

電磁鋼板を用いた磁気シールド効果の 数値予測に関する研究

— 弱磁場に対する珪素鋼板のヒステリシス曲線の推定と確認 —

川瀬 隆治* 田野井淳一*

要約： 電磁鋼板の一つである珪素鋼板を用いて磁場低減対策を検討する場合には、対策実施前に効果をより正しく予測しておく必要がある。効果の予測には、実験による方法と、数値シミュレーションによる方法があるが、両者の結果は概して異なる場合が多い。その原因の一つは、数値シミュレーションの出力結果が、入力する材料特性の条件によって大きく異なるためである。数値シミュレーションの結果を大きく左右する材料特性には、珪素鋼板のヒステリシス曲線（B—H カーブ）がある。メーカーのカタログ値では、5A/m を上回る磁場に対してのヒステリシス曲線しか示されていないのが実情である。本稿では、実験による実測結果をもとに、実験結果と同様の数値シミュレーション結果が得られるヒステリシス曲線を、5 A/m 以下の弱磁場について推定したので報告する。尚、数値シミュレーションには、積分要素法による3次元磁場分布解析ソフト（ELF 社製 ELF Magic Mini）を用いた。

キーワード： 環境磁場、磁気シールド、数値計算

目次： 1. はじめに
2. 対象材料とヒステリシス曲線の推定
3. 計算値と実測値との比較
4. まとめと考察

1. はじめに

建物の磁気シールド材として用いられている珪素鋼板は、本来は、トランスやモーターなどのコイル軸心としての需要が多く、数十 μ T（マイクロテスラ）程度の比較的大きな磁界を拘束する材料として活用されている。実際に、珪素鋼板の多くは、数十 μ T 程度の磁場に対して最大の性能を発揮する材料が多く、性能の一つを示す透磁率の値は、約 10A/m 前後の磁界(磁束密度で約 12 μ T)に対して最大となる。

珪素鋼板を建物の磁気シールド材として適用する場合には、10 μ T 以上の比較的大きな磁場を軽減する場合には、透磁率が高くなるために特に有効である。一方、高圧送電線から発生する交流磁場を軽減しようとする場合などには、数 μ T 程度の比較的弱い磁場を扱うため、珪素鋼板を適用した場合には、材料としての最大性能は発揮されない。しかし、弱磁場に有効なパーマロイやアモルファスなどのような他の磁気シールド材料に比べて、珪素鋼板は材料コストが安く経済性の面で有効であるため、さほど高い軽減率が要求されない場合など、用途によっては弱磁場に対して珪素鋼板の適用が検討される場合が多い。

磁場低減対策を検討する場合には、対策実施前に効果をより正確に予測しておく必要がある。しかし、数 μ T 以下の弱磁場に対して珪素鋼板を適用し、磁場を軽減

しようとする際には、弱磁場に対する材料の性能が、メーカーから示されていないことが問題となる場合がある。そのため対策を実施した場合の効果を事前に予測することが、一般には困難となる。対策効果をより正確に予測するためには、実際の珪素鋼板を用いた実物大実験、または縮小模型実験などを実施する必要がある。

効果の予測には、実物大または縮小模型実験による方法と、数値シミュレーションによる方法があるが、両者の結果は概して異なる場合が多い。その原因の一つは、数値シミュレーションの出力結果が、入力する材料特性の条件によって大きく異なるためである。数値シミュレーションの結果を大きく左右する材料特性には、珪素鋼板のヒステリシス曲線（B—H カーブ）がある。メーカーのカタログ値では、5A/m を上回る磁場に対してのヒステリシス曲線しか示されていないのが実情である。

本稿では、実験による実測結果をもとに、実測結果と同様の数値シミュレーション結果が得られるヒステリシス曲線を、5 A/m 以下の弱磁場について推定し、実用的なヒステリシス曲線が得られたので報告する。

実測値には、平成 12 年度、13 年度に東急建設、三井住友建設（当時、三井建設）、フジタの 3 社が共同で実施した環境磁場の予測・低減化対策技術に関する研究^{1)~4)}成果の一部を用い、計算値との比較対象とした。数値シミュレーションには、積分要素法による 3 次元磁場

