

3D積層造形による銅合金ヒートシンク設計のための熱伝導解析：物性値の温度依存性と熱伝達係数の不確かさの考慮

Design by Heat Conduction Analysis for Additive Manufacturing of Copper Alloy Heat Sink:
Consideration of Temperature-dependent Properties and Uncertainty in Heat Transfer Coefficient

高野直樹¹⁾, 水野智之²⁾, Maximilian Friedrichs-Dachale²⁾, 瀧澤英男³⁾, 植松美彦⁴⁾
Naoki Takano, Tomoyuki Mizuno, Maximilian Friedrichs-Dachale, Hideo Takizawa and Yoshihiko Uematsu

1) 博(工) 慶應義塾大学 教授 (〒223-8522 横浜市港北区日吉3-14-1, E-mail: naoki@mech.keio.ac.jp)

2) 慶應義塾大学大学院理工学研究科 (〒223-8522 横浜市港北区日吉3-14-1)

3) 博(工) 日本工業大学 教授 (〒345-8501 埼玉県南埼玉郡宮代町学園台4-1, E-mail: htaki@nit.ac.jp)

4) 博(工) 岐阜大学 教授 (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1, E-mail: uematsu.yoshihiko.z3@f.gifu-u.ac.jp)

This paper describes the design of copper alloy heat sink based on the heat conduction analysis by FEM and its additive manufacturing. The temperature-dependent thermal properties of the additively manufactured copper alloy were measured first. To reduce the maximum temperature in the initial design of the heat sink, the heat conduction paths were designed considering the manufacturability based on the knowledge or know-hows of successful laser powder bed fusion additive manufacturing. It was found that the temperature-dependence of the thermal conductivity contributed to reduce the temperature effectively. The heat transfer coefficient was assumed to be constant, because water temperature was not analyzed. Therefore, it was regarded as the uncertain parameter considering the water temperature rise. It was confirmed that the designed heat conduction paths work well. The assemblability was also considered and circular holes for mechanical joint were designed. They were successfully manufactured with the help of peripheral support.

Key Words : Metal Additive Manufacturing, Copper Alloy, Heat Sink, Heat Conduction Path, Temperature-dependent Thermal Properties

1. はじめに

Laser Powder Bed Fusion (L-PBF)方式の金属3D積層造形(metal additive manufacturing)は、鋼、アルミ合金、純チタンやチタン合金、コバルトクロム合金など幅広い材料を用いた複雑形状の製造法として実用化されてきた。ヒートシンクに適した高い熱伝導率を有する純銅は、1000-1010 nmの波長のレーザの反射率が高く[1]、エネルギー吸収率が低いため、積層造形が困難な材料であり、CuCrZrなどの銅合金の研究がなされてきたものの[2-4]、国内では研究報告が少ない材料である。本研究では次章に述べる電子ビームコンバータ用の水冷式ヒートシンクを銅合金CuCrZrで製造すべく、熱伝導経路により温度低下を図る設計ならびに造形、造形品の幾何的精度の評価を行った。

2. 電子ビームコンバータ用ヒートシンク

核医学検査に用いるテクネチウムの原料であるMo-99の製造のため、超伝導加速器で発生した電子ビームから変換された γ 線をMo-100に照射するためのコンバータは、電子ビーム通過領域の固体がすべて発熱源となるため、その冷却が課題となっている[5,6]。本研究で扱うコンバータ用ヒートシンクの初期設計をFig. 1に示す。外殻ケースと内部の7枚の冷却板から構成される。電子ビームを γ

線に変換するため、固体の総厚さは6.0 mm以上が必要となり、初期設計では6.5 mmとしている。

3. 3D積層造形した銅合金CuCrZrの物性値

3D積層造形した材料の物性値は、初期欠陥などの影響により、従来法で製造した場合の物性値と異なることがある。熱伝導解析に必要な熱的特性および密度の測定のため、直径10 mm、厚さ2 mmの円板を用いて密度と熱伝導率を測定し、直径5 mm、厚さ1 mmの平板を用いて比熱の測定とマイクロCT(分解能 0.005 mm)による気孔率の計測を行った。298.15 K～573.15 Kの範囲で測定した熱伝導率と比熱をFig. 2に示す。密度は8870 kg/m³、気孔率はわずか0.0076%であった。

