

研究テーマ 「ブラスト処理による伸線ワイヤ材の磁気特性改善」

研究責任者 所属機関名 名古屋工業大学

官職又は役職 教授

氏 名 佐藤 尚 メールアドレス sato.hisashi@nitech.ac.jp

共同研究者 所属機関名 名北工業（株）

官職又は役職 生産技術部長

氏 名 井上 雅也

（令和5年度募集）第36回 助成研究 完了報告書

1. 実施内容および成果ならびに今後予想される効果の概要（1,000字程度）

【1】実施内容および成果

ウェットブラストは、硬質粒子と液体を混合したスラリーを圧縮空気によってノズルから材料表面へ高速噴射し、表面加工を行う技術である。本研究では、伸線加工されたS10C（Fe-0.1%C 合金）ワイヤにウェットブラストおよび熱処理を施し、低鉄損で優れた磁気特性を有する表面を持つS10Cワイヤ材の開発を目的とした。その結果、主に以下の知見を得た。

まず、基礎データとして、ウェットブラストおよび熱処理を施していないS10Cワイヤ材の鉄損を測定した。その結果、周波数1MHz、外部磁場0.3mTの条件における鉄損は7.20W/kgであることが明らかとなった。本研究では、この値を基準としてウェットブラストおよび熱処理が鉄損に及ぼす影響を評価した。

次に、ウェットブラストを施したS10Cワイヤ材に対し、鉄損改善に適した熱処理条件を検討するため、種々の温度で3時間の熱処理を行い、表面組織を観察した。その結果、すべての試料においてパーライト組織が観察されず、初析フェライト(α)のみが観察された。また、 α とオーステナイト(γ)の二相領域である750℃および850℃で熱処理を行った場合、ワイヤ半径方向と鉄の<001>方位が平行となる{001}繊維集合組織が表面に形成された。さらに、その結晶配向強度は、750℃処理材に比べて850℃処理材の方が高かった。一方、 γ 単相領域である900℃で熱処理を施した試料では、特定の集合組織が形成されず、結晶方位がランダムであった。これらの試料のうち、750℃および850℃で熱処理を施した試料について、周波数1MHz、外部磁場0.3mTの条件で鉄損を測定した結果、それぞれ7.04W/kgおよび4.43W/kgとなった。以上より、 α と γ の二相領域で、かつ比較的高温側での熱処理が、鉄損低減に有効であることが明らかとなった。

【2】今後予想される効果の概要

本研究では、S10Cワイヤ材表面に鉄損低減に有効な{001}繊維集合組織を形成するための熱処理条件に関する指針を得ることができた。今後、熱処理温度のさらなる最適化を行うことで、鉄損の一層の低減が期待される。

従来、鉄系軟磁性材料としては純鉄やFe-Si合金が広く用いられており、特にワイヤ材には純鉄が一般的に使用されている。一方、炭素鋼であるS10Cは、これらの材料と比較して低コストであるという利点を有する。そのため、S10Cワイヤ材の鉄損を純鉄やFe-Si合金と同等の水準まで低減できれば、ソレノイド部品をはじめとする軟磁性部品のコスト削減に大きく寄与する。以上より、本研究の成果は、軟磁性部品の低コスト化に貢献する技術的基盤となることが期待される。

2. 実施内容および成果の説明

2.1 緒言

ウェットブラストは、硬質粒子と液体を混合したスラリーを圧縮空気によってノズルから材料表面へ高速噴射し、表面加工を行う技術である。我々は、過去に純鉄系軟磁性ワイヤ材にウェットブラストを施すと、ワイヤの半径方向と鉄の<001>および<111>方向が平行になった{001}+{111}二重繊維集合組織がワイヤ表面に形成することを見出した。さらに、それに対して熱処理を施すと、{111}繊維集合組織が消滅し、{001}繊維集合組織がワイヤ表面に残留することも見出している。この{001}繊維集合組織は無方向性電磁鋼板の理想的な結晶方位分布と同等であることから、このウェットブラストと熱処理は純鉄系軟磁性ワイヤ材の表面磁気特性である鉄損を低減することが期待できる。しかしながら、このウェットブラストと熱処理に伴う{001}繊維集合組織の形成がワイヤ材の鉄損に及ぼす影響は分かっていない。さらに、ウェットブラストと熱処理によって炭素鋼の鉄損を純鉄系軟磁性材料と同等の水準まで低減できれば、ソレノイド部品をはじめとする軟磁性部品のコスト削減に大きく寄与することが期待できる。

