

静圧スラスト軸受の動特性に及ぼす流体の慣性力の影響*
(第6報, スロット絞りを有する静圧スラストカラー軸受に対する影響)

春山 義夫*¹, 風巻 恒司*¹, 森 淳暢*²
森 美郎*², 吉澤 慎一*³

Influence of Fluid Inertia Forces on the Dynamic Characteristics
of Externally Pressurized Thrust Bearings
(6th Report, Inertia Effects on the Dynamic Performance of Externally Pressurized Thrust Collar Bearings With a Slot Restrictor)

Yoshio HARUYAMA, Tsuneji KAZAMAKI, Atsunobu MORI,
Haruo MORI, and Shin-ichi YOSHIZAWA

In this report, the effects of fluid inertia forces in externally pressurized thrust collar bearings with a slot restrictor are investigated theoretically and experimentally. The inertia forces generated within the restrictor and the bearing clearance are considered. From the experiment, it is concluded that the influence should be considerable when the kinematic viscosity of the lubricant becomes too low, and the presented analysis yields fairly good predictions for dynamic bearing performance.

Key Words: Lubrication, Externally Pressurized Thrust Bearing, Inertia Effect, Dynamic Performance, Slot Restrictor

1. 緒 言

近年, 軸受の潤滑流体として水や液体金属などの動粘度の低い流体を使用する場合も多くなってきている。そのような軸受では, 軸受特性に及ぼす流体の慣性力の影響がかなり大きくなる場合も多く, 特に動特性には静特性に比べ大きな影響が現れることがわかった^{(1)~(5)}。既報^{(6)~(9)}では, 毛細管絞りを有する静圧スラスト軸受を対象に, 動特性に及ぼす慣性力の影響を理論的, 実験的に調べた。本報では引き続き, スロット絞りを有する静圧スラストカラー軸受について, スロット絞り部および軸受すきま内の流体の慣性力が動特性に及ぼす影響を理論的に調べ, 実験的な検討を加える。スロット絞りは, 平行平面間を流体が流れる際の流動抵抗による圧力降下を利用して絞りの作用を行わせるものであり, この絞りを有することによって軸受面にポケットを設けることなくして大きな負荷容量, 軸受剛性を得ることが可能となる。なお, ここで対象

とする軸受に関しては, 流体の慣性力が無視しえる場合の静特性についての森・矢部の研究⁽¹⁰⁾がある。

2. 主 な 記 号

本報で使用する記号は, 既報⁽⁷⁾に準じるが, 新たに用いる主な記号を以下に示す。

b_s : スロット絞りのすきま

$$F_q = \frac{1}{\ln(r_0/r_s)} - \frac{1}{\ln(r_1/r_s)}$$

l : スロット絞りの長さ

p_n, P_n : 供給圧力

r_0 : 軸受外半径

r_1, R_1 : 軸受内半径

r_s, R_s : スロット位置半径

u_x : スロット絞り内の x 方向速度成分

x : スロット長さ方向座標

y : スロットすきま方向座標

$$\Gamma: \text{供給パラメータ} = \frac{r_s b_s^3}{l \eta_0 F_q}$$

添字ほか

s : 定常成分

t : 非定常成分

\wedge : 調和振動の振幅

* 昭和59年9月7日 北陸信越支部信越地方(長岡)講演会において講演, 原稿受付 昭和61年9月8日。

*¹ 正員, 富山大学工学部 (〒930 富山市五福3190)。

*² 正員, 京都大学工学部 (〒606 京都市左京区吉田本町)。

*³ 正員, 電気化学工業(株) (〒100 東京都千代田区有楽町1-4-1)。

ここに、記号が二つあるものは前者が有次元量、後者が無次元量を表す。

3. 理論解析

本報で扱う軸受は、図1に示されるような、スロット絞りを有する静圧スラストカラー軸受であり、解析するにあたっての仮定は、軸受すきま内の流れについては既報^{(7)~(9)}と同様の仮定を用い、スロット絞り部については次のような仮定を用いる。

- (1) スロット絞り内の流れは平行平面すきま内の流れと考え、流れは層流で助走距離は無視できる。
- (2) スロット絞り入口部での流体の急加速による圧力降下は無視できる。
- (3) 絞りより軸受すきま内へ流体が流入する際の流路の曲がりによる圧力変化は無視できる。
- (4) スロットすきまはカラーの幅に比べて十分小さく無視できる。

