ターボ分子ポンプ自身のガス放出の定量評価

(第1報 理論的検討)*

尾 高 憲 二**

(受理1996年7月19日, 掲載決定1996年9月7日)

Quantitative Evaluation of Outgassing from Turbomolecular Pumps

(1)—Theoretical Analysis

Kenji ODAKA

(Mechanical Engineering Research Laboratory, Hitachi, Ltd.,
502 Kandatsu, Tsuchiura-shi, Ibaraki 300, Japan)

(Received July 19, 1996, Accepted September 7, 1996)

The influence of outgassing from a turbomolecular pump (TMP) on the pumping speed was investigated theoretically. The investigation was based on a combination of the transmission probabilities of the gas through blade rows with outgassing from every part of the TMP. A new formulation was derived for evaluating pressure from the intrinsic pumping speed and the outgassing rate of the TMP. This formulation clarified the physical meaning of the conventional pumping speed. Several of the principal quantities used in conventional methods of pumping speed evaluation can be used with the new formulation. A method was also developed for measuring outgassing rate of TMP. This method enables quantitative evaluation of the influence of materials, surface treatments, and configurations of TMP on the pumping speed. The high accuracy of pressure evaluation by the new method facilitated the selection of the appropriate size of pump for a vacuum system.

1. はじめに

ターボ分子ポンプ (Turbomolecular Pump, TMP) は, 排気するべきガスを真空系外に排出して大きなガス負荷に耐え, 取り扱い易く, 容易に超高真空が得られることから広く用いられている. TMP の排気速度の測定方法は, 性能試験方法¹⁾として規格に定められている. カタログ等に記載される排気速度の公称値は, この規格に則って測定されたものである. 真空装置の設計に当たって, 到達圧力や排気所要時間を予測するために公称排気速度が用いられる. しかし超高真空装置の排気の実験によれば, 真空容器のガス放出速度測定のような最も単

純な (内部に試験装置等を含まない) 構成の装置においてさえ, ガス放出量を公称排気速度で除した値 (Q/S) に比べると, 実際に測定される圧力は常に大きく, 数倍に達することも珍しくない. これは, 実際の排気過程において実現されるポンプの排気速度が, 公称値に比べてかなり小さいことを示しており, その原因はポンプ自身が放出するガスにあることが推測される.

Iguchi ら²⁾は, TMP の翼表面からのガス放出量が圧縮比に及ぼす影響を理論的に解析し, 到達圧力を下げるためには翼からのガス放出の抑制が鍵であることを示した. 彼らは翼のガス放出を低減するため, 翼の加工法を改善し, さらに放熱特性の向上によってロータ温度を低下させ, 2×10^{-10} Pa の到達圧力を実現した^{2,3)}.

尾高ら⁴⁾は, チタンサブリメーションポンプ (蒸発型チタンゲッタポンプ, TSP) に関して, ポンプ作用を担

* 第43回応用物理学関係連合講演会にて講演.

** 朝日製作所機械研究所 (〒300 茨城県土浦市神立町502)

うチタン膜から水素が放出されることを示し、膜中の水素を低減して 10^{-11} Pa 台の圧力を発生した。また、Tera-da^ら³⁾は、TSP の性能を評価するための基本量として、ポンプの固有排気速度及びポンプ自身のガス放出量を用いることを提唱した。さらに、コンダクタンス変調法と呼ぶ実験手法を併せて開発し、 10^{-10} Pa 台において固有排気速度、及びポンプ自身のガス放出量を分離して測定することに成功した。TSP と同じ溜め込み式のクライオポンプに対しても、この実験手法を用いて性能測定が行われている。

上記の研究は、TMP のみでなく TSP やクライオポンプにおいても、ポンプ自身のガス放出が到達圧力付近におけるポンプ性能を支配する要因であり、その低減が極高真空領域におけるポンプ性能向上に、不可欠であることを明かにした。このことは到達圧力付近のみならず、大気開放後の運転開始からの排気の全域に亘って、ポンプ自身のガス放出がポンプ性能を理解するための重要な要素であることを示唆すると思われる。

現在の TMP の性能試験方法¹⁾には、ポンプ自身のガス放出についての記述は無く、定量的評価の対象とされていないことを示している。この性能試験方法における取扱いに対応して、真空装置の圧力予測において TMP 自身のガス放出が考慮されることはなかった。これが最初に記したように、圧力の予測値と実測値とに大きな相違を生じさせる原因と考えられる。

TMP の排気性能は、Kruger と Shapiro⁶⁾が提唱した、翼列に入射するガスの通過確率に基づくモデルを用いて説明される。しかしこのモデルは、単段翼列の排気作用の説明に利用されるに止まっている。TMP 全体の排気性能を、ガスの通過確率に基づいて定量的に記述することは試みられていない。Kruger^ら⁶⁾は翼列の排気速度及び圧縮比がガスの通過確率と密接に関係することを示しているが、モンテカルロ法等による TMP の性能解析においては、圧縮比の変化に重点が置かれ、ガスの通過確率や排気速度に対しては殆ど関心が払われていないように見える。翼からのガス放出量を考慮して TMP の排気性能の解析を行ったのは Iguchi^ら²⁾が最初であるが、到達圧力の低下を圧縮比の増加として捉えており、ガス通過確率及び排気速度との関連についての考察は行われていない。

