

「積層造形部品開発の効率化のための基盤技術開発事業」
終了時評価報告書

2025年3月

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構
研究評価委員会

2025 年 3 月

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構
理事長 斎藤 保 殿

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構
研究評価委員会 委員長 木野 邦器

NEDO技術委員・技術委員会等規程第34条の規定に基づき、別添のとおり評価結果について報告します。

「積層造形部品開発の効率化のための基盤技術開発事業」
終了時評価報告書

2025年3月

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構
研究評価委員会

目 次

はじめに	1
審議経過	2
分科会委員名簿	3
研究評価委員会委員名簿	4
第1章 評価	
1. 評価コメント	1-1
1. 1 意義・アウトカム（社会実装）達成までの道筋	
1. 2 目標及び達成状況	
1. 3 マネジメント	
（参考）分科会委員の評価コメント	1-3
2. 評点結果	1-8
第2章 評価対象事業に係る資料	
1. 事業原簿	2-1
2. 分科会公開資料	2-2
参考資料1 分科会議事録及び書面による質疑応答	参考資料 1-1
参考資料2 評価の実施方法	参考資料 2-1

はじめに

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構においては、被評価プロジェクトごとに当該技術の外部専門家、有識者等によって構成される分科会を研究評価委員会によって設置し、同分科会にて被評価対象プロジェクトの研究評価を行い、評価報告書案を策定の上、研究評価委員会において確定している。

本書は、「積層造形部品開発の効率化のための基盤技術開発事業」の終了時評価報告書であり、NEDO 技術委員・技術委員会等規程第 32 条に基づき、研究評価委員会において設置された「積層造形部品開発の効率化のための基盤技術開発事業」（終了時評価）分科会において評価報告書案を策定し、第 79 回研究評価委員会（2025 年 3 月 17 日）に諮り、確定されたものである。

2025 年 3 月

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構
研究評価委員会

審議経過

● 分科会（2024 年 9 月 26 日）

公開セッション

1. 開会
2. 分科会の設置について
3. 分科会の公開について
4. 評価の実施方法について
5. プロジェクトの説明

非公開セッション

6. プロジェクトの補足説明
7. 全体を通しての質疑

公開セッション

8. まとめ・講評
9. 今後の予定
10. 閉会

● 第 79 回研究評価委員会（2025 年 3 月 17 日）

「積層造形部品開発の効率化のための基盤技術開発事業」（終了時評価）

分科会委員名簿

(2024 年 9 月現在)

	氏名	所属、役職
分科会長	ひらつか さだと 平塚 貞人	岩手大学 理工学部 教授
分科会長 代理	いながき いくひろ 稲垣 育宏	日鉄関西マシニング株式会社 取締役
委員	いわさき たくや 岩崎 拓也	三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング株式会社 コンサルティング事業本部 デジタルイノベーションビジネスユニット デジタルトランスフォーメーション推進部 シニアマネージャー
	たなか ともひさ 田中 智久	東京工業大学 工学院 機械系 准教授
	はまおか あきお 浜岡 昭夫	株式会社日立製作所 モノづくり戦略本部 企画部 シニアエキスパート

敬称略、五十音順

研究評価委員会委員名簿

(2025 年 3 月現在)

	氏 名	所属、役職
委員長	きの くにき 木野 邦器	早稲田大学 理工学術院 教授
委員	あさの ひろし 浅野 浩志	岐阜大学 特任教授 一般財団法人電力中央研究所 研究アドバイザー
	いなば みのる 稲葉 稔	同志社大学 理工学部 教授
	ごないかわ ひろし 五内川 拡史	株式会社ユニファイ・リサーチ 代表取締役社長
	すずき じゅん 鈴木 潤	政策研究大学院大学 政策研究科 教授
	はらだ ふみよ 原田 文代	株式会社日本政策投資銀行 常務執行役員
	まつい としひろ 松井 俊浩	東京情報デザイン専門職大学 情報デザイン学部 学部長・教授
	まつもと ま ゆ み 松本 真由美	東京大学 教育学部附属教養教育高度化機構 環境エネルギー科学特別部門 客員准教授
	よしもと ようこ 吉本 陽子	三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング株式会社 産業創発部 事業戦略グループ 主席研究員

敬称略、五十音順

第 1 章 評価

1. 評価コメント

1. 1 意義・アウトカム（社会実装）達成までの道筋

本事業は、積層造形における金属の溶融凝固現象を解明するとともに、高度な計測・機械制御技術を開発し、金属積層造形部品等における開発の効率化及び高品質の確保を目指すものである。アウトカム達成までの道筋は、これまで取り組んできた基盤技術等をベースに、外部環境、技術動向などの調査も踏まえて検討されており、本事業終了後の自立化も見据えて、素形材企業等への導入だけではなく、公設試験研究機関を通じた中小企業への成果普及、受託製造サービスへの導入などが考慮され評価できる。また、本事業を通じて創出した知的財産は、当事業参加者間で適切に管理され、標準化戦略においてもフォーラム標準の構築に向けた検討が進んでおり、今後の展開が期待される。

一方で、2030 年のアウトカム達成に向けては、各企業・機関が主体で普及を進めていくうえでの施策や取組、役割分担のさらなる具体化について、必要に応じて官民での検討が望まれる。

1. 2 目標及び達成状況

社会的影響等を踏まえてアウトカム指標・目標値が設定されており、アウトカム目標の達成の見込みはおおむね妥当である。開発リードタイムを 1/5 に短縮する目途はついており、高く評価したい。また、現状の課題や海外・競合動向を踏まえ、適切かつチャレンジングなアウトプット目標が設定されており、目標は事業終了段階で全て達成されている点も高く評価できる。プロセスマップ自動生成やフィードバック制御機能の強化により、欠陥率減少や修復などを実現しており、他国には見られない優れた機能であり大きな成果といえる。さらに、論文発表 40 報、特許出願 10 件も評価したい。

一方で、2030 年に国内素形材企業への導入割合 10%というアウトカム目標達成には、利用対象領域・場面や、課題の解決方法など、積層造形の利用を促すための取り組みや、設計者の理解の促進をより進めるなど普及に向けた検討をさらに具体化していただきたい。さらに、積層造形は、原材料（粉末）、造形装置、および造形製品の組み合わせが多岐にわたると想定されるため、素形材企業等での最適化の取り組みも必要になると思われる、必要に応じてバックアップ体制を構築していくよう提言したい。

1. 3 マネジメント

本事業の実施体制および指揮系統は明確であり、アウトプット目標およびアウトカム目標達成に向けて、産学官が連携した適切な体制であり、中間評価時の指摘も踏まえユーザー企業を参画させるなどの体制が構築されていた点を評価したい。例えば、レーザーと電子ビームのそれぞれの開発で得られた知見について、共通化できる部分を相互に有効利用する仕組みとした事は意義がある。また、必要な研究開発案件が適切に計画され、進捗状況の把握も適切に行われていたと考える。

今後は、開発技術の普及拡大にむけ、サプライチェーン、バリューチェーン全体で考える必要があり、積層造形の製造プロセス開発者だけでなく、設計、調達、造形部品のエンドユーザーなどもメンバーに加えた議論が重要である。本事業における産学官の体制は、積層造形技術の発展に関して貴重な資産であり、今後も必要に応じて連携できるよう組織あるいは人脈の維持をお願いしたい。

(参考) 分科会委員の評価コメント

1. 1 意義・アウトカム（社会実装）達成までの道筋

＜肯定的意見＞

- ・ 将来像（ビジョン・目標）の実現に向けて、実証、標準化が網羅されていた。
- ・ 役割分担が明確にされていた。
- ・ 本事業終了後の自立化を見据えていた。
- ・ 情報発信と技術普及の取組が行われていた。
- ・ オープン・クローズ戦略が適切に設定されていた。
- ・ 参加者間での知的財産の取扱いも適切に行われていた。
- ・ 標準化戦略の取組も行われていた。
- ・ これまで取り組んできた、3D プリンタ用金属材料の開発、製造プロセスの基盤技術の開発等をベースに、外部環境および技術動向の調査を踏まえて道筋が検討されていることが確認できた。本プロジェクトの技術開発が目標通り進捗しており、各種展示会での広報宣伝活動も鋭意実施されている点についても確認した。
- ・ オープン・クローズ領域における知的財産および標準類について、適切に管理されていることが確認できた。またアウトカム達成に向けて、事業終了後の特許譲渡等が計画的に推進されており、当初の目標通りに取り組まれていることを確認した。さらに、レーザービーム方式および電子ビーム方式の両者における研究開発内容に沿った特許出願がされていることも確認できた。標準化については、実用化に向けてフォーラム標準の構築に向けた検討も進んでおり、今後の展開が期待される。
- ・ ユーザー企業への導入だけではなく、公設試を通じた中小企業への成果普及、サービスビューロへの導入を通じた設計領域も含めた成果活用促進など、幅広く検討がされている点を評価。
- ・ 本事業を通じて創出した知財は適切に管理されており、さらにはビジネスを担う企業への移管も着実に進められている。今後の知財活用に期待したい。
- ・ 個別技術の開発目標は達成されているため、それらを商用機に搭載するための開発が直ちにスタートできると考えられる。
- ・ システマティックな知財管理体制がある。
- ・ PCT 出願による海外での積極的な知財化をタイムリーに進めることも重要である。
- ・ アウトカム達成までの道筋は、シナリオとしては完成されており、且つ理解しやすいものである。
- ・ 重要箇所の特許取得はなされており、全体的な特許の数としても十分である。

＜問題点・改善点・今後への提言＞

- ・ 実用化・事業化フェーズでは、各企業・機関が主体で普及を進めていくことになるが、本プロジェクト終了後の、アウトカム達成に向けた具体的なフォロー体制がやや不明瞭であり、2030年の目標達成に向けた技術支援やコストダウン支援など、必要に応じて官民でのバックアップ体制の構築が望まれる。

- ・特に海外における関連特許等については、引き続き監視の上、必要に応じて関係者および事業者への展開をはかって頂くよう提言したい。
- ・成果の普及・波及先は検討がなされているものの、実現に向けた役割分担や取組・施策については、さらなる具体化が必要である。
- ・経済波及効果などは開発の進捗や社会実装の見通しに合わせた見直しは行われていない。
- ・海外先進企業のベンチマークは行われたが、プロセス技術についてのみであり、社会実装のあり方なども含めたベンチマークが望まれる。
- ・オープン戦略としては、開発技術のどの部分をオープンにして、どこにどうやって普及拡大させていくかの検討が欲しい。
- ・標準化戦略についても同様に、標準化を目指すのは当然であるが、それがどの業界でどのような価値を生むなどが明らかでないと、受け入れられないと思う。

1. 2 目標及び達成状況

<肯定的意見>

- ・社会的影響等を踏まえてアウトカム指標・目標値が設定されていた。
- ・アウトカム目標の達成の見込みはおおむね妥当である。
- ・本事業が目指す将来像（ビジョン・目標）と関係のあるアウトカム指標・目標値及びその達成時期が設定されていた。
- ・アウトカムが実現した場合、日本経済の進展や国際競争力の優位性もある。
- ・アウトカム目標の設定根拠は、示された事例において明確かつ妥当であるが、今後の動向でケースバイケースのこともある。
- ・達成状況がカウントできる指標が設定されていた。
- ・社会的影響等を踏まえてアウトプット指標や目標値を適切に見直していた。
- ・すべての項目で、最終目標は達成（◎または○）していた。
- ・フィードバック制御機能の強化により、欠陥率減少に飛躍的な効果があった。
- ・論文発表 40 報、特許出願 10 件と多くの必要なものが発表されていた。
- ・アウトプット指標、目標値、達成時期が無理なく明確に設定されていた。
- ・達成状況がカウントできる指標が設定されていた。
- ・グローバル市場における市場規模予想にもとづき、2030 年までのアウトカム目標について、定量的に設定され、技術普及に向けた戦略が確認できた。実用化に向けては、プロセスマップ提供による開発期間短縮、および高度モニタリング・フィードバック機能等による付加価値の増強について目途が得られていることが確認できた。
- ・本プロジェクトの中間評価結果を踏まえて、アウトプット最終目標が適切に見直しされており、技術的な内容のみならず、ユーザーが活用できる手順書についても目標設定がされていることが確認できた。達成状況については、レーザービーム方式および電子ビーム方式のいずれも全ての項目で達成できており、その中でも対象品

種数は過達していることも確認できた。これらの成果に対しては、論文発表や特許出願がされていることも確認された。また副次的成果として、モニタリング機能の開発により、大幅な品質レベル向上の目途が得られることから、航空宇宙、自動車および医療用途等の産業分野への波及が期待される。

- ・ 本事業の実施を通じて積層造形部品の開発期間を 1/5 に短縮する目途はついており、高く評価したい。
- ・ 過去のプロジェクトで創出された研究成果は AM 装置として製品化され世に出されている。本事業の成果も同様に市場投入されることが期待できる。
- ・ 現状 AM の課題や海外・競合動向を踏まえ、適切かつチャレンジングな目標が設定されており、進捗状況も含め適切に管理されていたと評価。設定した目標は事業終了段階で全て達成されている点も高く評価したい。
- ・ 目標開発期間の設定は開発システム搭載機の普及に極めて重要である。その意味で 1/5 という設定は妥当であり、プロセスマップの活用も視野に入れて達成可能であると考ええる。
- ・ 造形プロセスにおける欠陥発生率ゼロの目標にむけ、個別アウトプット目標の設定値の根拠が妥当である。
- ・ プロセスマップの自動生成は AM の普及に資すると考えられるため、本システムをオプションとして（あるいは既存の機械に）組み込むためのさらなる開発が期待される。
- ・ アウトカム目標の設定項目の、品質確保、開発リードタイム短縮などの重要性は、普遍的なものであり、社会環境の変化で大きく変わるものではないので、いずれも妥当である。
- ・ アウトプット目標の設定項目は妥当であり、全て目標値をクリアしている。
- ・ プロセスマップ自動生成やインプロセスモニタリング機能は、他には見られない優れた機能であり大きな成果であると考ええる。

<問題点・改善点・今後への提言>

- ・ 市場予測は、2021 年の実績が主であるが、2023 年度など最近情報も入れるとよい。
- ・ アウトカム達成見通しについては、今後事業者の努力に依存する部分もあり、不確定要素がある点については否めず、研究開発で得られた技術の導入支援など、引き続きのサポートが必要である。また、事業者およびユーザーへの幅広い広報活動も有益と考えられるので、展示会のみならず専門誌への投稿や SNS の活用等についても検討して頂きたい。
- ・ 本プロジェクトで得られたプロセスマップ、モニタリング・フィードバック制御機能等については、手順書も整備されており、事業者の活用が期待されるが、積層造形においては、原材料（粉末）、造形装置、および造形製品の組み合わせが多岐にわたることが予想されることから、各事業者での最適化取り組みも必要になると思われる、必要に応じて官民でのバックアップ体制を構築していくよう提言したい。

- ・ 2030 年に国内素形材企業への導入割合 10%という高い目標が設定されているが、追加機能開発などの検討はされているもののユーザーの利用対象領域・場面や、ユーザー課題の解決方法など、ユーザーの利用を促すための取り組みが不明瞭であった。本事業で優れた成果が生み出されているので、普及に向けた検討をさらに具体化して頂きたい。
- ・ 実生産現場における開発期間短縮のためには AM の特性を理解して設計を行う事が必要であり、設計者の理解の促進を進める必要がある。
- ・ 国内企業への導入 10%目標の達成には最終的にシステムの価格を抑えることが重要であるとする。
- ・ 対象欠陥サイズの 50 μ m 以上としている点については、疲労破壊などの観点からは今後検討できると良い。
- ・ アウトプット目標との整合性が十分でなく、アウトカム目標の達成見込みは不明瞭。
- ・ 検証に使われているサンプル数が少ないので、全体のバラツキが分かる様に、もう少し多くデータを積み上げられる事を希望する。

1. 3 マネジメント

<肯定的意見>

- ・ PL、SPL とも技術力、実用化・事業化能力を十分発揮していた。
- ・ 実施者間での連携も実用化・事業化を目指した体制となっていた。
- ・ 個別事業の採択プロセスも適切であった。
- ・ 研究開発データの利活用・提供方針も適切であった。
- ・ 研究の健全性・公正性の確保に係る取組を行っていた。
- ・ アウトプット目標達成に必要な要素技術が網羅され、要素技術間で連携もあった。
- ・ スケジュールも適切に計画されていた。
- ・ 研究開発の進捗状況を適宜把握し、管理する手法は適切であった。
- ・ 本プロジェクトの実施体制および指揮系統は明確であり、アウトプット目標およびアウトカム目標達成に向けて、産学官が連携した適切な体制であることが確認された。レーザービーム方式および電子ビーム方式における技術情報連携体制、および中間評価時の改善事項であるユーザーとの連携強化についても織り込まれていることを確認した。なお、個別事業の採択プロセス、および研究の健全性・公平性について問題がないことを確認した。
- ・ アウトプット目標達成に必要な研究開発案件および予算に関する、ロードマップが整備されており、適切にスケジュールリングされていることが確認できた。また、進捗状況については、技術推進委員会やサイトビジット等により計画的にトレースされていることを確認した。
- ・ 中間評価での指摘も踏まえユーザー企業を参画させるなど、実用化・事業化を見据えた適切な体制が組まれていたと評価。
- ・ レーザー・電子ビームと技術が異なる 2 つのテーマが実施されたが、双方で定期的

にコミュニケーションを取ることで知財や開発技術の共有・相互利用なども実施されていた。単なる実施体制の構築にとどまらず、成果を最大化するための体制が構築されていた点を高く評価したい。

- ・ 各アウトプット目標が達成されており、実施体制として適切であったと考える。
- ・ レーザーと電子ビームのそれぞれの開発で得られた知見は、開発実施の仕組みで共通化できる部分を相互に有効利用する事で、事業として一体で実施する意義が高まり、また今後の開発や実用化・事業化が加速できると考える。
- ・ 定期的な進捗確認と実施者間での連携が行われており、適切な進捗の管理が行われていたと考える。
- ・ 技術開発における推進体制は、開発実施者やユーザー造形協力企業等の選択は妥当である。
- ・ アウトプット目標は全て達成しているので、管理は適切であったと考える。

<問題点・改善点・今後への提言>

- ・ 本プロジェクトにおける産学官の体制は、積層造形技術の発展に関して、貴重な資産であり、今後も必要に応じて連携できるよう組織あるいは人脈の維持をお願いしたい。
- ・ 本プロジェクトでは、コロナ禍による影響で、意図せずリモート会議による進捗フォローが実施されたが、進捗状況を把握する上で有効であったと思われる。今後も面着（サイトビジット含む）による確認とリモート確認のバランスを確保しながら効率的な運営がなされるよう期待する。
- ・ アウトカム実現に向けてはユーザー企業の巻き込みがさらに必要であると思われる。今後の取り組みに期待したい。
- ・ 達成されたアウトプット成果の有効性の検証は引き続き必要であると感じる。特にいったんプロセスマップが得られ、それに基づいた適切なプロセスパラメータのもとで十分な性能で部品造形ができる場合のフィードバック機能の有効性・費用対効果については今後の実用化の中で検討して行く必要がある。
- ・ 開発技術の普及拡大は、サプライチェーン、バリューチェーン全体で考える必要があり、製造プロセス開発者だけでなく、設計、調達、造形部品のエンドユーザーなどもメンバーに加えた議論が重要である。
- ・ アウトカム目標への道筋が不明瞭なので、必要な技術が網羅されているかは分からない。

2. 評点結果

評価項目・評価結果		各委員の評価					評点
1. 意義・アウトカム（社会実装）達成までの道筋							
(1)アウトカム達成までの道筋		A	B	B	B	C	2.0
(2)知的財産・標準化戦略		A	A	A	A	B	2.8
2. 目標及び達成状況							
(1)アウトカム目標及び達成見込み		B	B	B	B	C	1.8
(2)アウトプット目標及び達成状況		A	A	A	A	A	3.0
3. マネジメント							
(1)実施体制		A	A	A	A	B	2.8
(2)研究開発計画		A	A	A	B	B	2.6

《判定基準》
A：評価基準に適合し、非常に優れている。
B：評価基準に適合しているが、より望ましくするための改善点もある。
C：評価基準に一部適合しておらず、改善が必要である。
D：評価基準に適合しておらず、抜本的な改善が必要である。

（注）評点は A=3、B=2、C=1、D=0 として事務局が数値に換算・平均して算出。

第 2 章 評価対象事業に係る資料

1. 事業原簿

次ページより、当該事業の事業原簿を示す。

「積層造形部品開発の効率化のための
基盤技術開発事業」

事業原簿

公開版

担当部	国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 バイオ・材料部
-----	--

更新履歴

更新日	更新内容
2021 年 8 月 30 日	初版発行
2024 年 8 月 28 日	事業終了に伴う更新

目次

概 要	1
プロジェクト用語集	1
1. 意義・アウトカム（社会実装）達成までの道筋	1-1
1.1. 事業の位置づけ・意義	1-1
1.1.1. 事業の背景・目的・将来像	1-1
1.1.2. 政策・施策における位置付け	1-1
1.1.3. 技術戦略上の位置付け	1-2
1.1.4. 外部環境の状況（技術、市場、制度、政策動向など）	1-2
1.1.5. 他事業との関係	1-3
1.2. アウトカム達成までの道筋	1-4
1.3. 知的財産・標準化戦略	1-4
1.3.1. 知的財産管理	1-4
1.3.2. 知的財産管理（技術研究組合での知財活動）	1-5
2. 目標及び達成状況	2-1
2.1 アウトカム目標及び達成見込み	2-1
2.1.1 アウトカム目標の設定および根拠	2-1
2.1.2 波及効果	2-3
2.1.3 実施体制本事業における本事業における実用化の考え方及び見込み	2-3
2.1.4 費用対効果	2-3
2.2 アウトプット目標及び達成状況	2-4
2.2.1 アウトプット目標の設定および根拠	2-4
2.2.2 アウトプット目標の達成状況	2-5
2.2.3 研究開発成果の意義	2-8
2.2.4 副次的成果及び波及効果	2-9
2.2.5 特許出願及び論文発表	2-9
3. マネジメント	3-1
3.1. 実施体制	3-1
3.1.1. NEDO が実施する意義	3-1
3.1.2. 実施体制	3-1
3.2. 受益者負担の考え方	3-1
3.3. 研究開発計画	3-2
3.3.1. 予算および研究開発のスケジュール	3-2
3.3.2. 進捗管理	3-2
3.3.3. 進捗管理：中間評価結果への対応	3-3
3.3.4. 進捗管理：中間評価結果への対応（実用化・事業化取組）	3-4
3.3.5. 進捗管理：成果の実用化・事業化に向けたマネジメント	3-4

3.3.6.	進捗管理：動向・情勢変化への対応.....	3-4
3.3.7.	進捗管理：成果普及への取り組み.....	3-5
3.3.8.	進捗管理：開発促進財源投入実績.....	3-5
4.	目標及び達成状況の詳細.....	4-1
4.1.	レーザービーム方式における研究開発.....	4-1
4.1.1.	事業内容詳細.....	4-1
4.1.2.	溶融凝固現象の解明による欠陥発生の予測技術の開発【研究開発項目①-L】.....	4-6
4.1.3.	高度モニタリング及びフィードバック制御機能の開発【研究開発項目②-L】.....	4-16
4.1.4.	積層造形部品作製のための開発・評価手法の開発【研究開発項目③-L】.....	4-20
4.1.5.	まとめ.....	4-25
4.2.	電子ビーム方式における研究開発.....	4-27
4.2.1.	事業内容詳細.....	4-27
4.2.2.	溶融凝固現象の解明による欠陥発生の予測技術の開発【研究開発項目①-E】.....	4-32
4.2.3.	高度モニタリング及びフィードバック制御機能の開発【研究開発項目②-E】.....	4-35
4.2.4.	積層造形部品作製のための開発・評価手法の開発【研究開発項目③-E】.....	4-42
4.2.5.	まとめ.....	4-44
添付資料.....		1
●プロジェクト基本計画.....		1
●各種委員会開催リスト.....		10
●特許論文等リスト.....		11

概要

プロジェクト名	積層造形部品開発の効率化のための基盤技術開発事業	プロジェクト番号	P19007
担当推進部/ プロジェクトマネー ジャーまたは担当者 及びMETI 担当課	バイオ・材料部 PMgr 柳本 勝巳（2023 年 8 月～2024 年 3 月） IoT 推進部 PMgr 三代川 洋一郎（2020 年 4 月～2023 年 6 月） IoT 推進部 PMgr 川端 伸一郎（2019 年 3 月～2020 年 3 月）		
0. 事業の概要	ものづくりの付加価値を高めていくためには、複雑形状等が実現できる積層造形技術を積極的に活用することが有効である。一方、金属の積層造形技術では、現象解明さえ十分には進んでおらず、品質の再現性確保や新規開発に係るコストと時間が課題となっている。 本事業では、積層造形における金属の溶融凝固現象を解明するとともに、高度な計測・機械制御技術を開発し、金属積層造形部品等における開発の効率化及び高品質の確保を目指す。		
1. 意義・アウトカム（社会実装）達成までの道筋			
1.1 本事業の位置 付け・意義	第 4 次産業革命が進展する中、ものづくりの付加価値を高めていくためには、多品種少量生産、複雑形状、高機能化等が実現できる積層造形技術を積極的に活用することが有効である。また、世界市場が積層造形技術を活用した付加価値生産の流れに向かう中、その製造プロセスを前提とする機能を持った部品が一般化した場合、従来の工法（鋳造、鍛造等）では対応不可となる。このため、我が国のものづくり企業にとっても、早期に積層造形技術を活用した金属部品等の開発を促進する必然性が高まっている。 特に、我が国の素形材産業の競争力を強化していくためには、高い技術力を保有している企業群の稼ぐ力を引き出し、産業の底上げを行うことや、我が国のみならずグローバル市場から付加価値の高い事業を取り込んで収益性を高めていくことが急務である。 また、金属の積層造形技術は、そもそもの現象解明の研究さえも十分には進んでいないため、付加価値が高い複雑形状、高機能の部品や機能性合金の造形では、品質の再現性を確保することが難しく、新規開発に多大なコストと時間がかかることが課題となっている。		
1.2 アウトカム達 成までの道筋	・ 2030 年度までに、プロセスマップ自動生成機能の実用化、モニタリング機能・フィードバック機能の搭載を進める。 ・ 2030 年度までに、公設試、サービスビューロ、企業等での社会実装を進める。		
1.3 知的財産・標 準化戦略	・ 研究開発成果に関わる知的財産権は、原則として全て委託先に帰属させる。 また、NEDO プロジェクトにおける知財マネジメント基本方針を適用する。 ・ 技術研究組合では、知財審議会を設置するとともに、知的財産権取扱規程等を整備して本事業に参加する全ての組合員と知的財産権の帰属、実施許諾等について合意。 ・ 知財マネジメント強化のため、権利全般とその取り扱いは、技術研究組合が一元管理。 ・ 開発案件の特許化技術を抽出し、開発スケジュールに沿ってタイムリーな知財取得を図る。 ・ 海外での特許を念頭に PCT 国際出願とする。		
2. 目標及び達成状況			
2.1 アウトカム目標 及び達成見込み	・ 積層造形部品の開発期間を 1/5 に短縮 試験研究機において、開発した機能・システムを利用することにより、リードタイムが 1/5 程度まで短縮できることが確認できたため、これらの機能を商用機に搭載することで実部品の造形においても開発期間を 1/5 に短縮できる見込み。 ・ 本システム搭載金属 3D プリンタの国内素形材企業への導入割合 10% 本事業で開発した機能群は海外製品と比較して性能的に優位性があり、プロセスマップ自動生成機能を有した装置は上市されていない。これらの画期的な研究開発成果を事業化することにより導入が促進され目標を達成できる見込み。		
2.2 アウトプット 目標及び達成状 況	[レーザービーム方式] 研究開発項目①：溶融凝固現象の解明による欠陥発生の予測技術の開発 ・ 欠陥発生予測システムの予測精度 95%以上 試験研究機による教師データを用いて、機械学習を利用した欠陥予測システムを開発し、予測精度 95%以上を達成した。 研究開発項目②：高度モニタリング及びフィードバック制御機能の開発 ・ フィードバック制御機能による造形プロセス中の 50μm 以上の欠陥率 0% 試験研究機により、収集した造形表面の画像データを用いて表面性状パラメータを計算し、50μm 以上の大きさの欠陥率 0%を満足する特定の表面性状パラメータを見出し、フィードバックのための再溶融による欠陥補修機能を開発した。		

	研究開発項目③：積層造形部品作製のための開発・評価手法の開発 ・開発・評価手法の開発のために必要な積層造形物に関する評価データを、金属材料4種類以上について蓄積する。 汎用型モニタリング装置により、インコネル718合金、Ti-6Al-4V合金、SUS316L合金、AlSi10Mg合金に加えて銅合金についても、リアルタイムでメルトプール、パウダーベット及び造形表面の評価データを蓄積した。 ・積層造形部品を効率的に開発・評価する手法をユーザが活用できる手順書として纏める。 汎用型モニタリング装置によるユーザ造形品の造形を行い、開発した機能の有効性を確認し、ユーザが活用できる手順書として纏めた。 [電子ビーム方式] 研究開発項目①：溶融凝固現象の解明による欠陥発生の予測技術の開発 ・欠陥発生予測システムの予測精度95%以上 造形後の表面形状データから欠陥の有無を予測するソフトウェアを試作し、欠陥予測システムの精度97.7%を達成した。 研究開発項目②：高度モニタリング及びフィードバック制御機能の開発 ・積層造形プロセスにおける粉末敷き詰め状態及び造形面について、精度10μm以下で凹凸を計測BSE（反射電子）モニタリング機能を用いて試験研究機に実装した状態でパウダーベッド表面全域の造形表面について、精度10μm以下の表面凹凸形状が画像化できる機能を開発した。 ・フィードバック制御機能による造形プロセス中の50μm以上の欠陥率0% フィードバック制御機能を試験研究機に実装し、欠陥率が減少することが確認できた。 プロセスマップ自動生成ソフトウェアにより最適条件を決定し、それをベースにした最適再溶融条件を採用することで再溶融フィードバック機能を適用した造形により欠陥率0%を達成した。 研究開発項目③：積層造形部品作製のための開発・評価手法の開発 ・開発・評価手法の開発のために必要な積層造形物に関する評価データを、金属材料4種類以上について蓄積する。 4種類の金属種（Ti-6Al-4V合金、純銅、SCM440合金、AlSi10Mg合金）について表面性状データを収集し、開発手法を用いてプロセスマップを構築した。 ・積層造形部品を効率的に開発・評価する手法をユーザが活用できる手順書として纏める。 開発システムを用いた積層造形部品開発手順を手順書としてまとめた。							
3. マネジメント								
3.1 実施体制	プロジェクトマネージャー	バイオ・材料部 柳本 勝巳						
	プロジェクトリーダー	プロジェクトリーダー： 近畿大学 次世代基盤技術研究所 特任教授 京極 秀樹 サブプロジェクトリーダー： 東北大学 未来科学技術共同研究センター 特任教授 千葉 晶彦						
	委託先	技術研究組合次世代3D積層造形技術総合開発機構（TRAFAM）						
3.2 受益者負担の考え方	本研究開発は、実用化まで長期間を要するハイリスクな基盤的技術に対して、産学官の複数事業者が互いのノウハウ等を持ちより協調して行う事業であり、委託事業として実施する。							
	主な実施事項	2019fy	2020fy	2021fy	2022fy	2023fy		
	研究開発項目① 溶融凝固現象の解明による欠陥発生の予測技術の開発	委託(1/1)	委託(1/1)	委託(1/1)	委託(1/1)	委託(1/1)		
	研究開発項目② 高度モニタリング及びフィードバック制御機能の開発	委託(1/1)	委託(1/1)	委託(1/1)	委託(1/1)	委託(1/1)		
	研究開発項目③ 積層造形部品製作のための開発・評価方法の開発	委託(1/1)	委託(1/1)	委託(1/1)	委託(1/1)	委託(1/1)		
3.3 研究開発計画								
	事業費推移	主な実施事項	2019fy	2020fy	2021fy	2022fy	2023fy	総額

	[単位:百万円]	研究開発項目① 溶融凝固現象の 解明による欠陥 発生の予測技術 の開発	163	157	220	406	359	1,305
	研究開発項目② 高度モニタリン グ及びフィード バック制御機能 の開発							
	研究開発項目③ 積層造形部品製 作のための開 発・評価方法の 開発							
	事業費	2019fy	2020fy	2021fy	2022fy	2023fy	総額	
	会計（一般）	151	120	204	354	359	1,188	
	追加予算	12	37	16	52	0	117	
	総 NEDO 負担額	163	157	220	406	359	1,305	
	情勢変化への対 応	・コロナ禍でのニューノーマルな対応として、2021 年度からリモートでの進捗報告会を四半期毎に実施することで進捗管理の強化を実施。最終年度後半については、月次で進捗状況を確認。 ・2020 年 5 月下旬、東北大学分室の電子顕微鏡が故障した際、コロナ禍の混乱で委託先だけの解決が困難であったため、NEDO が自らナショプロ向けリースサービスを探し出し、委託先とリース業者との橋渡しをして研究開発の中断を回避。 ・単年度契約の汎用型モニタリング装置開発担当の再委託先ヒカリについて、次年度シームレスに研究継続を可能にするため、前倒しによる体制変更への対応を実施。 ・2023 年度、コロナ禍開け後に、改めて進捗状況確認と実用化についての意見交換のため、各研究分室のサイトビジットを 3 件実施。 ・2023 年度、ユーザに対するヒアリング調査結果から、研究対象の金属種として銅合金を追加することを踏まえ、レーザー方式の研究加速のため研究員 1 名増員の相談があり、対象者の現勤務先との関係を考慮した最適な登録方法にて対応を実施。						
	中間評価結果へ の対応	(1) 当該技術開発は、海外においても実用化に向けて加速されており、国際競争力を維持向上させ、実用化に向けて早期の目途を得るためにも、さらなる装置技術および製造技術の蓄積が重要である。 対応：TRAFAM 技術報告会での海外報告や 2022 年度調査事業にて海外技術動向を把握。 (2) CO2 排出低減の面でも積層造形は優れているため、カーボンニュートラルの観点も意識することが望ましい。 対応：2022 年度実施の調査事業で CO2 削減効果の試算を実施 (3) 今後は、常に最新の海外動向をフォローし、我が国の優位性を保つために必要となるものがあれば、国の予算措置や NEDO 財源等を活用した研究開発内容の追加やユーザ企業を取り込んだ体制を引き続き検討する等、より幅広い対応を期待する。 対応：ユーザ検証実施を前提とした予算獲得。 研究進捗を加速するための加速予算を 2021 年、2022 年獲得。 ユーザ企業を 2021 年以降適宜再委託先として追加。 (4) 設定された開発ベンチマークが不明瞭であるため、積極的にユーザ目線の意見を反映し、実施計画の見直しなども提案してほしい。 対応：TRAFAM 技術報告会での海外報告。2022 年度調査事業での技術動向把握。 (5) 社会実装する主体がどこになるのか明確でなく、実用化・事業化に向けた戦略は十分とは言えないことから、企業と連携した体制を今一度検討してほしい。 (8) 研究開発成果が全て得られてから事業化を進めるのではなく、本事業を通じて開発したものから順次市場に投入していくことも検討頂きたい。 対応：2022 年度からレーザー方式実用化・事業化を加速するため、汎用型モニタリングシステム開発のため再委託先を追加。2022-2023 年に開発し、2024 年度以降実用化・事業化を加速。 (6) 市場やユーザのニーズを広く把握した上で、そのニーズと現状の技術レベルとの間のギャップの分析や課題の対応策など、検討するべき点は多いといえよう。						

		対応：技術研究組合内のユーザ会、2022 年度 NEDO 調査事業などでユーザヒアリングを実施し課題を抽出。 (7) 今後は、実用化・事業化の加速および海外との競争力強化をより一層意識し、必要であれば財源を確保した上で研究開発等を前広に追加検討して頂きたい。 対応：ユーザ検証を前提とした予算獲得。 研究進捗加速するため加速予算を 2021 年、2022 年獲得。	
評 価 に 関 す る 事 項	事前評価	2018 年度実施 担当部 IoT 推進部	
	中間評価	2021 年度実施 担当部 IoT 推進部	
	終了時評価	2024 年度 終了時評価実施	
別添			
投稿論文	「査読付き」 17 件		
特 許	「出願済」 10 件（10 件）、「登録」 1 件（0 件）、「実施」 0 件（うち国際出願）		
その他の外部発表 （プレス発表等）	「学会発表・講演」 34 件 「受賞」 5 件 「展示会への出展」 5 件		
基本計画に関する事 項	作成時期	2019 年 3 月 作成	
	変更履歴	2021 年 1 月 改訂（研究開発項目③の内容修正、PMgr の変更） 2023 年 7 月 改訂（担当推進部、PMgr の変更）	

プロジェクト用語集

レーザービーム方式（電子ビーム方式と共通の用語も含む）

用語	説明
積層造形	付加製造のうち造形層を積み重ねることによって 3D の造形物を実体化する加工法。
メルトプール	JIS Z3001 溶接用語では、溶融池と定義されており、ここでは、レーザーあるいは電子ビームによる熱源によってできた溶融した金属のたまりをいう。
パウダーベッド	粉末床ともいい、ここでは粉末を積層し、造形を行う場所。
リコート	パウダーベッド方式の 3D プリンタにおける造形面に粉末を一定の厚みで敷き詰める動作。スキージ、レーキ等と呼ぶことがある。
ビード	造形中に溶融凝固した金属部分。AM では、トラック（track）ということも多い。
ポーリング現象	熱源による投入エネルギーが低いと溶融が不十分となり、トラック周囲の温度が低いなど溶融金属との濡れ性が低い際にトラックがボール状となること。
ハンピング現象	溶接分野で使われる表現で、ここでは走査速度が速過ぎる場合に、表面張力のバランスや溶融金属の流体不安定性、蒸発ガスの影響などによりメルトプール内での溶融金属の流れ速度が間歇的になり、溶融金属の山と谷が周期的に発生すること。
エネルギー密度	造形パラメータとしてよく用いられるパラメータの一つで、ここでは体積当たりに投入されるエネルギーとして用いている。
レイヤー表面	各層ごとのパウダーベッド及び造形面の表面を指す。
パターン投影法	縞模様を対象物に投光し、その反射光を画像センサで受光し、投光と反射光のパターン変化を解析して三次元画像を生成する方法。
プロセスマップ	造形における適切な条件を見出すために使用するパラメータの関連性を示す図。パラメータとして出力と走査速度による図を使用することが多い。
スパッタ	レーザーや電子ビームを照射した際に飛散する溶融金属の飛沫。
プルーム	レーザー照射により発生したプラズマ、すなわち電離によって生じた荷電粒子を含む気体のことをいう。
反跳力	レーザーや電子ビームを照射した際に発生する金属蒸気に対する反力。
三次元光学プロファイラ	ここでは、光学的手段により三次元的な表面性状を計測する装置をいう。
教師データ	機械学習の学習用に用いる正解付きのデータ。
CNN	畳み込みニューラルネットワーク。畳み込み層、プーリング層、全結合層から構成され、層間が全結合層ではないニューラルネットワークのこと。ニューラルネットワークは人間の脳内の神経回路網を模したネットワークモデルのことであり、入力層、隠れ層、出力層から構成され、データを用いて各層間の重みパラメータを学習させる。
分類器	特徴に基づいてデータをグループ分けするモデル。
汎化性能	未知のデータに対する識別能力。
機械学習	コンピュータがデータから学習し、分類や予測などを実施するアルゴリズムやモデルを構築する技術のこと。

電子ビーム方式

用語	説明
反射電子(BSE)、反射電子像	真空中で物質表面に電子ビームを照射した際に、固体内で散乱し、再び真空中に放出された比較的エネルギーが大きい電子。この電子の放出量は照射された物質(平均原子番号)に依存するため、その放出電子量に相当する信号を用いて画像化すると平均原子番号に依存した組成コントラストが得られる。この画像を反射電子像と呼ぶ。
ディープラーニング	階層が深いニューラルネットワーク。
スモーク現象	粉末が電子ビームで帯電し、クーロン力で反発し、飛散する現象。
チャージアップ	帯電すること。
エミッション電流	電子源のカソード(エミッター)から放出される電子数に対応した電流量。
半価幅	強度が最大値の 1/2 になる幅。
クーロン力	帯電した物体間に働く力。
PREP 粉末	プラズマ回転電極 (PREP) 法で作製した粉末。PREP 法は、回転させた原料金属の電極棒にプラズマを照射し、熔融させた金属を遠心力で飛ばし、球状化させ製粉する技術。
PA 粉末	プラズマアトマイズ (PA) 法で作製した粉末。PA 法は、原料金属 (ワイヤーや粒塊状) をプラズマで熔融し、不活性ガスを吹き付け製粉する手法。
離散拡散法 (DEM)	粒子からなる系において、各粒子間の相互作用を計算しながら個々の粒子の挙動を計算する手法。
数値流体力学計算 (CFD)	流体の運動方程式 (ナビエ-ストークス方程式など) を数値計算で解き、気相や液相などの流体の挙動を計算する手法。
アパーチャー径	結像レンズ系において結像に使用される電子ビームの広がり (開き角) を制限するアパーチャーの直径。
ベースプレート	造形に用いる基板。
熱電子	高温に加熱された物質表面から放出される電子。温度が高い程その放出量が多い。
スキージ	パウダーベッド方式の 3D プリンタにおける造形面に粉末を一定の厚みで敷き詰める動作。リコート、レーキ等とも呼ぶことがある。
対物レンズ電流	対物レンズの電磁コイルに流す電流量。この電流により対物レンズの磁束密度が変化し、造形面上のビーム径が制御できる。

1. 意義・アウトカム（社会実装）達成までの道筋

1.1. 事業の位置づけ・意義

1.1.1. 事業の背景・目的・将来像

背景：

- ・ものづくりの付加価値を高めていくためには、複雑形状等が実現できる積層造形技術を積極的に活用することが有効である。
- ・世界市場が積層造形技術の活用が進む中、我が国も早期に積層造形技術を活用した金属部品等の開発を促進することが重要となる。
- ・一方、金属の積層造形技術では、現象解明さえ十分には進んでおらず、**品質の再現性確保や新規開発に係るコストと時間が課題**となっている。

目的：

- ・**積層造形における金属の溶融凝固現象を解明**するとともに、**高度な計測・機械制御技術を開発**し、金属積層造形部品等における開発の効率化及び高品質の確保を目指す。

将来像：

- ・高度な計測・機械制御により、高品質化・効率化を実現することで、**積層造形技術を活用した金属部品の開発期間を1/5に短縮**することにより、我が国における積層造形技術の普及を目指す。それにより2030年度における本システムを搭載した**金属3Dプリンタの国内素形材企業への導入割合10%**（事業所ベース）を目指す。これにより年間500億円の開発コストの削減が見込まれる。

1.1.2. 政策・施策における位置付け

【科学技術イノベーション総合戦略2017】

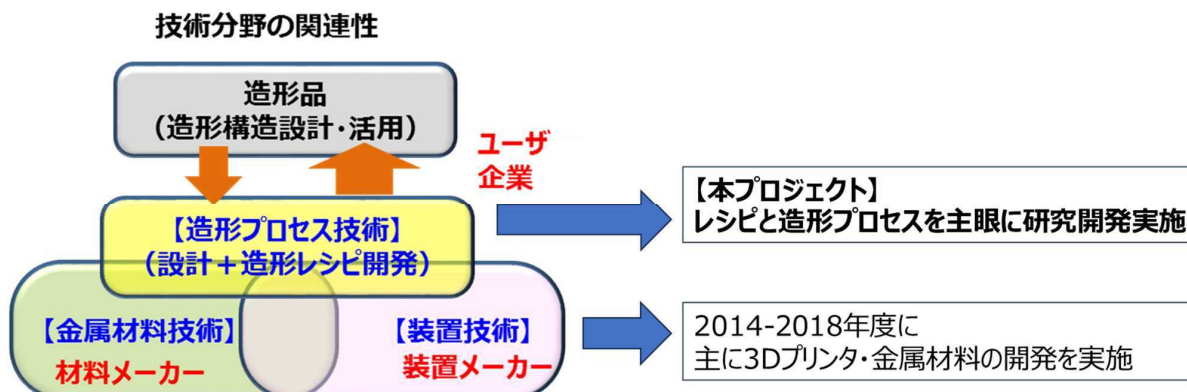
生産プロセスにおいては、多様化したユーザニーズに迅速かつ柔軟に対応して、高性能、高品質な製品を提供するために、AIを搭載し知能化された機械やロボット、複雑形状を高速かつ高精度で造形する**3Dプリンタ**など新たな付加価値を持ったもの・コトを創出する革新的な生産技術の開発とその導入支援に取り組む。

【未来投資会議2018】

データ連携やIoT、**3Dプリンタ**等を活用して、顧客の多様なニーズに対応する多品種少量生産等が可能となり、高い現場力を有し、小回りの利く中小企業ならではの新たな市場獲得のチャンスが生まれる。

1.1.3. 技術戦略上の位置付け

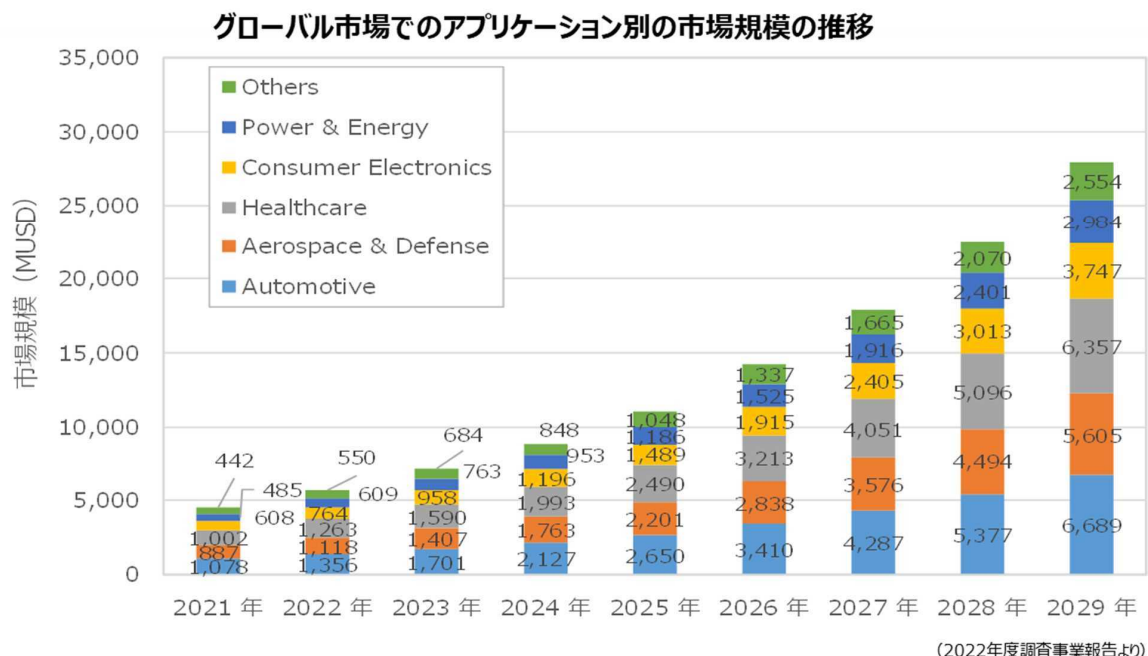
- 技術としては、装置/金属粉末材料/プロセス（レシピ）の3要素に大別。
- 要素はそれぞれに密接に関連、独立に扱うと適切な造形品を得ることは困難。
- 技術全体を統合化する（例えば装置企業がコントロール）方向にある。



1.1.4. 外部環境の状況（技術、市場、制度、政策動向など）

金属積層造形装置の市場動向

- 2021年時点でのグローバル市場でのAM関連製品・サービス（装置、ソフトウェア、造形サービス等）の市場規模は約45億ドル
- 今後年率25.5%で成長し、2029年には約280億ドルになると予想。
- 自動車が最も大きな市場と考えられている。ヘルスケア、航空宇宙・防衛、エレクトロニクス、エネルギー機器、その他（産業機械、金型・工具等）が続く。



【2022-2023 年度実施の調査に基づく市場/技術の最新動向】

米国 America Makes、EU Horizon2020 等の関連プロジェクト調査を実施。

以下の技術テーマを主眼に推進されている状況。

主要推進テーマ

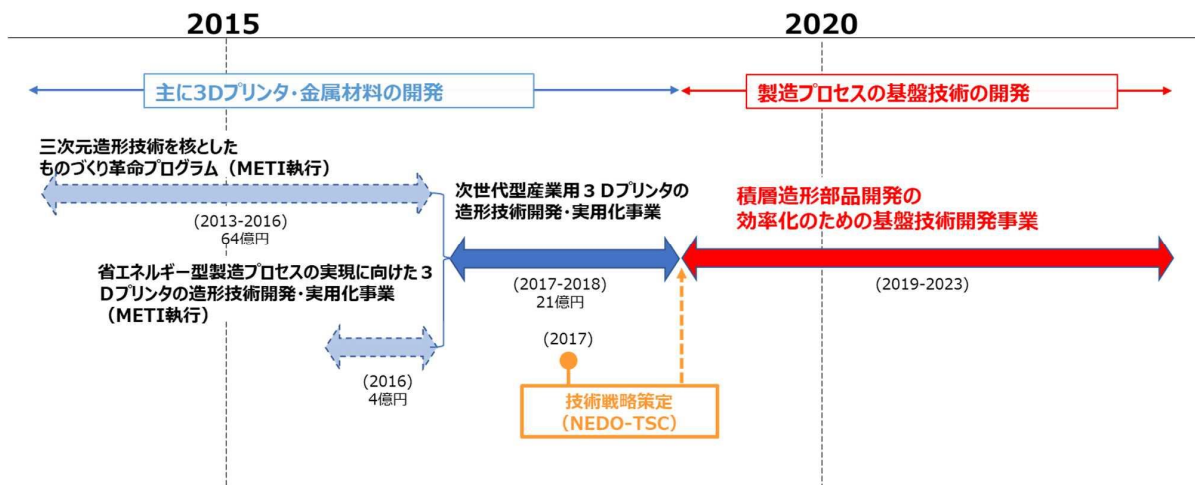
- ・欠陥の抑制・制御、欠陥発生予測等
- ・設計支援（AI/機械学習 の利用、データベース構築を含む）

重要構成要素技術

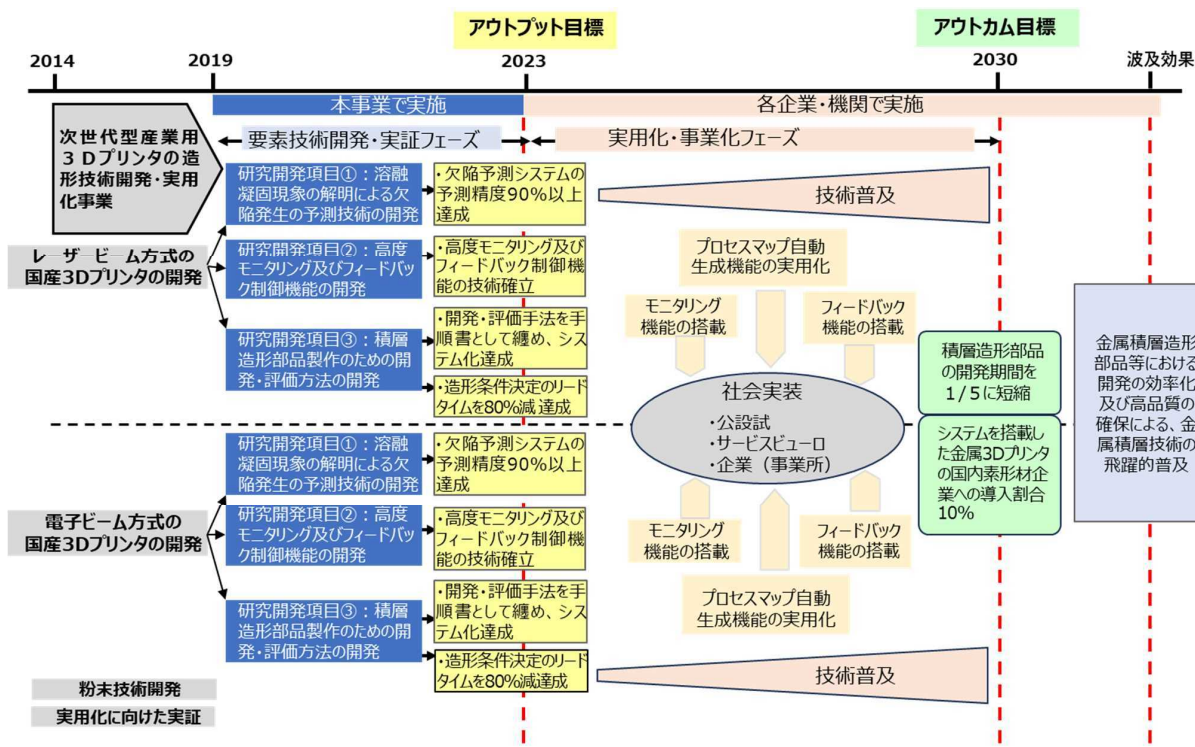
- ・インプロセスモニタリング技術
- ・プロセス制御技術
- ・欠陥や造形品の特性の予測技術（シミュレーション、AI 等）
- ・データを活用した設計支援技術
（AI・機械学習、データベース、シミュレーション、プロセス標準化等）

1.1.5. 他事業との関係

- ・NEDO では、2017 年度から金属の積層造形技術関連プロジェクトを推進。
- ・本事業では、過去のプロジェクトの成果（METI 執行も含む）や技術戦略の策定を踏まえ、製造プロセスの基盤技術の開発を実施。



1.2. アウトカム達成までの道筋



1.3. 知的財産・標準化戦略

1.3.1. 知的財産管理

- 研究開発成果に関わる知的財産権は、原則として全て委託先に帰属させる。
また、NEDOプロジェクトにおける知財マネジメント基本方針を適用する。
- 技術研究組合では、知財審議会を設置するとともに、知的財産権取扱規程等を整備して本事業に参加する全ての組合員と知的財産権の帰属、実施許諾等について合意。
知財基本方針：
「本プロジェクト（委託研究）の範囲内及びプロジェクトの期間内で得られた知的財産（職務発明）は、技術研究組合次世代3D積層造形技術総合開発機構に帰属させる」
- 知財マネジメント強化のため、権利全般とその取り扱いは、技術研究組合が一元管理。
知財審議会、WG（ワーキンググループ）の開催
知財基本方針に基づいた、知財関連の規程、規則を設定
（職務発明等の規程、規則、実施許諾、特許権の譲渡等）
- 開発案件の特許化技術を抽出し、開発スケジュールに沿ってタイムリーな知財取得を図る。
- 海外での特許を念頭に PCT 国際出願とする。

1.3.2 知的財産管理（技術研究組合での知財活動）

事業期間中

知財戦略に基づき、知財取得を積極的に推進。

事業終了後

- ・ TRAFAM 特許の有償譲渡

プロジェクトの完了に伴い、特許譲渡を開始。

- ・ 欧米特許

「欧州及び米国特許権の譲渡に係る細則」に従い、知財審議会で合意済方針に基づき、2024 年度に有償譲渡を完了予定。

- ・ 日本特許

「日本特許権の譲渡に係る細則」に従い、知財審議会で合意済方針に基づき、2024 年度に有償譲渡を完了予定。必要に応じて、具体的な特許譲渡について知財審議会にて審議、合意の上で、該当する組合員と譲渡契約を締結。

2 目標及び達成状況

2.1 アウトカム目標及び達成見込み

2.1.1 アウトカム目標の設定および根拠

本事業は基本計画にアウトカム目標を記載している。アウトカム目標はアウトプット目標を達成する事により、事業終了後実証期間を経てアウトカムへと繋げていくものであり、本事業のアウトカム目標は以下となる。

【アウトカム目標】

本プロジェクトの成果により、積層造形による部品等の造形の品質の向上、造形プロセスの繰り返し安定性の確保とともに、積層造形部品製作のための開発・評価手法が確立されることで、積層造形部品の開発期間が 1/5 に短縮されることを目指す。また、それにより 2030 年度における本システムを搭載した金属 3D プリンタの国内素材材企業への導入割合 10%（事業所ベース）を目指す。

このアウトカム目標の根拠は、次の通りである。

・短期アウトカム

現状の金属積層造形部品（配管部品：マニホールド、高さ 120mm、AlSi10Mg 合金）の新規開発時の製造リードタイムについて、技術研究組合次世代 3D 積層造形技術総合開発機構の組合員の大学、サービスビューロ、企業の 12 機関に確認した。結果、表 2-1 に示す通り、現状では、製造リードタイムの総計は 11 週間で、その内、造形条件決定のリードタイムは、プロセス開発に 3 週間、試作・造形に 3 週間で、計 6 週間であった。

従って、短縮率を 80%（1/5）とすると、成果目標は、同表に記載の通り、1.2 週間となる。

表 2-1 金属積層造形部品開発のリードタイム

工程	現状		アウトカム
	最低所要時間	造形条件決定の リードタイム	成果目標
企画・設計（材料選定）	2週間	6週間 → 1.2 週間	
造形準備（モデル・サポート設計、データ作成）	1週間		
プロセス開発	3週間		
試作・造形	3週間		
後処理（冷却、取り外し（含サポート）、HIP、熱処理）	1週間		
仕上げ加工、検査	1週間		
総計	11週間		

・長期アウトカム

2017 年（平成 29 年）工業統計では、国内の素材材企業として、従業員数 30 人以上の事業所は

2400 金属製品製造業 4,184

3100 輸送用機械器具製造業 3,723

合計 7,907
であり、2030年度に10%（約 791 事業所）への導入を目指す。

このアウトカム目標に向けて、本事業でのアウトカム達成の見通しは、以下の通りである。

レーザービーム方式について、まず積層造形部品の開発期間を 1/5 に短縮する目標については、高速造形可能な装置開発が有効であるが、これも限界にきていることから、これまで多くの時間を必要としてきた最適造形条件探索時間の短縮や試行錯誤による造形回数を減らすことによるプロセス全体での開発期間の短縮を目指す。図 2-1 に示すように、これを解決する非常に有効な手段であるプロセスマップ自動生成機能ならびに試行錯誤による造形回数を減らして欠陥レスの高品質製品を造形するためのインプロセスモニタリング・フィードバック機能の開発により、目標達成可能であると考えている。

つぎに、本システムの開発については、図 2-1 に示すように、2019年度～2023年度にインプロセスモニタリング・フィードバックシステムの開発に関する基盤技術と実用化技術を開発してきた。2023年度の段階はTRL 6 レベルにあると考えており、事業化への足掛かりができた。2024 年度以降に、汎用型モニタリング装置の改良を行うとともに、プロセスマップ自動生成機能のオプション化、インプロセスモニタリング・フィードバック機能のオプション化を行い、事業化を図る予定である。

