



HOKKAIDO
UNIVERSITY

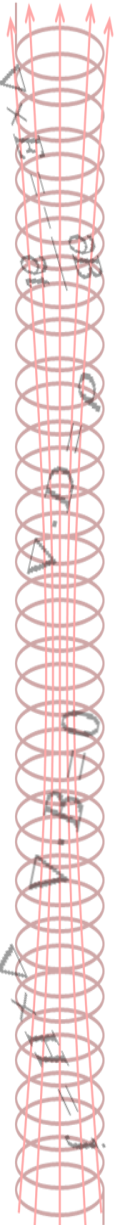
非適合有限要素法を用いた インダクタの三次元形状最適化



伊藤 泰久*, 五十嵐 一, 渡辺 浩太
(北海道大学)
飯島 洋祐, 河野 健二
(太陽誘電)

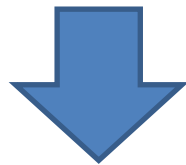
発表構成

- 研究背景
- 研究目的
- 補間法
- 非線形有限要素方程式
- 解析モデル
- 形状最適化
- 形状最適化結果
- 結論

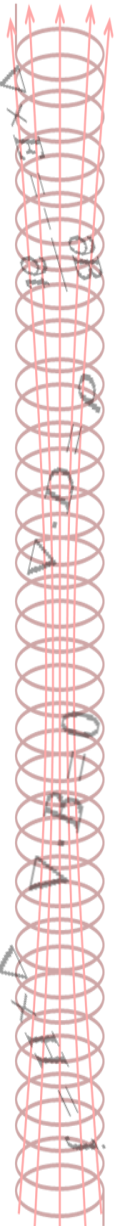


研究背景

- 電磁機器の開発において、有限要素解析に基づいた三次元形状最適化が広く行われている。
- 最適化を行う際、多くのモデルは複数の形状から構成されている。

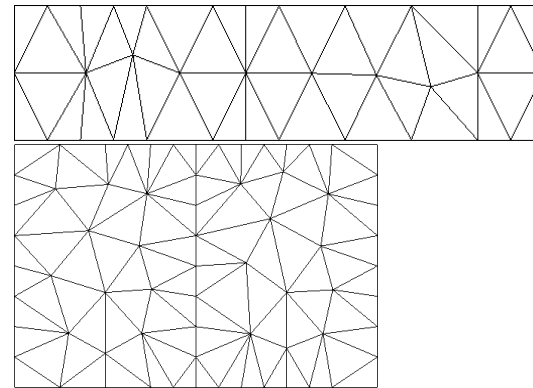
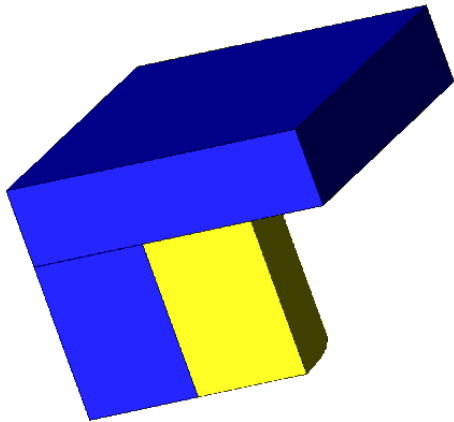


- 用いる有限要素メッシュが1つであると・・・
 - ・モデル形状が変化する度にメッシュを作成
 - ・解析時間が増加

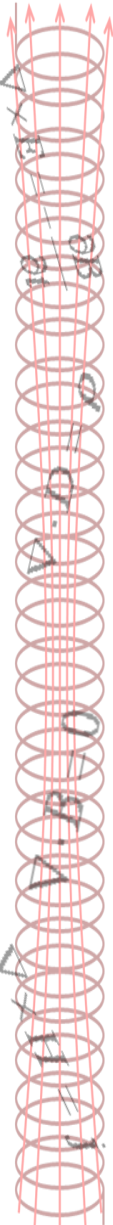


研究背景

- 用いるメッシュデータが1つであると・・・
 - モデル形状が変化する度にメッシュを作成
 - 解析時間が増加
- 複数の部分領域ごとにメッシュを作成すると・・・



- メッシュの作成は解析前の一度のみ
- 解析の簡便性が向上
- モータなどの移動体にも適用可能

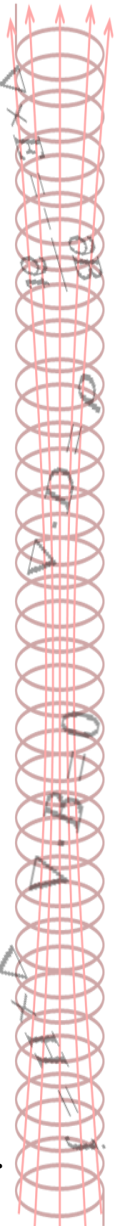


- このとき、メッシュは一般に非適合となるため、何らかの処方が必要になる。

非適合有限要素法

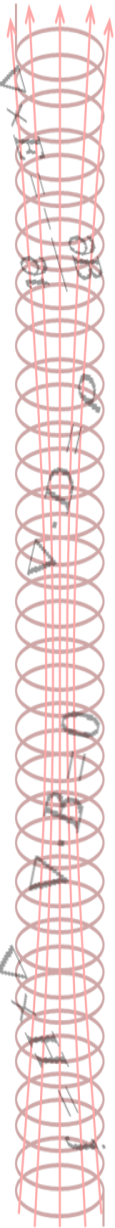
手法	磁束連続性を課す方法
不連続ガラージン法	ペナルティ項 ⇒精度がペナルティ係数に依存
モルタル有限要素法	ラグランジュ未定乗数法 ⇒零対角項があり、特別な線形計算法が必要
補間法	一方のメッシュの辺に割り振られた未知数をもう一方のメッシュの辺に割り振られた未知数の線形和で表わす方法*

*C.Golovanov, J.L.Coulomb, Y.Marechal, G.Meunier, "3D Mesh Connection Techniques Applied to Movement Simulation," *IEEE Trans. Magn.*, vol.34, no.5, pp.3359-3362, 1998.



