

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 14 日現在

機関番号：32704

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420089

研究課題名(和文) ジャーナル軸受のホップ分岐現象の解明とその応用に関する研究

研究課題名(英文) Study on Hopf bifurcation of Journal bearings and its applications

研究代表者

宮永 宜典 (Miyanaga, Norifumi)

関東学院大学・理工学部・准教授

研究者番号：00547060

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究ではジャーナル軸受のホップ分岐現象を検討し、安定解析に応用した。また、安定限界近傍における分岐の種類や周期解を求め、油膜の非線形性をより詳細にとらえた安定限界特性解析を行った。その結果、subcritical bifurcationと呼ばれる領域では安定限界に達する前でも、振動振幅が周期解より大きくなった途端、振幅は急激に増加した。一方、supercritical bifurcationと呼ばれる領域では、安定限界速度以上でも、振幅は周期解に沿うように徐々に増加する現象が見られた。これらの結果は実験によっても確かめることができた。

研究成果の概要(英文)：In this study, we investigated a hopf bifurcation phenomena of journal bearings and applied it to their stability analysis. Further more, we obtained types and periodic solutions of the bifurcations occurred in the bearings, performed the stability analysis with the nonlinearity of the fluid film. As a result, in a subcritical bifurcation region, the vibration amplitude of the shaft immediately increased even lower speed of stability limit. On the other hand, in a supercritical bifurcation region, the vibration amplitude of the shaft increased with the periodic solution even higher speed of stability limit.

研究分野：トライボロジー

キーワード：ジャーナル軸受

1. 研究開始当初の背景

近年の回転機械で求められるすべり軸受けの作動環境はますます過酷になってきており、加えて生活必需品やインフラ設備では、不測の事態が生じた際にも、安定に運転されるかもしくは安全に停止できることが求められている。ジャーナル軸受の研究は、これまでに数多く行われており、さまざまな想定に対して性能を発揮できるようになってきているが、今後は想定外の事態に備えた新しい考え方が必要である。

そこで本研究では、ジャーナル軸受で生じる分岐現象に着目し、Hopf 分岐理論における周期解と安定性との関連性について検討した。大きく分けて、この周期解は2種類存在し、それぞれを Subcritical bifurcation (亜臨界分岐) と Supercritical bifurcation (超臨界分岐) と呼ばれる。前者は周期解の外側を初期値とした場合に不安定振動を生じるもので、後者は周期解上にリミットサイクルを生じるものである。

研究では、従来の摂動解析手法や非線形軌道解析に加えて、Hopf 分岐解析を行い、両者の関係を検討した。また、Subcritical bifurcation (亜臨界分岐) と Supercritical bifurcation (超臨界分岐) が得られるように条件設定した実験により、解析結果の妥当性について検討した。

2. 研究の目的

本研究では、ジャーナル軸受に分岐理論を適用して Hopf 分岐現象を解明することにより、これまで定量的に明らかでなかった現象を新たな設計・運転指針に応用すべく、以下のことを目的とした。

- 有限幅軸受にホップ分岐理論を適用し、軸受系で生じる分岐現象を詳細に検討する。
- 従来法 (摂動解析手法や非線形軌道解析) でも明らかに出来たものに加えて、これまでに明らかに出来なかったような現象を考察し、設計者に新たな指針を示す。

3. 研究の方法

3.1 理論

(1) 解析対象

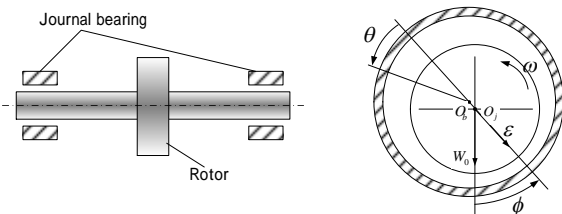


図1 ジャーナル軸受

本研究では、図1に示すジャーナル軸受を対象とする。軸には不釣り合いは無く、軸中央にロータを有し、軸重量はここにすべてが

集中しているとする。軸は剛体軸とする。また、軸受端において等しいジャーナル軸受が配置されている。

(2) 潤滑方程式

本研究では、ジャーナル軸受の油膜の圧力は式(1)の一般的なレイノルズ方程式で記述されるものとする。

$$\frac{\partial}{\partial \theta} \left((1 + \varepsilon \cos \theta)^3 \frac{\partial p}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{4\lambda^2} (1 + \varepsilon \cos \theta)^3 \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = -6\varepsilon \sin \theta \{1 - 2\dot{\phi}\} + 12\dot{\varepsilon} \cos \theta \quad (1)$$

