

令和 4 年 6 月 20 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02455

研究課題名（和文）ショットピーニングにて発現する特異現象を用いた表面組織制御の指導原理の究明

研究課題名（英文）Clarification of design principle for surface microstructural control based on anomalous phenomena caused by shot-peening

研究代表者

佐藤 尚（SATO, Hisashi）

名古屋工業大学・工学（系）研究科（研究院）・准教授

研究者番号：50402649

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,700,000円

研究成果の概要（和文）：ショットピーニング(SP)に伴う加工表面近傍の相変態メカニズムおよび集合組織形成過程について調査した。Fe合金にSPを施すとSPで生じる圧縮残留応力に起因して相変態温度が変化し、Fe-33%Ni合金の場合は逆変態が発生することが分かった。また、SPに伴う塑性変形は単軸圧縮変形が支配的であり、それに応じた繊維集合組織が形成する。さらに、純FeへのSPと熱処理は無方向性電磁鋼板と同じ{001}繊維集合組織の形成が可能であることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ショットピーニング(SP)にて生じる圧縮残留応力がFe合金へのSPに伴う相変態挙動に及ぼす影響について明らかにし、SPにて生じる逆変態の発現要因を見出した。また、SPに伴う塑性変形は単軸圧縮変形が支配的であり、それに伴って繊維集合組織が形成することも明らかにした。さらに、純FeへのSPと熱処理で無方向性電磁鋼板と同等の結晶学的集合組織を得ることが出来ることを見出し、新たな無方向性電磁鋼板の製造技術として利用できることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：Phase transformation mechanism and crystallographic texture by shot-peening (SP) were investigated. When the SP is subjected to Fe alloy, phase transformation temperature changes due to residual compressive stress induced by SP. As a result, reverse transformation from martensite to austenite occurs by SP for this Fe-33%Ni alloy. Moreover, in this study, it was clarified that plastic deformation by SP is dominated by uniaxial compressive deformation, and that the uniaxial compressive deformation by SP makes fiber-type crystallographic texture. Furthermore, it was found that {001} fiber texture, which is the same crystallographic texture with non-oriented electrical steel sheet, can be obtained by performing both SP and heat treatment for pure Fe.

研究分野：構造材料

キーワード：ショットピーニング 相変態 集合組織 巨大ひずみ加工 電磁鋼板

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

ショットピーニング(SP)は、無数の硬質粒子を高速度で金属材料表面に衝突させることで、加工表面近傍に圧縮残留応力を付与することや結晶粒微細化を生じさせることが可能な表面加工法である。この SP による圧縮残留応力は、硬質粒子が材料表面に衝突したときに生じる衝撃波や加工表面近傍での局所的な塑性変形によって発生するといわれている。一方、加工表面で生じる結晶粒微細化は、硬質粒子が材料表面に衝突することで生じる巨大なせん断変形にて生じる。このように、SP は、圧縮残留応力を付与しつつ加工表面に巨大な塑性変形を加えることが出来るという点で圧延や線引きなど他の塑性加工法と異なる。

研究代表者らは、サブゼロ処理によってマルテンサイト相( $\alpha'$ )を多く有する Fe-33%Ni 合金に SP を施すと、オーステナイト相( $\gamma$ )体積分率が增加する特異な逆変態が生じることを見出した<sup>1)</sup>。一方、 $\gamma$ 相単相である Fe-33%Ni 合金に SP を施すと加工誘起マルテンサイト変態が発生する。もし、この特異な逆変態が SP に伴う加工発熱に起因するならば、 $\gamma$ 相単相である Fe-33%Ni 合金に SP を施しても加工誘起マルテンサイト変態は生じない。そのため、この特異な逆変態の主要因は SP 中の加工発熱と考えにくい。しかしながら、この SP に伴う特異な逆変態の発現要因は解明されていない。さらに、研究代表者らは、純 Fe に SP を施すと加工表面の板面法線方向と Fe の結晶の $\langle 001 \rangle$ 方向および $\langle 111 \rangle$ 方向が平行となるような $\{001\} + \{111\}$ 繊維集合組織が形成することを見出した。金属材料に圧延などを施すことで変形集合組織が形成することは知られている。しかしながら、SP にて形成する結晶学的集合組織については報告がなされていない。よって、SP による結晶学的集合組織の形成過程についても不明である。

このように、SP は他の加工法と違って相変態挙動を始めとした種々の特異な現象を発現する。これまでの SP に関する研究は疲労強度や耐腐食性に着目されていた。そのため、SP にて生じる基礎現象の発現要因など SP に関する学術的知見には不明な点が多い。よって、SP による加工表面の組織制御技術の高度化や SP の利用分野拡大のためにも、本研究では SP の素性を学術的側面から究明することを目指した。

