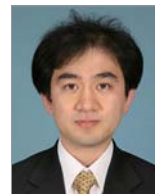


モータの中の磁場を可視化する

近藤 稔

車両制御技術研究部(動力システム 主任研究員)



こんどう みのる

はじめに

電車はモータで車輪を回して走っています。そして、そのモータでは電磁石で磁場をつくることで、電力から動力を生み出しています。そのため、モータの性能を良くするためには、モータの中でどのような磁場が発生しているかを良く把握する必要があります。

しかし、磁場は目で見ることはできません。計測器を使えば空間中の磁場は測定できますが、物体中の磁場は測定することもできません。では、どのようにすればモータの中の磁場を把握することができるのでしょうか？

現在、その最も有効な方法がコンピュータシミュレーションによる磁場の可視化です。モータの中の磁場の計算は複雑で膨大ですが、近年のコンピュータの劇的な進歩により、現在では、モータの中の磁場の計算もパソコンである程度できるようになりました。

モータの技術は長い年月をかけて発達してきた成熟した技術ですが、モータの中の磁場をコンピュータで手軽に可視化できるようになったのは比較的最近のことです。可視化してみると、モータの中の磁場が詳細に明らかになり、新たな認識、新たな発明も生まれ、モータ技術の更なる進歩に貢献できます。

以下では、電車用モータとして広く用いられている誘導モータの内部の磁場を有限要素法(FEM)という計算方法を用いたコンピュータシミュレーションにより可視化することで、モータを高効率化して鉄道をより省エネにするための新しいアイデアが生まれた例を紹介します。

電車用モータのしくみ

はじめに、電車用モータのしくみについて簡単に説明します。最近の電車用モータは誘導モータと呼ばれるモータが主流です。誘導モータは回る部分(回転子)と回らない固定された部分(固定子)からなります。誘導モータでは固定子に取り付けられた巻線に電気を流して電磁石を作り、

その磁力で電車を走らせる力を出します。この電磁石は電気が流れる巻線と磁気が流れる鉄心でできています。鉄心は磁気が流れやすい鉄板を積み重ねて作ったもので、磁気の大半は鉄心の中を流れていきます。通常の誘導モータではこの電磁石のセット(相)が3セット(3相)あり、それらに流す電流を順番に変化させていくことでモータの中に回転する磁界を作ります。

そして、電車が加速するときには、回転子の回転よりも、回転磁界を少しだけ速く回転させると、回転子の導体で作られる電気回路に電流が流れ、回転子にも電磁石ができ、この回転子の電磁石と固定子の電磁石の間に働く力で電車を走らせることができます。

回転子に電流が流れるしくみ

ここで、電源につながっていない回転子の電気回路に電気が流れるのは、電磁誘導と呼ばれる現象によるものです。電磁誘導とは磁場の中を導体が移動すると、その導体中に電気を流そうとする力(起電力)が発生して電気が流れる現象です。磁場を表現するのに磁力線がよく用いられますが、この磁力線を用いて電磁誘導を説明すると、磁力線が導体を横切ることにより電気を流そうという力が発生する現象と考えることができます。

回転磁界と回転子の回転の向きと速さが同一であれば、磁力線が回転子内を移動することがなく、回転子に電流は流れません。しかし、回転磁界を回転子より少しだけ速く回転させると、回転磁界が回転子に対して移動するため、回転子の中を磁力線が移動し、回転子の電気回路に起電力が発生します。このようにして発生した起電力により回転子の電気回路を循環するように電気が流れます。

また、より多くの磁力線が横切る方がより多くの電流が流れるので、回転子内の電流は磁力線が多く通る場所に流れます。電磁石に発生する力は磁力線と電流の相互作用で発生するので、回転子内では最も効果的に力を発生できる