2030 年度までには、我が国における装置導入も大幅に増加していき、高品質で安定した製品製造技術の確立がますます要求されるようになると予測され、インプロセスモニタリング・フィードバック機能の導入は必須となると予測される。現状では、有効なインプロセスモニタリング・フィードバック機能は開発されておらず、TRAFAM ユーザからも本システムの事業化は期待されている。このような状況を鑑み、金属 3D プリンタの国内素材企業への導入割合 10%（事業所ベース）を見込んでいる。

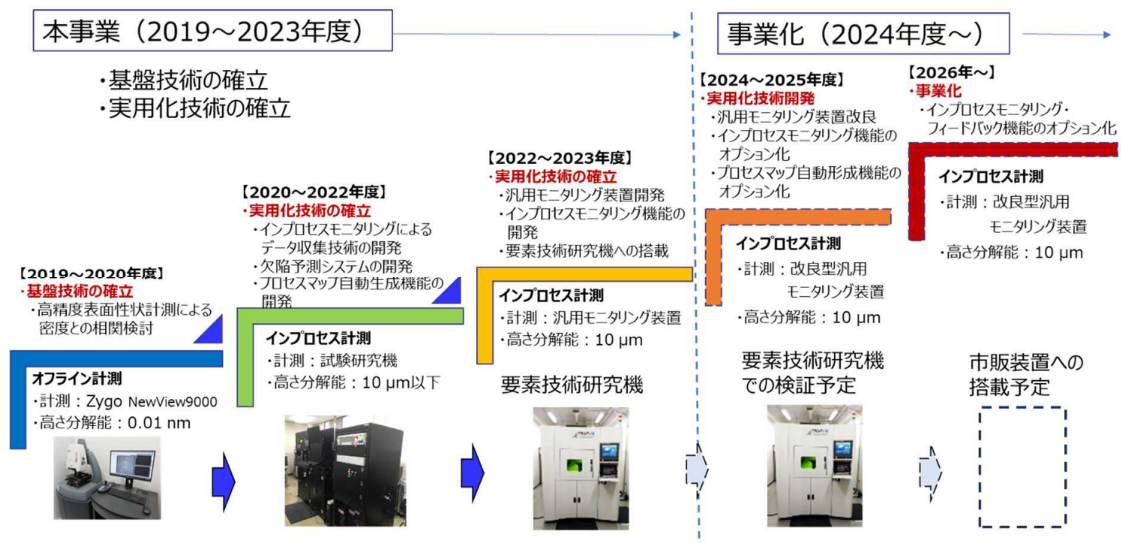


図 2-1 本事業でのアウトカム達成の見通し（レーザービーム方式）

電子ビーム方式についても同様であり、アウトカム目標を電子ビーム積層造形技術の普及とそれを用いた金属部品製造の実現と設定した。近年、欧米では、従来製法で作製していた金属部材を金属積層造形技術で製造するようになってきており、日本でも金属積層造形を用いた金属部品を製造できるようになる必要性が出ている。特に電子ビーム積層造形は航空機エンジンの動翼材の製造に実際に用いられており、電子ビーム積層造形による金属部品開発の普及は、特に高温での性能が求められるハイエンド部材において重要であり、上記のアウトカム目標を設定した。

2.1.2 波及効果

本事業で開発する主な機能は、プロセスマップ自動生成機能およびインプロセスモニタリング・フィードバック機能である。

レーザービーム方式については、まずプロセスマップ自動生成機能は、現状ではプロセスマップを作成して最適造形条件を見出すためには、TRAFAMの組合員であるユーザからの聴き取りによると、表2-1に示したように3週間程度かかるとの回答を得ている。これが、ほぼ一晩で最適造形条件を見出すことができるようになれば、今後ますます適用材料が増えるとともに、同じ材種でも異なった粉末の利用が増えることが予測されることから、本機能の有効性は非常に高く、その波及効果は大きい。

つぎに、インプロセスモニタリング・フィードバック機能については、装置メーカーの許可あるいは搭載装置の制御機能に依存する面が多いが、装置の開発によりオプションでの搭載が可能となれば、欠陥レスで造形が可能となり、波及効果は大きいと予測される。

電子ビーム方式については、電子ビーム積層造形技術の普及とそれを用いた金属部品製造の実現により、金型無しニアネットシェイプによる金属部品製造が実現できるようになるため、特に少量生産において、ポスト加工削減による低コスト化が期待できる。また、量産ラインを現在の部品から他の部品の製造用ラインに変更する必要がある、かつ、今後も現在の部品の製造も頻度は少なくとも継続しなくてはならない場合（例えば、ガソリン車用部品から電気自動車用部品に量産ラインを切り替えて、ガソリン車用の部品の製造も必要になる場合）が考えられる。そのような場合、積層造形による部品製造の実現は、量産ラインを新部品用に変更後も、現在の部品の量産用金型を維持しなくても製造を継続できるようになるという点で有効である。

2.1.3 実施体制本事業における本事業における実用化の考え方及び見込み

本事業で開発したモニタリング機能、欠陥予測機能、プロセスマップ自動生成機能、モニタリング・フィードバック機能のオプションとしての販売、またはこれらの機能を搭載したレーザービーム方式および電子ビーム方式の3Dプリンタの販売、またはこれら機能を有する試作機や製品による造形サービスが開始された時点を実用化と定義する。

本事業では、各技術の検討を順調に進められ、またユーザ実証を実施して評価を行っており、今後各機能を市販機へ搭載するための必要な改善を進める等、実用化に向けた検討・追加の研究開発を着実に行うことで、2030年度に向けてアウトカム目標を達成する見込みである。

なお、電子ビーム方式の3Dプリンタでは、本事業で開発したモニタリング機能を先行して2024年に実用化する計画である。

2.1.4 費用対効果

後述するように、2019～2023年度までの本事業の予算総額は委託研究費で11.88億円である。これに対し、アウトカムで想定している経済波及効果は、2030年度に、造形装置 632億円（791事業所×0.8億円）、造形品 1,900億円を見込んでいることから、十分な費用対効果があると想定する。

さらに、金属積層造形部品の開発期間を大幅に（80％）短縮することで、飛躍的なコストダウンが可能になるため、金属積層造形部品の採用が加速することが予想され、さらなる「+α」の波及効果が期待できる。

2.2 アウトプット目標及び達成状況

2.2.1 アウトプット目標の設定および根拠

・レーザービーム方式のアウトプット目標と根拠

金属積層造形技術、とりわけ航空宇宙分野やエネルギー産業機器分野に最も適用されている方式は、粉末床溶融結合（PBF）である。レーザーを熱源としたPBF（PBF-LB）は、ロケットや航空機のエンジン、発電機用タービンなどの大型複雑形状品への適用が多いことから、品質保証と併せて、開発時間の短縮が重要な課題となっている。開発期間の短縮には、もちろん高速造形可能な装置開発による製造時間の短縮も必要であるが、これも限界にきていることから、これまで多くの時間を必要としてきた最適造形条件の探索時間の短縮や試行錯誤による造形回数を減らすことは、プロセス全体での開発期間の短縮のために有効な手段である。これを解決する非常に有効な手段として、プロセスマップ自動生成機能と併せて、試行錯誤による造形回数を減らして欠陥レスの高品質製品を造形するためのインプロセスモニタリング・フィードバック技術の開発がある。しかしながら、レーザービーム方式においては、インプロセスでのメルトプールモニタリングは行われているものの、レーザーが高速で移動するためメルトプールに関するデータが膨大となり、フィードバック機能の開発には至っていないのが現状である。

このような背景の下、本事業では、プロセスマップ自動生成機能の開発と併せて、欠陥レスの高品質製品を安定して造形可能とするインプロセスモニタリング・フィードバック機能を開発し、中小企業にも展開できるシステムとして開発することを目標とした。目標及び目標設定の根拠は、表2-2のとおりである。

・電子ビーム方式のアウトプット目標と根拠

金属造形部品の実用化のためには、部材の組織制御以前に欠陥レスの造形を実現することが重要であり、また、造形中に造形品の品質をモニタリングするインプロセスモニタリング技術、欠陥レスの条件を効率的に導出する技術の開発も重要となる。さらに、幅広い金属種の部材を造形するためには、複数種の金属に対するデータを蓄積する必要がある。さらに、レシピ開発用の小型造形機と量産用の造形機との間でレシピ変換を実現できれば、少量の粉末でレシピ開発をし、量産に繋げることができるようになる。また、研究用の単純形状だけでなく、実部品形状での検証も重要である。目標及び目標設定の根拠は、表2-2のとおりである。

表2-2 アウトプット目標の設定および根拠

研究開発項目	最終目標	根拠
①：溶融凝固現象の解明による欠陥発生の予測技術の開発	・欠陥発生予測システムの予測精度95%以上	・欠陥率0%の実現には、欠陥予測システムの予測精度が高い必要があるため、最終目標を95%以上とした。
②：高度モニタリング及びフィードバック制御機能の開発（レーザービーム方式）	・積層造形プロセスにおける粉末敷き詰め状態及び造形面について、精度10 μ m以下で凹凸を計測（中間目標）	・粉末の粒径が30～75 μ m程度であることを考慮して、粉末敷き詰め状態及び造形面を精度良く計測するために10 μ m以下とした。
	・造形面の欠陥部分を再溶融する機能を開発（中間目標）	・不慮の現象で欠陥が発生した場合に再溶融機構が必要になるため。
	・フィードバック制御機能による造形プロセス中の50 μ m以上の欠陥率0%	・X線CTで計測可能な50 μ m以上を対象として欠陥率0%とした。
②：高度モニタリング及びフィードバック制御機能の開発（電子ビーム方式）	・試験研究機に実装した状態で積層造形プロセスにおける粉末敷き詰め状態及び造形面について、精度10 μ m以下で凹凸を計測	・粉末の粒径が45～110 μ m程度であること及び平坦な造形面の性状判定から欠陥予測することを考慮して、粉末敷き詰め状態及び造形面を精度

		良く計測するため、最終目標を $10\mu\text{m}$ 以下とした。
	フィードバック制御機能による造形プロセス中の $50\mu\text{m}$ 以上の欠陥率 0%	X線 CT で計測可能な $50\mu\text{m}$ 以上を対象として欠陥率 0% とした。
	電子銃異常やチャージアップ発生を抑制・検知し装置を一時停止する機能の実装	電子銃異常やチャージアップの発生が欠陥に繋がるため、また粉末のチャージアップによって突発的に発生する粉末飛散(スモーク)は放置すると装置に損傷を与えるため、異常検知機能が必要。
③：積層造形部品製作のための開発・評価方法の開発	開発・評価手法の開発のために必要な積層造形物に関する評価データを、金属材料 4 種類以上について蓄積する。	実際に多様な金属部品開発にも応用できるように、複数の種類の金属種でのデータ蓄積も重要であるため、最終目標として 4 種類以上とした。

2.2.2 アウトプット目標の達成状況

レーザービーム方式では、表 2-3 に示す通り、プロセスマップ自動生成機能と欠陥判別フィードバック機能を有する汎用型モニタリング装置を開発し、実用機に近い要素技術研究機に搭載してユーザ造形により検証した結果、その有効性が確認できたことから、TRL6 レベルに達したと考えており、事業化への第一歩の段階に達したといえる。今後、事業化に向けて、本システムを展開していくためには、汎用型モニタリングシステムの小型化・高機能化と併せて、システム全体の機能の向上を図る等、実用化に向けた検討・追加の研究開発を着実に行う必要がある。

表2-3 レーザービーム方式における最終目標に対する成果と達成の根拠

個別事業	目標 (2024年3月)	成果 (2024年3月)	達成度	達成の根拠／ 解決方針
1. 溶融凝固現象の解明による欠陥発生の予測技術の開発	・インコネル718、チタン合金、ステンレス鋼及びアルミニウム合金の4種類以上の評価データを取得する。	・試験研究機を改良して、インコネル718合金、Ti-6Al-4V合金、SUS316L合金、AlSi10Mg合金に加えて銅合金を対象として、リアルタイムでメルトプール、パウダーベッド及び造形表面の画像データを収集した。また、造形体の密度及び欠陥状況をX線CTにより収集した。	◎	5種目となる銅合金データを取得したため、大幅達成と評価
	・欠陥予測システムの予測精度を95%以上にする。	・試験研究機による上記教師データを用いて、機械学習を利用した欠陥予測システムを開発し、予測精度(再現率)95%以上を達成した。 再現率(Recall)：実際に欠陥であったものの内、欠陥と予測できた割合	○	再現率0.97で、目標達成した。
2. 高度モニタリング及びフィードバック制御機能の開発	・フィードバック制御機能により造形プロセス中の50 μ m以上の大きさの欠陥率を0%とする。	・試験研究機により、収集した造形表面の画像データを用いて表面性状パラメータを計算し、50 μ m以上の大きさの欠陥率0%を満足する特定の表面性状パラメータを見出し、フィードバックのための再溶融による欠陥補修機能を開発した。 ・試験研究機を用いて、ユーザ実証によるフィードバックのための欠陥補修機能を検証し、その有効性を確認した。 ・実用化のための汎用型モニタリング装置を開発し、試験研究機用のシステムを改良して搭載し、モニタリング・フィードバック機能の有効性を確認した。	○	開発した汎用型モニタリング装置にフィードバック制御機能を付加し。ユーザ実証(造形)を行い、目標の50 μ m以上の欠陥率0%を達成した。
3. 積層造形部品作製のための開発・評価手法の開発	・開発・評価手法の開発のために必要な積層造形物に関する評価データを、金属材料4種類以上について蓄積する。	・汎用型モニタリング装置によりインコネル718合金、Ti-6Al-4V合金、SUS316L合金、AlSi10Mg合金に加えて銅合金についても、リアルタイムでメルトプール、パウダーベッド及び造形表面の評価データを蓄積した。	◎	5種目となる銅合金データを取得したため、大幅達成と評価
	・欠陥予測システムと高度モニタリング・フィードバック制御機能、ならびにプロセスマップ探索手法を用いて積層造形部品を効率的に開発・評価する手法をユーザが活用できる手順書として纏め、システム(ソフト)化する。本システムおよび手順書を用いて、造形条件決定のリードタイムを1/5(1-2週間)に短縮する。	・試験研究機による欠陥予測システムと高度モニタリング・フィードバック制御機能、ならびにプロセスマップ自動生成機能を開発した。加えて、2022年度より実用化のための汎用型モニタリング装置の開発を行い、高度モニタリング・フィードバック制御機能、ならびにプロセスマップ自動生成機能を有するシステムを開発した。最終的に汎用型モニタリング装置による4社のユーザ造形品の造形を行い、開発した機能の有効性を確認し、ユーザが活用できる手順書として纏めた。 リードタイム1/5については、達成済み。	○	ユーザ実証により、開発した各機能の有効性を確認できた。造形条件決定のリードタイム6週間(6)に対し、プロセス開発0.6w+試作0.4w=1.0wとなり、目標の1/5以下を達成した。

電子ビーム方式における最終目標に対する成果と達成の根拠を表2-4に示す。

表 2-4 電子ビーム方式における最終目標に対する成果と達成の根拠

個別事業	目標 (2024 年 3 月)	成果 (2024 年 3 月)	達成 度	達成の根拠／ 解決方針
1. 溶融凝固現象の解明による欠陥発生 の予測技術の 開発	・欠陥予測システムの予測精 度を 99%以上に。	・Ti-6Al-4V 合金パウダーベッドの放射率を計測し、シ ミュレーションにより Ti-6Al-4V 合金パウダーベッドの 溶融凝固を解析した。 ・表面形状のデータから欠陥の有無を予測するソフト ウェアとパウダーベッドの充放電シミュレーションソ フトウェアを試作、予測精度(再現率)99%以上を達成し た。 再現率(Recall) : 実際欠陥であったものの内、欠陥 と予測できた割合	○	熱放射率は高温 で顕著に増加す ることを明らか にした。 再現率 0.977 で、 目標達成した。
2. 高度モニタリ ング及びフィード バック制御機能の 開発	・試験研究機に実装した状態 でパウダーベッド表面及び 造形表面を精度 10 μ m 以下 で計測できる三次元計測機 能を開発する。	・光学式、及び電子ビーム方式の 2 方式で 10 μ m 以下の表 面凹凸形状を反映した画像が得られる機能を開発し、 目標達成した。 ・装置構成の簡素化/コスト低減を考慮し、電子ビーム方 式のモニタリング(BSE 像観察)に注力し、更なる高度化 を図った。	○	ベースプレート 上に加工した 10 μ m の段差が確認 できた、及び造 形中の造形表面 において光学方 式と同等の表面 形状画像が取得 できた。
	・フィードバック制御機能に より造形プロセス中の 50 μ m 以上の大きさの欠陥率を 0% とする。	・仙台分室で開発された欠陥予測システムを搭載し、再 溶融 FB 機能の実機検証において、粉末ガスポア率を下 回る欠陥率が確認でき、最終目標(粉末起因のガスポア を含まず)を達成した。	○	最適条件から少 しずらした造形 条件での FB 制御 を入れた造形に おいて、粉末ガ スポア率を下回 る欠陥率が確認 できた。
	・電子銃異常やチャージアッ プ発生を抑制・検知し装置 を一時停止する機能を実装 する。	・電子銃ロバスト性向上やパウダーベッド面シールドカ バーにより、電子銃異常やチャージアップ発生(スモー ク発生含む)を抑制した。 ・電子銃のアノード電流やライナーチューブ電流を検出 し、電子銃異常やスモーク発生時にインターロックが 働き装置を安全停止させる機能を実装した。	○	アノード電流や ライナーチュー ブ電流異常を検 知し、安定停止 を確認。またソ フト的なスモー ク検知も実ス モークで正常動 作を確認した。
3. 積層造形 部品作製のた めの開発・評 価手法の開発	・部品開発・評価手法の開発 のために必要な積層造形物 に関する評価データを 4 種 類以上の金属材料について 蓄積する。	・4 種の合金系のデータを蓄積し、達成した。 ・Ti-6Al-4V 合金でプロセスマップ探索手法を検証した。 ・純 Cu、SMA40 合金、AlSi10Mg 合金の造形を完了した。	○	Ti-6Al-4V 合金、 純銅、SMA40 合 金、AlSi10Mg 合 金のデータを蓄 積、目標達成し た。
	・欠陥予測システムと高度モ ニタリング及びフィード バック制御機能、ならびに プロセスマップ探索手法を 用いて積層造形部品を効率 的に開発・評価する手法を ユーザが活用できる手順書 として纏め、システム (ソ	・プロセスマップ自動生成ソフトウェアを開発、動作検 証完了。 ・形状による入熱への影響を計算するソフトウェアを開 発。 ・熱電子画像シミュレーションソフトウェアを開発。 ・リードタイム 1/5 については、達成済み。	○	開発機能、開発 ソフトウェアを 用いた、積層造 形部品開発の リードタイムを 推定したとこ ろ、従来 6 週間 (42 日) に対し、

	フト)化する。本システムおよび手順書を用いて、造形条件決定のリードタイムを1/5 (1-2週間)に短縮する。		8日で可能となり、目標のリードタイム1/5を達成した。
	・小型機のレシピを中型機のレシピに変換するポストプロセッサを開発する。	・中型機 (JAM-5200EBM) によるデータ収集。 ・小型機 (電子ビーム試験研究機) のビーム径計測技術の開発。 ・小型機のプロセスマップ構築実験。 ・改善完了した小型機でデータ収集開始。ポストプロセッサが完成し、目標達成。	○ レシピ開発用の小型造形機と量産用中型造形機とのレシピ変換する手法を開発したことで、量産部品のレシピ開発の効率化に繋がることが確認できた。
	・フィードバック制御造形のユーザ実証	・ユーザ実証 (フィードバック制御なし/あり) が完了。 ・FB有により欠陥を修復でき、なおかつ原料粉末のガスボア欠陥率よりも低い欠陥率であったため、造形欠陥0%を達成。 ・また、ユーザ所有の市販装置での造形も実施し、本PJで開発した装置とFB機能によって造形することで、欠陥率をより低くできることを確認。 ・バルク溶融部が本PJの対象ではあるが、大型かつ輪郭溶融が多い部材でもユーザ実証を行い、バルク溶融部ではなく輪郭溶融部に欠陥が生じやすい傾向にあるなどの課題を抽出した。	○ ユーザ実証が完了し、FBが有効であることを確認し、目標達成。

2.2.3 研究開発成果の意義

レーザービーム方式における本研究開発に意義としては、次の点が挙げられる。

- ① 機械学習を利用したプロセスマップ自動生成機能を開発し、種々の材料のインプロセスモニタリングデータに適用して、短時間で最適造形条件を見出せた。この最適造形条件を用いてユーザ造形を行った結果、造形体内部では $50\mu\text{m}$ 以上の欠陥が存在しない高密度の造形体が得られ、その有効性が確認できた。これは、今後対象材料が拡大していくこと、また同じ材料でも粉末が異なれば造形条件が異なることを考慮すれば、ユーザにとって非常に強力なツールとなる。
- ② 実用化のために、汎用型モニタリング装置を開発し、インプロセスモニタリング・フィードバック機能を要素技術研究機に搭載して、ユーザ造形を行った結果、欠陥率が低下し、その有効性を確認できた。これにより、特に大型複雑形状品の造形においては、これまでと比べて試行錯誤による造形回数を大幅に減らして、欠陥レスの高品質製品を造形可能となる意義は非常に大きい。加えて、インプロセスモニタリングデータの収集・保管が可能となり品質保証の手立てとなる。

電子ビーム方式では、高精度の欠陥予測システムとフィードバック制御によって、欠陥を従来よりも削減できることを実証した。このことは、金属積層造形技術を用いて金属部品を製造するうえで、欠陥を含まない造形部品の製造に繋がるという点で意義がある。また、本事業で開発したインプロセスモニタリング技術は、非破壊で造形部品の評価を行うためのデータを提供できる技術であり、X線を透過できないサイズの金属部品でも非破壊で欠陥を評価できる点で意義がある。また、プロセスマップを自動で探索する技術の開発は、これまで要していた膨大な時間と作業者の負担を大幅に削減でき、電子ビーム積層造形の普及に繋がる点で意義がある。さらに、本事業で開発

した技術を用いた金属部品開発・評価の手順書は、これから金属部品を金属積層造形で製造するうえで、効率的な手法を提供するという点で意義がある。

2.2.4 副次的成果及び波及効果

レーザービーム方式では、本事業で当初プロセスマップ自動生成機能について、電子ビーム方式で開発された特許を利用する予定であったため、プロセスウィンドウを探索するシステムを考えていた。しかし、レーザービーム方式では、造形表面が電子ビームとは大きく異なり非常に複雑であることから、表面性状パラメータを導入し、システムを改良して最適造形条件を提示するシステムを開発できた点は、今後の波及効果に与える影響は非常に大きい。

また、当初は、試験研究機でのシステム開発を考えていたが、実用化のために、汎用型モニタリング装置開発を行い、実用機に近い要素技術研究機に搭載して、プロセスマップ自動生成機能、欠陥発生予測機能及びインプロセスモニタリング・フィードバック機能が有効に稼働することが確認できた点も、今後の事業化を促進する上では大きな成果であった。

電子ビーム方式では、本事業で熱電子によるインプロセスモニタリングも当初予定に追加で実施した。熱電子モニタリング画像のシミュレーション技術も確立し、シミュレーションと実験の両面から熱電子モニタリング画像が溶融状態を反映した情報を含んでいることを明らかにできたことが副次的成果である。熱電子モニタリング画像を用いることで、欠陥予測の精度向上、フィードバック制御機能の向上、溶融状態の制御に繋がると期待される。

2.2.5 特許出願及び論文発表

本事業の2024年3月31日時点での特許出願数、論文発表数、新聞雑誌等への掲載の結果を表2-5に示す。

表2-5 特許出願および論文発表等の件数

	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度	2023年度	計
特許出願（うち外国出願）	0	4(4)	0	4(4)	2(2)	10(10)
論文	8	6	6	11	9	40
研究発表・講演	2	15	14	19	12	62
受賞実績	0	1	2	1	1	5
新聞・雑誌等への掲載	0	1	0	0	0	1
展示会への出展	0	2	0	4	3	9

本事業では精力的に知財の創出を行い、10件の特許出願を行った。内1件は登録を完了した。それ以外にも学会誌への論文投稿等を精力的に行った。

3. マネジメント

3.1. 実施体制

3.1.1. NEDO が実施する意義

◇ 産業力強化

本事業の推進により、金属積層造形の基盤技術が社会実装されることで、我が国のサポーターインダストリーである素形材産業をはじめとするものづくり産業が高付加価値事業を獲得し、産業全体の底上げが期待される。

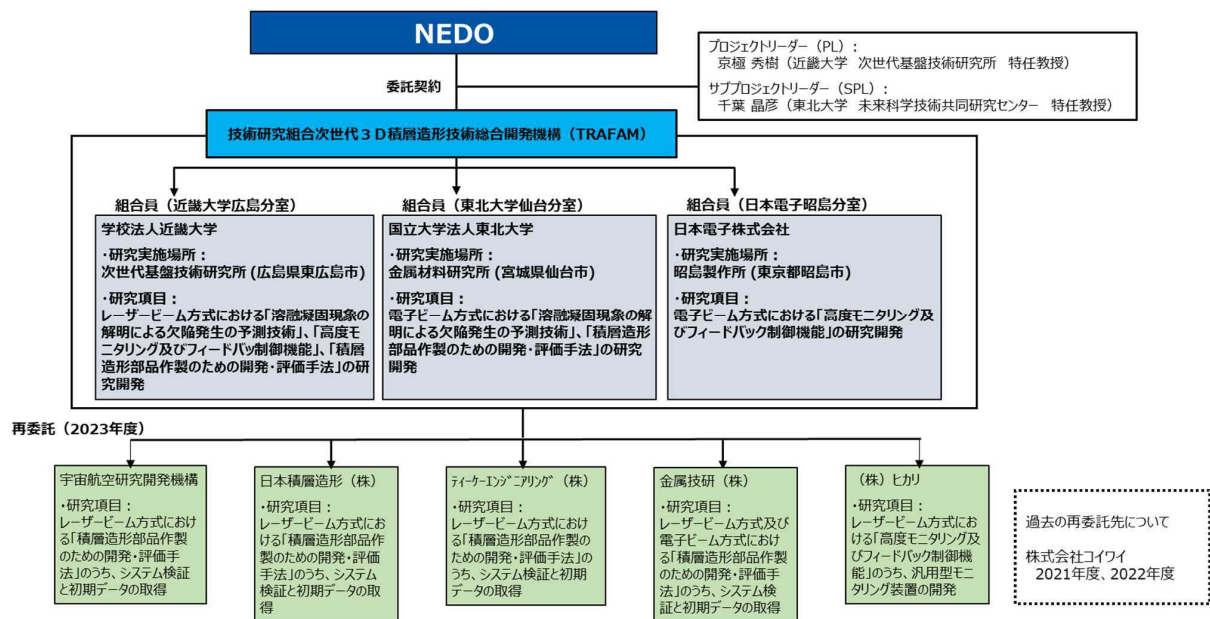
◇ 国際競争

金属積層造形は海外では急速に広まりつつあるが、日本は出遅れている状況であり、積層造形部品等の開発に必要な基盤技術開発に迅速に取り組む必要がある。開発された成果が早期に社会実装されることで、国際競争力の強化に大きく貢献することが期待される。

◇ 産学連携の必要性

金属積層造形に係る共通基盤技術は、産学官連携による技術、知財及びノウハウを集約しての研究開発が必須である。

3.1.2. 実施体制



3.2. 受益者負担の考え方

本研究開発は、実用化まで長期間を要するハイリスクな基盤的技術に対して、産学官の複数事業者が互いのノウハウ等を持ちより協調して行う事業であり、委託事業として実施する。

3.3. 研究開発計画

3.3.1. 予算および研究開発のスケジュール

研究開発項目	2019	2020	2021	2022	2023
溶融凝固現象の解明による欠陥発生の予測技術の開発	欠陥発生原因と造形条件の関係性解明				
	各種条件・材料等によるモニタリングデータ等の蓄積				
	欠陥予測システムのプロトタイプ試作		蓄積データや機械学習を用いた欠陥予測システムの構築		
高度モニタリング及びフィードバック制御機能の開発	PB表面三次元計測技術の高度化				
		再溶融による欠陥補修技術の開発			
	欠陥予測システムと連携したフィードバック制御機能の開発		高度モニタリング・フィードバック機能の開発		
積層造形部品製作のための開発・評価方法の開発	自動化可能なプロセスマップ探索手法の確立				手順書・システム構築
			プロセスマップDBからの造形条件作成手法の開発		
			ユーザ 検証		
予算（億円）	1.5	1.2	2.0	3.5	3.6

3.3.2. 進捗管理

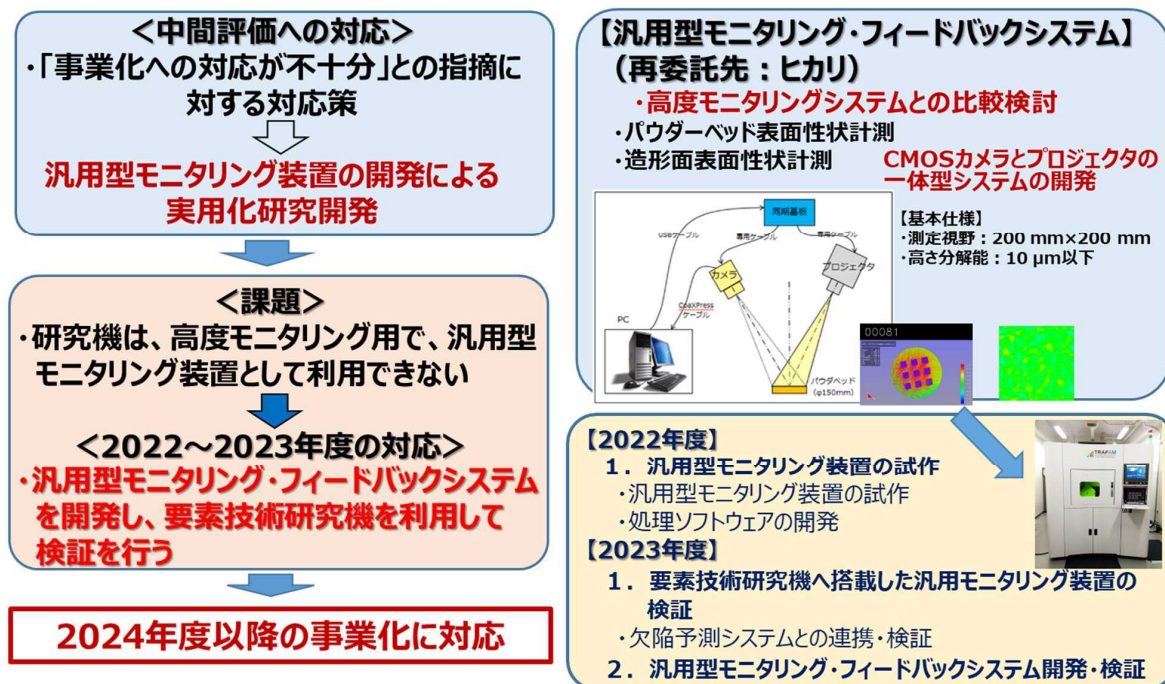
- ・ 外部有識者からなる技術推進委員会による進捗確認と技術的評価、サイトビジットによる開発状況確認を通じて、目標達成に向けた適切な進捗管理を実施。
- ・ 月次の進捗管理として、登録研究員の従事日誌を確認し、また、実施者に対して予算執行状況の報告を求めることで、研究開発の課題、予算執行の遅滞などが発生していないことを確認。

会議名	対象項目	実施時期	内容
技術推進委員会	全項目	2020/10月	・ 外部有識者委員による、開発方針・推進計画、開発進捗、実用化・事業化に関する確認
技術推進委員会	レーザー	2021/4月	・ 外部有識者委員による、ユーザー検証に関する再委託先追加の審議
技術推進委員会	全項目	2022/3月 2023/3月	・ 外部有識者委員による、開発方針・推進計画、開発進捗、実用化・事業化に関する確認 ・ ユーザー検証及び汎用型モニタリング装置開発に関する再委託先追加の審議
技術推進委員会	全項目	2024/1月	・ 外部有識者委員による進捗・成果と実用化・事業化に関する確認
進捗報告会	全項目	2021/8月 2022/8月、12月 2023/7月、10月	・ 四半期毎の研究進捗状況を共有
サイトビジット(東北大)	電子ビーム	2019/10月	・ 進捗報告、確認、今後の予定等確認 ・ 要素技術研究機、日本電子2次試作機確認
サイトビジット(東北大)	電子ビーム	2020/7月	・ 進捗報告、確認 ・ 電子顕微鏡故障対策に関する打合せ
サイトビジット(近畿大)	レーザー	2022/10月	・ 装置見学・デモ、研究の進捗確認 ・ 国内における積層造形技術の普及について、意見交換
サイトビジット(日本電子)	電子ビーム	2023/8月	・ 装置見学・デモ、研究進捗報告、確認 ・ 実用化・事業化に向けた打合せ
サイトビジット(近畿大)	レーザー	2023/9月	・ 装置見学・デモ、進捗報告、確認 ・ 実用化・事業化に向けた打合せ
サイトビジット(東北大)	電子ビーム	2023/12月	・ 装置見学・デモ、進捗報告、確認 ・ 実用化・事業化に向けた打合せ

3.3.3. 進捗管理：中間評価結果への対応

評価項目	評価コメント	対応方針	対応
事業の位置付け・必要性	【1】当該技術開発は、海外においても実用化に向けて加速されており、国際競争力を維持向上させ、実用化に向けて早期の目途を得るためにも、さらなる装置技術および製造技術の蓄積が重要である。	【1】本事業で開発を進めている欠陥予測システムやインプロセスモニタリング技術等については、現時点での国際競争において優位性が確保できている。その一方で、最近では海外における当該技術開発が加速していることも認識しており、実用化の面において海外に出遅れることのないよう引き続きマネジメントに取り組んでいく。	TRAFAM技術報告会での海外報告や2022年度調査事業にて海外技術動向を把握。
	【2】CO2 排出低減の面でも積層造形は優れているため、カーボンニュートラルの観点も意識することが望ましい。	【2】金属積層技術の活用や普及によるCO2排出削減効果は既に意識しており、現在実施中の調査事業においてCO2削減効果の試算等に取り組んでいる。	2022年度実施の調査事業でCO2削減効果の試算を実施。同調査で想定した将来市場見込に基づき自動車、金型等の分野に関し試算。製品使用時、原料使用量削減、製造プロセスを通して、144.2万t-CO2の削減効果と想定。
研究開発マネジメント	【3】今後は、常に最新の海外動向をフォローし、我が国の優位性を保つために必要となるものがあれば、国の予算措置や NEDO財源等を活用した研究開発内容の追加やユーザー企業を取り込んだ体制を引き続き検討する等、より幅広い対応を期待する。	【3】NEDO財源を積極的に活用するとともに、経済産業省と連携したR5年度概算要求により、国際競争における優位性の確保を意識して柔軟に研究開発内容等の追加を検討する。 なお、ユーザー企業を取り込んだ体制については既に今年度構築しており、来年度も継続する。	ユーザー検証実施を前提とした予算獲得。研究進捗加速するため加速予算を2021年、2022年獲得。ユーザー企業を2021年以降適宜再委託先として追加
研究開発成果	【4】設定された開発ベンチマークが不明瞭であるため、積極的にユーザー目線の意見を反映し、実施計画の見直しなども提案してほしい。	【4】海外の競合装置に関する最新の情報を収集するとともに、ユーザー意見を聴取し適宜実施計画書に反映する。	TRAFAM技術報告会での海外報告、2022年度調査事業でのユーザーヒアリングにより技術動向を把握。実施計画への反映は不要と判断。
成果の実用化・事業化に向けた取り組み及び見直し	【5】社会実装する主体がどこになるのか明確でなく、実用化・事業化に向けた戦略は十分とは言えないことから、企業と連携した体制を今一度検討してほしい。	【5】・【8】レーザービーム方式の研究開発成果を事業化する企業を早急に選定し、本事業と連携した体制を構築する。また、技術研究組合内で事業化検討会を立ち上げ、具体的な戦略や計画等の検討を進める。(補足参照)	2022年度からレーザー方式実用化・事業化加速するため、汎用モニタリングシステム開発のため再委託先を追加。2022-2023年に開発し、2024年度以降実用化・事業化を加速。
	【8】研究 開発成果が全て得られてから事業化を進めるのではなく、本事業を通じて開発したものを順次市場に投入していくことも検討頂きたい。		
	【6】市場やユーザーのニーズを広く把握した上で、そのニーズと現状の技術レベルとの間のギャップの分析や課題の対応策など、検討するべき点は多いといえよう。	【6】技術研究組合内のユーザー会を活用してユーザーニーズの収集と分析、課題抽出等を行い事業後半の研究開発に反映する。	技術研究組合内のユーザー会、2022年度NEDO調査事業などでユーザーヒアリングを実施し、課題を抽出。
	【7】今後は、実用化・事業化の加速および海外との競争力強化をより一層意識し、必要であれば財源を確保した上で研究開発等を前広に追加検討して頂きたい。	【7】NEDO財源を積極的に活用するとともに、経済産業省と連携したR5年度概算要求により、実用化・事業化の加速や海外との競争力強化を意識して柔軟に研究開発内容等の追加を検討する。	ユーザー検証を前提とした予算獲得。研究進捗加速するため加速予算を2021年、2022年獲得。

3.3.4. 進捗管理：中間評価結果への対応（実用化・事業化取組）



3.3.5. 進捗管理：成果の実用化・事業化に向けたマネジメント

- 本事業成果の実用化・事業化を加速する取り組みとして、これまでの研究開発の進捗状況を踏まえ、2021年度からユーザ企業による検証を追加した。
- ユーザ検証では、金属積層造形における欠陥の最小化を実現するための造形条件を容易に作成するシステムの検証と初期データの蓄積を行う。
- NEDOは、2021年度の概算要求の状況を踏まえ、タイムリーな開発促進財源等の投入を行いユーザ検証の実現に結び付けた。また、検証を効果的に進めるため、ユーザの選定を主体的に検討した。

3.3.6. 進捗管理：動向・情勢変化への対応

- コロナ禍でのニューノーマルな対応として、2021年度からリモートでの進捗報告会を四半期毎に実施することで進捗管理の強化を実施。最終年度後半については、月次で進捗状況を確認。
- 2020年5月下旬、東北大学分室の電子顕微鏡が故障（老朽化のため修理不能）した際、コロナ禍の混乱で委託先だけの解決が困難であったため、NEDOが自らナショプロ向けリースサービスを探し出し、委託先とリース業者との橋渡しをして研究開発の中断を回避。
- 単年度契約の汎用型モニタリング装置開発担当の再委託先ヒカリについて、次年度シームレスに研究継続を可能にするため、前倒しによる体制変更への対応を実施。
- 2023年度、コロナ禍明け後に、改めて進捗状況確認と実用化についての意見交換のため、各研究分室のサイトビジットを3件実施。

- 2023 年度、ユーザに対するヒアリング調査結果から、研究対象の金属種として銅合金を追加することを踏まえ、レーザー方式の研究加速のため、研究員 1 名増員の相談があり、対象者の現勤務先との関係を考慮した最適な登録方法にて対応を実施。

3.3.7. 進捗管理：成果普及への取り組み

- ・ 2021,2023,2024 年 nano-tech NEDO ブース内にてパネル展示及びビデオ紹介。
- ・ 2022 年 JIMTOF TRAFAM ブースにて成果を展示。2024 年 11 月の JIMTOF で、本プロジェクトの成果報告を実施予定。

3.3.8. 進捗管理：開発促進財源投入実績

年度	項目	金額 (百万円)	内容	成果
2019	フィードバック制御（レーザービーム方式）	12	海外競合の研究進捗を踏まえ、スパッタ等不慮による欠陥が発生した場合の欠陥発生を防止するフィードバック機能を開発を前倒して実施。	フィードバック精度の向上と、海外競合に対する優位性の確保。
2020	欠陥予測システム	18	欠陥予測システムにおける画像データ処理の自動化、欠陥判別機能及びプロセスマップの開発。	欠陥予測システムの精度向上及びユーザー検証の効率的な実施。
2020	メルトプールモニタリング（電子ビーム方式）	19	メルトプール観察用電子顕微鏡の電子銃の改良を前倒して実施	中間目標におけるメルトプール画像化の達成。さらには、前倒しに伴う予算の戦略的運用によるユーザー検証の着実な実施。
2021	電界放出型電子顕微鏡による元素マッピング	16	原料粉末の組成変化について化学分析による、正しく欠陥のないことを評価の実施。	X線CTでの評価だけでなく、酸化物などといった異物の評価実施により、造形材の欠陥評価をより正確にかつ効率的に実施。
2022	電子ビーム方式プロセスマップ自動生成機能の汎用化	52	開発中のプロセスマップ自動生成機能から出力される各種金属のプロセス条件を、各装置仕様に合わせて最適レシピに変換する手法を開発、検証の実施。	電子ビーム方式の「欠陥予測システム」の開発の内「自動プロセスマップ生成機能」の事業化を加速。

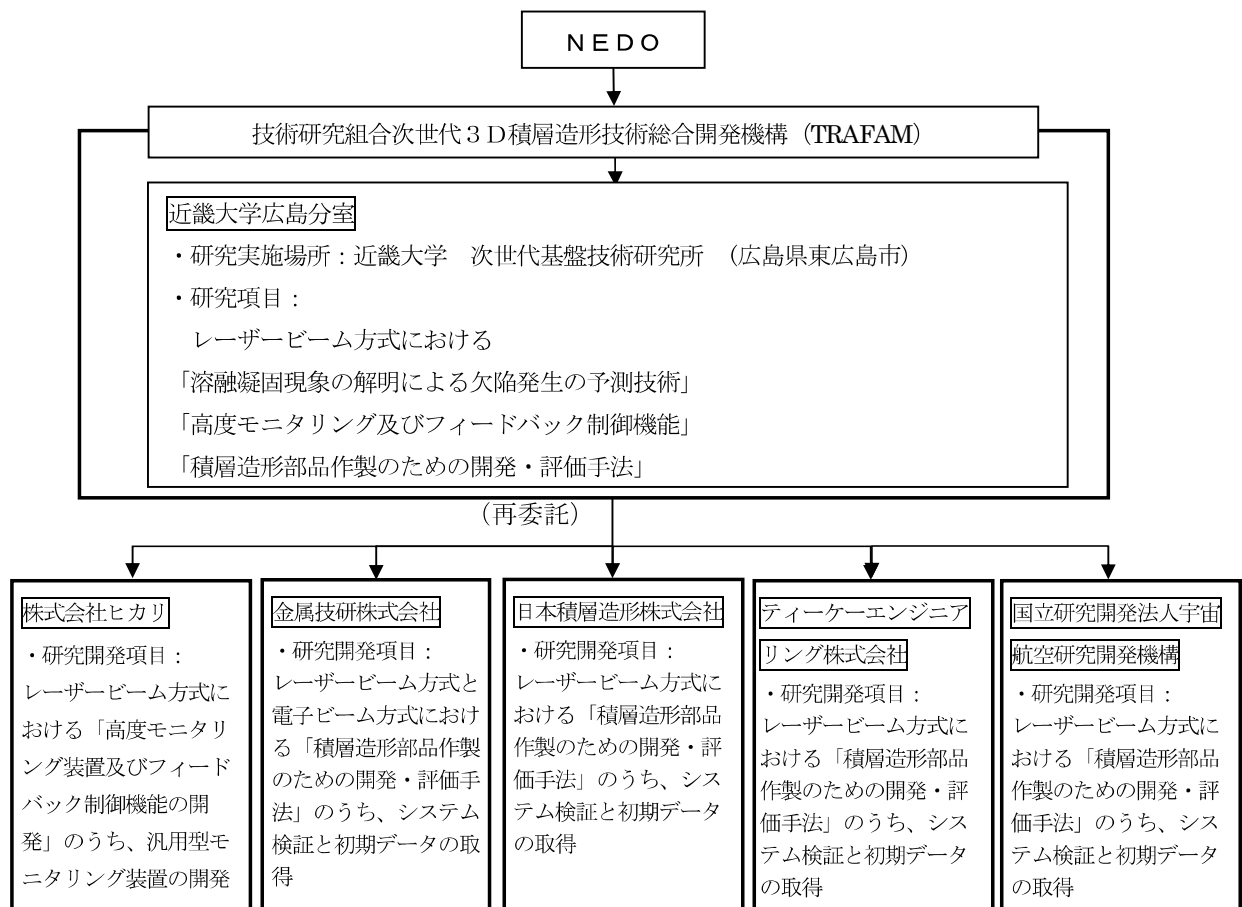
4. 目標及び達成状況の詳細

4.1. レーザービーム方式における研究開発

4.1.1. 事業内容詳細

実施者名、実施体制

レーザービーム方式の開発は、近畿大学で実施した。近畿大学が造形機とモニタリングのハードウェア、ソフトウェアの開発およびシミュレーション技術の開発、各合金種のデータ収集を行った。また株式会社ヒカリが、汎用型モニタリング装置の開発を行った。システムの実用化を加速するため、ユーザー実証を行い、システム検証と初期データの取得を行った。



期間

期間：2019年4月～2024年3月

実用化への道筋

(1) 研究開発を行う製品・サービス等の提供

本事業で開発した、欠陥予測システム、モニタリング・フィードバック制御システムおよびプロセスマップ自動生成システムの提供を目指す。

① 欠陥予測システムの提供

2022 年度に近畿大学広島分室が東北大学仙台分室と共同で開発済み。特許申請しており、実用化可能である。事業化については、ソフトウェア開発を行った（株）先端力学シミュレーション研究所（ASTOM）に外注として検討させた。

② モニタリング・フィードバック制御システムの提供

2019 年度に近畿大学広島分室が特許申請し、これに基づいてシステムを開発。事業化については、装置開発の（株）ヒカリ、要素技術研究機開発の（株）松浦機械製作所ならびにソフトウェア開発を行った ASTOM の 3 社で検討。このため、従来の装置に搭載可能なシステムとして開発し、事業化展開する予定である。

③ プロセスマップ自動生成システムの提供

2022 年度に近畿大学広島分室が東北大学仙台分室と共同で開発済み。特許申請しており、実用化可能である。事業化については、ソフトウェア開発を行った ASTOM が検討するが、（株）ヒカリが担当するモニタリングシステムも必要。

(2) 実用化・事業化の制約

① ハードウェアの制約

本事業では、（株）松浦機械製作所により開発された要素技術研究機で、モニタリング・フィードバックシステムを開発したが、他メーカーの造形装置では同システムのモニタリング用コンポーネント、フィードバック用コンポーネントと連携する個別の実装方法が課題である。加えて、モニタリング装置の小型化・高機能化が課題となる。

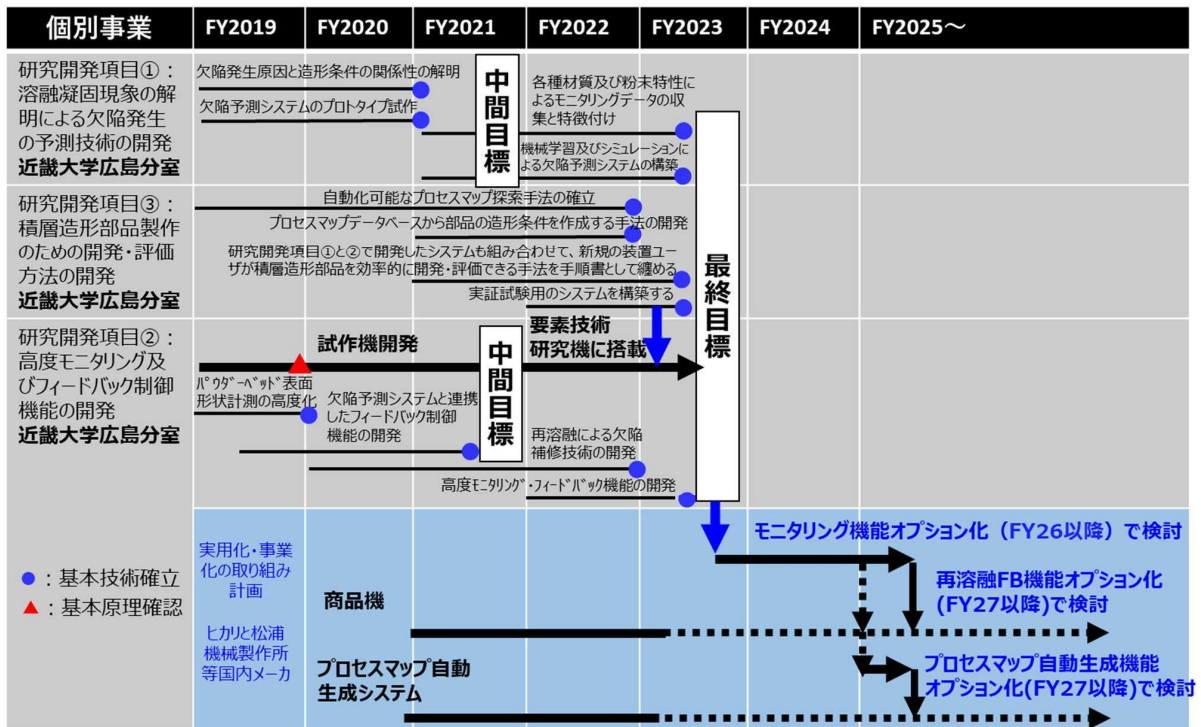
② ソフトウェアの制約

プロセスマップ自動生成システムについても、モニタリングシステムが必要となるため、装置への組み込みが難しい場合には、外部からのモニタリング装置の開発が必要となる。

(3) 事業化のスケジュール

事業化までのスケジュールは、表 4-1-1 に示すとおりである。2024 年度以降、プロセスマップ自動生成システムを含むモニタリング機能のオプション化、モニタリング・フィードバック機能のオプション化を行う。

表 4-1-1 事業の内容および事業化へ向けてのスケジュール



アウトプット目標

本研究開発項目のアウトプット目標を表 4-1-2 に示す。

表 4-1-2 研究開発項目とその最終目標及びその根拠

個別事業	最終目標	根拠
研究開発項目①：溶融凝固現象の解明による欠陥発生予測技術の開発	・欠陥発生予測システムの予測精度 95%以上	・欠陥率0%の実現には、欠陥予測システムの予測精度が高い必要があるため、最終目標を 95%以上とした。
研究開発項目②：高度モニタリング及びフィードバック制御機能の開発 (レーザービーム方式)	・積層造形プロセスにおける粉末敷き詰め状態及び造形面について、精度10μm以下で凹凸を計測 (中間目標)	・粉末の粒形が30~75μm程度であることを考慮して、粉末敷き詰め状態及び造形面を精度良く計測するために10μm以下とした。
	・造形面の欠陥部分を再溶融する機能を開発 (中間目標)	・不慮の現象で欠陥が発生した場合に再溶融機構が必要になるため。
	・フィードバック制御機能による造形プロセス中の50μm以上の欠陥率 0%	・X線CTで計測可能な50μm以上を対象として欠陥率 0%とした。
研究開発項目③：積層造形部品製作のための開発・評価方法の開発	・開発・評価手法の開発のために必要な積層造形物に関する評価データを、金属材料4種類以上について蓄積する。	・実際に多様な金属部品開発にも応用できるように、複数の種類の金属種でのデータ蓄積も重要であるため、最終目標として4種類以上とした。

アウトプット目標の達成状況

本事業では、世界最高水準の高度モニタリング・フィードバック制御機能とプロセスマップ探索手法を有する三次元積層造形システムを構築し、金属の積層造形部品等の開発のリードタイムを短縮し、生産効率を上げるため、レーザービーム方式における溶融凝固現象に影響を及ぼすといわれているレー

ザー出力や走査速度などの造形条件とパウダーベッド（粉末床）の表面性状及び造形表面性状の関係性、さらにはこれらの現象と欠陥の関係を明らかにするため、モニタリング装置を高度化し、欠陥発生メカニズムを解明した。これにより多くのデータを取得して特徴付けを行い、すでに提案者が実施している AI 技術のひとつである機械学習手法並びにシミュレーションによる予測精度の高い欠陥予測システムを構築した。欠陥予測システムは、画像判別機能と欠陥判別機能からなり、画像判別機能は表面画像データをラベリングする機能であり、欠陥判別機能はモニタリングデータから欠陥の有無を判別する機能である。併せて、プロセスマップ自動生成機能を開発し、欠陥予測システムと連携したモニタリング・フィードバック制御機能を有するシステムを構築して、実製品に適用可能な三次元積層造形システムを開発するとともに、積層造形品の造形のための手順書を作成した。また、文献調査の実施や主要な国内外の会議・展示会に参加し、技術動向調査を行った。

本事業では、以下の 3 つの項目 (①-L~③-L) について研究開発を行った。なお、成果および目標の達成度は、表 4-1-3 に示している。

(1) 熔融凝固現象の解明による欠陥発生の予測技術の開発【研究開発項目①-L】

- 1) 欠陥発生原因と造形条件の関連性の解明
- 2) 欠陥予測システムのプロトタイプ試作
- 3) 各種材質及び粉末特性によるモニタリングデータの収集と特徴づけ
- 4) 機械学習及びシミュレーションによる欠陥予測システムの構築

(2) 高度モニタリング及びフィードバック制御機能の開発【研究開発項目②-L】

- 1) パウダーベッド表面三次元計測技術の高度化
- 2) 欠陥予測システムと連携したフィードバック制御機能の開発
- 3) 再溶融による欠陥補修技術の開発
- 4) 汎用型モニタリング装置の開発（（株）ヒカリ）

(3) 積層造形部品作製のための開発・評価手法の開発【研究開発項目③-L】

- 1) 自動化可能なプロセスマップ探索手法の確立
- 2) ユーザ実証
- 3) 手順書作成
- 4) リードタイムの短縮

表 4-1-3 開発項目、目標、成果および達成度

個別事業	目標 (2024年3月)	成果 (2024年3月)	達成度	達成の根拠／ 解決方針
1. 溶融凝固現象の解明による欠陥発生予測技術の開発	・インコネル718、チタン合金、ステンレス鋼及びアルミニウム合金の4種類以上の評価データを取得する。	・試験研究機を改良して、インコネル718合金、Ti-6Al-4V合金、SUS316合金、AlSi10Mg合金に加えて銅合金を対象として、リアルタイムでメルトプール、パウダーベッド及び造形表面の画像データを収集した。また、造形体の密度及び欠陥状況をX線CTにより収集した。	◎	5種目となる銅合金データ取得したため、大幅達成と評価
	・欠陥予測システムの予測精度を95%以上にする。	・試験研究機による上記教師データを用いて、機械学習を利用した欠陥予測システムを開発し、予測精度(再現率)95%以上を達成した。 再現率(Recall)：実際に欠陥であったものの内、欠陥と予測できた割合	○	再現率0.97で、目標達成した。
2. 高度モニタリング及びフィードバック制御機能の開発	・フィードバック制御機能により造形プロセス中の50 μ m以上の大きさの欠陥率を0%とする。	・試験研究機により、収集した造形表面の画像データを用いて表面性状パラメータを計算し、50 μ m以上の大きさの欠陥率0%を満足する特定の表面性状パラメータを見出し、フィードバックのための再溶融による欠陥補修機能を開発した。 ・試験研究機を用いて、ユーザ実証によるフィードバックのための欠陥補修機能を検証し、その有効性を確認した。 ・実用化のための汎用型モニタリング装置を開発し、試験研究機用のシステムを改良して搭載し、モニタリング・フィードバック機能の有効性を確認した。	○	開発した汎用型モニタリング装置にフィードバック制御機能を付加し、ユーザ実証(造形)を行い、目標の50 μ m以上の欠陥率0%を達成した。
3. 積層造形部品作製のための開発・評価手法の開発	開発・評価手法の開発のために必要な積層造形物に関する評価データを、金属材料4種類以上について蓄積する。	汎用型モニタリング装置によりインコネル718合金、Ti-6Al-4V合金、SUS316L合金、AlSi10Mg合金に加えて銅合金についても、リアルタイムでメルトプール、パウダーベッド及び造形表面の評価データを蓄積した。	◎	5種目となる銅合金データ取得したため、大幅達成と評価
	欠陥予測システムと高度モニタリング・フィードバック制御機能、ならびにプロセスマップ探索手法を用いて積層造形部品を効率的に開発・評価する手法をユーザが活用できる手順書として纏め、システム(ソフト)化する。本システムおよび手順書を用いて、造形条件決定のリードタイムを1/5(1-2週間)に短縮する。	試験研究機による欠陥予測システムと高度モニタリング・フィードバック制御機能、ならびにプロセスマップ自動生成機能を開発した。加えて、2022年度より実用化のための汎用型モニタリング装置の開発を行い、高度モニタリング・フィードバック制御機能、ならびにプロセスマップ自動生成機能を有するシステムを開発した。最終的に汎用モニタリング装置による4社のユーザ造形品の造形を行い、開発した機能の有効性を確認し、ユーザが活用できる手順書として纏めた。 リードタイム1/5については、達成済み。	○	ユーザ実証により、開発した各機能の有効性を確認できた。 ・造形条件決定のリードタイム6週間(w)に対し、プロセ開発0.6w+試作0.44w=1.04wとなり、目標の1/5以下を達成した。

成果の意義

レーザー積層造形において、造形面の表面性状パラメータと密度の関係を定量化して、欠陥発生予測が可能であることを明らかにしたことにより、モニタリング後に、特定の表面性状パラメータを使用して in-situ でフィードバック機能を動作できるシステム開発が可能となったことは極めて重要な成果である。さらに、事業化に向けて、実用機に近い要素技術研究機へ①プロセスマップ自動生成システムと②再溶融によるモニタリング・フィードバック機能を搭載して、ユーザ実証を行ってその有用性を確認し、50 μ m以上の大きさの欠陥を抑えた高品質の造形品の造形が可能であることを明らかにしたことは、事業化への第一歩といえる。

特許出願件数、論文発表数等

レーザービーム方式における、特許出願件数、論文発表数等は表 4-1-4 の通りである。

表 4-1-4 特許出願件数、論文発表数等

	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度	2023年度	計
特許出願（うち外国出願）	0	2(2)	0	1(1)	0	3(3)
論文	0	1	2	4	3	10
研究発表・講演	0	7	12	12	10	41
受賞実績	0	0	0	0	1	1
新聞・雑誌等への掲載	0	0	0	0	0	0
展示会への出展	0	1	0	2	1	4

