複合型ターボ分子ポンプのガス放出量の定量評価*

尾高 憲二**・佐藤 修**

(受理1998年4月14日, 掲載決定1998年6月6日)

Quantitative Evaluation of the Outgassing Rates from a Turbomolecular Drag Pump

Kenji ODAKA and Osamu SATOH

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

(Received April 14, 1998, Accepted June 6, 1998)

Outgassing rates from a turbomolecular drag pump (TDP) are measured and compared with those from a turbomolecular pump with axial stages only (TAP). Before baking, outgassing rates of both types of TMPs fit the same time-dependent curve. After baking, on the other hand, outgassing rates of the TDP are 1/3 to 2/3 of those of the TAP. The structure, material, surface finish, and contamination might affect the outgassing rates. So, the current results show that we can evaluate quantitatively the effect of these factors on pumping performance using outgassing rates.

1. はじめに

筆者らは, ガスの通過確率の考え¹⁾を TMP の翼列全体に適用することにより, ターボ分子ポンプ (TMP) 自身のガス放出量 (1)構成部材のガス放出量と(2)排気口側から吸気口側へ通過するガス量との和)を定量的に扱うことのできる, TMP の排気の式を提案した²⁾. この式に基づいて測定された TMP 自身のガス放出量は, ステンレス鋼容器に比べてベーキング前で数倍, ベーキング後の到達圧力付近では20倍以上という大きな値を示した³⁾. この結果は, 到達圧力のみでなく排気の全過程にわたって, TMP 自身のガス放出量が装置の圧力に大きな影響を及ぼすことを示す. 従って, TMP 自身のガス放出量のデータベース化によって, 真空装置の圧力予測並びにポンプ容量の選定の精度を, 従来に比べて格段に向上させ得ると期待される. また, タンデム運転による TMP の排気性能の変化から, 排気口側から入射して吸気口側へ通過するガスの量と構成材料のガス放出量とを

分離して測定することに成功した⁴⁾. この結果から, TMP 自身のガス放出量の定量測定を通して, TMP の構造や材質, 表面処理等が排気性能に及ぼす影響の定量的評価の可能性が示された.

最近, 高い吸入圧力での排気速度の増大を目的として, 軸流段の排気口側にドラッグポンプを組み込んだ複合型 TMP が製品化されている. 複合化によって水素圧縮比が増大し, 到達圧力が低下する場合もある⁵⁾. 高圧側への作動範囲の拡大はドラッグポンプの排気作用に因るもので, ポンプ自身のガス放出量とは直接関係が無い. 一方, 到達圧力の低下は, 軸流段の排気口側から吸気口側に通過するガス量の減少に因るものであり, ポンプ自身のガス放出量の変化として測定可能と考えられる. 今回, 従来のタンデム運転に相当する 10^{-9} Pa 台の到達圧力が得られた複合型 TMP⁶⁾の, ポンプ自身のガス放出量を測定した. 結果を以下に報告する.

2. 実験方法

2.1 基礎式

本研究の基礎となる TMP の排気の式の導出及び Q_p の測定法については, 既に報告した¹⁾. 本研究の結果の

* 第38回真空に関する連合講演会にて講演

** ㈱日立製作所機械研究所 (〒300 茨城県土浦市神立町502)

表示に必要な項目のみを、以下に記す。

TMP の吸気口側の圧力 P_3 は、TMP 自身のガス放出量 Q_P ($\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \text{s}^{-1}$) を用いて、次式で表わされる。添え字 3 は TMP の吸気口側を表わす。

$$P_3 = \frac{Q_i + Q_w + Q_P}{S_P} \quad (1)$$

ここで、 Q_i は外部から導入されるガス量、 Q_w は容器のガス放出量、 S_P ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) は固有排気速度で、TMP の性能試験方法⁶⁾記載の公称排気速度 S と一致する。TMP 自身のガス放出量は、TMP の構成部材からのガス放出量と、TMP の排気口側から入射して吸気口側に通ずるガス量との和である。外部からのガス導入が無い ($Q_i=0$) 場合、式(1)より Q_P は次式で表わされる。

