

〈一般研究課題〉 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

助成研究者 大同大学 田中 浩司



レーザー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
(大同大学)

Fundamental research on local non- magnetization of soft magnetic steel sheet by laser melting technique

Kouji Tanaka
(Daido University)

Abstract :

Ferrous soft magnetic materials are commonly used for electric facilities, and especially, electric sheet steel 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 a steel sheet needs to be controlled and flux leakage to be cut off. In this work a unique laser working technique combining cutting and melt-infiltration has been examined for local non-magnetization of a narrow flux path of sheet steel.

Two-ply 0.5mm-thick sheet steels were cut using defocused laser beam so as to make 0.2~0.8mm-wide slit. The cut surface exhibits metallic luster and little oxidation. Then Cu or Cu-Si wire was placed onto a slit and melted using 1.0~4.0kW laser beam. Due to a low laser absorptance of copper, more than 2.0kW-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 decreases linearly with decreasing the amount of Fe dissolution. With 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 sheet steel.

1. 緒言

一般住宅にはこれまでエレベーター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ー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での短絡など、磁気回路における漏れ磁束が発生すると効率が低下するので、磁石-ステータ間のブリッジ幅を小さくして磁束を制限する⁽¹⁾。さらには遮断したい部分を物理的に切断したり、樹脂フィルムを挿入したりするが、いずれも回転中の大きな遠心力に対してローター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、強磁性フェライト鋼の局部加熱によって部分的に非磁性化する方法^(2,3)が実用化されているが、モータ用の1mm以下の薄鋼板では微細な加熱部の制御が困難であり、有効な改質手段が見出されていない。

このような精密加熱にはレーザが最も適しており、薄板であれば積層した状態での切断や溶接が可能である。そこで2段階のレーザ加工技術を駆使して、薄鋼板にスリットを設けたのち銅(Cu)またはCu合金を浸入させ、通過する磁束を著しく低下させる工法を考案した。そこで本報告では、基礎研究として電磁鋼板(Fe-Si合金)のレーザ切断面の適否、ファイバレーザによるCuの溶融可否、そして溶融Cu液相が切断スリット内を充填する挙動を明らかにすることを目的とした。特にCuとFeとの排他的な冶金反応により、鋼板からのFe希釈を抑えたCu層が挿入でき、非磁性層として複雑微細なルートで磁束を遮断すると期待される。

2. 試料および実験方法

用いた軟磁性材料は無方向性電磁鋼板(日本製鉄製 100×50×厚さ0.5mm)であり、約3%のSiを含む。各2枚を重ねて厚さ1.0mmとし、コア径0.15mmのYbファイバレーザで出力0.8~2.0kW、速度700mm/分で長さ30mmの直線スリットを切断加工した。加工装置の近接写真を図1に示す。アシストガスには圧力1.0MPaの窒素ガスを用いた。デフォーカスによりビーム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0.2,0.5,0.8mmの3種類とした。

上記のうち、実測幅0.2mmのスリット上に純Cu線(ϕ 1mm)またはCu-3%Siろう材線(ϕ 1.2mm, 以下CuSi線)を設置し、出力を最大4.0kWに高めた同レーザを照射して溶融させスリット内への浸入を試みた。

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、走査型電子顕微鏡(SEM)により溶浸状態を観察した。改質部の透磁率への影響を鑑み、周囲の鋼板が溶融して混入するFe濃度をEDS検出器にて分析し、スリット幅の中心付近5点の平均を改質部のFe希釈量とした。

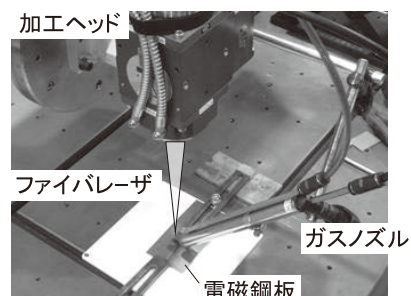


図1 レーザ加工の様子

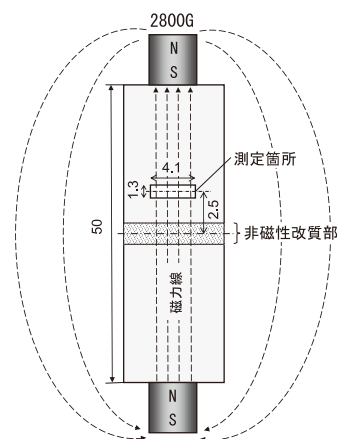


図2 改質部の磁束密度測定方法

改質部を中央にして電磁鋼板を50×10mmでワイヤカットにより切り出し、図2に示す方法で非磁性化の効果を評価した。2800Gsの市販ネオジウム磁石を上下に取り付け、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 を測定した。これから減磁率 X を以下の式で定義して比較評価した。