ここで、

- z : 軸受における座標
- ε : 軸の偏心率
- φ : 軸受偏角
- p : 油膜圧力
- θ : 偏角

(3) 境界条件

本研究では、ハーフゾンマーフェルドの境界条件を用いて式(1)の潤滑方程式を解いた。この条件は、静的つり合い位置におけるくさび領域に油膜があるものとし、逆くさび領域では油膜が破断しているもので、以下のとおりである。

$$\begin{aligned} p &= 0 \text{ at } \theta = 0 \text{ or } \pi \leq \theta \leq 2\pi \\ p &= 0 \text{ at bearing ends} \end{aligned} \quad (2)$$

(4) 軸の運動方程式

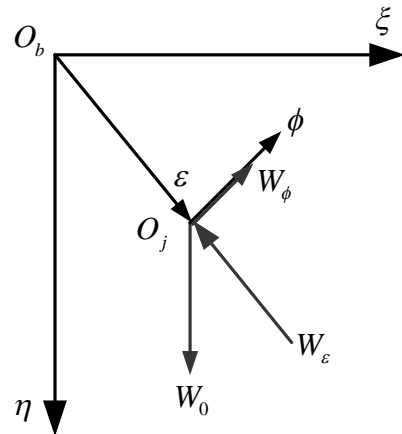


図2 油膜力とその座標系

図2の座標系において、剛体軸の偏心方向と偏角方向の運動方程式は以下の通りとなる。

$$\begin{cases} \dot{\varepsilon} = \varepsilon \dot{\phi}^2 - \frac{\beta}{W_0} W_\varepsilon + \beta \cos \phi \\ \varepsilon \ddot{\phi} = -2\varepsilon \dot{\phi} + \frac{\beta}{W_0} W_\phi - \beta \sin \phi \end{cases} \quad (3)$$

$$W_\varepsilon = - \int_{-1/2}^{1/2} \int_0^{2\pi} p \cos \theta d\theta dz \quad (4)$$

$$W_\phi = \int_{-1/2}^{1/2} \int_0^{2\pi} p \sin \theta d\theta dz \quad (5)$$

(5) 状態方程式

上述の運動方程式を状態方程式に変形する．変数を $\varepsilon, \dot{\varepsilon}, \phi, \dot{\phi}$ として，

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varepsilon \\ \dot{\varepsilon} \\ \phi \\ \dot{\phi} \end{pmatrix} \quad (6)$$

とおく．ここで，

$$\dot{x}_1 = x_2 \equiv f_1$$

$$\dot{x}_2 = x_1 x_4^2 - \frac{\beta}{W_0} W_\varepsilon + \beta \cos \phi \equiv f_2$$

$$\dot{x}_3 = x_4 \equiv f_3$$

$$\dot{x}_4 = -\frac{2x_2 x_4}{x_1} + \frac{\beta}{x_1 W_0} W_\phi - \frac{\beta}{x_1} \sin \phi \sin x_3 \equiv f_4$$

