

# プロジェクトプレ終了評価報告書



評価委員会開催日: 令和5年1月11日

評価委員氏名(敬称略、五十音順)

辻 伸泰 京都大学 大学院工学研究科 教授  
中島 英治 九州大学大学院 総合理工学府 学府長・教授  
長滝 康伸 JFEスチール株式会社 スチール研究所 研究技監  
古原 忠 東北大学 金属材料研究所 所長・教授

確定年月日: 令和5年2月7日

プロジェクト名	グリーンプロセスを用いた低炭素化社会にむけた高性能構造材料の創製
研究責任者の氏名・所属・役職	渡邊 誠 構造材料研究拠点 接合・造型分野長
実施予定期間	平成28年度～令和4年度
研究目的と意義	地球環境負荷低減の観点から、火力発電や航空機等に使われる燃焼機関の効率向上を目的とし、金属材料、セラミックス及びその複合材料など耐熱材料を対象とする。これらの耐熱材料に対して、今後重要性を増すと考えられる3次元積層造形等のニアネットシェイプ製造技術、システム複雑化に伴う異種材料の接合・剥離技術、低温合成、焼結、鍛造・圧延、材料複合化技術等のグリーンプロセスに関する基礎研究を行い、高性能材料を創製するためのプロセスパラメータの最適化、さらに材料設計のためのプロセス技術構築を行う。さらに、最外層へ耐摩耗性・高潤滑性や耐酸化性を付与するためにコーティング等表面構造制御プロセスを確立し、最適化すること(プロセスセレクション)によって、火力発電や航空機ジェットエンジン等高温機器を高効率化する環境低負荷社会のための高効率、高性能材料を創製する。
研究内容	Ti合金、Ni基超合金、セラミックスなど広い範囲の耐熱材料について、3次元積層造形や異種接合、低温プロセスなど環境低負荷プロセスを適用し、プロセス条件基礎データ取得およびそれによりえらえる組織を観察し、プロセス条件に対する組織や特性の関連性を明確化し、高性能な材料創製のための最適なプロセスを確立する。令和元年度より、プロジェクトサブテーマを再編成し、「コンプレッサーに関わる新材料創製:3次元積層造形によるTi合金創製」および「タービンに関わる新材料創製:酸化物系セラミックスの創製」の2つのテーマへ集約し、取り組むこととした。コンプレッサーに関わる新材料創製では、3次元積層造形を用いて特性バランスが取れるTi合金を創製する。また、タービンに関わる新材料創製では、SiC/SiCを超える新しいセラミックス複合材料の開発に取り組む。
ミッションステートメント (具体的な達成目標)	令和元年度に再編成したテーマについて、下記の目標を設定した。 コンプレッサーに関わる新材料創製:商用Ti合金においてプロセス最適化による引張強度1100MPa、伸び14%の実現、熱処理および表面処理による疲労限向上(1.5倍)、新Ti合金造形体のクリープ特性について、既存鍛造材以上の特性実現、さらに3D造形によるオーセチック構造の実現。 タービンに関わる新材料創製:新しいZrO <sub>2</sub> 繊維の長繊維合成プロセスの確立と、連続製造プロセスの確立、見込みある新しいマトリックス用セラミックスの探索、これらを組み合わせる複合化プロセスの確立、これらにより、室温曲げ強度250MPa以上、1500℃で曲げ強度50MPaを有する複合体を創製。

プロジェクト実施期間(平成28年度～令和4年度)の見込みを含む主な研究成果(アウトプット)及び研究成果から生み出された(生み出される)効果・効用(アウトカム)、波及効果(インパクト)

(1) 主な研究成果(アウトプット)

