

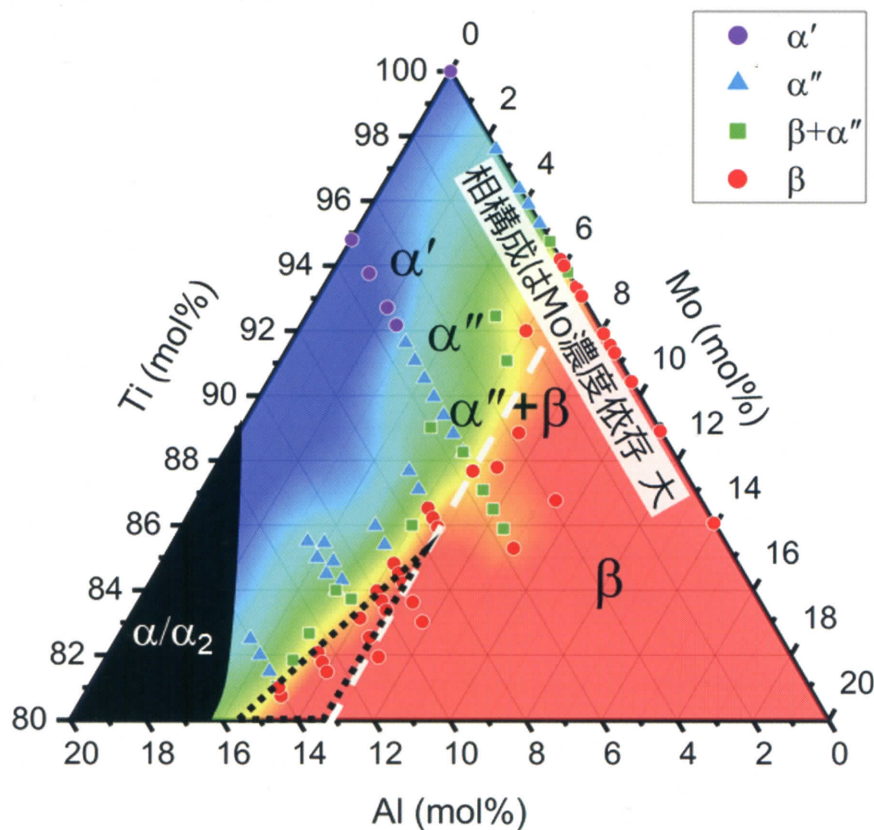
金属

3

KINZOKU MATERIALS SCIENCE & TECHNOLOGY

Vol.94 No.3(2024)

特集 チタン・チタン合金 —基礎と応用のトピックス—



Ti-Mo-Al 三元系合金の溶体化・急冷材の相構成

本文 46 ページ参照

特集 チタン・チタン合金—基礎と応用のトピックス—

特集にあたって	新家光雄, 池田勝彦	3(171)
チタンの需要動向と適用例	三木 基, 武智 勉	4(172)
チタン製錬・リサイクルの最近の話題 ~グリーン・チタンの製造の可能性~	岡部 徹	16(184)
チタン合金の状態図と組織	池田勝彦, 上田正人	22(190)
チタン合金の組織制御と強靱性	新家光雄	28(196)
チタン合金の塑性加工と組織制御: 動的球状化と結晶配向変化を 例としたプロセス最適化	松本洋明	37(205)
生体用形状記憶・超弾性チタン合金開発の最近の展開	野平直希, 田原正樹, 細田秀樹	46(214)
金属 Additive Manufacturing によるチタンおよびチタン合金の相変態と 組織制御	小笹良輔, 松垣あいら, 石本卓也, 中野貴由	56(224)
チタンへの抗菌性付与を目指した可視光応答型光触媒 TiO ₂ 膜の作製と評価	上田恭介, 成島尚之, 古泉隆佑	65(233)

トピックス キラリティに由来するスピン偏極効果について—最近の研究から—

.....	広部大地, 佐藤拓朗, 山本浩史	71(239)
近代日本におけるメタリコン芸術	坂口英伸	81(249)
王滝森林鉄道の復活保存活動	植木雅史	87(255)

私の視点 「黒鳥」と「ツチノコ」	松尾宗次	91(259)
------------------------	------	---------

連載 日本のローカル私鉄(3) 宮城(2)・福島・秋田・山形	石本祐吉	95(263)
--------------------------------------	------	---------

(続) 産業用ロール・ローラの技術的課題と解決(13)

中実圧延ロールとスリーブ式圧延ロールの残留応力解析ならびに疲労強度解析の

まとめ(前編).....	野田尚昭, 佐野義一, 高瀬 康, 堀田源治	104(272)
--------------	------------------------	----------

工業材料 NEWS—WEBパトロールから		2(170)
----------------------------	--	--------

催しものカレンダー 116(284) / 講演会・研究会案内 117(285)

次号予定 117(285) / 編集後記 118(286) / 広告索引 118(286)

編集顧問: 井野博満, 永田和宏

金属 Additive Manufacturing によるチタンおよびチタン合金の相変態と組織制御

小笹 良輔, 松垣 あいら, 石本 卓也, 中野 貴由

チタンおよびチタン合金は、組成や凝固プロセス、加工熱処理などの後工程に応じて多彩な結晶相や微細組織を形成し、種々の優れた機能性を発揮する。本稿では、新たな材料創製法として注目を集めている金属 Additive Manufacturing (AM) の一種である粉末床溶融結合 (Powder Bed Fusion : PBF) 法に焦点を当て、その特有の温度場に基づく金属の溶融/凝固現象とともに、これらを駆使したチタンおよびチタン合金の相変態や組織制御について解説する。

