2013年９月４日
平成２５年度電気学会C部門大会
先端技術セミナー

電磁界解析による最適設計技術

五十嵐　一

北海道大学　情報科学研究科
システム複合情報学研究室

http://hbd.ist.hokudai.ac.jp

計算知能による設計とは

人工知能の進展:
日産ミーブの自動運転
コンピュータが将棋に勝った
IBMワトソンがアメリカのクイズ番組で優勝
顔認識(USJ)

設計に適した方法は？

エキスパートシステム:どのように知識を表現し，活用するか

計算知能:
計算(シミュレーション)により知能処理を実現する

電磁界解析と進化論的最適化

1970年代	1st COMPUMAG 1976 Weiland, 有限積分法(FIT) 1977	Holland "Advances in Natural and Artificial Systems" 1978
1980年代	中田・高橋 1982 「電気工学の有限要素法」 Silvester&Ferrari "Finite elements for electrical engineers" 1983 Bossavit, 辺有限要素法 1988	Goldberg "Genetic Algorithm in Search, Optimization and Machine Learning" 1989
1990年代	3次元解析 GAによる最適化 Berenger, Perfect Matched Layer 1994	Michalewicz, " Genetic Algorithm + Data Structure=Evolution Programs" 1994 IEEE Trans. Evolutional Computation 1997
2000年代	商用ソフトの普及	Multi-objective, Particle Swarm…

Genetic Algorithm + Computational Electromagnetism = ?

Maxwell 方程式

$$\mathrm{rot}\mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$$

$$\mathrm{rot}\mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\mathrm{div}\mathbf{D} = \rho$$

$$\mathrm{div}\mathbf{B} = 0$$

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E}$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$$

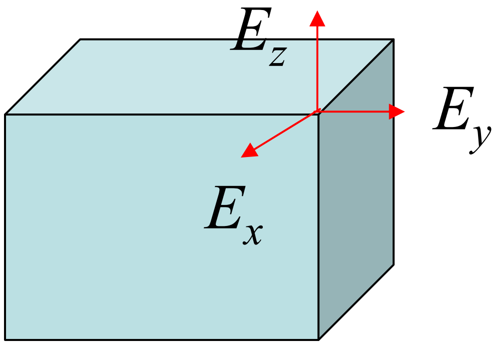
電磁界解析手法のまとめ

	有限要素法	FDTD (FIT)	モーメント法
原理	重み付残差法	Yeeアルゴリズム	積分方程式
主な用途	低周波 $\Delta t, j\omega$ 高周波 $j\omega$	高周波 Δt	高周波 $j\omega$
長所	形状表現能力	時間陽解法	無限領域
短所	時間陰解法 無限領域	形状表現能力	不均一媒質

電磁界の離散化

電界 $\boldsymbol{E}(\boldsymbol{x})$ を節点ベースの補間関数で近似する方法

$$\mathbf{E}(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^{\mathrm{n}} \mathbf{E}_i N_i(\mathbf{x})$$



有限要素

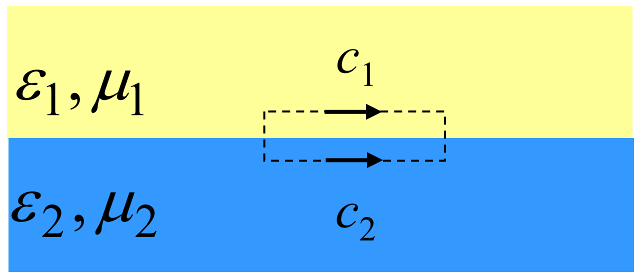
要素の界面で $\boldsymbol{E}$ の全成分が連続となる

↓

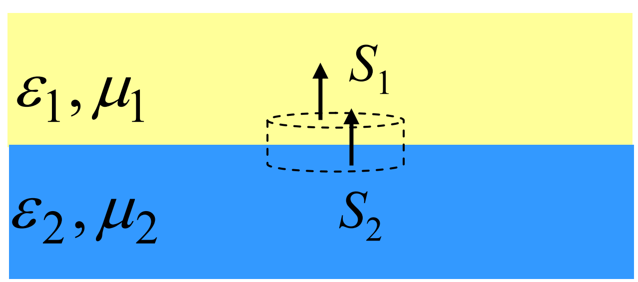
$\boldsymbol{E}$ の法線成分の不連続性を表せない
後に述べる可換性も満足できない

電磁界の境界条件

$$\int_{c_1} \boldsymbol{H} \cdot \mathrm{d}\mathbf{l} = \int_{c_2} \boldsymbol{H} \cdot \mathrm{d}\mathbf{l} \qquad \int_{c_1} \boldsymbol{E} \cdot \mathrm{d}\mathbf{l} = \int_{c_2} \boldsymbol{E} \cdot \mathrm{d}\mathbf{l}$$



$$\int_{S_1} \boldsymbol{D} \cdot \mathrm{d}\mathbf{S} = \int_{S_2} \boldsymbol{D} \cdot \mathrm{d}\mathbf{S} \qquad \int_{S_1} \boldsymbol{B} \cdot \mathrm{d}\mathbf{S} = \int_{S_2} \boldsymbol{B} \cdot \mathrm{d}\mathbf{S}$$



直接計測可能な量を変数とすべし

起電力 $e_i = \oint_{c_i} \boldsymbol{E} \cdot \mathrm{d}\mathbf{l}$

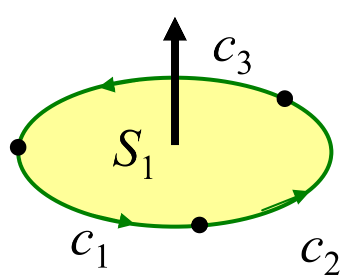
起磁力 $h_i = \oint_{c_i} \boldsymbol{H} \cdot \mathrm{d}\mathbf{l}$

磁束 $b_i = \int_{S_i} \boldsymbol{B} \cdot \mathrm{d}\mathbf{S}$

電束 $d_i = \int_{S_i} \boldsymbol{D} \cdot \mathrm{d}\mathbf{S}$

アンペアの法則 (静磁界)

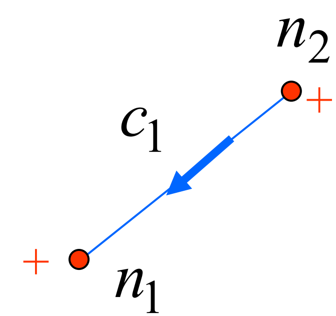
$$h_1 + h_2 + h_3 = j_1$$



ファラデーの法則

$$e_1 + e_2 + e_3 = -\frac{\mathrm{d}b_1}{\mathrm{d}t}$$

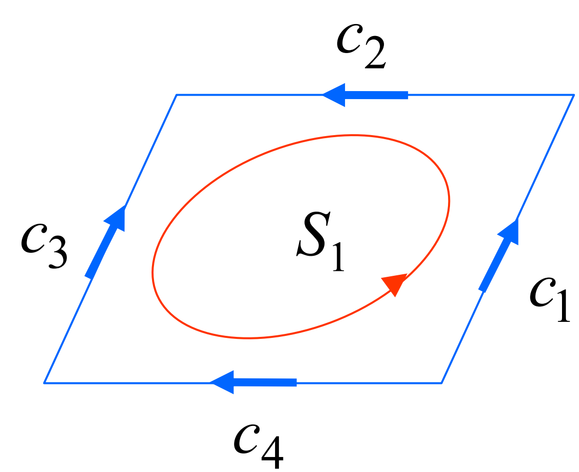
勾配行列 G と 回転行列 R
(節点接続行列と閉路行列)



$$\partial c_1 = n_1 - n_2 = \sum_j G_{1j} n_j$$

$$G_{ij} = \begin{cases} 1\,(-1) \cdots \partial C_i \text{ が } n_j \text{ に入る (出る)} \\ 0 \qquad\quad \cdots \partial C_i \text{ が } n_j \text{ を含まない} \end{cases}$$

$$R_{ij} = \begin{cases} 1\,(-1) \cdots \partial S_1 \text{ が } c_j \text{ と平行 (反平行)} \\ 0 \qquad\quad \cdots \partial S_1 \text{ が } c_j \text{ を含まない} \end{cases}$$



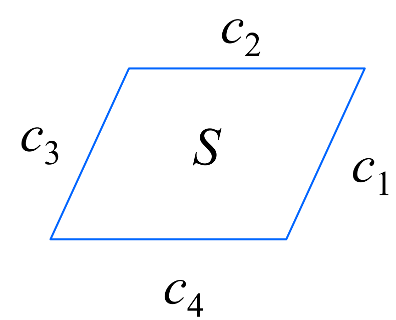
$$\partial S_1 = c_1 + c_2 - c_3 - c_4 = \sum_j R_{1j} c_j$$

$$\boxed{\mathrm{RG} = 0 \Leftrightarrow \mathrm{rot\,grad} = 0}$$

離散化により保存される性質

連続系 $\mathrm{rot}\,\mathrm{grad}\,u = 0$

離散系 $\mathrm{RG}\boldsymbol{u} = 0$



境界の境界はゼロ

$$\partial\partial S_i = \partial \sum_j R_{ij} c_j = \sum_{j,k} R_{ij} G_{jk} n_k = 0$$

$$\therefore \mathrm{RG} = 0$$

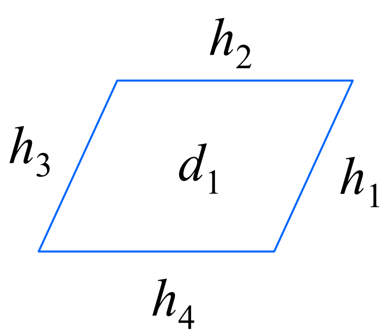
同様に

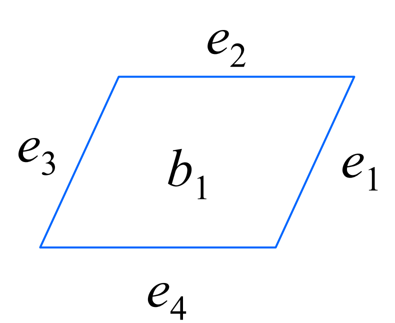
連続系 $\mathrm{div}\,\mathrm{rot}\,\boldsymbol{A} = 0$

離散系 $\mathrm{DR}\boldsymbol{a} = 0$

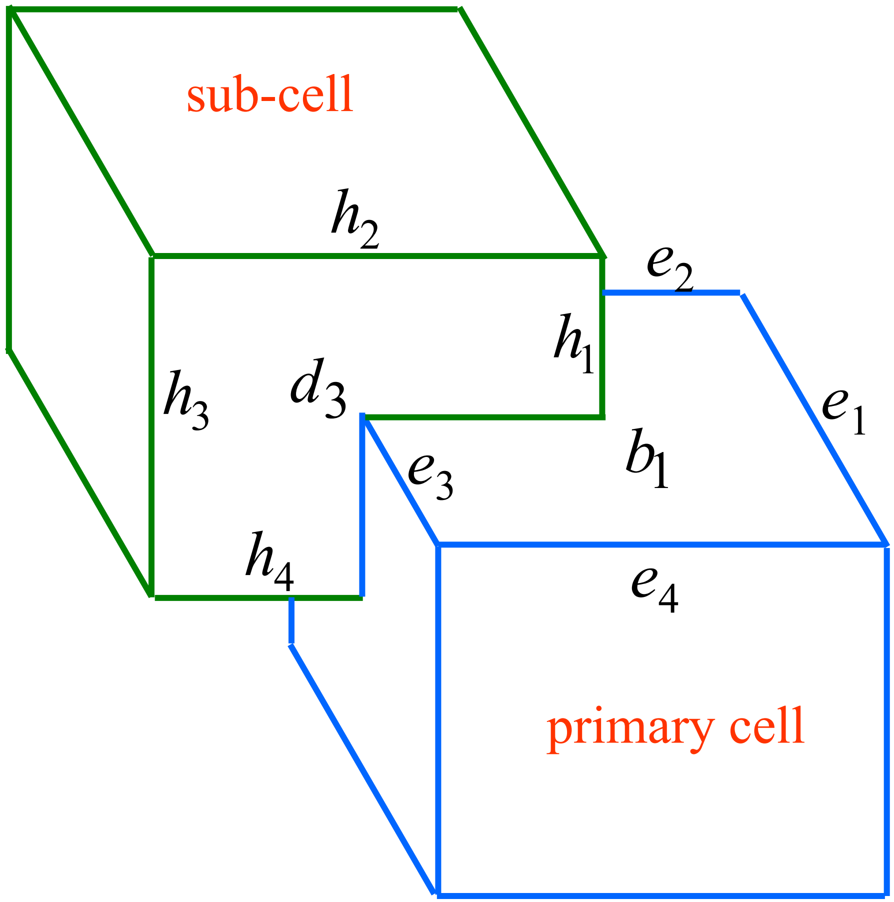
マクスウェル方程式の離散化

	アンペア則	ファラデーの法則
微分形	$\mathrm{rot}\boldsymbol{H} = \dfrac{\partial \boldsymbol{D}}{\partial t}$	$\mathrm{rot}\boldsymbol{E} = -\dfrac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t}$
積分形	$\oint_{\partial S} \boldsymbol{H} \cdot d\boldsymbol{l} = \int_{S} \dot{\boldsymbol{D}} \cdot \boldsymbol{n}\, dS$	$\oint_{\partial S} \boldsymbol{E} \cdot d\boldsymbol{l} = -\int_{S} \dot{\boldsymbol{B}} \cdot \boldsymbol{n}\, dS$
離散計	$\mathrm{R}\boldsymbol{h} = \dot{\boldsymbol{d}}$	$\mathrm{R}\boldsymbol{e} = -\dot{\boldsymbol{b}}$





FDTD法 (FIT)



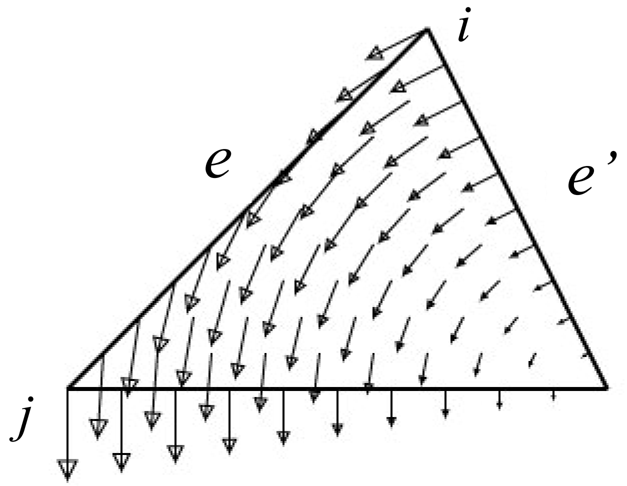
$$[R]\boldsymbol{e}^n = -[\mu]\frac{\boldsymbol{h}^{n+1/2} - \boldsymbol{h}^{n-1/2}}{\Delta t}$$

$$[R]^t\, \boldsymbol{h}^{n+1/2} = \boldsymbol{j}^{n+1/2} + [\varepsilon]\frac{\boldsymbol{e}^{n+1} - \boldsymbol{e}^n}{\Delta t}$$

有限要素法の基底関数が満足すべき条件

直交性 $\int_{e'} \mathbf{N}_e \cdot d\mathbf{l} = \delta_{ee'}$

$$\mathbf{A} = \sum_e a_e \mathbf{N}_e \quad \Rightarrow \quad a_e = \int_e \mathbf{A} \cdot d\mathbf{l}$$



$\boldsymbol{N}_e = \lambda_i \nabla \lambda_j - \lambda_j \nabla \lambda_i$

可換性 $[\mathrm{rot}\boldsymbol{N}] = \mathrm{R}^{\mathrm{t}}[\boldsymbol{M}]$

$$\mathbf{A} = \sum_e a_e \mathbf{N}_e \xrightarrow{\mathrm{rot}} \mathbf{B} = \sum_e a_e \,\mathrm{rot}\mathbf{N}_e$$

$$\Updownarrow$$

$$\mathbf{B} = \sum_s b_s \mathbf{M}_s = \sum_{s,e} R_{se} a_e \mathbf{M}_s$$

有限要素法の定式化

重み付き残差法

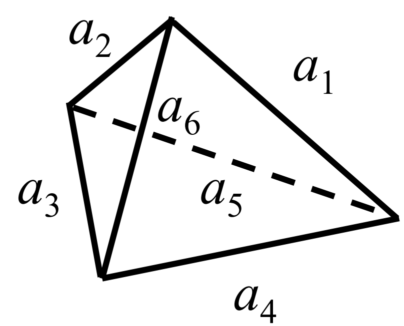
$$\int_{\Omega} \boldsymbol{w}(\boldsymbol{x}) \cdot \underbrace{[\mathrm{rot}(\nu(\boldsymbol{x})\mathrm{rot}\boldsymbol{A}(\boldsymbol{x})) - \boldsymbol{J}(\boldsymbol{x})]}_{\text{残差}} dV = 0$$

部分積分により弱形式を得る

$$\int_{\Omega} (\nu \mathrm{rot}\boldsymbol{w} \cdot \mathrm{rot}\boldsymbol{A} - \boldsymbol{w} \cdot \boldsymbol{J}) dV = 0$$

辺要素による近似

$$\boldsymbol{A}(\boldsymbol{x}) = \sum_{i} a_i \boldsymbol{N}_i(\boldsymbol{x})$$



ガレルキン法

$$\boldsymbol{w} = \boldsymbol{N}_i, i = 1,2,\ldots,e$$

有限要素方程式

$$\sum_j a_j \int_\Omega (\nu \mathrm{rot} \boldsymbol{N}_i \cdot \mathrm{rot} \boldsymbol{N}_\mathrm{j})\, dV = \int_\Omega \boldsymbol{N}_i \cdot \boldsymbol{J}\, dV, \quad i = 1,2,..,e$$

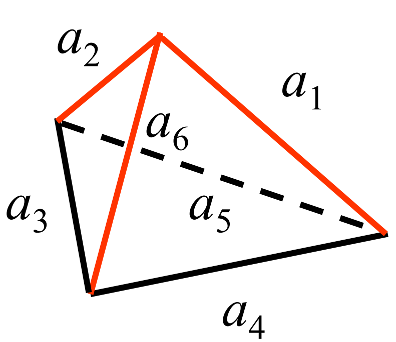
行列形式では

$$\mathrm{R}^{\mathrm{t}}\mathrm{NR}\boldsymbol{a} = \boldsymbol{j} \quad \Longleftrightarrow \quad \mathrm{rot}\left(\nu\, \mathrm{rot}\, \boldsymbol{A}\right) = \boldsymbol{J}$$

