

指向性エネルギー堆積法による軟磁性材料造形の基礎的研究

慶應義塾大学理工学部 システムデザイン工学科 ○金丸聡真, ◎小池 綾

要 旨

省資源かつ一体造形ができる付加製造技術は、複雑形状部品製造のコストと時間を大幅に削減できる。本研究は金属を用いた付加製造の一つである指向性エネルギー堆積法を用いて、モータの磁芯などに広く利用される軟磁性材料 FeSi 、 FeCoV の造形条件と磁性の評価を行った。目標形状に近い形状を得るための造形条件を同定し、 FeCoV 造形物のみ、レーザー出力が増加するにつれ低い保磁力を得ることを確認した。

1. 諸論

磁性材料は、モータや変圧器など、さまざまな分野で用いられる機能性材料で、電気自動車などの発達に伴い、その需要は増加傾向にある。その中でも軟磁性材料は低い保磁力、高い飽和磁化、高い透磁率を必要とし、モータの磁芯やセンサに用いられるなど、多くの応用可能性がある。しかし、軟磁性材料を用いるモータやセンサは部品点数が多く、作製工程が複雑化しやすいことや、切削による切りくずが発生することが課題となっている。その解決策の一つとして、省資源かつ一体造形ができる Additive Manufacturing (AM) が挙げられる。軟磁性材料を AM で造形することで、製造のコスト削減と時間短縮に貢献できると考えられる。指向性エネルギー堆積法 (DED) は、図 1 に示すように金属粉末をノズルから供給し、レーザーで溶融・凝固させる AM である^[1]。本研究では、最終目標をモータの一体造形、さらにはモータ冷却用の内部管を有する複雑な内部構造の作製とし、モータの磁芯に用いられる電磁鋼板用の軟磁性材料である FeSi 、 FeCoV を用いた DED での造形物の安定造形条件と磁性の評価を行う。さらに、造形物へ熱処理を行い、磁性と結晶組織への影響を評価する。

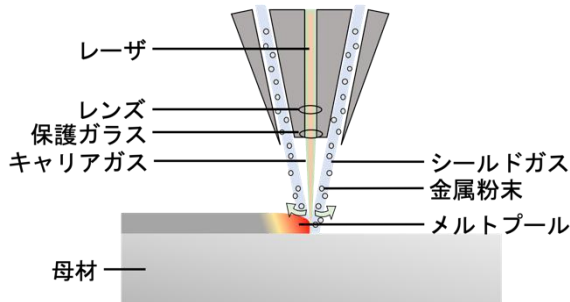


図 1. 指向性エネルギー堆積法

2. 実験方法

電磁鋼板に多く用いられる FeSi 及び、高い軟磁性特性を持つ FeCoV 粉末を用いて、レーザー出力、送り速度に対する造形物の形状と空孔率を確認した。図 2 に示される 50 積層の薄壁を造形し、目標高さである 20 mm の造形が可能な条件を同定した。これらの条件をもとに造形した軟磁性材料の断面について、残存空孔とエッチング処理を行った造形物の結晶構造をデジタル顕微鏡で観察し、元素分布を X 線回折装置 (XRD) 及び操作電子顕微鏡に搭載されたエネルギー分散型 X 線分析装置 (SEM-EDX) を用いて測定した。さらに、レーザー出力と磁性の関係を調べるために、レーザー出力を FeSi では 1200, 1400, 1600, 1800, 2000 W, FeCoV では 1000,

1200, 1400, 1600 W で薄壁を造形した。造形物は計測のために切断・研磨し、磁性を磁気特性測定システム (MPMS) で測定した。また、さらに、DED 装置内のレーザーを造形物に照射して熱処理を行い、磁性の測定を行った。

