三次元磁気シールド問題に対する位相最適化の検討

正 員 若尾真治 (早稲田大学)

正 員 小貫 天 (早稲田大学)

学生員 小川冬樹 (早稲田大学)

Investigation of Topology Optimization for 3D Magnetic Shielding Problems

Shinji Wakao, Member, Takashi Onuki, Member, Fuyuki Ogawa, Student (Waseda Univ.)

In recent years, the application of optimization methods coupled with magnetic field analysis is receiving ever increasing attention, and a large number and variety of methods have been proposed. For instance, the optimization of shield placement and its geometric boundaries has been of great interest in the area of rapid transit system, medical service adopting superconducting magnets, etc. The optimal design is categorized into sizing optimization, shape optimization, and topology optimization. Generally the topology optimization is effective for lightening the investigated model. However, there are few papers concerning with the topology optimization in which it is difficult to define design variables.

In this paper we propose the novel approaches to the 3D optimal design of magnetic shields, in which both the shape and topology optimization are implemented. We try to lighten the magnetic shield maintaining its shielding ability by using the hybrid finite element and boundary element method combined with the genetic algorithm. Finally some numerical results which demonstrate the validity of the proposed approaches are presented.

キーワード： 磁気シールド, 三次元問題, 位相最適化, 有限要素・境界要素併用法, 遺伝的アルゴリズム

1. まえがき

本論文は、電気機器設計への応用を前提に、電磁界解析に基づく有力な三次元最適化手法の開発を目的としている。電子計算機の発達と電磁界に対する様々な数値解析手法の研究開発により、ここ十数年の間に電気機器の設計分野に画期的な進歩がもたらされた。特に有限要素法や境界要素法に代表される数値計算技術に関しては、モデルの形状・寸法が与えられた場合の電界・磁界解析において、実用レベルに堪える段階まできている。しかし、得られた機器の解析結果に改良の余地がある場合には、所望の性能が備わるよう機器の設計変更をおこなう必要がある。基本原理を踏まえ蓄積技術を駆使しても、そこには少なからず試行錯誤の過程が入り、貴重な時間を無駄にするケースが多い。近年このような背景のもと、設計目標として与えられた電界・磁界分布などからモデルの形状・寸法を逆に決定する最適化手法の研究開発が精力的におこなわれている。最適設計問題は図1に示されるよう、寸法最適化問題、形状最適化問題、および位相最適化問題の三種類に大別できる。寸法最適化問題はモデルのあるパラメータのみが変動し、形状最適化問題はモデルの形状そのものが変化する問題である。一方、位相最適化問題とはモデルのトポロジー（レ

アウト）が変化する問題である⁽¹⁾⁽²⁾。一般に、モデルの重量を軽減する方法として、寸法最適化や形状最適化よりも位相最適化の方が効果的であることが指摘されている。しかし、モデル構造のトポロジーを変える位相最適化は設計変数として何を取るべきかが明確でなく、寸法最適化や形状最適化に比べて非常に困難であり、機器の位相最適設計に関して論じた研究はまだ少ない。

以上のような背景から、本論文では電気機器の位相最適設計を目的としている。具体的な対象としては、超電導マグネットを用いた医療機器や高速搬送システムなどの分野において最適化の課題として現在注目されている磁気シールド問題を取り上げる。そして、三次元位相最適化への新しいアプローチを提案・適用することで、軽量でかつ高い

図1 最適化問題の分類

Fig. 1. Category of optimization problems.

遮蔽効果を有するシールドの作成を目標とする。

磁気シールドの位相最適化は、シールドの表面形状を変化させることとシールド内部に任意形状の穴をあけるという二つの作業により達成できると考えられる(図2)。本論文では、これらの作業を並列的および直列的におこなう二種類のアプローチを提案し、物理的な考察に基づいて検討する。具体的には上記一連の作業を、有限要素・境界要素併用法に遺伝的アルゴリズムを組み入れることで実行し、軽量で高い遮蔽効果を有する磁気シールドをより短時間に効率的に設計する。有限要素・境界要素併用法は高い汎用性を有する有力な磁界解析手法の一つであり⁽³⁾⁽⁴⁾、一方の遺伝的アルゴリズムは生物の遺伝を模倣した確率的な探索アルゴリズムである。特に遺伝的アルゴリズムは、局所的最適解に陥りにくく高速に収束する最適化手法として近年注目を集めているが⁽⁵⁾⁻⁽⁸⁾、機器設計における純然たる三次元問題に適用された例はまだ少ない。今回は検証用の例題として、電気学会より提案されている三次元磁気シールド問題を取りあげ、本論文で提案した位相最適化手法の妥当性と有効性を示す。

