

博 士 論 文

環境磁場の計測と
数値シミュレーションに関する研究

平成 12 年 9 月

新 納 敏 文

①

博士論文

環境磁場の計測と
数値シミュレーションに関する研究

平成 12 年 9 月

新 納 敏 文

要 旨

最近の建物では悪化傾向にある磁場環境のもと、磁場の影響を受けやすい機器の設置されるケースが増えてきている。その結果、磁場による障害が顕在化しつつあり、建築分野では早急な対応が求められている。この問題を解決するためには、電子機器のみならず建物や都市空間までを考慮した、建築における EMC (Electro-Magnetic Compatibility) の確立が必要である。建物全体としてエミッションとイミュニティのバランスを考慮しなければならない。対象となる電磁環境には、大きく分けて磁場と電磁波がある。このうち、本研究では磁場、その中でも特に低周波の磁場を取り上げる。建築電磁環境を構成する要素ということで、本論文ではこのような磁場を環境磁場と称し、『建築環境に影響を与えるすべての磁場』と定義する。

このような背景のもと、本研究は建築における EMC、すなわち建物全体としてのエミッション、イミュニティを定量的に評価する手段として、環境磁場の計測法及び数値シミュレーション法について研究するものである。ポイントは、次の 3 点である。

- 1) 環境磁場の計測法の構築
- 2) 環境磁場の数値シミュレーション法の確立
- 3) EMI (Electro-Magnetic Interference) 問題の具体的解決

以下、この 3 点について要約を述べる。

まず、1) の計測法であるが、これは環境磁場の把握、評価のベースとなる。正しい計測を行うことが、正しい判断を下すための基本である。しかしながら、建築分野において環境磁場の標準計測法はなく、適当な計測器を使って各自の判断で計測、評価しているのが実情である。このような状況下、日本建築学会では 1994 年に磁場計測評価ワーキンググループを設立し、環境磁場の標準計測法に関する研究を進めてきた。筆者は、この研究に初期から加わり、幹事として活動してきた。本研究における計測法は、ワーキンググループでの研究成果をもとに筆者独自の知見を加えたものである。磁場計測の分類、磁場計測器の性能分析と性能確認試験、計測の基本的手順と具体的方法のとりまとめを行った上で、磁場の種類別に 8 種の計測システムを構築した。

次に、2) の数値シミュレーションであるが、これは建築における EMC を評価して EMI 問題解決のための具体的な対策を検討する際に有効である。特に、磁気シールドルームの設計

及び影響評価に有効な手段となる。本研究ではまず、磁気シールド問題に対応する辺要素を用いた3次元非線形磁場解析システムを開発した。これは従来の有限要素法と比較して、計算時間の短縮、解析精度の向上が期待できるものである。一方、有限要素法とは異なる原理に基づき、空間の要素分割が不要で無限領域を考慮できる改良積分方程式法が最近注目されている。本研究では、これらの解析手法により得られた結果を実測値と比較することにより、実用性(計算時間、解析精度等)の観点からその有効性と限界を明らかにした。

最後に、3)の EMI 問題では、計測及び数値シミュレーションにより、環境磁場に起因する3種類、5例の障害事例(①MRI 磁気シールド、②送電線磁場対策、③残留磁気問題)に対して具体的解決を図った。

①MRI 磁気シールドでは、病院における MRI 漏洩磁場の周辺機器への影響問題に対して、シールド効果に及ぼす間隙と開口の影響及び磁気飽和の数値シミュレーションによる検討、シールド性能を評価するための磁気シールドルーム内外における磁場計測、及び MRI 実機への数値シミュレーションの適用を行った事例について述べる。結果として、磁場計測によるシールド性能評価の妥当性、及び数値シミュレーションの有効性を明らかにした。

②送電線磁場対策では、送電線近傍建物における CRT ディスプレイの画像障害に対して、磁場低減対策として逆位相送電、距離減衰、磁気シールドを取り上げ、その効果を計測及び数値シミュレーションにより検証した事例について述べる。結果として、逆位相送電により磁場が建物内部で約 28～36%、屋外で約 20～28%に低減されること、距離減衰により磁場が送電線からの距離にほぼ反比例して小さくなること、建物の鋼製ルーフデッキと鋼製デッキプレートが図らずも磁気シールド材として機能して建物内部の磁場低減効果を高めていることを明らかにした。

③残留磁気問題では、事務所における CRT ディスプレイの画像障害、マンションにおけるテレビの画像障害、工場における無人搬送車の走行障害の3例に対して、それらの原因である残留磁気の解明、解決に取り組んだ事例について述べる。まず、障害を引き起こした磁場の発生源を鋼材の残留磁気と特定し、鉄骨造及び鉄筋コンクリート造の建物では残留磁気の影響の大きい領域がどこにでも存在する可能性のあることを明らかにした。次に、構造物に使われる代表的な鋼材として鉄骨、鉄筋、デッキプレートを取り上げ、製造工場、加工工場、建設現場に分けて残留磁気の発生原因の調査を行い、主な原因として鉄骨・鉄筋に対して製造工場(一部、加工工場)で使用されるリフティングマグネット、デッキプレートに

対して建設現場で実施されるスタッド溶接を抽出した。次に、リフティングマグネットによる鉄筋の着磁、スタッド溶接によるデッキプレートの着磁を対象として、試験体によるモデル実験及び数値シミュレーションを実施し、残留磁気の発生プロセスとメカニズムを明らかにした。最後に、残留磁気を低減化する具体的な対策について、製造工場、加工工場、建設現場、竣工後に分けてまとめた。

目 次

第1章 序 論	1
1.1 研究の背景	1
1.2 研究の目的と内容	3
1.3 本論文の構成	5
参考文献	7
第2章 建築における環境磁場問題	9
2.1 まえがき	9
2.2 環境磁場	10
2.2.1 磁場の種類	10
2.2.2 建物外部の磁場発生源	11
2.2.3 建物内部の磁場発生源	13
2.3 磁場の影響	15
2.3.1 機器への影響	15
2.3.2 人体への影響	18
2.4 磁場による障害事例	20
2.4.1 病院におけるMRI漏洩磁場の周辺機器への影響	20
2.4.2 送電線近傍建物におけるCRTディスプレイの画像障害	20
2.4.3 事務所におけるCRTディスプレイの画像障害	21
2.4.4 マンションにおけるテレビの画像障害	22
2.4.5 工場における無人搬送車の走行障害	22
2.5 あとがき	26
参考文献	27
第3章 環境磁場の計測法	29
3.1 まえがき	29
3.2 磁場計測の分類	30

3.2.1 計測の目的	30
3.2.2 計測の対象	31
3.2.3 計測の規模	31
3.2.4 その他(計測の時期, 計測者, 計測の場所)	32
3.3 磁場計測器	33
3.3.1 磁場計測器の種類	33
3.3.2 磁場計測器の性能確認試験	38
3.3.3 周辺機器	41
3.4 磁場計測の方法	45
3.4.1 計測の基本的手順	45
3.4.2 周辺環境の影響	46
3.4.3 磁場のベクトル成分計測	47
3.4.4 計測の同時性	49
3.4.5 計測データの整理	50
3.5 磁場計測システムの構築	54
3.5.1 直流磁場計測システム	54
3.5.2 交流磁場計測システム	58
3.5.3 変動磁場計測システム	61
3.6 あとがき	62
参考文献	63
第4章 辺要素を用いた数値解析システムの開発	65
4.1 まえがき	65
4.2 解析手法	66
4.2.1 基本式	66
4.2.2 混合法的弱定式化離散化	66
4.2.3 離散化	67
4.2.4 非線形解析	69
4.3 数値解析システム	71

4.4 数値解析例	72
4.4.1 線形解析	72
4.4.2 非線形解析	72
4.5 あとがき	76
参考文献	77
第5章 各種磁場解析手法の比較検討	79
5.1 まえがき	79
5.2 磁場数値解析	80
5.2.1 有限要素法	80
5.2.2 改良積分方程式法	80
5.2.3 解析モデル	81
5.3 磁気シールド効果計測実験	84
5.4 計測, 解析結果及び比較検討	85
5.4.1 2次元モデル	85
5.4.2 3次元モデル	86
5.5 あとがき	93
付録1. 磁性材料の直流磁化特性試験	94
参考文献	97
第6章 事例1: MRI 磁気シールドルーム設計及び評価法の検討	99
6.1 まえがき	99
6.2 磁気シールドルーム設計法の検討	100
6.2.1 間隙及び開口の影響	100
6.2.2 磁気飽和の効果	101
6.3 MRI 実機への適用	105
6.4 磁気シールドルーム計測評価法の検討	108
6.5 あとがき	112
参考文献	113

第7章 事例2：送電線近傍建物における磁場低減対策の検討	115
7.1 まえがき	115
7.2 建物内外の磁場計測	117
7.3 磁場数値解析	119
7.3.1 解析手法	119
7.3.2 解析モデル	120
7.4 磁場低減効果の検証	123
7.4.1 逆位相送電	123
7.4.2 距離減衰	124
7.4.3 磁気シールド	124
7.5 建物内磁場低減法の検討	131
7.5.1 磁気シールドボックス	131
7.5.2 サンドイッチ状磁気シールド板	132
7.6 あとがき	139
付録2. 磁場の一週間連続計測	140
参考文献	141
第8章 事例3：建物内残留磁気の実態と低減対策の検討	143
8.1 まえがき	143
8.2 建物内の磁場発生源の調査	145
8.2.1 CRTディスプレイの画像障害が発生した事務所	145
8.2.2 テレビの画像障害が発生したマンション	146
8.2.3 無人搬送車の走行障害が発生した工場	147
8.3 残留磁気による磁場の計測	149
8.3.1 事務所の床面	149
8.3.2 マンションの壁面	149
8.3.3 工場の床面	150
8.3.4 鉄骨造建物の詳細計測	150
8.3.5 鉄筋コンクリート造建物の詳細計測	152

8.4 残留磁気発生原因の調査	158
8.4.1 製造工場	158
8.4.2 加工工場	164
8.4.3 建設現場	170
8.4.4 発生原因の絞り込み	176
8.5 試験体による残留磁気着磁現象の検証	180
8.5.1 モデル実験	180
8.5.2 磁場数値解析	182
8.5.3 実験, 解析結果及び比較検討	183
8.5.4 残留磁気の経時変化	185
8.6 残留磁気低減対策の検討	193
8.6.1 製造工場	193
8.6.2 加工工場	194
8.6.3 建設現場	194
8.6.4 竣工後	196
8.7 あとがき	200
参考文献	201

第9章 結論	203
--------	-----

謝辞	207
----	-----

研究業績	209
A. 論文	209
B. 特許, 実用新案	215
C. 学会活動	217

第1章 序 論

1.1 研究の背景

MRI (Magnetic Resonance Imaging) 装置やリニアモーターカー等, 強磁場を応用した機器が様々な分野で利用されるようになってきた。建築分野でも, リニアモーターをエレベーターや建物内搬送システムに応用したり, 磁極の相反性を利用した建物の磁気浮上免震装置等が考えられ, 一部で実用化されている¹⁾。これらは, 磁場を有効に活用したものであるが, その裏返しとして周辺に磁場を漏洩している^{2), 3)}。

さらに, 都市部では送電線, 変電所, 電車線の近傍等, 磁場が比較的強い場所に建物が建設されることが多くなってきている⁴⁾。また, 最近の建物は大型化, 高層化, 情報化が進み, それに伴う建築設備の大電力化, 大容量化は, 建物内部の磁場を増大させる要因となっている⁵⁾。また, 鉄骨や鉄筋等の残留磁気問題も注目されつつある⁶⁾。このように, 最近の建物をとりまく磁場環境は悪化傾向にある⁷⁾。

一方, 建物の内部に設置される機器の中には, 磁場の影響で不具合が生じるものがある。例えば, コンピューター用の CRT ディスプレイでは, 画面に色ずれ現象や変動を伴う揺れ現象等の画像障害が発生する⁸⁾。電子顕微鏡では, 映像の歪み, ヒゲ状のノイズ等の映像障害が発生する。また, 磁気ディスク, 磁気カード等の磁気記録媒体では, 磁場の作用で記録が破壊される可能性がある。さらに, 磁場の生体系への影響も心配されている⁹⁾。これは, その是非の結論が未だ出ていないが, 慎重に対処すべき問題である。人体に関しては, ペースメーカーや金属を体内に埋め込んだ人達への影響も心配される¹⁰⁾。

このように, 最近の建物では悪化傾向にある磁場環境のもと, 磁場の影響を受けやすい機器の設置されるケースが増えてきている。その結果, 磁場による障害が顕在化しつつあり^{11), 12)}, 建築分野では早急な対応が求められている。

一方, 電気・電子の分野では, 電子機器から発生する不要な磁場や電磁波が他の電子機器に妨害を与えないように, EMC (Electro-Magnetic Compatibility) という概念が普及してきている¹³⁾。これは, 電磁氣的両立性あるいは電磁環境両立性と訳され, 磁場や電磁波を出す側と受ける側の電磁的な調和を図り, 両方の立場を満足させようとする考えである。つまり, 磁場や電磁波を出す側はできるだけこれを低減化し, 受ける側は磁場, 電磁波に対

する耐力を高くして妨害を受け難くするというものである。エミッション(Emission)とイミュニティ(Immunity)のバランスが重要となる。

エミッションとは、放射または伝導によって電子機器から伝搬される電磁エネルギーをいう。イミュニティとは、電子機器の外来ノイズに対する耐性、免疫性、妨害排除能力をいう。エミッションがイミュニティに勝ったとき、EMI(Electro-Magnetic Interference)が生じる。EMIとは、電子機器から発生する磁場、電磁波が他の電子機器に電磁的妨害を与える現象をいう。妨害を受けた電子機器では誤動作が生じる。

以上は電気・電子分野の話であるが、建築分野にも当てはめることができる。建物の磁場環境はエミッション、磁場の影響を受ける機器はイミュニティ、磁場による障害はEMIにそれぞれ対応する。磁場による障害を防止するためには、電子機器のみならず、建物や都市空間までを考慮した、建築におけるEMCの確立が必要となる^{14), 15)}。

建物は本来、器としてその造られた空間内にある人や機器を安全かつ正常に動作させる機能を有していなければならない。建築における電磁環境、すなわち建築電磁環境(建築分野と電気・電子分野の重なり合う分野での電磁環境)において、それは単に電子機器同士のエミッションとイミュニティの関係だけでなく、建物レベルで最適な電磁環境を構築することが求められる。内部に設置される情報機器、通信機器、医療機器、さらには建物の機能として設置される設備機器、電気機器までを含んだ建物全体としてのエミッションとイミュニティのバランスを考慮しなければならない。これが建築におけるEMCで、これからの高度情報化社会において益々求められてくるものと思われる。

なお、建築におけるEMCで対象とする電磁環境には、大きく分けて磁場と電磁波がある。このうち、本研究では磁場、その中でも特に低周波の磁場を取り上げる。建築電磁環境を構成する要素ということで、本論文ではこのような磁場を環境磁場と称す。詳しくは、第2章で定義する。

1.2 研究の目的と内容

本研究は、建築におけるEMC、すなわち建物全体としてのエミッション、イミュニティを定量的に評価する手段として、環境磁場の計測法及び数値シミュレーション法を開発するものである。そして、これらを用いて建築におけるEMI問題の具体的解決を図る。

以下、計測と数値シミュレーションについて現状を示しながら本研究のポイントを述べる。

まず計測であるが、これは環境磁場の把握、評価のベースとなる。正しい計測を行うことが、正しい判断を下すための基本である。正しい計測とは、目的に見合った適切な計測のことで、目的に応じてその方法は異なる。例えば、送電線周辺の磁場を簡単に影響評価する目的であれば簡易な方法でよい。それに対して、磁気シールドルームの性能評価を行う目的では、内部に設置される機器が正常に動作することを保証する精細な計測が必要となる。

しかしながら、建築分野において環境磁場の標準計測法はなく、適当な磁場計測器(ガウスメーター)を使って各自の判断で計測、評価しているのが実情である。磁場の標準計測法について他の分野の状況を調査したところ、鉄道車両を対象としたJIS規格¹⁶⁾があるのみであった。これは鉄道車両内部の磁場を対象とした計測法で、関連した論文¹⁷⁾も幾つか発表されている。その他は、送電線周辺の磁場を対象として、電気学会、電子情報通信学会等で発表¹⁸⁾、提案¹⁹⁾がなされている程度である。環境磁場は、磁場計測器さえあれば誰でも比較的容易にデータが入手できるため、誤った計測法で計測し、間違った判断が下されることも少なからずあったようである。

このような状況下、日本建築学会では1994年に環境工学本委員会電磁環境小委員会に磁場計測評価ワーキンググループを設置し、環境磁場の標準計測法に関する研究を進めてきた。筆者は、この研究に初期から加わり、幹事として活動してきた。1998年、ワーキンググループの研究成果^{20), 21)}を取りまとめ、磁場環境の計測に携わる技術者を対象とした実務上の手引書¹¹⁾を発刊した。本研究における計測法は、この研究成果をもとに別途実施した実験や実測等に基づく筆者独自の知見を加え、環境磁場を適切に評価する方法としてまとめたものである。ワーキンググループの研究が環境磁場の計測を標準化して、実務的な側面で誰でも間違いのない計測ができることを目指したものであるのに対し、本研究では建築におけるEMCの定量的な評価法として、環境磁場の理想的かつ実用的な計測法を提案する。

次に数値シミュレーションであるが、これは建築における EMC を評価して EMI 問題解決のための具体的な対策を検討する際に有効である。効果の予測はもちろん、電磁現象を的確に捉えることにより、最善の対策が提示できる。特に、磁気シールドルームの設計及び影響評価に有効な手段である。磁気シールド問題では、3 次元非線形磁場解析が必要となる。解析手法としては、磁気ベクトルポテンシャルを従属変数とする有限要素法 (Finite Element Method) が一般的である^{22), 23)}。これは、材料の非線形、異方性等の磁場問題特有の現象を扱うことができる利点があるが、3 次元場では未知数が膨大になり、多大な計算時間を要する。更に、磁気シールド問題では、開領域問題として広い空間を対象としなければならず、ますます未知数が多くなる。一方、境界要素法 (Boundary Element Method) の適用も行われている²⁴⁾。これは、要素分割が境界面のみで良いため未知数が抑えられ、開領域としての空間を容易に扱うことができる利点があるが、非線形問題を取り扱い難い欠点がある。そこで、有限要素法と境界要素法を組み合わせたコンビネーション法²⁵⁾等、互いの欠点を補い、利点を活かす手法が研究されているが、実用性の観点から磁気シールド問題に最適な 3 次元磁場解析手法は未だ確立されているとは言い難い。多くは、垂直方向を考慮しない 2 次元近似により、2 次元モデルとして解析しているのが実状である²⁶⁾。

こうした背景から、本研究では磁気シールド問題に対応する、辺要素を用いた 3 次元非線形磁場解析システムを開発した²⁷⁾。これは、従来の 3 次元有限要素法と比較して未知数が少なく計算時間が短くなるだけでなく、磁場の強さ H を直接未知量に選ぶため磁気ベクトルポテンシャル A の微分として H を求める手法より解析精度が向上することが期待できる。一方、有限要素法とは異なる原理に基づき、空間の要素分割が不要で無限領域を考慮できる改良積分方程式法 (Improved Integral Equation Method)²⁸⁾ が最近注目されている。これは、空間メッシュ、境界条件、ゲージ条件等の入力が必要で、任意の空間磁場を求めることができる。境界要素法の一種である磁気モーメント法を改良したもので、Maxwell の電磁方程式を積分方程式の形で解き、磁性体内の磁気モーメントを求めることにより、重ね合わせの原理から空間磁場を計算するものである。

本研究では、これらの解析手法を用いて、環境磁場を対象とした数値シミュレーション法の確立を図る。フィールド計測やモデル実験の結果と対比して、計算時間、解析精度を始めとする実用性の検証を行う。そして、計測法と合わせて、環境磁場による障害対策、すなわち建築における EMI 問題の解決に取り組む。

1.3 本論文の構成

本論文は 9 つの章から構成される。

第 1 章は序論であり、本研究の背景、目的、内容について述べる。

第 2 章では、建築における環境磁場問題の現状について EMC の観点から述べる。環境磁場を『建築環境に影響を与えるすべての磁場』と定義し、直流磁場、交流磁場、変動磁場に分類して建物内外の環境磁場の発生源をエミションの観点で整理する。次に、磁場の機器への影響をイミュニティの観点で明らかにする。また、磁場による具体的な障害事例について EMI の観点から紹介する。

第 3 章では、環境磁場の計測法について述べる。日本建築学会磁場計測評価ワーキンググループの研究成果をもとに、別途実施した実験や実測等に基づく筆者独自の知見を加え、環境磁場を適切に評価する計測法としてまとめる。磁場計測の分類から始め、磁場計測器、磁場計測の方法を検討し、本研究で用いる計測システムの構築まで行う。

第 4 章では、辺要素を用いた数値解析システムについて述べる。これは、本研究において開発したシステムで、辺要素を用いた有限要素法の定式化とその特長、数値解析システムの概要を説明する。また、本手法の有効性を確認するため、コイルを流れる電流が生み出す直流磁場の解析例も示す。

第 5 章では、磁気シールドルーム設計への適用を前提として、各種解析手法の比較検討を行う。取り上げた解析手法は、辺要素を用いた有限要素法、磁気ベクトルポテンシャルを従属変数とする有限要素法、改良積分方程式法の 3 種である。数値解析結果を磁気シールド効果計測実験により得られた実測値と比較し、実用性 (計算時間、解析精度等) の観点からその有効性と限界を明らかにする。

第 6 章～第 8 章では、磁場による機器の障害に対して、計測と数値シミュレーションにより解決を図った事例の紹介を行う。まず第 6 章では、病院における MRI 漏洩磁場の周辺機器への影響問題に対して、磁気シールドルーム設計支援として磁場数値解析によりシールド効果に及ぼす間隙と開口の影響、磁気飽和の効果について検討した事例、及びシールド性能を評価するために磁場計測を行った事例について述べる。また、MRI 実機にも数値シミュレーションを適用し、実測値と比較してその有効性を明らかにする。

第 7 章では、送電線近傍建物における CRT ディスプレイの画像障害に対して、具体的な

磁場低減対策として逆位相送電, 距離減衰, 磁気シールドを取り上げ, その効果を磁場計測及び数値解析により検証した事例について述べる。また, 渦電流を考慮した磁場数値解析の有効性についても触れる。さらに, 建物内での磁場低減法として, 磁気シールドボックス及びサンドイッチ状磁気シールド板を取り上げ, モデル実験と磁場数値解析により, その磁場低減効果について検討する。

第8章では, 事務所におけるCRTディスプレイの画像障害, マンションにおけるテレビの画像障害, 工場における無人搬送車の走行障害に対して, それらの原因である残留磁気の問題について述べる。まず, 実態を明らかにする。次に, 発生原因を調査し, 主な原因としてリフティングマグネットとスタッド溶接に注目する。さらに, 試験体によるモデル実験及び数値シミュレーションにより発生過程と性状を明らかにし, 低減対策についても言及する。この問題は現在, 建築におけるEMCの新しい問題として注目されているが, 筆者が先駆けとなって取り組んできたものである。

第9章は結論であり, 本研究で得られた結果及び知見を総括的に論じ, 今後の課題について述べる。

ここで, 本論文全体を通しての磁気に関する用語の使い方について整理しておく。まず, 「磁気」とは, 磁石が鉄粉等を吸引したり他の磁石に力を及ぼす性質や電流による電磁気的作用等, 磁気的現象全体を指す概念である。「磁気」による力や作用が働く空間を「磁場」あるいは「磁界」という。電気・電子分野では, 「磁界」の方が一般的であるが, 本論文では建築分野の慣例に従い, 「磁場」という表現で統一している。英語では, いずれもMagnetic Fieldである。

次に単位であるが, これはSI単位系で統一している。なお, 長さの単位で図中に表示していないものは, すべて“mm”である。

参考文献

- 1) 下野直人, 巖 慈愷, 岡本達雄, 瀬川輝夫, 山崎慶太: 磁気浮上階段周辺の磁場環境に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集(D), pp.1827-1828, 1994
- 2) 古戸義雄: MRI 装置用超電導マグネット, 低温工学, Vol.22, No.4, pp.251-258, 1987
- 3) 酒井 譲, 山下 彰彦: リニアモーターカー(MAGLEV)周辺の磁束密度分布に関する研究, 日本機電学会論文集(A編), Vol.58, No.553, pp.200-205, 1992
- 4) Gary B. Johnson: Measurements of magnetic field sources in schools, Proceedings of the American Power Conference, pp.276-281, 1992
- 5) 高橋 毅: ビル電気設備におけるEMC対策, EMC, No.68, pp.145-151, 1993
- 6) 新納敏文, 清川 博: 建物から発生する磁気に関する一考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集(D), pp.379-380, 1991
- 7) 浅野芳伸, 大桃重一郎, 宇津木勇: 建築をとりまく磁気環境の実態, 日本建築学会大会学術講演梗概集(D), pp.1803-1804, 1994
- 8) 清水義則: 外部磁界がテレビ受信機に与える影響と改善法, ARK Quarterly, Vol.2, No.1, pp.9-21, 1989
- 9) 大久保千代次: 電磁界の健康への影響, 保健婦雑誌, Vol.55, No.2, pp.153-165, 1999
- 10) 西村恒彦, 小塚隆弘, 亀井裕孟, 伊藤正光, 飯尾正宏, 飯沼 武, 池平博夫, 福田信男, 舘野之男, 有水 昇: NMR 使用環境における植込み型ペースメーカーの動作に関する検討, NMR 医学, Vol.3, No.1, pp.97-102, 1983
- 11) 日本建築学会磁場計測評価ワーキンググループ: 環境磁場の計測技術 — 現場における計測の事例 —, 日本建築学会, 1998
- 12) 日本建築学会電磁環境と建築設計編集ワーキンググループ: 電磁環境と建築設計 — はじめての設計者のために —, 日本建築学会, 2000
- 13) 仲川史彦, 佐藤利三郎, 窪田 明, 橋爪邦隆, 藤岡文七, 正田英介, 仁田周一, 杉浦行, 菊地 眞, 野中重夫, 岡村万春夫, 樋村教章, 小島健志, 清 紹英, 秋山光男, 佐藤公治, 大槻文芳, 吉野春幸, 赤嶺淳一, 大坂謙志郎: これからの EMC 加速するデジタル化と EMC, EMC, No.129, pp.17-37, 1999
- 14) 森田哲三, 矢花吉治, 安岡正人: 建築に於ける電磁環境問題, 日本建築学会大会学術

講演梗概集(D), pp.1657-1658, 1992

- 15) 重富正吉, 石川敏行, 鈴木元生, 森田哲三, 矢花吉治: 建築電磁環境の現状, 電気設備学会誌, Vol.14, No.8, pp.794-802, 1994
- 16) 日本工業規格: 鉄道車両-漏れ磁界測定方法, JIS E 4018, 1995
- 17) 正田英介, 水間 毅, 天野武一, 川崎邦弘, 加藤佳仁: 電気鉄道から発生する電磁界と測定法(電気鉄道の電磁環境技術協同研究委員会活動報告), 電気学会交通・電気鉄道研究会資料, TER-98-60, pp.77-80, 1998
- 18) 竹下和磨, 重光 司: 携帯型磁界暴露量計の開発と暴露実測, 電子情報通信学会技術研究報告, EMCJ91-29, pp.43-49, 1991
- 19) 山崎健一, 富田誠悦, 藤波秀雄, 重光 司: 低周波磁界計測に関する考慮点, 電気学会計測研究会資料, IM-95-48, pp.1-11, 1995
- 20) 菊池章裕, 三宅伸幸, 新納敏文, 富樫元康, 竹内信次郎, 浅野芳伸: 環境磁場計測方法の事例研究, 三島光産技報, No.18, pp.62-75, 1997
- 21) 佐々木勤, 新納敏文, 竹内信次郎, 三宅伸幸, 川瀬隆治, 菊池章裕: 環境磁場計測方法の事例研究(その2), 三島光産技報, No.19, pp.80-92, 1998
- 22) 加川幸雄: 電気・電子のための有限要素法の実践, オーム社, 1982
- 23) 中田高義, 高橋則雄: 電気工学の有限要素法, 森北出版, 1982
- 24) 坪井 始, 内藤 督: 実践数値電磁界解析法, 養賢堂, 1995
- 25) 酒井 譲, 山下彰彦: 有限要素法と境界要素法を併用した磁場解析, 日本機械学会論文集(A編), Vol.59, No.557, pp.211-218, 1993
- 26) 山崎慶太, 奥田清明, 阿部隆之, 内川義則, 志村 徹, 小谷 誠: 生体磁気用ヘキサゴナル型簡易磁気シールドルームの開発, 日本応用磁気学会誌, Vol.16, No.6, pp.769-774, 1992
- 27) 加藤泰正, 新納敏文, 清川 博, 本間俊雄, 登坂宣好: 辺要素を用いた3次元非線形静磁界解析システムの開発 - 磁気シールド設計支援 -, シミュレーション, Vol.11, No.3, pp.228-234, 1992
- 28) 矢野博幸: EWS/PCによる電磁場解析の手法と留意点, 精密工学会誌, Vol.62, No.10, pp.1402-1404, 1996
- 29) John D.Kraus: Electromagnetics, McGraw-Hill Inc., 1992

第2章 建築における環境磁場問題

2.1 まえがき

前章で述べたように、強磁場を応用した機器の利用、磁場が比較的強い場所での建物の建設、建物内部から発生する磁場の増大等に伴い、最近の建物をとりまく磁場環境は悪化傾向にある。建築における EMC の観点からすると、建物全体としてのエミッションが増大していると言える。

一方、建物の内部に設置される機器には、磁場の影響を受けるものが多くなってきている。磁気応用機器や磁気記録媒体等の高度化、多様化に伴い、磁場に対して今後ますます敏感になっていくものと思われる。これは、建物全体としてのイミュニティが低下していると言える。

このように、環境磁場は強くなる傾向(エミッションの増大)、機器の磁場に対する耐性は弱くなる傾向(イミュニティの低下)にあり、その結果、磁場による障害すなわち EMI が顕在化しつつある¹⁾。建築における EMC の観点からすると、建物全体としてのエミッションとイミュニティがアンバランスになってきていると言える。電子機器の高周波電磁波障害に対しては、「電気用品取締法技術基準」や「情報処理装置等電波障害自主規制協議会(VCCI)」等の規制が実施されてきているが、低周波の環境磁場障害に対する規制は今のところない。磁場による障害(EMI)を未然に防ぐには、建築サイドでも磁場を出す側(エミッション)、受ける側(イミュニティ)の特性を十分に把握しておく必要があると考える。

本章では、まず環境磁場を直流磁場、交流磁場、変動磁場の3つに分類し、建物内外の発生源についてエミッションの観点で整理する。次に、磁場の機器への影響をイミュニティの観点で明らかにする。また、人体への影響についても触れる。最後に、磁場による具体的な障害事例について EMI の観点から紹介する。

2.2 環境磁場

磁場は、磁石と電流の作用により発生する。地球も大きな磁石で、その結果地球上には地磁気が存在している。また、導体中を電流が流れると、その周辺には同心円状に磁場が発生する。建築における環境磁場も、すべて磁石や電流に起因している。

本節では、環境磁場の分類として、磁場の種類、建物外部の磁場発生源、建物内部の磁場発生源について述べる。これらは、建物全体としてのエミッションを決定する要因である。

2.2.1 磁場の種類

本研究では、環境磁場を『建築環境に影響を与えるすべての磁場』と定義する。その上で、以下の直流磁場、交流磁場、変動磁場の3つに分類整理する。

(1) 直流磁場

直流磁場は、時間的に変動のない、あるいは非常に長周期的な変動で短・中期的には無視できるような磁場をいう。発生源は、磁石と直流電流である。

(2) 交流磁場

交流磁場は、強さと方向が周期的に変化する磁場をいう。発生源は、主に交流電流である。交流磁場では、周波数が高くなると電磁波の形で放射される磁場が問題となるが、本研究では環境磁場として極低周波領域(ELF)の3kHzまでを対象とする。その中でも、主に商用周波数である50/60Hzの交流磁場を対象とする。

(3) 変動磁場

変動磁場は、1Hz程度あるいはそれ以下の周波数の緩やかで不規則な変動を示す磁場をいう。発生源は、磁場発生源の移動、電流の変動、磁場空間中の強磁性体の移動である。磁場発生源の移動には超電導マグネットを搭載したリニアモーターカーの走行、電流の変動には電車線に流れる電流の変動、磁場空間中の強磁性体の移動には自動車・エレベーター・天井クレーンの移動、あるいは鋼製の扉やシャッターの開閉等がある。

なお、突発的に発生する磁場として磁気ノイズがある。この原因は、大電力を使う装置の電源ON/OFF、電源ラインの伝導ノイズ、パルス電流、工事現場からの誘導ノイズ等である。磁気ノイズは、不規則に発生するため計測が難しい。本研究では、変動磁場の一種として取り扱う。

2.2.2 建物外部の磁場発生源

環境磁場にはすべて、対応する発生源がある。発生源の性質によって、磁場の種類が決まる。ここでは、建物外部に発生源を持つ磁場で、建物内部に侵入して設置機器に影響を及ぼすものについて述べる。

表2.2.1に、それぞれの発生源から発生する磁場の強度レベルを示す。これは、筆者が実際に計測を行った事例に基づく値である。

表 2.2.1 建物外部の磁場発生源：磁場の強さ(計測例)

発生源		磁場の強さ		
名称	諸元	直流磁場	交流磁場(波高値)	変動磁場(変動幅)
(1) 地磁気	日本	46 μ T	—	—
(2) 送電線	154kV(同相)	—	10.9 μ T(直下) 7.7 μ T(20m 離隔)	—
	154kV(逆位相)	—	2.6 μ T(直下) 1.2 μ T(20m 離隔)	—
(3) 変電所	66kV/6.6kV	—	8.5 μ T(敷地境界) 0.9 μ T(10m 離隔)	—
(4) 電車線	直流電源方式 (地下鉄)	—	—	22.0 μ T(5m 離隔) 10.3 μ T(10m 離隔)
	交流電源方式 (新幹線)	—	3.1 μ T(12m 離隔) 0.9 μ T(36m 離隔)	—
(5) 自動車	1800cc 乗用車	—	—	1.7 μ T(1m 離隔) 0.1 μ T(6m 離隔)
(6) 都市雑音	建設現場	—	2.0 μ T (アーク溶接3m離隔)	0.4 μ T (ダンプカー5m 離隔)

以下、それぞれの発生源について、磁場が発生する原理とその特徴を述べる。

(1) 地磁気

地球は一個の大きな磁石であり、北極近くにS極、南極の近くにN極がある。磁場の大きさは極に近づくに従って大きくなるが、日本ではほぼ46 μ Tである。地磁気は、長期的には緩やかに変動するが、その大きさは0.1%程度で安定した直流磁場とみてよい。建物内では鉄骨や鉄筋等の強磁性体の影響を受けるので一様な磁場とはならず、大きさも10~30%減少する。

(2) 送電線

電流が流れている周辺には、必ず磁場が存在する。送電線の周辺には、商用周波数(東日本:50Hz、西日本:60Hz)の交流磁場が存在している。磁場の強さはBiot-Savartの法則

により電流に比例して決まるが、送電線では三相の電線の打ち消し効果が働くため、周辺の磁場の強さは電線の配置と送電方式で決まる²⁾。なお、地中送電線は三相の電線が接近して配置されるため、打ち消し効果が大きく、地表面での磁場は弱くなる。

(3) 変電所

変電所は、高電圧で送電されてきた電気を降圧するための電力施設で、大規模施設から中・小規模施設まで街中に点在している。都市部では、建設用地の入手難から建物の地下に地下変電所として建設されることが多くなってきている。変圧器から負荷電流に比例した磁場が発生するとともに、1・2 次幹線からも磁場が発生しており、周辺には複雑な性状の磁場が存在している。変電所は建物に近接して建設されることが多く、特に地下変電所は建物の内部に建設されるため、十分な距離減衰が確保されず、比較的強い磁場が漏洩していることが多い。

(4) 電車線

国内の電車は、直流電源方式と交流電源方式(50Hz/60Hz)の 2 種類が混在している。JR の新幹線と在来線の栃木、茨城より北(新潟は直流)及び北陸は交流電源方式で、それ以外の多くの地区、及び私鉄では直流電源方式を採用している。直流電源方式では、き電線から電車のモーターに流れる直流電流はレールを通じて変電所に戻る。大きなループを描いて電流が流れることになり、周辺に磁場が発生する。この電流は電車の加速、減速により変動し、また複数の電車が走行しているため、複雑な変動磁場となる。一方、交流電源方式では、交流電流が流れており、交流磁場が存在している。送電線との違いは、電車の走行状況によって大きく変動する点である。

(5) 自動車

強磁性体で構成された自動車が走行すると、地磁気が乱されて低周波の磁場変動が現れる。強磁性体が多く使われた大型の自動車ほど大きく、特にタンクローリーの走行では周辺に大きな変動磁場が発生する。

(6) 都市雑音

建設工事を始め、都市部では各所に磁場の発生源がある。これらはノイズ的なものが多く、磁場の種類は特定しにくい。また、実用化開発が進められているリニアモーターカーは、直流の超電導マグネットを搭載しており、走行に伴って周辺には数 Hz の交流(変動)磁場が発生する。

2.2.3 建物内部の磁場発生源

次に、建物内部に発生源を持つ磁場で、設置機器に影響を及ぼすものについて述べる。

表 2.2.2 に、それぞれの発生源から発生する磁場の強度レベルを示す。これは、筆者が実際に計測を行った事例に基づく値である。

表 2.2.2 建物内部の磁場発生源：磁場の強さ(計測例)

発生源		磁場の強さ		
名称	諸元	直流磁場	交流磁場(波高値)	変動磁場(変動幅)
(1)MRI 装置	1.5T(ノン・シールド方式)	245.5mT(0.5m 離隔) 19.7mT(3m 離隔)	—	—
	1.5T(アクティブシールド方式)	35.4mT(0.5m 離隔) 0.4mT(3m 離隔)	—	—
(2)残留磁気	鉄骨造建物	0.56mT(床面) 0.13mT(1m 離隔)	—	—
(3)電気設備 電気配線	変圧器 6600V/3150V	—	1.2 μ T(1m 離隔) 0.1 μ T(5m 離隔)	—
(4)屋内電気 機器	CRT ディスプレイ(17inch)	—	1.1 μ T(0.1m 離隔) 0.1 μ T(0.5m 離隔)	—
	蛍光灯器具 (40w×2 灯)	—	0.4 μ T(0.1m 離隔) 0.0 μ T(0.5m 離隔)	—
(5)エレベーター	積載荷重 2.0t (油圧方式)	—	0.1 μ T(1m 離隔) 0.0 μ T(5m 離隔)	5.1 μ T(1m 離隔) 0.4 μ T(5m 離隔)
	天井クレーン 積載荷重 1.5t	—	0.1 μ T(直下) 0.0 μ T(10m 離隔)	2.2 μ T(直下) 0.1 μ T(10m 離隔)

以下、それぞれの発生源について、磁場が発生する原理とその特徴を述べる。

(1) MRI 装置

MRI装置は、人体の断層撮影を行う医療機器で、強い直流磁場と電波を利用して断面の画像化を行うものである。磁場発生装置としては、常電導磁石、超電導磁石及び永久磁石が用いられている。安定した強磁場(0.2T, 0.5T, 1.5T)が得られる超電導磁石タイプのMRI が臨床用として普及している。従来の MRI(ノン・シールド方式)は、コイルから発生する磁場が漏れやすい構造となっており、強い直流磁場が周辺に広く存在していたが、最近ではアクティブシールド機能を有する装置が普及し、強い磁場が存在する範囲は小さく抑えられている。

また、MRI と同じ原理に基づき、小型で主に実験用に使われる NMR(Nuclear Magnetic Resonance)も研究機関等に普及している。

(2) 残留磁気

構造物に用いられる鉄骨や鉄筋は、製造や施工の過程で残留磁気を帯びる³⁾。残留磁気により、周辺に直流磁場が発生する。この磁場は地磁気と重なり合って建物内部に広く存在する。その結果、強磁性体の移動に伴う地磁気の乱れが増幅されることも考えられる。

(3) 電気設備、電気配線

変圧器、受・配電盤、空調機ファンのような電気設備からは、商用周波数の交流磁場が発生している。電気配線では、一本のケーブル内に往復電流を流したり、多対撚線⁴⁾を使うと磁場を打ち消し合って漏洩は少なくなるが、1方向の単線では Biot-Savart の法則に従って磁場が周辺に漏洩する。

(4) 屋内電気機器

電気を使用する機器からは必ず漏洩磁場が生じる。商用周波数の交流電流を使うものであれば、同じ周波数の交流磁場が発生している。例えば、CRT ディスプレイ、蛍光灯器具等がある。また、環境磁場とは言えないが、モーターを使用するドライヤー等からも交流磁場が漏洩している。一方、強力な磁石を利用したスピーカーからは直流磁場が漏洩している。

(5) エレベーター

建物内に設置されるエレベーターは、油圧方式、バランスウェイト方式、リニアモーター方式に大別される。油圧方式では、強磁性体で構成されたエレベーター本体の昇降に伴い、地磁気が乱されて低周波の磁場変動が現れる。バランスウェイト方式では、さらに強磁性体のバランスウェイト(おもり)の影響が加わる。また、リニアモーター方式のエレベーターでは、磁石が利用されているため、その影響も加わる。いずれの方式も、(3)の交流磁場の漏洩もある。

また、工場や研究施設で用いられる天井クレーンも同様に考えることができる。

2.3 磁場の影響

磁場は、磁石と電流により発生するものであるが、逆に磁場の影響で起電力が発生したり、電流に力が働いたりする。また、磁石や磁性体に吸引力、反発力が働いたりもする。このように、磁場は直接的、間接的に機器に影響を及ぼし、結果として誤動作を生じさせることがある。また、人体への影響についても懸念されている。

本節では、磁場の影響を定量的に捉えることを目的として、機器への影響、人体への影響について分析する。これらは、建物全体としてのイミュニティを決定する要因である。

2.3.1 機器への影響

機器に影響を及ぼす磁場の強さ(閾値)は、機器によって異なる。代表的な機器の磁場に対する設置環境基準を表 2.3.1 に示す。これは、メーカーの設置基準(*で示す)と、筆者が実験で求めた閾値である。なお、()内は工業用計算機設置環境基準(JEIDA-29-1990)⁵⁾で規定されている値である。日本電子工業振興協会がまとめた推奨値であるが、安全率を見込んで低めの値となっている。

表 2.3.1 磁場に対する機器の設置環境基準

機 器 名	許容磁場強度		
	直流磁場	交流磁場(波高値)	変動磁場(変動幅)
(1)CRT ディスプレイ, テレビ	10~20 μ T (10 μ T)	1~2 μ T (1.5 μ T)	10~20 μ T
CAD 用ディスプレイ	5~10 μ T	0.5~1 μ T	5~10 μ T
(2)電子顕微鏡	—	0.03~0.25 μ T*	0.03~0.3 μ T*
(3)EB 露光装置	—	0.1~0.3 μ T*	0.1~0.3 μ T*
(4)SQUID	0.1 μ T*	0.01 μ T*	0.01 μ T*
(5)MRI 装置	—	0.1~1 μ T*	0.5~2 μ T*
(6)磁気ディスク, 磁気テープ	(5mT)	(5mT)	—
磁気カード	40~65mT	16~30mT	—
(7)磁気制御システム	0.2~0.3mT	—	—
(8)ペースメーカー	0.5mT*	0.85mT*	—

以下、それぞれの機器について、障害が起こる原理とその特徴を述べる。

(1) CRT ディスプレイ, テレビ

図2.3.1にCRTの原理図を示す⁶⁾。CRT(Cathode-Ray-Tube)は漏斗型をした真空管で、ネック部にある3つの電子銃から赤/青/緑に対応した3本の電子ビームが放射される。電子ビームは、通常管外に設けられた偏向コイルにより任意の方向に曲げられ、シャドーマスクを通して蛍光面上の赤/青/緑の蛍光体に当たってこれを光らせる。垂直用偏向コイルにより垂直走査、水平用偏向コイルにより水平走査が行われ、カラー画像が表示される。

ここで、電子ビームの軌道に外部から磁場が印加されると、ローレンツ力により電子ビームは円弧状に曲げられ、本来到達すべきシャドーマスクとは違う位置を通り、目標と異なる蛍光体を光らせることになる。また、磁場の強さ、方向が周期的に変化する交流磁場では、電子線の到達位置が周期的にずれる。その結果、直流磁場では色ずれ現象、交流磁場では揺れ現象が生じる。色ずれ現象は、画面の色が変色、あるいは輝度に変化するものである。画面の回転、歪みといった現象も生じる。揺れ現象は、画面が変動してちらつく現象である。いずれも磁場の印加方向により、その性状は異なる。程度は磁場の強さに比例する。

色ずれ現象の閾値は、画面サイズ、種類等によって異なるが、 $10\sim 20\mu\text{T}$ 程度とされている⁷⁾。また、揺れ現象の閾値は、波高値で $1\sim 2\mu\text{T}$ 程度とされている⁷⁾。図2.3.2に磁場の印加方向と色ずれ現象の関係、図2.3.3に同じく揺れ現象の関係を示す。閾値として示している値は、筆者が実験で確認したものである。

色ずれ現象は、地磁気に対して比較的小さい磁場でも生じる。ただし、CRT ディスプレイは、地磁気に対する補正機能として消磁機構を有しており、ある程度の直流磁場であれば色ずれ現象は消磁機構で抑えることができる。消磁機構は、CRT 内部に組み込まれた軟磁性体からなる磁気シールド材と、CRT 外部に取り付けられたコイルによって構成される⁸⁾。コイルに流す交流減衰電流により、磁気シールド材内部に反磁場が創出され、直流磁場の影響を相対的に打ち消すことができる。消磁ボタンとしてCRT ディスプレイに別途スイッチが設けられた機種もあるが、一般的には電源を入れた時に自動的に交流減衰電流が流れるようになっている。対象は地磁気であるが、もう少し強い磁場まで対応できる。消磁機構はメーカーにより様々で、また CRT のサイズやシャドーマスクの方式によっても対応可能な磁場の大きさは異なる。したがって、補正機能まで考慮した色ずれ現象の閾値は、機種によって大きな差がある。図2.3.2の括弧内に示す値は、筆者が実験で確認した結果である。

なお、CAD 用ディスプレイでは高解像度になる分、閾値が小さくなる。

(2) 電子顕微鏡

電子顕微鏡では、複数のレンズにより電子ビームが微細に絞り込まれ、試料に照射される。電子ビームの軌道に外部から磁場が印加されると、ローレンツ力により電子ビームは円弧状に曲げられ、映像に歪み、ヒゲ状のノイズ等が現れる。微弱な磁場でも影響を受ける。そのため、環境磁場に対して厳しい規制が設けられている。影響を及ぼすのは磁場の変動で、交流磁場と変動磁場が対象となる。閾値は、倍率・加速電圧等の性能、装置自体の磁気シールド機構の程度等により異なる。

(3) EB 露光装置

EB(Electronic Beam)露光装置は、IC(Integrated Circuit)製造用金型マスクを製作する装置であるが、次世代の IC では直接描画装置として検討されている。電子ビームを精密に制御する仕組みは電子顕微鏡に近く、装置に施された磁気シールド機構の程度により環境磁場の閾値は異なるが、交流磁場と変動磁場を対象に電子顕微鏡同様、厳しい水準が求められる。

(4) SQUID

SQUID(Superconducting Quantum Interference Device)は、超電導のジョセフソン効果を利用して微弱な磁場を検出する装置で、脳磁波や心磁波を計測する生体磁場の研究や診断に用いられている。生体から発生する磁場は $10\text{fT}\sim 100\text{pT}$ 程度の微弱なもので、環境磁場の影響を受けない空間が求められる。交流磁場、変動磁場のみならず、地磁気を含めた直流磁場も対象となる。

(5) MRI 装置

MRI 装置は、自ら強磁場を発生する装置であるが、装置内部では磁場の高い均一度が求められる。磁場変動により均一度が損なわれると、正確な画像が得られなくなる。

(6) 磁気記録媒体

磁気記録媒体としては、磁気ディスク、磁気テープ、磁気カード等がある。これらは、基板やフィルム上に塗布された磁性体粒子を磁気ヘッドで磁化させ、データを記録するものである。保磁力以上の強い磁場のもとでは、記録が破壊される可能性がある。

(7) 磁気制御システム

磁気制御システムには、磁気で走行が制御される無人搬送車、磁気近接スイッチを利用した制御システム、産業機械に取り付けられた磁気測長システム等がある。これらは、直流磁場を利用したシステムで、別の直流磁場が存在すると誤動作や精度不良に繋がる。

(8) ペースメーカー

心臓病患者に植込まれるペースメーカーは、人工的に電気信号を出し、それを心筋に伝えて拍動を起こさせる装置である。これは、電池(リチウム・ヨウ素電池)、制御回路、電極リードから構成されているが、電磁界の影響で誤動作が生じる懸念が指摘されている。例えば、直流磁場では1.1mTで誤動作が生じたという報告⁹⁾がある。これは、ペースメーカーの基本機能であるデマンドモード(拍動数が決められた回数以上のときはペースメーカーを休止させ、拍動数が少なくなったときに作動するモード)がASCNモード(常に固定レートで作動するモード)になるときの磁場の強さである。磁場の方向や機種により差異はあるが、人命に関わる問題であり、磁場に対しては十分な注意が必要となる。医療機関では、0.5mT以上の領域を管理区域として、ペースメーカー保持者が接近できないような措置が採られている。

2.3.2 人体への影響

最近、電磁波と生体の問題、いわゆる電磁波問題が話題となっている。ここで対象となっている電磁波は2つに分類することができる。1つは携帯電話等を対象とした高い周波数帯の電波で、もう1つは極低周波数帯の電磁界、特に商用周波数帯の交流磁場である。交流磁場が人体に及ぼす影響については、白血病、小児癌、妊婦の流産に繋がるとの報告、逆にまったく無害であるとの主張等、諸説入り乱れている^{10)~12)}。この問題に関しては、生体と電磁波の関連を把握する系統だった研究が少なく、現時点では結論が出ていない。磁場の人体に対する短期的、長期的、継世代的影響について、データの蓄積を図っている段階である。最近、いくつかのデータが公表されつつあり、表2.3.2はその一例としてICNIRP(国際非電離放射線防護委員会)が1997年に示したガイドライン¹³⁾の抜粋である。300GHzまでの電界、磁界、電磁界のガイドラインのうち、商用周波数(50/60Hz)における磁場の暫定的な規制値を示す。現在、WHO(世界保健機関)を始め、国内外の関係機関で調査、研究が進められており、その公表が待たれるところである。

表 2.3.2 商用周波数における磁場の参考レベル

条 件	磁束密度(rms 値)
職業的暴露	500 μ T
公衆への暴露	100 μ T

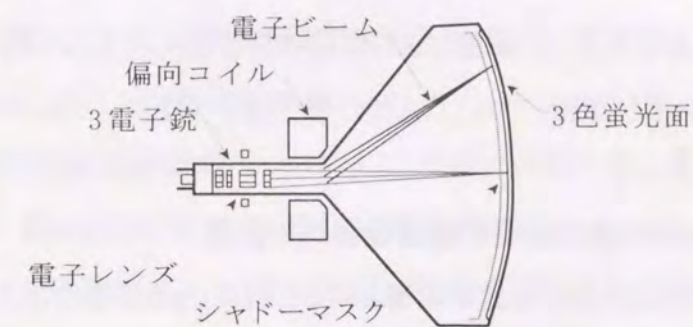


図2.3.1 CRTの原理

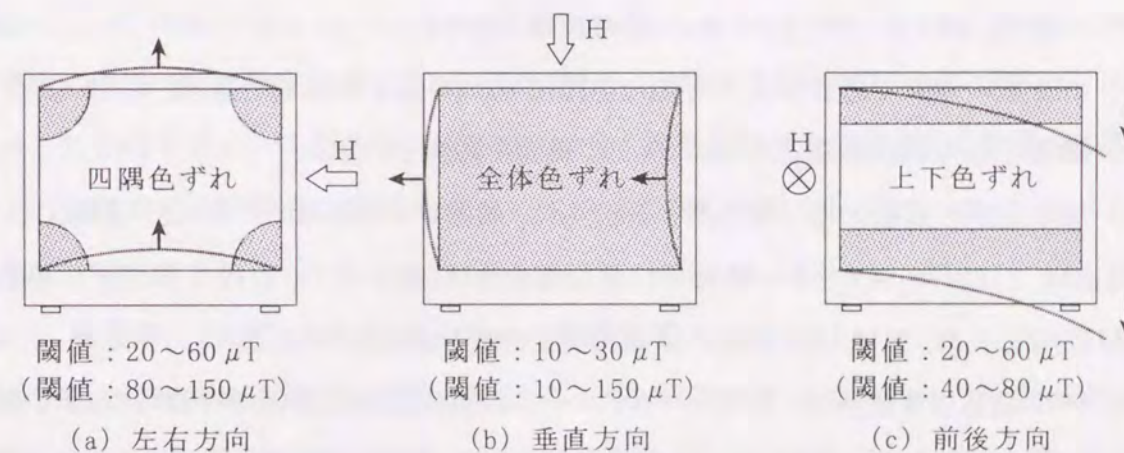


図2.3.2 直流磁場の印加方向とCRT色ずれ現象の関係

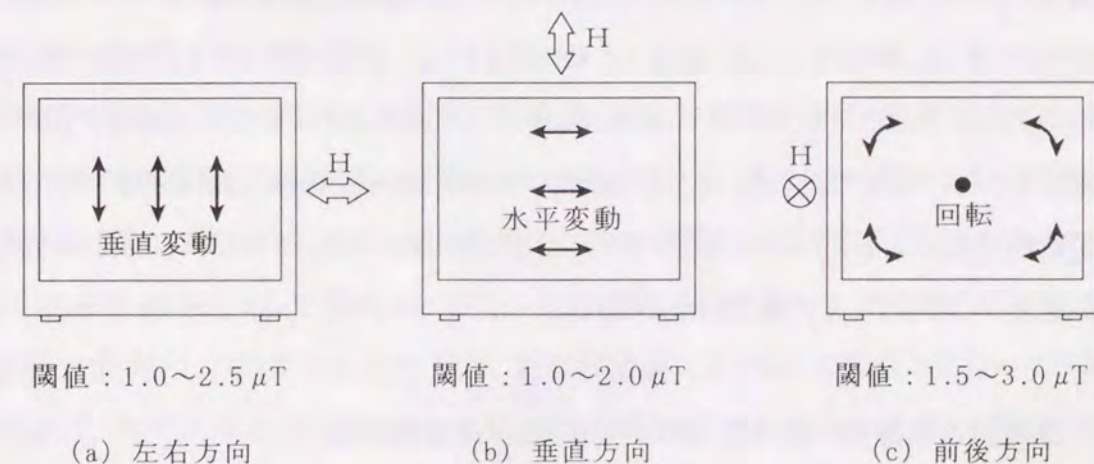


図2.3.3 交流磁場の印加方向とCRT揺れ現象の関係

2.4 磁場による障害事例

本節では、建物内部で発生した磁場による障害事例を紹介する。いずれも筆者が直接対応した事例で、対策を含む詳細については後の章で説明する。

2.4.1 病院における MRI 漏洩磁場の周辺機器への影響

既存病院の増築部分に、MRI 装置が設置されることになった。図 2.4.1 に MRI 室周辺の状況を示す。MRI 装置は、磁束密度 1.5T 仕様の超電導マグネット(ノン・シールド方式)を使用したものである。今回のケースではないが、MRI 装置から発生する漏洩磁場の影響で他の医療機器に障害が発生した事例が起きていた。そこで、MRI 室の設計・施工に当たり、ユーザー(病院、MRI メーカー)から次のような要求があった。

- 1) MRI 室の外部で患者が立入可能な空間に 0.5mT 以上の磁場を漏洩させない。
- 2) 隣接する X 線検査室に 0.1mT 以上の磁場を漏洩させない。
- 3) MRI 室内の磁場の均一度を高めるとともに、周囲からの磁気ノイズの侵入を抑える。

理由は、1)はペースメーカー保持者に悪影響を及ぼさないため、2)は X 線装置に悪影響を及ぼさないため、3)は MRI 装置の画像精度を安定させるためである。

本 MRI 装置は米国製で、磁気シールドルームの基本設計は米国で行われていた。仕様書の中で、1)、2)を満足させるために純鉄の厚板で床及び天井を除く四周にシールド壁を構成すること、シールド壁の適当な位置に出入口、監視窓、設備開口を1箇所ずつ設けることが謳われていた。また、3)に関しては、磁場の均一度を高めるために周辺に用いる鉄筋等を非磁性体(高 Mn 鋼)とすること、磁気ノイズの侵入は 1)、2)を満足させることで抑制できることが示されていた。ただし、これらの根拠となるデータは示されておらず、完成するまで性能を確認できない状況であった。そこで、磁気シールド効果を予測し、細部設計を行うために磁場数値解析によるシミュレーションを行うことになった。また、シールド効果を評価する方法が定まっておらず、その提案も求められた。

2.4.2 送電線近傍建物における CRT ディスプレイの画像障害

軽量鉄骨造 2 階建の事務所ビルにおいて、パーソナルコンピューターの CRT ディスプレイ画面に変動を伴う揺れ現象が認められ、日常業務に支障を来しているとの相談があった。

図 2.4.2 に建物周辺の状況を示すが、事務所の南側上空に送電線が走っていた。これは、複導体 2 回線からなる 154kV 特別高圧架空送電線(三相交流 50Hz)で、電流は平常時 1300~1800A_{rms} が流れている。また、鉄塔間でたるみがあり、事務所はこの鉄塔間中央の最低点(高さ 22333mm)近くに位置していた。

一般に、送電線周辺の電磁環境としては、以下の点に注意する必要がある。

- 1) 交流磁場 : 電流回りに発生する商用周波数の磁場。
- 2) 電磁誘導 : 交流磁場により近傍の電線に誘導電流が流れる現象。
- 3) 静電誘導 : 高電圧近傍で絶縁された物体に電荷がたまる現象。
- 4) コロナ放電 : 電線や碍子から生じるラジオ雑音、テレビ雑音、コロナ騒音等のノイズ。

電磁環境調査を行った結果、2)~4)に関しては、今回は特別問題なかった。交流磁場が原因で、CRT 画面が揺れているものと思われる。

現地には、1 階、2 階合わせて 50 台程度のパーソナルコンピューターが設置されていた。すべての CRT をチェックしたところ、階別では 2 階、部屋別では送電線近くに位置する部屋、同一の部屋内では外壁側に設置されたものに大きな揺れが認められた。

2.4.3 事務所における CRT ディスプレイの画像障害

鉄骨造 8 階建の事務所ビル 3 階において、一部のパーソナルコンピューター用 CRT ディスプレイで色ずれ現象が認められた。建物の構造は、柱は鉄骨鉄筋コンクリート造、梁は鉄骨造、床は鉄骨梁と一体化された合成スラブである。図 2.4.3 に周辺の状況を示す。CRT ディスプレイは普通の事務用机の上に単独で設置されており、他の CRT の設置環境と別段違いはなかった。

色ずれ現象は、直流磁場により CRT の電子ビームの軌道が曲げられた場合に生じる。閾値は、画面サイズ、種類等によって異なるが、10~20 μ T 程度とされている⁷⁾。この現象は、電源を入れたまま CRT ディスプレイを回転、あるいは移動させると生じることが多い。これは、CRT 内部に組み込まれた磁気シールド材の反磁場作用が効かなくなるためである。普通は電源を一旦落として再度入れると、CRT の消磁機構により現状の磁場と見合った反磁場が創出され、色ずれ現象は解消する。ただ、この機能は元来地磁気を対象としたものであり、磁場が所定の値以上になると対応できなくなる。筆者が別途行った実験によると、その値は 80 μ T 程度(図 2.3.2)である。今回は、このような消磁対策では対応できなかった。

2.4.4 マンションにおけるテレビの画像障害

鉄筋コンクリート造 15 階建のマンション 5 階において、家庭用テレビで色ずれ現象が認められた。図 2.4.4 に周辺の状況を示すが、テレビは 14inch の大きさを、部屋のコーナー部に木製のテレビ台に載せて設置されていた。

テレビの色ずれ現象発生メカニズムは、CRT ディスプレイと同様である。ただ、大画面化やハイビジョン化は色ずれをより一層目立たせるもので、色ずれ現象の閾値は小さくなる。また、事務所におけるパソコンの設置場所はある程度移動できるが、住宅内のテレビの場合、その移動は容易ではない。

なお、テレビ画像の場合、磁場による色ずれ現象の他に、テレビ電波の反射によるゴースト現象等も含まれている場合があり、区別して考える必要がある。今回のケースでは、明らかに直流磁場による色ずれ現象であった。

2.4.5 工場における無人搬送車の走行障害

鉄骨造 3 階建の精密組立工場 3 階において、ある一定の場所で無人搬送車が異常停止を繰り返すという障害が発生した。建物の構造は、柱・梁は鉄骨造、床は型枠代わりのデッキプレートであるフラットデッキ敷込の鉄筋コンクリート造である。図 2.4.5 に周辺の状況を示すが、他の場所と別段の違いはなかった。

無人搬送車は、床面に連続して貼られた光学式テープをガイドとして走行するものである。走行の制御は、床面の所定の箇所に貼られた番地磁石の情報を車上の番地センサーが読み取り、各番地に応じて停止、右折、左折という動作指示をコンピューターが出すことにより行われる。番地磁石は長さ 300mm、幅 100mm、厚さ 1mm のゴムフェライト磁石で、上面を N 極とした両端のクロック信号用磁石と、内側の 8 つの番地情報用磁石で構成されている。番地情報用磁石は、N 極を 1、S 極を 0 に対応させた 8 ビット情報を有し、256 種類の番地を表すことができる。ただし、実際に使われているのは最初の 4 ビットのみで、残りはシステム拡張用の予備ビットでいずれも上面 S 極となっている。したがって、使用されている番地は 0～15 のみである。

一方、番地センサーには、長さ 320mm の樹脂製筐体の中にクロック信号検出用として 2 個、番地検出用として 8 個の磁気センサーが番地磁石と同じ間隔で内包されている。磁気センサーは、番地磁石から発せられる磁気の垂直方向成分のみを検出する。番地センサー

は、磁気センサーの位置が床面から 25mm の高さになるように設置されており、番地磁石の真上に来た時、すなわち両端のクロック信号が同時に検出された時に 8 ビットの番地情報を読み取るようになっている。検出される磁気の閾値は、クロック信号、番地情報とも $200\mu\text{T}$ である。

ここで、磁気センサーの閾値以上の磁場が床面に存在すると、番地磁石と誤認識される可能性がある。また、床面の磁場が番地磁石の磁場と重なり、不正確な情報が提供される可能性もある。一方、無人搬送車は安全のため、本来存在しない番地が検出されると緊急停止するようになっている。16 番地以降の番地は存在しないため、緊急停止の対象となる。今回、障害が発生した場所は番地磁石が貼られていないところであり、床面に存在する磁場が架空の番地磁石を創り出し、それが本来存在しない番地であるため、無人搬送車が停止したものと考えられる。ちなみに、番地センサーで読み取られる磁気情報がすべて N 極の場合 255 番地となり、無人搬送車は停止する。

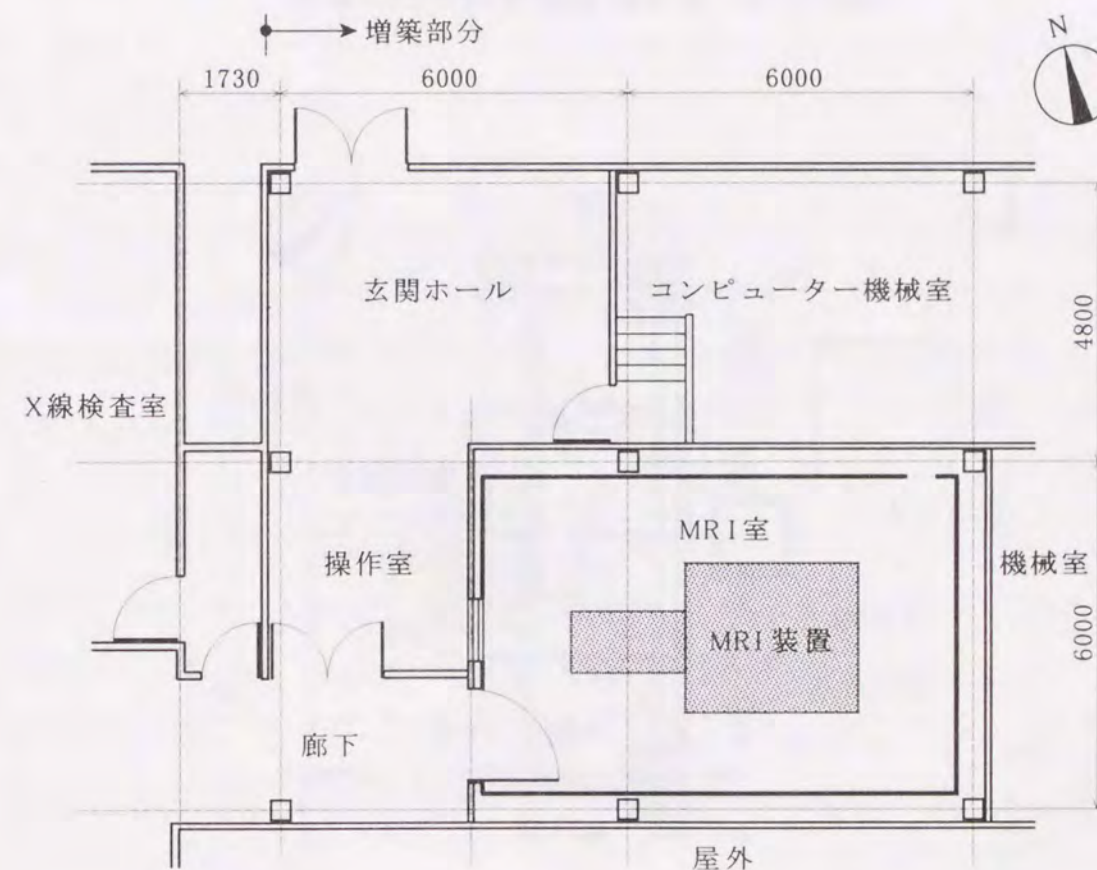
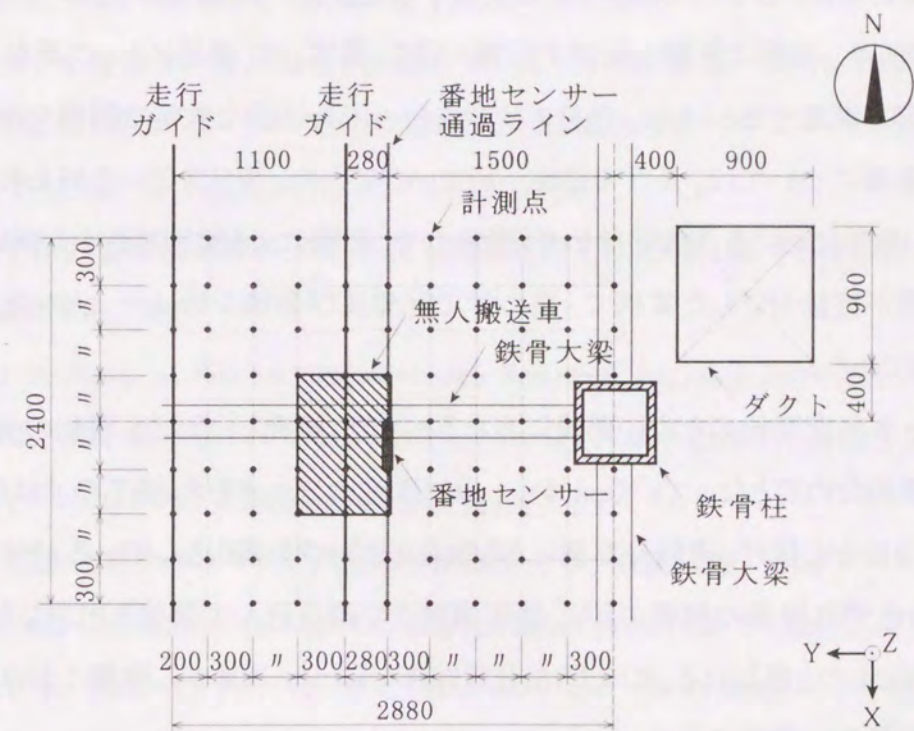
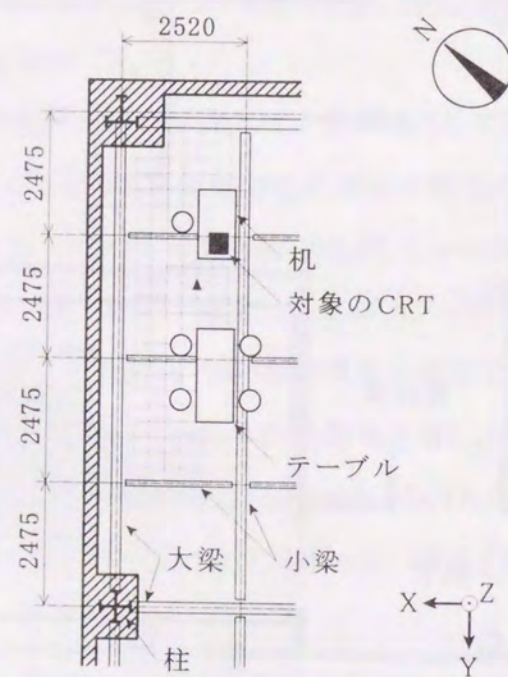
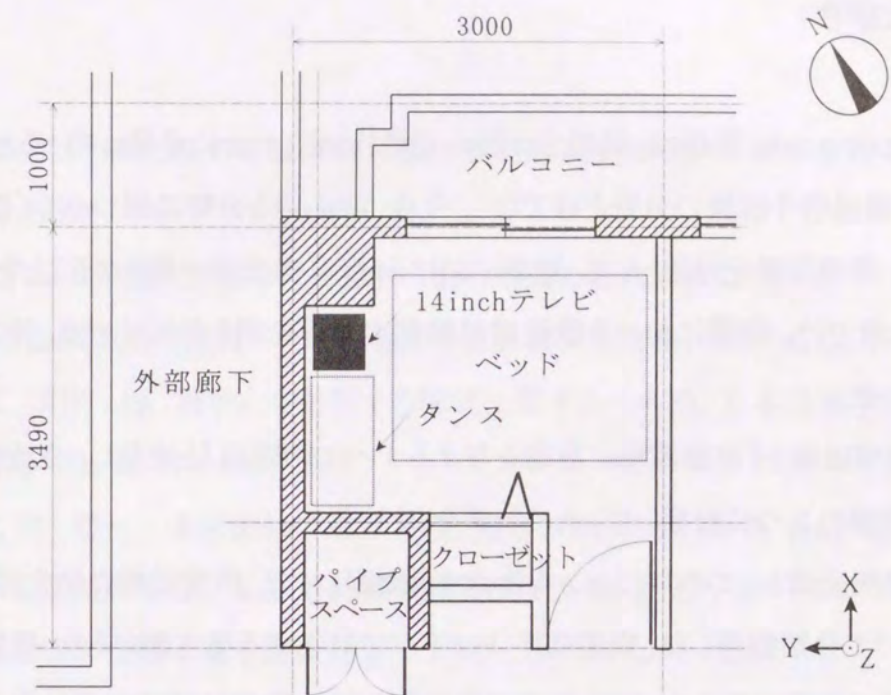
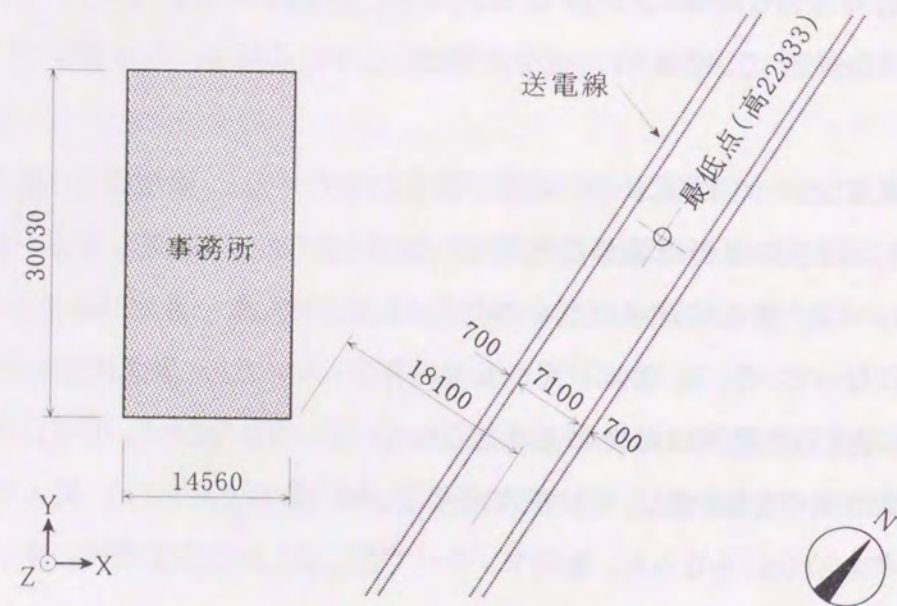


