

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 28 日現在

機関番号：13102

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560157

研究課題名(和文) 四角穴パターンを有するダンパシールにおける穴形状パラメータの最適化

研究課題名(英文) Optimization of Hole Configuration Parameters for Design of Damper Seals with Square-Hole Pattern

研究代表者

金子 覚 (KANEKO, Satoru)

長岡技術科学大学・工学部・教授

研究者番号：90161174

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,400,000円、(間接経費) 1,320,000円

研究成果の概要(和文)：本研究はポンプの高効率化，高安定性に寄与する液膜シールの開発を目的として，しゅう動面に四角穴パターンを有するシールを対象に，穴形状パラメータが静特性(漏れ特性)および動特性(振動特性)に及ぼす影響を解析した．穴形状パラメータとして穴断面積，穴数，穴部総面積一定のもとでの穴断面積と穴数の組み合わせの3通りを考慮した．その結果，小さな断面積の穴を多数設けることにより，漏れ流量の低減，ふれまわり周波数比WFR(不安定振動を引き起こすふれまわり速度の範囲)の低減とWFRに及ぼすシール入口旋回流速度の影響を小さくすることが可能となり，ポンプの効率と安定性に貢献することが明らかになった．

研究成果の概要(英文)：The axial leakage flow rate  $Q$ , the dynamic coefficients and the whirl-frequency ratio WFR of liquid annular seals are investigated for the three hole-pattern parameters formed in the stator surface: the cross-sectional area  $S_d$  of hole, total number  $N_d$  of holes, combinations of  $N_d$  and  $S_d$  under a constant total cross-sectional area of holes. Here, WFR corresponds to an upper limit of rotor whirling velocity at which the dynamic fluid force in the seal clearance enhances the whirling motion and smaller value of WFR is desirable due to narrowing the instability range of whirling velocity. The results show that increasing  $N_d$  and using the combinations of large  $N_d$  and small  $S_d$  yield a lower  $Q$  and smaller WFR, and reduce the quantitative effect of the inlet swirl velocity on WFR. Hence, these hole-patterns contribute to improving the efficiency and stability margin of pumps from the viewpoint of reducing the leakage flow rate and suppressing the rotor whirling motion.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・設計工学・機械機能要素・トライボロジー

キーワード：四角穴シール 漏れ流量 動特性係数 ふれまわり周波数比 入口旋回流速度 穴形状パラメータ 穴断面積 穴数

1. 研究開始当初の背景

最近の技術進歩、特に宇宙先端技術の開発により、遠心ポンプなどの流体回転機械は高速、高圧化さらに高効率を目指す傾向にある。このため、バランスピストン、ウェアリングなどの非接触液膜シール部からの漏れの低減やシール部を含むロータ系の安定性が高い次元で要求されている。ロータが安定した状態で回転するためには、シール部にはロータのふれまわり運動を抑制する動的流体力が発生する必要がある。液膜シールの静特性および動特性を積極的に改善する目的から、1980年代後半より研究代表者を含め国内外で、シールしゅう動面に種々の表面粗さ(例えば三角錐穴、円形穴、ハニカム形状などの穴パターン)設けたダンパシールが提案され、実験的、理論的に解析が行われている。これらのダンパシールは、一般に使用されているしゅう動面がスムーズな平行環状シールに比較して、漏れ流量が少なく、ふれまわり運動を抑制する接線方向力が大きい(対角減衰係数が大きく、連成ばね係数が小さい)などの特長がある。しかしながら、しゅう動面の複雑な形状が流れ場解析を困難にしており、実験と比較して理論的解析が立ち後れているのが現状である。したがって理論的な解析コードの構築、実験による解析コードの妥当性の検証、さらに解析コードの四角穴パターンの最適設計への適用が求められている。

2. 研究の目的

本研究はポンプの高効率化、高安定性に寄与する液膜シールの開発を目的として、しゅう動面に四角穴パターンを有するダンパシールを対象に、穴形状パラメータ(穴寸法、穴数、穴の配置)が静特性(漏れ流量)および動特性(動的流体力、動特性係数)に及ぼす影響を理論的、実験的に解析する。得られた結果より漏れの低減やポンプロータの安定性に寄与する穴形状パラメータの最適化をはかり、より高性能なシール設計への指針を与える。

3. 研究の方法

(1)数値解析 本研究では比較的解析が容易な四角穴を対象とする。すきまの厚さ方向に平均化した運動方程式と連続の式を基礎式として、数値計算により連立して解く。運動方程式中の壁面せん断応力を乱流係数と平均流速で表し、流体が穴部を通過する際のエネルギー損失は、段差部における急拡大損失係数、急縮小損失係数として解析に取り入れる。

