

連携記事

電磁鋼板を用いた磁気シールド技術

Magnetic Shield That Used Electrical Steels

新日本製鐵(株)
八幡技術研究部

藤倉昌浩

Masahiro Fujikura

鹿島建設(株)
エンジニアリング本部

齊藤 健

Takeshi Saito

新日本製鐵(株)
計測・制御研究開発部

藤崎敬介

Keisuke Fujisaki

1 はじめに

近年、電力や電子機器、通信の発展に伴う電磁場の相互干渉や生体への影響などの問題が広く認識されてきている。電磁場を有効利用するためには、不要な電磁場の遮蔽・吸収技術が必須である。商用周波数以下の低周波領域では、たとえばMRIにおいては解像度向上や検査時間の短縮のために直流磁場が増大する傾向にある。また、送配電の地中化も進んでおり、ケーブルやトランスなどが生活領域のより近くに設置されつつある。このような低周波電磁場では、磁場の減衰が主な対策となる。

本記事では、最近の磁気シールド、特に磁性体を使用する磁気シールド技術について、原理から得られる材料のあり方、最近提案されたシールド構造、そのシールド効果を計算するための電磁場解析技術について述べる。

2 軟磁性材料を用いた磁気シールドの原理と最適材料

直流磁場および商用周波数の磁場を遮蔽する場合には、透磁率の高い軟磁性材料で所望の空間を包囲する方法¹⁻⁶⁾がよく使われる。図1(a)にその方法における直流磁場分布の

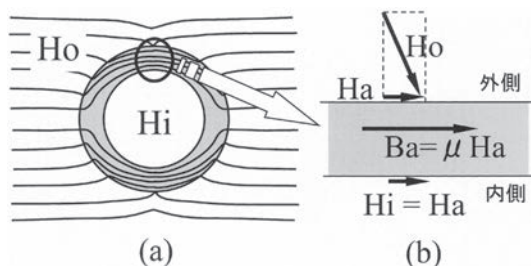


図1 高透磁率材料による磁気シールドの原理

模式図を、図1(b)に磁性体近傍の磁場の様子を示す。磁性体の透磁率： $\mu (= B/H)$ が高いほど、磁性体外部の磁束は磁性体面に対して垂直に入ろうとする⁷⁾。すなわち、外部磁場の強さ： H_o の磁性体近傍での磁性体内の磁束密度： B_a と平行な成分： H_a は、透磁率が大きいほど小さくなる。このときの磁性体の磁束密度 B_a は磁性体内では一定であるから、シールド体内部（磁性体裏側）の磁性体近傍における磁場の強さは H_a となる。すなわち H_a はシールド体内部で期待できる遮蔽後の磁場となる⁷⁾。交流の場合は、渦電流の効果によって裏側に達する磁場は小さくなるのでシールド後の磁場の強さ： H_i は H_a よりも小さくなることが期待できる。

上記の通り透磁率が高いほどシールド特性が良くなるが、磁性体の透磁率は磁性体に印加される磁場の強さによって変化する。それを示すのが磁性体の磁化曲線である。磁化曲線の例を図2に示す。透磁率は磁化曲線の傾き B/H であるから、磁場の強さと共に大きくなり、磁化曲線の“肩”の部分で最大となり、その後減少する。上記 H_a と B_a は、動作点 (H_a, B_a) として磁化曲線上を動くことになる。磁束密度 B_a は断面積あたりの磁束であるから、材料の断面積が大きくなるほど（すなわち使用量が増えるほど）、動作点 (H_a, B_a) は

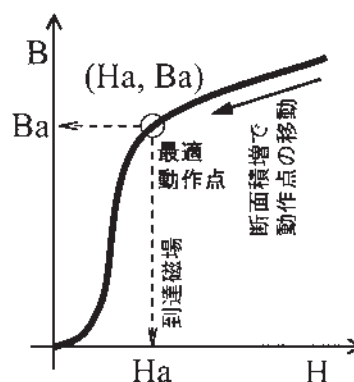


図2 磁化曲線上の最適動作点と磁気シールドによる到達磁場

高磁場から低磁場に移動する。動作点が磁化曲線の“肩”より大きい磁束密度領域では、磁束密度 B_a を低下させるに伴い、対応する磁場の強さ H_a は急激に低下する。従って、使用量の増加により急速な磁場の低下が期待できる。しかし肩より小さい磁束密度領域になると、いくら使用量を増やして磁束密度を低下させても、対応する磁場はあまり低下しない。従って、磁化曲線の肩の部分を最適動作点とすることができる。

