

時間領域特性を考慮したマルチマテリアルトポロジー最適化による磁気シールドルームの磁気遮蔽性能向上に関する研究

遠藤, 碧人 / ENDO, Aoto

(出版者 / Publisher)

法政大学大学院理工学研究科

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学大学院紀要. 理工学研究科編

(巻 / Volume)

65

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

6

(発行年 / Year)

2024-03-24

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00030687>

時間領域特性を考慮した マルチマテリアルトポロジー最適化による 磁気シールドルームの磁気遮蔽性能向上 に関する研究

STUDY ON IMPROVING THE MAGNETIC SHIELDING PERFORMANCE OF MAGNETICALLY SHIELDED ROOM USING
MULTI-MATERIAL TOPOLOGY OPTIMIZATION WITH TIME-DOMAIN CHARACTERISTICS

遠藤 碧人

Aoto ENDO

指導教員 岡本 吉史

法政大学大学院理工学研究科電気電子工学専攻修士課程

A magnetically shielded room (MSR) is installed to suppress external magnetic noise. MSR is a combination of multilayer ferromagnetic and conductive materials, and it is well known that the multilayer structure has higher shielding performance than the single layer structure. However, the truly optimal combination of the optimal spacing between layers, arrangement of materials, and number of layers has not been clarified. Structural optimization method is a method to derive the specific structure of MSR. Among structural optimization, topology optimization can realize the search with high degree of freedom regarding magnetic structure because the material density is set to the design variables. In addition, there are few reports of MSR optimization using TO, which combines ferromagnetic and conductive materials, and it is possible that innovative structures that do not depend on existing structures would be possibly derived. In this paper, MSR was optimized using the level set method (LSM). By using the time domain adjoint variable method (TDAVM) for design sensitivity analysis, Topology optimization considering the time-domain characteristics of electromagnetic phenomena has been implemented. As a result, a structure with reduced magnetic energy compared to the initial structure was obtained.

Key Words : magnetically shielded room(MSR), topology optimization, LSM

1. はじめに

近年、エレクトロニクスの高度化に伴い、電磁環境の悪化が顕著であり、磁気ノイズの対策が必須となっている^[1]. 例えば医療現場で用いられる MRI は原子核の磁気共鳴の原理に基づいて身体各部位の三次元断層写真を撮影するが、磁気ノイズによって磁界が変動すると MRI 画像にアーチファクト（ノイズを原因とした虚像）が生じてしまう^[2]. 病院施設内では電気室の使用やエレベータの昇降など様々な要因によって発生する磁気ノイズの対策として磁気シールドルーム（MSR）が設置される。MSR は磁気ノイズを抑制する目的で設計された部屋であり、医療機器や

エレクトロニクス機器など様々な場面で用いられる^[3]. 機器の高度化に伴い求められる性能も高度化し、よりシールド効果（Shielding Effectiveness : SE）の高い MSR が求められている。MSR は多層の磁性材料と導電材料が組み合わせられ、同等の厚さの単層構造よりも多層構造の方が高いシールド効果を持つ^[4]. また、強磁性材料と導電性材料をサンドイッチ状に組み合わせたシールド構造はシールド性能が大幅に向上することも報告されている。しかし、層間の最適な間隔や材料の配置、層数などについて、真に最適なコンビネーションは明らかになっておらず、解明が求められている。

MSR の具体的な構造を導く手段として構造最適化があ

る。構造最適化は寸法最適化，形状最適化，トポロジー最適化 (TO) に大別され，特に TO は材料の密度を変数とするため，設計の自由度が高い。また，磁性材料と導電性材料を組み合わせ TO による MSR の最適化の報告事例は少なく，既存構造に全く依存しない画期的な構造が導出される可能性がある。TO の手法として多くの研究機関で用いられている進化型アルゴリズム (Evolutionary Algorithm :EA) は，多様な解を同時に評価できるという利点があるが，計算コストが高いという欠点もある。特に導電性材料の解析を行う際には，高いメッシュ精度が必要で計算コストが更に増加する。一方で勾配法に基づく TO は随伴変数法などで感度 (目的関数，制約条件の設計変数に関する勾配) を計算する必要があるのでプログラム実装コストは高いが，EA と比較して収束が早く大幅に計算時間が短縮されるため，導電性材料を用いた最適化との親和性が高い。