4. 熱伝導解析によるヒートシンクの設計

Fig. 1(a)を解析対象とし、COMSOL Multiphysicsと3章で述べた物性値を用いて温度依存性を考慮した非定常熱伝導解析を行った。冷却水との界面における熱伝達率は一定で5000 W/(m²·K)と仮定した。固体の初期温度は293.15 Kとし、冷却水の流れ解析は行わず、水温は293.15 Kで一定と仮定した。電子ビーム通過領域内の固体はFig. 3に示す発熱率を仮定した。10節点四面体要素を用いた。

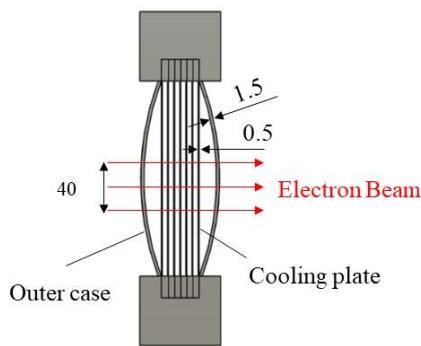
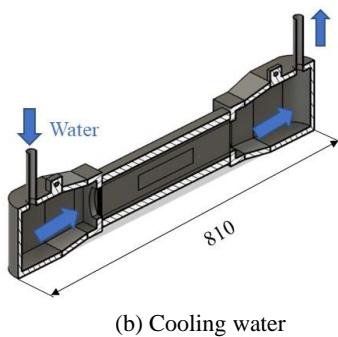
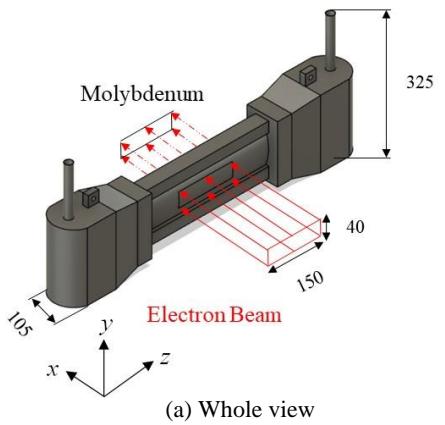


図-1 Initial design of heat sink for electron beam converter

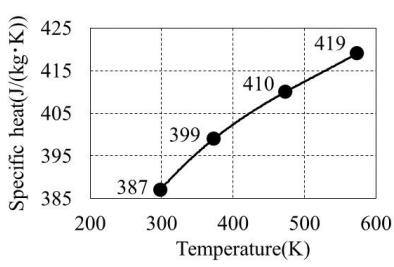
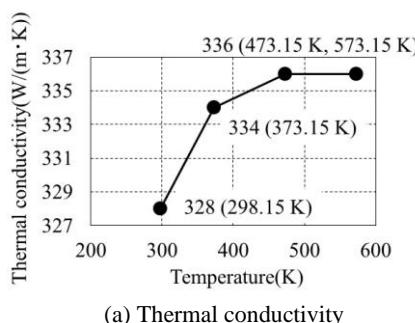


