

報告番号	甲 第 14241 号
------	-------------

主 論 文 の 要 旨

論文題目 エネルギー分析型中性子イメージングの
自動車用モータ材料への応用
(Application of Energy Resolved Neutron
Imaging to Automotive Motor Materials)

氏 名 笹田 星児

論 文 内 容 の 要 旨

カーボンニュートラル社会の実現に向けて、自動車産業では、従来の内燃機関を駆動力とする自動車から電気を駆動力とする自動車へ大きくシフトチェンジしている。自動車駆動用モータには、高効率化・小型化・低コスト化が求められており、モータを構成する各要素において様々な技術開発が行われている。その中でも、本研究では磁石材料とコア材料に関する技術開発に焦点を当て、それぞれの評価課題に対してエネルギー分析型中性子イメージングの応用を検討した結果を述べた。

1) 配向磁石の内部磁化分布評価

自動車用モータに用いられる磁石には、近年、磁粉の結晶方位をそろえることで磁束の流れる方向を制御し、高磁束密度を実現する配向磁石が採用されている。配向磁石の性能には、製造工程における磁石内部の磁粉の配向・磁化状態が大きく影響を与える。それゆえに、これらの評価技術は重要な基盤技術といえる。配向状態は、結晶方位を評価する EBSD, XRD を用いた破壊的手法で評価できる。一方、磁化状態の評価は、従来の破壊的磁束評価手法では計測値の定量性、空間分解能に課題がある。また、非破壊の評価手法である逆問題解析法は、解の一意性に課題がある。

非破壊で材料内部の磁場分布を評価可能な手法に、偏極中性子を用いた磁場イメージング手法が提案されている。本手法は材料内部の磁場分布を非破壊で評価可能な手法である。しかし、磁石内部の磁化評価へ適用する場合、漏洩磁束による中性子の試料入射前後のスピ状態への影響の低減、多磁区構造をもつ磁石材料の磁氣的不均一性を考慮する必要があ

る。そこで本研究では、実験において漏洩磁束低減のためのヨークの導入、解析において磁区の不均一性に起因する中性子偏極度の減衰を考慮することでこれらの課題解決をおこなった。これらの影響・効果を実験的に確認し、偏極中性子を用いた磁場イメージングの磁石内部磁化分布評価への適用性検討を目指した。

2) コア材料の内部打ち抜き残留ひずみ分布評価

モータコアの打ち抜き加工時に、材料内部に残留するひずみが鉄損を悪化させることが知られている。そのため、この内部の残留ひずみ分布を正確に評価可能な手法が求められている。従来の破壊的手法では、弾性ひずみの評価ができない点、ひずみの定量的な方向・強度の評価が困難な点が課題である。一方、非破壊での評価手法として高エネルギー放射光を用いた X 線回折による評価が報告されている。しかし本手法は原理的に点の計測であり、ひずみ分布を取得する際は試料を走査する必要がある。そのため、高空間分解能かつ広視野でひずみの 2 次元分布を取得するには膨大な時間が必要となる。

高空間分解能かつ広視野の 2 次元ひずみイメージングを実現可能な手法に中性子ブラッグエッジイメージングが提案されている。2 次元のひずみ情報は加工解析結果との比較に有効であり、実測結果との比較を通して、解析技術の妥当性検証、精度向上が期待される。しかし、本手法は、空間分解能とひずみ計測精度がトレードオフの関係にあることから、これらの両立が課題である。そこで本研究では、測定試料の加工・形状をデータの重ね合わせ処理に最適化することで、空間分解能の劣化を最小限に抑え、ひずみ計測精度の向上をおこなった。このデータの重ね合わせ処理による効果を定量的に評価し、中性子ブラッグエッジイメージングによるひずみ分布計測の空間分解能とひずみ計測精度の両立を実現することで、電磁鋼板打ち抜き残留ひずみ分布の評価への適用によるひずみ分布取得と、加工解析手法の結果の妥当性検証を目指した。