本研究開発項目では精力的に知財の創出を行い、3 件の特許出願を行い、内 1 件は登録を完了した。それ以外にも学会誌への論文投稿等を精力的に行った。

開発成果の詳細

4.1.2. 熔融凝固現象の解明による欠陥発生の予測技術の開発【研究開発項目①-L】

1) 欠陥発生原因と造形条件の関連性の解明

a) メルトプールの形態及び温度分布の測定

本研究開発では、まず NEDO 委託/助成事業の次世代型産業用 3D プリンタの造形技術開発・実用化事業（2017 年度～2018 年度）で開発したパウダーベッドの表面性状と併せてレーザー照射時の熔融状況（造形面性状とメルトプール挙動）を in-situ で観察可能なレーザー試験研究機を使用した。レーザー試験研究機は、造形部とその制御部ならびにメルトプールモニタリングとレイヤー表面モニタリング装置から構成されている（図 4-1-1）。造形部は、造形面積は $\phi 150$ mm で深さ 150 mm で、金属ブレードでのリコートが可能となっており、リコート速度は可変可能である。本研究では、リコート速度は 20 mm/s とした。レーザーは、最大出力 1 kW、波長 1070 nm のシングルモードファイバーレーザーを搭載しており、レーザースポット径は 100 μ m ($1/e^2$) として造形を行った。

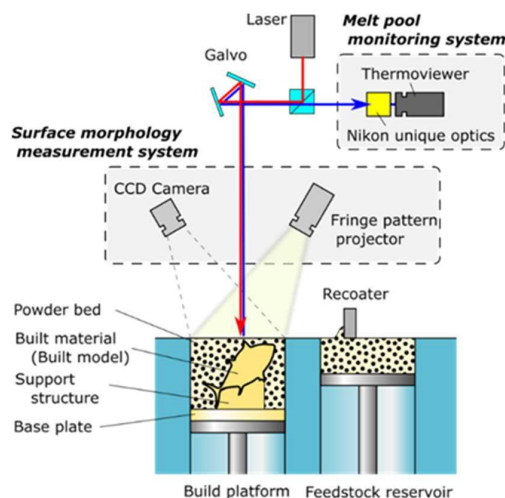


図 4-1-1 レーザー試験研究機の概要

メルトプールモニタリングには、熱画像計測システムを使用している。本研究では、メルトプールの温度変化により形状（幅と長さ）及びスパッタの数および大きさを計測した。レイヤー表面モニタリングは、CCD カメラとプロジェクタから構成されており、パターン投影法を用いており、光学分解能 $80\mu\text{m}$ /pixel、高さ分解能 $7\mu\text{m}$ 以下で計測可能となっている。本研究においては、パウダーベッド表面と造形面の表面性状を 2σ の値で定量化して計測した。

b) メルトプールの形態の変化とスパッタ発生メカニズム

パウダーベッドの状況を考慮して溶融凝固現象を明らかにしておくことは、高品質の造形体を作製する際には極めて重要である。丸棒を造形した際の CCD カメラによるマクロな造形状況及びモニタリング装置によるメルトプールの挙動を観察した。図 4-1-2 に示すメルトプールの状況を見ると、パウダーベッド側からはスパッタはほとんど発生せず、メルトプール上でスパッタが高速で上昇し、造形面側では、多くのスパッタが飛散していることが見て取れる。

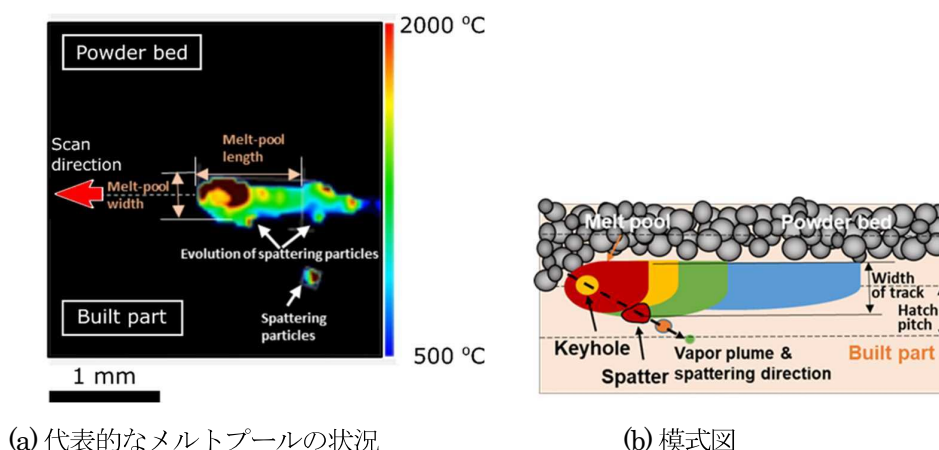


図 4-1-2 メルトプールモニタリングの例

メルトプールの挙動とスパッタの発生状況の模式図を図 4-1-3 に示す。パウダーベッドにレーザーが照射されると、パウダーベッドが溶融してメルトプールが形成される。この際ブルームが発生しこの反跳力によりメルトプールにくぼみまたはキーホールが発生する。また、ブルームの発生によりメルトプールの回りに急激な上昇気流が発生するためにパウダーベッド側の粉末が飛散してメルトプール近傍で剥ぎ取り（denudation）が発生するとともに、粉末がレーザービームに取り込まれて溶融してスパッタが発生する。メルトプールは熱伝導の違いにより、パウダーベッド側と造形面側では非対称となり、熱伝導の高い造形面側が広くなることにより、スパッタは造形面側から発生し、ブルームにより飛散する。造形面側では、図 4-1-3(b)に示すように、メルトプールの方からの粉末の溶融と併せて、造形面の凹凸（スパッタも含む）の影響によりメルトプールの溶融量が変化するために、これに伴ってメルトプールの大きさ（幅および長さ）が変化する。このため、ブルームの発生に起因する反跳力によってメルトプールの端部がブルームの方向に吹き飛ばされて発生する。パウダーベッドにおける大きな噴出物（スパッタ同士の凝集体やスパッタと粉末の凝集体）の存在によりメルトプールの形状が変化する。また、造形面の表面の凹凸によりメルトプールの形状が変化することもわかった。これは、スパッタが発生しやすくなることを示唆している。

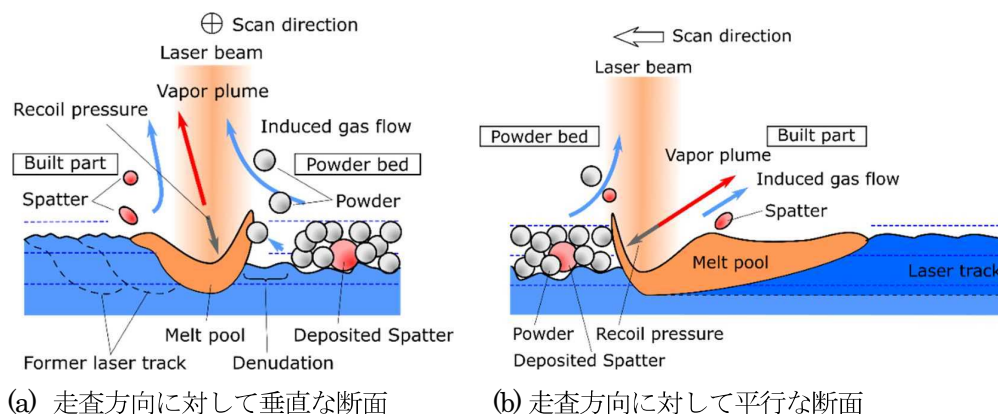


図 4-1-3 メルトプールの挙動とスパッタの発生状況の模式図

c) PBF-LB プロセス中のスパッタ発生抑制

上述したように、スパッタの発生は欠陥を誘引する原因の一つとなるため、造形面の表面性状を滑らかにすることによりできる限りスパッタの発生を抑制することが重要である。Zhen ら[1]は、ベースプレート上に粉末を敷いてレーザー照射を行うと、レーザー出力 400 W、走査速度 400~500 mm/s ではブルーームの発生が小さいためにスパッタが発生しにくいと報告している。また、Yin ら[2]は、レーザー照射によるメルトプールにおける蒸発までの dwell time ($t_{boiling} = \frac{\omega_e^2}{8\alpha} \tan^2 \left(\frac{\pi^{1.5} k \omega_e T_b}{\sqrt{2} A_p P} \right)$) よりレーザー照

射による溶融までの dwell time ($t_{dwell} = \frac{\sqrt{2} \omega_e}{v}$) を短くする造形条件を見出すことによりスパッタ (Metallic jet spatter) 発生抑制を図ることができると報告している。

このため、IN718 合金について、 $t_{boiling}$ と t_{dwell} を比較することにより、メルトプールからスパッタが発生する条件について検討した。これらの式を用いて作成したレーザー出力と走査速度に関する溶融曲線と蒸発曲線を図 4-1-4 に示す。材料定数としては、レーザー出力 P 、レーザースポット半径 (laser spot size) ($1/e^2$) $\omega_e = 50 \mu\text{m}$ 、レーザー吸収率 (laser absorptivity) $A_p = 0.30$ 、蒸発温度 (boiling temperature) $T_b = 3190 \text{ K}$ 、溶融材の熱拡散係数 (thermal diffusivity of the melt material) $\alpha = 5.6 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 、熱伝導率 (thermal conductivity) $\kappa = 29.6 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ を使用している。

本研究で使用しているスポット径 $d = 100 \mu\text{m}$ 及び Yin ら[2]によるスポット径 $d = 300 \mu\text{m}$ の場合について検討した結果を、それぞれ図 4-1-4(a)および(b)に示す。図中の青色の曲線以下では溶融しないことになるのに対して、赤色の曲線以上ではレーザー照射により蒸発が起こり、蒸気ジェットいわゆるブルーームが発生することになる。ブルーームの発生によりスパッタの発生やこれに伴うガス流の発生により粉末が飛散する。 $t_{boiling}$ の式は、あくまでも平板上に高出力レーザーを照射した場合の局所的な蒸発温度から求めたブルーーム発生までの dwell time であるので、必ずしもメルトプールからスパッタ (metallic jet spatter) が発生するわけではない。メルトプールからスパッタが発生するためには、一定の反跳力 (recoil pressure) が必要となる。すなわちキーホールが大きさが一定以上となる必要がある。本研究におけるスポット径 $d = 100 \mu\text{m}$ においては、適切な造形条件ではブルーームが発生してスパッタが発生することになる。これに対して、スポット径 $d = 300 \mu\text{m}$ では、Yin ら[2]の報告のように本研究の適切な造形条件においては、スパッタの発生が抑えられる可能性がある。しかしながら、これまで述べてきたように、実造形では本研究と同様にスポット径 $d = 100 \mu\text{m}$ 前後であり、かつ粉末が存在していることから粉末を取り込んだスパッタ (powder agglomeration spatter) や造形面の表面の凹凸によるスパッタ (defect induced spatter) も発生する。

このように、実造形においてはスパッタの発生を完全に防ぐことは難しく、欠陥が発生しやすいことを示唆している。すなわち、欠陥発生を防止するためには、フィードバック機能が必要である。

(参考文献)

- [1] H. Zheng, H. Li, L. Lang, S. Gong, Y. Ge, Effects of scan speed on vapor plume behavior and spatter generation in laser powder bed fusion additive manufacturing, J. Manufacturing Processes 36 (2018) 60–67.
- [2] J. Yin, L.L. Yang, X. Yang, H. Zhu, D. Wang, L. Ke, Z. Wang, G. Wang, X. Zeng, High-power laser-matter interaction during laser powder bed fusion, Additive Manufacturing 29 (2019) 100778.

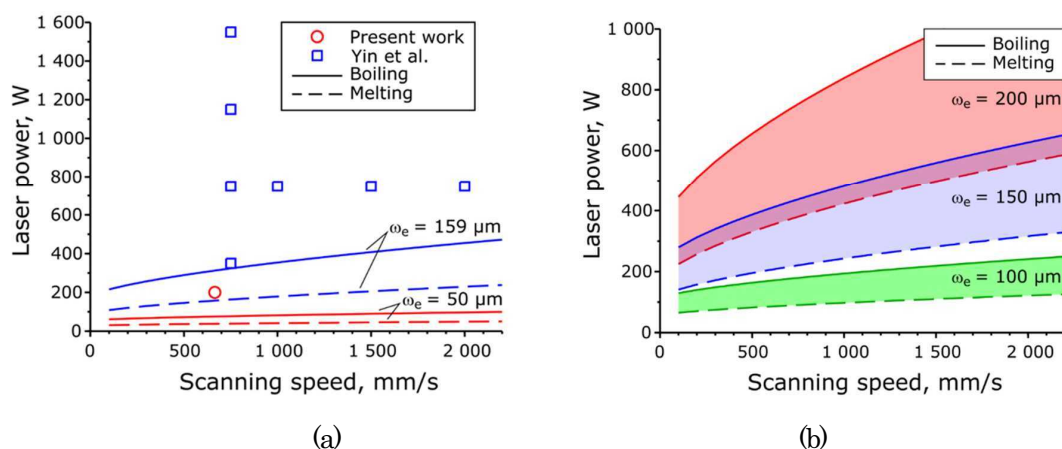


図 4-1-4 IN718 合金における走査速度とレーザー出力のプロセスマップ

d) まとめ

以上のように、パウダーベッドの表面性状とメルトプールの溶融挙動について体系的に検討し、実態に対応したスパッタの発生を含めた溶融現象を明らかにできた。主な結果は次の通りである。

- (1) レーザー照射の際には、パウダーベッド側と造形側の熱伝導の違いからメルトプールが造形側に広がり、その形態はレーザーの焦点を中心に左右非対称となるため、スパッタはパウダーベッド側より造形面側で多く飛散する。
- (2) 欠陥発生の原因となるスパッタ発生は、造形面の表面性状の影響を大きく受ける。
- (3) スパッタは、PBF-LB で通常使われるスポット径 $100 \mu\text{m}$ 程度では、理論上では発生する。

これらの結果は、最適造形条件で造形したとしても、場合によっては、スパッタ等が発生し、欠陥発生の原因となることを示唆していることから、欠陥発生予測するとともに、防止する機能が必要であることを意味している。

以上の報告は、[3] “Scientific Reports, 12 (2022) 20384”の一部である。

(参考文献)

- [1] H. Zheng, H. Li, L. Lang, S. Gong, Y. Ge, Effects of scan speed on vapor plume behavior and spatter generation in laser powder bed fusion additive manufacturing, J. Manufacturing Processes 36 (2018) 60–67.

[2] J. Yin, L.L. Yang, X. Yang, H. Zhu, D. Wang, L. Ke, Z. Wang, G. Wang, X. Zeng, High-power laser matter interaction during laser powder bed fusion, Additive Manufacturing 29 (2019) 100778.

[3] T.-T. Ikeshoji, M. Yonehara, C. Kato, Y. Yanaga, K. Takeshita, H. Kyogoku, Spattering mechanism of laser powder bed fusion additive manufacturing on heterogeneous surfaces, Scientific Reports, 12 (2022) 20384.

2)欠陥予測システムのプロトタイプ試作

a)造形条件と密度および内部欠陥の関係

本研究においては、上述した 1 kW シングルモードファイバーレーザーを搭載した試験研究機を使用して、IN718 を対象として 10 mm×10 mm×10 mm のキューブ造形を行った。造形条件は、表 4-1-5 に示すように、レーザースポット径(*d*) : 100 μm、レーザー出力(*P*) : 175～800 W、走査速度(*v*) : 550～2850 mm/s、ハッチピッチ(*h*) : 0.10 mm、積層厚さ(*t*) : 0.05 mm、エネルギー密度(*E*) : 24.1～82.4 J/mm³ で、窒素雰囲気下において酸素量 0.1%以下で実施した。これらのうち造形可能であった 121 個のキューブ試験片を用いて評価を行った。これまで、このような高出力・高速造形条件の範囲までは検討されていない。なお、エネルギー密度は、

$$E = \frac{P}{vht} \text{ J/mm}^3 \cdots \cdots (1-1)$$

により求めた。

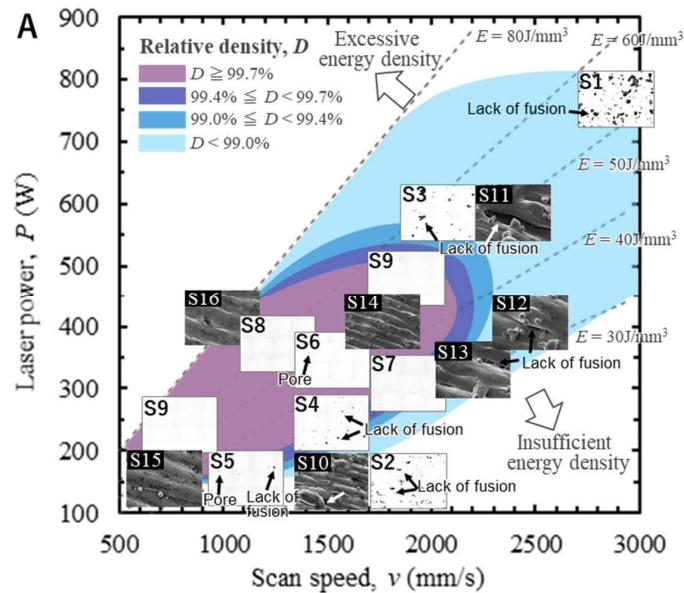
表 4-1-5 造形条件

850	340	227	170	136	113	97	85	76	68	62	57
800	320	213	160	128	107	91	80	71	64	58	53
750	300	200	150	120	100	86	75	67	60	55	50
700	280	187	140	112	93	80	70	62	56	51	47
650	260	173	130	104	87	74	65	58	52	47	43
600	240	160	120	96	80	69	60	53	48	44	40
550	220	147	110	88	73	63	55	49	44	40	37
500	200	133	100	80	67	57	50	44	40	36	33
450	180	120	90	72	60	51	45	40	36	33	30
400	160	107	80	64	53	46	40	36	32	29	27
350	140	93	70	56	47	40	35	31	28	25	23
300	120	80	60	48	40	34	30	27	24	22	20
250	100	67	50	40	33	29	25	22	20	18	17
200	80	53	40	32	27	23	20	18	16	15	13
150	60	40	30	24	20	17	15	13	12	11	10
100	40	27	20	16	13	11	10	9	8	7	7
P SS	500	750	1000	1250	1500	1750	2000	2250	2500	2750	3000

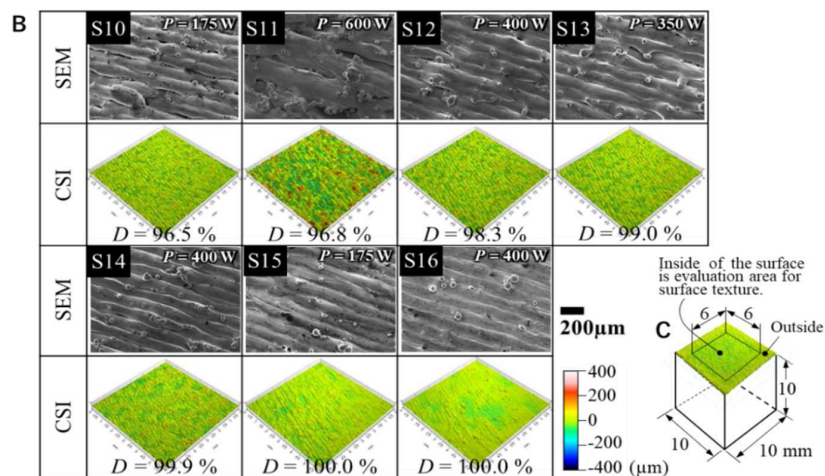
造形できた 121 個のキューブ試験片の相対密度を指標としたレーザー出力と走査速度のプロセスマップを作成した。なお、造形密度はアルキメデス法により測定し、相対密度の算出には、真密度 8.20 g/cm³を使用した。図 4-1-5 に、試験片の内部欠陥および造形表面の SEM 像を示したプロセスマップと造形面の表面性状の SEM 像と三次元プロファイラ (Zygo Newview9000) による CSI 像を示す。図中の密度が高い領域（紫色）はプロセスウィンドウと呼ばれ、この領域で内部欠陥が少ないことと合わせて滑らかな表面性状を呈していることがわかる。この領域を外れていくと、表面性状が荒れていくことがわかる。相対密度 99%程度以下になると熔融不良の欠陥が発生しはじめ、密度の低下とともに熔融不良欠陥は大きくかつ増加していくことがわかっている。マイクロポアの発生については、すべての条件で起こるわけではないが、図中の S7～S9 の試験片のように、レーザー出力が高い場合には、キーホールポアとして発生しやすいことが知られている。プロセスマップからわかるように、相対密度 99.7%以上の

高密度の領域では、ミクロポアの発生は見られるが、溶融不良の欠陥は観察されない。この領域を外れてくると、ミクロポアと併せて溶融不良欠陥が発生し始め、密度の低い高出力・高速領域では、S2 や S4 試験片のように非常に多くの溶融不良欠陥が発生することがわかる。

このように、内部欠陥（密度）と表面性状は相関があることがわかった。



(a) 表面性状と内部欠陥を指標としたプロセスマップ



(b) 表面性状と密度の関係

図 4-1-5 レーザー出力と走査速度のプロセスマップと表面性状と内部欠陥の関係

b) 表面性状と密度（内部欠陥）の相関

図 4-1-6 に低出力・低速造形条件における CSI 像を示す。レーザー出力を同条件として、異なる走査速度条件の表面を比較すると、走査速度が速いほど滑らかな部分が少なくなり、表面が粗くなっている。相対密度が 99% 以下の試験片では、細かな凹凸が表面全体に見られる。また、走査速度の条件を同じとし、レーザー出力の違いで表面を比較すると、レーザー出力が高くなるほど表面の凹凸周期が大きく

なっている。これは、出力が大きいほどメルトプールの幅が広くなるとともに、不安定になりやすいためである。

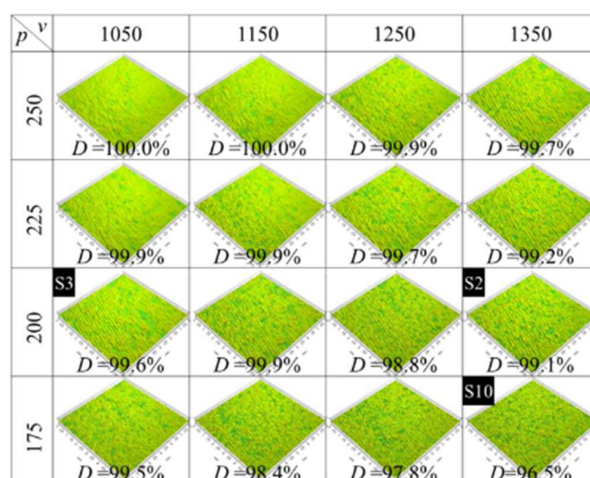


図 4-1-6 表面性状と密度の関係

これらの表面性状を定量化して、密度との関係を検討した。作製した 88 個の試験片における表面性状の測定データを用いて、ISO 25178-2 規格による 35 個の三次元表面性状パラメータを算出した。三次元表面性状パラメータと相対密度の関係を図 4-1-7 に示す。相関については、**maximal information coefficient (MIC)**[4]を利用して非線形解析を行った。MIC の値が 0.8 を超えると非常に相関が高いとされている。この図より、**Ssk** 及び **Sku** はそれぞれ MIC の値は 0.42 及び 0.34 と値が低く、通常よく使用される **Sa**、**Sq**、**Sv** などは、ほとんど MIC の値は小さく表面性状パラメータと密度の相関が低いことがわかる。これに対して、**Sz** は MIC の値が 0.71 と高く相関が高いことがわかる。また、**Svk** は MIC の値が 0.81 と最も高く、**Sk**、**Sq** 及び **Sdq** もそれぞれ 0.78、0.76 及び 0.76 と高い値を示しており、表面性状パラメータと密度は非常に相関が高いことがわかる。したがって、**Svk**、**Sk**、**Sq** 及び **Sdq** の表面性状パラメータを用いて高密度が得られる造形判断の閾値設定が可能である。このような造形面の表面性状と密度あるいは内部欠陥の関係については定性的には述べられているが、定量的に報告された例はない。

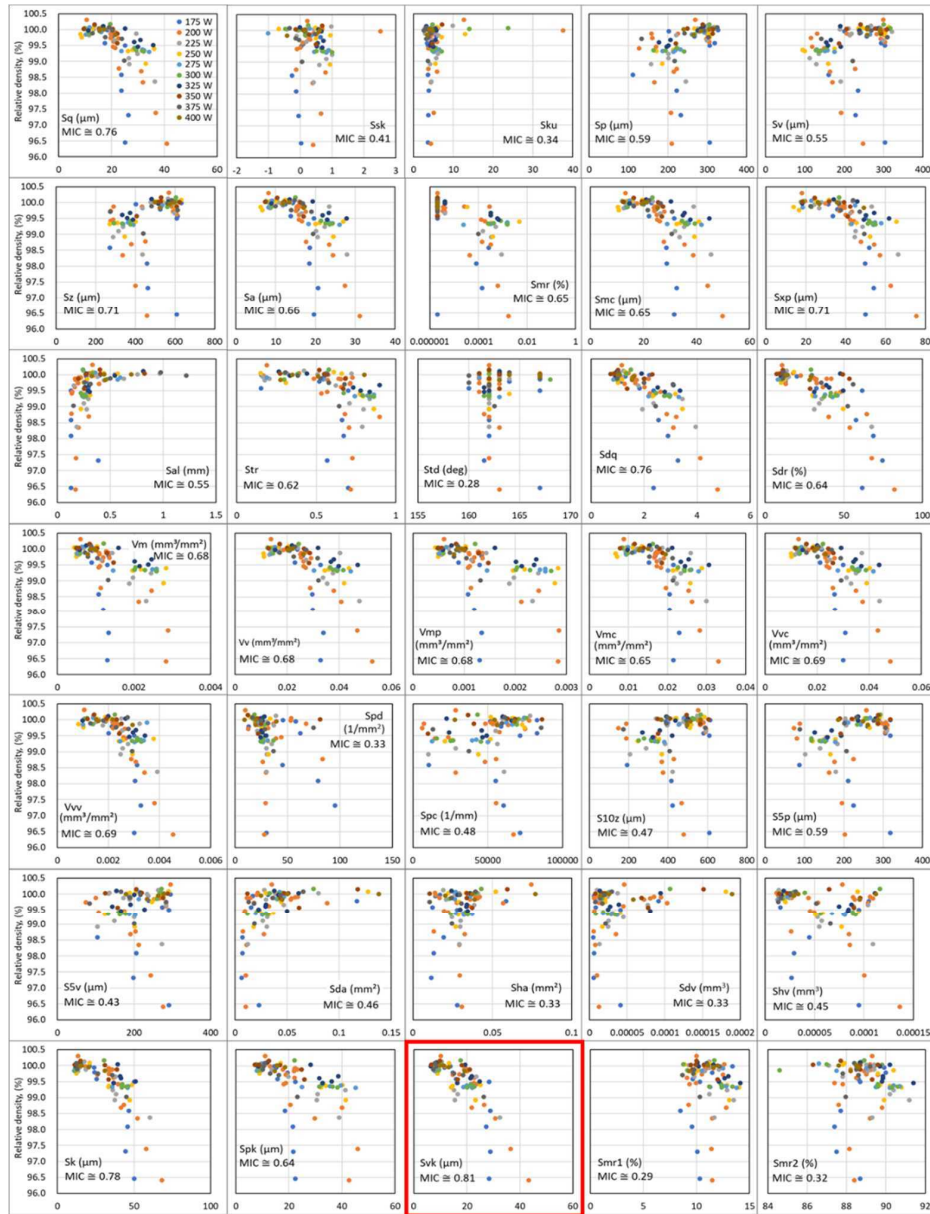


図 4-1-7 表面性状パラメータと造形密度の相関 (ISO 25178-2)

c) まとめ

三次元プロファイラの計測結果から、取得できた表面性状パラメータ 35 個のうち、特定の表面性状パラメータと密度との相関が非常に高く、表面性状パラメータを用いて造形密度の予測が可能であることがわかった。このため、本研究では、密度と相関の高い表面性状パラメータを使用して、欠陥発生予測システムを開発するとともに、プロセスマップ自動生成機能を開発することとした。

以上の報告は、[5] “Scientific Reports, 11(2021)22874” の内容の一部である。

(参考文献)

[4] D.N. Reshef et al. Detecting novel associations in large data sets. Science 334, (2011)1518–1524.

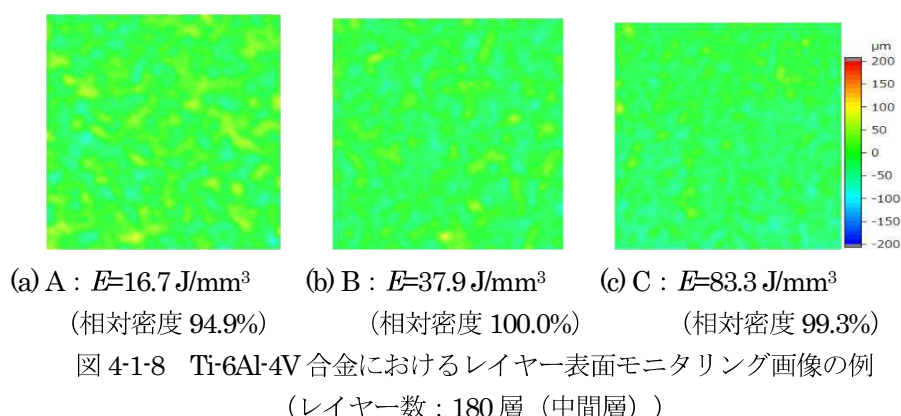
- [5] M. Yonehara, C. Kato, T.-. Ikeshoji1, K.Takeshita, H. Kyogoku, Correlation between surface texture and internal defects in laser powder-bed fusion additive manufacturing, Scientific Reports, 11(2021) 22874.

3) 各種材質及び粉末特性によるモニタリングデータの収集と特徴づけ

本研究開発では、IN718 合金、SUS316L 合金、Ti-6Al-4V 合金、AlSi10Mg 合金、及び銅合金についてモニタリングデータの収集を行った。モニタリングデータは、レーザー試験研究機を用いて、各種材料のメルトプール挙動、パウダーベッド及び造形面の表面性状データを収集し、欠陥発生予測システムの開発に利用した。

一例として、Ti-6Al-4V 合金のキューブ試験片の各造形条件に対する密度と表面性状を計測した例（図 4-1-8）を示す。これらの表面性状データを用いて表面性状パラメータの定量化を行うとともに、欠陥発生予測システム、プロセスマップ自動生成システムならびにフィードバックシステムの開発に利用した。

2) の項目で述べたように、CSI データによる密度と表面性状パラメータの相関がみられ、レーザー試験研究機による造形面の表面性状データによっても、密度と表面性状パラメータの相関があることがわかった。このため、in-situ で得られる表面性状データを利用して、表面性状パラメータの定量化を行うとともに、欠陥発生予測システム、プロセスマップ自動生成システムならびにフィードバックシステムの開発に利用できることがわかった



4) 機械学習及びシミュレーションによる欠陥予測システムの構築

a) 三次元プロファイラのデータによる欠陥予測システム

2019 年度には、東北大学仙台分室出願特許を基に欠陥予測システムのプロトタイプを試作を行った。教師データとして造形面のレイヤーモニタリング画像を用いた造形良否における判定データセットを準備し、畳み込みニューラルネットワーク (CNN) のモデルを用いて欠陥予測システムのプロトタイプを試作した。その結果、再現率 (Recall) はいずれのモデルも 80% 以上となり、さらに適合率及び F 値も高いモデルが予測システムとして適用可能なことを示し、中間目標は達成した。

b) レーザー試験研究機による欠陥予測システム

2019 年度の欠陥予測システムの試作では、予測精度 80% 以上となり、中間目標は達成できたが、最終目標の予測精度 95% 以上にはならなかった。また、2019 年度の CNN モデルは、電子ビーム用で開発されたシステムであることから、レーザービームの場合には、上述したように表面性状が大きく異なるため、CNN モデルを改良する必要がある。加えて、2019 年度は、入力データは三次元プロファイラのデータを

使用していたことから、インプロセスで利用する欠陥発生予測システムとはならない。このため、2020年度及び2021年度は、レーザー試験研究機の画像データを使用して、レーザー積層造形用の改良 CNN モデルを構築した。

表面計測の凹凸データを含む Depth データを直接畳み込みニューラルネットワーク（CNN）に入力し、欠陥予測を行った。図 4-1-9 に改良 CNN モデルを示す。図 4-1-10 にラベル付き学習用データの例として、bad データ（欠陥あり）と good データ（欠陥なし）をそれぞれ示す。これらのデータを用いて解析した結果を表 4-1-6 に示す。これからわかるように、再現率 0.97、適合率 1.00、F 値 0.98 となり、何れも最終目標の予測精度 95%以上となり、最終目標を達成できた。

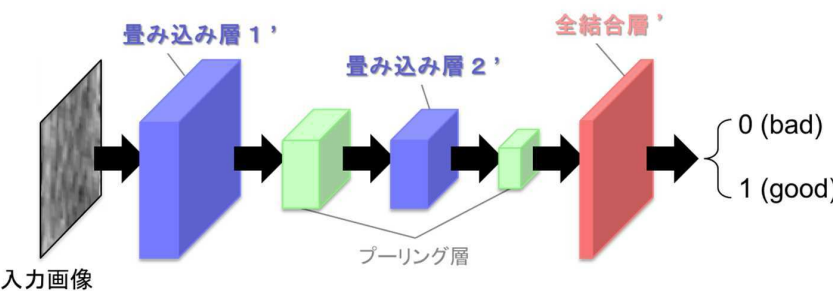


図 4-1-9 改良 CNN ベースモデル構成図

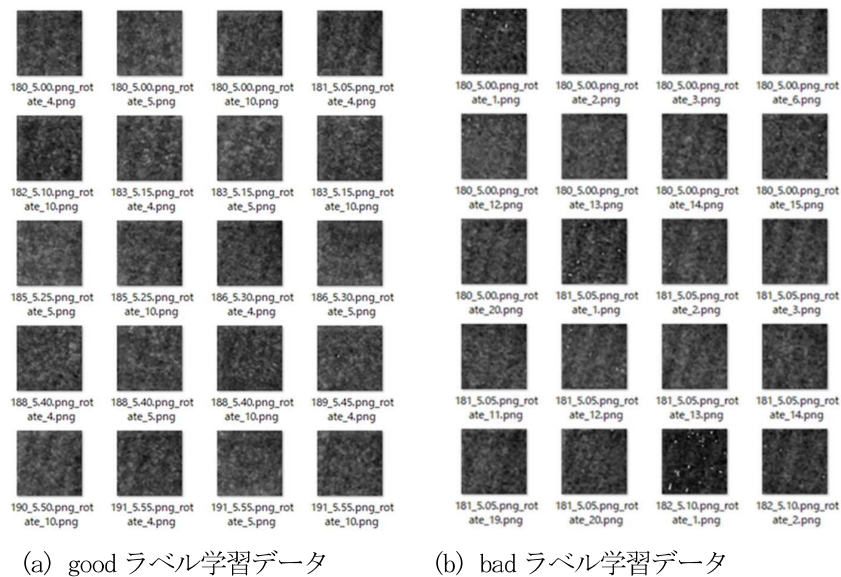


図 4-1-10 学習データの例

表 4-1-6 予測結果

項目	精度
再現率	0.97
適合率	1.00
F値(F1)	0.98

4.1.3. 高度モニタリング及びフィードバック制御機能の開発【研究開発項目②-L】

これまで述べてきたように、最適造形条件で造形すれば、基本的には欠陥は発生しにくいですが、レーザー積層造形においては、スパッタなどの発生により欠陥が発生する要因が多い。欠陥発生については、密度を指標として造形面の特定の表面性状パラメータと非常に強い相関があることがわかった。

これらの成果をもとに、欠陥予測システムを構築し、その概略図を図 4-1-11 に示す。欠陥予測システムは、(a) プロセスマップ自動生成機能、(b) フィードバック制御機能、および(c) 欠陥判別機能および欠陥予測機能学習エンジンから構成される。ユーザが要求するプロセスマップと最適化条件は (a) プロセスマップ自動生成機能が生成する。造形時に in-situ で造形表面をモニタリングしながら、ある特定の表面性状パラメータの値を閾値として、欠陥が発生すると予測された場合には、(b) フィードバック制御機能により再溶融され、50 μm 以上の欠陥がない造形が達成されるシステムとなっている。

以下に、要素技術の内容および汎用型モニタリング装置の開発と要素技術研究機への搭載について述べる。

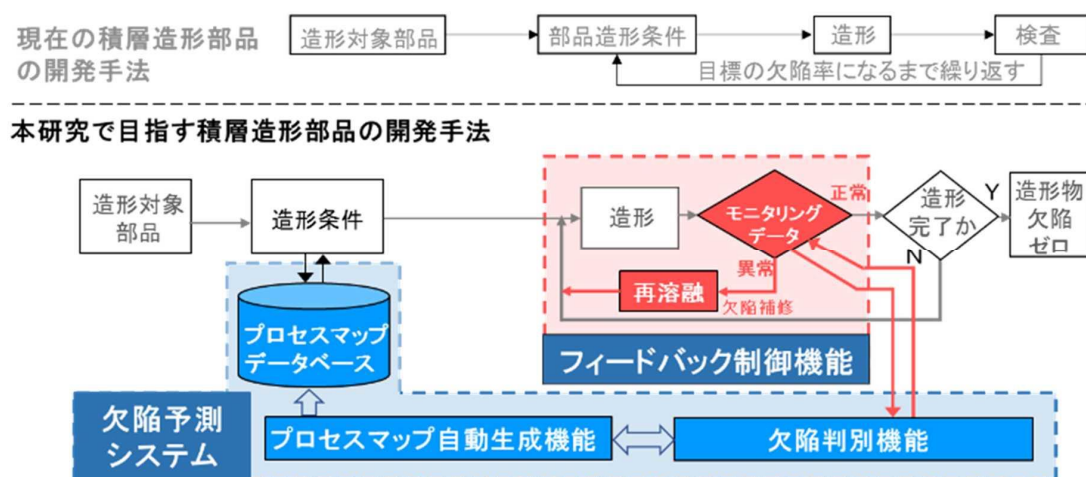


図 4-1-11 欠陥予測システムの概略図

1) パウダーベッド表面三次元計測技術の高度化

2019 年度に、既設のモニタリング装置を高度化した。主な改良点は次の通りである。開発目標であった既設のモニタリング装置の高さ分解能 30 μm から高さ分解能 9 μm （平面基準測定結果の 3 σ で規定）の高精度で計測可能な機能を開発し、目標値である 10 μm 以下（測定範囲 150 mm $\times$ 150 mm）の精度を達成した。この機能をレーザー試験研究機に実装した。また、パウダーベッド全面の温度分布や溶融状況を高精度で計測できる機能も組み込み、パウダーベッド表面温度を測定精度 $\pm 50^{\circ}\text{C}$ 以下で測定可能とし、モニタリング機能を高度化した。

2020 年度は、この機能を実装したレーザー試験研究機において取得するパウダーベッド表面の三次元点群データを用いて、指定した領域における表面画像データの取得と、ISO 25178-2 に準ずる三次元表面性状パラメータの算出を自動処理する機能を追加した。追加した表面性状算出ウィンドウ自動処理機能は、自動処理の対象レイヤーを任意に選択でき、レイヤー表面モニタリングデータから試験片の位置情報を元に、任意の矩形領域（Target Size/Test Size）を選択することが出来る。また、算出対象であるパウダーベッド表面、造形面について、それぞれ三次元表面性状パラメータ 15 種類と ASC データ、

カラーマップ画像、グレースケール画像を出力する。出力する三次元表面性状パラメータの画像の例を図 4-1-12 に示す。これらの画像データを欠陥予測システム開発に利用した。

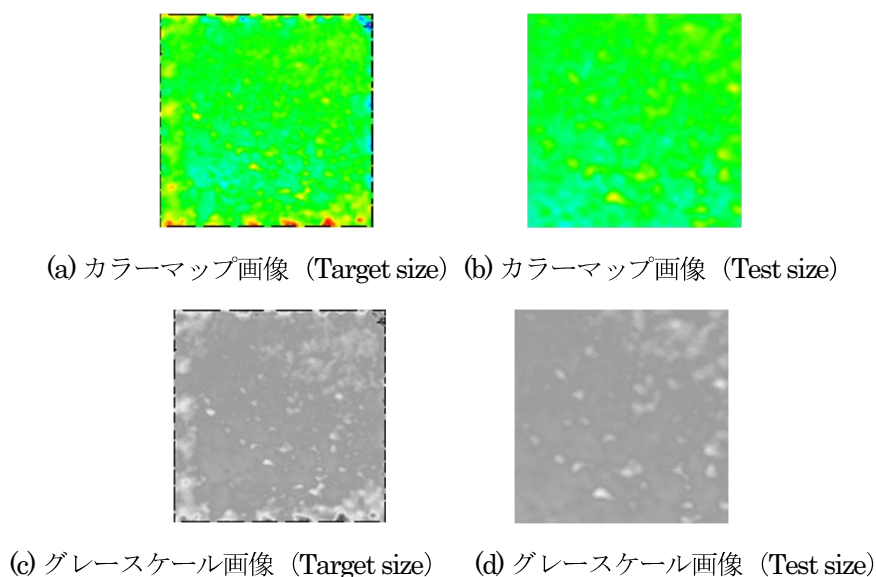


図 4-1-12 レイヤー表面モニタリングデータより出力する画像の例

2) 欠陥予測システムと連携したフィードバック制御機能の開発

汎用型モニタリング装置の実用化に向けて欠陥予測システムと連携したインプロセスモニタリングによるフィードバック制御機能の開発を行った。モニタリング・フィードバック機能は、(a) プロセスマップ自動生成機能、(b) 欠陥判別機能及びフィードバック制御機能の 2 種類であり、いずれもソフトウェアの開発と造形機で使用する制御ソフトの改良が必要となる。これらについては、(株) ヒカリが実施し、2022 年度には、これらの機能の動作確認を行った。2023 年度は、3) で述べるように、要素技術研究機に汎用型モニタリング装置を搭載して、動作確認を行った。詳細は、4) 汎用型モニタリング装置の開発の項目で述べる。

欠陥判別フィードバックシステムにおける機能は、4-1-2 1) で述べたように、欠陥判別機能とスパッタなどの不慮の欠陥防止のための再溶融機能である。造形機には要素技術研究機を使用し、欠陥判別機能及び三次元表面性状計測器とそれぞれ連携させることで欠陥の有無を判別し、必要に応じて再溶融を実行するシステムとなる。具体的には、部品造形中に一層毎のパウダーベッド表面および造形面の表面性状を三次元表面性状計測器で撮影し、欠陥の有無を判定する表面性状パラメータの計算を行う。そして、取得した表面性状パラメータの値が設定した閾値を超えた場合に再溶融を実行し、欠陥を補修しながら工程完了まで積層造形を継続する。なお、レーザービーム方式における欠陥補修では、装置の機能上造形条件の変更はできないため、同じ造形条件で再溶融を実施する。本システムは、要素技術研究においても動作確認ができ、フィードバック機能の有効性を確認できた。

3) 再溶融による欠陥補修技術の開発

IN718 合金を対象として、レーザー試験研究機による再溶融による欠陥補修について検討した。表 4-1-7 に示す造形条件で図 4-1-13 に示す角柱試験片をフィードバック有、無で造形して、再溶融に状況について調査した。

図 4-1-14 に再溶融した表面性状の状況の例を示す。積層数は 1876 層で、そのうち表面性状パラメータ Sku の閾値を用いて再溶融した層は 127 層であった。造形面の画像を見ると、再溶融前は表面の凹凸が明らかに観察されるが、再溶融後は、表面の凹凸が消えているのがわかる。また、図 4-1-15 にフィードバック制御した試験片の X 線 CT による計測結果を示す。X 線 CT による計測は、ボクセルサイズ $10\mu\text{m}$ で計測しており、ほぼ $30\mu\text{m}$ 以上の欠陥の計測が可能といわれている。体積欠陥率は 0.005% で、ほぼ欠陥がないことがわかる。これらの欠陥は、XY 断面の画像からわかるように、造形表面に存在する欠陥で、内部にはほとんど確認できない。このように、再溶融した場合には、造形体内部では目標とする欠陥サイズ $50\mu\text{m}$ 以上が 0% と考えられる。表面近傍の欠陥をなくするためには、粉末特性、造形条件を詳細に検討していくとともに、装置の改良も必要である。

表 4-1-7 造形条件

	P (W)	v (mm/s)	h (mm)	t (mm)	E (J/mm ³)
A	200	1100	0.10	0.05	36.4
C	300	1100	0.10	0.05	54.5

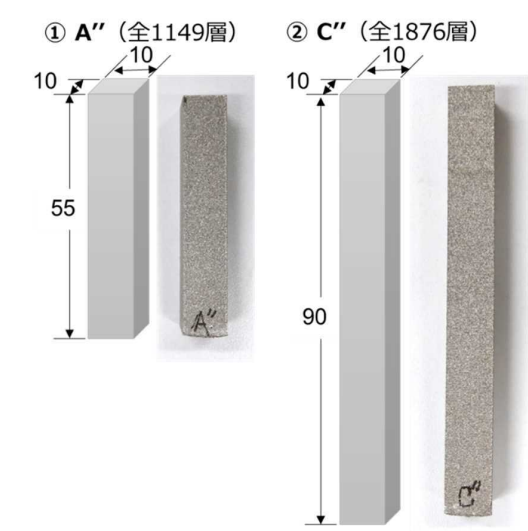


図 4-1-13 角柱試験片形状

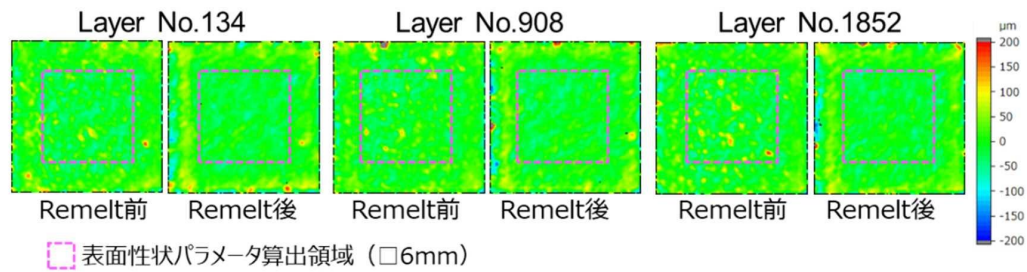


図 4-1-14 再溶融面の例

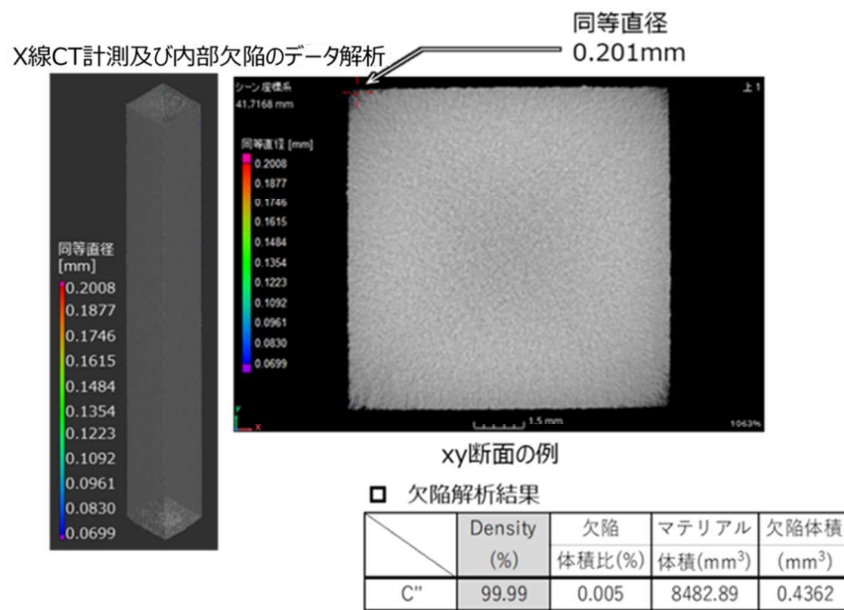


図 4-1-15 X 線 CT 計測及び内部欠陥データ解析

再溶融の回数に関しては、再溶融 1 回では大きな変化はなかったが、複数回繰り返した場合には、凹凸が大きくなり表面性状は悪化した。このため、再溶融は 1 回で表面性状が改善されることから、モニタリング・フィードバックシステムでは、1 回の再溶融とすることとした。

4) 汎用型モニタリング装置の開発((株) ヒカリ)

レーザー試験研究機は、高度モニタリング用で、汎用型モニタリング装置として利用できない。このため、2022～2023 年度に汎用型モニタリング・フィードバックシステムを開発し、要素技術研究機に搭載して検証を行うこととした。これが可能となれば、事業化への第一歩となる。

a) 汎用型モニタリング装置の基本仕様の達成状況

汎用型モニタリング装置の基本仕様は、以下の通りで、レーザー試験研究機とほぼ同等の仕様を達成している。

- ①測定視野：200 mm × 200 mm (Max) → 目標達成
- ②高さ分解能：10 μm 以下 → 15 μm：要素技術研究機に採用
- ③水平分解能：80 μm/pix 以下 → 目標達成 (69 μm/pix)
- ④高さ計測範囲：1 mm → 目標達成

b) 汎用型モニタリング装置の実装

a)で述べた仕様の汎用型モニタリング装置を要素技術研究機に実装した(図 4-1-16)。まず、2022 年度にシステムとして要素技術試験機、欠陥自動検出システム、汎用型モニタリング装置の 3 機能が連携動作するか確認した。2023 年度に、システムの全体構成開発は近畿大学広島分室が行い、要素技術試験機の改造は株式会社松浦機械製作所に外注し、欠陥自動検出システムのソフト作成は株式会社先端力学シミュレーション研究所 (ASTOM) に外注した。汎用型モニタリング装置は再委託先の株式会社ヒカリが開発を担当し、近畿大学広島分室とともに動作確認した。

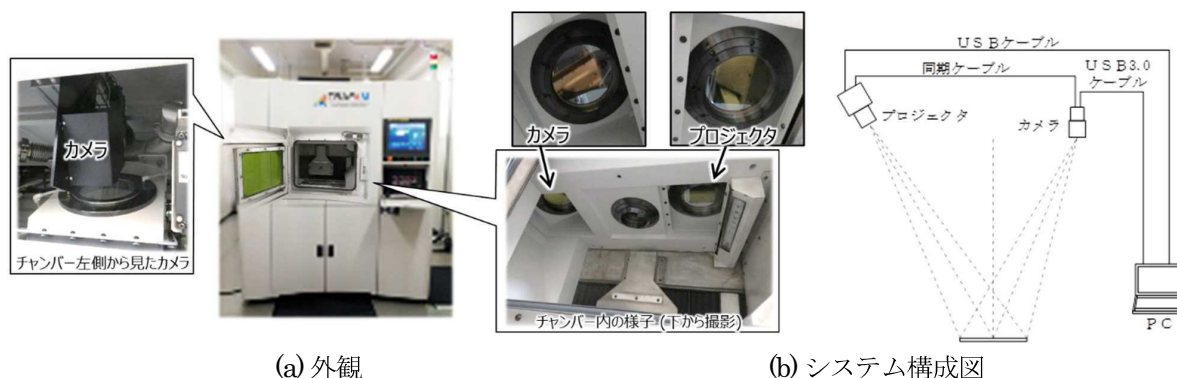


図 4-1-16 汎用型モニタリング装置を実装した要素技術研究機

c) プロセスマップ自動生成システム 制御シーケンス（要素技術研究機実装版）

要素技術研究機に実装したプロセスマップ自動生成システム制御シーケンスは、次のとおりである。なお、プロセスマップ自動生成システムの詳細は、4.1.4 で述べる。本システムでは、粉末をリコート後にパウダーベッドの表面性状を計測する。計測終了後にレーザー照射を開始して、終了後に造形面の表面性状を計測し、データ蓄積をする。決められた層の回数のデータ収集を行い、次に造形条件を変えて同様に造形面のデータ収集を繰り返し行い、プロセスマップを自動生成する。

本システムにより、材質 5 種類のデータ収集を行い、正常に動作することを確認した。

d) 欠陥判別フィードバックシステム 制御シーケンス（要素技術研究機実装版）

要素技術研究機に実装した欠陥判別フィードバックシステム 制御シーケンスは、次のとおりである。本システムでは、粉末をリコート後にパウダーベッドの表面性状を計測する。計測終了後にレーザー照射を開始して、終了後に造形面の表面性状を計測し、ある特定の表面性状パラメータを計算して欠陥発生の有無を判定する。欠陥発生無と判断した場合には、次の層の造形を行う。欠陥発生有と判断した場合には、再溶融を行う。なお、要素技術研究機では、造形条件を変えることができないので、同じ造形条件で再溶融する。その後、次の層の造形をおこなう。造形終了まで、このサイクルを繰り返す。

本システムにより、材質 5 種類について造形を行い、正常に動作することを確認した。

e) まとめ

要素技術研究機で、プロセスマップ自動生成機能と欠陥判別フィードバック機能の有効性を確認できたことは、事業化への第一歩となる。（TRL6 レベル）

4.1.4. 積層造形部品作製のための開発・評価手法の開発【研究開発項目③-L】

1) 自動化可能なプロセスマップ探索手法の確立

a) 三次元プロファイラの画像データによるシステムの構築

プロセスマップ自動生成手法については、TRAFAM 東北大学仙台分室で特許出願（PCT/JP2018/31389）しているが、欠陥発生予測システムと同様に表面性状が異なることから、プロセスマップ自動生成機能の仕様は TRAFAM 東北大学仙台分室と協議して作成した。

まず、プロセスマップ自動生成機能を確認するため、2019 年度に作製した IN718 合金におけるキューブ試験片 120 個分の表面性状パラメータを使用した。なお、キューブ試験片の表面性状は三次元光学プロファイラ（Zygo 製、NewView9000）で計測し、ISO25178-2 に準ずる三次元表面性状パラメータのうち 35 個のパラメータを算出した。

モニタリングデータからプロセスマップを生成するための SVM を用いた学習器における例として、評価時処理フローを図 4-1-17 に示す。本機能は、大まかに表面性状パラメータの予測を行う回帰処理と、表面性状パラメータから良・不良判定を行う 2 つのステップに分かれている。

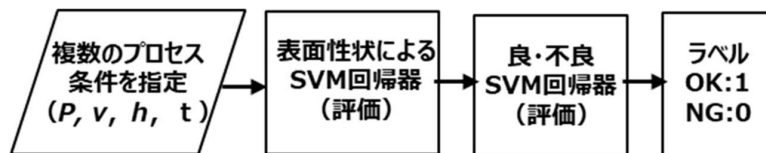


図 4-1-17 プロセスマップ自動生成機能における評価時処理フロー

次に、三次元プロファイラによるデータを使用して、造形条件からプロセスマップとプロセスマップ評価に用いた決定関数を求め、y 軸にレーザー出力 P 、x 軸に走査速度 v としてプロセスマップを生成した。造形条件 (P , v) を変化させた場合の OK/NG 予測結果と決定関数の分布図をそれぞれ図 4-1-18 および図 4-1-19 に示す。なお、決定関数は+1 側が OK 側、-1 側が NG 側を示す。これらのプロセスマップと実験によるプロセスマップ (図 4-1-5(a)) を比較すると、大まかには一致しており、本プロセスマップの有効性が確認できた。

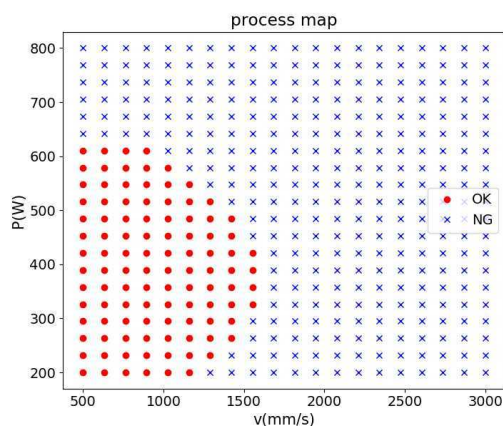


図 4-1-18 プロセス条件 (P , v) とプロセス OK/NG 条件の予測結果

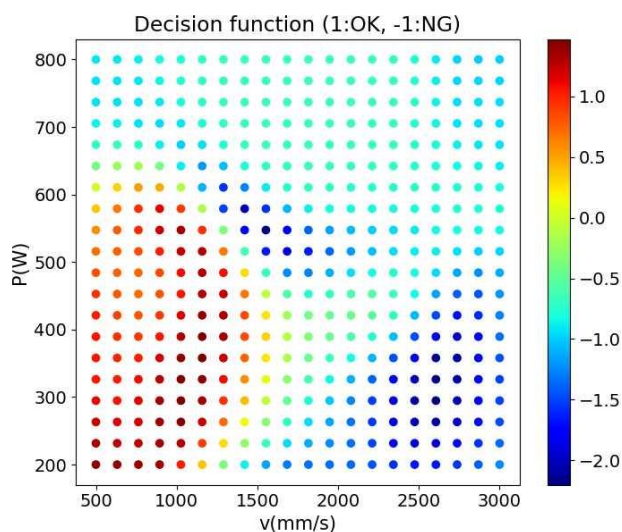


図 4-1-19 プロセス条件 (P , v) とプロセス決定関数の予測結果

b) インプロセスモニタリングの画像データによるシステムの構築

インプロセスモニタリングによるプロセスマップ生成機能とするために、レーザー試験研究機による表面性状データを利用して、その有効性を確認した。さらに、アルキメデス法による密度を用いた場合には、その密度が必ずしも造形表面性状に対応している訳ではないため、X線CTによる各層に対応する密度と表面性状を対応させて、機能の高精度化を図った。

最終的には、汎用型モニタリング装置を要素技術研究機に搭載して、動作確認を行って、各種材質のプロセスマップを自動生成した。IN718合金の例を図4-1-20に示す。汎用型モニタリング装置による計測データを用いて作成したプロセスマップは、図4-1-19に示す三次元プロファイルによる計測データを用いて作成したプロセスマップと比較すると、プロセスウィンドウが絞られていることがわかる。

このように、プロセスマップ自動生成機能によりプロセスマップを作成でき、最適造形条件を決定することができた。今後の材種並びに同じ材種でも粉末特性が異なるとプロセスマップも異なってくることから、本システムにより短時間で最適造形条件を探索できることは、ユーザにとっても極めて有用であるといえる。

本システムにより、代表的な5つの材種、IN718合金、SUS316L合金、Ti-6Al-4V合金、AlSi10Mg合金および銅合金について対応したが、Ti-6Al-4Vについては、プロセスマップは、実験結果とよく一致し、IN718合金およびSUS316L合金は、実験結果とほぼ一致したのに対して、AlSi10Mg合金および銅合金は実験結果とかなり異なる結果となった。今後は、さらに詳細な検討が必要である。