図-2 Temperature-dependent thermal properties

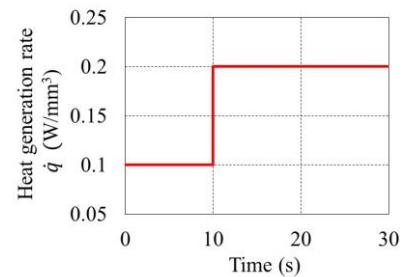


図-3 Heat generation rate in electron beam scanning region

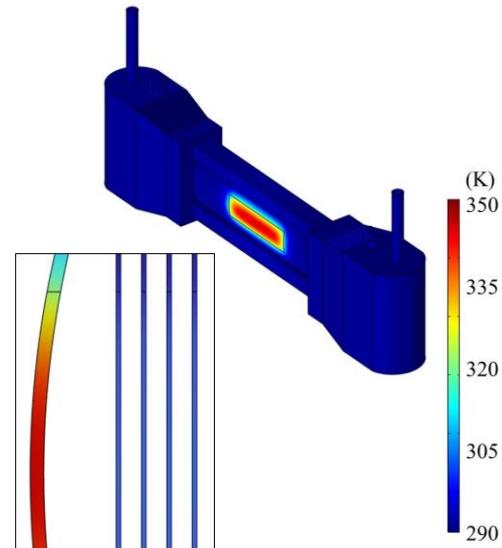


図-4 Temperature distribution for initial design

初期設計に対する温度分布をFig.4に示す。最高温度は外郭ケース中央部で観察され、一方冷却水中の冷却板の昇温は認めなかった。ケースの冷却効率を高めるには、フィンを設けて表面積を大きくすることが考えられるが、追加するフィンが新たな発熱源となるため、効果が相殺されることがわかったため、外郭ケースの熱を冷却板に伝える熱伝導経路[7,8]を設けることとした。

同時に、外郭ケースの板厚1.5 mmを薄肉化し、1.3 mmとするかわりに、Fig.5に示す形状として、圧縮熱応力による座屈を回避する設計とした。

熱伝導経路の設計指針をFig.6に示す。積層造形による製造可能性を考慮し、以下の知見に基づき設計を行った。

- (1) 積層数を小さくするために積層方向はFig.6中の向きとした。
- (2) 冷却水路は小領域に分割されるが、外郭ケース中央部の小領域の面積を冷却水の入口と出口で変化させ、流速を制御することで水温上昇による冷却性能低下を回避することを考え、熱伝導経路は長大な水流方向にテーパ角をつけるために、積層方向は水流方向と直交するFig.6中の向きとした。
- (3) 热伝導経路の斜め部材をサポートレスで造形するには一般に45°ルールが知られるが、CuCrZrの密度が高いため、35°以上であれば精度よく造形できると考え、 θ_a と θ_b を35°～45°の範囲で決定することとした。

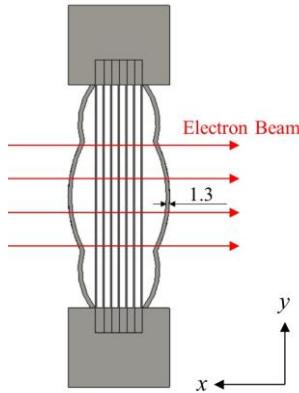
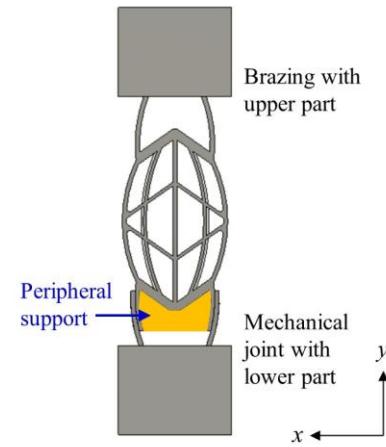


図-5 Thinning of outer case



(a) Cross-sectional view

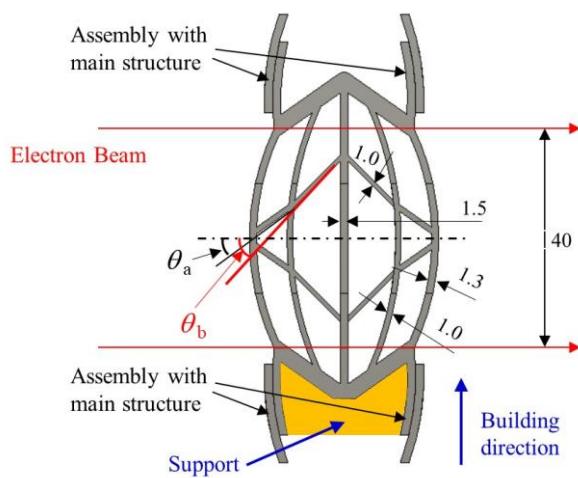


図-6 Design improvement by heat conduction paths and consideration of assemblability

