

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 1 日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K17947

研究課題名(和文) モーター鉄心の高透磁率化のための結晶方位制御法の開発

研究課題名(英文) Development of crystal orientation control method for high permeability of motor iron core

研究代表者

寺野 元規 (Terano, Motoki)

東京工業大学・工学院・助教

研究者番号：90708554

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、ローラーバニシング加工により純鉄板表面にせん断変形を付与した。バニシング加工とその後の熱処理により、局所的(加工面のみ)に静的再結晶を誘起させた。蓄積されたせん断変形はKAM値により調べ、熱処理とEBSD分析を繰り返すことにより、静的再結晶・粒成長の過程を調べた。その結果、十分な蓄積エネルギー(せん断変形)を加えることにより、静的再結晶が素材表面のみに優先的に生じることがわかり、そのエネルギー(変形)の大小により、結晶粒径が異なることを示した。以上により、純鉄板において、結晶組織制御の可能性を示した。

研究成果の概要(英文)：In this study, roller burnishing is employed to introduce the shear strain into the surface of the pure iron sheet. And effects of burnishing and annealing on static recrystallization in the finished surface layer are investigated utilizing Electron Back Scattering Diffraction (EBSD) analysis technique. The generation of shear deformation was confirmed by Kernel Average Misorientation (KAM) values at the surface layer. By conducting a series of the annealing and EBSD analyses, the static recrystallization process is observed. Since enough strain energy is accumulated by the burnishing in a specimen with large shear deformation zone, the static recrystallization occurs on the burnished surface preferentially after the annealing.

研究分野：塑性加工

キーワード：塑性加工 バニシング加工 静的再結晶

### 1. 研究開始当初の背景

小型モーター（アクチュエーター）は自動車、家電、情報機器など多くの工業製品に多数用いられている。日本における全消費電力のうち、約6割程度がモーターで消費されていると言われており、その効率の向上は、世界レベルでの電力消費削減ならびに CO<sub>2</sub> 排出量削減に直結する。例えば、日本の全消費電力は約 10,000 億 kWh であり、仮に 1%モーターの効率を改善できれば、年間 60 億 kWh の削減（火力発電機の約 3 機分）が可能となる。モーターの損失の約 4 割が鉄損であり、板材を薄くし、Si を添加することにより電気抵抗を大きくして、損失を小さくしている。また、鉄結晶の磁化容易軸 <100> 方位と磁力線方向を一致させることにより損失を小さくできる。磁気特性に優れた材料として、方向性・無方向性電磁鋼板があるが、小型モーターの磁力線方向（円周・半径方向）と磁化容易軸とを一致させることはできていない。もし磁力線方向に沿って、磁化容易軸をそろえることが出来れば、鉄芯の磁気特性（透磁率）を大幅に高めることが可能になり、非常に高効率なモーターができると期待される。

### 2. 研究の目的

モーター効率の向上を実現するための、結晶方位制御法を検討する。モーターの高効率化には、モーター鉄心の高透磁率化が必要不可欠であり、鉄板の磁化容易軸と磁力線方向とを一致させる必要がある。結晶方位の制御には、塑性ひずみと熱処理によって誘起される静的再結晶を利用する。本研究では、せん断ひずみにより材料内部に転位を導入して、再結晶の起点を作り、その後、熱処理により生じる静的再結晶過程を時系列的に観察する。再結晶粒の方位は、せん断加工条件および熱処理条件に依存すると考えられ、これらの条件が及ぼす結晶方位変化への影響を調査する。これにより、結晶方位も含めた結晶組織の制御技術についての原理の解明を目的とする。

### 3. 研究の方法

純鉄の圧延板を素材とし、円周方向にバニシング加工を施し、熱処理により静的再結晶を誘起する。図 1 にプロセスの概要を示す。



図 1 バニシング加工のプロセス

バニシング工具を回転させることにより、効果的にせん断ひずみを同心円状に導入することができる。

バニシング加工および熱処理後は、EBSD

(Electron BackScatter Diffraction) 分析により結晶組織を時系列的に観察し、結晶粒径や結晶方位を測定し、バニシング加工条件や熱処理条件が及ぼす再結晶粒への影響を定量的に分析する。これにより、バニシング加工による結晶組織制御技術の有効性を実験的に検証する。

