

令和 3 年 6 月 20 日現在

機関番号：17102  
研究種目：若手研究  
研究期間：2019～2020  
課題番号：19K14964  
研究課題名（和文）大容量の液体水素移送ポンプ向け全超伝導電動機の開発～小型試作機による動作実証～  
  
研究課題名（英文）Development of fully-superconducting motor for large-capacity liquid hydrogen pump -Operating demonstration of small prototype motor-  
  
研究代表者  
三浦 峻（Miura, Shun）  
  
九州大学・システム情報科学研究所・助教  
  
研究者番号：80804674  
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：水素社会に向けた液体水素移送用ポンプのための超伝導モーターの基礎的な研究開発を行った。具体的には、永久磁石の代わりに超伝導バルク磁石、銅巻き線の代わりに超伝導巻き線をそれぞれ使い、全超伝導モーターの小型試作機を設計・製作・試験した。本研究の成果は、ポンプだけでなく、軽量・高出力が求められる電気推進航空機、空飛ぶクルマ、および大容量洋上風力発電の回転機への展開も期待される。

#### 研究成果の学術的意義や社会的意義

解析や机上検討だけでは分からない実機製作への具体的な課題を、小型試作機の設計・試作・評価を通して明らかにした。特に回転試験により実際に超伝導モーターを回転させ、その動作を実証し、さらに現状の設計では振動が大きいという改善点を明らかにした。従来のモーターより飛躍的に軽量・高出力・高効率となる全超伝導モーターの実現に向けた重要な知見が得られた。

研究成果の概要（英文）：This fundamental research and development of superconducting motor for liquid Hydrogen pump was conducted for future Hydrogen society. The fully-superconducting motor employing superconducting bulk magnets instead of permanent magnet and superconducting windings instead of copper windings, was designed, fabricated and evaluated. The research results will have a spreading effect for not only pumps, but also electric-propulsion aircraft, flying car and offshore wind power.

研究分野：超伝導工学

キーワード：超伝導 モータ バルク 水素 ポンプ 液体窒素 回転機 電気推進

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

水素エネルギー社会の実現には、水素の製造から利用に至るトータルシステムを構築することが不可欠である。水素の貯蔵や輸送の際には、密度の大きな液体の状態を利用すると効率が良い。そこで液体水素移送用ポンプが必要となる。流体の漏洩がない点や断熱の観点から、ポンプ構造はポンプと電動機を一体として液体水素中で動作する浸漬型が有効である。また、駆動電動機を高効率化して損失つまり熱量を低減し、液体水素の蒸発を極力抑えるのが望ましい。既存の常伝導電動機と比較して、電気抵抗ゼロを特長とする超伝導技術は低損失で高効率なポンプを実現する。

これまでの多くの超伝導電動機の研究開発では、その軽量・コンパクト性や高効率性に関して数値解析により示されてきた。しかし、その高い効率や特性は試作機による実証はほとんどされておらず、またそれらの電動機の設計も非常に粗い。これは超伝導が極低温下においてのみ発現し、超伝導特有の電磁現象により損失が決まるという特殊な事情により、既存の常伝導電動機の設計理論・経験則が適用できないためである。そこでまず、冷却方式を考慮した具体的なクライオスタット構造や電動機構造の提案が必要となる。さらに試作による動作実証、および効率やトルクなどの回転機特性の検証が不可欠である。それにより超伝導電動機の実機製作への具体的な課題が明らかとなる。

### 2. 研究の目的

これまでの鉄と銅線で構成された電動機の設計理論・経験則から脱却し、小型テスト機の設計・試作・評価を通して、高効率の超伝導電動機の設計指針を提示し、実機製作への具体的な課題を明らかにすることを目的とする。

本研究は、液体水素移送用ポンプのみならず軽量・高出力が求められる電気推進航空機や空飛ぶクルマの推進用電動機、および洋上風力発電の発電機への発展も期待される。

### 3. 研究の方法

本研究課題では、液体水素への浸漬型であるため回転子巻線へ電流を流すためのスリップリングの取り付けが必要であり不向きであると判断した。そこで超伝導の高磁界発生の長所を活かしつつ回転子への通電の必要のない、図1に示すバルク超伝導体を界磁子に適用する永久磁石型全超伝導同期機を採用した。また、幅広の超伝導線材を積層させ、疑似的にバルク超伝導体を再現する線材積層型全超伝導同期機も試作した。具体的な研究方法を以下に示す。

