

Kiushi

haya / simulation / NEW / *

← ココに
おいてます。

GA と制約条件の勾配を用いた変圧器タンクシールドモデルの最適設計

○早川 雅浩¹, Čingoski Vlatko², 山下 英生³
(広島大学 工学部)

Optimal Design of Tank Shield Model of Transformer Using GA and the Gradient of the Constrained Condition

Masahiro Hayakawa, Vlatko Čingoski and Hideo Yamashita
Faculty of Engineering, Hiroshima University

Abstract In order to optimize various electromagnetic devices efficiently, optimization method is needed to investigate design of their shape and parameters. Recently various deterministic and stochastic searching methods have been used for optimization. However, these methods have several demerits. In this paper, an optimization using Genetic Algorithm(GA) and the gradient of the constrained condition is proposed. With this method the optimal solution is searched by using the gradient of the constrained condition after quasi-optimal solution is obtained by using the Genetic Algorithms. The usefulness of this proposed method is shown by its application to the tank shield model for which very good results are obtained.

1 緒言

電気学会の「電磁界問題最適化手法の高度化調査専門委員会」では、種々の最適化手法の有用性・実用性について検討するために、種々の最適化比較モデルを策定している。その中の一つに、磁気シールド板を有する変圧器のタンクモデルがある。タンクを想定した鉄板内に生じる渦電流による発熱を抑えて、かつシールド板の体積を最小にする変圧器タンクシールドモデルである [1]。このモデルにおいて、シールド板の形状や寸法を求める最適設計法が必要である。本論文では、適用分野にあまり依存せず、汎用的な最適化アルゴリズムである遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithms; 以後、GA) と最適化問題の制約条件の勾配を併用した最適化手法を提案し、本モデルに適用する。

GA は局所解に陥りにくく、大域的な探索が行えるが、局所的な探索能力に欠けるという問題がある。そこで、局所的探索には制約条件の勾配を指標とする探索方法を用いる。この方法は最初に GA により大域的な探索を行った後で、その最良解を出発点として、制約条件の勾配を指標とする探索方法により局所的な

探索を行う。この最適化手法を用いて、変圧器タンクシールドモデルの最適化を行った結果について述べる。

2 最適化対象モデル

図 1 に変圧器タンクシールドモデルを示す。変圧器タンクを想定した鉄板において、磁気シールドの体積が最小になり、局部加熱を抑制するために鉄板中の渦電流値が $0.4A/mm^2$ を超えないような磁気シールド板の寸法を決定する。図 1 のようにシールド板の幅を設計変数 $\mathbf{L} = (L_1, L_2, L_3, L_4)^T$ (T は転置) として取り扱う。以上の条件のもとで、次の (1) 式の目的関数 W (磁気シールド板の体積に等価) が最小になる寸法を求める。

$$W = \frac{1}{2} \cdot \frac{200}{3} (L_1 + 2L_2 + 2L_3 + L_4) \quad (1)$$

3 最適化手法

本論文では二段階からなる最適化を行う。第一段階では、大域的な最適化を行うために確率論的方法の一つである GA を使い、第二段階で局所的な探索を行うために制約条件の勾配を指標とする方法を用いる。本節では、まず初めに最適化のために用いた二次元渦

¹ 工学部第二類 (電気系) 博士課程前期
² 工学部第二類 (電気系) 助手
³ 工学部第二類 (電気系) 教授
739-8527 東広島市鏡山 1-4-1

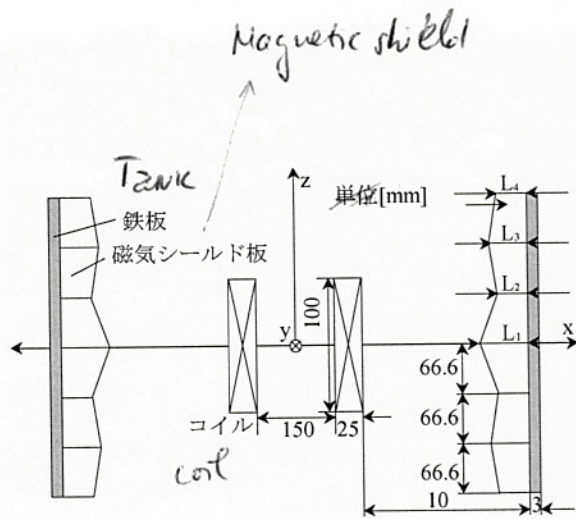


図1 変圧器タンクシールドモデル

電流解析の高速化について述べ、その後、二段階の最適化法について述べる。

3.1 有限要素解析とその高速化

2次元渦電流解析における支配方程式は次式で表される。

$$\nabla \times \nu \nabla \times \mathbf{A} = \mathbf{J}_0 - \sigma \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \nabla \phi \right) \quad (2)$$

