

レーザ加工を利用した軟磁性鋼板の部分非磁性化に関する基礎研究

田中 浩司*, 星野 勇司*,**, 川村 優希*,***

*大同大学工学部機械工学科 (〒 457-8530 名古屋市南区滝春町 10-3)

現: ポリマーエンジニアリング(株), *現: (株) ビッグモーター
koutnk@daido-it.ac.jp

Fundamental Research of Local Non-magnetization of Soft Magnetic Steel Sheet by Laser Processing

TANAKA Kouji, HOSHINO Yuji and KAWAMURA Yuki

(Received March 15, 2022)

Ferrous soft magnetic materials are commonly used for electric facilities, and especially, electric steel sheet for motors has been growing in importance in all industries. In order to miniaturize and increase the efficiency of electric motor unit, the magnetic flux in steel sheets needs to be controlled and flux leakage to be cut off. In this work a unique laser working on thin steel sheet combining cutting and melt-infiltration has been examined as a possible processing for local non-magnetization in a shape of a narrow layer.

Two-ply 0.5 mm-thick steel sheets were cut using defocused laser beam so as to make 0.2 ~ 0.8 mm-wide slit. The cut surface exhibited metallic luster and little oxidation. Then Cu or Cu-Si wire was placed onto a slit and melted using 1.0 ~ 4.0 kW laser beams. Due to a low laser absorptance of copper, more than 2.0 kW-laser power was needed to infiltrate the Cu completely, which caused a melting of the adjacent edges of steel slits with considerable dissolution of Fe into a Cu infiltration.

The Cu-Si wire showed a deeper infiltration than pure Cu wire. The magnetic flux density across the infiltration-modified layers decreased linearly with decreasing the amount of Fe dissolution. Under the best process conditions, it was decreased by 64% compared with an unmodified material, which reveals a modified emissivity less than 1/10 of electric steel sheet.

Key words : electric steel sheet, magnetic flux, non-magnetization, laser processing, infiltration, local modification

1. 緒 言

一般住宅にはこれまでエレベータや階段リフトなど少数の電動設備が存在したが、非常電源としての役割も担う電気自動車が入り込むことで、高電圧の電動ユニットが身近になってきている。産業用途に成熟したユニットを高効率・コンパクトな形態で利用するためには、電動機や変換器内の部品を小型化して、その中を流れる電流および磁束を精緻に制御する必要がある。

特にモータは、軟磁性鋼板を積層したロータに強力磁石が埋め込まれており、周囲を囲むステータと磁束をやりとりして高速回転する。ところが隣接する磁石間の短絡的磁束は磁気回路の効率を低下させるので、流路となる電磁鋼板のブリッジ幅をできるだけ小さくする必要がある¹⁾。さらには遮断したい部分を切断したり、樹脂フィルム等を挿入することが試みられているが、いずれも回転遠心力に対してロータの機械的強度が低下する問題がある。

他の磁気駆動部品では、非磁性ステンレス鋼の塑性加工によって磁束を通す部位に強磁性のマルテンサイトを生じさせたり^{2,3)}、その加工誘起マルテンサイトの局部加熱によって部分的に非磁性化する方法が実用化されている⁴⁾。しかしモータ用に積層して使用される薄鋼板では加熱範囲の制御が困難であり、多くの場合、熱影響によって磁気特

性が劣化する⁵⁾。このような狭小領域の精密加熱にはレーザが最も適しているが、加熱時間をいっそう小さくするためピコ秒レーザによるアブレーションを利用した切断が検討されている状況である⁶⁾。

以上のようにモータ用電磁鋼板では、高速かつ非磁性化の効果が高く、対象部分以外の磁気特性や強度特性に影響が少ない改質手段が見出されていない。そこでレーザ切断とレーザ溶接を組合わせた2段階の部分改質方法を考案した。すなわち、電磁鋼板にレーザ切断でスリットを形成したのち銅 (Cu) または Cu 合金を溶融・浸入させ、幅 1 mm 以下の範囲を非磁性化する方法である。

