安全保障技術研究推進制度　令和６年度終了課題　終了評価結果

1.　評価対象研究課題

（１）研究課題名：多元組成傾斜バルク材を用いた高温構造材料の網羅的な高効率探索

（２）研究代表者：物質・材料研究機構　大村　孝仁

（３）研究期間　：令和２年度～令和６年度

2.　終了評価の実施概要

日時　　：令和７年１１月２０日

場所　　：ＴＫＰ新橋カンファレンスセンター

評価委員：未来工学研究所　理事長、上席研究員

東京大学　名誉教授

平澤　泠（委員長）

横浜国立大学　名誉教授

宇宙航空研究開発機構　航空技術部門

航空利用拡大イノベーションハブ　主幹研究開発員

上野　誠也

大阪大学　名誉教授

梅田　直哉

近畿大学　名誉教授

京極　秀樹

東京科学大学　総合研究院　未来産業技術研究所　教授

佐藤　千明

宇宙航空研究開発機構　航空技術部門

航空利用拡大イノベーションハブ　主幹研究開発員

嶋　英志

日本大学　理工学部　航空宇宙工学科　特任教授

宇宙航空研究開発機構　宇宙科学研究所　名誉教授

嶋田　徹

金沢工業大学　情報理工学部　教授

東京工業大学（現　東京科学大学）名誉教授

藤田　政之

広島大学　大学院先進理工系科学研究科　教授

山本　元道

公共投資ジャーナル社　論説主幹

吉葉　正行

（委員長以外は五十音順・敬称略）

3. 研究と成果の概要

研究の概要

本研究では、最高で 10 元系の単一合金試料に対する室温～1200℃の弾塑性・クリープ特性と合金組成の関係を従来の 1000 倍の速度で取得するハイスループット評価技術を開発する。これにより、実際に TMW-4M3 に代表される、高圧タービンディスク合金組成範囲の熱力学・機械・腐食特性データベースを完成させることを目指す。データベースの各項目は下表のとおりである。

表　データベースの項目

基本状態図 (800～1250℃)	特性データベース（室温～1200℃）	
	機械特性	熱力学特性
四元系 Ni-Co-Al-Ti 系 γ，γ’二相域全域	弾性率	微細組織情報
	降伏応力	相安定性
五元系 Ni-Co-Cr-Al-Ti 系 γ，γ’二相域全域	加工硬化係数	相互拡散係数
	クリープ	耐酸化性

基本状態図は合金の組織設計をする上で骨格となるものであり、これをベースに固溶強化元素を添加した場合の各種特性データを取得する。

成果の概要

３つのサブテーマ（(A) 組成傾斜試料作製技術および多元系熱力学データ取得、(B) 局所特性測定技術、(C) 高速システム化技術）を設定して、各要素技術の高度化とそれらを連携させたハード・ソフトの開発を完成させた。全過程のハイスループット化について、データベースの構築に必要な４つの制御過程（合金組成、プロセス、組織、特性）に分類して高効率化率を算出したところ、従来比で約 300 倍を達成した。これは、３年が約 3.6 日に短縮できることに相当し、極めて大きなインパクトである。プロジェクト期間内に目標である 1000 倍にはわずかに届かなかったものの、今後の取り組みによって 1000 倍化の見通しを得た。成果に対する国内外の反響は予想をはるかに超えるものであり、学術界からは米国をはじめとする主要な研究機関から共同研究の問い合わせがあった他、国内の産業界からは実用材料開発に対する大きな期待が寄せられている。計測技術としての新規性・優位性にも注目が集まっており、開発のベースとして導入した電子顕微鏡、微小力学測定装置の海外メーカからは、プロジェクト終了後も継続的な連携を打診されている。国内外の学術講演会などにおける招待講演も多く、また DX 活用などの国家プロジェクトへの展開も進展しており、今後も多方面へのさらなる波及が期待できる。