ここで ν は磁気抵抗率、 \mathbf{J}_0 はソース電流密度、 σ は導電率を表す。また \mathbf{A} は磁気ベクトルポテンシャル、 ϕ は電気スカラーポテンシャルを表す。

本論文で採用しているGAを用いて最適設計を行う際に、渦電流解析を多数回(数千回に及ぶ)行う必要がある。したがって、一回の渦電流解析の処理時間を削減することにより最適設計を行う時間を激減することができる。(1)式は電気スカラーポテンシャルの勾配を考慮しており、解くべき連立一次方程式の係数マトリクスの非零要素数が増える。そのため、連立一次方程式の解法にICCG法を用いるとその前処理に計算時間がかかる。前処理の必要のないCG法との比較を行った。表1にCG法、ICCG法を用いて、渦電流解析を一度行うのに必要な計算時間を示す。ここで対象モデルとしては変圧器タンクシールドモデルを用いた。表1よりCG法を用いた方がICCG法を用いるより反復回数は3倍ほど必要とするが、計算時間は約1/4であることが分かる。そのため、本論文では連立一次方程式の解法にはCG法を用いている。

また最適設計を行う際に機器形状の変化により要素分割を変更する必要がある。本論文では解析領域を再分割領域とそれ以外の領域に分類する。再分割を行わない領域の情報(係数マトリクスなど)を予め保持しておき、機器形状が変化するとき再分割領域の情報

のみを付加することにより高速に解析を行う。

表1: 計算時間の比較

解法	計算時間 [s]	反復回数
CG法	3.1	117
ICCG法	14.3	42

(使用計算機: SGI Indigo2 IMPACT)

3.2 GAによる最適化の探索範囲の更新[2]

GAを用いて最適設計を行う際に、GA節点の移動幅が大きいと、その状態で求められる最適位置は、離散的な位置であるために、準最適解となる可能性が高い。より最適な位置を求めるにはGA節点の移動幅を世代進行とともに小さくすることが必要である。移動幅を小さくするためには次の二つの方法が考えられる。

- 1 GA節点に割り当てる遺伝子を構成するビット数を増やす方法。
- 2 GA節点の探索範囲を小さくする方法。

前者の場合、移動幅は小さくなるが、局所解に陥る可能性が増えるとともに解候補数が増加するために計算時間が増加する。また後者は誘引的なスキーマが最適解との共有ビットが少ない問題においても、探索範囲を変更することによりこの問題を解決する可能性を秘めている。そのため本論文では後者を用いる。

3.3 局所的探索手法

GAは複数の探索点からの多点並列探索であるため、それらが相互に協調及び競合することによって局所的な安定点に捕らわれにくい効果的な探索を行えるという特長を有している。またGAはこの大域的な探索が行える利点がある一方で、局所的な探索能力に欠けるという問題点が従来から指摘されている[3]。これはGAを用いると、最適解付近の解から最適解を見つけるのが非常に困難であることを示している。本論文では大域的な探索を行うことができるGAと局所的な探索を組み合わせ手法を用いている。局所的な探索方法としては最急降下法、ニュートン法、準ニュートン法などがある。しかし目的関数((1)式)より、勾配ベクトルが一定になるため、これらの手法では効率の良い探索を行うことができない。そのため制約条件(渦電流値の最大値)の勾配を指標として、探索を行う手法を提案する。次にこの手法のアルゴリズムの概略を示す。

step1 通常の GA により最良解を算出し、出発点とし、 $k=0$ とする。(今回は最大世代数を 200 世代とした。)

step2 探索ベクトル $\mathbf{d}^{(k)} = -1/\nabla J_{max}(\mathbf{L}^{(k)})$ を計算する。この時、探索ベクトルの中に負の値を持つ要素があれば、最大の負の値を持つ要素のみに値を持たせ、それ以外の要素は零とする。また探索ベクトルの中で勾配が求められなくなった要素を零にする。(物理的に不可能であるため)

step3 $t^{(k)} \sum_{i=1}^4 d_i^{(k)} = -0.02$ となるようにステップ幅 $t^{(k)}$ を求め、 $\mathbf{L}^{(k+1)} = \mathbf{L}^{(k)} + t^{(k)}\mathbf{d}^{(k)}$ とする。要素分割を再作成し渦電流場解析を行う。

step4 渦電流の最大値が指定値より大きければ一回前の解を最適解とし終了。そうでなければ、反復回数 $k=k+1$ として、step2 へ戻る。

表 2: GA パラメータ

L_i を表すビット数	5	L_i の範囲 [mm]	0 ~ 10
交叉率 [%]	60	突然変異率 [%]	10
最大世代数	200	個体数	20
エリート個体数	10		

