

材料押出(MEX)方式による純銅積層造形部品の 焼結変形抑制と材料特性に関する研究

山田 泰希*¹ 佐藤 惇*¹ 竹下 朋春*¹

Study on Sintering Deformation Control and Material Properties of Pure Copper Parts Fabricated by Material Extrusion (MEX) Method

Taiki Yamada, Atsushi Sato and Tomoharu Takeshita

材料押出法(MEX)は純銅積層造形(AM)の低コストかつ安全な手法として期待されているが、焼結時の大きな体積収縮に伴う変形が寸法精度上の課題となっている。本研究では、高周波焼入れコイル等の部分形状を模擬した「C字型試験片」に着目し、特有の開口変形に対するサポート構造の抑制効果を検証した。結果として、開口部に1 mm角の微小サポートを付与することで、自然な体積収縮を阻害せずに変形を抑制できることが判明した。更に、相対密度92.8 %、電気伝導率96.3 %IACSという高い材料特性を確認し、高精度・高機能な純銅部品造形に向けた実践的な設計指針を構築できた。

1 はじめに

近年、AI技術の発展や半導体需要の拡大に伴い、熱マネジメント部品として高い熱伝導性と電気伝導性を有する「純銅」の複雑形状部品(データセンタ用コールドプレートやヒートシンク等)に対するニーズが高まっている¹⁾。金属積層造形(AM)技術のうち、粉末床熔融結合法(PBF)や指向性エネルギー堆積法(DED)等のレーザ方式においては、純銅の光反射率の高さが課題であり²⁾、ブルーレーザや電子ビーム等の高額な専用装置が必要となる。これに対し、材料押出法(MEX)は、導入コストが安価かつ材料のハンドリングが容易であり、金属粉末の飛散による粉塵爆発や人体ばく露のリスクがなく、一般的な環境下で安全に造形できることから、純銅の新たな造形プロセスとして大きな注目を集めている。

MEX方式は、金属粉末を流動性物質(バインダー)と混練後、射出成形・脱脂焼結によって高精度複雑形状の三次元製品を製造する、金属粉末射出成形(MIM)の技術が応用される。図1に示す通り、造形後に脱脂・焼結工程が必須であり、焼結工程において寸法収縮が発生することが固有の制約となっている。

特に、本手法を用いて純銅製の高周波焼入れ用コイル等を造形する場合は、三次元的な内部冷却水路の一体形成や、ろう付けの工程の削減というメリットを享受できる。一方で、造形検証を進める中で、1ターン

コイルを模擬したC字型形状を焼結する際に特有の現象として「スリット開口部が外側に大きく広がる変形」が生じることが明らかとなった(図2)。この開口変形は、実用部品に求められる寸法精度を達成する上で解決すべき重大な課題である。本研究では、このC字型スリット部の変形に対し、最適なサポート構造の付与による抑制効果を検証するとともに、焼結体の密度や電気伝導率をはじめとする材料特性を総合的に評価し、実用化に向けた知見を得ることを目的とする。

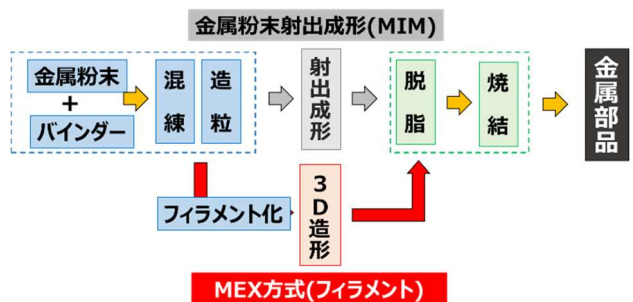


図1 MIMとMEXの工程

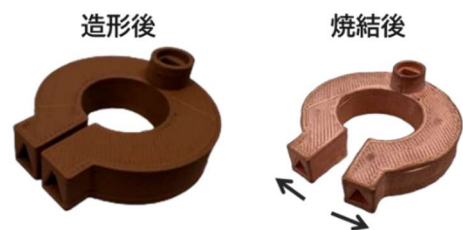


図2 焼結時の変形例

*1 機械電子研究所

2 研究、実験方法

本実験では、純銅MEX造形時の開口変形対策として、図3に示す通り、スリット開口部を連結するサポート構造の寸法を変化させた3パターンのC字型試験片（外径40 mm，内径30 mm）を設計した。サポートの設計寸法は以下の通りである。

