電車モーター内部の磁界と損失分布を数値計算で可視化する



依田　裕史
Hiroshi Yoda
超電導応用技術研究部
磁気浮上研究室
主任研究員



近藤　稔
Minoru Kondo
車両技術研究部
駆動システム研究室長

はじめに

鉄道車両の主電動機（電車の駆動用モーター）は，静止した固定子と，その内側で回転する回転子から構成されます。固定子と回転子には，磁束の通り道となる鉄心と，電流を流す導体が配置されています。固定子側の導体であるコイルに電流を流すと磁場が発生し，この磁場と回転子側の導体に流れる電流との相互作用によって，車輪を動かす回転力が生み出されます。一方，内部の磁束密度分布にむらや変動があると，余分な損失や回転力の変動が発生します。しかし，磁場そのものは目で見ることができず，鉄心や導体のどこで損失が発生しているかを，運転中の実機で直接測定することも困難です。

実機試験によって効率やトルク（回転力）を評価することはできますが，その性能が得られた理由まで明らかになるとは限りません。従来のモーター設計では，複雑な内部現象をシンプルな磁気･電気等価回路に置き換え，電圧，電流，トルクなどの関係を計算してきました☞コラム。この方法はモーター全体の特性を把握するうえで現在も重要ですが，内部のどこで磁束密度が高くなり，どの部位で損失が発生しているかを直接示すことはできません。主電動機の高効率化には，こうした部材ごとの損失を把握し，モーター全体で低減することが重要です[1)]。

有限要素法（FEM）☞を用いた電磁界解析では，モーター内部の磁束密度，電流密度，電磁力，損失などを位置ごとの分布として求めることができます（図1）。これらを可視化することで，

☞ コラム「モーター設計と電磁界解析の歩み」

モーター設計は長い間，磁気回路や電気等価回路，経験式，実機試験によって支えられてきました。複雑な内部現象を単純化した計算式に置き換えることで，限られた計算手段でも電流，回転速度，トルクなどの関係を見通すことができます。これらの方法は，現在もモーターの基本設計に欠かせません。

一方，等価回路では，鉄心内部の磁束密度分布や，部材ごとの電流・損失分布を直接求めることはできません。FEMを用いた電磁界解析では，モーターの形状を多数の小さな要素に分け，それぞれに材料の磁気的・電気的性質を与えることで，モーター内部に生じる磁場や電流の変化を計算します。回転軸に直交する断面を用いる二次元解析に加え，固定子コイルや回転子導体の端部，鉄心を固定する端板など，軸方向に変化する構造を含めた三次元解析も行われています。

近年は，計算機と解析技術の進歩により，実機の形状を詳しく再現した大規模な解析が可能になり，磁束密度分布，電流密度分布，電磁力および損失分布を可視化できるようになりました。また，電磁界解析で求めた損失や電磁力を，温度，強度，振動・騒音などの解析に利用する取り組みも進んでいます。FEMは従来の設計手法を置き換えるものではなく，これまで見えなかったモーター内部の現象を設計情報へ変える技術です。これにより，モーター設計は，経験と試作を中心とする方法から，内部現象を確認しながら性能を作り込む方法へ発展しています。

磁束密度分布のむらや損失が集中する部位を確認し，効率やトルクなどの性能差が生じる原因を内部現象から分析できます[2)]。

本稿では，磁性クサビを適用した鉄道車両用誘導電動機を対象に，電磁界解析によって明らかにした性能改善効果と，その背景にある磁束密度分布，電流密度分布および損失分布の変化について紹介します。

磁性クサビで磁気の流れをコントロールする

固定子と回転子の鉄心には，それぞれ導体を収めるための溝があり，この溝をスロットと呼びます。固定子スロットには巻線によるコイルが，回転子スロットには棒状の銅製導体である導体バーが収められています。固定子スロットの開口部には，コイルを保持するためのクサビが設置されています。一般的なクサビには非磁性の樹脂材料が用いられており，磁気的には空気とほぼ同様に作用します。スロットの開口部では磁束が通りにくいため，固定子と回転子の間の空隙（ギャップ）では，磁束密度が場所によって細かく変化し，分布に周期的なむらが生じます。