である．

静的つりあい点での位置と速度を用いて，

$$(x_{1st}, x_{2st}, x_{3st}, x_{4st}) = (\varepsilon_0, 0, \phi_0, 0)$$

とする．この静的つり合い点において，関数 f^1, f^2, f^3, f^4 に Hopf 分岐理論を適用する．

3. 2 実験

(1) 実験装置

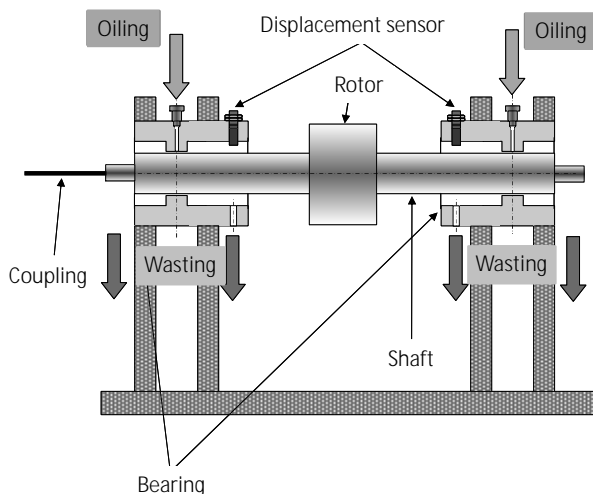


図3 実験装置

本研究では，Hopf 分岐解析の妥当性を検討するために，Subcritical bifurcation (亜臨界分岐) と Supercritical bifurcation (超臨界分岐) が得られるように条件設定した実験を

行った．図3に実験装置の概略図を示す．スペースの関係で全体像は示さないが，軸はカップリングを介してモータと接続している．また，両端を2つの等しいジャーナル軸受により支持されている．軸受の上部に給油口を設けてある．軸受はアクリルで制作しており，油膜破断の状況を観察できる．

モータの回転数は 0~12000rpm まで連続的に変化させることができる．軸の挙動は左右の軸受に設置されて渦電流式非接触変位計によってモニタリングする．

(2) 実験条件

本実験では，潤滑油として ISO 粘度グレードで VG10 と VG32 の 2 種類を用いた．潤滑油温度は 25 ± 1 として実験を行った．給油量は，ハーフゾンマーフェルドの条件が実現するように，油膜破断の様子を観察しながら調節した．

4. 研究成果

(1) Hopf 分岐解析の結果

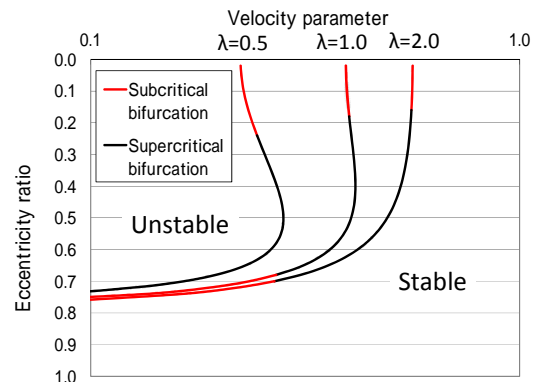


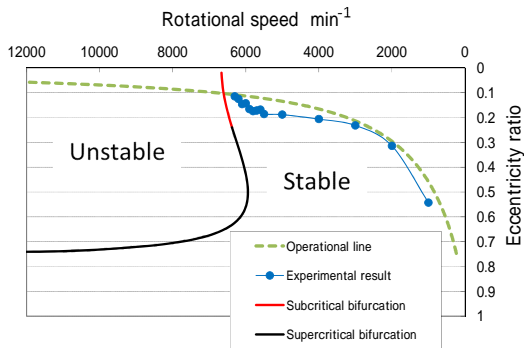
図4 安定限界線図

図4は Hopf 分岐解析により得られた安定限界線図である．安定限界点に関しては，従来までの線形摂動解析のものと同じ．しかしながら，この安定限界線には2つの分岐形態が隠れていたことが明らかになった．すなわち，低偏心状態と高偏心状態においては Subcritical bifurcation (亜臨界分岐)，中偏心状態では Supercritical bifurcation (超臨界分岐) を経て，軸受系は安定から不安定に変化するといえる．

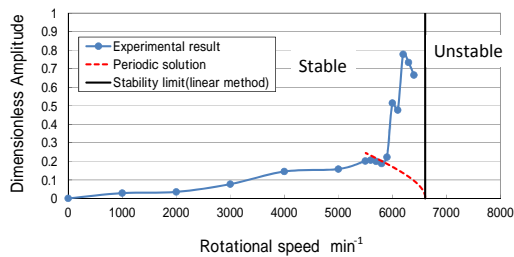
(2) 実験結果との比較

次に，図4で現れて2つの分岐形態が軸の挙動としてどのように表れるかを実験により検討した結果について示す．

図5は計算において，Subcritical bifurcation (亜臨界分岐) が起こると予測された条件での実験結果との比較を示している．ロータ質量 0.75kg，潤滑油として VG32 を用いた．図5からわかるように，安定限界回転数よりも低回転数側に周期解が現れ (赤の点線)，これとクロスすると同時に振動

