

「次世代型産業用 3Dプリンタの造形技術開発・
実用化事業」

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	5
I. 事業の位置付け・必要性について	8
1. 事業の背景・目的・位置づけ	8
1. 1 事業の背景	8
1. 2 事業の目的	8
1. 3 事業の位置づけ	8
2. NEDO の関与の必要性・制度への適合性	9
2. 1 NEDO が関与することの意義	9
2. 2 実施の効果（費用対効果）	9
II. 研究開発マネジメントについて	11
1. 事業の目標	11
2. 事業の計画内容	12
2. 1 研究開発の内容	12
2. 2 研究開発の実施体制	13
2. 3 研究開発の運営管理	14
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	14
3. 情勢変化への対応	16
4. 評価に関する事項	16
III. 研究開発成果について	17
1. 事業全体の成果	17
1. 1 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義	17
1. 1. 1 装置開発	17
1. 1. 2 粉末開発	19
1. 1. 3 基盤技術開発（造形条件、シミュレーション及びソフトウェア開発）	19
1. 1. 4 金属積層造形技術の実用化に向けた実証	20
1. 2 成果の普及（特許、論文、外部発表等の件数）	21
1. 3 知的財産等の確保に向けた取組	22
2. 研究開発項目毎の成果概要	22
2. 1 項目①「基盤技術の研究開発（委託）」	22
2. 2 項目②「高速・高性能の 3D プリンタの技術開発（委託・助成）」	23
2. 3 項目③「金属等粉末製造技術及び粉末修飾技術の開発（助成）」	26
2. 4 項目④「鋳造用砂型 3D プリンタの技術開発（委託、助成）」	26
2. 5 項目⑤「金属積層造形技術の実用化に向けた実証（助成）」	27
3. 研究開発成果の詳細	27
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	28

1. 成果の実用化・事業化に向けた戦略.....	28
2. 成果の実用化・事業化に向けた具体的取組.....	29
2. 1 砂型積層造形装置.....	29
2. 2 電子ビーム方式金属積層装置.....	29
2. 3 レーザービーム方式デポジション方式（マシニング）金属積層装置.....	30
2. 4 レーザービーム方式デポジション方式金属積層装置.....	31
3. 成果の普及活動.....	31

(添付資料)

- ・ (添付資料 1) プロジェクト基本計画
- ・ (添付資料 2) 実施方針
- ・ (添付資料 3) 平成 29 年度～平成 30 年度成果報告書
- ・ (添付資料 4) 特許リスト
- ・ (添付資料 5) 論文リスト

概要

		最終更新日	2019年11月20日
プロジェクト名	次世代型産業用 3D プリンタの造形技術開発・実用化事業	プロジェクト番号	P17002
担当推進部/PM	IoT 推進部 川端 紳一郎 (2016年12月～2019年2月)		
0. 事業の概要	<p>我が国ものづくり産業がグローバル市場において持続的かつ発展的な競争力を維持するために、地域の中 小企業等の持つ技術や資源を活用し、少量多品種で高付加価値の製品・部品の製造に適した三次元積層造形 技術や金属等の粉末材料の多様化・高機能複合化等の技術開発及びその周辺技術の開発を行い、次世代のも のづくり産業を支える 3D プリンタを核とした我が国の新たなものづくり産業の創出を目指す。また、3D プ リンタを普及させることにより、金属材料の製造に必要なエネルギー量の削減や、加工工程の短縮などによ るエネルギー効率の改善による省エネルギー型製造プロセスの創出を目指す。</p> <p>なお、本事業は、2014 年度（鋳造用砂型 3D プリンタについては、2013 年度）に経済産業省が開始した 事業を、2017 年度から NEDO に移管されたものである（鋳造用砂型 3D プリンタについては、2017 年度終 了）。</p>		
I. 事業の位置付 け・必要性につ いて	<p>金属加工において、切削加工、塑性加工等に次ぐ第三の加工法とされる 3D プリンタに代表される三次元 積層造形技術の進歩は、軽量でこれまでにない機能や複雑構造を有する等の高機能製品の開発を加速するだ けでなく、商品企画、設計、製造プロセスのデジタル化の進展等も伴い、地域の中小企業、個人の知恵や感 性を活かした新たな付加価値を持つ製品の創製、商品企画から設計・生産までの時間の大幅短縮、地理的、 空間的制約からの開放など、ものづくりに“革命”を起こす潜在力を秘めているとされ、欧米では製造業の再 生の柱として 3D プリンタを用いた三次元積層造形技術の開発が活発化している。</p> <p>また三次元積層造形技術は、従来の金属加工等のものづくり工程を大幅に短縮し、製造プロセスにおける 消費エネルギーの削減による省エネルギー効果も期待されているところである。したがって、我が国のもの づくり産業が国際競争力を維持し、次世代のものづくりをリードするためには 3D プリンタを用いた三次元 積層造形技術の開発・実用化が喫緊の課題となっている。</p>		
II. 研究開発マネジメントについて			
事業の目標	<p>本事業により開発される造形技術は、(a) 3D プリンタ装置、(b) 金属等粉末材料、(c) プロセスソフトウエ アにより構成される。</p> <p>(a) 3D プリンタ装置（研究開発項目②、④） 平成 30 年度までに、積層造形速度が平成 25 年時点の既存欧米装置の 10 倍、 製品精度が同 5 倍となる 3D プリンタ装置</p> <p>1) 電子ビーム方式（平成 30 年度） 速度：500cc/h、精度：±50 μm、造形サイズ：1,000 mm×1,000 mm×600 mm、 価格：5000 万円</p> <p>2) レーザービーム方式（平成 30 年度） 速度：500cc/h、精度：±20 μm、造形サイズ：1,000 mm×1,000 mm×600 mm、 価格：5000 万円</p> <p>3) 砂型造形装置（平成 29 年度） 速度：10 万 cc/h、造形サイズ：1,000 mm×1,000 mm×600 mm、 価格：2000 万円</p>		

開発体制	経産省担当原課	製造産業局 素形材産業室	
	プロジェクトリーダー	近畿大学 次世代基盤技術研究所 3D 造形技術研究センター 京極秀樹教授	
	委託先 助成先	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 助成先：技術研究組合 次世代 3D 積層造形技術総合開発機構 再委託先：早稲田大学、北海道立総合研究機構、兵庫県立工業技術センター	
情勢変化への対応	NEDO は、事業の運営管理として、研究開発の進捗状況や技術推進委員会の結果等を踏まえ、追加予算により研究開発を加速的に進捗させることで、優れた技術的成果が期待できるテーマに関して、追加予算（開発促進財源）の投入を行った。具体的には、2017 年度に 4 つの内容において合計 39.8 百万円の追加を行った。		
評価に関する事項	事前評価	2013 年度実施	経済産業省実施
	中間評価	2016 年度実施	経済産業省実施
	事後評価	2019 年度実施	担当部 IoT 推進部
Ⅲ. 研究開発成果について	<p>○研究開発項目①基盤技術の研究開発</p> <p>基盤技術開発においては、目標を大きく上回って目標を達成した。電子ビーム方式の基盤技術においては、電子ビームでの課題である“スモーク現象”発生原因を解明や造形条件におけるプロセスマップを機械学習法に依り短期間で作成することを可能にした。レーザービーム方式の基盤技術においては、熔融凝固現象の解明を行い、欠陥発生の原因を明らかにするとともに、新たに形状記憶合金材料の NiTi の造形・材料データベースを構築する等の成果を得た。</p> <p>○研究開発項目②高速・高性能の 3D プリンタの技術開発</p> <p>金属積層装置開発においては、概ね目標を達成し、一部の装置については、造形精度や最大造形サイズにおいて、目標を大きく上回って達成した。海外装置のスペックを上回る装置を開発することができた。</p> <p>○研究開発項目③金属等粉末製造技術及び粉末修飾技術の開発</p> <p>粉末開発においては、目標を達成した。新たな粉末製造技術開発により、積層造形に相応しい実用に供する金属粉末を提供可能とした。</p> <p>○研究開発項目④鋳造用砂型 3D プリンタの技術開発</p> <p>鋳造用砂型積層装置においては、目標を達成し、最大造形サイズについては目標を大きく上回って達成した。大型化・高速化については、高速・高精度ラインインクジェットヘッドの開発、高速造形用材料の開発や、高速リコート技術の開発を行った。高精度化については、粉末及びバインダーの開発を行った。また、耐熱化については、人工砂による骨材の開発を行った。これらにより、世界最大・最速で造形可能な砂型造形装置を開発、砂型の造形を可能とした。</p> <p>○研究開発項目⑤金属積層造形技術の実用化に向けた実証</p> <p>ユーザー実証においては、目標を達成した。開発装置 5 機種全ての実証試験を行い、19 件の検証を実施した。量産技術化に向けて、ユーザー組合員が、機械特性、部品精度、機能（冷却性能、回転試験等）等の評価を実施した。</p>		

	論文・発表	「論文」9件 「研究発表・講演」153件
	特許	「登録」64件（米国特許19件、欧州特許6件）
	その他の外部発表 （プレス発表等）	「受賞」3件 「新聞・雑誌等への掲載」65件 「展示会への出展」15件
IV. 実用化・事業化の見通しについて	<p>本事業においては、新会社（株式会社金属積層造形サポートシステム）を設立し、新会社が積層造形データや熱変形シミュレーション等のサポートサービスを行う。ソフト、装置、粉末においては、各企業が販売やメンテナンス等を行う。中小企業等への拡大にむけて、新会社と各企業が連携するビジネスモデルを構築した。</p> <p>各企業の具体的取組としては、砂型積層造形装置については、シーメットが2018年度より装置販売を開始し、国産1号機を納入済みである。また、金属積層装置についてはこれまでに、多田電機が2019年に納入、三菱重工工作機械が2019年に納入、東芝機械が2017年に上市するとともに2019年に受注を開始、という状況である。</p>	
V. 基本計画に関する事項	作成時期	2016年12月 作成
	変更履歴	無し

用語集

HIP(Hot Isostatic Pressing : 熱間等方圧加圧法) :

数 100~2000℃の高温と数 10~200MPa の等方的な圧力を被処理体に同時に加えて処理するプロセス。通常はアルゴンなどのガスを圧力媒体として等方的な圧力を加えて加工する。粉体の加圧焼結、焼結品、鋳造品の高密度化・内部欠陥除去による機械特性向上、同種・異種材料の拡散接合などに用いられる。

遠心力アトマイズ法 :

金属融液を遠心力により分裂させる方式。溶解した金属を容器の底から連続的に出湯させ、下方に配置された高速回転するディスク上に落下させる。融液はディスク上で拡がり、遠心力で外周方向に移動し、ディスクのエッジで分裂後、表面張力により球状となり凝固する。

ガスアトマイズ法 :

一般的に高周波誘導加熱炉で溶解した金属を容器の底から出湯させ、窒素、アルゴンなどの反応しにくい不活性ガスを吹付けることにより、融液を分裂させ凝固させることにより粉末を製造するプロセス。吹付けるガスが比較的冷却速度の遅いガスであるため、分裂した融液は、表面張力により球状になり凝固する。

サテライト :

アトマイズ法で粉末を作る際に母体となる粉末に小さな粉末が衛星のように付いているもの。欠陥の発生原因の一つになりやすい。

スパッタ現象 :

熔融中に金属粒が飛散する現象のことで、既に凝固した部分に付着するなどして品質の妨げになる。

スモーク現象 :

電子ビーム方式で、電子ビームを照射した際に粉末が帯電して、反発し合い飛んでしまう現象。

造形レシピ :

積層造形を行う上での造形条件。例えばレーザー積層造形においては、レーザー出力、走査速度、走査ピッチ、粉末積層ピッチ等がある。

鋳造用砂型 3D プリンタ :

鋳造法では、溶けた金属を砂で固めた型（砂型）に流し込み、凝固させることで金属部品を作製するが、従来は木型を用いて作製していた砂型を、砂を結合剤（バインダー）で一層ずつ固めていくことで積層造形する装置。

デポジション方式：

ISO 分類の DED 方式 (Directed Energy Deposition、DED、指向性エネルギー堆積) のこと。材料を付加したい部分に、粉末の噴射などにより材料を供給しながらレーザーなどの熱源を照射することで、造形物を構成するための材料を堆積させる。これを造形物形状に沿って連続的に移動させることで立体的造形物を得る。多くの場合、熱源にはレーザーが用いられ、材料は粉末として供給される。その他にも、電子ビームやプラズマアークを用い、材料がワイヤーとして供給されるものがある。

電子ビーム方式：

電子ビームを熱源とする積層造形技術で、電子ビームは電子顕微鏡などと同様に、陰極の加熱で発生する熱電子が加速されたもので、磁界コイルにより収束・偏向され粉末に照射される。電子ビームは磁界コイルで走査されるため、ガルバノミラーで走査されるレーザー方式よりビーム走査速度を 1000 倍以上大きくすることが可能。

中子：

鋳物の内部構造を作るための鋳型。鋳造後に鋳物の内部から取り出す必要がある。

熱変形：

金属積層造形の溶融・凝固の際に生じる残留応力等が原因で生じる変形のこと。

バインダー：

3D プリンタで用いる結合剤のこと。本事業で開発した鋳造用砂型 3D プリンタでは、砂表面の触媒とバインダーが反応し、硬化する。

バインダージェット方式：

ISO 分類の BJ 方式 (Binder Jetting、BJT、結合剤噴射) のこと。液体の結合剤 (バインダー) を選択的に供給して粉末材料を結合する付加製造技術。原理は一般のインクジェットプリンタの紙を粉末層に、インクをバインダーに置き換えたもので、粉末材料を 1 層敷きつめて重ねる動作と、その層に造形物の断面形状を印刷して結合させる動作を交互に繰り返す。造形終了後に粉末冶金と同じく焼結を行い、造形物を得る。

パウダーベッド方式：

ISO 分類の PBF 方式 (Powder Bed Fusion、PBF、粉末床溶融結合) のこと。ベースプレートと呼ばれる平らな金属板の上に原料粉末が敷き詰められ、その層に対し、レーザーあるいは電子ビームを、造形物の断面形状に沿って走査しながら照射することで粉末粒子が溶融凝固した材料の層が形成される。一層分の走査が完了すると、ベースプレートが積層厚さ分だけ下降し、その上に敷かれた新しい層に対して再びビームが走査され、層内の粉末粒子が溶融凝固されるとともに下層にも結合される。これを繰り返して 3 次元造形物を得る。

ヒューム現象：

熔融時に発生した金属蒸気が凝集して微細な粒子となったもの。レーザー光を散乱させたり、レーザーのレンズに付着し曇らせる原因となる。チャンバー内の空気の流れを利用して回収する。

分級：

粉体を粒子径の差によって仕分けることの総称。製造された粉末はプロセスに応じた粒度分布を有しており、積層造形用粉末として使用する場合には適切な粒度分布にするため分級を行う。

プラズマアトマイズ法：

プラズマトーチの中心に金属の線材を供給し、プラズマの熱とジェットの運動エネルギーで融液を分裂させることにより粉末を製造する方法。細径の線材を使用するため、噴霧室内の粉末密度が低くなり、ガスアトマイズに比べ、粉末の衝突に起因するサテライトが少ない非常に円形度の高い粉末が製造可能であるが、生産性が低い。

プロセスマップ：

造形プロセス（熱源出力、走査速度等制御条件）の良し悪しを一覧マップとして表示したもの。

ポロシティ（空孔）：

金属粉末そのものにガスアトマイズの気体が閉じ込められてしまうものをいう。熔融の際、ガスが抜けきれず残ってしまい、欠陥の発生原因の一つに成りやすい。

メルトプール：

熱源による熱の吸収により金属粉末が熔融した熔融池のこと。熔融池では、表面張力を駆動力とした流動現象（マランゴニ対流）が起きている。

リコーター：

金属粉末を、粉末供給のバッファ（ディスペンサー）から造形ステージへ均一に敷き詰める機構のこと。

レーザービーム方式：

レーザービームを熱源とする積層造形技術。金属積層造形で最も多い方法。主に用いられているレーザーは出力約 400W～1 kW のファイバーレーザーで、ガルバノスキャナーによって走査される。近年では複数本のレーザーを用いて、高速化、大型化が図られている。

I. 事業の位置付け・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

金属加工において、切削加工、塑性加工等に次ぐ第三の加工法とされる 3D プリンタに代表される三次元積層造形技術の進歩は、軽量でこれまでにない機能や複雑構造を有する等の高機能製品の開発を加速するだけでなく、商品企画、設計、製造プロセスのデジタル化の進展等も伴い、地域の中小企業、個人の知恵や感性を活かした新たな付加価値を持つ製品の創製、商品企画から設計・生産までの時間の大幅短縮、地理的、空間的制約からの開放など、ものづくりに“革命”を起こす潜在力を秘めているとされ、欧米では製造業の再生の柱として 3D プリンタを用いた三次元積層造形技術の開発が活発化している。

また三次元積層造形技術は、従来の金属加工等のものづくり工程を大幅に短縮し、製造プロセスにおける消費エネルギーの削減による省エネルギー効果も期待されているところである。したがって、我が国のものづくり産業が国際競争力を維持し、次世代のものづくりをリードするためには 3D プリンタを用いた三次元積層造形技術の開発・実用化が喫緊の課題となっている。

3D プリンタの装置開発の点では、国内メーカーが数社装置の開発販売を行っているが、海外トップ製品より競争力が弱くシェアは低い。経産省のプロジェクトで次世代型装置を研究開発中であり、海外製品を上回る性能を目標としている。現状ユーザーは主に海外製を使用しているが、迅速かつ十分なサポートが受けられない、コストが高いなどの点から、競争力を確保するためには高性能 3D プリンタの国産化が望まれている。

1. 2 事業の目的

我が国ものづくり産業がグローバル市場において持続的かつ発展的な競争力を維持するために、地域の中小企業等の持つ技術や資源を活用し、少量多品種で高付加価値の製品・部品の製造に適した三次元積層造形技術や金属等の粉末材料の多様化・高機能複合化等の技術開発及びその周辺技術の開発を行い、次世代のものづくり産業を支える 3D プリンタを核とした我が国の新たなものづくり産業の創出を目指す。また、3D プリンタを普及させることにより、金属材料の製造に必要なエネルギー量の削減や、加工工程の短縮などによるエネルギー効率の改善による省エネルギー型製造プロセスの創出を目指す。

1. 3 事業の位置づけ

三次元積層造形技術の研究開発は、第 5 期科学技術基本計画（平成 28 年 1 月 22 日）において先行的に開発を進めるとされているシステムのうちの「新たなものづくりシステム」に位置づけられており、「3D プリンタ等の革新的な生産技術の開発に取り組む」とされている。

また、製造業の再生の柱として、「日本再興戦略」改訂 2016（平成 28 年 6 月 2 日閣議決定）において国家プロジェクトとして推進すると位置づけられている。さらに、「科

学技術イノベーション総合戦略 2016」(平成 28 年 5 月 24 日閣議決定)においても、3D プリント等の革新的な生産技術の開発に取り組むことが明記されている。

また、NEDO 技術戦略研究センターが各技術分野の最新状況や技術課題等を公開する「TSC Foresight (Vol.32 金属積層造形プロセス分野)」においても、装置技術における装置コストや造形速度、材料技術における材料コスト、不純物、真球度や粒径分布、造形技術における造形条件最適化、等の技術課題が挙げられており、これらは本事業の技術課題と一致している。

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

本事業は、我が国の新たなものづくり産業の創出に貢献し、かつ我が国のものづくり産業の国際競争力向上に寄与するという国家的課題に対する取り組みである。また、その達成は、異なる技術領域の統合や異業種の連携が必要であり、かつその技術開発はチャレンジングなものであるため、民間の技術開発活動のみでは困難である。そして、比較的事業化に近い領域の研究開発を行う本事業においては、成果を早期に普及し、社会へ実装していくための活動が必要となる。以上のことから、本事業は、NEDO が関与する意義があるものである。

2. 2 実施の効果(費用対効果)

本事業の事業費は、2017～2018 年度の合計で、約 22.1 億円である。なお、経済産業省直轄時期も含めた 2013～2018 年度の合計は、約 90.6 億円である。

本事業で獲得し得る市場規模は、2030 年において、装置及び金属材料で 8000 億円、アプリケーションビジネスで 1.67 兆円と試算される。市場規模の内訳は、下表の通り。

また、三次元積層造形技術の適用が広がることにより、金属加工ものづくり工程が短縮され、エネルギー消費量が削減される。CO₂削減効果は、2024 年度で 36 万 t/年、2030 年度で 146 万 t/年と試算される。

表 1 市場規模計算の内訳

市場		
マシンビジネス		
3Dプリンタ市場からの予測（Wohlers Repoert 2016より推算）		工作機械市場からの予測
樹脂を含む3Dプリンタ全体	金属3Dプリンター	現在の工作機械市場(W.W)
2015年 5000億円	800億円（808台）伸び率 年30%	8兆円
2021年 2.6兆円	4000億円（4000台）	
2021年 装置+金属材料で	8000億円	(2030年も市場規模が同じとして)
2030年 2021年の2倍と見積もって	1.6兆円	工作機械の市場の2割が3Dプリンタに
台数シェア50%として	装置+金属材料で 8000億円	1.6兆円
アプリケーションビジネス	2030年	ニッケル合金、チタン合金、
全体の市場規模	造形部品市場規模	アルミ合金、銅、
金型・工具 7.8兆円	8050億円	ステンレス、鉄系合金
補修部品 4兆円	200億円	建機・航空機
医療用 5.9兆円(2020)	5600億円	整形外科インプラント
自動車（部品）3.4兆円	600億円	ターボ、シリンダーヘッド
発電（火力全体）24兆円	200億円	タービンブレード、ノズル
航空（エンジン）5.7兆円(2020)	1100億円	タービンブレード、ノズル
ロボット 1.9兆円	1000億円	人工歯、人口骨
2030年造形部品市場規模合計	1.67兆円	軽量化、意匠性、高機能化 効率向上

出所：新ものづくり研究会報告書 3Dプリンタが生み出す付加価値と2つのものづくり～「データ統合力」と「ものづくりネットワーク」（H26.2）を基に NEDO 技術戦略研究センター作成

II. 研究開発マネジメントについて

1. 事業の目標

本事業の目標は、高付加価値の製品製造に適した三次元積層造形技術の基盤技術、および装置を開発する。さらに、開発された各要素技術を集約し、造形物の品質確保のための実用化技術開発することである。

研究開発項目毎の目標値及びその根拠は、下表の通り。

表 2 研究開発目標とその根拠

研究開発項目	最終目標	根拠
①基盤技術の研究開発	造形・材料データベースの構築とシミュレーション技術による最適な加工条件の導出	積層造形を普及させるには装置・材料に対応したレシピ、熱変形予測 シミュレータ、実際の造形結果データ等が必要
②高速・高性能の3Dプリンタの技術開発	(a) 電子ビーム方式 ・速度：500cc/h ・精度：±50μm ・造形サイズ：1,000 mm ×1,000 mm ×600 mm ・価格：5000 万円 (b) レーザービーム方式 ・速度：500cc/h ・精度：±20μm ・造形サイズ：1,000 mm ×1,000 mm ×600 mm ・価格：5000 万円	平成30 年度までに、積層造形速度が平成25 年時点の既存欧米装置の10 倍、製品精度が同 5 倍となる3 Dプリンタ装置が求められる。目標価格はユーザーサイドの希望額をもとに設定。
③ 金属等粉末製造技術及び粉末修飾技術の開発	真球形状で、高流動性と耐酸化性を有する、Ti系、Ni系、Al系、Cu系、Fe系の合金等粉末。低コスト化試作。	3 Dプリンタに適した真球形状、高流動性、狭幅粒度分布、微細サイズ、高純度等の性能を有し、かつ低コストなTi系、Ni系、Al系、Cu系、Fe系の合金等粉末材料が必要
④ 鋳造用砂型 3Dプリンタの技術開発	・速度：10 万 cc/h ・造形サイズ：1,000 mm ×1,000 mm ×600 mm ・価格：2000 万円	平成29年度までに、積層造形速度が平成24年時点の既存欧米コンペティタ装置の10 倍、製品精度が同 5 倍となる3 Dプリンタ装置が求められる。目標価格はユーザーサイドの希望額をもとに設定。
⑤ 金属積層造形技術の実用化に向けた実証	組員ユーザーによる量産技術としての評価認定、造形データベースの構築	想定されるユーザー企業を巻き込んだ技術力強化を推進し、競争力を強化する必要がある

2. 事業の計画内容

2. 1 研究開発の内容

研究開発項目毎の開発内容及びスケジュールは、下表の通り。

表 3 研究開発項目毎の開発内容

研究開発項目	開発の内容
①基盤技術の研究開発（委託）	<ul style="list-style-type: none"> ・ 金属粉体の溶解・凝固プロセス解明 ・ 三次元積層造形条件・材料データベース構築 ・ 溶融凝固シミュレーション技術
②高速・高性能の3Dプリンタの技術開発（委託）（助成 1/2）	<p>それぞれが得意とする材料、加工品質、生産性によって応用分野を分ける傾向にある、電子ビームとレーザービームの2つの方式の装置開発と高速化・複層化改良実証。</p> <p>(a) 電子ビーム方式3Dプリンタ（大型プリンタ、複層プリンタ） (b) レーザービーム方式3Dプリンタ（大型プリンタ、複層プリンタ）</p>
③ 金属等粉末製造技術及び粉末修飾技術の開発（助成：1/2）	<ul style="list-style-type: none"> ・ 高融点・高活性金属粉末製造技術 ・ 金属粉末分級技術 ・ 粉末修飾技術
④ 鋳造用砂型3Dプリンタの技術開発（助成 1/2）	<ul style="list-style-type: none"> ・ 3Dプリンタの装置開発と高速化、複層化 ・ 耐熱積層鋳型による高融点金属鋳造への対応 ・ 局所的冷却性能制御技術の開発
⑤ 金属積層造形技術の実用化に向けた実証（助成 1/2）	<ul style="list-style-type: none"> ・ 造形品の品質保証方法 ・ 組合員ユーザーの試作部品を作成し、製品特性と再現性の評価

表 4 研究開発スケジュール

研究開発項目	2013年度	2014年度	2015年度	2016年度	2017年度	2018年度	2019年度
①基盤技術の研究開発	委託	設備導入	メカニズム解明 造形条件・ 材料データベース構築		メカニズム解明（溶解・凝固） 造形条件・材料データベース構築		最終目標
②高速・高性能の3Dプリンタの技術開発 (a)電子ビーム	委託・助成		新電子コラム、 改良型粉体供給・ 複層システム開発・高速化		新電子コラム、 改良型粉体供給・複層システム展開 量産試作機開発		
②高速・高性能の3Dプリンタの技術開発 (b)レーザービーム	委託・助成		試作機 モニタリング機能開発 1kWレーザー開発		高速化（レーザー2kW化）、 品質安定化改良・評価 量産試作機開発		
③ 金属等粉末製造技術及び 粉末修飾技術の開発	助成		高性能製造技術の開発、 粉末分級技術の開発、 粉末修飾技術の開発		高性能化（真球化等）、 低コスト化試作		
④ 鋳造用砂型3Dプリンタの技術開発	助成	積層造形装置の試作・開発・評価 耐熱バインダ材料開発 高冷却積層鋳造技術開発			高速化・複層化 実証 販売試作機開発	最終目標	
⑤ 金属積層造形技術の実用化に向けた実証	助成		設計・品質保証検討 試験運用・評価	中間目標	応用試作・評価 導入検討		最終目標

2. 2 研究開発の実施体制

NEDO は、プロジェクトリーダーとして近畿大学 次世代基盤技術研究所 3D 造形技術研究センター 京極秀樹教授を選定した。また、プロジェクトマネージャーに NEDO IoT 推進部 川端紳一郎を任命して、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た。

本事業は、経済産業省が、企業、大学等の研究機関から公募によって研究開発実施者を選定し、研究体制を構築して 2014 年度（一部テーマは 2013 年度）から開始実施したものであり、NEDO が 2017 年度より事業の承継を受け実施するものである。

委託事業と助成事業それぞれの実施体制詳細は、下図の通り。

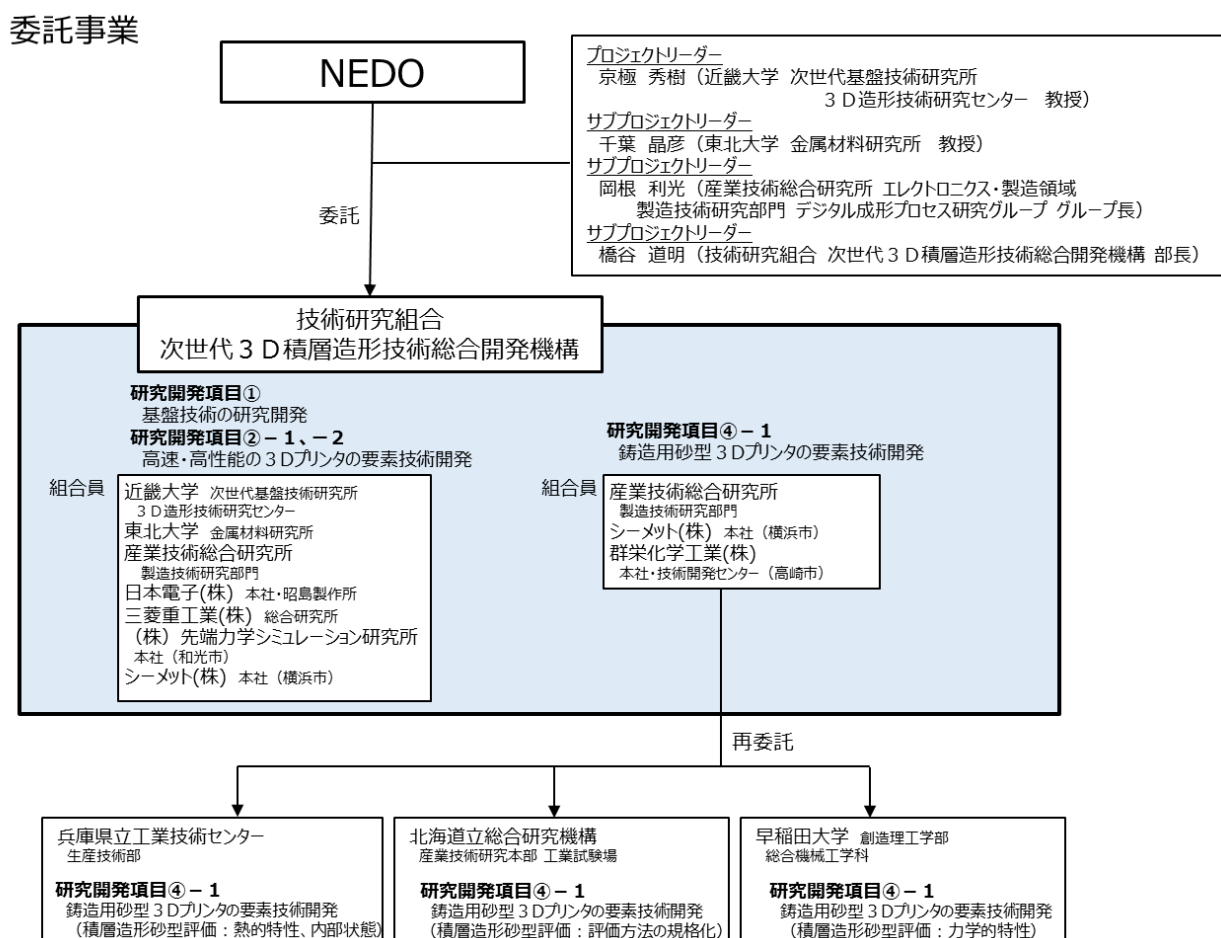


図 1 委託事業の実施体制

助成事業

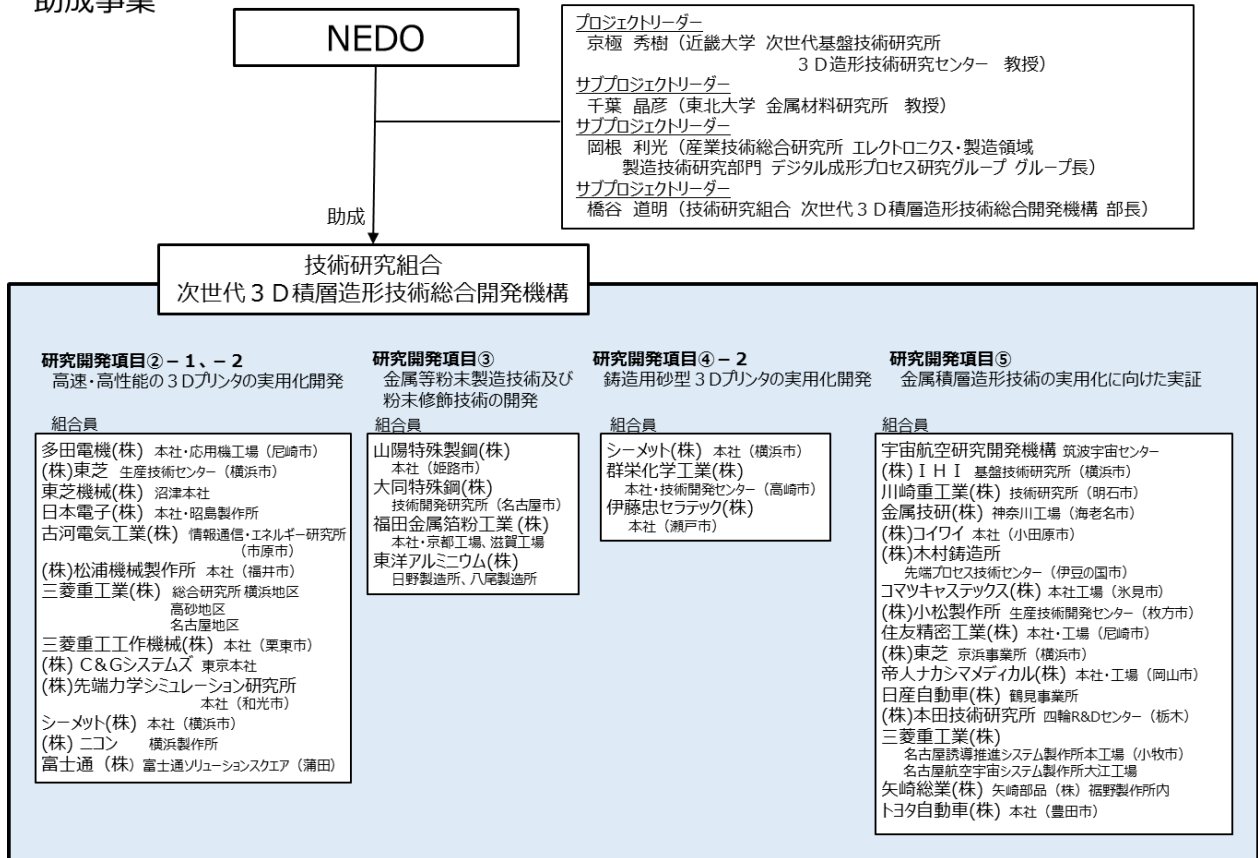


図2 助成事業の実施体制

2. 3 研究開発の運営管理

研究開発全体の管理・執行に責任を有するNEDOは、経済産業省及び研究開発実施者と密接な関係を維持しつつ、本事業の目的及び目標に照らして適切な運営管理を実施した。具体的には、技術推進委員会を開催し、外部有識者の意見を運営管理に反映させる他、実施者が開催する各種委員会への参加やサイトビジット等により進捗の確認や管理を行った。各種委員会の内容及びスケジュールは、表5に示す。

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

NEDOは、開発状況外部情勢、外部有識者の意見等をマネジメントに反映し、研究開発内容の変更を行った。具体的には、開発フェーズが進展したテーマを委託事業から助成事業に変更するとともに、外部情勢を踏まえてフィージビリティスタディー(FS)テーマの追加を行った。研究開発内容の変更の詳細は、下図の通り。

2017年度			2018年度		
委託			委託		
①-1	基盤技術	溶融凝固モニタリング 溶融凝固シミュレーション 積層条件・材料・特性のデータベース構築開始	①	溶融凝固モニタリング 溶融凝固シミュレーション 積層条件・材料・特性のデータベース構築開始	
②-1	電子ビーム	電子銃、電子コラム開発 複層造形技術の実証	②-1		
②-2	レーザービーム	高出力レーザーによる高速化、品質安定化 複層造形技術の実証	②-2		
委託から助成へ			FSを委託に追加		
助成			委託		
②-1	装置 (電子ビーム)	スパック装置開発	①-2	インプロセスモニタリング技術の先導研究 デジタルプラットフォーム構築の予備的研究	
②-2	装置 (レーザー)	スパック装置開発	②-1	スパック装置開発と 複層造形の実用化	
③	粉末	高性能化（スパック的）と低コスト化	②-2	スパック装置開発と 複層造形の実用化	
⑤	ユーザー造形	製品特性と再現性の評価	③	高品質造形の要件を満たす高性能化と製造技術	
			⑤	実証評価から実用性の実証	

図3 研究開発内容の変更

また、各年度において、実施者とシンポジウムを開催することで、各年度の進捗成果を一般に紹介し、アピールを行った。各種委員会及びイベントの開催実績は下表の通り。

表5 各種委員会・イベントの開催実績

会議名	対象開発項目	頻度	主催者	内容
技術推進委員会 (旧総合委員会)	全項目	2回/年	NEDO	・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
技術検討会	全項目	3回/年	実施者 (項目毎)	・進捗報告、確認 ・テーマ毎に計画、研究内容紹介、特別テーマの議論
成果活用についての会議	項目毎	随時	実施者 (項目毎)	・事業化検討会、知財審議会、 ・データベース検討会
ISO国内審議委員会	全項目	数回/年	国内審議委員会	・ISO標準化提案およびJIS化取り進め
サイトビジット	全分室	1回/年	NEDO	・装置、成果物の確認、担当者との意見交換
シンポジウム	全項目	1回/年	実施者と共催	・各年度毎の進捗成果を一般に紹介

※その他、METI・NEDO・TRAFAM定例会、展示会を随時実施

	2017年度												2018年度												2019
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4
イベント	契約締結(委託・助成)		第1回ISO国内審議委員会	総合委員会	第3回公開シンポジウム		第1回技術推進委員会	ものづくりマツチング展	サイトビジット		第2回技術推進委員会	第2回ISO国内審議委員会			第1回ISO国内審議委員会	第1回技術推進委員会	第2回ISO国内審議委員会	ものづくりマツチング展	第3回ISO国内審議委員会	サイトビジット		第2回技術推進委員会	第4回ISO国内審議委員会		第5回公開シンポジウム

3. 情勢変化への対応

NEDO は、事業の運営管理として、研究開発の進捗状況や技術推進委員会の結果等を踏まえ、追加予算により研究開発を加速的に進捗させることで、優れた技術的成果が期待できるテーマに関して、追加予算（開発促進財源）の投入を行った。具体的には、2017年度に4つの内容において合計39.8百万円の追加を行った。追加予算の詳細は下表の通り。

表6 開発促進財源投入実績

件名	年度	金額 (百万円)	目的	成果
実施項目① 電子ビーム方式基盤技術研究開発／ 交流方式の粉末電気抵抗測定器による高精度測定を追加	2017年度	2	溶融の際の電子ビーム照射時に原料粉末が飛散してしまうスモーク現象対策にNiコーティング等の粉末修飾技術が極めて有効だという技術的成果が上がっており、本対策を、より多くの金属粉末に対して展開するため。	交流電気抵抗測定を行うことで、粉末表面の酸化層のキャパシタ成分を計測でき、昇温に伴いキャパシタ成分が減少している様子が観察された。交流測定が、電子ビーム積層造形用の粉末特性評価に有効であった。
実施項目① 電子ビーム方式基盤技術研究開発／ チタン系金属間化合物のTiAlの造形を追加	2017年度	31	プロジェクト開始後の市場動向変化に対応するため、今後、積層造形において有用と見込まれる金属材料に重点的に取り組むことによって、プロジェクト終了時まで、造形レシピ開発を間に合わせるため。	TiAl 金属間化合物の造形を実施し、造形物(引張試験片、疲労試験片)の評価を行い、相対密度、熱処理条件、機械的性質、疲労試験結果をデータベース化した。
実施項目① レーザービーム方式基盤技術研究開発／ 真空中での溶融金属物性の取得を追加	2017年度	1.8	二流体モデルの溶融凝固シミュレーションを採用したことで、先行するLLNL(ローレンス・リバモア国立研究所)に対し、モデルの精緻化の点で優位性を確保できた。パラメーターの材料物性値を実測する事で、シミュレーションの精度向上を図るため。	金属粉末上にレーザービームまたは電子ビームを走査することで生じるミクروسケールでの溶融・凝固現象を、蒸発気体と溶融金属の二流体モデルで計算する際、計算に用いる物性データに実測値を用いることで、スパッタおよびブルームの予測精度が向上した。
実施項目① レーザービーム方式基盤技術研究開発／ チタン系合金としてNiTi合金の造形を追加	2017年度	5	プロジェクト開始後の市場動向変化に対応するため、今後、積層造形において有用と見込まれる形状記憶合金Ni-Tiの造形レシピを開発するため。	Ni-Ti合金の造形を実施し、試験片の評価を行い、造形レシピをデータベース化した。

4. 評価に関する事項

本事業は、経済産業省が公募によって委託先を選定し、研究体制を構築して開始した。2017年度に事業の円滑な推進のためにNEDOに事業移管されたものであり、NEDOでは、外部有識者による評価は行っていない。

NEDO は、技術評価実施規程に基づき、技術的・政策的観点から見た研究開発の意義、目標達成度、将来の産業への波及効果について、プロジェクト評価を実施する。効果的な制度運営等の観点から、事後評価を2019年度に実施する。

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

1. 1. 1 装置開発

装置開発（金属積層装置）においては、「2. 開発項目毎の成果概要」に示す通り、概ね目標を達成し、一部は目標を大きく上回って達成した。得られた成果について、欧米各社の装置と比較した結果を下図に示す。

電子ビーム方式においては、事業で開発した装置が、造形エリア体積と造形速度ともに海外装置を上回っている。

レーザービームデポジション方式においては、三菱重工工作機械装置、東芝機械装置ともに、造形速度について海外装置を上回っている。

レーザービームパウダーベッド方式においては、松浦機械製作所装置が造形エリア体積において海外装置を上回っている。なお、造形速度においては、熱源であるレーザーの数が多い海外装置の一部が、開発装置を上回っている。

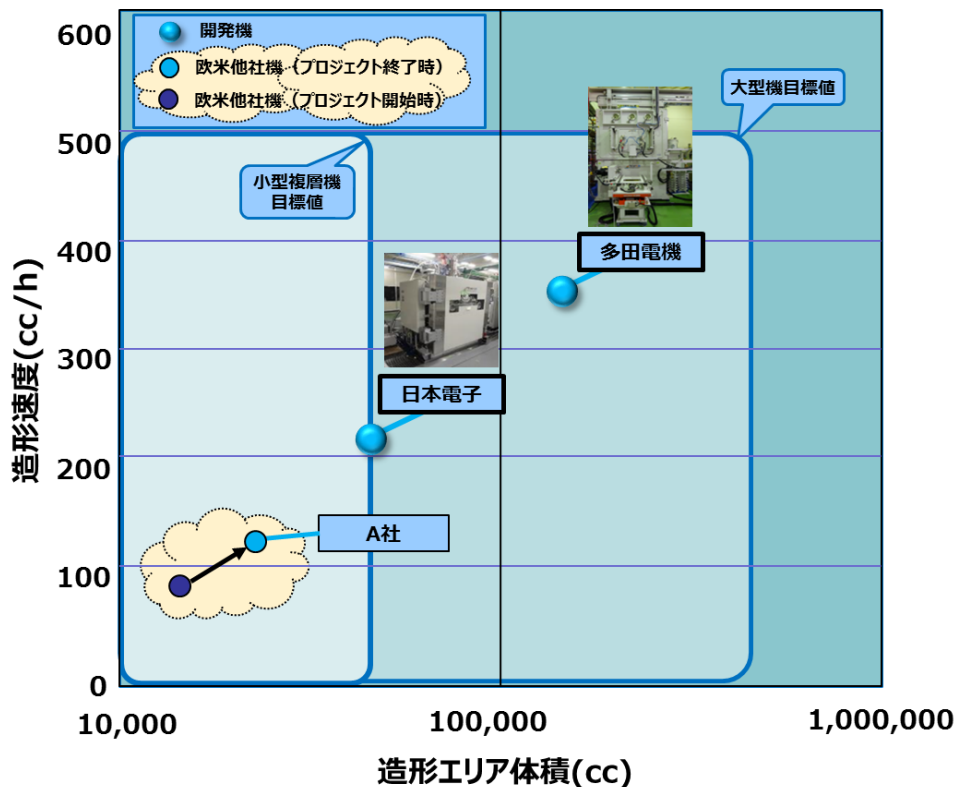


図4-1 造形エリア体積と造形速度（海外装置との比較）
（電子ビーム方式）

（各社カタログおよび展示会等の製品情報を基に NEDO にて作成）

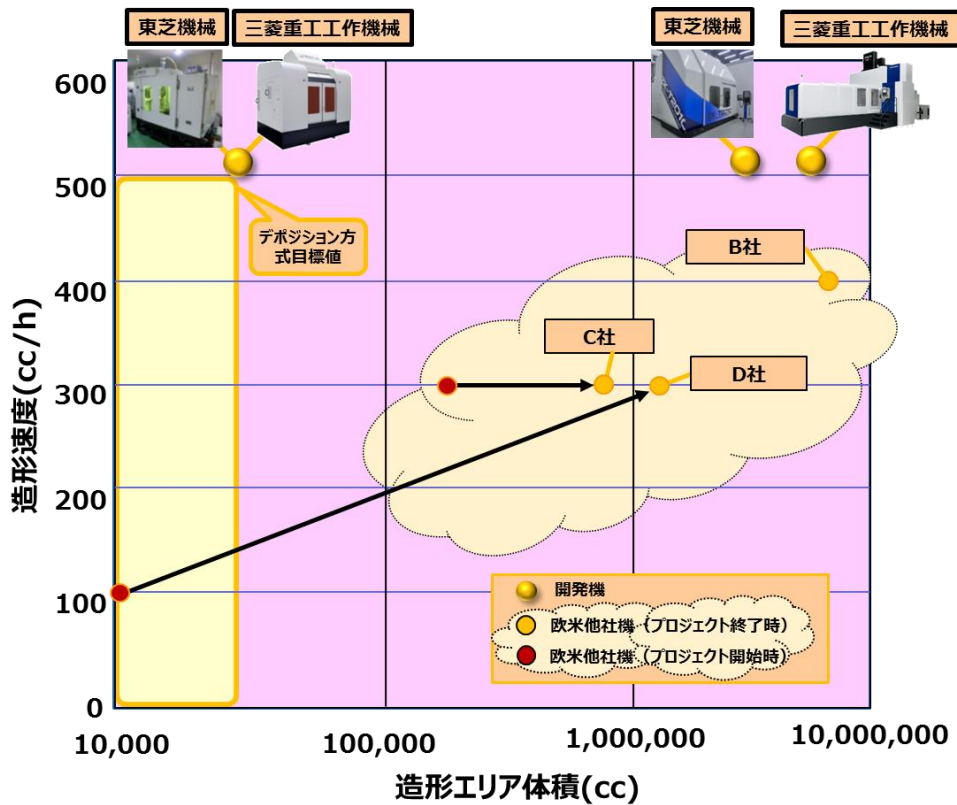


図4-2 造形エリア体積と造形速度（海外装置との比較）
（レーザービームデポジション方式）

（各社カタログおよび展示会等の製品情報を基に NEDO にて作成）

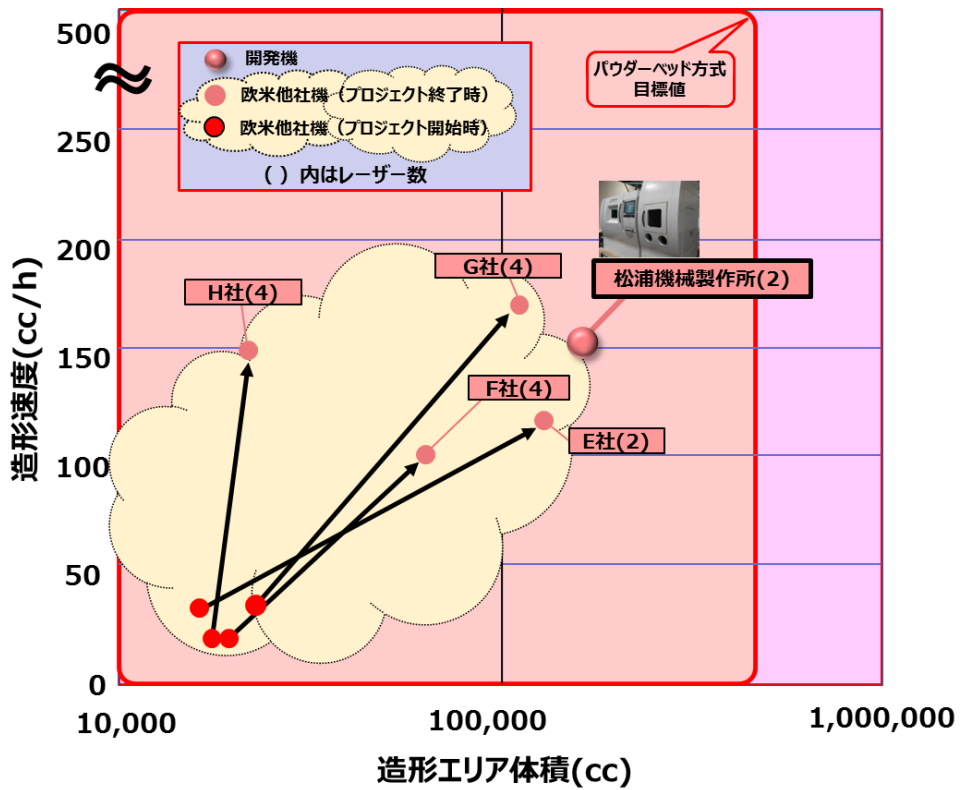


図4-3 造形エリア体積と造形速度（海外装置との比較）
（レーザービームパウダーベッド方式）

（各社カタログおよび展示会等の製品情報を基に NEDO にて作成）

装置開発（鋳造用砂型積層装置）においては、「2. 開発項目毎の成果概要」に示す通り、目標を達成し、一部は大きく上回って達成した。大型化・高速化については、高速・高精度ラインインクジェットヘッドの開発、高速造形用材料の開発や、高速リコート技術の開発を行った。高精度化については、粉末及びバインダーの開発を行った。また、耐熱化については、人工砂による骨材の開発を行った。これらにより、世界最大・最速で造形可能な砂型造形装置を開発、砂型の造形を可能とした。

1. 1. 2 粉末開発

粉末開発においては、「2. 開発項目毎の成果概要」に示す通り、目標を達成した。新たな粉末製造技術開発により、積層造形に相応しい実用に供する金属粉末を提供可能とした。具体的な開発材料や、開発粉末の開発当初との比較、適用事例を下表に示す。

表7 粉末開発の成果

粉末メーカー	開発当初	技術開発	開発後	開発材料	適用事例
大同特殊鋼	 EBM用Ti-6Al-4V粉末	特殊溶解法及び新ノズル開発によるガスアトマイズ法の開発	 EBM用Ti-6Al-4V開発粉末	Ti-6Al-4V CP-Ti Ti-6Al-7Nb TiAl NiTi	 タービン部品 (Ti-6Al-4V)  タービンロータ (TiAl)
山陽特殊製鋼	 従来法による分級結果	遠心分離方式金属粉末分級機構の開発	 開発装置による分級結果	IN718 SUS304 SUS316L SUS630 17-4PH クロム鋼 マルエージング鋼 780MPa熱間圧延鋼板	 高温静止部品 (IN718)  タービン翼モデル (クロム鋼)
福田金属	—	粉末修飾技術の開発	 耐酸化处理純銅粉末	純銅 Niコーティング銅 銅合金	 放熱部品 (純銅)  複層部品 (純銅+M2)
東洋アルミ	 ガスアトマイズ法	遠心アトマイズ粉末製造技術の開発	 遠心アトマイズ法	Al-10Si-Mg A2024 A3003 A6061 A7075	 大型シリンダヘッドモデル (Al-10Si-Mg)

1. 1. 3 基盤技術開発（造形条件、シミュレーション及びソフトウェア開発）

基盤技術開発においては、「2. 開発項目毎の成果概要」に示す通り、大きく上回って目標を達成した。

電子ビーム方式の基盤技術においては、電子ビームでの課題である“スモーク現象”発生原因を解明や造形条件におけるプロセスマップを機械学習法に依り短期間で作成することを可能にした。レーザービーム方式の基盤技術においては、溶融凝固現象の解明を行い、欠陥発生の原因を明らかにするとともに、新たに形状記憶合金材料の NiTi の造形・材料データベースを構築する等の成果を得た。

シミュレーション開発においては、高品質造形を担保するためのシミュレーション技術を開発した。具体的には、マイクロ溶融凝固シミュレーションにおいては、新たに提案した二流体モデルにより、一流体モデルでは不可能なスパッタ及びプルームの予測を可能にした。マクロ溶融凝固・組織予測シミュレーションにおいては、粉末を考慮したモデルにより、粉末のリコート及び溶融凝固状況の予測を可能にした。マクロ溶融凝固シミュレーションにおいては、新たに提案した溶融凝固モデルにより、高精度のメルトプール形状の予測を可能にした。熱変形シミュレーションにおいては、応力分布及び熱変形について、熱弾塑性解析では計算時間がかかるため実用性が低い計算を、固有ひずみ法を用いることで高速に計算を可能とし、デポジション方式について実用化した。

ソフトウェア開発においては、開発した各装置をユーザーが高効率で有効に活用可能とするために、パウダーベッド用 CAM ソフト及びデポジション用複層対応 5 軸 CAM ソフト、熱変形シミュレータ、材料・造形条件・品質データベースを統合化するソフトウェアを構築した。各ソフトウェアを開発するとともに、開発装置及びソフトウェア間のインターフェースを開発し、新会社（株式会社金属積層造形サポートシステム）を核としたユーザーと開発メーカー・大学間でデータを共有するシステムを開発した。システム全体の概念図を下図に示す。

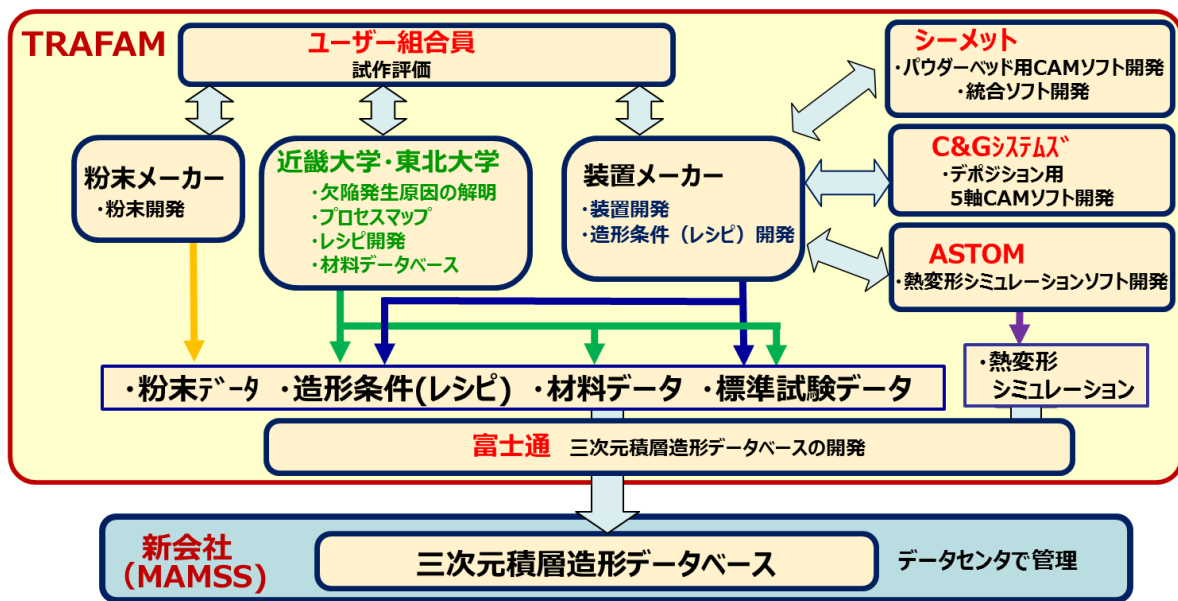


図5 システム全体の概念図

1. 1. 4 金属積層造形技術の実用化に向けた実証

金属積層造形技術の実用化に向けた実証においては、「2. 開発項目毎の成果概要」に示す通り、目標を達成した。開発装置 5 機種全ての実証試験を行い、19 件の検証を実施した。量産技術化に向けて、ユーザー組合員が、機械特性、部品精度、機能（冷却性能、回転試験等）等の評価を実施した。具体的な事象目的や造形部品を下表に示す。

表8 ユーザー実証

	機種	業界	造形部品名	目的
ユーザー組合員による実証評価	複層電子ビーム方式の3Dプリンタ技術開発 (日本電子)	産業機械 自動車 産業機械	エンジン部品 (図1) 熱交換フィン 高放熱部品	実機適用性の評価 熱交換性能の評価 複層部品造形の品質評価
	大型電子ビーム方式の3Dプリンタ技術開発 (多田電機)	エネルギー 航空機 産業機械	タービン翼部品(図2) エンジン部品 タービン部品 (図3)	造形安定性の評価 製造性に関する総合評価 実部品適用性評価
	複層レーザービーム方式の3Dプリンタ技術開発 (東芝機械)	航空機 エネルギー	エンジン部品 高温静止部品 (図4)	適用性評価 製造性に関する総合評価
	複層レーザービーム (マシニング)方式の3Dプリンタ技術開発 (三菱重工工作機械)	産業機械 航空機 自動車 医療	動力伝達模擬部品(図5) ダクト模擬部品 (図6) トランスミッション部品 人工関節	複合加工性の評価 複雑形状部品の一体造形/チタン合金の大気中造形 複層部品造形 粗面化
	大型高速レーザービーム方式の3Dプリンタ技術開発 (松浦機械製作所)	宇宙 航空機 自動車 自動車 航空機	エンジン部品 (図7) エンジン部品 シリンダヘッド (図8) 足回り部品 (図9) エンジン部品	大型部品造形の品質評価 回転部品の実施適用性評価 大型部品の造形性評価 足回り部品の試作性評価 熱交換機部品の品質評価
	海外製3Dプリンタ	AM試作 AM試作	テストピース テストピース	AM用金属粉末の再使用調査と再生の実証 造形物の品質保証の実証

造形部品
(代表例)



図1 図2 図3 図4 図5 図6 図7 図8 図9

1. 2 成果の普及 (特許、論文、外部発表等の件数)

本事業での特許、論文、外部発表等の件数は、下表の通りである。論文や研究発表等は順調に成果をあげ、特許については64件が日本国内で登録済み(米国特許は19件、欧州特許は6件が登録済み)である。特許及び論文においては、リストを別添として添付する。

表9 特許・論文等の件数

年度		2014	2015	2016	2017	2018	2019	総計
特許 登録 件数 (国内)	電子ビーム (パウダーベッド)	0	0	7	7	1	0	64
	レーザー (パウダーベッド)	0	0	0	3	3	0	
	レーザー (デポジション)	0	0	3	17	5	0	
	レーザー単体、粉末、ソフト	0	0	2	2	3	0	
	砂型、砂材料	0	0	8	3	0	0	
論文	0	0	0	2	4	3	9	
研究発表・講演	0	17	11	30	41	54	153	
受賞実績	0	0	0	0	0	3	3	
新聞・雑誌等への掲載	0	9	4	7	16	29	65	
展示会への出展	3	4	3	2	2	1	15	

1. 3 知的財産等の確保に向けた取組

特許については、上記 1. 2 「成果の普及」で記載した通りである。

標準化活動については、ISO/TC261（積層造形専門委員会）の国内審議団体を 2014 年 6 月から TRAFAM が担当しており、「国内審議委員会」および TC261 本体に準じた 6 つの「WG」を設置している。具体的な活動としては、国内委員会（年 4 回）や国際 web 会議、国内 WG 会議等を実施するとともに、欧州中心の ISO/TC261 と米国中心の ASTM F42 が協調して行う国際会議に参加した。中でも、2016 年 7 月 11-14 日に、第 8 回 ISO/TC261 国際会議を東京で開催（アジア初）した。また、2019 年 5 月に、日本単独の新規提案を 2 件提出するとともに新 JG 設立を提案、投票で新規提案及び新 JG 設立が承認され、2019 年 9 月に第 14 回 ISO/TC261 国際会議（フランス）においてファーストミーティングが開催された。また、JIS 原案作成も行っており、JIS B 9640「付加製造（AM）-用語及び基本的概念」が 2020 年に発行される予定である。

2. 研究開発項目毎の成果概要

2. 1 項目①「基盤技術の研究開発（委託）」

項目①「基盤技術の研究開発」の最終目標、成果、達成度、及び今後の課題は以下の通りである。

達成度「◎：大きく上回って達成、○：達成、△：一部達成、×：未達」

最終目標	成果	達成度	今後の課題と解決方法
造形・材料データベースの構築とシミュレーション技術による最適な加工条件の導出（電子ビーム方式）	電子ビームでの課題である“スモーク現象”発生原因を解明し、粉末表面特性の改善により仮焼結温度を大幅に低下できた。また、造形条件におけるプロセスマップを機械学習法に依り短期間で作成することを可能にするとともに、最適な加工条件の導出を可能とした。	◎	
造形・材料データベースの構築とシミュレーション技術による最適な加工条件の導出（レーザービーム方式）	熔融凝固現象の解明を行い、欠陥発生の原因を明らかにした。新たな熔融凝固モデルを提案し、熔融凝固現象を再現することができ、最適な加工条件の導出が可能となった。新たに形状記憶合金材料の NiTi の造形・材料データベースを構築できた。	◎	

2. 2項目②「高速・高性能の3Dプリンタの技術開発（委託・助成）」

項目②「高速・高性能の3Dプリンタの技術開発」の最終目標、成果、達成度、及び今後の課題は以下の通りである。

達成度「◎：大きく上回って達成、○：達成、△：一部達成、×：未達」

「複層電子ビーム方式の3Dプリンタ 技術開発」

最終目標	成果	達成度	今後の課題と解決方法
積層造形速度：500cc/h以上	6kW 高出力電子銃を搭載した装置開発及び予熱と熔融時間の短縮により、209cc/hを達成。	△	500cc/h 達成には複数の電子銃の制御が必要。
造形物の精度：±50μm 以下	新たな電子銃と照射機構を開発することにより、±11μmを達成。	◎	
複層造形技術の実用化	複層粉末散布機構の開発を行い、複層造形品を造形し、達成。	○	
最大造形サイズ：300mm×300mm×600mm以上	300 mm×300 mm×600 mmの装置を2台開発。	○	

「大型電子ビーム方式の3Dプリンタ技術開発」

最終目標	成果	達成度	今後の課題と解決方法
積層造形速度：500cc/h以上	大面積高速電子ビームコラムの開発及び放熱対策により、最大367 cc/hを達成。	△	500cc/h 達成には複数の電子銃の制御が必要。
造形物の精度：±50μm 以下	大面積高速電子ビームコラムの高精度化により±47μm(実測値-3/+47 μ m)を達成。	○	

最大造形サイズ：1,000 mm×1,000 mm×600 mm以上	大面積電子ビーム照射技術の開発及び粉末自動供給装置の開発により 500 mm×500 mm×600 mmサイズの装置を開発。	△	1000 mm×1000 mmを可能にするためには偏向角を大幅に広げる電磁レンズが必要であるが、それを構成する大口径コアの国内調達先が存在しないため海外を含めて調査。
------------------------------------	--	---	---

「複層レーザービーム方式の3Dプリンタ技術開発」

最終目標	成果	達成度	今後の課題と解決方法
積層造形速度：500cc/h以上	高性能ノズル・ヘッドの開発により 510cc/h を達成。	○	
造形物の精度：±20μm 以下	高性能ノズル・ヘッド及び5軸CAMソフトの開発により±19μm を達成。	○	
複層造形技術の実用化	複層用ノズル及び複層用5軸CAMソフトの開発により複層造形品を造形し、達成。	○	
最大造形サイズ：300 mm×300 mm×300 mm 以上	300 mm×300 mm×300 mmサイズの装置と併せてφ2000×1000 mm (H)サイズの大型装置開発を行い、達成。	◎	

「複層レーザービーム（マシニング）方式の3Dプリンタ 技術開発」

最終目標	成果	達成度	今後の課題と解決方法
積層造形速度：500cc/h以上	高性能ノズル及び機構の開発（高出力化：6 kW）により	○	

	501cc/h を達成		
造形物の精度：±20μm 以下	高性能ノズルの開発（高精度ノズル）及び造形プロセスの開発により±12μm 達成。モニタリング・フィードバック機能の開発により高品質化を達成。	◎	
複層造形技術の実用化	複層用ノズル及び機構及び複層用 5 軸 CAM ソフトの開発により 3 種類の自動車用等複層造形品を造形し、達成。	○	
最大造形サイズ：300mm×300mm×300mm 以上	300 mm×300 mm×H100 mm サイズの実証用装置開発。	○	

「大型高速レーザービーム方式の 3D プリンタ技術開発」

最終目標	成果	達成度	今後の課題と解決方法
積層造形速度：500cc/h 以上	レーザーの高出力化（1 kW 及び 2 kW シングルモードファイバーレーザーの開発）及びマルチレーザー制御システムの開発により 151cc/h を達成。	△	レーザーの高出力化とマルチビーム（4 台）制御による検討実施。
造形物の精度：±20μm 以下	高精度化のための CAM ソフトウェアの開発により±20μm を達成。	○	
最大造形サイズ：1,000mm×1,000mm×600mm 以上	600 mm×600 mm×600 mm サイズの装置を開発。	△	1000mm サイズの実現には、レーザーのマルチビーム化と、それにとまなう技術開発が必要。

2. 3項目③「金属等粉末製造技術及び粉末修飾技術の開発（助成）」

項目③「金属等粉末製造技術及び粉末修飾技術の開発」の最終目標、成果、達成度、及び今後の課題は以下の通りである。

達成度「◎：大きく上回って達成、○：達成、△：一部達成、×：未達」

最終目標	成果	達成度	今後の課題と解決方法
真球形状で、高流動性と耐酸化性を有する、Ti系、Ni系、Al系、Cu系、Fe系の合金粉末。低コスト化試作。	新アトマイズ法によるチタン合金系などの高融点、高活性金属粉末、高機能表面修飾技術による高機能銅粉末、遠心アトマイズ法によるアルミ合金粉末製造技術も開発し、真球形状の流動性に優れる製造技術を確立。また、解砕分散と遠心分離を組み合わせた高精度分級機構の開発し、サテライトのない球状粉末を製造できるとともに、造形装置に相応しい粒度分布の粉末を提供できる技術を確立。	○	

2. 4項目④「鋳造用砂型 3D プリンタの技術開発（委託、助成）」

項目④「鋳造用砂型 3D プリンタの技術開発」の最終目標、成果、達成度、及び今後の課題は以下の通りである。

達成度「◎：大きく上回って達成、○：達成、△：一部達成、×：未達」

最終目標	成果	達成度	今後の課題と解決方法
無機バインダー硬化システムの開発	無機バインダーをコーティングした砂と硬化剤のインクジェットとの組み合わせによる硬化システムを開発し、造形、鋳造を実施して性能を確認した。	○	
高冷却性能を有する有機バインダーおよび鋳型砂の開発	固体硬化剤をコーティングした砂とバインダーのインクジェットとの組み合わせによる	○	

	硬化システムを開発し、造形、 鋳造を実施して性能を確認し た。		
積層造型速度：10 万 cc/h 以上	リコーター、インクジェッ ト描画の高速化技術を開発、そ れを搭載した積層造形装置を開 発して、10 万 cc/h の速度を達 成した。	○	
最大造形サイズ：1,000 mm×1,000 mm×600 mm以 上	1,800 mm×1,000 mm×750 mmの造形エリアを搭載した積層 造形装置を開発した。	◎	
鋳型の製造コスト： 1,000 円/kg以下	材料のランニングコスト、 装置の稼働コスト等を含めて 1,000 円/kg以下を達成した。	○	

2. 5項目⑤「金属積層造形技術の実用化に向けた実証（助成）」

項目⑤「金属積層造形技術の実用化に向けた実証」の最終目標、成果、達成度、及び今後の課題は以下の通りである。

達成度「◎：大きく上回って達成、○：達成、△：一部達成、×：未達」

最終目標	成果	達成度	今後の課題 と解決方法
製品の特性と品質の安定性を評価することで量産技術として確立する	<ul style="list-style-type: none"> 5機種の開発装置により開発した粉末を用いて試験片を作製し、引張試験、疲労試験、破壊靱性試験を行った結果、引張特性は溶製材に匹敵する特性が得られたが、疲労特性、破壊靱性特性については、HIPにより溶製材に匹敵する特性が得られた。これらをデータベース化した。 ユーザー造形により実用可能な製品を造形。 	○	

3. 研究開発成果の詳細

研究開発成果の詳細においては、成果報告書を別添として添付する。

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. 成果の実用化・事業化に向けた戦略

本事業においては、2018年4月に新会社（株式会社金属積層造形サポートシステム、英語名称 Metal Additive Manufacturing Support System Co.,Ltd、略称 MAMSS）を設立した。

新会社は、積層造形レシピや熱変形シミュレーション等のサポートサービスを行う。ソフト、装置、粉末においては、各企業が販売やメンテナンス等を行う。中小企業等への拡大にむけて、新会社と各企業が連携するビジネスモデルを構築した。

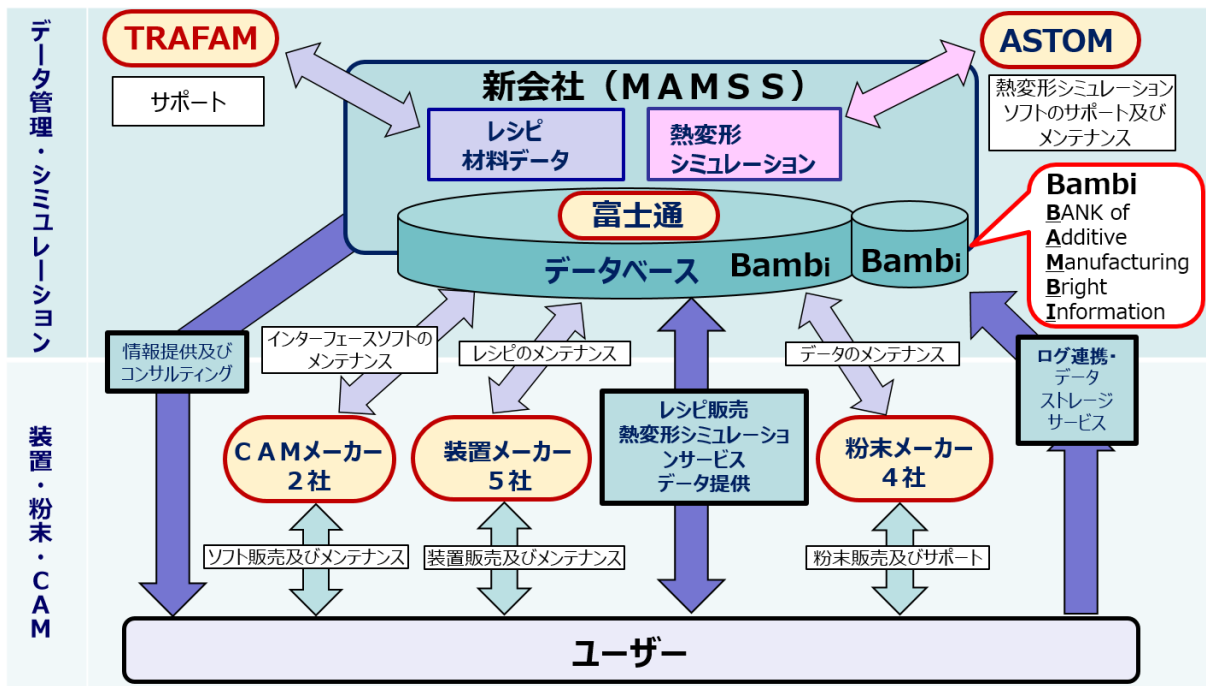


図6 新会社と各企業が連携するビジネスモデル

2. 成果の実用化・事業化に向けた具体的取組

2. 1 砂型積層造形装置

砂型積層造形装置については、シーメット株式会社が、事業期間中である 2015 年度に小型の砂型積層造形装置及び材料（骨材・バインダー）を早期に実用化した。そこで発生した課題（粉塵対策、安全対策、砂引きずり対策、ヘッドクリーニング対策等）を解決し、解決した内容を大型高速砂型積層造形装置及び材料にも反映したことにより、早期立ち上げに貢献した。その結果、計画通り、2018 年度より装置販売を開始し、同年に国産 1 号機を納入した（下図）。その後、これまでに小型機 10 台、大型機 2 台の納入実績がある。



図 7 販売装置（SCM-1800）

また、本装置については、2019 年 4 月に日刊工業新聞社 日本産業技術大賞 審査員特別賞を受賞するとともに、同年 5 月には日本鑄造工学会 豊田賞、論文賞を受賞した。

2. 2 電子ビーム方式金属積層装置

電子ビーム方式金属積層装置については、多田電機株式会社が、電子ビームを熱源とするパウダーベッド方式金属 3D プリンタの装置販売を 2019 年 9 月に開始した。本装置は、6kW の電子銃用電源の搭載で、業界最高の積層造形速度 250cc/h を実現するもので、電子ビーム発生源の加熱寿命を業界最高の 1000 時間を達成し、かつ各種造形条件設定の自由度が向上したものである。

本装置は、2019 年 3 月に多田電機株式会社より兵庫県立工業技術センターに納入された。また、同年 8 月に三菱電機株式会社より、電子ビーム金属 3D プリンタ(EZ300)がニュースリリースされ、同年 9 月に発売開始された。



図8 販売装置 (EZ300)

2. 3 レーザービーム方式デポジション方式 (マシニング) 金属積層装置

レーザービーム方式デポジション方式 (マシニング) 金属積層装置については、三菱重工工作機械株式会社が、造形状態を自動で監視・安定化させるモニタリング・フィードバック機能、及び航空・宇宙分野などで使用されるチタン合金等造形に必要なシールド機能の二つの開発技術の実用化に目途を付け、これらを搭載したエントリーモデルを2019年4月に市場投入した。同装置は、2019年3月にLAMDA200の初号機を滋賀県工業技術総合センターに納入され、同年4月には滋賀県工業技術総合センター内に開設された「高度モノづくり試作開発センター」に設置された。三菱重工工作機械株式会社は、同センターと連携して、ものづくり企業の新製品・新技術の創出を支援している。



図9 販売装置 (LAMDA200 DED AM SYSTEM)

2. 4 レーザービーム方式デポジション方式金属積層装置

レーザービーム方式デポジション方式金属積層装置については、東芝機械株式会社が、ノズル技術開発、プロセス適正化技術開発レシピ開発、アプリ開発を通じて、装置の製品化の目途をつけ、これら技術を搭載した 3D プリンタを 2017 年 10 月に上市した。その後、IMTS2018、JIMTOF2018、EMO2019 等の世界の 3 大工作機械ショーで公開し、ニーズ反映し、2019 年 11 月に ZK シリーズの受注開始をニュースリリースした。



図 10 試作機 (ZK-T2010)

3. 成果の普及活動

事業の成果を早期に社会へ実装していくため、成果の普及活動を行った。金属積層造形技術に関する人材育成を行うために、金属積層造形技術セミナーを開催した。TRAFAM が主催し、京極 PL、千葉 SPL、各装置メーカー、粉末メーカー、そしてユーザー組合員の専門家が講師を行った。2016 年度から 2019 年度に合計で 17 回（入門編 13 回参加者 351 人、実用編 4 回参加者 74 人）のセミナーを行った。

表 10 セミナー開催の実績

年度	内容・回数	場所・日程
2016	入門編 5 回	東京 9 月 21 日、広島 11 月 14 日、名古屋 12 月 14 日、 仙台 1 月 17 日、大阪 2 月 22 日
2017	入門編 4 回	札幌 6 月 21 日、東京 8 月 22 日、福岡 10 月 20 日、 名古屋 1 月 30 日
2018	入門編 2 回	東京 8 月 22 日、名古屋 2 月 7 日～8 日
	実用編 3 回	小田原 9 月 12 日、御殿場 12 月 10 日、栗東 3 月 8 日
2019	入門編 2 回	仙台 7 月 11 日、広島 10 月 18 日
	実用編 1 回	海老名 11 月 27 日

また、地域企業との連携を強化するために、公設試験研究機関（公設試）へ装置の導入を行った。4つの装置を計6か所の公設試へ導入した。

表11 公設試への装置導入の実績

装置メーカー	導入装置	公設試
シーメット(株)	SCM-800	秋田県産業技術センター、 兵庫県立工業技術センター、 三重県工業研究所
(株)松浦機械製作所	レーザービーム要素技術研究機	岩手県工業技術センター
多田電機(株)	電子ビーム要素技術研究機	兵庫県立大学（金属新素材研究センター）
三菱重工工作機械(株)	LAMDA200	滋賀県工業技術総合センター

「次世代型産業用 3Dプリンタの造形技術開発・実用化事業」

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

金属加工において、切削加工、塑性加工等に次ぐ第三の加工法とされる 3Dプリンタに代表される三次元積層造形技術の進歩は、軽量でこれまでにない機能や複雑構造を有する等の高機能製品の開発を加速するだけでなく、商品企画、設計、製造プロセスのデジタル化の進展等も伴い、地域の中小企業、個人の知恵や感性を活かした新たな付加価値を持つ製品の創製、商品企画から設計・生産までの時間の大幅短縮、地理的、空間的制約からの開放など、ものづくりに“革命”を起こす潜在力を秘めているとされ、欧米では製造業の再生の柱として 3Dプリンタを用いた三次元積層造形技術の開発が活発化している。

また三次元積層造形技術は、従来の金属加工等のものづくり工程を大幅に短縮し、製造プロセスにおける消費エネルギーの削減による省エネルギー効果も期待されているところである。したがって、我が国のものづくり産業が国際競争力を維持し、次世代のものづくりをリードするためには 3Dプリンタを用いた三次元積層造形技術の開発・実用化が喫緊の課題となっている。

なお、三次元積層造形技術の研究開発は、製造業の再生の柱として、新たな成長戦略である「日本再興戦略」改訂 2016（平成 28 年 6 月 2 日閣議決定）において国家プロジェクトとして推進すると位置づけられている。「科学技術イノベーション総合戦略 2016」（平成 28 年 5 月 24 日閣議決定）においても、3Dプリンタ等の革新的な生産技術の開発に取り組むことが明記されている。

②我が国の状況

3Dプリンタの装置開発の点では、国内メーカーが数社装置の開発販売を行っているが、海外トップ製品より競争力が弱くシェアは低い。経産省のプロジェクトで次世代型装置を研究開発中であり、海外製品を上回る性能を目標としている。現状ユーザーは主に海外製を使用しているが、迅速かつ十分なサポートが受けられない、コストが高いなどの点から、競争力を確保するためには高性能 3Dプリンタの国産化が望まれている。

③世界の取組状況

3Dプリンタは欧州、米国が装置性能でもシェアでも世界をリードしている。世界では既に 1000 台以上が導入され、主要マーケットは、航空宇宙関係、医療関係、F1 等レーシング関係、金型関係、試作関係である。ユーザーから装置メーカーへフィードバックが繰り返され、装置の改良と新たな製品の開発が進んでおり、一部リードユーザーは部品量産

の実用化のため装置メーカーとの関係強化の動きを見せている。

④本事業のねらい

我が国ものづくり産業がグローバル市場において持続的かつ発展的な競争力を維持するために、地域の中小企業等の持つ技術や資源を活用し、少量多品種で高付加価値の製品・部品の製造に適した三次元積層造形技術や金属等の粉末材料の多様化・高機能複合化等の技術開発及びその周辺技術の開発を行い、次世代のものづくり産業を支える3Dプリンタを核とした我が国の新たなものづくり産業の創出を目指す。また、3Dプリンタを普及させることにより、金属材料の製造に必要なエネルギー量の削減や、加工工程の短縮などによるエネルギー効率の改善による省エネルギー型製造プロセスの創出を目指す。

(2) 研究開発の目標

①アウトプット目標

本事業により開発される造形技術は (a) 3Dプリンタ装置、(b) 金属等粉末材料、(c) プロセスソフトウェアにより構成される。

(a) 3Dプリンタ装置 (研究開発項目②、④)

平成30年度までに、積層造形速度が平成25年時点の既存欧米コンペティタ装置の10倍、製品精度が同5倍となる3Dプリンタ装置

1) 電子ビーム方式 (平成30年度)

速度：500cc/h、精度：±50μm、造形サイズ：1,000mm×1,000mm×600mm、
価格：5000万円

2) レーザービーム方式 (平成30年度)

速度：500cc/h、精度：±20μm、造形サイズ：1,000mm×1,000mm×600mm、
価格：5000万円

3) 砂型造形装置 (平成29年度)

速度：10万cc/h、造形サイズ：1,000mm×1,000mm×600mm、
価格：2000万円

(b) 金属等粉末材料 (研究開発項目③)

3Dプリンタに適した真球形状、高流動性、狭幅粒度分布、微細サイズ、高純度等の性能を有し、かつ低コストなTi系、Ni系、Al系、Cu系、Fe系の合金等粉末材料

(c) プロセスソフトウェア (研究開発項目②および①、⑤)

造形ソフトウェア (CADデータからの変換機能、装置入力用の造形データ生成機能等より構成)

造形データベース (装置・材料に対応したレシピ、熱変形予測シミュレータ、実際の造形結果データ等より構成)

②アウトカム目標

三次元積層造形技術の適用が広がることにより、金属加工ものづくり工程が短縮され、エネルギー消費量が削減される。CO2削減効果として、平成31年度で36万t/年、平成42年度で146万t/年が見込まれる。世界における3Dプリンタ・材料の市場規模は平成42年度で1兆円を超える規模（Wohlers Report2016をもとに推定）とされ、本技術開発の成果により、我が国の3Dプリンタ関連産業がそのうちの数千億円規模の市場を獲得することが見込まれる。

③アウトカム目標達成に向けての取組

アウトカム目標の達成に向けて、実施者は研究開発段階から想定されるユーザー企業を巻き込んで、市場性の高い3Dプリンタと材料の開発を行う。また、積層造形の最適条件導出をサポートすることで、国内のユーザーの取り込みと製造技術力強化を推進し、競争力を強化して市場拡大を目指す。

NEDOは、本事業により開発された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。普及に際しては、我が国が次世代製造技術において優位性を確保し続けられるよう考慮し、事業終了後についても、継続的にユーザーへの技術支援が可能となるようなビジネスモデルの構築を促す。

(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 基盤技術の研究開発（委託）

金属粉体の溶解・凝固プロセス解明
三次元積層造形条件・材料データベース構築
溶融凝固シミュレーション技術

本研究開発は、民間企業単独では取り組むことが困難で、大学、公的研究機関等の参画による産官学の複数事業者が互いのノウハウなどを持ち寄り研究開発を実施する事業であり、委託事業として実施する。

研究開発項目② 高速・高性能の3Dプリンタの技術開発（委託、助成：1/2）

それぞれが得意とする材料、加工品質、生産性によって応用分野を分ける傾向にある、電子ビームとレーザービームの2つの方式の装置開発と高速化・複層化改良実証。

- (a) 電子ビーム方式3Dプリンタ (大型プリンタ、複層プリンタ)
- (b) レーザービーム方式3Dプリンタ (大型プリンタ、複層プリンタ)

本研究開発のうち、要素技術開発については民間企業単独では取り組むことが困難で、大学、公的研究機関等の参画による産官学の複数事業者が互いのノウハウなどを持ち寄り研究開発を実施する事業であり、委託事業として実施する。実用化開発については企業の積極的な関与により推進されるべき研究開発であり、助成事業として実施する。

研究開発項目③ 金属等粉末製造技術及び粉末修飾技術の開発 (助成：1/2)

高融点・高活性金属粉末製造技術

金属粉末分級技術

粉末修飾技術

本研究開発は、実用化に向けて企業の積極的な関与により推進されるべき研究開発であり、助成事業として実施する。

研究開発項目④ 鋳造用砂型3Dプリンタの技術開発 (委託、助成：1/2)

3Dプリンタの装置開発と高速化、複層化

耐熱積層鋳型による高融点金属鋳造への対応

局所的冷却性能制御技術の開発

本研究開発のうち、装置の要素技術開発および局所的冷却性能制御技術の開発については民間企業単独では取り組むことが困難で、大学、公的研究機関等の参画による産官学の複数事業者が互いのノウハウなどを持ち寄り研究開発を実施する事業であり、委託事業として実施する。実用化開発については企業の積極的な関与により推進されるべき研究開発であり、助成事業として実施する。

研究開発項目⑤ 金属積層造形技術の実用化に向けた実証 (助成：1/2)

造形品の品質保証方法

組合員ユーザーの試作部品を作成し、製品特性と再現性の評価

本研究開発は、実用化に向けて企業の積極的な関与により推進されるべき研究開発であり、助成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にNEDO IoT推進部 川端紳一郎を任命して、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。

本研究開発は、経済産業省が、企業、大学等の研究機関から公募によって研究開発実施者を選定し、研究体を構築して平成26年度から開始実施したものであり、NEDOが平成29年

度より事業の承継を受け実施するものである。

平成 26 年度から開始された「次世代型産業用三次元造形システム技術開発」については、平成 29 年度から委託して実施する。

平成 28 年度から開始された「省エネルギー型製造プロセス実現に向けた三次元積層造形技術の開発・実用化事業」については、平成 29 年度から助成により実施する。

(2) 研究開発の運営管理

NEDO は、研究開発全体の管理・執行に責任と負い、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

プロジェクトマネージャーは、プロジェクトリーダーや経済産業省及び研究開発実施者と密接な関係を維持しつつ、事業の目的及び目標、並びに本研究開発の目的及び目標に照らして適切な運営管理を実施する。また、必要に応じて、外部有識者の意見を運営管理に反映させる。

②技術分野における動向の把握・分析

プロジェクトマネージャーはプロジェクトで取り組む技術分野について、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

本研究開発の期間は、

研究開発項目①、②、③および⑤は平成 29 年度から平成 30 年度までの 2 年間、
研究開発項目④は平成 29 年度の 1 年間とする。

なお、本プロジェクトは、平成 26 年度から平成 28 年度までは経済産業省により実施したが、平成 29 年度から NEDO が実施する。

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・政策的観点から見た研究開発の意義、目標達成度、将来の産業への波及効果について、プロジェクト評価を実施する。効果的な制度運営等の観点から、事後評価を平成 31 年度に実施する。評価の時期については、本事業に係る技術動向、政策動向や当該研究開発の進捗状況等に応じて、適宜見直す。

5. その他重要事項

(1) 研究開発成果の取扱い (委託事業)

①成果の普及

構築した設計・製造基盤及び研究成果については、NEDO、実施者とも活用・普及に努める。

②標準化施策等との連携

得られた研究開発成果については標準化活動に役立てることとし、ISO/TC261 (国際標準化機構 積層造形技術 専門委員会) 国内審議委員会を通して、提案及び評価データ等の提供を行い、国際標準化に向けて積極的に役割を果たしていく。

③知的財産権の帰属、管理等取扱いについての方針

本研究開発の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、すべて契約実施先に帰属させることとする。また、開発段階から事業化を見据えた知財戦略を検討・構築し、適切な知財管理を実施する。なお、本プロジェクトは、原則として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。

(2) 基本計画の変更

NEDOは、当該研究開発の妥当性を確保するため、社会・経済的状況、国内外の研究開発動向、政策動向、施策の変更、評価結果、事業費の確保状況、当該事業の進捗状況等を総合的に勘案し、制度内容、実施方式等、基本計画の見直しを弾力的に行う。

(3) 根拠法

本事業は、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、第3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) 平成28年12月、制定。

(別紙1) 研究開発計画

研究開発項目① 基盤技術の研究開発

1. 研究開発の必要性

溶融・凝固のメカニズムの解明と理論化により高速、高精度造形を達成する

2. 研究開発の具体的な内容

溶融・凝固状態のモニタリング・分析の基盤技術開発

溶融・凝固プロセス等の機構解明とシミュレーション技術開発

積層造形条件と造形物の特性のデータベース作成

3. 達成目標

【最終目標】

造形・材料データベースの構築とシミュレーション技術による最適な加工条件の導出

研究開発項目② 高速・高性能の3Dプリンタの技術開発

1. 研究開発の必要性

多種の金属材料に対応し、材料の複層化や後加工する技術により世界最高水準を達成する

2. 研究開発の具体的な内容

(a) 電子ビーム方式

- ・高速高精度電子銃、電子ビーム照射機構、スキャン機構の開発、
- ・異種材料の複層造形技術の開発、複層システム用粉体供給技術の開発
- ・メルトプールモニタリング・フィードバック技術の開発

(b) レーザービーム方式

- ・高速化（レーザー2kW化、回折光学素子の採用）技術の開発
- ・異種材料の複層造形技術の開発
- ・メルトプールモニタリング・フィードバック技術の開発

3. 達成目標

【最終目標】

(a) 電子ビーム方式

速度：500cc/h、精度：±50μm、造形サイズ：1,000mm×1,000mm×600mm、

価格：5000万円

造形ソフトウェア（CADデータからの変換機能、装置入力用の造形データ生成機能等より構成）

(b) レーザービーム方式

速度：500cc/h、精度：±20μm、造形サイズ：1,000mm×1,000mm×600mm、

価格：5000万円

造形ソフトウェア（CADデータからの変換機能、装置入力用の造形データ生成機能等より構成）

研究開発項目③ 金属等粉末製造技術及び粉末修飾技術の開発

1. 研究開発の必要性

幅広い産業分野で使用される高融点金属等材料を、3Dプリンタに適した特性に最適化し、低コストで提供する

2. 研究開発の具体的な内容

新アトマイズ法による高融点・高活性金属粉末製造技術の開発

遠心分離方式金属粉分級機構の開発

高機能粉末製造のための粉末修飾技術の開発

3. 達成目標

【最終目標】

真球形状で、高流動性と耐酸化性を有する、Ti系、Ni系、Al系、Cu系、Fe系の合金等粉末。低コスト化試作。

研究開発項目④ 鋳造用砂型3Dプリンタの技術開発

1. 研究開発の必要性

中子の一体成型等、従来にない複雑な形状の鋳型や高融点金属鋳造を可能とする

2. 研究開発の具体的な内容

無機バインダーヘッドユニットの開発

無機バインダーおよび鋳型砂の開発

高冷却性能を有する有機バインダーおよび鋳型砂の開発

3. 達成目標

【最終目標】

速度：10万cc/h、造形サイズ：1,000mm×1,000mm×600mm、

価格：2000万円

研究開発項目⑤ 金属積層造形技術の実用化に向けた実証

1. 研究開発の必要性

製品の特性と品質の安定性を評価することで量産技術として確立する

2. 研究開発の具体的な内容

試験片による機械特性評価、物性特性評価の実施

試作品を実機に搭載して機能評価を実施

N数増による再現性評価の実施

3. 達成目標

【最終目標】

組合員ユーザーによる量産技術としての評価認定

造形データベースの構築

(別紙2) 研究開発スケジュール

	平成 29 年度 (2017 年度)	平成 30 年度 (2018 年度)	平成 31 年度 (2019 年度)
①基盤技術	メカニズム解明(溶解・凝固) 造形条件・材料データベース構築		事後評価
②(a) 電子ビーム式	新電子コラム、改良型粉体供給・複層システム展開		
②(b) レーザービーム式	高速化(レーザー2kW化)、品質安定化改良・評価		
③金属粉末製造技術	高性能化(真球化等)、低コスト化試作		
④砂型造形技術	高速化・複層化実証		

平成 29 年度実施方針

IoT 推進部

1. 件名：(大項目) 次世代型産業用 3D プリンタの造形技術開発・実用化事業

2. 根拠法

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、第 3 号及び第 9 号

3. 背景及び目的・目標

(1) 研究開発の背景

金属加工に於いて、切削加工、塑性加工等に次ぐ第三の加工法とされる 3D プリンタに代表される三次元積層造形技術の進歩は、軽量でこれまでにない機能や複雑構造を有する等の高機能製品の開発を加速するだけでなく、商品企画、設計、製造プロセスのデジタル化の進展等も伴い、地域の中小企業、個人の知恵や感性を活かした新たな付加価値を持つ製品の創製、商品企画から設計・生産までの時間を大幅短縮、地理的、空間的制約からの開放など、ものづくりに“革命”を起こす潜在力を秘めているとされ、欧米では製造業の再生の柱として 3D プリンタを用いた三次元積層造形技術の開発が活発化している。

