

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 3 日現在

機関番号：12608

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2013～2014

課題番号：25889019

研究課題名(和文)パニシング加工を利用した結晶方位制御法の検討

研究課題名(英文)Study of crystal orientation control method using burnishing

研究代表者

寺野 元規 (TERANO, MOTOKI)

東京工業大学・理工学研究科・助教

研究者番号：90708554

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、純鉄板(板厚1mm)を用いて、せん断ひずみによる結晶方位制御が実現可能かの実験的に検討した。せん断降伏応力以下で微小ひずみを導入する事により、大ひずみを導入した場合よりも結晶方位制御に適している事を示した。また、円周方向にせん断ひずみを導入するためのパニシング加工装置を開発し、パニシング加工と熱処理による結晶方位制御を試みた。本装置では、表層から約100 μ m程度の深さまでせん断変形を導入できた。また、高温焼鈍により再結晶粒径は、1mm程度まで成長した。結晶方位は全体的な配向は観察できなかったが、局部的には配向がみられた。以上の実験により、結晶方位制御の可能性を示した。

研究成果の概要(英文)：In this study, the crystal orientation control is experimentally investigated by using shearing deformation. The material is pure iron sheet which thickness is 1 mm long. The result shows that small shear stress which is smaller than yield shear stress is suitable for the crystal orientation control. Then, a burnishing apparatus was developed to induce shear strain in the circumferential direction. And we try to control the crystal orientation by heat treatment and burnishing process. In this device, the shear deformation is induced to a depth of about 100 μ m from the surface. After heat treatment of high temperature, the average recrystallized grain size was grown to approximately 1mm. And the crystal orientation is not globally orientated, but it is locally orientated. According to the above experiment, the possibility of the crystal orientation control is shown.

研究分野：生産工学・加工学

キーワード：機械工作・生産工学 金属生産工学 結晶工学 精密部品加工 構造・機能材料

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。また、全世界の電力のうち 50%以上がモーターにより消費されていると言われている。そのため、モーター効率の向上は世界レベルでの電力消費削減ならびに CO₂ 排出量削減に非常に大きな効果がある。小型モーターの効率向上には、ローターやステーターなどモーターの鉄芯の磁気特性の向上が有効である。

一方、磁気特性に優れた鉄芯用材料として、方向性電磁鋼板がある。しかし、コストが高く、その成形性は悪い。また、電磁鋼板は制御圧延で製造され、圧延方向と磁化容易軸とが平行となっている。それに対して、小型モーターでは、磁力線方向は円周方向と半径方向であるため、磁化容易軸をこれらの方向に一致させることは困難である。もしモーター鉄芯中の磁力線の経路（円周方向・半径方向）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

本研究はモーター効率を向上させるため、モーター鉄芯内の磁力線に合わせて磁化容易軸（ $\langle 100 \rangle$ 方位）をそろえる加工技術の開発を目的とする。結晶方位を制御するために、バニシング加工および熱処理による静的再結晶を利用する。本技術により、鋼板の結晶方位を制御し、小型モーター用の鉄芯鋼板における磁力線方向と結晶の磁化容易軸とをそろえる事が可能となる。また、結晶方位制御技術の原理の解明も目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、塑性せん断ひずみと熱処理（焼鈍）によって誘起される静的再結晶を利用して、結晶方位を制御する方法を検討する。再結晶粒の方位は、塑性加工条件および焼鈍条件に依存すると考えられているので、これらを制御することにより、結晶方位を制御する。これにより、小型モーター用鉄芯用に、円周・半径方向に磁化容易軸 $\langle 100 \rangle$ を配向させることを目指す。

(1) 円周方向に塑性せん断ひずみを導入するために、バニシング加工装置を設計・製作する。

(2) 純鉄板を試験片として、バニシング加工条件・熱処理条件が結晶方位（特に磁化容易軸 $\langle 100 \rangle$ ）に及ぼす影響を調査・検討する。結晶方位は EBSD 装置にて調べ、同装置の付属の解析ソフトにより集合組織の発達についても調べる。