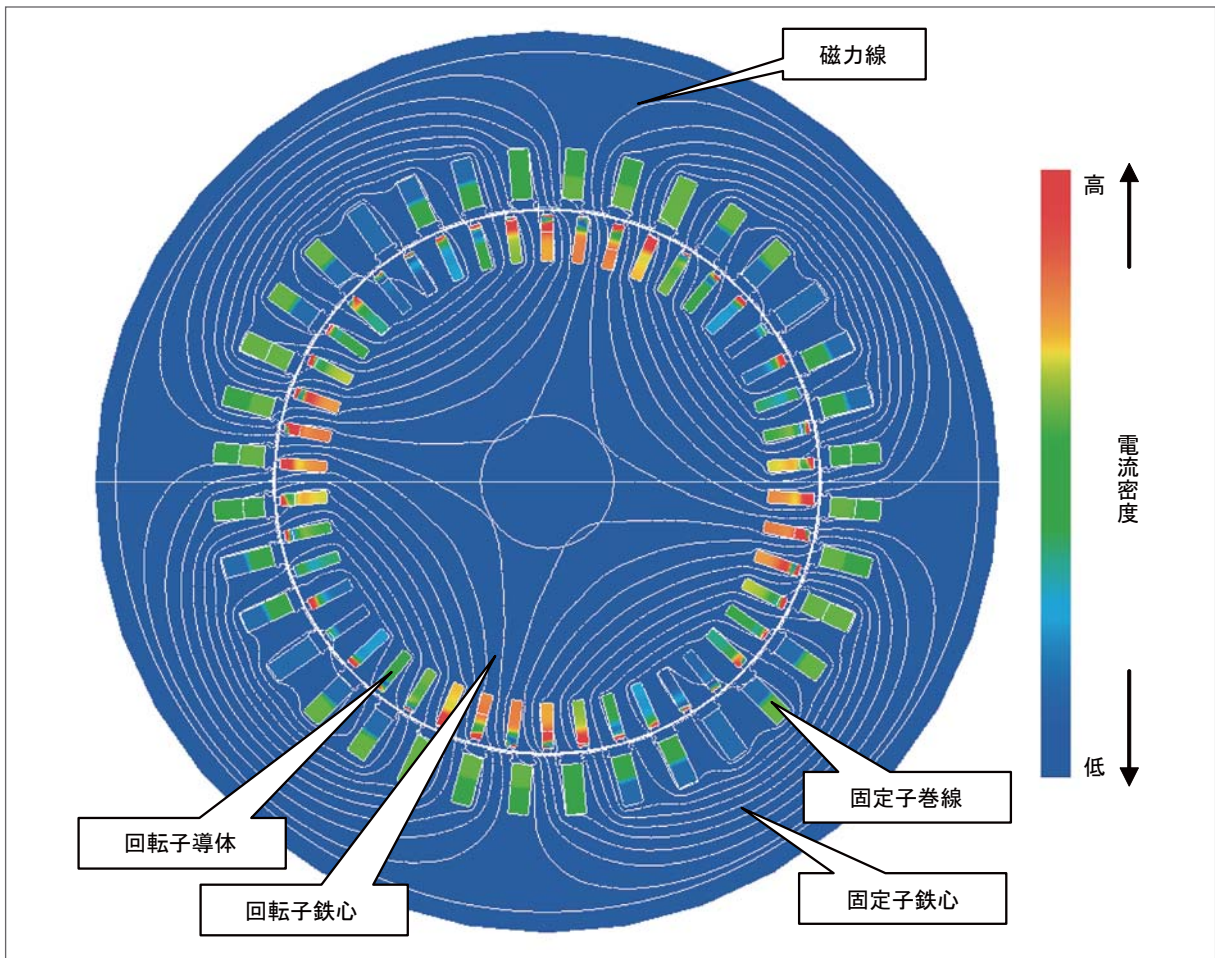


図1 誘導電動機の中を通る磁力線と電流密度の関係

場所に都合良く電流が流れてくれることになります。

図1はFEMにより計算した電車で用いるモーターの中の磁力線と電流密度です。磁力線が多く通っている場所にある回転子導体に多くの電流が流れていることが確認できます。

モーター内の余計な磁界

しかし、すべてが都合良く行くわけではありません。はじめに、固定子の電磁石で回転磁界を作ると説明しましたが、電磁石で無駄のない滑らかな回転磁界を作ることは実は容易ではありません。誘導モーターの場合、回転子と固定子の間の空間（ギャップ）での磁束密度が正弦波状に変化するような磁界が最も理想的だと考えられています（「磁束密度」は磁界を表現する量のひとつで、磁力線の密度を表しています）。そのような理想的な磁界を作るためには、無数のコイルを少しずつずらしながら並べて、滑らかに変化する磁界を作るのが良いのですが、製造コストなどを考えると、無数のコイルを使うのは現実的ではありません。電車で用いるモーターの場合は36個のコイルを使って、モーター内に4つの磁極を作るのが一般的です。コイルは固定子鉄心に設けられた36個の溝に納められて回転磁界を発生

