

令和 2 年 6 月 18 日現在

機関番号：32704

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06128

研究課題名(和文) ホップ分岐現象を考慮した気体潤滑軸受の設計法に関する研究

研究課題名(英文) Study on Design Method of Air Bearings with Considering Hopf Bifurcation

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) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、気体潤滑ジャーナル軸受のHopf分岐解析を安定解析問題に応用した。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、亜臨界分岐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、超臨界分岐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られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

回転機械の回転軸を支持するジャーナル軸受は、回転数が大きくなると装置の破壊に至るほどの大きな振動を引き起こす。これを避けるような軸受設計法を確立するために、Hopf分岐と呼ばれる現象に注目した軸受解析および軸受試験を行い、その特徴を明らかにした。本研究により、より安全性の高い軸受設計法につながると考えられる。

研究成果の概要(英文)：In this study, Hopf bifurcation analysis of gas lubricated journal bearings was applied to the stability analysis problem. In addition, the stability analysis was carried out by obtaining the kind of bifurcation and the periodic solution near the stability limit and capturing the non-linearity of the oil film. As a result, in the region called subcritical bifurcation, the amplitude increased sharply as soon as the vibration amplitude became larger than the periodic solution even before the stability limit was reached. On the other hand, in the region called supercritical bifurcation, there was a phenomenon that the amplitude gradually increased along the periodic solution even above the stable critical velocity. These results were confirmed by experiments.

研究分野：機械要素・トライボロジー

キーワード：気体軸受 Hopf 分岐

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

気体潤滑システムは、気体を潤滑剤として利用するために、クリーンかつ低摩擦で運転することができる。そのため、測定部以外の摩擦を嫌う精密測定機器や超高速回転機械などへの利用が拡大している。大型機器には静圧軸受が用いられているが、空間や静粛性に制約がありコンプレッサーが設置できない場合には動圧軸受が用いられている。Holmberg らの研究によれば、自動車や印刷機などで生じる摩擦エネルギー損失の6~7割がオイルや水を用いた流体潤滑によるものであると試算されており、気体潤滑システムの高度化が期待されている。

気体軸受を生活必需品やインフラ設備などへ適用するためには、設計者の想定を超えた不測の事態が生じたときでも、安定に運転されるもしくは安全に停止できることが求められる。従来、設計者は摂動法もしくは軸心軌跡追跡法を目的に応じて選択して計算を行い、ジャーナル軸受で自励振動が生じる限界の条件を表した安定限界線図などを設計・運転指針の一助としてきた。申請者らも、これらの手法を用いて数種類のジャーナル軸受の安定性を検討してきたが、前述したような“想定外の事態でも安定・安全”であるための設計に対する有用な情報は十分でないと考えている。また、これらの方法は、安定限界点での解析に限られる、計算コストが膨大である、などといった欠点がある。

### 2. 研究の目的

本研究では、気体潤滑システムの更なる高度化を目指して、気体潤滑ジャーナル軸受で生じるホップ分岐現象を解明し、これまで明らかでなかった非線形振動現象の一側面を新たな設計・運転指針として応用する。本提案により、異常振動が発生したとしても、焼付きや装置全体の破損といった大きなトラブルを避けられるような気体軸受の設計が可能となる。このことは、単にシステムの安定性の改善を意味するだけでなく、突発的な事態に対する安全性も獲得することになり、気体潤滑システムの産業応用をより拡大することにつながるものである。また、事前の研究によれば、ホップ分岐解析を軸受設計に利用して分岐形態を正しく理解することで、ジャーナル軸受の安定運転領域を高速側へ拡大することも期待できる。

### 3. 研究の方法

本研究では、気体潤滑システムの高度化を目的として、気体潤滑ジャーナル軸受のホップ分岐現象を詳細に検討することで、これまで十分に理解が進んでいなかった現象を理解し、それらを軸受設計の一指針として生かすことを目指している。本研究は、主に以下の方法で研究を進めた。

