

PDEフィルタを援用したトポロジー最適化によるアウターローター型SPMモーターの構造複雑性低減に関する研究

ARASE, Kohei / 荒瀬, 浩平

(出版者 / Publisher)

法政大学大学院理工学・工学研究科

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学大学院紀要. 理工学・工学研究科編

(巻 / Volume)

62

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

7

(発行年 / Year)

2021-03-24

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00023919>

PDE フィルタを援用したトポロジー最適化による アウトローター型 SPM モーターの 構造複雑性低減に関する研究

COMPLEXITY REDUCTION OF OPTIMIZED STRUCTURE OF OUTER-ROTOR-TYPE SPM MOTOR
USING TOPOLOGY OPTIMIZATION SUPPORTED BY PDE-FILTER

荒瀬浩平

Kohei ARASE

指導教員 岡本吉史

法政大学大学院理工学研究科電気電子工学専攻修士課程

Because the energy consumption of motor accounts for over 60 % of the total consumption in Japan, the design of high-performance motor is strongly required. The topology optimization (TO) which is one of powerful design methods is actively applied to the practical design of electrical machines. Since TO is capable of introducing the novel structure, the design from the new viewpoint is carried out. On the other hand, TO has some drawbacks: the overhead of the sensitivity analysis and the complexity of resultant topology. Although the first “sensitivity analysis” is indispensable to realize both the fast convergence of TO and the derivation of continuous structure, the second “complexity of resultant topology” should be avoided when the solution derived from TO is applied to the design of electrical machines as it is. Then, TO incorporated with PDE (Partial Differential Equation) filter is investigated in the maximization problem of average torque of the outer rotor type synchronous permanent magnet motor. It can be seen that PDE filter works well to reduce the complexity of the motor structure without deterioration of convergence characteristics of objective function and constraint conditions in comparison to the simple smoothing which is carried out by averaging the sensitivity on adjacent nodes.

Key Words : Halbach array, outer-rotor-type SPM, PDE-filter and topology optimization

1. はじめに

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) より、地球温暖化の主要因が二酸化炭素の放射強制力に基づくことが報告されている^[1]。このような趨勢の下、自動車業界ではガソリンエンジンから電動化へのシフトが、益々、活発化しており、永久磁石同期モーター (PMSM) の性能改善に関する研究が積極的に実施されている。

PMSM の特性は、永久磁石・鉄芯等の構造特性に加えて、永久磁石の磁化方向、電流位相角等、数多くのパラメータに依存している。そこで電磁界数値解析と形状最適化技法を併用した自動設計手法に関する研究が盛んに進められている^{[2]・[3]}。形状最適化計算では、事前に機器の概形を準備する必要があるため、抜本的な構造変化は起こりにくい。その一方、トポロジー最適化 (TO)^[4]では、指定された設計領域で使用する材料の数・種類を定めておけば、最適化手法により、各種材料の配置される位置・形状が自動的に決定されるため、計算条件によ

っては、抜本的な構造変化が生じる。

TO を用いたモーターの設計最適化例として、遺伝的アルゴリズムが活用された研究結果が報告されている^[5]・^[6]。これらの報告では、非物理的な構造生成を抑制する手法を採用することにより、設計に資する構造が導出されている。しかし、収束解を得るまでに、数千、数万回の有限要素解析を実施する必要があり、電気回路方程式との連成等を考慮した高度な順問題を取り扱う場合、設計最適化の応用範囲が計算時間に律される。その一方、目的関数・制約条件の感度解析を礎とする手法は、収束が速く、迅速な実応用が要請される問題に対して有効である。ただし、得られる構造は、設計領域の有限要素メッシュの粗密に影響を受ける。例えば、粗な有限要素メッシュを採用した場合、単純な構造が得られやすいが、細分化されたメッシュを採用した場合、構造自由度の向上に伴い、複雑構造が得られることがある。構造の複雑性を緩和する方法 (スムージング法) として、平均半径

内に含まれる節点の材料密度に重みづけして、平均化する方法^[7]が提案されている。この方法は計算コストが小さく、簡便であるが、人為的に感度へ適用するスムージング法であるため、目的関数・制約条件の収束特性の悪化が懸念される。

そこで本論文では、文献[8]で提案されている PDE (Partial Differential Equation) フィルタを導入し、目的関数・制約条件の収束劣化がなく、複雑な解の生成を抑制できるマルチマテリアル TO 手法^{[9]・[10]}を提案する。提案手法をアウターローター型 SPM モーターへ適用し、従来のスムージング法（隣接節点の感度により平均化する手法、以下 SS 法）と比較することで、その有効性を検討する。