【Ti合金の3D積層造形 関係】

- Ti-6Al-4V レーザ積層造形材のプロセスと組織、引張特性の相関について、造形条件と熱処理の最適化により、“引張強度 1150 MPa、破断伸び 14%”、および“引張強度 1100 MPa、破断伸び 19%”を達成した。
- 機械学習および画像解析を用いることで、3D造形Ti合金材の組織特徴量を定量評価する技術を確立し、さらにこれらプロセス条件、組織特徴量、引張特性との相関を予測するモデルを機械学習により開発した。
- フラットトップレーザを用いることで、世界で初めて、種結晶を用いず、厚さ数 cm にもおよぶ単結晶組織形成を、レーザ3D造形プロセスで実現した。さらに、ニアβ-Ti合金でも単結晶造形が可能であることを示唆した。
- Ti-6Al-4V材の疲労特性について造形まま材と比べ、 $10^6$ サイクルでの疲労強度を熱処理最適化により 1.5倍以上、HIP+DLC処理により 2.5倍以上向上した。
- 3D造形装置の独自改良により、二種類以上の原料粉末を用いた組成傾斜3D造形技術を確立した。Ti-Ni、Ti-Al、Ni-Al系について試作実験を行い組成と組織相関を明らかにした。
- 負のポアソン比を有するトラス構造体を、3D積層造形により創製することに成功した。最適なセル形状にすることで、理論的には90%以上の衝撃エネルギー吸収が可能であることを明らかにした。さらに、ST1開発の3D造形によるTi-Nb超弾性材を適用し、“材料+構造”によるエネルギー吸収体を実現した。
- 耐酸化性に優れた新規耐熱チタン(Ti-Al-Nb-Zr系)合金を提案し、固溶強化により、既存チタン合金よりも室温および高温強度を向上させることに成功した。その強度向上が構成元素の平均原子サイズ比を示すパラメータで定量的に評価可能であることを明らかにした。
- 開発した新規耐熱チタン合金について、レーザ3D造形のプロセス条件や熱処理条件を工夫することで、鍛造材では不可能であった、等軸α相の抑制と結晶粒径の制御により、クリープ特性(600°C137MPaの応力下で全塑性歪10%に750時間以上)の優れた積層造形体の作製に成功した。従来の鍛造材と比較して、7倍の特性向上を実現しており、極めて画期的な成果である。
- Ti合金(造形体)と、ポリエーテルエーテルケトン(PEEK)の接合について、極薄架橋層を介したほぼ直接接合技術を大気圧下、150°Cで実現した。有機材料表面を疎水性に保った状態での直接接合を実現し、有機-無機ハイブリッド構造の耐水信頼性の向上を実現した。

【セラミックス基複合材料 関係】

- マルチホールノズルで連続紡糸できる前駆体を開発することで、ジルコニア系酸化化物長繊維(繊維径: 10μm前後)の連続製造プロセス(量産化技術)を NIMS内で確立した。結晶成長を抑制することで、1300°Cまでは2GPa程度の引張強度を示すジルコニア長繊維を実現した。
- バギング法+PIP法でマトリックスを緻密化できる簡便なセラミックス基複合材料製造プロセスを確立し、ジルコニア繊維強化複合材料を実現した。開発したジルコニア系複合材料は、SiC/SiCでは著しい酸化損耗が生じる 1600°C以上において、優れた耐エロージョン性を実現した。
- SiC微粒子を分散させたHfB<sub>2</sub>超耐熱セラミック材料を開発した。従来材よりも高温強度が高く、かつ1400°Cまで低下せず、さらに1400°C以上では温度の上昇に伴い、強度が増大する(1500°Cで曲げ強度 約700MPa)という画期的な材料を実現した。
- 1400°CでCMASによる高温腐食耐性に優れる、セラミックス基複合材料用の新

**しい耐環境コーティング材を開発した。溶射プロセスを適用し、独自の原料粉末を NIMS 内で設計、製造する技術も確立した。**

- 室温～1500℃まで輻射光の影響を受けずに材料表面を光学顕微鏡観察する技術を実現した。さらにデジタル画像相関法を用いることで、1500℃のような**超高温環境でのひずみ分布測定や、膨張収縮、き裂発生**の**その場観察を可能**とした。
- (2) 研究成果から生み出された(生み出される)効果・効用(アウトカム)、波及効果(インパクト)
- 産業界においても実利用展開への模索が続いている3D積層造形プロセスについて、一般的な商用Ti合金(Ti-6Al-4V)を対象としたプロセス条件—組織—特性関連の基盤となるデータ蓄積、および相関予測モデルを提案した。データは論文の付帯データとして公開し、広く利用できるようにしたことで、成果の社会還元として大きな貢献となったものと考えられる。
- レーザによる単結晶造形という画期的な成果は、2022年6月に本分野の著名誌であるAdditive Materials Lettersにおいて発表以来、“Most Downloaded”論文および“Most Popular”論文の二項目で、ランクインし続けている。また、プレス発表は国内のみならず、海外の多くのサイトで掲載され、極めて大きなインパクトを与えた。今後のレーザ3D造形による単結晶耐熱合金部材実現につながる大きな成果である。
- 開発した新規耐熱チタン(Ti-Al-Nb-Zr系)合金の造形体は、優れた高温強度とクリープ強度を合わせ持つ新材料である。鍛造材と比較して、7倍以上ものクリープ特性の実現は、極めて画期的であり大きなインパクトのある成果である。チタン造形材の耐熱部位への適用拡大などに繋がること期待される。
- 3D造形プロセスの独自開発による二種類以上の原料粉末を混合することによる組成傾斜造形技術は、高速な合金探索や全く新しい材料実現につながる基盤技術であり、今後の新材料開発に大きな波及効果が期待される。
- 負のポアソン比を有するオーセチック構造体の設計および実現は、3D造形ならではのエネルギー吸収体として、Ti合金に限らず応用展開が期待される。
- Ti合金と有機材料の直接接合技術は、接着界面の優れた界面靱性と耐水性を実現した非常にインパクトのある成果である。厳しい環境での利用や高い信頼性が必要となるマルチマテリアル部材の製造への応用が期待される。
- 繊維強化セラミックス基複合材料の独自開発は非常に困難な研究である。長繊維の連続製造技術を確立することが極めて難しいためである。本研究では、当然市販されていないジルコニア長繊維の連続製造技術をNIMS内で確立し、これを用いたセラミックス基複合材料を実現した。関連論文は学会において論文賞を受賞すると共に、新たな外部資金獲得へも繋がり、研究成果が高く評価されている。また、開発材料は、SiC/SiCでは不可能な1600℃といった試験温度において優れた優位性を示しており、今後の発展が多いに期待される。
- 新に開発したHfB<sub>2</sub>超耐熱セラミック材料は、従来材よりも高温強度が高く、かつ1400℃まで低下せず、さらに1400℃以上では温度上昇に伴い、強度が増大する画期的な特性を発現しており、ロケットコーンや超音速旅客機などへの展開が期待される。
- セラミックス基複合材料用の新しい耐環境コーティング材の開発では、重工業メカとの長期的な共同研究に繋がっており、航空エンジンへの実装が期待できる。
- 1500℃のような超高温環境でのひずみ分布測定や、膨張収縮、き裂発生**のその場観察技術は、他では代替できない画期的な技術であり、高温材料の研究において幅広く利用される技術として普及することが大いに期待される。**

