

# EMSolution Topics



No.38 April, 2017

サイエンス ソリューションズ株式会社

〒153-0065 東京都目黒区中町 2-21-7

TEL: 03-3711-8900 FAX: 03-3711-8910

E-mail : emsdesk@ssil.co.jp URL : <http://www.ssil.co.jp/>

発行: EMSolution 事務局

桜前線が全国を駆け巡る中、皆様いかがお過ごしでしょうか。皆様からのご質問や業界での話題、EMSolution の特徴を活かした解析方法などの記事をまとめた EMSolution Topics No.38 をお送りいたします。

なお、記事に関するご要望やご意見などお寄せいただければ幸いです。

## ■ 気になる話題: IPMSM のコギングトルクのヒステリシス解析

貝森 弘行

近年、高効率化の要求が高まっていることもあり、モータの鉄損解析の精度向上が一つの命題であり、ヒステリシス特性を考慮した鉄損解析に注目が集まっています。今号では、少し見方を変えて IPMSM のコギングトルクに焦点を当て、BH カーブを用いた解析とヒステリシス特性を考慮した解析の比較について筆者なりに説明したいと思います。

IPMSM のコギングトルク解析は、電磁場解析の中でも難しい部類に入ると言われています。解析自体は非通電状態でロータを強制回転させるので簡単ですが、ここでいう「難しい」とは、計算精度を出すのが難しいという意味です。コギングトルクはロータ内の永久磁石とステータコアとの間に働く磁気吸引力に起因するため、ボルト穴や面取り等の形状依存が強く出てきます。経験的には、ギャップ部のメッシュが粗いとコギングトルクの次数(コギングトルク一周期で現れる高調波次数)は(メッシュ分割で表現できる次数が変わらなければ)変わりませんが振幅が変わり、ボルト穴等の形状依存で次数が変わってきます。コギングトルクは通電時のトルクに重畠してきますので、コギングトルクの低減がトルクリップルの低減、すなわちスムーズに回転できることにつながります。

さて、電磁界解析でコギングトルクを計算する場合、一般的には磁化特性として初磁化曲線(BH カーブ)を用いると思われます。BH カーブで表現できるのは非線形の磁化特性で、磁気飽和を考慮することができます。ただし、計算上は  $B$  と  $H$  の関係は常に BH カーブ上を動くため、ヒステリシスは考慮できません。逆に言えば、形状的に対称であったり、印加条件が対称であったりした場合、必ず対称の結果が得られることになります。コギングトルクも BH カーブを用いて計算する場合、平均がゼロとなり、正負で点対称の波形が得られます。しかしながら、ヒステリシスを考慮すると、 $B$  と  $H$  の関係は BH ループ状を動くため、ヒステリシス損が発生し、コギングトルクにはロストトルクとして現れます。

これらを確認するために、新たに提案された電気学会ベンチマークモデル「G モデル」を用いて、BH カーブを用いた場合とヒステリシスを考慮した場合のコギングトルク解析を、文献を参考にして行ってみます。ヒステリシス解析にはプレイモデルを使用します。そのため、図 1 に示すプレイモデルデータのある 50A470 をステータコアとロータコアに使用します。G モデルの形状を図 2 に示します。小さくてわかりづらいですが、ロータ表面に特徴的な凹凸があるため、コギングトルクが小さくなることが知られており、ヒステリシスの影響が出やすいと期待できます。