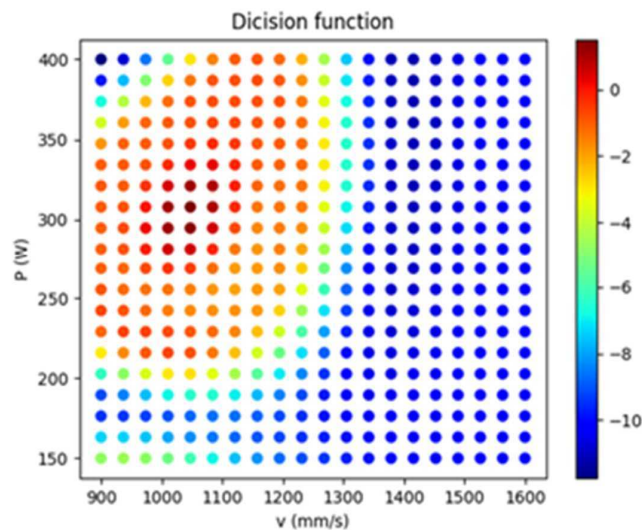


図 4-1-20 プロセスマップ自動生成機能による出力例

c) まとめ

汎用型モニタリング装置によるインプロセスのデータを使用して、プロセスマップ自動生成機能を使用して最適造形条件を見出すことができた。従来は、最適造形条件を見出すためには長期間を要していたが、本システムにより、一晩で最適造形条件が見いだせることは、生産性の向上において極めて有意義である。最適造形条件は、装置、材質、粉末特性により変わることが分かっており、今後、新たな材質や粉末特性の異なる粉末への対応が増えていく中では、極めて有効な手段であるといえる。

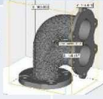
本プロジェクトでは、代表的な5つの材種、IN718合金、SUS316L合金、Ti-6Al-4V合金、AlSi10Mg合金および銅合金について対応したが、Ti-6Al-4V合金については、プロセスマップは、実験結果とよ

く一致し、IN718 合金および SUS316L 合金は、実験結果とほぼ一致したのに対して、AlSi10Mg 合金および銅合金は実験結果とかなり異なる結果となった。今後は、さらに詳細な検討が必要である。

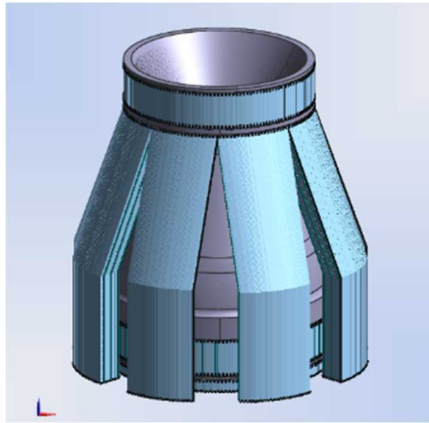
2) ユーザ実証

ユーザ実証については、表 4-1-8 に示す 4 社に協力頂き、4 種類のモデルを提供頂き、汎用型モニタリング・フィードバックシステムを搭載した要素技術研究機により造形を行い、汎用型モニタリング・フィードバック機能の有効性を検討した。

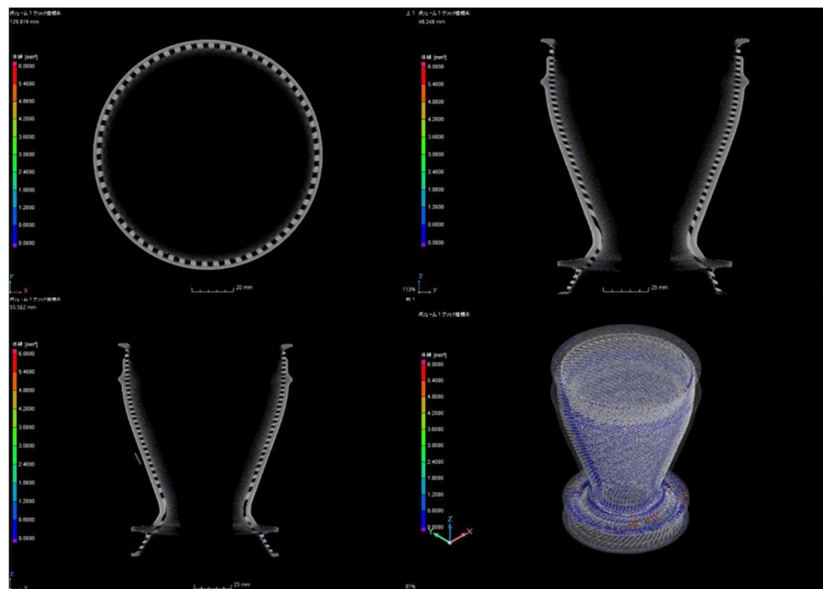
表 4-1-8 ユーザと造形品

ユーザ	材質	IN718 合金	SUS316L 合金	Ti-6Al- 4V合金	AlSi10Mg 合金	銅合金
A 社	航空宇宙分野 (ロケットエンジン部品)					
B 社		輸送機器分野				
C 社				航空宇宙分野		
D 社					電気機械器具分野(高周波コイル) 	

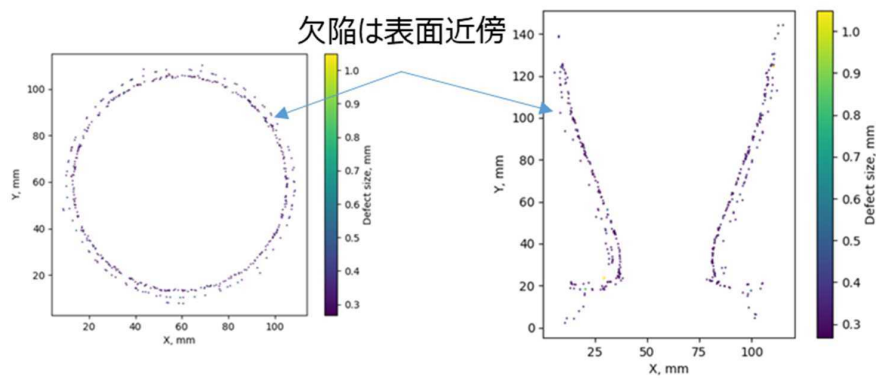
今回の各種造形品は、プロセスマップ自動生成機能による最適造形条件近傍で造形したことから、フィードバック機能の有無に依らず、高密度の造形体が得られ、フィードバック機能有では欠陥率が減少し、その有効性が確認できた。IN718 合金の例 (図 4-1-21) では、X 線 CT の解析結果 (図 4-1-22) では、欠陥のほとんどは表面部分の大きな凹凸である陥入欠陥であり、内部ではほとんど欠陥は検出できなかった。また、Ti-6Al-4V 合金の例では、フィードバックの有無に関わらず、高密度の造形体が得られており、欠陥は X 線 CT のボクセルサイズが約 60 μm と既に小さい欠陥であるため検出できないレベルである可能性が高い。ユーザ実証では、プロセスマップ自動生成機能により得られた最適造形条件近傍での造形条件を使用したため、いずれの材質でも高密度の造形体が得られており、プロセスマップ自動生成機能の有効性が認められた。



(a) 造形データの3Dモデル (b) フィードバック有
図 4-1-21 ユーザ造形の例 (A 社:IN718)



(a) X線CT画像



(b) 欠陥の分布

図 4-1-22 造形品（フィードバック有）のX線CT画像の例

3) 手順書作成

欠陥予測システムは、PBF-LB による製品造形で用いるプロセスマップを自動生成し最適化条件を提示するとともに、造形中の欠陥を判別して再熔融することで欠陥のない造形物を効率的に造形するシステムである。

手順書には、欠陥予測システムが、[プロセスマップ自動生成機能]、[フィードバック制御機能]、[欠陥判別機能および欠陥予測機能学習エンジン]から構成されることおよびそれぞれのコンポーネントに含まれる機能について示している。

4) リードタイムの短縮

現状のリードタイムについては、TRAFAMのユーザ会において聞き取りを行った結果（図4-1-23）、PBF-LB の造形においては、通常、プロセス開発と試作・造形の期間は 6 週間程度であるとのことであった。上述したように、プロセスマップの自動化が可能となり、プロセスマップの作成に 0.2 週間、造形に 1 週間、合計 1.2 週間程度となることがわかった。このように、プロセスマップ自動生成機能を搭載したモニタリング・フィードバックシステムを利用することにより、リードタイムは 1/5 以下に短縮できた。

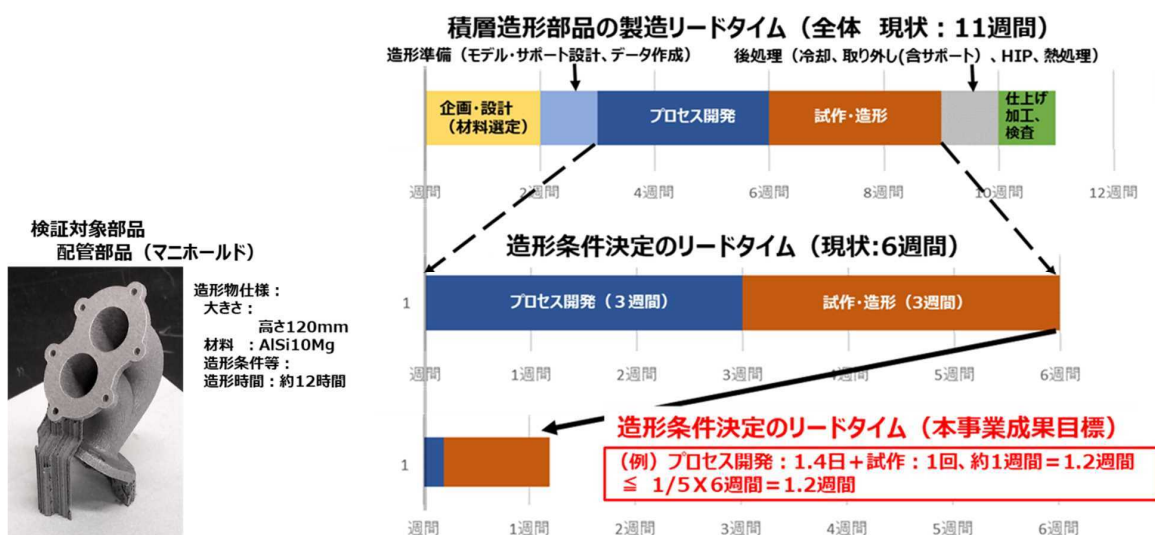


図 4-1-23 積層造形部品の製造リードタイム

4.1.5. まとめ

本事業では、以下の3つの項目(①-L～③-L)について研究開発を行い、最終目標については、すべて達成した。得られた主な結果は次の通りである。

1) レーザー試験研究機により、IN718 合金、Ti-6Al-4V 合金、SUS316L 合金、AlSi10Mg 合金、及び銅合金を対象として、リアルタイムでメルトプール、パウダーベッド及び造形面の画像データを収集した。予測精度を向上させるために、開発した自動画像収集ソフトウェアを使用して造形体の表面性状及び X 線 CT データを収集した。これらのデータを用いて、機械学習を利用した欠陥予測システムを開発し、予測精度 95%以上を達成した。

- 2) レーザー試験研究機により収集した造形表面の画像データを用いて表面性状パラメータを計算し、欠陥率を減少させる特定の表面性状パラメータを見出した。この特定の表面性状パラメータを用いて、フィードバックのための再溶融による欠陥補修機能を開発した。
- 3) 実用化のために、汎用型モニタリング装置を開発し、モニタリング・フィードバック機能を要素技術研究機に搭載して、ユーザ造形を行った結果、欠陥率が低下し、その有効性を確認できた。
- 4) 機械学習を利用したプロセスマップ自動生成機能を開発し、種々の材料のインプロセスモニタリングデータに適用した結果、実験により作成したプロセスマップとよく一致した。プロセスマップ自動生成機能による最適造形条件を用いてユーザ造形を行った結果、造形体内部では $50\mu\text{m}$ 以上の欠陥が存在しない高密度の造形体が得られ、その有効性が確認できた。
- 5) プロセスマップ自動生成機能と高度モニタリング・フィードバック機能を有する三次元積層造形システムを開発できた。ユーザがこのシステムを活用可能とするために、手順書を作成した。また、このシステムを利用することにより、リードタイムを $1/5$ 以下にすることができた。

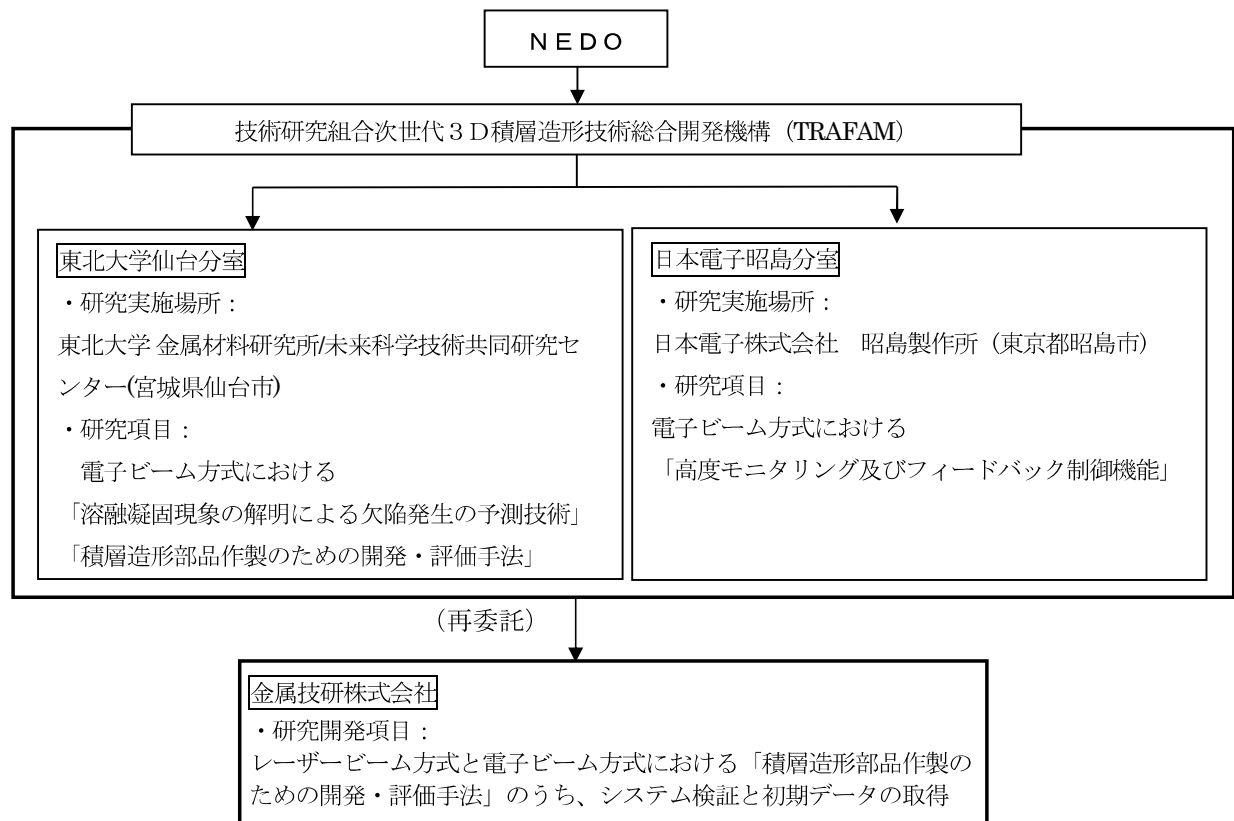
以上のように、プロセスマップ自動生成機能と欠陥判別フィードバック機能を有する汎用型モニタリング装置を開発し、実用機に近い要素技術研究機に搭載してユーザ造形により検証した結果、その有効性が確認できたことから、TRL6 レベルにあるといえ、事業化への第一歩の段階に達したといえる。今後、事業化に向けて、汎用型モニタリングシステムの小型化・高機能化と合わせて、システム全体の機能の向上を図る予定である。

4.2. 電子ビーム方式における研究開発

4.2.1. 事業内容詳細

実施者名、実施体制

電子ビーム方式の開発は、東北大学と日本電子株式会社で実施した。日本電子株式会社が造形機とモニタリングのハードウェアの開発を担当し、東北大学がソフトウェアの開発およびシミュレーション技術の開発、各合金種のデータ収集を行った。システムの実用化を加速するため、ユーザ実証を行い、システム検証と初期データの取得を行った。



期間

期間：2019年4月～2024年3月

実用化への道筋

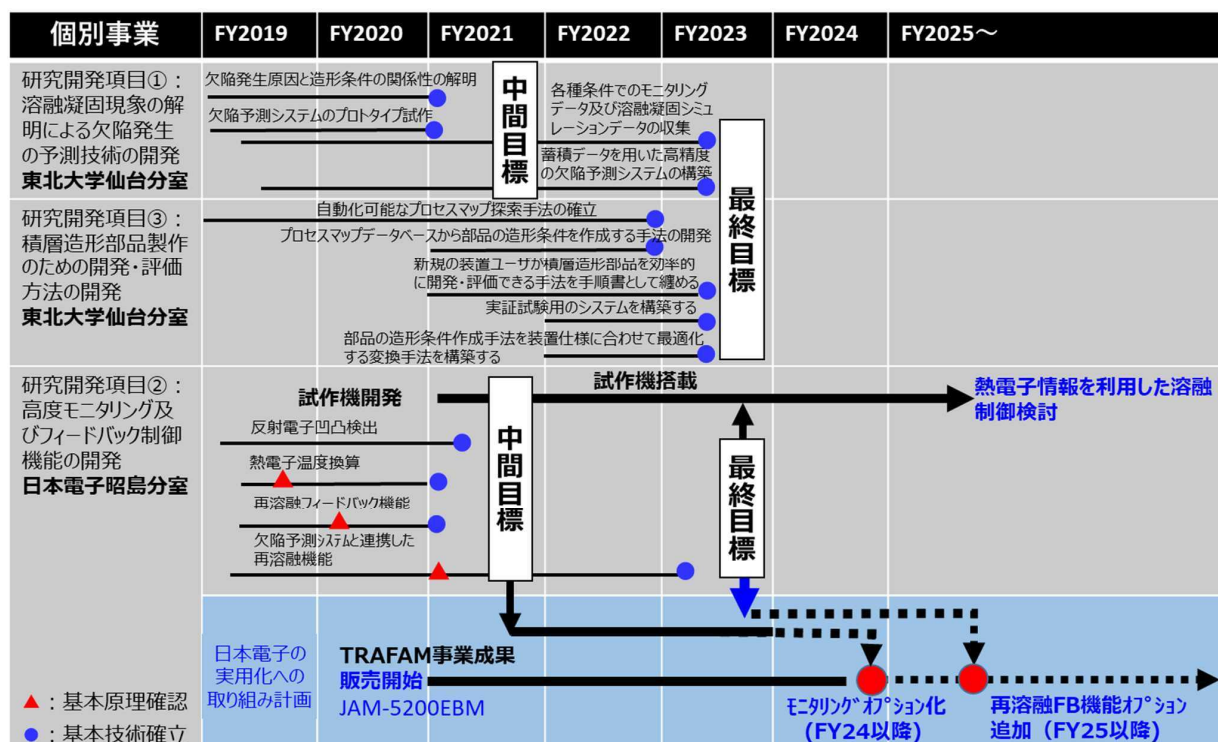
事業の内容、及び実用化に向けてのスケジュールを表4-2-1に示す。

反射電子凹凸検出に関しては、日本電子株式会社の製品機であるJAM-5200EBMに搭載可能なBSEモニタリング機能の開発を2023年度から開始し、2024年度にオプション化を目標に開発中である。

欠陥予測システムと連携した再溶融FB機能については、2025年度以降のオプション化を目指し企画中である。そのオプション化までは、単純に造形面のBSE画像の凹凸情報から直接判断できる比較的大きな欠陥を検知する機能をBSEモニタリング機能と一緒に開発中である。

また溶融中の熱電子情報を利用した新しい溶融制御方式の開発・実用化を2027年度目標に進める予定である。

表 4-2-1 事業の内容、及び実用化に向けてのスケジュール



アウトプット目標

本研究開発項目のアウトプット目標を表 4-2-2 に示す。

表 4-2-2 研究開発項目とその最終目標及びその根拠

個別事業	最終目標	根拠
研究開発項目①：溶融凝固現象の解明による欠陥発生予測技術の開発	・欠陥発生予測システムの予測精度 95%以上	・欠陥率0%の実現には、欠陥予測システムの予測精度が高い必要があるため、最終目標を 95%以上とした。
研究開発項目②：高度モニタリング及びフィードバック制御機能の開発（電子ビーム）	・試験研究機に実装した状態で積層造形プロセスにおける粉末敷き詰め状態及び造形面について、精度 10μm以下で凹凸を計測	・粉末の粒径が45~110μm程度であること及び平坦な造形面の性状判定から欠陥予測することを考慮して、粉末敷き詰め状態及び造形面を精度良く計測するため、最終目標を10μm以下とした。
	・フィードバック制御機能による造形プロセス中の50μm以上の欠陥率 0%	・X線CTで計測可能な50μm以上を対象として欠陥率 0%とした。
	・電子銃異常やチャージアップ発生を抑制・検知し装置を一時停止する機能の実装	・電子銃異常やチャージアップの発生が欠陥に繋がるため、また粉末のチャージアップによって突発的に発生する粉末飛散(スモーク)は放置すると装置に損傷を与えるため、異常検知機能が必要。
研究開発項目③：積層造形部品製作のための開発・評価方法の開発	・開発・評価手法の開発のために必要な積層造形物に関する評価データを、金属材料4種類以上について蓄積する。	・実際に多様な金属部品開発にも応用できるように、複数の種類の金属種でのデータ蓄積も重要であるため、最終目標として4種類以上とした。

研究開発項目ごとの研究テーマ内容

本事業では、レーザービーム方式と同じく世界最高水準の欠陥予測システムと高度モニタリング・フィードバック制御機能とを有する三次元積層造形システムを構築し、金属の積層造形部品

等の開発のリードタイムを短縮し効率化するため、電子ビーム方式におけるパウダーベッドの熔融凝固現象の学理を構築し、欠陥形成メカニズムを明らかにして、欠陥予測システムを開発した。さらに欠陥形成を予測し抑制するための高度モニタリング・フィードバック制御機能の要素技術を開発し、試験研究機に実装・実証した。さらに、TRAFAM で出願済の特許

(PCT/JP2018/31389) を基にプロセスマップの探索手法を確立し、試験研究機によるモニタリング結果を基に、その場観察可能で欠陥生成に関わるパラメータを抽出・検討し、そのパラメータを用いた自動化可能な条件探索手法を開発した。欠陥形成メカニズムがレーザービーム方式と異なるため、計測対象やモニタリング技術といった内容は電子ビーム方式特有の反射電子や熱電子等について集中して実施した。本事業では以下の3項目(①-E～③-E)の研究開発テーマについて研究開発を実施した。

研究開発項目①-E：熔融凝固の解明による欠陥発生の予測技術の開発
(TRAFAM 東北大学仙台分室)

研究開発項目②-E：高度モニタリング及びフィードバック制御機能の開発
(TRAFAM 日本電子昭島分室)

研究開発項目③-E：積層造形部品作製のための開発・評価手法の開発
(TRAFAM 東北大学仙台分室)

アウトプット目標の達成状況

表 4-2-3 に示すように全ての開発項目の目標を達成した。達成の根拠についても表 4-2-3 に記載した通りである。

表 4-2-3 開発項目、目標、成果、及び達成度

個別事業	目標 (2024年3月)	成果 (2024年3月)	達成度	達成の根拠／解決方針
1. 溶融凝固現象の解明による欠陥発生の予測技術の開発	・欠陥予測システムの予測精度を95%以上にする。	・Ti-6Al-4V合金パウダーベッドの放射率を計測し、シミュレーションによりTi-6Al-4V合金パウダーベッドの溶融凝固を解析した。 ・表面形状のデータから欠陥の有無を予測するソフトウェアとパウダーベッドの充放電シミュレーションソフトウェアを試作、予測精度(再現率)95%以上を達成した。 再現率(Recall)：実際に欠陥であったものの内、欠陥と予測できた割合	○	熱放射率は高温で顕著に増加することを明らかにした。再現率0.977で、目標達成した。
2. 高度モニタリング及びフィードバック制御機能の開発	・試験研究機に実装した状態でパウダーベッド表面及び造形表面を精度10 μm以下で計測できる三次元計測機能を開発する。	・光学式、及び電子ビーム方式の2方式で10μm以下の表面凹凸形状を反映した画像が得られる機能を開発し、目標達成した。 ・装置構成の簡素化/コスト低減を考慮し、電子ビーム方式のモニタリング(BSE像観察)に注力し、更なる高度化を図った。	○	ベースプレート上に加工した10μmの段差が確認できた、及び造形中の造形表面において光学方式と同等の表面形状画像が取得できた。
	・フィードバック制御機能により造形プロセス中の50μm以上の大きさの欠陥率を0%とする。	・仙台分室で開発された欠陥予測システムを搭載し、再溶融FB機能の実機検証において、粉末ガスボア率を下回る欠陥率が確認でき、最終目標(粉末起因のガスボアを含まず)を達成した。	○	最適条件から少しずらした造形条件でのFB制御を入れた造形において、粉末ガスボア率を下回る欠陥率が確認できた。
	・電子銃異常やチャージアップ発生を抑制・検知し装置を一時停止する機能を実装する。	・電子銃ロバスト性向上やパウダーベッド面シールドカバーにより、電子銃異常やチャージアップ発生(スモーク発生含む)を抑制した。 ・電子銃のアノード電流やライナーチューブ電流を検出し、電子銃異常やスモーク発生時にインターロックが働き装置を安全停止させる機能を実装した。	○	アノード電流やライナーチューブ電流異常を検知し、安定停止を確認。またソフト的なスモーク検知も実スモークで正常動作を確認した。
3. 積層造形部品作製のための開発・評価手法の開発	・部品開発・評価手法の開発のために必要な積層造形物に関する評価データを4種類以上の金属材料について蓄積する。	・4種の合金系のデータを蓄積し、達成した。 ・Ti-6Al-4V合金でプロセスマップ探索手法を検証した。 ・純Cu、SCM440合金、AlSi10Mg合金の造形を完了した。	○	Ti-6Al-4V合金、純銅、SCM440合金、AlSi10Mg合金のデータを蓄積し、目標達成した。
	・欠陥予測システムと高度モニタリング及びフィードバック制御機能、ならびにプロセスマップ探索手法を用いて積層造形部品を効率的に開発・評価する手法をユーザが活用できる手順書として纏め、システム(ソフト)化する。本システムおよび手順書を用いて、造形条件決定のリードタイムを1/5(1-2週間)に短縮する。	・プロセスマップ自動生成ソフトウェアを開発、動作検証完了。 ・形状による入熱の影響を計算するソフトウェアを開発。 ・熱電子画像シミュレーションソフトウェアを開発。 ・リードタイム1/5については、達成済み。	○	開発機能、開発ソフトウェアを用いた、積層造形溶接開発のリードタイムを推定したところ、従来6週間(42日)に対し、8日で可能となり、目標のリードタイム1/5を達成した。
	・小型機のレシピを中型機のレシピに変換するポストプロセッサを開発する。	・中型機(JAM-5200EBM)によるデータ収集。 ・小型機(電子ビーム試験研究機)のビーム径計測技術の開発。 ・小型機のプロセスマップ構築実験。 ・改善完了した小型機でデータ収集開始。ポストプロセッサが完成し、目標達成。	◎	5種目となる銅合金データ取得したため、大幅達成と評価
	・フィードバック制御造形のユーザ実証	・ユーザ実証(フィードバック制御なし/あり)が完了。 ・FB有により欠陥を修復でき、なおかつ原料粉末のガスボア欠陥率よりも低い欠陥率であったため、造形欠陥0%を達成。 ・また、ユーザ所有の市販装置での造形も実施し、本PJで開発した装置とFB機能によって造形することで、欠陥率をより低くできることを確認。 ・バルク溶融部が本PJの対象ではあるが、大型かつ輪郭溶融が多い部材でもユーザ実証を行い、バルク溶融部ではなく輪郭溶融部に欠陥が生じやすい傾向にあるなどの課題を抽出した。	○	ユーザ実証が完了し、FBが有効であることを確認。目標達成。

成果の意義

高精度の欠陥予測システムとフィードバック制御によって、欠陥を従来よりも削減できることを実証した。このことは、金属積層造形技術を用いて金属部品を製造するうえで、欠陥を含まない造形部品の製造に繋がるという点で意義がある。また、本事業で開発したインプロセスモニタリング技術は、非破壊で造形部品の評価を行うためのデータを提供できる技術であり、X線を透過できないサイズの金属部品でも非破壊で欠陥を評価できる点で意義がある。

また、プロセスマップを自動で探索する技術の開発は、これまで要していた膨大な時間と作業者の負担を大幅に削減でき、電子ビーム積層造形の普及に繋がる点で意義がある。さらに、本事業で開発した技術を用いた金属部品開発・評価の手順書は、これから金属部品を金属積層造形で製造するうえで、効率的な手法を提供するという点で意義がある。

また、装置開発としては、以下のような意義がある。

- ・光学方式及び電子ビーム方式(低角 BSE 検出)により $10\mu\text{m}$ の段差が測定できることを確認した。欠陥予測に必要なより平坦な造形表面性状判定に重要な性能である。
- ・欠陥予測システムと連携した再溶融 FB 機能を有する三次元積層造形システムを開発し、最適再溶融条件において粉末ガスポア率を下回る欠陥率で造形できることを確認した。これにより最終目標である欠陥率 0%を達成したことになる。
- ・欠陥予測システムと連携した再溶融 FB 機能を搭載することで欠陥率が低減でき、造形品の品質向上・安定化に貢献できる。

特許出願件数、論文発表数等

電子ビーム方式における、特許出願件数、論文発表数等は表 4-2-4 の通りである。

表 4-2-4 特許出願件数、論文発表数等

	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度	2023年度	計
特許出願（うち外国出願）	0	2(2)	0	3(3)	2(2)	7(7)
論文	8	5	4	7	6	30
研究発表・講演	2	8	2	7	2	21
受賞実績	0	1	2	1	0	4
新聞・雑誌等への掲載	0	1	0	0	0	1
展示会への出展	0	1	0	2	2	5

本研究開発項目では精力的に知財の創出を行い、7 件の特許出願を行った。それ以外にも学会誌への論文投稿等を精力的に行った。

4.2.2 溶融凝固現象の解明による欠陥発生の予測技術の開発【研究開発項目①ーE】

1) 欠陥発生原因と造形条件の関連性の解明

a) 粉末の熱放射率測定

パウダーベッド方式の積層造形技術では、粉末の熱放射率が粉末の溶融・凝固挙動に影響すると考えられる。レーザー方式の場合は、レーザーの吸収しやすさにも影響し、レーザー波長に対する放射率が高いほど、その波長に対する吸収率も高いため、溶融しやすい。一方、電子ビーム方式の場合は、粉末のエネルギー吸収率は材料に依らずほぼ一定で高い値を示すが、造形エリアのパウダーベッドを高温に保持するため、粉末からのエネルギー損失が粉末の放射率に依存して変わってくる。放射率が低い粉末ほど、エネルギー損失が少なくパウダーベッドを高温に維持しやすく溶融しやすい。また、溶融池周辺のパウダーベッドのエネルギー損失が少なくなるので、冷却速度や凝固速度にも影響を及ぼし、凝固組織にも変化が現れると考えられる。そこで、本研究では粉末の熱放射率を測定した。粉末放射率測定のセットアップを図4-2-1に、熱放射率の算出手順を図4-2-2に示す。0.3mmの溝を掘ったカーボンプレートに粉末を敷き詰め、カーボンプレートに電流を流すことで、粉末を急速加熱する。放射率の設定を1にした放射温度計の測定温度と熱電対の測定温度を用いて、粉末の放射率を算出した。用いた放射温度計で測定できる波長は900 nm、1350 nm、1550 nmである。また、測定チャンバーは真空引きしているが、チャンバー内の残留ガスやビューポート、ビューポート/放射温度計間の大気による吸収の影響もあるため、放射率既知のカーボンを用いて吸収補正を行った。

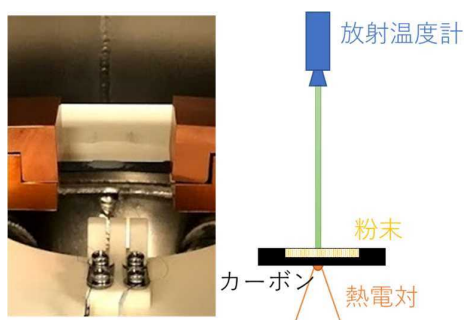


図 4-2-1 粉末熱放射率測定のセットアップ

粉末放射率測定 測定方法

1. 測定波長を設定 (900, 1350, 1550 nm)
2. 放射温度計の設定放射率を1に設定
3. 測定温度まで急速昇温
4. 放射温度計の温度と熱電対温度の値から下記の式で放射率を算出

$$\varepsilon = \frac{\exp\left(\frac{14387}{\lambda T_{TC}}\right) - 1}{\exp\left(\frac{14387}{\lambda T_{pyro}}\right) - 1}$$

5. 上記1～4を各波長と各温度に対して実施。

図 4-2-2 粉末熱放射率測定のセットアップ

2) 各種条件でのモニタリングデータ及び溶融凝固シミュレーションデータの収集

計測用電子ビームを用いることで、電子ビーム走査によるパウダーベッドの溶融・凝固現象のその場観察を行った。図4-2-3に示すように、隣接スキャンパスが重ならないようにラインオフセットを大き

くとした条件でブロックの造形を行うことで、シングルトラックのメルトプールのその場観察を実施した。電子ビームの条件は、エミッション電流 10 mA、OL 電流 7500 mA、走査速度 10 mm/s で実施した。シングルトラックの長さは 10 mm である。

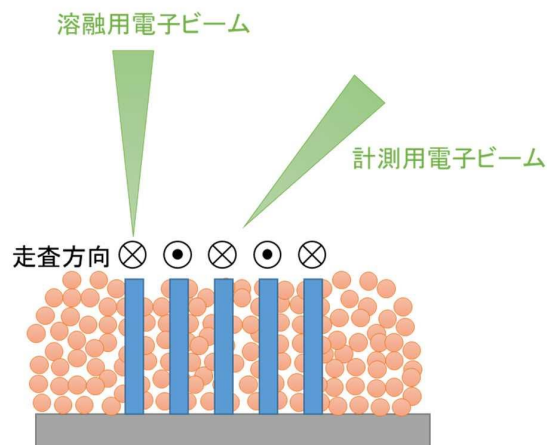


図 4-2-3 メルトプールのその場観察。ラインオフセットを広めにとって造形を行い、シングルトラックのメルトプールのその場観察を実施。

5 本のシングルトラックが視野に収まるようにその場観察した際のスクリーンショットを図 4-2-4 に示す。溶融中は溶融時に発生する反射電子なども検出されるため、バックグラウンドノイズが大きく詳細な観察は難しいが、パウダーベッドが溶融・凝固していく様子が観察された。溶融・凝固完了後の観察像では、各シングルトラックの上下方向の両サイドに黒いコントラストが観察されている。

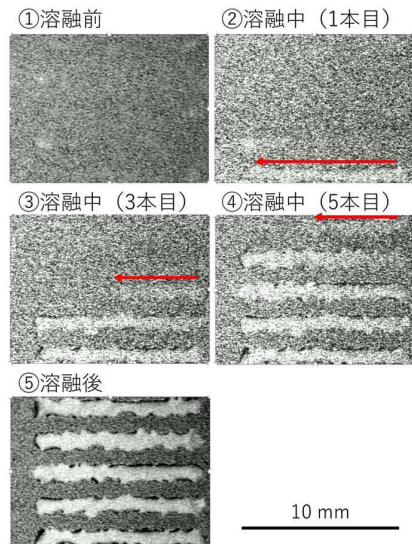


図 4-2-4 メルトプールのその場観察結果のスクリーンショット

また、DEM によるパウダーベッドの形成シミュレーションおよびシングルトラックの CFD シミュレーションを行い、そのデータ収集も行った。シミュレーションの一例を図 4-2-5 と図 4-2-6 に示す。

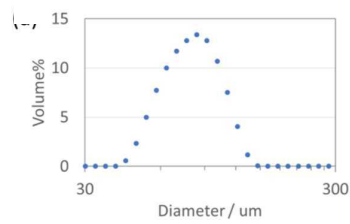


図 4-2-5 プラズマアトマイズで作製された
Ti-6Al-4V 合金粉末の粒度分布

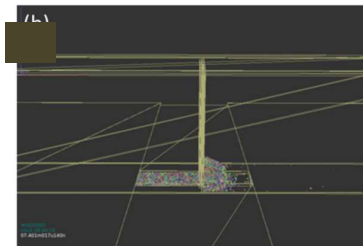


図 4-2-6 図 4-2-5 の粒度分布を与えて DEM で計算させた
パウダーベッド形成過程のスクリーンショット

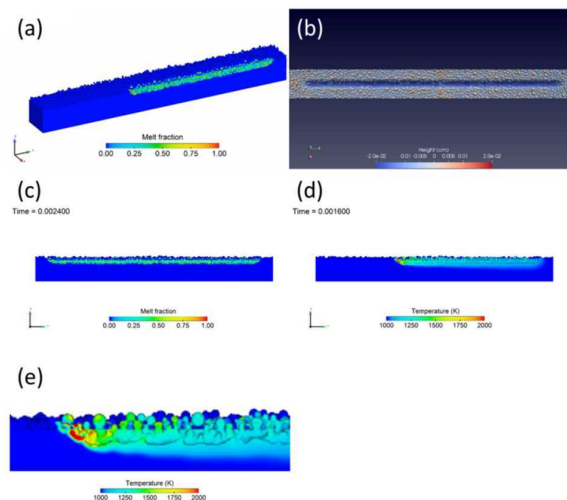


図 4-2-7 DEM で形成したパウダーベッドモデル上に電子ビームを走査させたときの溶融・凝固挙動の CFD によるシミュレーション結果。(a) 液相率のスクリーンショット。(b) 凝固後の高さマップ。(c) 液相率の電子ビーム走査方向に平行な縦断面。(d) 温度分布の電子ビーム走査方向に平行な縦断面。(e) 図 4-2-7 (d) のメルトプール先頭近傍の拡大図。

3) 欠陥予測システムの開発

4.2.3 で述べる 2 種の BSE 画像から得られる合成トポロジー画像を用いた欠陥予測システムを開発した。さらに、単純な形状の断面だけではなく、任意の形状の部品に対して欠陥判別が実施できる機能を

開発した。実造形データを用いて評価したところ、目標予測精度の95%に対して、97.7%の予測精度があることが確認できた。

4.2.3. 高度モニタリング及びフィードバック制御機能の開発【研究開発項目②ーE】

1) パウダーベッド表面三次元計測技術の高度化

パウダーベッド表面及び造形表面を精度 $10\mu\text{m}$ 以下で計測(観察)する手法として、既に近畿大学広島分室で開発されていた光学方式のレイヤー表面計測装置と熔融用電子ビームを利用した反射電子(BSE)像方式について、試験研究機に実装して比較検討した。レイヤー表面計測装置は、造形チャンバー上部のビューポートにそのプロジェクタとカメラを搭載し、鉛ガラス越しに造形面を計測できるように設置した。BSE 像観察は、造形面を覆う防着カバーの内側に反射電子検出用の電極を取付け、BSE 信号を検出し、画像化している。

図 4-2-8 は、 $10\mu\text{m}$ の段差を付けた試験研究機のベースプレートの写真(段差が見えるように光を照射)、及びその段差の寸法図である。

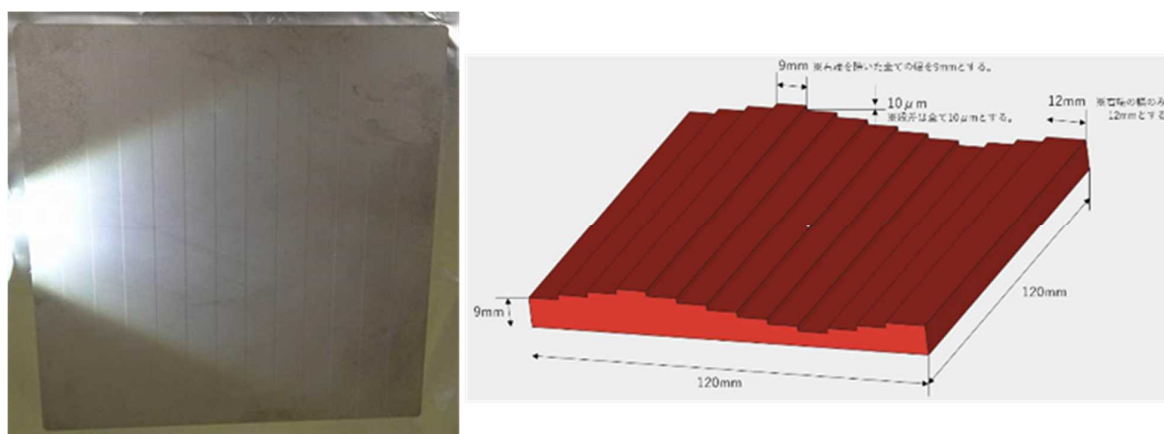


図 4-2-8 $10\mu\text{m}$ の段差付きベースプレートとその寸法図

図 4-2-9 は、 $10\mu\text{m}$ の段差付きベースプレートの光学方式の画像、及び電子ビーム方式の画像(分割 BSE 検出器使用)である。 $10\mu\text{m}$ の段差の確認としては、トレーサブルな標準試料で校正されたキーエンス製 3D 形状測定機で測定し、図 4-2-10 に示すように寸法通りの段差が確認されている。

このように光学方式と電子ビーム方式の両方で $10\mu\text{m}$ の段差が確認でき、パウダーベッド表面及び造形表面を $10\mu\text{m}$ 以下の精度で確認できる手法が開発できた。

図 4-2-11 に実際の造形プロセス中におけるパウダーヒート後、及び熔融後に同時取得した造形面の光学方式画像と電子ビーム方式画像を示す。どちらも同様な表面形状を示しており、パウダーベッド表面及び造形表面のモニタリングとして有用な情報が得られることが分かったが、光学方式には専用の光学系、ビューポートから造形面を観察するための防着カバーの開口、金属蒸気のビューポートへの蒸着防止等が必要となることから、商品機適用を考慮し電子ビーム方式を最終的に選択した。

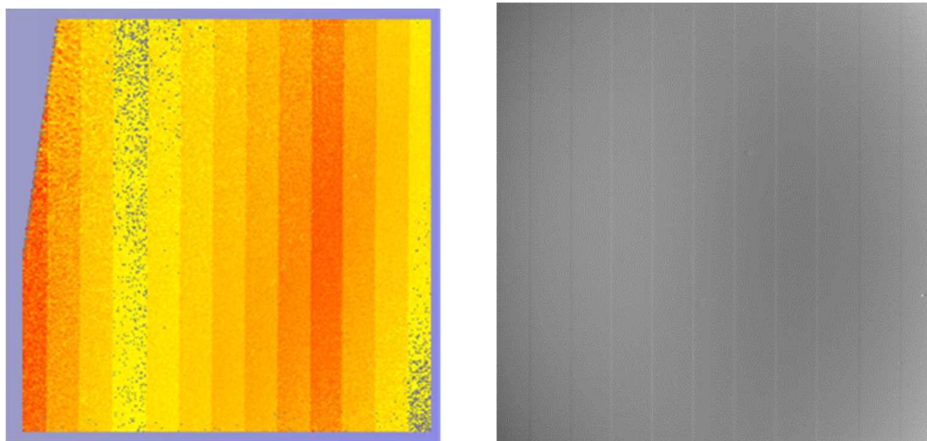


図 4-2-9 10 μm の段差付きベースプレートの光学方式の画像(左)、
及び電子ビーム方式の画像(右)

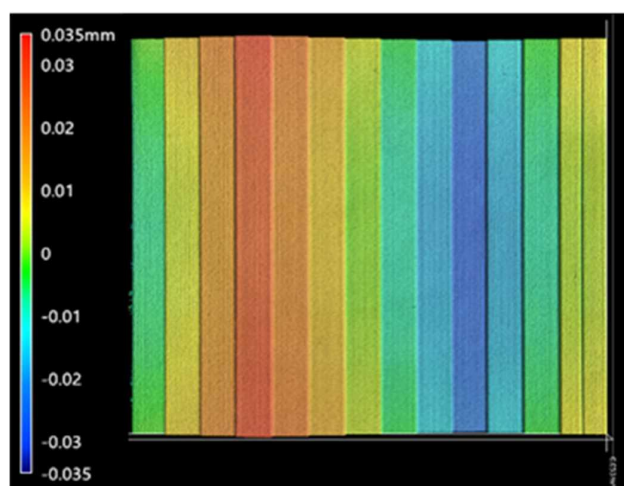


図 4-2-10 キーエンス製 3D 形状測定機による測定

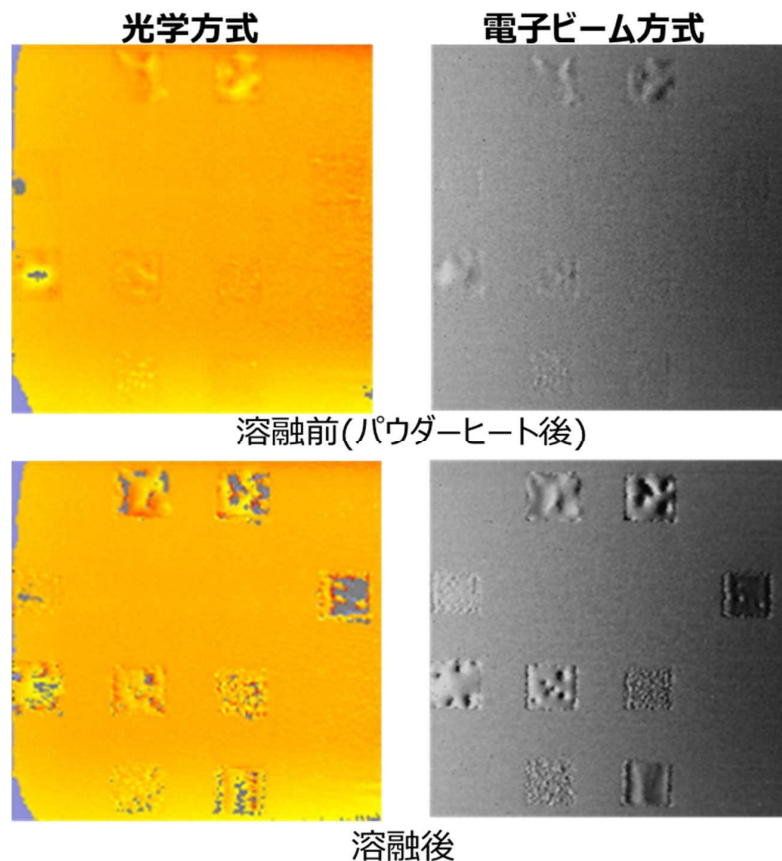


図 4-2-11 造形中にけるパウダーヒート後、及び熔融後の造形面の光学方式画像と電子ビーム方式画像

2) 欠陥予測システムと連携したフィードバック制御機能の開発

a) フィードバック制御機能の開発

熔融後の造形面の凹凸情報(BSE 画像)とパーツ位置情報を欠陥予測システムに送ることで、その熔融パーツ表面の熔融状態の判定結果が試験研究機の造形制御システムに返され、その判定結果に応じて再熔融の造形条件が設定されるシステムを開発した。動作確認としては、良否のみを判定するモードで強制的に不良の判定を造形システムに返して、再熔融フィードバック制御機能の働くことを確認した(結果は「3)再熔融による欠陥補修技術の開発」参照)。

b) BSE 画像による欠陥の確認

BSE 画像により造形中に熔融後のパーツ表面の凹凸情報が得られる。造形中の観察されるパーツ表面形状に直接欠陥に繋がる情報が得られるかについて、造形後の X 線 CT 測定によるパーツ内部の欠陥との相関関係について確認した。図 4-2-12 にその一例を示す。右図の X 線 CT 画像で下方から伸びている欠陥が消えていく過程において、左側の XY 断層像で 3 点確認できている欠陥がその少し上で 2 点に減っている。その断層位置付近に相当する BSE 画像を確認すると左図に示した BSE 画像のようにパーツの左下の凹み(下図)が次層(上図)で消えている様子が確認できた。この程度に大きな欠陥であれば BSE 画像から直接欠陥判別ができることが分かったが、目標とする検知すべき欠陥サイズは今回示したものよりも非常に小さく、直接欠陥を判別できるサイズは

BSE 画像の空間分解能に制限されると考えられる。そのため欠陥予測システムによる溶融表面の表面性状からの欠陥予測判別が必要となる。

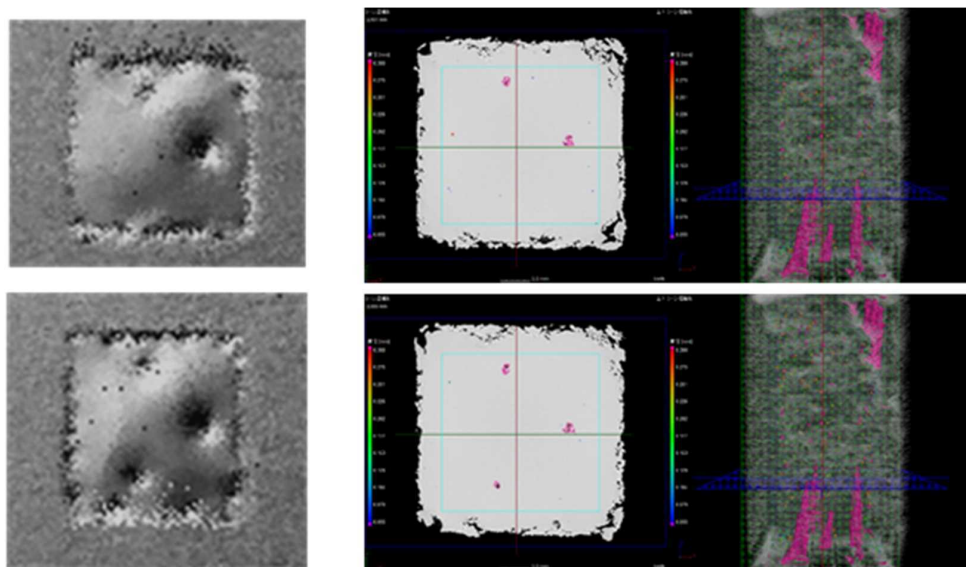


図 4-2-12 BSE 画像(左)と X 線 CT 画像(右)

3) 再溶融による欠陥補修技術の開発

再溶融の効果を確認するため、 $10 \times 10 \times 8 \text{ mm}^3$ のキューブ造形を下側 3 mm 再溶融なし、上側 5 mm を再溶融ありで 7 個造形した。再溶融条件は 7 個全てで同じ条件に設定した。造形後、X 線 CT 測定により欠陥率を計測したところ、再溶融ありの上部は 7 個中 5 個で欠陥率が小さくなり、改善が見られた。改善されなかった 2 個のキューブは、欠陥が発生し難い初期条件であったため、再溶融のプロセスによって過剰にエネルギーを投入することになり、逆に欠陥が増えてしまったのではないかと考えている。

図 4-2-13 に欠陥率が改善された造形物の一例として、その X 線 CT 画像を示す。図中のピンク色で示された部分が、欠陥が発生しているエリアであり、再溶融なしの下側 1~3 mm のエリアでは欠陥が多く発生しているのに対し、再溶融ありの 3~8 mm のエリアではほとんど欠陥が発生していないことが分かる。

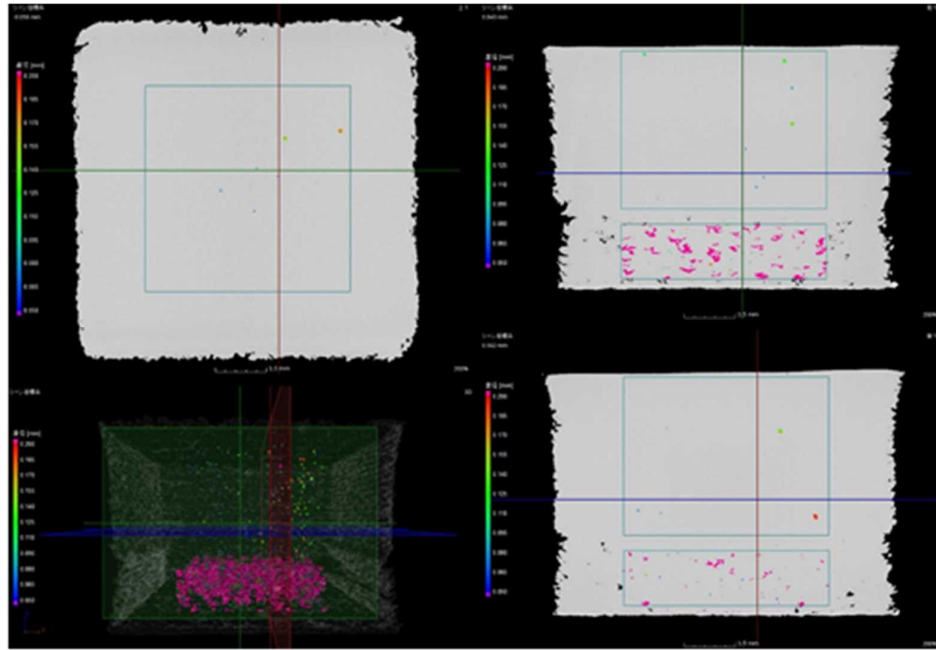


図 4-2-13 再溶融の有無による欠陥生成の変化を示した X 線 CT 画像

4) 欠陥予測システムと連携した高度モニタリング・フィードバック機能の開発

a) BSE 画像の高度化

4 分割検出器からの BSE 信号演算 $[(A-B)/(A+B)]$ 及び $[(C-D)/(C+D)]$ による XY 方向の傾斜情報、及び密度情報を反映した信号(各電極信号の加算信号)の 3 信号画像を同時取得するための制御システムを構築した。図 4-2-14 に 3 信号同時取得した BSE 画像を示す。観察試料は電子ビームの校正用ベースプレート(BP)である。左から $(A-B)/(A+B)$ 信号、 $(C-D)/(C+D)$ 信号、及び A+B 信号の画像である。

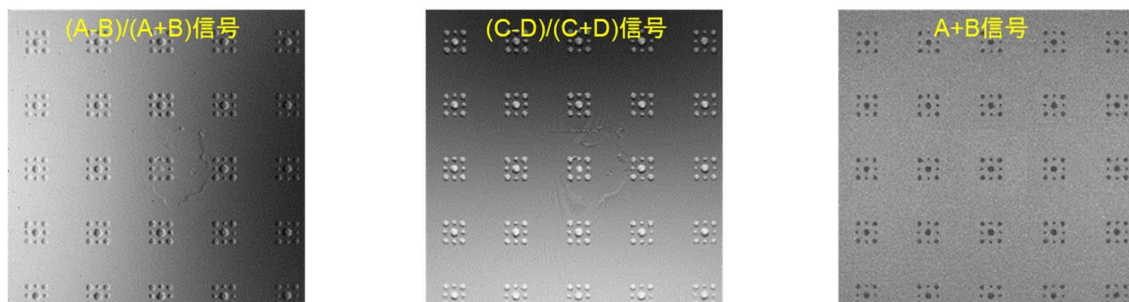


図 4-2-14 3 画像同時取得確認

パーツの溶融表面形状(凹凸情報)を X 方向の傾斜及び Y 方向の傾斜情報を反映した $(A-B)/(A+B)$ 信号画像及び $(C-D)/(C+D)$ 信号画像を画像処理的に合成し、凹凸を反映した画像への変換を試みた。図 4-2-15 は 10 mm 角キューブの造形中のある層の $(A-B)/(A+B)$ 信号及び $(C-D)/(C+D)$ 信号画像とその画像から合成した凹凸像を示す。電子ビーム方式における表面性状としては、このような合成凹凸画像を用いることでより現実的な表面形状が反映できるようになった。

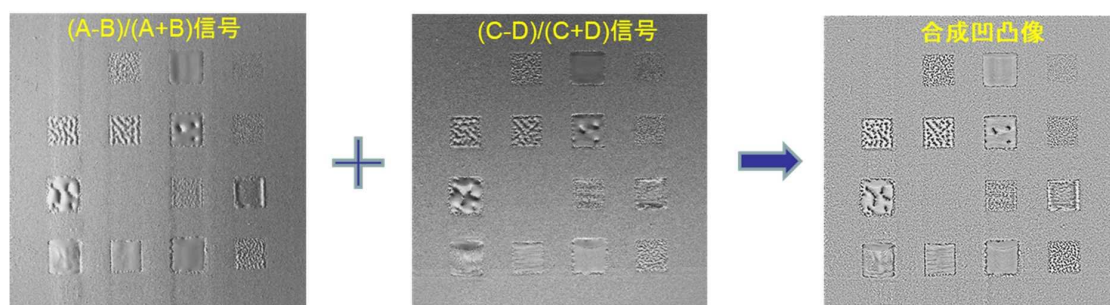


図 4-2-15 同時取得した 2 画像を用いた凹凸像合成例

b) 溶融中の熱電子モニタリング

熱電子検出電極にプラスの電圧を印加し熱電子を計測したところ、2 次電子・反射電子の放出量を超える熱電子が溶融中の高温領域から放出されていることが分かった。図 4-2-16 はその検証結果の一つであり、溶融時の検出電流画像(左:熱電子像)、及び溶融後の BSE 画像(右)を示している。溶融条件については、左図の熱電子(TE)像に大まかな条件を記載している。DF がデフォーカス状態で OL 電流 6000 mA、最適条件はほぼジャストフォーカスの OL 電流 7500 mA である。左図の電流画像で明確に認識できる 6 つの画像がほぼジャストフォーカスでの溶融であり、その中の黄色の破線で囲った部分が溶融ビーム電流 15mA、その他が 10mA である(DF と記載されておらず、かつほぼ認識出来ない画像は OL 電流が 6500 mA と 7000 mA のものである)。このように最適溶融条件や過溶融気味の溶融条件のような完全に溶融され溶融中に高温になっている部分から大きな信号が検出されており、検出器のモニタ値で 15 mA の溶融の際には 10 mA 近くの電流(電子)が検出されていた。従って、電子ビームで局所的に高温の溶融状態となった領域からは桁違いの熱電子が放出されており、このような状態では 1 次電子ビームの相互作用により放出される 2 次電子や反射電子に比べ熱電子が支配的になっていることが確認できた。

