

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

著者

飯島 洋祐^{*1}、河野 健二^{*1}、佐藤 奈津子^{*1}、五十嵐 一^{*2}、渡邊 浩太^{*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 21 年 4 月 1 日～平成 22 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の最適化設計の実現を目標としている。具体的には、磁性体材料の非線形特性を考慮しつつ、インダクタに対する電気的特性等の要求を満たす最適なインダクタの 3 次元形状の決定を実現する。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による最適化を行う。これまで計算負荷が膨大となる等の問題から実現が困難であった 3 次元での最適化を、地球シミュレータを用いることで解決する。これによって、日々高度化し続けるインダクタへの要求に対して、効率的かつ短期間に次世代の最適なインダクタ形状の設計を可能にする。本年度の利用では、地球シミュレータを用いた本インダクタ最適化設計手法の有効性を検証する。具体的には、本最適化プログラムを地球シミュレータに移植し、その詳細な性能検証と、地球シミュレータ向けへのプログラム改善による性能向上を検討する。

キーワード： インダクタ、磁性体、非線形特性、最適化、確率論的アルゴリズム

1. はじめに

近年、携帯電話などの電子機器の高性能化に伴い、電子部品に求められる電気的特性、構造的特徴も複雑化してきている。このため、電子部品の設計開発において、より高度な設計技術が必要不可欠となってきている。電子部品の一つであるインダクタに対しては、大電流化と小型化の要求が求められており、その要求は日々高度化してきている。従来、このようなインダクタへの要求に対しては、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。図 1 にインダクタの構造を示す。図 1 に示すように、インダクタは磁性体コアに巻き線が施されている構造をしており、この磁性体コアの材料特性を改善することでインダクタ特性の改善を図ってきた。例えば、インダクタの大電流化を実現しようとする場合に、磁気飽和し難い、つまり飽和磁気特性が大きい磁性

体材料をコアに用いることを検討してきた。

しかしながら、高度化する全ての要求を磁性体材料の改善だけで満たすことが困難になりつつあり、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ってきている。例えば、大電流化を実現するために、磁性体材料の磁気特性を考慮し、磁束の集中を抑制するような構造の設計が必要となる。加えて、日々変化し続けるインダクタへの要求に対して、迅速な設計開発を行うことが重要である。このためには、より短時間で、要求される特性を満たす最適なインダクタを設計開発する手法が必要不可欠である。

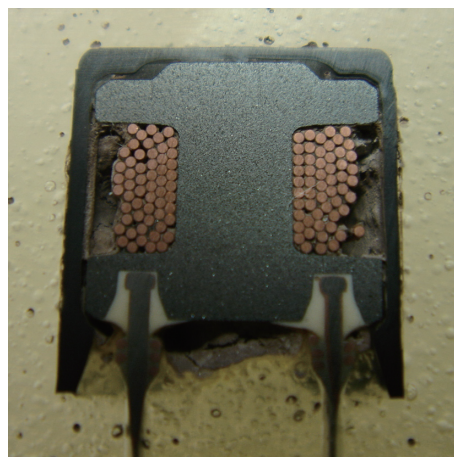


図1 インダクタの断面写真

そこで、本プロジェクトでは高度化する要求を満たす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。これまでに、2次元構造でのインダクタ最適化の検討を行ってきた¹⁾が、より複雑化する要求を満たすためには3次元での最適化技術の構築が必須である。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つを特徴とし、効率的かつ確実に最適な構造を探索することを目指している。3次元での構造最適化の実現は、計算時間が膨大になる理由からこれまで困難であったが、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。

現在、インダクタ全体の市場規模に対して日系企業が占める割合は、他の電子部品に比べると寡占度が非常に低い。このため、この分野でのわが国の国際競争力を高めるためには、迅速な設計開発が必要不可欠である。本プロジェクトによって、市場ニーズに合致した商品を短期的に設計開発できる能力を備えることで、この分野でのわが国の国際競争力を高め、将来的な市場拡大を目指す。

2009年度の利用においては、地球シミュレータを利用したインダクタの構造最適化を実現するために、最適化プログラムの移植を行い、高速化および並列化の検討を行った。

2. インダクタの設計最適化について

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2に示す。図2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。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る。これにより、所要の特性を満たすような最適なインダクタ形状を探索する。2.1でインダクタの解析手法、2.2で最適化手法について説明する。

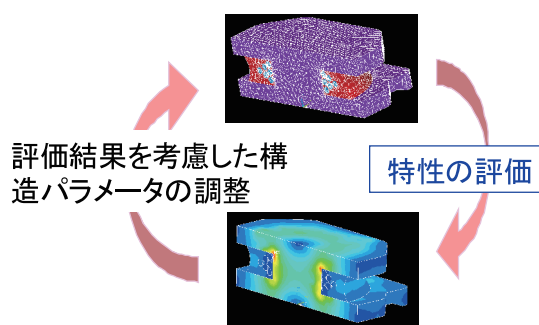


図2 インダクタの構造最適化の概要

2.1 インダクタ解析手法

インダクタの電気的特性の解析には有限要素法を用い、直流重畳特性の解析を行う。直流重畳特性とは、図3に示すようなインダクタに直流バイアス電流を印加した場合のインダクタンスの変化特性である。図3に示すように直流バイアス電流が印加されるとインダクタンス値は低下してしまう。これは、インダクタに用いられている磁性体材料の磁気飽和の影響によるものである。このため、直流重畳特性の解析には、図4に示すような磁性体材料の非線形特性を考慮する必要がある。図4は磁性体材料の直流での磁界と磁束密度の関係である。そこで、有限要素法による解析の際には磁性体材料の材料特性を用いた非線形解析を行う。

