資料 7-1

「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 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	163	157	220	406	359	1,305
			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、企業と連係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。
ボーリング現象	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	溶接分野で使用される表現で、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、溶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）をプラズマで溶融し、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】

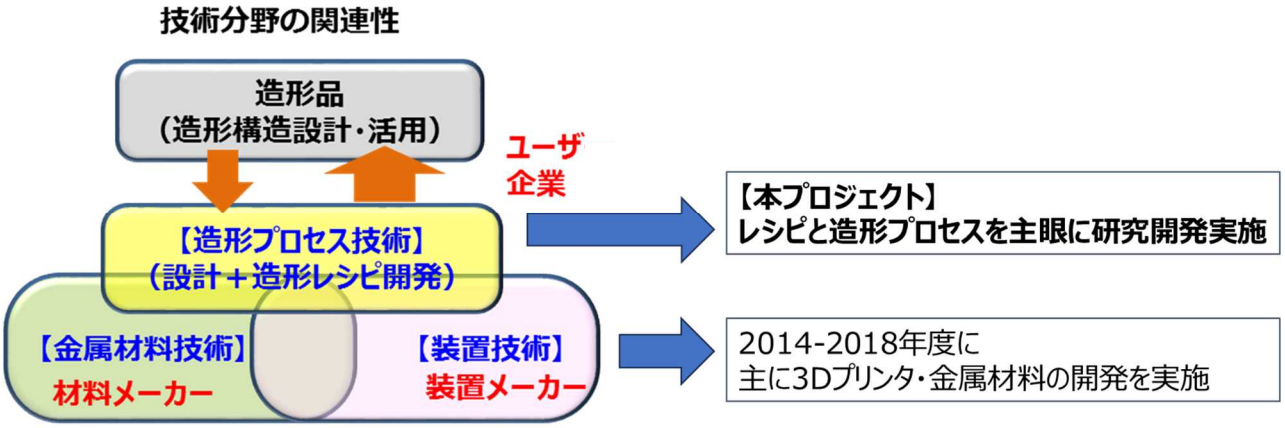
生産プロセスにおいては、多様化したユーザニーズに迅速かつ柔軟に対応して、高性能、高品質な製品を提供するために、ＡＩを搭載し知能化された機械やロボット、複雑形状を高速かつ高精度で造形する 3D プリンタなど新たな付加価値を持ったもの・コトを創出する革新的な生産技術の開発とその導入支援に取り組む。

【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

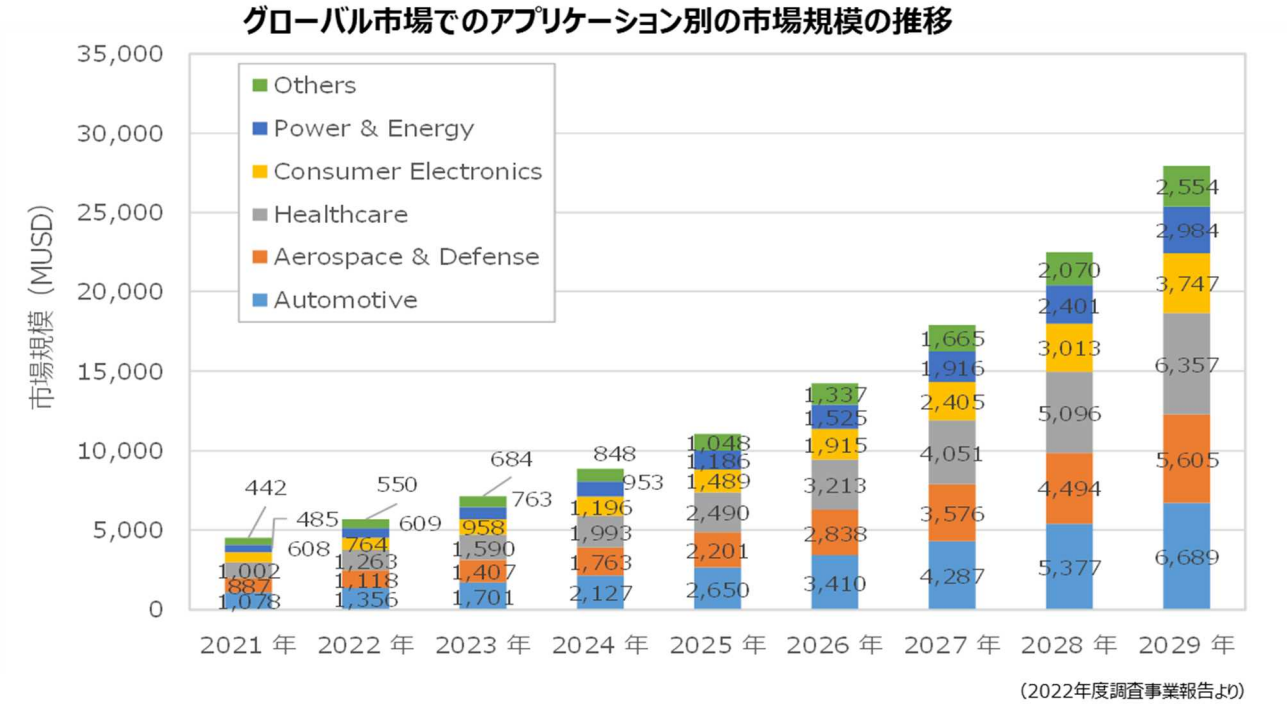
■　技術としては、装置/金属粉末材料/プロセス（レシピ）の 3 要素に大別。
■　要素はそれぞれに密接に関連、独立に扱うと適切な造形品を得ることは困難。
■　技術全体を統合化する（例えば装置企業がコントロール）方向にある。



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年度調査事業報告より）

【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）**

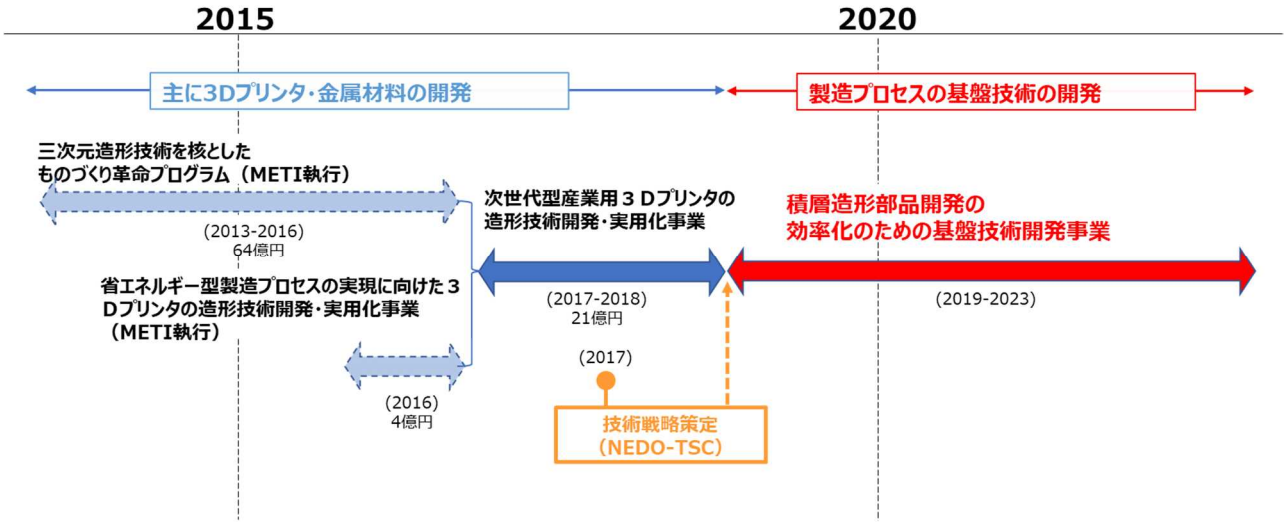
重要構成要素技術

- **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）

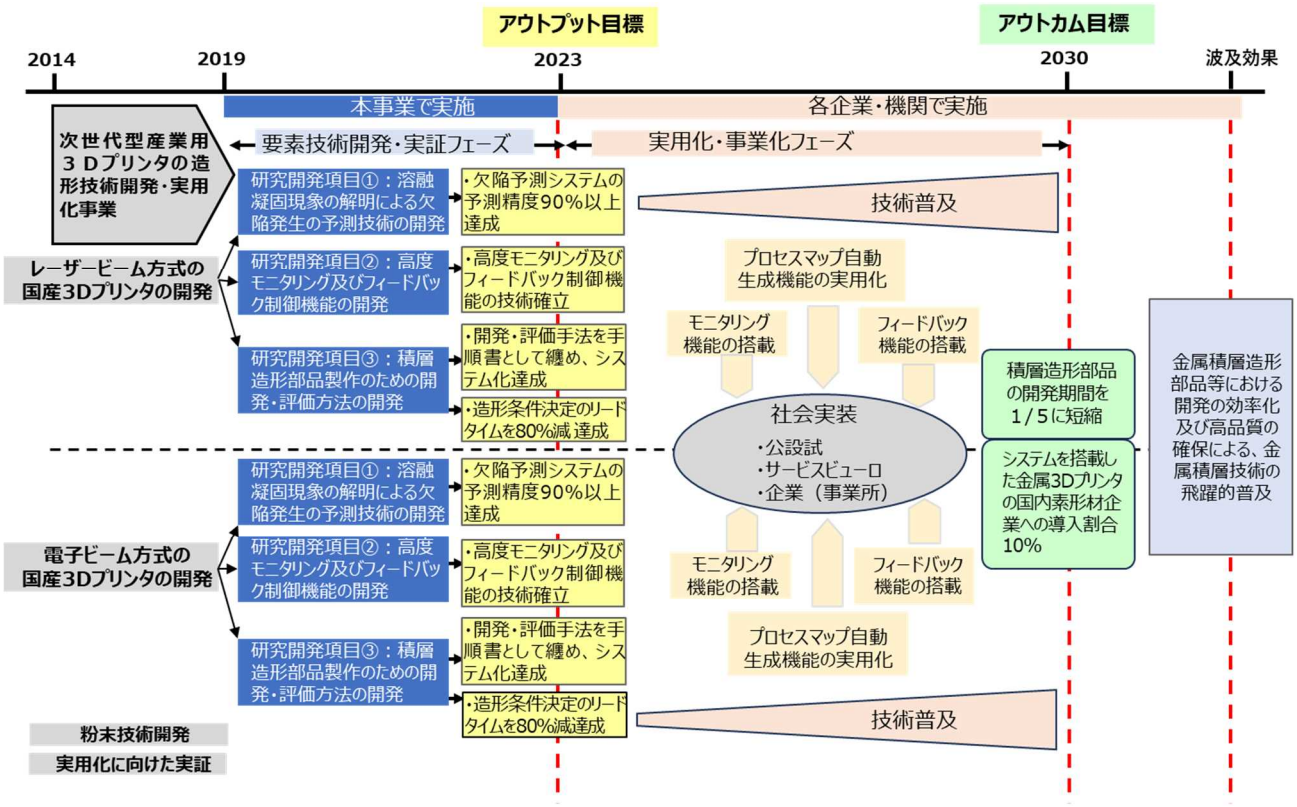
1.1.5. 他事業との関係

・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）

<u>事業期間中</u>

知財戦略に基づき、知財取得を積極的に推進。

<u>事業終了後</u>

・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 プリンタの国内素形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 120,mm、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		
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	6週間 ➡	1.2 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、国内の素形材企業として、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プリンタの国内素形材企業への導入割合10%（事業所ベース）を見込んでいる。

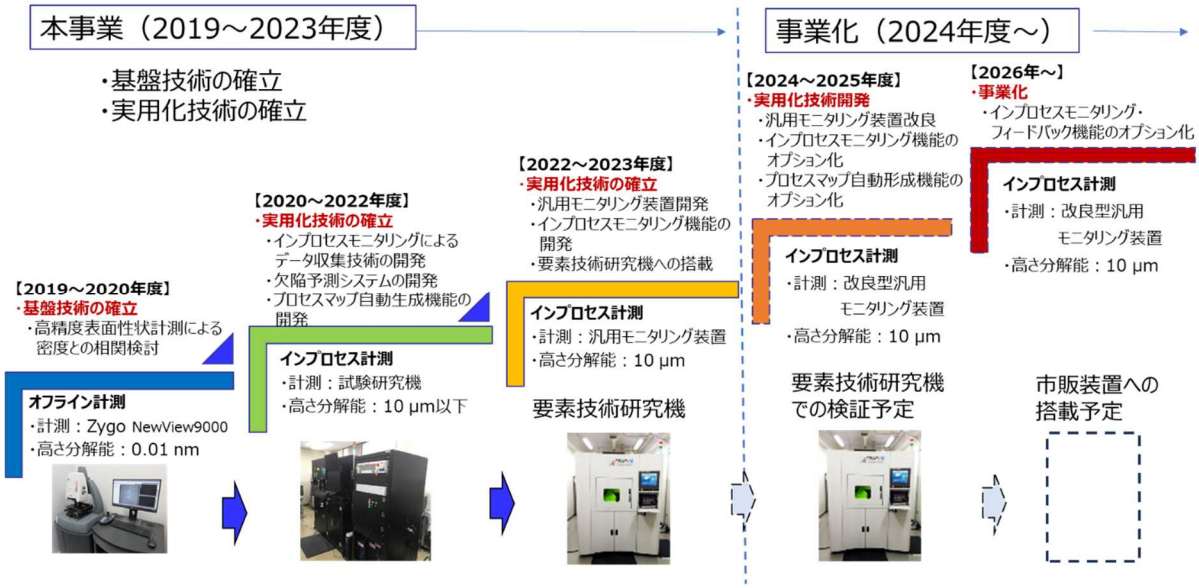


図2-1　本事業でのアウトカム達成の見通し（レーザービーム方式）

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、金型無しの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り、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いけない場合（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ｘ　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10μm以下で凹凸を計測（中間目標）	・粉末の粒径が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。
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。
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50μm以上の大きさの欠陥率を0%とする。	・試験研究機により、取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。
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(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。