この最適動作点を比較することで、材料のシールド性能を簡単に評価することができる。図3に代表的な材料の直流磁化曲線を示す。透磁率の高い材料として知られているパーマロイは最適動作点の磁場の強さ H_a が $2\mu\text{T}$ ($\sim 1.6\text{A/m}$) にあり、非常に小さい磁場まで減衰する能力がある。しかしそのためには磁性体内の磁束密度 B_a を 0.6T まで小さくしなければならず、材料の使用量が多くなってしまう。一方、通常の鋼板 SS400 では、最適動作点の磁束密度 B_a が 1.5T と大きく、パーマロイの約 40% の体積で最適動作点に達する。ただしそのときの磁場の強さ H_a は $2000\mu\text{T}$ とパーマロイの 1000 倍であり、大きな磁場減衰は望めない。そのようななかで方向性電磁鋼板 (以下 GO) は、 1.6T に最適動作点 B_a を持ち、そのときの磁場の強さ H_a は $20\mu\text{T}$ である。パーマロイと比べて少ない使用量で $20\mu\text{T}$ までの減衰が期待できる。ただし GO においては、圧延直角方向の透磁率は小さいので、磁場の方向に圧延方向をあわせるシールド構造としなければならない。

以上のように、磁気シールド材料に求められる基本的なことは①高い透磁率と、②高い磁束密度である。効率的に磁気シールド設計をするためには、対象の磁場の強さと要求磁場に応じて材料を選択し、動作点 (H_a , B_a) を磁化曲線の肩の部分に位置するよう適切な重量とすることが重要である。

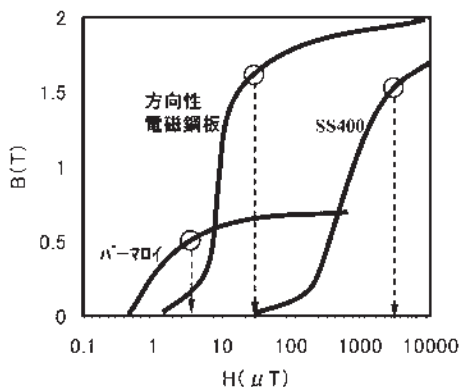


図3 代表的な磁性材料の直流磁化曲線

3 方向性電磁鋼板 (GO) を用いた開放型磁気シールド

最近、図4に示すような磁気シールド構造 (以下、開放型磁気シールド) を著者の一人が提案した⁸⁾。電流の周りに形成される磁場を対象とする場合、従来は (a) に示すように電流方向に平行な面状の磁性体で磁場を遮蔽する方法が一般的である。一方新たな構造は、電流方向に垂直な短冊状の磁性体を磁場の方向に平行に間隔を置いて配置するものである。短冊状の磁性体は、光の透過や通気性を確保しながら、磁場を遮蔽することができる。

この構造の磁気シールド性能を図5のような方法で評価した。1m離れた二本のケーブルに互いに逆向きの 50A の電流を流し、ケーブルの周りに磁場を形成させた。1本のケーブルの長さは 19m である。長手方向を圧延方向とした、厚さ 0.35mm 、幅 20mm 、長さ 900mm の GO を、磁場の方向に長手方向を合わせて、鋼板間の間隔 d を変化させ、 15m に渡って配列させた。間隔 d を広くする場合は単純に鋼板を取り除いたので、 d と共に使用する短冊状電磁鋼板の枚数は減少することになる。ケーブルから鋼板までの距離は 90mm とし、鋼板は電流に垂直に配置した。ケーブルからの距離 D を変化させて磁場を測定した。また比較として、厚さ 0.35mm で $900\text{mm} \times 900\text{mm}$ の GO を、図4-(a) のように圧