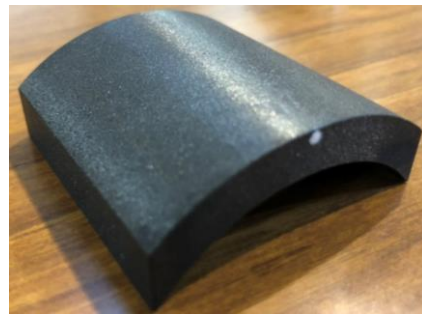


図1 瓦型のバルク超伝導体

- (1) 有限要素法を利用した電磁解析ソフトウェア **JMAG-Designer** を使い、試作機の電磁設計を行う。また、ポンプ、電気推進航空機、風力発電機等の実際のアプリケーションへ適用するサイズの超伝導回転機の電磁解析・設計を行い、超伝導回転機の性能を示す。
- (2) **3D-CAD** を使った全超伝導電動機の小型テスト機の詳細な設計を行い、実機製作への設計指針を示すための知見を得る。さらに電機子に使用する超伝導コイルを大学で所有する巻き線機により巻き線し、巻き線手法を確立する。
- (3) 試作機の着磁試験を行い、実機における簡便な着磁手法を確立するための知見を得る。
- (4) 試作機の回転試験により動作実証し、実機製作への課題を抽出する。

### 4. 研究成果

図2に巻き線したレーストラック型超伝導コイルを示す。超伝導線材は住友電工から購入した **Bi2223** 線材、および **SuperOX Japan** から購入した **RE** 系超伝導線材を使用した。ダブルパンケイコイルにおける転位並列導体の巻き線手法を開発した。本試作機には、2本の並列導体コイルを採用した。巻き線したいくつかの超伝導コイルには、超伝導特性の劣化が見られた。各コイルのターン数は180ターンであり、線材幅は4mmである。液体窒素77.3Kにおける臨界電流は、41~60Aであった。図3に6個の巻き線した超伝導コイルを組み合わせた電機子ユニットを示す。

図4に組み上げた全超伝導電動機概念図を示す。着磁試験における着磁コイルは超伝導電機子を使用する。実機においても、このように超伝導電機子を着磁コイルとしても使用することを想定し、これにより大型の着磁コイルが必要ない。本試験では、磁場中冷却法により着磁した。コイル発生磁場、着磁磁場、およびバルク超伝導体の温度を評価するために、図の位置にホールセンサーおよび温度センサーを設置した。図5に着磁試験における温度と磁場の時間依存性を示す。まず、電機子のみを液体窒素で冷却し、試験開始から25分まで待機し、バルク超伝導体の温度が臨界温度~92K以上であることを確認した。その後、電機子巻き線に35Aの

直流電流を流し、着磁磁場を発生させた。コイル発生磁場は測定箇所において約 0.12 T で、電磁解析の結果よりわずかに高い結果となったが、概ね一致し設計の妥当性が示された。試験開始から 62 分でバルク超伝導体も冷却し、その後 87 分において電機子電流をゼロにした。図より 0.07 T の磁場がバルク超伝導体に着磁されたことが分かり、このような簡易な方法で着磁試験が可能であることが分かった。その後、無負荷において 120 rpm の回転動作を確認し、電動機としての動作実証を達成した。回転試験において、振動が大きく、バルク超伝導体の形状改善や電機子コイルの巻き線構造・形状の改善が必要であることが明らかになった。

