

高精度損失評価のための電磁鋼板詳細解析手法のご紹介

1. 電磁鋼板の詳細解析の必要性

電磁鋼板は電気機器の動作に際し重要な役割を担っており、その性能を左右する重要な要素の1つである。近年では、電気機器設計の高度化により高精度な損失評価が求められており、電磁鋼板の詳細解析の重要性は増してきているといえる。

電磁鋼板の損失評価の高精度化においては様々な手法が提案されており、磁界解析を行った後に、磁界解析で得られた磁束密度波形を用いて後処理として鉄損解析を行う手法が普及している（一例として、弊社での検討例[1]-[3]）。一方で、解析対象によっては渦電流による反磁界や磁気特性のヒステリシス性の考慮が必要ながある。ここでは、簡単な例題を用い、磁界解析中に渦電流や磁気ヒステリシスを考慮することの意義を考える。解析対象は図1に示すような厚さ0.5[mm]、50A470相当の特性を持つ1枚の電磁鋼板とする。電磁鋼板には図に示すようにコイルが巻かれており、コイルに電流を流した場合に、鋼板内部で発生するヒステリシス損失と渦電流損失を評価する。

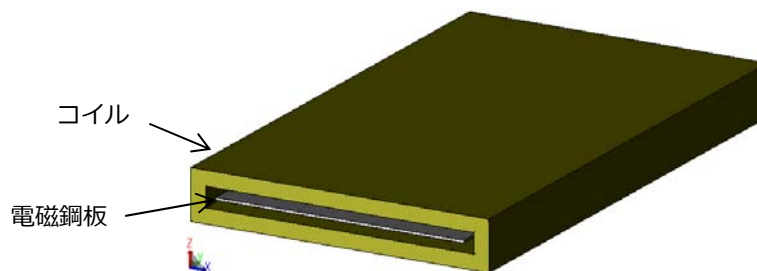


図1 電磁鋼板モデル

1.1 電磁鋼板内の渦電流分布の考慮

まず、渦電流の影響に焦点を当てるため、表1に示す4通りの計算を実施し、ヒステリシス損失と渦電流損失をそれぞれ求めた。渦電流考慮ありの場合の渦電流損失値は、図1の電磁鋼板内部の渦電流分布を捕らえられるように電磁鋼板部のメッシュ分割を行い磁界解析中に計算した。それ以外の場合の損失値は、磁界解析で得られた磁束密度波形をもとに後処理で過渡的に算出した¹。ここでは渦電流の影響調査に焦点を絞るため、磁界解析では初磁化（直流磁化）曲線を用い、磁気ヒステリシスは考慮していない。以降、磁界解析中に鋼板

¹ 渦電流損失は $\sigma(\partial A/\partial t)^2$ の式から求めた。ここに、 σ [S/m]：電気伝導率、 A [Wb/m]：磁気ベクトルポテンシャル、 t [s]：時間である。また、ヒステリシス損失の算出にはベクトルプレイモデル^[4]を用いた。

高精度損失評価のための電磁鋼板詳細解析手法のご紹介

内の渦電流を考慮しないで求めたケース 1, 3 の損失値が、考慮して求めたケース 2, 4 の値からどれほど乖離するかを確認する。

表 1 渦電流の影響調査のための計算ケース

	磁界解析中の渦電流考慮	コイル電流の周波数
ケース 1	なし	50[Hz]
ケース 2	あり	50[Hz]
ケース 3	なし	1[kHz]
ケース 4	あり	1[kHz]

最初にコイル電流 50[Hz]の場合について考察する。ケース 1 とケース 2 の結果の対比を図 2 に示す。ケース 1 のケース 2 に対する相対誤差は、ヒステリシス損失、渦電流損失、それらの合計値の順にそれぞれ 0.4%、3.7%、1.4%であった。これより、この場合には磁界解析で渦電流を考慮しなくても一定の精度で損失を求めることができているといえる。

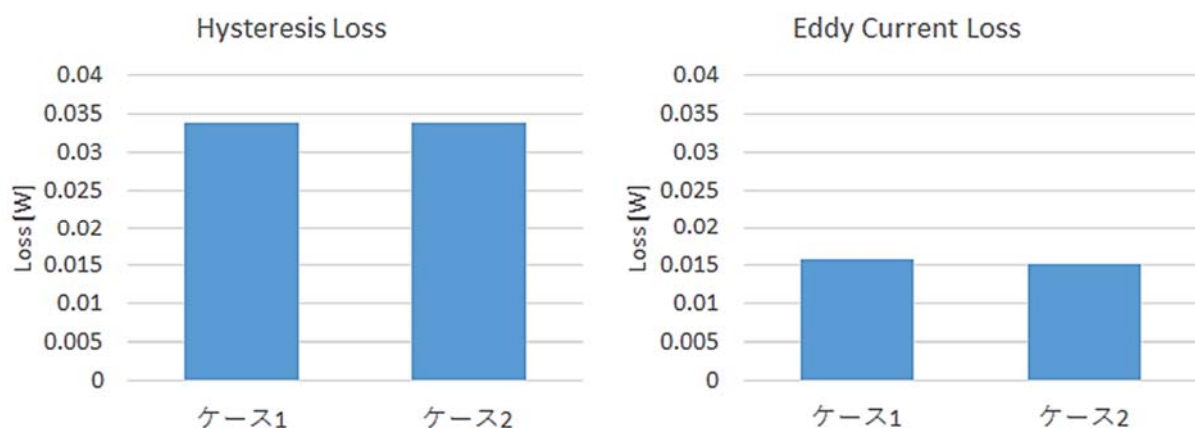


図 2 ケース 1 とケース 2 の結果の対比（左：ヒステリシス損失、右：渦電流損失）

次にコイル電流 1[kHz]の場合について考察する。ケース 3 とケース 4 の結果の対比を図 3 に示す。コイル電流 50[Hz]の場合と比べると渦電流の影響が大きく、ケース 3 で得られた損失値はケース 4 の数倍過大とい

