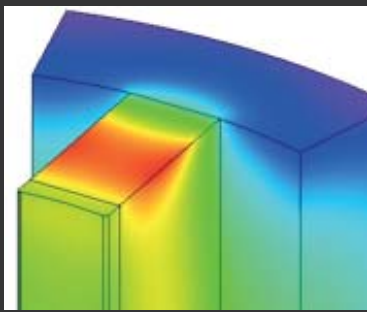
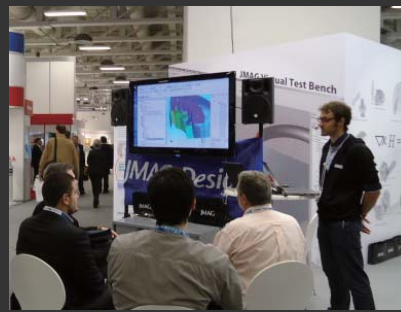
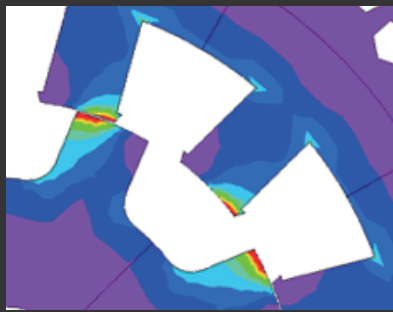
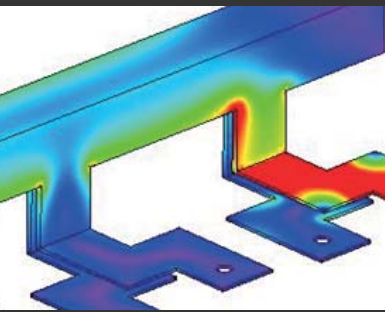


# JMAG Newsletter



2014年3月号

# 目次

- [1] JMAG導入事例 **John Deere**  
- 次世代重機の開発におけるバーチャルプロトタイピングの試み -
- [2] プロダクトレポート **JMAGによる高速計算**
- [3] プロダクトレポート **JMAG-ExpressによるPMモータ設計**
- [4] モータ設計講座 **第3回 モータ詳細設計の進め方**
- [5] ソリューション **第1回 熱解析ソリューション**
- [6] JSOL活動報告 **鉄損解析に対する最近の取り組み**
- [7] JMAGを100%使いこなそう **よくある問い合わせの中から**
- [8] JMAG 製品パートナー紹介 **MapleSoft**  
- MapleSim Connector for JMAG-RT -
- [9] イベント情報  
- 2014年4月～2014年6月の出展イベント紹介 -  
- JMAGイチオシセミナー紹介 -  
- イベント開催レポート -
- [10] 定期開催セミナーのご案内



## 株式会社JSOL

NTT DATA Global IT Innovator  
NTT DATA Group

エンジニアリングビジネス事業部

■東京 〒104-0053 東京都中央区晴海2丁目5番24号 晴海センタービル7階  
TEL: 03-5859-6020 FAX: 03-5859-6035

■名古屋 〒460-0002 名古屋市中区丸の内2丁目18番25号 丸の内KSビル17階  
TEL: 052-202-8181 FAX: 052-202-8172

■大阪 〒550-0001 大阪市西区土佐堀2丁目2番4号 土佐堀ダイビル11階  
TEL: 06-4803-5820 FAX: 06-6225-3517

E-mail [info@jmag-international.com](mailto:info@jmag-international.com) URL <http://www.jsol.co.jp/cae/>

※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。

# JMAG Newsletter 3月号のみどころ

JMAG Newsletter 3月号をお送りします。

今号の「JMAG 導入事例」は、建機、農機で世界をリードする John Deere です。JMAG 導入の背景と活用成果についてインタビューしました。John Deere の電化プロジェクトの中で JMAG を活用いただいている様子を紹介いただきます。

「プロダクトレポート」では、圧倒的な速度を誇る JMAG 高並列ソルバおよび GPU ソルバのパフォーマンスを紹介します。私たちは JMAG ソルバの高速化に注力しており、日々技術開発を進めています。大規模モデルを高速に計算されたい方、必見です。

また、モータ設計ツール JMAG-Express は、2009 年にリリース依頼次々と便利な機能を搭載してまいりました。今号では、JMAG-Express の新機能はもちろん、便利な機能のご紹介を交えながらモータ設計事例を紹介します。モータ設計業務の効率化にぜひとも、JMAG-Express を活用ください

「JMAG ソリューション紹介」では、モータの熱設計について紹介しています。第 1 回目となる今回は熱解析のモデル化技術に焦点を絞り、積層鋼板や巻線のモデル化について紹介します。

「JSOL 活動報告」と題しまして、鉄損評価に対する私達の取り組みを紹介します。いくつかある課題の中から、従来のスタインメッツの経験則の適用が難しい直流偏磁時の鉄損計算および必要となる材料データ、測定関する取り組みの紹介をいたします。

JMAG Newsletter は、JMAG をご利用中の方はもちろんのこと、JMAG をまだお使いでない方々や JMAG を使い始めた方にも読んでいただきたいと思っております。お近くに JMAG 初心者の方がいらっしゃいましたらぜひご紹介ください。

今回も盛りだくさんの内容でお届けします。どうぞ最後までご覧ください。

株式会社 JSOL  
エンジニアリングビジネス事業部  
電磁場技術グループ

## JMAG 導入事例

## John Deere

次世代重機の開発における  
バーチャルプロトタイピングの試み

建機、農機で世界をリードする John Deere。同社を代表する重機の開発では、生産性向上と運転コスト低減のため、操縦席の小型モータから高出力用ハイブリッドエンジン用モータに至るまで幅広く、電化プロジェクトが推進されています。燃費向上や快適な運転性能はもちろんのこと、ハイブリッド・トラクターへのアクティブ・トラクションコントロールの導入によるタイヤ寿命の改善まで、重機の電化がもたらす効果は数えきれません。そんな同社の電化プロジェクトでも、JMAG が活躍しています。今回のインタビューでは、同プロジェクトを統括する Jim Shoemaker 氏に JMAG 導入の背景と活用成果についてインタビューしてきました。

## 重機における電化の取り組み

—JMAG を導入されたきっかけは何でしょうか

**Shoemaker 氏** John Deere では電化プロジェクトを進めており、多くの製品がモータ駆動になっています（詳しくは 644k Hybrid Tractor WEB サイトを参照）。開発においてもバーチャルプロトタイピングに活発に取り組んでおり、可能な限り車両の試作を減らそうとしています。これは、設計、解析、試作からその検査まで、一連の開発プロセス全体における試作回数の削減を目標としています。このために構造解析、電磁場解析、流体解析などあらゆるシミュレーションの導入を進めています。



644k Hybrid Tractor

[http://www.deere.com/wps/dcom/en\\_US/products/equipment/wheel\\_loaders/644k\\_hybrid/644k\\_hybrid.page](http://www.deere.com/wps/dcom/en_US/products/equipment/wheel_loaders/644k_hybrid/644k_hybrid.page)



—JMAG を導入する以前の開発プロセスはどのようなものだったのですか

**Shoemaker 氏** 基本的にモータは、仕様や測定値を参照してサプライヤから購入していました。それを社内のモータベンチを用いて、熱特性から構造特性まで、車両の仕様に合致しているか検証していたのです。購入したモータが車両の要求を満たすものかどうか、物理的に逐一検証しなくてはなりませんでした。

—社内での設計は行われていなかったのですか

**Shoemaker 氏** 大抵、サプライヤの製品から利用可能なものを探していました。その形状から機器特性を理解するための計算は行っていましたが、基礎方程式を用いてアイデアが要求に見合うはずかを見積もるだけのものでした。



—電化プロジェクトは John Deere にとって重要とのことですが、その要求を満たすために独自の設計を行う必要もあったのではないのでしょうか

**Shoemaker 氏** それはありました。市場にある機器では私たちの車両に必要な出力やトルク密度を満たすものがありません。例えば、500W の卓上研削盤のモータの大きさを考えてみてください。私たちの車両は握りこぶし大のモータに、その 500W の定常出力を必要としているのです。高性能のサーボモータでも、私たちの車両のモータの 2、3 倍の大きさがあります。John Deere では、より小さなモータに非常に大きな出力とトルク密度を要求しています。それだけではありません。防水、泥土や飼料からの防汚、過酷な稼働条件への耐久性を備えなくてはなりません。サプライヤのカatalog品の中には、その様な要求を満たすものはありませんでした。

## バーチャルプロトタイプングへの高精度モデルの導入

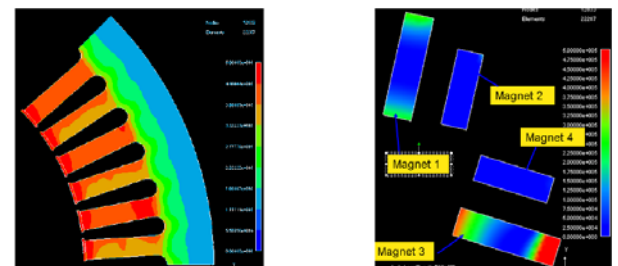
—確かプロジェクトでは SPEED も利用されていたと思います。どの様に連携されているのか教えてください

**Shoemaker 氏** SPEED では多くの性能予測を迅速に行うことができます。しかし、モータ出力が 100kW になることを予見することはできますが、損失の詳細解析にはあまり良くありません。SPEED では効率を 93～96%見積れるかもしれませんが、機械技術者はそれだけのモータを冷却するにはどれだけの冷却水が必要になるかと聞かでしょう。その効率予測範囲では、4kW から 7kW の熱量を排出することになり、2 倍の差があります。これでは機械技術者たちは、私のモデルが推測の域を出ていないと考えるでしょうし、当て推量でより良い結果を得るかも知れません。出力はおよそ 100kW と上手く予測できていたとしても、どれだけの熱量を排気しなくてはならないかはよく分からないのです。本当の効率がどれだけか、トルクリップルがどの程度になるか、製造時の許容誤差、電流・電圧のトレランスがどの程度の影響を与えるか、そしてその値を変更した際に機器へのどの様な影響が予測できるのか。そう

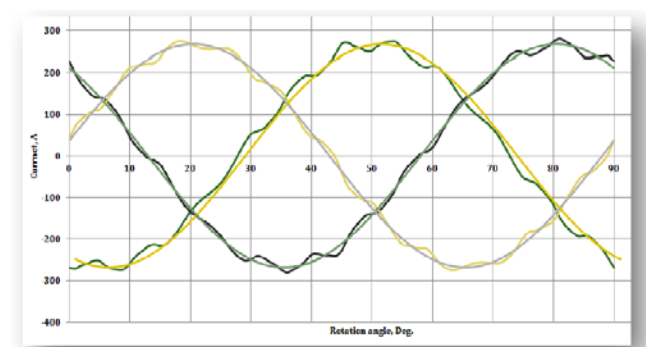
いったことを、更に深く理解する必要があるのです。

—では、電磁界有限要素解析 (Finite Element Analysis: FEA)による解析を導入した最初の動機は、損失評価の高精度化だったのですか

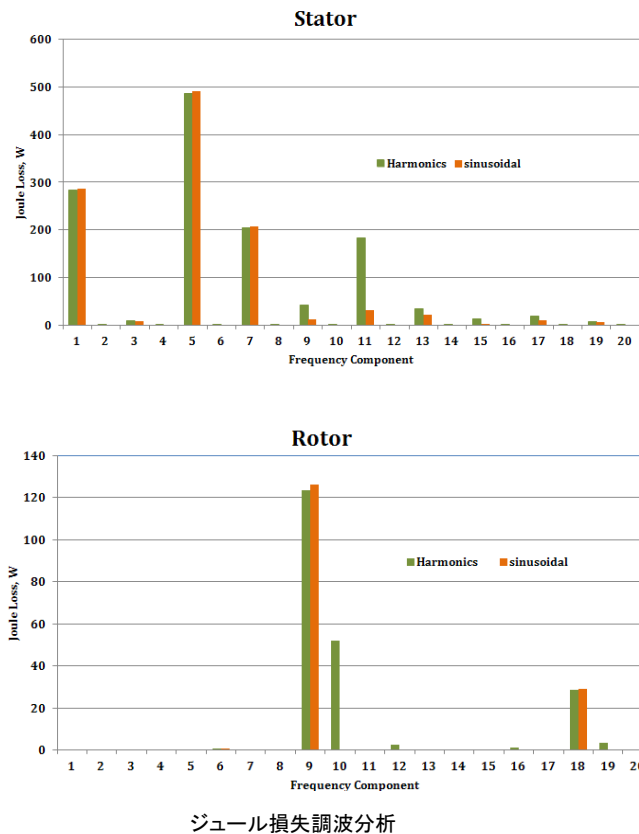
**Shoemaker 氏** 最初の動機は、トルクリップルや動特性といった機器性能の理解を深めることでした。それに続いて損失の高精度解析と制御性の把握ですね。制御性というのは、コイルをもう 1 巻増やした際に電流がどのくらい稼げて、制御に十分な余剰電圧を確保できるかといった検討です。SPEED から得られていた答えは、これらに対して正確ではありませんでした。私たちは今でも基本的なアイデアを得るための初期計算には SPEED を使っています。評価の前に感触を得るためにも、まずこれを行いたいと思っています。



鉄損と磁石損失



電流高調波の損失および効率への影響



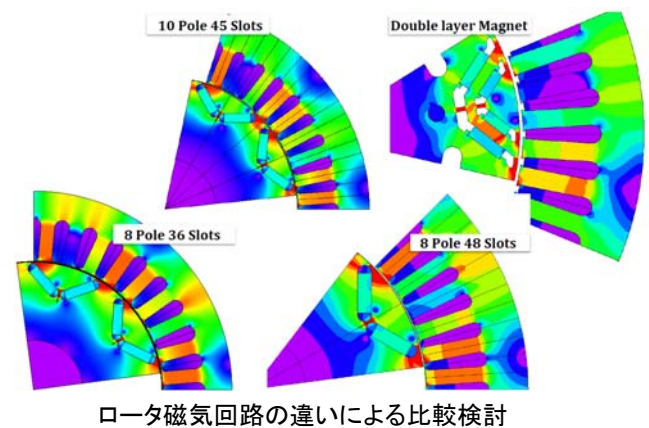
—他の FEA ツールと比較して JMAG の計算速度や精度はいかがですか

**Shoemaker 氏** 他の電磁界解析 FEA パッケージと同じく良い製品だと思いますが、製品比較には多くの時間がかかるので我々はあまり実施していないと思います。JMAG ではマルチフィジクスの連携が不足している様に思います(編集注:この度、マルチフィジクスの強化として JMAG はスモールマルチフィジックスを導入しました)。他のツールのように、あらゆる分野の解析を行うことができればと思います。JMAG の好きなところは、私たちの意見を聞いてもらえるところです。他のツールベンダーではそうはいかず、リリースされた製品を受け入れるしかありません。でも、私たちが例えばバスバーの課題に直面すれば、私は JMAG チームに「どうすればいいのか教えて」と言えば、それに応えてくれます。

—JMAG の導入によって、検討する設計案の数はどのくらい変わりましたか

**Shoemaker 氏** シミュレーションの導入前は、設計案 2

ケースの評価に 6 か月を要していました。ベンチを用いて測定を行うには、多くの手間がかかります。まず取付け器具や軸継手の設定、位置合わせ、冷却装置、位置センサーの調整、IPM を動作させるのに必要なインバーターの設定をしてから、過熱状態、飽和状態そして短絡などの試験を行うこととなります。それが今では、シミュレーションにより 1 週間に 50 ケースは評価することができるのです！私たちの場合、より深く調査する必要があるケースを抽出するために、まず SPEED を用いて誘導機、IPM、SRM などの検討を行っています。磁石が 1 層の場合と 2 層の場合の比較や磁石の角度や位置の検討を行い、そこから JMAG でより深く掘下げていくべき設計案を取捨選択しているのです。



—より深く掘下げて行くといいますと

**Shoemaker 氏** 最初の 1 週間では、複数ケースをざっと評価します。その後、2 ケースほどを取り出し、FEA による詳細解析を行い、目論見通りの設計になっているか確認するのです。それから、駆動回路を繋げて要望通りのパフォーマンスになるかを確認します。

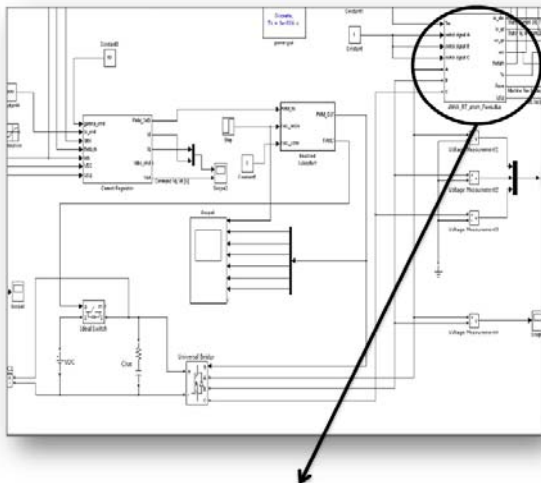
## 制御設計への取り組み

John Deere では各機器向けの制御装置も開発しています。この開発は John Deere とは別部門である John Deere Electronics Solutions(JDES)にて行われています。Jim Shoemaker 氏の部門では機器設計を担当していますが、システム全体のパフォーマンスをシミュレーションできるように制御装置の開発部門とも連携

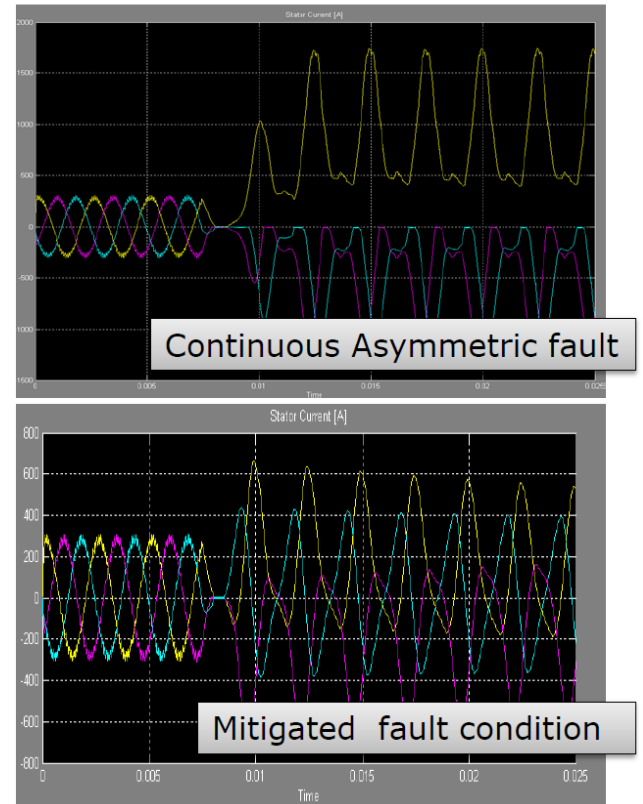
もしなくてはなりません。そのため、John Deere では JMAG-RT が活用されています。JMAG-RT を利用することで、Jim Shoemaker 氏の部門は高精度なモータモデルを作成し、HILS 上で評価するためのコンポーネントとして提供することが可能になっています。

—JMAG-RT を利用することの最大のメリットは为什么呢  
しょうか

**Shoemaker 氏** 私たちのところでは、IPM の制御装置を評価する際に、IPM を測定器に接続することなく HILS 上で模擬するために利用しています。JMAG-RT では、詳細な形状と材料データがあれば、機器特性を正確に模擬することができます。電流振幅ごとの最大トルク、最大効率、無負荷・最大負荷状態それぞれのマップを評価しています。また、この様なバーチャルツールを用いる事のもう一つのメリットは、動作限界での機器動作や、限界値を超えた状態での機器動作を、機器にダメージを与えることなく得ることができる点です。モータやインバーターが燃える心配もありません。



High fidelity RT model developed to capture Inductance variation in highly saturated fault condition



制御回路連携による故障時のシミュレーション

## 充実した技術サポートと技術資料で加速する導入を実感

—JMAG の技術サポートはどう感じですか

**Shoemaker 氏** 技術サポートは、私たちが今までに利用したどんな FEA ツールベンダーよりも優れていると感じています。もちろん、それはまだ私の要望どおりではありません。私は皆さんには、私たちの要求を見越し、私たちの考えを読み、いつでも依頼したものには次の日には応えていただきたいと思います。でも、当然それには時間が掛かりますし、皆さんの技術サポートは非常に良いと思っています。

—アプリケーションカタログなどオンラインの技術資料はいかがでしょうか

**Shoemaker 氏** 常々気に入っています。ユーザー会議の資料も良いですね。私たちはよくダウンロードして読んでいます。他のユーザーの皆さんの経験を得ることができるのは、良いことだと思っています。オンライン

のチュートリアルも素晴らしいと思います。誰もがやりたいことをざっと確認することができますね。

—そういうオンライン資料を利用することで、ツールの習得は速くなりましたか

**Shoemaker 氏** もちろんです。全くの JMAG 初心者にも、新しい機能、ツールを利用したい技術者 にも、有効でした。問題に当たった時にサンプルデータを用いることで、ツールに課題があるのか、使い方が間違っているのかを確認することもできます。

—JMAG や HILS のシステムを組み上げてから、費用対効果としては価値をお感じですか

**Shoemaker 氏** もちろん感じています。バーチャルプロトタイピングはコスト的に絶対有効です。

## マルチフィジクスの取込みによる高度モデル化に期待

—今後 JMAG を用いたシミュレーションには何を期待されていますか

**Shoemaker 氏** 現在最も興味があるのは、熱解析のモデル化です。トルクやスピードについては、非常に正確に評価できています。損失もほぼ正確で、課題はありますが大丈夫です。でも、モータがどの程度の熱を帯びるかの評価については、まだ道筋が得られていません。モータ中心が 180 度まで昇温しないためには、どの出力まで回して大丈夫なのか。現在はまだよく分かっておらず、温度を正確に予見できるツールがないために、JMAG などを用いてもなお、換算係数 2 を用いています。機器特性の評価はすばらしく、損失はおおよそ大きな問題はありますが、熱評価は厳しいです。

—機能的には JMAG にどのような改善を期待しますか

**Shoemaker 氏** うーん、それは私に答えられるかわかりません。やはり熱特性を正しく評価するために、さらにデータを搭載することでしょうか。ちょうど JFE の鋼板材料データベースを取り込んだように。これは JMAG

そのものの機能と言えるかどうか分らず、鋼板の材料データベースを取り入れただけですが、それがなくては正確な結果を得ることはできませんよね。熱解析についても同様だと思います。すべての熱抵抗値や熱容量が正しく分かれば熱特性を計算できるのだと思いますが、その特性値が私たちには分からないのです。スロット内の銅材から水冷帯の鉄材まで各特性値を把握するのは難しいですし、境界表面の伝達係数もよく分かりません。

—では、そういった熱特性値をも搭載すべきだということですね

**Shoemaker 氏** はい。それが次の課題だと思います。私たちのモータには様々な厚みのものがあり、更なる高トルクが必要であれば厚みを増すこともあり得ます。冷却のためには冷却材をステータ周りの冷却帯に流したり、エンドコイルに噴射しますが、モータの厚みがあり大きくなると、積層の中心ではコイルを十分に冷やすことができません。どの厚さまで耐えられるのか、冷却材の温度や流量を変えると可能な厚みはどの程度変わるのか、エンドコイルに掛ける冷却材を増やすと効果はあるのか、厚みが増した鋼板の下では効果が薄いのか、そういったことが次の研究課題です。熱が銅材を通してどれだけ早く端部に伝わり、どれだけ上手く熱を逃がせるか、その違いを把握すること。これはマルチフィジクスな課題だと思いますが、それこそ私が直面している課題です。

—それはソフトウェアだけでなく、材料やノウハウなども含めたソリューション拡充に取組む必要がありそうですね

**Shoemaker 氏** はい。ツールが良くても材料データが提供されなければ、ユーザーとしてはどこで材料が飽和してどの様に挙動するか把握できません。ツールを利用するためのそれらすべての情報が、これからの熱解析に必要なのだと思います。

—ツールの開発と併せて、解析知識の追加も必要に



なってくるわけですね

Shoemaker 氏 はい。現在のツールに含まれる知識ベースとは違います。必要なのは、最良の推測値で、少なくとも有効な見積りです。これも JMAG チームへのリクエストの一つですね。

これは多くのお客様から指摘されてきたことではありません。私たちは JMAG の機能の中に解析ナレッジを取り込んでいく必要があります。私たちはまさに今、取り組んでいます。皆様からの更なるフィードバックをお待ちしております。



John Deere

Deere & Company World Headquarters  
One John Deere Place  
Moline, Illinois 61265

[http://www.deere.com/wps/dcom/globalhome/deerecom/global\\_home.page](http://www.deere.com/wps/dcom/globalhome/deerecom/global_home.page)

# JMAG による高速計算

弊社では、JMAG ソルバの高速化に注力しており、日々技術開発を進めています。本稿では、圧倒的な速度を誇る JMAG 高並列ソルバおよび GPU ソルバのパフォーマンスを御紹介します。大規模モデルを高速に計算されたい方、必見です！

## はじめに

電気機器設計に許容される時間が年々短くなっています。設計時間短縮のための施策の一つとして、Computer Aided Engineering (CAE)の援用が挙げられます。電磁気に関する CAE では、JMAG でも採用している有限要素解析(Finite Element Analysis:FEA)が用いられることが多く、更なる設計時間短縮のため、FEA に要する時間の短縮がご利用者からの強い要望となっています。

