

機関番号：32689

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2007～2010

課題番号：19560150

研究課題名 (和文) 地震など危機状態に即応する安全性確保の滑り軸受の開発とそのトライボロジー解析

研究課題名 (英文) Tribological Analyses for Safety Sliding Bearings in Response to Emergency such as Earthquake

研究代表者

林 洋次 (HAYASHI HIROTSUGU)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：10063760

研究成果の概要 (和文)：

ハリケーンや台風などからの避難のために、また地震や津波などの救援のために、交通機関や予備電源に使用されるエンジン軸受や発電機械のタービンなどの回転機械に使用される滑り軸受は、危機状態での安全運転確保の滑り軸受の解析や開発が重要である。

動的状態のジャーナル滑り軸受解析の境界条件を明確にするために、動的状態のジャーナル軸受の油膜挙動を 2 台の高速ビデオカメラによって、実験的に解明した。同時に、摩擦特性と圧力分布を軸心軌跡と関係を実験的に明らかにした。

理論的研究では、コンロッド大端部軸受、ピストンピン軸受 (ピンボス軸受とコンロッド小端部軸受) と主軸受に対して、互いの連成効果を配慮した全軸受連成解析と特定の軸受 (コンロッド大端部軸受・ピストンピン軸受・主軸受) の特性のみを解析する簡略解析を提案した。衝撃荷重として燃焼ガス圧が作用するエンジン軸受固有の可変刻み幅ルンゲクッタ法を検討し、簡略解析にバランスウェイトを考慮する方法を確立した。さらにスターブ潤滑の影響を検討した。

研究成果の概要 (英文)：

It is important to analysis and develop the sliding bearings to certificate safty operation used engin bearigs and rotarinary machin bearings which are used for refuge from harricane & typhoon and for relife of earthquake & tsunami.

To investigate dynamic oil film observation in journal sliding bearings experimentally by two high speed video cameras because it is important to make clear boundary conditions in journal bearing used dynamically in engines and turbo machines, more accurate tester of multi-purpose journal bearings was developed, and experimental frictional force and pressure distribution in steady state were measured.

For scientific engine analyses, a simultaneous and approximate analyses were proposed for connecting rod big end bearings, for piston pin bearings and for crank shaft main bearings. However, to save computation time for engine bearing analysis, it is better to innovate new iteration methods to introduce solutions of partial differential equations in finite width bearing theory. Some kinds of Runge-Kutta methods were proposed by using variable step methods with inherent algorithm of engine bearings, and the characteristic of variable step's Runge-Kutta methods in engine bearing analyses are clarified. And effects of balance weight on performance such as journal orbits of piston pin boss bearings and small end bearings & big end bearings of connecting rod are small as compared with result of main bearings. The four new approximate analyses considering balance weight were proposed for main bearings and influences of balance weight on main bearings were shown in good agreements of results by simultaneous analysis, and the effects of starbation were discussed.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2008年度	700,000	210,000	910,000
2009年度	400,000	120,000	520,000
2010年度	400,000	120,000	520,000
2011年度	0	0	0
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

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：滑り軸受，トライボロジー，機械機能要素，設計工学

1. 研究開始当初の背景

昨今の世界状況から明らかなように、ハリケーンや台風などの予測可能な自然災害では避難のための交通手段、地震や津波などの突発的な自然災害では救援のための運搬手段、復旧活動ではライフライン確保のための発電設備や給排水ポンプまた食料運搬のための輸送機械が重要である。我々が直面した自然災害は、昨今のバーチャル的バブル的な産業よりも、鉄道・バス・トラック・乗用車・船舶・航空機などの交通機械、ブルドーザなどの建設機械、原子力や火力や水力などの発電機械、飲料水の給水や汚泥物物の排水に使用されるポンプなどの従来基幹産業の充実確保が人間の命を左右することを物語っている。その基盤機械の危機状態における安全運転に関する研究は重視されるべきである。

このような基盤機械の重要課題はトライボロジー技術に大きく依存している。トライボロジーとは、「相対運動をしながら互いに干渉しあう二面、ならびにそれに関連した実地応用に関する科学と技術」と定義された新しい専門分野である。

したがって、「外力に抵抗し得る物体の結合からなり、一定の相対運動をなし、外部から与えられたエネルギーを有用な仕事に変形するもの」とされている機械にとって、相対運動の科学技術のトライボロジーは、その定義から明らかなように、最も重要な技術の一つであり、欧米諸国ではキーテクノロジーとして取り扱われている。それゆえに、水力・火力・原子力発電所で使用される水車・タービン・ポンプなどの回転機械の軸受、また自動車や船舶などで使用されるエンジン軸受に対して、潤滑面のトライボロジーが基盤研究として重視されている。