本報告ではその可能性探索として以下の実験を実施し、電磁鋼板を通過する磁束の減少率 (減磁率) を最大化する条件の探索を目的とした。特に懸念されるのは鋼板から強磁性元素の Fe が改質部に希釈することであり、Cu または Cu 合金のみを溶融させ、速やかにスリット内に侵入させることが肝要となる。

2. 実験方法

2.1 切断スリット加工

まずレーザ切断を各種条件下で行い、切断面の性状を調査した。用いたのは日本製鉄製無方向性電磁鋼板ハイライトコア (100×50×t0.5 mm) であり、約 3% の Si を含む。各

2枚を重ねて厚さ1.0 mmとし、ファイバレーザ加工機（波長1070 nm, 集光径 $\phi 0.15$ mm）にて出力0.8~2.0 kW, 速度700 mm/min. で長さ30 mmの直線スリットを切断形成した。アシストガスには圧力1.0 MPaの窒素ガスを用いた。デフォーカスによりスポット径を調整し、適切な出力と組合せてスリット幅のねらいを0.2, 0.5, 0.8 mmの3種類とした。

2.2 非磁性材溶浸による改質層の形成

固体のスリット内部へ溶融Cuを浸入させるには、液相の表面張力、スリット幅、固体表面の濡れ性が影響する。表面張力は液滴の温度や表面酸化皮膜の有無、濡れ性はレーザ切断面の性状に左右されると考えられる。そこでスリット内部を観察した後、束ねたCu細線をスリット上に設置し、窒素雰囲気下の管状炉で1100℃, 10 min. 加熱保持して炉冷した。融点直上の温度としたのは、後述のようにCuのレーザ加熱がやや困難と予想されたため、比較的低温で表面張力が高い状態でのCu液相の浸入挙動を確認するためである。

レーザでのCu溶浸実験では、実測幅が約0.2 mmのスリットを選定した。加工部の近接写真をFig. 1に示す。スリットにそって純Cu線（ $\phi 1.0$ mm）またはCu-3.6%Si合金線（ $\phi 1.2$ mm, 以下CuSi線）を設置し、シールドガスとして窒素を40 l/分で流した。切断時と同じファイバレーザ加工機でスポット径を $\phi 0.2$ mmに調節して線径中心をねらって最大出力4.0 kWで照射した。加工速度は主に3000 mm/min. で実施した。

用いた近赤外レーザは純Cuへの吸収率が低く、純Cu線の溶融には大きな入熱量が必要と予想される。大入熱になるほど鋼板からのFe希釈が増大して非磁性化に不利になるばかりか、電磁鋼板の磁気特性にも悪影響が生じる。そこで一部の実験はブルーレーザ（波長455 nm, 集光径 $\phi 0.6$ mm）に転換して、溶浸時の低出力化を図った。加工条件はレーザ出力0.5~1.25 kW, 速度500 mm/min. である。

これら非磁性材の溶浸により改質した部分は、長手方向に垂直な断面を切断・研磨し、光学顕微鏡および走査型電子顕微鏡（SEM）により溶浸状態を観察した。また付属EDS検出器にてマクロなCu, Fe, Si濃度分布、およびスリット幅中心付近でFe濃度を7点分析して改質部の平均Fe希釈量を求めた。

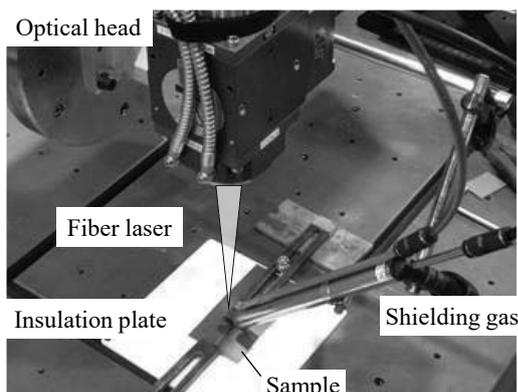


Fig. 1 Experimental setup of wire melt-infiltration.