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95%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)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10μm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。
	・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ト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、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50μm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、我が国のサポーテ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。

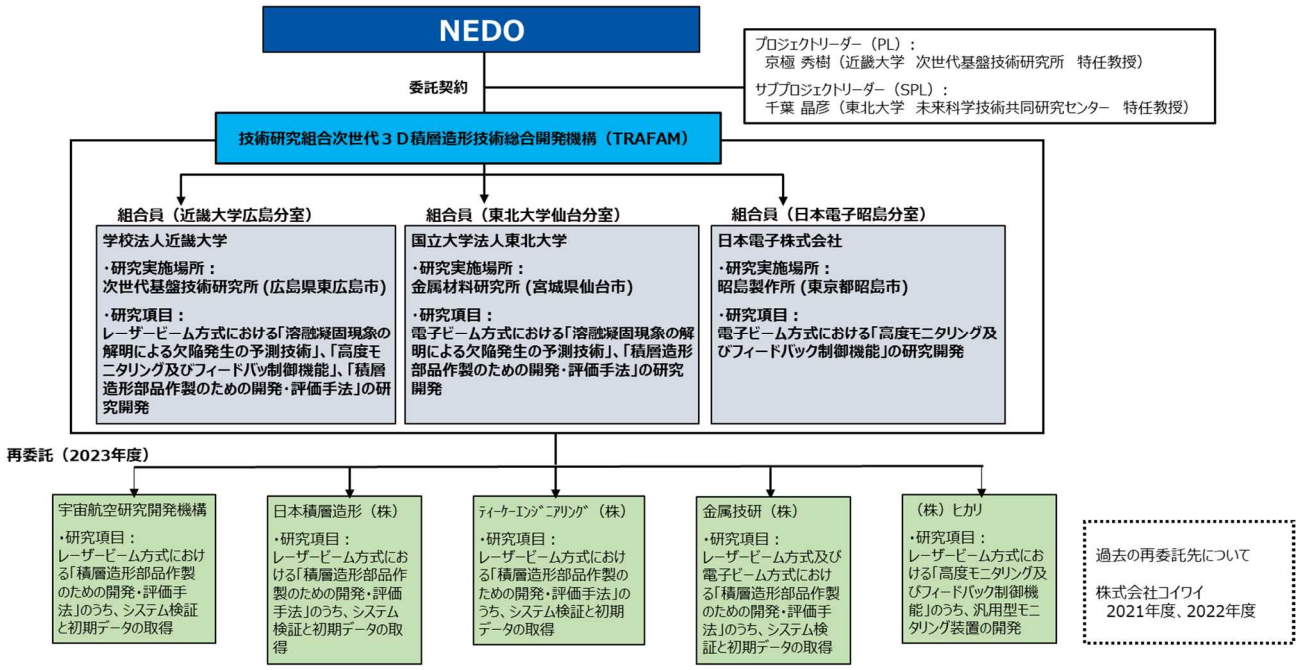
◇ 国際競争

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。

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。

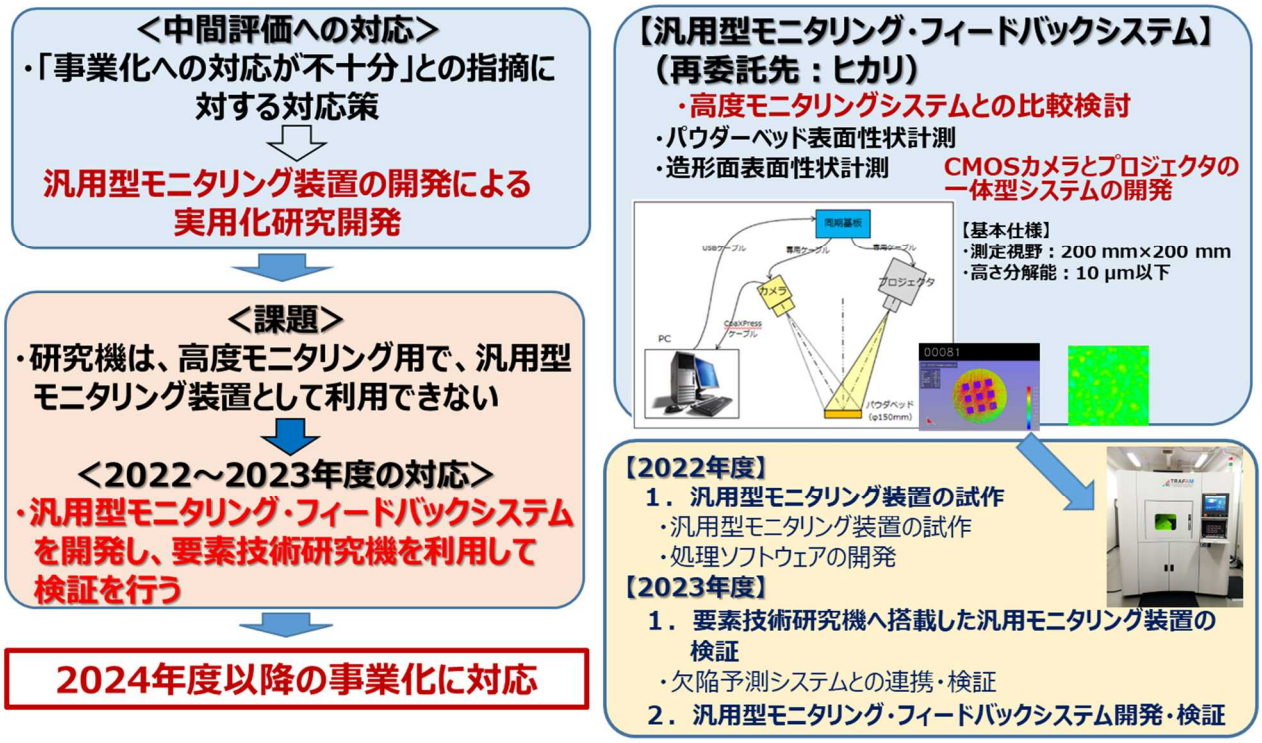
・月次の進捗管理として、登録研究員の従事日誌を確認し、また、実施者に対して予算執行状況の報告を求めることで、研究開発の課題、予算執行の遅滞などが発生していないことを確認。

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
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通し	【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、企業と連係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。	【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。
	【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。

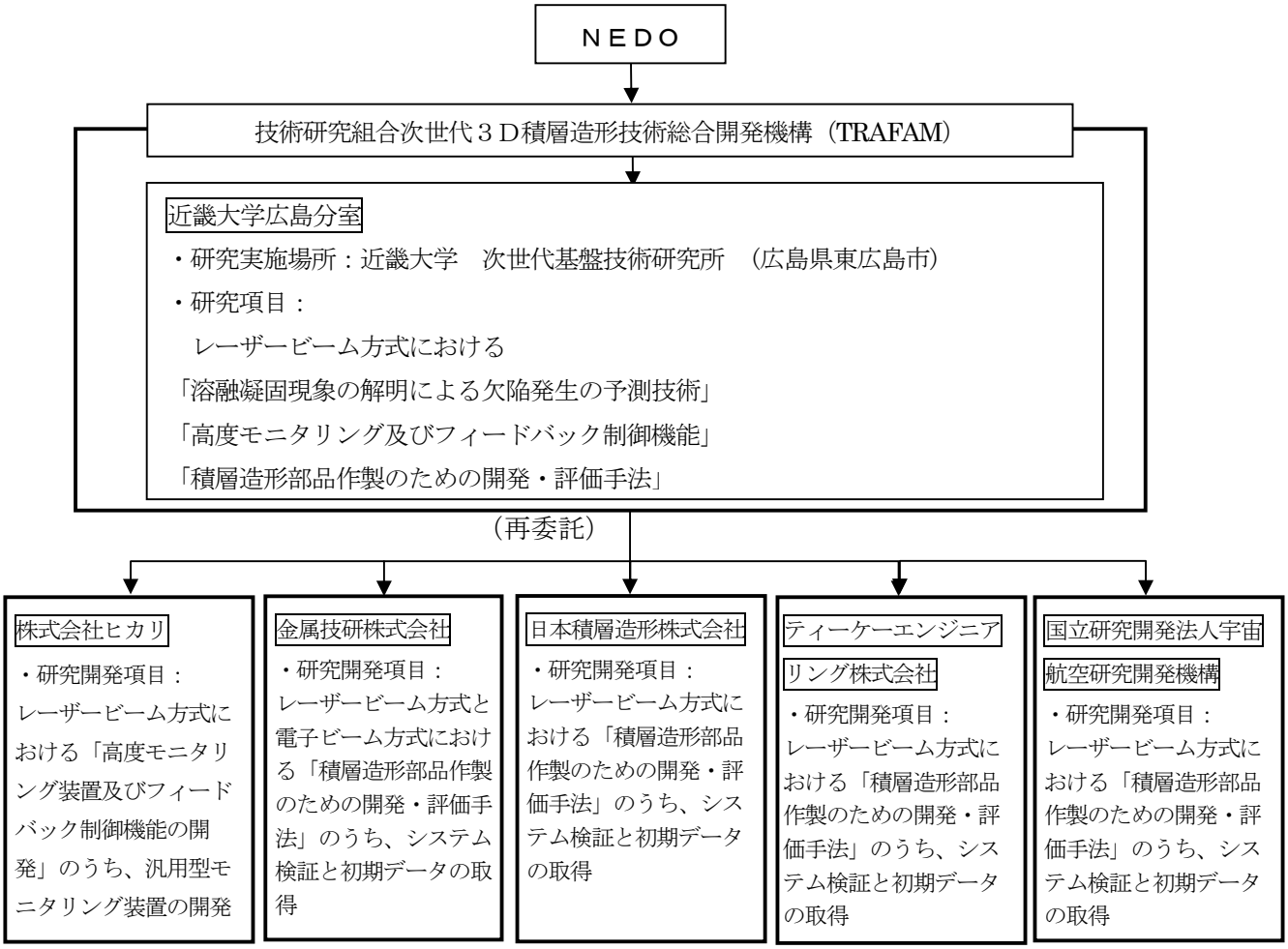
4.　目標及び達成状況の詳細

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。

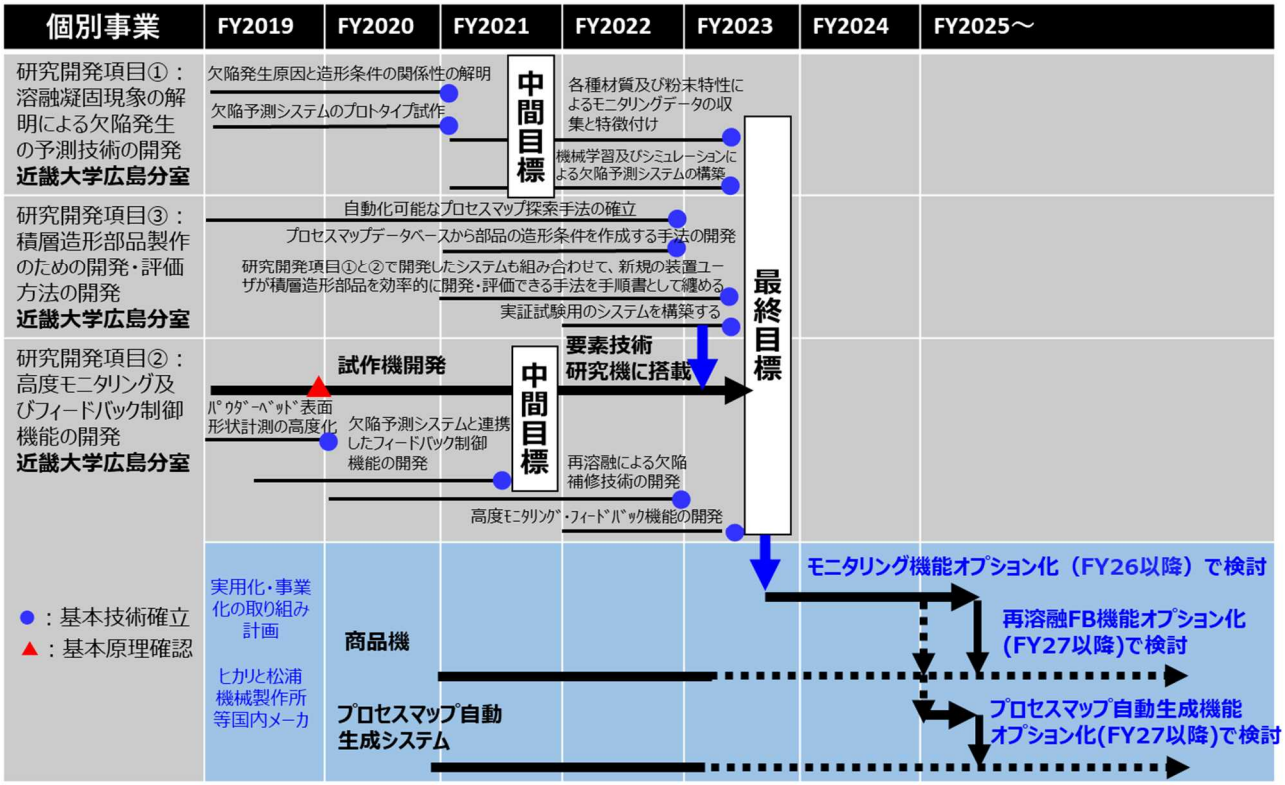
② ソフトウェアの制約

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。
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、欠陥発生の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) 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】