高精度損失評価のための電磁鋼板詳細解析手法のご紹介

う結果になった。この原因を調べるために、両ケースでの磁束密度波形を図4に示す。ケース3では渦電流の影響を考慮しなかったためにケース4と比べて鋼板内の平均磁束密度振幅が大きいことがわかる(図4左)。ただし平均磁束密度振幅の大小がケース3, 4の損失値の大小につながったと考えるのはまだ早い。ケース4で得られた鋼板内の磁束密度分布を図4右に示す。凡例には鋼板表面からの深さを示す。磁束は鋼板表面に偏って通っていることが確認できるが、最も多くの磁束が通る鋼板表面においても磁束密度の値は高々ケース3における値程度となっていることがわかる。これによりケース3の損失値がケース4より大きくなったことの説明がつく。今回の例では磁界解析中に渦電流を考慮しないと損失値が大きく見積もられるという結果だったが、鋼板内の磁束密度の偏りの程度によっては小さく見積もられることも考えられるので、状況に応じた考察が必要である。

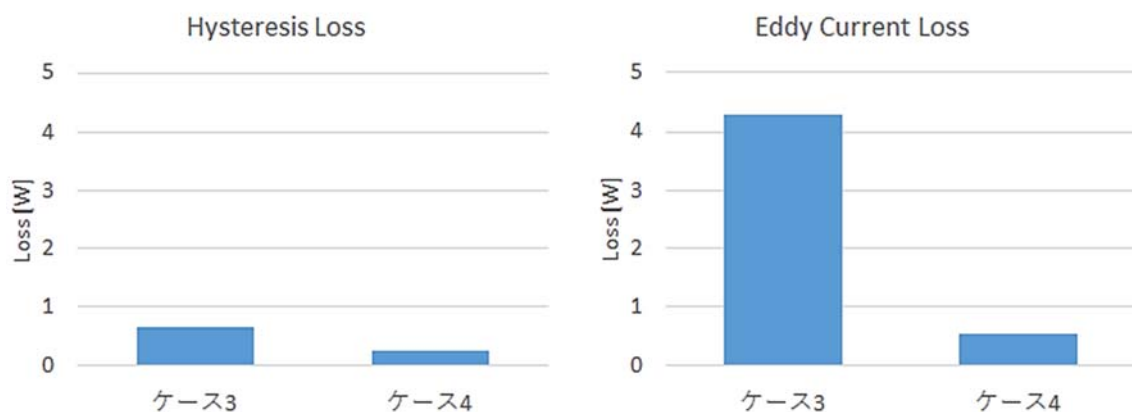


図3 ケース3とケース4の結果の対比(左: ヒステリシス損失、右: 渦電流損失)

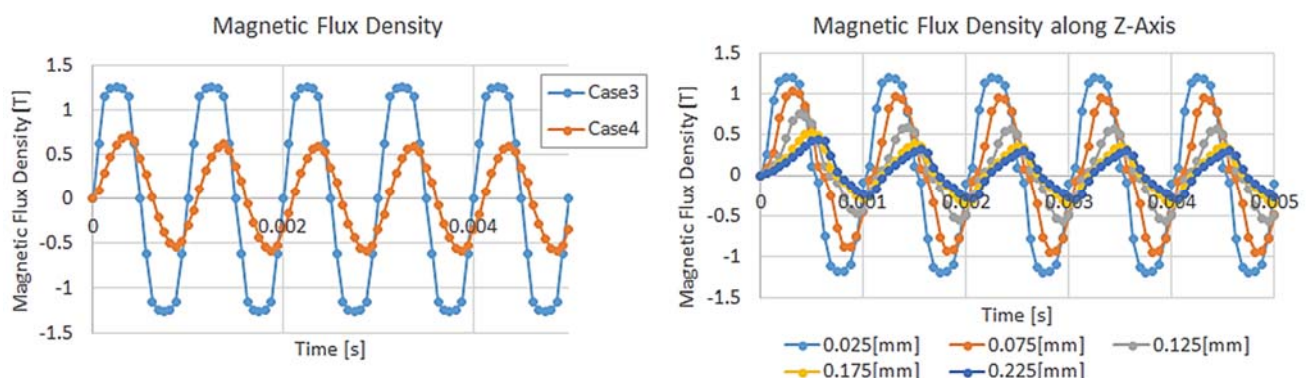


図4 ケース3とケース4の磁束密度波形の対比(左: 鋼板内平均、右: 鋼板内分布)

高精度損失評価のための電磁鋼板詳細解析手法のご紹介

1.2 電磁鋼板の磁気ヒステリシスの考慮

続いて磁気ヒステリシスの影響に焦点を当てるため、表 2 に示す 4 通りの計算を実施し、ヒステリシス損失と渦電流損失をそれぞれ求めた。磁気ヒステリシス考慮ありの場合のヒステリシス損失値は磁界解析中に得られた値を用い、それ以外の場合の損失値は、磁界解析で得られた磁束密度波形をもとに過渡的に算出した。ここでは磁気ヒステリシスの影響調査に焦点を絞るため、磁界解析では渦電流は考慮していない²。以降、磁界解析中に鋼板の磁気ヒステリシスを考慮しないで求めたケース 5, 7 の損失値が、考慮して求めたケース 6, 8 の値からどれほど乖離するかを確認する。

