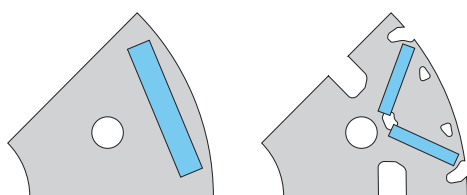


回転機のトポロジー最適化

坂本宏紀 Hiroki Sakamoto
阿部崇志 Takashi Abe

キーワード 有限要素法, トポロジー最適化, 電磁界解析, IPM モーター

概要



(a) 最適化前 (b) 最適化後

最適化のイメージ図

近年、電磁機器の高性能化が求められ、これに対応するため、当社では設計技術の高度化を進めている。今回、回転機の形状設計に着目し、近年注目を集めている形状最適化技術を開発した。この技術は、形状のトポロジーを設計変数として最適化する手法で、形状最適化手法の中では最も自由度が高い。このため、既存概念にとられない設計案が導出される可能性がある。この技術を回転機ロータコアの形状設計に適用した。その結果、特性が向上した形状を得ることができ、開発手法の有効性を確認した。

1 まえがき

環境・省エネ問題を背景に、回転機の高性能化が求められている。その中でも、埋込磁石同期電動機 (IPMSM) は、電気自動車の駆動用モーターなどに幅広く用いられ、高トルク化・高効率化の要求が非常に高い。IPMSMの性能を決定する重要な要素の一つであるロータコア形状は、電磁鋼板・磁石・空隙によって構成され、設計自由度が高い。その設計では技術者の知見や経験、過去の実績によるところが大きく、最適設計は容易ではない。当社では、ロータコア形状の最適設計を実現するために、近年注目を集めている最適化手法であるトポロジー最適化技術を北海道大学大学院と共同で研究してきた。本稿では、その共同研究の成果であるトポロジー最適化技術とその適用事例及び実測結果を紹介する。

2 トポロジー最適化技術⁽¹⁾

トポロジー最適化は、指定した固定設計領域の中での材料分布問題として最適化を行う。形態を設計変数として形状変更するため、空隙配置や数の決定が必要なIPMSMのロータコア設計に適している。

トポロジー最適化は、設計問題を設計領域 D 内に分布する物体領域 Ω と捉え直し、設計領域 D 内における物体領域 Ω と空洞領域 $D \setminus \Omega$ の最適な分布を求める。設計領域 D 内における物体領域 Ω の形状・形態は、以下に示す特性関数 $\chi_{\Omega}(x)$ を用いて表される。

$$\chi_{\Omega}(x) = \begin{cases} 1 & \text{for } x \in \Omega \\ 0 & \text{for } x \in D \setminus \Omega \end{cases} \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 x は D 内の任意点の座標を表し、 $\chi_{\Omega}(x)$ が 1 であればその点に材料が存在し、0 であればその点に材料が存在しないことになる。 $\chi_{\Omega}(x)$ は連続

系で定義されるが、有限要素などで評価する場合は離散系に置き換える必要がある。

電磁界解析分野では、この特性関数の置き換えにON-OFF法⁽²⁾と呼ばれる手法が用いられ、設計領域内の各要素で確率的最適化法を用い最適化を行う。この手法は要素の状態を自由に変化させるため、工学的に実現が困難な形状が創出される点や、設計領域の要素数に依存する膨大な設計変数による最適化計算時間の増加が問題となる。

そこで本最適化手法では、特性関数 $\chi_{\Omega}(x)$ を正規化ガウス関数ネットワーク (NGnet) を用いて近似する⁽³⁾⁽⁴⁾。NGnetは、空間的に滑らかに変化する正規化ガウス関数の重ね合わせによって出力を与える関数近似器の一種である。そのため、工学的に実用的な解を得やすく、設計変数がNGnetのパラメータとなるため、設計変数が少なくなる特徴がある。

$$y(x) = \sum_{i=1}^N w_i b_i(x) \dots\dots\dots(2)$$

$$b_i(x) = \frac{G_i(x)}{\sum_{k=1}^N G_k(x)} \dots\dots\dots(3)$$

$$G_k(x) = \frac{1}{(2\pi)^{D/2} |\Sigma_k|^{1/2}} \exp\left\{-\frac{1}{2} (x-u_k)^T \Sigma_k^{-1} (x-u_k)\right\} \dots\dots\dots(4)$$

