

博 士 論 文

建物内に敷設する電力線周辺での磁気遮蔽対策に関する研究

2017 年

久 保 直 也



# 建物内に敷設する電力線周辺での磁気遮蔽対策に関する研究

## 目 次

### 第1章 序論

1.1 研究目的	1
1.2 既往の研究と本研究の位置付け	2
(1) 一般的な磁気遮蔽対策	2
(2) 電力線周辺での磁気遮蔽対策	3
(3) 開放型の磁気遮蔽対策	4
(4) 本研究の位置付け	5
1.3 基礎的事項	6
(1) 電力線からの漏洩磁界	6
(2) 磁性材料の磁化曲線および種類	7
(3) 磁気遮蔽効果の評価方法	8
(4) 磁性材料の開孔率	9
参考文献	9

### 第2章 研究計画

2.1 研究計画	11
2.2 実験方法	13
(1) 磁気遮蔽	13
(2) 放熱効果	16
2.3 解析方法	18
(1) 磁場解析	18
(2) 熱流体解析	19
参考文献	19

### 第3章 電力線周辺での磁気遮蔽対策

3.1 はじめに	21
3.2 検証モデル	22
(1) 実験条件	22
(2) 解析条件	23
3.3 角筒形による磁気遮蔽効果	25
(1) 距離分布	25

(2) 電流特性 .....	26
(3) 磁束密度の時間変化による検証 .....	27
3.4 材料厚さによる比較 .....	28
3.5 多層化による効果 .....	30
3.6 まとめ .....	32
参考文献 .....	32

#### 第4章 開孔材料による放熱効果の検証

4.1 はじめに .....	33
4.2 検証モデル .....	34
(1) 開孔条件 .....	34
(2) 実験条件 .....	35
(3) 解析条件 .....	36
(4) 評価方法 .....	36
4.3 開孔による放熱効果 .....	37
(1) 実験結果 .....	37
(2) 解析結果 .....	38
(3) 実験および解析結果の関係 .....	40
4.4 まとめ .....	41

#### 第5章 開孔材料による磁気遮蔽対策の検証

5.1 はじめに .....	43
5.2 検証モデル .....	44
(1) 実験条件Ⅰ .....	44
(2) 実験条件Ⅱ .....	45
(3) 解析条件 .....	47
5.3 開孔による磁気遮蔽効果への影響 .....	49
(1) 距離分布 .....	49
(2) 電流特性 .....	52
5.4 開孔配列による比較 .....	55
5.5 開孔条件による磁気遮蔽効果への影響 .....	57
(1) 開孔数が与える影響 .....	57
(2) 開孔配列が与える影響 .....	58
(3) 開孔径が与える影響 .....	59
5.6 まとめ .....	60
参考文献 .....	60

第6章 開孔にともなう放熱効果と磁気遮蔽効果の関係	
6.1 はじめに	61
6.2 開孔にともなう磁気遮蔽効果の保持比	62
6.3 放熱効果と磁気遮蔽効果の関係	63
6.4 まとめ	65
参考文献	65
第7章 結論	67
本研究に関する研究業績	
A. 論文	71
B. 学術講演	72
C. 学会活動	73
謝辞	75



## 第 1 章 序論

### 1.1 研究目的

### 1.2 既往の研究と本研究の位置付け

- (1) 一般的な磁気遮蔽対策
- (2) 電力線周辺での磁気遮蔽対策
- (3) 開放型の磁気遮蔽対策
- (4) 本研究の位置付け

### 1.3 基礎的事項

- (1) 電力線からの漏洩磁界
- (2) 磁性材料の磁化曲線および種類
- (3) 磁気遮蔽効果の評価方法
- (4) 磁性材料の開孔率

### 参考文献





## 第1章 序論

### 1.1 研究目的

大都市圏を中心とした再開発などにより、建物の高層化・大規模化が進んでいる。そのため、建物内の居住・執務空間に近い場所へ電気設備が設けられることが増えている。

建物内の各電気設備からは、商用周波数の低周波磁界（50/60Hz）が発生する。この磁界は、CRT ディスプレイ、各種コンピュータ機器、電子顕微鏡や電子線描画装置などの電子線を利用した精密機器、MRI などの医療機器に対し、画面の揺れ、機器の機能低下などの磁気障害を起こすことがある<sup>[1-1],[1-2]</sup>。建物内の空間では、人や機器を安全かつ正常に動作させることが重要であり、電磁環境面（本研究では磁気環境面）に対する検討が必要不可欠となっている。

磁気障害を防止するため、（社）電子情報技術産業協会の産業用情報処理・制御機器設置環境基準（JEITA IT-1004A）では、例えばコンピュータ機器を対象とした環境磁界の基準値（約 3.8 $\mu$ T）を設けている<sup>[1-3]</sup>。また、一般の医療機器に対しては、EMC（電磁両立性）の国際規格である IEC 60601-1-2 で、医療機器の耐磁性における基準値（約 3.8 $\mu$ T）が設けられており<sup>[1-4]</sup>、これらは特にオフィスビルや病院などの建築磁気環境の基本設計において参考とされている。このような基準値や、各機器の許容値を上回る大きさの磁界が存在する空間では、磁界を効率よく低減あるいは制御する技術の確立が求められる。

建物の電気室およびその周辺には、建物内へ電力を供給するための受変電設備や配電設備が設置され、多くの電力線が敷設されている。そのため、漏洩磁界が大きくなりやすく、建築設計時には漏洩磁界の大きさを予測し、必要に応じて対策を検討することが多い<sup>[1-5]</sup>。特に、変圧器の低圧側（配電盤）から各階の分電盤へ向けて敷設される電力線（幹線ケーブル）では、比較的大きな通電電流である上に、多数のケーブル本数を集中して敷設するため、漏洩磁界が大きく磁気遮蔽対策が必要である。

著者は、建物内の電力線周辺のみを角筒形状の磁性材料により囲む磁気遮蔽方法について研究してきた。実用時には、電力線を敷設するケーブルラックへ磁性材料を設置する方法であり、施工の簡易性および磁性材料の設置スペースにおいて有利である。この磁気遮蔽方法は、電力線の周辺を完全に磁性材料で取り囲むことで高い遮蔽効果を得られる。しかし、電力線からは通電による発熱があり、電力線に通電できる電流（許容電流）を低下させないために、放熱を考慮した方法が要求される。そこで、電力線の周辺を磁性材料で取り囲む形状のまま、その材料に穴を開けること（開孔）により放熱を考慮した手法を考案した。

本研究は、基礎的な検証により、電力線周辺での角筒形状の磁気遮蔽方法が磁界を効率よく低減でき、放熱を考慮した開孔タイプの磁気遮蔽においても有効な技術であることを示すとともに、本手法における考え方や条件による違いについて、将来の設計用指針に向けての資料として提供することを目的としている。

## 1.2 既往の研究と本研究の位置付け

### (1) 一般的な磁気遮蔽対策

磁気遮蔽技術としては、図 1-1 に示した磁性材料で部屋を構成する磁気シールドルームが一般的である。磁気シールドルームは、医療施設での MRI 室、研究施設での電子顕微鏡、半導体製造施設での EB 描画装置のほか、生体磁気計測（心磁計測、脳磁計測）のような磁界の影響を受けやすい機器の周囲に設置されることが多く、外部からの磁界を低減するために活用される。MRI や電子顕微鏡などでの磁界許容値はメーカー・機種ごとに異なり、 $0.1\mu\text{T}$  以下の磁界環境を要求される場合もあり、その許容値以下とするために透磁率が高い材料による対策が必要となる。また、電気室のような磁界発生源側においても、外部への漏洩磁界を低減する目的で、磁性材料により電気室を囲む場合がある。

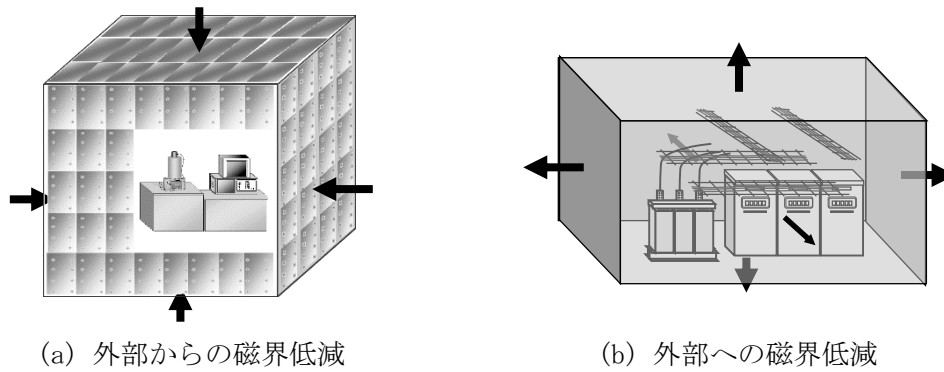


図 1-1 磁気シールドルーム

19 世紀末に Wills<sup>[1-6]</sup>が無限長円筒の遮蔽について示した式(1-1)などの簡易式が、その後の磁気シールドルームの概略設計にも利用されてきた<sup>[1-7]</sup>。図 1-2 に示すように、円筒材料の厚さを  $t$ 、半径を  $r$ 、透磁率を  $\mu_s$  とし、円筒の軸に直角に均一な外部磁界の大きさを  $H_0$ 、円筒内の磁界の大きさを  $H_1$  としたときの磁気遮蔽効果を求めている。つまり、高い磁気遮蔽効果を得るためには、透磁率が高く厚さが大きい（多層の）材料を用いることが基本的な考え方となる。

$$\frac{H_0}{H_1} \cong \frac{1}{2} \cdot \frac{\mu_s t}{r} \quad (1-1)$$

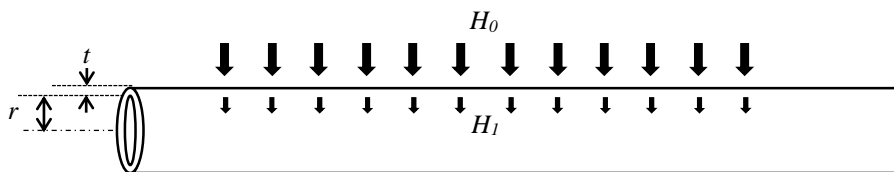


図 1-2 円筒材料による外部磁界の遮蔽

また、機器周辺での磁界低減対策として、磁性材料ではなく磁気センサやコイルを用いて変動磁界を低減する方法（磁場コントロールシステム）がある<sup>[1-8]</sup>。図 1-3 に基本的なシステム構成を示す。対象空間に設置した磁気センサの出力をもとにコントローラ部で演算し、コイルからの発生磁界により逆向きの磁界を発生させ、対象空間の変動磁界を低減させる。MRI や電子顕微鏡では、変動磁界が画像を乱す要因であり、本方法による磁界低減対策が有効である。図 1-1 の磁気シールドルームと組み合わせる対策を施す場合もある。

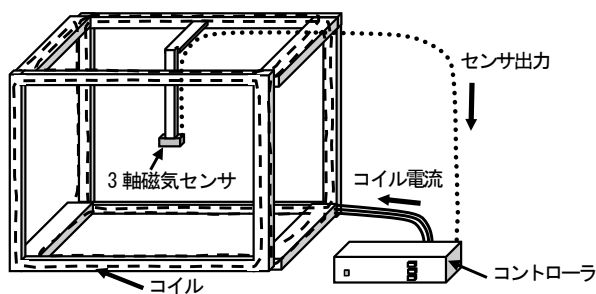


図 1-3 磁場コントロールシステム

## (2) 電力線周辺での磁気遮蔽対策

図 1-4 に、建物内の電力線における磁気遮蔽対策の検討範囲を示す。電気室に近く、電力線が多く敷設される場所では漏洩磁界が大きくなる。オフィスビルや病院などの場合、電力線の敷設位置から 3m 以上離れば 1 $\mu$ T 以下となることも多いが、1m 以内の位置では 10 $\mu$ T 以上になる場合がある。このように磁界は距離減衰するため、影響を受けやすい機器と電力線の位置を遠ざけることも磁界低減対策の 1 つである。また、配電電圧を高くすれば通電電流が小さくなり磁界低減には有利となる。しかし、磁気環境のみを考慮した建築設備の設計変更は容易ではなく、対策時には磁性材料を用いた方法を選択する場合が多い。

電力線での磁気遮蔽対策として、オフィスビル内での CRT ディスプレイやコンピュータ機器に対する磁界の影響を対象とする場合が多い。電子顕微鏡や MRI などの場合、(1)で述べた磁気シールドルームや磁場コントロールシステムによる対策が基本であるが、近傍に電力線がある場合には、追加して発生源（電力線）側での対策も要する場合がある。

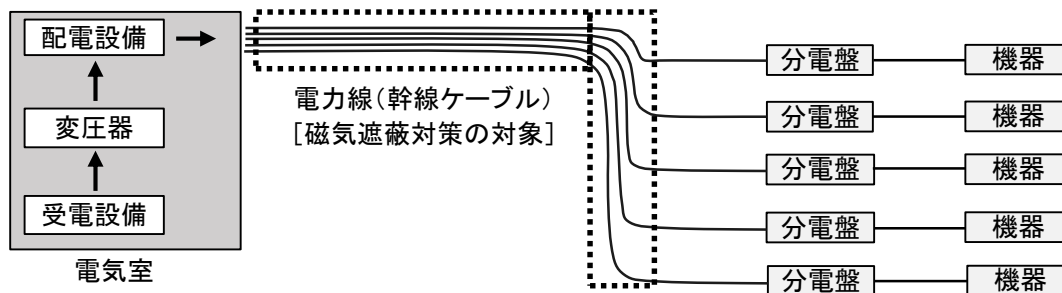


図 1-4 建物内の電力線における磁気遮蔽対策の検討範囲

電力線周辺での磁気遮蔽においては、円筒形の磁性材料による遮蔽効果を検討した例<sup>[1-9]</sup>がある。図 1-5 に示す正三角形配列の三相電流路を外径 200mm 程度の円筒形金属により囲む配置で、数値計算およびモデル実験を実施している。例えば、厚さ 5mm の鉄筒による遮蔽の場合、線路中心から 0.3m の位置での磁束密度を約 1/10 に低減している。材料の厚さ、外径および材料種類（特性）の条件による遮蔽効果の違いについて比較検討している。

また、変圧器周辺のブスバー配線路（銅板導体による母線）の上側を平面あるいは 3 面で磁気遮蔽したときの解析検討例<sup>[1-10]</sup>がある。例えば厚さ 10mm の珪素鋼板による 3 面遮蔽（幅 1000mm×高さ 400mm）の場合、ブスバーの上部 4m の位置での磁束密度を約 1/4 に低減できる数値解析結果が報告されている。

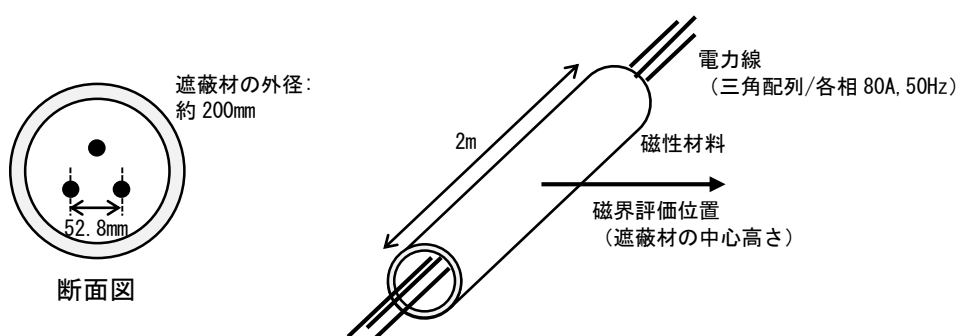


図 1-5 円筒形の遮蔽モデル

### (3) 開放型の磁気遮蔽対策

電力線からは発熱があり、放熱を考慮しない磁気遮蔽方法では、通電できる許容電流を低下させてしまう。電力線の放熱性効果も有する磁気遮蔽として、図 1-6 に示すフレーム状の閉磁路を等間隔で設置する方法により、開放型であっても高い遮蔽効果を確保できる事例が紹介されている<sup>[1-11]</sup>。磁界発生源を完全に覆わなくても、効率的な磁気回路を形成できれば、必要な空間における磁気遮蔽効果を確保できることを示している。例えば、幅 50mm、厚さ 0.35mm の電磁鋼板を 5 層重ねたフレーム（縦 300mm×横 900mm）を 150mm 間隔で設置した場合、約 1/3～1/6 に低減できる数値解析結果が報告されている。

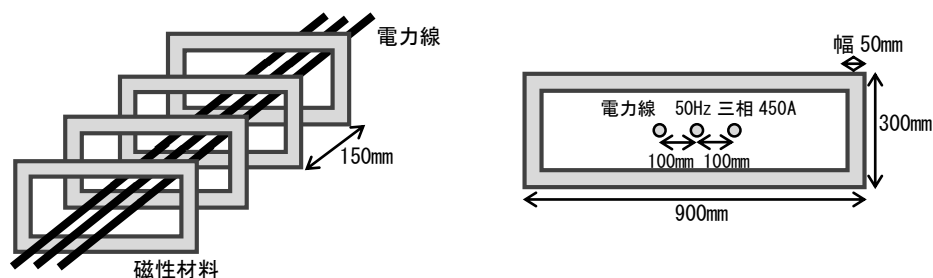


図 1-6 開放型の磁気遮蔽対策

#### (4) 本研究の位置付け

前述の図 1-5 で示した円筒形の電力線周辺での磁気遮蔽として、建物内での実用面においては金属管（鋼製電線管）を用いる方法が該当する。金属管工事は、電気工事の施工方法の1つであり、金属管は電線を保護する目的で使用されている。しかし、本論文で対象としている電気室近くの幹線ケーブルの場合、通常では数 10 本以上のケーブルがはしご形のケーブルラック（幅 300mm～1000mm など）上に敷設される。その多数のケーブルを改めて電線管内に収容することは、施工面においては困難であり、もしケーブルラックが入る大きいサイズの金属管（円筒形の磁性材料）を用意できても、建築上の設置スペースの観点から考慮して現実的な方法ではない。

施工の簡易性を考慮した場合、図 1-7 に示すように、電力線を敷設するケーブルラックの外側に沿って磁性材料を設置する方法が現実的である。平面材料および角部（L 形）材料による構成で、工場あるいは現地で組み合わせる。この角筒形の磁気遮蔽方法について提案し、電力線周辺での磁界を効率よく低減する技術としての有効性を検証する。図 1-5 の検証条件と比べて、形状だけでなく材料の種類および厚さが異なる。設計で役立つ資料を提供するため、種々の条件による違いについても検証する。

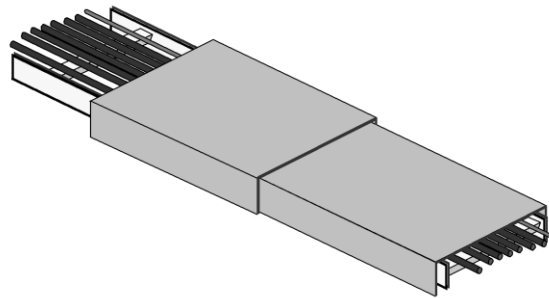


図 1-7 ケーブルラックに対する磁気遮蔽方法

また、図 1-6 で示した電力線周辺での放熱性効果を有する磁気遮蔽についても、ケーブルラックの周辺に磁性材料を設置できる方法であるが、遮蔽効果を得るためには上下および左右方向に適度な材料の幅（例えば 50mm）を必要とする。そのため、上下あるいは左右の方向に複数のケーブルラックを併設する際には設置スペースでの課題がある。そのような場合、図 1-7 の角筒形状による磁気遮蔽方法のほうが形状としては有効であり、予め多数の穴を開けた（開孔）磁性材料を用意し、放熱させる手法を提案する。開孔による放熱効果および磁気遮蔽効果の低下の大きさについて検証し、本手法が電力線周辺での磁気遮蔽方法として有効な技術であることを示す。また、設計で役立つ資料を提供するために、種々の開孔条件における磁気遮蔽効果を検証する。

### 1.3 基礎的事項

#### (1) 電力線からの漏洩磁界

電流が流れることで、電力線などの電気設備からは磁界が発生する。図 1-8 のように点 A に位置する導体の長さ  $\Delta l$  (m) の部分に電流  $I$  (A) が流れているとき、点 B の磁界の大きさ  $\Delta H$  (A/m) は、式(1-2)で算出される。これをビオ・サバールの法則という。ここで、 $r$  は微少長さの中心点 A から点 B までの距離、 $\theta$  は電流方向と点 B の方向のなす角である。

電力線のように導体全体から発生する磁界は、各位置（微少長さ）からの磁界の大きさを積分することで求められ、図 1-9 に示す無限長の直線導体から発生する磁界  $H$  は式(1-3)となる。式(1-3)により、磁界の大きさは電流の大きさ  $I$  に比例し、電流路からの距離  $r$  に反比例する。

$$\Delta H = \frac{I \Delta l \sin \theta}{4 \pi r^2} \quad (\text{A/m}) \quad (1-2)$$

$$H = \frac{I}{2 \pi r} \quad (\text{A/m}) \quad (1-3)$$

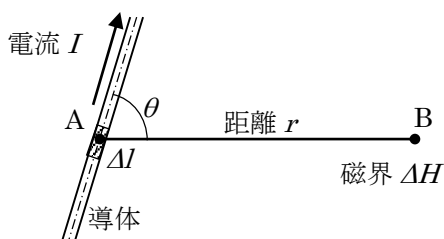


図 1-8 ビオ・サバールの法則

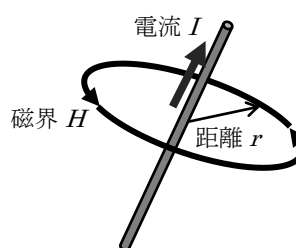


図 1-9 直線導体による磁界

ここで、機器へ電力を供給する電力線では、各電流路は単相 2・3 線や三相 3 線など複数本による構成で配線されているが、同回路の複数線路での電流において、その位相を考慮したベクトル和は基本的にゼロとなる。つまり図 1-10 のように、同回路の各電流路から発生する磁界は互いに打ち消し合い、位置の違いがなければ交流の漏洩磁界はゼロとなる。しかしながら、図 1-11 のように必ず線間距離  $a$  (位置の違い) が存在するので、各導体による磁界  $H_1$  および  $H_2$  の合成ベクトルとなる漏洩磁界  $H$  が発生する。つまり、同回路での線間距離が大きいほど、結果として漏洩磁界は大きくなる。

また、建物内に敷設される電力線のなかでは、変圧器の低圧側（配電盤）から各階の分電盤へ向けて敷設される電力線（幹線ケーブル）において、比較的太いケーブルに大きな電流が流れるので漏洩磁界が大きくなる。さらに、多数のケーブルを集中してケーブルラック上に敷設することが多く、漏洩磁界の総和が大きくなりやすい。このケーブルラックに対して効率の良い磁気遮蔽対策を施すことで、磁気環境の問題を解決できる建物が多い。

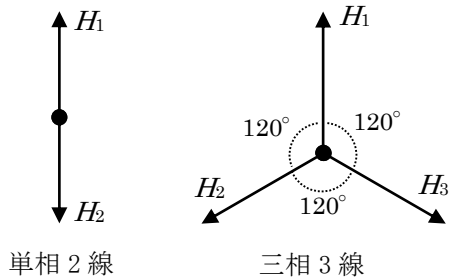


図 1-10 漏洩磁界のベクトル和

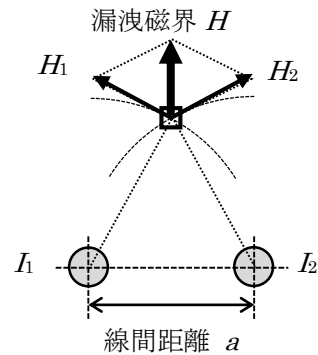


図 1-11 導体位置の違いによる漏洩磁界

(2) 磁性材料の磁化曲線および種類

磁界中で磁化が起こる物質を磁性体、それを工業用として扱う資材を磁性材料といい、磁力線を通しやすい性質を持つ。磁性体に磁界  $H$  を印加した場合、磁性体内部の磁束密度  $B$  は図 1-12 のようになる。これを磁化曲線または  $B-H$  曲線という。磁性体では、印加磁界に対して磁束密度は非線形特性を示し、強い磁界においては飽和する。この磁束密度の最大値を飽和磁束密度という。

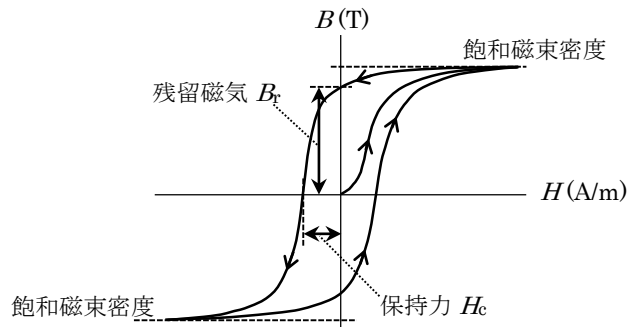


図 1-12 磁化曲線 ( $B-H$  曲線)

ここで、磁力線の通りやすさは透磁率  $\mu$  で表され、磁界  $H$  および磁束密度  $B$  の間には式 (1-4) の関係がある。磁気遮蔽対策を検討する際、図 1-12 のように透磁率  $\mu$  が一定でないことの把握が重要である。また、真空の透磁率  $\mu_0$  に対して、各材料における透磁率の比を比透磁率  $\mu_s$  といい、式(1-5)の関係がある。

$$B = \mu H \tag{1-4}$$

$$\mu_s = \mu / \mu_0 \tag{1-5}$$

磁気遮蔽は、比透磁率が高い磁性材料に漏洩磁界を集め、対象空間の磁界を減らす目的で実施される。磁気遮蔽用材料としては、主に電磁鋼板、アモルファス、パーマロイが使用される。遮蔽条件により材料への要求内容が異なるため、各材料特性を理解した選択が必要である。表 1-1 に主な磁気遮蔽用材料を示す。高いシールド性能を求める場合にはパーマロイを使用し、強磁界での広範囲のシールドには電磁鋼板を使用することが多い。