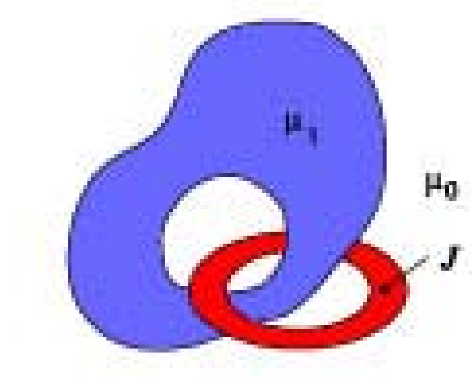
特異行列

$$\mathrm{Ker(R)} = \mathrm{G} \qquad \mathrm{Ker(rot)} = \mathrm{grad}$$

spanning treeの変数は冗長

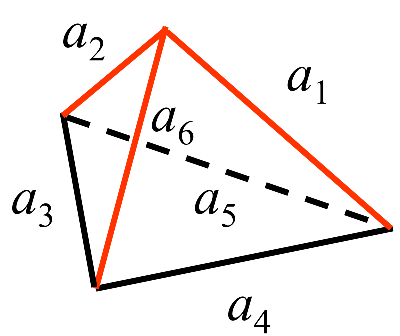


静磁界の有限要素解析



連続系	離散系
$\mathrm{rot}\left(\nu\,\mathrm{rot}\,\boldsymbol{A}\right)=\boldsymbol{J}$	$\mathrm{R}^{\mathrm{t}}\mathrm{NR}\boldsymbol{a}=\boldsymbol{j}$ 特異行列
$\mathrm{Ker(rot)}=\mathrm{grad}$	$\mathrm{Ker(R)}=\mathrm{G}$

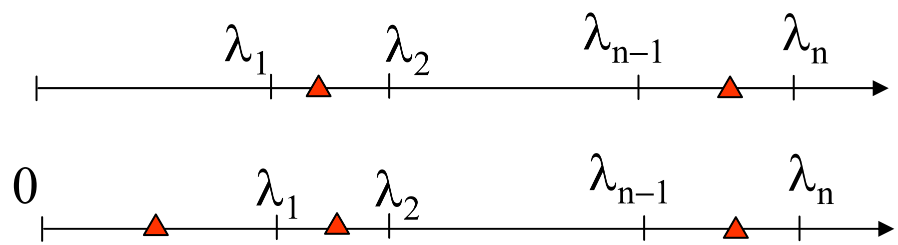
spanning treeの変数は冗長



正則化は行列条件の悪化を招く

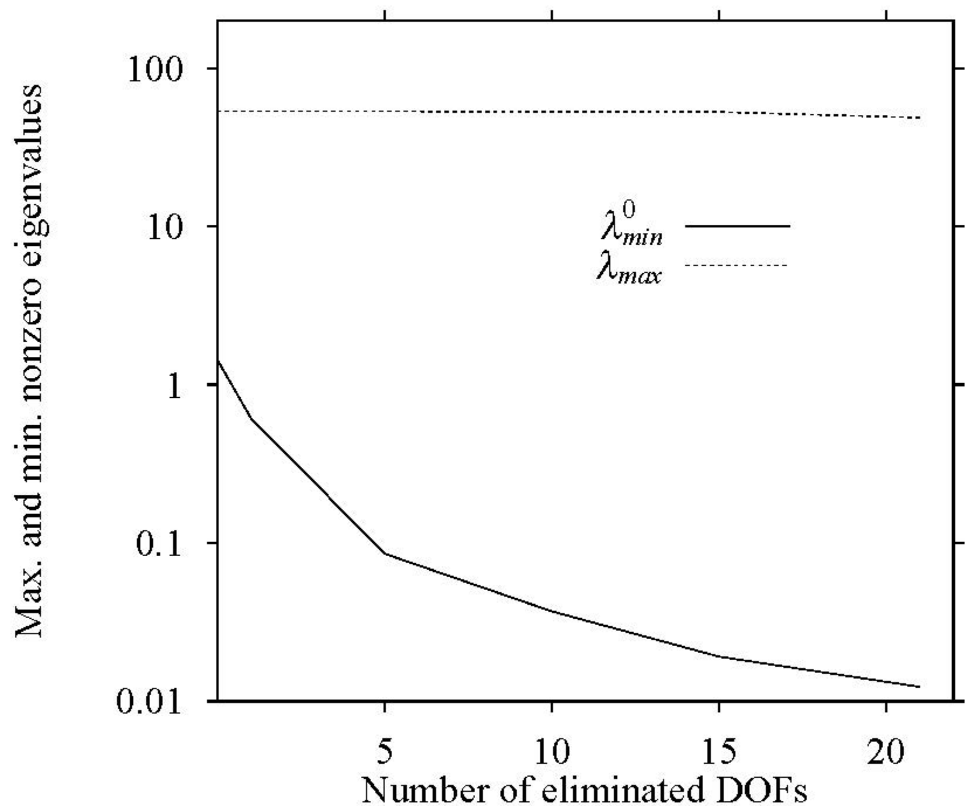
正則行列

特異行列



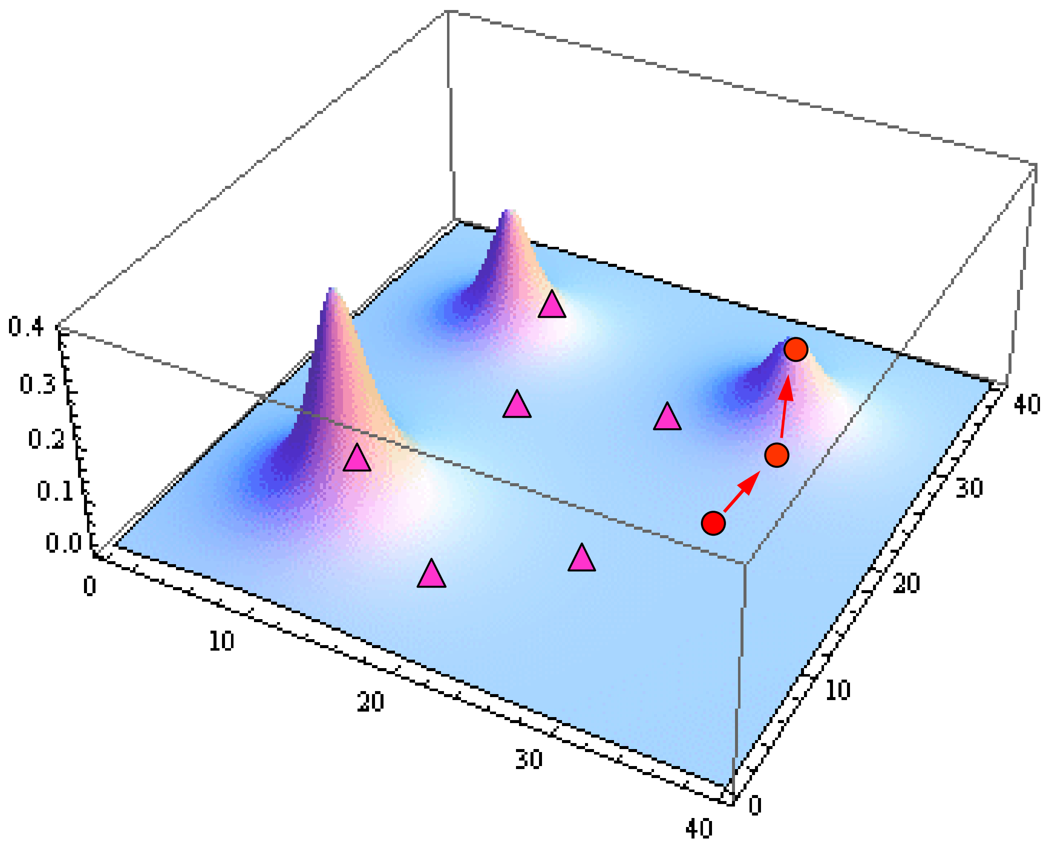
条件数

$$\mathrm{cond}(K) = \frac{\lambda_{\max}}{\lambda_{\min}}$$

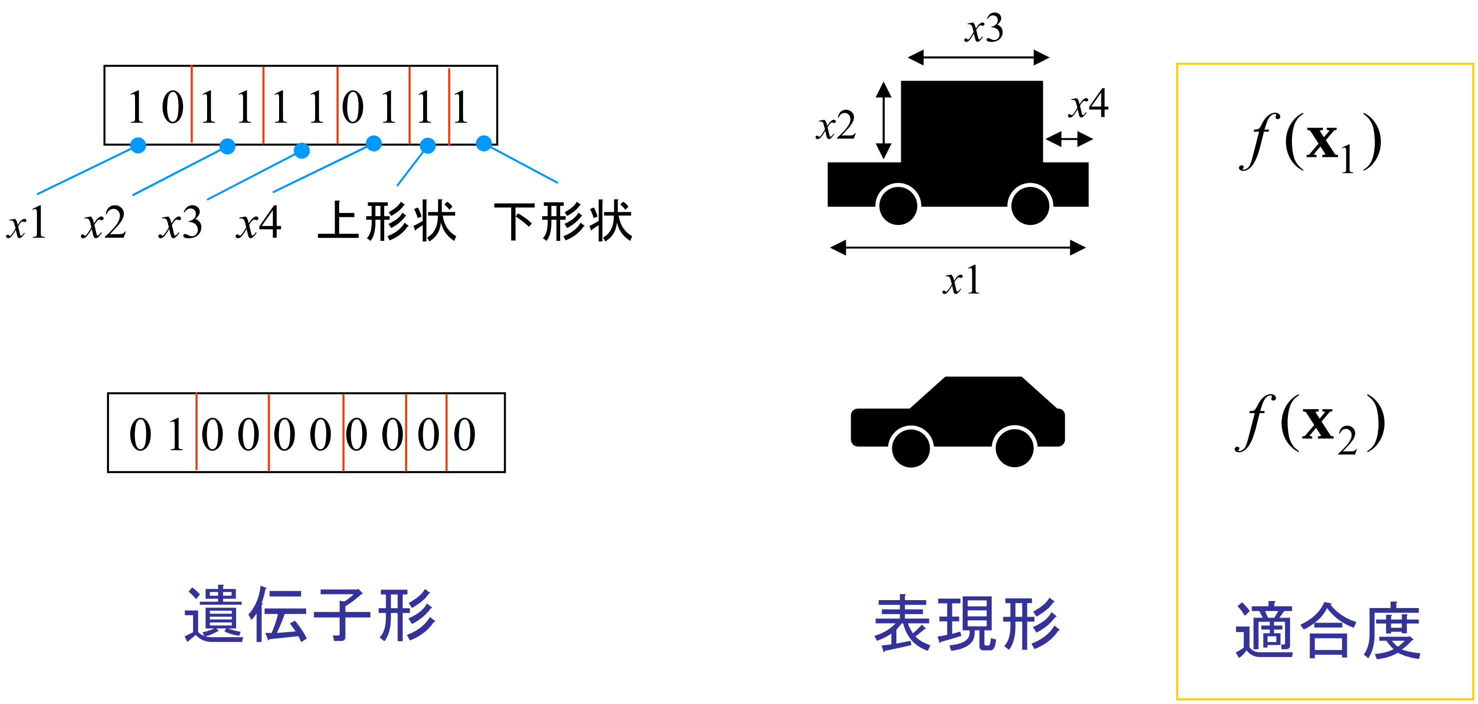


H. Igarashi, "On the Property of the Curl-Curl matrix in Finite Element Analysis with Edge Elements", IEEE Trans. Magn., vol. 37, no.5, pp.3129-3132 (2001)

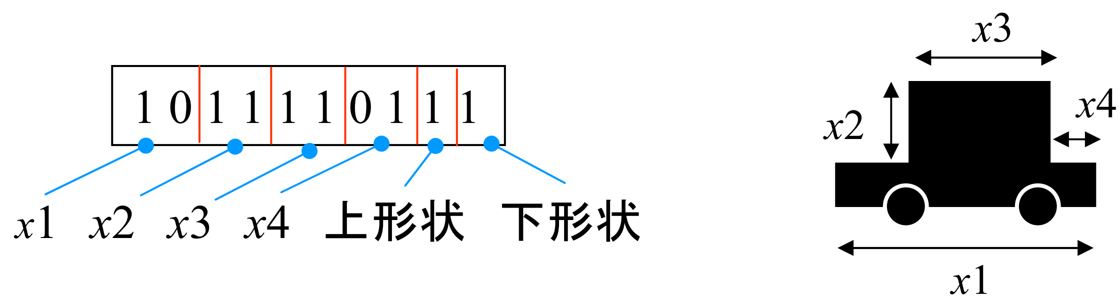
山登り法と集団的探索

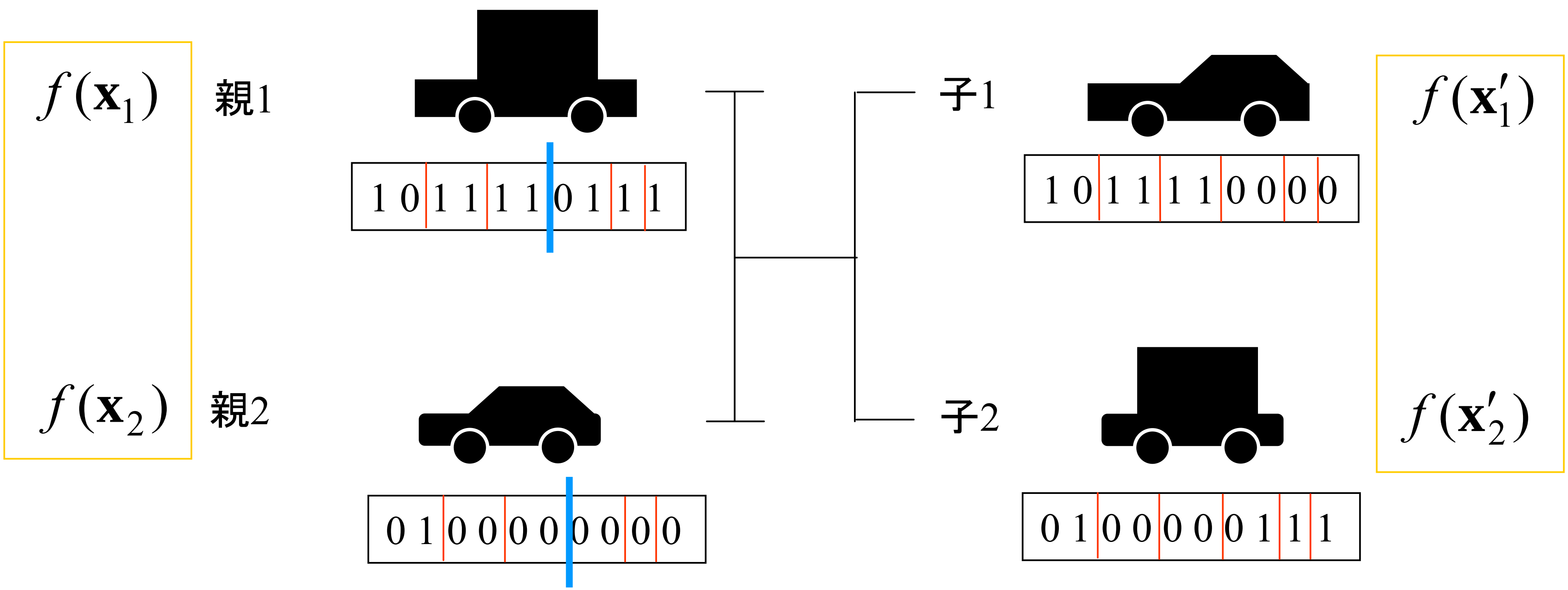


遺伝的アルゴリズム



1 0 1 1 1 1 0 1 1 1
x1 x2 x3 x4 上形状 下形状
0 1 0 0 0 0 0 0 0 0
x3
x2
x4
x1
$f(\mathbf{x}_1)$
$f(\mathbf{x}_2)$
遺伝子形
表現形
適合度


1 0 1 1 1 1 0 1 1 1
x1 x2 x3 x4 上形状 下形状
x3
x2
x4
x1


$f(\mathbf{x}_1)$
親1
1 0 1 1 1 1 0 1 1 1
$f(\mathbf{x}_2)$
親2
0 1 0 0 0 0 0 0 0 0
子1
1 0 1 1 1 1 0 0 0 0
$f(\mathbf{x}_1')$
子2
0 1 0 0 0 0 0 1 1 1
$f(\mathbf{x}_2')$

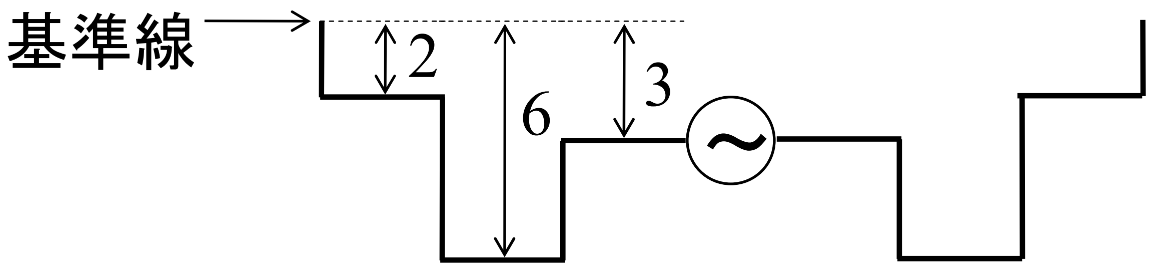
電磁界解析を用いた最適化

手法	特徴	課題
パラメータ最適化	幾何パラメータや 材料パラメータ など特徴量で表現	有限要素の変形 や生成が必要
トポロジー最適化	ビットマップや関数で 形状を表す	複雑形状

ICタグアンテナの最適化

目的：通信距離を最大化する．

ICとアンテナのインピーダンス整合を実現
アンテナゲインを最大化



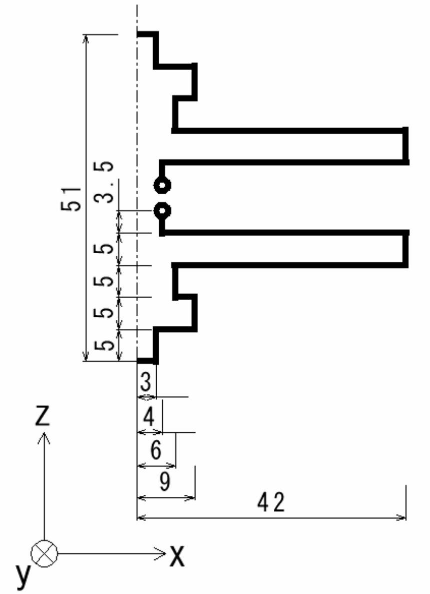
表現型 (Phenotype)

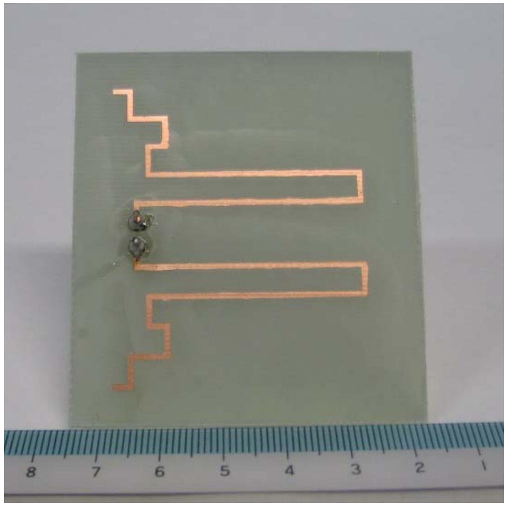
2	6	3

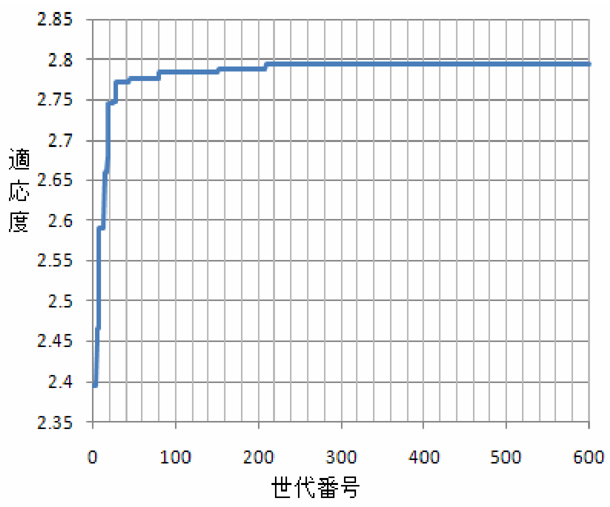
遺伝子型(Genotype)

