

# 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】

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 IoT 推進部
-----	--

## 目次

概要	1
用語集	6
I. 事業の位置づけ・必要性について	9
1. 事業の背景・目的・位置づけ	9
1. 1 事業の背景	9
1. 2 事業の目的	9
1. 3 事業の位置づけ	10
2. NEDO の関与の必要性・制度への適合性	12
2. 1 NEDO が関与することの意義	12
2. 2 実施の効果（費用対効果）	12
II. 研究開発マネジメントについて	13
1. 事業の目標	13
2. 事業の計画内容	13
2. 1 研究開発の内容	13
2. 2 研究開発の実施体制	15
2. 3 研究開発の運営管理	16
2. 4 研究開発成果の実用化・事業化に向けたマネジメントの妥当性	16
3. 情勢変化への対応	17
4. 評価に関する事項	19
III. 研究開発成果について	20
1. 事業全体の成果	20
1. 1 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義	20
1. 2 成果の最終目標の達成可能性	22
1. 3 成果の普及	24
1. 4 知的財産等の確保に向けた取組	24

2. 研究開発項目毎の成果.....	25
2. 1 レーザービーム方式.....	25
2. 1. 1 項目① 熔融凝固現象の解明による欠陥発生の予測技術の開発.....	25
2. 1. 2 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.....	32
2. 1. 3 項目③ 積層造形部品製作のための開発・評価方法の開発.....	34
2. 2 電子ビーム方式.....	34
2. 2. 1 項目① 熔融凝固現象の解明による欠陥発生の予測技術の開発.....	34
2. 2. 2 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.....	38
2. 2. 3 項目③ 積層造形部品製作のための開発・評価方法の開発.....	42
IV. 成果の実用化・事業化に向けた取組及び見通しについて.....	43
1. レーザービーム方式.....	43
1. 1 成果の実用化・事業化に向けた戦略.....	43
1. 2 成果の実用化・事業化に向けた具体的取り組み.....	43
1. 3 成果の実用化・事業化の見通し.....	43
2. 電子ビーム方式.....	43
2. 1 成果の実用化・事業化に向けた戦略.....	43
2. 2 成果の実用化・事業化に向けた具体的取り組み.....	43
2. 3 成果の実用化・事業化の見通し.....	44

# 概要

		最終更新日	2021年8月30日
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/ PMまたは担当者	IoT推進部 PM 三代川 洋一郎 (2020年4月～現在) IoT推進部 PM 川端 伸一郎 (2019年3月～2020年3月)		
0. 事業の概要	<p>ものづくりの付加価値を上げていくためには、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。</p> <p>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。</p>		
I. 事業の位置 付け・必要性 について	<p>第4次産業革命が進展する中、ものづくりの付加価値を上げていくためには、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。</p> <p>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働力を引き出し、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上げていくことが急務である。</p> <p>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。</p>		
II. 研究開発マネジメントについて			
事業の目標	<p>1)アウトプット目標</p> <p>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</p> <p>【中間目標】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>欠陥発生予測システムの予測精度 80%以上</li> </ul> <p>【最終目標】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>欠陥発生予測システムの予測精度 95%以上</li> </ul> <p>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</p> <p>【中間目標】</p> <p>(レーザービーム方式)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>積層造形プロセスにおける粉末敷き詰め状態及び造形面について、精度 10 μm 以下で凹凸を計測</li> <li>造形面の欠陥部分を再溶融する機能を開発</li> </ul> <p>(電子ビーム方式)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>積層造形プロセスにおける粉末敷き詰め状態及び造形面について、精度 30 μm 以下で凹凸を計測</li> <li>造形面の欠陥部分を再溶融する機能を開発</li> <li>メルトプール形状を画像化する機能を開発</li> <li>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</li> </ul> <p>【最終目標】</p> <p>(レーザービーム方式)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>フィードバック制御機能による造形プロセス中の 50 μm 以上の欠陥率 0%</li> </ul> <p>(電子ビーム方式)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>積層造形プロセスにおける粉末敷き詰め状態及び造形面について、精度 10 μm 以下で凹凸を計測</li> <li>フィードバック制御機能による造形プロセス中の 50 μm 以上の欠陥率 0%</li> </ul>		



レーザービーム方式

◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

研究開発項目	目標（中間）	成果	達成度	今後の課題と解決方針
1. 溶融凝固現象の解明による欠陥発生予測技術の開発	インコネル718合金の評価データを収集する。	モニタリング装置を改良して、インコネル 718 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できた。また、造形体の密度及び欠陥状況を X線 CT により収集できた。	○	達成済み。
	機械学習により欠陥発生予測を可能とする。	モニタリング装置により得られた造形表面画像データを機械学習用の教師データとして収集し、これらの画像データを用いて欠陥発生予測を可能とした。	○	最終目標の予測精度 95%以上に向けて、欠陥予測システムの改良を行い、予測精度 95%以上の目途を得ており、高精度化へ向けて開発中。
	欠陥予測システムの予測精度を 80%以上にする。	上記教師データを用いて、機械学習を利用した欠陥予測のプロトタイプシステムを試作し、予測精度 80%以上を達成した。	○	
2. 高度モニタリング及びフィードバック制御機能の開発	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を精度 10 μm 以下で凹凸を計測可能とする。	パウダーベッド及び造形表面の表面粗さの定量化のために、パターン投影法により高さ分解能 10 μm 以下 (7.3 μm) を達成した。	○	達成済み。
	測定精度 ±50 °C 以下でパウダーベッド表面温度を計測可能とする。	溶融凝固シミュレーションの精度を向上させるために、パウダーベッド表面の測定も行えるようにし、サーモビューワによる測定温度 ±50°C 以下を達成した。	○	達成済み。
	造形面の欠陥部分を再溶融する機能を開発する。	メルトプールモニタリングによるスパッタの大きさを計測するとともに、造形表面の表面粗さ計測による再溶融機能を開発した。現在、欠陥率 0% を満足する再溶融条件を探索しており、フィードバックのための欠陥補修機能を開発中。	○	造形プロセス中の 50 μm 以上の大きさの欠陥率を 0% とするフィードバック制御機能を開発。
3. 積層造形部品作製のための開発・評価手法の開発	プロセスマップ探索手法を検証する。	造形表面画像データの利用によるプロセスマップ自動作成手法を確立した。現在、最適条件自動探索システム構築のためのデータを取得中。	○	今後は、メルトプールモニタリングデータ、パウダーベッド及び造形表面データを用いた最適条件自動探索システムを構築。また、金属材料 2 種類以上の評価データを取得し、プロセスマップを探索する手法を検証する。
	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。	インコネル 718 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評価データを蓄積。現在、SUS630 合金について評価データを取得中。	○	
	キューブ試験片と併せて、実態に即した形状の試験片による評価データも取得する。	現在、インコネル 718 合金の実態に即した形状の試験片を用いて、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評価データを取得中。	△ (2022 年 3 月達成予定)	

III. 研究開発成果について

研究開発項目	目標（中間）	成果	達成度	今後の課題と解決方針
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	パウダーヘッドの溶融凝固挙動（マルチロールの安定性）と欠陥形成の相関を解明する。	Ti64 パウダーヘッドの放射率を計測し、シミュレーションにより Ti64 パウダーヘッドの溶融凝固を解析した。マルチロールのモニタリングが可能になった。今後機能の改善が完了次第、試験を実施する。	△ (2022年3月達成予定)	マルチロールモニタリング完成後、実施。 モニタリング試験を行う。 (2022年1月～)
	欠陥形成の学理構築を通して欠陥予測システムを開発・試作する。	欠陥形成は表面性状と関係があり、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ヘッドの充放電シミュレーションソフトウェアを試作した。	○	試験研究機に実装し、フィードバック機能との連携を行う。 電子ビーム方式のデータを増やし、欠陥予測システムの高精度化を実施。
	欠陥予測システムの予測精度を80%以上にする。	テスト用の単純形状造形材のデータで予測精度90%を達成した。	○	
2. 高度モニタリング及びフィードバック制御機能の開発	マルチロール形状を計測専用の電子ビームから得られた反射電子を用いて画像化可能とする。	観察用電子ビームを用いた反射電子画像で動画観察が可能となり、走査中の溶融ビームの状況が観察できた。	△ (2022年1月達成予定)	パウダーヘッド上での溶融観察条件の最適化を図り、マルチロール観察を実施予定。
	パウダーヘッド表面及び造形表面を精度30μm以下で三次元計測できる機能を開発し、試験研究機に実装する。	光学式レイヤー表面計測装置を試験研究機に搭載し、10μm以下の表面凹凸形状の計測ができることが確認され最終目標を達成した。 また反射電子像においても10μm以下の表面凹凸形状を反映した画像が得られており、最終目標を達成した。	◎	実造形での造形面の凹凸形状計測を実施予定。
	測定精度±50℃以下でパウダーヘッド表面温度を計測可能とする。	造形中に熱電子計測を実施し、積層数によって多少の差異は発生するものの、その精度は±50℃以下である事を確認出来た。	○	計測された温度を用いての造形制御の実施を予定。
	フィードバック制御機能（欠陥予測箇所の再溶融機能）を試験研究機に実装する。	フィードバック制御機能を試験研究機に実装し、再溶融機能を有効にして造形を実施した。結果、再溶融層において欠陥率の減少が確認できた。	○	欠陥予測システムを合わせたフィードバック制御の実施を行う予定。
	欠陥発生の原因となる異常状態を事前に検知可能とする。	メルト直前に取得した反射電子画像によって、異常状態の有無が確認出来た。	○	実造形での判別機能の動作確認を予定。
3. 積層造形部品作製のための開発・評価手法の開発	プロセスマップ探索手法を検証する。	Ti64合金でプロセスマップ探索手法を検証した。 プロセスマップ自動生成ソフトウェアを開発した。 入熱への形状の影響を計算するソフトウェアを開発した。	○	ソフトウェアの検証と実装。
	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1種類以上の金属材料について蓄積する。	Ti64合金に関して、データを取集した	○	合金種の拡張。

	投稿論文	「査読付き」 8 件、「その他」 0 件
	特 許	「出願」 4 件（うち「PCT出願」 4 件） 特記事項：本研究開発は、2014～2018 年に実施された「次世代型産業用 3D プリンタの造形技術開発・実用化事業」で取得した知財も活用している。
	その他の外部発表（プレス発表等）	14 件
IV. 成果の実用化・事業化に向けた取組及び見通しについて	<p>本中間評価における 2021 年度の間目標は、すべてのテーマで達成済みか達成見込みである。</p> <p>レーザービーム金属 3D プリンターは導入されてはいるが、まだコスト面、品質保証に課題があり、生産・量産のための導入は限定的で、試作用がほとんどである。このため、品質保証の観点から、本研究開発の成果を 2026 年度を目途に実用化・事業化を図っていく。</p> <p>電子ビーム方式の 3D プリンターの特に国内の市場状況は、以下のように推測している。</p> <p>1) 電子ビーム金属 3D プリンターを生産向けに導入している企業はまだ少なく、興味はあるが導入に踏み切れていない企業が多い。その理由の一つが 1 億円以上の装置価格である。</p> <p>2) また、モニタリングによる品質の保証や、スモーク等の電子ビーム方式固有の現象に対するリカバリ機能がいないため、ユーザーが生産向けの本格導入ができていない。</p> <p>この状況のもと本事業の成果を適用し、2026 年度までに実用化、事業化を図っていく。</p>	
V. 基本計画に関する事項	作成時期	2019 年 3 月 制定
	変更履歴	2021 年 1 月 改訂（ユーザー検証に伴う研究開発内容修正、PM 交代に伴う変更）

## 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	用語の説明
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、熔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熔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プリンター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	造形中に熔融凝固した金属部分。AMでは、トラック(track)ということも多い。
ポーリング現象	熱源による投入エネルギーが低いと熔融が不十分となり、トラック周囲の温度が低いなど熔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熔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熔融金属の流れ速度が間歇的になり、熔融金属の山と谷が周期的に発生すること。
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。
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熔融金属の飛沫。

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。
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	用語の説明
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。

クーロン力	帯電した物体間に働く力。
PREP 粉末	プラズマ回転電極 (PREP) 法で作製した粉末。PREP 法は、回転させた原料金属の電極棒にプラズマを照射し、熔融させた金属を遠心力で飛ばし、球状化させ製粉する技術。
PA 粉末	プラズマアトマイズ (PA) 法で作製した粉末。PA 法は、原料金属 (ワイヤーや粒塊状) をプラズマで熔融し、不活性ガスを吹き付け製粉する手法。
離散拡散法 (DEM)	粒子からなる系において、各粒子間の相互作用を計算しながら個々の粒子の挙動を計算する手法。
数値流体力学計算 (CFD)	流体の運動方程式 (ナビエ-ストークス方程式など) を数値計算で解き、気相や液相などの流体の挙動を計算する手法。
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 プリンター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。
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。
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。

## I. 事業の位置づけ・必要性について

### 1. 事業の背景・目的・位置づけ

#### 1. 1 事業の背景

第4次産業革命が進展する中、ものづくりの付加価値を上げていくためには、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上げ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 事業の目的

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熔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。

本プロジェクトでは、積層造形における金属の熔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. 3 事業の位置づけ

### 1) 政策的位置づけ

政府は、「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、「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。

### 2) 海外の研究開発の動向

海外における研究開発の動向として、米国の「America Makes」や欧州の「Horizon2020」、中国の「中国製造 2025」において金属積層造形関連のプロジェクトが進められている。

特に最近の動向として、米国の「America Makes」では、機械学習等を活用した AM 造形品の品質予測や in-situ プロセスモニタリング技術、リアルタイム欠陥低減等の研究開発テーマが開始されており（研究開発内容の詳細は不明）、今後の開発競争が益々激化していくことが予測される。