$$Q_P = P_3 S_P - Q_w \quad (2)$$

実効排気速度 S_{ef} と固有排気速度との間には、

$$S_{\text{ef}} = \frac{1}{1 + \frac{Q_P}{Q_i + Q_w}} \cdot S_P \quad (3)$$

の関係がある。TMP の到達圧力 P_{Pu} は、

$$P_{\text{Pu}} = \frac{Q_{\text{Pu}}}{S_P} \quad (4)$$

と表わされる。添え字 u はベーキングによって十分に脱ガスされた状態を示す。 P_{Pu} は、TMP の吸気口における到達圧力 P_{3u} から、容器のガス放出量に基づく圧力上昇分 Q_w/S_P を減じて算出される。

本研究では式(2)を用いて Q_P を算出するため、ステンレス鋼製の真空容器のガス放出速度をスルーブット法で測定し、 Q_w 及び P_3 を求めた。また、固有排気速度 S_P として公称排気速度 (カタログ値) S を用いた³⁾。容器全体のガス放出量 Q_w は次の式(5)を用いて算出した。

$$Q_w = \frac{A_w}{A_1} \cdot C \cdot (P_1 - P_2) \quad (5)$$

A_1 、及び A_2 並びに P_1 及び P_2 は各々、オリフィス上流側及び下流側の容器の表面積、並びに圧力である。 C はオリフィスのコンダクタンス、 $A_w = A_1 + A_2$ である。値は窒素換算値である。

2.2 実験装置

実験に用いたスルーブット法の装置の概要を、Fig. 1 に示す。供試 TMP は、Balzers のワイドレンジターボ分子ポンプ TPU180H ($S=0.18 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$, N_2) で、軸流段とドラッグポンプが組合せられており、水素の圧縮比は 5×10^5 と表示されている。超、極高真空装置の排気に数年間用いたが、汚染性のガス等は扱っておらず、清浄に保たれていると思われる。粗引きポンプは、ダイアフラムポンプ ($S=3 \text{ m}^3 \text{h}^{-1}$, 到達圧力 $< 500 \text{ Pa}$) である。ガス放出速度を測定する真空容器は SUS304 市販材で製

Fig. 1 Schematic of the measurement system.

Outgassing rates of the vacuum chamber are measured to evaluate outgassing rates of a TMP tested.

作し、バフと電解研磨の後、 $450^\circ\text{C} \times 30$ 時間のベーキングを行った。真空容器と供試 TMP とを連結する $\phi 100 \times 300$ の測定容器は、真空容器と同じ材質及び処理で製作し、その真空容器側に開口径 3.23 mm のオリフィスを設置した。オリフィスの開口部は、頂角 20 度のエッジで先端の厚みを 0.2 mm とした。コンダクタンスは厚みの無い円孔として算出した。 $A_1=0.543 \text{ m}^2$ 、 $A_2=0.263 \text{ m}^2$ である。圧力測定は、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を用いた。 P_2 を測定した位置から TMP 吸気口までの圧力の低下分は P_2 に比べて僅かであり、TMP 吸気口の圧力 P_3 として P_2 の値を用いて計算した。

150°C あるいは 200°C のベーキングを含む排気試験を、1 時間の大気解放を区切りとして数回行い、ガス放出速度が安定して再現されることを確認した。その後、 200°C のベーキングを含む排気試験を行って、TMP のガス放出量を測定した。

3. 実験結果

3.1 TMP 自身のガス放出量

Fig. 2 に TMP 自身のガス放出量 Q_P 、及び容器全体

(a) before baking
 $t=0$: TMP start, $\square$: Q_P , $\circ$: Q_W , $\blacktriangle$: Q_P (Bal 170 tandem).

(b) during baking
 $t=0$: baking start, $\square$: Q_P , $\circ$: Q_W .

(c) after baking
 $t=0$: baking stop, $\square$: Q_P , $\circ$: Q_W , $\blacktriangle$: Q_P (Bal 170 tandem).

Fig. 2 Outgassing rates from the TMP and the vacuum chamber.