H. Makimura, Y. Watanabe, K. Watanabe, H. Igarashi, Evolutional Design of Small Antennas for Passive UHF-Band RFID, IEEE Trans.Magn., vol.47, no.5, pp.1510-1513, 2011.5
牧村，渡辺，五十嵐，和木： 電波型パッシブRFIDによる電車線路設備のモニタリングシステム，電気学会論文誌C，vol.132, no.5, pp.691-696, 2012

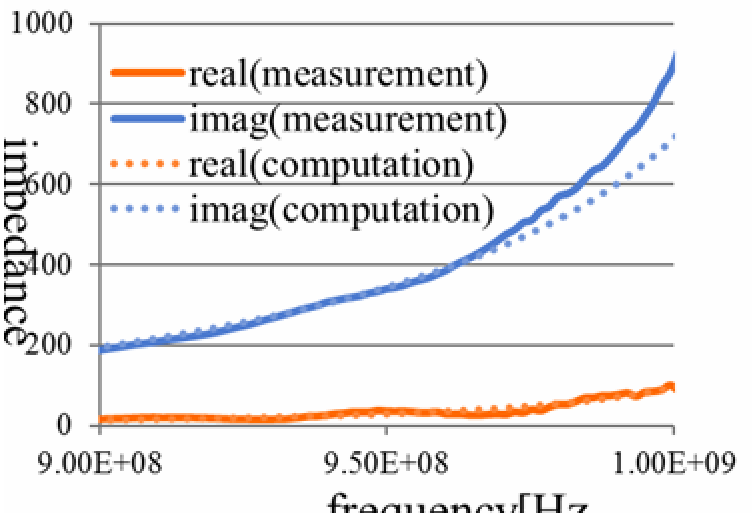
ICタグアンテナ最適化結果





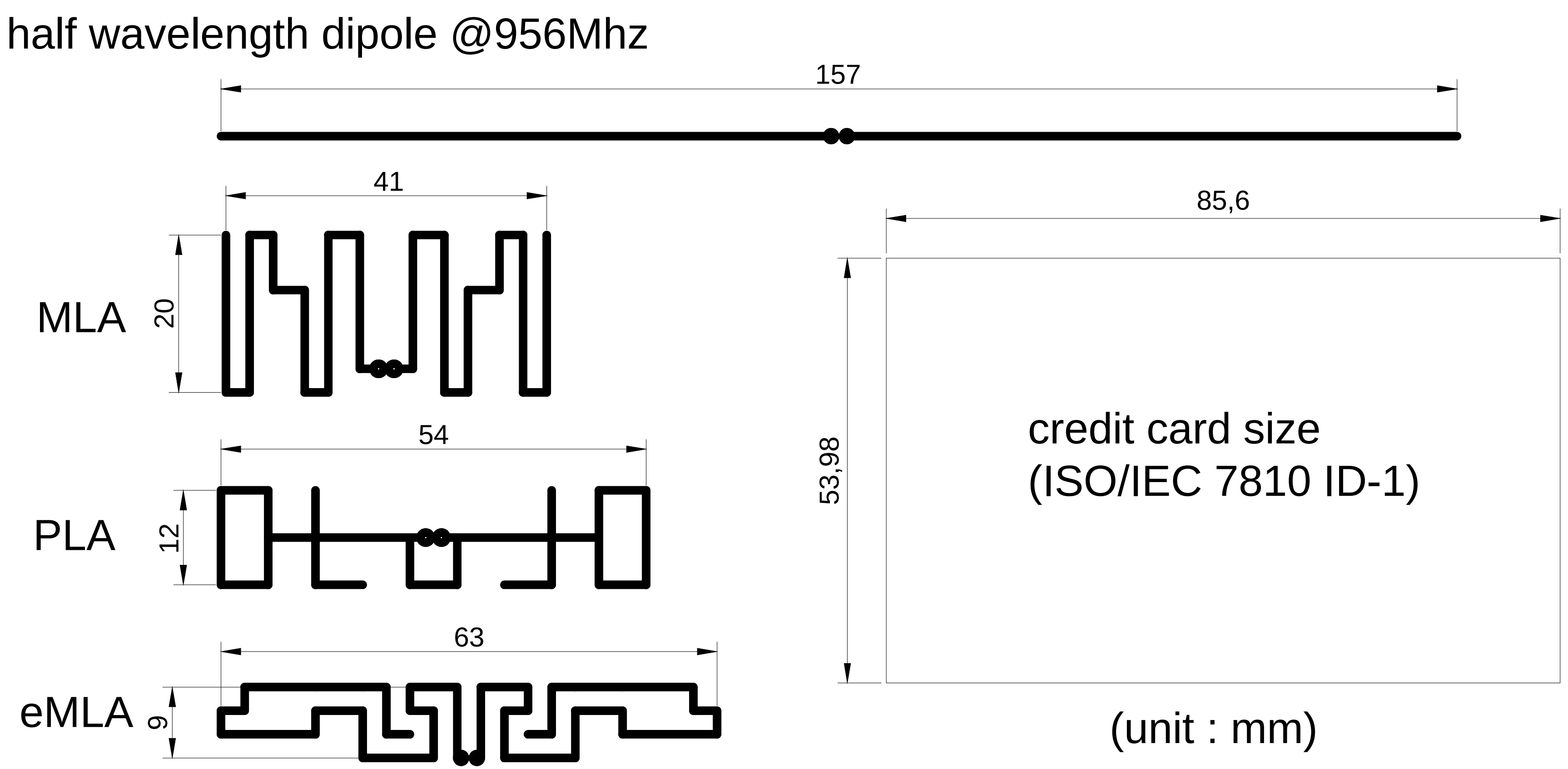


免疫アルゴリズムによる最適化過程



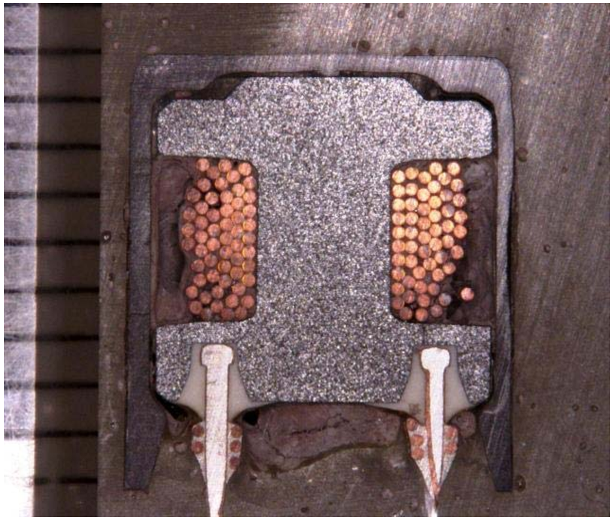
実測結果

ICタグ用アンテナの最適化

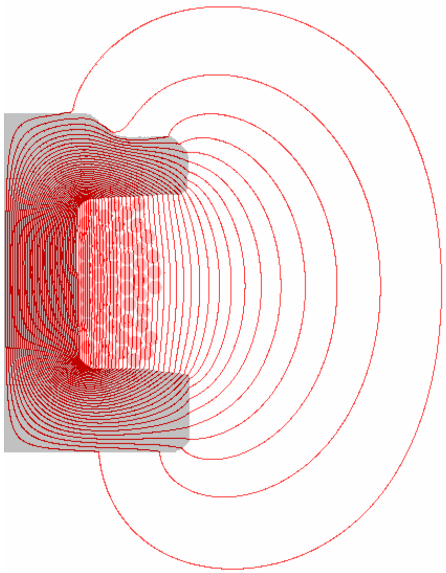


本研究の一部はJR東日本(株)との共同研究による

インダクタ最適化



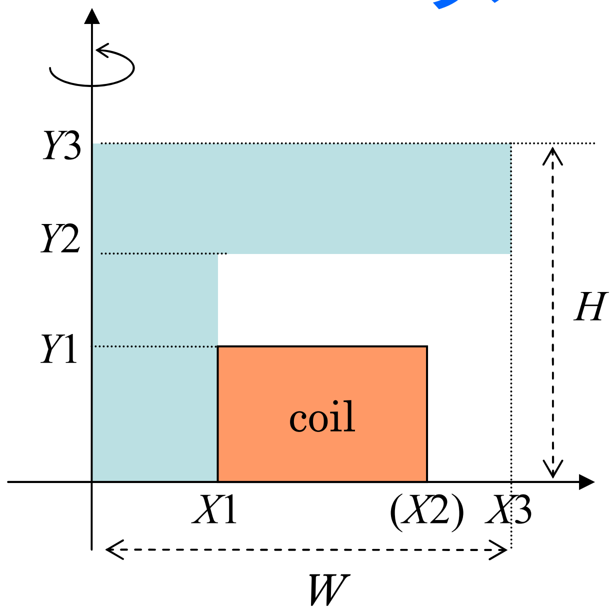
インダクタの断面写真
フェライトコアと巻き線



市場規模:約1兆円
日本シェア6割

小型化,高効率化,高性能化
が求められている.

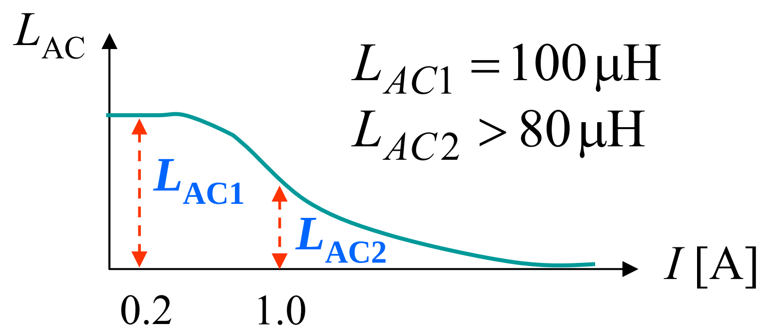
パラメータ最適化



1/4モデル

最適化パラメータ:

$$\boldsymbol{x} = (X1, X3, Y1, Y2, Y3)^{\mathrm{t}}$$



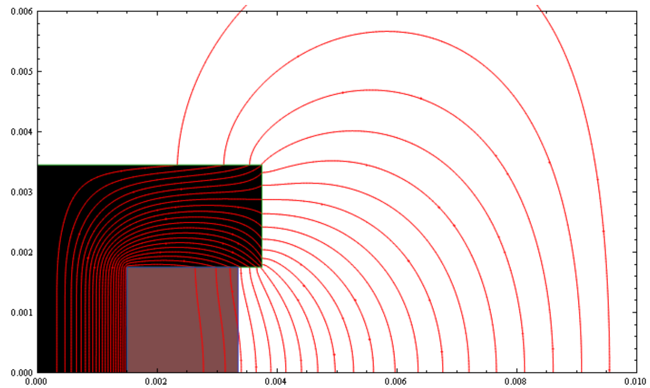
$$L_{AC1} = 100\,\mu\mathrm{H}$$
$$L_{AC2} > 80\,\mu\mathrm{H}$$

最適化問題

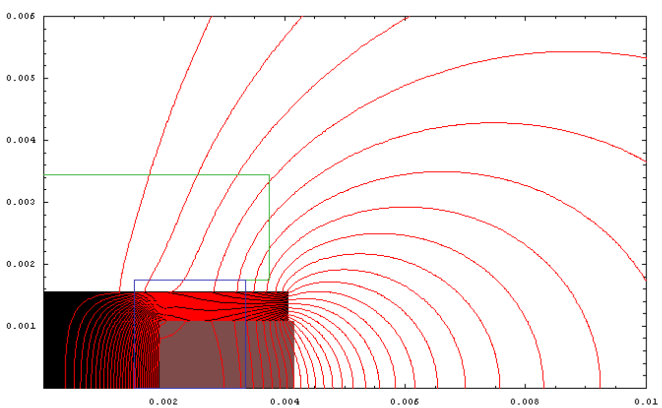
$$f(\boldsymbol{x}) = |L_{AC1} \times 10^6 - 100| + \alpha W^2 H + penalty$$

$$penalty = \begin{cases} 0 & (\mathrm{L_{AC2}} > 80[\mu\,\mathrm{H}]\text{のとき}) \\ 80 - L_{AC2} \times 10^6 & (\text{それ以外}) \end{cases}$$

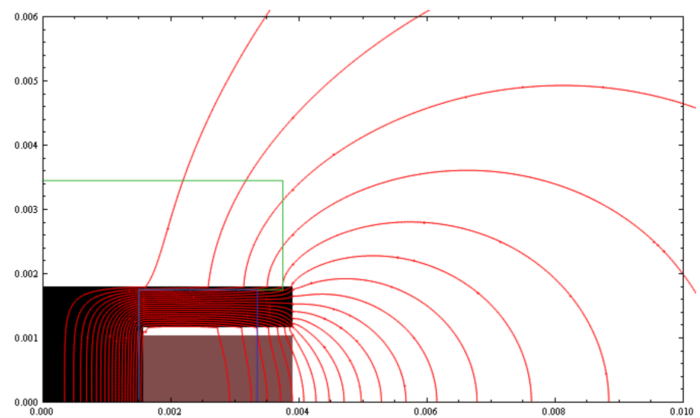
パラメータ最適化結果



最適化前



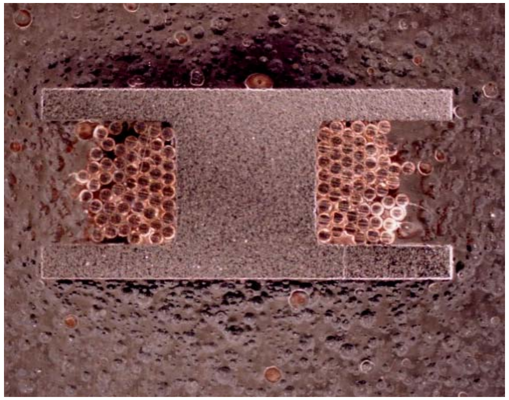
IAによる最適化結果



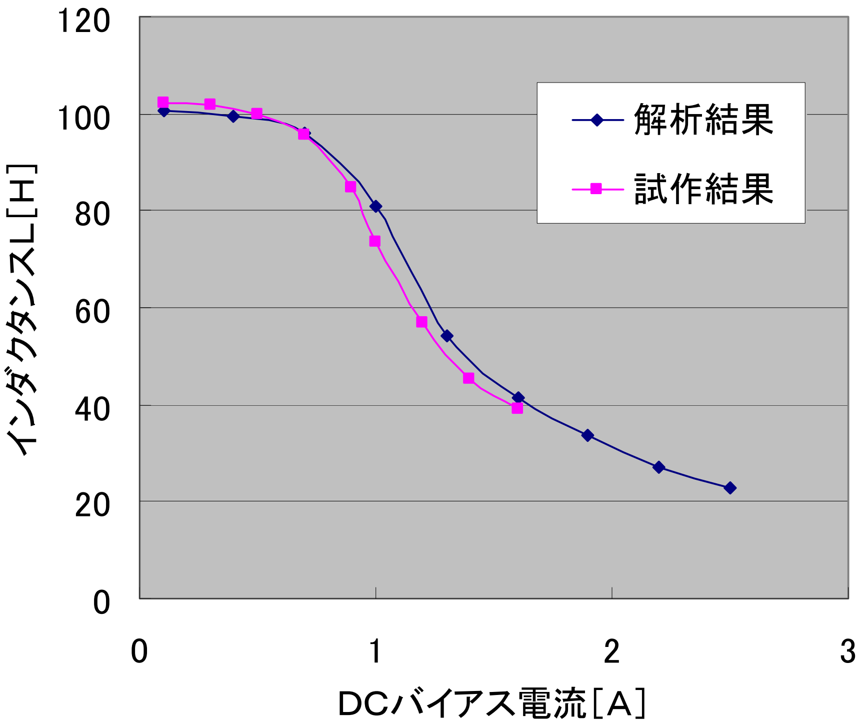
micro-GAによる最適化結果

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 Transactions on Magnetics,
vol. 46 no. 8, pp.3393 - 3396

パラメータ最適化の検証



試作したインダクタの断面写真

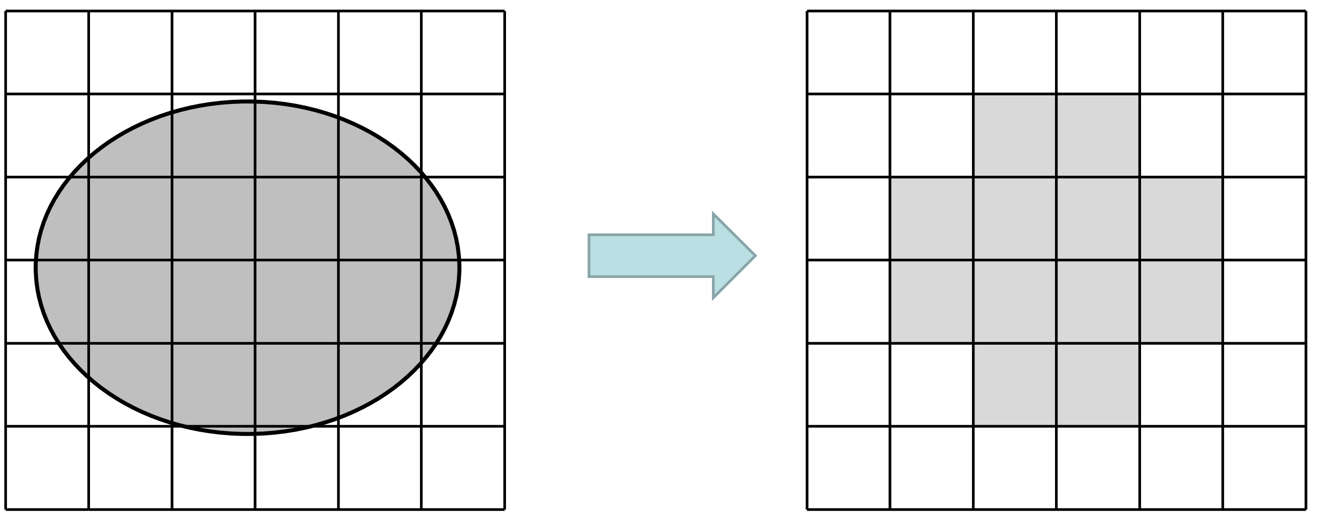


本研究は一部はJST産学協同シーズイノベーション化事業および
太陽誘電(株)との共同研究による

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 Transactions on Magnetics,
vol. 46 no. 8, pp.3393 - 3396

