# 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\*<sup>2</sup>、五十嵐 一\*<sup>2</sup>、廣川 雄一\*<sup>3</sup>、西川 憲明\*<sup>3</sup>

- \*1 太陽誘電株式会社
- \* 2 国立大学法人北海道大学
- \* 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 23 年 4 月 1 日~平成 24 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の実現を目標としている。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しつつ、目的に応じた最適なインダクタの3次元構造を設計可能にすることを目指している。そのために、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設計技術を構築する。一般的に、3次元構造での電磁界解析では要素数が増加してしまうため、計算負荷が膨大となってしまう事が問題となる。このため、3次元構造での構造最適化を実用的な計算時間内で実現することが困難であった。そこで、本プロジェクトでは地球シミュレータの計算機機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3年目の利用である。今年度の利用では、実際に巻き線型インダクタ の構造最適化を実行することで、構築してきた最適化技術の有効性を検証する。

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、構造的特徴は日々変化し、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の要求が増してきている。加えて、最近では基板実装の高密度化に伴って磁性部品からの漏れ磁界の低減が要求される場合もある。従来、このような磁性部品への要求に応えるために、新たな磁性材料の開発と経験的な知識に基づいた構造設計を行ってきた。例えば、インダクタの大電流化を実現するために、飽和磁気特性が大きい磁性材料の開発が行われてきた。しかしながら、高度化する全ての要求を満たすには、磁性材料の改善と共に、磁性材料の特性を最大限に発揮するための最適な構造設計が必須となる。具体的には、磁性部品内部や磁性部品から漏れる磁束の流れを制御するような

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構築を目的とし、確率論的アルゴリズムと電磁界解析を組み合わせた最適化設計技術を開発している。一般的に3次元での有限要素法による電磁界解析には膨大な計算負荷が生じてしまう。そこで、本プロジェクトでは地球シミュレータ (ES) を利用し、プログラムをES向けにチューニングすることで実用的な時間内での最適化設計の実現を目指している。今年度は、これまで開発してきた最適化技術を巻き線型インダクタの最適化実験に適用し、実際に最適化の有効性を検証した。

以下では、2章で本プロジェクトの概要について示す。3章では、今年度行ったプログラム改良を説明し、4章では最適化実験の概要を説明する。5章では実験結果を示し、その結果を検証する。最後に6章でまとめを述べる。

#### 2. 本プロジェクトの概要

インダクタの磁性部品の構造最適化を実現するために、本プロジェクトではインダクタの構造をパラメータ化し、有限要素法による電磁界解析によって磁性部品の特性をシミュレーションすることで現状のパラメータの評価値を計算する。その評価結果をもとに確率論的アルゴリズムで構造パラメータを探索し、最終的に要求する仕様を満たす最適な構造パラメータを自動で決定する。本プロジェクトでは、確率論的アルゴリズムとして免疫型アルゴリズムを用いている。最適化計算の際には、順にパラメータの候補値を評価していく必要があるが、その評価値の計算を並列化することで最適化計算の時間短縮を図っている。

昨年度までの検討により、四面体要素を用いた有限要素法を用いた場合、構造最適化の際に行うメッシュ変形において問題を引き起こす事が明らかになった。四面体要素の場合には構造パラメータの変更に応じてメッシュ構造を変形する必要があり、その際に不当なメッシュ変形が生じてしまう。そこで、昨年度の検討では、その解決策として Voxel 要素を用いる事にし、不当なメッシュ変形が生じないようにした。しかしながら、Voxel 要素を用いることで四面体要素の場合に比べて全体での要素数が増加していまい、計算負荷が増加してしまう。このため、Voxel 要素での ES 向けにプログラムチューニングを行い、構造最適化の計算効率の向上を目指している。

#### 3. プログラム改良点

本年度の利用において、Voxel 要素を用いた有限要素法による電磁界解析を高速化するために、要素間のマルチカラー化の検討を行った。具体的には、図1に示すように Voxel 要素を4つの色に分割し、全ての要素において同じ色の要素が隣り合う事がないようにした。

本プロジェクトにおける従来のプログラムでは、有限要素行列の生成において、要素間の依存関係があるために要素順に処理を進める必要があり、要素数の繰り返し処理が必要であった。マルチカラー化を行うことで、要素間の依存関係を取り除くことができ、色ごとに効率的に行列生成を行うことが可能になり、ベクトル化率を改善した。

今年度のプログラム改良による計算機性能の向上結果を検証するために、Voxel 要素数が 100 万要素での条件にて性能検証を行った。その結果、昨年度までのプログラムと比較し、計算性能を 409MFLOPS から 5035MFLOPS に約 12 倍向上できた。検証には計算機 8 ノードを並列化させ、同様な条件にて最適化計算を行った。