上に述べたように、TMP 自身から放出されるガスがポンプの排気性能、即ち真空容器内圧力に及ぼす影響の重要性については、到達圧力領域において認識され始めた。しかし、排気過程の全域における排気性能と TMP 自身のガス放出との関連についてはまだ検討されていない。このように TMP 自身のガス放出に対する取組が行

われなかった大きな原因は、TMP 自身のガス放出量を定量的に評価する方法が無かったことにあると考えられる。

本報告は、TMP 自身のガス放出量を定量的に扱うことのできる、TMP の性能評価方法を提案することを目的としている。この新しい性能評価方法は、真空容器内の圧力を排気速度及び TMP 自身のガス放出量と関連付けて簡明な式で表現し、圧力の予測等への適用が容易なものでなければならない。この式の導出に当たっては、TMP 全体に対するガスの通過確率の考えを基礎とし、TMP 各部からのガス放出量を含めた排気系の平衡状態のガスの釣合を考慮することから出発する。さらに、この式に基づいて TMP 自身のガス放出量と圧縮比との関係式が導かれる。この過程で TMP 自身のガス放出量、及び従来の排気速度等の物理的意味が明確にされる。さらに、TMP 自身のガス放出量を測定する方法、ならびに圧力予測の方法を提案し、TMP の研究開発への応用等について述べる。

2. ガスの通過確率に基づく TMP の排気特性の定式化

2.1 単段翼列

本研究の出発点である、ガスの通過確率と単段翼列性能との関係⁶⁾について簡単に触れておく。2次元に展開した回転翼を Fig. 1 に示す。添え字 3 は吸気口側を、4 は排気口側を表わす。吸気口側から翼内の空間に単位時間に入射するガス分子の量を N_3 (分子・s⁻¹)、排気口側から翼内の空間に単位時間に入射するガス分子の量を N_4 (分子・s⁻¹) とする。吸気口側から入射するガス分子が排気口側へ通過する通過確率を Σ_{34} 、排気口側から入射するガス分子が吸気口側へ通過する通過確率を Σ_{43}

Fig. 1 Schematic diagram of gas flow through a single rotating blade row.

とする。翼を通過する実際（ネット）の流量は

$$W \cdot N_3 = N_3 \Sigma_{34} - N_4 \Sigma_{43} \quad (1)$$

と表わされる。 W は排気効率で、 H_0 ファクタとも呼ばれる。圧縮比は P_3, P_4 を吸気口側、排気口側の圧力として、

$$\frac{P_4}{P_3} = \frac{N_4}{N_3} = \frac{\Sigma_{34}}{\Sigma_{43}} = \frac{W}{\Sigma_{43}} \quad (2)$$

と表わされる。最大圧縮比は

$$\frac{\Sigma_{34}}{\Sigma_{43}} \quad (3)$$

で、流れが無いとき（ $W=0$ ）に得られる。

2.2 新しい TMP の排気の式

2.2.1 排気モデルと基本式

TMP によって排気される Fig. 2 の真空容器を考える。ガスの釣合（質量保存）の式を導くに当たって、次の3点を仮定する。

- (1) TMP の翼列全体が分子流領域にある。
- (2) TMP の翼列全体の排気作用は式(1)と同じ形に表わされる。
- (3) 真空系は平衡状態にある。

TMP の翼列の排気口側はロータリポンプ等の補助ポンプによって排気され、分子流領域に保持されると想定することは自然であり、仮定(1)は妥当であろう。分子流領域ではガス分子間の相互作用が無いので、TMP の構成部材から放出されるガスは、容器から放出されるガスあるいは外部から導入されるガスとは独立して取り扱うことができる。

TMP 全体に対する通過確率等に対しても、単段翼列

Fig. 2 Schematic diagram of gas flow for a model of a TMP-evacuated chamber.

の式(1)と同じ記号、添え字を用いる。ポンプを構成する部材から放出されたガスの中で、吸気口側へ通過するものの総和を N'_p で表わす。TMP 内の位置 x における微小部分（面積 dA ）から放出されるガス量を $N_x dA$ 、位置 x から吸気口までのガスの通過確率を Σ_{x3} とすると、 N'_p は次式のように表わされる。

$$N'_p = \int_{\text{TMP}} N_x \Sigma_{x3} dA$$

積分範囲は、TMP 全体である。Fig. 2 において、TMP で排気されるネットのガスの量は次の3つの項からなる。

N_i : 真空容器の外部から単位時間に導入されるガス量（分子 $\cdot$ s $^{-1}$ ）,

N_w : 真空容器壁のガス放出量（分子 $\cdot$ s $^{-1}$ ）,

N'_p : ポンプの構成部材のガス放出量（分子 $\cdot$ s $^{-1}$ ）,

これら3項の和（ネットの排気量）は仮定(2)により、式(1)と同じ形で次のように表わされる。

$$N_i + N_w + N'_p = N_3 \Sigma_{34} - N_4 \Sigma_{43} \quad (4)$$

右辺の Σ はTMP 全体に対するガスの通過確率を表わす。式(4)を変形して、

$$N_3 = \frac{N_i + N_w + N'_p + N_4 \Sigma_{43}}{\Sigma_{34}} \quad (5)$$

が得られる。両辺に P_3/N_3 を乗じ、ボルツマン定数を k （ 1.38×10^{-23} J $\cdot$ K $^{-1}$ ）として、圧力とガス密度 n （分子 $\cdot$ m $^{-3}$ ）との関係を表わす式

