

令和元年6月11日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2018

課題番号：26289055

研究課題名(和文) ロケット用エンジン設計を支える非定常流体力連成ロータダイナミクス解析技術の開発

研究課題名(英文) Development of rotor dynamics analysis coupled with unsteady fluid force for rocket engine design

研究代表者

井上 剛志 (Inoue, Tsuyoshi)

名古屋大学・工学研究科・教授

研究者番号：70273258

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,600,000円

研究成果の概要(和文)：研究成果は以下である。(1) 平行環状シールのRD流体力について非線形バルクフロー解析手法を初めて構築し、静的偏心がクリアランスの0.7倍までのRD係数の高速低コストな解析を達成した。(2) 平行環状シールのRD流体力と軸振動の連成解析手法を構築し、実験でその妥当性を確認した。(3) ロケット用ターボポンプのインペラに作用するRD流体力の回転速度依存性を明らかにし、LE-7Aエンジンの地上燃焼試験で発生する回転非同期成分の発生メカニズムについて有力な考察を得た。(3) 磁気軸受を用いたロータダイナミクス試験装置を開発し、100 μm オーダーの大きさの楕円軌道を1 μm 精度で実現する制御系の構築を達成した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本課題では、流体力と軸振動を双方向で連成させて、時間領域でできるだけ低計算コストで解析するための手法を検討した。研究期間内では、まずはもっとも単純な平行環状シールの場合について達成した。このような考え方をほかのターボ要素にも拡張していけば、将来的には流体力をフルで考慮して回転機械の軸振動を予測できることが容易になる。また、並行して、流体力の効果のみを軸振動の解析に簡便に考慮するための流体力のモデル化についても調べ、その流体力モデルの適用範囲をできるだけ広げることにも達成した。また、これらの得られた理論解析結果を実験的にも検証してその妥当性を確認し、本研究成果の信頼性が高いことも示した。

研究成果の概要(英文)：In this task, we achieved the following. (1) For the RD fluid force of plain annular seals, a nonlinear bulk flow analysis method was developed for the first time for the case there is a large static eccentricity. High-speed low-cost analysis of RD coefficients was achieved for the range of static eccentricity up to 70% of the clearance. (2) A coupled analysis of RD fluid force of plain annular seal and rotor vibration was constructed, and its validity was confirmed experimentally. (3) The rotational speed dependency of RD fluid force of impeller was clarified, and a consideration on the mechanism of non-synchronized vibration components in the ground combustion test of LE-7A, which was not explained conventionally, was derived. (3) We developed a test system of RD fluid force using magnetic bearings, and achieved an elliptical orbit with a size of about 100 μm with an accuracy of 1 μm .

研究分野：機械力学・制御

キーワード：振動解析・試験 推進・エンジン ターボポンプ ロータダイナミック流体力 軸振動 連成解析

1. 研究開始当初の背景

現行ロケット H2A, H2B は液体燃料ロケットとして世界最大級であり、技術的に世界トップを争う。新型基幹ロケットでは国際競争力の面からコスト低減と高信頼性が最重要の要求である。H2 の 8 号機はターボポンプのインデューサに発生する振動により打上げ失敗した。現行 H2A, H2B でも、打上げ前の領収燃焼試験時にターボポンプの振動が顕在化することがある。燃焼試験時に振動が大きい場合は次号機用ターボポンプを引き当てるなどして打上げを実施している。コストとスケジュールへの影響は甚大であり、振動問題の根本的解決が期待されている。

ターボポンプの振動問題の原因特定が困難な理由として、軸振動解析に組み込むには高速で仕事する流体要素で作用するロータダイナミック流体力（以下、RD 流体力）のモデリングが不十分である点が多い。また、その検証に十分な実験が実施できていないことも要因である。2013 年 5 月に新型基幹ロケット開発が正式決定され、初号機の打上げが 2020 年予定となった。今回のロケットエンジン開発においては設計段階から振動低減化が要求されている。エンジン開発過程において、信頼性の高いターボポンプの軸振動解析技術はその設計や評価において必須であるが、このロータダイナミクス解析技術は難しく世界的にもまだ未開発である。