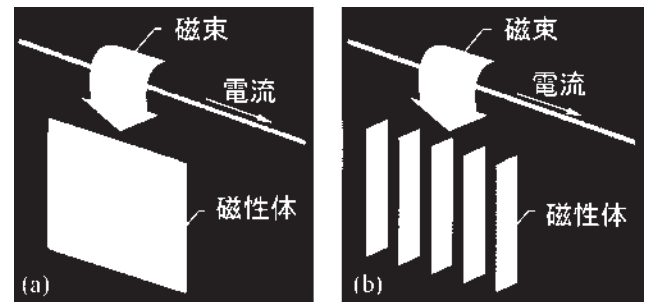


図4 (a) 従来式磁気シールド法と (b) 開放型磁気シールドの磁性体の配置

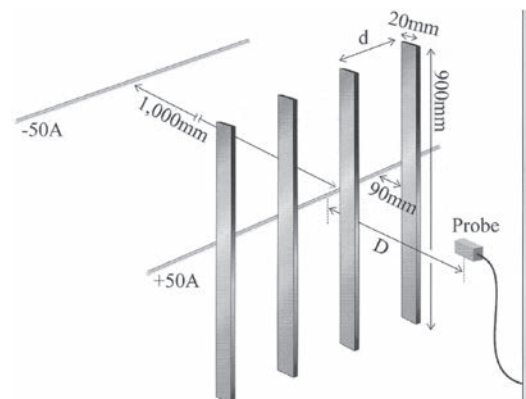


図5 開放型磁気シールドの性能評価方法

延方向を磁場方向、板厚方向をケーブルの半径方向として、やはりケーブルの長さ方向に15mに渡って隙間なく面状に配置し、シールド性能を測定した。

図6に銅板間隔 d を変化させた場合の漏洩磁場の強さにおよぼすケーブルからの距離 D の影響を示す。銅板間隔 d を小さくするほどシールド後の磁場は小さくなり、 $d = 25\text{mm}$ とすることによって、従来式の面でシールドした場合とほぼ同等の磁場まで減衰されることが分かる。この場合、使用する銅板の量は従来式の4/5である。要求される磁気シールド性能に応じて銅板の間隔を変えてシールド構造を選択できるなど、柔軟性を持たせた対策が可能となる。

上記の開放型磁気シールドは、銅板の面がシールド壁の面に対し垂直であれ、平行であれ、磁気シールド性能はほぼ同等であることが報告されている⁸⁾。しかしながら、例えば磁気発生源を銅板で囲ってシールドする場合、銅板の面をシールド壁の面に対し垂直に取れば、銅板端部を面同士を重ねて接触させることができるため、理想的な磁気回路を構成して磁気シールドできる可能性がある⁹⁾。図7にはそのことを考

慮し、銅板で閉磁路を形成した場合の開放型磁気シールド構造を示す。閉磁路で構成された構造の磁気シールド性能は、磁気回路的にはより単純化して比較検討することが可能である。図8にそれぞれのシールド構造に等価な磁気回路を示す¹⁰⁾。開放型シールドの磁気回路は(A)である。短冊状の磁性体端部を面で接合させた回路であり、エプスタイン測定回路と同じである。一方(B)、(C)は従来式シールド構造と等価な磁気回路である。磁気回路(B)はコーナー部で銅板端部が接触しているだけであり接合部からの磁場漏洩が予測される。(C)は接合部からの磁場漏洩を防ぐため、L型に曲げ加工した銅板4枚で磁気回路を構成したものである。

これらの磁気回路を、幅 $30\text{mm} \times$ 長さ 300mm のGOを用いて作製した。剪断された銅板を曲げ加工した後 $800^\circ\text{C} \times 2$ 時間の歪み取り焼鈍を施した。磁気回路に巻き線を施し、直流磁化特性を測定した。その結果を図9に示す。(B)や(C)の従来式に比べ(A)の開放型磁気シールドを模擬した磁気回路は、最適動作点が低磁場高磁束密度に位置し、シールド特性には好ましいことが分かる。(B)は端部からの磁束漏洩の