表 2 磁気ヒステリシスの影響調査のための計算ケース

	磁界解析中の 磁気ヒステリシス考慮	コイル電流の周波数
ケース 5	なし	50[Hz]
ケース 6	あり	50[Hz]
ケース 7	なし	50[Hz] + 150[Hz]
ケース 8	あり	50[Hz] + 150[Hz]

最初にコイル電流 50[Hz]の場合について考察する。ケース 5 とケース 6 の結果の対比を図 5 に示す。ヒステリシス損失は磁界解析中の磁気ヒステリシスの考慮の有無によらずほとんど変わらないという結果となった（図 5 左）。これは、磁気ヒステリシスの考慮の有無によらず、磁界解析結果の磁束密度振幅がほとんど変わらないためである（図 6）。一方で、渦電流損失には倍半分もの乖離がみられた（図 5 右）。この理由は、両者の BH 波形を比較することで説明できる（図 6）。図 6 中に A, B と示した箇所に、両者の特徴的な違いが現れている。ケース 6 では A の部分でなだらかに推移した後、B の部分で急激に変化が起きている（同図右、A-6, B-6）。一方のケース 5 では A の部分ではケース 6 と比べると大きな変化となっているが、B の部分ではケース 6 ほどの急峻な変化はみられず（同図右、A-5, B-5）、結果として渦電流損失の過小評価につなが

² ケース 5 はケース 1 と同一解析であるが、ここでは便宜上別番号を振っている。

高精度損失評価のための電磁鋼板詳細解析手法のご紹介

っている。以上より、磁界解析中に磁気ヒステリシスを考慮せずに初磁化曲線のS字部分を使ったことで、高調波を含まない正弦波励磁の場合であっても渦電流損失を過小評価してしまう場合があることがわかった。

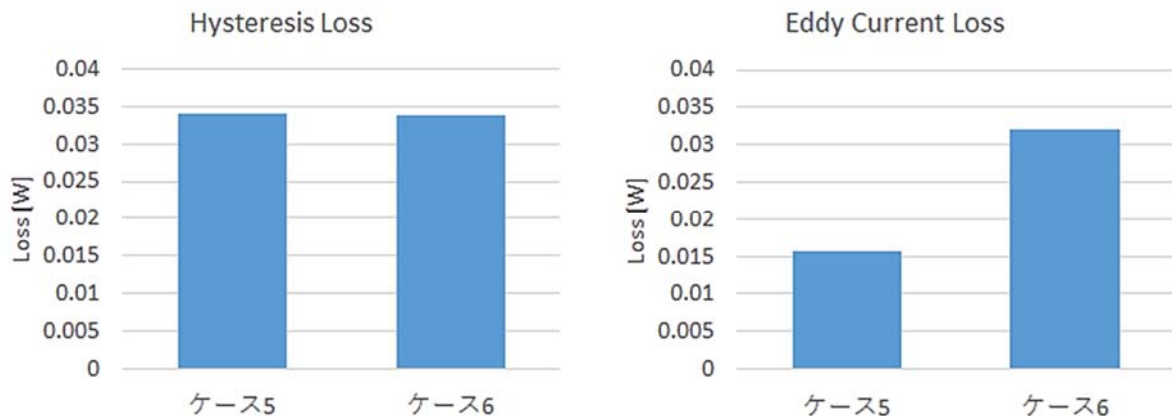


図5 ケース5とケース6の結果の対比（左：ヒステリシス損失、右：渦電流損失）

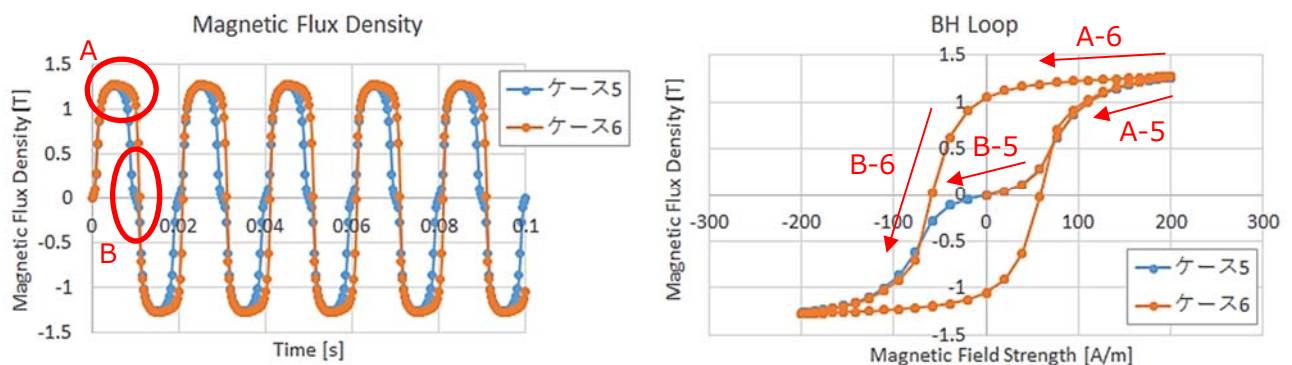


図6 ケース5とケース6のBH波形の対比（左：時刻歴磁束密度、右：BHループ）

次に、コイル電流 50+150[Hz]、すなわち3次高調波が重畳している場合について考察する。ケース7とケース8の結果の対比結果を図7に示す。ヒステリシス損失、渦電流損失ともに両ケースの間で乖離がみられた。今回も、この理由は両者のBH波形を比較することで説明できる（図8）。ヒステリシス損失の計算値がケース8の方が小さいのは、磁界解析中に磁気ヒステリシスを考慮したことで $B=1$ [T]を超えたあたりでの磁束密度変動量が少なくなったためである。マイナーループがほとんどつぶれておりヒステリシス損失としての勘定量も小さくなることがわかる（図8右、C-8）。一方のケース7では、高調波の影響を受けて磁束密度変