図2.4.1 MRI室周辺の状況



2.5 あとがき

建築におけるEMC問題は、認識され始めて間がなく、十分に浸透しているとは言い難い。しかし、情報通信や医療の分野だけでなく、今後はあらゆる分野に関わってくる問題である。本研究は、環境磁場を対象として、建築におけるEMC確立の一助となることを目指したものである。本章では、建築における環境磁場問題の全容を明らかにすべく、体系的な分析、整理を行った。

まず、環境磁場を『建築環境に影響を与えるすべての磁場』と定義し、直流磁場、交流磁場、変動磁場の3つに分類して、その特徴をまとめた。

次に、建物全体としてのエミッションを決定する要因として、環境磁場の発生源を建物外部、内部に分けて分類整理した。環境磁場にはすべて対応する発生源があり、発生源の性質によって磁場の種類が決まる。建物外部に発生源を持つ磁場は建物内部に侵入して設置機器に影響を及ぼす。また、建物内部に発生源を持つ磁場は周辺の設置機器に影響を及ぼす。これら環境磁場の強度レベルを計測により明らかにした。

次に、建物全体としてのイミュニティを決定する要因として、磁場の機器への影響について分類整理した。機器に影響を及ぼす磁場の強さ(閾値)は、機器によって異なる。メーカーの設置基準を調査するとともに、独自の実験を行って具体的な数値で閾値を示した。また、人体への影響については、是非の結論が出ていないため、現状を述べるに止めた。

最後に、建築における具体的なEMI問題として、磁場による障害事例を5例紹介した。いずれも筆者が直接対応した事例で、後の章で計測及び数値シミュレーションを用いて解決を図るものである。

本章は、本研究開始のための前段に当たるもので、研究というよりも現状の分析を中心とした解説書的な内容となっている。しかし、単に既往のデータをまとめるのではなく、一步踏み込んだ分析を心掛け、実験や実測による独自のデータを盛り込んでいる。特に、CRTディスプレイの色ずれ現象の解明のうち、消磁機構まで踏み込んで閾値を把握したデータはこれまでにないものと思われる。このような分析結果をもとに、次章から建築におけるEMC確立のための具体的研究に入る。

参考文献

- 1) 新納敏文, 竹内信次郎: 磁場障害に関する実態調査研究, 三島光産技報, No.20, pp.45-55, 1999
- 2) 新納敏文, 加川幸雄: 送電線近傍建物における磁場低減対策について — 計測と数値解析による低減効果の検証 —, 日本建築学会計画系論文集, No.494, pp.85-90, 1997
- 3) 新納敏文, 清川 博: 建物から発生する磁気に関する一考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集(D), pp.379-380, 1991
- 4) 大西 智, 林 憲一: 多対撚線の磁界特性, 信学技報, EMCJ99-8, pp.1-6, 1999
- 5) 日本電子工業振興協会: 工業用計算機設置環境基準, JEIDA-29-1990, 1990
- 6) 電子情報通信学会編: 電子情報通信ハンドブック, オーム社, 1988
- 7) 清水義則: 外部磁界がテレビ受信機に与える影響と改善法, ARK Quarterly, Vol.2, No.1, pp.9-21, 1989
- 8) 齋藤一郎: CRTにおける磁気シールド材の磁気特性と地磁気ドリフト, 電子情報通信学会論文誌C-II, Vol.J79-C-II, No.6, pp.311-319, 1996
- 9) 西村恒彦, 小塚隆弘, 亀井裕孟, 伊藤正光, 飯尾正宏, 飯沼 武, 池平博夫, 福田信男, 館野之男, 有水 昇: NMR使用環境における植込み型ペースメーカーの動作に関する検討, NMR医学, Vol.3, No.1, pp.97-102, 1983
- 10) 電磁界生体影響問題調査特別委員会: 電磁界の生体影響に関する現状評価と今後の課題, 電気学会, 1998
- 11) National Institute of Environmental Health Sciences, National Institutes of Health: NIEHS REPORT on Health Effects from Exposure to Power-Line Frequency Electric and Magnetic Fields, NIH Publication, No.99-4493, 1999
- 12) 高圧線問題全国ネットワーク: 高圧線と電磁波公害, 緑風出版, 1995
- 13) International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection: Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (up to 300GHz), 1997
- 14) 日本建築学会磁場計測評価ワーキンググループ: 環境磁場の計測技術 — 現場における計測の事例 —, 日本建築学会, 1998

- 15) 日本建築学会電磁環境と建築設計編集ワーキンググループ：電磁環境と建築設計 — はじめての設計者のために—, 日本建築学会, 2000
- 16) 赤尾保男：環境電磁工学の基礎, 電子情報通信学会, 1991
- 17) 福田 務, 相原良典：電力技術, オーム社, 1991
- 18) John D.Kraus：Electromagnetics, McGraw-Hill Inc., 1992

第3章 環境磁場の計測法

3.1 まえがき

環境磁場の把握, 評価のベースとなるのは計測である。正しい計測を行うことが, 正しい判断を下すための基本となる。正しい計測とは目的に見合った適切な計測であり, その根拠として標準計測法が必要となる。しかしながら, 建築において環境磁場の標準計測法はなく, 適当な磁場計測器(ガウスメーター)を使って各自の判断で計測しているのが実情である。環境磁場は磁場計測器さえあれば誰でも比較的容易にデータが入手できるため, 誤った計測法で計測し, 間違った判断が下されることも少なからずあったようである。

このような状況下, 日本建築学会では1994年に環境工学本委員会電磁環境小委員会に磁場計測評価ワーキンググループを設置し, 環境磁場の標準計測法に関する研究を進めてきた。筆者は, この研究に初期から加わり, 幹事として活動してきた。1998年, ワーキンググループの研究成果^{1), 2)}を取りまとめ, 磁場環境の計測に携わる技術者を対象とした実務上の手引書³⁾を発刊した。

本章は, この研究成果をもとに, 別途実施した実験や実測等に基づく筆者独自の知見を加え, 環境磁場を適切に評価する計測法としてまとめたものである。ワーキンググループの研究が環境磁場の計測を標準化して, 実務的な側面で誰でも間違いのない計測ができることを目指したものであるのに対し, 本研究では建築におけるEMCの定量的評価法として, 環境磁場の理想的, かつ実用的な計測法を提案する。磁場計測の分類から始め, 磁場計測器, 磁場計測の方法を検討し, 本研究で用いる計測システムの構築まで行う。これは, 建築におけるEMC, すなわち建物のエミッション, イミュニティを定量的に評価するための大きなツールとなる。

3.2 磁場計測の分類

環境磁場の計測を計画する場合、何のために行うか(計測の目的 Why), 何を対象に行うか(計測の対象 What), どのように行うか(計測の規模 How)をまずは明確にしておかなければならない。併せて、いつ行うか(計測の時期 When), 誰が行うか(計測者 Who), どこで行うか(計測の場所 Where)も決定しなければならない。

本節では、計測の目的、対象、規模、時期、計測者、場所の観点から、磁場計測の分類を行う。

3.2.1 計測の目的

(1) 機器の障害の原因調査

機器にイミュニティレベルを超える磁場が印加されると障害が発生する。その原因を特定し、適切な対策を講じるためには、磁場の発生原因を突き止め、その特性を明らかにしなければならない。磁場計測はその目的で行われる。例えば、鉄骨構造物におけるCRTの色ずれ障害調査、電車線周辺における電子顕微鏡の画像障害調査等がある。

(2) 磁気シールドルームの性能評価

MRI装置の漏洩磁場の遮断や電子顕微鏡の画像障害防止等の目的で、磁気シールドルームが建設される。磁気シールドルームは、内部に設置される機器が十分に性能を発揮できるように仕様を決めて建設されるが、完成後、性能を評価する目的で磁場計測が行われる。実際の磁場を印加した上で計測を行い、シールド性能を評価するのが一般的であるが、地磁気や大型コイルによる疑似的な磁場の印加により評価を行うこともある。

(3) 機器・人体への影響予測

送電線、変電所等の近傍に建物を計画する際、内部に設置を予定している機器に対して磁場の影響予測を行う必要がある。磁場計測はその目的で行われる。現地の磁場の計測結果と設置予定の機器のイミュニティをもとに、何らかの影響があると判断された場合は対策が検討される。

また、交流磁場と癌の関係、VDT(Visual Display Terminal)による白内障、流産の心配等、磁場による健康障害が一部で話題となっており、身近な家電製品から漏洩する磁場を計測する必要性も増えつつある。家電製品の特性を理解した正しい計測が求められる。

(4) 実験室における確認実験

環境磁場の直接的な計測ではないが、(1)～(3)を補う目的で、実験室で確認実験が行われ、評価のために磁場計測が行われる。実験室での計測は、計測環境が良い、計測システムが整っている等の長所がある反面、試験体のサイズが限定される、印加磁場が実際の磁場と異なる等の短所がある。相似則を始め、実際と実験との相関を十分に考慮した実験及び計測が求められる。

3.2.2 計測の対象

(1) 直流磁場

直流磁場は、時間的変動がない定常磁場である。よって、計測では瞬時値としての磁場の強さ及び方向を把握し、ベクトルで評価すればよい。

例) MRI装置、残留磁気、地磁気等

(2) 交流磁場

交流磁場は、磁場の強さと方向が周期的に変わっており、さらに三相交流では3本の電線間の位相差、複数の電線の影響等により複雑な性状を示す。よって、計測では短時間の時間軸波形を計測して、磁場の強さ、周波数、位相、波形等を把握する必要がある。

例) 送電線、変電所、電車線(交流)、電気設備、電気配線、屋内電気機器等

(3) 変動磁場

変動磁場は、1Hz程度あるいはそれ以下の周波数の緩やかなで不規則な変動を示す。例えば電車線周辺では、電車の運行状況や複数の電車の影響が重なって複雑な性状の変動磁場が現れる。よって、計測では中・長時間の時間軸波形を計測して、磁場の強さ、方向、波形等を把握する必要がある。

例) 電車線(直流・交流)、自動車、エレベーター等

3.2.3 計測の規模

(1) 点の次元での計測(小規模な計測)

1点あるいは数点を対象として行う。機器の障害の原因調査として機器の設置位置で行う計測では、機器に印加されている磁場の特性を直接把握できる。機器・人体への影響予測では、計測点とその周辺を代表する点であれば、これだけでも全体が把握できる。

(2) 線の次元での計測(中規模な計測)

磁場の距離減衰特性を求めるために行う。磁場発生源から適当な間隔で、計測点を連続的に設け、各計測点の基準軸が一致するようにプローブを設置して計測を行う。

(3) 面の次元あるいは立体的な空間での計測(大規模な計測)

磁場は3次元空間に広がっており、その分布を求めるために行う。適当な間隔でメッシュ状に設定した多数の計測点で、計測器を移動しながら計測を行う。立体的な空間の計測では、高さ方向にも複数の計測面を設け、プローブの設置高さを変えて順次計測を行う。

3.2.4 その他(計測の時期、計測者、計測の場所)

A. 計測の時期

計測の対象により、計測を実施する時期は異なる。

直流磁場は、時間的変動がないため、基本的には計測が可能となればいつ計測してもよい。ただし、周辺の状況が変わると影響が出る場合がある。

交流磁場は、周期的な変動とともに電流の変動に伴う磁場変動がある。送電線では、目的に応じて計測の時期(季節、曜日、時刻)を選択する必要がある。

変動磁場は、基本的には磁場による影響が予想される時間帯での計測となる。計測時間もそれに合わせて設定される。

B. 計測者

目的により、計測を実施する形態は様々である。

MRI装置等のように、機器メーカーやシールド専門業者によって実施される計測は、機器の動作保証、磁気シールドルームの性能保証の観点から行われる。施主が第三者の計測専門業者に委託する場合もある。

一方、建築サイドでは、3.2.1項で示した目的に従って磁場計測を行っている。現状では、磁場に関して見識の深い研究者や技術者が行うことが多いが、今後は計測の機会が増えるのに伴い、広く一般の技術者が実施することが予想される。本研究で目指す磁場計測法の確立は、この辺りを踏まえたものである。

C. 計測の場所

実験室における確認実験を除くと、現地で行うのが基本である。屋外での計測の場合、環境条件が悪いケースも多い。再現性が確保される場合は、別の場所でも計測が可能となる。

3.3 磁場計測器

磁場計測の中心をなすのは、磁場計測器(ガウスメーター)である。計測の対象は、磁束密度である。磁束密度の単位はSI単位系ではテスラ[T]であるが、CGS電磁単位系ではガウス[G]であったことから、磁場計測器の名称としては「ガウスメーター」が今日でも使われている。磁場計測器に万能なものはなく、対象や目的に合わせて最適な計測器を選定する必要がある。そのためには、磁場計測器の性能や特性を十分に把握しておく必要がある。また、環境磁場の性状を正しく認識するとともに後で分析を行うためには、データ記録計等の周辺機器の併用も必要となる。

本節では、磁場計測器を中心に、その周辺機器まで含めて性能及び特性の検討を行う。

3.3.1 磁場計測器の種類

磁場計測器は、磁気を検出するプローブ(検出器)と、プローブから送られてきた信号を処理して表示する計測器本体から構成される。またプローブは、磁気を検出するセンサーを内蔵したセンサー部、センサー部と計測器本体を接続するプローブケーブル及びコネクタで構成される。センサーの磁気検出方式により、対応可能な磁場の強さ・種類等が決まる。環境磁場を対象とすると、磁気検出方式は主にホール素子方式、フラックスゲート方式、磁気発振方式、サーチコイル方式の4種類がある³⁾。図3.3.1は、磁気検出方式による計測可能範囲と計測対象磁場の関係を示す図である。磁場計測器の選択に当たっては、計測対象の大まかな磁場の強さと種類を確認した上で、各機種仕様を調べ、計測目的に合ったものを選択する必要がある。

本研究では、磁場計測器の評価を兼ねながら、目的に応じて簡易な計測から精細な計測まで幅広く実施するという観点から、4種類の磁気検出方式すべての磁場計測器を使用した。本研究で使用した磁場計測器の種類と性能を表3.3.1に示す。磁場計測器の性能は、計測器メーカーのカタログや取扱説明書^{4)~12)}に記載されているものである。なお、HM-201に関しては、2種類のプローブをモードを切り替えて使用することにより、磁気発振とサーチコイル、2つの方式の計測器として使用できる。それぞれの性能は異なるため、2つに分けて記載している。

表 3. 3. 1 磁場計測器の種類と性能

磁場計測器	メーカー	磁気検出方式	計測範囲	分解能
9903	F.W.BELL	ホール素子	300 μ T $\sim$ 3T	0.1 μ T $\sim$ 1mT
640	F.W.BELL	ホール素子	100 μ T $\sim$ 1T	(0.1 μ T $\sim$ 1mT)
4048	F.W.BELL	ホール素子	20mT $\sim$ 2T	10 μ T $\sim$ 1mT
THM7025	METROLAB	ホール素子	20mT $\sim$ 2T	10 μ T $\sim$ 1mT
MAG03-MC	Bartington	フラックスゲート	100 μ T, 500 μ T	(アナログ)
MM-340	エムティアイ	フラックスゲート	100 $\cdot$ 1000 μ T	0.01 $\cdot$ 0.1 μ T
HM-201	エムティアイ	磁気発振	200 μ T	0.1 μ T
HM-101	エムティアイ	磁気発振	200 μ T	0.1 μ T
HM-201	エムティアイ	サーチコイル	200 μ T	0.1 μ T
4090	F.W.BELL	サーチコイル	20 $\cdot$ 200 μ T	0.01 $\cdot$ 0.1 μ T

磁場計測器	周波数特性	計測軸の数	表示値(交流磁場)	データ出力
9903	DC($\sim$ 100Hz)	三軸	実効値	GP-IB, アナログ 3V
640	DC $\sim$ 400Hz	三軸(切り替え式)	実効値	アナログ 1V(5V)
4048	DC $\sim$ 5kHz	一軸	実効値	なし
THM7025	DC	三軸	—	RS-232C
MAG03-MC	DC $\sim$ 1kHz	三軸	表示なし	アナログ 10V
MM-340	DC $\sim$ 200Hz	三軸	波高値	RS-232C, アナログ 1V
HM-201	DC	一軸	—	アナログ 1V
HM-101	DC	一軸	—	なし
HM-201	50 $\sim$ 20kHz	一軸	波高値	アナログ 1V
4090	20 $\sim$ 2kHz	一軸	実効値	アナログ 2V

磁場計測器	零点調整	プローブ形状	プローブケーブル長	電源方式
9903	磁気シールドケース	ϕ 8 $\times$ 50mm(125mm)	9m(1.5m+7.5m)	AC115V
640	磁気シールドケース	ϕ 8 $\times$ 50mm(100mm)	16.5m(1.5m+15m)	AC115V
4048	磁気シールドケース	4.2 $\times$ 64mm(112mm)	1m	単 3 $\times$ 4
THM7025	磁気シールドケース	12 $\times$ 12 $\times$ 100mm	1m	006P $\times$ 1, DC9V
MAG03-MC	なし	ϕ 25 $\times$ 202mm	5m	AC100V, DC12V
MM-340	磁気シールドケース	25 $\times$ 25 $\times$ 40mm	5m	AC100V
HM-201	電子回路	ϕ 11 $\times$ 130mm	2m	AC100V, 単 3 $\times$ 4
HM-101	電子回路	ϕ 11 $\times$ 130mm	2m	DC6V, 単 3 $\times$ 4
HM-201	なし	ϕ 11 $\times$ 130mm	2m	AC100V, 単 3 $\times$ 4
4090	なし	150 $\times$ 82 $\times$ 31mm	なし	006P $\times$ 1

以下、磁場計測器の性能についてポイントを記す。

(1) 計測範囲

環境磁場の特徴を表す第一は、磁場の強さである。磁場の強さの計測可能な範囲が計測範囲(計測レンジ)である。計測範囲を何段階かに切り替えて使用できるタイプもある。本表では、2段階切り替え式のものは両値、3段階以上切り替え式のものは最小値 $\sim$ 最大値を記載している。なお、MAG03-MCは切り替え式ではなく、2種類のプローブを保有している。

(2) 分解能

計測器が表示する最小単位である分解能は、計測範囲と比例関係にある。アナログ表示(640)では、最小目盛りの 1/10 を分解能とする。弱磁場を計測する場合、出力信号に含まれている雑音の周波数成分や誘導雑音が問題となることが多い。そのため、計測したい計測値の桁よりも更に一桁低い雑音レベルの分解能を有する計測器を使用する必要がある。

(3) 周波数特性

磁場計測器は、直流(DC)用と交流(AC)用に分けられる。直流磁場は直流用、交流磁場は交流用(周波数によっては直流用も可)、変動磁場は直流用で計測する。計測に際しては、計測器の周波数特性が対象磁場の周波数帯をカバーしているか確認する必要がある。デジタル計測器では信号処理でローパスフィルターがかけられており、一定の周波数以上では出力値が小さくなる。また、交流用では低い周波数でもカットされるので注意を要する。

(4) 計測軸の数

磁気を検出するセンサーは指向性を有しており、1つのセンサーだけからなる一軸プローブは、磁気検出軸方向と磁場の角度により示す値が異なる。直交する3つのセンサーからなる三軸プローブは、3成分の磁束密度を同時に計測することが可能なため、全磁力を求めることができる。ただし、センサーの大きさは有限で、厳密に言えば3つのセンサーは同じ位置にはないので、磁場が複雑に変化する空間では表示された全磁力の値は実際と異なる。

(5) 表示値(交流磁場)

直流磁場や変動磁場の計測では、瞬時値が表示されるので問題ないが、交流磁場の計測では演算処理された値が表示されるので注意を要する。

ここで、磁場の表示値に関わる用語を整理しておく。以後、本研究ではこの用語をもとに計測値を表現する。

瞬時値：計測のタイミングにおける瞬間の値をいう。直流磁場では一定、交流磁場では周期的に変化、変動磁場では緩やかに変動する。

正弦波交流磁場：磁束の強さと方向が次式で表される磁場を正弦波交流磁場という。地磁気等の直流成分は取り除かれたもので、零を中心に正負に変化する。

$$B = B_m \cdot \sin \omega t \quad (3.3.1)$$

波高値 B_m ：波高値は、図 3.3.2 に示す正弦波交流磁場の振幅を意味し、零レベルから山までの高さあるいは谷までの深さを指し、山から谷までの変化値 B_{p-p} (peak to peak) の半値をいう。磁場計測器では、交流波形を平均値検波してから波高値に換算する。

$$B_m = B_{p-p} / 2 \quad (3.3.2)$$

以後、本研究では特記なき場合、交流磁場は波高値で表示する。

平均値 B_{mean} ：図 3.3.2 に示す正弦波交流磁場の正の半波サイクルにおいて、横軸と $\omega t = 0$ から半波サイクルの位相角 π の間に囲まれる磁場波形の平均値は次式で与えられる。

$$B_{mean} = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} B_m \cdot \sin \omega t \cdot d\omega t = \frac{2B_m}{\pi} \quad (3.3.3)$$

真の実効値 B_{rms} ：正弦波交流磁場の実効値は、次式で与えられる。

$$B_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T B_m^2 \cdot \sin^2 \omega t \cdot d\omega t} = \frac{B_m}{\sqrt{2}} = \frac{\pi B_{mean}}{2\sqrt{2}} \approx 1.111 \cdot B_{mean} \quad (3.3.4)$$

磁場計測器には、平均値検波してから実効値に換算して実効値表示するものと、実効値検波した値をそのまま表示する真の実効値表示のものがある。

ピーク値 B_{max} ：図 3.3.3 に示す変動磁場において、計測時間内に何度か現れる極大値をピーク値という。変動磁場では、地磁気等の直流成分を含めて評価する。

最大値 B_{pmax} ：図 3.3.3 に示す変動磁場において、計測時間内で最も大きい値を最大値という。逆に、最も小さい値を最小値 B_{pmin} という。

(6) データ出力

計測データの出力形態には、データ記録計用のアナログ出力端子、コンピューターに接続するための RS-232C・GP-IB 用出力端子等がある。アナログ出力端子からは計測値に比例した電圧(アナログ値)、RS-232C・GP-IB 用出力端子からは信号処理回路で演算されたデータ(デジタル値)が出力される。

(7) 零点調整

計測前に必ず行わなくてはならない校正作業に零点調整がある。長時間に渡る計測では、

適当な時間毎にも零点調整を行う必要がある。方法としては、磁気シールドケース(ゼロガウスチャンバー)の中の零磁場空間にセンサー部を入れて零点を校正する方法が一般的である。磁気発振方式の磁場計測器では、電子回路的な方法としてプローブを固定した状態でセンサー回路の極性をスイッチで切り替え、その前後の指示値の絶対値が等しくなるように零点調整用ボリュームで調整する方法が採られている。なお、簡易型の磁場計測器等には、零点調整機能がないものがある。この場合、公的標準供給機関あるいは計測器メーカーで定期的に校正を行う必要がある。

(8) プローブ形状

プローブのセンサー部に収納されたセンサーは、形状や検出方式により計測するポイントが異なる。また、三軸プローブでは 3 つのセンサーが空間を隔てて設置されており、厳密に言えば同じ位置を計測している訳ではない。センサーの正確な位置、寸法、三軸直交度について調査しておく必要がある。空間の磁場分布が大きく変化する場合や、計測点間隔が狭い場合には計測値に誤差が生じる恐れがあるため、小型プローブの使用が求められる。一方、空間の磁場分布がほとんど変化しない場合や、計測点間隔が 1m 以上の場合には、センサー形状に対して対象空間が相対的に大きくなるので、センサー形状による誤差はほとんど無視できる。

(9) プローブケーブルの長さ

広い空間の環境磁場の計測では、プローブを計測器本体から離して、プローブのみを移動させながら計測することが多い。長尺ケーブルの利用、あるいは延長ケーブルの利用で可能となるが、ケーブルによる信号減衰特性を確認しておく必要がある。

(10) 電源方式

環境磁場の計測は屋外で計測する機会が多く、電池式あるいはバッテリー駆動式が便利である。AC100V を必要とする磁場計測器では、インバーターや小型発電機を利用するとよい。自動車用バッテリーを AC100V に変換するインバーターでは、150~250W の家庭用電気器具まで使えるようにした高効率軽量小型のものもある。磁場計測器に用いる場合は、電気の質(電圧、波形、ノイズ)に注意する必要がある。

3.3.2 磁場計測器の性能確認試験

前項で磁場計測器の性能について説明したが、これはあくまでメーカーが示すもので、実際には十分な性能を有していない場合や、使用条件によっては満足な性能を発揮できない場合も考えられる。データの異常を速やかに判断し、適切な計測を行うためには、磁場計測器の長所、短所を把握しておく必要がある。しかしながら、磁場計測器の性能について報告した事例はあまりない。そこで、磁場計測器の性能確認試験を実施した。

試験対象の磁場計測器は、以下の機種である。

- 1) 9903(三軸型ホール素子方式)
- 2) THM7025(三軸型ホール素子方式)
- 3) MAG-03MC(三軸型フラックスゲート方式)
- 4) HM-201(直流：一軸型磁気発振方式, 交流：一軸型サーチコイル方式)
- 5) 4090(一軸型サーチコイル方式)

これらは、本研究で主に使用した磁場計測器である。評価は計測器の表示値を目視で読み取ることにより行ったが、MAG-03MC は計測器側に表示機能がないため、デジタルマルチメーターR6871E(アドバンテスト)に出力して表示値を読み取った。三軸型では、磁場に対して方向が設定しやすい軸を対象とした。

性能確認試験の内容と結果について、以下に述べる。

(1) 感度試験

磁場発生装置として、0～100 μT まではヘルムホルツコイル(外径 ϕ 1500mm, 内径 ϕ 1300mm, コイル間隔 1500mm, 巻数 66 ターン, 駆動電流 0～15A, 中心点の最大発生磁束密度 550 μT), 100 μT 以上はソレノイドコイル(外径 ϕ 370mm, 内径 ϕ 100mm, 幅 100mm, 巻数 1008 ターン, 駆動電流 0～10A, 中心点の最大発生磁束密度 54.1mT)を使用した。磁場計測器のセンサー部をコイル中心部に設置し、0 μT , $\pm 10 \mu\text{T}$, $\pm 100 \mu\text{T}$, $\pm 1000 \mu\text{T}$, $\pm 10000 \mu\text{T}$ の直流磁場, 10 μT , 100 μT の正弦波交流磁場(50Hz)を印加して計測器の表示値を読み取った。

表 3.3.2 に結果を示す。THM7025 の直流磁場の弱い領域でやや感度が劣るが、その他は概ね良好な結果を示した。交流磁場に関して、実効値表示の磁場計測器(9903, 4090)では波高値に換算している。

表 3.3.2 感度試験結果

磁場計測器	直流磁場の表示値(上段: +, 下段: -)					交流磁場の表示値	
	0 μT	10 μT	100 μT	1000 μT	10000 μT	10 μT	100 μT
9903	0.0 0.0	10.0 -10.0	99.9 -99.8	998.1 -997.9	9989.3 -9988.5	10.2	102.0
THM7025	0 0	10 -20	90 -90	970 -980	9760 -9810	—	—
MAG-03MC	0.0 0.0	9.9 -9.9	99.5 -99.8	—	—	10.3	103.6
HM-201	0.0 0.0	10.0 -10.0	100.0 -100.0	—	—	9.7	98.4
4090	—	—	—	—	—	10.1	100.9

(2) 周波数特性試験

磁場発生装置として、ヘルムホルツコイルを使用した。プローブのセンサー部をコイル中心部に設置し、10 μT , 100 μT の正弦波交流磁場を周波数 10Hz, 30Hz, 50Hz, 60Hz, 100Hz, 150Hz, 200Hz の順に印加して計測器の表示値を読み取った。なお、THM7025 は直流磁場専用のため、試験は実施していない。

表 3.3.3 に結果を示す。9903 の高い周波数, 4090 の低い周波数で小さい値となったが、その他は概ね良好な結果を示した。なお、実効値表示の磁場計測器(9903, 4090)では波高値に換算している。

表 3.3.3 周波数特性試験結果

磁場計測器	交流磁場の表示値(上段: 10 μT , 下段: 100 μT)						
	10Hz	30Hz	50Hz	60Hz	100Hz	150Hz	200Hz
9903	10.4 103.4	10.3 102.5	10.2 102.0	10.2 101.5	10.1 100.6	9.1 91.2	7.3 72.9
THM7025	—	—	—	—	—	—	—
MAG-03MC	10.1 100.5	10.0 100.2	9.9 99.5	9.9 99.3	9.8 98.4	9.8 97.9	9.7 97.2
HM-201	8.0 81.2	9.6 97.1	9.7 98.4	9.8 98.4	9.8 98.4	9.9 98.6	9.9 98.9
4090	7.0 70.4	10.4 103.6	10.1 100.9	10.0 100.4	10.0 99.8	10.0 99.7	9.9 99.4

(3) 温度特性試験

プローブと計測器本体を温度試験装置内部に設置し、20℃の温度で 1 時間経過後、零

点調整を行い、温度を0℃、10℃、20℃、30℃、40℃、50℃に1時間間隔で変化させて計測器の表示値を読み取った。なお、4090 は交流磁場専用のため直流磁場は検出しないが、表示値の変動を記録した。

表 3. 3. 4 に結果を示す。ホール素子方式の磁場計測器(9903, THM7025)では大きく変動しており、温度変化のある環境での磁場計測においては十分注意する必要があると思われる。その他は、良好な結果を示した。

表 3. 3. 4 温度特性試験結果

磁場計測器	直流磁場の表示値(単位: μ T)						
	20℃	0℃	10℃	20℃	30℃	40℃	50℃
9903	31.0	80.5	45.6	30.1	38.7	49.0	69.3
THM7025	30	110	70	40	60	100	150
MAG-03MC	33.0	32.8	32.9	32.9	33.0	33.1	33.2
HM-201	33.3	33.1	33.2	33.3	33.3	33.4	33.5
4090	0.0	-0.1	0.0	0.0	0.1	0.1	0.2

(4) 零点ドリフト試験

実験室内で磁気シールドケース(パーマロイ製: ϕ 70×500mm, ϕ 50×300mm, 厚さ 2mm の二重構造)内にプローブを固定し、零点調整を実施した後、10 分間隔で計測器の表示値と環境温度を読み取った。試験は 9 時から 21 時までの 12 時間を 1 タームとし、夜を挟んで 3 日間継続した。温度変化による影響をできるだけ排除するため、比較的溫度変化の少ない時期に空調を入れない環境で行った。なお、4090 は交流磁場専用のため直流磁場は検

表 3. 3. 5 零点ドリフト試験結果

磁場計測器	第 1 ターム		第 2 ターム		第 3 ターム	
	表示値(μ T)	温度(℃)	表示値(μ T)	温度(℃)	表示値(μ T)	温度(℃)
9903	-0.8~3.6	19.1~21.8	-1.2~3.3	19.7~22.1	3.5~4.3	24.9~25.8
THM7025	0~40		10~40		20~50	
MAG-03MC	-0.1~0.0		0.0~0.1		-0.2~0.0	
HM-201	-0.4~0.0		-0.3~0.0		-0.7~-1.1	
4090	-0.1~0.1		0.0~0.1		0.0~0.2	

出しないが、参考値として表示値の変動を記録した。

表 3. 3. 5 に結果を示す。温度特性同様、ホール素子方式の磁場計測器(9903, THM7025)でドリフトが大きかった。

(5) 電磁界イミュニティ試験

情報処理装置のイミュニティ試験ガイドライン¹³⁾に示されている「放射電磁界イミュニティ試験・放射アンテナ法」に準拠して実施した。磁場計測器は、0.1 μ T(THM7025 は 10 μ T)の分解能が得られる計測レンジに設定し、零点調整後、3m 法電波暗室内に設置した。電磁界の印加方向は計測器の前面とし、電磁界の強さを 0~10V/m まで徐々に上げ、表示値の変動幅が 0.2 μ T(THM7025 は 20 μ T)に達した時点の電界強度値を記録した。電磁界の周波数は 80MHz, 100MHz, 200MHz, 300MHz, 500MHz, 800MHz, 900MHz で、偏波面は水平及び垂直である。

表 3. 3. 6 に結果を示す。計測値は電磁界の偏波面のうち、イミュニティが低い方の数値で代表した。イミュニティレベルは、機種及び周波数によって異なるが、全体としてホール素子方式の磁場計測器(9903, THM7025)で低い傾向が見られた。いずれの計測器も表示値が変動を始めた後、更に電磁界を強めていくと表示値の変動幅も大きくなった。

表 3. 3. 6 電磁界イミュニティ試験結果

磁場計測器	表示値が変動を始める電界強度(単位: V/m)						
	80MHz	100MHz	200MHz	300MHz	500MHz	800MHz	900MHz
9903	0.2	0.2	0.2	0.1	1.6	1.9	0.7
THM7025	0.1	0.1	0.05	0.1	0.3	0.3	0.3
MAG-03MC	3.6	4.3	—	—	—	—	—
HM-201	1.0	0.2	0.4	1.0	5.8	6.2	4.1
4090	—	—	—	5.0	—	4.3	4.9

— : 10V/m 印加時でも誤動作なし

3. 3. 3 周辺機器

磁場計測は磁場計測器さえあれば実施できるが、計測データの信頼性、計測作業の効率、事後の整理・分析等を考慮すると、計測をサポートする周辺機器が必要となる。

本項では周辺機器を概説するとともに、本研究で使用した機器を記述する。

(1) データ記録計

直流磁場は時間的変動がないため、瞬時のデータを適当な間隔で取ればよい。したがって、データ記録計としては磁場計測器のアナログ出力を取り込んで A/D 変換するデータロガーが基本となる。パーソナルコンピュータに A/D 変換機能を付加すれば、ソフトウェアで処理できる。また、磁場計測器に RS-232C や GP-IB 出力端子があれば、コンピュータに直接デジタル出力を取り込むことができる。なお、簡易な計測で計測点が少ない場合、データシートに手書きでも構わない。

直流磁場計測用データ記録計として、本研究で使用した機器を以下に示す。

- ・パーソナルコンピュータ PC-9821Na13, PC-9801NS/T, PC-9821As2 (日本電気)
- ・A/D 変換 PC カード NR-100 + データ入力ソフトウェア FLEX LOGGER (キーエンス)
- ・MM-340 用 RS-232C データ入力ソフトウェア HMS-100 (エムティアイ)
- ・THM7025 用 RS-232C データロガー Data Collector (BEATEC)
- ・GP-IB データ入力ソフトウェア MEASURE (自作)

交流磁場は周期的に変化するため、時間軸波形データを取り込む必要がある。したがって、データ記録計としては磁場計測器のアナログ出力を利用したオシロスコープ等の波形記録装置が基本となる。また、変動磁場は周波数は低いが緩やかに変動するため、長時間に渡ったデータの取り込みと表示機能が必要となる。したがって、データ記録計としてはアナログ出力を利用したペンレコーダーが基本となる。いずれもパーソナルコンピュータに A/D 変換機能を付加すれば、ソフトウェアで処理できる。また、計測が長時間に渡るとデータが大きくなるため、保存装置として別途データレコーダー等が必要となる。なお、データ記録計選択の際には、A/D 変換の分解能に注意する必要がある。12bit が主流であるが、14bit であれば入力レンジの 1/16384 と高精度な変換が可能となる。

交流磁場・変動磁場計測用データ記録計として、本研究で使用した機器を以下に示す。

- ・デジタルオシロスコープ VC-5410 (日立電子)
- ・サーマルアイレコーダー WR7300 (グラフテック)
- ・メモリハイコーダ 8808 (日置電機)
- ・パーソナルコンピュータ PC-9821Na13, PC-9801NS/T, PC-9821As2 (日本電気)
- ・A/D 変換ボード ADX-98H + 波形処理ソフトウェア WAVE MASTER II (カノーブス)
- ・A/D 変換 PC カード NR-100 + 波形処理ソフトウェア WAVE SHOT! (キーエンス)

- ・MM-340 用 RS-232C データ入力ソフトウェア HMS-100 (エムティアイ)

- ・デジタルレコーダー DR-M2a (ティアック)

(2) 電源装置

AC100V 電源しか使用できない磁場計測器や周辺機器を利用して外部で計測を行う場合、延長コードで電源を供給することになるが、それが不可能な場合には電源装置が必要となる。電気の質 (電圧、波形、ノイズ) を考えると充電式式の電源装置が適しているが、長時間計測ではインバーターと自動車用バッテリーの組み合わせとなる。この場合、電気の質を向上させるために定電圧装置を用いるとよい。

本研究で使用した電源装置を以下に示す。

- ・ポータブル AC 電源パック PAC² (日本電池)
- ・パワーインバーター DA-320S (厚木デバイス) + 自動車用バッテリー 40B19 (松下電池)
- ・ノイズ吸収自動定電圧装置 SY-1105 (ボルタック)

(3) プローブスタンド

磁場計測器のプローブのセンサー部を固定するためには、プローブスタンドが必要である。計測目的によっては手持ちでもよいが、正しい位置に固定し難い、体温で計測値が変動する等の不具合が生じる。プローブスタンドはプローブを長時間安定して保持できるという観点から、カメラの 3 脚のような形状のものが相応しい。直流磁場用としては、プローブ周辺の磁場を乱さない観点から非磁性の材料で構成する必要があるが、SUS304 等のステンレス、アルミニウム等が適している。交流磁場用としては、非磁性に加えて渦電流によりプローブ周辺の磁場を乱さない観点から電気絶縁性を有する材料で構成する必要があるが、アクリル、塩ビ等の樹脂、木材等が適している。ただし、筆者が行った実験¹⁴⁾では、ステンレス製でボリュームが小さいものであれば、渦電流の影響はほとんど無視できる程度であり、センサー検出部から少し離して保持すれば問題なく使える。

本研究で使用したプローブスタンドを以下に示す。

- ・アクリル樹脂製の台座上に長さ 0.3m, 0.5m, 1.0m の複数の SUS304 製ポールを継いだ支持棒を固定し、適当な高さに SUS304 製プローブ保持具を取り付けた SUS 製スタンド
- ・フェノール樹脂、ナイロン樹脂からなる樹脂製ホルダー
- ・アクリル製ポール、木製ポールにプローブを保持具やガムテープで固定

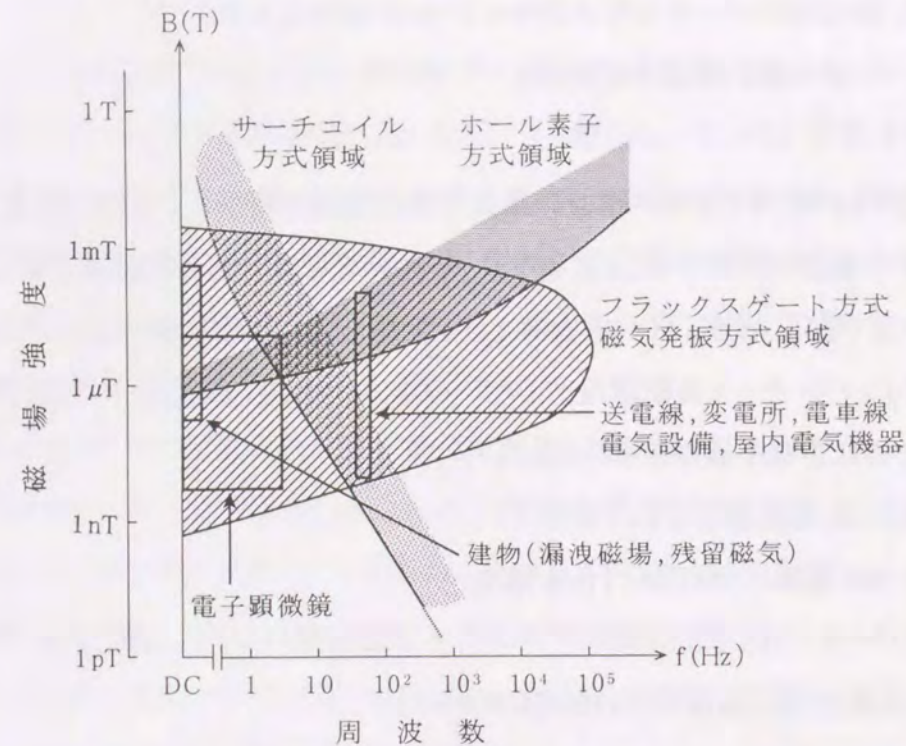


図3.3.1 磁気センサーの計測可能範囲と計測対象磁場³⁾

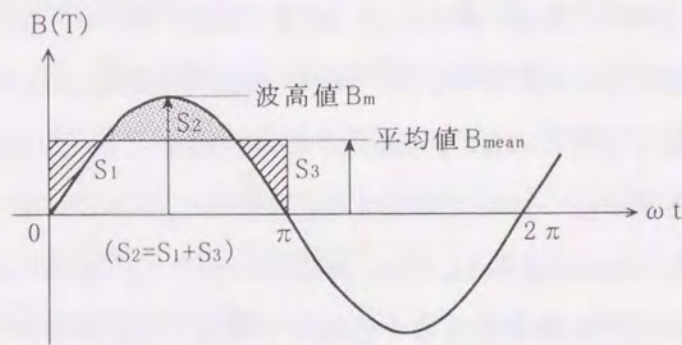


図3.3.2 正弦波交流磁場波形³⁾

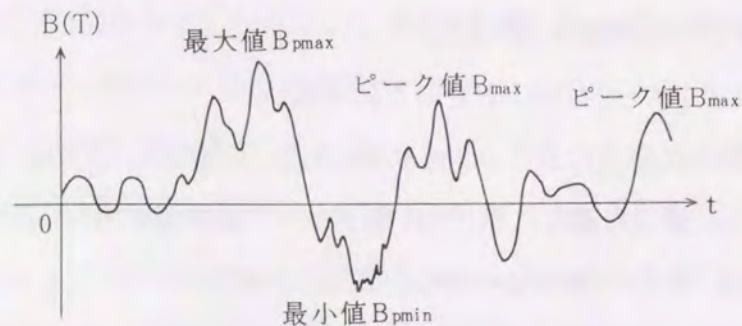


図3.3.3 変動磁場波形³⁾

3.4 磁場計測の方法

本節では、まず磁場計測を実施する際の基本的手順を示し、計測を進める上での留意点や具体的方法について述べる。

3.4.1 計測の基本的手順

① 事前調査

設計図面、文献等による机上調査、実際に現地に赴く現地調査で、計測の目的、対象、規模等を明確にした上で、実施計画を立てる。

② 周辺環境の整備

計測領域内にある什器備品等を可能な限り移動する。これは、計測点を求めるのに障害となるからだけではなく、強磁性体や導体の影響で磁場が乱されて正確な計測ができなくなることを避けるためである。周辺環境の影響については3.4.2項で詳述する。

③ 計測点の設定

計測の基準となる計測基準軸(X軸、Y軸、Z軸)の設定には、建物を基準とする方法と送電線等の磁場発生源を基準とする方法がある。計測点は、計測基準軸をベースに建物の柱や壁から距離を当たり、基準となる点やラインを設定した後、残りの点を順次求める。分布計測では、水平2方向に水系やテープ等を張ってメッシュを切り、その交点を計測点とする。計測基準軸の方向や計測点の位置は図面に明記する。

④ 計測器の配線

磁場計測器の入・出力端子に、プローブ、データ記録計等を確実に接続し、電源投入後、磁場が正常に検出されているかどうか動作確認をする。周辺の電磁界の影響¹⁵⁾や、送電線近傍では電界の影響¹⁶⁾により、異常な値を示す場合があるので最初に十分チェックする。

⑤ 計測器の設定

A/D変換機能を有するデータ記録計に時間軸波形データを取り込む際には、サンプリング周波数と計測時間(計測スパン)を設定する必要がある。両者は反比例の関係にある。交流磁場では、対象磁場の周波数をもとにサンプリング周波数が決められ、磁場の周波数の20~40倍程度が適当である。変動磁場では、計測時間が先に決められることが多い。

次に、直流磁場や変動磁場の計測では零点調整を行う。計測器によっては電源投入直

後のドリフトが大きい場合、ウォームアップの時間を十分に取ってから、零点調整を行う必要がある。その後、プローブをプローブスタンドに固定する。計測基準軸とプローブの軸方向が一致するように、プローブの向き、水平・垂直度に注意する。

⑥ 計測の実施

まず、最初の計測点にプローブを設置する。表示値の読み取り、あるいはデータ記録計へのデータ転送終了後、次の計測点へプローブを移動する。同様に、最後の計測点まで繰り返す。計測中は常に計測値に注意を払い、零点調整を適宜行ってドリフトの影響を回避する。代表的な点で定期的に計測を行っておくと、後でドリフトの補正ができる。磁場のベクトル成分計測については3.4.3項、計測の同時性については3.4.4項で詳述する。

⑦ 片付け

準備と反対の作業で片付けを行う。現地の状況記録として、写真、スケッチ、メモ等を残しておくとデータ整理の際に役に立つ。また、計測開始から終了までの適当なタイミングで、地磁気に相当するデータや方位を計測しておけば、後述する地磁気補正がしやすい。

⑧ データ整理

計測結果を評価しやすい形にまとめ、必要に応じて報告書の作成を行う。簡易計測であれば当日、現地でもできるが、基本的には事務所に持ち帰って後日行う。データ整理の方法については3.4.5項で詳述する。

3.4.2 周辺環境の影響

直流磁場の計測では、周辺にスチール製什器等の強磁性体が存在すると磁場が乱されて正確な評価ができなくなる懸念がある。また、交流磁場の計測では、強磁性体に加えてアルミニウム製備品等の導体も影響を及ぼし、渦電流により磁場が乱されることが考えられる。本項では、強磁性体と導体を対象に、その影響の度合いについて実験で検討した結果を述べる¹⁴⁾。

直流磁場では鉄骨構造物床面の残留磁気、交流磁場では送電線周辺の磁場を対象として実験を行った。これは、三軸型ガウスメーター(MAG-03MC: Bartington)のプローブを実験対象領域中心の床上350mmの位置に固定し、そのポイントを基準として東西南北4方向に100mmから1000mmまで100mm間隔で離隔させながら強磁性体、導体を設置し、それぞれの状態での磁場を計測するものである。

実験に用いた強磁性体、導体は、次の6種類である。

- 1) SS400 鋼板(幅 900mm×高 600mm, 厚 1mm)
- 2) パーマロイ板(幅 900mm×高 600mm, 厚 1mm)
- 3) アルミニウム板(幅 900mm×高 600mm, 厚 1mm)
- 4) スチール製デスク(幅 910mm×奥行 630mm×高さ 730mm)
- 5) スチール製ワゴン(幅 500mm×奥行 500mm×高さ 800mm)
- 6) ステンレス製ワゴン(幅 600mm×奥行 400mm×高さ 800mm)

実験に先立ち、対象領域の床上350mm面の磁場分布を計測した。図3.4.1(a)に直流磁場計測の結果を示すが、最大値はプローブを設置した点で、その周辺磁場は一様でない。一方、図3.4.1(b)に示す交流磁場計測の結果は、いずれも1.75μT前後とほぼ一様な磁場であった。なお、直流磁場計測では全磁力、送電線計測では位相を考慮して求めた3成分の合成値(真の全磁力)で評価を行っている。

図3.4.2に直流磁場計測の結果(北方向)を示す。透磁率の高いパーマロイ板の影響が一番大きく、その他の強磁性体でも明らかな影響がみられるが、1000mm程度離れるとほとんど影響がなくなっている。一方、アルミニウム、ステンレスといった非磁性材の影響は全くない。

次に、図3.4.3に交流磁場計測の結果(北方向)を示す。こちらも、パーマロイ板の影響が一番大きい。その他はプローブ近傍で影響が認められるが、離れても収束せずに変動している。これは、送電線に流れる電流の変動等、別の要因の影響が大きいものと思われる。

結果として、直流磁場計測では周辺の強磁性体の影響が大きい、1000mm程度離せばほとんど影響がなくなること、交流磁場計測では強磁性体の影響は認められるが、導体の渦電流による影響は僅かであることが明らかになった。

3.4.3 磁場のベクトル成分計測

磁場は、強さと方向を持っているためベクトル表示できる。3次元空間に広がる磁場の最も強い方向の磁束密度、すなわち全磁力を正確に計測するためには、三軸プローブでベクトル成分計測することが基本である。しかし、一軸プローブしか手元がない場合もある。

ここでは、一軸プローブも考慮した上で、ベクトル成分計測の方法について磁場の種類毎に述べる。一軸プローブ3本を直交配置して三軸プローブを模擬する方法も以前はよく用

いられたが、最近では三軸プローブが普及しているため、この方法は対象としない。

(1) 直流磁場

直流磁場は、強さと方向のみで表示される。3次元空間に広がる磁場の全磁力を正確に把握するためには、計測点における磁束密度 B の3成分 B_x , B_y , B_z を計測する必要がある。三軸プローブであれば一度に計測できるが、一軸プローブでも計測できる。この場合、一軸プローブを互いに直角に設置できる3成分計測用プローブスタンドを使用することが望ましい。手持ちでも可能であるが、精度は落ちる。いずれもプローブの方向を盛り替えて B_x , B_y , B_z を順番に計測し、その結果を表示する。全磁力 B_T は磁束密度の3方向成分 B_x , B_y , B_z のベクトル合成で求められる。図3.4.4にベクトル合成の原理を示すが、全磁力 B_T は次式のように求められる。

$$B_T = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2} \quad (3.4.1)$$

なお、一軸プローブの方向を3次元空間で回転させ、最も強い磁場を示す方向を探って計測値を読み取れば、それが全磁力となる。この場合は、デジタル表示ではわかりにくいいため、アナログ電圧計に接続してメーターの振れを見ながら行くと把握しやすい。ただし、精度は悪いので予備調査程度にしか実施できない。

(2) 交流磁場

交流磁場は、強さと方向が周期的に変わるため、全磁力も周期的に変わる。したがって、磁束密度の3成分 $B_x(t)$, $B_y(t)$, $B_z(t)$ を連続的に計測し、変動する全磁力 $B_T(t)$ から波高値あるいは実効値を算出する必要がある。三軸プローブであれば一度に3方向の計測ができるが、真の全磁力を瞬時値として計測するためには、高速A/D変換、高速演算処理機能が必要となる。しかし、このような機能を備えた磁場計測器は未だない。現在の磁場計測器は、波高値表示であれば各成分毎に求めた波高値 B_{xp} , B_{yp} , B_{zp} を用いて合成値 B_{RP} を次式のように求めている。実効値表示でも同様である。

$$B_{RP} = \sqrt{B_{xp}^2 + B_{yp}^2 + B_{zp}^2} \quad (3.4.2)$$

一軸プローブでも、3方向に盛り替えて計測し、同様の方法で合成値を求めることができる。

しかし、上式による合成値は、各成分間の位相関係を無視した計算値である。位相差があれば真の全磁力とは異なる。真の全磁力を求めるには、外部出力してコンピューターによる波形解析処理が必要となる。本研究では、簡易計測を除いて真の全磁力で評価を行っている。一軸プローブは、3方向の位相関係を捕らえられないため対応できない。

一軸プローブの特殊な使い方として、送電線に対する回転磁場の計測法がある。送電線では、電流の方向と一致する磁場成分は零であるから、送電線に対して直交する2次元平面について検討すればよく、図3.4.5に示すように磁場ベクトルの軌跡は、楕円形(場所によっては円形あるいは直線)の2次元回転磁場¹⁷⁾となる。そのため、2次元平面内の磁場合成の計算では、最大振幅を示す楕円長軸方向の計測値 $B_{\max}$ と、この長軸に直交する平面内で最大値を示す楕円短軸方向の計測値 $B_{\min}$ から、次式により合成値 B_R を求められる。

$$B_R = \sqrt{B_{\max}^2 + B_{\min}^2} \quad (3.4.3)$$

(3) 変動磁場

変動磁場の計測では、計測器の表示値はちらつくので、データ記録計を併用する必要がある。記録された波形あるいは計測値から同一時刻における3成分 B_x , B_y , B_z の瞬時値を読み取り、3.4.1式によりベクトル合成すれば、その時刻における真の全磁力 B_T が求められる。変動磁場では、真の全磁力は変動しており、最も大きな値が最大瞬時値、最も小さい値が最小瞬時値となる。ただし、この値単独ではあまり意味がなく、両者の差として求める変動幅や変化の割合を示す微分値等が問題となる。

変動磁場では、3成分の同時性が重要な意味を持つので、三軸プローブによる同時計測が必須である。一軸プローブは利用できない。

3.4.4 計測の同時性

時間的な変動がある磁場を対象に、複数の計測点のデータを比較評価するためには、すべての計測点で同時刻に計測を行う必要がある。しかし、計測器の数には限界があり、同時性が確保できない場合が多い。このような場合、計測値に対して何らかの補正が必要となる。ここでは、磁場の種類毎に同時性の必要性和補正方法を述べる。

(1) 直流磁場

直流磁場は時間的な変動がないため、基本的には計測の同時性は必要ない。ただし、構造物の残留磁気の計測では、施工のタイミングすなわち周辺状況で磁場が変化するため、計測の時期という同時性が必要となる。周辺状況が変わらない間に計測を完了させる必要がある。

(2) 交流磁場

送電線の交流磁場は、流れる電流に比例するため、電力需要の変動で電流が変わると

磁場の強さも変わる。また、複数の送電ラインがある場合、電流のバランスが変わり、磁場分布まで変わることになる。大きな電流変動がないと考えられる時間帯で、少ない計測点を計測するのであればあまり問題ないが、計測時間中に磁場の状況が変わる可能性がある場合や、計測点が多くて計測に長時間を必要とする場合は、磁場の状況をモニターする計測器を別途設置して定点計測する必要がある。この場合、モニターの値に応じて計測値を比例換算して補正する。モニターで使用する計測器は一軸でも構わない。

また、管轄の電力会社に依頼して、送電線の通電電流の時間変動実績データを入手すれば、モニターの代用となる。

(3) 変動磁場

電車線の変動磁場は、様々な条件により磁場が複雑に変動し、再現性はほとんど期待できない。したがって、計測の同時性は必須である。どうしても非同時計測となる場合は、モニター計測したデータから換算することになるが、磁場の分布が変わっているため、正確な補正はできない。

それに対して、エレベーターのように発生源が特定できる変動磁場は、条件を一定にすれば再現性が確保されるため、モニターとして定点計測すれば非同時計測でも正確な補正ができる。

3.4.5 計測データの整理

ここでは、計測データの整理方法について磁場の種類毎に述べる。

(1) 直流磁場

データ整理では、計測点毎に磁束密度の3方向成分 B_x , B_y , B_z と全磁力 B_T を一覧表に表す。それをもとに、磁束密度ベクトル図や磁束密度分布図等を作成する。

磁場計測では、磁場発生源を1つに絞り込んで計測すると磁場の性状を把握しやすい。直流磁場には必ず地磁気を重ねられており、この処理が問題となる。MRI等の強磁場の計測であれば値の桁数が違うため、あまり意識しなくてもよいが、構造物の残留磁気の計測では値が近いので、地磁気補正をうまく行えば残留磁気の特徴を把握しやすくなる。しかし、建物の内部の場合、地磁気自体が強磁性体により歪められ、場所によって強さや方向が異なるため、単純に一定の値を加算するだけでは地磁気成分の正確なキャンセルはできない。筆者は、計測点毎に地磁気成分の正確なキャンセルを行うために、数値シミュレーションを

用いて鉄骨構造物内部の地磁気の分布を求めてみた¹⁸⁾。結果として、床面から離れるに従って地磁気の歪みは少なくなり、1000mm 離れるとほぼ均一と見なしてよいことがわかった。本研究では、磁場の発生源から離れた計測点に対して、必要に応じて地磁気補正を行う。

(2) 交流磁場

交流磁場の表示形態には、波高値表示、実効値表示、真の実効値表示等がある。計測データには、いずれの表示形態による計測値であるか明記する。本研究では特記なき場合、波高値で表示している。計測結果は、計測点毎に磁束密度の3方向成分 B_{xP} , B_{yP} , B_{zP} と合成値 B_{RP} を一覧表に整理し、それをもとに磁束密度分布図等を作成する。真の全磁力を求めた場合は、合成値に置き換える。

なお、直流用の計測器で交流磁場を計測した場合、地磁気等の直流分が加算された計測結果となる。直流分は普通、意味を持たないので、除去した上で波形処理することが望ましい。

(3) 変動磁場

データ整理では、計測点毎に磁束密度の3方向成分 B_x , B_y , B_z の波形を出力する。それをもとに真の全磁力 B_T を計算して表示する。

変動磁場の計測では、評価の指標は変動磁場で影響を受けることが懸念される機器側にある。例えば、電子顕微鏡ではスキャン所要時間である80秒間(機器、条件により異なる)の変動幅(最大瞬時値－最小瞬時値)が問題となる。また、変化の割合を示す微分値や変動の頻度が問題となる機器もある。したがって、データ整理で求める値は計測の目的により異なり、目的に合ったデータ整理が必要となる。

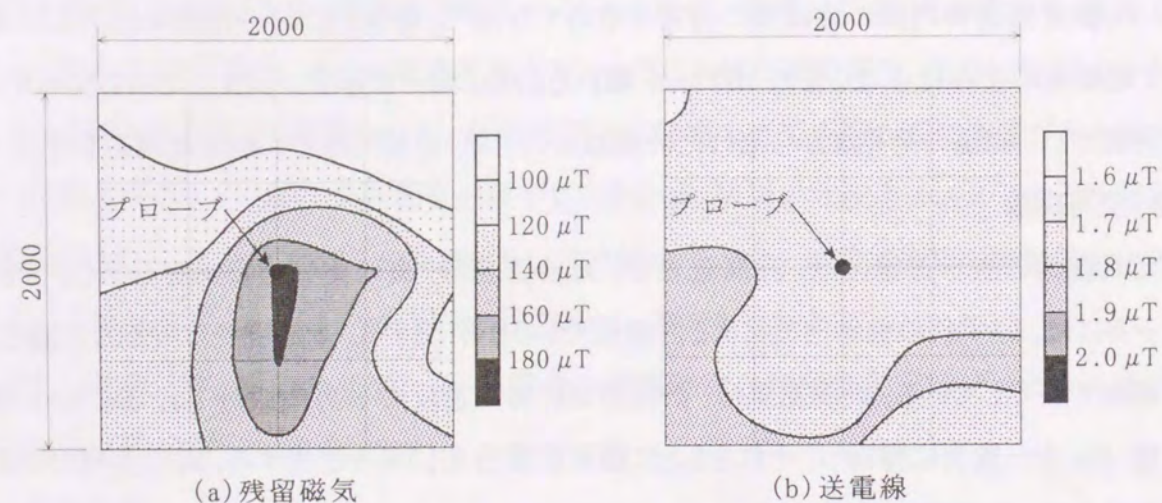


図3.4.1 残留磁気と送電線の磁束密度分布図

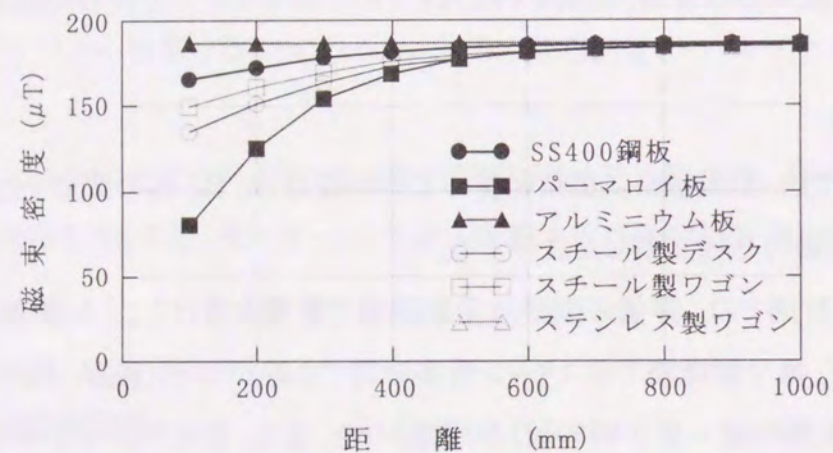


図3.4.2 磁場の大きさ：残留磁気

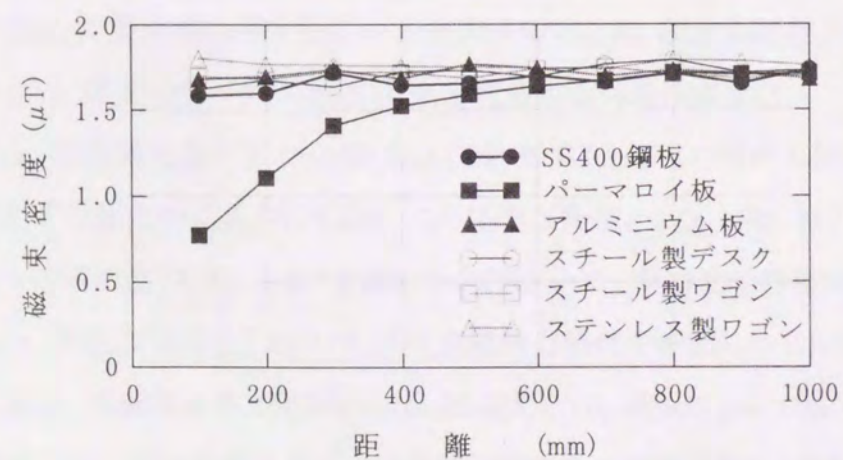


図3.4.3 磁場の大きさ：送電線

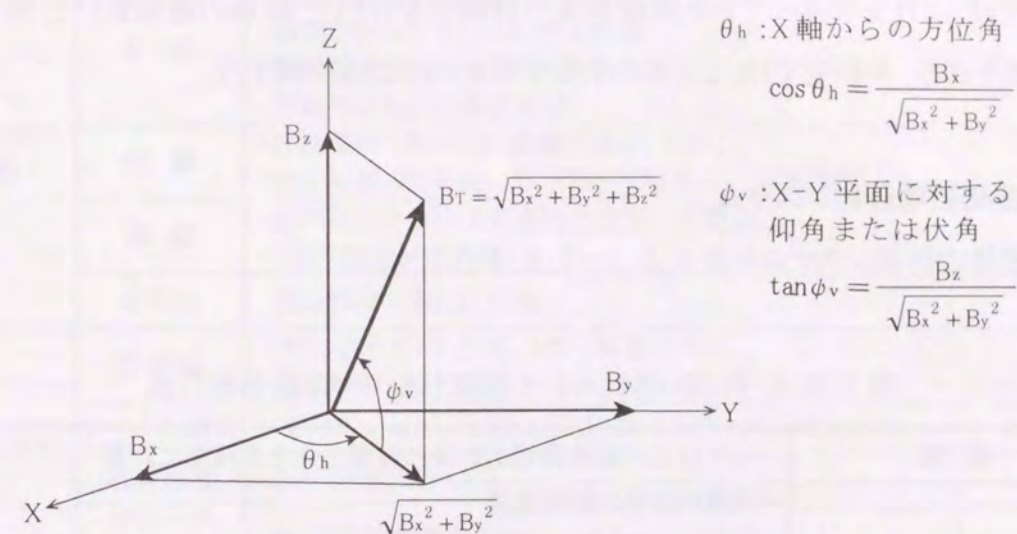


図3.4.4 磁場ベクトル合成の原理³⁾

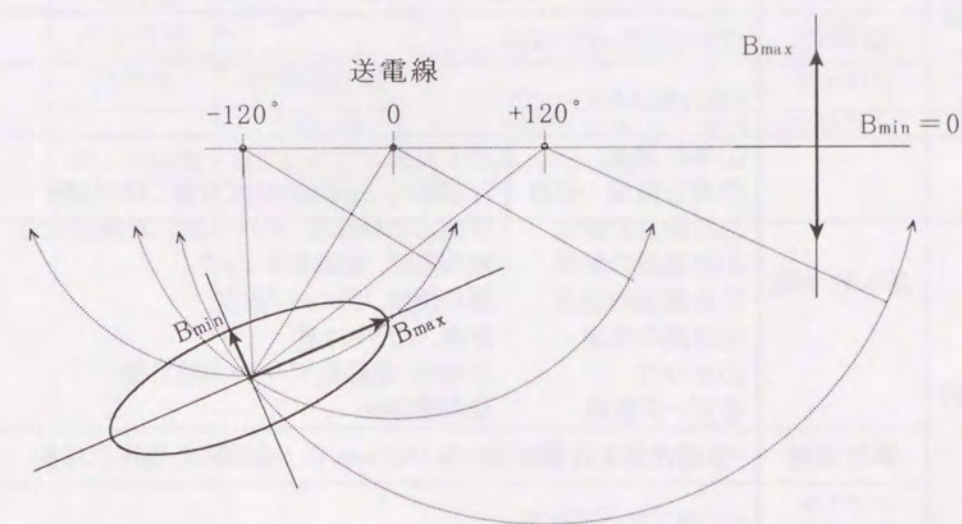


図3.4.5 送電線による回転磁場³⁾

3.5 磁場計測システムの構築

本節では、これまで述べてきた環境磁場の計測法をもとに、磁場の種類別に計測システムの構築を図る。本研究では、これらの計測システムにより計測を行う。

3.5.1 直流磁場計測システム

直流磁場の計測システムを表 3.5.1～3.5.4 に示す。

表 3.5.1 計測システム I：直流(強・中)磁場分布計測

概 要		・1mT 以上の直流磁場を対象に磁場分布を高精度に計測	
磁場計測の分類	目 的	・機器の障害の原因調査 ・磁気シールドルームの性能評価 ・機器や人体への影響予測 ・実験室における確認実験	
	対 象	・直流磁場の瞬時値(磁場の強さ, 方向) ・MRI 装置(近傍), 残留磁気(近傍)等	
	規 模	・面の次元あるいは立体的な空間での計測 ・(線の次元での計測)	
	その他	・周辺状況の変化に注意	
磁場計測器	計測器	・ホール素子方式 精度順に 9903 > 640	
	データ記録計	・PC-9821Na13, FLEX LOGGER, MEASURE	
	電源装置	・DA-320S, SY-1105	
	プローブスタンド	・SUS 製スタンド	
磁場計測の方法	基本的手順	①事前調査 ②周辺環境の整備 ③計測点の設定 ④計測器の配線 ⑤計測器の設定 ⑥計測の実施 ⑦片付け ⑧データ整理	必ず実施 什器備品(強磁性体)は可能な限り移動 計測基準軸設定, メッシュ状に計測点設定 動作確認, 電磁界チェック 零点調整, プローブ固定 計測, ドリフト注意 片付け, 地磁気データ・方位計測 報告書作成
	周辺環境	・強磁性体を計測領域から 1000mm 以上隔離した場所に移動	
	ベクトル成分計測	・三軸プローブ使用	
	同時性	・非同時計測	
	データ整理	・3 方向成分 B _x , B _y , B _z と全磁力 B _T を一覧表に整理 ・磁束密度分布図, ベクトル図作成	

表 3.5.2 計測システム II：直流(中・弱)磁場分布計測

概 要		・1 μ T～1mT 程度の直流磁場を対象に磁場分布を高精度に計測	
磁場計測の分類	目 的	・機器の障害の原因調査 ・磁気シールドルームの性能評価 ・機器や人体への影響予測 ・実験室における確認実験	
	対 象	・直流磁場の瞬時値(磁場の強さ, 方向) ・MRI 装置(隔離点), 残留磁気(隔離点), 地磁気等	
	規 模	・面の次元あるいは立体的な空間での計測 ・(線の次元での計測)	
	その他	・周辺状況の変化に注意	
磁場計測器	計測器	・フラックスゲート方式, (ホール素子方式) 精度順に MM-340 > MAG-03MC > (9903)	
	データ記録計	・PC-9821Na13, FLEX LOGGER, HMS-100, MEASURE	
	電源装置	・DA-320S, SY-1105	
	プローブスタンド	・SUS 製スタンド	
磁場計測の方法	基本的手順	①事前調査 ②周辺環境の整備 ③計測点の設定 ④計測器の配線 ⑤計測器の設定 ⑥計測の実施 ⑦片付け ⑧データ整理	必ず実施 什器備品(強磁性体)は可能な限り移動 計測基準軸設定, メッシュ状に計測点設定 動作確認, 電磁界チェック 零点調整, プローブ固定 計測, ドリフト注意 片付け, 地磁気データ・方位計測 報告書作成
	周辺環境	・強磁性体を計測領域から 1000mm 以上隔離した場所に移動	
	ベクトル成分計測	・三軸プローブ使用	
	同時性	・非同時計測	
	データ整理	・3 方向成分 B _x , B _y , B _z と全磁力 B _T を一覧表に整理 ・磁束密度分布図, ベクトル図作成 ・地磁気補正	

表 3. 5. 3 計測システムⅢ：直流(強・中)磁場簡易計測

概 要		・1mT 以上の直流磁場を対象に磁場を簡易に計測	
磁場計測の分類	目 的	・機器の障害の原因調査 ・機器や人体への影響予測	
	対 象	・直流磁場の瞬時値(磁場の強さ) ・NMR 装置(近傍), 残留磁気(近傍)等	
	規 模	・点の次元での計測 ・線の次元での計測	
	その他	・周辺状況の変化に注意	
磁場計測器	計測器	・ホール素子方式 精度順に THM7025 > 4048	
	データ記録計	・Data Collector, 手書き	
	電源装置	・不要	
	プローブ スタンド	・アクリル製ポール, 木製ポール, 手持ち	
磁場計測の方法	基本的手順	①事前調査	実施しなくても可
		②周辺環境の整備	不要
	③計測点の設定	計測基準軸設定, 計測点設定	
		④計測器の配線	動作確認, 電磁界チェック
	⑤計測器の設定	零点調整, プローブ固定	
		⑥計測の実施	計測, ドリフト注意
	⑦片付け	片付け, 地磁気データ・方位計測	
		⑧データ整理	現地整理, (報告書作成)
	周辺環境	・強磁性体から 1000mm 以上隔離した点で計測	
	ベクトル 成分計測	・三軸プローブ使用, 一軸プローブ 3 方向盛り換え ・一軸プローブの回転	
	同時性	・非同時計測	
	データ整理	・全磁力で評価	