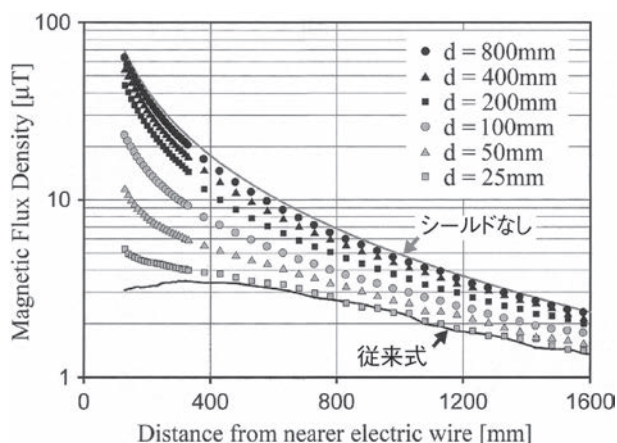


図6 磁性体間隔を変化させた場合の漏洩磁場の变化

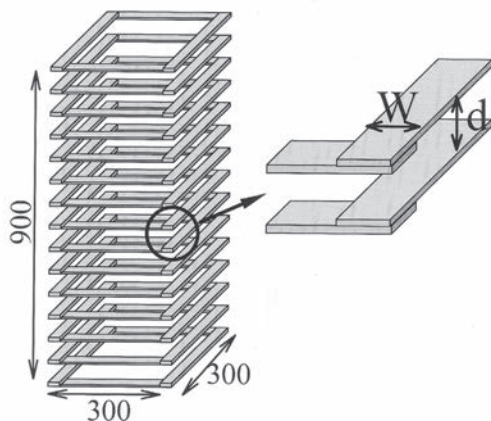


図7 評価した開放型磁気シールド体の概要図

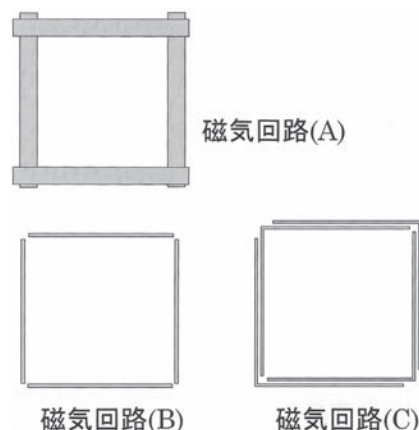


図8 各種シールド法の等価磁気回路；(A) 開放型シールド、(B) 従来式シールド、(C) コーナー部からの漏洩防止した従来式シールド

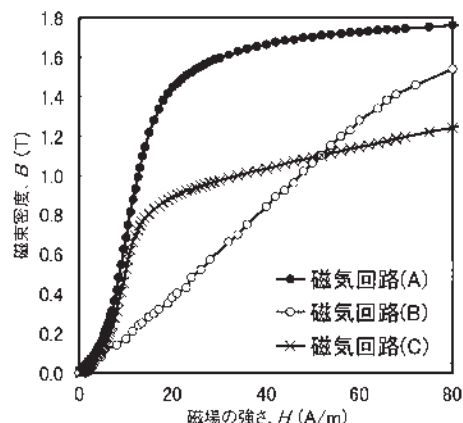


図9 各等価磁気回路の直流磁化曲線

影響で透磁率が低い磁化曲線となった。(C)においては、低磁場の透磁率は良好であるが、20A/m以上の高磁場で磁束密度が小さい。これはL曲げの影響と考えられる。歪みが焼鈍で取りきれれていないこと、磁束の流れが面外に90度変化することのいずれかまたは両方が原因と推測される。

