

令和 6 年 6 月 12 日現在

機関番号：17501

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K04419

研究課題名（和文）多結晶と磁区構造を考慮した電磁鋼板の異常渦電流損のモデリング手法の開発

研究課題名（英文）Development of modeling method for anomalous eddy current loss in electrical steel sheets considering polycrystalline and magnetic domain structures

研究代表者

高 炎輝（Gao, Yanhui）

大分大学・理工学部・准教授

研究者番号：40586286

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、電磁鋼板の磁気特性である鉄損の計算方法を高精度化にするため、電磁鋼板の多結晶と磁区構造を考慮した数値的なモデリング方法を開発し、電磁鋼板の異常渦電流損の発生メカニズムを明らかにするとともに鉄損解析の精度を向上することを目的とした。本研究は、電磁鋼板の異常損の発生要因である180度磁壁移動によって生じる異常渦電流損、異なる結晶粒方位による磁束不均一による異常渦電流損を考慮する数値的なモデリング法を開発し、各要因による損失を定量化した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電磁鋼板の異常渦電流損に関する研究は、1970年代から、電磁鋼板素材自身の鉄損を低減するため、実験と理論計算による研究が盛んになされて、異常渦電流損の発生原因を一部明らかにした。現在、数値解析技術は日々進化しており、数値解析技術を用いて低鉄損の電気機器を設計するため、数値的な手法で異常渦電流損の発生原因を再検討するようになった。数値的な手法その多くは、鉄損の測定値とフィッティングする方法で、各周波数と磁束密度での汎用が難しい。本研究で開発した手法は磁区構造と結晶方位を考慮した物理的な汎用性あるモデリング手法である。

研究成果の概要（英文）：In this study, to clarify the loss generation mechanism and improve the accuracy of iron loss analysis of electrical steel sheets, we developed a numerical modeling method that takes into account the polycrystalline and magnetic domain structure of electrical steel sheets. During the research period, we developed a numerical modeling method that takes into account the anomalous eddy current loss caused by 180° domain wall movement, and anomalous eddy current loss caused by nonuniform magnetic flux due to different grain orientations. We applied the developed methods to the anomalous eddy current loss calculation and quantified the loss due to 180° domain wall movement and grain orientation.

研究分野：電気機器

キーワード：電磁鋼板 異常渦電流損 磁区構造 結晶方位 磁界解析

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 近年、CO<sub>2</sub> 削減の観点から電気機器の高効率化への要求が高まっている。一方、機器の駆動用にインバータ電源が盛んに用いられているが、この電源に含まれる高調波成分により、機器の鉄芯で発生する鉄損が増加するため、高調波成分による電磁鋼板の鉄損増加を精度良く評価できる解析法を確立する必要がある。

(2) 電磁鋼板は、粒界を境界とした結晶粒が多数存在する集合組織化された多結晶体である。また、各結晶粒の中に磁化容易軸方向に磁気モーメントが揃った磁区が磁壁を介してある規則を持って集合している。電磁鋼板の鉄損を正しく評価するため、この多結晶と磁区構造を考慮した物理的なモデリング方法が必要となる。

(3) 一方、方向性電磁鋼板において、個々の結晶粒の結晶方位のばらつきにより、磁束を局所的に集中することを探針法という測定法で確認された。この磁束の局所的な集中により、磁壁の移動距離が長くなり、異常渦電流損の増加が見込まれる。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、電磁鋼板を用いたモータや変圧器、リアクトルの小型・低損失化設計を可能にするため、結晶粒方位のばらつきと磁区構造、磁気特性の非線形性および渦電流を考慮した均質化手法による電磁鋼板の磁界解析法を開発し、高精度な鉄損計算法を確立することである。

### 3. 研究の方法

#### (1) 鋼板の磁気特性の非線形性を考慮した磁区モデリング方法の開発

鋼板の磁気特性の非線形性と磁区構造を考慮した二次元渦電流解析法を開発し、電磁鋼板の鉄損計算に適用し、各種電磁鋼板の 180° 磁壁移動によって生じる異常渦電流損を定量化する。