(3) 純鉄板を試験片として、微小な塑性せん断ひずみを導入した後、熱処理による再結晶過程の観察を行う。

4. 研究成果

(1) バニシング加工装置の設計・製作

図1にバニシング工具を示す。工具先端には3つの従動ローラー（幅5mm）が取り付けられており、外径30mm、内径20mmに加工できる。また、バニシング工具内部には皿ばねが組み込まれており（ばね定数0.85kN/mm）、工具押付け量を制御する事により、負荷荷重（最大負荷3.4kN、最大押込量4mm）を制御できる。

図2にバニシング装置外観を示す。小型フライス盤にバニシング工具を取り付ける。フライス盤の回転速度を制御する事により、加工速度を制御し、押付け時間（負荷時間）により加工度を制御する。また、NCフライス盤にもバニシング工具を取り付ける事ができるように設計し、加工条件（押付け量・押付け時間・回転速度など）の再現を容易にできるようにした。

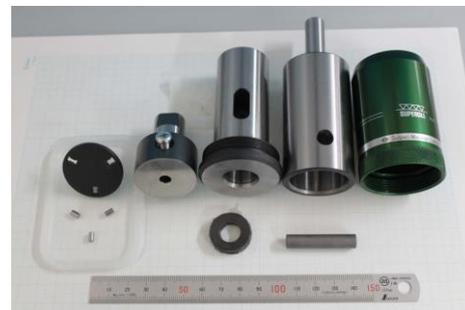


図1 バニシング工具

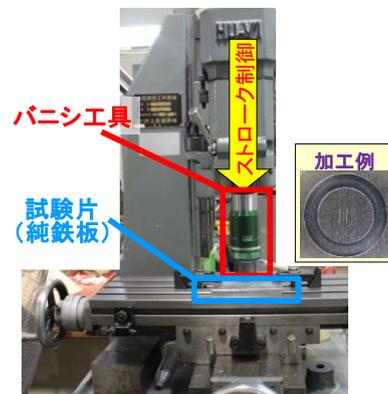


図2 バニシング加工装置

(2) バニシング加工結果

① 表面性状

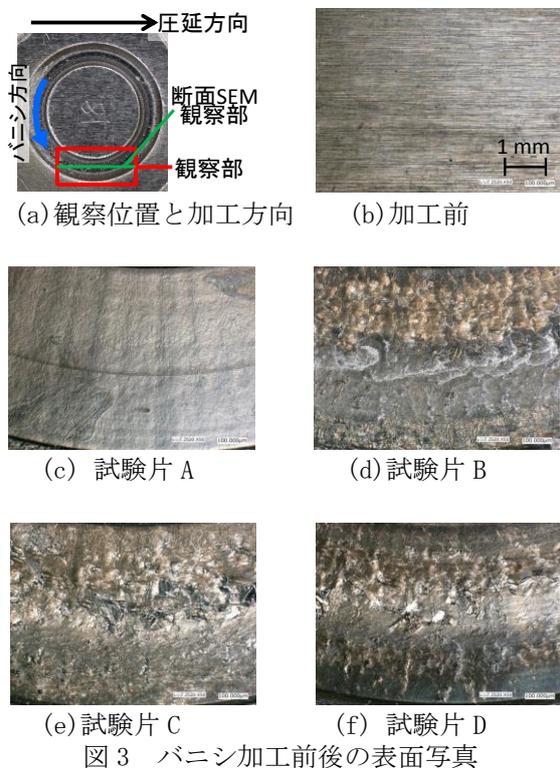
試験片はニラコ製純鉄(99.99%Fe)であり、一辺100mmの正方形板材(厚さ1mm)である。圧延による予ひずみを除去するために、バニシング加工前に700℃で1時間、アルゴン雰囲気下でひずみ取り焼鈍を施した。

表1にバニシング加工条件を示す。工具押付け荷重(押付け量)は0.5kN(2mm)、2.1kN(2.5mm)、2.6kN(3mm)とする。潤滑剤はマシン油とケロシンを用いる。

