ターボ分子ポンプ自身のガス放出の定量評価 (第2報 実験結果)*

尾 高 憲 二**

(受理1996年9月9日, 掲載決定1996年12月7日)

Quantitative Evaluation of Outgassing from Turbomolecular Pumps (2)—Experimental Results

Kenji ODAKA

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

(Received September 9, 1996, Accepted December 7, 1996)

The influence of the amount of outgassing from a turbomolecular pump (TMP) on pumping speed was investigated experimentally. The amount of TMP outgassing was calculated using the results of experiments for measurement of outgassing from a stainless steel vessel. The calculation method is based on a new formulation for pressure estimation in which intrinsic pumping speed and the amount of TMP outgassing are considered. The amount of TMP outgassing was found to be much greater than that from the vessel, and the ratio of the two reaches more than twenty after baking, having being four before baking. This makes the ratio of the effective pumping speed to the nominal one about 0.03 after baking, and 0.2 before baking. These results clarify that the amount of TMP outgassing plays quite an important role in pressure determination in the vacuum system. The high accuracy of pressure estimation by the new method facilitated selection of the appropriate size of pump for a vacuum system. The new formulation can also be used for quantitative evaluation of the influence of materials, surface treatments, and configuration of the TMP on the pumping speed.

1. はじめに

ターボ分子ポンプ (Turbo Molecular 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よく用いられる. 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. しかしこれまでの排気の経験によれば, 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その数倍の大きさである. 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となることを示した. 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, ポンプ作用を担うチタン膜から水素が放出されることを示し, 膜中の水

* 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)

素を低減して 10^{-11} Pa 台の圧力を発生した。また、Tera-da ら⁵⁾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。

これらの研究は、TMP や TSP において、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到達圧力まで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。

筆者は、TMP 自身のガス放出量を、排気の全領域に亘って定量的に評価することの出来る、新しい TMP の排気の式を導いた⁶⁾。導出に当たっては、Kruger と Shapiro⁷⁾が単段翼列の排気作用を説明するために提案した、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適用することを出発点とした。この排気の式に基づいて、TMP 自身のガス放出量を測定する方法、並びに真空容器内の圧力を高い精度で予測する方法が提案された。

本報告では上記の提案に基づいて、スループット法によるガス放出速度測定実験の結果⁸⁾を用い、TMP 自身のガス放出量を求めた結果について述べる。

2. 計 算 式

TMP 自身のガス放出量 Q_p を定量的に評価することの出来る、新しい TMP の排気の式の導出及び Q_p 測定法については、既に詳細に報告した⁶⁾。ここでは概要を述べる。

2.1 TMP の排気の式

TMP 吸気口の圧力 P_3 は、次式で表わされる。添え字 3 は TMP の吸気口側を、4 は排気口側を表わす。

$$P_3 = \frac{Q_i + Q_w + Q_p}{S_p} \quad (1)$$

ここで、

S_p : ポンプの固有排気速度 (m^3s^{-1}),

Q_i : 容器の外部から単位時間に導入されるガス量 ($\text{Pa}\cdot\text{m}^3\text{s}^{-1}$),

Q_w : 容器壁のガス放出量 ($\text{Pa}\cdot\text{m}^3\text{s}^{-1}$),

Q_p : TMP 自身のガス放出量 ($\text{Pa}\cdot\text{m}^3\text{s}^{-1}$),

である。固有排気速度 S_p は、TMP を構成する翼列全体の吸気口側から排気口側への、ガスの通過確率 Σ_{34} に対応する量で、次式で表わされる。

$$S_p = \frac{N_3 \Sigma_{34}}{n_3} \quad (2)$$

即ち、吸気口側から翼列に入射するガスの中で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ある。この翼の回転に伴う排気作用は、吸気口側の圧力が TMP の到達圧力以下であっても存在する。性能試験方法¹⁾によって測定される排気速度 S は、 S_p と同じ物理的意味を有するが、ポンプの到達圧力以上で定義される点が異なる。また、 S_p および S のいずれも、ネットの排気量に対応する量でないことは注意しなければならない。TMP 自身のガス放出量 Q_p は次式のように、2つの項からなっている。