また三次元積層造形技術は、従来の金属加工等のものづくり工程を大幅に短縮し、製造プロセスにおける消費エネルギーの削減による省エネルギー効果が期待されている。

我が国の製造業が国際競争力を維持し、次世代のものづくりをリードするためには 3D プリンタを用いた三次元積層造形技術の開発・実用化が喫緊の課題である。

三次元積層造形技術の研究開発は、製造業の再生の柱として、新たな成長戦略である「日本再興戦略」改訂 2016 (平成 28 年 6 月 2 日閣議決定) において国家プロジェクトとして推進すると位置づけられている。「科学技術イノベーション総合戦略 2016」(平成 28 年 5 月 24 日閣議決定) においても、3D プリンタ等の革新的な生産技術の開発に取り組むことを明記されている。

(2) 本事業のねらい

我が国ものづくり産業がグローバル市場において持続的かつ発展的な競争力を維持するために、地域の中小企業等の持つ技術や資源を活用し、少量多品種で高付加価値の製品・部品の製造に適した 3D プリンタや金属等の粉末材料の多様化・高機能複合化等の技術開発及びその周辺技術の開発を行い、次世代のものづくり産業を支える 3D プリンタを核とした我が国の新たなものづくり産業の創出を目指す。また 3D プリンタの普及を進めることで、従来の金属加工等のものづくり工程を大幅に短縮したエネルギー効率の改善につながる省エネルギー型製造プロセスの創出を目指す。

(3) 開発目標

現在の 3D プリンタでは、金属粉末を焼結・熔融するためのエネルギーを局所的に与えるため

のビーム源として、電子ビームとレーザービームの2つの方式がある。両者の長所と短所は相補的であり、それぞれが得意とする材料、加工品質、生産性によって応用分野を分ける傾向にある。本事業では、世界最高水準の三次元積層造形システムを構築するため、両方の方式について技術開発を行い、それぞれの特徴を最大限に発揮できる三次元積層造形技術の開発を推進する。両方式の技術開発における最終の目標を以下に示す。

[委託事業]

研究開発項目① 「基盤技術の研究開発」

最終目標 (平成30年度末)

- 1) 造形・材料データベースの構築とシミュレーション技術による最適な加工条件の導出

[委託事業、助成事業 (助成率: 1/2)]

研究開発項目②-1 「電子ビーム方式の3Dプリンタ技術開発」

最終目標 (平成30年度末)

- 1) 高速高精度電子銃、電子ビーム照射機構、スキャン機構の開発 (委託)
- 2) 異種材料の複層造形技術実用化 (委託)
- 3) 以下性能の装置開発 (助成)
 - ・積層造形速度: 500cc/h 以上
 - ・造形物の精度: $\pm 50 \mu\text{m}$ 以下
 - ・最大造形サイズ: 1,000 mm × 1,000 mm × 600 mm 以上
 - ・装置本体の販売価格: 5,000 万円以下

[委託事業、助成事業 (助成率: 1/2)]

研究開発項目②-2 「レーザービーム方式の3Dプリンタ技術開発」

最終目標 (平成30年度末)

- 1) 高速化 (レーザー2kW化)、品質安定化改良 (委託)
- 2) 異種材料の複層造形技術実用化 (委託)
- 3) 以下性能の装置開発 (助成)
 - ・積層造形速度: 500cc/h 以上
 - ・造形物の精度: $\pm 20 \mu\text{m}$ 以下
 - ・最大造形サイズ: 1,000 mm × 1,000 mm × 600 mm 以上
 - ・装置本体の販売価格: 5,000 万円以下

[助成事業 (助成率: 1/2)]

研究開発項目③ 「金属等粉末製造技術及び粉末修飾技術の開発」

最終目標 (平成30年度末)

- 1) 真球形状で、高流動性と耐酸化性を有する、Ti系、Ni系、Al系、Cu系、Fe系の合金粉末。低コスト化試作

[委託事業、助成事業 (助成率: 1/2)]

研究開発項目④ 「鋳造用砂型3Dプリンタの技術開発」

最終目標 (平成29年度末)

- 1) 無機バインダーヘッドユニットの開発 (委託)
- 2) 高冷却性能を有する有機バインダーおよび鋳型砂の開発 (委託)
- 3) 以下性能の装置開発 (助成)
 - ・積層造形速度: 10万 cc/h 以上

- ・最大造形サイズ：1,000 mm×1,000 mm×600 mm以上
- ・装置本体の販売価格：2,000 万円以下
- ・鋳型の製造コスト：1,000 円/kg以下

[助成事業（助成率：1/2）]

研究開発項目⑤ 「金属積層造形技術の実用化に向けた実証」

最終目標（平成30年度末）

- 1) 製品の特性と品質の安定性を評価することで量産技術として確立する

4. 実施内容及び進捗（達成）状況

経済産業省直執行として、以下の研究開発を実施した

実施体制：技術研究組合「次世代3D積層造形技術総合開発機構」

再委託：早稲田大学、北海道立総合研究機構、兵庫県立工業技術センター

4. 1 事業の実施状況

中間評価時における実施状況は

研究開発項目①「基盤技術の研究開発」 および

研究開発項目②-1「電子ビーム方式の3Dプリンタ技術開発」においては

要素技術研究機、複層電子ビーム機、大型高速電子ビーム機の計3台の試作機を製作
複層電子ビーム機

- ・積層造形速度：214cc/h（中間目標値：250cc/h 以上）
- ・造形物の精度：±27 μm（中間目標値：±40 μm 以下）
- ・最大造形サイズ：300 mm×300 mm×600 mm（中間目標値：300 mm×300 mm×600 mm）

大型高速電子ビーム機

- ・積層造形速度：100cc/h（中間目標値：250cc/h 以上）
- ・造形物の精度：±78 μm（中間目標値：±100 μm 以下）
- ・最大造形サイズ：500 mm×500 mm×600 mm（中間目標値：500 mm×500 mm×600 mm）

研究開発項目①「基盤技術の研究開発」 および

研究開発項目②-2「レーザービーム方式の3Dプリンタ技術開発」においては

要素技術研究機、レーザートリミング方式複層レーザー機、マシニング方式複層
レーザー機、大型高速レーザー機の計4台の試作機を製作

レーザートリミング方式複層レーザー機

- ・積層造形速度：359cc/h（中間目標値：250cc/h 以上）
- ・造形物の精度：±30 μm（中間目標値：±50 μm 以下）
- ・最大造形サイズ：300 mm×300 mm×100 mm（中間目標値：300 mm×300 mm×100 mm）

マシニング方式複層レーザー機

- ・積層造形速度：360cc/h（中間目標値：250cc/h 以上）
- ・造形物の精度：±24 μm（中間目標値：±50 μm 以下）
- ・最大造形サイズ：300 mm×300 mm×100 mm（中間目標値：300 mm×300 mm×100 mm）

大型高速レーザー機

- ・積層造形速度：68cc/h（中間目標値：250cc/h 以上）
- ・造形物の精度：±50 μm（中間目標値：±50 μm 以下）
- ・最大造形サイズ：600 mm×600 mm×400 mm（中間目標値：500 mm×500 mm×400 mm）

3Dプリンタ用制御ソフトウェア開発

- ・STL・AMF データ変換ソフトウェアを開発
- ・加工条件設定・編集、配置支援、サポート設定および加工前評価ソフトウェアを開発

研究開発項目③「金属等粉末製造技術及び粉末修飾技術の開発」においては

新アトマイズ法による高融点・高活性金属粉末製造技術の開発

- ・可視化技術活用による噴霧現象数値化を達成
- ・チタン合金粉末粒径 $75\mu\text{m}$ 以下を試作

気体流による遠心分離方式金属粉末分級機構の開発

- ・分級精度：粉末粒径 $45\mu\text{m}$ 以下とした場合の累積 95%で粒度 $35\mu\text{m}$
- ・分級歩留：篩分級に対し 28%の歩留り向上

高性能化粉末製造のための粉末修飾技術の開発

- ・銅系金属粉末を粉末粒径 $45\mu\text{m}$ 以下の収率で 66%以上
- ・粉末流動度で 21 秒/50g 以下
- ・酸化増加率を 9.90%/20 日以下

研究開発項目④「鋳造用砂型 3Dプリンタの技術開発」においては

要素技術研究機、試作機を製作

砂型造形装置

- ・積層造形速度：5 万 cc/h (中間目標値：5 万 cc/h 以上)
- ・最大造形サイズ：1,800 mm×1,000 mm×750 mm (5 万 cc/h)
(最終目標値：1,000 mm×1,000 mm×600 mm)

耐熱有機バインダ材料を開発し 5 万 cc/h の装置で造形を確認

4. 2 予算、事業規模

年度	委託事業	助成事業 (助成率 1/2)	事業規模
26 年度			
一般勘定	3,750 百万円	0 百万円	3,750 百万円
27 年度			
一般勘定	1,820 百万円	0 百万円	1,820 百万円
28 年度			
一般勘定	700 百万円	0 百万円	1,900 百万円
需給勘定	0 百万円	1,200 百万円	

4. 3 知財、学会発表

特許

特許等件数 (出願を含む)	61 件
特許権の実施件数	4 件
ライセンス供与数	4 件

学会発表

日本機械学会 2015 年次大会	10 件
レーザー学会学術講演会第 36 回年次大会	6 件

5. 事業内容

プロジェクトマネージャーに NEDO IoT 推進部 川端紳一郎を任命して、プロジェクトの進行全体の企画・管理や、その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。実施体制については、別紙を参照のこと。

5. 1 平成 29 年度（委託）事業内容

研究開発項目①「基盤技術の研究開発」においては

溶融・凝固状態のモニタリング・分析技術を開発し、各種金属でのデータ収集を行い、溶融・凝固プロセス等のシミュレーション結果と比較検討することにより、積層造形条件・材料と造形物の特性のデータベース構築を開始する

研究開発項目②-1「電子ビーム方式の 3D プリンタ技術開発」においては

高速高精度電子銃、新電子コラムの開発を行い、改良型粉体供給・複層システムを用いた異種材料の複層造形技術を実用化する

研究開発項目②-2「レーザービーム方式の 3D プリンタ技術開発」においては

レーザー出力の高出力 (2KW) 化による高速化と品質の安定化を行い、異種材料の複層造形技術の改良実証を行う

研究開発項目④「铸造用砂型 3D プリンタの技術開発」においては

無機バインダヘッドユニットの開発と高冷却性能を有する有機バインダおよび鑄型砂の開発を行う

5. 2 平成 29 年度（助成）事業内容

研究開発項目②-1「電子ビーム方式の 3D プリンタ技術開発」においては

以下性能の装置開発を行う。

- ・積層造形速度：500cc/h 以上
- ・造形物の精度：±50 μm 以下
- ・最大造形サイズ：1,000 mm×1,000 mm×600 mm以上
- ・装置本体の販売価格：5,000 万円以下

研究開発項目②-2「レーザービーム方式の 3D プリンタ技術開発」においては

以下性能の装置開発を行う。

- ・積層造形速度：500cc/h 以上
- ・造形物の精度：±20 μm 以下
- ・最大造形サイズ：1,000 mm×1,000 mm×600 mm以上
- ・装置本体の販売価格：5,000 万円以下

研究開発項目③「金属等粉末製造技術及び粉末修飾技術の開発」においては

Ti 系、Ni 系、Al 系、Cu 系、Fe 系の合金粉末の高性能化（真球化等）、低コスト化試作を

行う。

研究開発項目④「鋳造用砂型3Dプリンタの技術開発」においては
以下性能の装置開発を行う。

- ・積層造型速度：10万 cc/h 以上
- ・最大造形サイズ：1,000 mm×1,000 mm×600 mm以上
- ・装置本体の販売価格：2,000 万円以下
- ・鋳型の製造コスト：1,000 円/kg以下

研究開発項目⑤ 金属積層造形技術の実用化に向けた実証においては
組員ユーザーの試作部品を作成し、製品特性と再現性の評価を行う。

標準化活動として、得られた研究開発成果については、ISO/TC261（国際標準化機構 積層造形技術 専門委員会）国内審議委員会を通して、提案及び評価データ等の提供を行い、国際標準化に向けて積極的に役割を果たしていく。

5. 3 平成29年度事業規模

	委託事業	助成事業（助成率 1/2）
①一般勘定	300 百万円	0 百万円
②需給勘定	0 百万円	1,800 百万円
計	300 百万円	1,800 百万円

事業規模については、変動があり得る。

6. その他重要事項

(1) 運営・管理

研究開発全体の管理・執行に責任と決定権を有する NEDO は、経済産業省と密接な関係を維持しつつ、当該研究開発の目的及び目標に照らして適切な運営管理を実施する。また、必要に応じて、外部有識者の意見を運営管理に反映させる。

(2) 複数年度契約の実施

平成29～30年度の複数年度契約を行う。

(3) 知財マネジメントにかかる運用

「NEDO プロジェクトにおける知財マネジメント基本方針」に従ってプロジェクトを実施する。（研究開発項目①および②④の委託事業のみ）

7. スケジュール

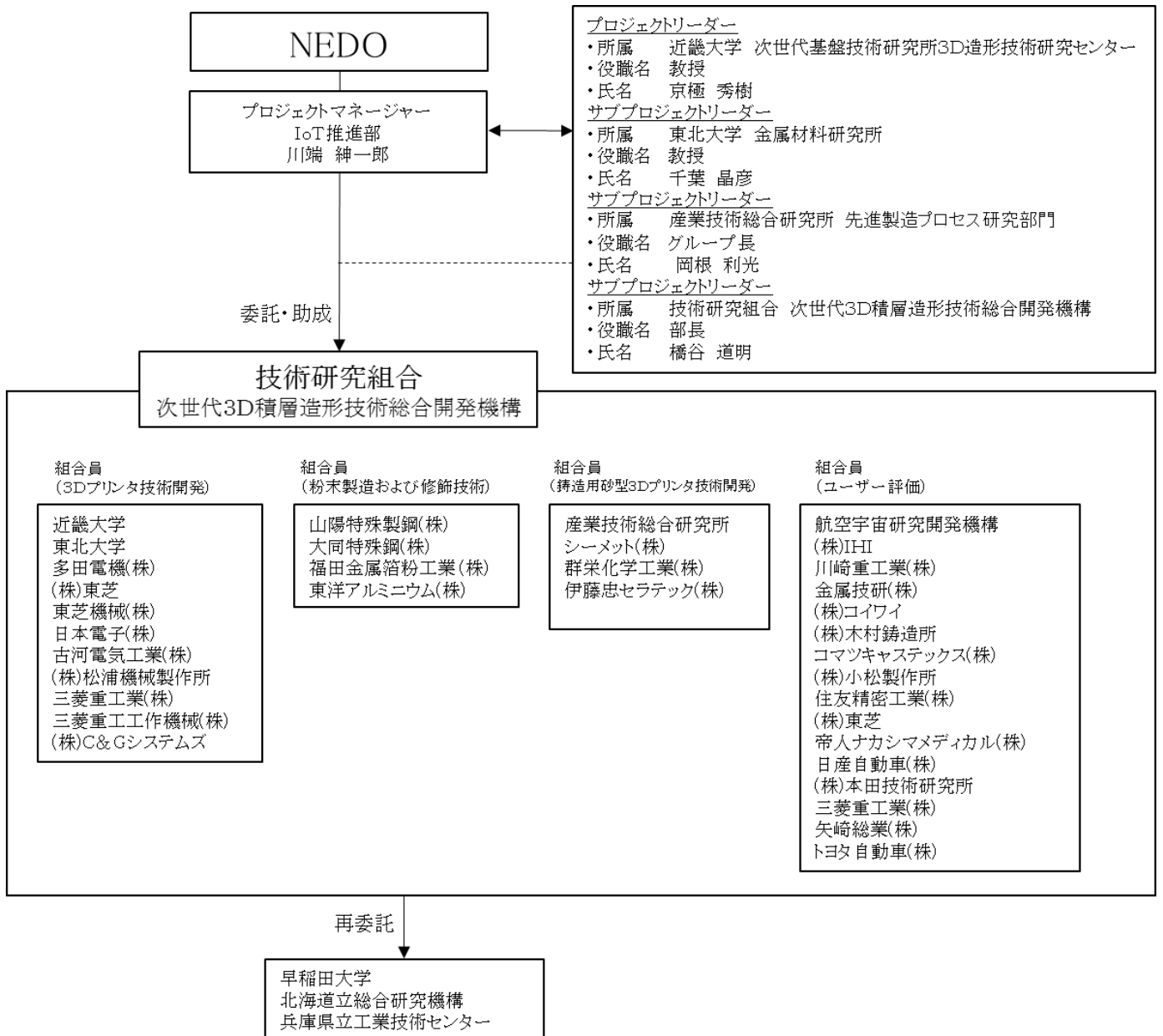
平成29年2月下旬・・・契約・助成審査委員会

平成29年4月1日・・・契約履行開始

8. 実施方針の改訂履歴

(1) 平成28年12月、制定

(別紙) 事業実施体制の全体図



平成 30 年度実施方針

IoT 推進部

1. 件名：(大項目) 次世代型産業用 3D プリンタの造形技術開発・実用化事業

2. 根拠法

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、第 3 号及び第 9 号

3. 背景及び目的・目標

(1) 研究開発の背景

金属加工に於いて、切削加工、塑性加工等に次ぐ第三の加工法とされる 3D プリンタに代表される三次元積層造形技術の進歩は、軽量でこれまでにない機能や複雑構造を有する等の高機能製品の開発を加速するだけでなく、商品企画、設計、製造プロセスのデジタル化の進展等も伴い、地域の中小企業、個人の知恵や感性を活かした新たな付加価値を持つ製品の創製、商品企画から設計・生産までの時間を大幅短縮、地理的、空間的制約からの開放など、ものづくりに“革命”を起こす潜在力を秘めているとされ、欧米では製造業の再生の柱として 3D プリンタを用いた三次元積層造形技術の開発が活発化している。

また三次元積層造形技術は、従来の金属加工等のものづくり工程を大幅に短縮し、製造プロセスにおける消費エネルギーの削減による省エネルギー効果が期待されている。

我が国の製造業が国際競争力を維持し、次世代のものづくりをリードするためには 3D プリンタを用いた三次元積層造形技術の開発・実用化が喫緊の課題である。

三次元積層造形技術の研究開発は、製造業の再生の柱として、新たな成長戦略である「日本再興戦略」改訂 2016 (平成 28 年 6 月 2 日閣議決定) において国家プロジェクトとして推進すると位置づけられている。「科学技術イノベーション総合戦略 2016」(平成 28 年 5 月 24 日閣議決定) においても、3D プリンタ等の革新的な生産技術の開発に取り組むことを明記されている。

(2) 本事業のねらい

我が国ものづくり産業がグローバル市場において持続的かつ発展的な競争力を維持するために、地域の中小企業等の持つ技術や資源を活用し、少量多品種で高付加価値の製品・部品の製造に適した 3D プリンタや金属等の粉末材料の多様化・高機能複合化等の技術開発及びその周辺技術の開発を行い、次世代のものづくり産業を支える 3D プリンタを核とした我が国の新たなものづくり産業の創出を目指す。また 3D プリンタの普及を進めることで、従来の金属加工等のものづくり工程を大幅に短縮したエネルギー効率の改善につながる省エネルギー型製造プロセスの創出を目指す。

(3) 開発目標

現在の 3D プリンタでは、金属粉末を焼結・熔融するためのエネルギーを局所的に与えるためのビーム源として、電子ビームとレーザービームの 2 つの方式がある。両者の長所と短所は相補

的であり、それぞれが得意とする材料、加工品質、生産性によって応用分野を分ける傾向にある。本事業では、世界最高水準の三次元積層造形システムを構築するため、両方の方式について技術開発を行い、それぞれの特徴を最大限に発揮できる三次元積層造形技術の開発を推進する。両方式の技術開発における最終の目標を以下に示す。

[委託事業]

研究開発項目① 「基盤技術の研究開発」

最終目標 (平成30年度末)

- 1) 造形・材料データベースの構築とシミュレーション技術による最適な加工条件の導出

[委託事業、助成事業 (助成率: 1/2)]

研究開発項目②-1 「電子ビーム方式の3Dプリンタ技術開発」

最終目標 (平成30年度末)

- 1) 高速高精度電子銃、電子ビーム照射機構、スキャン機構の開発 (委託)
- 2) 異種材料の複層造形技術実用化 (委託)
- 3) 以下性能の装置開発 (助成)
 - ・積層造形速度: 500cc/h 以上
 - ・造形物の精度: $\pm 50 \mu\text{m}$ 以下
 - ・最大造形サイズ: 1,000 mm × 1,000 mm × 600 mm 以上
 - ・装置本体の販売価格: 5,000 万円以下

[委託事業、助成事業 (助成率: 1/2)]

研究開発項目②-2 「レーザービーム方式の3Dプリンタ技術開発」

最終目標 (平成30年度末)

- 1) 高速化 (レーザー2kW化)、品質安定化改良 (委託)
- 2) 異種材料の複層造形技術実用化 (委託)
- 3) 以下性能の装置開発 (助成)
 - ・積層造形速度: 500cc/h 以上
 - ・造形物の精度: $\pm 20 \mu\text{m}$ 以下
 - ・最大造形サイズ: 1,000 mm × 1,000 mm × 600 mm 以上
 - ・装置本体の販売価格: 5,000 万円以下

[助成事業 (助成率: 1/2)]

研究開発項目③ 「金属等粉末製造技術及び粉末修飾技術の開発」

最終目標 (平成30年度末)

- 1) 真球形状で、高流動性と耐酸化性を有する、Ti系、Ni系、Al系、Cu系、Fe系の合金粉末。低コスト化試作

[委託事業、助成事業 (助成率: 1/2)]

研究開発項目④ 「鋳造用砂型3Dプリンタの技術開発」

最終目標 (平成29年度末)

- 1) 無機バインダーヘッドユニットの開発 (委託)
- 2) 高冷却性能を有する有機バインダーおよび鋳型砂の開発 (委託)
- 3) 以下性能の装置開発 (助成)
 - ・積層造形速度: 10万 cc/h 以上
 - ・最大造形サイズ: 1,000 mm × 1,000 mm × 600 mm 以上

- ・装置本体の販売価格：2,000万円以下
- ・鋳型の製造コスト：1,000円/kg以下

[助成事業（助成率：1/2）]

研究開発項目⑤ 「金属積層造形技術の実用化に向けた実証」

最終目標（平成30年度末）

- 1) 製品の特性と品質の安定性を評価することで量産技術として確立する

4. 実施内容及び進捗（達成）状況

4. 1 事業の実施状況

平成29年における実施状況は、

研究開発項目①「基盤技術の研究開発」においては

電子ビーム基盤技術は、

- ・熔融凝固状態のモニタリング技術開発として、メルトプールの温度・形態のモニタリング技術を確立した。
- ・スモーク現象解明のための粉末の熱伝導率・電気抵抗率評価の基礎技術を確立した。
- ・電子ビーム方式のマイクロシミュレーションモデルを構築し、プロセスマップを作成した。

レーザービーム基盤技術は

- ・熱変形予測シミュレーションのための計測法を確立した。
- ・IN718、Al合金（3種）の造形試験、レシピ開発を行い、造形条件をデータベース化した。また機能材料の、高強度Al合金、銅合金、NiTi合金のレシピ開発を行った。
- ・マイクロシミュレーションモデルを精緻化し、予測精度を向上した。

研究開発項目②-1「電子ビーム方式の3Dプリンタ技術開発」においては、高速高精度電子銃・電子ビーム照射機構、および高速スキャン機構を開発し、以下の試作機を開発した。

複層電子ビーム機

- ・積層造形速度：214cc/h（最終目標：500cc/h以上）
- ・造形物の精度：±27μm（最終目標：±20μm以下）
- ・最大造形サイズ：300mm×300mm×600mm（最終目標：300mm×300mm×600mm）

大型高速電子ビーム機

- ・積層造形速度：100cc/h（最終目標：500cc/h以上）
- ・造形物の精度：-2～+78μm（最終目標：±50μm以下）
- ・最大造形サイズ：500mm×500mm×600mm（最終目標：1000mm×1000mm×1000mm）

研究開発項目②-2「レーザービーム方式の3Dプリンタ技術開発」においては、高出力ファイバレーザー（2kW）等を開発し、以下の試作機を開発した。

レーザートリミング方式複層レーザー機

- ・積層造形速度：508cc/h（最終目標：500cc/h以上）
- ・造形物の精度：±19μm（最終目標：±20μm以下）
- ・最大造形サイズ：300mm×300mm×300mm（最終目標：300mm×300mm×300mm）

マシニング方式複層レーザー機

- ・積層造形速度：501.3cc/h（最終目標：500cc/h以上）
- ・造形物の精度：±12μm（最終目標：±20μm以下）

- ・最大造形サイズ：300 mm×300 mm×300 mm（最終目標：300 mm×300 mm×300 mm）
- 大型高速レーザー機
- ・積層造形速度：68cc/h（最終目標：500cc/h 以上）
 - ・造形物の精度：±50 μm（最終目標：±20 μm 以下）
 - ・最大造形サイズ：600 mm×600 mm×400 mm（最終目標：1000 mm×1000 mm×1000 mm）

また、装置化の共通技術開発においては、

3Dプリンタ用制御ソフトウェア開発

- ・STL・AMF データ変換ソフトウェアの開発完了
- ・加工条件設定・編集、配置支援、サポート設定および加工前評価ソフトウェアの開発完了

モニタリング機能の開発

- ・マルチプールモニタリング部の構想設計完了
- ・レイヤー表面モニタリング部の基本機能設計完了

研究開発項目③「金属等粉末製造技術及び粉末修飾技術の開発」においては、
新アトマイズ法による高融点・高活性金属粉末製造技術の開発

- ・可視化技術活用による噴霧現象解析技術確立
- ・微細チタン合金粉末製造技術開発：粒径 53 μm 粉末製造技術確立
(最終目標：45 μm 以下)

気体流による遠心分離方式金属粉末分級機構の開発

- ・分級精度として、累積 95%での粒度 35 μm（粉末粒径 45 μm 以下）
(最終目標：40 μm 以下)
- ・分級歩留として、篩分級に対する歩留り 45%（最終目標：40%以上）

高性能化粉末製造のための粉末修飾技術の開発

- ・平均粒径 15 μm の微細銅系粉末への修飾技術の確立（最終目標：平均 10 μm）
- ・銅系粉末積層造形による造形密度：99%達成（最終目標：99.5%以上）

アルミニウム合金粉末の製造技術開発

- ・レーザービーム方式に対応したアルミニウム合金粉末の製造技術の確立
(最終目標：レーザービーム方式、電子ビーム方式の製造技術確立と標準仕様確定)

研究開発項目④「鋳造用砂型 3Dプリンタの技術開発」においては、

無機バインダーヘッドユニットの開発完了、

高冷却性能を有する有機バインダーおよび鋳型砂の開発完了、

以下の性能を有する試作機の開発完了。

- ・積層造形速度：10 万 cc/h（最終目標 10 万 cc/h 以上）
- ・最大造形サイズ：1,800mm×1,000mm×750mm
(最終目標 1,000 mm×1,000 mm×600 mm以上)
- ・鋳型の製造コスト：1,000 円/kg（最終目標 1,000 円/kg 以下）

研究開発項目⑤「金属積層造形技術の実用化に向けた実証」においては、

宇宙/航空機、エネルギー、産業機械、医療、自動車の分野で、21 件の実証試験を実施し、評価中。

4. 2 予算、事業規模

年度	委託事業	助成事業 (助成率 1/2)	事業規模
26年度			
一般勘定	3,750 百万円	0 百万円	3,750 百万円
27年度			
一般勘定	1,820 百万円	0 百万円	1,820 百万円
28年度			
一般勘定	700 百万円	0 百万円	1,900 百万円
需給勘定	0 百万円	1,200 百万円	
29年度			
一般勘定	300 百万円	0 百万円	2,100 百万円
需給勘定	0 百万円	1,800 百万円	

4. 3 知財、学会発表

特許

特許等件数 (出願を含む)	66 件 (補助事業分 6 件を含む)
特許権の実施件数	7 件
ライセンス供与数	7 件
学会発表 (口頭発表を含む)	30 件 (国内 24 件、海外 6 件)
学会以外の発表	51 件

5. 事業内容

プロジェクトマネージャーに NEDO IoT 推進部 川端紳一郎を任命して、プロジェクトの進行全体の企画・管理や、その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。実施体制については、別紙を参照のこと。

5. 1 平成 30 年度 (委託) 事業内容

【一般勘定事業】

研究開発項目①-1「基盤技術の研究開発 (プロセス開発)」においては

熔融・凝固状態のモニタリング・分析技術を開発し、各種金属でのデータ収集を行い、熔融・凝固プロセス等のシミュレーション結果と比較検討することにより、最適な条件の導出と、積層造形条件・材料と造形物特性とのデータベースを構築する。

【需給勘定事業】

研究開発項目①-2「基盤技術の研究開発 (データ活用)」においては

世界最高の品質と再現性を目指した高度インプロセスモニタリング技術の研究開発を行うと共に、これらのデータを活用した 3D プリンティング用デジタルプラットフォーム構築の予備的研究を行う。

5. 2 平成 30 年度 (助成) 事業内容

研究開発項目②-1「電子ビーム方式の 3D プリンタ技術開発」においては

以下性能の装置開発を行う。

- ・積層造形速度：500cc/h 以上
- ・造形物の精度：±50 μm 以下
- ・最大造形サイズ：1,000 mm×1,000 mm×600 mm以上
- ・装置本体の販売価格：5,000 万円以下

また、2 種以上の異種材料の複層造形技術を実用化する。

研究開発項目②-2「レーザービーム方式の3Dプリンタ技術開発」においては以下性能の装置開発を行う。

- ・積層造形速度：500cc/h 以上
- ・造形物の精度：±20 μm 以下
- ・最大造形サイズ：1,000 mm×1,000 mm×600 mm以上
- ・装置本体の販売価格：5,000 万円以下

また、2 種以上の異種材料の複層造形技術を実用化する。

研究開発項目③「金属等粉末製造技術及び粉末修飾技術の開発」においては

高品質な造形を実現する高性能（真球化等）な Ti 系、Ni 系、Al 系、Cu 系、Fe 系の合金粉末の製造技術を確立する。

研究開発項目⑤ 金属積層造形技術の実用化に向けた実証においては

組合員ユーザーの試作部品の実証評価から、金属積層造形技術の実用性を実証する。

標準化活動として、得られた研究開発成果については、ISO/TC261（国際標準化機構 積層造形技術 専門委員会）国内審議委員会を通して、提案及び評価データ等の提供を行い、国際標準化に向けて積極的に役割を果たしていく。

5. 3 平成 30 年度事業規模

	委託事業	助成事業（助成率 1/2）
①一般勘定	300 百万円	0 百万円
②需給勘定	300 百万円	1,400 百万円
計	600 百万円	1,400 百万円

事業規模については、変動があり得る。

6. その他重要事項

(1) 運営・管理

研究開発全体の管理・執行に責任と決定権を有する NEDO は、経済産業省と密接な関係を維持しつつ、当該研究開発の目的及び目標に照らして適切な運営管理を実施する。また、必要に応じて、外部有識者の意見を運営管理に反映させる。

(2) 複数年度契約の実施

平成 29～30 年度の複数年度契約を行う。

(3) 知財マネジメントにかかる運用

「NEDO プロジェクトにおける知財マネジメント基本方針」に従ってプロジェクトを

実施する。(研究開発項目①および②④の委託事業のみ)

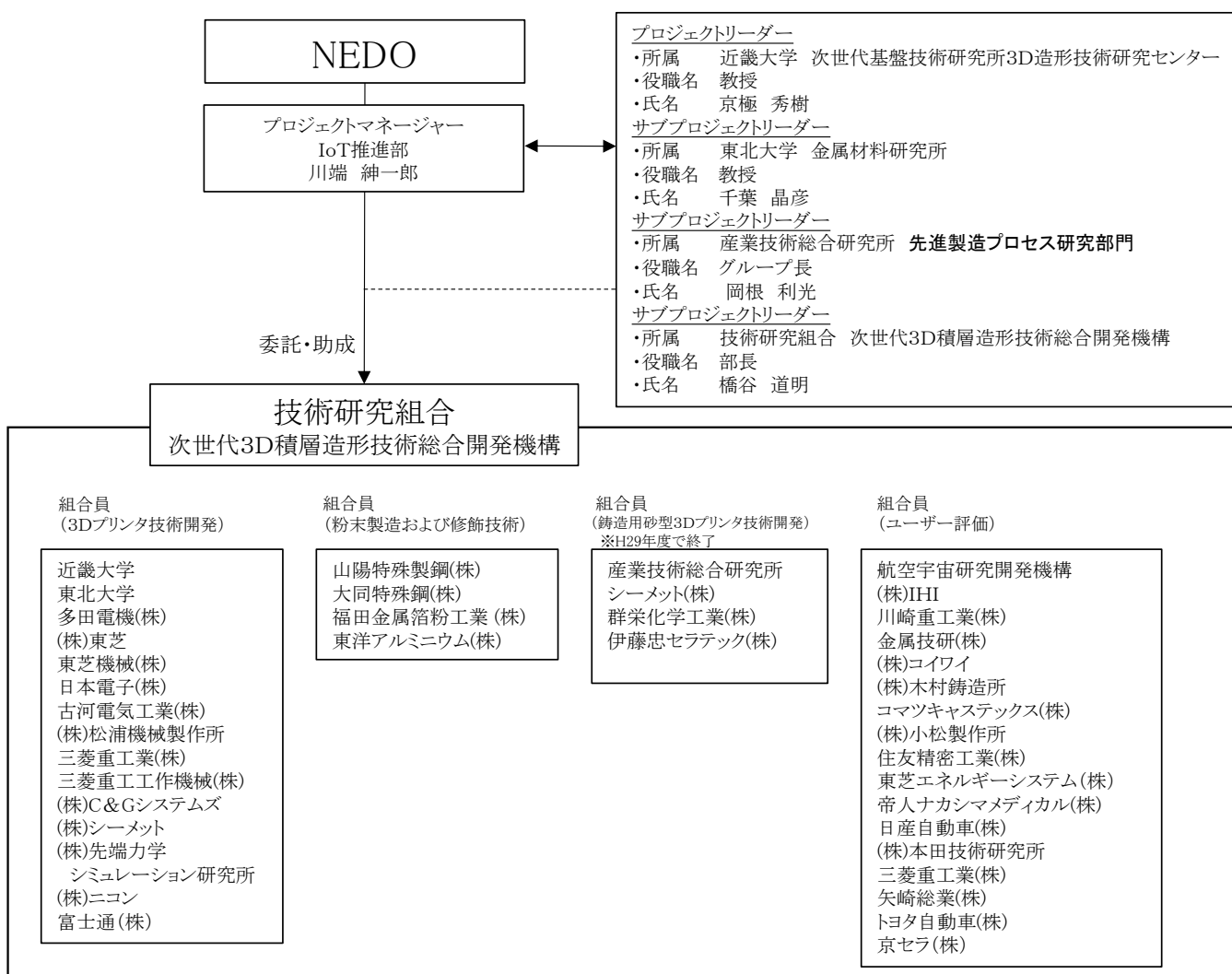
7. スケジュール

- 平成 30 年 6 月 . . . 後継プロジェクト事前評価
- 平成 30 年 11 月 . . . 前倒し事後評価

8. 実施方針の改訂履歴

- (1) 平成 30 年 2 月、制定

(別紙) 事業実施体制の全体図



平成 29 年度～平成 30 年度成果報告書

次世代型産業用 3 D プリンタの造形技術開発・実用化事業

平成 31 年 2 月

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構

(委託先)

技術研究組合次世代 3 D 積層造形技術総合開発機構

目次

まえがき	3
1. 研究開発の成果と達成状況	4
和文要約	5
英文要約	6
本文	
第1章 電子ビーム方式 3D 積層造形技術の基盤技術の研究開発	7
1-1 電子ビーム積層造形における金属粉末の溶融・凝固プロセスの解明 モニタリングシステム的设计、モニタリング装置の改良と自動化	7
1-2 金属粉末材料毎の積層造形に適した造形条件の確立	8
1-2-1 スモーク現象の解明	8
1-2-2 粉末物性と造形条件の相関調査	11
1-2-3 粉末電気抵抗測定	16
1-2-4 材料開発	19
1-2-5 粉末熱伝導率測定 (室温近傍)	28
1-3 伝熱溶融・溶融凝固シミュレーション技術開発	30
1-3-1 メルトプールのシミュレーション	30
1-3-2 凝固組織形成シミュレーション	34
1-4 加工、材料、評価データベース構築	35
1-4-1 開発機の造形物評価	35
1-4-2 標準試験片による開発機の造形物評価	41
1-4-3 得られたデータのデータベース化	51
1-5 3D プリンタ用制御ソフトウェアの開発	52
1-6 まとめ	55
第2章 レーザビーム方式 3D 積層造形基盤技術の研究開発	57
2-1 溶融凝固機構の解明及びモニタリング技術の開発	57
2-1-1 高速造形における溶融凝固機構の解明	57
2-1-2 メルトプール (溶融池) モニタリング技術の開発 (レーザデポジション方式)	61
2-1-3 パウダベッド形成状況モニタリング技術の開発	65
2-2 ミクロスケール溶融凝固機構の解明およびモニタリング技術、 マルチスケールシミュレーション技術の開発 (電子ビーム方式、 レーザビーム方式共通)	67
2-2-1 熱変形歪みシミュレーションとの連携	67
2-2-2 材料依存性予測の妥当性検証	71
2-2-3 結晶相予測シミュレーションとの連携	73
2-2-4 仮焼結体熱伝導率予測	75
2-2-5 二流体モデルの妥当性検証	78
2-2-6 観察・検証試験	81

2-3	熱変形予測シミュレーション技術の開発	87
2-3-1	汎用ソフトによる熱変形予測シミュレーション技術の開発	87
2-3-2	固有ひずみ法による熱変形予測シミュレーションの開発	89
2-3-3	固有ひずみ法による熱変形予測シミュレーションの開発 (サポート配置の最適化)	105
2-4	データベース構築(造形条件、粉末条件、 シミュレーション用データ)	119
2-4-1	開発機の造形物評価	119
2-4-2	高速造形用レシピの開発	137
2-5	機能材料の開発及び材料データベース化	145
2-5-1	高強度アルミニウム合金の開発及び材料データベース化	145
2-5-2	チタン系合金(機能材料)の開発及び材料データベース化	151
2-6	まとめ	160
	結び(総括および結論)	163
2. 研究発表・講演、文献、特許等の状況		
(1)	研究発表・講演、文献	164
(2)	特許等	178
(3)	その他公表(プレス発表等)	178

まえがき

本事業においては、我が国ものづくり産業がグローバル市場において持続的かつ発展的な競争力を維持するために、地域の中小企業等の持つ技術や資源を活用し、少量多品種で高付加価値の製品・部品の製造に適した3Dプリンタや金属等の粉末材料の多様化・高機能複合化等の技術開発及びその周辺技術の開発を行い、次世代のものづくり産業を支える3Dプリンタを核とした我が国の新たなものづくり産業の創出を目指す。加えて、3Dプリンタの普及を進めることで、従来の金属加工等のものづくり工程を大幅に短縮したエネルギー効率の改善につながる省エネルギー型製造プロセスの創出を目指す。

現在の3Dプリンタでは、金属粉末を焼結・溶融するためのエネルギーを局所的に与えるためのビーム源として、電子ビームとレーザービームの2つの方式がある。両者の長所と短所は相補的であり、それぞれが得意とする材料、加工品質、生産性によって応用分野を分ける傾向にある。本事業では、世界最高水準の三次元積層造形システムを構築するため、両方の方式について技術開発を行い、それぞれの特徴を最大限に発揮できる三次元積層造形技術の開発を推進する。

電子ビーム方式3D積層造形技術の基盤技術の研究開発においては、平成30年度は、設計したレシピ開発用小型装置とモニタリングシステムを用いて、プロセス素過程（電子ビーム走査によるメルトプールの形成とその凝固）のモニタリングを実施した。さらに、モニタリング結果のシミュレーションへのフィードバックを行い、シミュレーションの高精度化に繋げた。また、高効率なプロセス最適設計に資するように、本研究開発で得られた成果を整理し、三次元積層造形データベースに棚入れを行った。

レーザービーム方式3D積層造形技術の基盤技術の研究開発においては、平成30年度は、レーザービームを光源とした世界最高性能の複層化及び大型高速造形を可能とする3Dプリンタを開発するとともに、高品質の製品を製造するために、レーザービーム要素技術研究機による溶融凝固機構ならびに粉末積層機構の解明を行った。また、製品の品質保証を担保するためのモニタリング技術として、モニタリング装置を利用してパウダベッド形成状況及び造形面の状況から欠陥予測を行うとともに、パウダベッド方式の熱変形シミュレーションの実用化を図った。平成29年度に引き続き、新たな機能材料の加工条件のデータベース構築、さらには材料データベース構築を行い、実用開発機の制御ソフトウェア用データベース及びシミュレーション技術の高機能化を図った。これらにより、開発する3Dプリンタの高速・高精度・大型化及び複層化を図った。

1. 研究開発の成果と達成状況

本事業において実施した研究開発の成果と達成状況の概要は次のとおりである。

(1) 電子ビーム方式 3D 積層造形技術の基盤技術の研究開発

- ① 電子ビーム積層造形における金属粉末の熔融・凝固プロセスの解明
- ② 金属粉末材料毎の積層造形に適した造形条件の確立
- ③ 伝熱熔融・熔融凝固シミュレーション技術開発
- ④ 加工、材料、評価データベース構築

平成30年度には、これらの研究開発を行うことにより、次の成果を得るとともに、目標を達成できた。

- ① モニタリング高度化技術評価装置を導入し、実装したモニタリングシステムを用いて、熔融凝固現象を明らかにできた。
- ② インピーダンス測定結果を基に、スモーク抑制対策が可能となった
- ③ イコネル 718 合金、A7075 合金と併せて新しい合金 (A7075 合金に TiB_2 を添加したもの) の造形条件を明らかにできた。
- ④ モニタリング結果によりシミュレーションの検証を行い、その精度の向上を図ることができた。
- ⑤ 開発機で Ti-6Al-4V および TiAl 基金属間化合物の造形を実施し、造形物 (引張試験片、疲労試験片) の評価を行い、相対密度、熱処理条件、機械的性質、疲労試験結果をデータベース化できた。

(2) レーザビーム方式 3D 積層造形基盤技術の研究開発

- ① 熔融凝固機構の解明及びモニタリング技術の開発
- ② ミクロスケール熔融凝固機構の解明およびモニタリング技術、マルチスケールシミュレーション技術の開発 (電子ビーム方式、レーザービーム方式共通)
- ③ 熱変形予測シミュレーション技術の開発
- ④ データベース構築 (造形条件、粉末条件、シミュレーション用データ)

平成30年度には、これらの研究開発を行うことにより、次の成果を得るとともに、目標を達成できた。

- ① 新たに開発したモニタリング装置及び導入した表面性状測定装置を用いて、熔融凝固過程及びパウダベッド並びに造形面性状を計測可能となった。
- ② 開発したデポジション方式のモニタリング技術や解析技術により微細領域での造形欠陥発生過程のメカニズムを解明できた。
- ③ スーパーコンピュータを活用した汎用シミュレーション用モデルを構築し、大規模シミュレーションを実施し、シミュレーション用パラメータのデータベースを構築できた。
- ④ パウダベッド方式について熱変形予測シミュレーションのソルバー用固有ひずみデータベースを開発し、さらに固有ひずみ計測を実施し熱変形予測シミュレーション用データとすることができた。また、パウダベッド方式において熱変形を低減するためのサポート配置の最適化技術を開発できた。
- ⑤ イコネル 718、高強度アルミニウム合金、Ti-6Al-4V 合金などの高速造形レシピを開発し、造形物の評価を行い、データベース化できた。
- ⑥ 開発機で造形を実施し、造形物 (引張試験片、疲労試験片) の評価を行い、相対密度、熱処理条件、機械的性質、疲労試験結果をデータベース化できた。

本報告では、平成30年度の研究開発内容の詳細について、以下に述べる。

和文要約

本事業において実施した研究開発の成果と達成状況の概要は次のとおりである。

1. 電子ビーム方式3D積層造形技術の基盤技術の研究開発

- (1) 電子ビーム積層造形における金属粉末の熔融・凝固プロセスの解明のため、熔融観察装置を開発し、実装したモニタリングシステムを用いて、熔融凝固現象を明らかにできた。
- (2) 電子ビーム積層造形プロセスに特有のスモーク現象の発生メカニズムを解明し、原料粉末にボールミル処理を施すことにより、スモーク発生温度を下げることに成功した。
- (3) A7075 合金ベースの合金を開発し、造形条件を検討するとともに、電子ビームのオシレーションにより組織制御が可能となり、ホットクラックを抑制できた。
- (4) 合金粉末の交流電気抵抗測定の結果、粉末表面の酸化層のキャパシタ成分が計測でき、昇温に伴いキャパシタ成分が減少することが観察されたことから、交流測定が電子ビーム積層造形用の粉末特性評価に有効であることを明らかにした。
- (5) DEMシミュレーションにより、GA粉末とPREP粉末層の有効熱伝導率を算出した結果、GA粉末とPREP粉末では最適な予備加熱条件が異なることが示唆された。
- (6) CFDシミュレーションによる造形パラメータを、ベイズ推定を導入した機械学習法により最適化できることを示した。

2. レーザビーム方式3D積層造形基盤技術の研究開発

- (1) 開発したデポジション方式のモニタリング技術や解析技術により、積層異常の発生メカニズムを解明できた。また、その場（インプロセス）計測手法を開発し、「フィルタ補正逆投影法」を用いて、熔融池やプルームを抽出でき、解析画像と機械学習を用いて異常発生が生じた際の自動判定が可能となった。
- (2) 各種合金の高出力・高速造形レシピを開発し、造形体の評価を行った結果、高出力・高速造形においては、低出力・低速造形と比較すると熔融凝固現象の違いにより密度が低下することがわかった。

3. シミュレーション及びデータベース化

- (1) 積層造形法のマルチスケールシミュレーションの実現ためにミクロスケールシミュレーションからマクロシミュレーションへのパウダベッド方式における接続パラメータの取得のため、熱変形歪みシミュレーションに供する実効入熱量をスーパーコンピュータにより数値解析した結果、実験的熱計測データとほぼ一致し、開発したシミュレーション技法の有効性を示した。また、結晶相予測シミュレーションに熔融凝固過程の凝固線上の温度勾配値と冷却速度値を供した。
- (2) ミクロシミュレーションにおいて開発した二流体モデルの妥当性について、数値解析と実験により比較した結果、非圧縮性モデルでは大域的な圧力変動のみが一致するが界面の微細な構造が再現できないため、圧縮性考慮二流体モデルを新規に実装した。
- (3) 熱変形予測シミュレーションのソルバー用固有ひずみデータベースを開発し、さらに固有ひずみ計測を実施し、熱変形予測シミュレーション用データとすることができた。また、パウダベッド方式において熱変形を低減するためのサポート配置の最適化技術を開発できた。
- (4) TRAFAMプロジェクトにおける開発機で造形を実施し、各種材料の造形物（引張試験片、疲労試験片）の評価を行い、相対密度、熱処理条件、機械的性質、疲労試験結果（疲労強度、破壊靱性値など）をデータベース化できた。

英文要約

Title: Next-generation industrial 3D printers project (FY2017-FY2018) Final Report

1. Development of the core technology for electron beam additive manufacturing

- (1) In order to elucidation of melting and solidification process of metal powder, it was implemented as the improvement of the melting observation device.
- (2) The mechanism of occurrence of the smoke phenomenon could be clarified. We succeeded in lowering the smoke generation temperature by subjecting the raw material powder to a ball mill treatment.
- (3) A7075 base alloy suitable for electron beam additive manufacturing was developed. The possibility of suppressing hot cracks as well as microstructure control by the oscillation of the electron beam was verified.
- (4) As a result of the alternating current electrical resistivity measurement, the capacitor component of the oxide layer on the powder surface could be measured. AC measurement is effective for powder property evaluation because the capacitor component decreased with the temperature rise.
- (5) The effective thermal conductivity of the powder layer prepared with GA powder and PREP powder was calculated using DEM simulation. It was suggested that the optimum preheating condition differs between the GA powder and the PREP powder.
- (6) The possibility of establishing the optimization method of the modeling parameter by the machine learning method which introduced Bayesian estimation was shown.

2. Development of the core technology for laser beam additive manufacturing

- (1) The mechanism of occurrence of abnormal deposition could be elucidated using the DED monitoring system. The automatic abnormal deposition discriminating system was built using the analyzed images by the filtered back projection and the machine learning method.
- (2) The recipe for fabrication at high laser power and high scan speed conditions of various alloys was developed.

3. Simulation and construction of database

- (1) To acquire connecting parameters from microscale simulation to macro-simulation, the effective heat input to the powder bed was numerically analyzed by the super computer, and the experimental heat measurement data was almost in consistent. The temperature gradient values and the cooling rate values on the solidification line were provided for the crystal phase prediction simulation.
- (2) The validity of the two-fluid model developed in the micro simulation was confirmed by the experimental observation and the numerical analysis. Consequently, a compressible two-fluid model is newly implemented.
- (3) The inherent strain analysis solver could be developed using the inherent strain database. In order to optimize the deformation amount and support density after removing support, the inherent strain analysis solver could be developed.
- (4) The database on the various properties of the as-built, heat treated and HIPed specimens of various materials fabricated by the machines developed at the TRAFAM project was constructed.

第1章 電子ビーム方式3D積層造形技術の基盤技術の研究開発

1-1 電子ビーム積層造形における金属粉末の溶融・凝固プロセスの解明 モニタリングシステムの設計、モニタリング装置の改良と自動化

電子ビーム積層造形における金属粉末の溶融・凝固プロセスの解明のためには、溶融状態を観察するモニタリングシステムの構築が重要視されており、電子ビームを用いて金属粉末に照射した際の溶融現象を高速度カメラやSEMで観察することを目的に、溶融観察装置(α 機)を昨年度開発してきた。

その結果、いくつかの課題を解決する必要があり、その対策として以下の改良・確認の実施が必要となった。

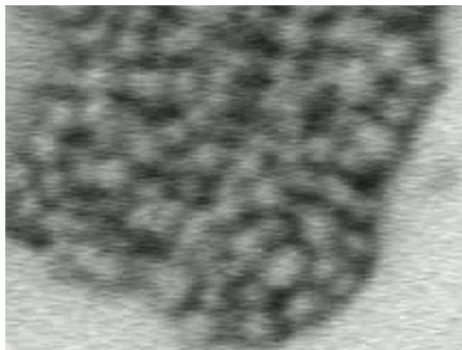
- (ア)電子銃のOリングレス化と収束レンズ(CL)・ライナーチューブ径の大口径化
- (イ)大口径化に伴うCLの新規作成
- (ウ)対物レンズ(OL)励磁固定でのCLによるフォーカス調整
- (エ)イオントラップ機能追加
- (オ)溶融状態の高速度カメラ、及びSEMでの観察・改良
- (カ)積層造形中での溶融観察

今年度は、上記の改良・確認について、①溶融観察装置(α 機)の改良を実施し、モニタリングシステムの要素技術の確立を目指した。

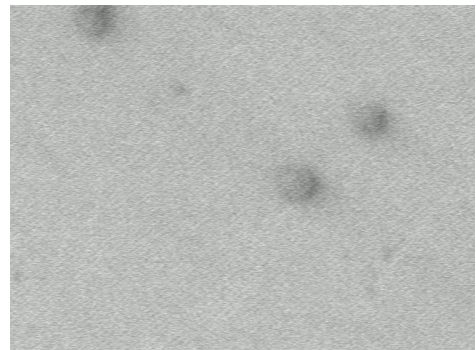
① 溶融観察装置(α 機)の改良

α 機は、溶融用電子銃カラムの小型化/低コスト化を実現するため、汎用SEMを改造したカラムを搭載しているが、溶融するための電子ビームを安定に供給できるようにするために、改良を実施した。

図1-1-1に改良前後の観察用SEMで観察したSEM像を示す。改良後では、Ti-6Al-4V粉末の輪郭が明確に観察されており、分解能向上が確認できた。



改良前



改良後

図1-1-1 観察用SEMのCL改良前後のSEM像比較

② まとめ

溶融観察装置 α 機で、観察用SEMのCL改良により、分解能向上が確認できた。

1-2 金属粉末材料毎の積層造形に適した造形条件の確立

1-2-1 スモーク現象の解明

電子ビーム積層造形において、スモーク現象が生じると欠陥を生じるだけでなく、その現象が造形エリア全体で生じると造形プロセス自体が中断することも多い。そのため本項目では、スモーク現象を解明し電子ビーム積層造形装置の生産性（信頼性）をより向上させ製造産業に提供できるようにすることが目的である。

実験装置の写真を図 1-2-1 に示す。粉末上にパルスでビームを照射し、造形チャンバ前面の観察窓から高速カメラを用いてスモーク現象の様子を観察した。

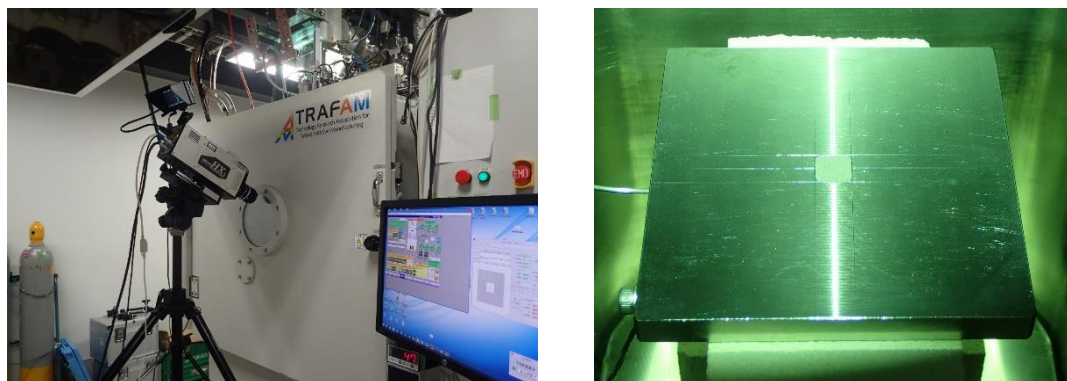


図 1-2-1 実験装置写真

表 1-2-1 に示したインコネル 718 粉末（未処理粉末とボールミル（BM）処理粉末）を用いてスモーク試験を実施した結果を表 1-2-2 に示す。実験に用いたビーム電流値はすべて 20 mA であった。表の右端の列に Smoke として表してスモーク試験の結果も示した。○はスモークしなかったことを示す。数値はスモークに至るまでの時間を示している。未処理粉末は RT~600℃でスモークを起こし 800℃まで加熱すればスモーク現象を抑制できることが判った。一方、ボールミル処理粉末は同様の試験条件で RTでもスモークを起こさなかった。ボールミル処理をすることにより大幅にスモーク温度が下がっていることが判る。

表 1-2-1 実験に用いた粉末の特徴

粉末	D ₁₀ μ m	D ₅₀ μ m	D ₉₀ Mm	平均粒子径 μ m
未処理粉末	51.6	77.0	97.9	73.5
BM 処理	45.3	71.2	100.0	68.7

表 1-2-2 スモーク試験実験条件

粉末	Temp ℃	Smoke msec
未処理	RT	72.8
未処理	600	497.2
未処理	700	△
未処理	800	○
ボールミル	RT	○
ボールミル	400	○
ボールミル	500	○
ボールミル	700	○

スモーク試験連続写真の一例を図 1-2-2 に示す。パウダベッド上にメルトプールを形成後、メルトプールは徐々に広がり、メルトプール周辺の粉末が移動し始めてから、完全にスモークを生じる様子が観察された。

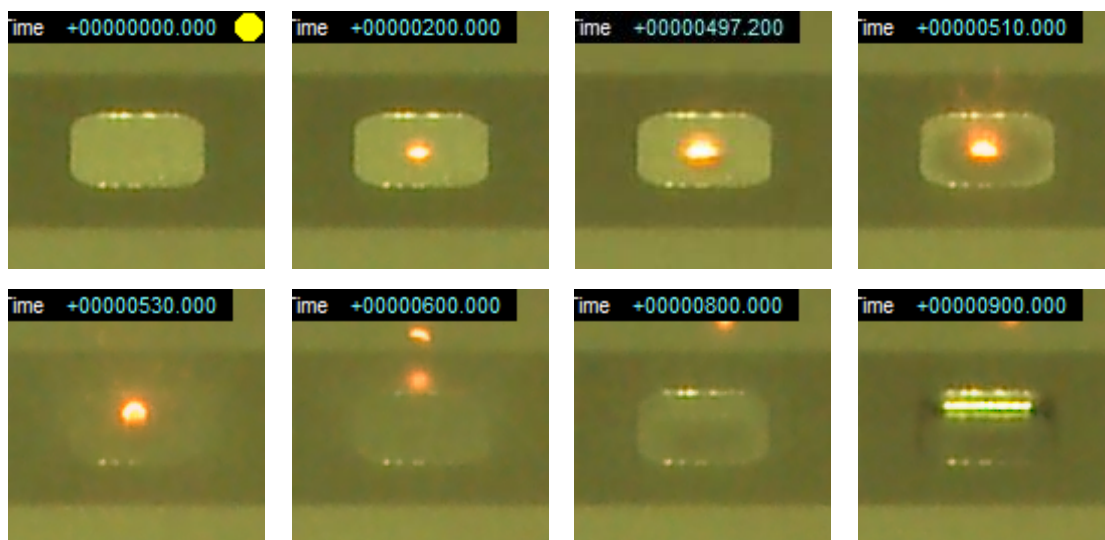


図 1-2-2 インコネル 718 合金粉末（未処理粉末）のスモーク連続写真

原料粉末にボールミル処理を施すことによりスモーク温度を下げることに成功したので、パウダベッド上に電子ビームによるハッチング試験を行いスパッタの有無を確認し実際に積層造形に応用可能な粉末であるか調査をした。ハッチング時の高速度カメラ撮影画像の連続写真を図 1-2-3 に示す。連続写真からも判るようにスパッタレスでハッチングが出来ていることが判った。

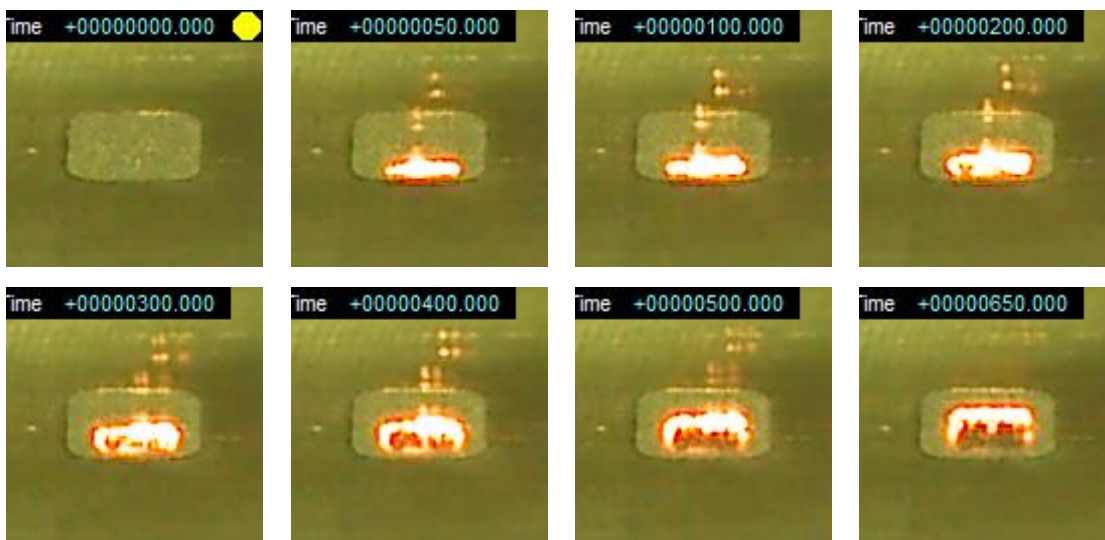


図 1-2-3 インコネル 718 合金粉末（BM 処理粉末）のハッチング試験

インコネル 718 同様に Ti-6Al-4V でもスモーク試験を実施した。その際、プレートの予備加熱は行わず、ビーム電流値を変化させてスモークが生じるまでの時間を計測した。その結果をまとめた図を図 1-2-4 に示す。BM 処理によりスモークが生じにくくなる傾向が見られた。

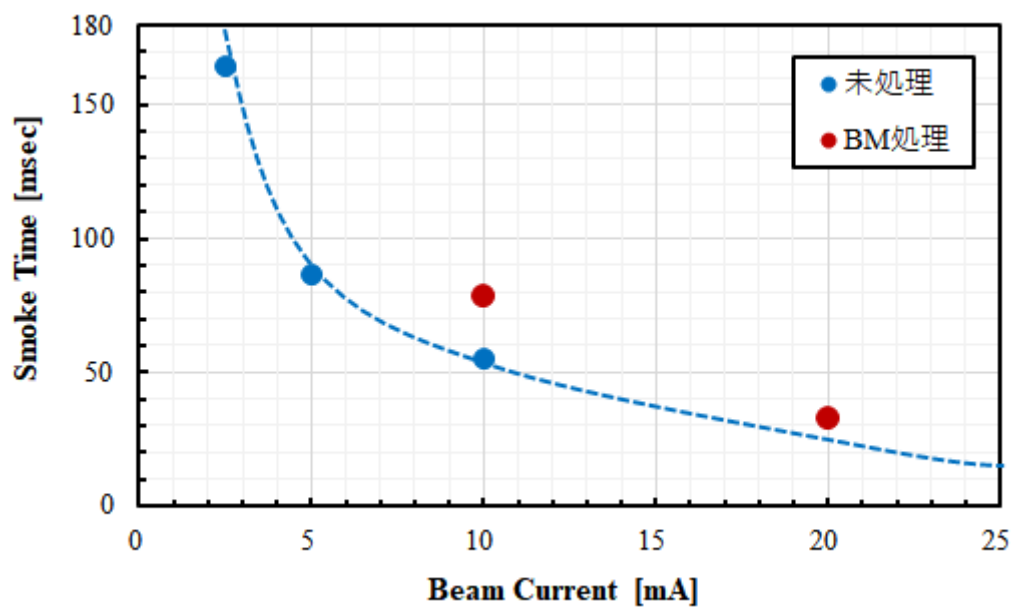


図 1-2-4 ビーム電流値とスモークタイム

1-2-2 粉末物性と造形条件の相関調査

パウダベッド方式の電子ビーム金属積層造形法では、粉末の性状（形態、粒度分布、内包ガスポアなど）が造形性ならびに造形物の密度などに影響を及ぼすことが考えられる。そこで、本項目では、粉末形状（球形度）や粒度分布、原料粉末内に包摂されたガス欠陥、粉末流動性等が造形条件にどのような影響を与えるか調査する為にガスアトマイズ法（GA）とプラズマ回転電極法（PREP）の2種類の手法で製造した粉末を原料として造形試験と造形物の密度調査や表面粗度調査を実施して、積層造形に適した原料粉末製造手法を調査することを目的とした。

GA粉末とPREP粉末の外形と断面のSEM像を図1-2-5、図1-2-6に示す。GA粉末は形状がいびつでガスポアが多く観察されたのに対し、PREP粉末は真球度が高く、ガスポアが観察されなかった。

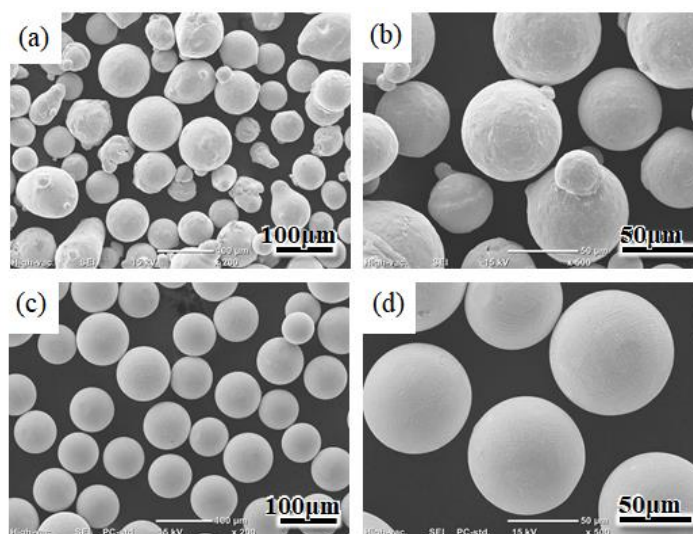


図 1-2-5 粉末 SEM 像

(a, b) GA 粉末 (c, d) PREP 粉末

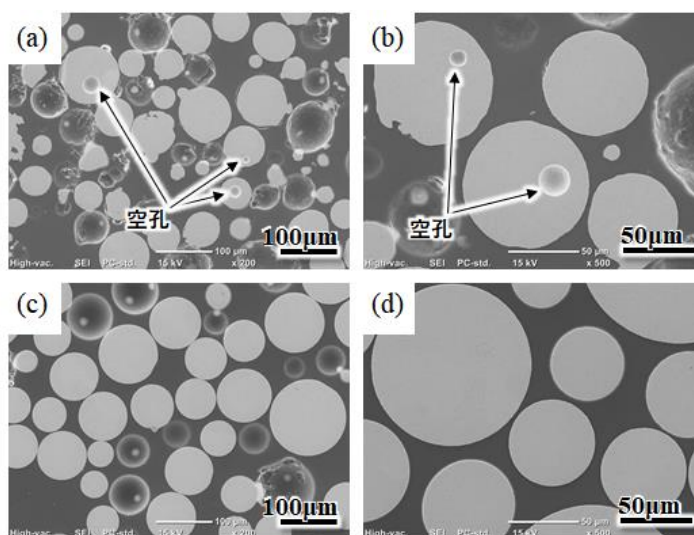


図 1-2-6 粉末断面 SEM 像

(a, b) GA 粉末 (c, d) PREP 粉末

造形に用いた粉末の粒度分布測定結果を図1-2-7に、粉末の円形度測定結果を図1-2-8に示す。PREP粉末は分布がシャープで円形度が高い。

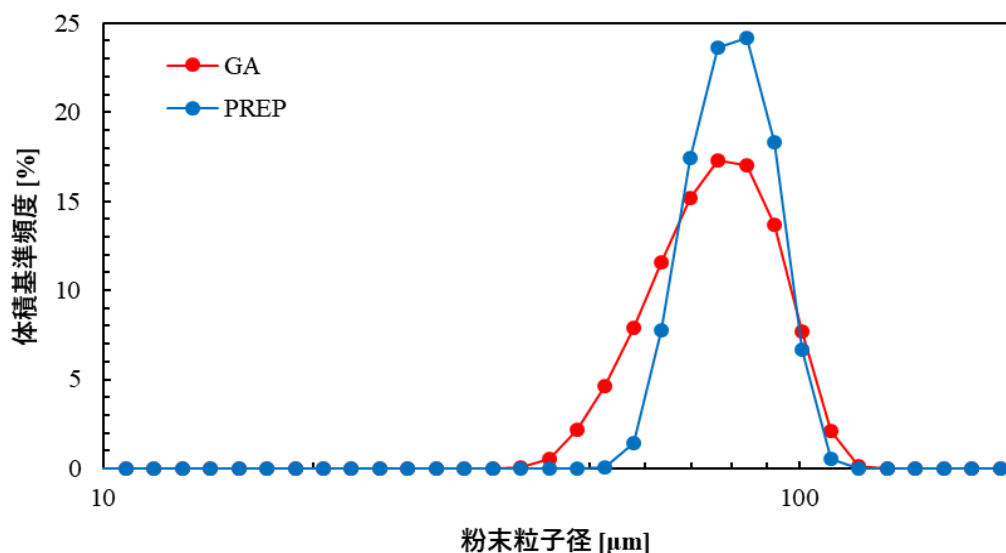


図 1-2-7 粉末粒度分布比較

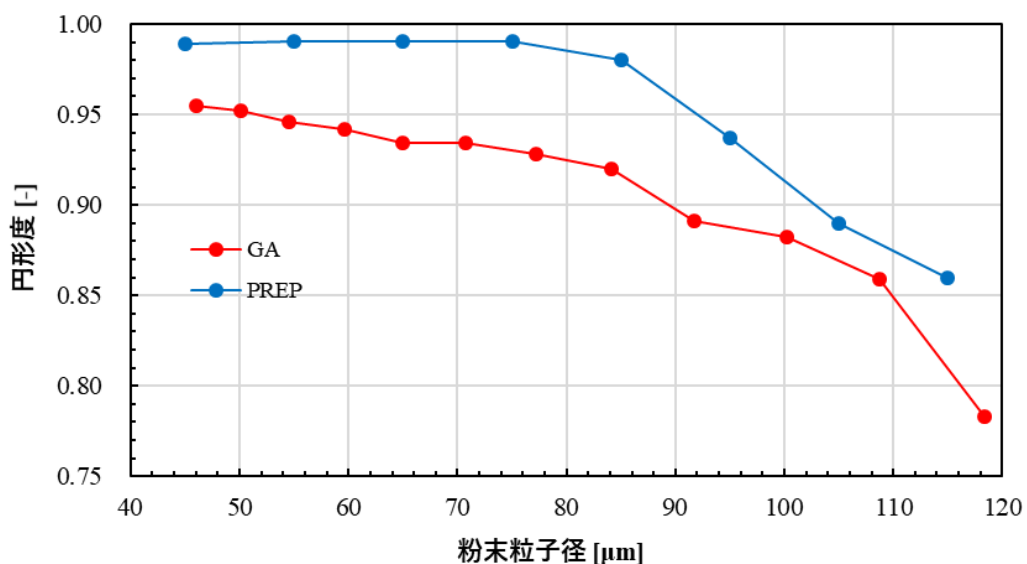


図 1-2-8 粉末球形度（円形度として算出）

GA 粉末と PREP 粉末では最適な造形条件が異なると考えられるので、それぞれの造形性の調査と最適造形条件で作製した造形物で相対密度の評価を行うことで、どちらの粉末が電子ビーム積層造形に適しているか明らかにすることとした。図 1-2-9 に GA 粉末と PREP 粉末で造形したそれぞれ 18 個の造形物の外観を示す。

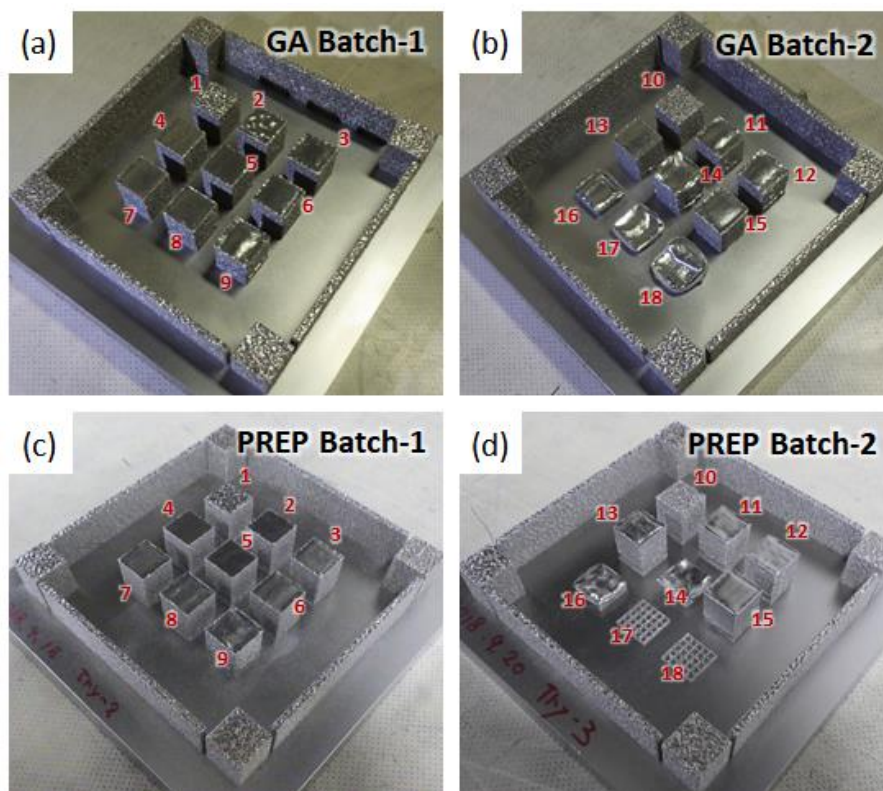


図 1-2-9 GA 粉末と PREP 粉末で積層造形した造形物
 (a) GA 粉末 Batch-1 (b) GA 粉末 Batch-2
 (c) PREP 粉末 Batch-1 (d) PREP 粉末 Batch-2

アルキメデス法で造形物の密度を評価し、単位体積当たり投入したエネルギーと密度の関係を図 1-2-10 に示す。PREP 粉末で造形した造形物の方が高い密度を有している

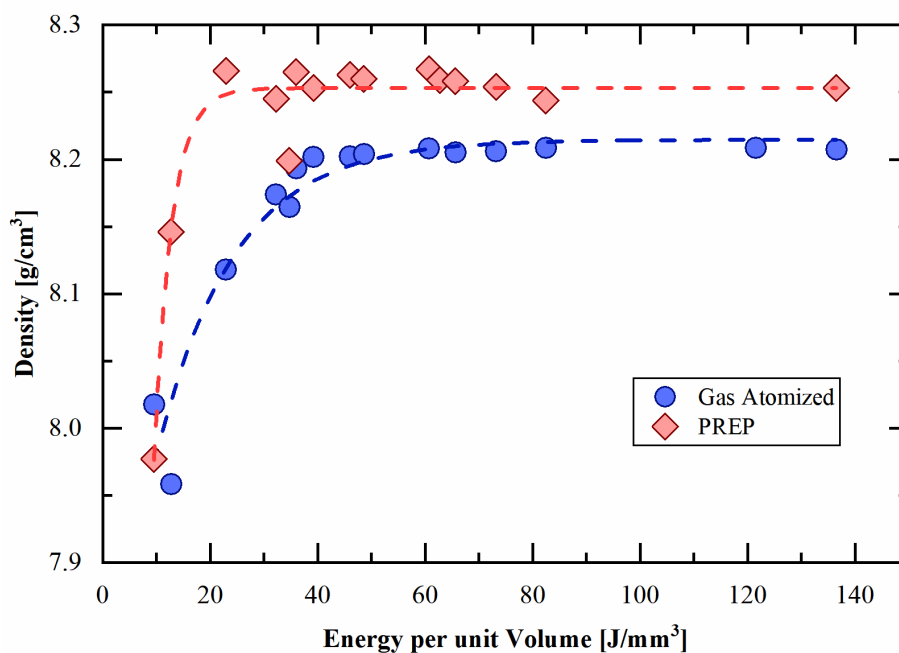


図 1-2-10 造形物密度評価 (アルキメデス法)

機械学習法で求めたプロセスウィンドを図 1-2-11 に示す。このプロセスウィンドから予測された最適条件で造形試験をした。GA 粉末造形物の最表面の様子を図 1-2-12 に PREP 粉末の最表面の様子を図 1-2-13 に示す。GA 粉末造形物の表面粗度 S_a は $39\mu\text{m}$ 、PREP 粉末造形物は $30\mu\text{m}$ と両者に顕著な差は無かったが、アルキメデス法で求めた密度は GA 造形物が 8.2g/cm^3 、PREP 粉末造形物が 8.4g/cm^3 であった。光学顕微鏡の断面写真から求めた相対密度は、ガスアトマイズ粉末造形物が 99.89%で、PREP 粉末造形物が 99.97% であった。相対密度は PREP の方が高い。

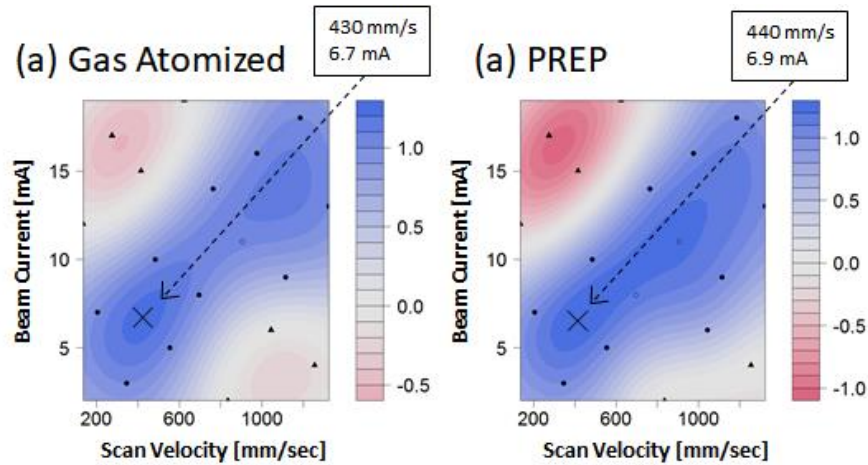


図 1-2-11 機械学習で求めたプロセスウィンド
(a) GA 粉末造形試験 (b) PREP 粉末造形試験

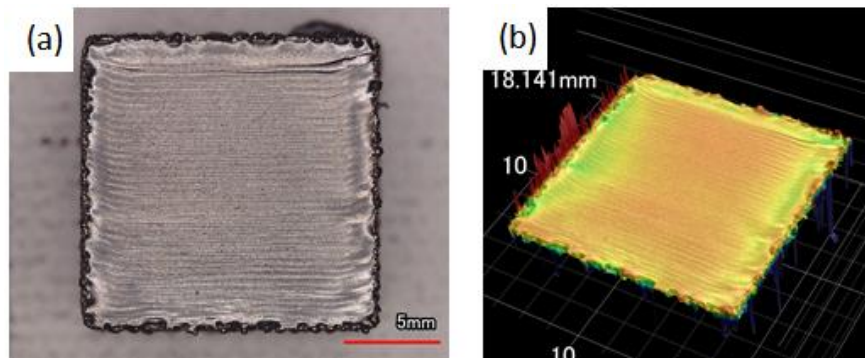


図 1-2-12 GA 粉末 最適条件で造形した造形物

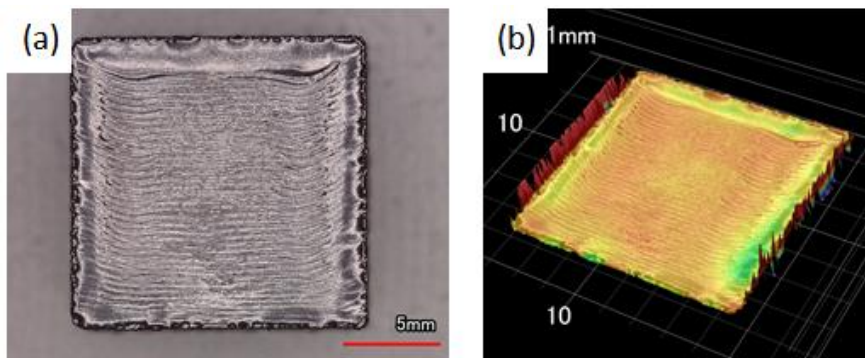


図 1-2-13 PREP 粉末 最適条件で造形した造形物

GA造形物およびPREP造形物の外形と密度から求めた造形ウィンドを図1-2-14と図1-2-15にそれぞれ示す。GA造形物よりもPREP造形物の方が造形ウィンドが広い。

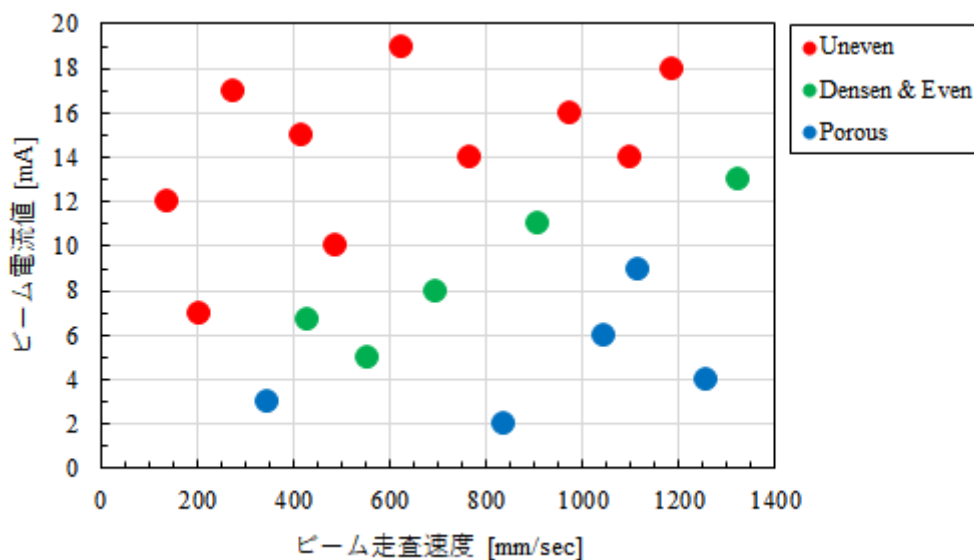


図 1-2-14 GA 粉末の造形ウィンド

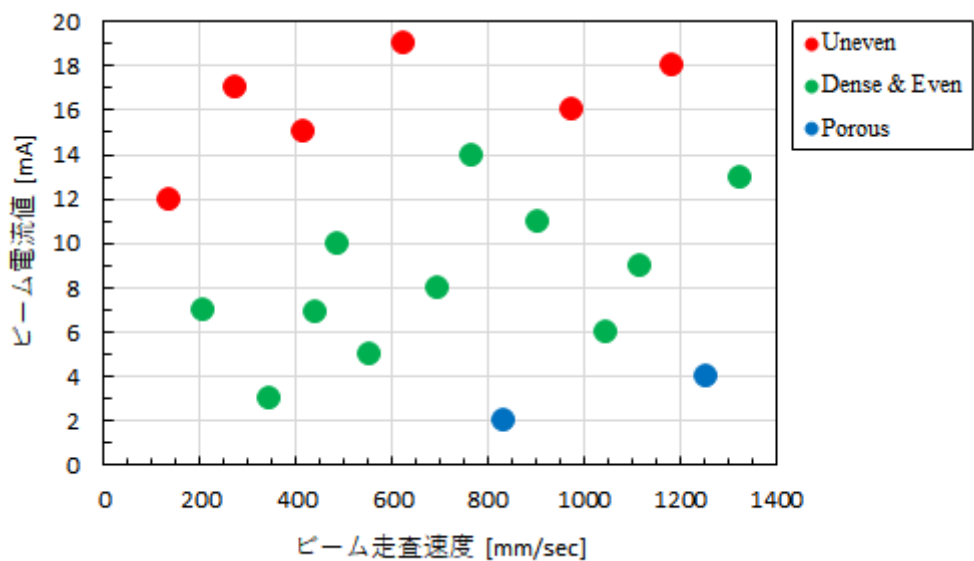


図 1-2-15 PREP 粉末の造形ウィンド

1-2-3 粉末電気抵抗測定

本研究開発項目の目的は、パウダベッド予備加熱温度の最適化及びスモーク現象の発生を回避する技術に資する基礎的知見の構築を行うために、粉末の電気特性を明らかにすることである。

表 1-2-3 に示すインコネル 718 合金粉末の電気抵抗測定を行った。Arcam の粉末はプラズマアトマイズ法で、その他の粉末はガスアトマイズ法で作製した粉末である。

表 1-2-3 評価した粉末の情報。

サンプル	インコネル718	インコネル718 Y-3855	インコネル718 Y-4104	インコネル718 F-9937 Arアトマイズ	インコネル718 F-9938 N2アトマイズ	
メーカー	Arcam	山陽特殊鋼	山陽特殊鋼	山陽特殊鋼	山陽特殊鋼	
Lot No	—	Y-3855	Y-4104	F-9937	F-9938	
SEM						
粒度 分布 (μm)	D10	36.4	42.4	44.4	50.6	49.0
	D50	51.7	57.3	60.5	70.5	68.3
	D90	77.6	84.2	92.8	113.2	108.9

図 1-2-16 に直流電気抵抗測定の結果を、図 1-2-17 に交流電気抵抗測定の結果の一部を示す。交流測定で、粉末表面の酸化物層のキャパシタ成分を計測できており、昇温に伴いキャパシタ成分が減少している様子が観察された。交流測定が、電子ビーム積層造形用の粉末特性評価で有効であることが判る。上記のインコネル 718 以外にも、PREP で作製したインコネル 718 や AlSi10Mg、A7075、Ti-6Al-4V、TiAl、酸化チタン、酸化クロムの電気特性も評価した。

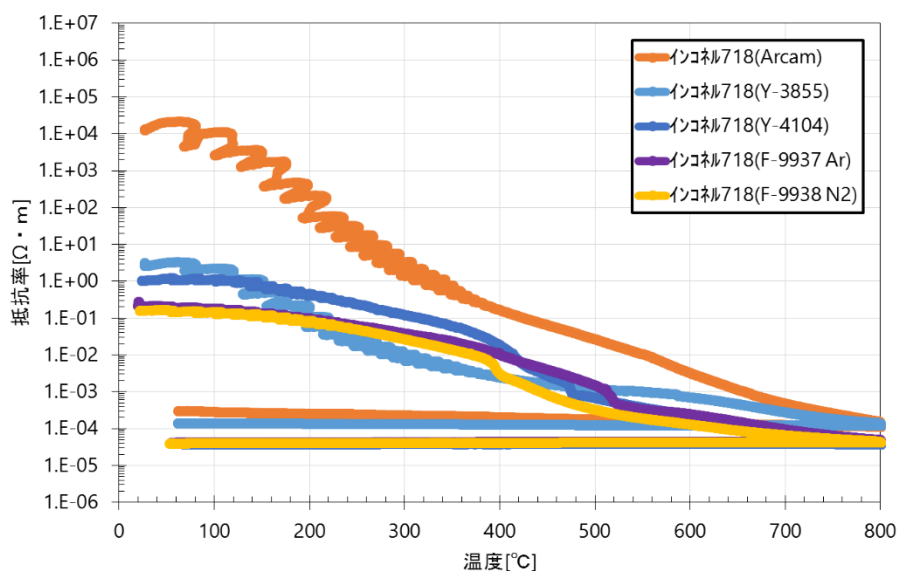
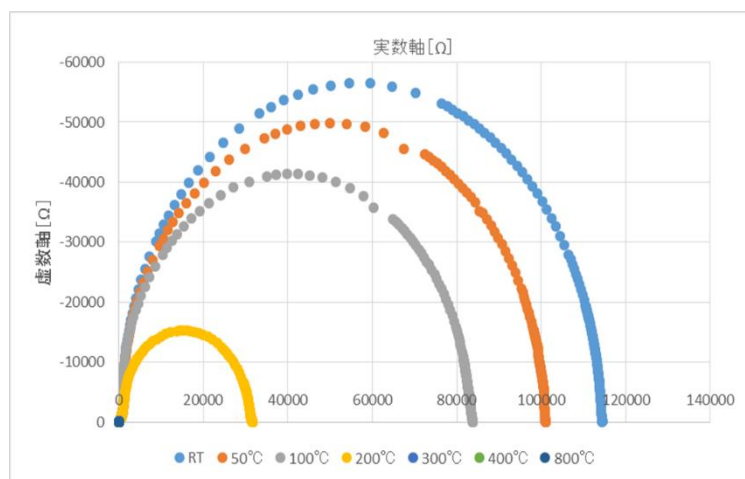
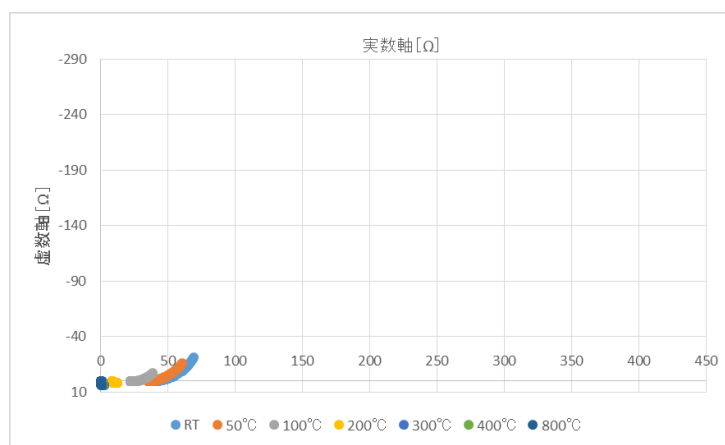


図 1-2-16 インコネル 718 合金 ガスアトマイズ粉末 粉末電気抵抗測定結果



インコネル 718 合金 プラズマアトマイズ粉末 (Arcam)



インコネル 718 合金 ガスアトマイズ粉末 F-9937 Ar (山陽特殊製鋼)

図 1-2-17 インコネル 718 合金 ガスアトマイズ粉末 交流インピーダンス測定結果

また、BM 処理の影響を評価するため、BM 処理前後の金属粉末の電気抵抗測定結果を図 1-2-18 と図 1-2-19 に示す。いずれの粉末もボールミル処理によって著しく電気抵抗が低下した様子が見られた。インコネル 718 のみ結果を示したが、Ti-6Al-4V や TiAl でも同様の結果が得られた。

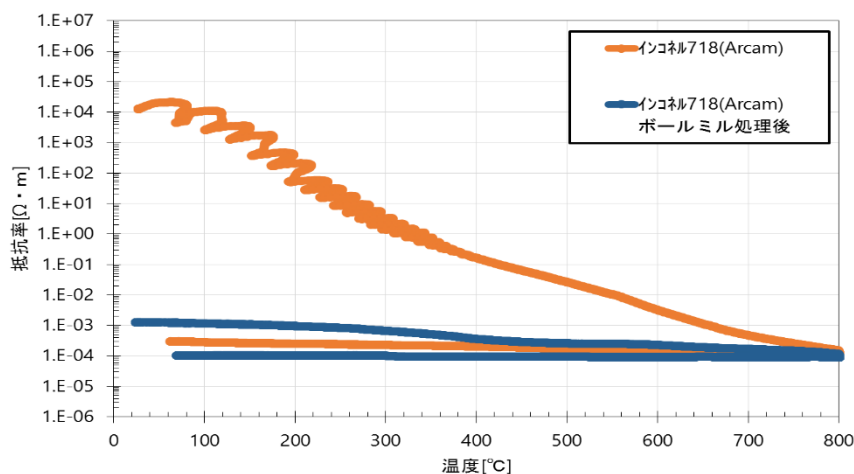
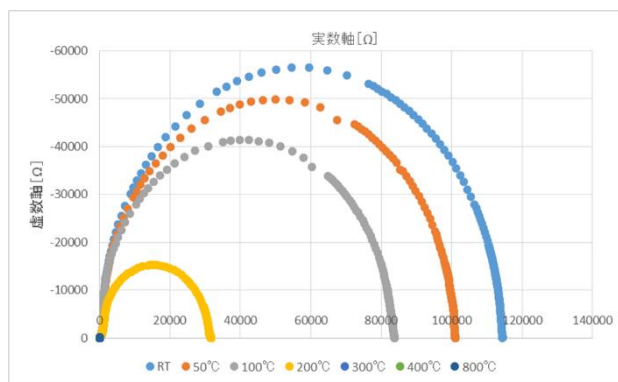
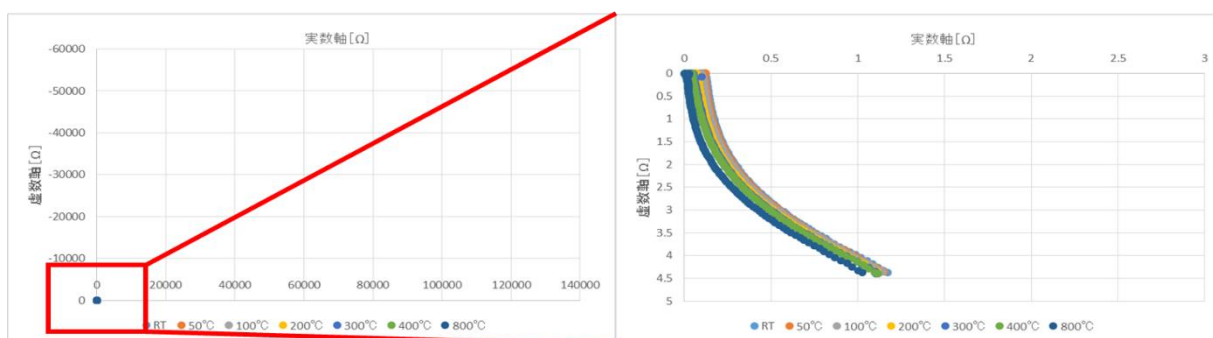


