無方向性電磁鋼板の磁場中熱処理効果の評価

Heat Treatment in Magnetic Field for Non-oriented Electrical Steel Sheet

木下 創^{*1}(正員), 戸高 孝^{*2}(正員), 佐藤 尊^{*2}(正員), 下地 広泰^{*3}(正員)

Tsukuru KINOSHITA (Mem.), Takashi TODAKA (Mem.), Takeru SATO (Mem.), Hiroyasu SHIMOJI (Mem.)

Heat treatment of non-oriented electrical steel sheets is performed in a magnetic field in order to control microstructure orientation and magnetic characterization. Magnetic field (0.5T-5T) is applied to specimens in a direction parallel to the rolling direction during heat temperature from 1023K to 1123K. Specimens magnetically heat treated, showed anisotropic characterization due to crystallographic orientation under high magnetic exciting condition. Recrystallization texture and orientation of specimens are characterized with X ray pole figure analysis. Magnetic heat treatment is found to enhance the selection of (100) or (110) plate parallel to electrical steel sheet surface.

Keywords: Heat treatment, iron loss, crystallographic orientation, anisotropy, pole figure

(2016 年 11 月 24 日受付, 2017 年 4 月 20 日再受付)

1 緒言

国際的なエネルギーの有効活用に対する要求があり, とりわけ電力消費全体に対する割合の大きい回転電動機(以下電動機と記す)に対して小型・高効率化が求められている。電動機の効率は, IEC 規格で規定されており, 効率クラスとして IE1(標準効率)から IE3(プレミアム効率)まで定められている。2015 年より IE3 に準じたトップランナー制度が適用されたことから, 電動機の高効率化の要求が高まっていくものと考えられる。

これらの社会的背景を踏まえ電動機の高効率化への取り組みとして, 損失の主要因である鉄損の低減が挙げられる。鉄損は鉄心の加工時の残留応力の影響で増大し磁気特性は劣化することが知られており, 鉄心材料の変更を伴わないで鉄損を低減するためには製造時に付与される残留応力の低減または, 活用が必要であると考えられる。

残留応力の低減については歪取り焼鈍が有効とされており, 無方向性電磁鋼板においては約 750°C の熱処理により加工歪による磁気特性の劣化を抑制することが可能とされている[1]。しかしながら, 歪取り焼鈍

を行う事により, 素材の集合組織が変化し磁化困難軸を含む組織が電磁鋼板の面内に発現し, 結晶磁気異性が発現するとされる 1.5T 以上において磁気特性が劣化することが報告されるなど, 単純な熱処理プロセスでは素材の特性を十分に活用できないことが懸念される[2,3]。そこで, 本論文では熱処理中に磁性材料の集合組織の制御が可能であると考えられる磁場中熱処理に着目した。

磁性材料を磁場中で熱処理することにより磁気特性が向上することは古くから知られており[4], その集合組織が制御可能であることは報告されている[5,6]。しかし, 磁場中熱処理された無方向性電磁鋼板の交番励磁下における磁気特性に関する詳細な報告は少ない。従って, 本論文では温度-磁場条件による交番励磁下での磁気特性および, 電磁鋼板の集合組織について検討を行った。

2 実験方法

2.1 磁場中熱処理装置

磁場中熱処理装置は内径 100mm を有する超電導マグネット(10T-CSM)と外径 50mm, 内径 22mm の電気炉を内に外径 14mm, 内径 12mm の石英ガラス管の一端を閉じたものを挿入し, ターボ分子ポンプで 10^{-3} [Pa] 以下に減圧可能な構造となっている[7]。

試料は無方向性電磁鋼板 50A470(JIS C 2552)をワイ

連絡先: 木下 創, 〒237-8555 神奈川県横須賀市夏島町 19 番地, 住友重機械工業(株) 技術研究所,
e-mail: tsukuru.kinoshita@shi-g.com

^{*1}住友重機械工業 ^{*2}大分大学

^{*3}大分県産業科学技術センター

や放電加工により 10mm×10mm に切断し、石英で製作した保持治具を用いて磁場中心に磁場方向と圧延方向が平行になるように石英管内に設置し、試料位置における熱処理中の磁場の均一性は十分に確保されている。試料付近の温度は Pt-Rh 熱電対を用いて測定した。

Fig.1 に温度プロファイルと磁場印加パターンを示す。本試験では $T/t_1=500^\circ\text{C/hr}$ で設定温度まで昇温し、目標温度到達後(t_2-t_1)=1hr を温度の保持時間とし、その後 $T/(t_3-t_2)=100^\circ\text{C/hr}$ で室温まで降温する。磁場は目標温度到達時から印加を始め一定磁場を保持したまま室温まで印加を続けた。

Table1 に本試験の処理条件を記す。到達設定温度は $T=750^\circ\text{C}$, 850°C とし、磁場の大きさは $B=0\text{T}\sim 5\text{T}$ とした。

Fig. 1 Schematic diagram of heat treatment condition in magnetic field.