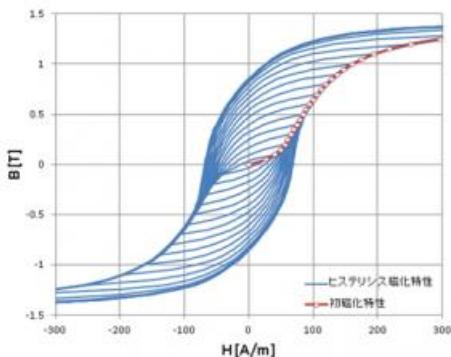


図 1 磁化特性



図 2 G モデル

早速コギングトルク解析結果を見てみましょう。図 3 に示すコギングトルク波形は、電気角 60 度で一周期の波形として現れています。「BH」が BH カーブを用いた結果、「PlayModel」が PlayModel を用いてヒステリシス解析した結果です。「BH」では先に説明しましたように、平均値がゼロの点対称の波形になっています。「PlayModel」にはヒステリシス特性を考慮しているため負側にロストルクがオフセットした波形となっています。参考までに、「PlayModel - average」として、「PlayModel」からロストルク分(平均値)を差し引いた波形も示します。波形はよく似ていますが、正側は両者ほぼ一致しているのに対し、負側ではわずかにずれが見られます。これはヒステリシス特性を考慮したことにより、上昇曲線時と下降曲線時の差が出ているものと考えられます。また、「BH」結果より PlayModel を用いてヒステリシス特性をポスト処理にて考慮する方法もありますが、これは磁性体中に適用されるため、ギャップ磁束密度より決まる(コギング)トルクにヒステリシス特性の影響は現れず、「BH」結果と同じになります。

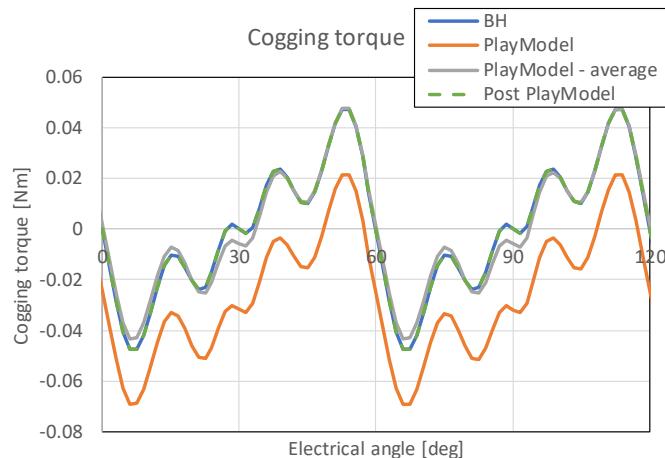


図 3 コギングトルク波形

「BH」結果と「PlayModel」結果の違いについて筆者なりに考察してみます。図 4 に電気角 30 度における磁束密度分布図を示します。ここで電気角 30 度は、ロータの極間がスロット間と一致し、「BH」結果ではコギングトルクがゼロになる位置です。先にも説明しましたように、BH カーブでは極間で分布が左右対称となっている(磁束密度ベクトルの向きは逆です)のに対し、「PlayModel」結果ではロータ表面やティース先端で分布が左右対称となっていません。確認のため、N 極と S 極のロータ表面の周期対称位置にある要素(d 軸上)の BH ループを図 5 に示します。先にも説明しましたように、「BH」結果は BH ループ上を動くため、上昇時、下降時共に重なっています。一方、「PlayModel」結果では BH ループとなっているため、上昇時と下降時の差が出ていることが確認できます。なお、0.8T 近傍でわずかながらループに凹みがあることが見て取れます。磁束密度の変化量としては非常に小さく、またプレイモデルの同定に使用したデータは 0.05T 刻みですので、PlayModel で正しく表現できていない可能性がありますのでご注意下さい。

