

令和 5 年 4 月 14 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2022

課題番号：21K14144

研究課題名（和文）電気推進飛行体向け超伝導バルク磁石型全超伝導同期モーターの磁化減衰抑制技術

研究課題名（英文）Suppression technology of magnetization decay for superconducting bulk magnet type fully superconducting synchronous motors for electric propulsion aircraft

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） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、強磁場が着磁可能な超伝導バルク型磁石を界磁子とする超伝導モーターについて、運転時における超伝導バルクの磁化減衰に着目し、その磁化減衰を抑制する研究開発を実施した。その一環として、台形形状や大きさの異なるコイルの組み合わせ等の新しい超伝導電機子コイルの形状・構造を開発し、またその巻き線手法を確立した。また、超伝導電磁シールド(ダンパーシールド)を試作し、その製作性を確認した。そして、それらの対策案および超伝導モーターの特性等を解析的に評価するための解析式の導出および解析コードの基盤を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、運転時における超伝導バルクの磁化減衰に着目し、その磁化減衰を抑制するための具体的な対策を提案した。本研究で開発する技術は、信頼性の高い超伝導同期モーターのキーテクノロジーとなり、軽量性・安全性が重要視される電気推進式の航空機や空飛ぶ車等の実現に貢献する。また、本研究で新しく開発した超伝導電機子コイルは様々な超伝導回転機へ応用可能であり、またその回転機の特性を大幅に向上させる技術となる。研究は、高出力密度の信頼性の高い超伝導モーターの開発に寄与し、それらを活用した電気推進飛行体を達成する。地球環境に優しく豊かな社会、持続可能な社会の実現に貢献し、また学術的にも意義のある研究となった。

研究成果の概要（英文）：We focused on the magnetization decays of the superconducting bulk magnet during operation of the superconducting motor that uses the superconducting bulk magnet as a field magnet. The suppression technology of the magnetization decays was developed in this study. As a part of this effort, we developed novel shapes and structures of superconducting armature coils, such as trapezoidal shapes and combinations of coils of different sizes, and established winding methods for them. In addition, a prototype superconducting electromagnetic shield (damper shield) was fabricated, and its manufacturability was confirmed. We also derived analytical formulas and developed the basis of analytical codes for analytically evaluating these technologies and the characteristics of superconducting motors.

研究分野：超伝導工学

キーワード：超伝導 モーター 磁化 回転機 バルク

## 1. 研究開始当初の背景

CO<sub>2</sub>削減のために電気推進式の航空旅客機の検討が世界中で進められているが、15~20 kW/kg以上の高い出力密度が推進用モーターに要請されており、重い鉄と銅で構成される既存の電動機では難しい。そこで高電流密度を特長とし、鉄心なしでも数テスラの強磁場を容易に発生させられる超伝導モーターが推進用モーターとして期待されている。

研究代表者の研究グループでは、電機子と界磁子の両方に超伝導巻き線を適用した全超伝導同期モーターの開発を行ってきた。この方式では巻き線型界磁子を採用しており、スリップリングを介して界磁電流を供給しているが、回転機構部と静止機構部を接触させるため損失が発生し、さらにそのメンテナンスが必要となる。高効率およびメンテナンスフリーとするためには非接触の励磁子等を開発し、スリップリングを排除する必要がある。本研究では図1に示すような超伝導バルク材を界磁子としたバルク磁石型の全超伝導モーターを研究開発する。超伝導バルク材は超伝導材のみで構成される焼結体であり、従来の永久磁石と比較して強磁場を着磁できる。

しかし、超伝導バルク磁石には、変動磁場中において着磁磁場が減衰するという課題がある。超伝導バルクを界磁子として適用するためには、この課題を解決することが必須である。例えば、旅客機の推進用モーターでは、出力が変動してしまう超伝導バルク界磁子の磁化減衰は許されず、磁化の減衰をゼロにする、もしくは限りなくゼロに近づける必要がある。安全性が重要視される航空機において、それが達成されなければ超伝導バルク型モーターの電気推進航空機への応用は難しい。