$$X = \frac{B_{\text{未処理}} - B_{\text{改質後}}}{B_{\text{改質後}}}$$

3. 実験結果

3.1 レーザ切断を応用したスリット加工

図3に、2枚重ねの電磁鋼板に作製したスリットの切断面を光学顕微鏡で観察した結果を示す。低出力(0.8W)で幅の小さいスリットの(a)では、レーザ照射方向にそった溝状の凹凸が見られ、融液の一部が除去しきれずにバリとなっている。バリは黒く酸化しているが、切断面そのものは金属光沢があり、厚い酸化皮膜など濡れ性を低下させる要因は認められない。高出力(2.0kW)で幅が大きい(b)ではバリはなく、やはりほとんど表面酸化がない状態であった。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黒くなったが、切断面の光沢には顕著な変化がなかった。

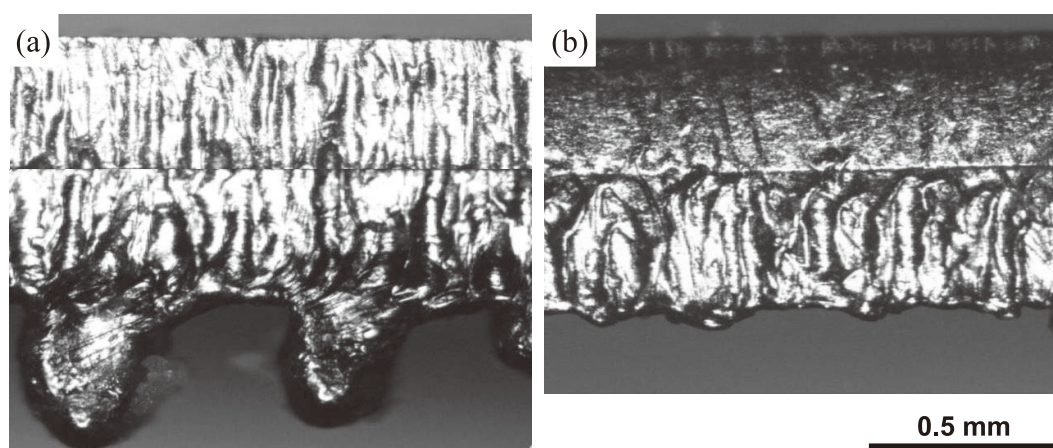


図3 電磁鋼板のスリット切断面
 (a) レーザ出力 0.8 kW, ビームスポット径 0.15 mm
 (b) レーザ出力 2.0 kW, ビームスポット径 1.0 mm

図4は幅0.2mmと0.8mmのスリット上にCu線を設置し、 N_2 雰囲気中1100℃で10分加熱した後に断面組織を観察したものである。0.2mmスリットでは溶融したCuがスリット内に浸入し、約1mm厚さの全体を埋めている。一方、幅の広い0.8mmでは溶融Cuがやや下垂した状態である。したがって耐酸化性元素であるSiを含む電磁鋼板では、レーザ切断による表面酸化の程度は小さく、スリット内へ溶融金属が浸入するための濡れ性は維持されると期待される。

3.2 レーザによるCuの溶融条件

工業的に広く用いられている波長1070nm付近の近赤外レーザは、純銅への吸収率が低いことが知られている。予備実験として、厚さ2mmの鉄板上でCu線およびCuSi線にレーザ照射し、鉄板へ

