

指向性エネルギー堆積法における磁性材料の金属相変化に関する基礎的研究

慶應義塾大学理工学部 システムデザイン工学科 小池綾研究室 所属 ○田中あんの, ◎小池綾

要旨

金属積層造形の一つである指向性エネルギー堆積法 (DED) は、造形点ごとにレーザー出力などの入熱条件を調整することで、造形物内で金属相を調整できる。本研究では、DED による工具鋼の積層時に入熱量を調整することで、磁性を決定づける金属相変化であるオーステナイト・フェライト比率の変化を評価した。X 線回折による解析結果から、レーザー強度を高めると造形物内のフェライトの比率が最大で3倍増加できることを示した。

1. 緒論

磁性体を含む多くの製品は部品点数が多く、生産コストや作製時間の削減のために、一体造形による工程集約の需要が高い。この解決策の一つとして、近年急激に普及している Additive Manufacturing が注目されている。従来の造形法より形状自由度が高くコスト低減でき、さらに一体部品に対して、一部磁性体を含んだ製品そのものを直接造形できるため、産業的価値が高い^[1]。その一方式である指向性エネルギー堆積法(DED)は、Fig. 1 のように、金属粉末をノズルから供給すると同時にレーザーにより造形点で熔融・凝固させることで積層造形を行う手法である^[2]。また、磁性材料として主に用いられている鉄基合金は、加熱や冷却の程度によって金属相が変化し、フェライト相は磁性を持ち、オーステナイト相は非磁性であることが知られている。DED はレーザーの出力や送り速度を調整して加熱・冷却速度を変化させられるため、これらの組織を任意にフェライト化して一体造形部品の一部のみを磁化できると考えられる。そこで本研究では、レーザー強度などの積層条件を変化させ、造形物の金属相や透磁率を評価することで、DED による磁気製品の一体造形への応用可能性を評価した。

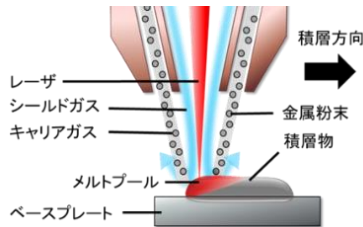


Fig. 1 指向性エネルギー堆積法

2. 実験方法

工具鋼(FeCrCoMo 合金, ロックウェル硬さ 44) の粉末を用いて、入熱条件の違いによる結晶組織の変化を評価した。送り速度を 1000 mm/min に固定してレーザー強度を 1000, 1400, 1600, 2000 W, 更により多くの熱エネルギーを与えるために、2000 W では送り速度を 1000, 667, 500 mm/min と低下させ、計六種類の 50 層の薄い壁状の造形物を作製した。造形物の壁面を削り出し、研磨した面に対して X 線回折法(XRD) と電子線後方散乱回折(EBSD)を用いて結晶組織を評価した。また、800, 1200 W で積層した造形物を追加して、超電導量子干渉計を用いて透磁率を評価した。作製した試験片の外観を Fig. 2 に示す。また、造形中の温度変化をサーモグラフィで測定することで、これらと温度との関係性を評価した。

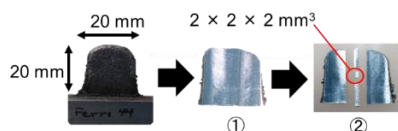


Fig. 2 作製した造形物と試験片の作製

3. 積層条件の違いによる結晶構造の評価

図 3 に入熱量が異なる積層物の XRD の結果を示す。造形物の金属組織は、レーザー強度が低いほど造形物内のオーステナイトの比率が高まり、レーザー強度が高いほどフェライトの比率が高まる傾向がある。また、ピークの強度からフェライト相の量を比較すると、レーザー強度が 1400 W と 2000 W (500 mm/min) の時で、フェライト量は 3.31 倍増加した。また Fig. 4 に示すように、EBSD 解析でもフェライトの増加を確認でき、XRD 結果と整合性が取れた。