4. 終了評価の評点

ＡＡ　想定以上の成果をあげた。

5. 総合コメント

高温材料の特性を網羅的に実測するにあたり、時間を極めて短縮できる方法論を確立した。材料開発速度の面で画期的な成果を挙げ、今後に期待が持てる。得られた成果は世界的な優位性を示すものであり、オリジナルな開発要素から、その優位性を維持できる見込みがある。

疲労強度や腐食については通常の試験法によるべきところが残されたが、研究成果は合金開発の効率化に資するところが大きいものであった。

一方で、設定された高い目標値に及ばなかった要因分析が希薄である。目標値に到達していない点と、どの程度実用化が可能かどうかは、対象となる材料系は異なるが、次期プロジェクトでの成果に期待する。

また、材料の範囲をさらに広範化し、さらに普遍化を図れるような手法にまで展開することを期待する。

6. 評価の観点ごとの評価結果と個々の委員によるコメント

6-1. 研究開始時に設定した研究目標の達成度（主題的成果）

(A) 組成傾斜試料作製技術および多元系熱力学データ取得

広範な組成範囲を１試料でカバーする組成傾斜試料の作製技術や、複相組織のタイライン情報を高速に取得できる技術を確立し、５元系状態図のプロトタイプ版を完成させるとともに 10 元系状態図構築への見通しを得た。

(B) 局所特性測定技術

最終目標の 1200℃に対しては 1100℃への到達にとどまったものの、圧子材料、荷重－変位の制御条件、結晶異方性の考慮、クリープ変形評価などの要素技術についてはプロトコルを確立し、測定技術全体の構築に到達した。

(C) 高速システム化技術

ハードウェアとしては、SEMに高温ナノインデンテーションを組み合わせて組成・組織・熱・機械的特性を同一ステージ上で測定する独創的な装置を開発し、試料作製以降の評価システムとして従来比数100倍の高効率化を達成した。(A)課題によるプロセス・状態図情報取得・組織解析による高速化と合わせると、全過程での高速化として数1000倍の高効率化を達成できる見通しを得た。

【個々の委員によるコメント】（主題的成果）

・数値的に未達成の目標があるが、新たな方法論を打ち立てており、高い成果を得ている。現状の成果の数値でも、革新的と判断できる。

・本事業は、実験により高効率で材料設計を行い、所望の材料特性を高速で探索できるシステムを開発しており、革新的内容である。探索速度については、目標を下回っている点は今後の課題である。

・開発期間を 1000 倍以上速くするという目標に対して、本研究では約 300 倍まで短縮しており、目標達成に対して一定の目途を立てている。

6-2.　計画時に想定していなかった成果（副次的成果）

プロジェクト開始時におけるプロセス技術の主たる開発目標の一つは、タイトルにも掲げた「組成傾斜」バルク材の開発であった。これに加えて「温度傾斜」の開発も計画に含めたが、難易度が格段に高いために限定的な温度範囲や精度を想定せざるを得ず、要素技術開発までが当初の目標であった。これに対して、最終的には想定を超える温度範囲 500～1370℃と 5℃/mm の分解能を達成し、さらに水冷機能を備えて高温組織を凍結することが可能なプロセス技術を開発することに成功した。これを応用して、Ni-14Al と Ni-20Al 合金拡散対である「金太郎アメ」試料(φ6、長さ 50mm)を温度傾斜熱処理し、10000 点のナノインデンテーションマッピング、微細組織観察、組成分析を実施し、一つの試料片に 1000～1300℃の時効温度範囲、14～20 at.%Al の組成範囲における微細組織－機械特性－プロセス温度－組成データセットを取得した。拡散対法では任意の元素の組成傾斜を導入することが可能であり、例えば成分ごとに濃度を変えた場合の機械特性の変化だけではなく、同時にその最適な熱処理条件を極めて短時間で知ることができる。同様の工程を企業で行うと数年かかるところを数か月でデータ取得することができるため、この手法は材料開発を驚異的に加速させるツールとなると見込まれる。

