慶應義塾大学学術情報リポジトリ
Keio Associated Repository of Academic resouces

Title	3D積層造形のための不確かさの系統的モデリングと確率的疲労寿命予測による品質保証
Sub Title	Quality assurance by systematized modeling of uncertainties and stochastic prediction of fatigue life for 3D printing
Author	高野, 直樹(Takano, Naoki) 植松, 美彦(Uematsu, Yoshihiko) 松田, 哲也(Matsuda, Tetsuya)
Publisher	
Publication year	2024
Jtitle	科学研究費補助金研究成果報告書 (2023.)
JaLC DOI	
Abstract	支配方程式に基づく不確かさの系統的なモデリングのため、物理的パラメータ、幾何的パラメータ、境界条件のパラメタリゼーションとサンプリング手法を確立した。金属3D積層造形に特有の製造可能性と組立性に関する過去の知見を考慮した設計手法について考察した。まず、チタン系材料を用いた歯科補綴クラスプの疲労寿命を、ばらつきを考慮して、造形前の設計段階でCADデータに基づく有限要素解析を用いて予測する技術を開発した。さらに、機械結合による組立のための円孔の幾何的精度、円孔の周辺サポートによるサポートレスの造形、2Dラティスによる多孔質サポートの特性評価と、銅合金によるヒートシンク設計に関する研究を行った。 For the systematic uncertainty modeling based on the governing equation, a methodology of parameterization and sampling for the physical and geometrical parameters and the boundary conditions was established. The design method considering the knowledge of manufacturability and assemblability acquired by past experiences that is unique to metal additive manufacturing was discussed. First, a prediction method of fatigue life considering its variability for titanium prosthetic clasps has been developed to be used in the design phase before manufacturing by the finite element analysis using CAD data. Furthermore, the geometrical accuracy of circular holes for assembly by mechanical joint, support-less additive manufacturing of circular holes with peripheral support, evaluation of properties of porous support with 2D lattice microarchitecture and the design of copper alloy heat sink were studied.
Notes	研究種目 : 基盤研究 (B) (一般) 研究期間 : 2020 ~ 2023 課題番号 : 20H02034 研究分野 : 計算力学
Genre	Research Paper
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KAKEN_20H02034seika

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the KeiO Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９　（共通）

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

令和　６ 年　 ５ 月　 ５ 日現在

機関番号：３２６１２
研究種目：基盤研究(B)（一般）
研究期間：2020～2023
課題番号：２０Ｈ０２０３４

研究課題名（和文）３D積層造形のための不確かさの系統的モデリングと確率的疲労寿命予測による品質保証

研究課題名（英文）Quality assurance by systematized modeling of uncertainties and stochastic prediction of fatigue life for 3D printing

研究代表者
高野　直樹（Takano, Naoki）

慶應義塾大学・理工学部（矢上）・教授

研究者番号：１０２０６７８２

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　14,000,000円

研究成果の概要（和文）：支配方程式に基づく不確かさの系統的なモデリングのため、物理的パラメータ、幾何的パラメータ、境界条件のパラメタリゼーションとサンプリング手法を確立した。金属3D積層造形に特有の製造可能性と組立性に関する過去の知見を考慮した設計手法について考察した。まず、チタン系材料を用いた歯科補綴クラスプの疲労寿命を、ばらつきを考慮して、造形前の設計段階でCADデータに基づく有限要素解析を用いて予測する技術を開発した。さらに、機械結合による組立のための円孔の幾何的精度、円孔の周辺サポートによるサポートレスの造形、2Dラティスによる多孔質サポートの特性評価と、銅合金によるヒートシンク設計に関する研究を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義
金属3D積層造形は新しい製造法として注目されているが、造形品の性能のばらつきや幾何的精度の問題があり、多くのノウハウを必要とするため、設計段階での品質保証が難しいという問題があった。3D積層造形に特有の不確かさを、支配方程式の物理的パラメータ、幾何的パラメータ、境界条件の観点から系統的にモデリングすることにより、造形前にばらつきを考慮したバーチャルテストを実現した。特にモデリングが難しい幾何的パラメータと境界条件の不確かさのパラメタリゼーションとサンプリング法を具体的に提示した。造形可能性と組立性を考慮した設計手法は、金属3D積層造形の発展と、熟練技術の伝承にも貢献するものである。

研究成果の概要（英文）：For the systematic uncertainty modeling based on the governing equation, a methodology of parameterization and sampling for the physical and geometrical parameters and the boundary conditions was established. The design method considering the knowledge of manufacturability and assemblability acquired by past experiences that is unique to metal additive manufacturing was discussed. First, a prediction method of fatigue life considering its variability for titanium prosthetic clasps has been developed to be used in the design phase before manufacturing by the finite element analysis using CAD data. Furthermore, the geometrical accuracy of circular holes for assembly by mechanical joint, support-less additive manufacturing of circular holes with peripheral support, evaluation of properties of porous support with 2D lattice microarchitecture and the design of copper alloy heat sink were studied.