応募者は分担者(内海, 安達)と共に 3 年前からロケット用ターボポンプのロータダイナミクス解析技術開発に着手し、これまでに以下の技術を確立した。ターボポンプの有限要素モデルを構築した(図 1)。多部品の組み立て部のモデル化、軸力、RD 流体力、巡回キャビテーション力の近似モデル化など従来コードでは考慮できていない新たな知見を取り入れたモデルであり、実機の固有振動数との整合性は確保できるようになった。RD 流体力としては、従来の流体工学の知見である線形化流体力モデルを組み込み、流体力の影響を近似的に考慮した。実機エンジンの非定常作動時の解析と実験の比較から、実験結果の回転速度同期成分のみを取り出せば、数値解析結果とほぼ定量的に一致することを確認していた(図 2)。

しかし従来成果では非同期成分の原因やその定量的説明には至っておらず、信頼性の高いターボポンプの軸振動解析技術構築に向けて解決しなければならない重要課題として残っていた。研究開始時点ではその要因として接触などの構造的的非線形性と RD 流体力の非線形性を考えていた。

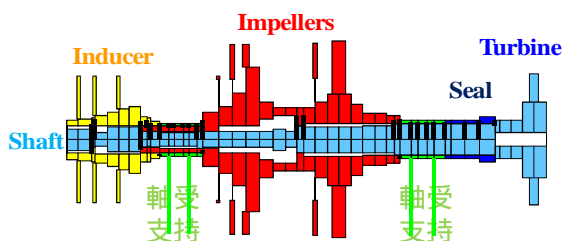


図 1

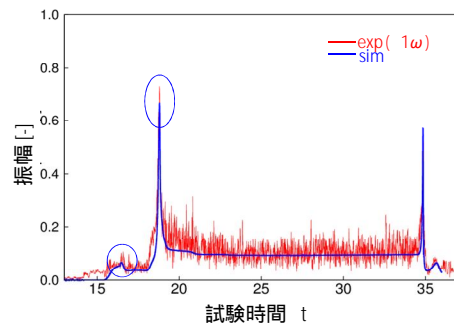


図 2

2. 研究の目的

本課題では、5 年の申請期間内に、次の内容を達成することを目標としていた。

課題 ロータ系の振動解析に実装可能な RD 流体力の理論モデル構築と計測：

様々な振動形態を伴うロータ系の振動解析に実装可能な形に RD 流体力の理論モデルを再構築する。実験的検証を行うことにより、完成度の高い RD 流体力モデルを開発する。

課題 流体要素の RD 流体力を考慮した実機ターボポンプの振動解析法構築：

課題 の RD 流体力モデルを組み込んだロータ系の振動を高速・高精度で解析する理論解析法を構築する。実機ターボポンプの設計ツールとして要求されるレベルにその解析コードを拡張する。

課題 流体要素を組み込んだロータダイナミクス試験装置開発と実験的検証：

各種の流体要素(作動流体: 常温水)を組み込んだロータダイナミクス試験装置を開発し、各流体要素毎に回転実験や加振実験, RD 流体力の制御実験を行う。これは、課題、を援用し、またその成果を検証するためである。

3. 研究の方法

課題：

- (1) 実機ターボポンプ(LE7A)の既存実験データ(時刻歴)の解析を行い、特徴をまとめた。
- (2) ターボ機械要素の隙間流れのうちの、平行環状シールについての簡便な解析方法として従来から用いられていたバルクフロー解析手法の拡張を行い、振幅が大きい場合や静的偏心が大きい場合についても高速で精度よく特性が得られる手法を構築した。

- (3) 平行環状シールの際間流れを半径方向に平均化したナビエーストックス方程式をそのまま差分近似し、RD 流体力を解析するコードを構築した。このコードはそのまま課題 のコード開発に用いた。
- (4) LE-7 エンジンのインペラについて、バルクフロー解析を回転速度を変化させつつ解析を行い、インペラの RD 流体力の回転速度依存性を調べた。このコードはそのまま課題 の LE-7 ターボポンプの安定性解析に用いた。

課題 :

- (1) 課題 で構築した平行環状シールの際間流れ解析と回転軸系の軸振動解析を各時刻で双方向連成させて解析するコードを開発した。
- (2) この解析コードを用いて、簡単な回転軸系の場合について広い回転速度範囲にわたって振動特性を解析した。
- (3) 課題 で解析した LE-7 エンジンのインペラの RD 流体力の回転速度依存性を LE-7 ターボポンプ全体の解析コードに組み込み、地上試験時の条件に合わせて計算し、安定性を解析した。その結果を、実験時の非同期振動成分の発生状況と比較して考察した。