JMAG においても、解析時間の短縮を実現するために高速な演算技術を導入しています。本稿では、JMAG-Designer Ver.13 において新たに導入された高並列ソルバならびに GPU ソルバについて、そのパフォーマンスを紹介するとともに、選択すべきハードウェア等、導入に際しての注意点を説明します。

## JMAG 高並列ソルバ

これまで JMAG ユーザーの皆様には、1 つのコンピュータ内のマルチコア CPU (Central Processing Unit) を有効に利用する SMP 並列ソルバをお使いいただいております。しかしながら、この SMP 並列ソルバでは 8 並列が上限とされているため、更に並列度の高いソルバによる計算時間の短縮が、多くのユーザー様より望まれていました。そこで弊社では、複数のコンピュータ(以下、ノード)を高速なネットワークで接続したクラスタシステムを用いて高い並列度で高速な演算を実現する JMAG 高並列ソルバ(以下、MPP ソルバ)を開発しました。このソルバは、クラスタ内の複数 CPU に加え CPU 内のマルチコアも利用することが可能で、従来よりも高い並列度の解析が可能となり、更なる速度向上

が期待できます。

## JMAG MPP ソルバの使い方

本ソルバ使用時には、JMAG 上での設定に加え、適切なハードウェアの選択と MPI (Message Passing Interface) の設定が必要になります。ここでは、JMAG 上での設定方法と、ハードウェアの選定ポイント、対応している OS および MPI について紹介します。

## JMAG における設定

JMAG-Designer の磁界解析スタディプロパティでソルバータグをクリックすると、ソルバーコントロールが表示されます。並列計算のタイプを「分散メモリ型」とし、並列度を設定します(図 1)。その後、解析を実行します。

注: JMAG-Designer Ver.13 では、お使いの市販ジョブスケジューラまたはコマンドラインからの実行になります。コマンドラインから実行する方のために、実行用のサンプルシェルをお渡ししております。JMAG-Designer Ver.13.1 より、JMAG スケジューラからの実行も可能となります。

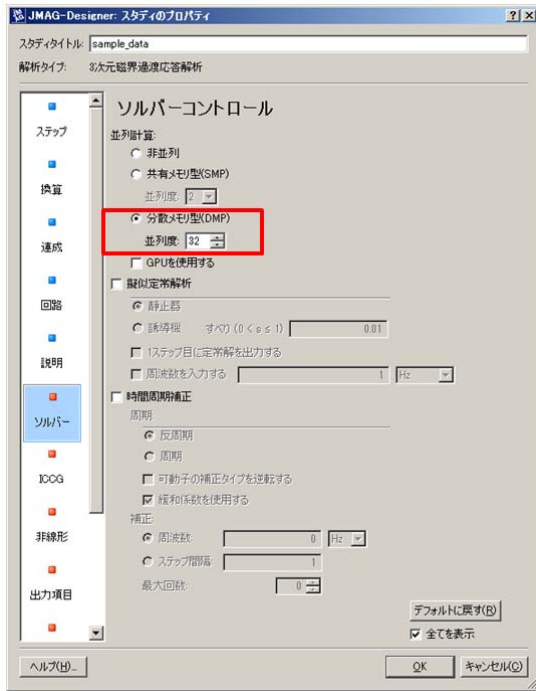


図 1 MPP ソルバの設定

## ライセンス

本ソルバをお使いいただく場合、従来の SMP 並列ソルバとは異なる専用ライセンス(MPS ライセンス)が必要です。並列度数が 16 以下ではライセンスは 2 本、17～32 並列は 3 本、33～64 並列は 4 本のライセンスを消費します。それ以上の並列度でお使いいただく場合は弊社までお問い合わせください。

## ハードウェア選定のポイントと対応 OS ならびに MPI について

JMAG MPP ソルバを用いて高い並列性能を得るためにはハードウェアの選定も重要となります。まず、各ノードについては、Intel® Xeon® E5 シリーズ以降等のメモリバス性能が高い CPU を選定します。また物理メモリを挿入するメモリスロットをすべて埋めることで、ハードウェアの並列性能を高めることができます(図 2)。

本ソルバは、1 ノード中のマルチコアのみでの計算も可能ですが、高並列計算をする場合には複数ノードのご使用を推奨します。その場合、ノード間のネットワークについては Infiniband をご使用ください。

対応 OS は、以下の通りです。いずれも 64bit OS です。

### ・Windows

Microsoft Windows 7

Microsoft Windows HPC Server 2008 R2

### ・Linux

RedHat Enterprise Linux 5、6

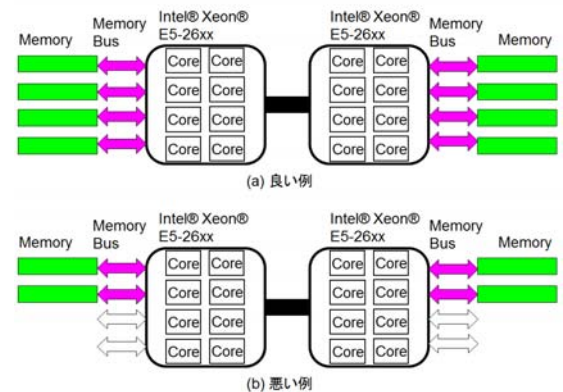


図 2 ハードウェア構成の例

(上:メモリスロットを埋めた良い例、  
下:メモリスロットを余らせた悪い例)

## MPP ソルバのパフォーマンス

### 計算速度の評価

ここでは、JMAG MPP ソルバを用いた速度性能向上の効果についてご紹介します。試験に使用したハードウェアスペックを示します(表 1)。

表 1 ハードウェアスペック

| CPU                         | Intel® Xeon® E5-2670 |
|-----------------------------|----------------------|
| Clock frequency(GHz)        | 2.6                  |
| Number of cores / processor | 8                    |
| Number of processors / node | 2                    |
| Memory (GB)                 | 32                   |
| Number of nodes             | 16                   |
| Network                     | Infiniband (QDR)     |

### 埋め込み型永久磁石モータの過渡応答解析

大規模な三次元永久磁石同期モータ(要素数:約 206 万)について、電気角一周期分の過渡応答解析を実行しました(図 3)。その結果、32 並列では約 2 時間

30分、64並列ではわずか1時間45分で解析を完了することができました(図4)。この性能は従来の非並列と比べ、それぞれ13倍、20倍の速度です。計算結果としてコギングトルクの履歴を示します(図5)。高並列においても非並列時と同一の結果が得られていることがわかります。

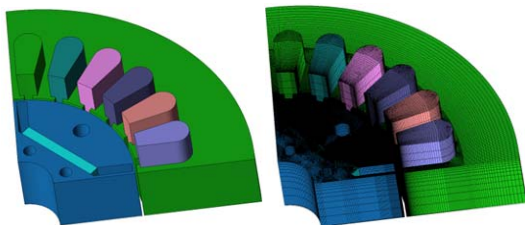


図3 埋め込み型永久磁石モータモデル

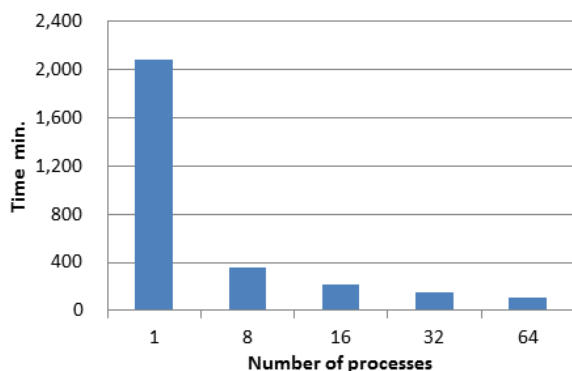


図4 解析時間(埋め込み型永久磁石モータ)

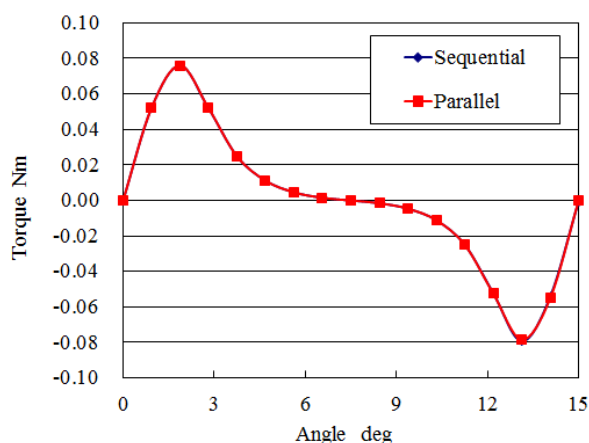


図5 コギングトルク

## バスバーの周波数応答解析

大規模な三次元バスバー(要素数:約242万)について周波数応答解析を行いました(図6)。非並列ではおよそ60分の解析時間を要していましたが、32並列では約6.4分、64並列ではわずか4.6分で解析を完了することができました(図7)。計算結果として、電流密度分布を示します(図8)。高並列時においても非並列時と同一の結果が得られています。

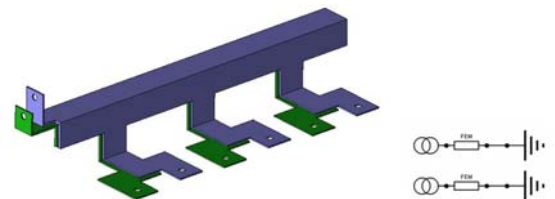


図6 バスバーモデル

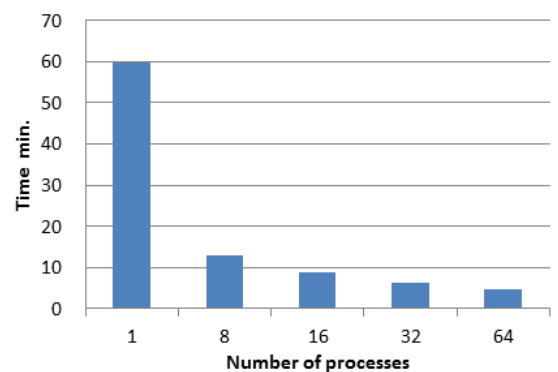


図7 解析時間(バスバー)

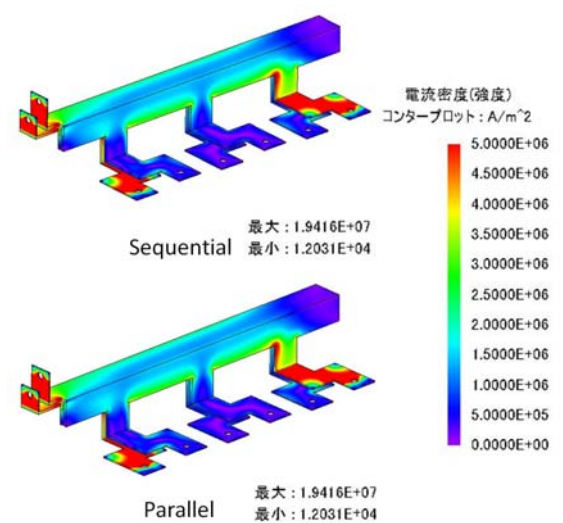


図8 電流密度分布



## JMAG GPU ソルバ

ここ数年、GPU (Graphics Processing Units) の性能は目覚ましい進歩を遂げています。GPU は CPU に比べて圧倒的にコア数が多く、並列処理を得意とします。最近では、その並列性能を活かして、本来の画像処理以外に、スーパーコンピュータの演算装置としても GPU が使われるようになっていきます。もちろん CAE の分野でも GPU は注目されており、数値計算など汎用な目的に GPU を利用する GPGPU (General-purpose computing on graphics processing units) が広まりつつあります。

弊社ではいち早く GPGPU に着目し、2012 年から GPU ソルバを提供しており、日々改良を重ね進化を続けております。

## JMAG GPU ソルバの使い方

### JMAG における設定

JMAG の GPU ソルバの使い方はとても簡単です。スタディのプロパティでソルバータグをクリックすると、ソルバーコントロールが表示されます。そこで「GPU を使用する」のチェックボックスを ON にするだけで使用することができます (図 9)。

### マルチ GPU

JMAG の GPU ソルバは、マルチ GPU にも対応しており、複数の GPU を同時に使用することで更に計算速度を加速することができます。PC の中に複数の数値計算用の GPU がある場合、ユーザーは同時に使用する GPU の数を指定することができます。例えば、2 基の GPU を同時に使用したい場合、並列計算ラジオボタンで「共有メモリ型(SMP)」を選択し、並列度を「2」と設定します (図 9)。同時に使用できる GPU の数は 2、4、8 基のいずれかとなります。

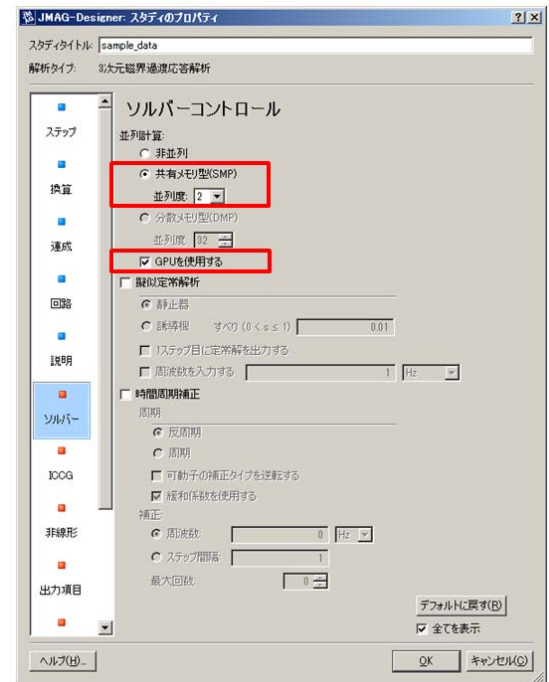


図 9 GPU ソルバの設定

### ライセンス

GPU ソルバを使用するには、Parallel Accelerator 2 (以下 PA2) のライセンスが必要となります。消費するライセンス数は、使用する GPU の数+1 となります。例えば、GPU を 1 基のみ使用する場合には PA2 のライセンスを 2 本消費します。GPU を 2 基同時に使用する場合には、PA2 のライセンスを 3 本消費します。

### ハードウェア環境

JMAG の GPU ソルバは NVIDIA 社製の数値計算向けの GPU のみをサポートしています。今現在サポートしている GPU は以下の通りとなります。

1. Tesla K40
2. Quadro K6000
3. Tesla K20
4. Quadro 6000
5. Tesla C2075
6. Tesla C2070
7. Tesla C2050

GPU ソルバの効果をより高く実感して頂くためにも、できるだけ上位の GPU を使用することをお勧めしてお

ります。

JMAG の GPU ソルバの対応プラットフォームは、Windows 64bit のみとなります。また、解析タイプは静磁界解析、過渡応答磁界解析となります。

## 推奨の計算対象

JMAG の GPU ソルバは、GPU と CPU が絶えず通信を行っています。そのため、計算対象のメッシュモデルが 2 次元や 3 次元でも数万要素程度の場合、計算時間が元々少ないためにかえって GPU-CPU 間の通信がネックとなってしまう場合があります。JMAG の GPU ソルバを使用する場合には、100 万要素超のできるだけ大規模なメッシュモデルを扱うことをお勧めします。

また、JMAG の GPU ソルバは、特殊な数値解法を使用しています。そのため、回路を含む計算モデルでは収束性が悪化する場合があります。電流条件のみを使用するなど、回路を使わない条件設定をお勧めします。

## GPU ソルバの性能

### 計算速度の評価

NVIDIA 社が提供する最新の数値計算向けの GPU、Tesla K40 で JMAG の GPU ソルバを評価した事例を紹介します。

JMAG では、計算時間の多くが有限要素法により得られる線形方程式の反復解法の処理、つまり求解部分の処理に費やされます。特に数百万要素の大規模なメッシュモデルを扱う場合、求解部分の処理時間はより顕著になります。JMAG の GPU ソルバはこの求解部分の処理を GPU により加速する技術を採用しています。そこで、以下では GPU ソルバによる求解部分の処理時間と JMAG の共有メモリ型 CPU 並列ソルバによる求解部分の処理時間の比較を示します。使用した GPU、CPU のハードウェアスペック以下の通りとなります(表 2)。

表 2 ハードウェアスペック

| Hardware               | CPU                   | GPU                   |
|------------------------|-----------------------|-----------------------|
|                        | Intel® Xeon®<br>X5670 | NVIDIA® Tesla®<br>K40 |
| Clock frequency(GHz)   | 2.93                  | 0.745                 |
| Number of cores        | 12 (2CPU)             | 2880 (1GPU)           |
| Memory(GB)             | 24                    | 12                    |
| Memory bandwidth(GB/s) | 32                    | 288                   |

## 埋め込み型永久磁石モータの静磁界解析

4 極 24 スロットの埋め込み型永久磁石モータモデル(図 3、1/8 部分モデル)において静磁界解析を実行した時の 1 解析ステップあたりの求解部分の総処理時間を示します(図 10)。本モデルの要素数は約 200 万要素となります。その結果、GPU を 1 基のみ使用した場合には 14.4 分、2 基使用した場合にはわずか 7.7 分で計算を完了することができました。これは、CPU1 コアの計算時間に比べて、GPU を 1 基のみ使用した場合で約 30 倍、GPU を 2 基使用した場合でさらに約 1.9 倍計算時間が短くなる結果となっています。

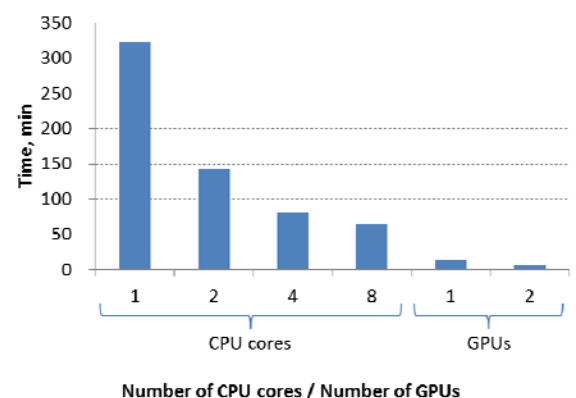


図 10 解析時間(埋め込み型永久磁石モータ)

## リニアモータの静磁界解析

次に、リニアモータモデル(図 11、1/2 部分モデル)において静磁界解析を実行した時の 1 解析ステップあたりの求解部分の総処理時間を示します(図 12)。本モデルの要素数は約 750 万要素となります。その結果、GPU を 1 基のみ使用した場合には 7.5 分、2 基使用した場合にはわずか 4.2 分で計算を完了することができ

ました。これは、CPU1 コアの計算時間に比べて GPU を 1 基のみ使用した場合で約 20 倍、GPU を 2 基使用した場合でさらに約 1.8 倍計算時間が短くなる結果となっています。

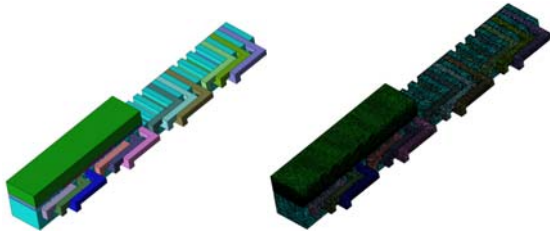


図 11 リニアモータモデル

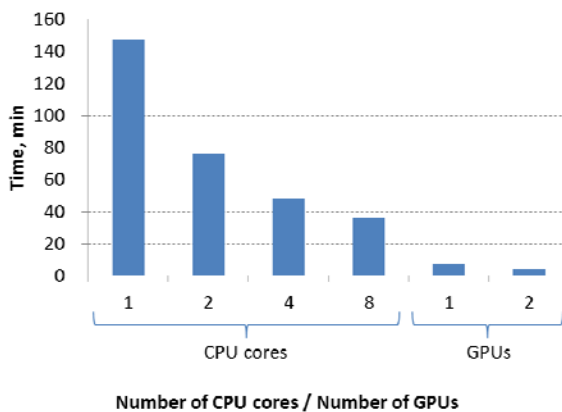


図 12 解析時間(リニアモータ)

### 誘導電動機の過渡応答磁界解析

最後に、ロータスキューを有する誘導電動機モデル(図 13、1/2 部分モデル)において過渡応答磁界解析を実行した時の 1 解析ステップあたりの求解部分の総処理時間を示します(図 14)。本モデルの要素数は約 900 万要素となります。Tesla K40 では GPU のメモリ量が 12GByte に増強されていますので、GPU1 基でもこのような超大規模な計算が可能となっています。GPU を 1 基のみ使用した場合には 71.3 分、2 基使用した場合には 34.5 分で計算を完了することができました。CPU1 コアでの計算時間が 965.3 分(約 16.1 時間)ですので、GPU による計算が圧倒的に速いことがわかります。この結果は、CPU1 コアの計算時間に比べて GPU

を 1 基のみ使用した場合で約 14 倍、GPU を 2 基使用した場合でさらに約 2.0 倍計算時間が短くなる結果となっています。

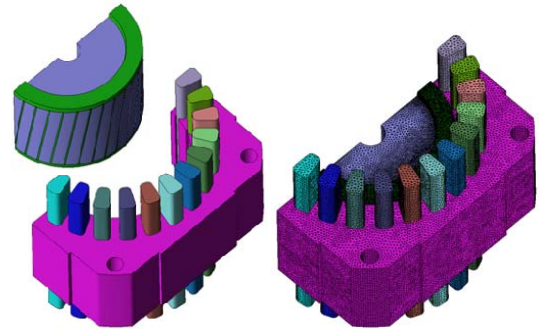


図 13 ロータスキューを有する誘導電動機モデル

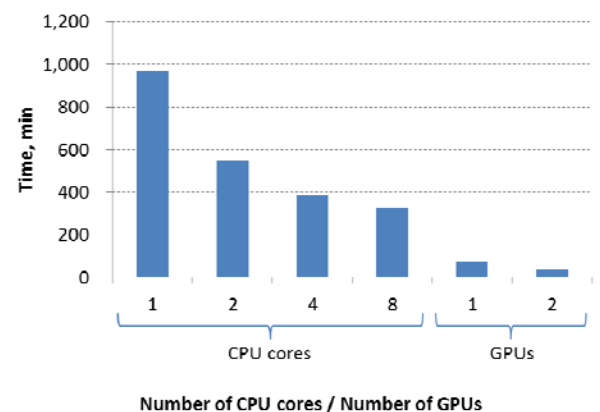


図 14 解析時間(誘導電動機)

## おわりに

本稿では、高速計算を可能にする JMAG MPP ソルバ及び GPU ソルバについて、それらの使用方法とパフォーマンスをご紹介しました。MPP ソルバにおいては、非並列箇所の処理時間短縮等により、更なる性能向上に取り組んで参ります。また、GPU ソルバは、近々周波数応答磁界解析にも対応する予定で、使用できる解析タイプの幅が広がります。

ぜひ一度、お手元で JMAG MPP ソルバ、ならびに GPU ソルバの性能を実感していただきたいと思います。

(三輪 将彦、仙波 和樹)

# JMAG-Express による PM モータ設計

モータ設計ツールである JMAG-Express に便利な機能が着々と追加されております。本稿では PM モータを例にして、JMAG-Express の特徴的な機能を活用したモータ設計事例を紹介します。モータ設計業務の効率化に是非とも JMAG-Express を活用していただきたいと思います。

## JMAG-Express とは

JMAG-Express とは、概念設計から基本設計、詳細設計までの検討を網羅したモータ設計ツールです。JMAG-Express には、基本特性を 1 秒で計算するクイックモードと、磁束密度や損失密度等の分布量やコギングトルクや誘起電圧等の時系列結果が評価できるパワーモードの 2 つのモードを用意しております。JMAG-Express を活用したモータ設計のフローを示します(図 1)。概念設計や初期設計時に、モータの大きなレイアウトを決める段階ではクイックモードを利用し、設計パラメータを最適化し、詳細設計案を固める段階ではパワーモードを利用します。本稿では、JMAG-Express Public と JMAG-Express パワーモードを用いて説明いたします。JMAG-Express Public とは、JMAG-Express クイックモードと同様に、基本特性を 1 秒で計算する無償版の設計ツールです。

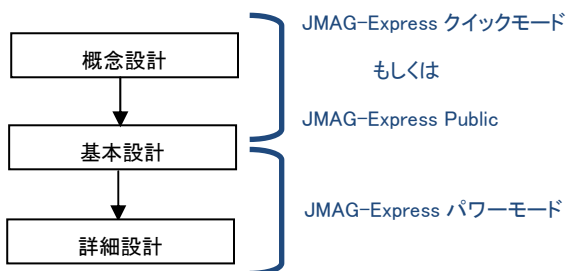


図 1 JMAG-Express を活用した設計フロー

## JMAG-Express Public によるモータ設計

PM モータを例に JMAG-Express Public を利用したモータ設計の方法を紹介します。本稿で設計するモータの要求仕様を示します(表 1)。JMAG-Express Public を利用したモータ設計フローを示します(図 2)。

表 1 要求仕様

|       |                         |
|-------|-------------------------|
| 出力    | 1.0(kW)                 |
| 効率    | 90(%) (出力 1.0kW 満たす駆動域) |
| 最大トルク | 2.5(Nm)                 |
| 電源電圧  | 200(V)                  |
| 最大電流  | 5(Arms)                 |
| 最大回転数 | 4000(RPM)               |

