名古屋大学 NAGOYA UNIVERSITY

配布先：文部科学記者会、科学記者会、名古屋教育記者会

2025 年 12 月 16 日

報道機関 各位

新手法で 3D プリンタ用の素材開発を大きく加速 Al-Fe 合金系で軽量・高強度・耐熱を実現、輸送機器に実装へ

【本研究のポイント】

・レーザビームを用いる金属 3D プリンタ[注 1)]技術を利用した非平衡なミクロ・ナノ組織[注 2)]の制御に向けた元素選択の考え方を新たに提案した。

・提案した考え方に基づいて開発したアルミニウム－鉄（Al-Fe）系合金[注 3)]の造形体は、高強度や高耐熱性などのさまざまな機能を有し、第 3・第 4 元素によって制御できることを明らかにした。

・この考え方はアルミニウム系合金だけでなく他の金属へも適用できるため、金属 3D プリンタ用の新たな材料開発を大きく加速させることが期待される。

【研究概要】

名古屋大学大学院工学研究科の材料デザイン工学専攻 高田 尚記 教授、キム ダソム 助教らの研究グループは、物質プロセス工学専攻 小橋 眞 教授、鈴木 飛鳥 准教授、加藤 正樹 博士 招へい教員（本務：あいち産業科学技術総合センター）と連携し、金属 3D プリンタ技術の一つであるレーザ粉末床溶融結合法[注 4)]が生み出す非平衡なミクロ・ナノ組織の制御に向けた元素選択の考え方を提案しました。この考え方を基に、アルミニウム（Al）と鉄（Fe）を基本組成とする新たな合金の種類を開発しました。開発した合金は 3D プリンタで造形可能なだけでなく、高強度や高耐熱性など多用な機能を有します。

本研究で開発された Al-Fe 合金系は自動車エンジン用圧縮機の回転体部品など、さまざまな軽量・耐熱部材への社会実装が見込めるだけでなく、本成果にて提案された考え方は Al だけでなく他の金属へも適用できるため、金属 3D プリンタに適用可能な新たな材料の開発を大きく加速させることが期待されます。

本研究成果は 2025 年 12 月 15 日 19 時（日本時間）付『Nature Communications』に掲載されました。

【研究背景と内容】

3D プリンタ(積層造形もしくは付加製造とも呼ばれる)技術の一つである金属粉末を用いたレーザ粉末床溶融結合(Laser Powder Bed Fusion: L-PBF)法は、従来の製造法では不可能な三次元複雑形状の部材を製造できます。その 3D プリンタで製造された金属造形体は、レーザ照射(図1)による超急冷凝固[注 5)](冷却が 1 秒間あたり 10 万度以上の速さで進み、急速に液体金属が固体になる現象)を通じて造られます。本研究グループは、金属造形体のミクロ・ナノ組織が非常に微細な構造を持つだけでなく、これまでにない非平衡状態[注 6)]であることに着目してきました。これまでの研究で、この金属 3D プリンタによる非平衡状態の創出は、軽量金属材料の代表である Al の性能を飛躍的に向上させるだけでなく、従来の常識とは異なる物性を生み出すことも明らかにしてきました。