研究目的

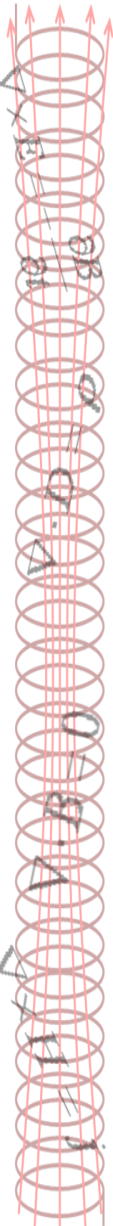
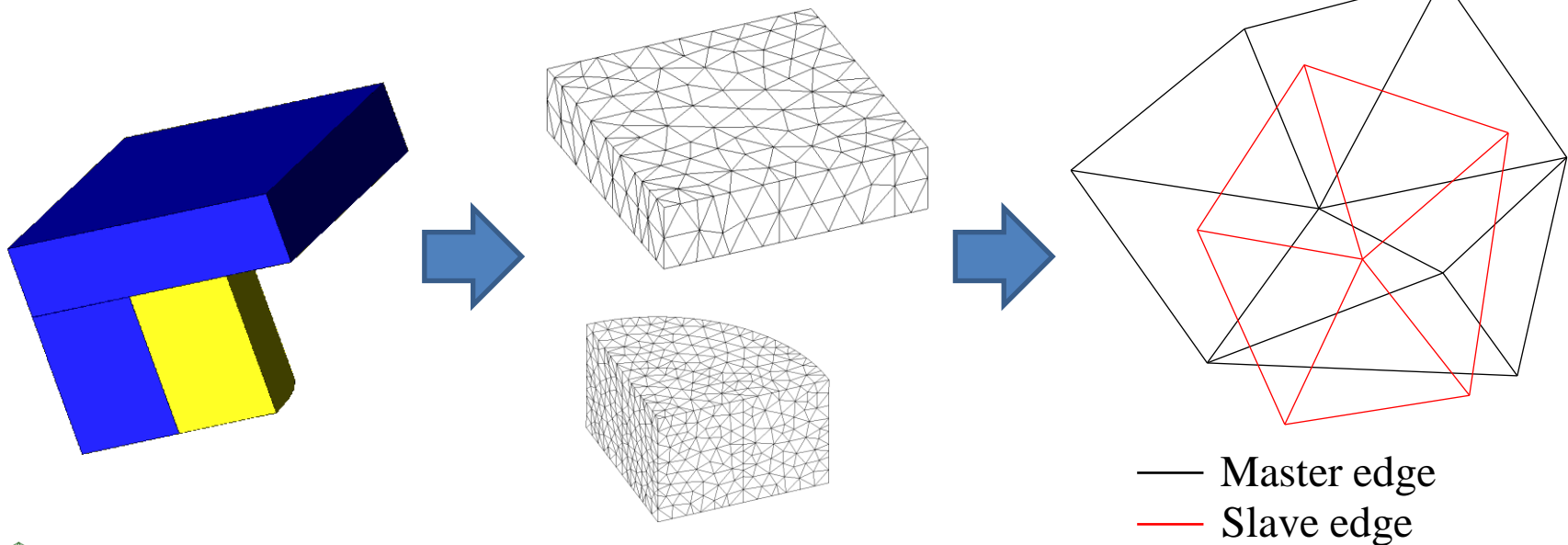
- 補間法を非線形有限要素解析に適用し、その有用性を確認する.
- それを用いてインダクタの三次元形状最適化を行い、その結果について検討する.
- このとき、弱いバイアス電流において所望のインダクタンスとなり、かつ強いバイアス電流においてインダクタンスの減少が決められた値以下となることを課す.
- 同時に、インダクタの体積ができるだけ小さくなることも課す.



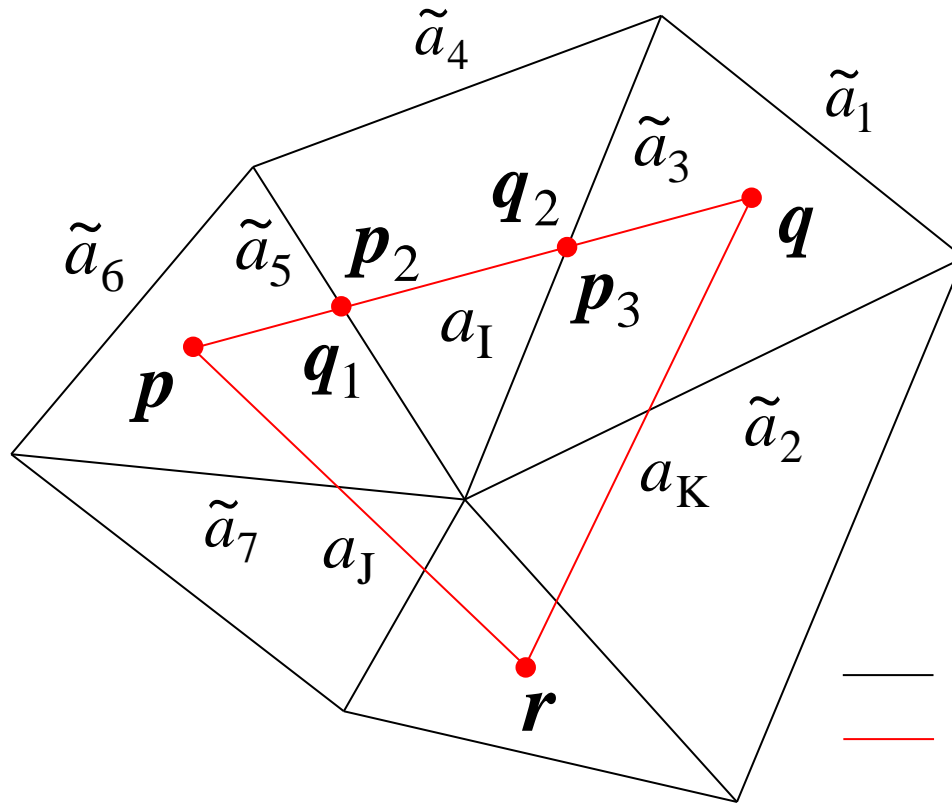
補間法

- 一方のメッシュの辺に割り振られた未知数をもう一方のメッシュの辺に割り振られた未知数の線形和で表わす方法

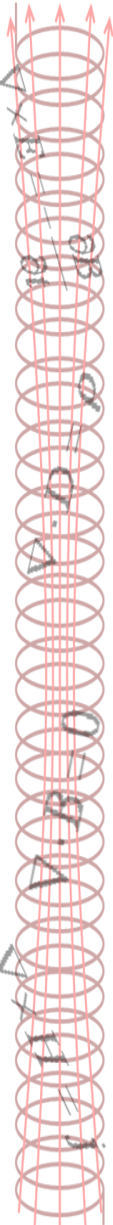
スレーブ, マスターと呼ぶ.