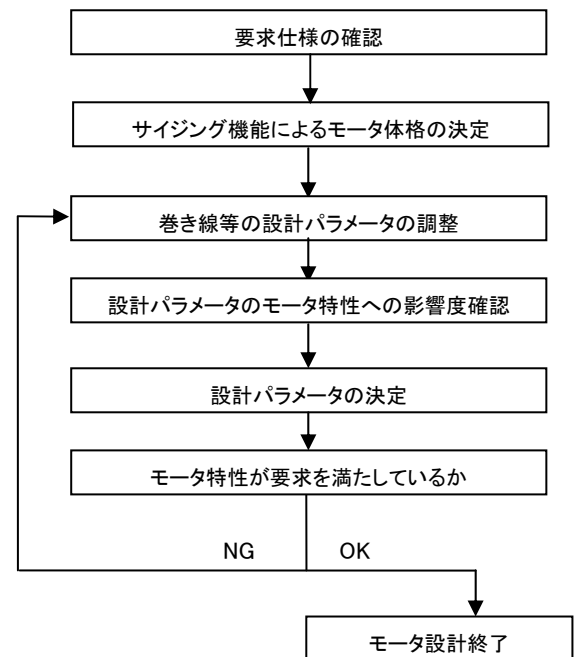


図 2 JMAG-Express Public を利用した設計フロー

### 要求仕様からモータ体格を瞬時に決定

モータの要求仕様からモータの体格を決定するため

には、モータ設計の知識や経験が必要で、大変手間がかかります。JMAG-Express Public にはサイジングという機能があり、モータの目標定格出力等の要求仕様を設定するのみで、モータ体格を瞬時に決めることができます。

それでは JMAG-Express Public のサイジング機能を用いてモータ体格を決めてみます。まず、使用する形状テンプレートを決定します。200 種類以上のテンプレートからロータとステータの組み合わせを自由に選択、変更できます(図 3)。万が一、お望みの形状が見つからない場合は、新たにテンプレートを作成することも可能です。ここでは磁石がかまぼこ型の SPM モータを選択します。サイジング機能では目標定格出力情報から、モータ体格を決めます(図 4)。スロット数や形状寸法だけでなく、材料等のパラメータも自動で調整します。

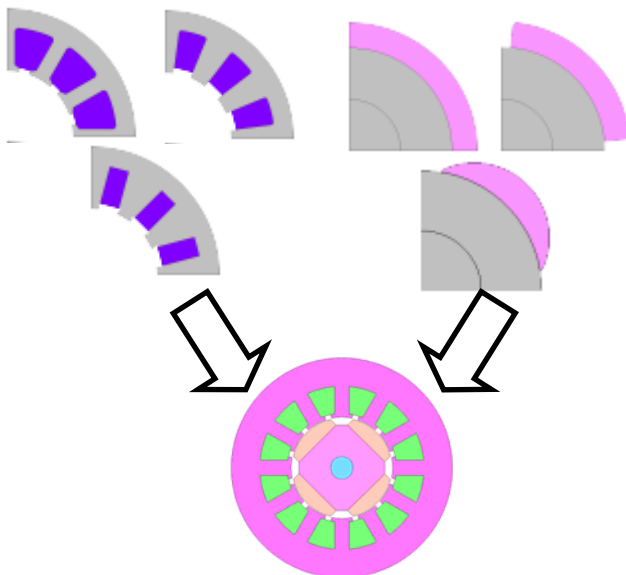


図 3 モータ形状タイプの選択

|                                                   | 目標値                               |
|---------------------------------------------------|-----------------------------------|
| 目標定格出力 (kW)                                       | <input type="text" value="1"/>    |
| <input checked="" type="checkbox"/> 目標最大トルク (Nm)  | <input type="text" value="2.5"/>  |
| <input checked="" type="checkbox"/> 目標最高回転数 (rpm) | <input type="text" value="4000"/> |

図 4 サイジング機能の設定例

## 巻線の検討

モータ体格が決まりコイルスペースが決まりましたので、巻線占積率を確認します。絶縁紙等の占める面積もありますので、コイルスペース 100%を電流通電領域とは使用できません。通常であれば、コイルスペースや占積率は寸法や素線径から自分で計算しなければなりません。JMAG-Express Public では、素線径や絶縁紙の情報から自動的に占積率を算出します(図 5)。また、巻線方法によって変わる抵抗値も自動で計算します。

ここでは、素線を丸線とし、巻線占積率を約 50%に調整し、モータの特性を確認します(図 6)。これでは、回転数 4000(RPM)付近で目標トルク 2.5(Nm)に達していないことが確認できます。

|        |                       |
|--------|-----------------------|
| 結線方式:  | スター結線                 |
| コイル接続: | 直列                    |
| 巻き数:   | 65 (Turn)             |
| ワイヤ設定  |                       |
| 設定タイプ: | 丸線寸法                  |
| 素線径:   | 0.7 (mm)              |
| パラ数:   | 1                     |
| 絶縁紙厚さ: | 0 (mm)                |
| 占積率:   | 51.9289 (%)           |
| 最大占積率: | 75 (%)                |
| 補正係数:  | 1                     |
| 相抵抗:   | 0.120242 ( $\Omega$ ) |
| 層数:    | 2                     |

図 5 巻線設定画面

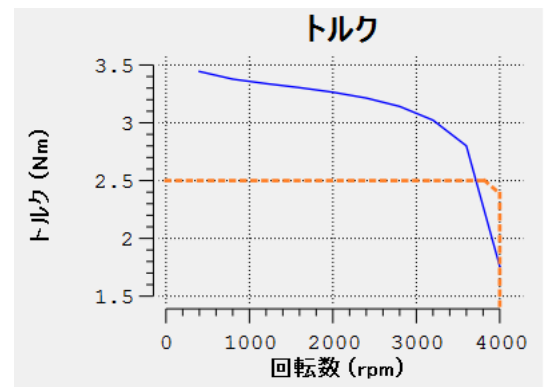


図 6 トルク結果(初期設計案)



## モータ特性が要求を満たしているかの確認

図 6 で確認した通り、低回転域ではトルクが 3(Nm) 以上であり問題ありませんが、4000(RPM) 付近では要求の最大トルク 2.5(Nm) を満たしていません。まずはこの点から解消していきたいと思います。回転数が上がるに従って、逆起電圧が大きくなっていることが原因だと考えられます。磁石が強すぎるのかもしれないので、磁石の形状を変更して、磁石磁束を下げてみたいと思います。今回は磁石幅を小さくしてみます(図 7)。瞬時に全回転数域での特性を確認できますので、磁石幅を変更しながら適切な値を決定します。今回の磁石幅の変更を改善案 1 とし、初期設計案と比較します。JMAG-Express では複数の設計案を一つのグラフに表示でき、簡単に比較できます(図 8、図 9)。

4000(RPM) でもトルク 2.5(Nm) 以上を確保できました。次にコイルの電流密度を確認します。自然対流で単芯の場合、電流密度は  $1.0 \times 10^7$  (A/m<sup>2</sup>) 以下に抑える必要があります。JMAG-Express Public では、トルクや出力だけでなく、各部の磁束密度やコイル内の電流密度も確認することができます(図 10)。コイル内電流密度が  $1.4 \times 10^7$  (A/m<sup>2</sup>) と少し高めであることが確認できます。径の大きい素線に変更し電流密度を下げるために、スロット面積を広げたいと思います。JMAG-Express Public では、トルクに大きく影響するギャップ長を固定しながら、形状寸法を自由に変更できます。ここでは、ギャップ長を維持しながら、0.66(T) と比較的磁束密度に余裕があるバックヨークを小さくすることでスロット面積を広げます(図 11)。スロット面積が大きくなったことで、同じ巻き数でも素線径を大きくすることができ、素線の電流密度を下げることができました(図 12)。最高トルク 2.5(Nm) だけでなく、出力 1.0(kW) も達成することができました(図 13)。

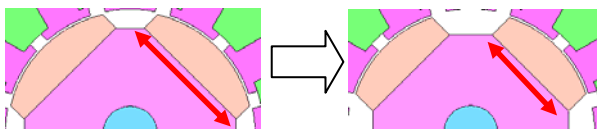


図 7 磁石幅の変更(改善案 1)

| グラフ | 磁石幅  | Ld        | Lq        | 自己インダクタンス | 相互インダクタンス  | Kt        | Ke        |
|-----|------|-----------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|
| 1   | 21.4 | 6.556e-03 | 7.616e-03 | 4.724e-03 | -2.362e-03 | 5.127e-01 | 5.127e-01 |
| 2   | 18   | 6.451e-03 | 6.947e-03 | 4.466e-03 | -2.233e-03 | 4.435e-01 | 4.435e-01 |

図 8 表示する設計案の選択画面

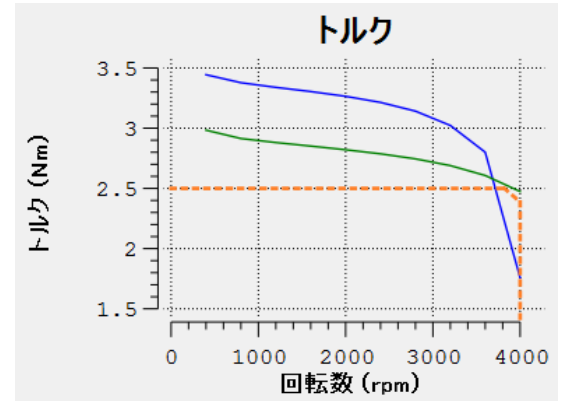


図 9 トルクの比較(初期設計案と改善案 1)

| 平均磁束密度(ティース) | 平均バックヨーク磁束密度 |
|--------------|--------------|
| 1.456e+00    | 6.605e-01    |

| 平均磁束密度(ギャップ) | コイル内電流密度  |
|--------------|-----------|
| 5.850e-01    | 1.483e+07 |

図 10 改善案 1 の計算結果

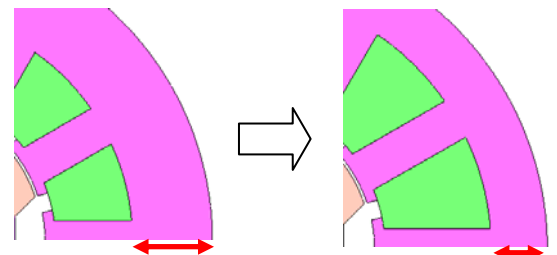


図 11 スロット面積の変更(改善案 2)

| 平均磁束密度(ティース) | 平均バックヨーク磁束密度 |
|--------------|--------------|
| 1.462e+00    | 9.743e-01    |

| 平均磁束密度(ギャップ) | コイル内電流密度  |
|--------------|-----------|
| 5.799e-01    | 7.267e+06 |

図 12 改善案 2 の計算結果

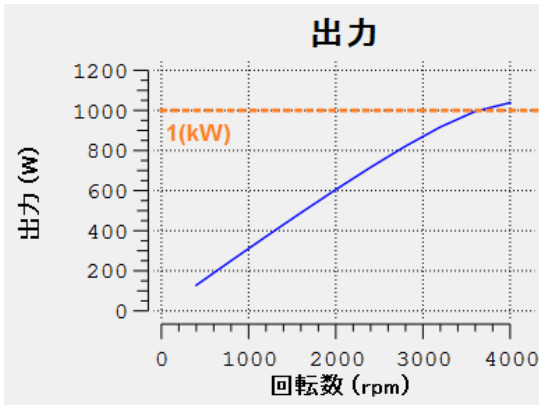


図 13 改善案 2 の特性結果

## JMAG-Express パワーモードによる高精度化

JMAG-Express Public の検討結果を受けて、詳細検討を JMAG-Express パワーモードで進めます。JMAG-Express パワーモードを利用したモータ設計フローを示します(図 14)。

JMAG-Express Public では磁束密度やトルクの平均値で検討しておりましたが、JMAG-Express パワーモードでは磁束密度や損失密度の分布、トルクや誘起電圧の時系列結果で検討できます(図 15)。磁束密度分布や磁束線の情報から、磁気飽和しているかの確認等、電磁鋼板を有効に活用できているか確認できます。また、トルク波形から、騒音の原因となるトルクの脈動(コギングトルク)を下げるための形状変更も検討できます。このように、JMAG-Express パワーモードを利用することで、磁気回路を効率良く構成するモータを設計することができます。

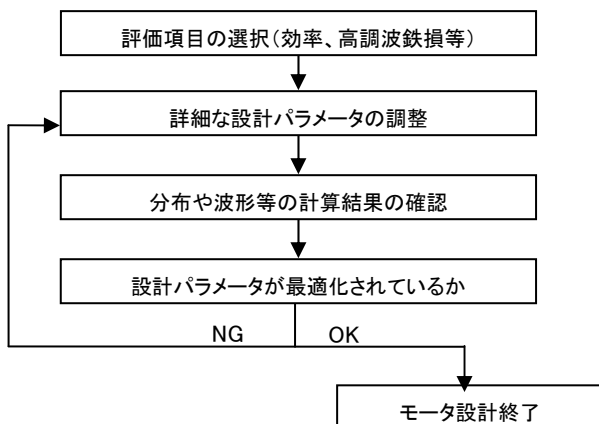


図 14 JMAG-Express パワーモードを利用した設計フロー

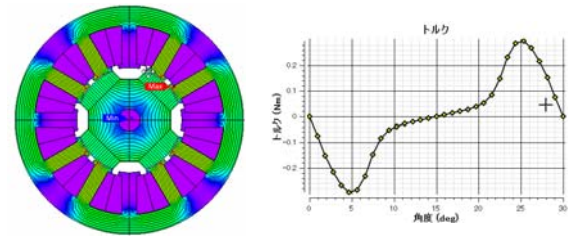


図 15 JMAG-Express パワーモードで得られる結果例  
(左:磁束密度分布と磁束線、右:コギングトルク)

## 効率マップを活用したモータ設計

通常では効率マップを求めるのに手間がかかりますが、JMAG-Express パワーモードを利用すると簡単に求まります。ここでは JMAG-Express パワーモードを利用して、駆動域全体の効率マップを確認します。効率マップを評価する場合、評価項目に「基本特性」を選択し、計算対象の「効率」にチェックを入れます(図 16)。あとは解析実行するのみで、電磁界有限要素解析を用いた詳細計算で得られた効率マップが得られます(図 17)。出力 1kW を満たす回転数 4000RPM で、効率 90% を満たしていることが確認できました。

効率マップとともに、銅損や鉄損のマップも確認できます。高負荷領域では銅損が大きくなり、高回転領域では鉄損が大きくなっている等も確認でき、なぜそのような効率マップになったのかの原因も確認することができます。パワーモードを活用することで、最適な設計パラメータを見つけることができます。

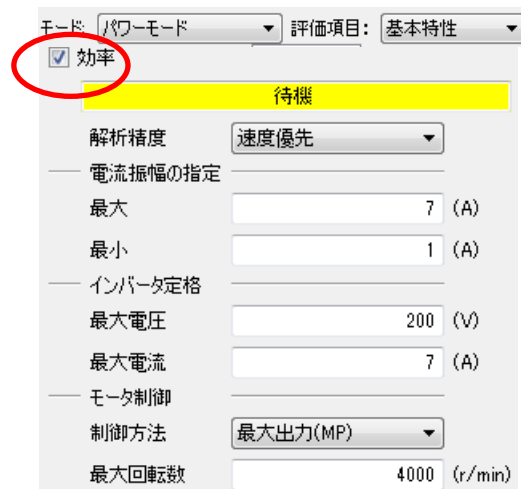


図 16 JMAG-Express パワーモードの設定

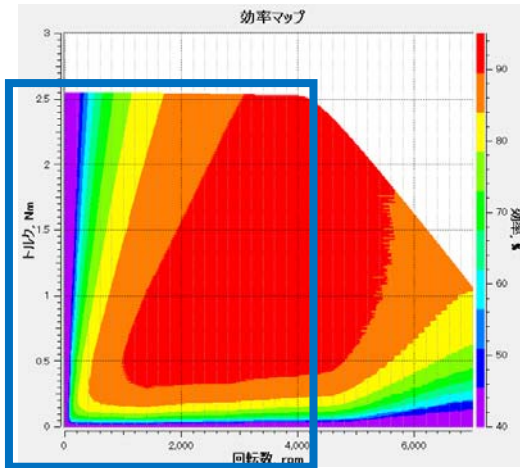


図 17 効率マップ

## 最後に

JMAG-Express を是非ともモータ設計に活用していただきたいと思います。紹介しました JMAG-Express Public は、無償ですので、どなたでもお使いいただけるモータ設計ツールです。JMAG-Express Public の次のバージョンでは、パラメトリック機能が搭載されます。こちらの機能も是非ともお試しください。

JMAG-Express パワーモードも是非お試しください。なお、JMAG-Express パワーモードは有償ライセンスが必要です。 

(服部 哲弥)

## JMAG-Express Public からモータ設計を始めよう

JMAG-Express を利用することで、モータの概念設計から詳細設計までの検討ができることはご理解いただけたかと思います。また、JMAG-Express Public 単体でもモータ設計を検討できることはご理解いただけたかと思います。JMAG-Express を体感いただくために、無償版の JMAG-Express Public からモータ設計を始めたいと思います。

JMAG-Express Public は簡単に入手できますので、以下の方法でソフトウェアとライセンスを取得して下さい。

### 1. ダウンロード

JMAG-Express Public の WEB ページにアクセスして、JMAG-Express Public をダウンロード。

### 2. ライセンスキーの取得

同じく JMAG-Express Public のページからライセンスキーの申し込み。

### 3. インストールとライセンスキーの設定

JMAG-Express Public をインストールし、送られてきたライセンスキーを入力。

JMAG-Express Public WEB ページ URL

<http://www.jmag-international.com/jp/express/index.html>

## 第 3 回 モータ詳細設計の進め方

この連載ではモータの設計の初心者を対象として、初歩的な知識の習得を望む方に設計の情報を提供することをテーマとして、我々が考えるモータ設計の進め方を紹介しております。今回は初期設計を行い、詳細設計のスタート地点となる初期設計案をまとめました。最終回となる第 3 回では、設計の仕上げとなる詳細設計に取り組みます。

詳細設計のキーワードはトレードオフで、JMAG-Designer/JMAG-Express が得意とする分野です。

JMAG-Designer/JMAG-Express を使って試行錯誤した事例を御紹介することで、モータの詳細設計の進め方のヒントになればと考えています。

### モータの詳細設計

初期設計を行い、要件を満たせることを確認したら、モータの詳細設計に取りかかります。ここからがモータ設計者にとって本番です。”詳細設計”は言い換えると”最終設計”なので、全てを決めます。部品の価格や作り方で文字通り全てです。そうでなければ実機を作ることができません。部品図までは書かないにしても、その寸前までを設計者はイメージできている必要があります。モータ設計者は、実際にモータ部品を実際の機械に取り付ける設計者やモータを組み立てる技術者の疑問に答える必要があります。モータ設計者の他にはその疑問に答えられる人は居ません。”この寸法は 0.5mm でなければいけないのか？作りにくいから、0.6mm にしたい”という提案に対しても、信念に基づいて”0.5mm でお願いします。理由はカクカクシカジカ…”と説明できなければいけません。この状況は別にモータ設計に限ったことではありません。我々のソフトウェアの開発もそうですし、ラーメン屋さんが新しいメニューを考案するときの苦労も同じです。最後の産みの苦しみが一番大変です。

またまた、前置きが長くなってしまいましたが、詳細設計におけるキーワードは以下となります。

- ・無駄をそぎ落とす
- ・トレードオフを吟味し高次元でバランスさせる
- ・品質を向上する
- ・信頼性は十分確保する

正確にはそれぞれは独立した事象ではありませんが、こ

のテーマに沿って詳細検討を進め、設計案を煮詰めていくことで良い製品に近づけていけるはずです。

第 3 回では、これらのテーマに沿って JMAG-Express Public や JMAG-Designer を使用した典型的な検討例を示しながら、モータの詳細設計を進めてみたいと思います。初期設計案として第 2 回でまとめたものを記します(表 1)。

表 1 初期検討で決定した諸元

| 項目     | 仕様          |
|--------|-------------|
| 形式     | インナーロータ SPM |
| 極数     | 4           |
| スロット数  | 12          |
| ステータ外径 | φ 80(mm)    |
| ロータ外径  | φ 40(mm)    |
| 積厚     | 51(mm)      |
| コイル巻数  | 60(turn/極)  |
| コイル抵抗  | 0.77(Ω/相)   |
| コイル線径  | φ 1.0(mm)   |
| 最大電流   | 7(Apeak)    |
| コア     | 50A400      |
| 磁石     | ネオジ焼結       |
| 重量     | 2(kg)       |
| 最大トルク  | 2.5(N・m)    |
| 最高回転数  | 4000(rpm)   |
| 出力     | 1(kW)       |

## 無駄をそぎ落としていく

まずは無駄をそぎ落としていきます。わかりやすい無駄の例は、磁束密度がやたらに低い磁路です。この部分をなくせば軽量化できます。あるいは、コイルの通路に振り分ければ銅損を減らせる可能性もあります。ただ、実際には無条件な無駄はあまり残っていない場合が多く、結果的には余裕を削って行くトレードオフの問題になる場合が多いです。

見落とされやすい無駄な磁路としてはロータ内側の磁路が挙げられます。シャフトとの勘合する必要もあるので、磁気回路の都合で無闇に削るわけにはいきませんが、検討する価値はあります。まずは磁路として必要最低限なスペースを確認します(図1)。

シャフト径は初期設計案では16(mm)にしていたのですが、これを±8(mm)の範囲で振ってみました。シャフト径を太くすることは、ロータの磁路を狭めることに相当します。

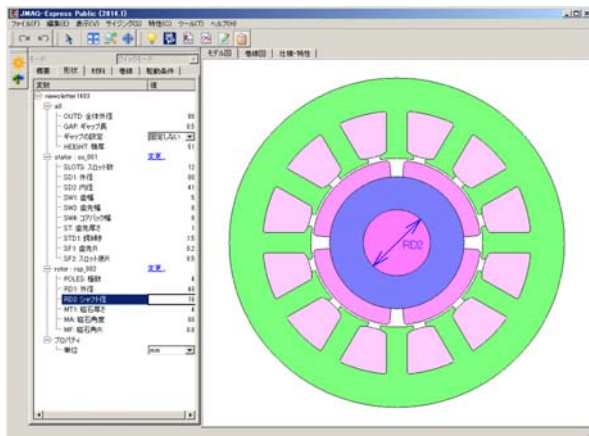


図1 シャフト径の検討

シャフト径の違いによるロータ重量とトルク定数の相関関係、シャフト径の違いによる回転数-トルク特性をみてみます(図2、3)。シャフト径(穴径)を振った結果、初期値の16(mm)より細くしてもトルク定数の向上はありませんでした。これは磁石内側の磁気抵抗が初期値でも十分低く、磁路を増やしても重量が増えるだけの無駄であることがわかりました。逆に太くした場合、20(mm)では殆ど影響が見えませんが、24(mm)まで太くすると磁石内側の磁路が足りなくなって、トルク定数が低下しています。

したがって、シャフト穴径は16(mm)から20(mm)に太くしても差し支えないことが解ります。ちなみにロータコア重量は

235(g)が191(g)に軽減されるので、40(g)の軽量化となります。全体で2(kg)程度のモータなので、寄与度としては小さいかなというのが印象はありますが、無駄は無駄ですので、20(mm)に変更することにします。

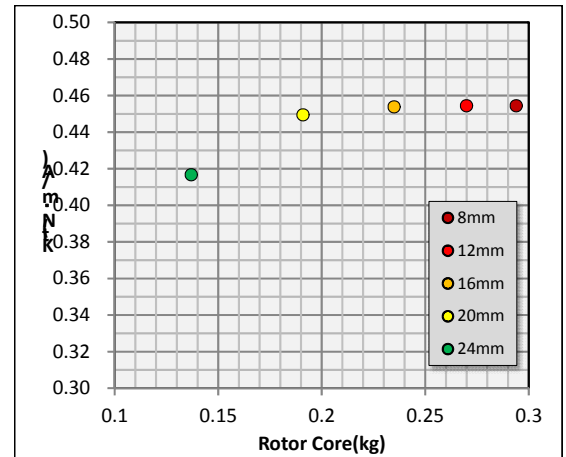


図2 シャフト径によるロータ重量とトルク定数の関係

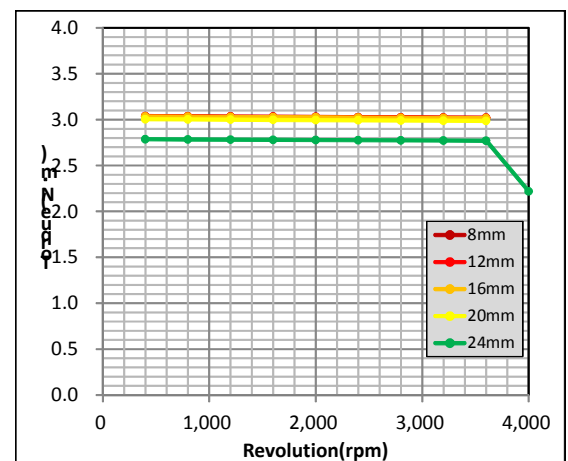


図3 シャフト径の違いによる回転数-トルク特性

## トレードオフを吟味する

設計の醍醐味はトレードオフです。あちらを立てるとこちら立たずというわけで、明らかに矛盾している設計パラメータを、なんとかまとめ上げるのが設計者の仕事です。

ここでは、ステータコアのヨークの幅について検討しました。外径と積厚を固定すれば、全体の外径・重量への影響はほとんどありません。モータ内部のスペースをうまくバランスさせるかがモータ設計者の検討項目になります。コアバックを厚くすると磁気飽和のリスクは減りますが、コイルの巻線スペースは圧迫され、抵抗値が増加し、銅損が増加します。コ