2.3 非磁性改質層の評価

改質部を中央にして電磁鋼板を50×10 mmに切り出し、Fig. 2に示す方法で非磁性化の程度を簡易的に評価した。2800 Gaussのネオジウム磁石を両端に取り付け、図中の測定窓にプローブを挿入してガウスメーターで磁束密度 $B_{mod}[T]$ を測定した。減磁率 X は以下の式で定義して比較した。ここで B_{unmod} は改質部のない試料（入手ままの電磁鋼板）で同様に測定した磁束密度である。

$$X = \frac{B_{unmod} - B_{mod}}{B_{mod}} \quad (1)$$

3. 実験結果および考察

3.1 レーザ切断面の性状と濡れ性

Fig. 3に、2枚重ね電磁鋼板に加工したスリットの切断面を観察した結果を示す。レーザ出力0.8 kW, スポット径0.15 mmで幅が約0.2 mmとなったスリットの(a)では、レーザ照射方向にそった溝状凹凸が見られ、融液の一部は除去されずにバリとなっている。切断面には金属光沢があり、一般に濡れ性を低下させる酸化皮膜等は認められない。スポッ

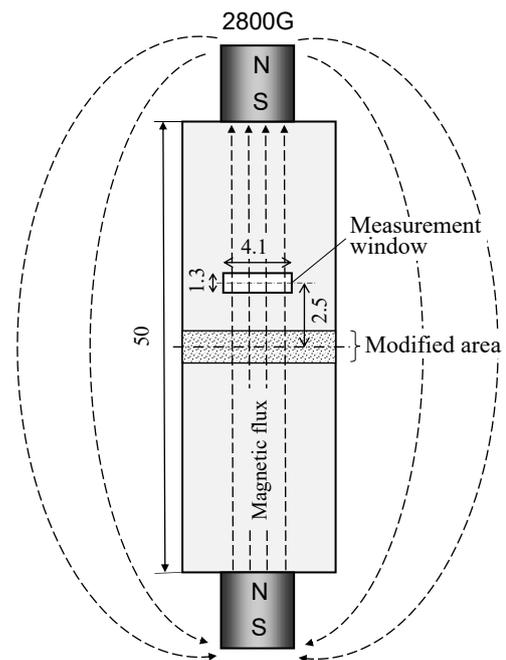


Fig. 2 Measurement of magnetic flux density in locally modified steel sheet.

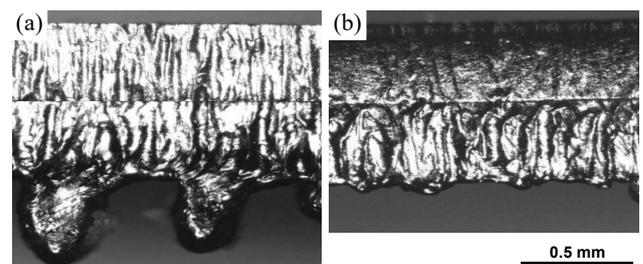


Fig. 3 Laser-cut surface of slit in two-ply steel sheets. (a) Laser power 0.8 kW, spot diameter 0.15 mm. (b) Laser power 2.0 kW, spot diameter 1.0 mm.

ト径を広げ幅を約 0.8 mm とした (b) でもやはり著しい表面酸化はなく、バリも残っていない。また比較としてアシストガスを空気に変えたところ、スリット周辺の鋼板表面はやや黒色化したが、切断面の光沢には変化が見られなかった。

Fig. 4 は、幅 0.2 mm と 0.8 mm のスリット上に純 Cu 線を白金線で固定し、1100℃ 加熱後に断面を観察したものである。幅 0.2 mm のスリットでは溶融した Cu が内部に浸入し、約 1 mm 厚さの鋼板全体に貫通して充填している。幅 0.8 mm でも同様に Cu が良く充填しているが、やや下垂した状態である。以上から、電磁鋼板のレーザ切断面は溶融 Cu に対する濡れ性を有し、適切な幅のスリットであれば Cu または Cu 合金の溶浸が可能と予想される。