また、結晶有限要素法による結晶法制御原理の検討も行う。数値シミュレーションには本学スーパーコンピュータ TUBAME を利用し、汎用の有限要素解析ソフト ABAQUS を利用する。結晶方位の制御因子の解明できれば、モーター用鉄心の結晶方位制御のみでなく、様々な材料、形状に対して結晶方位制御が可能となる。

### 4. 研究成果

素材表面にせん断変形を付与するためにバニシング加工を用いる。図 2 にバニシング工具を示す。工具には、スプリングが内蔵されており、工具押込量を制御する事により加工力を調整できる。スプリングはコイルスプリング（低荷重用、ばね定数 0.15 kN/mm）と皿ばね（高荷重、ばね定数 2.2 kN/mm）の 2 種を用いる。工具先端には幅 5 mm の従動ローラーが 3 つ取り付けられており、内径 10 mm、外径 20 mm の領域にバニシング加工できる。本工具を NC フライス盤 (MAKINO AE74) に取り付け、回転数 15rpm で加工する。

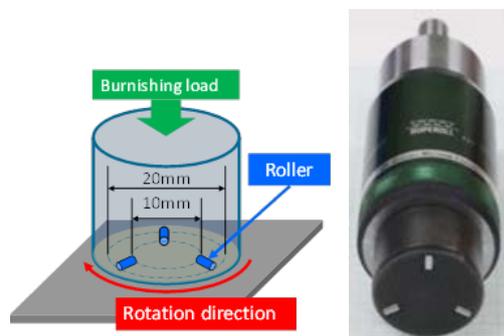


図 2 バニシング工具の模式図および写真

被加工材は厚さ 1 mm の純鉄圧延材（ニラコ製、99.99%Fe）である。圧延による予ひずみを除去するために、700°C、60 分、Ar 雰囲気中でひずみ取り焼鈍を施した。

バニシング加工条件を表 1 に示す。加工荷重 3 条件、加工保持時間 3 条件の合計 9 条件でバニシング加工を行った。試験後の加工表面を図 3 に示す。加工後の試験片は素材圧延方向とバニシング加工方向が平行となる断面を観察するために、ワイヤ放電加工機を用いて短冊状の試験片を切り出した。その後、アクリル樹脂に包埋し、研磨した後に、せん断変形域を観察するためにナイトール液で腐食し、SEM で観察した。図 4 に 1.0 kN、40 s の条件で加工した試験片の SEM 観察結果を示す。バニシング加工面は上面であり、バニシング加工方向は左から右である。加工面の

組織はバニシング加工方向に傾いており、せん断変形を受けた様子が観察できた。SEM 画像でせん断変形を確認できる加工面から長さをせん断変形域と定義する。各加工条件におけるせん断変形域を図5に示す。加工荷重が大きくなる、または、加工保持時間が長くなるほどせん断変形域は大きくなった。

表1 加工条件

加工荷重 (押込量)	0.31 kN(1.0 mm)
	0.60 kN(3.0 mm)
	1.0 kN(6.0 mm)
加工保持時間 (回転回数)	4 s(1 回転)
	20 s(5 回転)
	40 s(10 回転)