勾配法に基づく TO の代表例として密度法とレベルセット法 (LSM) がある。密度法は設計自由度が高い利点がある一方で最終構造にグレースケールに収束しやすいという欠点がある。一方で LSM はレベルセット関数の零等位面により物体の形状を表現するためグレースケールの発生を抑制することができるが，最適化構造が初期形状に依存しやすいという欠点がある。しかし，MSR の場合は先行研究ですでにシールド効果の高い構造の報告があり^[4]，それを初期構造とし，LSM を用いて最適化することで元々の知見に追加する形で新しい構造が得られる可能性がある。

そこで本論文では，MSR のシールド性能の向上を目的として LSM を用いてマルチマテリアルトポロジー最適化を行った。さらに，設計感度解析に時間領域随伴変数法 (TDAVM) を用いることで過渡状態も考慮した最適化を行った。その結果として，初期構造と比較して磁気エネルギーが減少する構造を得ることができたため，その仔細を報告する。

2. トポロジー最適化手法

(1) 有限要素法弱形式 (磁界解析)

磁界解析における有限要素法 (FEM) の弱形式は次式である。

$$G_i = \iint_{\Omega_m} \left\{ \frac{\partial N_i}{\partial x} \left(\nu \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial N_i}{\partial y} \left(\nu \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) \right\} dS - \iint_{\Omega_c} N_i \left\{ \sigma \left(\frac{\partial A_z}{\partial t} + E_z \right) \right\} dS = 0 \quad (1)$$

ここで， Ω_{all} は解析領域全体， Ω_c は導体領域， N_i は接点 i における形状関数， A_z は z 方向の磁気ベクトルポテンシャル， ν は磁気抵抗率， σ は電気伝導率， E_z は z 方向の電界を示す。また， Ω_c に流れる渦電流の総和が零であるという条件式は次式である。

$$G_E = \iint_{\Omega_c} \sigma \left(\frac{\partial A_z}{\partial t} + E_z \right) dS = 0 \quad (2)$$

(1)，(2)式を連立し， A_z ， E_z を変数とした方程式を解くことで磁界解析を行う。

(2) トポロジーのモデリング

設計領域内の材料決定のための 0 から 1 の値を取る特性関数 (ヘビサイド関数) $H(\psi)$ ^[5] を用いる。 $H(\psi)$ を次式に示す。

$$H(\psi) = \begin{cases} 0 & (\psi < -h) \\ \frac{3}{16} \left(\frac{\psi}{h} \right)^5 - \frac{5}{8} \left(\frac{\psi}{h} \right)^3 + \frac{15}{16} \left(\frac{\psi}{h} \right) + \frac{1}{2} & (-h \leq \psi \leq h) \\ 1 & (\psi > h) \end{cases} \quad (3)$$

ここで h は遷移幅， ψ は設計変数である。また，3 材料 (磁性体，導体，空気) を用いた最適化では 2 つの設計変数 ψ_1 ， ψ_2 を用いて，設計領域内の磁気抵抗率 ν 及び電気伝導率 σ を次式で定義する。

$$\nu(\psi, \mathbf{B}) = \{1 - H(\psi_1)\} \nu_0 + H(\psi_1) H(\psi_2) \nu_0 + H(\psi_1) \{1 - H(\psi_2)\} \nu_i(\mathbf{B}) \quad (4)$$

$$\sigma(\psi) = \{1 - H(\psi_1)\} \sigma_{air} + H(\psi_1) H(\psi_2) \sigma_c + H(\psi_1) \{1 - H(\psi_2)\} \sigma_i \quad (5)$$