表 3. 5. 4 計測システムⅣ：直流(中・弱)磁場簡易計測

概 要		・1 μ T ~ 1mT の直流磁場を対象に磁場を簡易に計測	
磁場計測の分類	目 的	・機器の障害の原因調査 ・機器や人体への影響予測	
	対 象	・直流磁場の瞬時値(磁場の強さ) ・NMR 装置(隔離), 残留磁気(隔離)等	
	規 模	・点の次元での計測 ・線の次元での計測	
	その他	・周辺状況の変化に注意	
磁場計測器	計測器	・磁気発振方式, (ホール素子方式) 精度順に HM-101, HM-201 > (THM7025) > (4048)	
	データ記録計	・Data Collector, 手書き	
	電源装置	・不要	
	プローブ スタンド	・アクリル製ポール, 木製ポール, 手持ち	
磁場計測の方法	基本的手順	①事前調査	実施しなくても可
		②周辺環境の整備	不要
	③計測点の設定	計測基準軸設定, 計測点設定	
		④計測器の配線	動作確認, 電磁界チェック
	⑤計測器の設定	零点調整, プローブ固定	
		⑥計測の実施	計測, ドリフト注意
	⑦片付け	片付け, 地磁気データ・方位計測	
		⑧データ整理	現地整理, (報告書作成)
	周辺環境	・強磁性体から 1000mm 以上隔離した点で計測	
	ベクトル 成分計測	・一軸プローブ 3 方向盛り換え, (三軸プローブ使用) ・一軸プローブの回転	
	同時性	・非同時計測	
	データ整理	・全磁力で評価	

3.5.2 交流磁場計測システム

交流磁場の計測システムを表 3.5.5～3.5.7 に示す。

表 3.5.5 計測システムV：交流磁場分布計測

概 要		・交流磁場を対象に磁場分布を高精度に計測	
磁場計測の分類	目 的	・機器の障害の原因調査 ・磁気シールドルームの性能評価 ・機器や人体への影響予測 ・実験室における確認実験	
	対 象	・交流磁場の時間軸波形(磁場の強さ, 周波数, 位相, 波形等) ・送電線, 変電所, 電車線(交流)等	
	規 模	・面の次元あるいは立体的な空間での計測 ・(線の次元での計測)	
	その他	・目的に応じて計測の時期(季節, 曜日, 時刻)を選択	
磁場計測器	計測器	・フラックスゲート方式 精度順に MM-340 > MAG-03MC	
	データ記録計	・VC-5410, 8808, PC-9821NA13, WAVE MASTER II, WAVE SHOT!	
	電源装置	・DA-320S, SY-1105	
	プローブスタンド	・SUS 製スタンド	
磁場計測の方法	基本的手順	①事前調査	必ず実施
		②周辺環境の整備	什器備品(強磁性体・導体)は可能な限り移動
		③計測点の設定	計測基準軸設定, メッシュ状に計測点設定
		④計測器の配線	動作確認, 電磁界チェック, 電界チェック
		⑤計測器の設定	サンプリング周波数・計測時間設定, プローブ固定
		⑥計測の実施	計測
		⑦片付け	片付け, 方位計測
		⑧データ整理	報告書作成
	周辺環境	・強磁性体を計測領域から 1000mm 以上隔離した場所に移動 ・導体は直近を避ける程度で可	
	ベクトル成分計測	・三軸プローブ使用	
	同時性	・同時計測 ・非同時計測, 定点モニター計測 ・通電電流の時間変動実績データ入手	
	データ整理	・3 方向成分 B_{xp} , B_{yp} , B_{zp} と合成値 B_{RP} を一覧表に整理 ・真の全磁力算出 ・磁束密度分布図作成 ・直流分除去	

表 3.5.6 計測システムVI：交流磁場連続計測

概 要		・交流磁場を対象に磁場の長期的(1 日以上)変動を高精度に連続計測	
磁場計測の分類	目 的	・機器や人体への影響予測	
	対 象	・交流磁場の強さ(波高値, 実効値)の変動 ・送電線, 変電所等	
	規 模	・点の次元での計測	
	その他	・目的に応じて計測の時期(季節, 曜日)を選択	
磁場計測器	計測器	・フラックスゲート方式 精度順に MM-340 > MAG-03MC	
	データ記録計	・DR-M2a	
	電源装置	・対応不可→AC100V	
	プローブスタンド	・樹脂製ホルダー	
磁場計測の方法	基本的手順	①事前調査	必ず実施
		②周辺環境の整備	不要
		③計測点の設定	計測基準軸設定, 計測点設定
		④計測器の配線	動作確認, 電磁界チェック, 電界チェック
		⑤計測器の設定	サンプリング周波数・計測時間設定, プローブ固定
		⑥計測の実施	計測
		⑦片付け	片付け, 方位計測
		⑧データ整理	報告書作成
	周辺環境	・強磁性体から 1000mm 以上隔離した点で計測 ・導体は直近を避ける程度で可	
	ベクトル成分計測	・三軸プローブ使用	
	同時性	・同時計測	
	データ整理	・真の全磁力算出 ・時間軸で評価 ・直流分除去	

表 3. 5. 7 計測システムⅦ：交流磁場簡易計測

概 要		・交流磁場を対象に磁場を簡易に計測	
磁場計測の分類	目 的	・機器の障害の原因調査 ・機器や人体への影響予測	
	対 象	・交流磁場の強さ(波高値, 実効値) ・送電線, 変電所, 電車線(交流)等	
	規 模	・点の次元での計測 ・線の次元での計測	
	その他	・計測時刻の選択	
磁場計測器	計測器	・サーチコイル方式 精度順に 4090 > HM-201	
	データ記録計	・手書き	
	電源装置	・不要	
	プローブスタンド	・手持ち	
磁場計測の方法	基本的手順	①事前調査	実施しなくても可
		②周辺環境の整備	不要
		③計測点の設定	計測基準軸設定, 計測点設定
		④計測器の配線	動作確認, 電磁界チェック, 電界チェック
		⑤計測器の設定	なし
		⑥計測の実施	計測
		⑦片付け	片付け
		⑧データ整理	現地整理
	周辺環境	・強磁性体から 1000mm 以上隔離した点で計測 ・導体は直近を避ける程度で可	
	ベクトル成分計測	・三軸プローブ使用, 一軸プローブ 3 方向盛り換え ・一軸プローブの回転磁場計測	
	同時性	・非同時計測	
	データ整理	・表示値, 合成値で評価	

3. 5. 3 変動磁場計測システム

変動磁場の計測システムを表 3. 5. 8 に示す。

表 3. 5. 8 計測システムⅧ：変動磁場連続計測

概 要		・変動磁場を対象に短期的(1 日まで)変動を高精度に連続計測	
磁場計測の分類	目 的	・機器の障害の原因調査 ・機器や人体への影響予測 ・磁気シールドルームの性能評価	
	対 象	・変動磁場の時間軸波形(磁場の強さ, 方向, 波形等) ・電車線(直流・交流), 自動車, エレベーター等	
	規 模	・点の次元での計測 ・線の次元での計測	
	その他	・磁場による影響が予想される時間帯で計測	
磁場計測器	計測器	・フラックスゲート方式 精度順に MM-340 > MAG-03MC	
	データ記録計	WR7300, 8808, PC-9821Na13, WAVE MASTER II, WAVE SHOT!, HMS-100, DR-M2a	
	電源装置	DA-320S, SY-1105	
	プローブスタンド	SUS 製スタンド	
磁場計測の方法	基本的手順	①事前調査	必ず実施
		②周辺環境の整備	什器備品(強磁性体)は計測点周辺のみ移動
		③計測点の設定	計測器基準軸, 計測点設定
		④計測器の配線	動作確認, 電磁界チェック
		⑤計測器の設定	サンプリング周波数・計測時間設定, 零点調整, プローブ固定
		⑥計測の実施	計測, ドリフト注意
		⑦片付け	片付け, 方位計測
		⑧データ整理	報告書作成
	周辺環境	・強磁性体を計測領域から 1000mm 以上隔離した場所に移動 ・導体は直近を避ける程度で可	
	ベクトル成分計測	・三軸プローブ使用	
	同時性	・同時計測 ・(非同時計測, 定点モニター計測)	
	データ整理	・真の全磁力算出 ・対象の機器から評価方法決定	

3.6 あとがき

本章では、これまで標準計測法のなかった建築における環境磁場の計測法について、環境磁場を正しく評価するための適切な計測法の確立という観点から、体系的に分析、整理し、実験、解析等で検証を行った。

まず、磁場計測の分類では、磁場計測を何のために行うか(計測の目的 Why)、何を対象に行うか(計測の対象 What)、どのように行うか(計測の規模 How)、いつ行うか(計測の時期 When)、誰が行うか(計測者 Who)、どこで行うか(計測の場所 Where)という観点から計測の分析、整理をした。

次に、磁場計測器では、具体的な計測器を取り上げて性能を整理するとともに、性能確認試験を実施して計測器の性能や特性の把握を図った。また、データ記録計等の周辺機器についても具体的に機器を列挙して必要性を検証した。結果として、一部の磁場計測器では、温度特性、零点ドリフト、電磁界イミュニティに注意する必要があることが判明した。

次に、磁場計測の方法では、まず計測の基本的手順をまとめ、環境磁場計測の具体的方法として、周辺環境の影響、磁場のベクトル成分計測、計測の同時性、計測データの整理について詳述した。

最後に、磁場の種類別に8つの計測システムを構築した。ここに、本研究で用いる環境磁場の計測法が確立した。

本章をまとめるに当たり、ベースとなったのは日本建築学会磁場計測評価ワーキンググループの研究成果³⁾である。1998年7月、書籍の発刊と期を合わせて講習会を行った。100名を超える参加者を集め、講演に対して熱心な質疑応答が行われた。このことから、世の中の関心の高さが伺える。磁場計測は、これまでEMCにとって裏方の存在で、表にあまり見えてこないものであった。既往の論文でも環境磁場の計測事例^{19)~24)}は多々あるが、計測法に焦点を当てたものは少ない^{25), 26)}。今後も、建築における環境磁場計測法の研究を続け、その成果は学会等を通して提案、普及させて行く所存である。

参考文献

- 1) 菊池章裕, 三宅伸幸, 新納敏文, 富樫元康, 竹内信次郎, 浅野芳伸: 環境磁場計測方法の事例研究, 三島光産技報, No.18, pp.62-75, 1997
- 2) 佐々木勤, 新納敏文, 竹内信次郎, 三宅伸幸, 川瀬隆治, 菊池章裕: 環境磁場計測方法の事例研究(その2), 三島光産技報, No.19, pp.80-92, 1998
- 3) 日本建築学会磁場計測評価ワーキンググループ: 環境磁場の計測技術ー現場における計測の事例ー, 日本建築学会, 1998
- 4) F.W.BELL: Operation&Maintenance Manual, Series 9900 Gaussmeter, 1991
- 5) F.W.BELL: Operation&Maintenance Manual, Model 640 Gaussmeter, 1987
- 6) 東陽テクニカ: F.W.BELL ハンディ・ガウスメータ取扱説明書 4048 型, 1987
- 7) METROLAB Instruments SA: THM7025 3-Axis Hall Magnetometer User's Manual, 1996
- 8) Bartington: Operation and Service Manual for MAG-03 MC Three Axis Magnetic Field Sensor 500, 250, 100 and 70 μ T Version, 1992
- 9) エムティアイ: 三軸磁界測定器 MM-340 取扱説明書, 1995
- 10) エムティアイ: Portable Gauss Meter Model 201 取扱説明書, 1991
- 11) エムティアイ: Compact Gauss Meter Model HM-101 取扱説明書, 1999
- 12) 東洋メディック: 米国 F.W.BELL 製 4090 ガウスメーター取扱説明書, 1997
- 13) 日本電子工業振興協会: 情報処理装置およびシステムのイミュニティ試験ガイドライン, 1992
- 14) 新納敏文: 磁場計測における問題について(その2) 計測点周辺の強磁性体と導体の影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集(D), pp.1033-1034, 1997
- 15) 三宅伸幸: 磁場計測における問題について(その4) 磁場計測器の放射電磁界イミュニティについて, 日本建築学会大会学術講演梗概集(D), pp.1037-1038, 1997
- 16) 川瀬隆治, 菊池章裕: 磁場計測における問題について(その5) 高圧送電線近傍における電界が環境磁場計測に及ぼす影響について, 日本建築学会大会学術講演梗概集(D), pp.1039-1040, 1997
- 17) D.W.Demo: Transmission Line Field, IEEE Trans. On Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-95, No.5, pp.1600, 1976

- 18) 新納敏文, 田中 輝: 鉄骨構造物における残留磁気の実態調査, 日本建築学会大会学術講演梗概集(D), pp.1043-1044, 1998
- 19) Gary B.Johnson: Measurements of magnetic field sources in schools, Proceedings of the American Power Conference, pp.276-281, 1992
- 20) J.E.Stangel, T.R.Johnson, M.S.Hart, M.T.Lewandowski: A cooperative analysis for siting a proposed urban 345kV transmission line, Proceedings of the American Power Conference, pp.292-298, 1992
- 21) F.P.Dawalibi: Computation of electromagnetic fields produced by electric power lines and residential electrical wiring, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.8, No.3, pp.1285-1294, 1993
- 22) A Report of the IEEE Magnetic Fields Task Force of the AC Fields Working Group of the Corona and Field Effects Subcommittee of the Transmission and Distribution Committee: A protocol for spot measurements of residential power frequency magnetic fields, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.8, No.3, pp.1386-1394, 1993
- 23) 松木英敏: 仙台地区における漏洩磁界分布の計測例, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-86-204, pp.59-67, 1986
- 24) 坂本禎智, 夏坂光男, 渡辺忠昭, 村上孝一: 三陸沿岸都市における低周波漏洩磁界強度の測定と二・三の考察, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-98-146, pp.11-17, 1998
- 25) 山崎健一, 富田誠悦, 竹下和磨, 重光 司: 低周波磁界の測定とその特徴, 電気学会計測研究会資料, MAG-94-36, pp.9-15, 1994
- 26) 正田英介, 水間 毅, 天野武一, 川崎邦弘, 加藤佳仁: 電気鉄道から発生する電磁界と測定法(電気鉄道の電磁環境技術協同研究委員会活動報告), 電気学会交通・電気鉄道研究会資料, TER-98-60, pp.77-80, 1998
- 27) 川西健次, 近角聰信, 櫻井良文: 磁気工学ハンドブック, 朝倉書店, 1998
- 28) 新納敏文, 竹内信次郎: 磁場障害に関する実態調査研究, 三島光産技報, No.20, pp.45-55, 1999
- 29) 新納敏文: 環境磁場計測方法の事例調査(その 3) 直流磁場計測方法の調査結果について, 日本建築学会大会学術講演梗概集(D), pp.1011-1012, 1996

第 4 章 辺要素を用いた数値解析システムの開発

4.1 まえがき

建築における EMI 問題解決のための具体的対策として, 磁気シールドがある。この設計及び影響評価に, 磁場解析による数値シミュレーションが有効な手段として用いられるようになってきた。解析手法としては, 磁気ベクトルポテンシャルを従属変数とする有限要素法が一般的である。しかしながら, 3 次元場の磁場解析は未知数が膨大になり, 多大な計算時間を要する。さらに, 入出力で取り扱うデータは膨大なため, 多大な労力を要する。そのため, 垂直方向を考慮しない 2 次元近似により, 2 次元モデルとして解析することも多い。

こうした背景から, 筆者等は強磁場(1.0T 以上)に対する磁気シールドに着目し, その効果を評価する数値解析システムを開発した¹⁾。主な目的は, MRI 施設を対象とした磁気シールドルームの設計支援である。そこでは, シールド材(強磁性体)として純鉄がよく使用される。しかし, 純鉄は重量が大きく剛性が低いことから, 施設の建築構造上あるいは施工上問題となることが多い。したがって, 十分なシールド効果を保持しつつ純鉄の使用量を極力少なくする設計が求められる。このような問題は, 3 次元非線形磁場解析を必要とする。3 次元は空間に広がる磁場を評価するために, 非線形は強磁性体の磁気飽和を扱うために必要となる。また, 強磁性体には珪素鋼板のように透磁率に関する磁気異方性を有するものもあるので, この点も考慮する必要がある。

本システムで採用した解析手法は, 辺要素^{2), 3)}を用いた有限要素法であり, 混合法による定式化⁴⁾を行っている。この方法は, 方程式の数と未知量の数を一致させるため, 理論上ゼロとなる Lagrange の未定乗数を未知量に加えている。

本システムの開発目標は, 3 次元非線形磁場解析を迅速かつ簡便に行うことである。本章では, まず辺要素を用いた有限要素法の定式化とその特長について述べる。次に, 数値解析システムの概要を説明する。最後に, 本手法の有効性を確認するため, コイルを流れる電流が生み出す直流磁場の解析例を示す。

4.2 解析手法

4.2.1 基本式

3次元直流磁場を支配する基本方程式は、次式のように表される。

$$\text{rot } H = J \quad \text{in } \Omega \quad (4.2.1)$$

$$\text{div}(\mu H) = 0 \quad \text{in } \Omega \quad (4.2.2)$$

境界条件を次のように与える。

$$(\mu H) \cdot n = 0 \quad \text{on } \Gamma_1 \quad (4.2.3)$$

$$H \times n = 0 \quad \text{on } \Gamma_2 \quad (4.2.4)$$

ただし、 H (A/m)は磁場の強さ、 J (A/m²)は電流密度、 μ (H/m)は透磁率テンソル、 n は境界上の法線ベクトルを表す。 μ は簡単のため対角成分のみを持つものとする。

磁場の強さ H と磁束密度 B (T) の関係は次式で与えられる。

$$B = \mu_0 H + M \quad (4.2.5)$$

ただし、 μ_0 は真空の透磁率、 M は磁化ベクトルを意味し、通常次のように設定する。

$$M = 0 \quad (4.2.6)$$

永久磁石を考慮するときは、 M は0でない値を与える。 N に対する等価電流 J_M は次式のように求めることができる。

$$J_M = -\text{rot}(\mu_0^{-1} M) \quad (4.2.7)$$

非線形性は透磁率 μ に含まれ、磁性体の磁気飽和によるものを考える。磁性体が異方性を有する場合には、変換テンソル T を用いることにより、次式のように主軸座標から変換する。

$$\mu = T^T \mu^* T \quad (4.2.8)$$

ただし、 μ^* は主軸方向に対する透磁率を意味する。

4.2.2 混合法的弱定式化

基本式(4.2.1)、(4.2.2)及び境界条件(4.2.3)、(4.2.4)に、Lagrangeの未定乗数 P を導入し、非負のパラメーター τ を用いることで次の弱形式が得られる。

$$(\text{rot } H, \text{rot } H^*) + (\text{grad } P, \mu H^*) = (J, \text{rot } H^*) \quad (4.2.9)$$

$$(\mu H, \text{grad } P^*) - \tau(P, P^*) = 0 \quad (4.2.10)$$

ただし、 H^* 、 P^* は適当な重み関数、記号 $(\cdot, \cdot)$ は内積を意味する。

τ の導入により、係数マトリクスの対角項にはゼロが入らず、多元の連立1次方程式を解く際に数値計算が安定する。

4.2.3 離散化

離散化には辺要素を用いる。辺要素は、要素接合間で未知量接線成分のみを連続にするものである。本解析では磁場の強さ H を直接未知量に選んで定式化を行っており、電気学会が提案する検証モデルにおいても優れた結果が得られている⁵⁾。磁気ベクトルポテンシャルを従属変数とする有限要素法による解析と比較すると、次の利点が挙げられる。

- 辺要素を用いる場合は、1要素の未知量数が要素を構成する節点の数と辺の数との和になる。磁気ベクトルポテンシャルを用いる場合は、節点数 $\times 3$ ($x \cdot y \cdot z$ 方向の自由度)となり、三角錐要素及び直方体要素において、辺要素の方が未知量は少なくなる。例えば、直方体要素の場合、未知量数は磁気ベクトルポテンシャルで24、辺要素で20となる。多くの要素が重なると、境界条件の関係で一概に全体の未知量数が減少するとは言えないが、有限要素法において構成する係数マトリクスのバンド幅が小さくなるので計算時間は確実に短縮される⁶⁾。
- 直接 H を未知量に選ぶため、ポテンシャル問題のように微分して H を計算する必要がない。そのため同次数の仮定関数を用いるならば、解析精度が向上する。
- 境界条件式(4.2.4)を含む要素において計算された H から境界上の H を再計算することにより、 H が十分に零に近いかをチェックすることができる。すなわち周囲境界に式(4.2.4)を適用する場合、解析領域を適切に設定しているかの判断ができる。

要素仮定関数には、式(4.2.2)を満たすものを選ぶ。したがって、 H の要素稜線の接線方向に対応する成分のみを持つ試験関数を導入する。

図4.2.1(a)に示す三角錐要素を用いたとき、仮定関数を次のように置く。

$$\left. \begin{aligned} H_x &= \alpha_1 + \alpha_2 y + \alpha_3 z \\ H_y &= \alpha_4 - \alpha_2 x + \alpha_5 z \\ H_z &= \alpha_6 - \alpha_3 x - \alpha_5 y \end{aligned} \right\} \quad (4.2.11)$$

(x, y, z)は直交直線座標である。式(4.2.10)を要素辺方向成分 H_t に変換し、式(4.2.8)、(4.2.9)に代入することで、次の一要素における離散化式を導くことができる。

$$\begin{bmatrix} V(B_l^{-1})^T E B_l^{-1} & (B_l^{-1})^T C \\ C^T B_l^{-1} & -\tau X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} H_t \\ P \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} V(B_l^{-1})^T e^T J \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (4.2.12)$$

ただし、 V は三角錐要素の体積、 λ_{mn} は m 辺と n 辺軸の方向余弦である。

$$B_l = \begin{bmatrix} \lambda_{5x} & y_5 \lambda_{5x} - x_5 \lambda_{5y} & z_5 \lambda_{5x} - x_5 \lambda_{5z} & \lambda_{5y} & z_5 \lambda_{5y} - y_5 \lambda_{5z} & \lambda_{5z} \\ \lambda_{6x} & y_6 \lambda_{6x} - x_6 \lambda_{6y} & z_6 \lambda_{6x} - x_6 \lambda_{6z} & \lambda_{6y} & z_6 \lambda_{6y} - y_6 \lambda_{6z} & \lambda_{6z} \\ \lambda_{7x} & y_7 \lambda_{7x} - x_7 \lambda_{7y} & z_7 \lambda_{7x} - x_7 \lambda_{7z} & \lambda_{7y} & z_7 \lambda_{7y} - y_7 \lambda_{7z} & \lambda_{7z} \\ \lambda_{8x} & y_8 \lambda_{8x} - x_8 \lambda_{8y} & z_8 \lambda_{8x} - x_8 \lambda_{8z} & \lambda_{8y} & z_8 \lambda_{8y} - y_8 \lambda_{8z} & \lambda_{8z} \\ \lambda_{9x} & y_9 \lambda_{9x} - x_9 \lambda_{9y} & z_9 \lambda_{9x} - x_9 \lambda_{9z} & \lambda_{9y} & z_9 \lambda_{9y} - y_9 \lambda_{9z} & \lambda_{9z} \\ \lambda_{10x} & y_{10} \lambda_{10x} - x_{10} \lambda_{10y} & z_{10} \lambda_{10x} - x_{10} \lambda_{10z} & \lambda_{10y} & z_{10} \lambda_{10y} - y_{10} \lambda_{10z} & \lambda_{10z} \end{bmatrix}$$

$$E = e^T e$$

$$e = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -2 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -2 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C = S^T \mu^T D (F^{-1})^T$$

$$S = \begin{bmatrix} V & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & V & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & V \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$F = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ x_1 & x_2 & x_3 & x_4 \\ y_1 & y_2 & y_3 & y_4 \\ z_1 & z_2 & z_3 & z_4 \end{bmatrix}, \quad X = \frac{V}{20} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 2 \end{bmatrix}$$

$$H_t^T = \{H_{t5} \ H_{t6} \ H_{t7} \ H_{t8} \ H_{t9} \ H_{t10}\}$$

$$P^T = \{P_1 \ P_2 \ P_3 \ P_4\}$$

また、 $H^T = \{H_x \ H_y \ H_z\}$ と H_t との関係は、次式で与えられる。

$$H = Q B_l^{-1} H_t \quad (4.2.13)$$

ただし、

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & y & z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -x & 0 & 1 & z & 0 \\ 0 & 0 & -x & 0 & -y & 1 \end{bmatrix}$$

図4.2.1(b)に示す直方体要素を用いた場合も三角錐要素と同様に考えることができ、一要素における離散化式は、式(4.2.12)と同形となる。 C と X の項に数値積分を利用するこ

とのみ異なる。使用する仮定関数は、次式を用いる。

$$\left. \begin{aligned} H_x &= \alpha_1 + \alpha_2 y + \alpha_3 z + \alpha_4 yz \\ H_y &= \alpha_5 + \alpha_6 z + \alpha_7 x + \alpha_8 zx \\ H_z &= \alpha_9 + \alpha_{10} x + \alpha_{11} y + \alpha_{12} xy \end{aligned} \right\} \quad (4.2.14)$$

4.2.4 非線形解析

磁性体内部の磁場の強さ H と磁束密度 B との関係は、透磁率 μ を用いて式(4.2.5)のように表される。また、磁気飽和現象を起こすため、図4.2.2に示すように B^2 と磁気抵抗率 $\nu (= \mu^{-1})$ の間には、強い非線形性が見られる。

非線形計算には、収束性が確実なNewton-Raphson法系の弧長法^{7)~9)}を採用している。更に有限要素法において構成される係数マトリクスはバンド状になるため、その性質を保持しながら収束計算が進められる修正Riks法^{10), 11)}を弧長法に取り入れ、計算時間の節約を図っている。

収束計算に用いるヤコビマトリクス $[J]$ は、式(4.2.12)を考慮すると次のようになる。

$$[J] = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial H_t} & \frac{\partial f_1}{\partial P} \\ \frac{\partial f_2}{\partial H_t} & \frac{\partial f_2}{\partial P} \end{bmatrix} \quad (4.2.15)$$

ただし、

$$f_1 = V(B_l^{-1})^T E B_l^{-1} H_t + (B_l^{-1})^T C P - V(B_l^{-1})^T e^T J$$

$$f_2 = C^T B_l^{-1} H_t - \tau X P$$

$$\frac{\partial f_1}{\partial H_t} = V(B_l^{-1})^T E B_l^{-1} + (B_l^{-1})^T S^T \frac{\partial \mu}{\partial H_t} D (F^{-1})^T P$$

$$\frac{\partial f_1}{\partial P} = (B_l^{-1})^T C$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial H_t} = C^T B_l^{-1} + F^{-1} D^T \left(\frac{\partial \mu}{\partial H_t} \right)^T S B_l^{-1} H_t$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial P} = -\tau X$$

上式に含まれる $\partial \mu / \partial H_t$ は次式のように考える。

$$\frac{\partial \mu}{\partial H_i} = T^T \frac{\partial v^*}{\partial B^{*2}} \frac{\partial B^{*2}}{\partial H_i} \frac{\partial \mu^*}{\partial v^*} T \quad (4.2.16)$$

ただし、 $v^* = \mu^{*-1}$ 、 $()^*$ は主軸方向の値を示す。式(4.2.16)の右辺 $\partial \mu^* / \partial v^*$ 、 $\partial B^{*2} / \partial H_i$ の各成分は計算により容易に導くことができる。 $\partial v^* / \partial B^{*2}$ は、図4.2.2に示すようなデータベースから与える。任意点のデータは、線形補間により計算する。

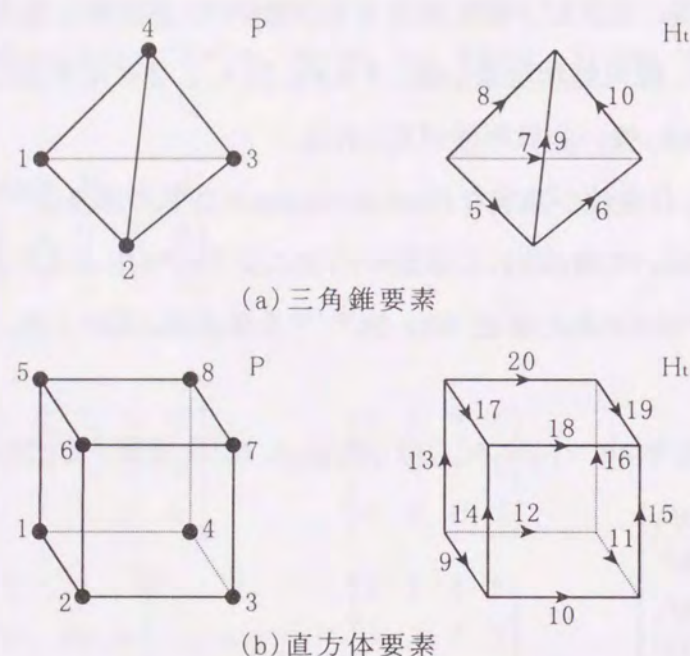


図4.2.1 辺要素法における未知量数

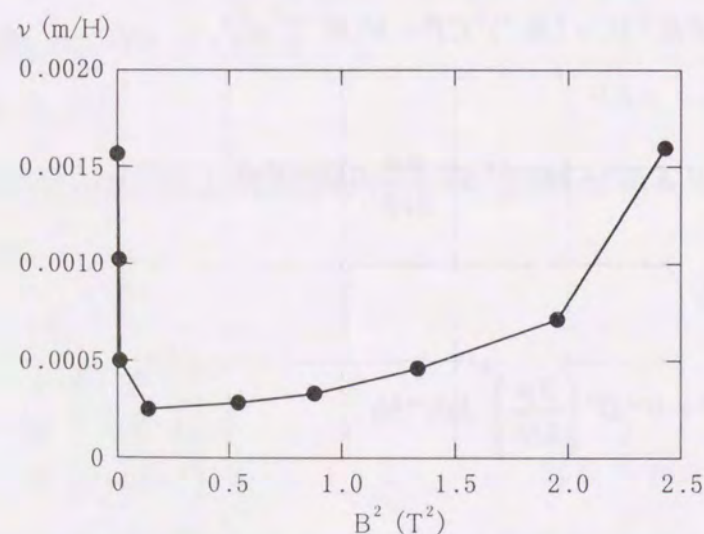


図4.2.2 磁気抵抗率曲線($B^2 - v$ 曲線)

4.3 数値解析システム

コンピュータ能力(演算速度、記憶容量)の向上により、3次元解析が実用的となった。しかし、3次元問題において、有限要素法で扱うデータは膨大なため、人力による正確なデータ作成はほとんど不可能である。本システムはその対策として、ワークステーション上でプリ・ポストプロセッサを活用する。ワークステーションはグラフィック機能に優れているため、対話形式で簡便にデータ処理を行うことができ、労力を大幅に低減できる。作成データをグラフィックにして多角度から見ることで、データのチェックも容易で、正確なデータ作成ができる。出力結果も同様に扱うことができ、任意の面(断面も含む)の磁束密度ベクトル図や分布図等が見られる。図4.3.1に示すように、プリ・ポストプロセッサ及び3次元非線形磁場解析に共通データを用いることにより、一貫した平易なシステムに構築できた。そのため、磁気シールドの設計に数値シミュレーション結果が迅速に反映でき、最適設計を有力に支援することができる。

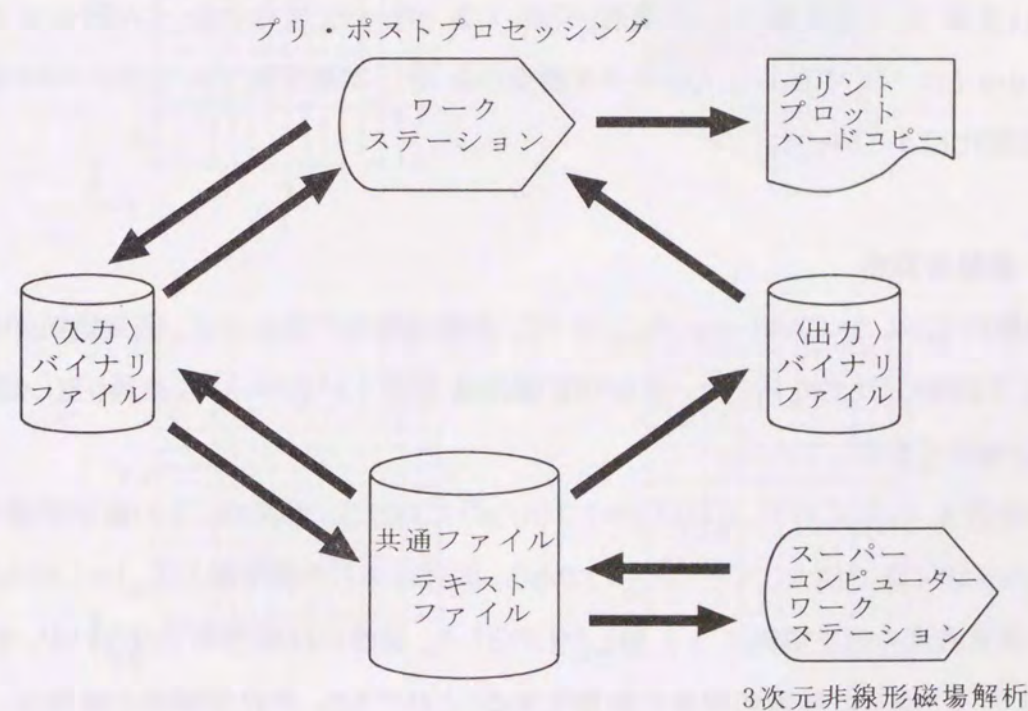


図4.3.1 数値解析システム

4.4 数値解析例

磁気シールド材の配置場所(1方向)によるシールド効果の基本的な性質を把握するため、線形解析及び非線形解析を行う。これらの計算により、本システムの有用性を示す。

4.4.1 線形解析

MRI 装置を想定し、コイルに流れる直流電流により発生する磁場の中に、シールド材(純鉄)を配置する問題を考える。解析モデルを図 4.4.1 に示す。対称条件を導入し、1/8 領域(図 4.4.1 の網掛け部)において解析を行った。要素分割は図 4.4.2 に示す。使用要素は直方体要素で、要素数:2028, 接点数:9632 である。

図 4.4.2 における面 ABCD(点 A, B, ..., H は各コーナーにある要素の重心位置を示す)上の磁束密度ベクトル(CASE-a・b・c・d・e)を図 4.4.3 に示す。斜線部がシールド材である。また、直線 DC 及び直線 DA 上の磁束密度分布を図 4.4.4 に示す。

CASE-b・c においては、シールド材背後(直線 Y_1Y_2 と直線 DC の交点)の磁束密度の値は、シールド材がないときに比べて約 1/14 となった。同様に CASE-d・e においては、シールド材背後(直線 X_1X_2 と直線 DA の交点)で約 1/3 となった。すなわち、CASE-b・c の方が CASE-d・e と比べて 4 倍以上のシールド効果があった。本解析モデルではシールド材の厚さによる変化は小さかった。

4.4.2 非線形解析

線形解析で示した CASE-c・e のについて、非線形解析の例を示す。磁気抵抗率曲線は図 4.2.2 に示したものをを用いた。収束判定値には 1.0×10^{-7} を用い、収束繰り返し回数は 3 ~ 4 回と極めて安定していた。

結果を図 4.4.5 に示す。これは $J=1.2(\text{A}/\text{m}^2)$ における、直線 DA 上の磁束密度の分布をシールド材以降で拡大して示したものである。同図における線形解とは、 $J=1.0(\text{A}/\text{m}^2)$ における磁束密度の値を単純に 1.2 倍したものとした。厳密には線形解ではないが、そうすることにより、より進んだ非線形現象の影響を見ることができる。非線形解析の結果は、ここで言う線形解析に比べて、0.1~0.3mT 程度大きくなっている。したがって、磁気飽和がシールドに対し、不利に作用するということが確認できる。

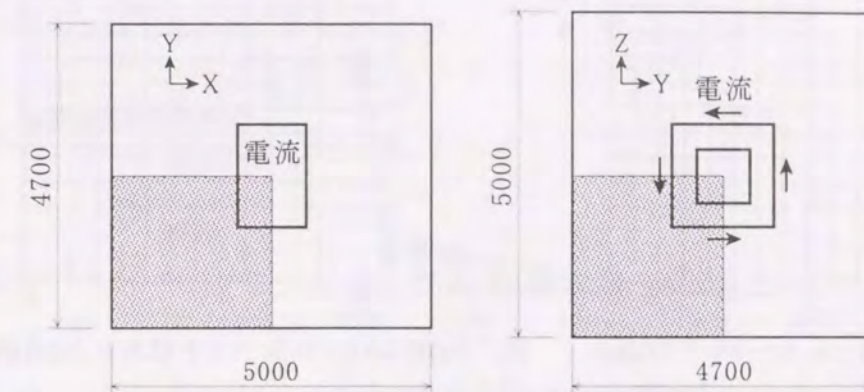


図4.4.1 解析モデル

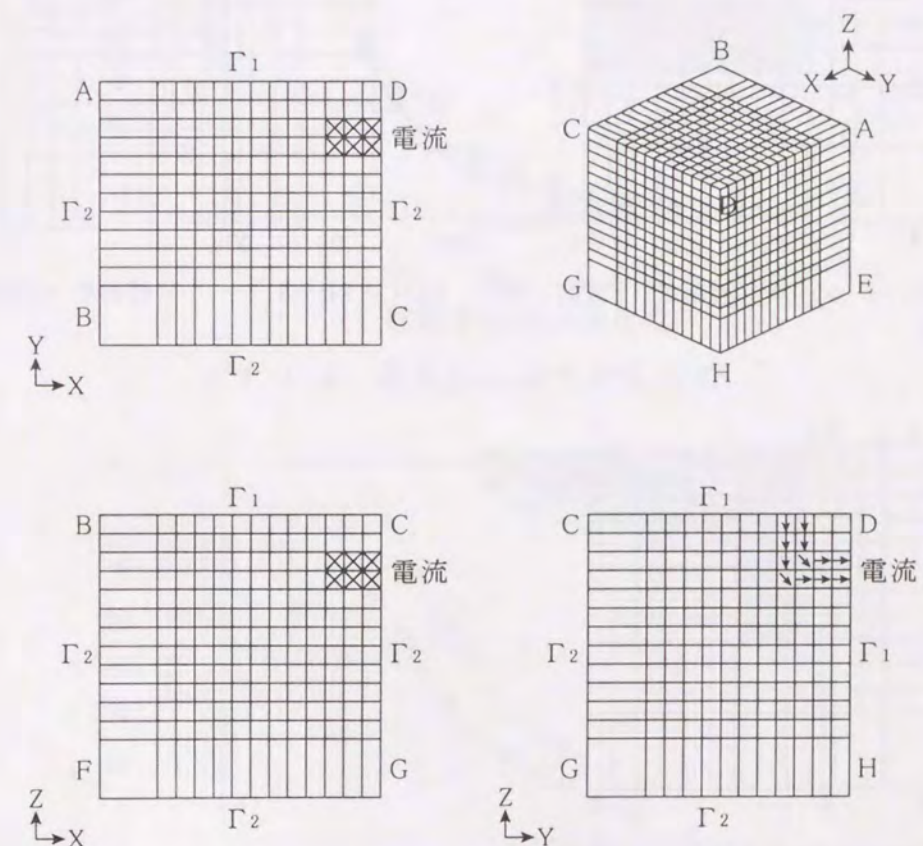


図4.4.2 要素分割図 (1/8解析モデル)

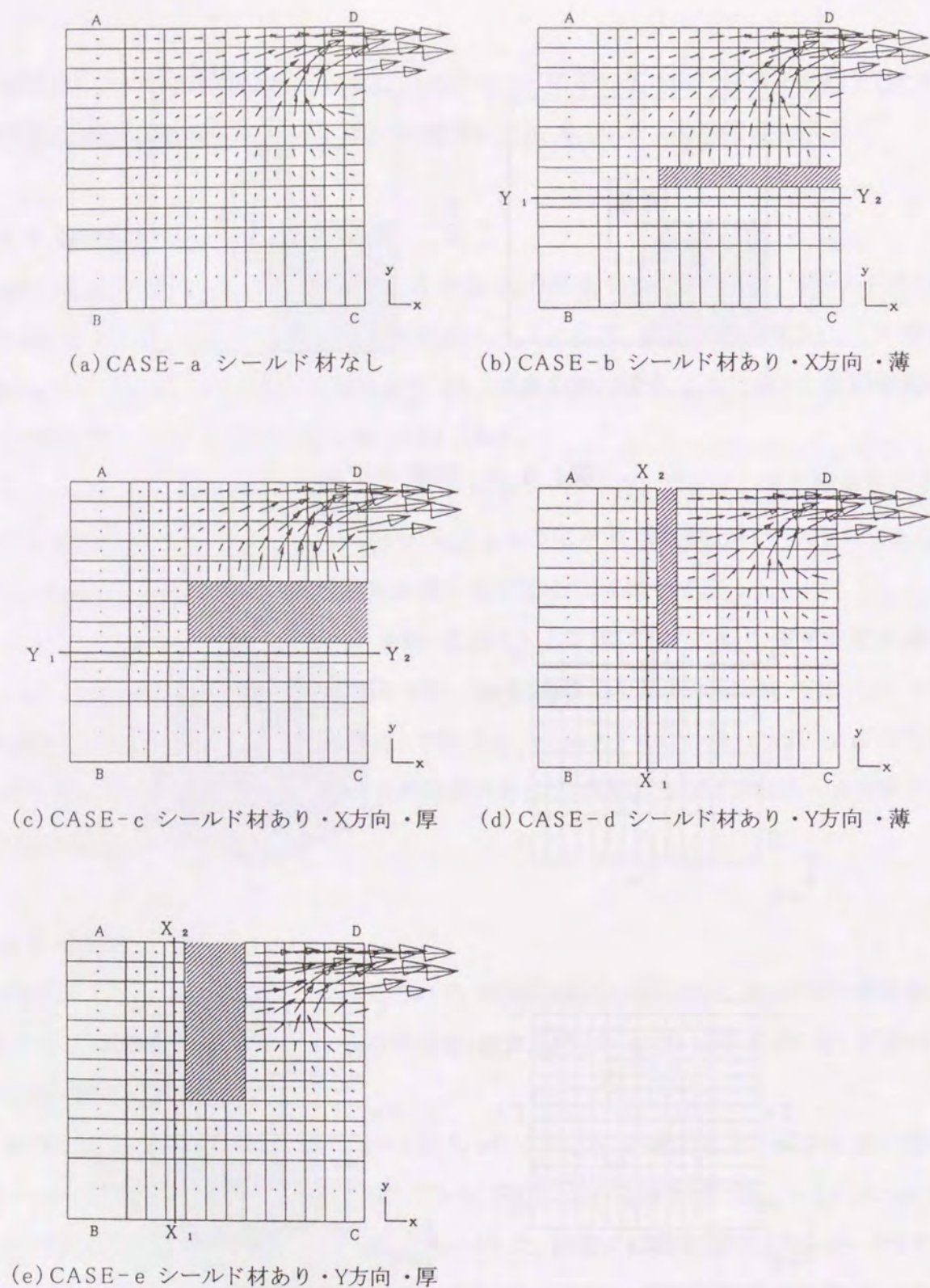


図4.4.3 面ABCDの磁束密度ベクトル図

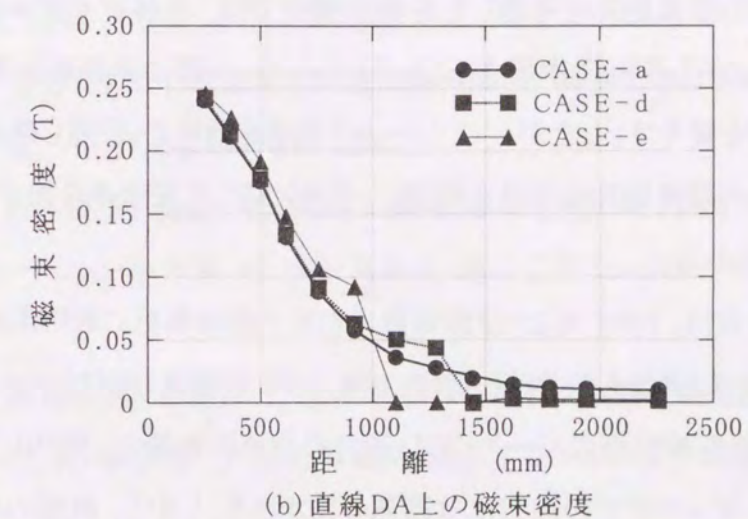
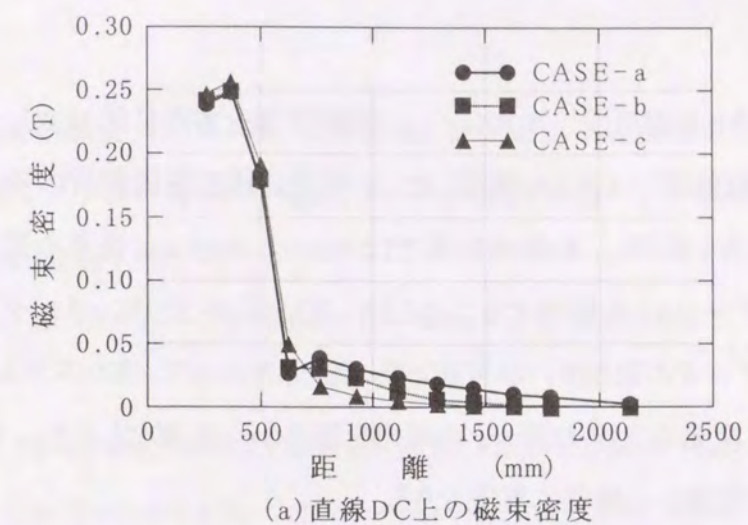


図4.4.4 線形解の磁束密度分布

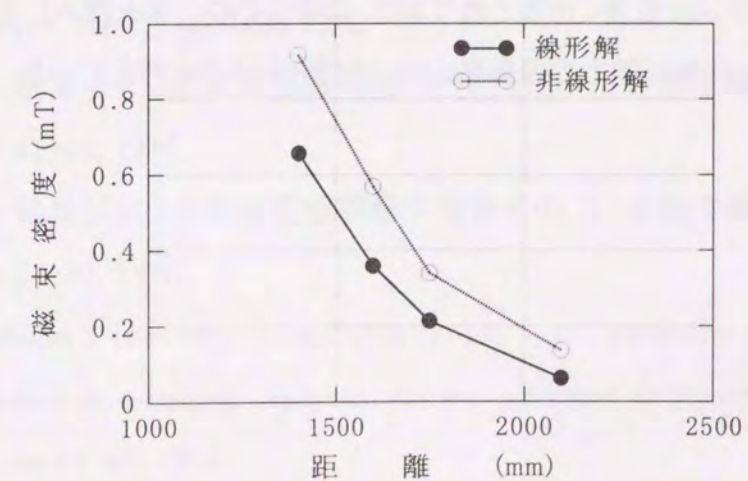


図4.4.5 直線DC上の磁束密度分布

4.5 あとがき

MRI 施設を対象とした磁気シールドルームの設計支援を主な目的として、シールド効果を評価するための数値解析システムを構築した。3 次元非線形磁場解析の手法には、辺要素を用いた有限要素法を採用し、非線形計算では Newton-Raphson 法系の弧長法を取り入れた。また、ワークステーションを利用することにより、プリ・ポストプロセッサはグラフィック表示となり、対話形式でデータの取り扱いが可能となった。したがって、本システムは、これまで労力を要していた 3 次元の入出力データの処理を容易かつ正確なものとし、磁気シールドルームの最適設計を迅速かつ簡便に支援できる。

磁気シールド材の磁気飽和を考慮した非線形解析では、本解析モデルにおいて、磁気飽和がシールド材に対し不利に作用することがわかった。一般に非線形計算は線形計算に比べて膨大な時間を費やす。したがって、シールド効果を効率よく計算し評価するためには、線形計算の結果から磁気飽和の程度を推測し、それに応じた安全率を掛けるというような手法が有効だと考えられる。

本章で述べた内容は、1988 年より建設業界で初めて磁場解析に取り組み、1992 年時点で得られた成果¹⁾をまとめたものである。現在では、MRI 装置及び磁気シールド技術のハード面での進歩、磁場解析技術のハード・ソフト面での発展の影響で、時代にそぐわない点も多々ある。特にコンピューターの性能には雲泥の差がある。しかし、根底の考え方に変わるところはなく、本システムの開発で得た技術的成果は大きいと考えている。また、現在 EMC 関連の解析プログラムは数多く市販されており、筆者もその一部を購入しているが、種々のソルバーを持つことが解析能力の総体的な向上に繋がるものと考えている。

参考文献

- 1) 加藤泰正, 新納敏文, 清川 博, 本間俊雄, 登坂宣好: 辺要素を用いた 3 次元非線形静磁界解析システムの開発 - 磁気シールド設計支援 -, シミュレーション, Vol.11, No.3, pp.228-234, 1992
- 2) J.C.Nedelec: Mixed Finite Elements in R^3 , Numerische Mathematik, Vol.35, pp.315-341, 1980
- 3) F.Kikuchi: Mixed and Penalty Formulation for Finite Element Analysis of an Eigenvalue Problem in Electromagnetism, Computer Method in Applied Mach. And Eng., Vol.64, pp.509-521, 1987
- 4) 菊地文雄: 混合法による電磁気学の諸問題の解法, 構造工学における数値解析シンポジウム論文集, Vol.11, pp.433-438, 1987
- 5) 池口修一, 松木直美, 金山 寛, 菊地文雄: 辺要素を用いた 3 次元非線形静磁場解析, 日本シミュレーション学会第 13 回計算電気・電子工学シンポジウム論文集, pp.59-64, 1992
- 6) 中田高義, 高橋則雄, 藤原耕二, 今井徹也: 辺要素の特徴と周期境界条件の検討, 日本シミュレーション学会第 12 回計算電気・電子工学シンポジウム論文集, pp.111-116, 1991
- 7) E.Riks: The Application of Newton's Method to the Problem of Elastic Stability, Trans. ASME J., Appl. Mech., pp.1060, 1972
- 8) 細野 透: 弧長法による弾性座屈問題の解析その 1, 日本建築学会論文報告集, No.242, pp.41-49, 1976
- 9) 細野 透: 弧長法による弾性座屈問題の解析その 2, 日本建築学会論文報告集, No.243, pp.21-30, 1976
- 10) Ekkehard Ramm: The Riks/Wempner approach - An extension of the displacement control method in nonlinear analyses, Recent advances in non-linear computational mechanics, pp.63-86, 1982
- 11) 加藤泰正, 片山和行, 本間俊雄: エラスティカ問題の積分方程式を用いた近似解析に関する研究, フジタ工業技術研究所報, No.25, pp. 151-156, 1989

- 12) 加川幸雄：電気・電子のための有限要素法の実例，オーム社，1982
- 13) 中田高義，高橋則雄：電気工学の有限要素法，森北出版，1982
- 14) Y.Kato, T.Shinno, H.Kiyokawa, T.Honma, N.Tosaka : A numerical simulation system for magnetic shielding, Applied Electromagnetic in Materials and Computational Technology, pp.157-162, 1992
- 15) 本間俊雄，片山和行，加藤泰正，野島 博，清川 博，新納敏文：非在来要素を用いた有限要素法による非線形静磁場の近似解析，フジタ工業技術研究所報，No.25, pp.145-150, 1989
- 16) 加藤泰正，片山和行，本間俊雄，清川 博，新納敏文，野島 博，登坂宣好：磁気シールド効果を評価する数値解析システム，フジタ技術研究所報，No.27, pp. 181-186, 1991
- 17) Y.Kato, K.Katayama, T.Shinno, H.Kiyokawa, T.Honma, N.Tosaka : Finite element analysis of three-dimensional nonlinear static magnetic fields in evaluation of magnetic shielding effects, Journal of Fujita Technical Research Institute, No.3, pp.73-80, 1992
- 18) 加藤泰正，本間俊雄，新納敏文，清川 博，登坂宣好，西村敏雄：磁気シールドルーム設計に対する数値解析について その 2. Exotic 要素を用いた有限要素法による解の評価，日本建築学会大会学術講演梗概集(A)，pp.1257-1258, 1989
- 19) 加藤泰正，新納敏文，本間俊雄，登坂宣好：非在来要素を用いた有限要素法による三次元非線形静磁場解析，日本大学生産工学部第 23 回学術講演会(数理部会)，pp.57-60, 1990
- 20) 加藤泰正，新納敏文，本間俊雄，登坂宣好：磁気シールド効果を評価する三次元非線形静磁界解析，日本シミュレーション学会第 12 回計算電気・電子工学シンポジウム論文集，pp.75-80, 1991
- 21) 清川 博，加藤泰正，新納敏文，本間俊雄，登坂宣好：磁気シールド効果を評価する数値シミュレーションシステム その 1. Nedelec 要素を用いた有限要素法による 3 次元静磁界解析，日本建築学会大会学術講演梗概集(D)，pp.383-384, 1991
- 22) 加藤泰正，新納敏文，清川 博，本間俊雄，登坂宣好：磁気シールド効果を評価する数値シミュレーションシステム その 2. 磁気飽和を考慮した有限要素法による 3 次元非線形静磁界解析，日本建築学会大会学術講演梗概集(D)，pp.385-386, 1991

第 5 章 各種磁場解析手法の比較検討

5.1 まえがき

前章で述べたように，強磁場(1.0T 以上)に対する磁気シールド効果を評価するために，3次元非線形磁場解析による数値解析システムを開発した¹⁾。解析手法は，辺要素を用いた有限要素法(Finite Element Method)である。これは，従来の 3 次元有限要素法と比較して未知数が少なく計算時間が短くなるだけでなく，磁場の強さ H を直接未知量に選ぶため磁気ベクトルポテンシャル A の微分として H を求める手法より解析精度が向上することが期待できる。

一方，有限要素法とは異なる原理に基づき，空間の要素分割が不要で無限領域を考慮できる改良積分方程式法(Improved Integral Equation Method)²⁾ が最近注目されている。これは，空間の要素分割，境界条件，ゲージ条件等の入力が必要で，任意の空間磁場を求めることができる。境界要素法の一つである磁気モーメント法を改良したもので，Maxwell の電磁方程式を積分方程式の形で解き，磁性体内の磁気モーメントを求めることにより，重ね合わせの原理から所定の空間磁場を計算するものである。

本章では，磁気シールドルーム設計への適用を前提として，辺要素を用いた有限要素法と改良積分方程式法による数値解析結果を磁気シールド効果計測実験により得られた実測値と比較し，実用性(計算時間，解析精度等)の観点からその有効性と限界を明確にする。比較のために，磁気ベクトルポテンシャルを従属変数とする有限要素法による結果も加えている。

5.2 磁場数値解析

解析手法は2種類である。2次元場と3次元場それぞれに対して線形及び非線形解析を行った。以下、各手法の概略を述べる。

5.2.1 有限要素法

Maxwell の方程式を混合法により次のように定式化した¹⁾。詳細は第4章に述べているので、ここでは概要を示す。

$$(\text{rot } H, \text{rot } H^*) + (\text{grad } P, \mu H^*) = (J, \text{rot } H^*) \quad (5.2.1)$$

$$(\mu H, \text{grad } P^*) - \tau (P, P^*) = 0 \quad (5.2.2)$$

ここで、 H は磁場の強さ、 J は電流密度、 μ は透磁率テンソル、 P はLagrangeの未定乗数、 H^* 、 P^* は適当な重み関数、 τ は非負のパラメーター、記号 $(,)$ は内積を表す。Lagrangeの未定乗数 P は、方程式の数と未知量の数を一様にするために導入したもので理論上零となる。境界条件は、対象場を取り囲む適当な境界 Γ を考え、そこで次の条件を満たすものとした。

$$(\mu H) \cdot n = 0 \quad \text{on } \Gamma \quad (5.2.3)$$

ここで、 n は境界上の法線ベクトルを表す。離散化には辺要素を用いた。辺要素は、要素間接合で未知量接線成分のみを連続にするものである。本解析では、 H を直接未知量に選んで定式化を行った。非線形計算には修正Riks法を採用した。以下、本手法を辺要素法と略称する。

また、磁気ベクトルポテンシャルを従属変数とする有限要素法も2次元モデルでの比較で用いた³⁾。境界には減衰型半無限要素^{4)~7)}を導入、非線形計算にはNewton-Raphson法を採用した。以下、本手法をポテンシャル法と略称する。

5.2.2 改良積分方程式法

通常の積分方程式法では、非同次の場を扱うのが簡単ではない。今回採用したものは積分方程式法を改良したもので、重ね合わせの原理を利用して磁場の強さ H を次のように求めるものである²⁾。

$$H = H_0 + H_m \quad (5.2.4)$$

ここで、 H_0 は電流によって作られる磁場の強さ、 H_m は磁化された磁性体によって作られる磁場の強さを表す。

H_0 はBiot-Savartの法則から次のように求められる。

$$H_0 = \frac{1}{4\pi} \int_V \frac{J \times r}{r^3} dV \quad (5.2.5)$$

ここで、 J は電流密度、 r は電流の流れている点からの距離、 V は解析領域を表す。一方、磁性体中に H が存在すると、磁気モーメント M が発生する。 H_m は M を用いて次のように表される。

$$H_m = \frac{1}{4\pi} \int_V \frac{(-\text{div } M) \cdot r}{r^3} dV \quad (5.2.6)$$

以上の式から、離散化した磁性体要素内の M を求めることにより、任意の空間の H を計算する。よって、空間の要素分割は不要である。非線形計算にはNewton-Raphson法を採用した。なお、解析にはELF/MAGICとして知られる磁場解析プログラムを利用した。

5.2.3 解析モデル

図5.2.1に磁気シールド壁モデルを示す。これは、MRI磁気シールドルームを1/10スケールで模擬したもので、4面のシールド壁と駆動コイルから構成されている。壁面には、縦横に壁を分断する間隙と3か所の開口がある。図5.2.2にモデルの断面図を示す。上図は水平断面図、下図は垂直断面図で、計測/評価位置も示してある。シールド壁の構成、間隙、開口、駆動電流をパラメーターとして変えられるようにモデルを作製した。シールド壁が4面構成(間隙0mm、開口なし)、駆動電流10Aのものを標準モデルと呼ぶ。図5.2.3は2次元場の標準モデルで、辺要素法による有限要素を用いている。

また、表5.2.1に各手法の比較に用いた解析モデルと使用コンピューターを示す。要素数及び節点数は数値実験を二、三行った上で、計算時間を考慮して選択した。また、非線形解析では、付図1.1に示すSS400のB-H入力用データを用いた。線形解析の場合は透磁率を $9.425 \times 10^{-4} (\text{H/m})$ とした。

表 5.2.1 解析モデルと使用コンピューター

	辺要素法	改良積分方程式法	ポテンシャル法
2次元モデル			
要素の種類	四角形要素(8節点)	薄板要素(8節点)	四角形要素(4節点)
要素数	3224	272	2780
節点数	9901	1096	3087
3次元モデル			
要素の種類	直方体要素(20節点)	直方体要素(8節点)	—
要素数	6440	521	—
節点数	29061	1148	—
コンピューター			
型名	SPARCstation2 (SUN)	PC-9821Ap2 (日本電気)	SPARCstation2 (SUN)
CPU	SPARC (40MHz)	i80486DX2 (66MHz)	SPARC (40MHz)
スピード	28.5MIPS (4.2MFLOPS)	54.0MIPS (2.5MFLOPS)	28.5MIPS (4.2MFLOPS)
メモリ	64M バイト	14.6M バイト	64M バイト
ハードディスク	3072M バイト	128M バイト	3072M バイト

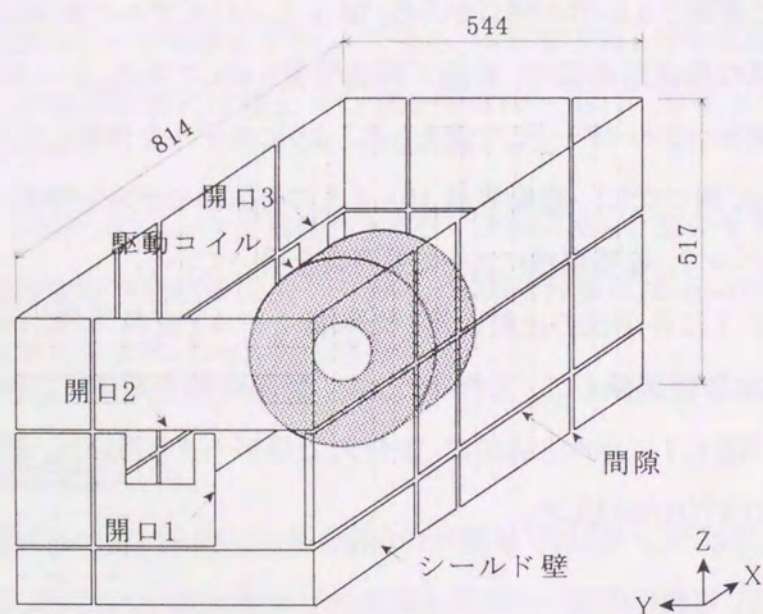
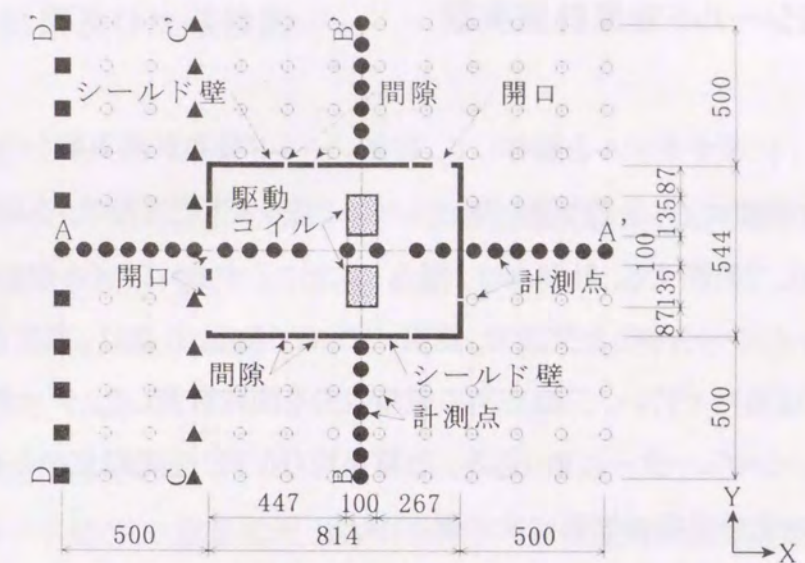
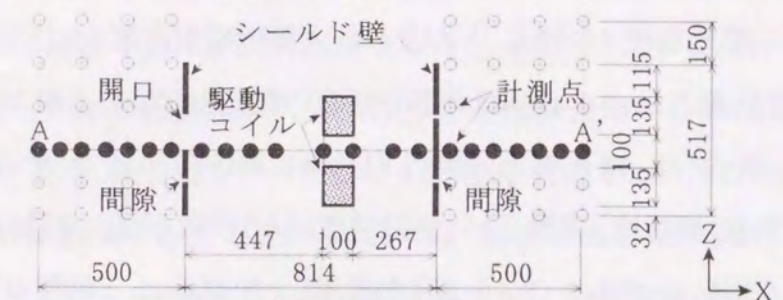


図5.2.1 磁気シールド壁モデル



(a) 水平断面図



(b) 垂直断面図

図5.2.2 モデルの断面図

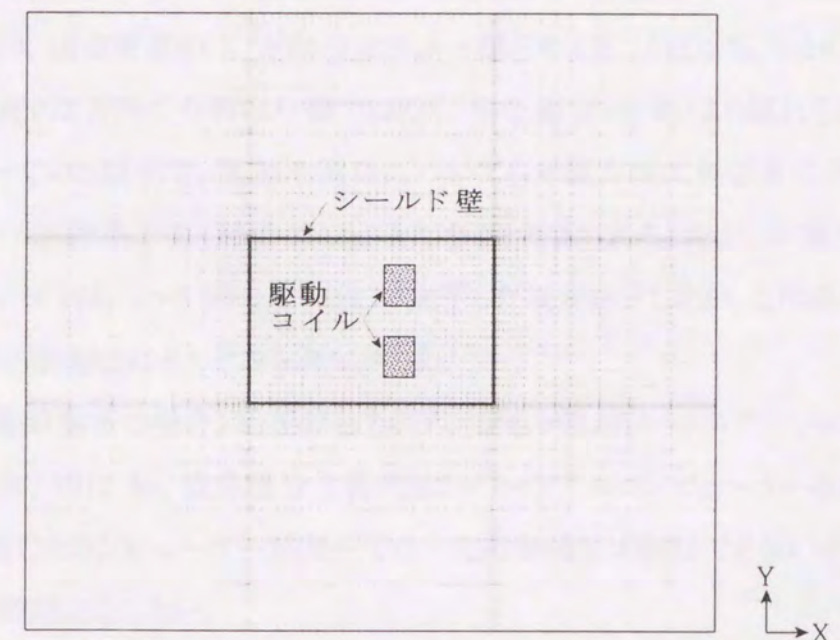


図5.2.3 2次元場の標準モデル:辺要素法

5.3 磁気シールド効果計測実験

図 5. 2. 1 に示すモデルを製作して、磁気シールド効果計測実験を行った。すなわち、磁場発生源の駆動コイルを取り囲む形でシールド壁を配したもので、空間の磁場はセンサーを順次移動して計測する。計測点は、図 5. 2. 2 に示すようにコイル中心軸を含む水平及び垂直平面をメッシュ分割した交点で、総数 162 点である。計測は、温度変化による影響を避けるため恒温室内で行い、三軸方向の磁場成分を同時計測した。データは GP-IB を介してパーソナルコンピュータに取り込み、加算平均(10 回)や地磁気のキャンセル等の処理を行った。主な実験装置の概略は次の通りである。

【駆動コイル】 外径 370mm, 内径 100mm, 幅 100mm の円形ソレノイドコイルで、銅線巻数 1008 ターン、駆動電流 0~10A, 中心点の最大発生磁束密度 54.1mT である。

【シールド壁】 厚さ 2mm の SS400 鋼板を所定の間隙を設けて下地木材に固定することにより構成した。サイズは、幅 544mm×奥行 814mm×高さ 517mm で、その詳細は図 5. 2. 1 に示す通りである。鋼板は、実験ごとに脱磁装置により消磁を施し、残留磁気を取り除いた。

【計測法】 計測システム I (3. 5 節)を適用し、計測器は三軸型ガウスメートル(9903 : F.W.BELL), データ記録計はパーソナルコンピュータ(PC-9821As2: 日本電気) + データ入力ソフトウェア(MEASURE : 自作)を用いた。

5.4 計測、解析結果及び比較検討

5.4.1 2次元モデル

以下のようなパラメーターに対して、2次元モデルの数値解析結果と実測値を比較した。

- 1) シールド壁の構成(なし, 1面, 2面, 3面, 4面)
- 2) 接合部の間隙(0mm, 1mm, 2mm)
- 3) 開口の有無(あり, なし)
- 4) 駆動電流の大きさ(5A, 10A)

図 5. 4. 1 はシールド壁なし、駆動電流 10A の条件下での数値解析結果と実測値との比較図である。上図が A-A'軸、下図が B-B'軸方向(駆動コイル中心軸)に沿った磁束密度の比較である。数値解は、解析手法による差はほとんどなく、実測値に比べるといずれも駆動コイルから離れるに従って磁束密度が大きく見積もられ、距離減衰効果が低めに評価される傾向が見られた。また、図 5. 4. 2 はシールド壁が 4 面構成(間隙 0mm, 開口あり)、駆動電流 10A の条件下での比較図である。ここでも数値解は、解析手法による差はほとんどなく、いずれも実測値に比べてシールド壁外部の磁束密度が大きく、距離減衰効果及びシールド効果が低めに評価される傾向が見られた。他のモデルも同様であった。

2次元モデルでは、本来垂直方向に有限長である駆動コイル及びシールド壁を無限長に想定したことになり、磁束密度の Z 方向の分布が一様と考えたことになる。しかし、実際のコイルでは磁束密度の Z 方向の分布は一様ではなく、中心面(A-A'軸)より離れるに従い磁束密度が小さくなっているはずで、間隙や開口についても垂直方向に無限長に想定することになるため、シールド効果が低く評価されることになると考えられる。なお、非線形解析における収束計算はいずれも 3~5 回の繰り返しで安定した収束を示したが、この磁束密度のレベルでは非線形の影響はほとんどみられなかった。

計算時間は、線形解析の場合、辺要素法とポテンシャル法がワークステーションを用いて、それぞれ 1100 秒, 1012 秒, 改良積分方程式法がパーソナルコンピュータを用いて 676 秒であった。使用したコンピュータが同一でないため単純な比較はできないが、その差はいずれも実用上問題にならない。

このように、2次元モデルでの磁場解析は、計算時間の点では十分な実用性を有するが、垂直方向も有限壁として取り扱う必要のある磁気シールドルームのシールド効果を定量的

に高い精度で評価するには無理があることが判明した。

5.4.2 3次元モデル

以下のようなパラメーターに対して、3次元モデルの数値解析結果と実測値を比較した。

- 1) シールド壁の構成(なし, 4面)
- 2) 接合部の間隙 1mm 及び開口の有無(あり, なし)
- 3) 駆動電流の大きさ(5A, 10A)

図 5.4.3 はシールド壁なし、駆動電流 10A の条件下での数値解析結果と実測値との比較図である。数値解は、A-A'軸軸に沿っては解析手法による差はほとんどなく、両者とも全体的に実測値と良く一致している。一方、B-B'軸に沿っては磁場評価が駆動コイル内で解析手法に依存するのがみられる。これは、辺要素法の駆動コイル周辺における要素分割の粗さに起因するものと考えられる。また、図 5.4.4 はシールド壁が 4 面構成(間隙 1mm, 開口あり)、駆動電流 10A の条件下での比較図である。数値解は、A-A'軸軸に沿っては解析手法による差はほとんどなく、両者とも全体的に実測値と良く一致している。非線形解析における収束計算はいずれも 4~5 回の繰り返し計算で安定した収束を示したが、非線形解は線形解よりも多少高めにしている。鋼材の磁気特性においては、本解析で対象としている弱い磁場領域での磁束密度が小さく、透磁率の設定が必ずしも妥当ではないためと考えられる。MRI 磁気シールドルームのように、磁気飽和が問題となる強い磁場領域を扱う場合には非線形解析が必須になるものと思われる。なお、辺要素法では繰り返し収束計算に多大な時間を要するため非線形解析は実施しなかった。一方、B-B'軸に沿っては、シールド壁なしの結果と同様に磁場評価が駆動コイル内で解析手法に依存するのがみられる。いずれにしても、定量的に正確な解を求めるには 3 次元場の解析が不可欠で、間隙や開口が多く存在するような複雑な対象になるほど顕著であることが判明した。