できるように接続されます。

このとき、磁場は鉄心の中を通るので、固定子の溝の部分には磁場はほとんど流れません。そのため、ギャップでの磁束密度が回転方向の位置によりどう変わるかを表したギャップ磁束密度分布は、溝の部分が大きく凹んだ形になります。図2はFEMにより計算したギャップ磁束密度分布の例です。図2では1つの磁極あたり9個の溝に対応する磁束密度分布の凹みが確認できます。このように固定子

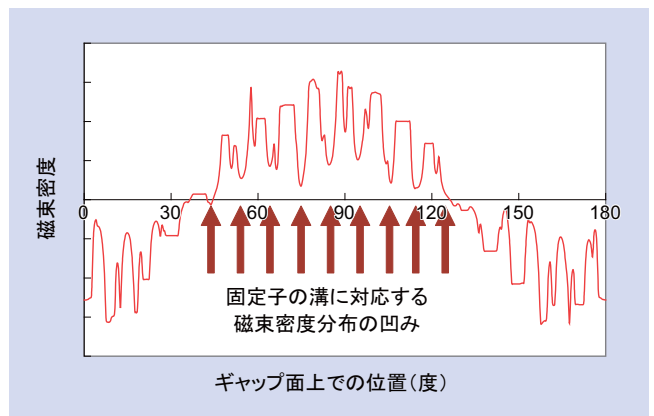


図2 誘導電動機のギャップ磁束密度分布

の溝の影響で磁束密度分布が乱れて余計な磁界が生じることは昔から知られていました。しかし、電車で用モータでそれがどの程度のものになるのかを手軽に確認できるようになったのは、FEMなどによるコンピュータシミュレーションができるようになってからのことです。

余計な磁界が生み出す余計な電流

さて、このように固定子の溝の影響などで余計な磁界があると、それに反応して回転子の回路に余計な電流が流れます。さきほど、回転磁界と回転子の回転速度が同一であれば回転子には電流が流れないと述べましたが、それは、理想的な正弦波状の磁束密度分布が実現されている場合の話です。余計な磁界による余計な電流は回転磁界と回転子の回転が同一のときでも流れます。

固定子の溝の影響による磁場は溝の位置で生じます。そのため、回転子の導体が溝の位置を通過するたびに、溝の影響により回転子に電流が流れます。回転子の導体は、モータが一回転するごとに溝の数だけ、溝による磁界の変動を受けるので、高い頻度で磁界が変動します。その結果、電磁誘導により回転速度×溝の数の周波数で回転子導体に電流が流れます。

図3はある回転子導体に流れる電流をFEMで計算した結果です。一回転する間に、溝の数(36)の分だけ電流が脈動していることが確認できます。図4は回転磁界と回転子の回転速度が同一のときの、回転子導体中の電流密度分布のFEMによる計算結果です。電流は回転子表面付近に集中して流れていることが確認できます。こういった電流密度分布を可視化できることもFEMならではのメリットです。