$$P = n \cdot k \cdot T \quad (6)$$

並びに、

$$N = \frac{Q}{k \cdot T} \quad (7)$$

という関係式を用いると、次式が得られる。

$$P_3 = \frac{Q_i + Q_w + Q'_p + k \cdot T_3 N_4 \Sigma_{43}}{\frac{N_3 \Sigma_{34}}{n_3}} \quad (8)$$

ガスの量は N （分子 $\cdot$ s $^{-1}$ ）から Q （Pa $\cdot$ m 3 s $^{-1}$ ）に書き換えられている。これが、真空容器内の圧力 P_3 とガスの通過確率及びTMP の構成部材からのガス放出量とを関連付ける式である。この式により、TMP 自身に起源を有する2つの量 Q'_p （TMP 構成部材のガス放出量）及び $k \cdot T_3 N_4 \Sigma_{43}$ （排気口側から吸気口側へ通過するガス量）を定量的に評価することが可能となる。

2.2.2 固有排気速度

式8の分母

$$\frac{N_3 \Sigma_{34}}{n_3}$$

は、吸気口側に入射して排気口側へ単位時間に通過するガスの量を、吸気口側における体積で表わしたもので、

通常用いられる排気速度の単位 ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) を有する。吸気口側に入射するガスの量 N_3 は、吸気口側の単位面積を単位時間にたたく分子数 Γ_3 に比例すると考えられるから、比例定数を A_{p3} とすると次のように表わされる。

$$N_3 = A_{p3} \cdot \Gamma_3$$

$$= \frac{1}{4} A_{p3} \cdot n_3 \cdot \bar{v}_3 \quad (9)$$

$\bar{v}_3$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) はガスの平均速度で、ガス定数を R ($\text{Joule} \cdot \text{mol}^{-1} \text{K}^{-1}$)、ガスの分子量を M ($\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$) として $\sqrt{8R \cdot T / (\pi \cdot M)}$ で表わされる。この比例定数 A_{p3} の意味は次のように考えられる。吸気口側の単位面積を単位時間にたたく分子数は Γ_3 であるが、翼の厚み、ロータによる流路の閉塞、翼の半径方向の排気性能の変化、翼端間隙等によって、実際に翼列内に入射する分子の量 N_3 は、 Γ_3 とポンプの吸気口側面積との積より小さい。 N_3 は、吸気口側の流路面積 A_{p3} を Γ_3 でたたく場合の分子の量に相当するから、 A_{p3} は吸気口側の実効流路面積である。分子流であれば、 A_{p3} は吸気口側の圧力によらず一定であると考えられる。そうすると式(9)より、

$$\frac{N_3}{n_3} = \frac{A_{p3} \cdot \bar{v}_3}{4} \quad (10)$$

が成り立つので、 N_3/n_3 はガスの種類と温度が一定ならば定数であることがわかる。 Σ_{34} は翼の幾何学的形状及び回転速度が一定の場合、ガスの種類と温度が一定ならば定数である。

以上述べたことから、式(8)の分母はガスの種類と温度が一定ならば、分子流領域では圧力によらず一定値となる。これを Terada ら⁵⁾ にならって、ポンプの固有排気速度と呼び S_p で表わすこととする。

$$S_p = \frac{N_3 \Sigma_{34}}{n_3} \quad (11)$$

通過確率 Σ_{34} の性質から明らかなように、TMP の吸気口側の圧力がどれほど小さくなくても S_p は常に一定の値を保ち続ける。翼が回転していれば、吸気口側から入射したガスは必ず一定の割合で排気口側へ通過するからである。即ち固有排気速度 S_p は、吸気口側の圧力がたとえポンプの到達圧力以下の圧力であっても、翼列の作用として実際に排気口側へ移動するガス分子の量を表わしている。式(11)で定義される TMP の固有排気速度は、Terada ら⁵⁾ が導入した TSP の固有排気速度とは異なる物理現象に対応する量である。しかしどちらの場合も、到達圧力以下の領域においてもポンプが本質的に有する排気作用の大きさを表わすという点で、同じ固有排気速度という言葉で呼ぶのが適当と考えられる。