パーマロイは、日本工業規格 JIS C 2531 に示される鉄ニッケル軟質磁性材料であり、磁気遮蔽に用いられるパーマロイには PB (50Ni 系) と PC (80Ni 系) の 2 種類がある<sup>[1-12]</sup>。PB は鉄とニッケルによる合金で、飽和磁束密度は約 1.5T と大きいため、やや強磁界用の遮蔽に適する。PC は鉄とニッケルのほかにモリブデンや銅などを含む材料で、比透磁率が極めて高い点が特徴で、微弱な磁界での遮蔽に適する。電力線のような磁界発生源近傍では強磁界となるため、そこに設置する材料としては PB パーマロイが適している。

表 1-1 主な磁気遮蔽用材料

材料	説明	最大比透磁率	飽和磁束密度 [T]
電磁鋼板	主には、鉄に珪素を添加した珪素鋼板。 厚さ 0.35mm や 0.5mm。	5,000~60,000	1.5~2.0
アモルファス	基材の種類として、鉄とコバルトに分類。薄帯状で厚さ 0.02mm~0.04mm。	10,000~100,000	0.5~1.6
パーマロイ	PB 鉄とニッケルを組み合わせた合金。 厚さ 0.5mm や 1.0mm。	30,000~70,000	1.3~1.5
	PC 鉄とニッケルに、モリブデンなどを組み合わせた合金。 厚さ 0.5mm や 1.0mm。	90,000~150,000	0.6~0.8

### (3) 磁気遮蔽効果の評価方法

磁気遮蔽効果の評価は、磁界計測器（ガウスメータ）を用いた磁束密度の計測により実施する。磁束密度はベクトル量であり、直交 3 方向のベクトル成分 ( $B_x$ ,  $B_y$ ,  $B_z$ ) から構成される。ベクトル量としての磁束密度の実効値は、各成分の実効値 ( $B_{x\text{rms}}$ ,  $B_{y\text{rms}}$ ,  $B_{z\text{rms}}$ ) を求めた上で、式(1-6)により算出する。次に、磁気遮蔽効果  $S$  は、式(1-7)により定義し、遮蔽前および遮蔽後における磁束密度  $B_{\text{rms}}$  の比により算出する。

$$B_{\text{rms}} = \sqrt{(B_{x\text{rms}})^2 + (B_{y\text{rms}})^2 + (B_{z\text{rms}})^2} \quad (1-6)$$

$$\text{磁気遮蔽効果 } S = (\text{遮蔽前の } B_{\text{rms}}) / (\text{遮蔽後の } B_{\text{rms}}) \quad (1-7)$$



#### (4) 磁性材料の開孔率

本研究では、電力線の周囲を取り囲む磁性材料において、開孔で放熱させる手法を提案し、開孔の数や配列による磁気遮蔽効果への影響を実験および解析により検証する。ここでは、式(1-8)に示すように、材料平面全体のなかでの開孔部分の面積比 (%) を磁性材料の開孔率と定義した。各開孔の大きさ、数および間隔などの詳細については第 4 章で述べる。

$$\text{磁性材料の開孔率} = \frac{\text{開孔部分の面積}}{\text{材料平面全体の面積}} \times 100 \quad (\%) \quad (1-8)$$

#### 参考文献

- [1-1] 仲家幸雄, 虎岩和彦: 医療施設の EMC, 電気設備学会誌, Vol.24, No.12, pp.914-917, 2004.12
- [1-2] 日本建築学会: 電磁環境と建築設計 ーはじめての設計者のためにー, 丸善, 2000
- [1-3] 電子情報技術産業協会: JEITA IT-1004A 産業用情報処理・制御機器設置環境基準, 2011
- [1-4] International Electrotechnical Commission: IEC 60601-1-2:2007 Medical electrical equipment – Part 1-2: General requirements for basic safety and essential performance – Collateral standard: Electromagnetic compatibility – Requirements and tests, 2007
- [1-5] 日本建築学会: 電気室から漏洩する磁場の予測・対策・計測評価技術, 丸善出版, 2014
- [1-6] Wills,A.P. : On the Magnetic Shielding Effect of Tri-Lamellar Spherical and Cylindrical Shells, Phys. Rev.9, pp.193-213, 1899
- [1-7] 山崎慶太, 藤原耕二, 近藤俊成, 稲本吉宏: 三次元磁界解析による磁気シールドルーム形状の設計, 日本建築学会計画系論文集 第 493 号, pp.93-98, 1997.3
- [1-8] 久保直也, 森田祐志: 磁場コントロールシステムの開発, 平成 18 年電気関係学会関西支部連合大会 講演論文集, 2006.11
- [1-9] 山崎健一, 河本正, 藤波秀雄: 円筒型シールド材による 3 相交流電流路の磁界遮へい効果, 電気学会論文誌 B, Vol.119, No.2, pp.252-258, 1999.2
- [1-10] 及川昌平, 芳賀昭, 山崎慶太: オフィス空間の磁界環境に関する検討ー受変電室の磁界環境測定ー, Journal of the Magnetics Society of Japan, Vol.30, No.2, pp.316-320, 2006.2
- [1-11] Saito,T. and T.Shinnoh : Applications using Open-Type Magnetic Shielding Method, Journal of the Magnetics Society of Japan, Vol.34, No.3, pp.422-427, 2010.3
- [1-12] 野平明夫: 磁気シールド材料, 電気設備学会誌, Vol.26, No.10, pp.767-770, 2006.10



## 第 2 章 研究計画

### 2.1 研究計画

### 2.2 実験方法

(1) 磁気遮蔽

(2) 放熱効果

### 2.3 解析方法

(1) 磁場解析

(2) 熱流体解析

### 参考文献



## 第2章 研究計画

### 2.1 研究計画

本研究を始めるにあたり、電力線周辺での角筒形状の磁気遮蔽技術における検討モデルの範囲および形状について検討する。

電力線においては、以下のような理由により、直線形状による1回路（三相3線での平衡電流回路）を対象として研究を進めることとする。

1) 建物内の電力線（幹線ケーブル）は、1つのケーブルラックに多数の電力線を集中して敷設するため、磁気遮蔽対策ではその全体を磁性材料で取り囲むことになる。ただし、各電力線からの漏洩磁界の大きさは、電力線のサイズ（線間距離）や形状により異なるため、多数の電力線によるモデル化は、磁気遮蔽効果についての検証を複雑にする。そのため、直線形状による1回路のみを対象とした。

2) 電力線1本のみでのモデル化では、モデルの単純化が期待できるが、実際の負荷へ電力を供給する電力線では、電流路は単相2・3線や三相3線など複数本で配線されており、現実的ではない。また、1本のみでは原理的にも磁気遮蔽効果は得られず、実験でもほとんど効果はないことが確認されている<sup>[2-1]</sup>。そのため、三相3線による平衡電流回路を対象とした。

また、磁性材料の磁気特性（磁化曲線）は厚みにより異なることから、縮小モデルではなく、実規模モデルによる検討が必要である。そのため、磁性材料を含めた大きさについては、実規模と同寸法でのモデルにより実施することとした。

次に、磁性材料に穴を開けること（開孔）により放熱を考慮した手法において、その開孔の大きさについて検討する。

本研究での対象は、商用周波数の低周波磁界（50/60Hz）であり、その波長は数千kmになる。直径が数mmの開孔を想定した場合、その開孔の大きさに対し、波長の大きさは $10^9$ 倍のオーダーであり、磁界が開孔部を通過することはなく、磁気遮蔽効果を損なわない有効な手段になると考えられる。ただし、開孔にともない磁界の漏洩は増えることが予想でき、その影響を検証することは重要である。直径5mmを基本条件とし、異なる大きさにおいても検証することとした。

なお、材料開孔の加工においては、数値入力による機械化作業のため、困難な条件を除けば、開孔加工により材料費が大きく増えることはない。そのため、開孔条件による費用への影響は無いものとして、磁気遮蔽効果の検証のみに着目して研究を進めた。

本研究では、実規模モデルによる実験および解析の両面から各検証作業を実施することで、解析による各種条件での磁気遮蔽の設計に活用できることも視野に入れて進めた。

本論文の構成を以下に示す。

第1章は序論であり、本研究の目的について述べ、既往の研究内容を踏まえたうえで本論文の位置付けを示す。また、本論文で必要な基礎的事項の概要を説明する。

第 2 章では、研究計画について述べる。研究計画を示したうえで、本研究での実験方法や解析方法について説明する。

第 3 章では、電力線周辺での磁気遮蔽対策において、実験および解析により、角筒形状の磁気遮蔽方法の有効性を明らかにする。さらに、各種条件による遮蔽効果の違いを示すことで、遮蔽効果が大きくなる有効な条件を検証する。

第 4 章では、電力線周辺での放熱を考慮した開孔タイプの磁気遮蔽方法について、開孔条件と放熱効果の関係を実験および解析により検証する。

第 5 章では、第 4 章で示した開孔タイプの磁気遮蔽方法の遮蔽効果について、実験および解析により検証する。さらに、各種開孔条件による違いを示すことで、開孔タイプの磁気遮蔽方法における設計用指針への提案内容について検討する。

第 6 章では、第 4 章および第 5 章で示した開孔タイプの磁気遮蔽方法について、放熱効果および遮蔽効果の関係を整理する。

第 7 章では、第 3 章から第 6 章の結果をもとに、本論文での総括を示し結論とする。

## 2.2 実験方法

### (1) 磁気遮蔽

図 2-1 に実験装置を示す。交流安定化電源（エヌエフ回路設計ブロック EC1000S×3 台および As-142）により 60Hz の出力電圧を調整し，三相変圧器（3.5kVA，200V/2.5V）により降圧する。変圧器の 2 次側に接続されたケーブル（CV150mm<sup>2</sup>-1C×3 本，長さ 5m）の終端を短絡させ，変圧器およびケーブルの各インピーダンスを負荷とした回路を構成する。電源で各相の電圧を調整し，ケーブルに最大 800A の三相平衡電流を通電できる。

木製および樹脂製の支持台上に，直線状のケーブルを中心間距離 50mm で横一列に設置した。なお，実験に必要な漏洩磁界の大きさにするため，中心間距離は通常の建物内配線よりも広くしている。この方法により，実際における多数の電力線による大きな漏洩磁界を模擬していると言える。そのケーブル周辺に，各辺 150mm の正方形管形状による磁性材料（PB パーマロイ）を遮蔽材として設置している。遮蔽材の長さにおいては，実験内容により 3500mm および 1000mm を用意した。写真 2-1 に実験状況の写真を示す。

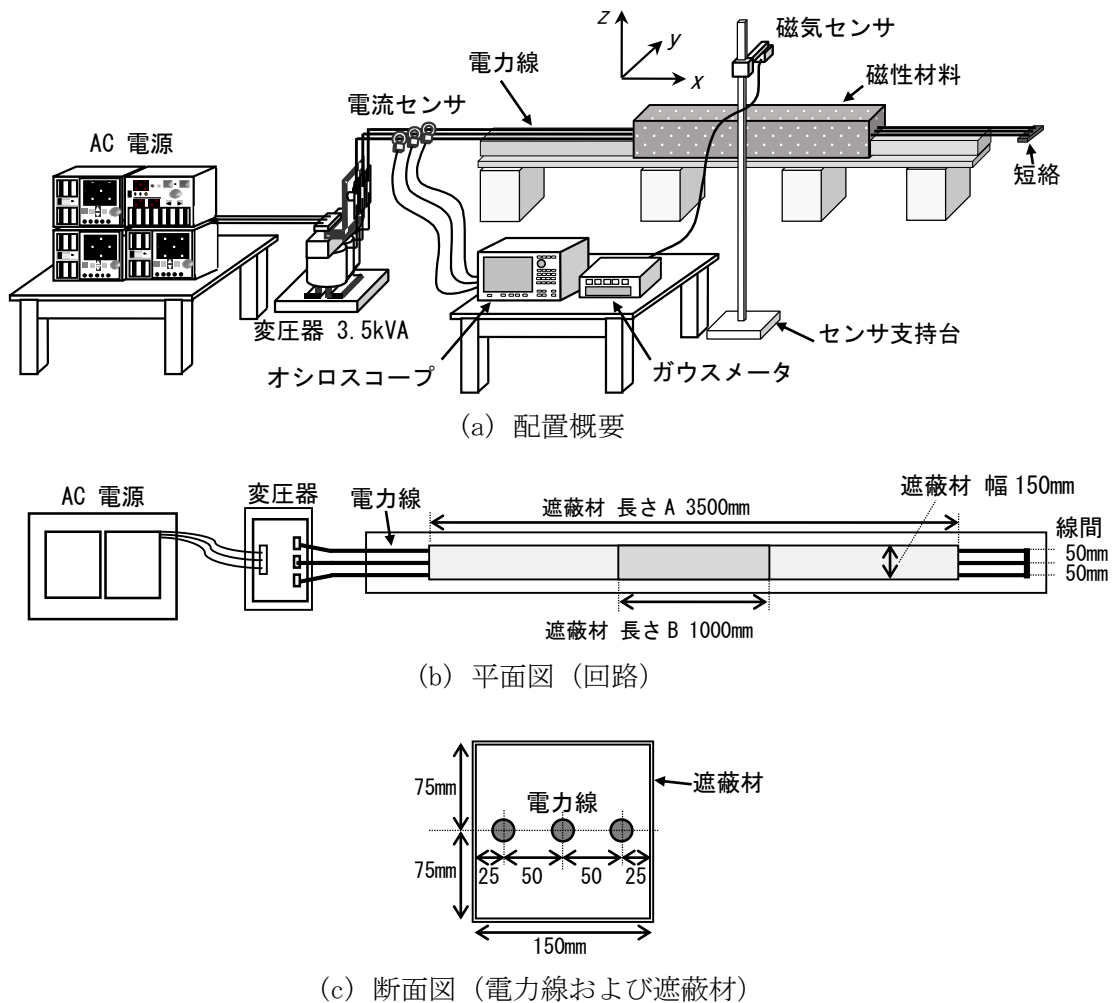


図 2-1 実験装置

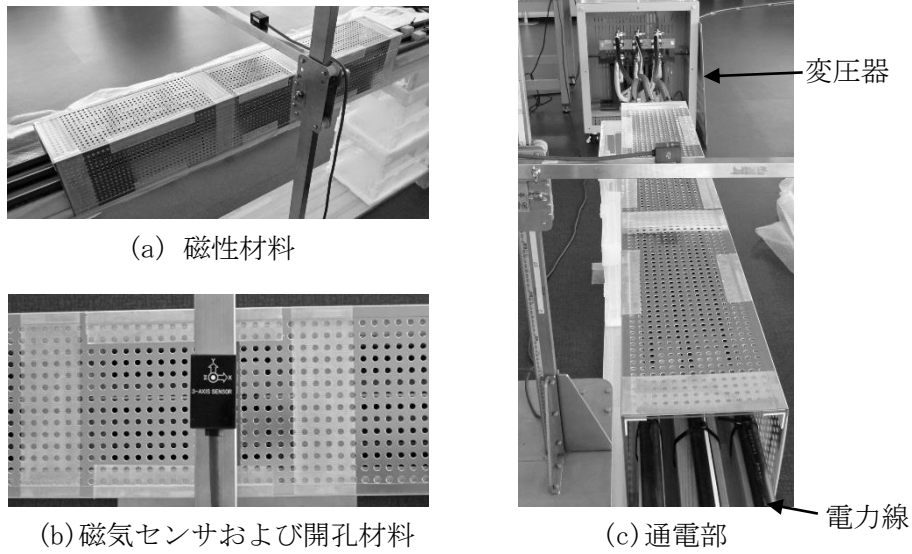


写真 2-1 実験状況

磁気センサは、図 2-2 に示すように、ステンレス（非磁性）製の支持台に固定した。磁気センサ位置は、電力線中央部の上側とし、上下に移動して所定の位置に固定して計測した。磁束密度の計測には、3 軸型の磁界計測器（MTI MM-340，フラックスゲート検出式）を用いている。また、各線電流の計測にはクランプ型電流センサ（日置電機 9661）を用いており、オシロスコープ（横河電機 DL750）により各線電流の実効値および位相を確認している。図 2-3 に三相 800A のときの電流波形を示す。各相ともに 60Hz の正弦波であり、平衡状態を確認しながら実験を進めた。写真 2-2 に電源および計測器の写真を示す。

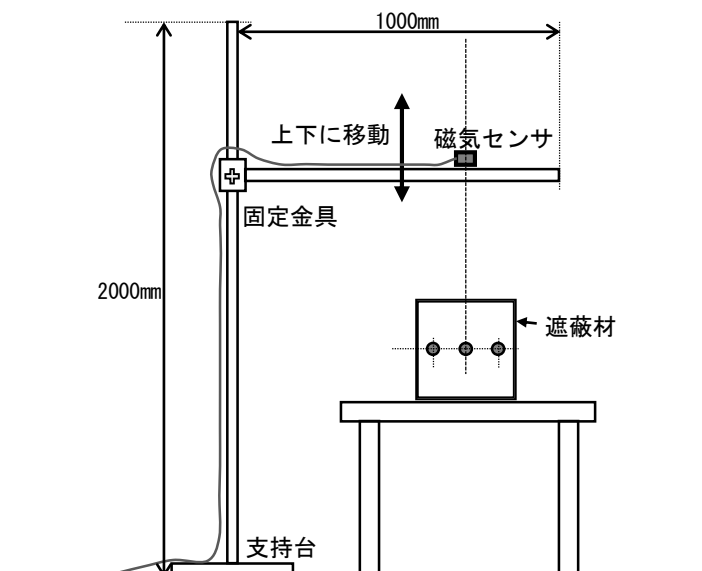


図 2-2 磁気センサ固定方法



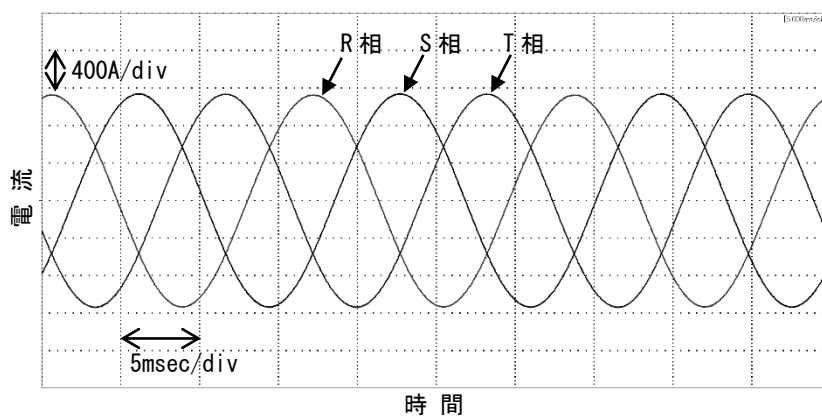


図 2-3 電流波形 (三相 800A)



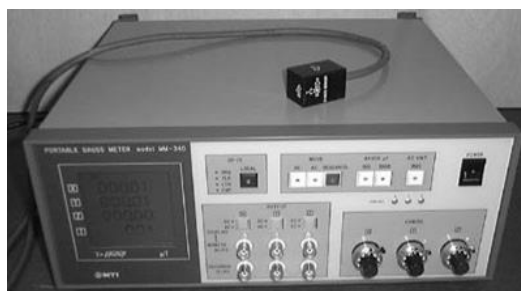
(a) 安定化電源



(b) オシロスコープ



(c) 電流プローブ



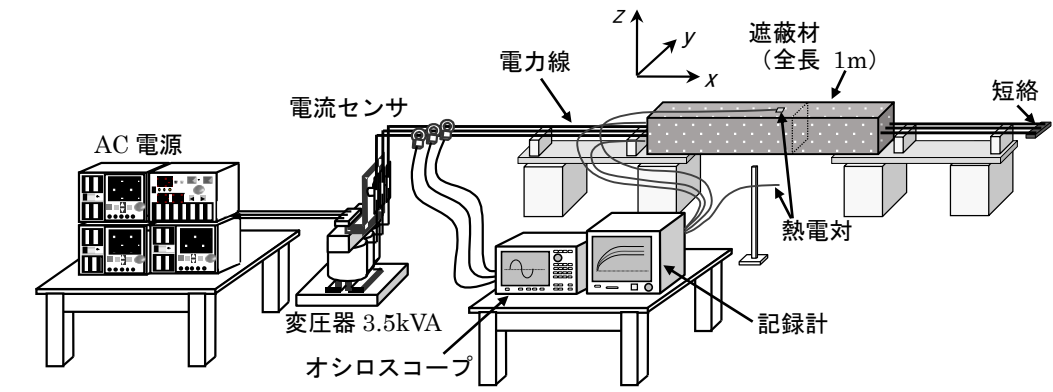
(d) 磁界計測器

写真 2-2 電源および計測器

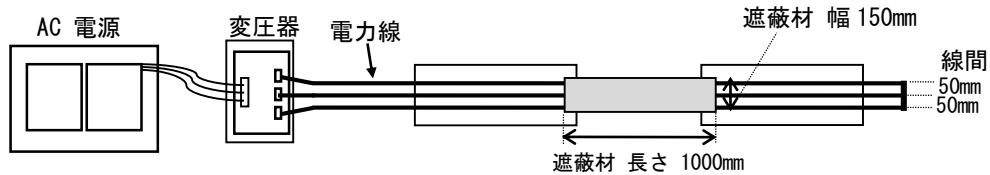
(2) 放熱効果

図 2-4 に実験装置を示す。交流安定化電源（エヌエフ回路設計ブロック EC1000S×3 台および As-142）および三相変圧器（3.5kVA, 200V/2.5V）により、その 2 次側の終端を短絡させた電力線（CV150mm<sup>2</sup>-1C×3 本、長さ 4m）に三相電流 400A を通電した。

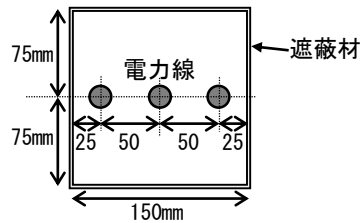
直線状の電力線を中心間距離 50mm で横一列に設置し、その周辺に 1 辺 150mm で長さ 1000mm の正方形管形状で磁性材料（PB パーマロイ、厚さ 0.5mm）を設置している。電力線および正方形管を正方形管の端部付近のみで支持することにより、温度測定に支持材による影響が出ないように考慮した。写真 2-3 に実験状況の写真を示す。



(a) 配置概要

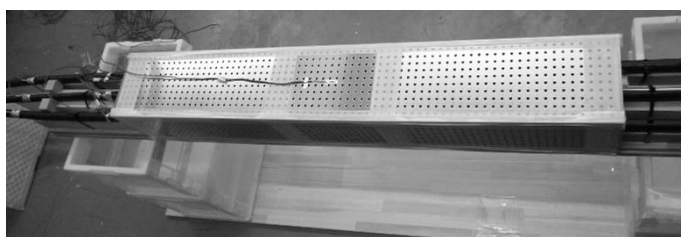


(b) 平面図（回路）



(c) 断面図（電力線および遮蔽材）

図 2-4 実験装置



(a) 磁性材料



(b) 熱電対

写真 2-3 実験状況

各線電流については、クランプ型電流センサ（日置電機 9661）を用いてオシロスコープ（横河電機 DL750）により確認した。また、温度の測定には T 型熱電対を用いている。記録計（横河電機 GX20, アナログ入力モジュール GX90XA）に複数の熱電対を入力し、各測定点の温度変化を 1 秒ごとでサンプリングし、1 分間（データ数 60）の平均値を記録した。写真 2-4 に記録計の写真を示す。

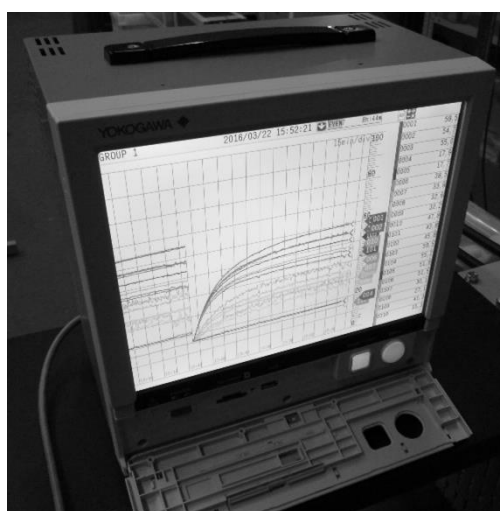


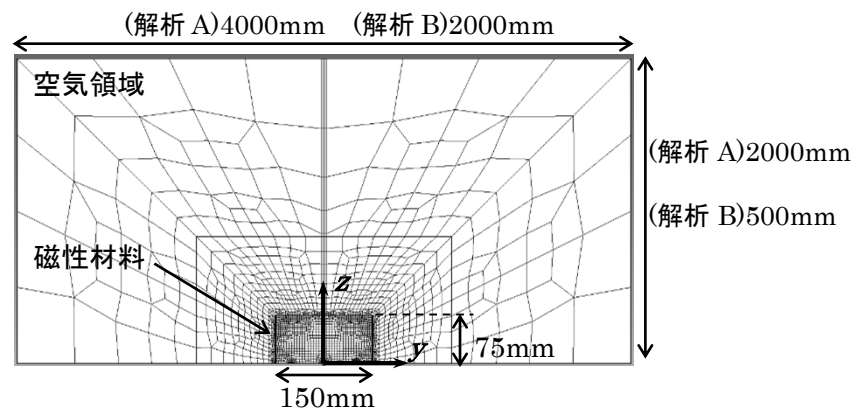
写真 2-4 記録計

## 2.3 解析方法

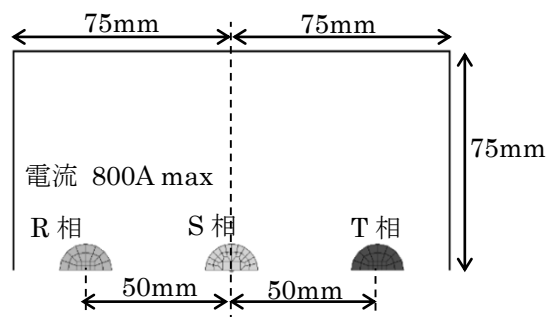
### (1) 磁場解析

磁場解析には、電磁場解析ソフトウェア（フォトン製 PHOTO-EDDY）を用いた。同ソフトウェアにより、無限長モデルによる有限要素法を用いた数値計算を実施した。図 2-5 に磁場解析モデル形状の概要を示す。電力線を中心間距離 50mm で横一列に配列し、PB パーマロイの正方形管（150mm×150mm）による磁気遮蔽のモデルとした。特に、磁性材料付近を細かく分割している。磁性材料の周辺には十分に広い範囲で空気領域を設定し、その大きさは解析内容により(A)4000mm×2000mm と(B)1000mm×500mm の 2 通りとした。実験と同様、正方形管シールドを平板と L アンクルで構成したモデルとした。モデル全体の対称性を考慮して、z 方向で 1/2 に分割した解析モデルとした。