高精度損失評価のための電磁鋼板詳細解析手法のご紹介

動量が多くなっており（図 8 右、C-7）、このためにヒステリシス損失値も大きい。そして、渦電流損失がケース 8の方が大きいのは、コイル電流 50[Hz]の場合と同様、図 8 中、B, B-7, B-8 と示した箇所の波形の違いによるものである。同図中 C で示した箇所ではケース 7の方が磁束密度の時間変化は一時的に大きくなるが、この波形の相違の影響は相対的に小さく、結果としてケース 8の方が渦電流損失値は大きい。以上より、磁界解析中に磁気ヒステリシスを考慮せずに初磁化曲線を使ったことで、ヒステリシス損失を過大評価、渦電流損失を過小評価してしまう場合があることがわかった。

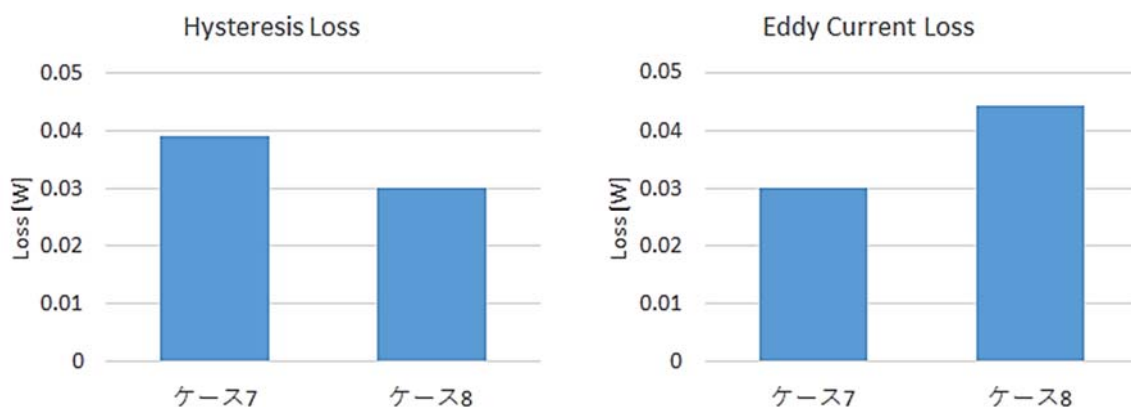


図 7 ケース 7 とケース 8 の結果の対比（左：ヒステリシス損失、右：渦電流損失）

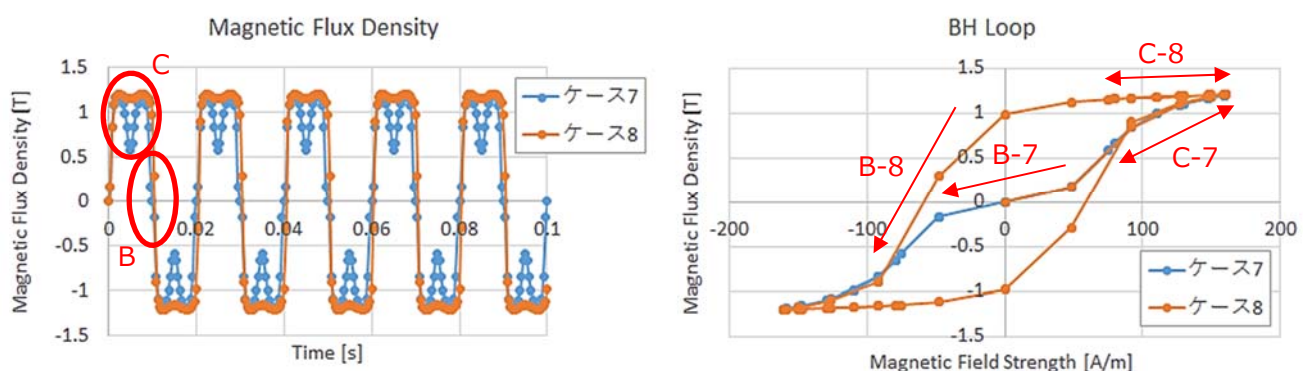


図 8 ケース 7 とケース 8 の BH 波形の対比（左：時刻歴磁束密度、右：BH ループ）

ここまで見てきたように、後処理鉄損解析による鉄損計算は、磁束密度変動の周波数が高く電磁鋼板内の渦電流の影響が大きい場合や、鋼板の初磁化曲線の S 字や高調波重畳により磁気ヒステリシスの影響が大きい場

高精度損失評価のための電磁鋼板詳細解析手法のご紹介

合には、精度が十分ではないことがある。このような場合には、電磁鋼板の損失評価の高精度化にあたり、磁界解析中の鋼板詳細解析による詳細な分析が必要であるといえる。

2. 鋼板詳細解析のための手法

前章では、磁界解析中に鋼板内の渦電流や磁気ヒステリシスを考慮する必要がある場合があることを確認した。ここではこれを実現するための解析手法を紹介する。1つの手として、鋼板1枚1枚を素直にモデル化し、鋼板内の渦電流分布を必要な精度で捕らえられるように詳細にメッシュを切った上で、渦電流と磁気ヒステリシスを考慮して磁界解析を行うことが考えられる。しかしこれを行うためには解析規模の増大は避けられず、また薄い電磁鋼板をモデル化したことで生成された扁平メッシュによるソルバーの収束性悪化の懸念もある（一例として、弊社での確認例[5]）。