分布解析ソフト（ELF 社製 ELF Magic Mini）を用いた。

2. 対象材料とヒステリシス曲線の推定

検討には、方向性珪素鋼板（30ZH105、厚さ 0.3mm）を用いた。メーカーカタログの数値に基づいた本材料のヒステリシス曲線を図 1 に示す。図 1 の通り、5 A/m 以下の弱磁界に対してはヒステリシス曲線が示されていない。ヒステリシス曲線を安易に外挿して数値を求めても、実測結果と同様の結果は得られない。

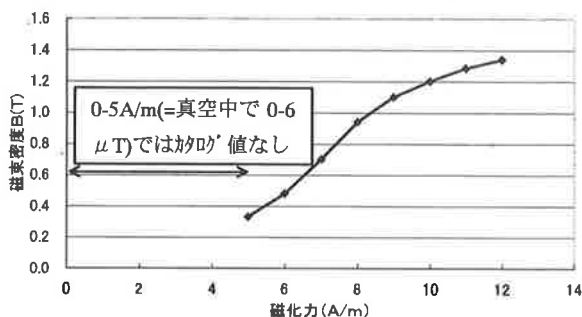


図 1 珪素鋼板 (30ZH105 かつら) のヒステリシス曲線

3. 計算値と実測値との比較

3.1 磁場分布の検討空間

磁場の分布状況を計算値と実測値で比較し検討するために、既報 1) ~ 3) で報告された計測空間と同様の直方体空間（幅 1.8m×奥行き 0.9m×高さ 0.9m、以下、「検討空間」）を設定した（図 2）。検討空間の中央を横切る鉛直中央断面を計測断面とし、計測点を 0.1m 間隔の格子点状に設定した。以降に示す磁場の検討結果では、直交三成分の波高値の合成値を、鉛直中央断面上の分布で示してある。

3.2 磁気シールド材の配置

検討に用いた磁気シールド材は、

- ・ 検討空間の上面・下面・前面の三面に磁気シールド材を敷設するコの字型配置（図 2、上）
- ・ 検討空間の前の面の 1 面のみに磁気シールド材を敷設する前面配置（図 2、下）

の 2 種類とした。磁気シールド材の層数は、シールド工事で実際に実施される層数の例を考慮して、6 層（厚さ 1.8mm）とした。実測においては、磁気シールド材同士の入り隅部に同じ材料の L 型のアングルを敷設した。高透磁率方向は、磁気シールド材敷設面の短辺方向（奥行き又は高さ 0.9m 方向）で統一し、アングルの高透磁率方向も、これと平行に合わせた。

3.3 実験条件

実験では、図 3 に示す東急建設電磁環境実験施設⁴⁾の架空コイル（地上高さ 10m、一辺 16m、20 回巻きの水平正方形コイル）で、単相 50Hz の交流磁場を発生さ

せた。検討空間を架空コイル中央真下付近の地上高さ約 1 m に配置し、上下方向の磁場が印加されるようにした。磁場の大きさは、検討空間の中央付近で、合成値が $5\mu\text{T}$ (=50mG) の波高値となるようにした。測定器には、3 軸磁力計（MTI 社製 MM-340、分解能 $0.05\mu\text{T}$ ）を用いた。