また、周波数が 60Hz と低い場合であっても、表皮厚さによる減衰効果は導電率だけでなく透磁率が高い場合にも得られる[2-2]。そのため、PB パーマロイの導電率（ $1.7 \times 10^6 \text{ S/m}$ ）を設定した。例えば、比透磁率 35000 の場合での表皮厚さは約 0.27mm である。そのため、磁性材料内において厚さ方向でも、表皮厚さを検討したうえで要素分割している。三相 60Hz の正弦波電流を位相 10 度（0.463msec）ごとで設定し、解析モデルにおける漏洩磁界計算を過渡応答解析として定常状態となるまで実施した。



(a) モデル全体



(b) 磁性材料・導体

図 2-5 磁場解析モデル形状の概要

## (2) 熱流体解析

熱流体解析ソフトウェア（ソフトウェアクレイドル製 **STREAM**）を用い、開孔にともなう電力線周辺での放熱効果を確認した。図 2-6 に解析時の材料配置を示す。

3本の直線状の電力線（導体断面積  $150\text{mm}^2$ 、外径  $22\text{mm}$ ）を中心間距離  $50\text{mm}$  で横一列に設置し、その周辺に厚さ  $0.5\text{mm}$  の PB パーマロイ（熱伝導率  $15\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ）による1辺  $150\text{mm}$  の正方形管形状で長さ  $500\text{mm}$  の有限長モデルを配した。座標軸として、電力線の長さ方向を  $x$  軸、隣り合う電力線間隔の方向を  $y$  軸、鉛直方向を  $z$  軸としており、 $x=0$  の面 A での対称性から、全長  $1\text{m}$  を想定している。

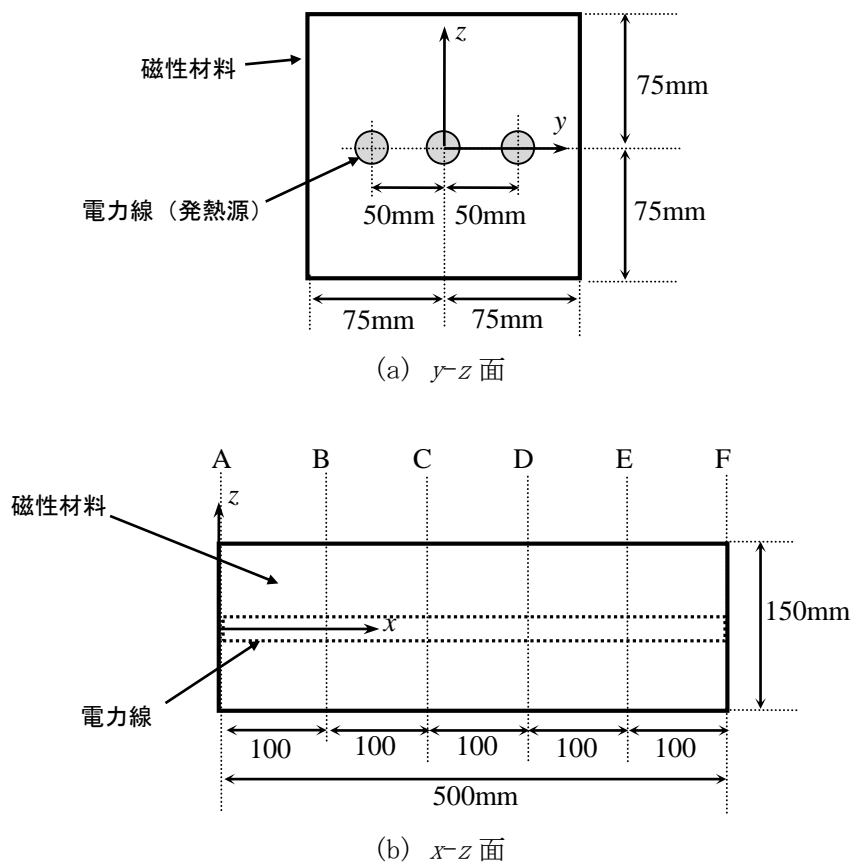


図 2-6 熱流体解析モデルの配置

## 参考文献

- [2-1] 山崎健一，岩本敏久，河本正，藤波秀雄：各種電線路における交流磁界分布と磁界遮へい方策に関する検討，電気学会論文誌 B, Vol.118, No.6, pp.635-641, 1998.6
- [2-2] 高橋則雄：三次元有限要素法 磁界解析技術の基礎，電気学会，2006



## 第3章 電力線周辺での磁気遮蔽対策

### 3.1 はじめに

### 3.2 検証モデル

- (1) 実験条件
- (2) 解析条件

### 3.3 角筒形による磁気遮蔽効果

- (1) 距離分布
- (2) 電流特性
- (3) 磁束密度の時間変化による検証

### 3.4 材料厚さによる比較

### 3.5 多層化による効果

### 3.6 まとめ

### 参考文献





## 第3章 電力線周辺での磁気遮蔽対策

### 3.1 はじめに

本章においては、電力線周辺での磁気遮蔽対策において、角筒形状の磁気遮蔽方法の有効性を明らかにすることを目的として、実験および解析により研究を進めた。ここで、建物の電力線に流れる電流の大きさは、一定ではなく季節や時間、使用負荷の状態により大きく変化する。そのため、電流の大きさにより漏洩磁界が大きく増減しても高い磁気遮蔽効果を維持できることと、遮蔽効果が大きいより有効な条件を検証する。

### 3.2 検証モデル

#### (1) 実験条件

図 3-1 に、実験モデル形状を示す。磁性材料として厚さ 0.2mm の PB パーマロイ 1 層を標準条件とし、幅 150mm の平板および幅 30mm の L アングルを組み合わせ、長さ 3.5m の正方形管形状を構成している。また、磁性材料の厚さにおいて 0.2mm のほか、0.35mm および 0.5mm においても検証する。そして、磁性材料の層数において 1 層のほか、2 層および 3 層においても検証する。

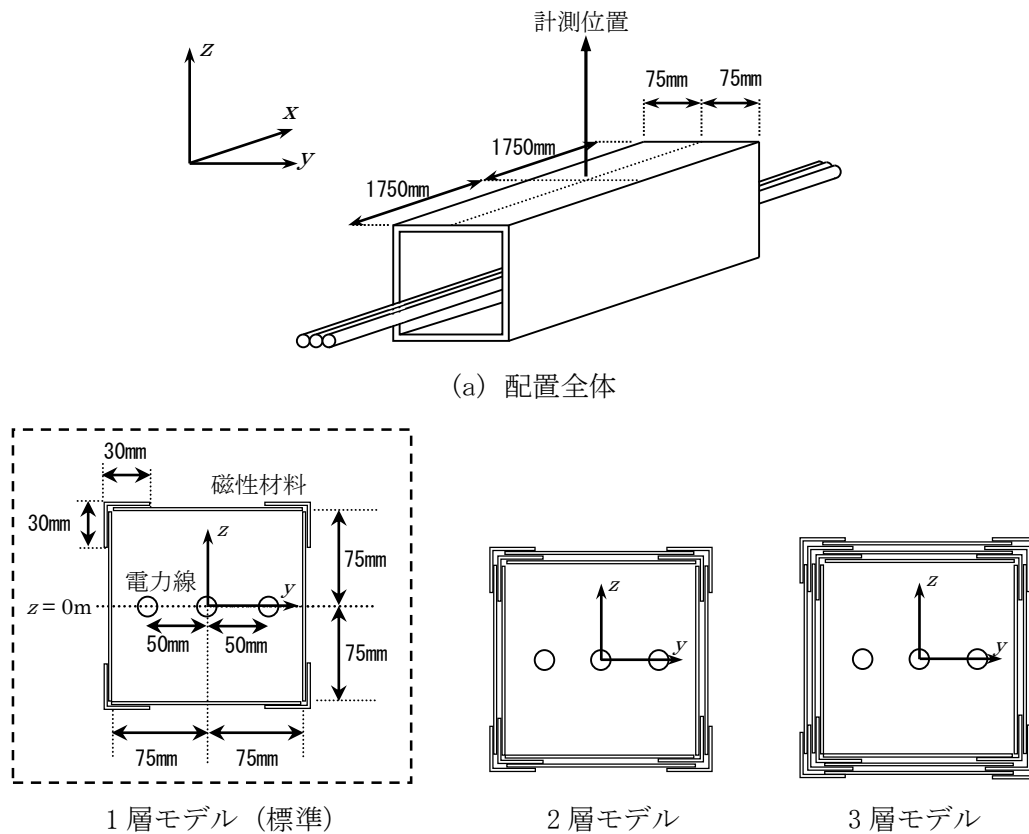
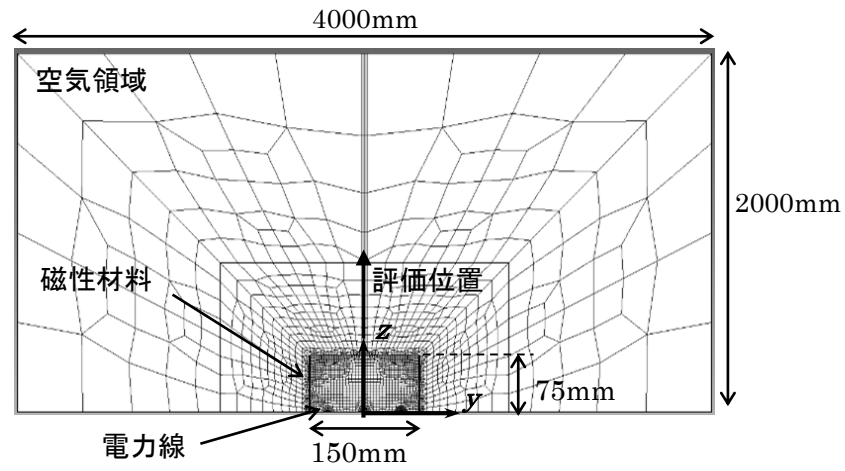


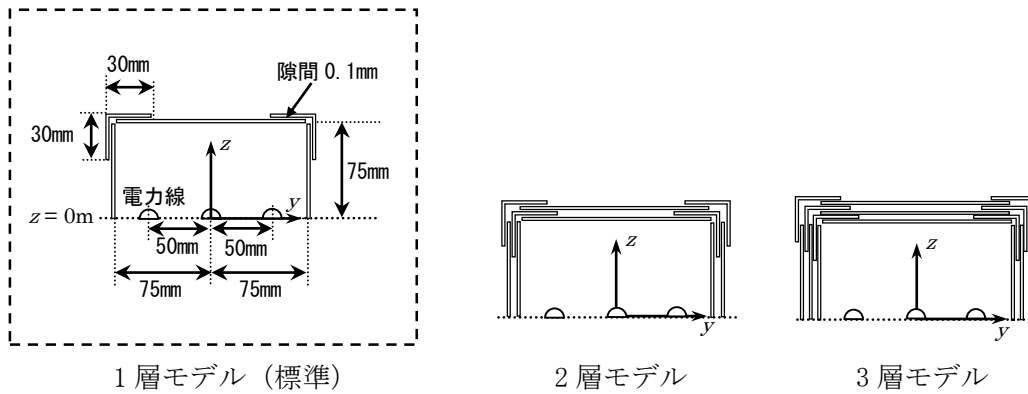
図 3-1 実験モデル形状

(2) 解析条件

図 3-2 に解析モデル形状を示す。実験時と同様に、磁性材料として PB パーマロイを選択し、厚さ 0.2mm の 1 層を標準条件とし、磁性材料の厚さにおいて 0.2mm のほか、0.35mm および 0.5mm においても検証する。そして、磁性材料の層数において 1 層のほか、2 層および 3 層においても検証する。空気領域を y 軸方向で 4m、z 軸方向で 2m の大きさとして設けた。なお、平板と L アンゲルの重なる部分では、各部材の隙間を 0.1mm とした。



(a) 解析モデル全体



(b) 電力線および磁性材料

図 3-2 解析モデル形状

解析条件として磁化曲線を設定するため、BHアナライザ（岩崎通信機 SY-8232）を用いて実験材料（PB パーマロイ）における特性を測定した。図 3-3 に、3 種類の厚さ（0.2mm, 0.35mm, 0.5mm）における PB パーマロイの磁化曲線の測定値を示す。ただし、磁性材料の磁化が弱い領域における非線形特性をそのまま設定すると、解析を収束させることが難しい<sup>3-1</sup>ため、本解析では磁化が弱い領域（磁界 15A/m 以下）を線形近似とした。図 3-4 に解析用に設定した磁化曲線を示す。

磁界 40A/m 以下では、厚さが 0.2mm に対し、0.35mm, 0.5mm においては比透磁率が低い条件となっている。周波数 60Hz, 最大比透磁率 60000 の場合での表皮厚さは約 0.2mm であるため、モデル作成においては磁性材料を厚さ方向で 0.1mm ごとに要素分割した。なお、厚さ 0.2mm, 1 層の解析モデルでは、要素数は約 56000, 節点数は約 28000 であった。

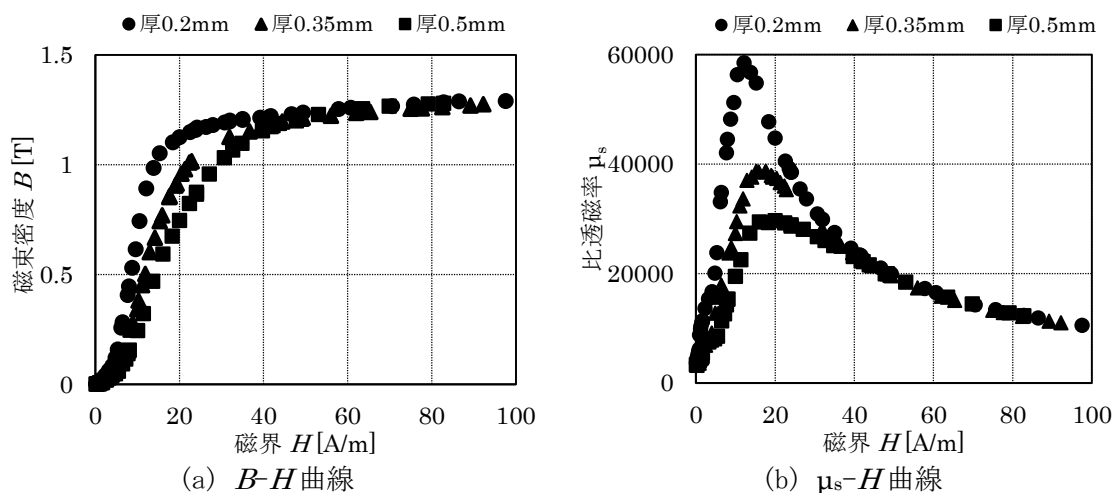


図 3-3 PB パーマロイの磁化曲線（測定値）

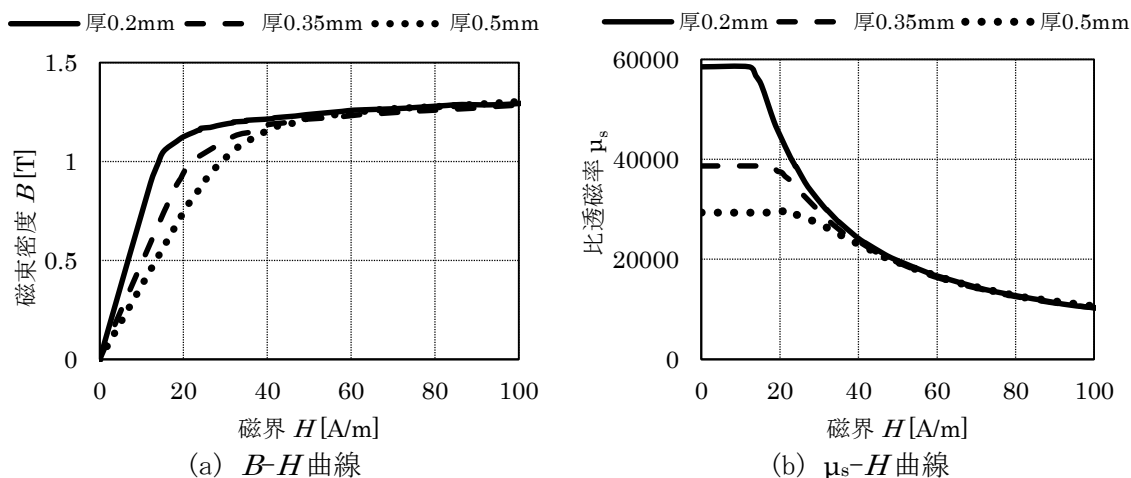


図 3-4 PB パーマロイの磁化曲線（解析条件）

### 3.3 角筒形による磁気遮蔽効果

#### (1) 距離分布

図 3-5 に、実験値および計算値により、ケーブルからの距離と磁束密度の関係を示す。実験値においては、遮蔽なしを黒丸、遮蔽時を白丸で示しており、計算値を実線および点線で示している。いずれにおいても、電流 200A、材料厚さ 0.2mm の条件により得られたものである。この結果から、磁性材料上側の  $z$  方向においてケーブルから離れるにつれて磁束密度は減少しており、遮蔽により広い範囲で磁束密度を大幅に低減できることを示している。

また、同図に示す実験値と計算値を比較すれば、磁束密度の距離減衰の様相は遮蔽の有無に関わらずよく一致しており、この解析モデルでの計算により、実験モデルの結果を再現できることを示している。ここで、遮蔽時の実験値において位置 0.7m 付近から磁束密度が上昇しているのは、磁気遮蔽材の端部からの磁界の回り込みによる影響だと考えられる。

図 3-6 に、ケーブルからの距離と磁気遮蔽効果の関係を示す。これは、遮蔽の有無それぞれの磁束密度の比を算出したものである。電流 200A、材料厚さ 0.2mm の条件において、実験時における磁気遮蔽効果は広範囲において 30 以上であり、ケーブルからの距離が 0.8m のときでも遮蔽効果は約 55 となることを確認した。

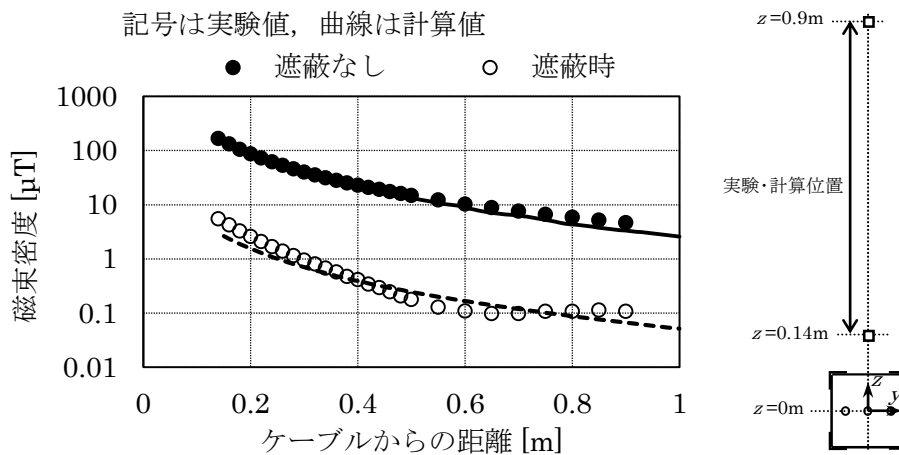


図 3-5 磁束密度 (電流 200A, 材料厚さ 0.2mm)

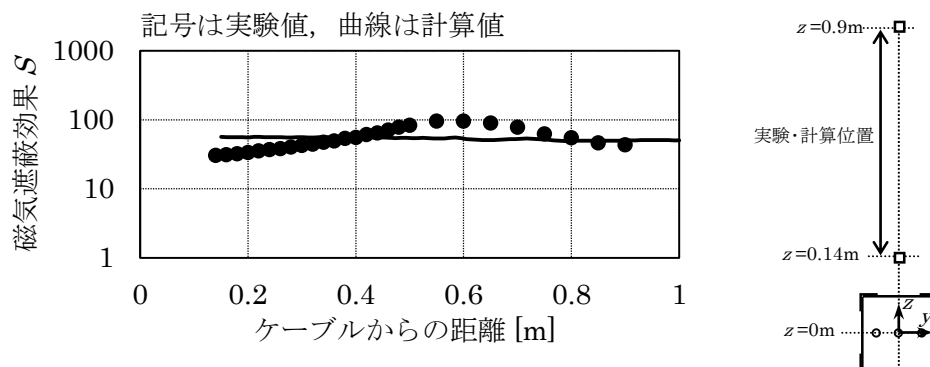


図 3-6 磁気遮蔽効果 (電流 200A, 材料厚さ 0.2mm)

(2) 電流特性

図 3-7 に、実験値および計算値により、遮蔽の有無における電力線電流と磁束密度の関係を示す。この結果は、位置  $z=0.2\text{m}$ 、材料厚さ  $0.2\text{mm}$  において、電流  $10\text{A}\sim 800\text{A}$  の条件により得られたものである。電流に対する磁束密度の変化の様子において、実験値および計算値は、遮蔽の有無に関わらずよく一致している。

図 3-8 に、電力線電流と磁気遮蔽効果の関係を示す。図 3-7 の結果をもとに算出したもので、電流条件により遮蔽効果が異なる。電流  $100\text{A}\sim 300\text{A}$  付近では、電流の増加にともない遮蔽効果が高くなっており、実験値における遮蔽効果の最大値は電流  $250\text{A}$  のときの約  $35$  であった。また、電流  $300\text{A}$  以上の条件においては大幅に遮蔽効果が低下している。

その要因については、次のように説明できる。大電流の条件では、電力線からの漏洩磁界が大きくなる。図 3-3(b)の比透磁率特性のとおり、厚さ  $0.2\text{mm}$  の PB パーマロイでは磁界  $15\text{A/m}$  以上で磁性材料の比透磁率が低下する。そのため、大電流の条件では磁性材料の比透磁率が低下し、遮蔽効果が低下するものと考えられる。

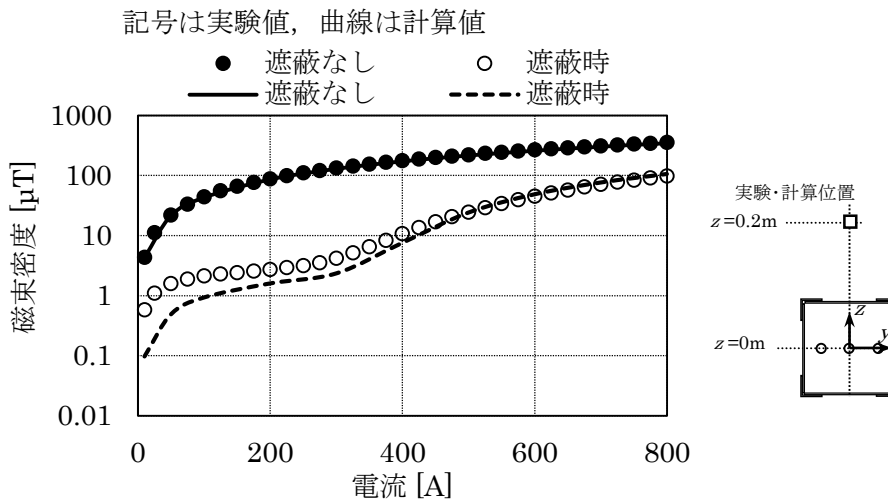


図 3-7 電力線電流による磁束密度 (位置  $z=0.2\text{m}$ 、材料厚さ  $0.2\text{mm}$ )

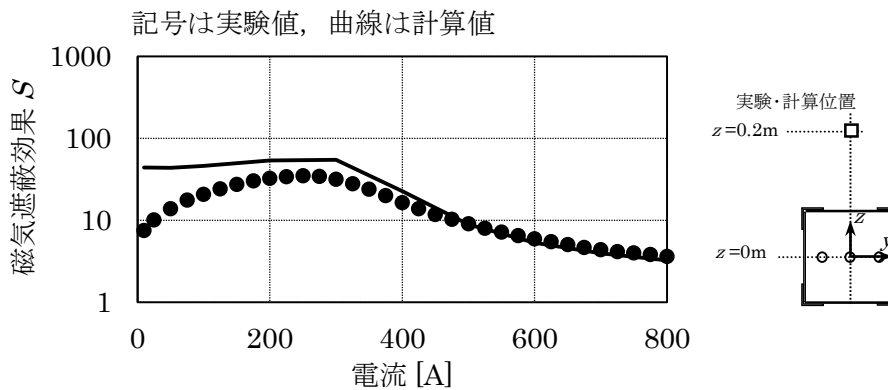


図 3-8 電力線電流による磁気遮蔽効果 (位置  $z=0.2\text{m}$ 、材料厚さ  $0.2\text{mm}$ )