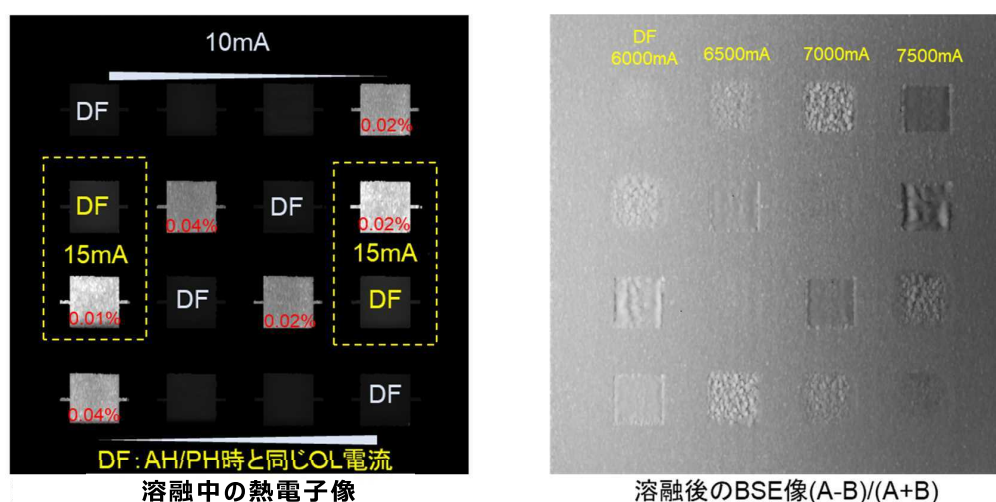


図 4-2-16 熱電子検出電極に+バイアス電圧を印加した場合の溶融時の検出電流画像(左)、溶融後の BSE 画像(右) (左図上下にある矢印はビーム径の変化のイメージ)

c) 欠陥予測システムと連携した再溶融 FB 機能による欠陥率 0%の達成

造形条件として昭島分室で経験的に求めた最適条件で造形し、欠陥予測システムと連携した再溶融 FB 機能による最適再溶融条件で再溶融した場合との比較を図 4-2-17 に示す。1、2 回目は、新品のプラズマアトマイズ Ti-6Al-4V 合金粉末を使用し、3 回目は新品粉末を含めた再生粉末を利用した。図 4-2-17 に示すように 3 回とも FB ありでは、最終目標の欠陥率 0%(粉末ガスポア率を下回る欠陥率)を達成した。粉末ガスポア率は今回使用した粉末と同じ TEKNA 社製のプラズマアトマイズ粉末について、仙台分室で測定された結果である。最適再溶融条件は、プロセスマップ自動生成で求めた最適溶融条件をベースにしている。

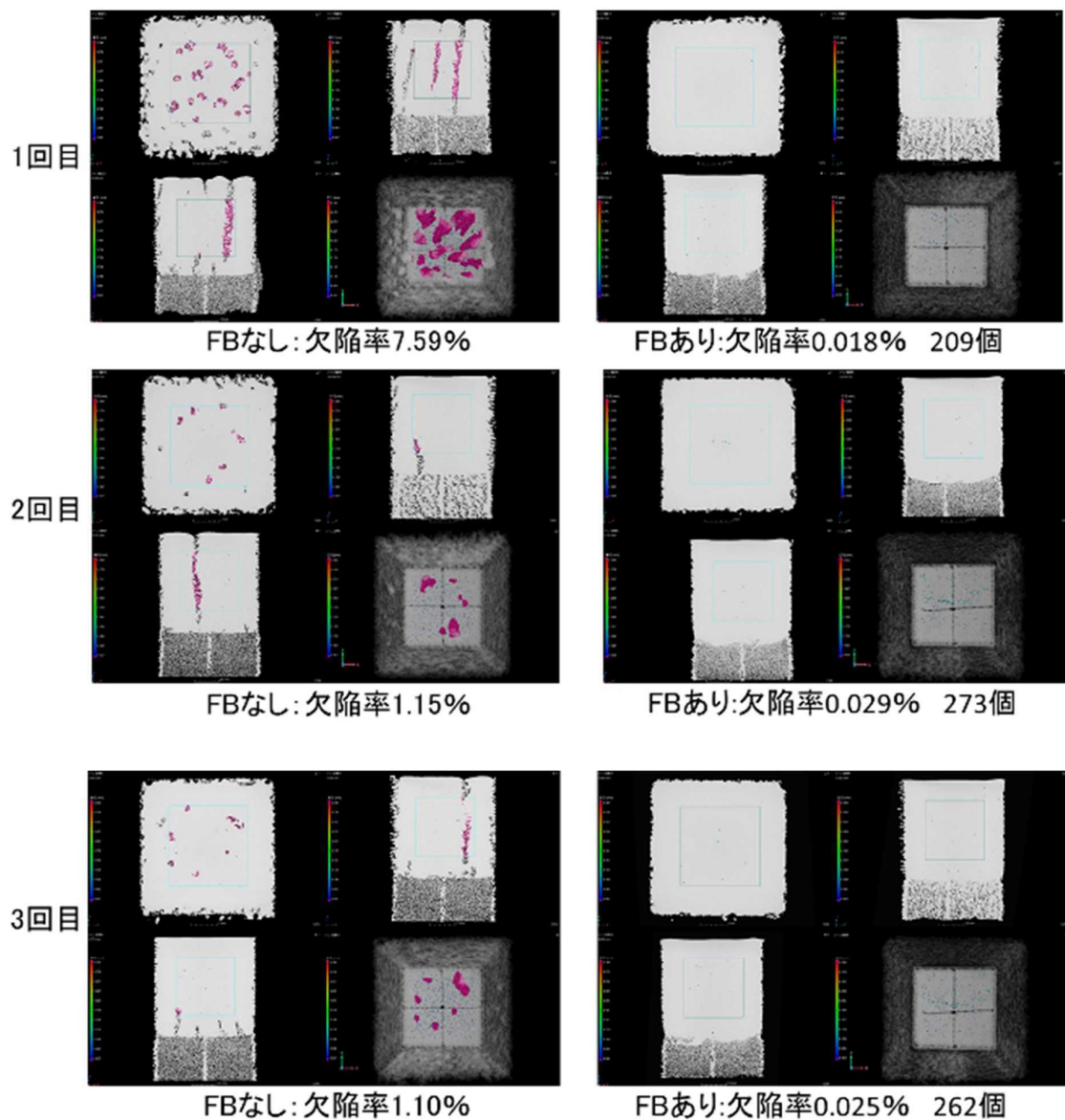


図 4-2-17 欠陥予測システムと連携した再溶融 FB 機能の有無による欠陥率の比較

4.2.4. 積層造形部品作製のための開発・評価手法の開発 【研究開発項目③-E】

1) 自動化可能なプロセスマップ探索手法の確立

4.2.3 で開発した高度モニタリング・フィードバック機能を用いて、実造形物による機械学習でプロセスマップの構築を行った結果、自動化が可能である目途を得た。

2) 積層造形部品を効率的に開発・評価する手法（ソフト）の開発

積層造形部品を効率的に開発・評価する手法として、プロセスマップの構築手順を纏め、この手順を自動化するソフトウェアを作成し実証した。この手順でかかる時間を見積もったところ、現状の 1/5 以下の時間で実施できることが判った。また任意形状断面の入熱状態を簡易計算する方法を開発した。

3) 開発手法を用いた 4 種合金データベースの構築

開発した手法を用いて、Ti-6Al-4V 合金、純銅、SCM440 合金、AlSi10Mg 合金の 4 種の合金のプロセスマップデータを収集した。

4) 装置間レシピ変換手法の開発

レシピ開発用の小型造形機と量産用中型造形機とのレシピ変換する手法を開発した。

5) ユーザ実証（小型部品：ヘリカルギア）

本ユーザ実証では、プロセスマップのデータを収集したサイズに収まるモデルを用い、欠陥予測システムとフィードバック制御機能の検証を実部品形状に対して行った。用いたモデルは図 4-2-18 に示すヘリカルギアである。直径 18mm のモデルであり、歯の傾斜角度が 10, 20, 30, 40, 45, 50, 55, 60, 65 度の 9 パターンのものを造形した。造形に用いた粉末は Ti-6Al-4V 合金である。フィードバック機能を使用しない場合とフィードバック制御機能を使用する場合に、2 つのケースについて造形を行った。得られた造形材を X 線 CT (Nikon XTH320) で評価した。X 線 CT による評価は金属技研にて実施した。管電圧は 280 kV、管電流は 105 μ A、ボクセルサイズは 44.1 μ m であった。

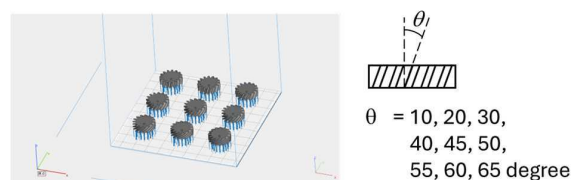


図 4-2-18 ユーザ実証（ヘリカルギア）用造形モデル

評価結果を図 4-2-19 に示す。フィードバック機能を使用することにより欠陥率を削減することに成功した。フィードバック無しの場合、造形品全体に欠陥が残っているのに対して、フィードバック制御機能を利用した場合は、アンダースキン部分に欠陥が残存しているが、バルク部分の欠陥をほぼ修復できていることを示している。また、フィードバック制御機能ありの場合に残存していた欠陥は球状であり、原料粉末に含まれているガス泡由来のものと考えられる。また、フィードバック機能の有無にかかわらず、既存装置に比べて、本プロジェクトで開発している装置の造形品において欠陥が少なくなるという結果も得られた。2 種の装置において、それぞれの装置に適した条件を選択して造形を行っているが、両者ともにヘリカルギア向けに条件を最適化した訳ではない。従って、本結果は、フィードバック制御を使用しない場合の本研究での開発装置が既存装置に比べて装置性能に優れていることを示すものではない。

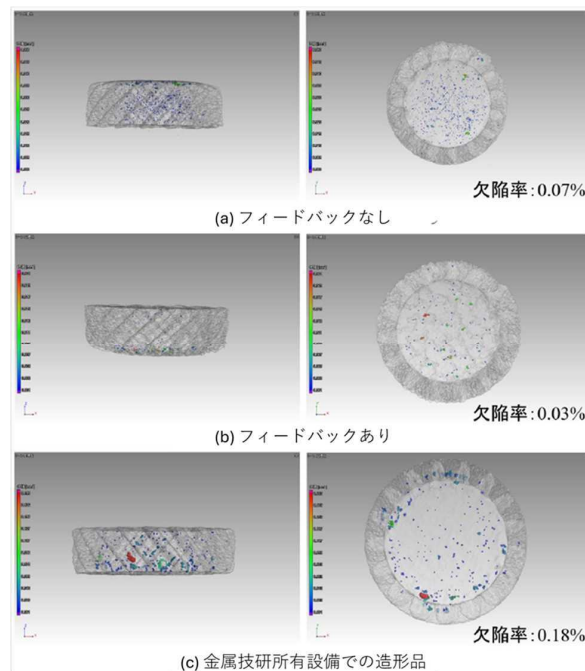


図 4-2-19 開発装置によるユーザ実証造形品および
既存造形装置での造形品の評価結果

6) ユーザ実証（大型部品：インペラ）

プロセスマップのサイズ内であれば、フィードバック制御機能で欠陥を修復できることが確認できた。本項目では、プロセスマップのサイズ外のパーツで検証を行った。検証したモデルは図 4-2-20 に示す最大直径部分が 50 mm 程度のインペラである。このモデルは輪郭描画部分の割合が多いことも特徴であり、輪郭部分の欠陥修復は本プロジェクトの対象外であるため、ヘリカルギアに比べて欠陥の残存が多くなると予想されるモデルである。造形に用いた粉末は Ti-6Al-4V 合金である。フィードバック機能を使用しない場合とフィードバック制御機能を使用する場合に、2つのケースについて造形を行った。得られた造形材を X 線 CT (Nikon XTH320) で評価した。X 線 CT による評価は IHI にて実施した。管電圧は 225 kV、管電流は 105 μ A、ボクセルサイズは 30 μ m であった。

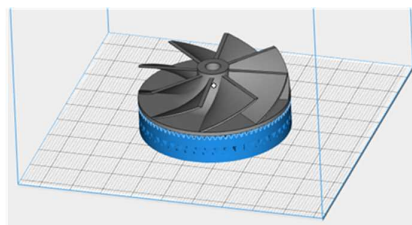


図 4-2-20 インペラの造形モデル

フィードバック無しおよびフィードバック有りの造形品の評価結果をそれぞれ図 4-2-21 と図 4-2-22 に示す。プロセスマップの範囲外のため、欠陥の残る条件であり、フィードバック制御無しで欠陥が残存しており、その欠陥率は 0.54% であった。欠陥は、最大直径のアンダースキン部分や輪郭部分に多く残っていることが確認できた。また、プロセスマップ範囲外のため、再溶融条件も正しい値を求めるこ

とができない。よって、欠陥は正しく判別できても再溶融条件が適切でないため、再溶融による欠陥が減少しておらず、フィードバック制御ありの欠陥率は0.97%であった。このことからフィードバック制御機能を用いても、プロセスマップ範囲外のサイズを有するモデルに対しては、欠陥低減の効果がないことが示された。本結果とヘリカルギアの結果とから判断すると、大型部品での欠陥レス造形を実現するには、大型に合わせたサイズに対するプロセスマップを構築することが何よりも重要であると考えられる。

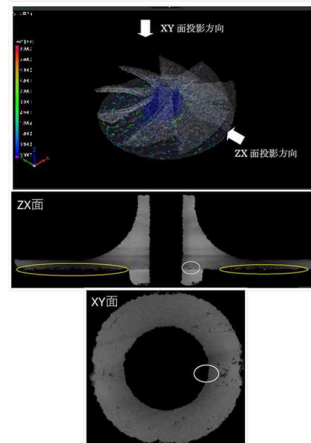


図 4-2-21 インペラのフィードバックバック制御無し造形品の X 線 CT 評価結果

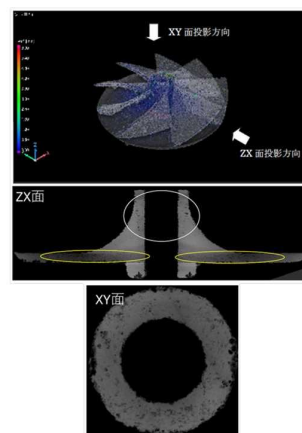


図 4-2-22 インペラのフィードバックバック制御有り造形品の X 線 CT 評価結果

4.2.5. まとめ

本研究では、開発目標達成のために、装置開発、システム開発、データ収集を行った。その結果、全ての目標の達成に加えて、熱電子モニタリング技術の開発ならびに熱電子モニタリング画像のシミュレーション技術の開発も行った。

1) 造形後の表面形状データから欠陥の有無を予測するソフトウェアを試作し、欠陥予測システムの精度 97.7%(95%以上)を達成した。

2) 4種類の金属種 (Ti-6Al-4V 合金、純銅、SCM440 合金、AlSi10Mg 合金) について表面性状データを収集し、開発手法を用いてプロセスマップを構築した。

3) BSE (反射電子) モニタリング機能を用いて試験研究機に実装した状態でパウダーベッド表面全域の造形表面について、精度 $10\mu\text{m}$ 以下の表面凹凸形状が画像化できる機能を開発した。フィードバック制御機能を試験研究機に実装し、欠陥率が減少することが確認できた。プロセスマップ自動生成ソフトウェアにより最適条件を決定し、それをベースにした最適再溶融条件を採用することで再溶融フィードバック機能を適用した造形により欠陥率 0%を達成した。また、電子銃異常やチャージアップ発生を抑制・検知し装置を一時停止する機能を実装した。

4) 開発システムを用いた積層造形部品開発手順を手順書としてまとめた。

5) 開発システムを用いることで、造形条件決定のリードタイムを従来の 1/5 の 1-2 週間に短縮可能であることを明らかにした。

6) レシピ開発用小型機—生産用中型機の装置間レシピ変換のポストプロセッサを開発した。

7) フィードバック制御を用いて造形のユーザ実証 (2 社) を実施した。

添付資料

●プロジェクト基本計画

P 1 9 0 0 7

「積層造形部品開発の効率化のための基盤技術開発事業」基本計画

材料・ナノテクノロジー部

1. 研究開発の目的・目標・内容

(1) 研究開発の目的

①政策的な重要性

第4次産業革命が進展する中、ものづくりの付加価値を高めていくためには、多品種少量生産、複雑形状、高機能化等が実現できる積層造形技術を積極的に活用することが有効である。また、世界市場が積層造形技術を活用した付加価値生産の流れに向かう中、その製造プロセスを前提とする機能を持った部品が一般化した場合、従来の工法（鋳造、鍛造等）では対応不可となる。このため、我が国のものづくり企業にとっても、早期に積層造形技術を活用した金属部品等の開発を促進する必然性が高まっている。

特に、我が国の素形材産業の競争力を強化していくためには、高い技術力を保有している企業群の稼ぐ力を引き出し、産業の底上げを行うことや、我が国のみならずグローバル市場から付加価値の高い事業を取り込んで収益性を高めていくことが急務である。

政策文書においても、「未来投資戦略2018」（2018年6月15日閣議決定）では、3Dプリンタを活用して、顧客の多様なニーズに対応する多品種少量生産等が可能となり、高い現場力を有し、小回りの利く中小企業ならではの市場獲得のチャンスが生まれるとしている。また、「科学技術イノベーション総合戦略2017」（2017年6月2日閣議決定）では、3Dプリンタなど新たな付加価値を持ったもの・コトを創出する革新的な生産技術の開発と導入支援に取り組むとしている。

また、金属の積層造形技術は、そもそもの現象解明の研究さえも十分には進んでいないため、付加価値が高い複雑形状、高機能の部品や機能性合金の造形では、品質の再現性を確保することが難しく、新規開発に多大なコストと時間がかかることが課題となっている。

②我が国の状況

国内では製品の試作までは行う企業が増加しているものの、実製品化・量産化に向けては、日本の品質要求レベルが非常に高いこともあり、ほとんど進んでいないのが現状である。ただし、装置・材料については、NEDO プロジェクト「次世代型産業用 3D プリンタの造形技術開発・実用化事業」で開発を行った。しかし、金属部品の積層造形を行うには、その材料、形状、大きさ等によって、ビームの出力量や速度、サポート材の配置等のパラメータを設定する必要があり、付加価値が高い複雑形状や高機能な部品の造形であるほど、最適なパラメータを見つけ出すことは容易ではなく、現在の積層造形技術では量産にあたっての品質の再現性を確保することが難しい。

その背景としては、品質に大きな影響を及ぼす金属の溶融凝固メカニズムが解明されていないことが挙げられている。このメカニズムが解明され、欠陥の発生要因が明確化できれば、高品質・高信頼の 3D プリンタが実現する。日本がこれを先んじて開発・社会実装し、高品質といった従来の日本のものづくりの強みを活かしつつ、短納期等のグローバルニーズにも対応することで、サポーティングインダストリーとしての競争力強化が求められているところである。

③世界の取組状況

America Makes や Horizon2020 のプロジェクトを進める欧米に加えて、中国製造 2025 を掲げる中国等では、先進的な企業を中心に金属の積層造形部品を本格導入するため、溶融凝固メカニズムの解明、インプロセスモニタリング機能による高品質化への取組及び造形レシピの収集によるノウハウの蓄積を加速化しようとしており、今後 5 年で航空宇宙分野、医療分野を筆頭に高付加価値製品への活用が急速に進む見込みである。これにより、今後我が国の素形材産業の競争力が脅かされる可能性がある。

④本事業のねらい

本プロジェクトでは、積層造形における金属の溶融凝固現象を解明するとともに、高度な計測・機械制御技術を開発し、金属積層造形部品等における開発の効率化及び高品質の確保を目指す。

（２）研究開発の目標

①アウトプット目標

本プロジェクトでは、金属積層造形部品等の品質確保及び開発の効率化のために、金属の溶融凝固現象の解明、高度な計測・機械制御技術の開発、積層造形技術における開発・評価手法の開発を行う。

具体的な目標としては、（別紙 1）研究開発計画の研究開発項目①～③の最終目標を達成することとする。

②アウトカム目標

本プロジェクトの成果により、積層造形による部品等の造形の品質の向上、造形プロセスの繰り返し安定性の確保とともに、積層造形部品製作のための開発・評価手法が確立されることで、積層造形部品の開発期間が 1/5 に短縮されることを目指す。また、それにより 2030 年度における本システムを搭載した金属 3D プリンタの国内素形材企業への導入割合 10%（事業所ベース）を目指す。

③アウトカム目標達成に向けての取組

NEDO は、本事業により開発された金属 3D プリンタを有効に活用する技術などの普及に向け、内外の技術開発動向、政策動向、市場動向等に基づき、目標見直しを適宜行い、研究開発の進捗管理など、細やかなマネジメントを実行することで、社会ニーズに合った研究開発を推進し、確実な実用化へと繋げる。

加えて、本プロジェクトで開発した成果を広く社会に普及させるために、展示会やシンポジウム等を通じた成果発信を積極的に行う。

（3）研究開発の内容

上記目標を達成するために、以下の研究開発項目について、別紙 1 の研究開発計画及び別紙 2 の研究開発スケジュールに基づき研究開発を実施する。

研究開発項目① 溶融凝固現象の解明による欠陥発生の予測技術の開発

研究開発項目② 高度モニタリング及びフィードバック制御機能の開発

研究開発項目③ 積層造形部品製作のための開発・評価方法の開発

本研究開発は、実用化まで長期間を要するハイリスクな基盤的技術に対して、産学官の複数事業者が互いのノウハウ等を持ちより協調して行う事業であり、委託事業として実施する。

2. 研究開発の実施方式

（1）研究開発の実施体制

プロジェクトマネージャー（以下、「PMgr」という。）に NEDO 材料・ナノテクノロジー部 柳本勝巳（2023 年 8 月～）を任命して、プロジェクトの進行全体の企画・管理や、プロジェクトに求められる技術的成果及び政策的効果を最大化させる。

NEDO は、公募により研究開発実施者を選定する。研究開発実施者は、企業や大学等の研究機関等（以下、「団体」という。）のうち、原則として日本国内に研究開発拠点を有するものを対象とし、単独又は複数で研究開発に参加するものとする。ただし、国外の団体の特別の研究開発能力や研究施設等の活用又は国際標準獲得の

観点から必要な場合は、当該の研究開発等に関し国外の団体と連携して実施することができるものとする。

研究開発能力を最大限に活用し、効率的かつ効果的に研究開発を推進する観点から、NEDO は研究開発責任者（プロジェクトリーダー（以下、「PL」という。））を選定し、各実施者は PL の下で研究開発を実施する。

（２）研究開発の運営管理

NEDO は、研究開発全体の管理、執行に責任を負い、研究開発の進捗のほか、外部環境の変化等を適時に把握し、必要な措置を講じるものとする。運営管理は、効率的かつ効果的な方法を取り入れることとし、次に掲げる事項を実施する。

①研究開発の進捗把握・管理

PMgr は、PL や研究開発実施者と緊密に連携し、研究開発の進捗状況を把握する。また、外部有識者で構成する技術検討委員会を組織し、定期的に技術的評価を受け、目標達成の見通しを常に把握することに努める。

②技術分野における動向の把握・分析

PMgr は、プロジェクトで取り組む技術分野について、必要に応じて内外の技術開発動向、政策動向、市場動向等について調査し技術の普及方策を分析、検討する。なお、調査の効率化の観点から、本プロジェクトにおいて委託事業として実施する。

３．研究開発の実施期間

2019 年度～2023 年度までの 5 年間とする。

４．評価に関する事項

NEDO は、技術評価実施規程に基づき、技術的及び政策的観点から研究開発の意義、目標達成度、成果の技術的意義並びに将来の産業への波及効果等について、プロジェクト評価を実施する。

評価の時期は、中間評価を 2021 年度、終了時評価を 2024 年度とし、当該研究開発に係る技術動向、政策動向や当該研究開発の進捗状況等に応じて、前倒しする等、適宜見直すものとする。

また、中間評価結果を踏まえ必要に応じて研究開発の加速・縮小・中止等の見直しを迅速に行う。

５．その他重要事項

（１）研究開発成果の取扱い

①成果の普及

研究開発実施者は、研究成果を広範に普及するよう努めるものとする。NEDOは、研究開発実施者による研究成果の広範な普及を促進する。

②知的財産権の帰属、管理等取扱いについての方針

研究開発成果に関わる知的財産権については、「国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 新エネルギー・産業技術業務方法書」第 25 条の規定等に基づき、原則として、全て委託先に帰属させることとする。なお、プロジェクトの初期段階から、事業化を見据えた知財戦略を構築し、適切な知財管理を実施する。

③知財マネジメントに係る運用

本プロジェクトは、「NEDO プロジェクトにおける知財マネジメント基本方針」を適用する。

④データマネジメントに係る運用

本プロジェクトは、「NEDO プロジェクトにおけるデータマネジメント基本方針（委託者指定データを指定しない場合）」を適用する。

（2）基本計画の変更

PMgr は、当該研究開発の進捗状況及びその評価結果、社会・経済的状況、国内外の研究開発動向、政策動向、研究開発費の確保状況等、プロジェクト内外の情勢変化を総合的に勘案し、必要に応じて目標達成に向けた改善策を検討し、達成目標、実施期間、実施体制等、プロジェクト基本計画を見直す等の対応を行う。

（3）根拠法

本プロジェクトは、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構法第 15 条第 2 号及び第 9 号に基づき実施する。

6. 基本計画の改定履歴

（1）2019 年 3 月、制定

（2）2021 年 1 月、別紙 1 研究開発項目③ 2. 研究開発の内容修正、併せて PM 変更

（3）2023 年 7 月、担当推進部、PMgr の変更

(別紙1) 研究開発計画

研究開発項目① 溶融凝固現象の解明による欠陥発生の予測技術の開発

1. 研究開発の必要性

金属部品の積層造形を行うには、その材料、形状、大きさ等によって、ビームの出力量や速度、サポート材の配置等のパラメータを設定する必要があるが、付加価値が高い複雑形状や高機能な部品の造形であるほど、欠陥の無い高品質な造形パラメータを見つけ出すことは容易ではない。量産にあたっての品質の繰り返し安定性を確保するためには、品質に大きな影響を及ぼす金属の溶融凝固メカニズムの解明及び品質に悪影響を及ぼす積層造形物中の欠陥生成の予測が必要である。

2. 研究開発の具体的内容

パウダーベッド方式（レーザービーム式及び電子ビーム式）の積層造形試験研究機により、造形プロセス中の溶融凝固現象を観察し、欠陥生成のメカニズムを解明し、欠陥予測システムを開発する。

3. 達成目標

【中間目標】

欠陥発生予測システムの予測精度 80%以上

【最終目標】

欠陥発生予測システムの予測精度 95%以上

研究開発項目② 高度モニタリング及びフィードバック制御機能の開発

1. 研究開発の必要性

造形プロセス中に予測された欠陥の生成を抑制し、欠陥の発生を抑えた高品質な積層造形物を製作するためには、研究開発項目①で開発された欠陥発生予測システムとともに、積層造形中の高度モニタリングシステムおよびフィードバック制御機能が必要である。

2. 研究開発の具体的内容

積層造形による部品等の造形にあたり、品質の向上、造形プロセスの繰り返し安定性を確保するため、積層造形プロセス中における造形前の粉末敷き詰め状態、造形後の表面を高分解能で三次元計測する機能及びメルトプールの温度分布を計測する機能の開発、①の欠陥予測システムと連動した高度モニタリング及びフィードバック制御機能の開発、レーザービーム式及び電子ビーム式の積層造形試験研究機に搭載可能にするための要素技術を開発する。

3. 達成目標

【中間目標】

(レーザービーム方式)

- ・積層造形プロセスにおける粉末敷き詰め状態及び造形面について、精度 10 μ m 以下で凹凸を計測
- ・造形面の欠陥部分を再溶融する機能を開発

(電子ビーム方式)

- ・積層造形プロセスにおける粉末敷き詰め状態及び造形面について、精度 30 μ m 以下で凹凸を計測
- ・造形面の欠陥部分を再溶融する機能を開発
- ・メルトプール形状を画像化する機能を開発
- ・ビーム照射前に欠陥発生要因となる異常状態を検知する機能を開発

【最終目標】

(レーザービーム方式)

- ・フィードバック制御機能による造形プロセス中の 50 μ m 以上の欠陥率 0%

(電子ビーム方式)

- ・積層造形プロセスにおける粉末敷き詰め状態及び造形面について、精度 10 μ m 以下で凹凸を計測
- ・フィードバック制御機能による造形プロセス中の 50 μ m 以上の欠陥率 0%

研究開発項目③ 積層造形部品作製のための開発・評価手法の開発

1. 研究開発の必要性

我が国のものづくり企業が積層造形技術を積極的に活用するためには、研究開発項目①及び②で開発された技術を用いて試作した積層造形部品の品質や性能に関するデータを蓄積し、積層造形部品の作製を効率的に開発・評価する手法の提案が必要である。

2. 研究開発の具体的内容

レーザービーム式及び電子ビーム式の積層造形機により、造形サンプルの試作及び評価を行い、最適な造形条件、組織分析、材料特性を研究する。また、積層造形技術を活用した金属部品開発などを効率的に行うための開発・評価手法を開発すると共に、研究開発項目①及び②で開発された技術を組み合わせ、ユーザが造形条件を容易に作成するためのシステムを構築し、検証と初期データの蓄積を行う。

3. 達成目標

【中間目標】

- ・開発・評価手法の開発のために必要な積層造形物に関する評価データを、金属材料1種類以上について蓄積する。

【最終目標】

- ・開発・評価手法の開発のために必要な積層造形物に関する評価データを、金属材料4種類以上について蓄積する。
- ・積層造形部品を効率的に開発・評価する手法をユーザが活用できる手順書として纏める。

(別紙2) 研究開発スケジュール

項目 \ 年度	2019	2020	2021	2022	2023	2024
溶融凝固現象解明による 欠陥予測システム開発	溶融凝固現象観察・メカニズム解明					終 了 時 評 価
	欠陥予測システム開発		中 間	欠陥予測システム開発		
(レーザー・電子ビーム共通) インプロセスモニタリング 技術開発	粉末敷詰め状態、造形表面計測					終 了 時 評 価
			評			
	計測・欠陥予測システムに基づく フィードバック制御技術開発					
			価			
フィードバック制御機能開発						終 了 時 評 価
			中 間			
造形部品の開発・評価手法 の策定	作製フロー・手順策定 評価フロー・手順策定					終 了 時 評 価
	データ蓄積・実証試験		中 間	データ蓄積・実証試験		

●各種委員会開催リスト

採択審査委員会		
件名	内容	実施日
採択審査委員会	・外部有識者委員による全提案のヒアリング審査 採択候補・不採択候補の決定	2019年5月28日

技術推進委員会		
件名	内容	実施日
2020年度 第1回 技術推進委員会	外部有識者委員による、開発方針・推進計画、開発進捗、実用化・事業化に関する確認	2020年10月30日
個別 技術推進委員会	外部有識者委員による、ユーザ検証に関する再委託先追加の審議	2021年4月8日
2021年度 第1回 技術推進委員会	・外部有識者委員による、開発方針・推進計画、開発進捗、実用化・事業化に関する確認 ・ユーザ検証及び汎用型モニタリング装置開発に関する再委託先追加の審議	2022年3月29日
2022年度 第1回 技術推進委員会	外部有識者委員による、開発方針・推進計画、開発進捗、実用化・事業化に関する確認	2023年3月1日
2023年度 第1回 技術推進委員会	外部有識者委員による進捗・成果と実用化・事業化に関する確認	2024年1月29日

●特許論文等リスト

【特許】

番号	出願者	出願番号	国内外 国 PCT	出願日	状態	名 称	発明者
1	技術研究組合 次世代3D積 層造形技術総 合開発機構	PCT/JP2020/034005	PCT（全 指定）	2020.9.8	出願 継続 中	積層造形におけるパ ウダーベッド評価方 法、積層造形システ ム、情報処理装置お よびその制御方法と 制御プログラム	家田牧子他
2	技術研究組合 次世代3D積 層造形技術総 合開発機構	PCT/JP2021/007420	PCT（全 指定）	2021.2.26	出願 継続 中	造形欠陥の検出方 法、3次元積層造形 システム、情報処理 装置、情報処理方法 および情報処理プロ グラム	青柳健大他
3	技術研究組合 次世代3D積 層造形技術総 合開発機構	PCT/JP2021/007535	PCT（全 指定）	2021.2.26	出願 継続 中	積層造形技術の開発 方法および3次元積 層造形システム	青柳健大他
4	技術研究組合 次世代3D積 層造形技術総 合開発機構	PCT/JP2021/016154	PCT（全 指定）	2021.4.21	出願 継続 中	積層造形における造 形品質評価方法、積 層造形システム、情 報処理装置およびそ のプログラム	家田牧子他
5	技術研究組合 次世代3D積 層造形技術総 合開発機構	PCT/JP2023/007320	PCT（全 指定）	2023.2.28	出願 継続 中	情報処理装置、情報 処理プログラムおよ びプロセスマップ生 成方法	家田牧子他
6	技術研究組合 次世代3D積 層造形技術総 合開発機構	PCT/2023/007240	PCT（全 指定）	2023.2.28	出願 継続 中	3次元積層造形装 置、造形表面モニタ 方法、および、情 報処理プログラム	北村真一他
7	技術研究組合 次世代3D積 層造形技術総 合開発機構	PCT/JP2023/007076	PCT（全 指定）	2023.2.27	出願 継続 中	3次元積層造形シス テムおよび3次元積 層造形方法	数森啓悦

8	技術研究組合 次世代3D積層造形技術総合開発機構	PCT/JP2023/007087	PCT（全指定）	2023.2.27	出願継続中	3次元積層造形装置及び3次元積層造形方法	数森啓悦
9	技術研究組合 次世代3D積層造形技術総合開発機構	特願 2022-524340	JP: 日本国	2021.4.21	登録済み	積層造形における造形品質評価方法、積層造形システム、情報処理装置およびそのプログラム	家田牧子他
10	技術研究組合 次世代3D積層造形技術総合開発機構	PCT/JP2024/013189	PCT（全指定）	2024.3.29	出願継続中	3次元積層造形システム	北村真一他
11	技術研究組合 次世代3D積層造形技術総合開発機構	PCT/JP2024/012716	PCT（全指定）	2024.3.28	出願継続中	3次元積層造形システム、その制御方法、および、制御プログラム	北村真一他

(Patent Cooperation Treaty: 特許協力条約)

【論文】

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月
1	Yufan Zhao, Yuichiro Koizumi, Kenta Aoyagi, Kenta Yamanaka, Akihiko Chiba	東北大学	Isothermal $\gamma \rightarrow \epsilon$ phase transformation behavior in a Co-Cr-Mo alloy depending on thermal history during electron beam powder-bed additive manufacturing	Journal of Materials Science & Technology, Vol.50, 162-170	有	2020 年 8 月
2	Yufan Zhao, Kenta Aoyagi, Yohei Daino, Kenta Yamanaka, Akihiko Chiba	東北大学	Significance of powder feedstock characteristics in defect suppression of additively manufactured Inconel 718	Additive Manufacturing, Vol. 34, 101277	有	2020 年 8 月
3	Yufan Zhao, Yuichiro Koizumi, Kenta Aoyagi, Kenta Yamanaka, Akihiko Chiba	東北大学	Thermal properties of powder beds in energy absorption and heat transfer during additive manufacturing with electron beam	Powder Technology, Vol.381, 44-54	有	2021 年 3 月
4	Akihiko Chiba, Yohei Daino, Kenta Aoyagi, Kenta Yamanaka	東北大学	Smoke suppression in electron beam melting of Inconel 718 alloy powder based on insulator-metal transition of surface oxide film by	Materials, Vol.14, 4662	有	2021 年 8 月

			mechanical stimulation			
5	Tack Lee, Kenta Aoyagi, Huakang Bian, Kenta Yamanaka, Shigeo Sato, Akihiko Chiba	東北大学	The microstructure and mechanical properties of selective electron beam melting manufactured 9-12Cr ferritic/martensitic steel using N- and Ar-atomized powder	Additive Manufacturing, Vol.45, 102075	有	2021 年 9 月
6	Yuchao Lei, Kenta Aoyagi, Akihiko Chiba	東北大学	A method to manipulate non-steady-state columnar-to-equiaxed transition in powder bed fusion additive manufacturing using an electron beam	Acta Materialia, Vol.227, 117717	有	2022 年 4 月
7	Yunwei Gui, Kenta Aoyagi, Huakang Bian, Akihiko Chiba	東北大学	Detection, classification and prediction of internal defects from surface morphology data of metal parts fabricated by powder bed fusion type additive manufacturing using an electron beam	Additive Manufacturing, Vol.54, 102736	有	2022 年 6 月
8	Yufan Zhao, Kenta Aoyagi, Kenta Yamanaka, Akihiko Chiba	東北大学	A survey on basic influencing factors of solidified grain morphology during electron beam melting	Materials & Design, Vol.221, 110927	有	2022 年 9 月
9	Yusuke Tachibana, Toshi-Taka Ikeshoji, Makiko Yonehara, Hideki Kyogoku	近畿大学	Optimization of process parameters in laser beam powder bed fusion using surface texture and density of Inconel 718	J. Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing	有	2022 年 10 月
10	Seungkyun Yim, Kenta Aoyagi, Huakang Bian, Yujie Cui, Akihiko Chiba	東北大学	Factors determining the flowability and spreading quality of gas-atomized Ti-48Al-2Cr-2Nb powders in powder bed fusion additive manufacturing	Powder Technology, Vol.412, 117996	有	2022 年 11 月
11	Yunwei Gui, Huakang Bian, Kenta Aoyagi, Akihiko Chiba	東北大学	Microstructure evolution and hardness of S30C carbon steel produced by powder bed fusion using an electron beam and subsequent heat treatments	Materials Letters, Vol.328, 133096	有	2022 年 12 月
12	Toshi-Taka Ikeshoji, Makiko Yonehara, Chika Kato, Yuma Yanaga, Koki	近畿大学	Sputtering mechanism of laser powder bed fusion additive manufacturing on heterogeneous surfaces	Scientific Reports	有	2022 年 12 月

	Takeshita, Hideki Kyogoku					
13	Yim Seungkyun, Kenta Aoyagi, Keiji Yanagihara, Huakang Bian, Akihiko Chiba	東北 大学	Effect of mechanical ball milling on the electrical and powder bed properties of gas-atomized Ti-48Al- 2Cr-2Nb and elucidation of the smoke mechanism in the powder bed fusion electron beam melting process	Journal of Materials Science & Technology, Vol.137, 36-55	有	2023 年 2 月
14	Yunwei Gui, Kenta Aoyagi, Akihiko Chiba	東北 大学	Development of macro- defect-free PBF-EB- processed Ti-6Al-4V alloys with superior plasticity using PREP-synthesized powder and machine learning-assisted process optimization	Materials Science and Engineering A, Vol. 864, 144595	有	2023 年 2 月
15	Kenta Aoyagi, Manabu Ono, Keiji Yanagihara, Kimio Wakoh, Akihiko Chiba	東北 大学	Developing auto process mapping technique for powder bed fusion using an electron beam	Progress in Additive Manufacturing, https://doi.org/10.1007/s40964-023-00535-3	有	2023 年 11 月
16	Yunwei Gui, Kenta Aoyagi, Huakang Bian, Akihiko Chiba	東北 大学	Machine-Learning-Assisted Development of Carbon Steel With Superior Strength and Ductility Manufactured by Electron Beam Powder Bed Fusion	Metallurgical and Materials Transactions A, Vol. 55, 320- 334	有	2023 年 11 月
17	Toshitaka Ikeshoji, Makiko Yonehara, Hideki Kyogoku	近畿 大学	Laser beam powder bed fusion of Inconel 718 under high power and scanning speed	Journal of Advanced Mechanical Design, Systems and manufacturing	有	2023 年 12 月

【外部発表】

(a) 学会発表・講演

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	青柳健大、小野 学、山中謙太、千 葉晶彦	東北大学	CPS 適合型積層造形システムの開発 (I) 〜プロセスマップ自動生成シス テム	日本金属学会第 168 回 講演大会	2021 年 3 月
2	趙 宇凡、崔 玉 傑、卞 華康、山 中 謙太、青柳 健大、千葉 晶彦	東北大学	実験と離散要素法による積層造 形用インコネル 718 合金粉末の 流動性評価	粉体粉末冶金協会 2021 年度春季大会	2021 年 6 月
3	千葉 晶彦、青柳 健大、台野 洋 平、工藤 貴浩	東北大学	電子ビーム積層造形における合 金粉末床のボールミル処理によ る”スモーク”抑制効果	粉体粉末冶金協会 2021 年度春季大会	2021 年 6 月
4	趙 宇凡、崔 玉 傑、卞 華康、山 中 謙太、青柳 健大、千葉 晶彦	東北大学	実験とシミュレーションによる 積層造形用金属粉末の流動性評 価	日本金属学会 2021 年度秋期講演大会	2021 年 9 月
5	劉 方舟、青柳 健大、柳原 圭 司、伊藤 桂介、 千葉 晶彦	東北大学	Mechanical Surface Treatments on Inconel 718 Powders for Controlling the	日本金属学会 2021 年度秋期講演大会	2021 年 9 月

			Powder Bed Charging in PBF-EB		
6	任 勝均, 卞 華康, 青柳 健大, 山中 謙太, 千葉 晶彦	東北大学	The effect of mechanical ball milling on electrical and powder bed properties of gas atomized Ti-48Al-2Cr-2Nb for suppressing smoke in EBM-AM process	日本金属学会 2021 年度秋期講演大会	2021 年 9 月
7	趙 宇凡, 卞 華康, 王 昊, 青柳 健大, 崔 玉傑, 雷 雨超, 山中 謙太, 千葉 晶彦	東北大学	電子ビーム積層造形における粉末特性と溶質トラッピング	日本金属学会 2021 年度秋期講演大会	2021 年 9 月
8	Akihiko Chiba	東北大学	Significant alloy powder characteristics for powder-bed fusion type electron beam additive manufacturing	2021 JAPAN-TAIWAN Advanced Materials and Semiconductor Technology Workshop	2021 年 10 月
9	K. S. N. Sesha, Kenta Yamanaka, Kenta Aoyagi, Akihiko Chiba,	東北大学	Influence of Thermal Treatments on the Microstructure and Mechanical Properties of Ti-6Al-4V Built by Electron Beam Melting (EBM)	MS&T21: Materials Science and Technology 2021	2021 年 10 月
10	Yunwei Gui, Kenta Aoyagi, Akihiko Chiba	東北大学	An ensemble machine-learning approach for predicting and understanding the characteristics of ball milled powders for PBF-EB process	粉体粉末冶金協会 2021 年度秋季大会	2021 年 11 月
11	Sri Naga Sesha Karri, Kenta Yamanaka, Kenta Aoyagi, Akihiko Chiba	東北大学	Correlation between microstructure and mechanical properties of water quenched Ti-6Al-4V built by electron beam melting (EBM)	粉体粉末冶金協会 2021 年度秋季大会	2021 年 11 月
12	任 勝均, 卞 華康, 柳原 圭司, 青柳 健大, 山中 謙太, 千葉 晶彦	東北大学	ボールミリングのガスアトマイズ Ti-48Al-2Cr-2Nb 粉末の電気的と粉末床特性に対する影響及び PBF-EBM プロセスにスモークメカニズムの解明	粉体粉末冶金協会 2021 年度秋季大会	2021 年 11 月
13	趙 宇凡, 王 昊, 青柳 健大, 雷 雨超, 卞 華康, 崔 玉傑, 山中 謙太, 千葉 晶彦	東北大学	電子ビーム積層造形における粉末特性と造形品質の関係	粉体粉末冶金協会 2021 年度秋季大会	2021 年 11 月
14	Akihiko Chiba, Yufan Zhao, Kenta Aoyagi, Kenta Yamanaka	東北大学	Optimal Alloy Powder Characteristics for Electron Beam Additive Manufacturing	ICMaSS2021: International Conference on Materials and Systems for Sustainability	2021 年 11 月
15	Hideki Kyogoku	近畿大学	The Role of TRAFAM and AM Technology Development (Plenary)	The 4th Smart Laser Processing Conference (SLPC2022)	2022 年 4 月
16	Yunwei Gui, Kenta Aoyagi,	東北大学	Machine learning-assisted development of carbon steels with superior	粉体粉末冶金協会 2022 年度春季大会	2022 年 5 月

	Huakang Bian、 Akihiko Chiba		performance fabricated by powder bed fusion type additive manufacturing using an electron beam	(第 129 回講演大 会)	
17	石神健太、青柳 健大、卞華康、 千葉晶彦、橋詰 良樹、田中昭衛	東北大学	AlSi10Mg 電子ビーム積層造形 物の機械特性	粉体粉末冶金協会 2022 年度春季大会 (第 129 回講演大 会)	2022 年 5 月
18	Hideki Kyogoku	近畿大学	Correlation between surface texture and internal defects in laser powder bed fusion	European Congress on Laser, Optics and Photonics 2022	2022 年 5 月
19	伊藤創大、米原牧 子、池庄司敏孝、 加藤 千佳、矢 永雄馬、竹下孝 樹、京極秀樹	近畿大学	レーザ積層造形プロセスにおける諸 現象のその場観察	日本機械学会 2022 年度年次大会	2022 年 9 月
20	石神健太、青柳 健大、橋詰良 樹、田中昭衛、 千葉晶彦	東北大学	電子ビーム 3D 積層造形による 過共晶 Al-Si 合金造形物の特性	粉体粉末冶金協会 2022 年度秋季大会 (第 130 回講演大 会)	2022 年 11 月
21	石岡功己、青柳 健大、石神健 太、千葉晶彦	東北大学	電子ビーム積層造形における Al 系合金粉末のスモーク現象に関 する研究	日本金属学会 2023 年春期第 172 回講演 大会	2023 年 3 月
22	YIMSEUNGKYUN 、Sun Jiayu、青 柳健大、山中謙 太、千葉晶彦	東北大学	In-situ observation of powder spreading in powder bed fusion additive manufacturing process using particle image velocimetry method	日本金属学会 2023 年春期第 172 回講演 大会	2023 年 3 月
23	Kenta Aoyagi, Manabu Ono, Keiji Yanagihara, Kimio Wakoh, Akihiko Chiba	東北大学	Development of Auto Process Mapping Technique For Powder Bed Fusion using an Electron Beam	EBAM2023	2023 年 3 月
24	Akihiko Chiba, Kenta Yamanaka, Kenta Aoyagi, Yujie Cui, Chen Yang	東北大学	Additive Manufacturing of High-Entropy Alloys with Electron Beam Melting	EBAM2023	2023 年 3 月
25	青柳健大、小野 学、柳原司、若 生公郎、山中謙 太、葛川生瑠、 教森啓悦、北村 真一、眞部弘 宣、千葉晶彦	東北大学	インプロセスモニタリング技術 とデータサイエンスを高度に活 用した欠陥予測技術とプロセス マッピング技術	第 6 回積層造形によ る素形材イノベー ション研究会	2023 年 3 月
26	Makiko Yonehara, Toshitaka Ikeshoji, Chika Kato, Yuma Yanaga, Koki Takeshita, Hideki Kyogoku	近畿大学	Correlation between internal defects and surface texture measured by using in-process monitoring system in powder bed fusion additive manufacturing	International Summit on Laser, Optics and Photonics (ISLOP2023)	2023 年 4 月
27	Hideki Kyogoku	近畿大学	Prediction of defects generation via in-process monitoring system in powder bed fusion additive manufacturing (Invited)	International Summit on Laser, Optics and Photonics (ISLOP2023)	2023 年 4 月
28	Toshitaka Ikeshoji, Makiko	近畿大学	Layer-wise in-process monitoring- and feedback system based on	The 34th Annual international Solid	2023 年 8 月

	Yonehara, Kenta Aoyagi, Kenta Yamanaka, AkihikoChiba, Hideki Kyogoku, Michiaki Hashitani		surface characteristics evaluated by machine-learning-generated criteria	Freeform fabrication Symposium - An Additive Manufacturing Conference - 2023T	
29	青柳健大、柳原圭 司、若生公朗、小 野学、山中謙太、 千葉晶彦	東北大学	電子ビーム粉末床溶融結合法におけ る造形性のサイズ依存性	日本金属学会 2023 年秋 期講演（第 173 回）大 会	2023 年 9 月
30	Yunwei Gui, Kenta Aoyagi, Huakang Bian, Kenta Yamanaka, Akihiko Chiba	東北大学	電子ビーム積層造形法における機械 学習を取り入れた最上表面性状判別 法による造形欠陥予測制御	日本金属学会 2023 年秋 期講演（第 173 回）大 会	2023 年 9 月
31	Makiko Yonehara, Toshitaka Ikeshoji, Kenta Aoyagi, Kenta Yamanaka, AkihikoChiba, Hideki Kyogoku, Michiaki Hashitani	近畿大学 東北大学 T R A F A M	Prediction of internal defects by layer-by-layer surface texture measured by using in-situ monitoring system in laser powder bed fusion additive manufacturing	Metal Additive Manufacturing Conference (MAMC2023)	2023 年 10 月
32	Toshitaka Ikeshoji, Makiko Yonehara, Hideki Kyogoku,	近畿大学	Process monitoring of laser beam powder bed fusion; Melt pool, surface morphology, and defects formation	The 2nd International Conference & Expo on Lasers, Optics & Photonics (OPTICS2023)	2023 年 10 月
33	Hideki Kyogoku	近畿大学	R&D and Industrial perspective of metal additive manufacturing in Japan (Plenary)	Metal Additive Manufacturing Conference (MAMC2023)	2023 年 10 月
34	青柳健大	東北大学	電子ビーム積層造形におけるインプ ロセスモニタリング/フィードバッ ク制御技術と 自動プロセス設計シ ステムの開発	第 17 回粉末積層 3D 造形技術委員会	2024 年 3 月

(b)受賞

番号	所属・受賞者	タイトル	受賞テーマ	受賞年月
1	東北大学 千葉晶彦	文部科学大臣賞 科学技術賞 研究部門	脊柱変形疾患に対する 革新的医療機器の開発 と実用化研究	2020 年 4 月
2	東北大学 千葉晶彦	第 28 回 日本金属学会 増分量賞	医療用金属材料を含む 構造・機能性金属材料 の力学特性と加工プロ セスに関する研究	2022 年 3 月
3	東北大学 千葉晶彦	第 61 回 日本金属学会 谷川ハリス賞	医療用金属材料を含む 構造用金属材料の力学 特性と加工プロセスに 関する研究	2022 年 3 月
4	東北大学 千葉晶彦	粉体粉末冶金協会第 60 回（令和 3 年 度）研究功績賞	電子ビームによる金属 積層造形技術に関する 基礎的研究と応用に 関する研究	2022 年 5 月
5	近畿大学 京極秀樹	粉体粉末冶金協会第 61 回（令和 4 年 度）研究功績賞	レーザ金属積層造形技 術に関する基礎的研究 と応用技術の開発	2023 年 6 月

(c)展示会への出展

番号	発表者	タイトル	イベント名	発表年月
1	技術研究組合次世代3D積層造形技術総合開発機構	積層造形部品開発の効率化のための基礎技術開発事業	nanotech 2021	2020 年 12 月
2	技術研究組合次世代3D積層造形技術総合開発機構	積層造形部品開発の効率化のための基礎技術開発事業	JIMTOF 2022	2022 年 11 月
3	技術研究組合次世代3D積層造形技術総合開発機構	積層造形部品開発の効率化のための基礎技術開発事業	nanotech 2023	2023 年 2 月
4	日本電子株式会社	JEOL Additive Manufacturing New Technical Information	Formnext2023	2023 年 11 月
5	技術研究組合次世代3D積層造形技術総合開発機構	積層造形部品開発の効率化のための基礎技術開発事業	nanotech 2024	2024 年 1 月

2. 分科会公開資料

次ページより、推進部署・実施者が、分科会において事業を説明する際に使用した資料を示す。

「積層造形部品開発の効率化のための基盤技術開発事業」 (終了時評価)

2019年度～2023年度 5年間

プロジェクトの説明 (公開版)

2024年9月26日

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

バイオ・材料部

積層造形部品開発の効率化のための基盤技術開発

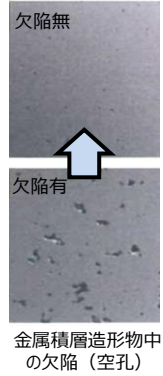
バイオ・材料部 PMgr：柳本 勝巳 チーム長

技術戦略次世代製造法積層造形プロセスVer.2.1

プロジェクトの概要

・素形材部品のものづくりに導入がはじまりつつある、金属積層造形において、現状では、品質を満足できるレベルまでの造形物を作り始めるまでには、多くの時間と経験が必要であり、中小事業者をはじめ装置導入の際の課題となっている。また、金属の積層造形技術は、そもそもの現象解明の研究さえも十分には進んでいないため、付加価値が高い複雑形状、高機能の部品や機能性合金の造形では、品質の再現性、均一性を確保することが難しく、新規開発に多大なコストと時間がかかることが課題となっている。

- ・本事業は、金属積層造形における品質の確保と部品開発の効率化を目指して、レーザービーム方式及び電子ビーム方式について以下の研究開発を実施する。
- ① 溶融凝固現象の解明による欠陥発生予測技術の開発
 - ② 高度モニタリング及びフィードバック制御機能の開発
 - ③ 積層造形部品製作のための開発・評価手法の開発



想定する出口イメージ等

アウトプット目標	・造形物の欠陥発生予測システムの<u>予測精度 95%以上</u> ・高度モニタリング及びフィードバック制御機能の開発（レーザービーム方式）（電子ビーム方式） ・粉末敷き詰め状態及び造形面について <u>精度10μm以下で凸凹を計測</u> ・フィードバック制御機能による造形プロセス中の<u>50μm以上の欠陥率0%</u> ・積層造形部品作製のための開発手法・評価手法の開発
アウトカム目標	本プロジェクトの成果により、品質の向上、造形プロセスの繰り返し安定性の確保とともに、積層造形部品作製のための開発・評価手法が確立されることで、<u>積層造形部品の開発期間が1/5に短縮</u>されることを目指す。また、それにより2030年度における本システムを搭載した金属3Dプリンタの<u>国内素形材企業への導入割合10%（事業所ベース）</u>を目指す。これにより年間500億円の開発コストの削減が見込まれる。

既存プロジェクトとの関係

・「次世代型産業用3Dプリンタの造形技術開発・実用化事業」（2017年度～2018年度）
装置、材料の開発
（本プロジェクトは品質の確保および保証のための技術開発）

事業計画

期間：2019～2023年度（5年間）
事業予算総額：11.8億円(委託)

＜研究開発スケジュール・評価時期・予算規模＞

	2019	2020	2021	2022	2023	2024
溶融凝固現象解明による欠陥予測システム開発	溶融凝固現象観察・メカニズム解明 欠陥予測システム開発					
高度モニタリング及びフィードバック制御機能（レーザー・電子ビーム）	粉末敷き詰め状態、造形表面計測 欠陥予測システム開発 計測・欠陥予測システムに基づくフィードバック制御技術開発					
開発・評価手法	作製フロー・手順策定 評価フロー・手順策定 実証試験 ユーザー検証					
評価時期			中間評価			終了時評価
予算（億円）	1.5	1.2	2.0	3.5	3.6	

ページ構成

1. 意義・アウトカム（社会実装）達成までの道筋



2. 目標及び達成状況



3. マネジメント

※本事業の位置づけ・意義
(1)アウトカム達成までの道筋
(2)知的財産・標準化戦略

(1)アウトカム目標及び達成見込み
(2)アウトプット目標及び達成状況

(1)実施体制
※受益者負担の考え方
(2)研究開発計画

- 事業の背景・目的・将来像
- 政策・施策における位置づけ
- 技術戦略上の位置づけ
- 外部環境の状況（技術、市場、制度、政策動向など）
- 他事業との関係
- アウトカム達成までの道筋
- 知的財産・標準化：オープン・クローズ戦略
- 知的財産管理

- 実用化・事業化の考え方と
アウトカム目標の設定及び根拠
- アウトカム目標の達成見込み
- ※費用対効果
- 非連続ナショプロに該当する根拠
- 前身事業との関連性
- 本事業における研究開発項目の位置づけ
- アウトプット目標の設定及び根拠
- アウトプット目標の達成状況
- 研究開発成果の副次的成果等
- 特許出願及び論文発表

- NEDOが実施する意義
- 実施体制
- 個別事業の採択プロセス
- 研究データの管理・利活用
- ※予算及び受益者負担
- 目標達成に必要な要素技術
- 研究開発のスケジュール
- 進捗管理
- 進捗管理：事前/中間評価結果への対応
- 進捗管理：動向・情勢変化への対応
- 進捗管理：成果普及への取り組み
- 進捗管理：開発促進財源投入実績
- モティベーションを高める仕組み

＜評価項目 1＞ 意義・アウトカム（社会実装） 達成までの道筋

- ※ 本事業の位置づけ・意義
- （１）アウトカム達成までの道筋
- （２）知的財産・標準化戦略

ページ構成

- 事業の背景・目的・将来像
- 政策・施策における位置づけ
- 技術戦略上の位置づけ
- 外部環境の状況（技術、市場、制度、政策動向など）
- 他事業との関係
- アウトカム達成までの道筋
- 知的財産・標準化：オープン・クローズ戦略
- 知的財産管理

1. 意義・アウトカム（社会実装）達成までの道筋

※本事業の位置づけ・意義
(1)アウトカム達成までの道筋
(2)知的財産・標準化戦略



2. 目標及び達成状況

(1)アウトカム目標及び達成見込み
(2)アウトプット目標及び達成状況



3. マネジメント

(1)実施体制
※受益者負担の考え方
(2)研究開発計画

事業の背景・目的・将来像

背景

- ものづくりの付加価値を高めていくためには、複雑形状等が実現できる積層造形技術を積極的に活用することが有効である。
- 世界市場が積層造形技術の活用が進む中、我が国も早期に積層造形技術を活用した金属部品等の開発を促進することが重要となる。
- 一方、金属の積層造形技術では、現象解明さえ十分には進んでおらず、**品質の再現性確保や新規開発に係るコストと時間が課題**となっている。

目的

- **積層造形における金属の溶融凝固現象を解明**するとともに、**高度な計測・機械制御技術を開発**し、金属積層造形部品等における開発の効率化及び高品質の確保を目指す。

将来像

- 高度な計測・機械制御により、高品質化・効率化を実現することで、**積層造形技術を活用した金属部品の開発期間を1/5に短縮**することにより、我が国における積層造形技術の普及を目指す。それにより2030年度における本システムを搭載した**金属3Dプリンタの国内素材企業への導入割合10%**（事業所ベース）を目指す。これにより年間500億円の開発コストの削減が見込まれる。