Outgassing rates from a tandem-operated TMP with axial stage alone are also shown for comparison (solid triangles designated as Bal 170 tandem).

(真空容器+測定容器) のガス放出量 Q_w を、白抜き四角及び丸で示す。比較のために、タンデム運転した軸流段のみの TMP (Balzers TPU170) (以下 Bal 170 tan と記す) の、TMP 自身のガス放出量⁴⁾を黒三角で示す。Fig. 2(a) はベーキング前、Fig. 2(b) はベーキング中、Fig. 2(c) はベーキング後の結果である。

Fig. 2(a) に見られるように、1 h の大気解放状態から排気を開始すると、 Q_p は容器のガス放出量 Q_w と同様に排気時間 t に対してはほぼ $t^{-\alpha}$ ($\alpha=1.26$) で減少した。 $t=7.2 \times 10^3$ s (2 h) における値は Q_p が 5.7×10^{-7} Pa·m³·s⁻¹、 Q_w が 5.3×10^{-7} Pa·m³·s⁻¹ であった。データが直線から少しずれてうねって見えるのは、室温の変化(周日)を反映している。容器温度は $t=7.2 \times 10^3$ s (2 h) で 23.5°C、 $t=5.04 \times 10^4$ s (14 h) で 31.8°C、 $t=1.044 \times 10^5$ s (29 h) で 28.8°C であった。また TMP 自身のガス放出量は、軸流段のみの TMP (Bal 170 tan) の結果と重なり、良く一致している。

排気開始後 1.062×10^5 s (29.5 h) にベーキングを開始した。Fig. 2(b) の横軸の時間は、ベーキング開始を基準 ($t=0$) としている。真空容器、測定容器ともに約 5 K·s⁻¹ で昇温し、 5.4×10^3 s (1.5 h) からベーキング終了の 7.02×10^4 s (19.5 h) まで、18 時間にわたって 206°C に保持した。 Q_p は一旦減少してから増加し、 7.2×10^3 s (2 h) 付近で最大となった後、緩やかに減少している。ベーキング初期の容器昇温時における Q_p の減少の原因は、次のように考えられる。温度上昇に伴って容器からのガス放出量が増加するが、オリフィス(排気速度)が小さいために排気が遅れ、容器内の圧力が準平衡状態以上に上昇する。このため、オリフィス前後の圧力差から求められるガス量が実際のガス放出量を上回り、式(5)の Q_w の値が過大となって、式(2)の Q_p の値が実際よりも小さく算出されるのである。容器が一定温度に達した 5.4×10^3 s 以後の Q_p は、正しい値と考えられる。ベーキングの後半では Q_p の減少は非常に緩やかで、ベーキング終了時の値は 1.3×10^{-7} Pa·m³·s⁻¹ である。

Fig. 2(c) の横軸の時間は、ベーキング終了時を基準 ($t=0$) としている。容器の温度低下と共に TMP 自身のガス放出量 Q_p は速やかに減少する。そして、 $t=2.52 \times 10^4$ s (7 h) で 7.6×10^{-10} Pa·m³·s⁻¹ に達した後は、減少は非常に緩やかになり、ポンプの構成部材は十分に脱ガスされた状態であると判断される。また、十分に脱ガスされた状態で、Bal 170 tan のガス放出量の約 3 分の 2 であることが分かる。Bal 170 tan のガス放出量の殆どが、構成部材から放出される⁴⁾。

カタログによれば供試 TMP の理論的到達圧力は、 10^{-9} Pa を下回る (10^{-10} Pa 台) とされている。この値は、排気口側から吸気口側へ通過する水素による圧力上昇に相当すると考えられる。しかし、実際に測定された供試 TMP の到達圧力は、後に述べるように、 1.7×10^{-9} Pa であった。これらを考え合わせると、到達圧力における構成部材のガス放出量 Q_{pu} は、TMP 自身のガス放出量のおよそ 2 分の 1 以上で、Bal 170 tan の Q_{pu}

Fig. 3 Effective pumping speeds and their ratio to the intrinsic pumping speed.