### (3) 磁束密度の時間変化による検証

図3-9に、 $z$ 軸方向磁束密度の時間変化を示す。電流200Aおよび400A, 材料厚さ0.2mm, 位置 $z=0.2\text{m}$ の条件で得られたものである。まず(a)遮蔽なしでは、磁束密度の波形は電流と同じく正弦波で、磁束密度のピークは時間0msecおよび8msec付近にある。これに対し、同じ電流200Aの(b)遮蔽時では、実験値と計算値ともに、磁束密度のピークが時間2msecおよび10msec付近にあり、遮蔽なしに比べて約2msec遅れている。これは遮蔽時の磁界が、元の磁界(遮蔽なし)および渦電流による磁界の合成となるため、さらに磁性材料の磁化曲線における非線形性により波形は歪んでいる。さらに、(c)の電流400Aでは、漏洩磁界が大きくなり材料の透磁率が低下したため、実験値と計算値ともに、時間2msecおよび10msec付近に現れるピークが大きく増加した波形となった。

実験値および計算値での波形の差異の要因として、実験での端部からの磁界の影響に加え、計算ではヒステリシス特性設定の難しさ、比透磁率などの特性における実験材料との不一致が考えられ、これらの内容が解決すれば、両者の差異は小さくなると期待できる。

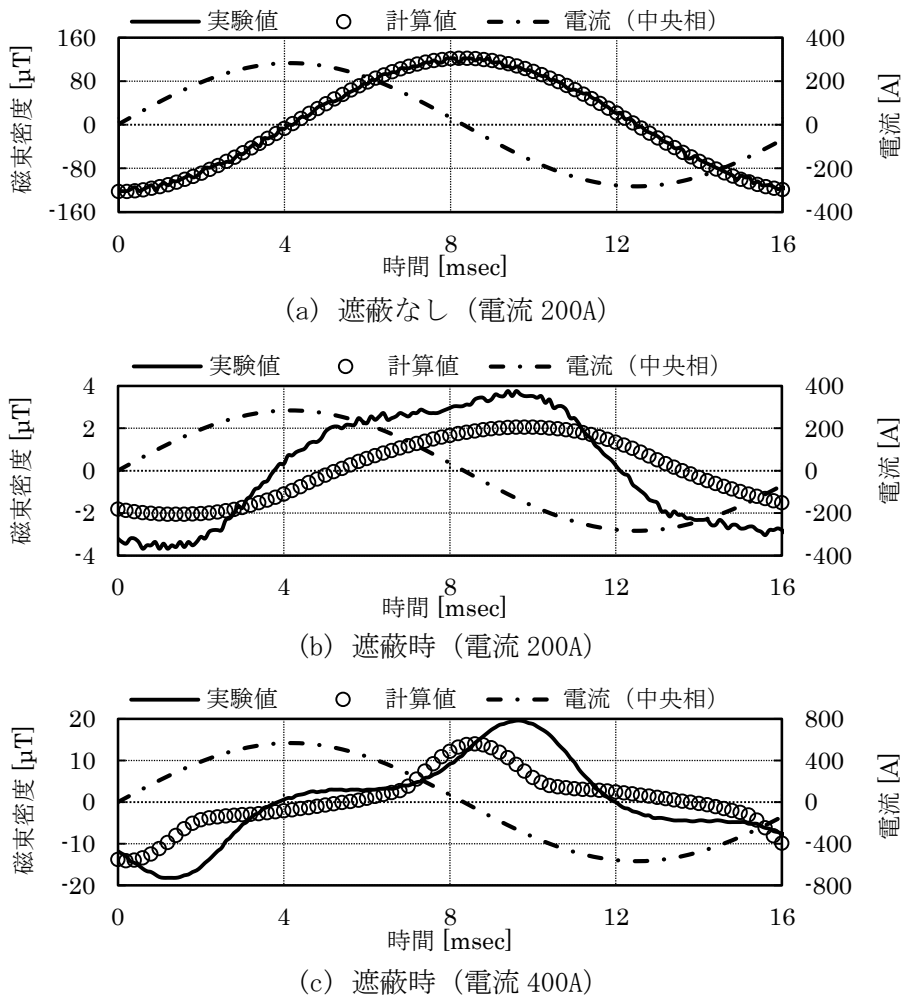


図3-9  $z$ 方向磁束密度の時間変化 (位置 $z=0.2\text{m}$ , 材料厚さ0.2mm)

### 3.4 材料厚さによる比較

図 3-10 に、数種類の材料厚さにおいて、電力線電流と磁気遮蔽効果の関係を示す。この結果は、位置  $z=0.2\text{m}$ 、電流  $10\text{A}\sim 800\text{A}$  において、材料厚さ  $0.2\text{mm}$ 、 $0.35\text{mm}$  および  $0.5\text{mm}$  の条件により得られたものである。また、そこから電流  $200\text{A}$ 、 $400\text{A}$ 、 $600\text{A}$  のときの結果を抽出し、図 3-11 に材料厚さと磁気遮蔽効果の関係を示す。

電流に対する磁気遮蔽効果の変化の様子において、実験値および計算値は、材料厚さに関わらず一致している。しかし、全体的に実験値に比べて計算値が大きい。その要因として、実験での端部からの磁界の影響に加え、計算での特性設定における実験材料との不一致などが挙げられる。また、特に電流が  $100\text{A}$  以下の条件では、実験値と計算値の差異が大きい。この要因は、図 3-4 での説明のとおり、磁化が弱い領域（磁界  $15\text{A/m}$  以下）において、実際の磁性材料における比透磁率の減少の考慮が計算において困難であるためである。

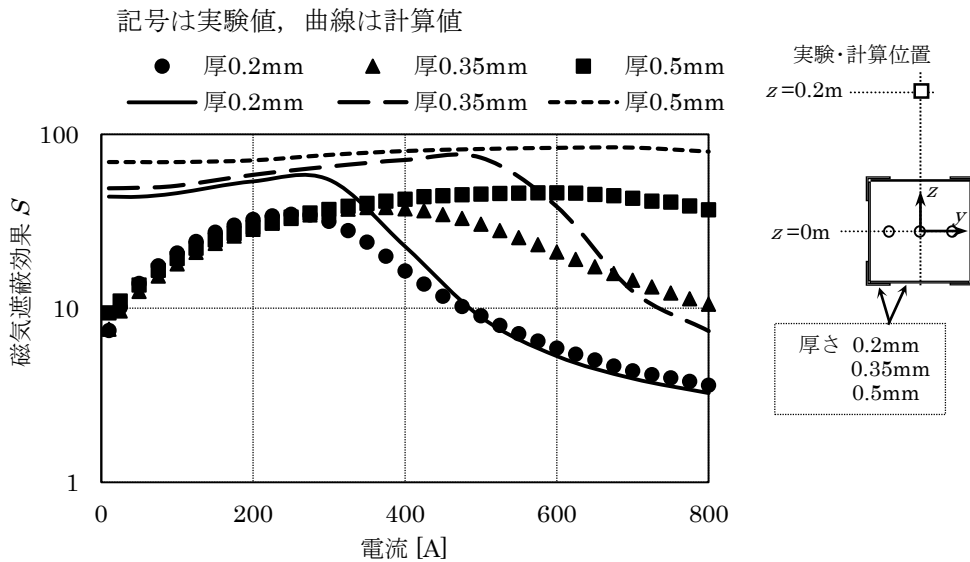


図 3-10 異なる材料厚さの電力線電流による磁気遮蔽効果

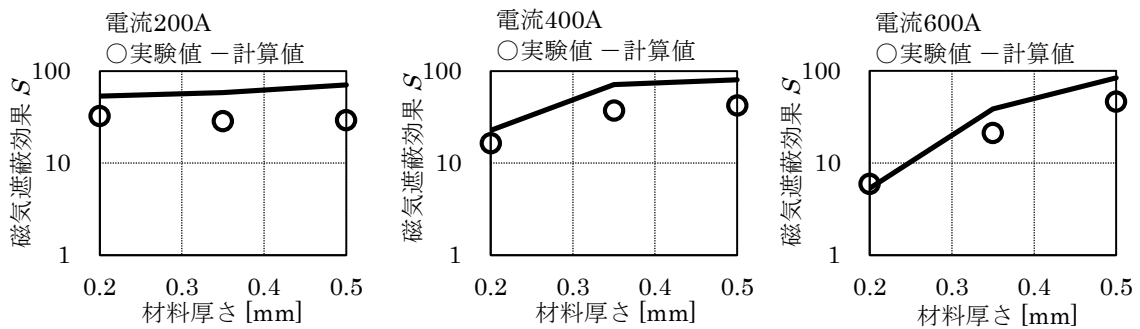


図 3-11 材料厚さによる磁気遮蔽効果（電流 200A, 400A, 600A）



図 3-10 において、磁気遮蔽効果が最大となるときの電流値に着目すると、材料厚さによりその電流値が異なる。厚さ 0.2mm では電流 250A、厚さ 0.35mm では電流 350A、厚さ 0.5mm では電流 600A のときに磁気遮蔽効果が最大である。図 3-3(b)から、厚さ 0.2mm では磁界 12A/m、厚さ 0.35mm では磁界 18A/m、厚さ 0.5mm では磁界 24A/m 以上で比透磁率が減少しており、この理由から厚さにより異なる電流条件で、その遮蔽効果が低下すると説明できる。

また、磁気遮蔽効果の最大値は、材料厚さが増えてもほとんど変わらず、厚さ 0.2mm では 35、厚さ 0.35mm では 38、厚さ 0.5mm では 46 である。この点については、図 3-3(b)に示すように、材料の厚さが増えると比透磁率の最大値が小さくなることに起因していると考えられる。表 3-1 に、比透磁率の最大値および材料厚さとの積を示す。積は材料厚さによりほぼ変わらないことを確認でき、式(1-1)で示す「比透磁率  $\mu_s$  および厚さ  $t$  の積が一定の条件では磁気遮蔽効果が同じ」という基本理論式の内容と一致している。

表 3-1 比透磁率の最大値および材料厚さとの積

材料厚さ $t$ [mm]	比透磁率の最大値 $\mu_{s \max}$	両者の積 $\mu_{s \max} \times t$
0.2	58000	11600
0.35	39000	13650
0.5	29000	14500

### 3.5 多層化による効果

図 3-12 に材料多層化における電力線電流と磁気遮蔽効果の関係を示す。この結果は、位置  $z=0.2\text{m}$ 、材料厚さ  $0.2\text{mm}$ 、電流  $10\text{A}\sim 800\text{A}$  において、磁性材料を 1 層、2 層および 3 層とした条件により得られたものである。また、そこから電流  $200\text{A}$ 、 $400\text{A}$ 、 $600\text{A}$  のときの結果を抽出し、図 3-13 に材料層数と磁気遮蔽効果の関係を示す。実験値および計算値ともに、電流の変化に対する磁気遮蔽効果の変化の様子は、材料層数に関わらず一致している。

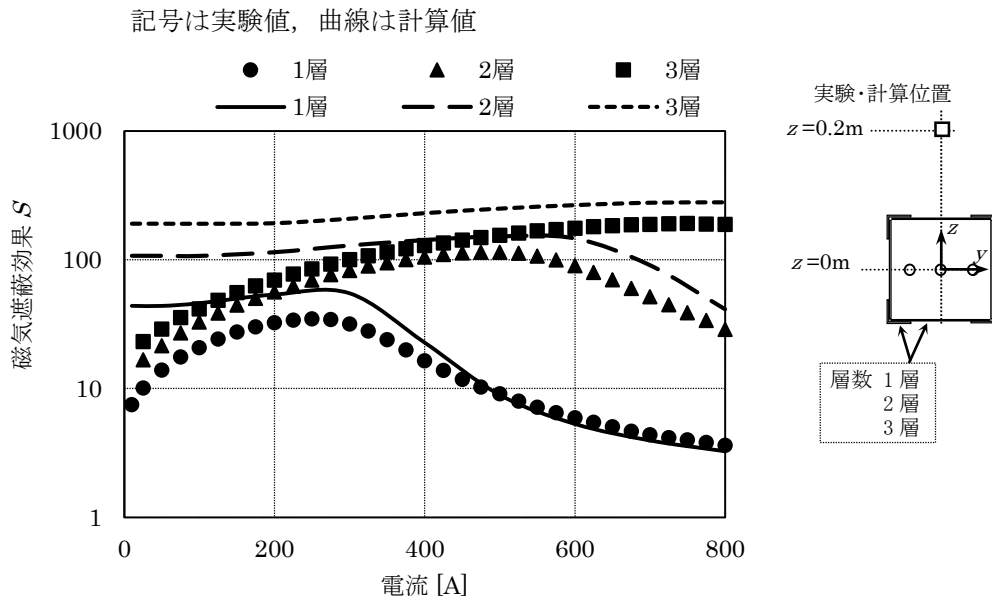


図 3-12 材料多層化における磁気遮蔽効果

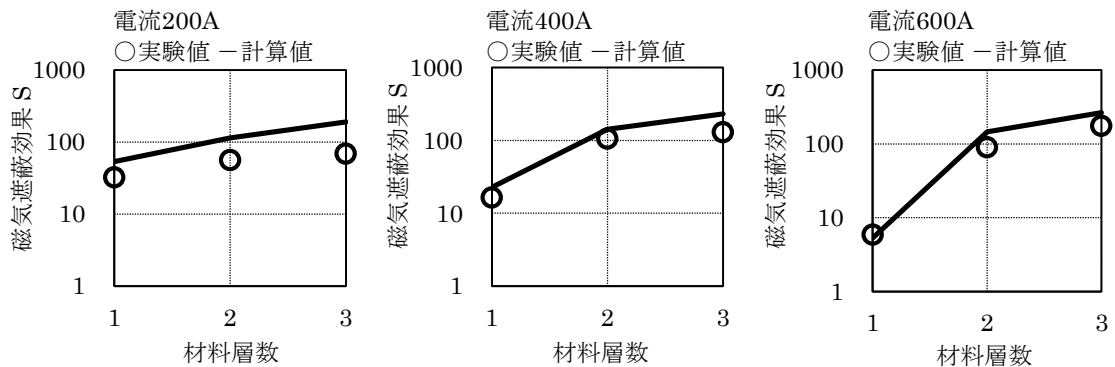


図 3-13 材料層数による磁気遮蔽効果 (電流  $200\text{A}$ 、 $400\text{A}$ 、 $600\text{A}$ )

図 3-12 において、磁気遮蔽効果が最大となるときの電流値に着目すると、材料層数によりその電流値が異なる。1 層では電流 250A, 2 層では電流 475A, 3 層では電流 750A のときに遮蔽効果が最大である。このように、層数が大きい条件において、遮蔽効果が最大となる電流値が大きくなっている。

また、磁気遮蔽効果の最大値について、材料 1 層では約 35, 材料 2 層では約 114, 材料 3 層では約 190 であった。材料多層化の場合では、前項のような各材料の厚さではなく、重ね合わせによる厚さの増加となる。既に 1 章での式(1.1)で示した、円筒の軸に直角に均一な外部磁界の大きさを  $H_0$ , 円筒内の磁界の大きさを  $H_1$  としたときの磁気遮蔽効果を算出する場合において、直径の異なる 3 層に重ねた円筒材料では、厚さを  $t$ , 半径を  $r$ , 比透磁率を  $\mu$  とし、式(3.1)で算出される (内側から順番に添字 1, 2, 3) [3-2], [3-3]。1 層での式(1.1)と比べて 3 層での磁気遮蔽効果が大きくなることに加え、このような多層の場合では、層間の隙間により効果が異なることを示している。

$$\begin{aligned}
 \frac{H_0}{H_1} &\cong 1 + \frac{1}{2} \frac{\mu_1 t_1}{r_1} + \frac{1}{2} \frac{\mu_2 t_2}{r_2} + \frac{1}{2} \frac{\mu_3 t_3}{r_3} \\
 &+ \frac{1}{2} \frac{\mu_1 t_1}{r_1} \cdot \frac{1}{2} \frac{\mu_2 t_2}{r_2} \left\{ 1 - \left( \frac{r_1+t_1}{r_2} \right)^2 \right\} \\
 &+ \frac{1}{2} \frac{\mu_2 t_2}{r_2} \cdot \frac{1}{2} \frac{\mu_3 t_3}{r_3} \left\{ 1 - \left( \frac{r_2+t_2}{r_3} \right)^2 \right\} \\
 &+ \frac{1}{2} \frac{\mu_1 t_1}{r_1} \cdot \frac{1}{2} \frac{\mu_3 t_3}{r_3} \left\{ 1 - \left( \frac{r_1+t_1}{r_3} \right)^2 \right\} \\
 &+ \frac{1}{2} \frac{\mu_1 t_1}{r_1} \cdot \frac{1}{2} \frac{\mu_2 t_2}{r_2} \cdot \frac{1}{2} \frac{\mu_3 t_3}{r_3} \left\{ 1 - \left( \frac{r_1+t_1}{r_2} \right)^2 \right\} \left\{ 1 - \left( \frac{r_2+t_2}{r_3} \right)^2 \right\} \quad (3-1)
 \end{aligned}$$

### 3.6 まとめ

電力線周辺での磁気遮蔽対策において、実規模モデルでの実験および解析により、角筒形状の磁気遮蔽方法の有効性を確認するとともに、各種条件による遮蔽効果の違いについて検証した。得られた結果を以下にまとめる。

(1) 距離減衰特性の検証から、今回の検証条件では、広い範囲で磁気遮蔽効果が 30 以上であることを確認した。また、実験値および計算値はほぼ同等であった。

(2) 電流特性の検証から、使用する材料の磁気特性により、高い磁気遮蔽効果が得られる有効な電流範囲が限定されることを確認した。磁気遮蔽効果は、電流の増加とともに高くなり、材料の磁束密度が飽和する電流条件を超えると低下した。また、実験値および計算値は同様の傾向を示した。

(3) 磁気遮蔽効果は、磁束密度の実効値による評価であるため、その詳細を分析するために時間変化を検証したところ、磁性材料の磁化曲線における非線形性により磁気遮蔽時の磁束密度は大きく歪んだ波形であった。実験および計算で得られた波形において、位相などでの差異は見られたが、電流条件にともなう波形の変化などでは同様の傾向を示した。

(4) 材料の厚さが異なるときの磁気遮蔽効果の違いについて検証し、厚さが大きい材料では電流値が大きい条件においても高い磁気遮蔽効果を確保できるが、厚さが増えても磁気遮蔽効果の最大値はほとんど変わらない。この結果から、角筒形の磁気遮蔽においても、円筒形の基本理論式と同様の傾向が得られたことを確認できた。

(5) 材料を多層構造としたときの磁気遮蔽効果の違いについて検証し、多層化により電流値が大きい条件で高い磁気遮蔽効果を確保でき、さらに磁気遮蔽効果の最大値が高くなった。この結果から、厚さ変化と同様に、円筒形の基本理論式と同様の傾向が得られたことを確認できた。

#### 参考文献

- [3-1] 坪井始, 内藤督彦: 数値電磁界解析法の基礎, 養賢堂, 1994
- [3-2] 佐々木有三郎, 大塚泰一郎: 高透磁率材による磁気遮蔽, 日本物理学会誌, 第 26 巻, 第 10 号, pp.792-796, 1971.10
- [3-3] 小笠原武, Boesten,L: 弱磁場にたいする磁気遮蔽, 日本物理学会誌, 第 28 巻, 第 12 号, pp.1041-1049, 1973.12

## 第4章 開孔材料による放熱効果の検証

### 4.1 はじめに

### 4.2 検証モデル

- (1) 開孔条件
- (2) 実験条件
- (3) 解析条件
- (4) 評価方法

### 4.3 開孔による放熱効果

- (1) 実験結果
- (2) 解析結果
- (3) 実験および解析結果の関係

### 4.4 まとめ



## 第4章 開孔材料による放熱効果の検証

### 4.1 はじめに

通常、磁気遮蔽対策を施さない予定でケーブル工事の設計をするため、例えば管路内への敷設に比べて、放熱条件のよいケーブルラック上への電力線敷設の場合には、大きな許容電流を設定した計画を可能とし、費用面を考慮してできるだけ細いサイズの電力線を選定されることが多い。もし電力線の許容電流に対して余裕のない条件で敷設した場合、そこへ磁気遮蔽対策（角筒形状の金属ダクト）を設けることで放熱条件が悪くなると、最悪の場合、電力線の絶縁被覆が溶解し、短絡などの要因で発火につながる危険性がある。


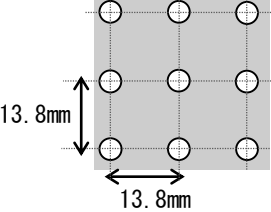
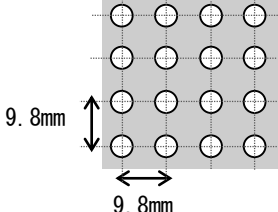
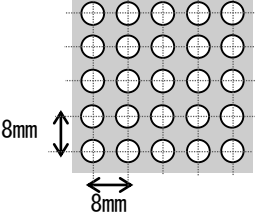
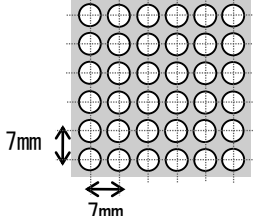
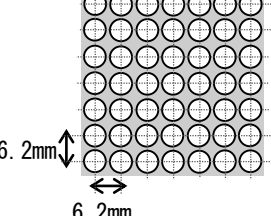
そのため、電力線に対して磁気遮蔽対策を施す際には放熱対策の検討が重要である。そこで、ケーブルラックへの磁気遮蔽において、磁性材により4面を取り囲む形状のまま、その材料への開孔により放熱を考慮した手法を考案した。本章では、磁性材料への開孔を想定したときの放熱効果について検討した。

## 4.2 検証モデル

### (1) 開孔条件

表 4-1 に磁性材料の開孔条件を示す。材料平面全体のなかでの開孔部分の面積比 (%) を磁性材料の開孔率と定義し、開孔率 0~50% の条件における放熱状況の違いを確認することとした。各開孔は円形でその直径を 5mm 固定とし、その配列は並列形としている。開孔率が大きい条件ほど、隣り合う開孔間の距離が小さい条件となる。

表 4-1 磁性材料の開孔条件

0%	10%	20%
		
30%	40%	50%
		



(2) 実験条件

放熱効果の検証のため、正方形管 1m の遮蔽材において、表 4-1 の各条件を用意し、電力線に三相電流 400A を通電したときの代表点での温度を測定した。

図 4-1 に、正方形管の構成および温度測定点を示す。(a)の正方形管ダクト中央付近での  $y$ - $z$  断面図において、ダクト内部の温度測定点を示している。放熱効果を検証するための温度測定点は、正方形管の中央部における①上面内側、②上面下部 25mm および③電力線表面であり、定常状態での温度を確認した。また、(b)の  $x$ - $y$  平面図に示すように、磁性材料による正方形管の端部から、電力線に沿って 1m 離れた位置での電力線表面の温度も測定している。そして、正方形管の側面から  $y$  方向に約 500mm 離れた位置での温度を周囲温度として測定し、各検証点での温度との差を上昇温度とした。

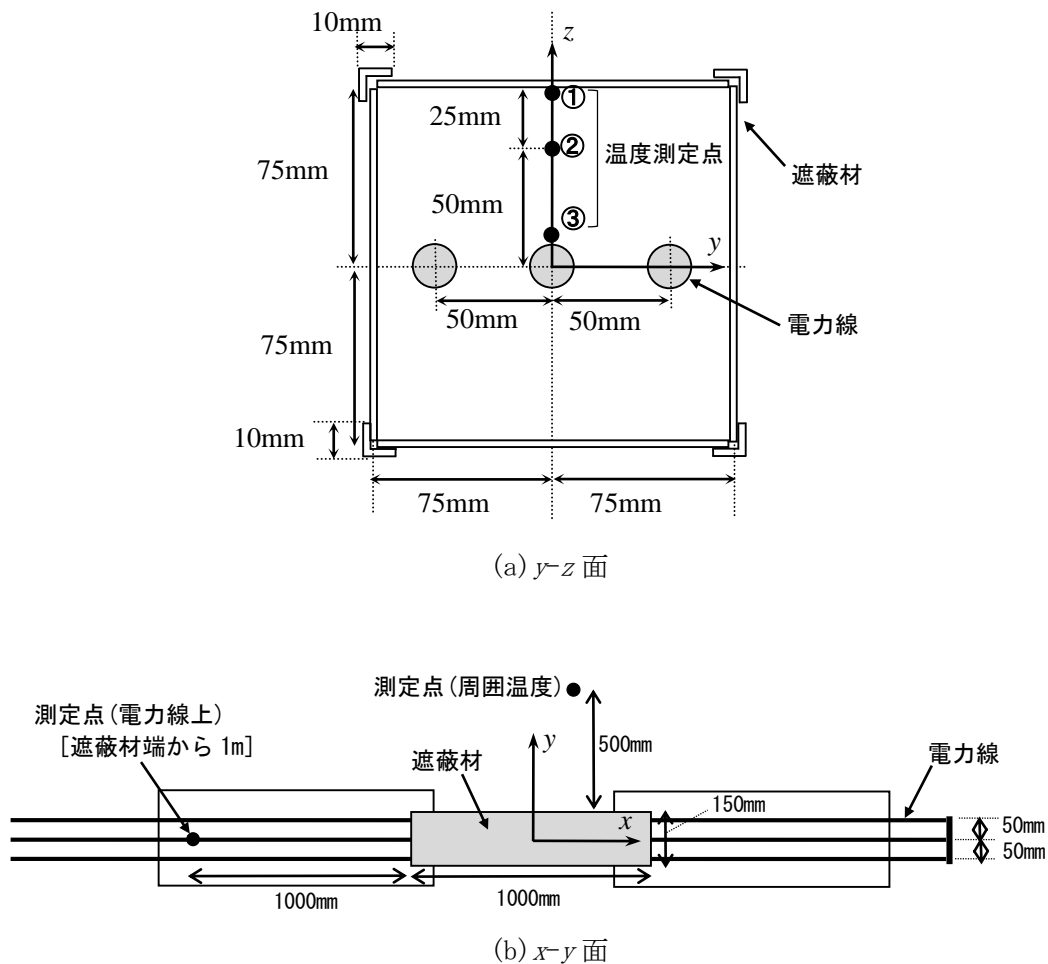


図 4-1 正方形管の構成および温度測定点

### (3)解析条件

放熱効果の検討のため、熱流体解析ソフトウェア(ソフトウェアクレイドル製 STREAM)を用い、有限長 1m モデルによる解析により、開孔率の大きさにともなう電力線周辺での温度分布を計算した。発熱源として、電力線 3 本での消費電力を 75W/m (電流 400A, 導体抵抗 0.157Ω/km の場合を想定) と設定し、表 4-1 に示した各条件の解析モデルを用意し、定常時における電力線表面および周辺での温度分布を計算した。なお、放熱効果の検証は上昇温度で評価するため、周囲温度を 20℃に設定している。