はじめに

チタン (Ti) および Ti 合金は、機械的性質や耐食性、生体適合性などの優れた機能性を有する一方で、酸素を含む他元素との反応性が高い、切削加工性が乏しい、さらには金属材料の中では比較的高価であるといった弱点がある。金属 Additive Manufacturing (AM) は、こうした Ti 系材料の弱点を克服しつつ高付加価値を与え得る技術として、近年注目を集めている。金属 AM は、金属粉末や金属ワイヤなどを出発原料とし、3次元 Computer Aided Design (3D-CAD) データに基づき、複雑な形状の立体構造物を作製することができる。金属 AM を Ti および Ti 合金に適用することによる利点としては、(1) 金型レスで製造できるため金型からの他元素のコンタミネーションを防ぐことができる、(2) (ニア) ネットシェイプでの造形ができるため切削加工性の低い Ti 系材料の加工を最小限に留めることができる、(3) 電子ビームが熱源の場合は高真空、レーザービームが熱源の場合は不活性ガス (アルゴン (Ar) など) 雰囲気での造形を行うため、酸素などの不純物の影響を極めて小さくすることが可能となる、(4) 金属 AM による一体造形により、難溶接材である Ti 系材料の溶接箇所を減らすことができる、(5) 金属 AM を Internet of Things (IoT) と連成することにより、Ti および Ti 合金を用いた製品のマスカスタマイゼーションが可能と

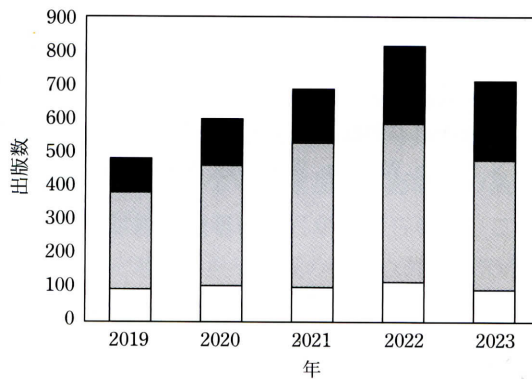


図1 DEDとPBFによるTi系材料に関する学術論文出版数の推移 (Scopusにより検索)。白色：PBF-EB/M、灰色：PBF-LB/M、黒色：DED。

なる、などが挙げられる。金属 AM はこのような多くの利点をもつことから、近年における学術論文出版数の推移からも見てとれるように、Ti および Ti 合金の AM 適用に関する研究・開発は世界中で盛んに行われている (図1)。本稿では、こうしたさまざまな利点に加えて、近年筆者らのグループが見出した、金属 AM 特有の温度場下での溶融/凝固挙動と熱処理効果に基づく各種 Ti 合金 (β 型 Ti 合金、Ti 含有ハイエントロピー合金、 β 相含有 TiAl 合金) における相変態、組織制御に関する近年の研究について解説する。

金属 AM の特徴とプロセス

現在の AM 技術は、ISO/ASTM52900 規格¹⁾

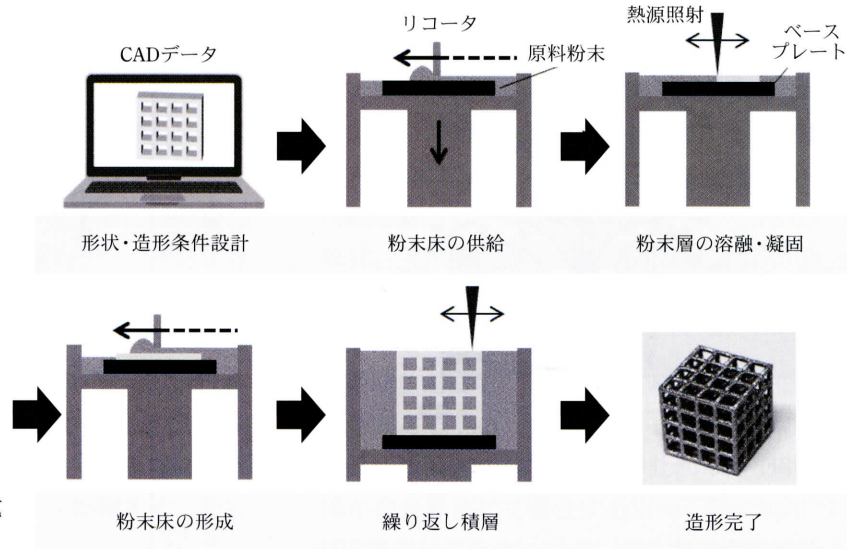


図2 PBF造形プロセスの模式図.

により、Binder Jetting (BJT)、Directed Energy Deposition (DED)、Material Extrusion (MEX)、Material Jetting (MJT)、Powder Bed Fusion (PBF)、Sheet Lamination (SHL)、Vat Photopolymerization (VPP) の7つのカテゴリに分類されている。なかでも、Ti および Ti 合金に多く適用されているのは DED と PBF である。とりわけ、PBF は Ti ならびに Ti 合金への適用例が最も多い AM 手法であり、電子ビームを熱源とする粉末床溶融結合 (Electron Beam Powder Bed Fusion of Metals : PBF-EB/M) 法とレーザを熱源とする粉末床溶融結合 (Laser-based Powder Bed Fusion of Metals : PBF-LB/M) 法が主に適用されている。こうした背景から、以降では、PBF を用いた研究事例を中心に紹介する。

PBF は熱源を用いて選択的に原料粉末を溶融/凝固させる手法であり、造形後に不要な未溶融粉末を取り除くことで所望の立体造形物を高精度に作製可能である。PBF-LB/M の場合、原料粉末には粒子径 10~45 μm、PBF-EB/M には 45~100 μm 程度の粉末を用いることが多い。原料粉末は比表面積が大きいことから、Ti 系材料などの高い活性を有する金属を原料粉末として用いる場合には、特に取り扱いに注意を要する。