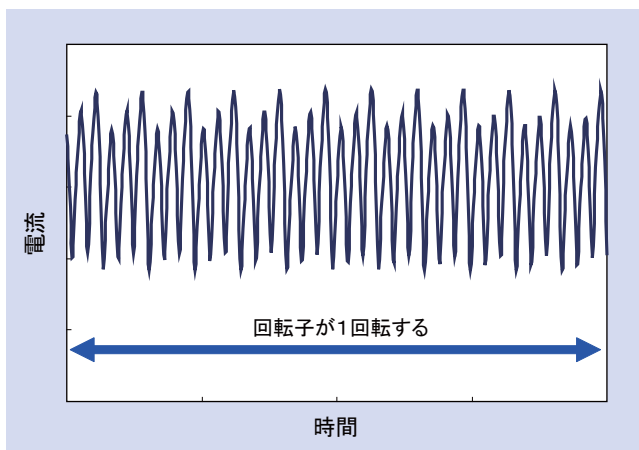


図3 回転子導体を流れる電流の時間変化

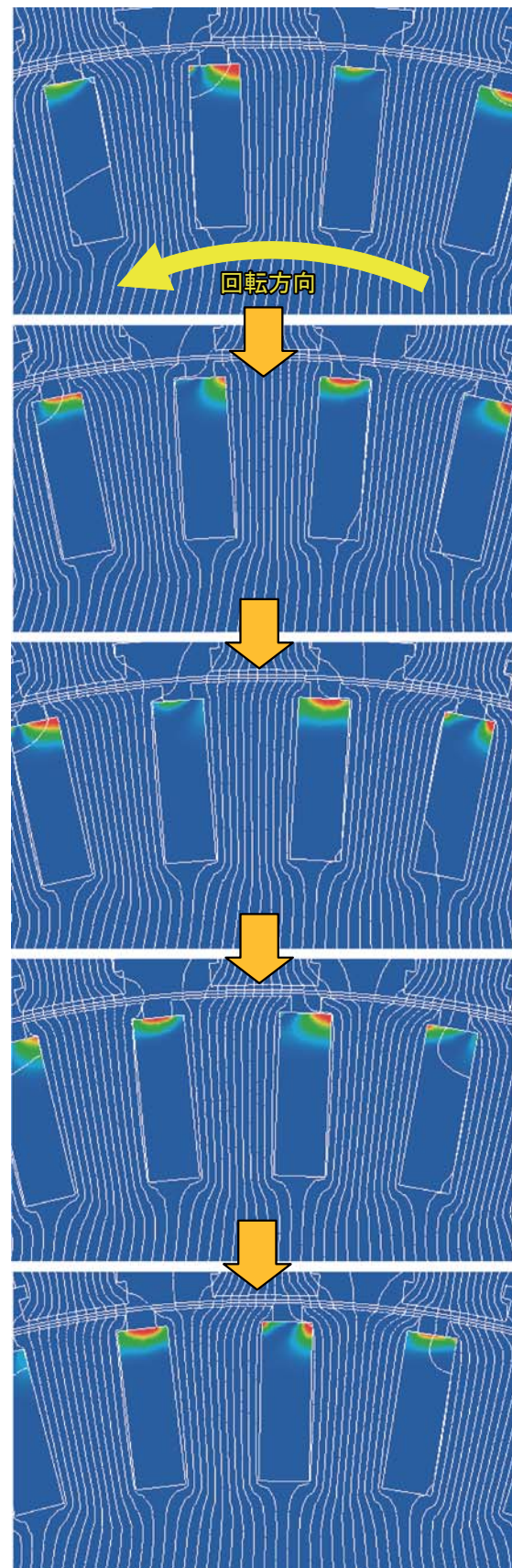


図4 回転子導体内の電流密度分布と磁力線の変化

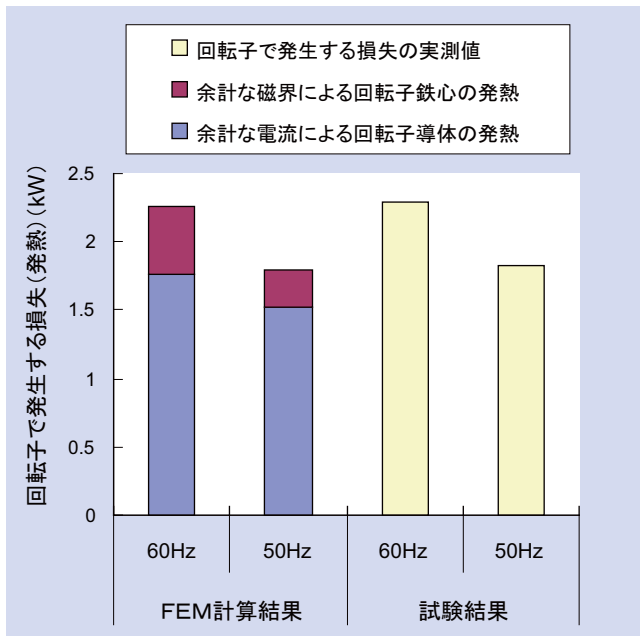


図5 回転子で発生する損失

余計な電流が流れないようにするために

このように、回転子導体には溝の影響で余計な電流が流れます。そして、電流が流れることで導体が発熱してモータが熱くなってしまいます。つまり、モータに入れた電気の一部が動力に変換されず、熱になってしまうので、エネルギーが無駄になり、モータをオーバーヒートさせる原因にもなります。図5は余計な磁界と余計な電流により発生する回転子の発熱をFEMで計算し、実測されたエネルギー損失と比較した結果です。両者は良く一致しており、FEMによる計算の妥当性が確認できます。

では、無駄な電流を流さないためにはどのようにすればよいのでしょうか？図4のように可視化された磁場を見ると、溝の影響で磁場が乱れている場所は回転子表面付近に限定されていることが確認できます。コンピュータの画面上ではこの磁力線が時間とともにどのように変化するかをアニメーションで表示でき、回転子表面付近の磁力線の位置が溝の通過とともに細かく変動することが確認できます。つまり、溝の影響による磁場の変動で回転子表面の磁力線が細かく動くことが、この無駄な電流の発生原因と考えられます。