### 2. 研究の目的

本研究では、SP 特有の“圧縮残留応力の付与”および“拘束状態での塑性変形”に着目することで SP による加工表面組織形成過程の素性を明らかにし、材料表面組織制御のための指導原理の創出につなげることを目的とした。それを達成するために、「SP にて生じる圧縮残留応力と相変態挙動の関係」、「SP にて形成する集合組織および集合組織形成過程の解明」および「SP を利用した次世代無方向性電磁鋼板の指導原理提案」について究明することを試みる。そして、SP という表層巨大ひずみ加工の素性を明らかにし、材料表面組織制御のための指導原理の創出につなげることを目標とした。

### 3. 研究の方法

#### 3-1. SP にて生じる圧縮残留応力と相変態挙動の関係

SP で生じる圧縮残留応力は、投射圧力で制御することが可能である。本研究では、SP にて生じる圧縮残留応力と相変態挙動の関係を見出すため、Fe-33%Ni 合金への SP で生じる逆変態に及ぼす投射圧力の影響について調査した。

さらに、Fe-33%Ni 合金でマルテンサイト変態が発生すると体積膨張が生じる。一方、Fe-28%Ni-20%Co 合金では、マルテンサイト変態に伴って体積収縮が生じる。Patel と Cohen の報告によると、Fe-33%Ni 合金に静水圧圧縮応力が作用すると相変態温度が低下する<sup>2)</sup>。一方、その理論に従って Fe-28%Ni-20%Co 合金に静水圧圧縮応力が作用した場合を考えると、相変態温度は上昇する。それゆえ、もし Fe-33%Ni 合金への SP に伴う逆変態が SP にて生じる圧縮残留応力に起因した相変態温度の低下によって生じるならば、Fe-28%Ni-20%Co 合金への SP では逆変態が生じないはずである。そこで、本研究では、サブゼロ処理を施した Fe-33%Ni 合金および Fe-28%Ni-20%Co 合金に SP を施し、それに伴う相変態挙動および逆変態開始温度( $A_s$ 点)の変化も調査した。

#### Fe-33%Ni 合金への SP で生じる逆変態に及ぼす投射圧力の影響

Fe-33%Ni 合金インゴットより 15 mm×15 mm×3 mm の SP 試料を切り出し、1100 °C で 30 min のオーステナイト化処理を施した後、水冷した。その後、水冷した SP 試料を液体窒素中に 30 min 含浸させることで、サブゼロ処理に供した。本研究では、これらの試料の加工表面に対して鏡面研磨を行い、SP 加工を施した。SP で用いた投射材は直径 210 ~ 300  $\mu\text{m}$  のジルコン粒子 ( $\text{ZrSiO}_4$ ,  $HV=650 \sim 800$ ) である。また、投射圧力は 0.2 MPa、0.4 MPa および 0.6 MPa とし、投射時間は 1 ~ 40 min とした。さらに、投射ノズル先端と試料間の距離は 300 mm である。その後、X 線回折法(XRD)にて加工表面近傍の $\gamma$ 体積分率を測定し、かつ加工表面近傍の $\alpha'$ 内部における残留応力を X 線による  $\cos \alpha$ 法にて測定した。

#### Fe-33%Ni 合金あるいは Fe-28%Ni-20%Co 合金の逆変態開始温度に及ぼす SP の影響

Fe-33%Ni 合金および Fe-28%Ni-20%Co 合金インゴットより 15 mm×15 mm×3 mm の SP 試料を切り出し、1100 °C で 30 min のオーステナイト化処理を施した。その後、SP 試料を液体窒素中に 30 min 含浸させることでサブゼロ処理に供した。さらに、これらの試料の加工表面に対して鏡面研磨を行い、SP を施した。SP で用いた投射材は直径 210-300  $\mu\text{m}$  の  $\text{ZrO}_2$  粒子であり、投射圧力

は 0.6 MPa とした。ノズルと試料間の距離および投射時間は、それぞれ 300 mm および 1~30 min である。その後、加工表面近傍における $\gamma$ 体積分率を XRD にて測定した。さらに、加工表面近傍の $\alpha'$ 内部における残留応力を  $\cos \alpha$ 法にて測定した。

### 3-2. SP にて形成する集合組織および集合組織形成過程の解明

本研究では、純 Fe 圧延板および純 Cu 圧延板に対して種々の条件にて SP を施し、それによって加工表面近傍に形成する結晶学的集合組織を調査した。まず、純 Fe 圧延板より、15 mm×15 mm×3 mm の試料を切り出し、切り出した試料を真空中にて 550 °C で 1 h の焼鈍処理に供した。その後、焼鈍処理をした試料に対して機械研磨を施し、SP 試料とした。本研究では、これらの試料に対して SP を施した。投射材は粒径 210  $\mu\text{m}$  ~ 300  $\mu\text{m}$  の  $\text{ZrSiO}_4$  粒子である。また、投射圧力および投射時間は、それぞれ 0.6 MPa および 10 min とした。投射ノズル先端から加工表面までの距離は 300 mm である。その後、本研究では、SP を施した試料における加工表面組織を走査型電子顕微鏡(SEM)、電子線後方散乱回折法(EBSD)および XRD にて評価した。