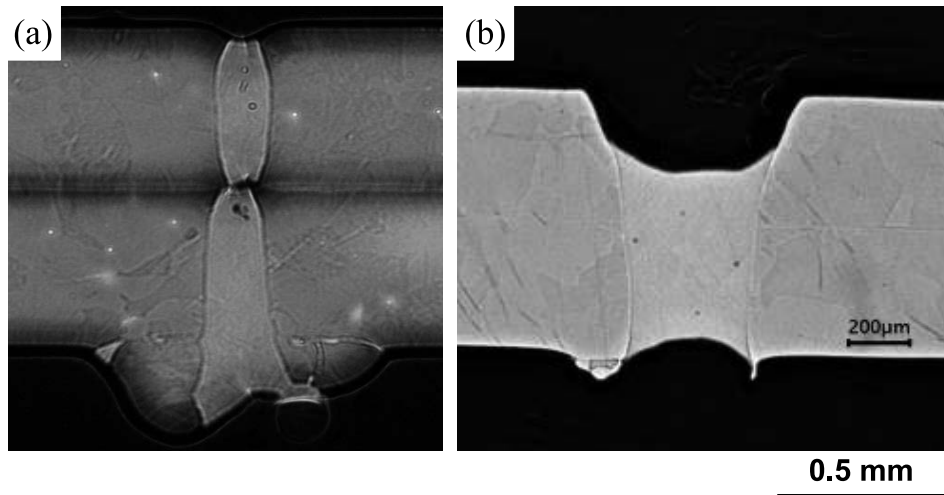


図4 炉加熱により電磁鋼板のスリット内に溶浸したCu融液
(a) スリット幅 0.23 mm, (b) スリット幅 0.86 mm

の溶着を試みた。CuSi線は1.0kW以上で溶着したが、Cu線は2.0kWでもほとんど溶融しなかった。吸収率を上げるためCu線表面を研磨紙で粗面化した結果、2.0kWで溶融することが分かったが、周辺の鉄板も加熱・変色して熱影響が大きかった。そこで以下では、スリット幅0.2mm、非磁性材料としてCuSi線を1.0～2.0kW、粗面化したCu線(以下Cu粗線)を2.0～4.0kWで電磁鋼板スリットへ溶浸させ、非磁性化の効果に対する溶浸状態の影響を検証した。

3.3 レーザによるCu非磁性層の溶浸

図5(a), (b)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。(a)2kWでは溶融したCuが盛り上がり、スリット内の2枚分の厚さまで十分に浸入していない。また電磁鋼板の上側の両エッジが溶融して消失しており、改質部はFeによる希釈が起こっていると予想される。さらに浸入したCuと鋼板との界面において、鋼板側にカーケンダルポイドと思われる空孔が多数認められ、接合強さの面でも適切でないと考えられる。(b)4.0kWでは鋼板2枚を貫通して溶融したものの、両側の鋼板をそれぞれ幅0.5mm以上溶融させ、改質部全体が溝鋼板の溶接組織のようにになっている。このように純銅は優れた非磁性材であるがレーザ溶浸に高出力を要し、周囲の電磁鋼板をともに溶融させるため、本法による部分非磁性化には適さないことが分かった。

一方、図5(c),(d)はCuSi線の場合であり、1.0kW、2.0kWともにCu-Si融液がスリット内に浸入してほぼ充填した。ただし1.0kWの方が低出力であるにも関わらず、電磁鋼板の溶融消失量が大きく見える。図中の拡大図を見ると、改質部に比較的大きなFeリッチ相(灰色)が確認されることから、電磁鋼板の溶融量が大きかったのはレーザ照射位置のずれが一因と考えられる。対して2.0kWの(d)ではごく微細なFeリッチ相が渦巻き状に分散している。CuSi線はろう材であり、含有するSiやMnによる優れた濡れ性と、純銅よりも高いレーザ吸収率が予想される。このため積層した鋼板の厚さ方向に、低出力でFe希釈を抑えつつ非磁性層として溶浸させるに適した材料であると言える。