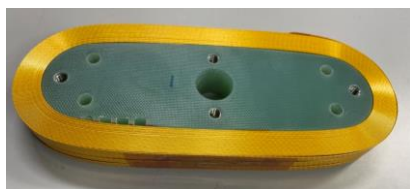


図 2 レーストラック型超伝導コイル

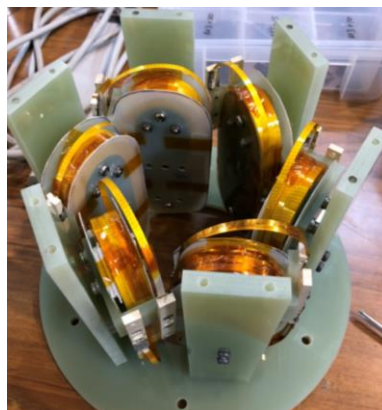


図 3 超伝導コイル電機子ユニット

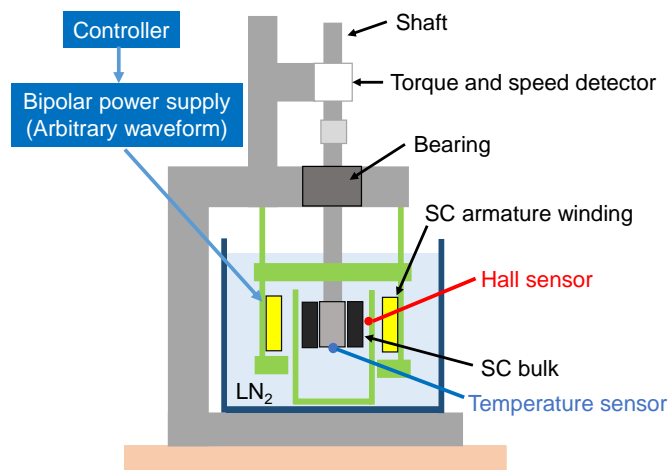


図 4 試作した超伝導電動機と評価ベンチの概念図

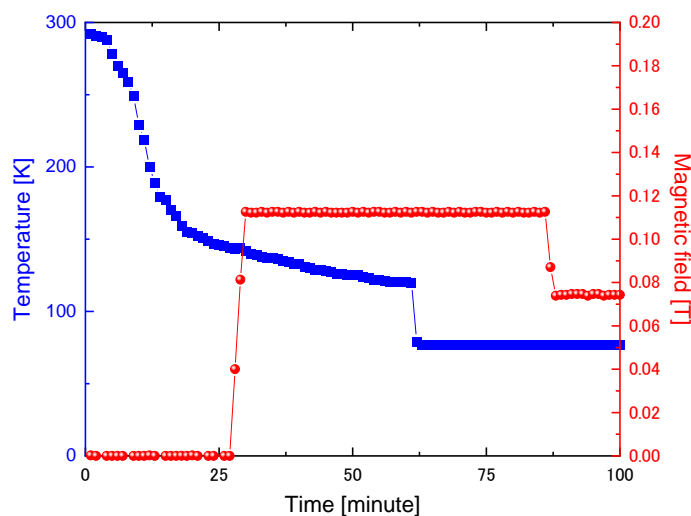


図 5 回転子における温度(青プロット)とバルク超伝導体表面付近の磁場(赤プロット)の時間依存性

※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。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Shun Miura, Masataka Iwakuma, Teruo Izumi	4. 巻 30
2. 論文標題 Lightweight Design of Tens-MW Fully-Superconducting Wind Turbine Generators with High-performance REBa2Cu3Oy Wires	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 5204106
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TASC.2020.2979157	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 Ryota Sugouchi, Masataka Komiya, Shun Miura, Masataka Iwakuma, Koichi Yoshida, Teruyoshi Sasayama, Takashi Yoshida, Kaoru Yamamoto, Yuichiro Sasamori, Hirokazu Honda, Yoshiji Hase, Masao Shuto, Masayuki Konno, Teruo Izumi	4. 巻 30
2. 論文標題 Conceptual Design and Electromagnetic Analysis of 2 MW Fully-Superconducting Synchronous Motors with Superconducting Magnetic Shields for Turbo-electric Propulsion System	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 3601905
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TASC.2020.2974705	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 Koichiro Ozaki, Yuma Doi, Koichi Yoshida, Shun Miura, Teruyoshi Sasayama, Takashi Yoshida, Kaoru Yamamoto, Masataka Iwakuma, Akifumi Kawagoe, Akira Tomioka, Masayuki Konno, Teruo Izumi	4. 巻 30
2. 論文標題 Conceptual Design of Superconducting Induction Motors using REBa2Cu3Oy Superconducting tapes for Electric Aircraft	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 3602605
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TASC.2020.2971671	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 Masataka Komiya, Ryota Sugouchi, Hiromasa Sasa, Shun Miura, Masataka Iwakuma, Takashi Yoshida, Teruyoshi Sasayama, Kaoru Yamamoto, Akira Tomioka, Masayuki Konno, Teruo Izumi	4. 巻 30
2. 論文標題 Conceptual Design and Numerical Analysis of 10 MW Fully-Superconducting Synchronous Generators Installing the New Casing Structure	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 5206607
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TASC.2020.2989746	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 Yuki Omanyuda, Shun Miura, Masataka Iwakuma	4. 巻 30
2. 論文標題 Additional AC Loss Properties of Three-Strand Transposed Parallel Conductors Composed of REBa2Cu3Oy Tapes	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 5900806
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TASC.2021.3062792	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 Hiromasa Sasa, Masataka Iwakuma, Koichi Yoshida, Seiki Sato, Teruyoshi Sasayama, Takashi Yoshida, Kaoru Yamamoto, Shun Miura, et al.	4. 巻 31
2. 論文標題 Experimental Evaluation of 1 kW-class Prototype REBCO Fully Superconducting Synchronous Motor Cooled by Subcooled Liquid Nitrogen for E-Aircraft	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 5200706
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TASC.2021.3055452	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 HiromasaSasa, Shun Miura, Masataka Iwakuma, Teruo Izumi, Takato Machi, Akira Ibi	4. 巻 580
2. 論文標題 Estimation Method for AC Loss of Perpendicularly Stacked REBa2Cu3Oy Superconducting Tapes under Magnetic Field	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physica C: Superconductivity and its Applications	6. 最初と最後の頁 1353801
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physc.2020.1353801	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計21件 (うち招待講演 6件 / うち国際学会 13件)