図 4-2 に、正方形管の構成および温度評価点を示す。解析結果としては温度分布を得られるが、放熱効果を検証するための温度評価点として、z 軸上 (y=0) における①上面内側、②上面下部 25mm、③電力線表面、④下面上部 25mm および⑤下面内側を選定した。

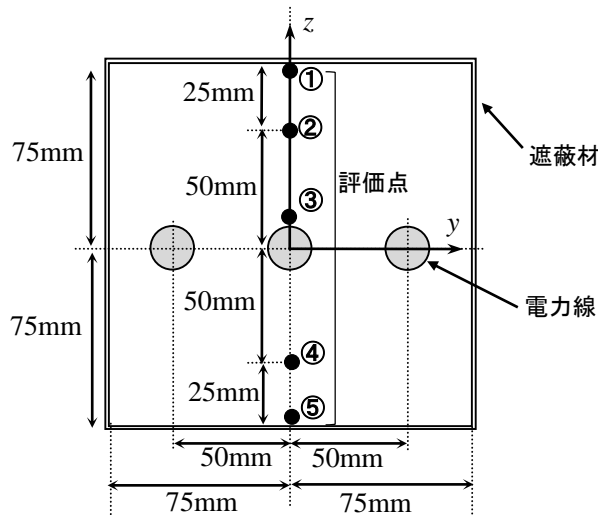


図 4-2 解析における温度評価点

### (4)評価方法

開孔にともなう放熱効果について、評価方法を述べる。電力線表面において、正方形管が無いときの上昇温度  $t_n$  に対し、管を設置しても開孔により上昇温度が  $t_n$  と変わらないことを目標とする。そのため、開孔による放熱効果としては、開孔率 0%での上昇温度  $t_0$ との差を考慮し、式(4-1)により放熱効果  $E_h$  を定義する。開孔時の上昇温度  $t_1$  が  $t_n$  と同じ場合、 $E_h$  は最大値 1 になる。

$$\text{開孔による放熱効果 } E_h = \frac{t_0 (\text{開孔率 0\%での上昇温度}) - t_1 (\text{開孔時の上昇温度})}{t_0 (\text{開孔率 0\%での上昇温度}) - t_n (\text{管無しでの上昇温度})} \quad (4-1)$$

### 4.3 開孔による放熱効果

#### (1) 実験結果

図 4-3 に、①上面内側、②上面下部 25mm、③電力線表面の温度および周囲温度の時間変化を示す。これは、開孔率 0%のときの測定結果である。通電電流を 400A に調整しながら各測定点の温度を記録し、数時間後の定常状態における結果を確認した。この条件では、周囲温度 17.3°Cにおいて、各部の温度は①33.4°C、②44.1°C、③61.0°Cであるため、上昇温度は①16.1K、②26.8K、③43.7K である。このとき、磁性材料による正方形管の端部から、電力線に沿って 1m 離れた位置での電力線表面の温度は 44.4°Cであり、開孔率 0%の磁性材料を設置したことで、電力線表面の温度が 16.6K 多く上昇したことになる。

図 4-4 に、正方形管の開孔率にともなう上昇温度の違いを示す。③(電力線表面)において、開孔率 0%での 43.7K 上昇に対し、開孔率 20%で 34.4K、開孔率 50%で 31.9K と減少した。①(上面内側)や②(上面下部 25mm)においても同様に、開孔率の増大にともなう上昇温度の減少を確認できる。

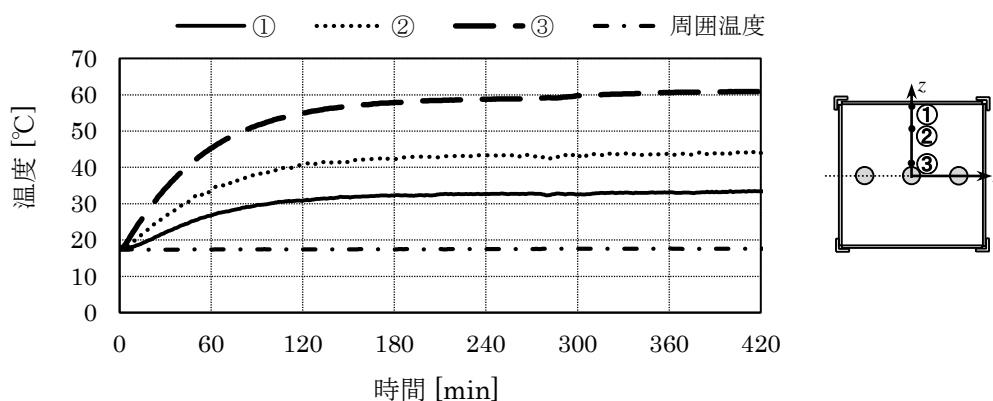


図 4-3 測定点温度の時間変化 (開孔率 0%)

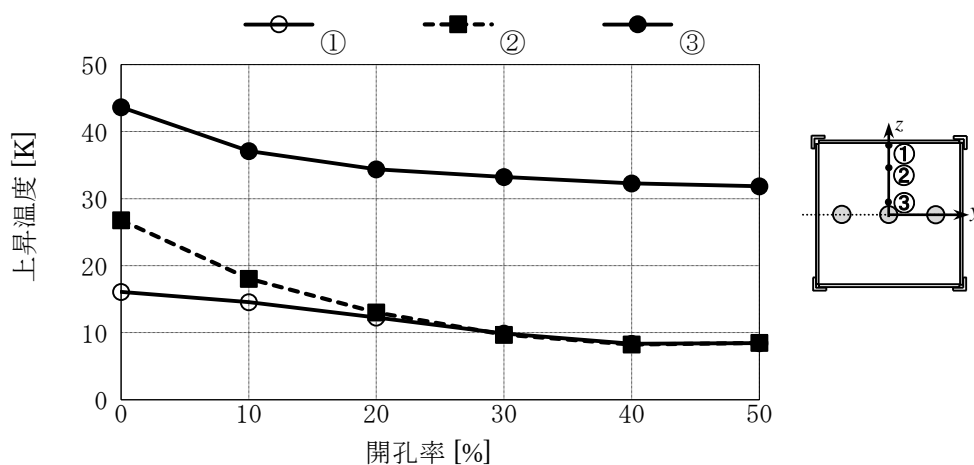


図 4-4 開孔率にともなう上昇温度の違い (実験)

(2)解析結果

有限長 1m モデルによる解析により，各開孔率における放熱効果を確認した。図 4-5 に，開孔率 0%での解析結果として，長さ方向の中央部 ( $x=0$ ) における定常状態での温度分布を示す。電力線付近から上部へ向かって熱が上昇し，正方形管上部で熱が留まるとともに，電力線の下部には正方形管に沿って熱が伝搬する様子が分かる。

また，図 4-2 でも示したとおり， $z$  軸上 ( $y=0$ ) における①上面内側，②上面下部 25mm，③電力線表面，④下面上部 25mm および⑤下面内側を基本的な温度検証点としており，③では 59.6°Cであり，その上昇温度は 39.6Kであった。

図 4-6 に長さ方向での温度分布を示す。正方形管 (PB パーマロイ) の表面では熱伝導がよく，正方形管の①(上面内側)や⑤(下面内側)においては，長さ方向でほぼ同じ温度であった。それに対し，②(上面下部 25mm)や③(電力線表面)においては，端部付近 ( $x$  座標 400mm ~500mm) で放熱による温度の低下があるが，中央部 ( $x$  座標 0mm ~400mm) の温度は  $x$  座標によらずほぼ同じである。この結果から，図 4-5 にも示した中央部 ( $x=0$ ) において，開孔条件による違いを検証することとした。

ここで，正方形管の有無における温度の違いを確認する。表 4-2 に，中央部 ( $x=0$ ) の位置①~⑤における正方形管が無い場合の温度，正方形管がある場合の温度および両者の温度差を示す。③(電力線表面)での温度は，正方形管が無い条件では 45.7°Cであり，正方形管を設けることで，さらに 13.9K 上昇する結果となった。

次に，開孔条件による違いを検証する。図 4-7 に，開孔率の大きさにともなう上昇温度の変化を示す。③(電力線表面)において，開孔率 0%での上昇温度が 39.6K であったのに対し，開孔率 20%で 30.5K，開孔率 50%で 27.4K と減少した。①(上面内側)や②(上面下部 25mm)においても，開孔率の増大にともない上昇温度が同様に減少していることを確認できる。

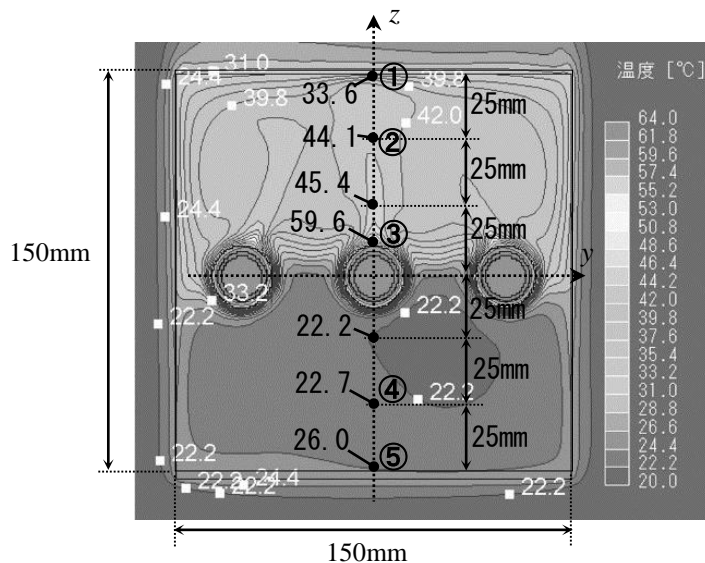


図 4-5 中央部における定常状態での温度分布

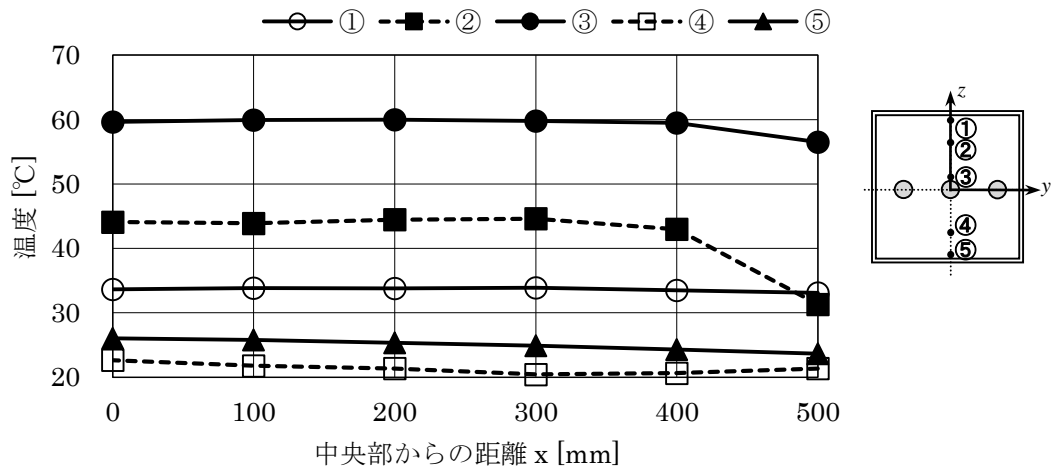


図 4-6 長さ方向での温度分布

表 4-2 正方形管の有無にともなう温度差

	温度 [°C]		温度差 [K]
	正方形管なし	正方形管あり (開孔率 0%)	
①	26.6	33.6	7.0
②	27.6	44.1	16.5
③	45.7	59.6	13.9
④	20.0	22.7	2.7
⑤	20.0	26.0	6.0

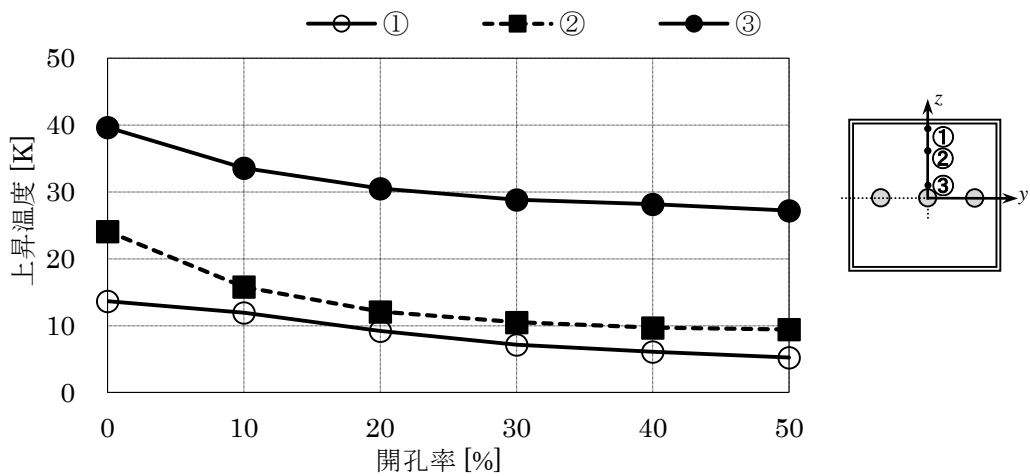


図 4-7 開孔率にともなう上昇温度の違い (計算)

(3) 実験および解析結果の関係

図 4-4 での実験結果および図 4-7 での解析結果を比較し、図 4-8 に両者の相関を示す。各位置での上昇温度および開孔率による変化について、実験結果と解析結果はほぼ同様の結果（相関係数 0.993）であり、本モデルでの解析により開孔にともなう放熱効果を十分に予測できることを示している。

実験および解析の結果から(4-1)式により放熱効果を算出し、図 4-9 に各開孔率における放熱効果を示す。開孔率の増大にともない放熱効果  $E_h$  は上昇し、実験結果の場合、開孔率 20%では 0.56、50%では 0.71 であった。なお、開孔率 10%での放熱効果は、実験結果と解析結果がほぼ一致しているが、開孔率の増大にともないその差が大きくなっている。その点において、開孔率が大きい場合、実験では支持材や固定材により塞がれる開孔数が増え、結果として設定した開孔率よりも低くなっていたためだと考えられる。

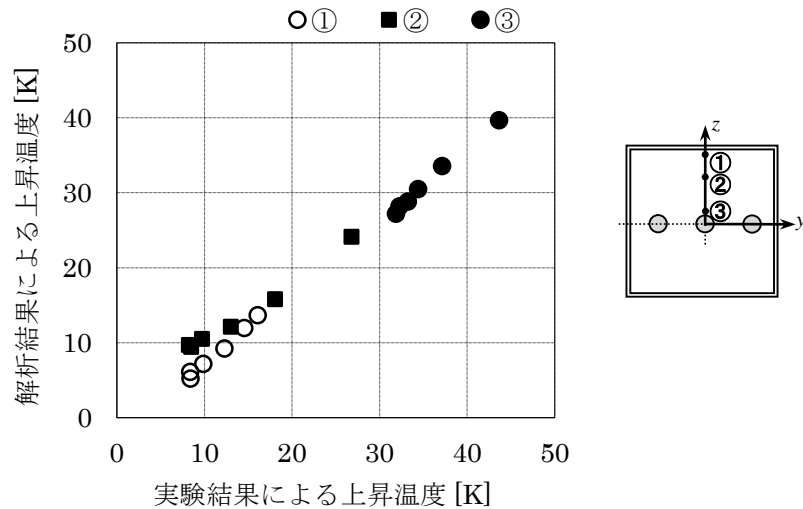


図 4-8 実験結果および解析結果の相関図

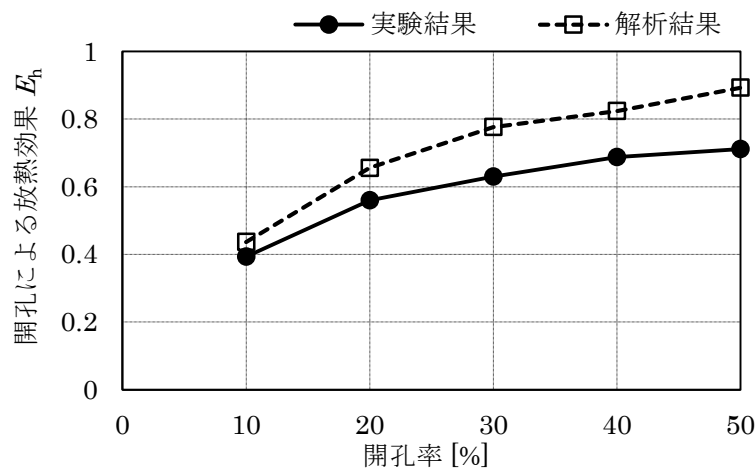


図 4-9 開孔率にともなう放熱効果

#### 4.4 まとめ

磁気遮蔽対策を施す際には放熱対策を検討することが重要であると考え、磁性材料への開孔を想定したときの放熱効果について、実験および解析により検討した。得られた結果を以下にまとめる。

(1) 磁性材料による長さ 1m の正方形管を用いた実験により、開孔にともなう放熱効果を検証した。電力線表面において、正方形管無しでは 27.1K 上昇であったのに対し、開孔率 0%の正方形管では 43.7K 上昇となった。しかし、その上昇温度は、開孔率 20%で 34.4K、開孔率 50%で 31.9K となり、開孔率の増大により正方形管無しでの結果に近づくことを確認した。

(2) 実験時と同様のモデルを用いた熱流体解析により、開孔にともなう放熱効果を検証した。解析結果においても、開孔率 0%での電力線表面の上昇温度が 39.6K であったのに対し、開孔率 20%で 30.5K、開孔率 50%で 27.4K と減少するなど、実験時と同様の結果が得られ、本モデルでの解析により各開孔率における放熱効果を十分に予測できることを確認した。

(3) 開孔にともなう放熱効果  $E_h$  (正方形管無しするとき  $E_h=1$ ) の式を定義し、実験結果および解析結果により、開孔率による放熱効果  $E_h$  の違いを確認した。開孔率 20%でも大きな放熱効果が得られ、50%ではさらに効果が高まるが、実際では  $E_h=1$  の条件は難しいことを明らかにした。開孔率が大きい条件で実験結果と解析結果の差が大きくなったが、同様の特性が得られることを確認した。





## 第5章 開孔材料による磁気遮蔽対策の検証

### 5.1 はじめに

### 5.2 検証モデル

- (1) 実験条件Ⅰ
- (2) 実験条件Ⅱ
- (3) 解析条件

### 5.3 開孔による磁気遮蔽効果への影響

- (1) 距離分布
- (2) 電流特性

### 5.4 開孔配列による比較

### 5.5 開孔条件による磁気遮蔽効果への影響

- (1) 開孔数が与える影響
- (2) 開孔配列が与える影響
- (3) 開孔径が与える影響

### 5.6 まとめ

### 参考文献



## 第5章 開孔材料による磁気遮蔽対策の検証

### 5.1 はじめに

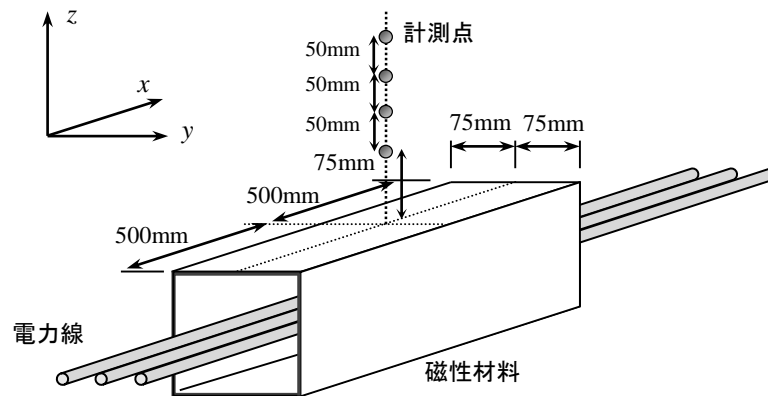
4章では、磁性材料への開孔を想定したときの放熱効果について検証し、開孔率20%でも大きな放熱効果が得られ、50%ではさらに効果が高まることを確認した。本章では、材料開孔にともなう磁気遮蔽効果について、種々の開孔条件により検証した。

## 5.2 検証モデル

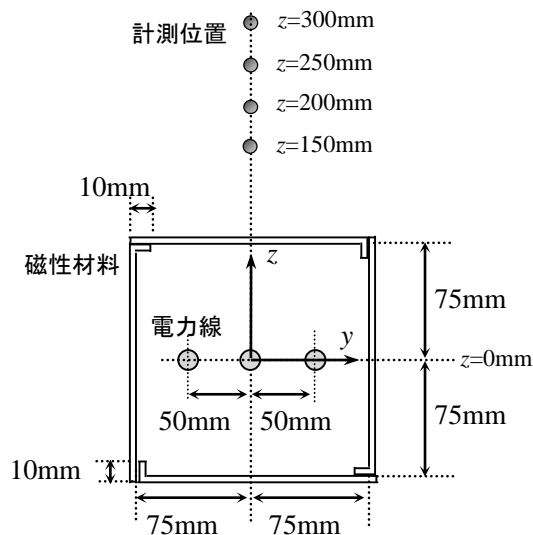
### (1) 実験条件 I

図 5-1 に、実験で使用した電力線および磁性材料の配置を示す。本実験では磁性材料の開孔による影響を確認することが目的であるため、磁性材料の長さは 1m とし、磁性材料に近い位置（電力線から 150mm~300mm）での計測評価とした。

材料の厚さについて、3 章では 0.2mm を標準として検討したが、0.2mm では開孔加工が難しい。そのため、材料の厚さを 0.5mm とした。また、1 辺 150mm の正方形管を形成するため、4 枚の幅 160mm の平板材料を熱処理後に L 字状に曲げ、角部で 10mm 重ねて点溶接により接続している。なお、磁性材の開孔は熱処理前の加工作業である。



(a) 配置全体



(b) 電力線，磁性材料，計測位置

図 5-1 実験モデル形状

表 5-1 に磁性材料の開孔配列および開孔間隔を示す。直径 5mm の円形による開孔とし、並列形の配列で開孔率 10%および 20%の材料を用意した。開孔率 10%のみで千鳥形の配列の材料を用意し、開孔配列による違いの有無を確認した。開孔率 10%のときは 13.1mm 間隔、開孔率 20%のときは 9.1mm 間隔である。

表 5-1 磁性材料の開孔配列および開孔間隔

	開孔率 10%	開孔率 20%
並列形開孔		
千鳥形開孔		

(2) 実験条件 II

様々な条件での磁気遮蔽効果の違いを確認するため、図 5-2 に示すモデルによる実験を実施した。磁性材料の長さは 1m とし、磁性材料に比較的近い位置（電力線から 150mm, 250mm, 500mm）での計測評価とした。厚さ 0.5mm, 幅 150mm の平板 4 枚および幅 10mm の L アンクル 4 本の PB パーマロイを組み合わせて、1 辺 150mm の正方形管形状の磁気遮蔽とした。なお、磁性材料の折り曲げおよび開孔は、熱処理前の加工作業である。