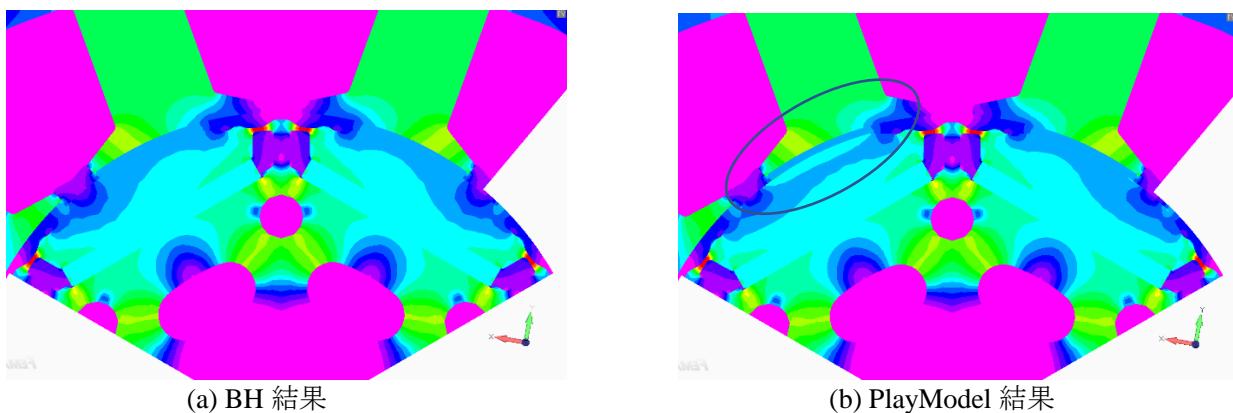


図 4 磁束密度分布

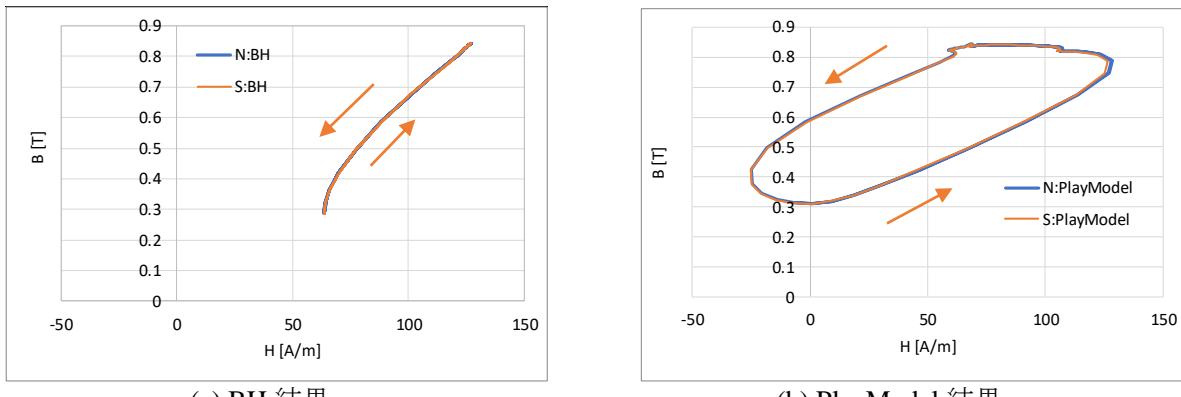


図 5 BH ループ

今回は IPMSM のコギングトルクのヒステリシス解析結果を説明致しました。ヒステリシス特性を考慮できるプレイモデルは国内では主流となりつつあるようですが、プレイモデルデータの作成(同定)のための磁化特性データを揃える必要があり、その上 BH カーブを用いた計算に比べかなりの計算コストが掛かってしまうのが現状だと思われます。公表されているプレイモデルを実機に適用した事例は少ないこともありますので、もしこんな解析をしてみたい(してほしい)等ありましたらお問い合わせ頂ければと思います。

[文献] 北尾, 他:「ヒステリシス特性を考慮した埋込磁石同期モータの有限要素磁界解析」,  
電学静止器・回転機合同研資, SA-16-63/RM-16-109 (2016)

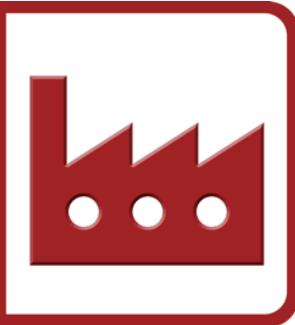
### EMSolution Tips: 水車発電機の電磁場解析 シミュレーション

この度、公益法人計算科学振興財団(FOCUS)様のスペコン シミュレーション利用事例集 第7号(2017年4月)に、EMSolution の解析事例が、掲載されましたので、ご紹介いたします。

HPC-EMSolution(並列高速電磁場解析ソルバー)を利用した計算時間の短縮についての事例となっておりますので、大規模モデルの解析をご検討されているみなさまにとって、ご参考になれば幸いです。

本解析事例(.pdf)は、以下の Web ページからもダウンロードすることができます。

公益財団法人 計算科学振興財団(FOCUS)  
スペコン シミュレーション利用事例集 2017年4月発行  
「水車発電機の電磁場解析 シミュレーション」  
<http://www.j-focus.or.jp/project/spread.html>