<p>プレ終了評価時の見込みを含む進捗状況及び自己点検・評価</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ プレ終了評価時の見込みを含む進捗状況 計画以上の進捗</li> <li>➤ 自己点検・評価 各サブテーマがばらばらに研究を実施していた総花的な状態から、テーマを絞り込み、プロジェクトとして共通的なゴールに対し推進する形へ変革できた点が、まず非常に適切であったと考えられる。また、これにより、チタン合金に対するレーザ 3D 造形技術の開発について、プロセス技術の確立、新材料の開発、3D 構造体の実現と、これまで NIMS が弱かった新しい技術分野に対し、確固たる基盤を構築することができた。SIP や NEDO での計算技術開発とも連携し、非常に大きな技術的な発展を達成できた。また、設定した各目標について、目標以上の成果を挙げることが出来た。繊維強化複合材料(CMC)の開発でも、長繊維製造プロセスを実現し、独自の複合材料開発を実現した点は、他では容易に真似のできない大きな成果であると考えている。唯一、複合化した材料の高温強度の改善が最終年度の課題として残っているが、残りの期間で達成できる見込みである。マトリックスとなり得る超耐熱セラミック材料の独自開発や、原料粉末からの CMC 用新規耐環境コーティングの開発と、各要素技術についても優れた成果を挙げることが出来た。複合材料の力学的な計算研究や特性評価の研究は従来からも多いが、本プロジェクトのように独自の材料開発、プロセス開発の研究は非常に限られている。グリーンプロセスを掲げたプロジェクトとして、テーマに恥じない成果を達成できたと考えられる。</li> </ul>
------------------------------------	--

評価結果		
【評価項目・基準】	評価	コメント
<p><b>研究計画・実施体制・マネジメント・連携活動</b></p> <p>【評価基準】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・研究成果の最大化のための研究実施体制や研究開発の進め方(マネジメント)は妥当であったか。</li> <li>・国や社会のニーズに適合しているか。</li> <li>・進捗に応じ、研究計画の必要な見直しを行ったか。</li> <li>・機構内連携や大学・産業界との連携の取組は十分であったか。</li> </ul>	<p>s:2 a:2 b:0 c:0</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・研究体制の変化に対応して、テーマの見直しを適切に進め、十分な成果につなげたことは高く評価できる。</li> <li>・テーマを超えた参画研究者の連携が少しずつ進んでいる。今後他機関や産業界との連携がより進むことを期待する。</li> <li>・プロジェクトの途中でテーマを見直すことは勇気と決断が必要なことであるが、今回の変更は非常に良い方向への軌道修正であったと思う。3D 造形を研究の中央に位置させたことは、現在の世界の研究動向を鑑みると素晴らしい判断であると思う。</li> <li>・当初計画はややぼんやりとしたものである感が否めないが、2019年度から2テーマへの集約を大胆に行い、その成果が出ている。</li> <li>・2019年度より、3D 造形技術、セラミクス複合材料開発に大胆に研究活動を集約している。中々実行面は難しさが多かったと推察されるが、界面制御PJに比して、実用性に重心を置くプロジェクトとしては、結果的には正しい方針転換だったのではないかと考える。</li> <li>・実用化に向けた産業界との連携も積極的に行われており、成果も出ている。</li> </ul>
<p><b>研究開発の進捗状況及び目標の達成状況</b></p> <p>【評価基準】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・設定した目標は達成されたか(または当初目標以上の成果が得られたか)</li> <li>・設定された目標以外の成果があるか。</li> </ul>	<p>s:2 a:2 b:0 c:0</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・テーマの見直しにより、中間評価以降の成果発信が飛躍的に伸び、PJ 全体として最終的に十分な成果が達成されている。</li> <li>・ベンチマークにおいて世界トップレベルの研究が行われていることは高く評価できる。</li> <li>・目標は達成されており、さらに新たな成果が得られており、全く問題ない。</li> <li>・目標は概ね達成でき、予想した以上の興味深い成果も得られている。期間中に外部資金獲得額が順調に増加している。</li> <li>・設定目標に対しては、計画どおり、あるいは想定以上の成果が出ている。さらに、当初計画以外の成果も数件見受けられる。当初計画以外の成果については、マネジメント面、人的面、資金面等の要因を深掘りし、次期PJでもさらに多くの想定外の成果ができるよう、マネジメントに反映させてはどうか。</li> </ul>