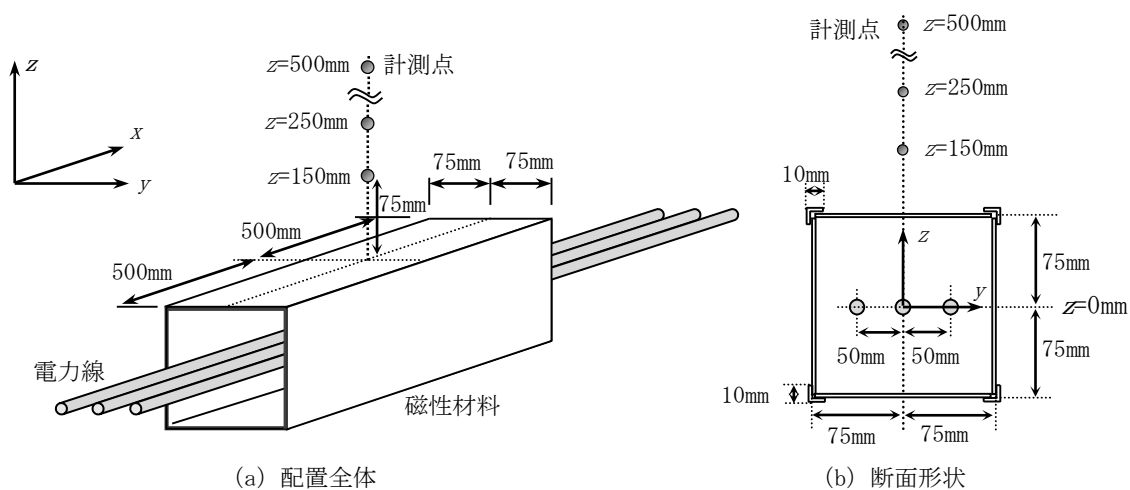
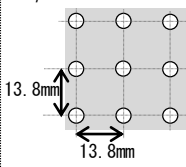
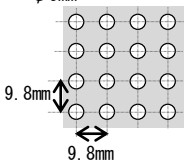
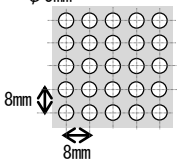
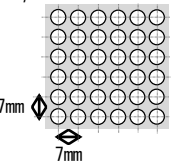
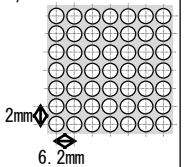
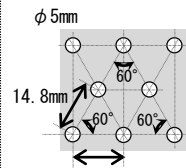
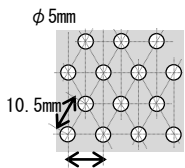
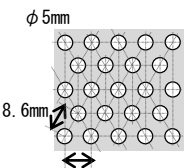
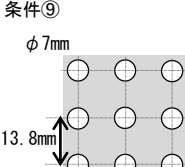
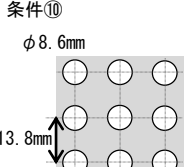


図 5-2 電力ケーブルおよび磁性材料の配置

表 5-2 に磁性材料の開孔条件を示す。直径 5mm の円形断面による開孔で、並列形で開孔率 10% の場合を標準条件とした。このとき、13.8mm 間隔の開孔で、各平板での開孔数は 710 個（幅方向 10 個×長さ方向 71 個）である。まず、基本条件と同じ並列形において、開孔数を増やす（開孔間隔を小さくする）ことにより開孔率 10%～50% の条件による違いを確認した。次に、千鳥形の配列の材料を用意し、同様に開孔数を増やして開孔率 10%～30% による実験により、開孔配列による違いの有無を確認した。また、各開孔の大きさを変更することで開孔率 20% および 30% の条件を用意し、開孔数変更時との違いの有無を確認した。

表 5-2 磁性材料の開孔条件

	開孔率 10%	開孔率 20%	開孔率 30%	開孔率 40%	開孔率 50%
並列形 (開孔数)	条件① [標準条件] $\phi 5\text{mm}$ 	条件② $\phi 5\text{mm}$ 	条件③ $\phi 5\text{mm}$ 	条件④ $\phi 5\text{mm}$ 	条件⑤ $\phi 5\text{mm}$ 
千鳥形 (開孔数)	条件⑥ $\phi 5\text{mm}$ 	条件⑦ $\phi 5\text{mm}$ 	条件⑧ $\phi 5\text{mm}$ 		
並列形 (開孔径)	条件① ( $\phi 5\text{mm}$ )	条件⑨ $\phi 7\text{mm}$ 	条件⑩ $\phi 8.6\text{mm}$ 		

(3)解析条件

図 5-3 に解析モデルを示す。実験条件 I による実験値の裏付けおよび考察を目的とした解析である。開孔周辺での磁場分布の検証が目的のため、解析領域を大きく設けず、 $y$  軸方向 1000mm、 $z$  軸方向 500mm の範囲とした。また、磁束密度の大きさを確認する評価位置について、実験条件 I と同じ位置とした。

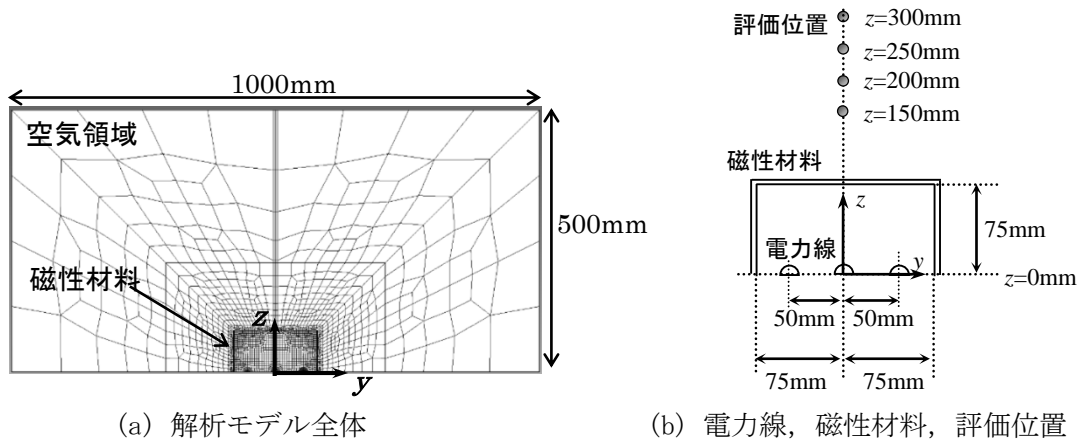


図 5-3 解析モデル形状

図 5-4 に解析モデルの開孔設定を示す。 $x$  方向で開孔間隔の 1 周期分のみをモデル化し、対称境界条件により、 $x$  方向で無限に開孔を繰り返す設定とした。並列形、開孔率 10% のとき、開孔間隔を 13.3mm とするだけでなく、 $x$  方向でも幅 13.3mm のモデル設定となる。また、千鳥形では、開孔部分の半分( $x$  方向)を  $x$  方向の両端にモデル化することにより、 $x$  方向で千鳥状の開孔を無限に繰り返す設定となる。

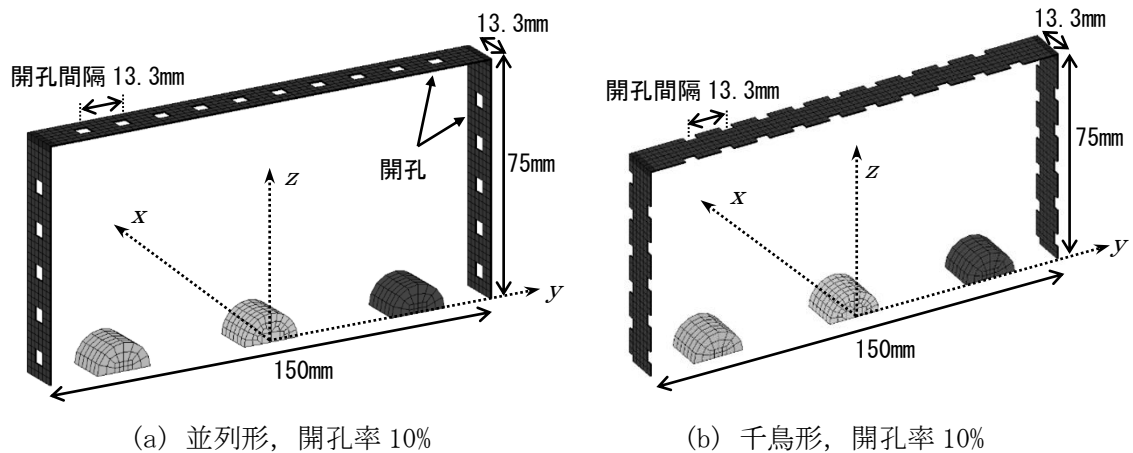


図 5-4 解析モデルの開孔設定

ここで、開孔の形状は1辺が約4.5mmの正方形とし、実験時と同様に、開孔数によって開孔率10%および20%に一致する合計開孔面積を確保している。 $y$ 方向と $z$ 方向において、開孔率10%では各辺10個、開孔率20%では各辺14個の開孔を設けた。開孔の形状を正方形としたのは、実験時と同じ円形開孔のモデル化が難しいためである。ただし、形状が異なっても開孔面積は同じであり除去した磁気モーメントの総和は等しい。また、形状による誤差は評価点までの距離と形状寸法差の比から与えられ<sup>[5-1]</sup>、磁性材料から評価点までの最小距離は75mmで、形状による寸法の違いは0.5mm(円直径と正方形1辺の差)のため、形状による誤差は約0.7%と小さい。そのため、正方形の開孔による解析でも問題はない。

図5-5に、解析用に設定したPBパーマロイの磁化曲線を示す。今回の実験条件Iで使用した材料の場合、折り曲げ加工による磁気性能の劣化が考えられ、実験材料の磁化曲線を測定しても、その特性値をそのまま使えない。図5-5の磁化曲線は、開孔なしの条件での計算値が実験値とほぼ一致するように設定した特性であり、開孔時の磁気遮蔽効果を確認するため、この磁化曲線を用いて解析した。平面部には、実線で示した飽和磁束密度1.25T、最大比透磁率35000の磁化曲線を設定した。また、角部の要素には、飽和磁束密度および最大比透磁率をさらに小さく設定することが必要と考え、点線で示した飽和磁束密度0.55T、最大比透磁率15000の磁化曲線を設定した。PBパーマロイにおいて、周波数60Hz、最大比透磁率35000の場合での表皮厚さは約0.27mmであるため、今回の解析では磁性材料を厚さ方向で3層に要素分割している。

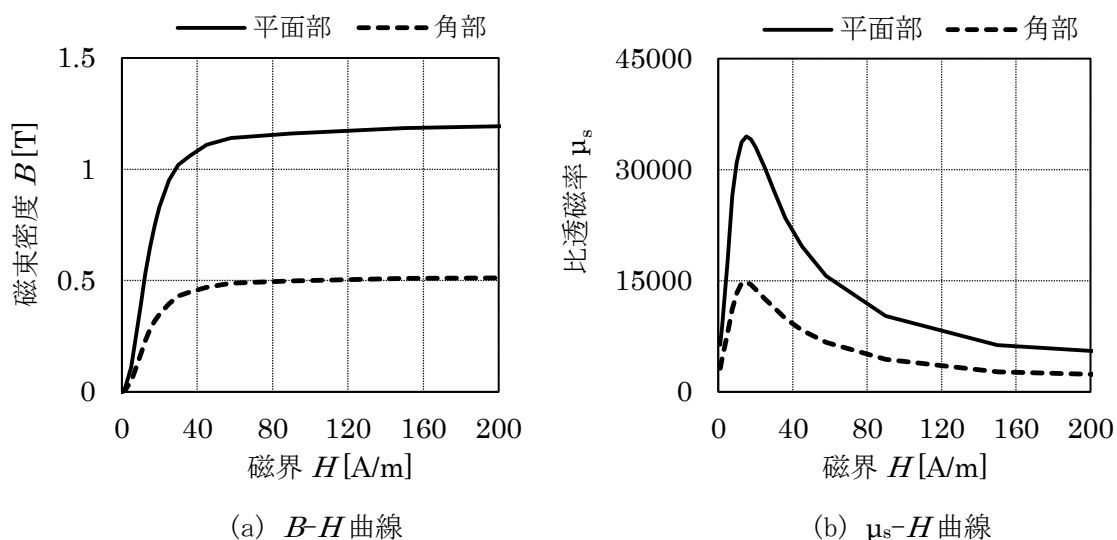


図5-5 PBパーマロイの磁化曲線(解析用)



### 5.3 開孔による磁気遮蔽効果への影響

#### (1) 距離分布

図 5-6 に、電流 100A のときの線路中心からの距離と磁束密度の関係を示す。遮蔽なしおよび遮蔽時において、実験値と計算値を合わせて示している。遮蔽により電力線からの漏洩磁界を大幅に低減できており、遮蔽なしの場合に比べて約 1/50 の磁束密度である。図 5-7 に示すとおり、実験値と計算値は、遮蔽有無のいずれにおいてもよく一致している。

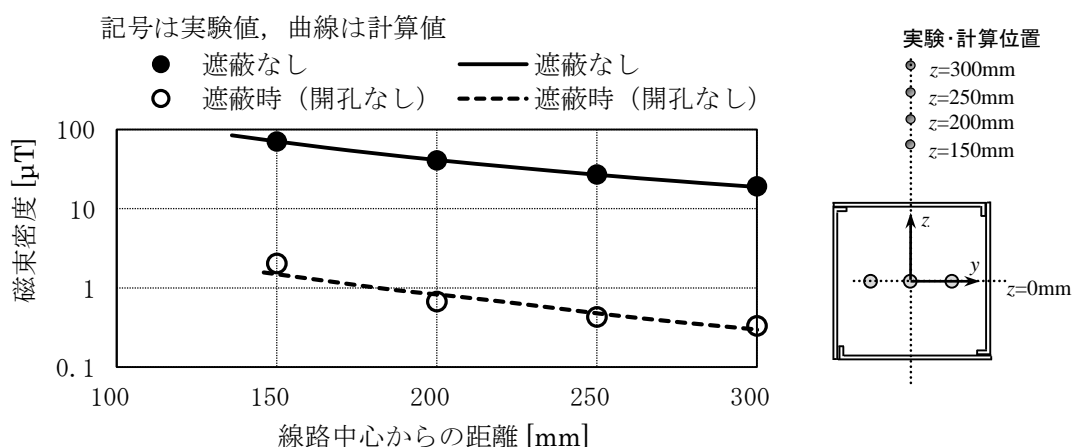


図 5-6 線路中心からの距離と磁束密度の関係（電流 100A）

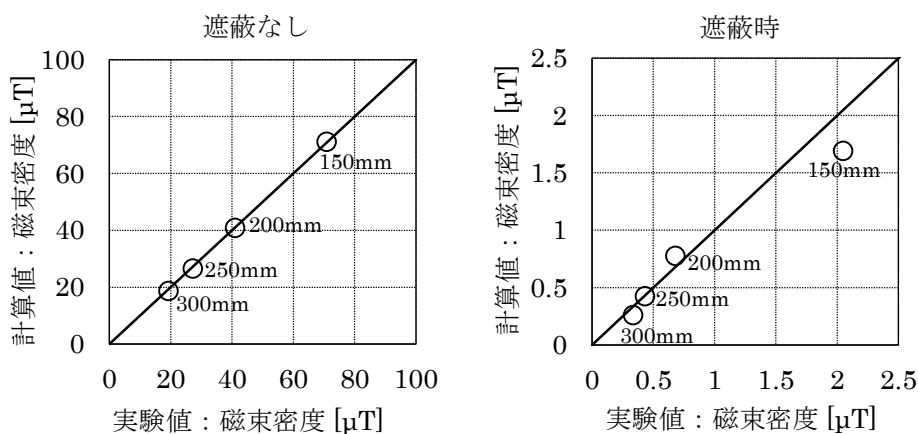


図 5-7 図 5-6 における実験値と計算値の比較

また、図 5-8 に、各開孔率における線路中心からの距離と磁気遮蔽効果の関係を示す。電流 100A の条件で、開孔の配列はいずれも並列形である。計測位置による磁気遮蔽効果の差が小さいことが分かる。図 5-9 に、計測位置ごとの開孔率と磁気遮蔽効果の関係を示す。実験値および計算値ともに、開孔率の変化に対する磁気遮蔽効果の変化の様子は一致している。実験値により、開孔なしの磁気遮蔽効果を基準とした開孔による低下幅を確認すると、開孔率 10%では 8~10、開孔率 20%では 16~21 であり、どの位置においても大幅な低下は見られず、安定して高い磁気遮蔽効果を確保できている。

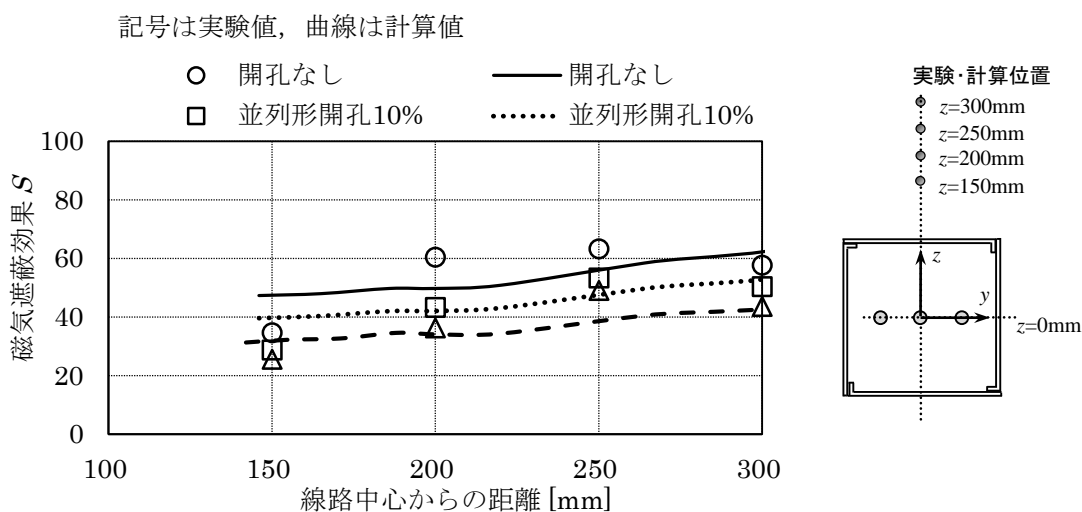


図 5-8 各開孔率における磁気遮蔽効果 (電流 100A)

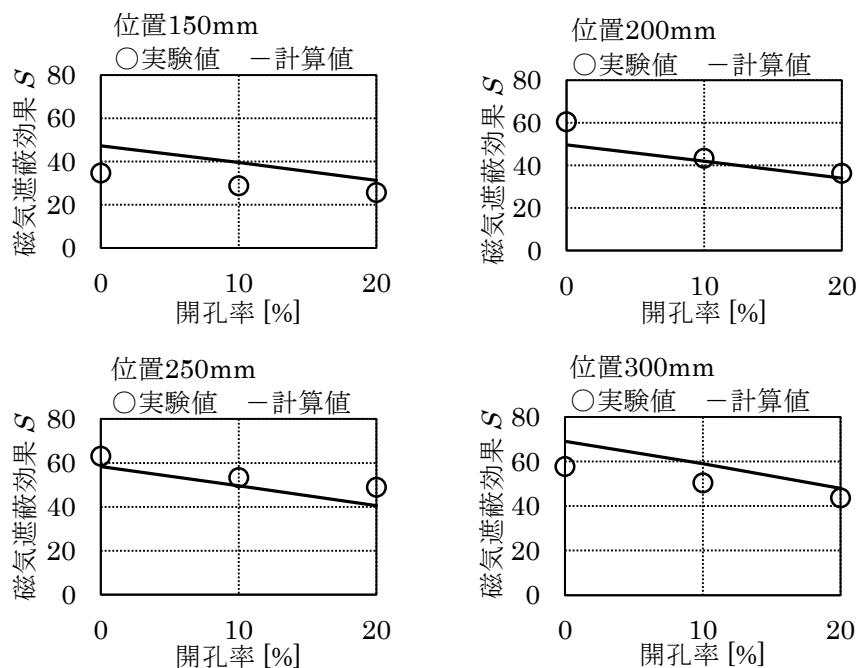


図 5-9 磁気遮蔽効果 (位置 150mm, 200mm, 250mm, 300mm)

ここでは、開孔率が大きい条件における磁気遮蔽効果の低下の様相について考察する。図 5-10 に、開孔率 20% で電流 100A のときの解析結果により得られた、磁性材料と開孔部の各要素における磁束密度ベクトルを示す。これは、開孔がない平面部に比べて、各開孔部分での漏洩磁界が大きいことを示している。

表 5-3 に、電流 100A のときの各開孔率における磁性材料内および開孔部（材料表面から約 1.5mm 外側）の磁束密度を示す。電流 100A の条件では、磁性材料内の磁束密度は 0.32T 以下である。図 5-5 で示される平面部に設定した磁化曲線では、磁界 20A/m (磁束密度 0.8T) 以上で曲線の傾きが減少し、比透磁率も低下し始める。それに比べて 0.32T 以下の場合、この比透磁率が低下する領域ではないため、材料内の性能としては余裕を持った状態である。

また、表 5-3 の右列のとおり、開孔部近傍での磁束密度は、開孔率 10% の 45.3 $\mu$ T に比べ 20% では 50.8 $\mu$ T と約 1 割大きい。これに加え、20% では開孔数が 2 倍になるため、開孔部全体からの漏洩磁界は開孔率にともない大きくなる。

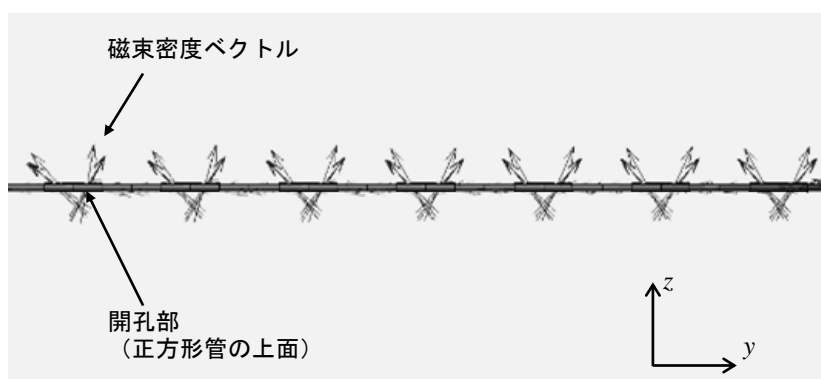


図 5-10 磁性材料周辺の磁束密度ベクトル（開孔率 20%，電流 100A）

表 5-3 各開孔率における磁性材料内および開孔部の磁束密度（電流 100A）

	磁性材料内（最大値）	開孔部（平均値）
	磁束密度 [T]	磁束密度 [ $\mu$ T]
開孔なし	0.23	
開孔率 10%	0.28	45.3
開孔率 20%	0.32	50.8

(2) 電流特性

実際に建物内の電力線に流れる電流は、各回路の使用状態により大きく変化し、それにもない漏洩磁界も変化する。また、例えば図 5-5 に示すように、磁性材料の透磁率は非線形であり磁界の大きさにより異なるため、広い電流範囲で磁気遮蔽効果を確認しておくことは重要である。そのため、磁性材料に比較的近い  $z=150\text{mm}$  の位置において、三相電流の大きさによる磁気遮蔽効果の違いを確認した。

図 5-11 に、開孔なしの遮蔽において、電力線電流と磁気遮蔽効果の関係を示す。実験値および計算値ともに、電流 600A までの磁気遮蔽効果は高くなり、600A を超えると急激に低下する特性となった。なお計算時には、図 5-5 に点線で示すとおり、磁性材料要素のうち角部の飽和磁束密度を低くした「角部設定あり」の磁化曲線を設定している。図 5-11 には、全て平面部用の磁化曲線で計算した「角部設定なし」のときの計算値も参考として点線で示したが、電流 600A 以上では実験値との違いが大きい。それに対し、実線で示した「角部設定あり」では実験値と同様の特性を示しており、熱処理後に折り曲げ加工があった場合など、部分的な磁気特性の低下を考慮したいときに有効な解析方法と言える。

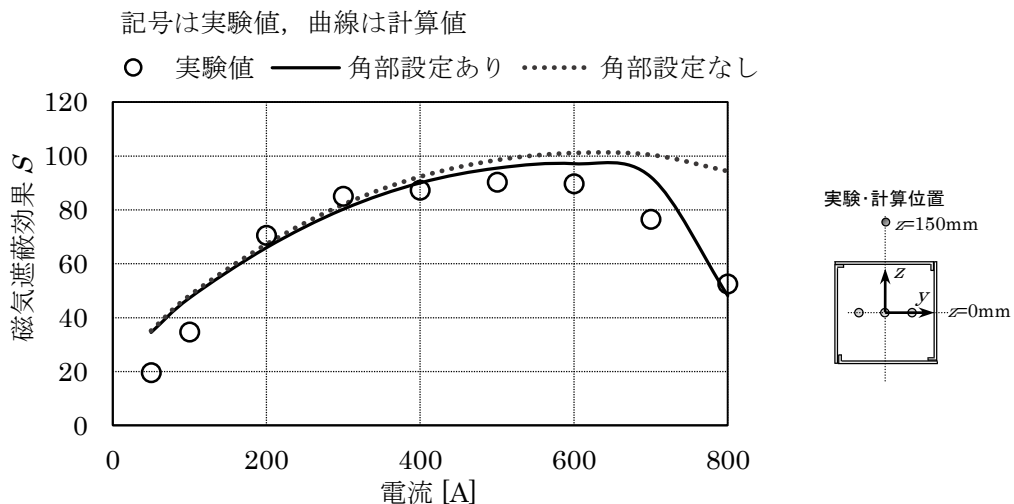


図 5-11 磁気遮蔽効果の電流特性（開孔なし，位置  $z=0.15\text{m}$ ）

図 5-12 に、各開孔率における電力線電流と磁気遮蔽効果の関係を示す。位置  $z=0.15\text{m}$ ，開孔配列は並列形で、実験値および計算値により示している。全体として、開孔なしの場合に比べて開孔がある場合には磁気遮蔽効果が低く、開孔率が大きいほど低くなっている。

図 5-13 に、電流条件ごとの開孔率と磁気遮蔽効果の関係を示す。実験値および計算値ともに、開孔率の変化に対する磁気遮蔽効果の変化の様子は一致している。実験値での磁気遮蔽効果の最大値は、開孔なしでの 90（電流 500A）に対し、開孔率 10%で 72（電流 500A），開孔率 20%で 51（電流 300A）であり、開孔率 20%においても、開孔なしの場合に比べて半分以上の磁気遮蔽効果を確保できている。