2. 磁気シールド問題に対する磁界解析手法と最適化手法

本論文では、磁気シールド問題に適した磁界解析手法として有限要素・境界要素併用法を採用する。また遺伝的アルゴリズムをこの併用法に組み入れ、シールドの表面形状を変化させると同時にシールド内部に穴をあけ、シールドの軽量化を図る。すなわち、観測点に対する遮蔽能力を損なわない効果的な磁性材料の配分法を探索する。

<2.1> 有限要素・境界要素併用法(The Finite Element and Boundary Element Method) 数値的な磁界解析手法の代表的なものとして、有限要素法と境界要素法の二つが挙げられる。特に、有限要素法は材質が複雑な領域の解析に有効であり、境界要素法は空気領域のような均一な開領域に対して効果を発揮する⁽³⁾。図2に示すように磁気シールド問題は一般に解析領域の大部分が空気領域で占められ、ここには境界要素法を適用する方が観測点における磁束密度の解析精度の面から有利である。また位相最適化をおこなう際に磁性板内部に穴をあけるため領域が不均質にな

図2 磁気シールドの位相最適化

Fig. 2. Topology optimization of magnetic shield.

ること、非線形性にも容易に対応できることなどから、磁性体領域については有限要素法を用いる方が適切である。したがって本論文では、長所がともに発揮されるよう両手法を併用する有限要素・境界要素併用法(以下、FE-BE併用法)を、磁気シールド問題の磁界解析に適用する。これは、シールドの表面形状の変化を伴う最適化作業において、リメッシングが不要などの点からも得策である。

また、最適化作業は多くの反復計算を伴い膨大な計算時間を要するため、特に三次元解析では未知変数の個数を減らし計算時間を短縮する工夫が必要である。これより考察物理量として、ベクトル量と比較して未知数の個数が少ない磁気スカラーポテンシャル ψ を採用する。詳細は文献(3)にゆずるが、各領域に対する定式化を以下に示す。

● 磁性体領域(有限要素法領域)

$$\int_{\Omega_m} \nabla N \cdot \mu \nabla \psi \, d\Omega - \int_{\Gamma} N \mu \frac{\partial \psi}{\partial n} \, d\Gamma = 0 \quad \dots\dots\dots(1)$$

ただし、 N : スカラー補間関数 μ : 透磁率
 n : 領域境界上の単位法線ベクトル

● 空気領域(境界要素法領域)

$$C_P \psi_P = \int_{\Omega_a} \nabla \frac{1}{r} \cdot d\mathbf{m} + \int_{\Gamma} \frac{\partial \psi_Q}{\partial n} \frac{1}{r} \, d\Gamma - \int_{\Gamma} \psi_Q \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{1}{r} \right) \, d\Gamma \quad \dots\dots\dots(2)$$

ただし、 C_P : ソース点 P から解析領域を見込む立体角
 r : ソース点 P と観測点 Q との距離
 m : 磁気双極子モーメント

<2.2> 遺伝的アルゴリズム(Genetic Algorithm) 遺伝的アルゴリズム(以下、GA)は遺伝の“適者生存の法則”に基づいた確率的な探索アルゴリズムであり、任意個数の個体(ある設計変数の値の組)で構成される初期集団をランダムに発生させ、遺伝子情報の交換をおこないつつ適応度の高いものを残して他を淘汰する“選択”過程を繰り返す。最適解を探索する。まず、対象とする問題の各設計変数の組に対して遺伝子型による表現方法を設定し、遺伝子情報の異なる個体を複数発生させる。次に、予め決めておいた評価関数を用いて各個体の適応度を計算する。ここでは、FE-BE併用法を用いて求めた観測点の磁束密度の値に基づいて適応度を算出する。適応度の低い個体は淘汰し、適応度の高いものを遺伝子の組み替えによって増殖させる。遺伝子の組み替えは“交叉”と“突然変異”によって確率的におこなわれ、もとの二つの個体両方(親)の性質を受け継いだ二つの新しい個体(子)が発生する。この結果、例えば二つの局所最適解に収束してしまった親からもさらに適応度の高い別の場所に子が生まれる可能性があり、より大域的な最適化が期待できる。GAに関するより詳しい解説は文献(5)-(8)等にゆずる。