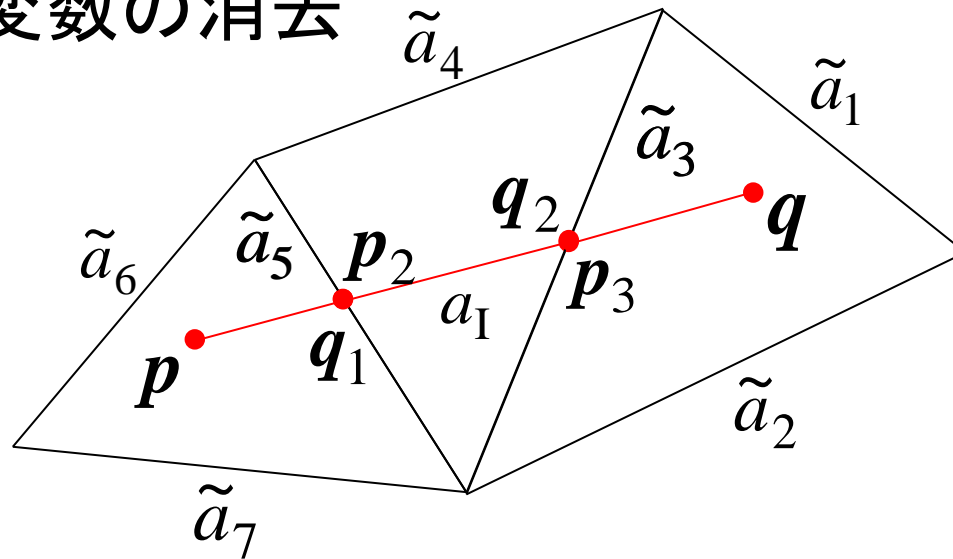
- スレーブ変数の消去



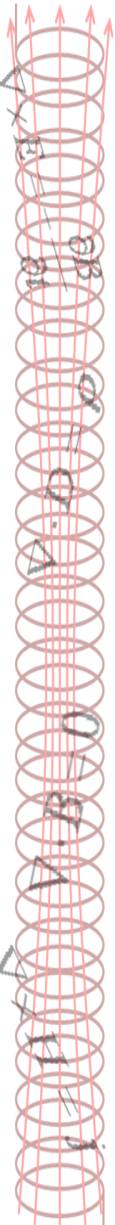
1~7: マスター辺
 I, J, K: スレーブ辺



- スレーブ変数の消去

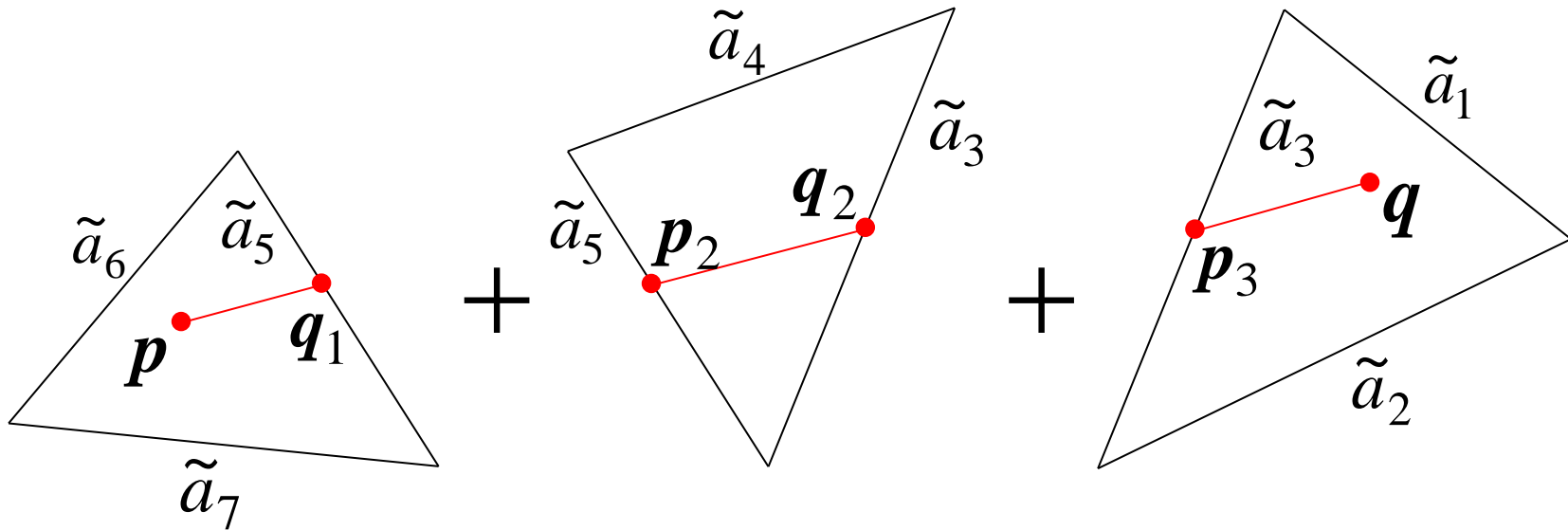


$$\begin{aligned}
 a_I = \int_{(p,q)} \mathbf{a} \cdot d\mathbf{s} &= \tilde{a}_5 \int_{(p,q_1)} N_5 \cdot d\mathbf{s} + \tilde{a}_6 \int_{(p,q_1)} N_6 \cdot d\mathbf{s} + \tilde{a}_7 \int_{(p,q_1)} N_7 \cdot d\mathbf{s} \\
 &+ \tilde{a}_3 \int_{(p_2,q_2)} N_3 \cdot d\mathbf{s} + \tilde{a}_4 \int_{(p_2,q_2)} N_4 \cdot d\mathbf{s} + \tilde{a}_5 \int_{(p_2,q_2)} N_5 \cdot d\mathbf{s} \\
 &+ \tilde{a}_1 \int_{(p_3,q)} N_1 \cdot d\mathbf{s} + \tilde{a}_2 \int_{(p_3,q)} N_2 \cdot d\mathbf{s} + \tilde{a}_3 \int_{(p_3,q)} N_3 \cdot d\mathbf{s}
 \end{aligned}$$



補間法

- スレーブ変数の消去



$$\begin{aligned}
 a_I &= \int_{(p,q)} a \cdot ds = \sum_k \sum_{j=1}^3 \tilde{a}_j^k \int_{(p_k, q_k)} N_j \cdot ds \\
 &= \sum_j C_{Ij} \tilde{a}_j
 \end{aligned}$$

$$\Rightarrow a = C\tilde{a} \quad (1)$$

a : すべての辺を含む解ベクトル
 \tilde{a} : マスター辺のみで構成される解ベクトル



非線形有限要素方程式

- Newton-Raphson法を用いる.

$$G(\tilde{\mathbf{a}}) \equiv \mathbf{K}(\tilde{\mathbf{a}}) - \mathbf{b} = 0 \quad (2)$$

$$K_i = \sum_{j=1}^e a_j \int_{\Omega} \nu(\mathbf{a}) \operatorname{rot} N_i \cdot \operatorname{rot} N_j dV$$

$$\frac{\partial \mathbf{K}}{\partial \tilde{\mathbf{a}}} \Delta \tilde{\mathbf{a}} = \mathbf{b} - \mathbf{K}(\tilde{\mathbf{a}}) \quad (3)$$

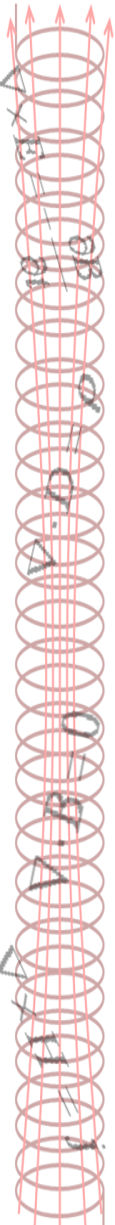
$$b_i = \int_{\Omega} N_i \cdot \mathbf{J} dV$$