2. トポロジー最適化手法

(1) 磁界解析

有限要素法を用いた磁界解析により、目的関数を評価する。磁気ベクトルポテンシャル A を未知変数とした静磁界における弱形式を次式に示す。

$$K^{(l)} A^{(l)} = F^{(l)} \quad (1)$$

ここで、 K は係数行列、 l は時間ステップ番号（回転子位置 l ）、 F は磁気ソースに基づく右辺ベクトルである。

(2) 複数材料の構造モデリング

設計領域に、 n 種類の材料で構造を表現する場合、各節点に $(n-1)$ 個の設計変数を定義する^{[9]・[10]}。例えば、三材料（空気、鉄芯、永久磁石）を表現する場合、磁気抵抗率は (2) 式のようになる。

$$\nu(\phi_1, \phi_2, |B|) = (1 - H(\phi_1))\nu_0 + (1 - H(\phi_2))H(\phi_1)\nu_e(|B|) + H(\phi_1)H(\phi_2)\nu_m \quad (2)$$

ここで、 ϕ は設計変数、 $H(\phi)$ は材料の充填率（密度）を示す 0 から 1 の間の値をとる関数、 ν_0 は真空の磁気抵抗率、 $\nu_e(|B|)$ は電磁鋼板の非線形磁気抵抗率、 ν_m は永久磁石の磁気抵抗率を示す。本論文では $H(\phi)$ に 5 次の連続化ヘビサイド関数^[11]を使用する。

(3) シンプルスムージング法

感度解析に基づく TO では、構造の修正レベルは、感度の大小に依存する。例えば、極端に大きい感度が見積もられた場合、特定部分の構造変化が促進され、全体的な構造は変化のない状態で収束することがある。また、局所解に捕捉されてしまい、設計困難な複雑な材料分布を有する構造が得られることもある。そこで、図 1 に示すように、随伴変数法 (AVM) から見積もられた特定節点における感度に対して、その周囲の節点で評価された感度を加算し、平均化することを考える。この場合、次式に示すように、節点 i の感度がスムージングされる。

$$\left. \frac{\partial f}{\partial \phi_i} \right|_{\text{smoothing}} = \frac{\frac{\partial f}{\partial \phi_i} + \sum_{k=1}^{N_a} \frac{\partial f}{\partial \phi_k}}{N_a + 1} \quad (3)$$

ここで、 f は目的関数・制約条件を示す。この方法では、自身の感度と周囲の節点における感度を用いて平均化したため、構造の複雑性を相応に低減できることが予想される。しかし、目的関数・制約条件の勾配を人為的に修正することになり、収束特性の悪化や、制約条件の限界となる解が得られないことが懸念される。

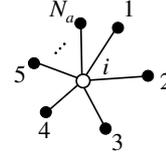


Fig. 1. Simple smoothing method.

(4) ヘルムホルツ方程式に基づく PDE フィルタ

フィルタリングされた変数 ψ について、(4) 式に示すヘルムホルツ方程式に基づく構造スムージング法が提案されている^[8]。

$$-R^2 \nabla^2 \psi + \psi = \phi \quad (4)$$

ここで、 R は任意の定数、 ψ はフィルタを適用したのちの設計変数を表す。(4) 式より、フィルタ適用後の設計変数は (5) 式のようになる。

$$\psi = (-R^2 \nabla^2 + 1)^{-1} \phi \quad (5)$$

R の値が零ならば $\psi = \phi$ となり、フィルタを適用していない場合と同様の計算を行うことになる。ガラーキン法により (4) 式の弱形式を導出すると、次式のようになる。

$$G_i = R^2 \iint_{\Omega_{\text{all}}} \left(\frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial \psi}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial \psi}{\partial y} \right) dx dy + \iint_{\Omega_{\text{all}}} N_i \psi dx dy - \iint_{\Omega_{\text{all}}} N_i \phi dx dy = 0 \quad (6)$$

ここで、 N_i は節点形状関数を示す。上式の右辺第一項から得られる行列を K 、第二、三項から得られる行列を C とすると、弱形式は次式のように記述できる。

$$(R^2 K + C) \psi = C \phi \quad (7)$$

(7) 式から左辺の係数行列の逆行列を右辺に乗じることでフィルタリングされた設計変数 ψ が得られる。なお本論文では、 $(-R^2 K + C)^{-1}$ の計算に、商用ソフト Matlab を用いる。また、順問題で使用する構造は ψ により定まるが、設計感度は目的関数の ϕ について検討しなければな

らない。関数 f の ϕ に関する設計感度は次式から得られる。

$$\frac{\partial f}{\partial \phi_i} = \frac{\partial f}{\partial \psi_1} \frac{\partial \psi_1}{\partial \phi_i} + \frac{\partial f}{\partial \psi_2} \frac{\partial \psi_2}{\partial \phi_i} + \dots + \frac{\partial f}{\partial \psi_n} \frac{\partial \psi_n}{\partial \phi_i} \quad (8)$$