計算時間は、線形解析の場合、辺要素法がワークステーションを用いて 479108 秒、改良積分方程式法がパーソナルコンピュータを用いて 3733 秒で歴然とした差が現れた。別途スーパーコンピュータ(CRAY EL 98, 267MFLOPS)を用いた計算時間は、辺要素法の場合 9775 秒であり、コンピュータの性能向上により解決する問題ではあるが、3次元モデルに対しては、有限要素法は辺要素を用いたものでも計算時間の点で実用性に欠ける。これは、開領域に対応するために外部領域を十分大きくとらなければならないため、適切

な無限要素等を接合することで要素数を減じて未知数を減らす等の工夫が必要と思われる。それに対して、改良積分方程式法は本質的に開領域に対応しており、解析精度、計算時間とも実用性が示された。

次に、改良積分方程式法について要素分割の影響を検討した。対象は 1mm の間隙、開口をともに有する 3 次元モデルで、磁性体要素数をパラメーターとした。図 5.4.5 に図 5.2.2 に示した C-C'軸及び D-D'軸に沿った数値解析結果と実測値の比較を示す。シールド壁から 500mm 離れた D-D'軸に沿っては要素サイズの影響は小さく、128 要素程度で十分な解析精度が得られている。それに対して、シールド壁から 50mm 離れた C-C'軸に沿っては要素サイズの影響が大きいことが判明した。したがって、改良積分方程式法を利用する場合、磁性体要素と磁束密度評価の位置関係に注意が必要である。

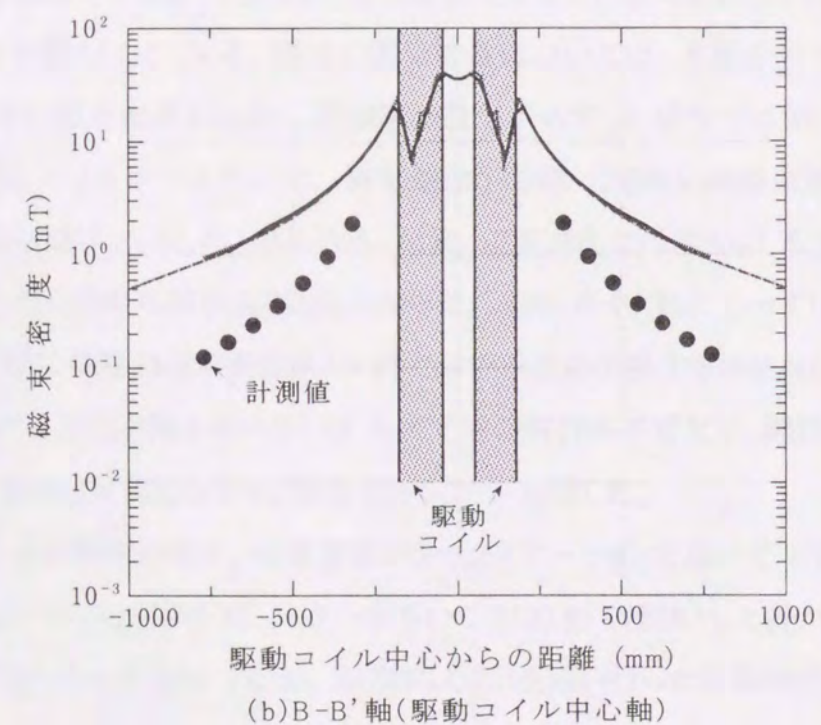
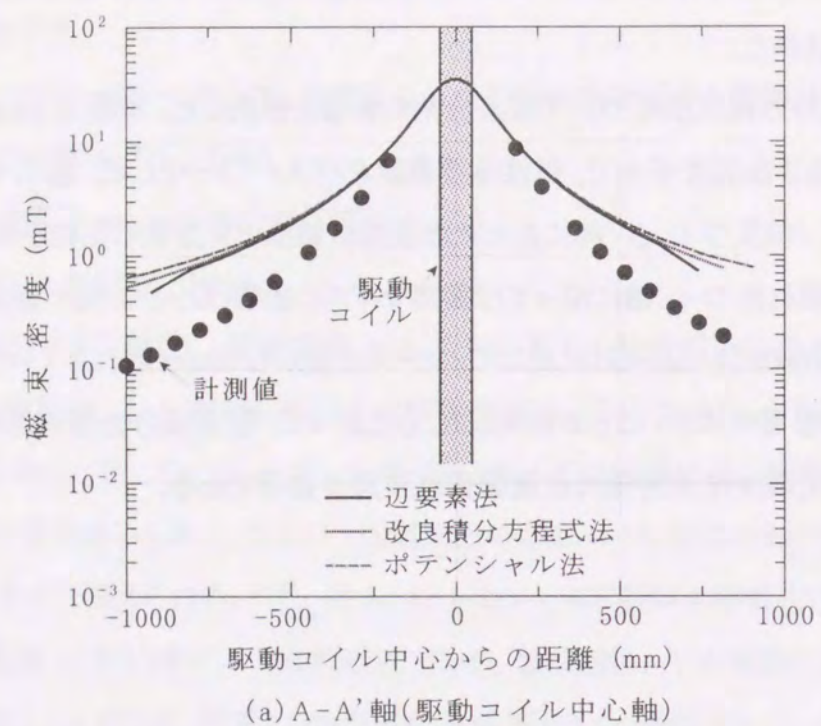


図5.4.1 2次元モデルの解析結果:シールド壁なし

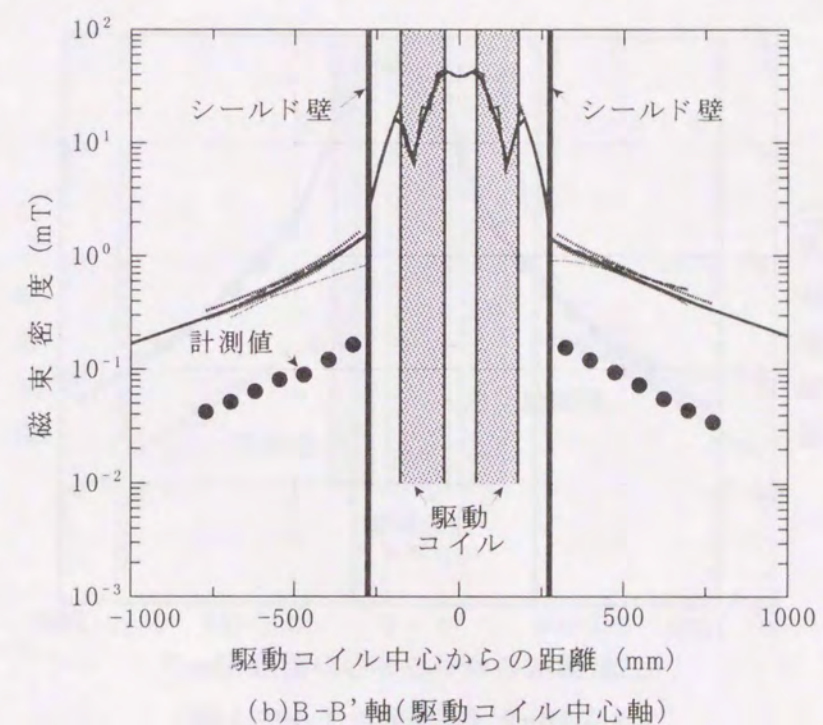
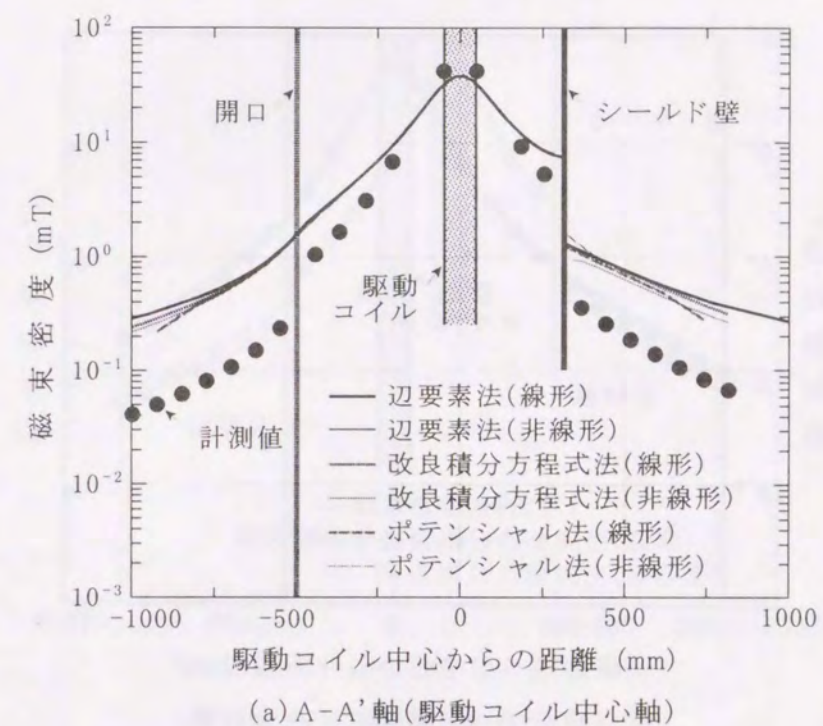


図5.4.2 2次元モデルの解析結果:シールド壁4面 (間隙0mm, 開口あり)

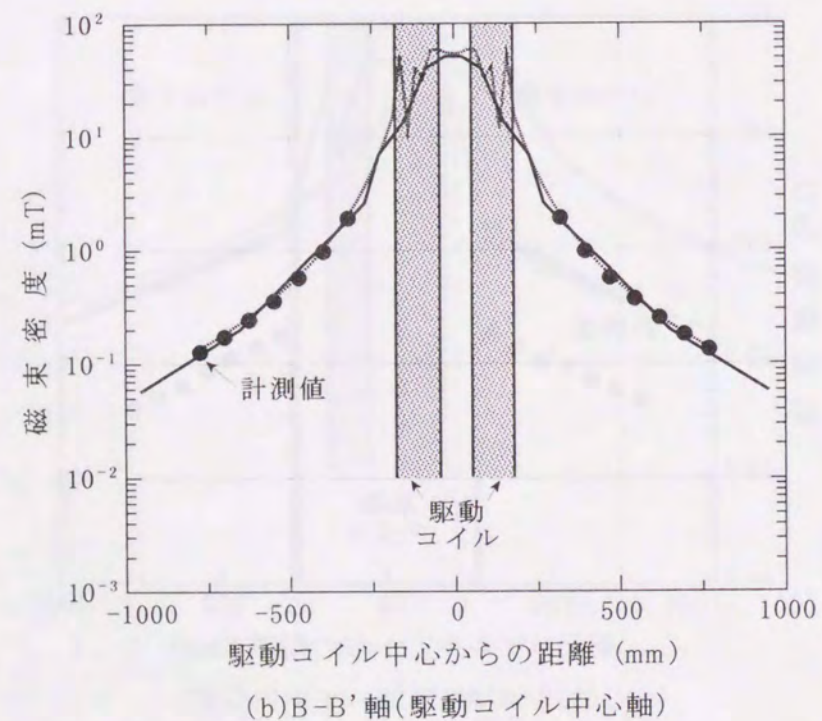
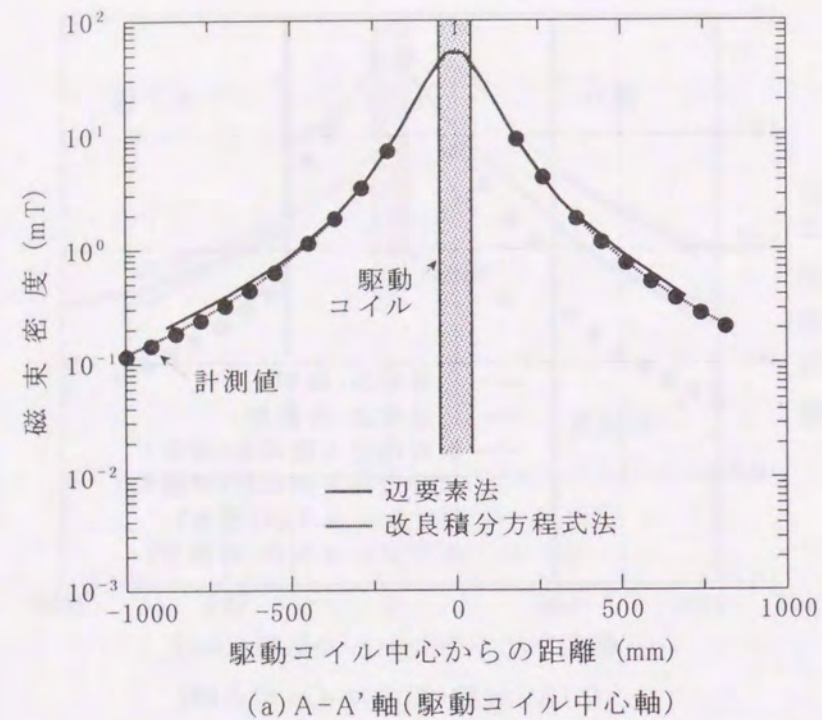


図5.4.3 3次元モデルの解析結果 : シールド壁なし

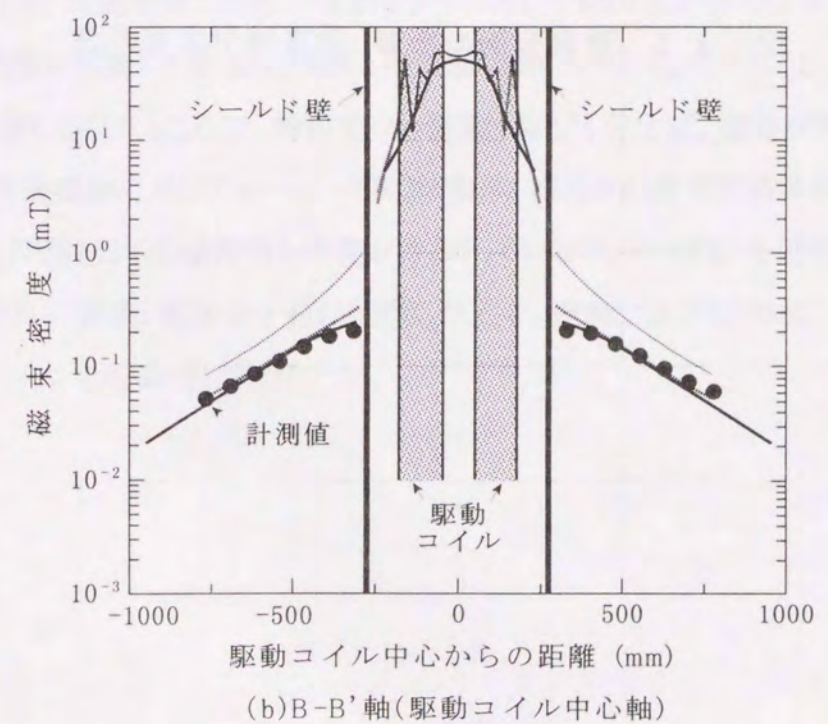
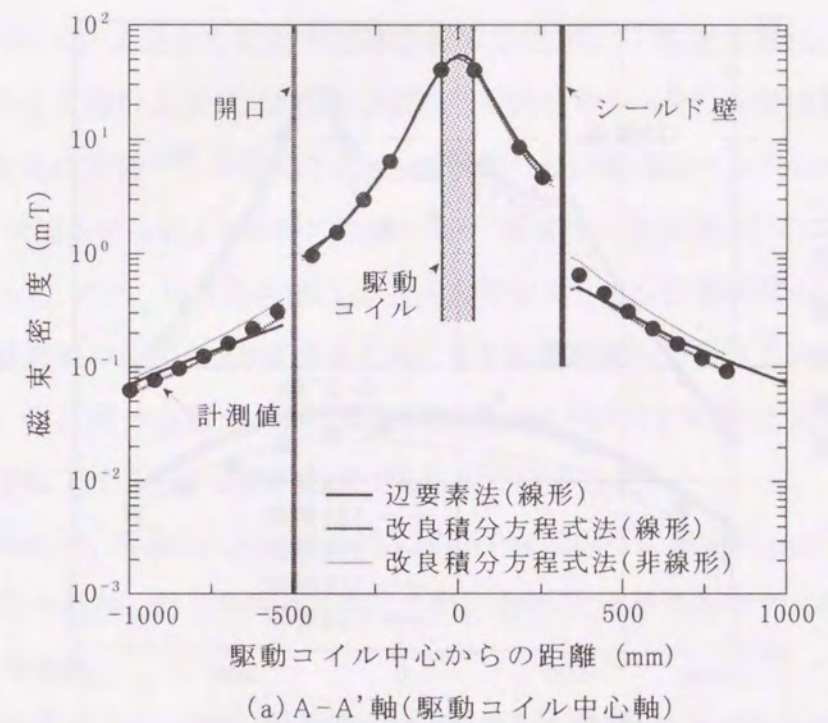


図5.4.4 3次元モデルの解析結果 : シールド壁4面 (間隙1mm, 開口あり)

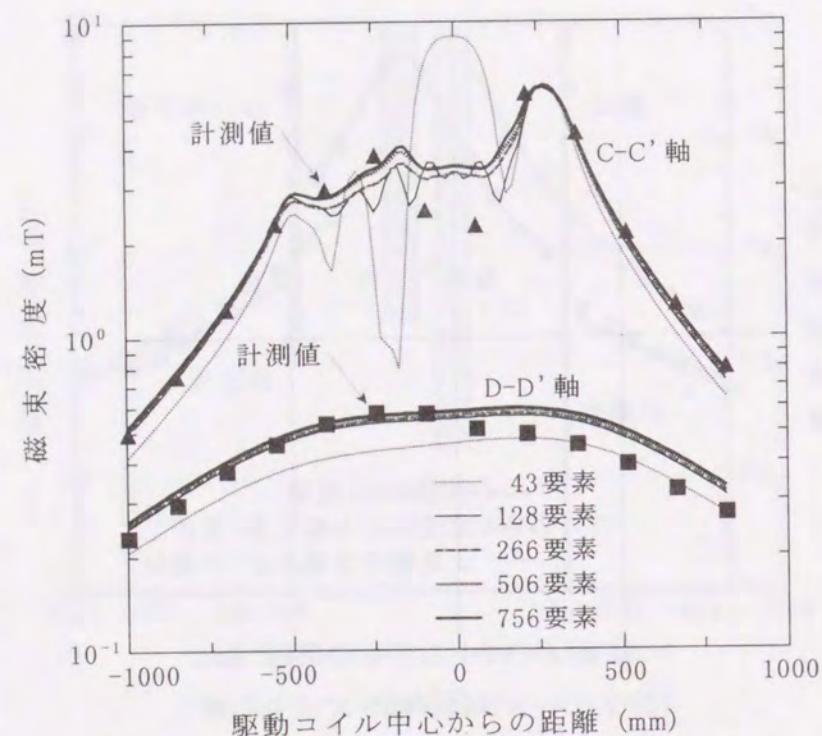


図5.4.5 要素分割の影響:改良積分方程式法

5.5 あとがき

磁気シールドルーム設計を支援する磁場解析手法として、有限要素法(辺要素法, ポテンシャル法)と改良積分方程式法を取り上げ, 実用的見地からその有効性を検討した。その結果, 垂直方向に有限でしかも部位によって一様でない磁気シールドルームのような場においては, 2次元モデルによる解析には難があり, 本来の3次元場としての解析が必須であることがわかった。ただ, 有限要素法は3次元解析に対しては計算時間の点で難点があり, これは無限要素等の併用により要素数を減じて未知数を減らす等の工夫を図ることが必要である。また, 改良積分方程式法は, 磁性体要素サイズが大きすぎると近傍での磁束密度の計算精度が低下するので注意が必要であることが判明した。

以上の数値解析, 実測の比較検討から, 解析手法は一つに限定するのではなく, 各手法の長所及び短所を理解した上で対象に応じて使い分けることが解析能力の総体的な向上に繋がるものと考える。

磁場解析技術は, コンピューターの急速な発展に伴って急速な進歩を遂げ, 最近では建築分野でも EMI 問題解決のための有効なツールとして利用されている。本章では触れていないが, 渦電流を考慮した動磁場問題への適用も始まっている。ただし, 3次元解析は未だ実用の域に達しかけたところで, 解決すべき課題も多い。例えば, 磁性材料の異方性, ヒステリシス(実効透磁率), リニアモーター等の移動体, 温度との連成問題等が挙げられる^{8)~11)}。また, 最適化問題としての逆解析も研究が行われている¹²⁾。今後は, 各解析手法に広く目を向け, それぞれの長所, 短所を十分に把握した上で, 建築における EMC 確立のための数値シミュレーション法を確立して行きたい。

付録 1. 磁性材料の直流磁化特性試験

非線形磁場解析の B-H 入力用データを得るために、各種磁性材料の直流磁化特性試験を行った。試験方法は、JIS C 2504(電磁軟鉄板)に準じている。

以下、測定機器、データ処理、試験体を示す。

- ・測定機器 直流磁化特性自動記録装置(理研電子)
本体 Model BHU-60
H 拡大装置 EXPH-100
XY レコーダー F-45
- ・データ処理 コンピューター及び周辺機器
パーソナルコンピューター PC-9801RA21(日本電気)
プロッター MP3300(グラフテック)
プリンター BJ130J(キヤノン)
データ処理ソフトウェア DC-BHS(理研電子)
- ・試験体 外径 45mm, 内径 33mm のリング形状
一次コイル 巻数(励磁コイル) 100 ターン
種類 ポリエステル銅線
直径 0.50mm
二次コイル 巻数(サーチコイル) 25 ターン
種類 ポリエステル銅線
直径 0.16mm

試験に供した材料は以下の 3 種類で、それぞれ 6 個ずつ試験体を作製した。

- 1) 純鉄(厚さ 1mm, 2mm, 6mm)
- 2) SS400(厚さ 1mm, 2mm, 6mm)
- 3) PC パーマロイ(厚さ 1mm, 2mm)

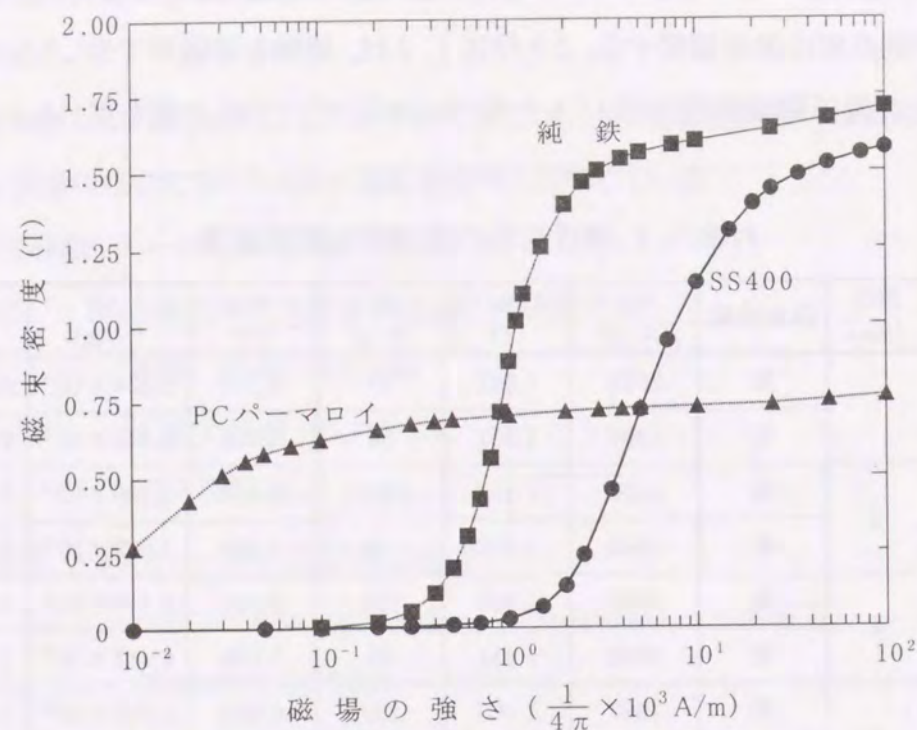
なお、試験体は平板をプレスで打ち抜いてリング形状に成形後、それぞれ 3 個ずつ磁気焼鈍を実施した。条件は、水素雰囲気中 950℃で 1 時間保持、その後徐冷である。

付表 1. 1 に、試験結果を示す。各材料の H_m (最大磁場強度), B_m (最大磁束密度), H_c (保磁力), B_r (残留磁束密度), μ_0 (初透磁率), μ_m (最大透磁率)を表示している。

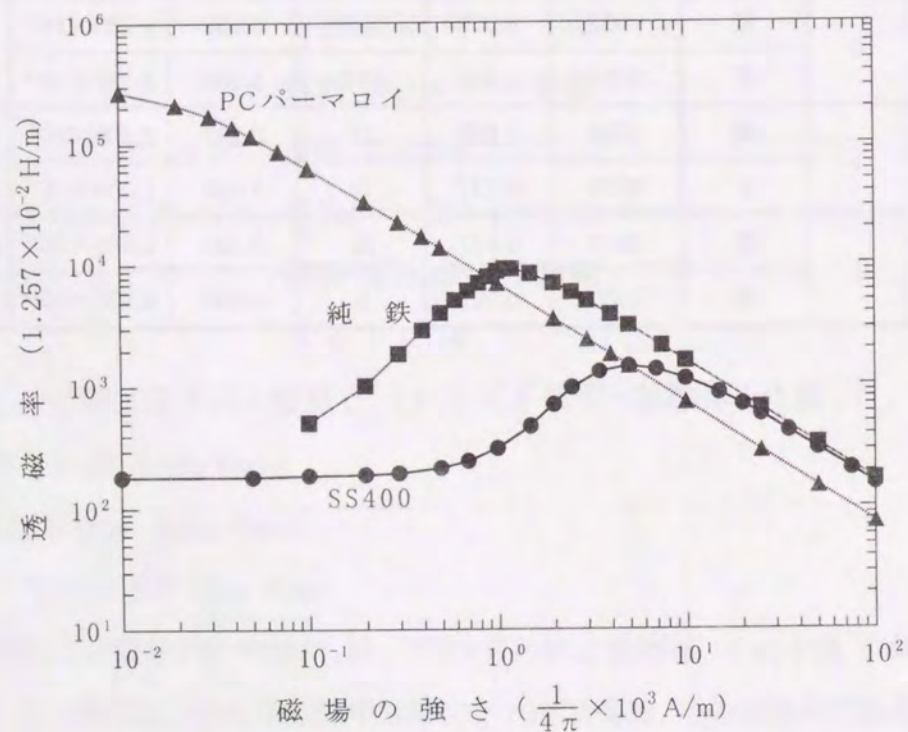
直流磁化特性試験の結果を分析し、各磁性材料の B-H 曲線として決定したものを付図 1. 1 に示す。計測点間は線形補間する。また付図 1. 2 は、縦軸を透磁率で表したものである。本研究では、非線形磁場解析の B-H 入力用データとして、これらの値を用いる。

付表 1. 1 磁性材料の直流磁化試験結果

材料	厚さ (mm)	磁気焼鈍	H_m (A/m)	B_m (T)	H_c (A/m)	B_r (T)	μ_0 (H/m)	μ_m (H/m)
純鉄	1	無	2001	1.547	60	0.709	3.834×10^{-4}	5.357×10^{-3}
		有	1989	1.331	36	0.730	8.372×10^{-4}	9.053×10^{-3}
	2	無	2005	1.552	104	0.672	2.149×10^{-4}	2.768×10^{-3}
		有	1998	1.476	70	1.204	3.029×10^{-4}	7.589×10^{-3}
	6	無	2009	1.347	132	0.514	2.413×10^{-4}	1.883×10^{-3}
		有	2008	1.484	65	1.199	6.411×10^{-4}	1.165×10^{-2}
SS400	1	無	1997	1.463	239	0.893	2.916×10^{-4}	1.824×10^{-3}
		有	2000	1.498	43	0.998	6.549×10^{-4}	8.954×10^{-3}
	2	無	2006	1.484	239	0.912	1.471×10^{-4}	1.842×10^{-3}
		有	2001	1.504	55	1.160	6.008×10^{-4}	9.337×10^{-3}
	6	無	2002	1.359	288	0.732	1.735×10^{-4}	1.332×10^{-3}
		有	2004	1.518	125	1.166	4.387×10^{-4}	4.482×10^{-3}
PC パーマロイ	1	無	1998	0.666	17	0.199	4.408×10^{-3}	5.502×10^{-3}
		有	2000	0.737	2	0.690	1.009×10^{-2}	1.388×10^{-1}
	2	無	2013	0.637	31	0.193	2.041×10^{-3}	2.943×10^{-3}
		有	2000	0.721	3	0.680	9.482×10^{-3}	1.257×10^{-1}



付図1.1 磁性材料のB-H曲線



付図1.2 磁性材料の透磁率曲線

参考文献

- 1) 加藤泰正, 新納敏文, 清川 博, 本間俊雄, 登坂宣好: 辺要素を用いた 3 次元非線形静磁界解析システムの開発 - 磁気シールド設計支援 -, シミュレーション, Vol.11, No.3, pp.228-234, 1992
- 2) 矢野博幸: EWS/PC による電磁場解析の手法と留意点, 精密工学会誌, Vol.62, No.10, pp.1402-1404, 1996
- 3) 加藤泰正, 本間俊雄, 新納敏文, 清川 博, 登坂宣好, 西村敏雄: 磁気シールドルーム設計に対する数値解析について その 2. Exotic 要素を用いた有限要素法による解の評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集(A), pp.1257-1258, 1989
- 4) O.C.Zienkiewicz, C.Emson, P.Bettess: A novel boundary infinite element, International journal for numerical methods in engineering, Vol.19, pp.393-404, 1983
- 5) 山淵龍夫, 加川幸雄: ハイブリッド型無限要素を用いたポアソン, ヘルムホルツ開領域問題の解析, 電子通信学会論文誌, Vol.J68-A, No.3, pp.239-246, 1985
- 6) 村山健一, 加川幸雄, 村井忠邦: ハイブリッド型無限要素を用いた磁束密度計算, 日本シミュレーション学会第 5 回計算電気・電子工学シンポジウム論文集, pp.33-38, 1985
- 7) T.Nakata, T.Takahashi, K.Fujiwara, M.Sakaguchi: 3-D open boundary magnetic field analysis using infinite element based on hybrid finite element method, IEEE transactions on magnetics, Vol.26, No.2, pp.368-370, 1990
- 8) 榎園正人: 電磁界解析の現状と問題点, 日本応用磁気学会第 104 回研究会資料, pp.1-4, 1998
- 9) 西口磯春: 磁性材料の電磁界解析の難しさと見通し, 日本応用磁気学会第 104 回研究会資料, pp.17-22, 1998
- 10) 坪井 始: 電磁界解析の実用化技術, 日本応用磁気学会第 104 回研究会資料, pp.23-28, 1998
- 11) 藤原耕二: 磁化特性の近似法に関する応用上の問題点, 日本応用磁気学会第 104 回研究会資料, pp.53-58, 1998
- 12) 繁田岳美, 大西和榮: 混合型有限要素法による静磁場逆問題の数値解法, 日本シミュレーション学会第 20 回計算電気・電子工学シンポジウム論文集, pp.113-118, 1999

- 13) 加川幸雄：電気・電子のための有限要素法の実例，オーム社，1982
- 14) 中田高義，高橋則雄：電気工学の有限要素法，森北出版，1982
- 15) 菊地文雄，岡部政之：有限要素システム入門，日科技連出版社，1986
- 16) 坪井 始，内藤 督：実践数値電磁界解析法，養賢堂，1995
- 17) 矢野博幸：ELF/MAGIC ユーザーズガイド，エルフ，1995
- 18) 新納敏文，加川幸雄，本間俊雄，加藤泰正，清川 博：磁気シールドルーム設計のための磁場解析手法の検討，日本応用磁気学会誌，Vol.18，No.5，pp.934-939，1994
- 19) Y.Kato, T.Shinno, H.Kiyokawa, T.Honma, N.Tosaka: A numerical simulation system for magnetic shielding, Applied Electromagnetic in Materials and Computational Technology, pp.157-162, 1992
- 20) T.Shinnoh, Y.Kagawa, T.Honma, Y.Katoh, H.Kiyokawa: A study of magnetic field analysis techniques for magnetically shielded room design, Proceedings of International Conference Modeling, Simulation & Identification, pp.187-190, 1994
- 21) 新納敏文，平澤光春，清川 博，本間俊雄，加藤泰正，加川幸雄：数値モデルによる磁気シールドルーム設計の検討，フジタ技術研究所報，No.31，pp.61-66，1995
- 22) 新納敏文，清川 博：シミュレーションによる磁気シールドルーム設計方法の検討，日本建築学会大会学術講演梗概集(D)，pp.1695-1696，1992
- 23) 新納敏文，加川幸雄，本間俊雄，加藤泰正，清川 博：磁気シールドルーム設計のための磁場解析手法の検討，第17回日本応用磁気学会学術講演梗概集，pp.379，1993
- 24) 新納敏文，加川幸雄，本間俊雄，加藤泰正，清川 博：磁気シールドルーム設計のための磁場解析手法の検討，日本シミュレーション学会第13回シミュレーション・テクノロジー・コンファレンス発表論文集，pp.15-18，1994

第6章 事例1：MRI 磁気シールドルーム設計及び評価法の検討

6.1 まえがき

本章から，磁場による機器の障害，すなわち建築における EMI 問題に対して，計測と数値シミュレーションにより解決を図った事例の紹介を行う。

まず本章では，2.4.1項で示した病院における MRI 漏洩磁場の周辺機器への影響に対して，磁気シールドルームの設計支援として磁場数値解析を適用した事例と，シールド性能を評価するために磁場計測を行った事例について述べる。

MRI 磁気シールドルームの設計は，ユーザー（病院，MRI メーカー等）からの要求に対して必要な遮蔽性能を設定することから始まる。遮蔽性能とは，対象磁場をどの程度まで小さくするか，その範囲をどこまでにするかということである。これは，シールド部材及びルーム形状の設定により概ね決まる。シールド部材とは磁性材料の種類とシールド壁の厚さ，ルーム形状とはルームの大きさとシールド壁の構成方法を指す。次の段階は，遮蔽性能をできるだけ落とさないように細部を設計する作業である。この段階における重要な検討事項に，間隙や開口からの磁気漏洩を抑えること，及びシールド部材が磁気飽和を起こさないようにすることがある。これらの検討に関しては経験に頼るところが大きい。

今回のシールドルームは，MRI メーカーにより基本設計が行われ，シールド部材とルーム形状の概略が示されていた。本事例では，シールド効果の予測，及び磁気漏洩と磁気飽和を考慮した細部設計のために磁場数値解析を行う^{1), 2)}。解析手法は，前章において有効性が明らかになった改良積分方程式法である。シールド効果に及ぼす間隙と開口の影響を1/10 スケールモデルによる実験との比較を踏まえて考察する。また，磁気飽和の効果についても設計の見地から検討する。そして，MRI 実機に適用し，シールド効果の検証及び数値解析の有効性の検討を行う。

もう一つの事例では，シールドルーム内外において詳細な磁場計測を行い，MRI 漏洩磁場の分布を求めてシールド性能を評価する方法を検討する。

6.2 磁気シールドルーム設計法の検討

6.2.1 間隙及び開口の影響

磁気シールドルームのシールド壁は、製造、運搬、施工上の制約から、複数の板に分割されて製作される。板の接合部には必ず間隙が生じる。また壁面には、人間の出入口、外部からの監視窓、設備配管の貫通のために開口が設けられる。これらは磁気漏洩の原因となり、所要のシールド性能を得るための妨げとなる。本事例では、これらの間隙や開口がシールド効果に及ぼす影響を明らかにするために、1/10 スケールモデルによる実験と磁場数値解析を行った。

解析には、改良積分方程式法による磁場解析プログラム ELF/MAGIC を利用した³⁾。これは積分方程式法を改良したもので、電流と磁性体が存在する系については磁場の強さ H を重ね合わせの原理により求めるものである。空間の要素分割が不要で、無限領域を考慮できることに特長がある。

解析モデルは、前章の図 5.2.1 に示すものである。これは、MRI 磁気シールドルームを 1/10 スケールで模擬したもので、4 面のシールド壁と駆動コイルから構成されている。壁面には、縦横に壁を分断する間隙と 3 か所の開口がある。開口 1 は出入口、開口 2 は監視窓、開口 3 は設備開口を想定したものである。要素形状は 8 節点六面体要素で、要素数は 521、節点数は 1148 である。解析は線形で行い、透磁率を 9.425×10^{-4} (H/m) に設定した。非線形解析にしなかった理由は、解析の目的がパラメーター(間隙、開口)の差異によるシールド効果の比較に主眼を置いたもので、条件を一定にすれば敢えて非線形解析とする必要がないこと、及び今回のような比較的弱磁場の領域では適切な透磁率を設定すれば非線形解析の結果とほとんど差がないことが数値実験により判明したからである。

図 5.2.1 に示すモデル(標準モデルと呼ぶ)を、間隙のみ存在するモデル、開口のみ存在するモデル、いずれも存在しないモデル(連続モデルと呼ぶ)に分けて、実験及び解析を行った。図 6.2.1 は駆動コイル中心軸を含む水平面における磁束密度分布図である。これらの比較から、間隙の影響は大きい、開口の影響は局所的で全体に与える影響は小さいことがわかる。また、実測値と解析値は概ね良く一致していた。

次に、間隙及び開口の影響を定量的に求める目的で、図 6.2.2 に示すモデルについて解析を行った。A は垂直方向、B は水平方向の間隙を有するモデルで、モデルはそれぞれ

間隙の幅 a, b がパラメーターとして変えられるようにした。間隙の位置は、標準モデルの位置に合わせている。また、C は磁束の流れに対して平行、D は垂直な壁面に開口を有するモデルで、それぞれ開口のサイズ c, d がパラメーターとして変えられるようにしてある。開口の位置は、それぞれ駆動コイル中心を通る軸に合わせている。

解析結果は、磁束密度がある値を越える面積について比較した。すなわち、シールド壁外部の駆動コイル中心軸を含む水平面上で、磁束密度が 0.1mT 以上、0.3mT 以上、及び 0.5mT 以上となる領域の面積を求めた。なお、シールド壁近傍では正確な解が求められないため¹⁾、50mm 以上離れた領域を対象とした。

図 6.2.3 に間隙を変化させたときの結果を示す。水平間隙モデルでは、間隙の幅が 1mm から 10mm になったときの 0.1mT 以上となる面積の増大率は約 1.04 倍、0.3mT は約 1.37 倍であり、間隙の幅が大きくなっても磁気漏洩が少ないことがわかる。それに対して垂直間隙モデルでは、0.1mT は約 1.32 倍、0.3mT は約 2.14 倍で、全体的に大きな磁気漏洩となることがわかる。

次に、図 6.2.4 に開口に関する計算結果を示す。垂直開口モデルでは、開口のサイズが 100mm から 250mm になったときの 0.1mT 以上となる面積の増大率は約 1.04 倍、0.3mT は約 1.32 倍で、開口が大きくなっても磁気漏洩が少ないことがわかる。ただ、100mm 以上では 0.5mT 以上となる面積が急激に増加しており、局所的な影響が大きいことがわかる。それに対して平行開口モデルでは、0.1mT は約 1.24 倍、0.3mT 以上は約 2.03 倍、0.5mT 以上は約 11.55 倍で、全体的かつ局所的に大きな磁気漏洩となることがわかる。

以上、垂直方向の間隙、及び磁束の流れに対して平行な壁面の開口を小さくする必要のあることが判明した。MRI 実機の磁気シールドルーム設計では、垂直方向の間隙を 2mm 以下とすること、出入口及び監視窓は磁束の流れに対して垂直な壁面に設けることで対応した。設備開口は機能上、磁束の流れに対して平行な壁面に設けざるを得なかったが、できるだけ MRI から離れた位置に設け、かつサイズを小さくすることで対応した。なお、水平方向の間隙は 5mm でも問題ないと思われたが、不統一による施工上のミスを防ぐため 2mm 以下とした。

6.2.2 磁気飽和の効果

磁気シールド材料は非線形磁気特性を有し、磁場の強さがある値以上になると磁気飽和

が生じる。MRI 等の強磁場を対象としたシールドルームでは、磁気飽和が起こると大きな磁気漏洩が生ずるので、目的に見合ったシールド材の設定が必要となる。次に、磁気飽和について設計の見地から検討する目的で解析を行った。

考察したモデルを図 6. 2. 5 右側に示す。これはすべて連続モデルであるが、形状は同一で板厚が異なるものである。それぞれ、駆動電流を変えて解析を行った。なお、磁気飽和の効果を調べるためには非線形解析が必須であり、付図 1. 1 に示す SS400 の B-H 入力用データを用いた。駆動電流が変わると磁場の強さが変わるため、評価は遮蔽量で行った。すなわち、駆動コイル中心軸を含む水平面において、シールド壁外 50mm から 500mm までの範囲について次式から遮蔽量を求め、全周について平均値を求めた。

$$\text{遮蔽量 } S(\text{dB}) = -20 \log \frac{B_2}{B_1} \quad (6. 2. 1)$$

ここで、 B_1 は遮蔽前の磁束密度、 B_2 は遮蔽後の磁束密度を表す。

図 6. 2. 5 に駆動電流を 10A から 100A に変えたときの結果を示す。板厚 2mm のモデル E では 30A 過ぎから磁気飽和に達して平均遮蔽量が急激に低下するのに対して、板厚 6mm のモデル F では 70A 過ぎまで磁気飽和に達しないことがわかる。一方、シールド壁内部の磁束密度の大きさに応じて板厚を 2mm, 4mm, 6mm と変えたモデル G は、F と比べて平均遮蔽量が多少劣るものの磁気飽和の効果に関してはほとんど違いのないことがわかる。このような配置は、コストが問題となる場合効果的な方法であり、設計で考慮すべき点であると思われる。

MRI 実機の磁気シールドルーム設計では、シールド壁内部の磁束密度を考慮して、シールド壁の板厚を 26mm, 52mm, 78mm の 3 段階に分けて設定し、磁気飽和を考慮した上でコストの削減、及び施工性の向上を図った。

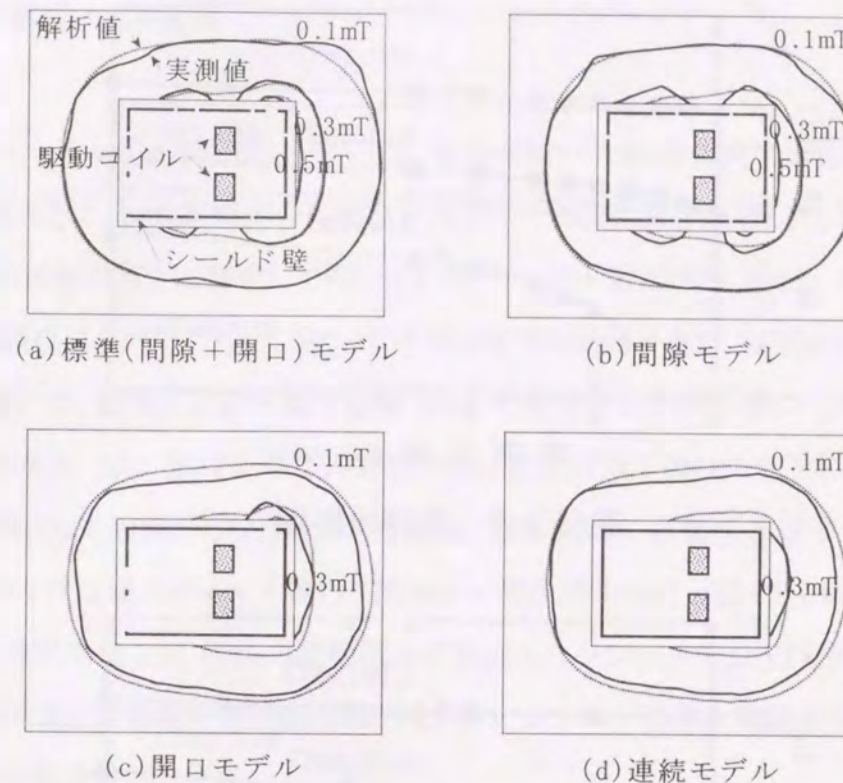


図6. 2. 1 各種モデルの磁束密度分布図

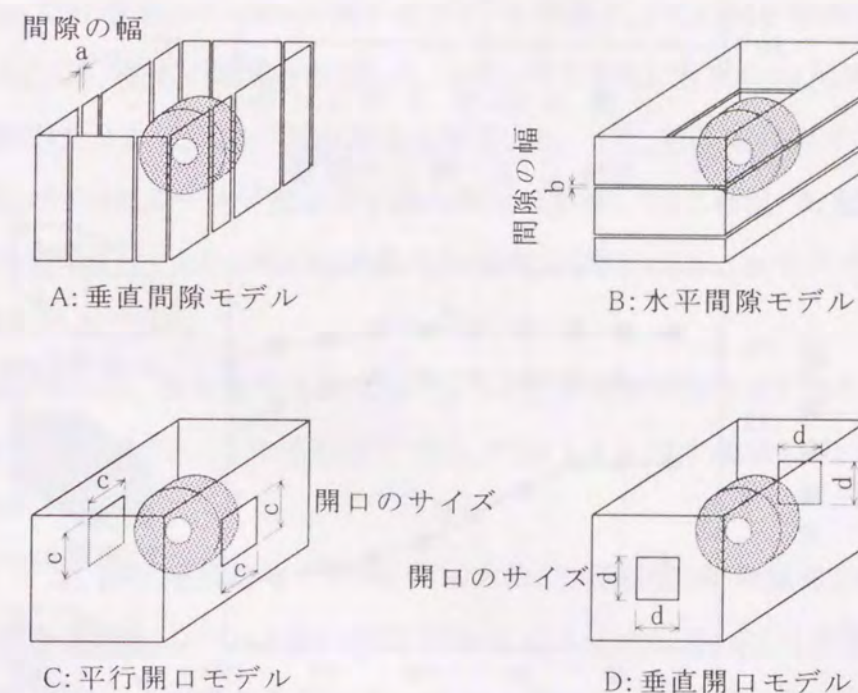


図6. 2. 2 間隙及び開口モデル

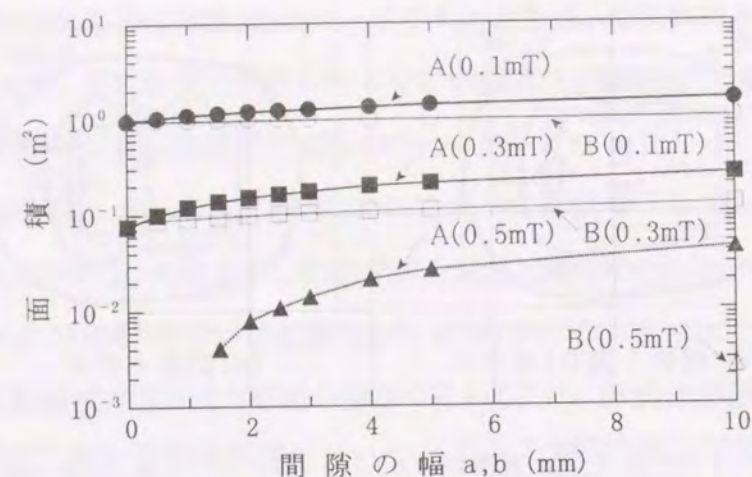


図6.2.3 間隙の影響

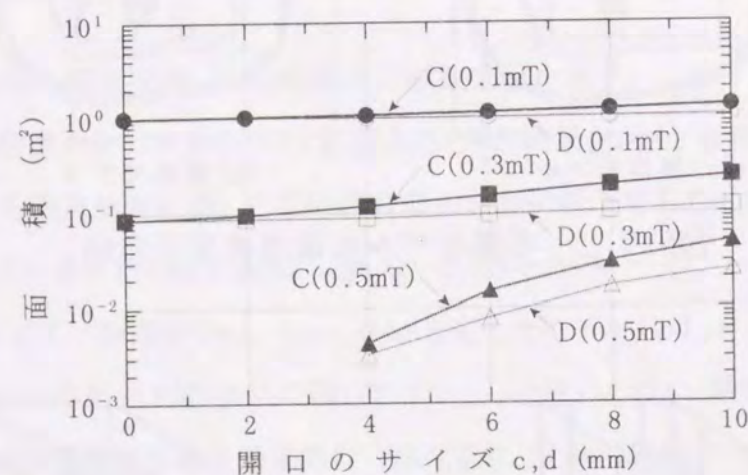


図6.2.4 開口の影響

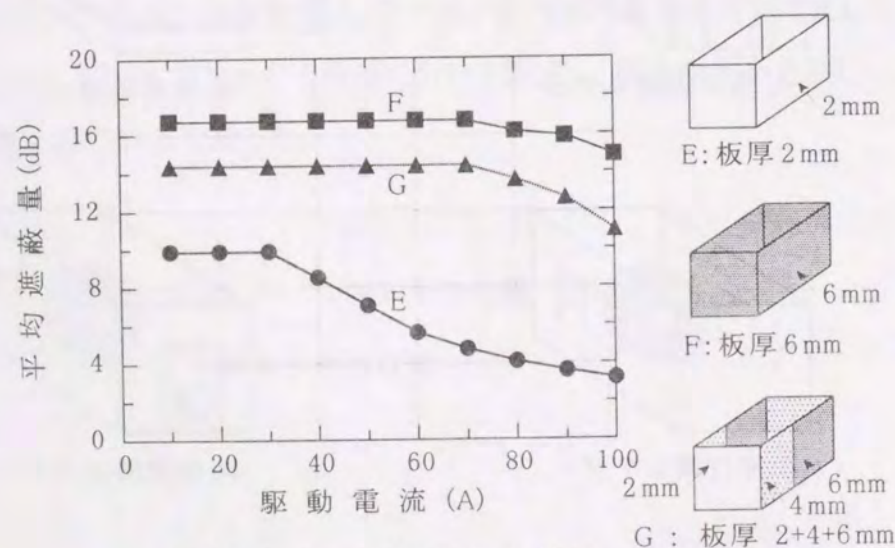


図6.2.5 磁気飽和の効果

6.3 MRI 実機への適用

MRI メーカーによる基本設計をベースに、前節で述べた磁場数値解析によるシミュレーション結果を踏まえて、MRI 実機用の磁気シールドルームの仕様を決定した。図6.3.1に平面図を示す。純鉄板の厚さは誇張して描いている。シールド壁は厚さ 26mm, 52mm, 78mm の3種類の純鉄板により構成されており、サイズは幅 5400mm×奥行 8150mm×高さ 5167mmである。壁面には、縦横に壁を分断する幅 2mm の間隙と3か所の開口(出入口、監視窓、設備開口)がある。MRI 室はシールド壁の内側に仕上げ層を設けて施工した。ここでは、電磁シールド層として銅箔からなる層がある他は、電磁的に影響を及ぼす材料は使っていない。室内サイズは幅 4960mm×奥行 7760mm×高さ 3700mm(一部 2950mm)である。また、MRI 装置は磁束密度 1.5T 仕様の超電導マグネット(ノン・シールド方式)を使用したものである。これらを対象に、磁場計測と数値解析を行い、シールド効果を確認するとともに数値解析の有効性の検討を行った。

磁場計測は、MRI 室内外を対象として行った。計測法としては計測システム I (3.5 節)を適用し、計測器は三軸型ガウスメーター(640:F.W.BELL)を用いた。MRI 室内部では、壁面から 150mm, MRI 装置から 150mm 離れたラインを端部とし、その間を 500mm 間隔を基準としてメッシュに切り、交点の磁場を計測した。なお、高さ方向にも 500mm 間隔を基準として計測面を6面設け、3次元空間の漏洩磁場を評価した。一方、MRI 室外部では、面としての計測が難しかったため、シールド壁近傍を線の次元で計測した。これは、計測を行った時期がMRI稼働後暫く経っており、周辺に機器や什器備品が搬入されていたためである。計測点数は、合計 394 点である。

一方、数値解析は、改良積分方程式法による3次元非線形解析を行った。解析モデルは図6.3.1に示すものである。非線形解析では、付図1.1に示す純鉄の B-H 入力用データを用いた。

図6.3.2は、MRI 室奥行方向(MRI の軸方向)で実測値と解析値を比較したものがある。MRI 中心の H-H' 軸、シールド壁の内側 290mm の I-I' 軸に沿っては非常に良く一致しているのに対して、シールド壁の外側 810mm の J-J' 軸に沿っては解析値が実測値より高めになっている。実機では、シールド壁外部にシールド壁を取り付けるための鉄骨等の強磁性体が存在するが、これらの存在を解析では考慮しなかったためと思われる。また、図6.3.3は、

MRI 室幅方向(MRI の軸直交方向)の比較である。MRI 中心の K-K' 軸, シールド壁の内側 300mm の L-L' 軸に沿っては非常に良く一致しているのに対して, シールド壁の外側 450mm の M-M' 軸に沿っては, 開口部周辺で良く一致しているがその他では解析値が実測値より低めになっている。奥行方向同様, 鉄骨等の強磁性体の影響が考えられる。

シールド効果については, 図 6.3.2, 図 6.3.3 からわかるように, MRI 室内部の強い漏洩磁場が MRI 室外部では小さく抑えられていた。なお, 外部では磁場の分布計測ができなかったため, 一軸ガウスメーターで簡易にポイント計測を行い, ユーザーからの要求を満足しているかどうかを確認した。結果として, 0.5mT ラインは MRI 室近傍のみに抑えられていた。また, 隣接する X 線検査室でも 0.1mT 以下となっており, シールド性能は初期の目標を満足するものであった。

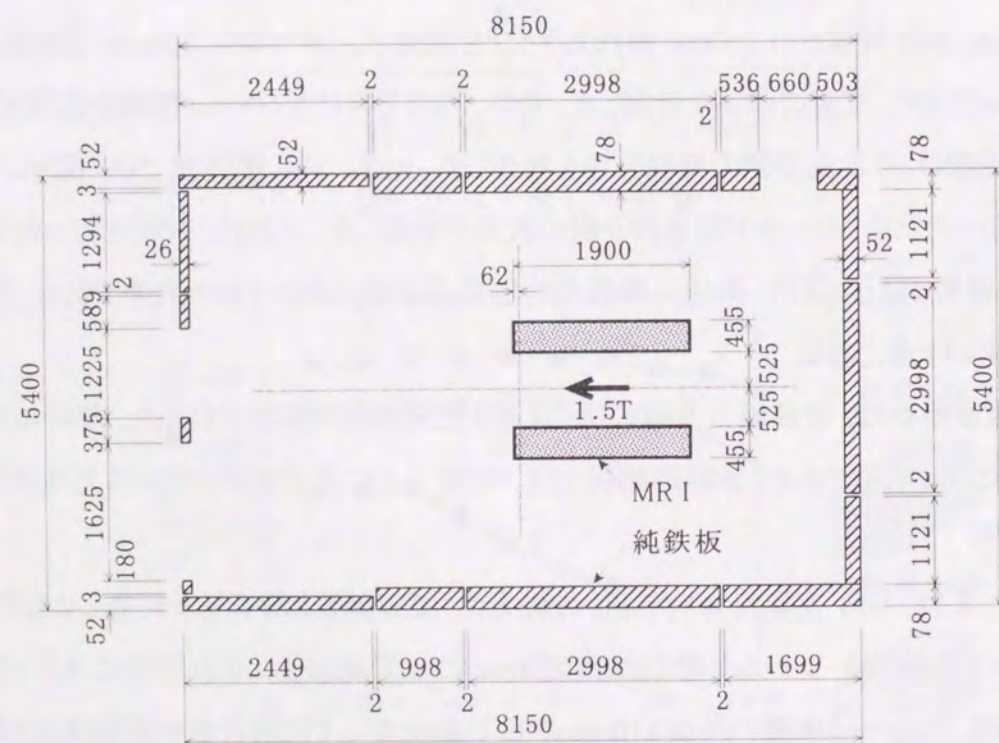


図6.3.1 解析モデルの平面図

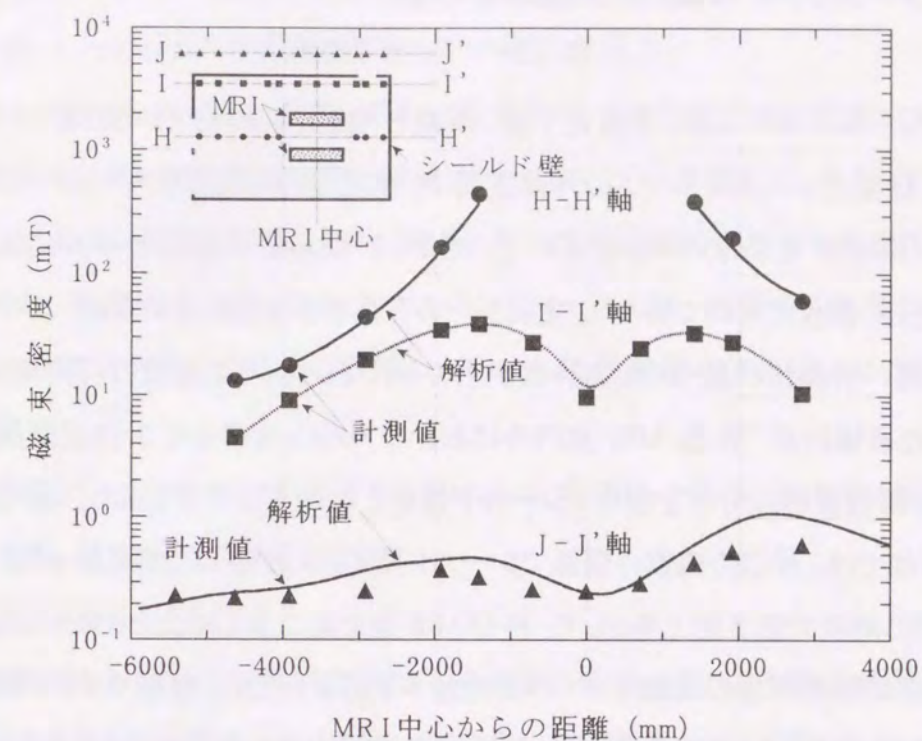


図6.3.2 実測値と解析値の比較: MRI 奥行方向

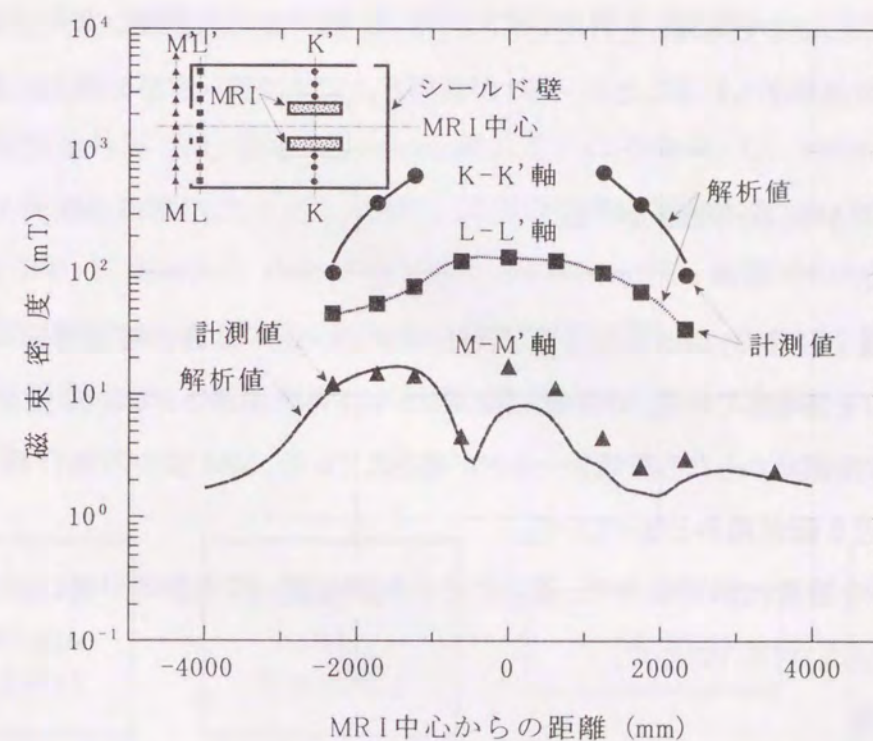


図6.3.3 実測値と解析値の比較: MRI 幅方向

6.4 磁気シールドルーム計測評価法の検討

MRI 磁気シールドルームは、工事完了後、所期の性能をクリアしているかどうか評価する必要がある。従来はシールドルームの外部空間で、携帯型の一軸ガウスメーターにより所定の磁場強度(例えば 0.5mT)ラインを求めていたが、計測精度が低く、シールド効果を簡易に確認するという程度のものであった。主にシールド業者が実施していたが、ユーザーからは信頼性の高い計測法に基づく性能評価が求められていた。これを受けて実施したのが、前節で述べた磁場計測である。MRI 室内外においてメッシュを切って 3 次元空間で磁場を計測し、MRI 漏洩磁場の分布を求めてシールド性能を評価する方法である。しかし、現実には MRI 室外部では、周辺の機器の関係でシールド壁近傍しか計測できなかった。

その後、同じ病院で第 2 期工事として、再び MRI 室を施工する機会を得た。ここでは役所への設置届けに漏洩磁場の正確なデータを添付する必要が生じ、建築サイドで磁場計測を行って性能を評価することが求められた。また、MRI 装置自体も新型のアクティブシールド方式であり、そのシールド効果を確認するための計測も求められた。筆者等は、磁気シールドルームの計測評価法について検討を重ね、精細な磁場分布計測に基づくシールド性能の評価法を提案した。ここで実施した計測をもとに、3.5 節で述べた計測システム I を構築した。なお、磁場数値解析も計画したが、MRI が新型ということでデータが公表されず、実施できなかった。

以下、実施した計測事例を紹介する。

(1) 周辺の状況

建物は鉄骨造 2 階建てで、MRI 室は 1 階にある。MRI は、1.5T 仕様の超電導磁石(アクティブシールド付き)を搭載している。MRI 室は磁気シールドルームとなっており、壁面 4 面、天井面、床面に珪素鋼板からなる磁気シールドが施されている。MRI 室の外側(1 階部分)は、2 面が屋内、残り 2 面が屋外となっている。

計測当日、MRI 装置は試運転中で、周辺にその制御装置、関連機器が置かれていたが、それ以外は何もない状態であった。

(2) 磁場計測器

MRI 装置から発生する磁場の強さを把握するだけであれば、一軸プローブを最大方向に合わせれば計測できるが、本計測では方向まで含めて評価する必要があったため、三軸計

測とした。また、MRI から発生する磁場は時間的変動のない直流磁場で同時計測の必要性はないため、1 つのプローブを移動させる非同時計測とした。

図 6.4.1 に計測システムを示す。プローブは、X・Y・Z 成分が同時に計測できる三軸型で、延長ケーブルを用いて計測器本体と接続した。プローブの固定には、ステンレス製スタンドを用いた。これは、磁場の影響を避けるため、すべて非磁性の材料から構成されているものである。また、計測器本体及びパーソナルコンピュータは、強磁場の影響を避けるため、できるだけ MRI から離れた場所に設置し、プローブと計測器本体の接続には延長ケーブルを用いた。

なお、計測データは、GP-IB を介してパソコンに転送し、ハードディスクに保存した。データは持ち帰り、後日データ処理を行った。

(3) 計測の実施

MRI 室内部の計測では MRI アクティブシールドの効果、MRI 室外部(1 階及び 2 階床面)の計測では磁気シールドルームのシールド効果の確認を目的として行った。

まず、MRI 室内部では、壁面から 150mm、MRI から 150mm 離れたラインを端部とし、その間を 400mm 間隔を基準としてメッシュに切り、交点の空間磁場を計測した。図 6.4.2(a) に計測領域を示す。計測高さは、MRI センターである 1 階床上 1070mm とした。計測点は 175 点である。

次に、MRI 室外部では、壁面から 150mm 離れたラインを端部とし、1500mm 離れたところまで 500mm 間隔を基準としてメッシュに切り、交点の空間磁場を計測した。図 6.4.2(b) に計測領域を示す。計測高さは、内部同様 1 階床上 1070mm とし、高低差のある屋外でもこの高さを守った。そのため、地面から 2500mm の高さとなる場所もあった。また、2 階でも同様の計測を行い、計測高さは 2 階床上 25mm とした。計測点は 571 点である。

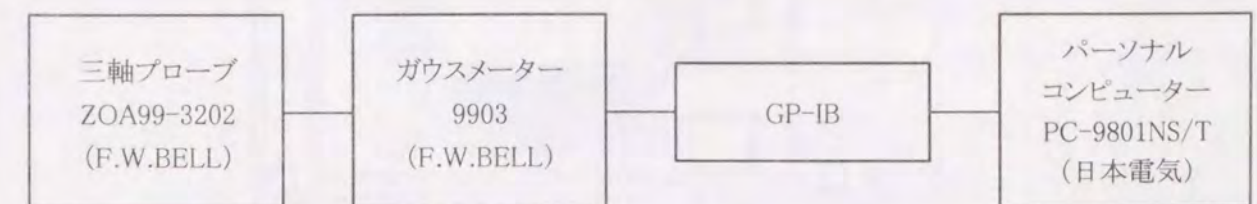


図 6.4.1 計測システム

計測に用いたガウスメーターのセンサーは、ホール素子方式である。これは、環境温度の変化に敏感で、今回のような外部空間の計測時には注意する必要がある。本来外部空間の磁場計測は、フラックスゲート方式等の環境温度の変化に影響を受けにくいガウスメーターを使うべきであるが、この方式では中・強磁場の計測ができないため、ホール素子方式のガウスメーターを用いて零点調整を適宜行うことで対処した。零点調整は、校正用の磁気シールドケースにプローブを挿入して行った。

(4) データ処理

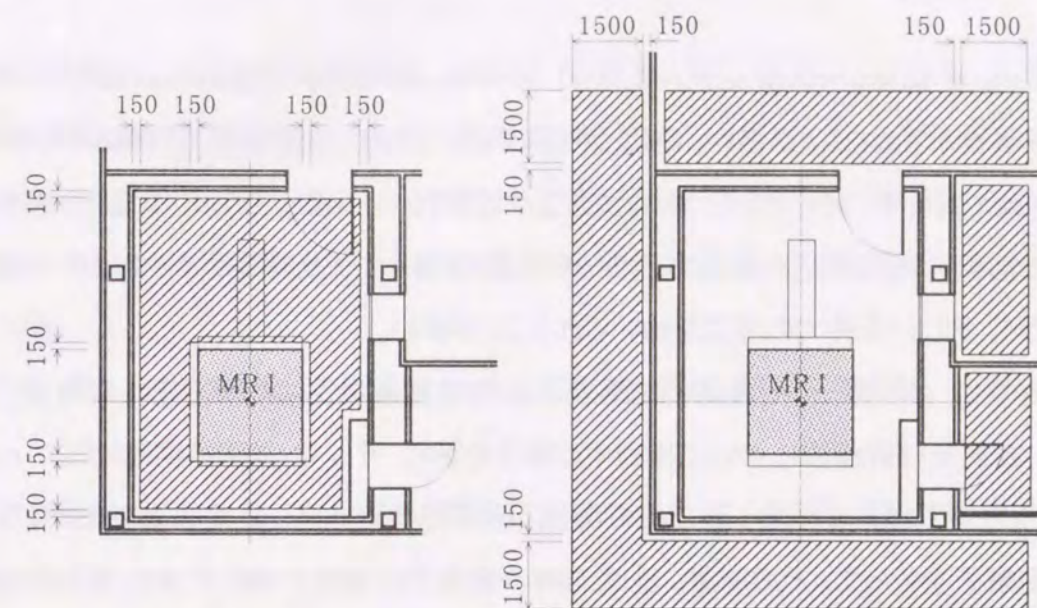
計測結果は、まずハードディスクに保存したデータを表計算ソフトウェアにより一覧表にまとめた。すなわち、計測点ごとに、計測番号、計測磁場のX成分・Y成分・Z成分・合成値(全磁力)、計測の日付、時刻を記述した。

次に、一覧表をもとに、MRI 室内部の磁束密度分布図とベクトル図を作製した。図 6. 4. 3 に MRI 室内部(1 階床上 1070mm)の磁束密度分布図を示す。

結果として、MRI 室内部では、アクティブシールドによる十分なシールド効果が確認された。一方、MRI 室外部では、磁場の強さが地磁気程度にまで落ちており、正確な磁束密度分布図を描くことはできなかった。これは、MRI 室から漏洩する磁場の強さがほとんど零であるということで、磁気シールドルームのシールド効果が確認された。

(5) 注意事項

MRI 磁場計測の注意事項として、MRI 室内部では、計測者は必ず身に付けた強磁性体を取り外して計測を行う必要がある。理由は 2 点あり、1 つは強磁性体により磁場が乱れること、もう 1 つは強磁性体が MRI に吸引されて危険であることである。例えば、1.5T の MRI では、1m 位まで近づくとポケットの中の強磁性体(例えば、鍵)は飛び出し、アナログ式の腕時計は止まってしまう。



(a) MRI 室内部

(b) MRI 室外部

図6.4.2 計測領域

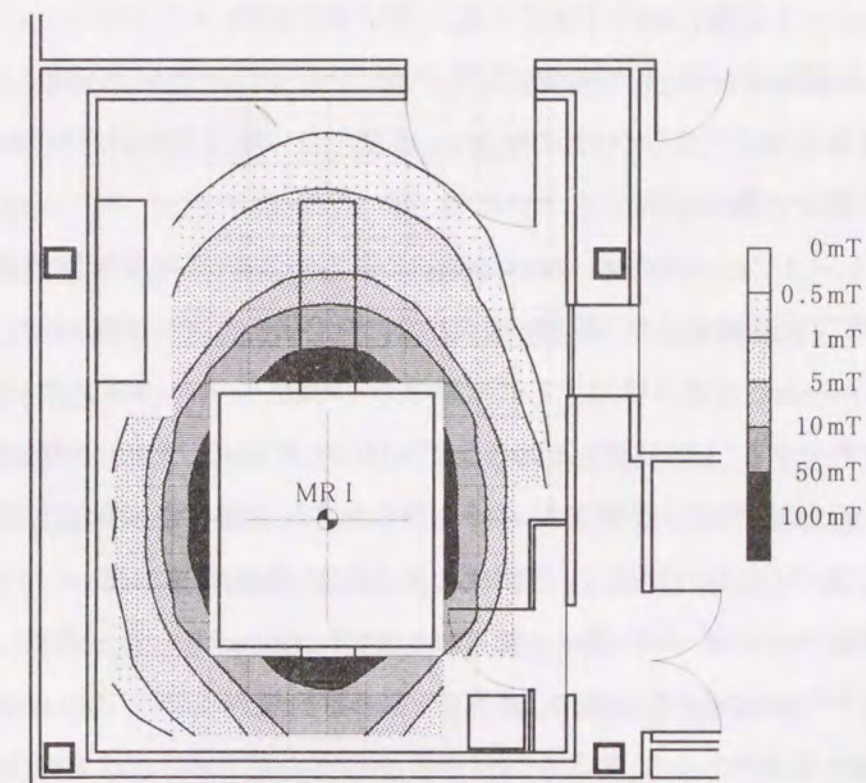


図6.4.3 MRI 室内部の磁束密度分布図

6.5 あとがき

一般に, MRI 磁気シールドルームは, MRI メーカーにより設計が行われ, 建築サイドには仕様のみが提示されることが多い。特に, 今回の MRI 装置は米国製で, 仕様決定の根拠は一切示されておらず, 何もわからないまま施工する状況であった。このような場合, 設計サイドでは安全率を大きく見込んだ過剰設計となることが多く, 一方建築サイドでは何の検討も行わず, 厳しい条件での施工を強いられることが多い。