図 1-2-18 インコネル 718 粉末 ボールミル処理前後 粉末電気抵抗測定結果



インコネル 718 合金粉末 (Arcam) ボールミル処理前



インコネル 718 合金粉末 (Arcam) ボールミル処理後

図 1-2-19 インコネル 718 粉末 ボールミル処理前後 交流インピーダンス測定結果

1-2-4 材料開発

① 電子ビーム積層造形に適した A7075 ベース合金の開発

本項目では、現状積層造形が困難な材料である超々ジュラルミン合金 JIS-A7075 のレシピ開発及び材料開発について報告する。本材料は難溶接材料とも呼ばれ電子ビーム溶融による積層造形が困難であることがわかっている。本材料のように積層造形のターゲット産業である航空機産業で使用されるが、積層造形が困難な材料の開発を行うことにより電子ビーム積層造形の有用性を実証することを目的とする。A7075 の造形には、凝固収縮時の粒界での割れと低融点元素の蒸発の 2 つの課題がある。実際に JIS 規格の A7075 合金の造形を実施して、同様の課題があることを確認した結果を図 1-2-20 と表 1-2-4 に示す。

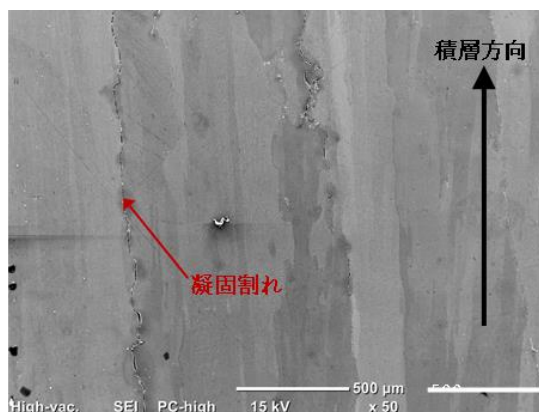
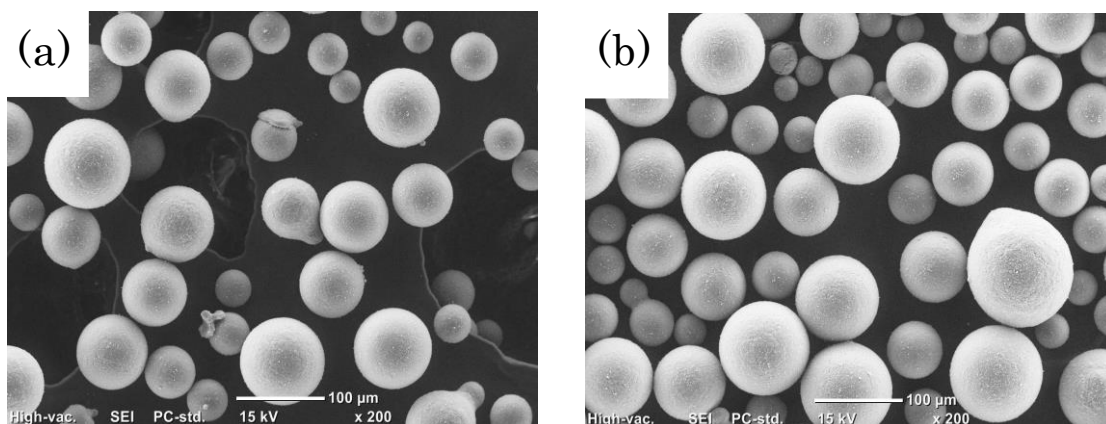


図 1-2-20 JIS 規格組成 A7075 造形時に確認した凝固割れ

表 1-2-4 亜鉛とマグネシウムの蒸発 (SEM-EDS)

元素	JIS H4140 [wt%]	造形前粉末断面 [wt%]	造形物断面 [wt%]
Mg	2.1 - 2.9	2.44	1.09
Zn	5.1 - 6.1	5.35	1.34

これらの課題を解決するために、開発組合員である東洋アルミニウム株式会社と東北大学仙台分室で A7075 ベースに亜鉛濃度、マグネシウム濃度を調整した粉末とチタン元素及びボロン元素を添加した 2 種類の粉末を開発製造した。これらの粉末の外形と粒度分布をそれぞれ図 1-2-21 と図 1-2-22 に示す。



(a) Mg,Zn 調整粉末

(B)Ti,B 添加粉末

図 1-2-21 A7075 ベース粉末 SEM 像

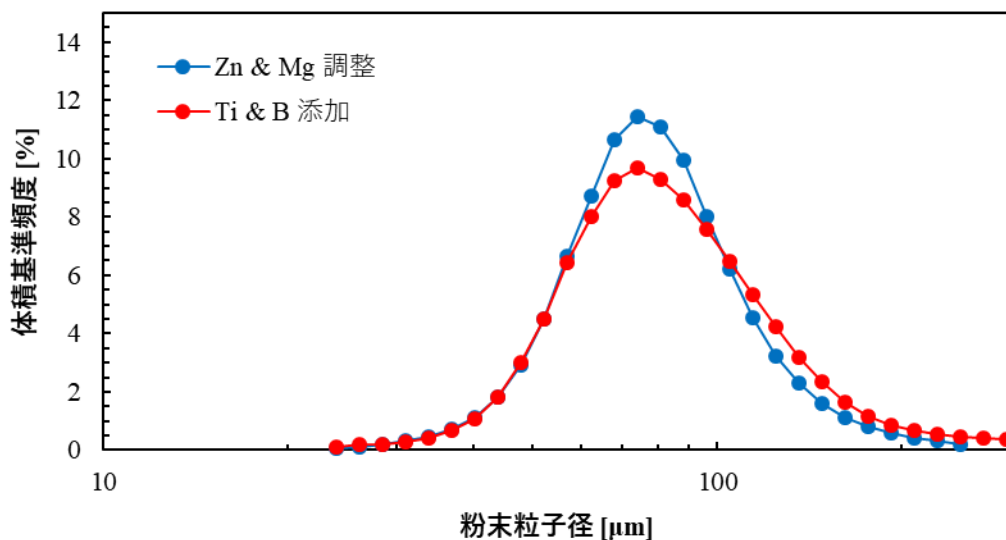


図 1-2-22 開発した A7075 粉末の粒度分布

これらの粉末を造形すると、熔融ビーム照射中に粉末飛散が激しく、正常な造形表面を得るには工夫が必要だと判った。実際にラスタースキャンで試験した造形物写真を図 1-2-23 に示す。全体的に最表面状態が悪く、良い造形物を得るのが難しいことが判る。



図 1-2-23 通常ラスタースキャンでの造形物

そこで、造形物とその周囲のみ局所的に追加でプレヒーティングを行った（以下、ローカルヒーティングと記す）。ローカルヒーティングを実施することで粉末飛散が減少し、その造形物表面形状の様子を図 1-2-24 に示す。また表面形状を 3 次元計測器で観察し、その際に得られた 3 次元画像を図 1-2-25 に示す。ローカルヒーティングを行うことで表面粗度が向上していることが判る。以上の結果からローカルヒーティングを行うことで表面粗度が向上することが判った。ローカルヒーティングを行うことで仮焼結が強固になり粉末飛散が減少し、その結果表面粗度が向上したと考えられる。

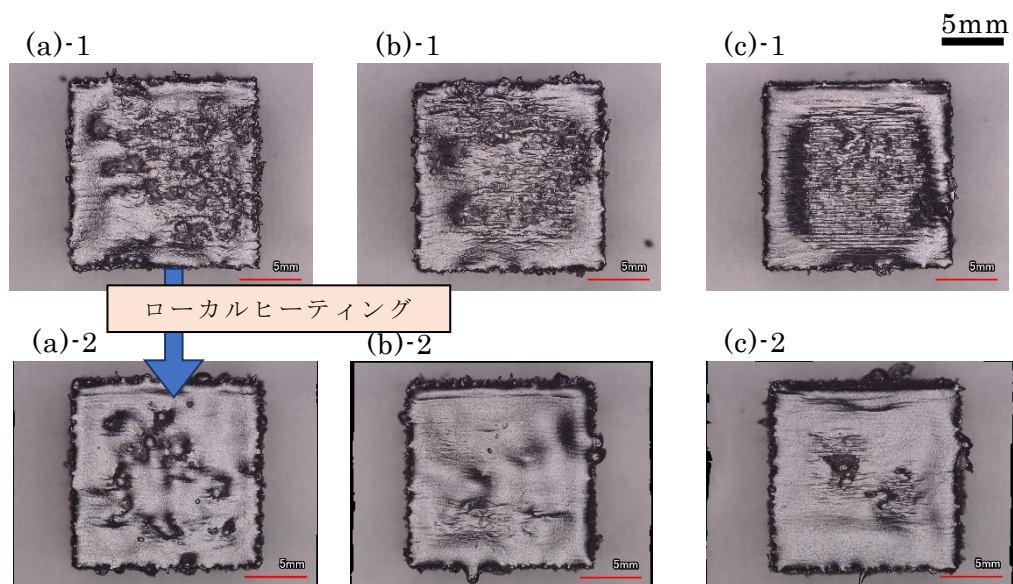


図 1-2-24 造形物最表面写真 ローカルヒーティングの効果

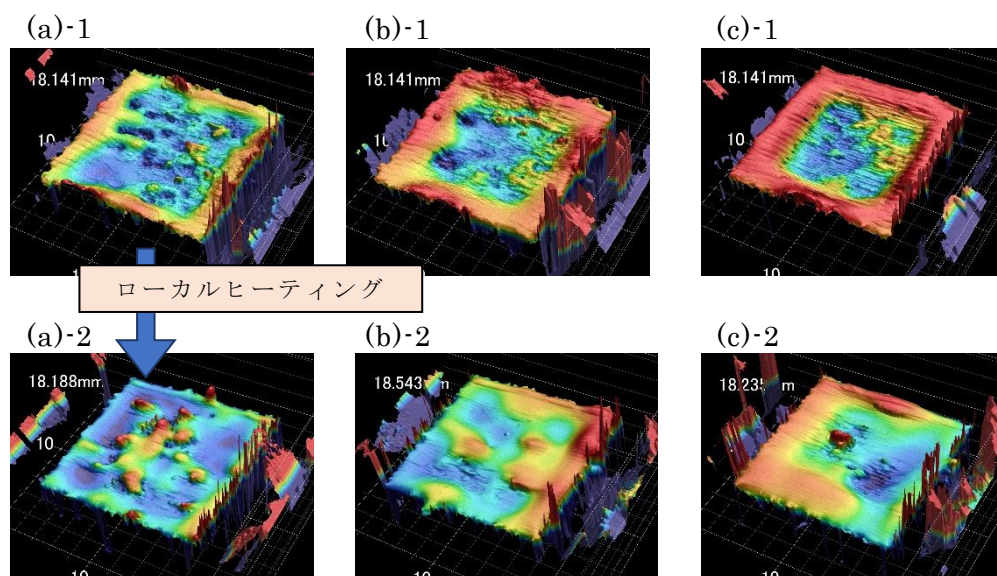


図 1-2-25 造形物 3次元計測器観察 ローカルヒーティングの効果

更なる改善のために、インターレースキャンでのビーム走査を試みた。3条件でラスタースキャンとインターレースキャンの比較を行った。図 1-2-26 に造形物の最表面画像を、図 1-2-27 に三次元計測機で表面形態を測定した結果を示す。インターレースキャンにすることで表面状態が改善される傾向にあるが、(c)-1 と (c)-2 に着目すると、インターレースキャンによって表面状態が悪化しているため、必ずしもインターレースキャンによって表面状態が改善したわけではなく、ビーム電流や走査速度などのビーム条件との組み合わせによって最適な条件が決まることが分かる。

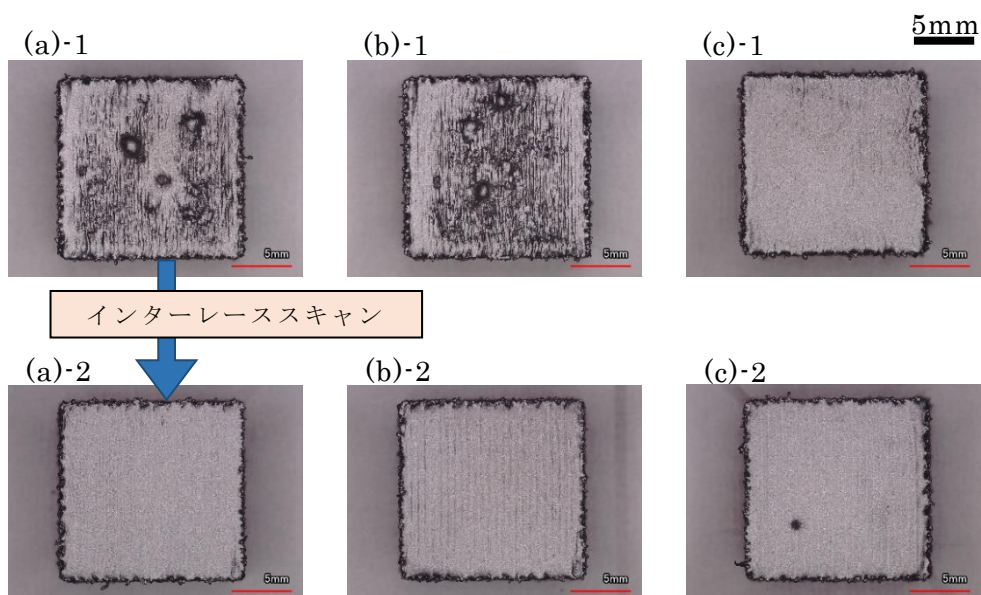


図 1-2-26 インターレーススキャンの効果 最表面写真

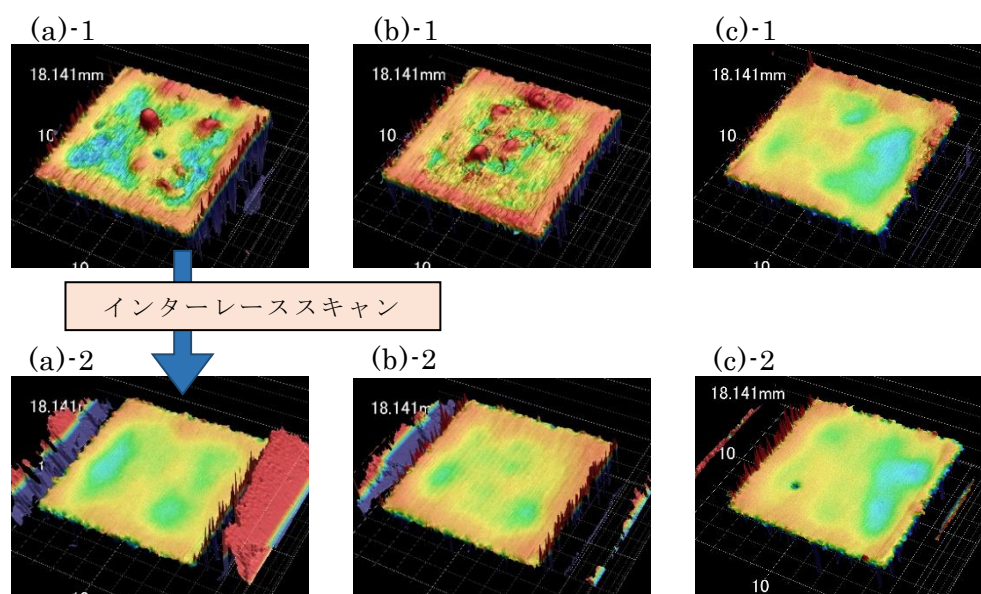


図 1-2-27 インターレーススキャンの効果 3D 計測器画像

造形前後の組成変化を明らかにするため、造形試験後に熱影響を受けた粉末の元素分析を実施した。造形試験は 350℃及び 430℃で実施した。造形エリアの各領域の亜鉛濃度分析結果を図 1-2-28 に示す。マグネシウム濃度分析結果を図 1-2-29 に示す。図中の HA は Heating Area の略称であり、予備加熱領域を示している。350℃造形試験ではヒーティングエリア中央でも亜鉛の蒸発は抑制できていたが、430℃造形試験ではヒーティングエリア中央だけでなく、ヒーティングエリアの端でも亜鉛の蒸発が確認された。マグネシウムについては 350℃造形試験でも 430℃造形試験でもパウダベッド粉末からの蒸発は見られなかった。

また、410℃で造形した造形物の亜鉛濃度分析結果を図 1-2-30 に、マグネシウム濃度分析結果を図 1-2-31 に示す。グラフの横軸は単位体積当たり投入したエネルギーである。亜鉛とマグネシウムともに蒸発による濃度減少が顕著であり、特に亜鉛濃度は JIS 規格を下回っていたため、更なる調整が必要である。

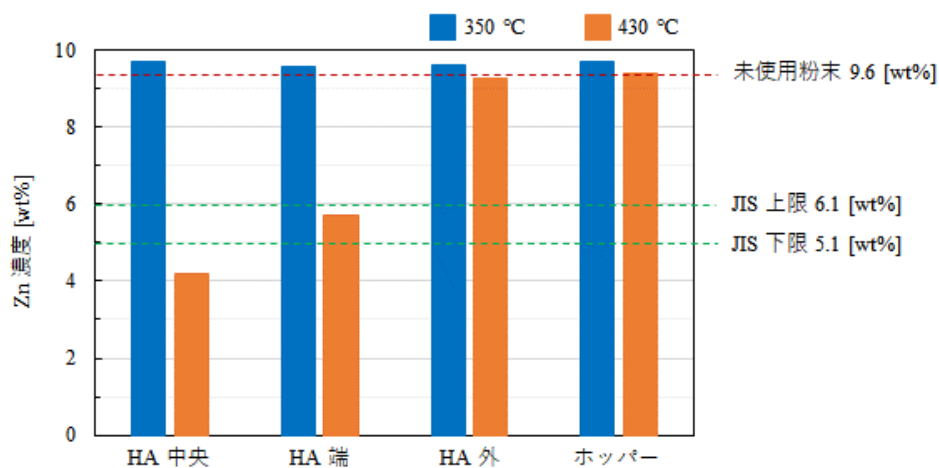


図 1-2-28 亜鉛濃度分析結果

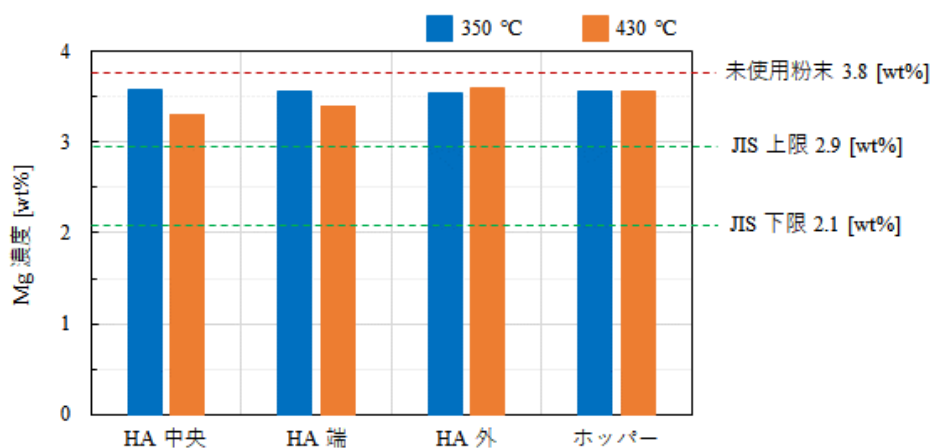


図 1-2-29 マグネシウム濃度分析結果

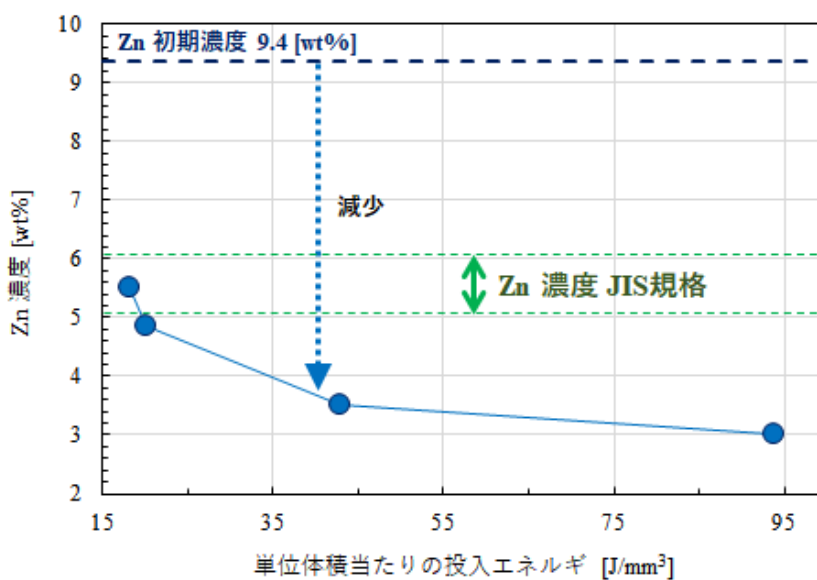


図 1-2-30 造形物の元素分析 Zn 濃度 (造形温度 410 °C)

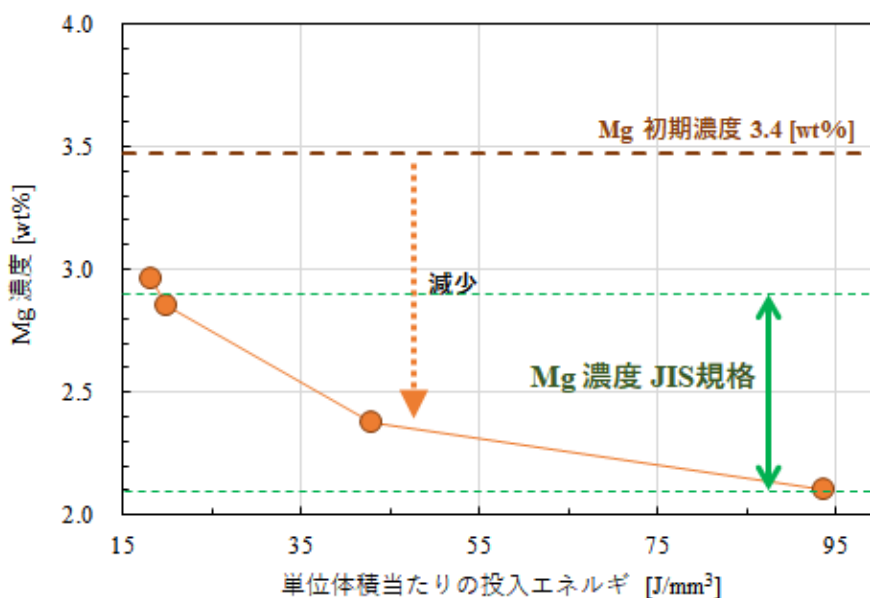
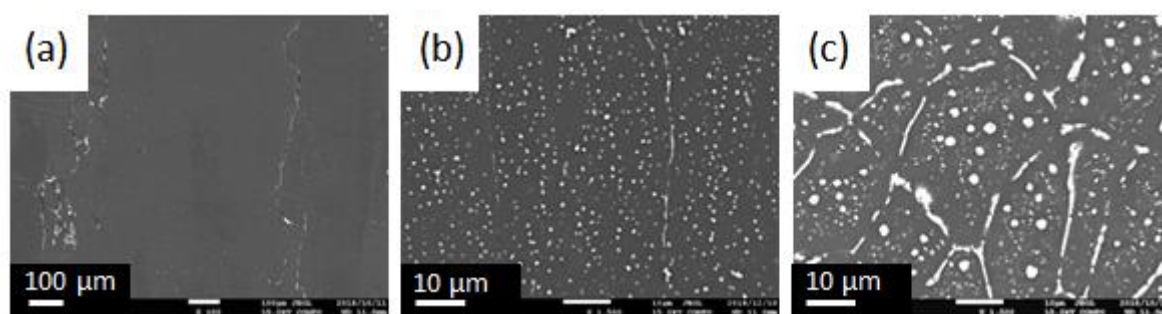


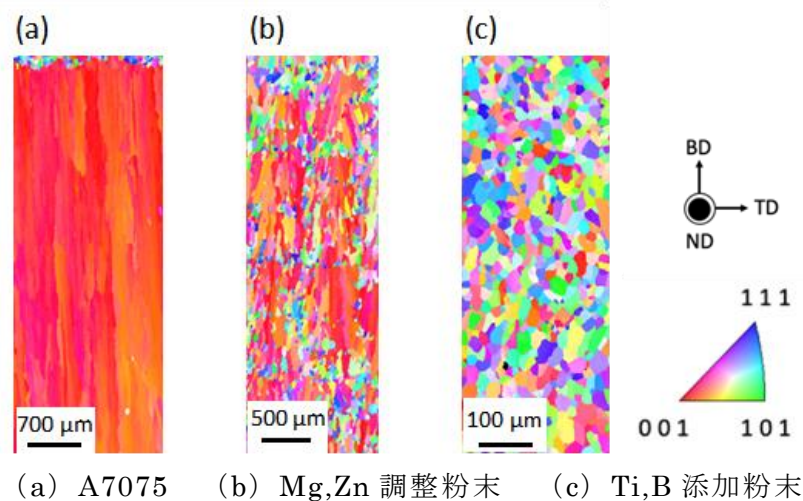
図 1-2-31 造形物の元素分析 Mg 濃度 (造形温度 410°C)

また、凝固収縮する際に生じる結晶粒界での割れ（ホットクラック）も A7075 造形での課題であるため、微細化剤である TiB_2 添加によるホットクラックへの効果も確かめた。造形した造形物断面の走査型電子顕微鏡による反射電子画像観察の結果を図 1-2-32 に示す。A7075 組成の造形物は柱状晶、A7075 の Zn 濃度と Mg 濃度を調整した組成も柱状晶、A7075 の Zn 濃度と Mg 濃度を調整しさらに TiB_2 を添加した組成では等軸晶が観察された。さらに図 1-2-33 に SEM-EBSD 観察の結果を示す。EBSD 観察でも、反射電子像同様に A7075 組成と A7075 の Zn 濃度と Mg 濃度を調整した組成では柱状晶、A7075 の Zn 濃度と Mg 濃度を調整しさらに TiB_2 を添加した組成では等軸晶が観察された。また平均結晶粒径は A7075 組成では測定不能、Zn 濃度 Mg 濃度調整組成では $99.4 \mu\text{m}$ 、 TiB_2 添加組成では $25.7 \mu\text{m}$ であった。 TiB_2 の添加により、ホットクラックの発生を抑制できることが判った。



(a) A7075 (b) Mg,Zn 調整粉末 (c) Ti,B 添加粉末

図 1-2-32 造形物の反射電子像



(a) A7075 (b) Mg,Zn 調整粉末 (c) Ti,B 添加粉末

図 1-2-33 SEM-EBSD 像

② 電子ビームオシレーションと凝固組織の関係

レーザービーム溶接分野では古くからオシレーションによる溶接手法が報告されており、6,000 番系アルミニウム合金のレーザーオシレーション溶接でホットクラックを抑制できたことを報告している。本項目では、電子ビームにおいて、オシレーションによるホットクラック抑制の可能性を検証した。オシレーションビームの概要を図 1-2-34 に示す。Scan Direction を Y 方向とする。X 方向にのみ揺動させたビームを AC-X とする。Y 方向にのみ揺動させたビームを AC-Y とする。X 方向と Y 方向に揺動させ円を描くようにしたビームを AC-C とする。それぞれのオシレーションパターンについてビーム走査速度、揺動周波数、振幅を任意に調整しビーム照射をすることが可能である。また式 (1) にオシレーションビームのビーム速度を示す。ビームオシレーションをしているのでビーム速度が一定ではない。ビーム速度例を図 1-2-35 に示す。図に示すようにオシレーション無しの走査速度と比較して速く動いたり、遅く動いたりする。また図示はしていないが AC-Y と AC-C では設定値次第で走査方向と逆方向にビームが動く。

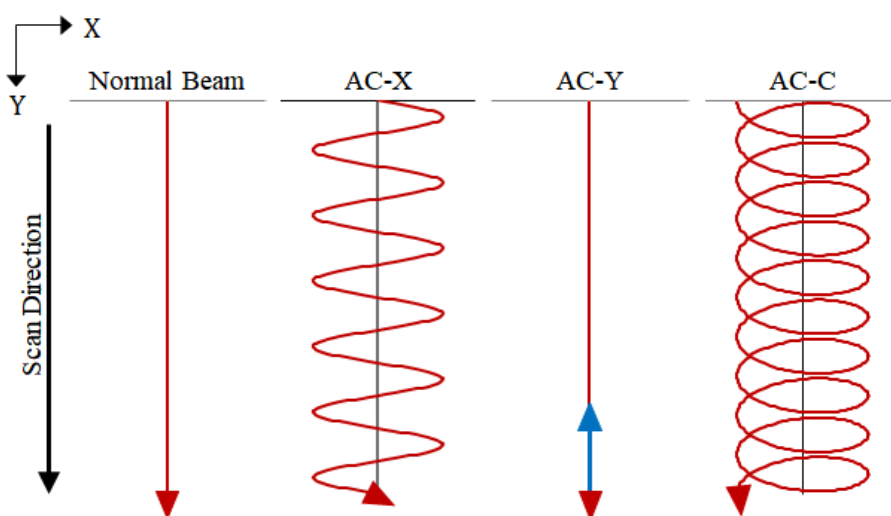


図 1-2-34 オシレーション概要

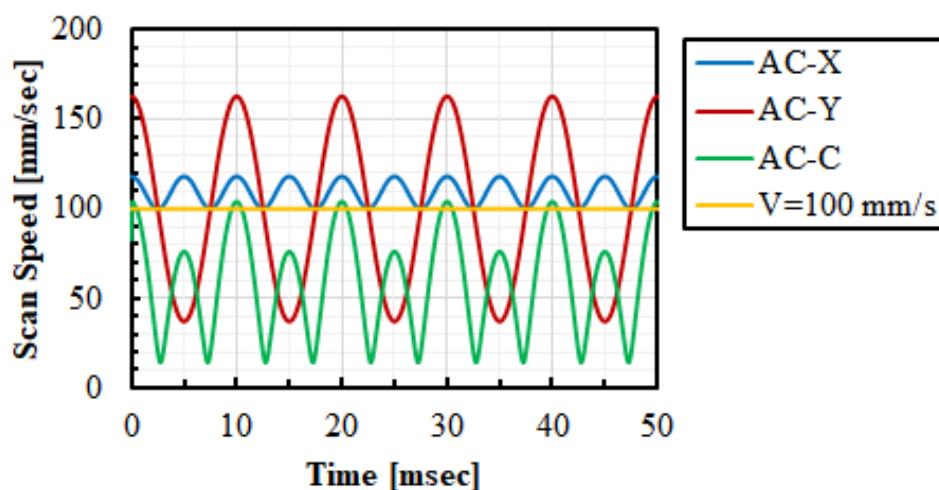
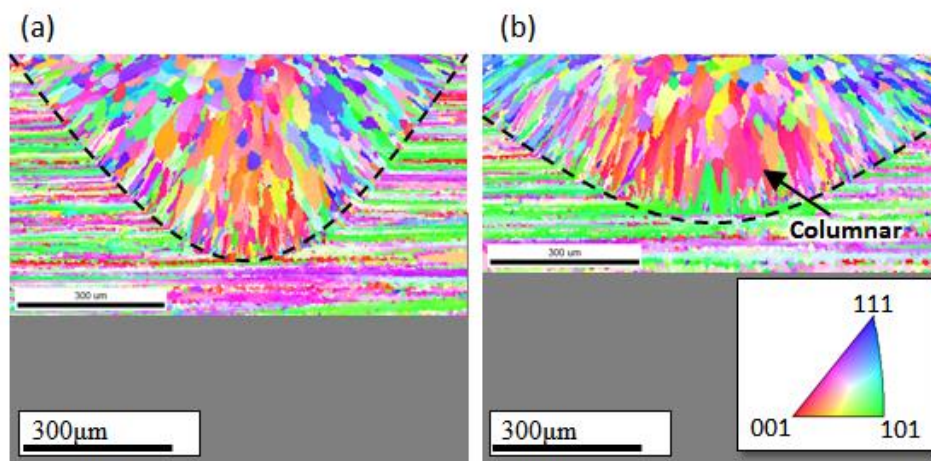


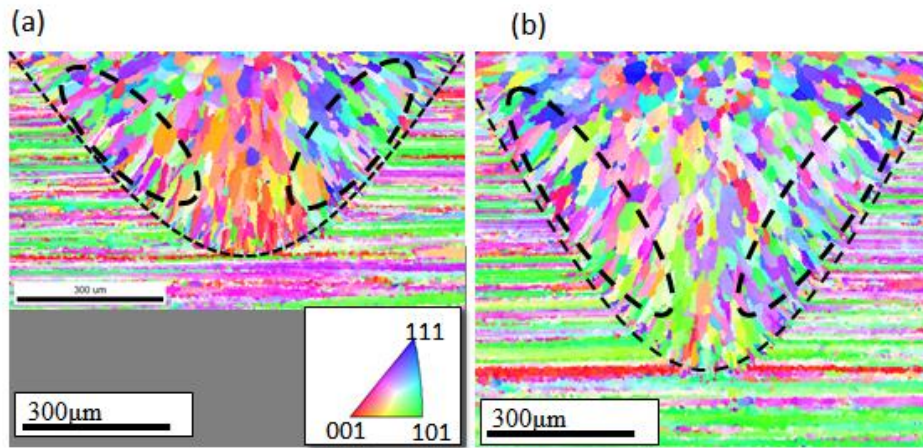
図 1-2-35 オシレーション種類とビーム速度の例

オシレーション試験は A7075 (T6) へのシングルビード照射試験として実施した。シングルビードの断面組織を SEM-EBSD で観察した。AC-X、AC-Y、AC-C すべてのオシレーションにおいてビーム走査速度とビーム出力は同じ値を用いた。AC-X、AC-Y、AC-C オシレーションの IPF マップをそれぞれ図 1-2-36 (b)、図 1-2-37 (b)、図 1-2-38 (b) に示す。各図の (a) はオシレーション無しの IPF マップである。オシレーションの有無でメルトプール形状と組織に違いがあることが判る。特に、AC-C オシレーションでは等軸晶に近い組織が得られた。オシレーションをすることでメルトプール内の対流が強まり (攪拌効果) 等軸晶に近づいたと考えられる。



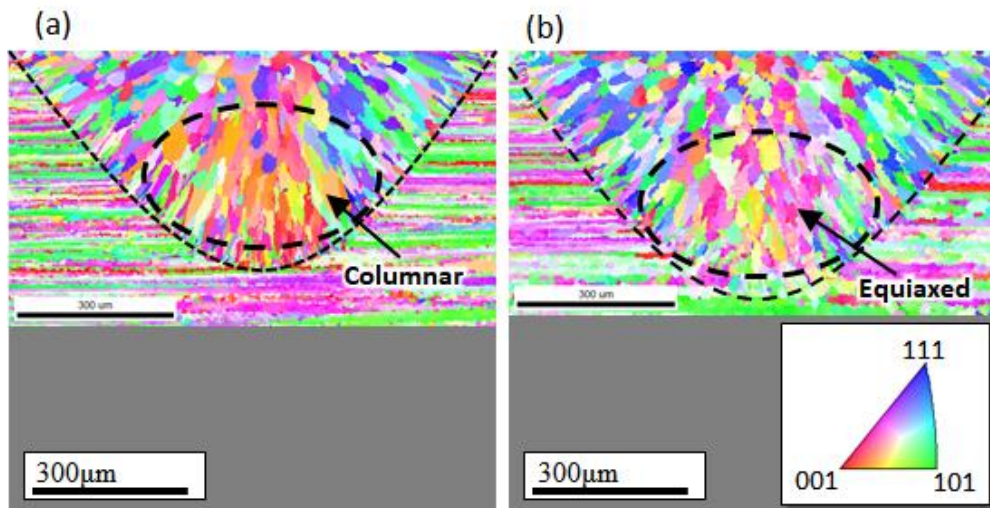
(a) オシレーション無し (b) AC-X オシレーション

図 1-2-36 AC-X オシレーション効果



(a) オシレーション無し (b) AC-Y オシレーション

図 1-2-37 AC-Y オシレーション効果



(a) オシレーション無し (b) AC-C オシレーション

図 1-2-38 AC-C オシレーション効果

1-2-5 粉末熱伝導率測定 (室温近傍)

本項目では、造形エリアの温度分布ならびに熱履歴に影響を及ぼすパウダベッドの熱伝導率を明らかにするために、粉末の熱伝導率ならびに電子ビーム積層造形装置で作製した仮焼結体の熱伝導を測定した。

① 室温近傍のインコネル718粉末およびその仮焼結体の熱伝導率

室温近傍の熱伝導率は定常法で測定した。図1-2-39に山陽特殊製鋼社製インコネル718粉末仮焼結体の熱伝導率測定結果を示す。粉末の製法による違いが見られ、仮焼結体の熱伝導率は粉末のそれよりも小さい値を示すことが判った。

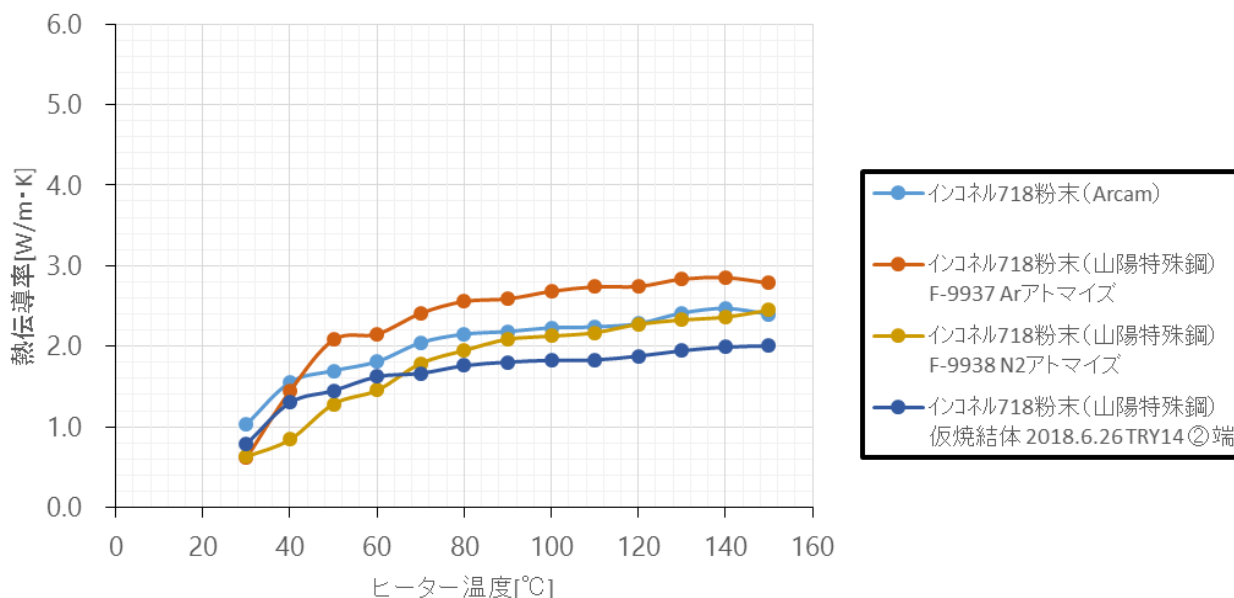


図 1-2-39 インコネル 718 粉末 仮焼結体 熱伝導率測定結果

② 高温でのインコネル718粉末の熱伝導率

実際の電子ビーム積層造形によるインコネル718の造形では、パウダベッドを1,000℃程度の温度まで加熱して造形が行われるため、高温での熱伝導率の値が重要である。そこで各製法の粉末の高温での熱伝導率測定を実施した。測定には熱線法を用いた。

図1-2-40にインコネル718粉末の熱線法による高温での熱伝導率測定結果を示す。室温～中低温側(600℃)では熱伝導率の大きな変化は見られなかったが、700℃以上の温度でArcam社製プラズマアトマイズ粉末と山陽特殊製鋼社製Ar・N2アトマイズ粉末それぞれ熱伝導率特性が異なった挙動で上昇している様子が見られた。700℃以上の温度域での熱伝導率特性の違いが造形性に影響を及ぼすと考えられる。ガスアトマイズ粉末の熱伝導率が高いのは、サテライトを多く含んでいるため焼結が進みやすいためだと考えられる。200℃以下での熱伝導率の測定値が図1-2-39と異なっているが、測定に用いた粉末の量に違いがあり、また、測定方法が異なるためである。

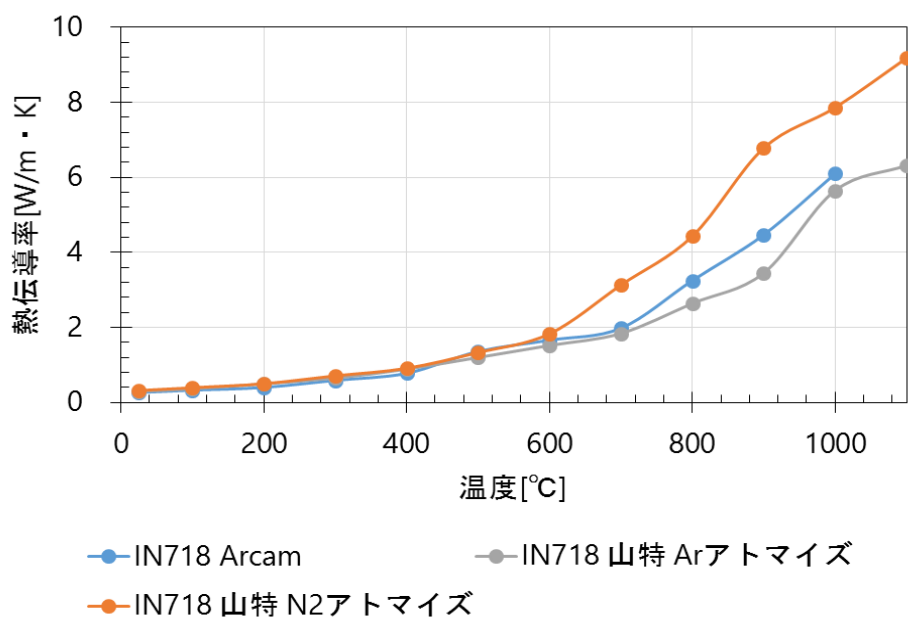


図 1-2-40 インコネル 718 粉末 高温での熱伝導率測定結果

1-3 伝熱溶融・溶融凝固シミュレーション技術開発

本項目では、造形プロセスの素過程であるパウダベッドの形成やパウダベッドのヒーティング、電子ビーム走査によるパウダベッドの溶融・凝固、凝固組織形成を離散要素(DEM)法、伝熱計算、数値流体力学(CFD)計算、セルラーオートマトン(CA)法などを用いてシミュレーションする技術を開発することを目的とした。

1-3-1 メルトプールのシミュレーション

① メルトプール形成・凝固挙動に及ぼす粉末種類の影響

図 1-3-1 にパウダベッド形成挙動を DEM でシミュレーションした結果を示す。図中の ϕ はパウダベッドのポロシティ(粉末床形成領域のうち、粉末で占有されていない領域の体積分率)を表している。PREP 粉末の方がガスアトマイズ(GA)粉末よりもパッキング密度の高いパウダベッドが形成できることが分かった。

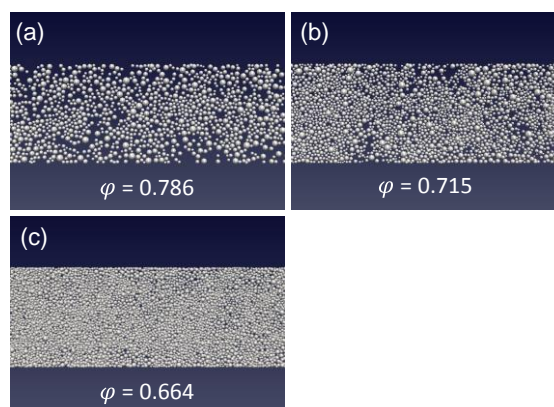


図 1-3-1 DEM シミュレーションで形成したパウダベッド。(a) GA 粉末、(b)GA 粉末 : PREP 粉末 = 1:1、(c) PREP 粉末

こうして得られた粉末床上に電子ビームを照射した際に形成されるシングルビードの CFD シミュレーション結果を図 1-3-2 に示す。この DEM シミュレーションと CFD シミュレーションから、粉末の種類によって粉末床のポロシティが変化し、最適な造形条件も変化することが示唆された。

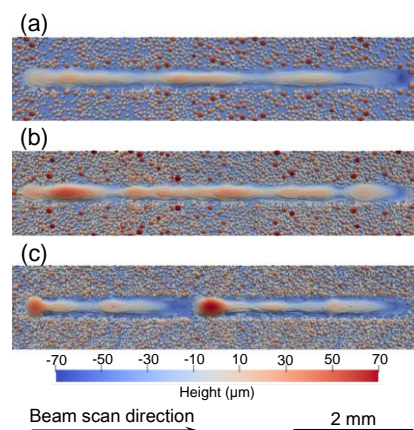


図 1-3-2 DEM シミュレーションで形成した粉末床上に電子ビームを照射した際に形成されるシングルビードの CFD シミュレーション。(a) GA 粉末、(b)GA 粉末 : PREP 粉末 = 1:1、(c) PREP 粉末。積層方向の高さをカラーで表示しており、赤い領域が高く、青い領域が低い

② 粉末床の有効熱伝導率のシミュレーション

パウダベッド方式の積層造形プロセスの場合、造形物は粉末床に埋もれているため、粉末床の有効熱伝導率も重要なパラメータである。DEM で充填した粉末層を GA 粉末と PREP 粉末で準備し、粉末層の有効熱伝導率を、シミュレーションを用いて算出した。実際のシミュレーションによって、定常状態に到達した際の温度分布を図 1-3-3 に示す。図中にそれぞれの粉末層のポロシティと有効熱伝導率を示している。PREP 粉末層の方が GA 粉末層よりもポロシティが小さく、有効熱伝導率が小さいという結果が得られた。これは、ポロシティの小さい PREP 粉末層の方が GA 粉末層よりも、粉末の表面積が大きく、粉末表面からの放射が多くなるため、熱抵抗が大きくなったためだと考えられる。

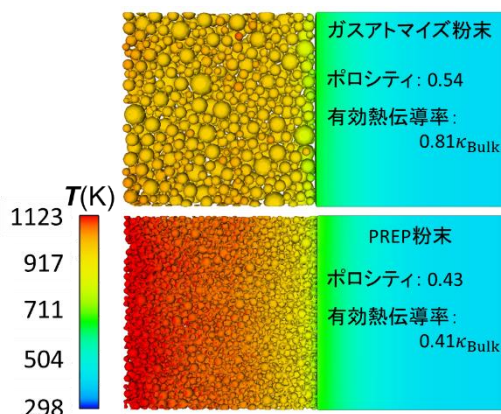


図 1-3-3 粉末層の熱伝導シミュレーションで定常状態に達した時の温度分布、及びそれぞれの粉末層のポロシティと有効熱伝導率

算出したそれぞれの粉末層の有効熱伝導率を用いて、粉末床の予備加熱のシミュレーションを実施した結果を図 1-3-4 に示す。図から分かるとおり有効熱伝導率の小さい PREP 粉末の方が GA 粉末よりも高温になっている領域が広がっており、同じ条件で予備加熱を行うと PREP 粉末床の方が焼結しやすいことを示唆している。つまり、GA 粉末と PREP 粉末では最適な予備加熱条件が異なることを示唆している。

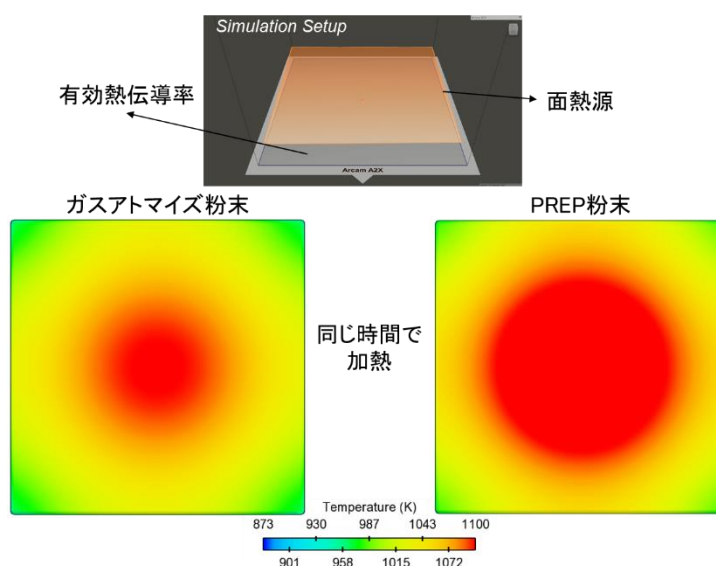


図 1-3-4 パウダベッドの予備加熱のシミュレーション

また、実際の GA 粉末は細長い棒状の粉末やサテライトを伴う粉末を多く含んでいるため、実際に近い形状の粉末モデルを作成し、DEM シミュレーションにより、GA 粉末のパウダベッド形成挙動をシミュレーションした結果を図 1-3-5 に示す。球状モデルを用いて得られる粉末の配置よりも、図 1-3-5 のシミュレーションで得られた粉末の配置が実際の GA 粉末のパウダベッドを反映していると考えられ、この粉末床モデル上に電子ビームを走らせることで、より現実に近い GA 粉末の熔融・凝固挙動をシミュレーションできると考えられる。

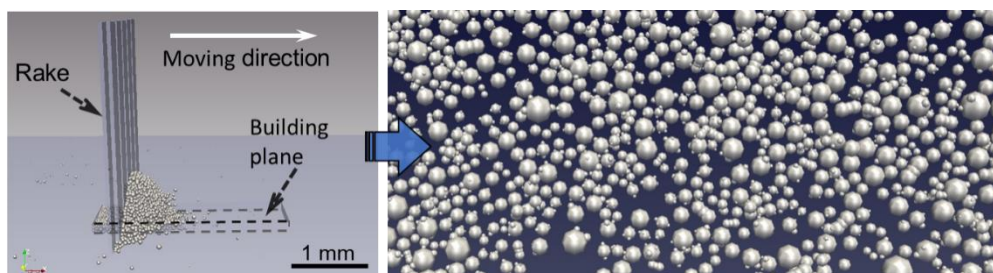


図 1-3-5 観察されたガスアトマイズ粉末の形態を再現した棒状粉末モデルとサテライトを伴う粉末モデルを用いたパウダベッド形成シミュレーション

③ メルトプールサイズとビーム照射条件の相関

CFD 計算で得られたインコネル 718 合金に電子ビームを照射した際に形成されるメルトプール幅とメルトプール深さをビーム出力と走査速度の関数としてプロットしたグラフを図 1-3-6 に示す。図 1-3-6 (a1), (b1), (c1)が計算したデータをプロットしたものであり、図 1-3-6(a2), (b2), (c2)はビーム出力、走査速度、メルトプール幅、メルトプール深さをそれぞれの最大値で割って規格化したグラフである。

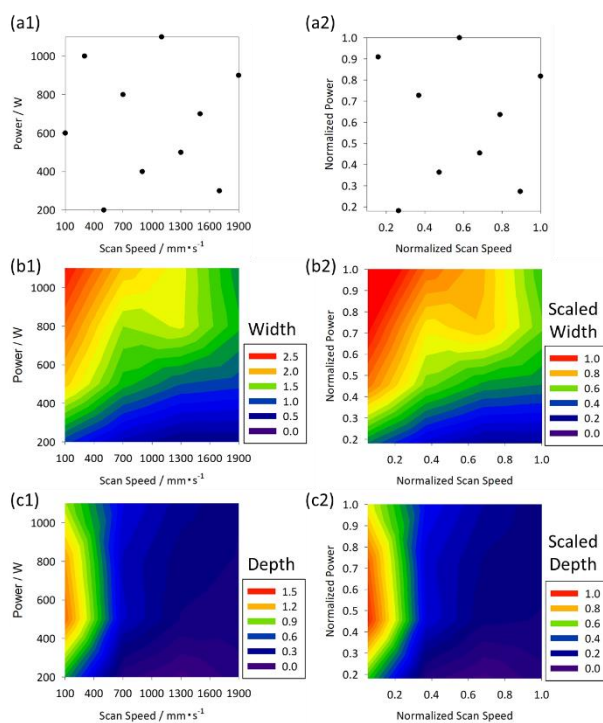


図 1-3-6 インコネル 718 合金バルク板材上に種々の照射条件で電子ビームを照射した際に形成されるシングルビードの CFD シミュレーションから算出したメルトプール幅とメルトプール深さの(a1, a2)データ点と(b1, b2, c1, c2)等高線プロット

この規格化したデータを用いたベイズ統計モデリングによって、メルトプール幅とメルトプール深さをビーム出力と走査速度から計算する回帰モデルの検証を行った。2つの回帰モデルで検証を行い、以下のモデルで回帰したものが自裁の計算結果と良い一致を示した。

$$\mu[n] = a + b \ln(P[n]) + c \ln(V[n])$$

$$Y[n] \sim \text{Normal}(\mu[n], \sigma)$$

図 1-3-7 にこのモデルで予測された値を縦軸に CFD から算出した値を横軸にプロットしたグラフ (図 1-3-7(a1, a2))、およびメルトプール幅とメルトプール深さの予測値の等高線プロット (図 1-3-7 (b1, b2)) を示す。図 1-3-7 (b1, b2) の等高線プロットは、比較的良好に CFD の等高線プロットを再現できている。

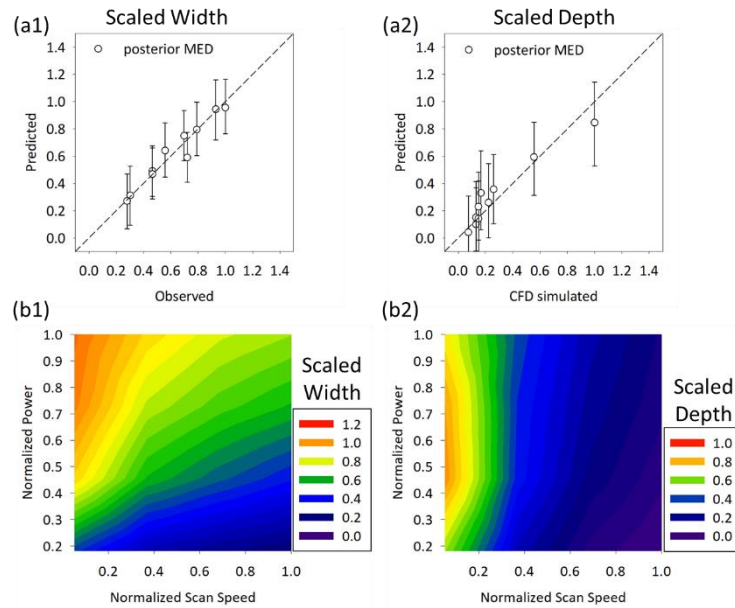


図 1-3-7 (a1, a2) モデル 2 の予測値と CFD 算出値の比較、(b1, b2) モデル 2 の予測値の等高線プロット。(a1, b1)がメルトプール幅、(a2, b2)がメルトプール深さに対するプロット。事後分布の 50%点を予測値としてプロットしており、(a1, a2)のエラーバーは 95%区間を表している

1-3-2 凝固組織形成シミュレーション

CA法を用いて、Ti合金系の凝固マップを作成した。代表的なTi合金であるTi-6Al-4V (Ti64)合金は、不純物としてOやFeを含み、それらの不純物濃度が材料特性に影響を及ぼすことが知られている。そこで、不純物であるOやFeが凝固マップに及ぼす影響を評価した。図1-3-8にTi64合金、及び、それに不純物としてOを0.075、0.190mass%含む合金、不純物としてFeを0.200、0.300mass%含む合金の凝固マップを示す。図1-3-8 (a)から、O濃度が増えるに伴いCET曲線が図の左側に、つまり凝固速度が小さい方向にシフトすることが分かる。O濃度の増加に伴い、等軸晶が形成されやすい傾向にあることが分かる。図1-3-8 (b)からFeもOと同様の効果があり、O濃度の増加に伴いCET曲線が低凝固速度側にシフトすることが分かる。OとFeと比較すると、Oの方がCET曲線の変化が大きい。

また、結果は示さないが、TiAl基金属間化合物の凝固マップも同様の手法で算出した。

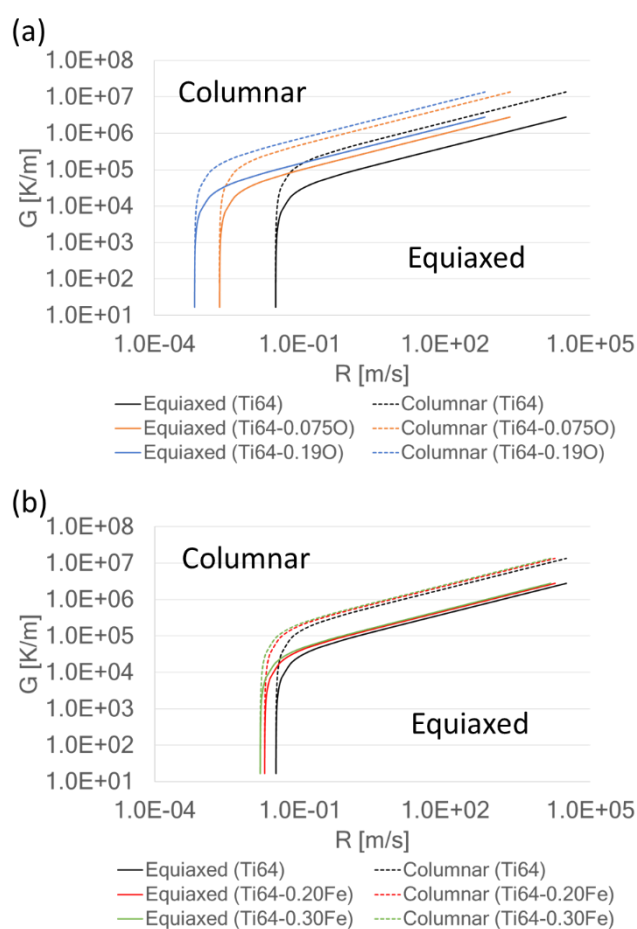


図 1-3-8 Ti-6Al-4V 合金の凝固マップと不純物の影響。(a) O の影響と (b) Fe の影響

1-4 加工、材料、評価データベース構築

1-4-1 開発機の造形物評価

積層造形のプロセス最適化は非常に時間とコストを要する工程であるため、積層造形装置の普及のためには、これまでの知見を蓄えデータベース化することが重要である。

そこで本項目では、データベース化した材料のうち、鉄系材料に関して記載する。

① データベース項目

加工・材料・評価の格納予定データの項目を表 1-4-1 に示す。装置情報、材料情報、造形物形状、制御パラメータ、造形物の評価情報を三次元積層造形データベース（以下データベースとする）に格納する。

表 1-4-1 データベースに格納するデータ

分類	項目	内容
装置情報	造形装置	造形に使用した装置
	ビルドタンク	ビルドタンク情報
	ベースプレート	ベースプレートサイズや材質
造形物情報	造形物形状	形状データ
材料情報	合金名	合金名
	粒度分布特性	粒度分布データ
	組成データ	組成分析結果
制御パラメータ	造形開始温度	造形開始時温度
	平均電流値	造形加工平均電流値
	ビーム電流値	予備加熱時のビーム電流値
	ビーム走査速度	予備加熱時のビーム走査速度
	ビームスポット径	電子ビームスポット径
	ラインオフセット	熔融時のビーム走査間隔
	積層厚さ	Z ステージ降下
評価情報	密度評価	アルキメデス法評価
	表面粗度評価	3次元計測器評価
	引張り強さ	JIS 試験法による
	疲労試験	JIS 試験法による
	プロセスウィンド	造形可能なパラメータ範囲

② 鉄系材料のデータベース

造形に用いた装置は要素技術研究開発機である。密度評価や表面粗度評価用造形物は 15mm×15mm×20mm のサイズで造形をした。各造形物で任意にパラメータを設定し 1 度に 9 個の直方体を造形、合計 2 回造形し、18 個の造形物を得ている。さらには機械学習法で条件を最適化して最適条件サンプルを 9 個造形した。引張り試験や回転曲げ疲労試験用は 15mm×15mm×100mm の角柱を造形し、そこから JIS 規格の試験片を削り出し評価をしている。造形条件は機械学習法で見出した最適条件である。

原材料の SEM 写真を図 1-4-1 に示す。原料粉末は GA 法で製造し 45~125 μ m に

(添付資料3) 成果報告書
 分級し使用した。GA 法での製造なのでサテライト粉末がやや目立つのが判る。原料粉末の粒度分布を図 1-4-2 に示す。原料粉末の流動性と嵩密度を表 1-4-2 に示す。流動性は JIS-Z-2502、嵩密度は JIS-Z-2504 で評価している。

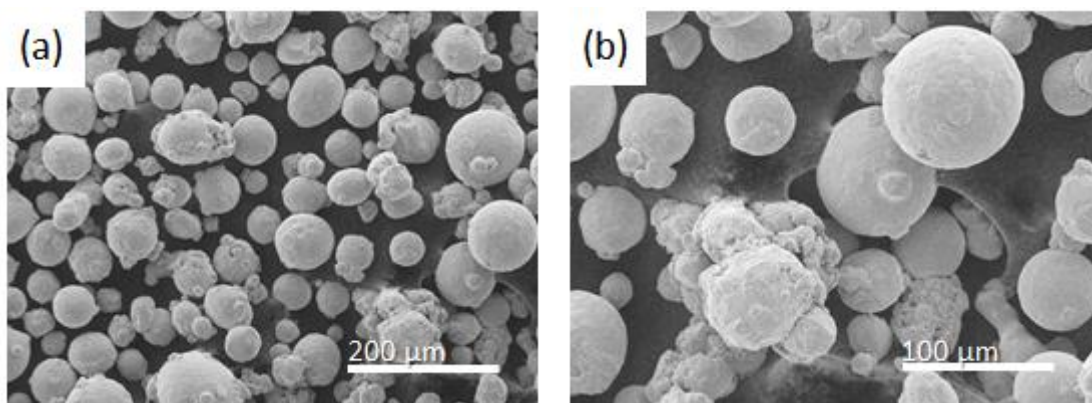


図 1-4-1 原料粉末 SEM 写真 (a) 100 倍 (b) 200 倍

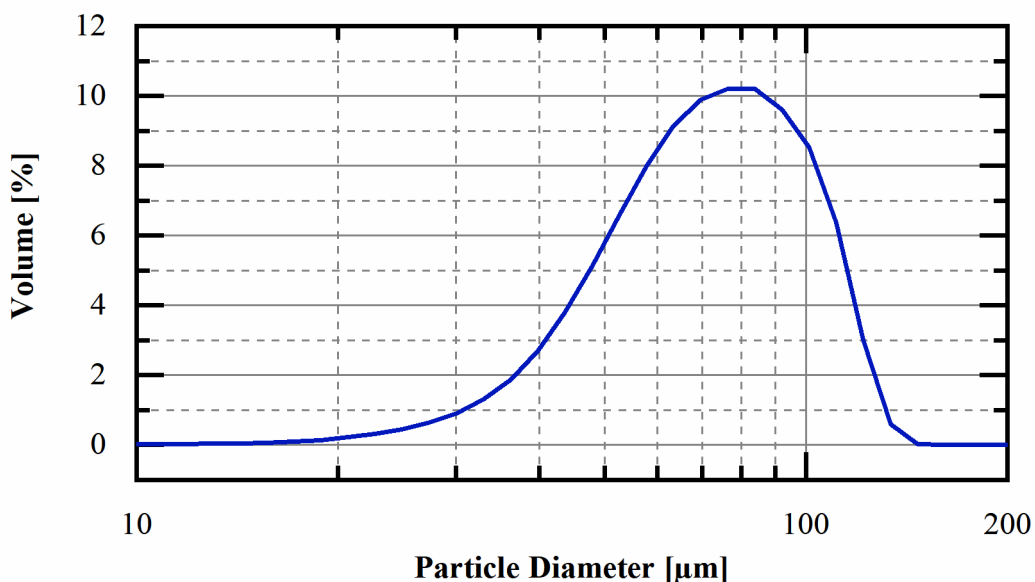


図 1-4-2 原料粉末粒度分布スペクトル

表 1-4-2 原材料流動性と嵩密度

流動性 / $50\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$	嵩密度 / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$
16.2	4.12

流動性： JIS Z 2502 試験

嵩密度： JIS Z 2504 試験

機械学習法で計算したプロセスウィンドを図 1-4-3 に示す。図中の青く濃い領域が造形欠陥の入りにくいロバストな造形条件である。

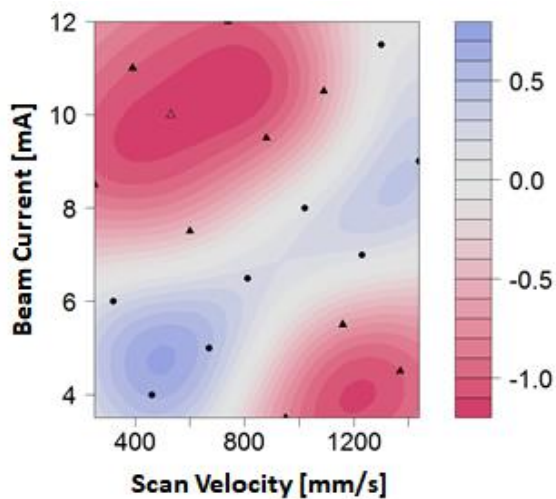


図 1-4-3 機械学習で計算したプロセスウィンド。

3D 形状測定器で造形物の最表面粗度を測定した。その一例として図 1-4-4 に表面写真を、図 1-4-5 に 3D 計測器画像を示す。さらに、最適条件で作製した造形物の表面写真と 3D 計測器画像を図 1-4-6 に示す。

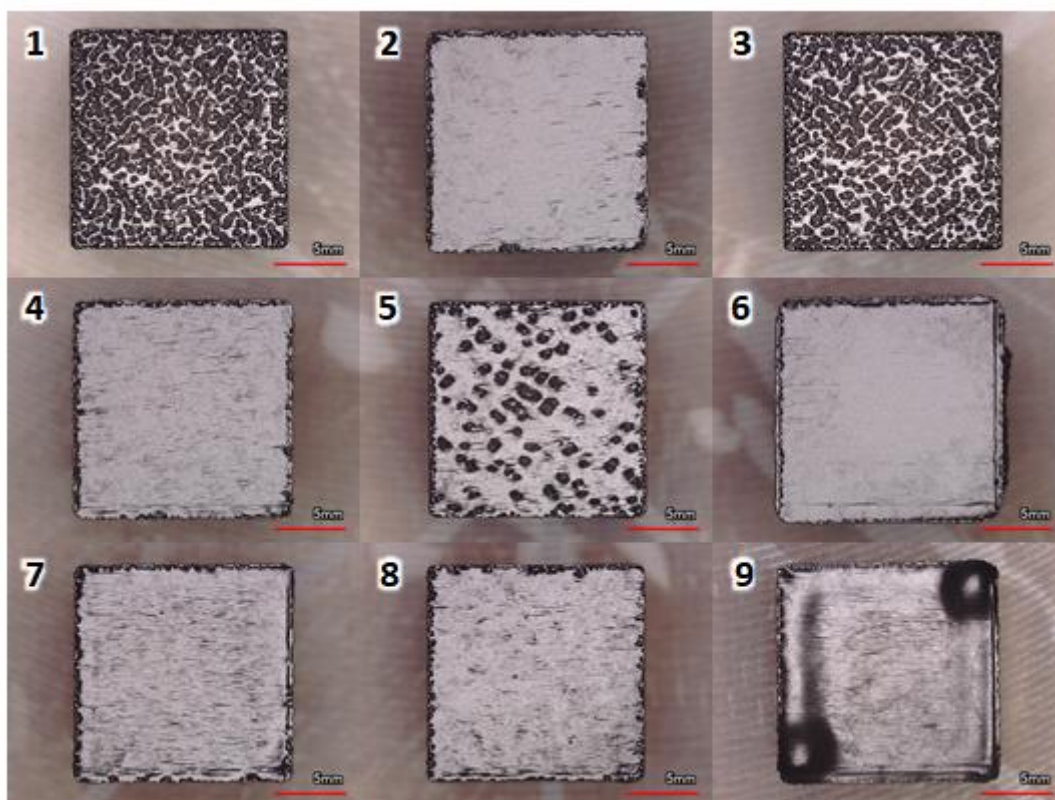


図 1-4-4 表面写真の一例

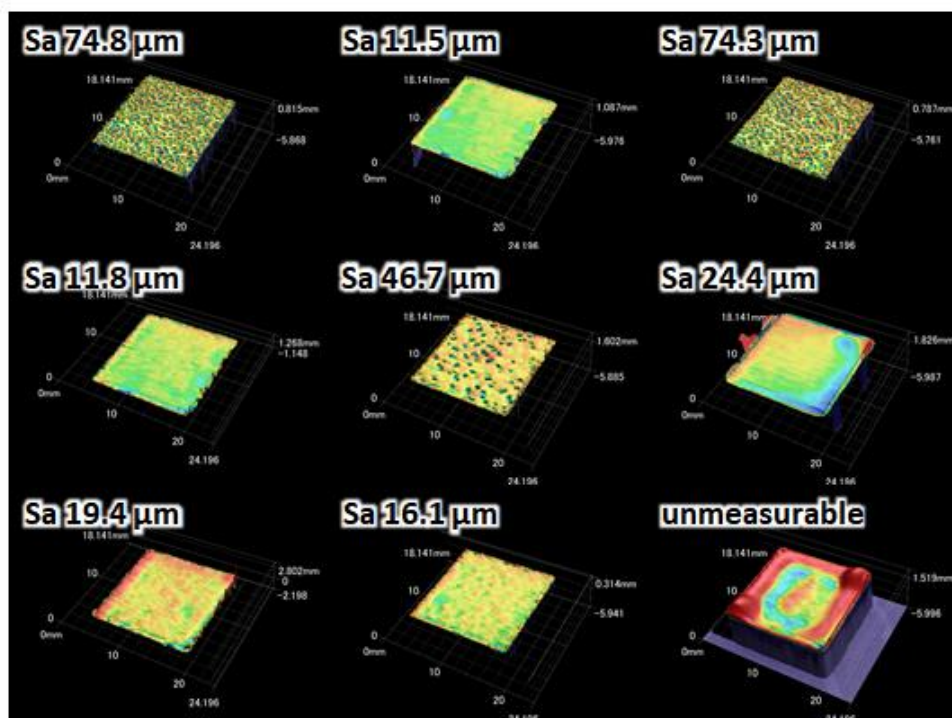


図 1-4-5 図 1-4-4 に示した造形物の 3D 計測器画像と表面粗度

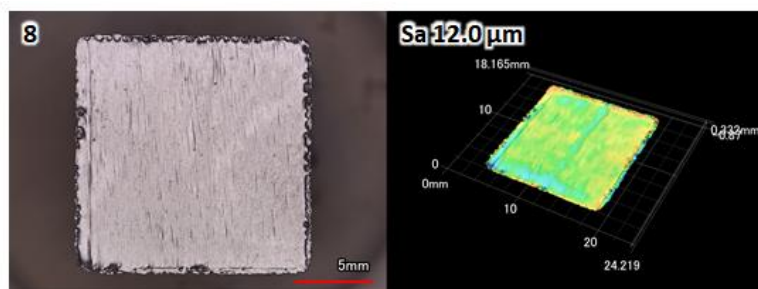


図 1-4-6 最適条件で造形した造形物の表面写真と 3D 計測器画像及び表面粗度

また、アルキメデス法で各サンプルの密度評価を行った。その結果を図 1-4-7 に示す。ある Volume Energy 以上で密度が一定に飽和しているが、これは造形物の形状を一定にしているためで、造形物の形状を変えると Volume Energy の閾値は変化する。

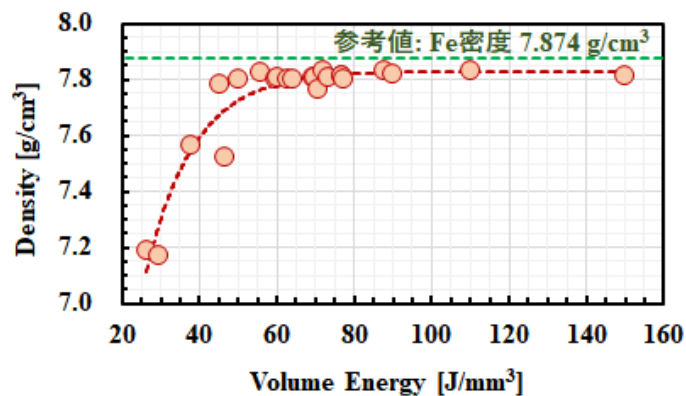


図 1-4-7 密度と Volume Energy の関係

15mm×15mm×100mm 造形物から引張り試験片を削り出し JIS Z-2241 引張り試験を実施した。試験片形状を図 1-4-8 に示す。引張り試験は INSTORON5982 で行っている。ひずみ速度は 2mm/min、温度は室温 (22℃) で試験を行った。引張り試験の結果として、応力ひずみ曲線を図 1-4-9 に引張り強さや 0.2% 耐力を表 1-4-3 に示す。0.2% 耐力は 111MPa、引張り強さは 299MPa であった。伸びは 46.1% であった。

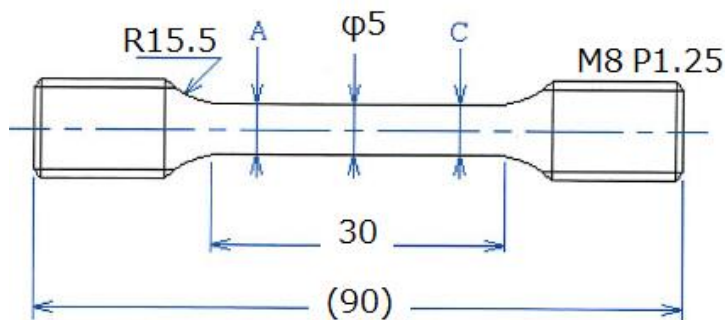


図 1-4-8 JIS Z-2241 引張り試験片

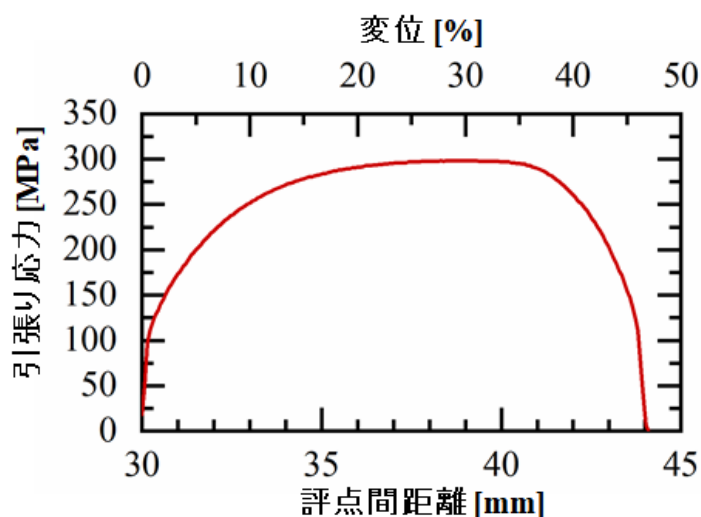


図 1-4-9 応力ひずみ曲線

表 1-4-3 引張り試験結果

試験温度 ℃	ヤング率 GPa	0.2%耐力 MPa	引張り強さ MPa	伸び %	絞り %	破断 位置
22	190.1	111	299	46.1	88.7	A

引張り試験同様に 15mm×15mm×100mm 造形物から試験片を削り出し JIS Z-2274 回転曲げ疲労試験を実施した。試験片形状を図 1-4-10 に示す。試験装置は島津製作所 H7 型小野式回転曲げ疲労試験装置を使用した。試験

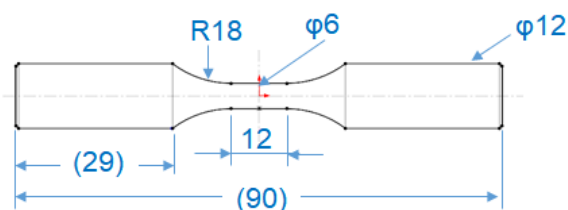


図 1-4-10 回転曲げ疲労試験片

本数は 8 本、試験温度は 22℃、試験速度は 3,000rpm で行った。1×10⁷ サイクルに達しても試験片が破断しない場合はその

時点で試験を終了した。試験結果として図 1-4-11 に S-N 線図を表 1-4-4 に試験応力及び荷重、破断サイクル数を示す。引張り試験の 0.2% 耐力 111MPa を参考に試験を実施したが 0.2% 耐力相当の応力を印可しても試験片は破断しなかった。0.2% 耐力の 1.5 倍相当 175MPa で 2.35×10⁶ サイクルでようやく試験片は破断した。

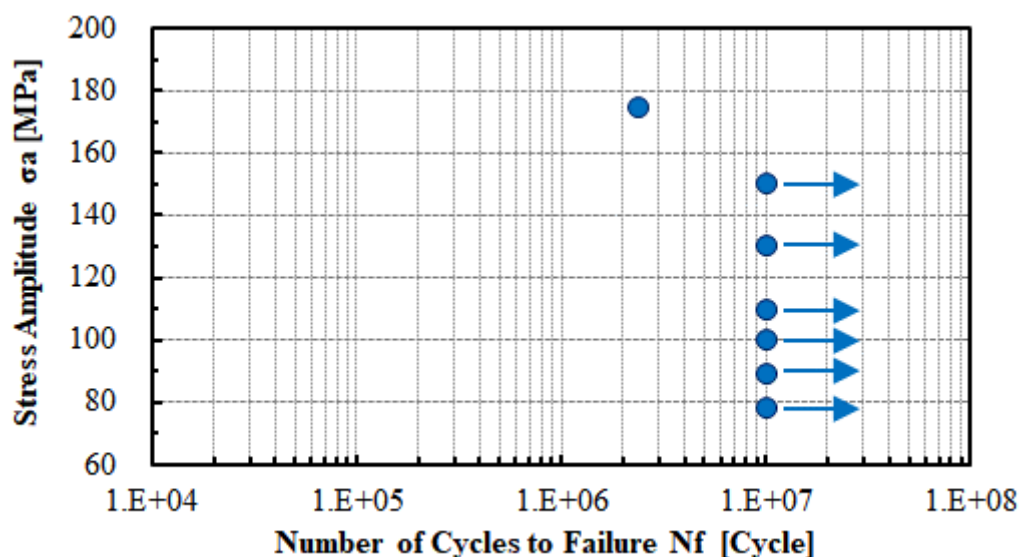


図 1-4-11 S-N 線図

表 1-4-4 試験応力と破断サイクル数

サンプル No.	応力 MPa	荷重 N	サイクル数
1	78	17	> 1×10 ⁷
2	89	19	> 1×10 ⁷
3	100	21	> 1×10 ⁷
4	110	23	> 1×10 ⁷
5	130	27	> 1×10 ⁷
6	225	46	※
7	150	32	> 1×10 ⁷
8	175	37	2.35×10 ⁶

※試験片が変形したため試験停止

1-4-2 標準試験片による開発機の造形物評価

① 目的

3D 積層造形物には空孔や造形方向による材料組織の異方性、熱処理条件等の機械的性質に影響を与え得る要因が存在している。将来的に 3D 積層造形物を機械構造物に取り入れるためには、造形物の機械的性質を把握しておくことが不可欠である。そのため、「1-4-2 標準試験片による開発機の造形物評価」では、TRAFAM で開発された積層造形装置を導入する際の検討項目になるとと思われる造形物の引張強さや疲労強度を取得することを目的とする。

② 目標

- TRAFAM で開発された 3D 積層造形装置により作製された造形物の金属疲労に関するデータ(S-N 曲線等)を取得する。
- 疲労強度に寄与し得る要因(内部欠陥、組織、熱処理条件等)についての知見を得る。

③ 実施計画

表 1-4-5 に示すように各装置で造形する材料に対して引張試験および疲労試験を計画した。各装置の対象材料は⑤以降に記載する

表 1-4-5 平成 30 年度 実施計画

		平成30年										平成31年		
		4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	
開発機の造形物評価	2017年度の検討から、造形条件を変更する材料		造形			熱処理, X線CT 引張試験, 疲労試験			整理 評価		データ ベース 登録			

④ 実施内容

造形物から試験片を作製し、引張試験及び疲労試験を実施した。

⑤ 複層電子ビーム 3D プリンタ

⑤-1 Ti-6Al-4V

⑤-1-1 造形

複層電子ビーム 3D プリンタ(以下、複層 EBM(Electron beam melting))により Ti-6Al-4V 合金を造形した。表 1-4-6 に使用した粉末に関する情報を示す。造形は平成 30 年度に検討した造形物の相対密度 99.9%以上を目標とした造形条件を基に改良した造形条件(以下、「改良高密度造形(MHD)」で、15mm×15mm×L105mm の角柱を 3 段重ねて造形した。実施内容を表 1-4-7 に示す。図 1-4-12 に造形物の外観写真の例を示す。

表 1-4-6 使用した粉末

材料	Ti-6Al-4V
製造メーカー	(株)大阪チタニウムテクノロジーズ
型番	TILOP-64-105
粒径, μm	45~105
平均粒径, μm	47.1

表 1-4-7 造形物に対する実施内容一覧

造形条件	荷重負荷方向	熱処理	用途	試験片数, 本	試験片番号
改良高密度造形(MHD)	水平	熱処理のみ (HIP なし)	引張試験片	2	JT-1~2
			疲労試験片	5	JT-3~7
		HIP 処理後 熱処理 (HIP あり)	引張試験片	2	JT-8~9
			疲労試験片	5	JT-10~14

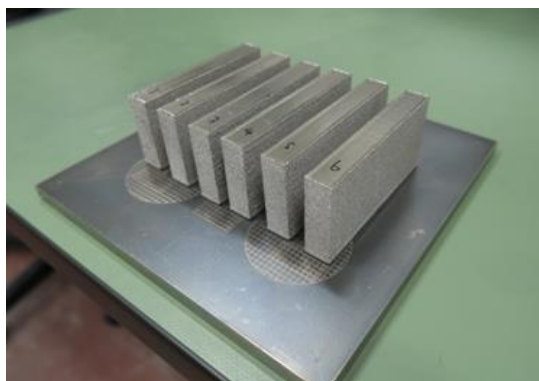


図 1-4-12 造形物の外観写真の例

⑤-1-2 熱処理

造形後の角柱に対して熱処理および HIP(Hot isostatic pressing)処理を実施した。表 1-4-8 に示すように各造形物のうち 7 本に対して熱処理のみを施し、7 本に対して HIP 処理後に熱処理を施した。Ti-6Al-4V 材の熱処理および HIP 処理の条件はそれぞれ、AMS 4911⁽¹⁻⁴⁻¹⁻¹⁾および AMS 4985⁽¹⁻⁴⁻¹⁻²⁾を参考に設定した。表 1-4-8 に熱処理および HIP 処理の条件を示す。以下、熱処理のみを施した造形物を「HIP なし材」、HIP 処理後に熱処理を施した造形物を「HIP あり材」と称する。

表 1-4-8 熱処理および HIP 処理条件

実施順	実施内容	温度, °C	圧力, MPa	保持時間, Hour	冷却方法
1	HIP 処理	920	100	2	炉冷
2	熱処理	843	—	2	アルゴンファーリング

⑤-1-3 引張試験

ASTM E08⁽¹⁻⁴⁻¹⁻³⁾に従い 図 1-4-13 に示す引張試験片を作製し、室温大気中で引張試験を実施した。ASTM E08⁽¹⁻⁴⁻¹⁻⁴⁾に従い室温大気中で引張試験を実施した。図 1-4-14 に引張試験結果を示す。図 1-4-14 は HIP なし材および HIP あり材のそれぞれ 2 本の平均値を示す。HIP 処理の有無に依らず、0.2%耐力、引張強さは同程度であった。

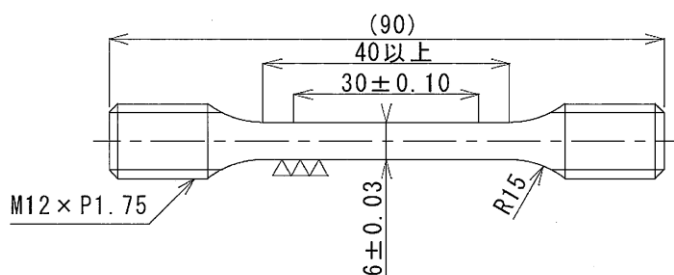


図 1-4-13 引張試験片形状(単位:mm)

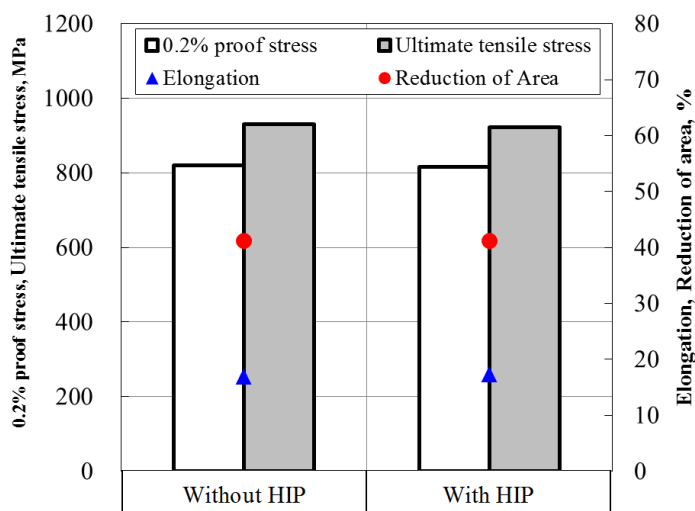


図 1-4-14 引張試験結果 平均値

⑤-1-4 疲労試験

ASTM E466⁽¹⁻⁴⁻¹⁻⁴⁾に従い疲労試験片を作製し、疲労試験を実施した。図 1-4-15 に試験片形状を示す。試験は室温大気中で荷重制御、応力比 R0.1 で実施した。試験周波数は 10Hz で実施したが、疲労寿命が長くなることが予想された一部の試験では 30Hz で実施した。

疲労試験結果を図 1-4-16 に示す。参考のために、平成 29 年度に実施した高速度造形条件(図中記号: HS)での疲労試験結果を合わせて示す。改良高密度造形(図中記号: MHD)、高速度造形のいずれの造形条件においても、HIP あり材は HIP なし材と比較して長寿命側にプロットされた。

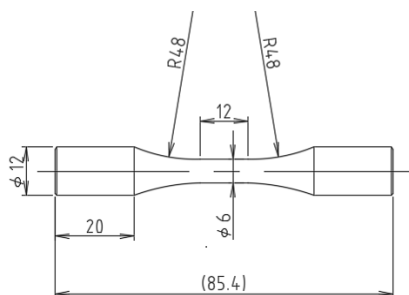


図 1-4-15 疲労試験片形状(単位 : mm)

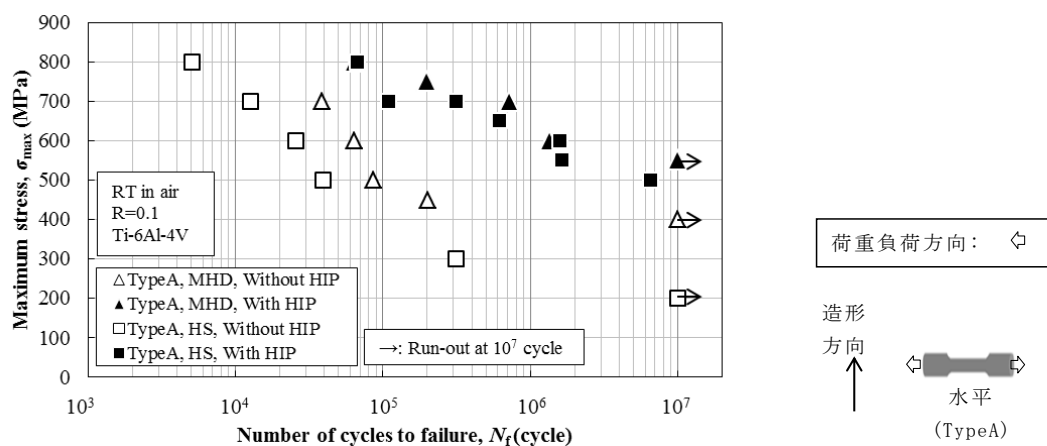


図 1-4-16 疲労試験結果

⑤-1-5 まとめ

複層 EBM により造形した Ti-6Al-4V を用いて引張試験および疲労試験を実施し、以下の結果を得た。

- 引張試験の結果、造形条件および HIP 処理の有無による機械的性質の有意な差は確認されなかった。
- 疲労試験の結果、HIP なし材と比較して HIP あり材の疲労寿命は長寿命側にプロットされた。

⑥ 大型高速電子ビーム 3D プリンタ

⑥-1 Ti-6Al-4V

⑥-1-1 造形

パウダベット方式の大型高速電子ビーム 3D プリンタにより Ti-6Al-4V 合金を造形した。表 1-4-9 に使用した粉末に関する情報を示す。造形は 16mm×16mm×L100mm の角柱をベースプレートに 1 段ずつ造形した。実施内容を

表 1-4-10 に示す。図 1-4-17 に造形物の外観写真の例を示す。

表 1-4-9 使用した粉末

材料	Ti-6Al-4V
製造メーカー	大同特殊鋼(株)
品名	Ti-64 合金粉末
ロット No.	D8724M4
粒径, μm	45~105
平均粒径, μm	94.4

表 1-4-10 造形物に対する実施内容一覧

試験片 長手方向	熱処理	用途	試験片数, 本	試験片番号
水平	熱処理のみ (HIP なし)	引張試験片	2	TT-1~2
		疲労試験片	5	TT-3~7
	HIP 処理後 熱処理 (HIP あり)	引張試験片	2	TT-8~9
		疲労試験片	5	TT-10~14

◎ : 造形方向

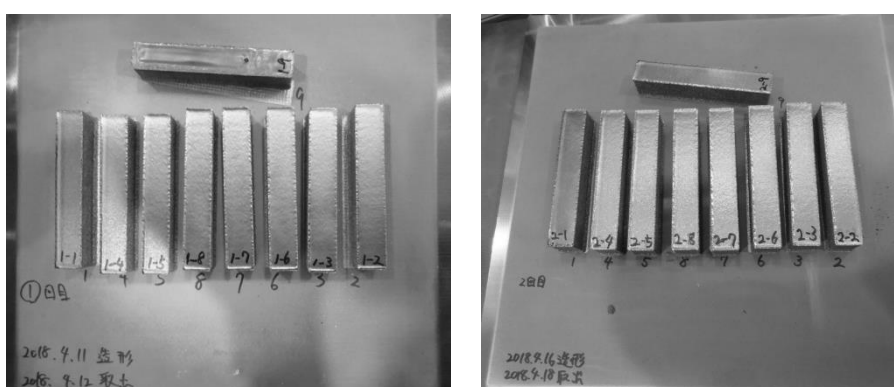


図 1-4-17 造形物の外観写真の例

⑥-1-2 熱処理

造形後の角柱に対して熱処理および HIP(Hot isostatic pressing)処理を実施した。

表 1-4-10 に示すように各造形物のうち 7 本に対して熱処理のみを施し、7 本に対して HIP 処理後に熱処理を施した。Ti-6Al-4V 材の熱処理および HIP 処理の条件はそれぞれ、AMS 4911⁽¹⁻⁴⁻¹⁻¹⁾および AMS 4985⁽¹⁻⁴⁻¹⁻²⁾を参考に設定した。表 1-4-11 に熱処理および HIP 処理の条件を示す。以下、熱処理のみを施した造形物を「HIP なし材」、HIP 処理後に熱処理を施した造形物を「HIP あり材」と称する。

表 1-4-11 熱処理および HIP 処理条件

実施順	実施内容	温度, ℃	圧力, MPa	保持時間, Hour	冷却方法
1	HIP 処理	920	100	2	炉冷
2	熱処理	843	—	2	アルゴンファーリング

⑥-1-3 引張試験

ASTM E08⁽¹⁻⁴⁻¹⁻³⁾に従い

図 1-4-18 に示す引張試験片を作製し、室温大気

(添付資料3) 成果報告書
 中で引張試験を実施した。図 1-4-19 に引張試験結果を示す。図 1-4-19 は HIP
 あり材、HIP なし材のそれぞれ 2 本の平均値を示す。HIP 処理の有無に依らず、
 0.2%耐力、引張強さは同程度であった。

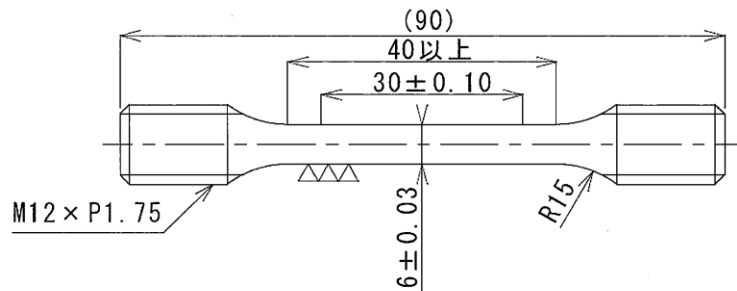


図 1-4-18 引張試験片形状(単位:mm)

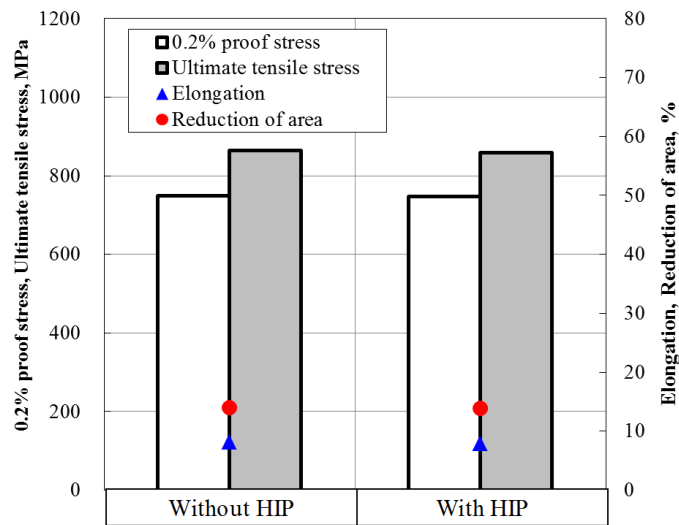


図 1-4-19 引張試験結果 平均値

⑥-1-4 疲労試験

ASTM E466⁽¹⁻⁴⁻¹⁻⁴⁾に従い疲労試験片を作製し、疲労試験を実施した。図
 1-4-20 に試験片形状を示す。試験は室温大気中で荷重制御、応力比 R0.1 で実
 施した。試験周波数は 10Hz で実施したが、疲労寿命が長くなることが予想さ
 れた一部の試験では 30Hz で実施した。

疲労試験結果を図 1-4-21 に示す。HIP あり材は HIP なし材と比較して長寿
 命側にプロットされた。

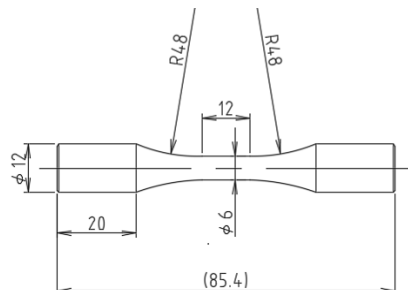


図 1-4-20 疲労試験片形状(単位 : mm)

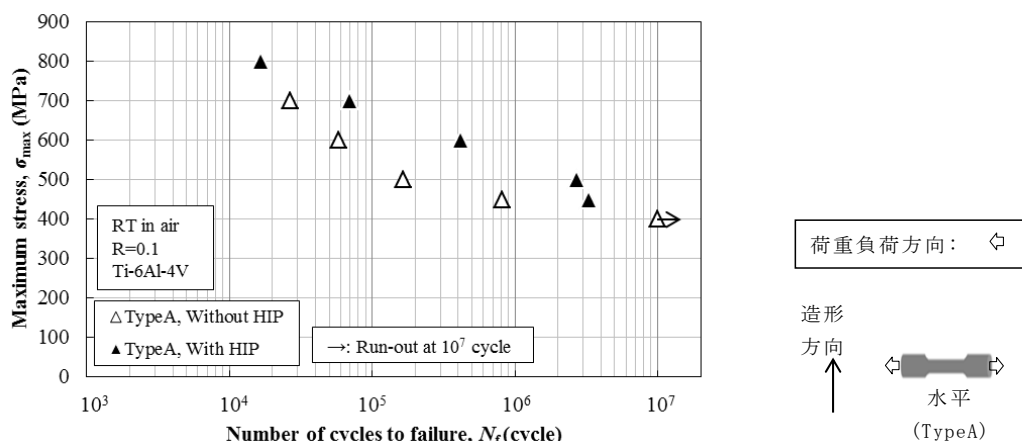


図 1-4-21 疲労試験結果(Ti-6Al-4V)

⑥-1-5 まとめ

大型高速電子ビーム 3D プリンタにより造形した Ti-6Al-4V を用いて引張試験および疲労試験を実施し、以下の結果を得た。

- 引張試験の結果、造形条件および HIP 処理の有無による機械的性質の有意な差は確認されなかった。
- 疲労試験の結果、HIP なし材と比較して HIP あり材の疲労寿命は長寿命側にプロットされた。

⑥-2 インコネル 718

⑥-2-1 造形

大型高速電子ビーム 3D プリンタによりインコネル 718 を造形した。表 1-4-12 に使用した粉末に関する情報を示す。図 1-4-22 に示すように 16mm×16mm×L100mm の角柱素材を作製し、試験片を製作した。実施内容を表 1-4-13 に示す。

表 1-4-12 使用した粉末

材料	インコネル 718
製造メーカー	山陽特殊製鋼(株)
型番	PI718
粒径, μm	45~105
平均粒径, μm	65.1



図 1-4-22 造形物の外観写真

表 1-4-13 造形物に対する実施内容一覧

荷重負荷 方向	熱処理	用途	試験片数, 本	試験片番号
水平	熱処理のみ (HIP なし)	引張試験片	2	TI2-1~2
		疲労試験片	5	TI2-3~7
	HIP 処理後 熱処理 (HIP あり)	引張試験片	2	TI2-8~9
		疲労試験片	5	TI2-10~14

⑥-2-2 熱処理

造形後の角柱に対して熱処理および HIP(Hot isostatic pressing)処理を実施した。表 1-4-13 に示すように各造形物のうち 7 本に対して熱処理のみを施し、7 本に対して HIP 処理後に熱処理を施した。熱処理条件は、AMS 5383⁽¹⁻⁴⁻¹⁻⁵⁾を参考に設定した。表 1-4-14 に熱処理および HIP 処理の条件を示す。以下、熱処理のみを施した造形物を「HIP なし材」、HIP 処理後に熱処理を施した造形物を「HIP あり材」と称する。

表 1-4-14 熱処理および HIP 処理条件

実施順	実施 内容	温度	圧力	保持 時間	冷却方法
		℃	MPa	hours	
1	HIP	1,163	100	4	室温まで冷却
2	溶体化	700	-	0.5	冷却せず 3 へ
3	溶体化	968±14	-	2	アルゴンファーリングで 300℃以下に
4	時効	718±8	-	8	冷却速度 55℃±8℃/hour で 3 へ
5	時効	621±8	-	8	アルゴンファーリング

⑥-2-3 引張試験

ASTM E08⁽¹⁻⁴⁻¹⁻³⁾に従い図 1-4-23 に示す引張試験片を作製し、室温大気中で引張試験を実施した。図 1-4-24 に引張試験結果を示す。図 1-4-24 は HIP なし材および HIP あり材のそれぞれ 2 本の平均値を示している。一部の試験片では標点部付近や標点外から破断したため、破断伸びおよび絞りを参考値扱いとした（図中では、参考値を点線の円で囲んで示している）。HIP 処理を施すことによって、0.2%耐力、引張強さが低下する傾向が確認された。

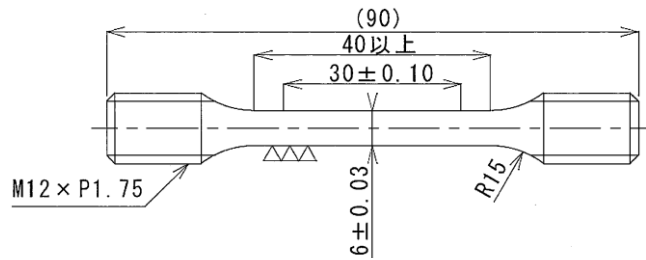


図 1-4-23 引張試験片形状(単位:mm)

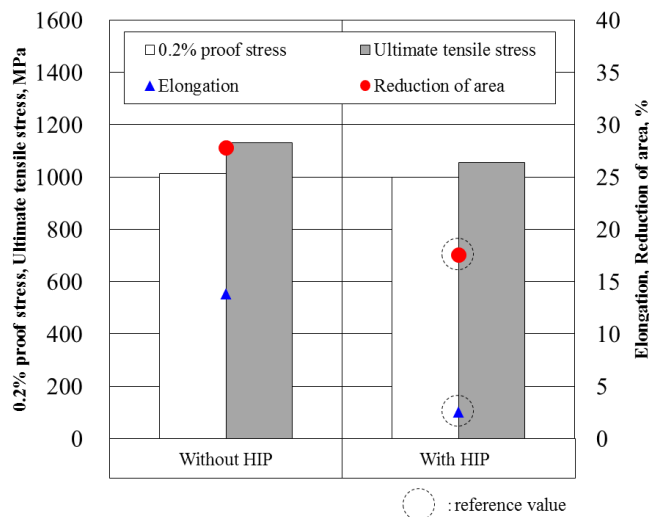


図 1-4-24 引張試験結果、平均値

⑥-2-5 疲労試験

ASTM E466⁽¹⁻⁴⁻¹⁻⁴⁾に従い疲労試験片を作製し、疲労試験を実施した。図 1-4-25 に試験片形状を示す。試験は室温大気中で荷重制御、応力比 R0.1 で実施した。試験周波数は 30Hz で実施した。

疲労試験結果を図 1-4-26 に示す。図中 Type A は水平材を表す。短寿命側では HIP なし材の方が長寿命となり、長寿命側では HIP あり材の方が長寿命となった。

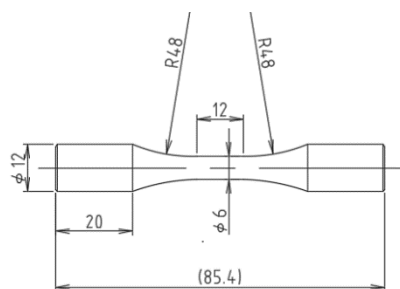


図 1-4-25 疲労試験片形状(単位 : mm)

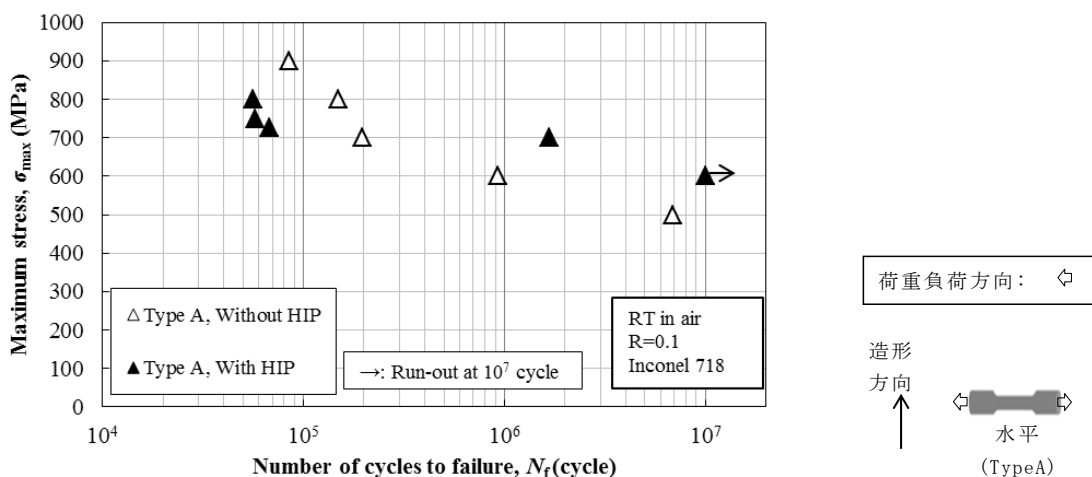


図 1-4-26 疲労試験結果

⑥-2-6 まとめ

大型高速電子ビーム3Dプリンタにより造形したインコネル718を用いて引張試験および疲労試験を実施し、以下の結果を得た。

- 引張試験の結果、HIP処理を施すことで、0.2%耐力および引張強さが僅かに低下する傾向が得られた。
- 疲労試験の結果、短寿命側ではHIPなし材の方が長寿命となり、長寿命側ではHIPあり材の方が長寿命となった。また、HIP処理の有無に依らず、疲労試験の破面には造形に起因したガスポアや溶融不良といった欠陥はなく、結晶粒のせん断すべり面が疲労き裂の起点部に観察された。

⑦ 参考文献

- ・ (1-4-1-1) AMS 4911N, “Titanium Alloy, Sheet, Strip, and Plate, 6Al - 4V, Annealed”, (2014).
- ・ (1-4-1-2) AMS 4985E, “Titanium Alloy, Investment Castings 6Al - 4V 130 UTS, 120 YS, 6% EL Hot Isostatically Pressed Anneal Optional or When Specified”, (2014).
- ・ (1-4-1-3) ASTM E 08-16a, “Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials”, (2016).
- ・ (1-4-1-4) ASTM E 466-15, “Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials”, (2015).