課題 :

- (1) アクチュエータとして磁気軸受とピエゾアクチュエータを選び、簡単なロータ系の実験装置を用いて、それぞれについて、回転中の高精度な軌道追従制御手法を開発した。
- (2) 磁気軸受を用いた制御で、メカニカルシールの接触力が作用する場合の軌道追従と高精度の接触力の推定を実現した。
- (3) 常温作動流体（水）を加圧して流し込み、RD 流体力を計測する装置を開発し、回転速度掃引実験を実施した。この装置の開発に難航し、加振実験に着手することが遅れたが、期間中にピエゾアクチュエータを用いた加振装置の作成と組付けまでを行った。

4. 研究成果

- (1) バルクフロー解析手法の拡張を行い、振幅が大きい場合にも有効な解析手法を開発した(論文)。その結果を用いて、流体力から軸振動解析に有用な RD 係数を求めて整理された。この成果により、軸振動が大きな共振付近などでも流体力を精度よく考慮できる。
- (2) 上記成果をさらに発展させ、実際の運転時に避けがたい静的偏心がある場合についても拡張した。解析手法の工夫を推し進め、クリアランスの半分程度の静的偏心がある場合についての RD 流体力の特性を明らかにした(図 3)(論文)。この成果により、静的偏心が大きい場合の軸振動についても流体力を精度よく考慮できる。
- (3) 磁気軸受を組み込んだ弾性ロータの実験装置を用い、回転中の高精度な軌道追従制御手法を開発した(論文)。期間内にこの成果をさらに進め、メカニカルシール接触時の軸軌道制御で誤差 $1\mu\text{m}$ 程度を達成し、精度の良い RD 流体力の実験的推定を実現している。
- (4) LE-7 エンジンのインペラの RD 流体力の回転速度依存性を解析した。この特性を他のターボ要素も有すると仮定し、LE-7 ターボポンプ全体の解析コードを開発した。このコードを用いて地上試験時の条件に合わせた解析を行って系の安定性を調べ、その結果を地上試験結果と比較して考察した。その結果、これまで説明ができなかった非同期振動成分の発生状況が系の不安定化と対応しているとの考察を得ることができた(論文)。
- (5) 平行環状シールの際間流れ解析と回転軸系の軸振動解析を各時刻で双方向連成させて解析するコードを開発した。この解析コードを用いて、簡単な回転軸系の場合について広い回転速度範囲にわたって振動特性を解析した。不安定化する速度近傍の初期値依存性(図 4)など、従来の研究では調べられなかった振動挙動を調べ、明らかにできた(論文)。

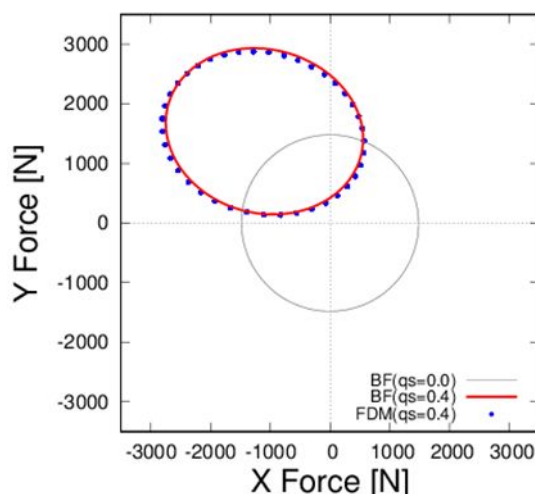


図 3

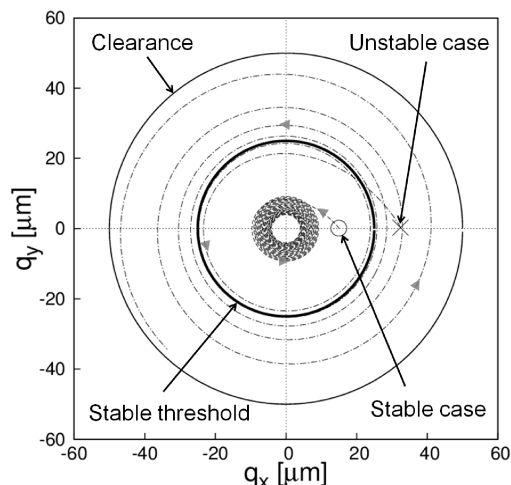


図 4

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 14 件)

