

トポロジー最適化を用いた モータコア設計手法の開発と実用化

Development and Practical Application of Motor Core Design Method Using Topology Optimization

真田 拓弥^{*1} 佐々木 智則^{*1} 岡部 大輔^{*1}
Takuya Sanada Tomonori Sasaki Daisuke Okabe

*1 先行開発部

要旨

環境規制強化により電動化が加速するなか、モータの高性能化が重要課題となっている。当社ではモータ性能を向上させるためにトポロジー最適化を用いたモータコア設計手法を開発した。本手法は、設計領域内の材料分布を自由に变化させて解を探索することにより、広い設計空間から最適形状を導出できるとともに、製造上の制約を考慮した形状生成を実現する。本手法をコンプレッサやフォークリフト用モータに適用し、ミーゼス応力やトルク脈動の低減を確認し、実用性を実証した。

キーワード：トポロジー最適化、モータコア設計、最適設計、連続最適化

Abstract

With the acceleration of electrification due to strengthening environmental regulations, enhancing motor performance has become an important issue. We have developed a motor core design method using topology optimization to improve motor performance. This method can derive optimal shapes from a wide design space by freely changing the material distribution within the design domain, as well as realize shape generation considering manufacturing constraints. When applied to motors for compressors and forklifts, reductions in von Mises stress and torque ripple were confirmed, demonstrating the practical applicability of this method.

Keywords: Topology Optimization, Motor Core Design, Optimal Design, Continuous Optimization

1 はじめに

環境規制強化により自動車をはじめ多くの分野で電動化が加速し、コンプレッサやフォークリフトの電動システム市場の成長が期待される。この成長市場で優位性を確保するには、電動システムの中核であるモータの高性能化が不可欠である。図1のコンプレッサ用モータはステータとロータで構成される。モータコアの形状は出力特性や効率に大きく影響するため、モータの高性能化にはモータコア設計の最適化が重要である。

設計手法として計算科学に基づく最適化技術があり、パラメータ最適化とトポロジー最適化に大別される。パラメータ最適化は設計者が事前に設定した変数とその範囲内で解を探索するため、結果がその設定に大きく依存する。一方、トポロジー最適化は設計領域内で材料分布を自由に变化させながら最適解を探索する。そのため、より広い設計空間から要求性能を満たす形状を生成できる。

当社はこのトポロジー最適化をモータコア設計に適用し、性能向上を実現した。本稿では、当該技

術の概要と実際に適用した成果を報告する。



図1 コンプレッサ用モータ概要
Fig.1 Overview of Motor for Compressor

2 トポロジー最適化

本章では、トポロジー最適化の基本的なアルゴリズムと、モータコア設計適用における特長について述べる。

トポロジー最適化の処理フローは図2の通りである。入力情報として、設計領域、解析条件、制約条件、目的関数を設定する。その後、形状生成手法と解探索手法を組み合わせ、設計領域の最適形状を探索する。生成された形状はCAE (Computer Aided Engineering) による特性評価が実施さ

れ、その結果を踏まえ探索方向を決定する。形状生成、特性評価を反復し、探索終了時点で最適解候補の形状を出力する。

また、トポロジー最適化のモータコア設計適用における特長は以下の通りである。

- 任意の形状を探索できるため、フラックスバリアのような形状自由度の高い複雑構造との相性が良い。
- モータコアは2次元設計のため、トポロジー最適化で複雑な形状が生成されても、従来同様に電磁鋼板の打ち抜き・積層で製造可能である。



図2 トポロジー最適化の処理フロー
Fig.2 Process Flow of Topology Optimization

3 モータコア設計への適用

3.1 形状生成手法

トポロジー最適化の代表的な形状生成手法に on/off法がある。この手法は、設計領域を小さな領域(要素)に分割し、各要素を「鉄が存在する状態(on)」または「空気の状態(off)」として材料分布を決定し、形状を生成する(図3)。