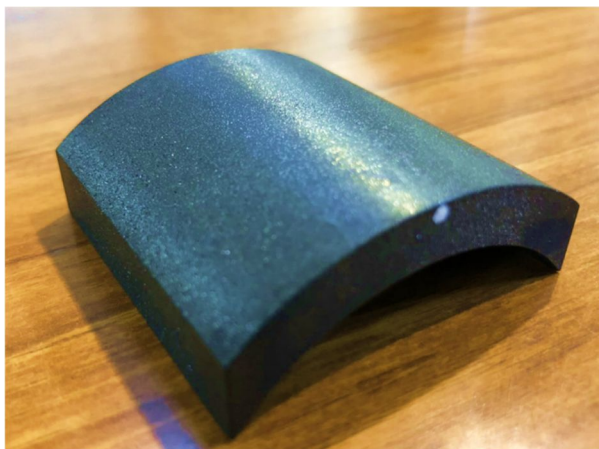


図1 超伝導バルク

## 2. 研究の目的

本研究では、従来の永久磁石より強磁場が着磁可能な超伝導バルクを界磁子とする軽量・高効率の全超伝導同期モーターの実現に向けて、「超伝導バルクの磁化減衰」という課題に取り組む。すなわち、本研究の目的は、モーター運転時における超伝導バルクの磁化減衰をゼロ、もしくは実用上問題のないほど微小に抑制する具体的な対策案を提案し、その磁化減衰への影響を机上検討・解析・実験から明らかにし、その有用性を示すことである。

## 3. 研究の方法

超伝導バルクの磁化減衰の要因は以下の通りである。バルク内に流れる永久電流(その値は臨界電流値と一致する)により磁束を捕捉することで超伝導バルクは磁化する。次に変動磁場に晒されることで超伝導特有の交流損失(熱)が発生する。さらに発生した熱により超伝導バルクの温度が上昇し、臨界電流つまり永久電流が低下し、磁化が減衰する。それ以外にも vortex-shaking 効果と呼ばれるメカニズムによっても磁化が減衰することが分かっている。

モーター運転時における磁化減衰の根本的な要因は、電機子巻線から発生する回転磁場の不均一性による高調波成分の影響と考えられる。銅線を用いた従来のモーターにおいても、電機子による回転磁界の高調波成分は振動(トルクリップル)などの要因となるため、電機子巻き線は分布巻き構造を採用している。しかし、セラミックである超伝導層を有する超伝導線材では、銅線のような複雑な形状の分布巻きは難しく、これまでの研究では単純なレーストラック型の集中巻きコイルとなっていた。そこで本研究では、脆弱な超伝導線材でも可能な分布巻き、またはそ

れに準ずる効果を発揮する巻き線構造を机上検討により考案し、巻き線機を使い実際に巻き線を実施し、その製作性を確認する。また、有限要素法を使った電磁界数値解析により、その効果および有用性を評価する。さらに運転時における超伝導バルク界磁子への変動磁場を抑制するために、超伝導電磁シールドを提案する。超伝導シールドの電流密度は $\sim 10^6$  A/cm<sup>2</sup>と銅に比べて4桁程度高いため、少量の巻き線でも変動磁場抑制効果が高いと考えられる。机上検討により超伝導シールドの形状等を検討し、実際に試作しその製作性を確認する。また電磁界解析により超伝導シールドの変動磁場抑制効果を評価する。超伝導バルクはセラミックなので熱伝導率が65 Kにおいて2~2.5 W/K/mと金属に比較して2桁程度低い。そのためバルク体内で発生した交流損失による熱の放熱が間に合わず、温度上昇を引き起こす。一方、超伝導線材はハステロイ金属層が全体の5-8割を占め、熱伝導率が高い。そこで、超伝導バルクの代わりに積層型超伝導線材で疑似超伝導バルク界磁子を検討する。

電磁界解析には主に数値計算汎用ソフトウェアのJMAG-Designerを使用し、2次元および3次元解析を行う。電機子コイルの巻き枠等を3D-CADにより設計し、3Dプリンタおよび切削加工によりGFRP等で製作する。実験においては、ホール素子磁気センサーやロゴスキーコイル等の測定機器および大容量バイポーラ電源を使用する。