本事例では, ユーザーから具体的な要求が示され, それを受けて筆者等は MRI シールドルームの設計及び評価法について検討する機会を得た。そして, 以下を実施した。

まず, シールド効果の予測, 及び磁気漏洩と磁気飽和を考慮した細部設計を行うために磁場数値解析を行った。その結果, 垂直方向の間隙及び磁束の流れに対して平行な壁面の開口を小さくする必要のあること, 磁束に応じて磁気飽和を起こさないような板厚の設定が可能であることが判明した。実際の設計では, 垂直方向の間隙を 2mm 以下とすること, 出入口及び監視窓は磁束の流れに対して垂直な壁面に設けること, シールド壁の板厚を 26mm, 52mm, 78mm の 3 段階に分けて設定すること等で対応した。

次に, MRI 実機を対象として実測値と解析値の比較を行った。その結果, シールドルーム内部では非常に良く一致していたのに対し, 外部では一致していないところがあった。入力条件等を見直す必要がある。

最後に, シールドルーム内外において詳細な磁場計測を行い, MRI 漏洩磁場の分布を求めてシールド性能を評価した。その結果, 要求に見合った性能が確認された。

シールドルームの性能を保証するのは建築サイドであり, シールド効果を予測し, 要求に見合った設計をすることは品質を高める上で大切なことである。また, 過剰設計を見直し, 施工に適した設計をすることは適正なコスト実現のために必要なことである。さらに, 正しい計測評価法に基づく性能の評価は, 信頼性の向上に繋がるものである。

MRI 磁気シールドルームに関する報告はあまり多くない。ユーザー(病院, MRI メーカー)からの報告^{4)~9)}が若干ある程度で, 建築サイドの事例報告はない。この点からも建築サイドの問題意識の低さがわかる。与えられた条件を忠実に施工するだけでなく, 他の分野にまで踏み込んだ検討が, 建築における EMC 確立のために必要となるものと思われる。

参考文献

- 1) 新納敏文, 加川幸雄, 本間俊雄, 加藤泰正, 清川 博: 磁気シールドルーム設計のための磁場解析手法の検討, 日本応用磁気学会誌, Vol.18, No.5, pp.934-939, 1994
- 2) 新納敏文, 加川幸雄: 改良積分方程式法による磁気シールドルーム設計方法の検討, 日本シミュレーション学会第 15 回計算電気・電子工学シンポジウム論文集, pp.59-62, 1995
- 3) 矢野博幸: EWS/PC による電磁場解析の手法と留意点, 精密工学会誌, Vol.62, No.10, pp.1402-1404, 1996
- 4) 稲葉政興, 杉山公夫, 高山成男, 守屋正寿: SignaTM(GE-MR) の設置環境について, 画像診断, Vol.5, No.11, pp.139-141, 1985
- 5) 杉本 博, 中嶋慶治, 古川 浩, 日野正章: MRI 導入に際しての建築・設備の問題点, 病院設備, Vol.28, No.4, pp.319-323, 1986
- 6) 中村 修, 秋山三郎, 佐野芳和, 新井誉夫: MRI 室の遮蔽, 日本放射線技術学会雑誌, Vol.42, No.7, pp.973-978, 1986
- 7) 中村 修, 秋山三郎, 佐野芳和, 新井誉夫, 内山 暁, 杉本 博: 磁場遮蔽に関する研究, 日本放射線技術学会雑誌, Vol.44, No.11, pp.1568-1574, 1988
- 8) 中村 修, 秋山三郎, 佐野芳和, 内山 暁, 杉本 博: 磁場遮蔽に関する研究(第2報), 日本放射線技術学会雑誌, Vol.46, No.4, pp.640-644, 1990
- 9) 櫻井芳美: 医療機器における磁気シールド技術と事例(新潟大学脳研究所における事例), EMC, No.109, pp.49-56, 1997
- 10) 矢野博幸: ELF/MAGIC ユーザーズガイド, エルフ, 1995
- 11) 日本建築学会磁場計測評価ワーキンググループ: 環境磁場の計測技術 ―現場における計測の事例―, 日本建築学会, 1998
- 12) T.Shinnoh, Y.Kagawa, T.Honma, Y.Katoh, H.Kiyokawa: A study of magnetic field analysis techniques for magnetically shielded room design, Proceedings of International Conference Modeling, Simulation & Identification, pp.187-190, 1994
- 13) 新納敏文, 平澤光春, 清川 博, 本間俊雄, 加藤泰正, 加川幸雄: 数値モデルによる磁気シールドルーム設計の検討, フジタ技術研究所報, No.31, pp.61-66, 1995

- 14) 新納敏文, 加川幸雄, 本間俊雄, 加藤泰正, 清川 博: 磁気シールドルーム設計のための磁場解析手法の検討, 第 17 回日本応用磁気学会学術講演梗概集, pp.379, 1993
- 15) 新納敏文, 加川幸雄, 本間俊雄, 加藤泰正, 清川 博: 磁気シールドルーム設計のための磁場解析手法の検討, 日本シミュレーション学会第 13 回シミュレーション・テクノロジー・コンファレンス発表論文集, pp.15-18, 1994

第 7 章 事例 2: 送電線近傍建物における磁場低減対策の検討

7.1 まえがき

本章では, 2.4.2 項で示した送電線近傍建物における CRT ディスプレイの画像障害に対して, 具体的な対策を抽出し, その効果を計測と数値シミュレーションにより検証した事例について述べる。

送電線の廻りには, 流れる電流に比例した大きさの磁場が発生しており, 送電線近傍の建物は常時かなりの大きさの磁場に曝されている^{1)~5)}。磁場の種類は, 商用周波数の交流磁場である。このような環境下では, 建物内部に設置された CRT ディスプレイ画面に変動を伴う揺れ現象が発生する。これを防ぐには, 建物内部の磁場を低減する必要がある。

送電線による磁場を小さくする方法として, 逆位相送電が有効であることが知られている⁶⁾。逆位相送電とは, 隣り合う 2 回線の送電線の位相差を逆相にすることで互いの磁場を打ち消し合うようにするもので, その有効性が報告されている^{7)~8)}。しかしながら, これらの報告では送電線を無限長直線あるいは単純な形状と仮定して磁場を評価しているのが実状である。また, 実測による逆位相送電の効果の検証についても, 屋外の限られた点での評価であり, 建物内部にまで及ぶものはない。なお, 既存の送電線を逆位相送電に変更するには, 電力会社による位相変換工事が必要である。

また, 最も単純な磁場低減の方法として, 距離減衰を利用することがある。建築計画の時点でこれを考慮すれば有効な磁場低減対策となり得る。すなわち, 磁場の大きさは発生源から離れるに従って減少するため, できるだけ送電線から離れた場所に建物を建てる, あるいは同じ建物内でも所要の部屋は送電線からできるだけ離れた位置に計画するというものである。しかし, この場合も実施に際しては効果を予測する必要がある, 磁場計測や数値解析による事前の調査検討が必要となる。

以上は, 送電線周辺全体を対象として磁場を低減する方法であるが, 建物内部で磁場を低減する方法として, 磁気シールドを利用することが考えられる。これについては実際に施された対策として, 電車沿線の住宅における磁気シールドボックスによる事例等が報告されている⁹⁾。この問題についても, 数値解析等による予測検証が期待される。

こうした背景の中, 筆者等は電力会社によって実施された逆位相送電のための位相変換

工事前後に、送電線近傍建物内外の同一地点で磁場の大きさを詳細に計測する機会を得た。これは、送電線近傍建物における EMI 調査の一環として行ったものである。計測結果をもとに、磁場低減対策に関する具体的検討を行った。また、計測と並行して磁場数値解析も行った。これは、計測結果を補って低減効果を検証すること、及び磁場低減対策の効果を予測検証するツールとして、その有効性を確認することを目的としたものである。

本章では、送電線近傍の建物を対象として、逆位相送電、距離減衰、磁気シールド、以上 3 つの磁場低減対策について、磁場計測と数値解析により低減効果を検証する。また、渦電流を考慮した磁場数値解析の有効性についても触れる。さらに、建物内での磁場低減法として、CRT ディスプレイ用には磁気シールドボックスを、他の用途のためにはサンドイッチ状磁気シールド板を取り上げ、モデル実験と磁場数値解析により、その磁場低減効果について検証する。

7.2 建物内外の磁場計測

図 7.2.1 は、建物と送電線の位置関係を示す配置図である。建物は軽量鉄骨造 2 階建の事務所で、その断面図を図 7.2.2 に示す。屋根面に鋼製ルーフデッキ(厚さ 0.6mm)、2 階床面に鋼製デッキプレート(厚さ 1.6mm)が敷きつめられている。これらは強磁性体であるが、導電性も有する。したがって、交流磁場に対して電磁気的效果を示す。外壁は珪酸カルシウム板からなり、また内装材も磁氣的・電氣的効果はない。一方、送電線は複導体 2 回線からなる 154kV 特別高圧架空送電線(三相交流 50Hz)である。電流は、平常時 1300~1800A_{ms} が流れている。送電線は鉄塔間でたるみがあり、建物はこの鉄塔間中央の最低点(高さ 22333mm)近くに位置している。ただし、この高さは送電線が外気温及び発生するジュール熱により伸縮するので変動する。上記の高さは計測時の平均的な高さで、トランシット測量により求めたものである。

磁場計測は建物の内外で行った。計測法としては計測システム V (3.5 節)を適用し、計測器は三軸型ガウスメーター(MAG-03MC: Bartington)、データ記録計はパーソナルコンピュータ(PC-9821NS/T: 日本電気)+波形処理ソフトウェア(WAVE MASTER II: カノーブス)を用いた。内部の計測部分は図 7.2.1 の A 室で、1 階、2 階とも 1500mm 間隔を基準にメッシュに切り、その交点の床上 1000mm で計測した。また、建物外周は、窓の中心部で計測した。一方、屋外は B-B', C-C'ライン上で、地面から 1000mm の高さで計測した。データは A/D 変換器を介してパーソナルコンピュータに取り込み、磁場の大きさ(波高値)は位相を考慮して 3 成分の合成値(真の全磁力)として評価した。

なお、送電線に流れる電流は需要により変動しており、磁場の大きさはそれに伴って変わる(付録 2. 参照)。そこで、図 7.2.1 の B 点を定点として常時計測し、他点での計測値はこれを基準に換算処理した。

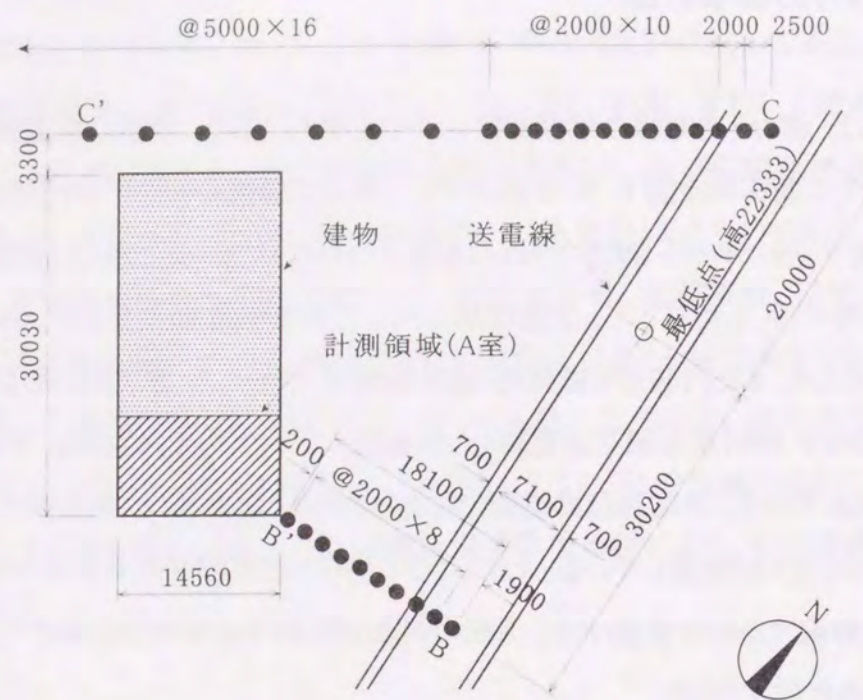


図7.2.1 配置図

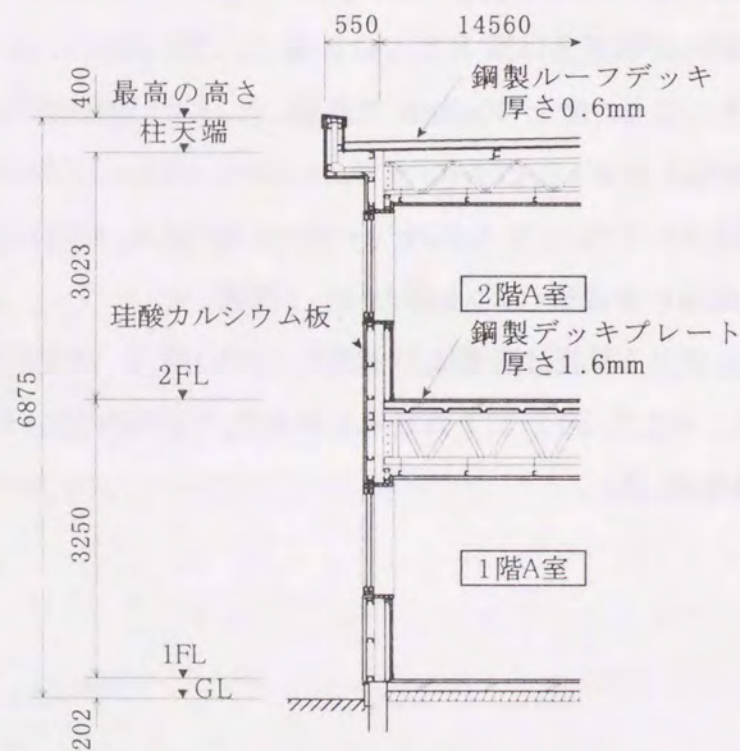


図7.2.2 建物断面図

7.3 磁場数値解析

7.3.1 解析手法

解析には、改良積分方程式法による磁場解析プログラム ELF/MAGIC を利用した。これは、重ね合わせの原理を利用して磁場の強さ H を次のように求めるものである¹⁰⁾。

$$H = H_0 + H_m + H_e \quad (7.3.1)$$

ここで、 H_0 は電流によって作られる磁場の強さ、 H_m は磁化された磁性体によって作られる磁場の強さ、 H_e は導体に流れる渦電流によって作られる磁場の強さを表す。

H_0 は Biot-Savart の法則から次のように求められる。

$$H_0 = \frac{1}{4\pi} \int_V \frac{J \times r}{r^3} dV \quad (7.2.2)$$

ここで、 J は電流密度、 r は電流の流れている点からの距離、 $r = |r|$ 、 V は要素が存在する領域を表す。

一方、磁場中に磁性体が存在すると、磁気モーメント M が発生する。 H_m は M を用いて次のように表される。

$$H_m = \frac{1}{4\pi} \int_V \frac{(-\text{div } M) \cdot r}{r^3} dV \quad (7.2.3)$$

また、 H_e は Biot-Savart の法則から次のように求められる。

$$H_e = \frac{1}{4\pi} \int_V \frac{J_e \times r}{r^3} dV \quad (7.2.4)$$

ここで、 J_e は導体に流れる渦電流密度を表す。これは、導体内部を通る磁束が変化する割合に比例するもので、差分近似により求める。

以上の式から、離散化した磁性体要素内の M 及び導体要素内の J_e が求められれば、任意の空間の H を計算することができる。非線形計算には、Newton-Raphson 法を採用している。

本手法は、有限要素法に比べて空間の要素分割が不要な分、全体の要素数が少なくなり、計算時間が短くなる特長がある。渦電流を考慮した 3 次元動磁場解析は大規模問題になり易く、有限要素法による解析は計算時間の点で難があると思われる。よって、ここでは計算時間を考慮した実用性の点から本手法を採用した。

7.3.2 解析モデル

図 7.3.1 に送電線の解析モデルを示す。これは、送電線のたるみを考慮して、折れ線ではあるが中央部で下がっているモデルである。図の上に送電線の断面詳細を示してある。電線は複導体で、三相交流 50Hz の電流が上線、中線、下線にそれぞれ $2\pi/3\text{rad}$ の位相差を持ち送電されている。図は鉄塔間 1 スパンのみ示しているが、実際には前後 1 スパンずつ加えた 3 スパンを対象とした。これ以上の領域を対象としても解析結果にはほとんど影響がないことを数値実験で確認している。解析では、各複導体に実際と同一の位相差及び電流値を与えた。すなわち、同相送電では左右 2 回線の位相差を同一に、逆位相送電では左右 2 回線の u 相と w 相の位相を逆にしたものである。また、図 7.3.2 に入力に用いた電流波形を示す。導体を流れる渦電流を組み入れるため、変動に対応する磁束を評価する必要があるが、定常状態になる 2 サイクルについて計算を行い、3 サイクル目の値を定常解として採用した。時間増分 Δt は計算時間を考慮して可変にしてある。なお、電磁誘導により架空地線及び鉄塔に流れる電流は考慮していない。

また、図 7.3.3 に建物の解析モデルを示す。これは、屋根面の鋼製ルーフデッキ(厚さ 0.6mm)と 2 階床面の鋼製デッキプレート(厚さ 1.6mm)をモデル化したものである。それぞれ、磁性体要素と導体要素を重ねて磁性と導電性の 2 つの特性を組み込んでいる。いずれも本来は折板状であるが、ここでは重量の等しい平板(屋根面厚さ 0.97mm, 2 階床面厚さ 2.25mm)に置き換えた。なお、建物構造体の軽量鉄骨材は解析では考慮していない。

表 7.3.1 に、モデルの電気・磁気特性と使用したコンピューターを示す。要素数と節点数は、二、三の数値実験を行った上で計算時間を考慮して選択した。屋根、床材の電気・磁気特性は、別途実験を行って求めたものである。また、磁性材の非線形性に関しては、同一モデルで比較を行った結果、非線形性を考慮しないでも適切な透磁率を設定すれば今回対象の磁場の大きさではほとんど差がないことが判明したため、計算時間を考慮して線形計算を採用した。

表 7.3.1 解析モデルと使用コンピューター

屋根、床材モデル	
要素数	電流要素：216, 磁性体要素：400, 導体要素：800
節点数	全体：1592
透磁率 μ	$1.46 \times 10^{-4} (\text{H/m})$
抵抗率 ρ	$1.50 \times 10^{-7} (\Omega \text{m})$
コンピューター	
型名	PC-9821Xa13(日本電気)
C P U	Pentium 133MHz

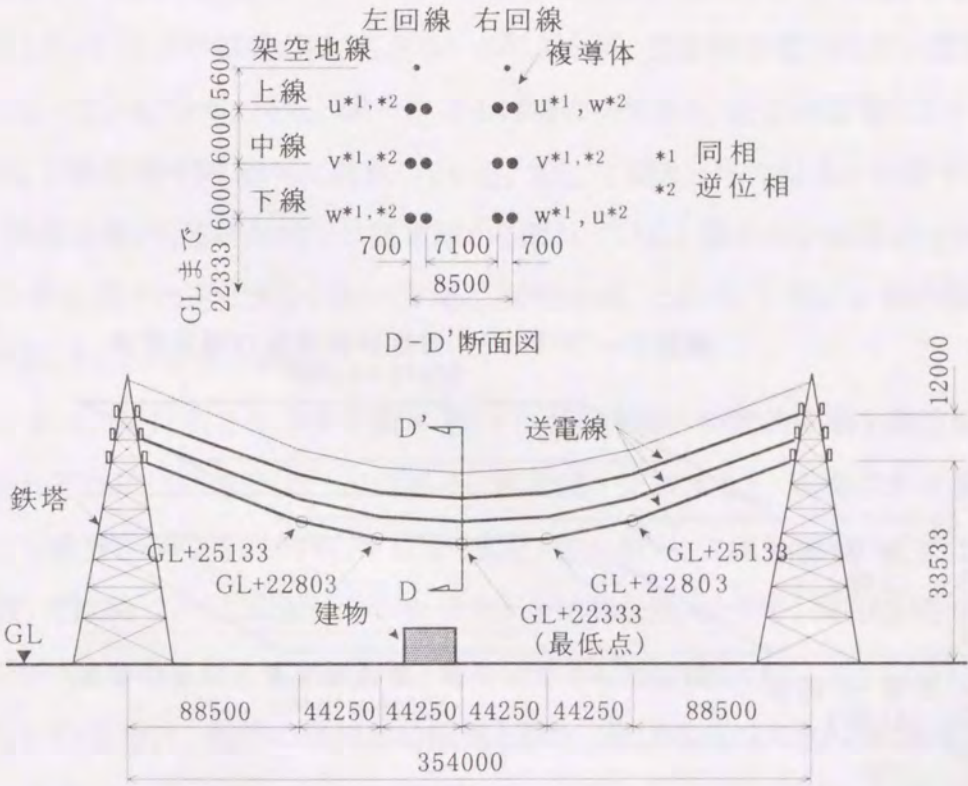


図 7.3.1 送電線の詳細

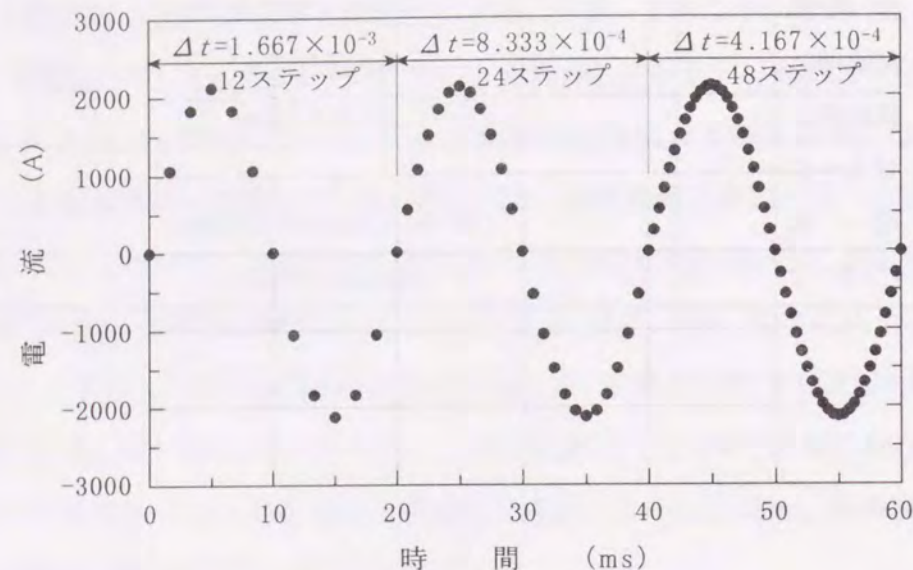


図7.3.2 電流波形

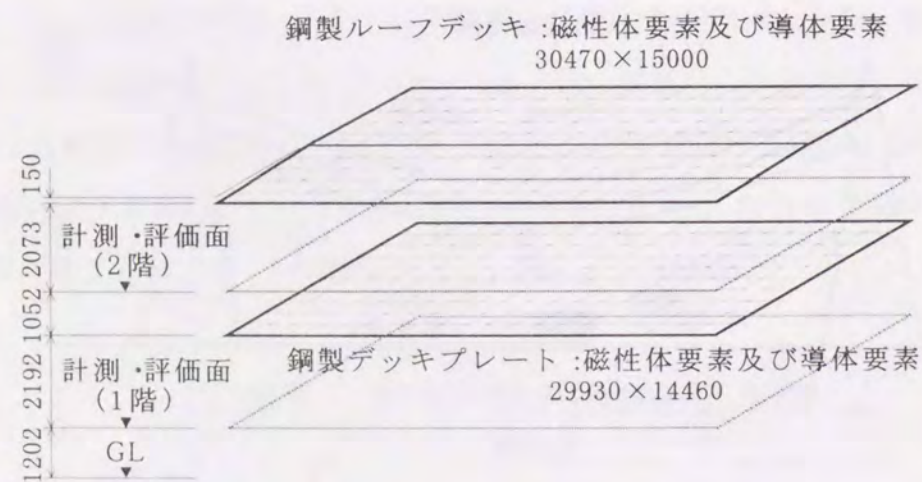


図7.3.3 建物構造の詳細

7.4 磁場低減効果の検証

第2章で述べたように、CRT ディスプレイ画面の変動を伴う揺れ現象がオペレーターに不快を与えない交流磁場の閾値を $1.0 \mu\text{T}$ (波高値) と設定した。磁場低減対策により、CRT ディスプレイが設置される場所で、磁場の大きさをそれ以下にする必要がある。

以上のことを前提に 3 つの磁場低減対策について、磁場計測及び数値解析を通して低減効果の検証を行った。

7.4.1 逆位相送電

図 7.4.1 に建物 1 階、図 7.4.2 に建物 2 階 A 室内の磁場計測結果を示す。これは、 $1500\text{A}_{\text{rms}}$ 送電時の床上 1000mm 面の磁束密度分布図である。建物外周数点での磁場の大きさも示している。いずれも、建物外周では送電線から遠い方が、また建物外周より室内中心部の方が磁場が小さくなっている。これは、後述する距離減衰効果と磁気シールド効果が重畳した結果と思われる。逆位相送電と同相送電の結果を比較すると、1 階、2 階とも同相送電では $1.0 \mu\text{T}$ 以下の領域がほとんどないのに対して、逆位相送電では広い領域で $1.0 \mu\text{T}$ 以下になっていることがわかる。同一地点の磁場の大きさは、逆位相送電により 1 階平均で約 36%、2 階平均で約 28% に低減している。また、1 階と 2 階の結果を比較すると、逆位相送電、同相送電とも建物外周では送電線から離れている 1 階の方が磁場が小さいのに対して、室内中心部では逆に大きくなっていることがわかる。これは、1 階と 2 階の磁気シールド効果の差によるものと思われる。

図 7.4.3 は、図 7.4.2 に示す 2 階 A 室内 E 点の磁場の時間的変動を逆位相送電と同相送電それぞれについて示したものである。実測値を比較すると、磁場の大きさは逆位相送電では X 成分 (水平) で約 71%、Y 成分 (水平) で約 67%、Z 成分 (垂直) で約 16%、大きさ (合成値) では約 21% に低減している。また、全体的な傾向として、同相送電では磁場は垂直成分が大きいのに対して、逆位相送電では水平成分が相対的に大きくなっている。各成分の大きさと位相は、電線の幾何学的配置と形状、及び電流の大きさと位相差により決まるもので、結果として各成分の大きさは場所によって異なり、位相にもずれが生じる。実測値と解析値を比較すると、解析値の方が全体的に大きめであるが位相のずれは良く一致しており、実測値と解析値は概ね一致していると言える。

図 7. 4. 4 は、屋外で逆位相送電と同相送電の比較を示したもので、1500A_{rms} 送電時の B-B'ラインについて評価したものである。逆位相送電では、左右の複導体が互いに磁場を打ち消し合い、磁場が約 20～28%に低減している。この傾向は、送電線から離れるに従って大きくなる。実測値と解析値は概ね一致しているが、建物の近くで実測値の方がやや大きくなっている。これは、解析では軽量鉄骨構造材の存在を考慮していないためと思われる。

7. 4. 2 距離減衰

図 7. 4. 5 は、1500A_{rms} 逆位相送電時に C-C'ラインについて実測値と解析値を比較をしたものである。送電線から離れるに従い、距離にほぼ反比例して磁場が小さくなっている。0～20m の間で実測値が若干ばらついてはいるが、これは計測時周辺地上に散在した鋼材(強磁性体)の影響と思われる。実測値と解析値は良く一致している。

また、前項で述べたように、建物外周では送電線から離れるに従って磁場が小さくなっている。さらに、内部でも外周に近い領域でその傾向が強く、距離減衰の効果が伺える。このことは、建築計画時に配置を考慮することが有効な磁場低減対策となり得ることを示すものである。

7. 4. 3 磁気シールド

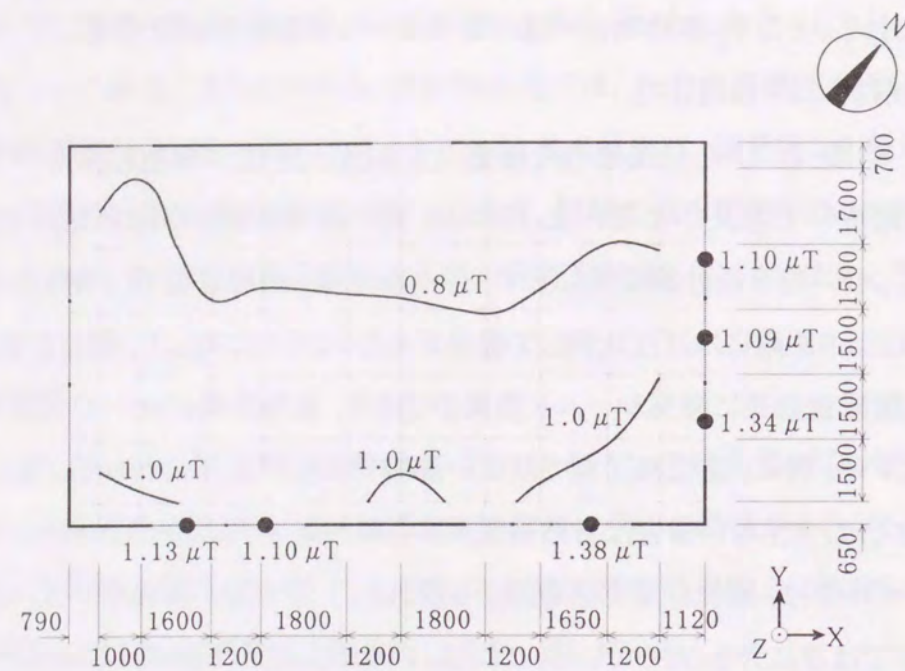
磁気シールドは、建物内の所要空間を磁気シールド材で覆い外部からの磁場の侵入を防ぐものである。交流磁場の場合、強磁性体による磁性体シールドのほかに、導電体による渦電流シールドが期待できる。磁気シールドは対象の大きさにより、磁気シールドボックス、磁気シールドルーム、磁気シールド建物に分類される。いずれの場合も、CRT ディスプレイが設置される場所でシールド後の磁場の大きさが 1.0 μT 以下でなければならない。

磁気シールドボックス及び磁気シールドルームに関しては市販の商品があり、その効果は技術的にもある程度確立しているものと思われる。そこで、本項では磁気シールド建物について検討する。磁気シールド建物は、建物全体を特殊な磁気シールド材で覆い、侵入磁場を小さくするものであるが、高性能なものは建設費が膨大になり、また開口部を持たない構成のものは現実的とは言えない。一方、今回の磁場計測結果(図 7. 4. 1, 図 7. 4. 2)によると、建物外周より室内中心部の方が磁場が小さくなっている。これは磁気シールドの効果であり、一般の鋼材である鋼製ルーフデッキと鋼製デッキプレートが磁気シールド材として機能して

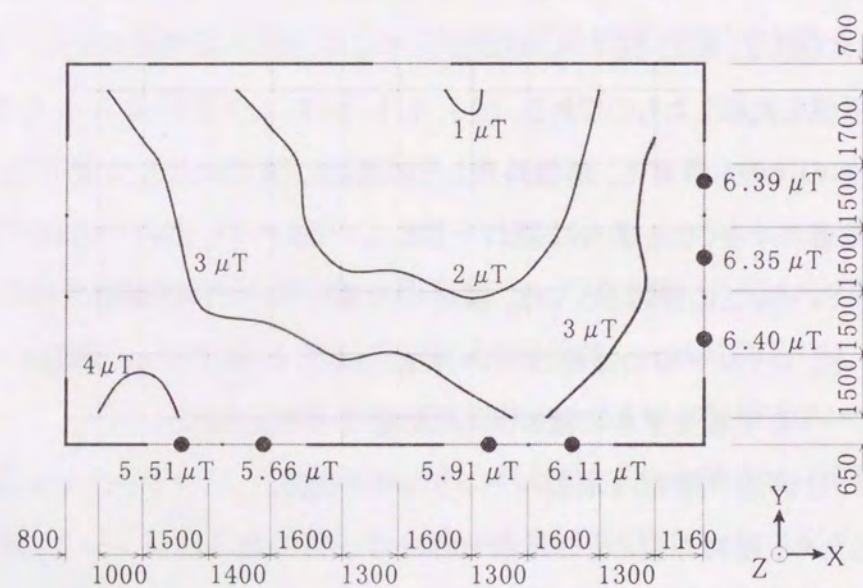
いると考えられる。そこで、本建物を一種の磁気シールド建物であると想定して、その効果について数値解析により検証した。

図 7. 4. 6, 図 7. 4. 7 に建物内の磁場の大きさについての解析結果を示す。これは、1500A_{rms} 送電時の 1 階及び 2 階床上 1000mm 面の磁束密度分布図である。比較のため、鋼材を設定しない場合の計算結果も示す。逆位相送電、同相送電とも、何も無い場合は距離減衰効果により距離にほぼ反比例して磁場が小さくなるのに対して、鋼材を設定したモデルでは、距離減衰効果に磁気シールド効果が加わり、建物外周に比べて内部では磁場が小さくなっている。特に、逆位相送電では広い領域で 1.0 μT 以下になっている。また、1 階、2 階の比較では、何も無い場合は当然送電線から離れた 1 階の方が小さい。一方、鋼材を設定したモデルでは、建物外周で送電線から離れた 1 階の方が磁場が小さいのに対して、室内中心部では逆に大きくなっている。これは、1 階では上面(2 階床面の鋼製デッキプレート)のみ磁気シールド層があるのに対して、2 階は上下面(2 階床面の鋼製デッキプレート及び屋根面の鋼製ルーフデッキ)の磁気シールド層に挟まれており、これがシールド効果に貢献していると考えられる。また、図 7. 4. 8 は図 7. 4. 2 に示す 2 階建物内 F-F'ラインについて実測値と解析値を比較したものである。図 7. 4. 1, 図 7. 4. 2 及び図 7. 4. 6, 図 7. 4. 7 による A 室内全体の比較も併せて、建物外周とその周辺の磁場の大きさ、及び室内中心部になるに従って磁場が小さくなる傾向は概ね一致しているものの、室内中心部では実測値の方が小さくなっている。この原因としては、解析で考慮していない軽量鉄骨構造材、建物内部の間仕切り、机、ロッカー等の強磁性体の存在、さらに本来折板状の鋼製ルーフデッキと鋼製デッキプレートを平板モデルに置き換えた影響等が考えられる。

以上、このような構造の建物は鋼製ルーフデッキと鋼製デッキプレートが磁気シールド材として機能するため、建物外壁とその近傍を除けば一種の簡易磁気シールド建物になっており、ある程度の磁場低減効果が期待できることが磁場計測及び数値解析により判明した。上下面に磁気シールド材を配した形になっている 2 階内部でその効果が特に大きい。なお、今回対象とした鋼材は、磁気シールド材としては性能が劣るものである。PC パーマロイ、アモルファス、珪素鋼板といった本来の磁気シールド材を使えば、更に大きな磁場低減効果が期待できるものと思われる。

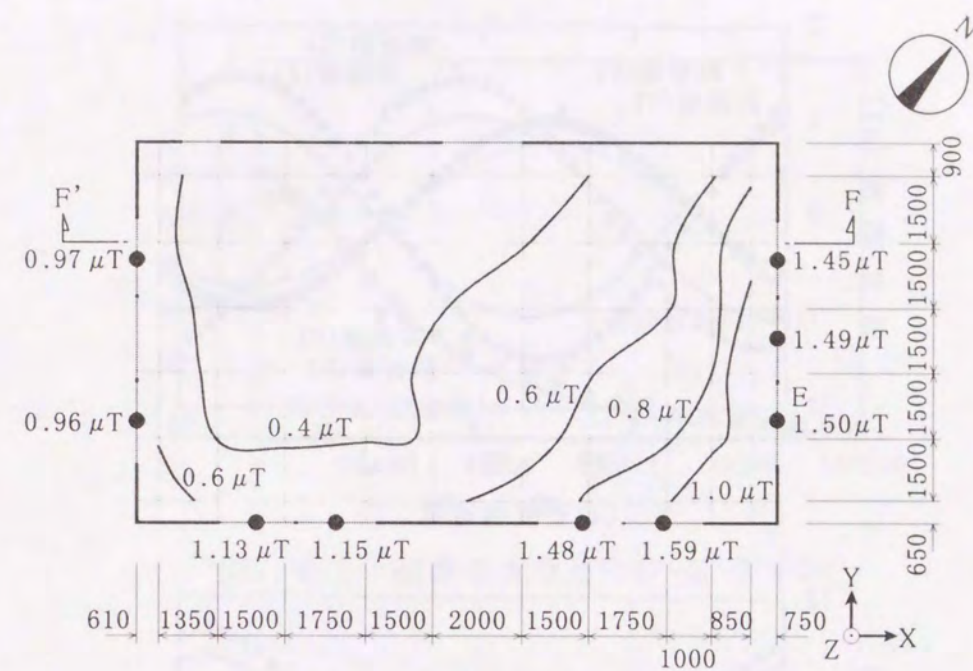


(a) 逆位相送電

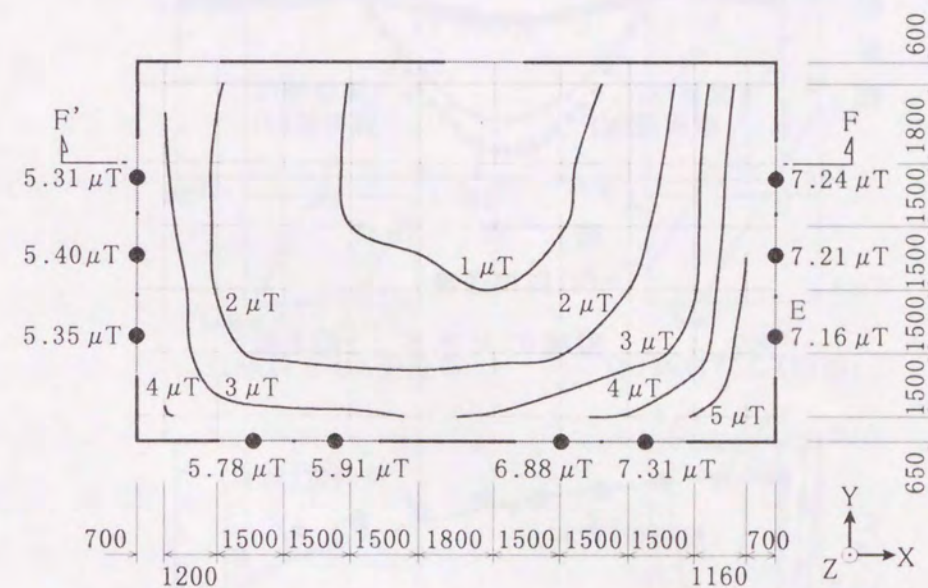


(b) 同相送電

図7.4.1 磁場の大きさ(計測値): 1階A室内

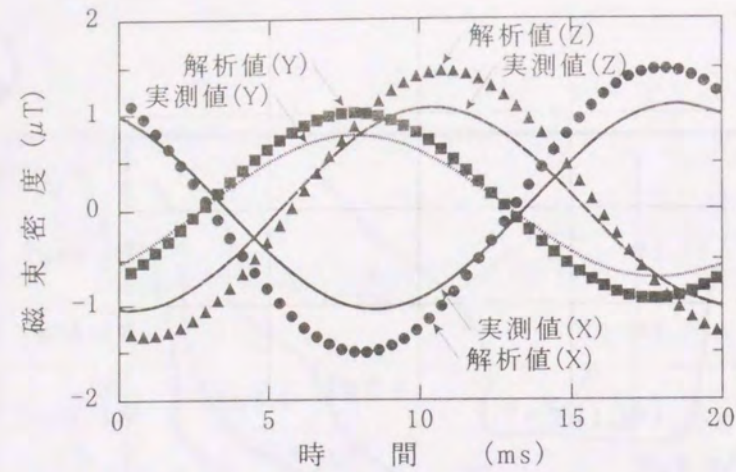


(a) 逆位相送電

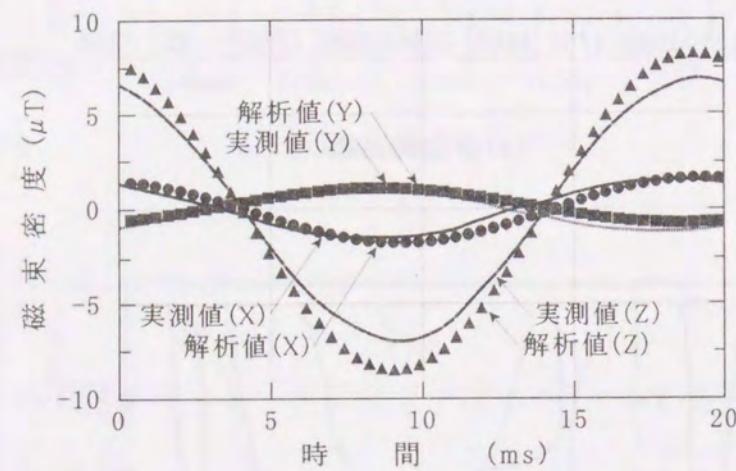


(b) 同相送電

図7.4.2 磁場の大きさ(計測値): 2階A室内



(a) 逆位相送電



(b) 同相送電

図7.4.3 磁場の大きさ：2階E点

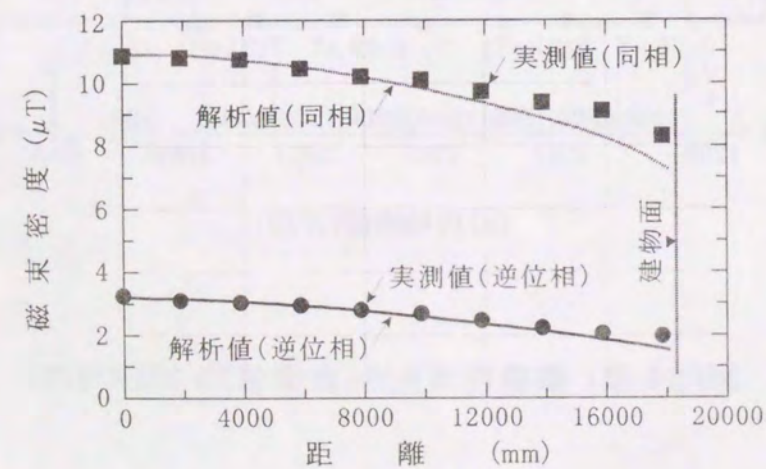


図7.4.4 磁場の大きさ：B~B'ライン

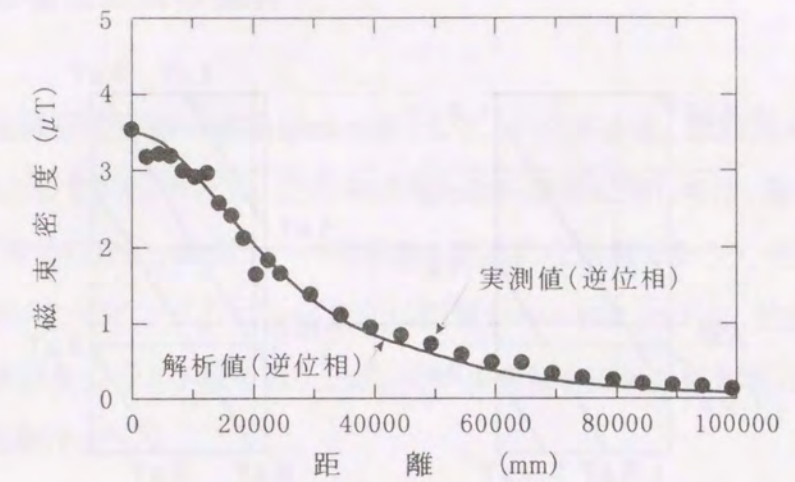
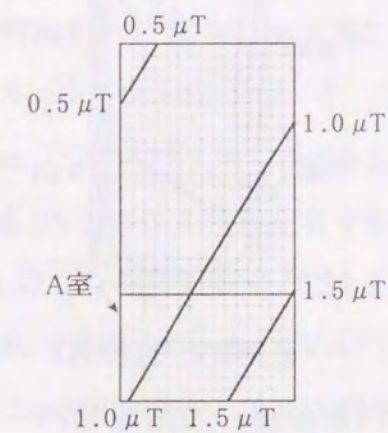
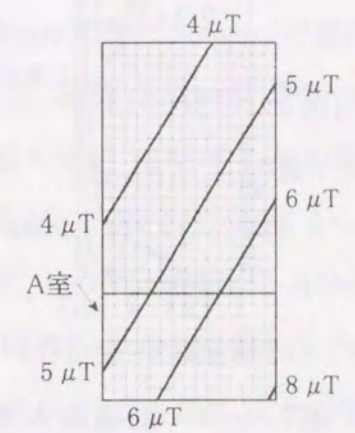


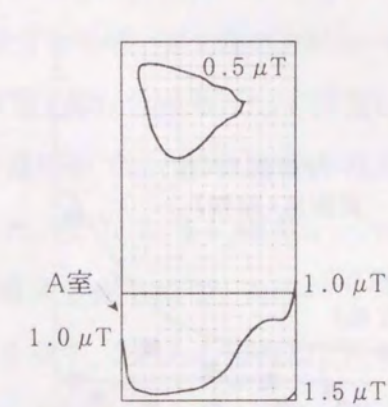
図7.4.5 磁場の大きさ：C~C'ライン



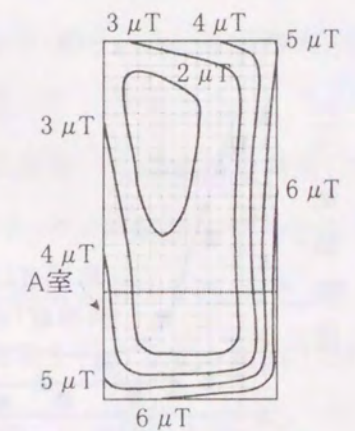
(a) 鋼材なし(逆位相)



(b) 鋼材なし(同相)



(c) 鋼材あり(逆位相)



(d) 鋼材あり(同相)

図7.4.6 磁場の大きさ(解析値)：1階建物内

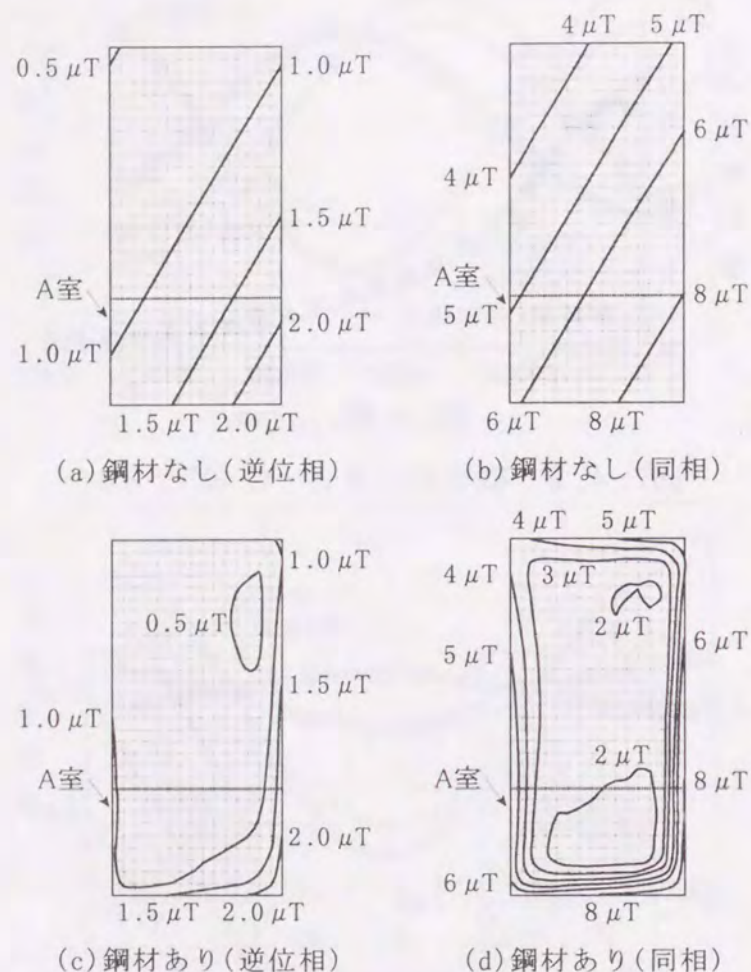


図7.4.7 磁場の大きさ(解析値): 2階建物内

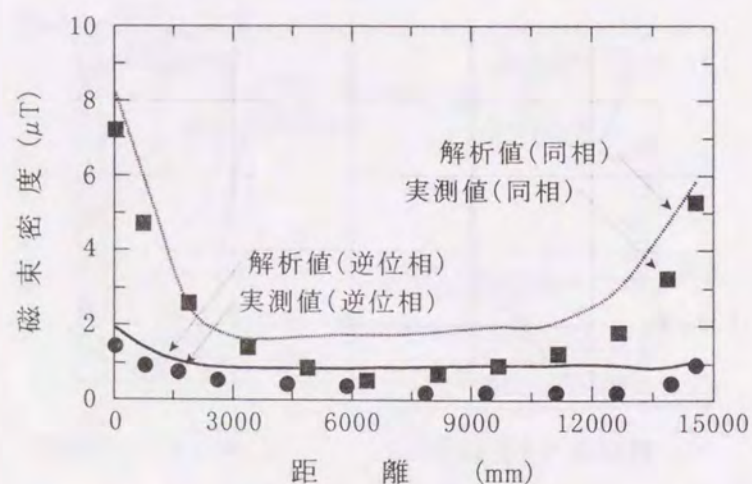


図7.4.8 磁場の大きさ: 2階F~F'ライン

7.5 建物内磁場低減法の検討

これまで、送電線近傍建物の磁場低減対策として、逆位相送電、距離減衰及び磁気シールドについて検討してきた。ただし、逆位相送電と距離減衰に関しては、建築サイドで自由に選択できる対策ではない。磁気シールドが最も現実的な対策であろう。そこで、建物内の磁場低減法として、CRT ディスプレイ用には磁気シールドボックスを、他の用途のためにはサンドイッチ状磁気シールド板を取り上げ、モデル実験と磁場数値解析により、その磁場低減効果の検証を行った。

7.5.1 磁気シールドボックス

磁気シールドボックスは、CRT 単体の前面を除く5面を覆うもので、厚さ1mmのパーマロイ板を用いて実物大サイズ(幅460mm×高さ450mm×奥行500mm)で製作した。

実験には、ヘルムホルツコイルを用いた。これは、直径1500mm、巻数33Tのコイルを2つ、間隔1500mmで平行に配したものである。最大電流13A、中心部の最大発生磁場260μT、周波数帯域0~200Hzの性能を有する。今回の実験では、電流0~1.56A、中心部の発生磁場0~31.17μT、周波数50Hzに設定した。この中に磁気シールドボックスを設置し、各種磁場を印加して実験を行った。コイル内の磁界は方向が固定されているため、印加磁場の方向を変えるときは試験体の設置方向を変化させた。計測法としては計測システムI(3.5節)を適用し、計測器は三軸型ガウスメーター(MAG-03MC:Bartington)を用いた。データはA/D変換器を介してパーソナルコンピュータに取り込み、磁場の大きさは位相を考慮して3成分の合成値(真の全磁力)として評価した。

一方、磁場数値解析では、改良積分方程式法を用いて渦電流を考慮した3次元非線形磁場解析を行った。図7.5.1に磁気シールドボックスの解析モデルを示す。要素数は、磁性体要素316、導体要素320で、矢印の方向に磁場を印加する。また、表7.5.1に材料の電気・磁気特性を示す。これらの特性は、別途実験を行って求めたものである。

以下、磁気シールドボックスの磁場低減効果について考察を述べる。

図7.5.2に磁気シールドボックスの中心点Gにおける磁気シールド効果(実測値)を示す。印加磁場を0~31.17μTの間で変えて、ボックス内の磁場の大きさを比較したものである。前後方向の磁界に対しては、前面にシールド板がないため、当然シールド効果が低い。

表 7. 5. 1 材料の電気・磁気特性

材 料	透磁率 μ (H/m)	抵抗率 ρ (Ω m)
SS400 鋼板	1.458×10^{-4}	1.50×10^{-7}
パーマロイ	1.762×10^{-2}	5.81×10^{-7}
アルミニウム	1.257×10^{-6}	6.35×10^{-8}

左右, 垂直方向はほぼ同等である。実際に CRT 単体をヘルムホルツコイル間に設置して, 画面の変動や揺れの閾値を求めた結果を表 7. 5. 2 に示す。いずれも, 中心点 G における印加磁場の大きさである。揺れ現象が起こりやすい方向は, 磁気シールドボックスがない場合は垂直方向, ボックスがある場合は前後方向であることがわかる。

表 7. 5. 2 CRT 画像揺れが生じる磁場閾値

方 向	シールドボックスなし	シールドボックスあり
前後(X 方向)	1.86μ T	3.69μ T
左右(Y 方向)	1.34μ T	11.08μ T
垂直(Z 方向)	1.08μ T	9.50μ T

次に, 図 7. 5. 3 に磁界が前後方向, 及び垂直方向に加えられているときのシールド効果を示す。印加磁場は 10μ T で, H-H'ラインについて比較したものである。前後方向では磁気シールドボックス内で場所による差が大きいことがわかる。それに対して, 垂直方向では全体的に小さく抑えられている。また, 同じ図に実測値(線で表示)と解析値(点で表示)が記入されているが, 両者は良く一致している。

以上, 磁気シールドボックスの磁場低減効果は印加磁場の方向により差が大きく, 利用に際してはこの点に注意する必要がある。

7. 5. 2 サンドイッチ状磁気シールド板

サンドイッチ状磁気シールド板は, 前節においてその効果が証明された方法で, 対象空間を 2 枚の磁気シールド板でサンドイッチ状に挟み込むものである。これは, 本来建物全体を対象にした磁気シールド法であるが, ここでは幅 900mm×奥行 600mm, 間隔 150mm の縮小モデルを製作した。使用した材料は, SS400 鋼板, パーマロイ板, アルミニウム板の 3 種で,

厚さはいずれも 1mm である。

実験は, 前項と同じ要領で行った。材料の固定には, 木製の枠を利用している。

磁場数値解析も, 前項と同様である。図 7. 5. 4 にサンドイッチ状磁気シールド板モデルを示す。要素数は, 磁性体要素, 導体要素ともに 432 である。材料の電気・磁気特性は, 表 7. 5. 1 の通りである。

以下, サンドイッチ状磁気シールド板の磁場低減効果について考察を述べる。

図 7. 5. 5 は磁気シールド板を磁界に対して平行方向, 図 7. 5. 6 は垂直方向に配したときのシールド効果を示したもので, 計測・評価面(図 7. 5. 4)における磁束密度分布図である。印加磁場の大きさは中心部で 10μ T である。上から, 何もない場合, SS400 鋼板, パーマロイ板, アルミニウム板の結果で, 左右で実測値と解析値を比較している。また, 同様に図 7. 5. 7(磁界と板は平行), 図 7. 5. 8(磁界と板は垂直)に I-I'ラインについてのシールド効果を示す。

これらによると, 印加磁場の方向によりシールド効果に大きな差があることがわかる。すなわち, 磁気シールド板を磁界に平行に配したときは, 強磁性によるシールド効果が大きい。特に, 比透磁率の大きいパーマロイのシールド効果が卓越している。それに対して, 垂直に配したときは, 強磁性はほとんど効かない。代わりに, 導体内渦電流によるシールド効果が認められる。すなわち, 抵抗率の小さいアルミニウムのシールド効果が一番大きい, ただ周波数 50Hz 程度ではその効果は小さい。実測値と解析値は, 平行磁界でのパーマロイのシールド効果の評価に若干の違いはあるが, 概ね良く一致している。

以上, サンドイッチ状磁気シールド板による磁場低減効果は, 印加磁場の方向により大きな差のあることが判明した。実際の建物では, 作用する外部磁場は方向が様々であることが想定されるため, 上の点を考慮した材料の選択, 形状の設定が必要となる。

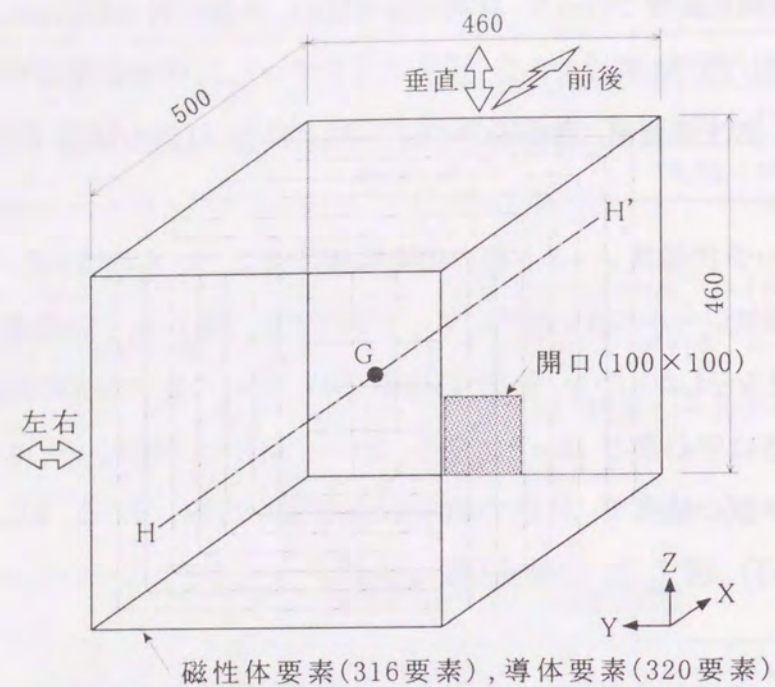


図7.5.1 磁気シールドボックスの解析モデル

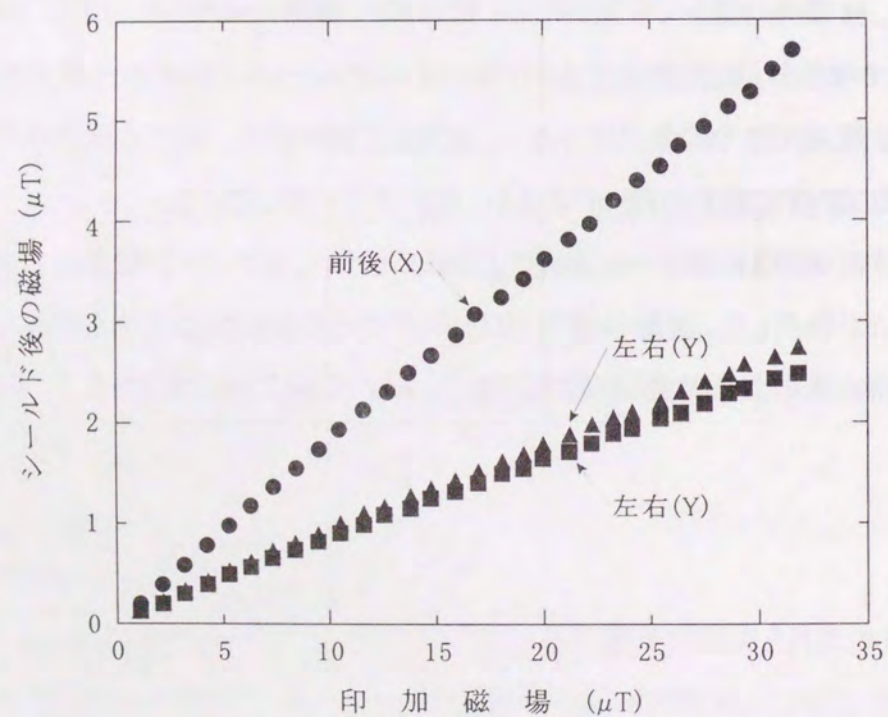


図7.5.2 磁気シールド効果：G点

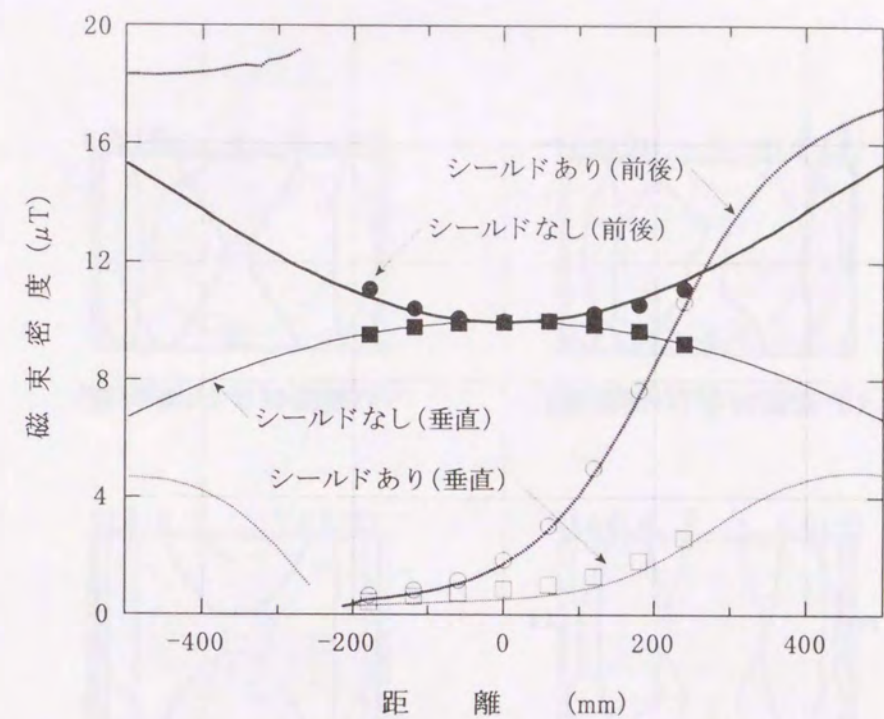


図7.5.3 磁場の大きさ：H～H'ライン

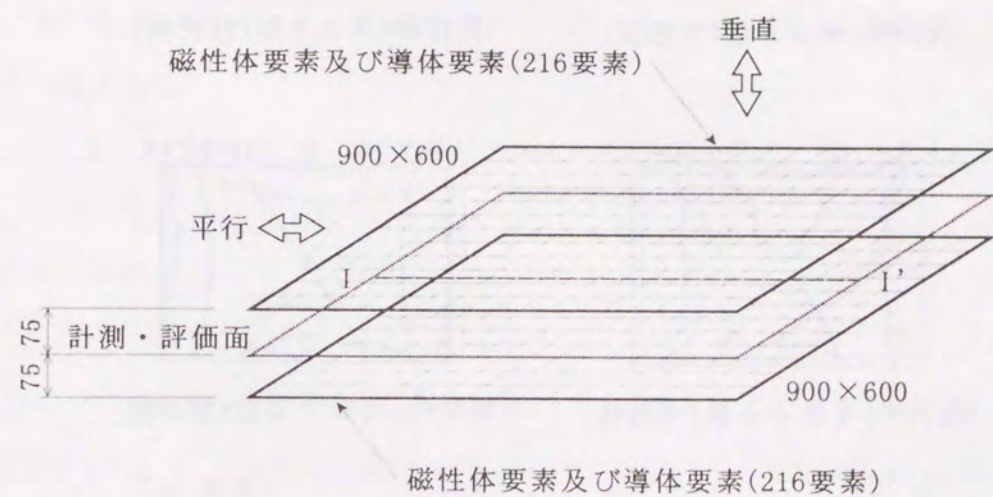
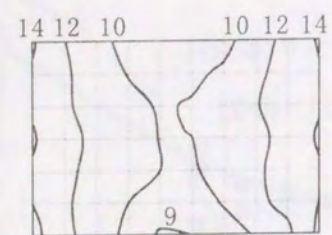
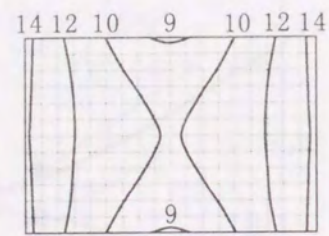


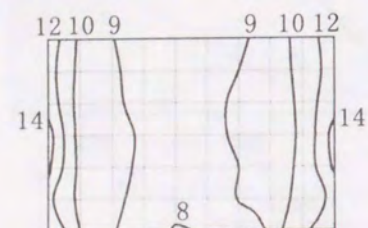
図7.5.4 サンドイッチ状磁気シールド板の解析モデル



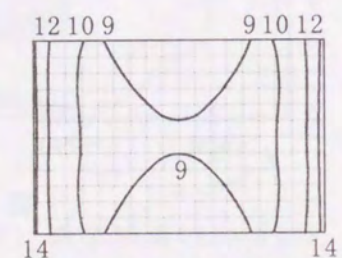
(a) 遮蔽材なし(実測値)



(b) 遮蔽材なし(解析値)



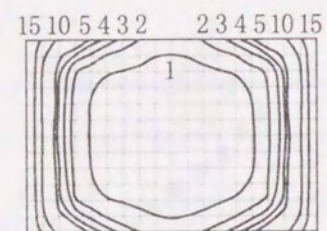
(c) SS400鋼板(実測値)



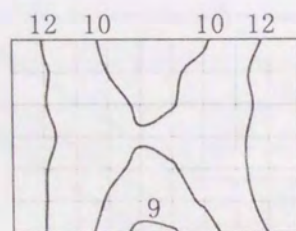
(d) SS400鋼板(解析値)



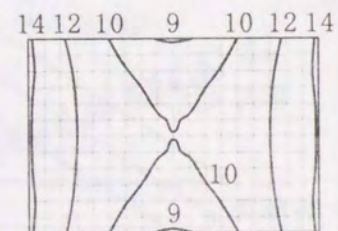
(e) パーマロイ板(実測値)



(f) パーマロイ板(解析値)



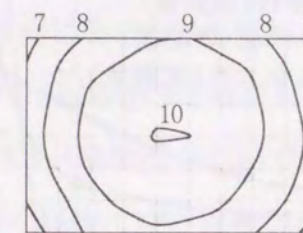
(g) アルミニウム板(実測値)



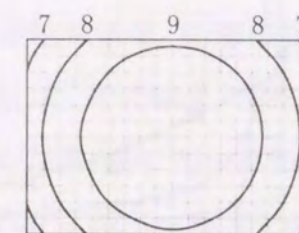
(h) アルミニウム板(解析値)

(単位 : μT)

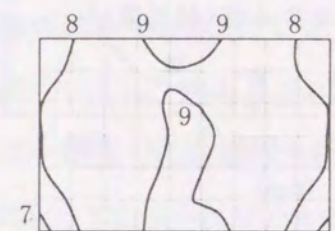
図7.5.5 磁気シールド効果(磁場 // 板)



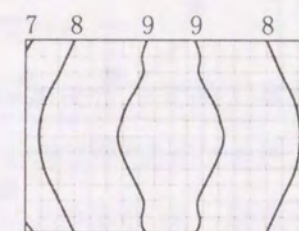
(a) 遮蔽材なし(実測値)



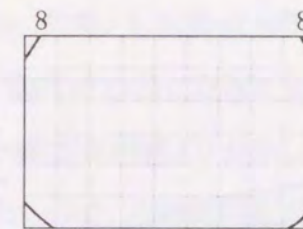
(b) 遮蔽材なし(解析値)



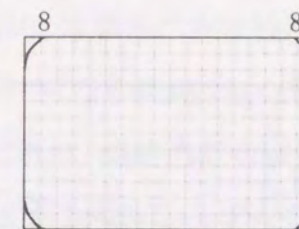
(c) SS400鋼板(実測値)



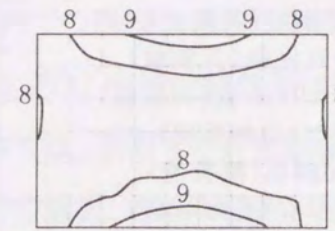
(d) SS400鋼板(解析値)



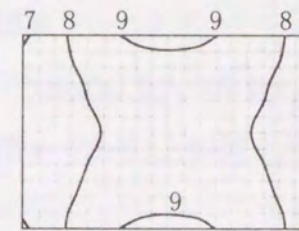
(e) パーマロイ板(実測値)



(f) パーマロイ板(解析値)



(g) アルミニウム板(実測値)



(h) アルミニウム板(解析値)

(単位 : μT)

図7.5.6 磁気シールド効果(磁場 $\perp$ 板)

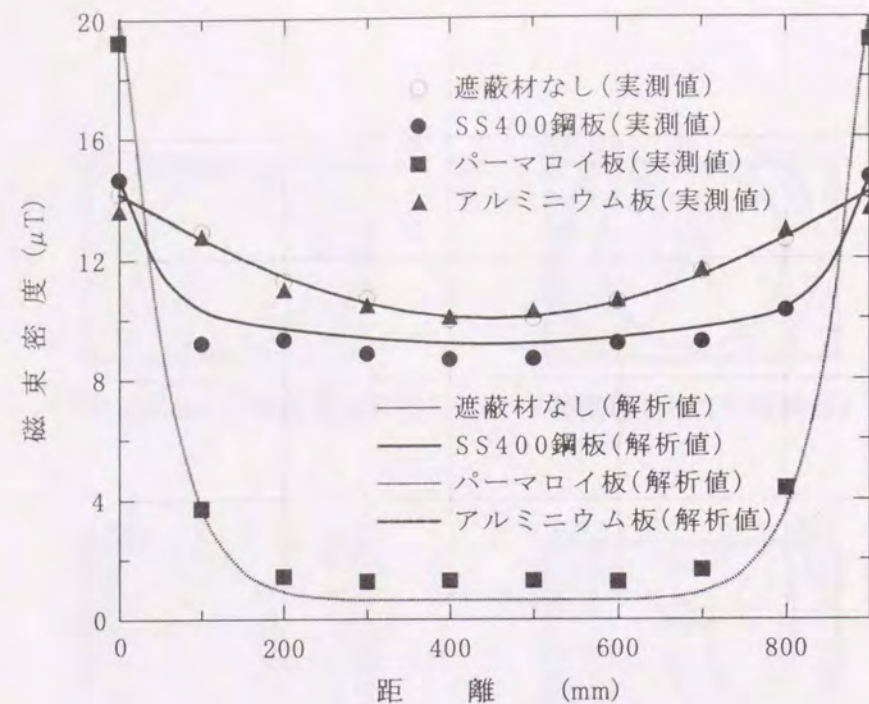


図7.5.7 磁気シールド効果：I～I'ライン(磁場//板)