ここで,

$$\frac{\partial \mathbf{K}}{\partial \tilde{\mathbf{a}}} = \frac{\partial \mathbf{K}}{\partial \mathbf{a}} \frac{\partial \mathbf{a}}{\partial \tilde{\mathbf{a}}} = \frac{\partial \mathbf{K}}{\partial \mathbf{a}} \frac{\partial}{\partial \tilde{\mathbf{a}}} (\mathbf{C} \tilde{\mathbf{a}}) = \frac{\partial \mathbf{K}}{\partial \mathbf{a}} \mathbf{C} \quad (4)$$

したがって, 両辺に左から \mathbf{C}^t をかけて

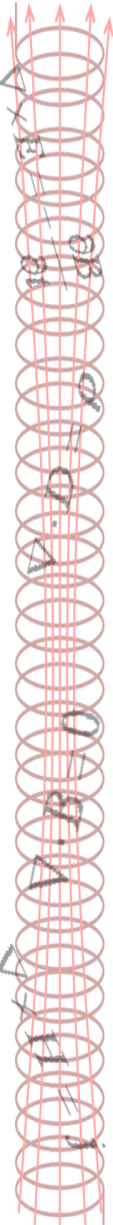
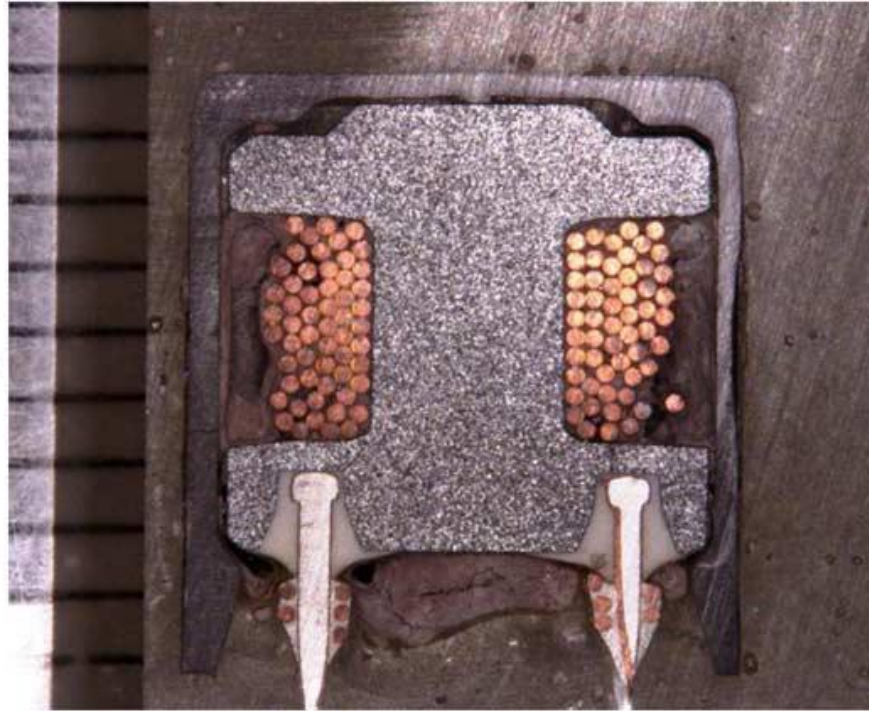
$$\mathbf{C}^t \frac{\partial \mathbf{K}}{\partial \mathbf{a}} \mathbf{C} \Delta \tilde{\mathbf{a}} = \mathbf{C}^t (\mathbf{b} - \mathbf{K}(\tilde{\mathbf{a}})) \quad (5)$$



解析モデル

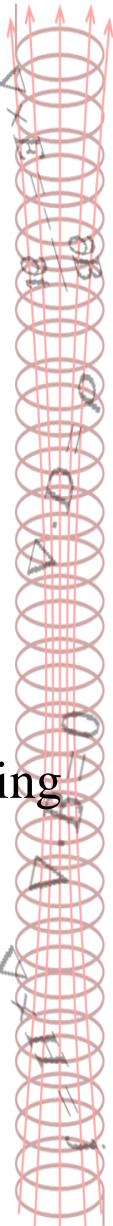
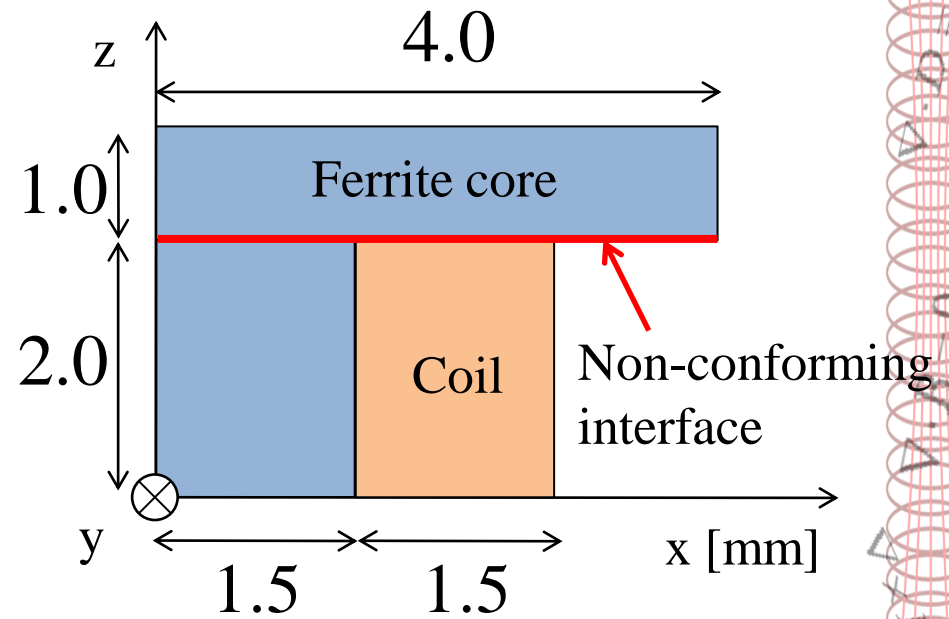
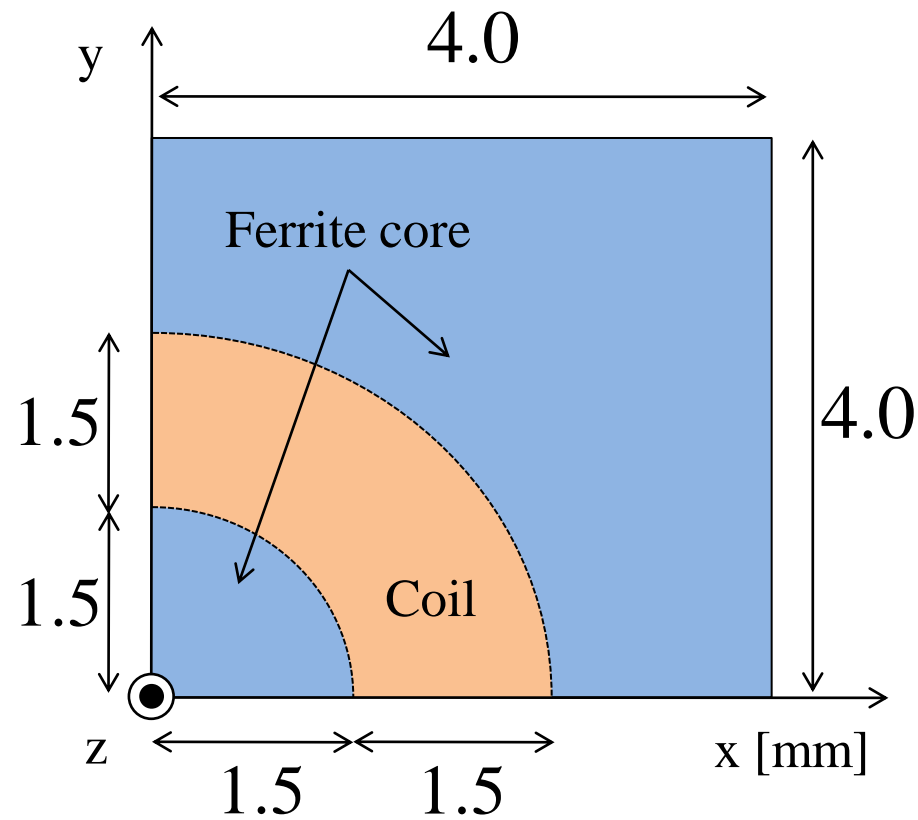
- 1/8モデルで解析を行う。