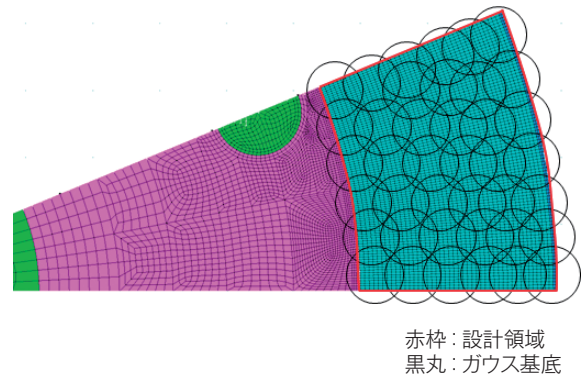
ここでNはガウス関数の数、Dは入力xの次元、 u_k 、 Σ_k はガウス関数kの中心ベクトルと共分散行列であり、 w_i は正規化ガウス関数 $b_i(x)$ の結合重みである。

NGnetの出力 $y(x)$ を用いて要素eによって離散化された特性関数を

$$\chi_{\Omega}(x_e) = \begin{cases} 1 & y(x_e) \geq 0 \\ 0 & y(x_e) < 0 \end{cases} \dots\dots\dots(5)$$

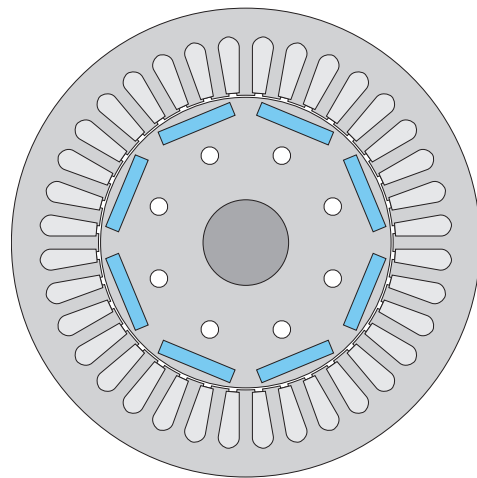
として定義する。ここで x_e は要素eの重心における座標値である。

第1図に設計領域内でのガウス基底の配置を示す。トポロジー最適化では、ガウスの基底を手動で設計領域内に密に配置し、結合重み w_i を変化させることで各NGnetを変化させ、全体の形状を変化させる。このように、結合重み w_i の値を確率的最適化法によって最適化することで、トポロジー最適化を



第1図 設計領域内でのガウス基底の配置

ロータコア22.5度を設計領域とした場合のガウス基底の配置を示す。



第2図 基本モデルの断面形状

最適化の対象とする8極36スロットのIPMSMの断面形状を示す。

行う。今回、空気と電磁鋼板の二種類の材料を説明したが、NGnetを複数用意することで、その重ね合わせによって電磁鋼板・磁石・空隙などの複数材料の最適化にも拡張できる。

3 最適化例

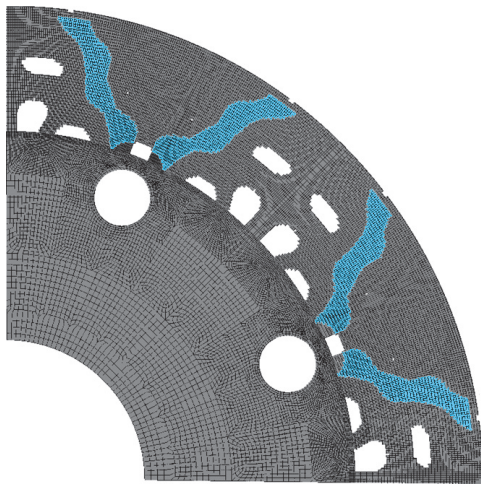
8極36スロットIPMSM (以下、オリジナルモデル) を対象として最適化を実施した。**第2図**に基本モデルの断面形状を、**第1表**に仕様を示す。今回は、磁石体積を削減しながら平均トルクを最大化することを目的に、電磁鋼板・磁石・空隙を対象とした最適化を行った。