ここで， ν_0 は真空の磁気抵抗率， $\nu_i(\mathbf{B})$ は磁性体の非線形磁気抵抗率， σ_{air} は真空の電気伝導率， σ_c は導体の電気伝導率， σ_i は磁性体の電気伝導率である。また，図 1 に 3 材料のモデリング図を示す。まず， $H(\psi_1)$ が非零である場合に要素に材料が定義される。つまり $H(\psi_1) = 0$ の領域には空気が定義される。次に $H(\psi_1) > 0$ かつ $H(\psi_2) = 0$ の領域では磁性材料が決定される。 $H(\psi_1) > 0$ かつ $H(\psi_2) > 0$ の領域では導電性材料が定義される。

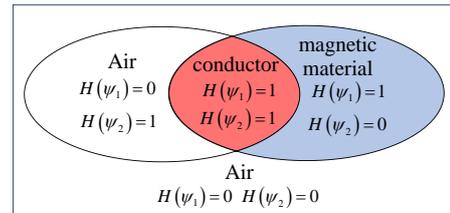


Fig. 1. Multi-material (3-material) modeling.

(3) レベルセット法 (LSM)

本論文では，LSM により TO を行う。LSM を用いたトポロジー最適化ではレベルセット関数 $\psi(r)$ によって設計領域内の物体領域 Ω_m と境界 $\partial\Omega_m$ を表現する。レベルセット関数の概念図を図 2 に示す。レベルセット関数が正であれば材料，負であれば空気とみなし，材料領域と空気領域の界面を零等位面として定義する。レベルセット関数の定義式は次式である。

$$\psi(r) = \begin{cases} d(r, \partial\Omega_m) & (r \in \Omega_m) \\ 0 & (r \in \partial\Omega_m) \\ -d(r, \partial\Omega_m) & (r \notin \Omega_m) \end{cases} \quad (6)$$

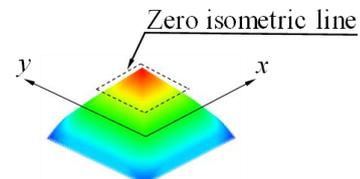


Fig. 2. Overview diagram of level set function.

(4) トポロジー最適化手順

本節では LSM による TO の手順を説明する. 制約を考慮した最適化を行うために, 逐次線形計画法^[6]を導入している.

図 3 に TO のフローチャートを示す. まず, TO における初期値を決定する (step 1). 零等位面の初期値については任意のものを設定する. 零等位面の初期値の具体的な値については 4 章にて詳述する. 次に時間領域随伴変数法 (TDAVM)^[7]により設計感度 $\partial W/\partial \psi$ を計算する (step 2). 次に TDAVM により求めた設計感度を用いて線形計画法 (LP) により, 設計変数の更新量 $\delta \psi$ を計算し (step 3), 設計変数 ψ を更新する (step 4). そして式(6)に従ってレベルセット関数の初期化を行う (step 5). Step2~step5 を反復回数 k が指定反復回数 k_{opt} になるまで繰り返す (step 6).

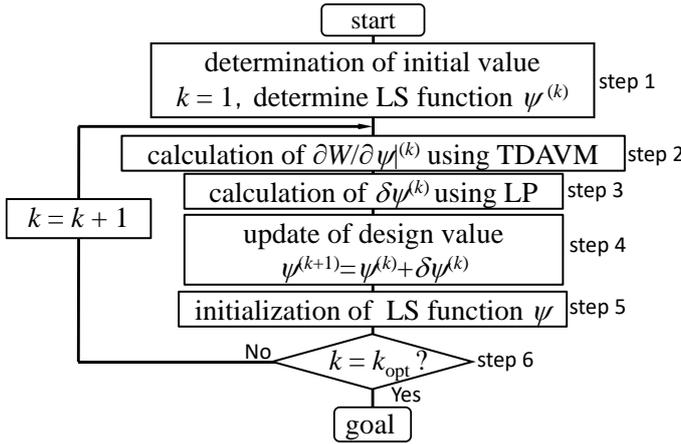


Fig. 3. Flowchart of TO based on LSM.