1mm \diamond



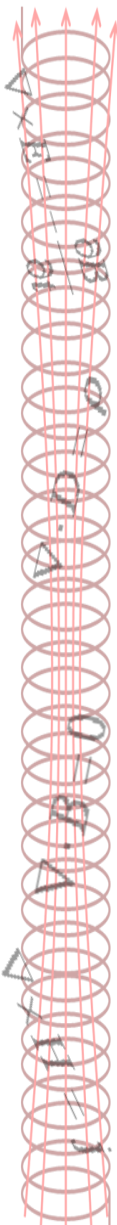
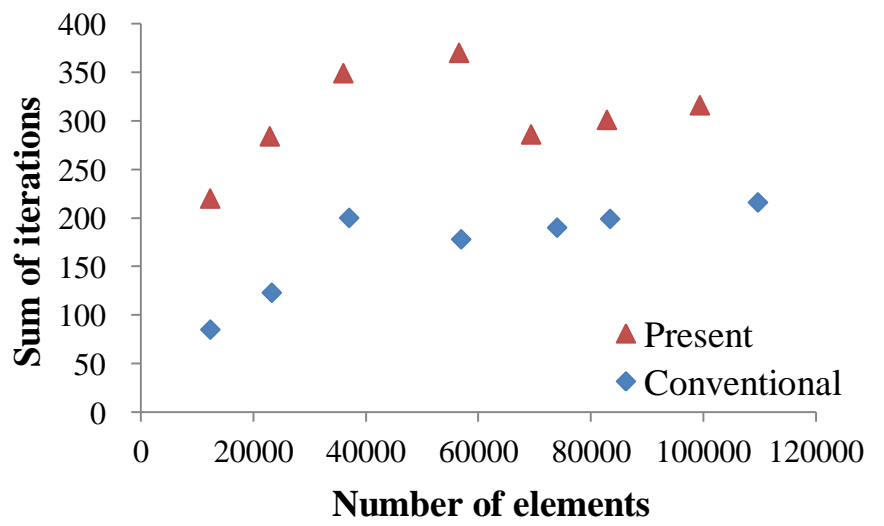
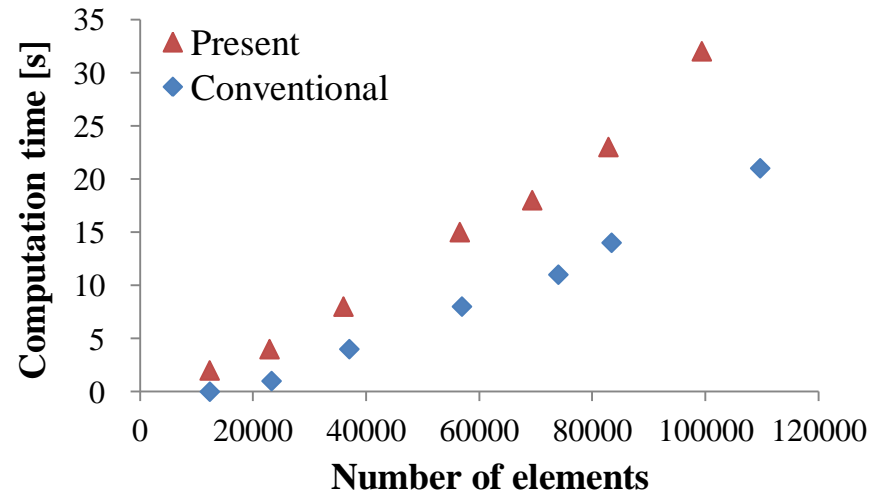
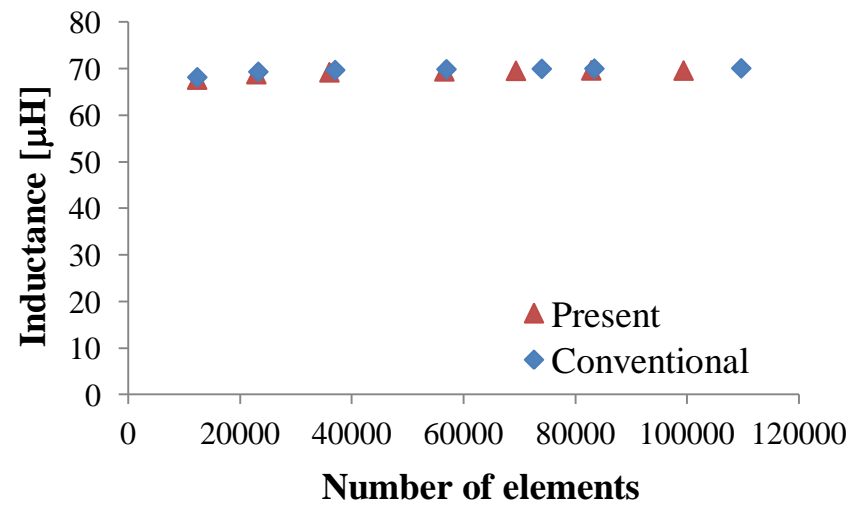
解析モデル