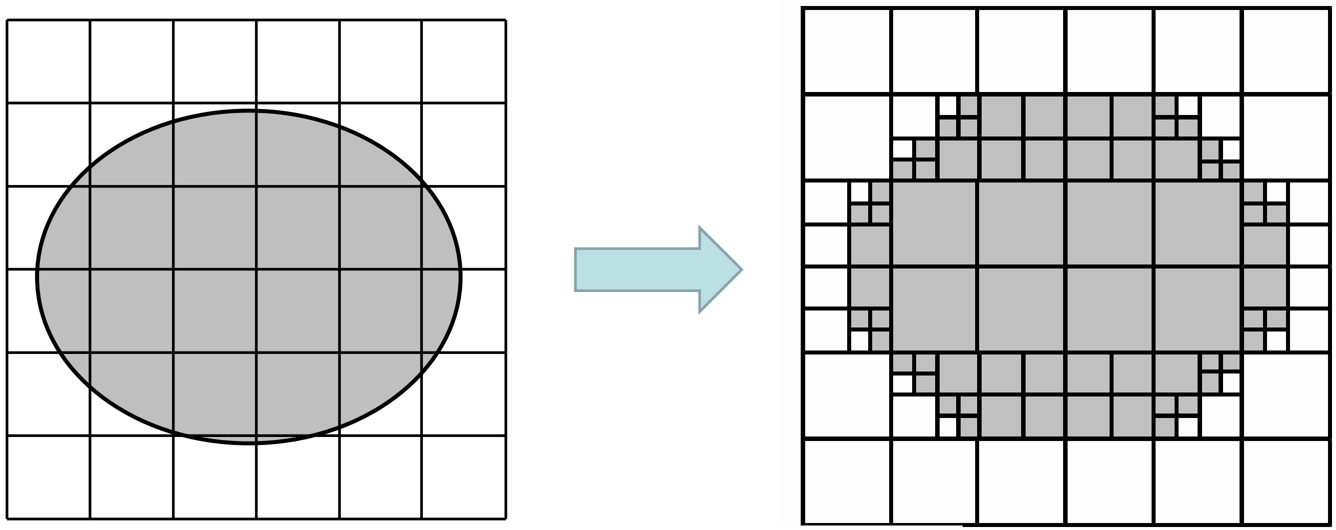
形状変化の表現法

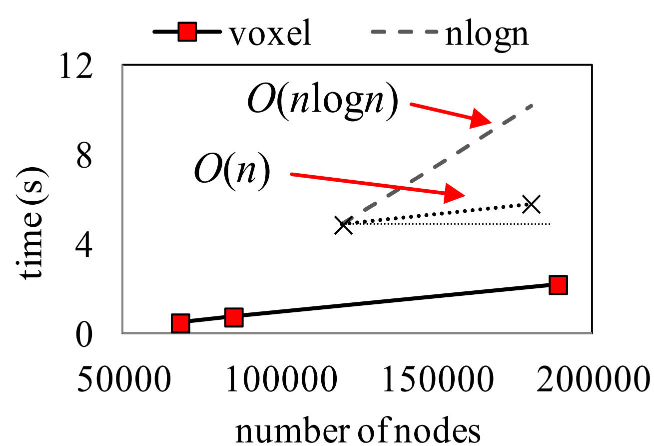
手法	特徴	課題
メッシュ生成	新たに有限要素を生成	計算量　O(nlogn)
メッシュ変形*	有限要素を変形	要素の裏返り
ボクセルFEM	ビットマップ状に形状を表現	材料境界が階段状



階層ボクセル有限要素法

材料境界近傍のボクセルを細分化することで,
表現能力形状を向上





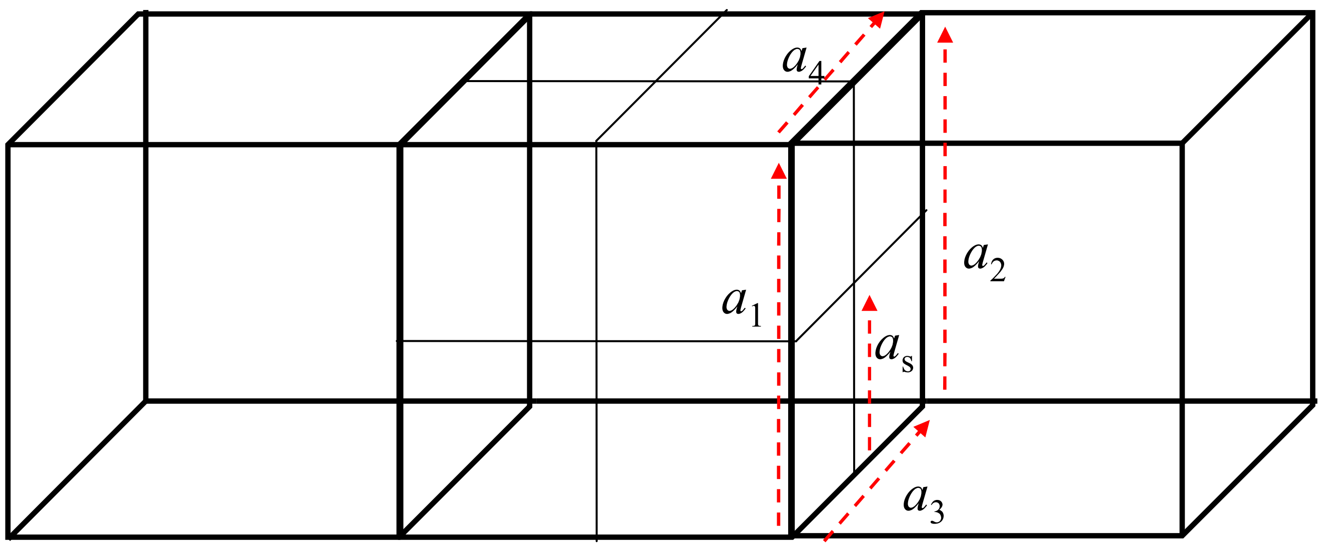
T. Sato, H. Igarashi, Coupled Analysis of Electromagnetic Vibration Energy Harvester with Nonlinear Oscillation, to appear in IEEE Trans. Magn.

非適合接続

要素間で磁束が連続になるように，スレーブ変数をマスター変数の線形結合により表現する．

$$a_s = \int_{e_s} \boldsymbol{A} \cdot d\boldsymbol{l} = \sum_j a_j \int_{e_s} \boldsymbol{N}_j \cdot d\boldsymbol{l}$$

$$= c_1 a_1 + c_2 a_2 + c_3 a_3 + c_4 a_4$$



インダクタの３次元最適化

目的:ジュール損失とヒステリシス損失の最小化

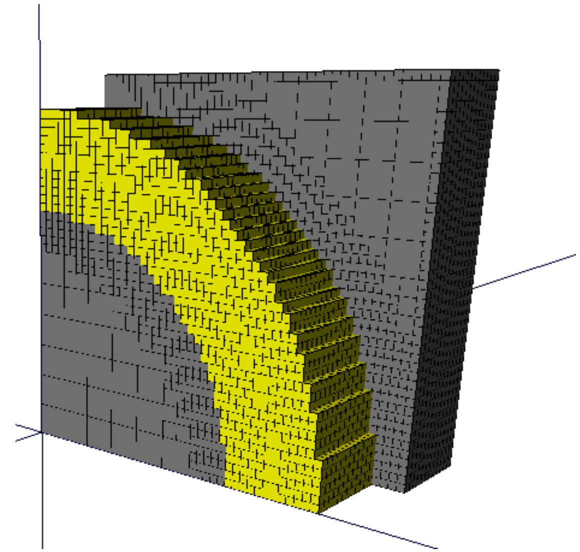
Objectives: $f_1 = R, \quad f_2 = W_{\boldsymbol{h}},$

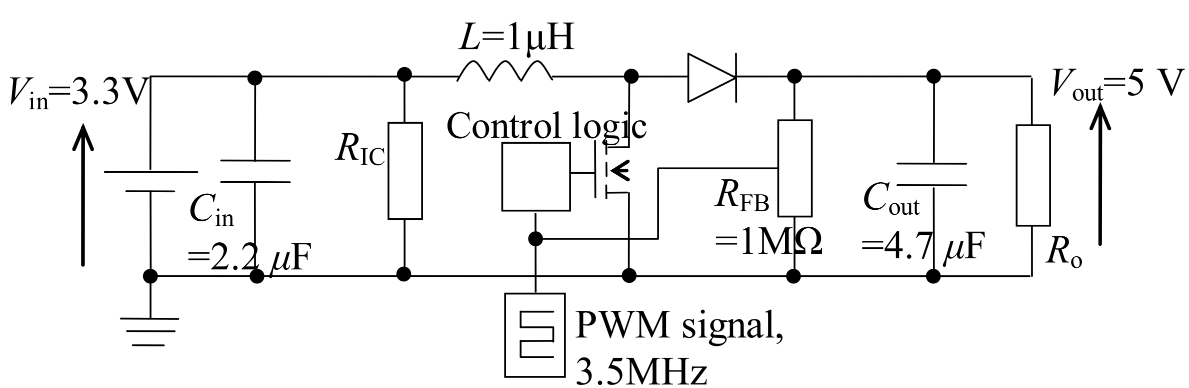
constraints:

$$\frac{(L - L_{\mathrm{T}})^2}{{L_{\mathrm{T}}}^2} < 0.03,$$

$$L_l > 0.7 L_{\mathrm{T}},$$

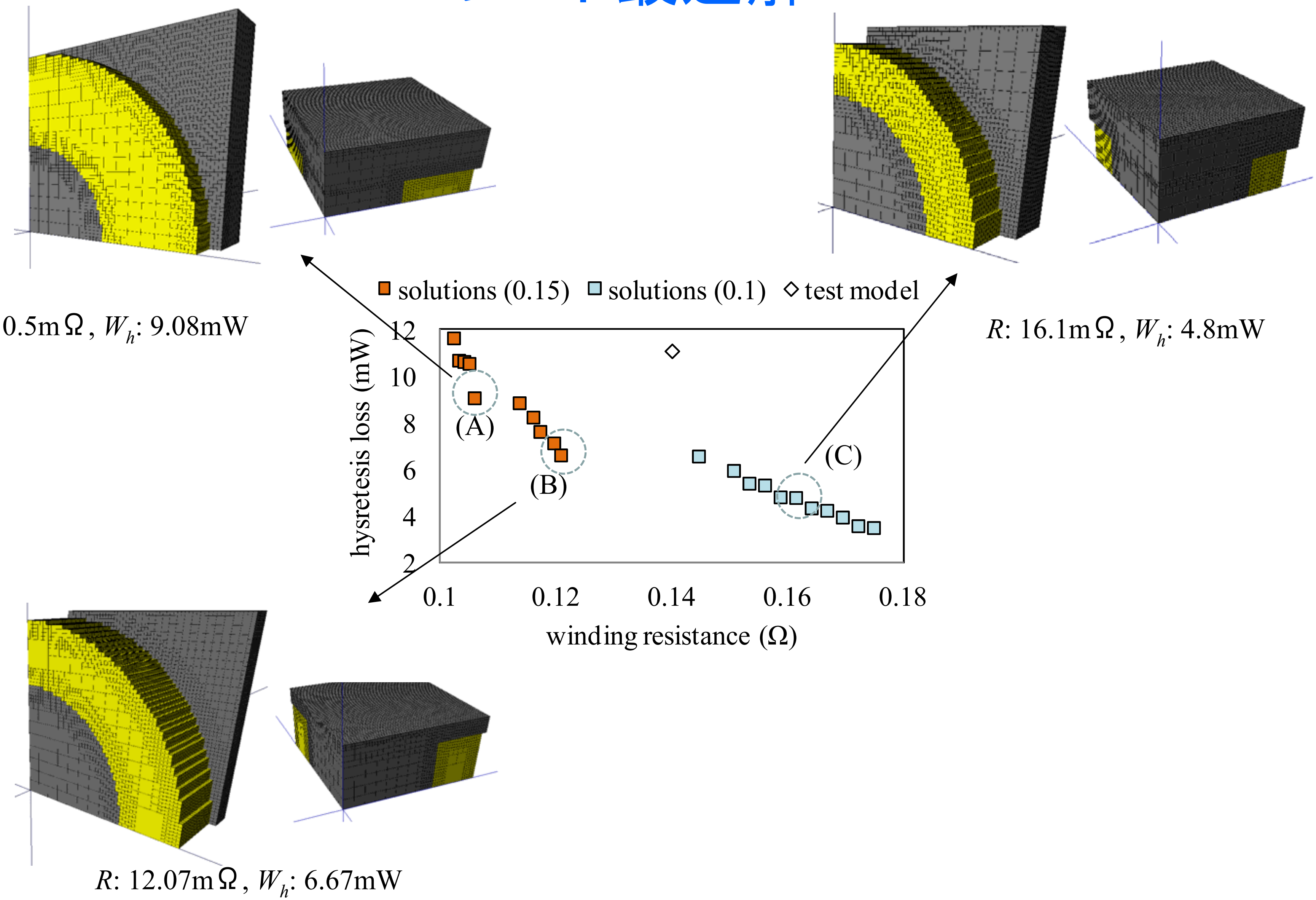
$$r_2 < w < 1.5\mathrm{mm}$$





Boost circuit.

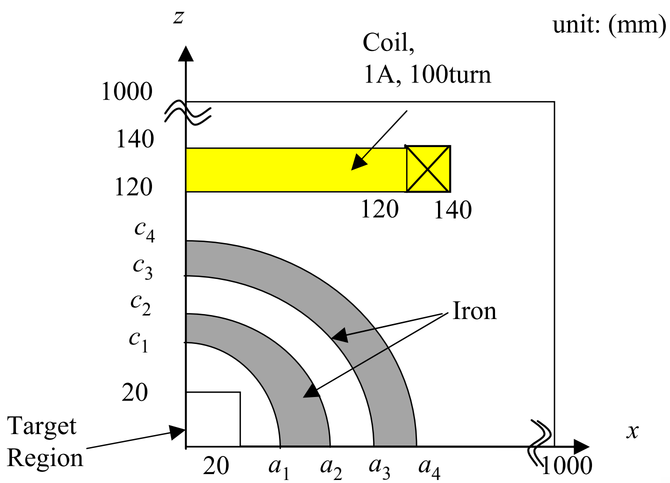
パレート最適解

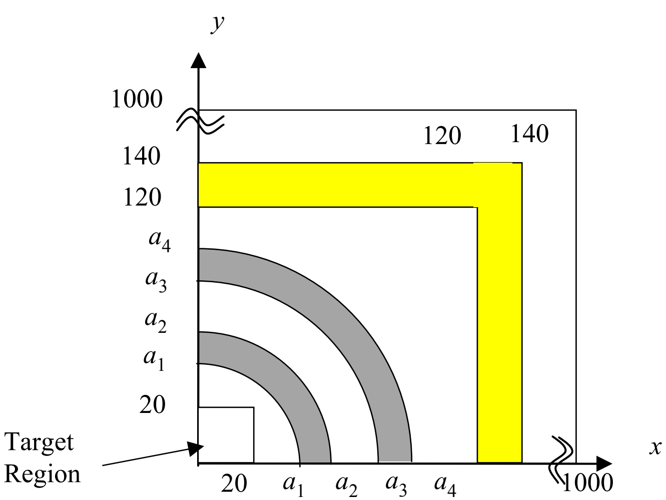


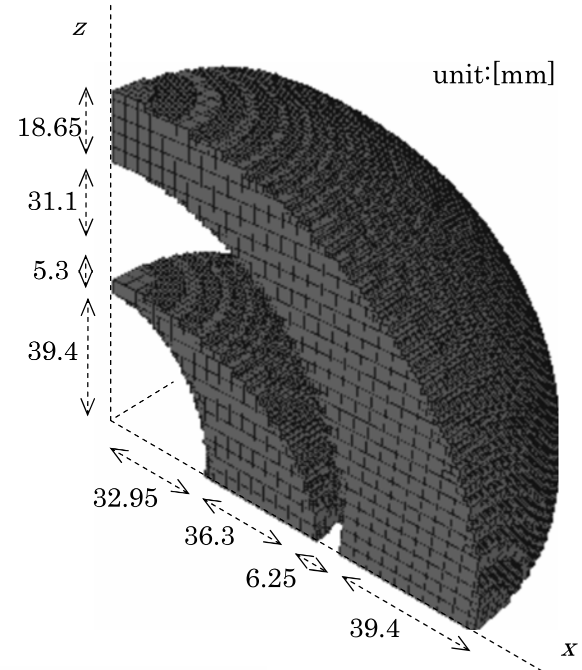
T. Sato, et al., 3-D Optimization of Ferrite Inductor Considering Hysteresis Loss, IEEE Trans. Magn., vol.49, no.5, pp.2129-2132, 2013

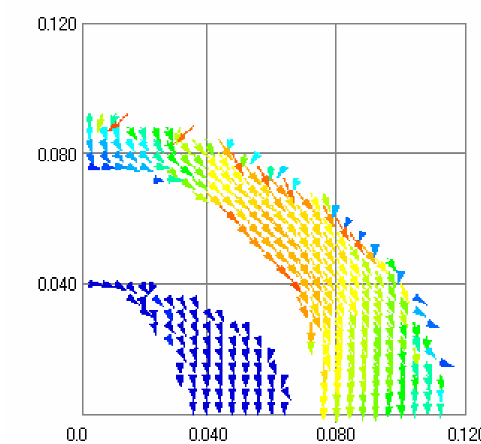
磁気シールドの3次元最適化

$$F = \frac{B_{tr}}{B_{\mathrm{T}}} + k\frac{W}{W_{\mathrm{T}}} \rightarrow \min.$$