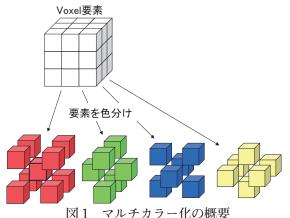
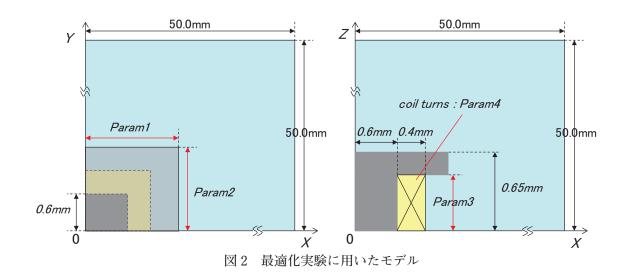


図1 マルチカラー化の概要

## 4. 最適化実験の概要

本年度では、実際に巻き線型インダクタを用いた最適化実験を行った。図2に実験に使用した解析モデ ルを示す。図2に示すように、今回の実験では磁性体コアのツバ部分と軸部分は角型とし、解析には1/8 モデルを用いた。磁性体コアの高さ、軸の幅、巻き線領域の幅は固定とし、それぞれ 1.3mm、0.6mm、0.4mm とした。磁性体コアの材料は透磁率を400に固定し、非線形特性は扱わないものとした。解析モデルのメッ シュ構造は図3に示すような分割数でメッシュを生成し、全要素数を100万要素とした。

構造パラメータとして4つのパラメータ (Param1、Param2、Param3、Param4) を設定した。Param1 と Param2 には磁性体コアのツバ部分の幅、Param3 には磁性体コアの軸部分の長さを設定した。Param4 には巻き線の巻き数である。最適化のパラメータは実数とし、各々のパラメータの調整範囲は表1の通り とした。



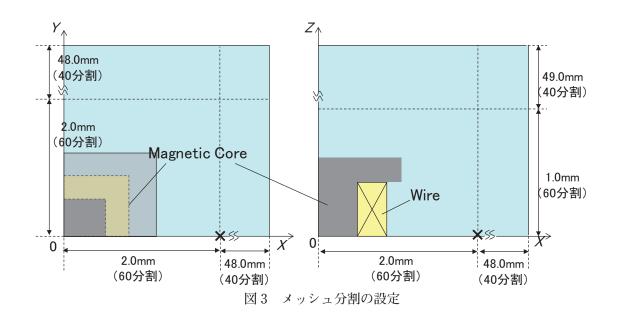


表1 パラメータの調整範囲

パラメータ	最小値	最大値
Param1	0.2mm	0.5mm
Param2	1.0mm	1.5mm
Param3	1.0mm	1.5mm
Param4	5 ターン	9 ターン

今回の最適化実験では、所要のインダクタンス値を満たしつつ、任意の座標における磁東密度を最小にするようなインダクタの構造最適化を行う。これによって、インダクタからの漏れ磁束の流れを制御した設計を目指す。そこで、最適化における評価関数 func は、次の式(1)のように設定した。

$$func = | B_{sim} | + penalty$$

(1)

ここで、 $B_{\text{sim}}$  は設定した xyz 座標の磁束密度の絶対値であり、xyz 方向の各々の磁束密度を  $B_x$ 、 $B_y$ 、 $B_z$  とした場合に  $B_{\text{sim}}$ =( $B_x^2+B_y^2+B_z^2$ ) $^{1/2}$  である。penalty は、インダクタのインダクタンス値をある一定の範囲内(誤差 10% 以内)にするための制約条件であり、

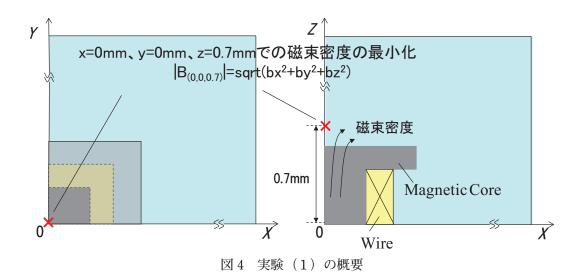
| L - 2.2  $\mu$  H | > 0.22  $\mu$  H の場合:penalty = ( | L-2.2  $\mu$  H | -0.22  $\mu$  H)  $\times\,10^{12}$ 

 $| L - 2.2 \mu H | < 0.22 \mu H$  の場合:penalty = 0

とした。ここで、L は電磁界解析で計算したインダクタンス値であり、今回の実験では目標のインダクタンス値を  $2.2~\mu$  H とした。インダクタンス値の誤差が $\pm$  10% の範囲内になるように制約条件を設けた。今回の検討では、最適化実験として次の 2 つのパターンを行った。

## 実験(1)

図4に示すように(0mm,0mm,0.7mm)の座標における磁束密度を最小にするような構造最適化を行う。 つまり、インダクタの上下部分への漏れ磁束を最小化するような設計を行う。



### 実験(2)

図5に示すように (2.0mm, 0mm) の座標における磁束密度を最小にする様な構造最適化を行う。 つまり、漏れ磁束によってインダクタと同一平面上に実装された他の部品への影響を最小化するような設計を行う。