- (4) θ_a と θ_b の決定においては、部材同士の交点で区切られた部材のアスペクト比がなるべく小さくなるものを選択することとした。これは、硬いリコータではなくカーボンブラシによる粉末散布で生じうる不具合と熱変形による造形不良を回避する理由による。
- (5) (4)と同様の理由で、積層方向の部材の厚さは1.0 mm以上とした。電子ビームを γ 線に変換するために総厚さ6.0 mmとすべく、各部材の厚さを決定した。
- (6) 組立性を考慮して機械結合のための円孔を設けることを考えたが、CuCrZrより密度がやや低いものの造形実績に富むマルエージング鋼で試作したところ、Fig. 6の黄色部のように周辺サポートがあれば、円孔内部のサポートレスで真円が得られることがわかつたため、下部のみ円孔を設けることとした。
- 以上の製造制約を考慮して得た最終設計図をFig. 7に示す。 θ_a と θ_b は35°～45°の範囲では最高温度に有意差がなかったため、体積の最小化、熱伝導経路の直線性、アスペクト比の観点から、ともに35°に決定した。上部の組立についてはロウ付けとした。

Fig. 5およびFig. 7の設計に対する熱伝導解析を行い、Fig. 4と比較した。最高温度の比較をFig. 8に、最終設計に対する温度分布をFig. 9に示す。薄肉化と熱伝導経路の設

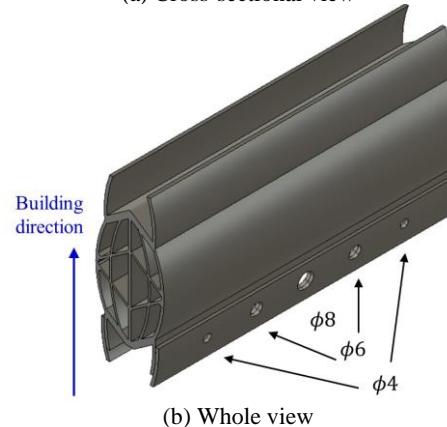


図-7 Final design considering manufacturability and assemblability

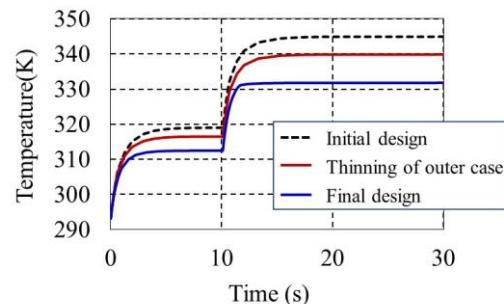


図-8 Reduction of maximum temperature by design improvement by thinning of outer case and appending heat conduction paths

置により初期設計からの温度上昇は約25%おさえることができた。Fig. 4とFig. 9を比較すると、外郭ケースの温度低下と、冷却水内部の冷却板の温度上昇が認められ、外郭ケースの熱が冷却板に運ばれ、水冷効果が向上したことがわかる。また、Fig. 2(a)よりわかる通り、温度が上昇するほど熱伝導率が高くなることも熱伝導経路の効果を高めたといえる。

5. 热伝達率の不確かさの考慮

前章の熱伝導解析の問題点の一つは、固体の温度上昇にともない冷却水の温度も上昇し、冷却効果が低下する

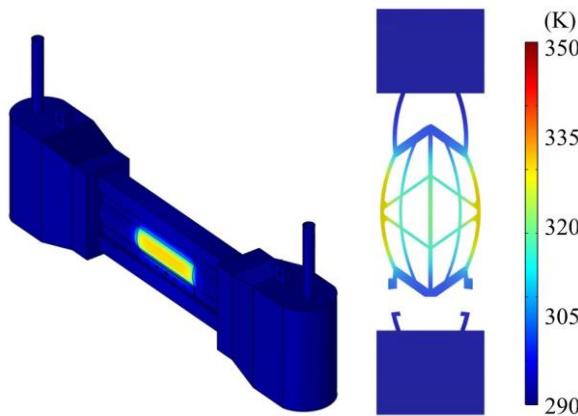


図-9 Temperature distribution for final design

効果が考慮されていない点にある。高価な流体構造連成解析を行うかわりに、水温上昇による熱伝達の低下を、固体温度(T_{Cu})の上昇とともに熱伝達率の低下で代用し、Fig. 10の熱伝達率($T_{funciton_of_Tcu}$)を仮定することとした。曲線部は以下の関数とした。

$$h_{function_of_Tcu} = 5000 - 1.37 \times 10^{-3} \times 1.093^{(T_{Cu}-185.2)} \quad (1)$$