研究分野：計算力学

キーワード：確率的シミュレーション　不確かさのモデリング　金属3D積層造形　確率的疲労寿命予測　ばらつき　歯科補綴物　ヒートシンク　幾何的精度

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１（共通）

１．研究開始当初の背景

設計段階で数値シミュレーション（CAE）を活用する際に品質保証やリスク分析を行うためには、不確かさを考慮した確率的シミュレーションの有効性が認知されるようになった。ランダムパラメータをいかに定義し、確率的シミュレーションを行うためには、パラメタリゼーションとサンプリングの 2 点がキーポイントとなることも提唱してきた。しかし、パラメタリゼーションはケースバイケースでアプローチ法が異なり、体系的に考える手法論が示されていなかった。そこで、支配方程式に基づき、物理的ランダムパラメータ、幾何的ランダムパラメータ、境界条件に関するランダムパラメータを網羅する系統的な不確かさのモデリング法の研究を開始した。

解析対象として 3D 積層造形を扱い、造形前の事前予測による品質保証を行うため、3D 積層造形でなくても大きなばらつきが見られる疲労寿命の予測を行うこととし、3D 積層造形に特有のばらつき、あるいは不確かさを数理的、統計的に考察した。シミュレーションによる予測結果は、造形品の疲労試験によりバリデーションを行う計画を立てた。

２．研究の目的

実用化が加速する金属 3D 積層造形品に含まれる多種多様な幾何的・物理的不確かさの数理的表現を行うことで、普遍性ある力学的モデリング法と確率的シミュレーション法の開発を行うことを目的とする。具体的にチタン系材料（チタン合金 Ti-6Al-4V および純チタン）を用いた歯科補綴物を主たる対象とし、疲労寿命のばらつきを、造形前の設計段階で予測できる計算力学手法を開発するとともに、実験を行い、事前予測の妥当性確認を行う。幾何的不確かさの要因となる造形不良や幾何的精度については、アルミ合金（Al-Si10-Mg）、マルエージング鋼、銅合金（CuCrZr）とポリアミド（PA2200）も加え、円孔に注目した統計的計測に基づき、造形姿勢との相関性を明かにし、造形可能性とともに、機械的結合による組立性についても考察する。その際、円孔とサポートの関係性について考察するとともに、多孔質なサポートのミクロ構造に関する考察も行う。また、熱伝導に優れる銅合金によるヒートシンクの設計と造形を通じて、造形可能性と幾何的精度に関する研究を行う。

３．研究の方法

(1)チタン系材料を用いた歯科補綴物（クラスプ）の疲労寿命の事前予測法の開発と妥当性確認

パーシャルデンチャにおいて自然歯を把持する部品であるクラスプは、患者の歯の形状や寸法にあわせてテイラーメイドされ、1 日 3 回の着脱を 10 年間繰り返すことを想定した 10^4 回以上の疲労寿命が求められる。そこで、クラスプをチャッキングできる専用の微小ストローク疲労試験機を導入し、チタン合金（Ti-6Al-4V、以下 Ti64 と略記）と純チタン（commercially pure Ti、以下 CPTi と略記）を用い、Laser Powder Bed Fusion（L-PBF）方式の 3D プリンターEOS M290 により、チャッキング用の円筒部を一体造形した疲労試験片を造形した。疲労寿命の平均値の予測には Smith-Watson-Topper（SWT）の式を用いることとし、式中のパラメータは Baumel and Seager 則を利用するほかに、疲労試験結果より同定した。最大主ひずみ、最大主応力の値は有限要素解析（FEA）により求めるが、FEA に用いる物性値は、クラスプと同じプロセスパラメータで造形したダンベル型引張試験片の静的試験により求めた。なお、Ti64 と CPTi の疲労特性の比較を、ばらつきを考慮して検定により行った。また、材料特性のばらつきが疲労寿命に及ぼす影響も調査した。初期欠陥についても破面観察や、ズーミング FEA による初期欠陥のモデリングについて検討した。妥当性確認のため、SWT の式のパラメータ同定に用いたクラスプとは形状、寸法が異なるクラスプに適用し、事前予測結果を実験結果と比較することとした。

(2)各種材料による円孔の幾何的精度の比較とサポート構造に関する研究

3D 積層造形のための設計において、円孔をサポートレスで造形する必要性が頻繁にある。円孔のゆがみと造形姿勢（積層角度）の相関性について調査した。特に、材料による違いについての知見を得ることを主たる目的とし、CAD による設計を行えば、造形することなく、事前に円孔のゆがみを考慮した数値モデルを生成し、FEA に用いることができる手法論を提案する。具体的に、材料としてアルミ合金（Al-Si10-Mg）、チタン系材料（Ti64、CPTi）、マルエージング鋼とポリアミド（PA2200）を用い、各材料を特徴づける物理量として密度を計測した。

まず、円孔径、板厚、造形姿勢を幾何的精度に影響を与える因子として、造形と統計的計測を行った。数値モデルを生成するための幾何的ランダムパラメータの検討を行った。FEA においては、物理的・幾何的ランダムパラメータの影響度合いを調査した。密度が異なる材料間で未焼結粉末によるセルフサポートの効果との関連性を調査した。

次に、円孔の内部はサポートレスであるが、周囲にサポートが存在する場合には、円孔のゆがみがないことを見出したため、サポート構造についてさらに次の 2 点の研究を行う。まず、2D ラティスよりなる多孔質なサポート構造のミクロ構造設計パラメータの影響を考察した。第 2 に、周囲サポートの有無による円孔のゆがみの違いを調査すべく、円孔つきダンベル試験片、多孔平板、門型多孔部品を設計、造形し、統計的計測を行った。