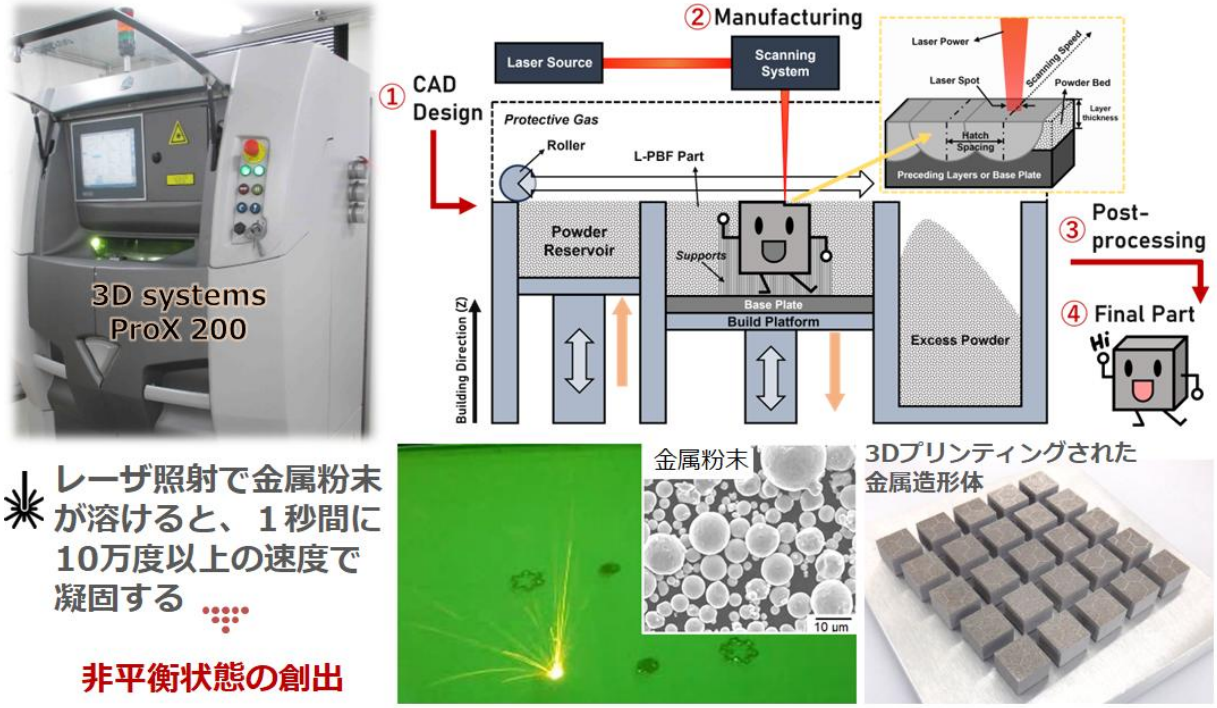

図1. 金属 3D プリンタ技術の一つであるレーザ粉末床溶融結合(Laser Powder Bed Fusion: L-PBF)法とそれを用いて 3D プリンティングされた金属造形体

これまで、最も一般的な金属元素である Fe を含む Al の金属 3D プリンタに関する基礎研究を進めてきました。一般に、Al への Fe の添加は素材を脆(もろ)くし、大気中での劣化を促進するため避けられています。しかし Fe を含んだ Al の 3D プリンタ造形体は、平衡状態よりもはるかに高濃度の Fe を含む非平衡状態で、微細な準安定相[注 7)]を持ちます。研究グループでは、この特性を利用して、常温で比較的高い強度を有することを明らかにしてきました。このような Al の常識と異なる発見に着想を得て、未踏の物質探索空間である Al と Fe などの遷移金属[注 8)]元素の組み合わせを利用し、3D プリンタに適用する新たな材料設計原理の構築を目指しています。

本研究では、L-PBF プロセスの素過程である急冷凝固に伴う固体と液体間の元素の移動の傾向に基づいて、これまで開発してきた Al-Fe 合金に添加する元素(任意の遷移

金属 M)を選定しました。この傾向は、液体から固体へ変化(凝固)の反応経路によって大きく分類でき(包晶(ほうしょう)反応[注9)]と共晶(きょうしょう)反応[注10)])、Al-X の2元系平衡状態図で簡単に調べることができます。

1. 包晶(Peritectic)反応型の元素:固体／液体間にて、α-Al 母相(固相)に移動する。
   → 多量の合金元素を含む過飽和固溶体[注11)]を形成し、α-Al 母相を強化する。
2. 共晶(Eutectic)反応型の元素:固体／液体間にて、液相に分配する。
   → Al_6M 化合物相の構造を有する元素の場合、Al_6Fe 準安定相の相安定性・体積率を向上させ、材料を強化する。