ここで、 $\partial f / \partial \psi$ はAVMによって求められる設計感度、 $\partial \psi / \partial \phi$ は(7)式の左辺係数行列 $(-R^2K + C)$ の逆行列の各成分に相当する。よって、 ϕ の更新に使用する設計感度は、 $(-R^2K + C)^{-1}$ と ψ に関する設計感度の行列ベクトル積から得られる。

(5) 永久磁石の残留磁束密度方向

残留磁束密度の x, y 成分をそれぞれ (9), (10) 式のように定義する。

$$B_{rx} = B_r \cos \theta \quad (9)$$

$$B_{ry} = B_r \sin \theta \quad (10)$$

ここで、 B_r は永久磁石の残留磁束密度の大きさ、 θ は x 軸を基準とした各有限要素の B_r の角度を示す。 θ は設計領域内の各有限要素に定義される設計変数となり、最急降下法により、求解する。 B_r の角度 θ の更新式を次式に示す。

$$\theta^{(k+1)} = \theta^{(k)} - \frac{\theta_{\max}}{\|\partial L / \partial \theta\|_{\infty}^{(k)}} \left(\frac{\partial L}{\partial \theta} \right)^{(k)} \quad (11)$$

ここで、 θ_{\max} は各最適化ステップにおける最大変化量、 $\|\partial L / \partial \theta\|_{\infty}$ はAVMで求めた設計感度の最大値ノルムである。 $\partial L / \partial \theta$ はAVMによって得られた設計感度を示す。

3. SPM モーターの設計最適化モデル

(1) 解析モデル

図2(a)にアウターローター型SPMモーターの解析モデル(1/6モデル)を示す。ローターとステータの磁性材料には50JNE300, SS400を採用した。また、リファレンスモデルでは、図2(b)に示すように、 B_r の方向を径方向としたNS配列を使用する。

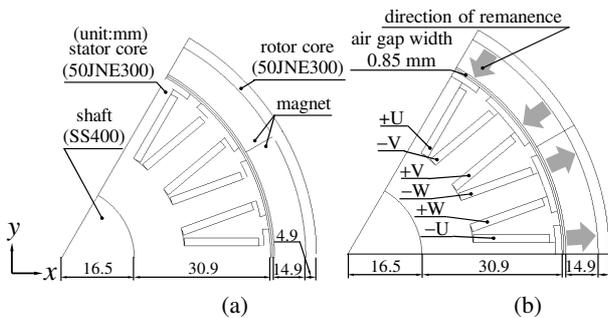


Fig. 2. Analysis model for outer-rotor-type SPM.

表1に磁界解析で使用するパラメータを示す。 n は巻線の巻数、 $|I|$ は電流の実効値、 β は電流位相角、 f は周波数、 B_r は残留磁束密度、 μ_m は永久磁石の比透磁率、 L は積厚である。

Table 1 Parameters for Magnetic Field Analysis

n	$ I $ [Arms]	β [deg.]	f [Hz]	B_r [T]	μ_m	L [mm]
20	3.0	90	90	0.539	1.21	27

(2) 最適化問題

本論文では、永久磁石体積をリファレンスモデルの体積以下に維持しながら、平均トルクの最大化を目的とする。最適化目標を次式のように定式化する。

$$\min. f(\phi_1, \phi_2, \theta) = -\frac{1}{N_s} \sum_{l=1}^{N_s} t_l(\phi_1, \phi_2, \theta) \quad (11)$$

$$\text{s.t. } g(\phi_1, \phi_2, \theta) = V_{\text{mag}}(\phi_1, \phi_2, \theta) - V_0 \leq 0$$

ここで、 $t_l(\phi_1, \phi_2, \theta)$ はローター位置 l におけるトルクである。制約条件 $g(\phi_1, \phi_2, \theta) \leq 0$ は、磁石体積を指定値以下に維持する制約条件、 $V_{\text{mag}}(\phi_1, \phi_2, \theta)$ は設計領域に対する磁石体積の割合、 V_0 は磁石体積の上限値である。なお制約条件は拡張ラグランジュ乗数法^[12]により、目的関数とパラメータを乗じた制約条件式を単関数化することで考慮される。

図3に、 B_r の初期方向を示す。図3(a)は B_r の方向のみを設計変数とした場合に用いる初期方向、図3(b)は B_r の方向に加えて、ローター構造の変化も考慮した場合における B_r の初期方向を示す。いずれもリファレンスモデルと同様に径方向のみ向いた状態になっている。なお、ローター構造を最適化する場合、設計変数 ϕ_1, ϕ_2 の初期値を0とする。

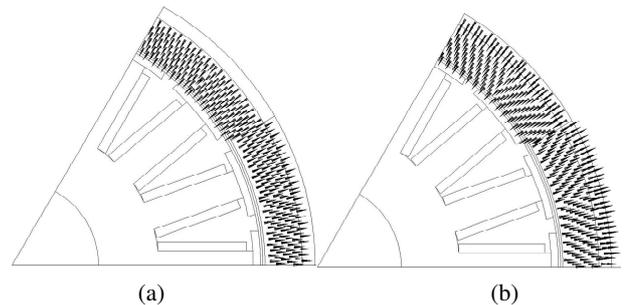


Fig. 3. Initial value of direction of remanence. (a) optimization of only direction of remanence. (b) optimization of material density and direction of remanence.