- (a)C字型①（拘束なし）：開口部のサポート構造無し
- (b)C字型②（面方向の拘束）：開口部に幅5 mm，厚み0.5 mmの薄板状サポートを付与
- (c)C字型③（点の拘束）：開口部に幅1 mm，厚み1 mmの細線状サポートを付与

これらの試験片を純銅フィラメントを用いて造形し、窒素雰囲気下における加熱脱脂，および真空中における高温焼結処理を，規定の温度プロファイルに従って行った。焼結完了後の試験片は，3Dデジタイザを用いてスリットの開口幅，および内径の寸法を測定した。

また，電気特性等の材料物性を評価するため，アルキメデス法を用いた密度測定を実施した。更に，焼結後のC字型試験片に対して全面研磨を施し，表面の凹凸や酸化膜を除去した上で，抵抗値測定を実施した。得られた寸法データと抵抗値から電気伝導率（%IACS）を算出し，理論値および先行研究のデータと比較検討した。

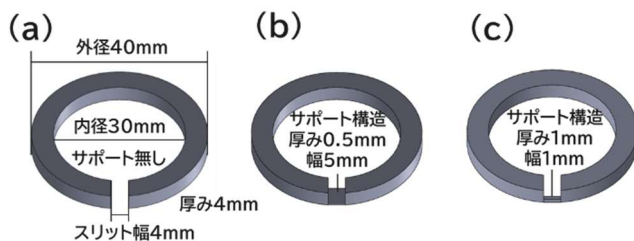


図3 設計したC字型試験片

(a)C字型① (b)C字型② (c)C字型③

3 結果と考察

3-1 サポート構造によるC字型試験片の変形抑制効果

各パターンのC字型純銅試験片における脱脂・焼結後の写真を図4，寸法測定結果を表1に示す。なお，表中の狙いの寸法は，等方的な収縮率から算出したものである。

実験の結果，開口部に対する拘束の有無によって変形の挙動が大きく変化することが確認された。サポートを一切付与しない比較基準の「C字型①」では，内径および開口幅が狙いの寸法から大きくずれ，変形が

生じる結果となった。これは，焼結過程においてC字形形状特有の収縮応力が開口部を外側へ押し広げるように働いたためと考えられる。

一方で，開口部を繋ぐ形で幅5 mm・厚み0.5 mmの「C字型②」を付与すると，開口幅の差分が狙いの寸法に対して-0.17へと改善を見せた。更に，拘束面積を落とした幅1 mm・厚み1 mmの「C字型③」においては，内径差分-0.20 mm，開口幅差分-0.15 mmとなり，全ての測定項目が最も設計値に近い良好な結果を示した。これらの結果により，C字型特有の開口部が広がる変形を防ぐためには，部品全体の自然な体積収縮を阻害せず，かつ開口部の広がりのみを物理的に繋ぎ止めるサポート構造を採用することの有効性が確認された。

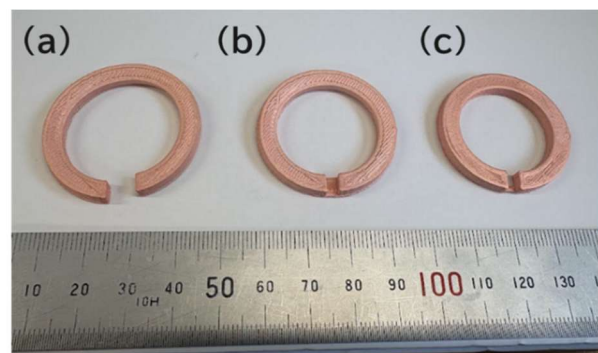


図4 脱脂焼結後の写真

(a)C字型① (b)C字型② (c)C字型③

表1 脱脂・焼結後の寸法測定結果

試験片条件	サポート寸法	内径 実測値 (差分) ※狙い24.6	開口幅 実測値 (差分) ※狙い3.28
C字型①	サポート無し	27.84 mm (+3.24)	6.76 mm (+3.48)
C字型②	幅5.0/ 厚み0.5 mm	25.66 mm (+1.06)	3.11 mm (-0.17)
C字型③	幅1.0/ 厚み1.0 mm	24.40 mm (-0.20)	3.13 mm (-0.15)

