

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19H02095

研究課題名(和文) ロケットターボポンプのロータダイナミクスの半解析的流体振動連成解析技術の開発

研究課題名(英文) Development of Semi-Analytical Fluid Vibration Coupled Analysis Technique for Rocket Turbopump Rotor Dynamics

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) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：本課題では下記を実施した。(1)ロケットターボポンプの曲げ振動の本質的な流体振動連成解析の理論構築については、平行シールとテーパシールに着目し、CFDに基づく予旋回係数と入口出口損失係数を求め、それらを考慮した連成解析手法の開発を行った。(2)ロケットターボポンプの軸方向振動の本質的な流体振動連成解析の理論構築については、バランスピストン構造の弾性変形と流体の連成解析を行った。(3)RD流体力を調べるロータダイナミクス試験装置を開発した。適応制御系を実装し、0.2MPaで流体を流しつつ2000rpmで回転時に piezoelectric actuator で多様な振れまわり軌道の追従制御とRD流体力の推定を達成した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本課題では、ロケットターボポンプの安全な運転を目指し、ポンプの流体力と軸振動をできるだけ解析的に表せる部分を解析的に考慮しつつ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モデリングと解析手法を検討した。これらは平行環状シールとテーパシール、インデューサ、バランスピストンについて達成した。これらの成果は、将来的にはロケットターボポンプ全構造について流体力をフルで同時に考慮して軸振動を予測できる技術開発に繋がっていく。また、並行して、流体力を調べるロータダイナミクス試験装置を開発し、様々な振れまわり軌道を描く制御系の構築と、その際の流体力の推定、そしてモデル化も達成した。

研究成果の概要(英文)：In this project, the following were conducted. (1) To develop a theory for coupled analysis of essential fluid vibration of a rocket turbo-pump, we focused on a parallel annular seal and a tapered seal, obtained the pre-swirl coefficient and inlet/outlet loss coefficient based on CFD, and developed a coupled analysis method that takes these into account. (2) To develop a theory for coupled analysis of essential fluid vibration of the axial vibration of a rocket turbo-pump, coupled analysis of elastic deformation of the structure of the balance piston and fluid was conducted. (3) A rotor dynamics test apparatus was developed to investigate RD fluid forces. An adaptive control system was implemented to achieve orbit-following control of various orbits and estimation of RD fluid force using a piezoelectric actuator during rotation at 2000 rpm while fluid flowed at 0.2 MPa in the apparatus.

研究分野：機械力学

キーワード：振動解析 流体振動連成解析 ロータダイナミック流体力

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. 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. 成功が続いている現行 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り, 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. 現在開発中の新型基幹ロケット H3 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り, メインエンジン LE-9 では初号機の設計段階からターボポンプの振動低減化が重要事項として要求されている.

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, 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)のモデリングが軸振動解析に組み込むには不十分である点が多い. これはこの RD 流体力が流体力学のアプローチで研究されてきたことに起因している. 近年の両者からの学術的なアプローチにも関わらずいまだにそのギャップが大きい. さらには, そのモデリングの妥当性を検証するための試験方法の確立自体も不十分なことも要因である.

ターボポンプの振動低減化を行うには, その設計や評価時において信頼性の高い軸振動解析技術が必須である. しかし, 実稼働状態をシミュレートし, RD 流体力の流体振動連成解析モデルを組み込みつつ効率的にロータダイナミクス特性を解析し得る大規模軸振動解析技術は難しく世界的にもまだ未開発である.

このターボポンプ設計に関して JAXA 中心の産学官共同研究が過去 9 年間行われ, 代表者は分担者(内海, 川崎, 安達)らと共にロケット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, 活動した. ここでは, 複数の流体要素の配置配列の形態設計が検討され, 振動学的見地に立つ構造最適化を流体設計の前段階に行う設計手法が提案され, 高い評価を得た. 代表者自身もこの活動を通して流体力と振動の相互作用問題に精力的に取り込み, 特に RD 流体力の解析や要素レベルでの流体振動連成解析を行い, そして代表者と分担者(内海, 川崎, 安達)らは, 以下の成果を挙げつつ, 技術を確立してきた.

- ・ターボポンプの多部品組み立て, RD 流体力線形係数などを取り入れた有限要素モデルを構築した(図 1). 実機の固有振動数との整合性を確保した.