- ・ (1-4-1-5) AMS 5383E, “Nickel Alloy, Corrosion and Heat-Resistant, Investment Castings, 52.5Ni - 19Cr - 3.0Mo - 5.1Cb(Nb) - 0.90Ti - 0.60Al - 18Fe, Vacuum Melted Homogenization and Solution Heat Treated”, (2012).

1-4-3 得られたデータのデータベース化

1-4-1、1-4-2 で得られたデータを三次元積層造形データベースに格納した。

1-5 3Dプリンタ用制御ソフトウェアの開発

本開発はパウダベッド方式金属積層造形装置の共通 CAM ソフトウェアの開発として始まり平成26年度から継続している。その開発目標の1つに「伝熱溶融・溶融凝固シミュレーション技術及び加工、材料、評価データベース等から加工条件等を設定し最適パスを生成することができるソフトウェアを開発する」がある。

ここで述べられている「伝熱溶融・溶融凝固シミュレーション技術及び加工、材料、評価データベース」にあたる「3D積層造形データセンター」は平成30年度に TRAFAM 主導でクラウド上に構築された。データセンター内には各装置の造形・粉末造形物特性データ、造形レシピ等を格納した「三次元積層造形データベース」と実造形前に造形物の熱変形量・温度分布などを予測する「熱変形シミュレーション」が設置されている。平成30年度は共通 CAM ソフトウェア内に上記データセンターとパウダベッド方式積層造形装置、その中でも電子ビーム積層造形装置とのデータ連携機能の実装を行った。

(1) データベースと電子ビーム積層造形装置の連携

平成30年度は図1-5-1に示す通り「造形レシピ」と装置の連携に関わる部分の開発を行った。データベースからダウンロードした造形レシピは共通 CAM ソフトウェアが装置で活用できるデータへと変換して装置に送る。一方、装置メーカーが造形レシピ内容を更新したい場合は共通 CAM ソフトウェアでレシピ内容を編集してデータベースへ再登録する。共通 CAM ソフトウェアはデータベースと装置間のインターフェースの役割を果たしている。

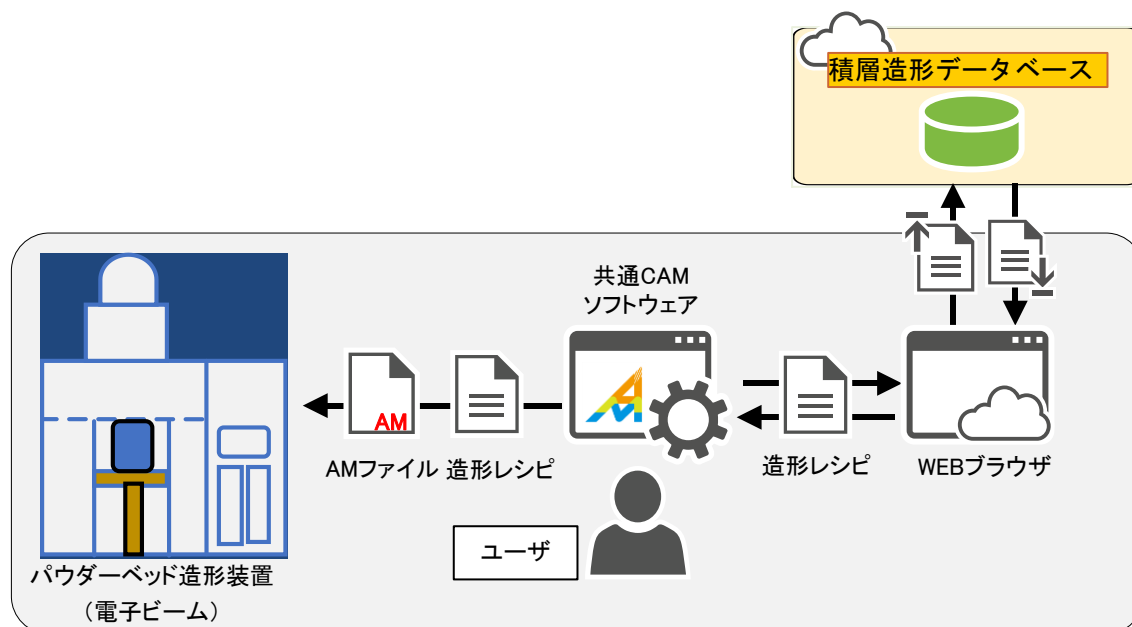


図 1-5-1 造形レシピと共通 CAM ソフトウェアの関係

(a) 造形レシピ編集機能

平成30年度は共通 CAM ソフトウェアに上記造形レシピを編集するための機能を実装した。元々の条件編集画面に造形レシピ用項目編集画面の追加を行っている。編集画面の一部を（図1-5-2）に示す。

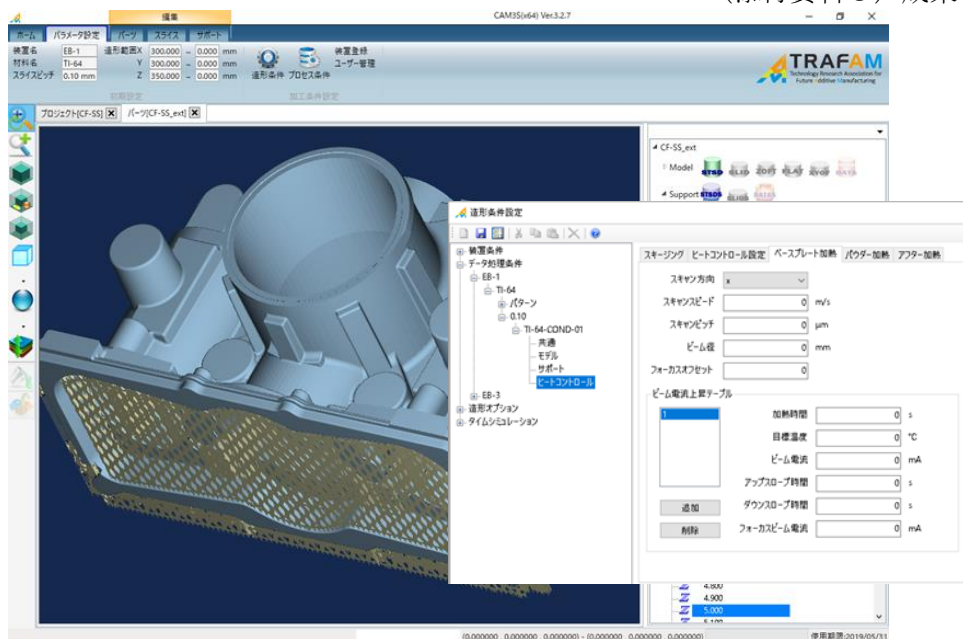


図 1-5-2 造形レシピ ヒートコントロール編集画面

(b) 造形レシピエクスポート機能

平成30年度は共通CAMソフトウェア内部で保持している各種条件を造形レシピ形式に変換して出力する機能を実装した。元々のエクスポート機能（AMフォーマットへの変換）に追加して造形レシピも同時にエクスポートする機能の追加を実施した。

(c) 造形レシピインポート機能

平成30年度はデータベースからダウンロードしたレシピの造形条件を共通CAMソフトウェアに取り込み利用できる機能を実装した。取り込んだ造形レシピ条件は共通CAMソフトウェアの初期設定条件機能を利用して再利用可能であり、値の変更も任意である。

(2) 熱変形シミュレーションと装置の連携

金属積層造形は造形過程で粉末の熔融凝固に伴う凝固収縮と造形物に変形が生じる。すると変形のため造形が途中で停止してしまったり、最終造形物の寸法精度を満たせなかったりなど変形の問題は最終形状と造形過程と両方に影響する。そこで、熱変形を予測する数値シミュレーションの利用が必要となる。そこで平成30年度は本章で述べるシミュレーションと電子ビーム積層造形装置の連携機能の実装を行った。

(a) サポート最適化ソフトウェアとのインターフェース開発

平成30年度は熱変形シミュレーション開発としてパウダベッド方式への対応が行われ、その中でASTOM東京分室（敬称略）が固有ひずみ法によるサポート最適化ソフトウェアの開発を実施した。サポート最適化とはシミュレーションにより算出したモデルの熱変形量の予測値をサポートの形状や位置を調整することでユーザが許容できる量に近づけて最終的に最適なサポートを導き出す処理である。また固有ひずみ法とは熱ひずみによる変形を計算する手法の一つで、加熱前の初期状態と冷却後の差を固有ひずみとして与えて弾性解析で求める方法である。サポート

最適化シミュレーションの処理の流れの概要を図 1-5-3 に示す。

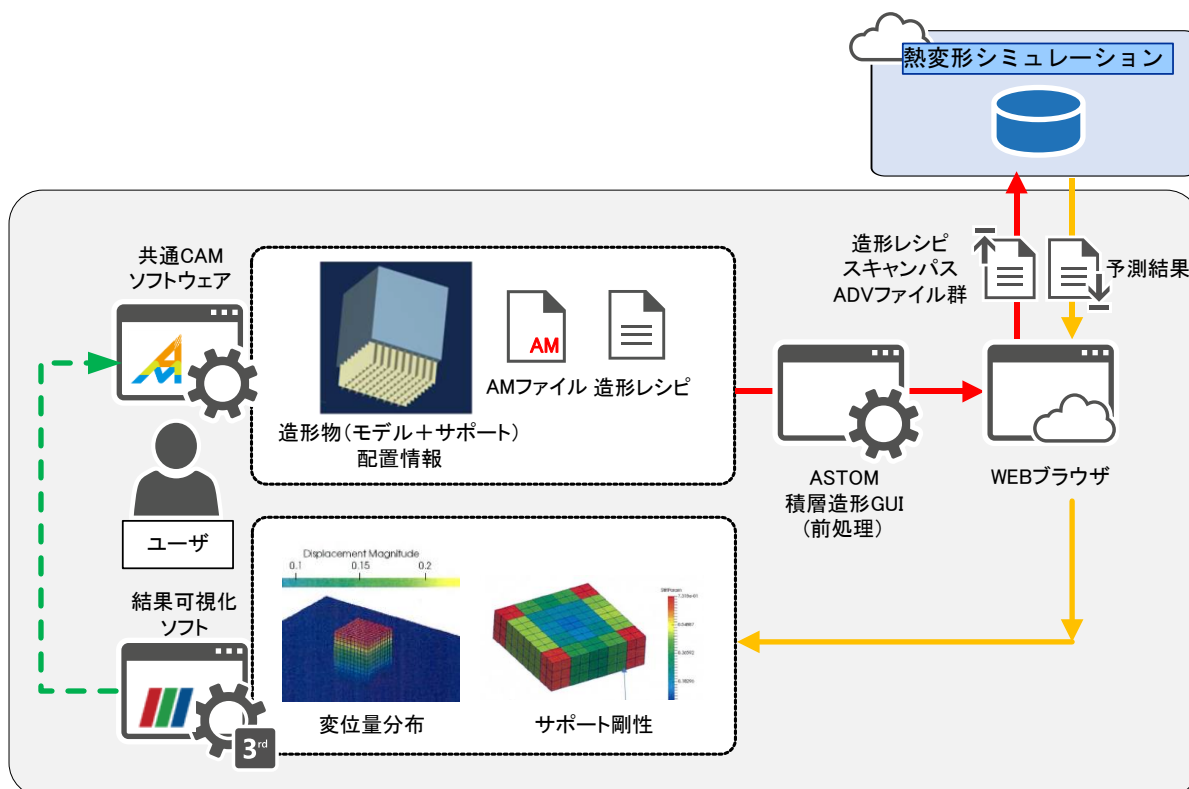


図 1-5-3 サポート最適化シミュレーション概要

サポート最適化シミュレーションの処理の流れは以下の通りである。

1. 共通 CAM ソフトウェアで造形モデルを読み込み、サポートを付加する。
2. 共通 CAM ソフトウェアのエクスポート機能でサポート最適化に必要なデータセットを準備する。
3. ASTOM 積層造形 GUI(前処理ソフト)に 2. のデータセットを渡す。造形物データをメッシュ化する等の前処理を行い解析用データに変換する。
4. 3. の解析用データをクラウドにアップロードして解析を開始する (シミュレーション計算はクラウド内で実施)。
5. 解析が完了したら結果ファイルをダウンロードする。可視化ソフトで結果ファイルを読み込んで予測結果を確認する。
6. サポートの調整を行う。必要であれば 2. に戻り再度シミュレーションを実施する。

1-6 まとめ

1-1 電子ビーム積層造形における金属粉末の溶融・凝固プロセスの解明

モニタリングシステムの要素技術の確立を目指し、溶融観察装置(α 機)の改良を実施した。 α 機については、シングルビード溶融時や模擬造形時の溶融過程観察に活用が可能である。モニタリング要素技術が確立されたことから、電子ビーム溶融過程の解析や造形条件の最適化へのフィードバックに反映させることが可能である。

1-2 金属粉末材料毎の積層造形に適した造形条件の確立

電子ビーム積層造形プロセスに特有のスモーク現象を解明し、電子ビーム積層造形装置の生産性(信頼性)をより向上させ製造業に提供できるようにするため、原料粉末にボールミル処理を施すことによりスモーク発生温度を下げることに成功した。

ガスアトマイズ法(GA)とプラズマ回転電極法(PREP)の2種類の手法で製造した粉末を原料として造形試験と造形物の密度調査や表面粗度調査を実施して、積層造形に適した原料粉末製造法について調査した。PREP粉末は真球度が高く、ガスポアが観察されなかった。造形に用いた粉末の粒度分布測定結果PREP粉末は分布がシャープで円形度が高い。PREP粉末で造形した造形物の方が高い密度を有している。相対密度はPREPの方が高い。

合金粉末の電気抵抗測定を行った。直流電気抵抗測定と交流電気抵抗測定の結果、交流測定で、粉末表面の酸化物層のキャパシタ成分が計測でき、昇温に伴いキャパシタ成分が減少することが観察された。交流測定が電子ビーム積層造形用の粉末特性評価に有効である。

電子ビーム積層造形に適したA7075ベース合金の開発では、A7075の造形には、凝固収縮時の粒界での割れと低融点元素の蒸発の2つの課題に対して、ローカルヒーティング、ビーム電流や走査速度などのビーム条件との組み合わせによって最適な条件が決まること見出し、電子ビーム積層造形法に最適な合金を開発した。

電子ビームにおいて、オシレーションによるホットクラック抑制の可能性を検証した。

オシレーションをすることでメルトプール内の対流が強まり(攪拌効果)等軸晶に制御可能であることを見出した。これによる組織制御の可能性を示した。

粉末の熱伝導率ならびに電子ビーム積層造形装置で作製した仮焼結体の熱伝導を測定した。室温では、仮焼結体の熱伝導率は粉末のそれよりも小さい値を示すことを示した。

高温でのInconel 718粉末の熱伝導率の測定の結果、ガスアトマイズ粉末の熱伝導率が高いのは、サテライトを多く含んでいるため焼結が進みやすいためだと考えられる。

1-3 伝熱溶融・溶融凝固シミュレーション技術開発

パウダベッド形成挙動をDEMでシミュレーションした結果、PREP粉末の方がガスアトマイズ(GA)粉末よりもパッキング密度の高いパウダベッドが形成できることが分かった。CFDシミュレーションから、粉末の種類によって粉末床のポロシティが変化し、最適な造形条件も変化することが示唆された。

DEMで充填した粉末層をGA粉末とPREP粉末で準備し、粉末層の有効熱伝導率を、シミュレーションを用いて算出した。実際のシミュレーションによって、定常状態に到達した際の温度分布は、PREP粉末層の方がGA粉末層よりもポロシティが小さく、有効熱伝導率が小さいという結果が得られた。これは、ポロシティの小さいPREP粉末層の方がGA粉末層よりも、粉末の表面積が大きく、粉末表面からの放射が大きくなるため、熱抵抗が大きくなったためである。有効熱伝導率の小さいPREP

粉末の方が GA 粉末よりも高温になっている領域が広がっており、GA 粉末と PREP 粉末では最適な予備加熱条件が異なることを示唆している。

また、実際に近い形状の粉末モデルを作成し、DEM シミュレーションにより、GA 粉末のパウダベッド形成挙動をシミュレーションした。この粉末床モデル上に電子ビームを走らせることで、より現実に近い GA 粉末の溶融・凝固挙動をシミュレーションできる。

CFD 計算で得られたインコル 718 合金に電子ビームを照射した際に形成されるメルトプール幅とメルトプール深さをビーム出力と走査速度の関数として、ビーム出力、走査速度、メルトプール幅、メルトプール深さのデータを用いたベイズ統計モデリングによって、回帰モデルの検証を行った。ベイズ推定を導入した機械学習法による造形パラメータの最適化法の確立の可能性を示した。

CA 法を用いて、Ti 合金系の凝固マップを作成した。不純物である O や Fe が凝固マップに及ぼす影響を評価した。O 濃度が増えるに伴い CET 曲線が図の左側に、つまり凝固速度が小さい方向にシフトすることが分かる。O 濃度の増加に伴い、等軸晶が形成されやすい傾向を説明した。また、TiAl 基金属間化合物の凝固マップも同様の手法で算出した。

1-4 加工、材料、評価データベース構築

要素技術研究開発機を用いて造形物のデータベースを構築した。引張り試験や回転曲げ疲労強度のデータベース構築を行った。造形条件は機械学習法で見出した最適条件である。流動性は JIS-Z-2502、嵩密度は JIS-Z-2504 で評価している。アルキメデス法で各サンプルの密度評価を行った。JIS Z-2241 引張り試験を実施した。JIS Z-2274 回転曲げ疲労試験を実施した。

1-5 3D プリンタ用制御ソフトウェアの開発

共通 CAM ソフトウェア内に上記データセンターとパウダベッド方式積層造形装置、その中でも電子ビーム積層造形装置とのデータ連携機能の実装を行った。

熱変形を予測する数値シミュレーションの利用が必要となる。シミュレーションと電子ビーム積層造形装置の連携機能の実装を行い、造形レシピ編集機能、造形レシピエクスポート機能、造形レシピインポート機能の開発を行った。

さらに、熱変形シミュレーション開発としてパウダベッド方式への対応として、固有ひずみ法によるサポート最適化ソフトウェアの開発を実施し、サポート最適化ソフトウェアとのインターフェース開発を行った。

第2章 レーザビーム方式3D積層造形基盤技術の研究開発

2-1 熔融凝固機構の解明及びモニタリング技術の開発

2-1-1 高速造形における熔融凝固機構の解明

① マクロ的熔融凝固シミュレーションでの造形条件新評価指標の導入

①-1 目的

レーザ式パウダベッド熔融法においてインコネル 718 の高速造形レシピ開発の為にマクロ的シミュレーションを用いて熔融凝固機構を解明する。

①-2 解析方法

平成29年度に開発した熔融凝固現象を加味した過渡熱変形解析有限要素法コードを用いて、インコネル 718 粉末床へのレーザ走査部の温度場の変化を求めた。レーザによる加熱は平面上ではガウシアン型のレーザプロファイルとし、深さ方向には固相、液相、粉末層上部、粉末層内部、粉末層底部に異なるレーザ吸収率を設定した。解析条件は D90 スポット径 $\phi 200\mu\text{m}$ 、レーザ出力 300W、走査速度 300-1,500mm/s、積層厚さ $50\mu\text{m}$ 、ハッチピッチ $150\mu\text{m}$ とした。スキャン幅は 5mm とし、これを 200 要素で区切ったため、1 解析 step、は 0.025/ (走査速度) とした。

①-3 結果と考察

従来の評価指標である熔融池寸法の時間変化(図 2-1-1)は 300W、600mm/s の適正造形条件、300W、1,500mm/s の低エネルギー密度条件のいずれの解析条件でも熔融池深さが粉末層厚さ $50\mu\text{m}$ 以上となり十分な溶け込みを有した造形条件となり得ることを示している。一方、新しく導入した粉体層底部での熔融池幅(図 2-1-2)の(c)条件では熔融池幅がハッチピッチよりも狭くなり、粉末層底部では熔融した部分同士が接続していないことが示されている。つまり、未熔融欠陥の発生が示唆された。

このように、従来の粉末層表面での熔融池寸法による評価では造形条件探索には不十分であり、本年度に導入した粉末層底面での熔融池寸法による評価の有用性が示された。

② DOEによるレーザプロファイルの変更と熔融凝固シミュレーション

②-1 目的

レーザ式パウダベッド熔融法においてスパッタ発生やガスポア欠陥を抑制する方法として DOE を装着してレーザプロファイルを変更した際に十分な熔融が得られるかを調査した。

②-2 解析方法

平成29年度に開発した熔融凝固現象を加味した過渡熱変形解析有限要素法コードを用いて、インコネル 718 粉末床へのレーザ走査部の温度場の変化を求めた。レーザによる加熱は平面上では DOE を用いてガウシアン型のレーザプロファイルを8分岐したマルチスポット型とした(図 2-1-3)。スポットの走査方向に対して分岐レーザスポットの配置はヨー角 0° 、 11.25° 、 22.5° の3種類について解析した。レーザ出力の総計は 980W とし、レーザ走査速度 600mm/s、粉末層厚さ $50\mu\text{m}$ とした。

②-3 解析結果を考察

粉末層表面の温度場から (図 2-1-4)、8 分岐したレーザプロファイルを走査した場合、ヨー角を 11.25° とすれば溶融した部分 (赤色部) が幅方向に連続することが示された。また、沸点以上となる領域 (灰色部) は小さいことが示された。沸点以上の領域はマイクロキーホールとなりスパッタ発生の原因となると考えられるが、これが小さいためスパッタ発生は抑制されると推測される。

深さ方向についても図 2-1-5 に示されるように、融点以上 ($1,340^\circ\text{C} >$) の領域が幅方向に連続しうる可能性が示された。

この結果から 8 分岐レーザプロファイルにおいても十分な溶け込み、かつ、スパッタを抑制した造形条件となる可能性が示された。

③ 粉末力学に基づくスキージング機構の解析

③-1 目的

スキージング条件により粉末層のかさ密度、一様さが変化する状況を粉末力学解析により予測する

③-2 方法

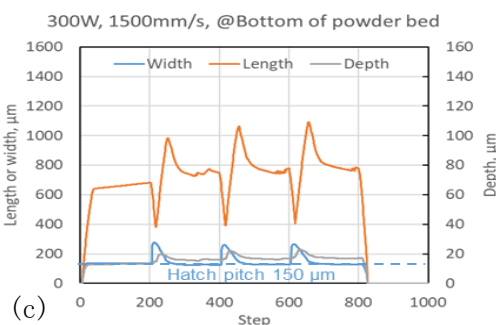
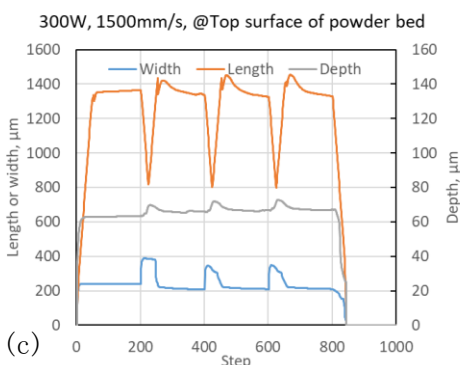
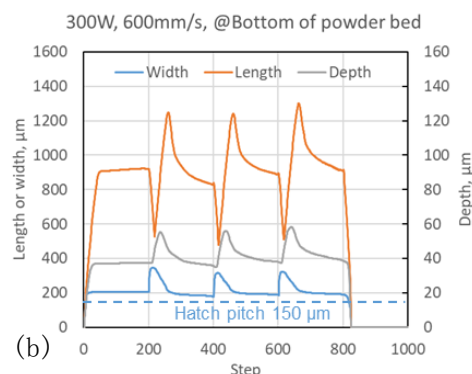
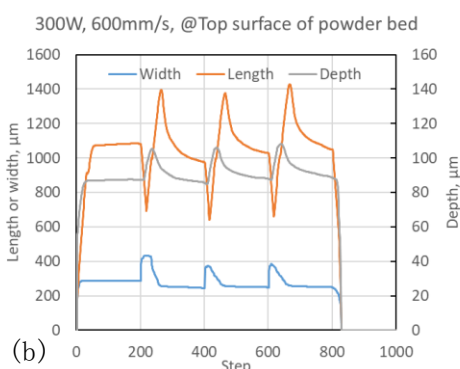
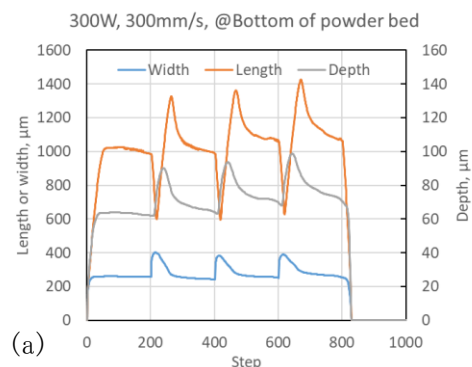
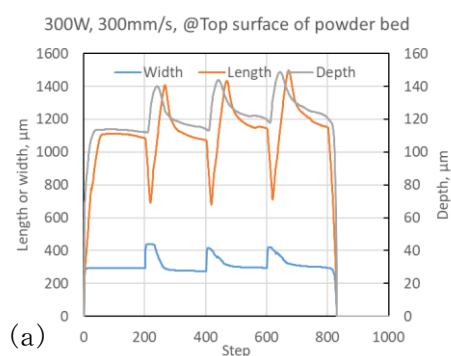


図 2-1-1 粉末層表面溶融池寸法

58 図 2-1-2 粉末層底部での溶融池寸法

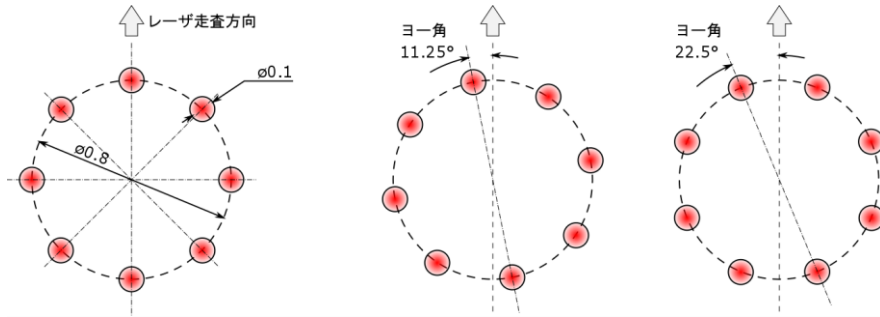


図 2-1-3 DOE を用いて 8 分岐したレーザープロファイルとスポットの走査方向

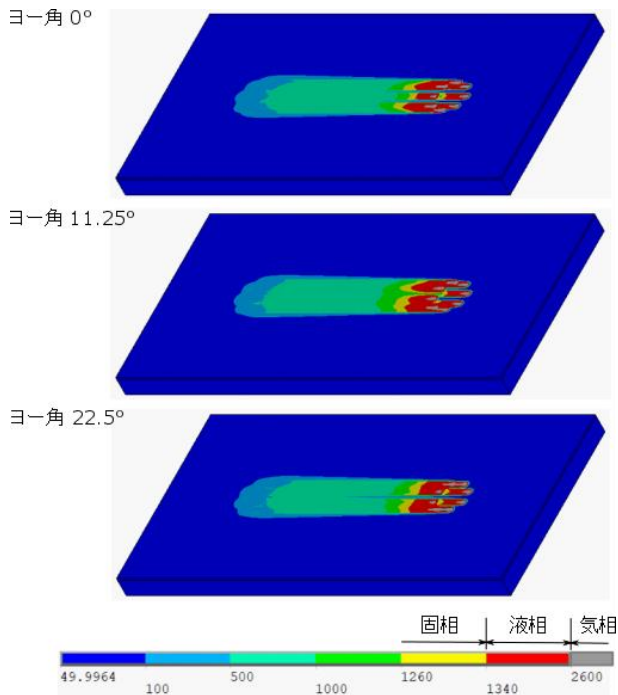


図 2-1-4 パウダベッド表面の温度分布

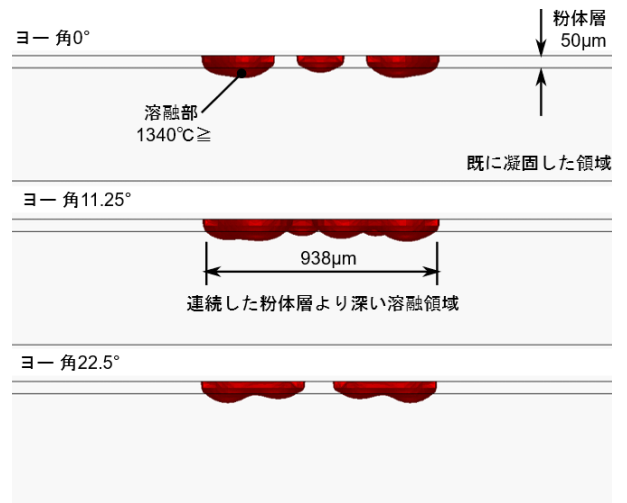


図 2-1-5 融点以上 ($1340^{\circ}\text{C} >$) 領域。レーザースポット進行方向 (-) 側から俯瞰

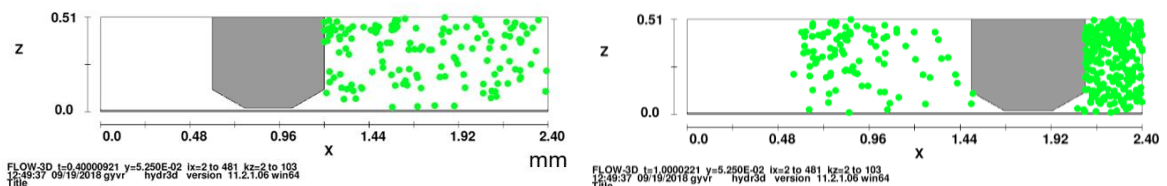


図 2-1-6 スキージング機構の DEM 解析による模擬

する状況を模擬した。粉末は粒径 $\phi 30 \mu\text{m}$ とし、1,000 粒子をリコータブレードの前に配置した。リコータブレードは厚さ 0.5mm で両肩に 30° の面取り付きとした。リコータブレードと底面の間隙は $50 \mu\text{m}$ とし、積層厚さを模擬した。

③-3 解析結果と考察

リコータブレード移動の前後での粉末の分布を 2 次元断面 (図 2-1-6) では間隙が $50 \mu\text{m}$ に対して粉末粒径 $30 \mu\text{m}$ と同程度のため間隙には縦方向にほぼ 1 個の粒子しか入らず、右側の初期の粉末が圧縮されていく状態となった。また、ブレード移動後の通過した粉末は層状に堆積せずに舞い上がった。粉末を間隙に押

し込んだ際に垂直方向の運動量が加えられたため間隙通過後に垂直方向に大きく運動したと考えられる。このことから、リコータブレードの移動速度を遅くすれば粉末が舞うことを抑制でき、また、リコータブレードの後ろ側の面取り角度をより小さく、長くすればブレードの底面にあたって強制的に粉末の垂直方向の運動は抑制されると思われる。

2-1-2 メルトプール（溶融池）モニタリング技術の開発（レーザデポジション方式）

① レーザデポジション方式による溶融凝固機構の解明

レーザデポジション方式の3D金属積層造形は、基材表面上に収束させた粉末ビームと、レーザをエネルギー源として基材表面上に集光したレーザビームの二つを同時に照射させることによって金属粉末材料が溶融凝固し造形層を形成する。

この方式では、粉末収束点とレーザ焦点の位置や量を精密に制御し、平坦性を担保して積層を繰り返していくことが最も重要なことであるといえる。特に、細書微細造形においては、加工点や造形パラメータのわずかな変化に敏感であり、造形層がその影響を受けてしまう。このため、より品質を安定化させるためには、微視的領域の溶融・凝固プロセスにおける異常造形の状態把握を行い、それをいかに抑えるのかを調べることが、正常な造形の実現に繋がる知見を得ることになると考えた。そこで、細書レーザデポジション法による溶融、凝固の過程を経る高速化での加工現象を観測し、その現象の把握や解明を行うこととした。

図2-1-7に、ステンレス鋼（SUS304）造形中の加工点を高速度カメラで計測した画像を示す。図2-1-7の(a)は、正常な造形過程の場合であり、造形方向に対して60度ほど傾けた「楕円状」の溶融地が積層の進行する先端部に形成されていることがわかる。また、レーザの照射点は、明るく白くなっており、溶融地下部にレーザが照射されていることがわかった。溶融地が楕円形状を保ったまま同じ積層厚で造形が進行し、造形一層の造形高さが均一に保たれていることが確認できた。

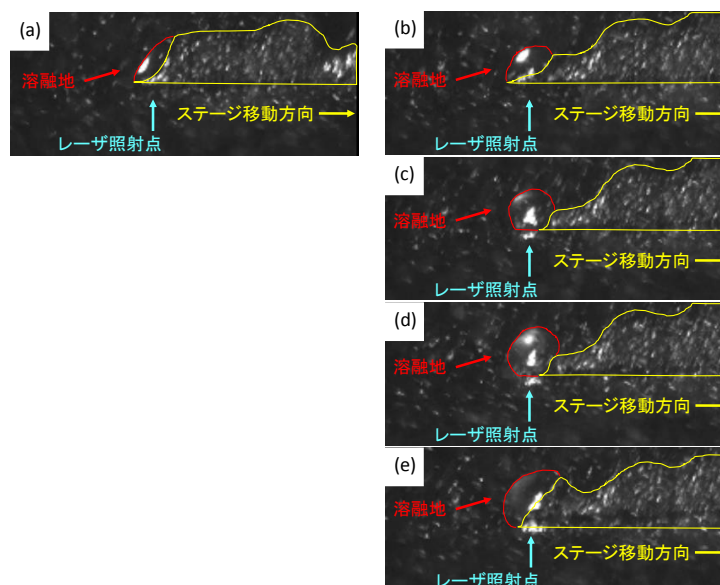


図 2-1-7 高速度カメラによる造形時の観と溶融地挙動

一方、図2-1-7の右図(b)～(e)は、造形層表面に凹凸が生じた過程の観察結果を示しており、異常積層発生の様子を示している。「たまご状」の溶融池は垂直上部方向に丸く膨れ上がり、その膨れ上がった溶融池が急速に冷却されて塊となって表面層に形成されていることがわかる。これは、いわゆるボーリングと呼ばれる現象で、液体状態の金属は界面エネルギーが高い場合では球形になりやすいという金属特有の現象により、濡れ性の悪い材料においての入熱表面でのエネルギー緩和を行うことに起因すると思われる。この現象は、ステンレス鋼以外にも、インコネル系やステライト系で特に顕著に示す現象であることも確認している。

こうしたボーリング現象の発生メカニズムを解明するために、さらに溶融池の局所状態を調べた。溶融池への小径粒子投入が安定である場合は正常な造形が進行していくのに対し、大径粒子が溶融池に導入されると溶融池が肥大化し、球状に盛り上がるボーリング現象が発生する過程を観測することができた。このことから、細書造形を行うためには、異常積層の発生原因である大径粒子の突発的な溶融池への侵入を避けるために、粉末のサイズを均一で、かつ、適切なサイズの粉末を安定供給していくことがとても重要であることがわかった。

次に、瞬時に発生する現象の様子を調べるには高速度カメラで観測することに関しては適切であるが、造形中のリアルタイムで映像を取得するには一度に取得する画像データ容量が大きく数秒間しか映像化できない。このため、造形中においてリアルタイム性は現時点では不可能であるといえる。そこで、簡易なカメラシステムを組み込み、リアルタイム性を確保しながら、レーザー光照射と同軸の垂直方向と水平方向の二つの方向からの測定を実施した。

図 2-1-8 に、側面方向から観測した結果を示す。正常な造形では、溶融地を含めた赤熱領域が観測され、また、レーザーが照射している箇所は、さらに輝度値が上がり、白色点となっていることが確認できた。さらに観測を進めていくと、異常造形が発生する箇所では、加工点から金属プルームの発生が起これ、プルームが収まると同時に溶融地が円状に大きく広がるボーリング現象が始まることを確認できた。この時のボーリング形成速度はおよそ 1/30 秒～1/60 秒であることがわかった。高速度カメラ動画の解析により大径粒子がボーリング現象発生のトリガーになっていることが確認できたため、金属プルームの発生は、大径粒子が溶融地に侵入し、所望よりも多くの粉末が溶け込むことで、金属のプラズマが発生しつつ、造形中の溶融地が肥大化していると考えられる。

以上から、このように、高速度カメラや簡易型のカメラシステムを造形に対して、垂直方向と水平方向から計測することにより、異常積層の原因となる金属プルームとボーリング現象の因果関係を明らかにするとともに、積層異常の発生メカニズムを解明することに成功したといえる。

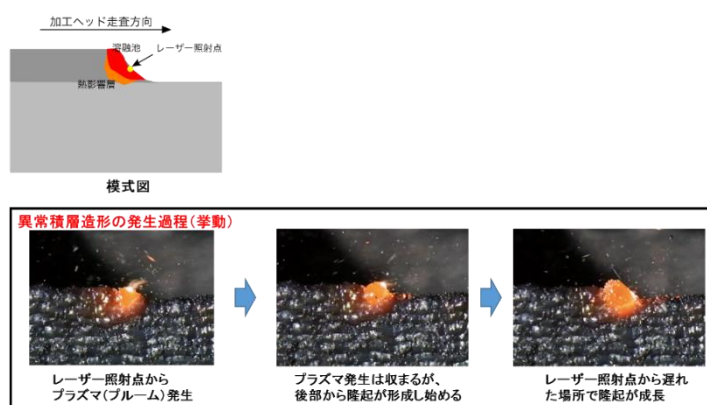


図 2-1-8 微小領域での造形プロセスのインプロセス観察

② レーザデポジションにおけるメルトプール(熔融池)モニタリング技術の開発

レーザデポジション方式の細書造形においては、精度向上が高いレベルで求められるものの、加工点での不安定な加工挙動に敏感である。このため、加工点での加工現象を把握し、いかに制御するかが鍵となり、「加工点で何が起きているのか」を造形時にその場で（インプロセスで）観測することは、造形の加工精度と安定性に直結する技術開発であるといえる。加工点での加工現象は複雑であり、加工状態を監視する上で必要と思われる加工点の熔融地の形状やプラズマの発生状態、熱影響部などをモニタリングするシステムと制御技術の開発が望ましいといえる。

また、加工点のモニタリングにおいては、精度の良い大きな測定器では計測スペースの確保が困難な場合が多く、また、造形中の加工物の形状や寸法によっては、計測ができない状況も考えられる。そのため、モニタリング手法を開発するには、造形加工に支障をきたさないものであることが必要となる。

そこで、細書レーザデポジションにおいて、リアルタイム性を確保したその場（インプロセス）計測手法を開発し、加工点での熔融池近傍の現象を捉えて、品質の安定した造形への技術的指針を得ることとした。

加工点を計測する上で、熔融池を垂直方向から観測するのみでは、造形の正常性を評価することが困難であると判断し、側面を組み合わせた多点で造形現象を同時に計測することで、リアルタイムで造形状況の良し悪しを観測することが可能になると考え、多点同時計測法の開発に取り組んだ。

本モニタリングシステムを用いて、熔融地から発生する光をレーザ入射と同軸方向に観測することで、レーザの照射点に円状に広がる熔融池を含んだ熱影響層部を観測可能とした。また、レーザの初期状態の不安定性に対しても可視化することが可能であり、さらに、レーザパワーを増加させていくことで、半熔融状態から正常で安定した熔融池が形成されている状態の計測や、不安定で金属ブルームが発生している様子も計測可能であることが確認できた。

また、造形の加工点からステージ移動していくにつれて、加工点では高温で赤熱している造形層箇所が、冷却されて黒色の背景色と同じになっていく過程も観測することに成功し、造形時の熱影響部の冷却過程を観察することが可能となった。図2-1-9にその様子を示す。この左図に示したとおり、時折、加工点から放射状に不規則に白赤色の光が放出する現象が見られており、これは、造形時に生じる熔融池近傍の金属ブルームの発生状況を映像で捉えることに成功した。こうしたプラズマの発生過程を計測可能にすることは、異常積層状況の把握にも有効であるといえる。

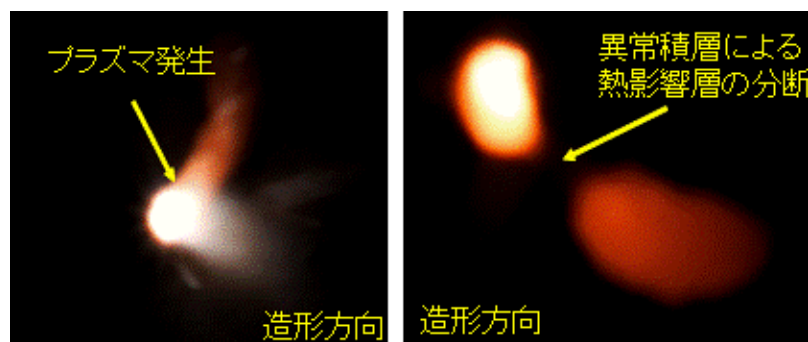


図 2-1-9 熔融地挙動観察による異常積層状態の突発的な発生

造形品質の向上のためには、造形中の状態を監視し、正常な加工状態を保つことが

必要になる。本研究で開発したリアルタイム計測動画像において、造形現象の観測に成功したが、新たに解析技術を導入し、造形状態の監視や安定性確保のためのフィードバック制御に繋げていくことが重要となる。

そこで、造形画像の熔融池局所領域に着目し、「フィルタ補正逆投影法 (FBP=filtered back projection)」を用い、熔融池の特徴を画像から抽出することとした。FBP法は画像データ $f(x; y)$ の各点に関数 $1/(X^2+Y^2)^{1/2}$ を重畳してぼかした像にし、そのぼかした投影データを補正した後に逆投影を行うことで画像は元データに近い状態で再構成することである。

本画像認識手法を用いて、造形中に金属プルームが発生した画像に対して、計算により得られた抽出した結果を図 2-1-10 に示す。バウンディングボックス(四角枠)を選択することで、熔融池と金属プルームを、選択した画像の色情報から特徴を引き出し、熔融池やプルームを抽出することに成功した。

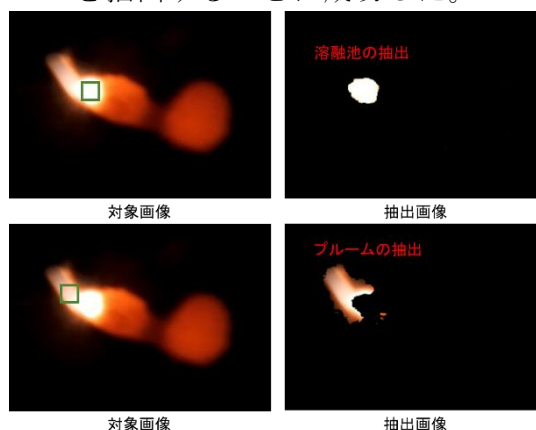


図 2-1-10 対象とする造形観測画像から熔融池とプルームの抽出

次に、解析画像と機械学習を用いて異常発生が生じた際の自動判定を試みた。得られた結果を図 2-1-11 に示す。複数の画像での判定を繰り返してみたが、プルーム(ヒューム)が発生している画像はすべてプルームが発生していると機械が判定を行った。モデルデータを次元削減による可視化を試みると、プルームの有無での境界が明瞭であり、分離、判定精度が非常に高いことが確認できた。画像解析と機械学習を組み合わせることで、異常積層時が発生した箇所プルーム発生を認識し、判定することが可能となった。

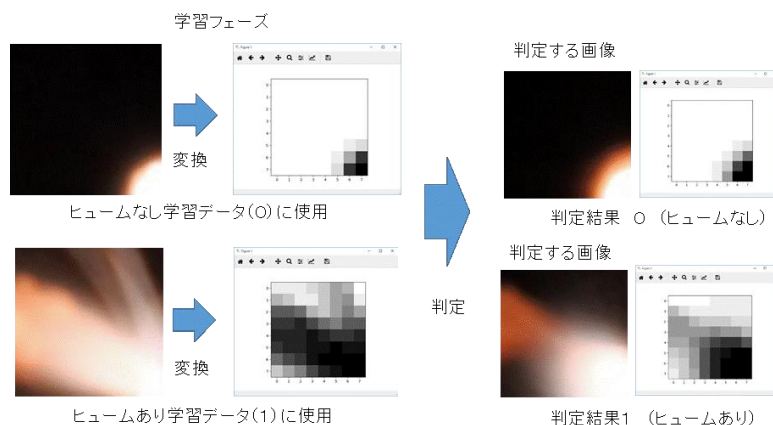


図 2-1-11 機械学習によるプルーム発生の有無の判定

2-1-3 パウダベッド形成状況モニタリング技術の開発

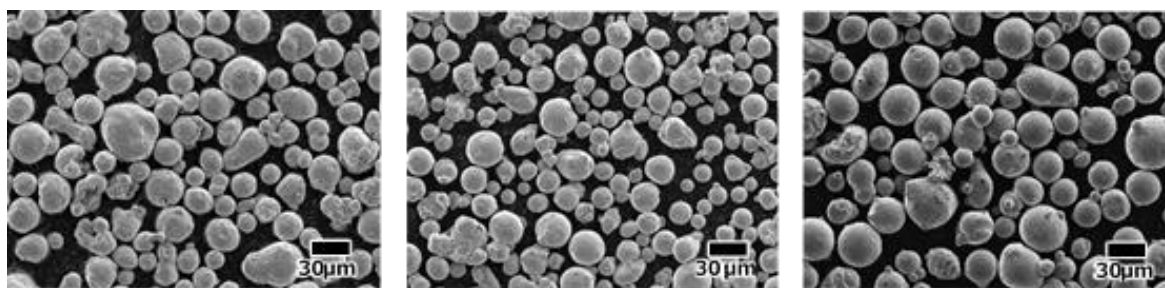
テストベンチに搭載されたモニタリング装置を用いて、リコート後に形成されたパウダベッド表面における凹凸の状況を三次元的に評価するため、リコート速度及び粉末供給量との関係を調査した。パウダベッドの測定範囲はφ150mmのベースプレート上であり、三次元で測定した点群データを基にベストフィット面、すなわち凹凸の平均面を設定する。平均面を基準としてパウダベッドの凹凸高さ方向の分布を標準偏差の値を用いて示し、ノイズを除去するため2σ(約95%)の領域を扱うこととする。

本実験で用いた粉末材料はインコネル718であり、山陽特殊製鋼製の粉末A及びB、C社製の粉末(粉末C)の合計3種類を準備した。表2-1-1に各々の粉末における粒度分布等の詳細を示す。また、粉末A、B及び粉末CのSEM観察画像を図2-1-12に示す。各々の粉末粒径を比べると、粉末Aは、粉末Bに比べて粒径の大きい粉末が含まれており、粉末Cはその中間の大きさである。

本実験で設定したリコート速度は、8mm/s～200mm/sの5条件とした。なお、要素技術研究機のリコート速度は500mm/min～12,000mm/minに対応する。要素技術研究機において造形物表面を通過する際の標準速度は500mm/minであり、テストベンチでは8mm/sとなる。また、粉末供給量は粉末供給部とベースプレートとの昇降比率として、粉末供給率の値を用いる。例えば、粉末供給率1.0倍とは、粉末供給部の上昇量がベースプレートの降下量0.05mmと同じ0.05mmの値となる。本実験では、粉末供給率をテストベンチの標準設定値である1.5倍を基準として、1.0～10.0倍まで変化させた。

表2-1-1 インコネル718の粉末特性

インコネル718	山陽特殊鋼		C社
	A	B	
JIS流動度(オリフィスφ5mm)	12.17	15.48	14.55
見掛密度	4.39	4.16	4.21
粒度分布			
D10	20	17	20
D50	39	30	31
D90	71	51	44
FT4(安定性+流速変化試験)			
基本流動性エネルギー、BFE(mJ)	775.59	857.04	728.52
安定性指標、SI	1.06	1.00	0.97
流動速度指標、FRI	1.12	1.18	1.14
比エネルギー、SE(mJ/g)	2.81	3.12	2.39
かさ密度、CBD(g/ml)	4.80	4.60	4.63
FT4(せん断試験)			
付着力、Cohesion	0.54	0.51	0.29
単軸崩壊強度、UYS(kPa)	1.61	1.51	0.89
最大主応力、MPS(kPa)	12.36	12.42	12.50
フローファンクション、FF	7.70	8.24	14.00
内部摩擦、AIF(deg.)	21.82	21.87	23.20
バルク密度、BD(g/ml)	4.85	4.68	4.74



(a) 粉末 A

(b) 粉末 B

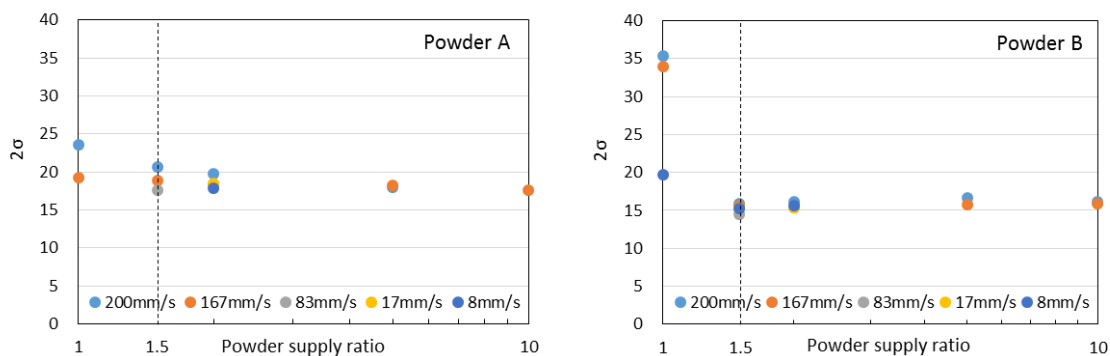
(c) 粉末 C

図 2-1-12 粉末の SEM 観察画像

図 2-1-13(a)~(c)に各々の粉末における粉末供給率と 2σ の関係を示す。いずれの粉末も粉末供給率 1.0 倍のとき 2σ は大きい値を示すが、粉末供給率を高くすることで 2σ の値は低下し、一定の値に収束する傾向が得られた。また、その値は粉末 A では約 $17\sim 18\mu\text{m}$ であり、粉末 B では約 $15\sim 16\mu\text{m}$ 、粉末 C では $16\sim 17\mu\text{m}$ となった。

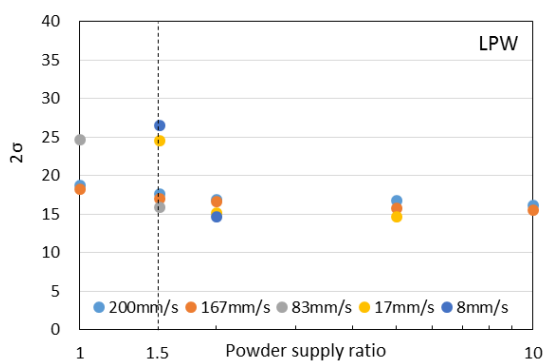
一方、リコート速度の違いに着目すると、リコート速度の速い方が 2σ の値は大きくなった。これは、リコート速度が速くなるとベースプレート上にリコートされた粉末の緻密性が低下するためと考えられる。

この結果を含めた実験結果より、(1) 2σ の値を用いてパウダベッド表面に形成された凹凸の状況の評価することができた。(2)リコート速度が速くなると 2σ の値は増加し表面の凹凸が大きくなるが、粉末供給量を増加させることで 2σ を適切な値まで低下させることができた。(3)リコート後におけるパウダベッドの凹凸状況を 2σ の値で判定しながら粉末供給量を調整することで欠陥の少ない造形物が得られることが示唆された。



(a) 粉末 A

(b) 粉末 B



(c) 粉末 C

図 2-1-13 粉末供給率と 2σ の関係

2-2 ミクロスケール溶融凝固機構の解明およびモニタリング技術、マルチスケールシミュレーション技術の開発(電子ビーム方式、レーザービーム方式共通)

今年度は本プロジェクト最終年度にあたり、ミクロスケールシミュレーションの実プロセス適用への道筋をつけるための取り組みとして、マクロシミュレーションへの接続パラメータの取得と、二流体モデルの妥当性検証を行った。

2-2-1 熱変形歪みシミュレーションとの連携

① 実効入熱量の評価

熱変形歪みシミュレーションでは、入熱量が重要なパラメータである。金属吸収されるエネルギーは、吸収率と蒸発で失われる熱量を考慮する必要がある。レーザーの場合吸収率の影響が大きい。電子ビームのエネルギーの吸収率はほぼ 100%とされているが、造形が真空中で行われるため蒸発による熱損失自体はレーザーよりも大きい。これをミクロシミュレーションから取得する方法を考えた。実効入熱量は図 2-2-1 のように評価した。 $z = z_1$ 以下の場所にある要素で、金属の体積割合が 0.5 以上の要素のエンタルピー量の総和を、計算の時間刻み Δt 毎に評価し、差分を求めて時間刻みで割り、時間当たり入熱量を求める。

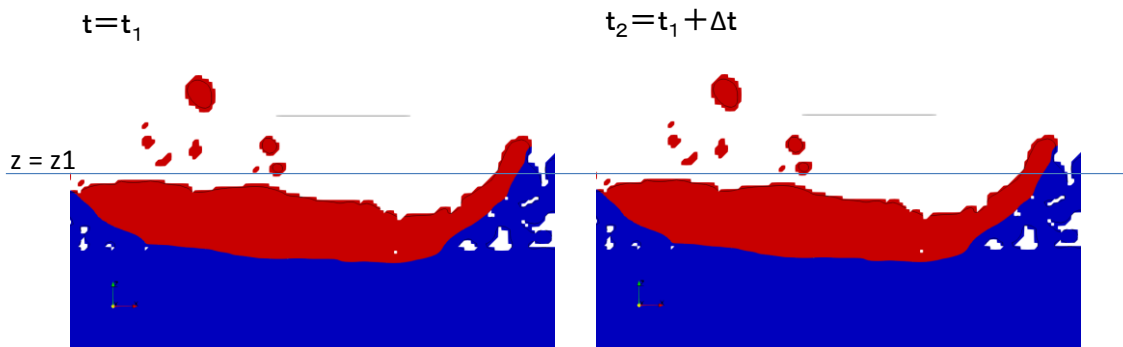


図 2-2-1 実効入熱量見積もりの概念図

② 実効入熱量を計算するためのシミュレーション

②-1-1 レーザービーム造形モデル(インコネル 718)

今年度「京」で計算したレーザービーム造形モデルを図 2-2-2 に示す。

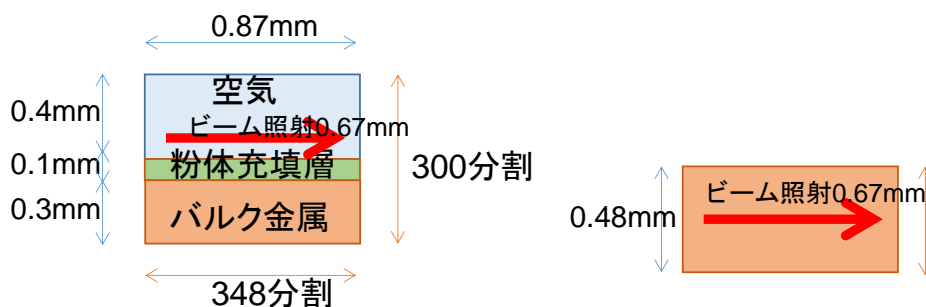


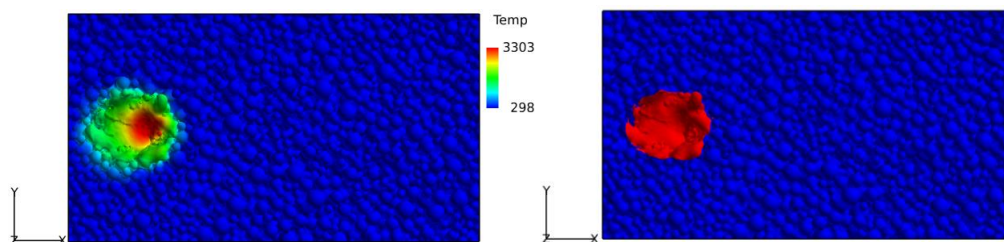
図 2-2-2 レーザービーム造形シングルビードモデル

②-1-2 レーザビーム造形モデル(インコネル 718)の計算結果

初期状態 25,000step, 1.25e-4s

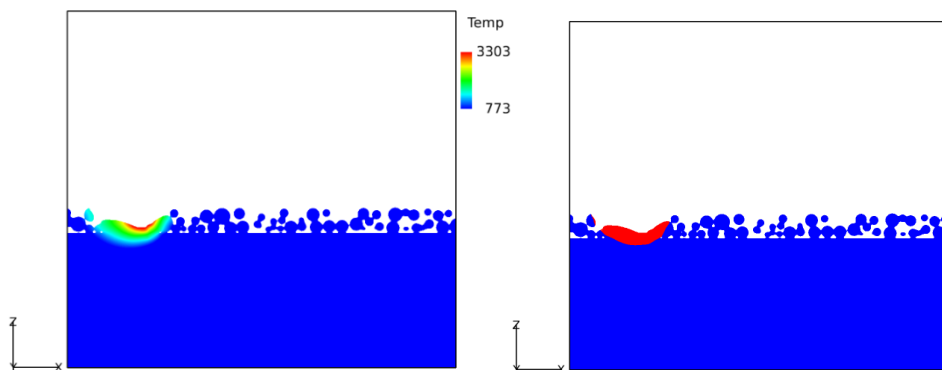
上面温度分布

上面熔融/非熔融



縦断面温度分布

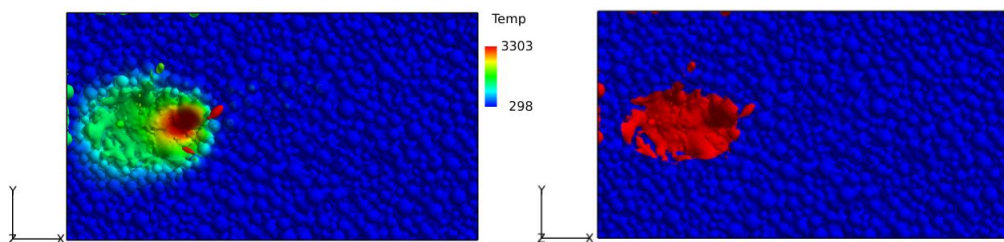
縦断面熔融/非熔融



50,000step,後 2.5e-4s

上面温度分布

上面熔融/非熔融



縦断面温度分布

縦断面熔融/非熔融

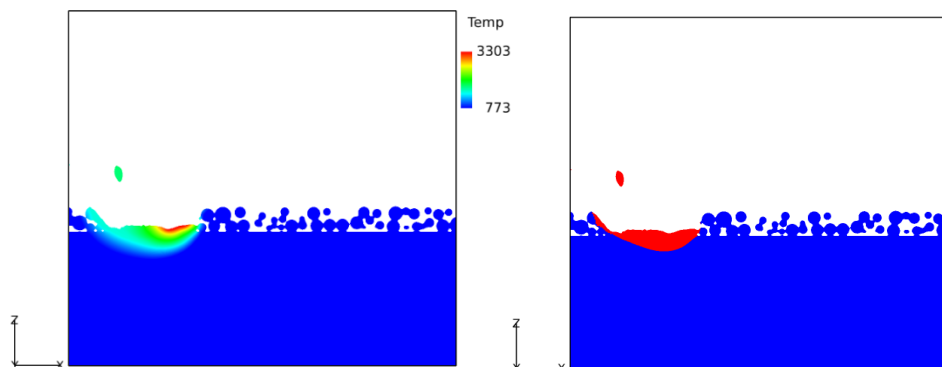


図 2-2-3 レーザビーム造形モデル(インコネル 718)熔融状態

レーザービーム造形モデル(インコネル 718)熔融状態を図 2-2-3 に示す。非圧縮性流体の方程式を使用しているため気相の速度が制限され熱伝達が悪くなる結果、蒸発量が実際より過剰に計算され、積層造形による金属厚みの増大がみられない。出力 292W、吸収係数 0.3、走査速度 610mm/s、実入熱量 87.6W、

平均入熱量 66.3 W、入熱効率 75% / 23% であった。ASTOM の熱計測データを用いたメソスケールのシミュレーションでは、吸収率 0.3-0.4 という結果が得られている。気相の速度が制限されたことによる熱伝達率の低下を考慮すると、おおよそ一致していると考えられる。

②- 2- 1 電子ビーム造形モデル(Ti64)

電子ビームのビーム径は $148.6 \mu\text{m}$ (1/e²幅) とレーザの $100 \mu\text{m}$ に比べて大きい
ため、図 2-2-4 に示すように、やや大きめのモデルについて計算を行った。

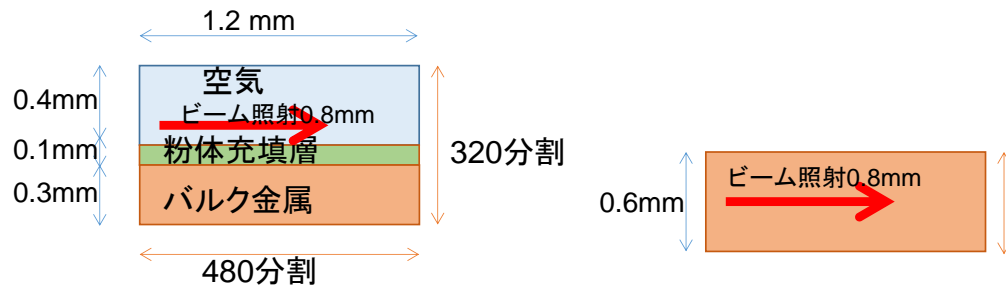


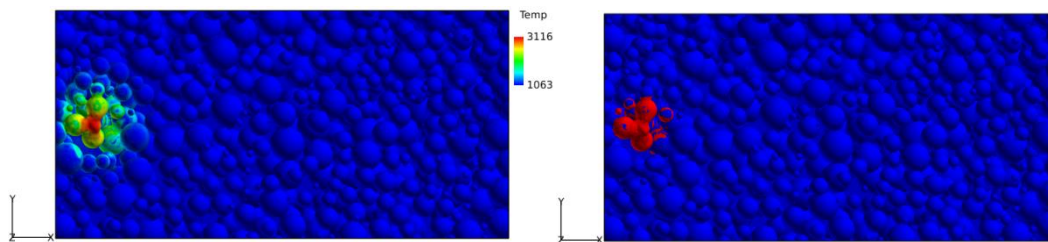
図 2-2-4 電子ビーム造形シングルビードモデル

②- 2- 2 電子ビーム造形モデル(Ti64)の計算結果

初期状態 10,000 step, 0.1e-4s

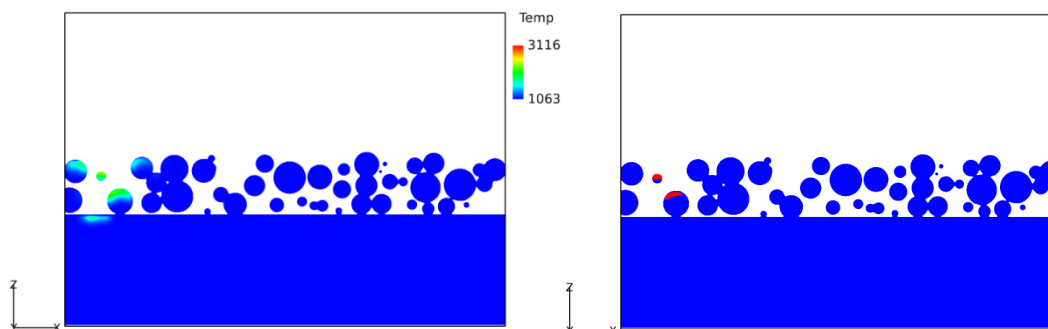
上面温度分布

上面熔融/非熔融



縦断面温度分布

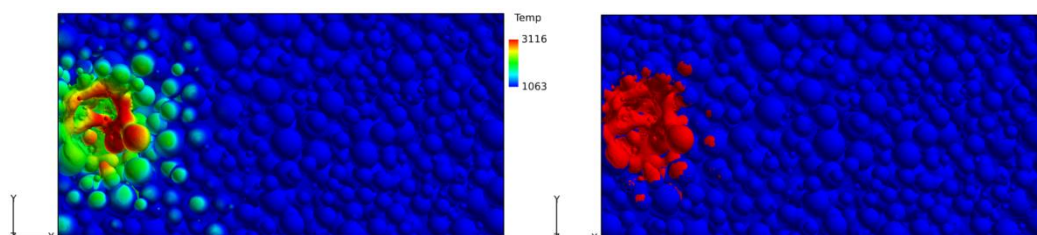
縦断面熔融/非熔融



64,000step, 0.495e-4s, 時間刻み 5e-10s

上面温度分布

上面熔融/非熔融



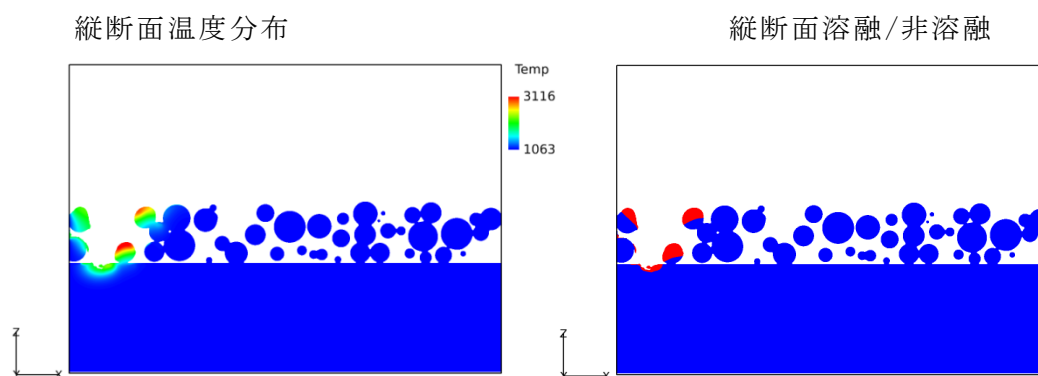


図 2-2-5 電子ビーム造形シミュレーション結果

図 2-2-5 に電子ビーム造形シミュレーション結果を示す。レーザ造形モデルと比較して明らかなように電子ビームモデルでは深い入熱が起こってはいるが、非圧縮性のモデルのため下方方向への熱伝達が小さく金属が揮発している。蒸発量が多い時の方が入熱効率は高かった。出力 360 W、吸収係数 1、走査速度 855mm/s の電子ビームについて、シミュレーション結果では実効入熱量 360W、平均入熱量 248 W、入熱効率 69% / 69%になった。ASTOM の熱計測データを用いたメソスケールのシミュレーションでは、吸収率 0.8 程度という結果が得られている。気相の速度が制限されたことによる熱伝達率の低下を考慮すると、おおよそ一致していると考えられる。

2-2-2 材料依存性予測の妥当性検証

① モデル

材料依存性の予測の可否の検討を行うため、レーザービームによる銅造形のシミュレーションを行った。図 2-2-6 にモデルを示す。

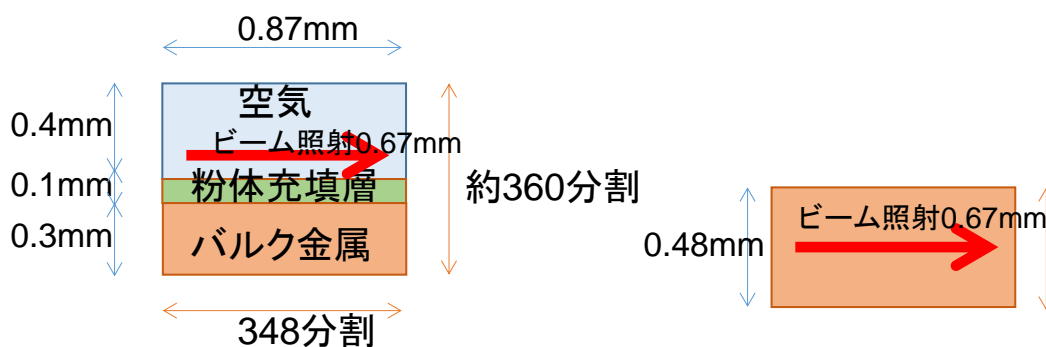


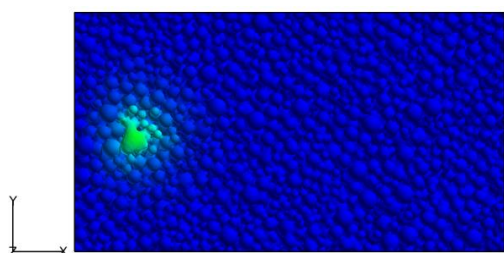
図 2-2-6 レーザビーム銅造形シングルビードモデル

② 計算結果

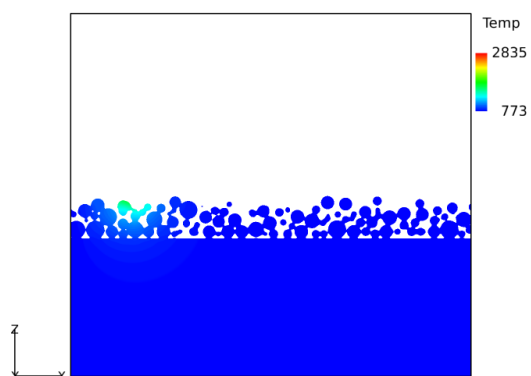
図 2-2-7 にレーザービーム銅造形シングルビードの計算結果を示す。

初期状態 25,000step, 1.25e-4s

上面温度分布

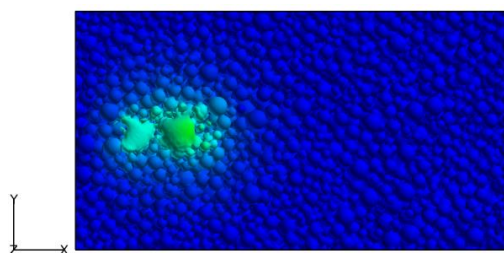


縦断面温度分布



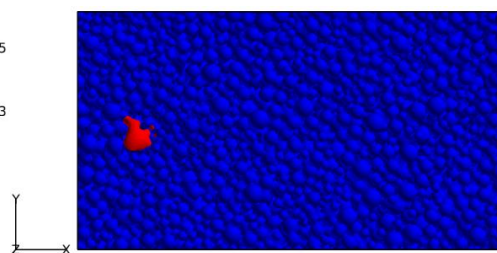
100,000step, 5e-4s

上面温度分布

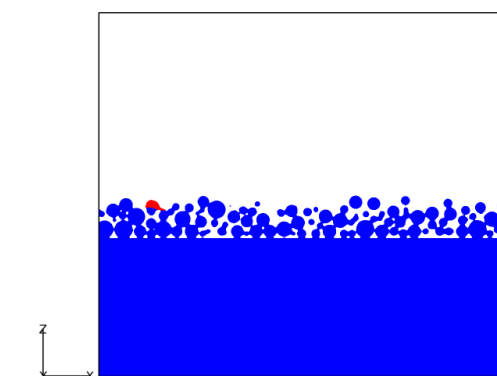


縦断面温度分布

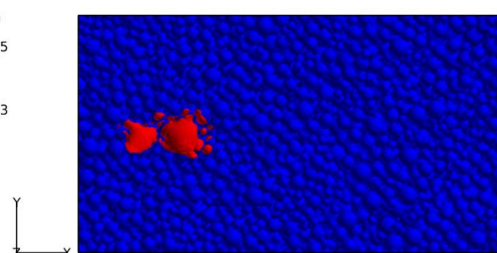
上面溶融/非溶融



縦断面溶融/非溶融



上面溶融/非溶融



縦断面溶融/非溶融

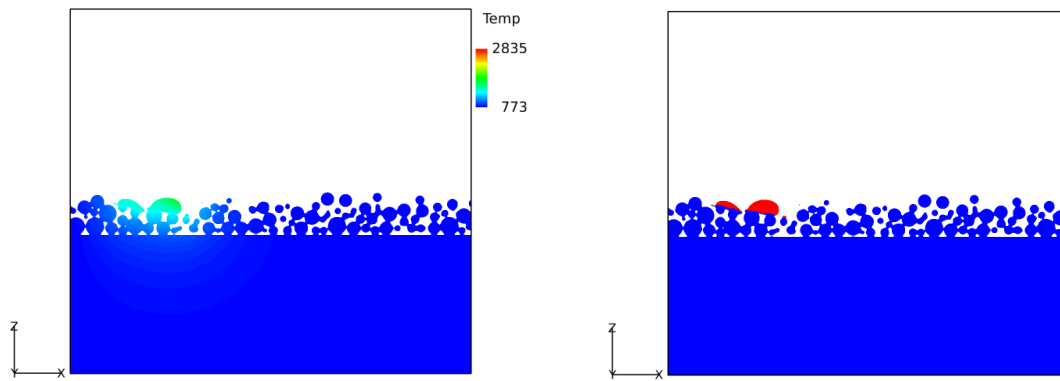


図 2-2-7 (続き) レーザビーム銅造形シミュレーション結果

③ 試験結果との比較

900W 300mm/s の造形試験での断面写真との比較を図 2-2-8 に示す。比較を議論できるレベルに達していない。圧縮性モデルでの検討が必須である。

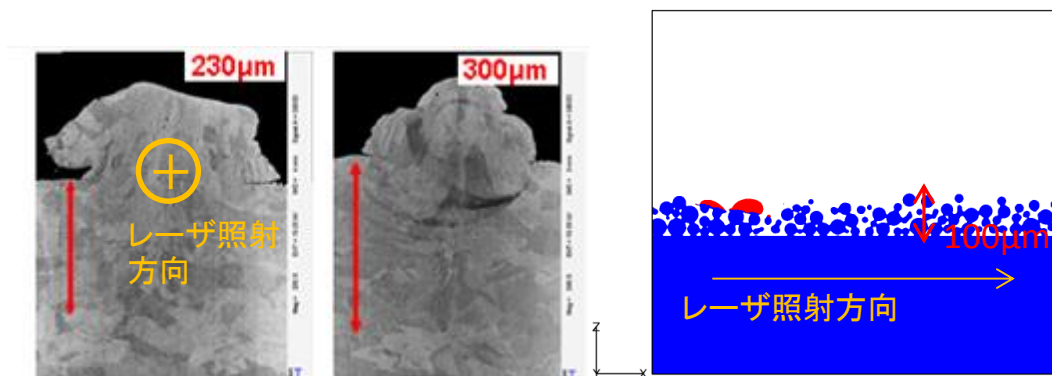


図 2-2-8 Cu 造形の試験 (左) とシミュレーション(右)の比較.