Table1 Production condition of the samples.

Sample name	Temperature [$^\circ\text{C}$]	Applied magnetic field [T]
NO	-	-
0T-750	750	0
0.5T-750	750	0.5
1.0T-750	750	1.0
2.0T-750	750	2.0
5.0T-750	750	5.0
2.0T-850	850	2.0
5.0T-850	850	5.0

2.2 2次元磁気特性測定[8]

Fig. 2 に 2 次元磁気特性測定装置を示す。2 次元磁気

(a) Measurement systems

(b) Main system

(c) Electrical steel sheet with B-coil

(d) H-coil

Fig. 2 Two-dimensional magnetic measurement apparatus.

特性測定装置は中心部に置かれた試料に対し任意方向の交番磁束で励磁し磁気特性を測定する。Fig.2(a)示すように、任意方向の交番磁束密度を測定試料に励磁するためにフィードバック制御が可能なシステムになっている。Fig.2(c)に示すように B コイルは各 x, y 方向に巻かれており、磁束密度 B は B_x , B_y として検出される。また、Fig.2(d)に示すように磁界強度 H は x 方向, y 方向に十字に巻かれた H コイルによって H_x , H_y として測定される。B コイルと H コイルの位置関係は B コイルの巻かれた電磁鋼板の上に H コイルが設置されている。Fig.2(c)に示すように B コイルは励磁用電磁鋼板の中心 20mm×20mm の範囲に巻かれており、励磁用電磁鋼板の中心部に 10mm□の穴を設けてそこに試料を設置する。励磁用電磁鋼板は熱処理試料と同ロットの鋼板から製作されており面一性は確保されている。磁界強度 H は、試料中心部直上に試料の圧延方向と x

方向が平行になるように設置された $4\text{mm} \times 4\text{mm}$ の H コイルで測定される。任意方向の交番磁束密度を試料に励磁するため、励磁コイルにおいてもそれぞれ x 方向, y 方向の 2 方向から励磁できるように設置されている。また、積層されたヨークを使うことによって磁束の漏れを防ぎ渦電流の発生を少なくしている。本測定装置を用いて中央部の試料を含む $20\text{mm} \times 20\text{mm}$ の領域の磁束密度が正弦波に制御された条件の基、任意方向の磁気特性の測定を行う。以上の条件を基に同一条件の試料を 3 個製作し、その平均値を測定結果とした。

2.3 X 線回折測定

磁場中熱処理試料の集合組織を評価するために X 線極点図測定を行った。極点図測定を行うに当たり、事前に主要な X 線回折ピークを確認するために θ - 2θ 測定によって検出確認を行った。Fig.3 に θ - 2θ 測定結果を示す。低角の回折角度から順に $\{110\}$, $\{200\}$, $\{211\}$ の比較的強度が大きいピークが得られることが判る。 $\{110\}$ と $\{200\}$ は磁化容易軸方向である $\langle 100 \rangle$ を含むため磁気特性を良好にせしめる重要な要因であると考えられる。 $\{211\}$ は磁化困難軸方向である $\langle 111 \rangle$ を含む結晶面であることから磁気特性を悪化させる要因となりうる。本論文では磁気特性に対して効果があると考えられる上記 3 つの回折ピークについて極点図測定を行う事とし、これらの集合組織を効果的に制御することができる条件について検討する。また、X 線極点図測定で用いる回折角度は純鉄(α -Fe)の値を使用し、試料毎の調整は行っていない。

Fig. 3 X ray diffraction pattern of non-oriented electrical steel sheet.

3 結果と考察

3.1 2次元磁気特性測定結果

Fig.4 に各磁場中熱処理条件における圧延方向の磁束密度と鉄損の関係を示す。熱処理前と比較すると一定の鉄損の低減ができていていることが確認できる。これは試料の切り出し成形時の加工歪が歪取り焼鈍効果により低減されたことによると考えられる。従って、本測定システムによる定性的な磁気特性の評価が可能であることが確認できた。また、圧延方向の磁気特性に対する磁場の強度の影響を見ると 5T までの磁場条件であれば磁気特性に対してほとんど影響を及ぼさないことが判った。

Fig. 4 Iron loss properties of magnetically heat treated samples.