3・1 軸受すきま内の流れ 流れの運動方程式および連続の式は無次元形では

$$Re^* \left(S \frac{\partial U}{\partial r} + U \frac{\partial U}{\partial R} + W \frac{\partial U}{\partial Z} \right) = -\frac{1}{A} \frac{\partial P}{\partial R} + \frac{\partial^2 U}{\partial Z^2} \dots\dots\dots (1)$$

$$0 = \frac{\partial P}{\partial Z} \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} (RU) + \frac{\partial W}{\partial Z} = 0 \dots\dots\dots (3)$$

と書き表され、境界条件は

$$\left. \begin{aligned} Z=0 \text{ で } U=W=0 \\ Z=H \text{ で } U=0, W=S \frac{dH}{dr} \\ R=R_1, 1 \text{ で } P=1 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

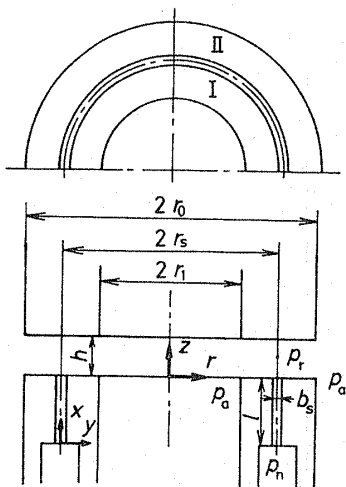


図1 静圧スラストカラー軸受の概略図

である。これらを厳密に解くことは困難であり、前報⁽⁹⁾と同様に、計算が容易で近似の精度も比較的良好な平均化法を用いて解析する。それは、式(1)の慣性項を膜厚方向に平均化して

$$\frac{Re^*}{H} \int_0^H \left(S \frac{\partial U}{\partial r} + U \frac{\partial U}{\partial R} + W \frac{\partial U}{\partial Z} \right) dZ = -\frac{1}{A} \frac{\partial P}{\partial R} + \frac{\partial^2 U}{\partial Z^2} \dots\dots\dots (5)$$

と置き換えて解くものであり、解は

$$\left. \begin{aligned} U &= \frac{1}{2} \left(\frac{c_1}{R} + \frac{6SR}{H^3} \frac{dH}{dr} \right) (Z^2 - HZ) \\ &: R_1 \leq R \leq R_s \\ &= \frac{1}{2} \left(\frac{c_2}{R} + \frac{6SR}{H^3} \frac{dH}{dr} \right) (Z^2 - HZ) \\ &: R_s \leq R \leq 1 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

$$W = -\frac{6S}{H^3} \frac{dH}{dr} \left(\frac{Z^3}{3} - \frac{HZ^2}{2} \right) \dots\dots\dots (7)$$

$$\left. \begin{aligned} P &= 1 + c_1 A \ln \frac{R}{R_1} - \frac{Re^* A H^4}{240} \left\{ c_1^2 \left(\frac{1}{R^2} - \frac{1}{R_1^2} \right) \right. \\ &+ \frac{24c_1 S}{H^3} \frac{dH}{dr} \ln \frac{R}{R_1} - \frac{108S^2}{H^6} \left(\frac{dH}{dr} \right)^2 (R_1^2 - R^2) \left. \right\} \\ &+ \frac{Re^* S A}{12H} \left\{ \frac{d(c_1 H^3)}{dr} \ln \frac{R}{R_1} \right. \\ &- 3S \frac{d^2 H}{dr^2} (R_1^2 - R^2) \left. \right\} \\ &- \frac{3SA}{H^3} \frac{dH}{dr} (R_1^2 - R^2) \quad : R_1 \leq R \leq R_s \\ &= 1 + c_2 A \ln R - \frac{Re^* A H^4}{240} \left\{ c_2^2 \left(\frac{1}{R^2} - 1 \right) \right. \\ &+ \frac{24c_2 S}{H^3} \frac{dH}{dr} \ln R - \frac{108S^2}{H^6} \left(\frac{dH}{dr} \right)^2 (1 - R^2) \left. \right\} \\ &+ \frac{Re^* S A}{12H} \left\{ \frac{d(c_2 H^3)}{dr} \ln R - 3S \frac{d^2 H}{dr^2} (1 - R^2) \right. \\ &- \left. \frac{3SA}{H^3} \frac{dH}{dr} (1 - R^2) \quad : R_s \leq R \leq 1 \right. \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (8)$$