#### (2) 結晶粒方位のばらつきを考慮した磁界解析法の開発

結晶粒方位のばらつきを考慮するため、多結晶モデルに全体座標系と各結晶粒の結晶粒方位に局所座標系を設定し、磁気異方性は局所座標系で取り扱い、局所座標系を座標変換で全体座標系にする結晶方位粒のばらつきを考慮した磁界解析法を開発し、電磁鋼板の鉄損計算に適用し、結晶粒方位のばらつきによって生じる異常渦電流損を定量化する。

### 4. 研究成果

(1) 異常渦電流を考慮しない場合、方向性電磁鋼板の断面内に古典渦電流のみ発生し、渦電流分布は図 1 (b) に示すようになる。古典渦電流により、図 1 (a) に示すよう表皮効果が生じる。異常渦電流を考慮するため、2020 年度は、鋼板の磁気特性の非線形性と磁区構造を考慮した二次元渦電流解析法を開発した。

開発した方法を方向性電磁鋼板の渦電流計算に適用し、図 2 (c) に示すように、電磁鋼板の 180° 磁壁移動によって磁壁の周辺に生じる異常渦電流分布を表現できた。それにより、表皮効果も強くなった(図 2 (a))。得られた古典及び異常渦電流分布を用いて渦電流損を定量化した結果、異なる印加磁界と周波数において、異常渦電流により渦電流損が増加し、最大約 20% 増加した(図 3)。