この問題を回避するために、二次元磁界解析に、ベクトルプレイモデル^[4]を考慮した一次元磁界解析を組み合わせる方法を取り入れる。この二次元解析と一次元解析とを組み合わせる手法は、鋼板幅が鋼板厚さに対して小さくなりすぎなければよい近似となる^[6]。手法の詳細は文献[7]に譲るが、本手法のイメージを図9に示す。二次元メッシュ上の各有限要素に対して鋼板厚み方向の一次元メッシュを用意し、この一次元メッシュ上で渦電流と磁気ヒステリシスを同時に考慮した鋼板解析を行う。各二次元要素内で一次元解析を行い得られた結果は、主解析である二次元解析にフィードバックされる。これにより、モデル規模を抑えつつ、渦電流と磁気ヒステリシスを考慮した磁界解析による損失値見積もりが可能となる。また、薄い鋼板を積厚方向にメッシュ分割することによるメッシュ扁平化の心配がなく、安定的なソルバー収束特性も期待できる。

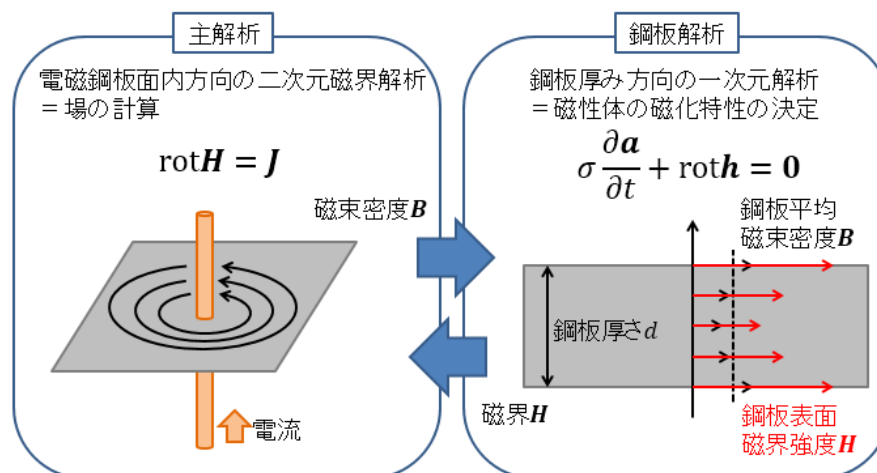


図9 二次元+一次元の鋼板詳細解析のイメージ

高精度損失評価のための電磁鋼板詳細解析手法のご紹介

3. 鋼板詳細解析による損失評価

前章で紹介した手法（新手法）を回転機ならびにリアクトルモデルに適用して損失値を評価した例を示す。計算精度の比較対象として、磁界解析時には渦電流と磁気ヒステリシスを考慮することなく初磁化曲線を使用し、磁界解析の後処理としてブレイモデルを考慮した一次元磁界解析を実行する手法（従来法）による解析を行った³。以下、比較対象の従来法の結果には“conventional”、新手法による結果には“new”というラベルを付記して示す。

まず、図 10 に示す回転機モデルに三相正弦波交流電流を通电して負荷解析を行った際の損失計算結果を示す。回転数 9,000 のときの結果を図 11 に、90,000 のときの結果を図 12 にそれぞれ示す。ヒステリシス損失と渦電流損失の合計値の手法間の差は、今回の手法の計算値を基準として、回転数 9,000 のときが 4.6%、回転数 90,000 のときが 15.2%であり、渦電流の影響が出やすい高回転時ほど差が有意であることが確認された。詳細を調べるために、大きな損失値が確認されたティース先端部における磁束密度周方向成分の値を回転数 9,000 の場合について抽出すると、図 13 のようになっており、手法間で目立った差異がみられた。さらに損失計算時に使用する鋼板内部の磁束密度分布には図 14 に示す違いが見られ、0.0007[s]から 0.0008[s]の間における鋼板内部での磁束密度の時間変化の急峻さの差が損失合計値の差に大きく寄与していることを確認した。磁界解析中に渦電流と磁気ヒステリシスを考慮したことにより、考慮しなかった場合と比べて磁束密度の時間変化の程度が緩和されたと考えられる。なお、図 14 中の凡例に示した数字は板厚 0.5[mm]の鋼板表面からの位置を示しており、1 が 0.025[mm]、5 が 0.225[mm]である。

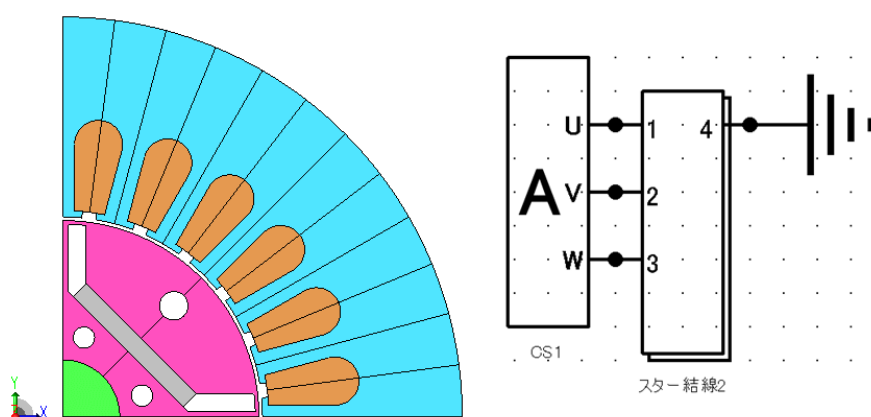


図 10 回転機モデル（IPM モータ）

³ 純粋に計算手法による差異を確認するため、異常渦電流は考慮していない。また、精度を重視するために、JMAG-Desinger Ver.17.1 より使用可能となった鉄損条件のオプション[1D 解析にヒステリシスモデルを適用する]を有効にした。