$$Q_p = Q'_p + k \cdot T_3 N_4 \Sigma_{43} \quad (3)$$

ここで、 Q'_p : TMP 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 ($\text{Pa}\cdot\text{m}^3\text{s}^{-1}$),

k : ボルツマン定数 ($\text{J}\cdot\text{K}^{-1}$),

T_3 : 吸気口側の温度 (K),

N_4 : 排気口側から単位時間に翼列内に入射するガスの量 (分子 $\cdot\text{s}^{-1}$),

Σ_{43} : 排気口側から翼列に入射したガス分子が吸気口側へ通過する通過確率,

である。式(1)及び式(3)から、容器のガス放出量 Q_w 並びに排気口側圧力 (N_4) をいくら小さくしても、TMP を構成する材料からのガス放出量 Q'_p が、実際の到達圧力を決定する要因と成り得ることが分かる。

2.2 実効排気速度

実効排気速度 S_{ef} は次式で定義される。

$$S_{\text{ef}} = \frac{Q_i + Q_w}{P_3} \quad (4)$$

式(1)の P_3 を代入すると、次式が得られる。

$$S_{\text{ef}} = \frac{1}{1 + \frac{Q_p}{Q_i + Q_w}} \cdot S_p \quad (5)$$

外部からのガス導入が無い ($Q_i = 0$) 場合は、次のように表わされる。

$$S_{\text{ef}} = \frac{1}{1 + \frac{Q_p}{Q_w}} \cdot S_p \quad (5')$$

実効排気速度と固有排気速度との比 S_{ef}/S_p は、 Q_p/Q_w によって決定される。即ち、真空容器のガス放出量 Q_w 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。

2.3 TMP 自身のガス放出量の測定

外部からのガス導入が無い ($Q_i=0$) 場合, TMP 自身のガス放出量 Q_P は式(1)から次のように書かれる。

$$Q_P = P_3 S_P - Q_W \quad (6)$$

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できる。真空容器のガス放出量 Q_W は, スループット法による真空容器のガス放出速度測定結果⁸⁾に基づき, 以下の方法により算出した。

オリフィスで2つに区切られており, TMP で排気される真空容器 (Fig. 1) を考える。装置全体が同一の材質及び表面処理によって製作され, 同じ排気の履歴を有するものとする。即ち, ガス放出速度が装置全体で同一の値であるとする。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。オリフィスの上流, 下流の圧力 P_1 及び P_2 を測定すると, 装置の全ての部分のガス放出速度が等しいことから, 容器全体のガス放出量 Q_W は次式で与えられる。 C はオリフィスのコンダクタンス, $A_W = A_1 + A_2$ である。

$$Q_W = \frac{A_W}{A_1} \cdot C \cdot (P_1 - P_2) \quad (7)$$

TMP 吸気口の圧力 P_3 は, P_2 を測定した位置から TMP 吸気口までのコンダクタンスに基づく圧力の補正を, P_2 に加えて算出した。詳細は5章で述べる。

Fig. 1 Schematic diagram of an evacuation system consisting of a TMP and a vessel divided by a partition with an orifice.

3. 実験装置

ガス放出速度測定に用いられた装置の概要を Fig. 2 に示す⁸⁾。全ての容器がガス放出速度測定実験のために新しく製作された。材質は SUS304 市販材で, バフ研磨及び電解研磨を行って鏡面仕上げとし, 450°C で 30 h の予備ベーキング (10^{-4} Pa) を行った。組み立てた後に 4 回の排気試験を行い, 続いて大気酸化 (200°C, 3 時間)⁹⁾を行って, 室温まで冷却した後に再び 4 回の排気試験を行った。排気試験毎に容器は 200°C で約 18 h のベーキングを行い, 同時に TMP も付属のベーキング用ヒータで加熱した。ベーキング時の TMP の温度は測定していないが, カタログ記載の最高ベーキング温度 (100°C) 付近と推測される。排気試験毎に, 装置が室温まで冷却した後に 1 h の大気解放を行った。本報告では, 大気酸化後の最後の 3 回の排気試験におけるガス放出速度測定の結果を用いて, TMP 自身のガス放出量を算出した。これら 3 回の排気試験は文献⁸⁾では, 実施の順番に従って Ex-2, Ex-3 及び Ex-4 と表わされている。

Fig. 2 Schematic diagram of an outgassing measurement system. (dimensions in mm).