3. 位相最適化の手順

<3.1> 解析モデル 検証用例题として取り上げる電気学会磁気シールドモデルを図3に示す。観測面上の磁束密度の最大値 $B_{\max}$ を $5 \times 10^{-3} \text{T}$ 以下に保つ条件のもと、シールド板の下側表面を固定し上側表面形状を変化させ、シールド板の重量最小化を目標とする。コイル電流は直流で $3.9789 \times 10^4 \text{A}$ 、磁性体は線形で比透磁率が1000とし、シールドの厚さは $1 \times 10^{-3} \sim 20 \times 10^{-3} \text{m}$ の範囲で変化可能とする。以下、モデルの対称性を考慮し1/4領域について解析する。

<3.2> 最適化手順 次に本論文で提案する位相最適化への二種類の手順について説明する。

(a)並列法 ここではシールドの表面形状の変化と穴をあける作業を並列的に（同時に）おこなう。本例题ではモデルが図4に示すように z 軸を中心としてほぼ対称であり、シールド板内を流れる磁束の総量は半径(R)方向に関して大きく変化する（円周(θ)方向には変化が少ない）。また、磁束の総量に応じて磁性材料を分配する方が効果的な最適化がおこなえと予想できる。以上の点に加え製作の容易さも考慮して、今回は、図5に示すように厚さ一定の二枚の磁性板で棒状のカギ型磁性塊を挟むことにより穴あきシールドを作成することとする。

GAを適用する場合、対象とする問題の解を遺伝子に相当する記号列にいかん適切に変換できるかが重要なポイントとなる。ここでは、図6に示す設計変数によりシールド厚および穴の有無を表現し、遺伝子型を設定した。ここで、シールド厚を表す設計変数 w は $+z$ 方向のみに変位可能とする。最適化手法にGAを用いているため、穴の有無のような離散的な設計変数値を、対応する遺伝子座に1か0を入れることで容易に表現できる。また、本手法においては磁性体領域

図3 三次元磁気シールドモデル
Fig. 3. 3D magnetic shielding model.

図4 シールド板内の磁束
Fig. 4. Flux in magnetic shield.

には有限要素法を適用するため、対応する有限要素の比透磁率を1000から1に変更することにより、穴をあける作業は数値計算上で簡単に実現できる。

(b)直列法 並列法では設計変数の個数が多くなると遺伝子型のビット長が長くなり、最適解の探索に要する時間が増大する。そこで、シールドの表面形状の変化と穴をあける作業を、二つの工程に分けて直列的におこなう方法を提案する。まずシールドを塊状のままその表面形状のみを変化・確定させ（第1工程）、次に確定した形状に対してシールド内部に穴をあける（第2工程）。第1工程では設計変数を図7(a)のようにおき、シールド板の上側表面形状のみを変化させる。具体的には、各設計変数 w を一定の刻み幅で $+z$ 方向にそれぞれ変位させ、FE-BE併用法により計算した観測面上の最大磁束密度 $B_{\max}$ を最も減少させたもの一つに関して、その変位を確定する。この操作を $B_{\max}$ の減少率が1%未満になるまで繰り返す。次に第2工程では、第1工程で得られた形状に対し設計変数を図7(b)のようにおく。ここでは更にGAを組み入れて、設計条件を満たす範囲でシールド内部に穴をあけると同時に磁性塊を挟む二枚の磁性板の厚さ t も変化させ、シールド全体の軽量化を図る。本手法により位相最適化を短時間で簡便におこなうことが期待できる。

4. 数値計算例

<4.1> 解析結果 電気学会磁気シールドモデルに対し、有限要素として四面体節点一次要素を、境界要素として三角形節点一次要素を採用し、図8に示すメッシュ分割

図5 穴あきシールド
Fig. 5. Shield with holes.

図6 並列法の設計変数
Fig. 6. Design variables (parallel type approach).