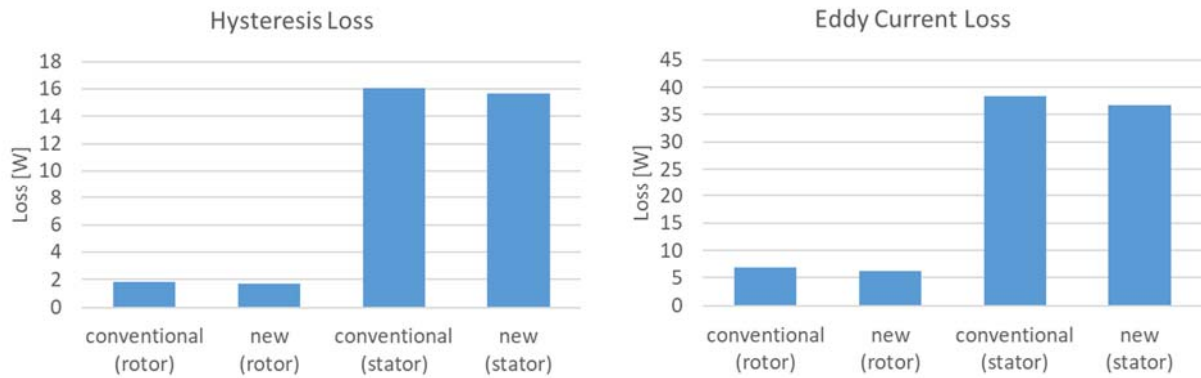


図 11 回転機モデル（回転数 9,000）での損失計算結果（左：ヒステリシス損失、右：渦電流損失）

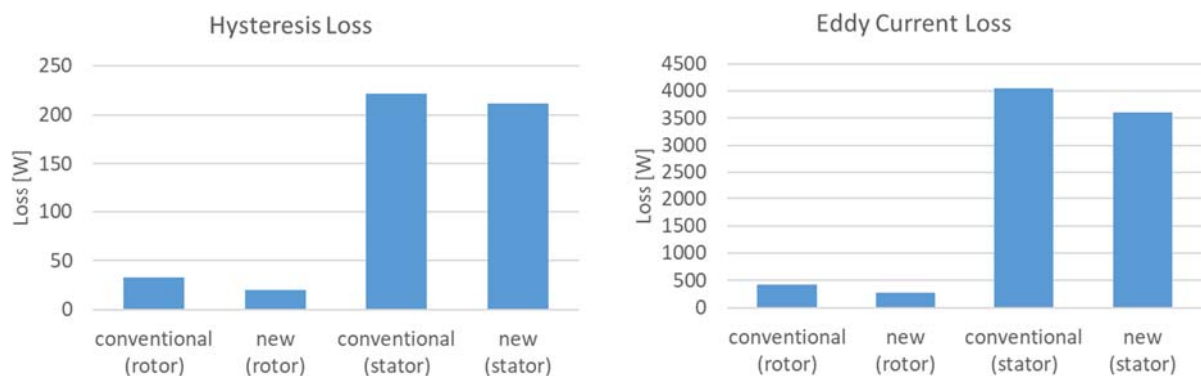


図 12 回転機モデル（回転数 90,000）での損失計算結果（左：ヒステリシス損失、右：渦電流損失）

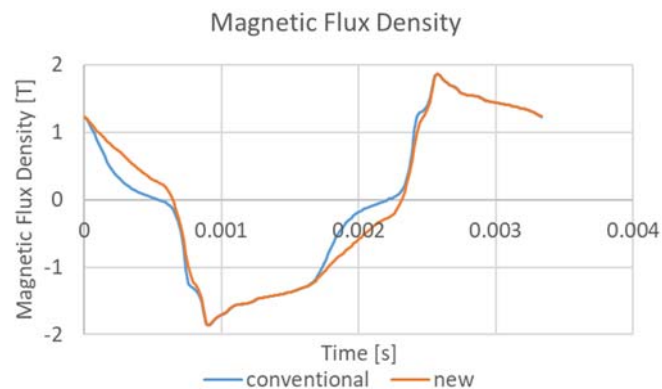


図 13 回転機モデル（回転数 9,000）での平均磁束密度波形

高精度損失評価のための電磁鋼板詳細解析手法のご紹介

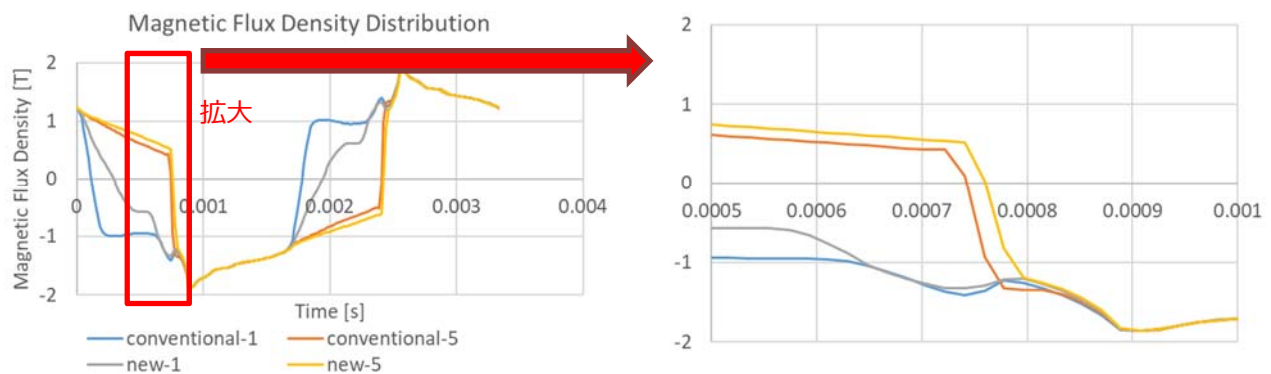


図 14 回転機モデル（回転数 9,000）での鋼板内の磁束密度分布

もう 1 例、図 15 に示すリアクトルモデルでの損失計算結果を示す。コイルには直流電流に加えて、その大きさの 10% の振幅を持つ 10[kHz] の正弦波電流を重ねさせ、スイッチングにより発生する高調波を模擬した。求めた損失値は図 16 に示すとおりであり、今回の手法により得られた損失値は後処理で求めた場合と比べて 11.4% 低くなった。コイル中央部における磁束密度波形を確認すると、今回の手法の適用有無による差異は図 17 に示す程度のものであった。しかし損失計算時に使用する鋼板内部の磁束密度分布には図 18 に示す違いが見られ、磁界解析中に渦電流と磁気ヒステリシスを考慮したことにより、考慮しなかった場合と比べて鋼板表面付近の磁束密度振幅が小さくなっていることが確認できる。結果としてこの差異が損失値の差につながったと考えられる。なお、図 18 中の凡例に示した数字は板厚 0.5[mm] の鋼板表面からの位置を示しており、1 が 0.00625[mm]、3 が 0.03125[mm]、14 が 0.16875[mm] である。