#### 4. 研究成果

従来のレーストラック型超伝導コイルと比較して、新しく台形型超伝導コイルを考案し、その有用性を机上検討および電磁解析より明らかにした。具体的には、レーストラック型コイルと比較して、台形型コイルは起磁力分布が正弦波分布に近づくことを見出し、さらに発生する磁場分布が高調波の少ない正弦波分布に近いことを確認した。所有する巻き線機を使い、台形型コイルを超伝導線材で巻き線した。巻き線した台形型コイルの劣化の有無を調べるために、液体窒素中において通電試験を実施し、四端子法により電流・電圧特性を測定した。巻き線時にスペーサーを導入する等の工夫を行うことで、巻き線による劣化、つまり臨界電流(ゼロ抵抗で流すことができる最大の電流値)の低下が発生しない巻き線手法を確立した。これ以外にも大きさの異なる超伝導コイルを複数配置することにより分布巻きに準ずる効果が得られることを見出し、またその形状のコイルを巻き線し、製作性を確認した。また分布巻きにも挑戦し、試作によるその製作性の確認を行った。それらの新規コイル構造の有用性を机上検討および電磁解析より定量的に明らかにした。このような新しく開発した電機子コイルは、超伝導バルク型モーターの磁化減衰の抑制のみならず、様々な超伝導モーターの特性の向上を可能にする。例えば、台形型超伝導コイルはレーストラック型コイルと比較して、コイル軸方向直線部が隣り合うコイルと交差することによりコイルピッチが拡大する。それにより巻き線係数向上が見込まれ、同期モーターの出力が向上することを見出した。また、超伝導誘導モーターにおいても、台形型超伝導コイルを採用することで大幅の特性向上が見込まれることが電磁解析よりわかった。このように新しく考案した超伝導電機子コイルの成果は超伝導回転機の研究分野に広く裨益する。

市販の希土類系高温超伝導線材を使い、超伝導電磁シールドを試作した。超伝導線材同士をはんだ等で低抵抗に貼り合わせ、その作製手法を検討した。また、幅の広い超伝導線材を積層し、疑似超伝導バルク界磁子を試作し、液体窒素中において着磁試験を実施し、その着磁特性を確認した。モーターの実負荷環境で試験するための実負荷試験機の組み立ておよび試運転を実施した。今後、本研究で開発した上記の要素技術を超伝導モーターへ組み込み、実負荷試験機を使った実証試験を実施する予定である。本研究の成果は、軽量・高出力密度の信頼性の高い超伝導モーターの開発に寄与し、それらを活用した電気推進飛行体を達成する。それら電気推進飛行体は人・モノの移動に伴うCO<sub>2</sub>排出を削減し、人・モノの快適な移動を可能にし、地球環境に優しく豊かな社会、持続可能な社会の実現に貢献する。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Yuki Omanyuda, Shun Miura, Masataka Iwakuma	4. 巻 31
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 Sasa Hiromasa, Iwakuma Masataka, Yoshida Koichi, Sato Seiki, Sasayama Teruyoshi, Yoshida Takashi, Yamamoto Kaoru, Miura Shun, Kawagoe Akifumi, Izumi Teruo, 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 Sasa Hiromasa, Miura Shun, Iwakuma Masataka, Izumi Teruo, Machi Takato, Ibi Akira	4. 巻 580
2. 論文標題 Estimation Method for AC Loss of Perpendicularly Stacked REBa2Cu3O 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 ~ 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 Okade Yuta, Miyazaki Hiroshi, Sasa Hiromasa, Yoshida Koichi, Miura Shun, Sasayama Teruyoshi, Yoshida Takashi, Kawagoe Akifumi, Iwakuma Masataka	4. 巻 32
2. 論文標題 REBCO Trapezoidal Armature Windings for Superconducting Induction Motors	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 5201706
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TASC.2022.3160146	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 Sasa Hiromasa, Miura Shun, Miyazaki Hiroshi, Sasayama Teruyoshi, Yoshida Takashi, Yamamoto Kaoru, Iwakuma Masataka, Hase Yoshiji, Sasamori Yuichiro, Honda Hirokazu, Konno Msayuki, Izumi Teruo	4. 巻 -
2. 論文標題 Thermal-Electromagnetic Coupled Analysis Considering AC Losses in REBCO Windings at 65 K of 10 MW Fully-Superconducting Synchronous Generators for Electric Aircraft	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TASC.2022.3160660	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 Omanyuda Yuki, Sasa Hiromasa, Miyazaki Hiroshi, Miura Shun, Iwakuma Masataka	4. 巻 32
2. 論文標題 Experimental Evaluation of Current Distribution in Three-Strand Transposed Parallel Conductors Composed of REBCO Superconducting Tapes	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 6601105
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TASC.2022.3154338	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 Shun Miura , Asato Kobun , Yohei Masuda, Kazuki Nakamura, Hiroshi Miyazaki , Akifumi Kawagoe , Hiromasa Sasa , Koichi Yoshida , Seiki Sato, and Masataka Iwakuma	4. 巻 33
2. 論文標題 Current Sharing Among Transposed Three-Parallel REBa2Cu3Oy Tapes in Single-Phase Armature Coils	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY	6. 最初と最後の頁 5200306
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TASC.2023.3241824	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 Asato Kobun , Yohei Masuda, Shun Miura , Hiroshi Miyazaki , Koichi Yoshida, Seiki Sato, Hiromasa Sasa , and Masataka Iwakuma	4. 巻 33
2. 論文標題 Basic Concept for Uniform Current Distribution in Parallel Conductors by Introducing a Small Number of Transpositions in REBCO Armature Coils	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY	6. 最初と最後の頁 5200406
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TASC.2023.3242621	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 Atsushi Takashima , Yuki Onamyuda , Asato Kobun , Hiroshi Miyazaki , Akifumi Kawagoe , Shun Miura, Koichi Yoshida , Seiki Sato, Hiromasa Sasa , and Masataka Iwakuma	4. 巻 33
2. 論文標題 Current Distribution of Armature Coils Combining Two Different Sizes of REBCO Racetrack Double Pancakes	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY	6. 最初と最後の頁 4600905
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TASC.2023.3241822	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. Miura, A. Kobun, Y. Masuda, H. Miyazaki, A. Kawagoe, H. Sasa, K. Yoshida, S. Sato, M. Iwakuma	4. 巻 -
2. 論文標題 Development and assessment of simplified analytical method for current distribution among REBa2Cu3Oy parallel conductors in armature windings for fully superconducting rotating machines	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Superconductor Science and Technology	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6668/acca4f	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13件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 10件)

