

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 7 日現在

機関番号：12608

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24656100

研究課題名(和文) プレス加工に依る自在な結晶方位制御法の検討

研究課題名(英文) Study of an arbitrary crystal orientation controlling method by a press process

研究代表者

吉野 雅彦 (Yoshino, Masahiko)

東京工業大学・理工学研究科・教授

研究者番号：40201032

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円、(間接経費) 960,000円

研究成果の概要(和文)：プレス加工を利用し鋼板の結晶方位を制御する方法を検討した。まず繰り返し剪断応力を加えるためのプレス加工実験装置を開発した。純鉄板を試験片として繰り返し剪断応力を加えた後、種々の条件で焼鈍した。試験片の断面をEBSDで分析し、結晶粒の方位分布を求めた。その結果特定の方位の結晶粒が粗大化することが確認された。これにより繰り返し剪断応力の付与により結晶方位を制御する可能性が示された。

研究成果の概要(英文)：The objective of this project is to study a new method to control crystal orientation of an iron sheet by using press machine. Firstly, an equipment to conduct experiments which adds vibration of shear stress to an iron sheet specimen was developed. After shear stress was added to a specimen many times by the equipment, the specimen was annealed. Then the distributions of crystal orientation were analyzed by an EBSD. It was found from the experiments that grains of particular crystal orientation was grown to be very large grains. Possibility of crystal orientation control was shown.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・生産工学、加工学

キーワード：プレス加工 生産工学 鉄鋼材料 結晶方位制御 静的再結晶 剪断

## 1. 研究開始当初の背景

モーターは自動車、家電、情報機器など、あらゆる工業製品に用いられており、例えば自動車には1台当たり約200個のモーターが用いられている。モーター無しでは我々の日常生活は成り立たないほど広く利用されており、我が国の全電力の約57%がモーターで消費されている。モーターのエネルギー変換効率は一般に90%を超えるが、それをさらに1%でも向上させることが出来れば、年間約60億kWhの電力が削減でき、これは火力発電に起因するCO<sub>2</sub>を約300万トン削減することに相当する。さらに我が国は世界の小型モーターの約60%を生産しており、世界的規模での電力消費の削減ならびにCO<sub>2</sub>排出量削減に効果がある。また本技術により鉄心の高磁束密度化による高トルク化が見込まれる。これはモーターの高速化、小型化、軽量化に繋がり、製品重量の軽減によるエネルギー効率向上、特に自動車においては燃費性能の向上が実現できる。さらにこれら製品の運送エネルギーの削減にも効果があり、多方面からの省エネルギー、省資源、CO<sub>2</sub>削減に貢献できる。

モーターのエネルギー損失のうち約40%がローターやステーターなどに生じる鉄損と言われている。鉄損のうちのヒステリシス損は鉄結晶の磁化容易軸(<100>軸)を磁力線方向に揃えることにより低減できることが知られている。このような目的で開発された鉄心材料として方向性電磁鋼板がある。これは板圧延を利用し素材全体に一樣な集合組織を生成し、結晶の磁化容易軸を板の長手方向に揃えたものである。方向性電磁鋼板は磁力線方向が一樣なトランスの鉄心として広く利用されている。

ところがモーターの鉄心では磁力線が複雑な方向を向くため、方向性電磁鋼板のように一方向のみに磁化容易軸を揃えても効果が少ない。そこでモーター鉄心には鋼板面内に磁化容易軸(<100>軸)をランダムに分散

させた無方向性電磁鋼板が用いられる。無方向性電磁鋼板は通常の鋼板に比べはるかに優れた特性を示すが、無方向性電磁鋼板と方向性電磁鋼板では鉄損が4倍ほどの違いがある。これは方向性電磁鋼板では磁力線方向と磁化容易軸が完全に一致しているのに対して、無方向性電磁鋼板では磁力線方向が磁化容易軸と必ずしも一致しないためである。すなわち、もしモーターの鉄心について磁力線方向に合わせて磁化容易軸を配置することが出来れば、モーター鉄心の鉄損を方向性電磁鋼板と同程度すなわちさらに1/4程度まで低減できると期待できる。これはモーターのエネルギー損失を約30%減少することに相当し、モーターのエネルギー変換効率を90%としても、さらに3%程度エネルギー変換効率を向上させることに相当し、年間約180億kWhの電力削減につながる。

