

確率論的アルゴリズムを用いた次世代インダクタの設計最適化

プロジェクト責任者

飯島 洋祐 太陽誘電株式会社 開発研究所 材料1グループ

著者

飯島 洋祐^{*1}、河野 健二^{*1}、渡辺 浩太^{*2}、五十嵐 一^{*2}、西川 憲明^{*3}、廣川 雄一^{*3}

*1 太陽誘電株式会社

*2 北海道大学

*3 独立行政法人海洋研究開発機構

利用施設： 独立行政法人海洋研究開発機構 地球シミュレータ

利用期間： 平成22年4月1日～平成23年3月31日

アブストラクト

本プロジェクトでは、地球シミュレータを利用したインダクタ等の磁性部品の最適化設計技術を実現することを目標としている。具体的には、インダクタに要求される電気的特性等の仕様を満たす最適なインダクタの3次元構造を決定可能とすることを目指している。その手法として、本プロジェクトでは確率論的アルゴリズムと有限要素法による電磁界解析を用いた最適化技術を構築する。一般的に、3次元での電磁界解析ではメッシュ数が増加してしまうために計算負荷が膨大となってしまうため、実用的な計算時間での3次元構造最適化の実現が困難であった。そこで、地球シミュレータの計算機性能を利用することで、この問題を解決する。

今年度は、昨年度に引き続き2年目の利用である。今年度の利用では、地球シミュレータの性能をより効率的に利用可能にすることを検証する。このために、本最適化プログラムのチューニングと、昨年度とは別の手法での最適化を検討する。

キーワード： インダクタ、磁性部品、構造最適化、確率論的アルゴリズム

1. 本プロジェクトの目的

近年、スマートフォンなどの電子機器の小型化、高性能化に伴い、電子部品に求められる電気的特性、構造的特徴も日々変化し、複雑化してきている。特に、インダクタなどの磁性部品に対しては大電流化や高周波数化と共に小型化や薄型化が要求されている。従来、このような磁性部品への要求の変化に対しては、主に磁性体材料の特性改善による検討が行われ、様々な磁性体材料が開発されてきた。例えば、インダクタの大電流化と高周波数化を実現しようとする場合に、飽和磁気特性が大きい磁性体材料の開発と周波数特性の改善が行われてきた。しかしながら、高度化する全ての要求を満たすには、磁性体材料の改善と共に磁性体材料の磁気特性を考慮した構造設計が重要となる。具体的には、大電流化を実現するために、磁性体材料の飽和磁気特性を考慮し、磁束密度の分布を制御するような構造設計が必要となる。

そこで、本プロジェクトでは次世代インダクタの最適構造を設計可能な技術の構築を目的とする。その手法として、本プロジェクトでは確率論的アルゴリズムを用いた最適化を行う。本プロジェクトでは、3次元でのインダクタの構造最適化を実現するために(1)電磁界解析によるインダクタ解析、(2)確率論的アルゴリズムによる構造探索の2つを用い、効率的かつ確実に最適な構造を探索する技術構築を目指している。3次元での構造最適化の実現には、膨大な計算負荷が生じてしまうが、地球シミュレータ(ES)の利用によってその問題を解決する。

今年度の利用においては、昨年度までの成果を引き継ぎ、地球シミュレータ向けの高速度チューニングと最適化手法の改良を検討した。以下では、2章で本プロジェクトの概要について示す。次に、3章において、高速度に向けたプログラムチューニングとして、①ロードバランスの改善と②有限要素行列生成関数の高速度化について示す。4章では、これまでの課題を解決するための手法としてVoxel要素での検討について示し、最後に5章でまとめを述べる。

2. 本プロジェクトの概要

本プロジェクトにおけるインダクタの構造最適化の概要を図1に示す。図1に示すように、インダクタの電気的特性を有限要素法による電磁界解析によって解析し、解析から得た電気的特性をもとに要求特性との差異を評価し、その評価結果からインダクタの構造パラメータを変更する。