と得られる。ここに、 $S = \omega r_0 / \bar{u}$ はストローハル数であり、慣性パラメータ Re^* 、非定常パラメータ Re^{**} とは $S = Re^{**} / Re^*$ の関係がある。また、 c_1, c_2 は積分定数であり、絞り部との流量連続条件および仮定(2)~(4)より決定される。

軸受の動特性を解析するにあたっては、既報^{(6)~(9)}と同様に、軸受すきまが平衡状態近傍で微小な正弦波振動をする場合を想定し、無次元時間 τ を $\tau = \omega t$ とし、すきま、速度、圧力を

$$H = 1 + \epsilon e^{j\tau} \dots\dots\dots (9)$$

$$\begin{aligned} (U, W, P) &= (U_s, W_s, P_s) \\ &+ (\bar{U}_t, \bar{W}_t, \bar{P}_t) \epsilon e^{j\tau} \dots\dots\dots (10) \end{aligned}$$

と置いて調べる。

3.2 スロット絞り内の流れ スロット絞り内の流れをすきま b_s , 長さ l の平行平面間の非圧縮性非定常層流と考え, 助走距離を無視すれば, 流れの運動方程式および連続の式は

$$\zeta \frac{\partial U_x}{\partial \tau} = -\frac{1}{A_s} \frac{\partial P}{\partial X} + \frac{\partial^2 U_x}{\partial Y^2} \dots\dots\dots (11)$$

$$0 = \frac{\partial P}{\partial Y} \dots\dots\dots (12)$$

$$\frac{\partial U_x}{\partial X} = 0 \dots\dots\dots (13)$$

と書き表され, 境界条件は

$$\left. \begin{array}{l} Y = -1, 1 \text{ で } U_x = 0 \\ X = 0 \text{ で } P = P_n \\ X = 1 \text{ で } P = P_r \end{array} \right\} \dots\dots\dots (14)$$

である。ただし, ここでは無次元量

$$X = x/l, Y = 2y/b_s, \tau = \omega t, U_x = u_x/\bar{u}, P = p/p_a, A_s = 4\mu l \bar{u} / (p_a b_s^2), \zeta = \rho \omega b_s^2 / (4\mu)$$

を用いている。これらを厳密に解くことは困難であるが, 角周波数 ω の正弦波状脈動流については, スロット出口部の圧力を

$$P_r = P_{rs} + \bar{P}_{ri} e^{j\tau} \dots\dots\dots (15)$$

と置き, 次のような解が得られる⁽¹¹⁾。

$$U_x = -\frac{1}{2A} (P_n - P_{rs})(Y^2 - 1) + \frac{j\bar{P}_{ri}}{A_s \zeta} \left\{ 1 - \frac{\cosh(Y\sqrt{j\zeta})}{\cosh\sqrt{j\zeta}} \right\} e^{j\tau} \dots\dots\dots (16)$$

$$P = P_n - (P_n - P_{rs})X + \bar{P}_{ri} X e^{j\tau} \dots\dots\dots (17)$$

式(6)および(16)の速度成分を用いて, 流量連続条件よりスロット出口部の圧力成分 P_{rs}, \bar{P}_{ri} を決めることができる。

3.3 軸受特性 既報⁽⁶⁾⁻⁽⁹⁾と同様に, 軸受反力の変位と同位相成分より剛性を, 変位速度と同位相成分より減衰係数を定義し, それぞれを $\pi r_0^2 p_a / h_0, \pi r_0^2 p_a / (h_0 \omega)$ で無次元化して無次元剛性 K および無次元減衰係数 B を定義すれば, それらは7個の無次元パラメータ $R_1 = r_1/r_0, R_s = r_s/r_0, P_n = p_n/p_a$ (無次元供給圧力), $\Gamma = r_s b_s^3 / (l h_0^3 F_q)$ (供給パラメータ), $b_s/h_0, Re^* = \rho h_0^2 \bar{u} / (\mu r_0)$ (慣性パラメータ), $Re^{**} = \rho h_0^2 \omega / \mu$ (非定常パラメータ) のみで整理することができる。ここに, $F_q = 1/\ln(r_0/r_s) - 1/\ln(r_1/r_s), \bar{u}$ は半径方向の代表速度であり, ここでは慣性力を無視して理論的に求まる平衡状態での軸受外周部での平均流速をとっている。