第3図に磁石体積削減を目的とした最適化形状

第 1 表 モータ仕様

モータの仕様を示す。

項目	仕様
軸長	50mm
出力	1.5kW
定格回転数	1500min ⁻¹
巻数	31turn



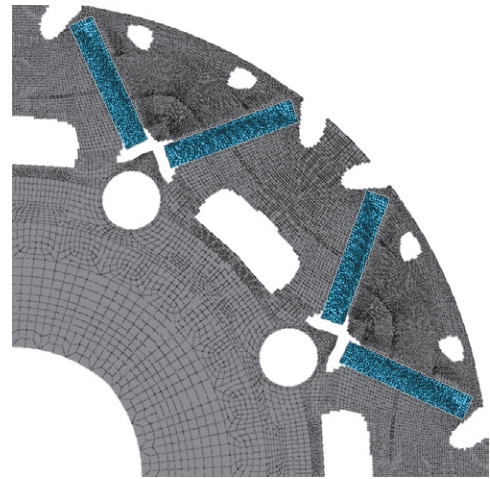
第 3 図 磁石体積削減を目的とした最適化形状

磁石は46%削減し、平均トルクは4%増加となる形状が得られた（オリジナルモデル比）。ただし、このままでは製造できない。

を示す。平均最大トルクは元のモデル以上で、磁石体積はオリジナルモデルから46%削減された形状が得られた。一方で、波打つような磁石の形状では、製造が困難である。そこで、磁石形状を製造しやすく長方形になるように手動で変更した。ただし、このままでは磁気特性の劣化が懸念されるため、磁石を固定して再度最適化した。第 4 図に最終的な最適化モデルを、第 5 図に最適化の結果を示す。

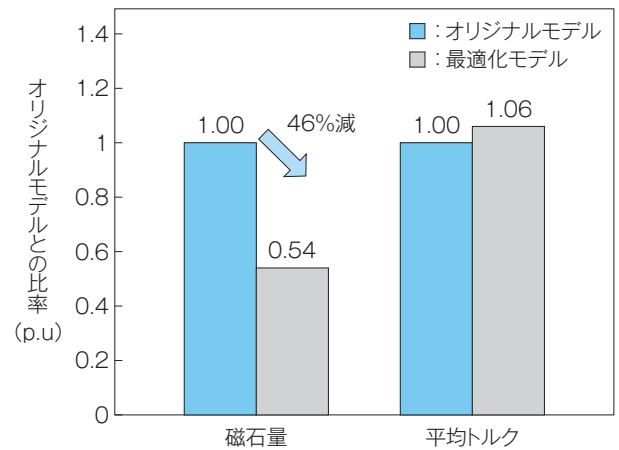
最後に最適化モデルの有効性を確認するために試作し、トルク特性を実測した。第 6 図に試作したロータコアの形状を示す。なお試作形状は、最適化モデルに対して製造上の要求を踏まえて磁気特性に影響を及ぼさない部分に修正を加えている。

第 7 図に平均トルクと電流位相角の関係（実測）を示す。初期モデルから磁石体積を半減したにもかかわらず、初期モデル以上の平均トルク特性が得られた。今回の最適化では、製造上の要求への対応以