そこで本研究では、伸線加工された S10C (Fe-0.1%C 合金) ワイヤ材にウェットブラストおよび熱処理を施し、低鉄損で優れた磁気特性を有する表面を持つ S10C ワイヤ材の開発を目的とした。

2.2 実験方法

本研究では供試材として S10C(Fe-0.1%C)ワイヤ材を用いた。この供試材は、 ϕ 12.0 mm から ϕ 10.85mm まで伸線加工が施された後、ひずみ取り焼鈍がされている。この S10C ワイヤ材に対し、ウェットブラストを施した。ノズル直下に S10C ワイヤ材を設置し、ワイヤ材表面に対して垂直にウェットブラストを施した。なお、ワイヤ材全周にわたって加工を施すため、試料を軸周りに回転させながらウェットブラストを施した。なお、ウェットブラストに用いた投射材は、球状のステンレス系投射材とした。そして、作製されたワイヤ材から長さ 5 mm の試料を切り出した。

その後、切り出した試料に対し、真空中で熱処理に供した。熱処理条件を表 1 に示す。なお、熱処理温度である 700℃は、Fe-C 平衡状態図において A_1 点より低い温度である。そのため、熱処理時に相変態が生じない。一方、750℃および 850℃は、 A_1 点よりも高いフェライト(α)とオーステナイト(γ)の二相領域である。さらに、900℃は、 A_3 点よりも高温であり、 γ 単相領域である。本研究では、ウェットブラストを施した S10C ワイヤ材に対して、これらの温度で熱処理を施した。

熱処理を施したワイヤ表面に対して、機械研磨および腐食研磨を施した。なお、このときのワイヤ表面の研磨量は約 5 μ m である。表面研磨後、ワイヤ表面の結晶方位分布を電子線後方散乱回折(EBSD)法にて調べた。そして、熱処理によってワイヤ表面に形成した結晶

学的集合組織を解析した．また，一部の試料に対してはワイヤ表面近傍の断面組織も同様の手法にて観察した．

さらに，本研究では，製造条件，材料組織および鉄損の関係を明らかにするために，熱処理を施した試料に対して交流磁気測定を行った．まず，熱処理を施した試料中央に対して， $\phi 6.0\text{ mm}$ の穴をあけ，リング状の試料を作製した．その後，磁場の印加に必要な励磁コイルおよび検出コイルの巻き線を施して磁気測定を行った．励磁条件は，最大磁束密度は 0.3 mT および周波数を 1 MHz とした．なお，利用した測定装置は，岩崎通信機（株）製 B-H analyzer SY 8218 である．

表 1 試料名および熱処理条件

試料名	熱処理温度	熱処理時間	Fe-C 状態図における領域
WBHT-700	700°C	3h	$\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$
WBHT-750	750°C		$\alpha + \gamma$
WBHT-850	850°C		$\alpha + \gamma$
WBHT-900	900°C		γ

α :フェライト， γ :オーステナイト

2.3 結果および考察

2.3.1 ウェットブラストを施した S10C ワイヤ材の表面組織

図 1(a)および(b)は，それぞれウェットブラストを施した S10C ワイヤ材の表面組織および加工表面近傍の断面組織を示す逆極点図(IPF)マップである．また，図 1(c)は，S10C ワイヤ材表面における (001)および(111)の極点図である．本研究では用いた S10C ワイヤ材には，パーライト組織が観察されなく，すべて初析 α で構成されていた．これは，熱処理時の冷却速度が空冷程度まで速かったためである．図 1(a)から，ウェットブラストを施した S10C ワイヤ材の表面には細かい結晶粒が存在していた．この平均結晶粒径は $1.3\text{ }\mu\text{m}$ であった．また，図 1(b)に示す断面組織を見てみると，表面から $10\text{ }\mu\text{m}$ 程度の深さまで微細な結晶粒で構成されており，それよりも内部は比較的大きな結晶粒となっていた．すなわち，ウェットブラストによって結晶粒が微細化していることがいえる．さらに，図 1(c)の極点図を見てみると，鉄の $\langle 001 \rangle$ および $\langle 111 \rangle$ がワイヤ半径方向に平行でかつそれを軸に回転するように結晶方位がランダムに分散した $\{001\} + \{111\}$ 二重繊維集合組織がワイヤ表面に形成していた．過去の研究において，純鉄板にショットピーニングを施すと，投射材の投射方向と鉄の $\langle 001 \rangle$ および $\langle 111 \rangle$ が平行で，かつそれを軸に回転するように結晶方位がランダムに分散した $\{001\} + \{111\}$ 二重繊維集合組織が形成することが報告されている¹⁾．同時に，この集合組織は単軸圧縮変形によって形成することも報告されている．よって，ウェットブラストの変形様式もショットピーニングと同様に単軸圧縮変形であることがいえ，それによってワイヤ表面に $\{001\} + \{111\}$ 二重繊維集合組織が形成されたといえる．

