

タケイ ケンタ

氏 名 武井 賢太

学位の種類 博士（工学）

学位記番号 博第1243号

学位授与の日付 2022年3月31日

学位授与の条件 学位規則第4条第1項該当 課程博士

学位論文題目 高温環境で使用する小型高推力なスタックブル電磁アクチュエータ
の設計と特性解析
(Design and Characteristics Analysis of Small-Sized and High
Thrust Stackable Electromagnetic Actuator on High
Temperature Field)

論文審査委員 主査 教授 竹下 隆晴
教授 水野 幸男
教授 森田 良文
准教授 北川 亘
教授 山口 忠
(岐阜大学)

論文内容の要旨

本研究では160度程度の高温環境での使用を想定した電磁アクチュエータの研究開発に着手する。本アクチュエータはホットメルト接着剤の塗布アプリケーションへの適用を目的としている。ホットメルト塗布アプリケーションは従来、空圧式アクチュエータが主流であるが、圧縮空気を利用した制御は応答性が低く、シリンダパッキンの摩耗等による定期的なメンテナンスを要することといった問題がある。対して、電磁アクチュエータに代替することで製造ライン作業の高速化及び省メンテナンスが期待される。またエアコンプレッサや配管などの大型設備が不要となるため、設備の小型化及び騒音の低減も可能である。しかしながら、高温環境での連続動作には大きな課題があり、現在までもホットメルト塗布アプリケーション用の電磁アクチュエータが提供されているが連続動作ができないものや永久磁石を利用せず電磁石のみで動作させるものとなっている。高温環境で使用する永久磁石は耐熱性を持つサマリウムコバルト磁石が適しているが、非常に高価であることや脆く欠けやすいことから不適である。電磁アクチュエータの駆動速度は出力に大きく依存することやホットメルト塗布アプリケーションには接着量の高精度な調整や複雑な塗布手法を可能とする高出力が求められることから、本研究では希土類永久磁石の中でも最も磁力の強いネオジム磁石を使用した小型高推力な電磁アクチュエータを提案し、三次元有限要素法による

磁界解析と高温環境を考慮した熱流体解析の連成解析を実施することで設計を行う。

提案する電磁アクチュエータの主な特徴は、①三次元磁路の提案による小型化と磁気的な吸引反発に基づいた動作による高推力化の実現、②1ユニットとなる基本モデルを積み重ねることで構成されるスタッカブル電磁アクチュエータの多段構造による諸特性の向上、③可動子軽量化を目的とした形状最適化による応答性向上の3点である。①に関して、コア材料には軟磁性材複合材料を用いることで複雑なモデル形状と三次元磁路を形成し、永久磁石と電磁石の磁気的な吸引反発により動作させることで、電磁アクチュエータの小型高推力を実現している。②に関して、1ユニットである基本モデルは2つの口の字型の固定子がチェーン状に組み合わさった構造をしているためユニットを積み重ねることが可能であり、基本モデルを積み重ねた多段構造のスタッカブル電磁アクチュエータは推力と応答性を向上させることができる。特に、縦方向に積み重ねた直列型モデルは可動子コアで高い磁束密度を扱うことで、積み重ねた基本モデル数以上の推力を出力することができる。また、基本モデルを積み重ねることで多様な諸特性を持つ電磁アクチュエータを構成できるため、ホットメルト塗布アプリケーションだけでなくインジェクターへの適用も期待できる。③に関して、新たな可動子形状の提案として、可動子に組み込まれた永久磁石を二分割し、樹脂を挟み込んだスペーサーモデルを提案している。永久磁石体積を減少させたことで、可動子の軽量化、さらにはモデル全体の磁束密度を低減できるためさらなる小型が可能となる。さらに可動子の軽量化が応答性の向上に繋がることから、可動子コアの形状最適化を行っている。その他、駆動時の損失を熱源とした温度評価と永久磁石の減磁及び電磁アクチュエータの性能評価、冷却用エア注入時の温度上昇抑制効果を確認している。