また、今年8月のSFFシンポジウムにおいては、海外のアカデミアを中心に、AIモデルによる造形プロセスの最適化や in-situ プロセスモニタリング技術、欠陥予測モデルの構築に関する多くの発表があったとの情報も得ている。

このような状況において、本事業の研究開発を今後さらに加速していくことが重要になってくると思われる。

表 I -1 海外の研究開発の動向

America Makes	(出典：America Makesウェブサイト)
<ul style="list-style-type: none"><li>■ <b>Open Project Call 2020</b>（7月公募）：約0.9億円<ul style="list-style-type: none"><li>・ 機械学習とAIのアプローチを活用したAM造形品の品質予測</li><li>・ 金属積層造形のための物理ベースモデリングとin-situプロセスモニタリング技術の交差検証</li></ul></li><li>■ <b>Open Project Call 2021</b>（6月公募）：約1.8億円<ul style="list-style-type: none"><li>・ AMプロセスのリアルタイム欠陥低減のための戦略</li><li>・ AMプロセスの生産性向上の機会の評価</li></ul></li></ul>	
Horizon2020 (EU)	(出典：Horizon2020ウェブサイト)
<ul style="list-style-type: none"><li>■ <b>PAM<sup>2</sup></b>：約5億円<ul style="list-style-type: none"><li>・ 高精度の金属積層造形品の開発</li><li>・ より競争力のある製品設計とより高い精度の部品開発を可能にする高度な設計、モデリング、プロセス及び計測方法を開発。</li></ul></li><li>■ <b>MANUELA</b>：約16.2億円<ul style="list-style-type: none"><li>・ 金属積層造形用にオープンアクセスのパイロットラインを提供するサービス（PBFレーザー/電子ビーム使用）</li><li>・ MANUELAのパイロットラインを利用したのBusiness Development10案件のOpen Callを実施する。</li></ul></li></ul>	
中国製造2025	(出典：「中国製造2025」の公布に関する国务院の通知の全訳)
<ul style="list-style-type: none"><li>・ 3Dプリンタをインテリジェント製造設備として研究開発を展開。</li><li>・ 3Dプリンタ技術・設備の生産プロセスにおける応用を加速、製造工程のシミュレーション・最適化、デジタル制御、製造状況のリアルタイムモニタリング、適応制御を促進。</li></ul>	

### 3) 他事業との関係

我が国において、金属の積層造形技術に関連する本格的なナショナルプロジェクトは、2013年度に経済産業省が開始した「三次元造形技術を核としたものづくり革命プログラム」となる。その後、経済産業省は2016年「省エネルギー型製造プロセスの実現に向けた3Dプリンタの造形技術開発・実用化事業」を追加し、これらの事業は2017年度からNEDOに移管され、「次世代型産業用3Dプリンタの造形技術開発・実用化事業」に統合して実施された。

これらの事業は、国産金属3Dプリンタと金属材料の開発を目的として行われたもので、技術研究組合次世代3D積層造形技術総合開発機構（TRAFAM）が受託し、装置メーカーや材料メーカー、大学等研究機関が参画した。特に国産金属3Dプリンタについては、6社が製品化している（ casting sand type of binder jetting method also included）。

また、2017年度には、NEDO技術戦略センター（NEDO-TSC）において「次世代製造法（積層造形プロセス）分野の技術戦略」（非公開）の策定が行われ、これまでの金属積層造形技術関連プロジェクトの成果や今後の課題整理、後継プロジェクトの検討が行われている。

その結果、2019年には、概算要求の状況も踏まえたうえで、特に課題として重要性の高い造形プロセスの基盤技術の開発に重点を置いて「積層造形部品開発の効率化のための基盤技術開発事業」（本事業）が開始されている。

なお、本事業については2019年度にNEDOが実施者の公募を行い、外部有識者による厳正な審査の結果、引き続きTRAFAMが過去のプロジェクトの成果等も有効に活用しつつ実施している。

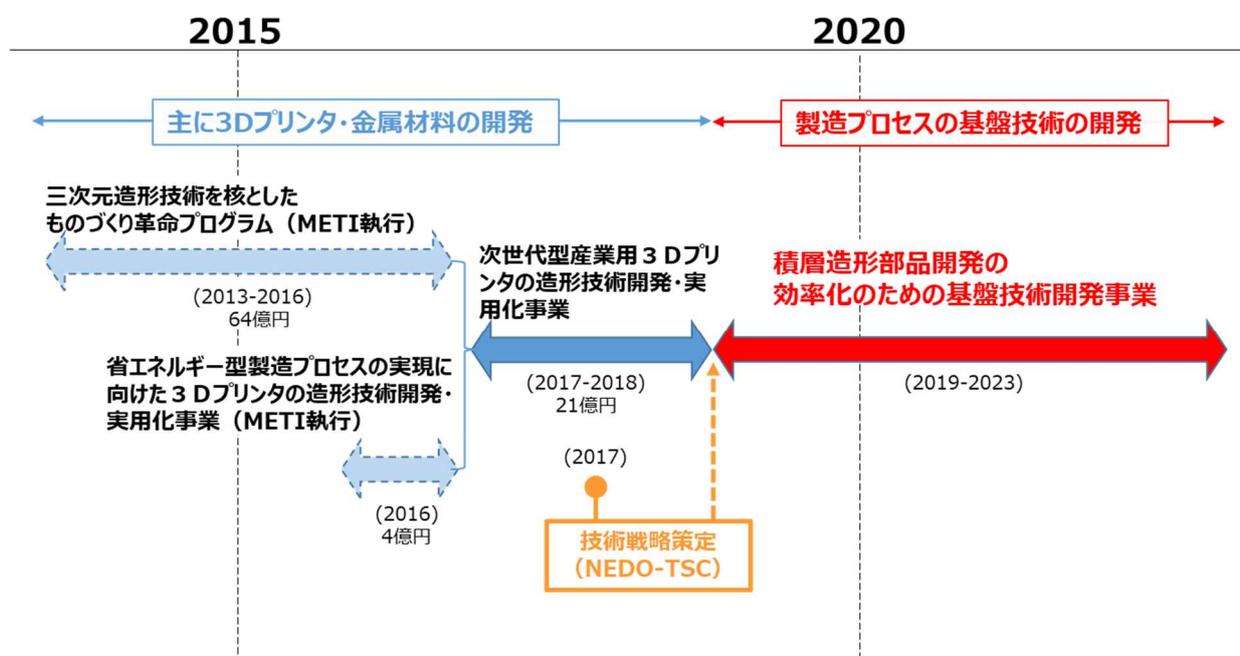


図 I-1 他事業との関係

## 2. NEDO の関与の必要性・制度への適合性

### 2. 1 NEDO が関与することの意義

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、我が国のサポート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。

さらに、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。

なお、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ため、本事業は NEDO のこれまでの知識、実績を活かして推進すべき事業である。

### 2. 2 実施の効果（費用対効果）

本事業は、2019 年度から 2023 年度の 5 年間に於いて、総額 7.7 億円で実施する予定である。また、アウトカム目標としては、以下のとおりとなっている。

- 本事業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。

これに対して 2030 年における経済波及効果としては、造形装置 632 億円、造形品 1,900 億円が見込まれる。また、開発期間短縮に伴うコスト削減としても相当な額の波及効果が期待される。

なお、経済波及効果の算定根拠としては、以下のとおり。

#### 経済波及効果（2030年）の算定根拠

##### 造形装置について

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

$$791 \text{ 事業所} \times 0.8 \text{ 億円/台} = 632 \text{ 億円}$$

##### 造形品について

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

$$2 \text{ 兆円 (造形品市場)} \times 632 / 6,500 \text{ (造形装置市場の比率)} \approx 1,900 \text{ 億円}$$

##### 開発期間短縮に伴うコスト削減について

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

## II. 研究開発マネジメントについて

### 1. 事業の目標

#### 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。

具体的な研究開発内容と達成目標については、「II. 2. 1 研究開発の内容」の項において説明する。

#### 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。

## 2. 事業の計画内容

### 2. 1 研究開発の内容

事業目標を達成するために、以下の研究開発項目①～③について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

なお、各研究開発項目における具体的な研究開発内容、達成目標（中間・最終）及び根拠については、以下のとおりである。

#### 1) 研究開発項目① 溶融凝固現象の解明による欠陥発生予測技術の開発

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。

表 II-1 研究開発項目①の目標と根拠

中間目標	最終目標	根拠
• 欠陥発生予測システムの予測精度 80%以上	• 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。 • また、中間評価の段階では、評価データ取得が不十分であるため、予測精度80%以上とした。

## 2) 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マルチプールの温度分布を計測する機能の開発、研究開発項目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。

表Ⅱ-2 研究開発項目②の目標と根拠（レーザービーム方式）

中間目標	最終目標	根拠
<ul style="list-style-type: none"> <li>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</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>粉末の粒径が15~45μm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。</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>造形面の欠陥部分を再溶融する機能を開発</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>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。</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>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%</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>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。</li> </ul>

表Ⅱ-3 研究開発項目②の目標と根拠（電子ビーム方式）

中間目標	最終目標	根拠
<ul style="list-style-type: none"> <li>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</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>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</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>レーザービーム方式と同様に最終目標を10μm以下とした。</li> <li>また、電子ビーム方式では、装置構造上の難しさがあるため、中間目標を30μm以下とした。</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>造形面の欠陥部分を再溶融する機能を開発</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>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。</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>マルチプール形状を画像化する機能を開発</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>電子ビーム方式の場合、従来技術（高速カメラ等）では、マルチプールを形成する現象を直接観察することが不可能であるため。</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>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</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>電子銃異常や粉末チャージアップ（スモーク）の発生が欠陥に繋がるため、異常検知機能が必要。</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>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%</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>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。</li> </ul>

## 3) 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

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、ユーザー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。

表 II-4 研究開発項目③の目標と根拠

中間目標	最終目標	根拠
<ul style="list-style-type: none"> <li>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。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>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。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>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、中間目標として1種類以上、最終目標として4種類以上とした。</li> </ul>

## 2. 2 研究開発の実施体制

本事業は、2019年度にNEDOが国内の企業（研究組合含む）、大学等を対象として公募を実施した結果、研究開発実施者に選定された技術研究組合次世代3D積層造形技術総合開発機構（TRAFAM）に委託して実施している。そして、2021年度にはユーザー検証の実施に伴い、ユーザー企業等3機関を再委託先に追加している。

また、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はプロジェクトリーダー（PL）に近畿大学の京極特任教授を、サブプロジェクトリーダー（サブPL）に東北大学の千葉教授を任命し、各組合員はPL及びサブPLの指揮の下でレーザービーム方式（主に京極PLが担当）及び電子ビーム方式（主に千葉サブPLが担当）の研究開発を実施する。

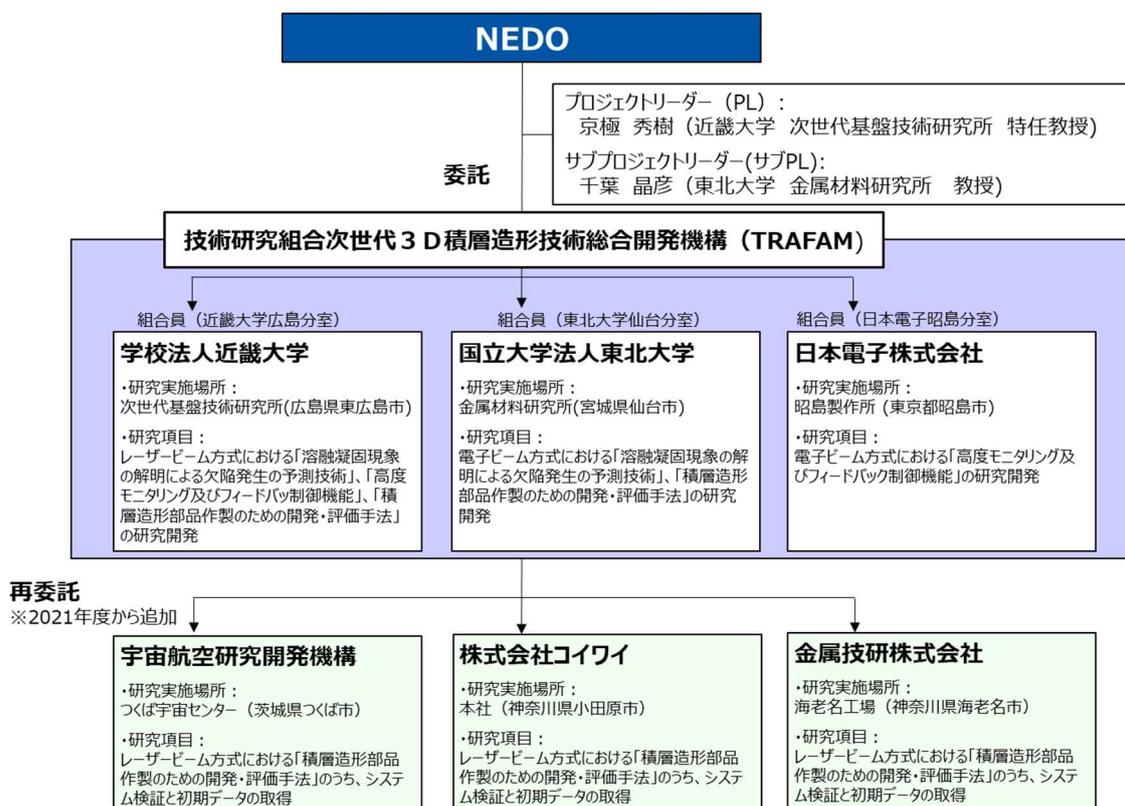


図 II-1 研究開発の実施体制

## 2. 3 研究開発の運営管理

NEDO は、研究開発全体の管理・執行を適切に遂行するため、経済産業省、プロジェクトリーダー、サブプロジェクトリーダー及び各実施者等と密接な関係を維持しつつ、プロジェクトの目的、目標に照らして適切な運営管理を実施した。