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、取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。
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。

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、50μm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.　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溶融状況（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φ150 ㎜で深さ 150 ㎜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 ㎜/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 μm（1/e^2）として造形を行った。

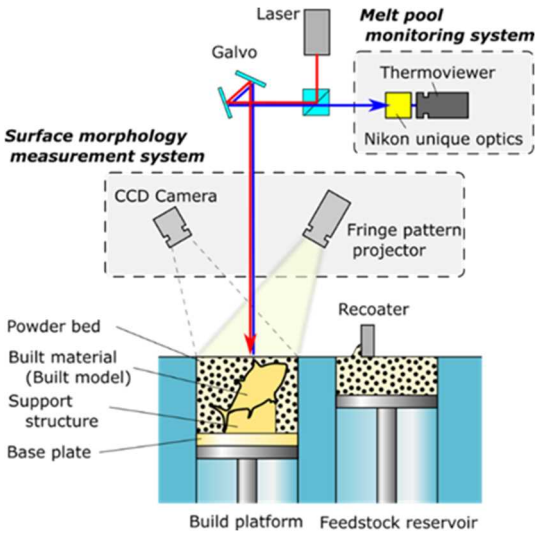
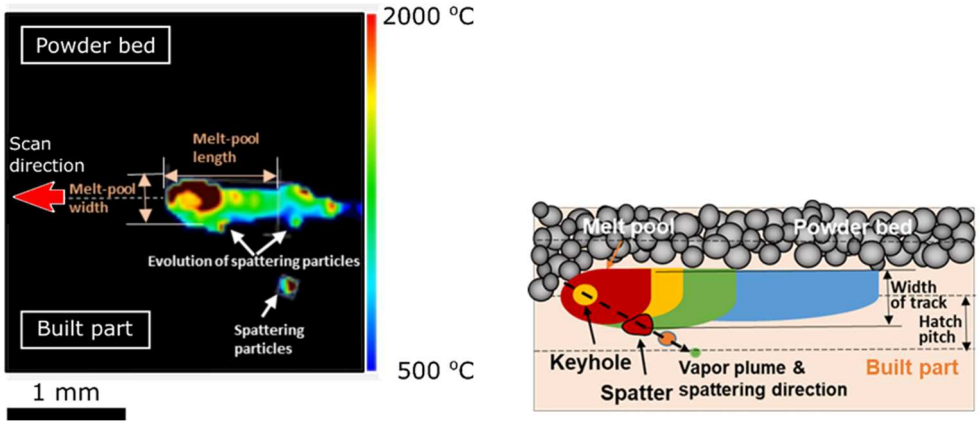


図 4-1-1　レーザー試験研究機の概要

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 80μm/pixel、高さ分解能 7μm 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

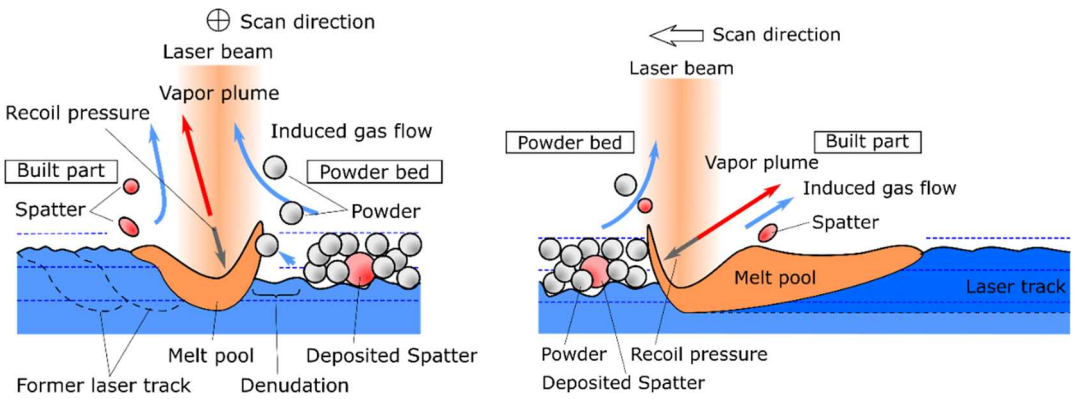
パウダーベッドの状況を考慮して溶融凝固現象を明らかにしておくことは、高品質の造形体を作製する際には極めて重要である。丸棒を造形した際の CCD カメラによるマクロな造形状況及びモニタリング装置によるメルトプールの挙動を観察した。図 4-1-2 に示すメルトプールの状況を見ると、パウダーベッド側からはスパッタはほとんど発生せず、メルトプール上でスパッタが高速で上昇し、造形面側では、多くのスパッタが飛散していることが見て取れる。



(a) 代表的なメルトプールの状況　　(b) 模式図

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。この際プ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、プ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、プ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、メルトプールの前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、プ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プ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。



(a) 走査方向に対して垂直な断面　　(b) 走査方向に対して平行な断面

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の抑制

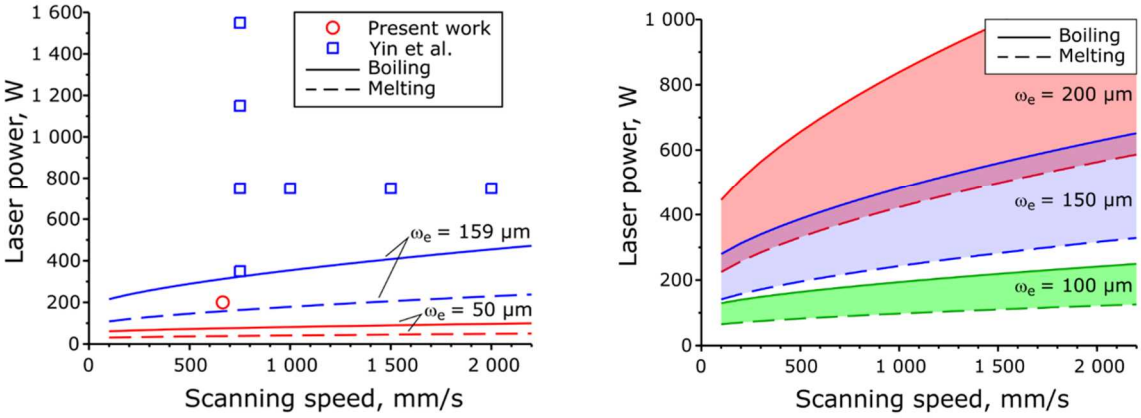
上述したように、スパッタの発生は欠陥を誘引する原因の一つとなるため、造形面の表面性状を滑らかにすることによりできる限りスパッタの発生を抑制することが重要である。Zhen ら[1]は、ベースプレート上に粉末を敷いてレーザー照射を行うと、レーザー出力 400 W、走査速度 400～500 mm/s ではプルームの発生が小さいためにスパッタが発生しにくいと報告している。また、Yin ら[2]は、レーザー照射によるメルトプールにおける蒸発までの dwell time（$t_{boiling} = \frac{\omega_e^2}{8\alpha}\tan^2\left(\frac{\pi^{1.5}k\omega_e T_b}{\sqrt{2}A_p P}\right)$）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）発生の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）（$1/e^2$）ω_e =50 μm、レーザー吸収率（laser absorptivity）A_p = 0.30、蒸発温度（boiling temperature）T_b=3190 K、溶融材の熱拡散係数（thermal diffusivity of the melt material）α =5.6×10^{-6} m^2/s、熱伝導率（thermal conductivity）κ =29.6 W/m・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 μm 及び Yin ら[2]によるスポット径 d=300 μm 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プルームが発生することになる。プル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プルーム発生までの 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の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 μm においては、適切な造形条件ではプル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 μm 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 μm 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.



(a) (b)

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 μm 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、

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

により求めた。

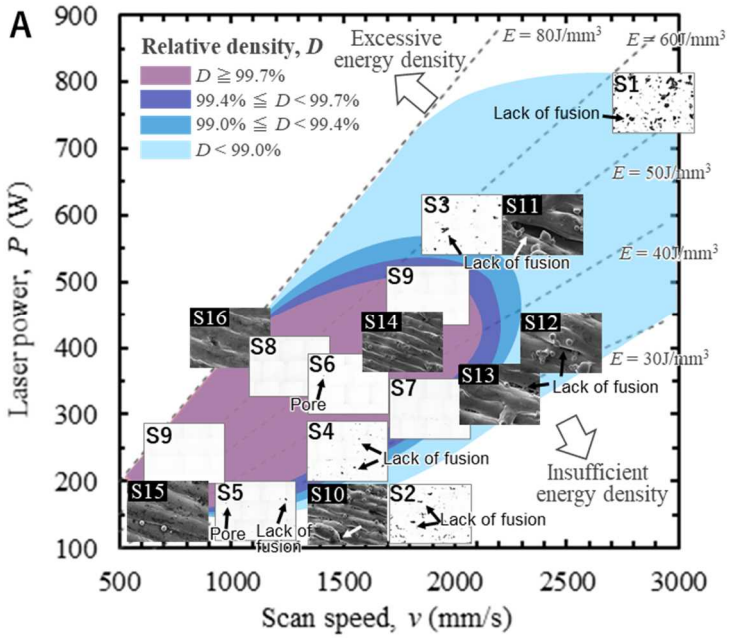
表 4-1-5　造形条件

P / SS	500	750	1000	1250	1500	1750	2000	2250	2500	2750	3000
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

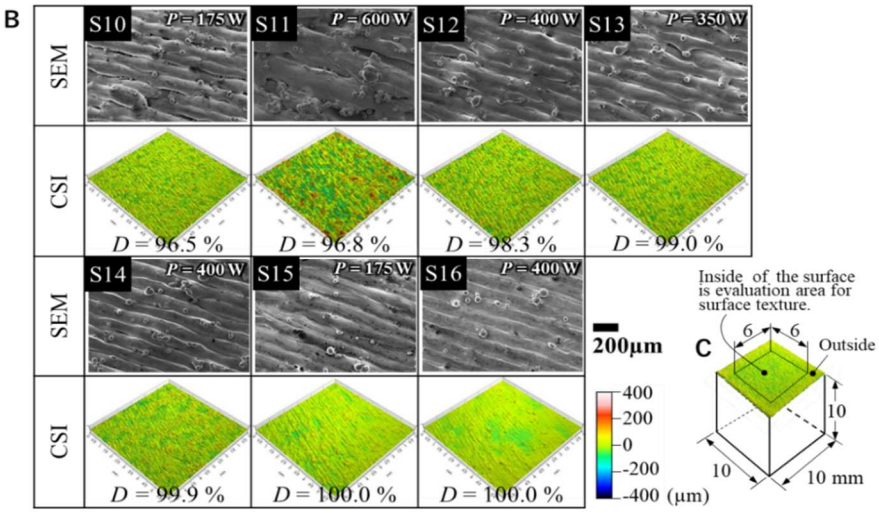
造形できた121個のキューブ試験片の相対密度を指標としたレーザー出力と走査速度のプロセスマップを作成した。なお、造形密度はアルキメデス法により測定し、相対密度の算出には、真密度 8.20 g/cm³ を使用した。図 4-1-5 に、試験片の内部欠陥および造形表面の SEM 像を示したプロセスマップと造形面の表面性状の SEM 像と三次元プロファイラ（Zygo Newview9000）による CSI 像を示す。図中の密度が高い領域（紫色）はプロセスウィンドウと呼ばれ、この領域で内部欠陥が少ないことと合わせて滑らかな表面性状を呈していることがわかる。この領域を外れていくと、表面性状が荒れていくことがわかる。相対密度 99%程度以下になると溶融不良の欠陥が発生しはじめ、密度の低下とともに溶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。ミ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を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。