Fig.4の初期設計とFig.7の最終設計に対して、熱伝達率を一定とした場合とFig. 10を用いた場合の最高温度をFig. 11に示す。熱伝導経路が無い初期設計では外郭ケース中央部での局所的な高温部位で冷却効果が失われ、大幅な温度上昇となるが、熱伝導経路を有する最終設計では熱伝達率の低下による悪影響はわずかである。Fig. 10の設定は極端な熱伝達率低下を仮定しているが、現実はFig. 11の実線と破線の間にあると考えられる。熱伝達率を不確かさのパラメータとした本解析により、熱伝導経路が有効であることが示された。

6. 3D積層造形と造形品の幾何的精度の計測

CuCrZrの粉末C18150 (Cr 0.5-1.5 wt%, Zr 0.05-0.2 wt%, Cu bal.) を用い、SLM280PSにより造形した。粉末直径はふるいにかける前の段階で30-40 μm であった。積層ピッチは30 μm であり、アルゴン雰囲気中で造形した。後処理として、ひずみ除去のための573.15 Kで30 min., 時効処理として873.15 Kで1 hの熱処理を施した。HIP処理は行っていない。これは3章の物性値計測用試験片と同様である。

サポート除去後およびサポート除去前の造形品をFig. 12に示す。サポートは多孔質な2次元ラティス構造である。ヒートシンク下部の機械結合のための円孔が見やすいように上下反転しているが、真円が得られたことがわかる。また、説明を割愛したが、外郭ケースと熱伝導経路の接続部には応力集中緩和のためにR1.0のフィレットを設けた。

幾何的精度の調査のため、マイクロCT撮像により、35°で設計した4本の熱伝導経路の角度を計測した。水流方向に9断面を等間隔にとり、ばらつきを評価したところ、平均値は34.4~35.7°で、変動係数(COV)は2.6~3.4%であった。積層方向の冷却板の板厚も計測し、電子ビームが通過

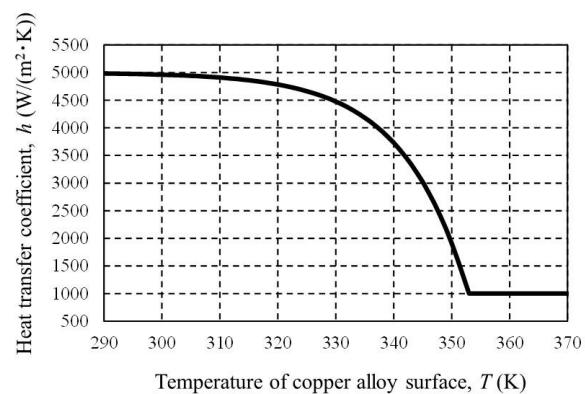


図-10 Assumed heat transfer coefficient to express the temperature rise of water

—	Final design with constant h
- - -	Final design with assumed $h(T_{Cu})$
—	Initial design with constant h
- - -	Initial design with assumed $h(T_{Cu})$

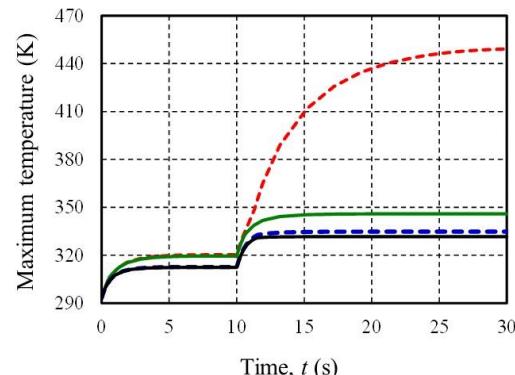


図-11 Comparison between initial and final designs with and without assumed heat transfer coefficient

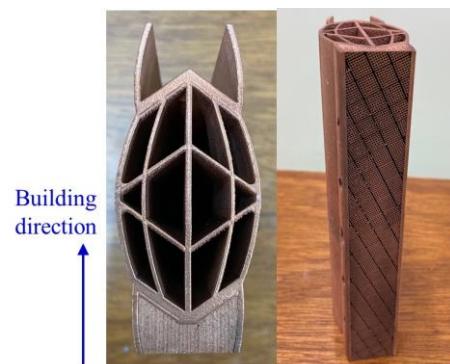
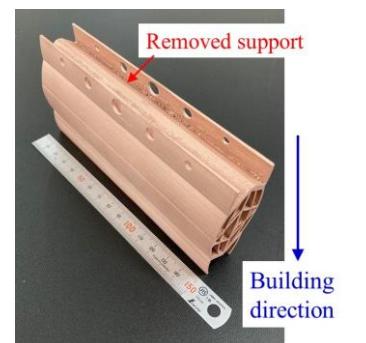