2.2.3 ポンプ自身のガス放出量

式(8)の分子の第3項及び第4項は、TMP 自身に起

因する。これらをまとめてポンプ自身のガス放出量と呼び、 Q_p で表わすこととする。

$$Q_p = Q'_p + k \cdot T_3 N_4 \Sigma_{43} \quad (12)$$

右辺第1項の Q'_p は、ポンプを構成する部材から放出されたガスの中で、吸気口側へ通過するものの総和である。ガス放出の部位が吸気口に近いほど、放出されたガスはより多く吸気口側へ通過するので、 Q'_p に対する寄与が大きい。吸気口から遠くなるほど Q'_p に対する寄与は小さい。Iguchi ら²⁾ の解析によれば、吸気口側の数段の翼車からのガス放出のみが圧縮比に影響を及ぼす。これは、吸気口側の数段の翼車からのガス放出が Q'_p の殆どの部分を占めることを意味する。従って、TMP を2台直列運転(タンデム運転)する場合にも、1台のみの運転の場合にも Q'_p の値は変化しないと考えられる。右辺第2項の $k \cdot T_3 N_4 \Sigma_{43}$ は、排気口側から翼内に流入して吸気口側へ通過するガス量である。これは Q'_p が存在しない、すなわちまったくガス放出の無い材料で構成した TMP においても、翼列の排気作用の一部として必ず存在するという点は固有排気速度と同じである。またその値は排気口側の圧力 (N_4) に比例するため、タンデム運転により大きく減少する。しかし、従来のタンデム運転による到達圧力の低下が1桁に止まっていたのは、 Q'_p が $k \cdot T_3 N_4 \Sigma_{43}$ のおよそ10分の1程度の大きさで、無視できない量であることを示している。

2.2.4 排気の式

ポンプの固有排気速度 S_p 及びポンプ自身のガス放出量 Q_p を用いて、式(8)を書き直すと次式が得られる。

$$P_3 = \frac{Q_i + Q_w + Q_p}{S_p} \quad (13)$$

これを TMP の排気の式と呼ぶこととする。ポンプ自身のガス放出量の測定、並びに容器内の圧力の予測への応用については、4章で詳細に述べる。

式(13)は Terada ら⁵⁾ が、TSP の排気性能を評価するために導入した、ポンプ吸気口における圧力の式と同じ形をしている。この式の形は、Fig. 2 の排気系モデルのガス平衡に対して一般的に導かれるものである。

2.2.5 実効排気速度

実効排気速度 S_{ef} を次式で定義する。

$$S_{ef} = \frac{Q_i + Q_w}{P_3} \quad (14)$$

式(13)の P_3 を代入すると次式が得られる。

$$S_{ef} = \frac{1}{1 + \frac{Q_p}{Q_i + Q_w}} \quad (15)$$

実効排気速度と固有排気速度との比 S_{ef}/S_p は、 $Q_p/(Q_i + Q_w)$ によって決定される。即ち、外部から導入され

Fig. 3 Dependence of compression ratio on compression-ratio parameter.

るガス量 Q_i と真空容器のガス放出量 Q_W の和が、TMP 自身のガス放出量 Q_P に比べて十分に大きい場合には、実効排気速度は固有排気速度に一致する。また、外部からのガス導入が無い ($Q_i=0$) 場合に、式(15)は次のように書かれる。

$$S_{ef} = \frac{1}{1 + \frac{Q_P}{Q_W}} \cdot S_P \quad (16)$$

この場合 S_{ef}/S_P は、TMP 自身のガス放出量と容器のガス放出量との比によって決定される。

2.2.6 圧縮比

TMP 自身のガス放出量及びガス導入によって、実際の圧縮比が式(3)で表わされる最大値からどのように変化するかを考察する。

式(9)と同様に、翼列の排気口側の実効流路面積 A_{P4} を次式によって定義する。

$$\begin{aligned} N_4 &= A_{P4} \cdot \Gamma_4 \\ &= \frac{1}{4} A_{P4} \cdot n_4 \cdot \bar{v}_4 \end{aligned} \quad (17)$$

単段翼列 (Fig. 1) の場合は $A_{P3}=A_{P4}$ であるが、多段の TMP においては一般には $A_{P3} \neq A_{P4}$ かつ $T_3 \neq T_4$ である。式(17)を式(8)に代入すると次式が得られる。

$$P_3 = \frac{1}{N_3} \cdot \frac{Q_i + Q_W + Q_P}{\Sigma_{34}} + \frac{A_{P4} \bar{v}_4 T_3}{A_{P3} \bar{v}_3 T_4} \cdot \frac{P_4}{\Sigma_{43}} \quad (18)$$

圧縮比 Π は次式で表わされる。

$$\Pi = \frac{P_4}{P_3} = \frac{\Sigma_{34}}{\Sigma_{43}} \cdot \frac{A_{P3} \bar{v}_3 P_4 \Sigma_{43}}{A_{P4} \bar{v}_4 \frac{T_3}{T_4} P_4 \Sigma_{43} + 4(Q_i + Q_W + Q_P)} \quad (19)$$

式(19)から、ガス放出 (Q_W, Q_P) や外部からのガス導入 (Q_i) によって圧縮比は減少するが、分母第1項の $P_4 \Sigma_{43}$ が大きいほど圧縮比の減少が少ないことが分かる。これは、排気口側の圧力 P_4 が高い場合、並びに水素やヘリウムのように軽いガスで Σ_{43} が大きい (即ち最大圧縮比が小さい) 場合に相当する。排気口側の圧力 P_4 が高い場合は同じ圧縮比ならば吸気口側の圧力も高く、ガス放出や外部からのガス導入によるガスの体積が小さくなるため、圧縮比への影響が小さいと考えられる。 Σ_{43} が大きく最大圧縮比が小さい場合も、吸気口側の圧力が大きい場合、同様に影響が小さいと考えられる。