3.2 予備検討：Cu 線と CuSi 線のレーザ溶融条件

Cu 系材料は一般にレーザ加熱による溶融が困難である。そこでまず、レーザ出力を 1.0~4.0 kW に大きく変えて、各線材の溶融状態を調査した。脱脂した厚さ 2 mm の市販軟鋼板の上に純 Cu 線および CuSi 線の両端をバイスで固定し、線径の中心をねらってスポット径 φ0.2 mm のビームを速度 3000 mm/min. で走査した。

Table 1 は目視により各非磁性線材の溶融状態を 3 段階に分類したものである。純 Cu 線はレーザ出力 2.0 kW 以下の時、照射によって振れ動き、ほとんど溶融しなかった。一方、CuSi 線はすべての出力で溶融が認められたが、2.0 kW 以上では軟鋼板表面に溶け拡がり、過剰に溶着した。

純 Cu 線のレーザ照射時の振れ動きは表面の反射によるものと推定し、研磨紙で粗面化したところ、2.0 kW 以上

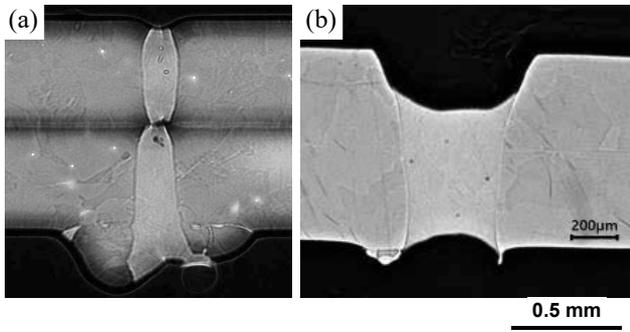


Fig. 4 Pure Cu wire melt and infiltrated into the slit of steel sheet. (a) Slit width 0.2 mm, (b) slit width 0.8 mm.

Table 1 Melting morphology of non-magnetic wires onto 2 mm-thick steel sheet. Yes: only wire melt, No: no melt, Excess: wire melt and severely fused with steel sheet.

Material	Laser Power, kW	Melting
Pure Cu wire as received (diameter 1.0mm)	2.0	No
Pure Cu wire with roughened surface (diameter 1.0mm)	1.0	No
	1.5	No
	2.0	Yes
CuSi wire (diameter 1.2mm)	1.0	Yes
	1.5	Yes
	2.0	Excess
	3.0	Excess

で溶融することがわかった。そこで以下では、粗面化した純 Cu 線 (以下 Cu 粗線) をレーザ出力 2.0~4.0 kW, CuSi 線を 1.0~2.0 kW で溶融させ、電磁鋼板 (スリット幅 0.2 mm) への溶浸状態を比較検証した。

3.3 レーザによる Cu 非磁性層の溶浸

Fig. 5 は、レーザ出力を変えて Cu 粗線を溶浸した時の断面組織を比較したものである。2 kW では溶融した Cu が盛り上がり、2 枚めの鋼板まで十分に浸入していない。炉加熱とは異なり、レーザ加熱の範囲が Cu 線周辺に限られ、極めて短時間で冷却されるため溶浸初期に凝固した結果と思われる。

より問題となるのは、高出力の影響によりスリットの上側エッジが溶融して消失している点であり、改質部に Fe が溶出したことが明らかである。Cu との界面には、Fe の外方拡散を示すカーケンダルポイドが多数認められ、界面の接合強さも不十分と予想される。

レーザ出力を 4.0 kW にすると溶融 Cu が鋼板 2 枚を貫通して充填したものの、両側の鋼板を各 0.5 mm 以上溶融させ、改質部が大きく拡大して通常の薄板溶接部のような形状になっている。中間の 3.0 kW 前後でも試行したが、充填不足と鋼板溶融を解消する条件は見いだせなかった。このように純 Cu は優れた非磁性材であるが、レーザでは溶融に高出力を要するため Fe 希釈が避けられず、本加工法による部分非磁性化には適さないことがわかった。