本報告でも同じ記号を用いることとする。

オリフィス上流側の面積は 1.5 m^2 ，下流側の面積は 0.35 m^2 である。

供試ターボ分子ポンプ (TMP) は、Leybold-Heraeus の TURBOVAC 360 である。既に長い期間 (数年間) にわたって、ステンレス鋼容器の排気のみで使用されたもので、反応性ガス等は流しておらず清浄な状態に保たれている。公称排気速度は窒素に対して $0.345 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ，水素に対して $0.35 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ である。排気側にもう 1 台の TMP (大阪真空 TF-160) が接続され (タンデム運転)，これがロータリポンプ (RP, Leybold-Heraeus D16A) に接続されている。圧力測定には、スピニングロータゲージを用いて感度校正したエクストラクタゲージ (Leybold-Heraeus IE140) を用いた。

容器の全表面積と公称排気速度 (窒素) との比 $A_s = A_w/S$ は $5.4 \text{ m}^{-1} \text{ s}$ である。また、Horikoshi の規格化された排気速度 $s^{(0)}$ に換算した値は 0.0016 となる。 $s = 4/(A_s \cdot \bar{v})$ の関係がある。 $\bar{v}$ はガスの平均速度である。 $A_s = 5.4 \text{ m}^{-1} \text{ s}$ は、装置が小さめのポンプで排気されることを示す。

4. 実験結果及びその検討

4.1 排気過程とポンプのガス放出量

排気開始からベーキングまでの、ベーキング前の排気過程におけるポンプ自身のガス放出量及び実効排気速度を、Fig. 3 に示す。排気開始時刻を基準時刻 ($t=0$) としている。Ex-2 は丸 (○)，Ex-3 は四角 (□) として Ex-4 は三角 (△) で表わされている。Fig. 3(a) にはポンプ自身のガス放出量 Q_p ，及び真空容器のガス放出量 Q_w を示す。排気開始から 9×10^4 秒 (25 時間) までの範囲では、TMP 自身のガス放出量は、真空容器のガス放出量と同様に、ほぼ直線的に減少し、その勾配は 1 よりも僅かに大きい。即ち、時間 t に関して $t^{-\alpha} (\alpha > 1)$ の形で減少する。TMP 自身のガス放出量は容器のガス放出量の約 4 倍と大きく、排気期間中この比はほぼ一定している ($Q_p/Q_w \sim 4$)。この結果 Fig. 3(b) に見られるように、実効排気速度 S_{ef} は約 $0.07 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ で排気期間中はほぼ一定であり、公称値 (固有排気速度 S_p) の約 20% という小さい値である (式(5'))。少し詳細に見ると、 S_{ef}/S_p 及び S_{ef} は排気開始と共に減少をはじめ、約 7×10^3 秒で最小値となった後再び増加している。これは真空容器のガス放出量と TMP 自身のガス放出量とで、時間変化の様子が微妙に異なることを示す。Fig. 3(a) を子細に見ると、 7×10^3 秒あたりで Q_p の曲線が上方に、また Q_w の曲線が下方にどちらも僅かに折れ曲がっていることが分かる。 S_{ef} の勾配 ($\partial S_{ef}/\partial t$) に対する寄与の大きさを

Fig. 3 Amount of TMP outgassing and effective pumping speed before baking.

式(5')から見積もると、 Q_w の方が Q_p より大きいことが分かる。Fig. 3(a) に見られる Q_w のわずかな折れ曲がり方が実効排気速度の値を変化させ、 P_3 に変化をもたらしている。

ベーキング後の結果を、Fig. 4 に示す。加熱停止時刻を基準時刻 ($t=0$) としている。Fig. 4(a) をみると、ポンプ自身のガス放出量の時間変化の様子は、真空容器のガス放出量の変化とよく似ている。ベーキングを終了すると容器のガス放出量は急激に減少するが、TMP 自身のガス放出量の減少は、真空容器のガス放出量に比べると緩やかである。両者の比は時間と共に増加し、ベーキング終了後 1×10^3 秒では約 4 であるが、 1×10^5 秒では 20 以上となっている。装置が到達圧力に達する 7.2×10^4 秒 (20 時間) 以後、TMP 自身のガス放出量は一定値 (約 $1.2 \times 10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \text{ s}^{-1}$) となった。本実験では供試 TMP の排気口側は他の TMP で排気 (タンデム運転) されているため、到達圧力においては式(3)の右辺第 2 項は十分に小さく、測定された Q_p は殆ど TMP の構成部材に起因する Q'_p と考えられる。この点については今後、排気口側の TMP の有無と Q_p との関係を調べ、確認する

Fig. 4 Amount of TMP outgassing and effective pumping speed after baking.