工具回転数は1075rpm(内周部:1100mm/s、外周部:1700mm/s)とする。

表1 バニシング加工条件

試験片	A	B	C	D
押付け荷重	0.5 kN	2.6 kN	2.6 kN	2.1 kN
潤滑剤	マシン油	マシン油	ケロシン	ケロシン

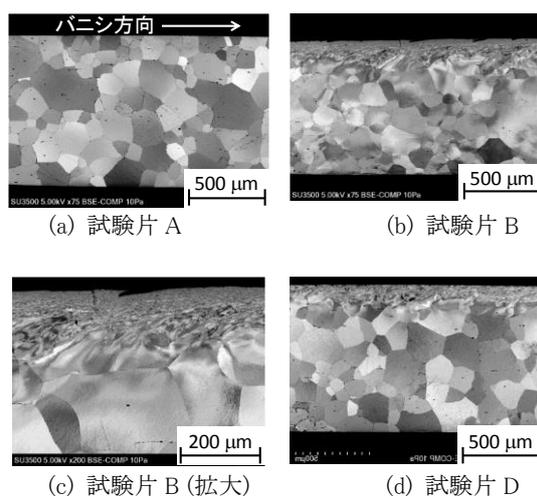


加工前および表1の条件で加工した表面写真を図3に示す。加工前は圧延により導入された圧延方向と平行な圧延傷が生じている。表面粗さは $6.9 \mu\text{mRz}$ ($0.92 \mu\text{mRa}$)であった。試験片Aでは元の圧延傷は消え、バニシ方向に擦過傷が観察できた。表面粗さは加工前より粗く、 $9.1 \mu\text{mRz}$ ($1.3 \mu\text{mRa}$)となった。試験片Bでは表面粗さは $34.4 \mu\text{mRz}$ ($3.2 \mu\text{mRa}$)であり、非常に粗い面となった。また、バニシ方向に沿って表面が流動した痕跡も観察できた。加工中では摩耗粉が大量に発生し、バニシ工具のローラーに凝着が観察された。試験片Cでは $22.8 \mu\text{mRz}$ ($0.81 \mu\text{mRa}$)であり、試験片Bと比べれば表面は滑らかになった。また、加工痕の内周・外周部近傍は、中央部と比べれば滑らかであった。摩耗粉は発生したが、その量は試験片Bよりも少なかった。潤滑剤をマシン油より低粘度のケロシンに変更した事により、潤滑状態が改善したと考える。試験片Dでは、試験片Cよりも押付け荷重を減らしたため、表面状態も改善し、 $15.9 \mu\text{mRz}$ ($0.78 \mu\text{mRa}$)となった。

② せん断変形領域の確認

せん断変形がどの程度深さ方向に導入されているかを測定するために、図3(a)に示す位置の断面組織を観察した。すなわち、ワイヤ放電加工機でバニシ加工部から試料を切り出し、エポキシ樹脂に埋め込んだ。この時、

バニシ加工方向に平行な断面が表面に現れるように包埋した。その後、耐水研磨紙、アルミナ砥粒、ダイヤモンドスプレー ($3 \mu\text{m}$)を用いて研磨し、ナイトール腐食液で20秒間腐食した。組織観察には日立ハイテクノロジーズ製走査電子顕微鏡 SU3500 を使い、反射電子 (BSE) 像で観察した。図4に断面観察結果を示す。バニシ加工方向は左から右方向である。試験片A(図4(a))では、結晶粒が歪んでおらず、せん断変形部を確認できなかった。加工力が小さいため、せん断変形が加わらなかったと考えられる。試験片B(図4(b),(c))では、上表層部(加工部直下)で材料がバニシ加工方向に流れており、せん断ひずみがかわっていることを確認した。約 $200 \mu\text{m}$ の深さ(初期板厚の $1/5$ 程度)までせん断域が広がっていた。また、せん断変形による表面の捲れ込みも確認でき、大きなせん断力がかわったと推察できる。一方、下表層近傍で結晶粒内のコントラストが不均一になっている。BSE像では、結晶面が密の場合は白、疎の場合は黒となる。したがって、コントラストが不均一という事は粒内で結晶格子がゆがんでいる、すなわち、ひずみが導入されたことを示唆している。よって、試験片Bでは押付け荷重が大きかったため、圧縮ひずみがかわったと推察する。この点については、今後、EBSDなどでより詳細に調査する必要がある。試験片D(図4(d))では、試験片Bと同様に上表層部に深さ約 $200 \mu\text{m}$ までせん断変形を導入できた。しかし、試験片Bのような大きな捲れ込みも観察されず、上表層部近傍を除けば結晶粒内におけるコントラストの不均一も観察されなかった。これは押付け荷重の低減、潤滑剤の変更によって、接触状態が改善し、表面状態の良化したためと考える。