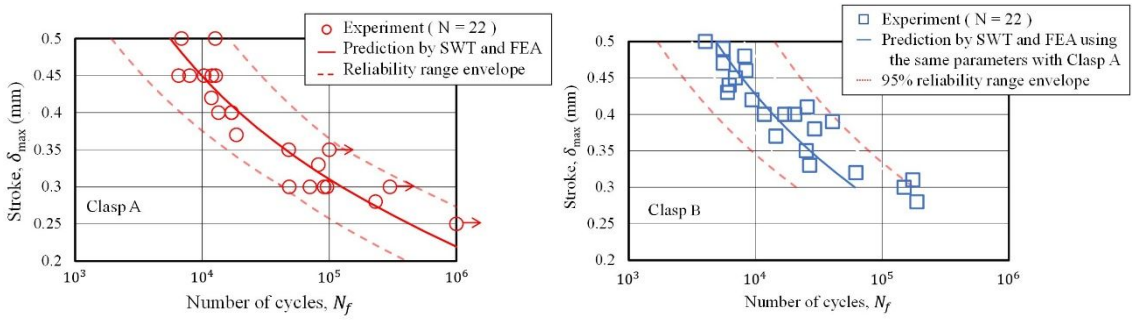
(3)銅合金によるヒートシンクの設計

L-PBF におけるエネルギー吸収率の低さから、国内ではまだ造形事例が少ない銅合金（CuCrZr）を造形機 SLM280PS により造形することに成功したため、熱伝導率の高さを生かしたヒートシンクの設計を行う。まず、銅合金の力学的、熱的特性を計測する。特に熱伝導率と比熱は 25℃～300℃の範囲で温度依存性の計測も行う。次に、計測した物性値を用い、非定常熱伝導問題の FEA を行いことにより、核医学検査用の Mo-99 を製造するための電子ビームコンバータに搭載するヒートシンクを設計する。その際、造形制約を考慮した設計を行うが、逆に、銅合金の密度の高さを考慮して、過去の造形制約の常識を破る設計に挑戦する。また、組立性を考慮した円孔も設けて、周囲サポートがある場合の円孔の幾何的精度を調査する。水冷式ヒートシンクの熱伝達係数の不確かさを考慮したモデリングと FEA も行い、設計案の有効性を検証する。

４．研究成果

(1)チタン系材料を用いた歯科補綴物（クラスプ）の疲労寿命の事前予測法の開発と妥当性確認

Ti64 製クラスプ、CPTi 製クラスプの疲労試験から SWT の式のパラメータを同定するとともに、両材料の物性値の計測、疲労寿命のばらつきを表す標準偏差を求め、ばらつきを考慮した疲労寿命の事前予測（バーチャルテスト）の手法を確立し、Journal of Prosthodontic Research(JPR)に 2 本の論文を公表した。同定を行った CPTi 製クラスプの例、および形状、寸法が異なるクラスプに適用した検証結果を図 1(a),(b)に、FEA の結果と疲労破壊した試験片を図 2 に示す。



(a)同定を行ったクラスプ　　(b)形状、寸法が異なるクラスプによる検証

図 1 CPTi 製クラスプのばらつきを考慮した疲労寿命の事前予測

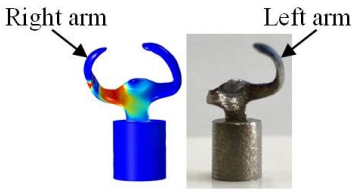


図 2　クラスプの弾塑性 FEA による最大主応力分布と疲労破壊した試験片

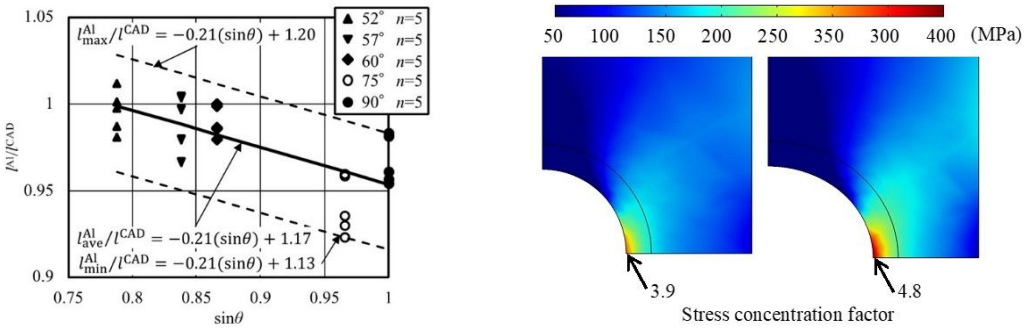
材料間の比較については、検定により CPTi 製クラスプの方が疲労寿命が有意に長いことを示した。材料特性のばらつきが大きかった Ti64 を対象として、物理的ランダムパラメータの影響を調査した結果、疲労寿命に与える影響はわずかであることを示し、Dental Materials Journal(DMJ)に論文を公表した。その際、初期欠陥を埋め込んだズーミング FEA の結果も示した。初期欠陥に関しては、JPR に破面観察結果も公表し、曲げ変形モードにおける引張応力側の表面が疲労き裂開始点であることを見出し、内部欠陥の影響は受けていないことを示した。

一方、CAD データに基づく FEA による事前予測では、造形品の幾何的精度の影響が考慮されていない。そこで、造形品のマイクロ CT イメージベース FEA との比較を行い、円筒チャック部を有する疲労試験片の幾何的精度が良好であり、CAD データに基づく事前予測手法が妥当なものであることを示し、”Finite element analysis of fatigue life of commercially pure titanium clasps additively manufactured with different building orientations”と題して DMJ に投稿中である。さらに、断面二次モーメントと断面積による幾何的精度の比較法を考案した。これらの指標を用いて、円筒チャック部を持たない臨床用のクラスプの幾何的精度についても、2 種類の造形姿勢とサポートを用い、調査した結果、クラスプのアーム部は CAD データより太く、疲労寿命は長いことがわかったが、CAD データに基づく事前予測の 95%信頼区間の上限に近い結果となり、提案した確率的な事前予測法の有用性が確認できた。

(2)各種材料による円孔の幾何的精度の比較とサポート構造に関する研究

まず、φ2 mm の円孔つきダンベル試験片については、純チタン、アルミ合金、ポリアミドの 3 種類の材料間で比較を行った。密度は順に 4.50 g/cm^3、2.53 g/cm^3、0.96 g/cm^3 である。円孔のゆがみは、ダンベル試験片の引張剛性、引張強度に寄与する最小リガメントを幾何的パラメータとし、積層角度の正弦と負の 1 次の相関性があることを見出し、内挿補間を許容する円孔のゆがみの予測を可能とした。図 3 には、アルミ合金の結果を示す。図 3(a)の傾きである積層角度依存性