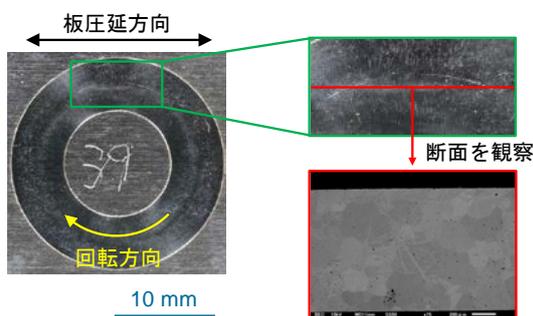


図3 加工例と組織観察位置

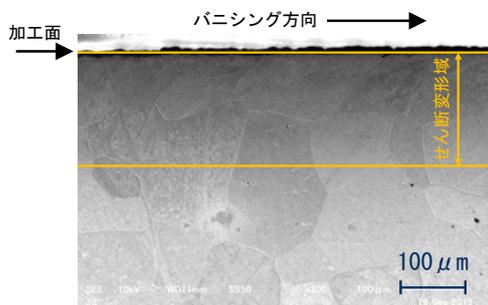


図4 加工断面のSEM像 (1.0 kN, 40 s)

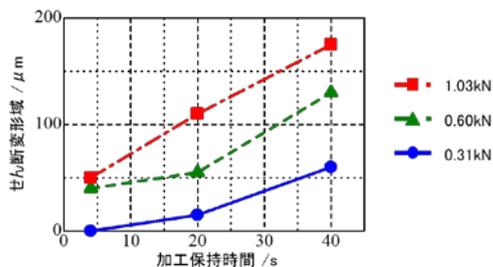


図5 せん断変形域と加工条件の関係

次に、熱処理が及ぼす静的再結晶への影響を調べる。バニシング加工後の試験片に対し、600°C、アルゴン雰囲気での熱処理とEBSD観察を交互に行い(図6)、静的再結晶過程を観察した。図7、図8にEBSD測定結果を示す。0.31 kN・4 s, 40 sの条件では、熱処理時間

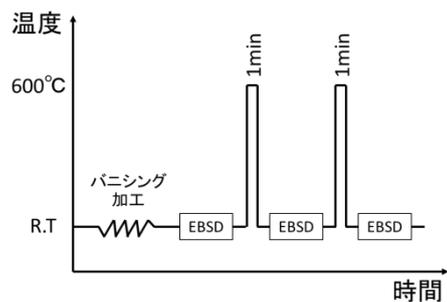


図6 熱処理とEBSD観察

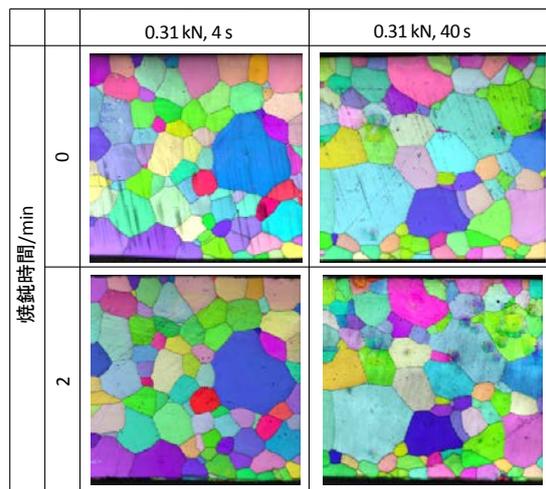


図7 熱処理前後のIPF Map (1.0 kN, 40 s)

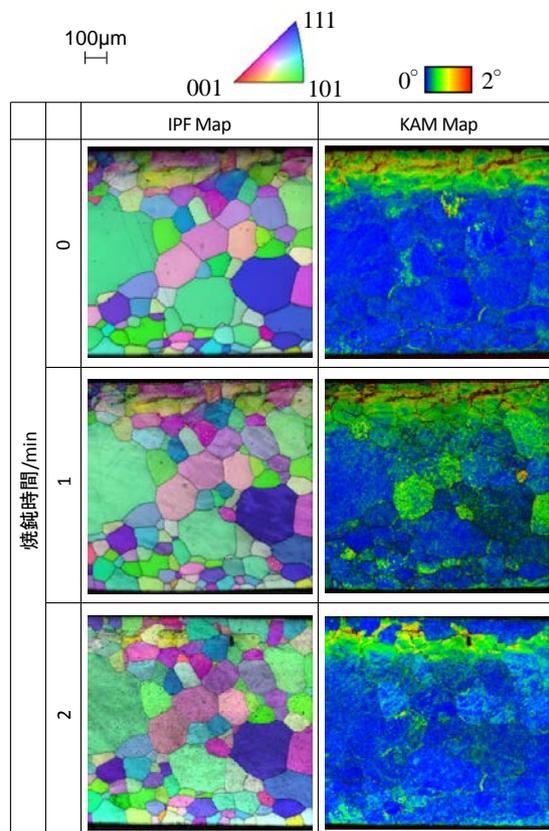


図8 焼鈍前後のIPF MapとKAM Map (1.0 kN, 40 s)