一方、純 Cu 圧延板に対しては、15 mm×15 mm×3 mm の試料を切り出し、400 °C で 1 h の焼鈍処理に供した。その後、これらの試料に対して機械研磨を施し、SP 試料とした。SP 条件は、投射時間を 45 min とした以外、純 Fe への SP 条件と同じである。また、SP を施した試料に対して、純 Fe 試料と同様の方法で表面組織観察を行った。

### 3-3. SP を利用した次世代無方向性電磁鋼板の指導原理提案

純 Fe に SP を施すと加工表面の板面法線方向と Fe の結晶の $\langle 001 \rangle$ 方向および $\langle 111 \rangle$ 方向が平行となるような $\{001\} + \{111\}$ 二重繊維集合組織が形成する。もし、この二重繊維集合組織から $\{111\}$ 繊維集合組織の成分を除去できれば、この結晶方位分布は無方向性電磁鋼板の結晶方位分布と同等のものとなる。本研究では、両面に投射圧力 0.2 MPa および投射時間 14 min で SP を施した板厚 0.2 mm の純 Fe 圧延板に対して、550 °C ~ 850 °C の種々の温度にて熱処理を施した。その後、EBSD にて加工表面に形成する結晶学的集合組織を調査し、熱処理温度に伴う結晶学的集合組織の変化およびその要因について検討した。さらに、熱処理を施した純 Fe 板の中で最も無方向性電磁鋼板に近い結晶方位分布を持つ試料に対し、交流磁気特性評価装置による微小単板試験法にて鉄損を測定した。そして、得られた結果に基づいて、本研究成果に対する無方向性電磁鋼板の製造技術としての可能性を検討した。

## 4. 研究成果

### 4-1. SP にて生じる圧縮残留応力と相変態挙動の関係

#### Fe-33%Ni 合金への SP で生じる逆変態に及ぼす投射圧力の影響

図 1 は、各投射圧力で SP を施した試料の $\gamma$ 体積分率と SP 加工時間の関係を示すグラフである。この図より、すべての投射圧力で SP によって $\alpha'$ から $\gamma$ への逆変態が生じていた。また、投射時間が長くなるにつれて $\gamma$ 体積分率は飽和している。さらに、この飽和したときの $\gamma$ 体積分率は、投射圧力が高くなるにつれて増加した。すなわち、SP で生じる逆変態は、より高い投射圧力で SP を施すほど顕著に生じることがいえる。一般的に、SP にて導入される圧縮残留応力は、より

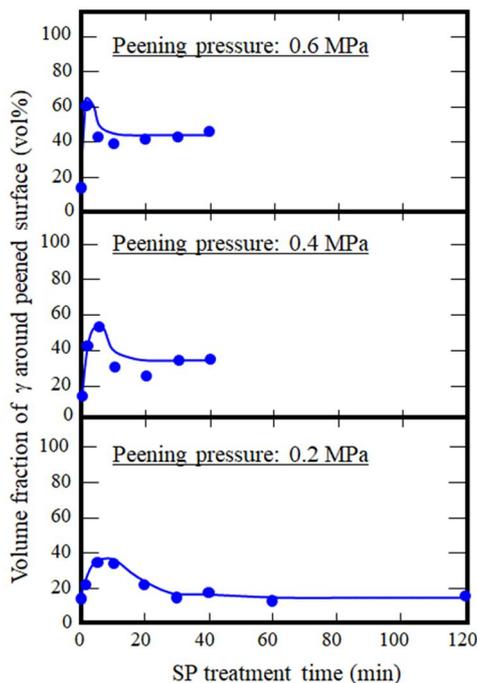


図 1 投射圧力 0.2 MPa, 0.4 MPa および 0.6 MPa で SP を施した試料の $\gamma$ 体積分率と SP 加工時間との関係。

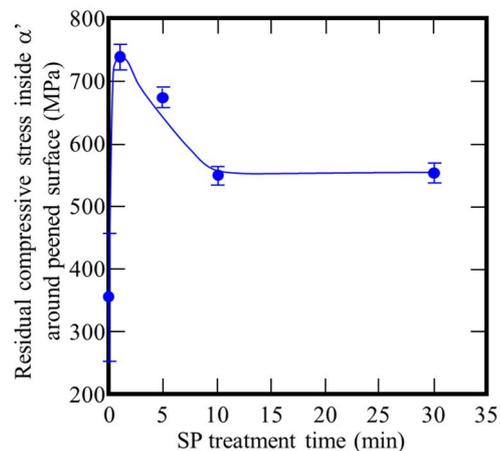


図 2 投射圧力 0.6 MPa で SP を施した試料の $\alpha'$ 内部の圧縮残留応力と SP 加工時間との関係。

高い投射圧力で SP を施すほど高くなることが知られている。このことから、SP にて導入される圧縮残留応力が加工表面の相変態挙動に影響を及ぼすことが推察される。そこで、本研究では、加工時間に伴う加工表面近傍の $\alpha'$ 内部における圧縮残留応力の変化を調査した。図2