4 最適化結果

前節で述べた手法を用いて、変圧器タンクシールドモデルの最適設計を行った。GA を用いるのに使用した GA パラメータを表 2 に示す。また 3.2 節で述べた探索範囲の更新について次の 3 ケースについて比較検討を行った。

case1 探索範囲を 10mm 一定とする。

case2 探索範囲を 1 回変化させる。(初代の探索範囲を 10mm として、100 世代の時点で探索範囲を 1/2 にする。)

case3 探索範囲を 2 回変化させる。(初代の探索範囲を 10mm として、70,140 世代の時点で探索範囲をそれぞれ 1/2 にする。)

最適設計は各々 5 回試行し、表 3 に step1 終了時の最良解の結果を示す。また最大世代数 200 世代までの GA による目的関数値の推移を図 2 に示す。表 3、図 2 の結果より case2 及び case3 の結果は探索範囲を更新後、顕著に解の更新が行われている。探索範囲を変化させない case1 よりも探索範囲を変化させる case2 及び case3 の方が良い結果が得られていることが分か

る。このことから局所解は探索空間中の狭い範囲に存在し、探索範囲を更新して探索範囲を狭めることは変圧器タンクシールドモデルに対しては有効であることが分かる。

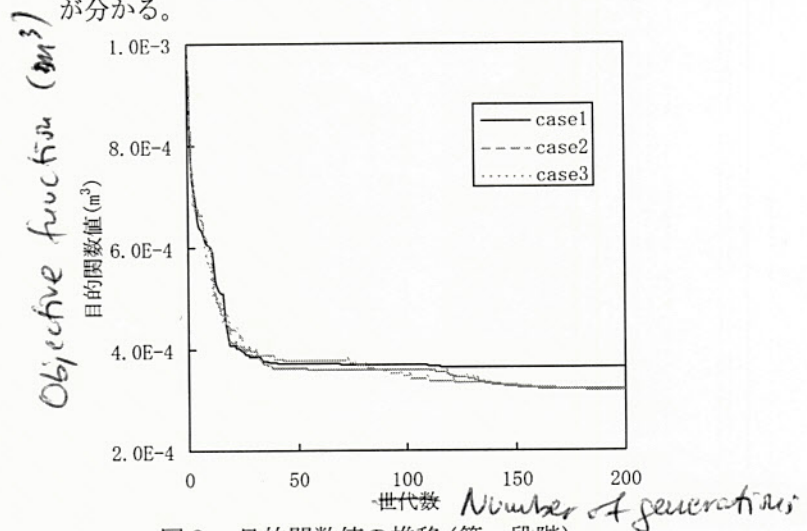


図 2 目的関数値の推移 (第一段階)

表 3: 最適化結果 (step1 終了後)

	case1	case2	case3
L_1 [mm]	4.545	4.621	4.735
L_2 [mm]	2.121	1.970	1.856
L_3 [mm]	0.606	0.455	0.455
L_4 [mm]	0.303	0.152	0.152
最良解算出世代	18	131	174
目的関数値 [$10^{-3}m^3$]	0.343	0.321	0.317

次に制約条件の勾配を用いた局所的な探索手法での目的関数の推移を図 3 に示す。また制約条件の勾配を用いた局所的な探索も含めた最適化手法による最終最適結果を表 4 に示す。ここで、目的関数値の平均減少分とは制約条件の勾配を用いた局所的な探索手法による 5 回の平均の目的関数値の減少分である。また平均反復回数とは制約条件の勾配を用いた局所的な探索手法による 5 回の平均反復回数を表している。表 4 より探索範囲を更新するほど、局所的な探索による平均反復回数は少なくなり、目的関数値の変化も少なくなっていることが分かる。またどのケースの場合も最終最適解の設計変数の値はほぼ同じとなり、目的関数値もほぼ等しい。このことより制約条件の勾配を用いた局所的な探索手法の有用性が実証できた。なお、最適設計を一回行うのに要した計算時間 (GA 処理および局所的探索の合計) は約 1 時間 (SGI Indigo2 IMPACT, CPU: R4400/250MHz) であった。

図 4 に鉄板付近の磁束密度分布と磁束線図を示す。この図は x 方向に 2.5 倍拡大したものを示している。

同図 (a) は磁気シールド板が無い場合の結果であり、(b) は最適化結果である。図 (a) より磁気シールド板がないため、鉄板内での磁束密度値が高いことが分かる。一方、図 (b) より高透磁率の磁性体材料である磁気シールドに磁束が吸収されているため、鉄板内での磁束密度値が低いことが分かる。

表 4: 最適化結果 (最終結果)

	case1	case2	case3
目的関数値の 平均減少分 [$10^{-4}m^3$]	0.474	0.069	0.058
平均反復回数	50	12	6.2
L_1 の範囲 [mm]	4.676	4.585	4.640
L_2 の範囲 [mm]	1.891	1.949	1.919
L_3 の範囲 [mm]	0.408	0.408	0.403
L_4 の範囲 [mm]	0.027	0.015	0.019
目的関数値 [$10^{-3}m^3$]	0.310	0.310	0.310