コアバックを薄くした場合はその逆です。銅損を適切に抑えつつ、磁気飽和させないための寸法検討になり、とまさにトレードオフ、調整、すり合せになります。

コアバックの初期値は 8(mm)で、±2(mm)変更して検討しました(図 4)。その際、コイルの巻数 60(turn)および、占積率 50.4(%)を維持するように素線径を変化させ、相抵抗のみが連動するようにしました。パラメータを示します(表 2)。

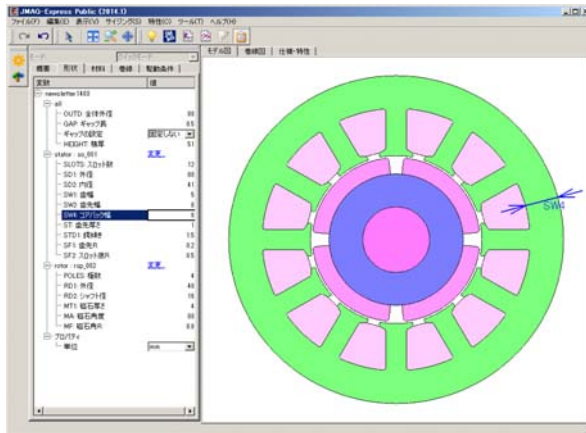


図 4 コアバック幅の検討

表 2 コアバック幅と素線径、相抵抗

| コアバック幅 | 素線径                    | 相抵抗               |
|--------|------------------------|-------------------|
| 6(mm)  | $\phi 1.12(\text{mm})$ | 0.457( $\Omega$ ) |
| 7(mm)  | $\phi 1.06(\text{mm})$ | 0.504( $\Omega$ ) |
| 8(mm)※ | $\phi 1.00(\text{mm})$ | 0.559( $\Omega$ ) |
| 9(mm)  | $\phi 0.94(\text{mm})$ | 0.625( $\Omega$ ) |
| 10(mm) | $\phi 0.87(\text{mm})$ | 0.720( $\Omega$ ) |

コアバック幅を変えた場合の相抵抗とトルク定数の関係を確認すると、初期値の 8(mm)より増やしても、トルク定数が変化しないことから、初期値でも磁気回路的には余裕があることがわかります(図 5)。しかし、相抵抗はスロット面積が減ることにより線形に増加していますので、コアバック幅を 8(mm)より広げることにはメリットがないことがわかります。逆に狭めた場合は、狭めるにしたがってトルク定数が低下しており、磁気回路に影響が出始めていることが解ります。相抵抗に関しては線形に低下していることも確認できます。

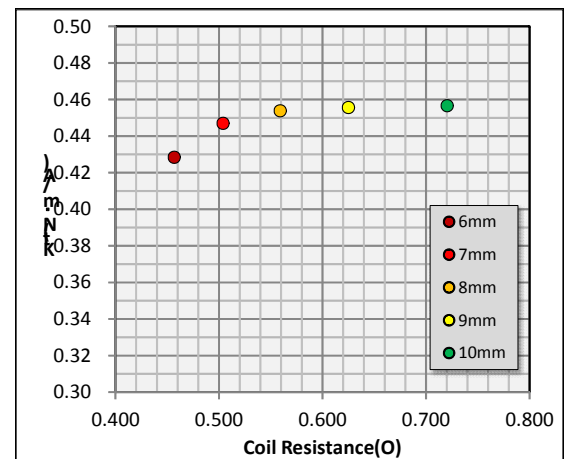


図 5 コアバック幅による相抵抗とトルク定数の関係

コアバック幅の違いによる回転数-トルク特性を確認すると、7~10(mm)ではあまり特性に影響は出ていませんが、6(mm)から最大トルクが低下している様子が確認できます(図 6)。

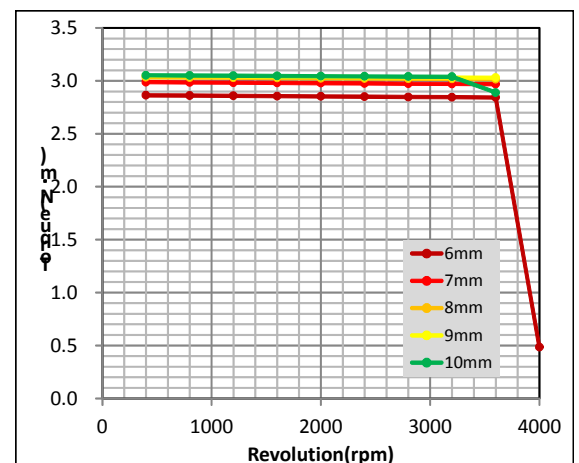


図 6 コアバック幅の違いによる回転数-トルク特性

回転数-効率特性を確認すると、コアバック幅を狭めることで相抵抗が低下するので効率が向上していますが、7(mm)より狭めても殆ど差がないことがわかります(図 7)。これらを総合し、コアバック幅は 7(mm)に変更することとします。

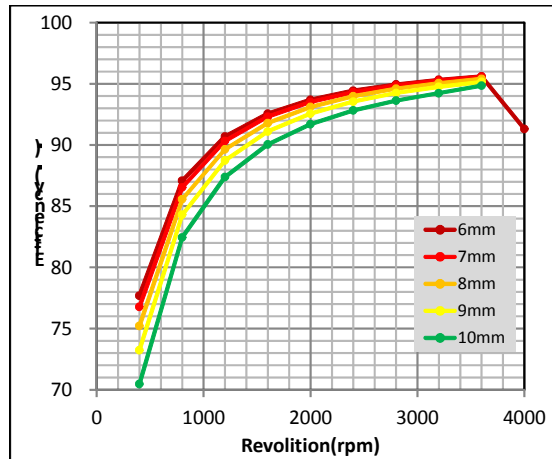


図 7 コアバック幅の違いによる回転数-トルク特性

次に歯幅について検討します。磁気回路での位置付けとしてはコアバック幅と同じで、歯幅を狭くすることでコイルの面積を上げることが可能となり、相抵抗の低減が期待できますが、磁気飽和のリスクが高まります。したがって、相抵抗と磁気飽和のバランスを取ることが検討方針となります。初期設計案では歯幅は 5(mm)でしたが、±2(mm)の範囲で振ってみました(図 8)。

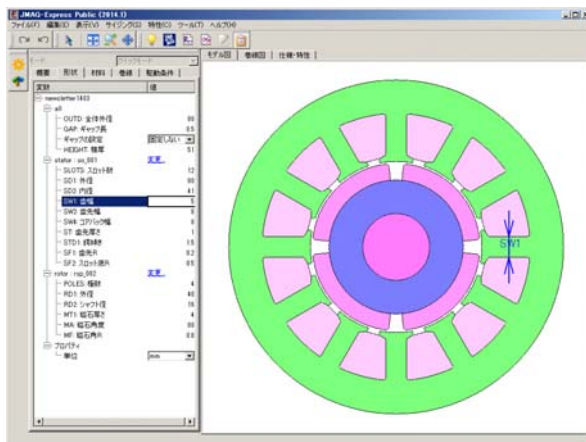


図 8 歯幅の検討

歯幅を変えた場合の相抵抗とトルク定数の相関関係を見ると、歯幅を変えることにより、相抵抗と磁気抵抗がトレードオフの関係になっていることがよくわかります(図 9)。歯幅を 4(mm)から 3(mm)に狭めると急激に磁気飽和が進み、トルク定数が低下しています。一方、6(mm)と 7(mm)ではトルク定数に変化がありませんので、磁気回路として余裕があることがわかります。ティースの平均磁束密度を確認しても、

4(mm)で 1.8(T)に達しており、ケイ素鋼板の一般的な飽和磁束密度の 2(T)に近づいていることがわかります(表 3)。

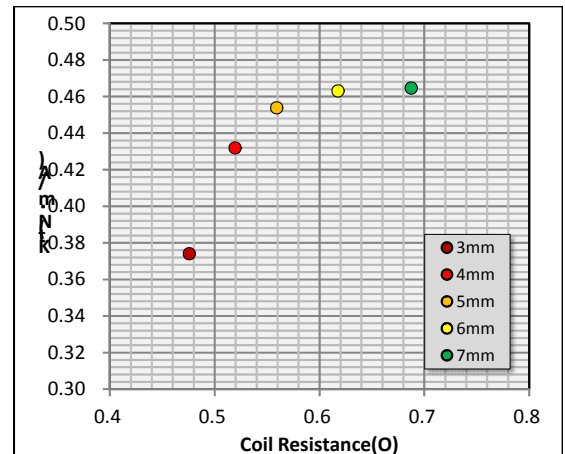


図 9 歯幅による相抵抗とトルク定数の関係

表 3 歯幅と平均磁束密度(ティース)

| 歯幅     | 相抵抗      | 磁束密度     |
|--------|----------|----------|
| 3(mm)  | 0.476(Ω) | 1.978(T) |
| 4(mm)  | 0.520(Ω) | 1.799(T) |
| 5(mm)※ | 0.559(Ω) | 1.561(T) |
| 6(mm)  | 0.618(Ω) | 1.353(T) |
| 7(mm)  | 0.687(Ω) | 1.171(T) |

歯幅を変えた場合の回転数-トルク特性をみると、既に 5(mm)以上ではトルク定数に変化していないことから解っているように、最大トルクに変化は殆どありません(図 10)。しかし、4(mm)、3(mm)と狭めると最大トルクが低下していることが解ります。

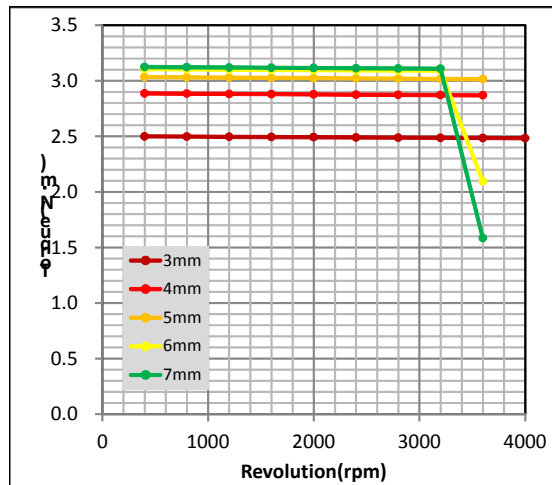


図 10 コアバック幅の違いによる回転数-トルク特性

トルク定数の低下は誘起電圧定数の低下と等価のため、高回転域での出力特性が向上していると捉えることで、設計的にメリットがあるように感じることもあるかと思いますが、高回転化を目指すのであれば、コイル巻数を減らしたり、磁石量を減らしたりすることで、高回転化を実現した方が正しいアプローチです。折角の磁石磁束を、ティースを細くしてスポイルするのは得策ではありません。

次に磁石の厚さについて確認してみましょう。特に希土類磁石の場合、モータの他の部品に比べて材料費が非常に高いので、使用する量について吟味が必要であることは言うまでもありません。

磁石の厚みを増すことで磁石自身の起磁力は増加します。しかし、磁石の比透磁率はほぼ 1.0 のため、モータの磁気回路で考えると厚みを増やした分だけエアギャップが伸びたのと同様の効果になってしまい、磁気回路全体での磁気抵抗が増加するので、厚みの増加分ほど磁束量は増えません。初期設計案は 4(mm)ですが±2(mm)の範囲で検討してみました(図 11)。

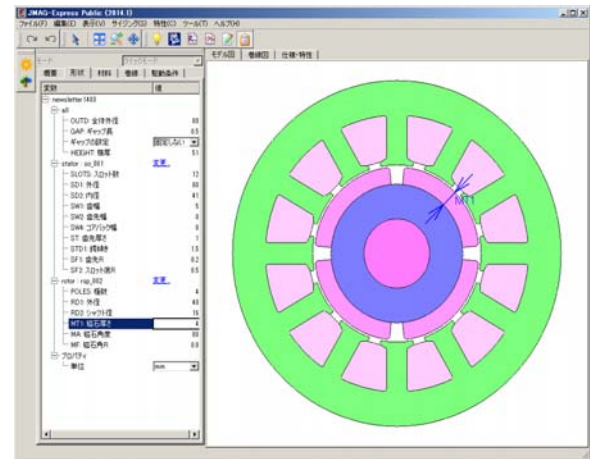


図 11 磁石厚さの検討

磁石厚さによる磁石重量とトルク定数の関係を見てみます(図 12)。磁石を初期値よりも厚くしてもトルク定数はあまり増加していません。これは、前述の通り起磁力と磁気抵抗の増加によるものです。一方、薄くしていくとトルク定数の大きく低下しています。モータの磁気回路では磁石以外にも、ロータとステータの間にエアギャップが存在しています。磁石を薄くしていくと、この変化しないエアギャップ長が相対的に効いてくるため、磁石を薄くする方がトルク定数への影響が大きいことが確認できます。回転数-トルク特性を確認すると、トルク定数の変化が出力特性にそのまま表れている様子が見てとれます(図 13)。

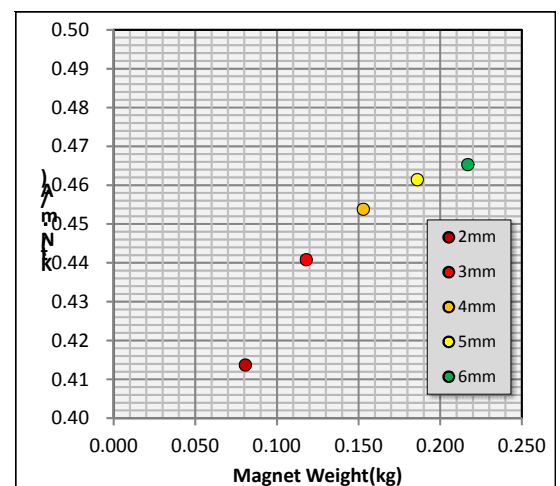


図 12 磁石厚さによる磁石重量とトルク定数の関係

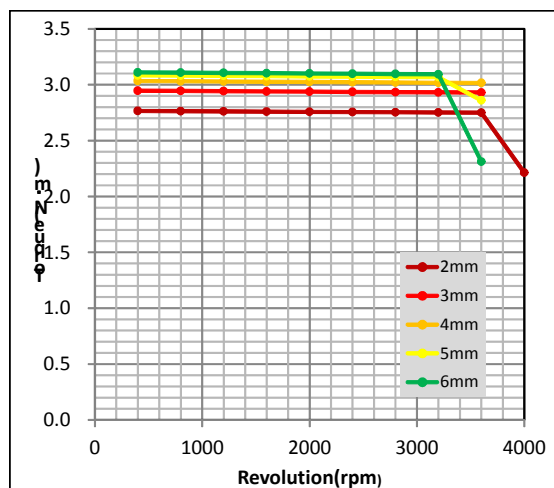


図 13 磁石厚さの違いによる回転数-トルク特性

磁石の厚みと回転数-トルク特性の関係を確認した結果、初期設計の 4(mm)から 3(mm)に薄くしても良さそうなのが確認できました。ただし、実際に厚みを決定する場合には、反磁界減磁や熱減磁を考慮する必要があります。このような解析は計算精度が必要になるので、JMAG-Designer のような精度の高いソフトウェアを用いて判断するのがよいと思います。

本来のモータ設計であれば他にもトレードオフを色々検討すべきことがあります。このまま全てについて実施すると一冊の本になってしまうので、トレードオフに関する事例の提示はこの程度に止めさせていただき、次のテーマである品質の向上についての検討してみたいと思います。

## 品質を向上する

品質とは何を指すか判断が分かれるところですが、ここではコギングトルク等のトルク変動や振動の要因を低減することが品質向上に繋がるモノとします。

例えばコギングトルクのように形状に対して敏感な検討は JMAG-Designer で行います。ここでは、磁極の弧の角度をパラメータにしてコギングトルクがどのように変化するかを確認して見ました。JMAG-Designer の解析画面は、汎用目的である分、設定項目や結果分析も多岐にわたり、高精度な解析を行うことができます(図 14)。

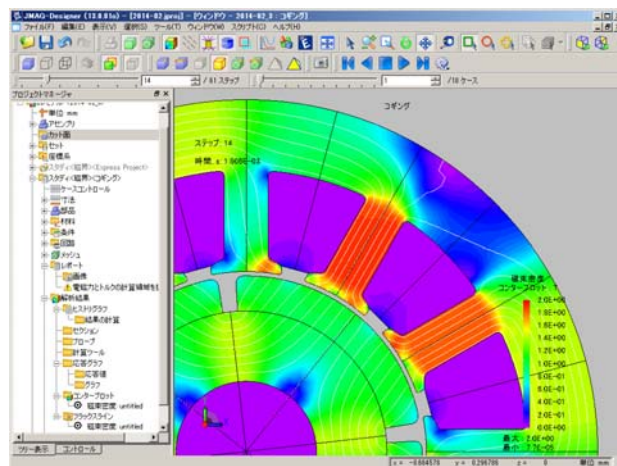


図 14 磁石角度の検討

得られたコギングトルクの波形を分析していきます(図 15)。初期設計案は磁極の弧の角度は 80(deg)で極間に 10(deg)分の隙間を空けています。このときのコギングトルクは±0.65(N·m)でした。磁石の角度を狭めて隙間を拡げるとコギングトルクが低下していき、68(deg)まで狭めると±0.15(N·m)まで低下する様子が確認できました。しかし、それ以上狭めると、逆にトルク変動が増加しました。

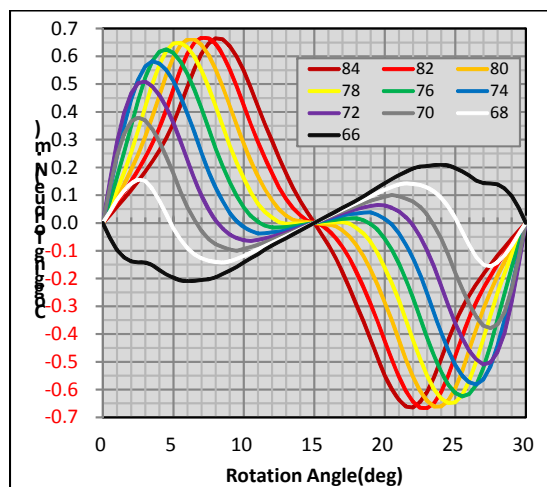


図 15 コギングトルク波形

コギングトルク低減のために磁石の角度を狭めると、当然磁石磁束が低下しますので、トルク定数の低下に繋がります。このときの誘起電圧波形(図 16)を JMAG-Designer で求めてみます。回転数は 600(rpm)です。

まず特徴的なのは、誘起電圧波形の振幅は概ね 14(V)付近で大きな差はありません。波形は、磁石の弧の角度が大



きい方が矩形波に近く、角度が小さくなるにしたがって高次成分が増えているように見えます。特にコギングトルクが最小となった 68(deg)では最大が 15.5(V)まで増加し、60(deg)での落ち込みは 12(V)を下回っています。このように誘起電圧が激しく変化すると、電流を正弦波に保つのが難しく、鉄損が増加する要因になるので、注意が必要となります。

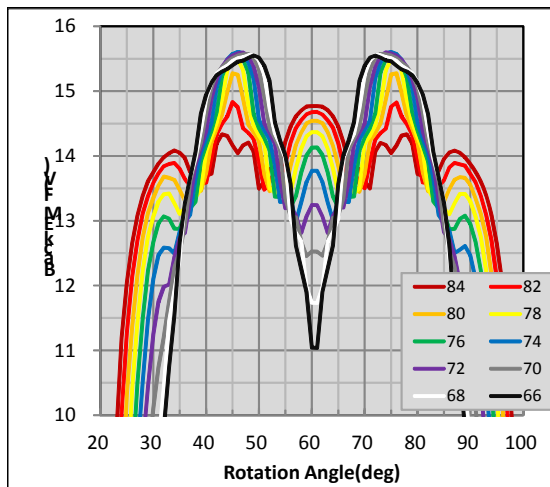
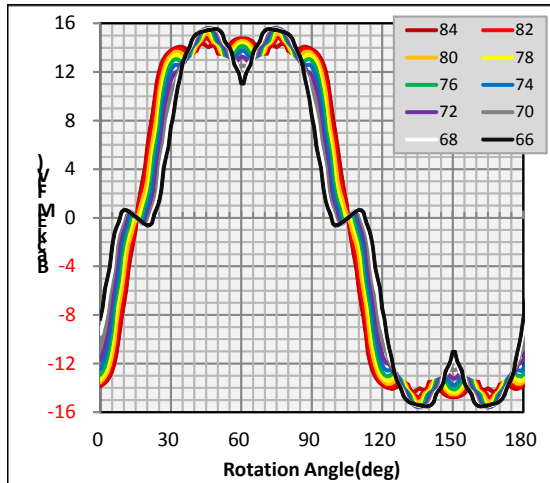


図 16 誘起電圧波形 上:1 周期分、下:ピーク付近

誘起電圧波形を FFT 処理した結果で分析してみます(図 17)。磁石角度は 84(deg)から 66(deg)まで変化させているので、単純換算で磁束数は 78(%)まで低下させていることになります。基本波である 20(Hz)の電圧振幅は角度を狭めるにしたがって漸減しますが 17.5(V)が 15.8(V)に低下しているだけなので、91(%)に留まっています。一方、スロット高調波にあたる 60(Hz)成分は 4.6(V)が 0.6(V)まで低下しており、14(%)と大幅に低減しました。しかし、回転 5 次の 100(Hz)成分は一

旦低下した後に急上昇するという動きを示しており、結局 1.8(V)から 3.3(V)に倍増していました。このように、モータは基本波だけでは読み切れない次数ごとの性質を持っているので、最終的な判断を下すためには精度の高いツールを使う必要があると考えています。

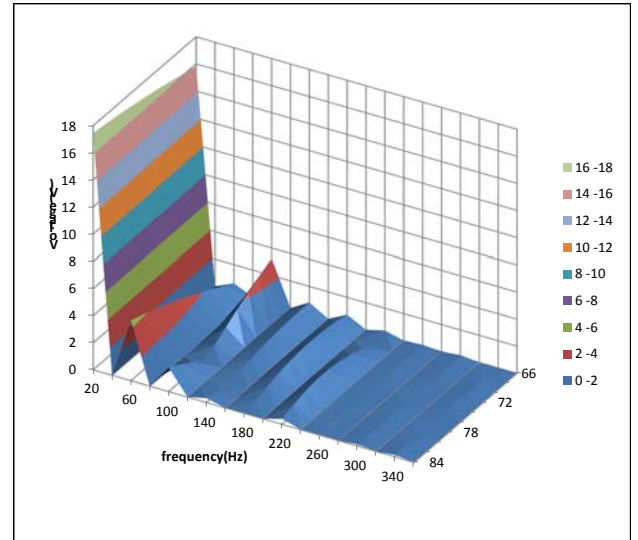


図 17 磁石角度ごとの誘起電圧のスペクトル比較

## 信頼性は十分か

性能を確保し、品質を向上したら、最後は信頼性です。電磁機械ですから出力が出るのは当然ですが、世の中の役に立つためには、振動や衝撃が加わっても壊れないであるとか、色々な環境において安定した性能を発揮するなどの信頼性が必要となります。これらは初期検討や詳細設計の中である程度片がついているべきです。勿論、壊れることは問題外ですが、余裕がありすぎる場合も設計的には問題であると思います。

ここでは温度範囲内で特性がどの様になるかを確認して見ましょう。今、この原稿は 2 月に書いています。この間ニュースで北海道での内陸で $-30(^{\circ}\text{C})$ を下回ったというニュースがありました。一方、昨夏は四国で $40(^{\circ}\text{C})$ を超えたことが話題になりました。狭い日本でも $-30\sim+40(^{\circ}\text{C})$ の温度変化するわけですから住んでいる人間も大変ですが、モータもその範囲でキチンと機能することが必要です。ここでは $20(^{\circ}\text{C})\pm 40(^{\circ}\text{C})$ で性能がどのように変わるかを確認します。

モータ部品で温度の影響を強く受けるのが、磁石とコイルです。ネオジム焼結磁石の残留磁束密度(Br)の温度係数は



-0.11(%/K)といわれているので、 $\pm 40(^{\circ}\text{C})$ 変化するとBrが $\pm 4.4\%$ 変化することがわかります。同様にコイルの電気伝導率の温度係数は0.38(%/K)といわれているので $\pm 40(^{\circ}\text{C})$ 変化すると $\pm 15.2\%$ 変化することがわかります。

この影響をモータに適用して、温度の違いによってトルク定数とコイル抵抗値がどのように変化するかを示します(図18)。初期温度を $20(^{\circ}\text{C})$ とし、 $60(^{\circ}\text{C})$ まで上昇させるとコイルの抵抗値が上昇して損失が増加し、磁石が弱まってトルク定数が低下するという相乗効果で出力・効率が低下してしまいます。磁石の強さで決まるトルク定数に影響が出ますが、温度係数が大きい銅損の変化が大きくなっていることがわかります。逆に、温度を $-20(^{\circ}\text{C})$ まで下げるとBrは上昇し、抵抗も下がるので、特性が向上することが期待できます。