2-2-3 結晶相予測シミュレーションとの連携

今年度は今までよりも大きなモデルと長い計算時間を準備することにより、溶融と凝固過程のシミュレーションを行い、図 2-2-9 に示す凝固線上での温度勾配 ∇T および冷却速度を取得した。

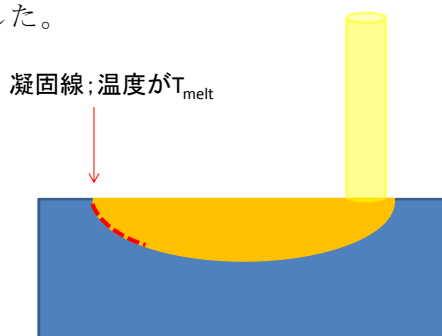


図 2-2-9 凝固線

計算機は東北大金属材料研究所の計算センターの MASAMUNE-IMR を使用し、54 ノード \times 36 コア、1920 並列の計算を行った。

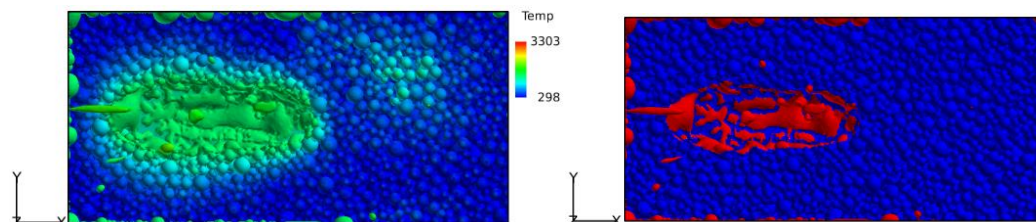
① モデル

基本的に「京」で計算したレーザのモデルと同じで、長さ方向のみ 1.15 倍したものを使用した。

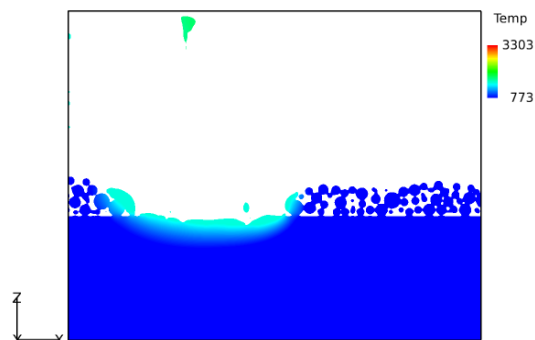
② 計算結果を図 2-2-10 および図 2-2-11 に、取得した冷却速度、温度勾配を表 2-2-1、表 2-2-2 に示す。

145,000step, 7.25e-4s

上面温度分布



縦断面温度分布



縦断面溶融/非溶融

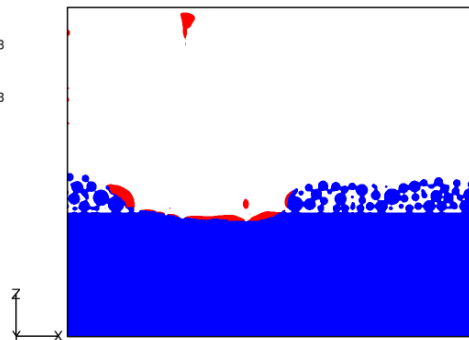


図 2-2-10 レーザビーム東北大モデル(インコニル 718)終状態



図 2-2-11 捕捉した固液共存領域

表 2-2-1 冷却速度

x 位置 mm	Y 位置 mm	Z 位置 mm	液相体積割合	エンタルピー J/kg	冷却速度 deg/s
0.2853	0.24	0.2875	0.285184	840327	-202.561
0.2853	0.24	0.285	0.739653	693056	-152805

表 2-2-2 温度勾配

x 位置 mm	Y 位置 mm	Z 位置 mm	液相体積割合	エンタルピー J/kg	温度勾配 deg/m
0.278	0.24	0.2875	0.022995	840213	11550.1
0.278	0.24	0.285	0.509553	682693	24246.2

2-2-4 仮焼結体熱伝導率予測

粉末の接続ネットワークを接触部分にのみ抵抗がある等価回路モデルで表し、電子ビームによりエネルギーを与えた時の発熱の分布を等価回路から予測する。予測した熱量を粒子間の接触部分に加え、2個の粒子の粒子径と接触面積、発熱量をパラメータとして二流体溶融シミュレーションによりネッキングの成長を見積もる。ネッキングの成長シミュレーションに関しては、粒子径2つ、接触面積、発熱量の4つのパラメータの組み合わせを網羅して行うことは不可能であるため、数十ケースの溶融シミュレーションを行い、モデルケース以外のパラメータの組み合わせについては予測値を用いる。図2-2-12に全体の流れを示した。

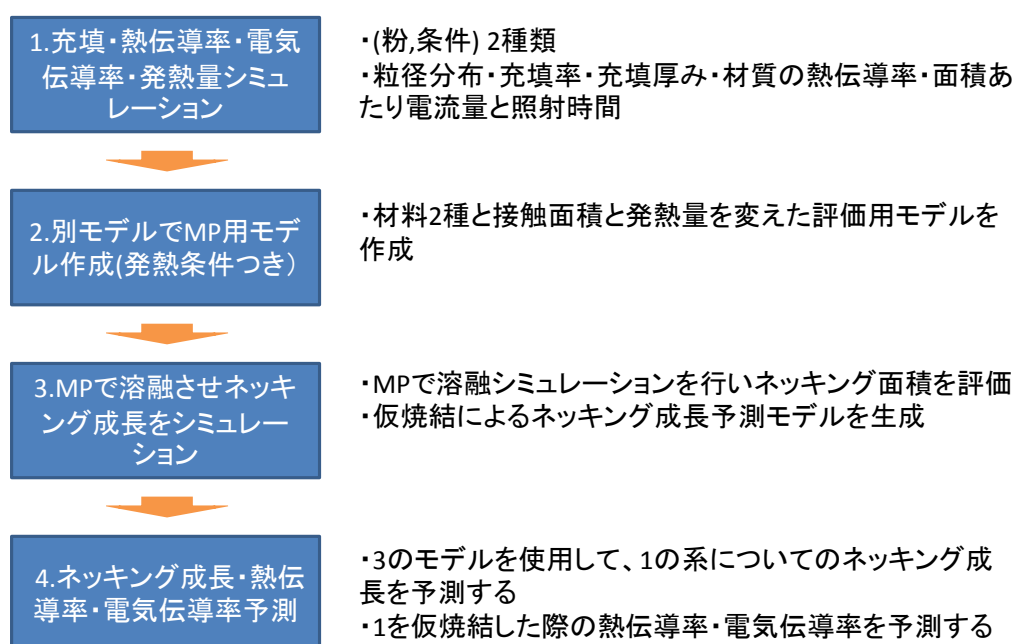


図 2-2-12 仮焼結シミュレーションの流れ

予測した値を表2-2-3にまとめた。

表 2-2-3 シミュレーションによる各種値の予測

	単位	山陽特殊製鋼	ARCAM
平均粒子径	mm	0.035	0.027
平均接触面積	mm ²	4.30E-04	2.73E-04
シミュレーションによる平均発熱量	W	5.95E-05	2.92E-05
試験条件で規格化した発熱量	J	0.072	0.020
試験での mm ² あたり照射時間	s	0.002	0.001
接触部分平均発熱量	W	44.045	20.431
ネッキング面積拡大率		2	2
粉体充填モデル電気抵抗値	Ωm	2.41E-05	2.54E-05
仮焼結電気抵抗予測値	Ω・1m ⁻¹	8.28E+04	7.86E+04
熱伝導率予測値 (ウィーマンフランク則)	W/mK	1.49E+00	1.41E+00

表 2-2-4 熱伝導率の測定結果 [W/mK]

	バルク	粉末	仮焼結体
Arcam	14.6	0.33	未取得
山陽特殊製鋼	14.6	0.39	1.83

粉末充填モデルの妥当性を確認するため、計算から得た粒子の連結数・接触面積を CT 観察から得た画像解析結果と比較した。断層像の例を図 2-2-13 に示す。

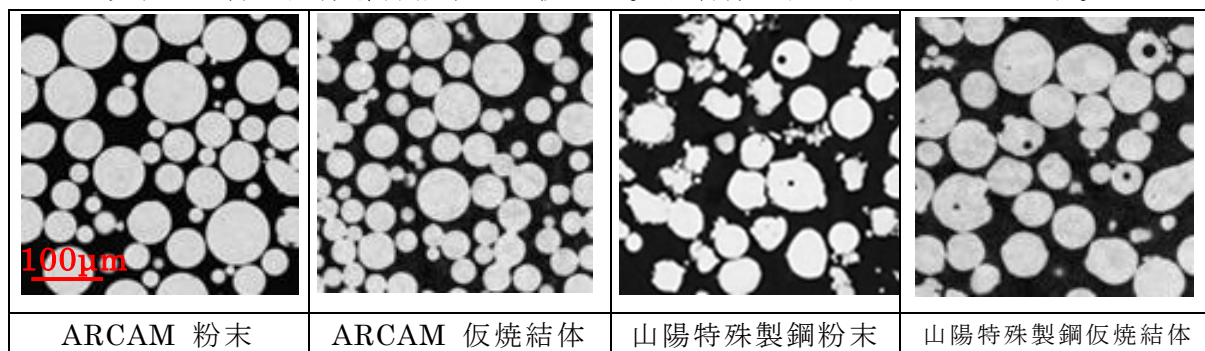


図 2-2-13 インコネル 718 粉末、焼結体の断層像 (SPring-8 で CT 観察を実施)

粉末と仮焼結体で接触面積の CT 画像解析結果を比較した。図 2-2-14 に示す通り、ARCAM、山陽特殊製鋼の両者とも仮焼結体の接触面積分布は粉末状態の接触面積分布より増加側へシフトしていることがわかった。予備加熱によって粉末粒子同士がつながる（ネッキングが形成される）様子が、X 線 CT の断層像から観察されており、ネッキングの形成により、接触面積が増加したことが示唆された。

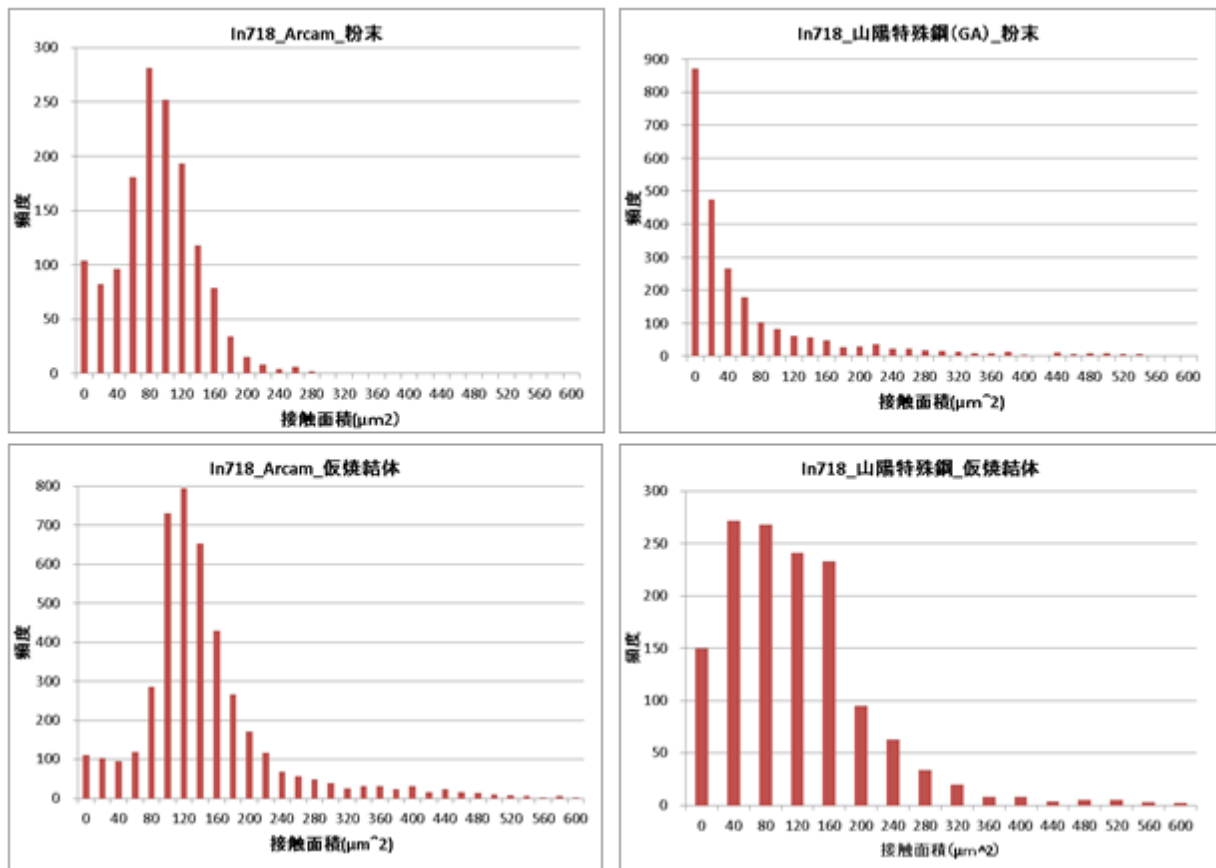


図 2-2-14 粉末と仮焼結の接触面積

2-2-5 二流体モデルの妥当性検証

非圧縮性の流体方程式を用いた二流体モデルでどこまで気液界面の状態を再現できているのかを確認するため、電磁浮遊法で浮遊させた金属液滴をシュリーレン法で観察を行った。試験の詳細については、2-2-6で述べる。電磁浮遊法の試験では、直径 6mm 程度の金属球を誘導電流により発生する磁力で浮遊させ、金属球の片側全面を覆う微弱なレーザ照射とヘリウム気体(比熱と熱伝導率が空気の 5 倍大きい: 質量の小ささから来るヘリウム原子の運動速度の大きさに起因する)で温度を制御し、気液界面からの蒸発特性を観察している。試験に対応させるため、 $40\mu\text{m}$ と $400\mu\text{m}$ 直径の金属球の浮遊状態を模擬したシミュレーションを行った。 $400\mu\text{m}$ でも実際の金属球の 1/10 スケールである。金属の材料は Ti64 を用いた。シュリーレン光学系の解像度は $10\mu\text{m}$ 程度であることが予想されていたため気液界面のクヌーセン層をなるべく大きくする目的で、試験・シミュレーションとも雰囲気の大気圧を 0.5 気圧に設定した(真空では蒸発が激しすぎ試験が不可能であり、0.5 気圧以下の有限圧力では放電が起こる危険があったため)。シミュレーションのパラメータは、(1) 蒸発・凝縮モデル、(2) 温度、(3) 重力、(4) 雰囲気ガスを除いて電子ビームモデルと同じである。大規模モデルの計算には理化学研究所「京」を使用した。

実験と同じサイズ(直径 5mm)のシミュレーションは計算規模として不可能であるため、球の直径を $400\mu\text{m}$ にして計算を行った。 $20,000\text{step}(1\text{e}-5\text{s})$ で定常状態に達している。図 2-2-15 に結果を示す。

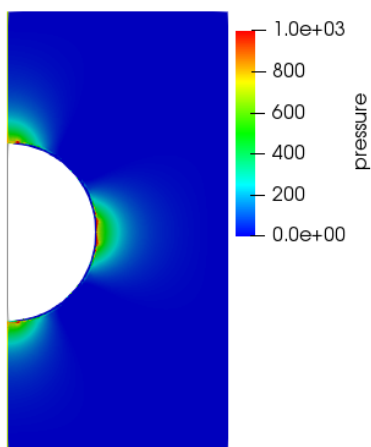


図 2-2-15 直径 $400\mu\text{m}$ 球の差圧分布(等高線図) 初期温度 2,170K

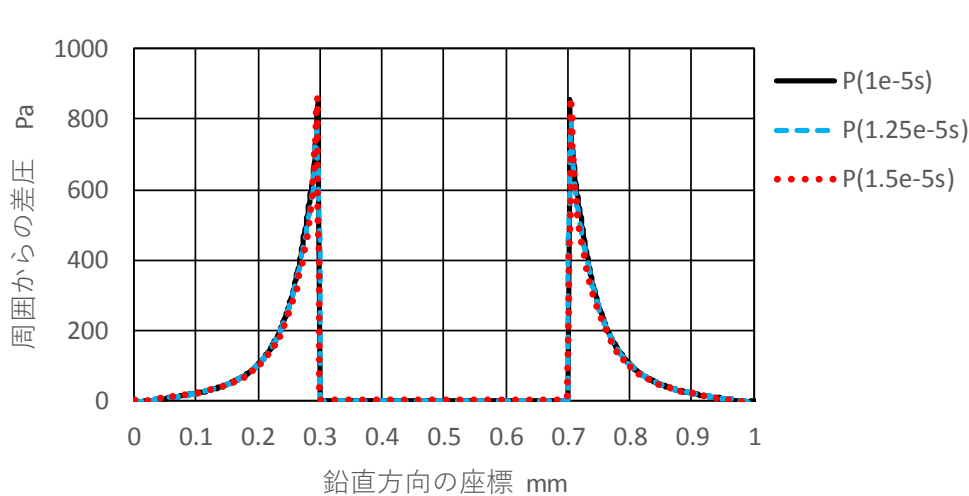


図 2-2-16 直径 $400\mu\text{m}$ 球の差圧分

球対称の分布にならないこと、分布の広がり径が半径よりも小さいことが特徴である。

① 観察結果との比較

シュリーレン法観察試験については、2-2-6に記載する。シュリーレン撮像図の解析を行い計算結果と比較検討した。



図 2-2-17 浮遊金属気液界面近傍のシュリーレン画像 矢印部分厚みは $35 \mu\text{m}$

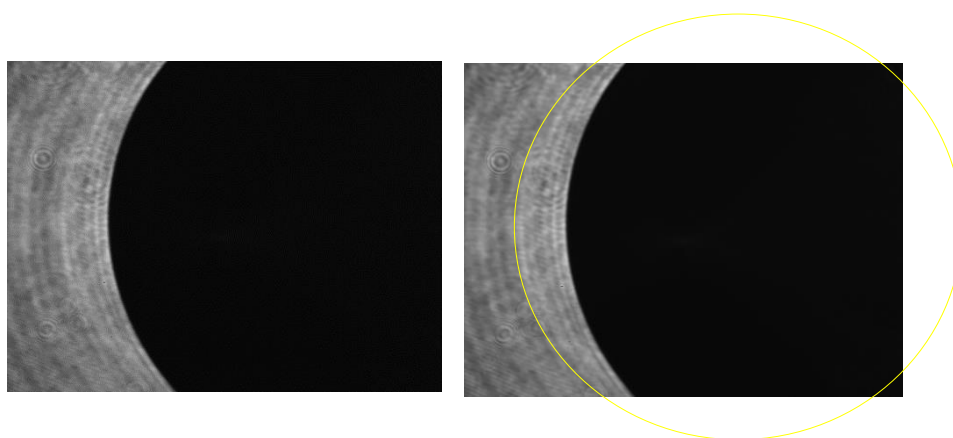


図 2-2-18 浮遊金属付近の密度変動
(金属球の半径は約 3mm 、黄色枠線で示した層の厚みは約 $550 \mu\text{m}$)

取得したシュリーレン像の解像度は $10 \mu\text{m}$ 程度で計画の数倍低かったことに加えて、干渉縞が強く、像の解析は困難ではあるものの、気液界面近傍に $35 \mu\text{m}$ の層が存在する可能性と、それよりも大きな $500 \mu\text{m}$ 程度のスケールで圧力変動がある可能性が見える。 $35 \mu\text{m}$ という長さは、 $2,000\text{K}$ における Ti-6Al-4V の金属原子の平均自由行程 $3 \mu\text{m}$ の 10 倍程度のスケールであり、理論的に言われているクヌーセン層の厚みとおおよそ一致する。圧力変動 $500 \mu\text{m}$ スケールのものは、二流体シミュレーションの結果示された $400 \mu\text{m}$ 球に対する圧力変動幅および球エンベロープの形に近い。シミュレーション結果は、この大きなスケールの圧力変動のサイズ依存性を示しており、 6mm 直径の球で $500 \mu\text{m}$ という厚みは計算結果と矛盾しない。次項目で説明するように、非圧縮性の二流体モデルでは大域的な圧力変動は正しく示せるが、近傍の微細な構造は示せないと考えられ、シュリーレン像の観察結果とシミュレーション結果との比較はそれを裏付けている。大きな変動の分布の形の要因として金属液滴の振動の可能性がある。

② 圧縮性考慮二流体モデルについて

今年度のレーザ造形シミュレーションモデルは、一昨年度に比べ 1.6 倍入熱量が大きい。また、電子ビーム造形のモデルでは真空中の沸点が約 400K 低下すること

により蒸発量は 7.5 倍増加する。また真空中では液相から気相に移動する金属原子が気体分子と衝突して蒸発を妨げられることが無いため大気圧中に比べて $1.85(=1/0.54)$ 倍程度蒸発量が多い。これら 2 つの効果を重ねる結果真空中の蒸発量は大気圧下に比べて約 14 倍大きくなる。今年度のシミュレーションでは、金属の蒸発量が多いため、気液界面での非平衡層における圧力変動が大きく、蒸発した金属気体の平均流速が熱速度に近づくと考えられる。例えば 2,000 K における Ti64 合金を構成するの原子の平均熱速度は 900m/s、音速のおよそ 3 倍ある。非圧縮性の流体の方程式で扱える気体速度の最大値はマッハ 0.3 であるため、蒸発が激しいシミュレーション条件では、気体の圧縮性のモデルが必要になる。ミクروسケールシミュレーションで、第一原理的に熔融凝固状態の予測を行うため圧力ベースの流体方程式に気体の密度依存性を取り込んだ。圧力依存性の流体方程式は一般的には密度ベースの方程式である。本方法は圧力ベースのアルゴリズムに密度補正をかけた方法を採用し、圧縮性モデルは問題なく実装できたと判断した。

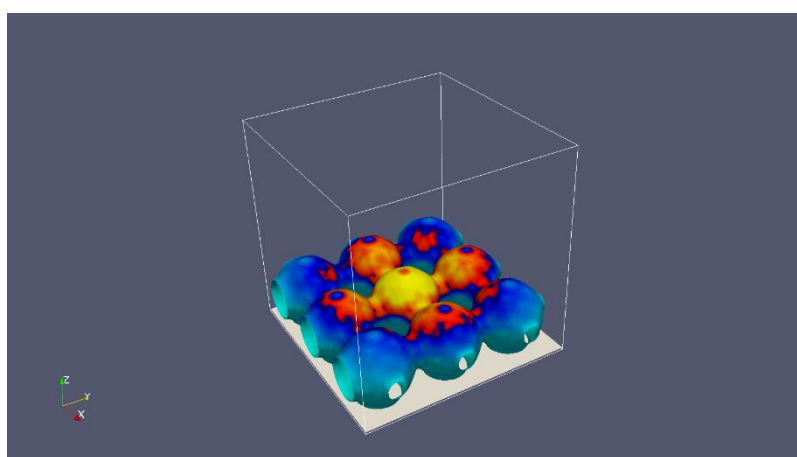


図 2-2-19 圧縮性機能テストモデル

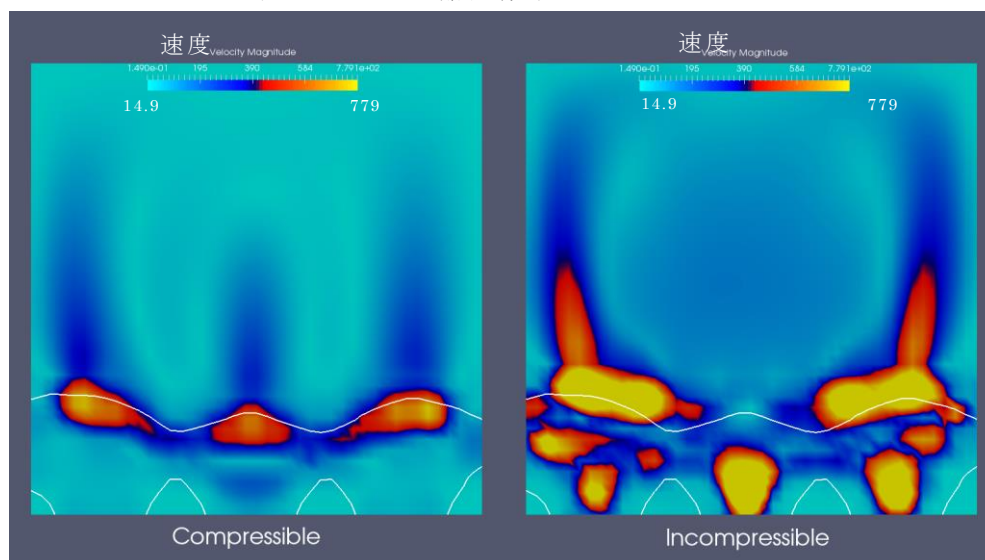


図 2-2-20 圧縮性モデル(左)と非圧縮性モデル(右)の速度分布の比較(3,000step,後)

2-2-6 観察・検証試験

① Cu 粉末へのレーザー照射時の熔融池深さ計測

①-1 目的

これまでに3D積層造形シミュレーションによる熔融池寸法の予測をInconel 718、Ti-6Al-4Vで行い、試験結果とほぼ一致することが確認できたので、レーザー吸収率、熱伝導率が大きく異なるCuでのシミュレーション結果との比較を行う。

①-2 試験方法

積層厚さ相当の溝を加工したCuのサンプルプレートにCu粉末を敷設し、標準積層造形条件(900W,300mm/s)を含む6条件でレーザーを照射し、熔融池深さを測定した。

①-3 試験結果

6通りのレーザー照射条件で形成されたビードを、ビードに垂直な断面を観察した結果を図2-2-21に示す。プレートに垂直な方向に配向した組織から熔融池深さを推定した。熔融池の境界は不明瞭で表面の凹凸も大きく、熔融池は安定に形成されなかった。Ti-6Al-4Vではレーザー出力200W、走査速度1,000mm/s程度で安定な熔融池が形成されたのに対し、Cuでは900W、150mm/sでも熔融状態は安定に維持されなかった。波長950nmの赤外線(照射レーザーの波長:1070nm)のCu金属表面の吸収率が0.1以下であるのに対し、酸化されたCu表面の吸収率は0.8を超える([1],[2])ことから、レーザー照射初期には酸化膜がレーザーを吸収し、Cu粒子は熔融し始めるが、清浄な金属表面が現れると、実効入熱量は激減し、さらに、熔融した粒子と母材との融着が進むと、Cuの高い熱伝導率によって熔融部から熱が奪われる。したがって、実効入熱量は酸化膜が消失するまでの間の吸収された熱量で決まり、熔融池の深さは大きく変化しなかったと考えることができる。

【参照文献】

- [1] 山口隆生 他, 有色金属およびその酸化物の分光放射率, 日本金属学会誌, Vol.62, No.12(1998), p1197-1203
- [2] 福山博之, 超高温熱物性計測システム (PROSPECT), 計測と制御, Vol.54, No.5 ,(2015)

② Inconel 718 ブロック造形時の造形物の温度計測

②-1 目的

熱変形予測の為にシミュレーションに必要な実効入熱量は、実験により求めているため熱変形予測を行う上でのボトルネックとなっており、ミクロスケールでの熔融凝固シミュレーションから実効入熱量を予測する検討を進める。実効入熱量は直接計測できないため、本試験で造形物の温度履歴データを取得し、データに合致するように伝熱シミュレーションモデル、実効入熱量を調整し、得られた実効入熱量とシミュレーションから得られた実効入熱量の比較を行った。

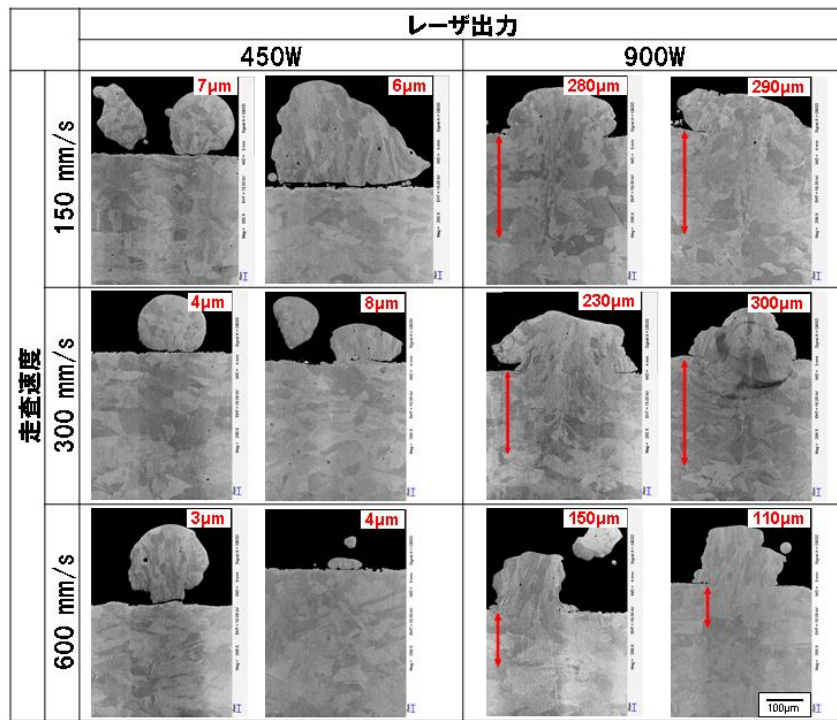


図 2-2-21 銅粉末へのレーザー照射により形成されたビードの断面状況および
溶融池深さ計測結果（写真中赤字；金属組織から推定）

②-2 試験方法

造形物に埋め込んだ熱電対によって温度履歴を計測した。熱電対はシース径 0.25mmφ の K-type 熱電対を用い、高速熱電対温度ロガー（シスコム製、最小測定間隔 10ms、内部メモリー記録型）で記録した。造形物は図 2-2-22 に示す通り、大型ブロック、小型ブロックとし、表面から 2mm、7mm の位置に熱電対を埋め込んだ。温度計測時のレーザー照射条件および走査パターンを図 2-2-23 に示す。ブロックの温度以外に造形室の壁面にも 4ヶ所熱電対を貼り、温度計測を行った。

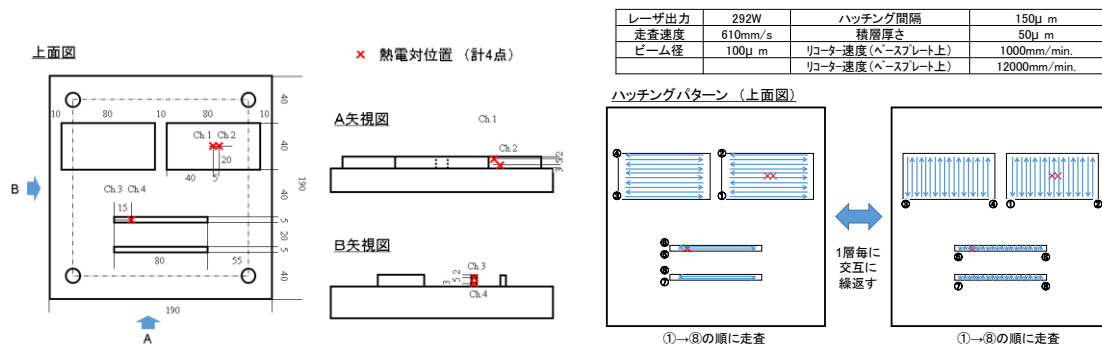


図 2-2-22 造形物の形状と温度計測位置 図 2-2-23 レーザ走査条件と走査パターン

②-3 試験結果

温度計測結果を図 2-2-24 に示す。ノコギリ状の温度変化は Chiumenti 等([1])からも報告されており、温度曲線に周期的に現れるピークは熱電対上をレーザーが通過するタイミングと対応すると考えられる。また、ピークの高、低、高、低の繰返しは走査方向に対応し、ブロックの短辺、長辺に平行な走査（図 2-2-24 の右図と左図）はそれぞれ高いピーク、低いピークに対応すると推定される。Ch.1、

Ch.2 の大型ブロックの温度に対して、Ch.3、Ch.4 の小型ブロックの温度は相対的に低く、レーザーでハッチングする面積によって造形物の温度が変化することが示唆される。

[1]:Chiumenti, Michele, et al. Additive Manufacturing 18 (2017): 171-185.

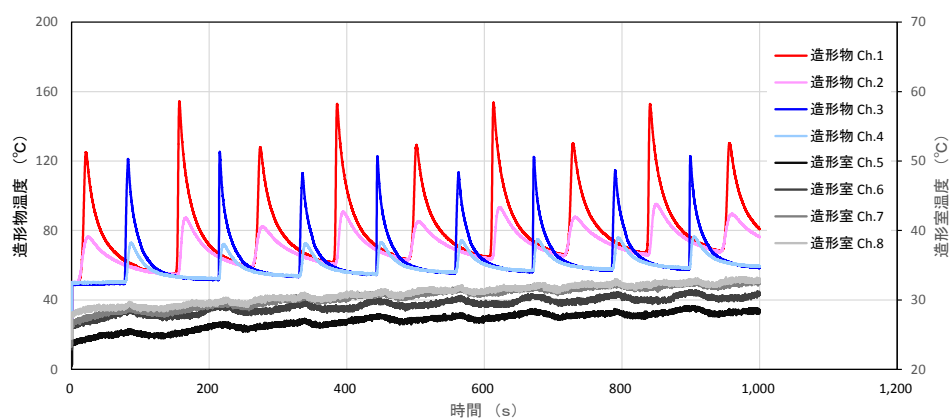


図 2-2-24 5層積層造形中の造形物および造形室の温度変化

③ シュリーレン法による金属融体表面近傍の観察

③-1 目的

本プロジェクトで開発した熔融凝固シミュレーションでは、雰囲気流体として取り扱う二流体モデルを用いていることから、高エネルギー密度レーザー照射時に熔融池から飛散するスパッタや発生蒸気によるプルーム流れが再現できる特徴がある。この二流体モデルの優位性を明確にするため、蒸発時に金属融体表面近傍に形成される非平衡層（クヌーセン層）の厚さを計測し、シミュレーションと比較することとした。

③-2 装置構成・観察方法

金属融体の表面近傍に形成されるクヌーセン層では気体の密度、圧力等が急激に変化することから、シュリーレン法による観察が可能と考えられる。2,000K以上に加熱された金属液滴の表面近傍に形成される数十 μm 以下の厚さのクヌーセン層の観察を行うため、電磁浮遊と長距離顕微鏡を組み合わせた観察実験を行うこととした。(図 2-2-25)

シュリーレン法による観察を行うためのレーザー光源(波長 640nm、出力 20mW)を入射窓側に設置し、観察用窓に Qestar 社製長距離顕微鏡と CCD カメラを設置した。

サンプルは誘導コイルに加え、サンプル上面へのレーザー照射(波長 807nm、最大出力 210W、ビーム径 $\phi 4\text{mm}$)で加熱し、温度はサンプル下面で放射温度計により計測した。雰囲気ガスは Ar-5% H_2 を使用し、チャンバ上部から下部に 1L/min の流量で流し、圧力は 50kPa に保持した。金属融体の振動や融体内の対流を抑制するため、超伝導マグネットにより 3-4T の磁場を印加した。

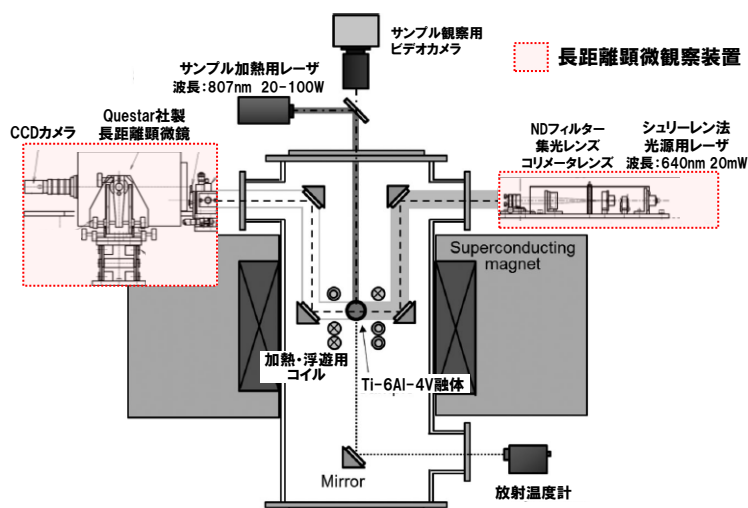


図 2-2-25 超高温物性計測システムに装着した長距離顕微鏡観察装置の構成図

③-3 観察結果

サンプル上面近傍および側面近傍の観察結果を図 2-2-26 に示す。レーザーが照射され、より高温に達していると予想される上面付近では、最高温度の 2,220K で背景よりも明るい層が観察された。明るい層の厚さは、サンプルの観察前後の平均質量 0.4394g を 2,220K での密度 4,010kg/m³ で割り、サンプルを球体として求めた直径 5.937mm から算出した結果、35 μm であった。再現性を確認するため、サンプルを冷却後、再度、観察を行った際にも、同様に厚さ 40 μm の背景よりも明るい層が観察された。

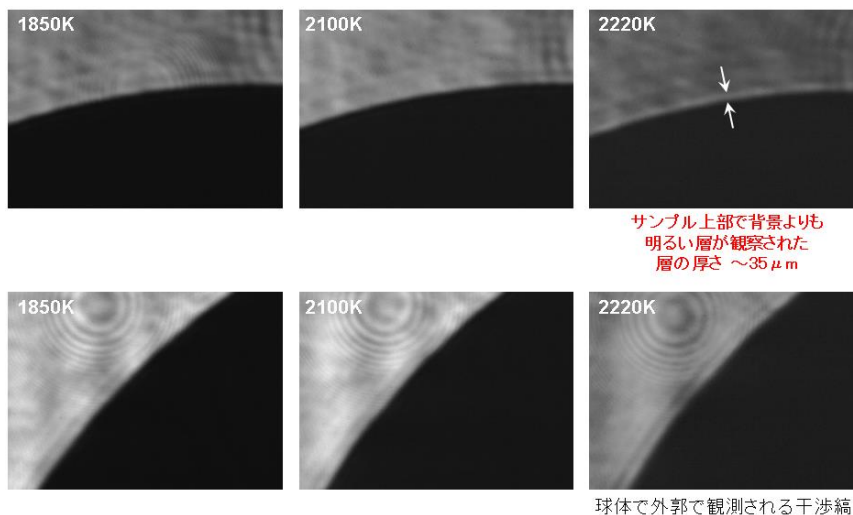


図 2-2-26 Ti-6Al-4V 融体上面近傍（上段）および側面近傍（下段）の観察結果
 図中温度は Ti-6Al-4V 融体下面温度

④ 原料粉末と造形品質の突合せ

原料粉末の品質及び充填状況と、造形物の品質との関係性を調べるため、粉末と造形物の X 線 CT 観察から得られた画像を解析して、粉末の粒径分布・粒子内気孔率と造形物中の気泡含有率の突合せを行った。

造形物中の気泡の CT 画像解析結果を図 2-2-27 に、CT 画像解析データから求めた造形物中の気泡含有率を表 2-2-5 に示す。

表 2-2-5 造形物中の気泡含有率

	粉の種類	造形物中の気泡含有率 (vol%)
(a)	ARCAM	0.0052
(b)	山陽特殊鋼-N2アトマイズ [®] (旧)	0.2381
(c)	山陽特殊鋼-Arアトマイズ [®]	0.1169
(d)	山陽特殊鋼-N2アトマイズ [®] (新)	0.0099
(e)	Prep	0.0005

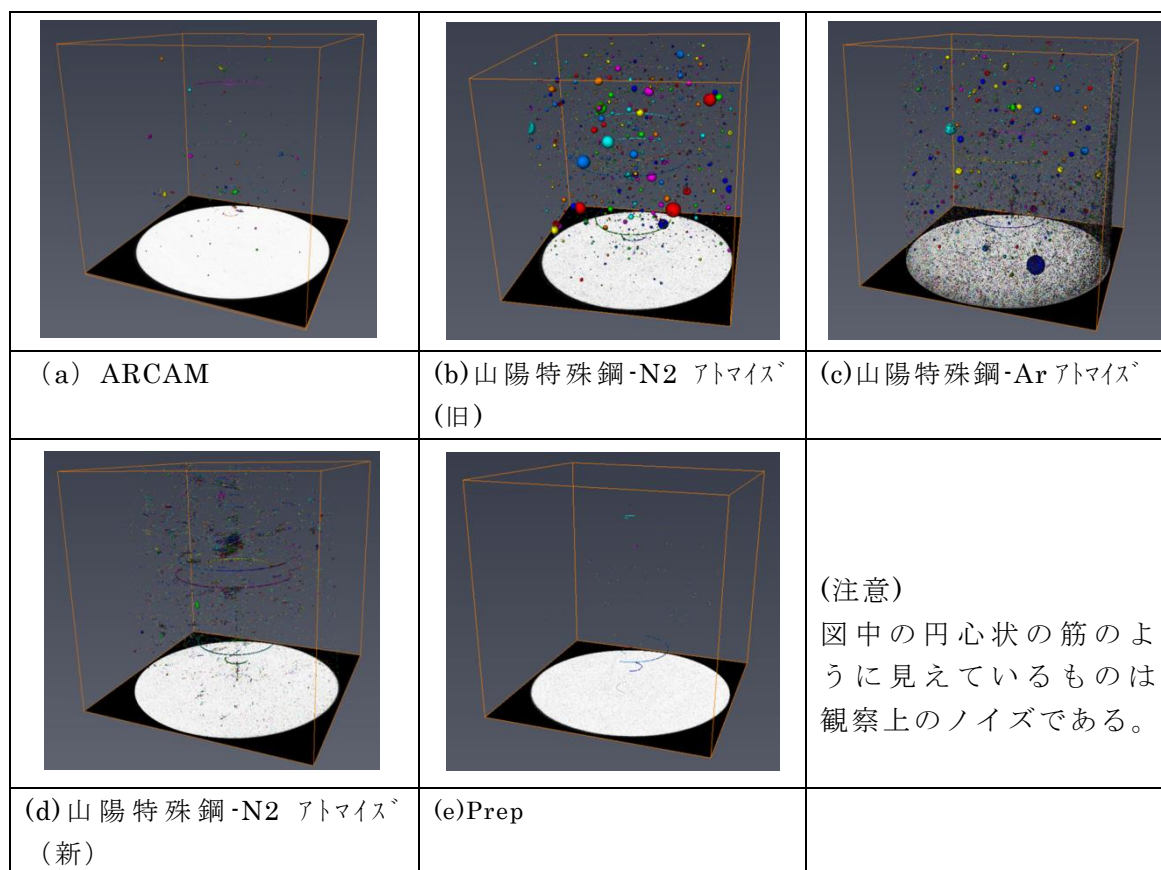


図 2-2-27 造形物中の気泡解析 -1

原料粉末の粒子気孔分布と造形物中の気泡分布を比較したところ、ほぼ一致することがわかった (図 2-2-28)。さらに、粉末の気孔含有率と造形物中の気泡含有率の傾向がよく一致することがわかった (図 2-2-29)。これらの結果から、造形物の品質には、原料粉末の粒子内気孔分布が関係していると考えられる。(e)Prep は造形中の気泡が数個であり比較にならないため省いた。)

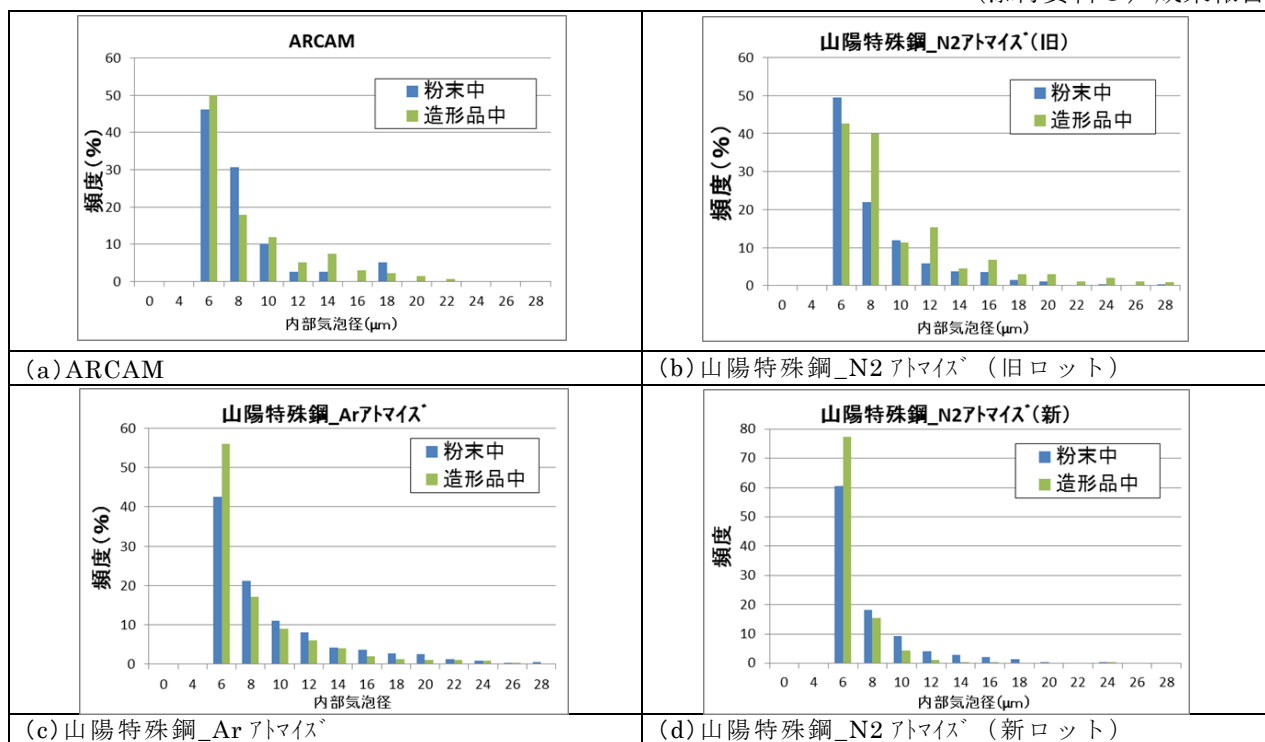


図 2-2-28 粒子内と造形物中の気泡径の比較 (計測値)

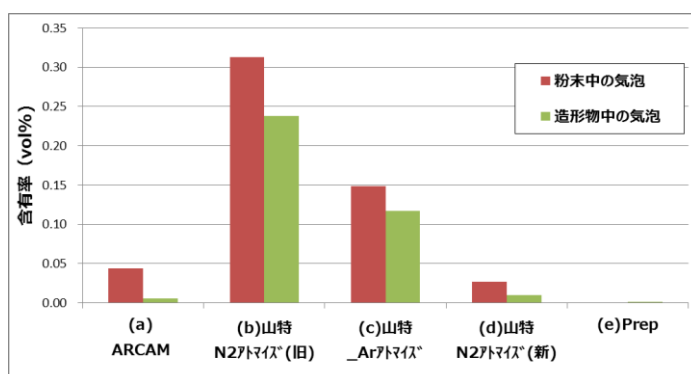


図 2-2-29 粒子内と造形物中の気泡率の比較 (計測値)

<まとめ>

- ・粉末上にレーザまたは電子ビームを走査することで生じるミクロスケールでの溶融・凝固現象を、蒸発気体と溶融金属の二流体モデル、粉末充填モデル、蒸発速度推算式を採用することで、実験値を必要としない第一原理的に模擬するための物理モデルを構築した。
- ・流体の圧縮や膨張による密度変化が小さく、その影響を無視できる場合には、非圧縮性流体として流れの計算を大幅に簡略化し計算することができるが、ミクロスケールでの溶融・凝固現象に対し、非圧縮性のシミュレーションの適用限界を明らかにした。
- ・超音速流れや体積の圧縮・膨張が大きい場合は実現象と同じく密度変化を考慮した圧縮性流体として取り扱う必要がある。蒸発金属の速度が非常に速い条件に対し圧縮性の二流体モデルによるマイクロシミュレーションプログラムを開発し気体速度制限なしで計算が可能になった。

2-3 熱変形予測シミュレーション技術の開発

2-3-1 汎用ソフトによる熱変形予測シミュレーション技術の開発

① 目的

付加製造における造形物の熱変形予測は商用の専用ソフトが供給されているが精度の保証はされておらず、また、データベースに供給された材料やレシピ以外での使用はできない場合が多い。これは、実際には、熱変形予測に考慮しなければならない造形条件が十分に解明されていないことが原因である。

そこで、汎用ソフトにより熱変形予測シミュレーション技術を開発し、熱変形予測に考慮すべき造形条件の解明を目的とする。

平成29年度までに一様等方的な熱収縮と考慮した有限要素解析により変形の予測誤差は3%以下に抑えられることが確認されているため、同様の手法を用いて積層面内のレーザ走査方向の熱変形への影響を明らかにする。

② 方法

②-1 両片持ち梁試験片の造形

インコネル718合金両片持ち梁試験片を造形した(図2-3-1)。造形条件はレーザ出力292W、走査速度610mm/s、スポット径 $\phi 0.1\text{mm}$ 、ハッチ幅0.15mm、積層厚さ $50\mu\text{m}$ とした。積層面内のレーザ走査は蛇行方式としたが、走査方向はx方向のみ、y方向のみと、x方向の走査をした積層面とy方向のみを走査した積層面を交互に重ねるxy方向と3種類用意した(図2-3-2)。造形後に片側の片持ち梁の下側のサポートをワイヤ放電加工機で切り離し、残留応力を解放した(図2-3-3)。

②-2 熱変形解析

インコネル718合金造形物の熱変形解析を汎用ソフトANSYS 18.2を用いて行った。解析対象は図2-3-1のモデルとし、初期温度条件は全体を $1,260^{\circ}\text{C}$ とし、全体を 100°C に冷却するとした。この際の熱膨張係数は等方とした。

③-3 接触式寸法計測

サポート切断前の造形物の寸法をノギスにより接触式の寸法計測を行った。

(a)幅方向、(b)高さ方向、(c)長さ方向ともに接触式寸法計測の値はばらつきがあった。また、FEM解析結果よりも全体的に収縮が少ない。これは表面の凹凸に寸法測定値が影響されているためであると考えられる(図2-3-4)。また、サポート切断前の造形物では走査方向による影響は見られなかった。

(a)幅方向は 0.05mm 程度の収縮と予測され、長手方向の採寸位置による傾向は特にみられず一定と考えられた。

(b)高さ方向は中央部が最も収縮し 0.15mm 程度であった。これは中央部に向かって縦方向の収縮と共に長手方向の収縮があるた

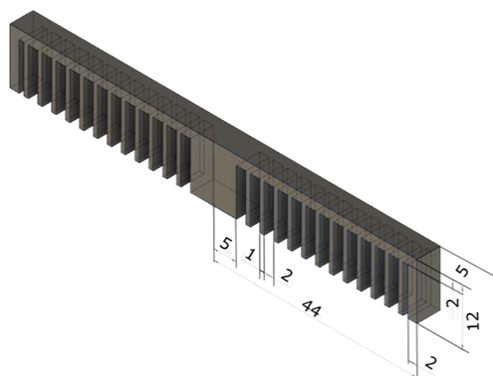


図 2-3-1 解析モデル

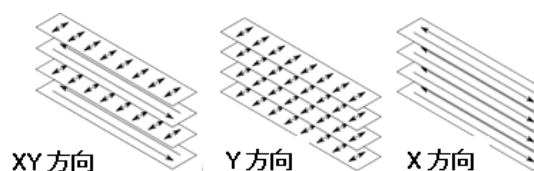


図 2-3-2 造形時のレーザ走査方向



図 2-3-3 造形時のレーザ走査方向

め片持ち梁部は中央部に向かって斜め下方向に引っ張られたためと考えられる。そのため、両端が最も高さ方向の収縮が小さい。

同様な傾向はFEM解析でも得られたが、解析結果は全体的に収縮量が大きかった。(c)長さ方向も場所による値のばらつきは少なく、走査方向による影響も見られなかった。

③-2 非接触式寸法計測

サポート切断後の造形物に対して gom ATOS Core を用いた非接触式寸法計測を行った。図 2-3-5 に両片持ち梁の上面で長手方向中央部の高さの分布を示す。図中、Z Nominal は設計値を示す。Z Actual Modified は高さ測定値である。Z Dev Modified は設計値と測定値の差分である。X Position の負側がサポートは切断していない部分であり、接触式寸法計測の値と比較ができる。この領域の差分値は平均-0.16mm であり、図 2-3-4(b)の値と一致している。

サポート切断部分の跳ね上がり量は

x 方向	2.274 mm
y 方向	1.442 mm
xy 方向	1.430 mm

だった。これはレーザートラックが凝固する際に幅方向の収縮が大きく影響するためと考えられる。y 方向と xy 方向がほぼ同じ値となったことから、交互の積層によって x 方向と y 方向の熱変形への影響が中間的に作用するわけではなく、より大きな熱変形を示す走査方向の積層よりも熱変形の小さい側の積層の方が全体の熱変形に影響することが示唆された。

このことから、積層面毎の走査方向は交互にするか、あるいは、方向を回転させていくことにより全体的に小さくできる可能性が示唆された。

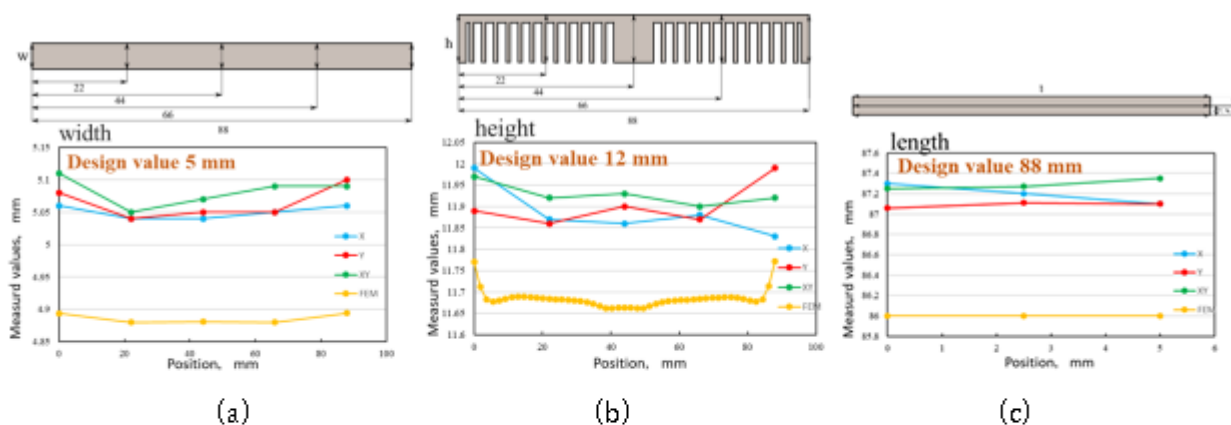


図 2-3-4 接触式寸法計測による造形物寸法と FEM 解析結果

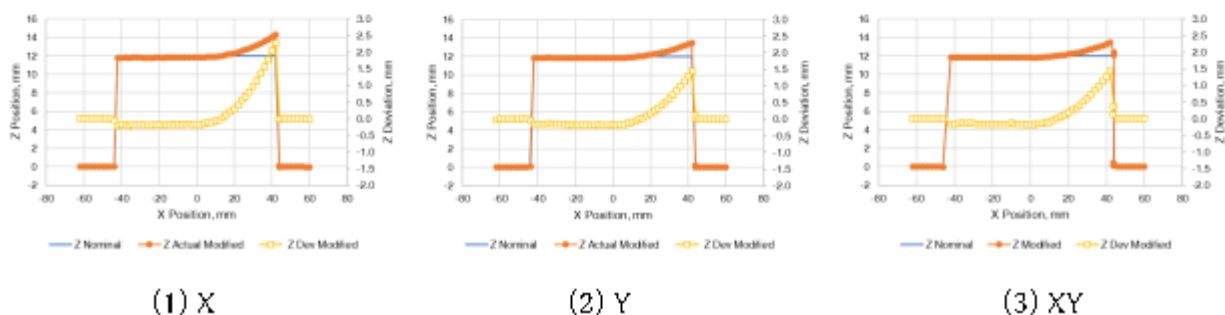


図 2-3-5 非接触式寸法計測による造形物寸法

2-3-2 固有ひずみ法による熱変形予測シミュレーションの開発

熱変形をシミュレーションで予測する方法としては、溶接シミュレーションに用いられる熱弾塑性解析手法が一般的であるが、この手法では造形物全体の温度履歴を非定常的に計算し、その温度履歴と温度に依存した物性値を用いて熱弾塑性解析を造形プロセスの全時刻で行う必要があるため、アーク溶接を模擬したシミュレーションでも計算時間が膨大になることが知られている。3次元積層造形、特にパウダベッド方式では積層の回数も非常に多くなるため、計算時間はアーク溶接に対するシミュレーションよりもさらに長くなることが予想される。

大型構造物の溶接シミュレーションにおいては、固有ひずみ法を用いた解析が行われることも多い。固有ひずみ法は溶接による変形が「固有ひずみ」という概念で整理されることを利用して、高速に溶接変形を算定する手法として発達してきた。

そこで、この概念を3次元積層造形に使用できるように拡張し、非定常的な熱履歴のプロセスを考慮せずに、造形物の変形を高速に計算する手法である固有ひずみ法を用いた変形シミュレーションソフトウェアに必要な3次元積層造形用固有ひずみデータベースを、熱弾塑性シミュレーションにより構築した。構築した固有ひずみデータベースは、2種類の粉末材料（Inconel 718、Ti-6Al-4V）に対するレーザービームパウダベッド方式および電子ビームパウダベッド方式向けのものである。

(1) パウダベッド用伝熱解析モデルの構築

固有ひずみを熱弾塑性解析結果から同定するためには、造形時の全体の状態の一部を模擬した解析モデルを構築する必要がある。パウダベッド方式では、造形条件（レシピ）やレーザー/電子ビームのスキャンパスによって変形が異なってくるため、これらの条件を反映できる解析モデルである必要がある。Keller[1]らは、図2-3-6で示されるHatchモデルで熱弾塑性解析を行い、その変形量から固有ひずみを同定した。

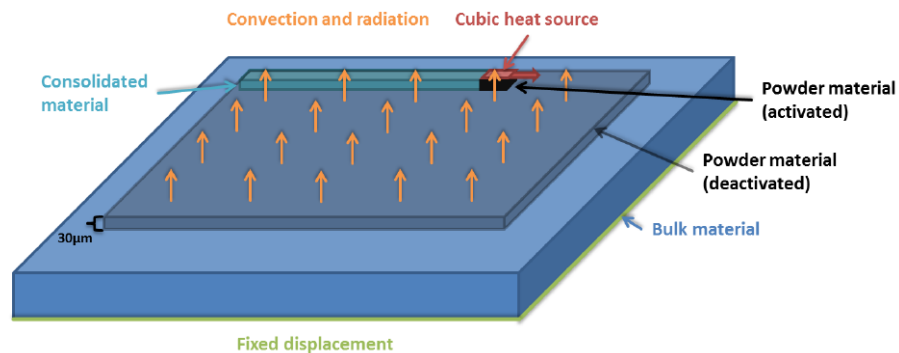


図 2-3-6 Hatch Model (参考文献[1])

このモデルでは、金属（Bulk material）の上に $30\mu\text{m}$ の金属粉末を敷き、その粉末を縁から順に Cubic heat source で入熱していくものとなっている。伝熱解析の境界条件は、粉末表面からの熱伝達と輻射、構造解析の境界条件として下部の全面固定の条件で、熱弾塑性解析を実施している。Keller らの Hatch モデルでは、下部の金属が粉末の存在領域よりも大きく、パウダベッド方式を模擬するモデルとしては不自然なため、図 2-3-7 に示す粉末の周りを金属で埋めた解析モデルを構築した。

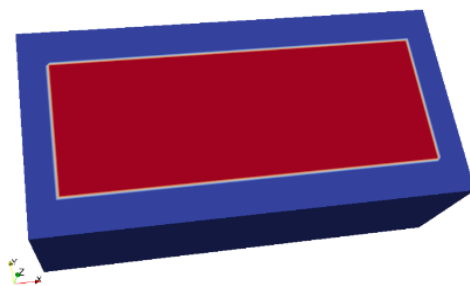


図 2-3-7 パウダベッド用伝熱解析モデル（青：金属、赤：粉末）

パウダベッド方式の造形では、粉末が全く拘束されずに熔融凝固するのは、一番始めのパスのみで、その後のパスはどちらかの側面が熔融凝固した金属になっている場合が多い。その状態を考慮して、粉末の周辺を金属でモデル化した。また、Keller らの Hatch モデルは造形面が正方形であるが、実際の造形の場合、スキャンパスは長手方向と短手方向がありそれによって変形にも異方性が生じることを考慮し、解析モデルの造形面を長方形とした。これにより、固有ひずみのスキャンパスによる異方性の同定が容易になることが期待できる。この解析モデルを用いた伝熱解析、熱弾塑性解析に関しては、以下で説明する。

参考文献

[1] N. Keller and V. Ploshikhin, “NEW METHOD FOR FAST PREDICTIONS OF RESIDUAL STRESS AND DISTORTION OF AM PARTS”, Solid Freeform Fabrication Symposium, At Austin, Texas, Volume: 25

(2) パウダベッド用伝熱解析モデルによる伝熱シミュレーション

メゾスケール伝熱解析シミュレータによるパウダベッド方式の熔融凝固を模擬した解析は、熱源はガウス型熱源、熱伝達は気相熱伝達、輻射熱伝達、液体金属の蒸発に伴う気化熱、融点による粉末・固体の物性値切替えを考慮した解析である。

最初に、粉末がインコネル 718 の場合の、レーザービームパウダベッド方式での伝熱解析結果を説明する。解析モデルは図 2-3-7 に示されるもので、造形レシピは粉末厚さ 0.05mm、レーザー出力 300W、レーザー径 0.15mm、走査速度 600mm/sec、ハッチ距離 0.15mm である。レーザースキャンパスは、図 2-3-8 に示されるものである。

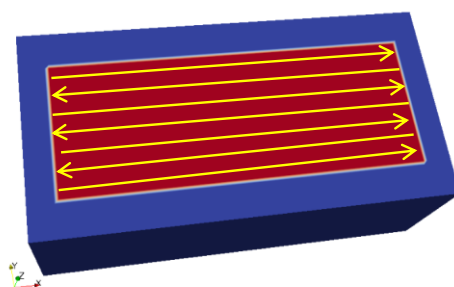


図 2-3-8 レーザービームパウダベッド方式のレーザースキャンパス（インコネル 718）

この解析条件でのメゾスケール伝熱解析シミュレータによるパウダ分布履歴、メルトプール履歴、温度履歴を、それぞれ図 2-3-9、図 2-3-10、図 2-3-11 に示す。この条件では、メルトプールが安定的に形成され、未熔融部もほとんど発生しないことが分かる。また、図 2-3-11 では一旦熔融して固体金属の物性値に切り替わった領域には熱が伝わっているが、粉末の領域は熱伝導率が小さいため、ほとんど熱が伝わらないことが分かる。

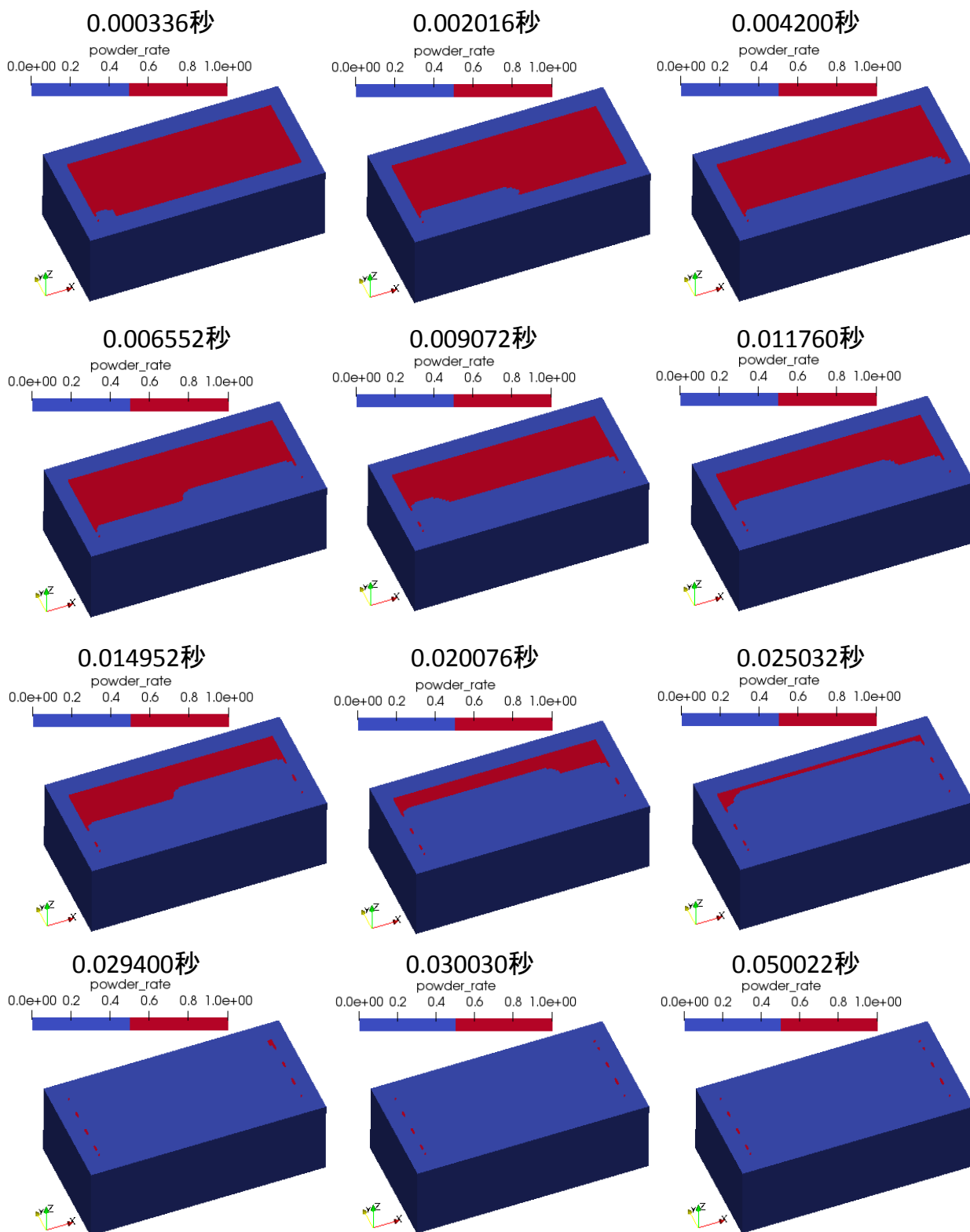


図 2-3-9 レーザビームパウダベッド方式のパウダ分布履歴 (インコネル 718)

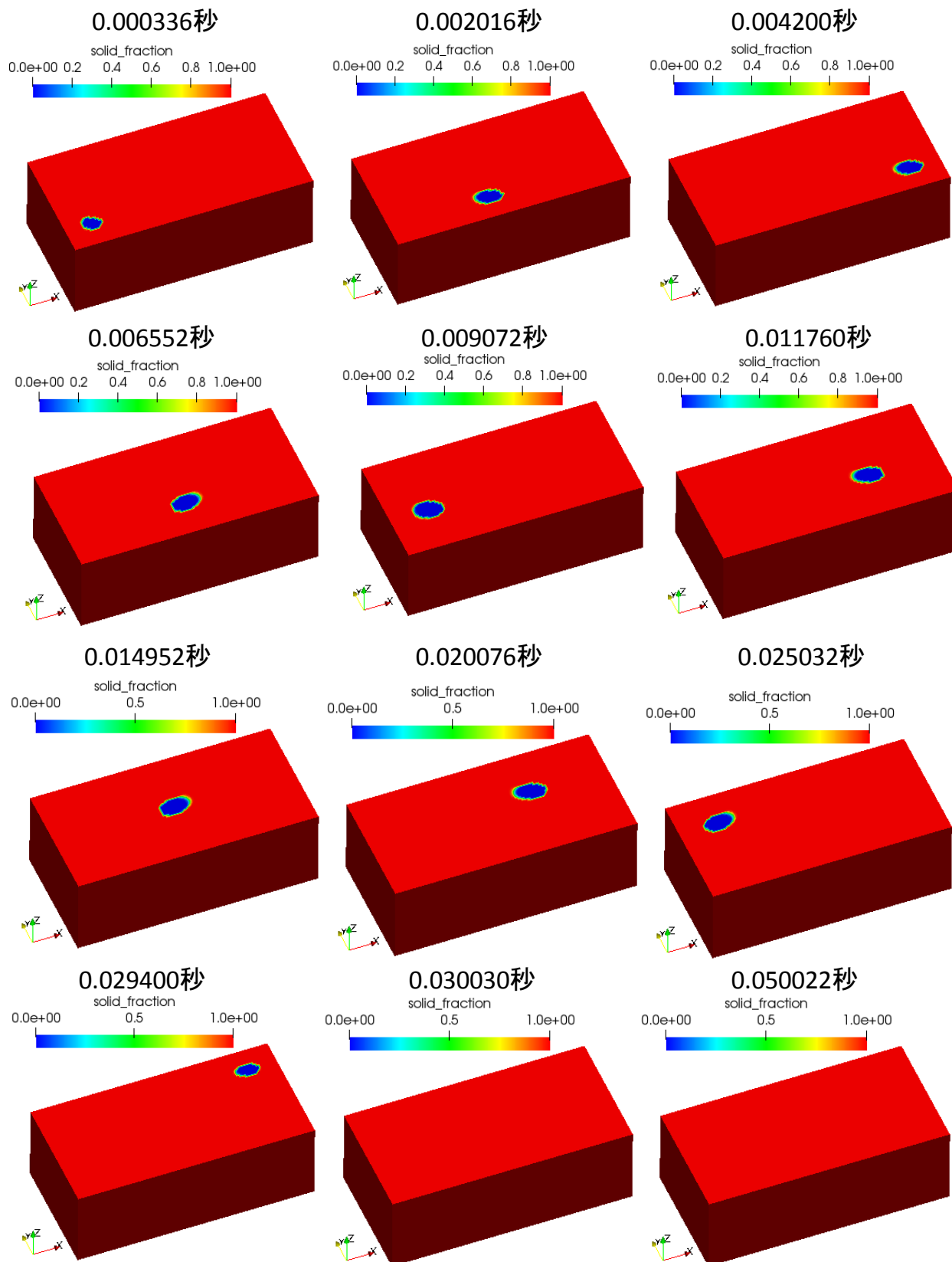


図 2-3-10 レーザビームパウダベッド方式のメルトプール履歴 (インコネル 718)

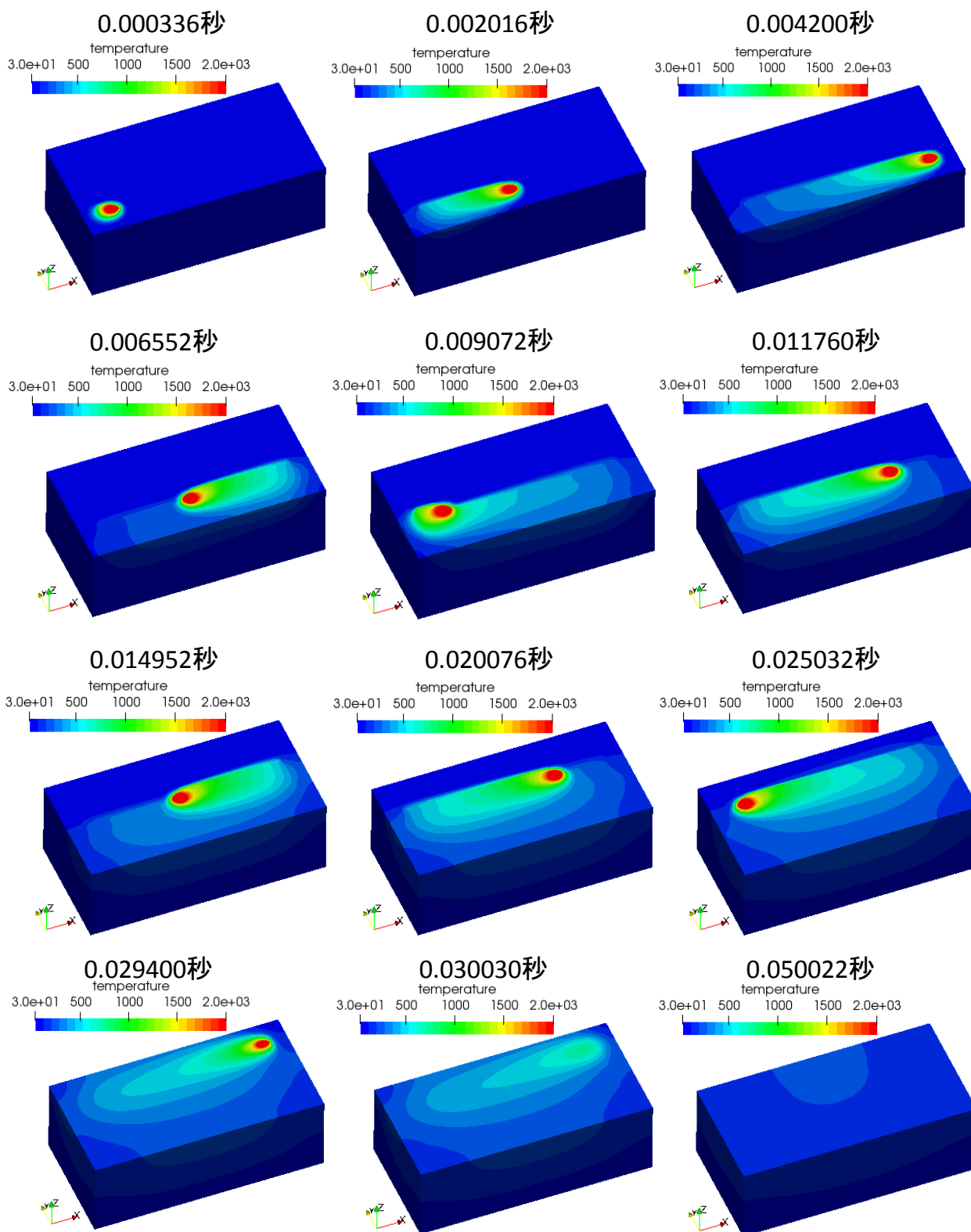


図 2-3-11 レーザビームパウダベッド方式の温度履歴 (インコネル 718)

伝熱解析結果からは、凝固速度および温度勾配が計算できるが、これらの関係は造形物の結晶組織の予測には重要である。レーザビームパウダベッド方式の場合の凝固速度と温度勾配の2次元グラフを、図 2-3-12 に示す。凝固速度は $0.001[\text{m/s}]$ から $2[\text{m/s}]$ 、温度勾配は $10^6[\text{K/m}]$ から $5 \times 10^7[\text{K/m}]$ の領域にある。この解析モデルではレーザスキャンパスは、3 往復しているために熱がこもり高温領域が広がった影響と考えられる。

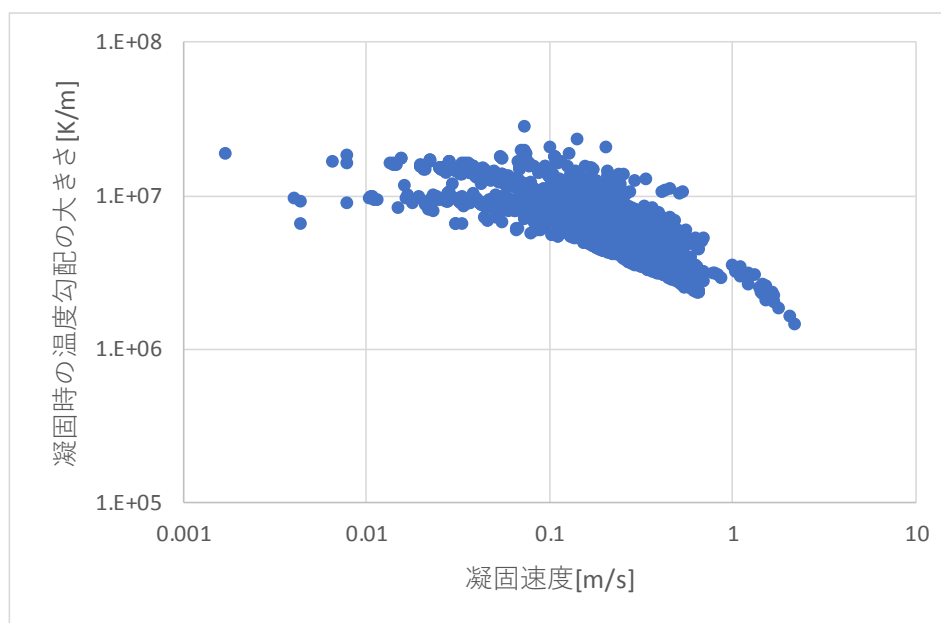


図 2-3-12 レーザビームパウダベッド方式における凝固速度[m/s]と凝固時の温度勾配の大きさ[K/m]の関係 (インコネル 718)

次に、粉末が Ti-6Al-4V の場合の、電子ビームパウダベッド方式での伝熱解析結果を説明する。解析モデルは図 2-3-7 に示されるもので、造形レシピは粉末厚さ 0.075mm、電子ビーム出力 200W、電子ビーム径 0.3mm、走査速度 500mm/sec、ハッチ距離 0.2mm、仮焼結温度 1,050℃である。電子ビームスキャンパスは、図 2-3-13 に示されるものである。

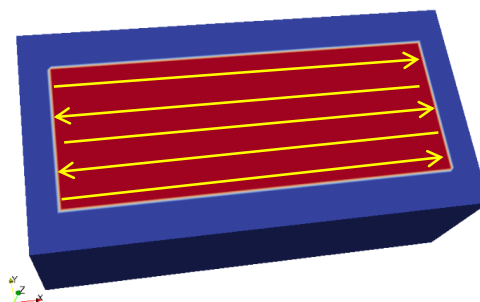


図 2-3-13 電子ビームパウダベッド方式の電子ビームスキャンパス (Ti-6Al-4V)

この条件でのメゾスケール伝熱解析シミュレータによるパウダ分布履歴、メルトプール履歴、温度履歴を、それぞれ図 2-3-14、図 2-3-15、図 2-3-16 に示す。図 2-3-15 と図 2-3-16 からは、Ti-6Al-4V は潜熱が大きく高温での熱伝導率が高いため、メルトプール形状の大きさに比べて、高温の温度領域が小さいことが分かる。

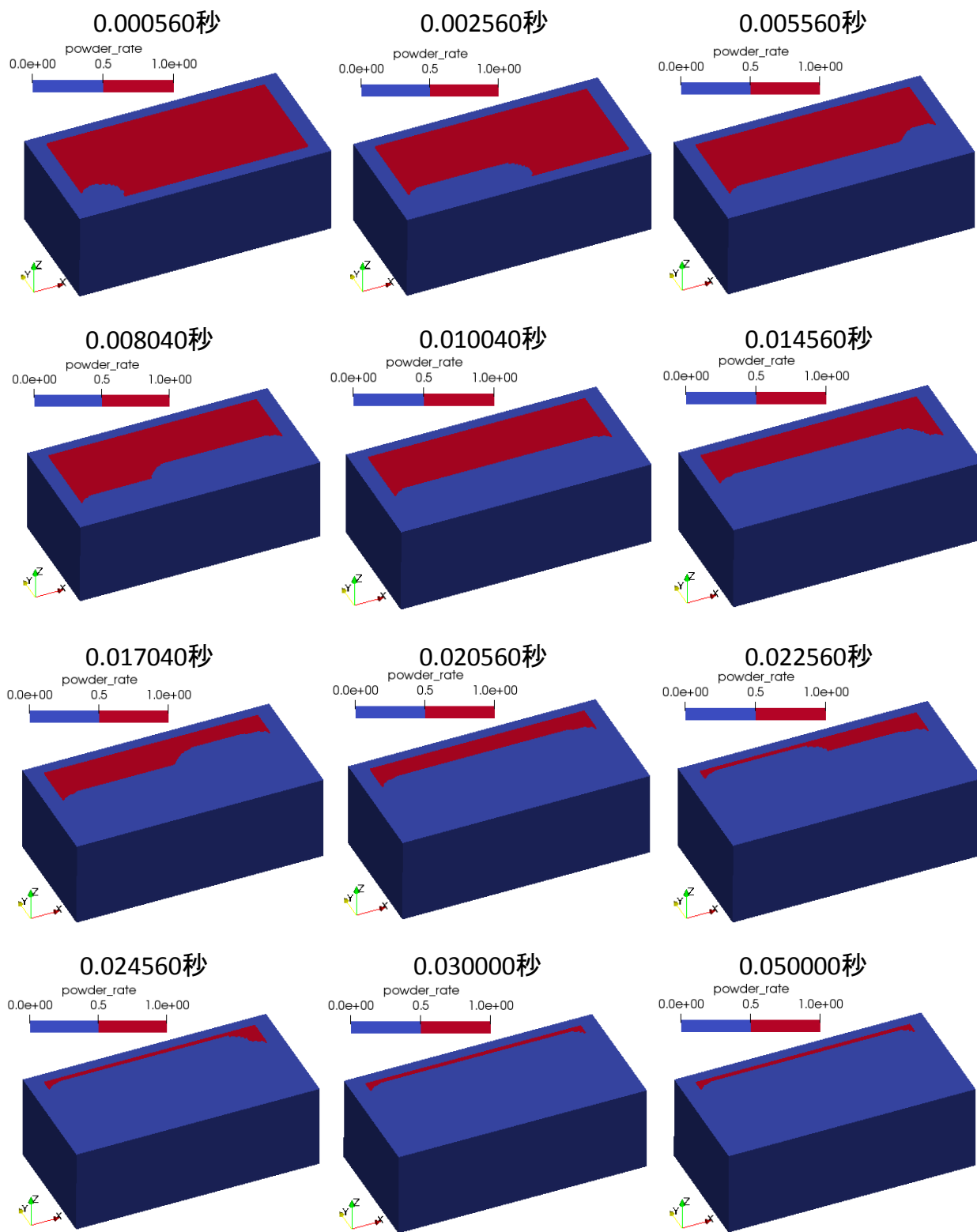


図 2-3-14 電子ビームパウダベッド方式のパウダ分布履歴 (Ti-6Al-4V)

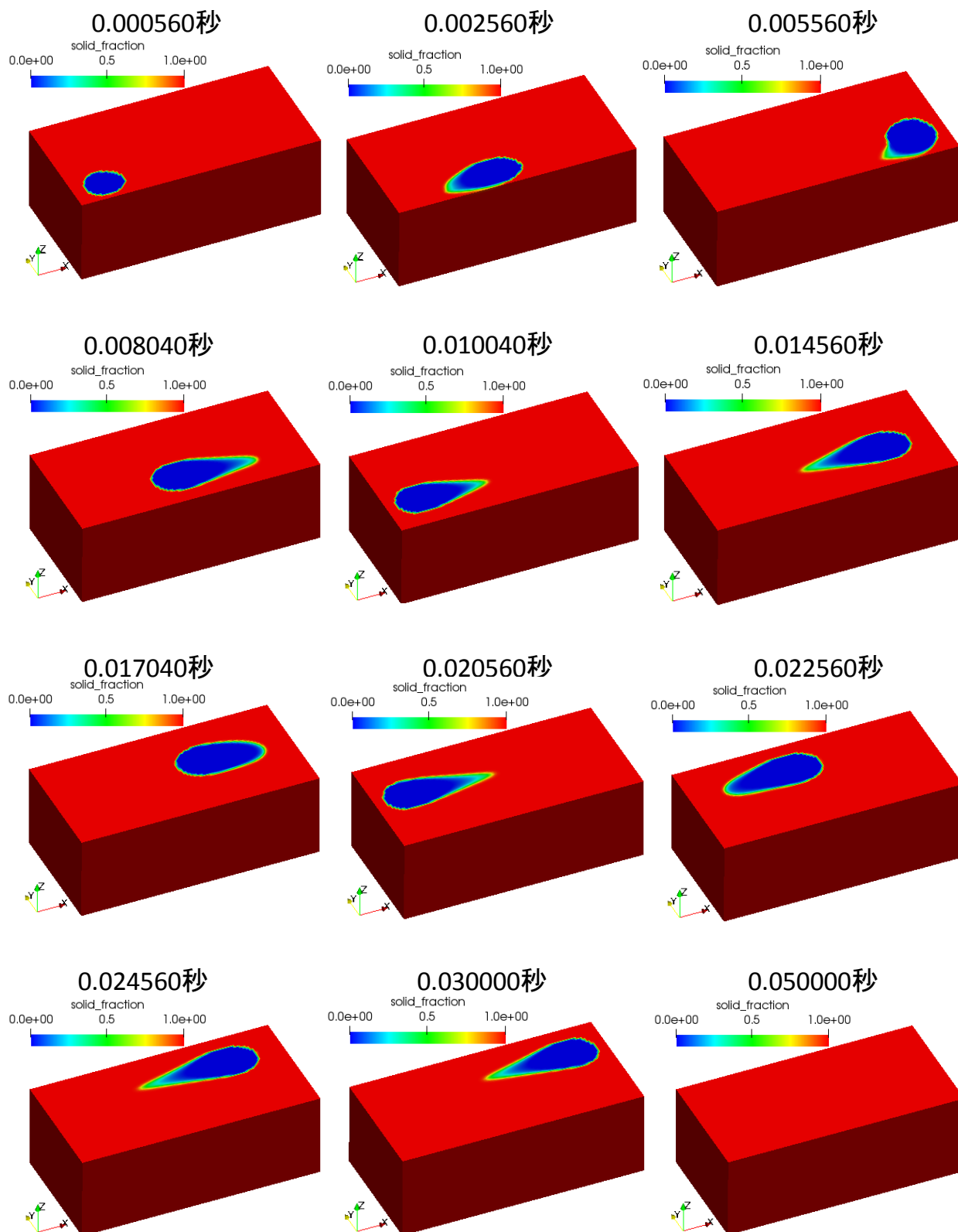


図 2-3-15 電子ビームパウダベッド方式のメルトプール履歴 (Ti-6Al-4V)

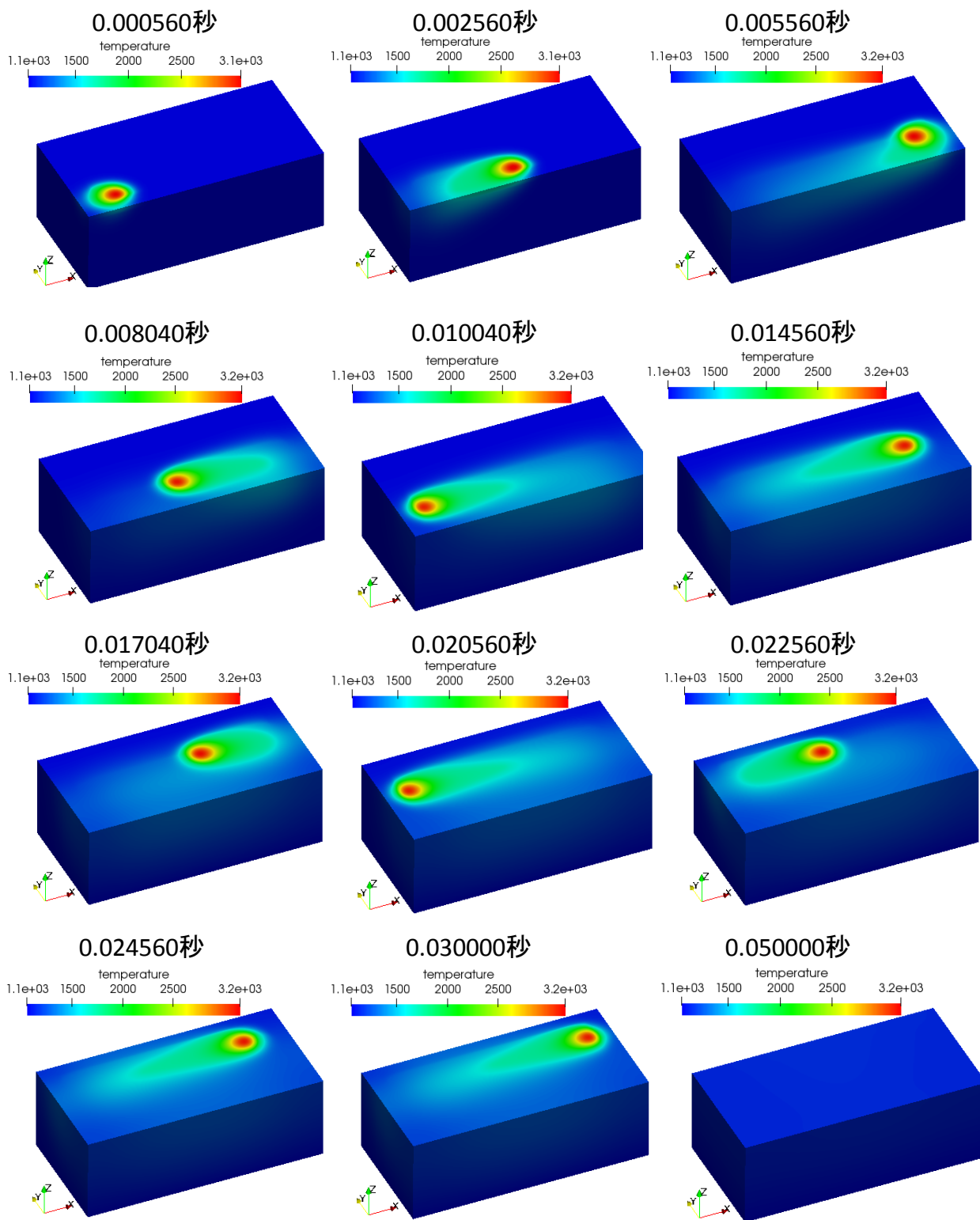


図 2-3-16 電子ビームパウダベッド方式の温度分布履歴 (Ti-6Al-4V)

電子ビームパウダベッド方式の場合の、凝固速度と温度勾配の2次元グラフを、図2-3-17に示す。凝固速度は0.001[m/s]から5[m/s]、温度勾配は 2×10^3 [K/m]から 2×10^5 [K/m]の領域にあるが、温度勾配はレーザービームの場合に比べて1/100程度の値となっている。これは電子ビームの場合、仮焼結を行い造形中でも高温に保たれるため、レーザービーム方式に比べて温度勾配が小さくなる。

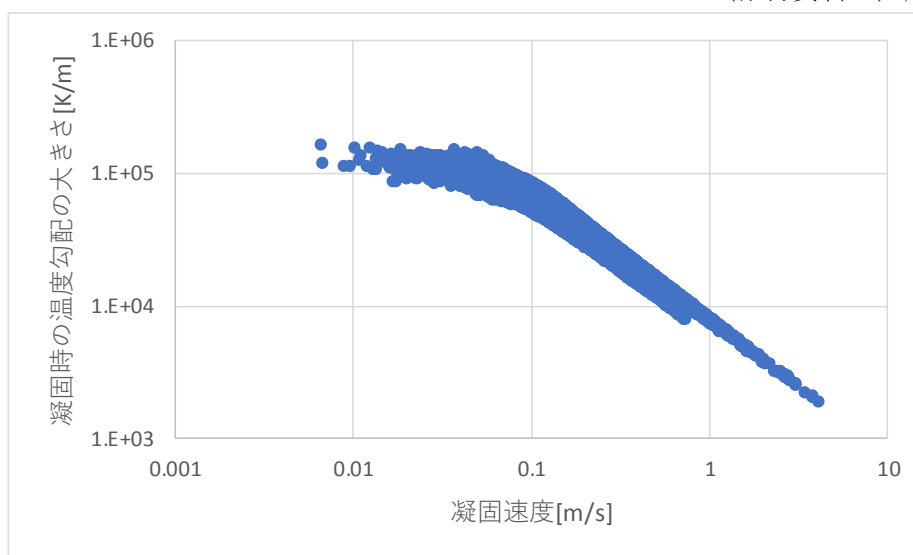


図 2-3-17 電子ビームパウダベッド方式におけるの凝固速度[m/s]と凝固時の温度勾配の大きさ[K/m]の関係 (Ti-6Al-4V)

(3) パウダベッド用固有ひずみデータベースの構築 (インコネル 718, Ti-6Al-4V)

メソスケール伝熱解析シミュレータの温度履歴の結果を引継いで、熱弾塑性解析を実施し、その変形量からパウダベッド方式に対する固有ひずみを同定した。

最初に、図 2-3-11 に示されるインコネル 718 に対するレーザービームパウダベッド方式の温度履歴を引継いだ熱弾塑性解析により計算された変位量の大きさ分布、相当応力分布、塑性ひずみ分布を、それぞれ図 2-3-18、図 2-3-19、図 2-3-20 に示す。これらの図の変形量は 10 倍にして表示している。なお、熱弾塑性解析の境界条件として、計算開始から冷却終了直前までの間は、底面および側面を完全拘束し、冷却終了時に底面の 3 点を拘束して応力を解放した。

図 2-3-18 からは、レーザーが照射された箇所の変位が溜まっていき、最終的に応力解放された時に大きく変形していることが分かる。図 2-3-19 では、レーザーが照射された領域および側面に相当応力が溜まっていき、最終的に境界条件を外した時に側面の応力は解放されるが、レーザー照射には大きな残留応力が残ることが分かる。図 2-3-20 からは、塑性ひずみはレーザー照射中や冷却時に蓄積されていき、応力解放後も大きな塑性ひずみが残留することが分かる。

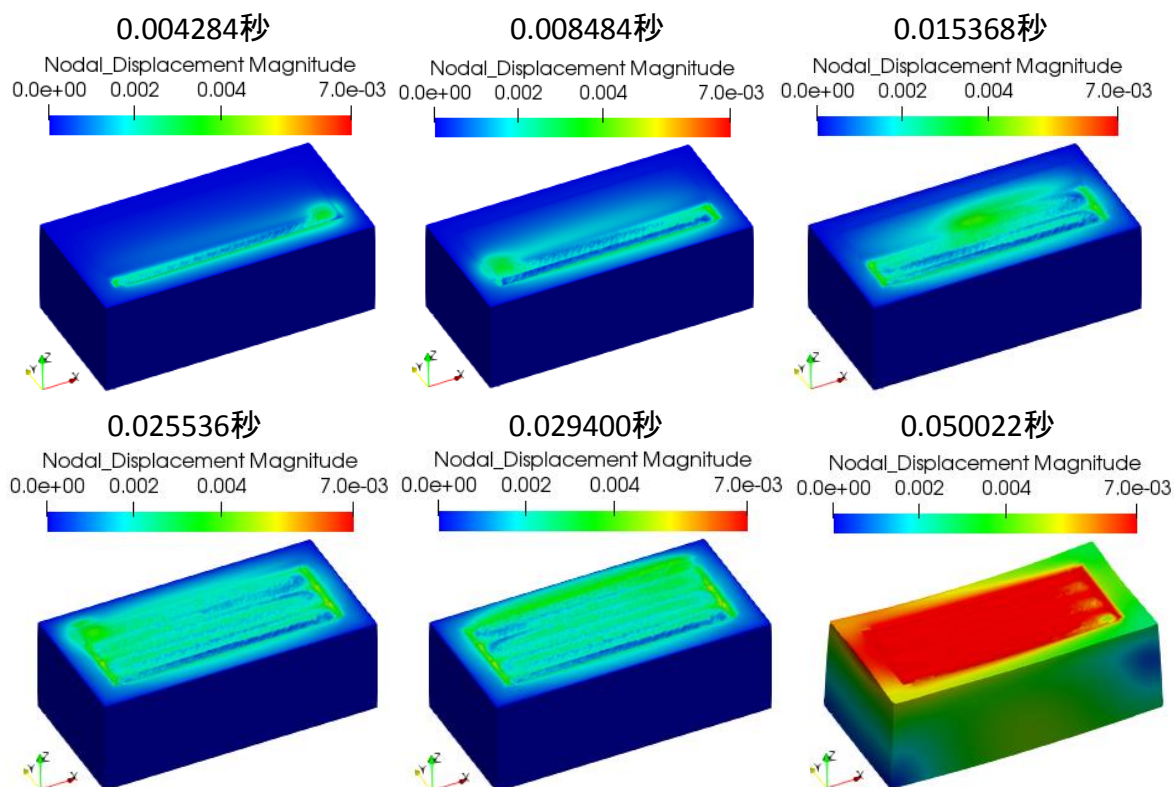


図 2-3-18 レーザビームパウダベッド方式の変位量の大きさ分布[単位：mm] (インコネル 718)