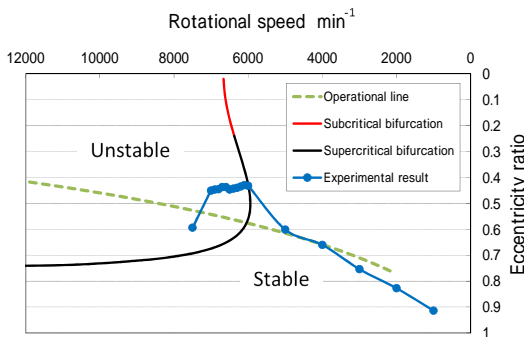


(a)

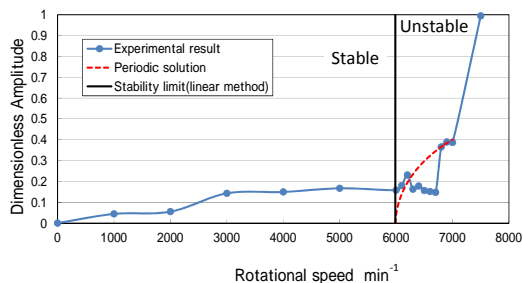


(b)

図5 Subcritical bifurcation (亜臨界分岐) に対する実験結果, (a) 安定限界線図, (b) 軸の振動振幅と回転数の関係



(a)



(b)

図6 Supercritical bifurcation (超臨界分岐) に対する実験結果, (a) 安定限界線図, (b) 軸の振動振幅と回転数の関係

幅が急激に増加していることがわかる。なお、この時の振動波形をFFT解析することにより、これがオイルホールであることを確認している。

一方、図6は Supercritical bifurcation (超臨界分岐) が起こると予測された条件での実験結果との比較を示している。ロータ質量 0.75kg, 潤滑油として VG10 を用いた。この場合、周期解は安定限界回転数よりも高速側にあり、安定限界回転数を超えると、周期解に沿ってリミットサイクルを描き、徐々に振動振幅が増加した。

図5, 図6のように、仮に軸受系に自励振動が生じるような事態になったとしても、設計段階で、Supercritical bifurcation (超臨界分岐) となるようにしておけば、直ちには設備の破損や人災による大事故にはならず、安全な対応が可能であることを示唆していると考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計14件)

1. Jun Tomioka, Norifumi Miyanaga, Yuichi Ushio and Makoto Mikami: Study of Stability–Boundary–Circles within the Bearing Clearance Using the Nonlinear Orbit Method, Design Engineering, Apr. 2014, Vol. 49, No. 4, pp.61-66.
2. Jun Tomioka, Norifumi Miyanaga: Effect of Surface Roughness of Mechanical Seals for Rotary Blood Pumps under blood sealing, Journal of Advanced Mechanical Design, System, and Manufacturing, Aug. 2014, Vol. 8, No. 1, pp.1-9. DOI : 10.1299/jamdsm.2014jamdsm0006
3. 野口昭治, 宮永宜典: 合成荷重における小径玉軸受の必要最小荷重の検討, 日本機械学会論文集, Jan. 2015, Vol. 81, No. 821, pp. 1-10, DOI : 10.1299/transjsme.14-00385
4. 富岡淳, 大藪美貴子, 福井康平, 齋藤健斗, 宮永宜典: 血液密封下のメカニカルシールにおける血漿成分および血球成分の漏れ量測定方法の提案, 設計工学, Apr. 2015, Vol. 50, No. 4, pp.194-199.