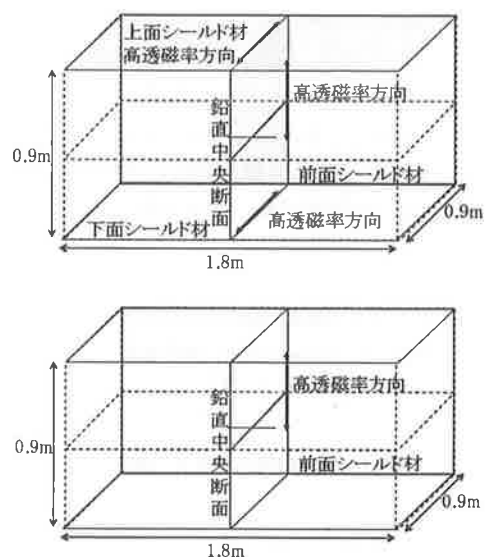


図 2 検討空間と磁気シールド配置
（上：コの字型配置、下：前面配置
前面：図中向かって奥の面）

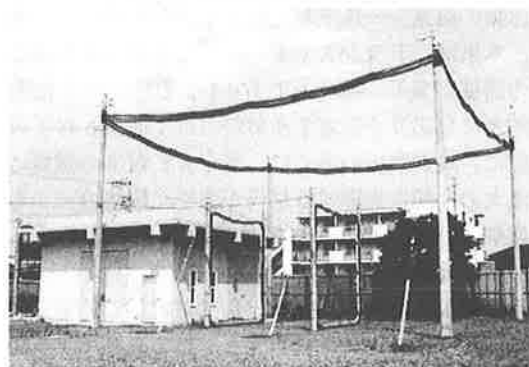


図 3 電磁環境実験施設 架空コイル 概観図

3.4 数値シミュレーション

数値シミュレーションでは、積分要素法による 3 次元磁場分布解析ソフト（ELF 社製 ELF Magic Mini）を用い、図 2 の実験と同様のシールド材配置条件でシミュレーションを行った。図 4 に線分電流要素（架空コイルに相当）とコの字型配置の磁気シールド材の配置概観図を示す。

3.5 実用的なヒステリシス曲線の推定

5 A/m 以下の弱磁界部分でのヒステリシス曲線を推定するために、次の手順による方法を採用した。

- ・ 磁化力 H（ヒステリシス曲線の横軸）が 5 A/m ~ 8 A/m までの 1 A/m 毎のヒステリシス曲線上の

- プロットを用い、3次曲線でフィッティングした。フィッティングにおいては、原点および磁化力 $H=1\text{ A/m}$ (横軸) の場合の磁束密度 B (縦軸) のみを指定した。
- 磁化力 $H=1\text{ A/m}$ (横軸) のときの磁束密度 B (縦軸) を指定するにあたり、 B を 0.001 A/m 毎に変化させ、「コの字型配置」の場合の中央点での磁束密度を数値シミュレーションで計算した。計算結果が実測値である $1.97\text{ }\mu\text{T}$ に最も近い値となる磁束密度を採用値とし、横軸値 $H=1\text{ A/m}$ に対する縦軸値 $B=0.005\text{ T}$ を採用した。