## 2. 研究の目的

そこで本研究ではモーター鉄心の製造工程(プレス加工)を利用し、鉄心中の磁力線の経路に沿って鋼板の結晶の磁化容易軸(<100>方位)を揃える技術の開発を目指す。本研究では、鉄芯用の低炭素鋼板において、剪断塑性ひずみ付与による結晶方位制御の可能性を明らかにし、その原理を検討する。さらにプレス加工を用いて結晶方位分布を自在に変化させ高機能鉄芯を開発するための指針を示す。

## 3. 研究の方法

### (1) プレス加工実験装置の開発

本実験では板状試験片に正確に剪断塑性ひずみを付与する必要があるため、ダイセットを用いた加工実験装置を開発した。本装置では試験片に平面ひずみ状態の剪断ひずみを与えるため試験片は長方形の板状とし、パンチとダイは平行な直線とした。パンチとダイのクリアランスおよび平行度を正確に調

整できるようにダイセットにこれらを組み込み、ネジによる微調整機構を取り付ける。

本実験では低速でパンチを押込み、正確な剪断ひずみを付与する必要がある。そこで図1に示すように鋼製の枠に圧下ネジを取り付け、そのネジを回すことによりダイセットを上部から押し下げる構造とした。ダイセットの押し下げ量は変位計で測定した。

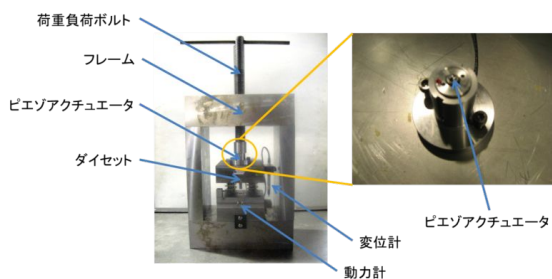


図1 プレス加工装置

さらに剪断応力の繰返し負荷による効果を調べるため、ネジとダイセットの間に図1に示すピエゾアクチュエータを組み込んだ。ピエゾアクチュエータに正弦波を入力し振動荷重を発生させ、クリアランス部に図2のように繰返し剪断応力が働くようにした。

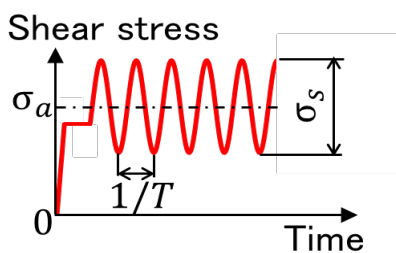


図2 試験片に働く剪断応力の変化

## (2)試験片の準備

本研究では素材として純鉄を用いる。純鉄は透磁率が高いため、安価な電磁石用の鉄心として広く利用されている。しかし純鉄では電磁誘導により発生する渦電流損が大きいいため、それを低減させる目的でSiを加えたものが一般に電磁鋼板として用いられている高Si鋼板である。高Si鋼板の結晶構造は純鉄と同じフェライト相(鉄)単層であり、そ

の再結晶挙動は類似していると考えられる。そこで本研究では高Si鋼板に比べ入手が容易で、素材の品質が安定している純鉄板(Fe99.99%)を試験片として用いた。純鉄板は厚さ1mmの板材より幅3mm長さ15mmの寸法に切断した後、700で1時間焼鈍してから、加工熱処理実験に用いた。

## (3)加工熱処理実験方法

プレス加工実験で剪断ひずみを加えた試験片をAr雰囲気中で焼鈍し、所定の時間保持したのち急冷した。本実験で使用した雰囲気焼鈍炉は、非酸化雰囲気中で試験片を急加熱、高温保持、急冷することが可能である。図3にこのようにして熱処理したときに試験片温度変化を示す。

表1に各試験片の実験条件を示す。

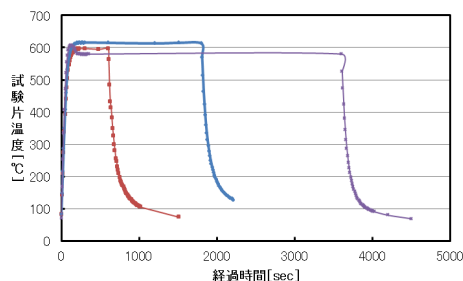


図3 試験片温度の時間変化

表1 各試験片の実験条件

	Initial load	Repeat count	Annealing temperature
Specimen A	-	-	-
Specimen B	250 N	1	-
Specimen C	250 N	18000	-
Specimen D	250 N	18000	600°C
Specimen E	250 N	18000	600°C
Specimen F	250 N	18000	800°C
Specimen G	250 N	18000	800°C