つぎに図7の開放型磁気シールド体を実際に作製し磁気シールド性能を調査した。幅Wが30mmおよび16.5mm、長さが300mmの長手方向に圧延方向をそろえた0.35mm厚のGOで磁気回路を作り、間隔dを空けて配置して、シールド体とした。全鋼材使用量一定のまま、磁性体の幅と磁気回路間の距離を表1のように変化させた。シールド体の大きさは、300mm×300mm×900mmと上下方向の長さを幅の3倍とし、上下からの磁場侵入の影響を無視することができる^{4,11)}ようにした。また従来式は、幅900mm、長さ1800mmのGOを長手方向中心部でL曲げし、4枚のL曲げた鋼板でシールド体を形成した。鋼板使用量は開放型、従来式ほぼ同量である。シールド体をヘルムホルツコイルの中に配置して外から磁場を印加し、シールド体内部の磁場を測定した。印加磁場は10Hzで100μTとした。

図10にシールド体中心部での磁場の強さを、d/Wで整理した結果を示す。従来型の漏洩磁束密度は7.8μTであった。これに対して開放型では板幅Wおよび磁気回路間隔：dが変化しても、中心部の漏洩磁場はd/Wに依存して変化するこ

表1 開放型シールド体の性能評価における、鋼板の幅Wと磁気回路間隔dの組み合わせ

W (mm)	d (mm)	d/W	層あたり磁性体枚数
30	15	0.50	1
	30	1.00	2
	45	1.50	3
16.5	15	0.91	2
	30	1.82	4
	45	2.73	6
	90	5.45	12

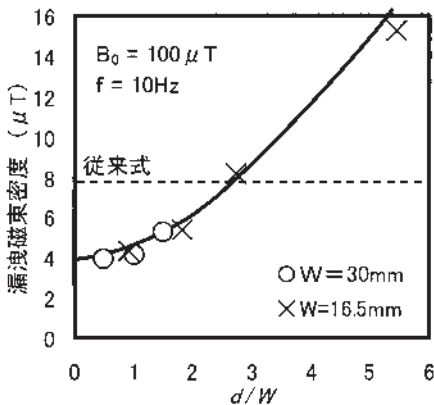


図10 サイズファクター d/W で整理した開放型シールド体中心部の漏洩磁場

とが分かる。d/Wを小さくする、すなわち間隔dを小さくするほど、板幅Wが大きくなるほど漏洩磁場は小さくすることができる。d/Wを3以下にすることによって、従来式よりも漏洩磁場は小さくなり、到達する磁場は従来式よりも小さくすることができる。図9に示したように、磁気回路(a)は磁気回路(c)よりシールド性能が高いと推定できる。d/Wをある程度以下にすることで、磁気回路からの漏洩磁場の考慮が不要になり、磁気回路の能力を発揮できる開放型のシールド性能が従来式より良好となったものと考えられる。

4 開放型磁気シールドの解析設計

実際のシールド構造を最適設計する場合は、電磁場解析技術の活用が欠かせない。解析においては、強磁性体部分と空気部分とでは、磁束密度の変化が大きいため、強磁性体およびその周辺の空間メッシュを細かく切る必要がある。実機規模のシールド室では鋼板厚みが1mm以下であるのに対してシールド室の大きさが数mあるため、メッシュ数が膨大になり、通常の計算機的能力を超える。そこで、図11に示した薄鋼板と空気との混合物を、有限要素法におけるひとつの等価要素と考える均質化法¹²⁻¹⁷⁾(以下等価BH法と称する)を考案した¹⁸⁾。

図11の等価要素において、薄鋼板が、X-Y平面に無限大に続き、Z方向には、この要素が周期的に無限遠まで繰り返されている、と仮定する。このとき、磁気回路の式より¹⁹⁾、X軸方向およびY軸方向の等価要素の磁気特性は、薄鋼板の磁気特性を薄鋼板の厚み：dと等価要素のZ軸方向の高さ：cとの比に案分したものと考えることができる。このため、等価要素におけるX軸方向およびY軸方向の等価な透磁率は次式で表すことができる。