$A_{P3}=A_{P4}$ かつ $T_3=T_4$ の場合には、式(19)は次のように書かれる。

$$\Pi = \frac{\Sigma_{34}}{\Sigma_{43}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{Q_i + Q_W + Q_P}{k \cdot T_3 N_4 \Sigma_{43}}} \quad (20)$$

ネットの流量を N_3 で除した値 ($N_i + N_W + N_P$)/ N_3 を排気効率 W とすると、式(20)は式(2)に一致する。式(20)は、ガス放出 (Q_W, Q_P) 及び外部からのガス導入 (Q_i) の和と排気口側から吸気口側へ通過するガス量 $k \cdot T_3 P_4 \Sigma_{43}$ との比によって、圧縮比と最大圧縮比との比 $\Pi/(\Sigma_{34}/\Sigma_{43})$ が定まることを示している。Fig. 3 に、圧縮比と最大圧縮比との比を $(Q_i + Q_W + Q_P)/(k \cdot T_3 P_4 \Sigma_{43})$ の関数として示す。この $(Q_i + Q_W + Q_P)/(k \cdot T_3 P_4 \Sigma_{43})$ を圧縮比パラメータと呼ぶこととする。

TMP 単体の性能を考える場合には、外部からのガス導入及び真空容器からのガス放出が無く ($Q_i=Q_W=0$)、圧縮比は次式で表わされる。

$$\Pi = \frac{\Sigma_{34}}{\Sigma_{43}} \cdot \frac{A_{P3} \bar{v}_3 P_4 \Sigma_{43}}{A_{P4} \bar{v}_4 \frac{T_3}{T_4} P_4 \Sigma_{43} + 4Q_P} \quad (21)$$

これは、Iguchi らの解析の場合に相当する。 $A_{P3}=A_{P4}$ かつ $T_3=T_4$ の場合、圧縮比は式(20)に対応して次のように書かれる。

$$\Pi = \frac{\Sigma_{34}}{\Sigma_{43}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{Q_P}{k \cdot T_3 N_4 \Sigma_{43}}} \quad (21')$$

3. TMP の性能試験方法との対応

性能試験方法[1]で測定方法が規定されている到達圧力及び排気速度と、固有排気速度及び TMP 自身のガス放出量との関係を調べる。

3.1 到達圧力

性能試験方法[1]では、測定容器及び供試ポンプ (TMP) をベーキングを行って十分に脱ガスした後、外部からの導入ガスが無い状態で測定される容器内の圧力

をポンプの到達圧力 P_{3u} としている。この条件は次の式で表わされる。添字 u は、ベーキングによって十分に脱ガスされた状態であることを表わす。

$$Q_i=0, Q_w=Q_{wu}, Q'_p=Q'_{pu}$$

$$N_3=N_{3u}$$

これらを式(8)に代入し、ガスの種類と温度が一定ならば $N_{3u}/n_{3u}=N_3/n_3=(1/4)A_{p3}\cdot\bar{v}_3$ であることを考慮し、分母を固有排気速度に書き換えて次式を得る。

$$P_{3u}=\frac{Q_{wu}+Q'_{pu}+k\cdot T_3N_4\Sigma_{43}}{S_p} \quad (22)$$

これが到達圧力の測定値である。容器のガス放出量 (Q_{wu}) が誤差として含まれる。 $Q_{wu}=0$ が理想であり、ポンプの到達圧力 P_{pu} は次式で定義される。

$$P_{pu}=\frac{Q'_{pu}+k\cdot T_3N_4\Sigma_{43}}{S_p} \quad (22')$$

式(22)から、容器のガス放出量並びに吐出側圧力 (N_3) をいくら小さくしても、TMP を構成する部材からのガス放出量 (Q'_{pu}) が、実際の到達圧力を支配する要因と成り得ることが分かる。そして、容器及びポンプ自身のガス放出が無い場合 ($Q_{wu}=Q'_{pu}=0$) に限って右辺は第3項のみとなり、最大圧縮比 Σ_{34}/Σ_{43} 及び粗引きポンプの性能 (排気口側圧力 P_4) によって到達圧力が定まる。

3.2 排気速度

排気速度の測定に先立って、系を十分に排気し、気体を導入しない状態で容器内の圧力 P_{30} を測定すると定められている¹⁾。排気に際して、ベーキングは必ずしも必要とされない。従って、排気速度測定のために準備される十分に排気された状態は、前項に述べた到達圧力を測定する場合に用意された状態とは異なる。そこで、排気速度測定のために十分に排気された状態を、添え字 0 を用いて表わす。式(22)と同様に、 P_{30} は次式で表わされる。