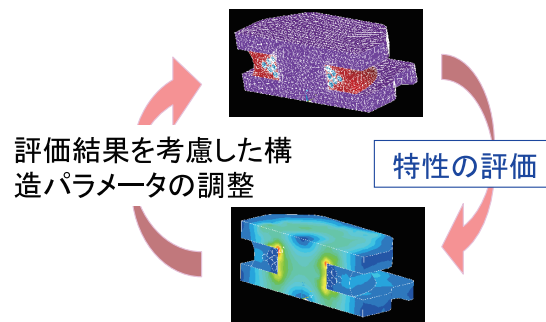


図1 最適化の概要

本プロジェクトでは、この構造パラメータの探索に確率論的アルゴリズムの一つである免疫型アルゴリズムを用いている。図2に免疫型アルゴリズムのフローチャートを示す^{1,2)}。免疫型アルゴリズムでは、次のような手順で最適化を実行する。

- 1) ランダムな個体を N 個生成する。
- 2) 各個体の目的関数値および拘束条件を評価する。
- 3) 終了条件が満たされれば(9)に飛ぶ。
- 4) 評価値に基づいて、下位の $P\%$ の個体を消去する。
- 5) 各個体について、それぞれ評価値に対応した個数のクローンを生成する。
- 6) 各クローンについて、突然変異操作を行う。クローンの中で最も優秀な個体と親個体を入れ替える。
親個体がクローンよりも優秀であれば、親個体を残す。
- 7) 個体数を N に保つために、個体をランダムに生成して集団に追加する。
- 8) (2)に戻る。
- 9) 終了

本手法では、インダクタなどの磁性部品の磁性体や巻き線の構造をパラメータ化し、免疫型アルゴリズムの個体としてパラメータ最適化を行う。上記手順の(2)では、有限要素法を用いて計算したインダクタの電氣的性能から目的関数値を設定している。

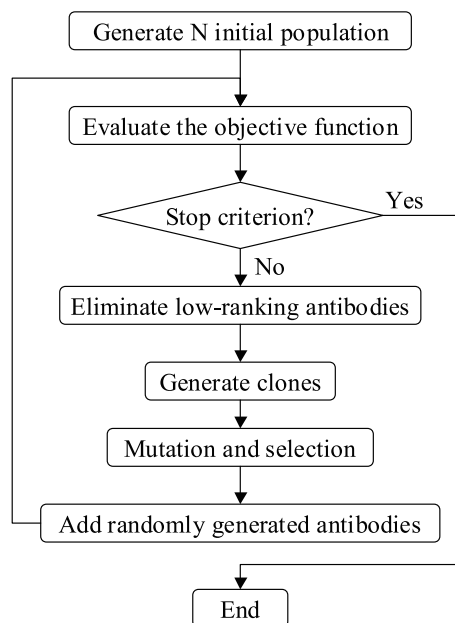


図2 免疫型アルゴリズムのフローチャート

3. 高速化に向けたプログラムチューニング

本年度の利用において、プログラムの高速化を実現するため、並列化におけるロードインバランスの改善、および有限要素行列の生成関数 (makeMat 関数) の高速化を検討した。

3.1 並列化におけるロードインバランスの改善

プログラムの並列化には global master-slave モデルを採用しており、各 CPU に 1 個体の計算を割り当てている。1 個体あたり 5 点のバイアス電流値の計算を行っているが、各個体の計算時間は一定ではないため、各 CPU の計算時間にはばらつき (ロードインバランス) が生じる。本年度はこのロードインバランスを改善するため、5 点のバイアス電流値についても各 CPU に割振るよう改良した (各 CPU に 1 つの個体と 1 点のバイアス電流値の組を割り当てることで、各 CPU の計算負荷を均等に近づけた)。

3.2 有限要素行列の生成関数の高速化

プログラム性能 (ftrace) の検証の結果、他の処理に比べて makeMat 関数での処理性能が低いことが分かった。加えて、本最適化においては最適化パラメータの変更毎に makeMat 関数によって有限要素行列を生成する必要があり、呼び出し頻度が多く、makeMat 関数のチューニングにより最適化全体の高速化が期待できる。

