

令和 4 年 6 月 30 日現在

機関番号：13601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04139

研究課題名(和文) 未利用低質熱源からエネルギー回収を行う熱磁気モータの数値モデル構築

研究課題名(英文) Numerical modeling of a thermomagnetic motor to extract energy from unused low quality heat source

研究代表者

中村 正行 (Nakamura, Masayuki)

信州大学・学術研究院工学系・教授

研究者番号：60207917

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、100℃以下の温廃水から熱エネルギーを回転運動エネルギーに変換できる熱磁気モータを提案した。この装置は、永久磁石の磁力と、温度変化に応じて磁気に変化する感温磁性材料を使用している。最初に、熱磁気モータの新しい構造の数値モデルを提案した。数値モデルを用いた数値解析により、さまざまな環境下での回転挙動を明らかにすることができた。複数の物理現象を組み合わせる有限要素法を数値計算に使用した。次に、トポロジー最適化法により磁気回路の最適形状を求め、温廃水からエネルギーを取り出すために必要な出力を向上させることのできる磁気回路の形状を設計できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

提案した熱磁気モータは、永久磁石の磁気エネルギーと、温度変化によって磁性が変化する感温磁性体の性質を利用し、100℃未満の温排水の有する熱エネルギーを回転運動エネルギーに変換できる装置であり、脱炭素社会に向けて、未利用エネルギーを有効活用できる可能性を有する。温度場、磁場、動力学現象の連成解析が行える有限要素法を用いて、熱磁気モータの数値モデルを構築できたことにより、さまざまな条件下における動作解析ができ、効率を向上させるための設計が可能となった。

研究成果の概要(英文)：In this study, we proposed a thermomagnetic motor that can convert thermal energy into rotational kinetic energy from hot wastewater below 100°C. This device uses the magnetic power of a permanent magnet and a temperature-sensitive magnetic material whose magnetism changes with temperature changes. First, a new structure model for a thermomagnetic motor was proposed. The numerical model can clarify the rotational behavior under various environments by numerical analysis. We used the finite element method for numerical computation, which enables analysis by coupling multiple physical phenomena. Next, we find out the optimum shape of the magnetic circuit by the topology optimization method and design the shape of the magnetic circuit that can improve the output required to extract energy from the hot wastewater.

研究分野：設計工学

キーワード：回転機械 モータ トルク 出力 熱磁気 磁気回路 磁場解析 温度場解析

1. 研究開始当初の背景

(1) 一般に低質熱源からのエネルギー回収は熱力学の法則から効率が低いとされている。これらの熱源は低質ではあるが膨大な量が未利用であり、たとえ低効率であっても長時間の運転を行うことで、有効利用できる量のエネルギー回収が可能であると考えられる。本研究は温泉水や冷却排水程度の温度(40 ~ 65 程度の温度範囲)の超低質熱源を動力とする機械装置を利用する。熱磁気現象を利用して、エネルギー変換装置の動作範囲をこれまで利用されていない低温側の超低質範囲に拡大する。

(2) 構想・設計・試作・実験検証およびシミュレーションによる可視化の開発プロセスに基づき、新規装置開発を実施する設計手法であるモデルベース開発手法が産業界において定着しつつある。モデルベース開発では、複雑な物理現象の精密な数値解析が求められると同時に、実機の動作を支配する有効な設計パラメータの抽出とそのモデル化が鍵となる。実機動作とモデルパラメータの導出を多目的最適化手法により実現することで、熱磁気モータの最適設計を行う。

2. 研究の目的

本研究は、多目的最適化手法などの最適化手法と複数の物理現象の連成解析を用いて熱磁気モータの動作メカニズムを解明する。これにより熱磁気モータの数値モデルを構築することで設計指針を明らかにし、最適設計を行うことを目的としている。

(2) また、多目的最適化手法などの最適化手法と複数の物理現象の連成解析を行うことで、未利用の温度範囲の低質熱源からエネルギー回収を行う装置のメカニズムと装置構成に関する知見を得ることを目的としている。これによりエネルギー回収を行う熱源の温度に応じたエネルギー変換装置の数値モデルが構築でき、回収可能エネルギー量を増加させることができる。

3. 研究の方法

(1) 研究当初は、精度の良い数値解析には熱磁気モータを構成する材料の精度の良い物性値が必要と考え実測を予定していたが、実験計測により取得する物性値にも誤差が含まれるため、物性値は仮定値を用いることとした。また、材料を変更した場合にも連成解析により装置の動作解析を行うことができるため、感温磁性材料、磁気回路の構成要素の熱伝導率などの熱物性値もデータベースにある一般的な値を仮定した。なお、これらの値の誤差を想定して、物性値が変動した場合の解析を行って影響を調べることで、装置の動作条件をさらに詳しく定めることができる。