2. 研究の目的

前述の背景から、本研究は、発電所で使用

される水車・タービン・ポンプなど回転機械の滑り軸受また自動車や船舶などで使用されるエンジンの滑り軸受に対して、地震などの衝撃荷重が作用した場合も安全に運転ができる新しい滑り軸受を開発し、それをトライボロジー解析によって検証し、安全性を確保し、かつ高性能化と高信頼化を計るために、この種の軸受のトライボロジー設計手段を確立することが本研究の全体構想である。

本研究課題では、前述のように自然災害に対処する最優先の基幹産業に共通的に使用されるジャーナル滑り軸受を取り上げる。水力・火力・原子力発電所で使用される水車・タービン・ポンプなどの回転機械の滑り軸受は普段は定常状態で運転されるが、地震などの衝撃荷重が作用すると、軸受隙間内で軸心が急激に移動するので、複雑な軸心挙動によって潤滑油膜は形成と破断を繰り返していると推測できるが、その油膜の動的挙動は不明である。そこで、まず、変動荷重が作用する普通の真円ジャーナル滑り軸受の軸心軌跡や圧力変動を計測すると同時に、軸受隙間内の油膜が刻々と変化する状況を高速度ビデオカメラによって従来は見えなかった現象を直接観察撮影して、油膜の動的挙動を実験的に解明する。次に、その実験的研究成果に基づいて理論解析を行い、動荷重下の滑り軸受の解析的取扱いを確立する。次に、その解析手法によって、色々な方式で弾性支持された非真円ジャーナル滑り軸受を新しく考案し、衝撃荷重下での軸心軌跡の時間応答を解析的に求め、地震など危機状態状況でも安全に運転ができることを解明し、その安全性を実験によって検証することが本研究課題の具体的な目的である。

3. 研究の方法

まず4年間全体の研究計画・方法の流れを概説する。初年度の平成19年度は、ジャーナル滑り軸受のモデル試験機を改良して、普

通の真円ジャーナル滑り軸受に対して、軸心軌跡と軸受隙間内の圧力変動を計測すると同時に、潤滑油膜の形成破断の動的挙動を実験的に解明する。次年度の平成20年度は、これらの実験的研究成果に基づいて、潤滑油膜の動的挙動を考慮した潤滑理論解析を構築する。平成21年度および平成22年度は、実験結果と解析結果を比較検討して分析し、種々の方式で弾性支持された非真円ジャーナル軸受を考案し、前述の理論を適用することによって、地震など衝撃荷重が作用する場合の時間応答を求め、危機状況下での安全運転を理論的に解明し、かつ非真円ジャーナル軸受の実験を行って理論解析を検証することによって、安全性を確保する滑り軸受の設計方策を提示する。

4. 研究成果

初年度の2007年度は、すでに製作した実験装置を改良して、潤滑油膜の形成破断の動的挙動を実験的に解明する。衝撃荷重が作用するので、軸受隙間内の軸心の軌跡は急激に変動するから、軸受隙間内にも油膜の形成領域と破断領域は刻々と変化するので、透明なアクリル樹脂で軸受ブシュを製作し、購入した高速度ビデオカメラを用いて撮影する。また、エンジンのコンロッド大端部軸受のように回転軸の内部から潤滑油を供給するジャーナル滑り軸受とクランクシャフト主軸受のように静止している軸受ブシュを介して外部から給油するジャーナル滑り軸受があることから、それぞれの方式の軸と軸受ブシュを複数製作した。この実験装置では、一定回転する直流モータによって軸を回転させ、また、回転軸の部分にスリットを設けた円板を装着し、フォトランジスタによって同期信号を取得して、電磁加振機をコンピュータで制御することによって、衝撃荷重を加える力強制方式と衝撃荷重に対応する衝撃的変位を加える変位強制方式の2方式を使用できるが、今回は簡単な正弦波強制振動方式を採用した。さらに、軸の回転動を検知するフォトマイクロセンサによってパルス信号を発生するトリガー発生装置を製作し、電磁加振機と高速度ビデオカメラ装置の同期を計った。まず、予備実験として静特性実験を行い、軸受隙間内の油膜圧力分布の実験結果は従来の理論解析結果とよい一致をみたことから、実験装置の精度と信頼性を確認することができた。次に、高速度ビデオカメラを用いて、動特性実験を行い、軸受隙間内の油膜破断の挙動の撮影に成功した。

2年目の2008年度では、前年度は本科研究費で購入した1台の高速度ビデオカメラで透明材料の軸受を撮影したが、今回はさらに、反対側の油膜の様相が及ぼす影響を検討するために、既存の高速度ビデオカメラをも使