1. 発表者名 Shun Miura, Masataka Iwakuma, Teruo Izumi
2. 発表標題 Electromagnetic design of tens MW-class fully-superconducting wind power generators with high-performance REBa2Cu3Oy wires
3. 学会等名 International Conference on Magnet Technology 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takuma Furukawa, Shun Miura, Masataka Iwakuma
2. 発表標題 Additional AC loss properties of three-strand parallel conductors composed of Y-based superconducting tapes
3. 学会等名 International Conference on Magnet Technology 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masataka Komiya, Ryota Sugouchi, Takuya Aikawa, Hiromasa Sasa, Shun Miura, Takashi Yoshida, Teruyoshi Sasayama, Masataka Iwakuma, Akira Tomioka, Masayuki Konno, Teruo Izumi
2. 発表標題 Design and Numerical Analysis of 10 MW-class Fully-Superconducting Synchronous Generators Installing the New Casing Structure
3. 学会等名 International Conference on Magnet Technology 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Goki Kawasaki, Hiromasa Sasa, Shun Miura, Masataka Iwakuma, Akira, Tomioka, Masayuki Konno, Teruo Izumi
2. 発表標題 Design and Analysis of 6.9/1.0 kV-10 MVA Lightweight Superconducting Transformers with REBCO Coated Conductors
3. 学会等名 International Conference on Magnet Technology 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ryota Sugouchi, Takuya Aikawa, Masataka Komiya, Hiromasa Sasa, Shun Miura, Masataka Iwakuma, Koichi Yoshida, Teruyoshi Sasayama, Akira Tomioka, Konno Masayuki, Teruo Izumi
2. 発表標題 Design and Electromagnetic analysis of 2 MW Fully-Superconducting Synchronous Motors Composed of REBa2Cu3Oy coated conductors for Turboelectric Propulsion System
3. 学会等名 International Conference on Magnet Technology 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Koichiro Ozaki, Hiromasa Sasa, Koichi Yoshida, Shun Miura, Teruyoshi Sasayama, Takashi Yoshida, Masataka Iwakuma, Akira Tomioka, Konno Masayuki, Teruo Izumi
2. 発表標題 Conceptual design and electromagnetic analysis of 40 kW-class superconducting induction motors for electric propulsion vertical take-off and landing aircraft
3. 学会等名 International Conference on Magnet Technology 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shun Miura, Takuma Furukawa, Masataka Iwakuma
2. 発表標題 Additional AC loss properties of transposed three-strand parallel conductors with REBa <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>y</sub> superconducting tapes wound into one-layer solenoidal coils
3. 学会等名 14 th European Conference on Applied Superconductivity (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ryota Sugouchi, Takuya Aikawa, Masataka Komiya, Shun Miura, Masataka Iwakuma, Koichi Yoshida, Teruyoshi Sasayama, Kaoru Yamamoto, Akira Tomioka, Konno Masayuki, Teruo Izumi
2. 発表標題 Electromagnetic Design of 2 MW Fully-Superconducting Synchronous Motors
3. 学会等名 14 th European Conference on Applied Superconductivity (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Goki Kawasaki, Hiromasa Sasa, Shun Miura, Masataka Iwakuma, Akira, Tomioka, Masayuki Konno, Teruo Izumi