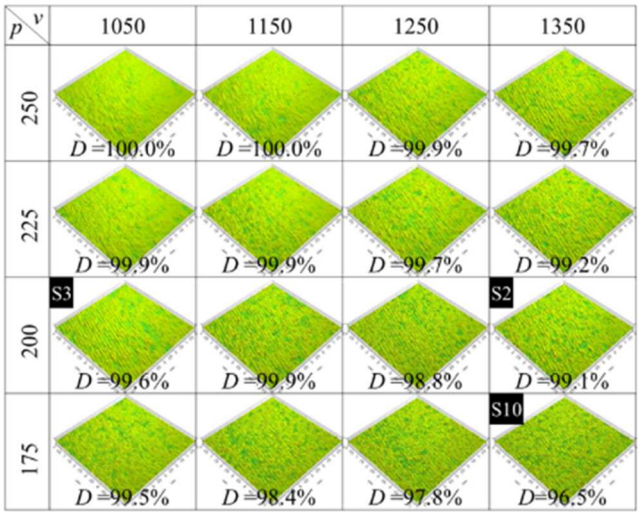


図 4-1-6　表面性状と密度の関係

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。

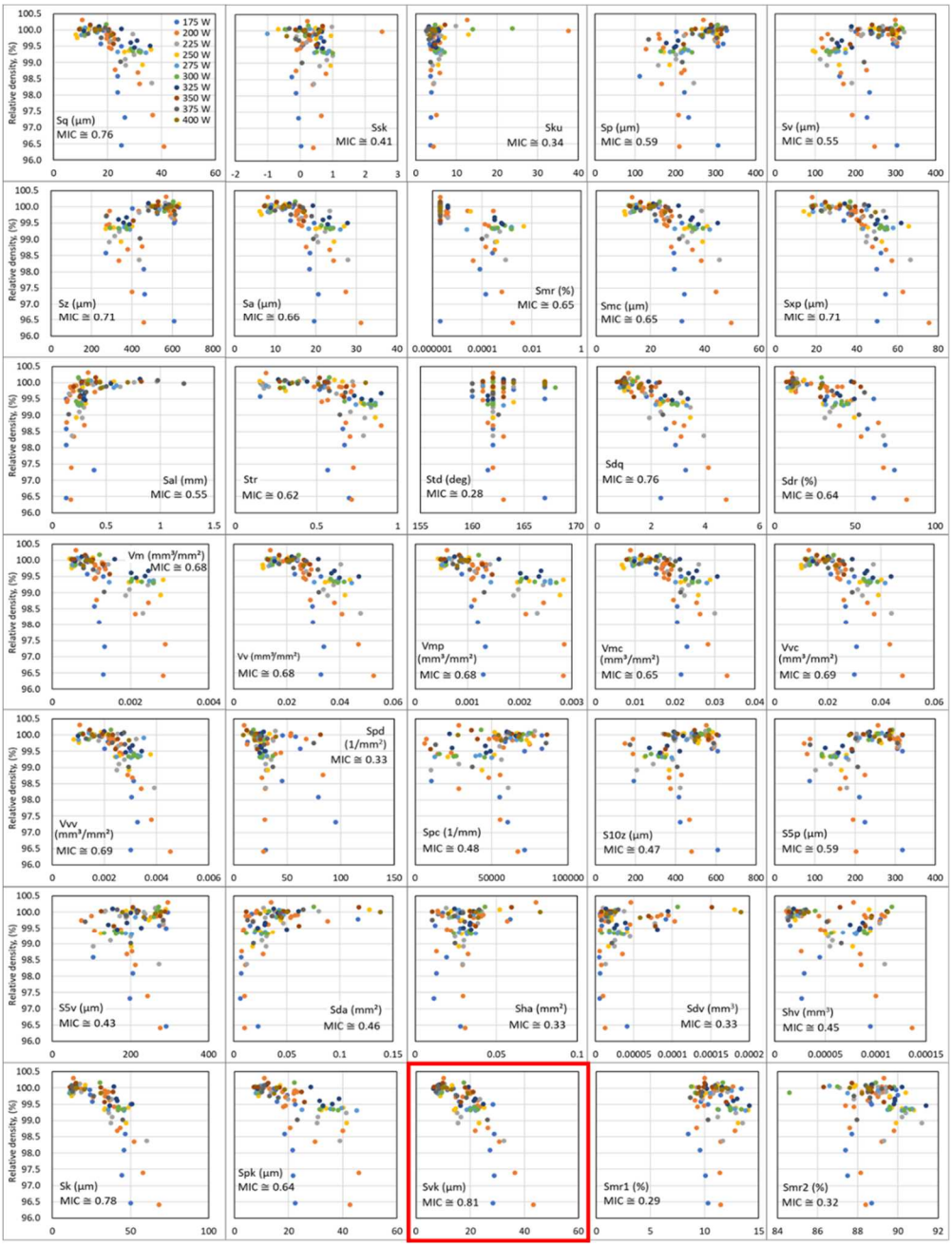


図 4-1-7　表面性状パラメータと造形密度の相関（ISO 25178-2）

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.

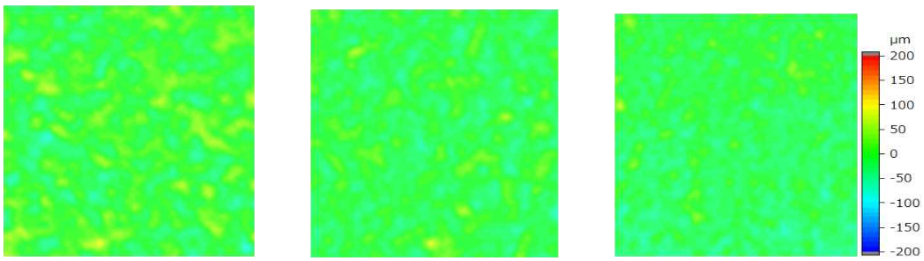
[5] M. Yonehara, C. Kato, T.-. Ikeshoji1, K.Takeshita, H. Kyogoku, Correlation between surface texture and internal defects in laser powder-bed fusion additive manufacturing, Scientific Reports, 11(2021) 22874.

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



(a) A：E=16.7 J/mm³　(b) B：E=37.9 J/mm³　(c) C：E=83.3 J/mm³
（相対密度 94.9%）　（相対密度 100.0%）　（相対密度 99.3%）

図 4-1-8　Ti-6Al-4V 合金におけるレイヤー表面モニタリング画像の例
（レイヤー数：180 層（中間層））

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の試作を行った。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。

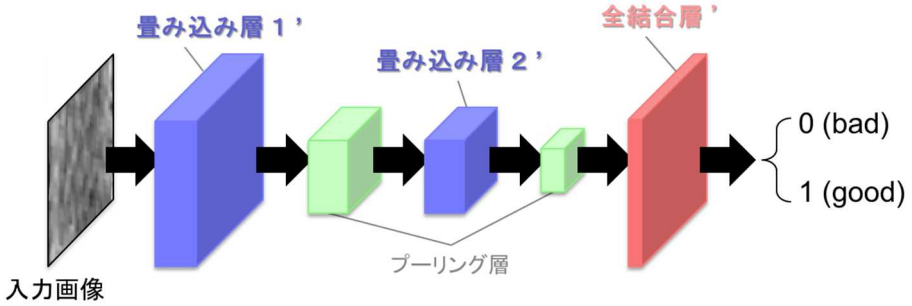
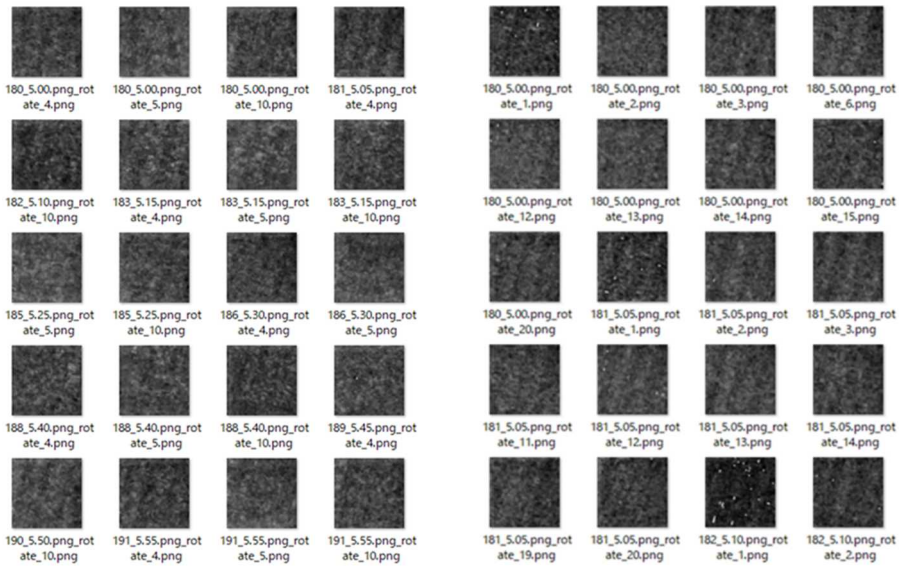


図4-1-9　改良CNNベースモデル構成図



(a) goodラベル学習データ　　(b) badラベル学習データ

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ー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、50μm 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。

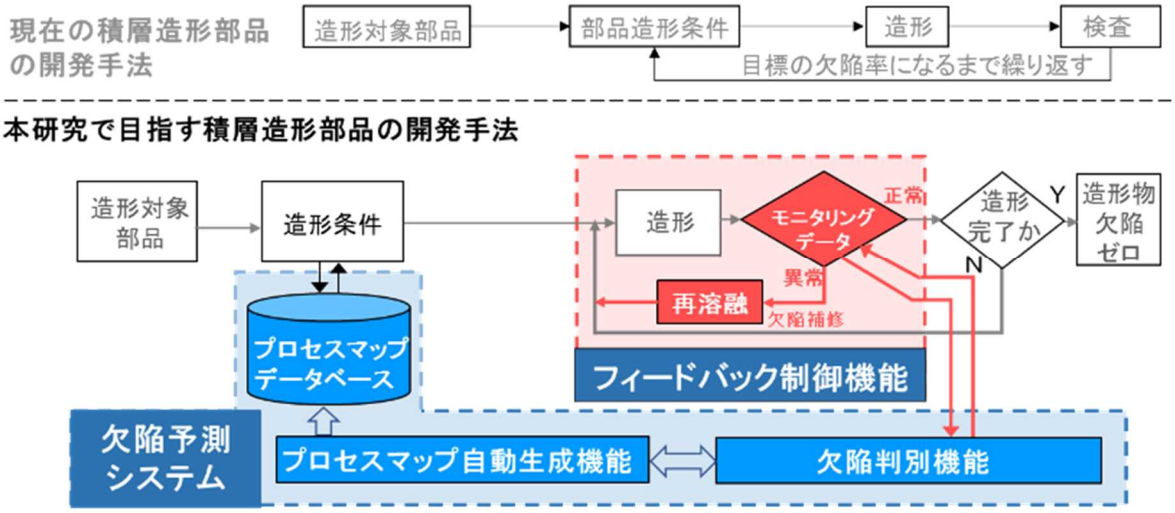


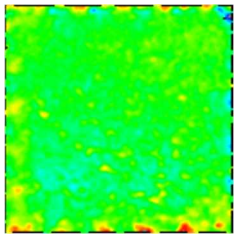
図 4-1-11　欠陥予測システムの概略図

1)パウダーベッド表面三次元計測技術の高度化

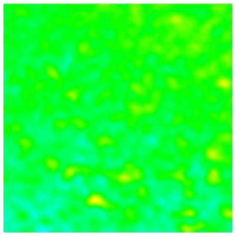
2019 年度に、既設のモニタリング装置を高度化した。主な改良点は次の通りである。開発目標であった既設のモニタリング装置の高さ分解能 30μm から高さ分解能 9μm（平面基準測定結果の 3σ で規定）の高精度で計測可能な機能を開発し、目標値である 10 μm 以下（測定範囲 150 mm× 150 mm）の精度を達成した。この機能をレーザー試験研究機に実装した。また、パウダーベッド全面の温度分布や溶融状況を高精度で計測できる機能も組み込み、パウダーベッド表面温度を測定精度±50 ℃以下で測定可能とし、モニタリング機能を高度化した。

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、

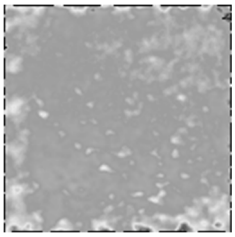
カラーマップ画像、グレースケール画像を出力する。出力する三次元表面性状パラメータの画像の例を図 4-1-12 に示す。これらの画像データを欠陥予測システム開発に利用した。



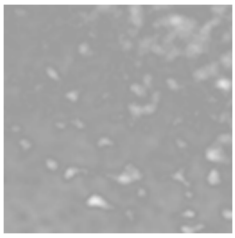
(a) カラーマップ画像（Target size）



(b) カラーマップ画像（Test size）



(c) グレースケール画像（Target size）



(d) グレースケール画像（Test size）

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 10μm で計測しており、ほぼ 30μm 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 50μm 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