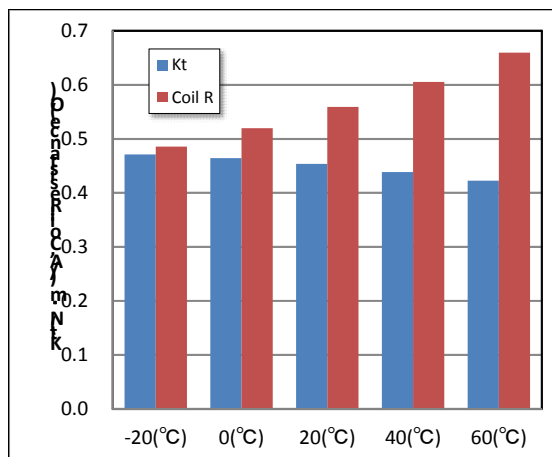


図18 温度の違いによるトルク定数、コイル抵抗の変化

次に、実際にモータ特性にどれほどの影響があるのかを確認してみましょう。回転数-トルク特性をみると、トルク定数が低下しているため最大電流時のトルクが低下している様子が確認できます(図19)。一方、磁石磁界が弱まっている分、誘起電圧定数も下がるので高回転まで回るようになります。回転数-効率特性では、温度の上昇により銅損が増加するので効率が低下している様子が確認できます(図20)。特に出力中で銅損が支配的となる低回転で効率が低下し、 $20(^{\circ}\text{C})$ で75(%)あった効率が $60(^{\circ}\text{C})$ で70(%)まで低下することがわかります。

この影響は、実運用状態では自分自身の発熱にでてきます。モータの出力を一定に維持しようとした場合、温度が上昇していくと、モータ温度が上がる→性能・効率が低下→入

力を増やして回復→発熱量の増加→モータの温度が更に上がる→…の連鎖反応に陥り、急激に温度が上昇することもあります。特に高温時に目標効率以上(=目標損失以下)の性能を発揮できているかを確認することが重要になってきます。

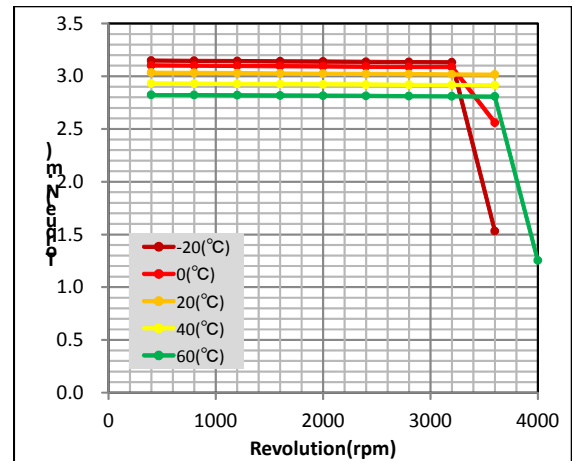


図19 温度の違いによる回転数-トルク特性

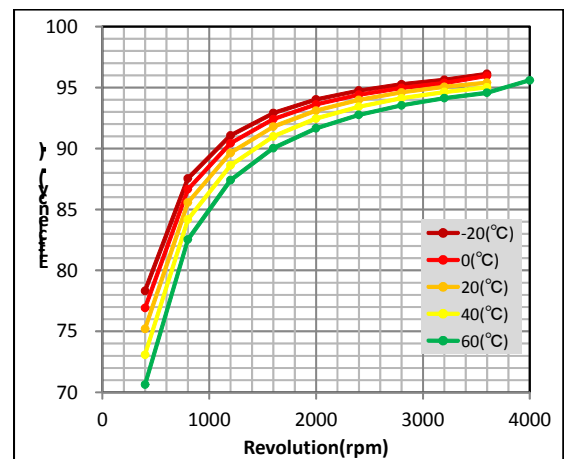


図20 温度の違いによる回転数-効率特性

## ゴールに辿り着けたか

これらの詳細検討により設計案がブラッシュアップされました。無事要件を満たし、信頼性やコストの見通しがたったのでしょうか。そうであれば、設計も完了です。

今回の数少ない検討の中でも初期設計案に対して各部の見直しを図りました。変更点に示します(表4)。検討の結果、若干の改善を図ることができました。特に磁石のサイズを削減できたことは、コスト面で有利になります。

表 4 初期設計案と最終案

| 項目     | 初期案               | 最終案               |
|--------|-------------------|-------------------|
| シャフト径  | 16(mm)            | 20(mm)            |
| コアバック幅 | 8(mm)             | 7(mm)             |
| 磁石厚さ   | 4(mm)             | 3(mm)             |
| 相抵抗    | 0.559( $\Omega$ ) | 0.504( $\Omega$ ) |
| トルク定数  | 0.454(N·m/A)      | 0.434(N·m/A)      |
| 最大トルク  | 3.03(N·m)         | 2.90(N·m)         |
| 磁石重量   | 0.153(kg)         | 0.118(kg)         |
| 全重量    | 2.24(kg)          | 2.26(kg)          |

回転数-トルク特性、回転数-効率特性を見ると、最終案では最大トルクは 3.03(N)から 2.90(N·m)に下がりましたが、効率は若干改善しています。その上で、磁石を 20(%)以上低減できているので悪くない結果だと思われます(図 21、22)。

もちろん、誌面の関係で一部しか検討していませんので、実際の設計では、もっと様々な検討を行う必要はあります。一つの検討で何割も改善することはないと思います。せいぜい 1(%)くらいでしょう。しかし、“塵も積もれば山となる”の諺どおり、多数の項目で 1(%)ずつでも改善すれば、製品では数(%)以上の改善することが期待できるので、地道な努力を続けることは大切です。

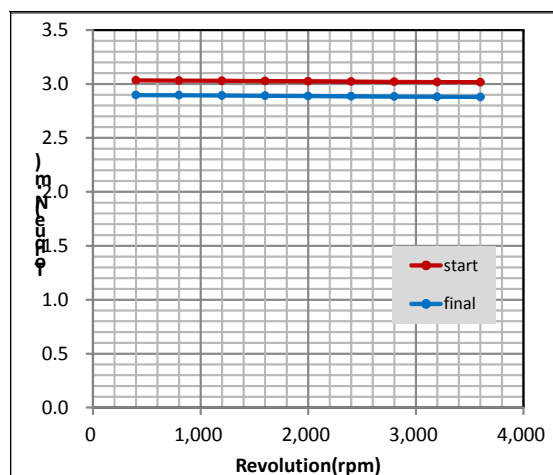


図 21 初期設計案と最終案の回転数-トルク特性

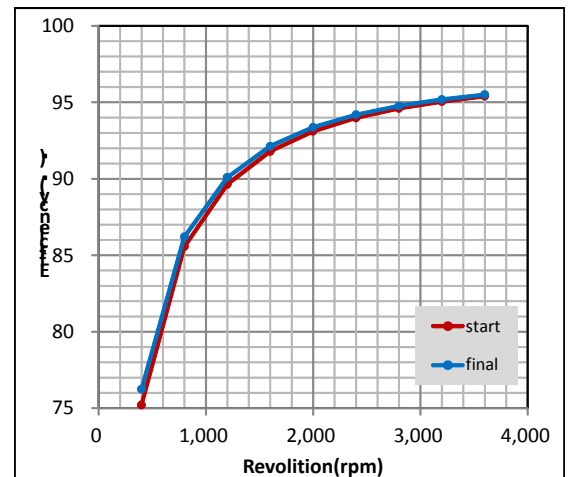


図 22 初期設計案と最終案の回転数-効率特性

## 試作機からのフィードバックを活かす

詳細設計が終わり、無事の設計がまとまれば試作に移ることになり、答え合わせになります。ここで色々なことがおきますので、更に対策していきます。解りやすく、設計(解析)ではトルクが〇〇(N·m)出るという計算結果だったが、実機では××(N·m)に留まったということもあるかと思います。その原因を探り、とにかく対策するしかないのですが、その過程で、どの時点の検討・どの部位で誤差が生じたのかを把握するチャンスとなり、非常に重要なフィードバックが得られます。そこを把握し、検討方法を修正することで次回設計時における改善点が明確になります。ベテランの設計者はそのような経験を沢山持っているのです。予め性能マージンを数%持っておいて、最後に吐き出すとか、材料にファクターを掛けて検討をしていくなどのノウハウがあると思います。

## 連載のおわりに

今回の連載では、私たちなりに考えるモータ設計のプロセスをまとめてみました。モータ設計にこれから取り組む方や興味をお持ちの方には設計の流れをイメージしていただけたと思います。また、設計の流れの中で JMAG-Express Public や JMAG-Designer のツールを活用していく方法などもご理解いただけたのではないのでしょうか。

ただし、設計におけるツールの寄与度は所詮気の利いた電卓程度です。良い設計をするためには、設計者のセンスが重要である必要ないことはありません。ツールは設計者の判断を助けることはあっても、ツール自身は主體的

に良い設計案を生み出したりはしません。多分、最適化ソフトウェアと磁界解析ソフトを組み合わせで出てくる最適設計案は、ベテラン設計者が手計算でひねり出してきた設計案に合わないと思います。それに、ベテラン設計者が最適化ソフトと磁界解析を組み合わせれば更に最強の設計案を生み出すことが期待されますので、どんな道具を使っても初心者はベテランには合わないのです。したがって、とにかく設計初心者は場数を踏んでセンスを磨いていただき、ベテラン設計者になっていただくしか道はないのです。その練習台として JMAG-Express Public や JMAG-Designer を使って設計を進めてください。 

(坂下 善行)

# コラム トルク変動発生の様子

モータ設計講座ではモータ設計の流れを中心に解説していますが、このコラムでは設計講座で説明しきれなかった話題について JMAG を使った簡単な実験を行いながら考えてみます。

今回の話題はトルクリップルについてです。モータ設計者にとってトルク変動の低減は課題であり続けるテーマだと思います。残念ながら、我々はここでトルク変動低減の妙案や秘策を披露するほどの設計力を持っていませんので、JMAG を使ってトルク変動の様子を示す事で、皆さんがトルク変動低減を対策される際のヒントを提示できればと考えています。

そもそも、モータはどの様にトルクを発生しているのでしょうか。みなさんはトルク(電磁力)を見た事がありますか？私はありません。教科書を見ると、ローレンツ力によってトルクを生じるとか、マックスウェル応力により発生する等それらしいことが説明されていますが、本の中の話です。私は実際にトルクが出ている様子を見たいと常々思っていました。その思いは未だ果たされていないのですが、JMAG はそれに近いものを見る機会を与えてくれます。

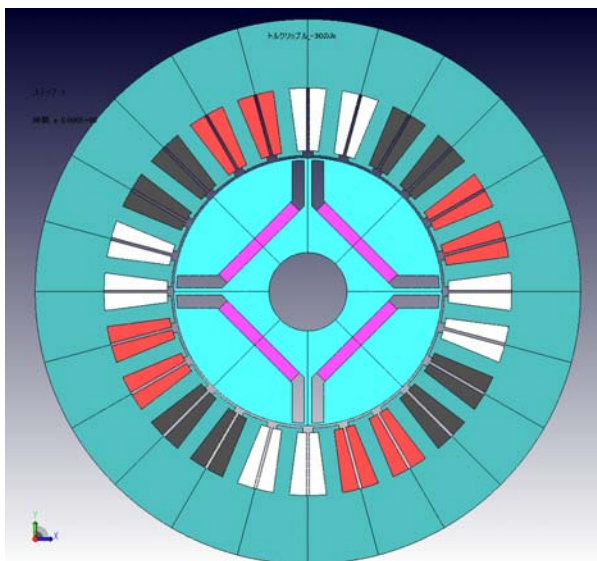


図 1 モータモデル形状

トルク変動発生の様子を観測するために IPM モータについて解析を実行しました(図 1)。対象は 4 極 24 スロットですので、電気角は 90(deg)になります。電流は三相正弦波を通電したところ、トルク波形は図の通りになりました(図 2)。トルク波形のグラフを見ると、トルク変動が 15(deg)ごとに大きく落ち込んでおり、スロットピッチによる影響である事が予想されます。ここで、”スロットピッチによる影響である事が予想されます”と軽く結論づけて解った気になると、トルクリップルが見えてきません。もう少し掘り下げる必要があります。

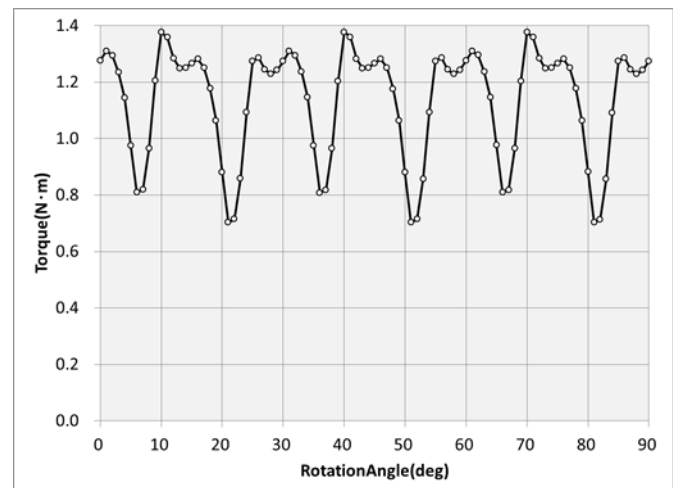


図 2 モータのトルク変動

普通にトルクを発生している状態のモータの磁束線と節点力を確認してみます(図 3、4)。特徴的なのは、とにかくロータとステータの吸引力(半径方向の力)が非常に大きいということです。ただし半径方向の力はトルクに寄与しないので、ここでは無視します。

ティースから出ている電磁力ベクトルを見ると、ロータのN極とS極の境目付近のティースでトルクに繋がる $\theta$ 方向の大きな力が出ている事がわかります。他の位置にあるティースには、有効なトルクは出て無さそうです。

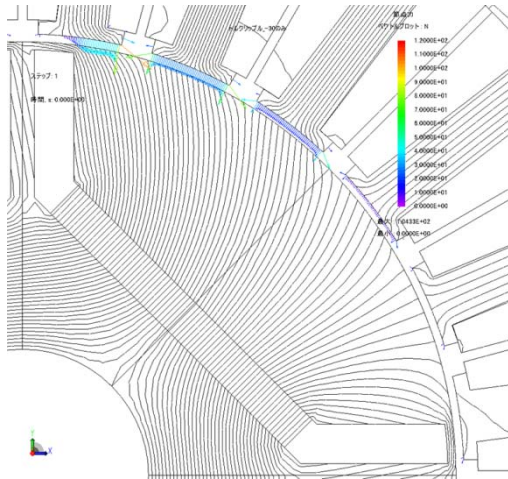


図3 モーター内の磁束線と節点カベクトル

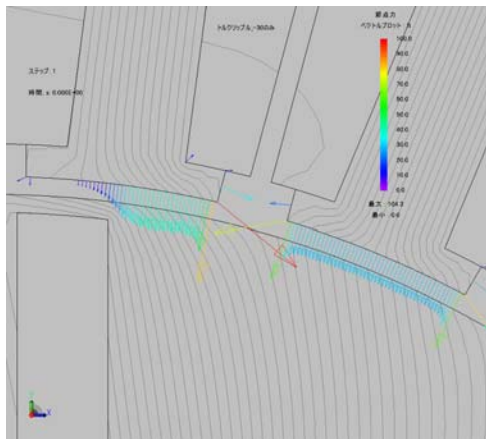


図4 モーター内の磁束線と節点カベクトル(拡大)

次にティース一本ごとにトルク条件を設定し、ティース1本ごとのトルクを観測してみます(図5)。

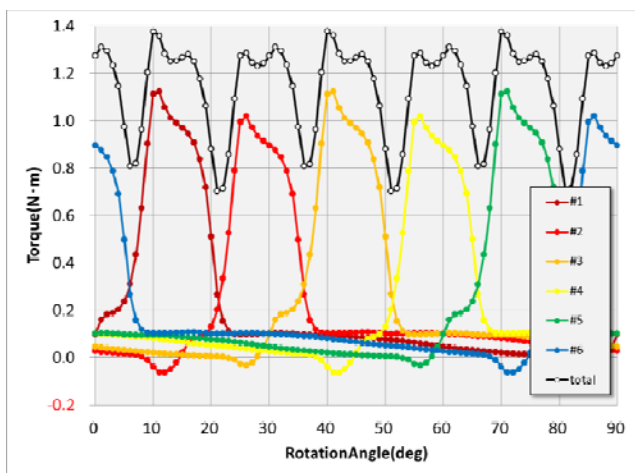


図5 各ティースの全体のトルク波形(電気角 1/2 周期分)

節点カベクトルの絵から何となく推測できていましたが、実際にグラフにしてみるとなかなか壮観です。これにより解ることは、モータが発生するトルクの大部分は一本のティースで生じている事がわかります。回転に伴い、その歯が入れ替わることでトルクを連続して発生していることも良くわかります。1本のティースに着目すると、電気角半周期である 90(deg)のうち 15(deg)弱の間トルクを発生し、残りの 75(deg)強の間はお休みしている感じになっています。ここで、”15(deg)弱”といったのが重要で、トルク変動はこの”弱”が大きく、オーバーラップが上手くないときに谷ができることで発生していることが解ります。

もう少しトルク波形を細かく見て見ましょう。1 ティースピッチに相当する 0-15(deg)の区間で拡大してみます(図6)。

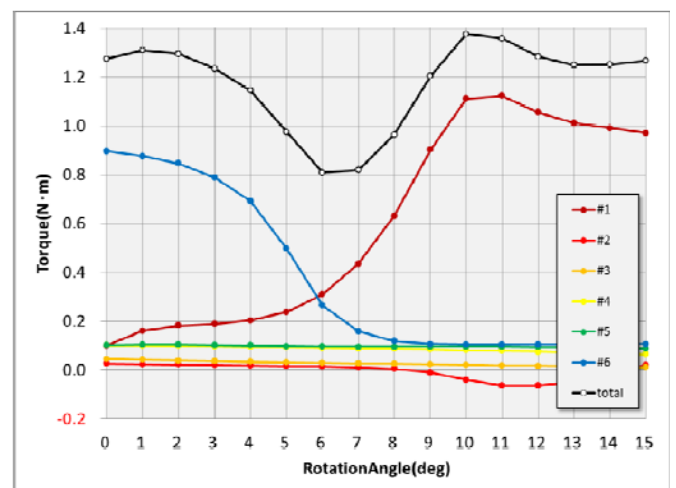


図6 各ティースの全体のトルク波形(1 スロット分)

実際にロータに発生しているトルクは黒線です。回転角 0(deg)では#6(青)のティースのトルクが支配的で、#5(緑)と#1(茶)、#4(黄)が多少、#2(赤)、#3(橙)が僅かにトルクを発生している状態です。回転が進むにつれて、#6のトルクが急減し、#1が急増していますが、増減がイコールにならないため、トルク変動が発生していることが解ります。

トルク変動を低減するためには、オーバーラップが上手くいくようにすれば良いという結論が導かれるのは言うまでもありません。山の時間を増やすようにで



できれば良いのですが、実際には山を切り崩して谷を埋めるイメージで対策していくことになると思います。この辺の対策は、スロットやロータの詳細形状などの実際の幾何形状が影響してくるので、JMAG-Designerのような高精度な電磁界有限要素解析 (Finite Element Analysis: FEA) を利用しないと検討することすれできないと思います。

今回は IPM モータについて試してみましたが、SPM でどうなるのか、集中巻(分数スロット)の場合はどうか、でも様子が変わってくると思われます。誘導電動機でどうなるのかなども興味は尽きません。設計者の腕の見せ所ですので、JMAG を活用していただき、設計者の皆さんに解決していただくことを期待しております。

他にも、このコラムで取り上げて欲しいテーマがありましたら、応えていきたいと考えております。テーマや内容に関する御意見などがございましたら、JMAG Newsletter 編集部まで、お気軽にお寄せください。J

E-mail : [info@jmag-international.com](mailto:info@jmag-international.com)

## ソリューション

# 第 1 回 熱解析ソリューション

モータの熱設計は、モータを含む周辺環境の小型化と高密度化に伴って重要性を増しており、磁気回路設計者もモータの発熱と放熱の問題は常に頭に入れておかなければならなくなっています。

本稿では、磁気回路設計者から見たモータの熱設計のための CAE の利用について、JMAG の熱解析機能を中心に、モデル化のための基本的な考え方とそれに基づく事例紹介を 2 回に分けて紹介いたします。

## はじめに

### 熱設計の必要性

ネオジウム磁石に代表される希土類磁石を利用した永久磁石型モータの開発は、同体積のフェライト磁石を利用したモータに比べてはるかに大きなエネルギー密度を得られるため、モータの小型化・高密度化の流れを大きく加速しました。一方でモータの小型化・高密度化は、銅損をはじめとする各種損失に起因する発熱密度の増加をもたらし、それに伴う放熱と冷却対策が求められるようになりました。特に希土類磁石はこれまでの磁石に比べて耐熱性が弱いため、熱減磁対策は必須となります。対策のひとつとして熱解析シミュレーションを利用した各部の温度上昇や熱伝導経路の確認が熱設計を検討する上で、有効な手段となります。

本稿では、モータにおける熱現象に焦点を絞り、JMAG が提供する熱解析のソリューションを 2 回に渡って紹介していきます。第 1 回目の今回は、モータの熱現象に対して JMAG が提供する熱解析機能とそのためのモデリングについて紹介いたします。

## JMAG の熱解析機能と熱-磁界連成解析

JMAG は渦電流損失や鉄損を精度よく計算できる磁界解析機能だけでなく、熱伝導現象を扱うための熱解析機能も提供しています。このため、磁気回路設計だけでなく、熱設計を同時に考慮した検討が可能です。

### JMAG の熱解析機能

JMAG の熱解析機能は、フーリエの熱伝導方程式に

基づいて解析を行います。このため、解析対象の熱輸送現象がおもに熱伝導により生じる場合は、現象を正確に解くことができます。実機における熱輸送の経路内には、空気などの流体が含まれる場合が一般的ですが、流体による熱輸送現象は対流効果によるものであり、熱伝導とは異なります。また解析対象を取り囲む流体が存在する場合は、流体への放熱現象が重要となります。JMAG の熱解析機能は流体の影響を等価回路として考慮することができます。次節以降で JMAG によるモータの熱設計に向けた熱解析モデルの考え方について見ていきます。

### 熱-磁界連成解析

熱解析に必要な熱源は、損失として磁界解析から求められます。このため、熱解析では、磁界解析と熱解析を同時に行う熱-磁界連成解析が基本的な解析の考え方となります。連成解析は現象に応じて、磁界から熱の一方方向連成、または熱と磁界の双方方向連成を選択できます。

一方方向連成解析は、解析対象の温度依存性が無視できる場合、たとえば材料特性が着目する温度変化の範囲では影響を無視しうる場合)に適用可能な解析手法です。磁界解析で熱源の元となる損失を一度だけ計算し、熱解析はその結果を参照して解析対象の温度分布を算出します。あるいは、現象の開始から十分に時間が経過して、過渡状態から定常状態に移行した後の温度分布などに着目する場合にも使うことができます。モータの熱解析では定常状態に達した後の温度分

布を検討するケースが多く、比較的良好に用いられる手法です。

双方向連成解析は、解析対象内の材料特性に対する温度依存性が無視できない場合に適用される解析手法です。熱解析は磁界解析から渡される損失に基づく温度分布を求めて磁界解析に温度分布を渡します。磁界解析では温度変化により更新された物性値に基づいて磁界解析を行い、損失を計算して再び熱解析に損失を渡す、この過程を双方の解析で繰り返します(図1)。

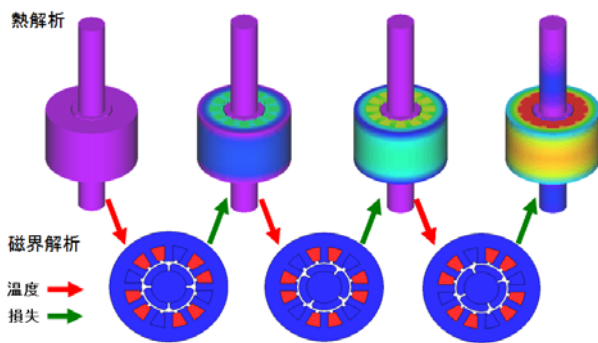


図1 双方向連成のイメージ

## 熱-磁界連成解析のためのモデリング

本節では、熱-磁界連成解析に必要な磁界解析モデルと熱解析モデルのモデリングを紹介します。

### 損失の扱い

熱解析は、磁界解析から得られる損失を熱源として使用します。そのためには、磁界解析で損失を発生する対象をモデル化する必要があります。

ではモータの発熱源は何でしょうか。代表的な熱源として巻線の銅損、コアの鉄損、磁石の渦損、ケースやシャフトなどの漂遊損が挙げられます。効率を検討する上では、これら全ての損失の寄与度を詳しく分析する必要がありますが、熱の問題では特に巻線の銅損と磁石の渦損が重要です。

まず銅損ですが、モータに生じる発熱のうち、絶対量がもっとも大きく、また発熱領域が巻線に限られることから、発熱密度も高くなり、解析による評価では、寄与が最も大きい熱源となります。ただし銅損そのもの

については、駆動電流と巻線の仕様から求められる直流抵抗から発生する熱量を手計算で見積もることも可能です。

次に磁石に生じる渦損は、一般に絶対値では銅損に比べてかなり小さいものの、磁石体積が小さいことや磁石からコアや外部の空気への放熱が悪いと、磁石に集中した発熱により不可逆減磁をもたらすことがあります。特に高回転領域でスロット高調波による影響が強く表れるケースでは要注意です。このため、銅損と並んで、検討が必要な発熱源となります。

これに対して鉄損や漂遊損は、損失の発生領域が大きいですが、絶対値は銅損ほど大きくはなく、単位体積あたりの損失密度は上二つに比べると低くなるため、発熱源としてはクリティカルな問題にはならないことが多いようです(高効率モータの中には運転領域によっては銅損と鉄損の発生量が同等くらいのケースもあります)。