Fig.1に解析に用いた座標系を示す。シールすきま内を静的に偏心した状態で角速度 $\omega$ で自転をしているロータに、微小変位、微小運動速度、微小加速度の微小変動量を与えたとき生じる動的な液膜反力 $f$ とその成分を示す。

本解析では、作動流体を水とし等粘度の非圧縮流体であると仮定する。液膜シール内の単位幅あたりの周方向流量 $\phi_u(=u_m h)$ 、軸方

向流量 $\phi_w(=w_m h)$ 、液膜圧力 $p$ は次の基礎方程式で支配される。

$$\rho \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (u_m \phi_u) + \frac{\partial}{\partial z} (w_m \phi_u) + \frac{\partial \phi_u}{\partial t} \right\} = - \frac{12\mu}{G_x h^2} \phi_u + \frac{6\mu R \omega}{G_x h} - h \frac{\partial p}{\partial x} \quad (1)$$

$$\rho \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (u_m \phi_w) + \frac{\partial}{\partial z} (w_m \phi_w) + \frac{\partial \phi_w}{\partial t} \right\} = - \frac{12\mu}{G_z h^2} \phi_w - h \frac{\partial p}{\partial z} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \phi_u}{\partial x} + \frac{\partial \phi_w}{\partial z} + \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \quad (3)$$

ここで、 $t$ 、 $\rho$ 、 $\mu$ はそれぞれ時間、密度、粘性係数である。 $G_x$ 、 $G_z$ は壁法則と混合修正距離を基にして得られる乱流係数で、圧力勾配に基づく流量とその圧力勾配の比を表している。圧力 $p$ と $\phi_u$ 、 $\phi_w$ の境界条件は

$$\begin{aligned} z=+0: p &= p'_{in} - (1+\eta)\rho(\phi_w/h)^2 \\ z=L: p &= p_{out} = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 $\eta$ は入口損失係数である。シール流入端では動圧および $\eta$ による圧力降下を考慮している。周方向平均速度 $u_m$ の流入端での境界条件は入口旋回流速度として次のように与えられる。

$$z=+0: u_m = \alpha R \omega \quad (5)$$

式(5)で、 $\alpha$ は入口旋回流係数であり、 $u_{in}$ とロータの周速度 $R\omega$ との比である。なお、本研究では $\alpha$ は0.1~1.2の範囲の値を用いた。流体が段差部を通過する際の圧力損失は、すきまの拡大部ではすきま比より求められる損失式を用い、すきまの縮小部ではシールと比較形状に近いステップベアリングにおける損失式を用いて求めた。静的平衡状態にあるロータに、微小変位 $\Delta X$ 、 $\Delta Y$ 、微小運動速度 $\Delta \dot{X}$ 、 $\Delta \dot{Y}$ 、微小加速度 $\Delta \ddot{X}$ 、 $\Delta \ddot{Y}$ を与えたときに生じる液膜反力の $X$ 、 $Y$ 方向成分 $f_x$ 、 $f_y$ は、12個の動特性係数 $K_{ij}$ 、 $C_{ij}$ 、 $M_{ij}$  ( $i, j = X, Y$ )を用いて式(6)のように表すことができる。また同心ふれまわり運動時の動特性係数は式(7)で与えられる。

$$\begin{aligned} f_x &= f_{x0} + K_{xx} \Delta X + K_{xy} \Delta Y \\ &\quad + C_{xx} \Delta \dot{X} + C_{xy} \Delta \dot{Y} + M_{xx} \Delta \ddot{X} + M_{xy} \Delta \ddot{Y} \\ f_y &= f_{y0} + K_{yx} \Delta X + K_{yy} \Delta Y \\ &\quad + C_{yx} \Delta \dot{X} + C_{yy} \Delta \dot{Y} + M_{yx} \Delta \ddot{X} + M_{yy} \Delta \ddot{Y} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{cases} M_m = M_{XX} = M_{YY}, M_c = -M_{XY} = M_{YX} = 0 \\ C_m = C_{XX} = C_{YY}, C_c = -C_{XY} = C_{YX} \\ K_m = K_{XX} = K_{YY}, K_c = -K_{XY} = K_{YX} \end{cases} \quad (7)$$