は円孔のゆがみの程度を表す指標であり、密度が高い純チタン、アルミ合金、ポリアミドの順に幾何的精度がよいことがわかった。このことから、密度が 8.87 g/cm^3 で純チタンの 2 倍に近い銅合金では、サポートレス時の造形精度はさらによいことが示唆された。この成果の一部は、Mechanical Engineering Journal と材料に論文として公表した。



(a) リガメント長さと積層角度の相関性　(b) CAD データ(左)と幾何的精度を考慮した FEA

図 3 アルミ合金製円孔つきダンベル試験片

さらに、円孔径を φ3、φ4、φ6、φ8 とし、板厚もパラメータとした系統的な試験片の設計と造形を行い、統計的計測を行った。前記の円孔つきダンベル試験片の知見を一般化し、任意の積層角度において円孔の形状のゆがみをフーリエ級数展開により近似する手法を考案した。

また、円孔内部はサポートレスで、周囲にサポートが存在する場合には精度よく造形できることをマルエージング鋼において見出した。そこで、周囲サポートの影響を系統的に調査する試験片をアルミ合金、純チタン、マルエージング鋼で造形し、統計的データを取得することができた。

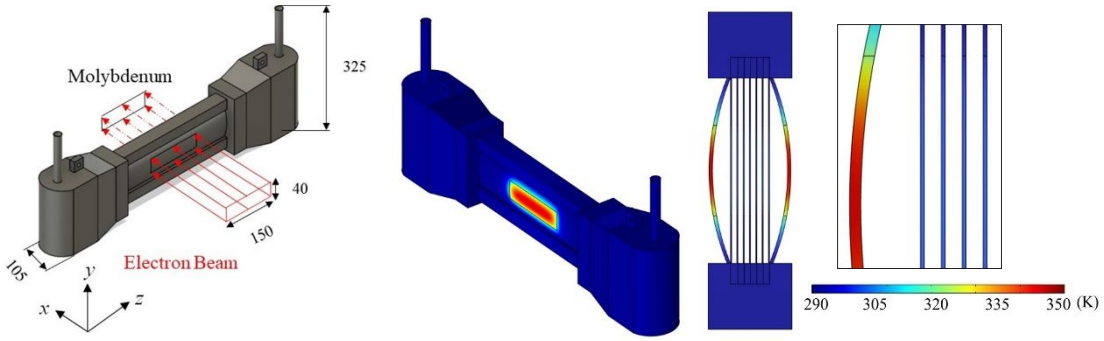
2D ラティス構造をもつ多孔質サポートのミクロ構造設計パラメータの影響も Ti64 を対象に検討した。ストラット幅の設計値は 0.1 mm であるが、スペーシングは 0.3 mm～1.0 mm の間で設計可能である。ストラット太さと不連続部の幾何的ランダムパラメータを定め、マイクロ CT 撮像により統計データを取得し、パラメータ間の相関性に注意してサンプリングに工夫して、造形不良を考慮した等価物性値をマルチスケール FEA により計算した成果は Additive Manufacturing に論文として公表した。サポートの機械的、熱的特性は造形プロセスに影響を及ぼす。本成果は、造形プロセスシミュレーションの精度向上に寄与するものと期待される。

(3)銅合金によるヒートシンクの設計

超伝導加速器により発生する電子ビームをコンバータにより γ 線に変換し、Mo-100 に照射することにより、核医学検査に用いるテクネチウムの原料となる Mo-99 を得るため、コンバータの発熱をおさえるヒートシンクを設計した。電子ビーム通過領域内の固体がすべて熱源となる点に注意し、放熱フィンの設置ではなく、熱伝導経路を設けて熱を分散して水冷する設計方針をとった。図 4 にコンバータの外観とヒートシンクの初期設計案に対する熱伝導解析結果を示す。

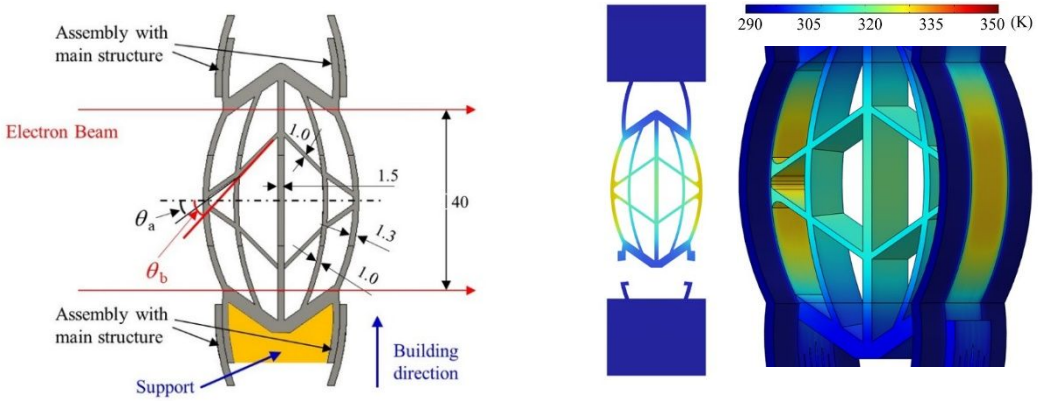
設計においては外郭の板厚を 1.5 mm から 1.3 mm に薄肉化するとともに、外郭から内部の冷却板までの熱伝導経路を設けた。内部の冷却板の初期設計値は 0.5 mm であったが、造形可能性を考慮して 1.0 mm 以上とし、図 5(a)の設計を行った。図中の角度はサポートレスであれば 45° 以上が求められるが、前記の通り、銅合金の密度が高いことから、35°とし、熱伝導経路を短くし、発熱を抑える設計とした。下部は機械的結合による組立を考え、周囲サポートが存在する条件下で φ4、φ6、φ8 の円孔を設けた。