具体的には、外部有識者の意見を運営管理に取り入れるため技術検討委員会を開催したほか、サイトビジット等により進捗の確認や管理を行った。また、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図ることとした。

なお、これまでに実施してきた運営管理の内容及びスケジュールを表Ⅱ-5に示す。

表Ⅱ-5 研究開発の運営管理

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
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	2021/1月 ⇒中止	・ PR動画撮影、進捗報告、確認等を予定 ⇒緊急事態宣言の影響で中止
進捗報告会	全項目	2021/8月	・ 四半期毎の研究進捗状況を共有

## 2. 4 研究開発成果の実用化・事業化に向けたマネジメントの妥当性

### 1) ユーザー検証の追加

海外では、航空機、自動車等の分野を中心に積層造形技術を利用した金属部品生産の実用化が積極的に進められつつある状況にある。また、新型コロナウイルス感染拡大の影響によりサプライチェーンリスクも顕在化してきている。

そのため、NEDOは経済産業省と連携し、本事業成果の実用化・事業化を加速する取り組みとして、これまでの研究開発の進捗状況を踏まえ、2021年度からユーザー企業等による検証を追加した。ユーザー検証では、金属積層造形における欠陥の最小化を実現するための造形条件を容易に作成するシステムの検証と初期データの蓄積を行う。

なお、ユーザー検証の実施にあたって、NEDOは経済産業省及び委託先と連携し、2021年度の概算要求の状況に応じて検証の規模や内容を検討するとともに、開発促進財源等の活用等のマネジメントを実施してきた。また、検証を効果的に進めるため、2021年度からユーザー企業等を本事業に追加することで、体制構築のためのマネジメントも実施した。

## 2) 開発促進財源等の活用

本事業では、成果の実用化・事業化に向けて限られた予算で効果を最大化するため、研究開発の進捗等に応じて、NEDO 独自の開発促進財源等の効果的な投入することで対応してきた。特に、2020 年度では、経済産業省とも連携して、概算要求の状況に応じてタイムリーに開発促進財源等を投入することで、2021 年度のユーザー検証の実現に結び付けることができた。

なお、これまでに投入してきた開発促進財源等の実績を表 II-6 に整理する。

表 II-6 開発促進財源等投入実績

年度	項目	金額 (百万円)	内容	成果
2019	フィードバック制御 (レーザービーム方式)	12	海外競合の研究進捗を踏まえ、スパッタ等不慮による欠陥が発生した場合の欠陥発生を防止するフィードバック機能を開発を前倒して実施。	フィードバック精度の向上と、海外競合に対する優位性の確保。
2020	欠陥予測システム	18	欠陥予測システムにおける画像データ処理の自動化、欠陥判別機能及びプロセスマップの開発。	欠陥予測システムの精度向上及びユーザー検証の効率的な実施。
2020	マルチプルモニタリング (電子ビーム方式)	19	マルチプル観察用電子顕微鏡の電子銃の改良を前倒して実施	中間目標におけるマルチプル画像化の達成。さらには、前倒しに伴う予算の戦略的運用によるユーザー検証の着実な実施。

## 3) 知的財産の管理

本事業では、「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、事業の成果に関わる知的財産権等については、原則として全て委託先に帰属させることにしている。

なお、委託先である技術研究組合は、プロジェクトの初期段階から、実用化・事業化を見据え、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している。また、我が国の産業競争力の強化に資するための知財マネジメントとして、権利全般とその取り扱いは、技術研究組合が一元管理することにしている。

## 3. 情勢変化への対応

### 1) コロナ禍での対応

新型コロナウイルス感染拡大に伴い、2020 年に全国レベルでの緊急事態宣言が行われた

際、事業遂行上の支障（出勤等ができない、研究設備が使用できない、研究資材が納入されない等）が顕在化してきた。そのため、2020年度においては、コロナ禍の影響により研究開発の中断や遅延を回避するため、委託先に対して定期的な状況確認を実施した。その結果、年度途中では、学内立入禁止措置や出勤停止等の影響により若干研究開発が遅延する状況もあったが、委託先の協力もあり計画どおりに事業を推進することができた。

また、2020年5月には、東北大学の学内立入禁止措置の解除後に、東北大学分室が保有する電子顕微鏡が故障（原因は電源投入時の突入電流によるコンデンサ焼損で、老朽化のため修理不能）した際、コロナ禍の混乱で委託先だけの解決が困難であったため、NEDOが自らナショプロ向けリースサービス（単年度契約が可能のため途中解約金が発生しない、予算に応じた柔軟な費用設定が可能等）を探し出し、委託先とレンタル業者との橋渡しをして研究開発の中断を回避することができた。

## 2) 積層造形技術の普及に向けた調査

2020年度以降、新型コロナウイルス感染拡大の影響により、製造業をはじめとする産業界で、サプライチェーンの見直し・強化等の観点から積層造形技術の活用への期待が益々高まっている。実際、欧米では自動車業界、航空宇宙業界等において実生産技術として金属積層造形技術が採用されている一方、国内製造業では金属積層造形技術の積極的な導入・活用はまだ進んでいない状況にある。

このような背景から、2021年度において、国内外を対象として、金属積層造形技術に関わる技術開発の動向や金属3Dプリンタに関わるビジネスモデル、各産業分野での導入状況やサプライチェーン強化等に向けた取り組み状況等について調査・分析し、技術的課題等の整理を行ったうえで、今後の日本における金属積層造形技術の普及に向けて取り組むべき方策について検討するため調査事業を開始した。

なお、調査事業は本事業とは別枠（NEDO 自主財源によるもので、委託先も本事業と異なる）で実施するものであるが、経済産業省の原課とも連携して進めており、調査結果については本事業後半の予算要求や事業計画の拡充、プロジェクトマネジメント等の検討に活用することを予定している。

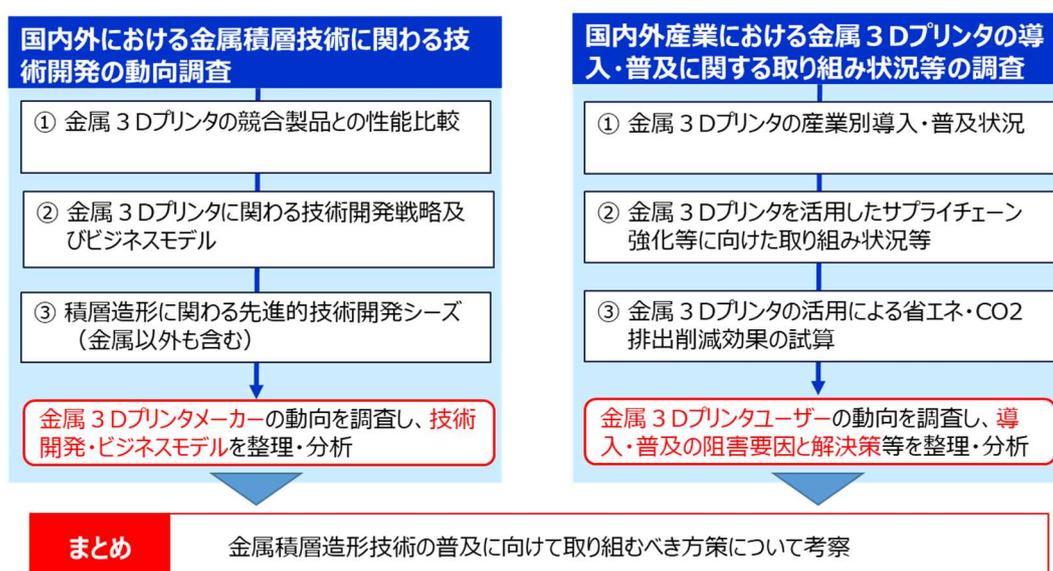


図 II-2 積層造形技術の普及に向けた調査のスキーム

#### 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、事後評価を 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。

### Ⅲ. 研究開発成果について

#### 1. 事業全体の成果

##### 1. 1 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

表Ⅲ-1.1-1 中間目標と達成度（レーザービーム方式）

◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

研究開発項目	目標（中間）	成果	達成度	今後の課題と解決方針
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合金の評価データを収集する。	モニタリング装置を改良して、インコネル718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できた。また、造形体の密度及び欠陥状況をX線CTにより収集できた。	○	達成済み。
	機械学習により欠陥発生予測を可能とする。	モニタリング装置により得られた造形表面画像データを機械学習用の教師データとして収集し、これらの画像データを用いて欠陥発生予測を可能とした。	○	最終目標の予測精度95%以上に向けて、欠陥予測システムの改良を行い、予測精度95%以上の目途を得ており、高精度化へ向けて開発中。
	欠陥予測システムの予測精度を80%以上にする。	上記教師データを用いて、機械学習を利用した欠陥予測のプロトタイプシステムを試作し、予測精度80%以上を達成した。	○	
2. 高度モニタリング及びフィードバック制御機能の開発	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を精度10μm以下で凹凸を計測可能とする。	パウダーベッド及び造形表面の表面粗さの定量化のために、パターン投影法により高さ分解能10μm以下(7.3μm)を達成した。	○	達成済み。
	測定精度±50℃以下でパウダーベッド表面温度を計測可能とする。	溶融凝固シミュレーションの精度を向上させるために、パウダーベッド表面の測定も行えるようにし、サーモビューワによる測定温度±50℃以下を達成した。	○	達成済み。
	造形面の欠陥部分を再溶融する機能を開発する。	メルトプールモニタリングによるスパッタの大きさを計測するとともに、造形表面の表面粗さ計測による再溶融機能を開発した。現在、欠陥率0%を満足する再溶融条件を探索しており、フィードバックのための欠陥補修機能を開発中。	○	造形プロセス中の50μm以上の大きさの欠陥率を0%とするフィードバック制御機能を開発。
3. 積層造形部品作製のための開発・評価手法の開発	プロセスマップ探索手法を検証する。	造形表面画像データの利用によるプロセスマップ自動作成手法を確立した。現在、最適条件自動探索システム構築のためのデータを取得中。	○	今後は、メルトプールモニタリングデータ、パウダーベッド及び造形表面データを用いた最適条件自動探索システムを構築。また、金属材料2種類以上の評価データを取得し、プロセスマップを探索する手法を検証する。
	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。	インコネル718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評価データを蓄積。現在、SUS630合金について評価データを取得中。	○	
	キューブ試験片と併せて、実態に即した形状の試験片による評価データも取得する。	現在、インコネル718合金の実態に即した形状の試験片を用いて、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評価データを取得中。	△ (2022年3月達成予定)	

表Ⅲ-1.1-2 中間目標と達成度（電子ビーム方式）

研究開発項目	目標（中間）	成果	達成度	今後の課題と解決方針
1. 溶融凝固現象の解明による欠陥発生への予測技術の開発	パウダーヘッドの溶融凝固挙動（マルチロールの安定性）と欠陥形成の相関を解明する。	Ti64パウダーヘッドの放射率を計測し、シミュレーションによりTi64パウダーヘッドの溶融凝固を解析した。マルチロールのモニタリングが可能になった。今後機能の改善が完了次第、試験を実施する。	△ (2022年3月達成予定)	マルチロールモニタリング完成後、実施。 モニタリング試験を行う。(2022年1月～)
	欠陥形成の学理構築を通して欠陥予測システムを開発・試作する。	欠陥形成は表面性状と関係があり、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ヘッドの充放電シミュレーションソフトウェアを試作した。	○	試験研究機に実装し、フィードバック機能との連携を行う。 電子ビーム方式のデータを増やし、欠陥予測システムの高精度化を実施。
	欠陥予測システムの予測精度を80%以上にする。	テスト用の単純形状造形材のデータで予測精度90%を達成した。	○	
2. 高度モニタリング及びフィードバック制御機能の開発	マルチロール形状を計測専用の電子ビームから得られた反射電子を用いて画像化可能とする。	観察用電子ビームを用いた反射電子画像で動画観察が可能となり、走査中の溶融ビームの状況が観察できた。	△ (2022年1月達成予定)	パウダーヘッド上での溶融観察条件の最適化を図り、マルチロール観察を実施予定。
	パウダーヘッド表面及び造形表面を精度30μm以下で三次元計測できる機能を開発し、試験研究機に実装する。	光学式レザ-表面計測装置を試験研究機に搭載し、10μm以下の表面凹凸形状の計測ができることが確認され最終目標を達成した。 また反射電子像においても10μm以下の表面凹凸形状を反映した画像が得られており、最終目標を達成した。	◎	実造形での造形面の凹凸形状計測を実施予定。
	測定精度±50℃以下でパウダーヘッド表面温度を計測可能とする。	造形中に熱電子計測を実施し、積層数によって多少の差異は発生するものの、その精度は±50℃以下であることを確認出来た。	○	計測された温度を用いての造形制御の実施を予定。
	フィードバック制御機能（欠陥予測箇所の再溶融機能）を試験研究機に実装する。	フィードバック制御機能を試験研究機に実装し、再溶融機能を有効にして造形を実施した。結果、再溶融層において欠陥率の減少が確認できた。	○	欠陥予測システムを合わせたフィードバック制御の実施を行う予定。
	欠陥発生の原因となる異常状態を事前に検知可能とする。	メルト直前に取得した反射電子画像によって、異常状態の有無が確認出来た。	○	実造形での判別機能の動作確認を予定。
3. 積層造形部品作製のための開発・評価手法の開発	プロセスマップ探索手法を検証する。	Ti64合金でプロセスマップ探索手法を検証した。 プロセスマップ自動生成ソフトウェアを開発した。 入熱への形状の影響を計算するソフトウェアを開発した。	○	ソフトウェアの検証と実装。
	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1種類以上の金属材料について蓄積する。	Ti64合金に関して、データを取集した	○	合金種の拡張。

◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

## 1. 2 成果の最終目標の達成可能性

表Ⅲ-1.2-1 最終目標の達成可能性（レーザービーム方式）

研究開発項目	現状	最終目標	達成見通し
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	モニタリング装置を改良して、インコネル 718 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できた。また、造形体の密度及び欠陥状況を X 線 CT により収集できた。	チタン合金、鉄系合金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。	本年度、SUS630 及び Ti64 を対象としてデータ取得を行っており、達成の見込み。
	上記教師データを用いて、機械学習を利用した欠陥予測のプロトタイプシステムを試作し、予測精度 80%以上を達成した。	欠陥予測システムの予測精度を 95%以上にする。	最終目標の予測精度 95%以上に向けて、欠陥予測システムの改良を行い、予測精度 95%以上の目途を得ており達成の見込み。
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	パウダーベッド及び造形表面の表面粗さの定量化のために、パターン投影法により高さ分解能 10 μm 以下 (7.3 μm) を達成した。 メルトプールモニタリングによるスパッタの大きさを計測するとともに、造形表面の表面粗さ計測による再溶融機能を開発した。現在、欠陥率 0%を満足する再溶融条件を探索しており、フィードバックのための欠陥補修機能を開発中。	・フィードバック制御機能により造形プロセス中の 50 μm 以上の大きさの欠陥率を 0%とする。	造形プロセス中の 50 μm 以上の大きさの欠陥率を 0%とするフィードバック制御機能を開発中で、達成の見込み。
3. 積層造形部品作製のための開発・評価手法の開発	インコネル 718 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評価データを蓄積。現在、SUS630 合金について評価データを取得中。	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。	本年度、SUS630 及び Ti64 を対象としてデータ取得を行っており、達成の見込み。
	実態に即した形状の試験片を用いて、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評価データを取得予定。	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	インコネル 718 を対象として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の開発の見通しが立っており、今年度 SUS630 , Ti64 のデータ取得も行っており、達成の見込み。

		形条件決定のリードタイムを 1/5 (1-2 週間) に短縮する。	
--	--	-----------------------------------	--

表Ⅲ-1.2-2 最終目標の達成可能性 (電子ビーム方式)

研究開発項目	現状	最終目標	達成見通し
1. 溶融凝固現象の解明による欠陥発生予測技術の開発	Ti64 パウダークラッドの放射率を計測し、シミュレーションにより Ti64 パウダークラ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クラッドの充放電シミュレーションソフトウェアを試作した。 予測精度 80%を達成した。(90%程度)	欠陥予測システムの予測精度を 95%以上にする。	マルチプルインプロセスモニタリング機能の改善が今年度中に完了。 必要なソフトウェアの開発は既に完了。データを増やすことで、欠陥予測システムの精度を 95%に高精度化できる見込み。
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	光学式レーザー表面計測装置を試験研究機に搭載し、10 μm 以下の表面凹凸形状の計測ができることが確認された。 また反射電子像においても 10 μm 以下の表面凹凸形状を反映した画像が得られている。	試験研究機に実装した状態でパウダークラ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 方式で達成見込み
	フィードバック制御機能を試験研究機に実装し、投入エネルギー不足の条件で、再溶融機能を有効にして再溶融した場合と、無効にして再溶融しなかった場合の比較で、再溶融することで欠陥率が減少することが確認できている。	フィードバック制御機能により造形プロセス中の 50 μm 以上の大きさの欠陥率を 0%とする。	欠陥予測システムを合わせたフィードバック制御の実施することで達成する見込み
	メルト直前に取得した反射電子画像によって、スモークや粉末供給不足といった造形物溶融面の粉末の有無を判定し、粉末がない場合を異常状態として検知できている。 また電子銃では異常ビームのモニタリングを行っており、異常検知でインターロックが働き装置を安全停止させる機能が搭載されている。	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。	スモークが発生してもメルト直前の反射電子画像判定でそれが検知でき、そのリカバリ機能が実装される。

3. 積層造形部品作製のための開発・評価手法の開発	Ti64 合金でプロセスマップ探索手法を検証した。	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。	来年度以降に3種の合金系のデータを蓄積し、達成できる見込み。
	プロセスマップ自動生成ソフトウェアを開発した。 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ー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。	必要なソフトウェアの開発はほぼ完了しており、試験研究機に実装し、リードタイムを検証する。手動での検証では、4セット分のデータでプロセスマップが構築できることを確認済みなので、目標を達成できる見込み。

### 1. 3 成果の普及

表Ⅲ-1.3-1 論文、外部発表等の件数（内訳） 【2021年7月末現在】

	2019 年度	2020 年度	2021 年度	2022 年度	2023 年度	総計
論文	1	4	3			8
研究発表・講演	2	10	1			13
新聞・雑誌等への掲載	0	1	0			1

### 1. 4 知的財産等の確保に向けた取組

本プロジェクトでは、以下の戦略に沿った取り組みを行っている。

1. 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。
2. 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。
3. 海外での特許取得を念頭に、PCT国際出願を基本とする。

表Ⅲ-1.4-1 特許の件数（内訳） 【2021年7月末現在】

	研究開発項目	2019 年度	2020 年度	2021 年度	2022 年度	2023 年度	計	総計
特許出願	レーザー方式	0	2(2)	0			2(2)	4(4)
(うち外国出願)	電子ビーム方式	0	2(2)	0			2(2)	

また、本研究開発は、2014～2018年に実施された「次世代型産業用3Dプリンタの造形技術開発・実用化事業」で取得した知財に基づき実施している。さらに研究成果をもとに2020年度に4件出願した。

今後は、実評価結果から特許化技術を抽出し、追加知財取得を図っていく。

## 2. 研究開発項目毎の成果

### 2. 1 レーザービーム方式

#### 2. 1. 1 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

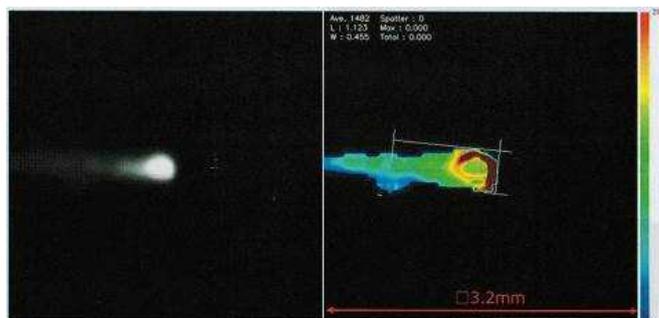
本項目では、積層造形プロセス中の欠陥生成メカニズムの学理を解明し、欠陥予測システムの開発に繋げることを目的とする。本研究開発項目での開発内容は以下の通りである。

##### 1) 欠陥発生原因と造形条件の関連性の解明

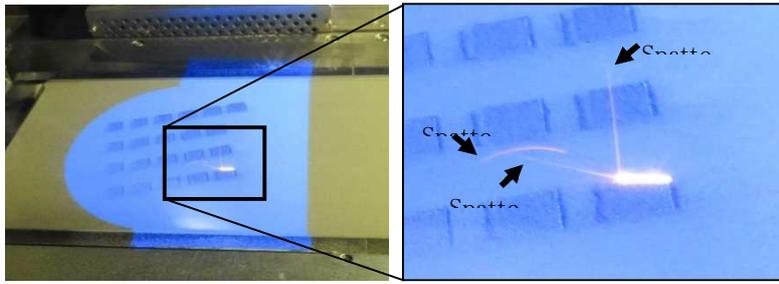
###### a) メルトプールの形態及び温度分布の測定

NEDOプロジェクト(2017～2018年度)において開発したメルトプールの温度分布と形状を精度よく計測できる世界トップレベルのモニタリング装置をさらに高度化したレーザー試験研究機として改良した。装置の仕様等の詳細は、2. 1. 2項で述べる。

本装置により、メルトプールの形態、温度分布及び金属飛沫(スパッタ)の状況(図Ⅲ. 2. 1-1)ならびにパウダーベッド及び造形面の表面性状(図Ⅲ. 2. 1-2)をin-situで観察可能となった。

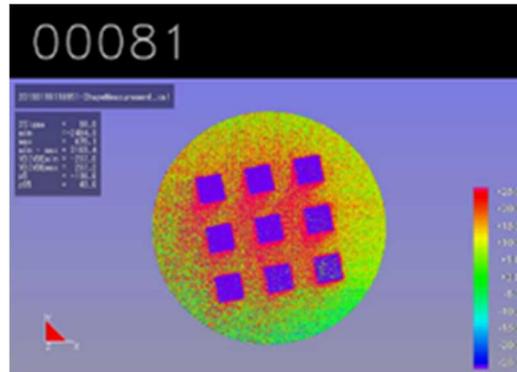


(a) メルトプールの形態及び温度分布



(b) スパッタの発生状況

図Ⅲ. 2. 1-1 メルトプールの観察状況

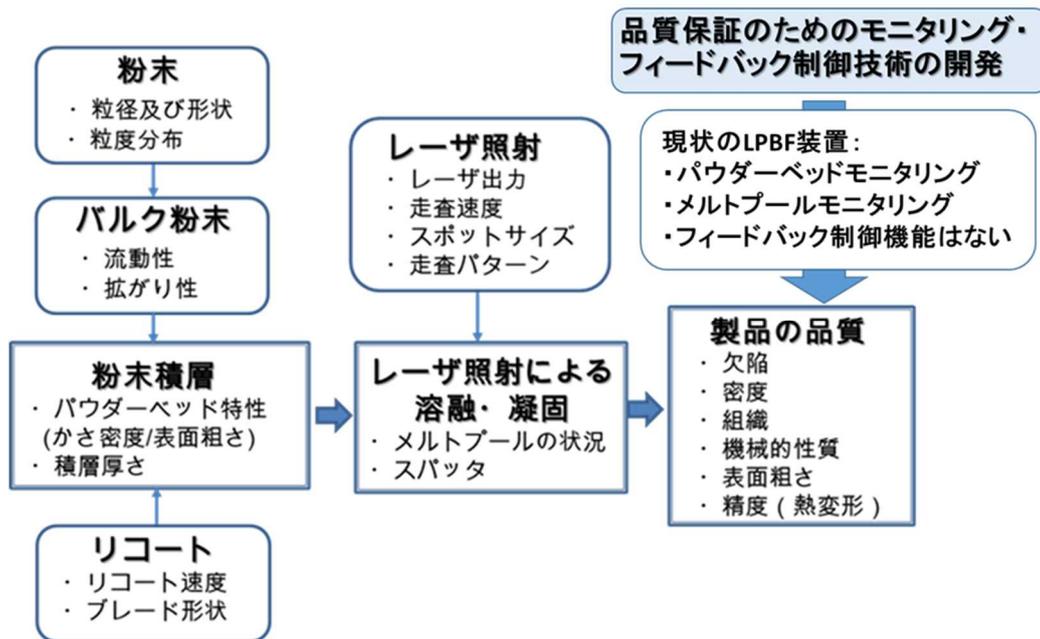


図Ⅲ. 2. 1-2 パウダーベッド面及び造形面の観察状況

#### b) 欠陥発生原因と造形条件の関連性

レーザービーム方式による積層造形は、図Ⅲ. 2. 1-3 に示すように、粉末のリコートとレーザー照射のプロセスを有するため、欠陥発生の原因となる因子が多く、造形品質を担保することが難しい。ここでは、欠陥発生原因と造形条件の関連性を解明することを目的とする。

内部欠陥の種類には、大きく分けてキーホールによる空孔と、未熔融による空隙が挙げられる。未熔融による空隙は、適切な造形条件が選択されていないためである。具体的には、(1)メルトプールの溶け込み深さが足りず造形体内部のビード間に空隙が発生する場合、(2)粉末を十分に溶かすことができず造形体表面のビードが不連続となるポーリング現象やハンピング現象による場合、(3)粗大なスパッタが造形表面に付着することによるスキージ不良に起因する熔融不良の場合がある。これらのうち、(1)及び(2)は適切な造形条件を選択することで欠陥を予測し回避することが出来る。しかし、(3)の粗大スパッタの発生に関しては、様々な要因が考えられる。



図Ⅲ. 2. 1-3 PBF-LB プロセスにおける製品品質に及ぼす主なパラメータ

ここでは、未溶融欠陥の一要因である粗大スパッタが造形面に付着する場合に着目し、スパッタの発生原因について検討した。まず、インコネル718合金（以後、IN718）を対象とし、レーザー試験研究機を用いて in-situ でメルトプール形態、温度分布やスパッタ発生状況に加え、パウダーベッド表面及び造形面の表面性状に関するモニタリングデータを収集する。次に、造形条件と欠陥発生状態の関係性について、表面欠陥と内部欠陥の関係や、取得した各種モニタリングデータと内部欠陥の関係より考察し、欠陥発生原因と造形条件の関連性を解明する。

このため、まずキューブ試験片による検討と併せて、丸棒形状の試験片を造形して、実態に近い状況で検討した。作製した丸棒の全てのレイヤーについて、パウダーベッド表面とレーザー照射後の造形面の表面性状データについて、レイヤー表面モニタリングシステムより自動取得した。

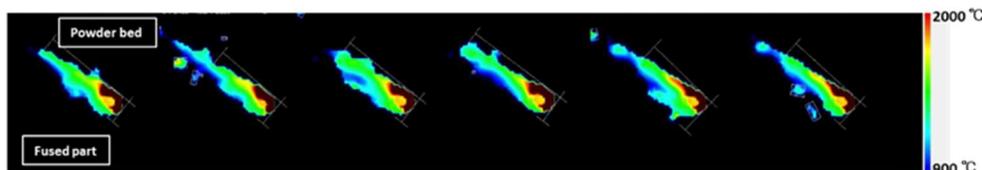
次に、表面性状については、パターン投影法によりパウダーベッドの凹凸高さ方向の分布をベストフィット面からの標準偏差  $\sigma$  の値を用いて式(2.1)で算出した<sup>(1)</sup>。この値は突出した山や谷といったノイズを除去した値となるため、 $2\sigma$  の値を表面性状の指標とした。

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z})^2} \approx Sq \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

パウダーベッド（PB）表面と造形面のレイヤー表面モニタリング画像より表面性状を評価した。高密度条件におけるPB面の $2\sigma$ の値は10  $\mu\text{m}$ 程度で、層ごとに大きな変化はなかった。PB面の $2\sigma$ の値は、これまで報告<sup>(1)</sup>している値やChenら<sup>(2)</sup>による計測結果とほぼ一致した。これに対して、造形面の $2\sigma$ の値は60~70  $\mu\text{m}$ 前後と高くなっており、造形面の凹凸が大きいことがわかった。このように、パウダーベッド並びに造形面の表面性状を定量化することができた。

- (1) K. Yuasa, M. Tagami, M. Yonehara, T-T. Ikeshoji, K. Takeshita, H. Aoki, H. Kyogoku, Influences of powder characteristics and recoating conditions on surface texture of powder bed in metal additive manufacturing, Int. J. Advanced Manufacturing Technology, 115 (2021) 3919-3932. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07359-x>.
- (2) H. Chen, Y. Chen, Y. Liu, Q. Wei, Y. Shi, W. Yan, Packing quality of powder layer during counter-rolling-type powder spreading process in additive manufacturing, Int. J. Machine Tools Manufacturing, 153(2020) 103553.