このような磁束密度分布の細かなむらを空間高調波と呼びます。空間高調波が回転子を通過すると，回転子の導体バーに本来の駆動に必要な電流に加えて，細かく変動する電流が生じ，余分な損失や発熱が生じます。また，回転力も一定ではなく，周期的に変動します。この回転力の変動をトルク脈動と呼びます。トルク脈動がモーターから歯車へ伝わると，歯車のかみ合い部を振動させる原因になります。このため，

図1　等価回路による計算と電磁界解析の比較

	等価回路による計算	電磁界解析（FEM）
計算の考え方	・内部現象を磁気・電気回路に置換 ・少数の値でモーター全体を表現	・実際の形状を小さな要素に分割 ・各要素の状態を詳細に計算 ・磁気飽和などの材料の非線形性を各要素で考慮可能
得られる結果	・電圧 ・電流 ・回転速度 ・トルク ・効率	左記の全体特性に加えて ・磁束密度分布 ・電流密度分布 ・電磁力分布 ・損失分布
内部現象の把握	・全体的な傾向を把握 ・内部現象は計算結果から推定	・磁束密度が高い場所を可視化 ・磁気飽和や損失が集中する部位を特定
求められる経験・ノウハウ	・計算式の選択 ・特性曲線や補正値の設定 ・内部現象の推定	・形状・材料・解析条件のモデル化 ・計算結果の解釈
計算量・計算時間	・比較的小さい ・短時間で計算可能 ・多くの条件を比較しやすい	・モデルを細かくするほど増加 ・三次元解析では特に大きい
主な用途	・基本仕様の検討 ・運転特性の把握 ・多数の設計案の比較	・全体性能と内部現象の詳細評価 ・鉄心などの詳細な形状設計 ・改善効果と副作用の分析

☞ 有限要素法（FEM）

有限要素法は，複雑な形状を三角形や四面体などの小さな「要素」に分け，各要素内の物理量の変化を近似して，領域全体の状態を求める数値解析手法です。1940年代に原型が示され，1950年代に航空機の構造設計を背景として実用化が進みました。その後，計算機の発展とともに構造物，熱，電磁界へと適用範囲が広がりました。電磁界解析では，磁束密度の大きさと向き，材料の非線形性，回転による時間変化などを表す必要があります。現在では，モーター内部の磁束密度分布や電流密度分布などを求める代表的な手法となっています。