図2には、一例としてPBFにより立体造形物を得るための手順を模式的に示す。リコータにより

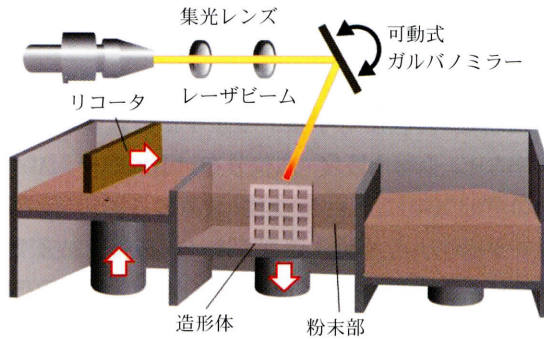


図3 PBF-LB/M装置構成の概略図.

原料粉末を掃引し、形成した粉末床にレーザビームを二次元スライスデータに基づき照射することで、照射部分のみを選択的に溶融/凝固することができる。層ごとに溶融/凝固この過程を繰り返すことで立体造形物が得られる。PBF-LB/Mの場合、レーザの走査は光路中の集光レンズやガルバノミラーを含む光学系によって制御される(図3)。一般的には、主に Ar 雰囲気中にて 0.1% 未満の低酸素濃度下で造形が実施される。この際、造形ステージ直上には Ar ガスなどの不活性ガスをフローさせることで、レーザ照射により発生するブルームやその凝固生成物としてのヒュームの除去が可能となる。

レーザ・電子ビームの照射は金属粉末の溶融に

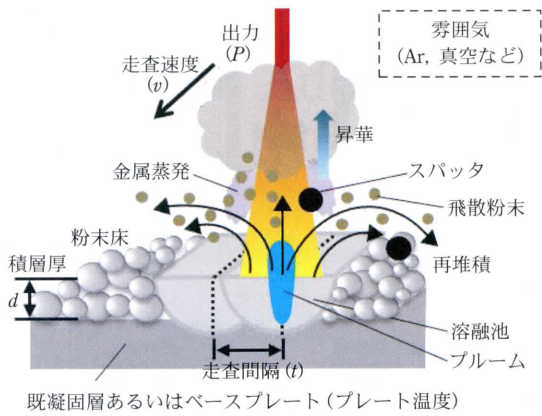


図4 PBFの造形条件に関わるさまざまな因子。

より溶融池を形成する。その3次元形状や凝固時における温度場のコントロールが最適な形状²⁾³⁾と材質^{4)~10)}の制御、ひいては材料の高機能化につながる。そこにはさまざまな因子が関与している。例えば、使用する熱源の種類や物性、原料粉末の各種物性(熱源に対するエネルギー吸収率や熱伝導率など)や粉末粒度・形状分布、造形チャンバー内の雰囲気場に加えて、PBF装置の各種造形パラメータ(出力、 P [W], 走査速度、 v [m/s], 走査間隔、 d [m], 積層厚さ、 h [m])などが挙げられる(図4)。多くの場合、単位体積当たりの投入エネルギー密度($E = P / (v \cdot d \cdot h)$ [J/m³])が入熱に関わる指標として利用される。造形体の組織形成に関わる固液界面の移動速度や温度勾配、熱流方向には、入熱パラメータに加えて、原料金属の熱伝導や熱伝達を介したエネルギーの散逸を考慮する必要がある。一般的に、金属はPBF-EB/Mで用いる電子ビームに対して80%以上の高いエネルギー吸収率を示す。

一方で、金属はレーザーに対しては比較的低いエネルギー吸収率を示すうえ、金属種に応じて異なるエネルギー吸収率となる(図5)¹¹⁾¹²⁾。例えば、一般的に普及しているPBF-LB/M装置で用いられるYbファイバーレーザー(波長1064 nm)に対して、銅(Cu)は極めて低いエネルギー吸収率を示すことに加え、熱伝導率が高い¹³⁾ことから、純Cuを原料粉末として造形する際には、Cuの融

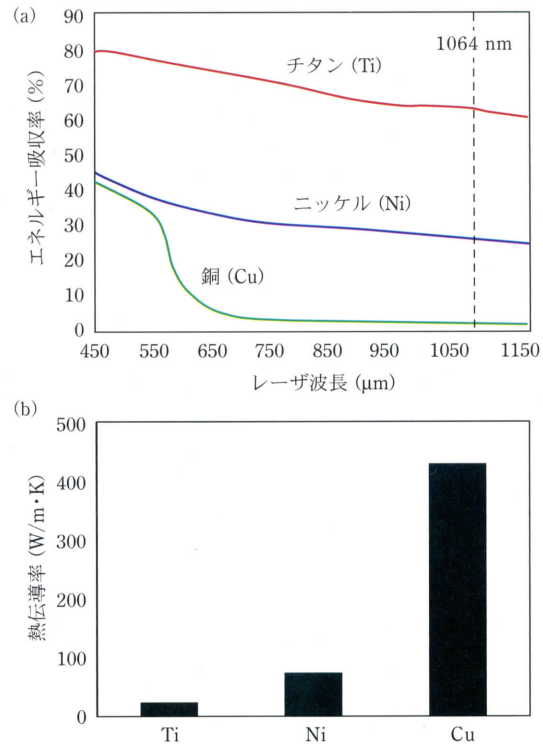


図5 各金属の(a)エネルギー吸収率の波長依存性、(b)300 Kにおける熱伝導率。(文献11)12)を改変引用)