Fig. 6 は CuSi 線の場合であり、レーザ出力が 1.0 kW, 2.0 kW とともに Cu-Si 融液がスリット内に浸入して、2 枚分の厚さにほぼ充填した。ただし、低出力であるにも関わらず、1.0 kW の方が電磁鋼板の溶融消失量が大きく見える。

Cu と Fe は化学的に排他的な相互作用をもち、特に Si が添加された 3 元系では液相中でも分離するようになる⁷⁾。それぞれ下に溶浸流入口を拡大したマイクロ組織を示す通り、(a) 1.0 kW の改質層中には比較的大きな塊状 Fe リッチ相 (灰色) が確認される。この形状から Fe リッチ相は、溶融 Cu と分離した液滴が急冷されて生じたと考えられる。

対して (b) 2.0 kW では Fe リッチ相が微細になり、渦巻き状に分散している。液相分離する特殊な Cu 合金では同時多発的に生成した微小液滴の運動が観察されており⁸⁾、運動速度は液滴の表面張力と、溶融部の温度勾配に支配される⁷⁾。さらにレーザ加熱では溶融部が攪拌され、より高温で冷却速度が大きい場合、液滴は凝集しにくいと考えられる。本実験では出力が高いほど高温になるので、渦巻き

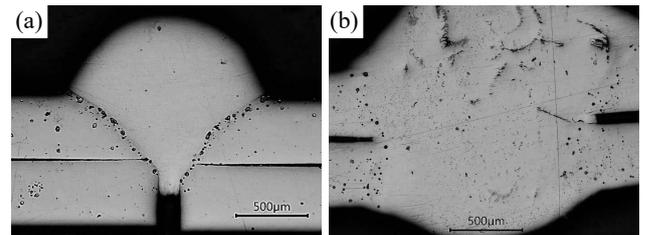


Fig. 5 Cross section of modified layer with laser infiltrated non-magnetic material using Cu roughened wire. (a) Laser power 2.0 kW, (b) laser power 4.0 kW.

状組織は上記の理由によると考えられるが、鋼板の溶融消失量が比較的小さい理由は不明である。

以上のように、積層された電磁鋼板に対し、低出力で Fe 希釈を抑えながら非磁性材を溶浸させるには、純 Cu よりも CuSi 線が適していた。Cu への Si 添加は濡れ性の向上に加え、波長 1064 nm でのレーザー吸収率が 2%Zr や 2%Cr 添加で大きく増加する⁹⁾ のと同様な効果があると推定できる。

3.4 改質部の Cu/Fe 濃度と減磁率

各溶浸材料・加工条件に対し、改質した電磁鋼板の磁束密度、ならびに改質部の Fe 希釈量を Table 2 に示す。未処理の鋼板単体での磁束密度の測定値は 62.2 mT であったので、これを基準に減磁率を算出し、100%-Fe 濃度を Cu 濃度と見なして両者の関係を Fig. 7 にまとめた。図より改質部の Cu 濃度が高いほど減磁率は線形的に増加することがわかる。本研究の範囲では、レーザー出力 2.0 kW で CuSi 線を溶浸させたとき、減磁率は最大で 64% となった。

3.5 ブルーレーザーでの低出力化

Fig. 8 に同じ 2 枚重ねの電磁鋼板スリット上で、ブルーレーザーを用いて純 Cu 線および CuSi 線をそれぞれできるだけ小さい出力で溶融させた時の溶浸状態を示す。(a) 純 Cu 線の 0.5 kW 溶浸では上側の鋼板のみの充填ながらスリット形状は保たれており、白枠部分の元素分布を見ると改質部はほぼ Cu のみからなっている。一方、(b) CuSi 線