# 水車発電機の電磁場解析 シミュレーション

## —高効率化のための渦電流損低減解析事例—

研究・開発機関 : サイエンスソリューションズ株式会社  
 利用施設 : 自社設備  
 計算規模 : PCクラスタ4ノード 64コア  
 利用ソフトウェア : 電磁場解析ソフトウェア HPC-EMSolution

### Before

- 従来より、大形回転機である発電機を対象に、開発・設計段階で大規模な三次元電磁場解析が積極的に行われています。
- しかし、水車発電機は設置する河川の水量と落差によって最適な回転速度が異なります。このため、設計の度に大規模な三次元解析を実施する必要がありますが、計算時間が膨大となるため現実的ではありませんでした。

### After

- PCクラスタを用いて並列計算を行うことで、従来1ヵ月かかった計算が47時間と大幅な時間短縮が図れました。
- 計算時間を短縮できることで、高効率化を狙った形状変更を行う際に必要な大規模な三次元解析を実用的に行えるようになり、事前の検討を十分行うことが可能となりました。

### ■ 背景と目的

水車発電機は太陽光発電や風力発電と並んで、再生可能エネルギーを使用して発電できること、落差さえあれば発電できること、から設置可能範囲も広く、近年再注目されています。

水車発電機には塊状磁極鉄心が用いられることが多い、その表面損失の低減は効率向上には必須です。

塊状磁極鉄心の渦電流による表面損失を評価するため、図1に示す水車発電機モデルで電機子コイルエンドとコア端部も考慮した三次元電磁場解析を行います。

さらに塊状磁極鉄心上下部にある非磁性体の磁極端板(導電性)も考慮し、磁極表面に軸方向にスリット状のへこみを入れ、渦電流損の低減効果も評価します。

評価対象である塊状磁極鉄心と固定子スロットおよび界磁コイルを、形状周期対称性を利用して軸方向1/2、周方向1/5を有限要素メッシュで作成し、形状が複雑な

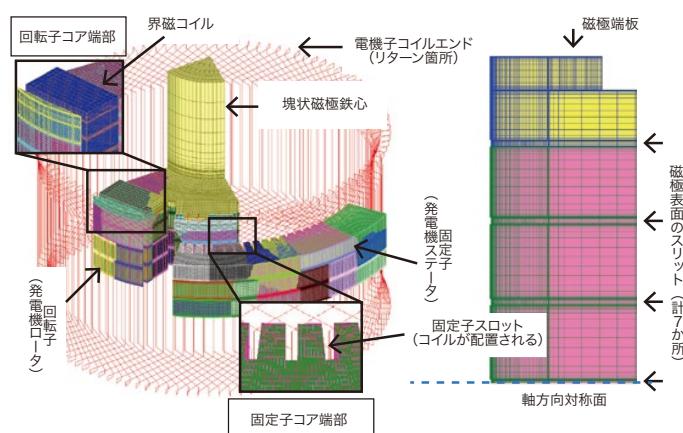


図1 水車発電機モデル

固定子スロット内の電機子コイルは、有限要素メッシュとは独立に定義することで、膨大なメッシュ数にならないように工夫しています。本モデルでは線電流として電機子コイルを模擬しています。

磁極表面のスリットは、軸方向対称面に1か所で上下にそれぞれ3か所ずつの計7か所、最上部は磁極鉄心上下部の非磁性体である磁極端板との間に設けています（図1右図参照）。

塊状磁極鉄心を用いた水車発電機モデルが大規模になる理由として、磁極鉄心表面に表皮厚さ（渦電流浸透深さ）を細かいメッシュ分割で表現しなくては計算精度が出ないことがあげられます。

本例では周波数50Hzで運転するため、スロット高調波（スロット数×周波数）で概算すると表皮厚さはおよそ0.2mmとなり、磁極鉄心表面に層状に非常に扁平なメッシュを作成する必要があります。