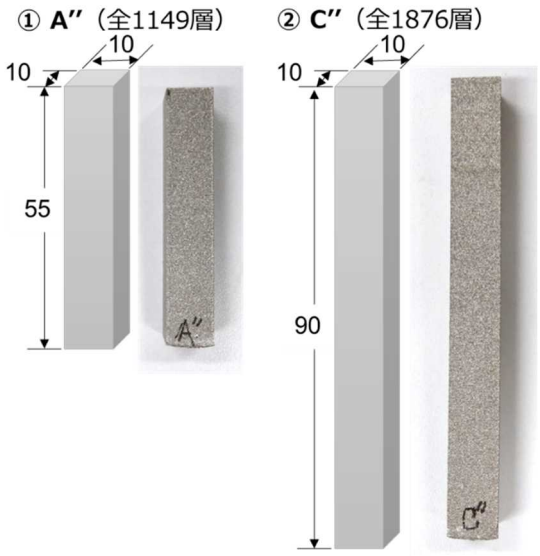


図 4-1-13　角柱試験片形状

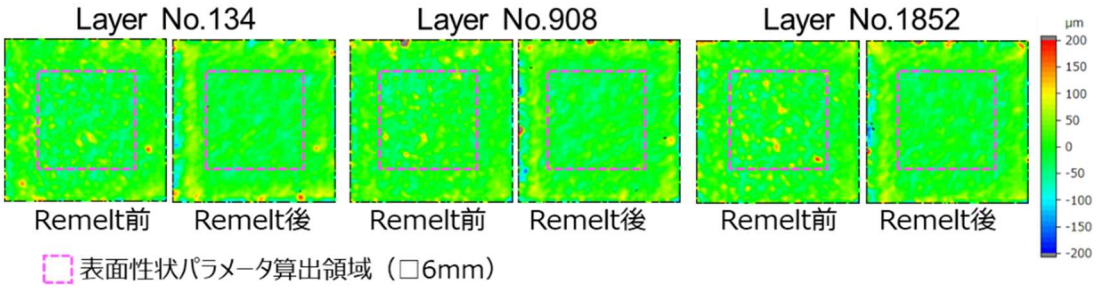
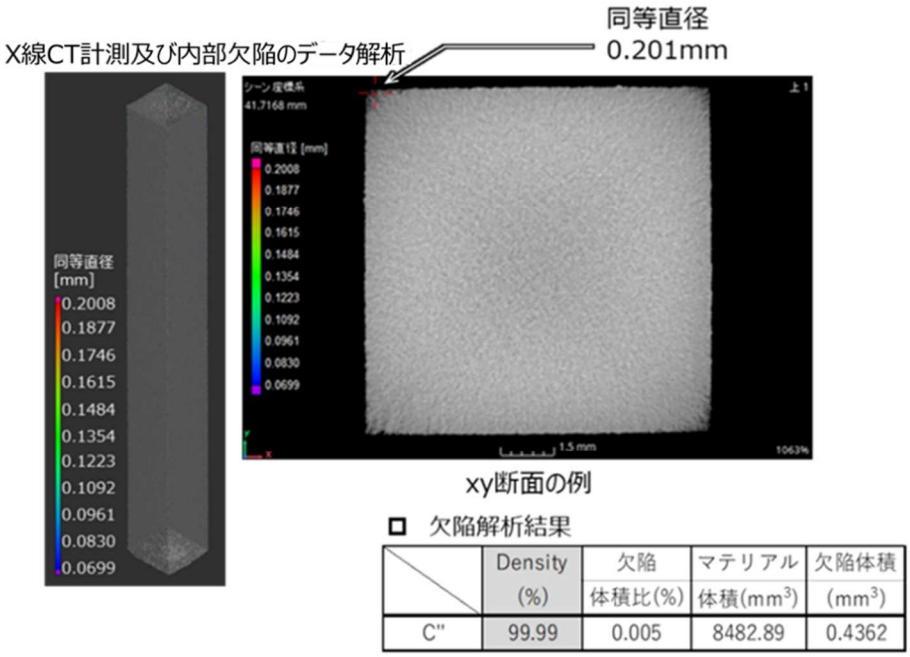


図 4-1-14　再溶融面の例



	Density (%)	欠陥 体積比(%)	マテリアル 体積(mm³)	欠陥体積 (mm³)
C"	99.99	0.005	8482.89	0.4362

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。

(a) 外観　　(b) システム構成図

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ー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。

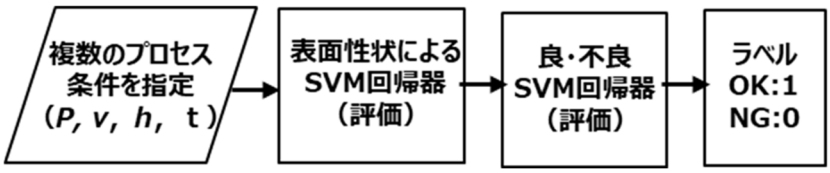


図 4-1-17　プロセスマップ自動生成機能における評価時処理フロー

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。

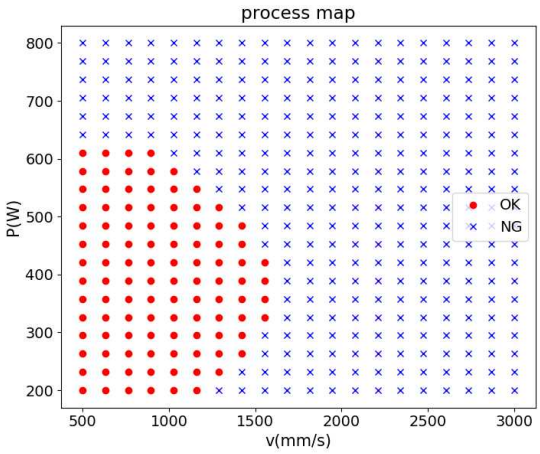


図 4-1-18　プロセス条件(*P*, *v*)とプロセス OK/NG 条件の予測結果

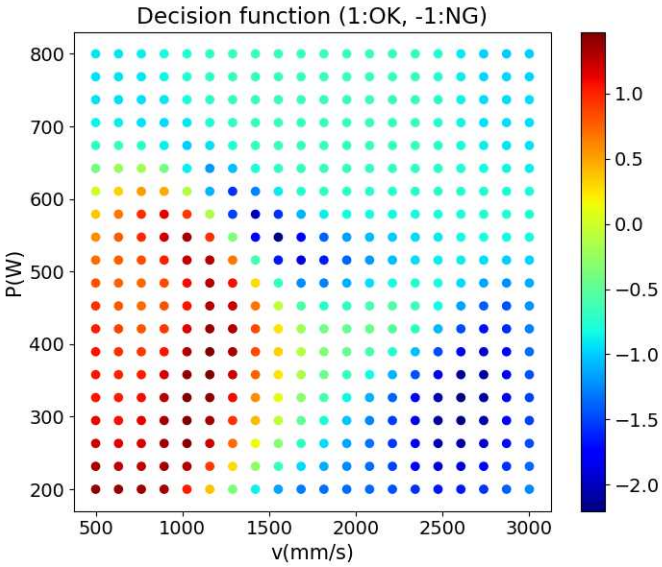


図 4-1-19 プロセス条件(*P*, *v*)とプロセス決定関数の予測結果

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ラ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。

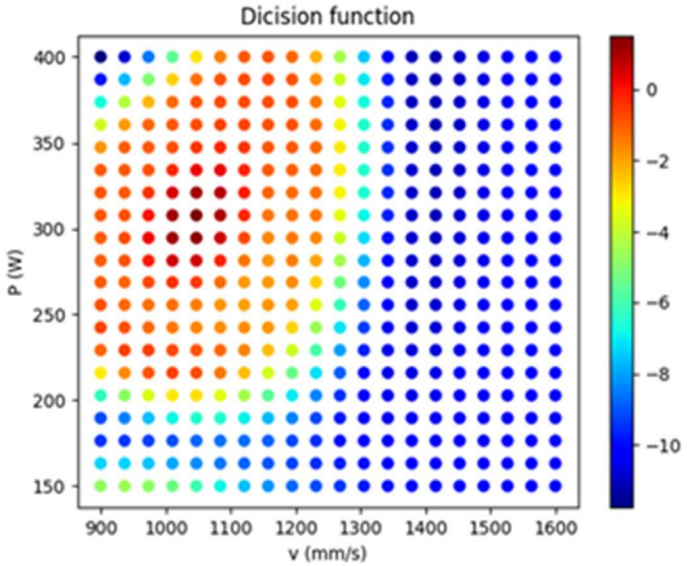


図 4-1-20　プロセスマップ自動生成機能による出力例

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。

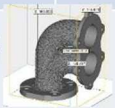
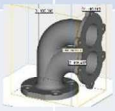
本プロジェクトでは、代表的な 5 つの材種、IN718 合金、SUS316L 合金、Ti-6Al-4V 合金、AlSi10Mg 合金および銅合金について対応したが、Ti-6Al-4V 合金については、プロセスマップは、実験結果とよ

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。

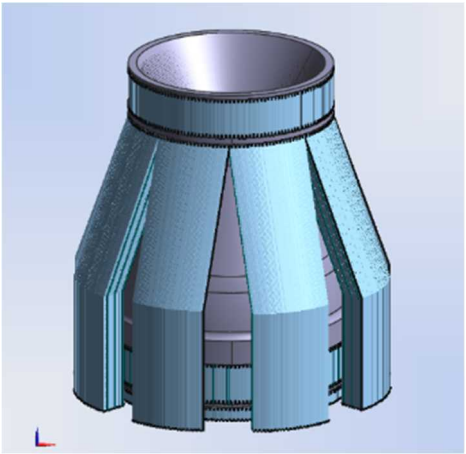
2)ユーザ実証

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

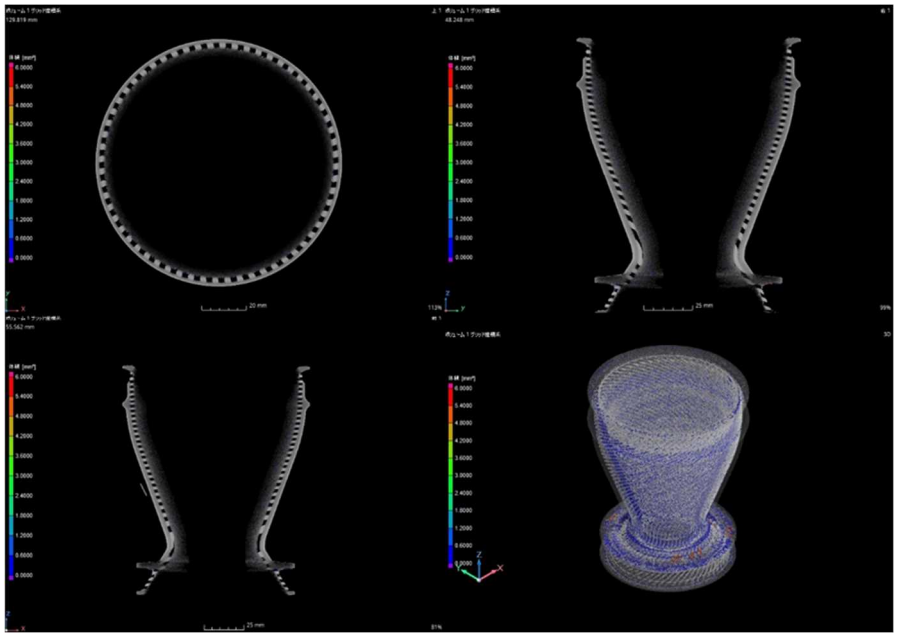
材質 ユーザ	IN718 合金	SUS316L 合金	Ti-6Al-4V合金	AlSi10Mg 合金	銅合金
A社	航空宇宙分野 (ロケットエンジン部品)				
B社		輸送機器分野 		輸送機器分野 	
C社			航空宇宙分野		
D社					電気機械器具分野(高周波コイル)

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 60μm 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。

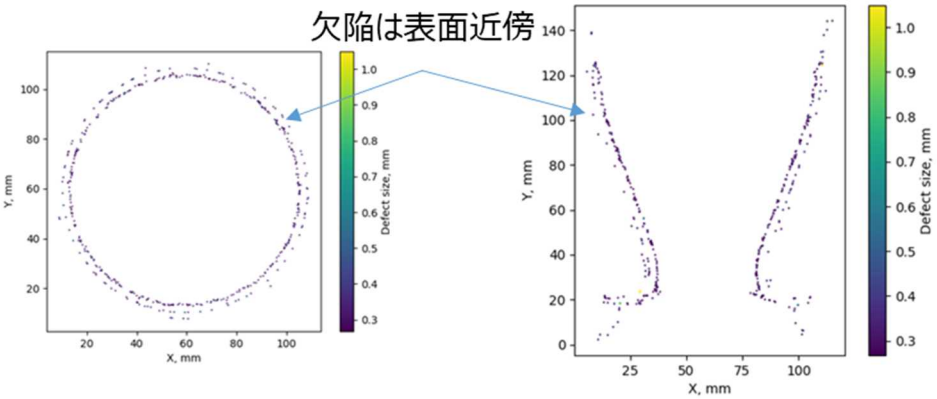


(a) 造形データの３Ｄモデル　　(b) フィードバック有

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溶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。