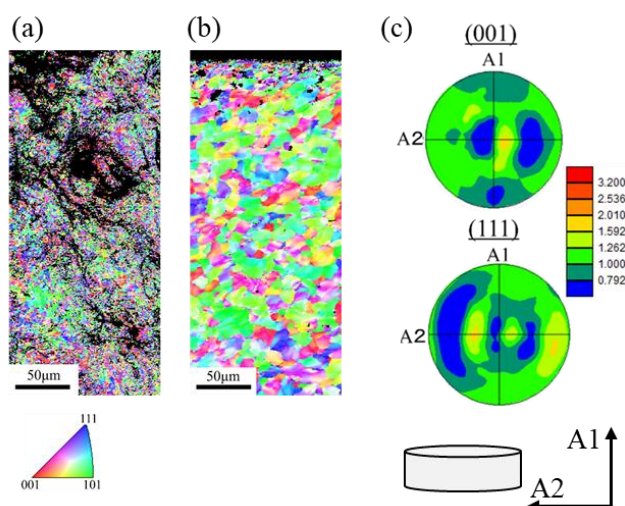


図 1 ウェットブラストを施した S10C ワイヤ材の表面組織と断面組織:

(a) 加工表面の IPF マップ, (b) 断面の IPF マップ, (c) 加工表面の極点図.

2.3.2 ウェットブラストを施した S10C ワイヤ材への熱処理に伴う表面組織変化

図 2 (a)から(d)は, それぞれウェットブラストを施した S10C ワイヤ材に対し, 700 °C, 750 °C, 850 °C および 900 °C で 3 h の熱処理を施した試料表面の IPF マップである. これらの IPF マップから, 熱処理を施した試料は図 1(a)に示す熱処理を施していない試料に比べて大きな結晶粒を有していた. すなわち, 熱処理を施したすべての試料は再結晶および結晶粒粗大化が生じているといえる.

図 3 (a)から(d)は, それぞれウェットブラストを施した S10C ワイヤ材に対して 700 °C, 750 °C, 850 °C および 900 °C で熱処理を施した試料表面の(001)および(111)極点図である. A₁ 点よりも低い 700 °C で熱処理を施した WBHT-700 は, (001)極点図の中心付近に弱いピークが存在していた. しかし, ショットピーニングで観察されるような配向強度が高い{001}繊維集合組織は見られていない. 一方, A₁ 点よりも高く, αとγの二相領域となる 750 °C および 850 °C で熱処理を施した WBHT-750 および WBHT-850 では, (001)極点図の中心部に強いピークが存在し, それを囲むようなピークも存在していた. すなわち, 両試料とも表面に{001}繊維集合組織を有している. また, 結晶の配向強度は, 熱処理温度が高い WBHT-850 の方が高かった. 一方, γ単相領域である 900 °C で熱処理を施した WBHT-900 の表面結晶方位分布は, 強い結晶配向を有していなく, ランダムであった. すなわち, これらの結果から, ウェットブラストを施した S10C ワイヤ材に{001}繊維集合組織を持たせるためには, αとγの 2 相領域の比較的高い温度で熱処理を施した方がよいことが明らかとなった.