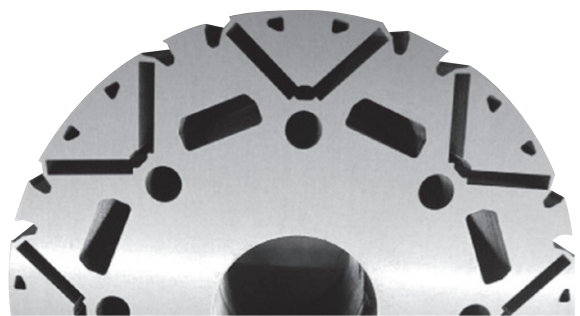
第 4 図 最適化モデル形状

第 3 図の磁石をストレートに手直して得られた形状を示す。



第 5 図 最適化の結果

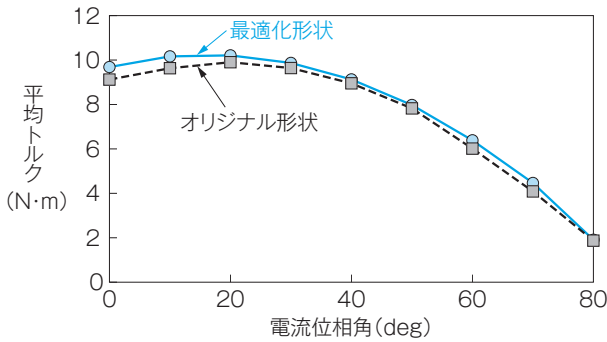
磁石は46%削減し、平均トルクは6%増加となる形状が得られた。



第 6 図 試作したロータコアの形状

磁気特性に影響を及ぼさない部分を簡略化している。

外は人の手はほとんどかかっていない。トポロジー最適化によって、有効な形状を得られることを確認した。



第7図 平均トルクと電流位相角の関係（実測）

実測でも平均トルクが向上していることを確認できる。

4 設計ガイド法

3項のように製造上の要求から最適化結果をそのまま適用できない場合がある。その場合、設計者が特性を劣化させないように形状変更する必要がある。そこで、形状の特性に対する感度を求めて可視化し、設計者の形状修正を手助けする手法（設計ガイド法）を開発した。本項ではその感度に応じて、特性変化後の形状を可視化する方法を説明する。

設計ガイド法では、NGnetの結合重み w の関数として特性 $T(w)$ を定義し、 $T(w)$ を増加又は減少させた場合の形状の変化方向を求める。 w 空間における w の変化による T の変化 dT は式(6)で定義できる。

$$dT = \sum_{i=1}^n \frac{\partial T}{\partial w_i} dw_i = \nabla_w T \cdot dw \quad \dots\dots\dots(6)$$

ここで、 $\nabla_w \phi$ は、

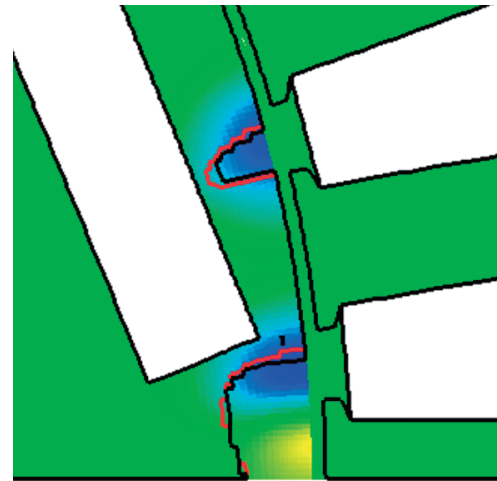
$$\nabla_w \phi = \nabla_w \sum_{i=1}^n w_i b_i = [b_1 \ b_2 \ \dots \ b_n]^t \quad \dots\dots\dots(7)$$

となる。次に $\nabla_w T$ の方向に変化したときの ϕ の変化 $\delta\phi$ は式(8)となる。

$$\begin{aligned} \delta\phi(x) &= \phi(w + \nabla_w T) - \phi(w) \\ &= \phi(w) + \varepsilon \nabla_w T \cdot \nabla_w \phi - \phi(w) \\ &= \varepsilon \nabla_w T \cdot \nabla_w \phi \\ &= \varepsilon \sum_{i=1}^n \frac{\partial T}{\partial w_i} b_i(x) \quad \dots\dots\dots(8) \end{aligned}$$