- ・実機の非定常振動解析コードも開発した. 回転速度同期成分のみを取り出せば実機データと解析結果とのほぼ定量的な一致を確認した(図 2). しかし, フル次元物理モデルであり解析コストが大きい.

- ・インデューサの巡回キャピテーションについて, 分担者(内海, 川崎)が理論的検討を行ってきた.

- ・バランスピストンについては, 代表者と分担者(内海, 川崎, 藪井)で剛体バランスピストンモデルの流体振動連成モデルの基礎的検討を進めてきた.

- ・RD 流体力の回転速度依存性を明らかにし, ターボポンプの固有値解析により実機の地上燃焼試験で表れる非同期成分の説明に着手した.

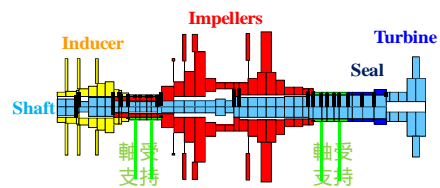


図 1 ターボポンプ有限要素モデル

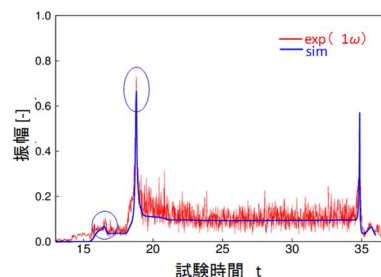


図 2 試験と解析結果比較(同期成分)

そして、上記のような機械力学と流体力学の専門家の技術的な連携・議論と共同研究を通して、代表者と分担者のグループはようやく本質的な流体振動連成解析技術に真っ向から取り組む素地を得ていた。

2. 研究の目的

本研究の目的は「RD 流体力が作用するロケットターボポンプの実稼働時のロータダイナミクスを高速・高精度に調べるための流体振動連成解析技術の開発」であった。そして本課題では、4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 ロケットターボポンプの曲げ振動挙動の本質的な流体振動連成解析の理論構築

ターボポンプの基本構成要素(インデューサ、インペラ、軸受、シール、タービン)についての RD 流体力の流体振動連成解析モデルを構築する。それらのターボ要素をすべて組み込んだロケットターボポンプの有限要素モデルを構築し、この流体振動連成ターボポンプモデルの高速かつ高効率な解析方法を検討し、開発する。そして、その有効性を確認する。

課題 ロケットターボポンプの軸方向振動の本質的な流体振動連成解析の理論構築

ターボポンプの軸方向振動に関する基本構成要素(バランスピストン)についての RD 流体力の流体振動連成解析モデルを構築する。ターボポンプの剛体モデルおよびインペラの弾性モードを考慮した多自由度モデルについて解析を実施し、その有効性を確認する。

課題 各種ターボ要素の流体振動連成特性の実験的検証

各ターボ要素の RD 流体力を調べるロータダイナミクス試験装置を開発する。制御系を工夫し、高い制御性能と力推定性能を実現する。その装置にターボ要素(インデューサ、インペラ、シール、作動流体：水)を順次取り付け、それぞれの RD 流体力の特性を明らかにする。

3. 研究の方法

課題 ロケットターボポンプの曲げ振動挙動の本質的な流体振動連成解析の理論構築

- ・各種のターボ要素の流体振動連成解析モデルを構築する。
- ・インデューサの1次元流体解析モデルに翼間2次元流れ解析を組み込み、旋回・付着キャビテーション間の遷移をも解析し得る流体解析モデルを構築する。それを発展させてインデューサの旋回・付着キャビテーションに関する流体振動連成解析モデルを構築するその有効性を CFD 解析や JAXA 既設のキャビテーション試験装置を用いた実験で検証する。
- ・各種ターボ要素の流体振動連成解析モデルを含めたターボポンプの有限要素モデルを構築し、その半解析的流体振動連成手法の構築に向け基本方針を十分に時間をかけて検討する。そして、実稼働時のターボポンプ全体の流体振動連成モデルの高速かつ高効率な解析を行う。地上燃焼試験あるいは JAXA 既設の極低温ターボポンプ試験設備を用いた回転実験のデータと比較し、その妥当性を検証する。