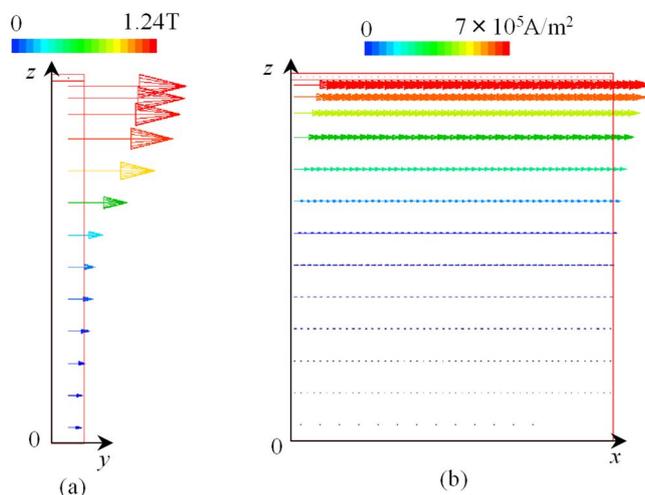


図 1 異常渦電流を考慮しない場合の(a)磁束分布と(b)古典渦電流分布

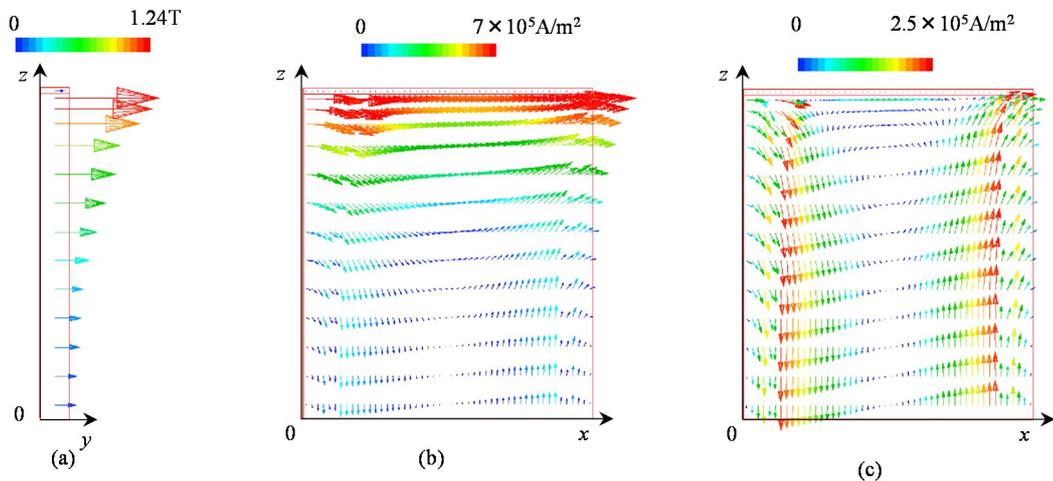


図2 異常渦電流を考慮された場合の(a)磁束分布，(b)古典と異常渦電流分布，(c)異常渦電流分布

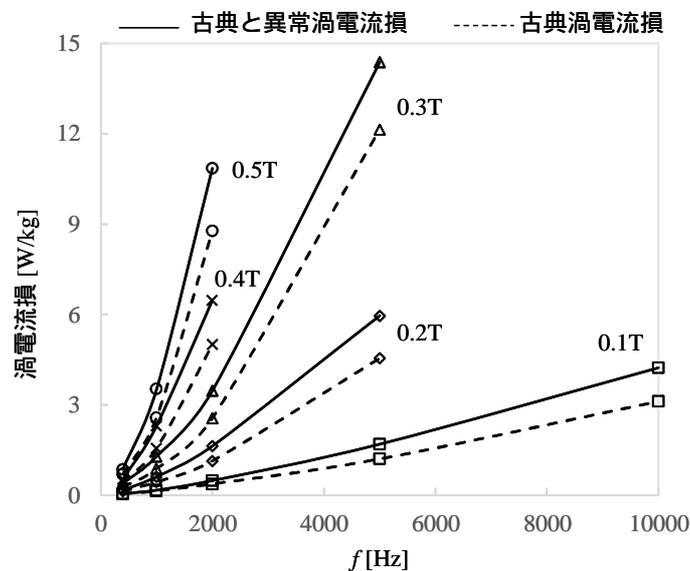


図3 渦電流の比較

(2) 2020年度は方向性電磁鋼板のための異常渦電流損評価方法を開発したが，2021年度は，無方向性電磁鋼板のための異常渦電流損評価方法を開発した．具体的に，無方向性電磁鋼板の結晶粒方位のばらつきを考慮した磁界解析法を開発し，開発した方法を無方向性電磁鋼板の多結晶モデルに適用した(図4)．結晶粒は，簡単のため，0.1mm角の立方体が，格子状に整列していると仮定した．各結晶粒の磁化容易軸方向は図5に示すようにランダムに与えた．

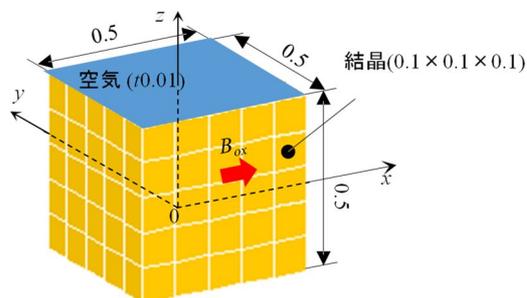


図4 無方向性電磁鋼板の多結晶モデル

図6(i)に得られた磁束分布を示す．図6(i)(a)から，結晶粒方位のばらつきを考慮しない場合，磁束分布は横方向に均一であることがわかる．一方，結晶粒方位のばらつきを考慮することにより，磁束密度の局所的な集中が発生していることが図6(i)(b)で確認できた．それにより，鋼板表面の渦電流も大きくなった(図6(ii)(b))．

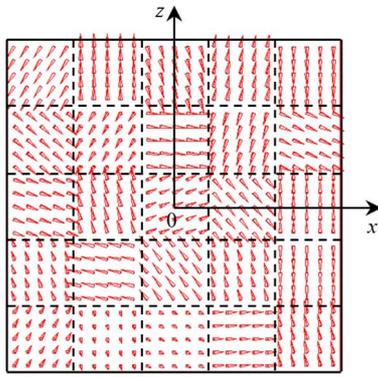


図5 磁化容易軸方向の分布( $y = 0$ )

