

令和 6 年 6 月 4 日現在

機関番号：17102

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2022～2023

課題番号：22K18811

研究課題名（和文）冷却システムを必要としない超伝導モビリティの実現に向けた蓄冷システムの開発

研究課題名（英文）Development of Cooling Storage System for Superconducting Mobility without On-board Cooling System

研究代表者

東川 甲平（Higashikawa, Kohei）

九州大学・システム情報科学研究所・准教授

研究者番号：40599651

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、冷却システムを必要としない超伝導モビリティの実現に向けた蓄冷システムの開発である。超伝導モータは、従来のモータでは為し得ないほどの出力密度を達成し得るため、大型旅客機の電動化の唯一解とされるほどの期待を受けている。一方、超伝導モータの運用では、超伝導部を低温に保ち続けることが不可欠であり、それにかかる冷却システムの重量は、その成否を左右する重大な課題となっている。そこで本研究では、比熱の高い固体窒素と熱伝達流体の組み合わせた高機能蓄冷材を開発し、超伝導モータへの適用可能性を実証することで、冷却システムの搭載を必要としない夢の超伝導モビリティの実現可能性を提示することに挑戦した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

超伝導機器の開発においては、冷却技術が不可欠であるにもかかわらず、はじめに超伝導機器の諸元が定まり、その上で要求される冷却システムが設計されるため、その結果、トータルシステムとしての実現可能性に疑問が投げかけられることがしばしばある。本研究は、この負のスパイラルを断ち切り、超伝導機器のスタンドアロン運転の可能性を拓く革新的な研究である。具体的には、微量のガスを添加することによって比熱の高い固体窒素の蓄冷性能を余すところなく活用できることを明らかとし、超伝導モビリティの冷却にかかる重量を1/10に低減できることを示し、今後のCO2削減に不可欠となる高効率モビリティの実現の可能性を示した。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this research is to develop a cooling storage system to realize superconducting mobility without the need for an on-board cooling system. Superconductive motors are expected to be the only solution for the electrification of large passenger aircraft because they can achieve a high-power density that cannot be achieved with conventional motors. On the other hand, it is essential to keep the superconducting part at a low temperature in the operation of a superconducting motor, and the weight of the cooling system is a critical issue that determines the success or failure of the motor. In this study, we developed a high-performance cold storage material that combines solid nitrogen with a heat-transfer fluid to demonstrate its applicability to superconducting motors, thereby presenting the feasibility of superconducting mobility that does not require an on-board cooling system.

研究分野：超伝導工学

キーワード：蓄冷システム

1. 研究開始当初の背景

超伝導技術は、電気抵抗がゼロであることによる低損失化と、銅などの非超伝導材料の数百倍にも及ぶ高い電流密度での通電が可能であることによる高出力密度化に代表される特長を有しており、磁気浮上列車はもちろんのこと、その他の様々なモビリティへの適用が期待されている。特に高温超伝導モータの適用例としては、2010年ごろにIHIによる船舶用途の取り組みがあり、2015年ごろまでは住友電工による自動車用途の取り組みがあった。近年では、国際民間航空機関（ICAO）でのCO₂排出量規制の合意により、航空機の電動化が検討されるようになり、その排出の大半を占める大型旅客機の電動化に関しては超伝導モータの適用しか解がなさそうだといいことで、現在の応用超伝導の分野では最も大きな話題となっている。超伝導モータの出力密度が極めて高くなる理由は、超伝導線材に極めて高い電流密度での通電が可能となるために、鉄心を用いなくても高い磁界を発生できることによる。例えば、従来のモータの出力密度が最大でも5 kW/kg程度であるのに比較して、超伝導モータは航空機用途で要求される20 kW/kgを初めて達成できる可能性があるものとして期待されている。実際に、様々な研究グループが超伝導モータの設計を始め、40 kW/kgというような設計結果を出してくるようなグループもある。しかし、信頼のできる複数の研究グループが詳細な設計に入ったところ、電機子における交流損失が甚大で、これを冷却するための冷却システムが膨大となり、冷却システムを含めた出力密度は上記の要求値を達成できない恐れがあることがわかってきた。また、その冷却システムに必要な電力もトータルシステムの効率に影響する。すなわち、超伝導モータ自体には極めて高いポテンシャルがあるにも関わらず、冷却システムとの組み合わせにより、その潜在能力を発揮できない状況にある。

2. 研究の目的

そこで本研究の目的は、冷却システムを必要としない超伝導モビリティの実現に向けた蓄冷システムの開発である。比熱の高い固体窒素と熱伝達流体の組み合わせた高機能蓄冷材を開発し、冷却システムの搭載を必要としない夢の超伝導モビリティの実現可能性を提示することに挑戦する。

3. 研究の方法

航空機用途を考えた場合、超伝導モータに要求される最大出力は離陸時のみであり、このタイミングだけ十分な性能を発揮できるように冷却されていればよい。すなわち、初めに十分に冷却された蓄冷材のみを搭載しておけば、冷凍機などの重くかつ消費電力の大きな冷却システムを機体に搭載しなくてもよくなる可能性がある。具体的には、蓄冷材としては、銅の3倍程度という極めて高い比熱を有する固体窒素を想定し、この弱点を補う熱伝達流体として微量のガスを添加することを計画した。さらに、この蓄冷材については、航空機が補給や整備などで地上にいる時間内に準備できるように、その高速作製法も検討した。