3. 最適化モデル

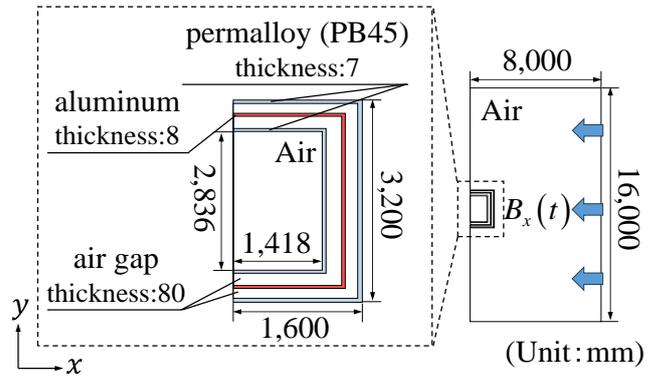
(1) 解析モデル

図 4 に MSR の解析モデルを示す. 図 4 (a) は Reference モデル (節点数: 88,480, 要素数: 176,712), 図 4 (b) は最適化モデル (節点数: 148,874, 要素数: 297,492, 設計変数: 142,478) である. 図 4 (a) の寸法や材料配置は文献 [4] で使用されているモデルを参考にしており, 図 4 (b) の寸法は図 4 (a) のパーマロイ, アルミニウム, 空気ギャップの領域を一括で設計領域としている. シールド領域の磁性材料として PB45^[7]を使用し, 初透磁率は 5,000, 電気伝導率は 1.7×10^6 とした. また, シールド領域の導電性材料としてアルミニウムを使用し電気伝導率は 3.53×10^7 とした. また, 図 4 (b) の設計領域内に発生する空気のみ, 渦電流の連続条件を満たすために微小な電気伝導率 (1×10^{-8}) を設定した. また, 入力磁界 $B_x(t)$ は以下の式のように定義している.

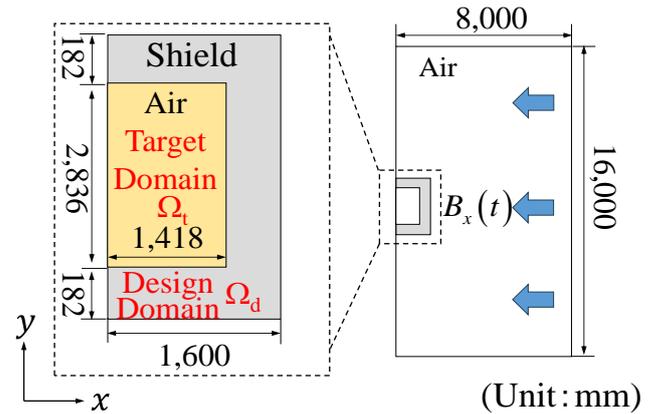
$$B_x(t) = B_0 \sin(2\pi ft + \beta) \quad (7)$$

ここで, B_0 は入力磁束密度の振幅, f は周波数, β は入力磁界の位相角を示す. また, 本論文では表 1 に示すように CaseA と CaseB の 2 ケースの周波数において磁界解析を行う. また, 表 2 に磁界解析で使用するその他のパラメータを示す. T は入力磁界の周期, Δt は時刻タイムステップ幅,

n_t は解析時間ステップ数, μ_0 は真空の透磁率である.



(a) Reference model.



(b) Optimization model.

Fig. 4. MSR analysis model.