## (4)EBSD装置による結晶方位分析

プレス剪断加工による塑性変形組織および焼鈍により形成された再結晶粒の結晶方位を測定するために、電子後方散乱回折法(EBSD)による加工痕断面の結晶方位測定を行った。EBSDは電解放射型走査電子顕微鏡(FE-SEM)に搭載されており、高い空間分解能が得られる。試験片は中央の断面を分析するため、中心線に沿ってワイヤー放電加工装置で切断し樹脂に埋め込み、コロイダルシリカ

で研磨したのち、EBSD 分析を行った。

#### 4. 研究成果

##### (1) 振動条件の影響

図 4 にひずみ取り焼鈍した、すなわち加工前の、試験片の EBSD 分析データを示す。(a) は IQ (image quality) マップ、(b) は偏差角マップ、(c) は IPF (the inverse pole figure) マップである。(a) の IQ 値は分析の信頼性を示し、暗い部分が低い IQ 値、明るい部分が高い IQ 値を表している。IQ 値は結晶方位の影響を受けるが、それに加え結晶にゆがみがあると IQ 値が低くなることが知られており、相対比較ではあるが、暗い部分に結晶のゆがみが蓄積していると考えられる。図を見ると結晶毎の明るさは異なっているが、それぞれの結晶内での IQ 値の分布はほとんど見られず、結晶格子のゆがみ(塑性ひずみ)はないと考えられる。(b) の偏差角マップは  $\langle 111 \rangle$  方位からの偏差角を表している。すなわち青い部分は結晶の  $\langle 100 \rangle$  軸が ND 方向を向いており、赤い部分は  $\langle 100 \rangle$  軸が ND 方向から  $50^\circ$  くらいずれた方向を向いていることを表している。(c) の IPF マップは RD 方向から観察した結晶面を示しており、挿入図の基準三角形の色でその結晶面を表している。これらの図より、試験片の平均粒径は約  $200\text{--}500\ \mu\text{m}$  であり、また結晶内結晶方位分布には特別な傾向や特色は見られないことが判る。

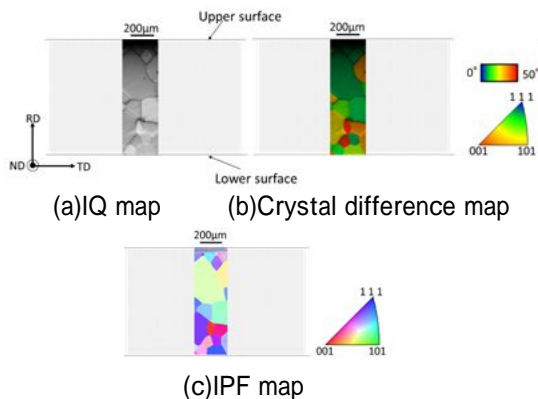


図 4 加工前の試験片(A)の EBSD データ

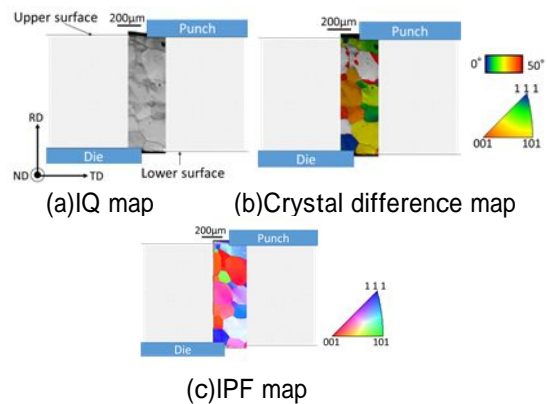


図 5 応力を一回加えた試験片(B)の EBSD データ

図 5 は一度だけ応力振動を加えた試験片 (B) の剪断部分の EBSD データである。(a)を見ると結晶内で IQ 値が分布しており、それぞれの結晶に格子の変形が生じていることが判る。これにより結晶内に転位が蓄積されたと考えられる。さらに(b)の偏差角マップでは偏差角が図 4 のものと比べて大きくなり、場所によっては  $50^\circ$  を越えていることが判る。(c)の IPF マップでは結晶方位分布に特徴は見られない。