$$\hat{\mu}_x = \frac{d\mu_{\epsilon} + (c-d)\mu_{air}}{c} \dots\dots\dots (1)$$

$$\hat{\mu}_y = \frac{d\mu_t + (c-d)\mu_{air}}{c} \dots\dots\dots (2)$$

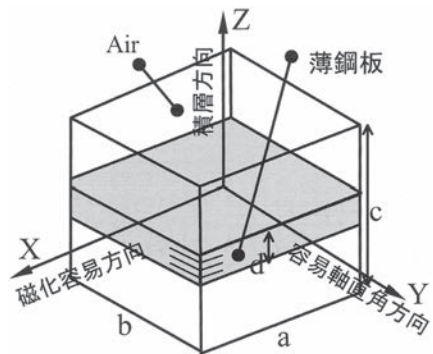


図11 薄鋼板と空気の混合物の等価要素

ここで μ_e 、 μ_t 、 μ_{air} はそれぞれ、GO材容易軸方向、GO材困難軸方向、空気透磁率である。

これに対し、Z軸方向は、薄鋼板が積層しているため反磁界の影響が強くまた、等価要素において空気の割合が多い。このため、X軸方向およびY軸方向と比べて磁化されにくいと考えて、今回は、Z軸方向の磁気特性は空気とみなすことにした。

$$\hat{\mu}_z = \mu_{air} \dots\dots\dots (3)$$

上式(1)、(2)では、GO材の磁気特性より等価要素の磁気特性が解析的に導出される。このため、等価要素の磁気特性の算出においては、等価要素に対して数値解析を行う必要がなく、また材料の磁気飽和性より、等価要素の磁気飽和性をも考慮されている。また、各軸の鋼材の異なる磁気特性を用いることで、鋼材の磁気異方性をも考慮している。ただし、ここで提唱している等価BH法では、等価要素の磁気特性として式(1) - (3)を用いているので、等価要素内の磁場分布は均一と仮定している。このため、等価要素内といった微小領域での磁場分布が問題となる場合には等価BH法は適用できない。今回考えている磁気シールドでは、等価要素よりも大きなマクロ領域での空間分布を問題にしているので、等価BH法の適用が可能であると考えられる。

図12に示す実機規模の開放型シールド室について電磁場を解析した。このシールド室では、磁気シールド作用を持つGO材は図13(a)のように配置されている。これを解析するため等価BH法を適用した。更にGO材以外にも、磁性体である支持部材、フレーム材が図13(b-1)、(b-2)のように配置されている。これらの影響も、等価BH法を用いて解析した。支持部材、フレーム材の等価要素は、それぞれ図13(c-1)、(c-2)に示した口型、L型の要素となる。等価要素を



図12 実機規模の磁気シールド室

用いることで、励磁コイル、シールド鋼板、構造物をも考慮しても、節点数：496, 838、要素数：478, 224に納めることができた。通常の数値解析では、これよりも2-3桁大きな解析メッシュを必要とする。境界条件としては、励磁コイル、磁気シールド室より十分遠方にあるため、対称境界を設定した。

以下に解析結果を示す。図14は磁気シールド室内部に置かれた電磁石が発生する磁場分布である。実測結果と解析結

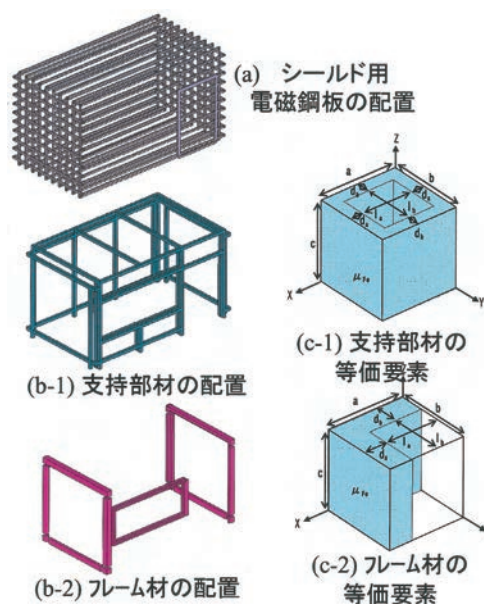


図13 磁性体の配置と等価要素；(a) シールド用電磁鋼板の配置、(b-1) 支持部材の配置、(c-1) 支持部材の等価要素、(b-2) フレーム材の配置、(c-2) フレーム材の等価要素