TABLE I. FREQUENCY OF MAGNETIC FIELD ANALYSIS

	f [Hz]
CaseA	DC(直流)
CaseB	50

TABLE II. PARAMETERS FOR MAGNETIC FIELD ANALYSIS

B_0 [T]	β [deg]	T [s]	Δt [s]	n_t	μ_0
0.125	90	$1/f$	$T/16$	48	$4\pi \times 10^{-7}$

(2) 最適化問題

本論文では設計領域内のパーマロイ及びアルミニウムの面積を制約として, ターゲット領域の磁気エネルギー W の最小化を設計目標とする. 従って, 最適化問題は次式のように定義できる.

$$\begin{aligned} \min. \quad & W = \int_0^{t_{\text{end}}} \iint_{\Omega_t} \frac{V_0}{2} \mathbf{B}(t)^2 dS dt \\ \text{s.t.} \quad & g_1 = S_{\text{Per}}(\psi) \leq S_{\text{max}1} \\ & g_2 = S_{\text{Al}}(\psi) \leq S_{\text{max}2} \end{aligned} \quad (8)$$

Ω_t はターゲット領域, t_{end} は終端時刻, S_{Per} はパーマロイの総面積, S_{Al} はアルミニウムの総面積, $S_{\text{max}1}$, $S_{\text{max}2}$ はそれぞれパーマロイ, アルミニウムの面積の最大値であり, $S_{\text{max}1}$

$= 0.84504\text{m}^2$, $S_{\text{max}2} = 0.48288\text{m}^2$ とする. 最適化の反復回数 $k_{\text{opt}} = 10$, 最適化ケースは表 1 と同様とする. また, 図 5 は初期構造における設計変数 ψ_1 , ψ_2 の零等位面を示したものである. また, 図 6 には図 5 のように零等位面を設定したときの最適化モデルの初期構造を示す.

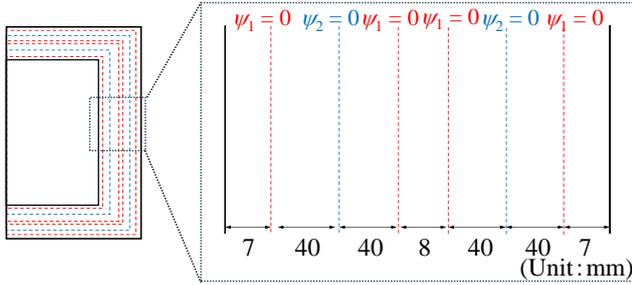


Fig. 5. Zero level set in the initial structure.

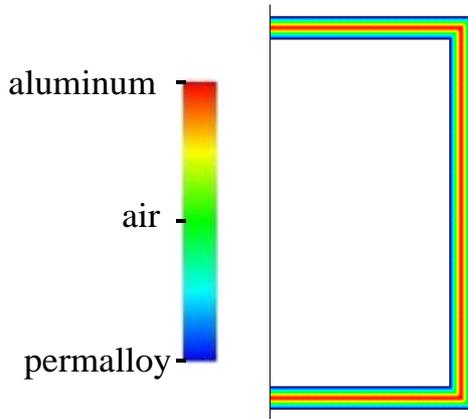


Fig. 6. Initial structure of optimization model.

4. 磁気シールドルームの性能評価方法

本論文ではシールドルーム内部の空気領域の中心に磁界評価点 P を設け, 以下に式を用いて SE を計算することで性能評価を行う. 図 7 に磁界評価点 P を, 次式に SE の計算式を示す.

$$SE(\text{dB}) = -20 \log_{10} \left(\frac{|B_{\text{sh}}|}{|B_{\text{non}}|} \right) \quad (9)$$

ここで, B_{sh} はシールドを設置した場合の点 P における磁束密度, B_{non} はシールドを設置しない場合の点 P における磁束密度である.

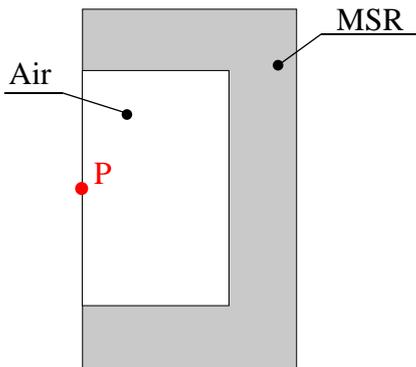


Fig. 7. Evaluation point for shielding coefficient.