により解析をおこなう。

また、シールド板の上側表面を平らなまま変化させず、かつ塊状のままシールド厚だけを增加させた場合（位相最適化を施さない場合）、シールドの体積が $V_0 = 7.90 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ で設計条件 $B_{\max} < 5 \times 10^{-3} \text{ T}$ を満足する。以下この体積値 V_0 を基準として考察を進める。

(a)並列法 図9に示す設計変数により24ビット長の遺伝子型を設定し（図6参照）、以下の(3)式で表される評価関数を用いて位相最適化をおこなう。

$$f = V + (\text{Max}[5 \times 10^{-3}, B_{\max}] - 5 \times 10^{-3}) \times \text{weight} \cdots (3)$$

ただし、 V ：シールド板の体積

weight：体積値と磁束密度値の評価に及ぼす

影響をバランスさせるための重み

今回は $\text{weight} = 10$ とし、二枚の磁性板厚 t は $1.5 \times 10^{-3} \text{ m}$ 一定とする。GAのパラメータは個体数を50，“選択”には重み付きルーレット方式とエリート保存方式を併用し，“交叉”には一点交叉方式を，“突然変異”の確率は0.05に設定した⁽⁶⁾⁽⁷⁾。また、評価関数の最良値が50世代にわたり変化しない場合に探索を打ち切るものとする。図10、表1に

図7 直列法の設計変数

Fig. 7. Design variables (serial type approach).

図8 メッシュ分割図

Fig. 8. Meshes of model.

並列法による最終結果を示す。設計条件 $B_{\max} < 5 \times 10^{-3} \text{ T}$ を満たしたまま V_0 と比較して約82.8%まで重量軽減が達成され、本手法の有効性が確認できる。図10の最終結果を得るまでに実際に磁界計算をおこなった形状パターンは全パターン 2^{24} 通り中の6301通りであり、GAの収束の高速性も確認できる。

(b)直列法 まず第1工程として、図11(a)に示す各設計変数の刻み幅を $2 \times 10^{-3} \text{ m}$ とし、FE-BE併用法による磁界解析をもとにシールド板の表面形状を決定する。今回は初期形状を $w_1 \sim w_9 = 1 \times 10^{-3} \text{ m}$ および $3 \times 10^{-3} \text{ m}$ の二通りの場合について最適化をおこなった。各初期値に対し $B_{\max}$ および体積変化の過程を図12に、初期値が $1 \times 10^{-3} \text{ m}$ の場合のシールドの形状変化の過程を図13に示す。初期値が $1 \times 10^{-3} \text{ m}$ および $3 \times 10^{-3} \text{ m}$ の場合、それぞれ反復回数が25回、16回で $B_{\max}$ の減少率が1%未満となった。各々の反復計算の際、シールド厚を表す設計変数 w を一定の刻み幅で $+z$ 方向に変位させているため、シールド板の体積増加率は $B_{\max}$ の減少率ほど急激には変化していないことがわかる。次に第2工程として、遮蔽効果を損なわないよう適切にシールド内部に穴をあけ軽量化を図る。図11(b)に示す設計変数により10ビット長の遺伝子型を設定し（図7参照）、(3)式で表される評価関数を用いて位相最適化をおこなう。ここで二枚の磁性板の厚み t は、各々の穴をふさいでしまわないように $w - 2t > 0.5 \times 10^{-3} \text{ m}$ の条件のもと $1 \times 10^{-3} \sim 8 \times 10^{-3} \text{ m}$ の間で変位可能とする。GAのパラメータに関しては、個体数を20、評価関数の最良値が20世代にわたって変化しない場合に探索を打ち切るとし、その他は並列法のときと同じである。

図9 並列法の設計変数

Fig. 9. Design variables (parallel type approach).

図10 並列法の解析結果

Fig. 10. Results of parallel type approach.

表1 並列法の解析結果

Table 1. Results of parallel type approach.

設計変数	w_1	w_2	w_3	w_4	w_5	w_6
解析結果 ($\times 10^{-3} \text{ m}$)	4.0	2.0	4.0	8.0	4.0	0.5

図14, 表2に直列法(初期値 $1 \times 10^{-3} \text{m}$)による最終結果を示す。設計条件 $B_{\text{max}} < 5 \times 10^{-3} \text{T}$ を満たしたまま V_0 と比較して約 83.1% まで重量軽減が達成され, 本手法の有効性が確認できる。また, 図14の最終結果を得るまでに実際に磁界計算をおこなった形状パターンは, 両工程あわせて 432 通りであり, 全計算時間は並列法のときの約 1/14 であった。