予定である。

Fig. 4(b)をみると、ベーキングを停止すると実効排気速度は急速に減少し、 3.6×10^4 秒 (10時間) で一定値となっている。この値は2回目の排気試験 (Ex-3) では $0.008 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ で公称排気速度の僅か2%，ベーキング前の実効排気速度の13%である。残留ガスは90%以上が水素であり⁸⁾、到達圧力付近においては、ターボ分子ポンプの水素に対する排気能力が極めて小さいことを示している。これはFig. 4(a)に見られるように、十分にベーキングした状態においても、TMPの構成部材からのガス (水素) 放出量が多いことが原因である。

3回の排気試験の結果を比較すると、ベーキング前 (Fig. 3) 及びベーキング後 (Fig. 4) のいずれの場合も、ポンプ自身のガス放出量及び実効排気速度の再現性は良好である。

ターボ分子ポンプ自身のガス放出速度 $q_p (=Q_p/A_p, A_p$: TMP 吸気口面積) を、Fig. 5に示す。ベーキング後の到達圧力における q_p は約 $1.6 \times 10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ (Ex-2, Ex-3) である。

Fig. 5 Outgassing rates of the TMP before and after baking.

4.3 ポンプの到達圧力

真空容器からのガス放出が無い理想的な場合には、ベーキングにより十分に脱ガスされた状態のTMP自身のガス放出量を Q_{pu} として、ポンプの到達圧力 P_{3u} は次式で表わされる。添え字 u は、ベーキングにより十分に脱ガスされた状態を示す。

$$P_{3u} = \frac{Q_{pu}}{S_p} \quad (8)$$

十分に脱ガスされた状態におけるTMP吸気口の圧力を P_{3u}^* 、そのときの容器のガス放出量を Q_{wu} とすると、 $P_{3u} = P_{3u}^* - Q_{wu}/S_p$ である。Fig. 4のデータで、ベーキング終了後 1.8×10^5 秒におけるTMP自身のガス放出量、及び式(8)より算出されるポンプの到達圧力をTable 1に記す。装置の到達圧力 P_{3u}^* と、容器のガス放出量を補正して得られた到達圧力 P_{3u} との差は、 $1 \times 10^{-10} \text{ Pa}$ 以下の小さな値である。3回目の排気試験 (Ex-4) におけるTMP自身のガス放出量及び到達圧力が、他の2回の排気試験に比べて少し大きい、ポンプの到達圧力は約 $3.5 \times 10^{-9} \text{ Pa}$ である。この値はタンデム運転で得られたものであり、先に述べたように殆どTMPの構成部材からのガス放出量 Q'_{pu} に起因し Q'_{pu}/S_p に相当する量と考えられる。

4.4 真空容器内のガス組成

オリフィス下流の容器内のガスは、式(1)の右辺の分子の各項からの寄与を含む。本実験の場合は、外部からのガス導入が無い ($Q_i=0$) ことから、ガス組成は容器からのガス放出とTMPからのガス放出とで定まる。

オリフィスを通過するガスの釣合は、 $P_2=P_3$ とすると、 A_0 をオリフィスの開口部面積として、次式で表わされる。右辺の各項が、上流側の容器内のガス組成への寄与を表わす。

Table 1 Ultimate pressure of the TMP

evacuation cycle	pressure downstream of the orifice P_2 (Pa)	pressure at TMP inlet P_{3u}^* (Pa)	outgassing from TMP Q_{Pu} (Pa·m ³ s ⁻¹)	ultimate pressure of TMP P_{3u} (Pa)
Ex-2	3.8×10^{-9}	3.7×10^{-9}	1.2×10^{-9}	3.6×10^{-9}
Ex-3	3.5×10^{-9}	3.4×10^{-9}	1.2×10^{-9}	3.3×10^{-9}
Ex-4	4.2×10^{-9}	4.1×10^{-9}	1.4×10^{-9}	4.0×10^{-9}