また、図Ⅲ. 2. 1-4 に、高密度条件におけるメルトプールの挙動を示す連続画像の例を示す。各々のメルトプール画像は、左下が造形側で右上がパウダーベッド側となっており、試験片中央部付近を走査する際の画像として、左の画像から右の画像へと変化している。これからわかるように、メルトプールが溶融側に広がり、その形態はレーザーの焦点を中心に左右非対称となっていることが確認できる。これは、PB 側と造形面側の熱伝導率が大きく異なることに起因しており、熱伝導率の高い造形面側にメルトプールが広がったためである。また、高密度条件ではレーザー走査によるメルトプールの形態の変化は小さいのに対して、低密度条件ではメルトプールの形態が一様ではなく、メルトプールの長さや幅が変化するとともに、スパッタの発生にも影響があることがわかった。



図Ⅲ. 2. 1-4 メルトプールモニタリング画像の例（高密度条件）

このように、PBF-LB の実造形におけるメルトプールからのスパッタの発生現象は、適正な造形条件においても、パウダーベッドが存在することから粉末の取り込みやスパッタなどの存在により、メルトプールの溶融量が増加して肥大化すると、反跳力によりメルトプールから溶融部が押し出された後に、ブルームによって分離されることによりスパッタが発生することがわかった。また、スパッタが実際の積層厚さ（積層厚さに嵩密度により低下する厚さ（沈み込み量）を足した厚さ）より大きくなると、スパッタは欠陥を発生させる原因となるため、メルトプールからのスパッタの発生をできるだけ抑えることは、欠陥発生を抑制するための方策の一つである。

## 2) 欠陥予測システムのプロトタイプ試作

IN718 合金を対象として、レーザー試験研究機を用いて、メルトプール形態、温度分布やスパッタ、ブルームを高精度でその場観察することにより、造形条件とキューブ試験片の表面欠陥並びに内部欠陥との特徴付けを行い、欠陥発生予測システムを構築することを目的としている。

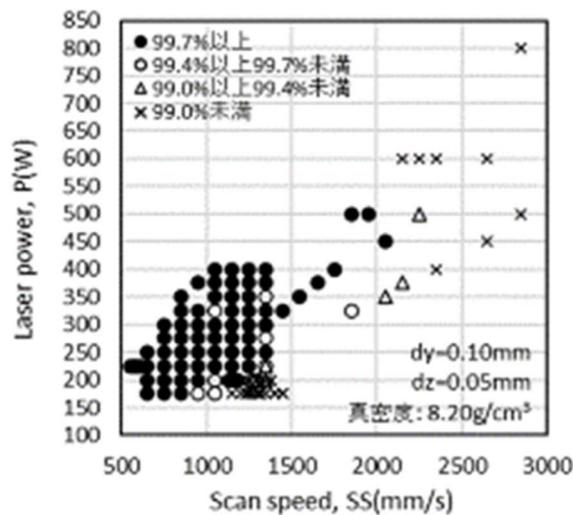
### a) 実験によるプロセスマップの作成

IN718 合金のキューブ用プロセスマップを作成するために、造形において重要なパラメータであるレーザー出力と走査速度を変化させてライン造形および面造形を行うとともに、

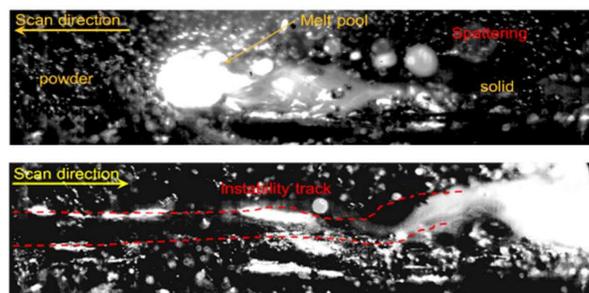
10 mm×10 mm×10 mm のキューブを造形し、プロセスマップの作成を行った。併せて、重要な指標であるエネルギー密度と相対密度の関係についても検討した。

図Ⅲ.2.1-5 に、キューブ試験片による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示す。これからわかるように、造形可能であった造形体の相対密度は、アルキメデス法により測定した結果、ほとんどが 99.7%以上となっている。なお、相対密度は、真密度を 8.20 g/cm<sup>3</sup> として算出した。一方、高出力・高速造形条件においては、密度が低いことがわかる。これは、これまで報告<sup>(3)</sup>されているように、高出力、高速造形条件においては、図Ⅲ.2.1-6 に示すように、メルトプールが不安定になり、スパッタの発生が多くなること、ガスの巻き込みが増えることなどにより密度が低下することが要因として知られている。

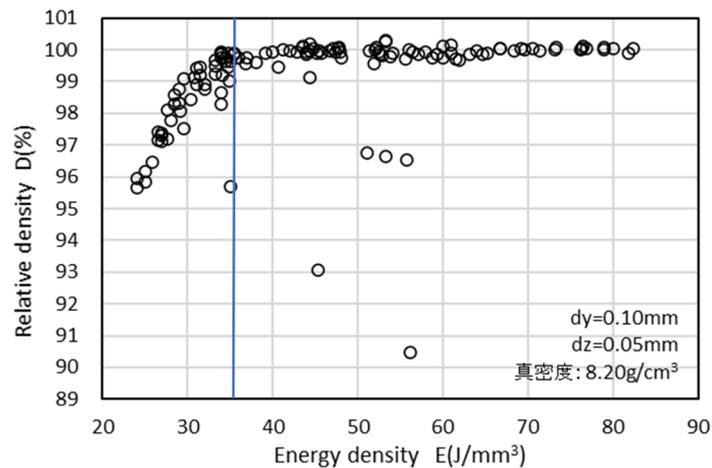
また、図Ⅲ.2.1-7 に、プロセスパラメータとしてよく使用されるエネルギー密度と造形密度の関係を示す。図より、エネルギー密度が約 35 J/mm<sup>3</sup> 以上の条件で高い造形密度が得られたことから、エネルギー密度の閾値は 35 J/mm<sup>3</sup> と考えられる。



図Ⅲ.2.1-5 造形体の密度を指標としたプロセスマップ



図Ⅲ.2.1-6 高出力、高速造形条件における IN718 の溶融凝固現象



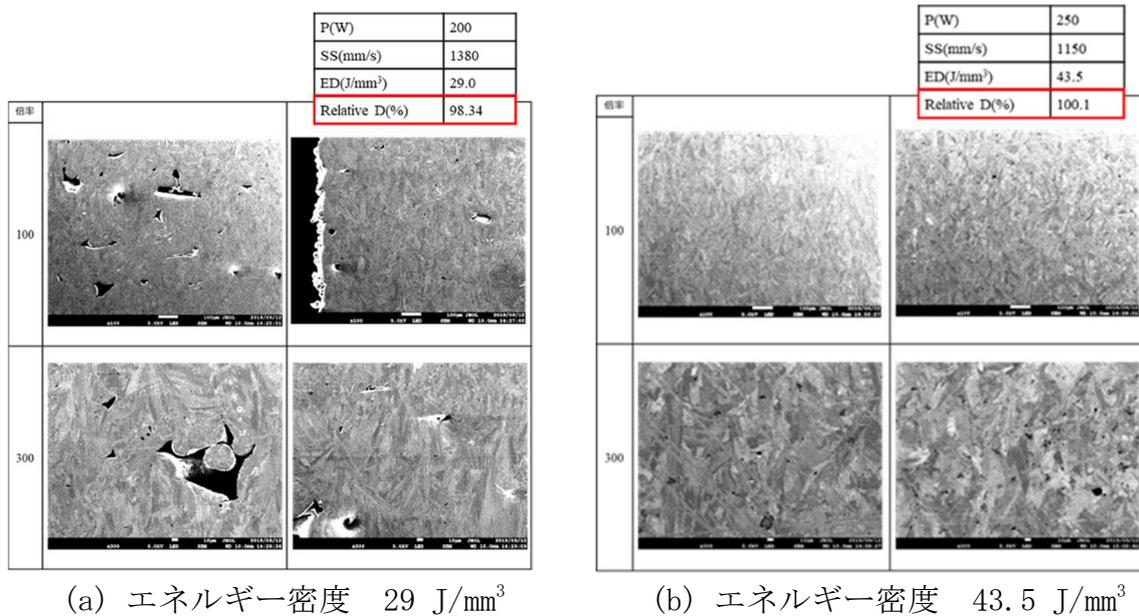
図Ⅲ. 2. 1-7 エネルギー密度と造形密度の関係

- (3) 例えば、H. Kyogoku, T. T. Ikeshoji, A review of metal additive manufacturing technologies: Mechanism of defects formation and simulation of melting and solidification phenomena in laser powder bed fusion process, Mech. Eng. Rev. 7 (2020) 19-00182.

b) 断面観察による内部欠陥状況の把握

欠陥発生原因と造形条件の関連性を解明するため、レーザー試験研究機で作製したキューブ試験片のうち代表的な試験片を選定し、断面観察から内部欠陥状況を把握した。また、全ての試験片の造形密度を測定し、造形条件との関係を調べた。さらに、表面性状の測定結果から表面欠陥と内部欠陥の関係を検討した。

造形体の断面観察による内部欠陥状況の結果の例を図Ⅲ. 2. 1-8 に示す。エネルギー密度が低い場合には、多くの未熔融欠陥が積層面に並んで観察されるのに対して、図Ⅲ. 2. 1-7 に示したようにエネルギー密度が相対密度 100%以上を示す閾値である  $35 \text{ J/mm}^3$  以上の  $43.5 \text{ J/mm}^3$  での組織においては、相対密度が 100%以上でも  $10 \text{ }\mu\text{m}$  以下の微細な空孔（ポア）が多く点在していることがわかる。本研究においては、欠陥の大きさ  $50 \text{ }\mu\text{m}$  以上を対象としていることから、欠陥はないものとして取り扱うこととする。



図Ⅲ. 2. 1-8 断面観察による内部欠陥状況の例

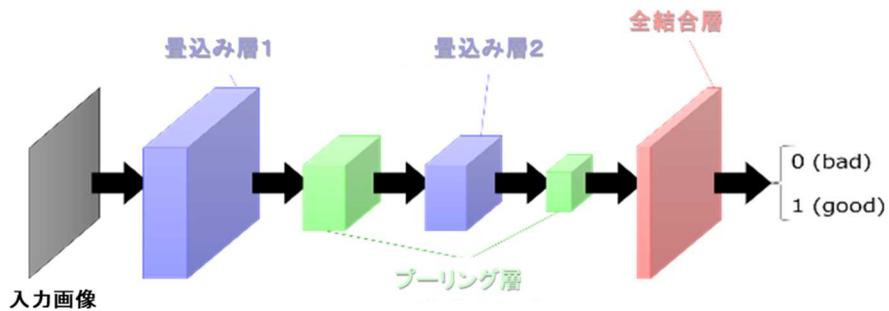
c) 三次元プロファイラによる表面性状パラメータと造形密度の関係

表面性状測定には、各種造形条件で造形した 121 個のキューブ試験片を用いた。また、測定には三次元光学プロファイラ (ZYGO NewView™ 9000) を用いて、三次元表面性状の測定を行った。なお、表面性状には ISO 25178-2 により規定されたパラメータを用いて評価した。これらの結果を用いて、密度と表面性状パラメータとの関係から相関行列より相関係数を求め、密度に及ぼす影響が大きい表面性状パラメータについて検討を行い、密度との相関が大きいパラメータを見出した。

一方、レーザー試験研究機のレイヤー表面モニタリング機能によるデータ取得を行い、両者の相関について検討した結果、両者のデータには相関があることがわかった。このため、レーザー試験研究機のデータ取得を行い、表面性状と欠陥の関係について検討を行った。

d) 欠陥予測システムの開発

東北大学仙台分室の特許による欠陥予測システムのプロトタイプにより検討を行った。教師データとして造形面のレイヤー表面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、欠陥予測システムのプロトタイプを試作した。プロトタイプ CNN モデルを図Ⅲ. 2. 1-9 に示す。得られた結果より、再現率 (Recall) はいずれのモデルも 0.8 以上となった。このように、レイヤー表面モニタリング画像より教師データを作成するとともに、CNN 設定条件について検討することにより試作した欠陥予測システムのプロトタイプを用いて検証した結果、欠陥発生予測精度 80%以上を達成した。このため、最終目標の予測精度 95%を目指して、画像判別機能に入力する画像データ処理を自動化するソフトウェアを開発し、画像処理の自動化を図るとともに、プロトタイプの欠陥予測ソフトウェアを大幅に改良し、最終目標である予測精度 95%を達成できる目途を得た。