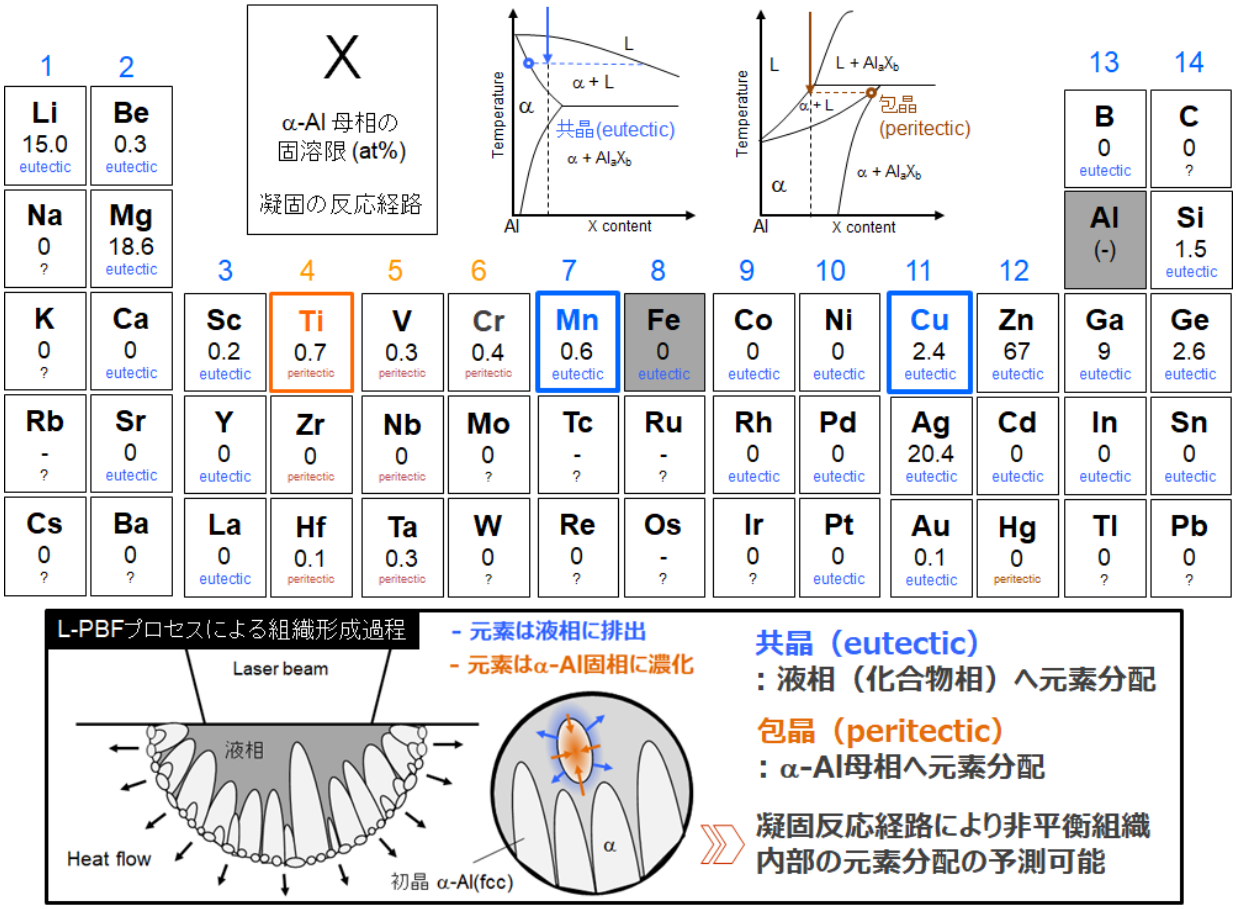

図2. 元素の予測される役割:Al-X2元系における凝固反応(共晶 or 包晶)とα-Al 母相に含むことができる最大の元素濃度(固溶限)を周期表に基づいてまとめた。

図2に示した考え方に基づき、α-Al 母相を強化させる役割のチタン(Ti)(包晶反応かつα-Al 母相に含むことができる濃度が高い)と Al_6Fe 準安定相による強化を促進する役割のマンガン(Mn)、銅(Cu)(共晶反応かつ Al_6Fe 相と同じ結晶構造の化合物を Al と生成する)を添加する元素として選びました。本研究では、これらの元素を組み合わせた Al-Fe を基本とする多元素を含む合金の成分を、金属 3D プリンタにおける超急冷凝固を模擬した熱力学計算[注12)]を用いて設計しました。実際に、Al-Fe-Cu、Al-Fe-Mn、Al-Fe-Ti 3 成分系の合金粉末を用いて金属 3D プリンタの造形を行い、ミクロ・ナノ組織観察の結果、本研究で提案した考え方の有効性を実証しました。また、高い強度の Al は金属 3D プリンタによる製造が困難であることが知られていますが、設計合金は比較的幅広い