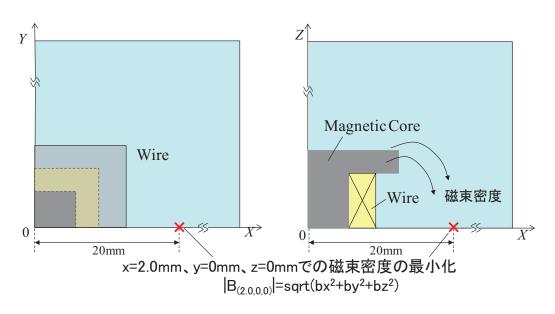


図5 実験(2)の概要

### 5. 最適化実験の結果および検証

図 6、7 に実験(1)と実験(2)の実行結果を示す。図 6、7 の横軸は最適化の世代数、縦軸は各世代における評価関数の最小値を示している。図 6、7 に示すように、実験(1)と実験(2)ともに世代数が進むに従って評価関数の値が最小化している。2 つの結果ともに約 20 世代以降は評価関数値の変化がなく、設定した最適化パラメータ範囲での最適値がほぼ探索できていると言える。最適化の結果として得られたそれぞれのパラメータは表 2 の通りである。

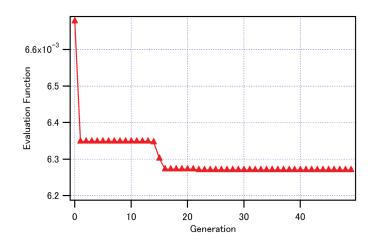


図6 実験(1)の最適化結果

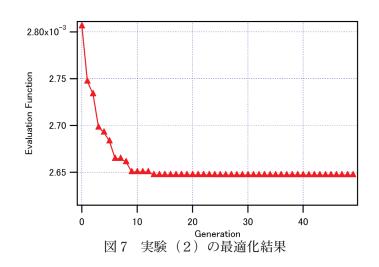


表 2 最適化結果のパラメータ値

パラメータ	実験(1)の結果	実験(2)の結果
Param1	0.3243mm	0.288mm
Param2	1.458mm	1.024mm
Param3	1.486mm	1.031mm
Param4	5.0 ターン	6.4 ターン

図8に実験(1)と実験(2)の最適化構造の3次元モデルを示す。図8のモデルは全体の1/8モデルである。図9は各々の構造における磁力線の様子を示している。表2と図8からわかるように、実験(1)の結果ではツバ部分の幅が長くなっており、軸の長さは実験(2)の結果と比較して長くなっている。この結果、図9に示すように実験(1)では磁束を水平方向に流れ易くし、インダクタの上部から漏れる磁力線を抑えている。一方、実験(2)の結果ではツバ部分が短くなっており、軸の長さも短い。実験(2)の構造では、ツバ部分の幅が短くしたことで、図9に示すように磁束を垂直方向に流れ易くし、水平方向への漏れ磁束を抑えている。磁性体コアの構造を変形させる事でインダクタンス値が変形するが、各々の

構造において所要のインダクタンス値を満たすために巻き線の数を調整しており、実験(1)と実験(2) ともにインダクタンス値は 2.2  $\mu$  H  $\pm$  10% を満たしている。

以上のように、本最適化実験において任意の座標での磁束密度の大きさを評価関数に設定することで、 磁束の流れを制御したインダクタ設計が可能であることを示せた。

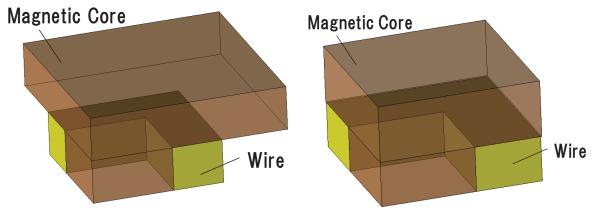


図8 最適化構造の3次元モデル(左:実験(1)、右:実験(2))

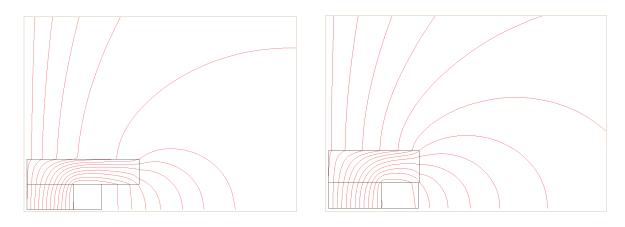


図9 最適化構造の磁力線分布(左:実験(1)、右:実験(2))

## 6. まとめ

本年度の利用においては、(1) Voxel 要素を用いた有限要素法による電磁界解析プログラムのチューニング、(2) 巻き線型インダクタを用いた最適化実験と検証、の2つを行った。前者では、マルチカラー化による処理を施すことで計算処理能力を向上させ、プログラムの実行速度を昨年度と比較して約12倍高速化させた。後者では、実際に巻き線型インダクタの構造最適化を行い、磁束密度の分布を制御した構造最適化を実現した。実験によって、最適化の評価関数の設定に応じて、磁束密度の分布を制御し、所要のインダクタンス値を満たすインダクタ設計が実現できることを示した。

今後、本プロジェクトによって高度化し続ける磁性部品に対する要求を満たす設計を短期間で効率的に 実現でき、アプリケーションや回路設計者の要望に応じた最適なインダクタ設計が期待できる。

## 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さま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。