ε : 微小定数

このとき、磁性体領域と空気領域の境界で $\delta\phi(x) > 0$ ならば物性を増やし、 $\delta\phi(x) < 0$ ならば物性を減らすことで特性 T が目的の方向に変化する。



— 変化前 — 変化後

第8図 設計ガイド法における可視化の一例

変化前（最適化形状）を黒線で、変化後（特性許容形状）を赤線で示す。この範囲内の形状修正は、トルクに与える影響が小さい。

次に特性の許容量を決定する方法を考える。 $\nabla_w T$ の方向に変化したときの w 空間内での特性の変化方向における特性の変化 δT は、

$$\begin{aligned} \delta T(w) &= T(w + \varepsilon \nabla_w T) - T(w) \\ &= T(w) + \varepsilon \nabla_w T \cdot \nabla_w T - T(w) \\ &= \varepsilon \nabla_w T \cdot \nabla_w T \\ &= \varepsilon \sum_{i=1}^n \frac{\partial T}{\partial w_i} \frac{\partial T}{\partial w_i} \quad \dots\dots\dots(9) \end{aligned}$$

となる。式(9)から特性の変化量は ε によって制御できることが分かる。十分に小さい ε から計算を開始し、徐々に ε を増加させることで適切な ε を決定する。例えば、特性の5%を許容した感度方向への変化を考える場合、式(10)を満たすぎりぎりまで ε を変化させながら計算する。

$$\frac{\delta T(w)}{T(w)} < 0.05 \quad \dots\dots\dots(10)$$

式(11)に示す出力関数を用いて形状の描画をすることで、特性変化後の形状を可視化できる。

$$\phi(w + \varepsilon \nabla_w T) \quad \dots\dots\dots(11)$$

第8図に設計ガイド法における可視化の一例を示す。変化前（最適化形状）を黒線とし、変化後（特性許容形状）を赤線として可視化することで、そ

れぞれの変更を評価できる。この手法を用いると特性の向上・影響の最小化・製造性の向上など目的に応じた形状の変更を選択できる。

5 むすび

近年注目を集めているトポロジー最適化技術に係る当社の取り組みを紹介した。今後も最先端の解析技術を開発し、その解析技術を用いた製品の設計・開発を通じて社会に貢献していく。

最後に、トポロジー最適化の技術開発を進めるにあたり、長年にわたってご助言・ご指導・理論検討をいただいた北海道大学大学院 五十嵐一教授に感謝の意を表する次第である。

・本論文に記載されている会社名・製品名などは、それぞれの会社の商標又は登録商標である。

《参考文献》

- (1) 西脇真二, 泉井一浩, 菊池昇:「トポロジー最適化」, 丸善出版, 2013
- (2) Watanabe, F. Campelo, Y. Iijima, K. Kawano, T. Matsuo, T. Mifune, T., and H. Igarashi, "Optimization of inductors using Evolutionary algorithms and its experimental validation," IEEE Trans. on Magn., Vol.46, No.8, pp.3393-3396, 2010.
- (3) 佐藤孝洋・五十嵐一・高橋慎矢・内山翔・松尾圭祐・松橋大器:「トポロジー最適化による埋込磁石同期モータの回転子形状最適化」, 電気学会論文誌. D, 産業応用部門誌, Vol.135, No.3, pp.291-298, 2015
- (4) 古井真太郎・五十嵐一・坂本宏紀・阿部崇志・小倉和也:「損失を考慮したIPMモータのトポロジー最適化」, 電気学会静止器回転機合同研究会, SA-16-023, RM-16-023, 2016

《執筆者紹介》



坂本宏紀
Hiroki Sakamoto

基盤技術研究所
電磁機器に関わる解析技術の研究・開発に従事



阿部崇志
Takashi Abe

基盤技術研究所
解析シミュレーション技術及び材料強度評価技術の開発に従事