- 1/8モデルで解析を行う。



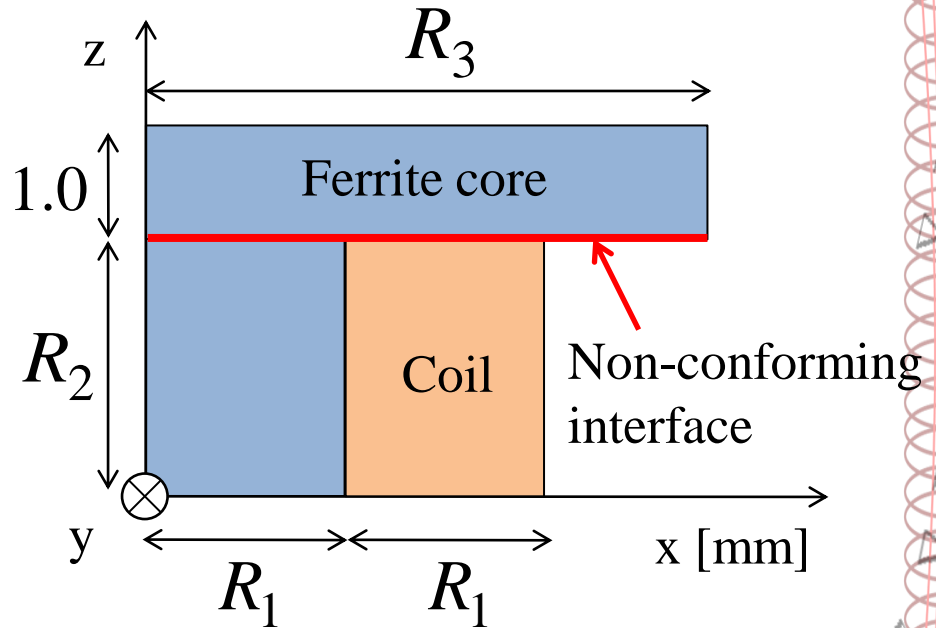
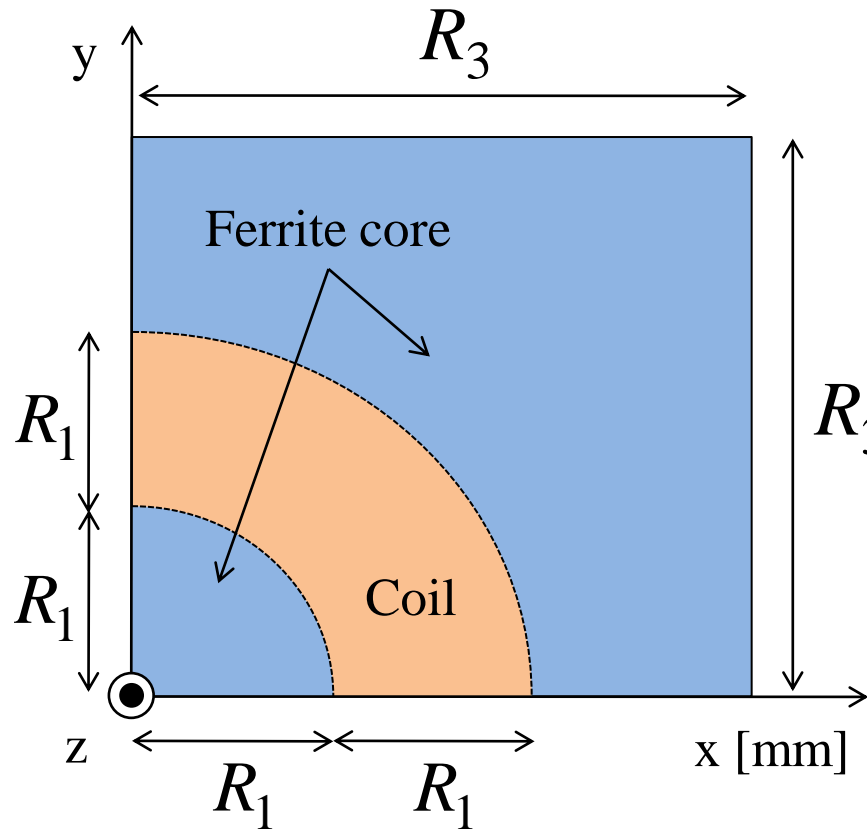
非線形解析結果

- インダクタンス, 解析時間, ICCG法の収束回数

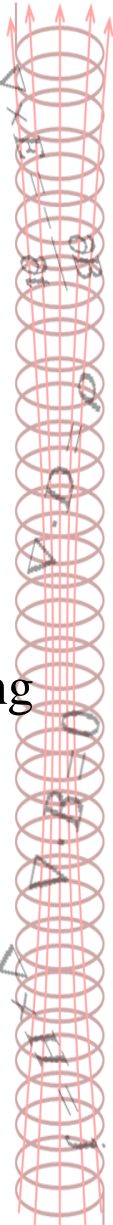


解析モデル

- 最適化変数は R_1 , R_2 , R_3 の3つである。



ただし, $R_1=1.5$, $R_2=2.0$, $R_3=4.0$ [mm]の状態から
0.5~1.5倍の拡大・縮小を行う。



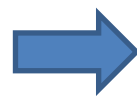
形状最適化

- インダクタコイルに、直流成分に交流の信号成分を重畳した電流を流すことを想定する。

- 目的関数*

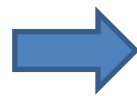
*K.Watanabe, F.Campelo, Y.Iijima, K.Kawano, T.Matsuo, T.Mifune, H.Igarashi, "Optimization of Inductors Using Evolutionary Algorithms and Its Experimental Validation," *IEEE Trans. Magn.*, vo.46, no.8, pp.3393-3396, 2010.

- DCバイアス電流0.2Aでのインダクタンス



$$L_{AC1} = 100\mu\text{H}$$

- DCバイアス電流1.0Aでのインダクタンス

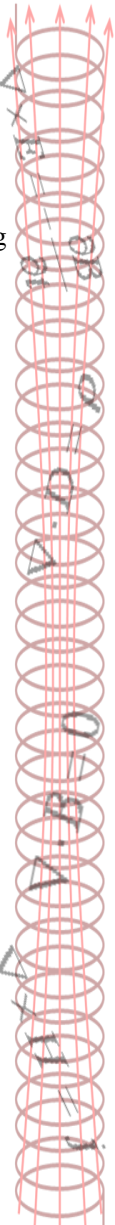


$$L_{AC2} \geq 80\mu\text{H}$$

- 外寸体積 ($10^8 W^2 H$) を小さくする。

$$f(R_1, R_2, R_3) = -\left\{ \left| L_{AC1} \times 10^6 - 100 \right| + 10^8 W^2 H + \textit{penalty} \right\} \rightarrow \max \quad (6)$$

$$\textit{penalty} = \begin{cases} 0 & \text{if } L_{AC2} \geq 80\mu\text{H} \\ 80 - L_{AC2} \times 10^6 & \text{if } L_{AC2} < 80\mu\text{H} \end{cases} \quad (7)$$