磁極表面にスリットを設けると、さらにメッシュ数は増え、計算時間が増大してしまうのが課題です。

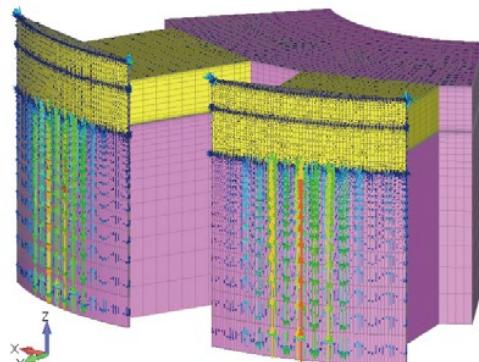


図2 塊状磁極鉄心の渦電流損ベクトル分布  
(スリット無しの場合)

## ■ 利用成果

スリット有りの塊状磁極鉄心モデルはスリット無しのモデルよりもおよそ2倍（約230万六面体要素）大きなモデルとなるため、32並列の領域分割（図1の色分け）を行い、PCクラスタを用いて並列計算を行いました。この規模で300ステップ以上の計算が必要であるため、従来は1ヵ月かかった計算が47時間に短縮できました。

図2（スリット無し）では、磁極表面にスロット数の分だけループする渦電流分布が見られます。

一方、図3（スリット有り）では、渦電流はスリットを渡って流れるため、等価的に電気抵抗が高くなり、平均的に最大値が減少していることが確認できます。

図4に規格化した磁極鉄心と磁極端板の表面損失を示します。スリットを設けたことで表面損失はおよそ60%に低減でき、形状変更による効率向上の一手段として適当であることがわかります。

HPC-EMSolutionを活用することで、大規模なモデルでのパラメータサーベイが可能となりました。

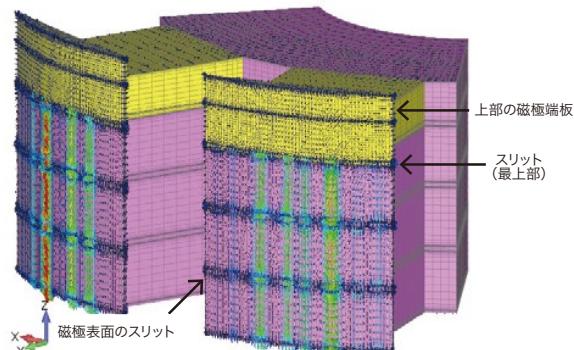


図3 塼状磁極鉄心の渦電流損ベクトル分布  
(スリット有りの場合)

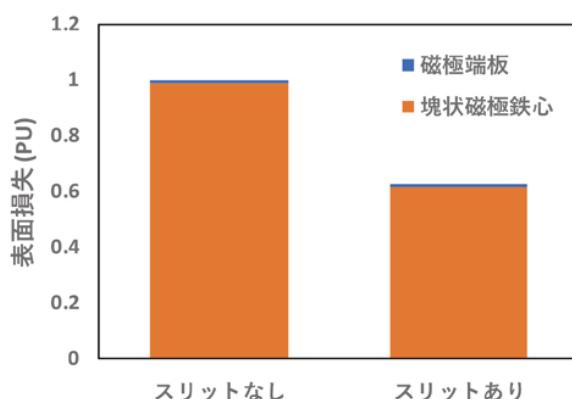


図4 塼状磁極鉄心の表面損失

## ■ ちょっと一息：EMSolution の故郷(品川神社) その 32

東京の桜の名所といえば、上野公園、千鳥ヶ淵等が有名だったのですが、今年のTVでは目黒川が主流になりました。今回は、この目黒川の河口付近まで行って見ます。

当社からは、直線で東南東に約4km、目黒川が第一京浜道路に交差したところから都心方向に約 200m 行くと、左側に品川神社があります。当社近辺の目黒川の河川敷の幅は狭く、川の両脇に急峻な坂道が多いのですが、河口部付近のこの周辺は、河川敷の幅も広くなっています。品川神社はこの河川敷にあるのですが、この神社だけはお椀を伏せたような形になっていて、第一京浜からは傾斜のキツイ階段になっています。蛇足ですが、江戸末期に東京湾にお台場を造営した時は、この周辺から土砂を掘り海上に運んだ事が記録されています。神社だけを残し周辺は掘削したのかもしれません。