また、高温微小力学試験の技術開発の過程において、例題として用いた単組成 Ni 基超合金の変形挙動の特異な温度依存性を発見した。すなわち、300～600℃の範囲においてクリープ変形がほぼ消滅すると同時に負荷過程の荷重－変位曲線上に鋸刃状の形状が発現するセレーションと呼ばれる現象が現れることを明確化した。高温材料における最も重要な特性の一つであるクリープ変形特性の大幅な性能向上を期待させる発見であり、その発現機構にセレーションがどのように関係しているかという視点は学術的にも興味深い。例えば、動的ひずみ時効や双晶変形などの素過程が仮説として成り立つと考えられるが、温度・組成に対する依存性がどのような因子（例えば積層欠陥エネルギーなど）で支配されるのかを明らかにすることで、材料設計の新しい指針を得られる可能性がある。この端緒的な結果から、さらに深堀研究を継続して論文発表を目指している。

【個々の委員によるコメント】(副次的成果)
・材料特性として重要なクリープ特性を議論する手がかりを得た。
・多元系材料まで展開できることを明らかにしている点は評価できる。
・組成傾斜・温度傾斜を高度に実現させており、将来の材料開発の高速化を可能にする成果を得ている。

6-3.　他の者により派生した成果（間接的成果）

SEM 内微小力学試験装置は、米国 Bruker Hysitron 社から導入したものを活用している。目標温度である 1200℃にはプロジェクト期間内に到達できなかったが、その後も Hysitron 社との連携を継続しており、2025 年 10 月時点で 1200℃到達の見込みを得ている。計測データとして発表できる段階に至れれば、1200℃の実績は世界初になる。

【個々の委員によるコメント】(間接的成果)
・共同研究の申し出があるなど、組織外の研究者との交流が発生している。まだ成果にはなっていないが、外へのインパクトは十分にあり、今後に期待できる。
・評価装置は専門企業との共同開発につながる見込みが得られている。

6-4.　科学技術上特筆すべき成果

上述の通り、本プロジェクト成果に対する国内外の反響は予想をはるかに超えるものであった。最初の出版論文に対して最も反応が早かったのは、米国オークリッジ国立研究所を中心とするハイエントロピー合金を研究しているグループであった。彼らは、無限に存在する合金組成の組み合わせから最適解を効率的に得る方法として我々の技術に注目したようであり、我々側としては Ni 基超合金以外への応用として重要なヒントを得た(技術流出防止の観点から共同研究は実施していない)。また、国内企業からは 300 倍の高効率化について驚きを伴う反応があり、いくつかの二者間共同研究や国家プロジェクトですでに活用が開始されている。最も特筆すべき点の１つは計測技術の進化に対する反応で、プロジェクト期間中にハードを導入した ZEISS 社や Bruker 社はプロジェクト成果を将来的に製品化することを念頭に入れた連携を打診してきており、特に ZEISS 社はドイツ本社から役員が何度も物質・材料研究機構（NIMS）に来訪して協議を行っている。さらに、国内で活発に進められているデータ駆動型の材料開発研究に対する親和性の良さから、文科省「データ創出・活用型材料研究開発プロジェクト DxMT」や JST 経済安全保障重要技術育成プログラム（K Program)「耐熱超合金の高性能化・省レアメタル化に向けた技術開発及び革新的な製造技術開発」などへの展開が進行中で、多方面への大きな波及効果が期待できる。

【個々の委員によるコメント】（科学技術上特筆すべき成果）
・セレーション解明の手がかりを得たことのほかに、実測定の大幅な時間短縮法を確立し、高温材料の網羅的な特性測定法を確立した。
・高温材料だけでなく、他の材料系へも展開可能な点は評価できるが、材料特性については、静的強度とクリープ強度に限定されると思われる。
・従来技術比 300 倍の加速は大きい成果である。
・材料の探査から評価まで一貫して実施できるハイスループットな材料開発システムを構築した点が高く評価できる。

6-5.　論文（投稿中のものも含む），学会発表等
原著論文　掲載 3 編、投稿予定 3 編
学会発表　国内、国際、一般、招待　計 18 編（予定含む）
プレス発表　１件（2025 年 7 月 7 日）