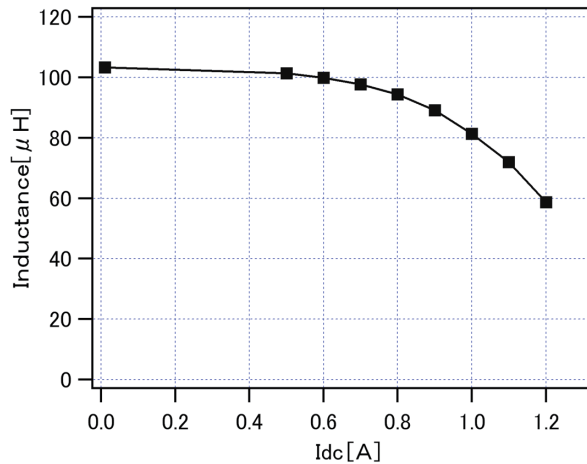


図3 直流重畳特性

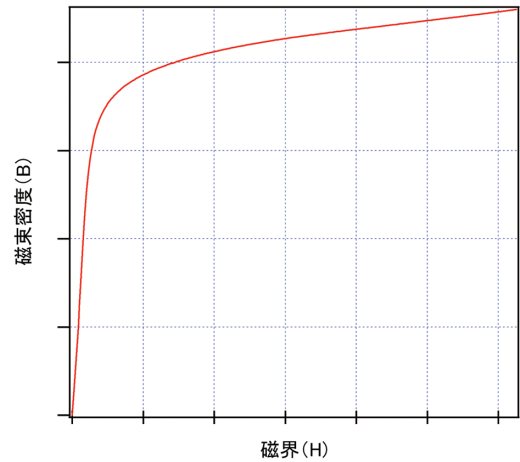


図4 磁性体の直流 BH 特性

図5に直流重畳特性解析のフローチャートを示す。図5に示すように、直流重畳特性の解析は非線形解析と線形解析を組み合わせ、インダクタに流れる直流バイアス電流を変更しながら各バイアス電流におけるインダクタンスを計算することで行う。

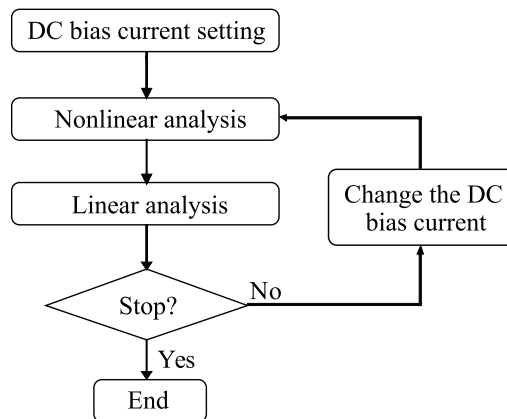


図5 直流重畳特性の解析フローチャート

2.2 最適化アルゴリズム

本節では、まず2.2.1にて本プロジェクトで用いた最適化アルゴリズムである免疫型アルゴリズムについて説明する。次に、2.2.2で最適化の評価関数とパラメータ調整方法について説明する。

2.2.1 免疫型アルゴリズム

本プロジェクトでは、最適化アルゴリズムとして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る。図6に免疫型アルゴリズムのフローチャートを示す^{2,3)}。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、図2に示したようにインダクタ形状をパラメータ化し、免疫型アルゴリズムの個体とし、(2)の評価関数値には2.1で述べた有限要素法を用いて計算したインダクタ性能の解析結果を設定する。これにより、要求する性能を満たす最適なインダクタ形状を自動的に決定可能になる。

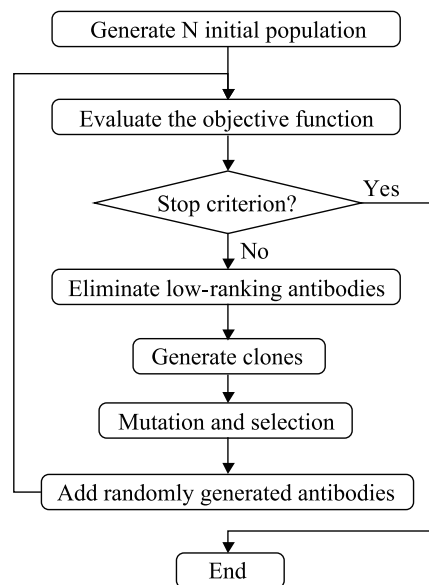


図6 免疫型アルゴリズムのフローチャート

2.2.2 評価関数とパラメータ調整方法

最適化の評価関数は、要求されるインダクタ性能に応じて設定する。直流重畳特性を評価関数とする場合には、要求される性能（例：1[A]でのインダクタンス値が80 [μ H]）に対する誤差を評価関数とし、その誤差が最小になるように最適化を行う。最適化するパラメータとしてインダクタの磁性体コアの寸法、巻き線の巻き数等の構造を設定する。最適化過程においてパラメータが変更された場合には、メッシュ情報を修正しながら解析モデルを変更し、評価解析を行う。