- ・気体潤滑ジャーナル軸受のホップ分岐現象を解析するための数値計算コード開発と理論解析

- ・実験装置の改良と実験による現象解明

次頁の図1は申請者らが開発した気体潤滑軸受の試験装置(ジャーナル軸受(動圧型)とスラスト軸受(静圧型と動圧型)の試験が可能)である。軸はエアタービン方式で回転し、モータの継手などからの拘束は受けない。軸受スリーブを脱着する形式であり、様々な軸受設計法を評価できる。軸受試験時の軸の振動挙動は非接触変位計により測定している。

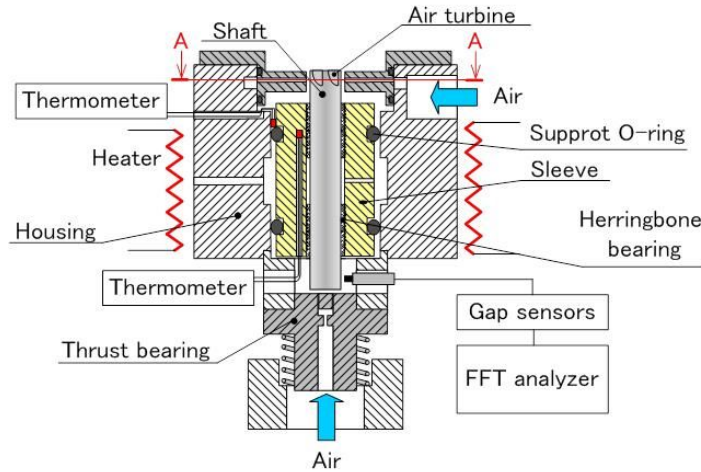
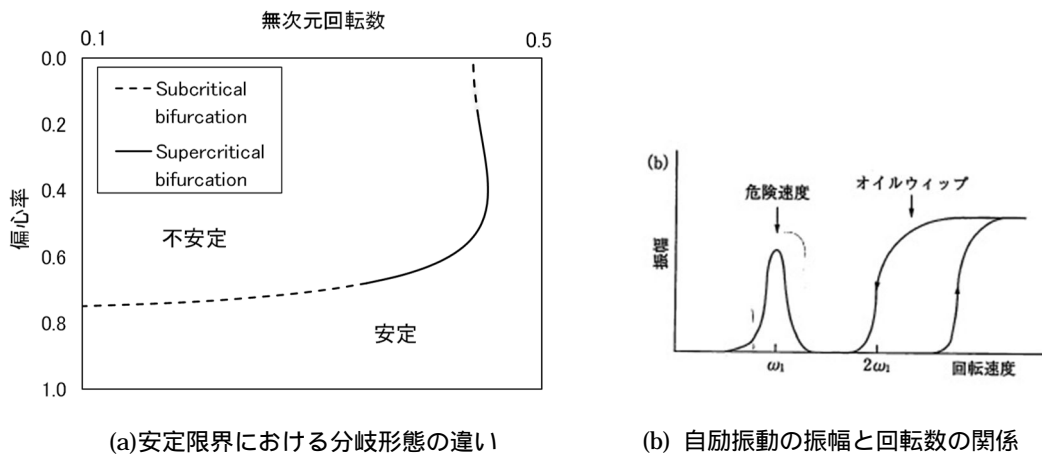


図1 軸受試験装置

#### 4. 研究成果

図2は有限幅軸受を対象としてホップ分岐現象を解析した際の一例である。一見、一般的な安定限界線図のように見えるが、実線と破線はそれぞれスーパークリティカル分岐とサブクリティカル分岐を表わしている。従来の手法では、実線と破線は一色単になってしまう。本研究の手法がより詳細であるといえる。これらの分岐形態の違いは上述の通りである。この軸受の場合には、破線で示した部分を横切るように運転された場合のみ自励振動のヒステリシス現象が生じた(従来から、ヒステリシス現象は低偏心率と高偏心率でのみ起きると報告されていたが、理論的には十分な説明がされていない。予備研究の結果は実現象と傾向が一致している。).