③ 結晶組織変化

次に、バニシング加工による結晶組織変化を調べるため、鉄板を試験片として、バニシング加工および熱処理を施した。その後、再結晶組織を EBSD で分析した。熱処理は一次

焼鈍を 850°C で 5 分間 (アルゴン雰囲気) 行い、二次焼鈍を 1200°C で 2 時間 (真空雰囲気) 行った。

図 5 に (a) 未加工材、(b) パニシング加工材、(c) パニシング加工+熱処理材の IPF map を示す。(a) 未加工材は粒内で結晶方位が分布しており、熱間圧延時に導入されたひずみが残存していると考えられる。結晶方位はランダムな配向となっている。(b) パニシ加工材は Θ 面では加工面にパニシ加工によるせん断ひずみが導入されていることが確認できる。(c) パニシ加工+熱処理材では、結晶粒が粗大化し、上下面を貫く粗大な結晶粒が発生している。特に R 面では、IPF のカラーが赤色に近い事から、 $\langle 001 \rangle$ に配向している可能性がある。



(a) 未加工材 (b) 加工材 (c) 熱処理材

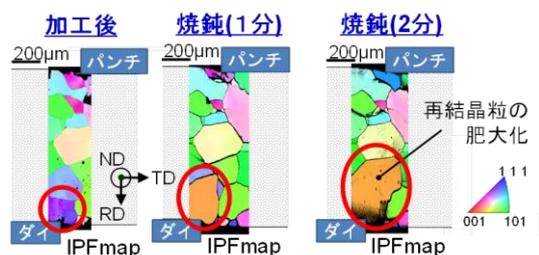
図 5 各試験片の IPF map

(3) 再結晶過程に及ぼす微細せん断加工と熱処理の影響

① 粒成長・再結晶過程の時系列観察

試験片は厚さ 1.0 mm、幅 3 mm、長さ 20 mm の純鉄板を用いる。せん断試験前にひずみ取り焼鈍 (700°C、60 分、アルゴン雰囲気) を行う。せん断応力は純鉄試験片のマクロなせん断降伏応力 (約 90MPa) よりも低くなる範囲で荷重を負荷した。試験後、600°C で熱処理し、長手方向断面の EBSD 観察を行う。

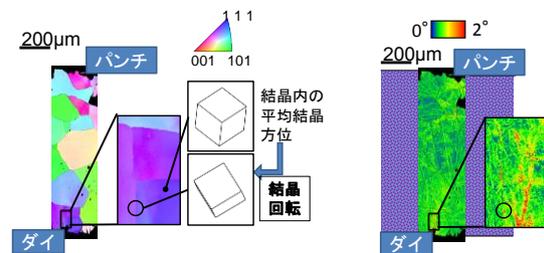
図 6 に、73 MPa のせん断応力を負荷した試験片の静的再結晶過程の時系列観察結果を示す。加工後の組織と焼鈍時間 1 分、2 分の組織を見比べると、クリアランス部の左下 (丸部：ダイ角部近傍) で結晶粒が粗大化している。その粗大化した結晶粒の方位は元の結晶の方位と異なった。本実験では、負荷した平均のせん断応力は降伏応力以下であり、マクロ的には弾性変形のみで塑性変形は生じないことになる。このため再結晶の駆動力となる塑性ひずみエネルギーは蓄積されず、組織変化は起きないと思われた。しかしダイ角部で応力集中が生じ、塑性変形したため、そこから再結晶粒の発生および粒成長が進んだと考えられる。



(a) 加工後 (b) 焼鈍 (1 分) (c) 焼鈍 (2 分)

図 6 再結晶過程の時系列観察 (73 MPa)