動特性に現れる慣性力の影響は $Re^*, Re^{**}, b_s/h_0$ の3個のパラメータで決まる。

4. 計算結果

図2から6に $R_1 = 0.5, R_s = 0.75, P_n = 6$ の場合の剛

性 K および減衰係数 B の計算例を示す。

図2は絞り部および軸受すきま内の流体の慣性力が K, B に及ぼす影響を調べるためのものである。図2中, 破線は慣性力を省略した場合の値を示し, 一点鎖線は絞り部の慣性力のみを考慮した場合, 二点鎖線は軸受すきま内の慣性力を考慮した場合, 実線は両方を考慮した場合の値を示す。この図より, K については, 供給パラメータ Γ の小さい領域では慣性力の影響はあまり大きく現れておらず, Γ の大きい領域で軸受すきま内の慣性力の影響が主に現れて K を減少させていることがわかる。 B については, Γ の小さい領域では軸受すきま内の慣性力の影響が主に現れ, Γ の大きい領域で絞り部の慣性力の影響が主に現れて B を増加させている。

図3, 4は横軸に Γ をとり, 図5, 6は横軸に Re^{**} をとり, パラメータとして Re^* および b_s/h_0 をとって整理したものである。図中, 破線は慣性力を省略した理論値を示している。図3~6より以下のことがわかる。 K については, Re^{**} の値があまり大きくない場合には慣性力の影響は小さいが, Re^{**} の増加とともに K を急激に減少させ, それは Re^* が小さいほど, b_s/h_0 が大きいほど著しい。 B については, 概して, 慣性力は B を増加させており, それは Re^* および b_s/h_0 の値が大きいほど大きく, Re^{**} の値にはあまり関係しない。

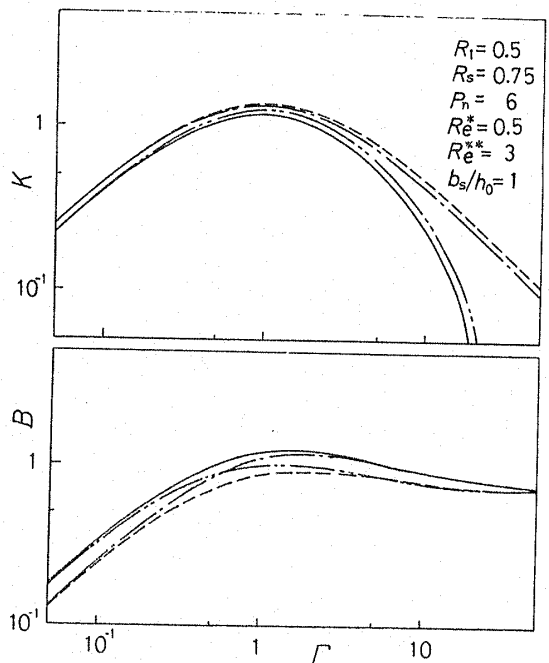


図2 K, B に及ぼす各部の流体の慣性力の影響

5. 実験結果との比較

本章では、軸受すきまを正弦波状に微小振動させた際の変動圧力を測定し、理論値と比較して解析結果の妥当性を調べる。

実験装置および実験方法は既報⁽⁶⁾⁽⁸⁾と同様である。試験軸受の形状諸元は

$$2r_0 = 60 \text{ mm}, 2r_s = 40 \text{ mm}, 2r_1 = 20 \text{ mm},$$

$$b_s = 97 \mu\text{m}, l = 23 \text{ mm}$$

であり、潤滑流体には灯油を使用している。実験は、軸受すきま

$$H = h/h_0 = 1 + \varepsilon \cos \omega t \quad \dots\dots\dots (18)$$

に対して、圧力を

$$P = p/p_a = P_0 + \varepsilon P_{am} \cos(\omega t - \theta) \quad \dots\dots\dots (19)$$