6-6.　特許（出願中のものも含む）
出願中：　国内１件　外国１件

【個々の委員によるコメント】（論文、特許、学会発表等の研究成果）
・金額の割に原著論文の数は少なく、今後に期待すべきと思われる。
・インパクトファクターの高い論文誌へ投稿されており評価できる。
・材料科学分野での学術論文等への投稿も期待したい。
・特許出願数は少ないが、実施内容をほぼ網羅している。
・今後普及しうる方法と思われるので特許の成立やさらなる出願が期待される。
・さらに総合的な知財へのアプローチも期待したい。

6-7.　科学技術への波及効果
前述のように、本プロジェクトで対象とした Ni 基超合金の開発に加えて、ハイ・ミディアムエントロピー合金や多組成・多相・複雑組織などの設計自由度の高い材料系における最適化指針の確立に寄与すると期待される。また、近年盛んに活動が進められているデータ駆動型の研究開発においては、質・量ともに充実したデータベースを整備することの重要性が再認識されており、そのアプローチに対して本プロジェクトで開発した高効率化技術は極めて大きな貢献をもたらすと考えられる。さらに、広範囲の組成・組織・温度を網羅して新たな特性を見出すことは、その特性発現を支配する新たな物理モデルの発見にも繋がると期待され、学術的な寄与に対する期待も高い。

【個々の委員によるコメント】(発展性と波及効果)
・疲労強度や腐食の問題を乗り越えることで、航空用タービン用材料等に使われる合金開発につながることを期待したい。
・多方面の国家プロジェクト・企業連携に発展する動きがある。
・材料開発の方法論やシステムが既に構築できているので、今後はより広範な材料開発に適用できるものと予想される。

6-8.　効率的な研究実施体制とマネジメント

本研究プロジェクトでは、３つのサブテーマの連携性や機動性を考慮して、単一組織内で研究体制を構築した。単独機関による実施体制によって、研究チーム内のコミュニケーションは比較的に取りやすい状況にあった。博士研究員などの研究参画者を研究期間中に変更した経緯があり、最近では外国人のポスドクが多く参画する事情から、会議メンバーを限定するなど情報の取り扱いについては細心の注意を払った。

【個々の委員によるコメント】(効率的な研究実施体制とマネジメント)
・若手を巻き込み、継承研究者を広げた。
・単一組織内で開発を行った体制であり、それぞれの専門家の連携がとれていた。
・単一組織内で、それぞれの専門グループを形成し、効率的に研究実施されていると思われる。

6-9.　研究推進時に生じた問題への対応

ハードウェアの開発において、電子顕微鏡と微小力学試験装置のメーカ間の連結をNIMSが調整する想定で計画していたが、想定外に両者間のギャップが大きくハードルが高いことが明白となり、これを補うために軌道修正を行って電子顕微鏡観察における多機能化・自動化に切り替えることで対応した。結果的に、この軌道修正は多様な微小力学試験結果の解析を行えるという副次的な効果をもたらし、多様な測定に対する高効率化が実現できた。

【個々の委員によるコメント】(研究推進時に生じた問題への対応)
・研究の障害に対して次候補を採用するなどの対策をとり、期間内に成果を挙げることを重視していた。
・新たな材料学的課題が見出されており、その究明を期待したい。
・問題は適切に扱われ、解決されたと思われる。

6-10.　経費の効率的な執行

　複数の参加者が同一の予算の配算体（予算の執行及び管理の補助を行う単位）で執行するため、配算体内での参画者ごとの内訳などについて管理する体制を取った。年度当初予定から変更する場合は参画者間で増減を確認し、業務執行に支障が発生しないように管理した。

【個々の委員によるコメント】（経費の効率的な執行）

・高額な装置を有効に活用している。できれば国内メーカが開発できればよかったが、検討の末に断念したとの説明であった。
・装置開発、材料作製に主に支出されており、効率的に執行されていると思われる。
・問題ない。費用対効果としても十分と評価できる。