表2に、最適化パラメータを示す。 k_{opt} は最適化の反復回数、 θ_m は時間ステップあたりのローターの回転ピッチ、 V_0 は永久磁石面積の上限値の設計領域全域に対する割合である。

Table 2 Parameters for Optimization

k_{opt}	V_0	θ_{max} [deg.]	θ_m [deg.]
300	0.726	1.0	0.5

4. トポロジー最適化結果

本最適化問題では、CPU : Intel Core i7-6700K 4.0 GHz & Memory 32GB RAM が配備された PC を用いる。

(1) 永久磁石の残留磁束密度方向のみを設計パラメータとした最適化

図 4 に、ローター構造をリファレンスモデル (図 2 (a)) の状態に固定し、 B_r の方向のみを最適化した結果を示す。本結果を case 1 と定義する。最適化後、 B_r は径方向のみならず、周方向にも向くようになった。得られた B_r の方向は連続性を持ち、ハルバツハ配列に近い配向となった。

図 5 にリファレンスモデルと、最適化結果のトルク特性の比較を示す。リファレンスモデルに比べ全ての時刻ステップに対して case 1 のトルク特性の方が高く、かつ、波形が正弦波に近い形になっているとわかる。

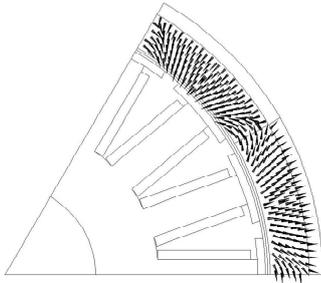


Fig. 4. Optimized direction of remanence on case 1.

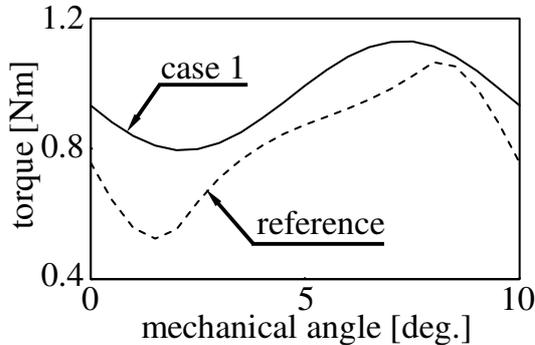


Fig. 5. Torque characteristics on case 1.

表 3 に最適化結果を示す。ここで、 t_a は平均トルク、 t_r はトルクリプルを示す。得られたモーターは、リファレンスモデルに比べ、良好な値を得られた。平均トルクは約 1.17 倍に向上し、トルクリプルは 30% ほどに抑制することができた。また、計算時間は 40 分程度であった。

Table 3 Optimization Result on Case 1

case	changeable parameter	t_a [Nm]	t_r [Nm]	elapsed time [h]
1	direction of remanence	0.964	0.333	0.72
reference	-	0.822	0.542	-

(2) ローター構造・残留磁束密度方向双方を設計パラメータとした最適化

表 4 に最適化条件を示す。ここでは 2 ケースの最適化を定義する。case 2 は設計領域の鉄芯と永久磁石構造の変化のみ、case 3 は設計領域の材料構造に加え、 B_r の方向変化を考慮した最適化を行う。本最適化では B_r の初期方向として、図 3 (b) の分布を採用する。

Table 4 Conditions on Case 2 and 3

case	changeable parameter	N_s	R
2	iron + magnet	20	0
3	iron + magnet + direction of remanence		0

図 6 に TO 後のローター構造を示す。図 6 (a) に case 2 の最適化結果を示す。リファレンスモデルの構造とは異なり、磁石領域の境界 (0, 30, 60 度) 付近に鉄芯材料が多く分布しており、磁石同士が接触する境界が狭くなった。また、磁石の径方向外側に薄い層が現れた。図 6 (b) は case 3 の最適化結果である。永久磁石領域の空気ギャップ近傍において、複数の窪みが生成され、その中は鉄芯で充填されており、構造が複雑化している。また、永久磁石の外側にも鉄芯が層状に生成された。

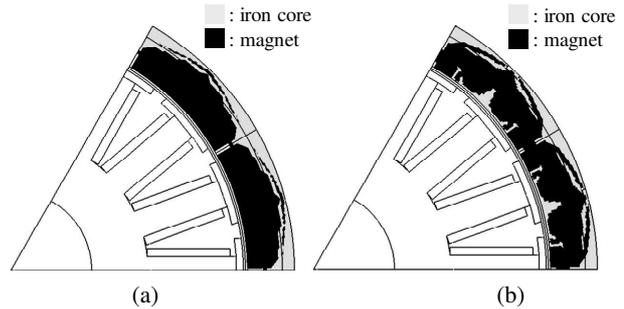


Fig. 6. Optimized topologies on case 2 and 3. (a) case 2. (b) case 3.