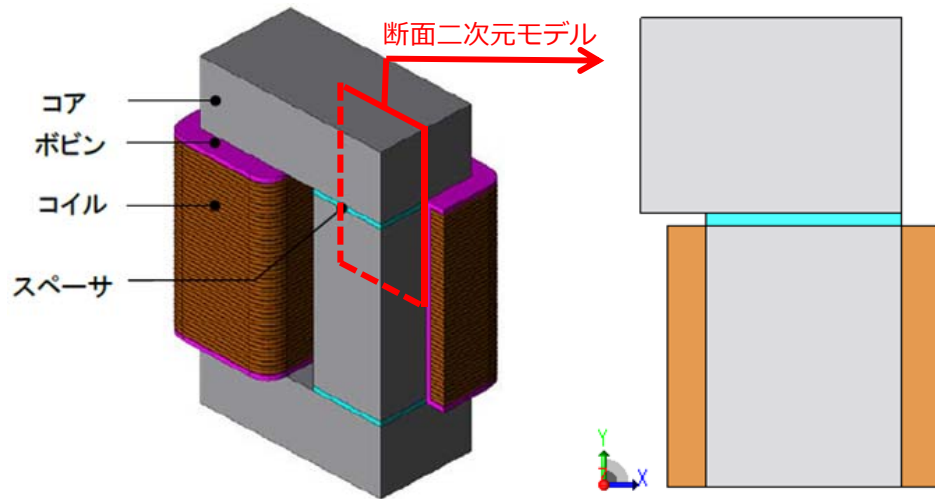


図 15 リアクトルモデル（直流重畳考慮）

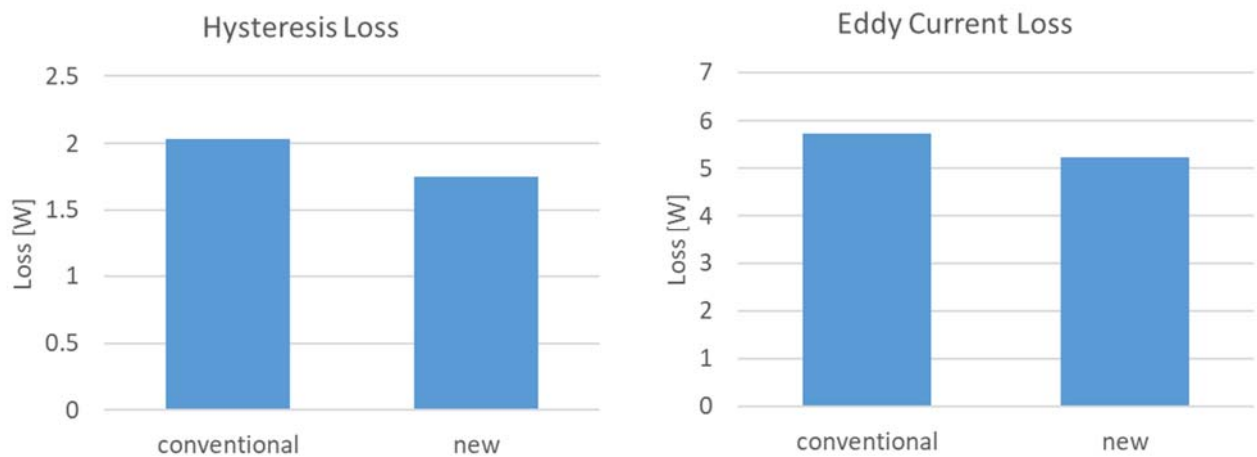


図 16 リアクトルモデルでの損失計算結果（左：ヒステリシス損失、右：渦電流損失）

高精度損失評価のための電磁鋼板詳細解析手法のご紹介

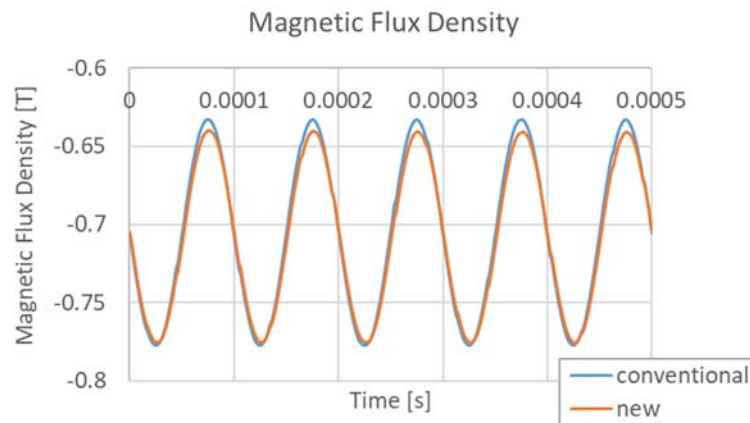


図 17 リアクトルモデルでの平均磁束密度波形

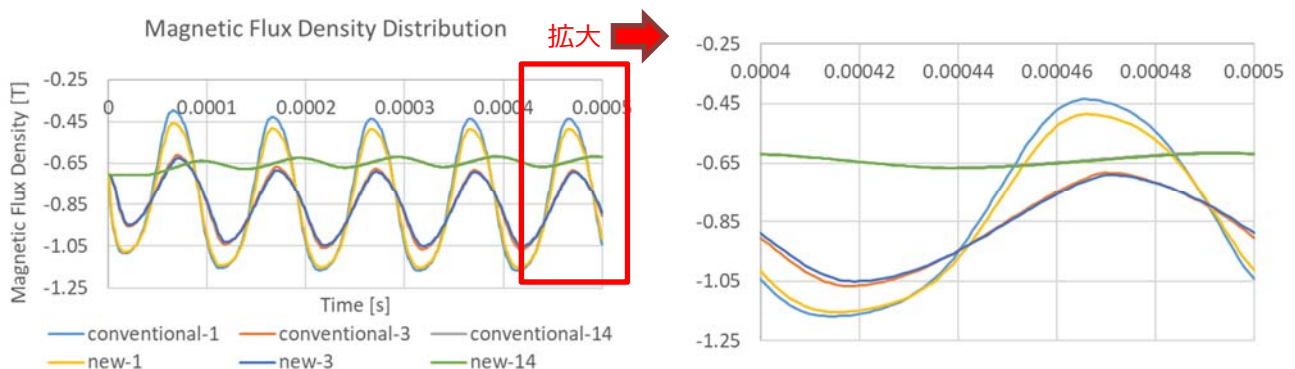


図 18 リアクトルモデルでの鋼板内の磁束密度分布

なお、磁界解析の非線形反復回数ならびに線形ソルバー反復回数は表 3 に示すとおりとなった。磁界解析中に渦電流ならびに磁気ヒステリシスを考慮したことで回数は増加傾向にあるが、非線形性が強まったことならびに非対称ソルバーが必要になったことが原因として考えられる。それでも安定性に支障をきたすことはなく、計算が問題なく進行して解が得られた。

高精度損失評価のための電磁鋼板詳細解析手法のご紹介

表 3 非線形・線形ソルバー反復回数

	非線形 (conventional)	非線形 (new)	線形ソルバー (conventional)	線形ソルバー (new)
回転機モデル (回転数 9,000)	1,664	1,605	212,778	357,128
回転機モデル (回転数 90,000)	1,693	1,478	246,174	466,034
リアクトルモデル	954	1,251	40,021	84,231

以上より、回転機モデルでは高回転時に鋼板内渦電流の影響が出てくることが、リアクトルモデルでは直流重畳状態の場合に鋼板の磁気ヒステリシスの影響が出てくることを確認した。そしていずれの事例においても、新手法による解析により、従来法とは異なるより鋼板内の物理現象を精密に再現した上での損失値が得られることを確認した。