図 5(b)の熱伝導解析結果より、外郭の熱が内部冷却板まで伝達され、全体に温度分布は均一化され、図 6(a)のように最高温度を低減することに成功した。また、水温上昇にともない熱伝達による冷却性能が低減することを考慮し、熱伝達係数を固体温度の関数として不確かさを表現し



(a)コンバータ外観　(b)ヒートシンクの初期設計案に対する熱伝導解析による温度分布

図 4　コンバータと水冷式ヒートシンクの初期設計案

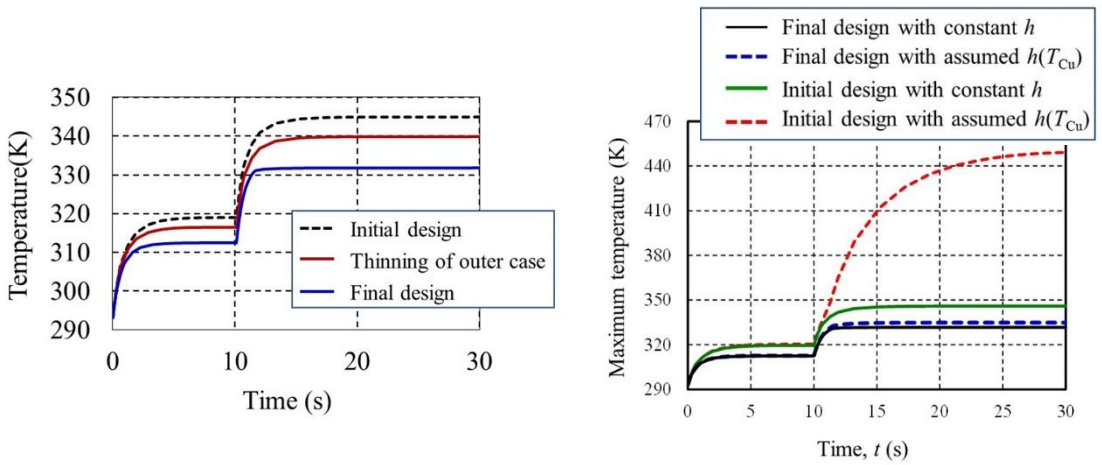


(a)L-PBF を前提とした設計改良　　(b)熱伝導解析結果

図 5　L-PBF を前提に電子ビームコンバータに搭載するヒートシンクの設計

た境界条件のモデルを考案し、解析した結果を図 6(b)に示す。最終設計では熱伝達係数の不確かさの影響が見られないことがわかる。これは、熱伝導係数の温度依存性の効果にもよっている。

造形品を図 7 に示す。2D ラティス構造をもつサポート、サポート除去後の造形品、周囲サポートによる円孔の幾何的精度がわかる。挑戦的にサポートレスで 35°の角度で設計した熱伝導経路の幾何的精度をマイクロ CT 撮像により確認したところ、誤差は高々2%、変動係数が高々3.4%であり、十分な精度を有することがわかった。これらの成果は、”Design and laser powder bed fusion additive manufacturing of copper alloy heat sink for electron beam converter”と題して材料に投稿した。



(a)設計改良による最高温度の低減　　(b)熱伝達係数の不確かさを考慮した解析

図 6　設計改良による最高温度の低減と有効性の検証結果

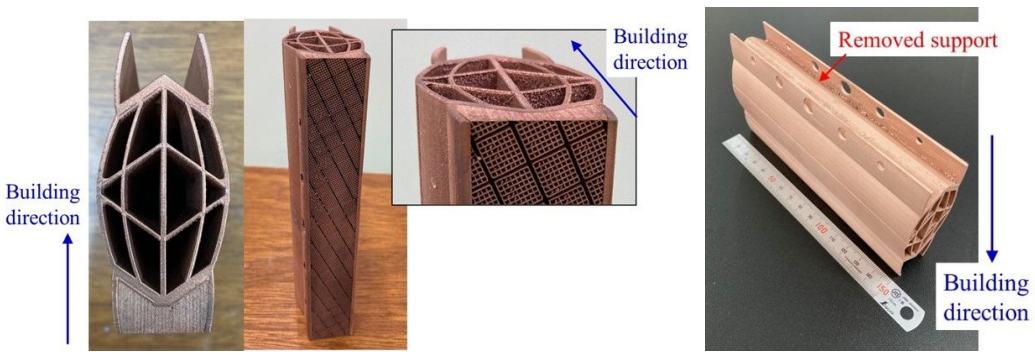


図 7　銅合金による造形

本研究を通じて得た知見あるいはノウハウを、ランダムパラメータとして確率的に表現し、CAE による最適設計における制約条件に用いることができるような技術開発へと発展させる知識融合型 CAE の構想を日本機械学会計算力学部門ニュースレータに記述し、公表した。曖昧さが残るノウハウをランダムパラメータとして表現するアイディアは、不確かさのモデリングの研究の発展として着想された。本研究により、製造可能性、組立性に関する設計ノウハウの数理的、定量的表現の基礎技術が構築できた。この成果は、品質保証のみならず、技術伝承にも貢献できる新しい CAE 技術へと繋がるものと期待される。

５．主な発表論文等

〔雑誌論文〕　計11件（うち査読付論文　9件／うち国際共著　0件／うちオープンアクセス　8件）

１．著者名 Kento Odaka, Shota Kamiyama, Hideo Takizawa, Naoki Takano, Satoru Matsunaga	４．巻 67
２．論文標題 Comparison of the fatigue life of pure titanium and titanium alloy clasps manufactured by laser powder bed fusion and its prediction before manufacturing	５．発行年 2023年
３．雑誌名 Journal of Prosthodontic Research	６．最初と最後の頁 626～632
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2186/jpr.JPR_D_22_00207	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 －