図3に高速化の概要を示す。図3(a)は、有限要素行列を生成する処理の一部で、ある辺要素 ig に接している各要素 (要素番号 3、8) のベクトルポテンシャルを足し込む。この処理を並列に行うと、正しく計

算できない可能性があるため、ベクトル化は阻害される。そこで、この処理を並列化するため、図 3(b)のようにマルチカラー法を適用した。図 3(b)では、まず、緑色に属している各要素のベクトルポテンシャルが各辺要素に並列で足し込まれる(辺要素 ig には要素 3 のベクトルポテンシャルが足し込まれる)。次に、水色に属している各要素に対して同様の処理を行う(辺要素 ig には要素 8 のベクトルポテンシャルが足し込まれる)。このように、同色に属している要素間には辺要素への足し込みで依存関係がないため、ベクトル化(並列処理)ができる。また、実際の解析においてはマルチカラー法の色数は 20 とした。この高速化により、makeMat 関数の処理時間を 2862.397[sec] から 1115.519[sec] に短縮することができた。

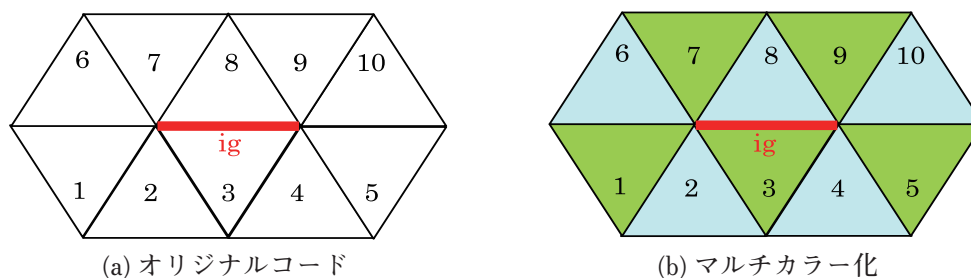


図 3 前処理(色分け)による高速化

4. Voxel 要素を用いた最適化検討

これまでの最適化検討では、有限要素法において四面体要素を用いてきた。しかしながら、最適化においてメッシュ変形時にエラーが生じる課題があり、その課題を解決するために Voxel 要素を用いた最適化手法を検討した。

4.1 これまでの検討における課題

インダクタなどの磁性部品においては、磁性体コアの形状や巻き線は曲面形状をしている。そのような複雑な形状についても柔軟な近似を行うために、これまでの検討では有限要素法の解析に図 4 に示すような四面体要素を用いる事を考えてきた。四面体要素を用いた検討では、最適化において形状パラメータの変更に応じて各要素の節点を移動することで、メッシュを再構築し、最適化を実現する。しかしながら、この方法ではパラメータ変更の際に各節点を全体的に円滑に移動する必要があり、メッシュ構造が複雑な場合には節点を移動することでメッシュが異常変形し、解析できない場合が発生してしまう課題がある。

