



Title	レーザ粉末床溶融結合におけるマルテンサイトの分解促進を指向したTi 合金設計原理の構築
Author(s)	寺前, 拓馬
Citation	大阪大学, 2026, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/105438
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

論文内容の要旨

氏 名 (寺 前 拓 馬)

論文題名

レーザー粉末床溶融結合におけるマルテンサイトの分解促進を指向したTi 合金設計原理の構築

論文内容の要旨

レーザー粉末床溶融結合 (PBF-LB) は、輸送機器から医療器具といった幅広い分野でその適用が進められている。この適用拡大は、複雑形状部品を容易に実現加工であることに起因する。その際、形状実現が切削加工や塑性加工に依存しない点は、 $\alpha+\beta$ 型チタン (Ti) 合金のような難加工材を扱う上で大きな利点である。その反面、PBF-LBでは、レーザーの照射により溶融した原料粉末床が急速に冷却されることで、延性が乏しいとされる非平衡 α' マルテンサイトが $\alpha+\beta$ 型Ti合金中に形成される。延性回復には、後熱処理工程の追加やPBF-LBプロセス条件の最適化といった工程設計を介した取り組みが不可欠だが、こうした手法は生産性や普遍性に課題を有する。非平衡 α' マルテンサイトの平衡 $\alpha+\beta$ 相への分解は、 β 相安定化元素の α' マルテンサイトの格子欠陥への拡散を介して行われる。そこで、本研究では、後熱処理を適用することなく、PBF-LB中で α' マルテンサイトのその場分解を促進するために、合金設計に立脚したアプローチを構築した。これにより、高速拡散性かつ難共析変態性を有する β 相安定化元素であるマンガン (Mn) を活用することで、PBF-LB造形体組織の $\alpha+\beta$ 相への平衡化が促進されるとともに、その添加量に応じて幅広い強度と延性を付与可能であることが明らかとなった。本論文は全6章で構成され、内容は以下のとおりである。

第1章は緒言であり、PBF-LBを含む付加製造 (Additive Manufacturing) ならびに $\alpha+\beta$ 型Ti合金の概要と課題について述べた。そのうえで、本研究の目的と方針を提示した。

第2章の文献調査では、PBF-LBとTi合金の基礎的知見の整理をそれぞれ行い、PBF-LB 法で作製した $\alpha+\beta$ 型Ti合金で形成される非平衡 α' マルテンサイトに関する課題を詳細に論じた。加えて、当課題に対する既往研究の試みとその背景にある機構理解に関して体系的な批評を行った。その際、合金設計に関連する試みに焦点を当て、 α' マルテンサイトの分解促進が期待できる合金化元素の要件を挙げた。その要件を満たす元素として Fe, Mn, Cr を提示した。

第3章では、前章で導いた合金化元素群について、最も一般的に使用されている β 相安定化元素であるVに対する α' マルテンサイト分解における優位性の検証を実施した。また、それぞれFe, Mn, CrとTiからなる金属間化合物相に対する析出 β 相の安定性の評価を行うことで、特に $\alpha+\beta$ 相への分解促進を可能にする元素の探索を行った。計算平衡状態図と固相焼結法により作製された、それぞれFe, Mn, Cr, V添加Ti-6Al系合金に対し、PBF-LBプロセス中の固有熱処理現象を模した熱履歴を付与し、その組織構造や相構成の変化を分析した。その結果、MnとFeに α' マルテンサイト分解促進効果が認められた。ただし、Mn添加合金とは異なり、Fe添加合金では金属間化合物TiFeの形成が認められ、共析変態抑制の観点から、FeはMnほど優れた β 相安定化元素ではないことが示された。これらの結果から、本研究が目的とする合金設計に適した β 相安定化元素として、Mnが見出された。

第4章では、Mnに着目し、その α' マルテンサイト分解促進効果のPBF-LBでの実証を行った。平衡状態図計算に基づいて、 α' マルテンサイト分解温度域において、比較対象のTi-6Al-4Vと同程度の β 相安定度を有するMn添加Ti合金としてTi-2Mnを設計し、これら合金の試料をPBF-LBにより16水準の体積エネルギー密度 (VED) のもとで作製した。その結果、組織形態変化および元素分布の平衡化の観点から、Ti-2Mnの方がTi-6Al-4VよりもVED増加に伴う α' マルテンサイトの $\alpha+\beta$ 相への分解が促進されたことが示された。