課題 ロケットターボポンプの軸方向振動の本質的な流体振動連成解析の理論構築

- ・バランスピストンに関し、従来成果を拡張して剛体モデルの軸方向振動の流体振動連成モデルを検討し構築する。つぎに、その弾性モードも考慮した軸方向振動の流体振動連成モデルを検討し構築する。
- ・バランスピストンの動特性試験装置を開発して実験を行い、上記の流体振動連成解析モデルを検証する。

課題 各種ターボ要素の流体振動連成特性の実験的検証

・高速回転中のロータをピエゾアクチュエータを用いて高速振れ回り加振するロータダイナミクス試験装置を開発する。高精度な軌道追従で、軸軌道は様々に制御可能とし、オブザーバによる精緻な RD 流体力の測定手法も開発する。実験データに機械学習を用いた RD 流体力のモデリングとパラメータ同定手法も構築する。

・開発した試験装置にターボ要素を順次取り付け、その回転・加振実験により、各要素の RD 流体力の特性を順次明らかにする。そして、課題 の各流体振動連成解析モデルの完成度を高める。

4. 研究成果

本課題では、下記の成果を達成した。

- (1) 課題 で、ターボポンプの基本構成要素としてまずはシールに着目し、その RD 流体力の流体振動連成解析モデルを構築した。とくに傾きと並進の両自由度を考慮した連成解析手法の開発を行った。また、振れまわりを与えた時の RD 係数の導出も実施し、従来成果と比較できる範囲で良好な結果を得た。
- (2) 課題 で、ターボポンプの基本構成要素として続けてシールに着目し、その RD 流体力の流体振動連成解析モデルを構築した。入口出口領域を考慮した非定常振れ回り状況下の CFD 解析を多数実施し、RD 流体力解析部分の精度向上を進めた。とくに CFD に基づく予旋回係数と入口出口損失係数を求め、それらを考慮した流体解析部分を用いた連成解析手法の開発を行った。
- (3) 課題 で、入口出口領域を考慮した非定常振れ回り状況下の CFD 解析を多数実施することに加えバルクフロー解析手法の構築も実施し、RD 流体力解析部分の精度向上を進めた。とくにテーパがある場合について CFD に基づく予旋回係数と入口出口損失係数を求め、それらを考慮した流体解析部分を用いた連成解析手法の開発を行い、実験と比較し考察した。
- (4) 課題 で、重力の影響の有無が動的挙動に与える影響について調べ、流体振動連成解析における定性的な挙動の際を明らかにした。
- (5) 課題 で、ティンデューサにおける旋回キャビテーションから付着非対称キャビテーションへの遷移を調べるための連成解析コードの開発を進めた。とくに 1 次元流路モデルと、2 次元翼間流れ解析モデル、そしてロータモデルの 3 理論モデル連成解析を行い、その結果を元に旋回キャビテーションから付着非対称キャビテーションへの遷移の考察と連成時の状態の更新の方法の検討を繰り返し実施し、定性的ながらそのメカニズムについて説明した。
- (6) 課題 で、ターボポンプの軸方向振動に関する基本構成要素であるバランスピストン部分の構造の弾性変形と流体の連成解析を行い、実機で問題が報告されている事象の説明に有効な結果を得た。
- (7) 課題 で、RD 流体力を調べるロータダイナミクス試験装置を開発した。適応制御を組み込んだ制御系の工夫を行い、装置に 0.2MPa 程度の流体を流し込みつつ 2000rpm 程度で自転回転時にピエゾアクチュエータで振れまわり軌道制御（振れまわり半径数十 μm ）を行い、RD 流体力の測定を達成した。軌道追従制御誤差は約 1 μm 程度を達成した。
- (8) 課題 で、RD 流体力を調べるロータダイナミクス試験装置で、回転速度を低速から増速しつつ実験を実施できるように拡張し、回転速度変化とともに軌道追従制御誤差が増減することについて新たにフィルタを設計してその低減を達成した。
- (9) 課題 で、RD 流体力を調べるロータダイナミクス試験装置で、適応制御を組み込んだ制御系

の工夫を行い，同心円軌道の場合，静的偏心がある場合，複数周波数の軌道の場合の軌道追従制御と RD 流体力の推定を達成し（図 3），CFD 結果と比較・検証した（図 4）。