Table 2 Ratios of the amount of outgassing from the vessel to the amount of total outgassing

	outgassing rate from the vessel q_W (Pa·m ³ s ⁻¹ m ⁻²)	amount of outgassing from the TMP Q_P (Pa·m ³ s ⁻¹)	Ratios of the amount of outgassing from the vessel to the amount of total outgassing	
			in the vessel upstream of the orifice	in the vessel downstream of the orifice
before baking* t=6.5×10 ³ s	2.3×10^{-8}	1.2×10^{-7}	0.96	0.21
after baking** t=1.8×10 ³ s	2.2×10^{-11}	1.2×10^{-9}	0.76	0.03

*Fig. 3, **Fig. 4.

$$A_0 \Gamma_1 = \frac{C}{k \cdot T \cdot S_p} \left[\left(\frac{S_p}{C} + 1 \right) A_1 \cdot q_{W1} + A_2 \cdot q_{W2} + Q_P \right] \quad (9)$$

ここで、 $\Gamma_1 = (1/4)n_1\bar{v}$ (n_1 : 上流側容器内のガス密度、 $\bar{v}$: ガスの平均流速)、 k はボルツマン定数、 q_{W1} 及び q_{W2} は各々、オリフィス上流側及び下流側の容器のガス放出速度で、本実験では等しい値 ($q_{W1} = q_{W2} = q_W$) である。

式(9)は次のように導かれる。下流側容器の圧力 P_2 は式(1)より、次式で表わされる。

$$P_2 = \frac{A_1 \cdot q_{W1} + A_2 \cdot q_{W2} + Q_P}{S_p}$$

上流側容器から流出するガス分子の数は、オリフィスを通じて下流側容器へ流れる $A_0 \cdot \Gamma_1$ である。上流側容器に流入するガス分子の数は、オリフィスを通じて下流側容器から流入する $A_0 \cdot \Gamma_2$ 、及び容器からのガス放出量 $A_1 \cdot q_{W1}/kT$ である。上流側容器内のガスが平衡状態にあるとすると、

$$A_0 \cdot \Gamma_1 = A_0 \cdot \Gamma_2 + \frac{A_1 \cdot q_{W1}}{kT}$$

が成り立つ。ここで、 $C = A_0 \bar{v}/4$ 、 $\Gamma_2 = (1/4)n_2\bar{v}$ 及び $P_2 = n_2 kT$ を考慮して、式(9)が導かれる。

オリフィス径 $\phi 5.6 \times 10^{-3}$ m、 $A_1 = 1.5$ m²、 $A_2 = 0.35$ m² として、容器内のガス組成における容器からのガス放出の占める割合を、Table 2 に記す。オリフィス上流では、ベーキング前には96%のガスが容器起源であり、ベ

ーキング後においても76%が容器起源である。一方オリフィス下流では、ベーキング前において容器起源のガスは21%に過ぎず、ベーキング後においては3%のみが容器起源である。

以上の結果から、残留ガス分析結果の解析に際しては、ポンプからのガス放出の影響について十分に注意しなければならないことが分かる。

4.5 圧力予測

TMP 吸気口の圧力 P_3 は、TMP 自身のガス放出量及 Q_P 及び固有排気速度 S_p を用い、式(1)により算出される。ここで、次式で計算される P_C との比較を行う。

$$P_C = \frac{Q_W}{S} + P_{3u} \quad (10)$$

式(10)は、従来圧力予測によく用いられている式である。これは性能試験方法¹⁾において排気速度の算出に用いられる式に基づいており、装置の到達圧力の代りにポンプの到達圧力 P_{3u} を用いている。

Fig. 3 及び Fig. 4 に示された2回目の排気試験 (Ex-3) の、 P_3 に対応する P_C の値を Fig. 6 に示す。Table 1 の2回目の排気試験のポンプの到達圧力、並びに Fig. 3 及び Fig. 4 の容器のガス放出速度のデータを用いて算出した。Fig. 6(a) はベーキング前、Fig. 6(b) はベーキング後の圧力である。ベーキング前では、 P_C は P_3 の約15%の大きさである。ベーキング後 1×10^5 秒経過して装置が到達圧力に達した状態では、 P_C は P_3 と一致す

Fig. 6 Comparison of results obtained using the new method of pressure prediction with ones obtained using a conventional one.