用し、2台の高速度ビデオカメラをトリガー信号で互いに連動させ、かつ軸が回転しはじめるときにストロボを発光させ、記録されたコマ画像にも時刻信号を撮影させた。その2つの高速度ビデオカメラの撮影画像を分析した結果、静止状態から定常状態までの運転過程の油膜の状況が解明され、油膜破断は負圧側の潤滑油中の気泡が油膜圧力の低下によって析出するエアレーションであることが明らかになった。高速度ビデオカメラによって、油膜破断の成長過程も明らかになり、軸受外部から、空気が侵入すると同時に、軸受外部へ流出した潤滑油が再侵入するという興味深い現象が解った。

2009年度では、実験的研究として、軸と軸受の衝突を防止する安全装置を新規に製作し、衝撃荷重によって高速度で軸心軌跡が変動する実験条件下で、高速度ビデオカメラによって、油膜破断の状況を撮影すると同時に、油膜圧力の変動過程も計測し、その潤滑メカニズムを明確にする動的油膜挙動を実験的に検討した。一方理論的研究として、油不足の潤滑状態も配慮し、動的油膜挙動を考慮した油膜形成領域の境界条件式あるいは油膜破断領域の支配偏微分方程式を新たに考案し、変動あるいは衝撃荷重下の有限幅真円ジャーナル滑り軸受に対する偏微分方程式のレイノルズ方程式をルングクッタギル法と逐次緩和法によって差分方程式を初期値境界値問題として数値解析し、軸心軌跡、圧力変動、油膜の形成領域および消滅領域を刻々と算出した。

最終年度の2010年度では、本研究の総まとめを行った。実験的研究では、軸の回転速度を停止状態から上昇させ一定回転速度で運転した後に回転速度を減少させ停止するまでの過渡状況に着目し、軸受隙間内の油膜破断の発生成長消滅過程を高速度ビデオカメラによって撮影すると同時に、油膜圧力と軸心軌跡の変動過程も計測した。理論的研究では、エンジン軸受を解析する新解法として、反復計算を導入した簡便解法を提案し、従来のルングクッタギル法に比較し、30%の演算時間で数値計算可能で、衝撃荷重下のエンジン軸受解析に有効な解法であることを立証した。

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 林 洋次, ジャーナル軸受のスターブ潤滑 (第3報, 真円軸受の安定性解析), 日本機械学会 2007年度年次大会講演論文集, 査読無, Vol. 4, pp. 161-162.
- ② 林 洋次・加茂 俊二, ジャーナル軸受の

- スターブ潤滑 (第4報, 浮動リング軸受の安定性解析), 日本機械学会 2007 年度年次大会講演論文集, 査読無, Vol. 4, pp. 163-164.
- ③ 林 洋次・小川 彩子, 動圧気体ジャーナル軸受の動特性解析, 日本トライボロジー学会・トライボロジー会議'07秋(佐賀) 予稿有, 査読無, pp. 279-280.
- ④ 林 洋次・遠藤 陽作, ビンガム粘弾性流体潤滑の研究(扇形パッドスラスト軸受), 日本トライボロジー学会・トライボロジー会議'07 秋(佐賀) 予稿集, 査読無, pp. 281-282.
- ⑤ 林 洋次・林 雅洋, 無限小丸みをもつ微分可能連続膜厚さ関数を導入したステップ軸受の解析, 日本機械学会中国四国支部第 46 期総会・講演会講演論文集, 査読無し, No. 085-1, pp. 341-342.
- ⑥ 林 洋次・林 雅洋, 複数領域流体潤滑解析の新発想解法(第1報, 無限小丸み微分可能膜関数単一領域化解法), 日本機械学会 2008 年次大会講演論文集, 査読無, Vol. 4, pp. 147-148.
- ⑦ 林 洋次・本橋 明夫, 数領域流体潤滑解析の新発想解法(第2報, 油膜/破断領域と境界/接続条件の同時解法), 日本機械学会 2008 年次大会講演論文集, 査読無, Vol. 4, pp. 149-150.
- ⑧ 林 洋次, ジャーナル軸受の動特性油膜観察実験, 日本機械学会 2008 年次大会講演論文集, 査読無, Vol. 4, pp. 151-152.
- ⑨ 林 洋次, ジャーナル滑り軸受試験機および非ニュートンレオメータの開発とその研究成果, 日本トライボロジー学会・トライボロジー会議'09 春(東京) 予稿集, 査読無, pp. 123-124.
- ⑩ 林 洋次・古野 秀和, エンジン軸受の連成解析と簡略解析(バランスウェイトの考慮), 日本機械学会 2009 年次大会講演論文集, 査読無, Vol. 3, pp. 133-134.
- ⑪ 林 洋次・小松 裕太, エンジン軸受の可変刻み幅ルンゲクッタ法による数値解析, 日本機械学会 2009 年次大会講演論文集 査読無, Vol. 3, pp. 135-136.
- ⑫ 林 洋次, エンジン軸受の油膜観察(試験機の開発と静特性実験), 日本機械学会 2009 年次大会講演論文集 査読無, Vol. 3, pp. 137-139.
- ⑬ 林 洋次, スラストスクイーズ軸受試験機の開発とその研究成果, 日本トライボロジー学会・トライボロジー会議'10 春(東京) 予稿集, 査読無, pp. 177-178.
- ⑭ 林 洋次, グリースのビンガム粘弾性流体潤滑の研究. 日本トライボロジー学会・トライボロジー会議 2010 秋(福井) 予稿集, 査読無, pp. 321-322.