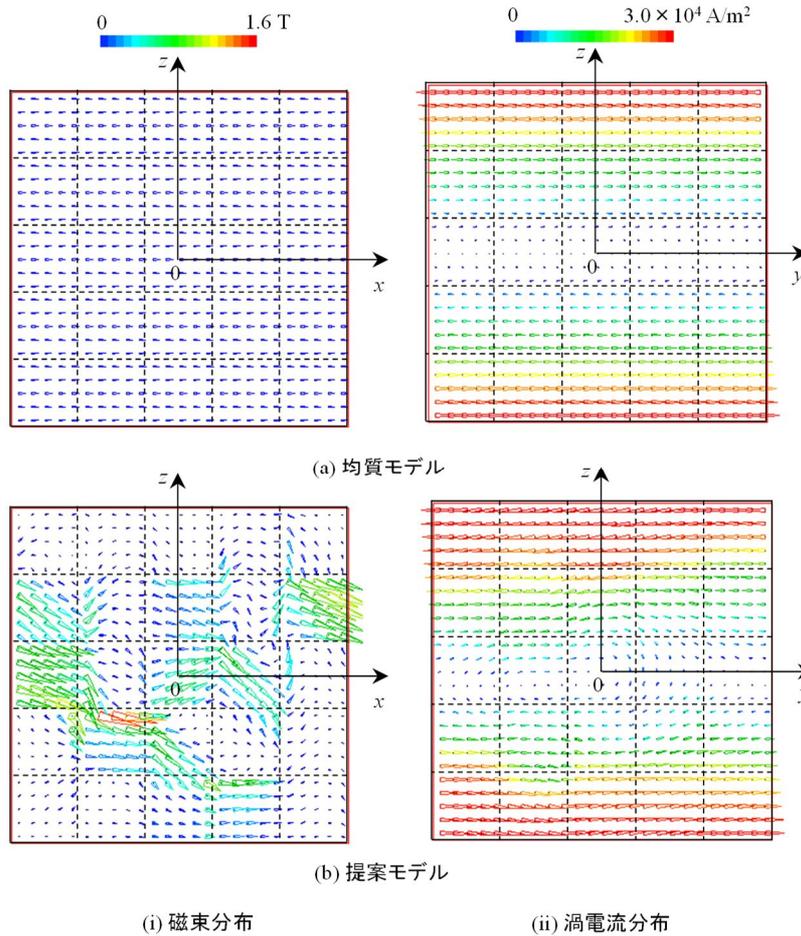


図6 結晶方位考慮するとなしの磁束分布，渦電流分布の比較( $B_{max}=0.5T$ ,  $f=100Hz$ )

最後に，得られた渦電流分布を用いて異常渦電流損を評価した結果，結晶粒方位のばらつきにより鋼板中の渦電流損が大きくなり，全体の渦電流損の値は約20%を増加した（図7）。

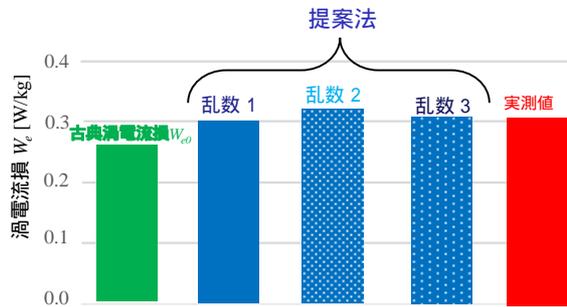


図7 結晶方位による渦電流損の変化

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Yanhui Gao, Taketo Shibauchi, Yuji Gotoh, Weimin Guan, Kazuhiro Muramatsu	4. 巻 59
2. 論文標題 Dynamic Hysteresis Calculation of Silicon Steel Considering DC Hysteresis and Anomalous Eddy Current Loss	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	6. 最初と最後の頁 1-5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TMAG.2023.3234596	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Yanhui Gao, Yuuji Gotoh, Kyoya Hamada, Shun Araki, Kazuhiro Muramatsu, Yukiha Takeuchi, Yasuhito Takahashi, Koji Fujiwara, Tetsuya Ogawa, Chio Ishihara, Kohei Aiba, and Seira Otsuka	4. 巻 58
2. 論文標題 Modelling of magnetic anisotropy due to compression molding of soft magnetic composite for inductance calculation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	6. 最初と最後の頁 1-4
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TMAG.2022.3176853	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 0件/うち国際学会 7件）