$$P_{30}=\frac{Q_{w0}+Q'_{p0}+k\cdot T_3N_4\Sigma_{43}}{S_p} \quad (23)$$

(1) 流量計法

流量計を用いる測定の場合は、 P_{30} を測定した後、流量 Q の試験気体を流して圧力 P_3 を測定する。排気速度 S は次式で計算される。

$$S=\frac{Q_i}{P_3-P_{30}} \quad (24)$$

P_3 は次式で表わされる。

$$P_3=\frac{Q_i+Q_{w0}+Q'_{p0}+k\cdot T_3N_4\Sigma_{43}}{S_p} \quad (25)$$

式(23)及び式(25)を式(24)に代入して、

$$S=S_p \quad (26)$$

が得られる。流量計法では Q_{w0} 、 Q'_{p0} 、及び $k\cdot T_3N_4\Sigma_{43}$ は

式(24)において消去され、 S には影響を与えない。従って測定に先だって十分に脱ガスする目的は、測定中における Q_{w0} 及び Q'_{p0} の変化を、 Q_i に比べて無視できるほど小さくする点にある。式(26)から、性能試験方法¹⁾によって測定される排気速度は、固有排気速度と一致することがわかる。この排気速度が、吸気口側から排気口側へのガスの通過確率のみに関係する量であって、式(1)のネットの流量に対応する量ではない、即ち排気口側から吸気口側へのガスの通過確率を含まないことが、明確になった。ただし式(1)より、

$$\frac{P_4}{P_3} \leq \frac{\Sigma_{34}}{\Sigma_{43}}$$

が成り立つ場合、即ち TMP 吸気口圧力が容器及び TMP 自身のガス放出が無い場合の到達圧力よりも十分に大きい場合には、排気速度 S はネットの流量に一致することが分かる。

(2) オリフィス法

オリフィス法の場合には、オリフィスの下流の圧力、 P_2 を以て TMP の吸気口側圧力 P_3 に等しい ($P_2=P_3$) としている。 $P_{30}(P_{20})$ を測定した後、流量 Q_i の試験気体を流し、オリフィスの上流及び下流の圧力 P_1 及び P_2 を測定する。排気速度 S は次式で計算される。

$$S=\frac{C\cdot(P_1-P_2)}{P_3-P_{30}} \quad (27)$$

オリフィス上流側容器のガス放出量を Q_{w1} とすると、

$$C\cdot(P_1-P_2)=Q_i+Q_{w10}$$

である。 $C(P_1-P_2)$ には、オリフィス上流側容器のガス放出量 Q_{w10} が、誤差として含まれる。 S の測定は $P_2 > 10\cdot P_{20}$ となる圧力範囲で行われるので、

$$Q_i > 9\cdot(Q_{w0}+Q'_{p0}+k\cdot T_3N_4\Sigma_{43}) \quad (28)$$

が成り立つ。従って相対誤差は、以下のように評価される。

$$\frac{Q_{w10}}{Q_i} < \frac{Q_{w10}}{(Q_{w0}+Q'_{p0}+k\cdot T_3N_4\Sigma_{43})} \quad (29)$$

オリフィスの上流、下流のテストドームはほぼ大きさが等しいから、 $Q_{w0} \approx 2\cdot Q_{w10}$ とすると、 $Q_{w10}/(9\cdot Q_{w0})$ は約 6% と見積もられる。式(29)の右辺の分母は、ポンプ自身のガス放出量 ($Q'_{p0}+k\cdot T_3N_4\Sigma_{43}$) を含んでおり、実際の相対誤差はさらに小さくなる。

TMP の性能試験方法においては、TMP の到達圧力以下の圧力領域で排気速度 S は定義されていない。従って、固有排気速度 S_p と排気速度 S の物理的意味は同じであるが、その定義領域が異なるのである。式(26)は、到達圧力以下における固有排気速度 S_p の値を、性能試験方法¹⁾に規定された方法で排気速度 S の値として測定可能であることを示す。

Fig. 4 Schematic diagram of outgassing from a chamber divided by an orifice.

4. 容器内のガス組成とポンプ自身のガス放出

真空容器内のガスの釣合は式(4), あるいは式(13)で表わされる。これは, 真空容器内に残留するガスの起源が外部から導入されるガス, 容器から放出されるガス, 及びポンプ自身から放出されるガスの3つであることを示す。外部からのガス導入が無い場合でも, 測定された真空容器内のガス組成がそのまま容器から放出されるガスの組成を表わすものでなく, TMP 自身のガス放出を含むことに注意しなければならない。

容器から放出されるガスの組成を高精度に測定するために, Fig. 4 に示すように, 容器とTMP のあいだにオリフィスを挿入する方法が考えられる。

開口面積 A_0 のオリフィスを介して排気される, オリフィス上流側の容器内のガスの釣合は次式で表わされる。

$$A_0 \Gamma_1 = \frac{A_1 \cdot q_{w1}}{k \cdot T} + A_0 \Gamma_2 \quad (30)$$

左辺はオリフィスの上流側から下流側へ通過するガス量, 右辺第1項はオリフィス上流側容器のガス放出量, 第2項はオリフィス下流側から上流側へ通過するガス量である (単位は分子 $\cdot s^{-1}$)。ここで,

$$\Gamma_2 = \frac{1}{4} n_2 \bar{v}$$

である。簡単のために $P_2 = P_3 = (Q_w + Q_p) / S_p$ であるとすると, 式(30)の右辺を書き換えると, 次式が得られる。

$$A_0 \Gamma_1 = \frac{C}{k \cdot T \cdot S_p} \left[\left(\frac{S_p}{C} + 1 \right) A_1 \cdot q_{w1} + A_2 \cdot q_{w2} + Q_p \right] \quad (31)$$