の3分の1から3分の2と見積もられる。

TMP自身のガス放出量の相違は翼列の構成、材質、表面処理等のTMPの仕様、さらには使用に伴って付着した汚れ等の違いを反映すると考えられる。上に述べた結果は、これらの要素が排気性能に与える影響を定量的に評価する手段として、TMP自身のガス放出量の測定が有効であることを示すものである。

3.2 実効排気速度

Fig. 3に実効排気速度 S_{ef} 、及び実効排気速度と固有排気速度（カタログ値）との比 S_{ef}/S_p を示す。Fig. 3(a)はベーキング前、Fig. 3(b)はベーキング中、Fig. 3(c)はベーキング後の結果である。

1 hの 대기開放の後、排気を開始して 5.4×10^3 s (1.5 h) を経過すると、実効排気速度は $0.087 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$ ($S_{ef}/S_p = 0.48$) ではほぼ一定値となった。これは式(3)において $Q_i = 0$ を考慮すると、 Q_p と Q_w との比が一定であることを示す。

Fig. 3(b)に見られる、ベーキング初期の実効排気速度の増加は、容器のガス放出量の急増を反映するが、3.1に述べた理由から、その値は実際よりも大きく算出されていると考えられる。容器が一定温度に達した 5.4×10^3 s 以後の実効排気速度は、正しい値と考えられる。ベーキング後半には、実効排気速度は緩やかに減少する。 $t = 7.2 \times 10^3$ s において $0.11 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$ 、 $t = 7.02 \times 10^4$ s において $0.089 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$ である。緩やかな減少は、Fig. 2(b)の $t \geq 9 \times 10^3$ s に見られるように、容器のガス放出量の減少速度が、TMP自身のガス放出量の減少速度よりも少し大きいことを表わす。

ベーキング終了後は、Fig. 2(c)に見られるように容器が冷却してガス放出量が減少するのに対応して、実効排気速度は Fig. 3(c)のように減少し、 $t = 1.296 \times 10^5$ s (36 h) で $0.01 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$ に達した。これは固有排気速度の5.5% ($S_{ef}/S_p = 0.055$) に相当する。 $t = 9 \times 10^3$ s (2.5 h) における実効排気速度の一時的増加は、真空計の脱ガスによってTMPに流入するガス量が増加したためである。Fig. 2(c)の容器のガス放出量に見られる同時刻における僅な変化（突出）に対応する。

3.3 到達圧力

十分に脱ガスされた状態で測定されたオリフィス下流の圧力 P_{20} は、ベーキング終了後 4.176×10^5 s (116 h) で 1.82×10^{-9} Pa であった。容器のガス放出量に基づく圧力上昇 $Q_{wu}/S_p = 1.2 \times 10^{-10}$ Pa から、TMPの到達圧力 P_{Pu} は 1.7×10^{-9} Pa と算出された。

4. ま と め

ドラッグポンプを内部に組み込んだ複合型TMP (Balzers, TPU180H) のTMP自身のガス放出量 Q_p を測定し、同じメーカーの軸流段のみのTMP (TPU170, タンデム運転) と比較した。大気解放からの排気では、両者はよく一致した。十分に脱ガスされた状態では、 Q_p では複合型が軸流段のみの約3分の2で、構成部材からのガス放出量 Q'_p は、複合型は軸流段のみの3分の1から3分の2と見積もられた。これは翼列の構成、材質、表

面処理,あるいは汚れ等の違いを反映すると思われる.
これらの要素が排気性能に及ぼす影響を定量的に評価する
ために, TMP 自身のガス放出量は有効な手段である
ことが示された.

〔文 献〕

- 1) C. H. Kruger and A. H. Shapiro: 1960 7th Natl.
Symp. Vac. Technol. Trans. (Pergamon, 1961), (1961)
p6.
- 2) 尾高: 真空, **39** (1996) 488.
- 3) 尾高: 真空, **40** (1997) 28.
- 4) 尾高: 真空, **40** (1997) 761.
- 5) 尾高, 上田: 真空, **34** (1991) 29.
- 6) 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.
- 7) K. Odaka and S. Ueda: J. Vac. Sci. Technol., **A13**
(1995) 520.