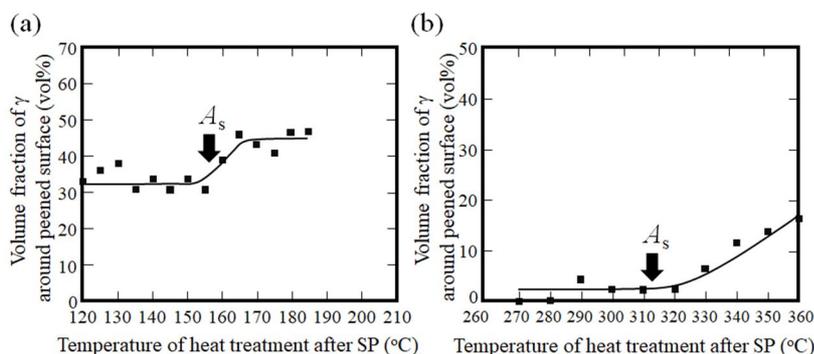


図3 投射圧力 0.6 MPa および投射時間 30 min で SP を施した(a) Fe-33%Ni 合金 および(b) Fe-28%Ni-20%Co 合金への熱処理に伴う $\gamma$ 体積分率を示すグラフ。

は、投射圧力 0.6 MPa で SP を施した時における $\alpha'$ 内部の圧縮残留応力と SP 加工時間との関係を示すグラフである。この結果より、圧縮残留応力は、最も $\gamma$ 体積分率が高くなる加工時間 1 min が高くなることが分かった。Patel と Cohen は、Fe-33%Ni 合金に静水圧圧縮応力が外力として作用した場合、そのマルテンサイト変態開始温度( $M_s$ )が低下することを報告した<sup>2)</sup>。また、その際、 $T_0$ 点( $T_0=(M_s+A_s)/2$ )点も低下することも述べている。そこで、Patel と Cohen の式を用いて圧縮残留応力の発生に起因する  $T_0$ 点の変化量を推算した。その結果、投射圧力 0.6 MPa および加工時間 1 min での SP による  $T_0$ 点の低下量は $\Delta T_0 = 40.7$  °Cであった。SP 前における Fe-33%Ni 合金の  $T_0$ 点は  $T_0 = 55.5$  °Cである。そこで $\Delta T_0$ から SP を施した Fe-33%Ni 合金の  $T_0$ 点を算出すると、SP を施した Fe-33%Ni 合金の  $T_0$ 点は  $T_0 = 14.8$  °Cであった。この  $T_0$ 点は、SP 加工時の温度(室温)に比べて低い。よって、SP で生じる逆変態の発生要因は、SP にて導入された圧縮残留応力に起因する相変態温度の低下であることが明らかとなった。

#### Fe-33%Ni 合金あるいは Fe-28%Ni-20%Co 合金の逆変態開始温度に及ぼす SP の影響

Fe-33%Ni 合金にマルテンサイト変態が発生すると体積膨張が生じる。一方、Fe-28%Ni-20%Co 合金では、マルテンサイト変態に伴って体積収縮が生じる。3-1 節にて既に述べたが、もし Fe-33%Ni 合金への SP に伴う逆変態が SP にて生じる圧縮残留応力に起因した相変態温度の低下によって生じるならば、Fe-28%Ni-20%Co 合金への SP では逆変態が生じないはずである。そこで、本研究では、サブゼロ処理を施した Fe-33%Ni 合金および Fe-28%Ni-20%Co 合金に SP を施し、それに伴う相変態挙動および  $A_s$ 点の変化を調査した。