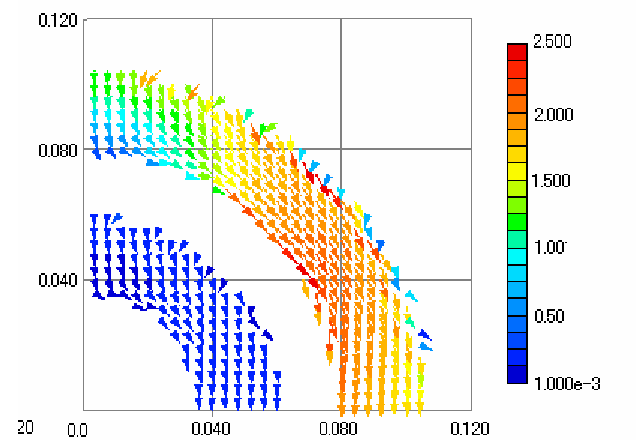








(a):最適化形状：
B_{br}:0.16, W:5908.99

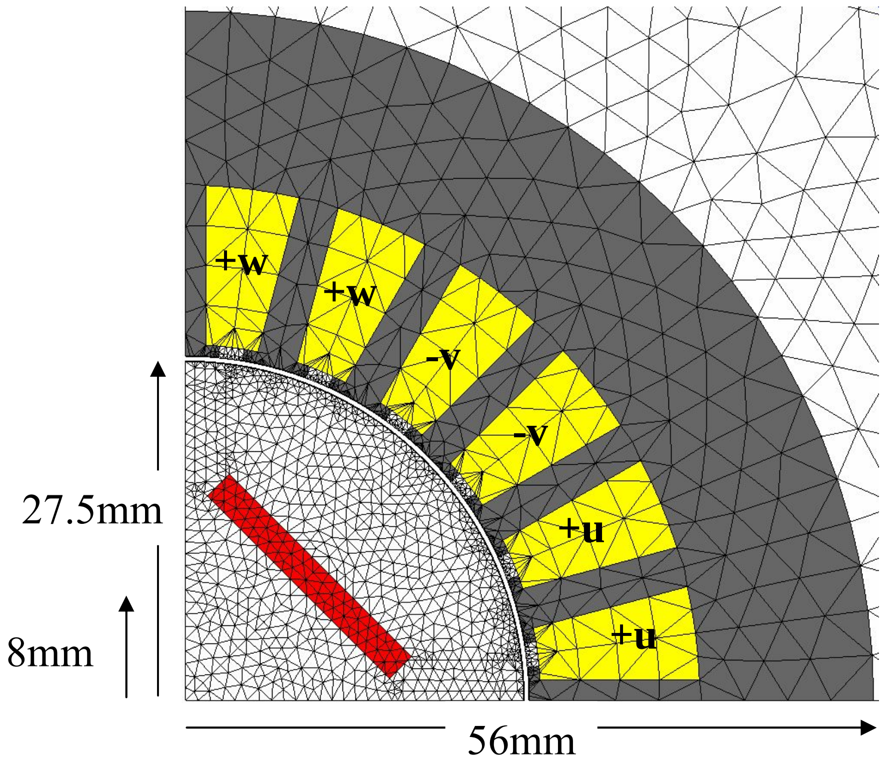


(b)：等厚形状：
B_{br}:0.337, W:5957.9

トポロジー最適化

On-Off法:セルの2値状態(材料あり，なし)を決める

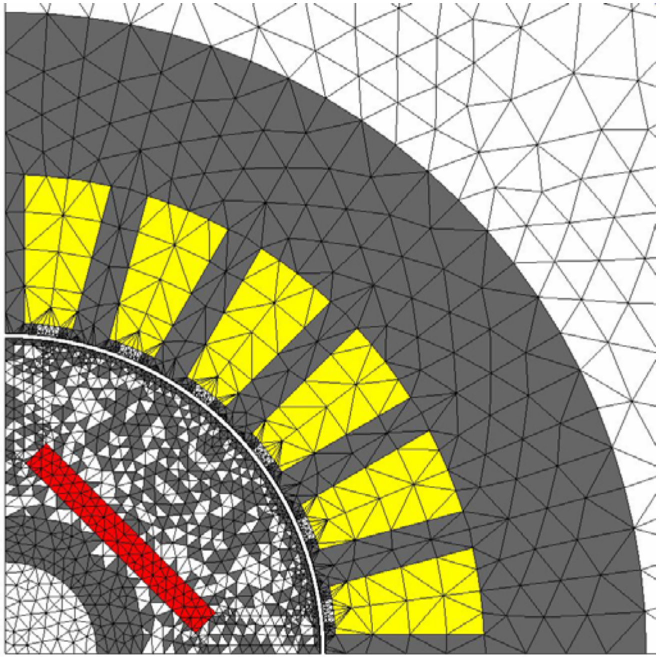
$$f(\boldsymbol{x}) = -\frac{T}{T_0} + w\frac{T_{\max} - T_{\min}}{T} \to \min.$$



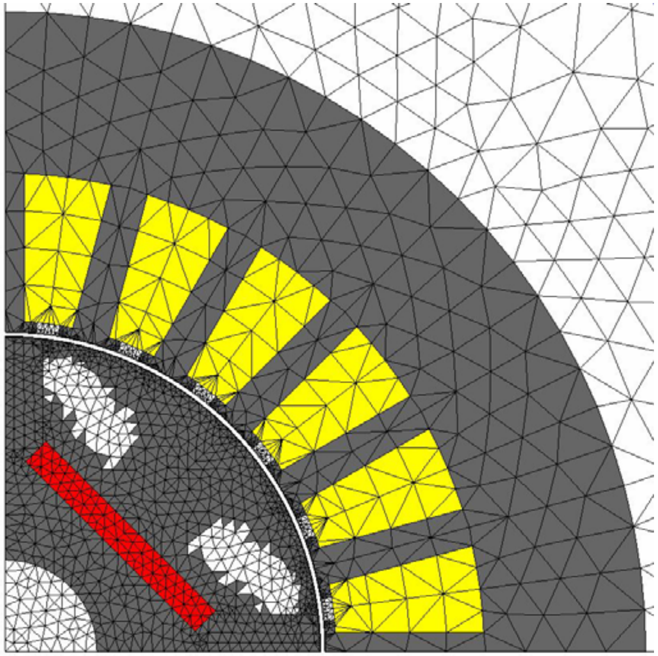
IPM*のロータ構造の最適化

*電気学会技術報告，no.776, 回転機のバーチャルエンジニアリングのための電磁界解析技術

空間フィルタの適用

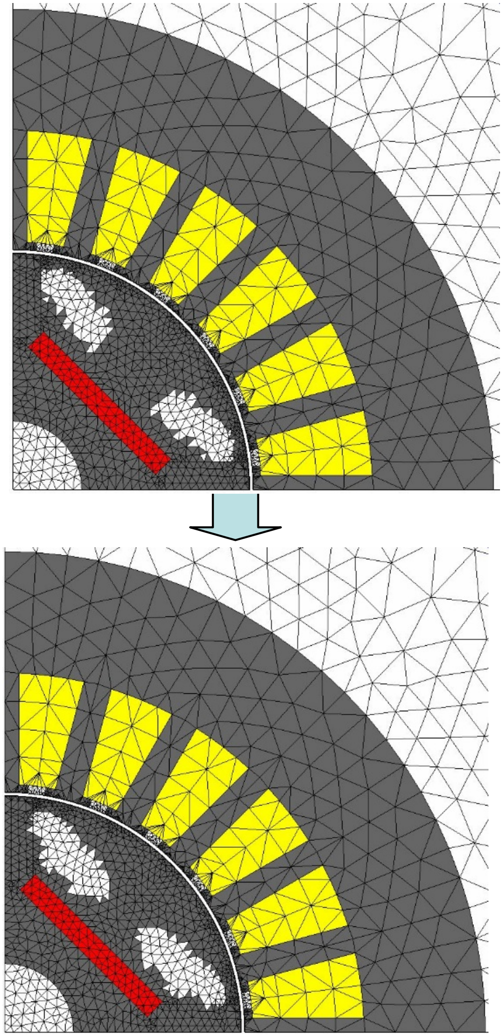


トルク平均(Nm)	2.195
リップル	0.136
目的関数	-0.167

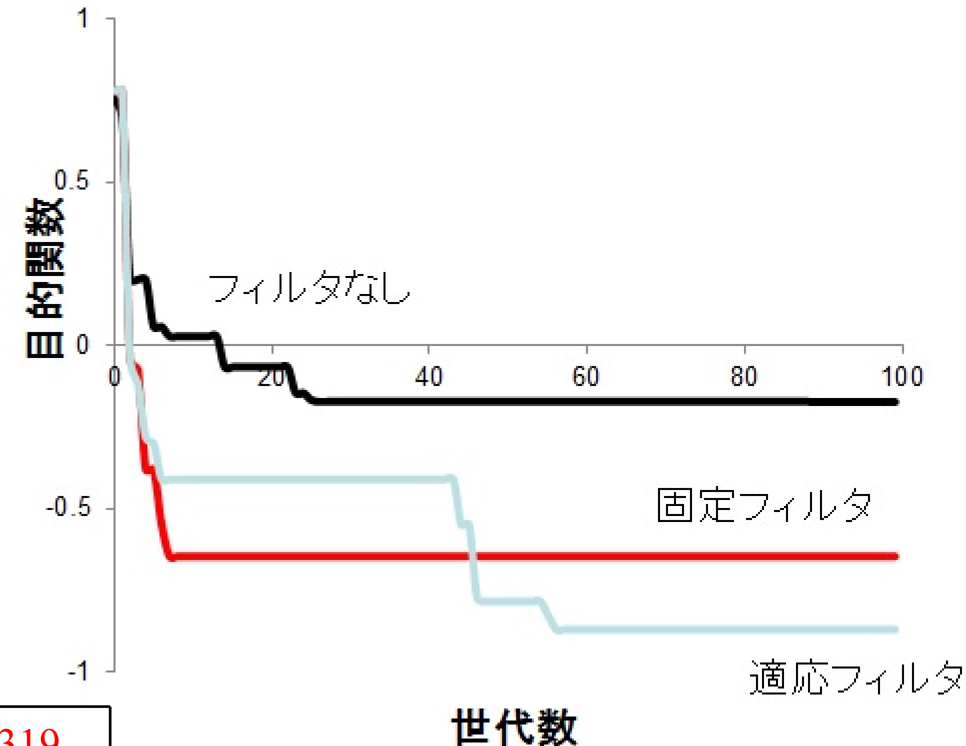


トルク平均(Nm)	3.728
リップル	0.103
目的関数	-0.647

適応フィルタリング

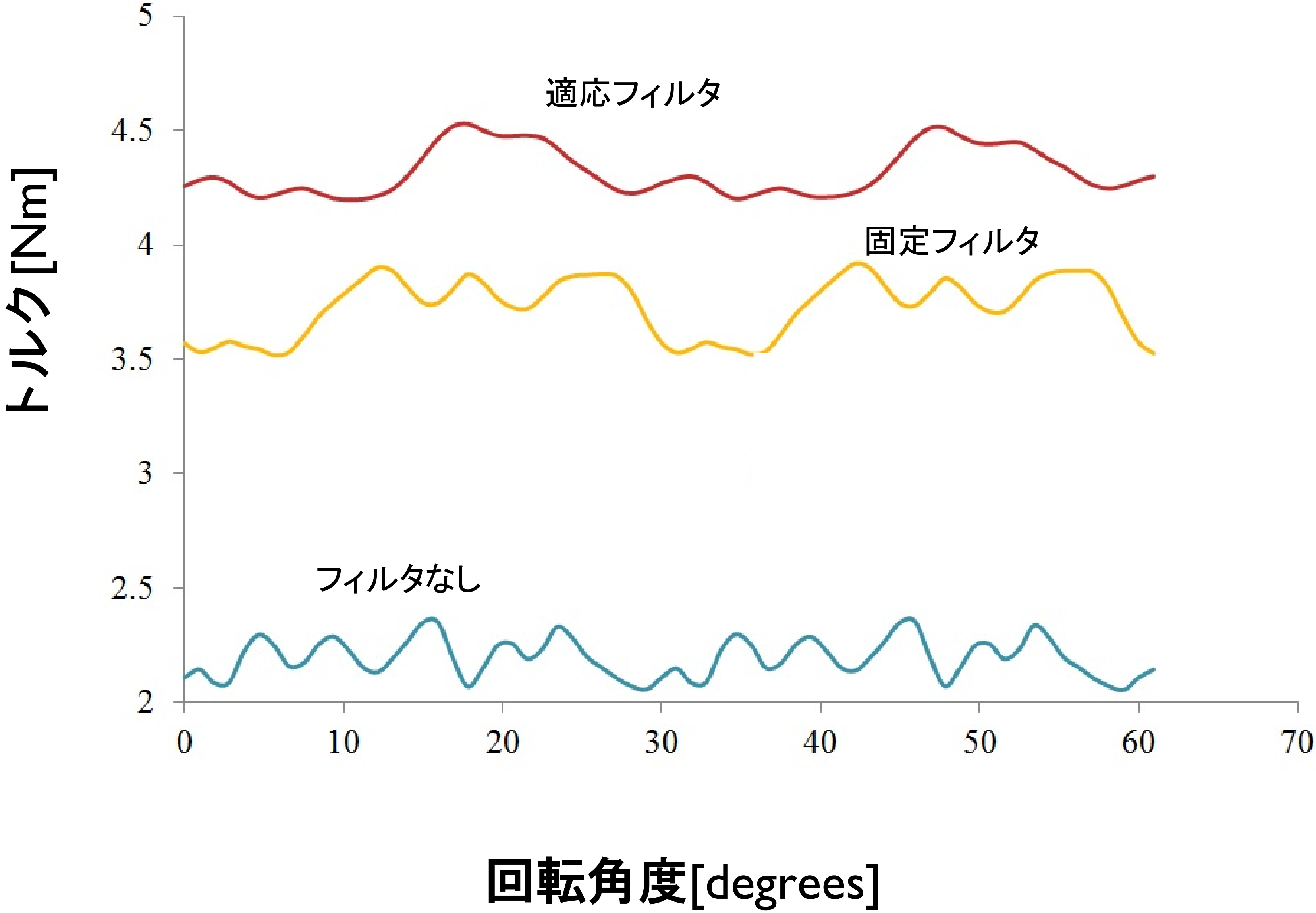


$$\mathit{filtering} \propto 1 - \exp\left(- \frac{\text{change in } f}{\text{temperature}} \right)$$



トルク平均(Nm)	3.728→ 4.319
リップル	0.103 → 0.0767
目的関数	–0.647 →–0.870

日高，五十嵐，計算工学会2013にて発表予定



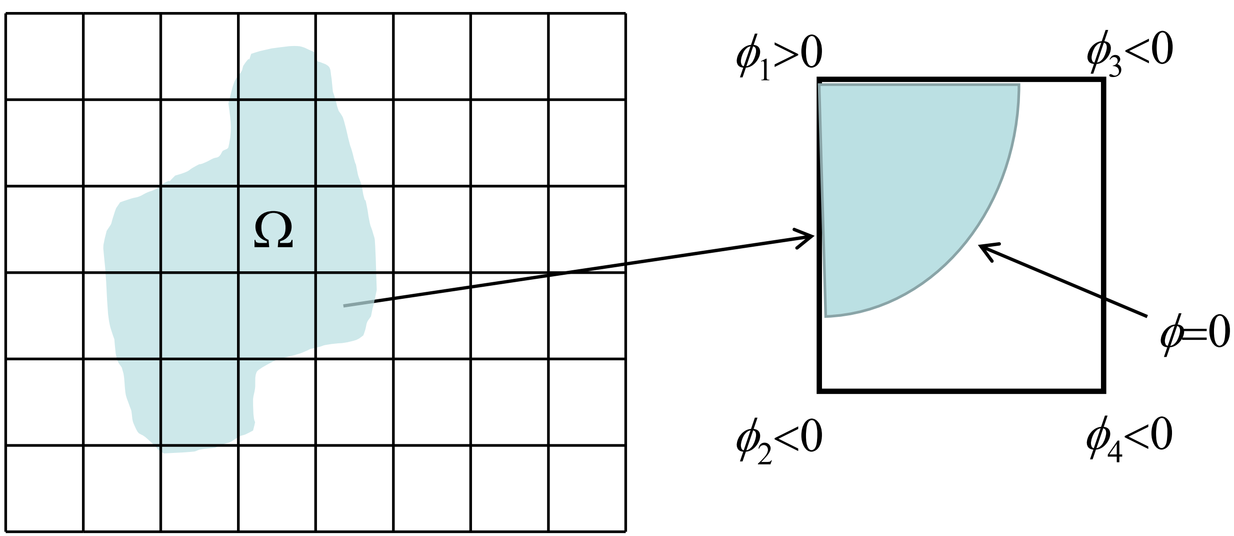
適応フィルタ
固定フィルタ
フィルタなし
トルク[Nm]
回転角度[degrees]
5
4.5
4
3.5
3
2.5
2
0
10
20
30
40
50
60
70

レベルセット法

レベルセット関数

$$\phi(\boldsymbol{x}) = \begin{cases} d(\boldsymbol{x}, \partial\Omega) & \boldsymbol{x} \in \Omega \quad \text{材料中} \\ 0 & \boldsymbol{x} \in \partial\Omega \quad \text{材料境界} \\ -d(\boldsymbol{x}, \partial\Omega) & \boldsymbol{x} \notin \Omega \quad \text{材料外} \end{cases}$$

$$d(\boldsymbol{x}) = \min_{\boldsymbol{y} \in \partial\Omega} (\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y})$$



レベルセット法

静磁界の有限要素方程式:

$$\mathrm{K}\boldsymbol{a} = \boldsymbol{j}$$

レベルセット関数の修正

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = -\frac{df}{d\phi} = -\frac{\partial f}{\partial \phi} - \frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{a}}\frac{\partial \boldsymbol{a}}{\partial \phi}$$

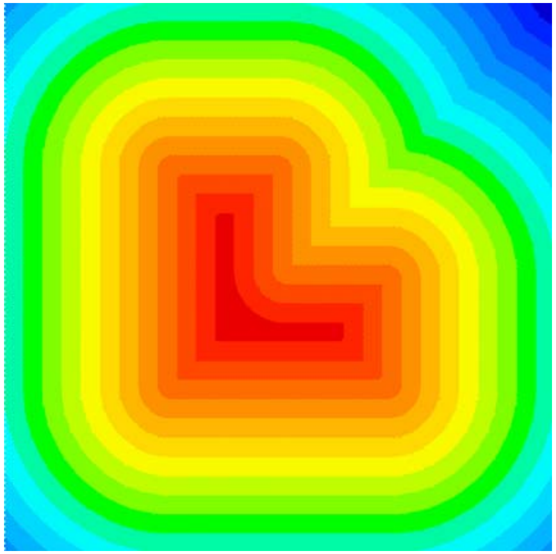
f: 目的関数

随伴変数法

$$\tilde{f}(\boldsymbol{x}) = f(\boldsymbol{x}) + \boldsymbol{z}^t(\boldsymbol{j} - \mathrm{K}\boldsymbol{a})$$

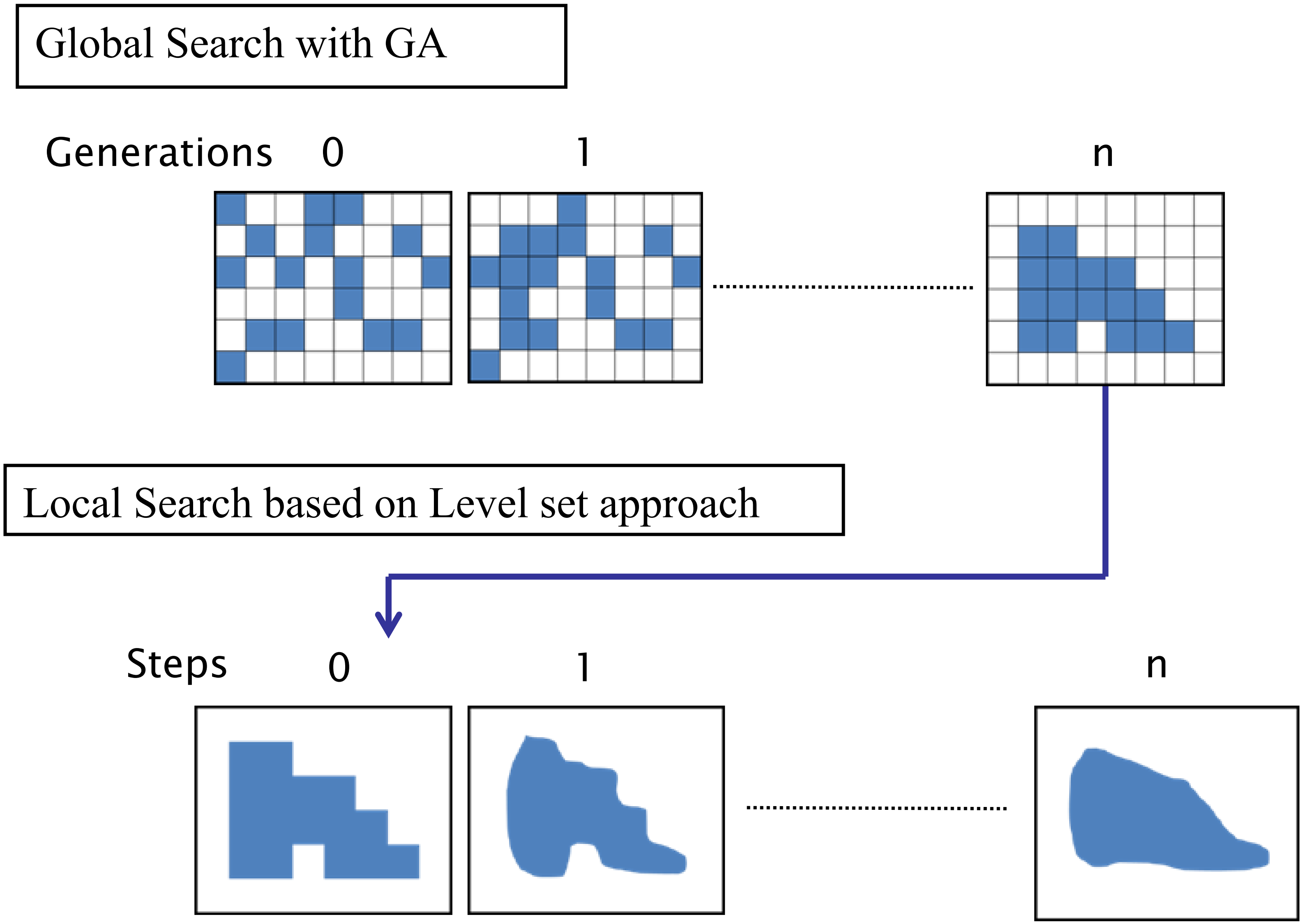
$$\frac{\partial \tilde{f}}{\partial \phi} = \frac{\partial f}{\partial \phi} + \left[\left(\frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{a}}\right)^t - \boldsymbol{z}^t\mathrm{K}\right]\frac{\partial \boldsymbol{a}}{\partial \phi} - \boldsymbol{z}^t\frac{\partial \mathrm{K}}{\partial \phi}\boldsymbol{a}$$

$$\mathrm{K}\boldsymbol{z} = \frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{a}}$$