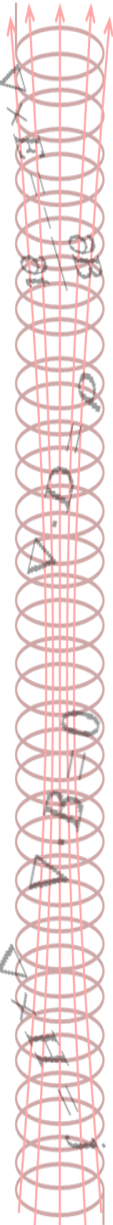
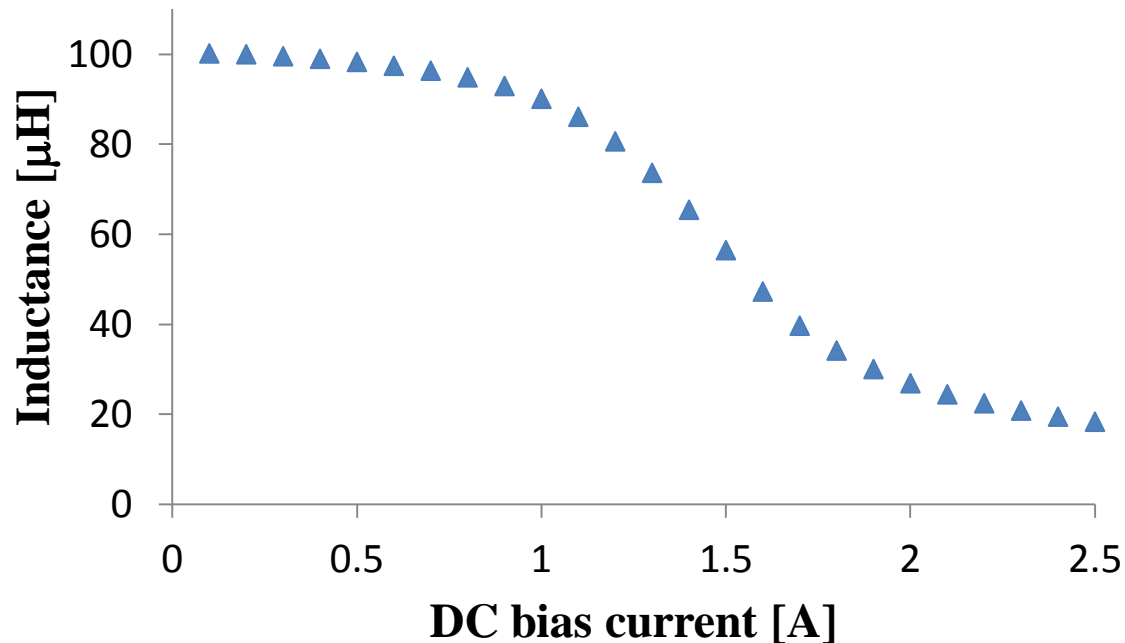


形状最適化結果

- 最適解 (実数型遺伝的アルゴリズム)

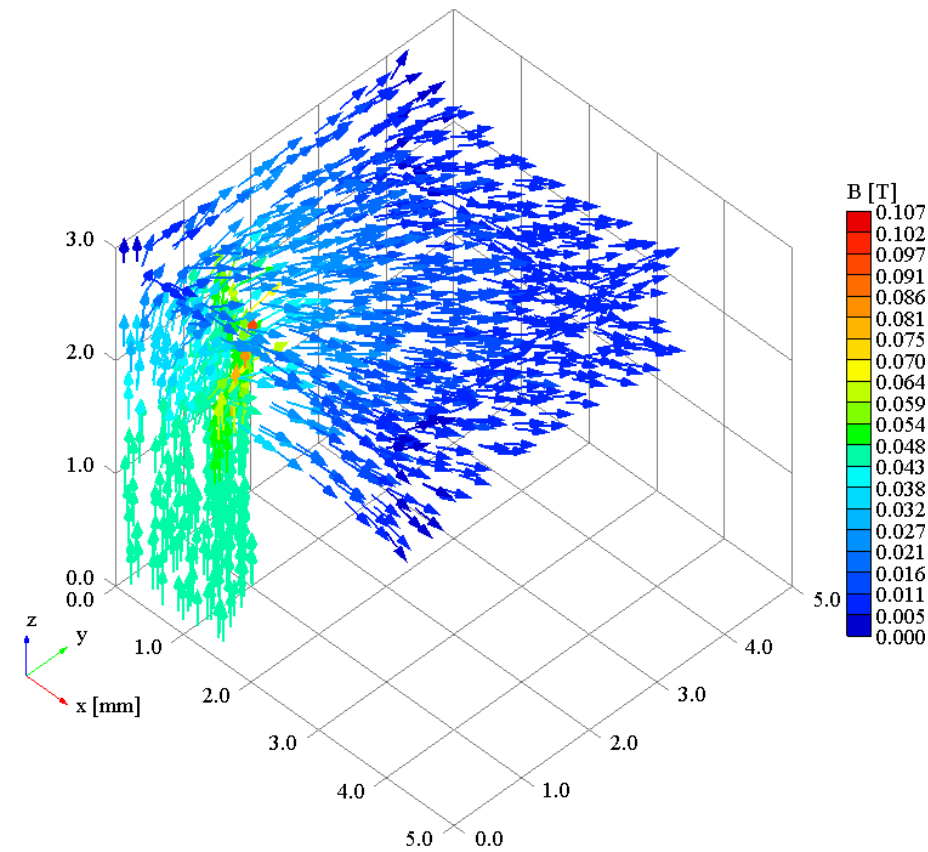
<i>Fitness</i>	L_{AC1}	L_{AC2}	$10^8 W^2 H$	R_1	R_2	R_3
-5.03	100.0	90.1	5.03	1.92	1.19	4.80
(Reference)			4.80	1.50	2.00	4.00