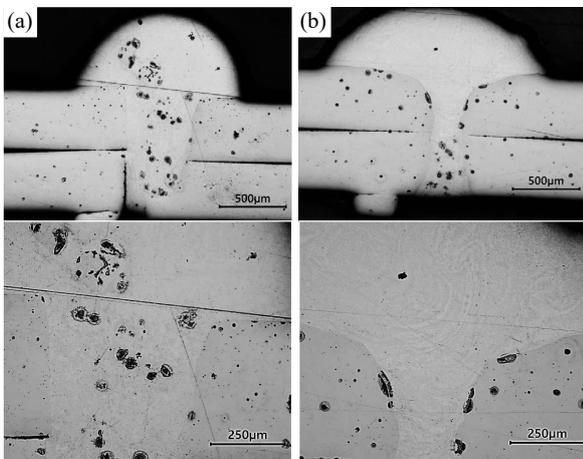


Fig. 6 Cross section of modified layer with laser infiltrated non-magnetic material using CuSi brazing wire. (a) Laser power 1.0 kW, (b) laser power 2.0 kW. Each magnified view below shows Fe-rich phase in the infiltration layer.

Table 2 Relationship between magnetic flux density and Fe dissolution in modified layers of electrical steel sheet.

Material	Laser Power, kW	B mT	X %	dissol. Fe mass%
-	-	62.2	0.0	100.0
CuSi wire	2.0	28.8	54	32.7
	3.0	46.9	25	57.4
	4.0	47.6	23	58.6
Pure Cu wire (Roughened)	1.0	31.1	50	42.2
	2.0	22.5	64	25.0

1.0 kW ではやや Fe が溶出しており、電磁鋼板との界面付近に Si が偏在していることがわかる。同様に分析すると、改質部中心付近の平均 Fe 濃度はいずれも 10% 以下であった。すなわち減磁率を低下させる電磁鋼板からの Fe 希釈は、短波長レーザーで出力を 1.0 kW 以下にして溶浸すればいっそう抑制できる可能性がある。

4. 考 察

4.1 改質部の透磁率

同じ 2 枚重ね電磁鋼板の切断面を突き合わせた隙間に純銅板を挿入して、模擬的に Cu 濃度 100% の改質部を設けた時の磁束密度は 23.1 mT であった。このように非磁性体で鋼板間をシールドしても、有限サイズの試料では空気中を回流する磁束が検出される。また純銅の透磁率は空気のものにほぼ等しい (1.3×10^6 H/m) ため、今回の測定方法では 20 mT 前後の磁束密度が常に存在すると考えられる。

したがって磁束密度 22.5 mT で減磁率が最大であった CuSi 改質材では、すでに純銅なみの透磁率に減少している

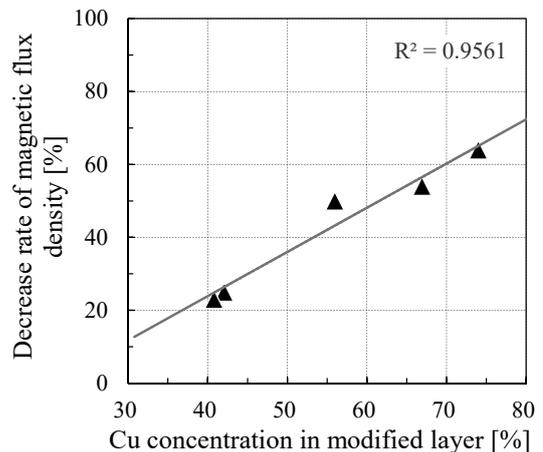


Fig. 7 Decrease rate of magnetic flux density before /after the modification by CuSi infiltration.