SP を施した Fe-33%Ni 合金および Fe-28%Ni-20%Co 合金の $\gamma$ 体積分率と SP 加工時間の関係を調べた結果、Fe-33%Ni 合金では SP によって逆変態が生じた。一方、Fe-28%Ni-20%Co 合金への SP では、加工誘起マルテンサイト変態のみが生じていた。図 3(a)および(b)は、それぞれ 0.6 MPa で 30 min の SP を施した Fe-33%Ni 合金および Fe-28%Ni-20%Co 合金への熱処理に伴う $\gamma$ 体積分率の変化を示すグラフである。図 3(a)から、Fe-33%Ni 合金では 150 °C ~ 160 °Cの間で $\gamma$ 体積分率の増加が開始した。これは、SP を施した Fe-33%Ni 合金の  $A_s$ 点が 150 °C ~ 160 °Cに存在することを意味する。SP を施していない Fe-33%Ni 合金の  $A_s$ 点を四端子法にて測定した結果、SP 前の  $A_s$ 点は 200°Cであった。よって、Fe-33%Ni 合金の  $A_s$ 点は SP によって 40 °C ~ 50 °Cだけ低下している。一方、図 3(b)から、SP を施した Fe-28%Ni-20%Co 合金の $\gamma$ 体積分率は、310 °C ~ 320 °Cの間で増加が開始した。SP 前における Fe-28%Ni-20%Co 合金の  $A_s$ 点が 270 °Cであるため、Fe-28%Ni-20%Co 合金の  $A_s$ 点は SP によって上昇することがいえる。

そこで、両合金における SP 前後の $\alpha'$ 内部の残留応力を測定した。その結果、Fe-33%Ni 合金の SP 前および SP 後の $\alpha'$ 内部における残留応力は、それぞれ 356 MPa (圧縮)および 695 MPa (圧縮)であった。一方、Fe-28%Ni-20%Co 合金の SP 前後の残留応力は、それぞれ 433 MPa (引張)および 604 MPa (圧縮)となった。SP 後における $\alpha'$ 内部の残留応力は両合金とも圧縮応力である。よって、前の述べた Fe-33%Ni 合金のみ SP によって逆変態が生じるという実験結果は、Patel と Cohen の報告<sup>2)</sup>から期待される結果と一致している。そこで、本研究では、SP 後の Fe-33%Ni 合金における $\alpha'$ 内部の圧縮残留応力から $\Delta T_0$ を推算した結果、 $\Delta T_0 = 38.2$  °Cであった。この $\Delta T_0$ は、図 3 から得られた SP に伴う  $A_s$ 点の低下量とほぼ一致している。以上より、SP に伴う圧縮残留応力によって Fe-33%Ni 合金および Fe-28%Ni-20%Co 合金の相変態温度が変化することは明らかであり、Fe-33%Ni 合金への SP に伴う逆変態は SP で生じる圧縮残留応力に起因した相変態温度の低下によって生じることが明らかとなった。

#### 4-2. SP にて形成する集合組織および集合組織形成過程の解明

本研究では、純 Fe 圧延板および純 Cu 圧延板に対して SP を施し、それによって形成する結晶学的集合組織を調査した。図 4(a)および(b)は、それぞれ SP 前後における純 Fe 圧延板の(001)および(111)極点図である。この時の SP 条件は、投射圧力が 0.6 MPa および投射時間が 10 min である。この極点図から、SP 前は再結晶集合組織を有しているが、SP 後は Fe の結晶の<001>方向あるいは<111>方向と SP の投射方向が平行となった{001}+{111}二重織維集合組織が形成していた。一方、純 Cu 圧延板に対する SP 前後の(111)および(110)極点図を図 5 に示す。図 5 より、ランダ

ムな結晶方位分布を有する純 Cu 圧延板(図 5(a))に対して投射圧力 0.6 MPa および投射時間 45 min で SP を施すと, Cu の結晶の<011>方向と投射方向が平行になった{011}繊維集合組織が加工表面に形成した(図 5(b)). 過去の研究において, 純 Fe の{001}+{111}二重繊維集合組織および純 Cu の{011}繊維集合組織は単軸圧縮変形で得られることが報告されている. それゆえ, この集合組織の解析結果から, 本研究で用いた ZrSiO<sub>4</sub> 投射材による SP では単軸圧縮変形が支配的であることが推測できる.

そこで, 本研究では, 加工表面に潤滑剤であるボロンナイトライド(BN)を塗布した純 Fe 圧延板に SP を施し, それによって形成する集合組織を調査した. BN を塗布した純 Fe 圧延板に SP を施した場合, 投射材と試料の間に生じる摩擦が小さくなるため, 加工表面でのせん断変形が小さくなる. その結果, SP にて形成する繊維集合組織の主要因が SP による単軸圧縮変形であるならば, BN を塗布した純 Fe 圧延板に形成する繊維集合組織の結晶配向の強さは, より大きくなることが期待できる. そこで, BN を塗布していない試料および塗布した試料に対し, SP を投射圧力 0.6 MPa および投射時間 15 min で施した. その結果, BN を塗布した試料に形成した{001}繊維集合組織の結晶配向の強さは BN を塗布していない試料に比べて高くなった. この結果から SP に