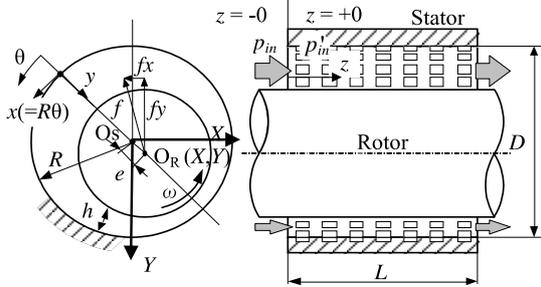


Fig.1 Liquid annular seal with square-hole pattern stator and coordinate system

(2)実験 しゅう動面に四角穴パターンを有するダンパシールをいくつか製作し、静および動特性実験を行い、数値計算の妥当性を検証する。Fig.2 に四角穴シールの形状を示す。シール内径  $D$  は  $71.725\text{mm}$ 、シール長さ  $L$  は  $60.0\text{mm}$ 、ランド部平均半径すきま  $c$  は  $0.292\text{mm}$  ( $2c/D=8/1000$ ) である。3種類の穴形状パラメータ、すなわち、穴断面積（穴数一定）、穴数（穴断面積一定）、穴部総断面積一定下での穴数と穴断面積の組み合わせを考慮した。なお、穴の深さは  $d_c=0.5\text{mm}$ 、入口部のランド幅  $z_{in}=4\text{mm}$  を一定とした。

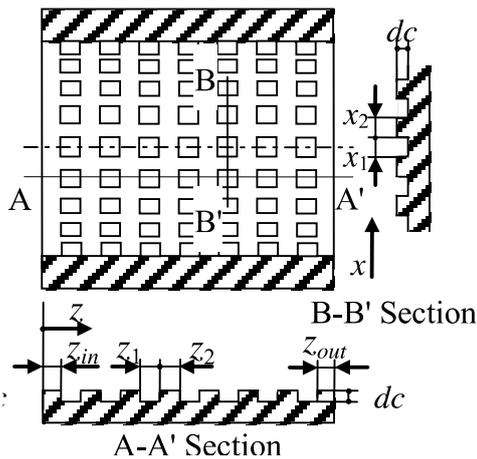


Fig.2 Geometry of square-hole pattern seal (cross-sectional view)

#### 4. 研究成果

(1)実験結果と数値計算結果の比較と検討 Fig. 3, Fig.4 に軸方向漏れ流量  $Q$  とロータ自転速度  $N$  の関係、ロータの微小同心ふれまわり運動時（ふれ

まわり半径  $e_r$ ) に生じる半径方向流体力  $F_r$  と接線方向流体力  $F_t$  とふれまわり速度比  $\Omega/\omega$  の関係をそれぞれ示す。なお、穴は円周方向に 27 個、軸方向 7 個それぞれ等間隔に配置されている。穴部寸法は  $x_1 \times z_1 \times d_c = 4.17\text{mm} \times 4.0\text{mm} \times 0.5\text{mm}$ 、ランド部は  $x_2 \times z_2 = 4.17\text{mm} \times 4.0\text{mm}$  である。平行溝付シールでは、溝の幅、深さ、及び軸方向の配置は四角穴のそれらと同じである。作動流体（水）の密度及び粘度（水温  $26^\circ\text{C}$  における）は  $\rho = 996.8\text{ kg/m}^3$ ,  $\mu = 0.871\text{ mPa}\cdot\text{s}$  である。これらの図より、実験と計算はおおむね一致しており、数値解析モデルとその解析結果の妥当性が検証された。

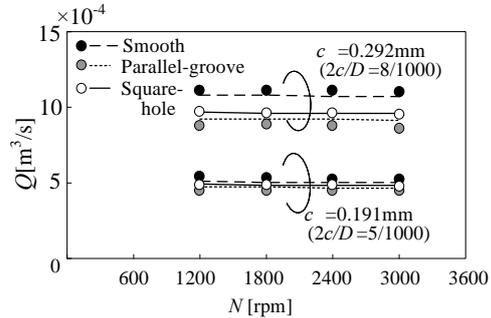


Fig. 3 Axial leakage flow rate versus rotor spinning velocity;  $p_a = 686\text{ kPa}$