(10) 課題 で，課題 1 の連成解析の妥当性を検証するための実験を実施し，課題 の実験結果との比較を試みた。

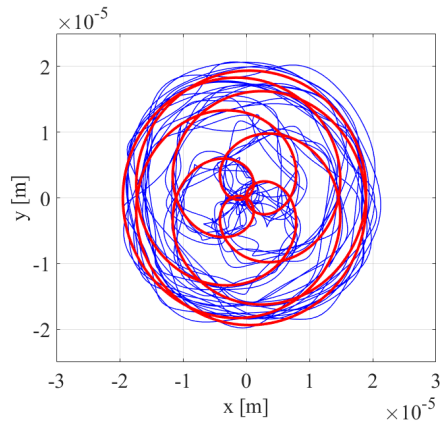


図 3 多周波数軌道の追従制御結果

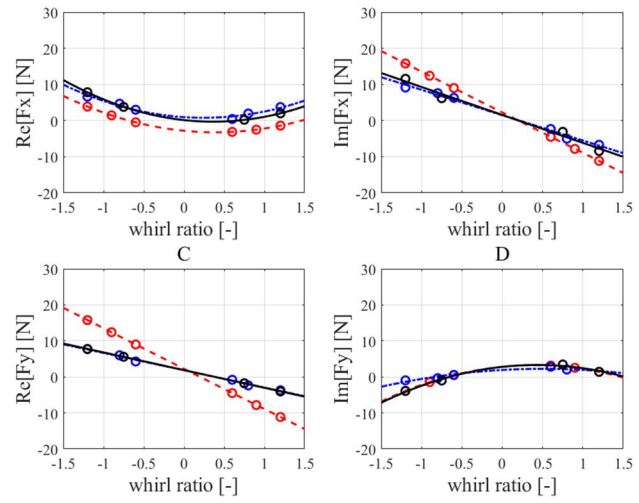


図 4 RD 流体力推定結果と検証

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9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 平木博道, 藪井将太, 井上剛志	4. 巻 49
2. 論文標題 バランスピストン機構のインペラ弾性変形と音響振動の連成を考慮した軸方向振動の検討	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ターボ機械= Turbomachinery	6. 最初と最後の頁 202-211
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11458/tsj.49.4_202	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 S Yabui, H Inoue, T Inoue	4. 巻 27
2. 論文標題 Control scheme of adaptive feedforward cancellation considering of Bode's integral theorem for synchronous vibration suppression in rotating machinerics	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Vibration and Control	6. 最初と最後の頁 2586-2599
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1177/1077546320962593	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 Shota YABUI, Hideyuki INOUE and Tsuyoshi INOUE	4. 巻 143
2. 論文標題 Track-Following Controller Design Using an Active Magnetic Bearing for Measurement of the Rotor Dynamics Coefficient of the Annular Seal	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ASME J. Dyn. Sys., Meas., Control	6. 最初と最後の頁 11pages
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1115/1.4049542	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 Yudai Kunori, Tsuyoshi Inoue, Kenjiro Miyake	4. 巻 143
2. 論文標題 Two-Way Coupled Shooting Analysis of Fluid Force in the Annular Plain Seal and Vibration of the Rotor System	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ASME, Journal of Vibration and Acoustics	6. 最初と最後の頁 9pages
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1115/1.4049381	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 Yabui Shota, Inoue Tsuyoshi	4. 巻 141
2. 論文標題 Development of Adaptive Feed-Forward Cancellation With Frequency Estimation Algorithm for Compensation of Periodic Disturbance at Arbitrary Frequency	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control	6. 最初と最後の頁 121014(12pages)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1115/1.4044719	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 HIRAKI Hiromichi, INOUE Tsuyoshi, YABUI Shota	4. 巻 85
2. 論文標題 Experimental study on stability of axial direction of Balance Piston mechanism	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Transactions of the JSME (in Japanese)	6. 最初と最後の頁 19-00187
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.19-00187	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 YABUI Shota, HIRAKI Hiromichi, INOUE Tsuyoshi	4. 巻 85
2. 論文標題 Development of model for stability analysis in a balance piston mechanism in turbopump by using active control	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Transactions of the JSME (in Japanese)	6. 最初と最後の頁 18-00445
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.18-00445	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 Yabui Shota, Inoue Tsuyoshi	4. 巻 141
2. 論文標題 Development of a Measurement System for Analyzing Periodic External Forces Acting on Rotating Machineries	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control	6. 最初と最後の頁 101008(9pages)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1115/1.4043759	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 Tsuyoshi Inoue, Hirohisa Ohama, Yuki Imaeda, Satoshi Kawasaki, Takashi Shimura, Mitsuru Shimagaki and Masaharu Uchiumi	4. 巻 currently Published Online
2. 論文標題 Investigation of Transition Phenomenon from Rotating Cavitation to Attached Asymmetric Cavitation by Coupled Analysis of One-Dimensional Flow Path Model of 3-Blade Inducer and Shaft Vibration System	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Vibration Engineering & Technologies	6. 最初と最後の頁 17pages
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 -