- バイアス電流依存特性

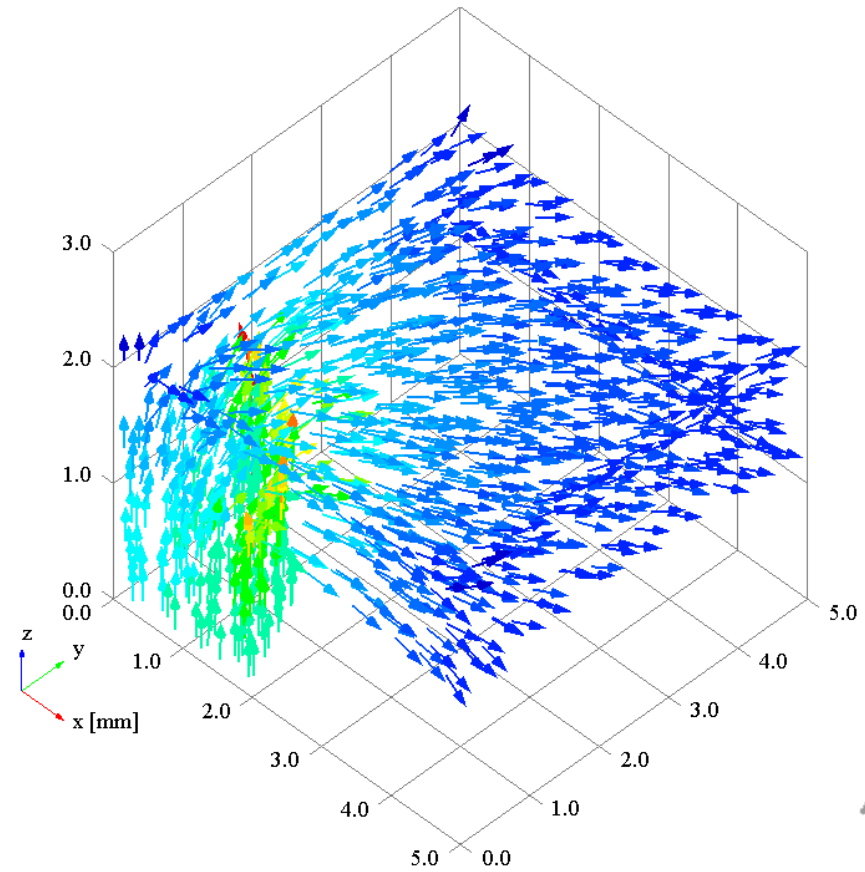


形状最適化結果

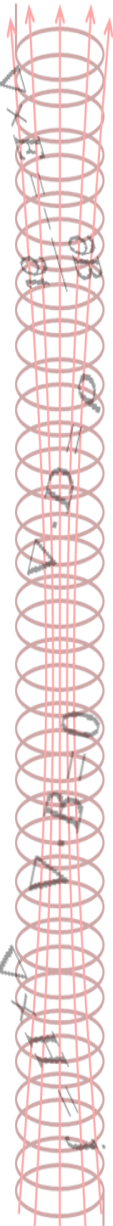
- 磁束密度分布



(a) Reference model

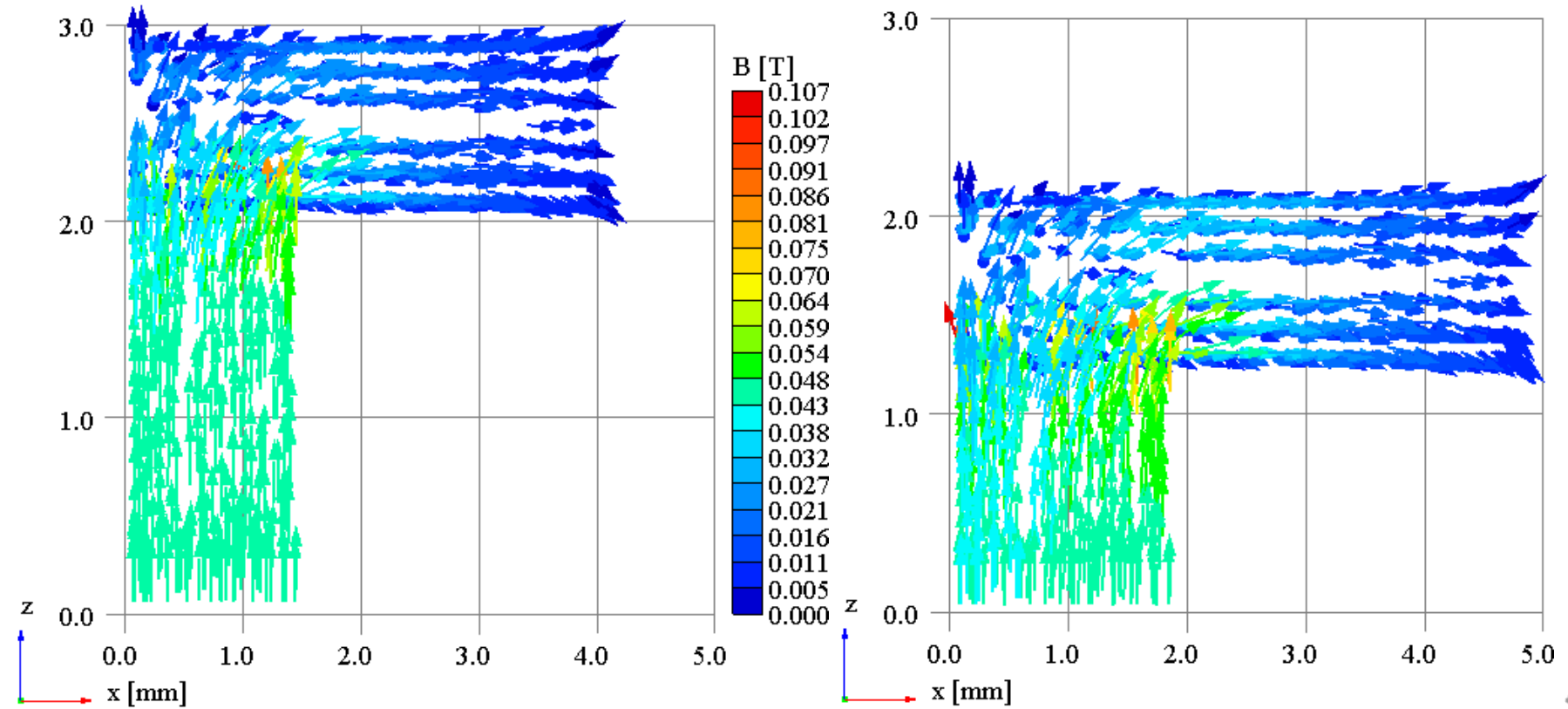


(b) Optimized model



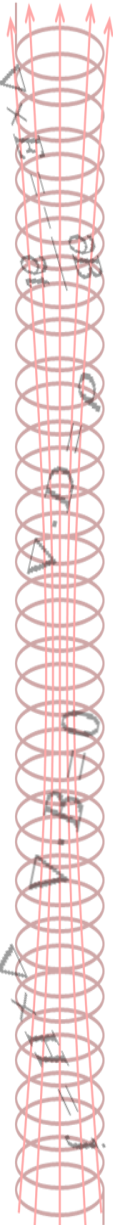
形状最適化結果

- 磁束密度分布



(a) Reference model

(b) Optimized model



- 補間法を非線形有限要素解析に適用し、その有用性を確認した.
- それを用いてインダクタの三次元形状最適化を行った.
- このとき、インダクタコイルに直流成分に交流の信号成分を重畳した電流を流すことを想定し最適解を得た.
- その結果、得られた最適形状は文献*で得られた最適形状と同じ特徴を持つことがわかった.

*K.Watanabe, F.Campelo, Y.Iijima, K.Kawano, T.Matsuo, T.Mifune, H.Igarashi, "Optimization of Inductors Using Evolutionary Algorithms and Its Experimental Validation," *IEEE Trans. Magn.*, vo.46, no.8, pp.3393-3396, 2010.