<4.2> 考察 提案した二つの手法による最終結果の比較を表3に示す。やはり, シールドの表面形状を変化させることとシールド内部に任意形状の穴をあけるという二つの作業を同時におこなう並列法のときに, 位相最適化の見地から最良の結果が得られているが, 一方の直列法を用いた場合にもこれに匹敵する良好な結果を得ることができた。並列法と比較して, 設計変数を多くとったにも関わらず計算時間を大幅に短縮できることを考慮すれば, 本論文で提案した直列法は大変有効なものであると考えられる。

次に, 直列法の各工程における作業の意味を物理的に解釈する。本モデルにおいて設計条件 $B_{\text{max}} < 5 \times 10^{-3} \text{T}$ を満たす最適(重量最小)なシールド形状は, 以下の二つの効果を発揮するよう形状を適切に変化させることで得られる。

- [効果1] 観測面に達する磁束の総量を減らす効果, すなわちモデルにおける xy 方向の磁気抵抗を減らし磁束を同方向に流れ易くする効果。
- [効果2] 観測面上の磁束分布を均一化する効果。

図11 直列法の設計変数

Fig. 11. Design variables (serial type approach).

図12 磁束密度および体積の変化

Fig. 12. Flux density and volume of shield at each iteration.

効果1は磁性材料の体積に因るところが大きく, 効果2はシールドの表面形状に因るところが大きい。図12, 13(第1工程)はこれらの両効果が共に発揮されるようにシールド板の表面形状が変化していった結果である。しかし, 直列法の第1工程ではシールド板を塊状のまま形状変化させているため, 表面形状に因るところが大きい“効果2”を発揮させるうえで, 得られたシールド形状には余分な磁性材料が含まれている可能性がある。この余剰部分を除去するのが第2工程であり, 表3からもわかるように第1工程終了時の状態から更に重量を軽減することができる。

以上の物理的考察からも, シールド表面形状のみを検討するだけでなく, 内部に穴をあけることで位相の最適化まで考慮することの有効性がわかり, 本論文で提案する並列および直列の二つの手法の妥当性を示すことができる。

<4.3> 今後の課題 今回の数値計算例に関して, シールド板の離散化, 設計変数や初期値の設定, GAのパラメータ調整などの仕方によっては, 得られる最終結果に変化の生じる可能性がある。しかし, 位相最適化問題では安定して真に最適な位相決定を保証することは, 特に離散的な数量に基づいて計算をおこなう数値解析法において一般に困難である。一つの対策方法としては, 解析対象とするモデルを細かくメッシュ分割し, モデル構造のトポロジーを十分に表現できるだけの数多くの設計変数とその変位刻み幅を設定することが考えられるが, 位相最適化に要する計算

図13 板厚形状の変化(初期値 $1 \times 10^{-3} \text{m}$)

Fig. 13. Cross section of shield at each iteration.

図14 直列法の解析結果(初期値 $1 \times 10^{-3} \text{m}$)

Fig. 14. Results of serial type approach.

表2 直列法の解析結果(初期値 $1 \times 10^{-3} \text{m}$)

Table 2. Results of serial type approach.

設計変数	w_1	w_2	w_3	w_4	w_5	w_6	w_7	w_8	w_9
解析結果 ($\times 10^{-3} \text{m}$)	1.0	5.0	3.0	17.0	7.0	15.0	3.0	5.0	3.0

表3 シールドの体積の比較
Table 3. Comparison between shields' volume.

			体積($\times 10^{-3} \text{m}^3$)	体積/ V_0 (%)
平板形状(V_0)			7.900	100.000
並列法			6.545	82.848
直 列 法	初期値	第1工程	6.822	86.354
		第2工程	6.563	83.075
	$1 \times 10^{-3} \text{m}$	第1工程	6.687	84.646
		第2工程	6.680	84.552

時間の観点からこれも実用上限界がある。最終的には、最適化の対象となる機器の物理的な特性や機器製作に際しての条件、使用する計算機の処理速度・記憶容量などを考慮に入れた上で、設計者が適切に最適化作業時の諸条件を決定する必要がある⁹⁾。今回の数値計算例でも、図4で示したモデル特性に基づいて、要素が極端に扁平にならずかつ実用上問題のない時間範囲で最適解の探索がおこなえと考える程度にメッシュ分割、設計変数の初期値およびその刻み幅、個体数などのGAの各種パラメータを設定している。今後は、以上の点を踏まえ、本手法に関して最適化プロセスの安定化をはかる工夫をさらに検討することが課題である。