る。従って、式(10)がほぼ正しい値を与えるのはベーキング後の到達圧力のみである。排気開始から到達圧力までの排気過程においては、実際の圧力の数分の1の小さい値を与える。これは、式(10)で計算された排気速度を有するTMPを用いると、所定の圧力に到達するのに予測値の数倍の時間を要することを意味する。即ち、式(10)は必要な排気速度を過小に見積もるため、予測値の数倍の排気速度を有するTMPを用いなければ、所定の時間で目標圧力に到達することはできない。これは式(10)がTMP自身のガス放出を考慮していないことが原因であり、圧力予測に式(1)を用いることで解決される。言い替えれば、式(1)を用いることにより高い精度で、必要なポンプ容量を決めることが出来る。

Fig. 7 Model of flow-path element for estimating conductance. (dimensions in mm)

5. TMP 吸気口圧力 P_3 の算出

スルーブット法のガス放出速度測定装置においては、TMP 吸気口の圧力は直接には測定されないため、オリフィス下流の圧力測定位置までの圧力補正が必要となる。ここで本報告で用いた圧力補正の方法と計算結果について述べる。Fig. 1の装置では、圧力測定位置から供試TMPの吸気口まで、Fig. 7の太い実線で示される円筒1 ($\phi 197 \times 200$)、厚みの無い円孔 ($\phi 97$)、及び円筒2 ($\phi 97 \times 175$) からなるダクトで連絡されている。20°Cの窒素に対するコンダクタンスは各々 $4.71 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ 、 $0.869 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ 、及び $0.643 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ で、ダクト全体では $0.343 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ となってTMPの公称排気速度 ($0.345 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) とほぼ等しい。これは、 P_2 とTMP吸気口の圧力 P_3 とは、異なる値として取り扱う必要があることを示す。

TMP 吸気口圧力 P_3 は、圧力測定値 P_2 にダクトのコンダクタンスによる圧力低下の補正を加えて算出した。Fig. 7の右側に示した流路要素を組合せた1次元流路として、コンダクタンスを計算した。ダクトのガス放出速度はオリフィス上流側容器の測定値と同一とし、円筒部はガス放出源が分布しているとした。2つの円筒をつなぐ $\phi 197 \times \phi 97$ の環状部分は、厚みの無い円孔 ($\phi 97$)とその上流側におかれた集中ガス放出源として扱った。温度は容器の実測値を用いた。

第2回排気試験 (Ex-3) における圧力、TMP自身のガス放出量及び実効排気速度に対する補正の影響を、Fig. 8 (ベーキング前) 及び Fig. 9 (ベーキング後) に示す。式(6)において P_3 の代りに P_2 を用いて算出した

Fig. 8 The effect of correction of the pressure on amount of TMP outgassing and effective pumping speed before baking.

Fig. 9 The effect of correction of the pressure on amount of TMP outgassing and effective pumping speed after baking.

値を、補正前の値として*をつけて示した (Q_p^* , S_{ef}^* 等)。

オリフィス下流側圧力の測定値 P_2 とコンダクタンス補正を行って求めた TMP 吸気口圧力 P_3 を比べると、Fig. 8 のベーキング前では明らかに差が見られ、その比 P_3/P_2 の単純平均値は 0.84 である。この圧力補正によって Q_p は平均で 0.80 倍に、 S_{ef} は平均で 1.20 倍になっている。排気開始直後から $t \sim 10^3$ s までの試験した範囲内で、補正による Q_p の変化率がほぼ一定しているのは、Fig. 3(a) に見られるように、 Q_p と Q_w との比がほぼ一定しているためである。このため S_{ef}/S_p がほぼ一定となり、補正による変化の割合が一樣になると考えられる。