1. 発表者名 Yuta Okade, Hiroshi Miyazaki, Hiromasa Sasa, Koichi Yoshida, Shun Miura, Teruyoshi Sasayama, Takashi Yoshida, Akifumi Kawagoe, Masataka Iwakuma
2. 発表標題 Study of REBCO Trapezoidal Armature Windings for Superconducting Induction Motor
3. 学会等名 27th International Conference on Magnet Technology (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kaito Noda, Hiromasa Sasa, Hiroshi Miyazaki, Shun Miura, Takashi Yoshida, Teruyoshi Sasayama, Masataka Iwakuma, Akifumi Kawagoe, Teruo Izumi, Masayuki Konno, Yuichiro Sasamori, Hirokazu Honda, Yoshiji Hase, Masao Shutoh
2. 発表標題 Estimation of AC loss for a high-power density 10 MW REBCO superconducting synchronous generator cooled by sub-cooled liquid nitrogen
3. 学会等名 The 34th International Symposium on Superconductivity (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名	Masashi Sumida, Masataka Iwakuma, Hiromasa Sasa, Shun Miura, Hiroshi Miyazaki, Masayuki Konno, Teruo IZUMI
2. 発表標題	Design Study of 3 -10 MVA-6.9/1.0 kV REBCO Superconducting Transformers with Lightweight and Current-Limiting Function for an E-aircraft Propulsion System
3. 学会等名	27th International Conference on Magnet Technology (国際学会)
4. 発表年	2021年

1. 発表者名	Yuki Omanyuda, Hiromasa Sasa, Hiroshi Miyazaki, Shun Miura, Masataka Iwakuma
2. 発表標題	Experimental Evaluation of Current Distribution in Three-Strand Transposed Parallel Conductors Composed of REBCO Superconducting Tapes
3. 学会等名	27th International Conference on Magnet Technology (国際学会)
4. 発表年	2021年

