ねじ溝型真空ポンプの排気特性に及ぼす第二成分気体の効果*

神吉 達夫**・神戸 俊和**・坂本 隆一***・松本 隆夫***

(受理1993年11月29日, 掲載決定1994年2月5日)

Effects of Secondary Gas on Evacuation Characteristics of Grooved Axial Flow Pump

Tatsuo KANKI**, Toshikazu KANBE**, Ryuichi SAKAMOTO***
and Takao MATSUMOTO***

**(Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Himeji Institute of Technology, 2167 Shosha, Himeji)

*** (Daikin Industries, Ltd., Rinkai Factory, 3-12 Chikkou-Shinmachi, Sakai, Osaka)

(Received November 29, 1993, Accepted February 5, 1994)

1. はじめに

一般に、掃引型真空ポンプの排気速度は気体の種類に依存し、排気性能は分子量の小さい気体に対し低下するという特性をもっている。このことから、混合気体を排気するとき、例えば、軽い気体を定量排気しているとき、第二成分として重い気体を導入することにより排気速度や到達圧に影響が現れることが推測される。本研究では、ねじ溝型真空ポンプを対象として、第二成分気体を導入した場合の排気特性を実験的に調べ、到達圧と各気体の流量、背圧およびロータ回転数などの関係を明らかにした。また、平滑化モデル^{1,2)}を用い、二成分気体の排気特性を平均化した物性値の単成分気体として解析し、実測値と比較検討した。

2. 実験方法

ねじ溝型ポンプの形状と実験装置は前報³⁾と同様である。吸入側および背圧側の圧力は隔膜型真空計(MKS, 122AA, 127AA)で、各気体の流量はキャピラリー流量計で測定した。ロータの回転数はケイシングの振動をスペクトラムアナライザーで測定し周波数解析により確認した。ここでは、軽い気体としてHe, 重い気体としてArを用いた。実験は室温 $25 \pm 5^\circ\text{C}$ で行った。

3. 実験結果と考察

Fig. 1(a), (b), (c) は、ロータ回転数を $N=200$ rps, 背圧を $p_2=100, 200, 400$ Pa, He 流量を $Q_{\text{He}}=30 \sim 200$ sccm で固定した場合について、到達圧 p_1 と Ar 流入量 Q_{Ar} との関係を示している。到達圧 p_1 は、当然ながら、 Q_{He} が小さいほど低くなる。第二成分としての Ar 流入の効果として、1) 低流入量域では、全流量が大きくなるにも拘らず、到達圧 p_1 は Q_{Ar} が増すとともに低下する。2) 到達圧はある Q_{Ar} 値で最低値 $p_{1\min}$ を示し、その後 Q_{Ar} が増加するとともに上昇する。3) $p_{1\min}$ に対応する Q_{Ar} 値は Q_{He} が増加すると高い流量側に変移するが、Ar 流量と He 流量の比 ($Q_{\text{Ar}}/Q_{\text{He}}$) $p_{1\min}$ は小さくなる。4) ($Q_{\text{Ar}}/Q_{\text{He}}$) $p_{1\min}$ は背圧 p_2 が高くなるほど高くなる。ここに図示しないが、このような効果はロータ回転数が低くなるほど著しくなる。これら 1)~4) について、例えば、Fig. 1(b) において、 $Q_{\text{He}}=30$ sccm の場合、 p_1 は 92 Pa から Q_{Ar} の増加とともに低下し、 $Q_{\text{Ar}}=40$ sccm で最低値 $p_{1\min}=68$ Pa を示しその後増大する。 $p_1=p_{1\min}$ での流量比は、 Q_{He} が小さくなるにしたがって ($Q_{\text{Ar}}/Q_{\text{He}}$) $p_{1\min}$ は $0.3 \rightarrow 1.3$ と変化する。また、Fig. 1(a), (b), (c) において $Q_{\text{He}}=100$ sccm とした場合、背圧が $p_2=100, 200, 400$ Pa と変化するのに応じて、($Q_{\text{Ar}}/Q_{\text{He}}$) $p_{1\min}$ は $0.5, 0.9, 1.0$ と変化する。ロータ回転数との関係について 200 rps の場合と比較すると、400 rps では、第二成分気体の導入の効果は微小で Q_{Ar} の増加による低作動圧力

* 平成5年10月28日 第34回真空に関する連合講演会で講演(28a-5)

** 姫路工業大学工学部産業機械工学科(〒671-22 姫路市書写2167)

*** ダイキン工業株式会社臨海工場(〒592 堺市築港新町3丁目12番地)

Fig. 1 Attainable pressure vs. flow rate, $N=200$ [rps].

Fig. 2 Attainable pressure vs. flow rate comparison with calculated values, $Q_{He}=50$ [sccm].