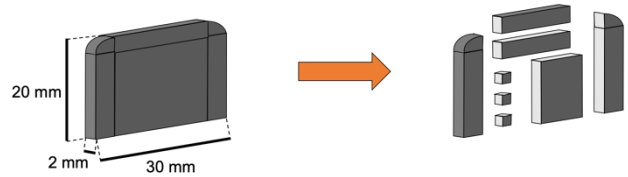


図 2. 薄壁造形物の概要

3. 造形物の基礎的特性

目標高さである 20 mm を正確に造形するためのパラメータの同定を行った。スクリーニング試験を行い、薄壁の造形を行ったところ、造形高さはレーザー照射時間の時間である Dwell 時間と粉末供給量に大きく依存することが確認された。よって、Dwell と粉末供給量を各材料に対して固定して、レーザー出力を変更することで、入熱量を変えて磁性との相関を調べた。レーザー出力以外のパラメータを表 1 に示す。

表 1. 目標形状の造形パラメータ

パラメータ	単位	FeSi	FeCoV
送り速度	mm/min	900	900
Dwell 時間	s	8	8
粉末供給量	g/min	14.4	12.7
キャリアガス速度	l/min	5	5

また、 FeCoV 造形物の空孔率を測定した。DED で造形した FeCoV の空孔率は 0.2% 以下と低い値を示した。 FeSi 造形物は、研磨時に表面が変色をし、空孔領域を識別できなかったことから、空孔率の測定ができなかった。

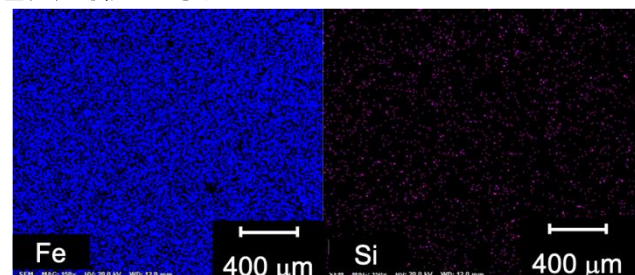


図 3. FeSi の元素分布

それぞれの造形物の組成を確認した。FeSi 造形物の外側は酸化鉄(III)と四酸化三鉄の混合物と推測される組成を示した。また、図3のように、FeSi 造形物をSEM-EDXで元素分布を観察したところ、Fe, Siの分布に偏りは確認されなかった。

図4のように、研磨とエッチングされたFeSi 造形物の側面をデジタル顕微鏡で観察したところ、積層方向への結晶粒成長が見られた。DEDで造形したFeCoVは積層方向への結晶異方性があると考えられる。

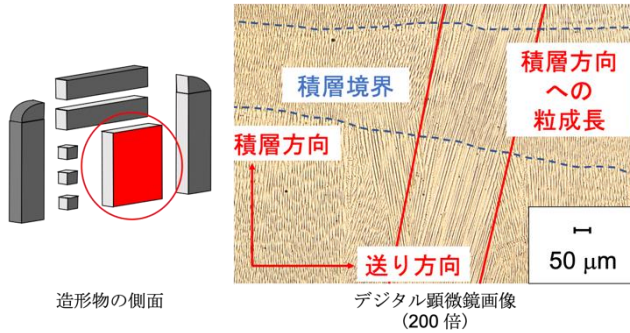


図4. FeSi 造形物における結晶粒の成長方向

4. レーザ出力と磁性の関係

MPMSを用いて造形物の磁性を測定した。FeSi 造形物について、レーザー出力の違いに対して保磁力の差は見られなかった。異なるレーザー出力で造形したFeCoV 造形物のヒステリシス曲線を図5に、磁性特性の数値を表2に示した。図5および表2のように、レーザー出力が一番高い1600 Wの試料は98.8 A/mという低い保磁力を示した。

表2. FeCoV 造形物のレーザー出力と磁性の関係

	レーザー出力 [W]			
	1000	1200	1400	1600
飽和磁化 [T]	2.33	2.36	2.27	2.32
保磁力 [A/m]	343	477	515	98.8