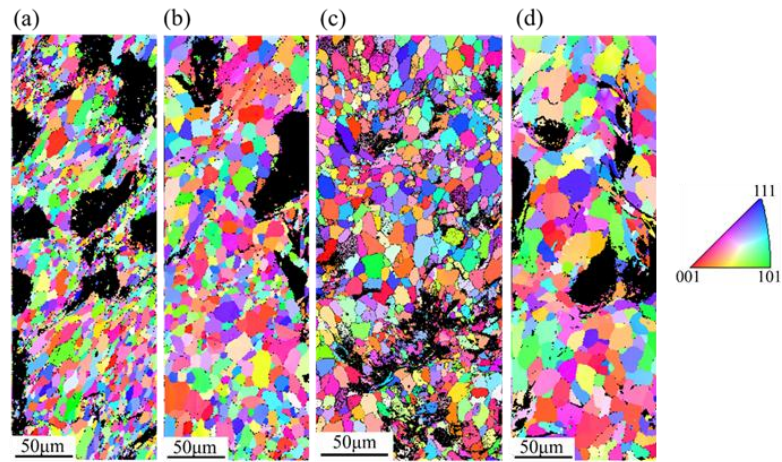


図 2 ウェットブラストと熱処理を施した S10C ワイヤ材表面における IPF マップ:
(a) WBHT-700, (b) WBHT-750, (c) WBHT-850, (d) WBHT-900.

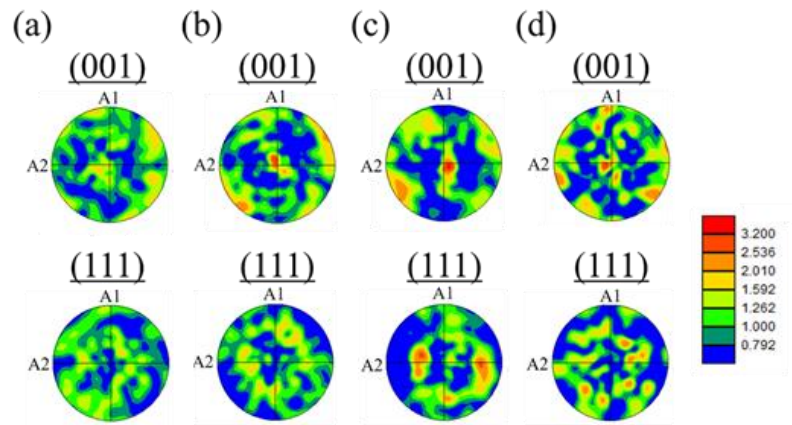


図 3 ウェットブラストと熱処理を施した S10C ワイヤ材表面における IPF マップ:
(a) WBHT-700, (b) WBHT-750, (c) WBHT-850, (d) WBHT-900.

2.3.3 ウェットブラストおよび熱処理を施した S10C ワイヤ材の磁気特性評価

本研究では、ウェットブラストおよび熱処理を施した S10C ワイヤ材に対して、鉄損の測定を行った。なお、鉄損の測定は、{001}繊維集合組織を有する WBHT-750 および WBHT-850 に対して行った。また、比較材としてウェットブラストおよび熱処理を施していない S10C ワイヤ材に対しても鉄損を測定した。表 2 は各試料の鉄損である。この表からウェットブラストと熱処理を施すことで S10C ワイヤ材の鉄損が低下することが分かる。また、WBHT-750 および WBHT-850 の鉄損を比較すると、より配向強度の強い{001}繊維集合組織を有する WBHT-850 の方が鉄損は小さかった。よって、材料組織と鉄損の関係は一致している。以上の結果より、 α と γ の二相領域で、かつ比較的高温側での熱処理が、鉄損低減に有効であることが明らかとなった。

表 2 各試料の鉄損

試料名	鉄損
未加工材	7.20 W/kg
WBHT-750	7.04 W/kg
WBHT-850	4.43 W/kg

3. まとめ

本研究では，ウェットブラストおよび熱処理を施した S10C ワイヤ材の表面組織および鉄損を調査し，S10C ワイヤ材の鉄損低減に有効な熱処理条件について検討した．その結果， α と γ の二相領域で，かつ比較的高温側での熱処理が，最も配向強度が強い{001}繊維集合組織を形成し，かつ鉄損低減に有効であることが明らかとなった．

参考文献

- 1) 佐藤尚：熱処理, Vol. 65 (2025) pp. 20-26.