第1章では、本研究の背景と目的を述べた後、本論文の概要について説明する。

第2章では、本論文で実施する電磁界解析と熱解析の連成解析手法について説明する。

第3章では、縦方向、横方向に積み重ねることができるスタッカブル電磁アクチュエータの1ユニットである基本モデルを提案する。また、三次元有限要素法による磁界解析を実施し、基本モデルの諸特性を検討する。

第4章では、基本モデルがチェーン構造であることを活用し、基本モデルを縦方向、横方向に積み重ねた直列型モデルと並列型モデルの構造を説明する。また、各モデルについて磁界解析を実施し、諸特性を検討する。

第5章では、応答性向上を目的として、可動子軽量化を実現したスペーサーモデルを提案し、諸特性を検討する。さらに、スペーサーモデル構造を直列型モデルに適用し、応答性の向上を確認する。

第6章では、磁界・熱流体解析の連成解析により、電磁アクチュエータ駆動時の発熱を確認し、空冷システムの必要性を検討する。また、空冷時の諸特性を検討する。

第7章では、本論文で得られた成果と今後の課題について述べる。

論文審査結果の要旨

ホットメルト用塗布機器では、空圧式アクチュエータやピエゾアクチュエータが一般的に用いられている。空圧式アクチュエータは構造が単純で安定した推力が得られる特徴を有している。しかしながら、即応性が低く、エア設備の設置、フィルタ類の交換等の定期メンテナンスといった問題がある。ピエゾアクチュエータは電圧により変位するピエゾ素子を利用するため、高い即応性を持ち、安定して高推力を発生できる。しかしながら、ノズル先端と対象にギャップを設けて液状のホットメルトを塗布する仕組みのため、さまざまな対象に対して精度の良いギャップ制御に課題がある。また、ピエゾ素子は変位量が非常に小さく塗布手法の選択肢を狭める要因となっている。

本研究では、ホットメルト用塗布機器に用いる小型、高効率な電磁アクチュエータを開発する。電磁アクチュエータは、電源とインバータで駆動でき、システム全体を小型化できる。電磁アクチュエータは、磁氣的吸引を利用した高い即応性を持ち、ノズルと対象を接触させてホットメルトを駆動できるので、対象物によらず安定な塗布も可能である。

第1章では、本研究の背景と目的、本論文の概要について説明する

第2章では、電磁界数値解析において三次元有限要素法の基となる電磁場の基礎方程式を導出し、電磁機器への適用法について説明する。また、伝熱解析との連成解析手法について説明する。

第3章では、小型、高効率スタッカブル電磁アクチュエータの基本モデル構造を提案する。基本モデルについて三次元有限要素法を用いた磁界解析により推力および応答性を確認する。矩形波電流通電時の推力波形、応答波形について述べる。

第4章では、基本モデルのチェーン構造を利用して基本モデルを縦方向、横方向に積み重ねた直列型モデルと並列型モデルの構造について述べる。また、直列型モデルと並列型モデルについて磁界解析により諸特性を確認する。

第5章では、可動子を軽量化したスペーサーモデルを提案し、可動子形状を最適化することで電磁アクチュエータの応答性の向上を確認する。続いて、スペーサーモデル構造を直列型モデルに適用し、応答性の向上を確認する。

第6章では、磁界・熱流体連成解析により高温環境の考慮および電磁アクチュエータ駆動時の損失を熱源とした熱解析を行い、空冷システムの必要性について述べる。さらには空冷による冷却効果を確認する。また空冷システムを導入することで、電磁アクチュエータが高温環境においても要求性能を満足することを確認する。

第7章では、本論文で得られた成果、今後の課題、今後の展望について述べる。

武井 賢太 氏の博士論文で論じられている上記研究の成果は、学術論文4編（全て審査有り）および国際会議論文3編（審査有り）に公表されている。これらの学術的な価値から、博士論文として十分な内容と判断され、博士（工学）の学位に適格であると認める。