図 7 に最適化で得られた B_r の分布を示す。なお、図 7 (a) に case 2 の B_r の方向を示す。case 2 では、 B_r の方向変化を許容していないため、全てが径方向である。図 7 (b) に case 3 の B_r の方向を示す。図 4 の B_r 方向を踏襲するような、ハルバツハ配列に近い配向となった。

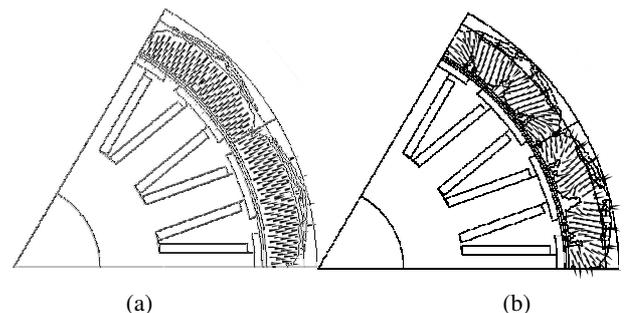


Fig. 7. Optimized direction of remanence on case 2 and 3. (a) case 2. (b) case 3.

図 8 に最適化結果のトルク特性を示す. case 2 の特性は, リファレンスモデルに比べて各時間ステップにおけるトルクが若干向上したものの, 大きな違いは見られない. case 3 では平均トルクが上昇したことが分かる. さらに, リファレンスモデルに比べ, トルクリップルの軽減がなされた結果であると見て取れる. 本結果と図 4 より, 本モデルの平均トルク向上には, B_r の方向が大きく寄与していることがわかる.

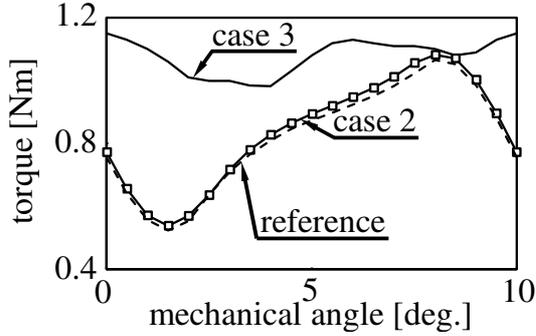


Fig. 8. Torque characteristics on case 2 and 3.

表 5 に最適化結果を示す. 平均トルクにおいて, case 2 の値はリファレンスモデルとほぼ同値となり, case 3 ではリファレンスモデルより大きく向上した. また, case 3 では, トルクリップルも大幅に減少した. 本結果と表 3 より, B_r の方向は SPM モーターの最適化において, 平均トルクを向上させるうえで, 重要な設計パラメータといえる. なお, 全ケースにおいて, 永久磁石の面積は制約値以下に維持されており, 計算時間は 50 分程度であった.

Table 5 Optimization Result on Case 2 and 3

case	changeable parameter	t_a [Nm]	t_r [Nm]	V_{mag}	elapsed time [h]
2	iron + magnet	0.840	0.544	0.726	0.77
3	iron + magnet + direction of remanence	1.076	0.168	0.726	0.83
reference	-	0.822	0.542	-	-

(3) PDE フィルタを考慮した最適化

本節では, 鉄芯・永久磁石の構造に加えて, 残留磁束密度方向もパラメータとして TO を実行する. このとき, 永久磁石の B_r の初期方向として, 図 3 (b) を採用する. 表 6 に最適化条件を示す. ここでは, 4 ケースの最適化条件を定義する. case 4 は SS 法, case 5 ~ case 7 は PDE フィルタを用いた最適化で, R の値を 0.5, 1.5, 2.5 に変化させる.

Table 6 Optimization Conditions Among Case 4 and Case 7

case	smoothing type	N_s	R
4	simple smoothing	20	-
5	PDE filter		0.5
6	PDE filter		1.5
7	PDE filter		2.5