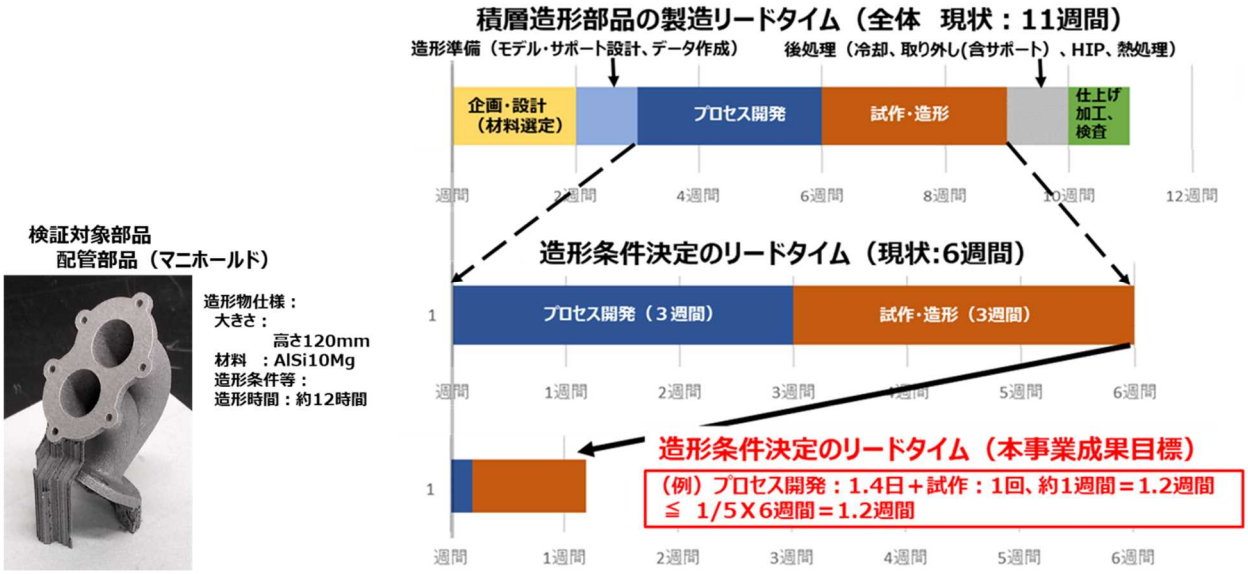


図 4-1-23 積層造形部品の製造リードタイム

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50μm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、TRL 6 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

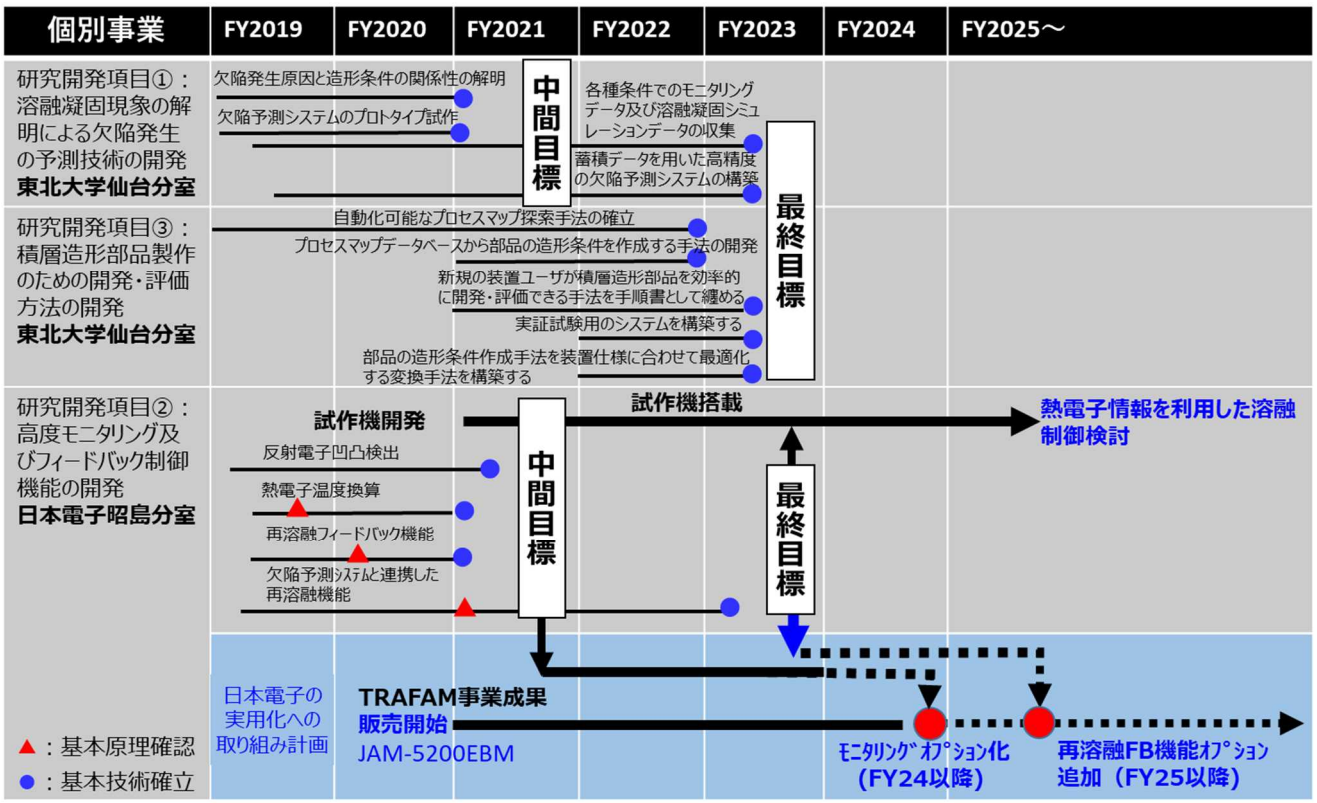
事業の内容、及び実用化に向けてのスケジュールを表 4-2-1　に示す。

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。
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溶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：溶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ト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、開発ソフトウエアを用いた、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。
	・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。

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 10μm 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－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。0.3㎜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。

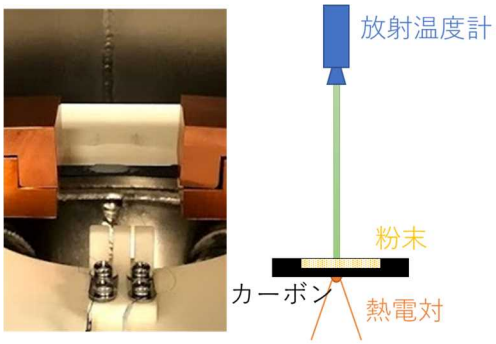


図 4-2-1 粉末熱放射率測定のセットアップ

<u>粉末放射率測定　測定方法</u>

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

くとっ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。

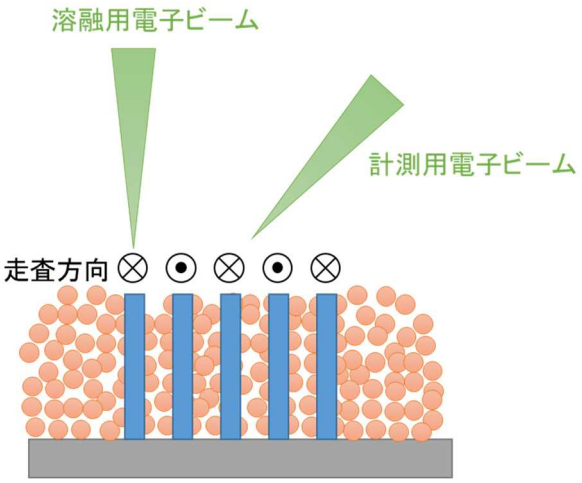


図 4-2-3 メルトプールのその場観察。ラインオフセットを広めにとって造形を行い、シングルトラックのメルトプールのその場観察を実施。

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。

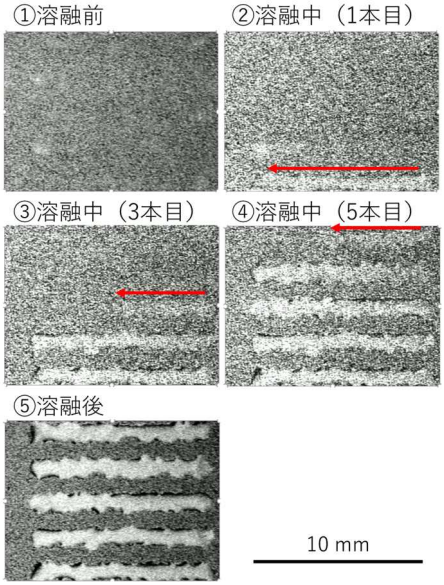


図 4-2-4 メルトプールのその場観察結果のスクリーンショット

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。

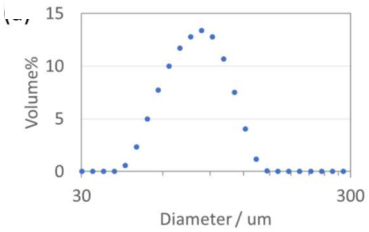


図 4-2-5 プラズマアトマイズで作製された
Ti-6Al-4V 合金粉末の粒度分布

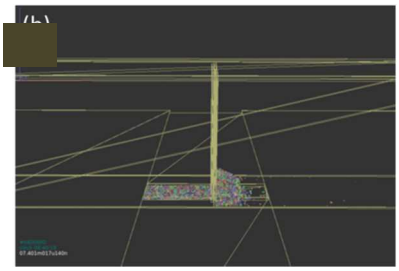


図 4-2-6　図 4-2-5 の粒度分布を与えて DEM で計算させた
パウダーベッド形成過程のスクリーンショット

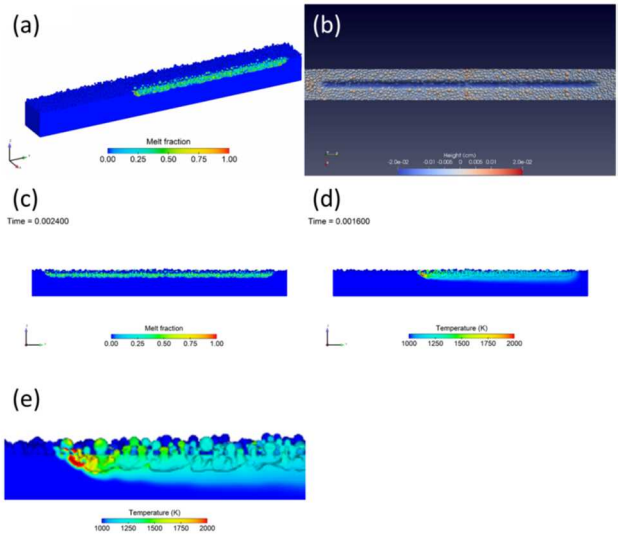


図 4-2-7 DEM で形成したパウダーベッドモデル上に電子ビームを走査させたときの溶融・凝固挙動の CFD によるシミュレーション結果。(a) 液相率のスクリーンショット。(b) 凝固後の高さマップ。(c) 液相率の電子ビーム走査方向に平行な縦断面。(d) 温度分布の電子ビーム走査方向に平行な縦断面。(e) 図 4-2-7 (d)のメルトプール先頭近傍の拡大図。

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－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 10μm 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溶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、10μm 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。

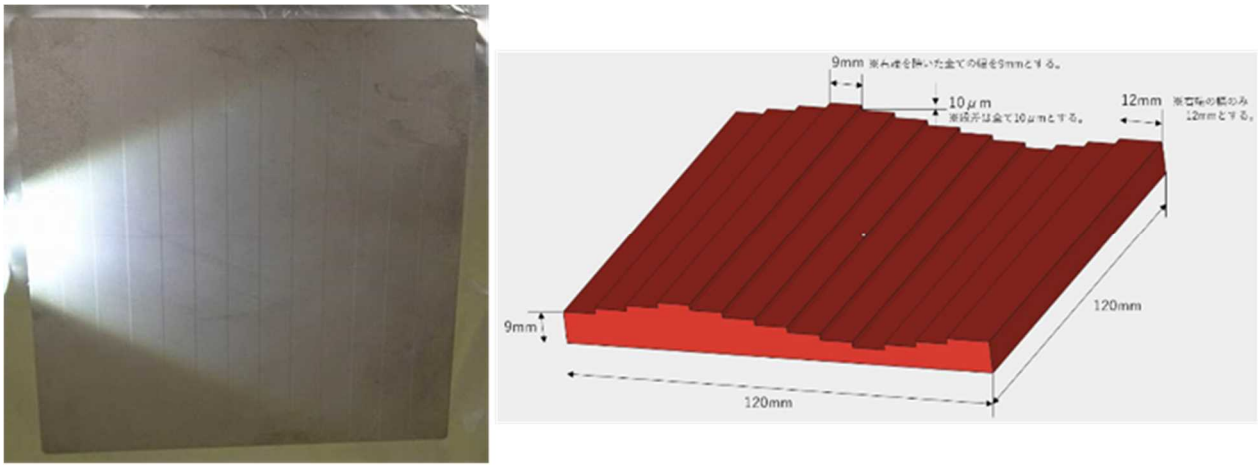


図 4-2-8　10μm の段差付きベースプレートとその寸法図

図 4-2-9 は、10μm 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。10μm 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 10μm の段差が確認でき、パウダーベッド表面及び造形表面を 10μm 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、及び溶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。