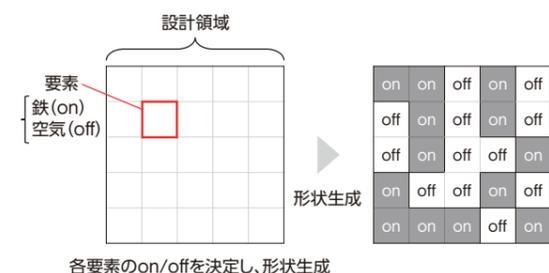


図3 on/off法の概要
Fig.3 Overview of on/off Method

モータコア設計分野では、on/off法の1つとしてNGnet(Normalized Gaussian Network) on/off法^[1]が広く利用されている。この手法は、設計領域全体に複数のガウス基底関数(正規分布に基づく数学的な関数)を配置し、それらの重ね合わせによって得られる形状関数の符号を基に各要素の材料分布を決定する。形状関数が正の値を持つ

領域に位置する要素には「鉄」を、負の値を持つ領域に位置する要素には「空気」を割り当てる。

NGnet on/off法は、ガウス基底関数が複数の要素にまたがって影響を与えるため、on/off法で問題となっていた極端に細い構造や不自然に複雑な構造を回避し、連続的で滑らかな形状を生成できる。また、要素数分の膨大な離散変数に代わり、少数のガウス基底関数の重み係数のみで形状生成できるため設計変数が削減され、計算負荷を軽減できる。さらに連続的な重み係数により離散最適化問題を連続最適化問題に変換でき、安定した最適化が実現される。これらの利点から、NGnet on/off法をモータコア設計における形状生成手法として採用した。

NGnet on/off法による形状生成は以下の手順で実施される(図4)。

1) 基底関数配置

設計領域全体に複数のガウス基底関数を配置する。

2) 重み係数の適用

各関数に重み係数を積算する(山の高さを変化させる)。

3) 形状関数構築

各関数を重ね合わせることで形状関数を構築する。

4) 材料状態決定

設計領域内の要素の中心位置で形状関数の値を参照し、その値が正なら「鉄(on)」、負なら「空気(off)」として材料の状態を決定し、形状を生成する。

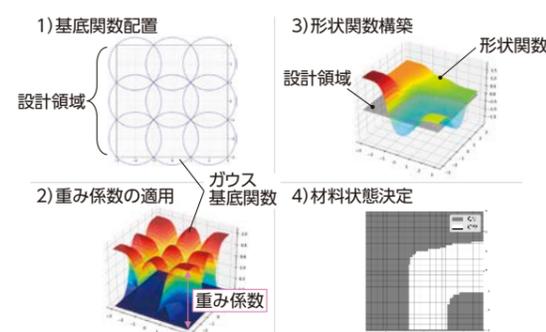


図4 NGnet on/off法の概要
Fig.4 Overview of NGnet on/off Method

3.2 解探索手法

NGnet on/off法によりガウス基底関数の重みを変化させ形状を最適化する場合、一般的な勾配

ベース解探索手法では局所解に陥りやすく、良好な解を見つけることが困難であった。とくに、モータコア設計のような多峰性を持つ複雑な目的関数においては、複数の局所解が存在するなかで良好な解を見つけるために、探索の方向や範囲を状況に応じて変更できる手法が必要である。そこで、解探索手法にはCMA-ES(Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy)を採用した。

CMA-ESは、複数の解候補を評価し、そのなかで性能の良い解を基に、次に探索すべき領域を自動的に絞り込んでいく仕組みを備えている。この仕組みにより、探索を有望な領域に集中させつつ、局所解に陥ることを防ぐことができる。また、複数の解候補の評価値を比較し探索方向を決定するため、微分計算が困難な関数や不連続な関数に対しても適用できる汎用性の高いアルゴリズムである。

CMA-ESによる探索は以下の手順で実施される(図5)。

1) 解候補集団の生成

現時点で有望と考えられる解(初期解はランダム)を中心として、設計解候補の集団を生成する。

2) 解候補の評価とランク付け

生成した候補それぞれについて目的関数や制約条件に対する達成度を評価し、有望な解を見つける。

3) 探索方法の更新(進化)