図 9 に TO より得られたローター構造を示す. 図 9 (a) は case 4 の最適化結果である. 図 6 (b) ($R=0$) と比べ, 一極当たり三つに分離されていた空気ギャップ付近の鉄芯領域が一つの連続した領域になった. また, 永久磁石の径方向最外部に位置していた鉄芯が消失していることが分かる. 図 9 (b) は, case 5 の最適化結果である. $R=0$ の結果に比べ, SS 法と同様に, 内側の鉄芯が 1 つに結合され, 永久磁石最外部の磁石層が消滅したことが分かる. また SS 法に比べ, 磁石内部の鉄芯の面積が小さくなったことが見てとれる. 図 9 (c) は case 6 の最適化結果である. case 4, case 5 と同様, 空気ギャップ近傍の鉄芯構造が簡素化され, 二つの磁石層のうち最外層が消失した. また, 図 9 (a), (b) では, 15 度・45 度付近の磁石内部に生成された突起部が, 図 9 (c) では消失したため, 構造の複雑性低減が促進された. 上記の 3 つの結果において, いずれも, 永久磁石の外形は丸みを帯び, 空気ギャップ近傍に鉄芯が分布している. 図 9 (d) は, case 7 の最適化結果である. これまで得られた形状と異なり, 半円状の簡素な永久磁石構造が得られた. 以上より, R を増加させることにより, 永久磁石・鉄芯領域双方の複雑な構造変化を抑制できることが分かった.

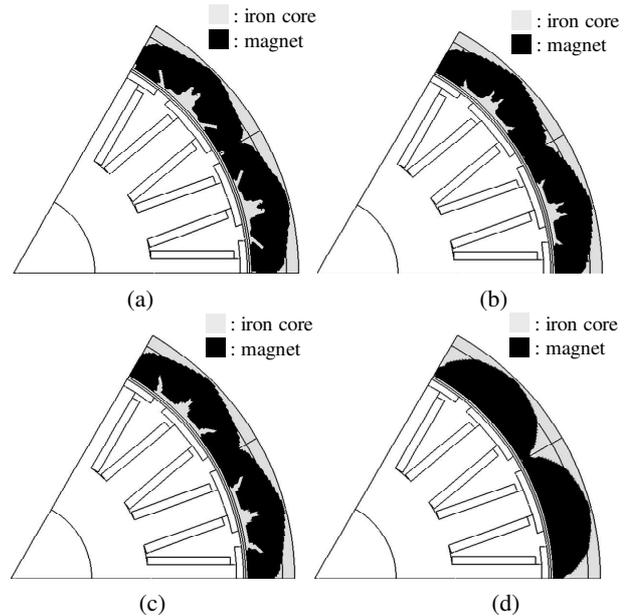


Fig. 9. Optimal structures with some smoothing methods. (a) case 4 (SS). (b) case 5 (PDE filter with $R=0.5$). (c) case 6 (PDE filter with $R=1.5$). (d) case 7 (PDE filter with $R=2.5$).

図 10 に最適化で得られた永久磁石の残留磁束密度方向を示す. 図 10 (a) ~ (d) は, それぞれ, case 4 から case 7 で得られた B_r の分布を示す. 図 10 (a) ~ (c) の B_r 分布は図 7 (b) と類似の配向であり, 磁石内部に生成された鉄芯付近の B_r は, 径方向を向く分布となった. また, 図 10 (d) の結果では, 15 度・45 度付近を境に, B_r の方向が徐々に周方向へ変化することが見て取れる. また, 磁石の結合部である 30 度付近では, B_r が連続的になって

おり、全体的にハルバツハ配列のような配向であることが見て取れる。

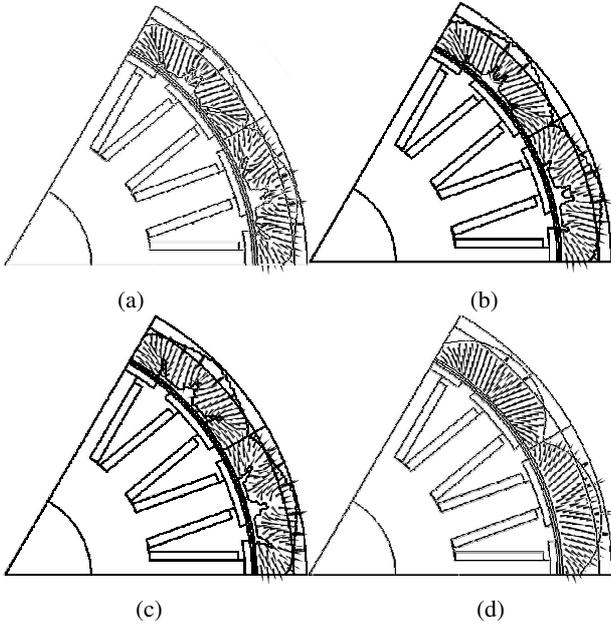


Fig. 10. Optimized direction of remanence among case 4-case 7. (a) case 4 (SS). (b) case 5 (PDE filter with $R = 0.5$). (c) case 6 (PDE filter with $R = 1.5$). (d) case 7 (PDE filter with $R = 2.5$).