品川神社の創建は文治 3 年(1187 年)です。太田道灌が江戸城を築城したのが 1457 年、徳川家康が江戸城に入城したのが 1590 年なので、歴史を持った神社です。徳川家康は、品川神社に関ヶ原の戦勝祈願をし(1600 年)、祈願が成就したことから徳川家は歴代、この神社を厚く庇護しました。その後、明治天皇が准勅祭社に指定、1975 年には東京十社の一つに指定されています。良く解らない言葉が出てきますが、結局のところ東京を代表する10の神社の一つという事のようです。

第一京浜道路に面した神社の入り口には石の鳥居があります。神社に鳥居は珍しくありませんが、向かって右側の柱には登り龍、左側の柱には下り龍の彫刻があります。鳥居の右側には「元準勅祭 品川神社」、および「新東京百景」の石柱があり、また左側には石の大黒天があります。鳥居をくぐるとすぐに石段で途中に踊り場がありますが、この踊り場の左側にある鳥居の先に富士塚の登山道入口と刻まれた石と一合目の石柱があります。



石鳥居



登山道

富士塚とは、江戸時代の中頃に富士山信仰が盛んになり、富士山に見立てたミニ富士山が建設されるようになったものです。東京都内には10以上の富士塚が現存しているそうですが、品川神社の富士塚は都内最高との事です。それだけでなく、富士塚の表面には溶岩が敷き詰められ、富士山らしい様相になっています。江戸時代にあれだけの量の溶岩を運んだのは大変だったろうと思います。登山道は富士塚の斜面を斜めに登り、途中で鋭角に折れ山頂に至ります。山頂は直径数メートルの円形の平地になっていて中心部には旗を掲揚する石柱があり、私が行った時には鯉幟がはためいていました。富士塚の頂上からは西側は木とかビルがあり、富士山は見えませんが、南側には京浜急行の線路、その南側に市街が見えます。江戸時代であれば、目の前に東海道の品川宿、その先に東京湾がクリクリと見えた筈です。富士塚の北側に向かう下山道を降りると、浅間神社があり傍に交通安全のお守りになっている「無事カエル」の彫刻が富士塚の北斜面に埋め込まれています。富士に蛙だから、「無事帰る」とうダジャレですが、この神社はもともと海上交通の安全祈願に創建されたという事なので、交通安全があるのは当然なのかもしれません。

先程の石段は藤塚の東側を登り、そのまま少し直進すると、左側に浅間神社があり、ここから反時計回りに社務所、本殿、赤い鳥居、忠魂碑と社、神楽舞台、包丁塚、七福神が目に入ります。この場所からは見えませんが、社務所と本殿の間の奥には宝物殿があり、赤い鳥居は何本か並んでいるのですが、最初の鳥居から北側に行ったところに阿那神社の上社、一旦右手に行き少し降りた先に下社があります。



赤い鳥居



神楽舞台

下社の前には泉があり、この泉の水でお金や印鑑を洗い、水を持ち帰り家の四隅に巻けば、金運上昇という事です。残念ながら、今回写真撮影に行った時は夕方で、閉じられていて金運情報のチャンスを失いました。金運は神頼みでは無く、自分で稼げという事と解釈しておきます。

江戸時代、日本橋を起点とする東海道の最初の宿場町が品川宿ですが、この宿は東海道に沿って長く、非常に繁盛したと伝えられています。品川神社の周辺はその後の開発に取り残された結果、今でも往時の雰囲気が残って居て、最近はこれが観光資源になりつつあります。という事でこの周辺には昔から飲食店が多く、使い古された包丁を収め、同時に調理に使われた鳥獣・魚・野菜等の靈を慰めたるため包丁塚が建立されたと記されて居ました。

### **EMSolution Topics No.38**

編集・発行: 〒153-0065 東京都目黒区中町 2-21-7  
サイエンス ソリューションズ株式会社

お問い合わせは、下記までお願いいたします。

EMSolution 事務局

E-mail: [emsdesk@ssil.co.jp](mailto:emsdesk@ssil.co.jp) TEL:03-3711-8900 FAX:03-3711-8910