(2) 本研究ではマルチフィジックス解析ソフトウェアを用いて磁気回路周囲の温度場、磁場の様子をシミュレーションにより可視化し、詳細な駆動メカニズムの解明にむけて、装置構成と駆動メカニズムの関係を明らかにする。動力学解析も連成しておこなうことで、装置の出力も見積もる。さらに、停止状態からの自発駆動が可能であるか、遷移状態を経て定常状態に収束するか、定常状態において、加熱冷却の温度等が変動した場合に、再度、定常状態に収束するかなどの数値実験を行う。

(3) 実機による実験結果から、トルクを増大させるにはロータ周囲に配置した感温磁性材料の温度応答と磁性変化に影響する次の1~4の関係を適切に決定する必要があることがわかっており、初期の実験装置の磁気回路を、電動モータなどで出力を向上させ

る目的のために主流となっている構成に変更する。

1. 永久磁石の配置と磁力の方向
2. 加熱冷却温度と時間
3. 磁気回路と磁性材料の温度依存磁気特性との関係
4. 各部分の熱伝達率や磁性材料の熱伝導率などの熱物性値との関係

熱磁気モータにおける主なトレードオフ関係は、運転温度、ロータ直径に依存する運転回転数、磁場の強さやキュリー温度に依存する磁気回路の性能の3者の間にあると考えられる。多目的最適解を得ることで、熱源および冷却源の温度範囲および容量に応じた最適な規模の装置設計を目指す。

(4) 磁気回路の最適設計により出力の向上を図るため、密度法に基づくトポロジー最適化手法を導入することで最適形状を決定する。

4. 研究成果

(1) 本研究では、複数の物理現象を連成させて解析ができる有限要素法を用いた数値解析により、新規に提案した構造の熱磁気モータに関して、種々の環境下における回転挙動の解明と出力向上が可能な最適構造を見出した。

(2) 一般的にモータなどの電子機器に使われている磁性材料は発熱などによる温度上昇における磁性低下を避ける必要があり、キュリー点温度が常温域より大幅に高い磁性材料が用いられる。これに対して、熱磁気モータで使用する熱源は温排水であり、100を超えることはない。また、熱磁気モータは常温域での温度変化による磁性の変化が大きい磁性材料を用いる必要がある。感温磁性材料には Gd やフェライト系材料などがあるが、本研究では入手しやすいことと機械的性質や加工性などを検討した結果、フェライト系材料の一つである整磁合金を用いることとした。

(3) 感温磁性体は温度変化によって磁性が変化する性質を有している。感温磁性体で構成されるロータは永久磁石から発生する磁界内において冷却されると比透磁率が高くなる。次に、加熱されると比透磁率が低くなる。これにより、永久磁石が発生する磁界内において比透磁率が高いエリアと低いエリアが存在し、形状による磁気突極性ではなく磁気物性値による磁気突極性を有することができ、トルクを発生させることができる。図1に新規に提案した熱磁気モータの構造を湿す。冷却加熱と比透磁率分布が連続して行えるような構造であり、電動モータの構造を参考にしてはいるが、形状による磁気突極性ではなく磁気物性値による磁気突極性を有する構造となっている。この形状モデルに対して、地場と温度場、動力学現象が連成する数値モデルを構築した。

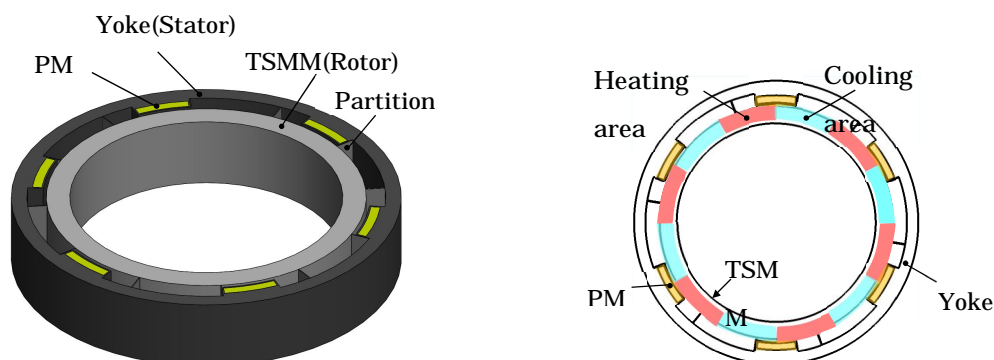


図1 新規に提案した熱磁気モータの数値モデル

ステータ (Stator) に鋼材、ロータ (Rotor) に感温磁性材料 (TSMM、整磁合金) を用い、永久磁石 (PM) を組み込んで磁気突極性を有する構造