点まで粉末温度が到達せずに溶融不足が生じやすい¹²⁾。一方で、Tiはエネルギー吸収率が高いことから比較的容易に入熱することが可能であり、熱伝導率が低いことから蓄熱されやすい特徴をもつ。このように、類似の造形パラメータであっても、原料粉末の物性に応じて入熱・抜熱挙動がそれぞれ異なることから、各材料で生じる特有の温度場と材料自体の特徴を理解しつつ、それらを駆使することでPBFならではの組織制御がはじめて実現可能となる。以降では、筆者らがこれまでに見出した、PBF-LB/M特有の温度場(主に指向性温度場^{4)~6)}、急冷温度場⁷⁾⁸⁾、*in-situ*での熱処理⁹⁾¹⁰⁾により制御可能なTiおよびTi合金の相変態、組織制御の研究事例について紹介する。

指向性温度場に基づくβ型Ti合金の結晶集合組織と結晶方位制御

骨機能代替インプラント材料として用いる金属

材料は、生体為害性を示さないことに加え、優れた力学的信頼性を有しつつ、力学的に生体に適合することが求められる。皮質骨のヤング率は約30 GPaであり、骨と金属材料とのヤング率差に起因して生じる応力遮蔽を抑制するためには、骨類似の低ヤング率を有する骨インプラント材料の創製が重要となる。なかでも、 β 型Ti合金(体心立方構造: bcc)は、オッセオインテグレーションにより骨との高い結合能をもつことに加え、比較的低いヤング率を示すことが知られている。 β 型Ti合金の一種であるTi-15Mo-5Zr-3Al(mass%)合金(ISO 5832-14)は、単結晶化により結晶方位に依存したヤング率の大きな異方性を発現する。その結果、ヤング率は $\langle 001 \rangle$ にて最小の約44 GPaを示す¹⁴⁾。これは皮質骨のヤング率に匹敵する低値であり、 $\langle 001 \rangle$ を長管骨長軸と平行方向に配向化させた本Ti合金を創製することで応力遮蔽の抑制が期待される。

PBF-LB/Mを本合金に適用し、スキャンストラテジー(XスキャンとXYスキャン)を制御することで結晶成長方位の選択的制御を実現した⁶⁾。ここで、スキャンストラテジーは層ごとの熱源走査方向のパターンとその組み合わせを示す。図6に示すように、XスキャンとXYスキャンではいずれの場合も単結晶様組織となるが、造形体内部の

結晶方位がそれぞれ異なる(図6(a), (b))。X方向への往復走査を行うXスキャンの場合、レーザ走査方向に対して垂直な断面内では、固液界面の法線方向(\parallel 熱流方向)に沿って $\langle 001 \rangle$ セルが優先成長する(図6(c))。伸長したセルは溶融池の中央部付近で会合し、会合界面を形成する(図6(c) 橙色線部)。結果として、造形方向には $\langle 011 \rangle$ が優先配向化することになる。つまり、Xスキャンにおいては、原料粉末のレーザ溶融にともない形成される指向性温度場により、立方晶系金属の優先成長方位である $\langle 001 \rangle$ が、おおよそ熱流方向に沿って成長しつつ、左右から成長したセル同士の配向関係が会合界面にて整合する方向(造形方向に対して 45° 傾いた方向)となるようにそれぞれのセルが優先成長することで、 $\langle 011 \rangle$ が造形方向へと配向化した単結晶様組織が形成される。一方で、X方向とY方向への往復走査を層ごとに繰り返して造形するXYスキャンの場合には、X方向に沿ったレーザ走査により、X方向には $\langle 100 \rangle$ 、Y方向には $\langle 011 \rangle$ が形成される。一方、Y方向に沿ったレーザ走査により、X方向には $\langle 011 \rangle$ 、Y方向には $\langle 010 \rangle$ が形成される(図6(d))。その結果、X面とY面のいずれにおいても $\langle 100 \rangle$ と $\langle 011 \rangle$ の成長が競合することになる。しかしながら、優先成長方位である $\langle 100 \rangle$ が $\langle 011 \rangle$ を淘汰することにより、X方向

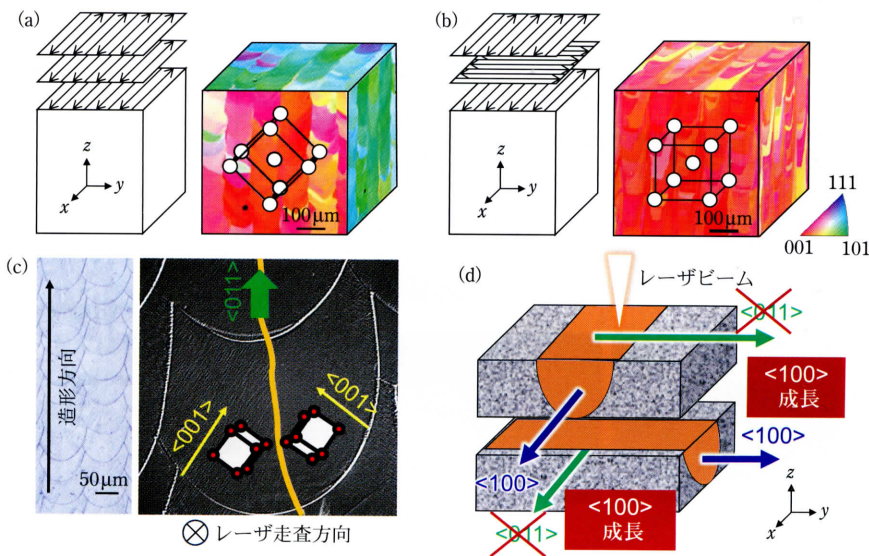


図6 β 型Ti-15Mo-5Zr-3Al合金におけるスキャンストラテジーに依存した結晶方位制御。(文献4)を改変引用)