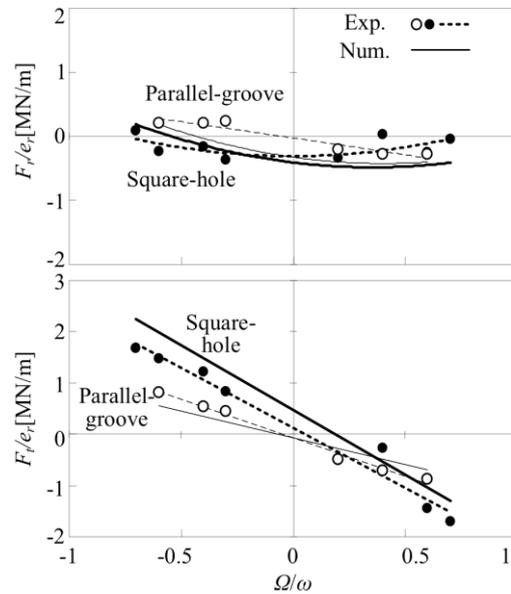


Fig. 4 Dynamic force coefficients versus ratio of whirling velocity to spinning velocity;  $N = 3000\text{ rpm}$ ,  $p_a = 686\text{ kPa}$

(2)静および動特性に及ぼす穴形状パラメータの影響 ここでは数値解析により得られた代表的な結果を Fig.5~Fig.8 に示す。穴形状パラメータとして穴部総断面積一定下で穴数と穴断面積の組み合わせの3通りの結果を示す。図中の No.3-1, No.3-2, No.3-3 は穴数（周方向  $\times$  軸方向） $\times$  穴寸法（周方向長さ  $\times$  軸方向長さ）が、それぞれ  $(54 \times 14) \times (2.08\text{mm} \times 2.0\text{mm})$ ,  $(27 \times 7) \times (4.17\text{mm} \times 4.0\text{mm})$ ,  $(16 \times 4) \times$

(7.04mm×7.0mm)に対応する. Fig.5 の  $Re_a$  は無次元流量に対応し,  $\rho Q/(2\pi\mu)$  で定義される.

Fig.5 より穴数が多くなると  $Re_a$  すなわち漏れ流量  $Q$  が減少する. これは軸方向流れが穴部を通過する際のエネルギー損失 (軸方向流れに直交する段差部の長さに対応する) が穴数の多い No.3-1 の組み合わせが大きいためである. 穴数一定のもとで穴断面積 (穴寸法) を変えた場合および穴断面積一定のもとで穴数を変えた場合は,  $Q$  に及ぼす定量的な影響は小さい.

Fig.6 に動特性係数の主対角減衰係数  $C_m$  (ふれ回り運動を抑制する指標), 連成ばね係数  $K_c$  (ふれ回り運動を促進する指標) と入口旋回流速度係数  $\alpha$  の関係を示す. 穴断面積が小さく穴数の多い No.3-1 の組み合わせでは,  $C_m$  は増加し,  $K_c$  の大きさは減少するとともに  $\alpha$  が  $K_c$  に及ぼす定量的な影響が小さくなる.

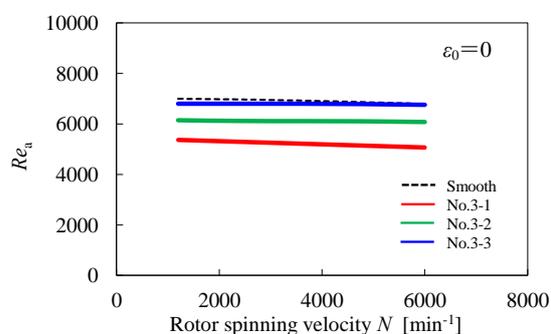


Fig.5 Axial mean Reynolds number versus rotor spinning velocity

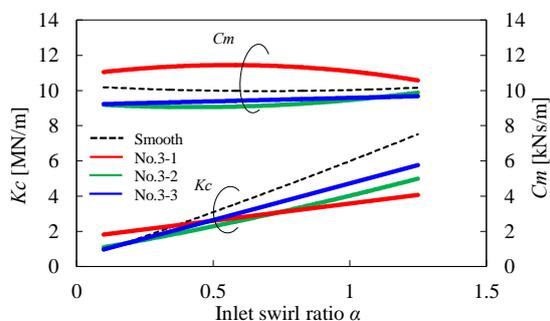


Fig.6 Rotor dynamic coefficients versus inlet swirl velocity

(3) ふれまわり周波数比  $WFR$  入口旋回流速度係数  $\alpha$  の関係に及ぼす穴形状パラメータの影響

Fig.7 にふれまわり周波数比  $WFR$  と入口旋回流速度係数  $\alpha$  の関係を示す.  $WFR$  は  $Kc/(C_m\omega)$  で与えられ, ロータ系の安定性指標の一つである. ロータが角速度  $\omega$  で自転しながらシール中心を角速度  $\Omega$  でふれまわり運動しているとき,  $0 < \Omega/\omega < WFR$  ( $WFR > 0$  の場合) の条件でロータは不安定 (ロータのふれまわり運動が接線方向動的流体力によって促進される) となる. したがって,  $WFR$  が小さい方が同じ  $\Omega$  に対して  $\omega$  が大きな値までとれることからロータの安定性が高くなる. Fig.7 より, 穴断面積が小さく穴数の多い No.3-1 の組み合

わせの  $WFR$  は  $\alpha$  に対する増加率が小さく,  $\alpha > 0.3$  では穴数の少ない他の組み合わせより  $WFR$  が小さく, ロータの安定性が向上している.