### 物性値の検討

磁界解析では磁石やコアの磁性体の磁化特性については、もちろんですが、渦電流を扱う場合は、磁石などの電気伝導率も必要となります。さらに物性値が温度によって有意に変化する場合は、各物性データの温度テーブルが必要となります。巻線についても主に銅損からの発熱で電気伝導率が変化しますので、こちらについても温度テーブルを確認しておきます。ただし巻線の電気伝導率については、モデル化の関係上、電気伝導率の値ではなく、巻線抵抗値に換算して考慮することになります。

また熱解析においても、解析に必要な熱伝導率や比熱は温度依存性を持ちます。想定される温度変化に対する物性値への影響を確認して、温度依存性を考慮した熱物性のデータを準備します。

### 形状モデリング

ここでは熱-磁界連成解析に必要な形状のモデル化について紹介します。

## 1. モデル化される対象の違い

形状のモデル化にあたっては、磁界解析と熱解析で必要とされる部品が異なることが重要なポイントとなります。磁界解析では、主磁路となる磁性体(ロータ/ステータ)と起磁力源の磁石、巻線がモデル化の対象となります。モータを囲むケース、あるいはシャフトなどは主磁路ではなく、一般に損失密度も小さいため、モデル化の対象から外すことが可能です。一般に電磁現象は熱現象にくらべて時定数が小さく、連成解析では有意な温度変化が生じるまでに必要となる解析のステップ数が大変多くなります。モデル化にあたっては、精度に影響のない部品はできるだけ簡略化します。

後述するように、磁界解析で2次元モデル化が可能な対象では、その結果を使って熱解析の3次元モデルと組み合わせることが可能です。このため、モータの磁界解析では、モータの形状に応じて、2次元解析と3次元解析を選択することができます。ラジアルギャップ型モータのような主磁路が積層面内で、かつ端部からの漏れ磁束などの影響が無視できる場合は、断面を切り出した2次元モデリングが便利で有効です。

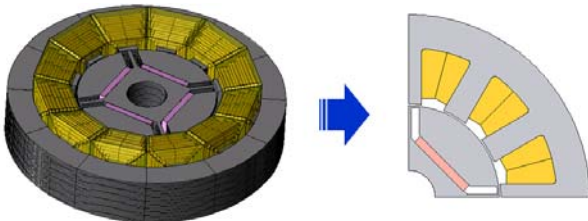


図2 厳密モデル(左)と2次元モデルによる簡略化(右)

これに対して熱解析では、熱伝導の経路として必要な部品をモデル化します。このため、磁界解析でモデル化対象から外されたケースやシャフトなどの部品が必要です(図3)。また巻線を固定するために使用される樹脂材なども、熱伝導の経路としてモデル化する必要があります。また、解析に含まれる部品が増えるため、これらの部品により、モデルの対称性が磁界解析に比べて低下することがあります。磁界解析では周方向に1/4モデルでモデル化ができたけれども、熱解析では1/2モデル、あるいはフルモデルが必要、という場合もありますので、モデル化の検討では注意が必要で

す。

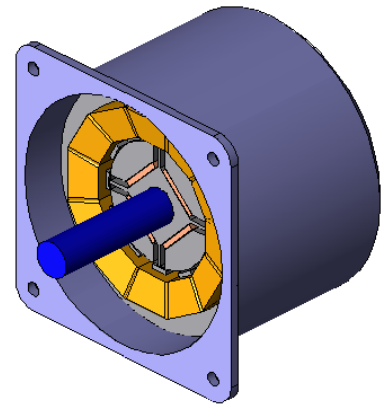


図3 ケース、シャフト付3次元モデル

## 2. 空気領域のモデリング

磁界解析では、空気領域も重要な磁路としてモデル化が必須ですが、熱解析では一般に空気領域に対してメッシュによるモデル化は行いません。これは、空気が流体であり、流体による熱輸送は、熱伝導ではなく、対流による流体運動によって行われるため、熱伝導方程式をそのまま適用することができないからです。しかし放熱を考える上は、流体の効果を何らかの手段で取り込む必要があります。

このような場合に利用するのが熱伝達境界条件です。熱伝達境界条件では、熱伝達係数と参照温度(流体の温度)を指定します。熱伝達係数は、流体の種類や流体の状態によって大きく変化しますが、自然対流下の空気は  $10(\text{Wm}/^\circ\text{C})$  前後の値となります。強制対流の場合は、 $1000(\text{Wm}/^\circ\text{C})$  前後の値になるとされており、自然対流時に比べて2桁程度も大きくなります[1]。熱伝導解析ではこの値の取り方で結果が大きく左右されるため、値の選択には解析を進めるうえでもっとも悩むところです。熱伝達係数は、流体の熱伝導率と境界面から参照温度に達するまでの距離の比で表されます。このため、値が大きいほど、対流による境界面からの熱の移動が素早く行われることになり、参照温度に達するまでの距離が短くなります。熱伝達係数は境界面からの流体側の各位置における温度を測定することで求められますので、この距離が経験的に把握できている場合は、おおよその値を見積もることができます。その



他の推定方法としては、熱流体解析などから熱伝達係数の分布値が分かっている場合は、その結果を境界条件として利用することもできます。

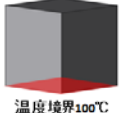
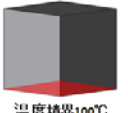
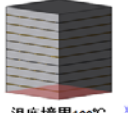
### 3. 積層鋼板のモデリング

モータの主磁路となるステータとロータには多くの場合、積層鋼板が使用されます。積層鋼板は磁気的には面内方向に磁束が通りやすいが、積層方向には磁束が通りにくい特徴を持ちます。解析においても磁気的異方性を考慮した積層構造のモデル化が必要です。磁界解析では、鋼板を一枚ごとにモデル化することなく、バルク状のモデルに対して絶縁層の厚みを占積率として取り込むことで面内方向と積層方向の磁気的異方性を考慮します。

熱解析モデルでは、熱伝導率について、面内方向と積層方向に異方性を持たせることで積層構造を考慮します。また JMAG の熱解析機能には、バルク形状に対して、積層方向と面内方向に異なる熱伝導率を設定できる機能があります。

異方性の効果を確認するため、電磁鋼板を重ねた状態を想定した複数の解析モデルで検証を行いました。解析モデルはモデルごとに熱伝導率の特性が異なる等方性モデル、異方性モデル、厳密モデルの3モデルからなり、積層方向の最下面に 100℃の温度境界を設定した時の積層方向の温度分布の違いを確認しました。各解析モデルの仕様を示します(表 1)。

表 1 積層異方性検証のための解析モデル

| 等方性モデル                                                                                          | 異方性モデル                                                                                          | 厳密モデル                                                                                           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <br>温度境界100℃ | <br>温度境界100℃ | <br>温度境界100℃ |
| <b>・材料特性</b><br>磁性体の等方的な熱伝導率を指定                                                                 | <b>・材料特性</b><br>占有率に応じて、XY 面内とZ方向で異なる熱伝導率を指定                                                    | <b>・材料特性</b><br>層ごとに磁性体と絶縁体の熱伝導率を指定                                                             |
| <b>・境界条件</b><br>下面に 100℃の温度境界<br>その他の面は熱伝達境界                                                    | <b>・境界条件</b><br>下面に 100℃の温度境界<br>その他の面は熱伝達境界                                                    | <b>・境界条件</b><br>下面に 100℃の温度境界<br>その他の面は熱伝達境界                                                    |

解析の結果、厳密モデルでは、積層方向に沿った温度差は約 20℃でしたが、等方性モデルでは約 5℃であり、温度分布状態も大きく異なりました(図 4 左、図 5)。これに対して、異方性モデル(図 4 中央、図 5)の温度差は約 20℃であり、温度分布も厳密モデル(図 4 右、図 5)と同じような傾向を示しています。

この結果から、電磁鋼板のモデル化は、熱解析においても、磁界解析における材料モデリングと同じ手法を適用できることがわかります。

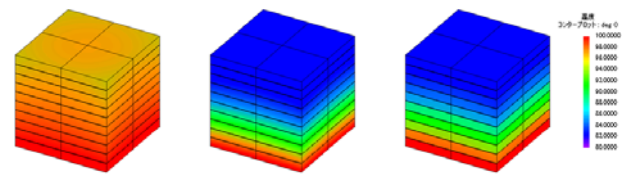


図 4 温度分布比較(温度コンタースケールは同一)  
左から等方性モデル、異方性モデル、厳密モデル

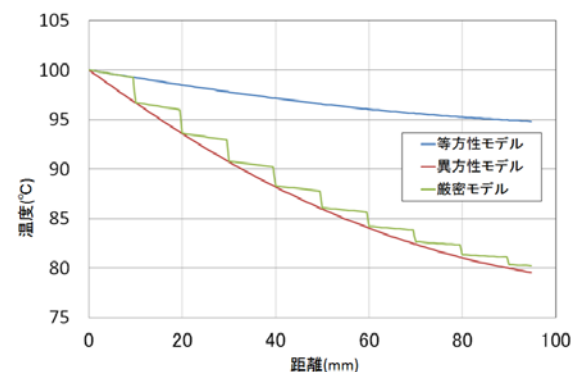


図 5 積層方向に沿った中心部の温度変化の比較  
厳密モデルでは熱抵抗の大きな絶縁層で温度勾配が大きい

なお上記のモデルでは、積層方向端部に固定温度を設定しているため、積層方向に温度差が出やすい設定となっており、積層構造のモデル化の違いがそのまま結果に反映されたケースとなっています。実際のモータでは鉄心の積層方向に沿って巻線が巻かれているため、巻線に接している鉄心の積層方向に熱伝導が生じて、均一に熱されやすくなると思われます。しかし次節で示す集中巻構造のモータ鉄心を使った例で示すように、コアに対する等方性モデル(図 6 左)と異方性モデル(図 6 右)でも、上記のモデルほどの差はありませんが、積層方向の温度分布では、両モデルで差が見られることがわかります。



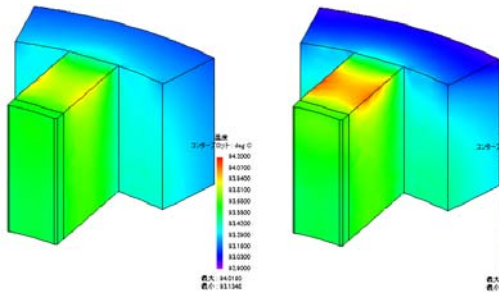


図6 等方性モデル(左)と異方性モデル(右)における温度分布  
等方性、異方性はコアの熱伝導率の違いをあらわす

#### 4. 巻線のモデリング

巻線形状は駆動周波数による表皮効果や近接効果が無視できる場合は、素線単位でのモデル化は必要がないため、巻線をひと塊のブロックとして扱うことができます。巻線のブロック化は、一般に素線径が表皮厚さ以下になるような大型機を除けば、回転機では周波数と線径の関係から妥当なモデル化ですが、熱解析では巻線の断面方向と巻線方向で熱伝導のしやすさが異なるため、これに応じた異方的な熱伝導率性の考慮が必要です。巻線には、形状を整えるため、ワニスやエポキシ樹脂などの樹脂材が塗布されているケースが多くみられますが、ここでは十分な樹脂が塗布されており、素線間に空隙部はない仮定します。素線から発生した熱は断面方向には、必ず樹脂材を経由して熱伝導が行われます。このため断面方向の実効的な熱伝導率は、巻線と樹脂材の熱抵抗が直列に構成されると見なすことができます。これに対して巻線方向には、素線が樹脂材とモザイク状に連続分布するため、実効的な熱抵抗はそれぞれが並列に構成されると見なすことができます。等価的な熱抵抗のイメージ図を示します(図7)。

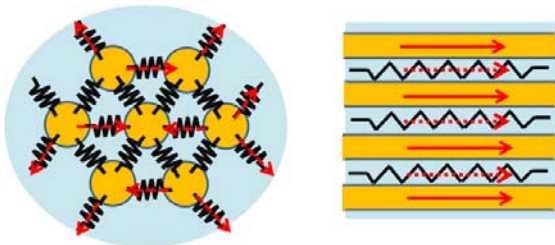


図7 巻線内の熱抵抗異方性のイメージ図

断面方向(左)と巻線方向(右)の熱抵抗分布、橙色分が素線、水色部分が樹脂、矢印は熱流束を表す

JMAGの熱解析機能では、バルク状の巻線モデルに対して、巻線の断面方向と巻線方向に異方的な熱伝導率を設定できます。異方性の効果を確認するため、積層方向に1/2の1ティース分の集中巻のモデルに対して、巻線をバルクで表現したバルクモデルと素線単位で表現した厳密モデルを比較しました。さらにバルクモデルは、巻線全体に等方的な銅の熱伝導率を指定した等方性モデルと巻線の占積率に応じて、断面方向と巻線方向に異なる熱伝導率を設定した異方性モデルに分かれます(表2)。それぞれの巻線に厳密モデルの巻線形状から求まる直流抵抗に10(A)の直流電流を通電した際の損失値を総量指定で設定して解析を行いました。

表2 巻線異方性検証のための解析モデル

| 等方性モデル                                    | 異方性モデル                           | 厳密モデル                        |
|-------------------------------------------|----------------------------------|------------------------------|
|                                           |                                  |                              |
| 巻線には銅の等方的な熱伝導率を指定。コアには、占積率に応じた異方的熱伝導率を指定。 | 占積率に応じて、巻線の断面方向と長手方向で異なる熱伝導率を指定。 | 巻線と樹脂材にそれぞれ銅とエポキシ樹脂の熱伝導率を指定。 |

まず厳密モデルでは、予想されるように巻線内に温度の高い分布が見られ、最高温度は99.9℃でした(図8左)。さらに詳細に分布をみると巻線の中心から外寄りに温度の高い状態が見られます。これは、モデル形状が周方向に周期構造であることから、周方向の樹脂断面は断熱状態で熱が伝導しませんが、内寄りの巻線に生じる熱はティースに流れ込むことができるため、外寄りの巻線に高い温度分布が見られると考えられます。また巻線が巻かれたコアでは、積層方向上端部の温度が高くなっています(図8右)。

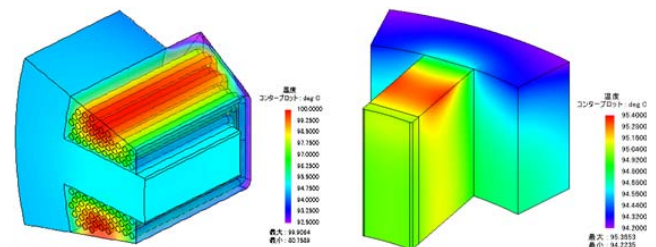


図8 厳密モデルにおける温度分布(左:巻線あり、右:コアのみ)

次にバルクモデルでは巻線の異方性の有無で大きな差異があることがわかります(図9)。等方性モデルでは、ほぼ等温分布に近い状態となっており、最高温度も94.2℃でした(図9左上)。このため分布、最高温度ともに厳密モデルの結果とは乖離が見られます。またコアの温度分布も厳密モデルに比べると積層方向に等温分布に近い結果がみられます(図9右上)。

これに対して異方性モデルは、巻線における温度分布は厳密モデルに類似しており、最高温度も巻線部で99.3℃であり(図9左下)、コアのみの比較でも、最高温度差は1.2℃でした(図9右下)。異方性を考慮したことにより温度分布が改善していることを確認できます

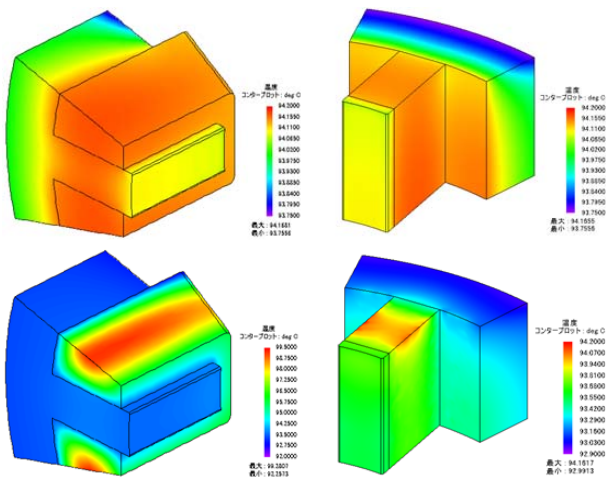


図9 等方性モデル(上)と異方性モデル(下)の温度分布

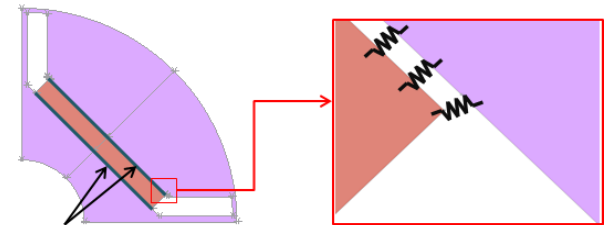
## 5. 狭い間隙部のモデリング

モータでは、磁石スロットと磁石や分割コアの境界部分など非常に狭い隙間が見られます。これらは磁界解析における磁気抵抗として効いてくる場合があります、磁界解析では、メッシュによるモデル化の代わりに磁気ギャップ条件を設定することで解析に考慮します。

熱解析でも熱抵抗としてモデル化が必要な場合があります。たとえば磁石スロットと磁石の間隙部分には、コアに比べて極めて熱伝導率の低い接着剤が塗布されており、磁石からの放熱を検討する上で、モデル化が必要になります。しかし一般に接着剤の厚みは非常に薄く、メッシュによるモデル化は困難です。

そのような場合には接触熱抵抗条件によるモデル化が便利です(図10)。接触熱抵抗条件では、あらかじめ

め設定すべき熱抵抗値を把握しておく必要がありますが、間隙部の形状をモデル化する必要がないため、メッシュを作成する必要がありません(形状と熱伝導率が定義されていれば、電気抵抗の計算と同様に熱抵抗を手計算で見積もることも可能です)。



接触熱抵抗

図10 接触熱抵抗によるモデル化のイメージ  
右図の空隙部分はイメージであり、メッシュ上は連続

ロータの磁石からの発熱について、接着剤を接触熱抵抗でモデル化した場合と、接着部のモデル化を考慮しない場合の比較を示します(図11)。接着部を接触熱抵抗でモデル化した場合は、モデル化しない場合に比べて、放熱が悪くなるため、磁石部の温度が上昇します(ロータコア自身の温度上昇は鈍くなります)。また接触熱抵抗は、メッシュによるモデル化が必要ありませんが、熱抵抗を介して磁石と磁石スロットが結ばれるため、境界部では、温度分布に接触熱抵抗による温度差相当の不連続が生じます(図12)。

なお、ロータのモデル化にあたっては、ロータの回転運動による放熱への影響を考慮する必要がありますが、紙面の関係で、次号で触れることにいたします。

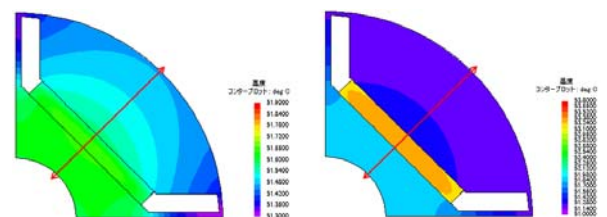


図11 接触熱抵抗による接着部のモデル化の有無の違い  
図中の矢印は図12のセクショングラフの参照位置を示す

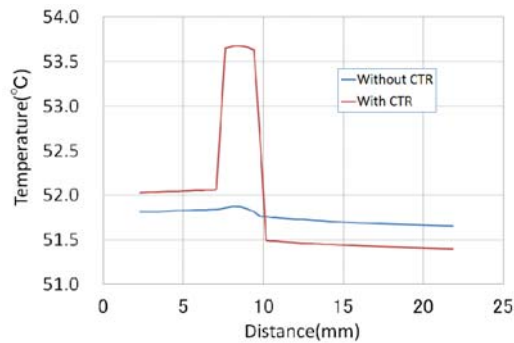


図 12 接触熱抵抗による接着部のモデル化の有無の違い

図中の 7.5～10mm にみられる不連続は磁石を横切った際に生じたもの (CTR: Contact Temperature Resistance)

## 熱等価回路の検討

空気領域のモデル化でも触れましたが、熱伝導方程式の範囲では、流体は有限要素モデルとして直接モデル化することはありません。このため、空間的に離れた複数の部品から形成される対象に熱伝導解析を適用する場合は、熱等価回路を使用します。有限要素モデルとしてモデル化されていない流体部分は、熱等価回路上では部品間を結ぶ熱抵抗に置き換えられます。各部品は熱抵抗素子を繋ぐ節点として表されます。また熱等価回路は、流体だけでなく、解析モデルとしてモデル化されていない部品を節点として表すことができます。例えば、ケースが有限要素モデルとして表されていませんが、放熱はケースと外側空気層の境界面を通して行われるため、熱等価回路上でケースの効果を表現します。図 13 のケースを省略したモデルに対する熱等価回路の一例を示します (図 14)。

このように熱等価回路は、流体の効果や有限要素の熱解析モデルとしてモデル化が困難な部品からの影響を定性的に考慮することができます。熱等価回路については、次号でも引き続き取り上げる予定です。

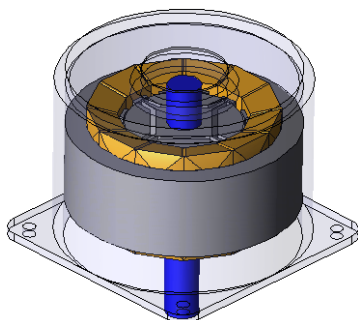


図 13 ケース部を省略した簡易モデル  
半透明で示したケースがメッシュでモデル化されていない

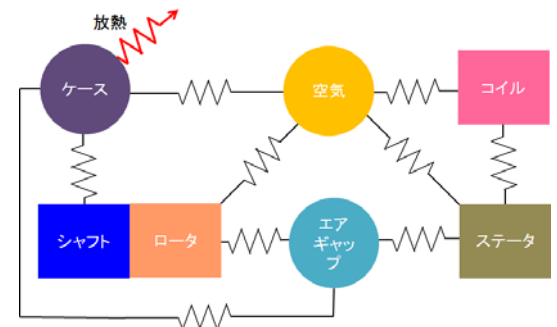


図 14 図 13 に対応する熱等価回路モデル

図中の四角形で示された素子は、有限要素モデルとしてモデル化されたものを表す。丸で表された素子は、等価回路上でのみ定義されており、メッシュモデルとしては存在しない

## おわりに

今号は、モータの熱現象にスコープを合わせて、JMAG による熱解析ソリューションにおけるモデル化の基本的な考え方を紹介いたしました。積層鋼板や巻線における均質化法に基づく取り扱いなど、モータの熱解析特有のモデリングを御覧いただくことで、これから解析に取り組まれようとしている方にとっては、熱解析の奥深さと面白さに気づいていただけたのではないのでしょうか。さらに進んだ熱解析を行うには、熱流体解析のようなシミュレーションが必要になる場合もありますが、熱伝導解析の範囲であっても、モデル化の工夫次第で、モータの熱設計の検討に役立つ情報が得られると思っていただければ、幸いです。

次号では、今回紹介したモデル化を具体的な事例に適用したユースケースとその結果について紹介いたします。また、JMAG の磁界解析とほかの熱流体ソルバーを連携したソリューションについても紹介する予定です。お楽しみに。J

(西尾 隆行)

## 参考文献:

- [1] 庄司正弘「伝熱工学」東京大学出版会



# 鉄損解析に対する最近の取り組み

磁界解析における損失評価には多くの課題が残されています。その課題に対する弊社の最近の取り組みの中から、直流偏磁状態の鉄損評価への取り組みを紹介します。

## はじめに

磁界解析における損失評価には多くの課題があり、私たちもその課題に対し取り組んできました。これまでの主な取り組みを JMAG Newsletter2013 年 9 月号で紹介しました。

<http://www.jmag-international.com/jp/newsletter/201309/04.html>

この記事の図 7 で鉄損に影響する要因として高調波を上げていますが、今回はその高調波、特に直流偏磁状態の高調波に対する鉄損解析の最近の取り組みを報告します。

## 新たな鉄損計算手法への取り組み 従来の鉄損計算手法の疑問

従来の JMAG の鉄損評価手法はスタインメッツの経験則の拡張です。スタインメッツの経験則は交流励磁状態の鉄損を経験式化し、交流の電気機器の鉄損を良く表現できるとして幅広く用いられてきました。私たちもこの手法を永久磁石同期モータや変圧器などの鉄損評価に用いてきました。例えば、JMAG Newsletter2013 年 9 月号で紹介した”晴海プロジェクト”でもスタインメッツの経験則を用いて PWM インバータ駆動の永久磁石同期モータの鉄損を評価し、実測と良い一致を見せるという感触を得ました。

しかし、スタインメッツの経験則を PWM インバータのキャリアや空間高調波が重畳した問題に適用できるのか？という疑問を常々持っていました。スタインメッツの経験則ではヒステリシス損失や渦電流損失を表す係数をエプスタイン法で測定した鉄損特性から決定します。エプスタイン法では時間平均値として 0 になる

(つまり直流偏磁していない、以下 0 点 周りと表現します) 交流の磁束密度を印加して測定し、ここから係数を決めますが、この係数を基本波成分や直流成分に重畳した高調波にも適用できるという確固たる理由はありません。もちろん実用上問題のないレベルのことなのかも知れません。それを確認する意味でも 0 点周りのきれいな正弦波励磁で無い任意の波形にも適用できる鉄損計算手法に取り組むこととしました。