1. 発表者名 Kazuki Matsuyuki, Hiroshi Dozono, Kazuhiro Muramatsu, Yanhui Gao, Weimin Guan, Cuihua Tian, Jiixin Yuan, Baichao Chen, Hamed Hamzehbahmani
2. 発表標題 Modeling of excess loss due to variation of grain orientation in non-oriented electrical steel sheet
3. 学会等名 21st International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics (ISEM 2023), no. PB-1a: 4 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hamed Hamzehbahmani, Taketo Shibauchi, Yanhui Gao, Weimin Guan, Kazuhiro Muramatsu
2. 発表標題 An Experimental-Numerical Approach for Energy Loss Separation of Grain-Oriented Electrical Steels
3. 学会等名 2023 IEEE International Magnetic Conference - Short Papers (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yanhui Gao, Kazuki Matsuyuki, Hiroshi Dozono, Kazuhiro Muramatsu, Weimin Guan, Cuihuad Tian, Jiaxin Yuan, Baichao Chen, Hamed Hamzehbahmani
2. 発表標題 Modeling of excess loss in non-oriented electrical steel sheet considering grain orientation
3. 学会等名 The 20th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (IEEE CEFC 2022), no. P14-3 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yanhui Gao, Taketo Shibauchi, Yuji Gotoh, Weimin Guan, Kazuhiro Muramatsu
2. 発表標題 Dynamic hysteresis calculation of silicon steel considering DC hysteresis and anomalous eddy current loss
3. 学会等名 The 20th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (IEEE CEFC 2022), no. 010-1 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Gao, T. Ohira, Y. Gotoh, W. Guan, X. Zhao and K. Muramatsu
2. 発表標題 Investigation on simple numerical modeling of anomalous eddy current loss in steel sheet using multiple boundary conditions
3. 学会等名 MMM 2022 Conference, HPA-09 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 柴内勇人, 高炎輝, 村松和弘
2. 発表標題 電磁鋼板の交流ヒステリシスループのモデリング
3. 学会等名 電気学会静止器・回転機合同研究会, nos. SA-23-015, RM-23-015
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 柴内 勇人, 高 炎輝
2. 発表標題 直流ヒステリシス特性と異常渦電流損を考慮した無方向性電磁鋼板の鉄損計算
3. 学会等名 2022電 気・情報関係学会九州支部連合大会, nos. 03-1A-04
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松雪和樹, 堂園 浩, 村松和弘, 高 炎輝, 関 偉民
2. 発表標題 結晶方位のばらつきを考慮した無方向性電磁鋼板の異常渦電流損のモデリング
3. 学会等名 2021年度(第74回) 電気・情報関係学会九州支部連合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 柴内勇人, 高 炎輝
2. 発表標題 直流ヒステリシス特性と異常渦電流損を考慮した方向性電磁鋼板の鉄損計算
3. 学会等名 2021年度(第74回) 電気・情報関係学会九州支部連合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松雪和樹, 堂園 浩, 村松和弘, 高 炎輝, 関 偉民
2. 発表標題 無方向性電磁鋼板の結晶方位と非線形磁気特性を考慮した異常渦電流損のモデリング
3. 学会等名 電気学会静止器・回転機合同研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yanhui Gao, Hiroshi Dozono, Kazuhiro Muramatsu, Weimin Guan, Cuihua Tian, Jiabin Yuan, Baichao Chen, Hamed Hamzehbahmani
2. 発表標題 Modeling of excess loss taking account of variation of crystal orientation in non-oriented electrical steel sheet
3. 学会等名 The 19th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (IEEE CEFC 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Weimin Guan, Yanhui Gao, Kazuhiro Muramatsu, Hamed Hamzehbahmani
2. 発表標題 Modeling of domain wall associated eddy current in silicon steels
3. 学会等名 The 19th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (IEEE CEFC 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高 炎輝、堂園 浩、村松和弘
2. 発表標題 無方向電磁鋼板の結晶方位を考慮した異常渦電流損のモデリングの定量的検討
3. 学会等名 電気学会静止器・回転機合同研究会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	村松 和弘  (MURAMATSU Kazuhiro)  (30263627)	佐賀大学・理工学部・教授    (17201)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------