5. Norifumi Miyanaga, Jun Tomioka: Development of Herringbone-Grooved Aerodynamic Journal Bearing Systems for Ultra-High-Speed Rotations, Key Engineering Materials, July 2015, Vol. 657, pp.652-657. DOI : 10.4028/www.scientific.net/KEM.656-657.652
 6. Norifumi Miyanaga, Jun Tomioka: Investigations of Cylindrical and Conical Whirl Instabilities on Hydrodynamic Journal Bearings, Key Engineering Materials, July 2015, Vol. 656, pp.688-693. DOI : 10.4028/www.scientific.net/KEM.656-657.688
 7. Norifumi Miyanaga, Jun Tomioka: Stability Analysis of Herringbone-Grooved Aerodynamic Journal Bearings for Ultra High-Speed Rotations, International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing, June 2016, Vol. 4, No. 3, pp. 156-161. DOI : 10.7763/IJMMM.2016.V4.246
 8. Norifumi Miyanaga, Jun Tomioka: Effect of Support Stiffness and Damping on Stability Characteristics of Herringbone-Grooved Aerodynamic Journal Bearings Mounted on Viscoelastic Supports, Tribology International, Aug. 2016, Vol. 100, pp.195-203. DOI : 10.1016/j.triboint.2016.01.019
 9. Norifumi Miyanaga, Jun Tomioka, Effect of Dynamic Properties of Support O-rings on Stability of Herringbone-Grooved Aerodynamic Journal Bearings, Tribology Online, Feb. 2016, Vol. 11, No. 2, pp.272-280. DOI : 10.2474/trol.11.272
 10. Norifumi Miyanaga, Jun Tomioka, Stability Threshold of Herringbone-Grooved Aerodynamic Journal Bearings with Considering frequency Dependence of External Stiffness and Damping Elements, Design Engineering, June 2016, Vol. 51, No. 6, pp.427-440. DOI : 10.14953/jjsde.2015.2659
 11. Jun Tomioka, Mikiko Oyabu, Norifumi Miyanaga, Effects of Hematocrit of the Sealed Blood on the Leakage Characteristics of Blood Cell Component and Plasma Component in a Mechanical Seal, Tribology Online, May 2016, Vol. 11, No. 5, pp.568-574. DOI : 10.2474/trol.11.568
 12. Jun Tomioka and Norifumi Miyanaga, Blood Sealing Performance of Magnetic Fluid Shaft Seals, Tribology International, 早期公開中.
 13. 野口昭治, 金田徹, 宮永宜典: 小型玉軸受の損傷に及ぼすラジアル方向外部振動の影響 (第1報, 10m/s までのラジアル振動を与えた場合), 設計工学, 早期公開中. DOI : 10.14953/jjsde.2016.2712
 14. Norifumi Miyanaga, Shigeaki Minamikawa and Jun Tomioka, Effect of Acid Washing of SiC Particles on Dispersing and Friction Properties of Ni-P-SiC Composite Plating, Key Engineering Materials, accepted.
- 〔学会発表〕(計5件)
1. 富岡淳, 宮永宜典, 田口浩徳, 新井一輝, 森谷安幸: 油潤滑ジャーナル軸受のシリンドリカルおよびコニカルホワールの同時計測, 日本設計工学会 2014 年度春季研究発表講演会論文集, 2014 年 5 月, pp. 163-166 .明治大学中野キャンパス(東京都中野区)
 2. Norifumi Miyanaga, Jun Tomioka: Measurements of Cylindrical and Conical Whirls on Hydrodynamic Journal Bearings, Proceedings of IC3MT 2014, Aug. 2014, in

USB drive. Taipei(Taiwan)

3. 富岡淳, 土居可尚, 田村重典, 宮永宜典 :
油潤滑ジャーナル軸受における給油角度の変化が油膜の状態およびオイルホ
ワール発生に及ぼす影響, 日本設計工学
会 2016 年度春季研究発表講演会論文集,
2016 年 5 月, pp. 35-36 . 東京工業大学大
岡山キャンパス(東京都目黒区)
4. 富岡淳, 松岡修史, 大熊勇生, 宮永宜典 :
強制油膜破断機能付き油潤滑ジャーナ
ル軸受の潤滑特性, JSDE2017 春季研究
発表講演会, 発表予定 . 千葉工業大学津
田沼キャンパス(千葉県習志野市)
5. Norifumi Miyanaga and Jun Tomioka:
Calculations of Bearing Performance by
using Cavitation Algorithm, The 4th
Internationa Conference on Design
Engineering and Science, ICDES 2017, Sep.
2017, accepted. Aachen(Germany)

6 . 研究組織

(1)研究代表者

宮永 宜典 (MIYANAGA, Norifumi)
関東学院大学・理工学部・准教授
研究者番号 : 00547060

(2)研究分担者

富岡 淳 (TOMIOKA, Jun)
早稲田大学・理工学術院・教授
研究者番号 : 40217526