5. トポロジー最適化結果

図 8 (a) に CaseA, 図 8 (b) に CaseB の最終構造を示す. 図 9 に CaseA と CaseB の磁気エネルギー W の推移, 図 10 (a) に CaseA, 図 10 (b) に CaseB の制約関数 g_1 と g_2 の推移を示す. 図 11 (a) に CaseA, 図 10 (b) に CaseB の最終構造における磁束線を示す. また, 表 3 (a) は CaseA と Reference モデル (入力磁界は DC) における SE, 表 3 (b) は CaseB と Reference モデル (入力磁界 $f = 50\text{Hz}$) における SE を比較したものである.

(1) 入力磁界 DC (CaseA) における最適化

図 8 (a) から, 初期構造と比較して, MSR の上下部分ではパーマロイとアルミニウムの層が厚くなっていることがわかる. 一方で, MSR の右側部分では, 中間のアルミニウムの層が中心部分に近づくにつれて薄くなっている. 外側のパーマロイの層もアルミニウムと同様に薄くなり, 内側のパーマロイの層では断続的に空気層が挟まるような構造となった. これは, 磁気シールドでは角点に磁束が集中しやすいという特徴があることから, 最適化において上下部分の材料が優先的に決定されたことが理由だと考えられる. また, 図 9 の CaseA から, 初期構造と比較して磁気エネルギー W が減少していることがわかるため, 最適化が成功していることがわかる. しかし, 表 3 (a) から, Reference モデルと比較すると SE が半分程度であることがわかる. 図 10 (a) 磁束線を見ると, MSR 右側のアルミニウムが最も薄い部分と内側のパーマロイ層の隙間に存在する空気から磁束線が MSR 内の空気領域に流入してしまっていることがわかる. このことが Reference と比較して SE が劣ってしまった原因として挙げられる. 図 9 を見ると, 目的関数である磁気エネルギー W が最適化の最終ステップにおいても収束していないため, 最適化ステップ数を増やすことで Reference を上回る SE を持った構造を導出できる可能性がある. また, 図 10 (a) を見ると, 制約関数 g_1 と g_2 がともに満たされていないことがわかる. これは図 3 の TO のフローチャート上の step4 によって満たされた制約条件が step5 の LSM によって成立しなくなっている可能性がある. 改善案として, step5 の後に Newton 法などを用いて設計変数を修正することで制約条件を満たすような方法がある.

(2) 入力磁界 $f = 50\text{Hz}$ (CaseB) における最適化

図 8 (b) から, CaseA と同様に, 初期構造と比較して MSR の上下部分ではパーマロイとアルミニウムの層が厚くなり, MSR の右側部分では, 中心部分に近づくにつれてパーマロイ, アルミニウムともに層が薄くなる構造が得られた. 図 10 (b) の磁束線を見ると, 外側のパーマロイ層を通過して MSR のシールド領域内に流入した磁束線が, アルミニウムの層によって MSR 内の空気領域への流入を阻害していることがわかる. このことから, アルミニウムが電磁シールドとしての役割を果たしていることが確認できる. しかし, 表 3 (b) から, Reference モデルと比較すると SE が 5 分の 1 程度であることがわかる. 図 9 を見ると, 目的関数である磁気エネルギー W が最適化の最終ステップにおいても収束していないことから, CaseA と同様

に最適化ステップ数を増やすことで **Reference** を上回る **SE** を持った構造を導出できる可能性がある。また、図 10 (b) から、制約条件 g_1 , g_2 がともに満たされていないことがわかる。これについても **CaseA** の場合で先述したものと同様の手法を用いることで改善が可能である。