第5章では、依然としてMnをPBF-LB Ti合金に添加した例が少なく、その基礎的知見に乏しいことを踏まえて、 $\alpha+\beta$ 型Ti-Mn合金の組織構造と力学特性に及ぼすMn添加量の影響を調査した。その結果、1wt%以上のMn添加により、前章で観察した組織形態変化が発現することを明らかにした。なお、4wt%のMn添加では、原料予混合粉末中のMn粒子の配置に起因する固溶Mn成分の分布の不均質性により、島状の粗大 β 相が形成された。また、Mn添加量の増加に伴い、引張試験における破断伸び値が19%から1.3%へと低下するとともに、最大引張強度が724 MPaから1203 MPaへと増加し、幅広い強度と延性が認められた。これら特性値は、先行研究でのTi-Mn合金の加工熱処理材等よりも優れた水準にあり、組織解析結果と一般的な強化機構モデルに基づく定量解析から、転位強化が大きく寄与したことが示された。

第6章では、本研究成果の総括と今後の展望を述べ、本論文を結んだ。

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (寺 前 拓 馬)			
論文審査担当者	(職)	氏 名	
	主 査	教授	近藤 勝義
	副 査	教授	中谷 彰宏
	副 査	教授	林 高弘
	副 査	教授	梅田 純子
	副 査	准教授	佐藤 雄二
論文審査の結果の要旨 本論文では、データ駆動型ものづくり技術として近年、急速に普及が進む金属積層造形法の一つであるレーザ粉末床溶融プロセス（以下、PBF-LB 法）を用いてチタン合金を作製した際、延性に乏しい非平衡マルテンサイト相の生成を伴うことなく、α 相と β 相による高強度と高延性の両立を実現する新たな合金設計原理の確立を目指している。PBF-LB 法は、複雑形状部品を高い設計自由度で造形可能な付加製造技術として、輸送機器や医療分野を中心に実用化が進展している。特に、切削加工や塑性加工が困難な $\alpha+\beta$ 二相チタン合金に対して有効な製造手法である。その一方で、溶融池の急速凝固に起因して、延性に乏しい非平衡な α'マルテンサイト相が形成されるという本質的な課題を有する。この問題に対しては、後熱処理工程の付与やプロセス条件の最適化による対応が検討されてきたが、生産性や汎用性の観点から必ずしも十分な解決策とは言い難い。α'マルテンサイト相の分解は、β 相安定化元素の拡散挙動に強く依存することから、本研究では、工程設計に依存しない合金設計の観点に立脚し、PBF-LB 造形過程における α'マルテンサイト相のその場分解を促進する合金設計原理の構築とそれによるチタン造形体の高強度・高延性の発現を主たる目的としている。本研究で得られた主要な成果は、次の 4 点に要約される。 (1) 非平衡な α'マルテンサイト相の分解機構に関して、合金化元素である β 相安定化元素の拡散速度と、チタンとの金属間化合物の形成能に係る共析反応に関する既往研究の体系的整理と機構的考察を通じて、α'マルテンサイト相の分解促進に資する合金化元素の要件を明確化し、Fe、Mn、Cr を有望な候補元素として抽出している。 (2) これら元素と従来広く用いられてきた β 相安定化元素である V との実験的な比較検証を通じて、Mn および Fe が α'マルテンサイト分解に対して有効であることを示した一方、Fe では金属間化合物 TiFe の形成が確認され、共析変態抑制の観点から Mn がより適した β 相安定化元素であることを明らかにしている。 (3) Mn 添加 Ti 合金を対象として PBF-LB 造形実験を実施し、汎用 $\alpha+\beta$ 二相チタン合金である Ti-6Al-4V と比較して、体積エネルギー密度の増加に伴う α'マルテンサイト相の分析による $\alpha+\beta$ 相の生成が顕著に促進されることを透過型電子顕微鏡観察および 3 次元アトムプローブ解析など微視的構造解析手法を用いて実証している。 (4) Mn 添加量が PBF-LB チタン造形体の組織構造および力学特性に及ぼす影響を体系的に評価し、添加量制御を通じて、α 相の結晶粒径と β 相の分布形態および強度－延性バランスを広範に制御可能であることを示している。 以上のように、本論文は β 相温度域での添加元素の高速拡散と共析反応抑制の観点から抽出した β 相安定化元素であるマンガン Mn を活用した合金設計により、積層造形後に熱処理を施すことなく PBF-LB 造形体において、組織の平衡化および力学特性制御が可能であることを明らかにしている。また、提案した合金設計原理は、PBF-LB 用チタン合金の高強度・高延性化に資する材料設計指針として有用であり、力学機能性チタン合金を廉価に製造できるプロセス構築に寄与する基盤的知見を提供するものである。 よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。			