Fig. 9 のベーキング後の結果を見ると、補正值と補正前の値の比 (P_3/P_2 , Q_p/Q_p^* , S_{ef}/S_{ef}^*) はベーキング停止直後の $t = 1 \times 10^3$ s ではベーキング前とほぼ同じであるが、温度の低下に伴って差は小さくなり、 $t > 1 \times 10^4$ s では補正による違いは見られなくなる。これは温度の低下に伴って TMP 吸気口における実効排気速度が、 P_2 測定位置から TMP 吸気口までのコンダクタンスに比べて、小さくなることを示す。この原因は Fig. 4 に見られるよ

うに、TMP 自身のガス放出量と容器のガス放出量との比 Q_p/Q_w が大きくなることにある。

6. 新しい TMP の排気の式の応用

TMP の排気性能は固有排気速度 (公称排気速度) と、TMP 自身のガス放出量とで過不足無く記述される。従ってこれまでの排気速度に加えて TMP 自身のガス放出量を測定することにより、排気性能を定量的、かつ分析的に評価することができる。即ち、TMP の材質や表面処理、翼の形状、さらには複合化による構造変化等が排気性能に与える影響を、固有排気速度と TMP 自身のガス放出量の変化として定量的に評価することが可能となる。これは TMP の性能向上や開発を支援する重要な情報となる。実験装置としては、オリフィス法の TMP 性能試験装置¹⁾を用いることが出来る。従来の排気性能測定過程においてオリフィス上流、下流の圧力変化を記録することにより、既に述べた方法で、TMP 自身のガス放出量を測定することができる。この場合、真空容器は TMP 吸気口付近で流路面積が減少しており、オリフィス下流の圧力測定位置から TMP 吸気口までの圧力低

下を補正することが必要であろう。

また、既に製品化されているターボ分子ポンプについても、TMP 自身のガス放出量の値を知ることが出来れば、ユーザが装置の圧力予測や TMP の選択を行う際に役立つ。ポンプメーカーに TMP 自身のガス放出量の測定と、データの公開をお願いしたい。

7. おわりに

ポンプ自身のガス放出量を定量的に評価することの出来る、新しい TMP の排気の式⁶⁾に基づき、スループット法によるガス放出速度測定実験の結果を用いて、タンデム運転された TMP のポンプ自身のガス放出量を求めた。

主な結果は以下の通りである。

(1) TMP 自身のガス放出量は、ベーキングを含む排気過程において、真空容器と同様の変化を示す。ベーキング前は $t^{-\alpha} (\alpha > 1)$ で減少する。ベーキング終了後は速やかに減少して、約 1×10^5 秒で装置が到達圧力に達するとともにほぼ一定値となった。その値は、今回試験した TMP では $1.2 \times 10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ であり、殆ど TMP の構成部材からのガス放出と考えられる。

(2) TMP 自身のガス放出量は、真空容器に比べて数倍以上と大きい。特に、装置が到達圧力に達した段階では、20数倍に達した。

(3) 実効排気速度と固有排気速度（公称排気速度）との比はベーキング前には約20%であり、ベーキング後に装置が到達圧力に達した段階では、3%にまで減少した。

(4) TMP の到達圧力は約 $3.5 \times 10^{-9} \text{ Pa}$ であった。

(5) 従来の圧力予測の式（式(7)）は、装置の到達圧力のみを正しく予測することが出来る。排気開始から到達圧力までの排気過程においては、実際の数分の1の低い圧力を予測する。

(6) 新しい排気の式により、TMP で排気される真空容器の圧力予測の精度が、従来よりも大きく向上し、適切な排気速度（容量）の TMP の選択が可能になる。

(7) TMP 自身のガス放出量を測定することにより、TMP の材質や表面処理、さらには複合化等の構造変化が排気速度に与える影響を、定量的に評価する可能性がひらける。また TMP 自身のガス放出量は、ユーザの圧力予測や TMP 選択に役立つ。TMP 自身のガス放出量の測定と、データの公開を提案したい。

【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，PP35 (1993).
- 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) 尾高憲二：真空 39 (1996) 488.
- 7) C. H. Kruger and A. H. Shapiro: 1960 7th natl. Symp. Vac. Technol. Trans. (Pergamon, 1961) (1961) 6.
- 8) K. Odaka and S. Ueda: J. Vac. Sci. Technol. A13 (1995) 520.
- 9) K. Odaka and S. Ueda: Vacuum 47 (1996) 689.
- 10) G. Horikoshi: J. Vac. Sci. Technol. A5 (1987) 2501.