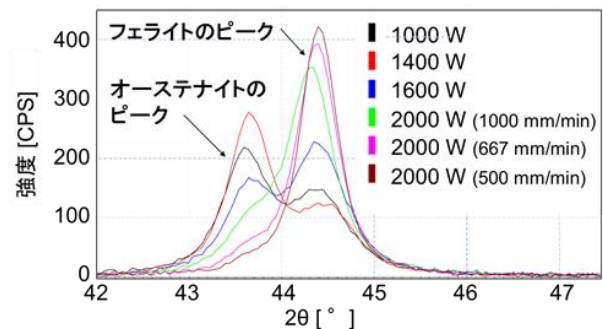


Fig. 3 入熱量が異なる造形物の XRD 結果

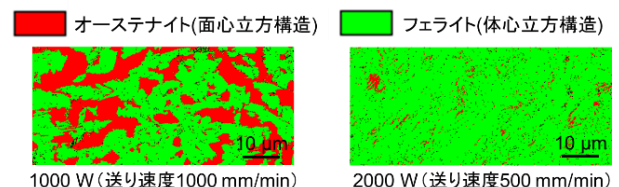


Fig. 4 EBSD による相分布図

こうした積層条件の違いによる変化は、積層中の温度変化の違いが原因と考えられる。そこで、サーモグラフィを用いた温度測定を行った。Fig. 5 に積層中の造形物の温度状態を示す。造形物の中央である白枠の表面温度の時間変化を計測した結果が Fig. 6 である。例としてレーザー強度 1000 W で積層した場合の温度変化を示した。最高温度に到達した点が、測定点が積層されたときであり、その後上部の積層で再加熱が繰り返され、温度が周期的に変化しながら徐々に温度が低下した。本研究では、積層直後から 300 °C までの冷却速度を算出した。Fig. 7 にフェライト強度と冷却速度の関係を示す。冷却速度が速いほどフェライトが生成されることがわかる。すなわち入熱量を増加させると、磁性を持たないオーステナイトから磁性をもつフェライトへと変化したため、これにより磁性も向上したと予想できる。

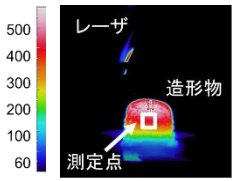


Fig. 5 積層中の様子

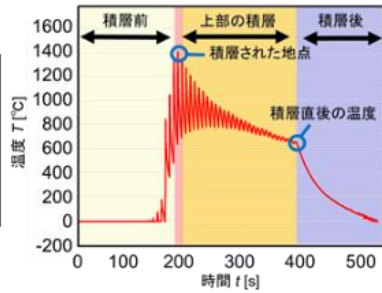


Fig. 6 造形物の中央部の温度変化 (レーザー出力 1000 W)

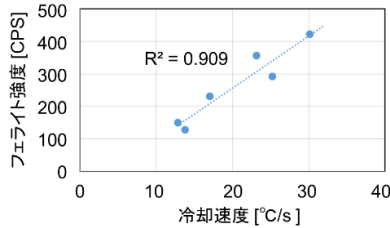


Fig. 7 フェライト強度と冷却速度の関係

4. 積層条件の違いによる透磁率の評価

Fig. 8 に入熱量が異なる積層物の透磁率を示す。透磁率はレーザー強度が 1200 W で最小になり、2000 W (送り速度 500 mm/min) はその 3.48 倍となった。これは、1200 W より弱いレーザー強度で積層すると、粉末に元から含まれていたフェライトが残留した、もしくはさらに冷却効率が高い場合に生じるマルテンサイト変態により透磁率が高まったと考えられる。Fig. 9 の透磁率とフェライト相の相関を評価すると決定係数が高く推測と一致した。さらに、Fig. 10 の冷却速度と透磁率の相関も高く、決定係数は $R^2 = 0.80$ である。この結果から、DED において入熱条件をプロセス中に調整することで、造形物の一部の磁気特性を任意に変化させられることを示した。