１．著者名 田中春満，高野直樹，瀧澤英男	４．巻 72
２．論文標題 アルミ合金とポリアミドの3Dプリンティングによる円孔つき平板の幾何的精度と積層角度の相関性	５．発行年 2023年
３．雑誌名 材料	６．最初と最後の頁 384～391
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2472/jsms.72.384	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 －

１．著者名 Kento Odaka, Shota Kamiyama, Naoki Takano, Yoshihiko Uematsu, Satoru Matsunaga	４．巻 68
２．論文標題 Fatigue life prediction considering variability for additively manufactured pure titanium clasps	５．発行年 2023年
３．雑誌名 Journal of Prosthodontic Research	６．最初と最後の頁 336～346
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2186/jpr.JPR_D_23_00074	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 －

１．著者名 Takumi Oshima, Naoki Takano	４．巻 84
２．論文標題 Apparent properties of porous support structure with imperfections in metal additive manufacturing	５．発行年 2024年
３．雑誌名 Additive Manufacturing	６．最初と最後の頁 104090～104090
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.addma.2024.104090	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 －

1．著者名 高野直樹	4．巻 70
2．論文標題 3D 積層造形前のバーチャルテスト：品質保証と技術伝承のための知識融合型CAE への期待	5．発行年 2023年
3．雑誌名 日本機械学会計算力学部門ニュースレター	6．最初と最後の頁 23～27
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 －

1．著者名 Mizuki Maruno, Naoki Takano	4．巻 8
2．論文標題 Probabilistic prediction of mechanical behavior of additively manufactured product considering geometrical imperfections associated with building direction	5．発行年 2021年
3．雑誌名 Mechanical Engineering Journal	6．最初と最後の頁 1-13
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/mej.21-00288	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 －

1．著者名 Yoshihiko Uematsu, Toshifumi Kakiuchi, Yaodong Han, Masaki Nakajima	4．巻 11
2．論文標題 Proposal of fatigue limit design curves for additively manufactured Ti-6Al-4V in a VHCF regime using specimens with artificial defects	5．発行年 2021年
3．雑誌名 Metals	6．最初と最後の頁 1-13
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/met11060964	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 －

1．著者名 Kento Odaka, Naoki Takano, Hideo Takizawa, Satoru Matsunaga	4．巻 41
2．論文標題 Probabilistic finite element analysis of fatigue life of additively manufactured clasp	5．発行年 2022年
3．雑誌名 Dental Materials Journal	6．最初と最後の頁 286-294
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.4012/dmj.2021-174	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 －

1．著者名 Lucas Degeneve, Naoki Takano	4．巻 6
2．論文標題 Influence of higher orders of Neumann expansion on accuracy of stochastic linear elastic finite element method with random physical parameters	5．発行年 2020年
3．雑誌名 Mechanical Engineering Letters	6．最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/mel.20-00228	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 －

1．著者名 Tetsuya Matsuda, Kazuma Yamauchi, Nozomi Semba, Nobutada Ohno	4．巻 33
2．論文標題 Effects of random laminate misalignment on macroscopic and microscopic elastic/viscoplastic behaviors of ultrafine plate-fin structures	5．発行年 2021年
3．雑誌名 Continuum Mechanics and Thermodynamics	6．最初と最後の頁 1637-1657
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s00161-021-00988-3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 －

1．著者名 高野直樹	4．巻 72
2．論文標題 加工・造形不良と不確かさを考慮したモデリングと品質保証	5．発行年 2020年
3．雑誌名 機械の研究	6．最初と最後の頁 761-767
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 －

〔学会発表〕　計46件（うち招待講演　5件／うち国際学会　7件）

1．発表者名 高野直樹，神山祥大，植松美彦，小高研人，松永智
2．発表標題 純チタン3D積層造形による歯科クラスプの疲労寿命のばらつきを考慮した予測手法
3．学会等名 日本材料学会第72期学術講演会
4．発表年 2023年