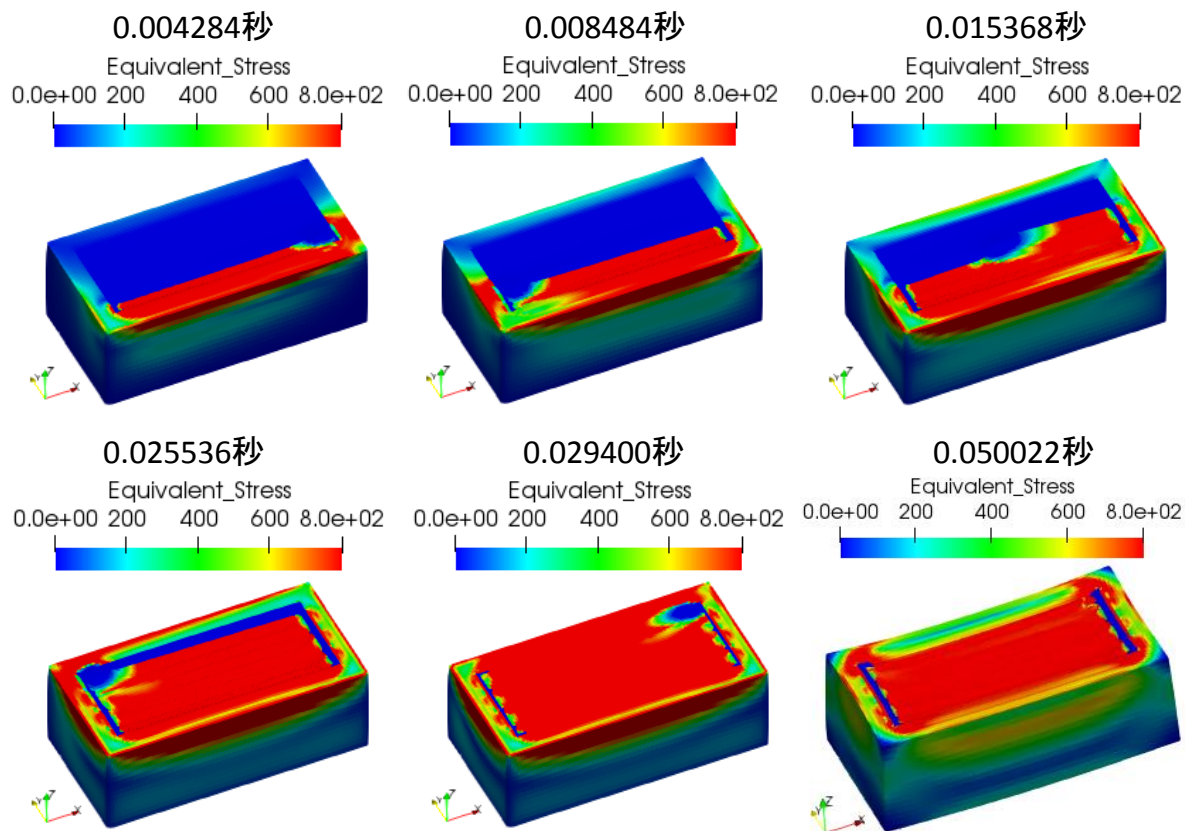


図 2-3-19 レーザビームパウダベッド方式の相当応力分布[単位：MPa] (インコネル 718)

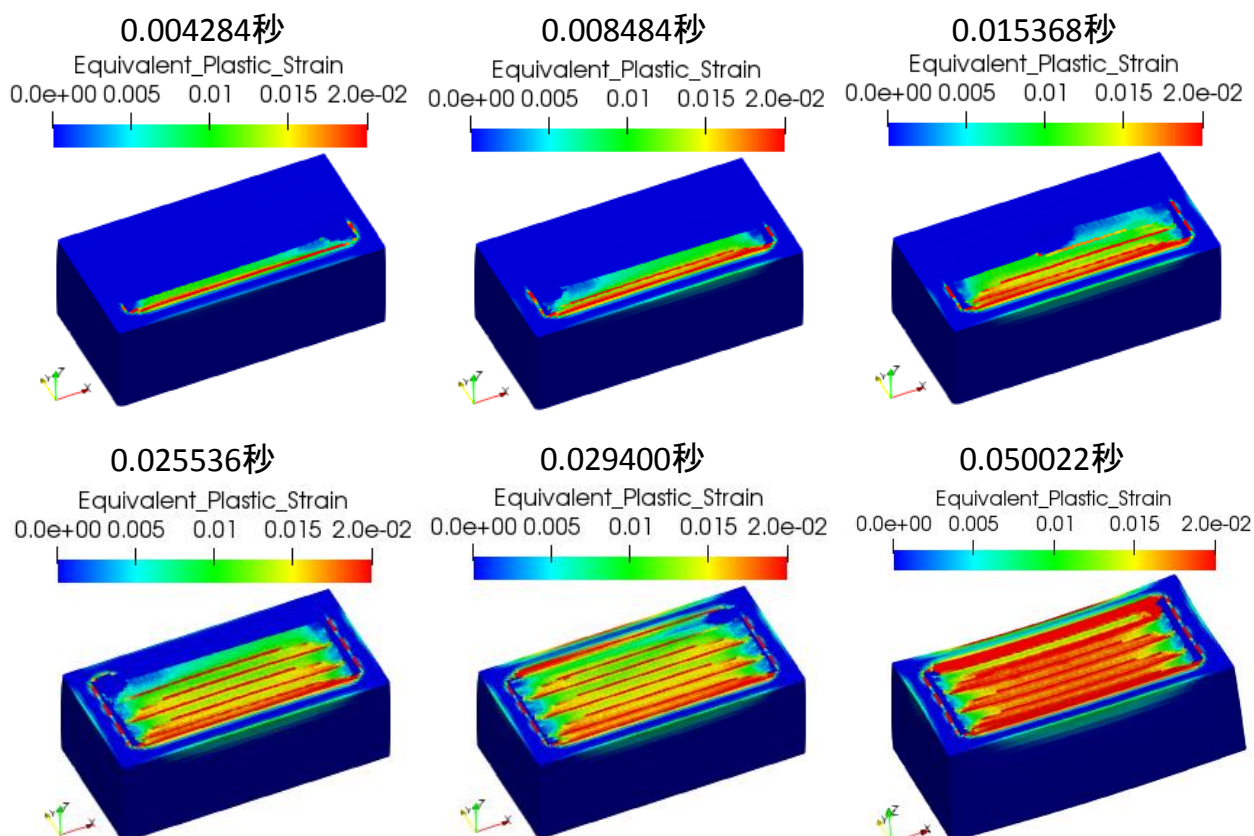


図 2-3-20 レーザビームパウダベッド方式の塑性ひずみ分布 (インコネル 718)

図 2-3-18 に示される変位量分布を用いて、固有ひずみの値を同定する。固有ひずみ解析において、固有ひずみを付与する領域は塑性ひずみが発生した領域とすることを考える。これは、固有ひずみへの寄与は塑性ひずみが多いからである。

図 2-3-21 には、レーザビームパウダベッド方式の熱弾塑性解析において、相当塑性ひずみが 0.001 を超えた要素を抽出した分布を示している。相当塑性ひずみの値を、固有ひずみを付与する領域の決定に用いれば、電子ビームパウダベッド方式への適用も可能となる。

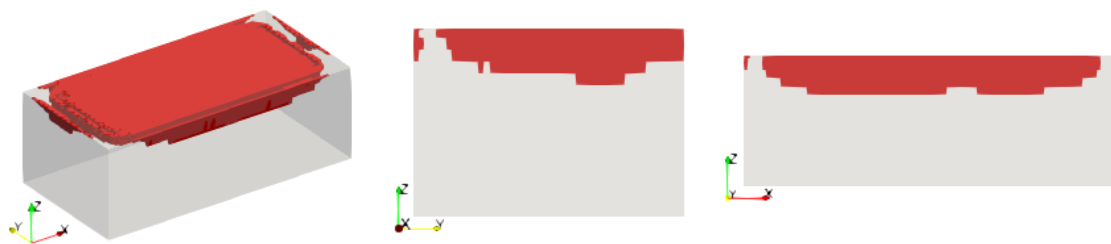


図 2-3-21 レーザビームパウダベッド方式において相当塑性ひずみが 0.001 以上の要素分布 (図の赤色領域)

相当塑性ひずみが 0.001 を超えた要素に対して固有ひずみを付与する場合に、図 2-3-18 の変形量を再現する固有ひずみを算出すると、 $\varepsilon_{xx} = -5.6e-3$ 、 $\varepsilon_{yy} = -5.0e-3$ 、 $\varepsilon_{zz} = -6.0e-3$ 、非対角成分は全て 0 となる。この固有ひずみの値を用いて固有ひずみ解析から変位量を計算した結果を図 2-3-22 に示す。

この固有ひずみの値は、実測から同定した固有ひずみの値にかなり近いものとなっ

ている。ただし、レーザスキャンパスや伝熱境界条件などは、実際の造形物とこの解析モデルでは異なるため、固有ひずみの精度を向上するためには、実際の造形物に近いレーザスキャンパスや伝熱境界条件を設定する必要がある。

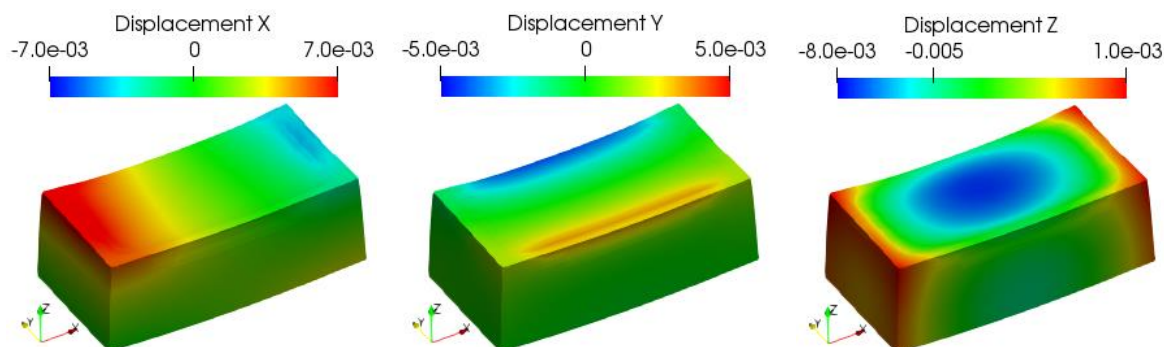


図 2-3-22 相当塑性ひずみ 0.001 以上の要素に固有ひずみを付与する場合の固有ひずみ解析ソルバーによるレーザビームパウダベッド方式の方向別変位量分布[単位: mm] (インコネル 718)

次に、図 2-3-16 に示される Ti-6Al-4V に対する電子ビームパウダベッド方式の温度履歴を引継いだ熱弾塑性解析により計算された変位量の大きさ分布、相当応力分布、塑性ひずみ分布を、それぞれ図 2-3-23、図 2-3-24、図 2-3-25 に示す。なお、これらの図中の変形量は 50 倍して表示している。Ti-6Al-4V では図 2-3-15 に示されるように、メルトプールの大きさが抑制されるため、冷却速度は早くなり、発生する変形量分布はレーザビームの場合に近いものになる。ただし、インコネル 718 に比べてヤング率や降伏応力が低いため、図 2-3-24 に示されるように、冷却後に残る残留応力は小さくなる。

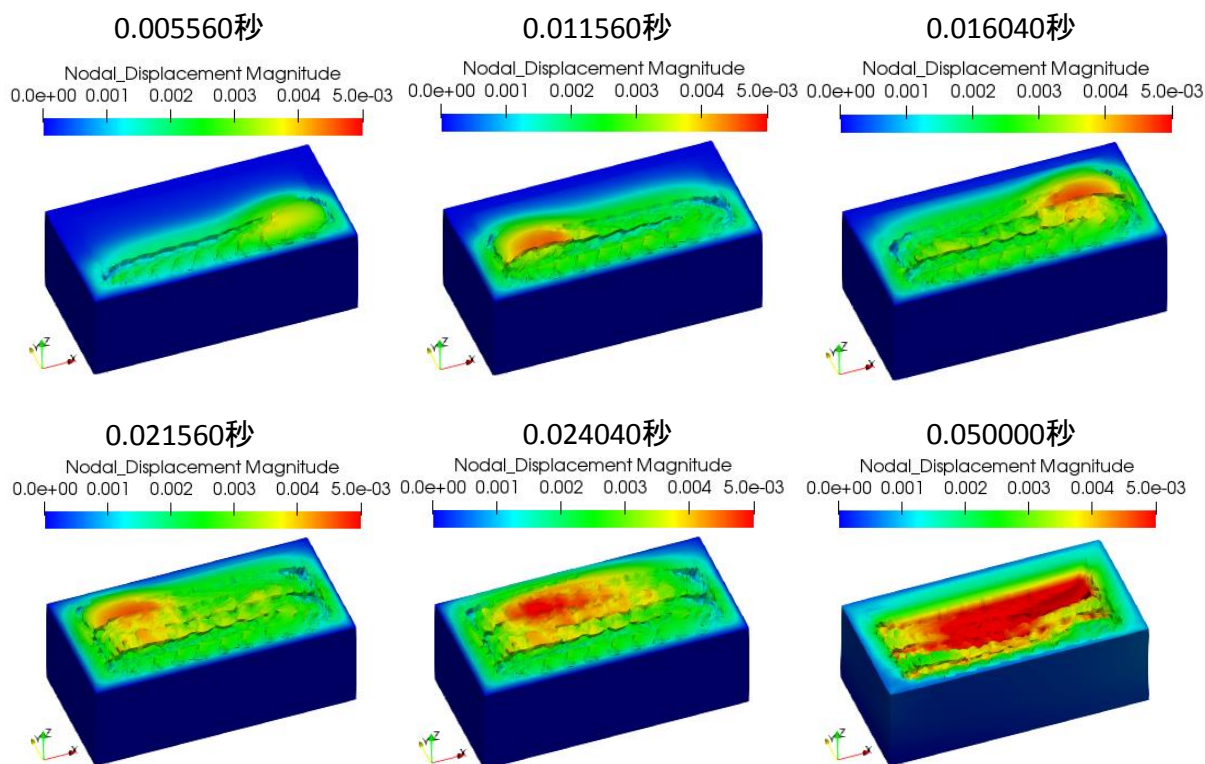


図 2-3-23 電子ビームパウダベッド方式の変位量の大きさ分布[単位: mm](Ti-6Al-4V)

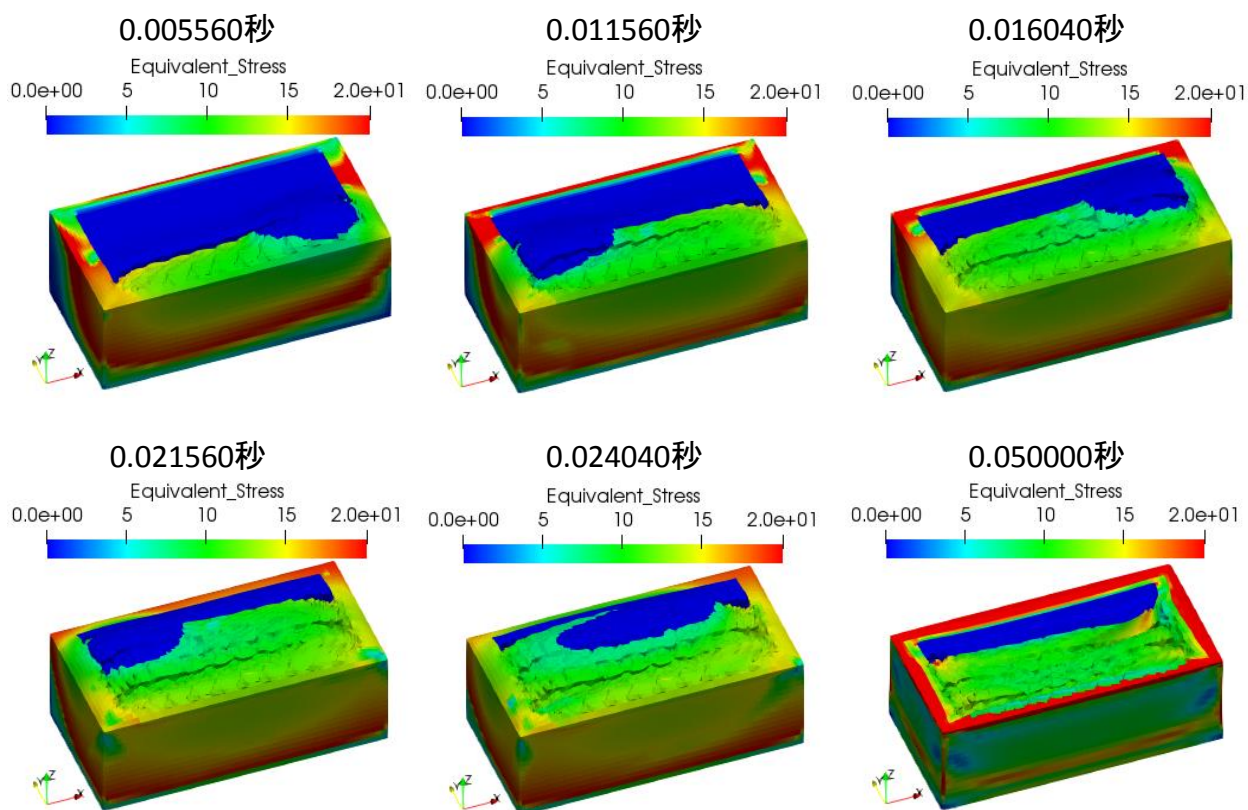


図 2-3-24 電子ビームパウダベッド方式の相当応力分布[単位：MPa] (Ti-6Al-4V)

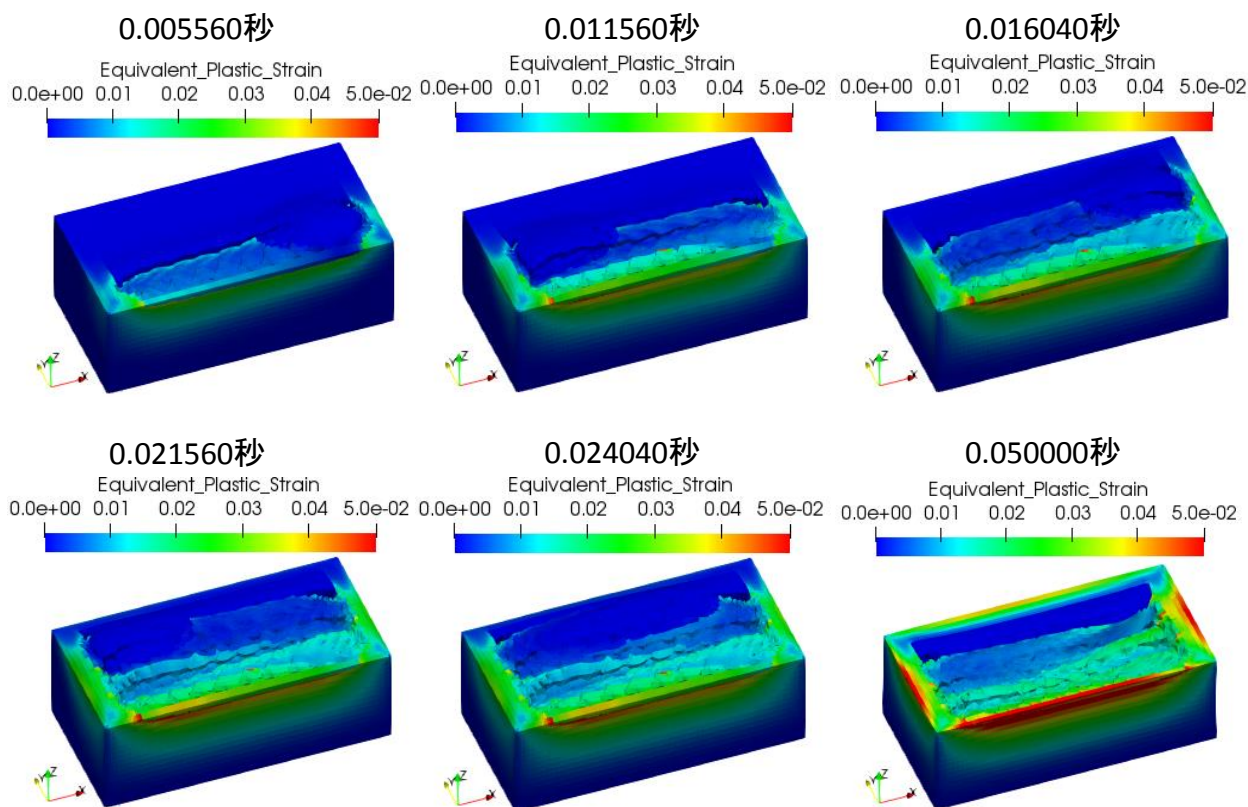


図 2-3-25 電子ビームパウダベッド方式の塑性ひずみ分布 (Ti-6Al-4V)

図 2-3-23 に示される変位量分布を用いて、固有ひずみの値を同定する。固有ひずみを付与する領域は、レーザビームの場合と同様に、塑性ひずみが発生した領域とする。なお、電子ビーム方式の場合の固有ひずみは、初期温度状態の変形量から算出するため、全体の温度が仮焼結温度である 1,050°C まで下がった冷却後の最終時刻の変形量を使用する。固有ひずみの同定方法は、レーザビームパウダベッド方式と同様の方法を用いる。

Ti-6Al-4V に対する電子ビームパウダベッド方式における冷却後の変形量の X 方向、Y 方向、Z 方向の変形量を、図 2-3-26 に示す。なお、図中の変形は 50 倍にして表示している。図 2-3-27 には、Ti-6Al-4V に対する電子ビームパウダベッド方式の熱弾塑性解析において、相当塑性ひずみが 0.001 を超えた要素を抽出した分布を示している。相当塑性ひずみが 0.001 を超えた要素に対して固有ひずみを付与する場合に、図 2-3-26 の変形量を再現する固有ひずみを算出すると、 $\epsilon_{xx} = -2.7e-4$ 、 $\epsilon_{yy} = -2.5e-4$ 、 $\epsilon_{zz} = -5.0e-3$ 、非対角成分は全て 0 となる。図 2-3-28 には、その固有ひずみテンソル値を用いた固有ひずみ解析により得られた X 方向、Y 方向、Z 方向の変形量を示す。なお、固有ひずみを同定する際には、電子ビーム照射により入熱されたベッド部ではなく、解析モデル全体の変形が合うように固有ひずみを調整する必要がある。

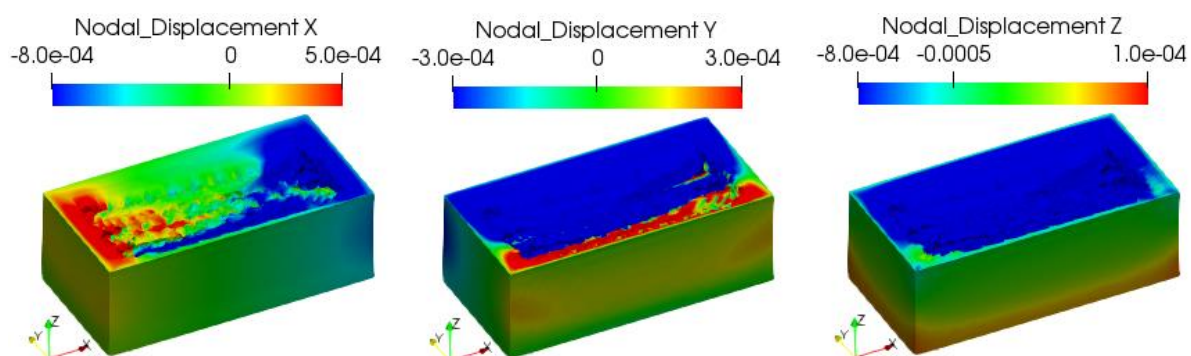


図 2-3-26 電子ビームパウダベッド方式の方向別変位量分布[単位: mm](Ti-6Al-4V)

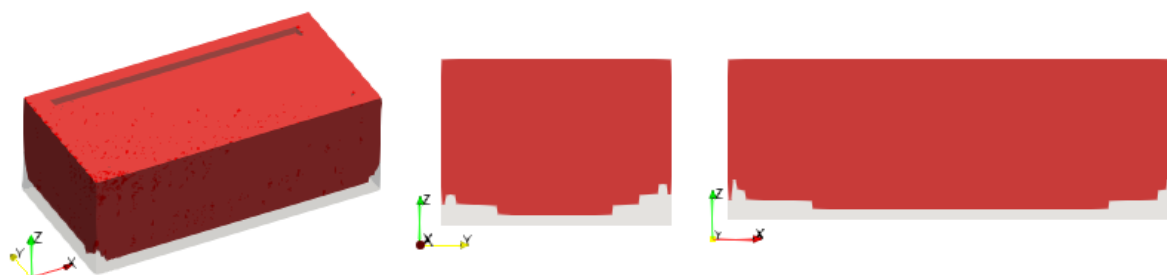


図 2-3-27 電子ビームパウダベッド方式において相当塑性ひずみが 0.001 以上の要素分布 (図の赤色領域、Ti-6Al-4V)

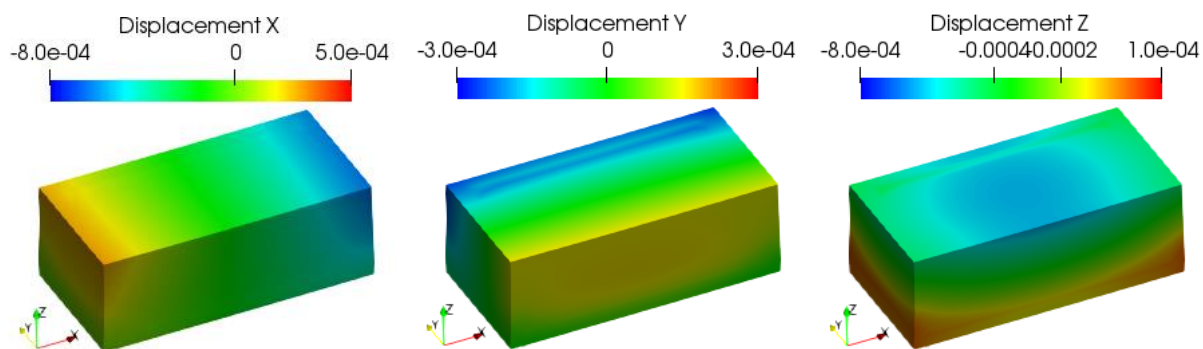


図 2-3-28 相当塑性ひずみ 0.001 以上の要素に固有ひずみを付与する場合の固有ひずみ解析ソルバーによる電子ビームパウダベッド方式の方向別変位量分布[単位: mm]
(Ti-6Al-4V)

固有ひずみ法による熱変形予測シミュレーションの開発では、まずパウダベッド用伝熱解析モデルを構築し、メソスケール伝熱解析シミュレータを用いて、インコル 718 および Ti-6Al-4V に対して、レーザービーム方式および電子ビーム方式の場合の伝熱解析を実施し、温度履歴を計算した。その温度履歴を引継いで熱弾塑性解析を実施した結果得られた変位量を用いて、インコル 718 に対するレーザービームパウダベッド方式での固有ひずみデータベース、および Ti-6Al-4V に対する電子ビームパウダベッド方式での固有ひずみデータベースを構築した。これらの固有ひずみデータベースを用いる固有ひずみ解析ソルバーにより、デポジション方式同様にパウダベッド方式においても、熱弾塑性解析と比較する、飛躍的に高速計算が可能な熱変形予測シミュレーション技術を開発した。

2-3-3 固有ひずみ法による熱変形予測シミュレーションの開発 (サポート配置の最適化)

パウダベッド方式では、サポート構造が造形物の変形へ影響する。そのため、生産効率を低下させずに熱ひずみの発生を抑制する造形条件（レシピ）やサポート構造、配置を検討する必要があるが、実際に 3D プリンタでトライ&エラーを繰り返して、その造形物形状に適した造形条件（レシピ）やサポート構造、配置を探索することはリードタイムやコストの増加の要因となってしまう。

熱変形をシミュレーションで予測する方法としては、溶接シミュレーションに用いられる熱弾塑性解析手法が一般的であるが、この手法では造形物全体の温度履歴を非定常的に計算し、その温度履歴と温度に依存した物性値を用いて熱弾塑性解析を造形プロセスの全時刻で行う必要があるため、アーク溶接を模擬したシミュレーションでも計算時間が膨大になることが知られている。3次元積層造形、特にパウダベッド方式では積層の回数も非常に多くなるため、計算時間はアーク溶接に対するシミュレーションよりもさらに長くなることが予想される。

大型構造物の溶接シミュレーションにおいては、固有ひずみ法を用いた解析が行われることも多い。固有ひずみ法は溶接による変形が「固有ひずみ」という概念で整理されることを利用して、高速に溶接変形を算定する手法として発達してきた。

そこで、この概念を3次元積層造形に使用できるように拡張し、非定常的な熱履歴のプロセスを考慮せずに、造形物の変形を高速に計算できる3次元積層造形用固有ひずみ解析ソルバーを用いて、サポート切除後の変形量とサポート密度を最適化するための機能を開発した。

(1) サポート最適化のための固有ひずみソルバーの改良

パウダベッド方式では、積層毎にレーザー/電子ビーム照射部の熔融凝固により熱変形が発生するため、固有ひずみ解析の精度を向上させるためには、積層毎に固有ひずみを付与して熱変形を計算することが望ましい。積層毎に熱変形を計算するモデルとして、Keller[1]らは図 2-3-29 に示される解析モデルを提案した。この解析モデルでは、最初に造形物全体の解析モデルを作成するが、熱変形を計算する層よりも造形方向下側のみで変形計算を行い、上側は変形を計算しないモデルとなっている。

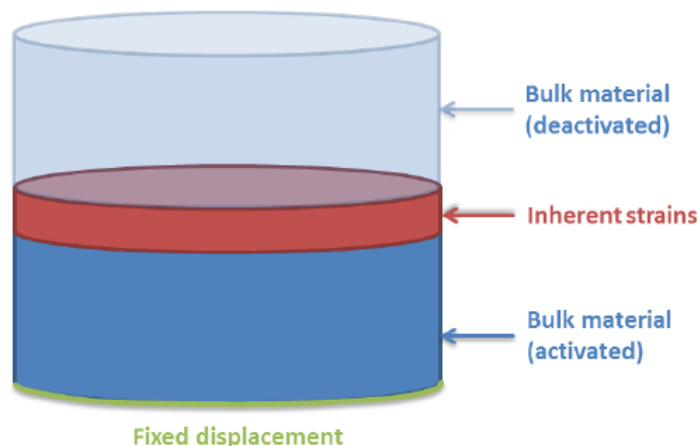


図 2-3-29 積層毎に固有ひずみを付与する解析モデルの概要 (Keller, et.al.[1])

Keller らの解析モデルを参考にして、固有ひずみ解析では、図 2-3-30 に示される解析モデルで積層毎に固有ひずみを付与する解析を実施する。以下では、この解析手

法を Layer by Layer 解析と記す。

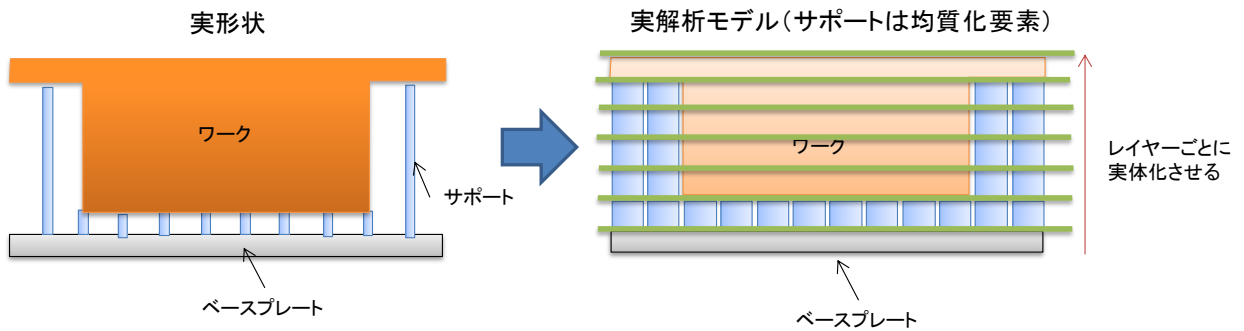


図 2-3-30 レイヤー毎に実体化させる固有ひずみ解析モデル

この解析モデルでは、ベースプレート直上のレイヤーから実体化して固有ひずみによる熱変形解析を行い、変形計算した後に、次のレイヤーを実体化して変形計算を行うことを繰り返し、全体の変形を計算する。この解析モデルの模式図を図 2-3-31 に示す。粉末要素として実体化したレイヤーの要素は、初期は応力・ひずみが 0 となっているが、このレイヤーに固有ひずみを付与し変形計算をした結果、応力・ひずみが発生する金属固体要素に切り替わる。次のレイヤーでは、金属固体要素の上に粉末要素が実体化し、その粉末要素に固有ひずみを付与し変形計算を行うことを繰り返していく。

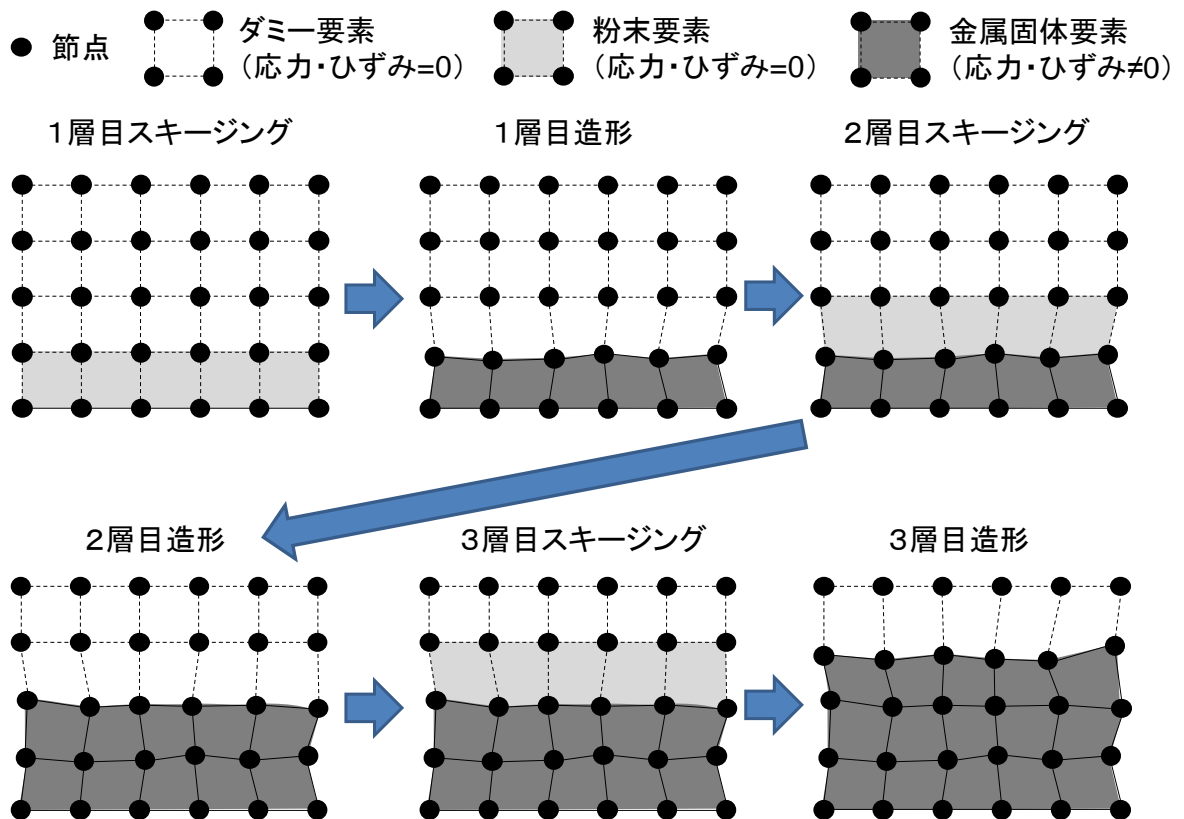


図 2-3-31 レイヤー毎の変形計算の模式図

また、この解析モデルではサポートの微細構造形状を再現する要素分割は行わずに、サポートも造形物に合わせて均質化した要素分割を行う。サポートに対応する要素に

関しては、そのサイズの要素で実際のサポート剛性を再現するように、要素剛性を調整する。なお、固有ひずみを付与する造形部は、固有ひずみ法の性質上、弾性解析で計算するが、サポートは造形部に比べて剛性が低く、変形が大きく破壊が発生することもあるため、弾塑性解析で計算する。

近畿大学広島分室の要素技術研究機で実際に造形を行った楕円サポート付き片持ち梁に対して、Layer by Layer 解析機能を用いた解析を実施した。解析モデルの概要を図 2-3-32 に示す。解析モデルは、実際の造形物の 1/2 対称モデルとなっている。このモデルでは楕円サポートは微細構造がなく均質化する必要がないため、通常の要素としてメッシュ分割を行った。

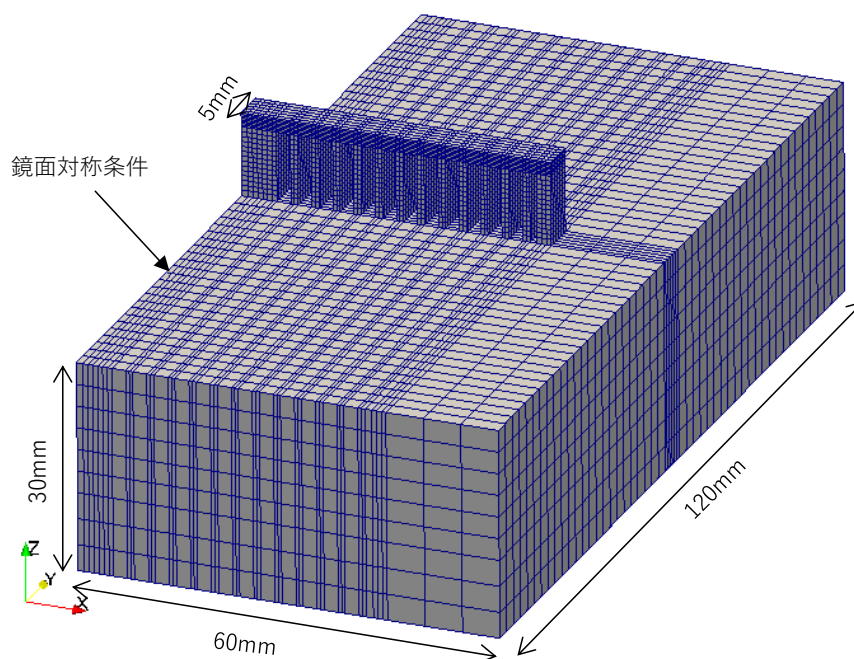


図 2-3-32 楕円サポート付き片持ち梁解析モデル概要

造形部は 22 レイヤーでモデル化を行った。実際の造形は、粉末厚さ 0.05mm で 240 層の造形となるが、解析モデルで全ての層を再現すると計算量が膨大になるため、10 層程度をまとめて 1 レイヤーでモデル化した。また最終的に切断する箇所をサポートとして取り扱い、中央部の切断しない箇所は造形部として扱う。

材料物性値は、表 2-3-1 の値を使用する。ベースプレートは SUS304、造形物とサポートはインコネル 718 に相当する物性値となっている。

表 2-3-1 楕円サポート付き片持ち梁解析モデルで使用する材料物性値

物性値 \ 部位	造形物	ベースプレート	サポート
ヤング率[GPa]	200	196	200
ポアソン比	0.27	0.3	0.27
降伏応力[MPa]	---	---	800
加工硬化係数[MPa]	---	---	1280

固有ひずみの値は、 $\varepsilon_{xx} = -0.0039$, $\varepsilon_{yy} = -0.00212$, $\varepsilon_{zz} = -0.003$ (せん断成分は全て0) を用いる。この固有ひずみの値を X 軸方向の往復に対応したスキャンパスで付与した Layer by Layer 解析結果の変位量を、図 2-3-33 から図 2-3-36 に示す。なお、図中の変形倍率は 5 倍となっている。

図 2-3-33 と図 2-3-34 からは、サポートは独立に造形されるため、ほとんど変形せずに造形されていくことが分かる。ところが、梁部の造形が始まる図 2-3-35 からは、梁部を介してサポートが繋がるため、梁部の収縮によってサポートも大きく変形する。特に梁部の最下部のレイヤーの収縮によってサポートは大きく変形するが、梁の造形が進み、梁が厚くなってくると梁の剛性が増して、梁の上部に与えられた収縮の影響が梁とサポートの連結部まで届かなくなり、サポートの変形は進まなくなる。

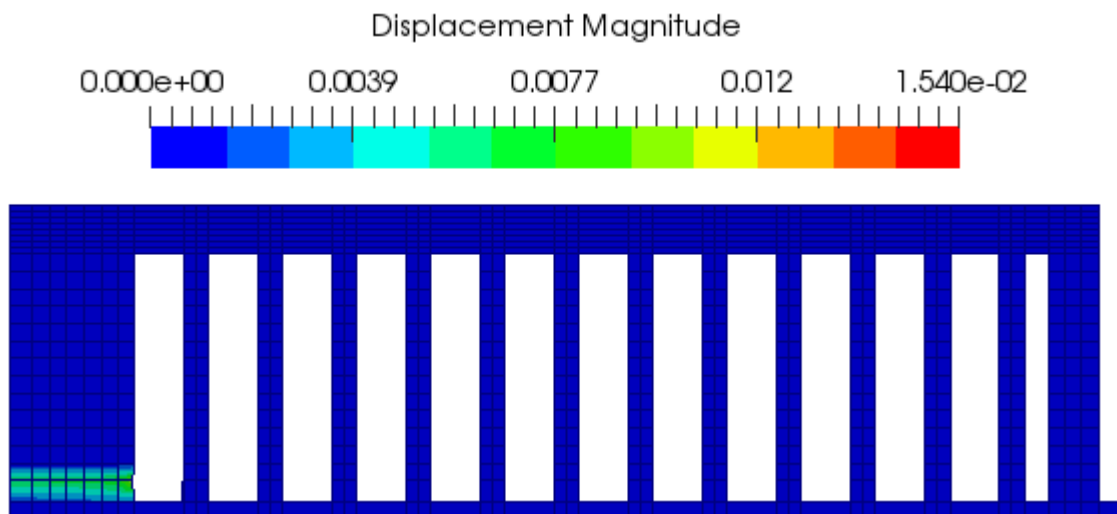


図 2-3-33 Layer by Layer 解析結果の変位量カラーコンター図 (1 レイヤー目)

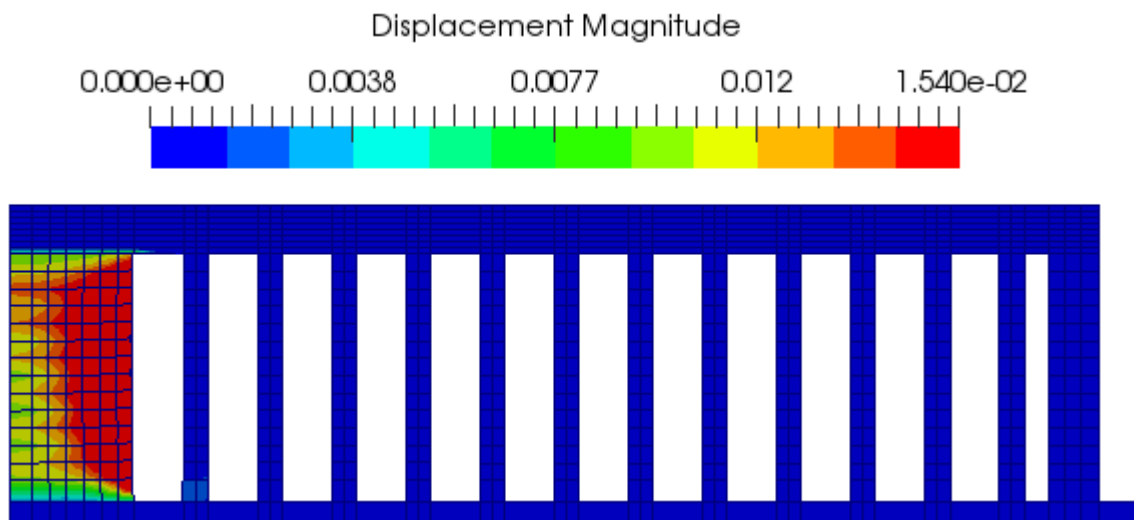


図 2-3-34 Layer by Layer 解析結果の変位量カラーコンター図 (14 レイヤー目)

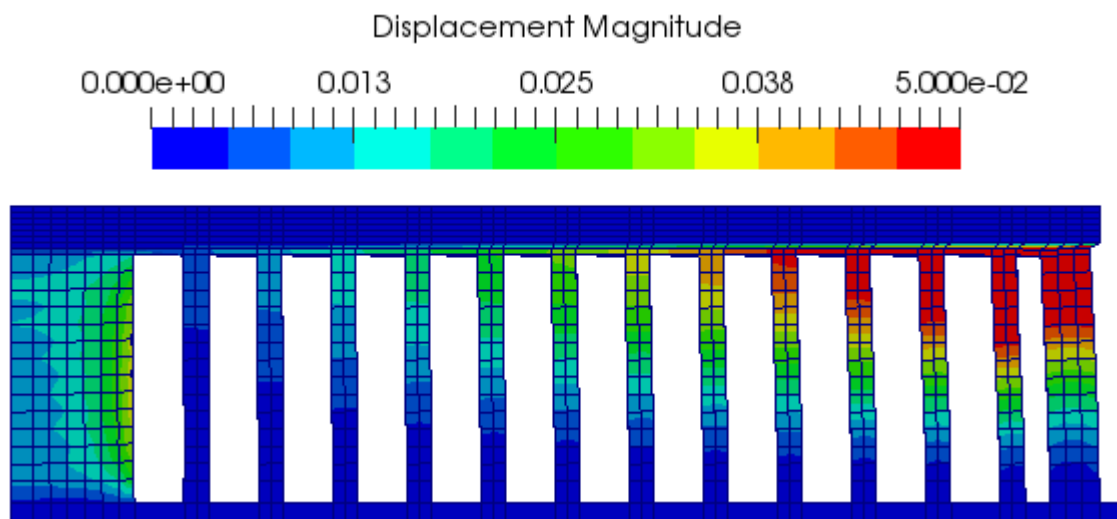


図 2-3-35 Layer by Layer 解析結果の変位量カラーコンター図 (15 レイヤー目)

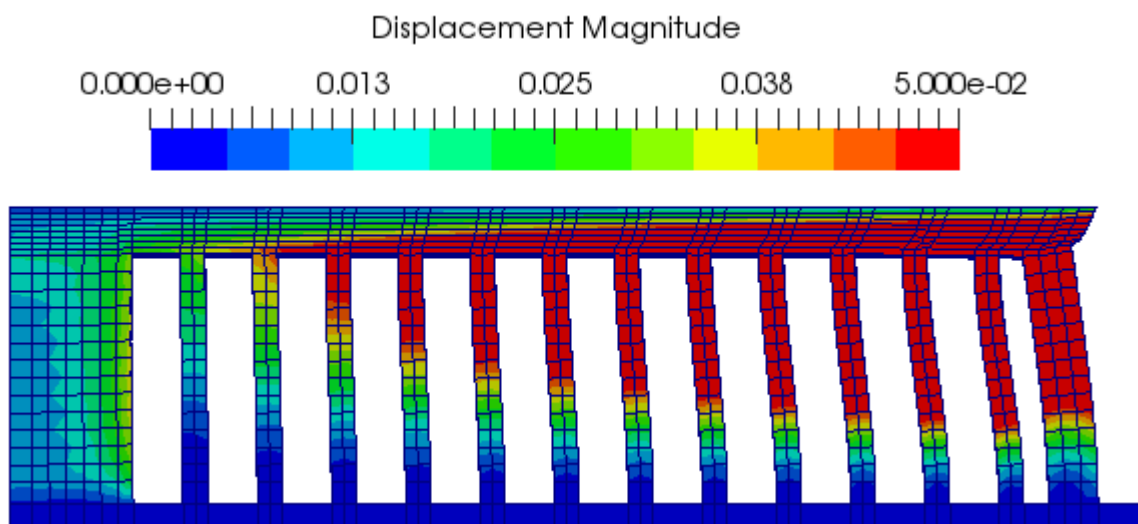


図 2-3-36 Layer by Layer 解析結果の変位量カラーコンター図 (22 レイヤー目)

次に、サポート要素の反力を 0 にすることでサポート切断を模擬する計算アルゴリズムで、楕円サポート付き片持ち梁解析モデルのサポート切断時の変形を計算した結果を図 2-3-37 に示す。この解析では、固有ひずみは $\varepsilon_{xx} = -0.0039$, $\varepsilon_{yy} = -0.00212$, $\varepsilon_{zz} = -0.003$ (せん断成分は全て 0) という値で計算しているが、スキャンパスが y 方向の場合に対しては、 ε_{xx} がパス方向になるように固有ひずみテンソルを回転させている。またスキャンパターンが xy 方向の場合は、x 方向の固有ひずみを付与したレイヤーの次のレイヤーには y 方向の固有ひずみを付与するよう、x 方向と y 方向の固有ひずみを交互に割り当てることで、xy 方向のスキャンパターンを模擬している。

この図からは、Keller[1]らの解析結果と同様に、固有ひずみ法を用いてサポート切断を模擬した変形解析により、実際の造形物の変形を再現でき、なおかつ固有ひずみの異方性とスキャンパターンを対応させることにより、スキャンパターンの違いによる変形量の差も再現できることが確認できた。

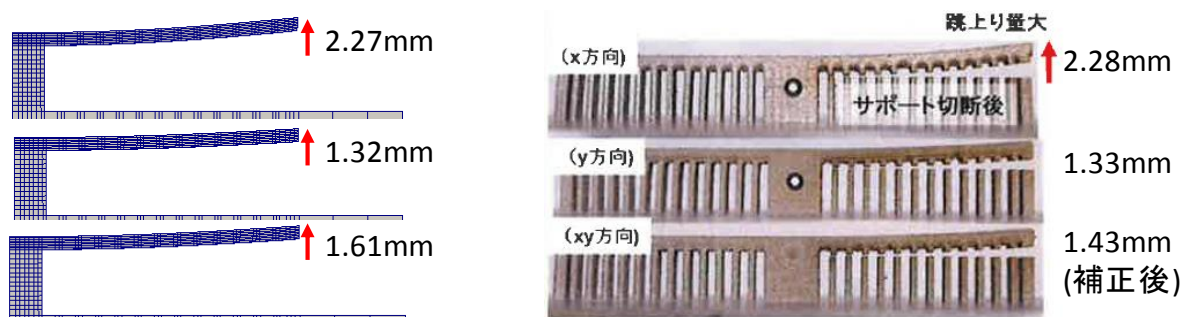


図 2-3-37 Layer by Layer 解析におけるサポート切断による変形解析結果 (左) と実造形物のサポート切断後の変形結果 (右)

参考文献

[1] N. Keller and V. Ploshikhin, “NEW METHOD FOR FAST PREDICTIONS OF RESIDUAL STRESS AND DISTORTION OF AM PARTS”, Solid Freeform Fabrication Symposium, At Austin, Texas, Volume: 25

(2) サポートモデル最適化機能の開発

固有ひずみソルバーを用いたパウダベッド方式のサポート最適化機能の開発では、CAM3S で幾何的に生成されたサポートの配置は変更せずに密度 (サポートの厚み) を変更して変形量とサポート質量を最適化する機能 (このサポート最適化を以下では「均一的サポートモデル最適化」と記す。) と、サポートの配置を変更して変形量とサポート質量を最適化する機能 (このサポート最適化を以下では「非均一的サポートモデル最適化」と記す。) の二種類の最適化機能を開発した。

まず始めに、図 2-3-38 に均一的サポートモデル最適化の概要図を示す。均一的サポートモデル最適化では、サポートを領域 (最小単位は 1 要素) に分けて、それぞれの領域でサポートの密度を変化させた時に、変形量が大きくなるようにしながら、サポートの質量がなるべく少なくなるように最適化を行う。

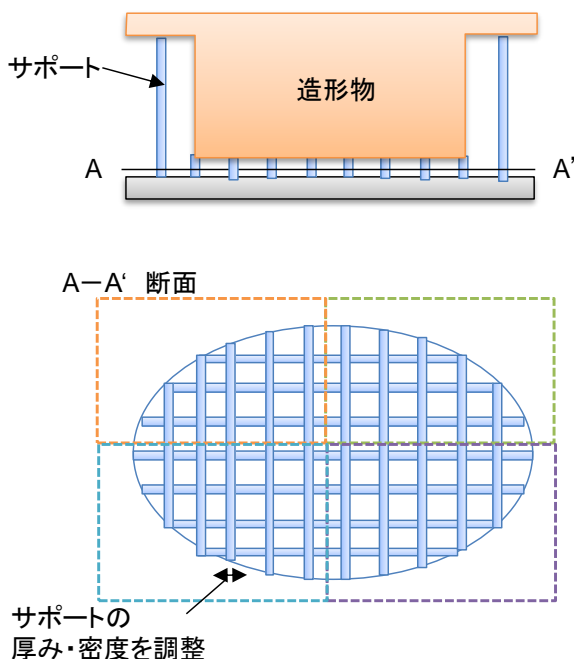


図 2-3-38 均一的サポートモデル最適化概要図

この最適化では、初期にサポートが存在していた領域からサポートを完全に無くすことはせずに、サポートの密度のみを調整する。なお、以下ではサポートの剛性と密度、質量は比例関係にあると仮定する。

図 2-3-39 に、均一的サポートモデル最適化の処理フローを示す。まず、造形形状データと造形レシピ、材料特性データ、初期のサポート配置データを用いて、固有ひずみ解析により変形量を求める。その後、固有ひずみ解析結果で応力の高低に応じて、サポートの密度を最適化アルゴリズムの中の勾配法を用いて調整して、サポート密度の最適化を行う。なお、最適化の実行は、米国サンディア国立研究所で開発されたオープンソースの最適化システムである「DAKOTA」(Design Analysis Kit for Optimization and Terascale Applications)を使用した。

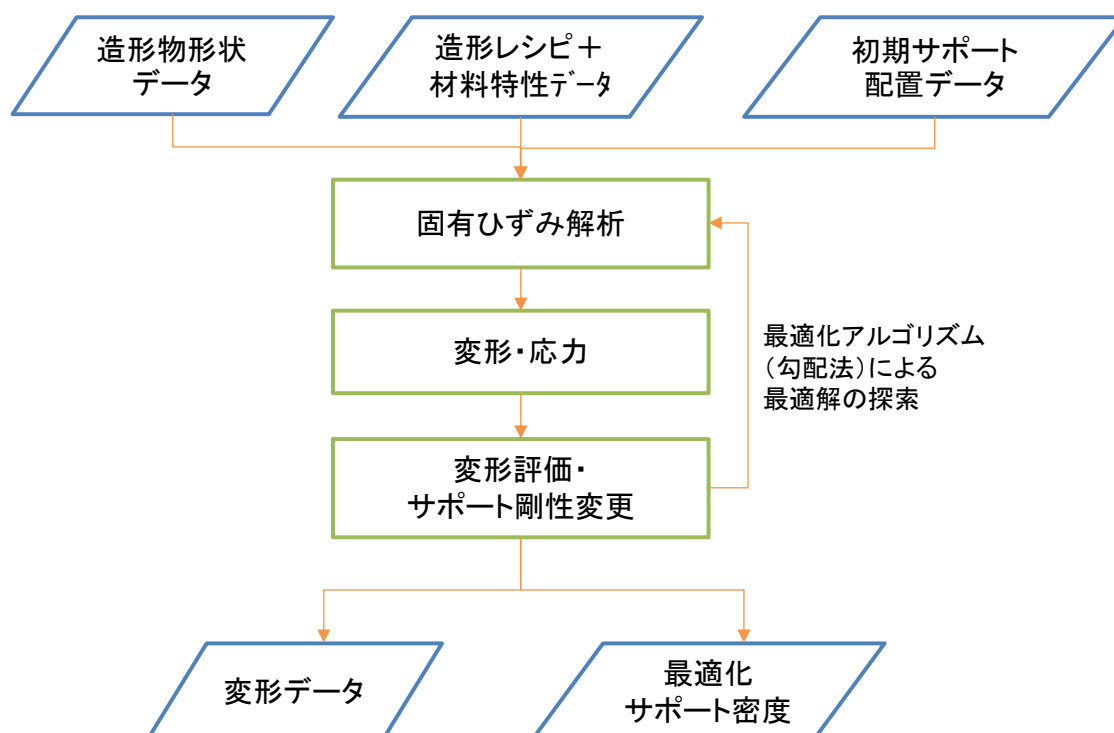


図 2-3-39 均一的サポートモデル最適化の処理フロー

均一的サポートモデル最適化を行うための評価関数としては、初期の固有ひずみ解析からの変位差とサポート総質量がトレードオフの関係になる式を使用した。変位差とサポート総質量に対する重みパラメータによって、変位をなるべく小さくすることを優先するか、逆にサポート総質量をなるべく小さくすることを優先するかを調整できる。均一的サポートモデル最適化では、この評価関数が極小値をとるように、各領域でのサポート密度パラメータを、勾配法により最適化する。

図 2-3-40 に、均一的サポートモデル最適化の検証モデルを示す。このモデルは、ベースプレートの上に、 $10\text{mm} \times 10\text{mm} \times 3\text{mm}$ のサポートを造形し、そのサポートの上に $10\text{mm} \times 10\text{mm} \times 10\text{mm}$ のキューブ形状を造形するモデルである。解析メッシュサイズは、 1mm とし、材料物性値はインコネル 718 のものを使用した。なお、ベースプレート四隅のボルト穴を完全拘束する境界条件で解析を実施した。

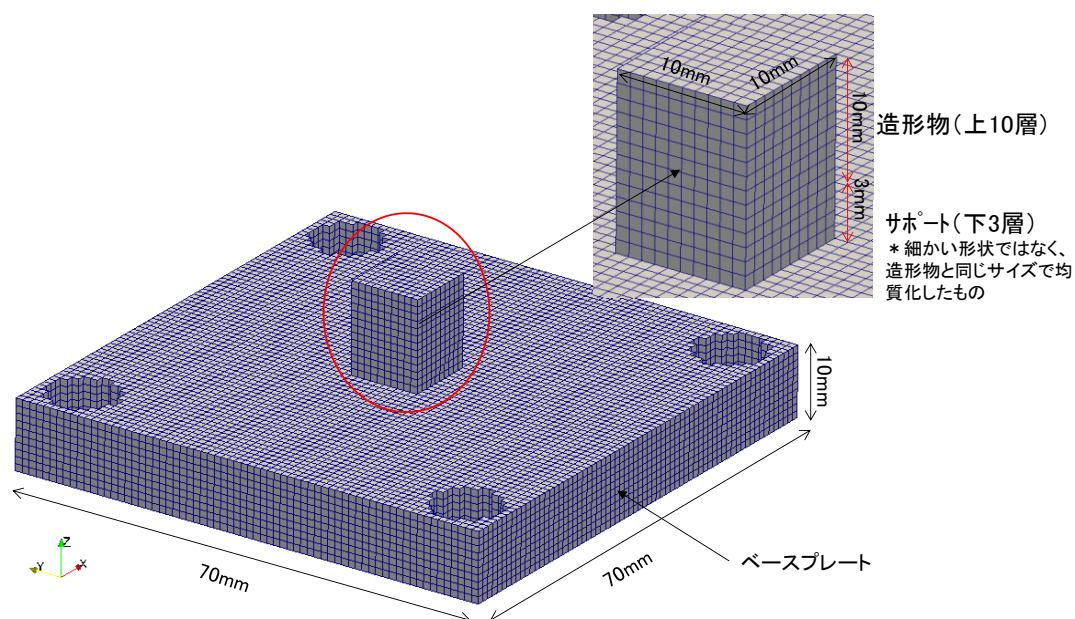


図 2-3-40 均一的サポートモデル最適化の検証モデル

図 2-3-41 に、検証モデルにおける均一的サポートモデル最適化前の変位量のカラーコンター図を示す。均一的サポート最適化前の最大変位は 0.2855mm で、最適化後は 0.3mm なので、最大変位は 0.0145mm 増加している。

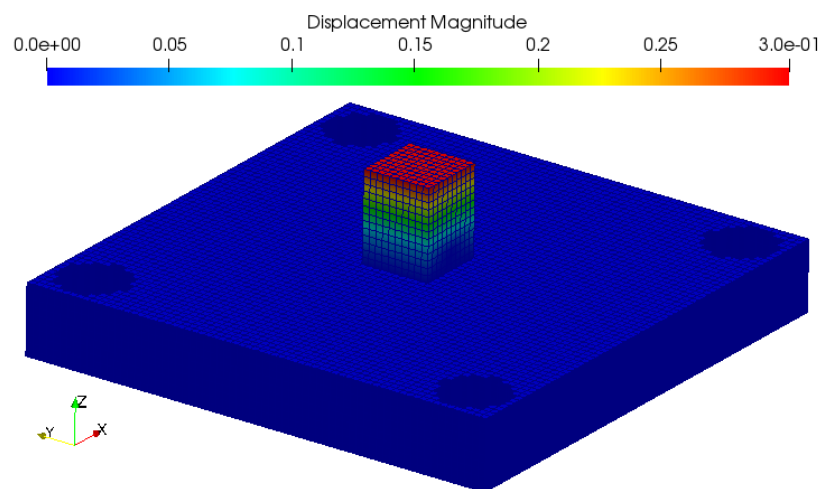


図 2-3-41 均一的サポート最適化後の変形量

図 2-3-42 に、均一的サポートモデル最適化後のサポート密度パラメータのカラーコンター図を示す。この図からは、変形量の大きいキューブ四隅のサポートの密度は高くし、変形の小さいキューブ中央部のサポート密度は低くした結果となっており、妥当な結果と考えられる。この検証モデルでは、サポートの質量は最適化によって 60% 削減できることが示された。

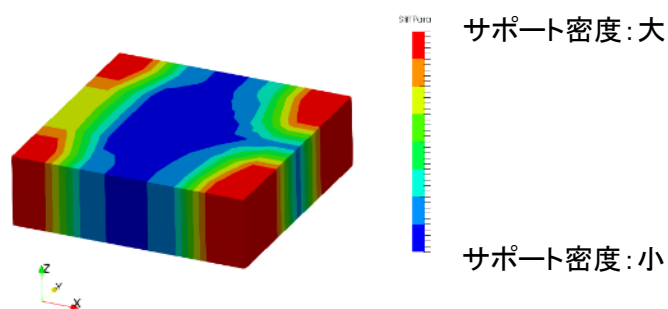


図 2-3-42 均一的サポートモデル最適化後のサポート密度分布 (サポート要素のみ表示)

均一的サポートモデル最適化の検証モデルでは、最適化により変位は 0.0145mm (5%に相当) 増加したが、サポート質量は 60%削減できた。この変位量とサポート質量のどちらかをより最適化したい場合は、評価関数における重みパラメータを調整する。

次に、非均一的サポートモデル最適化の概要図を図 2-3-43 に示す。

非均一的サポートモデル最適化では、ある位置のサポートの有無が、変形量に与える影響の大きさを評価しながら、サポートの質量がなるべく少なくなるように最適化を行う。

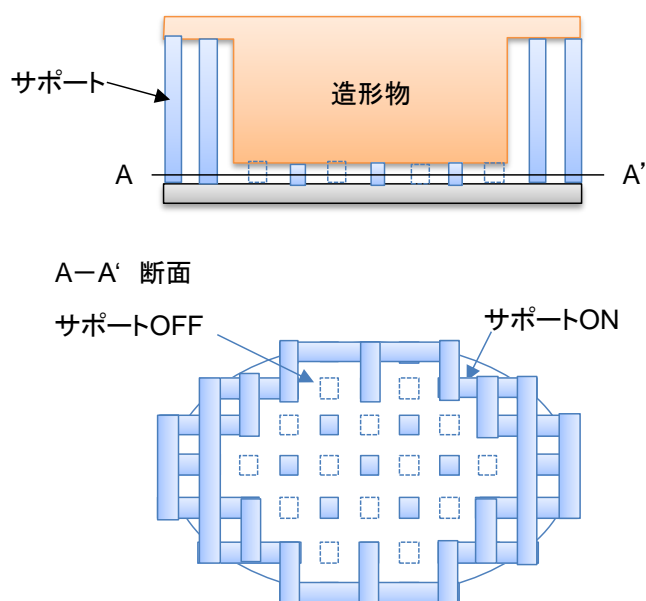


図 2-3-43 非均一的サポートモデル最適化概要図

図 2-3-44 に、均一的サポートモデル最適化の処理フローを示す。まず、造形形状データと造形レシピ、材料特性データ、初期のサポート配置データを用いて、固有ひずみ解析により変形量および応力を求める。その後、固有ひずみ解析結果の変形量、応力分布から、遺伝的アルゴリズムで最適化するためのサポートの試行配置を生成する。サポート試行配置の生成方法は、後述する。その後、複数のサポート試行配置に対して、固有ひずみ解析を実行し、それぞれの試行配置に対して変形量、応力を計算し、その結果からサポートの ON/OFF を変更し、遺伝的アルゴリズムで最適化を行う。なお、遺伝的アルゴリズムによる最適化は、「DAKOTA」を使用して実行した。

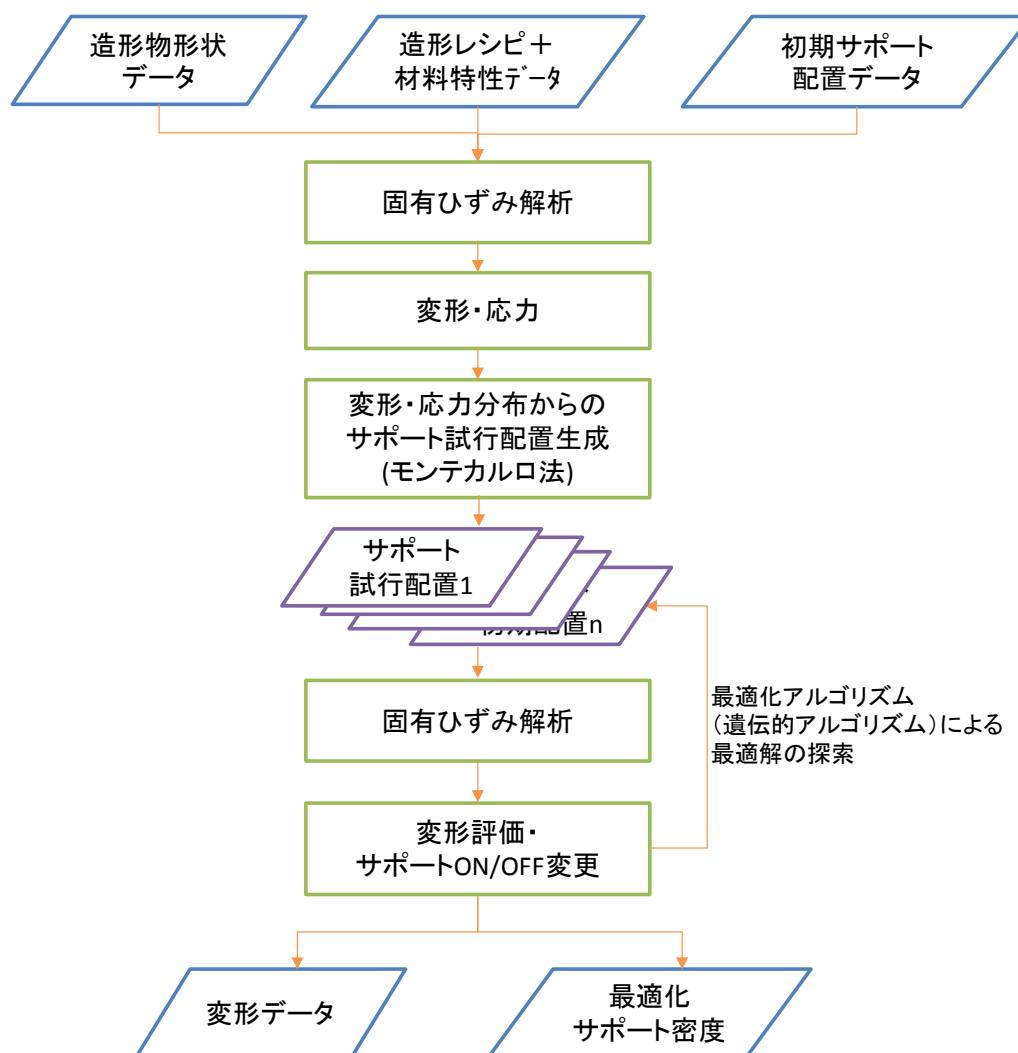


図 2-3-44 非均一的サポートモデル最適化の処理フロー

図 2-3-45 に、サポート試行配置の生成方法の概要を示す。図 2-3-44 の処理フローの中で、最初に行う固有ひずみ解析の結果から、揺らぎを考慮しながら応力が高い要素はサポートを ON にする確率を大きくし、また、隣接サイトと同じ ON・OFF 状態になる確率は大きくするように試行サポート分布を生成し、揺らぎを考慮しながらモンテカルロ計算を行い、遺伝的アルゴリズムのサポート試行配置を決定する。

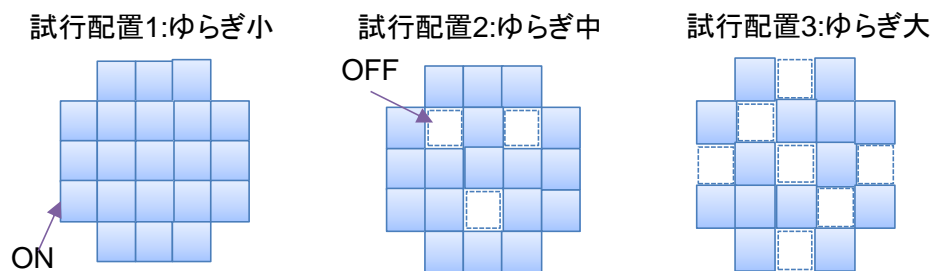


図 2-3-45 サポート試行配置生成方法概要図

初期サポート試行配置の生成は、さまざまなクラスターサイズの初期サポートが生

成されるようにして、遺伝的アルゴリズムによる最適化結果が、初期サポート配置に依存した局所最適にならないようにした。

図 2-3-46 には、遺伝的アルゴリズムによるサポート配置最適化方法のイメージ図を示す。図中の横軸はサポート配置のパターン、縦軸は最適化のための評価関数の値となっている。サポートが全体に配置されれば変形量は小さくなるがサポート質量は大きいため、評価関数の値は大きくなる。一方、サポート配置で OFF の位置が多くなればサポート質量は小さくなるが変形量が大きくなり、評価関数の値は大きくなってしまふ。多数個の試行配置の中から遺伝的アルゴリズムを用いて、変形を抑えながらサポート質量が最小になるようなサポート配置を探索し、最適化する。

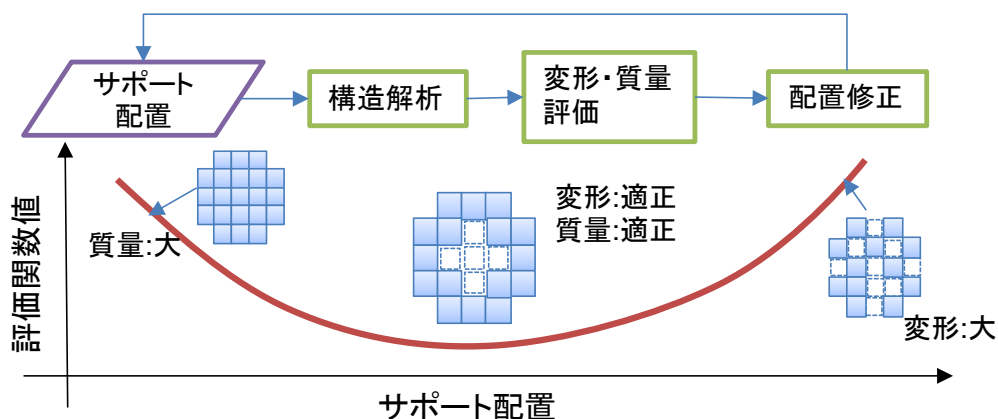


図 2-3-46 遺伝的アルゴリズムによるサポート配置最適化方法のイメージ図

そのためには、評価関数が図 2-3-45 に示されるような振舞いをするように、適切に関数形を設定する必要がある。これを実現するために、非均一的サポートモデル最適化では、初期状態からの変位差、各サイトの質量和、初期状態からの応力差、隣接相互作用それぞれからの寄与の和となる評価関数を採用した。この評価関数が極小値をとるように各サイトのサポート ON/OFF を、遺伝的アルゴリズムを用いて最適化を行った。

図 2-3-47 は、様々なサポートの初期配置から出発して、遺伝的アルゴリズムによって、サポートの配置を最適化していく途中の履歴を示す。この図からは、様々なサポートの初期配置から出発しても、最終 step, では四隅のサポートが ON になっており、分布としては似たようなものとなる事が分かる。ただし、遺伝的アルゴリズムは、離散的な最適化を行うため、異なる初期配置からスタートすると、最適化後の分布が完全に一致することはほとんどない。そのため、様々な初期配置を生成し、その中で、最適化した結果の評価関数が最小となる分布を、最適化の結果として採用することで、より良い最適化解を得られるような処理フローとなっている。

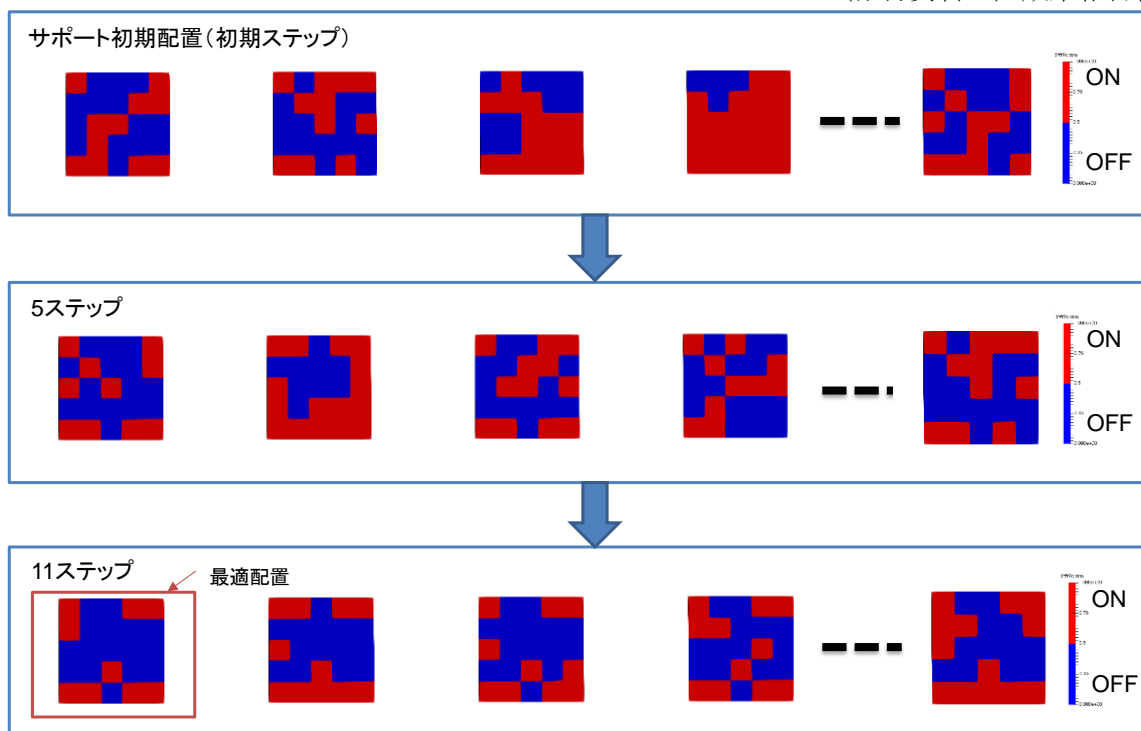


図 2-3-47 遺伝的アルゴリズムによるサポート配置の時間発展

図 2-3-48 に、非均一的サポートモデル最適化後の変位量のカラーマップを示す。非均一的サポート最適化前の最大変位は 0.2855mm で、最適化後は 0.3mm なので、最大変位は 0.0145mm 増加している。

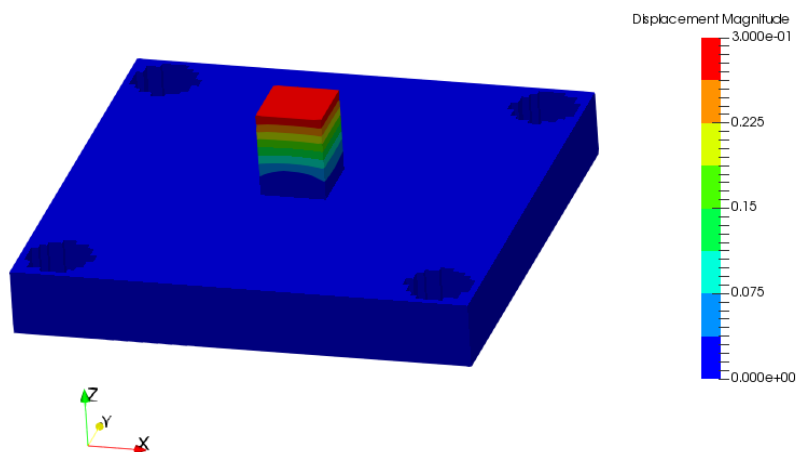


図 2-3-48 非均一的サポート最適化後の変位量

図 2-3-49 および図 2-3-50 は、非均一的サポートモデル最適化後の、サポートに発生する応力分布およびサポートの ON/OFF の分布を示す。この図からは、サポートは変形量の大きいキューブの四隅で ON になり、変形量の小さいキューブ中央では OFF になることが分かる。そのため、応力もサポートが ON になるキューブの四隅で高い値が発生する。このようなサポート配置では、キューブ下面の全面にサポートを配置した場合に比べて、サポート質量は 36%に低減できることになる。また、最適化前のサポート初期配置に比べても、サポート質量は 82%に低減できる。

このように、遺伝的アルゴリズムによる非均一的サポートモデル最適化により、サ

ポート配置自体の最適化が可能になる。ただし、この最適化は応力をベースに行っており造形できない条件のサポート配置を生成する可能性があるため、実際の造形に適用し、実用性を検証していく必要がある。

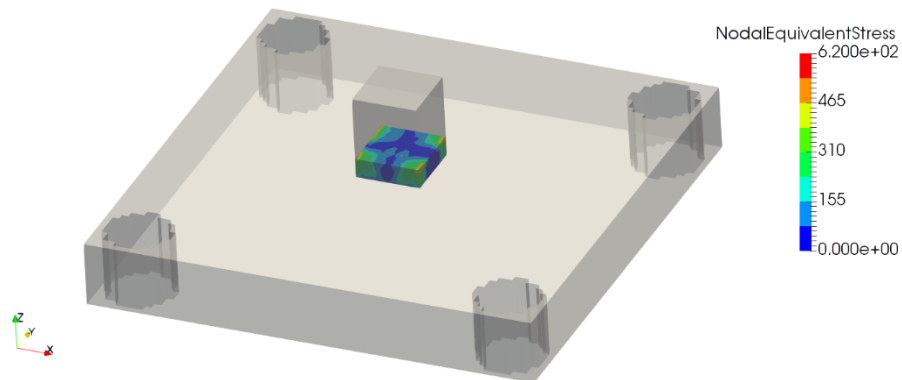


図 2-3-49 非均一的サポートモデル最適化後のサポート部応力分布

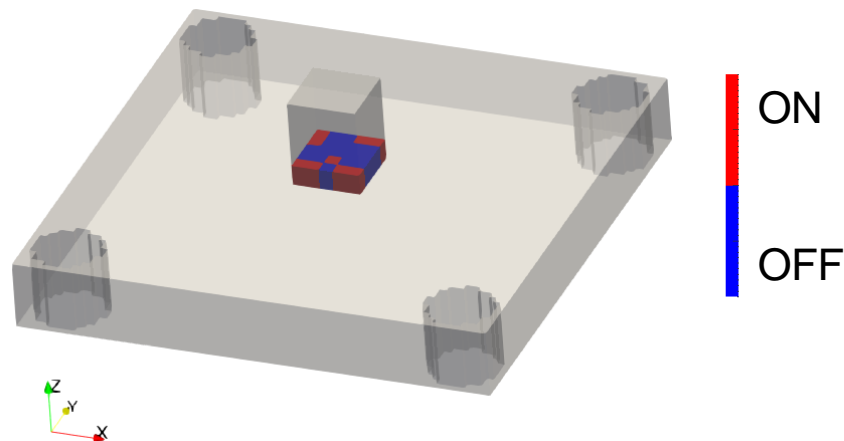


図 2-3-50 非均一的サポートモデル最適化後のサポート部 ON/OFF 分布

固有ひずみ法による熱変形予測シミュレーションの開発（サポート配置の最適化）では、サポートによる造形物の変形抑制を計算するために、積層毎に固有ひずみを付与して変形を計算するための **Layer by Layer** 解析機能を固有ひずみ解析ソルバーに追加した。さらにサポート切断時の内部応力解放に伴う変形を計算する機能を、固有ひずみ解析ソルバーに追加した。

Layer by Layer 解析機能とサポート切断時の変形解析機能を用いて、レーザビームパウダベッド方式の片持ち梁造形物の変形量と固有ひずみ解析ソルバーの変形量を比較したところ、変形量はよく一致することが確認できた。これらの機能により、変形量とサポート配置・密度の関係が計算できるようになるため、サポートの最適化計算ができる。まず、サポートの配置は維持したままサポート密度のみを最適化する均一的サポートモデル最適化の機能を開発した。評価関数は、サポート質量と変形量がトレードオフする関係に設定し、勾配法を用いて最適化を計算する。この均一的サポート最適化をキューブ造形に適用したところ、実際に変形量の大きい角部のサポート密度が大きくなる妥当な解が得られた。

さらに、初期のサポート配置の変更も含めてサポート質量を最適化する非均一的サ

ポートモデル最適化の機能を開発した。非均一的サポートモデル最適化では、まず複数の揺らぎパラメータを考慮したモンテカルロ計算を行い、遺伝的アルゴリズムによる最適化のための初期試行サポート配置を生成する。次に、多数の試行サポート配置の中から遺伝的アルゴリズムを用いて、変形を抑えながらサポート質量が最小になるようなサポート配置を探索する。この非均一的サポート最適化をキューブ造形に適用し、変形量の大きいキューブ角部のサポートは維持し、変形量の小さいキューブ中央のサポートは除去するという妥当な結果が得られることが確認した。

2-4 データベース構築 (造形条件、粉末条件、シミュレーション用データ)

2-4-1 開発機の造形物評価

① 目的

3D 積層造形物には空孔や造形方向による材料組織の異方性、熱処理条件等の機械的性質に影響を与え得る要因が存在している。将来的に 3D 積層造形物を機械構造物に取り入れるためには、3D 積層造形材の機械的性質を把握しておくことが不可欠である。そのため、「2-4-1 開発機の造形物評価」では、TRAFAM で開発された 3D 積層造形装置を導入する際の検討項目になるとと思われる造形物の引張強さや疲労強度を取得することを目的とする。

② 目標

- TRAFAM で開発された 3D 積層造形で作製された材料の金属疲労に関するデータ(S-N 曲線等)を取得する。
- 疲労強度に寄与し得る要因(内部欠陥、組織、熱処理条件等)についての知見を得る。

③ 実施計画

表 2-4-1 に示すように各装置で造形する材料に対して引張試験および疲労試験を計画した。各装置の対象材料は⑤以降に記載する。

表 2-4-1 平成 30 年度 実施計画

		平成30年										平成31年		
		4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	
開発機の 造形物 評価	1. 2017年度に疲労強度を確認済みの材料			造形		熱処理, X線CT 破壊靱性試験 き裂進展試験					整理・評価	データベース登録		
	2. 2017年度の検討から, 造形条件を変更する材料		造形		熱処理, X線CT 引張試験, 疲労試験				整理評価	データベース登録				
						造形		熱処理, X線CT, 疲労試験, 破壊靱性試験, き裂進展試験		整理評価	データベース登録			

④ 実施内容

造形物から試験片を作製し、引張試験及び疲労試験を実施した。

⑤ マシニングセンタ方式の複層レーザービーム 3D プリンタ

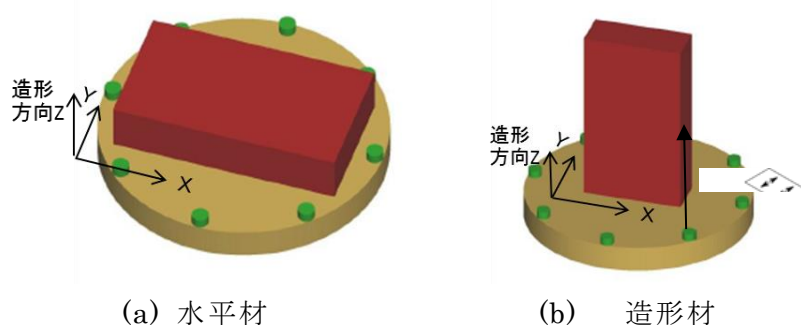
⑤-1 SUS304

⑤-1-1 造形

マシニングセンタ方式の複層レーザービーム 3D プリンタにより SUS304 を造形した。粉末には、山陽特殊製鋼で製造された SUS304 を用いた。表 2-4-2 に使用した粉末に関する情報を示す。造形は平成 29 年度に検討した太ビード造形条件で、図 2-4-1 に示すような $t30\text{mm} \times 75\text{mm} \times 135\text{mm}$ の平板を造形した。試験片の荷重負荷方向が水平方向および造形方向になるように寸法が異なる 2 種類の造形物を使用した。実施内容を図 2-4-3 に示す。図 2-4-2 に造形物の外観写真の例を示す。

表 2-4-2 使用した粉末

材料	SUS304
製造メーカー	山陽特殊製鋼
合金名 (型番)	PSS 304
製品ロット No.	F-9744
粒径, μm	45~75



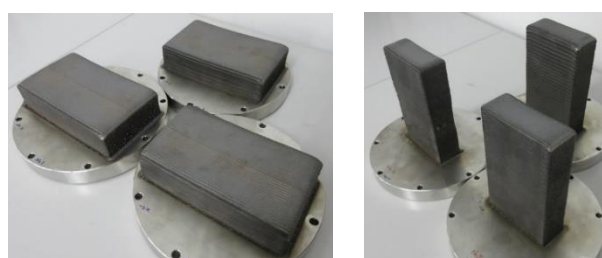
(a) 水平材

(b) 造形材

図 2-4-1 造形時のイメージ

表 2-4-3 造形物に対する実施内容一覧

造形条件	荷重負荷方向	熱処理	用途	試験数,体	試験片番号
太ビード	水平	熱処理 (HIP なし)	引張試験片	3	BH-11~13
太ビード	造形	熱処理 (HIP なし)	引張試験片	3	BP-11~13



(a) 水平材

(b) 造形材

図 2-4-2 造形物の外観写真の例

⑤-1-2 熱処理

表 2-4-3 に示すようにすべての試験片に熱処理を施した。SUS304 材の熱処理の条件は AMS 2759/4(2-4-1-1)を参考に設定した。表 2-4-4 に熱処理の条件を示す。以下、熱処理のみを施した造形物を「HIP なし材」と称する。

表 2-4-4 熱処理条件

実施順	実施内容	温度, ℃	圧力, MPa	保持時間, Hour	冷却方法
1	熱処理	1,066	—	2	水冷

⑤-1-3 引張試験

ASTM E08(2-4-1-2)に従い図 2-4-3 に示す引張試験片を作製し、ASTM E08 に従い室温大気中で引張試験を実施した。図 2-4-4 に引張試験結果を示す。

図 2-4-4 は水平材および造形材のそれぞれ 3 本の平均値を示す。荷重負荷方向に依らず、0.2%耐力、引張強さ、伸び、絞りは同程度であった。

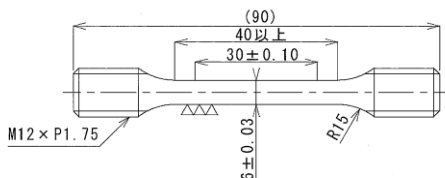


図 2-4-3 引張試験片形状(単位:mm)

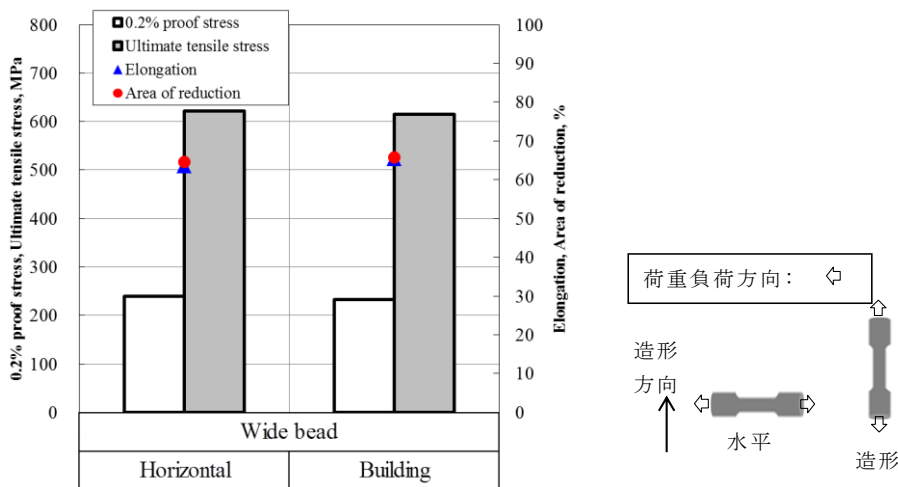


図 2-4-4 引張試験結果 平均値

⑤-1-4 まとめ

マシニングセンタ方式の複層レーザビーム 3D プリンタにより造形した SUS304 を用いて造形物の引張試験を実施し、以下の結果を得た。

- 引張試験の結果、造形条件による 0.2%耐力、引張強さ、伸び、絞りに造形方向の影響は確認されなかった。

⑤-2 インコネル 718

⑤-2-1 造形

マシニングセンタ方式の複層レーザービーム 3D プリンタを用いて、インコネル 718 を造形した。粉末は山陽特殊製鋼製の PI718 を用いた。表 2-4-5 に使用した粉末に関する情報を示す。造形は平成 29 年度に検討した太ビード造形条件と同等の条件で、図 2-4-5 に示すように 135mm×30mm×75mm の平板を造形した。試験片の荷重負荷方向が水平方向および造形方向になるように向きが異なる 2 種類の平板を造形した。平板の造形数は 6 個である。実施内容を表 2-4-6 に示す。

表 2-4-5 使用した粉末

材料	インコネル 718
製造メーカー	山陽特殊鋼(株)
型番	PI718
粒径, μm	45~75

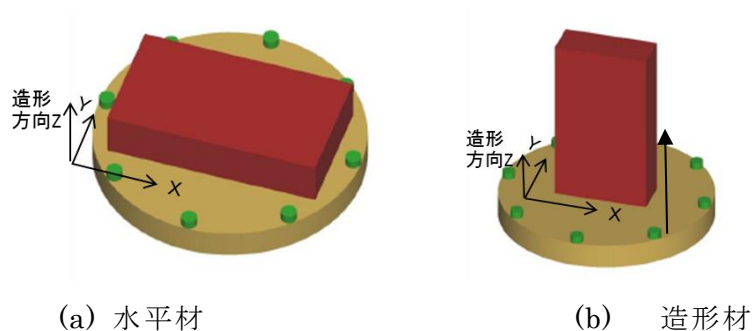


図 2-4-5 造形時のイメージ

表 2-4-6 造形物に対する実施内容一覧

荷重負荷方向	用途	試験数,体	試験片番号
水平	引張試験	2	DH-12, 13
造形	引張試験	2	DP-12, 13

⑤-2-2 熱処理

造形後の全平板に対して熱処理を実施した。熱処理条件は、AMS 5383⁽²⁻⁴⁻¹⁻⁶⁾ を参考に設定した。表 2-4-7 に熱処理条件を示す。

表 2-4-7 熱処理条件

実施順	実施内容	温度	保持時間	冷却方法
		°C	hours	
1	溶体化	700	0.5	冷却せず 2 へ
2	溶体化	968±14	2	アルゴンファーリングで 300°C 以下に
3	時効	718±8	8	冷却速度 55°C±8°C/hour で 3 へ
4	時効	621±8	8	アルゴンファーリング

⑤-2-3 引張試験

ASTM E08⁽²⁻⁴⁻¹⁻²⁾に従い図 2-4-6 に示す引張試験片を作製し、室温大気中で引張試験を実施した。図 2-4-7 に引張試験結果を示す。図 2-4-7 は水平材および造形材のそれぞれ 2 本の平均値を示している。水平材は造形材よりも 0.2% 耐力、引張強さが高い傾向が得られた。