そこで、図6のように、その磁場が乱れている回転子表面付近の部分から導体を取ってしまうことを考えました。

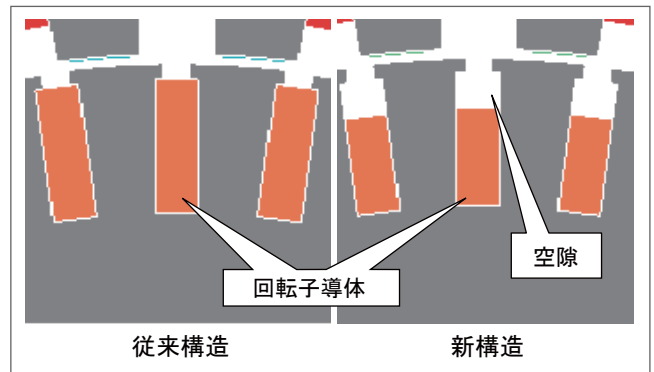


図6 空隙を設けた回転子構造

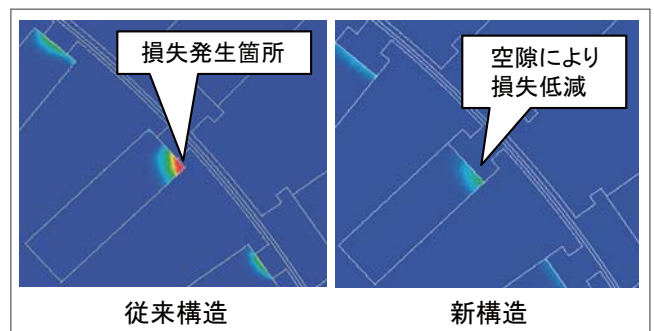


図7 新構造による回転子損失低減効果

図7はFEMにより余計な電流による回転子導体の発熱の可視化を行い、図6のように空隙を設けた場合と従来構造との比較を行ったものです。余計な電流による発熱は完全には無くならないものの、大幅に削減できていることが分かります。計算結果によると、図6の構造により余計な電流で無駄になるエネルギーを半減できることが分かりました。この構造については、今後、実際に試作試験を行い、省エネ効果を確認していく予定です。

おわりに

以上、FEMによるコンピュータシミュレーションでモータの中の磁場を可視化し、省エネなモータを実現するためのアイデアが生み出された例をご紹介しました。FEMの良さばかり書きましたが、気をつけなければいけないのは、FEMはあくまでも実物をモデル化して計算した結果に過ぎないということ、そのモデル化が不適切であれば実際の現象を表現できないということです。今回の問題については図5で示した通り実測との一致が確認されていますが、新しい問題についてFEMなどの計算による可視化を適用する際には、計算モデルの妥当性について良く考えた上で、適用していくことが重要です。RRR