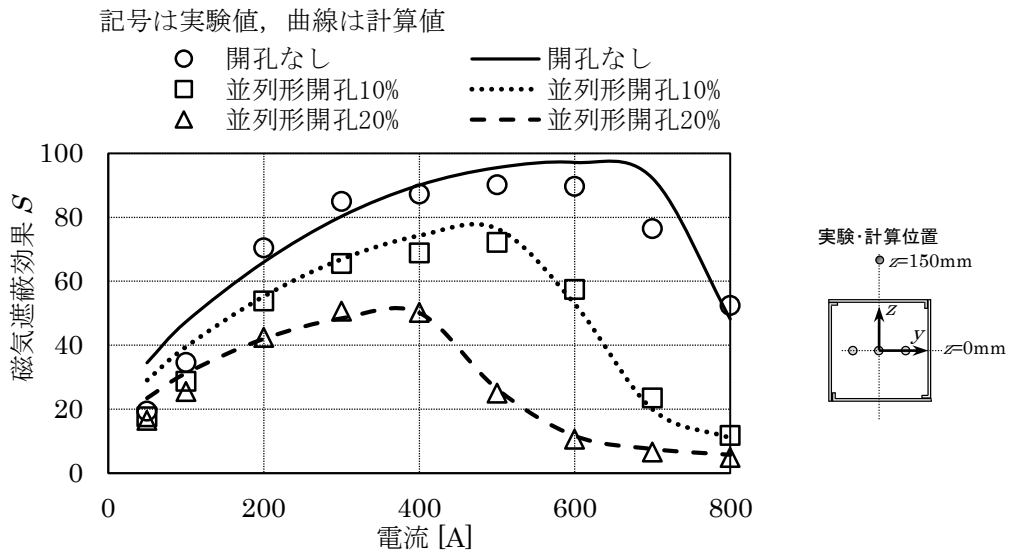


図 5-12 各開孔率における磁気遮蔽効果の電流特性 (位置  $z=0.15\text{m}$ )

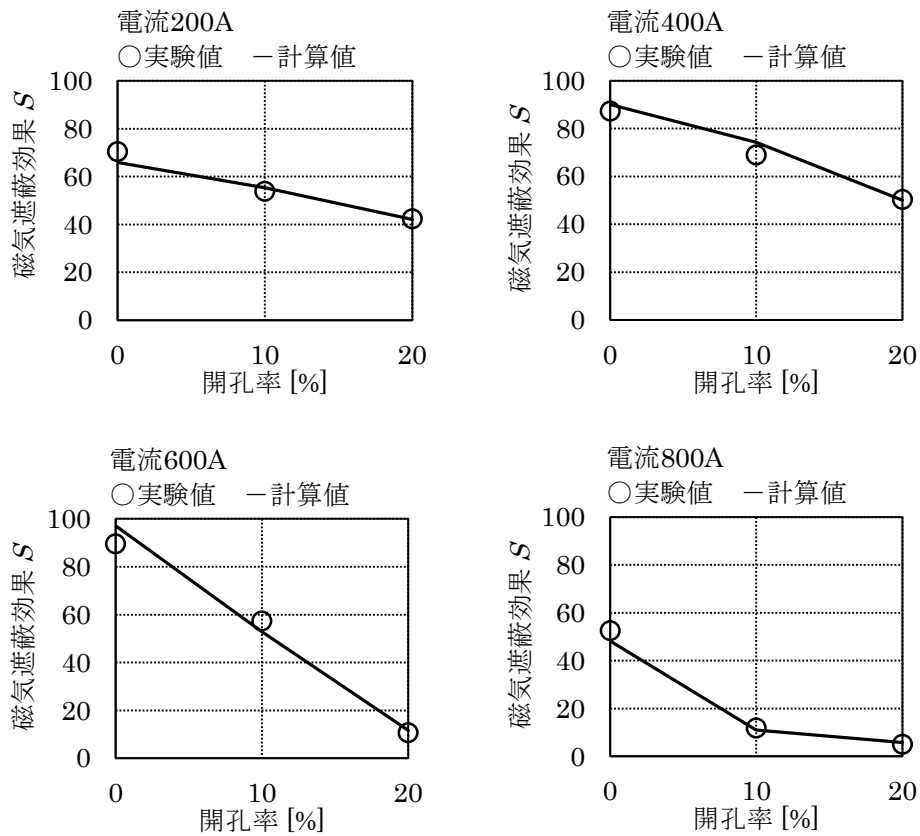


図 5-13 磁気遮蔽効果 (電流 200A, 400A, 600A, 800A)

各開孔率における磁気遮蔽効果は、開孔なしのときに 600A 以上の電流条件で低下するのに対し、開孔率 10%では 500A、開孔率 20%では 400A と小さい電流条件で低下している。この磁気遮蔽効果の低下の要因について考察するため、表 5-4 に電流条件 300A～600A の解析結果から、各開孔率における磁性材料内の最大磁束密度を示す。磁性材料内での磁束密度について、例えば電流 300A では開孔なしで 0.73T、開孔率 10%で 0.79T、開孔率 20%で 0.85T であり、開孔率の増加にともない磁性材料内での磁束密度が増加することが示されている。これは、磁性材料の開孔数が増えると、磁束が通過できる断面積が減少するためである。

PB パーマロイの磁化曲線は、図 5-5 に示したように 1.0T 付近の磁束密度において透磁率が大きく低下し始める特性であるが、表 5-4 から開孔なしでは 600A、開孔率 10%では 500A、開孔率 20%では 400A のときに約 1.0T であり、これらは図 5-12 で磁気遮蔽効果が低下した電流条件とよく一致する。

この結果より、漏洩磁界が大きい条件では、磁性材料の断面積に余裕をもたせて材料内の磁束密度を減少すれば、磁気遮蔽効果の低下を抑制できる。電流が大きく漏洩磁界が大きい条件において、開孔材料を用いることで透磁率が低下する際には、厚さの大きい材料の選定により断面積を増やす方法が有効である。

表 5-4 各開孔率における磁性材料内の最大磁束密度

電流	磁性材料内の最大磁束密度 [T]			
	300A	400A	500A	600A
開孔なし	0.73	0.90	0.98	1.02
開孔率 10%	0.79	0.94	1.01	1.13
開孔率 20%	0.85	1.02	1.14	1.18

#### 5.4 開孔配列による比較

図 5-14 に、開孔配列が異なる条件での線路中心からの距離と磁気遮蔽効果の関係を示す。これは、電流 100A で開孔率 10%の条件で、並列形と千鳥形での違いを確認したものである。全ての位置において、開孔配列による磁気遮蔽効果の差は 15%以内であり、開孔配列による影響が小さいことを確認した。

図 5-15 に、開孔配列が異なる条件での電力線電流と磁気遮蔽効果の関係を示す。位置  $z=0.15\text{m}$ 、開孔率 10%の条件で、並列形と千鳥形での違いを確認したものである。広い電流範囲において、両者の磁気遮蔽効果に大きな違いが見られないことを確認した。ただし、600A 以上の電流が大きい条件において、千鳥形開孔での磁気遮蔽効果が高い傾向が見られる。この違いの要因について以下で考察する。

表 5-5 に開孔配列による開孔間隔の違いを示す。実験時および解析時では形状および開孔寸法に違いがあるが、いずれにおいても、並列形に比べて千鳥形での開孔ではその間隔が大きくなる。そのため、磁性材料内で磁束が通過できる断面積に違いが生じ、実験時の場合、並列形では最小  $4.1\text{mm}^2$  に対し、千鳥形では  $4.9\text{mm}^2$  になる。材料の断面積が小さい条件で磁気遮蔽効果の低下幅が大きくなるのは、前述の開孔率による違いと同様である。なお、開孔配列の違いによる開孔間隔の比は実験時では 1.19、解析時では 1.03 である。そのため、解析時に比べて実験時において、開孔配列による磁気遮蔽効果の低下幅が大きくなったと考えられる。

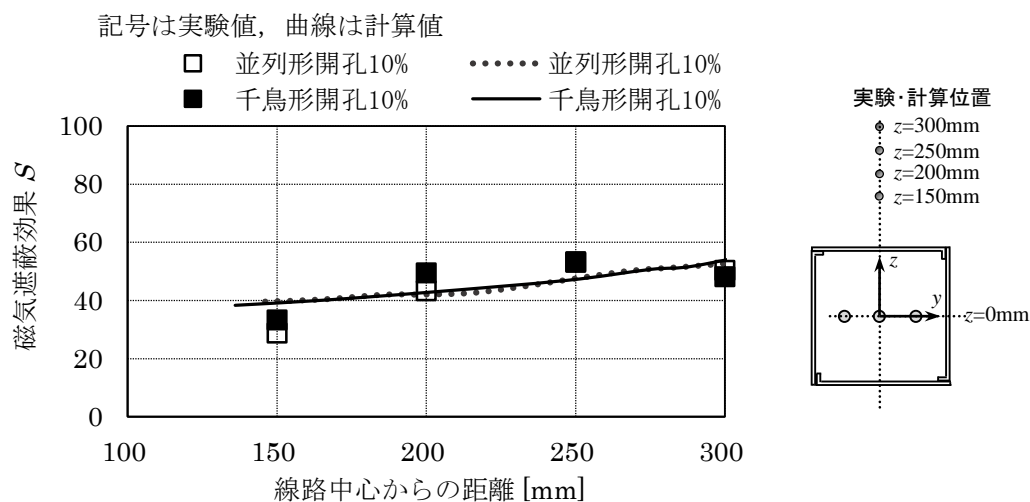


図 5-14 開孔配列が異なる条件での磁気遮蔽効果 (電流 100A)

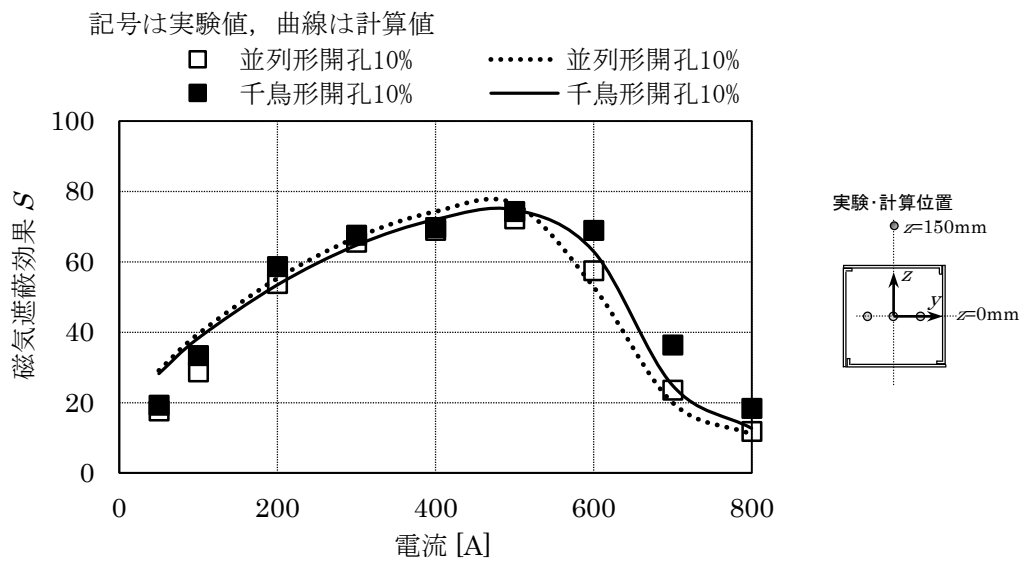


図 5-15 磁気遮蔽効果の電流特性 (位置  $z=0.15\text{m}$ )

表 5-5 開孔配列による開孔間隔の違い

	実験時	解析時
並列形開孔	 8.1mm	 8.8mm
千鳥形開孔	 9.7mm	 9.1mm



### 5.5 開孔条件による磁気遮蔽効果への影響

開孔材料を活用した磁気遮蔽対策の設計のため、様々な条件での遮蔽効果の違いを整理する必要がある。5.2(2)で示した実験条件Ⅱにより、開孔条件による違いを比較した。

#### (1) 開孔数が与える影響

表 5-2 の上段のように開孔数を増やして開孔率を変化させた場合において、図 5-16 に電力線電流と磁気遮蔽効果の関係を示す。計測位置および電流条件に関わらず、開孔数が多い条件ほど磁気遮蔽効果が低いことがわかる。例えば開孔率 10%のときに電流 500A 以上で現れる、大きい電流条件による磁気遮蔽効果の低下は、磁性材料の磁気飽和によるものだが、開孔率が大きい条件ほど、より小さい電流条件で大幅に低下していることがわかる。

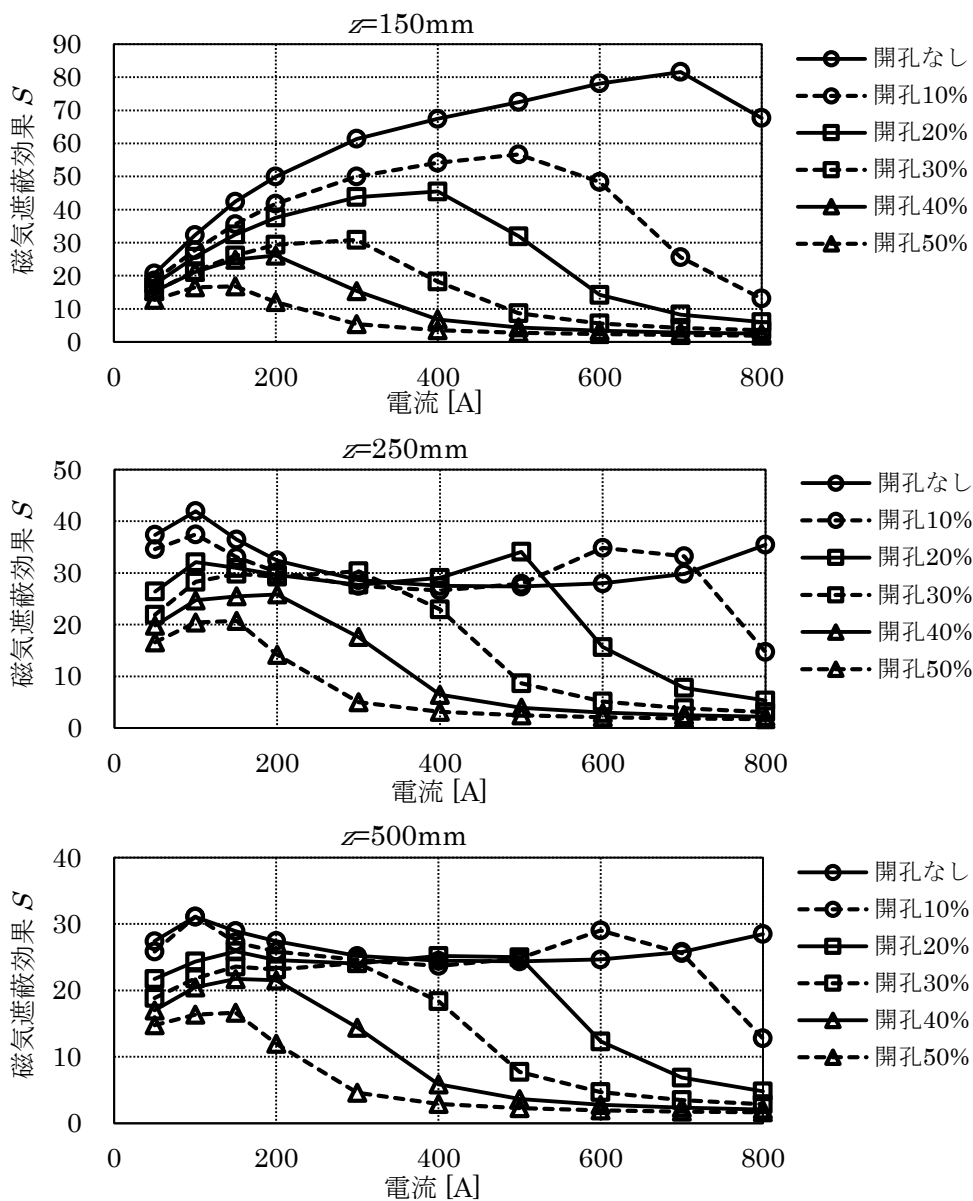


図 5-16 磁気遮蔽効果の開孔率による違い（並列形）

(2) 開孔配列が与える影響

表 5-2 の開孔率 10～30%での上・中段のように，開孔数を等しくして開孔配列を変化させた場合において，図 5-17 に電力線電流と磁気遮蔽効果の関係を示す。全体的に開孔配列による違いはほとんど無いが，例えば開孔率 30%，電流 400A のように開孔率および電流が大きい条件では，並列形よりも千鳥形での磁気遮蔽効果が大きく，配列による違いが見られる。この傾向に関し，いずれの位置においても，開孔率 10%に比べて 20%および 30%の条件で明らかである。表 5-3 で示したように，並列形に比べて，千鳥形では隣接する開孔間がわずかに広く磁束が通りやすい条件になるが，その開孔間の差は開孔率が大きい条件ほど大きく，その影響が出ていると考えられる。

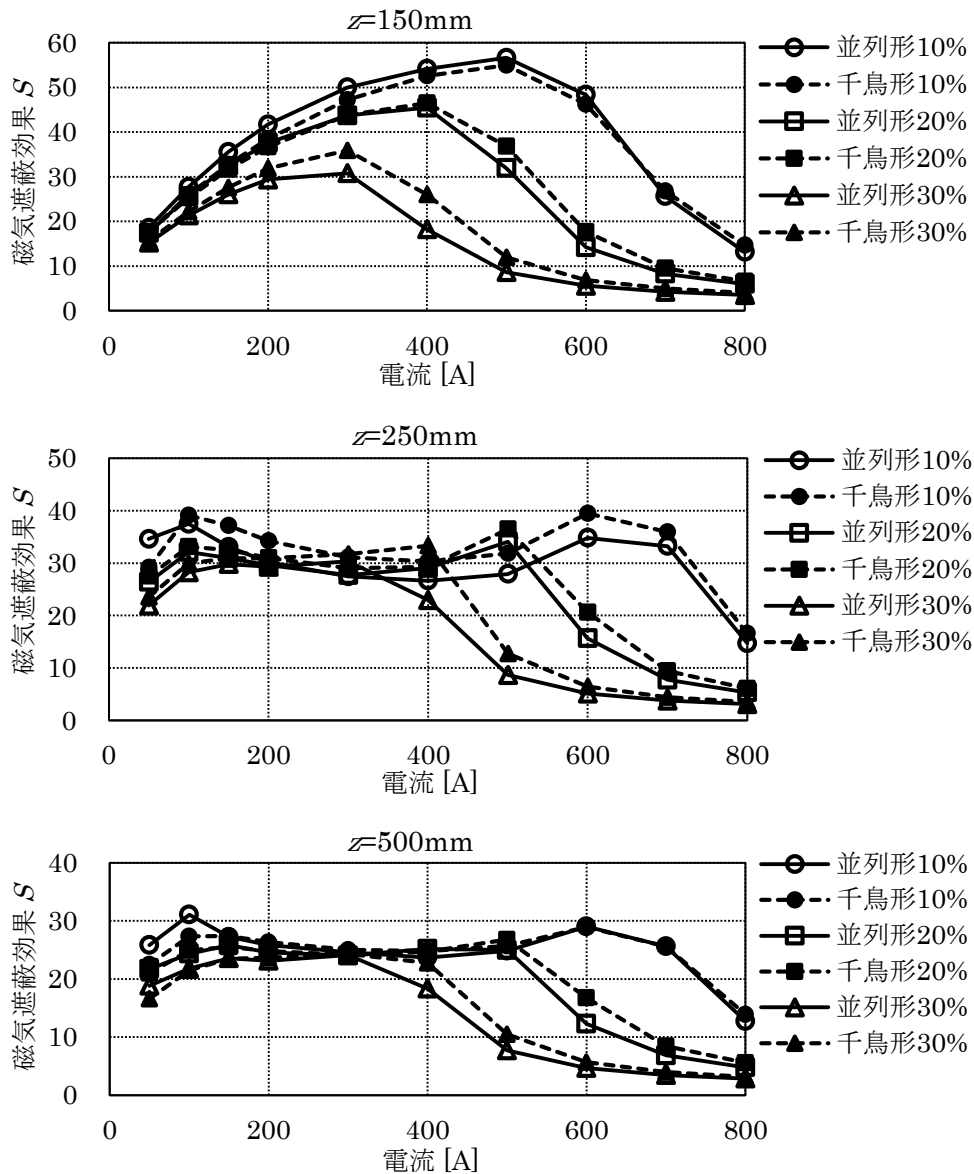


図 5-17 磁気遮蔽効果の開孔配列による違い

### (3) 開孔径が与える影響

表 5-2 の下段のように開孔径を大きくして開孔率を変化させた場合において、図 5-18 に電力線電流と磁気遮蔽効果の関係を示す。開孔数を増やした場合との比較である。全体的な傾向として、電力線に近い計測位置 ( $z$ 座標 150mm) では開孔径を変更した条件のほうで磁気遮蔽効果が低いですが、電力線から遠い計測位置 ( $z$ 座標 500mm) では両者の差が非常に小さいことがわかる。

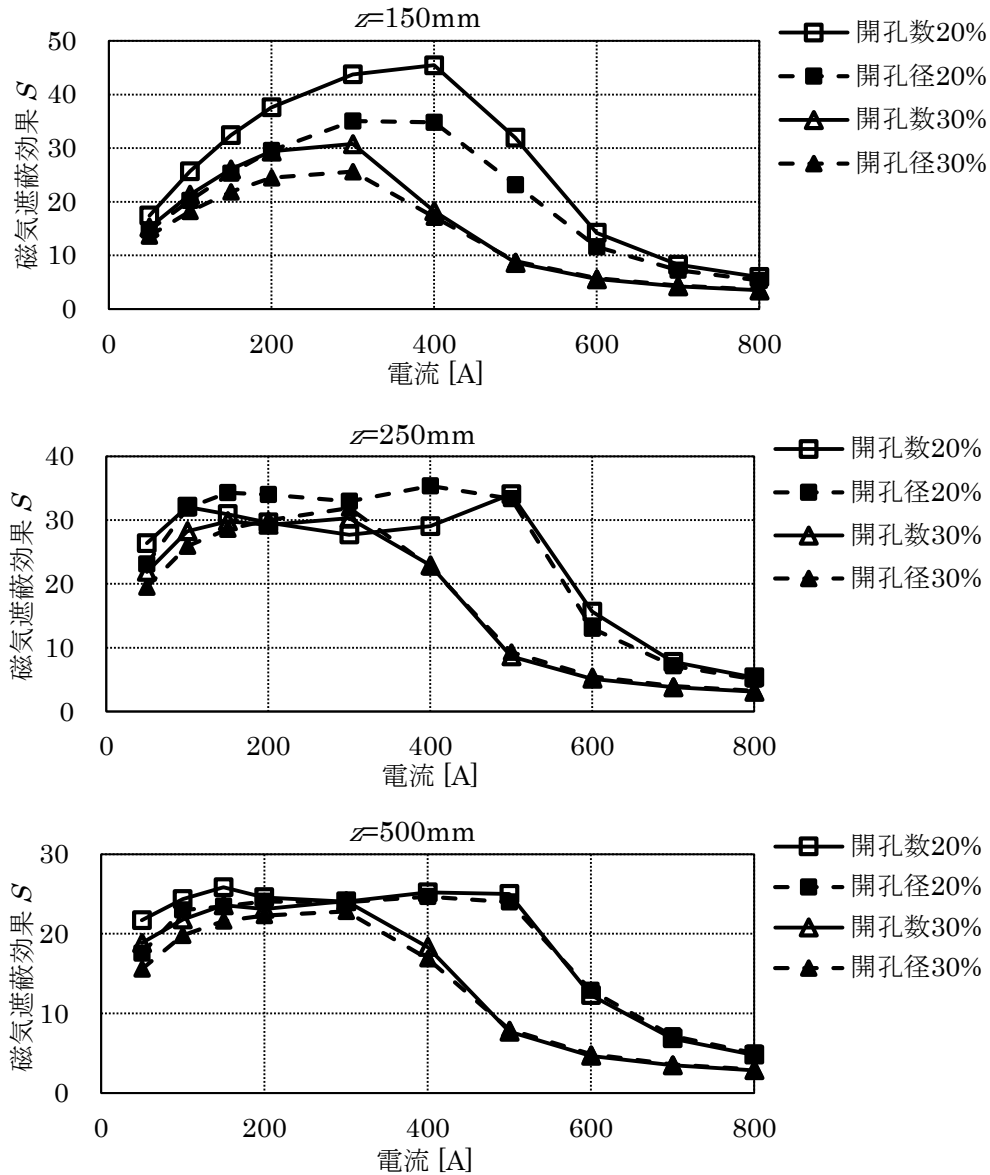


図 5-18 磁気遮蔽効果の開孔径による影響

## 5.6 まとめ

電力線周辺での放熱を考慮した開孔タイプの磁気遮蔽方法について、実験および解析により検証した。さらに、各種開孔条件による違いを示すことで、開孔タイプでの磁気遮蔽方法の設計に向けての基本的な考え方を示した。得られた結果を以下にまとめる。

(1) 開孔率が大きい条件ほど磁気遮蔽効果が低下するが、線路中心からの距離に関わらず、開孔率 20%においても高い磁気遮蔽効果を確保できることを示した。しかし、開孔率が 30%以上の条件では、開孔無しの条件に比べて、広い電流範囲において磁気遮蔽効果が半分以下となった。磁性材料の種類や厚さにより効果の大きさや特性は異なるが、0.5mm の PB パーマロイでは開孔率 20%以下の材料による磁気遮蔽が良いことが確認された。