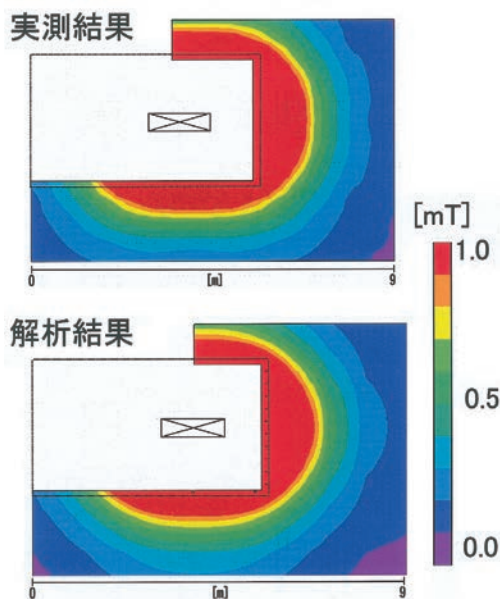


図14 電磁石が発生する磁場分布の実測と解析結果

果はよく一致していることが分かる。これに磁気シールド室を付与した場合の漏れ磁場の分布を、コンター表示した実測結果と解析結果とを図15に示す。励磁コイルの側面およびコーナ部分で漏れ磁場が大きくなっている様子が、いずれの結果からも明らかである。漏れ磁場の定量的評価結果を図16に示す。横軸は、励磁コイル中心点から励磁方向への距離で、シールド室あり／なしの条件で、実測データと解析データとを比較している。X=1.7mのところ磁気シールド平面が存在しており、それ以降の値が漏れ磁場になる。実測による漏れ磁場と解析による漏れ磁場とがよく一致していることが分かる。また、シールドに用いた鋼板内部の磁束密度について調べてみると、部分的に磁気飽和領域に達しているところ

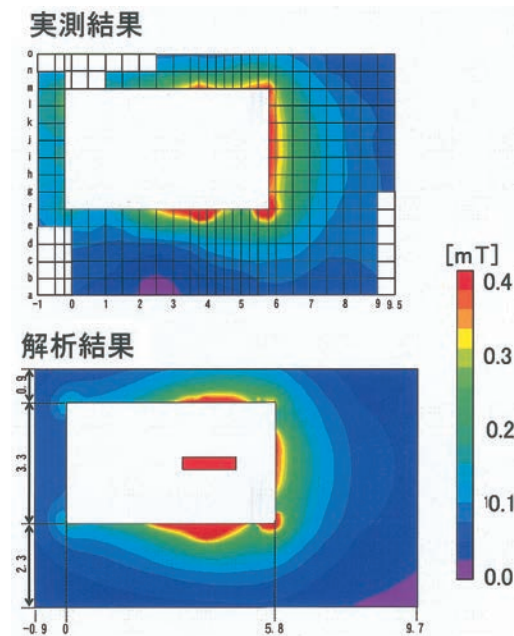


図15 シールド室外の漏洩磁場の実測と解析結果

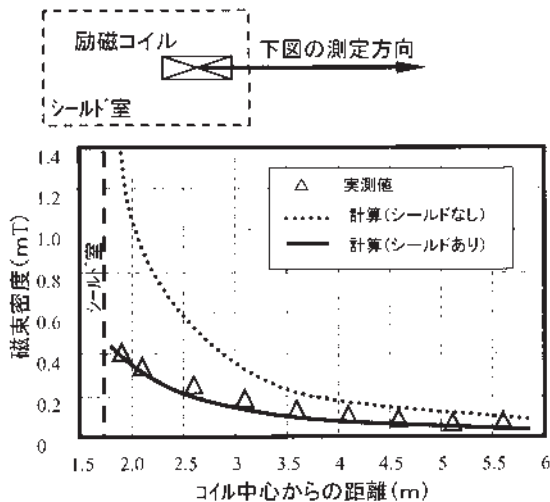


図16 電磁石軸方向の磁場分布

るも存在している。今回の等価BH法では、三軸異方性モデルを用いているために、鋼板の磁気飽和時の影響が懸念されていたが、今回の結果からは、漏れ磁場に対するその影響は少ないものといえる。