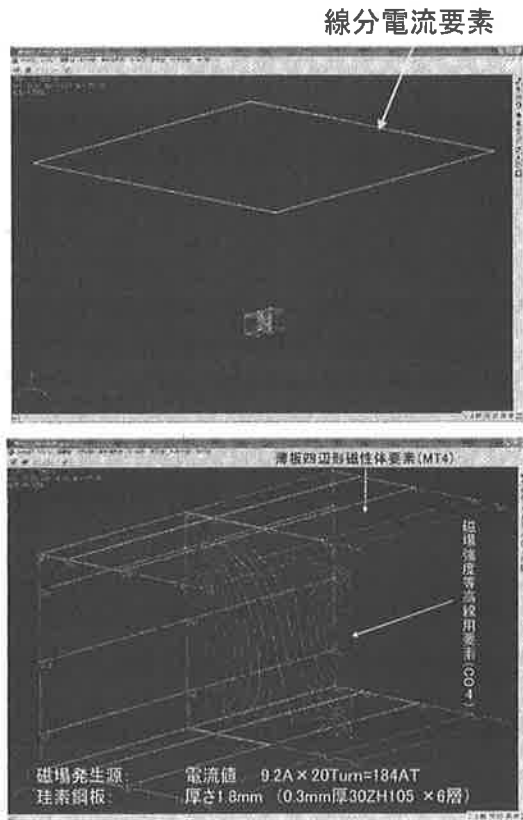


図4 線分電流要素 (上) とコの字型配置磁気シールド材 (下) の配置概観図

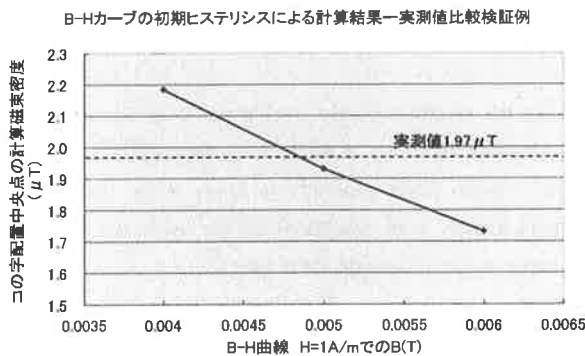


図5 磁化力 $H=1\text{ A/m}$ のとき磁束密度 B と計算磁束密度の関係

図5に、ヒステリシス曲線の横軸値が磁化力 $H=1\text{ A/m}$ のときの縦軸値 (磁束密度 B) を 0.004 T から 0.006 T に変化させたときの、「コの字型配置」での中央点の計算磁束密度の変化を示す。本図より、図中の点線で示されている実測値 $B=1.97\text{ }\mu\text{T}$ に最も近い結果が得られる縦軸値の磁束密度は 0.005 T であることがわかる。

磁化力 $H=5\text{ A/m}$ 以下の範囲について最終的に得られたヒステリシス曲線を、図6に示す。

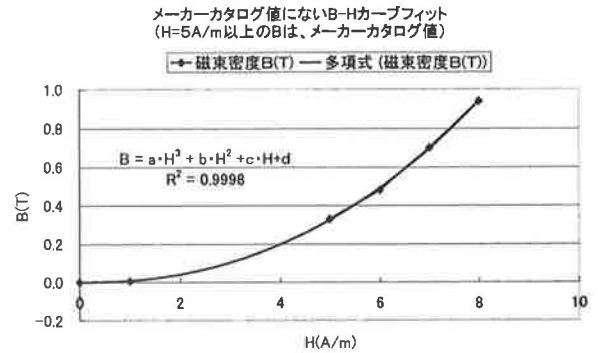


図6 5 A/m 以下の弱磁界における推定ヒステリシス曲線

3.6 計算値と実測値との比較結果

図6の通りに推定したヒステリシス曲線を用い、数値シミュレーションで得られた計算結果の分布と、実験による実測値の分布を、図7、図8、図9に示す。各分布は、鉛直中央断面 (図2参照) の分布で示している。また各図の左が実測値、右が計算値の分布を示している。図中の数値は、中央点での磁束密度を示している。

図7は磁気シールド材がない場合の結果である。

図8には、磁気シールド材を前面 (図中の左辺) に配置した「前面配置」の実測値と計算値の分布が示してある。計算では、図6で一部推定したヒステリシス曲線の結果を用いている。

図9は、磁気シールド材をコの字型に配置した「コの字型配置」の結果である。珪素鋼板との距離が 0.2 m 以内の部分では、計算時の格子点間隔の粗さのために一部で実測値と計算値に違いが見られるが、鉛直中央断面の中央付近では、ほぼ計算値と実測値が一致していることがわかる。

ヒステリシス曲線は、図9の「コの字型配置」を用いて推定しているが、図8の「前面配置」でも、計算値と実測値がよく調和している。このことから、今回推定したヒステリシス曲線によって、磁化力 $H=5\text{ A/m}$ 以下の弱磁場に対して、実測値と同様の計算結果が得られていることが確認できた。

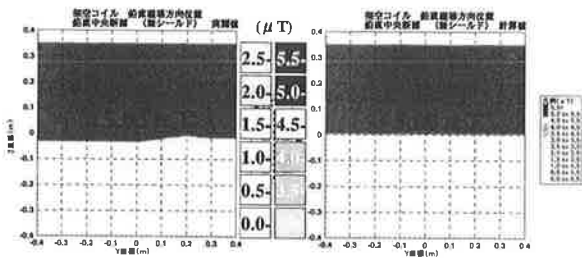


図7 磁気シールド無し (左:実測値、右:計算値)