C はオリフィスのコンダクタンス ($= (1/4) A_0 \cdot \bar{v}$) である。右辺の3つの項が, オリフィス上流側の容器内のガスの発生源を表わす。TMP の固有排気速度とオリフィスのコンダクタンスとの比 S_p/C が大きいほど第1項の比率が高まり, 上流側容器のガス放出の占める割合が大きくなる。従って, TMP の排気速度及びオリフィスの開口径を適切に選択し, さらに下流側容器の材質, 処理を上流側容器と一致させることにより, オリフィス上流側の容器内のガス組成を上流側容器から放出されるガス放出の組成に近づけることが出来る。式31により, 下流側容器のガス放出 (q_{w2}) 及びポンプ自身のガス放出 (Q_p) の影響の大きさを, 定量的に評価することが可能である。

5. TMP 自身のガス放出量の測定と圧力予測への適用

この章では, 実際の排気過程における TMP 自身のガス放出量の測定方法, 並びに真空装置の圧力予測への適用について考察する。

5.1 ポンプ自身のガス放出量の測定

系外からのガス導入が無い ($Q_i = 0$) 場合は, 式(13)よりポンプ自身のガス放出量 Q_p は次式で与えられる。

$$Q_p = P_3 S_p - Q_w \quad (32)$$

固有排気速度 S_p は, 性能試験方法[1]により求めた排気速度 S の値, 即ちカタログ記載の公称値を用いることが出来る。従って, 真空容器のガス放出量 Q_w 及び TMP 入り口の圧力 P_3 を知ることが出来れば, ポンプ自身のガス放出量が求められる。

容器のガス放出量 Q_w は, オリフィス法による排気速度測定装置あるいはガス放出速度測定装置において, オリフィスの上流及び下流の容器のガス放出速度が一致する場合には, 容易に測定できる。このためには, オリフィスの上流及び下流に, 同じ材質及び表面処理によって作製した容器を用いばよい。同一の材質及び処理によって作成された Fig. 3 の装置において, オリフィスの上流, 下流の圧力を P_1 及び P_2 , オリフィス上流側及び下流側の試験容器の表面積を A_1 及び A_2 とする。容器全体のガス放出量 Q_w は, オリフィスのコンダクタンスを C として, 次式で与えられる。

$$Q_w = \frac{A_1 + A_2}{A_1} \cdot C \cdot (P_1 - P_2) \quad (33)$$

ポンプ入り口の圧力が測定されていない場合は, オリフィス下流の圧力測定位置からポンプ入り口までのコン

ダクタンスによる圧力補正を行い、オリフィス下流の圧力からポンプ吸入口の圧力 P_3 を算出することが出来る。従って、ポンプ自身のガス放出量 Q_p は次式で表わされる。

$$Q_p = S_p \cdot P_3 - \frac{A_1 + A_2}{A_1} \cdot C \cdot (P_1 - P_2) \quad (34)$$

この方法によれば、大気解放から排気を開始し、ベーキングを経て到達圧力に至る間のポンプ自身のガス放出量の変化を、連続的に測定することができる。また、外部からのガス導入は存在せず、有効排気速度は式(16)で表わされる。

ポンプ自身のガス放出量をポンプ吸気口側の面積 A_p で除し、ポンプ吸気口の単位面積当たりの量 q_p として表わすことにより、容量、材質、処理等の影響、さらに中間流領域のポンプとの複合化の効果等を定量的に評価することが容易となる。 q_p をポンプ自身のガス放出速度と呼ぶことにする。

$$q_p = \frac{Q_p}{A_p} \quad (35)$$

以上、全圧計による測定について述べたが、ガス成分毎に測定を行うことにより、排気開始から到達圧力に至るまでの排気過程全体にわたって、ガス種毎のポンプ自身のガス放出量を求めることが可能である。Terada ら⁵⁾ が提案した Q マスを用いるコンダクタンス変調法は、ガス成分毎の測定を行うための有効な手法であろう。この場合、ポンプ入り口の分圧計測のため、オリフィス下流側にも Q マスを取り付けることが必要となる。

式(34)から求められる Q_p は、TMP の構成部材のガス放出量 Q'_p 及び排気口側から吸気口側へ通過するガス量 $k \cdot T_3 N_4 \Sigma_{43}$ を含む。排気口側に別の TMP を挿入してタンデム運転とし、排気口側から吸気口側へ通過するガス量を 2~3 桁小さくすることにより、TMP の構成部材のガス放出量を測定することが出来る。こうして、 Q'_p 及び $k \cdot T_3 N_4 \Sigma_{43}$ を各々定量的に測定することにより TMP の翼の形状、段数、材質、表面処理等の影響を定量的に評価することが可能となる。これは TMP の開発、研究に大きく役立つと期待される。また、固有排気速度 $N_3 \Sigma_{34}/n_3$ や $k \cdot T_3 N_4 \Sigma_{43}$ の実測値と比較、検討することより、ガスの通過確率 (Σ) の計算結果を実験的に検証することが出来るであろう。これは、排気速度予測を可能とする、新しい TMP 設計法の開発へと発展して行く可能性を示唆する。