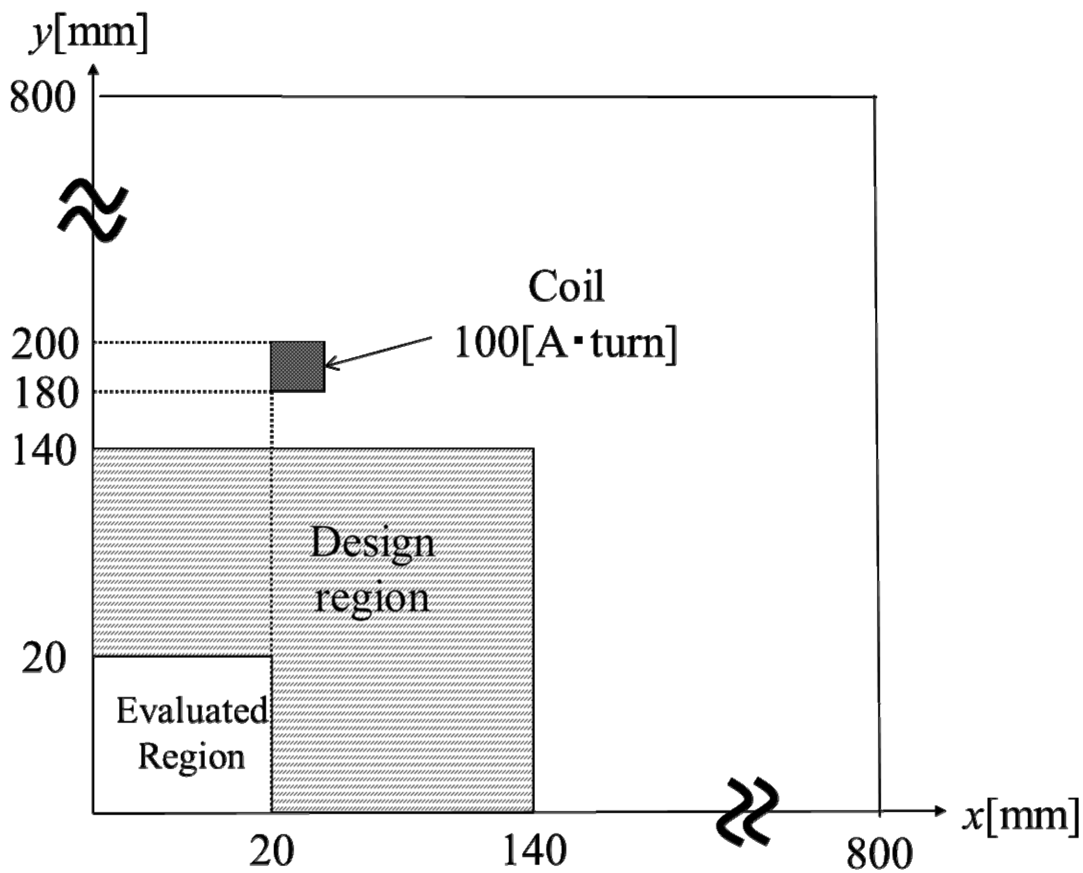
レベルセット関数 ϕ の等高線

２段階法：On-Off法とレベルセット法

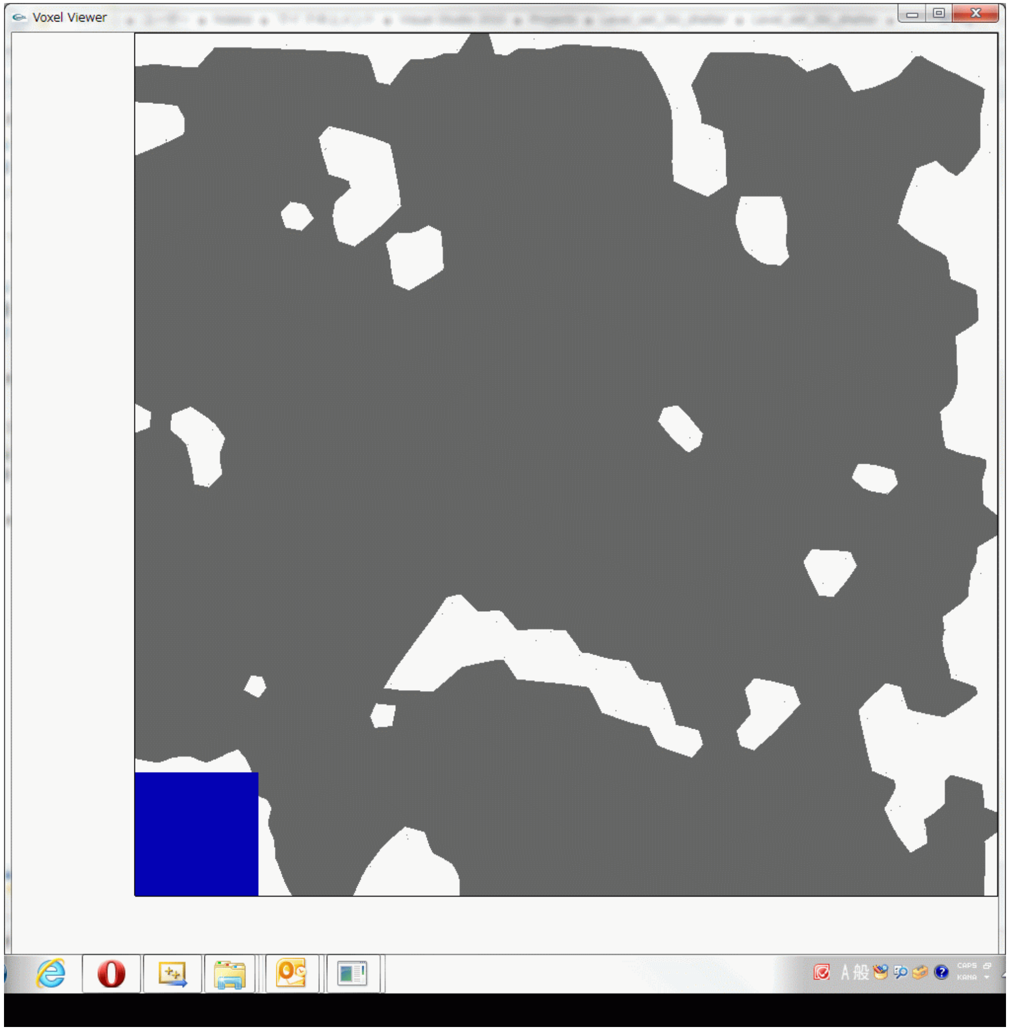


２段階法による磁気シールド形状の最適化

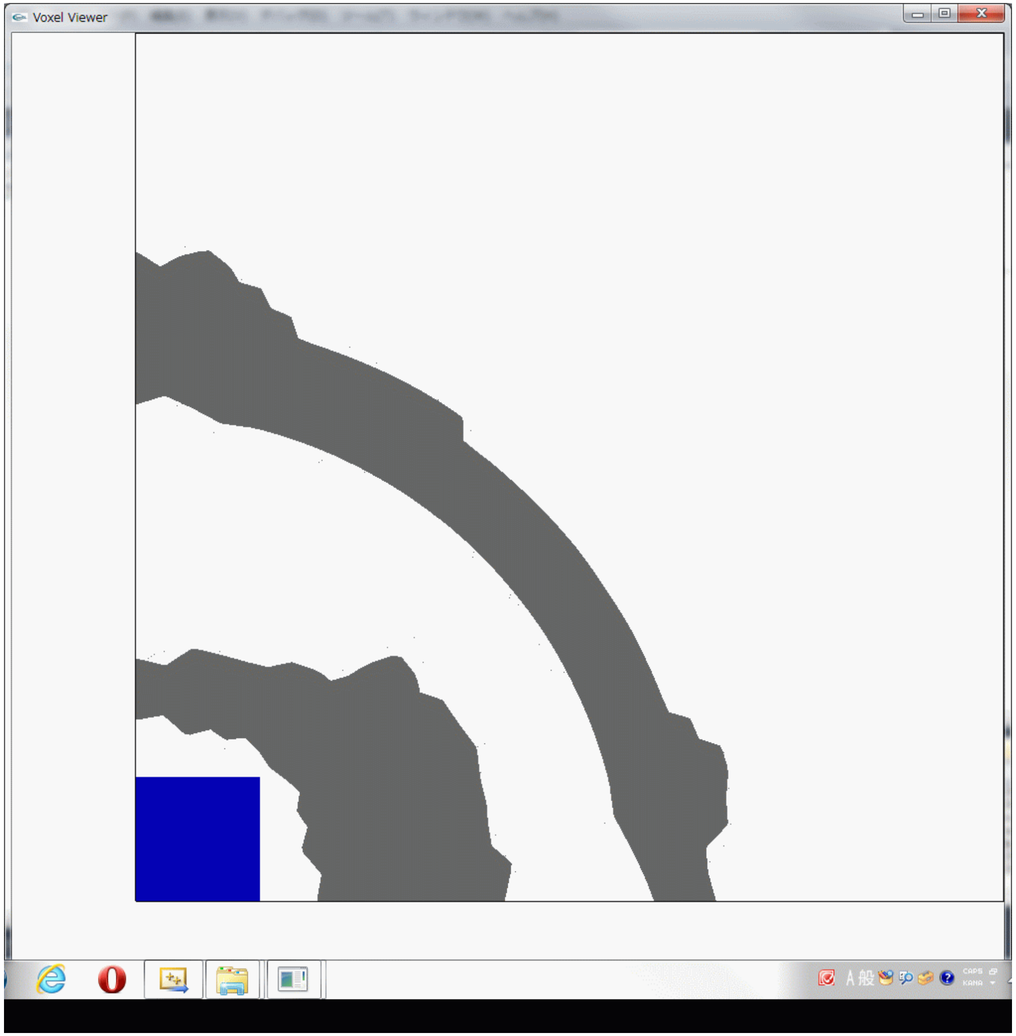
$$f(\phi) = W_M \frac{|\mathbf{B}|_{average}}{10^{-5}} + \frac{S}{S_{design}} \to \min.$$

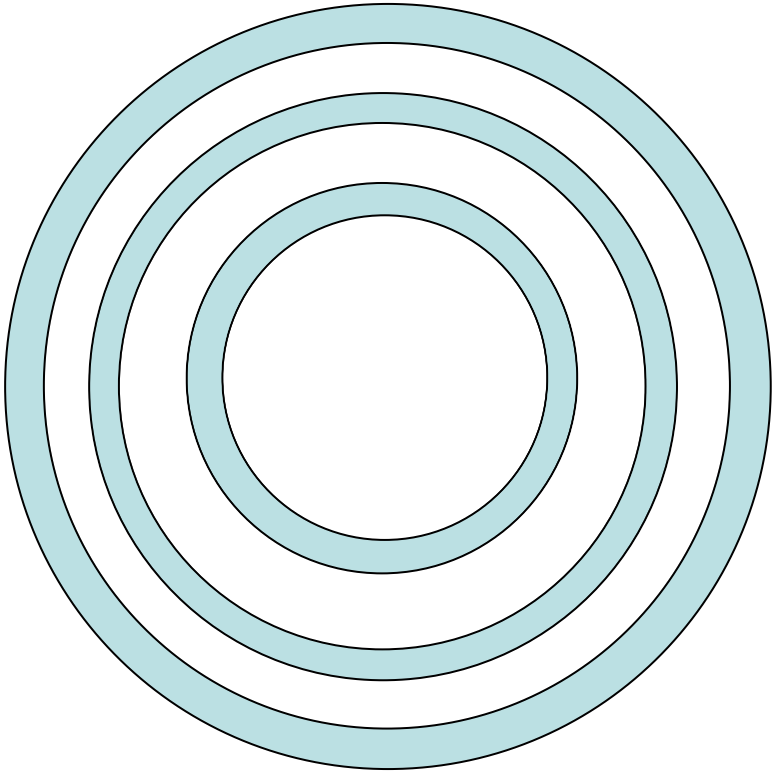


On-Off法による大域探索



レベルセット法による局所探索

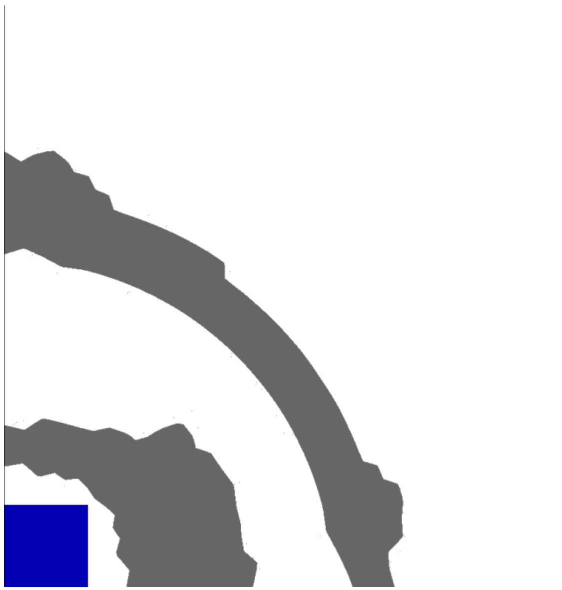




A.P. Wills, On the magnetic shielding effect of trilamellar shperical and cylindrical shells, Phys. Review, vol.4, 193, 1899

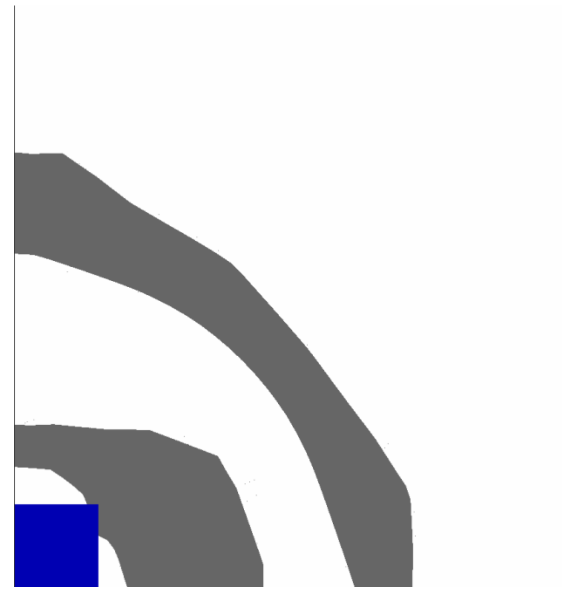
最適化結果

On-Off 法



$\lvert \boldsymbol{B} \rvert_{average} / 10^{-5}$	0.124
Volume of the core (cm^2)	2.736
Objective function	0.0678

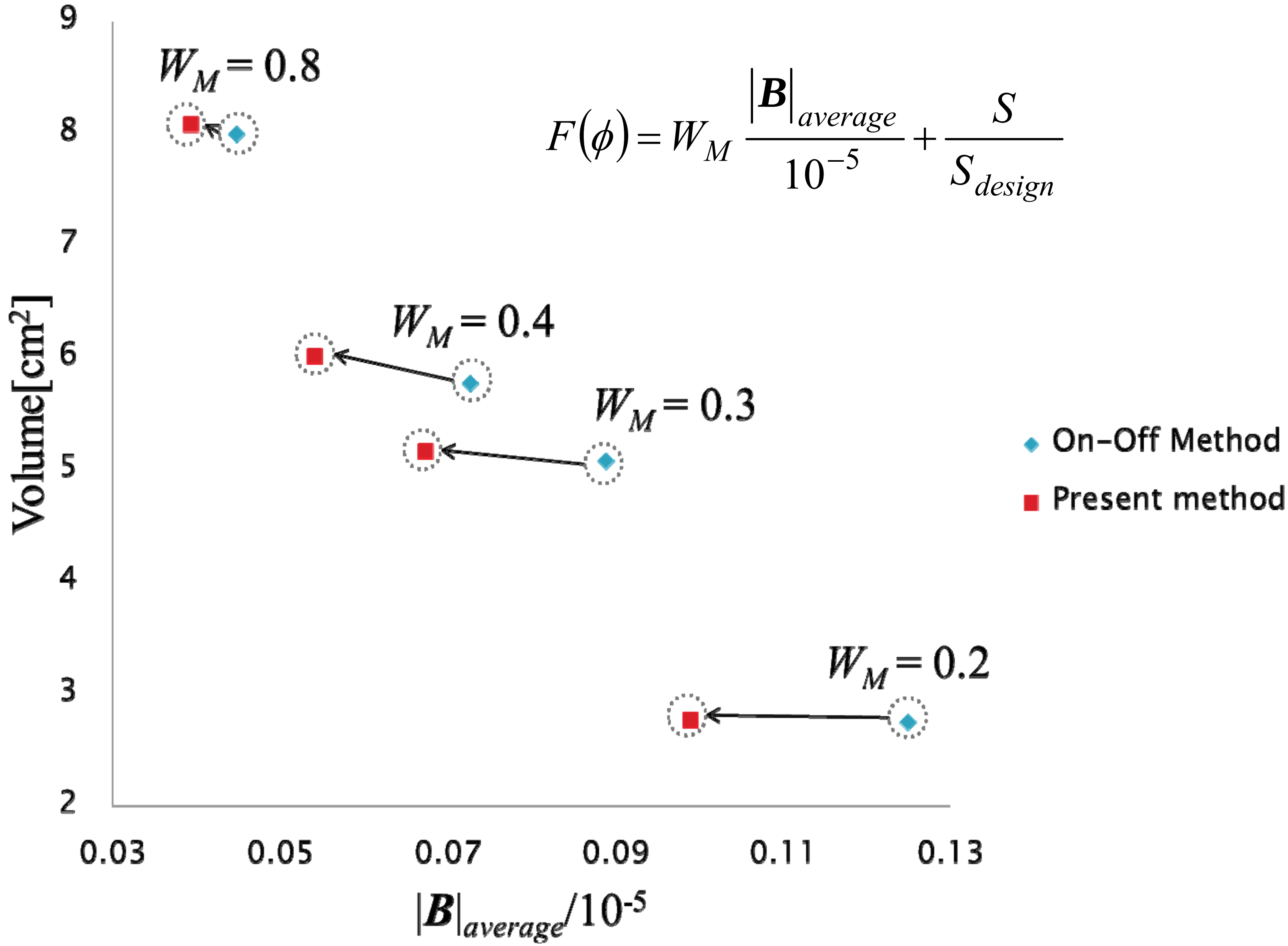
On-Off + レベルセット



$\lvert \boldsymbol{B} \rvert_{average} / 10^{-5}$	0.0990
Volume of the core (cm^2)	2.776
Objective function	0.0631

Y. Hidaka, T. Sato, H. Igarashi, Topology Optimization Method Based on On-Off Method and Level Set Approach, presented at COMPUMAG2013, to appear in IEEE Trans. Magn.