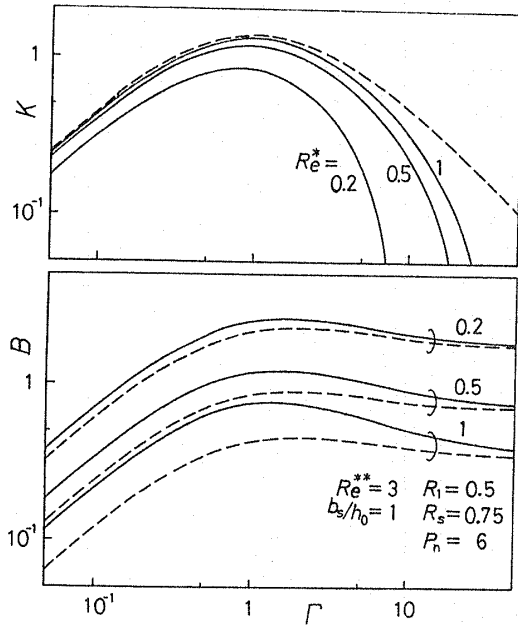


図3 K, B に及ぼす Re^* の影響

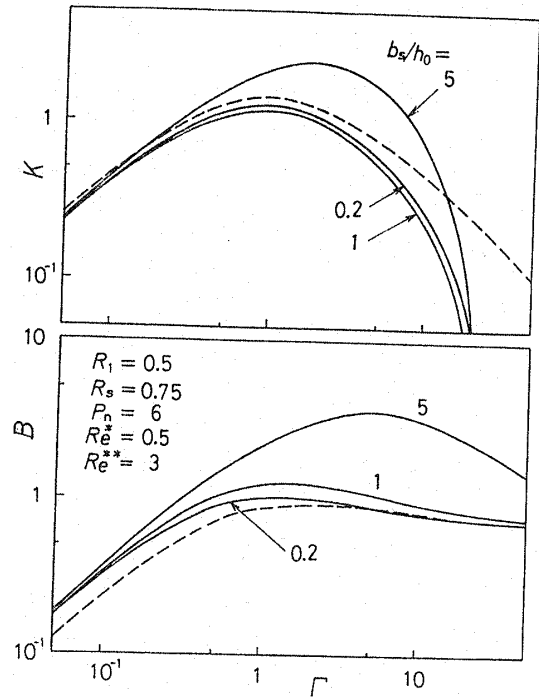


図4 K, B に及ぼす b_s/h_0 の影響

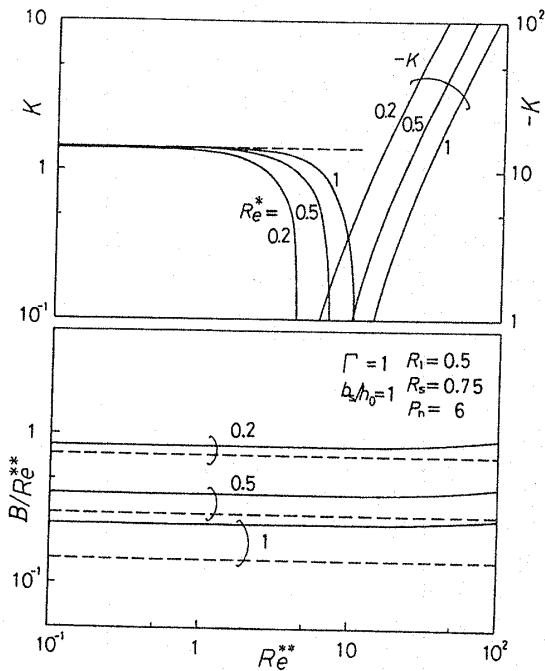


図5 K, B に及ぼす Re^* の影響

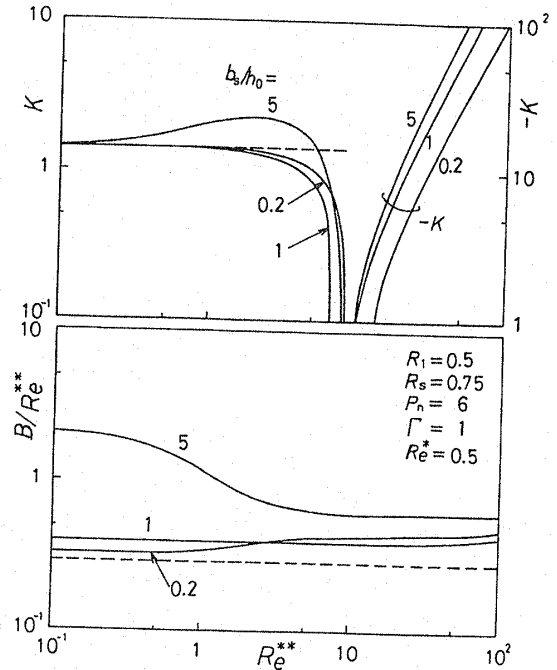


図6 K, B に及ぼす b_s/h_0 の影響

と置き、変動圧力の振幅より P_{am} を、変位と圧力の波形の中心位置の差より位相の進み角 θ を求めた。

図7, 8に実験結果と理論値の比較を示す。圧力測定位置は $r=15\text{ mm}$ ($R=0.500$) および 25 mm ($R=0.833$) である。図中、破線は慣性力を省略した理論値である。なお、本実験では、供給圧力 P_n も軸受すきまの振動に応じてほぼ正弦波状に変化しており、理論値を求める際に考慮している。図7, 8の実験に対する供給圧力の変動の測定値をそれぞれ図9, 10に示す。図中の実線で示した値を用いて理論値を求めている。図7は振動数 f を 250 Hz に固定し、平衡状態の軸受すきま h_0 を変化させた場合のものであり、横軸に供給パラメータ Γ をとって示している。実験値は、 P_{am}