図 7 にダイ近傍の IPF map の拡大図と結晶方位および KAM map を示す。IPF Map を見ると、粒界近傍で同じ結晶粒内でありながら結晶方位が異なる部分が確認できた。KAM map と比較すると、同位置で KAM 値が大きい部分が見られ、強い結晶回転、すなわち転位の集中が生じていることが判る。この部分の結晶方位は焼鈍後に成長した再結晶粒の結晶方位とほぼ一致している。すなわちダイ角部周辺の応力集中により局所的なひずみが生じ、そこに転位が集中したことにより組織変化の駆動力が蓄積され、その後の熱処理により、ここを起点として再結晶が生じたと考えられる。したがって、この結晶回転が生じた部分が、再結晶核となったと推察できる。この結晶内ではシュミット因子の大きなすべり系からすべり変形が生じ、それが転位の集中を生じさせると考えられる。その転位の集中部分の位置とその結晶方位が予測できれば、再結晶粒の位置、結晶方位を制御できると考えられる。



(a) IPF map (b) KAM map

図 7 ダイ近傍の EBSD 観察

② 繰返しせん断応力が及ぼす再結晶への影響

せん断試験装置にピエゾアクチュエータを取り付け、繰返し試験片にせん断応力を負荷した場合の再結晶挙動を調べる。図 8 に試験片に働くせん断応力の時間変化を模式的に示す。Case①は前節で示した通常のせん断応力負荷実験の場合の応力変化を示す。Case②は繰返しせん断応力負荷実験の場合の応力変化を示す。この場合、最大応力 τ_m は一定に保ち、5 Hz の振動数で 18000 回応力振動を加えた。ここで τ_m は 30 MPa~44 MPa の範囲とした。その後の試験片に熱処理 (600°C、60 分、アルゴン雰囲気) を施し、断面を EBSD で観察した。

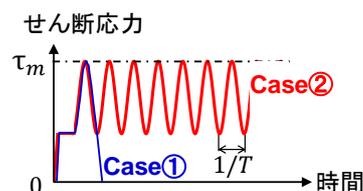


図 8 繰返しせん断応力負荷試験

図 9 に τ_m に対する平均粒径の変化を示す。●が1回のみせん断応力を負荷した場合、○が18000回繰返し負荷した場合である。1回負荷の場合 τ_m が 42 MPa を越えると平均粒径が増大するが、それに対して繰返し負荷では 44 MPa を越えると平均粒径が増大することが判る。繰返し負荷では、塑性変形が繰り返されるため蓄積されるひずみエネルギーも大きく、再結晶・粒成長が優先的に生じ易くなると予想されたが、当試験では逆の傾向が見られた。その原因は現状では不明であるが、一つの可能性として繰返し負荷の場合クリアランス部全体に転位が広がったのに対し、1回負荷では転位が一部の場所に集中したことが考えられる。

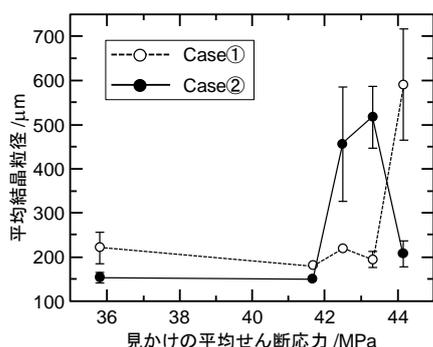


図 9 繰返し応力が及ぼす粒成長・再結晶への影響

(4) まとめ

- ① 円周方向にせん断ひずみを付与するための装置として、バニング加工を選定し、バニング工具を設計・製作した。
- ② 板材表層部にせん断変形を表面からし 200 μm の深さまで導入可能であることを実験的に示した。
- ③ バニング加工+熱処理した試験片の EBSD 測定を行い、半径方向に $\langle 001 \rangle$ に近い方位が得られた。
- ④ 繰返しせん断応力を負荷する事により、粒成長・再結晶が生じる加工力が低くなる事を示した。

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 2 件)

- ① Motoki Terano 他, Microstructure change by micro metal forming of sheet iron, 4M/ICOMM2015, 2015年3月31日~4月2日, ミラノ(イタリア).
- ② 寺野元規 他, 純鉄板の表面性状に及ぼすバニング加工条件の影響, 2014年度砥粒加工学会学術講演会, 2014年9月11日~13日, 岩手大学 工学部(岩手県・盛岡市).

[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・大学院理工学研究科・助教

研究者番号：90708554