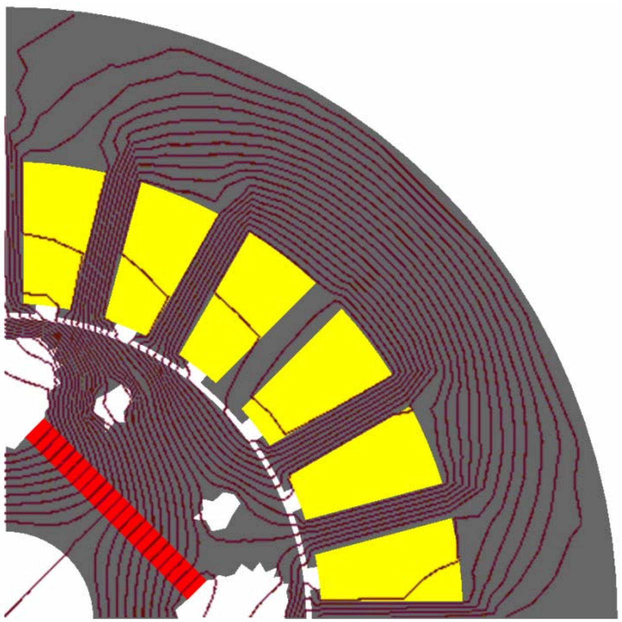
解の変化



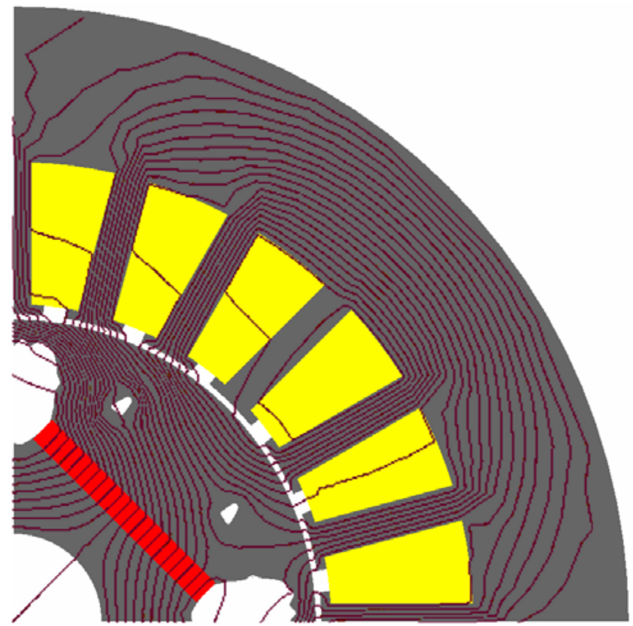
9
8
7
6
5
4
3
2
Volume[cm^2]
0.03
0.05
0.07
0.09
0.11
0.13
$|\boldsymbol{B}|_{average}/10^{-5}$
$W_M = 0.8$
$W_M = 0.4$
$W_M = 0.3$
$W_M = 0.2$
$F(\phi) = W_M \dfrac{|\boldsymbol{B}|_{average}}{10^{-5}} + \dfrac{S}{S_{design}}$
On-Off Method
Present method

On-Off法と2段階法の比較

On-Off method	On-Off + Level Set method



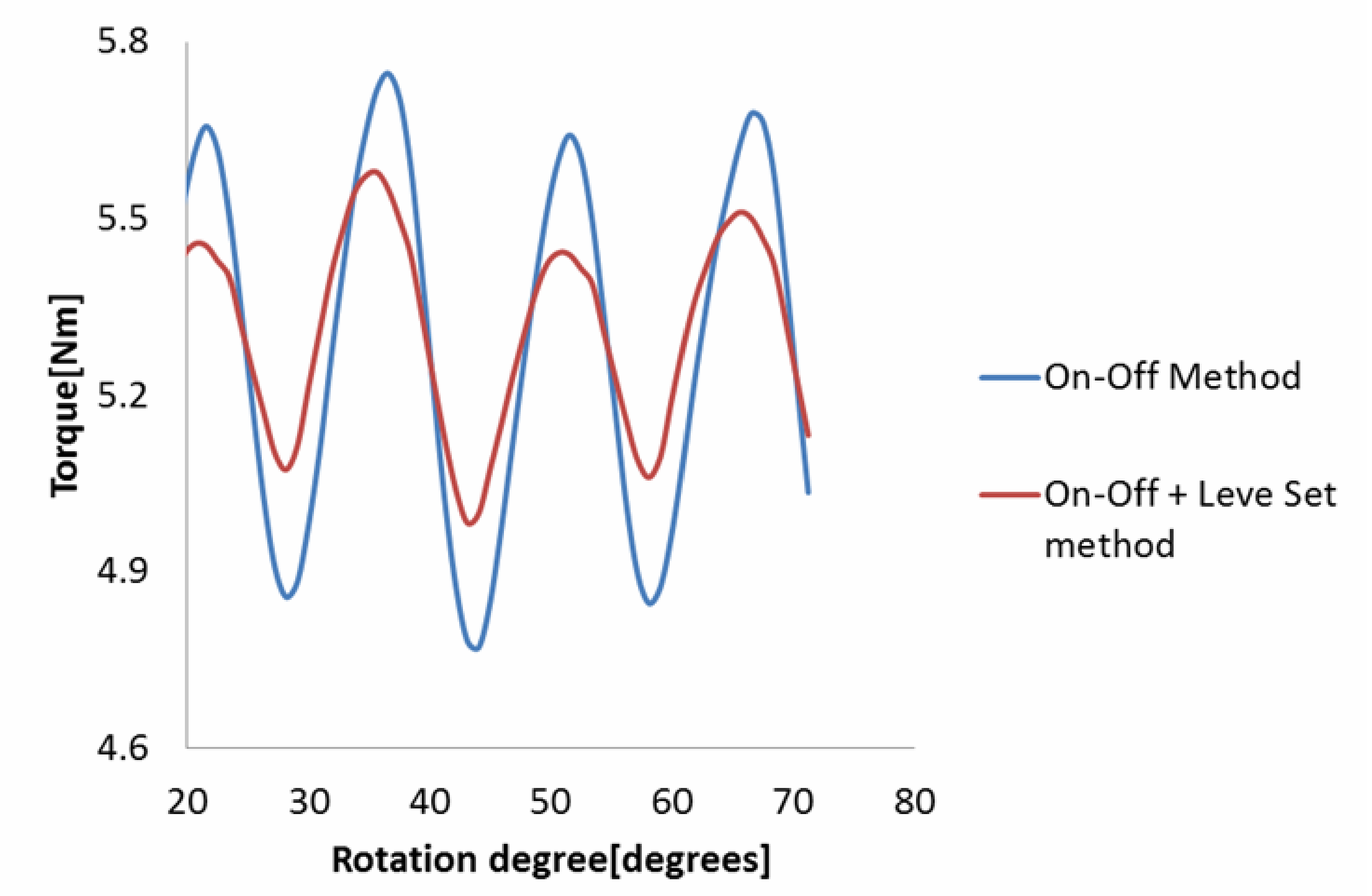
Torque average (Nm)	5.280
Torque ripple	0.184
Objective function	-0.806



Torque average (Nm)	5.309
Torque ripple	0.112
Objective function	-1.018

Y. Hidaka, T. Sato, H. Igarashi, Topology Optimization Method Based on On-Off Method and Level Set Approach, presented at COMPUMAG2013, to appear in IEEE Trans. Magn.

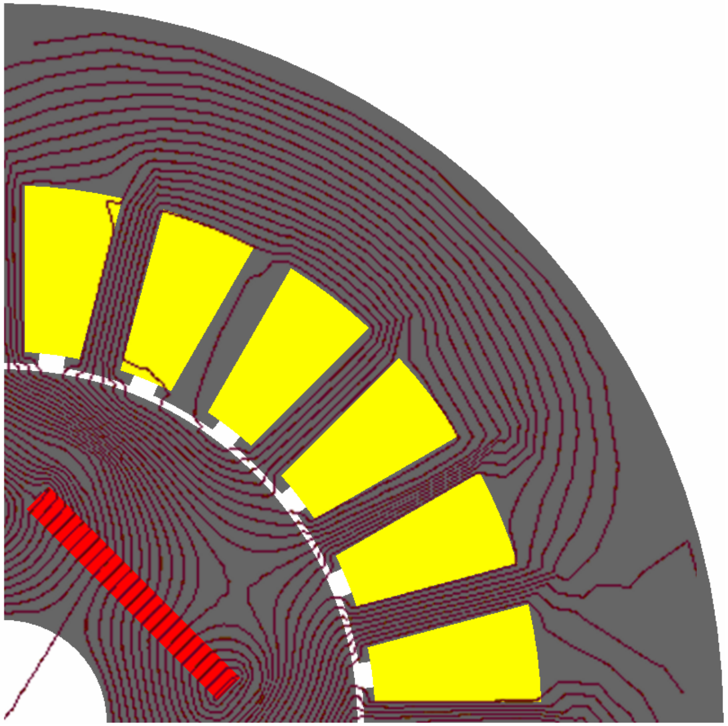
On-Off法と2段階法の比較

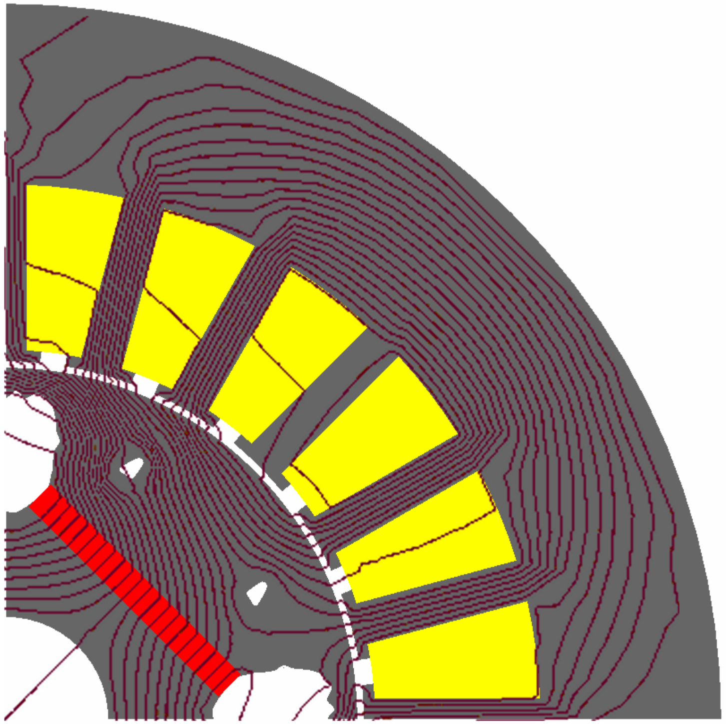


Y. Hidaka, T. Sato, H. Igarashi, Topology Optimization Method Based on On-Off Method and Level Set Approach, presented at COMPUMAG2013, to appear in IEEE Trans. Magn.

