溝断面形状の異なる希薄ガスビスコシールの 密封性能の比較*

沢田 雅**・中村 雅英**

(昭和60年1月6日受理)

Comparative Studies on Sealing Performance of Rarefied-Gas Viscoseals with Different Groove Shapes

Tadashi SAWADA and Masahide NAKAMURA

(Akita University, Mining College, Akita)

(Received January 6, 1986)

1. まえがき

大気圧空間から真空容器へ，あるいは真空容器内の低真空領域から高真空領域への回転導入端子のシールとして使用される希薄ガスピスコシールに関する既存の研究^{1)~8)}は著者らによるものも含め，大部分が矩形溝に関するものであり，矩形以外の溝断面形状に関するものはほとんど見当たらない．

本報では円弧および三角断面溝をもつ希薄ガスバシコシールの密封係数を理論的に求め、さきに求めてある矩形溝シールも含めて溝断面形状と密封性能の関係について検討する。また実験により理論の妥当性を確かめる。

2. 理論

円溝溝をもつビスコシルを例にとり、円周方向に展開すれば **Fig. 1** のようになる。ローターとスリーブの相対運動を考察すれば、いずれが動いても密封効果は同じになるので、**Fig. 2** のように溝深さ b で無次元化した溝断面で上壁が紙面に垂直に速度 V で移動するとして取りあつかう。流れは等温非圧縮定常層流で、すべり境界条件が成りたつとすれば、溝に沿う速度 v に対してナビエ・ストークスの方程式は次のようになる。

$$\frac{\partial^2 v}{\partial \dot{x}^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial \dot{z}^2} = \frac{b^2}{\mu} \frac{dp}{dy} \quad (1)$$

Geometrical parameters

$$\xi = a / b$$

$$\beta = b / \delta$$

$$\varepsilon = a / (a + d)$$

Fig. 1 Developed view of viscoseal

* 昭和60年11月7日 第26回真空に関する連合講演会で講演 (7Ap-12)

** 秋田大学鉱山学部（秋田市手形学園町1-1）

Fig. 2 Cross sections of grooves and point-setting

ここで μ は粘性係数, p は圧力である.

式(1)は形式的に解くことが可能で

$$v = v_V V + v_p \frac{b^2}{2\mu} \frac{dp}{dy} \quad (2)$$

と表せる. ここで

$$\begin{aligned} v_V = & \alpha_{1V} \hat{x}^2 + \alpha_{2V} \hat{x} + \beta_{1V} \hat{z}^2 + \beta_{2V} \hat{z} \\ & + \gamma_V \hat{x} \hat{z} + \eta_V + R \sum_{n=3}^{\infty} C_{nV} (\hat{x} + i\hat{z})^n \\ & + J \sum_{n=3}^{\infty} D_{nV} (\hat{x} + i\hat{z})^n \end{aligned} \quad (3)$$

となり, v_p は式(3)の添字 V を p に置き換えた式で与えられる. 式(3)において R は実数部, J は虚数部, i は虚数単位を表す. また α_{1V} , α_{2V} , β_{1V} , β_{2V} , γ_V , η_V , C_{nV} , D_{nV} は未定定数で, Fig. 2 に示すように境界上に有限個の点を取り, これらの点においてのみ境界条件 (すべり境界条件) を満たすように決定される. 速度分布の計算結果の一例を Fig. 3 に示す.

Fig. 3(a) には溝に沿う圧力勾配 $dp/dy=0$ のとき, 移動壁の速度 V により溝内に生ずる速度を V で無次元化した値 v_V を, また Fig. 3(b) には移動壁の速度 $V=0$ のとき, 圧力勾配 dp/dy により生ずる速度を $(b^2/2\mu)(dp/dy)$ で無次元化した値 v_p を示してある. なお v_p は負で

あるから, ここでは $-v_p$ を示した.

式(2)を溝断面内で積分することにより, 断面(A)の x, y 方向の単位幅当たりの流量 $(Q_g)_x$, $(Q_g)_y$ および断面(B)の x, y 方向の単位幅当たりの流量 $(Q'_g)_x$, $(Q'_g)_y$ は次のように表される.

$$\left. \begin{aligned} (Q_g)_x &= 0 \\ (Q_g)_y &= q_V \rho b U \cos \alpha + q_p \frac{\rho b^3}{2\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right)_g \\ (Q'_g)_x &= -q'_V \rho b U \sin \alpha + q'_p \frac{\rho b^3}{2\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)_g \\ (Q'_g)_y &= q'_V \rho b U \cos \alpha + q'_p \frac{\rho b^3}{2\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right)_g \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

山部分ではクエット流として x, y 方向の単位幅当たりの流量 $(Q_r)_x$, $(Q_r)_y$ は次のように表される.

$$\left. \begin{aligned} (Q_r)_x &= -r_V \rho b U \sin \alpha + r_p \frac{\rho b^3}{2\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)_r \\ (Q_r)_y &= r_V \rho b U \cos \alpha + r_p \frac{\rho b^3}{2\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right)_r \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式(4)および(5)において U は周速, ρ はガスの密度である.