政策・施策における位置づけ

■ 科学技術イノベーション総合戦略2017

生産プロセスにおいては、多様化したユーザーニーズに迅速かつ柔軟に対応して、高性能、高品質な製品を提供するために、A I を搭載し知能化された機械やロボット、複雑形状を高速かつ高精度で造形する**3Dプリンタ**など新たな付加価値を持ったもの・コトを創出する革新的な生産技術の開発とその導入支援に取り組む。

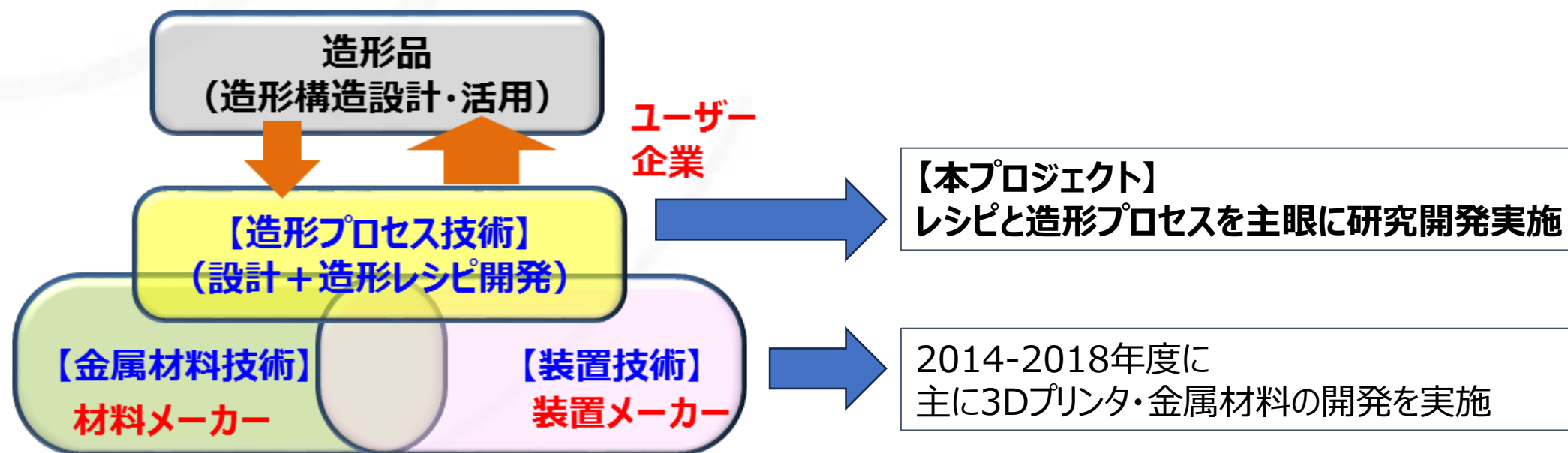
■ 未来投資会議2018

データ連携やIoT、**3Dプリンタ**等を活用して、顧客の多様なニーズに対応する多品種少量生産等が可能となり、高い現場力を有し、小回りの利く中小企業ならではの新たな市場獲得のチャンスが生まれる。

技術戦略上の位置づけ

- ・技術としては、装置/金属粉末材料/プロセス（レシピ）の3要素に大別。
- ・要素はそれぞれに密接に関連、独立に扱くと適切な造形品を得ることは困難。
- ・技術全体を統合化する（例えば装置企業がコントロール）方向にある。

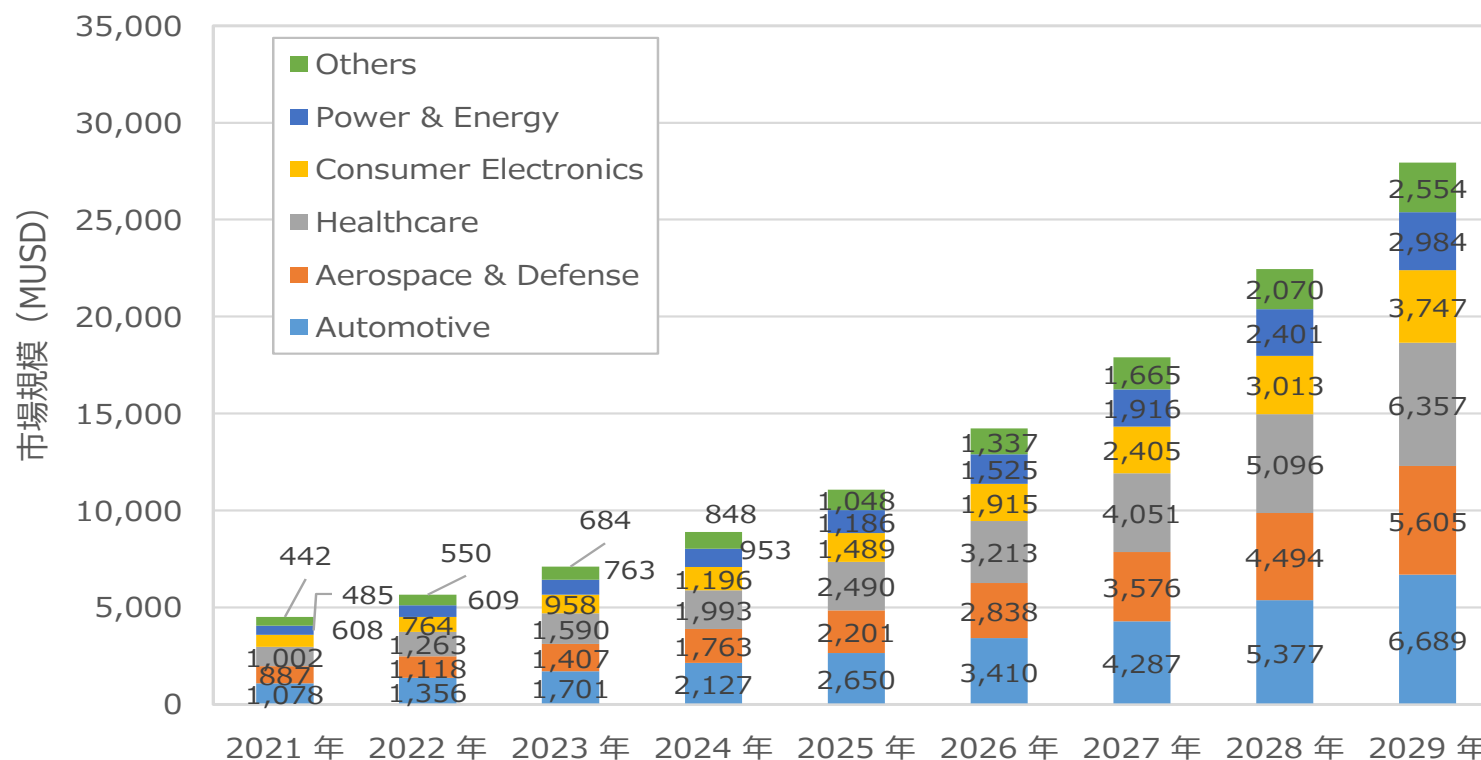
技術分野の関連性



外部環境の状況（技術、市場、制度、政策動向など）

金属積層造形装置の市場動向

- 2021年時点でのグローバル市場でのAM関連製品・サービス（装置、ソフトウェア、造形サービス等）の市場規模は約45億ドル
- 今後年率25.5%で成長し、2029年には約280億ドルになると予想。
- 自動車が最も大きな市場と考えられている。ヘルスケア、航空宇宙・防衛、エレクトロニクス、エネルギー機器、その他（産業機械、金型・工具等）が続く。



グローバル市場でのアプリケーション別の市場規模の推移

2022年度調査事業報告より

外部環境の状況（技術、市場、制度、政策動向など）

【2022-2023年度実施の調査に基づく市場/技術の最新動向】

米国 America Makes、EU Horizon2020 等の関連プロジェクト調査を実施。
以下の技術テーマを主眼に推進されている状況。

主要推進テーマ

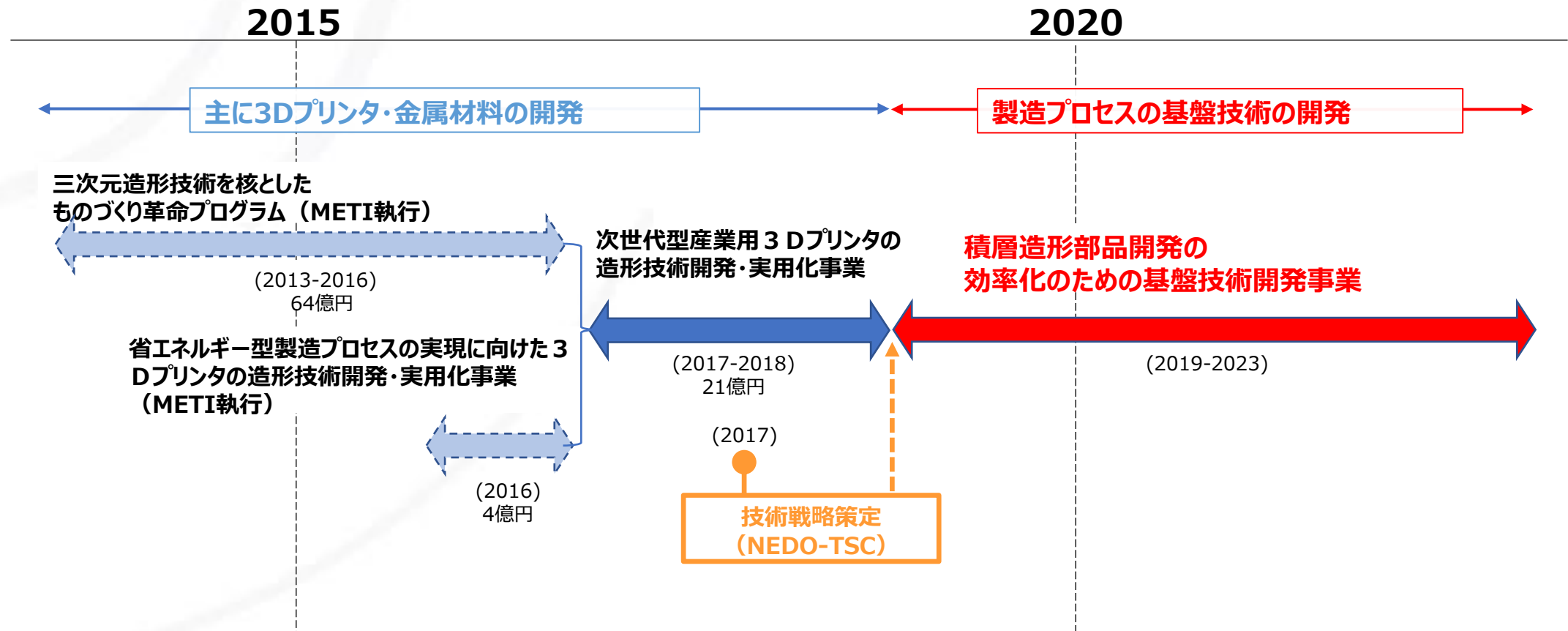
- ・欠陥の抑制・制御、欠陥発生予測等
- ・設計支援（AI/機械学習 の利用、データベース構築を含む）

重要構成要素技術

- ・インプロセスモニタリング技術
- ・プロセス制御技術
- ・欠陥や造形品の特性の予測技術（シミュレーション、AI 等）
- ・データを活用した設計支援技術
（AI・機械学習、データベース、シミュレーション、プロセス標準化等）

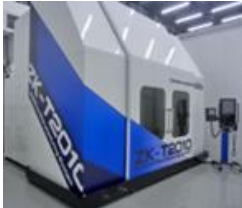
他事業との関係

- NEDOでは、2017年度から金属の積層造形技術関連プロジェクトを推進。
- 本事業では、過去のプロジェクトの成果（METI執行も含む）や技術戦略の策定を踏まえ、製造プロセスの基盤技術の開発を実施。



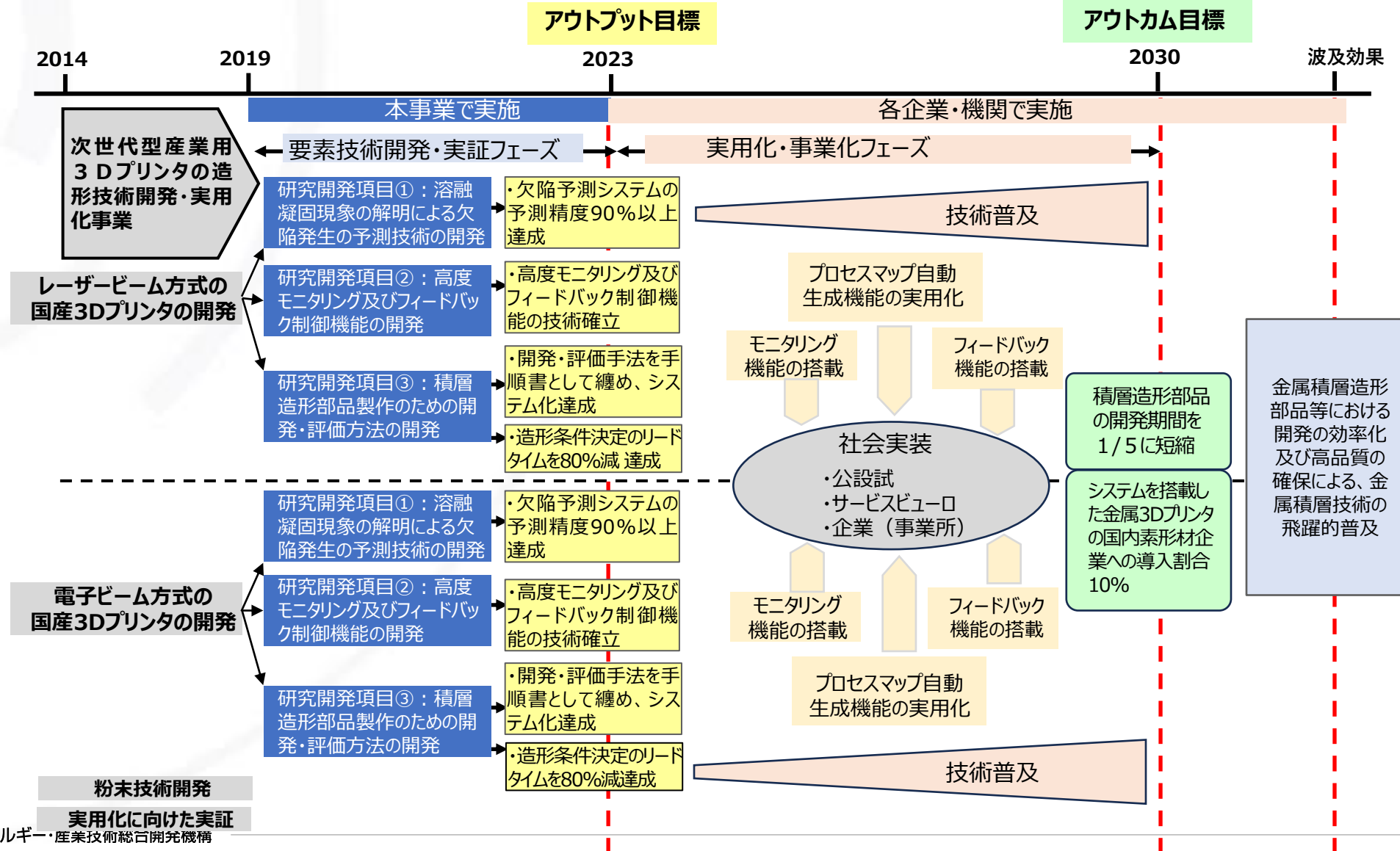
他事業との関係(参考)

- 次世代型産業用 3 D プリントの造形技術開発・実用化事業（METI 執行事業も含む）では、TRAFAMのもとで複数の装置メーカーが参画し、国産金属 3 D プリントを製品化している。

電子ビーム方式	レーザービーム方式	バインダージェットティング方式（砂型）
 多田電機  三菱電機 EZ300  日本電子JAM-5200EBM 写真提供：日本電子	 東芝機械 ZK-T2010  松浦機械製作所  ニデックマシンツール (旧 三菱重工工作機械) LAMDA200	 シーメット SCM-800  シーメット SCM-1800

アウトカム達成までの道筋

※機密性の高い詳細版は「非公開版」に掲載



- 研究開発成果に関わる知的財産権は、原則として全て委託先に帰属させる。
また、NEDOプロジェクトにおける知財マネジメント基本方針を適用する。
- 技術研究組合では、知財審議会を設置するとともに、知的財産権取扱規程等を整備して本事業に参加する全ての組合員と知的財産権の帰属、実施許諾等について合意。
知財基本方針：「本プロジェクト（委託研究）の範囲内及びプロジェクトの期間内で得られた知的財産（職務発明）は、技術研究組合次世代3D積層造形技術総合開発機構に帰属させる」
- 知財マネジメント強化のため、権利全般とその取り扱いは、技術研究組合が一元管理。
知財審議会、WG（ワーキンググループ）の開催
知財基本方針に基づいた、知財関連の規程、規則を設定
（職務発明等の規程、規則、実施許諾、特許権の譲渡等）
- 開発案件の特許化技術を抽出し、開発スケジュールに沿ってタイムリーな知財取得を図る。
- 海外での特許を念頭にPCT国際出願とする。

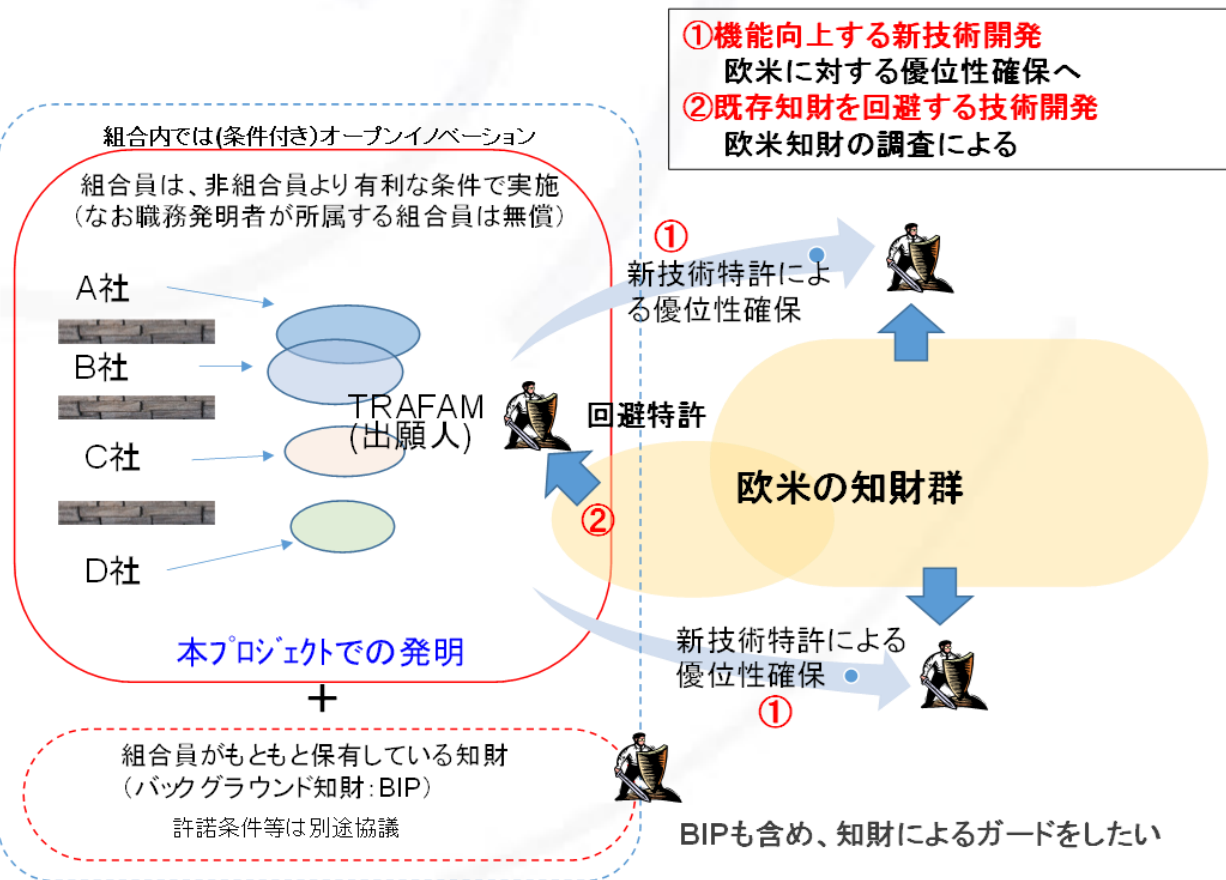
```
graph TD; NEDO[NEDO]; TRAFAM[TRAFAM]; Members([組合員各機関]); NEDO -- "出願報告" --> TRAFAM; TRAFAM -- "確認" --> NEDO; TRAFAM --- Members; TRAFAM --- Procedures[知財関係の手続き、管理];
```



知的財産管理（技術研究組合での知財活動）

事業期間中

- 知財戦略に基づき、知財取得を積極的に推進。



事業終了後

- TRAFAM特許の有償譲渡
「積層造形部品開発の効率化のための基盤技術開発」プロジェクトの完了に伴い、特許譲渡を開始。
- 欧米特許
「欧州及び米国特許権の譲渡に係る細則」に従い、知財審議会で合意済方針に基づき、2024年度に有償譲渡を完了予定。
- 日本特許
「日本特許権の譲渡に係る細則」に従い、知財審議会で合意済方針に基づき、2024年度に有償譲渡を完了予定。必要に応じて、具体的な特許譲渡について知財審議会にて審議、合意の上で、該当する組合員と譲渡契約を締結。

＜評価項目 2＞ 目標及び達成状況

- (1) アウトカム目標及び達成見込み
- (2) アウトプット目標及び達成状況

1. 意義・アウトカム（社会実装）達成までの道筋

※本事業の位置づけ・意義
(1)アウトカム達成までの道筋
(2)知的財産・標準化戦略



2. 目標及び達成状況

(1)アウトカム目標及び達成見込み
(2)アウトプット目標及び達成状況

- 実用化・事業化の考え方とアウトカム目標の設定及び根拠
- アウトカム目標の達成見込み
- ※費用対効果
 - 非連続ナショプロに該当する根拠
 - 前身事業との関連性
 - 本事業における研究開発項目の位置づけ
 - アウトプット目標の設定及び根拠
 - アウトプット目標の達成状況
 - 研究開発成果の副次的成果等
 - 特許出願及び論文発表



3. マネジメント

(1)実施体制
※受益者負担の考え方
(2)研究開発計画

実用化・事業化の考え方とアウトカム目標の設定及び根拠

アウトカム目標	根拠
積層造形部品の開発期間を1/5に短縮	ユーザーヒヤリングにより設定。積層造形部品において、（2019年提案時）の金属3Dプリンタを用いて造形条件等の最適化をするために必要な期間を母数とした開発期間を1/5（1-2週間）に短縮する。
2030年度における本システムを搭載した金属3Dプリンタの国内素形材企業への導入割合10%（事業所ベース）を目指す。	2017年度工業統計をもとに算定。 （素形材産業の範囲としては、2017年度の工業統計より、従業員30人以上の金属製品及び自動車部品等を製造する事業所数に対する導入割合として算出。791事業所）



社会実装

実用化・事業化	【実用化】 ユーザー企業による検証を行うことにより成果の有効性を確認。 さらに、レーザービーム方式については、製品化に向けた汎用型モニタリング装置の開発・検証も実施。 【事業化】 開発した個別機能のオプション化により段階的な市場投入を進める。 レーザービーム方式：モニタリング機能（2026年FY以降）、再溶融FB機能（2027年FY以降）、プロセスマップ自動生成機能（2027年FY以降） 電子ビーム方式：モニタリング機能（2024年FY以降）、再溶融FB機能（2025年FY以降） ※個別製品化計画等については非公開資料にて説明
---------	--

アウトカム目標の達成見込み

アウトカム目標	達成の見込み	課題
積層造形部品の開発期間を1/5に短縮	試験研究機において、プロセスマップ自動生成機能、モニタリング・フィードバックシステムを利用することにより、リードタイムが1/5程度まで短縮できることが確認できたため、これらの機能を商用機に搭載することで実部品の造形においても開発期間を1/5に短縮できる見込み。	商用機への搭載に向けたシステムの小型化・コスト削減を事業者が検討中。
本システム搭載金属3Dプリンタの国内素形材企業への導入割合10%	欠陥発生予測技術や高度モニタリング・フィードバック機能は海外製品と比較して性能的に優位性があり、プロセスマップ自動生成機能を有した装置は上市されていない。これらの画期的な研究開発成果を事業化することにより導入が促進され目標を達成できる見込み。	TRAFAMのユーザー会での議論や各種展示会への出展等を通じて、市場への導入に向けた活動を実施中。

費用対効果

事業予算総額

11.8億円

アウトカム目標

- ・ 積層造形部品の開発期間を1/5に短縮
- ・ 本システム搭載金属3Dプリンタの国内素形材企業への導入割合10%

経済波及効果（2030年）

- ・ 造形装置：632億円
- ・ 造形品：1,900億円
- ・ 開発期間短縮に伴うコスト削減：+ α

2,532億円
+ α

経済波及効果（2030年）の算定根拠

造形装置について

- ・ 2030年に本システム搭載金属3Dプリンタは、国内の791事業所に導入されると予測（経済産業省が平成29年度工業統計をもとに算定）。また、装置価格は0.8億円／台と仮定。
791事業所×0.8億円／台＝632億円

造形品について

- ・ 2030年の金属積層造形関連の世界市場予測（NEDO-TSC）では、造形装置6,500億円、造形品2兆円となっている。
- ・ 造形品の市場規模は、造形装置市場に比例すると仮定。また、国内造形装置市場は上記より632億円。
- ・ 2兆円（造形品市場）×632／6,500（造形装置市場の比率）≒1,900億円

開発期間短縮に伴うコスト削減について

- ・ 「新ものづくり研究会 報告書」（平成26年 経済産業省）では、3Dプリンタ等（金属以外も含む）による経済波及効果（2020年）を21.8兆円と予測している。そのうち、装置・材料、造形品等の直接市場以外にも、生産性の革新によるコスト削減により10.1兆円の効果があるとしている。
- ・ したがって、「+ α 」については、相当な額の波及効果が期待される。

本事業における研究開発項目の位置づけ(1)

研究開発項目	研究開発内容
①溶融凝固現象の解明による欠陥発生予測技術の開発	造形プロセス中の溶融凝固現象を観察し、欠陥生成のメカニズムを解明し、欠陥予測システムを開発する。
②高度モニタリング及びフィードバック制御機能の開発	積層造形プロセス中における造形前の粉末敷き詰め状態、造形後の表面を高分解能で三次元計測する機能及びメルトプールの温度分布を計測する機能を開発する。また、①の欠陥予測システムと連動した高度モニタリング及びフィードバック制御機能を開発する。
③積層造形部品製作のための開発・評価方法の開発	レーザービーム式及び電子ビーム式の積層造形機により、造形サンプルの試作及び評価を行い、最適な造形条件、組織分析、材料特性を研究する。また、積層造形技術を活用した金属部品開発などを効率的に行うための開発・評価手法を開発する。

本事業における研究開発項目の位置づけ(2)



アウトプット（終了時）目標の設定及び根拠

■ 研究開発項目①：溶融凝固現象の解明による欠陥発生予測技術の開発（共通）

最終目標	根拠
欠陥発生予測システムの予測精度 95% 以上	欠陥率0%の実現には、欠陥予測システムの予測精度が高い必要があるため、最終目標を 95%以上とした。

■ 研究開発項目②：高度モニタリング及びフィードバック制御機能の開発（レーザー）

最終目標	根拠
フィードバック制御機能による造形プロセス中の50μm以上の欠陥率 0%	X線CTで計測可能な50μm以上を対象として欠陥率 0 %とした。

アウトプット（終了時）目標の設定及び根拠

■ 研究開発項目②：高度モニタリング及びフィードバック制御機能の開発（電子ビーム）

最終目標	根拠
積層造形プロセスにおける粉末敷き詰め状態及び造形面について、精度10 μ m以下で凹凸を計測	粉末の粒径が45～110 μ m程度であることを考慮して、粉末敷き詰め状態及び造形面を精度良く計測するため、最終目標を10 μ m以下とした。
フィードバック制御機能による造形プロセス中の50 μ m以上の欠陥率 0%	X線CTで計測可能な50 μ m以上を対象として欠陥率 0 %とした。

■ 研究開発項目③：積層造形部品製作のための開発・評価方法の開発（共通）

最終目標	根拠
開発・評価手法の開発のために必要な積層造形物に関する評価データを、金属材料4種類以上について蓄積する。	実際に多様な金属部品開発にも応用できるように、複数の種類の金属種でのデータ蓄積も重要であるため、最終目標として4種類以上とした。
積層造形部品を効率的に開発・評価する手法をユーザーが活用できる手順書として纏める。	ユーザーが効率的に活用可能とするため。

アウトプット目標の達成状況

レーザービーム方式 (1)

研究開発項目	最終目標	達成状況
1. 溶融凝固現象の解明による欠陥発生予測技術の開発	欠陥予測システムの予測精度を95%以上にする。	・試験研究機による教師データを用いて、機械学習を利用した欠陥予測システムを開発し、予測精度95%以上を達成した。

レーザービーム方式 (2)

研究開発項目	最終目標	達成状況
2. 高度モニタリング及びフィードバック制御機能の開発	フィードバック制御機能により造形プロセス中50μm以上の大きさの欠陥率を0%とする。	・試験研究機により、収集した造形表面の画像データを用いて表面性状パラメータを計算し、50μm以上の大きさの欠陥率0%を満足する特定の表面性状パラメータを見出し、フィードバックのための再溶融による欠陥補修機能を開発した。 ・試験研究機を用いて、ユーザー実証によるフィードバックのための欠陥補修機能を検証し、その有効性を確認した。 ・実用化のための汎用型モニタリング装置を開発し、試験研究機用のシステムを改良して搭載し、モニタリング・フィードバック機能の有効性を確認した。

アウトプット目標の達成状況

レーザービーム方式 (3)

研究開発項目	最終目標	達成状況
3. 積層造形部品作製のための開発・評価手法の開発	開発・評価手法の開発のために必要な積層造形物に関する評価データを、金属材料4種類以上について蓄積する。	・汎用型モニタリング装置により、インコネル718合金、Ti-6Al-4V合金、SUS316L合金、AlSi10Mg合金に加えて銅合金についても、リアルタイムでメルトプール、パウダーベット及び造形表面の評価データを蓄積した。
	積層造形部品を効率的に開発・評価する手法をユーザーが活用できる手順書として纏める。	・汎用型モニタリング装置によるユーザー造形品の造形を行い、開発した機能の有効性を確認し、ユーザーが活用できる手順書として纏めた。

アウトプット目標の達成状況

電子ビーム方式

研究開発項目	最終目標	達成状況
1. 溶融凝固現象の解明による欠陥発生の予測技術の開発	欠陥予測システムの予測精度を95%以上にする。	・造形後の表面形状データから欠陥の有無を予測するソフトウェアを試作し、欠陥予測システムの精度97.7%(95%以上)を達成した。
2. 高度モニタリング及びフィードバック制御機能の開発	試験研究機に実装した状態でパウダーベッド表面及び造形表面を精度10 μm以下で計測できる三次元計測機能を開発する。	・BSE（反射電子）モニタリング機能を用いて試験研究機に実装した状態でパウダーベッド表面全域の造形表面について、精度10 μm 以下の表面凹凸形状が画像化できる機能を開発した。
	フィードバック制御機能により造形プロセス中の50μm以上の大きさの欠陥率を0%とする。	・フィードバック制御機能を試験研究機に実装し、欠陥率が減少することが確認できた。プロセスマップ自動生成ソフトウェアにより最適条件を決定し、それをベースにした最適再溶融条件を採用することで再溶融フィードバック機能を適用した造形により欠陥率0%を達成した。

アウトプット目標の達成状況

電子ビーム方式

研究開発項目	最終目標	達成状況
3. 積層造形部品作製のための開発・評価手法の開発	部品開発・評価手法の開発のために必要な積層造形物に関する評価データを4種類以上の金属材料について蓄積する。	・4種類の金属種（Ti-6Al-4V合金、純銅、SCM440合金、AlSi10Mg合金）について表面性状データを収集し、開発手法を用いてプロセスマップを構築した。
	積層造形部品を効率的に開発・評価する手法をユーザーが活用できる手順書として纏める。	・開発システムを用いた積層造形部品開発手順を手順書としてまとめた。

研究開発成果の副次的成果等

	副次的成果、波及効果
産業分野への波及	本事業で開発したモニタリング機能により、欠陥の有無をリアルタイムまたは造形後短時間で確認することが可能になるため、高コストな外部特性評価への依存を最小限に抑えながら、Born-qualified(造形時点で品質が保証可能)が実現でき、高い品質レベルが要求される宇宙・航空機・自動車等の産業分野への波及が期待できる。
新規参入障壁の低減	本事業で開発したプロセスマップ自動生成機能により、金属積層造形技術のノウハウや経験が十分でなくとも、高品質な部品の造形が可能になるため、金属積層造形部品の採用や金属積層造形市場への新規参入の障壁が低くなり、金属積層造形の加速的な普及が期待できる。

特許出願及び論文発表

レーザー方式	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度	2023年度	小計
特許出願（うち外国出願）	0	2(2)	0	1(1)	0	3(3)
論文	0	1	2	4	3	10
研究会発表・講演	0	7	12	12	10	41
受賞実績	0	0	0	0	1	1
新聞・雑誌等の掲載	0	0	0	0	0	0
展示会への出展	0	1	0	2	1	4

電子ビーム方式	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度	2023年度	小計
特許出願（うち外国出願）	0	2(2)	0	3(3)	2(2)	7(7)
論文	8	5	4	7	6	30
研究会発表・講演	2	8	2	7	2	21
受賞実績	0	1	2	1	0	4
新聞・雑誌等の掲載	0	1	0	0	0	1
展示会への出展	0	1	0	2	2	5

＜評価項目 3＞ マネジメント

（１）実施体制

※ 受益者負担の考え方

（２）研究開発計画

1. 意義・アウトカム（社会実装）達成までの道筋

※本事業の位置づけ・意義
(1)アウトカム達成までの道筋
(2)知的財産・標準化戦略



2. 目標及び達成状況

(1)アウトカム目標及び達成見込み
(2)アウトプット目標及び達成状況



3. マネジメント

(1)実施体制
※受益者負担の考え方
(2)研究開発計画

- NEDOが実施する意義
- 実施体制
- 個別事業の採択プロセス
- 研究データの管理・利活用
- ※予算及び受益者負担
- 目標達成に必要な要素技術
- 研究開発のスケジュール
- 進捗管理
- 進捗管理：事前/中間評価結果への対応
- 進捗管理：動向・情勢変化への対応
- 進捗管理：成果普及への取り組み
- 進捗管理：開発促進財源投入実績
- モティベーションを高める仕組み

NEDOが実施する意義

✓ 産業力強化

本事業の推進により、金属積層造形の基盤技術が社会実装されることで、我が国のサポーターディングインダストリーである素形材産業をはじめとするものづくり産業が高付加価値事業を獲得し、産業全体の底上げが期待される。

✓ 国際競争

金属積層造形は海外では急速に広まりつつあるが、日本は出遅れている状況であり、積層造形部品等の開発に必要な基盤技術開発に迅速に取り組む必要がある。開発された成果が早期に社会実装されることで、国際競争力の強化に大きく貢献することが期待される。

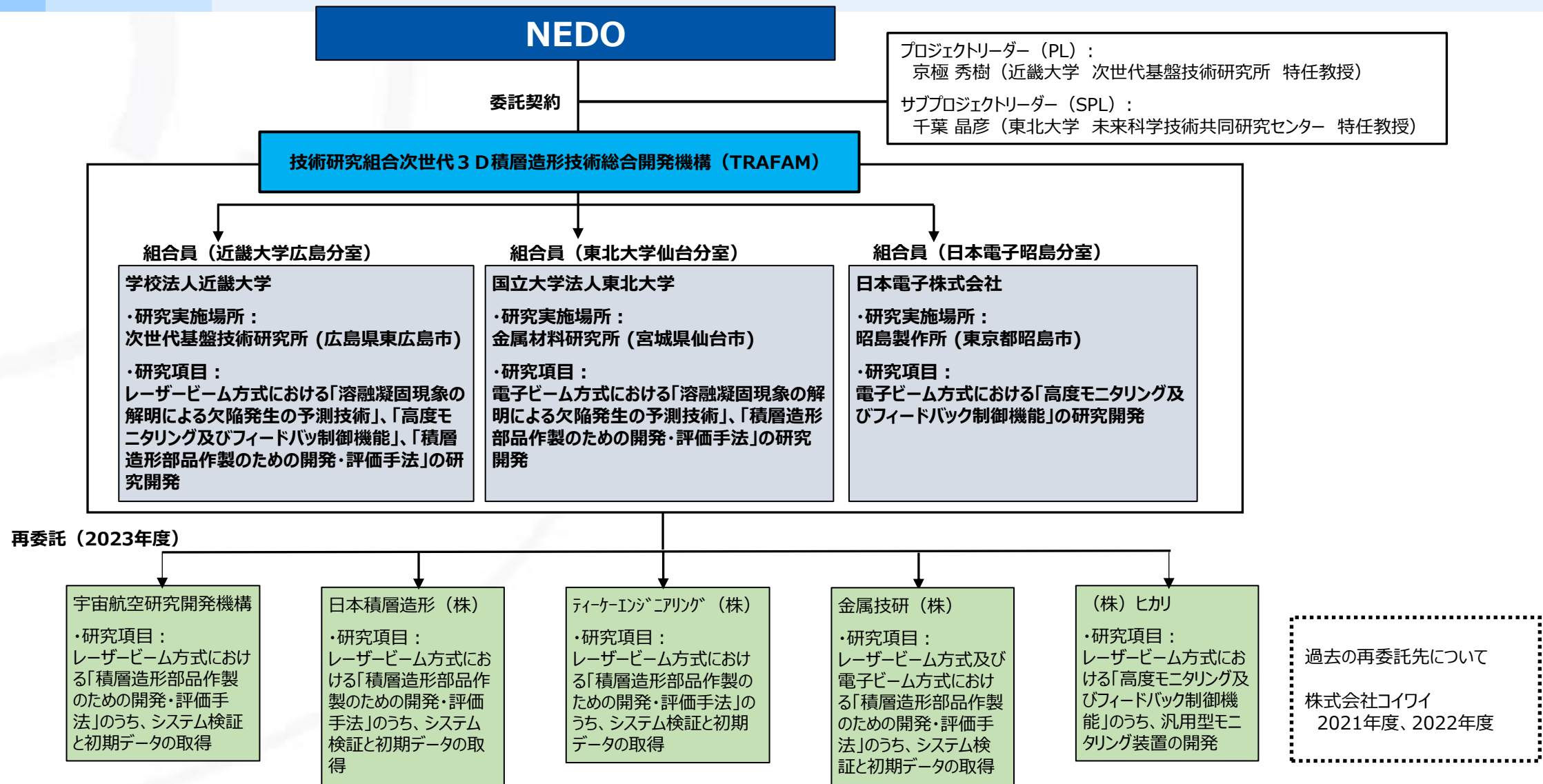
✓ 産学連携の必要性

金属積層造形に係る共通基盤技術は、産学官連携による技術、知財及びノウハウを集約しての研究開発が必須である。



NEDOが持つこれまでの知識、実績を活かして推進すべき事業

実施体制



個別事業の採択プロセス

【公募】

- 公募内容：金属積層造形部品等の品質確保及び開発の効率化のために、金属の溶融凝固現象の解明、高度な計測・機械制御技術の開発、積層造形技術における開発・評価手法の開発を行う。
- 公募予告（2019年3月1日）⇒公募（2019年4月2日）⇒公募〆切（2019年5月9日）

【採択】

- 採択審査委員会（2019年5月18日）
- 採択審査項目；NEDOの標準的採択審査項目を基に、各項目の重要度に応じた重み付け係数（重要度に応じて傾斜配分。ii.技術評価項目については、技術の優位性の観点から重要であり重み付けを最も高い3点とした。続いて、iii.実用化、事業化評価項目、i.事業者評価項目の順に重要度に応じて割合を設定）を委員採点に乗じたものを採点結果とした。
- 採択条件；採択審査委員会での、採択条件は特になし。
- 留意事項；研究の健全性・公正性の確保に係る取組；公募の際にその他の研究費の応募・受入状況を確認し、不合理な重複及び過度の集中がないか確認した。(公募要領：留意事項(17))

予算及び研究開発のスケジュール

研究開発項目	2019	2020	2021	2022	2023
溶融凝固現象の解明による 欠陥発生の予測技術の開 発	欠陥発生原因と 造形条件の関係性解明				
	各種条件・材料等によるモニタリングデータ等の蓄積				
	欠陥予測システムの プロトタイプ試作		蓄積データや機械学習を用いた 欠陥予測システムの構築		
高度モニタリング及びフィードバッ ク制御機能の開発	PB表面三次元計測技術の高度化				
		再溶融による欠陥補修技術の開発			
	欠陥予測システムと連携した フィードバック制御機能の開発		高度モニタリング・フィードバック機能の開発		
積層造形部品製作のための開 発・評価方法の開発	自動化可能なプロセスマップ探索手法の確立				手順書・システム構 築
			プロセスマップDBからの造形条件作成 手法の開発		
			ユーザー検証		
予算（億円）	1.5	1.2	2.0	3.5	3.6



進捗管理

- 外部有識者からなる技術推進委員会による進捗確認と技術的評価、サイトビジットによる開発状況確認を通じて、目標達成に向けた適切な進捗管理を実施。
- 月次の進捗管理として、登録研究員の従事日誌を確認し、また、実施者に対して予算執行状況の報告を求めることで、研究開発の課題、予算執行の遅滞などが発生していないことを確認。

会議名	対象項目	実施時期	内容
技術推進委員会	全項目	2020/10月	・ 外部有識者委員による、開発方針・推進計画、開発進捗、実用化・事業化に関する確認
技術推進委員会	レーザー	2021/4月	・ 外部有識者委員による、ユーザー検証に関する再委託先追加の審議
技術推進委員会	全項目	2022/3月 2023/3月	・ 外部有識者委員による、開発方針・推進計画、開発進捗、実用化・事業化に関する確認 ・ ユーザー検証及び汎用型モニタリング装置開発に関する再委託先追加の審議
技術推進委員会	全項目	2024/1月	・ 外部有識者委員による進捗・成果と実用化・事業化に関する確認
進捗報告会	全項目	2021/8月 2022/8月、12月 2023/7月、10月	・ 四半期毎の研究進捗状況を共有

進捗管理

会議名	対象項目	実施時期	内容
サイトビジット(東北大)	電子ビーム	2019/10月	- 進捗報告、確認、今後の予定等確認 - 要素技術研究機、日本電子2次試作機確認
サイトビジット(東北大)	電子ビーム	2020/7月	- 進捗報告、確認 - 電子顕微鏡故障対策に関する打合せ
サイトビジット(近畿大)	レーザー	2022/10月	- 装置見学・デモ、研究の進捗確認 - 国内における積層造形技術の普及について、意見交換
サイトビジット(日本電子)	電子ビーム	2023/8月	- 装置見学・デモ、研究進捗報告、確認 - 実用化・事業化に向けた打合せ
サイトビジット(近畿大)	レーザー	2023/9月	- 装置見学・デモ、進捗報告、確認 - 実用化・事業化に向けた打合せ
サイトビジット(東北大)	電子ビーム	2023/12月	- 装置見学・デモ、進捗報告、確認 - 実用化・事業化に向けた打合せ

進捗管理：中間評価結果への対応（1／2）

評価項目	評価コメント	対応方針	対応
事業の位置付け・必要性	【1】当該技術開発は、海外においても実用化に向けて加速されており、国際競争力を維持向上させ、実用化に向けて早期の目途を得るためにも、さらなる装置技術および製造技術の蓄積が重要である。	【1】本事業で開発を進めている欠陥予測システムやインプロセスモニタリング技術等については、現時点での国際競争において優位性が確保できている。その一方で、最近では海外における当該技術開発が加速していることも認識しており、実用化の面において海外に出遅れることのないよう引き続きマネジメントに取り組んで行く。	TRAFAM技術報告会での海外報告や2022年度調査事業にて海外技術動向を把握。
	【2】CO2 排出低減の面でも積層造形は優れているため、カーボンニュートラルの観点も意識することが望ましい。	【2】金属積層技術の活用や普及によるCO2排出削減効果は既に意識しており、現在実施中の調査事業においてCO2削減効果の試算等に取り組んでいる。	2022年度実施の調査事業でCO2削減効果の試算を実施。同調査で想定した将来市場見込に基づき自動車、金型等の分野に関し試算。製品使用時、原料使用量削減、製造プロセスを通して、144.2万t-CO2の削減効果と想定。
研究開発マネジメント	【3】今後は、常に最新の海外動向をフォローし、我が国の優位性を保つために必要となるものがあれば、国の予算措置や NEDO財源等を活用した研究開発内容の追加やユーザー企業を取り込んだ体制を引き続き検討する等、より幅広い対応を期待する。	【3】NEDO財源を積極的に活用するとともに、経済産業省と連携したR5年度概算要求により、国際競争における優位性の確保を意識して柔軟に研究開発内容等の追加を検討する。 なお、ユーザー企業を引き込んだ体制については既に今年度構築しており、来年度も継続する。	ユーザー検証実施を前提とした予算獲得。研究進捗加速するため加速予算を2021年、2022年獲得。ユーザー企業を2021年以降適宜再委託先として追加

進捗管理：中間評価結果への対応（2／2）

評価項目	評価コメント	対応方針	対応
研究開発成果	【4】設定された開発ベンチマークが不明瞭であるため、積極的にユーザー目線の意見を反映し、実施計画の見直しなども提案してほしい。	【4】海外の競合装置に関する最新の情報を収集するとともに、ユーザー意見を聴取し適宜実施計画書に反映する。	TRAFAM技術報告会での海外報告、2022年度調査事業でのユーザーヒアリングにより技術動向を把握。実施計画への反映は不要と判断。
成果の実用化・事業化に向けた取り組み及び見直し	【5】社会実装する主体がどこになるのか明確でなく、実用化・事業化に向けた戦略は十分とは言えないことから、企業と関係した体制を今一度検討してほしい。	【5】・【8】レーザービーム方式の研究開発成果を事業化する企業を早急に選定し、本事業と連携した体制を構築する。また、技術研究組合内で事業化検討会を立ち上げ、具体的な戦略や計画等の検討を進める。(補足参照)	2022年度からレーザー方式実用化・事業化加速するため、汎用モニタリングシステム開発のため再委託先を追加。2022-2023年に開発し、2024年度以降実用化・事業化を加速。
	【8】研究開発成果が全て得られてから事業化を進めるのではなく、本事業を通じて開発したもののから順次市場に投入していくことも検討頂きたい。		
	【6】市場やユーザーのニーズを広く把握した上で、そのニーズと現状の技術レベルとの間のギャップの分析や課題の対応策など、検討すべき点が多いといえよう。	【6】技術研究組合内のユーザー会を活用してユーザーニーズの収集と分析、課題抽出等を行い事業後半の研究開発に反映する。	技術研究組合内のユーザー会、2022年度NEDO調査事業などでユーザーヒアリングを実施し、課題を抽出。
	【7】今後は、実用化・事業化の加速および海外との競争力強化をより一層意識し、必要であれば財源を確保した上で研究開発等を前広に追加検討して頂きたい。	【7】NEDO財源を積極的に活用するとともに、経済産業省と連携したR5年度概算要求により、実用化・事業化の加速や海外との競争力強化を意識して柔軟に研究開発内容等の追加を検討する。	ユーザー検証を前提とした予算獲得。研究進捗加速するため加速予算を2021年、2022年獲得。

進捗管理：中間評価結果への対応（実用化・事業化取組）

＜中間評価への対応＞

- ・「事業化への対応が不十分」との指摘に対する対応策



汎用型モニタリング装置の開発による
実用化研究開発



＜課題＞

- ・研究機は、高度モニタリング用で、汎用型モニタリング装置として利用できない



＜2022～2023年度の対応＞

- ・汎用型モニタリング・フィードバックシステムを開発し、要素技術研究機を利用して検証を行う

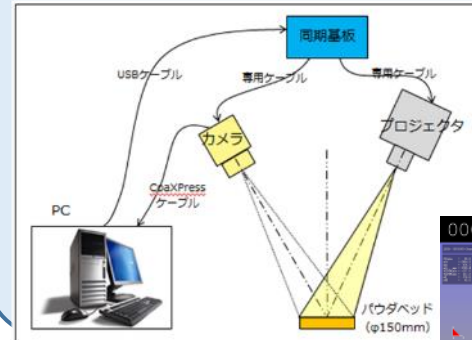


2024年度以降の事業化に対応

【汎用型モニタリング・フィードバックシステム】 （再委託先：ヒカリ）

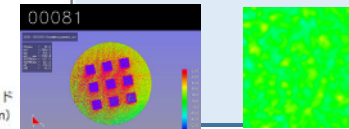
- ・高度モニタリングシステムとの比較検討
- ・パウダーベッド表面性状計測
- ・造形面表面性状計測

CMOSカメラとプロジェクタの
一体型システムの開発



【基本仕様】

- ・測定視野：200 mm×200 mm
- ・高さ分解能：10 μm以下



【2022年度】

1. 汎用型モニタリング装置の試作
 - ・汎用型モニタリング装置の試作
 - ・処理ソフトウェアの開発

【2023年度】

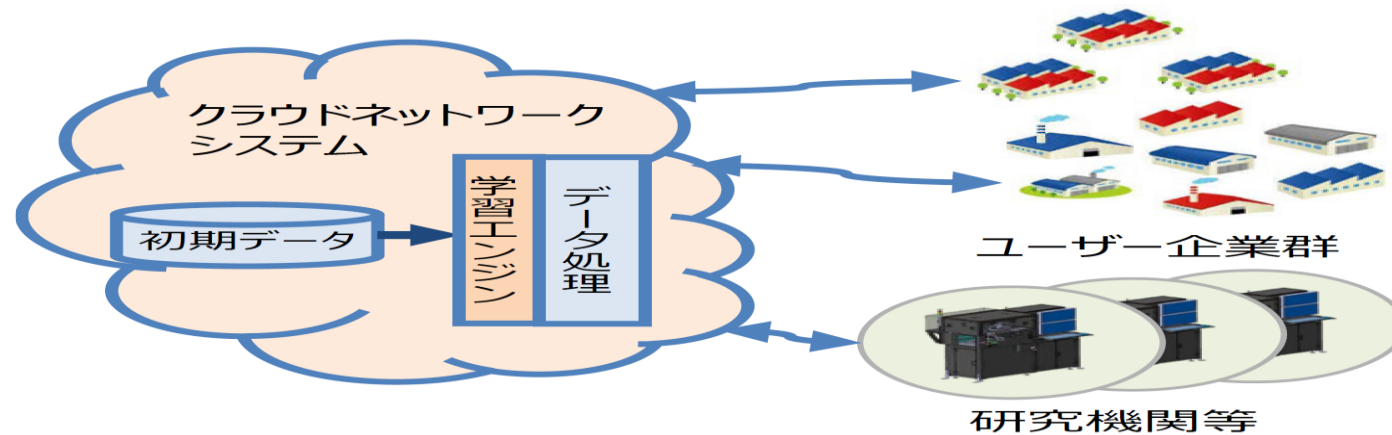
1. 要素技術研究機へ搭載した汎用モニタリング装置の検証
 - ・欠陥予測システムとの連携・検証
2. 汎用型モニタリング・フィードバックシステム開発・検証



進捗管理：成果の実用化・事業化に向けたマネジメント

- 本事業成果の実用化・事業化を加速する取り組みとして、これまでの研究開発の進捗状況を踏まえ、**2021年度からユーザー企業による検証を追加**した。
- ユーザー検証では、金属積層造形における欠陥の最小化を実現するための造形条件を容易に作成するシステムの検証と初期データの蓄積を行う。
- NEDOは、2021年度の概算要求の状況を踏まえ、**タイムリーな開発促進財源等の投入を行いユーザー検証の実現**に結び付けた。また、検証を効果的に進めるため、**ユーザーの選定を主体的に検討**した。

【システム検証・データ蓄積イメージ】



出典：令和3年度経済産業省予算のPR資料

進捗管理：動向・情勢変化への対応

- コロナ禍でのニューノーマルな対応として、2021年度からリモートでの進捗報告会を四半期毎に実施することで進捗管理の強化を実施。最終年度後半については、月次で進捗状況を確認。
- 2020年5月下旬、東北大学分室の電子顕微鏡が故障（老朽化のため修理不能）した際、コロナ禍の混乱で委託先だけでの解決が困難であったため、NEDOが自らナショプロ向けリースサービスを探し出し、委託先とリース業者との橋渡しをして研究開発の中断を回避。
- 単年度契約の汎用型モニタリング装置開発担当の再委託先ヒカリについて、次年度シームレスに研究継続を可能にするため、前倒しによる体制変更への対応を実施。
- 2023年度、コロナ禍開け後に、改めて進捗状況確認と実用化についての意見交換のため、各研究分室のサイトビジットを3件実施。
- 2023年度、ユーザーに対するヒアリング調査結果から、研究対象の金属種として銅合金を追加することを踏まえ、レーザー方式の研究加速のため、研究員1名増員の相談があり、対象者の現勤務先との関係を考慮した最適な登録方法にて対応を実施。

進捗管理：成果普及への取り組み

- 2021,2023,2024年 nano-tech NEDOブース内にてパネル展示及びビデオ紹介。
- 2022年JIMTOF TRAFAMブースにて成果を展示。2024年11月のJIMTOFで、本プロジェクトの成果報告を実施予定。



TRAFAAM展示ブース(2023年 Nano-tech)

- NEDO出展ブース内にて、TRAFAAMも展示。
- 現プロジェクトの事業概要や前プロジェクト（次世代型産業用3D）成果のパネル、ビデオによる紹介や造形サンプルの展示を実施。
- TRAFAAMと日本電子の説明員が来場者に対応。



TRAFAAM展示ブース(2022年 JIMTOF)

- 現プロジェクトの事業概要や前プロジェクト（次世代型産業用3D）成果のパネル、ビデオによる紹介や造形サンプルの展示を実施。

進捗管理：開発促進財源投入実績

年度	項目	金額 (百万円)	内容	成果
2019	フィードバック制御（レーザービーム方式）	12	海外競合の研究進捗を踏まえ、スパッタ等不慮による欠陥が発生した場合の欠陥発生を防止するフィードバック機能を開発を前倒して実施。	フィードバック精度の向上と、海外競合に対する優位性の確保。
2020	欠陥予測システム	18	欠陥予測システムにおける画像データ処理の自動化、欠陥判別機能及びプロセスマップの開発。	欠陥予測システムの精度向上及びユーザー検証の効率的な実施。
2020	マルチプルモニタリング（電子ビーム方式）	19	マルチプル観察用電子顕微鏡の電子銃の改良を前倒して実施	中間目標におけるマルチプル画像化の達成。さらには、前倒しに伴う予算の戦略的運用によるユーザー検証の着実な実施。
2021	電界放出型電子顕微鏡による元素マッピング	16	原料粉末の組成変化について化学分析による、正しく欠陥のないことを評価の実施。	X線CTでの評価だけでなく、酸化物などといった異物の評価実施により、造形材の欠陥評価をより正確にかつ効率的に実施。
2022	電子ビーム方式プロセスマップ自動生成機能の汎用化	52	開発中のプロセスマップ自動生成機能から出力される各種金属のプロセス条件を、各装置仕様に合わせて最適レシピに変換する手法を開発、検証の実施。	電子ビーム方式の「欠陥予測システム」の開発の内「自動プロセスマップ生成機能」の事業化を加速。

「積層造形部品開発の効率化のための基盤技術開発事業」 (終了時評価)

2019年度～2023年度 5年間

プロジェクトの詳細説明 (公開版)