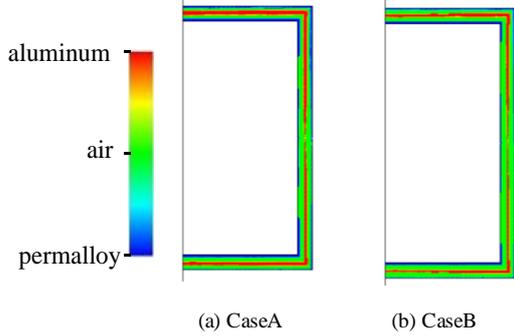


Fig. 8. Optimized topologies. (a) DC (b) $f = 50\text{Hz}$

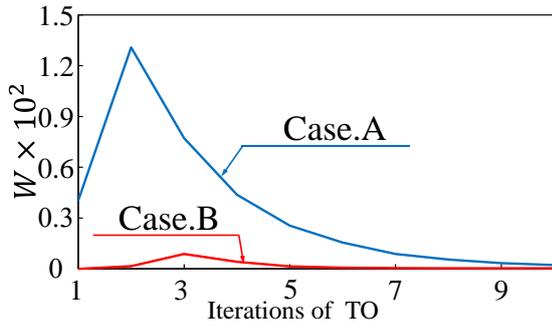
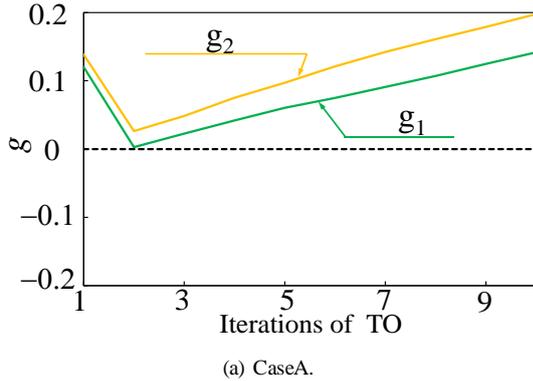
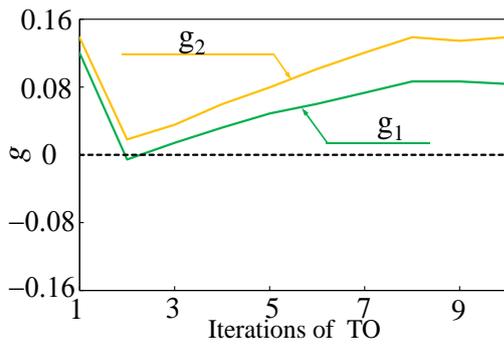


Fig. 9. Convergence characteristics of magnetic energy W .



(a) CaseA.



(b) CaseB.

Fig. 10. Convergence characteristics of constraint function g_1 and g_2 .

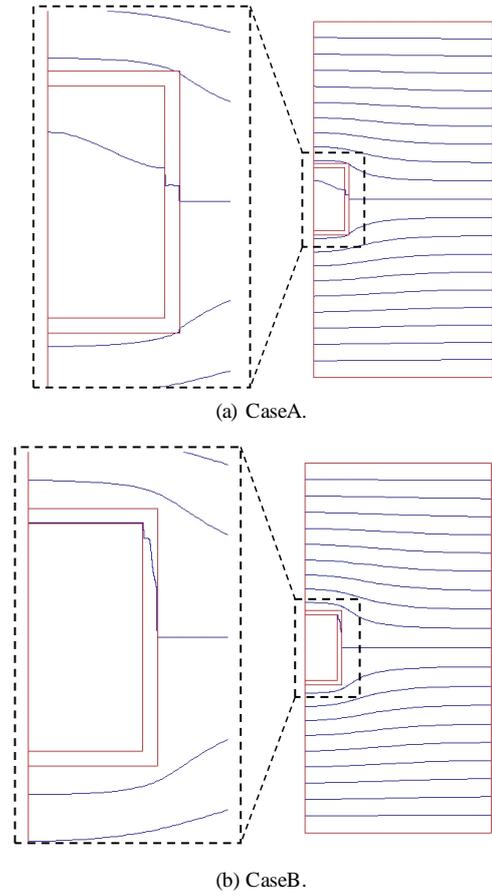


Fig. 11. Magnetic flux lines in the final structure.