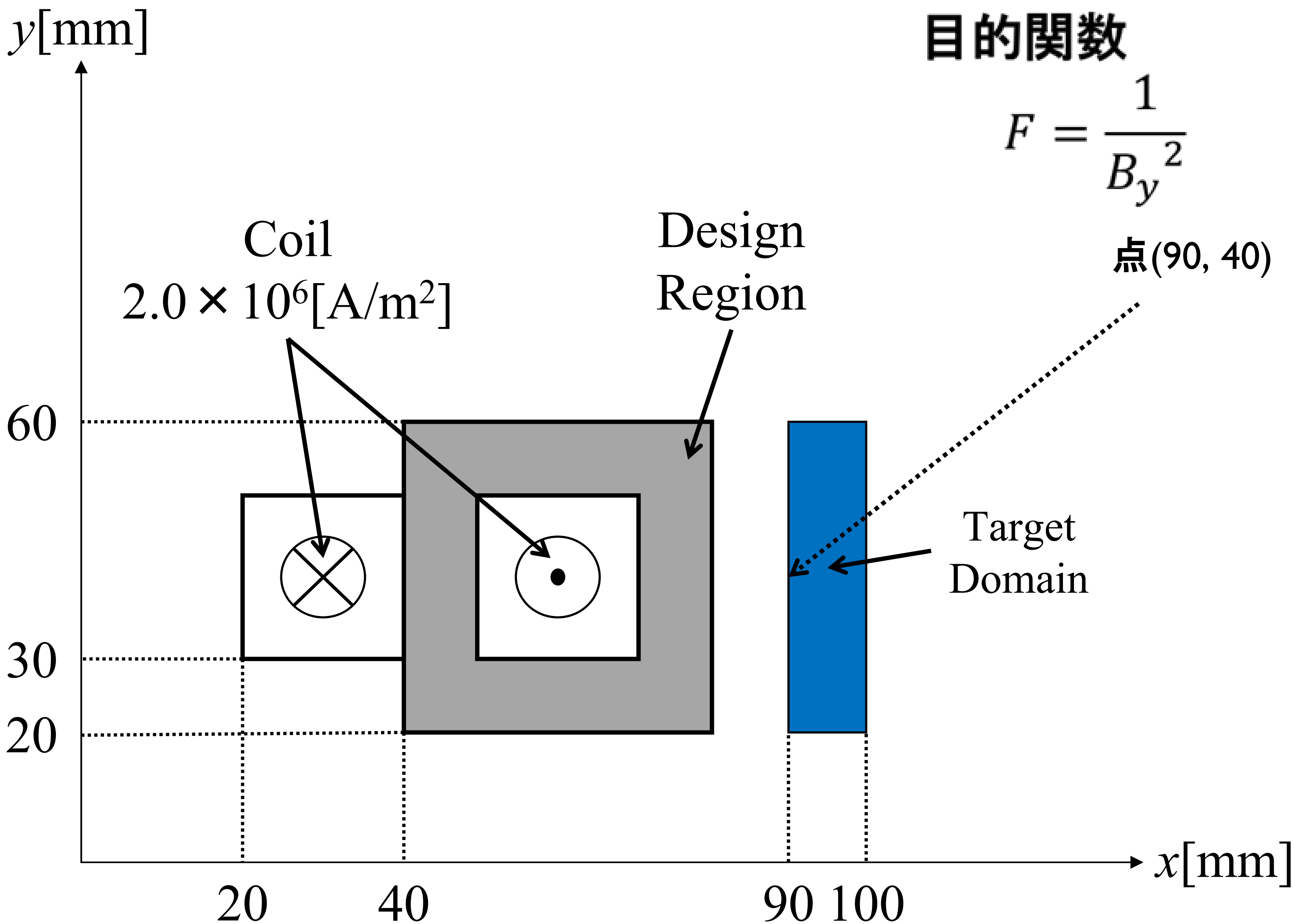
フラックスバリアの効果

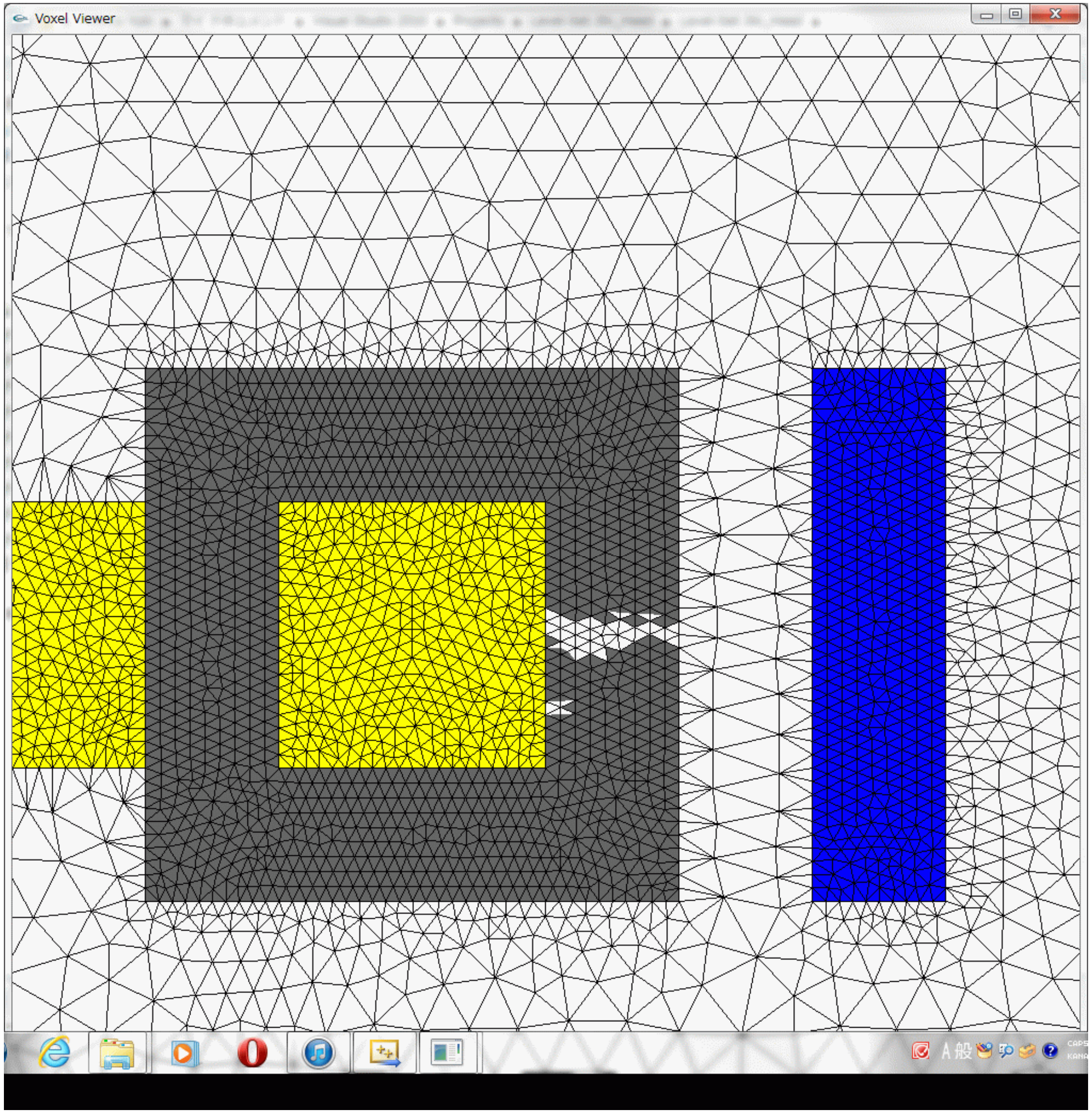
Non Flux Barrier	Flux Barrier





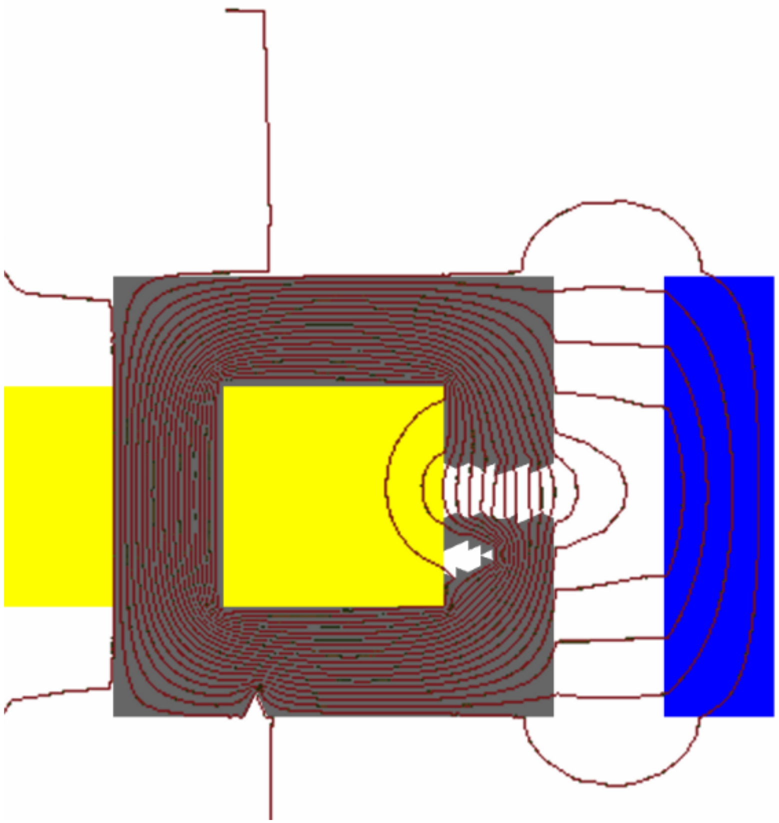
２段階法による磁気コア形状の最適化



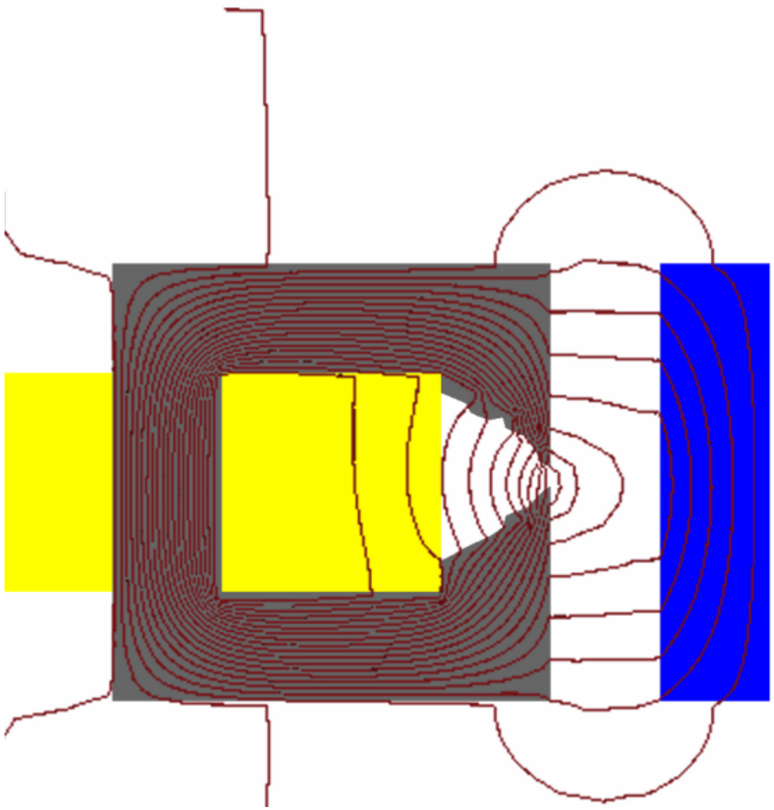

Voxel Viewer

On-Off法と2段階法の比較

On-Off 法



On-Off + レベルセット



目的関数	67.480	65.198

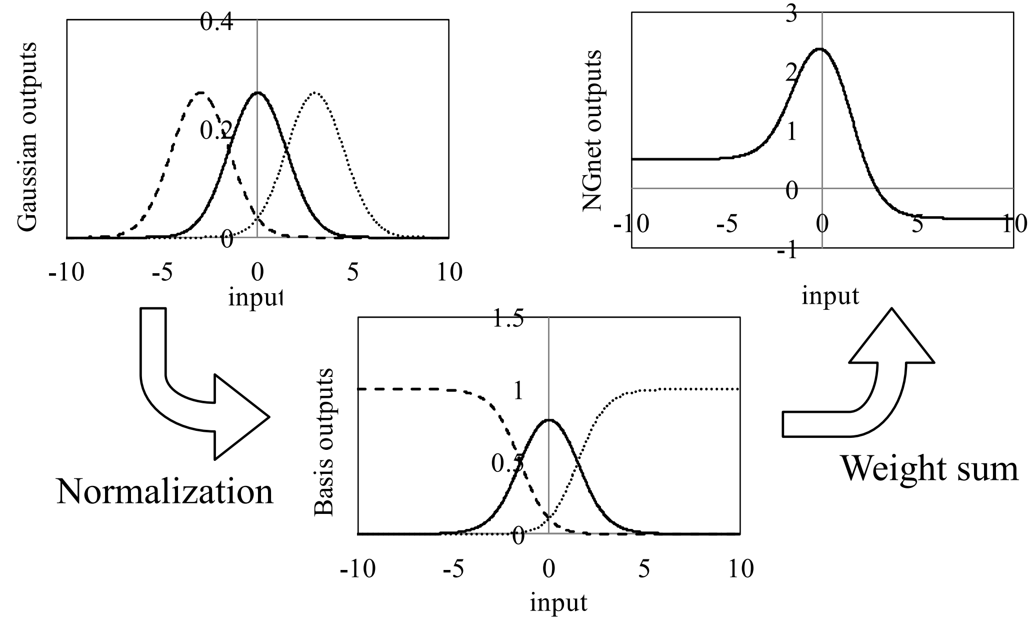
関数重ね合わせによるトポロジー最適化

NGnet[1]を用いる方法[2]

$$y(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^{N} w_i \hat{G}_i(\mathbf{x})$$

$$\hat{G}_i(\mathbf{x}) = \frac{G_i(\mathbf{x})}{\sum_{k=1}^{N} G_k(\mathbf{x})}$$

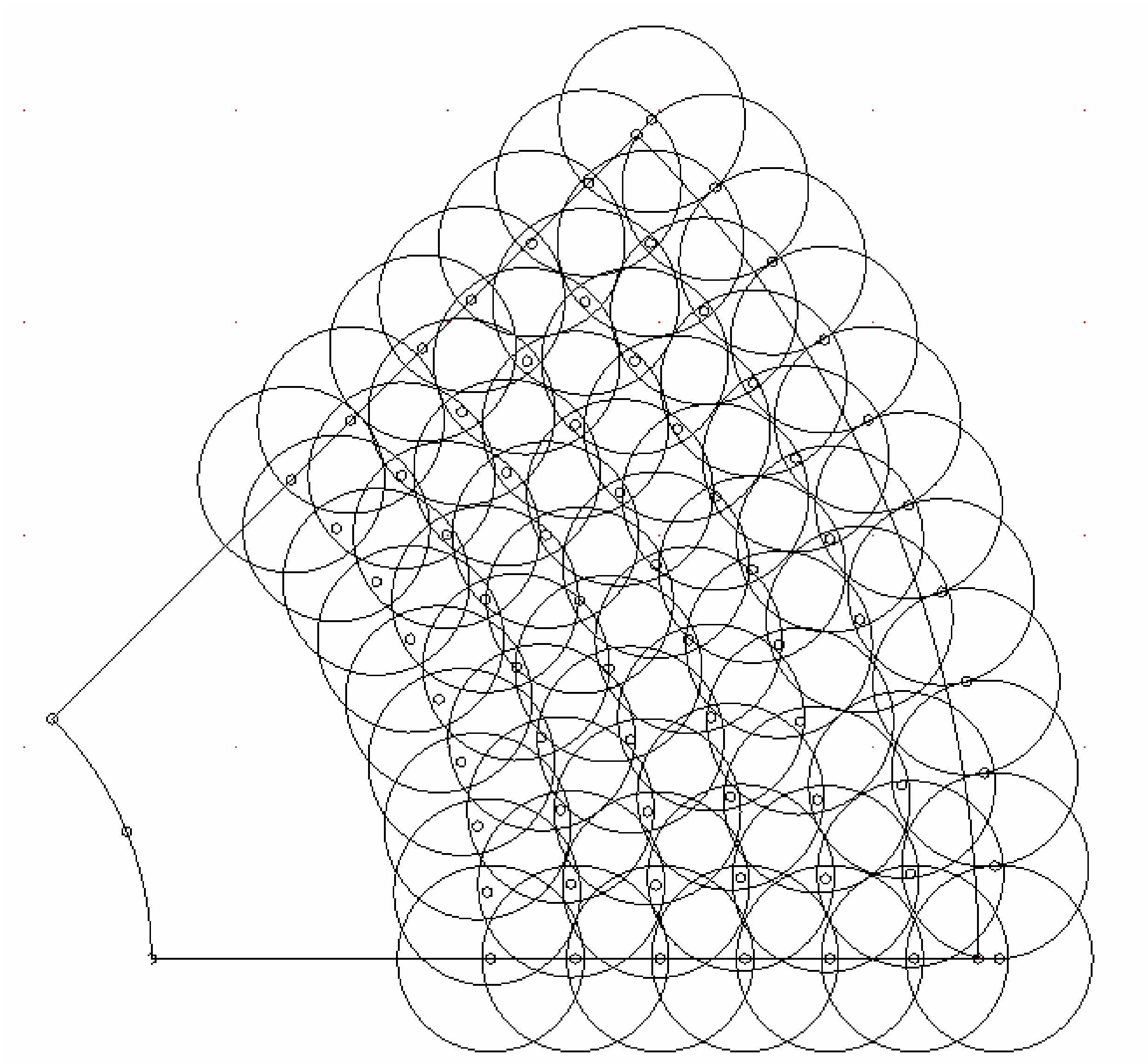
$G_i(\boldsymbol{x})$: ガウス関数



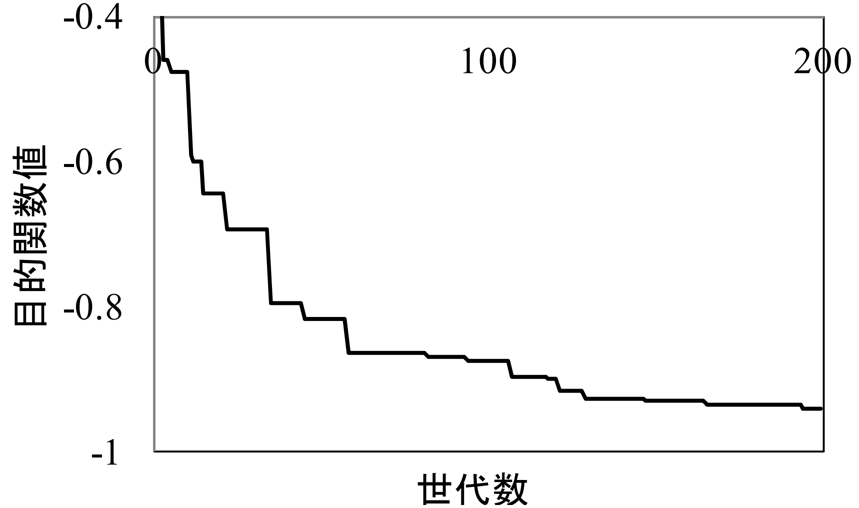
(1)J. Moody: "Fast Learning in Networks of Locally-Tuned Processing Units," Neural Computation, Vol. 1, No. 2, pp. 281-294, 1989.

(2)佐藤孝洋，渡辺浩太，五十嵐一，“正規化ガウス関数ネットワークを用いた電気機器のトポロジー最適化法”，静止器回転機合同研究科，SA-13-064,RM-13-078，2013

ガウス基底の配置

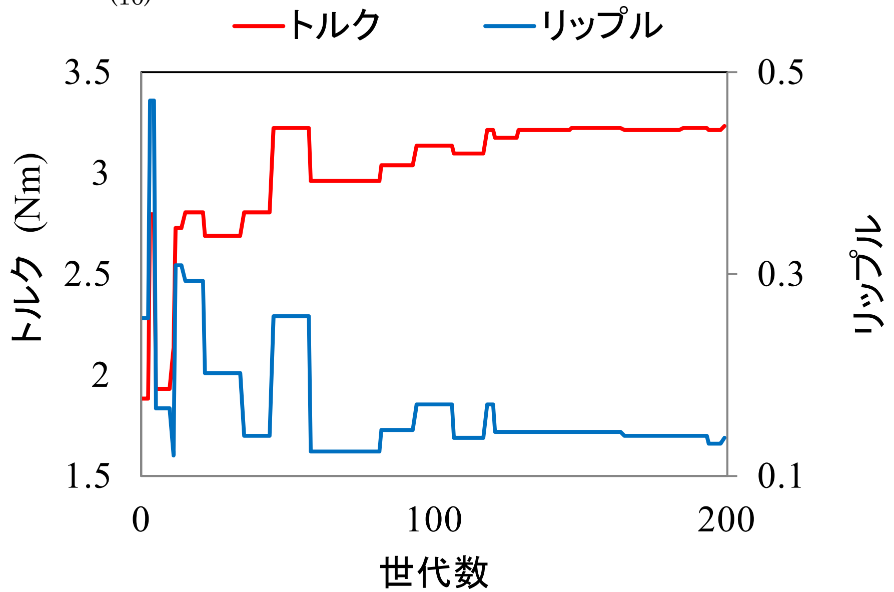


最適化の過程



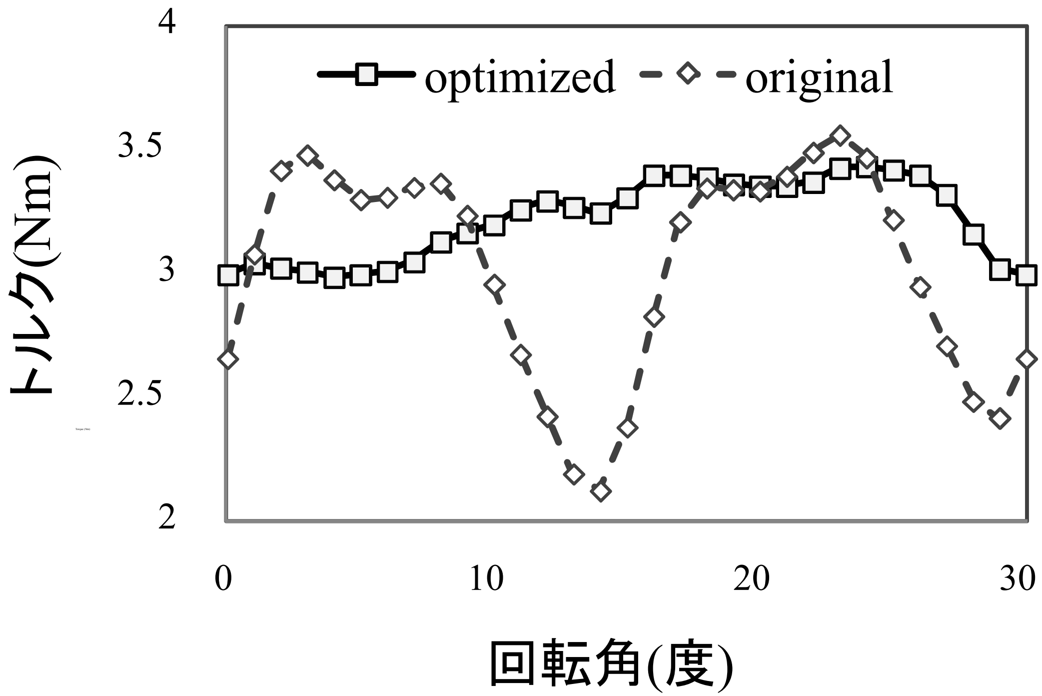
-0.4
-0.6
-0.8
-1
0
100
200
目的関数値
世代数

(10)

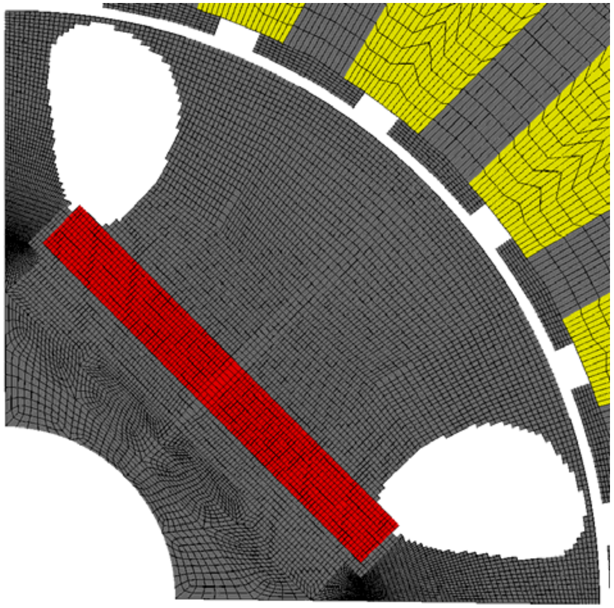


トルク
リップル
3.5
3
2.5
2
1.5
0.5
0.3
0.1
0
100
200
トルク (Nm)
リップル
世代数

最適化結果



トルクの変化



最適化された
フラックスバリアの形状

本研究の一部は(株)明電舎との共同研究による

佐藤孝洋，渡辺浩太，五十嵐一，“正規化ガウス関数ネットワークを用いた電気機器のトポロジー最適化法”，静止器回転機合同研究科，SA-13-064,RM-13-078，2013

コンピュータによる設計

設計原則:　設計者はコンピュータが設計したものについてよく理解していなければならない.

弱い設計原則:
設計者はコンピュータどのような原理でものを設計するのかを理解していなければならない.

今後の課題

(1) 現実の設計に適用するために，さまざまな要因を考慮して最適化を行える技術を構築する

(2) トポロジー最適化に関する理論を構築する

(3) 電磁界解析の高速化，最適化の効率化

(4) ものづくりとの協調