伴う塑性変形は, 単軸圧縮変形が支配的であることがいえる. そこで, 本研究では純 Fe 圧延板および純 Cu 圧延板への SP に伴う繊維集合組織の形成要因について検討した. 過去の研究において, 純 Fe 多結晶および純 Cu 多結晶への単軸圧縮変形における Taylor 因子が報告されている<sup>3)</sup>. その研究によると, 純 Fe 多結晶への単軸圧縮変形では{001}で Taylor 因子が最大となり, 純 Cu 多結晶への単軸圧縮変形では{011}で最大となる. SP は表層巨大ひずみ加工の一つであるため, より大きな塑性変形が生じる. その結果, 一定時間あるいは一定投射圧力以上の条件で SP を施すと, Taylor 因子が最も大きい結晶面が加工表面に配向する. よって, SP に伴う結晶学集合組織の形成過程は, SP に伴う単軸圧縮変形と Taylor 因子によって説明できる.

#### 4-3. SP を利用した次世代無方向性電磁鋼板の指導原理提案

純 Fe 圧延板で形成する集合組織は, SP 後は Fe の結晶の<001>方向および<111>方向と SP の投射方向が平行となった{001}+{111}二重繊維集合組織であることを前項4-2で見出した. もし, この二重繊維集合組織から{111}繊維集合組織の成分を除去することができれば, 無方向性電磁鋼板と同じ結晶学的集合組織である{001}繊維集合組織となる. そこで, 本研究では, SP を施した純 Fe 圧延板に対して種々の温度にて熱処理を施すことで{111}繊維集合組織の除去を試みた. その結果, 熱処理温度が高くなるにつれて{111}繊維集合組織の強度が低下し, 850 °Cで 5 h の熱処理で{001}繊維集合組織となった. すなわち, SP 後の純 Fe 圧延板に適切な熱処理を施すことで, 無方向性電磁鋼板と同じ{001}繊維集合組織を形成させることができる. これは, Fe の{001}面の表面エネルギーが他の結晶面に比べて小さいことに起因する. そこで, SP を施していない純 Fe 焼鈍材および SP と 850 °Cで 5 h の熱処理を施した純 Fe 板の鉄損を印加磁束密度 1 T および印加周波数 1 kHz にて測定し, 無方向性電磁鋼板としての可能性を調査した. その結果, SP を施していない純 Fe 焼鈍材の鉄損は  $W_{10/1k} = 142.49$  W/kg であり, SP と熱処理を施した純 Fe 板の鉄損は  $W_{10/1k} = 114.91$  W/kg であった. よって, 純 Fe 圧延板に SP と熱処理を施すことによって, 純 Fe 圧延板の鉄損を下げる事が出来る. それゆえ, 本研究で見出した SP による集合組織形成は, 新たな無方向性電磁鋼板の製造方法として利用できることが明らかとなった.

#### 参考文献

- 1) H. Sato, T. Nishiura, E. Miura-Fujiwara, Y. Watanabe: *Mater. Sci. Forum*, 706-709 (2012) 1996.
- 2) J. R. Patel and M. Cohen: *Acta Metall.*, 1 (1953) 531.
- 3) C. S. Barrett, L. H. Levenson: *Trans. AIME*, 137 (1940) 112.

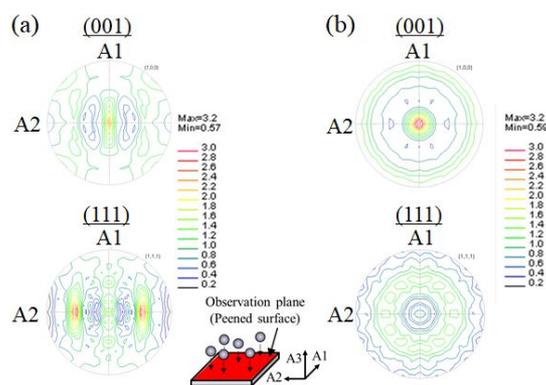


図 4 純 Fe 圧延板の(001)および(111)極点図: (a) SP 前, (b) 投射圧力 0.6 MPa で 10 min の SP 後.