5. まとめと今後

本稿では電磁鋼板の詳細解析手法を紹介し、渦電流ならびに磁気ヒステリシスの影響が大きい場合に損失解析高精度化に有用であることを示した。今後は三次元モデルへの適用事例を作成し、積層鋼板解析の高精度化へとつなげていきたい。

6. 参考文献

- [1] JMAG ユーザー会 2018 セミナー S-01、「損失解析手法レビュー」
- [2] JMAG ユーザー会 2018 セミナー S-13、「異常渦電流損失のモデリング」
- [3] 株式会社デンソー 吉岡様、「モータ鉄損予測精度向上に向けたヒステリシスモデルの適用」、JMAG ユーザー会 2018
- [4] T. Matsuo and M. Shimasaki, "Two Types of Isotropic Vector Play Models and Their Rotational Hysteresis Losses," *IEEE. Trans. Magn.*, Vol.44, No.6, pp.898-901 (2008)
- [5] 近藤、仙波、山田、「高アスペクト比要素使用時の ICCG 法の収束性と SDT 法の適用性に関する検討」、電気学会静止器・回転機合同研究会資料、SA-09-11, RM-09-11 (2011)
- [6] 浅沼、仙波、成田、山田、「二次元電磁鋼板渦電流解析の課題について」、電気学会静止器・回転機合同研究会資料、SA-15-79, RM-15-117 (2015)

- [7] 浅沼、仙波、成田、阿波根、山田、「渦電流と磁気ヒステリシスを考慮した電磁鋼板のモデリングに関する検討」、電気学会静止器・回転機合同研究会資料、SA-18-71, RM-18-90 (2018)

お問い合わせ

JMAG ビジネスカンパニー

TEL:03-5859-6007

info@jmag-international.com

※記載されている製品およびサービスの名称は、それぞれの所有者の商標または登録商標です。