次に交番励磁の磁場方向を変化させたときの磁気特性を Fig.5 に示す。Fig.5(a)に示すように励磁条件 0.4T とするとすべての磁場中熱処理条件で鉄損が低減することが分かる。これは上述の歪取り効果の影響と考えられる。また、圧延方向(0 度)から圧延直交方向(90 度)に向かうに従って鉄損が増加しており、圧延磁気異方性が現れていると考えられる。Fig.5(b)では励磁条件を 1.0T としたときの各方向に励磁した鉄損特性を示している。熱処理前の試料では前述の 0.4T の時と同様に 0 度から 90 度に向かうに従い鉄損が増加している。一方、熱処理後の試料は磁場の有無に関わらず 45 度から 60 度で極値が観測されることから熱処理により圧延異方性の効果が軽減され、結晶異方性が発現している状態であると考えられる。さらに励磁磁場の強度を大きくし 1.6T で測定した結果を Fig.5(c)に示す。

(a) 0.4T

(b) 1.0T

(c) 1.6T

Fig. 5 Depending on inclination flux angle of iron loss.

Fig. 6 Comparison of iron loss characteristics by heat treatment in magnetic field at 1123K.

0.5T-750 以外の全ての条件で 45 度付近の鉄損が最大になり磁気異方性を有していることが分かる。磁気異方性を示した試料の内 0.5T-750 以外は 0 度と 90 度の鉄損値がほぼ等価であることから磁化容易軸である $\langle 100 \rangle$ が 0 度に集積しそれと等価な $\langle 010 \rangle$ が 90 度に向いていると推定される。0.5T-750 では 0 度のよりも 90 度の鉄損が大きくなっており $\{110\}\langle 001 \rangle$ が 0 度方向に集合組織として存在する可能性を示している。

次に熱処理時の温度条件について検討を行った。Fig.6 に熱処理時の印加磁場 2T と 5T について 850℃ で熱処理を行った試料の励磁方向による鉄損の変化を示す。750℃ で磁場中熱処理した試料の各励磁方向で規格化し、励磁条件は 1.0T である。これより、5T-850 の 45 度及び 60 度方向以外の磁気特性は処理温度 750℃ に比べて低減しており、2T 以下の磁場中熱処理であれば印加磁場より温度の方がより磁気特性に対する感度が高いことがわかる。5T-850 の 45 度、60 度では磁場中熱処理による結晶異方性の影響が顕著に得られた結果であると考えられる。従って、より大きな磁場、または温度等高いエネルギー状態を作り出すことでより磁気特性に影響を与えることができる可能性を示している。

3.2 X 線回折測定結果

Fig.7(a) に熱処理試料と同じ形状に切り出した熱処理前の電磁鋼板の X 線極点図測定結果を示す。 $\{110\}$ 極点が極点図の中心(試料の鉛直方向:ND)に対して約

Fig. 7 {110}, {200}, {211} pole figure analysis of magnetically heat treated non-oriented electrical steel sheet.

35°圧延方向(RD)に傾いた位置に存在し、また、{200}極点がRDに約60°傾き、0°, 60°, 120°鋼板面に回転した位置に存在することから鋼板面に平行に(111)面に近い集合組織を有していることが判る。また、{211}極点においてはNDに付近に強度の大きい極点が点在しており、(112), (122)面に近い集合組織を鋼板面に平行に有していることが判る。従って、{110}, {200}極点図測定の結果と併せると試料表面に平行に(111), (112), (122)面と比較的磁化困難軸方向<111>を含みやすい面指数を有する集合組織が存在することが判る。

Table2に熱処理条件による各極点図測定で得られたX線回折強度を示す。磁場を印加しない状態での熱処理では、熱処理前の試料と比較すると{110}極点と{211}極点でその差が確認された。{110}極点では最大の強度が得られるRD方向に約35度傾いた位置の強度が低下していることが確認できることから、(111)面が減少していることがわかる。Fig.7(b)に示す{211}極点においてはND付近の強度が低下し、(112)面が減少していることが分かった。磁化困難軸方向<111>を含む面である(211)面主体の集合組織が低減できたことから磁気特性を改善する方向に向かうことが予想され、

上述の磁気特性の測定結果でも磁気特性の改善傾向が得られている。

次に、熱処理時の磁場が集合組織に与える影響について検討を行った。Table2に示すように温度条件750°Cでは0.5T以上の磁場中熱処理条件においてすべての条件で{200}, {211}極点図測定結果で変化が得られた。{200}極点図ではND付近の強度が減少していることから(100)面が減少していることが判る。また、Fig.7(c)に示すように傾き角が約40°から60°で集合組織が観測されている。特にRDとTDで比較的高強度の極点が見られていることから(110)面、または(111)面に近い集合組織が鋼板面に平行に増加したと考えられる。{211}極点については磁場によりRDに60°傾けた位置の強度が低下していることから(111)面が減少したと考えられる。従って{200}極点図で観測された集合組織は(110)面に近い面を主体とした集合組織であると考えられる。

磁場中熱処理時の温度条件を850°Cとして集合組織の変化を観察した結果をFig.7(d)に示す。850°Cでは{200}極点において、傾き角約40°から60°の強度が減少したことから(111)面が減少したと考えられる。ま

Table2 X ray diffraction intensity of {110},{200} and {211} pole figures.