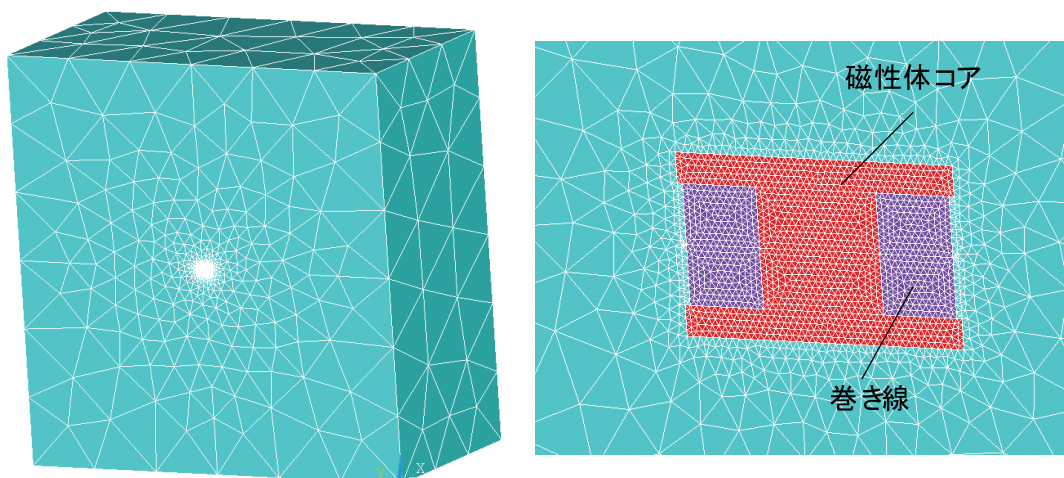


図 4 四面体要素での解析モデル

4.2 Voxel 要素を用いた最適化検討

4.1 で示した課題を解決するために、Voxel（六面体）要素を用いた最適化を検討した。具体的には、図5に示すように解析領域を Voxel 要素で分割し、最適化では形状パラメータに応じて各要素の材料を再設定する。これによって、メッシュ変形の課題を解決する。図5に示すように、磁性体コア付近と空気領域とでメッシュに粗密をつけ、磁性体コア付近のパラメータを調整する範囲ではメッシュを細かくした。Voxel 要素を用いることで、メッシュ移動による問題が解決でき、有限要素法の計算においても収束性を改善できる。

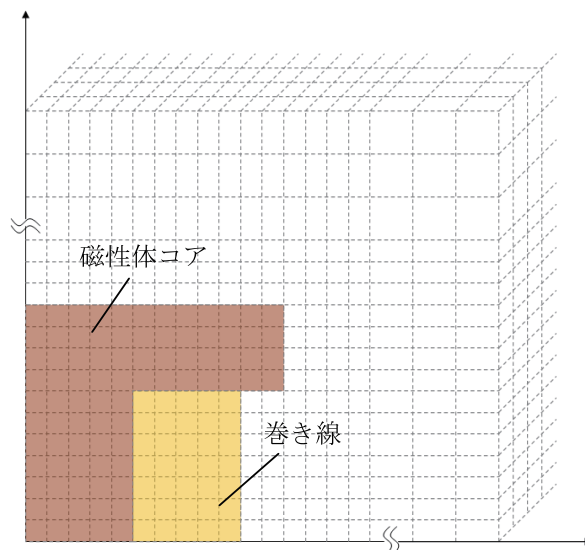


図5 Voxel 要素を用いた解析

4.3 Voxel 要素を用いた最適化実験

Voxel 要素を用いて巻き線インダクタの最適化のテスト実験を行った。最適化モデルを図6に示す。図6に示すように、磁性体コアの寸法と巻き線の巻き数の合計6つを最適化パラメータとして設定し、磁性体の透磁率は400に固定した。最適化における目的関数は、

$$EvaluationFunction = |L - 2.0[\mu H]|$$

と設定した。ここで、 L はインダクタンス値であり、 $2.0\mu H$ との誤差を目的関数とした。

図7に最適化実験の結果を示す。図7の横軸は最適化の世代数を示し、縦軸は目的関数を示す。図7には、初期個体を変えて最適化を4回実行した結果を示している。図7に示すように、最適化の世代が進むと共に目的関数（インダクタンス値の誤差）が最小化していく事が確認でき、最適化が実行できている。今回の最適化では4ノード（32プロセッサ）を使用し、計算時間に約8時間（29760[sec]）を要した。最適化で使用したモデルの要素数は512000要素である。