〔学会発表〕 計9件(うち招待講演 0件/うち国際学会 3件)

1. 発表者名 大川 颯, 井上 剛志, 堀口 祐憲
2. 発表標題 同期振れまわり振動時のインデューサの流路ごとのポンプ動特性の評価
3. 学会等名 日本機械学会 第99期 流体工学部門 講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 全 旭東, 井上 剛志, 田浦 裕生
2. 発表標題 ラピリンスシールの静特性と動特性に対する歯の位置の影響
3. 学会等名 日本機械学会 第99期 流体工学部門 講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 木村 祥吾, 井上 剛志, 田浦 裕生
2. 発表標題 平行環状シールの隙間流れ解析の境界条件の検討
3. 学会等名 日本機械学会 第99期 流体工学部門 講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 木村 祥吾, 井上 剛志
2. 発表標題 環状シールの隙間流れと軸振動の双方向FSI解析と実験
3. 学会等名 Dynamics and Design Conference 2021 (D&D2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 太田 敦大, 藪井 将太, 井上 剛志
2. 発表標題 流体力の実験的推定のためのAFCを用いた高精度振れ回り軌道追従制御の設計
3. 学会等名 Dynamics and Design Conference 2021 (D&D2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shota Yabui, Hideyuki Inoue, Tsuyoshi Inoue
2. 発表標題 Excitation System with Active Magnetic Bearing Control Performance Improvement for Rotordynamic Force Measurement,
3. 学会等名 IEEE International Conference on Mechatronics (ICM2021) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yudai Kunori, Tsuyoshi Inoue and Kenjiro Miyake
2. 発表標題 Two way Coupled Analysis of Fluid Force in the Annular Plain Seal and Vibration of the Rotor System Using Shooting Method
3. 学会等名 ASME 2019 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference (IDETC/CIE 2019), August 18-21, 2019, Anaheim, CA, USA (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大濱寛久, 井上剛志, 川崎聡, 内海政春, 志村隆
2. 発表標題 1D-CAEモデルを用いたインデューサの付着非対称キャピテーションの考察
3. 学会等名 第82回ターボ機械協会岡山講演会, 2019, 岡山
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kentaro Ura, Tsuyoshi Inoue and Shota Yabui
2. 発表標題 Experimental Estimation of Friction Characteristic of Annular Plain Seal
3. 学会等名 The 18th Asia-Pacific Vibration Conference, 18-20 November, 2019, University of Technology Sydney, Australia (国際学会)
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	安達 和彦 (Adachi Kazuhiko) (30243322)	中部大学・工学部・教授 (33910)	
研究分担者	川崎 聡 (Kawasaki Satoshi) (30839105)	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・研究開発部門・研究領域主幹 (82645)	
研究分担者	神谷 恵輔 (Kamiya Keisuke) (50242821)	愛知工業大学・工学部・教授 (33903)	

6. 研究組織（つづき）

	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	堀口 祐憲 (Horiguchi Hironori) (60314837)	大阪大学・基礎工学研究科・准教授 (14401)	
研究分担者	高木 賢太郎 (Takagi Kentaro) (60392007)	豊橋技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・教授 (13904)	
研究分担者	内海 政春 (Uchiumi Masaharu) (60727634)	室蘭工業大学・大学院工学研究科・教授 (10103)	
研究分担者	藪井 将太 (Yabui Shota) (90800756)	東京都市大学・理工学部・准教授 (32678)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関