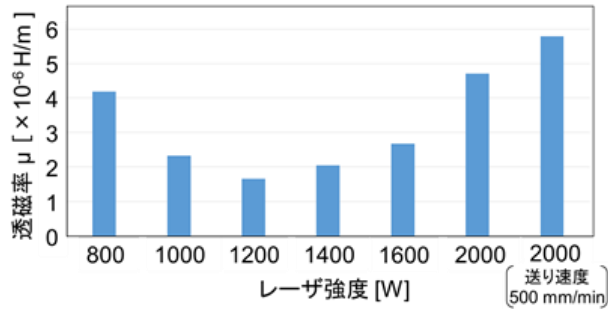


Fig. 8 積層条件の違いによる透磁率

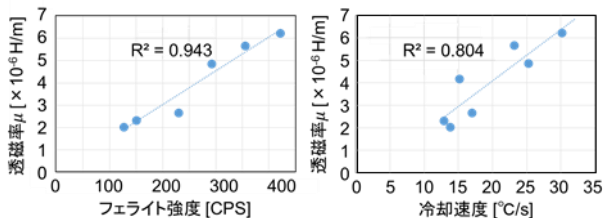


Fig. 9 透磁率とフェライト強度 Fig. 10 透磁率と冷却速度

5. 再溶融による磁性変化

レーザー出力と送り速度以外に金属相および透磁率を変化させる方法を検討する。ここでは、3 層ごとにレーザーのみを照射する再溶融を行った造形物を評価した。Fig. 11 に再溶融の有無を比較し

た造形物の透磁率を示す。これより、再溶融を行うと透磁率が上昇した。

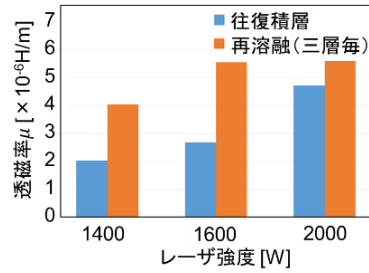


Fig. 11 再溶融による透磁率の変化

そこで、この再溶融を用いて一体造形の中で磁性を変化させる造形を試みた。このとき、フェライトの比率が磁性の強度と比例すると仮定し、XRD で評価を行った。積層は、1200 W で $90 \times 9 \times 6$ mm のブロック形状の造形物を作製し、3 層ごとに Fig. 12 に示す端から 15 mm の部分①のみをレーザー出力 2000 W を照射して再溶融を行った。その後、Fig. 12 に示すように 6 等分し、それぞれ X 線解析を行った。結果を Fig. 13 に示す。結果として 1200W のみの②～⑥に関してほとんどフェライトのみの造形物となった。これは積層が平らなブロック積層であるため、母材へと熱が移動できる面積が増え、全体的に冷却速度が高くなったことが原因と考えられる。また、再溶融部分に関して、レーザー強度を当てた①の部分のみオーステナイトが 2.25 倍増加し、一見今までと反する結果となった。しかし、①では最も冷却速度が遅くなっていることがわかり、このことから他の部分よりオーステナイトが多く生成されたと考えられる。



Fig. 12 作製したブロック造形物 (①のみ再溶融を行った)

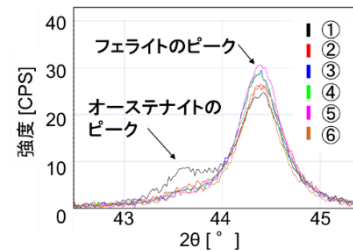


Fig. 13 ブロック積層の X 線回折の結果 (①: 再溶融)

6. 結論

本研究は、工具鋼用粉末を DED で作製した造形物は、入熱量の差異によって金属組織を変化できることを示した。また、冷却速度と透磁率にも相関性がみられ、DED で造形物の磁性を変化させられることを示した。本研究における積層条件中で、最大でフェライトが 3.3 倍、透磁率が 3.5 倍増加した。

7. 参考文献

[1] E.A.Pérido, J.Jacimovic, F.García Ferré, L.M.Scherf, "Additive manufacturing of magnetic materials", Additive Manufacturing, Vol.30, 2019.12, 100870.
 [2] 桐原 慎也, "新たなものづくり 3D プリント活用最前線—基盤技術, 次世代型開発から産業分野別導入事例, 促進の取組みまで", Vol.1, 2015.12, pp.11-19.