2024年9月26日

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

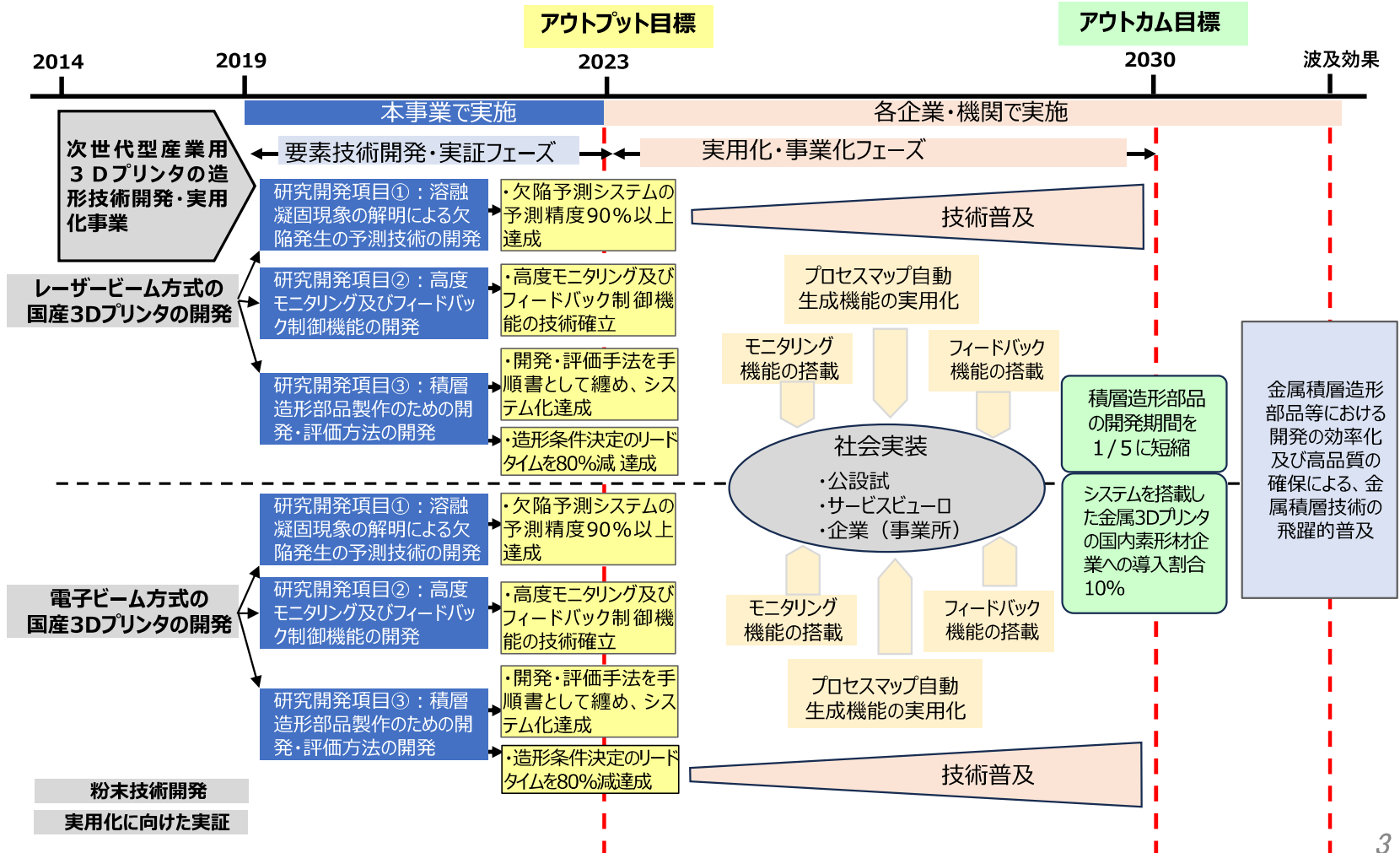
バイオ・材料部

用語集

用語	説明
積層造形	付加製造のうち造形層を積み重ねることによって3Dの造形物を実体化する加工法。
メルトプール	JIS Z3001溶接用語では、溶融池と定義されており、ここでは、レーザーあるいは電子ビームによる熱源によってできた溶融した金属のたまりをいう。
パウダーベッド	粉末床ともいい、ここでは粉末を積層し、造形を行う場所。
リコート	パウダーベッド方式の3Dプリンタにおける造形面に粉末を一定の厚みで敷き詰める動作。スキージ、レーキ等と呼ぶことがある。
エネルギー密度	造形パラメータとしてよく用いられるパラメータの一つで、ここでは体積当たりに投入されるエネルギーを示す。
パターン投影法	縞模様を対象物に投光し、その反射光を画像センサで受光し、投光と反射光のパターン変化を解析して三次元画像を生成する方法。
プロセスマップ	造形における適切な条件を見出すために使用するパラメータの関連性を示す図。パラメータとして出力と走査速度による図を使用することが多い。
スパッタ	レーザーや電子ビームを照射した際に飛散する溶融金属の飛沫。
三次元プロファイラ	ここでは、光学的手段により三次元的な表面性状を計測する装置をいう。
教師データ	機械学習の学習用に用いる正解付きのデータ。
機械学習	コンピュータがデータから学習し、分類や予測などを実施するアルゴリズムやモデルを構築する技術のこと。
BSE(反射電子)、 反射電子像	BSE(Backscattered electron)は、真空中で物質表面に電子ビームを照射した際に、固体内で散乱し、再び真空中に放出された比較的エネルギーが大きい電子。この電子の放出量は照射された物質(平均原子番号)に依存するため、その放出電子量に相当する信号を用いて画像化すると平均原子番号に依存した組成コントラストが得られる。この画像を反射電子像と呼ぶ。
スモーク現象	粉末が電子ビームで帯電し、クーロン力で反発し、飛散する現象。
チャージアップ	帯電すること。
ベースプレート	造形に用いる金属製の基板。
熱電子	高温に加熱された物質表面から放出される電子。温度が高い程その放出量が多い。

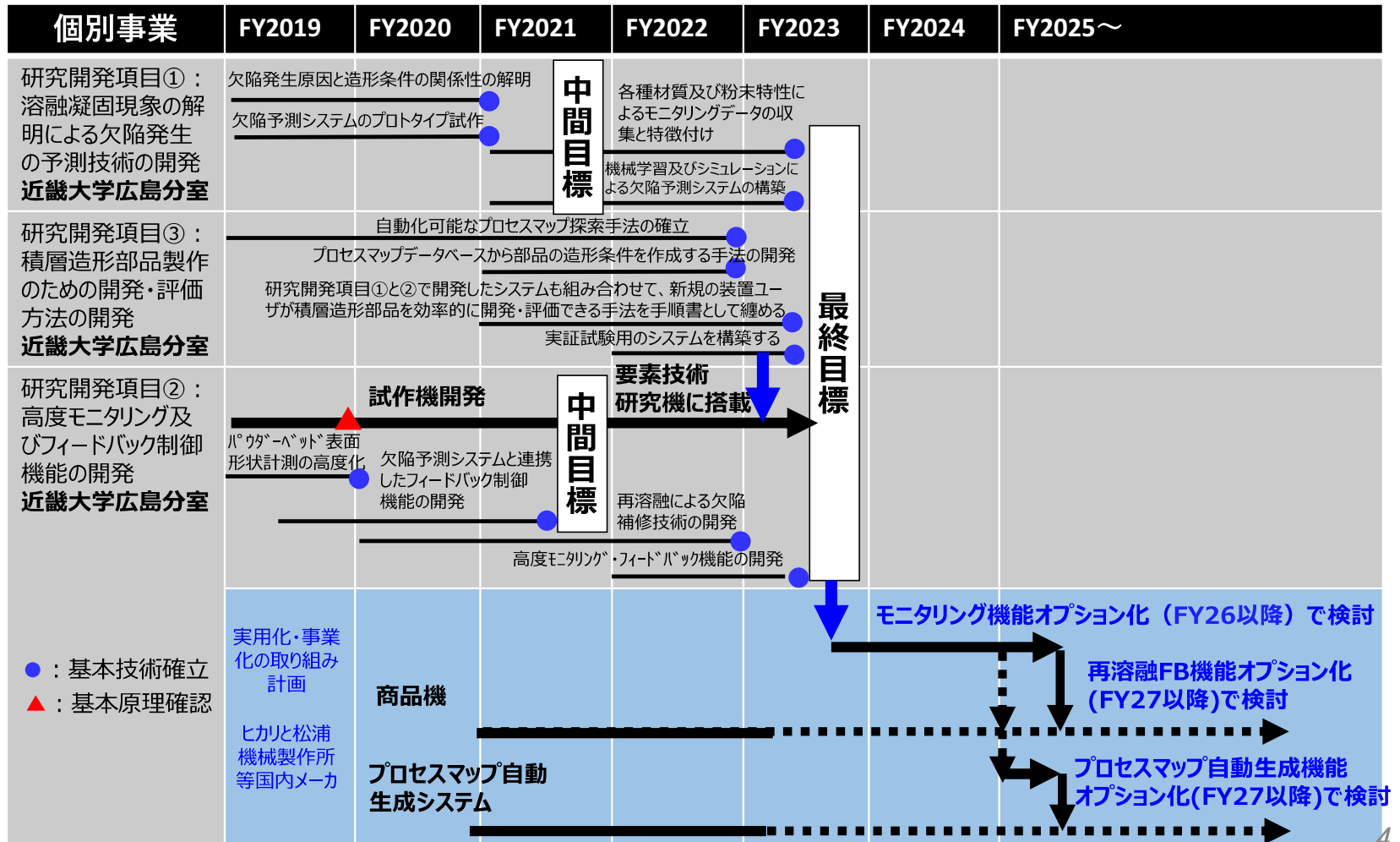
アウトカム達成に向けた戦略・具体的取組

研究開発項目：レーザービーム方式/電子ビーム方式における研究開発



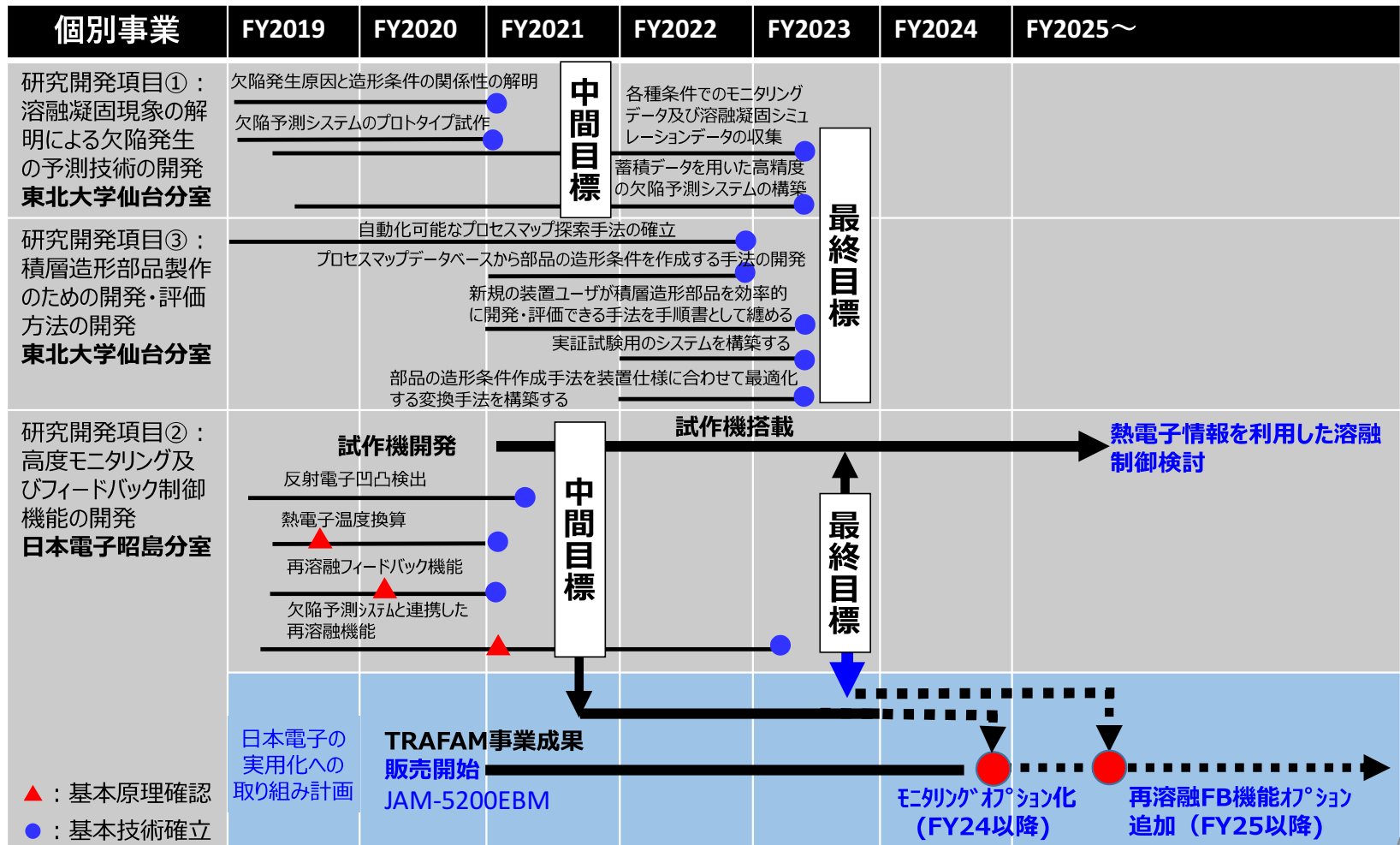
アウトカム達成に向けた戦略・具体的取組

研究開発項目：レーザービーム方式における研究開発



アウトカム達成に向けた戦略・具体的取組

研究開発項目：電子ビーム方式における研究開発



アウトカム目標の達成見込み（海外に対する優位性）

項目	海外機との比較
性能	当事業で開発した技術（表面モニタリング技術、フィードバック技術、欠陥予測技術）は、現時点の海外製品の状況（下表）と比較して、総合的に優位性があり、実用化により製品の優位性を確保できると考える。特に、造形面の表面状態からプロセスマップを自動的に生成する機能は他社にはない機能である。
コスト	レーザービーム方式は、既存技術であるパターン投影(pattern projection)方式による汎用型のモニタリング方式を採用しており、他社と比較して同等レベルと予想される。 電子ビーム方式では他社にはない機能である。

金属パウダーベッド方式 3Dプリンタ各社のプロセスモニタリングの動向

メーカ	国	方式	パウダーベッド 表面モニタリング	メルトプール モニタリング	造形面 表面モニタリング	フィードバック	本事業の 優位性
本事業	日本	レーザービーム方式 電子ビーム方式	3次元(*PP) 3次元(*BSE)	あり	表面性状と欠陥 との相関	あり(再溶融) プロセスマップ自動 調整機能	—
GE Additive	米国	電子ビーム方式	2次元	なし	温度	なし	あり
EOS	ドイツ	レーザービーム方式	2次元	あり	温度	あり 次回レーザー出力調整 (Smart Fusion)	あり
Velo3D	米国	レーザービーム方式	3次元(*PP)	あり	温度	なし (パウダーベッド監視)	あり

個別にモニタリング機能を製品化しているメーカ（代表例、他に9社ある）

Zeiss (2022～)	ドイツ	レーザービーム方式	3次元(*PP)	なし	なし	なし	あり
Phase3D (2023～)	米国	レーザービーム方式	3次元(*PP)	なし	表面性状とX線CT による欠陥との相関	なし	あり

PP : pattern projection、* BSE : backscattered electron

出典：Wohlers Report 2024 P175-P186、各社HP

アウトカム目標の達成見込み（市場動向）

市場動向とアウトカム目標

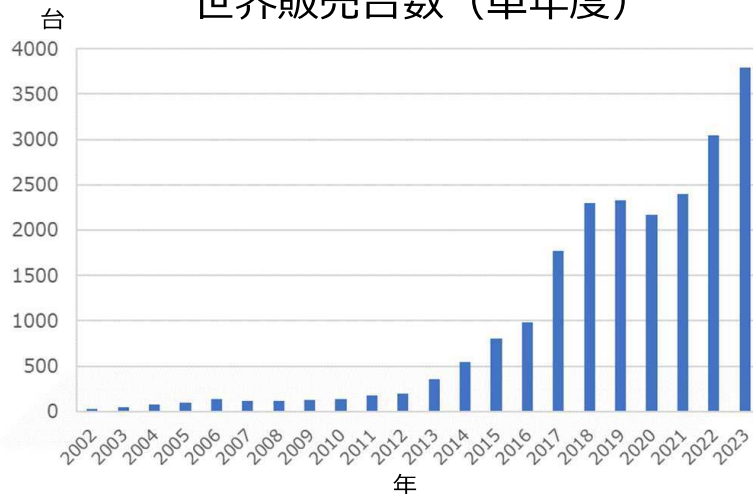
世界の金属積層造形装置の販売台数は、下表の通り増加傾向にある。この増加傾向が継続し、2030年には、単年度で1万台の販売台数、累計で7万台程度になると予想する。

現状の世界の累計販売台数約2.2万台の内、国内での販売台数(=導入台数、海外機を含む)は、現状600台程度(世界の3%程度)と推定している。

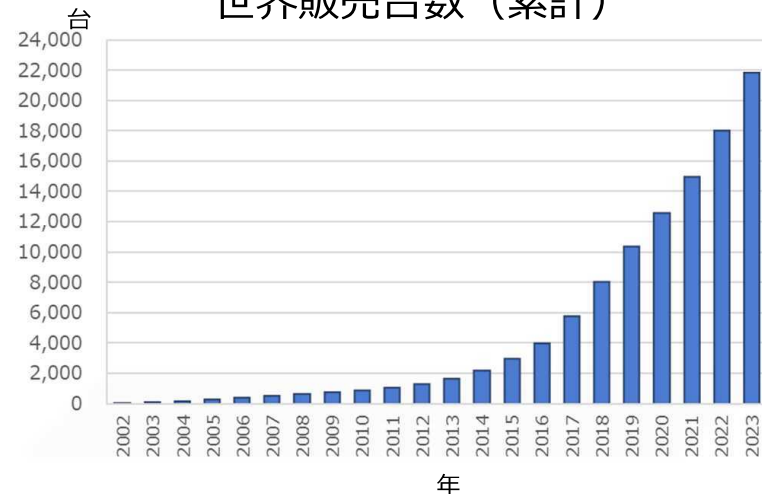
今後、国内企業の導入が加速し、世界の5%になったとすると、2024年～2030年の国内導入台数は、 $(7万台 - 2.2万台) \times 0.05 = \text{約}2400\text{台}$ 。

以上より、アウトカム目標791台は、**今後2030年までに国内で導入される3Dプリンタの1/3に、本事業で開発した技術を実装すること**を意味する。

世界販売台数（単年度）



世界販売台数（累計）



出典：Wohlers Report 2024

アウトカム目標の達成見込み

アウトカム目標	達成見込み	課題
本プロジェクトの成果により、積層造形による部品等の造形の品質の向上、造形プロセスの繰り返し安定性の確保とともに、積層造形部品製作のための開発・評価手法が確立されることで、積層造形部品の開発期間が1/5に短縮されることを目指す。	・レーザービーム方式及び電子ビーム方式で、プロセス全体での開発期間の短縮に有効な手段である プロセスマップ自動生成機能 、ならびに試行錯誤による造形回数を減らして欠陥レスの高品質製品を造形するための インプロセスモニタリング・フィードバック機能 の開発を完了し、実証システム（試作品）の導入環境に近い環境での実証（TRL6レベル）を行い、短期アウトカムが達成できることを明らかにした。	・レーザービーム方式については、今後汎用型モニタリング装置の実用化に向けた改良と、プロセスマップ自動生成機能およびインプロセスモニタリング・フィードバック機能のオプション化を行い、製品・システムレベルでの実証（TRL7レベル）を行う必要がある。 ・電子ビーム方式については、モニタリング機能については、オプション化に向けて製品化が進んでいる。今後は、プロセスマップ自動生成機能およびインプロセスモニタリング・フィードバック機能の製品レベルでの実証、製品化を行う必要がある。
上記により、2030年度における本システムを搭載した金属3Dプリンタの国内素形材企業への導入割合10%（事業所ベース）を目指す。	・2030年度までには、我が国における装置導入も大幅に増加していき、高品質で安定した製品製造技術の確立がますます要求されるようになると予測され、インプロセスモニタリング・フィードバック機能の導入は必須となると予測される。現状では、別紙に示す通り、海外製品でも有効なインプロセスモニタリング・フィードバック機能は開発されておらず、TRAFAMユーザからも本システムの実用化が期待されている。実用化されれば導入が進むと考える。	・レーザービーム方式については、開発システムを製品化するとともに、成果を公開し、オプション搭載をする3Dプリンタメカを開拓していく必要がある。 ・電子ビーム方式については、本事業に参画している日本電子株式会社が開発技術を実装して実用化する計画であり、今後の事業化により、導入事業所の増加が期待される。

副次的効果および波及効果

項目	波及効果
モニタリング機能	現状は、高い品質レベルが要求される宇宙・航空機・自動車等の造形物では、造形後にX線CT等により欠陥がないか確認が必要である。本事業で開発したモニタリング機能により、欠陥の有無をリアルタイムまたは造形後短時間で確認することが可能になるため、高コストな外部特性評価への依存を最小限に抑えながら、Born-qualified(造形時点で品質が保証可能)が実現でき、大幅なコストダウンになる可能性がある。
プロセスマップ自動生成機能	現状は、新規の造形を行う場合、装置・使用材料粉末・造形物形状等毎に、最適条件を探索するためのプロセスマップの作成に約5～10週間要している。 本事業で開発したプロセスマップ自動生成機能は、この作業を、自動でほぼ一晩で完了することも可能な技術であり、大幅な造形コストの低減ができるほか、適用材料の増加や、同材種でも異なる粉末の利用が増えることが予測されることから、本機能の有効性は非常に高く、その波及効果は非常に大きい。 また、本機能の信頼性を向上させることで、金属積層造形技術のノウハウや経験が十分でなくとも、高品質な部品の造形が可能になるため、金属積層造形部品の採用や金属積層造形市場への新規参入の障壁が低くなり、金属積層造形の加速的な普及が期待できる。
モニタリング・フィードバック機能	現状は、造形後に外部特性評価によって欠陥がないか確認しているため、そこで欠陥が発見され、検討の結果、当該部品の要求品質（機械特性：引張強度、疲労強度等、物性：欠陥、空孔率等）を満足しないと判断された場合は、その部品は廃却され、再造形が必要となる。 モニタリング・フィードバック機能を用いることで、欠陥レスの造形が可能となり、外部特性評価不要なBorn-qualified部品の一発造形が実現でき、大幅なコストダウンに繋がる可能性がある。

個別事業ごとの目標と根拠(1/2)

個別事業	最終目標	根拠
研究開発項目①：溶融凝固現象の解明による欠陥発生予測技術の開発	欠陥発生予測システムの予測精度 95%以上	欠陥率0%の実現には、欠陥予測システムの予測精度が高い必要があるため、最終目標を 95%以上とした。
研究開発項目②：高度モニタリング及びフィードバック制御機能の開発 (レーザービーム方式)	積層造形プロセスにおける粉末敷き詰め状態及び造形面について、精度 10μm以下で凹凸を計測	粉末の粒形が30~75μm程度であることを考慮して、粉末敷き詰め状態及び造形面を精度良く計測するために10μm以下とした。
	造形面の欠陥部分を再溶融する機能を開発	不慮の現象で欠陥が発生した場合に再溶融機構が必要になるため。
	フィードバック制御機能による造形プロセス中の50μm以上の欠陥率 0%	X線CTで計測可能な50μm以上を対象として欠陥率 0 %とした。

個別事業ごとの目標と根拠(2/2)

個別事業	最終目標	根拠
研究開発項目②：高度モニタリング及びフィードバック制御機能の開発（電子ビーム）	試験研究機に実装した状態で積層造形プロセスにおける粉末敷き詰め状態及び造形面について、精度10μm以下で凹凸を計測	粉末の粒径が45～110μm程度であること及び平坦な造形面の性状判定から欠陥予測することを考慮して、粉末敷き詰め状態及び造形面を精度良く計測するため、最終目標を10μm以下とした。
	フィードバック制御機能による造形プロセス中の50μm以上の欠陥率 0%	X線CTで計測可能な50μm以上を対象として欠陥率 0 %とした。
	電子銃異常やチャージアップ発生を抑制・検知し装置を一時停止する機能の実装	電子銃異常やチャージアップの発生が欠陥に繋がるため、また粉末のチャージアップによって突発的に発生する粉末飛散(スモーク)は放置すると装置に損傷を与えるため、異常検知機能が必要。
研究開発項目③：積層造形部品製作のための開発・評価方法の開発	開発・評価手法の開発のために必要な積層造形物に関する評価データを、金属材料4種類以上について蓄積する。	実際に多様な金属部品開発にも応用できるように、複数の種類の金属種でのデータ蓄積も重要であるため、最終目標として4種類以上とした。

個別事業ごとの目標達成状況

研究開発項目：レーザービーム方式における研究開発(1/2)

個別事業	目標 (2024年3月)	成果 (2024年3月)	達成度	達成の根拠／ 解決方針
1. 溶融凝固現象の解明による欠陥発生の予測技術の開発	・インコネル718、チタン合金、ステンレス鋼及びアルミニウム合金の4種類以上の評価データを取得する。	・試験研究機を改良して、インコネル718合金、Ti-6Al-4V合金、SUS316合金、AlSi10Mg合金に加えて銅合金を対象として、リアルタイムでメルトプール、パウダーベッド及び造形表面の画像データを収集した。また、造形体の密度及び欠陥状況をX線CTにより収集した。	◎	・5種目となる銅合金データを取得したため、大幅達成と評価。
	・欠陥予測システムの予測精度を95%以上にする。	・試験研究機による上記教師データを用いて、機械学習を利用した欠陥予測システムを開発し、予測精度(再現率)95%以上を達成した。 再現率(Recall)：実際に欠陥であったものの内、欠陥と予測できた割合	○	・再現率0.97で、目標達成した。
2. 高度モニタリング及びフィードバック制御機能の開発	・フィードバック制御機能により造形プロセス中の50μm以上の大きさの欠陥率を0%とする。	・試験研究機により、収集した造形表面の画像データを用いて表面性状パラメータを計算し、50μm以上の大きさの欠陥率0%を満足する特定の表面性状パラメータを見出し、フィードバックのための再溶融による欠陥補修機能を開発した。 ・試験研究機を用いて、ユーザ実証によるフィードバックのための欠陥補修機能を検証し、その有効性を確認した。 ・実用化のための汎用型モニタリング装置を開発し、試験研究機用のシステムを改良して搭載し、モニタリング・フィードバック機能の有効性を確認した。	○	・開発した汎用型モニタリング装置にフィードバック制御機能を付加し、ユーザ実証（造形）を行い、目標の50μm以上の欠陥率0%を達成した。

個別事業ごとの目標達成状況

研究開発項目：レーザービーム方式における研究開発(2/2)

個別事業	目標 (2024年3月)	成果 (2024年3月)	達成度	達成の根拠／ 解決方針
3. 積層造形部品作製のための開発・評価手法の開発	開発・評価手法の開発のために必要な積層造形物に関する評価データを、金属材料4種類以上について蓄積する。	汎用型モニタリング装置によりInconel718合金、Ti-6Al-4V合金、SUS316L合金、AlSi10Mg合金に加えて銅合金についても、リアルタイムでメルトプール、パウダーベッド及び造形表面の評価データを蓄積した。	◎	・5種目となる銅合金データを取得したため、大幅達成と評価。
	欠陥予測システムと高度モニタリング・フィードバック制御機能、ならびにプロセスマップ探索手法を用いて積層造形部品を効率的に開発・評価する手法をユーザが活用できる手順書として纏め、システム（ソフト）化する。本システムおよび手順書を用いて、造形条件決定のリードタイムを1/5（1-2週間）に短縮する。	試験研究機による欠陥予測システムと高度モニタリング・フィードバック制御機能、ならびにプロセスマップ自動生成機能を開発した。加えて、2022年度より実用化のための汎用型モニタリング装置の開発を行い、高度モニタリング・フィードバック制御機能、ならびにプロセスマップ自動生成機能を有するシステムを開発した。最終的に汎用型モニタリング装置による4社のユーザ造形品の造形を行い、開発した機能の有効性を確認し、ユーザが活用できる手順書として纏めた。 汎用型モニタリング装置におけるプロセスマップ自動生成機能の開発により造形条件決定のリードタイム1/5を達成。	○	・ユーザ実証により、開発した各機能の有効性を確認できた。 ・造形条件決定のリードタイム6週間(w)に対し、プロセス開発0.6w + 試作0.44w = 1.04wとなり、目標の1/5以下を達成した。

個別事業ごとの目標達成状況

研究開発項目：電子ビーム方式における研究開発(1/3)

個別事業	目標 (2024年3月)	成果 (2024年3月)	達成度	達成の根拠／ 解決方針
1. 溶融凝固現象の解明による欠陥発生予測技術の開発	・欠陥予測システムの予測精度を95%以上にする。	・Ti-6Al-4V合金パウダーベッドの放射率を計測し、シミュレーションによりTi-6Al-4V合金パウダーベッドの溶融凝固を解析した。 ・表面形状のデータから欠陥の有無を予測するソフトウェアとパウダーベッドの充放電シミュレーションソフトウェアを試作、予測精度(再現率)95%以上を達成した。 再現率(Recall)：実際に欠陥であったものの内、欠陥と予測できた割合	○	・熱放射率は高温で顕著に増加することを明らかにした。 ・再現率0.977で、目標達成した。
2. 高度モニタリング及びフィードバック制御機能の開発	・試験研究機に実装した状態でパウダーベッド表面及び造形表面を精度10 μm以下で計測できる三次元計測機能を開発する。	・光学式、及び電子ビーム方式の2方式で10μm以下の表面凹凸形状を反映した画像が得られる機能を開発し、目標達成した。 ・装置構成の簡素化/コスト低減を考慮し、電子ビーム方式のモニタリング(BSE像観察)に注力し、更なる高度化を図った。	○	・ベースプレート上に加工した10μmの段差が確認できた、及び造形中の造形表面において光学方式と同等の表面形状画像が取得できた。
	・フィードバック制御機能により造形プロセス中の50μm以上の大きさの欠陥率を0%とする。	・仙台分室で開発された欠陥予測システムを搭載し、再溶融FB機能の実機検証において、粉末ガスポア率を下回る欠陥率が確認でき、最終目標(粉末起因のガスポアを含まず)を達成した。	○	・最適条件から少しずらした造形条件でのFB制御を入れた造形において、粉末ガスポア率を下回る欠陥率が確認できた。

個別事業ごとの目標達成状況

研究開発項目：電子ビーム方式における研究開発(2/3)

個別事業	目標 (2024年3月)	成果 (2024年3月)	達成度	達成の根拠／ 解決方針
2. 高度モニタリング及びフィードバック制御機能の開発	・電子銃異常やチャージアップ発生を抑制・検知し装置を一時停止する機能を実装する。	・電子銃ロバスト性向上やパウダーベッド面シールドカバーにより、電子銃異常やチャージアップ発生(スモーク発生含む)を抑制した。 ・電子銃のアノード電流やライナーチューブ電流を検出し、電子銃異常やスモーク発生時にインターロックが働き装置を安全停止させる機能を実装した。	○	・アノード電流やライナーチューブ電流異常を検知し、安定停止を確認。またソフト的なスモーク検知も実スモークで正常動作を確認した。
3. 積層造形部品作製のための開発・評価手法の開発	・部品開発・評価手法の開発のために必要な積層造形物に関する評価データを4種類以上の金属材料について蓄積する。	・4種の合金系のデータを蓄積し、達成した。 ・Ti-6Al-4V合金でプロセスマップ探索手法を検証した。 ・純Cu、SCM440合金、AlSi10Mg合金の造形を完了した。	○	・Ti-6Al-4V合金、純銅、SCM440合金、AlSi10Mg合金のデータを蓄積し、目標達成した。
	・欠陥予測システムと高度モニタリング及びフィードバック制御機能、ならびにプロセスマップ探索手法を用いて積層造形部品を効率的に開発・評価する手法をユーザが活用できる手順書として纏め、システム(ソフト)化する。本システムおよび手順書を用いて、造形条件決定のリードタイムを1/5(1-2週間)に短縮する。	・プロセスマップ自動生成ソフトウェアを開発、動作検証完了。 ・形状による入熱への影響を計算するソフトウェアを開発。 ・熱電子画像シミュレーションソフトウェアを開発。 ・リードタイム1/5については、達成済み。	○	・開発機能、開発ソフトウェアを用いた、積層造形部品開発のリードタイムを推定したところ、従来6週間(42日)に対し、8日で可能となり、目標のリードタイム1/5を達成した。

個別事業ごとの目標達成状況

研究開発項目：電子ビーム方式における研究開発(3/3)

個別事業	目標 (2024年3月)	成果 (2024年3月)	達成度	達成の根拠／ 解決方針
3. 積層造形部 品作製のための開 発・評価手法の開 発	・小型機のレシピを中型機の レシピに変換するポストプロ セッサを開発する。	・中型機（JAM-5200EBM）によるデータ収集。 ・小型機（電子ビーム試験研究機）のビーム径計測技 術の開発。 ・小型機のプロセスマップ構築実験。 ・改善完了した小型機でデータ収集開始。ポストプロセッ サが完成し、目標達成。	○	・レシピ開発用の 小型造形機と量 産用中型造形 機とのレシピ変換 する手法を開発 したことで、量産 部品のレシピ開 発の効率化に繋 がることが確認で きた。
	・フィードバック制御造形の ユーザ実証	・ユーザ実証（フィードバック制御なし/あり）が完了。 ・FB有により欠陥を修復でき、なおかつ原料粉末のガス ポア欠陥率よりも低い欠陥率であったため、造形欠陥 0%を達成。 ・また、ユーザ所有の市販装置での造形も実施し、本PJ で開発した装置とFB機能によって造形することで、欠陥 率をより低くできることを確認。 ・バルク溶融部が本PJの対象ではあるが、大型かつ輪郭 溶融が多い部材でもユーザ実証を行い、バルク溶融部 ではなく輪郭溶融部に欠陥が生じやすい傾向にあるな どの課題を抽出した。	○	・ユーザ実証が完 了し、FBが有効 であることを確認。 目標達成した。

レーザービーム方式の成果 (アウトプット目標達成度) と意義

1. 溶融凝固現象の解明による欠陥発生予測技術の開発

開発目標	主な成果
1.各種材質及び粉末特性によるモニタリングデータの収集と特徴づけ 2.機械学習及びシミュレーションによる欠陥予測システムの構築	1. インコネル718合金、SUS316L合金、Ti-6Al-4V合金、AlSi10Mg合金、銅合金を対象として、モニタリング装置によりメルトプール、パウダーベッド及び造形面の画像データを取得し、特定の表面性状パラメータによる造形密度及び欠陥予測が可能であることを解明。 【意義】 欠陥予測への適用可能であることを示した。(TRL2) 2. モニタリング装置より得られた造形表面画像データを教師データとして、機械学習による欠陥予測システムを構築し、予測精度95%以上を達成。 【意義】 造形表面画像データにより欠陥発生予測可能なことを確認した。(TRL2)

【各種材料におけるモニタリングデータの収集と特徴づけ】

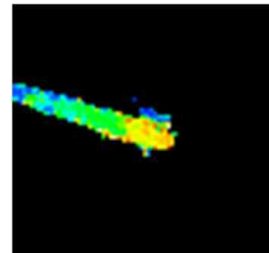
- モニタリング装置によりメルトプール、パウダーベッド及び造形面の画像データを取得可能



【装置仕様】

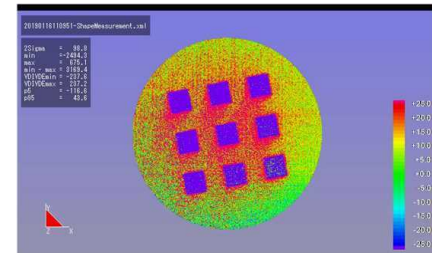
(造形部)

- ・レーザー：
1 kWシングルモードファイバレーザー
- ・造形体積：
φ150 mm×150 mm
- ・リコート：ハードブレード



【メルトプールモニタリング機能】

- ・メルトプール幅・長さ計測
- ・スパッタ数・総面積計測
- ・温度範囲：900-1600℃
- ・モニタリング：10000 fps



【表面性状モニタリング機能】

- ・パターン投影法
- ・表面性状パラメータ自動計測機能
- ・高さ分解能：10 μm以下

図1-1 レーザー試験研究機の外観と画像取得状況

レーザービーム方式の成果 (アウトプット目標達成度) と意義

1. 溶融凝固現象の解明による欠陥発生予測技術の開発

【表面性状パラメータと密度 (内部欠陥) の相関】

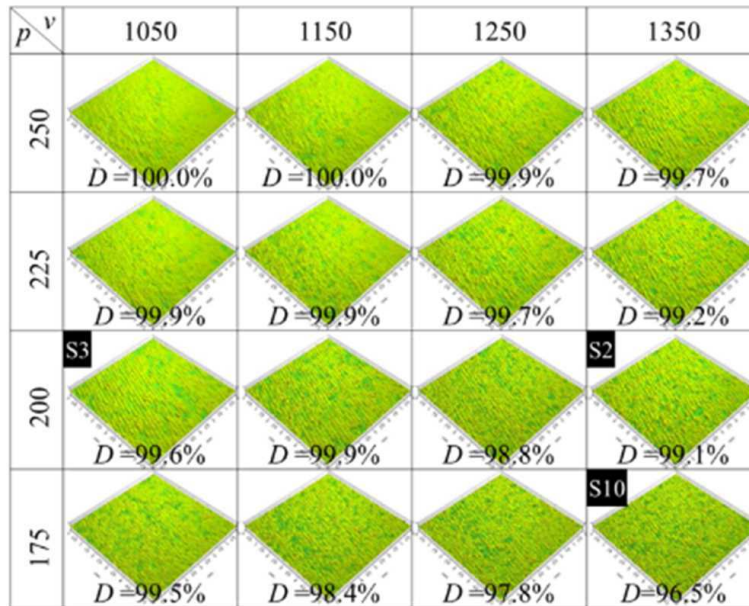


図1-7 表面性状と造形密度の関係

- 三次元プロファイルの計測結果から、取得できた表面性状パラメータ35個のうち、**表面の突出谷部深さSvkや二乗平均平方根高さSqが造形密度との相関が高く、表面性状パラメータを用いて造形密度の予測が可能**であることがわかった。

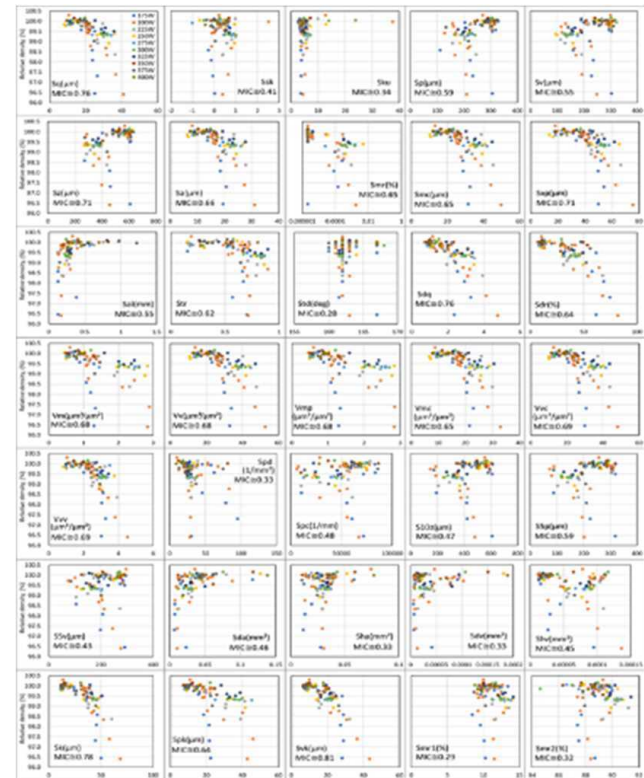


図1-8 表面性状パラメータと造形密度の相関 (ISO 25178-2)

レーザービーム方式の成果 (アウトプット目標達成度) と意義

2. 高度モニタリング及びフィードバック制御機能の開発

開発目標	主な成果
1. 高度モニタリング・フィードバック (FB) 機能の開発 2. 汎用型モニタリングFB機能の開発	1. レーザー試験研究機により、フィードバック機能として表面性状パラメータによる欠陥率0%を満足する再溶融条件の閾値を決定し、造形面の欠陥部分を再溶融する機能も開発して、インプロセスモニタリング・フィードバックシステムを構築した。 2. 2023年度に、汎用型モニタリング装置を要素技術研究機に実装し、インプロセスモニタリング・フィードバック機能の動作確認を行い、ユーザ実証により、その有効性を確認できた。 【意義】要素技術研究機での機能の有効性を確認した。(TRL6)

(1) 汎用型モニタリングFB装置の実装 (2023年度)



図2-1 汎用型モニタリング装置を実装した要素技術研究機の外観

レーザービーム方式の成果 (アウトプット目標達成度) と意義

3. 積層造形部品作製のための開発・評価手法の開発 1

開発目標	主な成果
1. 新規装置ユーザが積層造形部品を効率的に開発・評価する手法(ソフト)の開発及びスタンドアロンで実証し、手順書として纏める。 2. ユーザ企業や研究機関等との間で造形評価の実証試験を行うために必要となるシステム構築を行い、検証する。	1. 要素技術研究機に実装したプロセスマップ自動生成システムの有効性を確認できた。IN718合金、SUS316L合金、Ti-6Al-4V合金、AlSi10Mg合金及び銅合金のプロセスマップを作成した結果、IN718合金、SUS316L合金、Ti-6Al-4V合金では精度よく最適造形条件を予測できたが、AlSi10Mg合金、銅合金ではさらに精度向上が必要である。 2. ユーザ企業による実証試験を実施するため、ユーザ企業4社(金属種5種)の3DCADデータから造形データを作成し、プロセスマップ自動生成機能およびモニタリング・フィードバック機能の有効性を確認できた。 【意義】プロセスマップ自動生成による最適造形条件適用による高密度化と汎用型モニタリング・フィードバック機能により、50μm以上の大きさの欠陥を抑えた高品質な部品の造形が可能であることを確認(TRL6)⇒事業化への第一歩 3. 各種機能について手順書として纏めた。

(1)キューブ試験片の作製とプロセスマップ自動生成用データの収集 (IN718合金)

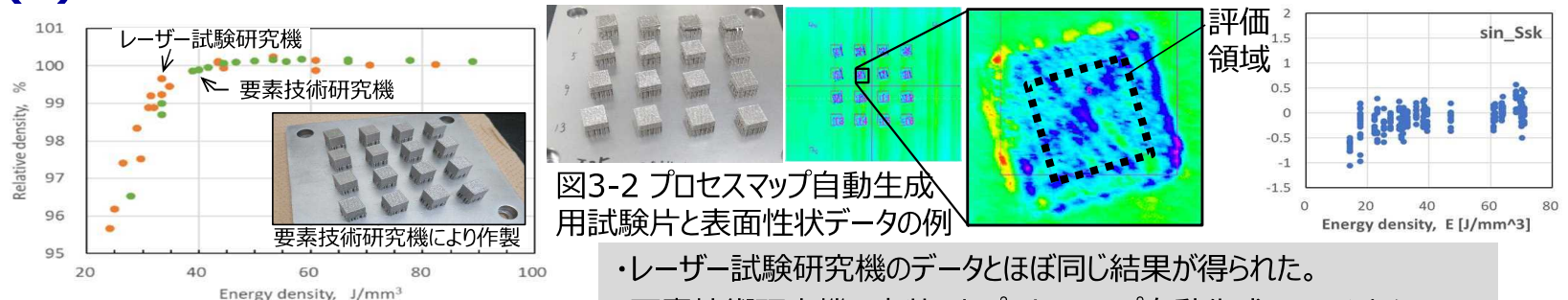


図3-1 アルキメデス法による相対密度とエネルギー密度の関係

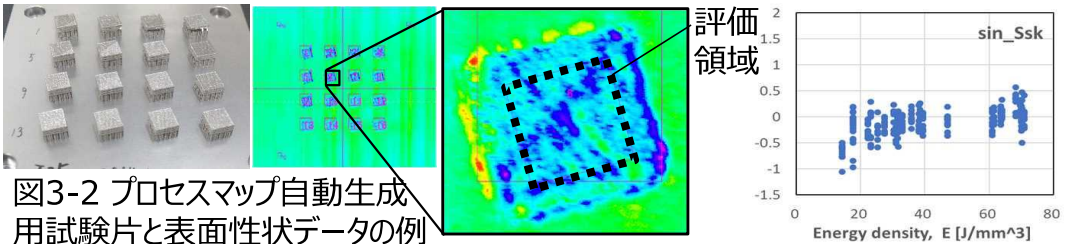


図3-2 プロセスマップ自動生成用試験片と表面性状データの例

- ・レーザー試験研究機のデータとほぼ同じ結果が得られた。
- ・要素技術研究機に実装したプロセスマップ自動生成システムから各種合金における表面性状データを取得できた。

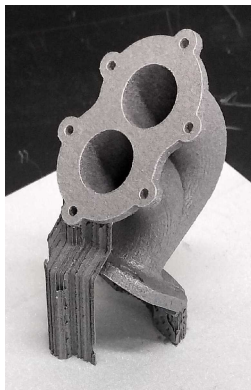
レーザービーム方式の成果 (アウトプット目標達成度) と意義

3. 積層造形部品作製のための開発・評価手法の開発 2

3. 開発目標	主な成果
3. 欠陥予測システムと高度モニタリング及びフィードバック制御機能、ならびにプロセスマップ探索手法を用いて積層造形部品を効率的に開発・評価する手法をユーザが活用できる手順書として纏め、この手順書を用いて、造形条件決定のリードタイムを1/5 (1-2週間) に短縮する。	1. 現状の積層造形部品開発期間について、TRAFAMユーザ会にて確認したところ、検証対象部品 (下記) で、11週間が見込まれることが判った。このうち本事業の範囲である「造形条件決定のリードタイム」は6週間を見込む。 2. 開発したプロセスマップ自動生成機能およびフィードバック制御機能により、造形条件決定のリードタイムを1.04週間 (1/6) にすることができた。 【意義】アウトカム目標(積層造形部品開発期間を1/5に短縮)達成に繋げることができる。(TRL5)

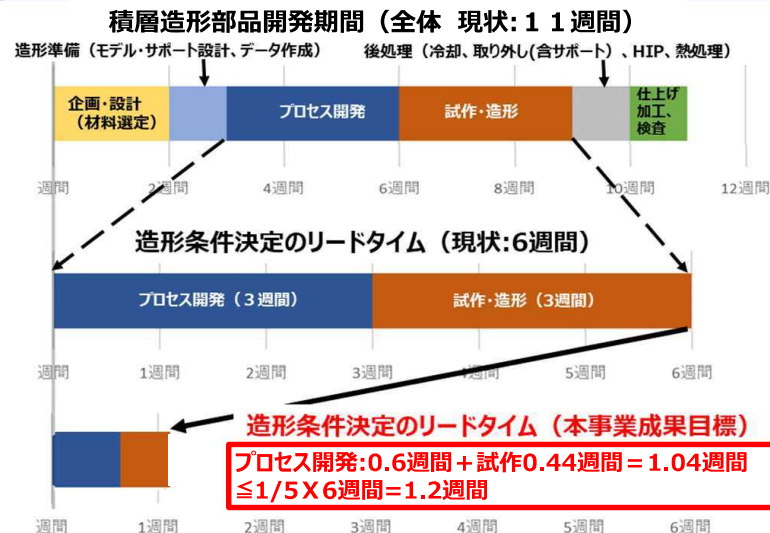
検証対象部品

配管部品 (マニホールド)



造形物仕様：
 大きさ：高さ120mm
 材料：AlSi10Mg
 造形条件等：
 造形時間：約12時間

図3-2 積層造形部品の製造リードタイム



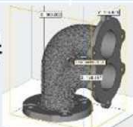
レーザービーム方式の成果（アウトプット目標達成度）と意義

4. ユーザ造形による実証実験（2023年度）

【ユーザ実証の結果】

⇒ユーザ4社のご協力により4種類のモデルを提供頂き、汎用型モニタリング・フィードバックシステムを搭載した要素技術研究機により造形。

■ 2023年度ユーザ造形 造形物一覧

ユーザー	材質	IN718	SUS316L	Ti64	AlSi10Mg	Cu合金
A社	航空宇宙分野 (ロケットエンジン部品)					
B社		輸送機器分野			輸送機器分野	
C社				航空宇宙分野		
D社						電気機械器具分野 (高周波コイル) 

電子ビーム方式の成果（アウトプット目標達成度）と意義

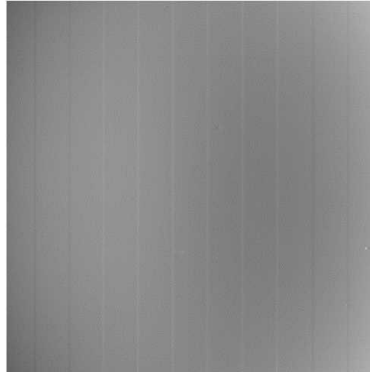
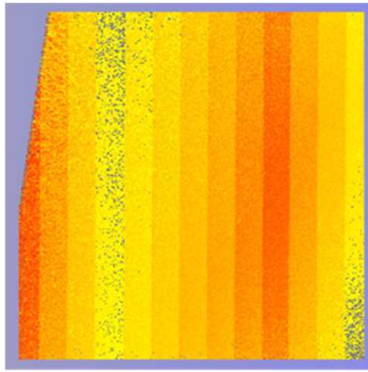
1. 溶融凝固現象の解明による欠陥発生予測技術の開発

開発目標	主な成果
1. 欠陥発生原因と造形条件の関連性の解明	1. Ti-6Al-4V合金と純銅、AlSi10Mg合金の熱放射率を測定し、各材料の熱放射率を明らかにした。 【意義】 各材料の溶融しやすさ、造形温度維持のしやすさの指標となるデータが得られた。(TRL1)
2. モニタリングデータ及び溶融凝固シミュレーションデータの収集。	2. 観察用電子ビームを用いたモニタリングデータの収集および溶融凝固シミュレーションデータを収集した。 【意義】 粉末の溶融凝固挙動を電子ビームを用いて直接観察した世界初のモニタリングデータを得た。また、シミュレーションによる電子ビーム方式の長所を明らかにした。(TRL1)
3. 欠陥予測システムの開発	3. 2種のBSE画像から得られる合成トポロジー画像を用いた欠陥予測システムを開発した。 【意義】 単純な形状の断面だけではなく、任意の形状の部品に対して、欠陥判別が実施でき、フィードバック制御による欠陥補修の実現に繋がる。(TRL4)

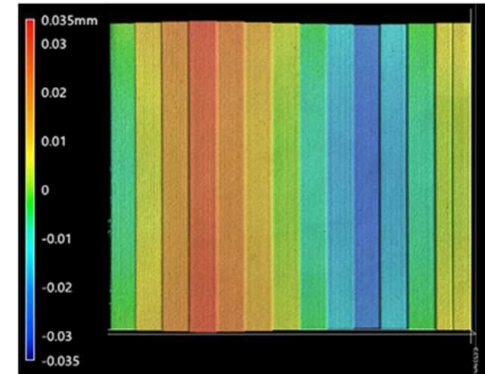
電子ビーム方式の成果 (アウトプット目標達成度) と意義

2. 高度モニタリング及びフィードバック制御機能の開発 1

開発目標	主な成果
1. 試験研究機に実装した状態でパウダーベッド表面及び造形表面を精度10 μm 以下で計測できる三次元計測機能を開発する	パウダーベッド表面及び造形表面の高精度モニタリング： ・ 光学式、及び電子ビーム方式の2方式で10μmの段差が測定できることを確認した。商品機適用を考慮し、電子ビーム方式を選択した。 ・ 画像収取方法の改良、及びDF/DS/DT補正データ自動測定機能からの適切な補正データの適用による画質改善を実施。ビーム径測定により100μm程度のビーム径が得られていることが確認できた。 【意義】 欠陥予測に必要な計測精度を確保できた。(TRL5)



10 μm の段差付きベースプレートの光学方式の画像(左)、及び電子ビーム方式の画像(右)

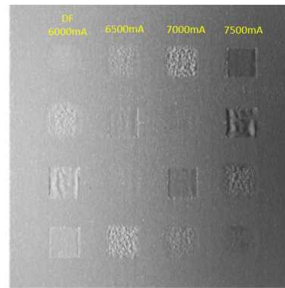
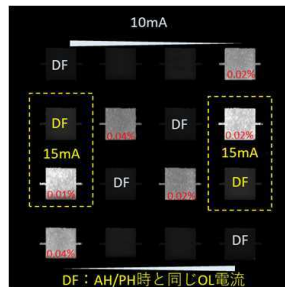


トレーサブルな標準試料で校正された3D形状測定機による段差の確認

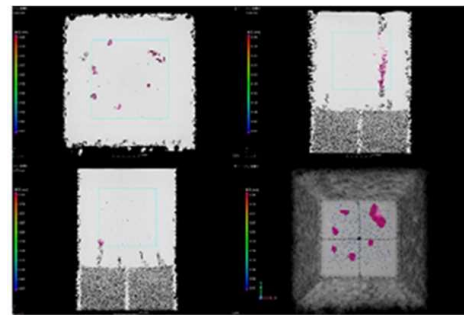
電子ビーム方式の成果 (アウトプット目標達成度) と意義

2. 高度モニタリング及びフィードバック制御機能の開発 2

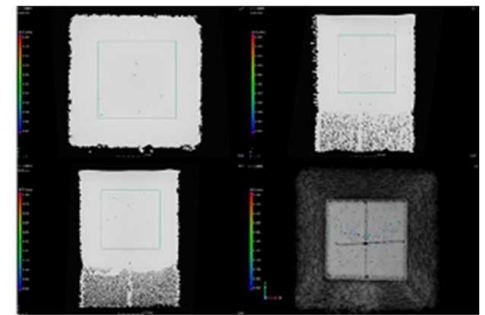
開発目標	主な成果
2. フィードバック制御機能により造形プロセス中の50 μ m以上の大きさの欠陥率を0%とする	欠陥予測システムと連携した再溶融FB機能による欠陥率0%の達成： ・ 仙台分室で開発された欠陥予測システムを搭載し、再溶融FB機能の実機検証完了。 ・ 実造形では、熱電子信号の挙動を基に最適化を図った再溶融条件で粉末ガスポア率を下回る欠陥率が確認でき、最終目標(粉末起因のガスポアを含まず)を達成。 【意義】最終目標の50μm以上の欠陥率0%を達成した。(TRL5)



熱電子検出電極に+バイアス電圧を印加した場合の溶融時の熱電子像(左)、溶融後のBSE像(右)



FBなし: 欠陥率1.10%



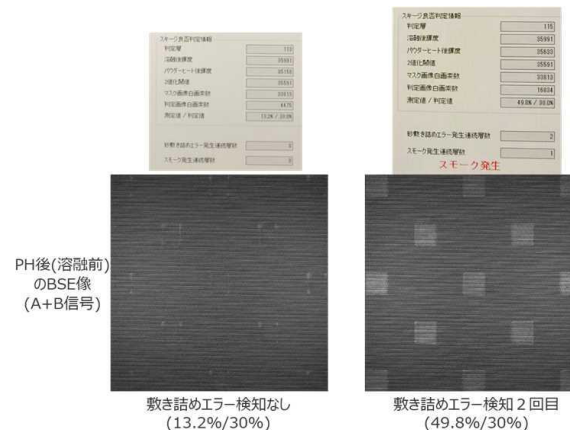
FBあり: 欠陥率0.025% 262個

欠陥予測システムと連携した再溶融FB機能の有無による欠陥率の比較

電子ビーム方式の成果 (アウトプット目標達成度) と意義

2. 高度モニタリング及びフィードバック制御機能の開発 3

開発目標	主な成果
3. 電子銃異常やチャージアップ発生を抑制・検知し装置を一時停止する機能を実装する	異常検知機能の開発： - 電子銃のアノード電流やライナーチューブ電流を検出し、電子銃異常やスモーク発生時にインターロックが働き装置を安全停止させる機能を実装した。 - またBSE画像を用い次層でリカバリーさせるためのソフト的な機能を実装し、実スモーク発生による粉末敷き詰めエラーの連続検知でスモーク発生の判断・検知されることが確認できた。 【意義】実用化・事業化に必要な基礎技術を開発できた。(TRL5)



BSE像による粉末敷き詰めエラー検知と連続検知によるスモーク判定

電子ビーム方式の成果 (アウトプット目標達成度) と意義

3. 積層造形部品作製のための開発評価手法の開発

開発目標	主な成果
1. 自動化可能なプロセスマップ探索手法の確立	1. 自動化可能なプロセスマップ探索手法を提案、実証した。 【意義】プロセスマップ探索の自動化に繋がる成果を得た。(TRL3)
2. 積層造形部品を効率的に開発・評価する手法の開発	2. 任意形状断面の入熱状態を簡易計算する方法を開発した。 【意義】種々サイズのプロセスマップを活用し、任意形状部品の条件最適化を簡易計算で実現できる可能性を示した。(TRL2)
3. 4 種合金データベースの構築	3. Ti-6Al-4V合金、純銅、SCM440合金、AlSi10Mg合金のデータベースを構築した。 【意義】4 種の合金データベースを構築したことで、同一材料の造形部品開発の効率化に繋がる。(TRL1)
4. 本システムおよび手順書を用いて、造形条件決定のリードタイムを1/5 (1-2週間) に短縮する。	4. プロセスマップ探索手法を用いた造形条件の絞り込みと絞り込んだ条件による部品造形で目標を達成できる目途を得た。 【意義】アウトカム目標(積層造形部品開発期間を1/5に短縮)達成に繋げることができる。(TRL5)
5. 装置間レシピ変換手法の開発	5. レシピ開発用の小型造形機と量産用中型造形機とのレシピ変換する手法を開発した。 【意義】レシピ開発用の小型機を用いることで、量産部品のレシピ開発の効率化に繋がる。(TRL2)
6. ユーザ実証	6. 実部品形状で欠陥予測・フィードバック制御で欠陥を減少させることに成功した。 【意義】実部品の欠陥レス造形の実現に繋がる。(TRL5-6)

参考資料 1 分科会議事録及び書面による質疑応答

研究評価委員会

「積層造形部品開発の効率化のための基盤技術開発事業」(終了時評価) 分科会 議事録および紙面による質疑応答

日 時：2024 年 9 月 26 日（木）12：30～17：15

場 所：NEDO 川崎 2301～2303 会議室（リモート開催あり）

出席者（敬称略、順不同）

<分科会委員>

分科会長	平塚 貞人	岩手大学 理工学部 教授
分科会長代理	稲垣 育宏	日鉄関西マシニング株式会社 取締役
委員	岩崎 拓也	三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング株式会社 コンサルティング事業本部 デジタルイノベーションビジネスユニット デジタルトランスフォーメーション推進部 シニアマネージャー
委員	田中 智久	東京工業大学 工学院 機械系 准教授
委員	浜岡 昭夫	株式会社日立製作所 モノづくり戦略本部 企画部 シニアエキスパート

<推進部署>

金子 和生	NEDO バイオ・材料部 部長
日高 博和	NEDO バイオ・材料部 次長
青柳 将	NEDO バイオ・材料部 部素材・プロセスユニット ユニット長
柳本 勝巳(PMgr)	NEDO バイオ・材料部 部素材・積層造形チーム チーム長
高野 学	NEDO バイオ・材料部 部素材・積層造形チーム 主査
石井 和久	NEDO バイオ・材料部 部素材・積層造形チーム 専門調査員
笠島 都	NEDO バイオ・材料部 部素材・積層造形チーム 主事

<実施者>

京極 秀樹(PL)	近畿大学 名誉教授
千葉 晶彦(SPL)	東北大学 名誉教授
池庄司 敏孝	元近畿大学 次世代基盤技術研究所 元客員准教授
山中 謙太	東北大学 金属材料研究所 准教授
青柳 健大	東北大学 金属材料研究所 助教
眞部 弘宣	日本電子株式会社 3D 積層造形プロジェクト プロジェクト長
北村 真一	日本電子株式会社 3D 積層造形プロジェクト
君島 孝尚	技術研究組合 次世代 3D 積層造形技術総合開発機構 専務理事
橋谷 道明	技術研究組合 次世代 3D 積層造形技術総合開発機構 技術推進部 部長
永島 洋	技術研究組合 次世代 3D 積層造形技術総合開発機構 技術推進部 副主任研究員

<オブザーバー>

白石 亮佑	経済産業省 製造産業局 素形材産業室 係長
藤本 辰雄	NEDO イノベーション戦略センター ナノテクノロジー・材料ユニット ユニット長
岡田 明彦	NEDO イノベーション戦略センター ナノテクノロジー・材料ユニット 主査

<評価事務局>

山本 佳子	NEDO 事業統括部 研究評価課 課長
木村 秀樹	NEDO 事業統括部 研究評価課 専門調査員
中島 史夫	NEDO 事業統括部 研究評価課 専門調査員
北原 寛士	NEDO 事業統括部 研究評価課 専門調査員

議事次第

(公開セッション)