5. ま と め

一般に、モデルの重量を軽減する方法として、寸法最適化や形状最適化よりも位相最適化の方が効果的であることが指摘されてきたが、モデル構造のトポロジーを変える位相最適設計は非常に難しく、電気機器の位相最適化に関して論じた研究はまだ少ない。本論文では軽量で高い遮蔽効果を有するシールドの設計を目指し、シールドの表面形状の変化と内部に穴をあけるという二つの作業に基づく三次元磁気シールドの位相最適化に取り組んだ。具体的には二種類の方法を提案し、一つは上記二つの作業を同時におこなう方法(並列法)であり、もう一つは個別におこなう方法(直列法)である。そして、この二つの方法を用いて電気学会磁気シールドモデルの三次元位相最適化をおこない、その妥当性と有効性を確認した。提案手法の特長および得られた知見の主なものをもとめると以下ようになる。

- (1) 提案手法では、磁気シールド問題に対する位相最適化作業の特性を考慮して、磁気スカラーポテンシャルを変数とするFE-BE併用法を磁界解析手法に採用すると同時に、穴の有無のような離散的な設計変数にも対応が容易であるGAを探索アルゴリズムとして組み入れている。
- (2) 並列および直列の二つの方法を用いて電気学会磁気シールドモデルの三次元位相最適化をおこなった結果、単純な平板形状の場合と比較して、遮蔽効果を保ったまま二割弱の重量軽減が達成された。
- (3) 並列法は最良の結果を与えるが、直列法も最適化の結果は良好で、計算時間を大幅に短縮できることを考えあわせれば大変有効なものと考えられる。

- (4) また、直列法の第1・2工程における作業に対して数値計算結果とあわせて物理的な意味付けをおこない、シールド表面形状だけでなくシールド内部の穴も考慮して形状最適化から位相最適化へ展開することの有効性を明らかにした。

(平成8年6月4日受付, 平成8年11月6日再受付)

文 献

- (1) J.B.Rosyd and J.B.Caldwell, "Design approach and dimensional similarity in layout optimization of structural systems," Computers Structures, Vol.40, No.5, p.1125, 1991.
- (2) 大坪・鈴木:「有限要素システム(4)構造最適設計」, シミュレーション学会誌, Vol.13, No.4, p.333 (平6-12)
- (3) 小貫・若尾:「スカラーポテンシャルを未知数とする有限要素・境界要素併用法による三次元電磁界解析」, 電学論A, Vol.112, No.5, p.346 (平4-5)
- (4) S.Wakao and T.Onuki, "Electromagnetic field computations by the hybrid FE-BE method using edge elements," IEEE Trans. on Magn., Vol.29, No.2, p.1487, March 1993.
- (5) D.E.Goldberg, "Genetic Algorithm in Search, Optimization and Machine Learning," Addison Wesley Publishing, 1989.
- (6) 萩原:ニューロ・ファジィ・遺伝的アルゴリズム, 8.3, 産業図書(平6)
- (7) 伊庭:遺伝的アルゴリズムの基礎, オーム社(平6)
- (8) 山村・小林:「遺伝的アルゴリズムによる組合せ最適化」, シミュレーション学会誌, Vol.12, No.1, p.4 (平5-3)
- (9) 小貫・若尾・池本:「物理的・工学的考察に基づいた形状最適化手法のロバスト性」, 電気学会静止器・回転機合同研資, SA-95-6, RM-95-68 (平7-8)

若尾 真治

(正員) 昭和40年7月7日生。平成5年3月, 早稲田大学大学院理工学研究科博士後期課程修了。平成8年4月, 同大学理工学部電気電子情報工学科専任講師, 現在に至る。博士(工学)。平成7年度電気学会優秀論文発表賞受賞。IEEE, 日本シミュレーション学会などの会員。

小貫 天

(正員) 昭和4年7月31日生。昭和26年3月, 早稲田大学第一理工学部電気工学科卒。29年4月, 早稲田大学理工学部奉職, 43年4月, 同大学教授。工学博士。昭和39・40年度電気学会本部・東京支部評議員。62年電気学会論文賞受賞。平成6年度電気学会業績賞受賞。IEEEなどの会員。

小川 冬樹

(学生会員) 昭和47年12月20日生。平成7年3月, 早稲田大学理工学部電気工学科卒。平成9年3月, 早稲田大学大学院理工学研究科修士課程修了, 在学中は主に電磁界の数値解析, 電気機器の最適設計に関する研究に従事。同年4月より三菱自動車工業(株)に勤務, 現在に至る。