁾) を求めるコンダクタンス変調法については、すでに報告してあるので、ここでは到達圧力状態における測定について簡単に述べる。

Fig. 3 は、オリフィス系が A の場合を例にして、真空系内の全気体放出速度と排気速度の関係を模式的に示したものである。ポンプが本来持っている固有の排気速度を S_p 、外部から真空容器に導入する気体流量を Q 、真空容器内壁からの全気体放出速度を Q_w 、ポンプ自身

Fig. 3 Illustration of the quantities appeared in equations.

からの全気体放出速度を Q_p とすると、ポンプ入口の圧力 P_p は

$$P_p = \frac{Q + Q_w + Q_p}{S_p} = \frac{Q + Q_w}{S_p} + P_{p0} \quad (1)$$

となる。 P_{p0} はポンプ自身から放出する気体をポンプが排気することによる圧力成分で、真空容器側にポンプがないとすれば、分子流条件下では P_{p0} は容器全域で同じになる。 Q_p 、 P_{p0} は実測不可能な量なので、 Q_p の寄与を含むポンプの実効的な排気速度 S を導入すれば

$$P_p = \frac{Q + Q_w}{S} \quad (2)$$

となる。したがって (1)、(2) 式から、 S と S_p との関係は

$$S = \frac{Q + Q_w}{Q + Q_w + Q_p} S_p \quad (3)$$

となる。

真空容器に対する排気速度 S_A はオリフィス系のコンダクタンス C_A と S との合成として、(4) 式で表わすことができる。B についても同様に (5) 式のようになる。

$$\frac{1}{S_A} = \frac{1}{C_A} + \frac{1}{S} - \frac{1}{\frac{\bar{v}}{4} \pi R_{p^2}} \quad (4)$$

$$\frac{1}{S_B} = \frac{1}{C_B} + \frac{1}{S} - \frac{1}{\frac{\bar{v}}{4} \pi R_{p^2}} \quad (5)$$

ここで、 C_A と C_B はモンテカルロ法によって得た値を使

Fig. 4 Pressure dependence of the measured pumping speeds of pump consisted of SIP and TGP for hydrogen gas.

用しており、室温の水素については $C_A=4295$ l/s, $C_B=1194$ l/s である。 R_p はポンプの半径、 $\bar{v}$ は室温における気体の平均速度である。外部からの気体導入のない、 $Q=0$, $Q_w=\text{const.}$ の条件となった到達圧力状態では、 P_A , P_B と S_A , S_B の関係は次式のように表わしてよいであろう。

$$Q_w = P_A S_A = P_B S_B = P_p S \quad (6)$$

すなわち、

$$\frac{S_A}{S_B} = \frac{P_B}{P_A} \quad (7)$$

となる。したがって、測定値 P_A , P_B と (4), (5), (7) 式とから S , S_A , S_B が求まる。さらに、 P_A , P_B の値と S_A , S_B の値を用いれば、 Q_w を求めることができる。また、 Q_w と Q_p に起因する真空容器内の圧力を、バックグラウンドとして (6) 式の P_A , P_B から差し引くと、 S_p を求めることができる³⁾。

3. 実験結果とまとめ

Q_w が排気速度測定時間内で変化しないものと仮定すると、 §2 で示した方法を用いて、SIP と TGP の複合排気系の到達圧力状態における水素に対する S として、 Fig. 4 の矢印の4点が得られた。図の横軸は、オリフィス A を用いたときの容器内の圧力 P_A である。 P_A が $10^{-10} \sim 10^{-8}$ Torr の圧力領域における測定値（実線の上下に分布）は、外部から容器に水素を導入して求めた S の値である。この値は、 $Q \gg Q_w + Q_p$ において S_p に近づく。

矢印で示した測定値は、外部から水素を流し込んで測定した値の約1/3になっている。このことは、到達圧力付近では、ポンプ自身から放出する気体をポンプが排気することの影響が大きく、ポンプ外からの気体に対する排気速度が著しく低下していることを示している。矢印の点に対する、 S_A , S_B と P_A , P_B の値を使って、容器内壁

Fig. 5 Illustration of the variation of pressure during the measurement of pumping speed as a function of total amount of gas pumped.