図Ⅲ. 2. 1-9 プロトタイプ CNN モデル

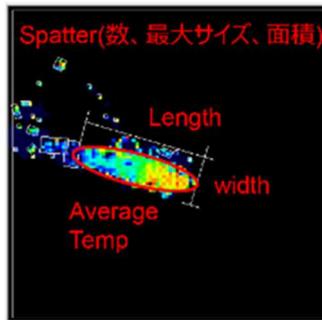
## 2. 1. 2 項目② 高度モニタリング及びフィードバック制御機能の開発

### 1) モニタリング技術の高機能化

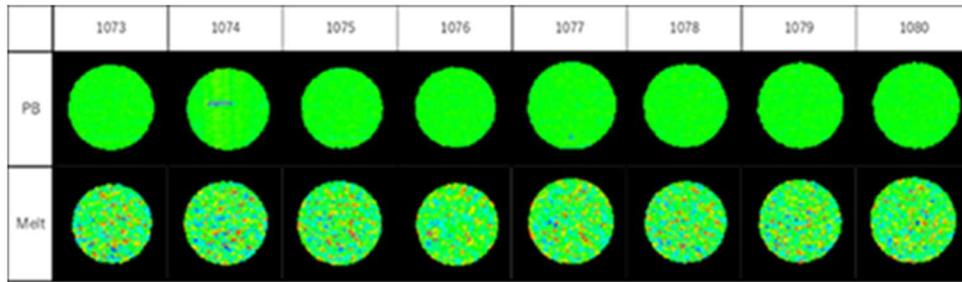
レーザー試験研究機（図Ⅲ. 2. 1-10）におけるモニタリング機能の高性能化を図った。パウダーベッド及び造形体のモニタリングにおける高さ分解能 30  $\mu\text{m}$  から目標値である 10  $\mu\text{m}$  以下に高精度化するとともに、メルトプールモニタリングにおいてメルトプール形態（幅、長さ）及びスパッタ量（図Ⅲ. 2. 1-11）のリアルタイム計測機能を追加した。レイヤー表面モニタリングにおけるキューブ造形体の表面性状測定結果の例を図Ⅲ. 2. 1-12 に示す。また、パウダーベッド全面の温度分布や熔融状況を高精度で計測できる機能も組み込み、パウダーベッド表面温度を測定精度 $\pm 50^{\circ}\text{C}$ 以下で測定可能とし、モニタリング機能を高度化した。



図Ⅲ. 2. 1-10 レーザー試験研究機外観



図Ⅲ. 2. 1-11 メルトプールモニタリング画像

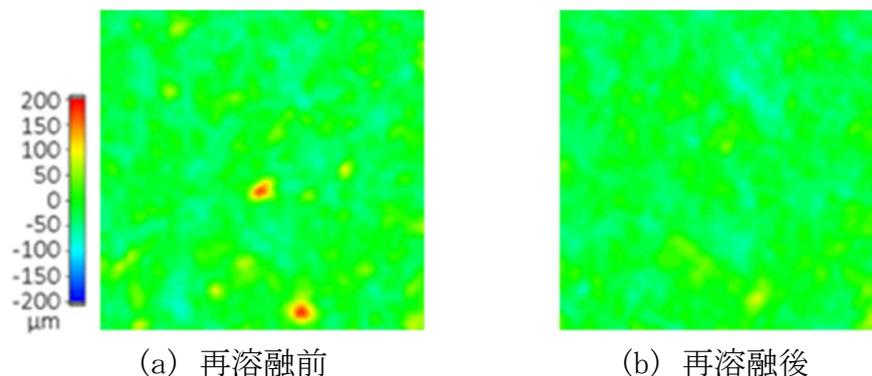


図Ⅲ. 2. 1-12 レイヤー表面モニタリング計測例

## 2) 再溶融による欠陥補修システムの開発

2020年度に予定していた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前倒しして、2019年度に実装した。

欠陥発生を抑制するためのフィードバック制御機能を実装したシステムを用いて、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について実証実験を行った。まず、再溶融効果について検討した結果、例えば図Ⅲ. 2. 1-13 に示すように、高さ 200  $\mu\text{m}$  以上の凸部が消滅するなど、表面性状の改善ができ、欠陥発生を防止できることを明らかにした。さらに、ISO 25178-2 に規定されている表面性状パラメータを用いて再溶融のための閾値を決定した。



図Ⅲ. 2. 1-13 再溶融前後における溶融面のモニタリング画像

## 2. 1. 3 項目③ 積層造形部品製作のための開発・評価方法の開発

モニタリングデータからプロセスマップを自動生成しプロセスウィンドウを探索する手法を設計した。まず、三次元プロファイラ画像データを用いた本探索手法の有効性を検証した。また、キューブ試験片を用いてプロセスマップ作成用のデータ（IN718 合金）を収集し、データベースに登録するシステムを構築した。

さらに、欠陥と相関の高い表面性状パラメータを使用するとともに、機械学習を用いて、装置側で取得したモニタリングデータからプロセスマップを自動生成する機能を開発した。自動生成したプロセスマップは、図Ⅲ. 2. 1-5 に示した実験値によるプロセスマップと比較してほぼ一致することを確認した。

さらに、IN718 合金を対象として、造形体の形状因子及び典型的な走査パターンを変化させた場合の各種データ収集を開始した。これらのモニタリングデータからプロセスマップを探索する手法の改良と検証を行っている。また、ステンレス鋼およびチタン合金についても、同様のデータ収集を開始した。

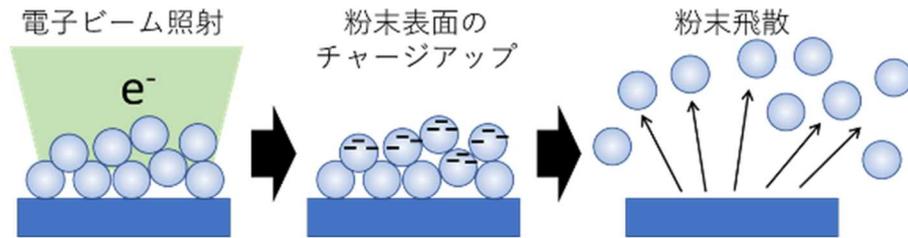
## 2. 2 電子ビーム方式

### 2. 2. 1 項目① 熔融凝固現象の解明による欠陥発生の予測技術の開発

パウダーベッドの熔融凝固現象の学理を構築し、欠陥形成メカニズムを明らかにして、欠陥予測システムを開発する。計測専用の電子ビームから得られた反射電子像を用いて画像化する機能を試験研究機に搭載する。この搭載した機能を用いてパウダーベッドの熔融凝固挙動をその場観察し、パウダーベッドの表面計測結果や熔融凝固シミュレーションによる解析も組み合わせながら、欠陥形成の学理を構築する。本項目では、Ti-6Al-4V 合金を用いる。さらに、その成果を基に、欠陥を予測するシステムを開発する。この欠陥予測システムは、造形表面画像データを判別する機能（画像判別機能）と表面画像データから造形欠陥の有無を 1 積層ごとに予測する機能（欠陥判別機能）の 2 つから成る。画像判別機能と欠陥判別機能はともにディープラーニングを用いる。

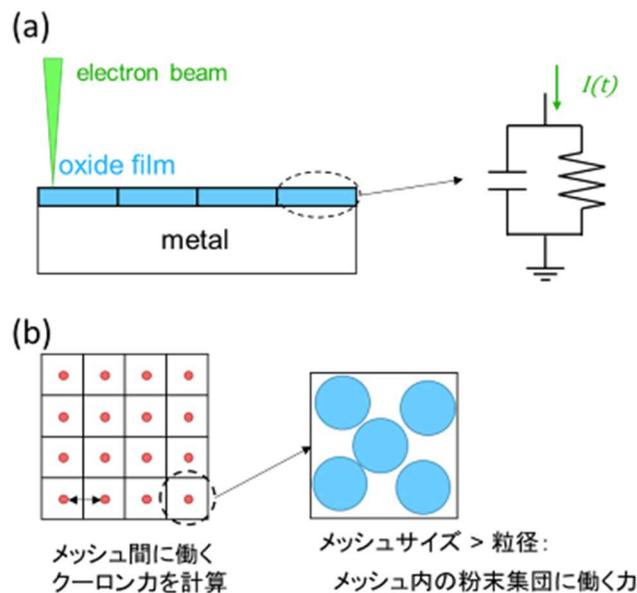
#### （1）欠陥発生原因と造形条件の関連性の解明

電子ビーム積層造形ではエネルギー源が負の電荷を有した電子ビームであるため、図Ⅲ. 2. 2-1 に示したようにパウダーベッド表面に電子ビームを照射した際に粉末が帯電し、粉末間の静電反発力によって粉末が飛散するスモークという現象が発生しうる。このスモーク現象は欠陥形成に繋がるおそれがあるため、電子ビーム積層造形では重要な課題である。そこで、電子ビームの走査条件とスモーク現象の関係をコンピュータ上で解析し、さらにパウダーベッドの昇温挙動も解析するために、パウダーベッドのヒーティングを計算するシミュレーションソフトウェアを開発した。



図Ⅲ. 2. 2-1 電子ビーム照射により生じるスモーク現象

開発したシミュレーションソフトでは、パウダーベッドの充放電挙動の計算を単純化するため、パウダーベッドを図Ⅲ. 2. 2-2 (a)のようにモデル化した。実際には表面に薄い酸化物の層を有した粉末の凝集体であるが、それを表面に薄い酸化膜を有したバルク体で表した。ここで酸化膜の等価回路を示しているが、この酸化膜の時定数を粉末凝集体の電気抵抗測定（インピーダンス測定）から求めた。また、計算する領域が広いため、実際にはメッシュサイズを粒径より大きく設定することが多く、メッシュ間に働くクーロン力を計算しているため、計算されるクーロン力は図Ⅲ. 2. 2-2 (b)に示したように粉末集団に働くクーロン力である。開発したシミュレーションソフトウェアを用いてビーム径の影響を計算し、ビーム径がクーロン力に及ぼす影響を明らかにした。



図Ⅲ. 2. 2-2 (a) パウダーベッドヒーティングのシミュレーションにおけるパウダーベッドのモデルと等価回路。(b) メッシュサイズと実際の粉末との関係。

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熔融・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、熔融しやすい。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ため、冷却速度や凝固速度にも影響を及ぼすため、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。その結果、PREP 粉末と PA 粉末で放射率の違いがあることが分かり、同じ PREP 粉末で波長依存性を評価すると、波長が長いほど放射率が大きく、高温になるほど放射率が大きくなることが分かった。

## (2) 欠陥予測システムのプロトタイプ試作

表面形状のレイヤーモニタリングデータから欠陥の有無を判別するシステムを試作するのが目的である。表面形状のレイヤーモニタリングデータは造形表面の高さをマッピングした 2 次元画像であり、画像の特徴を学習させ判別させるには CNN が適しているため、CNN を用いて試作を行った。CNN の構造を図 III. 2. 2-3 に示す。20 条件でキューブ試験片を造形した際の 101 層分のレイヤーモニタリングデータから造形材の領域だけをクロップして切り出し、2020 枚の画像データを用意した。アルキメデス法で求めた相対密度を基に 99. 0% 未満のものを欠陥あり材 (Bad)、99. 0% 以上のものを欠陥なし材 (Good) とし、画像データを欠陥あり材と欠陥なし材の 2 種類に分割した。欠陥あり材と欠陥なし材のそれぞれからトレーニング用データと評価用データをランダムで選択し、トレーニング用データ数/評価用データ数の比が 90/10 または 75/25 となるように 2 種類のデータセットを準備した。また、これらの画像のピクセル値として、測定高さの値を設定した画像、および -200 ~ +200  $\mu\text{m}$  を 0 ~ 1 に規格化した画像の 2 種類を用意した。トレーニング用データ数/評価用データ数の比、並びに画像ピクセル値の前処理の違いによって、表 III. 2. 2-1 に示した 4 種類のプロトタイプを試作した。

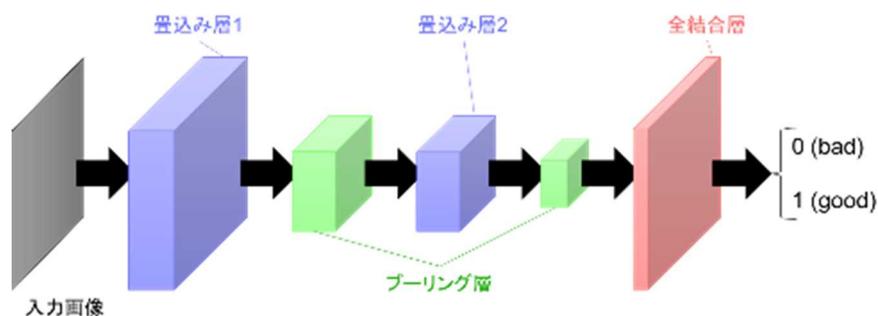


図 III. 2. 2-3 欠陥予測システムのプロトタイプで用いた CNN の構造。

表Ⅲ.2.2-1 試作した4種類のプロトタイプ

Model	入力画像のピクセル値	Training / Test
Model 1.1	測定高さ [μm]	90/10
Model 1.2	-200 ~ +200 μm を 0 ~ 1 に規格化した値	90/10
Model 1.3	測定高さ [μm]	75/25
Model 1.4	-200 ~ +200 μm を 0 ~ 1 に規格化した値	75/25