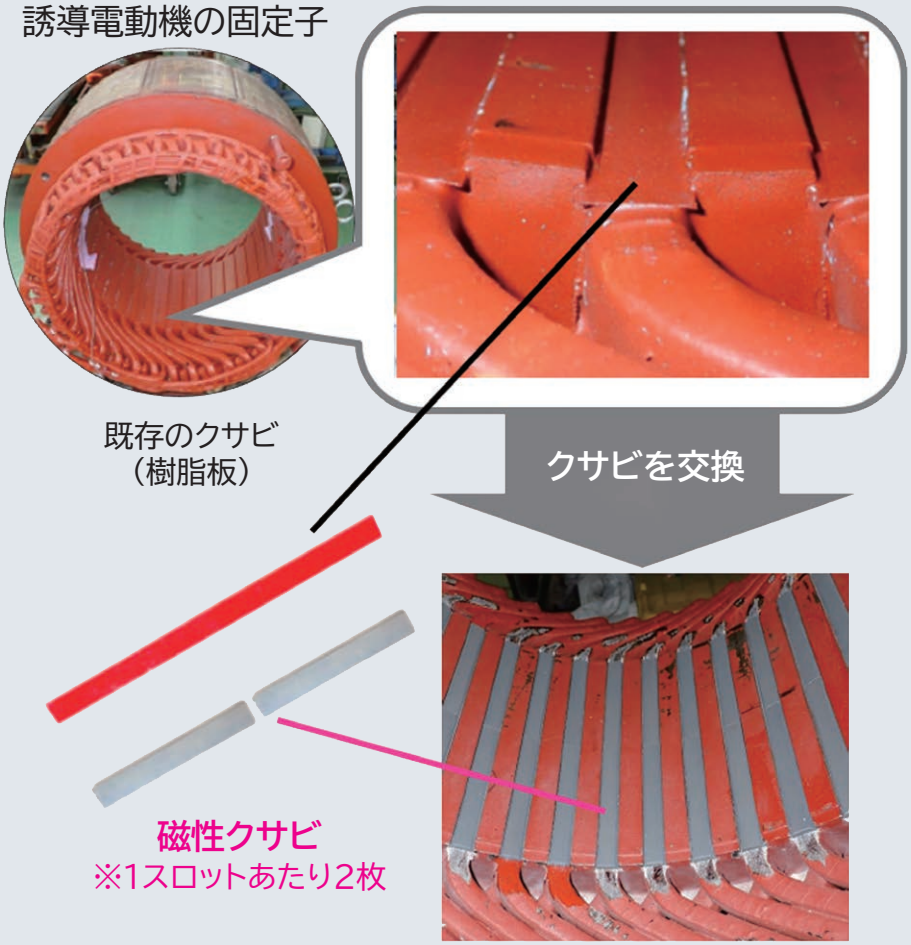


図2　誘導電動機固定子への磁性クサビ適用

☞ コラム「モーターの損失」

モーターに入力された電力の一部は，熱や空気の運動などに変わり，損失となります。損失は大きく，モーターを駆動するための通電に伴う銅損と，トルクを発生させるための磁気作用に伴う鉄損に分けられます。銅損は巻線や回転子導体の電気抵抗によって発生する損失です。鉄損は鉄心などの磁性材料で磁束密度が変化することによって発生する損失であり，磁化と消磁の繰り返しに伴うヒステリシス損と，材料内部に誘起される電流によって発生する渦電流損があります。磁性クサビも鉄損を生じますが，電気伝導率が極めて低いため，その大部分はヒステリシス損です。

また，軸受などの摩擦による損失と，回転子や冷却ファンが空気を動かすことで生じる風損は，まとめて機械損と呼ばれます。このほか，電流分布の偏りや漏れ磁束などに起因して生じる，基本設計では個別に見積もることが難しい損失を漂遊負荷損と総称します。高効率化には，これらの損失をモーター全体で低減することが重要です[5]。

トルク脈動を抑えることは，歯車装置から発生する騒音や駆動系の振動の低減にもつながります[3]。

磁性クサビ[4]は，固定子スロットの開口部に設置されている一般的なクサビを，絶縁性をもつ磁性材料製のものに置き換える技術です（図2）。磁性クサビに置き換えると，隣り合う固定子鉄心の歯の間に磁束の通り道が形成されます。これにより，固定子スロット開口部で生じる磁束密度の急な変化が緩和され，ギャップの磁束密度分布が滑らかになります。その結果，空間高調波が抑えられ，回転子に生じる余分な損失とトルク脈動の低減が期待できます。

ただし，磁性クサビに置き換えれば，モーター内のすべての損失が減少するわけではありません。磁性クサビ自身にも時間とともに変化する磁束が通るため，磁性クサビの内部で鉄損が発生します。また，磁束の経路が変わることで，周辺の鉄心や他の部材の損失が増加する場合もあります。このため，回転子で減少する損失だけでなく，磁性クサビ自身や周辺部材で新たに生じる損失も調べ，モーター全体として損失が低減するかを評価する必要があります☞コラム。