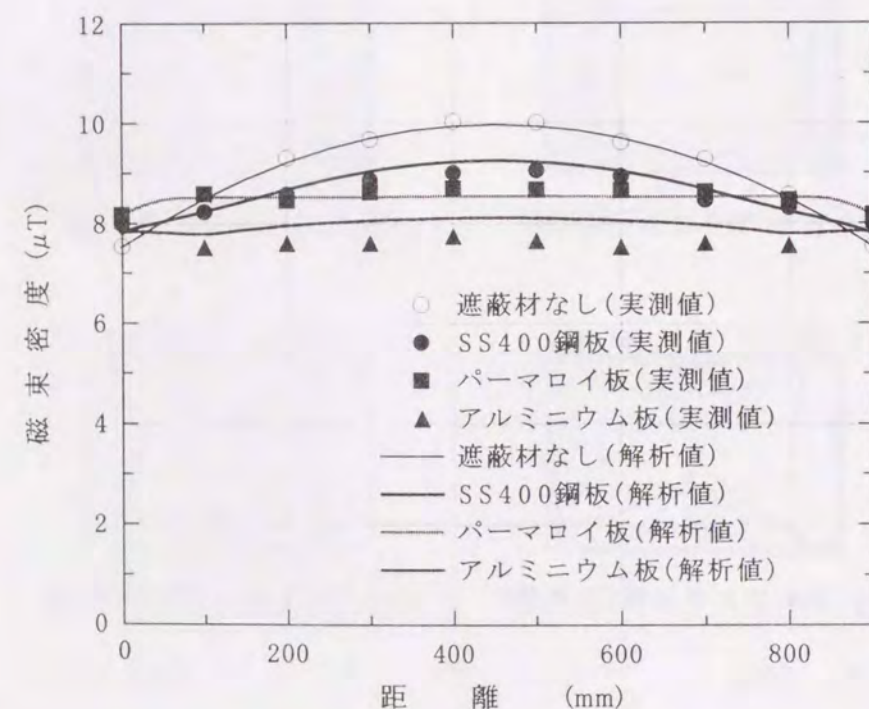


図7.5.8 磁気シールド効果：I～I'ライン(磁場⊥板)

7.6 あとがき

送電線近傍建物における磁場低減対策として、逆位相送電、距離減衰及び磁気シールドの効果について、磁場計測と数値解析により検証した。その結果、逆位相送電にすることにより磁場の大きさが建物内部平均で約 28～36%，屋外で約 20～28%に低減され、試験に供された構造の建物では内部の広い領域でCRTディスプレイ画面の揺れの閾値である $1.0 \mu\text{T}$ 以下になっていること、距離減衰により送電線からの距離にほぼ反比例して小さくなること、鋼製ルーフデッキと鋼製デッキプレートが図らずも磁気シールド材として機能して、建物内部の磁場低減効果を高めていることが明らかになった。

逆位相送電については、電力会社によって実施された位相変換工事前後で、送電線近傍建物内外の同一地点での磁場の大きさを詳細に計測することができた。位相変換工事は、通常電力会社によって公表されないまま実施されることが多く、同一地点で逆位相送電と同相送電の比較を行ったデータは貴重なものと考えられる。

また、改良積分方程式法を用いた数値解析の結果は、屋外及び建物外周とその周辺では、磁場の大きさ、位相とも実測値と概ね一致しており、本手法の有効性が示された。ただ、建物内部では、室内中心部になるに従って磁場が小さくなる傾向は良く捉えていたものの、室内中心部での値は実測値より大きくなっていた。これは、建物内部の磁気シールド効果が低く見積もられたもので、その原因を追究する必要がある。特に、モデルの最適化については、本来折板状の鋼製ルーフデッキと鋼製デッキプレートを平板モデルに置き換えた影響等を実験により確認する必要がある。

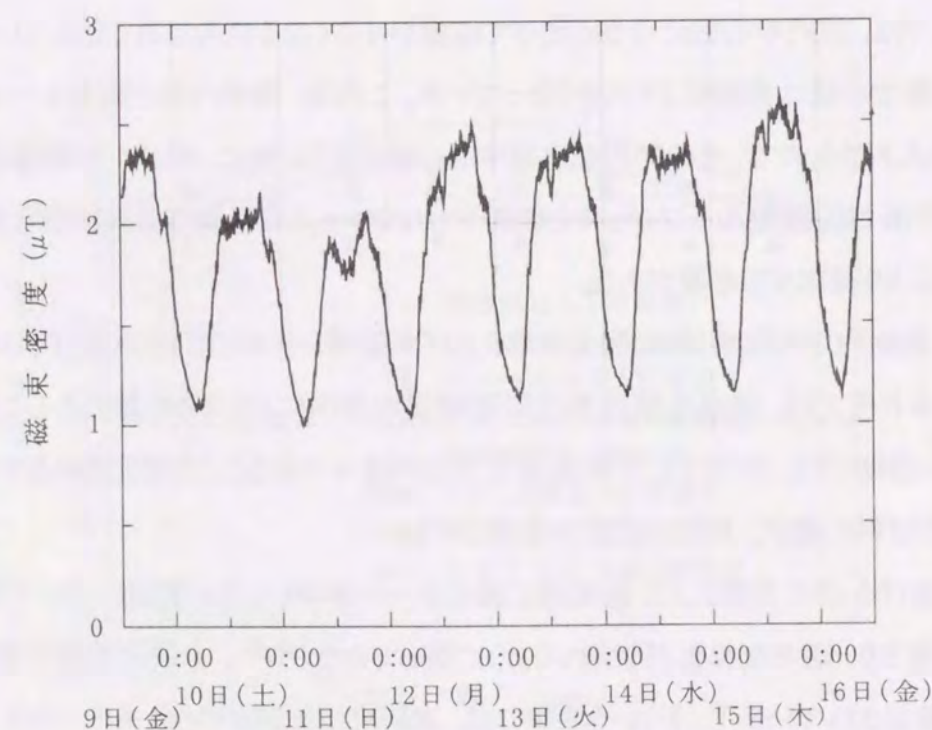
さらに、建物内での磁場低減法として取り上げた磁気シールドボックス及びサンドイッチ状磁気シールド板では、磁場低減効果は印加磁場の方向により大きな差のあることが判明した。実際の建物では、作用する外部磁場は方向が様々であることが想定されるため、この点を考慮した材料の選択、形状の設定が必要となる。

建築における EMI 問題には、送電線に絡むケースが多い。この問題については、最近特に関心が高まり、様々な報告がなされるようになってきた^{11)～13)}。本研究成果を検証するような論文も発表されている¹⁴⁾。そういう意味では、本研究は先鞭をつけたものであり、建築における EMC 確立のために多少なりとも貢献できたものと自負している。

付録 2. 磁場の一週間連続計測

送電線に流れる電流は需要により変動しており、それに伴って磁場の大きさが変わる。そこで、本文中図 7. 2. 1 の B 点の磁場の大きさを一週間連続計測し、変動の幅を確認した。計測法としては計測システム VI (3. 5 節) を適用し、計測器は三軸型ガウスメーター (MAG-03MC : Bartington) を用いた。デジタルレコーダー (DR-M2a : ティアック) と接続し、10 分間隔で自動的にデータを収集保存するようにした。

付図 2. 1 に計測結果を示す。一週間単位でみると土、日曜日、一日単位で見ると 23 時から翌 8 時の間の磁場が小さいことがわかる。また、一日の最大値と最小値の差は大きい日で約 $1.5 \mu\text{T}$ である。本事例の計測時間帯である 10 時から 16 時の間の変動幅は、5~10%程度と推定される。なお、これは計測日が 1995 年 6 月 9 日 (金) ~16 日 (金) で、本文の磁場計測実施日とは異なる。



付図 2. 1 連続磁場計測結果

参考文献

- 1) Gary B. Johnson : Measurements of magnetic field sources in schools, Proceedings of the American Power Conference, pp.276-281, 1992
- 2) J.E.Stangel, T.R.Johnson, M.S.Hart, M.T.Lewandowski : A cooperative analysis for siting a proposed urban 345kV transmission line, Proceedings of the American Power Conference, pp.292-298, 1992
- 3) F.P.Dawalibi : Computation of electromagnetic fields produced by electric power lines and residential electrical wiring, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.8, No.3, pp.1285-1294, 1993
- 4) A Report of the IEEE Magnetic Fields Task Force of the AC Fields Working Group of the Corona and Field Effects Subcommittee of the Transmission and Distribution Committee : A protocol for spot measurements of residential power frequency magnetic fields, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.8, No.3, pp.1386-1394, 1993
- 5) 日本建築学会磁場計測評価ワーキンググループ:環境磁場の計測技術ー現場における計測の事例ー, 日本建築学会, 1998
- 6) 赤尾保男:環境電磁工学の基礎, 電子情報通信学会, 1991
- 7) 高須和彦, 笹野隆生, 鈴木俊男:送電線周辺の磁束密度分布に関する研究, 放電研究, No.132, pp.18-21, 1991
- 8) 大桃重一郎, 前川 真:特別高圧架空送電線からの磁界の影響について, 日本建築学会電磁環境研究発表会, EME 91-009, 1992
- 9) 清水義則:外部磁界がテレビ受信機に与える影響と改善法, ARK Quarterly, Vol.2, No.1, pp.9-21, 1989
- 10) 矢野博幸:EWS/PCによる電磁場解析の手法と留意点, 精密工学会誌, Vol.62, No.10, pp.1402-1404, 1996
- 11) 石橋孝一, 黒崎幸夫, 岡崎靖男, 宇津木勇:送電線直下建物の磁気遮蔽に関する研究 (その 1) 電磁鋼板を天井面, 床面に敷設したときの磁気遮蔽効果, 日本建築学会大会学術講演梗概集(D), pp.1057-1058, 1995
- 12) 山崎健一, 岩本敏久, 河本 正, 藤波秀雄:各種電流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, 電学論 B, Vol.118, No.6, pp.635-641, 1998

- 13) 清水雅仁, 加藤克巳, 匹田政幸, 長江敏広, 早川直樹, 大久保仁: 送電線周辺磁界におよぼす電力線電流条件の影響, T.IEE Japan, Vol.118-B, No.4, pp.437-443, 1998
- 14) 梶原 暁: 送電線下の単板構造の磁気遮蔽の研究, 清水建設研究報告, No.69, pp.75-80, 1999
- 15) 矢野博幸: ELF/MAGIC ユーザーズガイド, エルフ, 1995
- 16) 新納敏文, 加川幸雄: 送電線近傍建物における磁場低減対策について - 計測と数値解析による低減効果の検証 -, 日本建築学会計画系論文集, No.494, pp.85-90, 1997
- 17) 新納敏文, 清川 博: 高圧送電線近傍の建物における磁場低減対策について, 日本建築学会大会学術講演梗概集(D), pp.1113-1114, 1993
- 18) 新納敏文, 清川 博: 高圧送電線近傍の建物における磁場低減対策について(その2), 日本建築学会大会学術講演梗概集(D), pp.1825-1826, 1994
- 19) 新納敏文, 加川幸雄: 高圧送電線近傍建物における磁場低減方法の検討, 日本シミュレーション学会第16回計算電気・電子工学シンポジウム論文集, pp.13-16, 1995
- 20) 新納敏文, 加川幸雄: 送電線近傍の建物内磁場低減法の検討, 日本シミュレーション学会第16回計算電気・電子工学シンポジウム論文集, pp.51-54, 1996

第8章 事例3: 建物内残留磁気の実態と低減対策の検討

8.1 まえがき

本章では, 2.4.3項, 2.4.4項, 2.4.5項で示した, 事務所におけるCRTディスプレイの画像障害, マンションにおけるテレビの画像障害, 工場における無人搬送車の走行障害に対して, それらの原因である残留磁気の実態調査, 発生メカニズムの解明, 具体的な低減対策の検討を行った事例について述べる。

近年のインテリジェントビルに代表される事務所ビル, 無人化を指向する先端工場, 最新医療機器が導入される病院等に設置される機器には, 磁気に対して敏感なものが多くなっている。このうち, 電子顕微鏡や EB 露光装置等のように微弱な変動磁場の存在下でも所要性能が発揮できなくなる機器に対しては, 磁気シールドルームが設置され高度な磁場制御空間が配慮されるが, 一般の機器に対しては強磁場発生源が近くにない限り何も考慮されていないのが現状である。

ただ, これらの機器の中にも, 地磁気程度の弱い磁場で悪影響が出るものがある。例えば, コンピューター用のCRTディスプレイ(本章では以下, CRTと称す)では, $80\mu\text{T}$ 程度の磁場で画面に色ずれ障害が生じる。また, 磁気情報により走行を制御される方式の無人搬送車では, $200\mu\text{T}$ 程度の磁場で走行障害が生じる。

一方, 建物内の磁場環境は, 従来強い磁場に対しては磁気シールド等の対策が講じられていたが, 弱い磁場はあまり問題視されていなかった。しかしながら, 建物全体を対象として磁場を $80\mu\text{T}$ 以下, すなわち地磁気程度まで低減する場合, 従来問題視されなかったものでも考慮すべきものがある。その一つに, 鉄骨構造物や鉄筋コンクリート構造物の残留磁気問題がある。

残留磁気とは, 強磁性体に磁場が印加された際, 磁場を取り除いた後に残る内部磁化のことである。切断や曲げ加工等により塑性変形が生じた際にも, 磁歪の逆効果に起因して発生する。強磁性体は残留磁気により磁化され, その結果周辺に磁場が形成される。従来, 金属部品等の製造過程においては, 加工効率や加工精度を妨げる要因として問題視され, 発生過程の研究や低減対策が検討されてきた^{1)~3)}。低減対策としては, 交流減衰電流を与えて内部の残留磁気を零にする, いわゆる消磁(脱磁ともいう)が一般的である。効果は対

象物の大きさや材料の種類によって異なるが、概ね周知の技術として確立されている⁴⁾。

然るに建物に対しては、残留磁気はこれまでほとんど認識されていなかった。筆者の知る限り、先の発表⁵⁾前に建物を対象として残留磁気問題を言及した例はない。鉄骨構造物や鉄筋コンクリート構造物に使われる鉄骨、鉄筋、デッキプレート等の鋼材は強磁性体であり、金属部品同様、製造や施工の過程で残留磁気を帯びる。しかしながら、建物は体が大きく、部材の取り外しもできないため、金属部品と同様の方法で残留磁気を取り除くことは困難である。また、残留磁気が発生する過程も複雑で、残留磁気を発生させない工法を見出すことも容易でない。残留磁気は目に見えないため、障害を引き起こすレベルでも見逃されて施工が進み、竣工後に初めてその存在が明らかになり、多大な対策費が必要となることも多々ある。その対策も対処療法的なものが多く、残留磁気の存在すらわからないまま障害を受ける機器側の対策のみ講じられたケースも過去にはあったようである。

本章では、2.4.3項、2.4.4項、2.4.5項で紹介した磁場による障害事例を対象として、その原因である残留磁気に焦点を当てる。まず、実態を明らかにする。次に、発生原因を調査し、主な原因としてリフティングマグネット(本章では以下、リフマグと称す)とスタッド溶接に注目する。さらに、試験体によるモデル実験及び数値シミュレーションにより、発生過程、性状を明らかにする。最後に、低減対策についても言及する。

なお、本事例では現地あるいは実験室で磁場計測を行い、その結果をもとに残留磁気を評価する形態をとった。計測の対象は磁束密度であるが、磁場が複数の磁束から形成されるとして、空間に関しては磁場、また鋼材の表面(あるいは表面近傍)に関しては残留磁気と記述する。正確には、鋼材内部の残留磁気により周辺に磁場が発生し、その評価のために磁場計測器で磁束密度を計測するものである。また、磁場計測に用いた計測法については、原則として計測システム名及び磁場計測器のみ記述している。磁場計測器は、対応する計測システム(3.5節)に示す機器の選択を心掛けているが、実施時期の関係で最適なものが使用されていない場合もある。

8.2 建物内の磁場発生源の調査

2.4.3項、2.4.4項、2.4.5項で紹介した障害事例は、いずれも建物内に存在する直流磁場が障害の原因と考えられる。それは、地磁気と重なり合って建物内の磁場環境を創出しているものである。

そこで各事例において、現地調査、設計図面調査、ヒヤリング等により直流磁場の発生源の調査を行った。本節では、これらの調査結果について述べる。

8.2.1 CRT ディスプレイの画像障害が発生した事務所

2.4.3項で障害事例として紹介した事務所では、図2.4.3に示すように、CRTの色ずれが認められた場所は壁や柱から十分に離れていた。また現地で、色ずれが発生したCRTを周辺に移動しながら色ずれの程度の変化を調べた結果、回転させると様相が大きく変わること、前後左右に動かすと程度が変化して目立たなくなるところもあれば逆に悪くなることもあること、床面に近付けるとさらに悪くなることがわかった。よって、建物の床自体あるいはその下部に何らかの磁場発生源があるものと推定された。本建物の床は、コンクリート製スラブの上に高さ100mmのGFRC製OAフロアが敷き込まれたものである。本調査では、障害発生地点周辺の床面を対象として磁場発生源の特定を図った。

一般に、建物床面の磁場発生源として、次の5つが考えられる。

- ① OAフロア内部、床スラブ内部、あるいは下階天井裏に設置された電気配線
- ② 誤って床スラブ内部に埋め込まれたマグネット
- ③ 下階にある変圧器等の電気設備、NMR等の強磁場発生装置
- ④ 周辺の電気機器
- ⑤ 強磁性体の残留磁気

①については、障害が発生した場所周辺のOAフロア内部と下階天井裏に電気配線があったが、電流値が小さいこと、及び交流であることから対象外である。交流磁場であれば2.3.1項に示すようにCRT画面は揺れるはずで、今回のような色ずれは直流磁場が原因と考えられるからである。

②については、鉄骨建方時に墨出し補助具として使われる小型マグネットの取り外しを忘れた際に生じる可能性がある。しかし、今回の施工でマグネットは使われていないため対象

外である。たとえあったとしても、机上面まで影響を及ぼすような強さのマグネットではない。

③については、下階も同様の事務所であるため対象外である。

④については、スピーカー等に内包されるマグネット、モーターを使用する機器等があるが、今回のケースでは周辺にいずれも存在していないため対象外である。下階天井面の蛍光灯からも磁場は発生するが、これは交流磁場である。また、CRT の色ずれは隣接する CRT 同士の相互干渉でも発生するが、今回は CRT 単独状態で発生しており、関係ない。

結局、⑤の強磁性体の残留磁気が、磁場発生源として考えられる唯一のものであった。図 8. 2. 1 に床面の断面図を示すが、鉄骨、デッキプレート、溶接金網、スタッドボルトといった鋼材は強磁性体で、強い磁場が印加されると残留磁気を帯びる性質を有している。なお、机やキャビネット等の什器備品も鋼製であれば残留磁気を帯びるが、周辺の什器備品を全て取り除いた状態でも色ずれが生じたため、今回のケースでは対象から外してよい。今回は、鋼材の残留磁気により周辺に直流磁場が発生し、CRT に色ずれを生じさせているものと考えられた。

8. 2. 2 テレビの画像障害が発生したマンション

2. 4. 4 項で障害事例として紹介したマンションでは、図 2. 4. 4 に示すように、テレビは部屋のコーナー部に設置されていた。テレビを周辺に移動しながら色ずれの程度の変化を確認した結果、壁面から離すと目立たなくなること、床面に近付けてもほとんど変化がなく、遠ざけると逆に悪くなる場所があることがわかった。よって、建物の壁自体あるいはその反対側に何らかの磁場発生源があるものと推定された。本建物の壁は、コンクリートの上にビニール製クロスを貼ったものである。本調査では、障害発生地点周辺の壁面を対象として磁場発生源の特定を図った。

一般に、建物壁面の磁場発生源として、次の 4 つが考えられる。

- ① 壁内部、あるいは壁下地層内部に設置された電気配線
- ② 反対側にある変圧器等の電気設備、NMR 等の強磁場発生装置
- ③ 周辺の電気機器
- ④ 強磁性体の残留磁気

結果として、8. 2. 1 項と同様、①～③については対象外で、④の強磁性体の残留磁気が磁場発生源として考えられる唯一のものであった。図 8. 2. 2 に壁面の断面図を示すが、強

磁性体である鉄筋が多数入っており、これらの残留磁気により直流磁場が発生し、テレビに色ずれを生じさせたものと考えられた。なお、ダンス、ベッドは木製であり、残留磁気を帯びることはない。

8. 2. 3 無人搬送車の走行障害が発生した工場

2. 4. 5 項で障害事例として紹介した工場では、床面に存在する磁場が架空の番地磁石を創り出していると考えられ、建物の床自体あるいはその下部に何らかの磁場発生源があるものと推定された。本建物の床は、コンクリート製の床スラブの上にウレタン樹脂系塗料が塗られたものである。本調査では、障害発生地点周辺の床面を対象として磁場発生源の特定を図った。

検討した項目は、8. 2. 1 項の①～⑤である。

①については、三相 200V の電力線が鉄骨梁下を走っているが距離が離れていること、火災報知器用の配線が床スラブ内部に埋め込まれているが電流が非常に小さいことから発生源とは考えられない。また、これらから発生する磁場は交流磁場で、今回対象の直流磁場ではない。

②については、今回の施工でマグネットは使われていないため対象外である。

③については、下階は組立工場であり、電気室や配電盤等も近くにないことから対象外である。

④については、周辺に存在していないため対象外である。

結局このケースでも、⑤の強磁性体の残留磁気が磁場発生源として考えられる唯一のものであった。図 8. 2. 3 に床面の断面図を示すが、鉄骨、鉄筋、デッキプレート、スタッドボルト、高張力ボルトといった鋼材は強磁性体であり、これらの残留磁気により床面に直流磁場が発生し、架空の番地磁石を創り出しているものと考えられた。

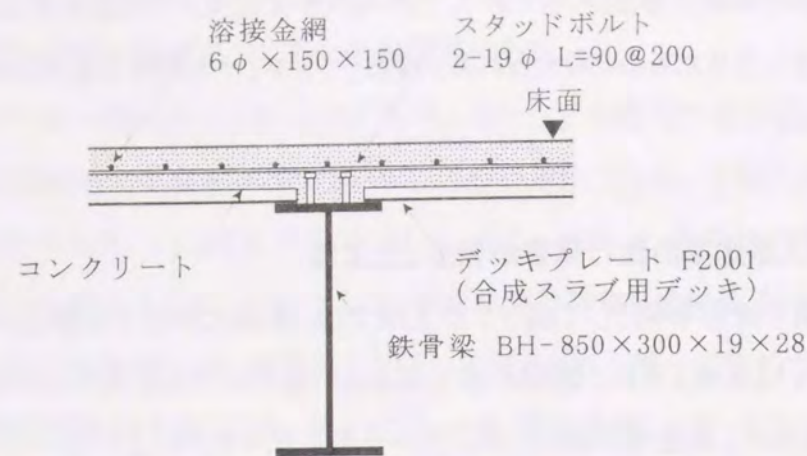


図8.2.1 事務所床面の断面図

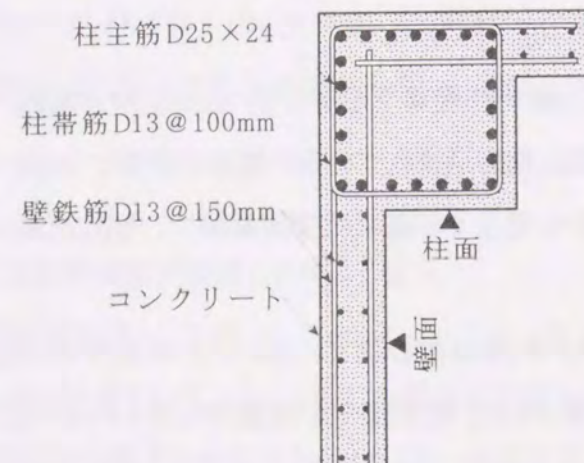


図8.2.2 マンション壁面の断面図

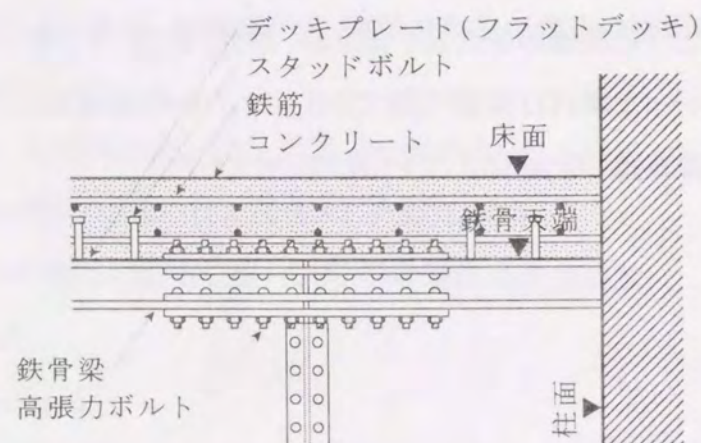


図8.2.3 工場床面の断面図

8.3 残留磁気による磁場の計測

3つの障害事例について、障害発生地点周辺で鋼材の残留磁気を対象として磁場計測を行った。また、無作為に抽出した竣工直後の鉄骨造及び鉄筋コンクリート造の建物を対象として、建物内の詳細な磁場計測を行った。本節では、これらの計測結果について述べる。

8.3.1 事務所の床面

2.4.3項の事務所において、色ずれ現象が認められた地点周辺の床面を対象として磁場計測を行った。

計測法としては計測システムⅡ(3.5節)を適用し、計測器は三軸型ガウスメーター(9903:F.W.BELL)を用いた。プローブを非磁性のステンレス製スタンドに固定し、所定の位置に順次移動して計測を行った。計測点は、鉄骨梁センターを基準に310mm間隔(小梁間隔の1/8)でメッシュを切り、その交点とした。計測点数は188点、計測高さは床上0mm, 350mm, 700mm, 1000mmである。

計測に際しては、机、椅子、キャビネット等の什器備品を計測領域からできるだけ離れた場所に移動した。これは、鋼材等の強磁性体により磁場が乱されて、正確な計測ができなくなることを避けるためである。

図8.3.1に床上0mm面及び床上700mm面における磁束密度分布図を示す。床上0mm面では全体的に磁場が強く、不規則に分布しているが、床面から離れるに従って距離減衰効果により磁場が弱くなるとともに磁場の大きい領域がまとまってきている。今回問題となったCRTは床上700mmにあり、磁場の大きさが80μT以上の領域に設置されていた。

8.3.2 マンションの壁面

2.4.4項のマンションにおいて、壁面を対象として磁場計測を行った。本マンションは入居後6ヶ月が経過しており、対象の部屋内にはテレビの他にタンスとベッドが設置されていた。これらの移動は困難であるため、テレビのみ室外に移動し、テレビが置かれている空間を計測した。

計測法としては計測システムⅡ(3.5節)を適用し、計測器は設置上の制約から一軸型ガウスメーター(HM-201:エムティアイ)を用いた。アクリル製支持棒にプローブを固定し、3方

向に盛り替えて計測を行った。計測点は、壁面を横 167mm×縦 300mm 基準にメッシュを切り、その交点とした。計測点数は 28 点、壁面からの離隔距離は 0mm, 200mm である。

図 8. 3. 2 に磁束密度分布図を示す。上図が壁面、下図が柱面で、それぞれ地磁気補正值で表示している。この図から、壁面の影響が大きいことがわかる。柱面 200mm 離隔の左側中程に磁場が大きいところがあるが、これは壁面の影響である。磁場の大きい領域は、テレビ設置高さと概ね一致していた。

8. 3. 3 工場の床面

2. 4. 5 項の工場において、障害が発生した地点周辺の床面を対象として磁場計測を行った。

計測法としては計測システムⅡ(3. 5 節)を適用し、計測器は三軸型ガウスメーター(640 : F.W.BELL)を用いた。プローブを非磁性のステンレス製スタンドに固定し、所定の位置に順次移動して計測を行った。計測点は、床下鉄骨梁の位置、無人搬送車の走行ガイド、及び番地センサー通過ラインを基準に 300mm 間隔でメッシュを切り、その交点とした。計測点数は 98 点、計測高さは磁気センサーの取り付け高さである床上 25mm である。

計測に際しては、周辺の障害物を取り除いた。なお、計測領域周辺に番地磁石はない。

図 8. 3. 3 に磁束密度分布図を示す。上図は全磁力で表示したものである。下図は磁場の N 極垂直(Z 方向)成分で表示したものである。これは、番地センサーにより検出される極性と成分に相当している。磁場は不規則に分布しているが、番地センサー通過ラインに存在する N 極垂直成分が 200 μ T 以上のポイントと異常停止箇所は一致していた。

8. 3. 4 鉄骨造建物の詳細計測

以上、3 つの障害事例について磁場計測を行った結果、いずれも障害の原因となり得る直流磁場が検出された。これは、鋼材の残留磁気が発生源と考えられる。

それでは、障害を引き起こすような大きさの直流磁場、その発生源である残留磁気は一般的に存在するものであろうか。これまでの計測は、障害が発生した後、その周辺のみを対象として行ったもので普遍性に欠ける。そこで、竣工直後の建物を実無作為に抽出し、建物内の詳細な磁場計測を行った。本項では鉄骨造建物の計測事例を 2 件紹介する。

最初の建物は、鉄骨造 31 階建の事務所ビルである。構造は 2. 4. 3 項の事務所と同様で、床面には合成スラブの上に高さ 100mm の OA フロアが敷き込まれている。この 16 階事務室

の床面全体を対象として磁場計測を行った。計測時は入居前であり、フロア内に什器備品は何もない状態であった。

計測法としては計測システムⅡ(3. 5 節)を適用し、計測器は三軸型ガウスメーター(9903 : F.W.BELL)を用いた。プローブを非磁性のステンレス製スタンドに固定し、所定の位置に順次移動して計測を行った。計測点は、柱を基準に 1000mm 間隔でメッシュを切り、その交点とした。計測点数は 1397 点、計測高さは床上 0mm である。

図 8. 3. 4 に磁束密度分布図を示す。計測点毎に丸印の大きさを磁場の大きさを表している。これをみると、磁場の大きい領域がいくつか存在していることがわかる。この中で特に大きい領域として領域 A と領域 B を抽出し、詳細な計測を行った。領域 A は下面にデッキプレートと溶接金網が存在する面、領域 B は下面に鉄骨梁が存在するラインに対応している。計測点数は領域 A が 297 点、領域 B が 45 点、計測高さはいずれも床上 0mm, 1000mm である。図 8. 3. 5 に領域 A の磁束密度分布図を示すが、床上 0mm 面では磁場が不規則に変化し、床上 1000mm 面では磁場の大きい領域がまとまっている。このことから、鋼材の残留磁気自体は局所的で不規則に分布しており、それが集中した領域で床上の磁場が大きくなることがわかる。また、図 8. 3. 6 は領域 B の計測結果であるが、床上 0mm では磁場の大きい点が 3 か所あり場所による差が大きいこと、床上 1000mm では床上 0mm と比べて一気に小さくなり緩やかな分布を示していることがわかる。

次の建物は、鉄骨造 3 階建の工場である。構造は、柱・梁が鉄骨造、1 階床が鉄筋コンクリート造、2・3 階床がフラットデッキ敷込の鉄筋コンクリート造である。この 1 階部分の鉄骨柱を対象として磁場計測を行った。

計測法としては計測システムⅠ(3. 5 節)を適用し、計測器は三軸型ガウスメーター(9903 : F.W.BELL)を用いた。対象は、H 形鋼—582mm×300mm×12mm×17mm からなる C・D・E・F の 4 本の柱である。フランジ面に、C は床上 2000mm まで 100mm 間隔、D・E・F は床上 1950mm まで 150mm 間隔でメッシュを切り、その交点の鉄骨表面で計測を行った。計測点数は 236 点である。また C・D は、柱面から水平方向 1000mm 離隔までの領域で分布計測を行った。計測点数は 224 点、計測高さは床上 650mm, 1100mm である。

図 8. 3. 7 に各鉄骨柱フランジ面の磁束密度分布図を示す。フランジ端部で磁場が大きく、中心部で小さくなる傾向が見られる。最大値は、柱 F の右上部で検出された 1.208mT である。また、図 8. 3. 8 に柱 C の床上 1100mm 面における磁束密度ベクトル図及び分布図を示

す。鉄骨面から外部に向かって磁束が放射されていること、鉄骨柱近傍では強い磁場が存在しているが距離減衰効果により離れるに従って磁場は弱くなっていることがわかる。

以上、無作為に抽出した鉄骨造建物においても残留磁気による磁場の大きい領域の存在することが確認された。ここに CRT や無人搬送車が設置されると、障害が発生する可能性があるものと思われる。他にも4件の調査を行ったが同様の結果を示しており、鉄骨構造物では残留磁気の影響の大きい領域がどこにでも存在する可能性のあることが明らかになった。

8.3.5 鉄筋コンクリート造建物の詳細計測

次に、鉄筋コンクリート造建物の計測事例を紹介する。

対象の建物は、壁式鉄筋コンクリート造 13 階建のマンションである。この 2 階及び 3 階を対象として磁場計測を行った。計測時は入居前で内部には家具等何もない状態であった。

まず、2 階及び 3 階のコンクリート壁面全体を対象として計測システムⅣ(3.5 節)で簡易計測を行った。三軸型ガウスメーター (THM7025 : METROLAB) のプローブを手に持って壁面に沿って移動しながらフロア全体を計測した。計測高さは、床上 1000mm である。

結果として、壁面に $100 \mu\text{T}$ 以上のポイントが点在していることがわかった。特に、2 階、3 階とも共通して東西外壁面で $100 \mu\text{T}$ 以上の磁場がまとまって計測された。

そこで、この領域を対象として計測システムⅡ(3.5 節)で磁場分布計測を行った。計測器は三軸型ガウスメーター (9903 : F.W.BELL) を用い、プローブを非磁性のステンレス製スタンドに固定し、所定の位置に順次移動して計測を行った。計測点は、幅 4800mm で壁面から 900mm 離隔までの領域を 300mm 間隔でメッシュを切り、その交点とした。計測点数は 68 点、計測高さは床上 500mm, 1000mm, 1500mm である。

図 8.3.9 に 2 階西側外壁面の磁束密度分布図を示す。高さによる差はあまりなく、 $100 \mu\text{T}$ 以上の領域が角部近くに $2000\text{mm} \times 300\text{mm}$ 程度存在していることがわかる。また、壁面から離れるに従って、磁場は弱くなっている。

以上、無作為に抽出した鉄筋コンクリート造建物においても残留磁気による磁場の大きい領域の存在することが確認された。ここに CRT やテレビが設置されると、色ずれ障害が発生する可能性があるものと思われる。他にも 2 件の調査を行ったが同様の結果を示しており、鉄筋コンクリート構造物では残留磁気の影響の大きい領域がどこにでも存在する可能性のあることが明らかになった。

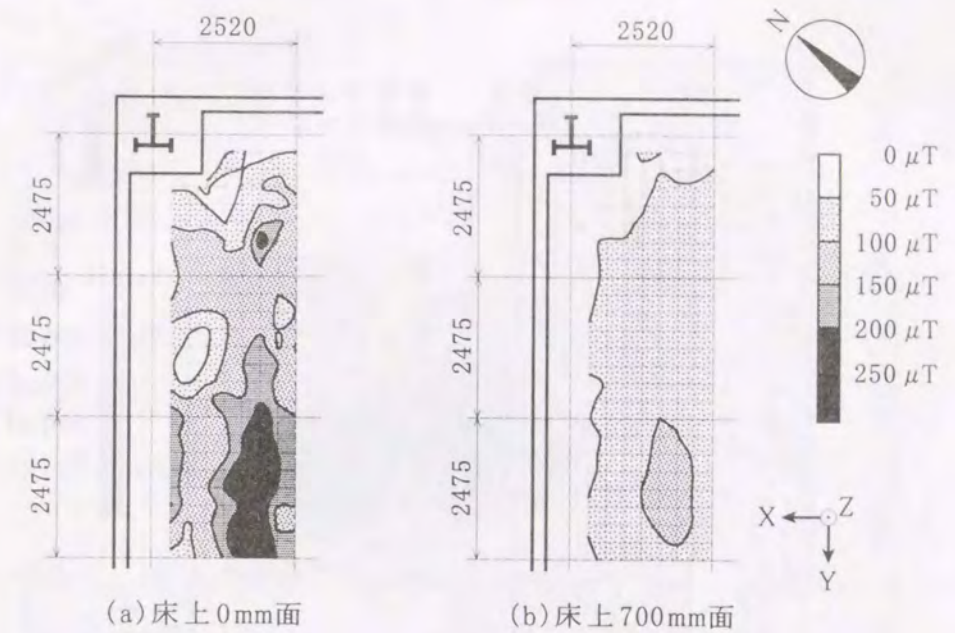


図8.3.1 事務所床面の磁束密度分布図

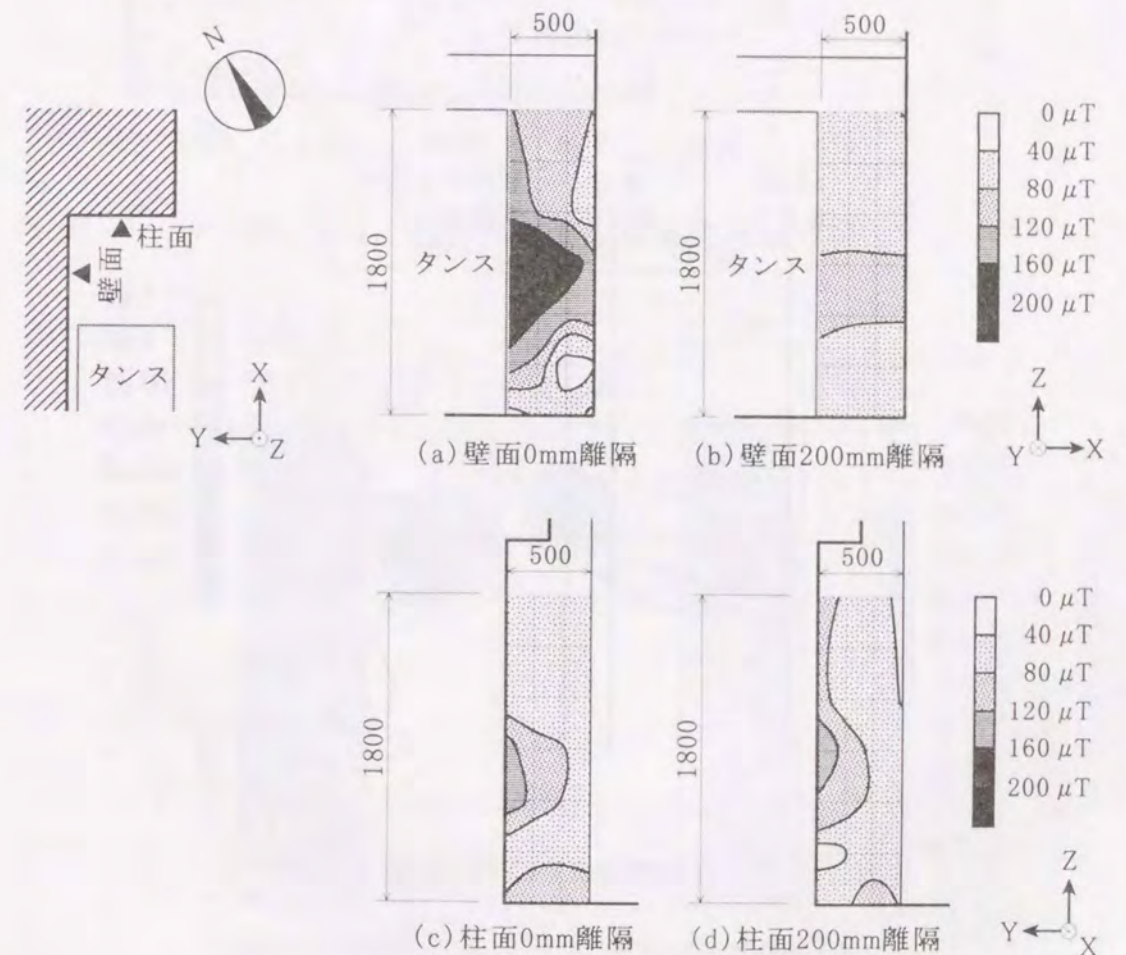
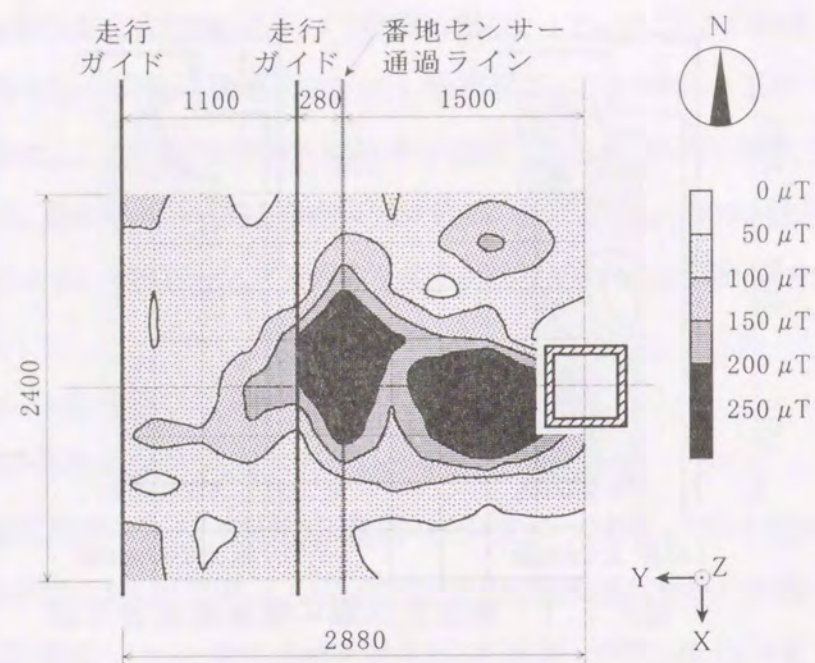
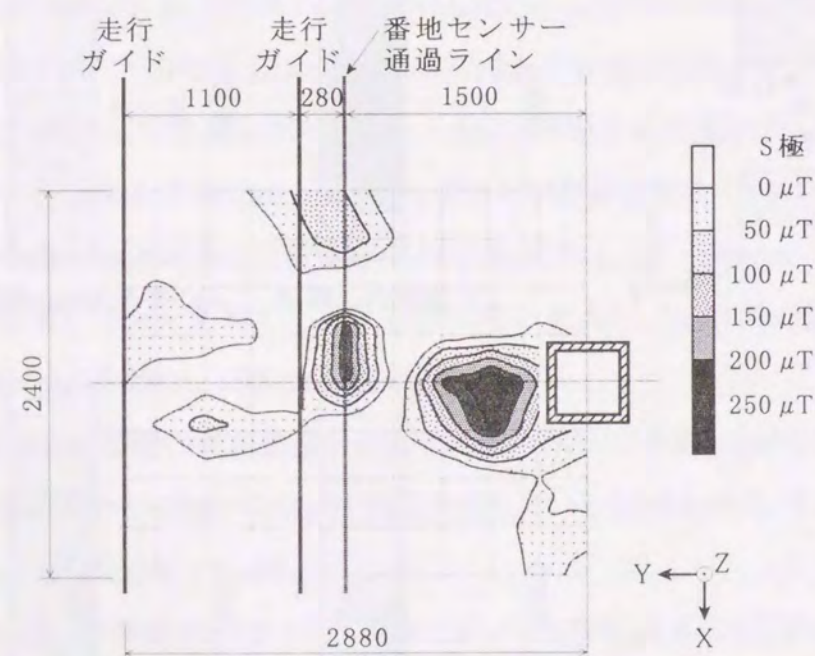


図8.3.2 マンション壁面の磁束密度分布図



(a) 全磁力



(b) N極垂直(Z方向)成分

図8.3.3 工場床面の磁束密度分布図

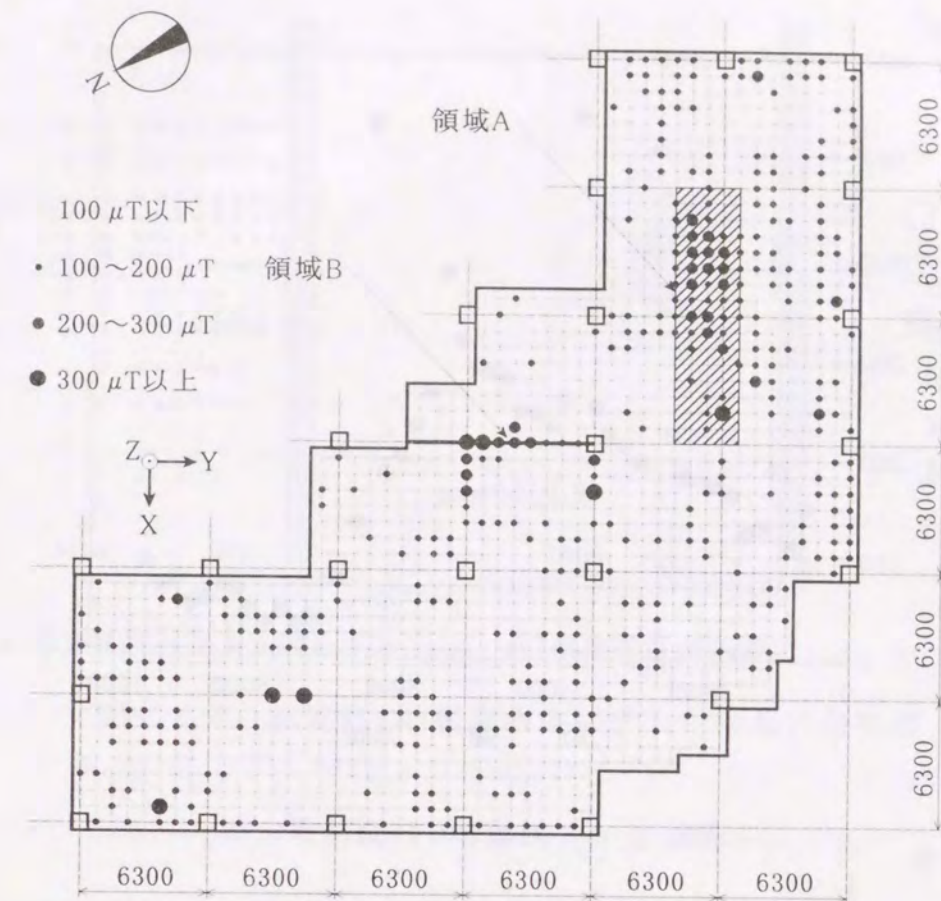
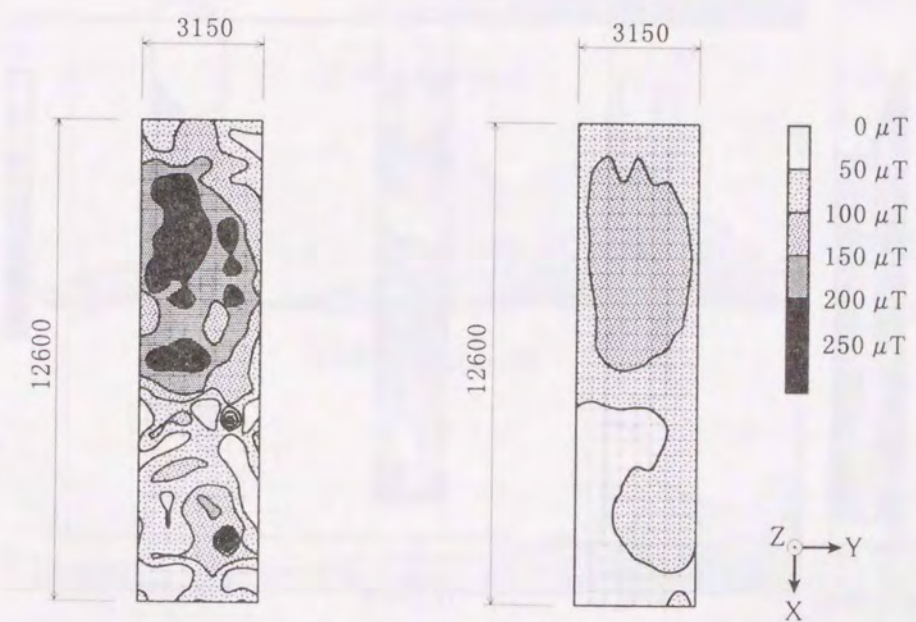


図8.3.4 事務室床面の磁束密度分布図



(a) 床上0mm面

(b) 床上1000mm面

図8.3.5 領域Aの磁束密度分布図

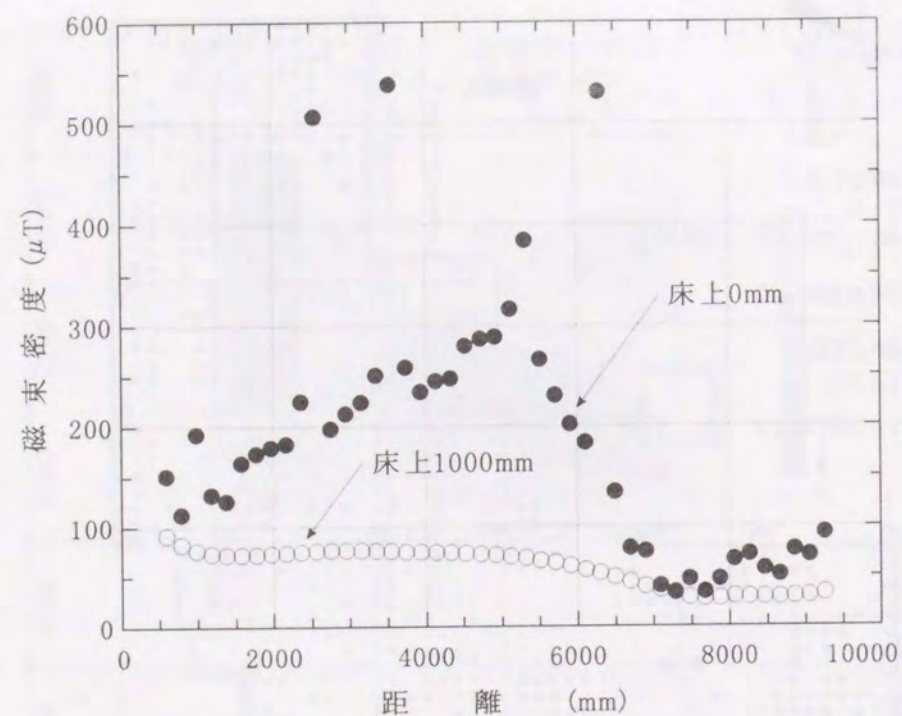


図8.3.6 領域Bの計測結果

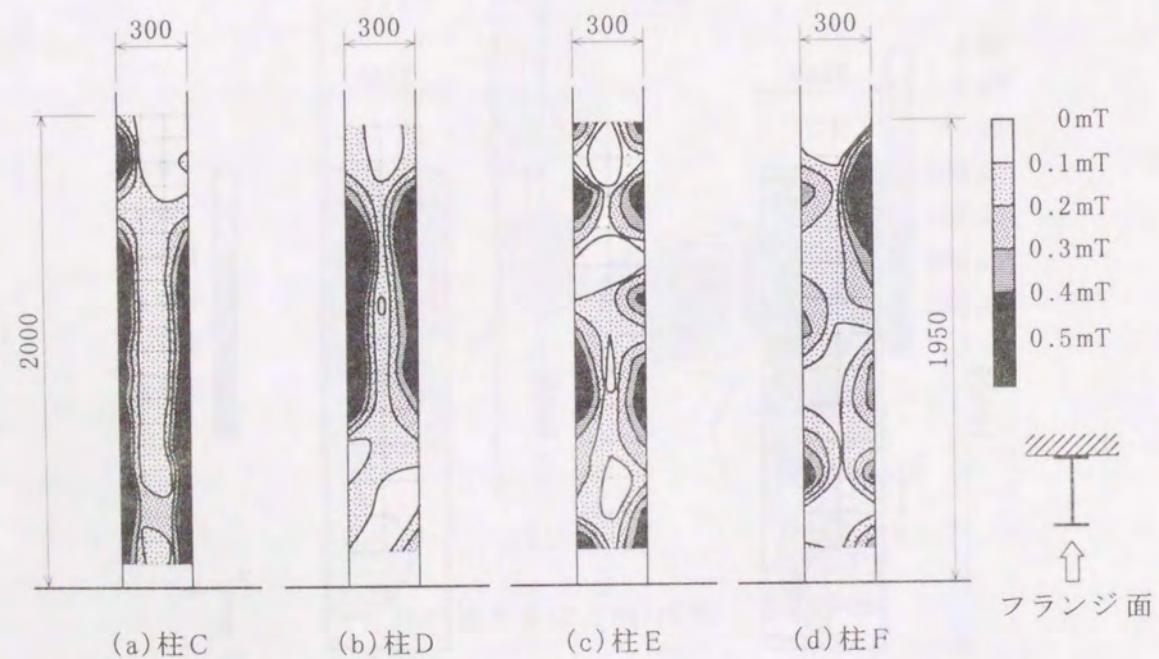


図8.3.7 鉄骨柱フランジ面の磁束密度分布図

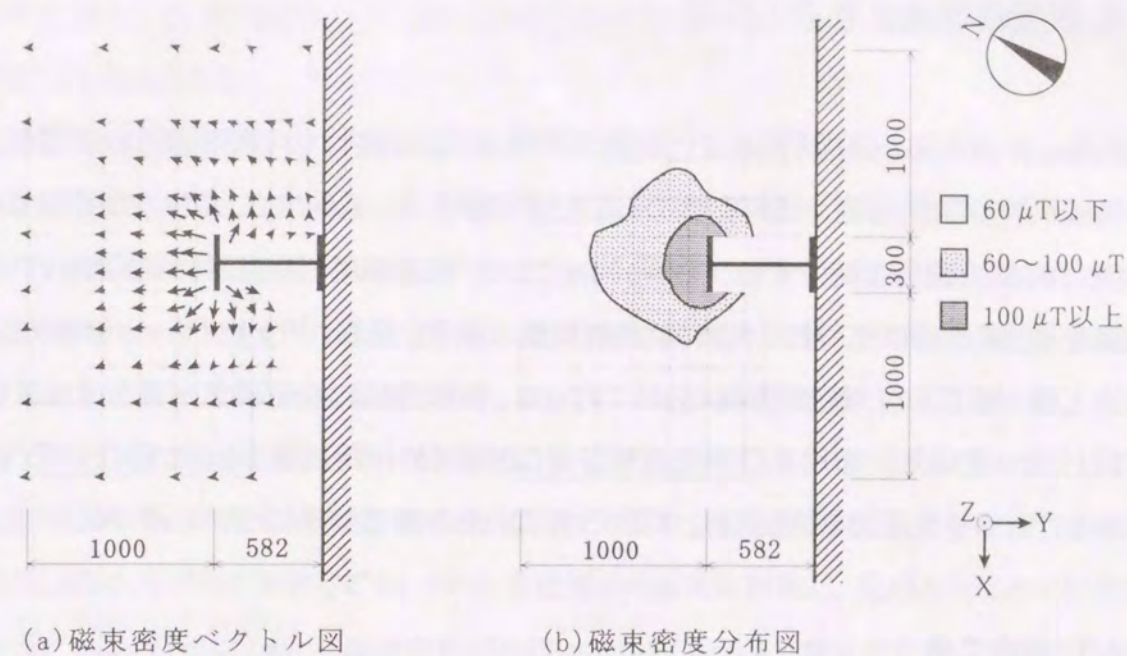


図8.3.8 鉄骨柱Cの磁束密度ベクトル図及び分布図

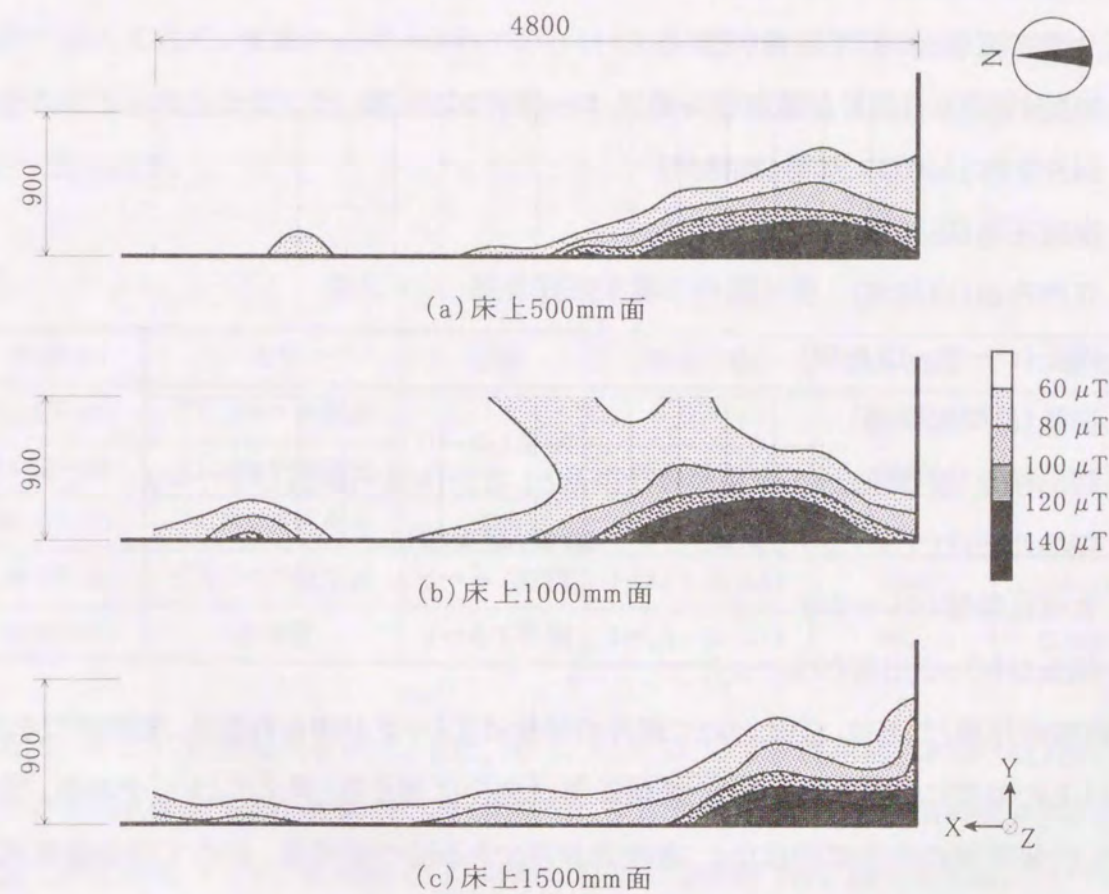


図8.3.9 2階西側外壁面の磁束密度分布図

8.4 残留磁気発生原因の調査

前節の計測結果から、鉄骨造及び鉄筋コンクリート造の建物では残留磁気の影響の大きい領域がどこにでも存在する可能性のあることが判明した。それでは、鋼材の残留磁気はどこで、どのような過程で発生するのであろうか。ここで、残留磁気の発生原因の調査を行った。

調査は、構造物に使われる代表的な鋼材として鉄骨、鉄筋、デッキプレートを取り上げ、製造工場、加工工場、建設現場に分けて行った。強磁性体に残留磁気が発生する直接的要因として、電磁気的作用及び塑性変形が生じる機械的作用に着目し、工程の分析、現地計測を行って発生原因を抽出した。本節では、これらの調査結果について述べる。

8.4.1 製造工場

(1) 鉄 骨

鉄骨の製造工場として代表的な高炉メーカーを1社選択し、工場の調査を行った。製造、保管、出荷の工程は、以下の通りである。

- ① 材料ヤードから鋼片を搬入(クレーン, ローラーコンベア)
- ② 鋼片を約 1300℃に加熱(加熱炉)
- ③ 連続圧延(圧延機)
- ④ 自然冷却(冷却床)
- ⑤ 矯正(ローラー矯正機)
- ⑥ 切断(冷間鋸断機)
- ⑦ 製品検査(検査床)→不合格品は仕掛品としてラインから撤去(クレーン)
- ⑧ 製品仕分け(チェントランスファー), 結束(結束機)
- ⑨ 倉庫に保管(クレーン)
- ⑩ 船及びトラック出荷(クレーン)

電磁気的作用としては、①において鋼片の移載にリフマグが使われるが、加熱炉でキュリ一点以上の温度に加熱されるため、残留磁気は完全に消えると考えてよい。その後、②～⑤では残留磁気の発生要因はなく、機械的作用である⑥の切断後、初めて残留磁気が発生するものと思われる。続く⑦までの移送はローラーコンベアであるため問題ないが、不合格品の撤去にリフマグが使われる。その後、リフマグは⑨の一部と⑩で使われる。その他、

間接的要因として、磁気を帯びた装置や材料等との接触における磁気誘導で残留磁気を帯びることも考えられる。

本調査では、適当な工程で鉄骨の磁場計測を行い、残留磁気の発生原因を探った。計測法としては計測システムⅢ(3.5節)を適用し、計測器は三軸型ガウスメーター(THM7025:METROLAB)を用いた。プローブを手にとって鉄骨の所定位置に垂直に固定し、順次移動して計測を行った。鉄骨からの離隔距離は 0mm である。対象は、調査当日製造ラインに流れていたロール I 形鋼である。表 8.4.1 に計測対象の鉄骨部材を示す。

まず⑦の工程で磁場計測を行った。最初に検査床を流れている M-SF-A を対象として、検査床の流れを一時的に止めて 300mm 間隔でフランジ側面の残留磁気を計測した(M-SF-A1)。次に、リフマグを使って M-SF-A を仕掛かり場所に移動し、先程と同じ点で計測した(M-SF-A2)。さらに反転し、裏面の計測も行った(M-SF-A3)。参考のため、不合格品として仕掛かり場所に置かれていた M-SF-B も計測した。いずれも、周囲 1m 以内に磁場を乱すものがないように注意した。

次に⑨の工程で、倉庫に山積みされている M-SF-C を対象として 300mm 間隔でフランジ上面の残留磁気を計測した。周辺には同種の I 形鋼が多数あり、これらの影響込みの計測ということになる。

表 8.4.1 鉄骨製造工場の計測対象

計測No.	工程	分類	部材寸法	長さ(mm)	材質
M-SF-A1	⑦リフマグ使用前	ロール I 形鋼	I-115×95×11	9600	SM115C
M-SF-A2	⑦リフマグ使用后				
M-SF-A3	⑦リフマグ使用后				
M-SF-B	⑦リフマグ使用后	ロール I 形鋼	I-115×95×11	7000	SM115C
M-SF-C	⑨保管	ロール I 形鋼	I-115×95×11	9000	SM115C

表 8.4.2 に計測結果を示す。また、図 8.4.1 はリフマグ使用前(M-SF-A1)と使用后(M-SF-A2)の比較を示したもので、計測点毎に丸印の大きさと残留磁気の大きさを表している。これらから、リフマグ使用前では、切断の影響で端部が 2mT 程度まで磁化されているが、その他はほとんど磁化されていないことがわかる。一方、リフマグ使用后では、リフマグ接触面に 4mT 程度の残留磁気が発生し、端部も 4mT 程度まで大きくなっている。この傾向

は、他の計測対象(M-SF-B, M-SF-C)も同様であった。また、裏面(M-SF-A3)でも、多少小さくなっていたが、同様の傾向を示した。

以上、鉄骨の製造工場における残留磁気の発生原因としてはリフマグが支配的であり、その他に切断と磁気誘導の影響があることが判明した。

表 8. 4. 2 鉄骨製造工場の計測結果

計測No.	計測点数	計測面	計測値(mT)		
			最大値	最小値	平均値
M-SF-A1	33	フランジ側面	2.36	0.02	0.24
M-SF-A2	33	フランジ側面	3.88	0.03	0.89
M-SF-A3	33	フランジ側面	3.56	0.03	0.83
M-SF-B	25	フランジ側面	4.97	0.09	0.98
M-SF-C	31	フランジ上面	3.40	0.17	0.99

(2) 鉄 筋

鉄筋の製造工場について事前調査した結果、リフマグが主な発生原因として抽出された。そこで、まず関東地区の電炉メーカー11社を対象としてリフマグの使用状況を確認した。結果として、鉄屑を電炉に入れる際にはすべてのメーカーで使用されているが、保管及びトラック積み込み時には4社で使用、7社で非使用であることがわかった(1998年2月時点)。本調査では、保管及びトラック積み込み時のリフマグ使用メーカーを1社、非使用メーカーを1社選択し、それぞれ工場の調査を行った。製造、保管、出荷の工程は両社とも共通で、以下の通りである。

- ① 鉄屑と副原料を電気炉に投入して溶解精錬(クレーン)
- ② 鋼片の製造(連続鑄造設備、鑄造カッター)
- ③ 鋼片を約1000℃に加熱(加熱炉)
- ④ 連続圧延(圧延機)
- ⑤ 自然冷却(冷却床)
- ⑥ 切断(冷間鋸断機)
- ⑦ 製品検査(検査場)
- ⑧ 結束(結束機)

⑨ 倉庫に保管(クレーン)

⑩ トラック出荷(クレーン)

電磁気的作用としては、①において鉄屑の移載にリフマグが使われるが、溶解精錬されるため、残留磁気は残らない。その後も残留磁気発生要因はなく、機械的作用である⑥の切断で初めて残留磁気が発生するものと思われる。その後、リフマグ使用メーカーでは⑨と⑩のクレーン揚重の際、リフマグが使われる。リフマグ非使用メーカーでは、代わりにワイヤ掛けによる揚重が行われる。その他、間接的要因として、磁気を帯びた装置や材料等との接触における磁気誘導で残留磁気を帯びることも考えられる。

本調査では、⑨の工程で鉄筋束の磁場計測を行い、残留磁気の発生原因を探った。リフマグ使用メーカーの製造ラインで、リフマグ使用前後の比較を行えば直接的な影響評価ができるが、危険のため立入禁止で実現しなかった。リフマグ使用メーカーと非使用メーカーの鉄筋を同じ工程で比較することで代用した。計測法としては計測システムⅢ(3.5節)を適用し、計測器は一軸型ガウスメーター(4048:F.W.BELL)を用いた。計測点毎にプローブをX・Y・Z方向に順次盛り替えて3方向非同時に計測を行い、後で全磁力を求めた。対象の鉄筋は束の上部に位置する適当な3本で、500mm間隔で残留磁気を計測した。鉄筋からの離隔距離は0mmである。表8.4.3に計測対象の鉄筋を示す。

表 8. 4. 3 鉄筋製造工場の計測対象

計測No.	リフマグ	工程	分類	サイズ	長さ(mm)	材質
M-SB-A	使用	⑨保管	異形鉄筋	D38	6000	SD345
M-SB-B	使用	⑨保管	異形鉄筋	D29	8000	SD345
M-SB-C	使用	⑨保管	異形鉄筋	D25	11500	SD345
M-SB-D	使用	⑨保管	異形鉄筋	D16	8000	SD345
M-SB-E	非使用	⑨保管	異形鉄筋	D38	6000	SD345
M-SB-F	非使用	⑨保管	異形鉄筋	D29	4500	SD390
M-SB-G	非使用	⑨保管	異形鉄筋	D25	9000	SD345
M-SB-H	非使用	⑨保管	異形鉄筋	D16	7500	SD295A

表8.4.4に計測結果を示す。端部は切断の影響で局所的に大きな値を示すため、リフマグの影響と分離する目的で端部のみと端部を除いたものに分けて集計している。また図8.4.