(2) 磁気遮蔽効果における電流特性を確認することで、磁性材料の開孔による漏洩磁界の影響に加え、大電流により大きな漏洩磁界となる条件では、開孔率の増加にともない、より小さい電流条件で磁気遮蔽効果が低下することを示した。その考察により、各条件における磁性材料内外での磁束密度を比較し、その違いから磁気遮蔽効果の低下の要因が明らかになった。

(3) 並列形と千鳥形での異なる開孔配列による違いを確認し、その考察では磁束が通過できる断面積における開孔配列による違いを説明した。全体的には開孔配列による遮蔽効果の差は小さい。ただし、特に開孔率が大きい条件において、漏洩磁界が大きくなる条件では千鳥形での遮蔽効果のほうが良い結果が得られた。開孔材料を用いる際、開孔配列を考慮する必要はないものとするが、使用条件によっては千鳥形を選択したほうが有利になることが明らかになった。

(4) 開孔位置を固定して各開孔径を大きくした材料を用意し、開孔数を増やす条件との違いを確認した。電力線の近傍では、同じ開孔率でも開孔径を大きくする方法での磁気遮蔽効果が低下する結果となった。そのため、電力線近傍を対象とした磁気遮蔽であれば、小径の開孔数を多く配置する方法を選択したほうがよい。しかし、開孔径の大きさに比べて十分に遠方を対象とした一般的な磁気遮蔽の場合には、開孔径の影響を考慮せずに設計できることが明らかになった。

## 参考文献

[5-1] Jackson, J.D.: ジャクソン電磁気学 (上) 原書第 2 版 (西田稔 訳), 吉岡書店, 1995

## 第6章 開孔にともなう放熱効果と磁気遮蔽効果の関係

### 6.1 はじめに

### 6.2 開孔にともなう磁気遮蔽効果の保持比

### 6.3 放熱効果と磁気遮蔽効果の関係

### 6.4 まとめ



## 第6章 開孔にともなう放熱効果と磁気遮蔽効果の関係

### 6.1 はじめに

磁気遮蔽時に要求される性能は案件ごとに異なる。元々の設置環境や目標値により、放熱効果を重視する場合と、逆に磁気遮蔽効果を重視する場合があると考えられる。そのため、4章で得られた放熱効果に対し、5章で得られた磁気遮蔽効果の関連性を確認するため、開孔にともなう両者の比較を実施することとした。

## 6.2 開孔にともなう磁気遮蔽効果の保持比

開孔率と磁気遮蔽効果  $S$  の関係については、5章で詳しく述べた。しかし、そこで示した特性の表示では、磁性材料による正方形管が持つ本来の磁気遮蔽効果が、開孔によりどの程度低下したのか分かりにくい。そのため、式(6.1)により、開孔率にともなう磁気遮蔽効果の保持比  $E_s$  を定義する。これは、開孔無しにおける磁気遮蔽効果  $S_n$  を基準とし、開孔時に遮蔽効果が低下せずに保持できる度合いを示すものである。

$$\text{磁気遮蔽効果の保持比 } E_s = \frac{\text{開孔時における磁気遮蔽効果 } S_1}{\text{開孔無しにおける磁気遮蔽効果 } S_n} \quad (6-1)$$

開孔率と磁気遮蔽効果の関係を示した5章のうち、幅広い開孔率の条件について検証した図5-16の実験データ ( $z$ 座標 150mm) を用い、各開孔率における磁気遮蔽効果の保持比を(6-1)式により算出したものを図6-1に示す。電流条件ごとの「開孔無しにおける磁気遮蔽効果  $S_n$ 」をもとに、磁気遮蔽効果の保持比 ( $E_s$ ) を算出している。例えば遮蔽効果が半減 (保持比 0.5) までを設計条件とした場合、電流 400A による漏洩磁界の条件では、開孔率 20% であれば条件を満たすが、開孔率 30% では条件を満たさないことを示している。

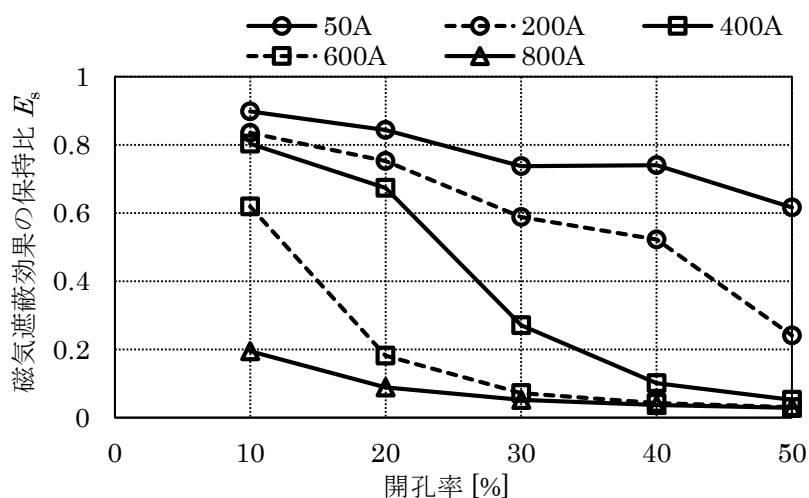


図 6-1 磁気遮蔽効果の開孔径による影響



### 6.3 放熱効果と磁気遮蔽効果の関係

開孔条件にともなう放熱効果と磁気遮蔽効果の関係を整理するため、実験により得られたデータとして、4章で得られた放熱効果  $E_h$  (図 4-9) および図 6-1 に示した磁気遮蔽効果の保持比  $E_s$  を用いる。図 6-2 に、開孔率にともなう放熱効果と磁気遮蔽効果保持比の関係を示す。磁気遮蔽効果には、代表として電流 200A および 400A の条件を選定して示した。例えば、放熱効果  $E_h$  および磁気遮蔽効果の保持比  $E_s$  の設計条件をともに 0.5 以上とした場合、磁性材料の開孔率として 20%を選定することになる。開孔率を 30%にすると、電流が大きく漏洩磁界が大きい条件のときに設計条件を満たさない。

次に、図 6-3 に解析値による放熱効果と磁気遮蔽効果の関係を示す。図 6-2 と同様の傾向を示している。なお、図 6-3 の磁気遮蔽効果保持比のデータとして、参考までに図 5-12 で示した無限長モデルでの解析結果 (開孔率 10%および 20%) を用いた。

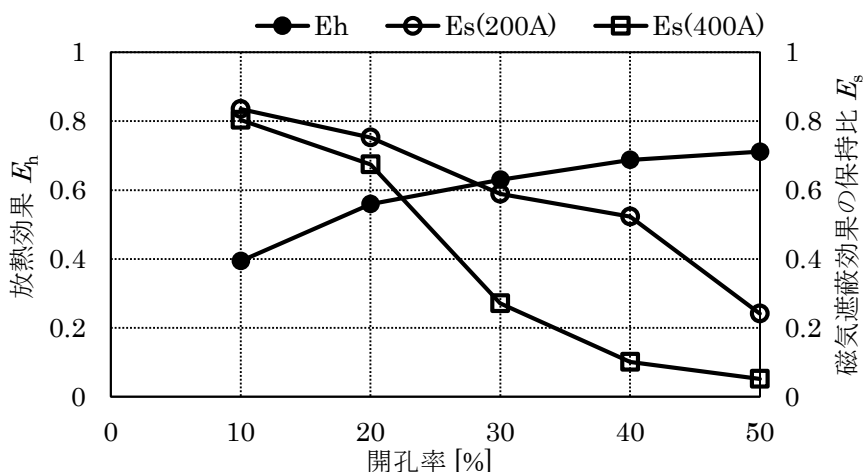


図 6-2 開孔率にともなう放熱効果と磁気遮蔽効果保持比の関係 (実験)

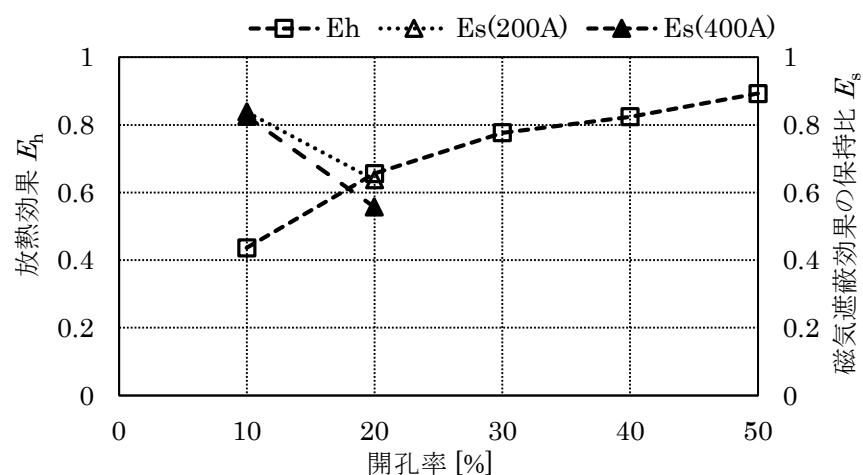


図 6-3 開孔率にともなう放熱効果と磁気遮蔽効果保持比の関係 (解析)

ここで、放熱効果および磁気遮蔽効果の優先順序は、検討案件ごとに異なる。片方の効果を優先する開孔条件を選択することで、他方の効果が不足になる場合がある。このとき、不足分を補う方法が重要となり、図 6-3 により具体的に解説する。磁気遮蔽効果の保持比 0.8 が最優先の場合、開孔率は 10%以下を選定することになるが、放熱効果が不足するときは、電力線の導体断面積を大きくし、許容電流に余裕を持たせる対策が必要となる<sup>[6-1]~[6-3]</sup>。また、放熱効果 0.7 が最優先の場合、開孔率は 50%以上を選定することになるが、磁気遮蔽効果が不足するときは、3章で示したとおり、磁性材料の厚さや層数を増やすことで、遮蔽効果の低下を防ぐことができる。

#### 6.4 まとめ

放熱効果および磁気遮蔽効果の関連性を確認するため、開孔にともなう両者のデータ比較を実施した。得られた結果を以下にまとめる。

(1) 開孔無しの条件での磁気遮蔽効果を 1 とし、開孔率にともなう磁気遮蔽効果の保持比  $E_s$  を定義することで、開孔による磁気遮蔽効果の低下度合いを分かりやすく示した。

(2) 開孔にともなう放熱効果  $E_h$  および磁気遮蔽効果の保持比  $E_s$  を 1 つの図内に整理することで、両者の関係を分かりやすく示した。放熱効果および磁気遮蔽効果における優先順序は検討案件により異なり、開孔材料を用いた磁気遮蔽の設計時に開孔条件を選定する方法につながると考える。

#### 参考文献

[6-1] 日本電線工業会：JCS 0168-1 日本電線工業会規格 33kV 以下電力ケーブルの許容電流計算－第 1 部 計算式および定数，2004

[6-2] 長谷部守邦：導体の温度上昇と許容電流，電気設備学会誌，Vol.16，No.7，pp.690-694，1996.7

[6-3] 山田正治：許容電流，電設技術，Vol.62，No.3，pp.34-38，2016.3



## 第 7 章 結論



## 第7章 結論

本章では、各章における内容を総括し、本研究の成果をまとめ、全体の結論とする。

第1章では、まず建物内での磁気環境における検討課題を示したうえで、本研究の目的について述べた。次に、既往の研究内容を説明したうえで、本論文での研究内容の位置付けを示した。また、本論文の内容に関連する基礎的事項の概要を説明した。

第2章では、まず本論文での研究における検討モデルの範囲や形状について示し、本論文の構成を示すことで研究計画を説明した。次に、本研究で用いた実験装置、計測器および数値計算で用いた2次元解析モデルについて、基本的な内容を説明した。

第3章では、電力線周辺での磁気遮蔽対策において、角筒形状の磁気遮蔽方法の有効性を明らかにすることを目的として、実験および解析により研究を進めた。さらに、各種条件による遮蔽効果の違いを示すことで、遮蔽効果が大きいより有効な条件を検証した。

距離減衰特性としては広い範囲で高い磁気遮蔽効果を得られたが、電流特性としては使用する材料の磁気飽和などの磁気特性により、高い磁気遮蔽効果を得られる有効な電流範囲が限定されることを確認した。また、材料の厚さや層数を変えたときの磁気遮蔽効果の違いについて検証し、厚さおよび層数のいずれが大きい材料でも大電流時に高い磁気遮蔽効果を確認できるが、多層時のほうが有効であることを確認し、角筒形の磁気遮蔽においても、円筒モデルによる基本理論式と同様の傾向が得られることを示せた。

第4章では、磁気遮蔽対策を施す際には放熱対策を検討することが重要であると考え、磁性材料への開孔を想定したときの放熱効果について、実験および解析により検証した。

実験により、正方形管が無い場合に比べ、開孔無しの場合では温度上昇が大きい、開孔率の増大により正方形管無しでの結果に近づくことを確認した。また、実験時と同様のモデルを用いた熱流体解析により、開孔にともなう管内の温度を検証し、実験時と同様の結果が得られ、解析により各開孔率にともなう温度を十分に予測できることを確認した。そして、開孔にともなう放熱効果の式を定義し、実験結果および解析結果において、開孔率による放熱効果の特性を示した。

第5章では、電力線周辺での放熱を考慮した開孔タイプの磁気遮蔽方法において、開孔時の遮蔽効果を実験および解析により検証した。さらに、各種開孔条件による違いを示すことで、開孔タイプでの磁気遮蔽方法の設計に向けての考え方を整理した。

開孔率が大きい条件ほど磁気遮蔽効果が低下するが、例えば開孔率20%の条件においても高い磁気遮蔽効果を確認できることを示した。材料の開孔による漏洩磁界の影響に加え、特に大電流時には開孔率の増加にともない磁気遮蔽効果が低下することを示した。

並列形と千鳥形での開孔配列による遮蔽効果の差は小さいが、大電流時には千鳥形を選択したほうが有利になることを示した。また、開孔数を増やすのではなく各開孔径を大きくした場合、電力線の近傍では磁気遮蔽効果が低下しやすいが、十分に遠方を対象とした磁気遮蔽の場合には、開孔径の影響を考慮せずに設計できることが分かった。

第 6 章において、放熱効果および磁気遮蔽効果の関連性を確認するため、開孔にともなう両者のデータ比較を実施した。

開孔率にともなう磁気遮蔽効果の保持比を定義することで、開孔による磁気遮蔽効果の低下度合いを分かりやすく示した。開孔にともなう放熱効果および磁気遮蔽効果の保持比を同図内に整理することで両者の関係を分かりやすく示し、開孔材料を用いた磁気遮蔽の設計時における開孔条件の選定につながる結果を得た。

以上が本論文の主な内容である。ここで、表 7-1 に本研究での磁気遮蔽方法による遮蔽効果などの特徴について、電力線敷設を対象とした他研究との比較内容を示す。他研究での方法については文献で紹介されている条件であり、同一条件による比較とはならないが、本研究で示した方法において、少ない材料体積にも関わらず十分に高い磁気遮蔽効果であることが分かる。また、他研究による方法では、厚い材料を用いて必要な遮蔽効果を確認していると考えられるが、大幅に材料重量が増加すると支持強度の考慮も必要となるので注意が必要である。

表 7-1 他研究による方法との磁気遮蔽効果などの比較

	遮蔽形状・概寸	使用材料	電力線配列 ・電流	評価位置 (電力線からの距離)	遮蔽効果	材料 体積比	施工性	放熱性
本研究 ①	角筒形 (開孔なし) 幅 150mm×高 150mm	パーマロイ (PB) 厚 0.2mm	水平配列 50mm 間隔 三相 10-800A	200mm	4~35	1(基準)	○	×
本研究 ②	角筒形 (並列開孔 20%) 幅 150mm×高 150mm	パーマロイ (PB) 厚 0.5mm	水平配列 50mm 間隔 三相 10-800A	150mm	5~51	2	○	○
他研究 (1) [1-9]	円筒形 直径 200mm	鉄 厚 5mm	三角配列 53mm 間隔 三相 80A	300mm	10	20	△	×
他研究 (2) [1-10]	3 面形 幅 1000mm×高 400mm	珪素鋼板 厚 10mm	ブスバー 300mm 間隔 単相 800A	4m	4	110	○	△
他研究 (3) [1-11]	フレーム状開放型 横 900mm×縦 300mm, 幅 50mm, 間隔 150mm	電磁鋼板 厚 0.35mm ×5 層	水平配列 100mm 間隔 三相 450A	1m 以内	5	8	△	○

他研究(1)… [1-9] 山崎健一, 河本正, 藤波秀雄: 円筒型シールド材による 3 相交流電流路の磁界遮へい効果, 電気学会論文誌 B, Vol.119, No.2, pp.252-258, 1999.2

他研究(2)… [1-10] 及川昌平, 芳賀昭, 山崎慶太: オフィス空間の磁界環境に関する検討—受変電室の磁界環境測定—, Journal of the Magnetics Society of Japan, Vol.30, No.2, pp.316-320, 2006.2

他研究(3)… [1-11] Saito,T. and T.Shinnoh: Applications using Open-Type Magnetic Shielding Method, Journal of the Magnetics Society of Japan, Vol.34, No.3, pp.422-427, 2010.3



磁気遮蔽対策を設計する場合、静磁界中に置かれた円筒、球あるいは立方体における基本式で換算することが多いが、実際に施す対策時における真の遮蔽効果を予測することは難しい。そのため、電力線周辺での磁気遮蔽対策を実施するときの設計では、本研究で示した各種条件によるデータや考え方が役立つものとする。しかしながら、今回は基礎的な検討として 150mm×150mm の大きさの正方形管形状による研究であり、よく扱われるケーブルラック寸法（幅 600mm～1000mm）での検証や多数のケーブルが敷設された場合の検証ができていない。そのような面では、実用化に向けてはまだ課題が残っており、引き続き研究を継続する必要がある。

それに加え、磁性材料の開孔時において、千鳥形状の向きや角筒の形状や厚さが異なる条件での検証も加え、開孔数、開孔大きさ、厚さおよび形状などをパラメータとした経験式を構築できれば、設計でさらに活用しやすいものになると考える。6章で整理したように、放熱効果と磁気遮蔽効果においてはトレードオフの関係がある。多目的最適化のように、複数の目的関数を同時に求める手法を採用すれば、設計時の検討で有効になると期待できる。

また、数値計算では有限長モデルによる検討や渦電流、磁性材料のヒステリシス特性を考慮した解析も実施できるが、条件数が多い解析を簡易に精度よく実施することは難しい。解析結果は要素作成方法および物性条件に大きく依存するため、各設計時において簡易に予測計算ができるとは言い難い。この点においては、実用的な計算方法の向上について検討を進めたい。今後もこれまでと同様、建築および電気・電子の両分野に視点を向け、磁気環境技術の確立のために研究活動を進めていく所存である。



本研究に関する研究業績

- A. 論文
- B. 学術講演
- C. 学会活動



## 本研究に関する研究業績

### A. 論文

#### 学術論文

- [1] 谷口和彦, 森田祐志, 久保直也: 三相電力線からの極低周波磁界に対する磁気シールドに関する検討, 電気学会論文誌 B, Vol.123-B, No.6, pp.734-741, 2003年6月  
→ 第3章
  
- [2] 久保直也, 西村和則, 清田誠良: 電力線周辺での磁気遮蔽材における開孔の影響に関する検討, 日本建築学会環境系論文集, 第80巻, 第716号, pp.897-903, 2015年10月  
→ 第5章
  
- [3] 久保直也, 西村和則, 清田誠良: 磁気遮蔽材の開孔による放熱効果と遮蔽効果の関係ー電力線周辺での磁気遮蔽材における開孔の影響に関する検討(その2)ー, 日本建築学会環境系論文集, 第82巻, 第731号, pp.11-17, 2017年1月  
→ 第4章, 第6章
  
- [4] 久保直也, 西村和則, 清田誠良: 様々な材料開孔条件における電力線周辺での磁気遮蔽効果に関する研究, 日本建築学会技術報告集, 第54号, 2017年6月  
→ 第5章

#### 著書

- [1] 日本建築学会 電気室の漏洩磁場刊行小委員会(新納敏文, 久保直也, 榊原宏行他): 電気室からの漏洩磁場の予測・対策・計測評価技術, 日本建築学会, 2014年

## B. 学術講演

- [1] 久保直也, 谷口和彦, 森田祐志: 低周波磁界のシールド効果に対するケーブル電流の影響, 平成 13 年度電気設備学会全国大会一般講演, pp.69-70, 2001 年 8 月
- [2] 久保直也, 谷口和彦, 森田祐志, 道下和明: 低周波磁気遮へい効果における磁性材料の多層化による影響, 平成 14 年度電気設備学会全国大会一般講演, pp.17-18, 2002 年 9 月
- [3] 久保直也, 谷口和彦, 森田祐志: 磁場コントロールシステムの開発, 平成 15 年度電気設備学会全国大会一般講演, pp.377-378, 2003 年 8 月
- [4] 久保直也, 谷口和彦, 森田祐志: 低周波磁気遮へいにおける磁性材料の開孔による影響, 平成 17 年度電気設備学会全国大会一般講演, pp.1-2, 2005 年 9 月
- [5] 久保直也: 電気室周辺での磁界分布計算方法の検討, 平成 18 年度電気設備学会全国大会一般講演, pp.215-216, 2006 年 9 月
- [6] 久保直也: 配電線周辺での渦電流による金属発熱の検討, 2007 年電気設備学会全国大会一般講演, pp.13-14, 2007 年 9 月
- [7] 久保直也: 建物内での磁気環境対策, 平成 20 年電気関係学会関西支部連合大会シンポジウム, p.S52, 2008 年 11 月
- [8] 久保直也, 西村和則, 谷口和彦, 森田祐志: 開孔型材料による磁気遮蔽効果の検討, 平成 26 年電気学会全国大会, p.179, 2014 年 3 月
- [9] 久保直也, 西村和則, 谷口和彦, 森田祐志: 電力線周辺の磁気遮蔽における磁束密度波形に関する検討, 2014 年電気設備学会全国大会, pp.289-290, 2014 年 8 月
- [10] 久保直也: 開孔型材料の磁気遮蔽効果に関する基礎的検討, 2014 年度日本建築学会大会(近畿)学術講演会, p.581, 2014 年 9 月
- [11] 久保直也, 西村和則, 谷口和彦, 森田祐志: 電力線位置による壁面磁気遮蔽効果の解析, 平成 26 年電気関係学会関西連合大会, p.405, 2014 年 11 月
- [12] 久保直也, 西村和則, 清田誠良: 非磁性材料による電力線周辺での磁気遮蔽に関する検討, 2015 年電気設備学会全国大会, pp.353-354, 2015 年 9 月
- [13] 久保直也, 西村和則, 清田誠良: 非磁性金属遮蔽における周波数特性の検証, 平成 27 年電気関係学会関西連合大会, p.325, 2015 年 11 月
- [14] 久保直也, 西村和則, 清田誠良: 電力線周辺での磁気遮蔽における評価位置による効果の検証, 2016 年電気設備学会全国大会, pp.105-106, 2016 年 9 月
- [15] 久保直也, 西村和則, 清田誠良: 電力線磁気遮蔽での遮蔽長による効果の検証, 平成 28 年電気関係学会関西連合大会, p.409, 2016 年 11 月

## C. 学会活動

### 委員会

- [1] 日本建築学会 環境工学委員会 磁気環境小委員会 (2009年4月～2013年3月) 委員
- [2] 電気学会 次世代ビル電気設備の安全・安心テクノロジー調査専門委員会 (2013年1月～2014年12月) 幹事
- [3] 日本建築学会 環境工学委員会 変動磁場計測評価小委員会 (2013年4月～2015年3月) 委員
- [4] 日本建築学会 環境工学委員会 電気室の漏洩磁場刊行小委員会 (2013年4月～2015年3月) 幹事
- [5] 日本建築学会 環境工学委員会 磁気環境技術テーマ検討WG (2015年4月～) 幹事

### 会員

- [1] 日本建築学会 正会員
- [2] 電気学会 正会員
- [3] 電気設備学会 正会員
- [4] 照明学会 正会員
- [5] 日本技術士会 正会員





## 謝 辞

本研究は、筆者が2000年より株式会社きんでん京都研究所および広島工業大学大学院工学系研究科で取り組んできたものです。2013年4月から広島工業大学大学院で本研究を実施するにあたり、広島工業大学工学部 建築工学科 清田誠良教授 ならびに 電気システム工学科 西村和則准教授 には、多くの貴重なご指導とご鞭撻を賜りました。謹んで感謝の意を表するとともに、厚く御礼申し上げます。

広島工業大学情報学部 情報工学科 永田武教授 ならびに 同大学工学部 電子情報工学科 田中武教授 には、本論文の作成にあたり貴重なご教示を賜りました。心より感謝申し上げます。

株式会社きんでん京都研究所 北村康一所長には、研究の機会を与えていただくとともに、暖かい励ましの言葉をいただきました。厚く御礼申し上げます。同社京都研究所 第二研究開発部 谷口和彦部長 ならびに 森田祐志次長には、研究立ち上げ時からの確なご助言を多くいただくとともに、在学中の研究環境面においても大変なご配慮をいただきました。心より感謝申し上げます。また、同社京都研究所の諸氏ならびに同社の多くの方々から様々なご協力をいただきました。厚く御礼申し上げます。

磁気遮蔽対策の手法や考え方に関しまして、日本建築学会環境工学委員会磁気環境小委員会のなかで有用な知見を多く学ぶことができました。元主査の鹿島建設株式会社技術研究所 新納敏文氏 他、委員の方々に心より感謝申し上げます。

磁場解析の面では、株式会社フォトンの皆様に有用なご助言を多くいただきました。厚く御礼申し上げます。