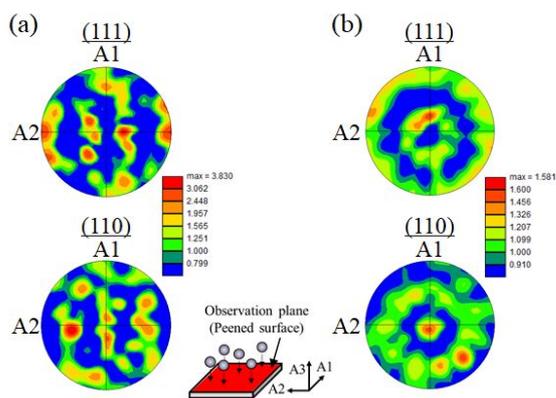


図 5 純 Cu 圧延板の(111)および(110)極点図: (a) SP 前, (b) 投射圧力 0.6 MPa で 45 min の SP 後.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Hisashi Sato, Takuto Tominaga, Tadachika Chiba, Tomokazu Moritani, Yoshimi Watanabe	4. 巻 1016
2. 論文標題 Effects of Peening Direction on Reverse Transformation Induced by Shot-Peening for Fe-33%Ni Alloy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Materials Science Forum	6. 最初と最後の頁 1252 ~ 1257
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4028/www.scientific.net/MSF.1016.1252	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 -
1. 著者名 Satoshi Motozuka, Hisashi Sato, Yuji Muramatsu, Masahiko Morinaga	4. 巻 151
2. 論文標題 Interfacial Effect Between Graphite and Iron Substrate on Basal Plane Orientation and Lubricity of Graphite	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Tribology International	6. 最初と最後の頁 106455 ~ 106455
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.triboint.2020.106455	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 -
1. 著者名 Satoshi Motozuka, Yuki Mako, Hisashi Sato, Hirofumi Hojo, Yasuo Okazaki	4. 巻 521
2. 論文標題 Effect of Lubricant Milling Aids on The Recrystallization Behavior and Magnetic Properties of Ball-Milled Iron Powders Having (0 0 1) Fiber Texture for Soft Magnetic Composite	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Magnetism and Magnetic Materials	6. 最初と最後の頁 167548 ~ 167548
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jmmm.2020.167548	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 -
1. 著者名 Hisashi Sato, Yuya Ito, Golap Kalita, Yoshimi Watanabe	4. 巻 Online先行公開
2. 論文標題 Crystallographic Texture and Applications of Pure Cu Formed by Shot Peening	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 physica status solidi (b)	6. 最初と最後の頁 2100550 ~ 2100550
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/pssb.202100550	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23件（うち招待講演 5件 / うち国際学会 11件）