具体的には以下のとおりである。まず、蓄冷システムの鍵となる固体窒素は、作製速度の観点から、液体窒素（77 K）の充填後の真空引きによる蒸発熱による固化（63 K）を採用した。凝固点温度（63 K）の固体窒素をさらに液体ヘリウムとの熱交換によって20 Kまで冷却し、その後外部からの冷却を行わない状態での温度変化を評価することで、蓄冷特性を明らかとした。

4. 研究成果

まず初めの試みとして、試料ステージに液体ヘリウムを流し、同ステージとの熱交換によって固体窒素を冷却する場合、63 K から 20 K に達するまでに 19 時間も要することがわかった。これは固体窒素の低い熱伝導率によるものであり、固体窒素内に大きな温度分布ができることによる。そこで、図 1 に示すような多層のリング状の熱交換器を導入することによって、2 時間程度で固体窒素の冷却が行えることを確認した。

試料ステージに発熱体を設置し、試料ステージと固体窒素中の温度の時間変化をそれぞれ評価したところ、固体窒素の温度はほぼ変化せず、試料ステージの温度だけが上昇する様子が見られた。これも固体窒素の低い熱伝導率によるものである。そこで、固体窒素中に熱伝達流体としてヘリウムガスを導入することで実効的な熱伝導率は飛躍的に向上し、試料ステージと固体窒素中の温度差はほぼ解消した。すなわち、固体窒素の大きな比熱による熱容量を余すところなく利用できる蓄冷システムの可能性を示した。

これにより、MW 級のモータを想定した場合に見込まれる kW 級の発熱を本蓄冷システムによって 8 時間以上保冷できることが明らかとなった。また、同様の冷却のために冷却システムを搭載する場合には 1000 kg 程度の質量の増加となるが、本蓄冷システムを適用すれば、固体窒素が固体状態を保つ制約の場合には 480 kg、固体窒素の融解まで許容する場合にはわずか 100 kg の増加にとどまることを明らかとし、飛躍的な軽量化が可能となることを示した。このように、航空機の電動化をはじめとする超伝導モビリティの可能性を切り拓く貴重な成果が得られた。

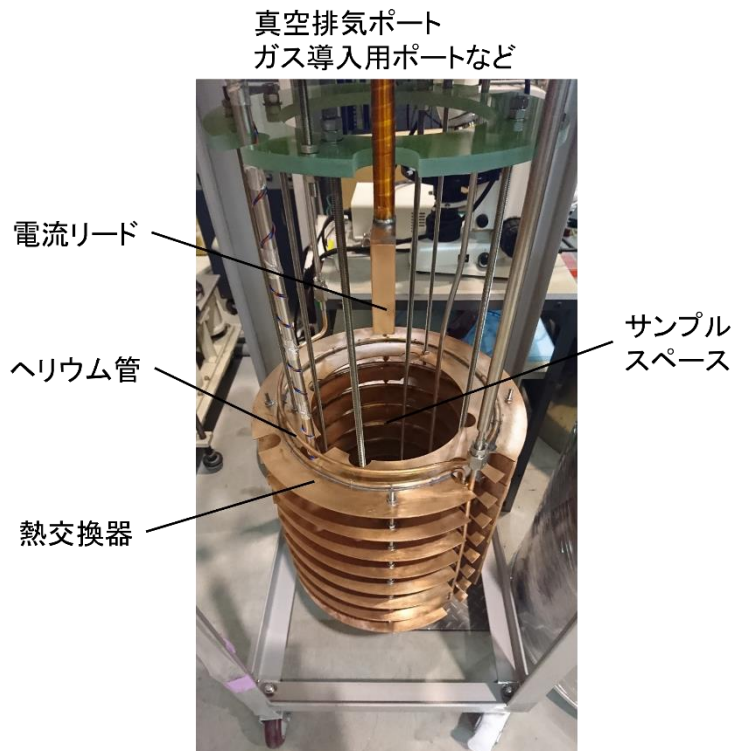


図 1 固体窒素蓄冷媒の作製・評価装置の写真

(真空引き時の蒸発熱による固体窒素の作製

またはヘリウムなどの低温流体との熱交換による固体窒素の作製が可能であり

熱伝達流体の混合が可能となる装置を製作)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 東川 甲平
2. 発表標題 [Invited] 超伝導電力機器のHILSに関する活用事例
3. 学会等名 RTDS日本ユーザグループミーティング（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 東川 甲平
2. 発表標題 [Invited] 超伝導電力システム応用に関する研究紹介
3. 学会等名 低温工学・超電導学会 第9回若手の会勉強会（招待講演）
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 東川 甲平, 木須 隆暢
2. 発表標題 高温超伝導線材とその電力システム応用に関するシミュレーション
3. 学会等名 低温工学・超電導学会 令和4年度東北・北海道支部/第2回材料研究会 合同研究会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 平尾 上総, 東川 甲平, 木須 隆暢
2. 発表標題 高温超伝導パンケーキコイル冷却時の熱ひずみ特性解析
3. 学会等名 低温工学・超電導学会 2022年度 九州・西日本支部 若手セミナー・支部研究成果発表会
4. 発表年 2022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
--	---------------------------	-----------------------	----

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