域での p_1 の低下は小さい。なお、第二成分による効果について $Q_{Ar}=0$ での到達圧を基準とすると、基準値からの差圧は背圧が高くなるほど大きくなるが、基準値に対する比は逆に小さくなる。

Fig. 2(a), (b), (c) に、He 流量が $Q_{He}=50$ sccm で、背圧が $p_2=100, 200, 400$ Pa の場合について、各回転数 ($N=100\sim 400$ rps) に対する到達圧力 p_1 と Ar 流量 Q_{Ar} の関係を示す。図の実線は、気体の拡散を無視し、分子量については平均分子量、平均自由行程については混合粘性係数より推算した値を用い、各 Kn 数に対応する単成分気体の流量係数³⁾を用いて、平滑化モデル^{1,2)}より計算された値を示している。計算値は、 p_1 が Q_{Ar} の増加とともに減少し極値を示し再び増加する傾向をよく表している。 $Q_{Ar}/Q_{He}\rightarrow 0$ あるいは $Q_{Ar}/Q_{He}\rightarrow \infty$ では気体は単一成分に近づき、両者は一致する。背圧が $p_2=400$ Pa の場合には、計算値は全領域において実測値をよく説明している。この場合、到達圧力域は $p_1>100$ Pa で、流域

は間隙基準で $Kn<0.1$ でありロータ溝部での気体の流れは連続流である。背圧が $p_2=200$ Pa の場合、 $N=100, 200$ で到達圧の高い領域では、計算値は実測値と対応しているが、 $N=300, 400$ と到達圧が低くなると、特に極小値を示す領域で偏差が大きくなっている。このときの到達圧力域では、 $0.1<Kn<1$ であり、気体の流れは連続流と自由分子流の中間域（遷移流域）にある。背圧が $p_2=100$ Pa になると、計算値と実測値の相関はむしろ良くなる。これは、背圧が低くポンプの排気能力が流量に対して余裕があり、第二成分の効果が小さくなっているためであると思われる。この場合の流域は、 $1<Kn$ であり、流れはほぼ自由分子流域にある。自由分子域においては、分子相互衝突がないことから、各成分気体が相互作用なしに排気される。図の一点鎖線は、各成分気体が独立に排気されると仮定して（排気側での分圧比は気体の導入比に等しいとして到達分圧を求めた）計算された結果を示している。一点鎖線は、特に圧力の低い領域

Fig. 3 Flow rate ratio vs. lowest attainable pressure.

において、実線よりも実測値により近い値を示している。当然ながら、これは高い圧力域では実測値を説明することはできない。

このように、第二成分の気体導入による排気能に対する効果は、作動圧力域が高い領域では、ロータ溝部での混合気体の流れ (Couette-Poiseuille 流) を呈するとして説明することができる。また、作動圧の低い領域では、各気体は独立に排気され分圧の効果として説明することができる。中間遷移域においては、成分気体の分子相互作用が現れ、気体の排気および漏洩は複雑な現象となることが予想される。この領域においては、成分気体の拡散の効果も働くものと推察される。

Fig. 3(a), (b), (c) に背圧 $p_2 = 100, 200, 400$ Pa とした場合の p_{1min} と p_{1min} を示すときの流量比 (Q_{Ar}/Q_{He}) p_{1min} の関係を示している。この図は、第二成分気体の効果が最も著しく現れるときの到達圧と流量比の関係を示している。この図は、軽い気体を所定速度で排気し所望の到達圧を得たいとき、第二成分気体をどの程度導入すれば最適であるかの判断基準を与える。図によると、 p_{1min} は、ある p_{1min} 値 (~ 50 Pa) を境に低い側 (自由分子流域側) では Q_{Ar} 値が小さくなるほど低くなり、高い側 (連続流域側) では Q_{Ar} 値が大きくなるほど低くなっている。このように、 p_{1min} 対 (Q_{Ar}/Q_{He}) p_{1min} の挙動が流相 (自由分子流か連続流か) によって異なることは、第二成分の効果が流域によって機構的に異なることを示唆している。自由分子流域側では、成分気体は分圧の効

果により、連続流域側では、粘性の効果により漏洩流が抑制されるためであろう。中間遷移域では成分気体の拡散の効果も考慮する必要があるものと考えられるが、この問題については今後検討したい。

4. おわりに

ねじ溝型真空ポンプによる軽い気体 (He) の排気について、第二成分気体として重い気体 (Ar) を導入した場合の排気特性を明らかにした。その結果を要約すると、1) 第二成分の混入により、低流量域では、全流量が増大するにも拘らず到達圧が低下する。2) 到達圧が極小となる流量比値が存在する。3) 到達圧の低下は、高圧域では粘性効果による漏洩抵抗の増大、低圧域では、吸引側の分圧の効果として説明される。4) 高圧域および低圧域では、拡散を無視した解析によって実測値を説明することができる。

二次的な効果として拡散誘引効果が考えられる。この問題については、拡散を考慮した希薄混合気体の流れの解析が必要である。

〔文 献〕

- 1) E. F. Boon and S. E. Tal: *Chemie. Ing. Tech.*, **31** (1959) 202.
- 2) 澤田, 中村: *真空*, **28** (1985) 803.
- 3) 神吉, 原田, 坂本, 松本, 樽谷: *化学工学論文集*, **19** (1992) 911.