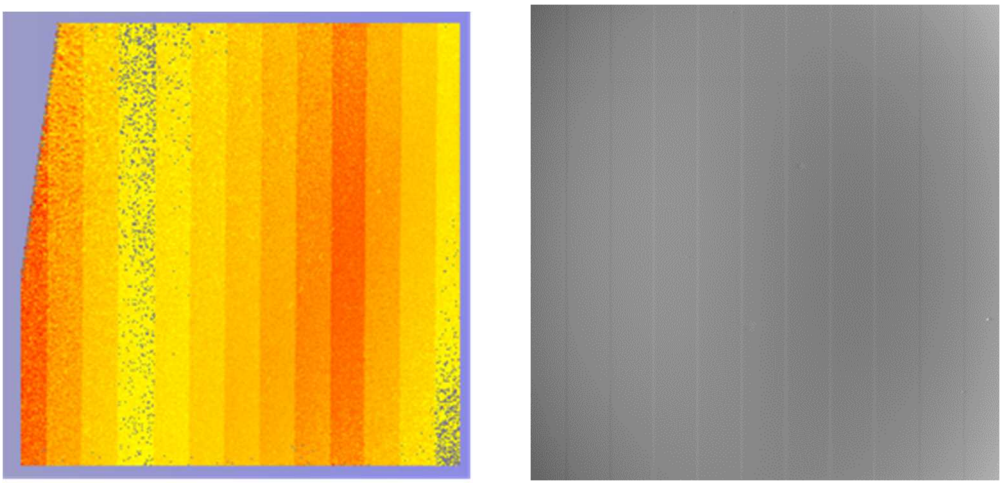


図 4-2-9　10μmの段差付きベースプレートの光学方式の画像(左)、
及び電子ビーム方式の画像(右)

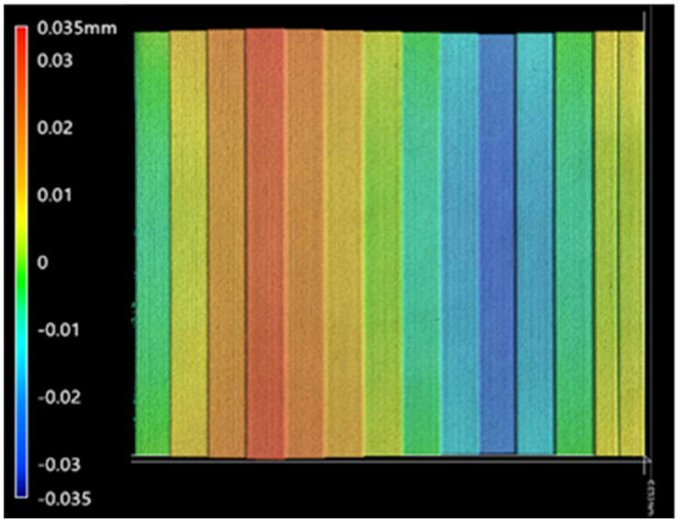


図 4-2-10　キーエンス製 3D 形状測定機による測定

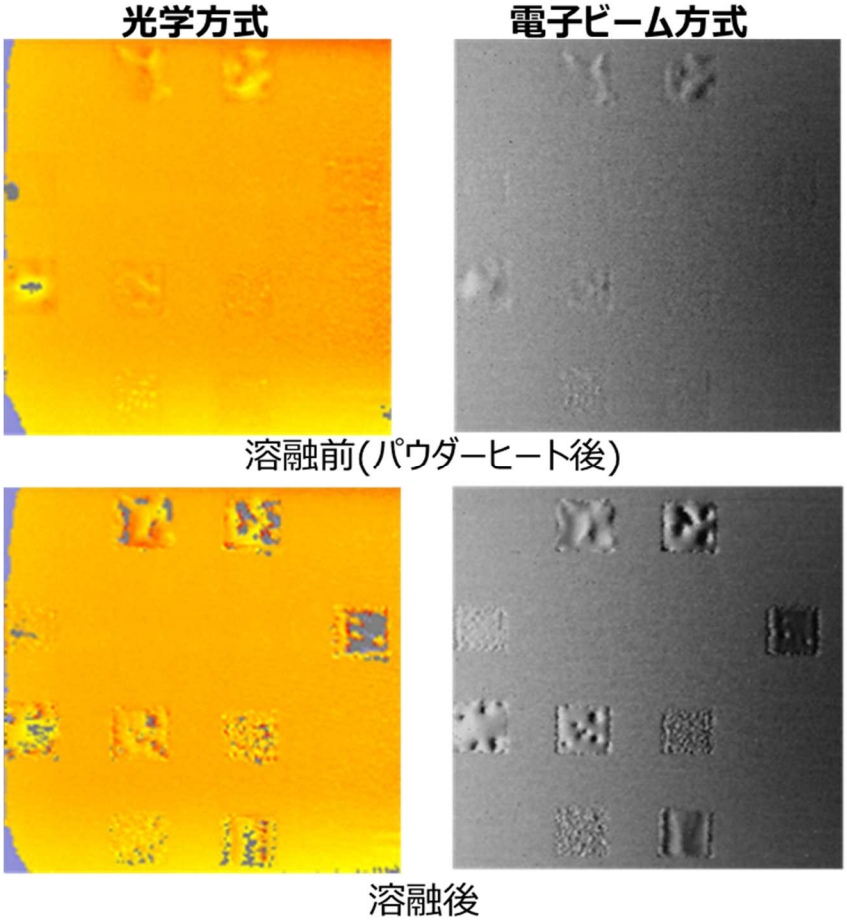


図 4-2-11　造形中にけるパウダーヒート後、及び溶融後の造形面の光学方式画像と電子ビーム方式画像

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

溶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、その溶融パーツ表面の溶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溶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、再溶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)再溶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溶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。

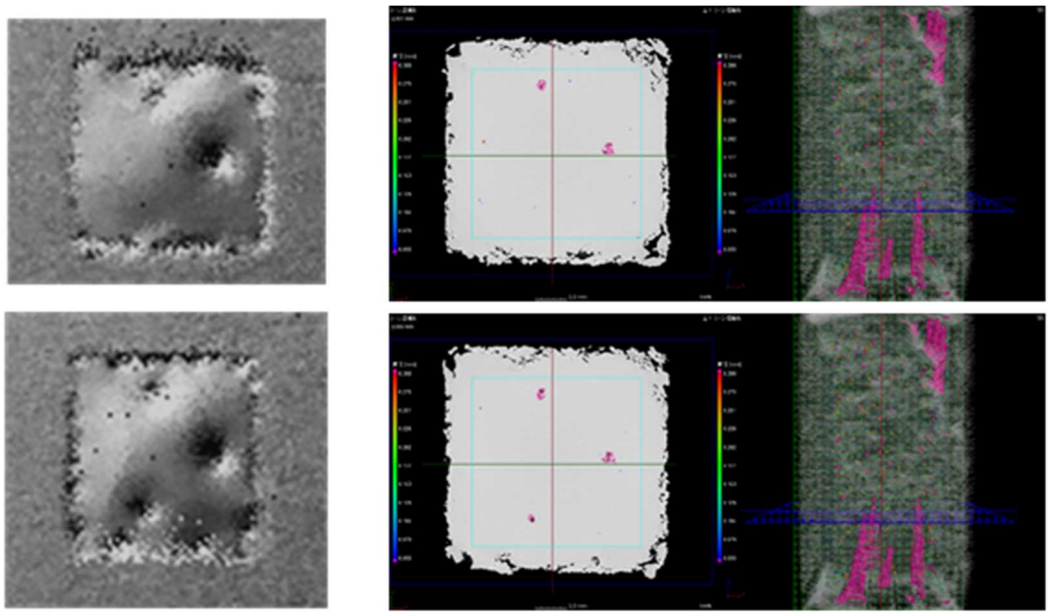


図 4-2-12　BSE 画像(左)と X 線 CT 画像(右)

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、10×10×8 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。

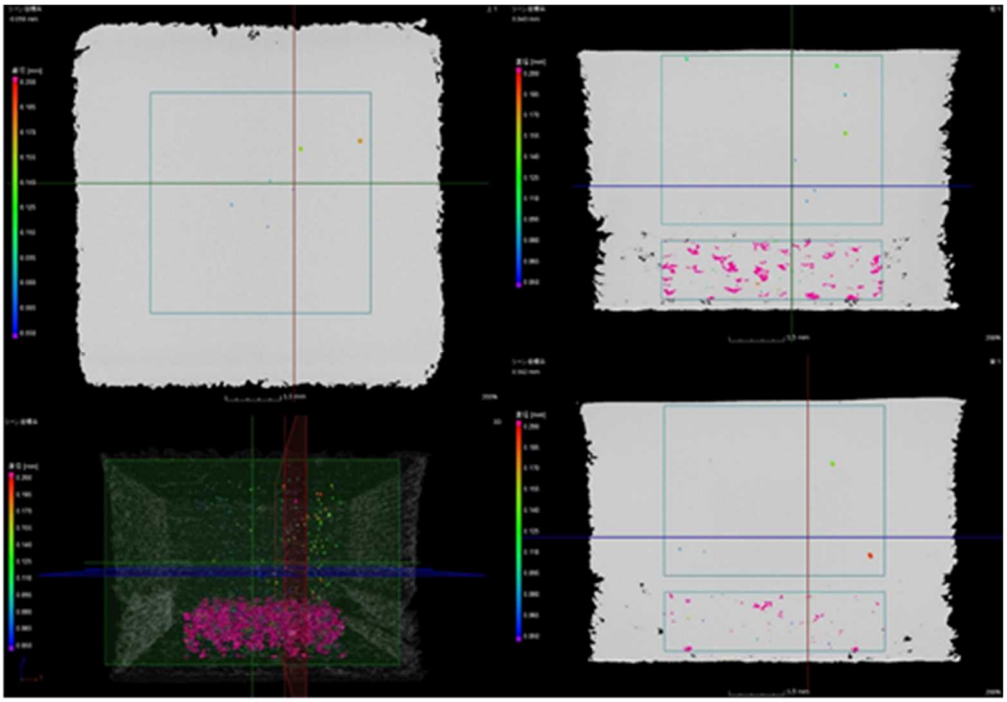


図 4-2-13 再溶融の有無による欠陥生成の変化を示した X 線 CT 画像

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系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。

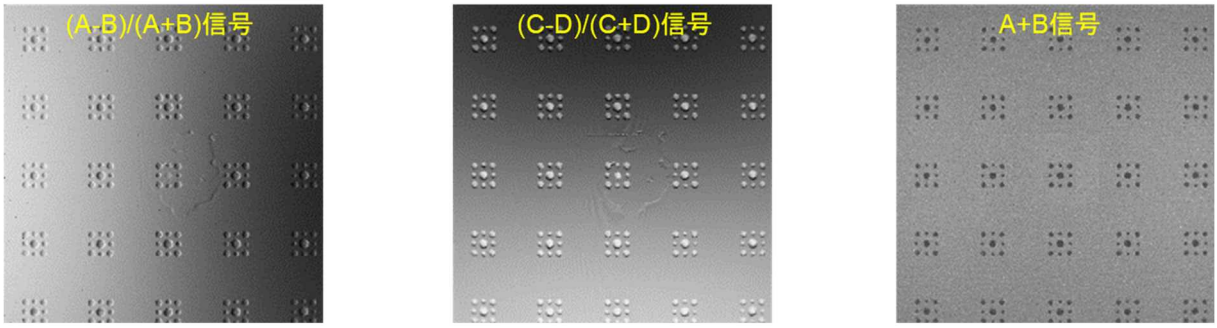


図 4-2-14　3 画像同時取得確認

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。

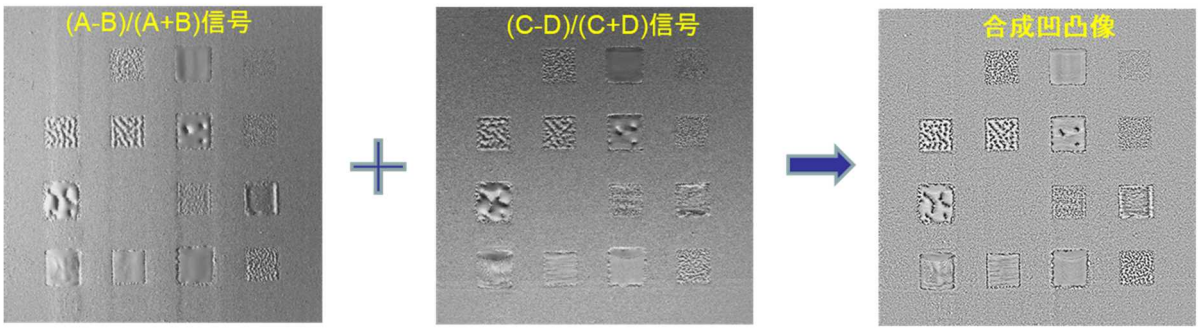
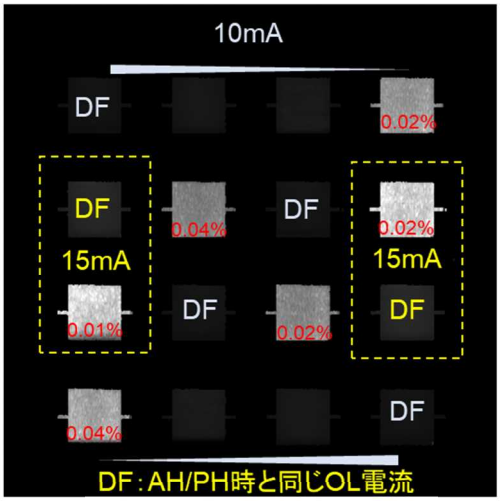