図-12 Additive manufacturing using CuCrZr

する総厚さを計測した結果、6.1 mmの設計値に対して、造形品では平均6.43 mm、変動係数3.6%という結果となり、幾何的精度は許容範囲内であると判断された。これは4章で述べた知見(1)～(7)に基づき設計したことによる。

7. 3D積層造形のための知識融合型CAEへの期待

複雑形状の製造が可能な金属3D積層造形では、トポロジー最適化の併用が有効とされている。しかしながら、本研究では、放熱フィンや熱伝導経路による発熱源の増加と冷却効果のトレードオフとなり、加えて、造形の成功の鍵となる4章の知見(1)～(7)を考慮したトポロジー最適化を行うに至らなかった。特に、板厚やアスペクト比に関する知見は、過去の造形の失敗例と成功例に基づく曖昧さをともなうノウハウである。多くの造形プロセスパラメータとの相関性は科学的に未解明のノウハウも多い。偏微分方程式を数値的に解くシミュレーションが厳密なものであるのに対し、曖昧なノウハウとの融合は容易ではないと思われる。

そこで、著者らがこれまでに研究してきた不確かさのモデリング・シミュレーション法を応用し、知識をランダムパラメータとして表現し、確率的シミュレーション法を活用することが考えられる。ランダムパラメータ空間内でのサンプリングを工夫すれば、ノウハウという知識の外挿も可能による革新的設計案の創出が期待できると考える。

さらに、ノウハウという知識を数理的、定量的に表現できれば、3D積層造形の技術伝承にも寄与できるのではないかと期待する。

8. 結言

本研究では、銅合金CuCrZrのL-PBF方式の3D積層造形により、電子ビームコンバータ用ヒートシンクの設計および造形を行った。熱伝導経路の設置が、材料の熱伝導率の温度依存性の影響もあり有効に機能した。造形品の幾何的精度にも大きな問題は見られなかった。

今後の課題の一つは、HIP処理の効果を検討することである。また、3章の試験片で計測した表面粗さは $R_a=0.0138 \pm 0.00017$ mm, $R_z=0.069 \pm 0.00098$ mmであったが、これが水流に及ぼす影響と熱伝達率への影響を評価することも重要な課題であると考える。

最後に、造形可能性あるいは造形制約、および組立性も考慮した設計を実用的に行うために、過去の造形の経験で得た知識と融合したCAEへの展望を述べた。

参考文献

- [1] Constantin, L. et al.: Laser 3D printing of complex copper structures, *Additive Manufacturing*, Vol. 35, 101268, 2020.
- [2] Ma, Z. et al.: Selective laser melting of Cu-Cr-Zr copper alloy: parameter optimization, microstructure and mechanical properties, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 828, 154350, 2020.
- [3] Bai, Y., et al.: Additively manufactured CuCrZr alloy: Microstructure, mechanical properties and machinability, *Materials Science & Engineering A*, 819, 141528, 2021.
- [4] Zhou, W., et al: Fabrication of a strong and ductile CuCrZr alloy using laser powder bed fusion, *Additive Manufacturing Letters*, Vol. 5, 100121, 2023.
- [5] Richards, V.N., et al: Cyclotron production of ^{99m}Tc using $^{100}\text{Mo}_2\text{C}$ targets, *Nuclear Medicine and Biology*, Vol. 40, pp.939-945, 2013.
- [6] McCarter, J.L., et al.: Accelerator production of Mo-99 using Mo-100, 12th International Particle Accelerator Conference, Brazil, 2021.
- [7] Babuska, T.F., et al.: An additive manufacturing design approach to achieving high strength and ductility in traditionally brittle alloys via laser powder bed fusion, *Additive Manufacturing*, Vol. 34, 101187, 2020.
- [8] Li, B., et al.: Desining biologically inspired heat conduction paths for ‘volume-to-point’ problems, *Materials & Design*, Vol. 130, pp.317-326, 2017.