1, 2 分での組織の変化はごくわずかである。一方, 1.0 kN・40 s の条件では熱処理時間 1 分で, バニシング加工面に静的再結晶が進んでいる。熱処理時間 2 分ではさらに静的再結晶が進んでいる。KAM Map を見ると, バニシング加工面の KAM 値が大きく, 多くの転位が導入されていることが判る。一方, 熱処理を施すと KAM 値が小さくなっており, 導入された転位が静的再結晶の駆動力となったと考えられる。

以上より, バニシング加工により, せん断変形(ひずみエネルギー, 転位)を加えることにより, その後の熱処理で静的再結晶を誘起させることができる。また, 加えるひずみを制御する(加工荷重か加工時間を制御する)ことにより, その後の粒生成や粒成長が変化したことから, 結晶粒径の制御も可能と考えられる。

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

① Motoki Terano, Fan Zhang, Masahiko Yoshino, Influence of burnishing condition on static recrystallization of an iron sheet, *Procedia Engineering*, 査読有, 印刷中。

[学会発表] (計 6 件)

①永島史悠, 寺野元規, 吉野雅彦, プレス加工を用いた結晶組織制御法の検討, 日本機械学会関東支部講演会, 2016 年 3 月 10 日~3 月 11 日, 東京工業大学(東京都・目黒区)。

②駱自超, 寺野元規, 吉野雅彦, Numerical study of influencing parameters of single crystal iron static recrystallization, 日本機械学会関東支部講演会, 2016 年 3 月 10 日~3 月 11 日, 東京工業大学(東京都・目黒区)。

③張帆, 寺野元規, 吉野雅彦, 純鉄の静的再結晶過程に及ぼすバニシング加工の影響, 日本塑性加工学会平成 28 年度春季講演会, 2016 年 5 月 20 日~5 月 22 日, 京都工芸繊維大学(京都府・京都市)。

④Luo Zichao, Masahiko Yoshino, Akinori Yamanaka, Motoki Terano, Numerical study of tensile test of single crystal pure iron by crystal plasticity finite element model, 日本塑性加工学会第 67 回塑性加工連合講演会, 2016 年 10 月 21 日~10 月 23 日, 日本工業大学(埼玉県・南埼玉郡)。

⑤Fan Zhang, Motoki Terano, Masahiko Yoshino, Experimental Study on Static Recrystallization in the Burnished Surface Layer, The 8th Japan-Taiwan Workshop on Mechanical Engineering and Aerospace, 2016 年 10 月 28 日~29 日, 東京工業大学(東京都・目黒区)。

⑥Motoki Terano, Fan Zhang, Masahiko Yoshino, Influence of burnishing condition on static recrystallization of an iron sheet, International Conference on the Technology of Plasticity, ICTP 2017, 2017

年 9 月 17 日~9 月 22 日, (ケンブリッジ・イギリス)。

[その他]

研究室ホームページ(助成金による研究成果)

<http://www.yocky.mes.titech.ac.jp/kenkyuzyosei.html>

#### 6. 研究組織

##### (1)研究代表者

寺野 元規 (TERANO, Motoki)  
東京工業大学・工学院・機械系・助教  
研究者番号: 90708554

##### (2)研究分担者

なし

##### (3)連携研究者

なし

##### (4)研究協力者

吉野 雅彦 (YOSHINO, Masahiko)  
東京工業大学・工学院・機械系・教授  
研究者番号: 40201032