## 新しい鉄損の計算手法

任意の波形にも適用できる手法となると、経験則ではなく、より鉄損の発生原理に即した計算手法が必要になると考えました。鉄損は主にヒステリシス損失と渦電流損失から構成されます。ヒステリシス損失は磁性体の磁気ヒステリシス現象に起因する損失ですので、磁気ヒステリシス現象をモデリングする必要があると考えました。また、渦電流損失は時間変化する磁束によって鋼板に誘起される誘導電流によって生じますが、誘導電流の流れ方は鋼板の厚みや非線形の透磁率などによって影響されますので複雑な現象を扱う必要があります。これらに対応する計算手法を調査し、以下の2つの手法を検討することとしました。

### 1. ヒステリシスモデリング

磁気ヒステリシス現象をモデリングする手法として等方性ベクトルプレイモデルに着目しました。磁気ヒステリシスをより厳密に扱うので、直流偏磁状態にも対応すると予想しました。等方性ベクトルプレイモデルを用いた鉄損評価の方法を示します(図 1)。まずは磁界解析内で等方性ベクトルプレイモデルを用いず、磁界解析の後処理で鉄損を評価する為に使いました。

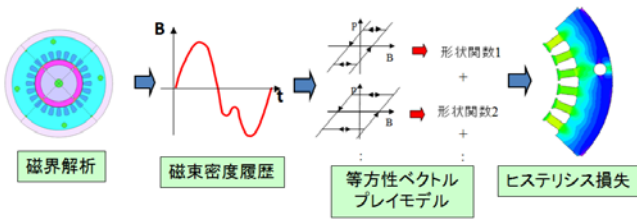


図1 ヒステリシスモデルによるヒステリシス損失評価

## 2. 積層解析

前述の通り、任意の励磁波形の場合には鋼板の厚み方向の渦電流分布は複雑になると考えられます。この現象をまともに磁界解析で扱うには電磁鋼板の厚み方向に要素分割し、三次元解析を行う必要があります。一般に三次元解析は非常に計算時間がかかります。そこで二次元解析の後処理として鋼板厚み方向の分布を考慮して渦電流損失を計算する手法(積層解析)に着目しました。本手法の流れを示します(図2)。

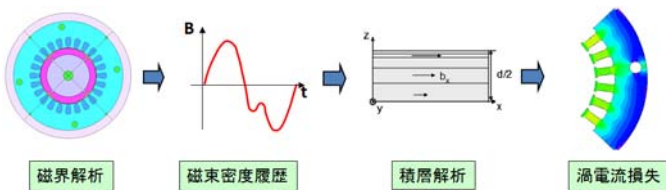


図2 積層解析による渦電流損失評価

## 計算に必要なデータと整備状況

前述の積層解析は鋼板の電気伝導度と厚みが分かれば計算できます。一方ヒステリシスモデルを使う為には対称ループ群が必要です(図3)。スタインメッツの経験則で用いるエプスタイン法の鉄損特性はJISで測定方法が規格化されていますし、電磁鋼板のカタログにも載っていますので容易に入手することができます。それに対し対称ループ群は容易には入手できないため将来ユーザー様に使って頂くためにも測定して用意する必要がありますがありました。測定するまでは論文に記載されたグラフから目を凝らしながら読み取って検証に用いていました。そこで2013年度に同志社大学藤原研究室との共同研究で電磁鋼板の対称ループ群を測定しました。測定の様子を示します(図4)。高磁束密度(約2T)まで測定するためには試験片に1000ターン近い励磁コイルを巻く必要がありました(図5)。しかもリング状

の試験片に巻きますのでこれが想像以上に大変な作業でした。サランラップの芯を短く切った物にコイルを巻きつけ、それをボビンにしてリングの穴を通しながら巻いていく様を御想像頂ければ幸いです。藤原研究室の学生さんのお力を借りながら試験片の作成、測定を行いました。

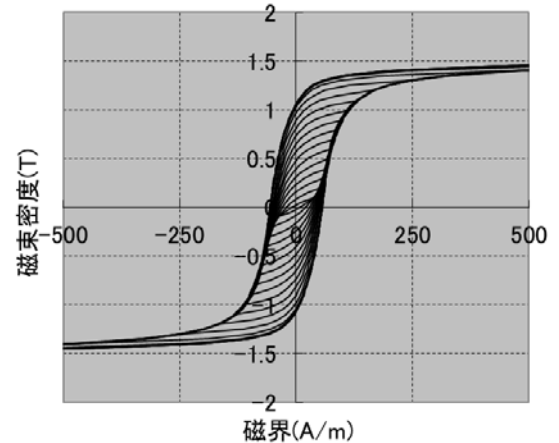


図3 対称ループ群の例

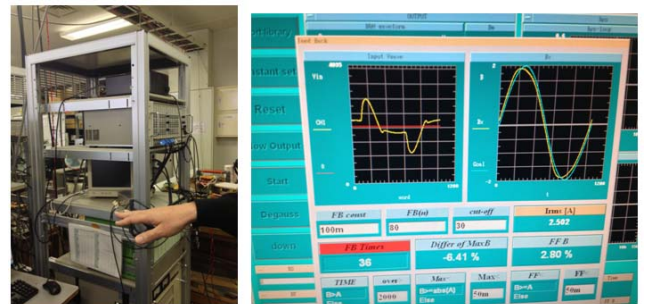


図4 測定の様子



図5 試験片



測定の大変さを味わいたい方に、どのようなデータを測定すれば良いのか以下に紹介します。

- ・対称ループを、磁束密度振幅  $B_m$  を  $\Delta B$  毎変えながら  $N$  本測定する。
- ・測定が必要な本数  $N$  は磁束密度の最大値を  $B_{max}$  とすると、 $N=B_{max}/\Delta B$
- ・ $\Delta B$  でどのくらい小さいループまで表現できるかが決まる。振幅が  $\Delta B/2$  以下のループは表現されない。
- ・渦電流の影響がないように、できる限り低い周波数で測定する。あるいはいくつかの周波数で測定し、0Hzに外挿する。

## 実機による検証

手法の効果を検証するためにスイッチトリラクタンスモータ(以下、SRM)を試作し、鉄損を測定しました。実機は以下のようなものです。測定は芝浦工業大学赤津研究室との共同研究で行いました。測定の様子を紹介します(図6)。

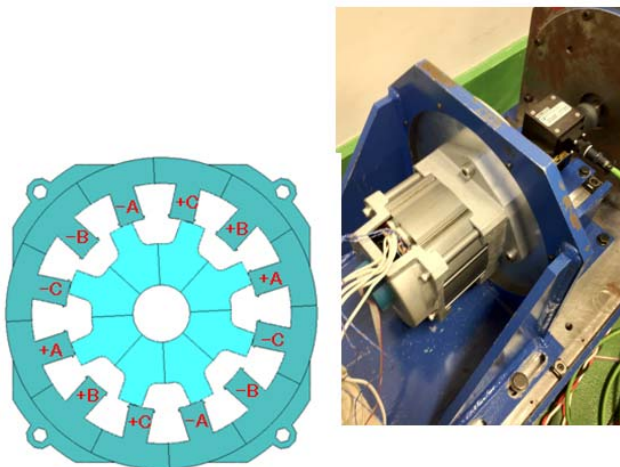


図6 SRMの断面形状と測定の様子

## SRMの励磁状態

検証にSRMを選んだ理由は、SRMの各部の磁束密度波形は典型的な直流偏磁状態となっている為です(図7)。このため従来より鉄損の評価が難しい問題であると認識されていました。同じような問題に回転機では永久磁石同期モータのロータ、静止器では直流バイアス動作をさせるリアクトルがあります。

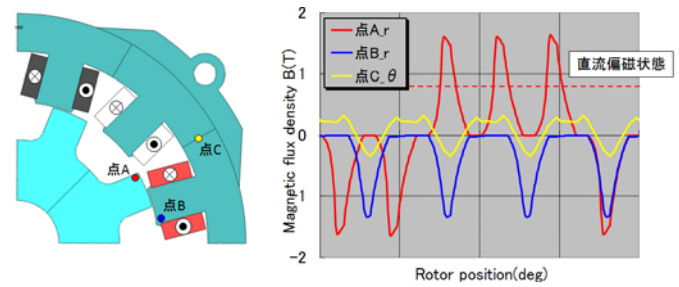


図7 SRM各部の磁束密度履歴

## 鉄損の比較

今回検討した新手法及び従来のスタインメッツの経験則と実測を比較した結果を示します(図8)。回転数が高いほど従来法は過小評価となりますが、新しい手法では測定と同程度の値が得られています。本手法を導入した目論見通りの結果となり安堵しました。

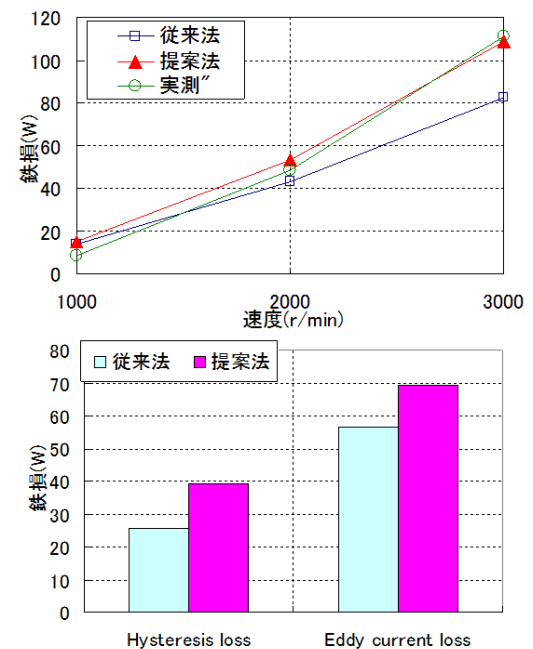


図8 鉄損の比較

## 得られる結果の例

等方性ベクトルプレイモデルで得られるヒステリシス損失の分布(図9)、およびヒステリシスループの例(図10)を示します。このように複雑なループを描いていることが分かりました。

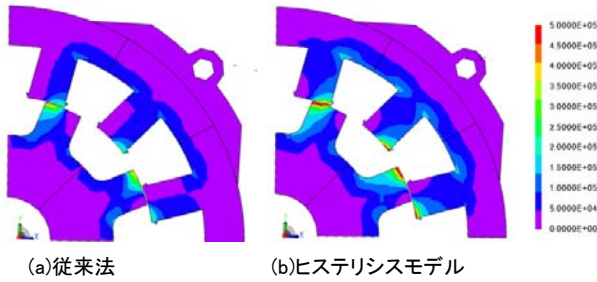
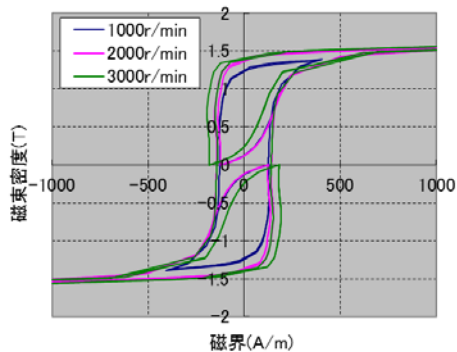
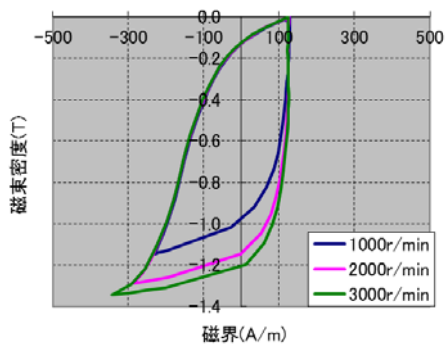


図 9 ヒステリシス損失分布



(a)点 A



(b)点 B

図 10 ヒステリシスループ

いますのでトルクや電流には鉄損の影響が入っていません。そのため、得られたトルクから鉄損分を差引くなどで評価をしています。トルクや電流への鉄損の影響を磁界解析中にダイレクトに反映する手法を検討します。

- ・磁気特性の応力依存性や加工歪の影響を機能としては取り扱うことができますが、データの入手が困難です。そのため 2014 年度に応力依存性や加工歪の磁気特性への影響を測定する予定です。また、実機での評価を行う予定です。

- ・本稿では詳細は述べませんでしたが、積層解析の場合は異常渦電流損(通常の誘導電流では評価できない渦電流損失)が含まれない為、補正係数として考慮する必要があります。そこには様々な仮定が含まれますので、より高精度な鉄損評価の為には異常渦電流損もより原理に即したモデリングが必要と考えています。

今後の活動に関してはまたの機会に紹介したいと思います

(成田 一行)

## 今後

今回は直流偏磁状態の鉄損評価の課題への取り組みとして新しい鉄損計算手法の導入、対称ループの測定、実機測定との比較の活動を報告しました。結果、直流偏磁状態での鉄損計算精度の改善は見られました。まだ鉄損解析には多くの課題が残っており、その中のいくつかの課題に対しこれからの活動で取り組む予定です。

- ・磁界解析の中で鉄損をエネルギー損失として反映させる。現在は磁界解析の後処理で鉄損を評価して

JMAG を 100%使いこなそう

# よくある問い合わせの中から

JMAG は先行研究開発から製品の量産設計、教育分野まで幅広く御利用いただいております。この JMAG Newsletter を御覧いただいている方の中には、JMAG の操作に慣れていない、設定方法に確信を持たずに戸惑いながら使用している方なども沢山いらっしゃるのではないのでしょうか。JMAG 使用中に疑問に思ったことは、ユーザーサポートだけでなく、御自身でも解決できるよう弊社のホームページに FAQ を掲載しております。

今回は、その FAQ から、最近よくあるお問い合わせ 5 つを紹介しています。“操作方法”、“解析技術”、“トラブルシューティング”とカテゴリーを分類しておりますので、御興味のある項目をお読みください。

## 操作方法 FAQ-934

### Q1. JMAG 以外のソフトウェアを利用して、構造解析や熱流体解析を行っています。JMAG と連携して解析するにはどのようにすればよいですか。

JMAG-Designer には、Abaqus (SIMULIA 社) や LMS Virtual.Lab (LMS 社) と連携するツールがありますが、他のソフトウェアと JMAG を連携させた解析は可能でしょうか。JMAG で得られた損失分布を考慮した熱流体解析や電磁力分布を考慮した振動解析を検討しています。何か方法はありますか。

### A1. 多目的ファイル出力ツールを使用することで連携が可能です。JMAG で得られた解析結果を汎用のファイル形式に変換し、希望の CAE ソフトウェアで読み込みます。

JMAG-Designer では、JMAG 以外の CAE ソフトウェアと連携するために、二通りの方法を提供しています。

一つ目は、専用のツールを使用する方法です。Abaqus (SIMULIA 社) と LMS Virtual.Lab (LMS 社) に対応しています。二つ目は、JMAG で得られた解析結果を汎用のファイル形式に変換し、他のソフトウェアで利用する方法です。CSV、Nastran、Universal ファイル形式に対応しています。

お問い合わせの状況であれば、二つ目の方法を使用してください。ファイル変換ツールとして多目的ファイル出力ツールを提供しています。前述のファイル形式に対応しているソフトウェアであればそのまま入力ファイルとして利用できます。

## 操作方法 FAQ-935

### Q2. 解析結果を要素や節点単位でファイルに出力することはできますか。

### A2. 多目的ファイル出力ツールまたは結果テーブル機能を利用してください。

JMAG-Designer では、テキスト形式にて要素や節点ごとに解析結果をファイル出力するとして、多目的ファイル出力ツールと結果テーブル機能を提供しています。以下では、それぞれの機能とメリットについて紹介いたします。

### 多目的ファイル出力ツールで結果を評価する

多目的ファイル出力ツールでは、メッシュ情報と共に解析結果をファイル出力します。出力範囲は部品単位で指定します。

多目的ファイル出力ツールで結果を評価するメリットは 2 点あります。1 点目は JMAG 以外のソフトウェアから書き出されたメッシュデータに物理量をマップして出力できる点です。2 点目は、Nastran や Universal といった一般に利用されている形式で出力できる点です。JMAG 以外のソフトウェアがこれらのファイル形式に対応している場合は、そのまま入力ファイルとして利用できます。

### 結果テーブル機能で結果を評価する

結果テーブル機能は、JMAG-Designer の結果表示で要素や節点を選択し、解析結果をテーブル表示・ファイル出力する機能です。GUI 上で手軽に要素や節点単位の解析結果を確認できます。要素や節点の選択範囲を任意に指定することができますので、局所的な部位の評価に便利です。

結果テーブル機能については、FAQ-901 も参照してください。

## 操作方法 FAQ-936

### Q3. 過渡応答の磁界解析で得られた電磁力を周波数応答の構造解析で利用する方法を教えてください。

JMAG 以外の構造解析ソフトウェアで振動解析することを検討しています。このとき、加振力となる電磁力は JMAG の過渡応答解析で得られた解析結果を使用したいと考えています。過渡応答解析による時間軸の結果を周波数軸の情報に変換するにはどのようにすればよいでしょうか。

### A3. 多目的ファイル出力ツールを使用して、過渡応答解析の結果を周波数成分にフーリエ変換できます。[出力形式]を[周波数応答解析]に設定してください。

多目的ファイル出力ツールでは、解析結果を静解析、過渡応答解析、周波数応答解析の出力形式に変換することができます。以下に、磁界過渡応答解析の結果を構造周波数応答解析用に変換して出力する際のオプションについて紹介します。

#### 過渡応答解析から周波数応答解析へ変換する設定のオプション

多目的ファイル出力ツールの[出力形式]を[周波数応答解析]に設定し、入力結果ファイルリストに磁界過渡応答解析の解析結果を指定した場合、次のオプションが設定できます。

- ・対象ステップ：フーリエ変換時の基本周期となる時間ステップを設定します。磁界過渡応答解析の全ステップの解析時間を基本周期としたい場合は、全ステップを選択します。

- ・周波数次数：フーリエ変換で得られた周波数成分のうち、実際に出力する次数を指定します。0 次から指定された次数までの周波数成分が出力され、高次の周波数成分は抑制されます。次数の指定を行わなかった場合は、全次数の周波数成分が出力されます。



## Q4. 「磁界を求めるための反復計算(ICCG)が収束していません」というワーニングメッセージが出ます。対応方法を教えてください。

### A4. 確認するポイント 3 点を紹介します。

ICCG 法による反復計算の収束が不十分な場合に確認すべきポイントを優先度の高い順に 3 点紹介します。

ICCG 法(不完全コレスキー分解前処理による共役勾配法)を使用した反復計算では、有限要素法のマトリックスを解いて磁束密度(実際は磁束密度を求めるために必要となるベクトルポテンシャル)の分布を求めています。

「反復計算(ICCG)が収束していません」というメッセージは、設定した最大反復回数の ICCG の反復計算が行われても残差が収束判定値以下の値にならなかったということを示しています。

まずは収束状況の詳細を確認してください。ICCG 法の収束状況はソルバーレポートの[収束状況リスト]の[場の収束]で確認できます。残差が収束判定値と近い場合は最大反復回数が足りていない可能性が考えられます。最大反復回数を増やすことで改善が期待できます。残差が収束判定値から大きく離れている場合は、下記 3 点を順に確認してください。

#### ICCG の解法の変更(3 次元解析の場合)

ICCG の解法には、導体領域にスカラーポテンシャルを追加しない解法である A 法、未知数として追加する解法である A-Φ 法 1、および 2 という 3 つの手法を提供しています。デフォルトでは A 法が設定されます。渦電流の計算を含むモデルの場合、A-Φ 法 1 または 2 へと設定を変更することで改善が期待できます。

A-Φ 法 1 は、比較的汎用性の高い解法です。A-Φ 法 2 は A-Φ 法 1 と比較して収束性がよい解法ですが、一部のモデルでは収束しない場合もあります。計算速度の面より A-Φ 法 2 を推奨していますが、A-Φ 法 2 で収束しないモデルの場合には A-Φ 法 1 を試してください。

#### メッシュ

ICCG 反復計算で解いている有限要素法のマトリックスはメッシュ形状に依存性があります。アスペクト比が大きい(偏平な)要素を含むモデルでは、反復計算が十分に収束しない場合があります。アスペクト比が大きい要素については、メッシュの右クリックメニューにある[品質]機能にてハイライトすることで確認できますので、要素サイズを変更するなどの検討を行い品質の改善を図ってください。メッシュの品質改善により、ICCG 反復計算の収束性の改善が期待できます。

#### 時間刻み(渦電流を考慮した過渡応答解析の場合)

渦電流を考慮した過渡応答解析では 1 ステップ前の情報が ICCG の反復計算に用いられます。そのため、時間刻みが粗い場合、誤差が積み残されていく場合があります。特に、定常状態が得られていない過渡状態では、誤差の影響が大きくなります。時間刻みを細かく設定することで改善が期待できます。

反対に、時間刻みが極端に小さい場合には前ステップからの変化量が絶対的な物理量に比べて極端に小さくなるため、精度よくその差分を評価するためには、誤差をより小さくする必要があります。ICCG の収束判定値を厳しくすることで、誤差を小さくする効果が期待できます。

## Q5. 「非線形反復が収束していません」というワーニングメッセージが出ます。対応方法を教えてください。

### A5. 確認するポイント 4 点を紹介します。

非線形反復計算の収束が不十分な場合に確認すべきポイントを優先度の高い順に 4 点紹介します。

非線形反復計算では、材料の磁化特性が非線形性を持つ場合に透磁率を決定するための反復計算を行います。材料の磁化特性が線形の場合は透磁率が一意に決まるため非線形反復計算は行われません。非線形反復計算では、ニュートンラプソン法と逐次反復法の 2 つの手法を提供しています。

「非線形反復が収束していません」というメッセージは、設定した最大反復回数の非線形反復計算が行われても残差が収束判定値以下の値にならなかったということを示しています。まずは非線形反復計算の収束状況の詳細を確認してください。非線形反復計算の収束状況は、ソルバーレポートの[収束状況リスト]の[非線形の収束]にて、反復計算における各回の残差から確認できます。

非線形反復計算の回を重ねるに従って残差が収束判定値へと近づいていく場合は、最大反復回数が足りていない可能性が考えられます。最大反復回数を増やすことで改善が期待できます。非線形反復計算の回を重ねても残差が収束判定値に近づかず、ほぼ一定となる場合や増加傾向にある場合は、下記に紹介する 4 点を順に確認してください。

#### ICCG 反復計算の精度向上

非線形反復計算の各回で ICCG の反復計算が行われるため、ICCG の反復計算の精度が悪い場合は非線形反復計算の精度も期待できません。ICCG の収束状況についてワーニングメッセージが出力されている場合は FAQ-937 の確認ポイント 3 点を確認してください。ICCG の収束状況についてワーニングメッセージが出力されない場合でも ICCG 反復計算で得られた結果の精度が十分ではなく、非線形反復計算の収束性に影響する場合があります。ICCG 反復計算の収束判定値をより小さい値に変更し精度向上を図ることで非線形反復の収束性が改善することが期待できます。

#### 材料特性の確認

非線形反復計算は磁化特性の B-H カーブ上で透磁率を決定するための計算です。材料を線形材に変更して非線形反復計算の収束性が改善する場合は、元々設定されていた磁化特性が原因で収束性が悪いと考えられます。磁化特性の設定に不備がないか確認してください。磁化特性を点列で指定している場合は、B-H 点列の傾きが単調減少になるように修正することで非線形反復の収束性が改善することが期待できます。

#### 回路の設定

回路上で電圧源素子が FEM コンダクタ素子に接続されたモデルの場合、電圧源素子と FEM コンダクタ素子の間にスイッチ素子を設定し、解析の 1 ステップ目で FEM コンダクタ素子に流れる電流をゼロにすることで、非線形反復の収束性が改善することが期待できます。

#### 減衰係数の変更(ニュートンラプソン法の場合)

減衰係数はデフォルトで[減衰係数 2]が使用されています。ダイオードを含む解析では、減衰係数 1 の方が非線形反復計算の収束に適した設定となるケースがよくありますのでお試しください。

なお、減衰係数 1 を使用する場合、BH データなどの非線形磁化特性に S 字を含まないカーブを指定してください。

## WEB 上でのテクニカル FAQ

弊社ホームページでもテクニカル FAQ を紹介しておりますので、あわせて御利用ください。

URL: <http://www.jmag-international.com/support/ja/faq/index.html> (ユーザー認証あり)

テクニカル FAQ は、実際にお客様が疑問もしくは不明に思った問い合わせですので、御覧することで新しい JMAG の利用方法も発見できることもあるかと思います。弊社ホームページの FAQ も随時更新していきますので、JMAG Newsletter と併せて御利用いただき、解析業務を効率化させていただきたいと思います。JMAG を使用していて不明点や疑問点が生じた場合、JMAG テクニカルサポートを御利用ください。JMAG を 100%使いこなしましょう。 

(荒木 健友)

# MapleSoft

## MapleSim Connector for JMAG-RT

システムレベルシミュレータとして定評のある MapleSim。特にライブラリーの充実には目をみはるものがあります。その充実した Maplesim のライブラリーに JMAG-RT モデルも加わりました。

MapleSim の特長と JMAG-RT との連携によるメリットについて紹介します。

### MapleSim の特長と強み

MapleSim は、電気回路や機構、機械、伝熱など複数の領域に渡る物理システムの統合的なモデリングおよびシミュレーションを提供します。高速高精度なシミュレーションを行うと同時に、モデル開発時間とシミュレーション時間を劇的に削減します。

MapleSim は“white-box” Modelica のプラットフォームであり、複雑なマルチドメインモデルに対応するための柔軟性と拡張性を提供します。MapleSim を使うことで、他のツールに比べて高速に、モデル作成、分析、システムレベルシミュレーションを行うことができます。

Maple と連携した MapleSim は、オープンな環境であるため、ユーザは自由に独自のコンポーネントを組み込み、分析、シミュレーションすることが可能です。最適化計算の過程で 10 万ケースものシミュレーションを実行しようとも、SIL での検証、HIL でのリアルタイムシミュレーションを実行したとしても、計算時間はかかりません。MapleSim の独自技術が高速化、コード自動生成を可能にします。精度を落とすことなく、システムレベルのリアルタイムシミュレーションが実行可能です。

### MapleSim と JMAG-RT 連携のメリット

MapleSim は、最新技術に対応するマルチドメインシステムレベルのモデリングシミュレーションプラットフォームであり、モデル開発時間、分析時間を劇的に短縮します。JMAG は、熱、構造、振動の問題といった多様な要素を考慮しつつ、モータや発電機等電気機器の設計、分析、微調整を行うことができます。

Maplesoft  
Executive Vice President and  
Chief Scientist,  
Mr. Laurent Bernardin 氏

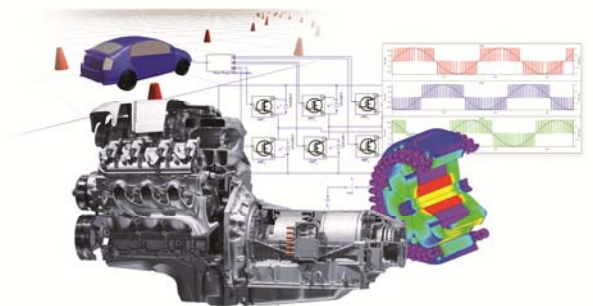


この二つを結び付けるものが、MapleSim Connector for JMAG-RT です。この新しいコネクタを使用すれば、JMAG で作成したモータや発電機のモデルを MapleSim モデルに組み込むことができます。

JMAG のモータ、発電機モデルを MapleSim モデルに組み込むことで、完成品の部品とモータや発電機の相互に与え合う影響を検討することが可能になります。

例えば、ハイブリッド車では、バッテリー、内燃エンジン、タイヤ、その他部品がモータ性能に重要な影響を与える可能性があります。

この多様な要素を全て1つのシステムレベルモデルに組み入れることで、技術者が設計全体の動作をより深く理解、最適化することが可能となり、試験機段階で初めて問題に気づくといった不快な経験を回避することができます。





また、JMAG モデルからのインダクタンスや逆起電力情報をもとに、トルクや速度などのパワー出力特性を実装することにより、システムモデルをさらに洗練させることができます。例えば、非対称モータ構造により発生した非正弦波磁束や電流を組み込むことが可能です。さらに、MapleSim が提供するシステムモデル全体の高度に最適化された自動生成コード作成機能により、プラットフォームを問わず、リアルタイムの実行、HIL テストおよび SIL テストにも活用できます。

### ローラン・バーナディン Maplesoft 副社長 兼チーフサイエンティストより一言

多様なツールが存在する今日、技術者たちは多大なコストをかけることなく、必要に応じてツールを自由に使い分ける必要があります。JMAG と MapleSim との連携により、それぞれのメリットを最大限に利用して設計上の課題を解決することができます。

### 最後に

MapleSim Connector for JMAG-RT は、モータや発電機がシステムの他部品と相互に影響を及ぼし合う可能性のある全てのシステムの開発に適しています。特に電気やハイブリッド車に最適です。



The MapleSim Connector for JMAG-RT is available for purchase from the Maplesoft webstore, or by contacting the Maplesoft sales team.