溝部分と山部分についてそれぞれ独立に求められた流れを溝と山の境界における x 方向の流量の連続条件

$$(Q_g)_x + (Q'_g)_x = (Q_r)_x \quad (6)$$

を用いて関係づける. 一方, 実際には溝部と山部の境界で不連続である軸方向の圧力勾配を Boon と Tal⁹⁾ の "narrow groove 理論"

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial l} \cos \alpha &= \varepsilon \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)_g + (1-\varepsilon) \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)_r \\ \frac{\partial p}{\partial l} \sin \alpha &= \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right)_g = \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right)_r \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

により平滑化する. 平滑化された軸方向圧力勾配 dp/dl

Fig. 3 Velocity distributions

を求めると

$$\frac{d\bar{p}}{dl} = \frac{2\mu U F \cos \alpha \sin \alpha + 2\mu G Q / (\rho \delta)}{b^2 (H \sin^2 \alpha + r_p q'_p / \varepsilon)} \quad (8)$$

$$\left. \begin{aligned} F &= -(1-\varepsilon) \left\{ q'_p(q_v + q'_v - r_v) \right. \\ &\quad \left. + r_p \left(\frac{\varepsilon}{1-\varepsilon} q_v - q'_v + r_v \right) \right\} \\ G &= \left\{ \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} q'_p + r_p \right\} / \beta \\ H &= (1-\varepsilon) \left\{ q'_p(q_p + q'_p) \right. \\ &\quad \left. + r_p \left(\frac{\varepsilon}{1-\varepsilon} q_p - 2q'_p + r_p \right) \right\} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

である。

密封係数は

$$\Lambda = \frac{6\mu U}{\delta^2 (d\bar{p}/dl)_{Q=0}} \quad (10)$$

により定義され、 $q_v, q'_v, q_p, q'_p, r_v, r_p$ が幾何学パラメータ (ξ, β) と圧力の関数であるから、式(10)も幾何学パラメータと圧力の関数となる。またこの値は小さいほど密封性能がよい。

Fig. 4 Optimum values of helix angle and sealing coefficient

実験ではシールの上流と下流の差圧 Δp とシール全長 L により、式(10)の $(d\bar{p}/dl)_{Q=0}$ を $\Delta p/L$ で置き換えた次式が用いられる。

$$\Lambda_m = \frac{6\mu UL}{\delta^2 \Delta p} \quad (11)$$

式(10)の Λ を最小にするねじ傾斜角 α_{0p} (最適ねじ傾斜角と呼ぶ。) およびそのときの密封係数 Λ_{0p} を $\xi=2.0, \varepsilon=0.5$ の円弧、三角および矩形断面溝をもつシールについて計算した例を Fig. 4 に示す。大きい β に対しては三角溝が最も密封性能がすぐれ、円弧、矩形の順であり、小さい β に対しては円弧、矩形、三角の順であるが、その差はあまり大きくない。一方、最適ねじ傾斜角 α_{0p} は溝形状によりかなり異なる。すなわち、溝断面形状をどのように決めても、その形状に適したねじ

- (1) Vacuum chamber
- (2) High frequency induction motor
- (3) Seal rotor
- (4), (5) Throttle valves
- (6) Baratron vacuum transducer
- (7) Displacement micro manometer
- (8) Flow controller

Fig. 5 Experimental apparatus

Fig. 6 Comparison of experimental and theoretical results

傾斜角を選ぶなら溝形状による密封性能の優劣はあまりないといえる。

3. 実 験

実験装置の構成は Fig. 5 のようである。バトロロン真空計(6)によりシールの上流圧を、また、精密微差圧計(7)によりシールの上流と下流の差圧を測定し、これらの測定値から式(11)の A_m を計算した。なお実験装置および方法の詳細な説明は文献6)に記載されている。

実験結果と理論値の比較を Fig. 6 に示す。横軸は下流圧とすきま δ に対応するクヌッセン数の逆数(逆クヌッセン数)である。実験値は理論値と大きい逆クヌッセン数に対してはよく一致しているが、逆クヌッセン数の小さい範囲では若干差異を生じている。これは本報の計算がシール内全域ですべり流が成りたつという条件で行われたため、この計算結果が適用できる逆クヌッセン数の下限はせいぜい1程度である。その範囲では実験値と理論値はほぼ一致しており、理論は妥当なものと考えられる。

4. 結 言

円弧、三角、矩形の三種類の溝断面形状について密封性能を比較した結果、いずれの溝断面形状を採用してもその形状に適したねじ傾斜角を選べば、溝形状による密封性能の優劣はあまりないことがわかった。

〔文 献〕

- 1) H. W. Baron: *Ingenieur* **74** (1962) 144.
- 2) M. W. Milligan and H. J. Wilkerson: *ASLE Trans.* **13** (1970) 296.
- 3) 大木直久・小茂鳥和生: *機講論* **730-15** (1973) 163.
- 4) T. Sawada: *Bull. JSME* **22** (1979) 974.
- 5) 沢田雅, 森川裕久: *真空* **24** (1981) 181.
- 6) T. Sawada & H. Morikawa: *Bull. JSME* **24** (1981) 1666.
- 7) T. Sawada: *Proc. 10th Int. Conf. Fluid Seal.* (BHRA 1984) p. 409.
- 8) 沢田雅, 中村雅英: *真空* **28** (1985) 803.
- 9) E. F. Boon and S. E. Tal: *Chem. Ing. Tech.* **31** (1959) 202.