有望な解の周辺を重点的に探索するように探索の方向や範囲を調整し、次の世代の解候補集団を生成する方法を改善する。

4) 反復と終了判定

1)~3)を繰り返し、反復回数が指定回数に達した時点で探索を終了する。

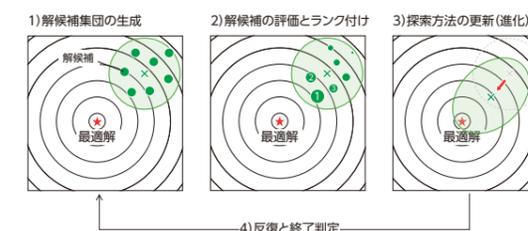


図5 CMA-ESの概要
Fig.5 Overview of CMA-ES

3.3 製造制約への対応

モータコア設計にNGnet on/off法とCMA-ES

を組み合わせることで、効率的に高性能な最適形状を導出できる一方で、実際には製造できない形状となることがある。

モータコアは通常、電磁鋼板を打ち抜き加工して積層することで製造される。打ち抜き加工には加工精度を担保するための寸法制約が存在する。この制約によりトポロジー最適化が生成する高性能形状が製造困難な形状と判定され、設計者が手作業で修正を施す必要が生じる。こうした修正は、最適形状の性能を維持しつつ製造可能な形状に整える作業であるため、試行錯誤が求められる。

そこで、最適化過程そのものに製造制約を組み込む手法を開発した。具体的には、最適化中の形状に対して幾何学的な寸法制約を設定し、最小寸法未満の細い部分や狭い隙間を自動検出して制約違反として処理する。この手法により、製造可能な形状のみが最適化過程で評価対象となるため、打ち抜き加工に適したモータコア形状を生成できる。

寸法制約違反検出は以下の手順で実施される(図6)。

1) 材料境界のグループ핑

材料の境界を形成する辺を基に連続する境界線をグループ分けする。

2) 周囲節点抽出

材料境界上の各節点を中心節点とし、最小寸法未満の距離にあるほかの材料境界上の節点を抽出する。

3) 周囲節点のグループ確認

抽出した節点が中心節点と同じグループ内に属しているかを確認する。

4) 制約違反判定

(1)異なるグループの場合

2つの空間に挟まれる部位は細く、最小寸法違反と判定される。

(2)同じグループの場合

近傍に位置する周囲接点を違反と誤検出することを防ぐため、中心節点から周囲節点までの「経由する辺の数」を計算し、その数が基準値を超える場合のみ最小寸法違反と判定する。

5) 全域処理

材料境界上のすべての節点に1)~4)を実施する。

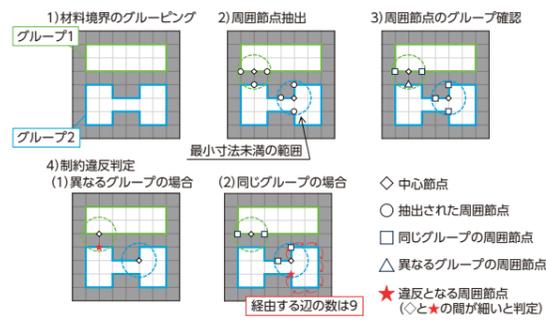


図6 寸法制約違反検出の概要
Fig.6 Overview of Dimension Constraint Violation Detection

開発手法の効果を確認するため、コンプレッサ用モータのロータコア設計に対し、製造制約なしの場合と製造制約ありの場合で最適化を行った。最適化を行った結果、同程度の性能を持つ異なる形状が生成された(図7)。製造制約を組み込んだ場合、細い箇所(図7左赤丸部)が解消され、寸法制約を満たした形状が獲得できることを確認した。

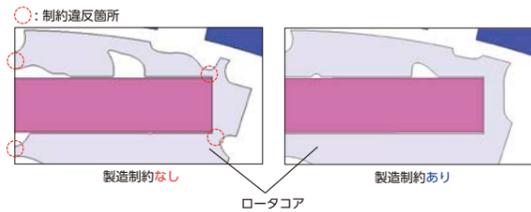


図7 製造制約の有無によるロータコア形状の比較
Fig.7 Comparison of Rotor Core Shapes With and Without Manufacturing Constraints