[学会発表] (計 14 件)

- ① 林 洋次, ジャーナル軸受のスターブ潤滑(第3報, 真円軸受の安定性解析), 日本機械学会 2007 年度年次大会, 関西大学, 2007 年 9 月 12 日.
- ② 林 洋次・加茂 俊二, ジャーナル軸受のスターブ潤滑(第4報, 浮動リング軸受の安定性解析), 日本機械学会 2007 年度年次大会, 関西大学, 2007 年 9 月 12 日.
- ③ 林 洋次・小川 彩子, 動圧気体ジャーナル軸受の動特性解析, 日本トライボロジー学会・トライボロジー会議'07 秋, 佐賀大学, 2007 年 9 月 27 日.
- ④ 林 洋次・遠藤 陽作, ビンガム粘弾性流体潤滑の研究(扇形パッドスラスト軸受), 日本トライボロジー学会・トライボロジー会議'07 秋, 佐賀大学, 2007 年 9 月 27 日.
- ⑤ 林 洋次・林 雅洋, 無限小丸みをもつ微分可能連続膜厚さ関数を導入したステップ軸受の解析, 日本機械学会中国四国支部第 46 期総会・講演会, 近畿大学工学部, 2008 年 3 月 7 日.
- ⑥ 林 洋次・林 雅洋, 複数領域流体潤滑解析の新発想解法(第1報, 無限小丸み微分可能膜関数単一領域化解法), 日本機械学会 2008 年次大会, 横浜国大, 2008 年 8 月 6 日.
- ⑦ 林 洋次・本橋 明夫, 数領域流体潤滑解析の新発想解法(第2報, 油膜/破断領域と境界/接続条件の同時解法), 日本機械学会 2008 年次大会, 横浜国大, 2008 年 8 月 6 日.
- ⑧ 林 洋次, ジャーナル軸受の動特性油膜観察実験, 日本機械学会 2008 年次大会日本機械学会 2008 年次大会, 横浜国大, 2008 年 8 月 6 日.
- ⑨ 林 洋次, ジャーナル滑り軸受試験機および非ニュートンレオメータの開発とその研究成果, 日本トライボロジー学会・トライボロジー会議'09 春, 東京代々木オリンピック村, 2009 年 5 月 20 日.
- ⑩ 林 洋次・古野 秀和, エンジン軸受の連成解析と簡略解析(バランスウェイトの考慮), 日本機械学会 2009 年次大会, 岩手大学, 2009 年 9 月 16 日.
- ⑪ 林 洋次・小松 裕太, エンジン軸受の可変刻み幅ルンゲクッタ法による数値解析, 日本機械学会 2009 年次大会, 岩手大学, 2009 年 9 月 16 日.
- ⑫ 林 洋次, エンジン軸受の油膜観察(試験機の開発と静特性実験), 日本機械学会 2009 年次大会, 岩手大学, 2009 年 9 月 16 日.
- ⑬ 林 洋次, スラストスクイーズ軸受試験機の開発とその研究成果, 日本トライボロジー学会・トライボロジー会議'10 春,

東京代々木オリンピック村, 2010年5月17日.

- ⑭ 林 洋次, グリースのビンガム粘弾性流体潤滑の研究. 日本トライボロジー学会・トライボロジー会議 2010 秋, 福井大学, 2010年9月16日

[図書] (計 2 件)

- ① 共著: 林 洋次他, 連成潤滑モデルによる軸受軸心軌跡および油膜厚さの予測, 日本機械学会「RC221 第 9 回エンジントライボロジー研究分科会」成果報告書, 日本機械学会, 2007年8月30日発行, pp. 69-74.
- ② 共著: 林 洋次他, エンジン軸受のオイル消費低減ならびに省エネ対策の基礎的潤滑メカニズムに関する研究, 日本機械学会「RC236 第 10 回エンジントライボロジー研究分科会」成果報告書, 日本機械学会, 2010年6月25日発行, pp. 23-28.

[その他]

ホームページ等

<http://www.f.waseda.jp/mehaya/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

林 洋次 (HAYASHI HIROTSUGU)
早稲田大学・理工学術院・教授
研究者番号: 10063760