図 11 に、最適化後のトルク特性を示す。いずれの最適化結果も、リファレンスモデルに比べて平均トルクが向上していることが分かる。case 4 ~ case 6 では、位相差が少ないトルク波形が得られた。また、永久磁石が半円状に分布した case 7 の波形は正弦波のような波形になった。

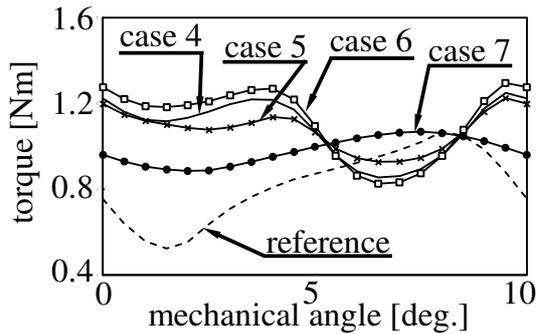


Fig. 11. Torque characteristics among case 4 - case 7.

図 12 に、図 9 (c) と図 9 (d) から得られた回転角が零度の際の磁束線を示す。図 12 (a) に case 6, 図 12 (b) に case 7 の磁束線を示す。図 12 (b) の結果では、図 12 (a) に比べて、空気ギャップにおける磁束線の間隔が径方向に対して、概ね一定になっていることが、図 11 にみられる case 7 のトルクリプル低減に寄与していると考えられる。

表 7 に最適化結果を示す。全てのケースで、リファレ

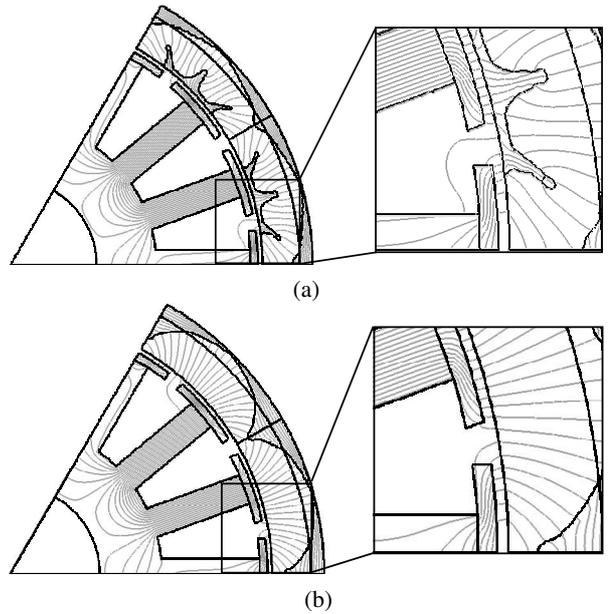


Fig. 12. Magnetic flux line on case 6 and 7. (a) case 6 (PDE filter with $R = 1.5$). (b) case 7 (PDE filter with $R = 2.5$).

ンスモデルに比べて平均トルクの向上が見られた。特に case 6 では、PDE フィルタを適用していない同条件 ($R = 0$) の最適化結果より、平均トルクが上昇しており、全ケースにおいて、平均トルクが最大となった。また、永久磁石内部に鉄芯が生成された case 4 ~ case 6 の結果では、平均トルクが比較的高く算出されたのに対し、永久磁石が半円状に分布した case 7 では、平均トルクが低くなっていることが分かる。永久磁石内部に生成される鉄芯の役割として、マグネットトルクに加えて、リラクタンストルクを活用し、平均トルクの向上が促進されたと考えられる。そのため、鉄芯領域が生成されなかった case 7 では、case 4 ~ case 6 に比べて平均トルクの値が低下したと推察できる。以上より、構造の複雑性は、平均トルクと関係があり、両者はトレードオフの関係にあることが考えられる。また、case 4 では、SS 法に基づくスムージングが制約条件の感度の厳密性を阻害するため、 V_{mag} の収束値が制約条件の上限値 (0.726) に到達していないことがわかる。一方、PDE フィルタを適用した結果では、制約条件に関する感度の厳密性が保証されているため、 V_{mag} が 0.726 に近い値に収束したことが見て取れる。

Table 7 Optimization Result

case	t_a [Nm]	t_r [Nm]	V_{mag}	elapsed time [h]
4	1.085	0.397	0.719	0.82
5	1.050	0.297	0.724	0.89
6	1.113	0.470	0.724	0.84
7	0.980	0.183	0.726	0.84
reference	0.822	0.542	-	-

5. 結論

本論文では、アウターローター型 SPM の複数材料トポ

ロジー最適化に PDE フィルタを適用し、形状の複雑性低減を試みた。得られた結果を要約すると、以下のようになる。

(1) 永久磁石の残留磁束密度 (B_r) 方向のみを設計パラメータとした最適化では、片側に強い磁界を生成できるハルバッハ配列に近い配向が得られた。

(2) ローター構造, B_r の方向双方を設計パラメータとした, 最適化を行った場合, 永久磁石の外側は瓦型のような形状となり, 永久磁石内側に鉄芯が埋め込まれた複雑な構造が得られた。また, 得られた B_r 分布はハルバッハ配列に似た配向であることが明らかとなった。