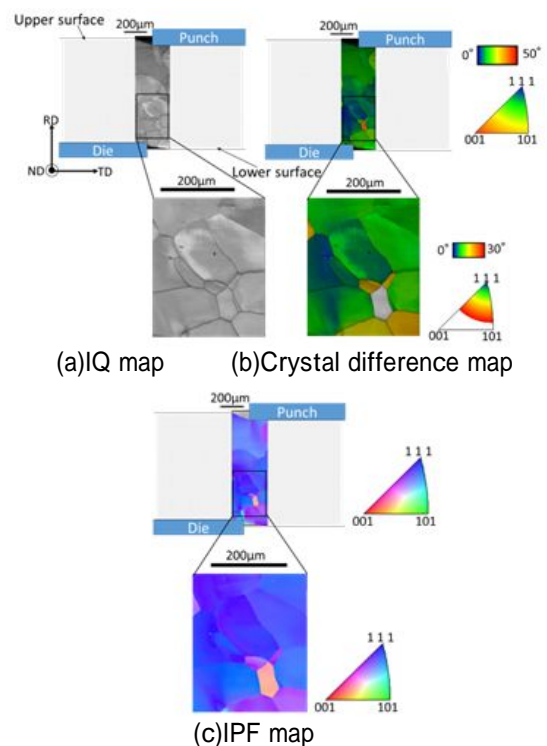


図 6 応力振動を 18000 回加えた試験片(C)の EBSD データ

図6は18000回応力振動を加えた試験片(C)の剪断部分のEBSDデータである。(a)のIQマップ図中の拡大図部分を見ると、結晶粒内でIQ値が分布しているのが見られる。図5のIQマップと比べるとコントラストが強く、繰返し応力を付加したことにより大きなひずみが結晶格子に生じたものと思われる。これにより転位密度も図5に比べて高くなっていると考えられる。(b)の偏差角マップでは殆どの領域で偏差角が $20^\circ$ 以下である。また(c)のIPFマップでは殆どの結晶がRD方向に(111)面が向いていることが判る。非常に強い特徴のようにも見えるが、このような結晶方位の集中が起きる特段の理由は考えられず、偶然によるものと思われる。

## (2) 焼鈍条件の影響

図7に、応力振動を18000回加えた後 $600^\circ$ で60分焼鈍した試験片の剪断部分のEBSDデータを示す。どちらの試験片もほぼ同等の条件で実験したものである。

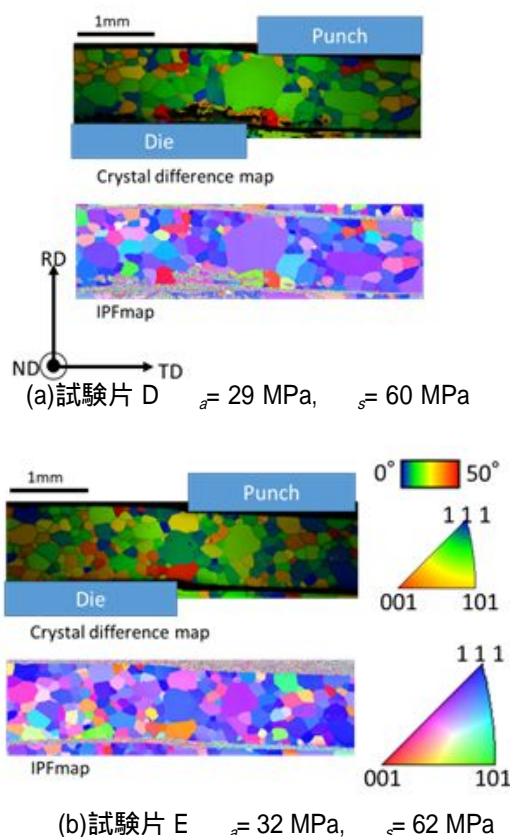


図7 応力振動を18000回加え $600^\circ$ で60分焼鈍した試験片のEBSDデータ

試験片Dでは、断面積 $4.59 \times 10^5 \mu\text{m}^2$ の大きな結晶粒が剪断部分に見られる。この結晶粒は他の結晶粒より明らかに大きく、繰返し応力の付加と焼鈍により粒成長が起きたものと考えられる。偏差角マップ(上図)を見るとこの粗大粒の偏差角は $10^\circ$ 程度であることが判る。IPFマップ(下図)を見ると、この結晶の(211)面がRD方向に向いていることが判る。それに対して試験片Eでは剪断部に特段大きな結晶粒は見られず、粒成長は生じていない。