5 おわりに

電磁鋼板を使用する磁気シールド技術について述べた。直流磁化曲線の肩の部分最動点であり、この最動点を考慮することにより、材料の選択および大まかな使用量の適正化を図ることができる。従来と異なる開放型磁気シールド構造は、圧延方向に透磁率の高い方向性電磁鋼板の材料特性を活かす磁気回路を構成することが可能であり、高いシールド性能を実現しながら、同時に通気性や光の透過性も併せ持つことができる。また開発した等価BH法という均質化法を用いた計算機解析を用いることで、実機規模の計算結果が実測値とよく一致した。

参考文献

- 1) A.W.Rucker : On the magnetic shielding of concentric spherical shells, Phil Mag., 37 (1894), 95-130.
- 2) A.P.Wills : On the Magnetic Shielding Effect of Trilamellar Spherical and Cylindrical Shells, Phys. Rev. (Series I), 9 (1899), 193-213.
- 3) B.J.Patton and J.L.Fitch : Design of a room-size magnetic shield, J.Geophys.Res., 67 (1962), 1117-1121.
- 4) D.Cohen : A shielded facility for low-level magnetic measurements, J.Appl.Phys., 38 (1967) 3, 1295-1296.
- 5) A.J.Mager : Magnetic Shields, IEEE Trans.Magn., 6 (Mar.1970), 67-75.
- 6) V.Kelha, J.Pukki, R.Peltonen, A.Penttinen, R Ilmoniemi and J.Heino : Design, construction, and performance of a large-volume magnetic shield, IEEE Trans.Magn., 18 (Jan.1982), 260-270.
- 7) 佐々木寛 : 川崎製鉄技報, 25 (1993), 64-70.
- 8) T.Saito : Features of a Wall With Open-Type Magnetic Shielding Method, IEEE Trans.Magn., 44 (Nov.2008), 4191-4194.
- 9) 齊藤健 : 特許第 3633475 号
- 10) M.Fujikura, K.Segawa, K.Chikuma, K.Fujisaki, J.Mino, T.Morita, T.Saito, H.Hirano, and T. Shinnoh : Open-Type Magnetic Shield Structure and its Performance, IEEE Trans.Magn., 44 (Nov.2008), 4179-4182.

- 11) E.Paperno, I.Sasada, and K.Tashiro : Experimental correction of the axial shielding equation, IEEE. Trans.Magn., 33 (2002) 3324-3326.
- 12) J.C.M.Garnett : Colors in material glasses and metal films, Trans.Roy.Soc., 53 (1904), 385-420.
- 13) A.Sihvola and J.A.Kong : Effective permittivity of dielectric mixtures, IEEE Trans.Geosci. & Remote sensing., 26 (1988) 4, 420-429.
- 14) 和木浩, 五十嵐一, 本間利久 : 電気鉄道の直流磁界に対する磁気シールドの解析—複雑構造物の等価透磁率決定法の検討, 電気学会論文誌A, 125-A, (2005) 4, 309-316.
- 15) 亀有昭久, 藤原耕二 : 均質化法による積層鉄心の非線形静磁場解析, 電気学会静止器・回転機合同研究会資料, SA-05-83, RM-05-90 (2005)
- 16) H.Kaimori, A.Kameari and K.Fujiwara : FEM Computation of Magnetic Field and Iron Loss in Laminated Iron Core Using Homogenization Method, IEEE Trans.Magn., 43 (2007) 4, 1405-1408.
- 17) 成田一行, 服部哲弥, 三輪将彦 : 積層鋼板のモデル化による鉄損計算精度への影響, 電気学会静止器・回転機合同研究会資料, SA-04-70, RM-04-94 (2004)
- 18) 藤崎敬介, 藤倉昌浩, 美野二郎, 佐藤正次 : 薄鋼板用均一化法による三次元磁場解析, 電学論D, 128 (2008) 3, 303-309.
- 19) S.Taguchi, T.Yamamoto and A.Sakakura : New grain-oriented silicon steel with high permeability "ORIENTCORE HI-B", IEEE Trans.on Magn., 10 (Jun 1974) 2, 123-127.

(2009年2月16日受付)