木暮大貴, 井上剛志, 川崎聡, 内海政春, ロータダイナミック流体力の回転速度依存性を考慮した固有値解析による LE-7 液水ターボポンプロータの非同期成分の考察, ターボ機械, 47-3, (2019), pp.179-184, 査読有

三宅建次郎, 井上剛志, 内海政春, 池本篤史, 単純ロータ系の軸振動と平行環状シールのロータダイナミック流体力の連成解析, ターボ機械, 47-7, (2019), pp.227-237, 査読有
Atsushi Ikemoto, Tsuyoshi Inoue, Kazukiyo Sakamoto, Masaharu Uchiumi, Nonlinear Analysis of Rotordynamic Fluid Forces in the Annular Plain Seal by Using Extended Perturbation Analysis of the Bulk-Flow Theory (Influence of Whirling Amplitude in the Case with Concentric Circular Whirl), ASME, Journal of Tribology. 2018; 140(4):041708-041708-15., doi: 10.1115/1.4039370, 査読有

Koya Yamada, Atsushi Ikemoto, Masaharu Uchiumi and Tsuyoshi Inoue, Nonlinear Analysis of Rotordynamic Fluid forces in the Annular Plainseal by Using Extended Bulk-Flow Analysis (Influence of Static Eccentricity and Whirling Amplitude), ASME, J. Eng. Gas Turbines Power 141(2), 021017 (2018) (8 pages), doi: 10.1115/1.4041128, 査読有

加藤 潤也, 藪井 将太, 高木 賢太郎, 井上 剛志, ロータ系の任意振れ回り軌道における外力の解析に向けた磁気軸受装置の開発, 日本機械学会論文集, 84 巻 (2018) 861 号 p. 17-00227, DOI:10.1299/transjsme.17-00227, 査読有

Junya Kato, Tsuyoshi Inoue, Kentaro Takagi, and Shota Yabui, Nonlinear Analysis for Influence of Parametric Uncertainty on the Stability of Rotor system with Active Magnetic Bearing using Feedback Linearization, ASME, Journal of Comput. Nonlinear Dynam. 2018; 13(7):071004-071004-9., doi: 10.1115/1.4040128, 査読有

Shota Yabui and Tsuyoshi Inoue, Development of optimal controller design method to compensate for vibrations caused by unbalanced force in rotor system based on Nyquist diagram, Journal of Vibration and Control, Volume: 25 issue: 4, page(s): 793-805, (13pages), 2018, doi.org/10.1177/1077546318797173, 査読有

〔学会発表〕(計 25 件)

Hiroki Manabe, Shota Yabui, Hideyuki Inoue, Tsuyoshi Inoue, Development of Experimental Active Magnetic Bearing Device for Measurement of Mechanical Seal Reaction Force Acting on Rotor, Proceedings of International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference 2018 (IDETC2018), IDETC2018-85883, QuebecCity, Aug 26-29, 2018.

Shota Yabui, Tsuyoshi Inoue, Development of Active Magnetic Bearing System Using Adaptive Feedforward Cancellation for Compensation and Analysis of External Forces in Rotating Machinery, Proceedings of International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference 2018 (IDETC2018), IDETC2018-85754, QuebecCity, Aug 26-29, 2018.

小林 翔吾, 藪井 将太, 井上 剛志, ピエゾアクチュエータを用いた回転軸系の 2 自由度高速加振装置の開発, TEC18 東海支部第 67 期総会・講演会, 2018/3/13 (名古屋大学)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等
なし

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名: 安達 和彦

ローマ字氏名: Adachi Kazuhiko

所属研究機関名: 中部大学

部局名：工学部

職名：教授

研究者番号（8桁）：30243322

研究分担者氏名：神谷 恵輔

ローマ字氏名：Kamiya keisuke

所属研究機関名：愛知工業大学

部局名：工学部

職名：教授

研究者番号（8桁）：50242821

研究分担者氏名：高木 賢太郎

ローマ字氏名：Takagi Kentaro

所属研究機関名：名古屋大学

部局名：工学研究科

職名：准教授

研究者番号（8桁）：60392007

研究分担者氏名：内海 政春

ローマ字氏名：Uchiumi Masaharu

所属研究機関名：室蘭工業大学

部局名：大学院工学研究科

職名：教授

研究者番号（8桁）：60727634

(2)研究協力者

なし

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。