3. ESにおけるベクトル化と並列化検討

本プログラムは、全てC++を用いて実装した。プログラムは、①有限要素法による解析プログラム、②免疫型アルゴリズムによる最適化プログラムの2つから構成されている。本プログラムを地球シミュレータに移植するにあたり、ベクトルCPU向けへの高速化検討と、並列化検討を行った。3.1で高速化検討について述べ、3.2で並列化について説明する。

3.1 高速化検討

インダクタの電気的特性を評価する電磁界解析プログラムについて、高速化検討を行った。まず、有限要素法による計算をESで行うに当たり、(1)行列情報の保存形式をJDS (Jagged Diagonal Storage) 化した。次に、有限要素法での計算において最も負荷が大きい行列積演算について、(2) Unrolling化による高速化検討を行った。それぞれ2つについて、下記で説明する。

(1) 行列格納形式のJDS化

有限要素法の計算において、係数マトリクスは未知節点数で決定される。未知節点数が500である場合、係数マトリクスは 500×500 の大きさとなる。今回のインダクタの解析においても、未知節点数は数万以上になる。このような大規模行列を扱った有限要素法の計算を地球シミュレータで行うにあたり、ベクトル化性能を向上させるために行列の保存形式をJDS化した。

(2) Unrolling化

今回のインダクタ特性の計算について、プログラム性能をFtraceで検証したところ、最大の計算負荷は行列積の計算になることが明らかになった。要素数が約35万の場合、行列積の計算は全体の約34%を占めている。このため、プログラム全体の高速化を行う上で、この行列積の計算プログラムを高速化することが効果的であり、その方法を検討した。従来は、行列積をfor文による繰り返し計算で行っていた。この繰り返し計算の部分について、Unrolling化を行った。

3.2 並列化検討

免疫型アルゴリズムの計算では、図6に示すように各個体を全て評価した後、次の世代の個体生成を行う。各個体の評価計算（インダクタの電気的特性の評価）については、完全に独立しているため、評価計算について並列化処理が可能である。そこで、本プロジェクトでは、マスタ・スレイブ型の並列化を検討し、マスタ（1CPU）で最適化アルゴリズム全体を制御し、スレイブ（他のCPU）で評価計算を行うこととした。全ての個体について評価計算が終了した場合、マスタCPUで評価結果の集計と新規個体生成を行い、新たな個体の評価計算を再度スレイブCPUに分配する。

4. プログラム性能検証

本プログラムをESに実装した結果について、(1) Unrolling化の結果と(2) 並列化の結果の2つを述べる。本検証での解析では、有限要素法の要素数を約35万とした。

(1) Unrolling化の結果

表1にUnrolling化の前後の行列積プログラムにおける性能を示す。表1に示すように、Unrolling化によってベクトル演算率が向上し、計算処理速度が1.85倍となった。

表1 Unrolling化の性能比較

—	ベクトル演算率	FLOPS
Unrolling 前	99.45%	1205.1MFLOPS
Unrolling 後	99.83%	2223.9MFLOPS

(2) 並列化の結果

本年度の利用では、32ノードまでの並列化を実現した。表2に26ノードと32ノードで並列化した場合の性能を示す。26ノードと32ノードを比較した場合の並列化率は100.03%である。しかしながら、本年度の利用でロードバランスの影響が問題となることが明らかになった。並列化による性能を最大限に利用するためには、ロードバランスを考慮した最適化が重要となる。

表2 並列化の性能

CPU 数	Real Time(sec)	ベクトル演算率(%)
26ノード (208CPU)	4448.686	97.310
32ノード (256CPU)	3558.245	97.639

5. まとめ

本年度の地球シミュレータの利用において、インダクタ最適化プログラムを移植し、ベクトル化による高速化と並列化検討を行った。前者では、行列格納方式のJDS化とUnrolling化の検討により、ES向けへの高速化を実現できた。後者では、最適化計算の並列化を検討し、最大32ノードまでのCPUを利用した最適化計算が実現できた。

今後は、さらなる高速化検討と並列化の検討を行いつつ、より確実な最適化を実現するために免疫型アルゴリズムの最適化パラメータ（個体数など）のチューニングを行う予定である。

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) H.Igarashi, W.Watanabe, T.Matsuo, T.Mifune, K.Kawano, Y.Iijima, “Stochastic Optimization of Inductor Shapes”, The paper of Joint Technical Meeting on Static Apparatus and Rotating Machinery, IEE Japan, SA-08-65.93-98, 2008.
- 2) L.N.de Castro, J.Timmis, “Artificial immune systems: a new computational intelligence approach”, Springer-Verlag, 2002.
- 3) 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.