各プロトタイプを評価用データで検証し、表Ⅲ.2.2-2 に示したように True Positive (TP)、False Negative (FN)、False Positive (FP)、True Negative (TN) のに分類されたデータ数を求めて混同行列を作成した。それらの値から精度 (Accuracy)、再現率 (Recall)、適合率 (Precision)、F 値 (F1) を算出した。

ここで、精度は全ての評価データ数に対する正解データ数の割合、再現率は実際に欠陥が含まれる造形材のうち、欠陥ありと予測できた割合、適合率は欠陥ありと予測された造形材のうち、実際に欠陥を含んでいた造形材の割合、F 値は適合率と再現率の調和平均である。欠陥予測システムでは欠陥ありのものを欠陥なしと判定するのが致命的であるため、評価指標としては再現率が高い方が良いと考えられる。どのプロトタイプも 80% を超える再現率が得られた。

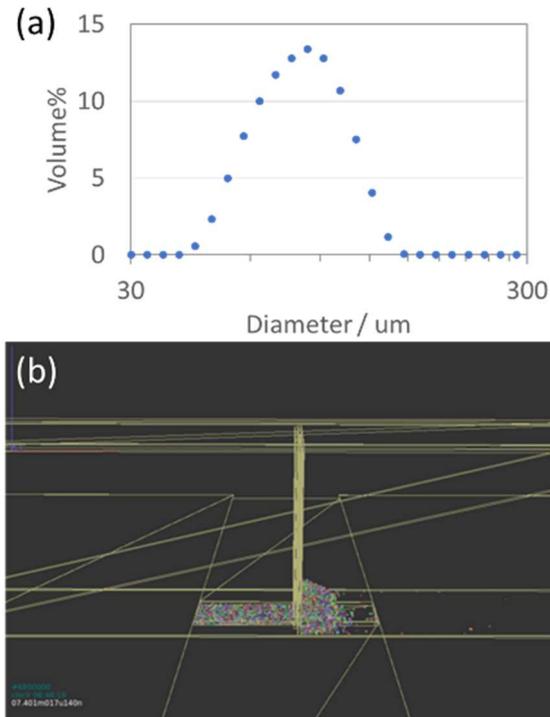
表Ⅲ.2.2-2 評価用データの分類

		予測	
		Bad	Good
密度 測定	Bad	TP	FN
	Good	FP	TN

### (3) 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

離散要素法 (DEM) によるパウダーベッドを形成するシミュレーションを実施し、この DEM で形成したパウダーベッド上に電子ビームを走査させた時の溶融・凝固する挙動を数値流体力学計算 (CFD) を用いてシミュレーションを実施した。

図Ⅲ.2.2-4 に DEM によるパウダーベッド形成シミュレーション結果を示す。図Ⅲ.2.2-4(a) はプラズマアトマイズで作製された Ti-6Al-4V 粉末の粒度分布の実測値であり、この粒度分布を与えてシミュレーションを行ったパウダーベッドの形成過程のスクリーンショットが図Ⅲ.2.2-4(b) である。



図Ⅲ.2.2-4 (a) プラズマアトマイズで作製されたTi-6Al-4V粉末の粒度分布。(b) 図Ⅲ.2.2-4 (a)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Ⅲ.2.2-4のDEMシミュレーション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パウダーベッドの熔融・凝固挙動をCFDによるシミュレーションで解析し、明らかにした。

また、インプロセスモニタリングデータの収集も行い、モニタリングデータで取得できる情報と内部欠陥の相関を明らかにし、欠陥予測システムの開発につなげる必要がある。そこで、内部欠陥と相関のあると考えられる表面凹凸を反映した反射電子(BSE)画像を取得するインプロセスモニタリング機能でモニタリングデータの収集を行った。表面の凹凸を反映したBSE画像を取得できることが確認でき、CNNの学習用にこのインプロセスモニタリング画像を収集中である。

## 2.2.2 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

5つの中間目標に対する現在までの成果について報告する。

中間目標1：メルトプール形状を計測専用の電子ビームから得られた反射電子を用いて画像化可能とする。

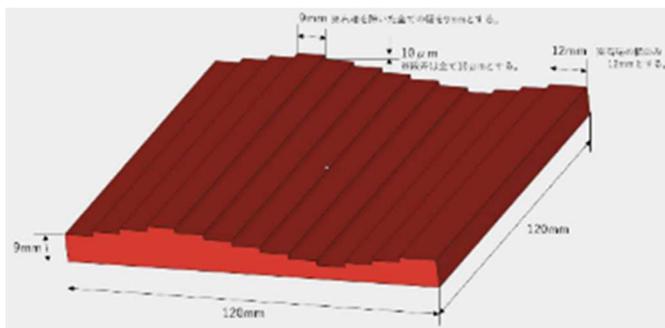
成果1：観察手法を変更して観察速度の改善を図った。この方式により観察用電子ビームを用いた反射電子画像で動画観察が可能となり、走査中の熔融ビームの状況が観察できた。

今後、パウダーベッド上で熔融観察条件の最適化を図り、メルトプール観察を進めていく。

中間目標 2：パウダーベッド表面及び造形表面を精度 30  $\mu\text{m}$  以下で三次元計測できる機能を開発し、試験研究機に実装する。

成果 2：光学式レイヤー表面計測装置を試験研究機に搭載し、10 $\mu\text{m}$  以下の表面凹凸形状の計測ができることが確認され最終目標を達成した。

図Ⅲ.2.2-5 に 10 $\mu\text{m}$  の高さ分解能(精度)を確認するために作製した 10 $\mu\text{m}$  段差付きベースプレートの概要図とその段差を視覚的に確認するため左側から光を当てた時のベースプレートの光学写真を示す。

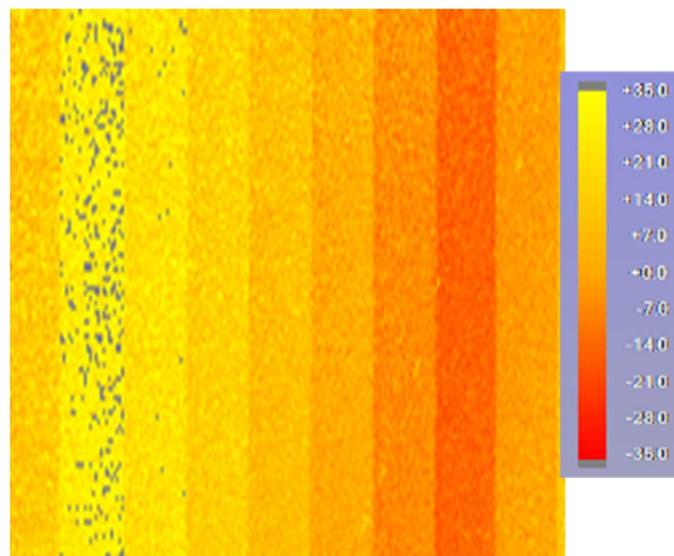


10 $\mu\text{m}$  段差ベースプレート概要図  
(上図は段差を誇張している為正確な寸法ではない)

10 $\mu\text{m}$  段差ベースプレートの光学写真

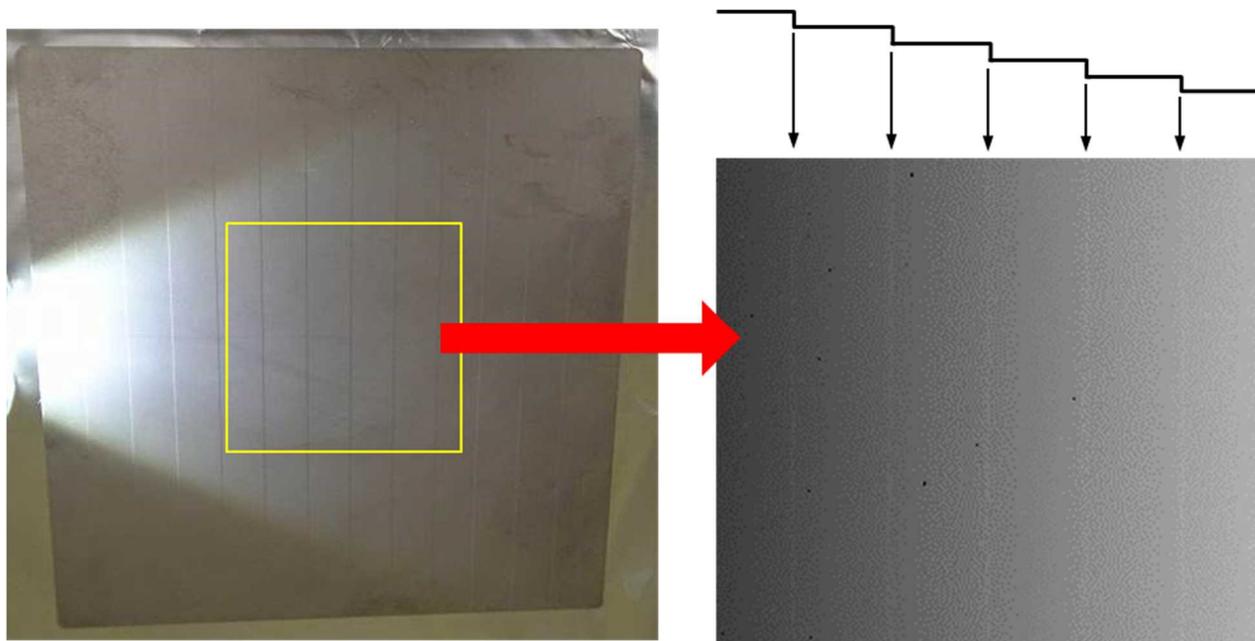
図Ⅲ.2.2-5 10 $\mu\text{m}$  の段差を付けたベースプレート

図Ⅲ.2.2-6 にレイヤー表面計測装置による 10 $\mu\text{m}$  段差付きベースプレートの計測画像を示す。図のように 10 $\mu\text{m}$  段差が明瞭に計測できており、10 $\mu\text{m}$  の精度で凹凸形状が測定できることがわかる。



図Ⅲ.2.2-6 レイヤー表面計測装置による 10 $\mu\text{m}$  段差プレート計測画像

図Ⅲ. 2. 2-7 は分割反射電子検出器を用いて同じ 10 $\mu$ m 段差付きベースプレートに 60kV-0.3mA の溶融用電子ビームによる反射電子 (BSE) 像を観察した結果を示す。図中、左側が図Ⅲ. 2. 2-5 で示した光学写真であり、右側が BSE 像である。BSE 像においても 10 $\mu$ m 段差を反映したコントラストが見えていることがわかる。



10 $\mu$ m 段差ベースプレートの光学写真

10 $\mu$ m 段差ベースプレート反射電子像

図Ⅲ. 2. 2-7 分割反射電子検出器による 10 $\mu$ m 段差プレートの反射電子像観察

以上のように、光学式のレイヤー表面計測装置、及び溶融用電子ビームによる BSE 像においても 10 $\mu$ m 以下の表面凹凸形状を反映した画像が得られており、最終目標の 10 $\mu$ m 以下の計測を達成できる性能が確認できている。

今後、実造形中のパウダーベッド表面、及び造形表面も同様の精度で計測・観察できることを確認する。

中間目標 3：測定精度 $\pm 50^{\circ}\text{C}$  以下でパウダーベッド表面温度を計測可能とする。

成果 3：パウダーベッド表面の温度計測は、従来はベースプレート底面の温度を熱電対で計測し、その温度からパウダーベッド面の温度を算出していたり、のぞき窓からの赤外線放射温度計で造形面のある一点の温度を計測していたりしていたが、パウダーベッド面の平均的な温度の測定精度を更に向上させるため、パウダーベッド面からの熱電子計測による温度測定を試みた。

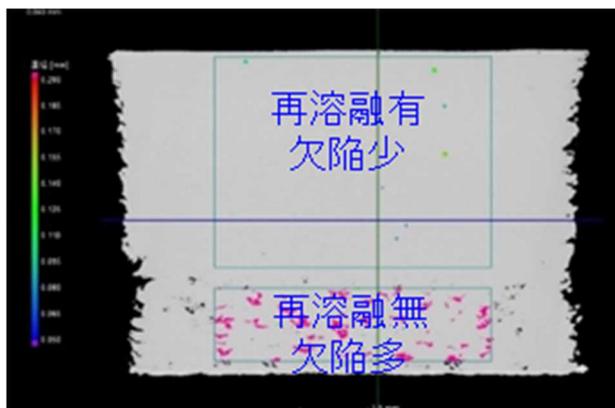
造形中の熱電子計測では、積層数によって多少の差異は生じるものの、温度精度としては $\pm 50^{\circ}\text{C}$  以下であることが確認できた。

今後は、熱電子計測からの温度情報による実造形における温度フィードバック制御を行い、造形品質の安定化に繋げていく予定である。

中間目標 4：フィードバック制御機能（欠陥予測箇所の再溶融機能）を試験研究機に実装する。

成果 4：フィードバック制御機能を試験研究機に実装し、再熔融機能を有効にして造形することで、再熔融することにより欠陥率が減少することが確認できた。

図Ⅲ.2.2-8は、 $10 \times 10 \times 8 \text{ mm}^3$ のキューブを造形において、積層高さ 8mm の内、最初の 3mm は欠陥率が大きくなるような熔融条件で造形し、その上の 5mm はそれまでと同じ条件で熔融した後、毎層再熔融機能を実行させた造形物の X 線 CT 画像を示す。積層高さ 3mm 以下の領域にはボイドが多数ある一方、積層高さ 3mm 以上の領域ではボイドが大幅に減少していることが確認でき、再熔融機能が欠陥率低減に効果があることが示された。