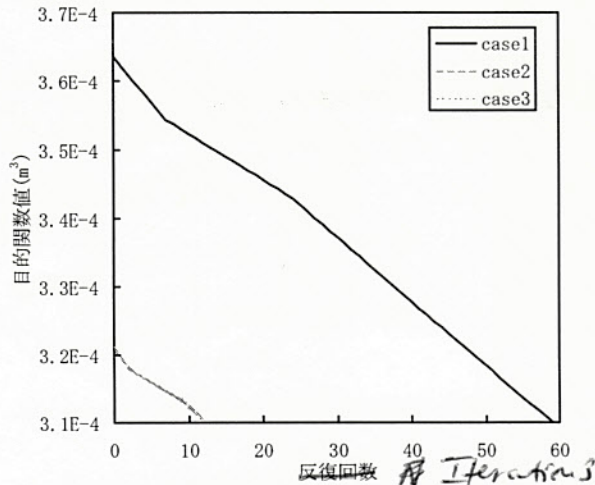


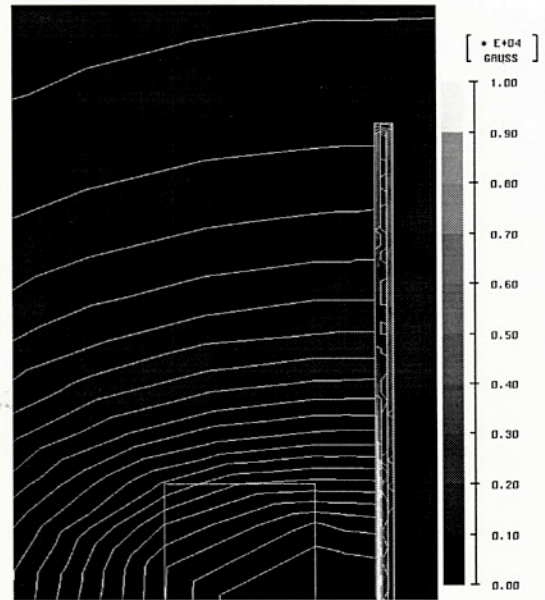
図 3 目的関数値の推移 (第二段階)

5 まとめ

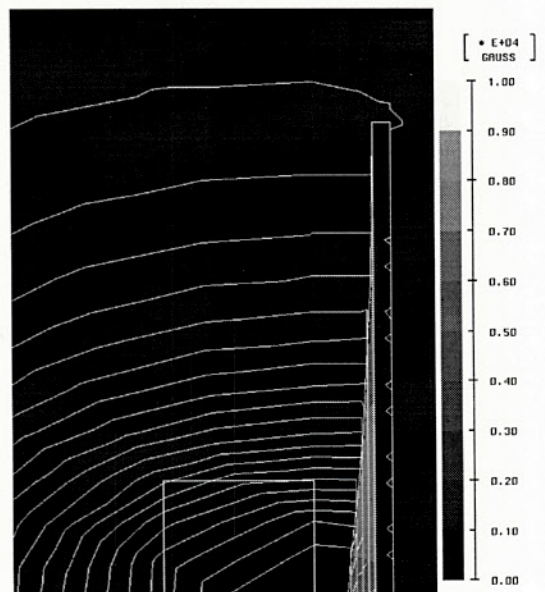
本論文では GA と制約条件の勾配を指標とした局所的探索手法を併用した手法を提案した。GA で得られた最良解を出発点とし、制約条件の勾配を指標とした局所的探索手法が効率良く探索を行えることを変圧器タンクシールドモデルに適用することにより示した。また、最適化手法に併用した有限要素解析において CG 法を用いることや再分割領域のみの情報を計算することにより高速な最適設計を行えることを示した。さらに GA 節点の移動幅を小さくするような探索範囲を世代進行とともに更新を行うことは変圧器タンクシールドモデルには有効であることを示した。

参考文献

- [1] 高橋則雄、北村哲朗：“変圧器タンクシールドモデルの寸法最適化”，計算機工学後援会論文集, Vol. 3, pp. 327-330 (1998).
- [2] V.Cingoski, N.Kowata, K.Kaneda, H.Yamashita：“Inverse Shape Optimization Using Dynamically Adjustable Genetic Algorithms”，*IEEE Trans. on Energy Conversion*, (1996)(採録決定)。
- [3] Juno Kim, Hong-bae Lee, Hyun Kyo Jung and Songyop Hahn：“Optimal Design Technique for Waveguide Device”，*IEEE Trans. on Mag.*, Vol. 32, No. 3, pp. 1250-1253 (1996).



(a) 磁気シールド板なし



(b) 最適結果

図 4 磁束密度分布及び磁束線図