<p><b>研究成果の創出等</b> 【評価基準】 ＜科学的・技術的視点＞ ・世界トップレベルの研究 成果が得られたか。 ・対外発表（論文・学会 等）の量や質について費 用対効果は十分なもので あるか。 ＜社会的・経済的視点＞ ・研究成果は新技術や実 用化につながるもので あるか。 ・得られた研究成果によ り、優れた効果・効用（ア ウトカム）や波及効果（イ ンパクト）が得られたか （期待されるか）</p>	<p><b>s:2</b> <b>a:2</b> <b>b:0</b> <b>c:0</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・構造材料という見かけ上ハイインパクトな成果の出にくい研究領域において、積層造形さらに新規耐熱材料という注目度の高い研究テーマで、世界的にトップレベルの学術的成果が出ている。</li> <li>・プロセスマテリアルデータ連係で DX 主導の研究が進んでいることは評価できる。今後のさらなる研究の高効率化が期待できる。</li> <li>・3D 造形法で擬似単結晶材料が得られたことは、非常に大きな研究成果である。</li> <li>・高温材料に関して興味深い科学的成果が得られている。発表論文数は順調に増加している。よりレベルの高いジャーナルに採択されるよう、底上げが望まれる。</li> </ul> <p>（科学的・技術的視点）</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・得られた成果のベンチマークも定量的になされていて、その成果の世界レベルでの優位性が明確化されている。</li> <li>・対外発表（論文・学会等）の量や質についても申し分ないとする。</li> </ul> <p>（社会的・経済的視点）</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・界面制御 PJ に比して、より実用化に近い領域の研究であるだけに、社会的インパクトの大きい成果につながる可能性の高い成果が多く認められる。</li> </ul>
<p style="text-align: center;"><b>総合評価</b></p>	<p><b>S:1</b> <b>A:3</b> <b>B:0</b> <b>C:0</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・新規性の高いテーマが多い中で、成果の応用展開につながるように産業界との対話・連携が進むことを期待したい。</li> <li>・第5期における新たなテーマ設定の中で、従来型の着実なスタイルの研究者と新しいスタイルの研究者との対話が進み、さらに高い次元の研究が進められる体制を構築していただければと思う。</li> <li>・今後の発展が期待される。</li> <li>・テーマの再編など期間中に苦労もあったと思われるが、その成果が軌道に乗り順調に発展し始めているように思われる。引き続きグループ間の垣根を超えた連携や、若手の自発的な活動に基づく発展を目指していただきたい。</li> <li>・界面制御 PJ 同様、全体的には S 評価を与えても良い成果だと考えるが、やはり更なる質向上への余地がある点、期待を込めて A 評価としたい。</li> <li>・実用化には想定できない課題や環境変化もあり、期待通りの実用化実現には多くのハードルがあると思う。NIMS でどこまでを研究領域とするかは、難しい部分があるが、とくに環境変化への対応は踏み込んだ検討が必要ではないだろうか。とくに積層技術に関しては、プロセス技術や、要素技術の進歩が、革新的に進むケースも想定される。このような環境変化の中でも耐えうる研究成果とするためのマネジメントは必要と考える。</li> <li>・今回除外となったテーマの中にも、深掘りすることで、より大きな成果につながりえる研究もあるのではないかと。また、高温での連続光学顕微鏡観察技術などは、耐熱材料以外への適用も十分あり得ると考える。適用フィールドを拡大する研究も大事にして欲しい。</li> </ul>