1. 開会
2. 分科会の設置について
3. 分科会の公開について
4. 評価の実施方法について
5. プロジェクトの説明

5.1 プロジェクトの説明

意義・アウトカム（社会実装）達成までの道筋

目標及び達成状況（概要）

マネジメント

5.2 プロジェクトの詳細説明

目標及び達成状況（詳細）

5.3 質疑応答

(非公開セッション)

6. プロジェクトの補足説明
 - 6.1 レーザービーム方式の研究開発
 - 6.2 電子ビーム方式の研究開発
7. 全体を通しての質疑

(公開セッション)

8. まとめ・講評
9. 今後の予定
10. 閉会

議事内容

(公開セッション)

1. 開会

- ・開会宣言（評価事務局）

2. 分科会の設置について

- ・研究評価委員会分科会の設置について、資料1に基づき事務局より説明。
- ・出席者の紹介（評価委員、評価事務局、推進部署）

【平塚分科会長】 分科会長を拝命いたしました岩手大学の平塚です。私の専門は、材料加工であり、特に casting 工学と凝固プロセスを行っています。本日は、どうぞよろしくお願いいたします。

【稲垣分科会長代理】 日鉄関西マシニング株式会社の稲垣です。中間評価の際にも委員として携わりました。元は日本製鉄でチタン合金を主体とする材料関係を行っており、本日の内容とも関わりが深い状況です。よろしくお願いいたします。

【岩崎委員】 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティングの岩崎です。私の専門は、製造業・素形材等の先端技術調査をはじめ、最近では、積層造形を含む新しい技術を用いた現場の業務改善や DX 推進コンサルを専門としております。どうぞよろしくお願いいたします。

【田中委員】 東京工業大学の田中です。私は機械系に属しており、専門は生産技術になります。アディティブのプロセスそのものというよりは、どのように設計に使うのか、あるいは、生産システムを仮にラインの中に入れるといった場合に、どのような形で無駄なく他とのバランスを取っていけるか、こうした観点で研究をしています。よろしくお願いいたします。

【浜岡委員】 日立製作所の浜岡です。現職制としては、日立グループ全体の生産技術を見るといった立場になりますが、2005 年から 2012 年にかけて、社内ベンチャーの位置づけの下、光造形・樹脂・金属を含めた積層造形において、社内のサービス・ビューロといった形で様々な運営をしてまいりました。その後、「TRAFAM」が始まった頃より、技術推進委員として本分科会の PL である京極先生、SPL である千葉先生には、いろいろと好き勝手を言わせていただきながら一緒に行ってきております。本日は、評価委員という形になりますが、よろしくお願いいたします。

3. 分科会の公開について

評価事務局より資料 2 及び 3 に基づき説明し、議題 6.「プロジェクトの補足説明」及び議題 7.「全体を通しての質疑」を非公開とした。

4. 評価の実施方法について

評価の手順を評価事務局より資料 4-1～4-5 に基づき説明した。

5. プロジェクトの説明

- (1) 意義・社会実装までの道筋、目標及び達成度、マネジメント

推進部署より資料 5-1 に基づき説明が行われ、その内容に対し質疑応答が行われた。

- (2) 事業全体像の具体的説明

実施者より資料 5-2 に基づき説明が行われ、その内容に対し質疑応答が行われた。

【平塚分科会長】 御説明ありがとうございました。

それでは、ただいまの説明に対する御意見、御質問をお受けいたします。稲垣分科会長代理、お願いいたします。

【稲垣分科会長代理】 御説明いただき、大変理解が深まりました。今後のアウトカム達成に向け、グローバル市場の見通しを拝見した際に、自動車、航空・宇宙は非常にマस्पロで伸びていく分野だと思います。その一方、積層造形に向いていると考えるのが医療関係です。例えば、人工骨は人に応じたデザインが必要となり、積層造形が非常に適していると思います。今回のプロジェクトによる、そうした点でのアウトカム達成に向けたPR、もしくは、何か御見解があればお聞かせください。

【千葉 SPL】 御指摘の医療に関して、人工関節・股関節の場合、カスタム人工股関節が最も患者様のためにはよいと思っているものの、それが容易には認められない状況です。その背景としては、どのように品質保証をするかといった問題があります。一方、その点がしっかりと確保できたのならば、爆発的に使われていくとも思います。また、既存の加工法である溶解鍛造・型鍛造、切削は非常に時間のかかる工程であり、かつコストも非常に高いですが、今のアディティブは、鍛造品に匹敵するほどの強度も出ており、場合によっては、それ以上出せるとも考えます。しかしながら、人工股関節を例にすると、「骨頭」という大腿骨に当たる部分とステムのつなぎ目に「ネック部」というものがあり、そこを非常に細くせざるを得ないため、どうしてもその強度が足りないのではないかと懸念を多くの医師は持つようです。そうした意見が強くある中、我々が「今の鍛造品以上の強度が出せるため問題ない」と言っても、「そうであれば、しっかりとインスペクションをしてほしい」と返されます。ひとえに「骨頭系」と言っても、太さは10ミリ近くあり、そこをインスペクションするというのは、X線システムでは難しいところです。そうしたところで、まさに今回インスペクションフリーで原理的にレイヤーごとに欠陥を検出し、有無を見ていくものとなり、欠陥があれば補修をしていきます。このプロセスが確立されれば、インスペクションフリーのアディティブ製品ができ、そうすると、医療のみならず自動車部品等にも使われていくだろうと我々は期待しております。

【稲垣分科会長代理】 ありがとうございます。「Born-qualified」の話として理解いたしました。これから高齢化社会になれば、必ずニーズは大きくなると思います。実用化に向け、ぜひ引き続き注力いただければと思います。

【平塚分科会長】 それでは、岩崎委員、お願いいたします。

【岩崎委員】 研究成果がしっかり出ており、大変競争力のある技術が開発されたという印象を持ちました。質問はアウトカムの話になりますが、例えばプロセスレシピを自動でつくる技術ができ、それを世の中に広めていく場合、もともと要素技術であり、様々なところに使えることは理解ができるものの、国内の産業と考えた際には、導入しやすい領域、中長期的に一緒に横で伴走をしなければ浸透しづらい領域等の様々あると思います。そうすると、アウトカムの実現に向けて幾つかステップが出てくるのではないかと考えますが、そのあたりの見解はいかがでしょう。

【京極 PL】 御指摘のとおり、この技術の実用化までには、もう一つ行う必要があると考えます。レーザーの場合だと、実際にオプション化は容易ではなく、もう少し時間がかかると思います。一方、今、公設試には非常に多くの装置が入っているため、そうした中小企業様が多く来られるところに入れていただきながら、第一段階としてやっていけたらよいと思っています。裾野を広げなければ、この技術は絶対に広がりません。何とかして日本にこの技術を根づかせないといけないと考えている次第です。

それからもう一つ、サービス・ビューロ様は非常に苦勞をされています。一生懸命に取り組まれながらも、実際には相当困られており、この技術があれば大変役立つところがあるため、次の段階では、そうした点に加え、企業に対しては新しい製品を開発するところで、こうしたものを入れていただくと、非常にメリットをもたらすものと考えるところです。今回のプロジェクトだけではありませんが、この造形のところだけを見ると相当よい成果が出たと自負するものの、実際から言えば、もう少し設計のところも考えなければ、「よりよい」といった地点には到達し得ないと思います。次のプロジェクトは未定であるものの、そうした観点も踏まえ、日本として次のステップにいくことが重要だと私自身は考え

ます。

【岩崎委員】 具体的かつ詳細な説明をありがとうございます。理解をいたしました。アウトカム達成までの道筋の中心に「社会実装」とあり、「公設試サービス・ビューロ/企業」となっていた点で、その違いがあまり見えなかったことから伺った次第です。また、設計が必要といった点も、まさしく京極 PL のおっしゃるとおりと考えます。そのあたりも含め、今後さらに広げるための活動を検討いただければと思います。ありがとうございました。

【平塚分科会長】 参考までにお聞きいたします。最後のスライドにあるユーザーの実証において、実用品の形状で欠陥予測やフィードバックを行い、欠陥の予測にも成功されたとの説明でした。この実用品に関して、具体的にはどのような製品であり、どういった材質になるのかを教えてくださいませんか。

【京極 PL】 レーザーは、先ほど示したように一応は 5 種類に対応をしており、この分野でよく使われる IN718、Ti64、SUS316L、AiSi10Mg に加え、プラスアルファとして Cu 合金になります。電子ビームについては、Ti64、炭素鋼の SCM440C であり、アルミと純銅は、電子ビームのほうが多分得意だと思います。純銅ができれば、熱交換器等の需要があるといった話も伺っています。基本的に、広めていくために大事な材質の研究を実施しているところです。

【平塚分科会長】 ありがとうございます。先ほどレーザーのほうで、マニホールド（アルミ）のものができたということでした。電子ビームにおいては、どのようなものができましたか。

【千葉 SPL】 インペラとギアであり、歯車の 2 種類を造形いたしました。

【平塚分科会長】 そうしたものをはじめ、様々実装できると思いますし、引き続き期待をしております。ありがとうございます。

それでは、田中委員、お願いいたします。

【田中委員】 目標に対する成果がしっかり出されており、素晴らしいと思いました。その上で、少し伺います。まず目標設定として例えば対象とする欠陥サイズを 50 ミクロン以下、あるいは表面凹凸の検出精度を 10 ミクロン以下であるとか、X 線で検出可能なサイズの欠陥をゼロにすると決められています。つまり、現状の X 線 CT の分解能で見られるところを目標設定にされていると思いますが、実際にそれを部品として、特に高付加価値の部品として使う際には、また別の欠陥サイズのターゲットが出てくると考えます。そうした点で、現状の値及び将来ここまで伸ばすといった見込みを含めた見解があれば、教えてください。

【京極 PL】 今回は、強度的なところはプロジェクト外になるため行っていないんですが、我々の経験からすると材質によって相当違っていくものと考えます。50 ミクロン以下であれば大体球形になっていき、そうすると、引張強度についてはあまり影響がなくなっていくと思います。一方、疲労については影響があり、どうしても下がっていくことから、より小さな欠陥サイズにする必要があると思います。また、例えば 10 ミクロンを見ようと思っても、実際から言えば、見られません。我々も今、X 線 CT の中でボクセルサイズ 39 ミクロンで見えています。これは、ある程度領域を取ってみたいといけませんし、絞ればある程度いけるのですが、そうすると非常に微小な領域しか見られない。こうした点が非常に難しいところです。

そして、今後企業に使っていただくことを考えると、我々のやっているものは基本的に構造部材であるため、強度も含めたデータベースをつくり、国として行っていく必要があると考えます。「日本としてどうするのか」を本当は議論するべきであるものの、今回のプロジェクトはモニタリングとフィードバックにフォーカスをしていることから、そちらまで予算を取れていません。委員のおっしゃる点はずっともであり、先ほどの人工骨の話に関しても、実際には使えないものとなってしまいます。これは経産省に言うべきなのか、NEDO に言うべきなのかは分かりませんが、国としてしっかりとできる体制を取っていただければうれしい限りです。

【田中委員】 ありがとうございます。私も自分の研究にてダンパー等の複雑部品で応用を行おうとすると、京極 PL の言われるように、強度ではなく疲労が非常に心配になります。そうした観点から質問をいたしました。

【京極 PL】 我々が様々行った中で、例えば Ti64 は今回も表面性状が非常によいものであり、表面性 Sa でいくと 5 ミクロンぐらいまでが「条件よし」となります。インコネルやステンレスであれば、Sa で十数ミクロンになります。表面性状がよいものは、本当によい条件で行えば欠陥がほとんど入りません。また、疲労試験に関して Ti64 で行ったこともあります。磨いてもほとんど見えないようなものは、通常の溶製材に近い疲労挙動が出ます。しかし、その際には、たまたま出てきたのだろうと考えます。そこを狙うのは難しく課題でもあるのですが、鑄造材・鍛造材・AM 材の使うところを設計者に分かるようにしっかりと見せなくてはならないと私は思っています。我々だけでなく、国としてしっかり見せなくては日本で絶対に AM は伸びません。アメリカは、NASA 等の国の研究所が束になり、標準局も共に行っているわけです。そうした仕組みを日本としてもつくっていかねければ、日本では広がらないと考えます。

【千葉 SPL】 私からも補足をいたします。欠陥に関する目標 50 ミクロン以上、表面トポロジー 10 ミクロン以上に関して、まず前者の目標設定の根拠は 2 つほどあると思います。1 つは、例えば現場で 50 ミクロン以下の欠陥を見つけるとなれば、X 線 CT のボルテージが 250 キロボルト、300 キロボルトといったものを使わないと見られません。実際、中小企業ではそういう装置があるかという、多分あまりないと思います。そのため、100 キロボルト程度で見える欠陥というと 50 ミクロン以上ではないか。要は、実用上の問題として、この技術を普及させるためには何がよいのか。あまりに細かい欠陥を議論しても実際には使えないといったところから来ています。そして、もう一つの視点は、アディティブではどのぐらいの欠陥ができるのかといった原理的な問題です。凝固学的な問題とプロセス上の問題ですが、まず凝固学的な問題で欠陥ができるとしたら、デンドライト-デンドライト間の隙間に生じる凝固割れになります。凝固割れになれば、恐らく 100 ミクロン以上の長さになり、幅が 20 ミクロン、30 ミクロンほどであり、原理的にできるものが凝固割れだとすれば、50 ミクロンの目標でよいだろうと考えました。

それから後者に関しては、「Lack of fusion」と言われる溶け残り欠陥ですが、それは粉末が溶けずに残っているわけです。粉末の粒径はレーザーであれば 10 ミクロンから 50 ミクロンほど、電子ビームであれば 45 ミクロンぐらいから 150 ミクロンです。そうすると、実際に 1 個の粉末が溶け残ったとしても、その周りに影響する規模というのは大体 100 ミクロン以上になります。それが粉末の大きさから来ていると考えれば、原理的にアディティブマニファクチャリングでは、プロセス上の欠陥を 50 ミクロン以上で設定しておけばよい。また、もっと細かい欠陥は粉末由来になります。ガスアトラマイズ粉末を使うとガスが入っているのですが、そのガスポアは我々がコントロールをできない話です。要は、ガスのない粉末を使えばよいのですが、このプロジェクトにおいて、先ほど柳本 PMgr より説明のあったとおり、今回、我々は粉末に関する取扱いを研究していません。前者、後者とも、非常に実用的であり、技術・学術的にも合理的であるといった根拠で立てていることを御理解いただきたく思います。

【田中委員】 ありがとうございます。非常にリーズナブルであるということで理解をいたしました。

【平塚分科会長】 それでは、浜岡委員、お願いいたします。

【浜岡委員】 これまでの説明を伺い、まさに京極 PL、千葉 SPL のおっしゃるとおりだと感じております。そうした上で、最も気になる点がアウトカムとアウトプットの差をどのように埋めるかです。アウトプットは、実際に目標を達成されたということでよいのですが、これができたからアウトカムにいいのかと言えば、そうではありません。まだ様々乗り越えなくてはならないハードルがあると思います。そして、確かに品質に関しては無欠陥ができれば非常にすばらしいものの、「これで無欠陥にできた」

と言っても、爆発的に普及するような気もいたしません。そこが、京極 PL の言われた「こうしたものを設計等に入れていかなくては駄目だ」という点であることも大きく頷けます。一方、少し失礼な言い方になりますが、設計が重要だというのは TRAFAM が始まる前から皆が言っていた話であり、そこが全く進んでいないとも言えます。結局、設計側としては、我々はなぜアディティブを使わなくてはいけないのかといった面もあるのかもしれません。そうすると、次のステップとしてそこをどうやって埋めていかなくてはいけないのか。企業側、ユーザー側としても、それを使って効率よく製品をつくっていくような設計者を養成することが必要であるとして、企業側がそのように考えるかどうかというのは、また別だと思います。では、本当に実際に産業構造としてあまり日本国内で生産されなくなるといったことになるのであれば、どのように国内で利益を残していくのか。そうした際に、設計が非常に付加価値になると思うものの、設計者の養成というよりは、むしろ機能だけを与えると、どういう形状が理想であり、どういうつくり方にしていくのかというものが、AI 等を使って自動的にプロセス設計までの全てを行えるようにしなければ使われていけない印象を持ちます。しかしながら、それは非常にハードルが高く、相当先の長い話ではないかと考える次第です。

他方、欧米のほうが様々進んでいるという話も理解をしています。数年前に GE Additive がリープエンジンの燃料ノズルを出された際には、これは非常に普及するものと思いました。しかし、長い目で見ていくと、実際にはそれほど爆発的に普及している様子が感じられません。そうしたときに、「一体なぜだろうか」といった部分をどのように分析されるのか。今後、次のステップとして何をすべきかというところは非常に難しいと思いますが、何か御意見がありましたら、お聞かせください。

【京極 PL】 本当に御指摘のとおりです。浜岡委員は、10 年間ずっと TRAFAM の動きを見ていただいているため、そうした意見が出るのだと思います。今回のものに関しては、少なくともこのようにすれば欠陥が出ない製品をつくることができる。だが、そこに対するサポートをどのようにつけるのか。要は、Design for Additive Manufacturing (DfAM) の話になるわけですが、そこを含めた検討は今回行っていません。実際には、そうした点も含めた DfAM の話をして行わなければいけませんし、ある程度今回のシステムが開発できたら、レシピは一応出来ているため、押せばできるものの、それ以前の話になります。そして、一番大きいのはサポートの問題をしっかりとプラスアルファすることです。電子ビームのほうでも出ていましたが、製品の形状、大きさのところの問題として、「そう言ったけれども、この形のときにできないではないか」といった話が多分出てくると想定します。そうしたところも含めた設計の話をプラスしなければ、容易にはできないと考えます。

一方、海外において、「DfAM」といった言葉はよいものの、それがしっかりとできているかと言えば、実際にはできていません。こうした部分は設計の方と実際にプロセスを行っている人間が話をする必要があります。そういう意味では、浜岡委員のほうが会社内で実行できてよいのではないかと思います。ここ 10 年、TRAFAM 自体は、装置も何とか作り、国産のものが出来て、それなりに売り始めました。そして、今回は高品質のものをつくらないといけないため、モニタリング・フィードバック技術の開発を行いました。次の段階は、今、御指摘の部分をしっかりと実施するプロジェクトを立てていくべきだと思います。また、10 年前と決定的に違う点として、今は企業も相当装置を入れられて実際にやられてきていることを考えれば、我々の考えているものが今後は可能になるのではないかと思いますし、そうしたプロジェクトを本来は国としてやっていくべきではないかと個人的には思うところです。千葉先生は、いかがでしょうか。

【千葉 SPL】 これは、京極先生と私、または TRAFAM の NEDO プロジェクトを行っているから言えることかもしれませんが、今までのアディティブの分野のインスペクション技術、In-situ モニタリング技術は、ほとんどがメルトプールだと考えます。そのメルトプールを追いかけていく技術は大変難しいものであり、欠陥予測等を行う技術はなかなか適用できないといった話になっていると思いますが、

我々はそこではなく、面に着目しています。天面の欠陥発生の有無で、品質が決まる要素を丁寧にあらゆる科学技術を導入して追及していけば、恐らくインスペクションが必ずできるだろうと考えているのです。しかし、そこは今このプログラムで始まったばかりでもあります。うがった言い方をすれば、それを行っていないから、結局はインスペクション技術が中途半端なままになる。難しいAIを使い、In-situ モニタリング技術を駆使してやる技術は非常に面白いと思うものの、今回のプロジェクトを通して、天面を見ることは非常に合理的だといった確信をより強く持ちました。これからAMが本当に自動車でも提供できるのか。それに対し、私はこのプロジェクトが影響力を及ぼし、徐々に波及していくのではないかと期待をしているところです。言い過ぎかもしれませんが、そういう希望を持ってこれからやっていきたいと思います。

【浜岡委員】 どのように様々普及をさせていくのかといった際に、おっしゃるとおり、10年前とは違うところがあります。確かに、10年前に始めた頃は、基本的にはメタルのAMがパウダーベッドとデポジションでほぼ集約されたという印象がありました。一方、最近になると、バインダージェット、ワイヤーが出てくるといったように、またいろいろと騒がしくなっています。それから、樹脂系なども金属に負けないような強度を持った材料を出してきているといった状況もあります。そうしたものをまとめ、国全体で考えなくてはいけないことだと私も思います。どうもありがとうございました。

【平塚分科会長】 ありがとうございました。それでは、予定の時間が参りましたので、以上で議題5を終了いたします。

(非公開セッション)

6. プロジェクトの補足説明

省略

7. 全体を通しての質疑

省略

(公開セッション)

8. まとめ・講評

【浜岡委員】 本日は、お疲れさまでした。アウトプットに関して、全て計画どおりに目標を達成されたという素晴らしい成果を伺いました。そうした上で、議論の中で幾度か質問をいたしましたが、これからのアウトカムに向けては、さらに何が必要か。これは、先生方をお願いをする話ではないとも思いますが、今後のアウトカムにつなげるために必要となることは声を大にして言っていただきたいです。また、私としても、アウトプットからアウトカムにつながる部分がまだ弱いといった感想を正直持っています。これをつなげるためのハードルは多くありますが、実施者の皆様がおっしゃられていたように、設備だけの問題ではなく、設計の問題等をサプライチェーン全体で考えていかなくてはならない話だと思います。今までの皆様の素晴らしい成果を実現するためにも、ぜひそうした提案を行っていただければありがたいです。引き続きよろしく願いいたします。

【田中委員】 いろいろと御説明をいただき、大変勉強になりました。目標に対する成果もしっかりと出されており、すばらしかったです。また、議論の中で言われていたように、プロセスそのものを高度化することも大事だと思いますが、私の専門分野で言えば、これをどう設計に生かすか。あるいは、生産システムにどのように入れていくかが非常に重要であり、そうした方面の研究もこれから大事ではないかと思っています。加えて、汎用モニタリングシステムをどのようにオプション化していくかも大変重要で

す。大学の研究者仲間に聞くと、いろいろな大学で例えば予算がついたとなれば、「今はやっているから、アディティブを入れましょう」となるものの、実際にはノウハウが非常に求められることから、ほとんど使われません。あまり条件出しがうまくいかず、結局は機械加工で時間をかけて作ったほうが精度がよいとなっていきます。そうした意味では、モニタリングオプションを既にある機械にどのようにつけていくか。その成果を生かしていくことが今後大事ではないでしょうか。本日は、ありがとうございました。

【岩崎委員】 本日は、御説明を伺いまして、技術開発・研究開発の観点においてしっかりと進められていることを理解いたしました。各種目標を達成したと宣言できるところまで至ったことは非常にすばらしかったと思います。かつ、いろいろな技術的成果を創出されてきたことも確認いたしました。また、最後に質問をしたところになりますが、レーザーと電子ビームといった技術も現象も違う2つのテーマがある中、それらが連携して特許を融通する、あるいは、メルトプールではなく表面性状と内部欠陥の相関を見ればよいといった新たな評価指標を生み出されたことも本当に素晴らしい成果だと思っています。アウトカムの目標に向けても、話を伺う限り、解決すべき技術課題は既に明確になっていると考えます。技術戦略と事業戦略の両輪をより具体化して計画を立てていくことで、2030年に向けてのアウトカムの実現につながっていくと思いますので、今後とも引き続きの御検討をよろしくお願いいたします。

【稲垣分科会長代理】 本日は、御準備及び丁寧な説明をいただきまして誠にありがとうございました。非常に理解が深まった次第です。前回の中間評価の際に確認を行ったものから、特にアウトプットになっている技術課題について、短期間で非常に大きな成果を出していただけており、関係者の皆様には敬意を表します。一方、これからの課題として、本日の議論・講評において幾度か上げられているように、アウトカムの目標達成が次のステップであり、大きな課題だと思います。これからの実用化に際して、例えばメーカーでオペレーティングが始まれば、課題や品質管理を含めたところが出てくると考えますので、関係者の皆様には引き続き連携いただきながら、ぜひ支援をいただけるようお願いを申し上げます。かつ、これから発展しようと思えば、コストを下げていくのが非常に大きなテーマだと思いますので、その点もフォローをよろしくお願いいたします。本日は、大変お疲れさまでした。

【平塚分科会長】 最後に私から講評を行います。積層造形技術の欠陥現象を解明するといった基礎研究において、京極 PL、千葉 SPL 共にすばらしい成果を出されていました。また、欠陥防止のためのモニタリング技術も達成できており、大変よい成果を出されたものと理解いたします。今後のアウトカムに関して、いずれは実製品への応用を期待されますが、流れとしては、基礎研究から製造プロセス、プロセス研究のほうに移っていくと思います。具体的に申し上げますと、例えば製品を作る場合でも、肉厚では厚いところもあれば小さいところもあります。そういうものをどのように積層造形をしていけばよいのか。もしかしたらサポートが必要かもしれない。こうしたものがつながっていくと、実用化も早くなると思います。しかし、これを行うためには、国の支援も必要ですので、ぜひとも推進のサポートをお願いできれば幸いです。以上、私からの講評となります。ありがとうございました。

【北原専門調査員】 委員の皆様、御講評をありがとうございました。続きまして、実施者側、推進部署側からお言葉を頂戴いたしたく思います。それでは、京極 PL よりお願いいたします。

【京極 PL】 委員の皆様、本日は御多忙の中、我々のプロジェクト評価を賜りまして誠にありがとうございました。御意見を様々ないただきましたが、特にアウトカムに関する点は以前より頂戴しており、何とかここまでやってきたところで、実用化・事業化につなげたいと我々全員が思っている次第です。また、TRAFAM 自体、このプロジェクトは10年間やってきております。委員の中には、当初から御評価をいただいている先生方もいらっしゃいますし、経済産業省及びNEDOの皆様にも長らく御支援をいただいております。次のプロジェクトが立ちましたら、我々は実現に向け頑張ってまいりますので、引き

続き御支援、御協力のほどよろしくお願いいたします。本日は、どうもありがとうございました。

【北原専門調査員】 京極 PL、ありがとうございました。続いて、NEDO バイオ・材料部の金子部長より
お願いいたします。

【金子部長】 ただいま御紹介にあずかりました金子です。本日は、先生方から技術面及び事業化面について
多岐にわたる御示唆を頂戴いたしました。誠にありがとうございます。また、本事業は「新たなものづ
くりの手法」として 2019 年から 5 年間行ってきましたが、その大半がコロナ禍という状況下であり、
研究開発が進めにくい社会状況でもありました。そうした中にもかかわらず、目標及び成果に関して、
先生方から御評価をいただいたことを大変うれしく思います。京極 PL、千葉 SPL、企業の皆様のたゆ
みない努力について、私からも改めて敬意を表したく思います。そして、先生方からご指摘いただいた
「アウトカムについての道筋」について、事業としては今回で終了となるものの、我々も事業化に向け
ての研究開発を行うにおいて、しっかりとフォローを行い、少しでも前進するように見ていきたいと
思っておりますので、引き続き御指導をいただければ幸いです。本日は、どうもありがとうございました。

【平塚分科会長】 ありがとうございました。それでは、以上で議題 8 を終了といたします。

9. 今後の予定

10. 閉会

配布資料

資料 1	研究評価委員会分科会の設置について
資料 2	研究評価委員会分科会の公開について
資料 3	研究評価委員会分科会における秘密情報の守秘と非公開資料の取り扱いについて
資料 4-1	NEDO における技術評価について
資料 4-2	評価項目・評価基準
資料 4-3	評点法の実施について
資料 4-4	評価コメント及び評点票
資料 4-5	評価報告書の構成について
資料 5-1	プロジェクトの説明資料（公開）
資料 5-2	プロジェクトの詳細説明資料（公開）
資料 6	プロジェクトの補足説明資料（非公開）
資料 7-1	事業原簿（公開）
資料 7-2	事業原簿（非公開）
資料 8	評価スケジュール

以下、分科会前に実施した書面による公開情報に関する質疑応答について記載する。

「積層造形部品開発の効率化のための基盤技術開発事業」（終了時評価）分科会

ご質問への回答（公開分）

資料番号・ ご質問箇所	ご質問の内容	委員名	回答
			説明
資料 5-1 P9	今後の市場予想について、2021 年は実績と思われますが、例えば 2022 年、2023 年の実績あるいは実績の見通し情報があれば教えて下さい（不明なら結構です）。	稲垣 分科会長 代理	2022 年、2023 年の実績あるいは実績の見通し情報はございません。 資料中注記に記載の通り、2022 年度に実施した調査事業報告よりの引用となり実績の検証は実施できておりません。
資料 5-1 P10	設計支援としての AI 適用について、当プロジェクトに反映できることがあれば教えて下さい。	稲垣 分科会長 代理	本研究の成果は、設計支援としての AI 適用を行う際に、設計時（造形前）に種々の形状の部品の最適プロセス条件を自動探索する技術として活用できる可能性があります。
資料 5-1 P19	アウトカムの達成に向け、実用化に際しての標準類（例えば適用される金属毎のレシピなど）は提供できるようになる方針（P25～P28にある、手順書に含まれる）と理解して良いでしょうか。	稲垣 分科会長 代理	レーザー方式の手順書に関しては、要素技術研究機での「プロセスマップ自動生成機能」及び「フィードバック制御機能」の操作手順を記載しています。 本システムでは、レシピを提供するのではなく、レシピを作成するためのシステムとなっています。装置や粉末が異なれば、それに対応した最適造形条件を提供するようになっています。

資料番号・ ご質問箇所	ご質問の内容	委員名	回答
			説明
資料 5-1 P41	汎用型モニタリング・フォードバックシステムは、電子ビーム方式、およびレーザービーム方式のいずれにも適用可能な技術でしょうか。	稲垣 分科会長 代理	P.41 の図は、レーザー方式に関する図ですので、電子ビーム方式とは異なります。 レーザー方式は同図に記載のように光学的な方式に対して、電子ビーム方式は電子ビーム照射により放出される反射電子を利用しております。
資料 5-1 P44	2022年のJIMTOFでの出展に対するユーザーの反応はどのようなものでしたでしょうか。また、2024年のJIMTOFではアウトカム達成に向けた、プレゼンテーション施策は考えられていますでしょうか。	稲垣 分科会長 代理	2022年のJIMTOFに出展しました。そこではユーザーから、モニタリングフィードバック技術に期待する声を多数伺い、プロジェクトで開発中のモニタリング技術の実用化およびプロセス条件決定時間の短縮に対するニーズが大きかったことが分かりました。 また、2024年のJIMTOF(2024.11.5-10@東京ビッグサイト)では、Additive Manufacturing AreaのTRAFAM展示ブースで本プロジェクトの研究成果を展示するとともに、11.7に開催されるTRAFAMセミナーにおいて、本研究成果を発表する予定です。
資料 5-2 P6	コストの欄にある、電子ビーム方式のモニタリングについては他社には無い機能という内容は、コスト低減効果があるものと理解して良いでしょうか。	稲垣 分科会長 代理	歩留まりの向上に寄与するので、コスト低減につながります。

資料番号・ ご質問箇所	ご質問の内容	委員名	回答
			説明
資料 5-2 P21	レーザービーム方式において、造形条件決定までの試作造形期間が 0.44 週間と大幅に短縮されていますが、短縮された内容および 0.44 週間分の内容について教えて下さい。	稲垣 分科会長 代理	本事業で開発した欠陥予測システムのプロセスマップ生成機能の使用により造形条件決定までの期間が大幅に短縮できました。内訳は①造形機の準備，②プロセスマップ生成のための自動造形，③出力プロセスマップからの造形条件選択です。 ②は、従来は 6 バッチとしても、それぞれ試験片の取出し，評価，再度の造形準備の繰り返しがあり数週間必要でした。本手法では、最短で 1 バッチ(1 晩) で、造形・判定が可能となり、大幅に短縮することができました。
資料 5-2 P27	電子ビーム方式において、4 種類の合金のデータベースが構築されたとありますが、ユーザーが 4 種類以外の金属材料を開発検討する場合、この 4 種類のデータベースがあれば、横展開していくことで効率的な開発が可能になるものでしょうか。	稲垣 分科会長 代理	これらの4種の金属は、産業用金属の代表的なものであるもので、プロセスマップ自動生成を行う際の基準条件として応用ができるものであると考えています。
資料 5-1 P.9	市場規模予測が出ているが、各分野の内訳（比率）は 2029 年まで変わらないように見える。どこかの分野が先に市場を形成し（例えば実用がが進んでいる航空機や医療）、その後に他の分野にも広がっていく、という流れにはならないと予想しているということか？また、自動車が最も大きな市場とのことだが、具体的にどのようなところに使われているのか。	岩崎委員	・ ご指摘の市場規模予測は、2022 年度に実施した調査事業報告からの引用となります。 この予測は、市場レポートを基にした金属積層造形市場全体の動向についての概観となります。 一方で同調査にて、国内ユーザーに対してアンケート調査を実施（回答数 102）した結果からは、積層造形技術を適用して製造する部品・部材の利用先の産業分野として、自動車と金型・工具が最も多く、航空・宇宙、重工業、電気・電子・半導体、医療機器・医療部材が続く結果となっています。

資料番号・ ご質問箇所	ご質問の内容	委員名	回答
			説明
			- 自動車分野については、上記アンケート結果などから積層造形活用の目的として「物性の優れた難加工材の複雑な造形」、「耐熱＋軽量等のマルチマテリアルな造形」「マスカスタマイズによる高付加価値化」などがあげられており、AM工法の特徴を活かし、エンジン部品、車体フレーム、シャフトなどへの活用検討が進められているようです。 - TRAFAM 組合員のユーザー企業の意見から、大型製品の造形に苦勞しており、造形回数を重ねないと良品が製造できないため、本プロジェクトで開発しているレーザー方式のシステムは、非常に有効だという意見があります。このため、本システムは、大型製品を対象とした航空・宇宙、エネルギー・産業機器分野、半導体装置分野の大型部品・部材、ギガキャスト向け金型などに有効なシステムと考えています。 - 我が国の最重要産業である自動車については、AMに対するニーズは大きいですが、コスト面等で課題が多いため、今後我が国として自動車の量産に向けた技術開発・専用の装置開発が必要であると考えています。
資料 5-1 P.19	導入割合 10%は非常に高い目標であると思うが、「目標を達成できる見込み」と結論づけている根拠は何か。	岩崎委員	「資料 5-2/P.8/ アウトカム目標の達成見込み」に説明を記載しております。 2030 年度までには、我が国における装置導入も大幅に増加していき、高品質で安定した製品製造技術の確立がますます要求されるようになると予測され、インプロセスモニタリング・フィードバック機能の導入は必須となると予測されます。

資料番号・ ご質問箇所	ご質問の内容	委員名	回答
			説明
			現状では、別紙に示す通り、海外製品でも有効なインプロセスモニタリング・フィードバック機能は開発されておらず、 TRAFAM ユーザからも本システムの実用化が期待されていることから、実用化されれば導入が進むと考えます。
資料 5-1 P.45	P.39-40 の中間評価への対応で「ユーザー検証実施を前提とした予算獲得」とあるが、具体的にどの項目がそれにあたるのか？	岩崎委員	2020 年～2021 年の NEDO 内加速予算の獲得により、機器の入手の加速とともにその予算をユーザー検証に活用できるように対応しました。また、2022 年度以降予算額の増加によりユーザー検証を着実に実施しました。
資料 5-2 P.14	「最適条件から少しずらした造形条件での FB 制御を入れた造形において・・・」との記載があるが、モニタリング情報に基づいて最適条件からの変更必要量を算出している、という理解でよいか。	岩崎委員	ご指摘のようにモニタリングフィードバックシステムは、モニタリング情報に基づいて最適条件からの変更必要量を算出しております。成果として掲載したデータは、欠陥が発生する条件との比較のため、最適条件から少しずらした造形条件で動作確認した結果を示しております。
資料 5-2 P.15	「開発機能、開発ソフトウェアを用いた、積層造形部品開発のリードタイムを推定したところ、従来 6 週間(42 日)に対し、8 日で可能となり、目標のリードタイム 1/5 を達成した。」とあるが、「推定」とはどういうことか？開発成果やユーザー実証で実際に確認したわけではないのか？	岩崎委員	実際の部品開発の期間は部品形状・サイズに依存するため、推定という言葉を使用しています。

資料番号・ ご質問箇所	ご質問の内容	委員名	回答
			説明
資料 5-2 P.18	造形密度の予測が可能であることがわかったとのことだが、欠陥の有無はどのように判断するのか？密度のみで判断するのか？	岩崎委員	P.18 に示していますように、特定の表面性状パラメータと造形密度（内部欠陥）の相関があることがわかりました。開発したシステムでは、欠陥の判定を特定の表面性状パラメータで判定しております。 基本的に、本システムでは、まずプロセスマップ自動生成機能により最適造形条件を探索して、欠陥が出にくい条件で造形し、造形時に欠陥が出やすい造形表面と判断した場合には、再溶融して欠陥のない造形面とし、最終的に50μm以上の欠陥がない造形体を作製するシステムです。
資料 7-1 P.4-64～4-66	図 4-2-53 から図 4-2-56 にプロセスマップの例が掲載されているが、図によって解像度が大きく異なるのはなぜか？単に描画の問題か？	岩崎委員	単に描画の問題です。

資料番号・ ご質問箇所	ご質問の内容	委員名	回答
			説明
資料 7-1 P.4-70～4-71	5)ユーザ実証（小型部品：ヘリカルギア）欠陥率が記載されているが、これは 50 μ m 以上の欠陥の割合ということでしょうか？また、「2 種の装置において、それぞれの装置に適した条件を選択して造形を行っているが、両者ともにヘリカルギア向けに条件を最適化した訳ではない。従って、本結果は、フィードバック制御を使用しない場合の本研究での開発装置が既存装置に比べて装置性能に優れていることを示すものではない。」との記載があるが、これはどういう意味か？ヘリカルギア向けに条件を最適化すると欠陥率はさらに低くなると思われるが、既存装置よりも品質の高い製品を造形できるということではないのか？	岩崎委員	今回使用した造形条件（レシピ）がヘリカルギア向けに試作を繰り返して最適化されたものではないため、フィードバック制御を用いない開発装置と既存装置でも、より欠陥率を下げられる可能性があるという意味です。

資料番号・ ご質問箇所	ご質問の内容	委員名	回答
			説明
モニタリングとフィードバック制御について	層ごとにモニタリングを行い、必要に応じて再溶融等を行うことになると思いますが、 FB 制御を入れた場合と入れない場合とで造形時間はどれくらい変わるのか？例えばユーザー実証の例で教えて欲しい。また、欠陥が見つかって再溶融をした場合に表面性状がおかしくなり、さらに欠陥と判断されることもあると思われる。永遠と再溶融を繰り返さないための判断基準などはあるのか？または、再溶融を何度か繰り返すと欠陥なしと判断できる程度の性状になっていくのか？	岩崎委員	レーザー方式の場合は、欠陥判別システムのフィードバック機能（FB 機能）使用時の造形時間は実績で概ね 1.3 倍となりました。 AlSi10Mg 実造形では FB 機能無効で約 11 時間、有効で約 14 時間でした。 電子ビーム方式の場合は、ユーザ検証では、約 2 倍の時間がかかっています。 再溶融に関しては、最適造形条件で実施していますので、欠陥は出にくい状況です。 なお、今回のユーザー実証では欠陥発生が予測された場合の再溶融は 1 回を限度と設定しております。 複数回実施すると改善できないか、またはより悪化するという結果を得ています。
資料 7-1,4-2-4, 4)	装置間レシピ変換について実際に造形を行って検証したのであれば、結果を教えてください。	田中委員	小型機の最適条件を変換した条件が、中型機の最適条件（実験で確かめた条件）に変換されていることを確認しています。
資料 5-1 の 25 頁及び 27 頁のアウトプット達成状況の欠陥予測精度	レーザービーム、電子ビームともに欠陥予測精度を算出したサンプル数を教えてください。（パラメータの数ではなく、検証用に作成した造形品の数という意味です。）これが平均値だとすれば、どれくらいの幅を持っているかなども知りたいです。	浜岡委員	①レーザー方式では、サンプル数は 20 個で欠陥予測精度の算出に用いた画像数は 2020 画像です。電子ビーム方式では、サンプル数は 16 個で、欠陥予測精度の算出に用いた画像数は 740 画像です。

資料番号・ ご質問箇所	ご質問の内容	委員名	回答
			説明
	また、質問ではありませんが、表記方法がレーザービーム方式では「95%以上」、電子ビーム方式では「97.7%（95%以上）」となっており、記載方法を合わせて頂いた方が読みやすいです。（レーザビーム方式も資料5-2の12頁に再現率0.97の記載ありますが。）		
資料5-2の 21頁の積層 造形部品開発 期間短縮数値	①配管部品（マニホールド）での事例で検証されておりますが、他の部品についての検証実績もしくは事例があれば教えて頂きたい。形状によってもっと大きな効果が出るものや、あまり効果の無いものが出てくるのではないかと思います。 ②また質問ではありませんが、開発期間と造形条件決定のリードタイムは異なり、現状11週間かの開発期間のうち、造形条件決定が6週間なら、それ以外は5週間という事ですから、条件決定を6→1.04週間に短縮したのであれば、開発期間短縮は、11週間→6.04週間（5+1.04）という計算なのではないですか？実際には、本システムを実装する事で、それ以外の5週間の短縮にも寄与出来るとは思います。	浜岡委員	①開発期間の短縮の効果は、記載のマニホールドで実施しました。他の事例はありません。 ②ご指摘の通り、資料5-2の21頁の図3-2に記載の通り、開発期間と造形条件決定のリードタイムは異なります。本事業のアウトプット目標「造形条件決定のリードタイムを1/5（1-2週間）に短縮する」は、達成できました。しかし、アウトカム目標の「開発期間（現状11週間）を1/5に短縮する」を達成するためには、造形条件決定のリードタイム6週間以外の5週間（企画・設計、造形準備、後処理、仕上げ加工、検査）を短縮する必要がありますが、これらは今回のプロジェクトの研究範囲外です。従って、今後新たなファンドを獲得して、今回の成果も活用して、研究を進めていくべきと考えております。

参考資料 2 評価の実施方法

NEDO における技術評価について

1. NEDO における技術評価の位置付けについて

NEDO の研究開発の評価は、プロジェクト/制度の実施時期毎に事前評価、中間評価、終了時評価及び追跡評価が行われ、研究開発のマネジメントにおける PDCA サイクル（図 1）の一角と位置づけられています。さらに情勢変化の激しい今日においては、OODA ループを構築し、評価結果を計画や資源配分へ適時反映させることが必要です。

評価結果は、被評価プロジェクト/制度等の資源配分、事業計画等に適切に反映させることにより、事業の加速化、縮小、中止、見直し等を的確に実施し、技術開発内容やマネジメント等の改善、見直しを的確に行っていきます。

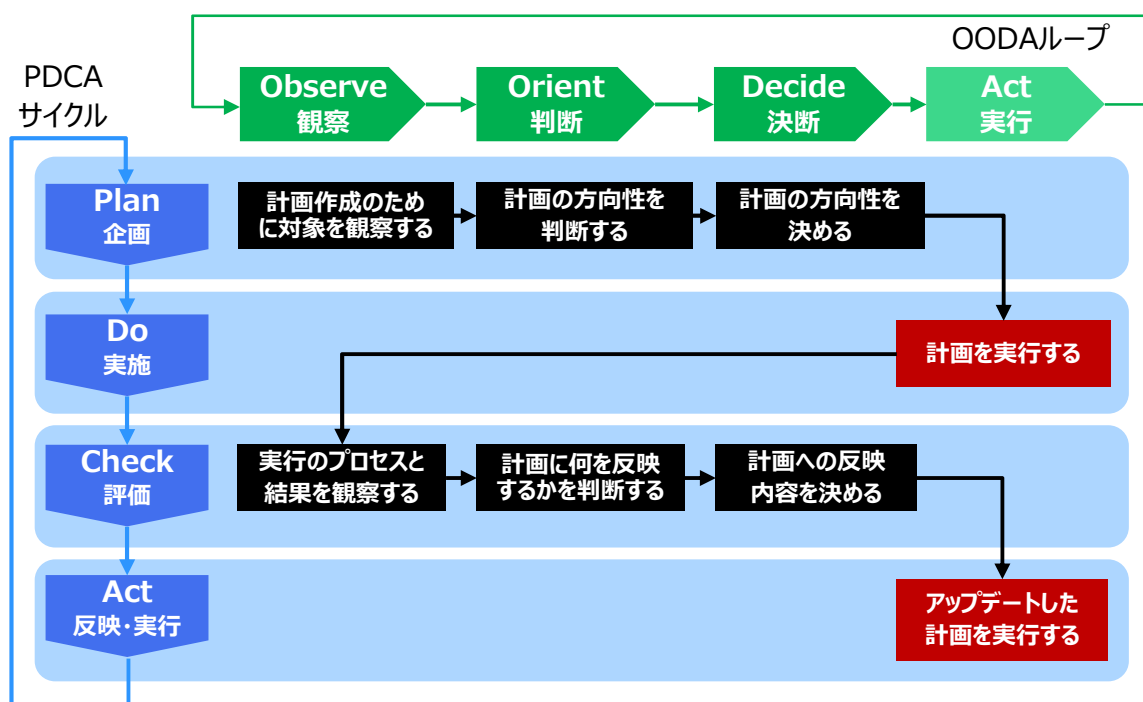


図 1 研究開発マネジメント PDCA サイクルと OODA ループ組み合わせ例

2. 技術評価の目的

NEDO では、次の 3 つの目的のために技術評価を実施しています。

- (1) 業務の高度化等の自己改革を促進する。
- (2) 社会に対する説明責任を履行するとともに、経済・社会ニーズを取り込む。
- (3) 評価結果を資源配分に反映させ、資源の重点化及び業務の効率化を促進する。

3. 技術評価の共通原則

技術評価の実施に当たっては、次の 5 つの共通原則に従って行います。

- (1) 評価の透明性を確保するため、評価結果のみならず評価方法及び評価結果の反映状況を可能な限り被評価者及び社会に公表する。なお、評価結果については可能な限り計量的な指標で示すものとする。

- (2) 評価の明示性を確保するため、可能な限り被評価者と評価者の討議を奨励する。
- (3) 評価の実効性を確保するため、資源配分及び自己改革に反映しやすい評価方法を採用する。
- (4) 評価の中立性を確保するため、可能な限り外部評価又は第三者評価のいずれかによって行う。
- (5) 評価の効率性を確保するため、研究開発等の必要な書類の整備及び不必要な評価作業の重複の排除等に務める。

4. プロジェクト評価/制度評価の実施体制

プロジェクト評価/制度評価については、図2に示す実施体制で評価を実施しています。

- (1) 研究開発プロジェクト/制度の技術評価を統括する研究評価委員会をNEDO内に設置。
- (2) 評価対象プロジェクト/制度毎に当該技術の外部の専門家、有識者等からなる分科会を研究評価委員会の下に設置。
- (3) 同分科会にて評価対象プロジェクト/制度の技術評価を行い、評価（案）を取りまとめる。
- (4) 研究評価委員会の上で報告を得て評価が確定され、理事長に報告。

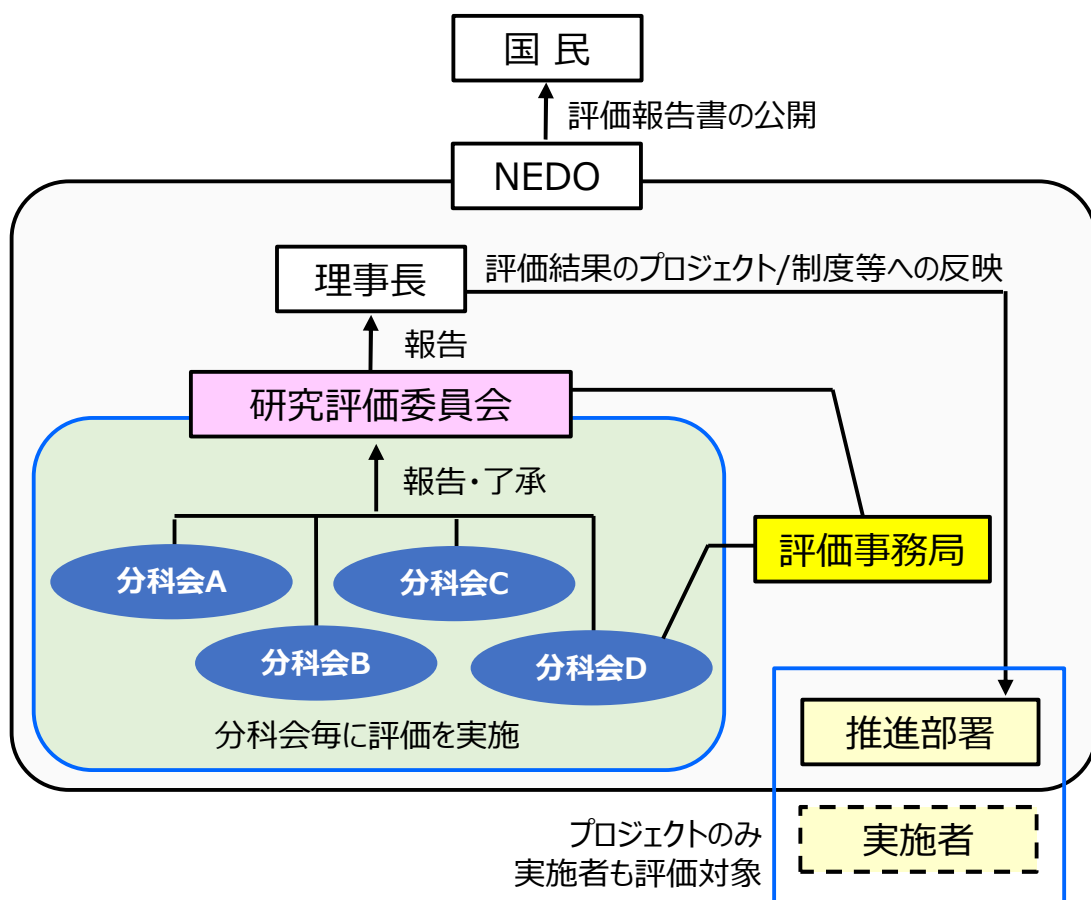


図2 評価の実施体制

5. 評価手順

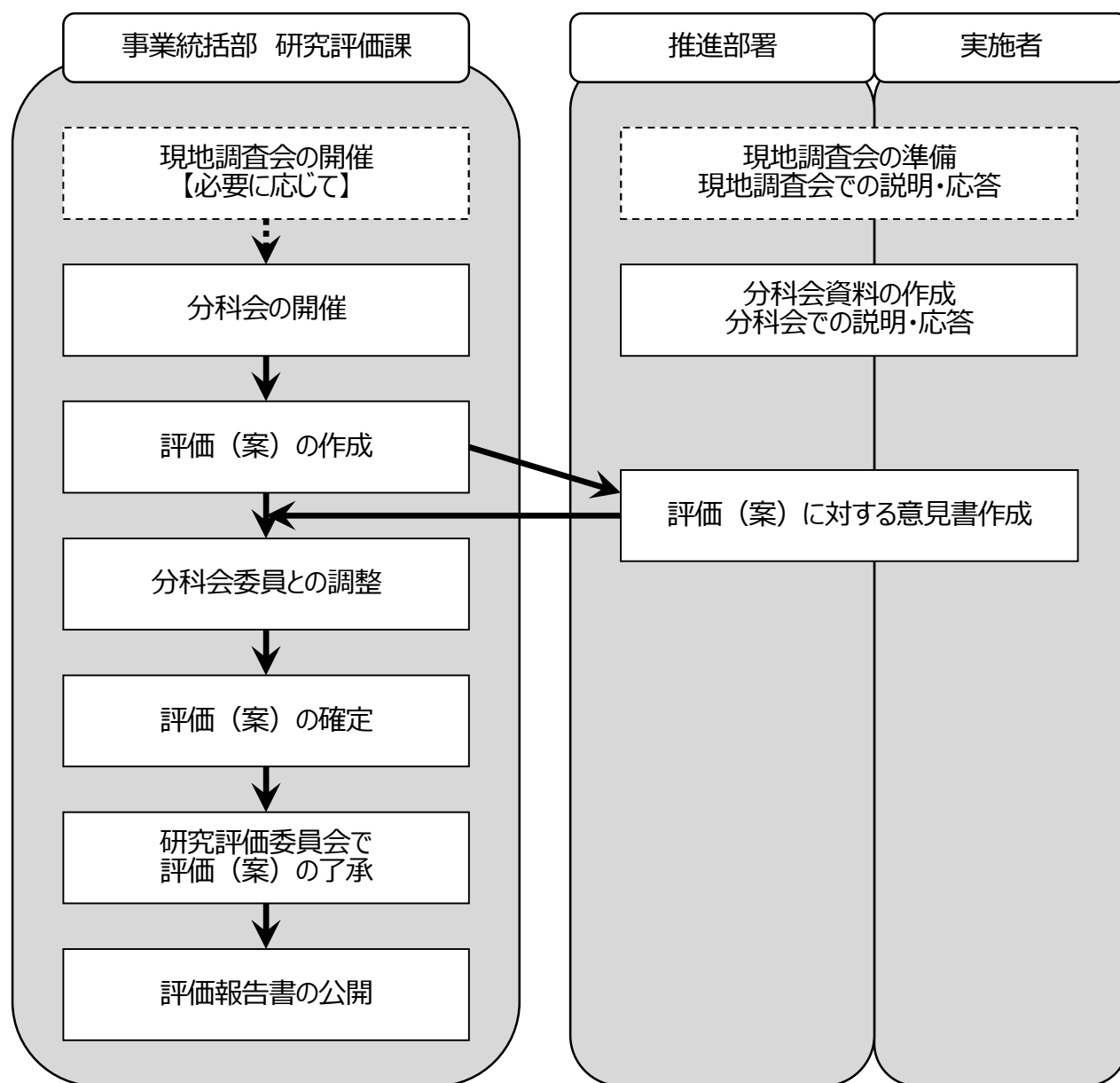


図3 評価作業フロー

「積層造形部品開発の効率化のための基盤技術開発事業」（終了時評価）分科会に係る
評価項目・評価基準

1. 意義・アウトカム（社会実装）達成までの道筋

(1) アウトカム達成までの道筋

- ・「アウトカム達成までの道筋」※の見直しの工程において、外部環境の変化及び当該研究開発により見込まれる社会的影響等を考慮したか。

※ 「アウトカム達成までの道筋」を示す上で考慮すべき事項

- ・将来像（ビジョン・目標）の実現に向けて、安全性基準の作成、規制緩和、実証、標準化、規制の認証・承認、国際連携、広報など、必要な取組が網羅されていること。
- ・官民の役割分担を含め、誰が何をどのように実施するのか、時間軸も含めて明確であること。
- ・本事業終了後の自立化を見据えていること。
- ・幅広いステークホルダーに情報発信するための具体的な取組が行われていること。

(2) 知的財産・標準化戦略

- ・オープン・クローズ戦略は、実用化・事業化を見据えた上で、研究データも含めた上で、クローズ領域とオープン領域が適切に設定されており、外部環境の変化等を踏まえてもなお、妥当であったか。
- ・本事業の参加者間での知的財産の取扱い（知的財産の帰属及び実施許諾、体制変更への対応、事業終了後の権利・義務等）や市場展開が見込まれる国での権利化の考え方は、オープン・クローズ戦略及び標準化戦略に整合し、研究開発成果の事業化に資する適切なものであったか。
- ・標準化戦略は、事業化段階や外部環境の変化に応じて、最適な手法・視点（デジュール、フォーラム、デファクト）で取り組んでいたか。

2. 目標及び達成状況

(1) アウトカム目標及び達成見込み

- ・外部環境の変化及び当該研究開発により見込まれる社会的影響等を踏まえてアウトカム指標・目標値を適切に※見直していたか。
- ・アウトカム目標の達成の見込みはあったか（見込めない場合は原因と今後の見通しは妥当であったか）。

※ アウトカム目標を設定する上で考慮すべき事項

- ・本事業が目指す将来像（ビジョン・目標）と関係のあるアウトカム指標・目標値（市場規模・シェア、エネルギー・CO₂削減量など）及びその達成時期が適切に設定されていること。
- ・アウトカムが実現した場合の日本経済や国際競争力、問題解決に与える効果が優れていること。
- ・アウトカム目標の設定根拠は明確かつ妥当であること。
- ・達成状況の計測が可能な指標が設定されていること。

(2) アウトプット目標及び達成状況

- ・外部環境の変化及び当該研究開発により見込まれる社会的影響等を踏まえてアウトプット指標・目標値を適切に*見直していたか。
- ・最終目標は達成しているか。未達成の場合の根本原因分析や今後の見通しの説明は適切だったか。
- ・副次的成果や波及効果等の成果で評価できるものがあつたか。
- ・オープン・クローズ戦略や実用化・事業化の計画を踏まえて、必要な論文発表、特許出願等が行われていたか。

※ アウトプット目標を設定する上で考慮すべき事項

- ・アウトカム達成のために必要なアウトプット指標・目標値及びその達成時期が設定されていること。
- ・技術的優位性、経済的優位性を確保できるアウトプット指標・目標値が設定されていること。
- ・アウトプット指標・目標値の設定根拠が明確かつ妥当であること。
- ・達成状況の計測が可能な指標（技術スペックとTRL*の併用）により設定されていること。

※TRL：技術成熟度レベル（Technology Readiness Levels）の略。

3. マネジメント

(1) 実施体制

- ・実施者は技術力及び実用化・事業化能力を発揮したか。
- ・指揮命令系統及び責任体制は明確であり、かつ機能していたか。
- ・実施者間での連携、成果のユーザーによる関与など、実用化・事業化を目指した体制となっていたか。
- ・個別事業の採択プロセス（公募の周知方法、交付条件・対象者、採択審査の体制等）は適切であったか。

- ・本事業として、研究開発データの利活用・提供方針等は、オープン・クローズ戦略等に沿った適切なものであったか。また、研究者による適切な情報開示やその所属機関における管理体制整備といった研究の健全性・公平性（研究インテグリティ）の確保に係る取組をしたか。

(2) 研究開発計画

- ・アウトプット目標達成に必要な要素技術の開発は網羅され、要素技術間で連携が取れており、スケジュールは適切に計画されていたか。
- ・研究開発の進捗を管理する手法は適切であったか（WBS^{※1}等）。進捗状況を常に関係者が把握し、遅れが生じた場合、適切に対応していたか。

※1 WBS：作業分解構造(Work Breakdown Structure)の略。

本研究評価委員会報告は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）事業統括部が委員会の事務局として編集しています。

NEDO 事業統括部 研究評価課

* 研究評価委員会に関する情報は NEDO のホームページに掲載しています。
(https://www.nedo.go.jp/introducing/iinkai/kenkyuu_index.html)

〒212-8554
神奈川県川崎市幸区大宮町1310番地
ミューザ川崎セントラルタワー
TEL 044-520-5160