Sample name	{110}	{200}	{211}
NO	5.5	11.3	5.3
0T-750	5.0	11.2	4.5
0.5T-750	4.0	5.4	6.4
1.0T-750	3.9	5.2	5.1
2.0T-750	4.8	5.0	7.7
5.0T-750	4.6	6.0	5.5
2.0T-850	5.3	13.0	9.6
5.0T-850	4.6	8.4	9.9

た、Table2 に示すように 750℃の磁場中熱処理条件と比較すると ND の{200}極点の強度が約 5 から約 8~13 まで増加していることから鋼板面に平行な(110)面と(111)面が減少し(100)面が主体となる集合組織に変質したと考えられる。(100)面は磁化容易軸方向<100>を含む面であることから、鋼板面に平行な(100)面が増加したことで磁気特性の改善効果が得られたと考えられる。45 度方向の交番励磁よりも 0 度、90 度の磁気特性が良好であった理由についても(100)面の<001>を含む集合組織が面内に平行に存在するため、磁化容易軸が RD と TD に優先的に配向していたためであると説明できる。磁気特性の測定結果では 5T-850 では RD 方向に(110)<001>を主体とした集合組織の存在を予想させたが、予想に則した結果は確認できなかった。温度条件を 850℃とすると 750℃では見られなかった極点が観測されるようになり、高温条件で磁場がより効果的に作用すると考えられる。

4 結言

本論文では、磁場中熱処理が無方向性電磁鋼板の磁気特性に与える影響を交番励磁下による鉄損測定と X 線回折測定による集合組織の評価の観点から検討を行い以下の知見を得た。

- 熱処理中に磁場を印加することで電磁鋼板の集合組織が変化し、熱処理前の(111)を主体とした鋼板面に平行な集合組織から(100)が主体となる集合組織に変化する。
- 交番励磁条件が 1.6T のとき印加磁場 2.0T 以下での磁場中熱処理では (100)面を主体とする集合組織への変質に起因する鉄損特性の変化が得られ、

RD と TD の鉄損特性がほぼ等価になるが、印加磁場を 5T とすると(110)の効果で RD 方向の鉄損が TD に比べ減少する。

- 熱処理中の磁場強度が 5T 以下であれば、磁気特性に対しては磁場強度条件に比べて温度条件の影響の方が大きい。

以上より、磁場中熱処理により無方向性電磁鋼板の集合組織を制御し、交番励磁下の磁気特性の大幅な改良を試みたが、軽微な磁気特性の向上しか確認できなかった。一方、鋼板面に平行な集合組織の部分的な制御が可能であることが確認できたことにより、磁場中熱処理による磁気特性の向上の可能性を示すことができた。今後の課題として、交番励磁下での定量評価と磁場中熱処理の 10T 程度までの高磁場化が挙げられる。

謝辞

本論文中の磁場中熱処理試料は東北大学金属材料研究所附属強磁場超伝導材料研究センターの共同利用研究(課題番号 16H0066)の成果を受けたものである。試料製作に当たり多大な助言を頂いた高橋弘紀助教の研究協力に謝意を表する。

参考文献

- [1] JFE スチール(株), JFE の電磁鋼帯, 2010.
- [2] A. Kutsukake, Y. Kido, T. Ikeda, T. Kinoshita, T. Todaka, "Influence of processing method of single sheet specimen on magnetic properties (No.4)", The Papers of Technical Meeting on Magnetics, IEE Japan, MAG-16-086, pp.23-28, 2016.
- [3] M. Wada, "Improvement of Magnetic Characteristics of Laminations by Flash Annealing", National Technical Report, vol.50, no.6, pp.878-882, 1984.
- [4] 小柴, 重本, 西沼, 原田, 異方性珪素鋼板の磁場中冷却処理について, 日立評論「金属特集号 第 2 集」, 別冊第 16 号, 1956.
- [5] N. Masahashi, M. Matsuo, K. Watanabe, J Mater Res, 1998.
- [6] C.M.B. Bacaltchuk et al., Scripta Materialia, vol.48, pp. 1343-1347, 2003.
- [7] 保科, 原川, 白石, 高橋, 小山, 磁場中熱処理によるケイ素鋼の磁化方向の制御, ケーヒン技報, vol.2, pp.16-20, 2013.
- [8] 佐藤, 榎園, 積分型ダイナミック E&S モデルにおける B-H 間の位相補正, 第 23 回 MAGDA コンファレンス論文集, pp. 259-264, 2014.