とY方向には〈100〉と〈010〉が優先成長し、結果としてZ方向には〈001〉が形成される。こうして得られた造形体のヤング率は、〈001〉に沿って約69 GPa、〈011〉に沿って約100 GPaを示すことが確認され、PBF-LB/Mによる結晶方位制御と異方性機能化を達成した。今後のさらなる結晶集合組織の集積化と軽元素の蒸発を考慮した最適組成の制御により、理想的な単結晶に近い低ヤング率化が達成されるものと期待される。

急冷温度場に基づくTi含有生体用ハイエントロピー合金の相分離抑制と単相化

近年当研究グループは、新たな生体用金属材料として、Tiを含有する生体用ハイエントロピー合金 (High Entropy Alloys for Biomedical Application : BioHEAs) を提案した¹⁵⁾。本合金群は、主に生体為害性の低い元素からなることを特徴とし、優れた力学特性と生体親和性を併せもつ。しかしながら、その多くは、元素偏析と相分離を示す¹⁶⁾ことから、理想的な均一固溶体状態とはいえず、本来の機能性を十分に発揮できていない。BioHEAsにて生じる相分離を抑制し固溶体を形成することで、本合金のさらなる高機能化が期待される。BioHEAsで生じる相分離を抑制するには、合金が熔融状態から凝固完了までに要する時間を短縮することが有

効となる。つまり、従来の創製手法である鋳造の冷却速度(100 K/s程度)では到達不可能な、高い冷却速度に基づく急冷凝固によりBioHEAsを創製することが相分離抑制を実現するための重要な鍵となる。

PBF-LB/Mは、レーザーにより形成される熔融池単位での局所の熔融/凝固を基本とし、最大 $10^5 \sim 10^7 \text{ K/s}^{17)}$ にも達する冷却速度を実現可能である。同様に、PBF-LB/MをBioHEAsに適用した場合であっても、鋳造法と比較して、PBF-LB/Mは高い温度勾配(G)と凝固速度(R)に基づき高い冷却速度($G \cdot R$)を実現することが可能である(図7)。図8(a)には、BioHEAsの一種である

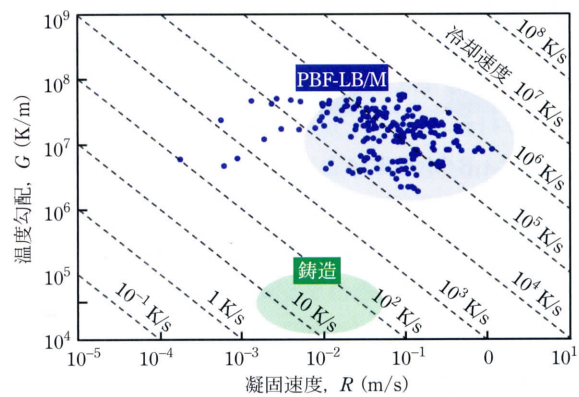


図7 有限要素法を用いた熱拡散シミュレーションにより算出したBioHEAsにおける G (温度勾配)– R (凝固速度)マップ。

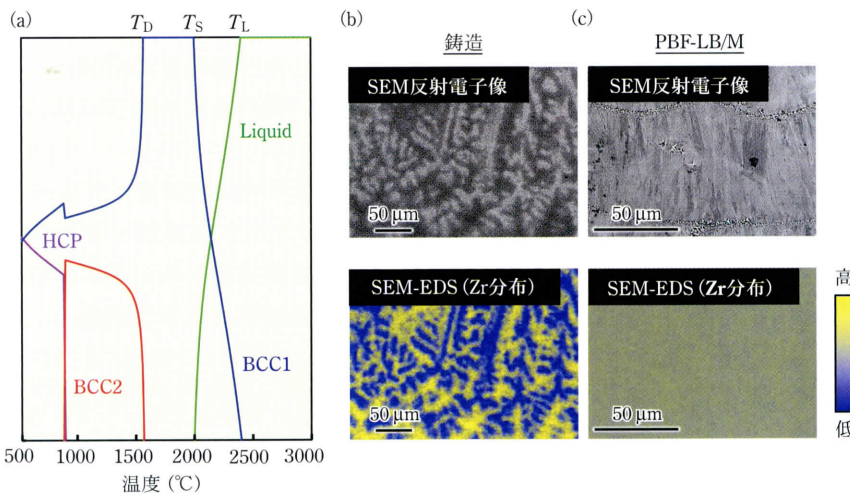


図8 $(\text{TiZr})_{1.4}(\text{NbTaMo})_{0.6}$ 合金の(a)計算平衡状態図と(b)PBF-LB/Mによる急冷凝固組織。
 T_L : 液相線,
 T_S : 固相線,
 T_D : 変態開始温度。
 (文献7)を改変引用)

(TiZr)_{1.4}(NbTaMo)_{0.6} 合金の計算平衡状態図を示す。液相線 (T_L) と固相線 (T_S) の温度差である凝固温度範囲は約 400°C であり、鑄造法で作製する場合には、主に高融点の Nb, Ta, Mo からなる dendrite 組織と主に低融点の Ti と Zr からなる inter-dendrite 組織が形成される結果、格子定数の異なる 2 種類の bcc 構造として相分離が生じる (図 8 (b))。こうした元素偏析と相分離は、高冷却速度の PBF-LB/M を適用することでマクロには抑制可能である (図 8 (c))。こうした結果は、急冷温度場を付与可能な PBF-LB/M が BioHEAs の元素偏析と相分離の抑制に有効な手段であることを示している。

in-situ 熱処理による β 相含有 TiAl 合金の相変態挙動

TiAl 合金は、小さい比重 (約 4.2 g/cm³) と 800°C 程度までの高温環境での使用が期待される軽量耐熱合金であり、Ni 基超合金に代わる材料としてタービン翼への適用が進んでいる。本合金は D0₁₉ 型構造の α_2 -Ti₃Al 相、L1₀ 型構造の γ -TiAl 相、B2 型構造の β -TiAl 相からなる複相金属間化合物であ