に関しては Γ の小さい領域で理論値よりやや大きく、 Γ の大きい領域では少し小さくなる傾向にあるが、おおむね合っている。 θ に関しては、実験値はやや小さく現れているが、理論値と比較的よく合っているといえる。図8は h_0 を $70\text{ }\mu\text{m}$ に設定し、 f を変化させたものである。図に見られるように、実験値は P_{am}, θ とともに理論値に比較的よく一致している。

本報の実験結果は、既報⁽⁸⁾⁽⁹⁾の毛細管絞りを有する静圧スラスト軸受の場合に比べ、理論値とのちがいがやや大きい。この原因としては、スロット絞りより軸受すきま内へ流体が流入する際の流路の曲がりの影響を考慮していないことが大きいと考えられ、今後の研究課題としたい。

以上により、流体の慣性力を考慮した本軸受の動特

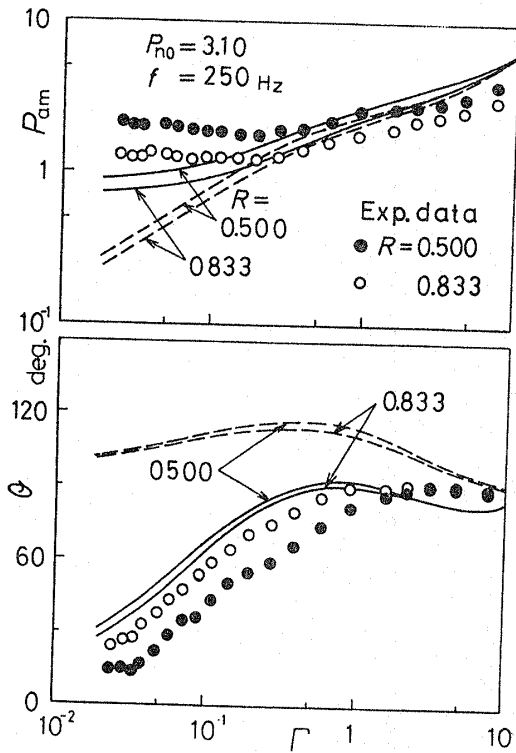


図7 実験結果との比較 ($\rho=804\text{ kg/m}^3, \mu=1.68\text{ mPa}\cdot\text{s}$)