１．発表者名
大嶋拓実，高野直樹，小高研人，松永智

２．発表標題
チタン合金3D積層造形における多孔質サポート構造のCT-FEMによる等価物性値の数値予測

３．学会等名
日本材料学会第72期学術講演会

４．発表年
2023年

１．発表者名
植松美彦

２．発表標題
3D積層造形品の疲労特性

３．学会等名
日本機械学会講習会 機械材料・材料加工のシミュレーションと計測（招待講演）

４．発表年
2023年

１．発表者名
高野直樹

２．発表標題
CAEによる3D積層造形品の疲労寿命の造形前予測

３．学会等名
日本機械学会講習会 機械材料・材料加工のシミュレーションと計測（招待講演）

４．発表年
2023年

１．発表者名
大嶋拓実，高野直樹，小高研人，松永智

２．発表標題
チタン合金3D積層造形における多孔質サポートの等価物性値の予測手法

３．学会等名
日本機械学会2023年度年次大会

４．発表年
2023年

１．発表者名
高野直樹

２．発表標題
3D積層造形によるセルフサポートされた円孔の幾何的造形不良

３．学会等名
日本機械学会第30回機械材料・材料加工技術講演会

４．発表年
2023年

１．発表者名
菅野幹也，高野直樹，小高研人，松永智

２．発表標題
純チタン歯科補綴クラスプの3D積層造形における造形姿勢と幾何的精度に関する研究

３．学会等名
日本機械学会第30回機械材料・材料加工技術講演会

４．発表年
2023年

１．発表者名
水野智之，高野直樹，阪井寛志，森川祐，神谷幸秀，原哲史

２．発表標題
3D 積層造形に適した超伝導加速器によるMo-99 製造用水冷式電子ビームコンバータの設計

３．学会等名
日本機械学会第36回計算力学講演会

４．発表年
2023年

１．発表者名
高野直樹，大嶋拓実

２．発表標題
金属3D積層造形におけるサポートのミクロな造形不良を統計的に考慮した等価物性値のCT-FEM解析

３．学会等名
日本機械学会第36回計算力学講演会

４．発表年
2023年

１．発表者名
高野直樹，田中春満

２．発表標題
アルミ合金およびポリアミドを用いた3D積層造形における円孔の幾何的精度

３．学会等名
日本材料学会第71期学術講演会

４．発表年
2022年

１．発表者名
丹羽樹生，柿内利文，植松美彦

２．発表標題
積層造形された純Tiラティス構造の引張り－圧縮疲労挙動

３．学会等名
日本材料学会第71期学術講演会

４．発表年
2022年

１．発表者名
Raphael Rarcy, Masataka Morikawa, Naoki Takano, Hideo Takizawa, Kento Odaka, Satoru Matsunaga

２．発表標題
Probabilistic modelling and homogenization analysis of porous support structure for titanium alloy additive manufacturing considering defects

３．学会等名
15th World Congress on Computational Mechanics and 8th Asian Pacific Congress on Computational Mechanics (WCCM-APCOM2022)（国際学会）

４．発表年
2022年

１．発表者名
Haruma Tanaka, Naoki Takano, Hideo Takizawa

２．発表標題
Probabilistic modelling of geometrical imperfection for additively manufactured circular hole using aluminum alloy and polyamide

３．学会等名
15th World Congress on Computational Mechanics and 8th Asian Pacific Congress on Computational Mechanics (WCCM-APCOM2022)（国際学会）

４．発表年
2022年

１．発表者名
Kazuma Akashi, Tetsuya Matsuda

２．発表標題
Two-scale damage propagation/strength analysis of CFRP laminates considering variability of fiber strength

３．学会等名
15th World Congress on Computational Mechanics and 8th Asian Pacific Congress on Computational Mechanics (WCCM-APCOM2022)（国際学会）

４．発表年
2022年

１．発表者名
高野直樹

２．発表標題
AMにおけるシミュレーションによる事前評価と設計

３．学会等名
日本機械学会2022年度年次大会（招待講演）

４．発表年
2022年

１．発表者名
高野直樹

２．発表標題
確率均質化法による非線形マルチスケールシミュレーションの必要性と課題点

３．学会等名
プラスチック成形加工学会 射出成形CAE委員会（招待講演）

４．発表年
2022年

１．発表者名
神山祥大，高野直樹，瀧澤英男，小高研人，松永智

２．発表標題
3D積層造形による純チタン歯科補綴クラスプの疲労寿命に関する研究

３．学会等名
日本機械学会M&M2022材料力学カンファレンス

４．発表年
2022年

１．発表者名
田中春満，高野直樹，瀧澤英男

２．発表標題
金属3D積層造形による円孔つき平板の幾何的精度に関する研究

３．学会等名
日本機械学会M&M2022材料力学カンファレンス

４．発表年
2022年

１．発表者名
片山直樹，秋田正之，中島正貴，柿内利文，植松美彦

２．発表標題
粉末床溶融積層造形により作製したオーステナイト系ステンレス鋼SUS316Lの塩水中における疲労挙動

３．学会等名
日本機械学会M&M2022材料力学カンファレンス

４．発表年
2022年

１．発表者名
植松美彦，柿内利文，太田崇照，北條正弘，藤本浩司

２．発表標題
積層造形した寸法の異なるTi-6Al-4V合金ラティス構造の圧縮－圧縮疲労特性

３．学会等名
日本材料学会第35回疲労シンポジウム

４．発表年
2022年

１．発表者名
松田哲也

２．発表標題
CFRPの長期信頼性評価に対するマルチスケール解析の寄与

３．学会等名
ファイバステアリング複合材料技術の実現性調査と技術課題分析に関する研究会シンポジウム　繊維強化プラスチック破壊の描像－破壊素過程の究明－（招待講演）

４．発表年
2022年

１．発表者名
新井滉平，松田哲也，澤田有弘，松本純一

２．発表標題
ネスティングを有する平織複合材料の3スケール樹脂浸透解析

３．学会等名
日本機械学会関東支部第29回総会・講演会

４．発表年
2023年

１．発表者名
高野直樹

２．発表標題
不確かさを考慮したバーチャルテストによる3D積層造形品の品質保証

３．学会等名
日本計算工学会第26回計算工学講演会

４．発表年
2021年

１．発表者名
明司和真，松田哲也，小橋卓実

２．発表標題
繊維強度のばらつきを考慮したCFRP積層板のツースケール損傷進展解析

３．学会等名
日本計算工学会第26回計算工学講演会

４．発表年
2021年

１．発表者名
神山祥大，佐藤章平，阿部裕太郎，高野直樹

２．発表標題
チタン合金3D積層造形品の品質保証のための不確かさを考慮した疲労寿命予測

３．学会等名
日本材料学会第70期学術講演会

４．発表年
2021年

１．発表者名
田中春満，丸野瑞希，高野直樹

２．発表標題
円孔を有する3D積層造形品の形状不良を考慮した数値モデリング

３．学会等名
日本材料学会第70期学術講演会

４．発表年
2021年

１．発表者名
Mizuki Maruno and Naoki Takano

２．発表標題
Predictive study on mechanical behavior of additively manufactured nylon products with holes considering a probable occurrence of geometrical imperfection