可視化が明らかにする改善メカニズムと効果

本稿では，鉄道総研が製作した高効率誘導電動機を対象に，固定子の一般的なクサビを磁性クサビに置き換えた場合の性能変化について，

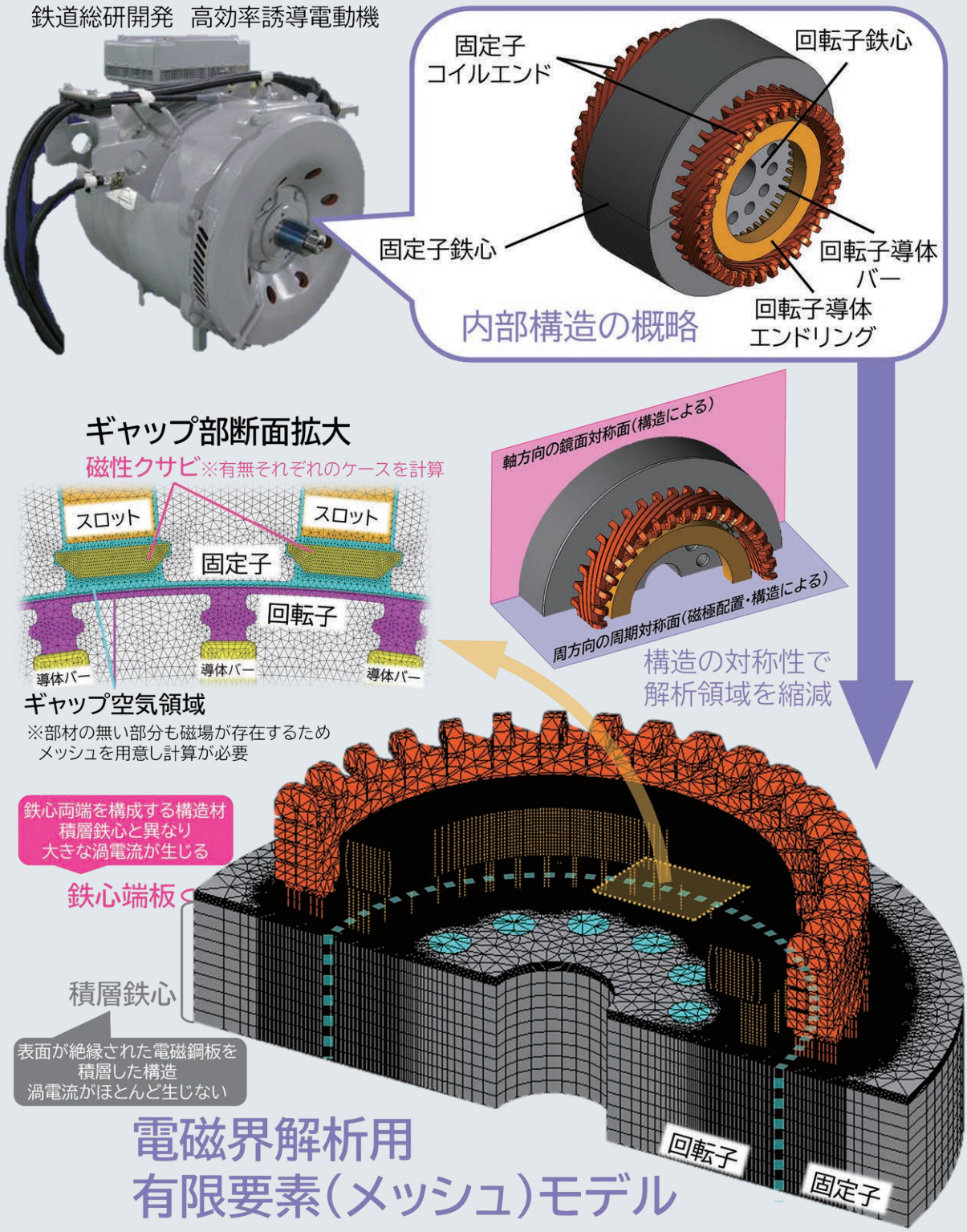


図3　高効率誘導電動機の三次元解析モデル

大規模三次元電磁界解析を行い比較した結果を紹介します。解析モデルは，固定子および回転子鉄心，固定子スロット先端に挿入した磁性クサビ，固定子コイル，エンドリングと導体バーからなる回転子導体からなります（図3）。固定子および回転子の鉄心は，薄い鋼板を重ねて渦電流の発生を抑えた積層鉄心を主要部とし，その軸方向両端には構造を保持する鉄心端板が設けられています。鉄心端板には比較的大きな渦電流が発生する可能性があるため，その分布と