2. 発表標題 Lightweight Design of 6.9/1.0 kV-10 MVA REBCO Superconducting Transformer
3. 学会等名 14 th European Conference on Applied Superconductivity (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuma Doi, Koichiro Ozaki, Koichi Yoshida, Shun Miura, Teruyoshi Sasayama, Takashi Yoshida, Masataka Iwakuma, Akira Tomioka, Konno Masayuki, Teruo Izumi
2. 発表標題 Electromagnetic design of 100 kW-class induction motors with HTS tapes
3. 学会等名 14 th European Conference on Applied Superconductivity (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Sasa, M. Iwakuma, S. Miura, M. Komiya, T. Aikawa, T. Sasayama, T. Yoshida, K. Yamamoto, T. Izumi, A. Tomioka, M. Konno, T. Umeno
2. 発表標題 Development of 1 kW fully-superconducting synchronous motor with REBCO wires
3. 学会等名 14 th European Conference on Applied Superconductivity (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐々湊太、三浦峻、小宮匡貴、須河内良多、笹山瑛由、吉田敬、山本薫、岩熊成卓、和泉輝郎、富岡章、今野雅之、梅野高裕
2. 発表標題 REBa2Cu3O <sub>y</sub> 超伝導線材を用いた1kW級全超伝導同期モータの冷却特性
3. 学会等名 2019年度電気・情報関係学会九州支部連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 土居祐麻、尾崎高一郎、吉田幸市、三浦 峻、笹山瑛由、山本 薫、吉田敬、岩熊成卓、富岡昭、今野雅行、和泉輝郎
2. 発表標題 REBCO線材を用いた超伝導誘導電動機概念設計と電磁解析
3. 学会等名 2019年度電気・情報関係学会九州支部連合大会
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 古川琢馬、三浦峻、岩熊成卓
2. 発表標題 REBCO3本並列導体の付加的交流損失の評価
3. 学会等名 2019年度低温工学・超電導学会 九州・西日本支部 支部研究成果発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 三浦峻
2. 発表標題 回轉機応用 (EUCAS2019, MT26)
3. 学会等名 中温度域超伝導材料の実用性能に関する調査研究会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 三浦峻
2. 発表標題 MT26, EUCAS2019: 回轉機
3. 学会等名 2019年度第4回冷凍部会-国際会議報告会- (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 三浦峻
2. 発表標題 REBCO高温超伝導線材の交流損失と機器応用
3. 学会等名 九州・西日本支部 2020年度若手セミナー・支部研究成果発表会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 住田雅志, 佐々滉太, 三浦 峻, 岩熊成卓, 今野雅行, 和泉輝郎
2. 発表標題 REBCO線材を用いた移動体用10MVA超伝導変圧器の軽量設計と限流機能の数値解析
3. 学会等名 令和2年電気学会全国大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 野田開仁, 須河内良多, 佐々滉太, 三浦 峻, 吉田 敬, 笹山瑛由, 岩熊成卓, 笹森雄一郎, 本田博一, 長谷吉二
2. 発表標題 電動航空機へ向けた全超伝導同期発電機における3次元有限要素法を用いた界磁巻線形状の比較検討
3. 学会等名 令和2年電気学会全国大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shun Miura, Kaito Noda, Ryota Sugouchi, Hiromasa Sasa, Teruyoshi Sasayama, Takashi Yoshida, Masataka Iwakuma
2. 発表標題 Development and Trial Test of Bulk-type Fully-Superconducting Synchronous Motor Composed of Bulk Field-pole Magnets and RE-Ba-Cu-O Armature Windings
3. 学会等名 Applied Superconductivity Conference 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuki Omanyuda, Shun Miura, Masataka Iwakuma
2. 発表標題 Additional AC loss and Current Distribution Properties of Transposed Three-Strand Parallel Conductors Composed of REBCO superconducting tapes
3. 学会等名 Applied Superconductivity Conference 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

九州大学 研究者情報  
<https://hyoka.ofc.kyushu-u.ac.jp/searchSP/details/K006656/index.html>  
research\_map  
<https://researchmap.jp/miurashun/>

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
研究協力者	岩熊 成卓  (Iwakuma Masataka)  (30176531)	九州大学・大学院システム科学研究所・教授    (17102)	

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
---------	---------