1. 発表者名	Kazane Matsumoto, Hiromasa Sasa, Shun Miura, Keishi Matsumoto, Hiroshi Miyazaki, Takashi Yoshida, Teruyoshi Sasayama, Kaoru Yamamoto, Masataka Iwakuma, Akifumi Kawagoe, Teruo IZUMI, Yuichiro Sasamori, Hirokazu Honda, Masayuki Konno, Yoshiji Hase
2. 発表標題	Numerical Analysis of 2 MW Fully Superconducting Synchronous Motor for Electric Aircraft Considering AC Loss in Field Winding
3. 学会等名	27th International Conference on Magnet Technology (国際学会)
4. 発表年	2021年

1. 発表者名	Hiromasa Sasa, Shun Miura, Hiroshi Miyazaki, Teruyoshi Sasayama, Takashi Yoshida, Kaoru Yamamoto, Masataka Iwakuma, Yoshiji Hase, Yuichiro Sasamori, Hirokazu Honda, Masayuki Konno, Teruo IZUMI
2. 発表標題	Thermal-Electromagnetic Coupled Analysis Considering AC Losses in REBCO Windings at 65 K of 10 MW Fully-Superconducting Synchronous Generators for Electric Aircraft
3. 学会等名	27th International Conference on Magnet Technology (国際学会)
4. 発表年	2021年

1 . 発表者名 Shun Miura, Asato Kobun, Atsushi Takashima, Hiromasa Sasa, Hiroshi Miyazaki, Akifumi Kawagoe, Masataka Iwakuma
2 . 発表標題 Current Distributions of Multi-strand Parallel Conductors Composed of REBa <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>y</sub> Superconducting Tapes in Armature Windings for Fully-superconducting Rotating Machines
3 . 学会等名 Applied Superconductivity Conference 2022 ( 国際学会 )
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 A. Takashima, Y. Onamyuda, A. Kobun, H. Miyazaki, A. Kawagoe, S. Miura, K. Yoshida, S. Sato, H. Sasa, and M. Iwakuma
2 . 発表標題 Current Distribution of Armature Coils Combining Two Different Sizes of REBCO Racetrack Double Pancakes
3 . 学会等名 Applied Superconductivity Conference 2022 ( 国際学会 )
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 A. Kobun, Y. Masuda, S. Miura, H. Miyazaki, K. Yoshida, S. Sato, H. Sasa, M. Iwakuma
2 . 発表標題 A. Kobun, Y. Masuda, S. Miura, H. Miyazaki, K. Yoshida, S. Sato, H. Sasa, M. Iwakuma
3 . 学会等名 Applied Superconductivity Conference 2022 ( 国際学会 )
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 K. Jingami, H. Miyazaki, M. Iwakuma, S. Miura, H. Sasa, W. Akaike, R. Oishi, K. Yoshida
2 . 発表標題 AC loss characteristics of stacked REBCO double pancake coils cooled by liquid nitrogen
3 . 学会等名 Applied Superconductivity Conference 2022 ( 国際学会 )
4 . 発表年 2022年



1. 発表者名 公文 麻人, 増田 陽平, 三浦 峻, 宮崎 寛史, 吉田 幸市, 佐藤 誠樹, 佐々 滉太, 岩熊 成卓
2. 発表標題 転位並列導体で構成した全超伝導回転機の電機子コイルの大電流容量化に関する研究
3. 学会等名 低温工学・超電導学会 九州・西日本支部 2022年度若手セミナー
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 公文 麻人, 増田 陽平, 山崎 亮斗, 岡出 祐汰, 三浦 峻, 宮崎 寛史, 吉田 幸市, 佐藤 誠樹, 佐々 滉太, 岩熊 成卓
2. 発表標題 転位並列導体で構成した全超伝導回転機の電機子コイル向けREBCOレーストラック型ダブルパンケーキコイルにおける均流化コンセプトの実験的評価
3. 学会等名 第104回 低温工学・超電導学会研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山崎 亮斗, 岡出 祐汰, 宮崎 寛史, 吉田 幸市, 佐々 滉太, 三浦 峻, 岩熊 成卓
2. 発表標題 台形コイルを用いた超伝導誘導機の電磁解析
3. 学会等名 第104回 低温工学・超電導学会研究発表会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

九州大学 研究者情報「三浦峻」  
<https://hyoka.ofc.kyushu-u.ac.jp/search/details/K006656/index.html>

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)		
研究協力者	宮崎 寛史  (Miyazaki Hiroshi)		
研究協力者	川越 明史  (Kawagoe Akifumi)		

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