る。これまで TiAl 合金では α_2 相と γ 相を中心とした相変態挙動の理解とそれに基づく微細組織や力学挙動の制御が中心に行われてきた。一方で、Al 量を減少させ、その代わりに Nb や Mo, Cr などの β 相安定化元素を添加することで、 β 相を組織に組み込んだ β 相含有 TiAl 合金が提案されている¹⁹⁾。本合金は、従来の代表的な TiAl 合金である Ti-48Al-2Cr-2Nb (48-2-2) 合金よりも優れた高温強度を示すことが報告されており、 β 相含有 TiAl 合金の相変態と組織制御に基づく高機能化が期待されている。

図 9 (a) には、 β 相含有 TiAl 合金である Ti-44Al-6Nb-1.2Cr の鑄造材 ($\alpha_2 + \beta + \gamma$ 混合組織) に対してレーザを高速でシングルスキャン ($P = 180$ W, $v = 800$ mm/s) することにより形成された溶融池とその周囲における相分布図を示している¹⁰⁾。ここで、溶融池境界は、走査型電子顕微鏡を用いて撮像した反射電子像 (SEM-BSE) の観察結果に基づき描かれている。なお、 α_2 相と α 相はいずれも六方晶系に属する結晶構造を有するため、後方散乱電子回折 (SEM-EBSD) 法では区別することが困難となる。ここで、 β 相が溶融池内の大部分で観察されるのに対して、 α_2 相が溶融池境界付近に局在

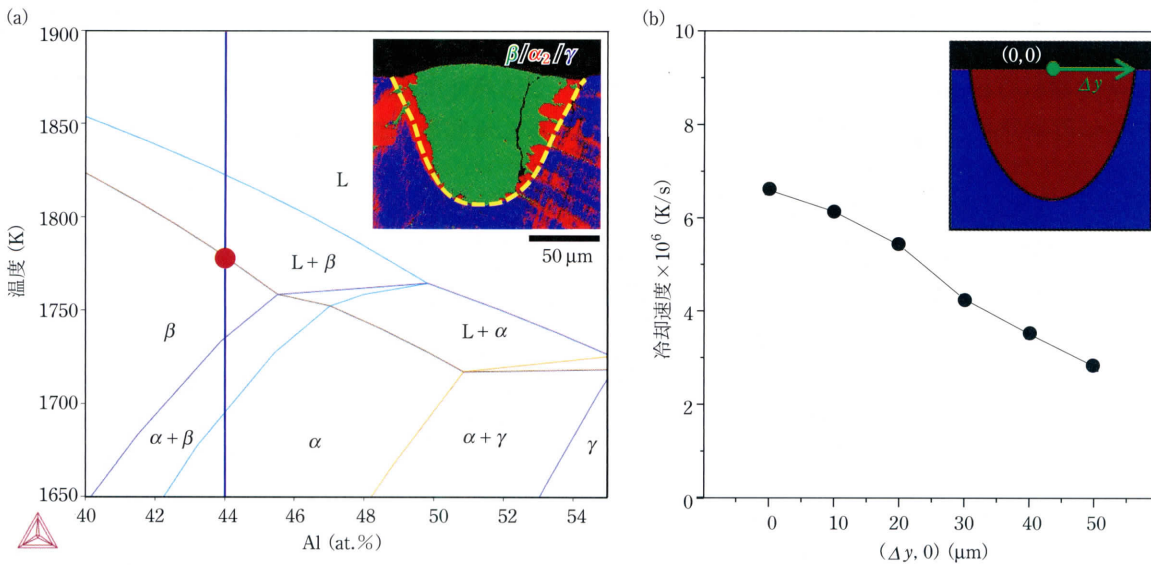


図 9 レーザのシングルスキャン時における β 相含有 TiAl 合金の冷却速度に依存した相変態挙動. (a) 計算平衡状態図と相分布図, (b) 冷却速度の場所依存性. (文献 10) を改変引用)

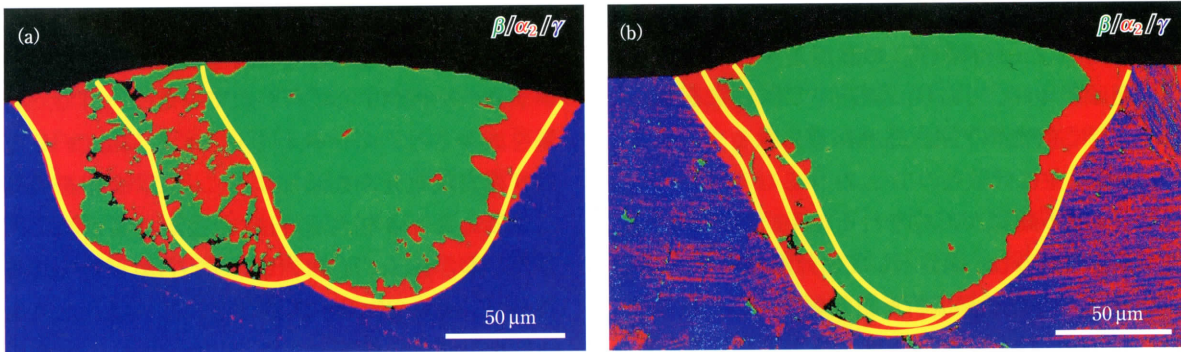


図 10 レーザのマルチスキャンにより形成された熔融池および周囲の相分布図. 走査間隔はそれぞれ (a) 10 μm , (b) 50 μm . (文献 10) を改変引用)

する様子が観察される. とりわけ興味深いことに, α_2 相は熔融池境界を挟んで熔融池内外に存在することが理解される. 熔融池内部と周囲の場所ごとの相変態挙動は以下のとおり考察される.