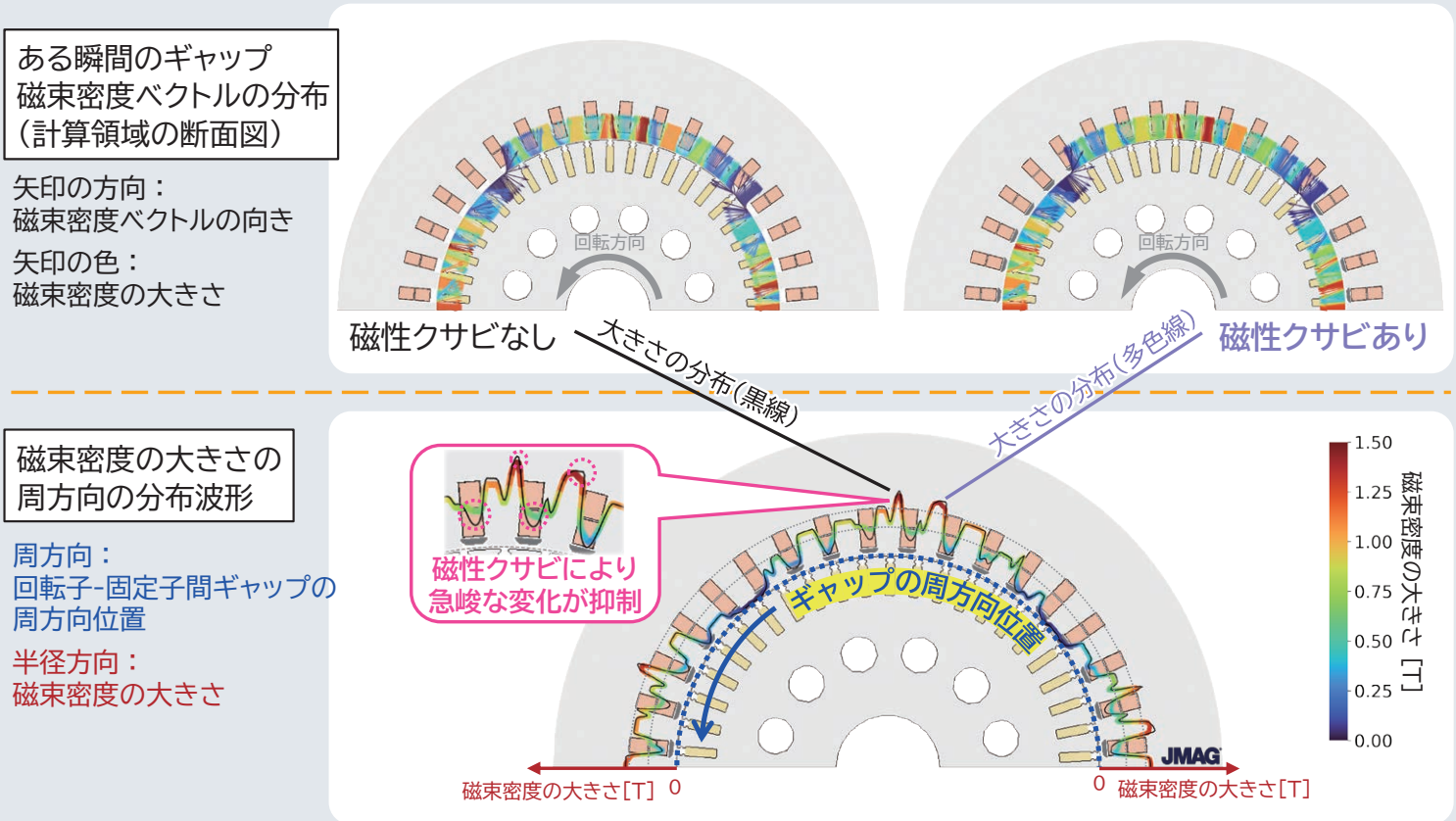


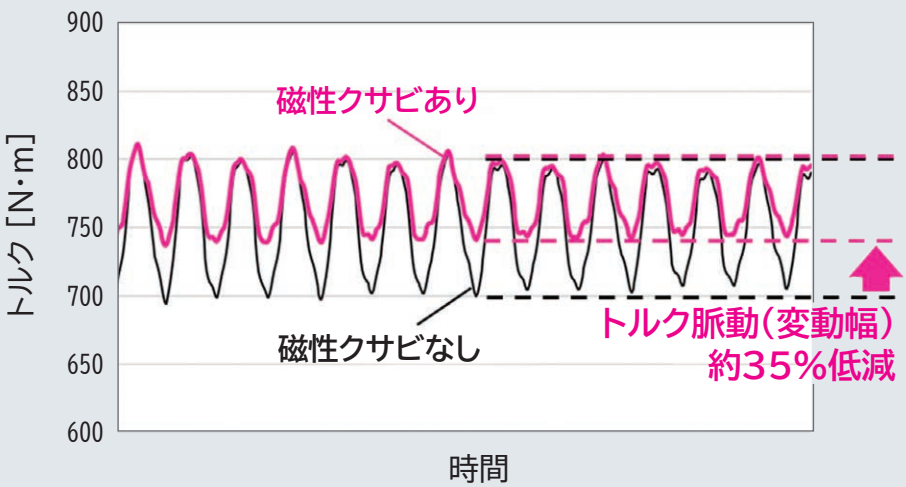
図4　磁性クサビによるギャップ磁束密度分布の変化

損失を評価するには，細かな有限要素メッシュを用いて端部構造を再現した三次元電磁界解析が必要です。

ここでは，定格回転条件における解析結果を示します。磁性クサビへの置き換えにより，固定子スロット開口部付近の磁束密度の変動が緩和され，固定子と回転子の間の空隙（ギャップ部）の磁束密度分布が滑らかになることがわかりました（図4）。この変化により，トルク脈動は約35％低減しました（図5）。

損失については，回転子導体および回転子鉄心端板で低減が見られました。一方，磁性クサビ自身には鉄損が発生し，固定子鉄心端板では渦電流損失が増加しました（図6）。これらの増減を合計すると，磁性クサビの有無による磁束密度分布の変化が影響を与える部位の損失は，約12％低減することがわかりました（図7）。

図5　磁性クサビによるトルク脈動の低減効果



おわりに

電磁界解析により，実機では直接観察できない主電

動機内部の磁束密度分布，電流密度分布および損失分布を把握できるようになりました。磁性クサビを適用した誘導電動機では，磁束密度分布の変化によるトルク脈動の低減に加え，回転子側で減少する損失と，磁性クサビや固定子鉄心端板で増加する損失を部材ごとに確認しました。

電磁界解析の意義は，実機試験を置き換えることではありません。実機試験では確認しにくい内部現象を可視化し，性能改善の理由と副作用を明らかにすることにあります。等価回路，電磁界解析および実機試験を相互に補完させることによって，モーター設計は，経験に基づく性能調整から，内部現象を理解して性能を作り込む段階へ進化しています。RRR