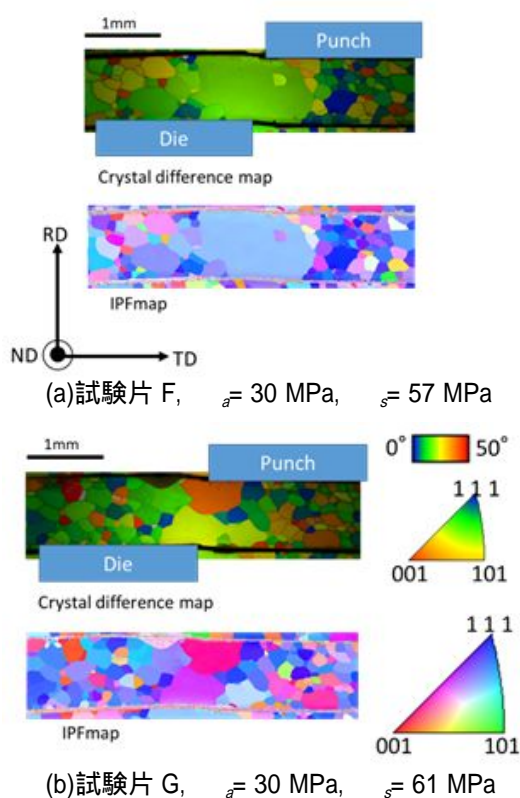


図8 応力振動18000回加え $800^\circ$ で60分焼鈍した試験片のEBSDデータ

図8は応力振動を18000回加え $800^\circ$ で60分焼鈍した試験片の剪断部のEBSDデータである。どちらの試験片もほぼ同等の条件で実験したものである。試験片Fでは、断面積 $11.85 \times 10^5 \mu\text{m}^2$ の大きな結晶粒が剪断部分に見られる。この結晶粒は他の結晶粒より明らかに大きく、繰返し応力の付加と焼鈍により粒成長が起きたものと考えられる。偏差角マップ(上図)を見るとこの粗大粒の偏差角は

10°程度であることが判る。IPF マップ(下図)を見ると、この結晶の(3 2 1)面がRD方向に向いていることが判る。それに対して試験片Gでは、試験片Fほどではないが、剪断部にやや大きな結晶粒が2個見られる。しかしこれらの結晶粒の偏差角は40~50°と大きく、また結晶方位も試験片Fの粗大結晶の方位とは大きく異なっている。

これらの結果より、剪断部に特定の方位の結晶粒がある場合、繰返し応力付与により転位エネルギーが結晶内に蓄積し、焼鈍したことにより再結晶が促進され粗大結晶が発生した可能性が考えられる。このとき転位エネルギーの蓄積は結晶方位に依るため、初期結晶方位の違いにより再結晶のし易さが異なり、特定の方位の結晶が粗大化したものと考えられる。この現象を利用すれば、任意の部分に特定方位の結晶粒のみを成長させることが可能になり、自在に結晶方位を制御することが可能になると期待できる。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 2 件)

- 1) 廣澤 勇二, 寺野 元規, 吉野 雅彦, 鳥塚 史郎: 鉄板の組織変化に及ぼすせん断ひずみの影響, 平成 25 年度塑性加工秋季連合講演会講演論文集, 2013/11/1 -11/3 大阪大学
- 2) Kohei Ibuki, Akinori Yamanaka, Masahiko Yoshino: EBSD Analysis of Static Recrystallized Microstructure Formed by Nano Plastic Forming and Annealing, MetalForming 2012, pp.747-750. 2012/9/16-9/19, KRAKOW POLAND.

〔その他〕

ホームページ等

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

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

吉野 雅彦 (Yoshino, Masahiko)

東京工業大学・理工学研究科・教授

研究者番号: 40201032

### (2)研究分担者

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