2 は、D16 鉄筋を対象としてリフマグ使用鉄筋(M-SB-D)と非使用鉄筋(M-SB-H)の計測結果を比較したもので、計測点毎に丸印の大きさが残留磁気の大きさを表している。これらから、リフマグ非使用鉄筋では、切断の影響で端部が多少磁化されているが、その他はほとんど磁化されていないことがわかる。一方、リフマグ使用鉄筋では、リフマグ接触部で大きな残留磁気が2か所存在しており、端部も大きくなっていた。ただし、両者とも端部の影響は局所的で、特にリフマグ非使用鉄筋では離隔とともに一気に減衰するものであった。

以上、鉄筋の製造工場における残留磁気の発生原因としてはリフマグが支配的であり、その他に切断と磁気誘導の影響があることが判明した。

表 8. 4. 4 鉄筋製造工場の計測結果

計測No.	計測点数	計測値(mT)			
		最大値 (端部)	最大値 (端部除く)	最小値 (端部除く)	平均値 (端部除く)
M-SB-A	13×3	1.94	0.99	0.08	0.38
M-SB-B	17×3	4.23	2.21	0.08	0.58
M-SB-C	24×3	0.69	1.69	0.04	0.46
M-SB-D	17×3	1.48	1.38	0.12	0.59
M-SB-E	13×3	0.35	0.08	0.03	0.06
M-SB-F	10×3	1.05	0.15	0.03	0.09
M-SB-G	19×3	0.98	0.18	0.03	0.10
M-SB-H	16×3	0.35	0.19	0.04	0.11

(3) デッキプレート

デッキプレートの製造工場として代表的なメーカーを 1 社選択し、工場の調査を行った。製造、保管、出荷の工程は、以下の通りである。

- ① コイル材料搬入(クレーン)
- ② 押し出し成形(冷間ロールフォーミング)
- ③ 切断(プレス)
- ④ 自動搬送(マグロール)
- ⑤ 10～20 枚を結束(クレーン、結束機)
- ⑥ 倉庫に保管(クレーン)

⑦ トラック出荷(クレーン)

電磁気的作用としては、④のマグロール及び⑤の結束場所への製品移載時に使われるリフマグがある。マグロールはマグネット製のローラーコンベアで、ロールの回転に伴う水平方向の推進力を磁力で伝えるものである。①・⑥・⑦は、ワイヤ掛けによる揚重が行われていた。また、機械的作用としては、②の押し出し成形と③の切断がある。その他、間接的要因として、磁気を帯びた装置や材料等との接触における磁気誘導で残留磁気を帯びることも考えられる。なお、①のコイル時点で残留磁気がないことは、別途高炉・電炉メーカーの調査で確認している。

本調査では、⑥の工程でデッキプレートの磁場計測を行い、残留磁気の発生原因を探った。製造ラインにおいて、マグロールやリフマグ使用前後の比較を行えば直接的な影響評価ができるが、危険のため立入禁止で実現しなかった。すべての要因が重なった状態での計測となった。計測法としては計測システムⅢ(3. 5 節)を適用し、計測器は三軸型ガウスメーター(THM7025: METROLAB)を用いた。対象のデッキプレートは東の上部に位置するもので、幅方向3点、長さ方向500mm間隔で残留磁気を計測した。デッキプレートからの離隔距離は0mmである。表 8. 4. 5 に計測対象のデッキプレートを示す。

表 8. 4. 5 デッキプレート製造工場の計測対象

計測No.	工程	分類	幅×厚さ(mm)	長さ(mm)	材質
M-DP-A	⑥保管	合成スラブ用デッキ	600×1.2	3000	SCW
M-DP-B	⑥保管	合成スラブ用デッキ	600×1.2	3500	SCW
M-DP-C	⑥保管	合成スラブ用デッキ	600×1.2	4000	SCW
M-DP-D	⑥保管	フラットデッキ	630×1.2	3000	L デッキ
M-DP-E	⑥保管	フラットデッキ	630×1.2	3500	L デッキ
M-DP-F	⑥保管	フラットデッキ	630×1.2	4000	L デッキ

表 8. 4. 6 に計測結果を示す。端部は切断の影響で局所的に大きな値を示すため、他の影響と分離する目的で端部のみと端部を除いたものに分けて集計している。

結果として、合成スラブ用デッキでは大きな残留磁気は検出されなかった。フラットデッキでは、端部、中程とも0.3～0.4mT程度の残留磁気は検出されたが、これは局所的なもので、その他は0.1mT程度の弱いものであった。これは、デッキプレートは1枚単位でみれば軽量

な部材であり、使用されるマグネットの磁力が弱いことに起因していると思われる。

以上、デッキプレートの製造工場における残留磁気の発生原因としてはマグロール自動搬送、リフマグ、切断、及び磁気誘導があるが、いずれも影響は小さいことが判明した。

表 8. 4. 6 デッキプレート製造工場の計測結果

計測No.	計測点数	計測値(mT)			
		最大値 (端部)	最大値 (端部除く)	最小値 (端部除く)	平均値 (端部除く)
M-DP-A	21	0.22	0.16	0.02	0.08
M-DP-B	24	0.15	0.13	0.01	0.07
M-DP-C	27	0.21	0.12	0.01	0.05
M-DP-D	21	0.41	0.28	0.03	0.13
M-DP-E	24	0.37	0.39	0.03	0.12
M-DP-F	27	0.51	0.38	0.01	0.13

8. 4. 2 加工工場

(1) 鉄 骨

鉄骨の加工工場の説明に入る前に、代表的な鉄骨部材の流通経路について説明する。

ロール H 形鋼(圧延もの)－高炉メーカー→2 次加工業者→建設現場

ビルト H 形鋼(組立もの)－高炉メーカー→1 次加工業者→2 次加工業者→建設現場
 コラム(柱材)－高炉メーカー→1 次加工業者→2 次加工業者→建設現場

プレート(平板)－高炉・電炉メーカー→商社・代理店の倉庫→2 次加工業者
 →建設現場

1 次加工業者は、圧延できないような大物部材の組立加工を中心に行い、製造工場に近い位置付けである。2 次加工業者は、中・小物部材の組立加工及び大物部材の仕上げ加工を中心に行い、種々雑多な工程を有する加工工場である。本調査では、1 次加工業者及び 2 次加工業者を 1 社ずつ選択し、工場の調査を行った。以下、2 つに分けて結果を示す。

【1 次加工業者】 コラム専門の加工工場の調査を行った。加工、組立、保管、出荷の工程は、以下の通りである。

- ① 平板の船荷卸し(クレーン)、工場内に保管
- ② 加工ラインに運搬(クレーン、台車)

- ③ 切断(ガス溶断機)
- ④ 溶断面の開先加工(フライス盤)
- ⑤ 曲げ加工(プレス機)
- ⑥ 組立及び溶接(炭酸ガス溶接)
- ⑦ 1 次検査→矯正
- ⑧ 錆止め塗装仕上げ、メッキ処理
- ⑨ 製品検査
- ⑩ 屋外ストックヤードに製品保管(クレーン)
- ⑪ トラック出荷(クレーン)

電磁気的作用としては、まずリフマグの使用があげられる。平板の揚重、ライン間の移載、製品の揚重等に 10 回以上使用される。その他、③・④・⑤が機械的作用、⑥の溶接が電磁気的作用として残留磁気の発生原因となり得るが、何といたってもリフマグが支配的と思われる。工場のライン周辺は危険のため立入禁止で、ライン上で残留磁気の変遷を探ることはできなかったが、⑩の保管状態で行ったコラムの検査では、リフマグ接触箇所では 0.5mT 程度、端部で 2mT 以上の残留磁気を検出された。

その他にも、ビルト H 形鋼専門の加工工場の調査を行ったが、ここでも平板の揚重にリフマグが使用されており、同様の残留磁気を検出された。

以上、鉄骨の 1 次加工業者における残留磁気の発生原因としては、リフマグの影響が支配的であることが判明した。

【2 次加工業者】 ロール H 形鋼及びコラムの加工を中心に手掛ける工場の調査を行った。加工、組立、保管、出荷の工程は部材により多少異なるが、概ね以下の通りである。

- ① 部材のトラック荷卸し(クレーン)、屋外ストックヤードに保管
- ② 工場内に運搬(クレーン、台車)
- ③ 穴開け加工(ドリルマシン)
- ④ 切断(帯ノコ盤)
- ⑤ 黒皮除去(ショットブラスト)
- ⑥ 接合部組立、仮溶接(交流アーク溶接)
- ⑦ 本溶接(炭酸ガス溶接)
- ⑧ 鉄筋貫通口等の雑加工(卓上ボール盤等)

⑨ 1次検査→矯正

⑩ 錆止め塗装仕上げ、メッキ処理

⑪ 製品検査

⑫ 屋外ストックヤードに製品保管(クレーン)

⑬ トラック出荷(クレーン)

電磁気的作用としては、⑥の接合部組立時に小物部材の揚重でリフマグ、⑧の穴開け加工時に卓上ボール盤の固定用マグネット、⑪の製品検査時にスケール固定用の小型マグネットの使用があげられる。これらは、いずれも小型の永久磁石である。また、⑥の交流アーク溶接では交流、⑦の炭酸ガス溶接では直流電流が使用される。機械的作用としては、③・④・⑤がある。これらは、一連の加工ラインで行われる。また、⑨の矯正はバーナーで加熱後、ハンマー打撃により行われるもので、機械的作用の一種である。その他、接合部取付部材の開先加工、シャーリング切断、ガス切断が機械的作用として加えられる。また、間接的要因として、磁気を帯びた装置や材料等との接触における磁気誘導で残留磁気を帯びることも考えられる。

本調査では、適当な工程で鉄骨の磁場計測を行い、残留磁気の発生原因を探った。計測法としては計測システム I (3.5 節) を適用し、計測器は三軸型ガウスメーター (9903 : F.W.BELL) を用いた。プローブを非磁性のステンレス製スタンドに固定し、所定の位置に順次移動して計測を行った。表 8.4.7 に計測対象の鉄骨部材を示す。

まず、①の工程で磁場計測を行った。対象は、製造工場及び 1 次加工業者からトラックで搬送されてきた直後の部材で、300mm～500mm 間隔でメッシュを切り、その交点で計測を行った。鉄骨からの離隔距離は 10mm、200mm である。

次に、梁材であるロール H 形鋼 (P-SF-F) に着目し、③～⑤の工程においてそれぞれの加工完了時に同一点で計測を行った。計測点数は 27 点、鉄骨からの離隔距離は 10mm、200mm である。比較のため、加工前後の②、⑥でも計測した。

最後に、⑫の工程で完成した梁材 (ロール H 形鋼) 3 本の計測を行った。計測点は、①の工程時と同様である。

表 8.4.8 に計測結果を示す。以下、工程毎に考察を述べる。

まず、①の工程では、いずれの部材にも残留磁気の大きい領域が 2～3 か所存在していた。これは、製造工場及び 1 次加工業者における加工・組立工程で使用されたリフマグの影

表 8.4.7 鉄骨加工工場の計測対象

計測No.	工程	分類	部材寸法	長さ(mm)	材質
P-SF-A	①保管	ロール H 形鋼	RH-500×200×10×16	12120	SM490A
P-SF-B1	①保管	ロール H 形鋼	RH-496×199×9×14	6120	SS400
P-SF-B2	①保管	(裏面)			
P-SF-C1	①保管	ビルト H 形鋼	BH-400×200×12×16	5000	SM490A
P-SF-C2	①保管	(裏面)			
P-SF-D	①保管	コラム	C-450×450×16	14620	STKC400R
P-SF-E	①保管	コラム	C-450×450×16	14630	STKC400R
P-SF-F1	②加工前	ロール H 形鋼	RH-496×199×9×14	8000	SS400
P-SF-F2	③穴開け				
P-SF-F3	④切断				
P-SF-F4	⑤ショットブラスト				
P-SF-F5	⑥加工後				
P-SF-G	⑫保管	梁材	H-500×200×9×19	5775	SM490A
P-SF-H	⑫保管	梁材	H-500×200×9×16	6576	SM490A
P-SF-I	⑫保管	梁材	H-500×200×9×19	6575	SM490A

響がそのまま残っているものと思われる。

次に、図 8.4.3 に②～⑥の工程における残留磁気の変遷を示す。これは、図に示す計測点で、②加工前の残留磁気の値を基準として各工程完了時の計測値の比率を計算し、全体の平均値を比較したものである。穴開けの影響はほとんどないこと、切断により切断面に 1mT 以上の大きな残留磁気が発生するが影響は切断面から 100mm 程度であること、ショットブラストにより切断面だけでなく全体として残留磁気小さくなることわかる。加工工程全体としては、加工前より残留磁気は小さくなるが、搬入時点で存在していた残留磁気は加工後も残っていることが判明した。

最後に、⑫の工程でも残留磁気の大きい領域が 2～3 か所ずつあり、搬入時点で存在していたものが加工完了後も残っているものと思われる。

なお、別途 H 形鋼とプレートを利用して、リフマグ、卓上ボール盤の固定用マグネット、交流アーク溶接、炭酸ガス溶接、矯正、開先加工、シャーリング、ガス切断の影響を確認した。結果として、部材表面の残留磁気は、リフマグは平均 1.46 倍、卓上ボール盤の固定用マグ

ネットは平均 1.21 倍、炭酸ガス溶接は平均 1.13 倍になったが、その他は変わらなかった。ただし、残留磁気が増大したものでも、200mm 離隔するとほとんど影響はなかった。

以上、鉄骨の 2 次加工業者における残留磁気の発生原因としては、切断、リフマグ、マグネット工具、炭酸ガス溶接、及び磁気誘導の影響があるが、いずれも搬入時点で有する残留磁気を越えるものではないことが判明した。

表 8. 4. 8 鉄骨加工工場の計測結果

計測No.	計測点数	10mm 離隔			200mm 離隔					
		計測値 (mT)			計測値 (mT)			地磁気補正值 (mT)		
		最大値	最小値	平均値	最大値	最小値	平均値	最大値	最小値	平均値
P-SF-A	81	1.002	0.009	0.253	0.220	0.014	0.087	0.192	0.030	0.058
P-SF-B1	72	1.090	0.053	0.390	0.230	0.023	0.088	0.202	0.043	0.059
P-SF-B2	72	0.382	0.017	0.151	0.130	0.009	0.058	0.108	0.008	0.033
P-SF-C1	60	0.384	0.011	0.100	0.080	0.033	0.056	0.053	0.012	0.032
P-SF-C2	60	0.414	0.012	0.105	0.085	0.035	0.058	0.055	0.011	0.034
P-SF-D	96	0.860	0.036	0.263	0.273	0.012	0.108	0.243	0.003	0.081
P-SF-E	96	0.878	0.075	0.298	0.194	0.024	0.117	0.163	0.008	0.088
P-SF-F1	27	0.779	0.145	0.414	0.162	0.105	0.133	0.137	0.078	0.108
P-SF-F2	27	0.699	0.138	0.392	0.157	0.105	0.129	0.136	0.073	0.101
P-SF-F3	27	1.301	0.143	0.549	0.177	0.109	0.149	0.149	0.080	0.122
P-SF-F4	27	0.571	0.045	0.306	0.123	0.084	0.104	0.105	0.055	0.078
P-SF-F5	90	0.546	0.034	0.204	0.117	0.012	0.069	0.086	0.008	0.043
P-SF-G	81	1.038	0.039	0.419	0.268	0.023	0.135	0.234	0.013	0.105
P-SF-H	90	0.777	0.028	0.241	0.189	0.043	0.102	0.158	0.024	0.079
P-SF-I	87	0.974	0.036	0.289	0.151	0.039	0.106	0.127	0.021	0.081

(2) 鉄 筋

製造工場から出荷された鉄筋は、一部商社や代理店の倉庫に保管されることもあるが、大部分は鉄筋の加工工場に搬送される。鉄筋の加工工場は、いわゆる工場というものは存在せず、敷地に余裕がある建設現場では現地、敷地に余裕がない建設現場あるいは大規模な建築物では鉄筋組立業者の加工場で加工が行われる。倉庫、加工工場とも設備として

大掛かりになるリフマグが使われることはなく、揚重にはワイヤ掛けによるクレーンが使用される。機械的作用としては、切断と曲げ加工がある。

本調査では、鉄筋組立業者の加工場において、鉄筋束を対象として磁場計測を行った。計測法として計測システムⅢ(3. 5 節)を適用し、計測器は三軸型ガウスメーター (THM7025: METROLAB) を用いた。手に持ったプローブを鉄筋束の端部から中程にゆっくり動かして概略の計測を行った。その後、代表的な鉄筋を数本抜き出し、木製作業台の上に置いて鉄筋単独状態で分布計測を行った。計測法としては計測システムⅠ(3. 5 節)を適用し、計測器は三軸型ガウスメーター (9903: F.W.BELL) を用いた。計測点は 300mm 間隔、鉄筋からの離隔距離は 0mm, 200mm である。表 8. 4. 9 に計測対象の鉄筋を示す。P-SB-F は、切断と曲げ加工の影響を確認するため、生材での計測後、切断と曲げ加工を施し、再度磁場計測を行った。

表 8. 4. 9 鉄筋加工工場の計測対象

計測No.	リフマグ	加工	分類	サイズ	長さ(mm)	材質
P-SB-A	使用	曲げ加工	異形鉄筋	D25	6700	SD345
P-SB-B	使用	曲げ加工	異形鉄筋	D19	6000	SD345
P-SB-C	非使用	生材	異形鉄筋	D29	4000	SD345
P-SB-D	非使用	生材	異形鉄筋	D10	6000	SD345
P-SB-E	非使用	曲げ加工	異形鉄筋	D13	3600	SD345
P-SB-F1	使用	生材	異形鉄筋	D25	6700	SD345
P-SB-F2	使用	切断				
P-SB-F3	使用	曲げ加工				

結果として、鉄筋束の状態では残留磁気の大い束と小さい束が存在していた。残留磁気が大い束は端部で 0.90~2.44mT, 中程で 0.11~0.65mT, 小さい束は端部で 0.07~1.02mT, 中程で 0.02~0.08mT であった。これは、リフマグ使用工場と非使用工場の製品に対応していた。

表 8. 4. 10 に鉄筋単独状態での計測結果を示す。鉄筋によって傾向がやや異なっているが、いずれも端部の切断面が大きく、中程にリフマグの影響が現れている。また、切断及び曲げ加工の実施前後の比較では、切断により切断面に磁極が現れること、曲げ加工による

影響はほとんどないことがわかった。

鉄筋置き場では、複数の製造工場から納入された鉄筋束が重なり合い、あるいは隣り合っていて置かれることがある。このような場合、リフマグ非使用鉄筋が使用鉄筋からの磁気誘導で残留磁気を帯びることが考えられる。またリフマグ使用鉄筋同士が接触した場合にも、リフマグ接触箇所がずれている、あるいは極性が反対であると、磁気誘導により残留磁気の分布が変わる可能性がある。

以上、鉄筋の加工工場における残留磁気の発生原因としては、切断と磁気誘導の影響があるが、いずれも搬入時点で有する残留磁気を越えるものではないことが判明した。

表 8. 4. 10 鉄筋加工工場の計測結果

計測No.	計測点数	0mm 離隔			200mm 離隔					
		計測値 (mT)			計測値 (mT)			地磁気補正值 (mT)		
		最大値	最小値	平均値	最大値	最小値	平均値	最大値	最小値	平均値
P-SB-A	23	0.600	0.042	0.227	0.095	0.037	0.056	0.058	0.008	0.031
P-SB-B	21	1.458	0.147	0.597	0.083	0.014	0.056	0.073	0.010	0.049
P-SB-C	15	0.206	0.022	0.062	0.067	0.020	0.045	0.028	0.004	0.015
P-SB-D	21	1.190	0.000	0.130	0.062	0.022	0.050	0.022	0.003	0.012
P-SB-E	13	0.402	0.036	0.146	0.065	0.018	0.053	0.026	0.005	0.013
P-SB-F1	23	0.580	0.043	0.222	0.093	0.039	0.060	0.055	0.009	0.033
P-SB-F2	23	0.690	0.041	0.245	0.093	0.043	0.062	0.057	0.010	0.036
P-SB-F3	23	0.578	0.044	0.218	0.091	0.038	0.058	0.053	0.009	0.032

(3) デッキプレート

デッキプレートの加工はほとんど製造工場で行われるため、加工工場は存在しない。大部分が製造工場から建設現場へ直送される。商社や代理店の倉庫に保管されることもあるが、この場合も電磁気的作用や機械的作用はなく、残留磁気発生の要因は存在しない。

8. 4. 3 建設現場

建設現場では、トラックにより搬送されてきた材料は、クレーン等の揚重機を利用して所定の場所に運ばれ、工程に従って順番に組み立てられる。鉄骨造の建物では、鉄骨、鉄筋、

デッキプレートが複合化されて一つの部位を構成する。例えば、床スラブは鉄骨梁の上にデッキプレートが敷かれ、その上に鉄筋を組んだ後にコンクリートが打設されて完成する。したがって、鉄骨、鉄筋、デッキプレートの残留磁気発生原因を単独に評価することは難しく、本調査では適当な工程で各部材を同時に評価した。なお、鉄筋コンクリート造の建物では、鉄筋のみが対象となる。

以下、鉄骨造と鉄筋コンクリート造に分けて調査結果を述べる。

(1) 鉄骨造

7つの建設現場で調査を行った。ここでは、最も規模の大きい事務所ビルの調査結果を紹介する。この建物は鉄骨造 20 階建てで、構造は柱・梁とも鉄骨造、床は合成スラブ及びフラットデッキ敷の鉄筋コンクリート造の 2 種類である。

最初に、床面を対象として設計図書、施工計画書等による事前調査、その後現地調査を行い、建設現場における電磁気的作用と機械的作用の洗い出しを行った。

その結果、電磁気的作用として以下の①～④、機械的作用として⑤～⑦が抽出された。

- ① スタッド溶接
- ② 炭酸ガス溶接
- ③ 交流アーク溶接
- ④ 鉄骨組立時のマグネット工具
- ⑤ 切断
- ⑥ 曲げ加工
- ⑦ 打撃矯正

さらに、間接的要因として磁気を帯びた他の材料との接触における磁気誘導で残留磁気を帯びることも考えられる。

これまでの調査で、③・⑥はほとんど影響がないこと、④・⑤は局所的に大きな残留磁気が発生するがその影響範囲は小さいこと、⑦は残留磁気が逆に小さくなることが判明していたため、本調査では①・②を主な対象とした。

ここでスタッド溶接とは、鉄骨梁と床スラブを一体化するために鉄骨梁天端に鋳鉄製のスタッドボルトを溶着する作業である。1200A～2000Aの直流電流を瞬時(0.6～1.2秒)に流し、溶接が行われる。1本当たりに要する時間は短いですが、例えば鉄骨梁上に150mm間隔で2本ずつ打つ場合、床面積1㎡当たり4～5本のスタッドボルトが溶接されることになる。溶接は、

地上に置かれた溶接機とスタッドガン(溶接点)をキャブタイヤケーブルで結び、直流電圧を印加して行われる。鉄骨にとるアースが正極で、スタッドガンが負極である。よって電流は、鉄骨からスタッドボルト、スタッドガンを通してキャブタイヤケーブルに流れる。スタッド溶接時に存在する鋼材は鉄骨とデッキプレートで、これらに加えられる電磁気的作用は次の3つが考えられる。

- i. アースをとった鉄骨に流れる電流
- ii. スタッドボルト～溶接点に流れる電流
- iii. キャブタイヤケーブルに流れる電流

いずれも電流が作り出す磁場が問題となる。このうち、iとiiは局所的な影響であるが、iiiは広い範囲で影響を受ける。キャブタイヤケーブルは鉄骨梁やデッキプレート上に接触して配線されるため、キャブタイヤケーブルに電流が流れると、これらの鋼材は強い磁場に曝されることになる。さらに、スタッド溶接はフロア全面を対象として行われ、それに伴ってキャブタイヤケーブルは頻繁に移動するため、フロア全面に影響を及ぼす。

また炭酸ガス溶接とは、炭酸ガスで遮熱層を作って行う半自動アーク溶接で、柱と柱、柱と梁等、高い信頼性が要求される部位の接合に使われる。300～500Aの直流電流を連続的に流し、1箇所当たりに要する時間は数10分である。溶接機、キャブタイヤケーブル、溶接地点の関係はスタッド溶接と同様であるが、溶接箇所が限られており移動も頻繁には行われないことから、スタッド溶接に比べて影響は小さいものと思われる。

本調査では、スタッド溶接と炭酸ガス溶接を対象として、i～iiiの電磁気的作用の影響について溶接前後の鉄骨及びデッキプレートの残留磁気を計測することにより評価した。

まず、iについてはいずれもほとんど影響がなかった。アースをとった鉄骨は断面が大きく、電流が分散されて電流密度が小さいためと考えられる。

次に、iiについてはスタッド溶接実施直後の鉄骨梁及びスタッドボルト天端の残留磁気を計測して影響を評価した。計測法としては計測システムⅢ(3.5節)を適用し、計測器は三軸型ガウスメートル(THM7025:METROLAB)を用いた。図8.4.4に計測結果を示すが、鉄骨梁天端、スタッドボルト天端ともばらつきはあるが大きな残留磁気を帯びていることがわかる。ただし、その影響は局所的で、特にスタッドボルトは100mm離隔すると地磁気程度にまで減衰していた。一方、炭酸ガス溶接に関しては、柱の溶接面で計測を行ったが、ほとんど影響はなかった。

次に、iiiについては合成スラブである8階、及びフラットデッキ敷込の鉄筋コンクリート床である10階を対象として残留磁気を計測し、その影響を評価した。8階は6000mm×9000mmの基準スパン5つを対象として、デッキプレート敷込後、スタッド溶接後、コンクリート打設後に同一箇所でも磁場計測を行い、残留磁気の発生状況及び変遷を探った。なお、鉄骨梁はH型鋼、デッキプレートは合成スラブ用デッキ、スタッドボルトはφ19×100mm、溶接電流は1800A、通電時間は0.8秒である。計測法としては計測システムⅡ(3.5節)を適用し、計測器は三軸型ガウスメートル(MAG03-MC:Bartington)を用いた。プローブを非磁性のステンレス製スタンドに固定し、所定の位置に順次移動して計測を行った。計測点は、鉄骨梁の中心を基準に600mm間隔でメッシュを切り、その交点とした。計測点数は880点、計測高さは床上0mm、1000mmである。10階も同様であるが、こちらは鉄筋コンクリート床であるため、溶接金網の代わりに鉄筋が使われている。なお10階は、柱部材の炭酸ガス溶接が実施される階であるため、スタッド溶接実施前に炭酸ガス溶接後の計測も行った。

図8.4.5に8階床面の計測結果を示す。これは代表的な2スパンの結果で、床上1000mm面における磁束密度分布図である。それぞれ右下部に領域内での最大値、最小値、平均値を記している。これらを比較すると、まずデッキプレート敷込後では残留磁気が小さいことがわかる。地磁気に比べると若干大きい領域があるが、これは鉄骨梁とデッキプレートに予め存在している残留磁気の影響と思われる。次にスタッド溶接後では残留磁気が一気に大きくなり、左のスパンに磁場が非常に大きい領域がある。スタッド溶接直後の計測であるため、デッキプレート敷込後との差がスタッド溶接の影響と考えられる。最後にコンクリート打設後ではスタッド溶接後と比べて残留磁気の傾向は同じであるが、全体として約5%小さくなっている。原因としては、補強筋として設置された溶接金網の影響、その配筋及びコンクリート打設作業の影響、経時変化等が考えられる。ただし、その後は竣工時までほとんど変化はなかった。

なお10階では、デッキプレート敷込後に比べて炭酸ガス溶接後に残留磁気が平均24%増大していたが、その後のスタッド溶接で様相は一気に変わり、最終的には8階より残留磁気は小さめであった。

次に、壁面を対象とした調査を行った。電磁気的作用として炭酸ガス溶接が抽出されたが、溶接前後に鉄骨柱面で計測を行った結果、影響は認められなかった。

以上、鉄骨造の建設現場における残留磁気の発生原因としては、床面の鉄骨梁とデッキ

プレートにおけるスタッド溶接の影響が支配的であり、その他に炭酸ガス溶接と磁気誘導の影響があることが判明した。また、スラブ補強筋として使われる鉄筋は、直接的にはスタッド溶接の影響は受けないが、間接的には磁気誘導により影響を受けるものと思われる。

(2) 鉄筋コンクリート造

3つの建設現場で調査を行った。ここでは、最も規模の大きいマンションの調査結果を紹介する。この建物は鉄筋コンクリート造14階建で、ここで使用されている鉄筋は8.4.1項でリフマグ使用メーカーとして調査した電炉メーカー製である。

主に壁面を対象として設計図書、施工計画書等による事前調査、その後現地調査を行い、建設現場における電磁気的作用と機械的作用の洗い出しを行った。

その結果、電磁気的作用として以下の①、機械的作用として②、③が抽出された。

- ① 交流アーク溶接
- ② 切断
- ③ 曲げ加工

さらに、間接的要因として磁気を帯びた他の材料との接触における磁気誘導で残留磁気を帯びることも考えられる。

これまでの調査結果から、いずれも大きな影響はないものと思われるが、鉄筋の残留磁気の変遷を探る目的で調査を行った。調査は9階及び11階を対象として、躯体工事時と仕上げ工事時の2回行った。

躯体工事時の調査では、9階は型枠脱型後、11階は壁の鉄筋組立中であつた。まず、9階のコンクリート壁面全体を対象として計測システムIV(3.5節)で簡易計測を行った。計測器は三軸型ガウスメーター(THM7025:METROLAB)を用い、プローブを手にとって壁面に沿ってゆっくり移動しながらフロア全体の概略値を計測した。計測高さは、床上1000mmである。その後、11階の配筋が完了した部分を対象として鉄筋表面の計測を行った。

仕上げ工事時の調査でも、まず9階及び11階の全体を対象としてコンクリート壁面の簡易計測を行った。計測法は躯体工事時と同じである。次に、大きな磁場が検出されたところを中心に、計測システムII(3.5節)で壁面及び床面の分布計測を行った。計測点は300mm間隔を基準としてメッシュ状に設定した。さらに、11階の2住戸を対象として、各部屋毎に基準点計測を行った。これは、部屋毎に数箇所ずつ設けた基準点の計測から、部屋全体としての磁場環境を評価するものである。基準点は、局所的な残留磁気の影響が入らな

いように壁面から500mm以上離れた点とし、いずれも高さは床上1000mmである。計測器は一軸型ガウスメーター(HM-201:エムティアイ)で、X・Y・Z方向に盛り替えて3方向を計測し、それぞれ地磁気補正を行った。

結果として、躯体工事時の壁面簡易計測では、0.1mT以上の磁場が13か所で計測された。また、鉄筋表面の計測では、製造工場、加工工場と同様な残留磁気を検出された。結果の一例として、図8.4.6に11階西面の計測結果を示す。計測点毎に丸印の大きさと残留磁気の大きさを表している。鉄筋別では、D19の残留磁気が大きく、1本の鉄筋に対して1か所ずつ残留磁気が大きく領域が存在していた。これは、長さ8000mmの鉄筋をリフマグ2個で吊り上げた後、半分に切断したためと思われる。ただし、鉄筋表面で大きな残留磁気も離隔により距離減衰で一気に小さくなっていた。

次に、仕上げ工事時の壁面簡易計測でも0.1mT以上の磁場が9階で5か所、11階で6か所計測されたが、躯体工事時に比べて小さくなっていた。これは、断熱処理を含む仕上げ層による距離減衰効果と考えられる。分布計測では、残留磁気の大きい領域が特定できたが、壁面から200mm離隔すると問題のないレベルにまで減衰していた。また、基準点計測では最大値36.9 μ T、最小値5.4 μ T、平均値18.8 μ Tであつた。

ここで、対照的な事例として、リフマグを使用していない鉄筋を用いたマンションの調査結果を紹介する。この建物は鉄筋コンクリート造4階建で、ここで使用されている鉄筋は8.4.1でリフマグ非使用メーカーとして調査した電炉メーカー製である。先程の事例の仕上げ工事時と同様な調査を行った結果、壁面簡易計測で0.1mT以上の磁場は検出されなかった。また、基準点計測では最大値31.1 μ T、最小値1.9 μ T、平均値10.2 μ Tであつた。

2つの事例を比較すると、リフマグの影響を評価できる。壁面簡易計測では、リフマグの影響が明らかに出ています。一方、基準点計測ではリフマグ使用鉄筋を用いたマンションでも比較的小さい値を示した。これは基準点が壁面から離れているからで、壁面簡易計測の結果と合わせると、鉄筋コンクリート造の建物において残留磁気が問題となるのは、リフマグ使用鉄筋を用いた際の壁面近傍のみということになる。

以上、鉄筋コンクリート造の建設現場では、リフマグ使用鉄筋に残留磁気認められるが、これは建設現場における発生原因ではない。建設現場に限定すると鉄筋に対して大きな発生原因はなかった。加工工場同様、切断と磁気誘導の影響が考えられる程度である。

8.4.4 発生原因の絞り込み

鉄骨、鉄筋、デッキプレートを取り上げ、製造工場、加工工場、建設現場の工程毎に残留磁気の発生原因を調査した。結果をまとめたものを表 8.4.11 に示す。

これらを総合的に分析した結果、次の 2 点が主な発生原因として絞り込まれた。

I. 鉄骨、鉄筋：製造工場（一部、加工工場）で使用されるリフマグ

II. デッキプレート：建設現場で実施されるスタッド溶接

（正確に言えば、溶接時にキャブタイヤケーブルに流れる電流）

これらは、表 8.4.11 中にアンダーラインで示している。

なお、鉄骨構造物では、鋼材として溶接金網、スタッドボルト、高張力ボルトも使われる。今回の障害発生地点周辺にも存在していた。しかし別途行った調査で、溶接金網は製造・加工時点でリフマグが使われないこと、建設現場での敷込みはスタッド溶接後であることがわかった。また、スタッドボルトは鋳造品であるため製造時点では残留磁気を帯びていない。その後、8.4.3 項で述べたようにスタッド溶接時に電流が流れて残留磁気を帯びるが、その影響は局所的である。また、高張力ボルトは加工後熱処理を施すため残留磁気はなくなる。以上のことから、溶接金網、スタッドボルト、高張力ボルトは今回の対象から外している。

表 8.4.11 残留磁気の発生原因

	製造工場	加工工場	建設現場
鉄 骨	- リフティングマグネット - 切断 - 磁気誘導	- リフティングマグネット - 切断 - マグネット工具 - 炭酸ガス溶接 - 磁気誘導	- スタッド溶接 - 炭酸ガス溶接 - マグネット工具 - 磁気誘導
鉄 筋	- リフティングマグネット - 切断 - 磁気誘導	- 切断 - 磁気誘導	- 切断 - 磁気誘導
デッキプレート	- マグロール自動搬送 - リフティングマグネット - 切断 - 磁気誘導		- スタッド溶接 - 炭酸ガス溶接 - 磁気誘導

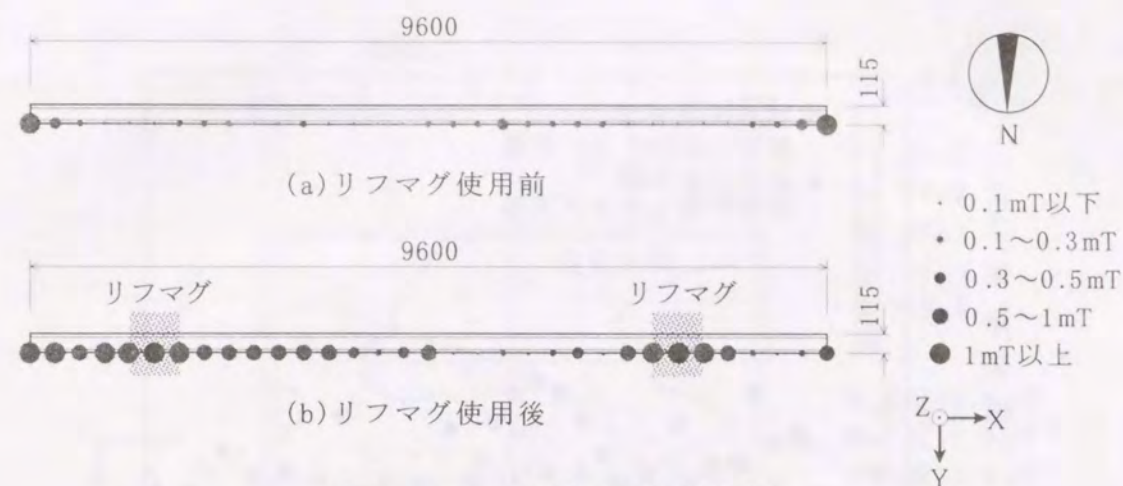


図8.4.1 I形鋼の残留磁気

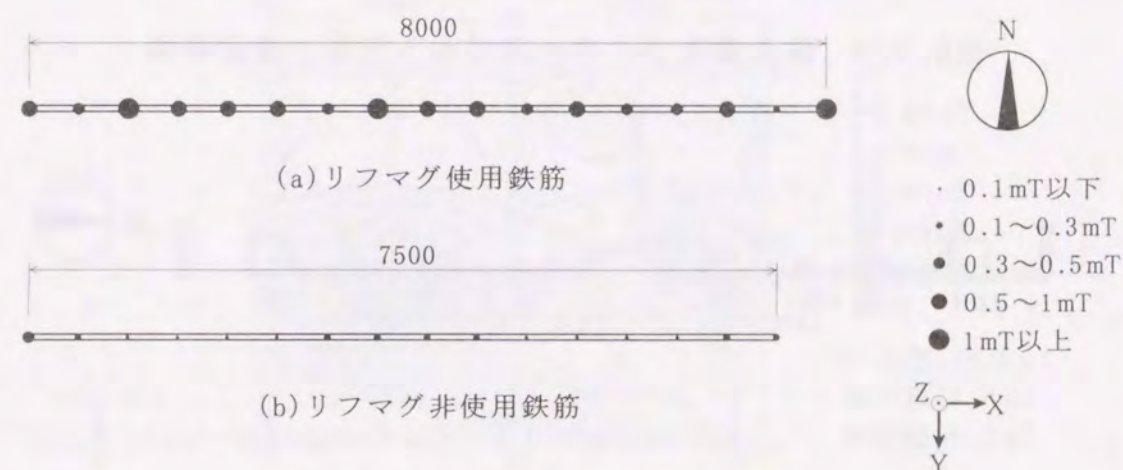


図8.4.2 D16鉄筋の残留磁気

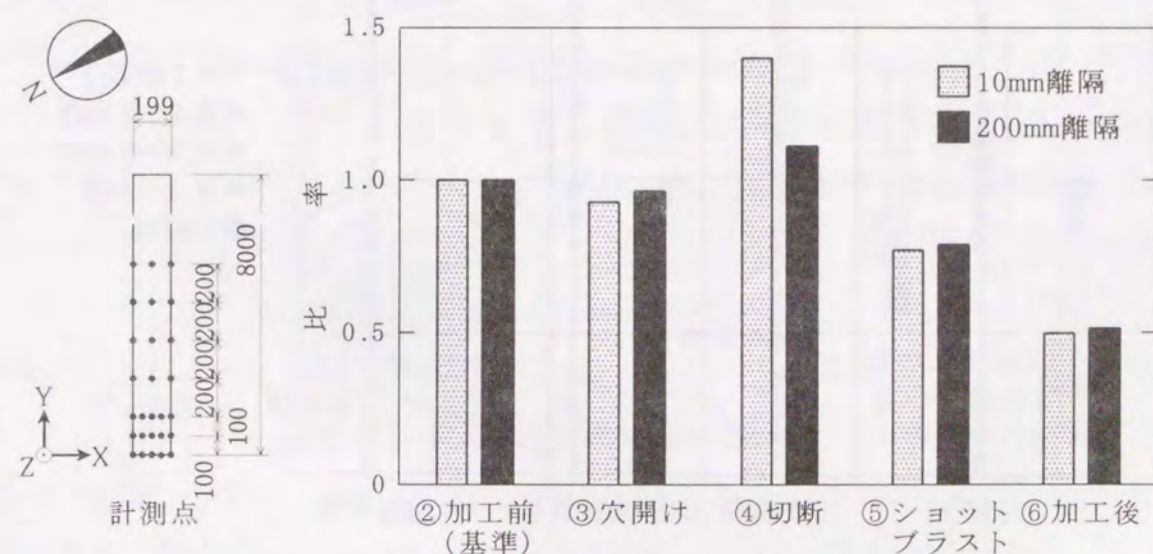


図8.4.3 鉄骨加工工程における残留磁気の変遷

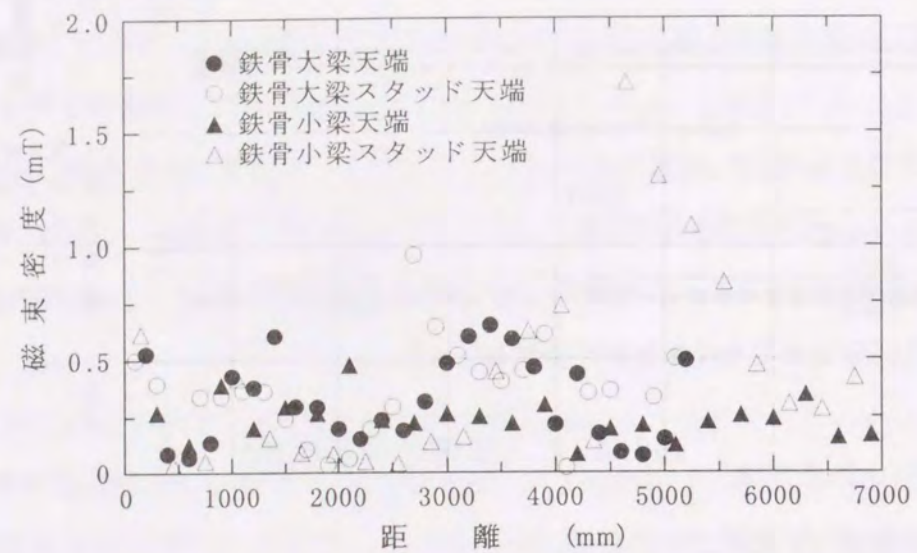


図8.4.4 鉄骨梁及びスタッドボルト天端の残留磁気

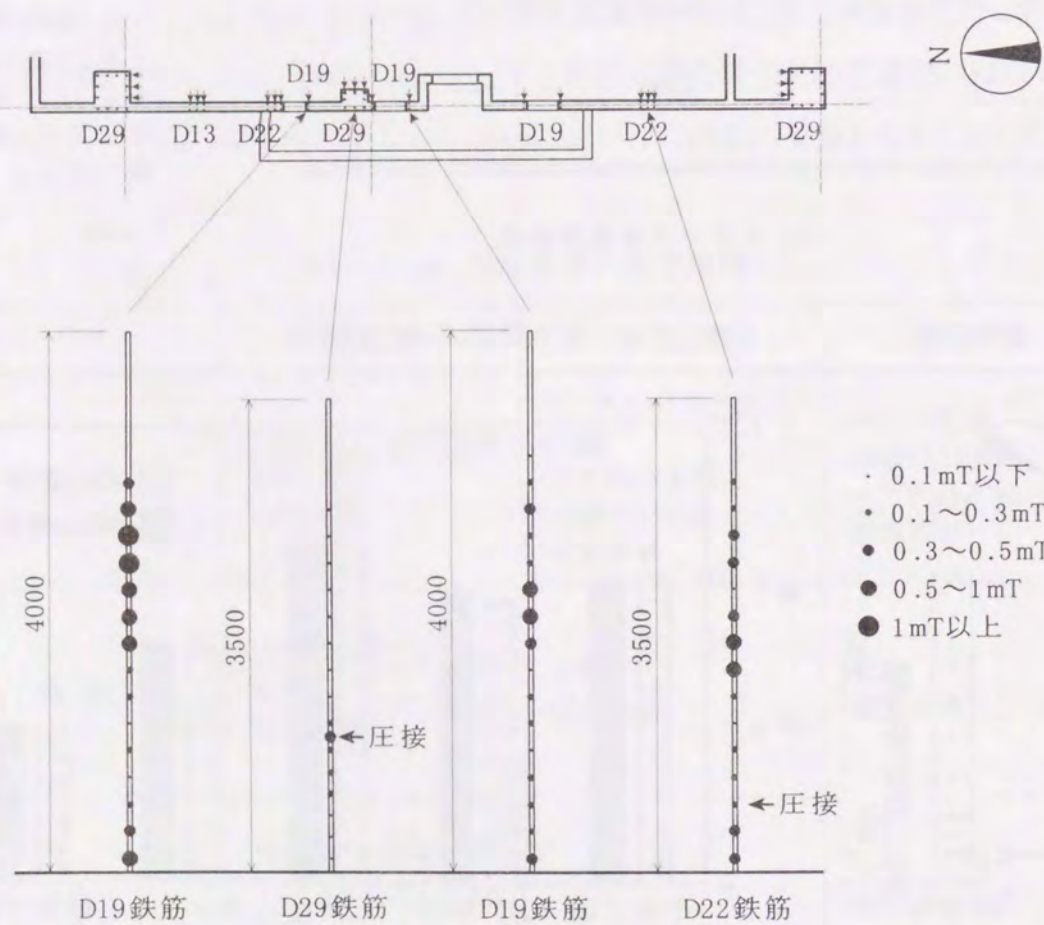


図8.4.6 鉄筋表面の残留磁気

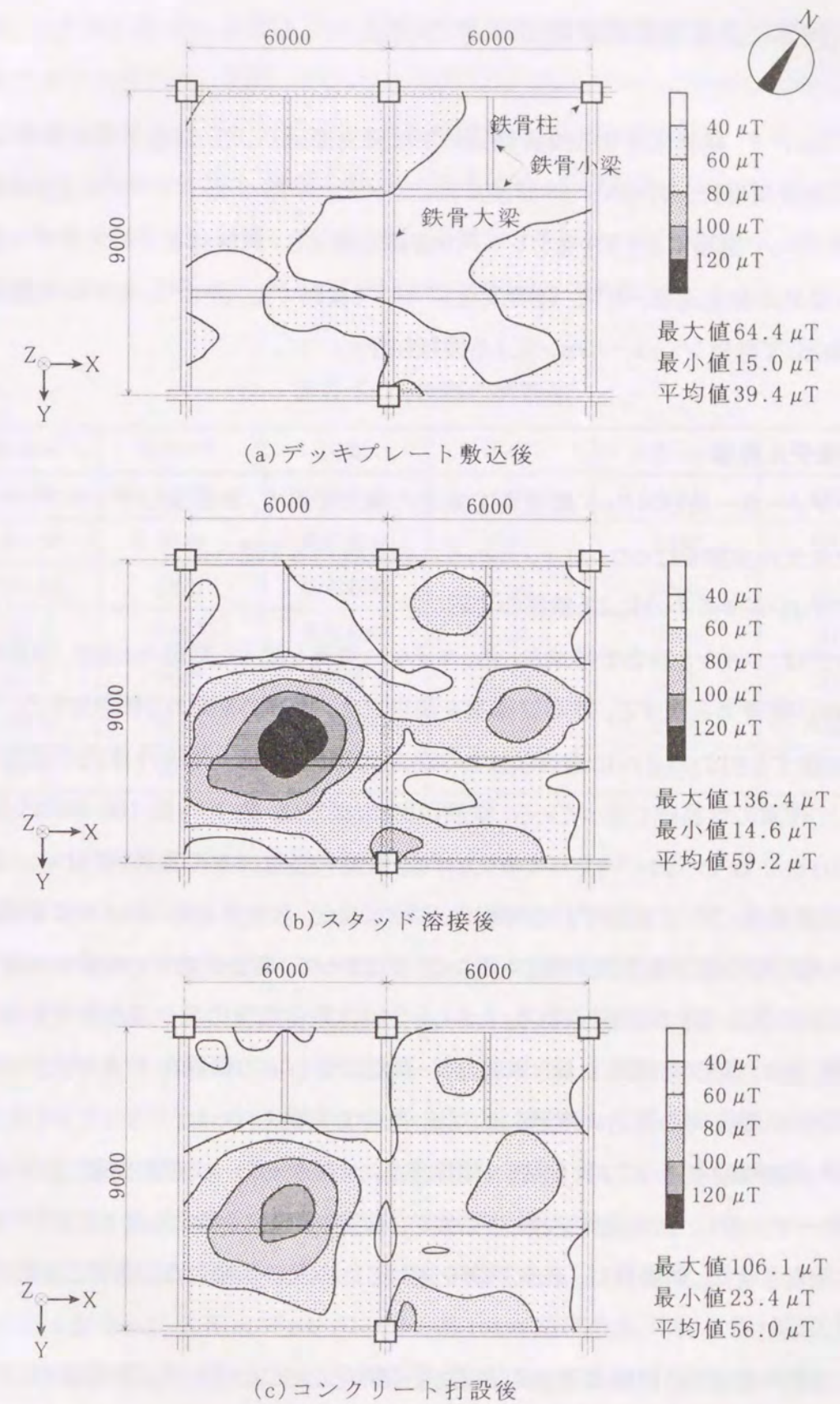


図8.4.5 8階床面の磁束密度分布図

8.5 試験体による残留磁気着磁現象の検証

前節において、鋼材に対する残留磁気の主な発生原因として、製造工場におけるリフマグ、及び建設現場におけるスタッド溶接が抽出された。本節では、リフマグによる鉄筋の着磁、及びスタッド溶接によるデッキプレートに着磁に着目し、試験体を用いたモデル実験により残留磁気の発生過程、性状、経時変化について検討する。併せて、モデル実験の試験体を対象として数値シミュレーションによる検証も行う。

8.5.1 モデル実験

リフマグメーカー及びスタッド溶接施工業者の協力を得て、鉄筋及びデッキプレートを対象としたモデル実験を行った。以下、それぞれの実験内容を述べる。

(1) リフティングマグネットによる鉄筋の着磁

リフマグは、コイルと鉄心で構成される。コイルに電流を流すと電磁石となり、強磁性体に対して強い吸着力を発する。鉄心は磁束を集中させ、吸着力を高める働きをする。強磁性体を切り離すときは、コイルに適当な強さの逆方向電流を流し、強磁性体内の残留磁気を小さくして作業の容易化を図っている。鉄筋用リフマグでは、数 10～数 100 本の鉄筋束(重量 2～3t)を 2 台でバランスをとって吊り上げる。鉄筋の揚重作業は複数回行われ、鉄筋とリフマグの接触ポイントは毎回ずれる可能性がある。また、状況に応じてコイルに通電する電流や切り離し時の逆方向電流の強さも異なる。したがって、履歴に応じて鉄筋の残留磁気は複雑に分布しているものと考えられる。しかし、今回は残留磁気の発生過程を定量的に把握するため、他の要因を排除した最も単純なケースとして 1 本の鉄筋を 1 台のリフマグで吊り上げ、また切り離し時の逆方向電流も流さない条件で実験を行った。

鉄筋の試験体を表 8.5.1 に示す。いずれもリフマグメーカーの工場で長さ 2000mm に鉄筋カッターで切断し、磁気焼鈍を施して鉄筋内部の残留磁気を除去した上で、リフマグを中央部に接触させた。試験体は、磁気誘導を避けるため互いに触れないように注意して実験室に搬入した。

残留磁気の評価は、試験体周辺の磁場を計測することにより行った。計測法としては計測システムⅡ(3.5節)を適用し、計測器は三軸型ガウスメートル(9903:F.W.BELL)を用いた。試験体を非磁性の木製実験台の上に固定し、ステンレス製スタンドに固定したプローブを順

次移動して計測を行った。計測面を図 8.5.1 に示す。これは鉄筋の軸方向センター面で、計測点は水平方向 50mm 間隔、鉄筋からの離隔距離 0mm, 50mm, 100mm, 200mm の交点とした。計測点数は 144 点である。リフマグ接触面を G 面とし、反対側の H 面、中間の I・J 面も計測した。各面の計測は、鉄筋を軸回りに回転させ、計測面を上に向けて行った。

なお、計測は地磁気の影響を抑えるため、磁気シールドルーム内で行った。計測場所周辺の環境磁場はほぼ均一で、約 5 μ T(地磁気の約 1/10)である。

表 8.5.1 鉄筋の試験体

試験体No.	リフマグ	分類	サイズ	長さ(mm)	材質
L-SB-A1	使用	異形鉄筋	D25	2000	SD390
L-SB-A2	使用	異形鉄筋	D25	2000	SD390
L-SB-A3	使用	異形鉄筋	D25	2000	SD390
L-SB-B	非使用	異形鉄筋	D25	2000	SD390
L-SB-C	使用	異形鉄筋	D19	2000	SD390
L-SB-D	使用	異形鉄筋	D13	2000	SD295A
L-SB-E	使用	異形鉄筋	D10	2000	SD295A

(2) スタッド溶接によるデッキプレートの着磁

デッキプレートの試験体を表 8.5.2 に示す。対象のデッキプレートは、合成スラブ用デッキとフラットデッキの 2 種類である。いずれもデッキプレート製造工場で長さ 1000mm に切断し、実験室に搬入して残留磁気を計測した後、スタッド溶接施工業者の工場で行った。切断はプレスカットにより行い、磁気焼鈍は施していない。試験体の所定の位置にスタッド溶接用キャブタイヤケーブルを直線状に設置し、溶接を行って所定の電流を通電した。電流の条件は、電流の方向、電流の強さ、通電時間、通電回数である。試験体は、磁気誘導を避けるため互いに触れないように注意して実験室に搬入した。

残留磁気の評価法は、前述のリフマグ実験と同様である。計測面は、図 8.5.2 に示す K・L・M・N の 4 面である。K 面はデッキプレートから 10mm 離隔の水平面、L 面は同じく 200mm 離隔の水平面である。ここに、100mm 間隔を基準としてメッシュ状に計測点を設定した。また、M 面は長さ方向の垂直面、N 面は幅方向の垂直面で、計測点は水平方向 100mm 間隔、デッキプレートからの離隔距離 10mm, 100mm, 200mm の交点とした。

なお計測は、前述のリフマグ実験同様、磁気シールドルーム内で行った。

表 8. 5. 2 デッキプレートの試験体

試験体No.	分類	電流の方向	電流の強さ	通電時間	通電回数
L-DP-A	合成スラブ用デッキ	幅方向	1800A	1.2 秒	1 回
L-DP-B	合成スラブ用デッキ	幅方向	1800A	1.2 秒	3 回
L-DP-C	合成スラブ用デッキ	幅方向	1800A	1.2 秒	5 回
L-DP-D	合成スラブ用デッキ	幅方向	1800A	0.8 秒	1 回
L-DP-E	合成スラブ用デッキ	幅方向	1200A	1.2 秒	1 回
L-DP-F	合成スラブ用デッキ	長さ方向	1800A	1.2 秒	1 回
L-DP-G	合成スラブ用デッキ	長さ方向	1200A	1.2 秒	1 回
L-DP-H	フラットデッキ	幅方向	1800A	1.2 秒	1 回
L-DP-I	フラットデッキ	幅方向	1800A	1.2 秒	3 回
L-DP-J	フラットデッキ	幅方向	1800A	1.2 秒	5 回
L-DP-K	フラットデッキ	幅方向	1800A	0.8 秒	1 回
L-DP-L	フラットデッキ	幅方向	1200A	1.2 秒	1 回
L-DP-M	フラットデッキ	長さ方向	1800A	1.2 秒	1 回
L-DP-N	フラットデッキ	長さ方向	1200A	1.2 秒	1 回

8. 5. 2 磁場数値解析

モデル実験で製作したリフマグ着磁鉄筋、及びスタッド溶接着磁デッキプレートの試験体を対象として、残留磁気の数値シミュレーションによる検証を行った。数値解析は、三次元磁場解析プログラム ELF/MAGIC⁶⁾をベースとして、磁性材料のヒステリシス性を加味したものを適用した。以下、それぞれの解析手順を述べる。

(1) リフティングマグネットによる鉄筋の着磁

鉄筋は、D25(L-SB-A)を対象とした。また、リフマグはモデル実験で使用したものをモデル化した。

図 8. 5. 3 に解析モデルを示す。これは、磁性体要素(リフマグの鉄心部:358 要素、鉄筋:92 要素)と電流要素(リフマグのコイル部:4 要素)から構成されている。まず、電流要素に電流 45500AT(20A×2275T)を入力し、磁性体内部の磁束密度を求める。リフマグの鉄心材である SS400、及び鉄筋材である SD390 は非線形特性を有し、図 8. 5. 4 にそれらの B-H 曲

線を示す。これは、別途実験(付録 1. 参照)により得られた実測値で、計測点間は線形補間する。

次に、磁性材料の B-H 特性から磁性体要素(鉄筋:92 要素)内部の残留磁気を計算する。これは、図 8. 5. 4 に示すように、ヒステリシス曲線から磁場の強さに対応した残留磁気 B_r と保磁力 H_c を要素毎に求めるものである。リフマグ着磁時に磁気飽和に達したときを $B_r = 0.926(T)$ 、 $H_c = -286(A/m)$ としている。

最後に、残留磁気を有する磁性体を磁石と仮定し、磁石要素(鉄筋:92 要素)を磁性体要素(鉄筋:92 要素)に重ねて設定して評価面の空間磁場を求める。磁石要素の減磁特性を図 8. 5. 4 の第 2 象限に示す。これはリフマグ着磁時に磁気飽和に達したときのデータで、それ以下では残留磁気 B_r に比例した値を入力する。

(2) スタッド溶接によるデッキプレートの着磁

デッキプレートは、これまでの調査で影響の大きいことが判明している合成スラブ用デッキを対象とした。また、スタッド溶接の電流の強さは 1800A、電流の方向は幅方向(L-DP-A)及び長さ方向(L-DP-F)とした。

図 8. 5. 5 に解析モデルを示す。これは、電流を幅方向に流したモデルで、磁性体要素(デッキプレート:288 要素)と電流要素(キャブタイヤケーブル:1 要素)から構成されている。まず、電流要素に電流 1800A を入力し、磁性体内部の磁束密度を求める。デッキプレート材の B-H 曲線は、図 8. 5. 4 の SD390 のものを利用した。

その後の残留磁気及び空間磁場の計算手順は、磁性体要素(デッキプレート:288 要素)及び磁石要素(デッキプレート:288 要素)が異なる点を除き、リフマグ解析と同様である。

8. 5. 3 実験、解析結果及び比較検討

(1) リフティングマグネットによる鉄筋の着磁

まず、モデル実験の結果を述べる。図 8. 5. 6 に D25 鉄筋(L-SB-A1, L-SB-A2, L-SB-A3)G 面の鉄筋から 0mm 離隔位置における磁束密度比較図(全磁力, Z 方向)を示す。リフマグ着磁前(L-SB-B)の結果も併記している。リフマグ接触により全体が大きく磁化されていること、鉄筋端部とリフマグ接触面が磁極となり、その極性は交互に入れ替わっていることがわかる。

また、図 8. 5. 7 にサイズ別試験体(L-SB-A1, L-SB-C, L-SB-D, L-SB-E)G 面の鉄筋か

ら 0mm, 200mm 離隔位置における磁束密度比較図(全磁力)を示す。鉄筋の残留磁気は径が太いほど大きく、特に鉄筋から離れたときにその影響が大きいことがわかる。

また、図 8. 5. 8 に D25 鉄筋(L-SB-A1)の軸方向センター垂直面(G・H 面)及び水平面(I・J 面)における磁束密度ベクトル図を示す。面による差はほとんどなく、リフマグ接触部と鉄筋端部を磁極とした 4 本の棒磁石を繋いだ形に磁化されていることがわかる。

次に、数値解析結果と計測値の比較検討を行う。図 8. 5. 9 に D25 鉄筋(L-SB-A1)G 面の鉄筋から 50mm, 200mm 離隔位置における磁束密度比較図(全磁力, Z 方向), 図 8. 5. 10 に評価面(G・H 面)における磁束密度分布図を示す。中央部で解析値が小さめに評価されているが、その他では良く一致している。また、磁束の方向も良く一致している。これは、このようなモデルが磁場の発生源である鉄筋の残留磁気及び空間磁場の性状(強さ, 方向)を良く表現できるということであり、その有効性が示された。

(2) スタッド溶接によるデッキプレートの着磁

まず、モデル実験の結果を述べる。電流の方向の影響評価として、図 8. 5. 11 に L-DP-A (幅方向)M 面, L-DP-F(長さ方向)N 面における磁束密度ベクトル図を示す。デッキプレートは電流により印加された磁場に従って、右ねじ方向(図 8. 5. 11 では、電流の向きが紙面から外に出る方向であるため、左回りになっている。)でほぼ同心円状の残留磁気特性を示すが、水平方向の距離減衰はほとんどないことがわかる。特に、L-DP-A(幅方向)のデッキプレート近傍では端部が磁極になり、端部に行くに従って逆に磁場が大きくなっている。電流の方向の比較では、幅方向に通電した方が全体的に大きな磁場を示した。この傾向は、フラットデッキでも同様であった。

また、電流の強さの影響評価として、図 8. 5. 12 に幅方向に通電した試験体(L-DP-A, L-DP-E, L-DP-H, L-DP-L)M 面のデッキプレートから 10mm, 200mm 離隔位置における磁束密度比較図(全磁力)を示す。L-DP-A の溶接前の結果も併記している。合成スラブ用デッキ、フラットデッキともスタッド溶接により全体が大きく磁化されていること、電流が強いほど残留磁気も大きいこと、デッキプレートの種類の比較では合成スラブ用デッキの方が大きいことがわかる。また、図 8. 5. 7 との比較では、デッキプレートは鉄筋と比べて離隔による距離減衰が小さいことがわかる。なお、通電時間と通電回数の影響はほとんどなかった。

次に、数値解析結果と計測値の比較検討を行う。図 8. 5. 13 に合成スラブ用デッキ(L-DP-A)評価面(M 面)のデッキプレートから 10mm, 200mm 離隔位置における磁束密度比較

図(全磁力, Z 方向), 図 8. 5. 14 に評価面(M 面)における磁束密度分布図を示す。いずれも傾向は良く一致しているが、解析値の方が全体的に小さくなっている。これは、磁場の発生源であるデッキプレートの残留磁気小さく評価されているということであり、スタッド溶接前からデッキプレートに存在していた残留磁気の影響を考慮していないためと考えられる。

8. 5. 4 残留磁気の経時変化

前述のモデル実験で残留磁気を帯びさせた鉄筋及びデッキプレートの試験体を用いて、残留磁気の経時変化測定を 1 年間継続して行った。試験体は一般空調環境の実験室内に試験体同士が接触しないように配慮して保存した。

表 8. 5. 3 に D25 鉄筋(L-SB-A), 合成スラブ用デッキ(L-DP-A), フラットデッキ(L-DP-H)の測定結果を示す。これは、リフマグ及びスタッド溶接による着磁直後を基準として、測定毎に同一点での比率を求め、その平均値を記したものである。1 年を通してほとんど変わっていないことがわかる。

残留磁気の経時変化に関しては、8. 4. 3 項で紹介した鉄骨造の事務所ビルでも継続的な計測を行った。コンクリート打設から 1 年弱経過した建物竣工直前に図 8. 4. 5 と同一場所で計測を行った結果、コンクリート打設後とほとんど変わっていなかった。すなわち、残留磁気は電磁気的作用、機械的作用を受けたときのみ変化し、その意味では建物竣工後はほとんど変化しないものと思われる。

表 8. 5. 3 鉄筋及びデッキプレートの残留磁気経時変化

時期 種類		着 磁 前	着 磁 直 後	1 週 間 後	4 週 間 後	13 週 間 後	26 週 間 後	52 週 間 後
D25 鉄筋	±0mm	0.073	1.000	0.972	0.968	0.966	0.965	0.963
	+200mm	0.208	1.000	0.987	0.979	0.975	0.973	0.972
合成 デッキ	±0mm	0.276	1.000	0.997	0.978	0.976	0.977	0.975
	+200mm	0.339	1.000	1.024	0.971	0.967	0.977	0.975
フラット デッキ	±0mm	0.351	1.000	1.014	1.008	0.999	0.998	0.997
	+200mm	0.307	1.000	1.025	1.028	1.015	1.008	1.006

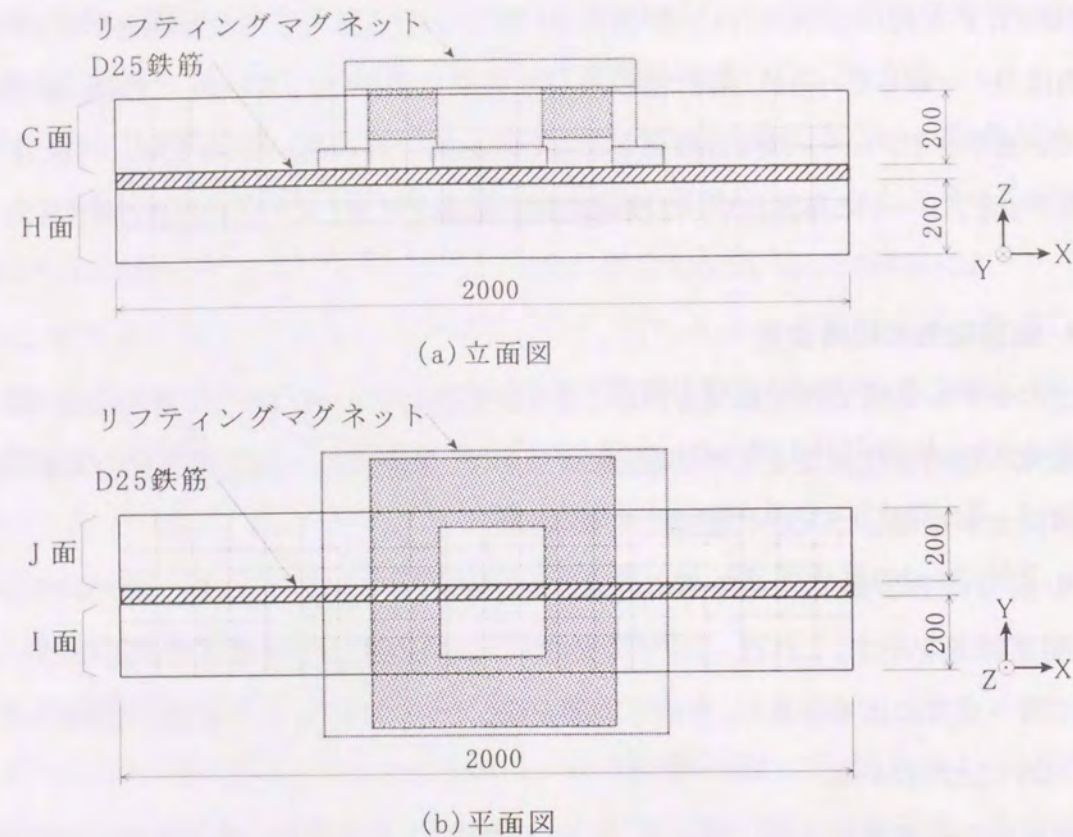


図8.5.1 鉄筋の計測面

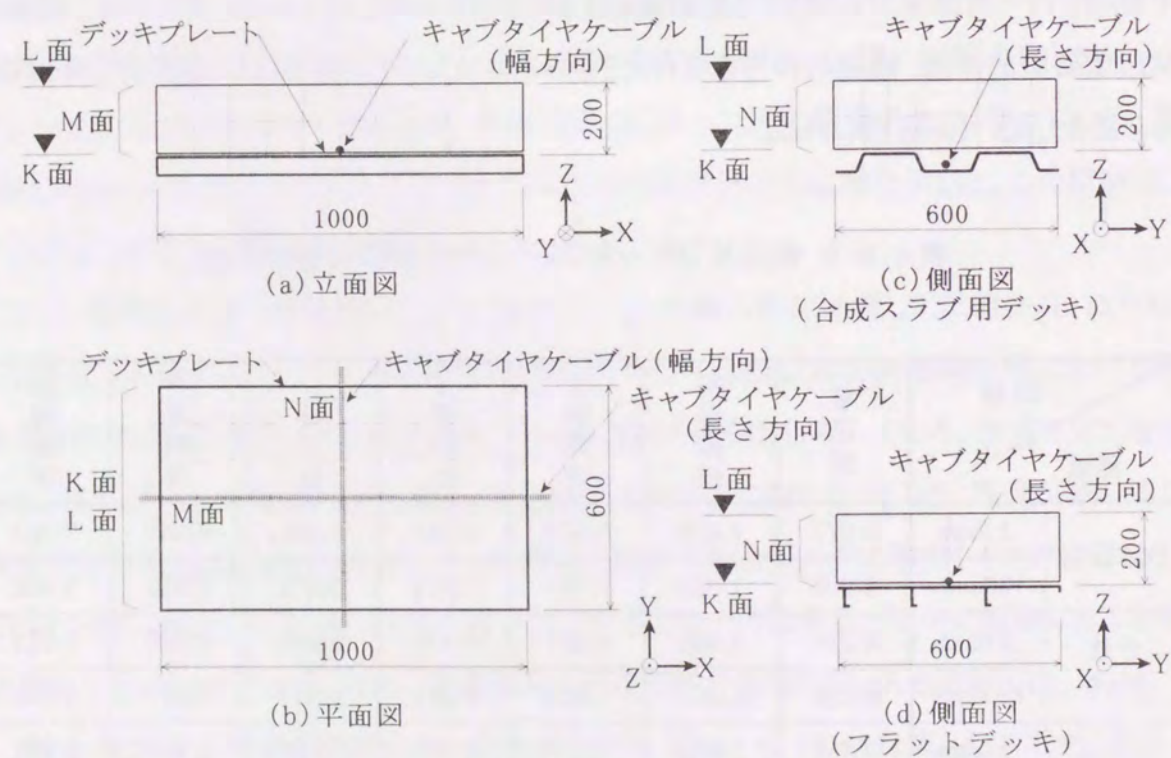


図8.5.2 デッキプレートの計測面

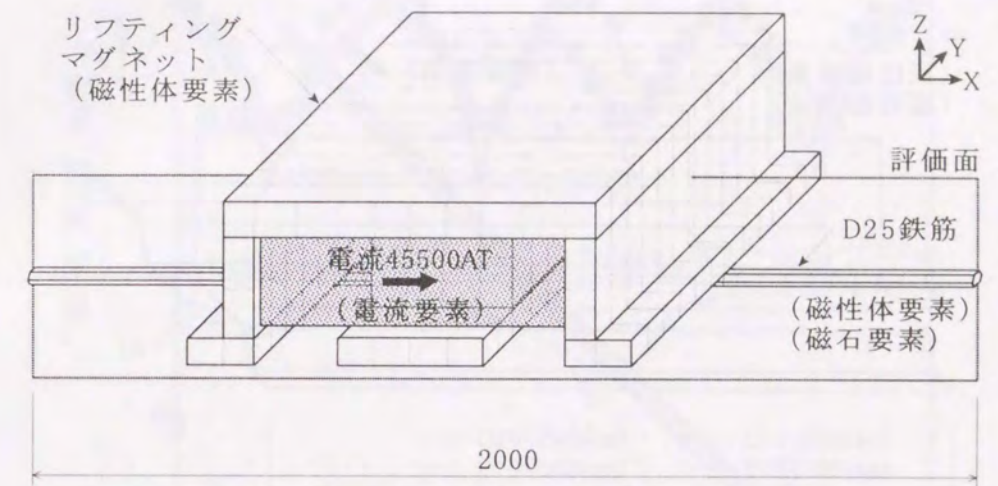


図8.5.3 鉄筋の解析モデル

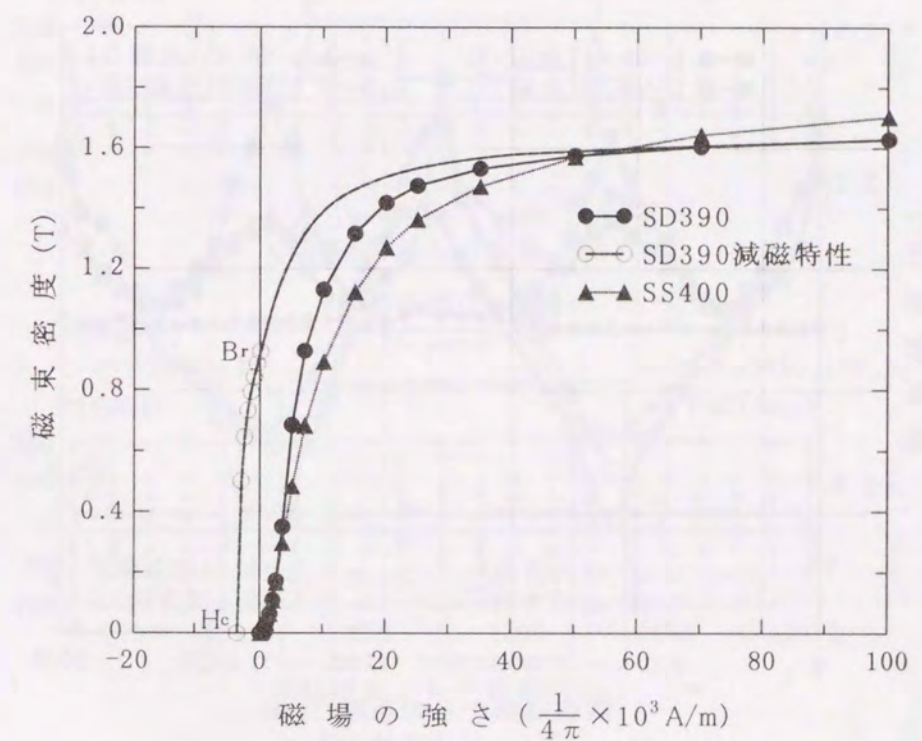


図8.5.4 磁性材料のB-H曲線

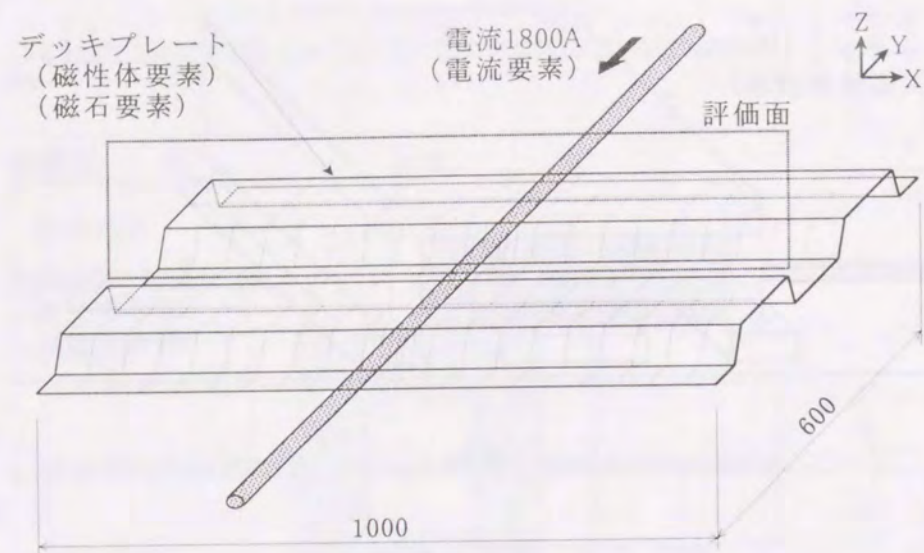


図8.5.5 デッキプレートの解析モデル

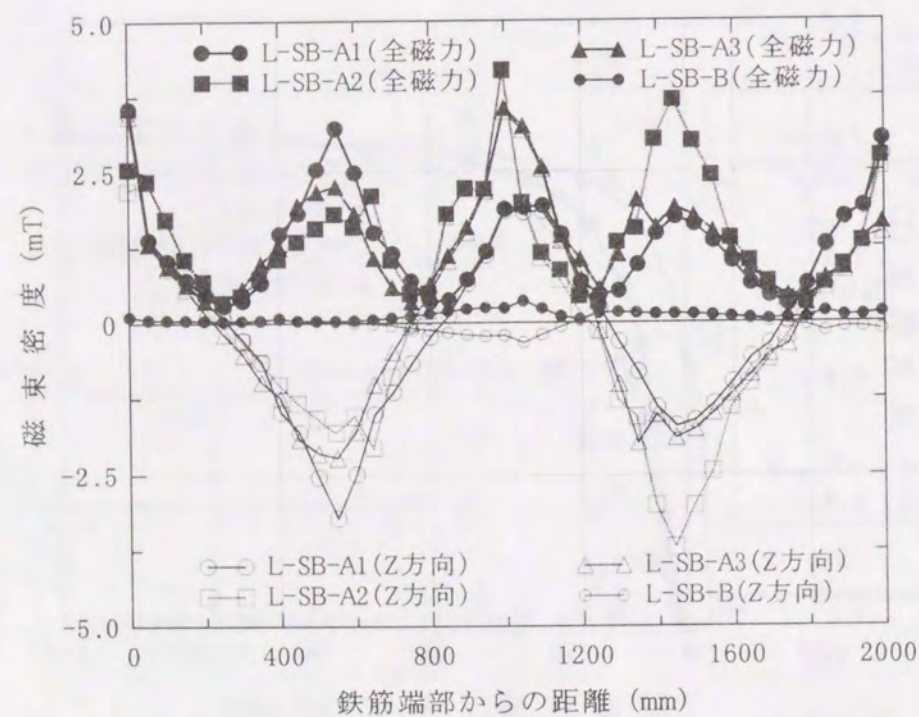


図8.5.6 D25鉄筋の磁束密度比較図

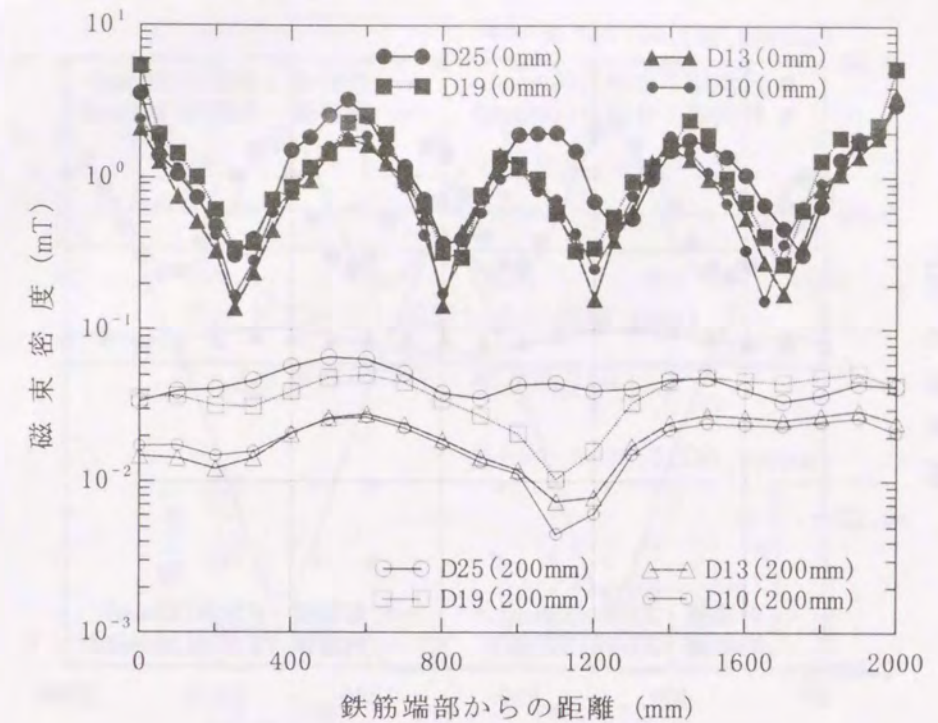
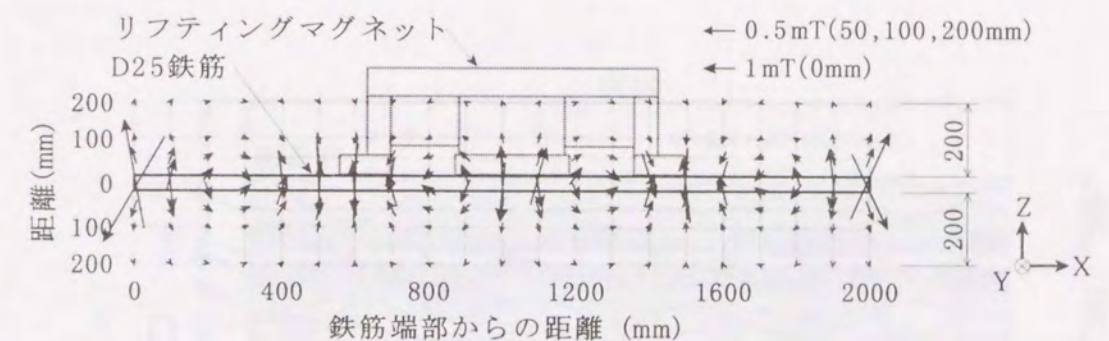
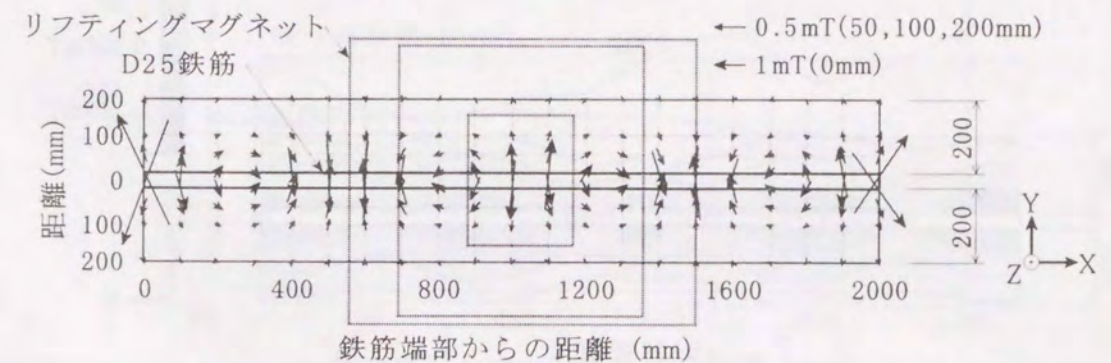