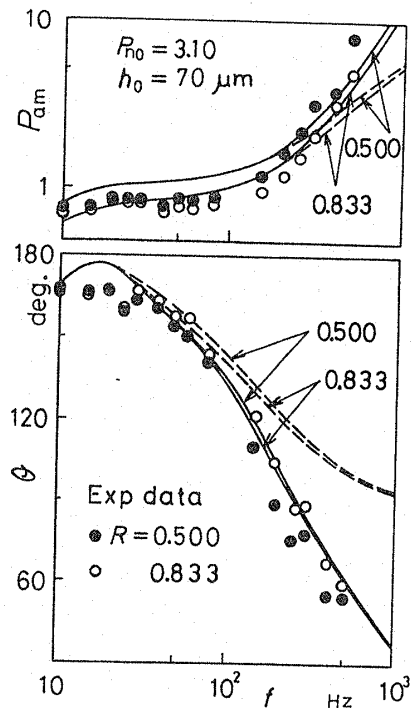


図8 実験結果との比較 ($\rho=804\text{ kg/m}^3, \mu=1.63\text{ mPa}\cdot\text{s}$)

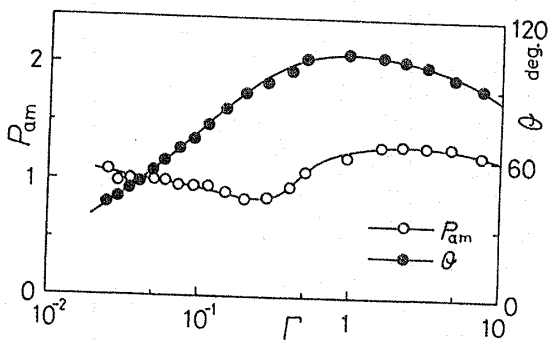


図9 供給圧力の変動の測定値 (図7の場合)

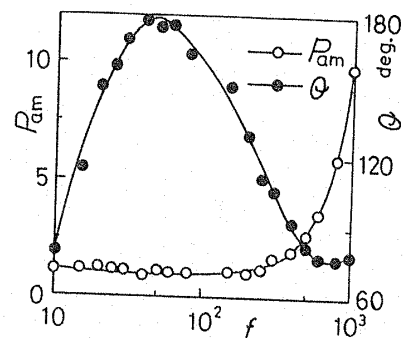


図10 供給圧力の変動の測定値 (図8の場合)

性はここで示した解析法によりおおむね予測できると思われる。

6. 結 言

スロット絞りを有する静圧スラストカラー軸受の動特性に及ぼす流体の慣性力の影響を理論的、実験的に調べ、次のような結論を得た。

(1) 剛性 K については、 Re^{**} の小さい領域では b_s/h_0 の値があまり大きくないかぎり慣性力の影響は小さいが、 Re^{**} の増加とともに K の値は急激に減少する。それは Re^* が小さいほど、 b_s/h_0 が大きいほど顕著である。

(2) 減衰係数 B については、概して、慣性力は B を増加させ、それは Re^* および b_s/h_0 が大きいほど大きく、 Re^{**} の値にはあまり関係しない。

(3) 実験結果は本報で示した解析結果におおむね合う。

終わりに、本研究に有益なご助言をいただいた富山

大学工学部 三上房男教授ならびに実験装置の製作にご協力いただいた(株)不二越 技術部新空圧機素開発チーフ 伊庭剛二氏に深く感謝する。また、実験に協力いただいた、当時、富山大学工学部学生 岩田敏裕、岩尾勝彦両君に感謝の意を表する。

文 献

- (1) Reinhardt, E. and Lund, J. W., *Trans. ASME, Ser. F*, 97-2 (1975), 159.
- (2) Constantinescu, V. N., *Proc. 2nd Leeds-Lyon Symp. on Tribology*, Lyon, France, Paper V (iii), (1975).
- (3) 森・ほか2名, 潤滑, 28-9 (昭58), 671.
- (4) 春山・ほか4名, 機論, 50-451, C (昭59), 561.
- (5) Haruyama, Y., ほか3名, *Trans. ASME, J. Tribology*, 107-1 (1985), 39.
- (6) 春山・ほか2名, 機論, 47-418, C (昭56), 759.
- (7) 春山・ほか4名, 機論, 51-471, C (昭60), 2877.
- (8) 春山・ほか5名, 機論, 52-474, C (昭61), 529.
- (9) 春山・ほか3名, 機論, 52-476, C (昭61), 1442.
- (10) 森・矢部, 機論, 30-214 (昭39), 665.
- (11) 今井, 流体力学 (前編), (昭48), 296, 裳華房.