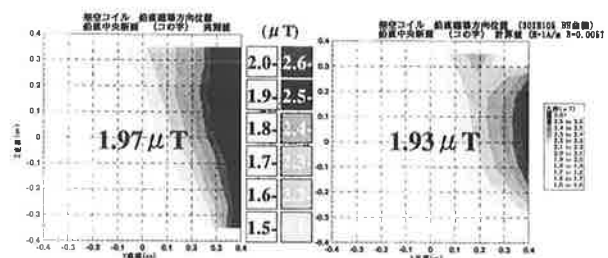


図9 コの字型配置 (左:実測値、右:計算値)

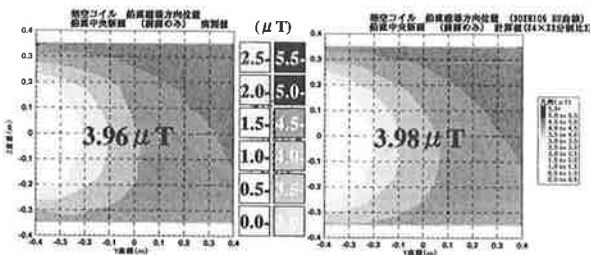


図8 前面配置 (左:実測値、右:計算値)

4. まとめと考察

珪素鋼板の磁場低減効果を積分要素法による3次元数値解析で予測するために、メーカーカタログでは示されていない5 A/m以下の弱磁場におけるヒステリシス曲線の推定を試みた。推定したヒステリシス曲線を用いて計算した磁場分布を実測値と比較し、計算値と実測値がほぼ同様の結果となっていることを確認した。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、平成12年・13年度に実施した三井住友建設(当時、三井建設)・フジタ・東急建設による3社共同研究の成果の一部に使わせていただきました。本共同研究で実質的な実験・検討作業に携わられた新納 敏文氏(元フジタ)、石橋孝一氏(三井住友建設)、および本共同研究の連絡会にて貴重なご意見をいただいた方々に、謝意を表します。

参考文献

- 1) 川瀬隆治、石橋孝一、新納敏文：送電線近傍における環境磁場の予測技術に関する研究 その7～その9、日本建築学会学術講演梗概集、pp1175～pp1180、2004.8.
- 2) 川瀬隆治、石橋孝一、新納敏文：送電線近傍における環境磁場の予測技術に関する研究 その4～その6、日本建築学会学術講演梗概集 40522～40524、pp1059～pp1064、2003.9.
- 3) 川瀬隆治、石橋孝一、新納敏文：送電線近傍における環境磁場の予測・低減化技術に関する研究 その1～その3、日本建築学会学術講演梗概集 40535～40537、pp1095～pp1100、2002.8.
- 4) 川瀬隆治、石橋孝一、新納敏文：送電線近傍における環境磁場の予測技術に関する研究 その1～その3、日本建築学会学術講演梗概集 40556～40558、pp1129～pp1134、2001.9.

RESEARCH ON THE NUMERICAL PREDICTION OF THE MAGNETIC SHIELD EFFECT USING AN ELECTROMAGNETIC PLATE AND SHEET

T.Kawase and J.Tanoi

To work on the measure against magnetic field reduction using the electromagnetic steel plate, it is necessary to predict an effect more correctly before measure implementation. Although there are a method by experiment and a method by the numerical simulation in prediction of an effect, both results differ generally in many cases. One of the cause is because the output result of a numerical simulation changes greatly with conditions of the hysteresis curve(B-H curve) to input. The actual condition is that only the hysteresis curve to the magnetic field exceeding 5 A/m is shown by a maker's catalog value. In this paper, based on the survey result by experiment, since the hysteresis curve from which an experiment and the same numerical simulation result are obtained was presumed about the weak magnetic field of 5 or less A/m, it is reported. In addition, the 3-dimensional magnetic field distribution analysis software (ELF Magic Mini by the ELF company) by the integration element method was used for the numerical simulation.