製造条件で 3D プリントすることができ、優れた製造性を実験的に示しました。

さらに高い強度や高い耐熱性を目指し、多元素の複合効果を意図した Al-Fe-Cu-Mn(共晶反応型元素の相乗効果)と Al-Fe-Mn-Ti(共晶反応型と包晶反応型の元素の複合効果)4 成分の合金を設計しました。特に、L-PBF による Al-Fe-Mn-Ti 合金造形体において、Mn 元素(共晶反応型)は準安定相の内部に存在し、Ti 元素(包晶反応型)は α-Al 母相内部に存在することを確認しました(図3(a))。これは、本研究の考え方(図2)に基づいて想定された異なる役割の元素の複合効果を実証するものです。Al-Fe-Mn-Ti 合金の 3D プリンタ造形体は、従来の Al と比べて 300℃の高温にて高強度を示すだけでなく(図2)、世界で開発されている Al の 3D プリンタ造形体よりはるかに優れた室温延性[注 13)]を有します(図3(b))。この優れた高温強度[注 14)]と室温延性は、高温で使用される構造材料としての高い信頼性を示すものです。

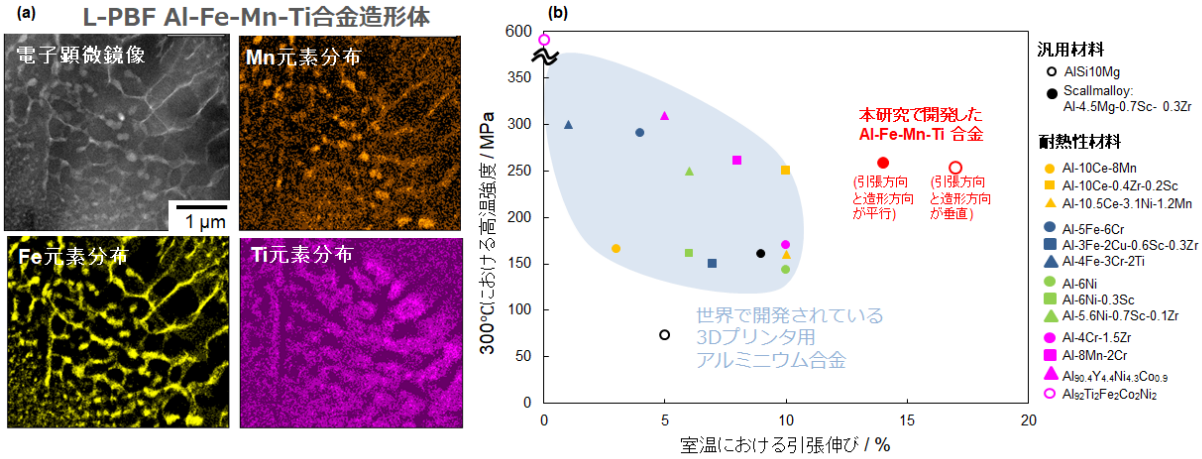

図3. (a) L-PBF 法によって造形された Al-Fe-Mn-Ti 合金のミクロ・ナノ組織の電子顕微鏡像とそれに対応する元素分布図、(b) L-PBF 法によって造形された Al-Fe-Mn-Ti 合金の 300℃における高温強度と室温における引張延性を世界で開発されている L-PBF 用 Al 合金と比較した図。横軸の値が大きいほど延性に優れる。

【成果の意義】

本研究成果は、金属 3D プリンタ技術が複雑な形の金属部材を造るだけでなく、素材にもたらす高機能・多機能性の制御指針を示すものです。開発した高強度 Al-Fe-Cu-Mn 合金や高耐熱性 Al-Fe-Mn-Ti 合金は、輸送機器におけるさまざまな軽量・耐熱部材への適用が期待されます。また、金属 3D プリンタ技術が生み出す非平衡なミクロ・ナノ組織を利用した材料の開発は、Al だけでなく、種々の金属に応用可能です。そのため、本成果にて提案された考え方は Al だけでなく他の金属へも適用でき、金属 3D プリンタに適用可能な新たな材料の開発を大きく加速させることが期待されます。