(4) 新規に提案した数値モデルについて、回転速度の変化による出力変動の様子を確認するため、複数の温度条件において回転速度を変化させ出力を求めた。その結果、各温度条件に対して、最高出力を発生する回転速度が異なることがわかった。このことから冷却加熱の温度に対して、最高出力が決まることがわかった。

(5) 次に、ロータが停止状態から定常回転に至る遷移挙動を解析するために動力学解析を行った。これにより、複数の温度環境下におけるロータの回転挙動を明らかにすることができ、持続的な出力の発生を確認できた。また、駆動途中に温度変化が生じた場合においても、回転動作が持続することを確認し、始動時に外部機器からの初期動力を必要とせず、自発駆動することがわかった。

(6) 磁場解析の結果から、提案した熱磁気モータの構造は、永久磁石から発生する磁束の多くが回転子に届かず短絡してしまうヨーク形状であることがわかった。短絡を減少させ出力向上を図るため、トポロジー最適化を適用して出力を最大化するヨーク形状を求めた。その結果、永久磁石を有する一般的な PM モータで用いられるフラックスバリアが形成され、短絡の減少が確認できた。また、得られた構造について複数の温度環境下において出力の向上が確認できた。図2に40%の体積制約と60%の体積制約を課した条件でのトポロジー最適化結果の例を示す。左図に最適構造と右図に磁束密度分布図を示す。この他のいくつかの体積制約条件に対して永久磁石付近にフラックスバリアが共通して生成されており、磁束が整流されていることが確認できる。このことにより、熱磁気モータにおいてもフラックスバリアを付与する設計は有効である。さまざまな駆動温度範囲においてトポロジー最適化により、平均して約30%出力が向上することがわかった。

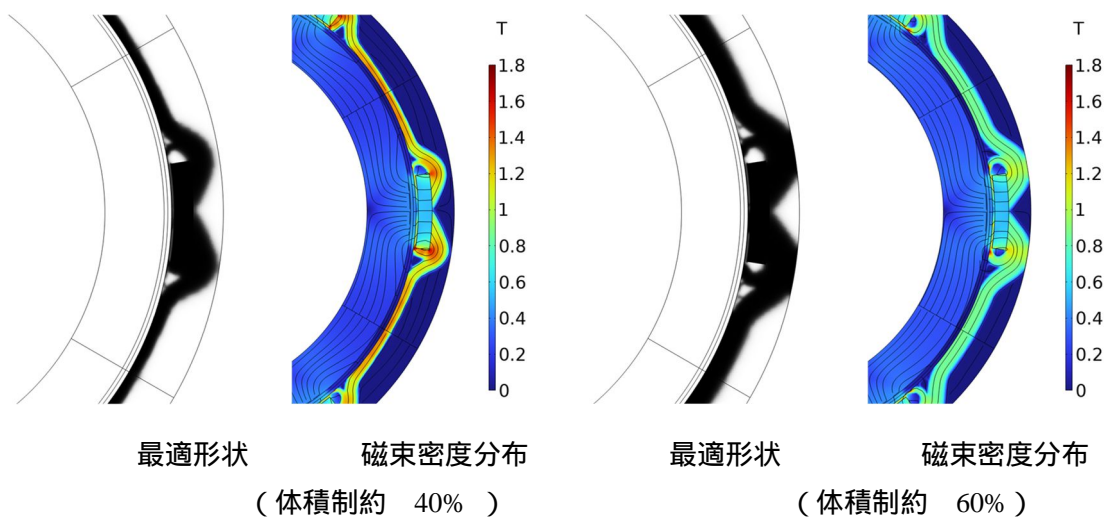


図2 トポロジー最適化結果 (1/6 部分)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 田中壮汰, 中村正行	4. 巻 30
2. 論文標題 温度場と磁場の連成に基づく熱磁気モータの回転動作解析	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本AEM学会誌	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) 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4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 田中壮汰, 中村正行, 長瀬功汰
2. 発表標題 温度場と磁場の連成解析に基づく積層型熱磁気モータの検討
3. 学会等名 日本機械学会設計工学システム部門講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田中壮汰, 中村正行, 長瀬功汰
2. 発表標題 温度場と磁場の連成解析に基づく熱磁気モータの出力特性の検討
3. 学会等名 電磁力関連のダイナミクスシンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 長瀬功汰, 田中壮汰, 足立涼, 中村正行
2. 発表標題 熱磁気モータヨーク形状のトポロジー最適化
3. 学会等名 電磁力関連のダイナミクスシンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田中壮汰, 中村正行
2. 発表標題 温度場と磁場の連成に基づく熱磁気モータの回転動作解析
3. 学会等名 MAGDAコンファレンス
4. 発表年 2021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
---------	---------