熔融池内部においては,

- ①レーザ照射により金属が熔融し形成された液相より β 単相組織が形成する (図 9 (a) 赤点部).
- ②形成された β 相組織は, 熔融池内の場所に依存した冷却速度 (図 9 (b)) に応じて異なる相変態挙動を示す. つまり, 熔融池境界付近 (冷却速度: $3 \times 10^6 \text{ K/s}$ 程度) では, 比較的反応速度の遅い $\rightarrow \beta + \alpha$ 変態ではなくマッシュ α 変態によりマッシュ α 粒が形成し, その後 α_2 相への規則化が生じる.
- ③極めて高い冷却速度 ($6 \sim 7 \times 10^6 \text{ K/s}$ 程度) の熔融池中央部付近では, 高温で晶出した β 相が超急冷によりそのまま残存したものと考えられる.

一方で, 熔融池周囲においては,

- ①レーザ照射により生じる高温での熱影響によって, β 単相組織が形成する.
- ②比較的反応速度の遅い $\beta \rightarrow \beta + \alpha$ 変態ではなくマッシュ α 変態によりマッシュ α 粒が形成し, その後 α_2 相への規則化が生じる.

PBF-LB/M は, 高温で晶出する β 相組織を低温まで維持できる極めて高い速度での急冷を実現可能であり, これは従来の鋳造や熱処理では実現不可能な, PBF-LB/M 特有の相変態挙動の制御といえる.

さらに 3 次元造形する際には, 隣接するレーザの走査や上層へのレーザ照射による熱処理の影響が顕在化し, それに応じた相変態挙動の制御が可能となる. 図 10 には, 走査間隔をそれぞれ 10 μm , 50 μm としてマルチスキャンを行うことで形成された熔融池とその周囲における相分布図を示す. 走査間隔 50 μm の場合には, 各レーザ走査の熔融池境界付近に形成される α_2 相と熔融池中央部付近の β 相とが交互に形成される組織が形成される (図 10 (a)). その一方で, 走査間隔 10 μm の場合には, 各レーザ走査により熔融池境界付近に形成される α_2 相が連続的に集積した組織を形成することが可能となる (図 10 (b)). このように, PBF-LB/M は, 走査間隔などの造形パラメータを制御することで熔融池周囲への熱処理効果による材質の制御をも可能とする材料創製プロセスであるといえる.

おわりに

本稿では, PBF-LB/M 方式の金属 AM を用いた Ti および Ti 合金の相変態と組織制御の研究事例について紹介した. PBF-LB/M は, その特徴である急冷温度場や指向性温度場に基づく特有の材質制御を駆使しつつ, 今後のレーザ技術や走査プログラムの高度化により, Ti および Ti 合金のさらなる高機能化に貢献し得る. さらには, これまでの取り組みにて明らかになってきた PBF-LB/M の特

な温度場とその金属組織形成機序を念頭においた、PBF-LB/M 製造に特化した材料のデザインが、高い機能性をもつ Ti 系材料の創製にブレークスルーをもたらすものと期待される。

謝辞

本稿で紹介した研究の一部は、日本学術振興会科学研究費補助金(22K18310, 22H05288, 22H01812, 23H00235)ならびに、JST-CREST 革新的力学機能材料の創出に向けたナノスケール動的挙動と力学特性機構の解明(ナノ力学)(JPMJCR2194)(研究総括:伊藤耕三先生)の支援を受けて実施された。