5.2 TMP の到達圧力の測定

前節に述べた Q_p を測定するためのオリフィスを設けた容器の、十分に脱ガスされた状態におけるガス放出量は、式(22)の Q_{wu} に相応する。従って、式(22')で表わ

される TMP の到達圧力は、次式で算出することが出来る。

$$P_{pu} = P_{3u} - \frac{Q_{wu}}{S_p} \quad (36)$$

5.3 容器内圧力の予測方法

ポンプ自身のガス放出量 Q_p の実験値を用い、式(13)に従って真空容器内の圧力 P_3 を精度よく予測することが出来る。また、ある圧力を得るために必要なポンプ容量を適切に選択することが出来る。

現在、真空装置の圧力予測には式(24)が用いられることが多い。ここで、式(24)と新しい TMP の排気の式(式(13))との相違について考察する。式(24)を用いる場合、装置の到達圧力 P_{30} を用いることが出来ないため、代りにポンプの到達圧力 P_{3u} (式(22))が用いられ、圧力予測値 P_c は次式で表わされる ($Q_i=0$)。

$$P_c = \frac{Q_w}{S} + P_{3u} \quad (37)$$

式(13)の P_3 と P_c との差は次式で表わされる。

$$P_c - P_3 = \frac{Q_{wu} - Q'_p + Q_{pu}}{S_p} \quad (38)$$

Q_{wu} はポンプの到達圧力測定に用いられる容器の、ベーキング後のガス放出量である。排気開始からベーキングまでの過程においては、 Q_{wu} 及びベーキング後のポンプ構成部材からのガス放出量 Q'_{pu} に比べて、ポンプ構成部材からのガス放出量 Q'_p が大きいので式(38)は一般に負であり、式(37)は実際の圧力 (P_3) よりも低く見積もることになる。これは、真空装置の設計に際してはポンプの排気速度を計算値に比べて大きめに選択するのがよい、という経験的事実を説明するものと考えられる。ベーキング後は式(38)の分子は Q_{wu} のみとなり、式(37)は圧力を少し高く見積もることになる。

6. ま と め

(1) 従来の単段翼列に対するガスの通過確率の考えを、TMP を構成する翼列全体に当てはめることにより、TMP 自身のガス放出量を、排気的全領域に互って定量的に評価することの出来る、新しい TMP の排気の式(式(13))を導いた。

$$P_3 = \frac{Q_i + Q_w + Q_p}{S_p} \quad (13)$$

ここで、 P_3 : 容器内圧力、 S_p : TMP の固有排気速度、 Q_i : 外部から導入されるガス量、 Q_w : 容器のガス放出量、 Q_p : TMP 自身のガス放出量、である。

(2) S_p は、翼列の作用によって吸気口側から排気口側へ、単位時間に通過するガス量を表わす。これは、ポンプの到達圧力以下であっても存在する。

(3) TMP 自身のガス放出量 Q_p は、1) TMP の構成部材から放出されて吸気口側へ通過するガス量、及び 2) 排気口側から翼列内に流入して吸気口側へ通過するガス量、の 2 項からなる。1) が TMP の到達圧力を支配する要因となる可能性がある。

(4) 性能試験方法[1]における到達圧力は、固有排気速度及び TMP 自身のガス放出量を用いて簡単な形に表わされる (式(22))。

(5) 性能試験方法[1]に規定されている、排気速度 S の物理的意味は固有排気速度と同じであるが、ポンプの到達圧力以上で定義される点異なる。ネットの排気量でないことは注意を要する。

(6) 通過確率 Σ 及び TMP 自身のガス放出量を用いて、圧縮比を表わす式が導かれた (式(19))。

(7) TMP 自身のガス放出量 Q_p を測定する方法を提案した。 Q_p を用いて装置の圧力を予測することにより、適切なポンプ容量を選択することが可能となる。

(8) TMP の構成部材のガス放出量 Q'_p 、及び排気口側から吸気口側へ通過するガス量 $k \cdot T_3 N_4 \Sigma_{43}$ の定量的測定に基づき、TMP の翼の形状、段数、材質、表面処理

等の影響を定量的に評価し、TMP の開発、研究に応用する可能性が示された。また、ガスの通過確率の計算結果の実験的検証、さらには排気速度予測を可能とする、新しい TMP 設計法の開発へと発展して行く可能性が指摘された。

(9) TMP で排気される容器内のガス組成は、ポンプ自身のガス放出を含むことに注意しなければならない。

〔文 献〕

- 1) 日本真空協会規格 JVIS 005 : ターボ分子ポンプ性能試験方法 : 日本真空協会, 1991.
- 2) M. Iguchi, M. Okamoto and T. Sawada : 真空 37 (1994) 742.
- 3) 久松広美, 石丸 肇, 浦野智秋 : 日本真空協会1993年6月研究例会「ポンプのガス放出と排気性能」予稿集 (1993) pp35.
- 4) 尾高憲二, 上田新次郎 : 真空 34 (1991) 29.
- 5) K. Terada, T. Okano and Y. Tuji : J. Vac. Sci. Technol. A7 (1989) 2397.
- 6) C. H. Kruger and A. H. Shapiro : 1960 7th Natl. Symp. Vac. Technol. Trans. (Pergamon, 1961). (1961) pp6.