TABLE III. COMPARISON OF SHIELDING EFFECTIVENESS

(a) COMPARISON OF CASE.A AND REFERENCE MODEL (INPUT MAGNETIC FIELD IS DC)

	reference	Optimized Structure
$ B $ [T]	0.00085	0.0098
SE [dB]	43.0	22.1

(b) COMPARISON OF CASE.B AND REFERENCE MODEL (INPUT MAGNETIC FIELD FREQUENCY IS 50Hz)

	reference	Optimized Structure
$ B $ [T]	9.94×10^{-11}	0.00138
SE [dB]	182.0	39.2

7. 結論

本論文では、レベルセット法 (LSM) を用いた磁気シールドルーム (MSR) のトポロジー最適化を行い、磁気エネルギー W の最小化及びシールド効果 (SE) の向上を行った。入力磁界が直流 (DC) の場合と周波数 $f = 50\text{Hz}$ の場合とともに、初期構造と比較して MSR の上下部分ではパーマロイとアルミニウムの層が厚くなり、MSR の右側部分では、中心部分に近づくにつれてパーマロイ、アルミニウムともに層が薄くなる構造が得られた。どちらも初期構造よりもターゲット領域内の磁気エネルギー W が減少した。しかし、どちらも **Reference** モデルと比較して小さな SE となった。磁気エネルギー W が最適化最終ステップにおいても減少傾

向にあることから、最適化ステップ数を増やすことで Reference を上回る SE を持った構造を導出できる可能性がある。

参考文献

- [1] 下川眞男:「鉄道路線から発生する磁気ノイズとその対策」, 電気設備学会誌, vol. 26, pp. 792-795 (2006)
- [2] 石川登:「病院施設における低周波磁界の低減対策」, 電気設備学会誌, vol. 26, pp. 783-787 (2006)
- [3] 榊原満:「極低周波微小磁界振動に対するパーマロイを用いた磁気シールド効果に関する研究」, 金沢工業大学 博士学位論文, vol. 45, pp. 276-279 (2022)
- [4] K. Yamasaki, K. Muramatsu, M. Hirayama, A. Haga, and F. Torita, “Optimal structure of magnetic and conductive layers of a magnetically shielded room,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 36, no. 5, pp. 3649–3651, Sep. 2000.
- [5] Y. Yamashita and Y. Okamoto, “Design optimization of synchronous reluctance motor for reducing iron loss and improving torque characteristics using topology optimization based on the level-set method,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 56, no. 3, Mar.2020. Art ID 7510704
- [6] F. Moses and S. Onoda, “Minimum weight design of structures with application to elastic grillages,” *Int. J. Numer. Methods Eng.*, Vol.1, No.4, pp.311-331, 1969.
- [7] M. Yamano, K. Katayama and Y. Okamoto, ” Sensitivity-based topology optimization of squirrel-cage induction motor in time domain using multi-material level-set method,” *IEEE Trans on Magn.*, vol. 58, Issue. 9, Sep. 2022.
- [8] 株式会社オータマ:「パーマロイとは」, <https://www.ohama.co.jp/whats.html>

研究業績

国際論文・発表（査読無し、○印：発表者）

- [1] ○Aoto Endo, and Okamoto Yoshifumi, ” Sensitivity Analysis Using Time-domain Adjoint Variable Method for Topology Optimization of Electromagnetic Shielding for Wire Harness Driven by DC-DC Converter,” *17th International Workshop on Optimization and Inverse Problems in Electromagnetism 2023 (OIPE 2023)*, Graz, Austria, Sep 2023