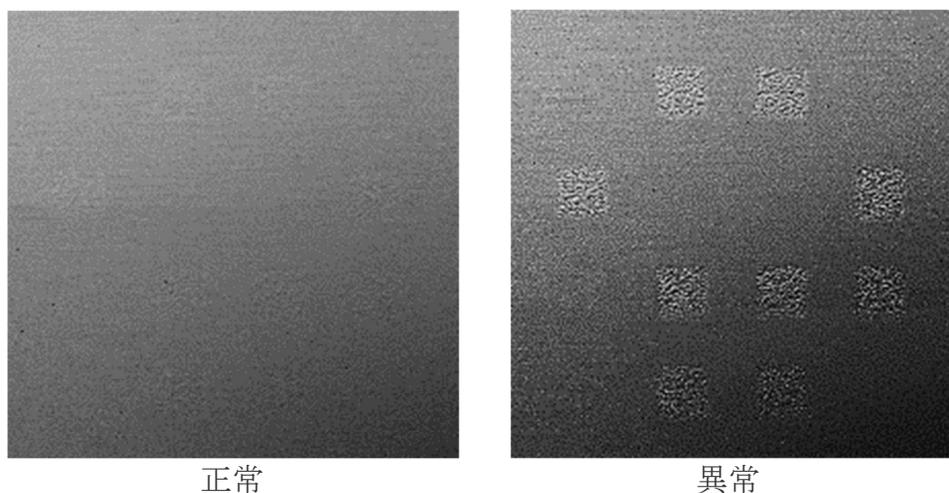


図Ⅲ.2.2-8 再熔融機能を使用した造形物の欠陥計測

中間目標 5：欠陥発生の原因となる異常状態を事前に検知可能とする。

成果 5：異常状態検知に必要な機能の確認として、造形中において正常な時と異常が発生した時の熔融工程直前の反射電子画像を図Ⅲ.2.2-9 に示す。図中、左側が熔融工程前に粉末がパウダーベット面に均一な厚みで敷き詰められた正常な状態であり、一層前の熔融された造形物表面が見えていないことがわかる。一方、右側は粉末敷き詰めが正常にできなかった状態であり、一層前の熔融された造形物表面が確認でき、異常発生として識別できる。このような異常は、粉末スキージ不良やスキージ後の粉末加熱中にスモークが発生した場合に起こる現象であり、これが検知された際にはリカバリ機能が働く。

今後、実造形においてこの機能の有効性を確認する予定である。



図Ⅲ.2.2-9 熔融工程直線の反射電子像観察による異常検知

## 2. 2. 3 項目③ 積層造形部品製作のための開発・評価方法の開発

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、そして自動化可能なプロセスマップ生成手法 (TRAFAM で出願した特許:PCT/JP2018/31389) を組み合わせて、新規の装置ユーザが積層造形部品を効率的に開発・評価できる手法を確立し、手順書として纏める。本研究開発項目で開発する手法は、(1) ユーザが作りたい部品を形状により分類、(2) その分類形状に対し欠陥を生じにくく外乱に対して強い造形条件を提示するプロセスマップの探索、(3) プロセスマップデータベースから部品造形条件の作成、(4) 高度モニタリング及びフィードバック制御機能搭載の試験研究機による造形、(5) 各積層面におけるインプロセスモニタリングデータの三次元再構築等による造形部品のポスト評価の手順からなり、これらを新規の装置ユーザでも実施可能できるように手順書を作成する。この手法の検証を、まずキューブ試験片で行い、その後、実際の金属部品形状 (インペラなど) に近いモデル形状での検証を行う。

### (1) 自動化可能なプロセスマップ探索手法の確立

プラズマアトマイズ粉末を用いてプロセスマップ探索手法の検証を行った。エミッション電流と対物レンズ電流 (OL 電流) を変えて 16 条件で造形を行った。造形材の表面形状の評価を行い、それを基に機械学習でプロセスマップを構築した。X 線 CT で測定された欠陥率と比較したところ、機械学習で予測された最適条件は欠陥率が最も小さい造形体が得られた造形条件の近い位置にあることが分かった。

造形条件最適化を容易に実行できるようにするためには、プロセスマップ構築試験を自動化することが有効である。プロセスマップ作製を自動化するソフトウェアを試作し、その動作検証を行い、正常に動作することを確認した。

## IV. 成果の実用化・事業化に向けた取組及び見通しについて

### 1. レーザービーム方式

#### 1. 1 成果の実用化・事業化に向けた戦略

レーザービーム金属3Dプリンターは導入されてはいるが、まだコスト面、品質保証に課題があり、生産・量産のための導入は限定的で、試作用がほとんどである。このため、品質保証の観点から、本研究開発の成果を、2026年度を目途に実用化・事業化を図っていく。

#### 1. 2 成果の実用化・事業化に向けた具体的取り組み

実用化・事業化に向けた具体的取組は、「積層造形部品開発の効率化のための基盤技術開発事業」事業原簿【非公開】に記載。

#### 1. 3 成果の実用化・事業化の見通し

実用化・事業化に向けた具体的取組は、「積層造形部品開発の効率化のための基盤技術開発事業」事業原簿【非公開】に記載。

### 2. 電子ビーム方式

#### 2. 1 成果の実用化・事業化に向けた戦略

電子ビーム方式の3Dプリンターの特に国内の市場状況は、以下のように推測している。

1) 電子ビーム金属3Dプリンターを生産向けに導入している企業はまだ少なく、興味はあるが導入に踏み切れていない企業が多い。その理由の一つが1億円以上の装置価格である。

2) また、モニタリングによる品質の保証やスモーク等の電子ビーム方式固有の現象に対して、リカバリー機能がないため、ユーザーが生産向けの本格導入ができていない。

このような状況下で本事業の研究開発項目を2026年度までに実用化・事業化を進める。

#### 2. 2 成果の実用化・事業化に向けた具体的取り組み

実用化・事業化に向けた具体的な取り組みは、「積層造形部品開発の効率化のための基盤技術開発事業」事業原簿【非公開】に記載されている。

## 2. 3 成果の実用化・事業化の見通し

成果の実用化・事業化の見通しについては、「積層造形部品開発の効率化のための基盤技術開発事業」事業原簿【非公開】に記載されている。

## 「積層造形部品開発の効率化のための基盤技術開発事業」基本計画

IoT 推進部

## 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上げていくためには、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、サポーター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、「PM」という。）にNEDO IoT推進部 三代川洋一郎を任命して、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

PM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

PM 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、事後評価を 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

PM 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. 基本計画の改訂履歴

(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

## (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て出すことは容易ではない。量産にあたっての品質の繰り返し安定性を確保するためには、品質に大きな影響を及ぼす金属の溶融凝固メカニズムの解明及び品質に悪影響を及ぼす積層造形物中の欠陥生成の予測が必要である。

#### 2. 研究開発の具体的内容

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

#### 3. 達成目標

##### 【中間目標】

欠陥発生予測システムの予測精度 80%以上

##### 【最終目標】

欠陥発生予測システムの予測精度 95%以上

### 研究開発項目② 高度モニタリング及びフィードバック制御機能の開発

#### 1. 研究開発の必要性

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

#### 2. 研究開発の具体的内容

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

#### 3. 達成目標

### 【中間目標】

(レーザービーム方式)

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

(電子ビーム方式)

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

### 【最終目標】

(レーザービーム方式)

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

(電子ビーム方式)

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

## 研究開発項目③ 積層造形部品作製のための開発・評価手法の開発

### 1. 研究開発の必要性

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

### 2. 研究開発の具体的内容

レーザービーム式及び電子ビーム式の積層造形機により、造形サンプルの試作及び評価を行い、最適な造形条件、組織分析、材料特性を研究する。また、積層造形技術を活用した金属部品開発などを効率的に行うための開発・評価手法を開発すると共に、研究開発項目①及び②で開発された技術を組み合わせ、ユーザー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ーが活用できる手順書として纏める。

(別紙2) 研究開発スケジュール

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

## 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	TRAFAM	PCT/JP2020/20406	PCT	2020/5/22	出願	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
2	TRAFAM	PCT/JP2020/34005	PCT	2020/8/9	出願	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
3	TRAFAM	PCT/JP2021/7420	PCT	2021/2/26	出願	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
4	TRAFAM	PCT/JP2021/7535	PCT	2021/2/26	出願	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

【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	H. Kyogoku, T.-T. Ikeshoji	近畿大学	A review of metal additive manufacturing technologies: Mechanism of defects formation and simulation of melting and solidification phenomena in laser powder bed fusion process	Mechanical Engineering Reviews, 7(1) (2020) 19-00182	有	2020/01
2	K. Yuasa, M. Tagami, M. Yonehara, T.-T. Ikeshoji, K. Takeshita, H. Aoki, H. Kyogoku	近畿大学、ニコン	Influences of powder characteristics and recoating conditions on surface texture of powder bed in metal additive manufacturing	Int. J. Advanced Manufacturing Technology, 115(2021) 3919-3932	有	2021/06
3	H. Bian, K. Aoyagi, Y. Zhao, C. Maeda, T. Mouri, A. Chiba	東北大学	Microstructure refinement for superior ductility of Al-Si alloy by electron beam melting	Additive Manufacturing, 32 (2020) 100982	有	2020/3
4	Yufan Zhao, Kenta Aoyagi, Kenta Yamanaka, Akihiko Chiba	東北大学	Role of operating and environmental conditions in determining molten pool dynamics during electron beam melting and selective laser melting	Additive Manufacturing, 36 (2020) 101559	有	2020/12

5	Yuchao Lei, Kenta Aoyagi, Yujie Cui, Dong- Soo Kang, Kosuke Kuwabara, Kinya Aota, Akihiko Chiba	東北大学	Process optimization and mechanical property investigation of non-weldable superalloy Alloy713ELC manufactured with selective electron beam melting	Materials Science and Engineering A, 787 (2020) 139485	有	2020/6
6	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, 34 (2020) 101277	有	2020/8
7	Yuchao Lei, Kenta Aoyagi, Kinya Aota, Kosuke Kuwabara, Akihiko Chiba	東北大学	Critical factor triggering grain boundary cracking in non- weldable superalloy Alloy713ELC fabricated with selective electron beam melting	Acta Materialia, 208 (2021) 116695	有	2021/4
8	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, 381 (2021) 44-54	有	2021/3

【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	湯浅健也、田上将治、米原牧子、池庄司敏孝、竹下孝樹、青木洋、京極秀樹	近畿大学、ニコン	金属積層造形におけるパウダーベッド表面性状の計測	日本機械学会 2020 年度年次大会	2020/09/14
2	池庄司敏孝、米原牧子、京極秀樹	近畿大学	Ni 基超合金レーザ式積層造形の溶融凝固数値計算によるプロセスマップ	日本機械学会 2020 年度年次大会	2020/09/14
3	京極秀樹	近畿大学	TRAFAM プロジェクトの成果報告	日本機械学会 2020 年度年次大会	2020/09/14
4	京極秀樹	近畿大学	次世代ものづくりにおける 3D プリントの将来像	日本機械学会 2020 年度年次大会	2020/09/14
5	池庄司敏孝、米原牧子、加藤千佳、湯浅健也、池田峻史、京極秀樹	近畿大学	レーザ式粉末床溶融結合過程における粉末床表面温度分布	溶接学会全国大会	2020/04/23
6	池庄司敏孝、米原牧子、京極秀樹	近畿大学	金属粉体輻射率の測定と PBF-LB における粉末床表面温度分布	溶接学会全国大会	2020/09/09
7	Kenta Aoyagi	東北大学	Development of Auto-Process Mapping System for Powder Bed Fusion Additive Manufacturing	1st French-Japanese Workshop on Additive Manufacturing	2021/5/12

8	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 回講演会	2021/3/18
9	千葉 晶彦, 青柳健大, 趙 宇凡, 卞 華康, 山中 謙太	東北大学	電子ビーム積層造形中に生ずる諸問題とその材料学的な解決	日本金属学会第 168 回講演会	2021/3/18
10	Yunwei Gui, Kenta Aoyagi, Huakang Bian, Akihiko Chiba	東北大学	Detection and classification of internal defects from surface morphology data of additively manufactured parts	日本金属学会第 168 回講演会	2021/3/18
11	雷雨超, 青柳健大, 青田 欣也, 桑原 孝介, 千葉晶彦	東北大学	電子ビーム積層造形による難溶接性超合金 Alloy713ELC の割れを導く機械的因子	日本金属学会第 168 回講演会	2021/3/18
12	千葉晶彦	東北大学	金属積層造形プロセスと金属粉末特性 —メルトプールの動的挙動と熔融凝固プロセス—	日本塑性加工学会 第 71 回塑性加工連合講演会	2020/11/14
13	千葉晶彦	東北大学	金属積層造形技術の概要と研究開発動向	日本塑性加工学会 第 338 回塑性加工シンポジウム「金属積層造形技術の最前線」—高機能・高付加価値製品の開発—	2020/9/30
14	趙 宇凡, 青柳健大, 台野 洋平, 山中 謙太, 千葉晶彦	東北大学	Powder Morphology in Defects Suppression of Additively Manufactured Inconel 718	日本金属学会 2020 年秋期講演大会	2020/9/17
15	千葉晶彦	東北大学	AMにおける熔融凝固現象と欠陥発生メカニズム	日本機械学会 2020 年度年次大会 先端技術フォーラム デジタルマニファクチャリングによるものづくり革新	2020/9/14

16	青柳 健大, 工藤 貴浩, 千葉 晶彦	東北大学	電子ビーム積層造形における予熱過程のシミュレーション	日本金属学会 2020年春期講演大会	2020/3/17
17	Kenta Aoyagi	東北大学	Simulation and data analysis for powder-bed-fusion type additive manufacturing using electron beam	SIP Additive Manufacturing International Workshop	2020/1/29