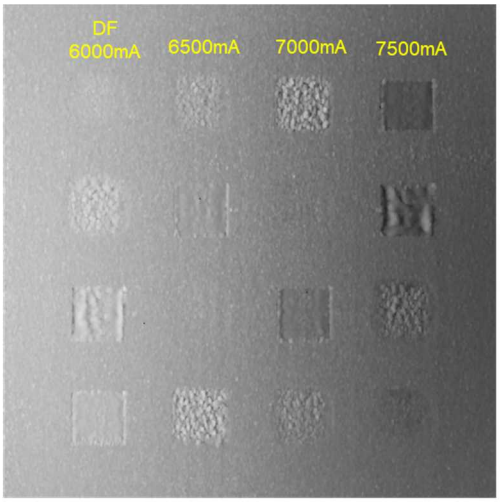
図 4-2-15　同時取得した 2 画像を用いた凹凸像合成例

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パーツが溶融ビーム電流 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パーツ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。



溶融中の熱電子像



溶融後のBSE像(A-B)/(A+B)

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まった最適溶融条件をベースにしている。

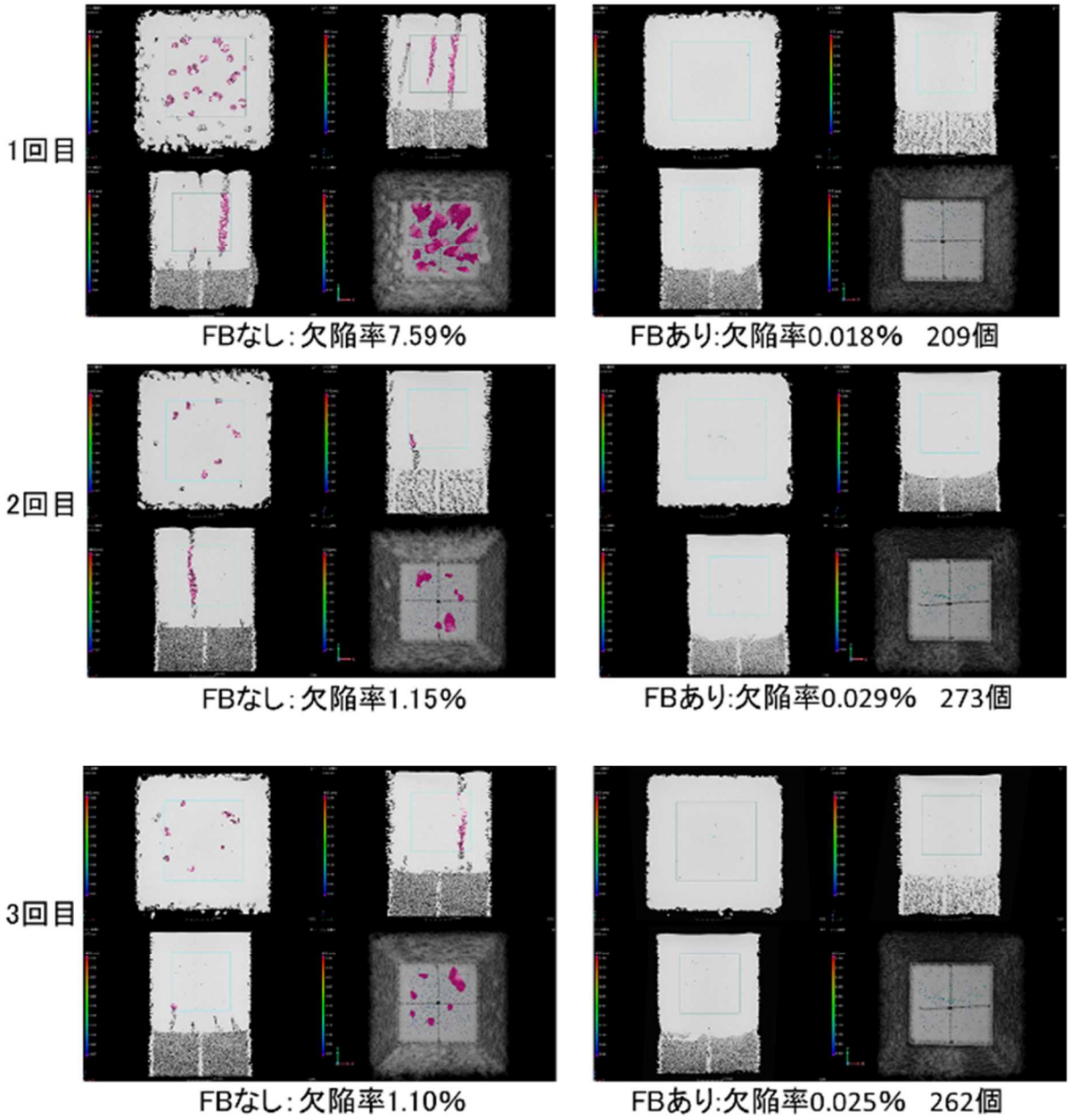


図 4-2-17 欠陥予測システムと連携した再溶融 FB 機能の有無による欠陥率の比較

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 μA、ボクセルサイズは44.1μmであった。

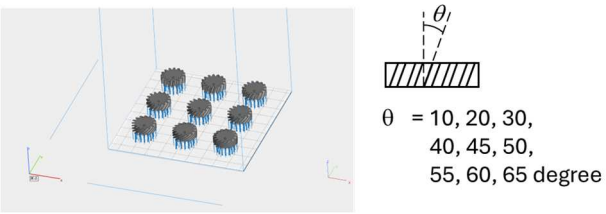


図4-2-18 ユーザ実証（ヘリカルギア）用造形モデル

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ポア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。

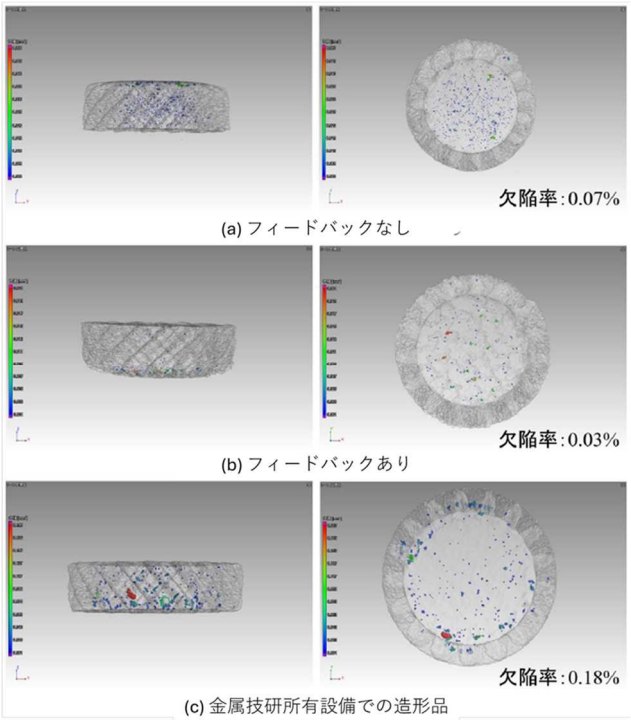


図 4-2-19 開発装置によるユーザ実証造形品および
既存造形装置での造形品の評価結果

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 μA、ボクセルサイズは 30μm であった。

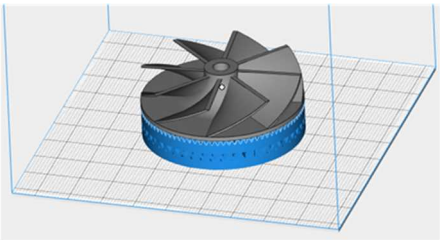


図 4-2-20 インペラの造形モデル

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。

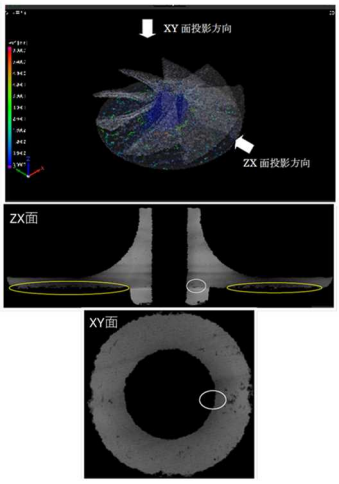


図 4-2-21 インペラのフィードバックバック制御無し造形品のX線CT評価結果

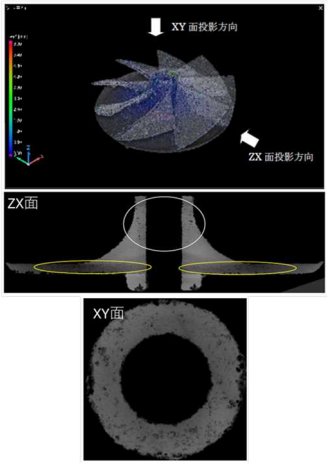


図 4-2-22 インペラのフィードバックバック制御有り造形品のX線CT評価結果

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 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

Ｐ１９００７

「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限り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 10μm 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 30μm 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 50μm 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 10μm 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 50μm 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】

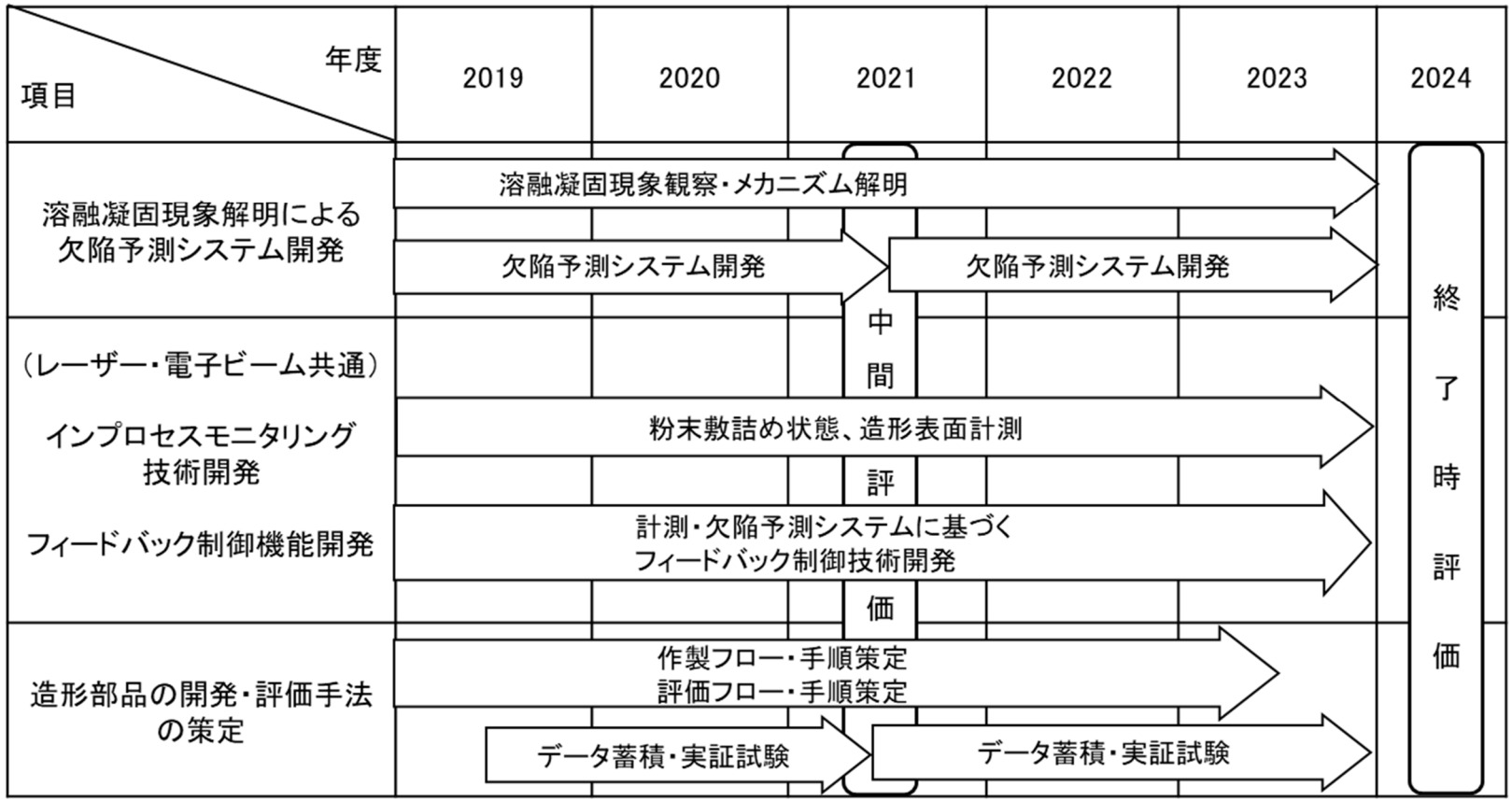
・開発・評価手法の開発のために必要な積層造形物に関する評価データを、金属材料1種類以上について蓄積する。

【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



●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 γ → ε 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, YumaYanaga, Koki	近畿大学	Spattering 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 b e d 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、蔦川生璃、数森啓悦、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 ＴＲＡＦＡＭ	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 増本量賞	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