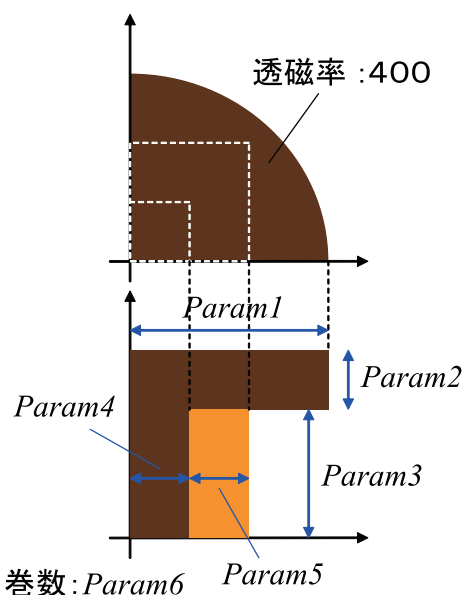


図6 最適化モデルおよびパラメータ

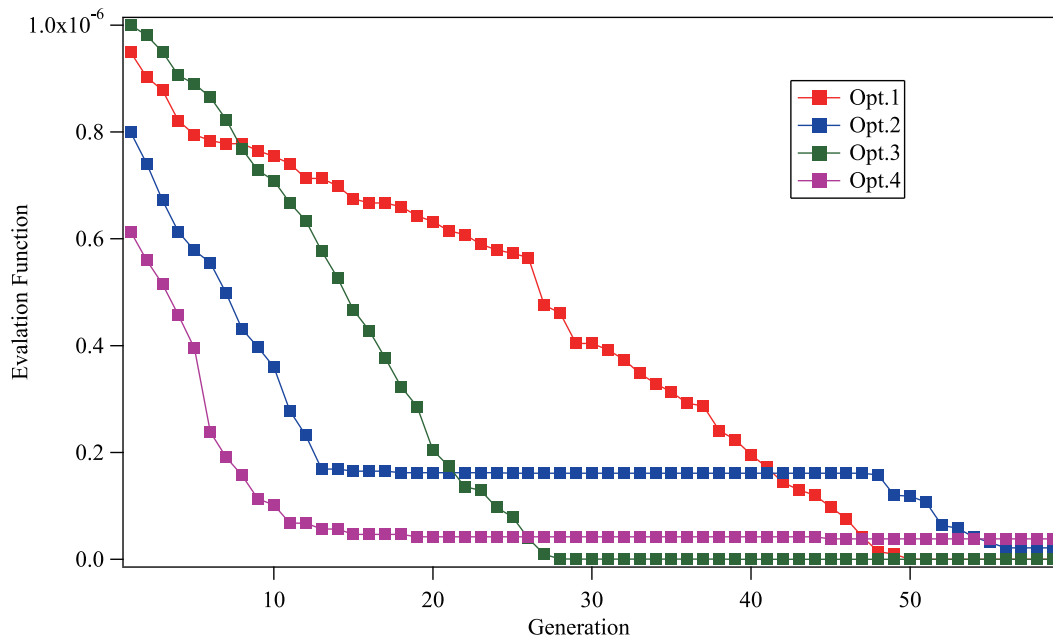


図7 最適化結果（目的関数の推移）

5. まとめ

本年度の利用においては、並列化におけるロードインバランスの改善と有限要素行列の生成関数の高速化を行い、地球シミュレータ向けにプログラムをチューニングした。さらに、四面体要素での課題を解決するために、Voxel要素での最適化を検討し、巻き線インダクタの最適化モデルにて地球シミュレータ上での動作を確認できた。今後は、様々な磁性部品のモデルにおいて、本最適化を適用した検証を進め、プログラム性能と最適化結果の検証を行う予定である。

本プロジェクトによって、市場のニーズに合致した商品設計を短期間、効率的に実現することが可能になる。これによって、この分野でのわが国の国際競争力の向上が期待できる。

謝辞

地球シミュレータを利用するに際して、独立行政法人海洋研究開発機構 地球シミュレータセンター シミュレーション応用研究グループの皆様には、親切なご指導と多大なアドバイスを頂きました。ここに、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) L.N.de Castro, J.Timmis, "Artificial immune systems: a new computational intelligence approach", Springer-Verlag, 2002.
- 2) F.Campelo, F.G.Guimaraes, H.Igarashi, J.A.Ramirez, "A Clonal Selection Algorithm for Optimization in Electromagnetics", IEEE Trans. on Magnetics, vol.41(5)1736-1739, 2005.