3-2 密度および電気伝導率の評価

実用的な熱マネジメント部品や電磁気部品としての性能を担保するため，アルキメデス法による密度測定および，全面研磨を施したC字型試験片を用いた電気特性の評価を行った。

本研究では，焼結体の相対密度の算出にあたり，無酸素銅（JIS C1020）の理論密度である 8.94 g/cm³ を基準値（100%）として用いた³⁾。アルキメデス法によって測定した結果，焼結体の相対密度は 0.928

(92.8 %)であった。更に、研磨後の試験片の寸法(厚さ2.7 mm, 断面積 12.259 mm², 有効端子間距離 87.84 mm)と、測定された抵抗値 $R = 0.1283 \text{ m}\Omega$ から体積抵抗率 ρ を算出した。その結果、体積抵抗率は $1.791 \text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm}$ となり、これを基に算出した電気伝導率は96.3 %IACSという良好な値を記録した。

一般に、多孔質体の電気伝導率は内部の空隙の影響を強く受け、相対密度に依存して低下する。本研究における相対密度0.928という数値は、バルク材と比較すると更なる高密度化の余地を残している。この密度に対して96.3 %IACSという高い導電率が算出された点については、測定に用いたC字形形状特有の要因を考慮する必要がある。本試験片における測定では電流が最短経路となる内径側を優先的に流れる「偏流」が生じやすく、平均直径から算出した端子間距離よりも実効的な電流経路が短くなる。そのため、得られた数値は形状依存の「見かけの電気伝導率」として高めに算出されている可能性が考えられる。

しかし、その形状要因を考慮しても本プロセスの焼結は良好な導電性を示しており、今後のプロセス最適化によりポロシティの低減が進めば、電気伝導率及び熱伝導率のさらなる特性向上が見込まれる。これは、先行研究⁴⁾における標準的なMEX造形品のデータ(表2)と比較しても良好な数値であり、高周波コイル等のプロトタイプ製作に向けた適用可能性が示されたと言える。

表2 MEX造形品と相対密度と電気伝導率

造形手法・材料	相対密度 [%]	電気伝導率 [%IACS]
MEX(本研究)	92.8	96.3
MEX(先行研究 ⁴⁾)	95.3 ± 0.5	82 ± 1
バルク材	100	100

4 まとめ

本研究では、PBF(粉末床溶融結合法)やDED(指向性エネルギー堆積法)等のレーザ方式において課題とされる光反射率の問題や、微細粉末の飛散に伴う粉塵爆発・人体ばく露のリスクという安全上の課題を低減し、純銅部品を安価かつ安全に製造できるMEX方式に着目した。

MEX方式による高品質な造形を実現するため、脱

脂・焼結プロセスにおける寸法収縮の挙動と効果的な変形抑制手法を検証した。

その結果、C字型スリット部の開口変形に対しては、開口部に1 mm角の微小なサポート構造を付与することで、全体の収縮を阻害せずに寸法精度を向上できるという実用的設計指針を得た。

また、造形物の材料特性評価において、0.928の相対密度と、MEX方式による純銅造形品としては高い96.3 %IACSの電気伝導率を確認した。これらの結果は、環境負荷や作業安全性の面でも優れる本手法が、実用的な電磁気・熱管理部品の製造プロセスに適用可能であることを示した。

5 参考文献

- 1) Tran, T. Q., et al. : The International Journal of Advanced Manufacturing Technology , Vol. 122 , pp. 285-306 (2022)
- 2) E. Hosseini, V. A. Popovich : Additive Manufacturing , Vol. 29 , 100784 (2019)
- 3) 日本産業標準調査会 : JIS H 3100 銅及び銅合金の板及び条 , 日本規格協会 (2018)
- 4) Antonio Cañadilla : Materials , Vol. 15 , p. 4644 (2022)