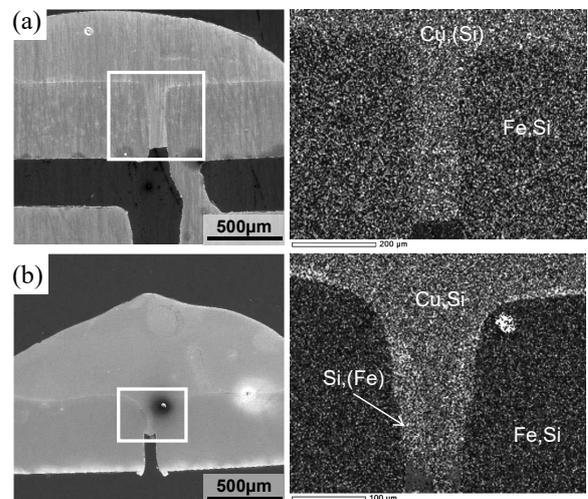


Fig. 8 Cross section of infiltration by blue laser irradiation (left) and component map of upper infiltrated section (right). (a) Cu roughened wire, Laser power 0.5 kW. (b) CuSi brazing wire, Laser power 0.75 kW.

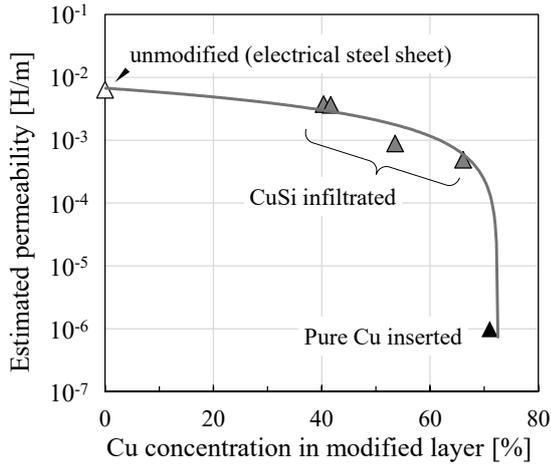


Fig. 9 Estimated permeability of the modified steel sheets.

ことになる。そこで電磁鋼板の透磁率を 6.3×10^3 H/m として、透磁率と磁束密度の線形性から各レーザー改質部の透磁率を推定し、Cu 濃度に対してプロットした結果を Fig. 9 に示す。これから改質部 Cu 濃度が増加するほど透磁率は低下し、約 70% 以上を維持するよう Fe 希釈を抑制して溶浸すれば電磁鋼板より一桁小さい透磁率が得られることがわかる。

約 30% の Fe 希釈量を許容しながら低透磁率化する理由として、互いの溶解度が小さい（溶解度ギャップが大きい）Cu-Fe 系溶融合金の熱力学的な相互作用によるメカニズムが考えられる。すなわち、Cu と Fe は液相状態でも Cu リッチ相と Fe リッチ相に分離しやすく、凝固に際して Cu 中の Fe 溶解度は極めて小さくなる。また電磁鋼板に添加された Si によって、この分離傾向はさらに顕著になることが知られており、Fig. 6 (a) の比較的大きな Fe リッチ相は液相分離により形成された可能性が高い。このため改質部のマトリックスとなる Cu リッチ相はほとんど Fe を含まない、純 Cu なみの非磁性体であり、多少の Fe リッチ相が点在していても有効に磁束を遮断すると考えられる。

4.2 ブルーレーザーの効果

しかしながら近赤外レーザーでは、Fe 希釈のない非磁性層を安定して形成することは困難であり、精密な部分非磁性化プロセスとして確立するためには短波長レーザーに置き換えての再検討が必要である。

今回は 1.0 kW 以下のブルーレーザーで、近赤外レーザー 2.0 kW よりも Fe 希釈を抑制することができた。ただし低出力のため、濡れ性の良い CuSi 線でも積層鋼板への充填厚さは充分でなく、浸入早期に凝固する結果となった。本来、清浄な金属面に対して溶融 Cu の濡れ性は高く、溶浸はごく短時間で完了するはずである。鋼板の予熱や低速度加工で冷却を遅らせれば、充填厚さは向上すると思われる。

また Fe 表面をいったん酸化させ、還元雰囲気中で溶融 Cu を接触させると、異常なまでに濡れ拡がることが知られている¹⁰⁾。レーザー溶浸においても、フラックス還元を利用すれば、酸化させた鋼板の切断面への高速溶浸が実現すると期待される。