図8.5.7 各種鉄筋の磁束密度比較図



(a) 垂直面(G・H面)



(b) 水平面(I・J面)

図8.5.8 D25鉄筋の磁束密度ベクトル図

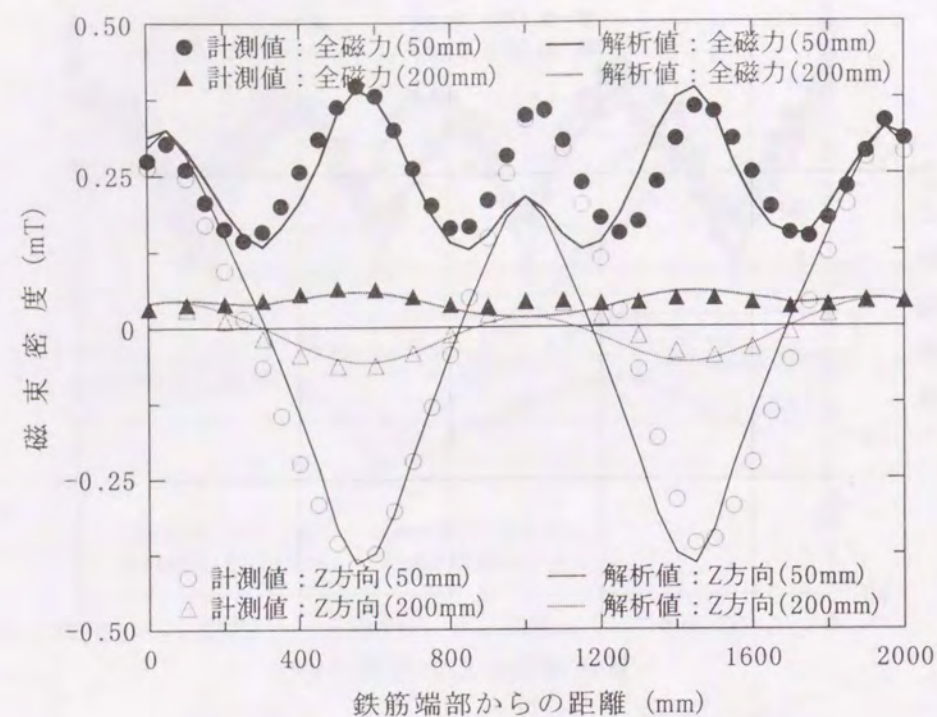


図8.5.9 計測値と解析値の比較：D25鉄筋の磁束密度比較図

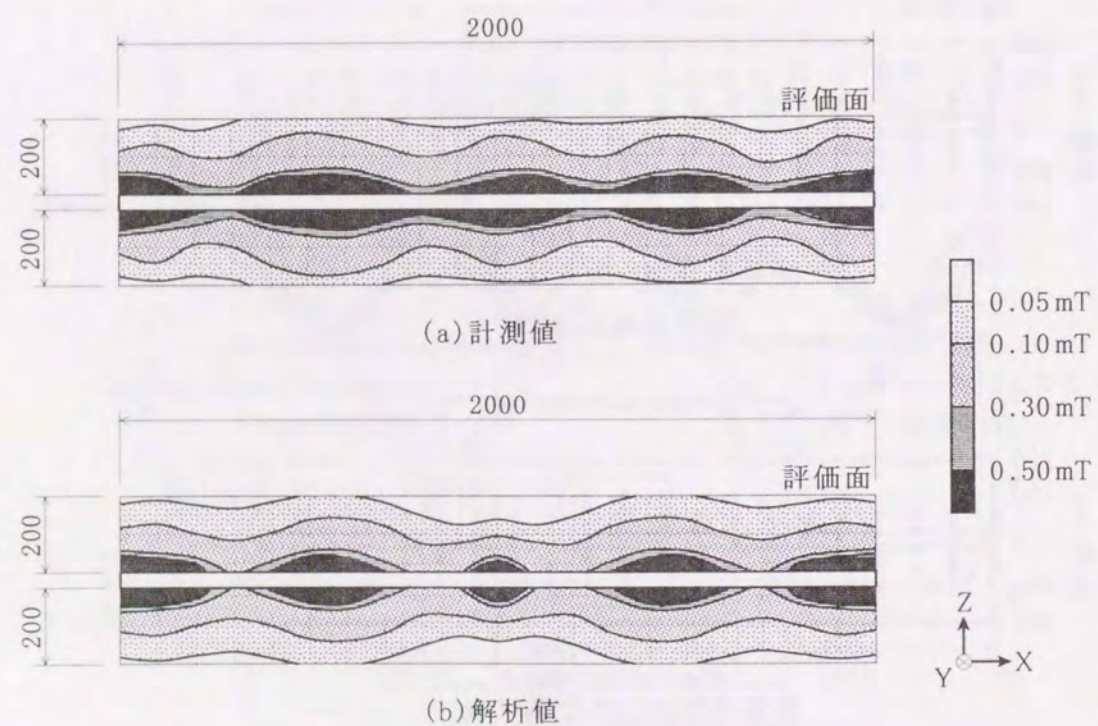
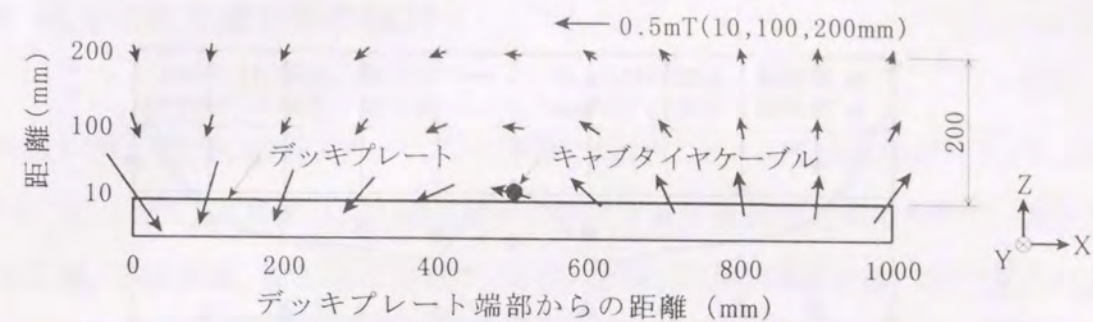
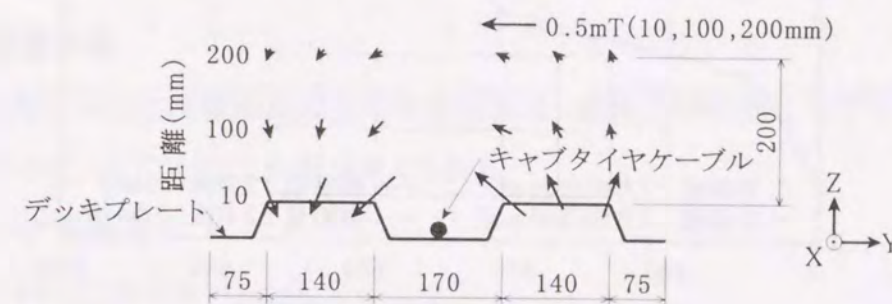


図8.5.10 計測値と解析値の比較：D25鉄筋の磁束密度分布図



(a) 電流の方向：幅方向(M面)



(b) 電流の方向：長さ方向(N面)

図8.5.11 合成スラブ用デッキの磁束密度ベクトル図

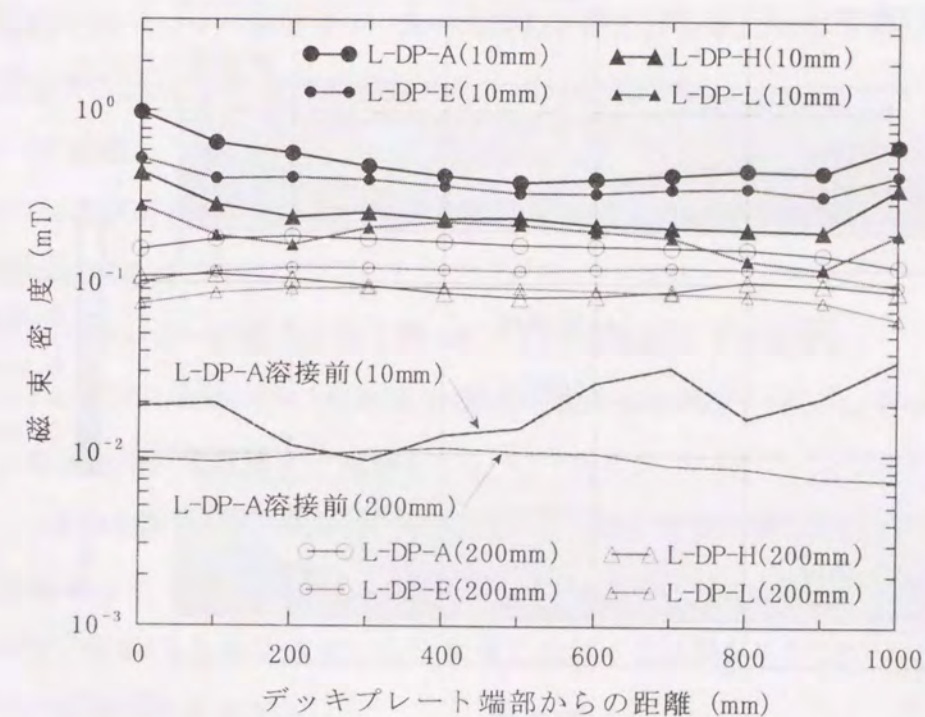


図8.5.12 デッキプレートの磁束密度比較図

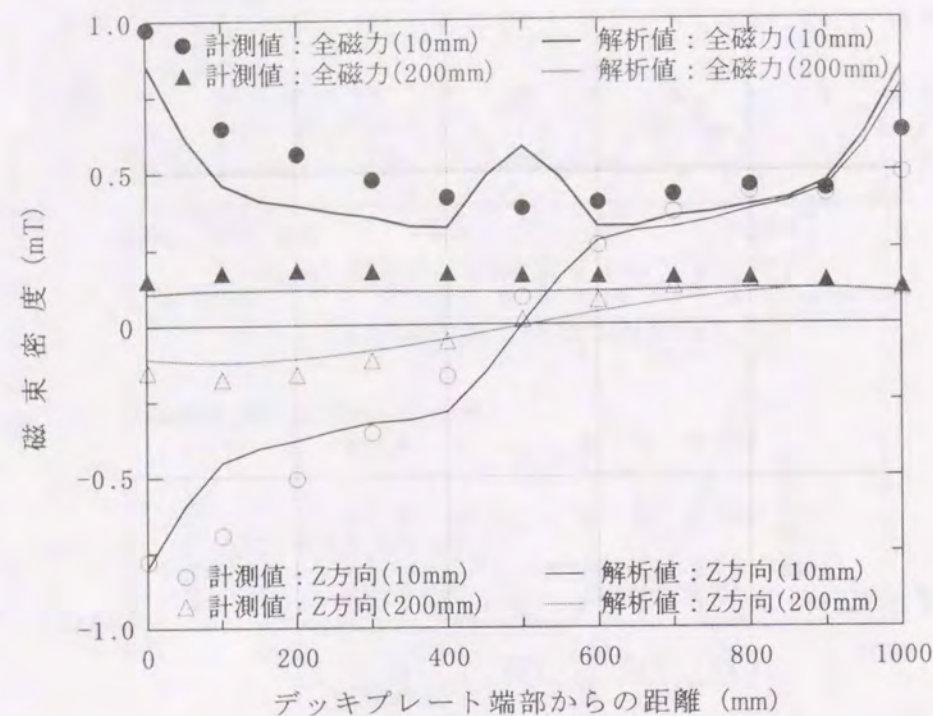


図8.5.13 計測値と解析値の比較：合成スラブ用デッキの磁束密度比較図

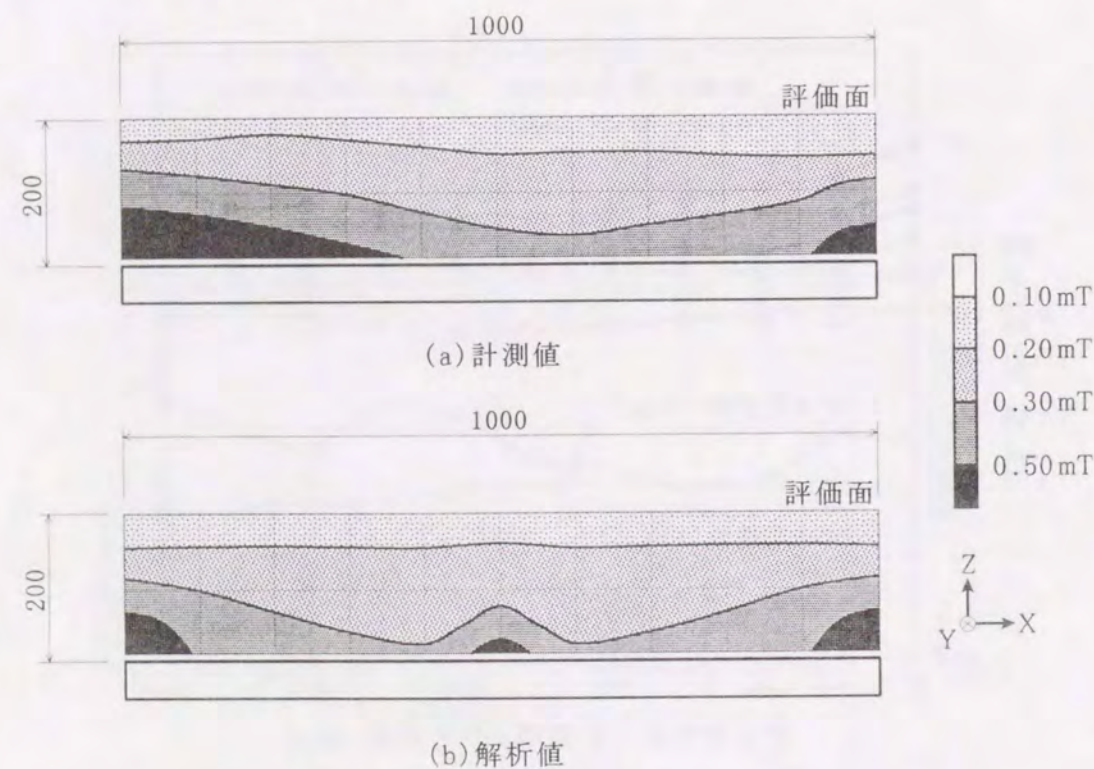


図8.5.14 計測値と解析値の比較：合成スラブ用デッキの磁束密度分布図

8.6 残留磁気低減対策の検討

前節までに、鉄骨、鉄筋、デッキプレート等の鋼材における残留磁気発生メカニズムを明らかにしてきた。本節では、残留磁気を低減化する具体的な対策について、製造工場、加工工場、建設現場、竣工後に分けて、方法、原理、効果、課題を述べる。これらは全て、実際の建物や実験で効果を確認したものである。

8.6.1 製造工場

製造工場における残留磁気の主な発生原因は、鉄骨及び鉄筋に対するリフマグの使用である。よって、以下のような対策が考えられる。

(1) リフマグ非使用

方法：ワイヤによる玉掛けを行う。

原理：残留磁気を発生させない。

効果：リフマグによる着磁がなくなる。(8.4.1項参照)

課題：鉄骨では、ワイヤ掛けにすると作業効率が落ち、コストアップに繋がる。

鉄筋では、リフマグ非使用メーカーの鉄筋を使えば簡単に対応できるが、メーカーを限定することになり、また工場省力化の流れに逆行する。

(2) リフマグ消磁

方法：リフマグ使用直後、リフマグのコイルに減衰交番電流を流す。

原理：残留磁気を消し去る。

効果：リフマグメーカーの協力を得て行った実験の結果を以下に示す。

コイルに20A→0A, 15パルス, 2秒間隔で減衰交番電流を流した。もっと周波数の高い電流を用いて短時間で減衰させるべきであるが、コイルのインダクタンスの関係でこの条件を設定した。実験は、D19鉄筋(L-SB-C)1本に対して行った。

図8.6.1にG面(図8.5.1)の鉄筋から0mm離隔位置における磁束密度比較図を示す。全体として残留磁気を1/2程度に低減する効果があることがわかる。特に、端部の低減効果が大きい。

課題：実施には20～30秒程度要し、作業性が劣る。効果を高めるためには、リフマグ本体の改造が必要である。

(3) リフマグ逆励磁

方法：リフマグ使用直後、リフマグのコイルに逆方向の電流を流す。

原理：残留磁気を小さくする。

効果：リフマグメーカーの協力を得て行った実験の結果を以下に示す。

コイルに 20A(2 秒)→0A(0.5 秒)→-6A(2 秒)→0A(0.5 秒)の順で電流を流した。

実験は、D19 鉄筋(L-SB-C)1 本に対して行った。

図 8.6.1 に G 面(図 8.5.1)の鉄筋から 0mm 離隔位置における磁束密度比較図を示す。全体として残留磁気を 80%程度に低減する効果があることがわかる。

課題：効果の大きさは、設定する電流により決まる。鉄筋が束の状態では、全てに効果のある電流の設定は難しい。

8.6.2 加工工場

加工工場における残留磁気の主な発生原因は、鉄骨に対するリフマグの使用である。対策は製造工場と同様である。

8.6.3 建設現場

建設現場における残留磁気の主な発生原因は、スタッド溶接の実施である。特にデッキプレートでは影響が大きい。よって、以下のような対策が考えられる。

(1) ケーブル離隔

方法：スタッド溶接時にキャブタイヤケーブルをデッキプレートから離隔する。

原理：印加磁場を小さくする。

効果：建設現場でスタッド溶接時にに行った実験の結果を以下に示す。

合成スラブ用デッキ及びフラットデッキの試験体(長さ 1000mm)を 3 枚ずつ建設現場に持ち込み、キャブタイヤケーブルとの離隔距離をパラメーターとして、幅方向、1800A, 1.2 秒, 1 回の条件で溶接電流を通電した。離隔距離は 0mm, 500mm, 1000mm である。

図 8.6.2 に、M 面(図 8.5.2)のデッキプレートから 10mm 離隔位置における磁束密度比較図を示す。場所により多少の差はあるが、全体としては離隔が大きいほど低減効果も大きいことがわかる。

建物での実施例として、図 8.6.3 にフラットデッキ床の 9000mm×9000mm 領域に適用した例を示す。これは、床上 1000mm 面における磁束密度分布図であるが、キャブタイヤケーブルを離隔(離隔距離 1000mm)することにより、磁場は地磁気レベルに抑えられており、大きな低減効果が認められる。

課題：離隔によりスタッド溶接の作業効率が落ちる。作業性を向上させるため、設計・施工計画での綿密な検討が必要である。

(2) スタッド溶接施工計画

方法：デッキプレートに印加される磁場を小さくする、あるいは残留磁気により床上に発生する磁場を小さくするようにスタッド溶接工法を改良する。

原理：印加磁場を小さくする。

磁場を打ち消す。

効果：次の点を考慮したスタッド溶接施工計画を立てる。

① 必要以上の長さのキャブタイヤケーブルは随時切り離す。

② 同一領域での複数回の溶接を避ける。

③ キャブタイヤケーブルを 1 か所に巻かない。

④ キャブタイヤケーブルの折り曲げ半径はできるだけ大きくとる。

①・②は、スタッド溶接時にキャブタイヤケーブルがデッキプレートに接触する機会を少なくするもので、当然残留磁気は小さくなる。②を実施するためには、スタッドボルトのサイズの統一、残施工を発生させない仮設計画等が必要となる。

③は、キャブタイヤケーブルが複数回巻かれた場合、コイルとなって印加磁場が大きくなるとともに、デッキプレートに発生する残留磁気の N 極, S 極の分布が乱れて互いを打ち消し合う効果も小さくなるため、これを防ぐものである。

④は、キャブタイヤケーブルが直線状であればデッキプレートに発生する左右対称の N 極, S 極が互いを打ち消し合うのに対して、キャブタイヤケーブルを折り曲げた場合、N 極, S 極の分布が乱れて互いを打ち消し合う効果が小さくなるため、これを防ぐものである。

課題：作業性を向上させるため、設計・施工計画での綿密な検討が必要である。

(3) 消 磁

方法：消磁装置を利用して、コイルに減衰交番電流を流す、あるいはコイルを対象物から

徐々に遠ざける。

原理：残留磁気を消し去る。

効果：鉄筋及びデッキプレートの試験体を用いて行った実験の結果を以下に示す。

消磁装置は部品用の小型消磁器で、仕様は周波数：50Hz，発生磁場：39.0mT (0mm)，9.5mT (50mm)，2.9mT (100mm)，0.5mT (200mm)である。試験体を実験台上に設置し、試験体から10mm離隔した位置で、消磁器を100mm/sの速さで水平に移動した。

鉄筋(L-SB-C)の結果として、図8.6.1にG面(図8.5.1)の鉄筋から0mm離隔位置における磁束密度比較図を示す。残留磁気を非常に低減する効果があることがわかる。

課題：試験体であれば比較的容易に処理できるが、実際の構造物で効果を出すことは難しい。対象となる壁面、床面にケーブルで大きなコイルを作り、減衰交番電流を流して残留磁気を徐々に小さくすることは原理としては可能であるが、効果を出すには装置が大掛かりとなり、コストも嵩む。最近事例⁷⁾が発表されている。

8.6.4 竣工後

残留磁気の低減対策は、製造及び施工段階で実施するのが基本である。しかし、建物竣工後に発覚するケースもある。本項では、その対策について述べる。

(1) 磁気シールド

方法：CRTを対象とした磁気シールドボックス、建物を対象とした磁気シールドがある。

磁気シールドボックスは、CRTをパーマロイやアモルファス等の強磁性体でできたボックスで覆う。

建物の磁気シールドは、壁面、床面、天井面の適当箇所に珪素鋼板等の強磁性体で磁気シールド層を設ける。

原理：磁場を遮る。

効果：建物の磁気シールドとして、2.4.4項のマンションで実施した事例を紹介する。

方向性珪素鋼板(厚さ0.35mm)2層からなる600mm×910mm×高さ1820mmのL形の磁気シールド衝立を製作した。1層目と2層目の圧延方向は直交させた。

図8.6.4に設置後の計測結果(地磁気補正值)を示す。全体としてシールド効果が

認められるが、珪素鋼板の端部に磁極ができるため、近傍にやや大きな磁場が現れている。

課題：磁気シールドボックスは、見た目が悪く、住宅には向かない。

建物の磁気シールドは、対象面積に応じてコストが高くなる。磁場の分布により効果に差がある。

(2) アクティブシールド

方法：問題となる磁場に対して逆方向の磁場を与えて打ち消す。

原理：磁場を打ち消す。

効果：2.4.5項の工場で実施した事例を紹介する。

異常停止箇所に対応するポイントに、上面全体がS極のゴムフェライト磁石を貼り付けた。残留磁気による磁場を打ち消して、番地センサーによりクロック信号として検出されないようにするためである。

課題：対象が小さい場合は容易であるが、大きくなると難しい。

(3) レイアウト変更

方法：対象の機器を磁場の影響のない場所に移動する。

原理：磁場から遠ざける。

効果：2.4.3項の事務所で実施した事例を紹介する。

計測結果からCRTに色ずれが起こる領域が特定できたため、CRTに影響のない場所に移動した。また、磁場の強い領域は打ち合わせコーナーとして、CRTを設置しないように配慮した。

課題：磁場計測に基づく根拠のある移動であるが、抜本的な対策ではない。入居者の同意が必要となる。

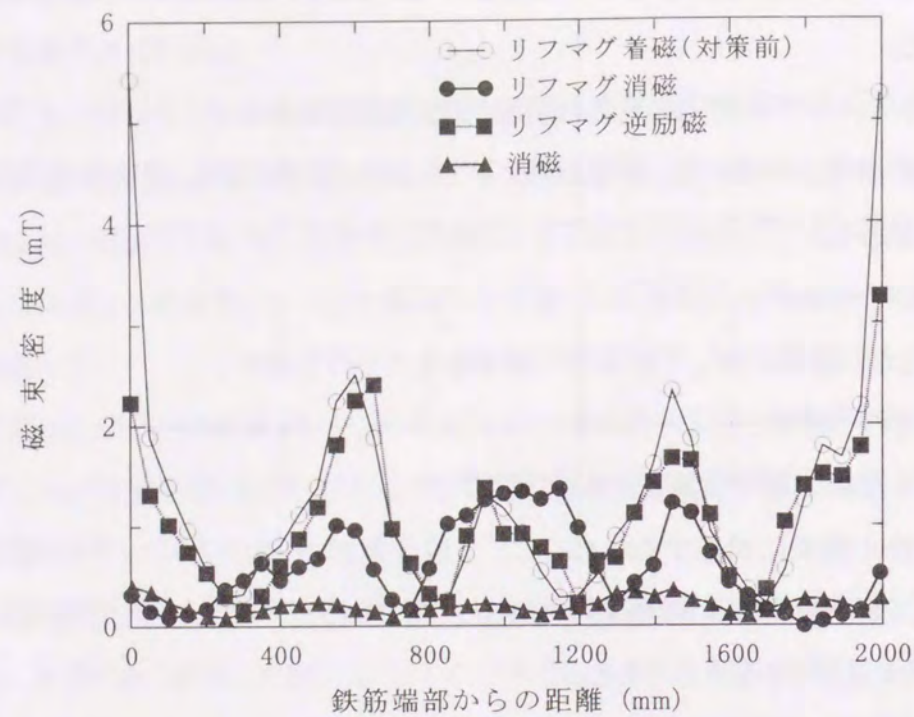


図8.6.1 D19鉄筋の磁束密度比較図

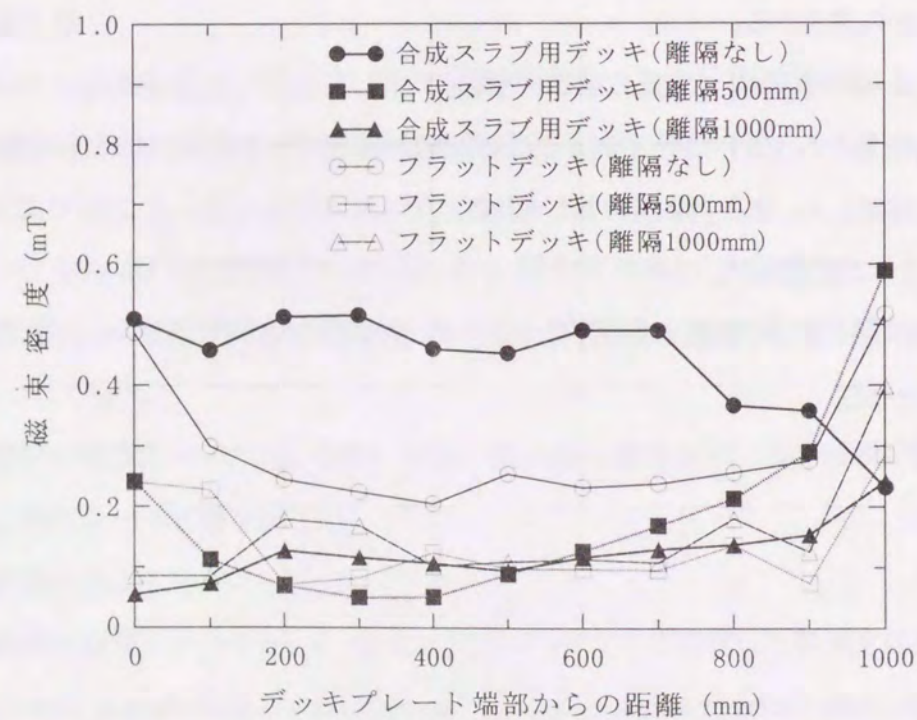


図8.6.2 デッキプレートの磁束密度比較図

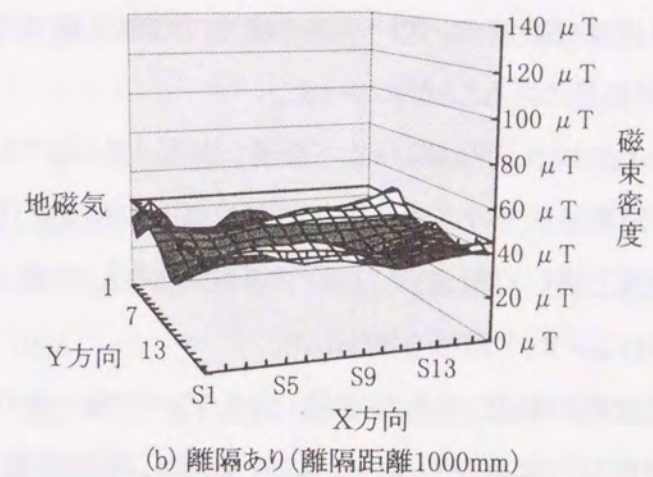
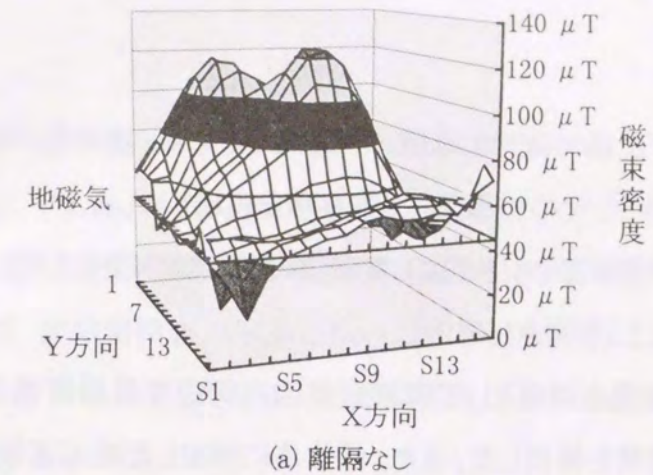


図8.6.3 キャブタイヤケーブル離隔の効果

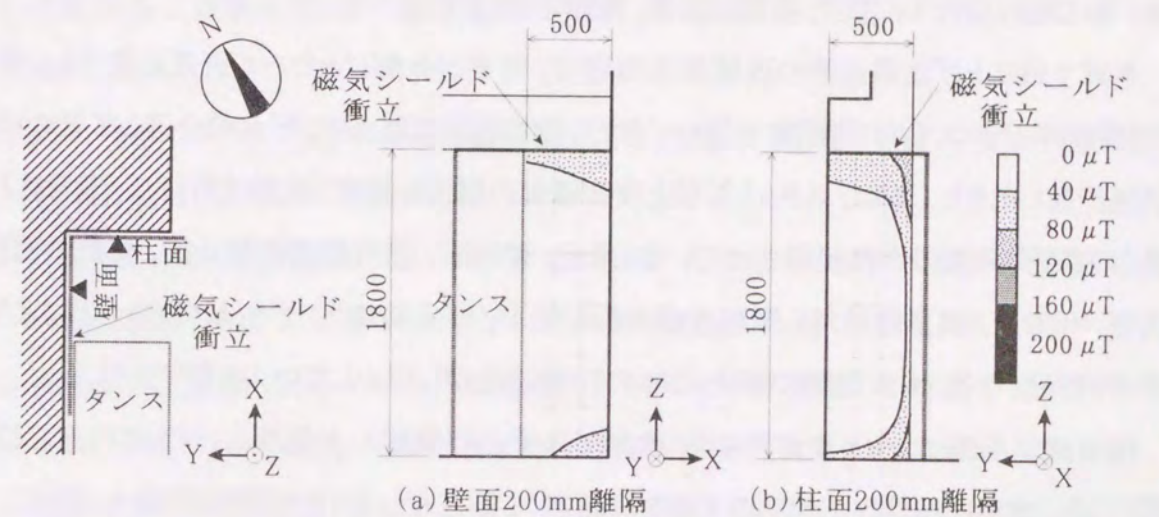


図8.6.4 磁気シールド衝立の効果

8.7 あとがき

事務所、マンション、工場で起きた障害事例を対象として、構造物の残留磁気問題の解明、解決に取り組んできた。その結果、以下の事項を明らかにした。

まず、各事例において障害を引き起こした磁場の発生源の調査を行い、いずれも鋼材の残留磁気の原因であることを突き止めた。

次に、鋼材の残留磁気を対象として障害発生地点周辺で磁場計測を行い、障害を引き起こすレベルの残留磁気を検出した。また、無作為に抽出した竣工直後の建物内で詳細な磁場計測を行い、鉄骨造及び鉄筋コンクリート造の建物では残留磁気の影響の大きな領域がどこにでも存在する可能性のあることがわかった。

次に、構造物に使われる代表的な鋼材として鉄骨、鉄筋、デッキプレートを取り上げ、製造工場、加工工場、建設現場に分けて残留磁気の発生原因の調査を行い、主な原因として鉄骨・鉄筋に対して製造工場（一部、加工工場）で使用するリフマグ、デッキプレートに対して建設現場で実施されるスタッド溶接を抽出した。

次に、リフマグによる鉄筋の着磁、スタッド溶接によるデッキプレートの着磁を対象として、試験体によるモデル実験及び数値シミュレーションを実施し、残留磁気の発生過程、性状、経時変化を把握した。実験結果とシミュレーション結果は比較的良く一致していた。

最後に、残留磁気を低減化する具体的な対策について、製造工場、加工工場、建設現場、竣工後に分けて、方法、原理、効果、課題をまとめた。

本章で取り上げた構造物の残留磁気問題は、筆者が先駆けとなって研究に着手し、現象の発見からメカニズムの解明まで行ってきたものである。これまで、学会等を通して世の中に問題提起してきた。特に、スタッド溶接と残留磁気の関係を特定した論文⁵⁾は広く認知され、多くの書籍⁸⁾や論文⁹⁾に引用されている。最近、建設省、都市整備基盤公団、設計事務所、住宅メーカー、同業他社等も問題意識を持ち始め、学会発表^{10)~14)}も数多くなされるようになってきた。今後とも本問題の解決に向けて、微力ながら努力していく所存である。

残留磁気問題は、マルチメディアの進展に伴うOA機器の大量導入、テレビの高品位化等により、建築におけるEMCの大きな問題として顕在化してくる可能性が強い。さらに、事務所ビルや工場のみならず、軽量鉄骨造の一般住宅においてもテレビの画像障害が報告されており、建築の設計・施工において対応すべき課題として、身近な問題となるであろう。

参考文献

- 1) Theobald Jakel : Entmagnetisieren von Stahlteilen: Theorie, Praxis und Kontrolle, Maschinenmarkt, Vol.81, No.40, pp.704-708, 1975
- 2) 山田 一, 山本行雄, 山下喜久男, 加藤 寛, 海川晃次 : 高張力鋼の通電脱磁法に関する基礎的考察, 非破壊検査, Vol.26, No.1, pp.10-16, 1977
- 3) 佐々木遼太郎, 佐々木正男 : 長尺鉄材の脱磁法及びその効果について, 非破壊検査, Vol.26, No.4, pp.269-271, 1977
- 4) 近角聡信, 太田恵造, 安達健五, 津屋 昇, 石川義和 : 磁性体ハンドブック, 朝倉書店, 1975
- 5) 新納敏文, 清川 博 : 建物から発生する磁気に関する一考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集(D), pp.379-380, 1991
- 6) 矢野博幸 : EWS/PCによる電磁場解析の手法と留意点, 精密工学会誌, Vol.62, No.10, pp.1402-1404, 1996
- 7) 石川 登, 梶原 堯, 岡田 哲, 犬伏 昭 : 建造物の残留磁気の除去方法について, 信学技報, EMCJ99-136, pp.37-42, 2000
- 8) 日本建築学会環境工学用教材改訂小委員会 : 建築環境工学用教材 環境編, 日本建築学会, 1995
- 9) 黒崎幸夫 : 建物を取り巻く電磁環境の実態, 電気設備学会誌, Vol.14, No.8, pp.803-809, 1994
- 10) 菊池章裕 : スタッド溶接による磁場に関する一考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集(D), pp.1055-1056, 1995
- 11) 宮崎弘志 : 建物内残留磁気とモニターへの影響 その1: 建物内の磁気環境調査結果と着磁原因検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集(D), pp.1127-1128, 1999
- 12) 宮崎弘志, 浜田由記子 : 建物内残留磁気とモニターへの影響 その2: 外部磁界強度とモニター色ずれの関係, 日本建築学会大会学術講演梗概集(D), 2000
- 13) 遠藤哲夫 : 集合住宅におけるCRTの色むらに関する検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集(D), 2000
- 14) 梶原 堯, 石川 登, 犬伏 昭 : 建物内消磁装置の開発, 日本建築学会大会学術講演

梗概集(D), 2000

- 15) 矢野博幸: ELF/MAGIC ユーザーズガイド, エルフ, 1995
- 16) 新納敏文, 加川幸雄: 鉄骨構造物における残留磁気の実態とその発生過程の検証, 日本建築学会計画系論文集, 投稿中
- 17) 日本建築学会磁場計測評価ワーキンググループ: 環境磁場の計測技術 - 現場における計測の事例 -, 日本建築学会, 1998
- 18) T.Shinnoh, Y.Kagawa: Study on Residual Magnetism in Steel-Frame Structures through Experiment and Numerical Simulation, JSST International Conference on Modeling, Control and Computation in Simulation, 2000
- 19) 新納敏文, 平澤光春, 清川 博, 高橋敏夫, 田中 輝: 鉄骨構造物の残留磁気の実態とその発生原因について, フジタ技術研究所報, No.32, pp.73-78, 1996
- 20) 新納敏文, 竹内信次郎: 磁場障害に関する実態調査研究, 三島光産技報, No.20, pp.45-55, 1999
- 21) 田中 輝, 新納敏文: 建物内残留磁気の実態調査, 電気設備学会全国大会講演論文集, pp.285-286, 1996
- 22) 新納敏文, 田中 輝: 鉄骨構造物における残留磁気の実態調査, 日本建築学会大会学術講演梗概集(D), pp.1043-1044, 1998
- 23) 新納敏文: 鉄骨構造物における残留磁気の実態調査(その 2) 計測と数値解析による残留磁気の検証, 日本建築学会大会学術講演梗概集(D), 2000

第9章 結 論

本研究は, 建築における EMC, すなわち建物全体としてのエミッション, イミュニティを定量的に評価する手段として, 環境磁場の計測法及び数値シミュレーション法を開発するものである。全体としての成果を要約すると次のようになる。

- 1) これまで標準計測法のなかった建築における環境磁場の計測法について, 種々の調査, 実験, 解析を行い, 体系的に分析, 整理することにより, EMC を評価する計測法として磁場の種類別に 8 つの計測システムを構築した。
- 2) 辺要素を用いた有限要素法を開発するとともに改良積分方程式法による磁場解析を加え, 実測値との比較を通して実用性(計算時間, 解析精度等)の観点からその有効性と限界を明らかにし, EMC を評価する数値シミュレーション法として確立した。
- 3) 上記の計測法及び数値シミュレーション法を用いて, 環境磁場に起因する 3 種類, 5 例の障害事例(MRI 磁気シールド, 送電線磁場対策, 残留磁気問題)に対して具体的解決を図った。

以下, 各章毎に得られた成果を要約する。

第 1 章では, 建物の磁場環境(エミッション), 磁場の影響を受ける機器(イミュニティ), 磁場による障害(EMI)をもとに, 建築における EMC 確立の必要性を説いた。また, 環境磁場の計測法及び数値シミュレーション法の現状と本研究のポイントを述べた。

第 2 章では, 建築における環境磁場問題を EMC の観点から, 体系的に分析, 整理した。まず, 環境磁場を『建築環境に影響を与えるすべての磁場』と定義し, 直流磁場, 交流磁場, 変動磁場の 3 つに分類して, その特徴をまとめた。次に, 建物全体としてのエミッションを決定する要因として, 環境磁場の発生源を分類整理した。次に, 建物全体としてのイミュニティを決定する要因として, 磁場の機器への影響について具体的な閾値を挙げてまとめた。最後に, 建築における EMI 問題として, 磁場による障害事例を 5 例紹介した。

第 3 章では, これまで標準計測法のなかった建築における環境磁場計測法の構築を図った。まず, 磁場計測を目的, 対象, 規模, 時期, 計測者, 場所の観点から分類した。次に, 磁場計測器の性能を分析するとともに, 性能確認試験を実施して計測器の性能や特性を調査した。その結果, 一部の計測器では温度特性, 零点ドリフト, 電磁界イミュニティに注意す

る必要のあることがわかった。次に、計測の基本的手順を示し、環境磁場計測の具体的方法として、周辺環境の影響、磁場のベクトル成分計測、計測の同時性、計測データの整理についてまとめた。最後に、磁場の種類別に8つの計測システムを構築した。

第4章では、MRI施設を対象とした磁気シールドルームの設計支援を主な目的として、シールド効果を評価するための数値解析システムを開発した。3次元非線形磁場解析の手法には、辺要素を用いた有限要素法を採用し、非線形計算ではNewton-Raphson法系の弧長法を取り入れた。また、ワークステーションとプリ・ポストプロセッサを利用し、3次元の入出力データの処理が容易かつ正確に行えて、磁気シールドルームの最適設計を迅速かつ簡便に支援できるシステムを構築した。

第5章では、磁場解析手法として有限要素法(辺要素法、ポテンシャル法)と改良積分方程式法を取り上げ、解析結果を磁気シールド効果計測実験により得られた実測値と比較し、実用性(計算時間、解析精度等)の観点からその有効性と限界を検討した。その結果、磁気シールド問題では2次元モデルによる解析には難があり、本来の3次元場としての解析が必須であることがわかった。ただ、有限要素法は3次元解析に対しては計算時間の点で難点があった。また、改良積分方程式法は、磁性体要素サイズが大きすぎると近傍での磁束密度の計算精度が低下するので注意が必要であることがわかった。

第6章～第8章では、磁場による機器の障害に対して、計測と数値シミュレーションにより解決を図った事例を紹介した。第6章では、病院におけるMRI漏洩磁場の周辺機器への影響問題に対して、まず磁気シールド効果の予測及び磁気漏洩と磁気飽和を考慮した細部設計を行うために磁場数値解析を行い、垂直方向の間隙及び磁束の流れに対して平行な壁面の開口を小さくする必要のあること、磁束に応じて磁気飽和を起こさないような板厚の設定が可能であることがわかった。次に、MRI実機を対象として実測値と解析値の比較を行い、良好な解析精度を確認した。最後に、MRI磁気シールドルーム内外においてメッシュを切って3次元空間で磁場計測を行い、MRI漏洩磁場の分布からシールド性能を評価した。

第7章では、送電線近傍建物におけるCRTディスプレイの画像障害に対して、具体的な磁場低減対策として逆位相送電、距離減衰、磁気シールドを取り上げ、その効果を磁場計測及び数値解析により検証した。その結果、逆位相送電にすることにより磁場の大きさが建物内部平均で約28～36%、屋外で約20～28%に低減され、試験に供された構造の建物では内部の広い領域でCRTディスプレイ画面の揺れの閾値である $1.0\mu\text{T}$ 以下となっているこ

と、距離減衰により送電線からの距離にほぼ反比例して小さくなること、鋼製ルーフデッキと鋼製デッキプレートが図らずも磁気シールド材として機能して、建物内部の磁場低減効果を高めていることがわかった。また、改良積分方程式法を用いた数値解析結果は、屋外及び建物外周とその周辺では磁場の大きさ、位相とも実測値と概ね一致しており、本手法の有効性が示された。さらに、建物内での磁場低減法として取り上げた磁気シールドボックス及びサンドイッチ状磁気シールド板では、低減効果は印加磁場の方向により大きな差があることがわかった。

第8章では、オフィスにおけるCRTディスプレイの画像障害、マンションにおけるテレビの画像障害、工場における無人搬送車の走行障害に対して、それらの原因である残留磁気問題の解明、解決に取り組んだ。まず、障害を引き起こした磁場の発生源の調査を行い、鋼材の残留磁気の原因であることを突き止めた。次に、鋼材の残留磁気を対象として障害発生地点で磁場計測を行い、障害を引き起こすレベルの残留磁気を検出した。また、無作為に抽出した竣工直後の建物内で詳細な磁場計測を行い、鉄骨造及び鉄筋コンクリート造の建物では残留磁気の影響の大きい領域がどこにでも存在する可能性があることがわかった。次に、構造物に使われる代表的な鋼材として鉄骨、鉄筋、デッキプレートを取り上げ、製造工場、加工工場、建設現場に分けて残留磁気の発生原因の調査を行い、主な原因として鉄骨・鉄筋に対して製造工場(一部、加工工場)で使用するリフティングマグネット、デッキプレートに対して建設現場で実施されるスタッド溶接を抽出した。次に、リフティングマグネットによる鉄筋の着磁、スタッド溶接によるデッキプレートの着磁を対象として、試験体によるモデル実験及び数値シミュレーションを実施し、残留磁気の発生過程、性状、経時変化を把握した。最後に、残留磁気を低減化する具体的な対策について、製造工場、加工工場、建設現場、竣工後に分けて、方法、原理、効果、課題をまとめた。

今後の課題は、以下の通りである。

環境磁場の計測法については、これまでの裏方的存在から一歩踏み出し、EMCを評価する必要不可欠な手段として各方面に本研究成果を公表し、その妥当性を議論をして行きたい。今後も計測法の研究を続け、学会等を通して提案、そして普及させて行きたい。

数値シミュレーション法については、まずは各解析手法の実用性(計算時間、解析精度等)の向上を図りたい。特に、有限要素法に関しては無限要素等の併用による計算時間の

短縮、渦電流を考慮した動磁場問題への適用を検討したい。本研究では、改良積分方程式法を主に利用しているが、解析手法は一つに限定するのではなく、各手法の長所及び短所を理解した上で対象に応じて使い分けことが解析能力の総体的な向上に繋がるものと考えている。

建築における EMC の取り組みは、未だ始まったばかりである。この確立のためには、電気・電子分野を始め、他の分野にまで踏み込んだ検討が必要となるものと思われる。今後とも建築分野、及び電気・電子分野を始めとする関連分野の研究者と協力し合い、建築における EMC の確立に向けて微力ながら努力していく所存である。

謝 辞

本研究は、筆者が1987年より株式会社フジタ技術研究所及び岡山大学大学院自然科学研究科で取り組んできたものです。岡山大学大学院自然科学研究科在籍期間中(1993年4月～1996年3月)、及びその後も研究の遂行に当たり、ご指導、ご鞭撻賜りました岡山大学工学部電気電子工学科教授 加川幸雄先生に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。

岡山大学工学部通信ネットワーク工学科教授 古賀隆治先生、同学部電気電子工学科教授 高橋則雄先生には、本論文の審査を通じて多くの貴重なご意見を頂きました。ここに、厚く御礼申し上げます。

秋田県立大学システム科学技術学部電子情報システム学科助教授 土屋隆生先生(元岡山大学)、岡山大学工学部電気電子工学科助手 若槻尚斗氏、同技官 八田和道氏には、岡山大学大学院自然科学研究科在籍期間中、及びその後も論文のご指導、ご鞭撻を賜りました。ここに、厚く御礼申し上げます。

本論文を作成するに当たり、株式会社フジタ技術センター所長 五味晴人氏、副所長 山本浩二氏、副所長 平澤光春氏、建築研究部長 土田恭義氏には、研究環境の面でご配慮頂きました。また、暖かい励ましも頂きました。ここに、厚く御礼申し上げます。

株式会社清川組 清川 博氏(元株式会社フジタ)には、研究の立ち上げ時から、常に暖かい励ましと的確なアドバイスを頂きました。また、岡山大学大学院自然科学研究科入学のきっかけも作って頂きました。心より感謝申し上げます。

鹿児島大学工学部建築学科助教授 本間俊雄先生(元株式会社フジタ)には、数値解析に関してご指導頂くとともに、本論文をまとめるに際し、暖かい励ましを頂きました。また、岡山大学大学院自然科学研究科入学のきっかけも作って頂きました。心より感謝申し上げます。

岡山大学大学院自然科学研究科入学に際しましては、田中修身氏(元株式会社フジタ技術研究所長)、村上 肇氏(元株式会社フジタ技術研究所管理部長)に大変お世話になりました。ここに、厚く御礼申し上げます。

辺要素を用いた数値解析システムを共同で開発頂きました株式会社フジタ技術センター構造研究部 加藤泰正博士に感謝の意を表します。

残留磁気の磁場計測にご協力頂きました株式会社フジタ首都圏事業本部東京支店設備部 田中 輝氏他、関係者の方々に感謝の意を表します。

磁場計測法に関しましては、日本建築学会電磁環境小委員会磁場計測評価ワーキンググループにおける研究が大きな支えとなっています。元主査の株式会社長大 菊池章裕氏(元東急建設)他、委員の方々に感謝の意を表します。

磁場計測器を始め、磁場計測法のデータに関しましては、株式会社エムティアイ常務取締役 竹内信次郎博士より快くご提供頂きました。また、本論文をまとめるに際し、暖かい励ましを頂きました。心より感謝申し上げます。

改良積分方程式法による解析にご助言頂きました株式会社エルフ代表取締役 矢野博幸氏、同システム部長 市田孝之氏に感謝の意を表します。

最後に、学位取得を目指して岡山大学大学院自然科学研究科に入学して以来 7 年半の間、何度も挫けそうになった私ですが、目的を完遂できたのは家族、そして広島にいる両親が期待を持って温かくサポートしてくれたお陰です。ここに、心より感謝致します。

平成 12 年 9 月

新納敏文

研究業績

A. 論文

* 本研究に関連する論文

学術論文

- *[1] 加藤泰正, 新納敏文, 清川 博, 本間俊雄, 登坂宣好: 辺要素を用いた 3 次元非線形静磁界解析システムの開発 — 磁気シールド設計支援 —, シミュレーション, Vol.11, No.3, pp.228-234, 1992
- *[2] 新納敏文, 加川幸雄, 本間俊雄, 加藤泰正, 清川 博: 磁気シールドルーム設計のための磁場解析手法の検討, 日本応用磁気学会誌, Vol.18, No.5, pp.934-939, 1994
- *[3] 新納敏文, 加川幸雄: 送電線近傍建物における磁場低減対策について — 計測と数値解析による低減効果の検証 —, 日本建築学会計画系論文集, No.494, pp.85-90, 1997
- *[4] 新納敏文, 加川幸雄: 鉄骨構造物における残留磁気の実態とその発生過程の検証, 日本建築学会計画系論文集(投稿中)
- [5] 永易 修, 新納敏文, 杉下 寛, 西山 宏, 佐藤壽芳, 大堀真敬: コンクリートベッド採用マシニングセンタの開発(第 1 報) — コンクリートベッドの振動特性に関する研究 —, 精密工学会誌, Vol.52, No.2, pp.313-318, 1986
- [6] H.Sugishita, H.Nishiyama, O.Nagayasu, T.Shin-nou, H.Sato, M.O-hori: Development of Concrete Machining Center and Identification of the Dynamic and the Thermal Structural Behavior, Annals of the CIRP, Vol.37, No.1, pp.377-380, 1988

著 書

- *[1] 日本建築学会磁場計測評価ワーキンググループ(菊池章裕, 新納敏文, 竹内信次郎, 富樫元康他): 環境磁場の計測技術 — 現場における計測の事例 —, 日本建築学会, 1998

Proceedings

- *[1] Y.Kato, T.Shinno, H.Kiyokawa, T.Honma, N.Tosaka : A Numerical Simulation System for Magnetic Shielding, Applied Electromagnetics in Materials and Computational Technology, pp.157-162, 1992
- *[2] T.Shinnoh, Y.Kagawa, T.Honma, Y.Katoh, H.Kiyokawa : A Study of Magnetic Field Analysis Techniques for Magnetically Shielded Room Design, Proceedings of International Conference Modeling, Simulation & Identification, pp.187-190, 1994
- *[3] T.Shinnoh, Y.Kagawa : Study on Residual Magnetism in Steel-Frame Structures through Experiment and Numerical Simulation, JSST International Conference on Modeling, Control and Computation in Simulation, 2000(投稿中)

技術報告

- *[1] 本間俊雄, 片山和行, 加藤泰正, 野島 博, 清川 博, 新納敏文 : 非在来要素を用いた有限要素法による非線形静磁場の近似解析, フジタ工業技術研究所報, No.25, pp.145-150, 1989
- *[2] 加藤泰正, 片山和行, 本間俊雄, 清川 博, 新納敏文, 野島 博, 登坂宣好 : 磁気シールド効果を評価する数値解析システム, フジタ技術研究所報, No.27, pp. 181-186, 1991
- *[3] Y.Kato, K.Katayama, T.Honma, T.Shinno, H.Kiyokawa, N.Tosaka : Finite Element Analysis of Three-Dimensional Nonlinear Static Magnetic Fields in Evaluation of Magnetic Shielding Effects, Journal of Fujita Technical Research Institute, No.3, pp.73-80, 1992
- *[4] H.Kiyokawa, Y.Tuchida, R.Isoyama, T.Shinnoh, M.Hirasawa : Experimental Study on the Electromagnetic Shielding Effectiveness of Metal Foils, Journal of Fujita Technical Research Institute, No.4, pp.73-82, 1993
- *[5] 新納敏文, 平澤光春, 清川 博, 本間俊雄, 加藤泰正, 加川幸雄 : 数値モデルによる磁気シールドルーム設計の検討, フジタ技術研究所報, No.31, pp.61-66, 1995
- *[6] 新納敏文, 平澤光春, 清川 博, 高橋敏夫, 田中 輝 : 鉄骨構造物の残留磁気の実態とその発生原因について, フジタ技術研究所報, No.32, pp.73-78, 1996

- *[7] 菊池章裕, 三宅伸幸, 新納敏文, 富樫元康, 竹内信次郎, 浅野芳伸 : 環境磁場計測方法の事例研究, 三島光産技報, No.18, pp.62-75, 1997
- *[8] 佐々木勤, 新納敏文, 竹内信次郎, 三宅伸幸, 川瀬隆治, 菊池章裕 : 環境磁場計測方法の事例研究(その2), 三島光産技報, No.19, pp.80-92, 1998
- *[9] 新納敏文, 竹内信次郎 : 磁場障害に関する実態調査研究, 三島光産技報, No.20, pp.45-55, 1999
- [10] 中林正勝, 永易 修, 新納敏文 : MC に採用したコンクリートベッドとコラムの効果, 応用機械工学, Vol.26, No.4, pp.105-111, 1985
- [11] 岡村一臣, 永易 修, 新納敏文 : コンクリート・マシニングセンター(CMC)の開発, フジタ工業技術研究所報, No.21, pp.7-12, 1985
- [12] 中林正勝, 新納敏文 : ならいアームのコンクリート化, 応用機械工学, Vol.27, No.1, pp. 180-185, 1986
- [13] 永易 修, 新納敏文, 杉下 寛, 西山 宏 : コンクリート・マシニングセンタ『CMC-HP』の開発, マシニスト, Vol.30, No.7, pp.54-58, 1986
- [14] 新納敏文, 宗村美貞, 中林正勝, 永易 修 : コンクリートマシニングセンターの熱特性に関する研究, フジタ工業技術研究所報, No.23, pp.61-66, 1987

口頭発表

- *[1] 加藤泰正, 本間俊雄, 新納敏文, 清川 博, 登坂宣好, 西村敏雄 : 磁気シールドルーム設計に対する数値解析について その2 Exotic 要素を用いた有限要素法による解の評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集(A), pp.1257-1258, 1989
- *[2] 加藤泰正, 新納敏文, 本間俊雄, 登坂宣好 : 非在来要素を用いた有限要素法による三次元非線形静磁場解析, 日本大学生産工学部第23回学術講演会, pp.57-60, 1990
- *[3] 加藤泰正, 新納敏文, 本間俊雄, 登坂宣好 : 磁気シールド効果を評価する三次元非線形静磁界解析, 日本シミュレーション学会第12回計算電気・電子工学シンポジウム論文集, pp.75-80, 1991
- *[4] 新納敏文, 清川 博 : 建物から発生する磁気に関する一考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集(D), pp.379-380, 1991

- *[5] 清川 博, 加藤泰正, 新納敏文, 本間俊雄, 登坂宣好: 磁気シールド効果を評価する数値シミュレーションシステム その 1. Nedelec 要素を用いた有限要素法による 3 次元静磁界解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集(D), pp.383-384, 1991
- *[6] 加藤泰正, 新納敏文, 清川 博, 本間俊雄, 登坂宣好: 磁気シールド効果を評価する数値シミュレーションシステム その 2. 磁気飽和を考慮した有限要素法による 3 次元非線形静磁界解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集(D), pp.385-386, 1991
- *[7] 新納敏文, 清川 博: シミュレーションによる磁気シールドルーム設計方法の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集(D), pp.1695-1696, 1992
- *[8] 新納敏文, 清川 博: 高圧送電線近傍の建物における磁場低減対策について, 日本建築学会大会学術講演梗概集(D), pp.1113-1114, 1993
- *[9] 清川 博, 大倉吉雅, 新納敏文: テレビ会議における音声信号障害事例, 日本建築学会大会学術講演梗概集(D), pp.1077-1078, 1993
- *[10] 新納敏文, 加川幸雄, 本間俊雄, 加藤泰正, 清川 博: 磁気シールドルーム設計のための磁場解析手法の検討, 第 17 回日本応用磁気学会学術講演梗概集, pp.379, 1993
- *[11] 新納敏文, 加川幸雄, 本間俊雄, 加藤泰正, 清川 博: 磁気シールドルーム設計のための磁場解析手法の検討, 日本シミュレーション学会第 13 回シミュレーション・テクノロジー・コンファレンス発表論文集, pp.15-18, 1994
- *[12] 新納敏文, 清川 博: 高圧送電線近傍の建物における磁場低減対策について(その 2), 日本建築学会大会学術講演梗概集(D), pp.1825-1826, 1994
- *[13] 新納敏文, 加川幸雄: 改良積分方程式法による磁気シールドルーム設計方法の検討, 日本シミュレーション学会第 15 回計算電気・電子工学シンポジウム論文集, pp.59-62, 1995
- *[14] 新納敏文, 加川幸雄: 高圧送電線近傍建物における磁場低減方法の検討, 日本シミュレーション学会第 16 回計算電気・電子工学シンポジウム論文集, pp.13-16, 1995
- *[15] 田中 輝, 新納敏文: 建物内残留磁気の実態調査, 電気設備学会全国大会講演論文集, pp.285-286, 1996
- *[16] 新納敏文: 環境磁場計測方法の事例調査(その 3) 直流磁場計測方法の調査結果について, 日本建築学会大会学術講演梗概集(D), pp.1011-1012, 1996

- *[17] 新納敏文, 加川幸雄: 送電線近傍の建物内磁場低減法の検討, 日本シミュレーション学会第 17 回計算電気・電子工学シンポジウム論文集, pp.51-54, 1996
- *[18] 新納敏文: 磁場計測における問題について(その 2) 計測点周辺の強磁性体と導体の影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集(D), pp.1033-1034, 1997
- *[19] 新納敏文, 田中 輝: 鉄骨構造物における残留磁気の実態調査, 日本建築学会大会学術講演梗概集(D), pp.1043-1044, 1998
- *[20] 新納敏文: 鉄骨構造物における残留磁気の実態調査(その 2) 計測と数値解析による残留磁気の検証, 日本建築学会大会学術講演梗概集(D), 2000
- [21] 永易 修, 新納敏文, 杉下 寛, 西山 宏, 佐藤壽芳, 大堀真敬: コンクリートベッド採用マシニングセンターの開発(その 1) -コンクリートベッドの振動特性に関する研究-, 昭和 59 年度精機学会春季大会学術講演会論文集, pp.859-862, 1984
- [22] 杉下 寛, 西山 宏, 永易 修, 新納敏文, 佐藤壽芳, 大堀真敬: コンクリートベッド採用マシニングセンターの開発(その 2) -コンクリートベッド採用マシニングセンターの振動特性に関する研究-, 昭和 59 年度精機学会春季大会学術講演会論文集, pp.863-866, 1984
- [23] 西山 宏, 杉下 寛, 永易 修, 新納敏文, 佐藤壽芳, 大堀真敬: コンクリートベッド採用マシニングセンターの開発(その 3) -コンクリートベッド採用マシニングセンターの振動特性に関する研究, 昭和 59 年度精機学会秋季大会学術講演会論文集, 1984
- [24] 新納敏文, 永易 修, 杉下 寛, 西山 宏, 佐藤壽芳, 大堀真敬: マシニングセンター(CMC)の開発, 昭和 60 年度精機学会春季大会学術講演会論文集, pp. 655-658, 1985
- [25] 新納敏文, 永易 修, 杉下 寛, 西山 宏, 佐藤壽芳, 大堀真敬: コンクリート倣いアームの試作とその特性, 昭和 60 年度精機学会秋季大会学術講演会論文集, pp. 209-210, 1985
- [26] 杉下 寛, 西山 宏, 永易 修, 新納敏文, 佐藤壽芳, 大堀真敬: コンクリート・マシニングセンターの熱特性に関する研究, 昭和 61 年度精密工学会春季大会学術講演会論文集, pp.575-576, 1986

- [27]新納敏文, 中林正勝, 小山田一雄, 杉下 寛, 佐藤壽芳, 大堀真敬: コンクリートマシニングセンタ(CMC)の開発 その1 材料及び振動特性, 第4回複合材料連合研究発表会講演論文集, pp.29-32, 1987
- [28]小山田一雄, 杉下 寛, 中林正勝, 新納敏文, 佐藤壽芳, 大堀真敬: コンクリートマシニングセンタ(CMC)の開発 その2 熱特性, 第4回複合材料連合研究発表会講演論文集, pp.33-36, 1987

B. 特許, 実用新案

* 本研究に関連する特許・実用新案

登録特許

- [1] 新納敏文: 特許第 1610626 号, 工作機械用コンクリート構造物, 1991.7.15
- [2] 新納敏文, 清川 博, 永易 修: 特許第 1682975 号, 工場床構造, 1992.7.31
- [3] 新納敏文, 清川 博, 大根 潔: 特許第 1829442 号, 超電導セラミックスの表面処理方法及びその装置, 1994.3.15
- [4] 清川 博, 新納敏文, 大根 潔: 特許第 1871727 号, コンクリート構造物の破壊検知方法, 1994.9.6
- [5] 片山和行, 新納敏文, 清川 博: 第 1877646 号, 建造物の免震装置, 1994.10.7
- [6] 新納敏文, 清川 博: 特許第 1883576 号, 廃棄物輸送装置, 1994.11.10
- *[7] 新納敏文: 特許第 1891322 号, 透磁率の測定装置と測定システム, 1994.12.7
- *[8] 新納敏文: 特許第 1903352 号, 磁気シールドルーム用扉, 1995.2.8
- *[9] 新納敏文: 特許第 1976246 号, 磁気シールドルーム用扉, 1995.10.17
- *[10] 新納敏文: 特許第 1993682 号, 磁気シールドルーム用窓, 1995.11.22
- *[11] 新納敏文: 特許第 1993683 号, 磁気シールドルーム用扉, 1995.11.22
- *[12] 新納敏文: 特許第 1993685 号, 磁気シールドルーム用扉, 1995.11.22
- *[13] 新納敏文: 特許第 1996653 号, 磁気シールドルーム用扉, 1995.12.8
- *[14] 新納敏文: 特許第 2004214 号, 磁気シールド壁の接合装置, 1995.12.20
- *[15] 新納敏文: 特許第 2102629 号, 磁気シールド壁の構築方法, 1996.10.22
- [16] 清川 博, 新納敏文: 特許第 2107929 号, 構造物の制振装置, 1996.11.6
- [17] 清川 博, 新納敏文: 特許第 2583467 号, 橋梁の架設工法, 1996.11.21
- *[18] 新納敏文: 特許第 2685673 号, 磁気シールドルームの窓構造, 1997.8.15
- *[19] 新納敏文: 特許第 2685674 号, 磁気シールドルームの窓構造, 1997.8.15
- *[20] 新納敏文: 特許第 2685675 号, 磁気シールドルームの窓構造, 1997.8.15
- *[21] 新納敏文: 特許第 2703684 号, 床面の自動消磁装置, 1997.10.3
- *[22] 新納敏文: 特許第 2764842 号, 変動磁場シールド性能測定用シールドボックス, 1998.4.3
- *[23] 新納敏文: 特許第 2779727 号, 変動磁場発生装置, 1998.5.15

- *[24]新納敏文：特許第 2793452 号, 磁気シールド板の製造方法, 1998.6.19
- *[25]新納敏文：特許第 2837595 号, アモルファス磁気シールド板と磁気シールド工法,
1998.10.9
- *[26]新納敏文：特許第 2837596 号, 磁気シールド床と磁気シールド床システム,
1998.10.9

登録実用新案

- [1] 新納敏文, 中林正勝：登録第 1844613 号, 局所空調空間の調和空気吹出装置,
1990.12.25
- [2] 新納敏文, 中林正勝：登録第 1967289 号, 局所空調空間構成装置, 1993.5.28

C. 学会活動

委員会

- [1] 日本建築学会 環境工学委員会 企画刊行小委員会 磁気シールド性能計測評価ワーキンググループ 幹事
- [2] 日本建築学会 環境工学委員会 電磁環境小委員会 電磁環境計測手法ワーキンググループ 委員

会 員

- [1] 日本建築学会 正会員
- [2] 電気学会 正会員
- [3] 日本シミュレーション学会 正会員
- [4] 日本応用磁気学会 正会員