３．学会等名
12th International Conference on Computational Methods (ICCM2021)（国際学会）

４．発表年
2021年

１．発表者名
森川正崇，Raphael Farcy，高野直樹，瀧澤英男，小高研人，松永智

２．発表標題
金属3D積層造形におけるサポート内ミクロ構造のマイクロCTイメージベース解析

３．学会等名
日本機械学会第34回計算力学講演会

４．発表年
2021年

１．発表者名
田中春満，高野直樹，瀧澤英男

２．発表標題
アルミ合金3D積層造形品の幾何的および物理的パラメータのばらつきを考慮した力学的挙動の事前予測

３．学会等名
日本機械学会第34回計算力学講演会

４．発表年
2021年

１．発表者名
赤座昌佳，松田哲也，泉崎一輝，久保凱，北條正弘，阿部雅史，森田直樹，吉川暢宏

２．発表標題
非弾性ツースケール解析に基づくCFRPの層間疲労強度予測手法の開発

３．学会等名
日本機械学会第34回計算力学講演会

４．発表年
2021年

１．発表者名
丹羽樹生，柿内利文，植松美彦

２．発表標題
積層造形された純Tiラティス構造の引張り－圧縮疲労挙動

３．学会等名
日本材料学会 材料Week材料シンポジウム 若手学生研究発表会

４．発表年
2021年

１．発表者名
神山祥大，永見凌，高野直樹，瀧澤英男，小高研人，松永智

２．発表標題
3D積層造形による純チタンおよびチタン合金製歯科クラスプの疲労寿命に関する研究

３．学会等名
日本機械学会関東支部第28期講演会

４．発表年
2022年

１．発表者名
本間紳太郎，高野直樹

２．発表標題
アルミ合金3D積層造形によるラティス構造の造形プロセスシミュレーションと圧縮試験結果の比較

３．学会等名
日本材料学会第69期学術講演会

４．発表年
2020年

１．発表者名
森川正崇，高野直樹，小高研人，松永智

２．発表標題
チタン3D積層造形におけるサポート内多孔質構造のマイクロCTイメージベース解析

３．学会等名
日本材料学会第69期学術講演会

４．発表年
2020年

１．発表者名
北野朝陽，高野直樹

２．発表標題
音響構造連成解析によるCFRP積層板の遮音特性評価－音源の音圧を確率密度関数で与えた解析－

３．学会等名
日本計算工学会第25回計算工学講演会

４．発表年
2020年

１．発表者名
高野直樹，古川達也，杉本剛，木島秀弥，田村茂之

２．発表標題
鋼材成分のばらつきを考慮した焼入れプロセスの相変態－熱伝導シミュレーション

３．学会等名
日本計算工学会第25回計算工学講演会

４．発表年
2020年

１．発表者名
丸野瑞希，高野直樹

２．発表標題
PA2200のPBF方式積層造形品の造形不良を考慮した力学的特性予測

３．学会等名
日本計算工学会第25回計算工学講演会

４．発表年
2020年

１．発表者名
Takateru Ohta, Toshifumi Kakiuchi, Masahiro Hojo, Koji Fujimoto, Yoshihiko Uematsu

２．発表標題
Compression-compression fatigue test of lattice-structured Ti-6Al-4V additively manufactured by EBM

３．学会等名
Asian Pacific Conference on Fracture and Strength 2020 (APCFS 2020)（国際学会）

４．発表年
2020年

１．発表者名
佐藤章平，高野直樹

２．発表標題
3D積層造形品のばらつきを考慮した有限要素解析と疲労寿命予測

３．学会等名
日本機械学会計算力学部門CMD2020計力スクウェア研究報告集

４．発表年
2020年

１．発表者名
北野朝陽，高野直樹

２．発表標題
音響構造連成解析において確率密度関数で与えられた音源の音圧に対する遮音特性予測

３．学会等名
日本機械学会計算力学部門CMD2020計力スクウェア研究報告集

４．発表年
2020年

１．発表者名
森川正崇，高野直樹

２．発表標題
金属3D積層造形におけるサポート内多孔質構造と残留金属のマイクロCTイメージベース解析

３．学会等名
日本機械学会計算力学部門CMD2020計力スクウェア研究報告集

４．発表年
2020年

１．発表者名
丸野瑞季，高野直樹

２．発表標題
PA2200のPBF方式積層造形品の造形不良を考慮した力学的特性予測

３．学会等名
日本機械学会計算力学部門CMD2020計力スクウェア研究報告集

４．発表年
2020年

１．発表者名
Naoki Takano

２．発表標題
Study on uncertainty factors for metal additive manufacturing by selective laser melting for stochastic finite element modelling

３．学会等名
14th World Congress on Computational Mechanics (WCCM-ECCOMAS Virtual Congress)（国際学会）

４．発表年
2021年

１．発表者名
Mizuki Maruno and Naoki Takano

２．発表標題
Stress analysis of open-hole tensile specimen of additively manufactured PA2200 considering geometrical imperfection

３．学会等名
14th World Congress on Computational Mechanics (WCCM-ECCOMAS Virtual Congress)（国際学会）

４．発表年
2021年

１．発表者名
杉野千智，柿内利文，中島正貴，植松美彦

２．発表標題
α＋βおよびβ型Ti合金溶製材上に積層造形したTi-6Al-4Vの組織様相と後熱処理の影響

３．学会等名
日本材料学会東海支部第15回学術講演会

４．発表年
2021年

１．発表者名
高野直樹

２．発表標題
3D積層造形品の品質保証のための不確かさのモデリングと確率的シミュレーション

３．学会等名
日本機械学会関東支部第27期総会・講演会

４．発表年
2021年

〔図書〕　計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

高野研究室へようこそ　JSPS KAKENHI Project
http://www.takano-lab.jp/project.html

６．研究組織

	氏名 （ローマ字氏名） （研究者番号）	所属研究機関・部局・職 （機関番号）	備考
研究分担者	植松　美彦 (Uematsu Yoshihiko) (80273580)	岐阜大学・工学部・教授 (13701)	
研究分担者	松田　哲也 (Tetsuya Matsuda) (90345926)	筑波大学・システム情報系・准教授 (12102)	

７．科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕　計0件

８．本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関