4 最適化事例

4.1 コンプレッサ用モータ

コンプレッサ用モータを対象としたロータコア最適化事例について述べる。本件は、遠心力によってロータコアに発生するミーゼス応力(材料破壊の可能性を示す指標)低減を目的とし、コンプレッサ事業部 技術部と協業で実施した。目的関数としてミーゼス応力最小化を設定し、制約条件として最小寸法制約とその他特性は元モデルと同等の性能維持を設定した。CMA-ESの世代数(反復回数)を300、個体数(各世代の解候補数)を100とした。設計変数にはガウス基底関数の重み係数256個を使用した。

最適化結果として、図8に示す通りロータコアにある固定穴横の応力緩和穴の形状変化が得られ、ロータコアに発生する最大ミーゼス応力19%

減の改善を実現した。

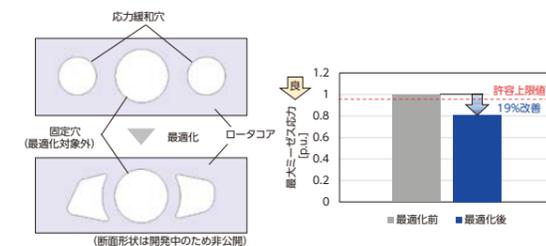


図8 コンプレッサ用モータの最適化結果
Fig.8 Optimization Results of Motor for Compressor

4.2 フォークリフト用モータ

フォークリフト用モータを対象とした最適化事例について述べる。本件は、振動騒音の原因となるトルク脈動(回転中のトルク変動)低減を目的とし、L&Fカンパニー SC開発部と協業で実施した。最適化の目的関数としてトルク脈動最小化を設定し、制約条件として最小寸法制約とその他特性は元モデルと同等の性能維持を設定した。設計領域はトルク脈動に寄与しやすいロータコア外周部を設定し、CMA-ESを用い、世代数を470、個体数を100とした。設計変数としては、ガウス基底関数の重み係数80個を使用した。

最適化の結果、図9に示すようにロータコア外周部に切り欠きを有する形状が得られ、トルク脈動71%減の改善を実現した。切り欠きによる磁気抵抗の調節で磁束が平滑化され、トルク脈動低減に寄与したと考えられる。また、切り欠きの位置や形状だけでなく、その個数についても最適化が適切に実現されている。これは、事前に設定した変数とその範囲内でのみ最適化を行うパラメータ最適化では実現できないトポロジー最適化の利点である。

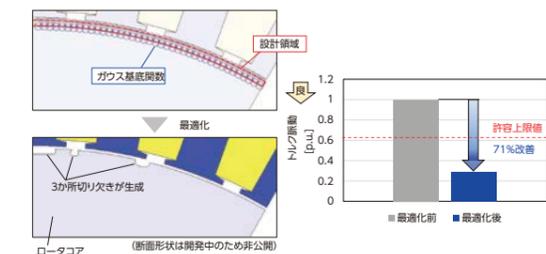


図9 フォークリフト用モータの最適化結果
Fig.9 Optimization Results of Motor for Forklift

5 まとめ

トポロジー最適化をモータコア設計に適用した手法を開発し、ロータコア設計を通じて高性能化を確認した。製造制約を最適化過程に組み込むことにより、製造性を考慮した形状の生成が可能となった。コンプレッサおよびフォークリフト向け事例において、ミーゼス応力やトルク脈動の低減を確認し、本手法の有効性を確認した。今後は磁石を含めたトポロジー最適化やAIを用いた設計手法の確立を進めつつ、ほかの電動システムへの適用範囲拡大を図る。

謝辞

本研究は室蘭工業大学との共同研究として実施いたしました。開発の推進にあたり、多大なるご指導とご協力を頂いた室蘭工業大学の佐藤孝洋先生をはじめ、関係者の皆様に深く感謝申し上げます。

参考文献

[1] T. Sato, K. Watanabe, H. Igarashi, "Multimaterial Topology Optimization of Electric Machines Based on Normalized Gaussian Network", IEEE Trans. Magn., vol. 51, no. 3, Art. No. 7202604, (2015).

著者紹介