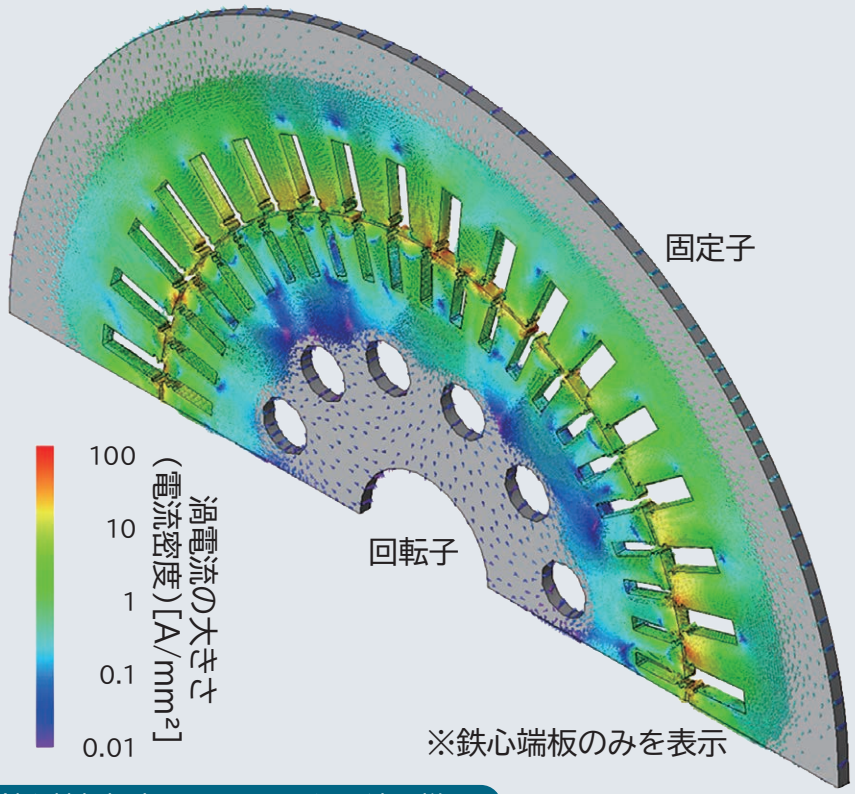
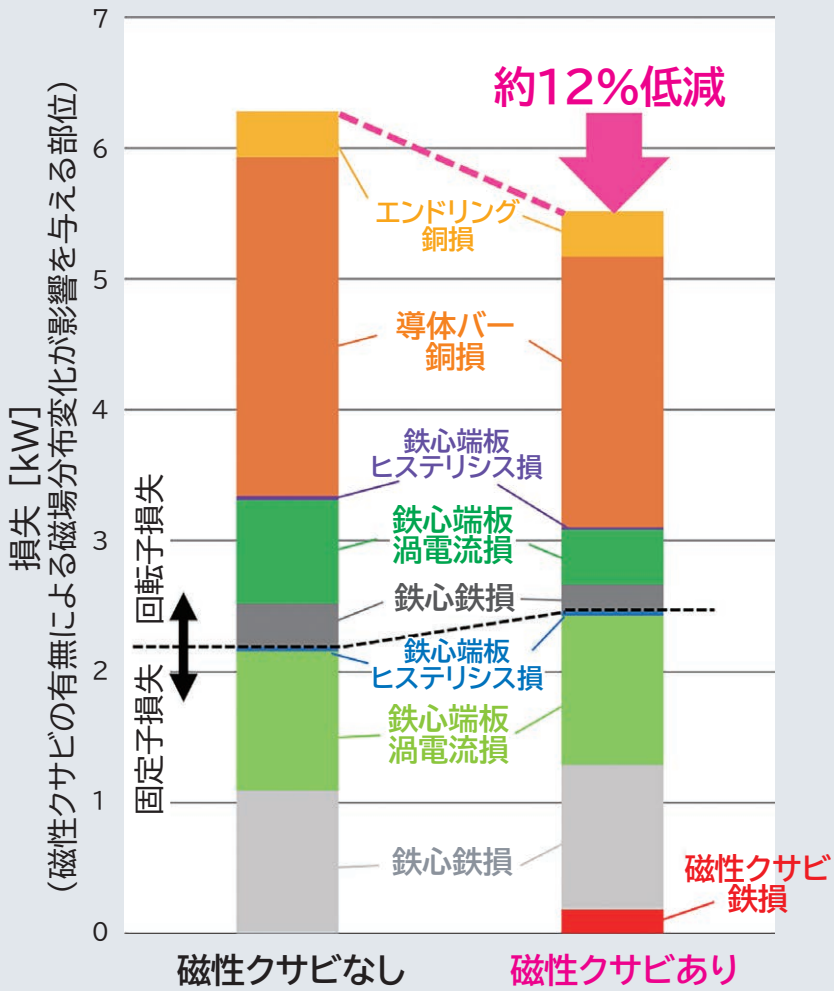


図6　鉄心端板損失の要因となる渦電流の様子

図7　磁性クサビによる損失内訳と低減効果



文　献

1）近藤稔：主電動機の高効率設計による電車の省エネルギー効果，鉄道総研報告，Vol.27，No.12，pp.29-34，2013
2）近藤稔：モータの中の磁場を可視化する，RRR，Vol.68，No.5，pp.2-5，2011
3）笹倉実，近藤稔：モーター・歯車装置からの音と振動を減らす，RRR，Vol.71，No.11，pp.12-15，2014
4）株式会社プロテリアル：モータ用磁性楔材料，https://www.proterial.com/products/soft_magnetism/mmsw.html（入手日：2026年7月21日）
5）近藤稔：モータの効率を上げる，RRR，Vol.66，No.3，2009