5. 結 論

- (1) 窒素ガスでのレーザー切断により電磁鋼板に幅約 0.2～0.8 mm のスリットを作製した結果、切断面はほとんど酸化されず、溶融 Cu との濡れ性は良好であった。
- (2) レーザ照射で Cu 線または CuSi 線のスリットへ溶浸させることができたが、周辺の鋼板が一部溶融して、Fe が希釈した改質部となった。CuSi 線ではより低いレーザー出力で溶浸可能であり、2.0 kW の時 2 枚重ね電磁鋼板の厚さ方向に充填し、かつ最も Fe 希釈量が小さい改質部を作製できた。
- (3) 改質部の Fe 希釈量が小さいほど通過する磁束密度は減少し、上記 2.0 kW 溶浸材では未処理の電磁鋼板の磁束密度の 64% 減となった。これは空気なみの低透磁率に相当する。
- (4) ブルーレーザーを用いると、近赤外レーザーよりも Cu 線を低出力で溶融でき、Fe 希釈をさらに抑制できる。

参 考 文 献

- 1) Fujimura, H., Harayama, R., Wajima, K., Yamazaki, S.: Non-oriented Electrical Steel Sheet and Its Application Technology for Traction Motor of Hybrid/Electrical Vehicles, *Nihon Seiketsu Gihou*, **412**, (2019), 167. (in Japanese)
- 2) Takeuchi, K., Sugiura, S., Katayama, T., Inui, T., Sunagawa, J.: Development of Compact Magnetic Solenoid Valves Using a Composite Magnetic Material; *Materia Jpn.*, **36-4**, (1997), 358. (in Japanese)
- 3) Sugiyama, S., Takenouchi, S., Ishikawa, T., Nakanishi, K., Aoyama, F.: Effect of Temperature Increase during Plastic Deformation on Ferromagnetic Property of Composite Magnetic Material, *Denso Technical Review.*, **5-1**, (2000), 54. (in Japanese)
- 4) Tsukamoto, T., Asakawa, M., Sudoo, S., Kouso, M., Nakasato, M.: Development of Magnetic Scaling Rods with T.R.I.P and Laser Beam Technology for Mechanical and Electrical Use, *Materia Jpn.*, **33-4**, (1994), 435. (in Japanese)
- 5) Tsuchida, Y., Yoshino, N., Sato, T., Enokizono, M., Mori, Y., Yamasaki, K.: Reduction of Iron Loss on Laminated Ultrathin Electrical Steel Sheet Cores by Secondary Current Heating Method, *J. Jpn. Soc. Applied Electromagnetics.*, **26-1**, (2018), 212. (in Japanese)
- 6) Kohno, K., Maruyama, Y., Orii, Y.: Processing on Electric Steel Sheets by DUV Picosecond Laser, *Materia Jpn.*, **61-2**, (2022), 109. (in Japanese)
- 7) Wang, C.P., Liu, X.J., Onuma, I., Kainuma, R., Ishida, K.: Formation of Immiscible Alloy Powders with Egg-Type Microstructure, **297-5583**, (2002), 990.
- 8) Tanaka, K., Kato, H., Oshima, T.: Design of Laves-phase-packed Spheres in Wear-resistant Cu Alloy by Controlled Liquid Immiscibility, *Calphad*, **58**, (2017), 50.
- 9) Kuse, T., Maeda, S., Nagatomi, Y., Yanagitani, A.: Effects of Additive Elements on Molding of Cu Alloy in Metal Additive Manufacturing, *Sanyo Technical Report* **26-1**, (2019), 28. (in Japanese)
- 10) Takahira, N., Tanaka, T., Hara, S., Lee, J.: Unusual Wetting of Liquid Metals on Iron Substrate with Oxidized Surface in Reduced Atmosphere, *Mater. Trans.* **46**, (2005), 3008.