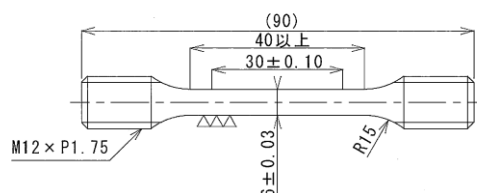


図 2-4-6 引張試験片形状(単位:mm)

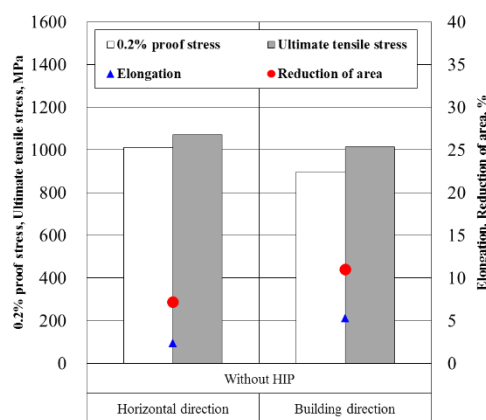


図 2-4-7 引張試験結果, 平均値

⑤-2-4 まとめ

マシニングセンタ方式の複層レーザービーム 3D プリンタにより造形したインコネル 718 を用いて引張試験を実施し、以下の結果を得た。

- 引張試験の結果、造形材よりも水平材の方が 0.2% 耐力、引張強さが高い傾向が得られた。

⑥ 複層レーザービーム 3D プリンタ

⑥-1 Ti-6Al-4V

⑥-1-1 造形

複層レーザービーム 3D プリンタにより Ti-6Al-4V 合金を造形した。表 2-4-8 に使用した粉末に関する情報を示す。造形は平成 29 年度に検討した造形条件で、図 2-4-8 に示すように t35mm×85mm×140mm の平板を造形した。平板の造形数は 4 個である。実施内容を表 2-4-9 に示す。

表 2-4-8 使用した粉末

材料	Ti-6Al-4V
製造メーカー	大同特殊鋼
製品ロット No.	D3713M2
粒径, μm	45~105
平均粒径, μm	76.1

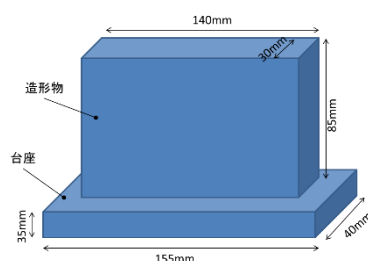


図 2-4-8 造形時のイメージ

表 2-4-9 造形物に対する実施内容一覧

荷重負荷方向	熱処理	用途	試験数,体	試験片番号
水平	HIP 処理後 熱処理 (HIP あり)	引張試験	3	TMH-11~13
造形	HIP 処理後 熱処理 (HIP あり)	引張試験	3	TMP-11~13

⑥-1-2 熱処理

造形後の平板に対して熱処理および HIP(Hot isostatic pressing)処理を実施した。表 2-4-9 に示すように造形物すべてに HIP 処理後に熱処理を施した。Ti-6Al-4V 材の熱処理および HIP 処理の条件はそれぞれ、AMS 4911⁽²⁻⁴⁻¹⁻⁷⁾および AMS 4985⁽²⁻⁴⁻¹⁻⁸⁾を参考に設定した。表 2-4-10 に熱処理および HIP 処理の条件を示す。以下、HIP 処理後に熱処理を施した造形物を「HIP あり材」と称する。

表 2-4-10 熱処理および HIP 処理条件

実施順	実施内容	温度, ℃	圧力, MPa	保持時間, Hour	冷却方法
1	HIP 処理	920	100	2	炉冷
2	熱処理	843	—	2	アルゴンガス冷却

⑥-1-3 引張試験

ASTM E08⁽²⁻⁴⁻¹⁻²⁾に従い図 2-4-9 に示す引張試験片を作製し、室温大気中で引張試験を実施した。図 2-4-10 に引張試験結果を示す。図 2-4-10 は水平材および造形材のそれぞれ 3 本の平均値を示す。引張試験の結果、造形材の方が水平材よりも 0.2%耐力、引張強さは向上傾向にある。伸び、絞りに関しては造形方向の依存性は確認されなかった。

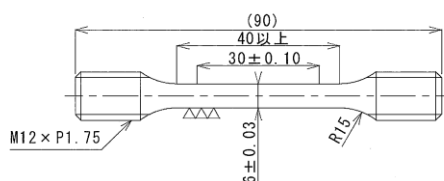


図 2-4-9 引張試験片形状(単位:mm)

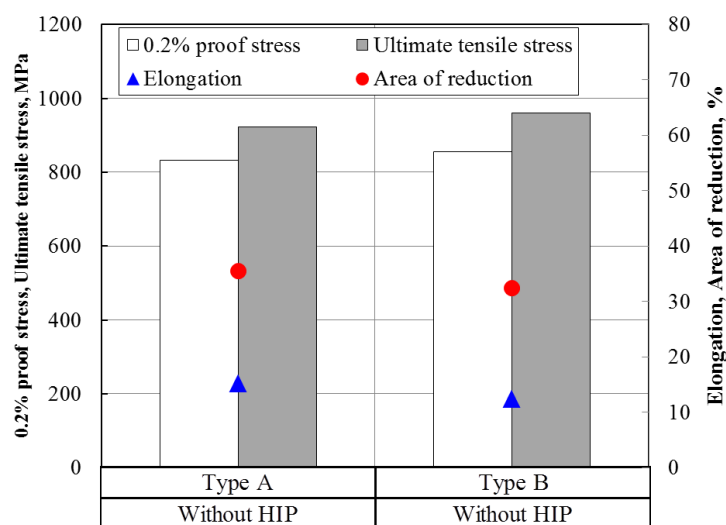


図 2-4-10 引張試験結果 平均値

⑥-1-4 まとめ

複層レーザービーム 3D プリンタにより造形した Ti-6Al-4V を用いて造形物の引張試験を実施し、以下の結果を得た。

- 引張試験の結果、造形方向材の方が水平方向材よりも、0.2%耐力、引張強さは向上傾向にある。伸び、絞りに関する造形方向の影響は確認されなかった。

⑥-2 インコル 718

⑥-2-1 造形

複層レーザビーム 3D プリンタにより、インコル 718 を造形した。粉末は、山陽特殊製鋼(株)により製造された PI718 を用いた。表 2-4-11 に使用した粉末に関する情報を示す。図 2-4-11 に示すような 105mm×85mm×t16mm の平板 6 枚を造形し、試験片作製に用いた。造形物の外観写真を図 2-4-11 に、実施内容を図 2-4-12 に示す。

表 2-4-11 使用した粉末

材料	インコル 718
製造メーカー	山陽特殊製鋼(株)
型番	PI718
粒径, μm	10~45
平均粒径, μm	35.6

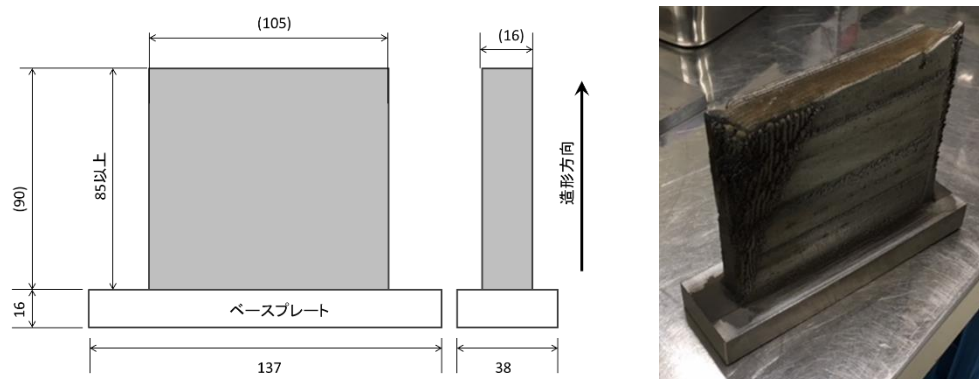


図 2-4-11 造形物の寸法および造形物の外観写真例

表 2-4-12 造形物に対する実施内容一覧

荷重荷方向	熱処理	用途	試験片数, 本	試験片番号
水平	熱処理のみ (HIP なし)	引張試験	2	TOI-1~2
		疲労試験	5	TOI-3~7
	HIP 処理後 熱処理 (HIP あり)	引張試験	2	TOI-8~9
		疲労試験	5	TOI-10~14
造形	熱処理のみ (HIP なし)	引張試験	2	TOI-15~16
		疲労試験	5	TOI-17~21
	HIP 処理後 熱処理 (HIP あり)	引張試験	2	TOI-22~23
		疲労試験	5	TOI-24~28

⑥-2-2 熱処理

造形後の平板に対して熱処理およびHIP(Hot isostatic pressing)処理を実施した。造形平板6枚のうち3枚に対して熱処理のみを施し、残りの3枚に対してHIP処理後に熱処理を施した。熱処理条件は、AMS 5383⁽²⁻⁴⁻¹⁻⁶⁾を参考に設定した。表2-4-13に熱処理およびHIP処理の条件を示す。以下、熱処理のみを施した造形物を「HIPなし材」、HIP処理後に熱処理を施した造形物を「HIPあり材」と称する。

表 2-4-13 熱処理およびHIP処理条件

実施順	実施内容	温度	圧力	保持時間	冷却方法
		℃	MPa	Hours	
1	HIP	1,163	100	4	室温まで冷却
2	溶体化	700	-	0.5	冷却せず3へ
3	溶体化	968±14	-	2	アルゴンファーリングで300℃以下に
4	時効	718±8	-	8	冷却速度55℃±8℃/hourで3へ
5	時効	621±8	-	8	アルゴンファーリング

⑥-2-3 引張試験

ASTM E08⁽²⁻⁴⁻¹⁻²⁾に従い図2-4-12に示す引張試験片を作製し、ASTM E08⁽²⁻⁴⁻¹⁻²⁾に従い室温大気中で引張試験を実施した。図2-4-13に引張試験結果を示す。図2-4-13は水平材/造形材、HIPなし材/HIPあり材の計4種のそれぞれ2本の平均値を示している。水平材においては、HIP処理を施すことによって、0.2%耐力、引張強さ、伸びおよび絞りが向上する傾向が確認された。一方で造形材においては、HIP処理を施すことによって、0.2%耐力および絞りのみが向上し、引張強さおよび伸びは低下する傾向が得られた。

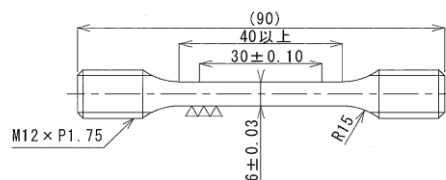


図 2-4-12 引張試験片形状(単位:mm)

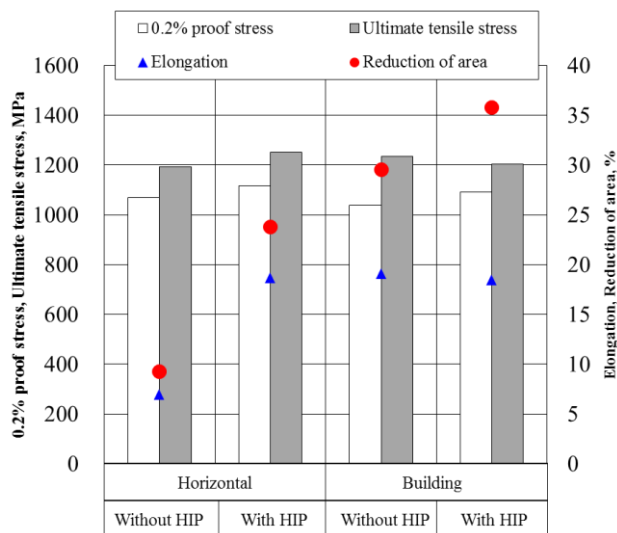


図 2-4-13 引張試験結果、平均値

⑥-2-4 疲労試験

ASTM E466⁽²⁻⁴⁻¹⁻⁹⁾に従い疲労試験片を作製し、疲労試験を実施した。図 2-4-14 に試験片形状を示す。試験は室温大気中で荷重制御、応力比 R0.1 で実施した。試験周波数は 30Hz で実施した。

疲労試験結果を図 2-4-15 に示す。図中の Type A および Type B はそれぞれ水平材および造形材を表す。水平材および造形材ともに、HIP 処理を施すことで疲労寿命が向上することが確認された。また、HIP あり材および HIP なし材ともに、水平材の方が長寿命となる傾向が確認された。

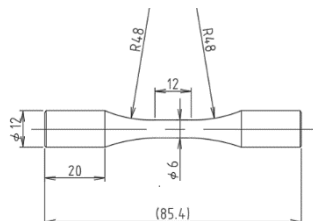


図 2-4-14 疲労試験片形状(単位：mm)

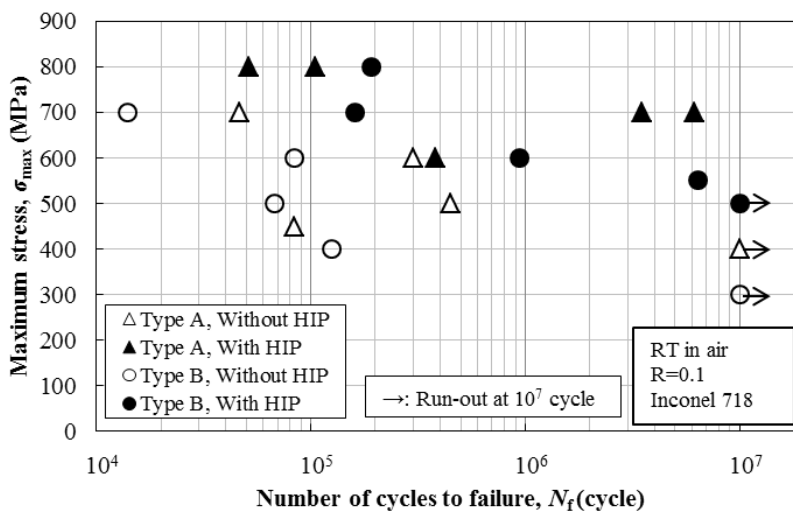


図 2-4-15 疲労試験結果

⑥-2-5 まとめ

複層レーザービーム 3D プリンタより造形したインコネル 718 を用いて引張試験および疲労試験を実施し、以下の結果を得た。

- 引張試験の結果、水平材においては、HIP 処理を施すことによって、0.2%耐力、引張強、伸びおよび絞りが向上する傾向が確認された。一方で造形材においては、HIP 処理を施すことによって、0.2%耐力および絞りのみが向上し、引張強さおよび伸びは低下する傾向が得られた。
- 疲労試験の結果、水平材および造形材ともに、HIP 処理を施すことで疲労寿命が向上することが確認された。また、HIP あり材および HIP なし材ともに、水平材の方が長寿命である傾向が確認された。

⑦ 大型高速レーザービーム 3D プリンタ

⑦-1 AlSi10Mg

⑦-1-1 造形

大型高速レーザービーム 3D プリンタにより AlSi10Mg を造形した。表 2-4-14 に使用した粉末に関する情報を示す。平成 30 年度に検討した造形条件で、図 2-4-16 に示すように 15mm×15mm×L105mm の角柱を、長手方向が水平方向および造形方向になるように造形した。造形数は 32 本である。実施内容を表 2-4-15 に示す。

表 2-4-14 使用した粉末

材料	AlSi10Mg
製造メーカー	東洋アルミニウム株式会社
型番	SI10MG40AA
平均粒径, μm	47.2

表 2-4-15 造形物に対する実施内容一覧

試験片 長手方向	熱処理	用途	試験片数, 本	試験片番号
水平	熱処理のみ (HIP なし)	引張試験片	2	MATH-1~2
		疲労試験片	5	MATH-3~7
	HIP 処理後 熱処理 (HIP あり)	引張試験片	2	MATH-8~9
		疲労試験片	5	MATH-10~14
造形	熱処理のみ (HIP なし)	引張試験片	2	MATP-1~2
		疲労試験片	5	MATP-3~7
	HIP 処理後 熱処理 (HIP あり)	引張試験片	2	MATP-8~9
		疲労試験片	5	MATP-10~14

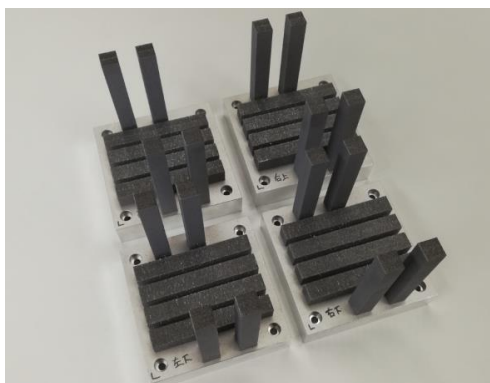


図 2-4-16 造形物の外観写真の例

⑦-1-2 熱処理

造形後の角柱に対して熱処理および HIP(Hot isostatic pressing)処理を実施した。表 2-4-15 に示すように各造形物のうち 14 本に対して熱処理のみを施し、残り 14 本に対して HIP 処理後に熱処理を施した。AlSi10Mg の熱処理としては、溶体化処理後人工時効硬化処理する T6 の熱処理が一般的であり、HIP 処理により疲労強度が向上する報告⁽²⁻⁴⁻¹⁻¹¹⁾があるため HIP 処理及び熱処理を実施した。熱処理および HIP 処理の条件は、ASTM F3301-18⁽²⁻⁴⁻¹⁻¹⁰⁾を参考に設定した。表 2-4-16 に熱処理および HIP 処理の条件を示す。以下、熱処理のみを施した造形物を「HIP なし材」、HIP 処理後に熱処理を施した造形物を「HIP あり材」と称する。

表 2-4-16 熱処理および HIP 処理条件

実施順	実施内容	温度, ℃	圧力, MPa	保持時間, Hour	備考
1	HIP 処理	525	100	4	Ar ガス中で HIP 処理
2	熱処理(溶体化処理)	530	—	6	水冷
3	熱処理(時効硬化)	175	—	5	水冷

⑦-1-3 引張試験

ASTM E08⁽²⁻⁴⁻¹⁻²⁾に従い図 2-4-17 に示す引張試験片を作製しし、室温大気中で引張試験を実施した。図 2-4-18 に引張試験結果を示す。図 2-4-18 は水平材/造形材、HIP あり/なし材のそれぞれ 2 本の平均値を示す。水平材および造形材ともに、HIP 処理を施すことによって、0.2%耐力および引張強さはほぼ変化せず、伸びおよび絞りは向上する傾向が確認された。

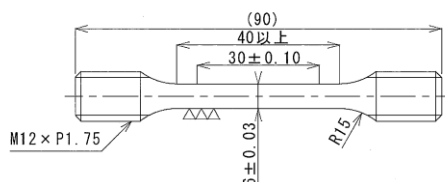


図 2-4-17 引張試験片形状(単位:mm)

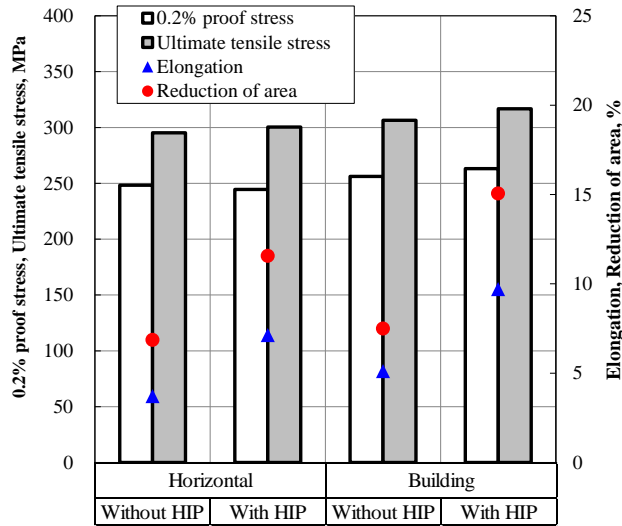


図 2-4-18 引張試験結果，平均値

⑦-1-4 疲労試験

ASTM E466(2-4-1-9)に従い疲労試験片を作製し、疲労試験を実施した。図 2-4-19 に試験片形状を示す。疲労試験は水平材 HIP あり材のみ実施した。試験は室温大気中で荷重制御、応力比 R0.1 で実施した。試験周波数は 30Hz で実施した。

疲労試験結果を図 2-4-20 に示す。試験最大応力の低下に従い、破断繰返し数が単調に増加した。HIP なし材の X 線 CT 計測結果には HIP あり材よりも大きな造形欠陥が認められ、大きな造形欠陥は疲労起点となり易いことから、HIP なし材の疲労強度は HIP あり材よりも短寿命側にプロットされる可能性がある。

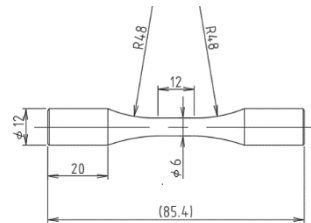


図 2-4-19 疲労試験片形状(単位：mm)

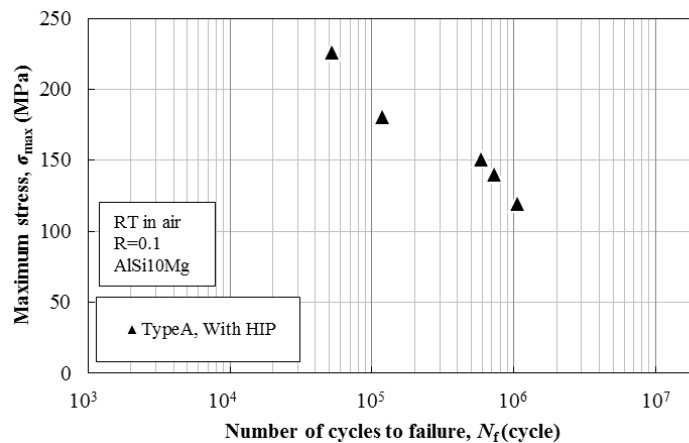


図 2-4-20 疲労試験結果

⑦-1-5 まとめ

大型高速レーザービーム 3D プリンタにより造形した AlSi10Mg を用いて引張試験および疲労試験を実施し、以下の結果を得た。

- 引張試験の結果、水平材および造形材ともに、HIP 処理を施すことによって、伸びおよび絞りが向上した。0.2%耐力および引張強さに対する HIP 処理の影響は明確には確認されず、ほぼ同程度であった。
- 疲労試験を実施し、HIP なし水平材の S-N 曲線を取得した。

⑦-2 インコネル 718

⑦-2-1 造形

大型高速レーザービーム 3D プリンタによりインコネル 718 を造形した。表 2-4-17 に使用した粉末に関する情報を示す。図 2-4-21 および図 2-4-22 に示すように、15mm×15mm×L105mm の角棒 32 本および 140mm×140mm×t30mm 平板 4 枚を造形し、試験片作製に用いた。実施内容を表 2-4-18 に示す。

表 2-4-17 使用した粉末

材料	インコネル 718
製造メーカー	山陽特殊製鋼(株)
型番	PI718
粒径, μm	10~45

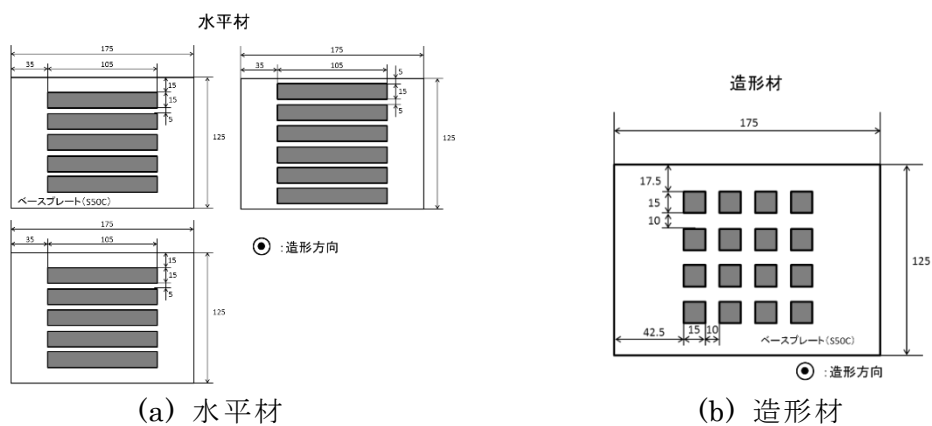


図 2-4-21 造形物（角棒）の寸法(単位：mm)

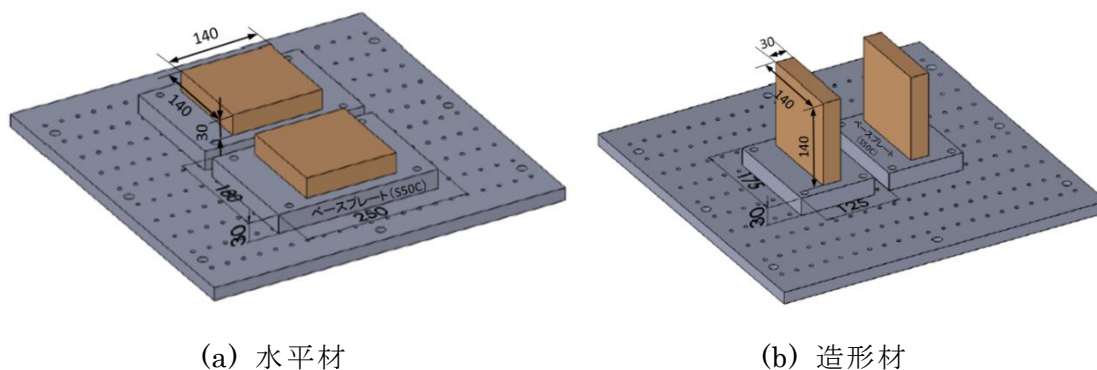


図 2-4-22 造形物（平板）の寸法(単位：mm)

表 2-4-18 造形物に対する実施内容一覧

荷重負荷方向	熱処理	用途	試験片数, 本	試験片番号
水平	熱処理のみ (HIP なし)	引張試験	2	MIH-1~2
		疲労試験	5	MIH-3~7
	HIP 処理後 熱処理 (HIP あり)	引張試験	2	MIH-8~9
		疲労試験	5	MIH-10~14
造形	熱処理のみ (HIP なし)	引張試験	2	MIP-1~2
		疲労試験	5	MIP-3~7
	HIP 処理後 熱処理 (HIP あり)	引張試験	2	MIP-8~9
		疲労試験	5	MIP-10~14

⑦-2-2 熱処理

造形後の角棒および平板に対して熱処理および HIP(Hot isostatic pressing) 処理を実施した。造形角棒 32 本のうち 14 本に対して熱処理のみを施し、その他 14 本に対して HIP 処理後に熱処理を施した。残りの 4 本は熱処理および HIP 処理を施さない造形ままの状態とした。造形平板 4 枚のうち 2 枚に対して熱処理のみを施し、残りの 2 枚に対して HIP 処理後に熱処理を施した。熱処理条件は、AMS 5383⁽²⁻⁴⁻¹⁻⁶⁾を参考に設定した。表 2-4-19 に熱処理および HIP 処理の条件を示す。以下、熱処理のみを施した造形物を「HIP なし材」、HIP 処理後に熱処理を施した造形物を「HIP あり材」と称する。

表 2-4-19 熱処理および HIP 処理条件

実施順	実施内容	温度	圧力	保持時間	冷却方法
		°C	MPa	hours	
1	HIP	1,163	100	4	室温まで冷却
2	溶体化	700	-	0.5	冷却せず 2 へ
3	溶体化	968±14	-	2	アルゴンファーリングで 300°C 以下に
4	時効	718±8	-	8	冷却速度 55°C±8°C/hour で 3 へ
5	時効	621±8	-	8	アルゴンファーリング

⑦-2-3 引張試験

ASTM E08⁽²⁻⁴⁻¹⁻²⁾に従い図 2-4-23 に示す引張試験片を作製した。引張試験片は造形角棒のうち計 8 本を用いて試験片形状に加工し、作製した。

ASTM E08⁽²⁻⁴⁻¹⁻²⁾に従い室温大気中で引張試験を実施した。図 2-4-24 に引張試験結果を示す。図 2-4-24 は水平材/造形材、HIP なし材/HIP あり材の計 4 種のそれぞれ 2 本の平均値を示している。水平材および造形材ともに、HIP 処理

を施すことによって、0.2%耐力は低下し、伸びおよび絞りは向上する傾向が確認された。

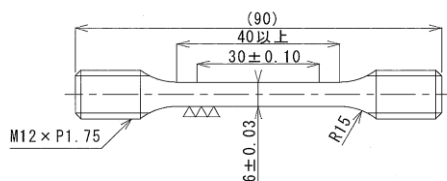


図 2-4-23 引張試験片形状(単位:mm)

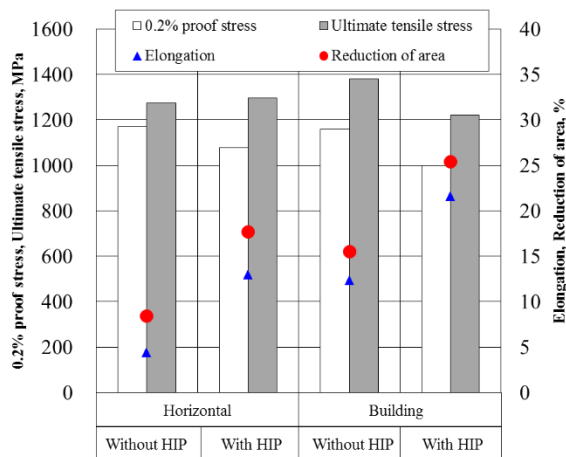


図 2-4-24 引張試験結果, 平均値

⑦-2-4 疲労試験

ASTM E466⁽²⁻⁴⁻¹⁻⁹⁾に従い疲労試験片を作製し、疲労試験を実施した。図 2-4-25 に試験片形状を示す。試験は室温大気中で荷重制御、応力比 R0.1 で実施した。試験周波数は 30Hz で実施した。

疲労試験結果を図 2-4-26 に示す。図中の Type A および Type B はそれぞれ水平材および造形材を表す。水平材および造形材ともに、HIP 処理を施すことで疲労寿命が向上することが確認された。また、HIP あり材においては、水平材の方が僅かに長疲労寿命であることが確認された。

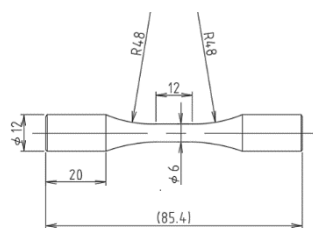


図 2-4-25 疲労試験片形状(単位:mm)

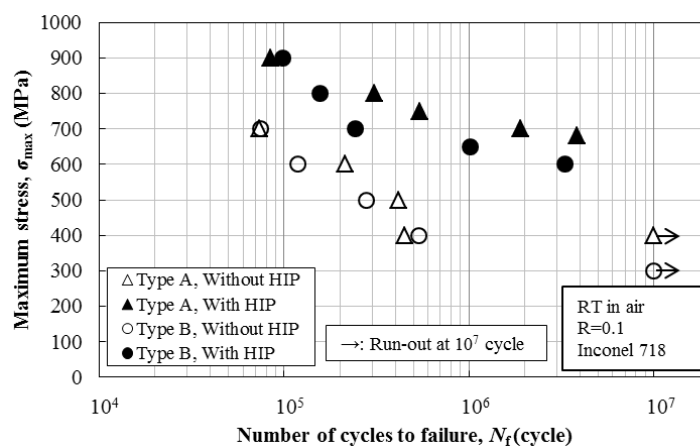


図 2-4-26 疲労試験結果

⑦-2-5 まとめ

大型高速レーザービーム 3D プリンタにより造形したインコネル 718 を用いて引張試験、疲労試験を実施し、以下の結果を得た。

- 引張試験の結果、水平材および造形材ともに、HIP 処理を施すことによって、0.2%耐力は低下し、伸びおよび絞りは向上する傾向が確認された。
- 疲労試験の結果、水平材および造形材ともに、HIP 処理を施すことで疲労寿命が向上することが確認された。また、HIP あり材においては、水平材の方が僅かに長寿命であることが確認された。

⑧参考文献

- (2-4-1-1) AMS 2759/4 Rev.C :2014 Heat Treatment, Austenitic Corrosion-Resistant Steel Parts
- (2-4-1-2) ASTM E 08-16a, “Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials”, (2016).
- (2-4-1-3) ASTM E1820-13, “Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness”, (2013).
- (2-4-1-4) ASTM E399-12, “Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness K_{Ic} of Metallic Materials”, (2012).
- (2-4-1-5) ASTM E647-13a, “Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates”, (2013).
- (2-4-1-6) AMS 5383F, “Nickel Alloy, Corrosion and Heat-Resistant, Investment Castings 52.5Ni - 19Cr - 3.0Mo - 5.1Cb(Nb) - 0.90Ti - 0.60Al - 18Fe Vacuum Melted Homogenization and Solution Heat Treated”, (2018).
- (2-4-1-7) AMS 4911N, “Titanium Alloy, Sheet, Strip, and Plate, 6Al - 4V, Annealed”, (2014).
- (2-4-1-8) AMS 4985E, “Titanium Alloy, Investment Castings 6Al - 4V 130 UTS, 120 YS, 6% EL Hot Isostatically Pressed Anneal Optional or When Specified”, (2014).
- (2-4-1-9) ASTM E466, “Standard Practice for Conducting Force Controlled

Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials”, (2007).

- (2-4-1-10) ASTM F3301-18, “Standard for Additive Manufacturing – Post Processing Methods – Standard Specification for Thermal Post-Processing Metal Parts Made Via Powder Bed Fusion”, (2018)
- (2-4-1-11) N.O. Larrosa, W. Wang, N. Read, M.H. Loretto, C. Evans, J. Carr, U. Tradowsky, M.M.Attallah, P.J. Withers, Linking microstructure and processing defects to mechanical properties of selectively laser melted AlSi10Mg loy, Theoretical and Applied Fracture Mechanics, Volume 98, Pages 123-133, (2018).

2-4-2 高速造形用レシピの開発

① インコネル 718 の高速度造形レシピの開発

①-1 目的

金属積層造形技術において、インコネル 718 合金は耐熱材料として一般的によく利用される合金の 1 つである。ここでは、高出力レーザを高速に照射した造形を造形時間の短縮を目的として、高速造形用レシピ開発を行う。

①-2 実験方法

本研究では、要素技術研究機（以下、要素機と記す）を用いた。使用粉末には、山陽特殊製鋼（株）製の平均粒径 30 μm のインコネル 718 ガスアトマイズ粉末を用いた。

まず、造形条件を検討するために、16.0 mm×12.2 mm×16.0 mm の造形物（以後、キューブと記す）の造形を行った。造形物の機械的性質は、JIS 14A 号に準じて引張試験片を作製し、引張試験により評価した。

表面状態の観察は Zygo 製 New view8000/9000 により行った。密度試験はアルキメデス法により測定した。相対密度の算出はインコネル 718 の時効処理後の真密度 (8.19 g/cm³) に対するものとした。欠陥の形状は造形物の断面を研磨後、日本電子製 JSW-7800F 走査型電子顕微鏡（以下、SEM と記す）により行った。組織観察はオリンパス製倒立金属顕微鏡 PME 3 (OM) により行った。なお、腐食は研磨後、10 % シュウ酸水溶液を使用して、電解腐食を行った。

①-3 結果と考察

①-3-1 造形条件

低出力・低速造形条件および高出力・高速造形条件は、それぞれ表 2-4-20 および表 2-4-21 に示す通りで、レーザ照射による粉末層に投入されたエネルギーを式 (1) により求めた。 E : エネルギー密度(J/mm³)、 P : レーザ出力(W)、 v : 走査速度(mm/s)、 h : ハッチピッチ(mm)、 t : 積層厚さ(mm)である。

$$E = P/vht \quad (1)$$

表 2-4-20 低出力・低速造形条件

Laser power (W)	250, 300, 350, 400
Scan speed (mm/s)	500, 600, 700, 800
Hatch pitch (mm)	0.15
Layer thickness (mm)	0.05
Spot diameter (mm)	0.20
Energy density(J/mm ³)	41.7 – 106.7

表 2-4-21 高出力・高速造形条件

Laser power (W)	600, 700, 800, 900, 1000
Scan speed (mm/s)	1,500, 2,000, 2,500, 3000, 3500
Hatch pitch (mm)	0.15
Layer thickness (mm)	0.05
Energy density(J/mm ³)	41.7 – 106.7

①-3-2 低出力・低速造形条件

エネルギー密度に対する表面粗さ及び造形物の相対密度（以後、造形密度と記す）の変化を、それぞれ図 2-4-27 及び図 2-4-28 に示す。図 2-4-27 からわかるように、エネルギー密度 50 J/mm³ 以下の場合には、図 2-4-27 (A) で示した造形物の表面画像からトラックが不安定になっており、ポーリング現象が発生し

ているため、エネルギー不足であることがわかる。また、エネルギー密度 90 J/mm^3 以上の場合は、図 2-4-27 (D)で示した表面画像からトラックは比較的滑らかであるがうねりが生じているとともに、大きなスパッタが発生していることからエネルギー投入が過剰であることがわかる。このため、滑らかな表面の造形物を得るためにはエネルギー密度 $60 \sim 80 \text{ J/mm}^3$ 付近が適切であることがわかる。その中でもよりエネルギー密度の高い 80 J/mm^3 で最も滑らかな表面を得ることができる。また、図 2-4-28 からわかるように、造形密度についても、エネルギー密度が 70 J/mm^3 程度以上で高密度となっており、エネルギー密度 90 J/mm^3 で造形密度 99.94% と非常に高密度な造形物が得られた。

これらの結果からプロセスマップを作成した。図 2-4-29 にプロセスマップを示す。これからわかるように、表面状態における最適造形条件はレーザ出力 300 W 走査速度 500 mm/s であることがわかる。一方、造形密度における最適造形条件はレーザ出力 350 W 走査速度 500 mm/s であることがわかる。したがって、レーザ出力 $300 \text{ W} \sim 350 \text{ W}$ 、走査速度 500 mm/s が最適な造形条件であるといえる。

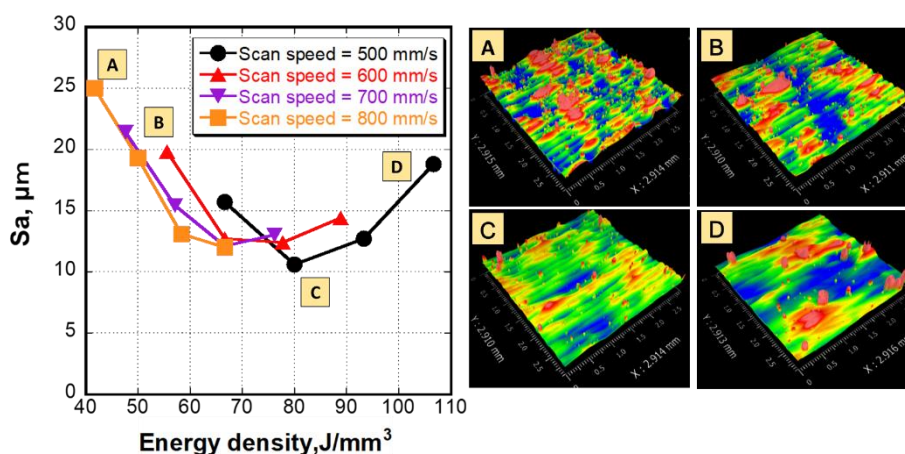


図 2-4-27 エネルギー密度と表面粗さの関係

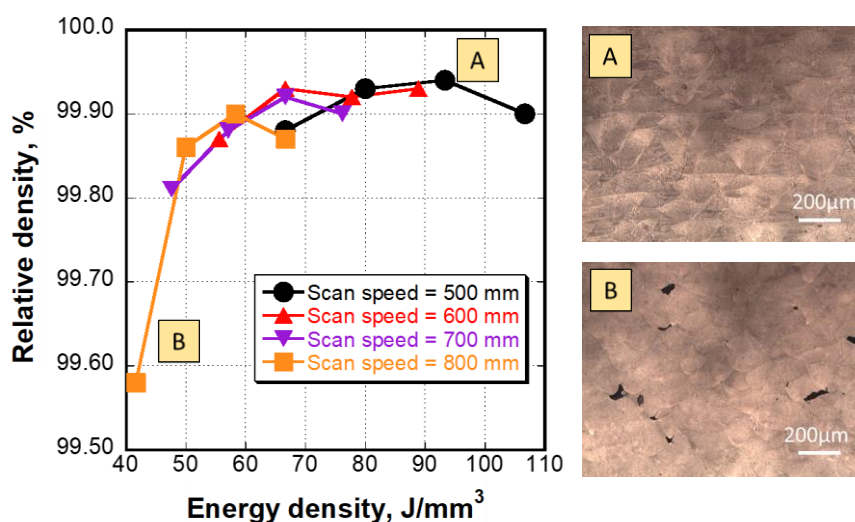
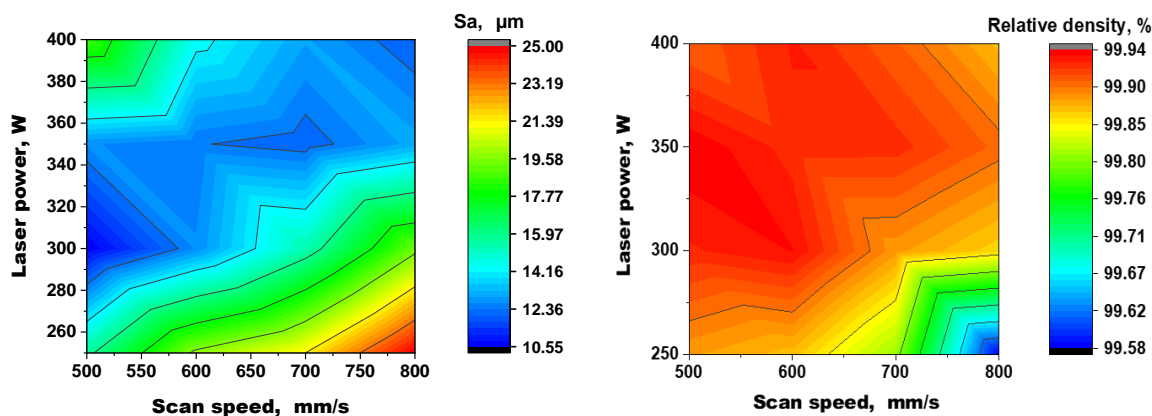


図 2-4-28 エネルギー密度と造形密度の関係



(a) 表面粗さによる評価 (b) 密度による評価

図 2-4-29 低出力・低速造形条件におけるプロセスマップ

① -3-3 高出力・高速造形条件

エネルギー密度に対する造形密度の変化を図 2-4-30 に示す。エネルギー密度が低い場合には、(C)、(D)に示すように不規則な形状の欠陥が発生していることがわかる。エネルギー密度 50 J/mm³ 付近の(B)では、ガスポアと考えられる丸い空隙が複数個確認されるが、エネルギー密度 60 J/mm³ 付近の(A)では、そのような空隙はほとんど観察されず相対密度は 99.2 %を超えている。これらの結果から、最適な走査速度は 1,500 mm/s であり、エネルギー密度 70~80 J/mm³ で高密度の造形物を得ることができることがわかった。これらの結果から、プロセスマップを作成した。図 2-4-31(a)にプロセスマップを示す。造形密度による最適造形条件はレーザー出力 600~700 W、走査速度 1,500 mm/s であることがわかる。

また、造形物の表面を SEM で観察を行った結果から、図 2-4-31(b)に示すプロセスマップを作成した。●、▲および×は、(●)滑らかな表面状態、(▲)粗い表面状態、(×)空隙が存在することを示している。走査速度 2,000~3,500 mm/s では全ての造形物の表面に空隙が発生していた。走査速度をより速くするとこの傾向はより顕著になる。

このように、高出力・高速造形条件では、走査速度 1,500 mm/s 以上では、高密度の造形物を得られないことがわかった。また、造形密度は、低出力・低層造形条件より低いことがわかった。

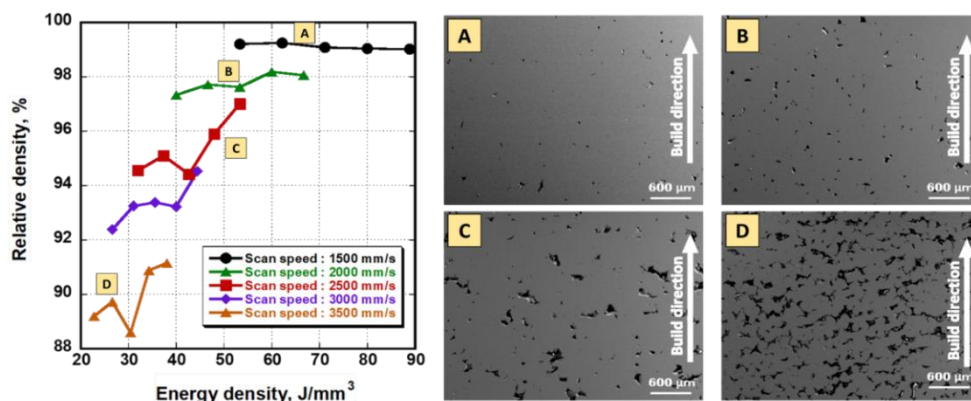


図 2-4-30 エネルギー密度と造形密度の関係

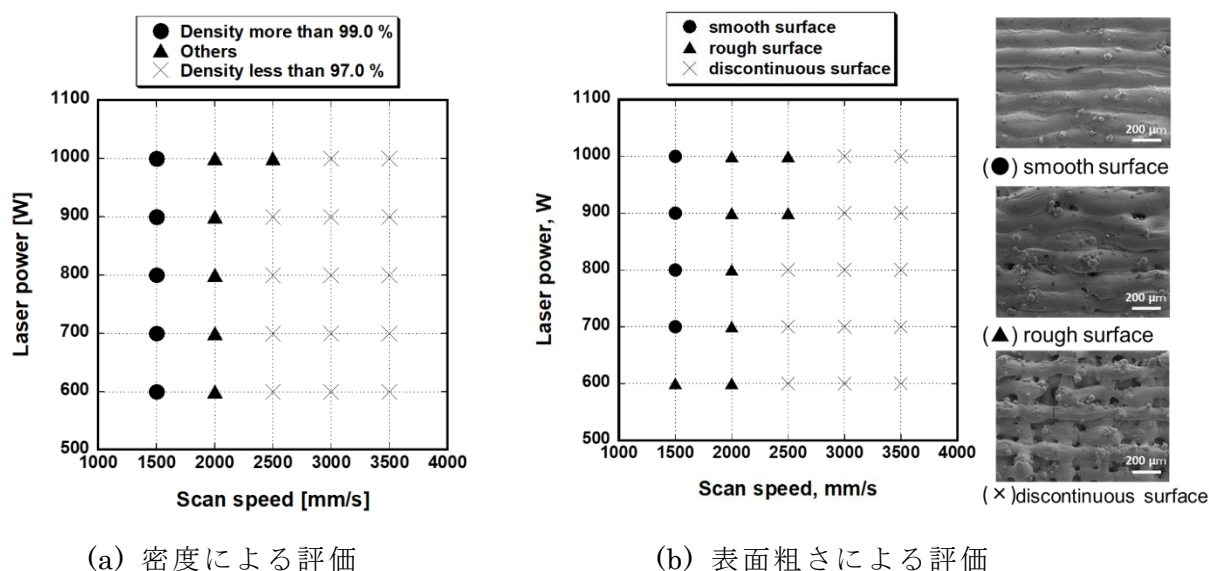


図 2-4-31 高出力・高速造形条件におけるプロセスマップ

①-4 まとめ

今年度は、高出力・高速造形条件との比較を行うために、低出力・低速造形条件についても体系的に検討した。得られた結果は以下の通りである。

- (1) 低出力・低速造形条件の場合、表面粗さ及び密度を指標としてプロセスマップを作成した結果、高出力・高速造形条件の場合より高密度の造形物が得られる領域が広がることわかった。
- (2) 高出力・高速造形条件の場合、最大相対密度は 99.2 %であったが、低出力・低速造形条件では 99.7 %と高い値が得られ、密度は低くなることわかった。
- (3) 高速造形を行う際には、70J/mm³程度以上のエネルギー密度が必要となるため、高出力での造形が必須であるため密度の低下は避けられないことわかった。

② アルミニウム合金 AlSi10Mg の高速造形レシピの開発

②-1 目的

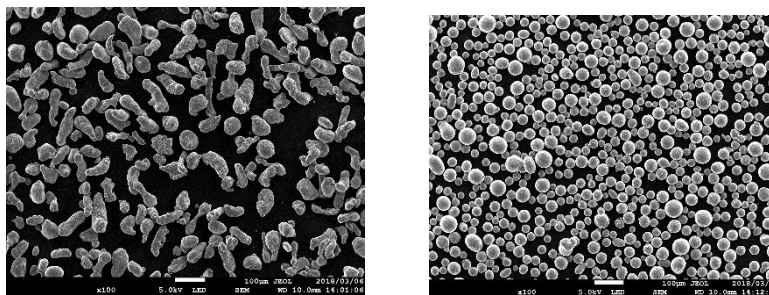
金属積層造形技術において、AlSi10Mg は鋳造用合金として一般的によく利用される合金の 1 つである。ここでは、高出力・高速造形条件による造形時間の短縮を目的として、高速造形用レシピ開発を行う。

②-2 実験方法

使用粉末は東洋アルミニウム社製の AlSi10Mg 合金粉末 2 種類（ガスアトマイズ法、回転円板法）を使用した。粒径はそれぞれ 20~63 μm である。図 2-4-32 ガスアトマイズ粉末及び回転円板粉末の SEM 画像を示す。装置及び試験片については、インコネル 718 の場合と同様である。

要素機を用いて、造形条件が異なる 25 個の TP (12mm 角) を造形した。レーザー出力、走査速度を変化させて造形条件を設定した。表 2-4-22 に一覧を示す。スパッタによる外観不良、密度低下を低減させるために走査速度を 1,100mm/sec 以上、積層造形速度向上のために積層厚を 0.1mm に設定している。

評価としては、アルキメデス法による密度試験、表面粗さ測定、断面観察、EBSD 分析を行った。さらに最も密度が高い条件で、造形方向 0°、45°、90°の引張試験片を 3 本ずつ作製し、引張試験を行った。



(a) ガスアトマイズ粉末 (b) 回転円盤粉末

図 2-4-32 AlSi10Mg 粉末の SEM 画像

表 2-4-22 造形条件

No.	パワー [W]	走査速度 [mm/sec]	積層厚 [mm]	ハッチ [mm]	走査 回数	Build Rate [mm/sec]	Build Rate [cc/h]	成形密度 [J/mm ³]	SpotD [mm]
1	500	1100	0.1	0.13	1	14.3	51.48	34.965	0.2
2	600	1100	0.1	0.13	1	14.3	51.48	41.958	0.2
3	700	1100	0.1	0.13	1	14.3	51.48	48.951	0.2
4	800	1100	0.1	0.13	1	14.3	51.48	55.944	0.2
5	900	1100	0.1	0.13	1	14.3	51.48	62.937	0.2
6	500	1300	0.1	0.13	1	16.9	60.84	29.586	0.2
7	600	1300	0.1	0.13	1	16.9	60.84	35.503	0.2
8	700	1300	0.1	0.13	1	16.9	60.84	41.420	0.2
9	800	1300	0.1	0.13	1	16.9	60.84	47.337	0.2
10	900	1300	0.1	0.13	1	16.9	60.84	53.254	0.2
11	500	1500	0.1	0.13	1	19.5	70.2	25.641	0.2
12	600	1500	0.1	0.13	1	19.5	70.2	30.769	0.2
13	700	1500	0.1	0.13	1	19.5	70.2	35.897	0.2
14	800	1500	0.1	0.13	1	19.5	70.2	41.026	0.2
15	900	1500	0.1	0.13	1	19.5	70.2	46.154	0.2
16	500	1700	0.1	0.13	1	22.1	79.56	22.624	0.2
17	600	1700	0.1	0.13	1	22.1	79.56	27.149	0.2
18	700	1700	0.1	0.13	1	22.1	79.56	31.674	0.2
19	800	1700	0.1	0.13	1	22.1	79.56	36.199	0.2
20	900	1700	0.1	0.13	1	22.1	79.56	40.724	0.2
21	500	1900	0.1	0.13	1	24.7	88.92	20.243	0.2
22	600	1900	0.1	0.13	1	24.7	88.92	24.291	0.2
23	700	1900	0.1	0.13	1	24.7	88.92	28.340	0.2
24	800	1900	0.1	0.13	1	24.7	88.92	32.389	0.2
25	900	1900	0.1	0.13	1	24.7	88.92	36.437	0.2

② -3 結果と考察

図 2-4-33 にエネルギー密度と造形密度の関係を示す。ガスアトマイズ粉末ではレーザー出力が 900W、走査速度が 1,100mm/sec で造形密度 99.58%、回転円板粉末ではレーザー出力が 800W、走査速度が 1,500mm/sec で造形密度 100.0%を示した。

図 2-4-34 にガスアトマイズ粉末及び回転円盤粉末造形物の表面粗さを指標としたプロセスマップを示す。測定項目は算術平均高さ (Sa) と最大高さ (Sz) である。更に、プロセスマップに密度、Sa、Sz の結果を色付けしたものを示す。なお、図中の●等の記号については、図中の表のとおりである。これより、造形

密度が高いほど表面が滑らかな傾向があることがわかった。これは、適切な造形条件で造形することでトラックの荒れやスパッタ発生を抑制しているためであると考えられる。

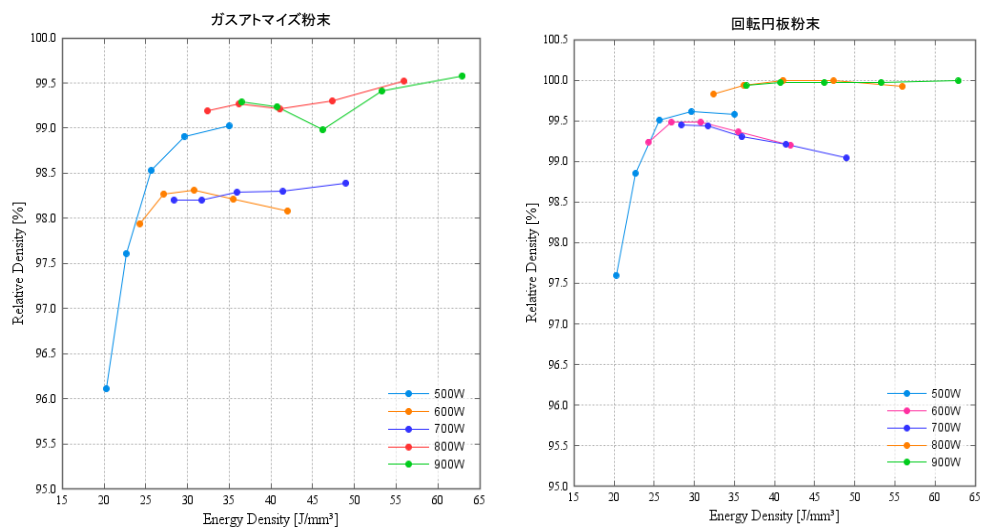


図 2-4-33 エネルギー密度と相対密度の関係

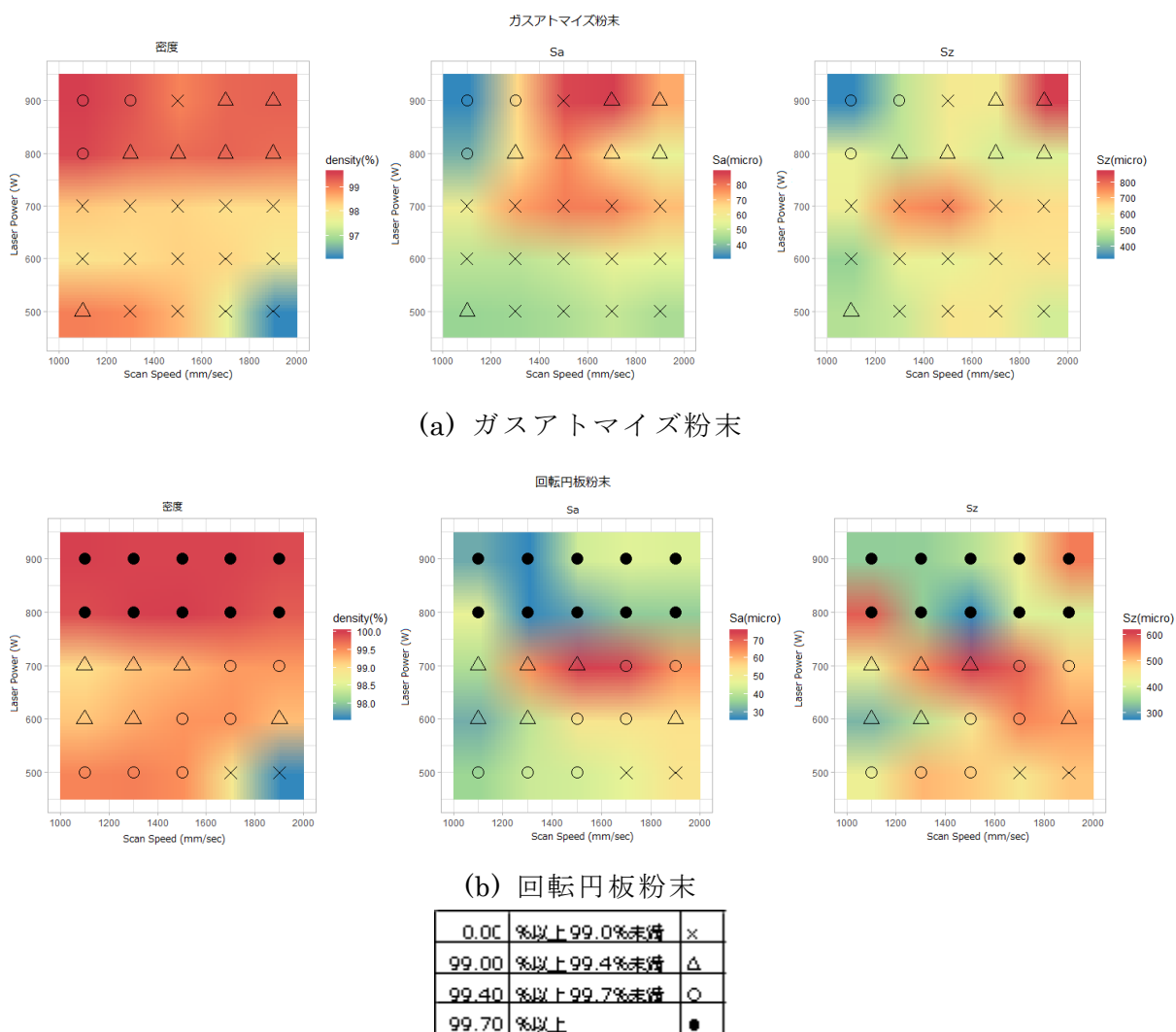
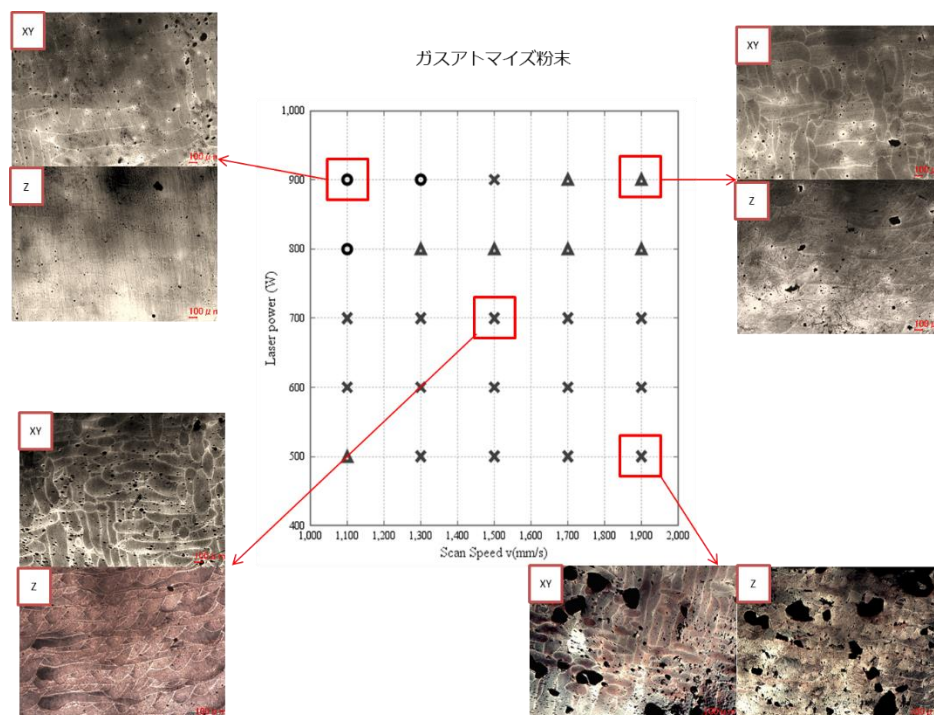
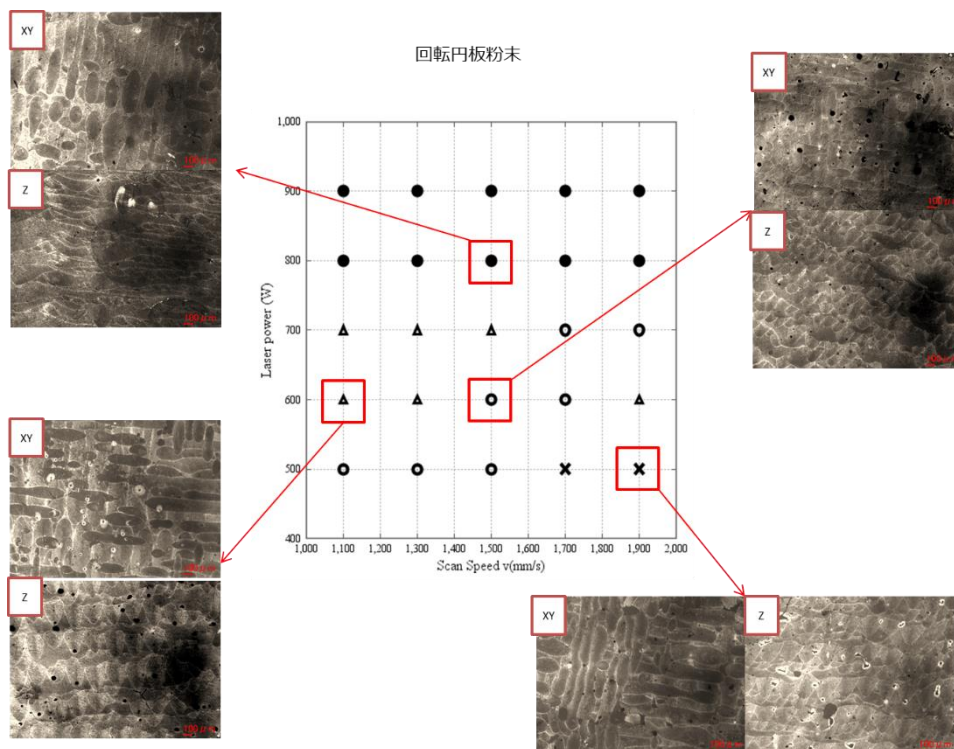


図 2-4-34 表面粗さを指標としたプロセスマップ

図 2-4-35 にガスアトマイズ粉末及び回転円盤粉末の造形物断面の OM 画像をプロセスマップ上に示す。ガスアトマイズ粉末はパワーが高く、走査速度の遅いほうが空隙は小さくなる。また、回転円板粉末は走査速度が遅い場合にビードの中心に空隙が見られることからキーホールが発生していると考えられる。



(a) ガスアトマイズ粉末

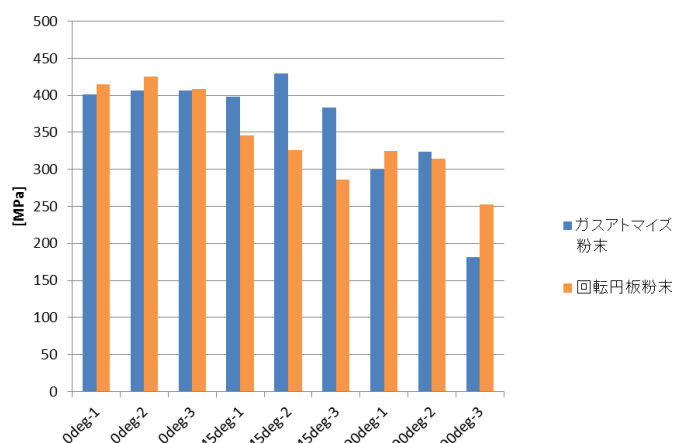


(b) 回転円盤粉末

図 2-4-35 造形物断面の OM 画像

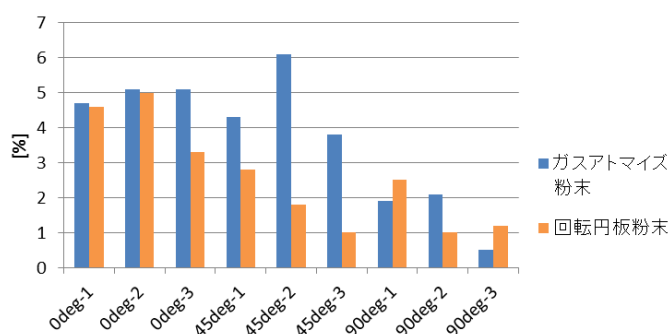
ガスアトマイズ粉末では 900W、1,100mm/sec の造形条件、回転円板粉末では 800W、1,500mm/sec の造形条件を使用して引張試験片を作製した。引張試験結果を図 2-4-36 に示す。この結果、造形方向 90° の結果において、引張強度並びに伸びが低いことがわかる。高速度カメラによりメルトプールの観察を行った結果、スパッタが発生し、周囲の粉末と凝集してトラック上に落下していることがわかった。このため、凝集した粉末が造形面上に堆積し溶融不良欠陥が発生し、特に断面積の小さい積層造形方向で大きく影響が出たことで、強度の低下につながったと考えられる。今後は、スパッタの状況を十分に検討することにより、造形条件を再度検討し、機械的性質の改善を行う必要がある。

引張強さ



(a) 引張強さ

伸び



(b) 伸び

図 2-4-36 引張試験結果

③ まとめ

- (1) ガスアトマイズ粉末では、造形密度 99.58%、回転円板粉末では造形密度 100% の条件を見出すことができた。このように、回転円盤粉末の方が、密度が高くなることがわかった。
- (2) 造形密度と表面粗さに相関がみられた。
- (3) EBSD 分析の結果、レーザ出力が高く、走査速度が遅い条件では、結晶粒径が積層造形の方に伸びる傾向がみられ、異方性が現れることがわかった。
- (4) 引張試験では、造形面上へスパッタの影響により引張強さ及び伸びにおいて、造形方向によりばらつきがあることがわかった。今後は、スパッタの影響を考慮した造形条件を検討していく必要がある。

2-5 機能材料の開発及び材料データベース化

2-5-1 高強度アルミニウム合金の開発及び材料データベース化

① 目的

高強度アルミニウム合金については、平成29年度A2024及びA6061合金を対象として、クラックの発生しない造形条件を明らかにしたが、高エネルギー密度での造形で表面粗さなどの品質に課題が残った。本年度は、高強度アルミニウム合金の開発を目指して、A3003合金をベースとして、合金設計を行って高強度化を図るための基礎研究を実施した。

② 実験方法

本研究ではガストマイズ法により作製した平均粒径43.5 μmのA3003粉末を用いた。粉末のSEM画像および化学成分を図2-5-1および表2-5-1に示す。

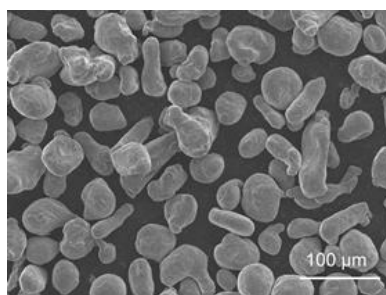


図 2-5-1 A3003 粉末の SEM 画像

表 2-5-1 アルミニウム合金粉末の化学成分分析表(mass%)

Element	Cu	Fe	Si	Mn	Mg
Mass%	0.11	0.11	0.09	1.11	<0.01
Element	Zn	Ni	Cr	Ti	Al
Mass%	0.02	0.01	<0.01	0.01	Bal.

③ 実験結果及び考察

③-1 シングルトラック造形による造形条件の検討

まず、シングルトラック（以後、ラインと記す）造形を行った。造形条件および造形物の画像を表2-5-2及び図2-5-2に示す。ライン造形におけるエネルギー密度の計算式を(1)に示す。

$$E_L = P/vd \quad (1)$$

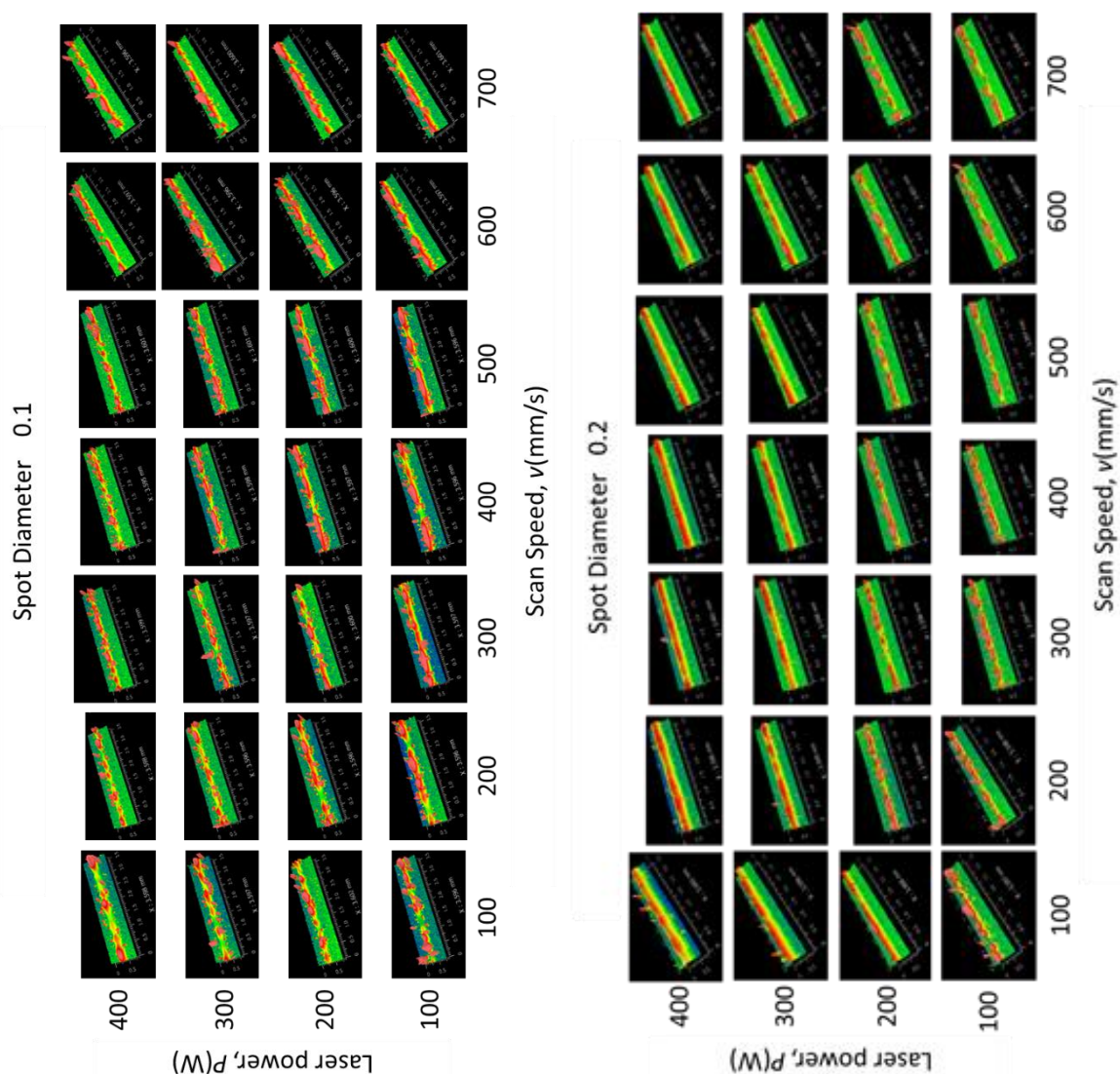
ここでは E_L :エネルギー密度(J/mm²)、 P :レーザ出力(W)、 v :走査速度(mm/s)、 d :スポット径(mm)である。

表 2-5-2 ライン造形の造形条件

レーザ出力(W)	100 ~ 400
走査速度(mm/s)	100 ~ 700
スポット径(mm)	0.1 ~ 0.3
テーブル温度(°C)	50
雰囲気ガス	Ar

ライン造形を行った3種類の試験片をSEMで表面観察、表面粗さ計 Zygo 製 New view8000/9000 により表面粗さ測定を行った。

まず、スポット径の影響について検討した。スポット径 0.1 mm と 0.2 mm の表面粗さの測定結果を図 2-5-2 に示す。スポット径 0.1 mm の場合には、全て表面が粗く、不均一なラインを示している。これは、アルミニウム合金は熱伝導率が高いため、トラックが細すぎるとメルトプールが十分に形成されないためと考えられる。一方、スポット径 0.2 mm の場合には、100 W 及び 200 W では 0.1 mm 同様表面は粗いものに対して、300 W 及び 400 W では滑らかな表面のものが見られた。なお、スポット径 0.3 mm では、表面粗さは不均一となった。

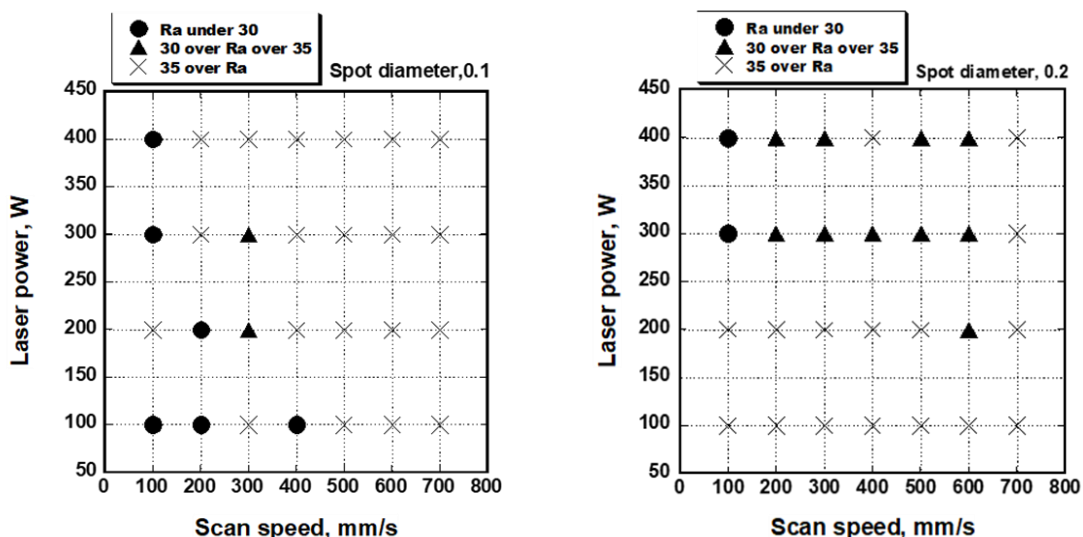


(a) スポット径 0.1 mm

(b) スポット径 0.2 mm

図 2-5-2 スポット径によるラインの表面粗さ測定結果

さらに、表面粗さ計により Ra (算術平均粗さ) を求め Ra とレーザー出力と走査速度に関するプロセスマップを作成した結果を図 2-5-3 に示す。



(a) スポット径 0.1 mm (b) スポット径 0.2 mm

図 2-5-3 表面粗さ Ra を指標としたプロセスマップ

プロセスマップから全体的に× (Ra が 35 μm 以上) が多く確認された。スポット径 0.2 mm では▲と×が、レーザー出力 100W 及び 200W と 300W 及び 400W で分かれており、300W 及び 400 W では均一な溶け込みができていることが Ra のプロセスマップでも確認できる。

また、A3003 は熱伝導率が非常に高いため、図 2-5-4 に示すように、投入エネルギーによるトラックの幅が大きく変化することがわかった。この図から同じスポット径 0.2 mm でもレーザー出力 300 W と 400 W で走査速度は同じ 600 mm/s の場合、トラックの幅が 0.7 mm も差があることから、レーザー出力およびスポット径を固定してキューブ造形条件の検討を行うこととした。ライン造形の結果から、スポット径 0.2 mm の 300 W では良い造形ができると予想されることから、この条件を固定して、キューブ造形を行うこととした。

Spot diameter	0.2 mm					
Laser power	300 W			400 W		
Scan speed	100 mm/s	300mm/s	600mm/s	100 mm/s	300mm/s	600mm/s
Energy density	15 J/mm ²	5 J/mm ²	2.5 J/mm ²	20 J/mm ²	6.7 J/mm ²	3.3 J/mm ²
Line						
Melt pool width	0.407 mm	0.337 mm	0.265 mm	0.581 mm	0.402 mm	0.338 mm

図 2-5-4 投入エネルギーによるトラック幅の変化

③-2 キューブによる最適造形条件の検討

キューブ造形 (10mm×10mm×12 mm) の造形条件を表 2-5-3 に示す。
レーザー照射による粉体層に投入されたエネルギー密度の式を (2) に示す。

$$E = P/vht \quad (2)$$

E :エネルギー密度(J/mm³)、 P :レーザー出力(W)、 v :走査速度(mm/s)、 h :ハッチピッチ(mm)、 t :積層厚さ(mm)である。

表 2-5-3 キューブ造形条件

レーザー出力 (W)	300
走査速度(mm/s)	200 ~ 600
ハッチピッチ(mm)	0.15 ~ 0.325
スポット径(mm)	0.2
積層厚さ(mm)	0.05
エネルギー密度(J/mm ³)	44 ~ 100
テーブル温度(°C)	50
雰囲気ガス	Ar

図 2-5-5 に示す造形結果からわかるように、走査速度 200 mm/s 及び 300 mm/s では表面がきれいな造形ができなかった。これは、造形中にスパッタが多く発生していたためと考えられる。走査速度の速い造形物では他の造形物に比べてきれいな造形物を作ることができた。この結果から走査速度 500~600 mm/s、ハッチピッチ 0.2~0.225 mm/s の条件で表面がきれいな造形ができるということがわかった。

次に、造形物を表面粗さ計で計測し、エネルギー密度と算術平均粗さ(Sa)の関係を図 2-5-6 に示す。併せて、表面粗さ結果の中でも最も造形が良かった A と造形が悪かった B の表面の状況を示す。A と B を比較すると B に関しては Sa の値は 62.88 μ m であり、画像からもトラック自体にうねりが生じていることがわかる。また、A の Sa の値は 24.99 μ m であった。A、B 共にエネルギー密度 50 J/mm³付近であるが 40 μ m 程度の違いが見られた。また、走査速度を速くするにつれて表面粗さが滑らかになっていることがわかった。

図 2-5-6 を基に算術平均粗さを指標としたプロセスマップを図 2-5-8 (a) に示す。●は表面粗さ Sa が 30 μ m 未満であり、最適条件に最も近い条件である。■は Sa30 μ m 以上 80 μ m 未満、▲は Sa80 μ m 以上、×は造形不可である。図から走査速度 600 mm/s、ハッチピッチ 0.225mm が最適条件であることがわかる。図 2-5-7 にエネルギー密度と走査速度の関係及び組織写真を示す。エネルギー密度 40 J/mm³において最も高密度造形物を得ることができたが、相対密度 98 %を下回った。組織写真に示すように、100 μ m 程度の空隙が多数確認された。

図 2-5-8 (b) に密度を指標としたプロセスマップを示す。●の部分にキューブ造形において最も良い造形ができた領域である。このプロセスマップから最適造形条件は、スポット径 0.2 mm、レーザー出力 300 W、ハッチピッチ 0.225 mm、走査速度 600 mm/s であることがわかった。

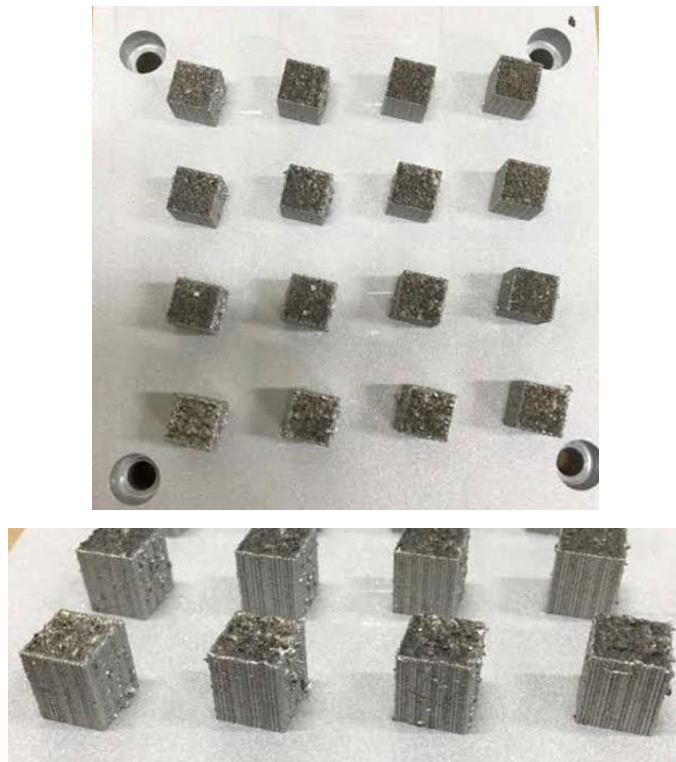


図 2-5-5 キューブ造形結果

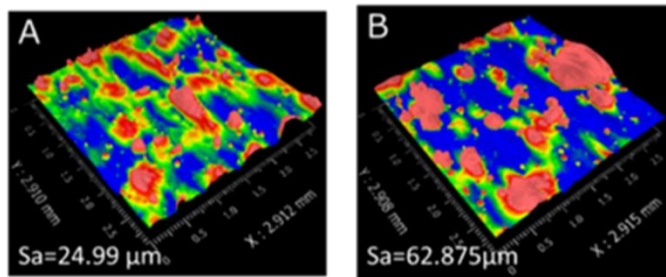
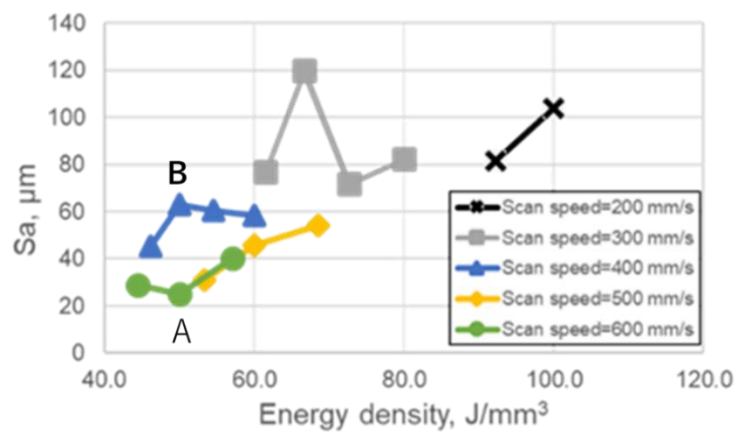


図 2-5-6 表面状態のエネルギー密度と算術平均粗さの関係および表面粗さ結果

④ まとめ

本研究では A3003 アルミニウム合金における最適造形条件の検討を行い、ライン造形、キューブ造形を行った結果、キューブ造形において、スポット径 0.2 mm、レーザ出力 300 W、走査速度 600 mm/s、ハッチピッチ 0.225 mm で造形を行うと表面粗さ 25 μm の造形物を得ることができた。しかし、造形密度は 98 % を下回り多くの空隙が確認された。

今後は、高エネルギー密度での最適条件を検討し、高強度材料を得るための合金設計を行っていく予定である。

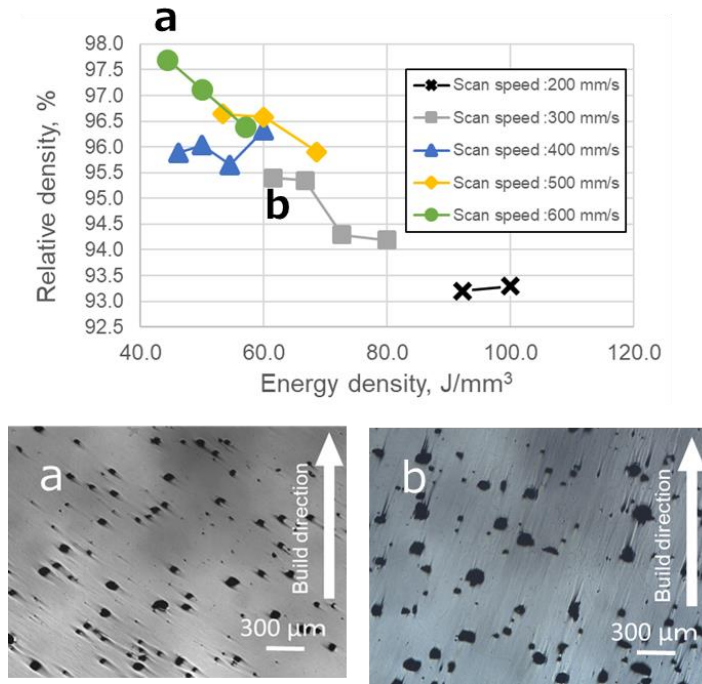
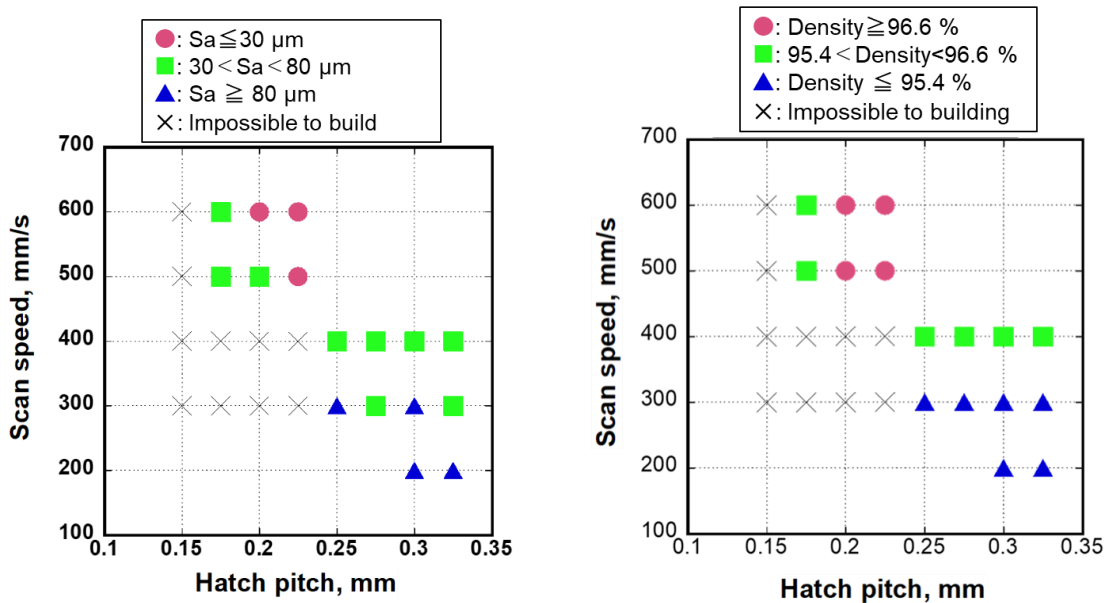


図 2-5-7 エネルギー密度と走査速度の関係および SEM 画像



(a) 表面粗さの指標による

(b) 密度の指標による

図 2-5-8 表面粗さ及び密度を指標としたプロセスマップ

2-5-2 チタン系合金（機能材料）の開発及び材料データベース化

①-1 使用粉末

本開発に用いたチタン系合金は図 2-5-9 に示す大同特殊鋼製の Ti-6Al-4V 合金である。表 2-5-4 に本粉末の成分重量比(mass%)を示す。また、本粉末の粉末粒径は +15/-45 μm に指定しているが、実際の粒度分布を図 2-5-10 に示す。

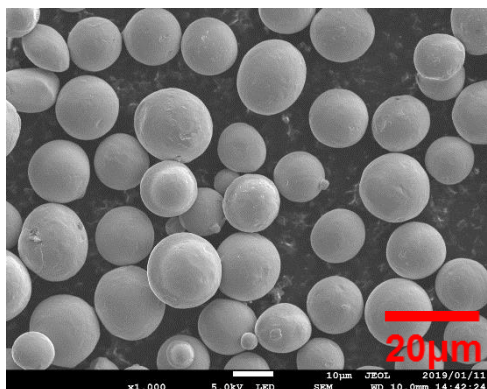


図 2-5-9 Ti-6Al-4V 合金の粉末

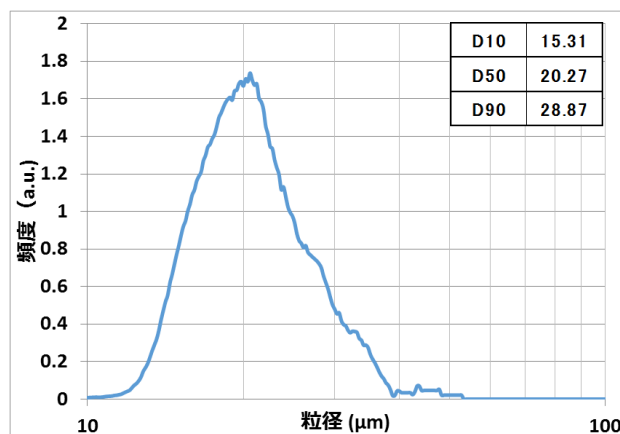


図 2-5-10 Ti-6Al-4V 粉末の粒度分布

表 2-5-4 Ti-6Al-4V 粉末の成分

Ti	Al	V	Fe	O	N	H	C
Bal.	6.43	4.01	0.07	0.182	0.025	0.002	0.06

①-2 予備試験

表 2-5-5 に本試験における造形条件を、表 2-5-6 にエネルギー密度のマップを示す。レーザ出力を 100W から 175W まで、各々走査速度を 500 mm/s から 800 mm/s まで割り振った。この造形条件で、サイズ 12.4mm×16.4mm×h16.0mm のキューブを図 2-5-11 に示すように 4×4 個で配置して造形を行った。

表 2-5-5 造形条件

No.	パワー [W]	走査速度 [mm/sec]	積層厚 [mm]	ハッチ [mm]	SpotD [mm]	エネルギー密度 [J/mm ³]
1	100	500	0.05	0.12	0.2	33.33
2	100	600	0.05	0.12	0.2	27.78
3	100	700	0.05	0.12	0.2	23.81
4	100	800	0.05	0.12	0.2	20.83
5	125	500	0.05	0.12	0.2	41.67
6	125	600	0.05	0.12	0.2	34.72
7	125	700	0.05	0.12	0.2	29.76
8	125	800	0.05	0.12	0.2	26.04
9	150	500	0.05	0.12	0.2	50.00
10	150	600	0.05	0.12	0.2	41.67
11	150	700	0.05	0.12	0.2	35.71
12	150	800	0.05	0.12	0.2	31.25
13	175	500	0.05	0.12	0.2	58.33
14	175	600	0.05	0.12	0.2	48.61
15	175	700	0.05	0.12	0.2	41.67
16	175	800	0.05	0.12	0.2	36.46

表 2-5-6 エネルギー密度

		走査速度 [mm/sec]			
		500	600	700	800
Laser power [W]	175	58.3	48.6	41.7	36.5
	150	50.0	41.7	35.7	31.3
	125	41.7	34.7	29.8	26.0
	100	33.3	27.8	23.8	20.8

図 2-5-11 にキューブ造形の外観状態を示す。造形時にレーザ照射面が常時ブレードと接触していたため、造形表面にも直線状の縦筋が確認される。また図 2-5-11 においてキューブ側面には多数の異物が確認された。これはレーザ照射で飛散したスパッタがスキージングで運ばれ側面に付着したと考えられる。これは、今回設定した造形条件の中に大幅に適していない条件が含まれていたためと考えられる。