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希釈量を表1

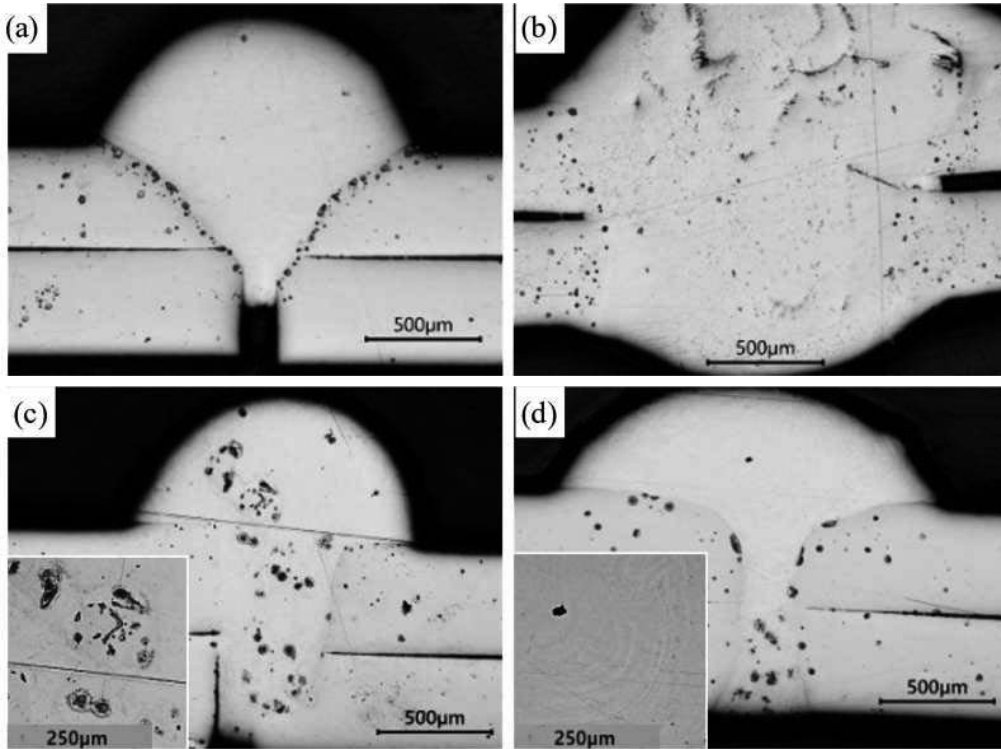


図5 電磁鋼板に非磁性層をレーザー溶浸させた改質部の断面組織
 (a) Cu粗線, レーザ出力 2.0 kW, (b) Cu粗線, レーザ出力 4.0 kW
 (c) CuSi線, レーザ出力 1.0 kW, (d) CuSi線, レーザ出力 2.0 kW

に示す。未処理の鋼板単体での磁束密度の測定値は62.2mT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図6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分かる。本研究の範囲では、レーザー出力2.0kWでCuSi線を溶浸させたとき、減磁率は最大で64%となった。

表1 改質した電磁鋼板の磁束密度とFe希釈量の関係

溶浸材料	レーザー出力 kW	磁束密度 mT	減磁率 %	Fe希釈量 mass%	Cu濃度 mass%
CuSi線 φ1.2	改質なし	62.2	0.0	100.0	0.0
	2.0	28.8	54	32.7	66.1
	3.0	46.9	25	57.4	41.7
	4.0	47.6	23	58.6	40.3
Cu粗線 φ1.0	1.0	31.1	50	42.2	53.6
	2.0	22.5	64	25.0	71.1

3.5 改質部の透磁率に関する考察

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23.1mT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气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20mT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22.5mT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図7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分かる。

約30%のFe希釈量を許容して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、図4(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ものと考察している。

一方、レーザー吸収率の低さにより、常に安定したCuの溶浸状態を実現することは困難であり、本コンセプトを精密な部分非磁性化プロセスとして確立するためには、より吸収率の高い短波長レーザーに置き換えての再検討が必要である。

4. 結 言

- (1) N₂アシストガスでのレーザー切断により電磁鋼板に幅約0.2~0.8mm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線を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、2.0kWの時2枚重ね電磁鋼板の厚さの方向に充填し、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2.0kW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。

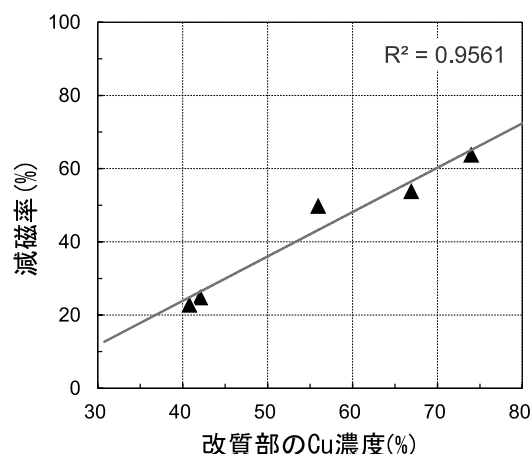


図6 改質部のCu濃度と減磁率の関係

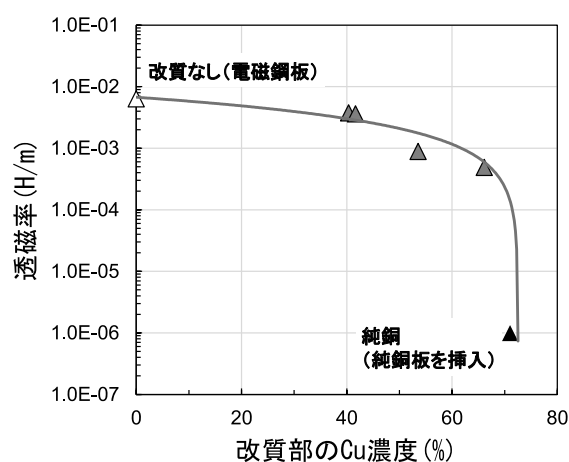


図7 改質部Cu濃度と推定透磁率の関係

参考文献

- (1) 藤村浩志, 平山 隆, 和嶋 潔, 山崎修一: 日本製鉄技報, 第412号(2019), pp167.
- (2) 塚本 孝, 浅川基男, 須藤忠三, 高祖正志, 中里雅一: まてりあ, 第33卷(1994), 第4号, pp358.
- (3) 竹内桂三, 杉浦慎也, 片山義唯, 乾 勉, 砂川 淳: まてりあ, 第36卷(1997), 第4号, pp358.