(4)  $Q$ ,  $WFR/\alpha$  の穴側面積の総和  $A_{wd}$  との関係 Fig.8 は  $WFR$  の  $\alpha$  に対する変化率  $WFR/\alpha$ , および四角穴シールと平行環状シールの  $Re_a$  の比  $Re_{ar}$  を縦軸に, シールステータ内周面の面積  $A$  に対する穴部側面積の総和  $A_{wd}$  の比  $A_{wd}/A$  を横軸にとってある. プロットしてある点は本解析の種々の組み合わせで得られたデータである. これより,  $A_{wd}/A$  が増加するにつれて,  $WFR/\alpha$  および  $Re_{ar}$  が直線的に減少していることが確認できる. これは, 四角穴シールにおいて漏れ流量および  $WFR$  の  $\alpha$  に対する変化率が, 流れに対して垂直な面 (側面積) の総和で整理できることを示唆している. この結果は, 穴形状パラメータの最適化に有用な情報を提供している.

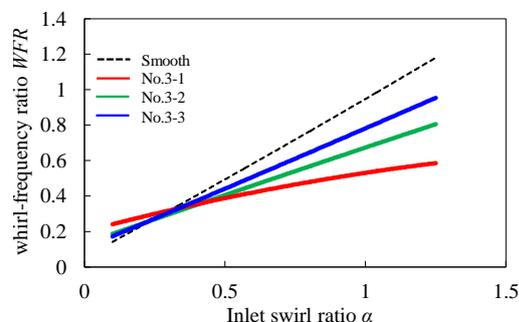


Fig.7 Whirl frequency ratio versus inlet swirl velocity

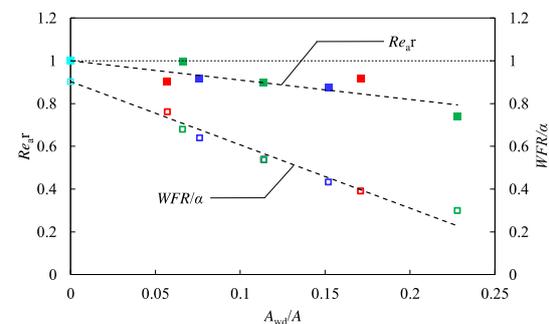


Fig.8 Axial Reynolds number and variation rate of whirl-frequency ratio with inlet swirl velocity versus total sidewall surface area of square-holes

## 5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 6 件)

- ① 金子 覚, 田浦裕生, ねじ溝付きシールの力学的特性に関する実験的研究, 日本機械学会北陸信越支部第 51 期総会・講演会, 2014 年 3 月 8 日, 富山県立大学工学部 (富山県).
- ② 金子 覚, 田浦裕生, ねじ溝付きシールの静特性に関する数値解析, 日本機械学

会北陸信越支部第51期総会・講演会, 2014年3月8日, 富山県立大学工学部(富山県).

- ③ 金子 覚, 田浦裕生, 四角穴パターンを有する液膜シールの静および動特性に関する数値解析, 日本機械学会機械力学・計測制御部門 D&D 2013, 2013年8月27日, 九州産業大学工学部(福岡県).
- ④ 金子 覚, 田浦裕生, 四角穴シールにおける穴寸法が力学的特性に及ぼす影響, 日本機械学会北陸信越支部第50期総会・講演会, 2013年3月9日, 福井大学工学部(福井県).
- ⑤ 金子 覚, 田浦裕生, 四角穴シールの静および動特性, 日本機械学会2012年度年次大会, 2012年9月10日, 金沢大学工学部(石川県).
- ⑥ 金子 覚, 田浦裕生, 四角穴シールの力学的特性に関する数値解析, 日本機械学会北陸信越支部第49期総会・講演会, 2012年3月10日, 金沢工業大学(石川県).

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

金子 覚 (KANeko, Satoru)  
長岡技術科学大学・工学部・教授  
研究者番号: 90161174

### (2)研究分担者

田浦 裕生 (TAURA, Hiroo)  
長岡技術科学大学・工学部・准教授  
研究者番号: 20334691