本研究は、2022 年から始まった科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業 さきがけ [未来材料]物質探索空間の拡大による未来材料の創製『金属 3D プリンタを用いた非平衡組織・準安定相の創出(JPMJPR22Q4)』及び 日本学術振興会 科学研究費助成事業 基盤研究(A)『金属 3D プリンタ技術が生み出す革新的耐熱アルミニウム合金の強化原理(JP24H00378)』の支援のもとで行われました。

【用語説明】

注 1)金属 3D プリンタ:
コンピュータで制作した三次元データを使って、その形に金属を用いて造形する装置。 国際規格 ISO/ASTM 52900 により、3D プリンタ技術は七つのカテゴリに分類され、金属に適用可能な手法は四つ(L-PBF 法はこの一つ)である。

注 2)ミクロ・ナノ組織:
一般に「材料組織」と呼ばれることも多く、材料を観察する際に肉眼では見えない微細な構造(結晶の集合体)を指す。結晶の種類、大きさ、分布によって物性は変化する。ミクロ組織は、光学顕微鏡や走査電子顕微鏡で観察される数十倍から数千倍程度の結晶、欠陥、介在物などを指す。ナノ組織は、さらに微細な領域での、結晶構造などの大きさがナノ(10 億分の 1)メートル(nm)単位の構造を指す。

注 3)合金:
二種以上の金属を混ぜた材料・物質。金属と非金属元素を混ぜた材料も、金属的性質を持つものは合金と呼ばれる場合が多い。

注 4)レーザ粉末床溶融結合法:
英語では、Laser Powder Bed Fusion(L-PBF)と呼ぶ。三次元データに基づいて、一層ずつ金属粉末を積み重ね、これを繰り返して対象物を造形する。具体的には、レーザ(Laser)照射を利用し、数十マイクロ(100 万分の 1)メートル厚さの金属粉末層(Powder Bed)を結合(Fusion)させる過程を繰り返し、金属の構造体を製造する技術。

注 5)凝固:
液体が固体になる現象。

注 6)非平衡状態:
平衡状態に達していない(エネルギーが最小でない)系の状態。

注 7)準安定相:
平衡状態では存在しない相。熱力学的に不安定な状態のみ存在できる。

注 8)遷移金属:
周期表で第 3 族元素から第 12 族元素の間に存在する元素。遷移元素とも呼ばれる。

注 9)包晶(ほうしょう)反応:
一般に、冷却中に固相と液相が反応し、全く新しい固相を形成する反応を指す。ここでは、固体と液体間において元素が固体に分配することに着目している。

注 10)共晶(きょうしょう)反応:
一般に、単一の液相が、温度が一定のまま二つの異なる固相に同時に変化する反応を指す。ここでは、固体と液体間において元素が液体に分配することに着目している。

注 11)過飽和固溶体:
平衡状態(固溶限)以上に元素が溶けている固体の状態。

注 12)熱力学計算:
多元素・多相の物質および材料の特性を熱力学に基づき定量的に数値解析する手法。

注 13)室温延性:
材料が常温で力を加えられたとき、ひび割れたり壊れたりせず、柔軟に引き伸ばされる性質を指す。構造体に用いられる材料の信頼性の観点から、重要な材料物性である。

注 14)高温強度:
高い温度における素材の強さ。圧力と同じ Pa 表記。構造用金属材料の場合、金属の溶ける温度(絶対温度)の半分以上を高温と称する場合が多い。

【論文情報】

雑誌名:Nature Communications
論文タイトル:Design of high-performance sustainable aluminum alloy series for laser additive manufacturing
著者:Naoki Takata (Nagoya Univ.), Koki Minamihama (Nagoya Univ.), Takanobu Miyawaki (Nagoya Univ.), Yue Cheng (Nagoya Univ.), Yifan Xu (Nagoya Univ.), Wenyuan Wang (Nagoya Univ.), Dasom Kim (Nagoya Univ.), Asuka Suzuki (Nagoya Univ.), Makoto Kobashi (Nagoya Univ.), Masaki Kato (Aichi Center for Industry and Science Technology)
DOI: 10.1038/s41467-025-67281-8
URL: https://www.nature.com/articles/s41467-025-67281-8