参考文献

- 1) ISO/ASTM 52900: 2021 Additive manufacturing – General principles – Terminology.
- 2) N. Ikeo, H. Fukuda, A. Matsugaki, T. Inoue, A. Serizawa, T. Matsuzaka, T. Ishimoto, R. Ozasa, O. Gokcekaya and T. Nakano: 3D puzzle in cube pattern for anisotropic/isotropic mechanical control of structure fabricated by metal additive manufacturing, *Crystals*, **11** (2021), 959. <https://doi.org/10.3390/cryst11080959>.
- 3) A. Matsugaki, T. Matsuzaka, T. Mori, M. Saito, K. Funaoku, R. Yamano, O. Gokcekaya, R. Ozasa and T. Nakano: PBF-LB fabrication of microgrooves for induction of osteogenic differentiation of human mesenchymal stem cells, *Int. J. Bioprinting*, **10** (2024), 406-416. <https://doi.org/10.36922/ijb.1425>
- 4) T. Ishimoto, K. Hagihara, K. Hisamoto, S.-H. Sun and T. Nakano: Crystallographic texture control of beta-type Ti-15Mo-5Zr-3Al alloy by selective laser melting for the development of novel implants with a biocompatible low Young's modulus, *Scr. Mater.*, **132** (2017), 34-38. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2016.12.038>
- 5) S.-H. Sun, K. Hagihara and T. Nakano: Effect of scanning strategy on texture formation in Ni-25 at.% Mo alloys fabricated by selective laser melting, *Mater. Des.*, **140** (2017), 307-316. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.11.060>
- 6) H. Amano, T. Ishimoto, R. Suganuma, K. Aiba, S.-H. Sun, R. Ozasa and T. Nakano: Effect of a helium gas atmosphere on the mechanical properties of Ti-6Al-4V Alloy built with laser powder bed fusion: A comparative study with argon gas, *Addit. Manuf.*, **48** (2021), 102444. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102444>
- 7) T. Ishimoto, R. Ozasa, K. Nakano, M. Weinmann, C. Schnitter, M. Stenzel, A. Matsugaki, T. Nagase, T. Matsuzaka, M. Todai, H. S. Kim and T. Nakano: Development of TiNbTaZrMo bio-high entropy alloy (BioHEA) super-solid solution by selective laser melting, and its improved mechanical property and biocompatibility, *Scr. Mater.*, **194** (2021), 113658. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2020.113658>
- 8) O. Gokcekaya, T. Ishimoto, Y. Nishikawa, Y. S. Kim, A. Matsugaki, R. Ozasa, M. Weinmann, C. Schnitter, M. Stenzel, H. S. Kim, Y. Miyabayashi and T. Nakano: Novel single crystalline-like non-equiatomically TiZrHfNbTaMo bio-high entropy alloy (BioHEA) developed by laser powder bed fusion, *Mater. Res. Lett.*, **11** (2023), 274-280. <https://doi.org/10.1080/21663831.2022.2147406>
- 9) M. Todai, T. Nakano, T. Liu, H. Y. Yasuda, K. Hagihara, K. Cho, M. Ueda and M. Takayama: Effect of building direction on the microstructure and tensile properties of Ti-48Al-2Cr-2Nb alloy additively manufactured by electron beam melting, *Addit. Manuf.*, **13C** (2017), 61-70. <http://dx.doi.org/10.1016/j.addma.2016.11.001>
- 10) S.-H. Park, O. Gokcekaya, R. Ozasa, K. Cho, H. Y. Yasuda, M.-H. Oh and T. Nakano: Microstructure evolution of gas-atomized β -solidifying γ -TiAl alloy powder during subsequent heat treatment, *Crystals*, **13** (2023), 1629. <https://doi.org/10.3390/cryst13121629>
- 11) NASA2016: Absorption characteristics of various metals vs wavelength.
- 12) R. Ozasa, M. Gupta, T. Ishimoto, A. Matsugaki, T. Kuse, A. Yanagimoto, M. Ueda, N. Ikeo and T. Nakano: Fabrication of copper alloys as conductive materials via laser beam powder bed fusion, *J. Smart Process*, **10** (2021), 265-269.
- 13) C. Y. Ho, R. W. Powell and P. E. Liley: Thermal conductivity of the elements, *J. Phys. Chem. Ref. Data*, **1** (1972), 279-421.
- 14) S.-H. Lee, M. Todai, M. Tane, K. Hagihara, H. Nakajima and T. Nakano: Biocompatible Low Young's modulus achieved by strong crystallographic elastic anisotropy in Ti-15Mo-5Zr-3Al alloy single crystal, *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.*, **14** (2012), 48-54. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2012.05.005>
- 15) M. Todai, T. Nagase, T. Hori, A. Matsugaki, A. Sekita and T. Nakano: Novel TiNbTaZrMo high-entropy alloys

- 16) T. Hori, T. Nagase, M. Todai, A. Matsugaki and T. Nakano: Development of non-equiatomic Ti-Nb-Ta-Zr-Mo high-entropy alloys for metallic biomaterials, *Scr. Mater.*, **172** (2019), 83-87. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2019.07.011>
- 17) K. Saeidi, X. Gao, Y. Zhong and Z. J. Shen: Hardened austenite steel with columnar sub-grain structure formed by laser melting, *Mater. Sci. Eng. A*, **625** (2015), 221-229. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.12.018>
- 18) S.-H. Sun, T. Ishimoto, K. Hagihara, Y. Tsutsumi, T. Hanawa and T. Nakano: Excellent mechanical and corrosion properties of austenitic stainless steel with a unique crystallographic lamellar microstructure via selective laser melting, *Scr. Mater.*, **159** (2019), 89-93. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2018.09.017>
- 19) T. Tetsui, K. Shindo, S. Kobayashi and M. Takeyama: A newly developed hot worked TiAl alloy for blades and structural components, *Scr. Mater.*, **47** (2002), 399-403. [https://doi.org/10.1016/S1359-6462\(02\)00158-6](https://doi.org/10.1016/S1359-6462(02)00158-6)

おざさ・りょうすけ OZASA Ryosuke

2019 大阪大学大学院工学研究科マテリアル生産科学専攻博士後期課程修了。同年 大阪大学大学院工学研究科助教, 現在に至る。機能性金属材料の微細構造・機能発現の機序と制御に関する研究開発に従事。博士(工学)。

まつがき・あいら MATSUGAKI Aira

2013 大阪大学大学院工学研究科マテリアル生産科学専攻博士後期課程修了。同年 大阪大学大学院工学研究科特任助教, 2020 同助教, 2021 同准教授, 現在に至る。生体組織の微細構造・機能発現の機序と制御に関する研究開発に従事。博士(工学)。

いしもと・たくや ISHIMOTO Takuya

2008 大阪大学大学院工学研究科マテリアル生産科学専攻博士後期課程修了。同年 大阪大学大学院工学研究科特任助教, 2009 同助教, 2014 同講師, 2016 同准教授, 2021 富山大学先進アルミニウム国際研究センター教授, 大阪大学大学院工学研究科特任教授を兼任, 現在に至る。軽金属材料の微細構造・機能創出に関する研究開発に従事。博士(工学)。

なかの・たかよし NAKANO Takayoshi

1992 大阪大学大学院工学研究科博士前期課程修了, 同年 大阪大学工学部助手, 1996 博士(工学)(大阪大学)。1999 大阪大学大学院工学研究科講師, 2001 同助教, 2008 同大学大学院工学研究科マテリアル生産科学専攻教授, 同大学異方性カスタム設計・AM 研究開発センターセンター長, 日本学術会議会員(第26期・27期)などを兼任, 現在に至る。高温耐熱材料の塑性変形機構の解明に端を発し, 「異方性材料学」の学理構築のため, 多様な骨基質配向化機構研究, 金属 AM による異方性形状・材質制御に関する研究に従事。