第 2 章では、配向磁石内部の磁化分布評価を目的に、偏極中性子イメージングの適用を検討した。既知の磁化をもつ異方性フェライト磁石に対して、磁化に応じた偏極度波長依存性を取得し、中性子のラーモア歳差運動に起因するスピン振動を計測した。実験的に漏洩磁束の低減を目的に試料を覆うヨークを用い、またマイクロな磁氣的不均一性を考慮するための減偏極を含めた解析手法を適用することで、スピン振動の周期から、磁石内部の磁化値を評価可能なことを実験的に確認した。裏付けとして、各量子化軸方向の偏極度に現れる減偏極の磁化依存性から、磁化の変化が磁化方向の 180° 反転が主要因であることを示した。

また、空間的な磁化勾配をもつ試料に対して、偏極中性子を用いて磁化の 2 次元イメージングを実施し、磁石内部の 2 次元磁化分布の取得を実現した。得られた結果の妥当性を、従来手法の破壊的手法、逆問題解析法にて得られた結果との比較、さらに各手法で実測した磁化分布から磁場解析にて推定した漏洩磁束分布と、実測した漏洩磁束分布との比較を通して、偏極中性子のイメージングにて得られた磁化の値の妥当性を確認した。その結果、偏極中性子イメージングは、従来手法に比べ、評価の空間分解能で優位性があることが示唆された。

偏極中性子イメージングにおいて、漏洩磁束による試料入射前後の中性子スピンの回転、また磁気的不均一性による減偏極が正確な磁化分布の計測を困難にする。これらの克服が今後の課題といえる。

第 3 章では、自動車用モータのコア材料において、加工時に発生する打ち抜き残留ひずみの可視化を目的に、中性子ブラッグエッジイメージングの適用を検討した。中性子ブラッグエッジイメージングによるひずみ計測の空間分解能とひずみ計測精度の両立に向け、同一条件で加工した試料の計測データの重ね合わせ処理を行い、その効果を検証した。打ち抜き加工した試料の評価では、重ね合わせ処理による空間分解能の劣化は 0.16 pix と、他の空間分解能を制限する要因に比べ小さいことを確認した。同時にひずみの計測ばらつきは、中性子統計数の向上によりひずみ計測精度 $\pm 186 \text{ } \mu\text{ST}$ を達成し、高精度なひずみの 2 次元イメージングが可能となった。より波長分解能の高い中性子の利用で更なる計測精度の向上が期待される。

このデータの重ね合わせ処理を用いて、打ち抜き加工した試料の磁束方向、打ち抜き方向のひずみ分布計測をそれぞれ実施した。磁束方向のひずみ分布計測では、(110)のブラッグエッジスペクトルを解析し、エッジ広がり分布、エッジ位置からマイクロひずみ分布を取得した。打ち抜き面端部に広がる引張ひずみ分布、コア内部に広がる圧縮ひずみ分布を実測し、打ち抜きクリアランス量の拡大にともなう残留ひずみ分布領域の拡大を確認した。打ち抜き方向のひずみ分布計測では、周方向の積算処理を行うことで、打ち抜き面からの各距離におけるひずみプロファイルを実測した。(211)のブラッグエッジスペクトルを解析し、打ち抜き端部から $200 \sim 300 \text{ } \mu\text{m}$ の領域に分布する圧縮ひずみ分布と、 $300 \sim 700 \text{ } \mu\text{m}$ の領域に分布する引張ひずみ分布を実測した。さらにクリアランス量の拡大によるこれらのひずみ領域の拡大を確認した。

加えて、中性子にて実測した試料に対して、EBSD を用いた断面組織分析、磁気特性評価による鉄損値の計測を実施し、これらの結果と中性子ブラッグエッジイメージングの結果を比較することで、中性子イメージングで得られた結果の妥当性を確認した。さらに、加工解析による内部残留応力分布の解析結果と中性子ブラッグエッジイメージングのひずみ分布実測結果を比較し、これらの一致を確認した。加工解析における Cockcroft-Latham の式を用いた簡易的な解析手法の妥当性/有効性を示した。

第 4 章では、各章の総括を行い、本研究の結論を述べた。さらに、偏極中性子による磁場イメージング、中性子ブラッグエッジによるひずみイメージングという 2 つの手法の今後の課題をまとめ、中性子応用の展望について述べた。

本研究では、ユニークな特徴を持つ中性子のエネルギー情報を活用したエネルギー分析型中性子イメージングの、自動車用モータ材料への応用について検討した、従来の分析・評価技術、解析技術と組み合わせることで、新しい材料・加工技術開発に対する新たな知見を提供することが可能になることを示した。