(a) 安定限界における分岐形態の違い

(b) 自励振動の振幅と回転数の関係

図2 ホップ分岐解析の一例

次に、研究代表者と研究分担者のグループは、ヘリングボーン動圧気体軸受の安定運転限界特性について検討してきた。解析には空気膜反力を摂動法によって線形化する線形法と非線形のまま取り扱い、軸心の挙動を追跡する非線形軌道法の2通りを行ってきた。図4はその結果の一例である。この結果からは、安定領域と不安定領域が得られており、偏心率と回転の関係別途用意することで、軸受設計の一助とすることができる。例えば、偏心率を低くして、(b)の条件に合うように軸受設計を行えば、(a)に比べて2倍ほど高速化が可能である。以上のように、ホップ分岐解析を行い、分岐形態を含めて軸受系の安定性を提示することで、新たな情報に基づく軸受設計法を提示できるものと考えている。

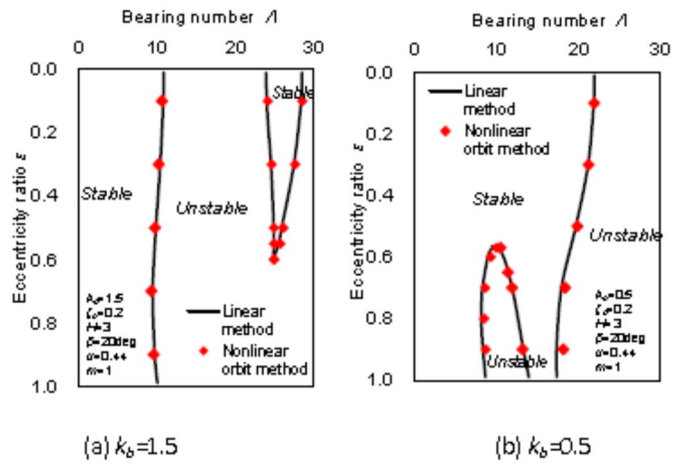


図4 粘弾性支持されたヘリングボーン軸受の安定限界線図<sup>3)</sup>  
 (  $k_b$  は粘弾性支持部の弾性係数 )

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Norifumi Miyanaga, Jun Tomioka,	4. 巻 22
2. 論文標題 Linear and Nonlinear Stability Analysis of Hydrodynamic Journal Bearings using Mass Conservative Cavitation Model	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Jurnal Tribologi	6. 最初と最後の頁 67-71
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Norifumi Miyanaga, Jun Tomioka,	4. 巻 4
2. 論文標題 Calculation of Bearing Performance by using the Cavitation Algorithm	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proceedings of 4th International Conference on Design Engineering and Science	6. 最初と最後の頁 112
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Norifumi Miyanaga, Terunao Kishida, Jun Tomioka	4. 巻 14
2. 論文標題 Experimental Investigation of Load Carrying Capacity and Frictional Torque of Dimpled Parallel Thrust Bearings	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Advanced Mechanical Design, System, and Manufacturing	6. 最初と最後の頁 1-10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/jamdsm.2020jamdsm0041	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件／うち国際学会 0件）

1. 発表者名 富岡淳，小林礼於，三保尚太，宮永宜典
2. 発表標題 溝回転ヘリングボーン動圧気体軸受の溝パラメータが潤滑特性に与える影響
3. 学会等名 日本設計工学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 富岡淳, 石川雄紀, 湯川達人, 宮永宜典
2. 発表標題 軸受系の傾斜角度が気体潤滑ヘリングボーンジャーナル軸受の潤滑特性に及ぼす影響
3. 学会等名 日本設計工学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 宮永宜典, 富岡淳
2. 発表標題 ジャーナル軸受の安定解析に対するHopf分岐理論の応用
3. 学会等名 日本設計工学会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	富岡 淳  (TOMIOKA Jun)  (40217526)	早稲田大学・理工学術院・教授   (32689)	