1. 発表者名 Hisashi Sato, Takuto Tominaga, Tadachika Chiba, Tomokazu Moritani, Yoshimi Watanabe
2. 発表標題 Effects of peening direction on reverse transformation induced by shot-peening for Fe-33%Ni alloy
3. 学会等名 International Conference on Processing & Manufacturing of Advanced Materials: Processing, Fabrication, Properties, Applications (Thermec' 2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐藤尚, 三井陽平, 石黒雄大, 成田麻未, 森谷智一, 渡辺義見, 本塚智
2. 発表標題 ショットピーニングで形成する純鉄の集合組織に及ぼす潤滑剤の影響
3. 学会等名 日本鉄鋼協会 第181回春季講演大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 伊藤祐哉, 佐藤尚, 渡辺義見
2. 発表標題 純Cuへのショットピーニングによる変形集合組織の形成挙動
3. 学会等名 日本金属学会・日本鉄鋼協会 東海支部 第30回学生による材料フォーラム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 本塚智, 佐藤尚
2. 発表標題 集合組織を有する鉄粉の再結晶過程の解明
3. 学会等名 日本鉄鋼協会第180回秋季講演大会シンポジウム 令和2年度第1回iMATERIA研究会 鉄鋼のミクロ組織要素と特性の量子線解析研究会 最終報告会 「量子ビームを用いた組織解析に基づく特性予測の進歩」 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐藤尚, 富永拓人, 森谷智一, 渡辺義見
2. 発表標題 Fe合金へのショットピーニングで生じる相変態に及ぼすマルテンサイト相残留 応力の影響
3. 学会等名 日本金属学会 2020年秋期講演(第167回)大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 石黒雄大, 佐藤尚, 森谷智一, 渡辺義見, 本塚智
2. 発表標題 純鉄へのショットピーニングにて形成する集合組織に及ぼす投射条件の影響
3. 学会等名 日本金属学会 2020年秋期講演(第167回)大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hisashi Sato, Sarath Babu Duraisamy, Yoshimi Watanabe
2. 発表標題 Effects of Al <sub>3</sub> Ti particle shape on its fragmentation behavior by severe plastic deformation for Al-Al <sub>3</sub> Ti composite
3. 学会等名 4th International Conference on Advanced Composite Materials (ICACM 2020) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hisashi Sato, Takuto Tominaga, Tomokazu Moritani, Yoshimi Watanabe
2. 発表標題 Effects of volume change by phase transformation on reverse transformation induced by shot-peening for Fe alloys
3. 学会等名 16th International Conference on Martensitic Transformation (ICOMAT2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuji Nakagawara, Hisashi Sato, Tomokazu Moritani, Yoshimi Watanabe
2. 発表標題 Effects of strain-induced cyclic transformation on microstructure around peened surface of SUS304 austenitic stainless steel
3. 学会等名 16th International Conference on Martensitic Transformation (ICOMAT2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hisashi Sato, Takuto Tominaga, Tadachika Chiba, Tomokazu Moritani, Yoshimi Watanabe
2. 発表標題 Effects of peening direction on reverse transformation induced by shot-peening for Fe-33%Ni alloy
3. 学会等名 The 11th International Conference on Processing & Manufacturing of Advanced Materials (Thermec 2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐藤尚, 石黒雄大, 森谷智一, 渡辺義見, 本塚智
2. 発表標題 純鉄へのショットピーニングにて形成する結晶学的集合組織
3. 学会等名 日本鉄鋼協会 第179回春季講演大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hisashi Sato
2. 発表標題 Novel microstructural controlling technique on surface of Fe alloys by using shot-peening
3. 学会等名 The 3rd FRIMS International Symposium on Frontier Materials (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yudai Ishiguro, Hisashi Sato, Yoshimi Watanabe
2. 発表標題 Crystallographic texture induced by shot-peening for pure iron
3. 学会等名 The 3rd FRIMS International Symposium on Frontier Materials (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuji Nakagawara, Hisashi Sato, Yoshimi Watanabe
2. 発表標題 Surface modification of SUS 304 austenitic stainless steel by strain-induced cyclic transformation
3. 学会等名 The 3rd FRIMS International Symposium on Frontier Materials (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 富永拓人, 佐藤尚, 森谷智一, 渡辺義見
2. 発表標題 正あるいは負の体積変化を伴うマルテンサイト変態に及ぼすショットピーニングの影響
3. 学会等名 日本鉄鋼協会・日本金属学会 東海支部 第29回学生による材料フォーラム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 富永拓人, 佐藤尚, 渡辺義見
2. 発表標題 Fe-Ni-Co合金へのショットピーニングにて生じる相変態挙動
3. 学会等名 日本鉄鋼協会 2019年(第178回秋季講演大会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤尚, 富永拓人, 知場三周, 渡辺義見
2. 発表標題 Fe-Ni合金へのショットピーニングで生じる逆変態に及ぼす投射方向の影響
3. 学会等名 日本鉄鋼協会 2019年(第178回秋季講演大会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hisashi Sato, Yudai Ishiguro, Satoshi Motozuka, Tadachika Chiba, Yoshimi Watanabe
2. 発表標題 Crystallographic fiber texture formed by shot-peening and heat treatment for pure iron
3. 学会等名 7th International Conference on Recrystallization and Grain Growth (ReX&GG 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤尚, 伊藤祐哉, 成田麻未, 森谷智一, 渡辺義見
2. 発表標題 純Cuへのショットピーニングに伴う集合組織形成過程
3. 学会等名 日本金属学会 2022年春期(第170回)講演大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hisashi Sato, Takuto Tominaga, Tomokazu Moritani, Yoshimi Watanabe
2. 発表標題 Effects of volume change by phase transformation on reverse transformation induced by shot-peening for Fe alloys
3. 学会等名 International Conference on Martensitic Transformation (ICOMAT2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 伊藤祐哉, 佐藤尚, 成田麻未, 森谷智一, 渡辺義見
2. 発表標題 純Cuへのショットピーニングに伴う結晶学的集合組織の形成過程
3. 学会等名 材料フォーラムTOKAI
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐藤尚, 櫻井彩香, 森谷智一, 渡辺義見
2. 発表標題 Fe-33%Ni合金およびFe-28%Ni-20%Co合金へのショットピーニングに伴う相変態温度の変化
3. 学会等名 日本鉄鋼協会 第182回秋季講演大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuya Ito, Hisashi Sato, Mami Mihara-Narita, Tomokazu Moritani and Yoshimi Watanabe
2. 発表標題 Formation process of crystallographic texture in pure Cu deformed by shot-peening
3. 学会等名 The 6th International Conference on Advanced Functional Materials (ICAFM 2021) (国際学会) (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 佐藤 尚, 本塚 智	4. 発行年 2022年
2. 出版社 技術情報協会	5. 総ページ数 7
3. 書名 「次世代EV/HEV用モータの高出力化と関連材料の開発」第3章第5節	

〔出願〕 計2件

産業財産権の名称 面内無方向性電磁金属板及びその製造方法	発明者 佐藤尚, 渡辺義見, 石黒雄大, 伊藤祐 哉, 本塚智	権利者 名古屋工業大学
産業財産権の種類、番号 特許、特願2020-181654	出願年 2020年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 無方向性電磁金属板及びその製造方法	発明者 佐藤尚, 石黒雄大, 伊藤祐哉, 渡辺義 見, 本塚智	権利者 名古屋工業大学
産業財産権の種類、番号 特許、特願2019-198282	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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	本塚 智  (MOTOZUKA Satoshi)  (30585089)	九州工業大学・大学院工学研究院・准教授   (17104)	
研究 分担者	渡邊 義見  (WATANABE Yoshimi)  (50231014)	名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・教授   (13903)	

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
---------	---------