(3) PDE フィルタを導入することによって, 制約条件の上限値を概ね満足する結果が得られることが明らかとなった。また, ラプラシアン係数を変化させると, 構造複雑性を制御できるため, 構造の設計限界を把握しやすくなる。

研究業績

- 1) 荒瀬浩平, 増田弘, 早津政人, 岡本吉史, 若尾真治: 「簡易永久磁石モーターモデルにおけるレベルセット法と数値計画法に基づくトポロジー最適化の性能評価」, 平成 31 年電気学会全国大会, 5-078, 北海道, 3 月, 2019.
- 2) H. Masuda, K. Arase, Y. Okamoto, and S. Wakao, "Multi-objective Topology Optimization of DC-based Reactor in Steady-state of Time Domain with Magnetic Nonlinearity," The 22nd International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields (COMPUMAG 2019), PA-M3-6, Sorbonne, France, July, 2019.
- 3) 荒瀬浩平, 岡本吉史, 若尾真治: 「レベルセット法に基づく複数材料の構造変化を考慮した電磁機器トポロジー最適化手法の検討—磁石磁化方向の設計パラメータへの導入—」, 電気学会静止器・回転機合同研究会, SA-19-079, RM-19-099, 宮城, 9 月, 2019.
- 4) 荒瀬浩平, 岡本吉史, 若尾真治: 「密度法とレベルセット法を併用したトポロジー最適化によるリニア同期モーターの推進力最大化に関する検討」, 令和 2 年電気学会全国大会, 5-078, 東京, 3 月, 2020.
- 5) 荒瀬浩平, 岡本吉史, 若尾真治: 「鉄芯・導体・空気領域の構造変化を考慮したマルチマテリアルトポロジー最適化の検討」, 令和 2 年電気学会全国大会, 5-078, 東京, 3 月, 2020.
- 6) 荒瀬浩平, 子田陸, 岡本吉史: 「PDE フィルタを援用したトポロジー最適化によるアウターローター型 SPM モーターの構造

複雑性低減に関する検討」, 電気学会静止器・回転機合同研究会, SA-20-021, RM-20-021, オンライン, 3 月, 2021.

参考文献

- 1) https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ipcc/ar5/ipcc_ar5_wg1_ts_jpn.pdf
- 2) S. Yamasaki, S. Nishiwaki, T. Yamada, K. Izui, and M. Yoshimura, "A structural optimization method based on the level set method using a new geometry-based re-initialization scheme," *Int. J. Numer. Meth. Engng.*, vol. 83, pp. 1580-1624, Mar. 2010.
- 3) Y. Fujishima, S. Wakao, M. Kondo, and N. Terauchi, "An optimal design of interior permanent magnet synchronous motor for the next generation commuter train," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 14, no. 2, pp. 1902-1905, Jun. 2012.
- 4) M. P. Bendsøe and N. Kikuchi, "Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method," *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, vol. 71, pp. 197-224, 1988.
- 5) Y. Okamoto, Y. Tominaga, and S. Wakao, "Topology optimization of rotor core combined with identification of current phase angle in IPM motor using multistep genetic algorithm," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 50, no. 2, Feb. 2014. Art. ID 7017904.
- 6) S. Sato, T. Sato, and H. Igarashi, "Topology optimization of synchronous reluctance motor using normalized gaussian network," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 51, no. 3, Mar. 2015. Art. ID 8200904.
- 7) N. Aage, E. Andreassen, B.-S. Lazarov, and O. Sigmund, "Giga-voxel computational morphogenesis for structural design," *Nature*, vol. 550, pp. 84-86, 2017.
- 8) A. Kawamoto, T. Matsumori, S. Yamasaki, T. Nomura, T. Kondoh, and S. Nishiwaki, "Heaviside projection based topology optimization by a PDE-filtered scalar function," *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 44, pp. 19-24, July. 2011.
- 9) P. Wei, and M.-Y. Wang, "Piecewise constant level set method for structural topology optimization," *Int. J. Numer. Meth. Engng.*, vol. 78, pp. 379-402, Dec. 2009.
- 10) 山下祐輝・荒瀬浩平・岡本吉史: 「永久磁石磁化方向の変化を考慮したマルチマテリアルトポロジー最適化手法による IPM モーターの高トルク・低鉄損構造の導出」, 静止器・回転機合同研究会資料, SA-20-021, RM-20-021, pp. 31-36 (2020)
- 11) H. Masuda, Y. Kanda, Y. Okamoto, K. Hirono, R. Hoshino, S. Wakao, and T. tsuburaya, "Topology optimization of induction heating model using sequential linear programming based on move limit with adaptive relaxation," *Open Physics*, vol. 15, no. 1, pp. 845-850, Dec. 2017.
- 12) 今野浩, 山下浩: 「非線形計画法」, 日科技連出版社 (1978)