The rectangular pressure pulse correspond to the gas inlet. The measurement is made at the quiescent region long after the gas inlet.

Fig. 6 Relation between the ultimate partial pressure and the pumping speed in the vacuum chamber for hydrogen.

からの単位面積あたりの気体放出速度 ΔQ_w を求めてみると、 2.7×10^{-12} Torr·l/s·cm², 1.8×10^{-12} Torr·l/s·cm² となり、いずれも、十分脱ガスされたステンレス鋼からの単位面積あたりの気体放出速度と同程度の値を示した⁴⁾。

気体ため込み式真空ポンプで排気している真空系に気体を大量に流した後は、到達圧力が高くなるという現象が観測される。この原因としては、 S の低下と、 Q_w の増加が考えられるので、コンダクタンス変調法を使って検討した。

Fig. 5 は、横軸を時間、縦軸を真空容器内の水素の分圧として、実験の経過を模式的に示したものである。まず、容器を十分脱ガスし、ポンプも十分活性化した状態で到達圧力状態における S を測定する。次に、水素を適当な流量で、ある時間だけ導入し、導入を止めた後、圧力が低下して安定になり到達圧力に達したと思われると

ここで S を測定する(矢印)。この操作を繰返し、総気体導入量が $1.3 \text{ Torr}\cdot l$ になるまで測定を行なった。

このようにして得られた結果を、横軸を測定時の到達圧力 P_A 、縦軸を S_A としてまとめると Fig. 6 が得られる。水素を排気したことによる到達圧力の上昇は、 S_A の減少にほぼ比例していることが分かる。図中の直線 α, β は ΔQ_W 一定の線で、 α が $\Delta Q_W = 2.0 \times 10^{-12} \text{ Torr}\cdot l/s\cdot \text{cm}^2$ 、 β が $\Delta Q_W = 1.8 \times 10^{-12} \text{ Torr}\cdot l/s\cdot \text{cm}^2$ である。測定点は、ほぼこれら2本の線の間に収まっている。このことは、この一連の測定の間、真空容器内壁からの単位面積あたりの気体放出速度が、上記の値の間でしか変化していないことを示している。すなわち、水素を大量に排気した後に到達圧力が上昇する原因は、主に Q_p の増加によって、 S が低下することによるものであると考えることができる。しかし、Fig. 6 では、 P_A が上昇するに伴い測定点が β 線上から α 線上に移動している傾向が見られるので、総気体導入量が増加したための到達圧力の上昇には、わずかではあるが Q_W の増加も寄与しているものと思われる。他の気体の場合、特に真空容器内壁と相互作用の大きい気体の場合には異なる結果が得ら

れることが予想される。

以上の結果から、コンダクタンス変調法によれば、到達圧力状態における $S, \Delta Q_W$ などを測定し得ることが明らかとなった。この方法では、真空容器に外部から気体を一定流量で導入すれば S_p も測定し得るので³⁾、 S_p, S, Q_W の値を(7)式に代入することによって、 Q_p も求めることができる。したがって、超高真空装置の到達圧力付近における、真空容器内壁からの全気体放出速度、ポンプ自身の全気体放出速度、ポンプの固有の排気速度の間のバランスによって決まる真空系の特性の測定と解析に、きわめて有力な方法であると思われる。

〔文 献〕

- 1) Committee on Standards, American Vacuum Society: Glossary of Terms Used in Vacuum Technology (Pergamon, 1958)
- 2) C.W. Oatley: Brit. J. Appl. Phys. 5 (1954) 358.
- 3) 寺田啓子, 辻泰, 岡野達雄: 真空 31 (1988) 259.
- 4) 小宮宗治: 真空技術, 林主税編 (共立出版株式会社 1985) 9.2節.