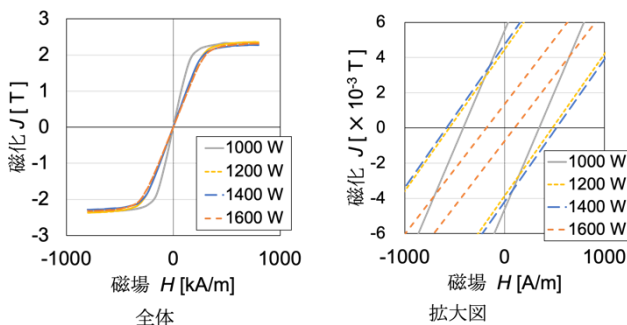


図5. FeCoV 造形物のレーザー出力と磁性

5. 熱処理の影響

従来の軟磁性材料製造では、作製後に残留応力を低減させるために焼きなましを行う^[2]。本研究でも、DEDで作製した造形物をチューブ炉にて焼きなましを行い、そのヒステリシス曲線を図6にまとめた。金属結晶の再結晶化が起こる1100℃での高温焼きなましを4時間行ったことで、FeCoV 造形物は一番小さい保磁力を示した。保磁力の低下はさらに、別の熱処理方法として金属積層造形装置内で造形物にレーザーを照射することで造形物を再溶融

させ、熱処理までを1装置で完結させることを試みた。それぞれの造形物のヒステリシス曲線拡大図を図7に示した。造形後に50回レーザー照射したFeSi 造形物は保磁力に差はなかったが、透磁率は増加したと考えられる。また、FeCoV 造形物はレーザー照射を150回行った試料は保磁力の低下が見られた。しかし、再溶融処理を行ったFeCoV 造形物には、冷却時の熱収縮が原因と思われるクラックが生じた。

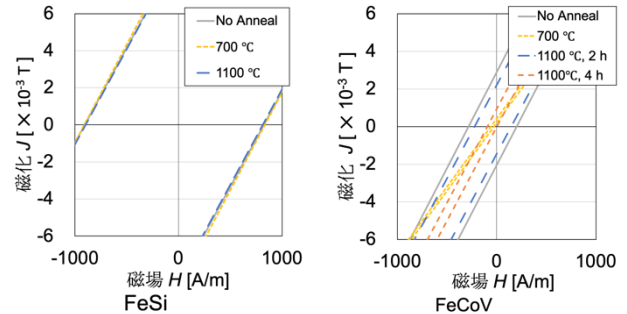


図6. 焼きなまし処理造形物の磁性

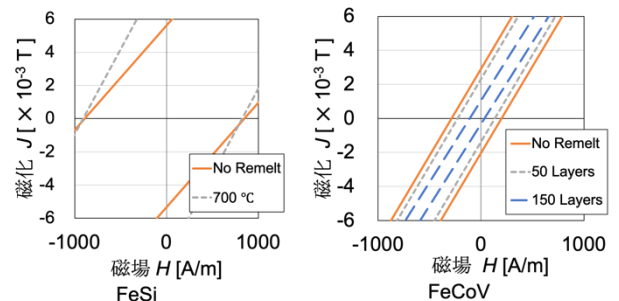


図7. DED 装置内熱処理造形物の磁性

6. 結論

本研究ではFeSi及びFeCoVの軟磁性材料をDEDで造形し、造形高さを確保できる適切な造形条件を同定し、レーザー出力と磁性の相関性を評価した。さらに、造形した軟磁性材料に熱処理を加え、磁性への影響を調べた。得られた知見を以下にまとめる。

- DEDにおいて造形形状に大きく寄与するパラメタはDwell時間と粉末供給量であり、これらを調整することでFeSiを安定的に目標形状どおりに造形を行えるパラメタを同定できる。
- FeSi 造形物の結晶粒は、積層方向に成長していることを確認した。
- FeCoV 造形物は、レーザー出力を上げることで保磁力を100 A/m以下に抑えられることが示された。
- チューブ炉による熱処理として、造形物に1100℃で4時間焼きなましを行った時に、低い保磁力を示した。
- DED装置内で行ったレーザー熱処理はFeCoV 造形物の磁性特性の向上に寄与することを確認したが、造形物内にクラックが生じた。

7. 参考文献

- 桐原慎也, 新野俊樹, “付加製造技術に関わる定義と各種工法”. 「新たなものづくり」3Dプリンタ活用最前線, 新日本印刷株式会社, 初版, 東京, 株式会社エヌ・ティー・エス, p. 11-18, (2015).
- 佐々木堂, 磁性材料の熱処理, 精密機械, Vol. 46, No. 10, p. 71-76, (1980).