Toll Free (Canada and USA): 1-800-267-6583

Phone: +1 519 747 2373

Fax: +1 519 747 5284

Email: [info@maplesoft.com](mailto:info@maplesoft.com)

Outside North America:

<http://www.maplesoft.com/contact/index.aspx>

## イベント情報

## 2014 年 4 月～2014 年 6 月の出展イベント紹介

JMAG は国内、海外問わず積極的にイベントに出展しております。イベント会場では JMAG のブースにお立ち寄りいただき、我々の活動を御覧ください。ここでは、2014 年 4 月～6 月の出展イベントを紹介いたします。

## NAFEMS Deutschsprachige Konferenz 2014

出展を行います。

## 開催概要

主催 : NAFEMS Ltd

日時 : 2014 年 5 月 20 日(火)～5 月 21 日(水)

場所 : Kongresshotel Bamberg(ドイツ:バンベルグ)

URL : <http://www.nafems.org/2014/dach/>

CAE コミュニティの国際企業である NAFEMS が主催するカンファレンスに出展します。

JMAG ブースでは、JMAG-Designer Ver.13 でよりつかいやすくなったスモールマルチフィジックス機能の活用事例を紹介します。磁界解析ユーザーでも磁界解析の中で手軽に遠心力や熱の影響を同時に考慮した解析ができる機能を利用することで、多面的なアプローチをすることができます。ブースにて活用事例を確認ください。

## SIMULIA Community Conference

出展を行います。

## 開催概要

主催 : Dassault Systemes SIMULIA

日時 : 2014 年 5 月 20 日(火)～5 月 22 日(木)

場所 : Rhode Island Convention Center(アメリカ:ロードアイランド)

URL : <http://www.3ds.com/events/simulia-community-conference/overview/>

昨年に引き続き SIMULIA 社のカンファレンスに出展します。

JMAG ブースでは、磁界解析による電気設計だけでなく、構造設計・熱設計を同時に検討されているお客様に対して、活用事例などを紹介いたします。磁界解析と構造・熱解析を組み合わせることで、これまでの磁界解析のみによる製品評価から、さらに多角的な視点での製品評価が可能になります。ブースにて活用事例を確認ください。



## Coil Winding Berlin

出展を行います。

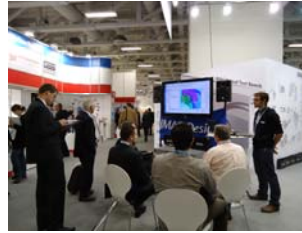
### 開催概要

主催 : i2i Events Group

日時 : 2014 年 6 月 24 日(火)~6 月 26 日(木)

場所 : Messe Berlin(ドイツ:ベルリン)

URL : <http://www.coilwindingexpo.com/berlin/>



巻線機、モータステータ、絶縁紙などコイルに関わるあらゆる製品が一同に会する世界最大級の展示会である Coil Winding には欧州をはじめ、世界各国から技術者が集まり、大型トランスや風力発電関連のブースが立ち並びます。

今年の JMAG ブースは、昨年よりも規模を拡大し、モータやトランスの解析事例を中心にデモンストレーションを行います。毎年好評をいただいているブース内プレゼンテーションも開催しますので、ブースに足をお運びください。

各会場では、2014 年初夏にリリース予定の JMAG-Designer Ver.13.1 をいち早くお披露目する予定です。

また、アメリカやドイツだけではなく世界各国で出展やセミナー開催を計画しております。ぜひ WEB ページにて出展情報を確認ください。皆様の来場をお待ちしております。J

(五十嵐 智美)

## イベント情報

## JMAG イチオシセミナー紹介

2014 年度春に 2 つの基礎講座を開講いたします。基礎知識を学びたい方はぜひ参加ください。

## ■ 電磁界解析基礎講座

対象 : これから電磁界解析をはじめの方、電磁気設計の経験が浅い方

受講効果 : JMAG の解析結果を用いて磁気回路等の設計の改善を図ることができるようになります

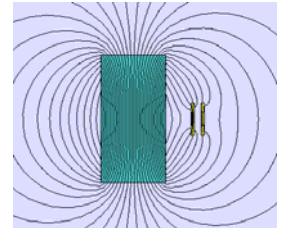
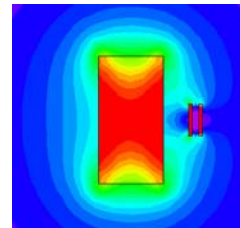
## 開催概要

主催 : 株式会社 JSOL

日時 : 2014 年 5 月 21 日(水)

場所 : 東京の JSOL セミナールーム

URL : [http://www.jmag-international.com/jp/seminar/op/basic\\_analysis.html](http://www.jmag-international.com/jp/seminar/op/basic_analysis.html)



設計技術と電磁界解析を結びつけるためには、ある程度の電磁気学基礎を学ぶ必要があります。しかし、設計者が手にいれるべきは、公式や法則ではなく、設計に生かせる知識、設計成果を評価できるツールです。

本セミナーでは、開発・設計を行うために必要となるであろう事柄に関して、設計成果を評価できる JMAG を用いて電磁気学や電気工学などが直観できるように、分かりやすく解説いたします。

## ■ 電気設計者のための構造解析基礎講座

対象 : 電磁気設計と共に構造の課題にも取り組みたいとお考えの方

受講効果 : 電気設計者が基本的な構造解析を自力で行えるようになります

## 開催概要

主催 : 株式会社 JSOL

日時 : 2014 年 6 月 10 日(火)

場所 : 東京の JSOL セミナールーム

URL : [http://www.jmag-international.com/jp/seminar/op/structural\\_analysis.html](http://www.jmag-international.com/jp/seminar/op/structural_analysis.html)



JMAG は磁界解析以外にも構造/振動解析機能を持っています。構造/振動解析機能を活用することで設計対象の電気設計に留まらず、構造設計も同時に検討することができます。

本セミナーは、電気設計者に構造解析の基礎を理解いただくことを目的としています。これから電磁気設計に加えて構造の課題にも取り組もうとされている方は本セミナーにぜひ参加ください。

電磁界解析は一見難しく思えます。

しかし、電磁気学を理解することで、解析手法の理解が進みます。解析手法を理解することで、解析に必要な入力条件が明確になり、解析結果に対する詳細な分析を行うことが可能になります。詳細な分析結果から、よい設計を行うための判断を確実に行うことができます。受講してスキルアップを図ってみませんか。J

(五十嵐 智美)



## イベント情報

## イベント開催レポート

2014 年 1 月～3 月に開催したイベントの様子をアテンド者が報告いたします。次回はずいぶん、皆様も御参加ください。

### Cocktail during the BLDC AND IPM Machine Design course by AMT

JMAG についての講演を行いました。

#### 開催概要

主催 : Advanced MotorTech LLC.

日時 : 2014 年 1 月 15 日(水)～17 日(金)

場所 : Location: Double Tree Hotel(アメリカ: サンフランシスコ)

URL : <http://www.advancedmotortech.com/training.html>

Advanced MotorTech 社主催のセミナーにて講演を行いました。

開催 2 日目に、電磁界有限要素解析 (Finite Element Analysis: FEA) を利用した機械設計のプロセスのセッションが 1 時間あり、Dr. Keith W. Klontz が JMAG について講演を行いました。講演では、JMAG-Designer の最新機能紹介だけでなく、IPM モデルを利用していくつかのケーススタディに基づく設計方法などを紹介しました。

参加者はアメリカ国内のエンジニアや研究者、設計者だけではなく、欧州の大学院生もいました。

セッション後にカクテルレセプションもあり、参加者から講演の内容や、FEA を利用したプロセスの改善方法などについて多くの質問を寄せられました。JMAG を利用した FEA によるプロセス改善への期待が十分に感じられる有意義な時間でした。J

(Dheeraj Bobba)

### JMAG-Designer Ver.13.0 バージョンアップセミナー

主催セミナーを開催いたしました。

#### 開催概要

主催 : 株式会社 JSOL

日時 : 東京 : 2014 年 1 月 29 日(水)

大阪 : 2014 年 1 月 30 日(木)

名古屋 : 2014 年 1 月 31 日(金)

場所 : 東京、名古屋、大阪の各 JSOL セミナールーム

URL : <http://www.jmag-international.com/jp/seminar/v-up/v-up130.html>

昨年 12 月にリリースされた JMAG-Designer Ver.13 のバージョンアップセミナーを弊社の晴海オフィス、土佐堀オフィス、名古屋オフィスで開催いたしました。

3 会場あわせて 40 名を超えるお客様に参加いただき、盛況のうちに終了することができました。

2 年前までは、参加者のうち JMAG-Studio ユーザーが半数以上という状況でしたが、今回は全員が JMAG-Designer の利用者であり、業務において JMAG-Designer が定着していることがわかりました。

参加者の中にはすでに JMAG-Designer Ver.13 をダウンロードされてお試しになられた方もおり、質問タイムでは新バージョンお



披露目のセミナーらしからぬ突っ込んだ質問や耳の痛いコメントも頂戴いたしました。

JSOL からの情報発信だけでなく、我々にとっても有益なフィードバックを得ることができました。J

(西尾 隆行)

## シノプシス Saber セミナー

JMAG についての講演を行いました。

### 開催概要

主催 : 日本シノプシス合同会社

日時 : 2014 年 2 月 14 日(金)

場所 : 日本シノプシス合同会社 東京本社(日本:東京都・世田谷区)

URL : <http://www.synopsys.co.jp/events/seminar/saber/>



技術パートナーの日本シノプシス合同会社主催の Saber 製品セミナーにて講演を行いました。

日本シノプシスからの講演では、SaberRD の新機能紹介と、モータやアクチュエータなどのプラントモデルの High Fidelity 化が必要なこと、それらが JMAG から提供されることを紹介いただきました。

弊社は、Saber と JMAG-RT の連携ソリューションを紹介しました。

講演後の休憩時間には、JMAG-RT に関する質問を多くいただきました。大雪の中参加された方々なので、どう実務に生かすかなど細かい質問や有用性など真剣な質問をいただきました。

セミナー講演を通して、高精度モータモデルの重要性を喚起できたのではないかと感じました。Saber ユーザーの皆様にも高精度モータモデル JMAG-RT の有用性を紹介できたのではないのでしょうか。J

(鈴木 雄作)

## 中国ユーザー向けモータ設計 WEB 講座

JMAG についての WEB セミナーを中国で開催しました。

### 開催概要

主催 : IDAJ-China Co., LTD.

日時 : 2014 年 3 月 7 日(金)

場所 : インターネット上

URL : <http://www.idaj.cn/news/show/id/3418> (中国語のみ)

IDAJ-China 社と、JSOL が初めて共同で Web セミナーを開催いたしました。

セミナーでは、JMAG-Express を利用したモータ設計プロセスを体験していただきました。電磁界解析シミュレーションに携わり 15 年になる JSOL の鈴木が講師を務め、経験談を交えての説明は参加者からとても好評でした。

参加人数は約 70 名で、職種は研究者、設計者、エンジニア、教授、大学生や大学院生など様々でした。

いままで Web セミナーの開催を望む声が多かったので、募集開始から開催日まで短い時間でも多くの参加者が集まったように思えます。

今回の高評価と成功事例をもって、今後も中国国内で WEB セミナーの開講を検討いたします。J

(IVY Wang)



## JMAG-Designer V13 New Function Seminar in 台湾

JMAG についての講演を行いました。

### 開催概要

主催 : Flotrend Corp.

日時 : 2014 年 3 月 11 日 (火)

場所 : GIS NTU Convention Center (台湾: 台北)

URL : [http://www.jmag-international.com/event/2014/v13\\_seminar\\_taiwan.html](http://www.jmag-international.com/event/2014/v13_seminar_taiwan.html)



代理店の Flotrend 社が台湾で JMAG-Designer バージョンアップセミナーを開催しました。

JMAG-Designer Ver.13 の新機能と、JMAG-Express の機能についてデモを交えて紹介いたしました。

約 40 名の方に参加いただき、参加者の多くはこれから電磁界解析を始める方でした。デモンストレーションを通じて JMAG の使いやすさを感じていただけたのではないのでしょうか。

セミナー終了後には多くの質問をお受けし、関心の高さを感じる事が出来ました。

JMAG はこれからも日本だけではなく、グローバル化にともなう国際的な業務運営に取り組めます。J

(鈴木 雄作)

## Symposium Elektromagnetismus

JMAG について発表を行いました。

### 開催概要

主催 : Technische Akademie Esslingen

日時 : 2014 年 3 月 25 日 (火)

場所 : Reinhold-Wurth-Hochschule (ドイツ: バーデン・ヴュルテンベルク)

URL : <http://www.tae.de/de/kolloquien-symposien/elektrotechnik-elektronik-und-energietechnik/symposium-elektromagnetismus/>



Technische Akademie Esslingen 社主催のシンポジウムに初めて講演及び出展を行いました。

会期中に、ドイツ語で 10 講演行われ、約 110 名が参加していました。会場の大学周辺には電磁気学を扱う企業が多く、主な参加者は、研究者、設計者、エンジニア、教授、大学生や大学院生でした。

講演では、電気機器設計のシミュレーション方法や、JMAG の活用事例などを紹介しました。講演後に多くの質問もいただき、楽しい時間を過ごせました。機会があればまた講演を行いたいと思います。J

(Thiebaud PFISTER)

新年は、世界各国で開催した展示会やセミナーを中心にレポートいたしました。JMAG は技術支援だけではなく、お客様の高精度、高効率化の一翼を担えるようこれからもよりよい製品を提供してまいります。

また、アメリカ、欧州に拠点がある JMAG 代理店、Powersys Solutions 社の WEB サイトがリニューアルいたしました。Webinar も積極的に開催をしておりますので、ぜひ一度 WEB ページを御覧ください。

URL : <http://www.powersys-solutions.com/>

文責: 五十嵐 智美

# JMAGセミナーのご案内

JMAG では導入ご検討のお客様からご使用中のお客様まで、ニーズにあった幅広いセミナーをご用意しております。

導入ご検討中のお客様

体験セミナー

## JMAG 体験セミナー

全ての方向け 無料

- ・PMモータ(3D)編
- ・モータ解析からRTモデル作成編
- ・誘導加熱編
- ・トランス編

ユーザー様、トライアル中のお客様

トレーニングセミナー

## JMAG-Designer Ver.13.0 バージョンアップセミナー

全ての方向け 無料

内容： - 新機能および改善内容のご紹介、新機能を使った解析デモンストレーション

## JMAG 初級トレーニングセミナー

入門～初心者 有料

ハンズオン

- ・モータ編
- ・トランス編
- ・誘導加熱編
- ・センサー/シールド/電磁弁編

## 電磁界解析基礎講座

入門～初心者 無料

レクチャー

- ・電磁気学の基礎
- ・磁界解析入門

## JMAG 中級・機能別セミナー

中級～熟練者 無料

ハンズオン

- ・回路
- ・最適化
- ・結果評価
- ・メッシュ、ソルバ
- ・自動化
- ・連携、連成
- ・形状作成
- ・材料

## JMAG スキルアップセミナー

上級者 無料

レクチャー

- ・電磁界解析技術者養成講座  
メッシュ / ソルバー / 形状作成、パラメトリック / 連成解析 / 回路連成解析 / 材料モデリング、鉄損 / 結果評価

WEBセミナー

## Studioユーザのための JMAG-Designer クイック移行セミナー (録画)

全ての方向け 無料

内容： - jcfデータを用いたJMAG-Designerの活用法  
- JMAG-Designerの形状編集機能クイック操作

## JMAG-Designer Ver.12 バージョンアップセミナー (録画)

全ての方向け 無料

内容： - 新機能および改善内容のご紹介、新機能を使った解析方法  
- JMAG-StudioのデータをJMAG-Designerで利用する方法

トピック別開催

主催セミナー

## 電気設計者のための 構造解析基礎講座

全ての方向け 無料

対象：電磁気設計と共に構造の課題にも取り組みたいとお考えの方  
セミナー受講効果：電気設計者が基本的な構造解析を自力で行えるようになります。

## これからモータ設計をする方のための 設計体験セミナー

全ての方向け 無料

対象： - モータ設計をこれから始める方、興味を持っておられる方  
- モータ設計に悩んでいる方

お申し込み、開催日程はWEBサイトをご覧ください。

<http://www.jmag-international.com/jp/>

株式会社JSOL エンジニアリング事業本部

■東京 〒104-0053 東京都中央区晴海2丁目5番24号 晴海センタービル7階  
TEL : 03-5859-6020 FAX : 03-5859-6035

■名古屋 〒460-0002 名古屋市中区丸の内2丁目18番25号 丸の内KSビル17階  
TEL : 052-202-8181 FAX : 052-202-8172

■大阪 〒550-0001 大阪市西区土佐堀2丁目2番4号 土佐堀ダイビル11階  
TEL : 06-4803-5820 FAX : 06-6225-3517

<http://www.jmag-international.com/>  
[info@jmag-international.com](mailto:info@jmag-international.com)



【マークの見方】それぞれ次のお客様が受講可能です。



JMAG正規ユーザー様のみ



JMAG正規ユーザー様とトライアル中のお客様



JMAG導入検討中のお客様



すべてのお客様

## 体験セミナー（導入をご検討中のお客様）

### JMAG 体験セミナー

対象者：磁界解析ソフトウェアの導入を検討されているお客様、トライアルを始めるお客様

開催会場：東京・名古屋・大阪（毎月定期開催）  
受講時間：半日  
受講料：無料



無料

全ての方向け

製品をご紹介するとともに、テキストに沿いながらご自身で解析を実習していただけます。実習内容を数種類用意しておりますので、お客様の実務に近いコースをお選びいただくことが出来ます。JMAG-Designerは解析経験の少ない人にも熟練者にも使いやすい電気機器設計・開発のためのCAEソフトウェアです。この機会に是非、JMAG-Designerの使いやすさをご体験下さい。

## トレーニングセミナー（ユーザー様、トライアル中のお客様）

### JMAG-Designer ver.13.0 バージョンアップセミナー

対象者：JMAGユーザー様

開催会場：東京・名古屋・大阪（毎月定期開催）  
受講時間：半日  
受講料：無料



無料

全ての方向け

JMAG-Designerの最新バージョンについてご紹介いたします。Designerの使いやすさをより向上させるために様々な機能を実装しております。実際に、操作をご体験いただけるハンズオンセッションを設けております。テーマ毎に小さなグループに分かれ、みなさまのリクエストを聞きながらすすめますので、みたいところ、知りたいところをじっくりとご確認いただけます。

### JMAG 初級トレーニングセミナー

ハンズオン

対象者：JMAG導入を検討し、トライアル中の方／JMAGをご利用部署に新たに配属された方など／これからJMAGをご利用になる方

開催会場：東京・名古屋・大阪（毎月定期開催）  
受講時間：半日  
受講料：30,000円（消費税別）



有料

入門者～初心者

JMAGを使い始めたお客様向けに、解析対象をモデル化するために必要な基本的な知識や操作方法に重点をおいた、これからJMAGをお使いになるユーザー様向けのセミナーです。解析モデルの作成、材料設定の基礎から、解析結果までの手順を丁寧に説明しますので、JMAGの操作や概念など基本から学ぶことができます。お客様のニーズに合わせたコースをご用意しております。

### 電磁界解析基礎講座

レクチャー

対象者：JMAGの導入を検討されているお客様／JMAGでの解析をはじめたばかりの方

開催会場：東京（随時開催）  
受講時間：半日  
受講料：無料



無料

入門者～初心者

磁気回路を設計する場合、磁束量に対して磁路が狭ければ磁束が溢れてしまいますし、逆であれば余計なスペースが無駄になってしまいます。また、電磁力やトルクを出すためには、うまく歪ませることが設計の焦点になります。本セミナーでは、開発を行うために必要となるであろう事柄に関して、JMAGを用いて解析と電磁気学や電気工学などが直観できるように、分かりやすく解説いたします。

### JMAG 中級・機能別セミナー

ハンズオン

対象者：セルラーニングシステムのプラクティスモード「学習する」を体験済みの方／JMAG（初級）トレーニングセミナーを受講済みの方／もしくは同等の経験を有する方

開催会場：東京・名古屋・大阪（毎月定期開催）  
受講時間：半日  
受講料：無料



無料

中級者～熟練者

形状作成や、回路連携など、JMAGの各機能にスコープを絞って、実際にお客様が効率的に精度よく解析いただくための情報を提供します。ハンズオン形式で実際に操作をしながらJMAGを習得いただくコースとなります。

### JMAG スキルアップセミナー

レクチャー

対象者：JMAGをご利用中で、全回参加できる方

開催会場：東京（各テーマごとに毎月1回開催）  
受講時間：1日  
受講料：無料



無料

上級者

JMAGによる解析技術の向上を目差す方を対象とした電磁界解析技術者養成講座です。JMAGをお使いになるに当たって有用な解析ノウハウや情報を、月に1テーマ提供する座学形式のセミナーです。メッシュ、ソルバなどJMAGの機能にスコープを絞って、基礎的な考え方から、高度な応用方法までをお伝えします。新機能についても合わせてご紹介し、お客様が効率的な解析を行っていただくための情報を提供します。

## WEBセミナー（遠方のお客様）

### Studioユーザーのための JMAG-Designer クイック移行セミナー（録画）

対象者：JMAG-Studioをご利用のユーザー様

開催会場：インターネット上  
受講時間：期間中は好きな時間に何度でも受講可能  
受講料：無料



無料

全ての方向け

JMAG-Studioをお使いの方で、JMAG-Designerへの移行を躊躇されているお客様に向けたWEBセミナーを開催します。JMAG-Studioで作成したデータを利用して、JMAG-Designerを簡単にお使いいただく方法をご紹介します。また、簡単な形状の作成方法もご紹介いたします。インターネットを使って録画セミナーをご覧いただけます。録画なので、好きな時間に受講することができます。

### JMAG-Designer ver.12 バージョンアップセミナー（録画）

対象者：JMAGユーザー様、特にJMAG-StudioからJMAG-Designerへの移行をご検討いただける方

開催会場：インターネット上  
受講時間：期間中は好きな時間に何度でも受講可能  
受講料：無料



無料

全ての方向け

本セミナーでは、2012年12月末にリリースいたしましたJMAG-Designer Ver.12について、2013年1月～3月に開催された集合セミナーの内容を抜粋してお届けします。インターネットを使って録画セミナーをご覧いただけます。録画なので、好きな時間に受講することができます。