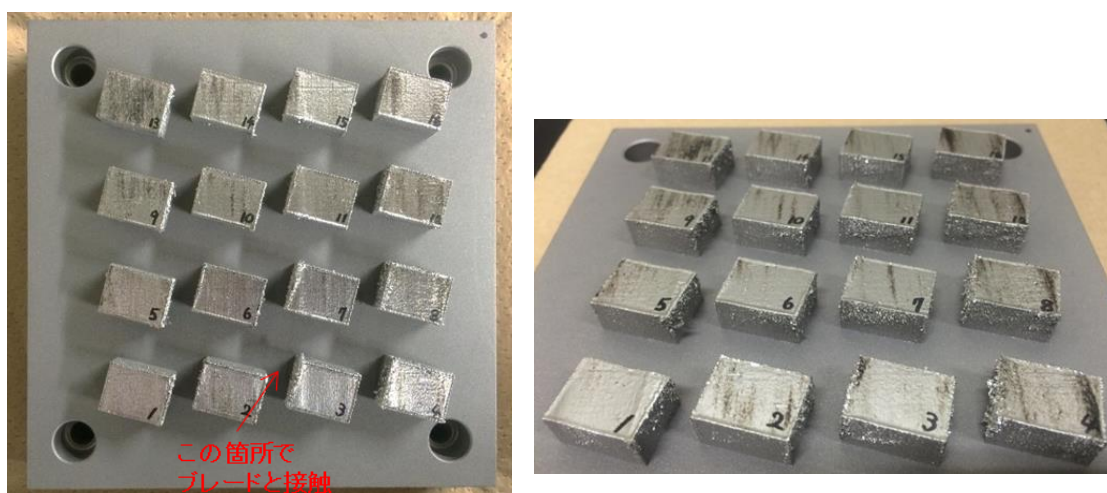


図 2-5-11 キューブ造形の外観

図 2-5-12 にキューブ上面の造形状態を示す(ここでは一部を抜粋)。ナンバーの後の数値はエネルギー密度である。エネルギー密度が高すぎる、または低すぎると表面が焼けたように茶色く変色した。また、エネルギー密度が高い場合には、表面に大きなスパッタが観察される。これは、未熔融欠陥を引き起こすとともに、上述したようにリコート時に接触して装置を停止するなどの影響を及ぼすことから、高密度エネルギーでの造形は避ける必要がある。表面状況からみると、エネルギー密度は 25~45 J/mm³ 辺りが適しているのではないかと推測される。

図 2-5-13 にエネルギー密度と相対密度の関係を示す。なお、真密度には 4.3974 [g/cm³]を用いた。図 2-5-13(a)からわかるように、レーザ出力に大きく依存していることがわかる。レーザ出力 125W 以上では、相対密度 100%を示しており、175W ではほぼ 100%以上となっている。しかし、それぞれのレーザ出力では、エネルギー密度が高くなりすぎると密度の低下がみられる。これは、上述したように、スパッタなどによる未熔融結果が原因と考えられる。

また、図 2-5-13(b)からわかるように、走査速度の影響も大きく、走査速度の低下

に伴ってエネルギー密度を増加させないと相対密度が 100%を超えない。

以上のことより、上述したように、エネルギー密度の範囲は、25~45 J/mm³ が適切であるといえる。

図 2-5-13 の結果から得られた相対密度を指標にしたプロセスマップを図 2-5-14 に示す。黒丸条件では 100%以上の密度を指してはいるが、図 2-5-12 に示すようにレーザ出力 175W では表面状態の変色レベルでありあまり好ましくないことが確認されている。従ってレーザ出力は 125W~150W、走査速度は 600~800 mm/sec が適しているのではないかと推測する。

以上の結果をもとに、造形条件を絞り込んで造形を行った。

(a) No.1_ 33.33 J/mm³



(b) No.3_ 23.81 J/mm³



(c) No.4_ 20.83 J/mm³



(d) No.7_ 29.76 J/mm³



(e) No.10_ 41.67 J/mm³



(f) No.11_ 35.71 J/mm³



(g) No.13_ 58.33 J/mm³

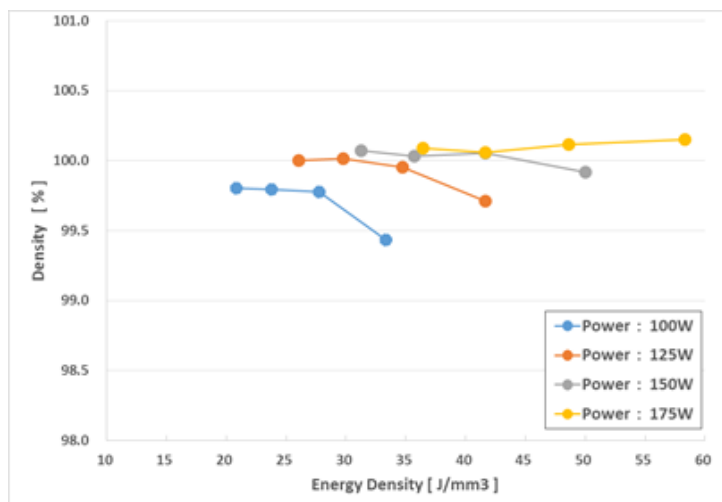


(h) No.16_ 36.46 J/mm³

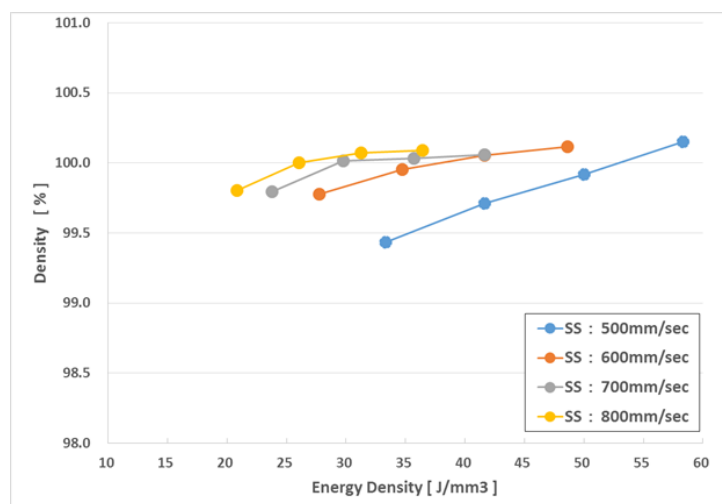


図 2-5-12 キューブの造形表面

500μm



(a) レーザ出力



(b) 走査速度

図 2-5-13 エネルギー密度と相対密度の関係

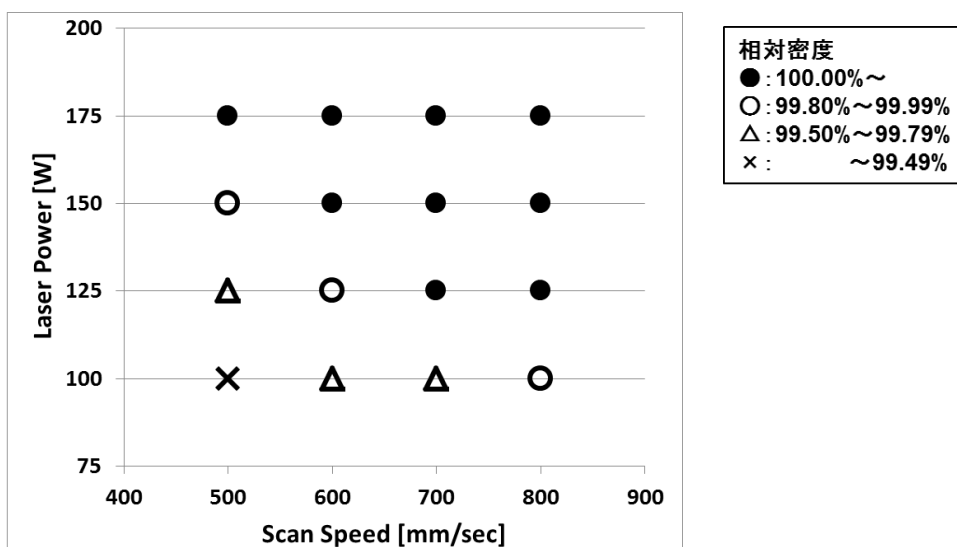


図 2-5-14 密度を指標としたプロセスマップ

①-3 最適造形条件の検討

表 2-5-7 に本試験における造形条件を示す。レーザ出力を 100W~175W に、走査速度を 600 及び 700 mm/s に設定した。前試験ではレーザ照射面にブレードと接触でアラームが発生したため、周囲を縁取るベクトルの条件も割り振った。この造形条件の元、サイズ 12.4mm×16.4mm×h16.0mm のキューブ試験片を 4×4 で配置して造形を行った。

表 2-5-7 造形条件
キューブ造形条件

No.	パワー [W]	走査速度 [mm/sec]	積層厚 [mm]	ハッチ [mm]	SpotD [mm]	エネルギー密度 [J/mm ²]
1	100	600	0.05	0.12	0.2	27.78
2	100	600	0.05	0.12	0.2	27.78
3	100	600	0.05	0.12	0.2	27.78
4	100	600	0.05	0.12	0.2	27.78
5	125	700	0.05	0.12	0.2	29.76
6	125	700	0.05	0.12	0.2	29.76
7	125	700	0.05	0.12	0.2	29.76
8	125	700	0.05	0.12	0.2	29.76
9	150	600	0.05	0.12	0.2	41.67
10	150	600	0.05	0.12	0.2	41.67
11	150	600	0.05	0.12	0.2	41.67
12	150	600	0.05	0.12	0.2	41.67
13	175	700	0.05	0.12	0.2	41.67
14	175	700	0.05	0.12	0.2	41.67
15	175	700	0.05	0.12	0.2	41.67
16	175	700	0.05	0.12	0.2	41.67

ベクトル造形条件

No.	パワー [W]	走査速度 [mm/sec]	積層厚 [mm]	SpotD [mm]
1	100	1000	0.05	0.1
2	100	1500	0.05	0.1
3	150	1000	0.05	0.1
4	150	1500	0.05	0.1
5	100	1000	0.05	0.1
6	100	1500	0.05	0.1
7	150	1000	0.05	0.1
8	150	1500	0.05	0.1
9	100	1000	0.05	0.1
10	100	1500	0.05	0.1
11	150	1000	0.05	0.1
12	150	1500	0.05	0.1
13	100	1000	0.05	0.1
14	100	1500	0.05	0.1
15	150	1000	0.05	0.1
16	150	1500	0.05	0.1

図 2-5-15 にキューブ造形の外觀状態を示す。また、図 2-5-16 にキューブ上面の造形状態を示す。枠内の数値はエネルギー密度である。上述したように、エネルギー密度が適切であることから、大きなスパッタは観察されず、表面の起伏も小さい。

図 2-5-17 にキューブ上面の表面粗さの測定結果を示す。この測定には ZYGO 製 NewView を用いた。赤で示される部分はスパッタである。表 2-5-8 にそれぞれの平均粗さ(Sa)と最大粗さ(Sz)を示す。Sa の値が 5 μ m 程度であり、これは商用機での値とほぼ同様である。また、Sz の値が 150 μ m 以下と比較的小さいことから造形表面は平坦に近い状態であると判断できる。なお Sa に差が見られるのは、条件要因ではなく測定箇所によるバラつきと推察される。

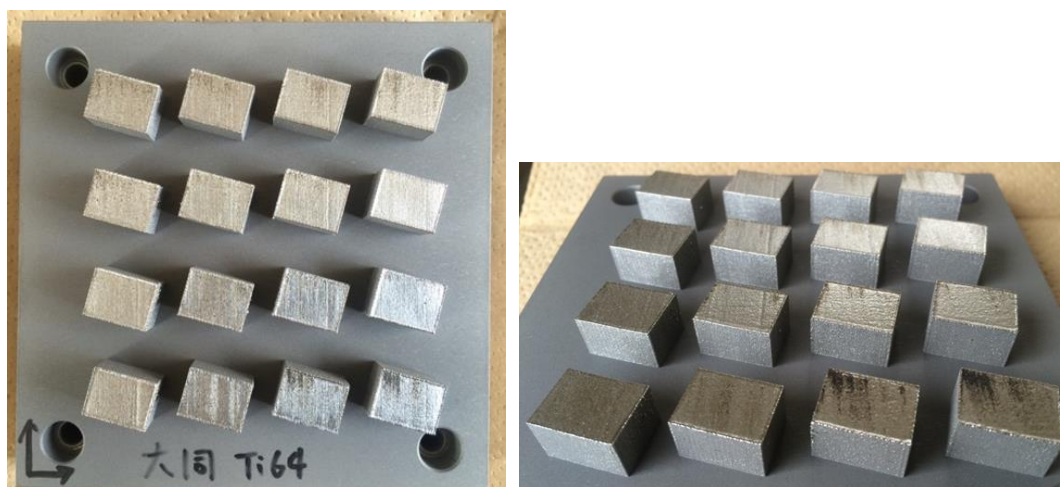
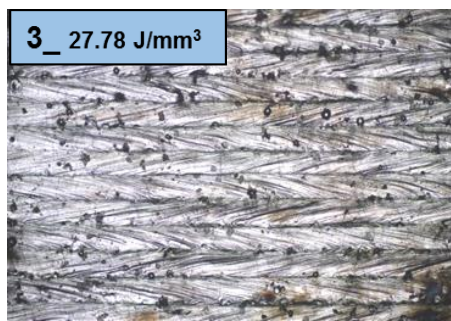
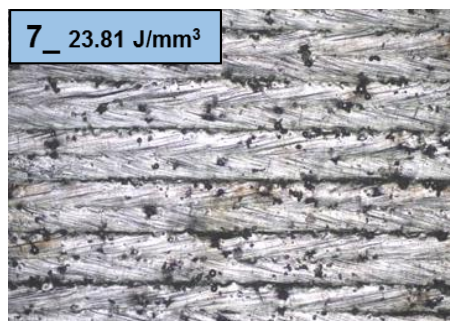


図 2-5-15 キューブ造形の外觀

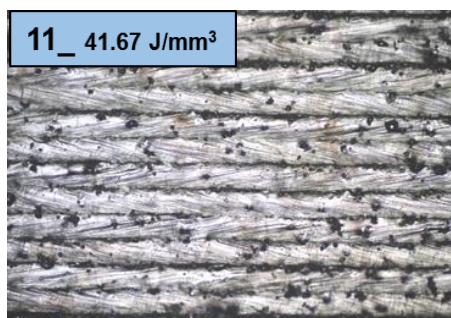
(a) No.3



(b) No.7



(c) No.11



(d) No.15

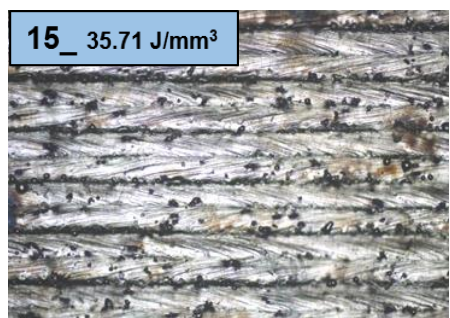
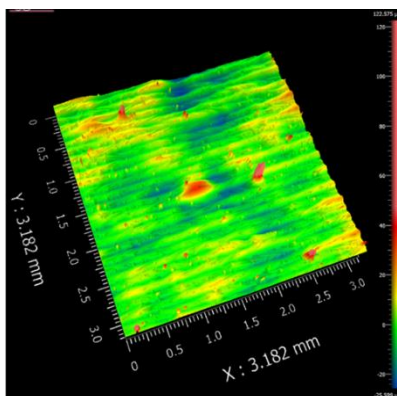
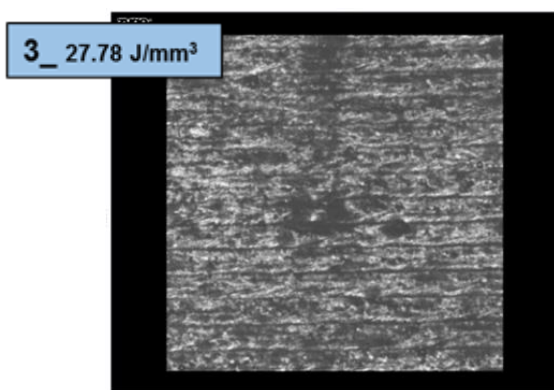


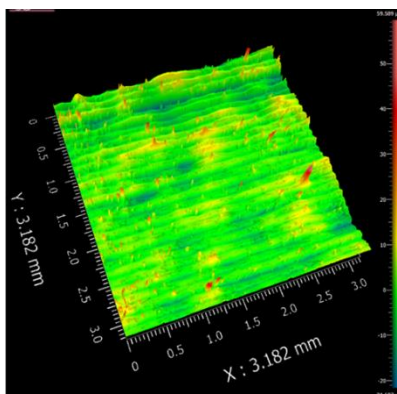
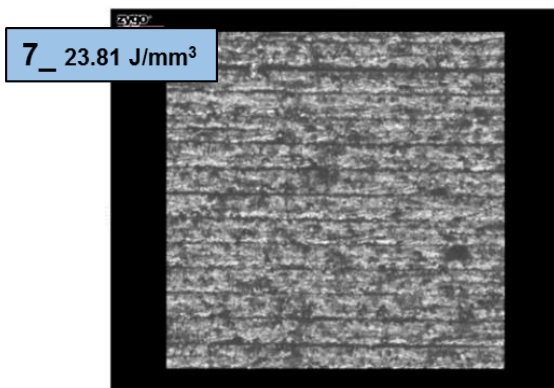
図 2-5-16 キューブの造形表面

500μm

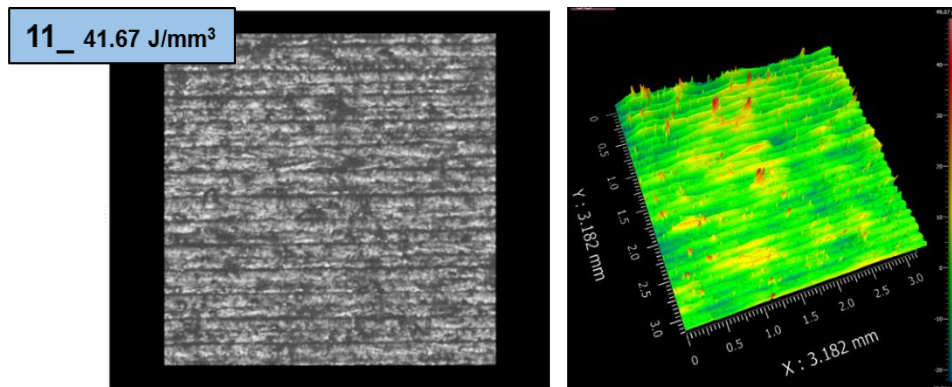
(a) No.3



(b) No.7



(c) No.11



(d) No.15

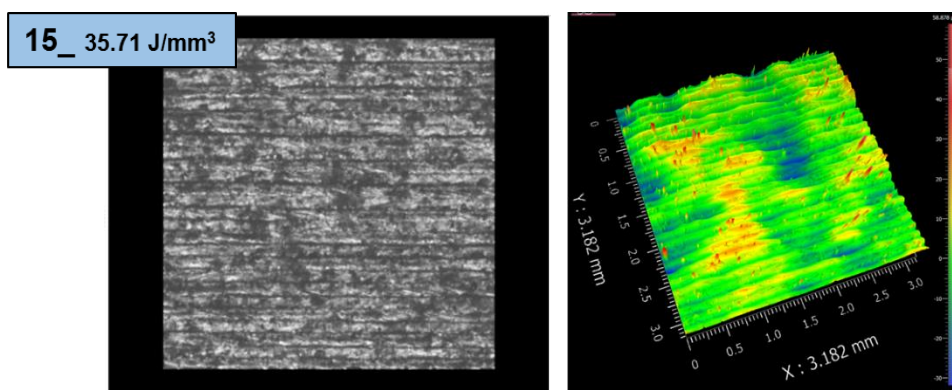


図 2-5-17 キューブの造形表面の粗さ状態(a)(b)(c)(d)

表 2-5-8 平均粗さ(Sa)と最大粗さ(Sz)

No.	パワー [W]	走査速度 [mm/sec]	積層厚 [mm]	ハッチ [mm]	SpotD [mm]	エネルギー密度 [J/mm ³]	平均粗さ Sa [μm]	最大粗さ Sz [μm]
3	100	600	0.05	0.12	0.2	27.8	6.169	148.173
7	100	700	0.05	0.12	0.2	23.8	4.294	81.196
11	150	600	0.05	0.12	0.2	41.7	4.746	71.414
15	150	700	0.05	0.12	0.2	35.7	6.466	90.764

図 2-5-18 にエネルギー密度による相対密度の変化を示す。真密度は 4.3974 [g/cm³]を用いたが、相対密度は、100%を超えた値となった。レーザー出力は 100W よりも 150W の方が相対密度は高くなった。また、走査速度に関しては、700mm/sec よりも 600mm/sec の方が、若干ばらつきが大きくなった。

これらの結果より、最適造形条件をレーザー出力 150W、走査速度 700mm/sec とし、引張試験片用の丸棒を造形した。

図 2-5-19 に引張試験用の丸棒の配置図を示す。丸棒のサイズは長さ 100mm、直径 14mm である。積層面に対して 0°、45°、90°の 3 種類で各々 3 本ずつ配置し造形した。なお傾斜 45°における茶色の板材はサポート箇所である。

図 2-5-20 に引張試験用の丸棒の外観状態を示す。

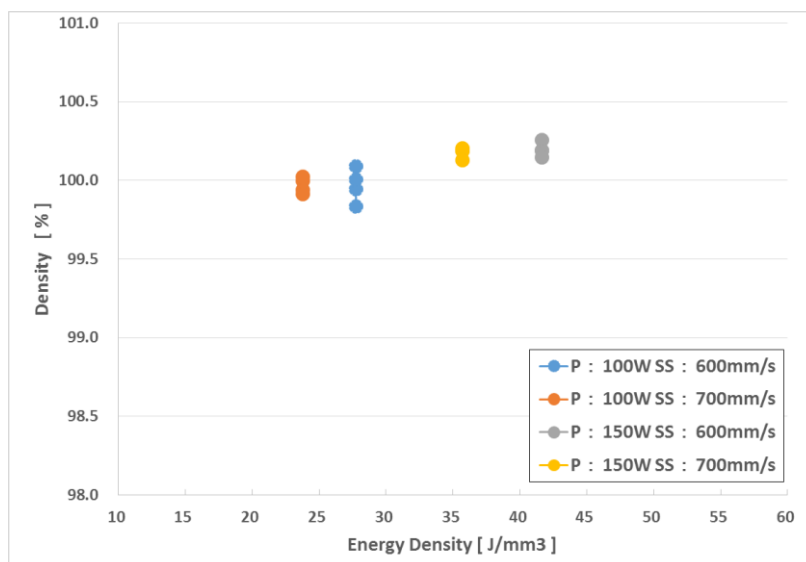


図 2-5-18 エネルギー密度による相対密度の変化

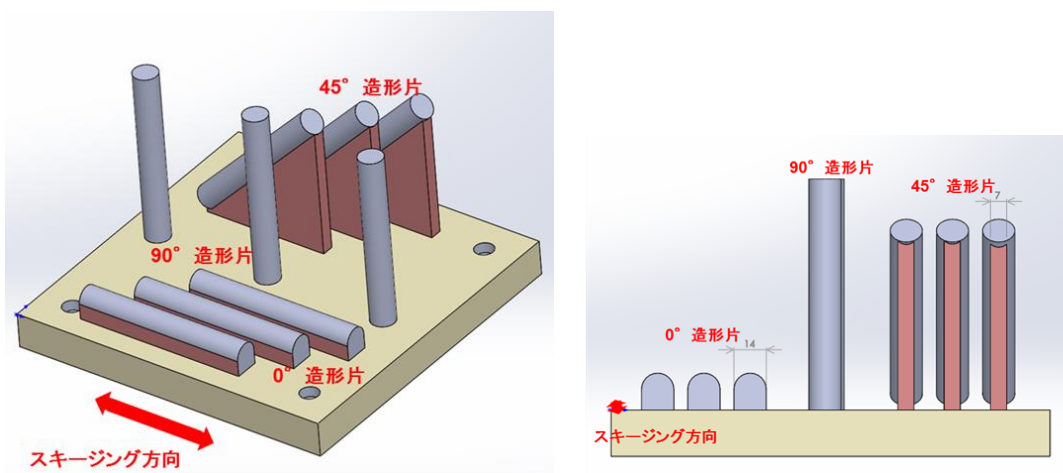


図 2-5-19 丸棒の配置図

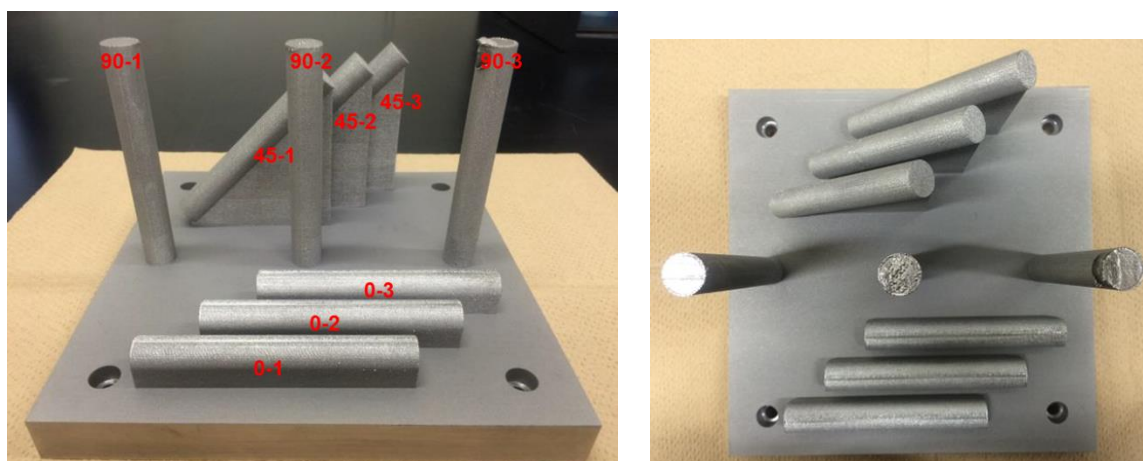


図 2-5-20 引張試験用の丸棒の外観状態

表 2-5-9 に引張試験結果を示す。但し、90°-3 は造形中にサポート部で折れた試験片であるため参考値とする。0.2%耐力は 90°造形が最も大きく、45°造形 0°

造形の順に小さくなった。引張強さは90°造形と45°造形が同等レベルで、0°造形が若干小さくなった。また、伸びと絞りとは同条件の試験片でもバラつきも大きい結果となった。伸びは4~8%程度のバラつきが見られる。特に、造形面に対して90°造形の場合には、ばらつきが大きいことから、積層間に未熔融欠陥が存在していると予測される。この結果を、表2-5-10に示すEOS社のデータと比較すると、EOS社のデータより強度が高く、伸びが低いことがわかる。これは、組織の違いによるものと考えられる。今後、積層ピッチやハッチピッチなどを含めた造形条件を詳細に検討していく必要がある。

表 2-5-9 引張試験評価結果

		0.2%耐力 [MPa]	引張強さ [MPa]	伸び [%]	絞り [%]	破断位置
積層面に対して 0°造形	0° -1	1132	1300	6	10.1	B
	0° -2	1123	1319	8	24.6	C
	0° -3	1158	1320	4.8	5.9	B
積層面に対して 45°造形	45° -1	1185	1354	7.6	24.3	A
	45° -2	1189	1363	6.3	11.3	A
	45° -3	1199	1360	4.1	4	A
積層面に対して 90°造形	90° -1	1227	1373	8.2	27.5	A
	90° -2	1235	1378	3.3	4.9	C
	90° -3	1050	—	1.4	2.7	C

※90°-3は耐力データ取得直後に破断したため引張強さデータは取得できず

表 2-5-10 EOS社のTi6Al4V合金のデータシート

造形方向	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)
積層面に対して 0°造形	1120±80	1240±50	10±3
積層面に対して 90°造形	1140±50	1290±50	7±3

① -4 まとめ

要素研究機により、開発したTi6Al4V合金粉末を用いて、造形条件を検討した結果、次のことがわかった。

- (1) エネルギー密度25~45 J/mm³で相対密度100%の造形物を造形できた。
 - (2) プロセスマップを作成した結果、レーザ出力100 W~175 W、走査速度600~700 mm/sが最適造形条件であることがわかった。
 - (3) レーザ出力150 W、走査速度700 mm/secとして、引張試験片用の丸棒を造形して、引張試験を行った結果、引張強さ1300 MPa以上の高強度の造形物を作製できたが、微細な未熔融及びガスポアなどの欠陥により、伸びはばらついた。
 - (4) 表面粗さは、Saで5 μm程度で、商用機と遜色ない造形物が得られた。
- 今後は、熔融凝固現象も踏まえて、最適な造形条件を検討していく必要がある。

2-6 まとめ

レーザービーム方式3D積層造形基盤技術の研究開発において得られた主な成果は、次のとおりである。

(1) 溶融凝固の解明及びモニタリング技術の開発

① メルトプールモニタリング技術の開発（レーザーデポジション方式）

レーザーデポジション方式において、細書レーザーデポジション法による溶融、凝固の過程を経る高速化での加工現象を観測し、その現象の把握や解明を行った結果、以下のことがわかった。

- ・細書造形を行うためには、異常積層の発生原因である大径粒子の突発的な溶融池への侵入を避けるために、粉末のサイズを均一で、かつ、適切なサイズの粉末を安定供給していくことがとても重要であることがわかった。
- ・高速度カメラや簡易型のカメラシステムを造形に対して、垂直方向と水平方向から計測することにより、異常積層の原因となる金属プルームとポーリング現象の因果関係を明らかにするとともに、積層異常の発生メカニズムを解明できた。
- ・リアルタイム性を確保したその場（インプロセス）計測手法を開発し、加工点での溶融池近傍の現象を捉えて、品質の安定した造形への技術的指針を得るため、「フィルタ補正逆投影法（FBP=filtered back projection）」を用いて、バウンディングボックス（四角枠）を選択することで溶融池と金属プルームを選択した画像の色情報から特徴を引き出し、溶融池やプルームを抽出できた。
- ・解析画像と機械学習を用いて異常発生が生じた際の自動判定を試みた結果、異常積層時が発生した箇所でプルーム発生を認識し、判定することが可能となった

(2) マルチスケールシミュレーション技術の開発

（電子ビーム方式、レーザービーム方式共通）

平成30年度は、ミクロスケールシミュレーションの実プロセス適用への道筋をつけるための取り組みとして、マクロシミュレーションへの接続パラメータの取得と二流体モデルの妥当性検証を行った。

① 熱変形歪みシミュレーションとの連携

- ・ASTOMの熱計測データを用いたメソスケールのシミュレーションで得られた結果と比較すると、レーザービーム及び電子ビーム造形とも、気相の速度が制限されたことによる熱伝達率の低下を考慮すると、二流体モデルを用いてシミュレーションを行った結果とおおよそ一致した。

② 二流体モデルの妥当性検証

- ・非圧縮性の流体方程式を用いた二流体モデルでどこまで気液界面の状態を再現できているのかを確認するため、電磁浮遊法で浮遊させた金属液滴をシュリーレン法で観察を行った結果、非圧縮性の二流体モデルでは大域的な圧力変動は正しく示せるが、近傍の微細な構造は示せないと考えられ、シュリーレン像の観察結果とシミュレーション結果との比較はそれを裏付けていた。
- ・第一原理的に溶融凝固状態の予測を行うため圧力ベースの流体方程式に気体の密度依存性を取り込むため、圧力ベースのアルゴリズムに密度補正をかけた方法を採用した結果、圧縮性モデルは問題なく実装できた。

(3) 固有ひずみ法による熱変形予測シミュレーションの開発

- ・溶接シミュレーションに用いられている「固有ひずみ法」の概念を3次元積層造形に使用できるよう拡張し、非定常的な熱履歴のプロセスを考慮せずに、造形物の変形を高速に計算する手法である固有ひずみ法を用いた変形シミュレーション

ンソフトウェアに必要な3次元積層造形用固有ひずみデータベースを、熱弾塑性シミュレーションにより構築した。その結果、インコネル718に対するレーザービームパウダベッド方式での固有ひずみデータベース、およびTi-6Al-4Vに対する電子ビームパウダベッド方式での固有ひずみデータベースを用いる固有ひずみ解析ソルバーにより、デポジション方式同様にパウダベッド方式においても、熱弾塑性解析と比較すると飛躍的に高速計算が可能な熱変形予測ができることがわかった。

- ・パウダベッド方式では、サポート構造が造形物の変形へ影響するため、生産効率を低下させずに熱ひずみの発生を抑制する造形条件（レシピ）やサポート構造、配置を検討する必要がある。このため、造形物の変形を高速に計算できるLayer by Layer解析機能を追加した3次元積層造形用固有ひずみ解析ソルバーを用いて、サポート切除後の変形量とサポート密度を最適化するための機能を開発し、その妥当性を確認できた。

(4) データベース構築（造形条件、粉末条件、シミュレーション用データ）

① 開発機の造形物評価

TRAFAMで開発された3D積層造形装置を導入する際の検討項目になると思われる造形物の引張強さや疲労強度を調査した。平成30年度は、造形物の引張試験を実施し、以下の結果を得た。

レーザービーム方式においては、

- ・マシニングセンタ方式の複層レーザービーム3Dプリンタ：SUS304及びインコネル718
- ・複層レーザービーム3Dプリンタ：Ti-6Al-4V及びインコネル718
- ・大型高速レーザービーム3Dプリンタ：AlSi10Mg及びインコネル718を対象とした。
- ・引張試験により0.2%耐力、引張強さ、伸び、絞りのデータを取得した。

② 高速造形用レシピの開発

本研究開発では、高速造形が大きな目標の一つであることから、高出力レーザーを高速に照射した造形を造形時間の短縮を目的として、高速造形用レシピ開発を行った。

・インコネル718の高速度造形レシピの開発

高出力・高速造形条件との比較を行うために、低出力・低速造形条件についても体系的に検討した。得られた結果は以下の通りである。

- ・低出力・低速造形条件の場合、表面粗さ及び密度を指標としてプロセスマップを作成した結果、高出力・高速造形条件の場合より高密度の造形物が得られる領域が広がることがわかった。
- ・高出力・高速造形条件の場合、最大相対密度は99.2%であったが、低出力・低速造形条件では99.7%と高い値が得られ、密度は低いことがわかった。
- ・高速造形を行う際には、70J/mm³程度以上のエネルギー密度が必要となるため、高出力での造形が必須であるため密度の低下は避けられないことがわかった。
- ・アルミニウム合金AlSi10Mgの高速度造形レシピの開発
- ・ガスアトマイズ粉末では、造形密度99.58%、回転円板粉末では造形密度100%の条件を見出すことができた。このように、回転円盤粉末の方が、密度が高くなることがわかった。
- ・EBSD分析の結果、レーザー出力が高く、走査速度が遅い条件では、結晶粒径が積層造形の方向に伸びる傾向がみられ、異方性が現れることがわかった。
- ・引張試験では、造形面上へスパッタの影響により引張強さ及び伸びにおいて、造

形方向によりばらつきがあることがわかった。今後は、スパッタの影響を考慮した造形条件を検討していく必要がある。

③ 機能材料の開発及び材料データベース化

- ・高強度アルミニウム合金の開発及び材料データベース化
高強度アルミニウム合金の開発を目指して、A3003 合金をベースとして、合金設計を行って高強度化を図るための基礎研究を実施した。
ライン造形、キューブ造形を行った結果、キューブ造形において、スポット径 0.2 mm、レーザ出力 300 W、走査速度 600 mm/s、ハッチピッチ 0.225 mm で造形を行うと表面粗さ 25 μm の造形物を得ることができた。しかし、造形密度は 98 % を下回り、高出力での造形が必要であることがわかった。
- ・チタン系合金（機能材料）の開発及び材料データベース化
要素研究機により、開発した Ti-6Al-4V 合金粉末を用いて、造形条件を検討した結果、次のことがわかった。
- ・エネルギー密度 25~45 J/mm³ で相対密度 100% の造形物を造形できた。
- ・プロセスマップを作成した結果、レーザ出力 100 W~175 W、走査速度 600~700 mm/s が最適造形条件であることがわかった。
- ・レーザ出力 150 W、走査速度 700 mm/s として、引張試験片用の丸棒を造形して、引張試験を行った結果、引張強さ 1,300 MPa 以上の高強度の造形物を作製できたが、微細な未溶融及びガスポアなどの欠陥により伸びはばらついた。
- ・表面粗さは、Sa5 μm 程度で、商用機と遜色ない造形物が得られた。

結び（統括および結論）

本事業では、世界最高水準の三次元積層造形システムを構築するため、電子ビーム及びレーザービーム両方式における、それぞれの特徴を最大限に発揮できる三次元積層造形の基盤技術を開発した。

電子ビーム及びレーザービーム両方式における金属粉末の熔融凝固現象の解明のために、それぞれ高性能のモニタリング装置を開発し、プロセスにおける現象を詳細にモニタリングし、その現象発生 of 学理を明らかにできた。また、モニタリング結果のシミュレーションへのフィードバックを行い、マイクロ及びマクロ熔融凝固シミュレーションの高精度化に繋がった。

パウダベッド方式用熱変形予測シミュレーションにおいて、固有ひずみデータベースを用いる固有ひずみ解析ソルバーを開発し、熱弾塑性解析と比較して飛躍的に高速計算可能な熱変形予測シミュレーション技術開発に成功した。

要素技術研究機並びに開発機による造形レシピ開発、造形体の機械的性質や疲労強度の材料データ、粉末材料特性などのデータベース構築を行うとともに、熱変形シミュレーションとの連携を可能とするシステム構築を行った。

このように、本事業における情報を装置メーカー・粉末メーカー・ソフトウェアメーカーと共有し、高効率で提供できるように3D積層造形データセンターに集約し、3Dプリンタ開発及び高付加価値製品の製造技術開発・普及並びに人材育成を図った。

以上のように、本事業においては実施目標に対して十分な成果を達成した。

2. 研究発表・講演、文献、特許等の状況

(1) 研究発表・講演、文献

(平成29年度)

発表年月日	発表媒体	発表題目	発表者(組織)	発表者(氏名)
平成29年4月5日	レーザ加工学会講演会	金属レーザ積層造形技術の現状と今後の展開	近畿大学・TRAFAM・経済産業省	京極秀樹, 橋谷道明, 君島孝尚, 松田均
平成29年4月17日	シンポジウムの内容紹介 造形物展示	高速金属3Dプリンタ	東芝	塩見康友
平成29年4月25日	日本技術情報センター主催セミナー「先駆企業にみる金属3Dプリントを駆使した金属製品・金型の製作技術と活用事例及び今後の展開」	金属3Dプリンタ用金属粉末の概要・製造法と開発動向及び今後の展開	福田金属箔粉工業	西田元紀
平成29年4月28日	(公)砥粒加工学会 次世代固定砥粒加工プロセス専門委員会	「レーザーデポジション方式による高速金属積層造形装置」	東芝機械	藤巻晋平
平成29年5月15日	(一社)溶接学会溶接法研究委員会	レーザ式粉体床積層造形におけるレ	近畿大学次世代基盤技術研究所	池庄司敏孝
平成29年5月18日	第15回東芝機械グループソリューションフェア2017	金属3Dプリンタが目指す未来のモノづくり産業の創出	近畿大学	京極秀樹
平成29年5月18日～20日	東芝機械グループソリューション	「金属3D積層造形装置」	東芝機械	深瀬泰志
平成29年5月26日、27日、28日	公益社団法人日本铸造工学会 第169回全国講演大会展示会・技術講演会	◆砂型積層造形装置「SCM-800」で造形した砂型(展示モデル一覧写真)	シーメット	多田美希
平成29年5月27-28日	日本铸造工学会 第169回全国講演大会	砂型用3Dプリンタ材料の紹介・展示	群栄化学	竹下幸祐
平成29年5月28日	公益社団法人日本铸造工学会 第169回全国講演大会展示会・技術講演会 全国大会展示会 PRセッション(展示会出展者による展示PR)	砂型積層造形装置(砂型3Dプリンタ)の紹介	シーメット	多田美希
平成29年6月5日	The 6th JSME/ASME International Conference on Materials & Processing ICM&P2017(特別講演)	The current status and prospects of metal Additive Manufacturing in Japan	近畿大学	京極秀樹
平成29年6月5日	Proceedings of the JSME/ASME 2017 International Conference on Materials and Processing ICM&P2017	Densification of pure copper object fabricated by selective laser melting process	近畿大学, 福田金属箔粉工業	今井堅, 荒木正浩, 池庄司敏孝, 中村和也, 杉谷雄史, 京極秀樹
平成29年6月5日	Proceedings of the JSME/ASME 2017 International Conference on Materials and Processing ICM&P2017	Microstructure and mechanical properties of Inconel 718 superalloy fabricated by selective laser melting	近畿大学	立花悠介, 荒木正浩, 池庄司敏孝, 中村和也, 京極秀樹
平成29年6月7日	シンポジウム内容の紹介、造形物展示	高速金属3Dプリンタの開発	東芝	塩見康友
平成29年6月14日	NBCIテクノロジー委員会3Dプリンタ分科会	金属3Dプリンタによる新しいものづくり	近畿大学	京極秀樹
平成29年6月19日	シンポジウム内容の紹介、造形物展示	高速金属3Dプリンタ	東芝	塩見康友
平成29年6月20日	光応用工学特別研究委員会	LMD高速金属3Dプリンタの開発	東芝	塩見康友
平成29年6月21日	平成29年度 産業技術連携推進会議 製造プロセス部会 第7回3Dものづくり特別分科会	高速金属3Dプリンタ	東芝	岡田直忠
平成29年6月21日～23日	第28回 設計・製造ソリューション展(東京ビッグサイト)	砂型用3Dプリンタにおける新開発材料の紹介	群栄化学	船津英利

平成29年6月29日	Lasers in Manufacturing 2017での口頭発表	Development of a High-speed and High-resolution 3D Printer by Using Laser Metal Deposition Technology	東芝	塩見康友
平成29年7月1日	「機械技術」vol.8	金属AM技術によるものづくりの可能性と金属材料の評価	近畿大学	京極秀樹
平成29年7月4日	シンポジウムの内容紹介 造形物展示、造形デモ	高速金属3Dプリンタの開発	東芝	塩見康友
平成29年7月14日	予稿、口頭発表 The 8th Japan-China-Korea joint Conference on MEMS/NEMS juli 13-15, 217, KINTEX, Korea	Development of Additive Manufacturing Systems for Metal Parts in Japan	産総研	岡根利光
平成29年7月21日	ものづくりの未来-The Future of Making Things~ (仮題) 「市場環境の変化を柔軟に対応していくために」	アディティブマニファクチャリングの”今”を語る ~最新事例について~	近畿大学	京極秀樹
平成29年7月21日	プレゼンテーション (配布資料無し)	「アディティブマニファクチャリングによる新生産システムの展開」全体60分のうち10分程度を分担 「ISO/TC261国際標準活動の紹介」	産業技術総合研究所	芦田極
平成29年7月24日	ひろしまアディティブ・マニファクチャリング研究会平成29年度第1回次世代ものづくり技術セミナー	金属3Dプリンタが目指す“ものづく	近畿大学	京極秀樹
平成29年7月28日	島根大学産学連携センター技術コミュニティラボ第1回ミーティング	金属3Dプリンタの可能性と活用につ	近畿大学	京極秀樹
平成29年8月9日	SFF (口頭発表、会議予稿集、会議録)	Selective laser melting of pure copper	近畿大学	京極秀樹
平成29年8月10日	Solid Freeform Fabrication Symposium 2017	Selective laser melting of pure c	近畿大学次世代基盤技術研究所	池庄司敏孝
平成29年8月10日	素形材センター月刊誌「素形材」8月号「高品質・高生産性を目指す最新のアルミニウム鋳造技術」特集	砂型差圧鋳造法による高品質中空複雑形状鋳物の開発	産業技術総合研究所	駒井公一 砂山昇
平成29年8月25日	The 4th Japan-Korea International Symposium on Materials Science Technology (基調講演)	The Current Status and Prospects of Metal Additive Manufacturing in Japan	近畿大学	京極秀樹
平成29年8月25日	The 4th Japan-Korea International Symposium on Materials Science and Technology 2017 (JKMST 2017)	Influence of Process Parameters on Densification of Pure Copper	近畿大学, 福田金属箔粉工業	今井堅, 池庄司敏孝, 中村和也, 杉谷雄史, 西田元紀, 京極秀樹
平成29年8月25日	The 4th Japan-Korea International Symposium on Materials Science and Technology 2017 (JKMST 2017)	Fabrication of Inconel 718 superalloy by Additive Manufacturing	近畿大学	立花悠介, 池庄司敏孝, 中村和也, 米原牧子, 京極秀樹
平成29年8月25日	一般社団法人粉体粉末冶金協会粉末積層造形技術委員会主催「第一回粉末積層3D造形技術委員会」特別講演	(仮題) TRAFAM活動成果の紹介	TRAFAM本部	本田正寿
平成29年8月29日、30日	第27回マイクロエレクトロニクスシンポジウム (MES2017)	LMD高速金属3Dプリンタの開発	東芝	塩見康友
平成29年9月1日	雑誌	金属積層造形技術動向「6. 産業技術総合研究所」	産業技術総合研究所	廣瀬伸吾
平成29年9月2日	日本機械学会 2017年度年次大会講演論文集	金属AM用粉末の開発	大同特殊鋼	奥村鉄平
平成29年9月4日	2017年度JSME年次大会「先端技術フォーラム」	金属AM技術最前線	近畿大学	京極秀樹
平成29年9月4日	2017年度JSME年次大会「先端技術フォーラム」	パウダーベッド式レザ積層過程における溶融凝固現象	近畿大学次世代基盤技術研究所	池庄司敏孝
平成29年9月4日	2017年度JSME年次大会「先端技術フォーラム」	金属積層造形品の評価と欠陥要因解析	日本電子	眞部弘宣

(添付資料3) 成果報告書

平成29年9月4日	2017年度JSME年次大会「先端技術フォーラム」	電子ビーム積層造形による金属組織制御	東北大学	千葉晶彦
平成29年9月4日	ポスターおよび造形物	レーザDED法による細書異種材精密造形	産業技術総合研究所	廣瀬伸吾 小木曾久人 板垣宏知
平成29年9月4日	日本機械学会 2017年度年次大会	金属AM用粉末の開発	大同特殊鋼	奥村鉄平
平成29年9月4日	日本機械学会 2017年度年次大会	レーザ積層造形における純銅の熔融凝固現象解析による造形条件の最適化	近畿大学	今井堅, 池庄司敏孝, 荒木正浩, 中村和也, 西田元紀, 杉谷雄史, 京極秀樹
平成29年9月4日	日本機械学会 2017年度年次大会	金属レーザ積層造形におけるINCONEL718の高速造形条件の検討	近畿大学	立花祐介, 荒木正浩, 池庄司敏孝, 中村和也, 京極秀樹
平成29年9月6日	学会発表(日本金属学会 2017年秋期(第161回)講演大会)	CA法による凝固マップの作成と金属積層造形プロセス設計での利用方法	東北大学	青柳健大
平成29年9月8日	広島CAE懇話会	金属積層造形技術とそのシミュレーション開発の最新動向	近畿大学	京極秀樹
平成29年9月13日	テレビ神奈川「神奈川ビジネスUp To Deto」	「コイワイの3Dものづくり」	コイワイ	小岩井豊巳
平成29年9月17日	日本機械学会第30回計算力学講演会(特別講演)	次世代ものづくりに求められる金属3Dプリンティング技術	近畿大学	京極秀樹
平成29年9月20-22日	第4回関西高機能金属展	アトマイズ粉末に関する展示パネル、造形サンプルの展示	山陽特殊製鋼	柴田・陰山
平成29年9月29日	PPTによる口頭発表	Precision complex casting applying 3D sand mold printer	産業技術総合研究所	梶野智史
平成29年9月30日～10月1日	日本鑄造工学会第170回全国講演大会(主催: 公社) 日本鑄造工学会)	「鑄型崩壊性能評価の定量化に関する試み	北海道立総合研究機構	戸羽篤也
平成29年9月30日～10月1日	日本鑄造工学会第170回全国講演大会(主催: 公社) 日本鑄造工学会)	砂型積層造形装置に関する展示とセミナー	シーメット	多田美希
平成29年10月3日	Laser Applications Conference at the OSA Laser Congress	Laser Beam Powder Bed Fusion of Pure Copper	近畿大学次世代基盤技術研究所	池庄司敏孝
平成29年10月6日	”The Laser Application Conference”で発表	High Speed and High accuracy LMD 3D printer	東芝	岡田直忠
平成29年10月6日	「第8回3次元積層造形精密後加工技術」勉強会での口頭発表および一次試作機および造形物展示	レーザメタルデポジション方式による高速・高精度3次元積層造形技術開発	東芝	岡田直忠
平成29年10月7日	第3回日本機械学会イノベーション講演会	次世代3D積層造形技術開発プロジェクトについて	近畿大学	京極秀樹
平成29年10月8日	第3回日本機械学会イノベーション講演会	SUS630のパウダーヘッド式レーザー積層造形の溶解凝固現象	近畿大学	池庄司敏孝
平成29年10月11日	大阪府工業協会主催 3Dプリンタ実践研究会にて講演	3Dプリンタの活用事例について「自動車・建設機械等量産部品への適用」	三菱重工工作機械	二井谷春彦
平成29年10月17日	航空宇宙人材育成セミナー	金属3Dプリンタによる”ものづくり”革新	近畿大学	京極秀樹
平成29年10月17日	第96回三重県鑄造技術研究所での講演	高付加価値鑄造品の実現に向けた砂型積層造形技術の開発	産業技術総合研究所	岡根利光
平成29年10月18日	(公財)岐阜県研究開発財団平成29年度第2回航空宇宙産業人材育成セミナー	金属3Dプリンタによる”ものづくり”革新	近畿大学	京極秀樹
平成29年10月20日	早稲田大学「材料技術研究所オープンセミナー」	超精密三次元造形システム技術開発「高速積層造形装置の開発」	シーメット	大場好一
平成29年10月20日	「金属積層造形技術」	第4章 プロセス現象の解析	近畿大学次世代基盤技術研究所	池庄司敏孝
平成29年10月20日	早稲田大学 材料技術研究所オープンセミナー	純国産砂型3Dプリンタの開発と鑄造事例の紹介	産業技術総合研究所	岡根利光

(添付資料3) 成果報告書

平成29年10月21日	講演 (口頭による発表)	「超精密三次元造形システム技術カ イの目標と課題」	産業技術総合研究所	岡根利光
平成29年10月24日	生産技術振興協会 主催 3Dプ リントによる”モノづくり”の革 命	3次元モノづくりによる航空機 (エ ンジン・機体) の新しい生産技術	川崎重工業	井頭賢一郎
平成29年10月27日	精密工学会 生産自動化専門委員 会	金属3Dプリンタの動向	近畿大学	池庄司敏孝
平成29年10月27日 (午前)	溶接学会 第106回界面接合研究 委員会	レーザー式パウダーヘッド溶融による Ni基合金とステンレス鋼の造形	近畿大学	池庄司敏孝
平成29年10月29日	(一社) 溶接学会界面接合研究委 員会	レーザー式パウダーヘッド溶融による Ni基合金とステンレス鋼の造形	近畿大学次世代基盤 技術研究所	池庄司敏孝
平成29年10月30日	近畿大学工学部「研究公開フォー ラム2017」【パネル展示】	「近畿大学次世代基盤技術研究所: 3D造形技術研究センターの取組」 「技術研究組合3D積層造形技術総 合開発機構 (TRAFAM) の研究成果」	近畿大学	京極秀樹
平成29年10月31日	ひろしま航空機産業協議会平成29 年度第1回技術向上ワークショップ	金属積層造形技術 (3Dプリンタ) の	近畿大学	京極秀樹
平成29年11月1日	平成29年度産業技術連携推進会議 関東甲信越静地域部会総会・製造 技術分科会合同窓会	金属3Dプリンタの動向国内外の動 向及び企業への導入・展開	近畿大学	京極秀樹
平成29年11月1日	石川県工業試験場より口頭による 依頼	レーザー金属積層造形の造形・評価 技術の最新研究開発動向	産業技術総合研究所	小木曾久人
平成29年11月8日	JSPMIC2017 (招待講演)	Parameter Optimization on the Fabrication of Aluminum Alloy Using Selective Laser Melting Process	近畿大学	京極秀樹
平成29年11月8日	NBCI 3Dプリンタ分科会での講演	「超精密三次元造形システム (砂型 プリンタ) の開発について」	産業技術総合研究所	岡根利光
平成29年11月9日	JSPM International Conference Powder and Powder Metallurgy~ 60th Anniversary	Parameter Optimization on the Fabrication of Aluminum Alloy Using Selective Laser Melting Process	近畿大学	京極秀樹
平成29年11月9日	ISID CAEフォーラム ”Think CAE, 2017	金属技研株式会社の金属積層造形と トポロジー最適化設計の取り組み	金属技研	増尾大慈
平成29年11月10日	精密工学会講習会	金属3Dプリンタによる複雑形状部 品作製の最新動向	近畿大学	京極秀樹
平成29年11月10日	月刊 Material Stage2017年11月 号	3Dプリンタ用金属粉末材料とその 可能性について	山陽特殊製鋼	西面由夏
平成29年11月10日	第68回塑性加工連合講演	金属積層造形の革新性と最近の研究 開発動向	東北大学	千葉晶彦
平成29年11月10日	神奈川県立産業技術総合研究所 「金属材料の積層技術」フォーラ ム	ハイブリッド3DプリンターLUMEXの 特徴とその実用例	松浦機械製作所	天谷浩一
平成29年11月11日	第69回塑性加工連合講演会	「 casting sand mold 3D printing technology」	産業技術総合研究所	岡根利光
平成29年11月14 日、 15日	第9回JSME先端生産技術に関する 国際会議	The research status and development trend of metal additive manufacturing technology	近畿大学	京極秀樹
平成29年11月15日	大阪府工業協会主催 3Dプリン タ実践研究会 第6回	航空機およびエネルギー機器にお ける金属積層造形技術の適用展開	川崎重工業	野村嘉道
平成29年11月15日	3Dプリンタ実践研究会での口頭 発表	レーザーメタルデポジション法に よる航空機向け材料の3D造形	東芝	岡田直忠
平成29年11月20日	「第32回台日工程技术検討会」 金属組検討グループ	「The localization of technical application and current status for 3D printing sand mold in Japan	産業技術総合研究所	岡根利光
平成29年11月29日 ~12月1日	モノづくりマッチングJapan2017	3D積層造形条件を最適化するミク ロスケール溶解凝固シミュレーシ ョン技術	三菱重工業	亘 紀子
平成29年11月29日 ~12月1日	モノづくりマッチングJapan2017	複層電子ビーム3Dプリンタ開発 (パネル)	日本電子	眞部弘宣
平成29年11月29日 ~12月1日	モノづくりマッチングJapan2017	平成28年度TRAFAM活動成果	三菱重工工作機械	吉村 仁

(添付資料3) 成果報告書

平成29年11月29日 ～12月1日	モノづくりマッチングJapan2017 ワークショップによる口頭発表及 びTRAFAMブースでのパネル展示	口頭発表：福田金属箔粉工業の粉末 製品とAM粉末について パネル展示：金属粉末修飾技術の開 発	福田金属箔粉工業	松本誠一
平成29年11月29日 ～12月1日	モノづくりマッチングJapan2017 への出展	複層電子ビーム3Dプリンタ方式に おけるノズル開発	東芝	塩見康友
平成29年11月29日 ～12月1日	モノづくりマッチングJapan2017 への出展	3Dプリンタ用ファイバーレーザー開 発	古河電気工業	石井宏辰 江森芳博 渡辺雄也
平成29年11月29日 ～12月1日	モノづくりマッチングJapan2017 への出展	レーザーデポジション方式用5軸CAM	C&Gシステムズ	
平成29年11月29日 ～12月1日	モノづくりマッチングJapan2017 への出展	高性能アトマイズ装置開発・粉末特 性評価技術	大同特殊鋼	名古屋分室
平成29年11月29日 ～12月1日	モノづくりマッチングJapan2017 パネル展示	砂型積層造形による鋳造法の新たな 展開	産業技術総合研究所	岡根利光
平成29年11月29日 ～12月1日	モノづくりマッチングJapan2017 口頭発表 (PPT)	アルミニウム合金粉末製造技術	東洋アルミニウム	TRAFAM八尾・日 野分室
平成29年11月29日 ～12月1日	モノづくりマッチングJapan2017 への出展	複層レーザービーム3Dプリンタ技 術開発 パネル展示	東芝機械	本間周平
平成29年11月29日 ～12月1日	モノづくりマッチングJapan2017 展示会出展 (ポスターおよび造形 物)	レーザーデポジション方式の精密造形 と物理現象の解明	産業技術総合研究所	廣瀬伸吾 板垣宏司 小木曾久人
平成29年11月29日 ～12月1日	モノづくりマッチングJapan2017 パネル展示	大型高速機SCM-1800パネル展示、 ソフトウェア紹介パネル (3枚)	シーメット	多田美希
平成29年11月29日 ～12月1日	モノづくりマッチングJapan2017 パネル展示	大同特殊鋼名古屋分室ブースでの金 属粉末の展示	大同特殊鋼	TRAFAM名古屋分 室
平成29年11月29日 ～12月1日	モノづくりマッチングJapan2017 展示/パネル	砂材料およびリサイクル技術の開発	伊藤忠セラテック	
平成29年11月29日 ～12月1日	モノづくりマッチングJapan2017 パネル展示	「1-1-2レーザービーム方式における 物理現象の解明」・「1-1-3-4マ クロ溶解凝固シミュレーション技 術」・「1-1-3-6熱変形シミュレ ーション技術」・「1-1-4-2レーザー ビームパウダヘッド方式」・「1-1- 6今後の展開」	近畿大学	京極秀樹 池庄司敏孝
平成29年11月29日 ～12月1日	モノづくりマッチングJapan2017 パネル展示	要素技術研究機にて造形した造形物 の展示	近畿大学	京極秀樹 池庄司敏孝
平成29年11月29日 ～12月1日	モノづくりマッチングJapan2017 への出展	複層電子ビーム3Dプリンタ造形物	日本電子	眞部弘宣
平成29年11月29日 ～12月1日	モノづくりマッチングJapan2017 展示物	砂材料及びリサイクル技術の開発	伊藤忠セラテック	
平成29年11月29日 ～12月1日	モノづくりマッチングJapan2017 TRAFAM展示ブースにおけるパネル 展示	大型レーザービーム3Dプリンタ	松浦機械製作所	市村 誠
平成29年11月29日 ～12月1日	モノづくりマッチングJapan2017 3D造形技術展	アルミニウム合金粉末	東洋アルミニウム	TRAFAM八尾・日 野分室
平成29年11月29日 ～12月1日	モノづくりマッチングJapan2017 展示用ビデオ	ビデオ上映	東北大学仙台分室	
平成29年11月29日 ～12月1日	モノづくりマッチングJapan2017 展示用造形物	造形物の展示	東北大学仙台分室	
平成29年11月29日 ～12月1日	モノづくりマッチングJapan2017 への出展	アトマイズ粉末に関する展示パネ ル、粉末サンプルの展示	山陽特殊製鋼	前田壮一郎
平成29年11月30日	モノづくりマッチングJapan2017 への出展	大型高速電子ビーム3Dプリンタの 技術開発	多田電機	宮田淳二

(添付資料3) 成果報告書

平成29年11月30日	モノづくりマッチングJapan2017 ワークショップ	金属技研株式会社の金属積層造形と トポロジー最適化設計の取り組み	金属技研	増尾大慈
平成29年12月	技術情報協会発行「産業用3Dプリンターの最新技術と材料開発」 (仮題)	・金属材料の開発における熱、ひずみによる変形への対応と精度向上 ・レーザービーム方式3Dプリンターの低エネルギー化・歪みへの対	近畿大学	京極秀樹
平成29年12月	日本真空学会 12月研究例会「金属積層造形の現状と展開」	AM研究開発の展望(仮題)	近畿大学	京極秀樹
平成29年12月1日	モノづくりマッチングJapan2017 口頭発表(PPT)	砂型積層造形による鋳造法の新たな展開	産業技術総合研究所	梶野智史
平成29年12月1日	モノづくりマッチングJapan2017 口頭発表(PPT)	積層造形用金属粉末の新たな展開	東洋アルミニウム	橋詰良樹
平成29年12月1日	モノづくりマッチングJapan2017 モノづくり推進シンポジウム	材料組織制御を志向した電子ビーム積層造形プロセスの計算機シミュレーション	東北大学仙台分室	小泉雄一郎
平成29年12月1日	モノづくりマッチングJapan2017 モノづくり推進シンポジウム	LB-PBFによる純銅の造形	近畿大学	池庄司敏孝
平成29年12月4日	㈱リコー/リコージャパン㈱ 「3Dプリンター最前線セミナー2017」での講演	Additive Manufacturing国際標準化の最新動向	産業技術総合研究所	芦田極
平成29年12月5日	日本真空学会2017年12月研究例会	金属積層造形技術の展望	近畿大学	京極秀樹
平成29年12月6日	日本技術情報センター セミナー	金属3Dプリンタ活用における造形体の評価方法及品質維持及び今後の課題・対策	日本電子	眞部弘宣
平成29年12月14日	砂型積層造形機(3Dプリンタ)見学・セミナー	砂型積層造形機(3Dプリンタ)見学・セミナー	シーメット	多田美希 兼吉高宏(兵庫県立工業技術センター)
平成30年1月10日	レーザ協会主催地方講演会(高松)にて3D金属積層造形に関する講演を行う	「デポジション方式金属3D積層造形の特徴と適用可能性について」	三菱重工工作機械	二井谷春彦
平成30年1月17日	第120回軽構造接合加工研究委員会	レーザ式パウダーヘッド溶融法による薄板の作製	近畿大学	池庄司敏孝
平成30年1月20日	第10回分子シュミレーション報告相談会	二流体モデルによる3Dプリンタ溶融凝固シュミレーション	三菱重工業	亘 紀子 山崎 紀子 小椋 譲
平成30年1月22日	自動車技術会第12回疲労信頼性部門委員会	金属3Dプリンタの現状と今後の動向	近畿大学	京極秀樹
平成29年1月26日	第46回ガスタービンセミナー ガスタービンおよびエネルギー関連技術の最新動向	航空エンジン部品に適用される革新的生産技術・材料技術 -川崎重工の事例を中心に-	川崎重工業	井頭賢一郎
平成30年1月31日	東芝レビュー 73巻 1号	製品の革新を実現する先端製造技術	東芝	岡田直忠
平成30年2月1日	レーザ加工学会誌2月号 特集「レーザープロジェクト最前線」	三次元造形技術を核としたものづくり革命プログラム(次世代型産業用3Dプリンター技術開発及び超精密三次元造形システム技術開発)(2014年度-2018年度)	近畿大学・東北大学 TRAFAM・経済産業省	京極秀樹, 千葉晶彦, 橋谷道明, 君島孝尚, 岡本繁樹, 松田均
平成30年2月	The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society (TMS), Vol.70, No.3 (2018) pp.396-400	Selective laser melting of pure copper	近畿大学次世代基盤技術研究所	池庄司敏孝
平成30年2月2日	第55回 粉末冶金技術研究会	次世代産業用3Dプリンタ技術開発	TRAFAM	西田元紀
平成30年2月2日	広島県・商工労働局、広島県立総合技術研究所、広島県西部工業技術センター、産総研中国センター計6名の来訪による、ポスター及び造形物の見学	高速3D積層造形技術開発の紹介	産業技術総合研究所	岡根利光
平成30年2月2日	第55回 粉末冶金技術研究会	金属積層造形技術の適用に対する期待と課題	I H I	佐藤彰洋

(添付資料3) 成果報告書

平成30年2月7日	「中国地域産総研技術セミナーin広島」	量産鋳造品への適用を目指した高速積層造形技術	産業技術総合研究所	岡根利光
平成30年2月8日	岩手県工業技術センター 講演会	金属技研株式会社の金属積層造形とトポロジー最適化設計の取組	金属技研	増尾大慈
平成30年2月14日	「nano tech 2018 国際ナノテクノロジー総合展・技術会議」 「nanotech / 3D Printing セミナー」での講演	3Dプリンティングの国際標準化最新動向と活用のポイント	産業技術総合研究所	芦田極
平成29年2月14-16日	3Dプリンティング2018	アトマイズ粉末に関する展示パネル(添付参照)、造形サンプルの展示	山陽特殊製鋼	柴田・陰山
平成30年2月18日	日本機械学会中国四国支部第56期総会・講演会	金属レーザ積層造形によるAl-10%Si-0.4%Mg合金の高出力・高速造形条件の検討	近畿大学	塩田匠, 立花悠介, 中村和也, 池庄司敏孝, 京極秀樹
平成30年2月22日	粉体・粉末冶金協会 粉末製造委員会	次世代産業用3Dプリンタ技術開発	TRAFAM	西田元紀
平成30年2月23日	日本溶接協会 レーザ加工技術研究委員会 LMPシンポジウム2018	次世代型産業用3Dプリンタの造形技術開発・実用化事業	TRAFAM	橋谷道明
平成30年2月23日	Iot World Conference名古屋で3D金属積層造形に関する講演	「金属3D積層造形技術最前線2018」-自動車・建築等量産分野への展開	三菱重工工作機械	二井谷春彦
平成30年2月23日	「光技術コンタクト」誌 2018年5月号 (Vol156, No5)	レーザメタルデポジション方式による高速・精度3次元積層造形技術とその応用	東芝	岡田直忠
平成30年2月23日	Iot World Conference名古屋2018での口頭発表	「金属3D積層造形技術最前線2018」-航空機向け材料とその応用	東芝	岡田直忠
平成30年3月7日	日本機械学会中国四国支部第56期総会・講演会	金属レーザ積層造形による高強度アルミニウム合金の造形	近畿大学	山本航平, 池庄司敏孝, 京極秀樹
平成30年3月7日	日本粉末工業会粉末冶金交流会	金属積層造形技術の最新動向	近畿大学	京極秀樹
平成30年3月9日	Journal of Minerals, Metals and Materials Society	Selective Laser Melting of Pure Copper	近畿大学	池庄司敏孝, 中村和也, 米原牧子, 今井堅, 京極秀樹
平成30年3月9日	第13回粉末冶金交流会	「積層造形技術動向」(仮)	近畿大学	京極秀樹
平成30年3月9日	光・量子デバイス研究会での口頭発表	高速・高精細金属3Dプリンタによる造形プロセス開発	東芝	塩見康友
平成29年3月14日	広島大学「革新的なものづくりシンポジウム」での講演(口頭発表)	高速金属3D積層造形技術による鋳造用鋳型の製造と複雑形状鋳造品への量産適用	産業技術総合研究所	岡根利光
平成30年3月15日	熊本県産業技術センター、鹿児島県工業技術センターから計2名の来訪による、ポスター及び造形物の見学。	鋳造用砂型積層造形の概要	産業技術総合研究所	梶野智史
平成30年3月26日	名古屋市工業研究所80周年記念講演 新技術が開く未来への扉 3Dものづくり支援センター開設記念講演会	「3Dプリンターが拓く次世代のものづくり」	産業技術総合研究所	岡根利光
平成30年3月29日	日本塑性加工学会 接合・複合分科会 AM研究班第1回コロキウム	次世代3D積層造形装置の開発	TRAFAM	西田元紀
平成30年3月30日	東芝レビュー 73巻 2号(東芝レビュー技術成果号)での発表	金属3Dプリンタ技術	東芝	塩見康友
平成30年3月31日	近畿大学次世代基盤技術研究所ホームページ	「次世代産業用3Dプリンタ技術開発(平成26年度~平成30年度)プロジェクトにおける平成28年度までの研究成果概要」	近畿大学	京極秀樹

(平成30年度)

発表年月日	発表媒体	発表題目	発表者(組織)	発表者(氏名)
平成30年4月1日	日本金属学会会報「まてりあ」4月号 「Additive Manufacturing(付加製造)の医療応用への展開と現状」	金属積層造形技術の可能性と技術開発動向	近畿大学	京極秀樹
平成30年4月12日	EBAM2018	Exploration of preheating temperature control techniques for simultaneously removing residual stresses and "smoke" in additive manufacturing with electron beam melting (EBM)	東北大学	千葉晶彦
平成30年4月19日	日本機械学会 定時社員総会	3Dプリンター その課題と最新動向(仮題)	近畿大学	京極秀樹
平成30年4月20日	日本溶射学会「溶射」2018年4月号に 「電子ビーム金属積層造形装置の開発と造形品評価」をテーマに日本電子の金属積層造形装置と品質検査に関連する技術の取組状況を掲載する。	「電子ビーム金属積層造形装置の開発と造形品評価」	日本電子	眞部弘宣
平成30年4月26日	2018国際ウエルディングショーレーザ加工フォーラム基調講演	レーザ加工技術適用の潮流(AMLSM技術の開発)	三菱重工業	石出孝
平成30年4月27日	OPIE2018特別オープンセミナーでの口頭発表	レーザメタルデポジション方式による高速・高精細金属3Dプリンタの技術開発	東芝	塩見康友
平成30年5月1日	日本ガスタービン学会誌 Vol.46、No.3、May2018	航産業用ガスタービンにおける金属積層技術の適用事例(仮題)	川崎重工業	野村嘉道
平成30年5月9日～11日	「第5回関西高機能金属展」	アトマイズ粉末に関する展示パネル、造形サンプルの展示	山陽特殊製鋼	柴田・陰山
平成30年5月14日	粉末冶金協会平成30年度春季大会(第121回講演大会)「原料粉PR会」	福田金属管粉工業の積層造形技術への取組と3Dプリンタ用粉末について	福田金属管粉工業	松本誠一
平成30年5月14～16日	粉体・粉末冶金協会 平成30年度春季大会	金属AM技術の最近の研究状況と開発状況と併せてTRAFAMの開発状況についても紹介する。	近畿大学	京極秀樹
平成30年5月16日	技術交流会(シンポジウム内容の紹介、造形物展示)	「高速金属3Dプリンタの開発」 「国プロへ参画世界トップの技術レベルを目指す」	東芝	塩見康友
平成30年5月18日	ガスタービン学会 学会誌平成30年5月号 特集「エネルギー分野における三次元積層技術の現状と展望」巻頭言	エネルギー分野における三次元積層技術の現状と展望特集によせて	TRAFAM本部	前川篤
平成30年5月18日	ガスタービン学会誌 5月号	エネルギー分野製品に向けた積層造形のHIP効果	金属技研	近藤大介 唐土庄太郎 増尾大慈
平成30年5月19日	電気製鋼(大同特殊鋼技報)第89巻(2018)No1	金属積層造形用粉末の製造プロセスと特性	大同特殊鋼	奥村鉄平 関本光一郎
平成30年5月20日	「光技術コンタクト」誌2018年5月号(Vol.56, No.5)	「レーザメタルデポジション方式による高速・高精度三次元積層造形技術とその応用事例」	東芝	岡田直忠
平成30年5月23日	(一社)ターボ機械協会「生産技術研究分科会」でのご講演	次世代型産業用AM(3Dプリンタ)について -TRAFAMプロジェクトを中心として-	TRAFAM本部	前川篤
平成30年5月23～24日	第89回レーザ加工学会講演会(大阪大学)	二流体モデルによる3Dプリンタ溶融凝固シミュレーション	三菱重工業	亘紀子 山崎紀子 小椋謙
平成30年5月24日	第89回レーザ加工学会講演会 口頭発表	SLM過程におけるレーザ照射部周りの温度分布と溶融地形形状の予測	近畿大学	池庄司敏孝
平成30年5月25日	公益社団法人自動車技術会 2018年フォーラム 自動車の革新を支える材料技術の最新動向講演(口頭発表)	「軽金属部材製造に関わる3Dプリンター技術」	産業技術総合研究所	岡根利光
平成30年5月29日	Nikon X-Ray User Forum 2018 (Invited Speaker)	JEOL electron beam 3D printer inspection with Micro X-ray CT	日本電子	眞部弘宣

(添付資料3) 成果報告書

平成30年6月6日	2018年度軽金属溶接協会年次講演大会におけるビデオ展示	レーザーメタルデポジション 法による軽金属造形	東芝	岡田直忠
平成30年6月6日	(一社)軽金属溶接協会 2018年度年次講演大会 企業展示 (展示場所:〒101-0025 東京都千代田区神田佐久間町4-20 溶接会館4F)	「レーザービーム方式の3D積層造形装置技術開発(複層レーザービーム3Dプリンタ)」	三菱重工工作機械	吉村仁
平成30年6月10日	日刊工業新聞社発行「月刊誌 機械設計7月号」	「総論 3D プリンティング技術・3Dプリンターの最新動向」	近畿大学	京極秀樹
平成30年6月10日	日刊工業新聞社 月刊誌「機械設計」7月号(6月10日発売)の「3Dプリンターとその周辺技術の最新動向」という特集企画において「解説 金属積層造形品の品質検証・分析技術の現状と今後」をテーマに執筆依頼があり、日本電子昭島分室の1次試作機で得られた金属積層造形結果と品質検査に関連する測量技術の取組状況を掲載する。	「金属積層造形品の品質検証・分析技術の現状と今後」	日本電子	眞部弘宣
平成30年6月11日	第121回軽構造接合加工研究委員会での口頭発表	レーザーメタルデポジション法による複合材料の3D造形	東芝	津野聡
平成30年6月12日	International Conference on Metal 3D Printing Technology and Application, 2018	Metal 3D Printing R&D on Industrial Application	東北大学	千葉晶彦
平成30年6月13～16日	大同特殊鋼株式会社	展示会用パネル	大同特殊鋼	
平成30年6月14日	インターモールド展示会「Fomnext pavilion」技術セミナー	「デポジション方式三次元金属積層造形技術の適用について」	三菱重工工作機械	二井谷春彦
平成30年6月14日	日経BP社主催 テクノロジーNEXT2018講演会	金属技研株式会社の金属積層造形とトポロジー最適化設計の取り組み	金属技研	増尾大慈
平成30年6月17日	The Fifth World 3D Printing Industry Conference	3D Printing, especially electron beam additive manufacturing technology in Japan	東北大学	千葉晶彦
平成30年6月20日	平成30年度 産業技術連携推進会議 製造プロセス部会 第9回3Dものづくり特別分科会	電子ビーム方式金属3D積層造形装置と造形品検査のご紹介	日本電子	眞部弘宣
平成30年6月20日	平成30年度 産業技術連携推進会議 製造プロセス部会 第9回3Dものづくり特別分科会	次世代型産業用3Dプリンタの造形技術開発・実用化事業と今後の展開	T R A F A M本部	橋谷道明
平成30年6月25日	“9th International Symposium on Laser Precision Micorofabrication”での口頭発表	High Speed 3D Printer Using Laser Metal Deposition	東芝	岡田直忠
平成30年6月	山陽特殊製鋼 技報	3D積層造形用C oレスマルエージング鋼粉末	山陽特殊製鋼	久世哲嗣
平成30年7月4日	サイバネットシステム(株)主催「Additive Manufacturingセミナー」	Additive Manufacturingの最新動向	近畿大学	京極秀樹
平成30年7月4日・5日	Additive Manufacturingのためのシミュレーション活用セミナー	金属技研における数値計算を利用した金属積層造形の取り組み	金属技研	増尾大慈
平成30年7月5日	日本技術情報センターセミナー	金属3Dプリンタ活用における造形体の評価方法と品質維持及び今後の課題・対策	日本電子	眞部弘宣
平成30年7月18日	The 71st IIW ANNUAL ASSEMBLY & INTERNATIONAL CONFERENCE __Joint Meeting “Additive manufacturing and related processes between C-1, IV, XII and C-VII” 口頭発表、講演予稿	Laser Beam Powder Bed Fusion of Pure Copper	近畿大学	池庄司敏孝
平成30年7月20日	第10回生産システム見える化展 特別講演会「IoTとデジタル化で加速するものづくり革新とは」生産システム部門特別講演共催No.18-62においてスライドを用いた講演	「総合生産システムの加工セルとして実用化が進むアディティブマニファクチュアリング(3Dプリンター)」	産業技術総合研究所 明治大学	芦田極 館野寿丈

(添付資料3) 成果報告書

平成30年7月23日	TOSHIBA REVIEW2018 (英文成果号)での発表	Deposition processing of copper and aluminium by the metal 3D printer	東芝	塩見康友
平成30年7月23日	一般社団法人 日本海運集会所 物流総合情報誌「海運」	国内の3Dプリンター活用に向けた研究開発の動向	T R A F A M本部	本田正寿
平成30年7月30日	三菱重工技報	「デポジション方式3次元金属積層造形装置の開発」	三菱重工工作機械	藤田善仁
平成30年7月31日	三菱重工技報55巻3号「インダストリー&社会基盤特集」平成30年7月末に発行、三菱重工ホームページにて一般に公開予定	「LMD方式3D金属積層造形機の開発と自動車・建機等量産分野への展開」	三菱重工業	二井谷春彦
平成30年8月3日	粉碎・混合・成形技術セミナー(主催:(一財)岡山セラミック技術振興財団)	ナノ粒子や球状化など粉末改質に用いられる高周波誘導熱プラズマ技術と装置の紹介	日本電子	小牧久
平成30年8月20日	産報出版株式会社発行 月刊「溶接技術」執筆	「3Dプリンティング技術の動向」	近畿大学	京極秀樹
平成30年8月30日	口頭発表(一般財団法人光産業技術振興協会多元技術融合光プロセス研究会)	パワーレーザ、レーザ加工・計測技術の最新動向	三菱重工業	石出孝
平成30年9月5日	「軽金属溶接」誌 2018年11月号	レーザメタルデポジション法による軽金属造形	東芝	岡田直忠
平成30年9月10日～15日	IMTS2018 (The International Manufacturing Technology Show 2018)	【展示】金属3D積層造形技術	東芝機械	本間周平
平成30年9月16日～20日	World PM 2018 (中国/北京市)	展示会用パネル	大同特殊鋼	
平成30年9月25日	「金属」誌 2018年10月号	レーザメタルデポジション法の実際	東芝	岡田直忠
平成30年9月25日	アグネ技術センター「金属」2018年10月号	金属粉末の製造法と特性	MAMSS	西田元紀
平成30年10月11日	SPIE/COS Photonice Asiaでの口頭発表	Development of Powder Focusing Nozzle for High Speed LMD 3D Printer	東芝生産技術センター	津野聡
平成30年10月17日～19日	モノづくりマッチングJapan2018「展示」	T R A F A Mプロジェクト内容の展示	近畿大学 東北大学 産総研 日本電子 多田電機 東芝 東芝機械 三菱重工業 三菱重工工作機械 松浦機械製作所 古河電気工業 シーメット C&G ASTOM 富士通 大同特殊鋼 山陽特殊製鋼 福田金属箔粉工業 東洋アルミニウム I H I 群栄化学工業 伊藤忠セラテック T R A F A M	京極秀樹、他2名 眞部弘宣 巨紀子 吉村仁 緑川哲史 石井宏達、他2名 池田貴 小町晃 前田壮一郎、他1名 橋詰良樹 佐々木厚太
平成30年10月18日	モノづくりマッチングJapan2018出展者ワークショップ講演	「レーザパウダーヘッド方式による大型金属積層造形装置」	松浦機械製作所	緑川哲史
平成30年10月18日	モノづくりマッチングJapan2018出展者ワークショップ講演	先端レーザー加工技術～金属積層造形から高出力レーザー溶解まで～	三菱重工工作機械	廣野陽子

(添付資料3) 成果報告書

平成30年10月18日	モノづくりマッチングJapan2018出展者ワークショップ講演	複層レーザービーム3Dプリンタ技術開発	東芝機械	深瀬泰志
平成30年10月18日	モノづくりマッチングJapan2018出展者ワークショップ講演	大同特殊鋼の粉末製品 その製造プロセスとAdditive Manufacturing	大同特殊鋼	秋山和範
平成30年10月18日	モノづくりマッチングJapan2018出展者ワークショップ講演	福田金属箔粉工業の粉末製品とAM用粉末について	福田金属箔粉工業	榎橋誠
平成30年10月18日	モノづくりマッチングJapan2018出展者ワークショップ講演	金属積層、レーザービーム工法・電子ビーム工法による量産実用化	コイワイ	小岩井修二
平成30年10月18日	モノづくりマッチングJapan2018出展者ワークショップ講演	アルミニウム合金粉末の3D積層造形および他用途への応用	東洋アルミニウム	橋詰良樹
平成30年10月18日	モノづくりマッチングJapan2018出展者ワークショップ講演	3D造形に適した山陽特殊製鋼の「スプライズ」粉末と開発事例	山陽特殊製鋼	前田壮一郎
平成30年10月18日	モノづくりマッチングJapan2018出展者ワークショップ講演	電子ビーム金属3D 積層造形装置の開発と造形品の検査	日本電子	眞部弘宣
平成30年10月18日	モノづくりマッチングJapan2018出展者ワークショップ講演	最新の高エネルギービーム加工技術のご紹介	多田電機	宮田淳二
平成30年10月18日	モノづくりマッチングJapan2018出展者ワークショップ講演	金属積層造形を対象とした固有ひずみ法による高速変形解析	ASTOM	池田貴
平成30年10月18日	モノづくりマッチングJapan2018出展者ワークショップ講演	レーザデポジション方式用5軸CAM	C&Gシステムズ	秋吉直
平成30年10月18日	モノづくりマッチングJapan2018出展者ワークショップ講演	金属技研における量産部品にむけた金属積層造形の取り組み	金属技研	斉藤暁
平成30年10月20日	光技術コンタクト誌	3D積層造形用金属粉末	山陽特殊製鋼	相川芳和
平成30年10月24日	AMEF2018	The Latest Actions of Technology Research Association for Future Additive Manufacturing	近畿大学	京極秀樹
平成30年10月24日	(株)日刊工業出版プロダクション発行『機械技術』誌2018年10月臨時増刊号(JIMTOF2018ガイドブック)	金属3Dプリンタによる製造業の今後を展望する	近畿大学	京極秀樹
平成30年10月26日	ハイテク推進セミナー講演会(①大阪島津マルチホール)主催(一社)精算技術振興協会共催(一社)大阪大学工業会後援大阪商工会議所	Digitalizationを活用した最新技術について-脱炭素社会に向けて-	T R A F A M本部	前川篤
平成30年10月27日	早稲田材料工学会主催「第12回金属系先端技術シンポジウム」口頭発表及びポスターセッションにおける展示物	口頭発表：金属3Dプリンタ用粉末「FAM (Fukuda Additive Manufacturing Powder)」 パネル展示：表面修飾技術によえう微細粉造形 (T R A F A M成果) 3D積層造形用球状金属粉末：FAM-GCU for SLM、for EBM (純銅及び銅合金粉末) 3D積層造形用修飾粉末：表面修飾粉末、未修飾粉末、流動性改善粉末 (改善処理前後) 積層造形モデル：純銅ヒートシンクモデル、銅合金計上限界モデル	福田金属箔粉工業	松本誠一
平成30年10月30日	粉末冶金協会平成30年度秋季大会	電子ビーム法およびレーザー法の積層造形装置で製作したSUS316L材の特性調査	金属技研	内田哲也
平成30年10月31日	粉末冶金協会平成30年度秋季大会(第122回講演大会)「企画セッションおよび講演特集：4.粉末積層3D造形技術における課題と最先端研究」口頭発表	選択的レーザー溶融法における銅合金の最適積層造形条件とその特性	福田金属箔粉工業	杉谷雄史

(添付資料3) 成果報告書

平成30年10月31日	粉末冶金協会平成30年度秋季大会	「金属レーザ積層造形によるインコネル718のプロセルマップの作成」 「金属レーザ積層造形による純銅のメルトプールの溶融凝固挙動作成」	近畿大学	京極秀樹
平成30年10月31日	粉末冶金協会秋季大会	3Dプリンタ用Coレスマルエージング鋼粉末の開発	山陽特殊製鋼	久世哲嗣
平成30年10月下旬～11月上旬	口頭発表、講演予稿	金属AMの最新技術、及び活用方法（仮題）	近畿大学	池庄司敏孝
平成30年11月	協会誌「軽金属溶接」	「金属3D積層造形制御ソフトウェア開発動向」関連	シーメット	大場好一
平成30年11月1日	口頭発表（JIMTOF2018 講演会）	最新AM技術とその適用化拡大	三菱重工業	石出孝
平成30年11月1日～6日	JIMTOF2018	複層電子ビーム3Dプリンタ造形品	日本電子	眞部弘宣
平成30年11月1日～6日	JIMTOF2018（東京）	LMD方式による金型の補修サンプル	C&Gシステムズ	小泉哲
平成30年11月1日～6日	展示会 日本工作機械見本市（JIMTOF2018）セミナー「金属Additive Manufacturingセミナー」	展示会「金属3D積層造形技術に関する展示」 セミナー「大型金属3D積層造形技術（レーザーデポジション方式）によるモノづくりの提案」	東芝機械(株)	深瀬泰志
平成30年11月1日～6日	JIMTOF2018（第29回日本国際工作機械見本市）	弊社ブースにて製品展示。テーマ「未来を想像/創造するイノベーション」	(株)松浦機械製作所	緑川哲史
平成30年11月2日	第5回「京」を中核とするHPCIシステム利用研究課題 成果報告会～ポスト「京」への移行期を迎えるHPCI	hp170088 3D積層ミクロスケール溶融凝固シミュレーション	三菱重工業	亘紀子
平成30年11月2日	金属Additive Manufacturing セミナー（東京ビッグサイト 会議棟7階703号室）主催：一般社団法人 日本工作機械工業会	「ハイブリッド金属3Dプリンタ「LUMEX」事例紹介	(株)松浦機械製作所	加納佳明
平成30年11月2日	JIMTOF2018 金属Additive Manufacturingセミナー	電子ビームパウダーベッド方式の3D金属積層造形装置開発	日本電子	眞部弘宣
平成30年11月5日	日本学術振興会 耐熱金属材料第123委員会	「金属AM技術の最新動向」（仮題）	近畿大学	京極秀樹
平成30年11月5日	第18回 国際工作機械技術者会議（IMEC2018）東京ビッグサイト・会議棟 レセプションホールA 主催：一般社団法人 日本工作機械工業会、株式会社 東京ビッグサイト	「ハイブリッド金属3Dプリンタの特長と課題」	(株)松浦機械製作所	緑川哲史
平成30年11月6日	依頼講演（口頭発表） OITDA 一般財団法人光産業技術振興協会 平成30年度多元技術融合光プロセス研究会 第3回研究交流会	表面処理およびDED積層造形と「プロセス・インフォマティクス」	産業技術総合研究所	廣瀬伸吾
平成30年11月7日	8th ALD Workshop & Conference VIM/ESR/VAR and Powder Metallurgy	Possibility to optimally control preheating temperatures for simultaneously removing residual stresses without occurring "smoke" in additive manufacturing with electron beam melting	東北大学	千葉晶彦
平成30年11月13日～16日	formnext2018	アトマイズ粉末に関する展示パネル（添付参照）、造形サンプルの展示。	山陽特殊製鋼	柴山・陰山
平成30年11月13日	レーザー技術総合研究所 オープンセミナー	レーザーメタルデポジション法による高速・高精度3次元積層造形	東芝	岡田直忠
平成30年11月15日	協会誌「軽金属溶接」2018年11月号への原稿掲載	「レーザービーム方式金属3D積層造形技術の開発動向」 ・レーザービームデポジション方式（マニシング方式）	三菱重工工作機械	二井谷春彦

(添付資料3) 成果報告書

平成30年11月15日	協会誌 「軽金属溶接」誌 2018年11月号	レーザーメタルデポジションによる軽金属の造形	群栄化学工業	岡田直忠
平成30年11月15日	軽金属学会誌 「軽金属溶接」 2018年11月号	積層造形用金属粉末の開発動向	大同特殊鋼	奥村鉄平
平成30年11月16日	学会発表 (P U C A 2 0 1 8)	金属積層造形による組織制御のための凝固マップ作成	東北大学	青柳健大
平成30年11月22日	山形大学インクジェット研究会 2018年度 第6回セミナーでの講演 (口頭発表)	「Additive Manufacturingの国際標準化動向と活用ポイント」	産業技術総合研究所	芦田極
平成30年11月23日	日本機械学会 第31回計算力学講演会	金属積層造形を対象とした固有ひずみ法による高速変形解析	ASTOM	池田貴
平成30年11月28日	日本材料科学会 平成30年関西・中国支部総会および講演会	金属粉末レーザー積層造形における造形条件のAl ₂ Si ₁₀ 4Mg合金組織への影響	近畿大学	加藤千佳
平成30年11月28日	日本材料科学会 平成30年関西・中国支部総会および講演会	金属粉末レーザー積層造形により製作したInconel718のテクスチャ評価	近畿大学	米原牧子
平成30年11月29日	口頭発表 (Laser Anwender Forum2018 (BIAS))	Latest additive manufacturing technology toward practical utilization	三菱重工業	石出孝
平成30年11月28日～30日	国際航空宇宙展2018	展示会用パネル	大同特殊鋼	
平成30年11月5日～12月4日	Photonix2018第18回光・レーザー技術展 (千葉幕張メッセ) への出展概要を周知するチラシを作成し、弊社顧客に配布します。	Photonix2018 第18回光・レーザー技術展弊社製品のご案内	三菱重工工作機械	吉村仁
平成30年12月5日	口頭発表 (レーザー加工技術展)	最新AM技術とその適用展開	三菱重工業	石出孝
平成30年12月5日～7日	Photonix2018第18回光・レーザー技術展 (東京ビッグサイト) への出展概要を主催者ホームページ紹介欄に掲載します。	弊社独自開発積層装置の製品情報掲載 (本製品には、TRAFAMノウハウである積層レーザーヘッド、ノズルが含まれる)	三菱重工工作機械	二井谷春彦
平成30年12月5日～7日	第5回高機能金属展	アトマイズ粉末に関する展示パネル (添付参照)、造形サンプルの展示。	山陽特殊製鋼	柴山・陰山
平成30年12月5日～7日	第5回高機能金属展 (幕張メッセにて開催)	展示パネル	大同特殊鋼	粉末製品部
平成30年12月5日～7日	Photonix2018 第18回光・レーザー技術展 (千葉:幕張メッセ)	TRAFAM平成29年度研究成果の展示 (AIパネル、積層サンプル、研究成果紹介動画)	三菱重工工作機械	吉村仁
平成30年12月5日～7日	第90回レーザー加工学会講演会 (産業技術総合研究所 臨海副都心センター別館 11F)	TRAFAM平成29年度研究成果のAIパネル展示、および、商用機LAMD A紹介AIパネル展示	三菱重工工作機械	吉村仁
平成30年12月10日	日刊工業新聞 月刊誌「機械設計」2019年1月号 執筆	「金属3Dプリンタの高速化とマルチマテリアル化の可能性と限界」	近畿大学	京極秀樹
平成30年12月10日～11日	第90回レーザー加工学会講演会 (産業技術総合研究所 臨海副都心センター別館 11F)	TRAFAM平成29年度研究成果のAIパネル展示、および、商用機LAMD A紹介AIパネル展示	三菱重工工作機械	吉村仁
平成30年12月19日	京都府中小企業技術センター主催「金属積層造形技術セミナー」にて講演	先端レーザー加工技術～金属積層造形から微細レーザー加工まで～	三菱重工工作機械	二井谷春彦
平成30年12月19日	京都府中小企業技術センター(京都市下京区中堂寺南町134)主催セミナー 京都府内の中小企業の方を対象に、3D技術活用セミナーを例年実施。 今年度のテーマは「積層造形技術」	次世代型産業用3Dプリンタについて -TRAFAMプロジェクトを中心として-	TRAFAM本部	橘谷道明
平成31年1月10日	マルチマテリアル研究拠点キックオフ・シンポジウム	金属積層造形技術によるマルチマテリアルの創製	東北大学	千葉晶彦

(添付資料3) 成果報告書

平成31年1月14日	レーザー学会学術講演会第39回年次大会シンポジウムでの口頭発表	レーザーメタルデポジション方式による高速・高精度3次元積層造形技術開発	東芝	塩見康友
平成31年1月21日	Spring-8 金属材料評価研究会(第14回)	放射光CTによる3Dプリンター用金属粒子の観察	三菱重工業	山崎紀子 亘紀子 小椋謙 渡辺俊哉
平成31年1月28日	口頭発表、講演予稿	金属3Dプリンターについて(仮題)	近畿大学	池庄司敏孝
平成31年1月29日	iJSME2019	TRAFAMによる次世代型3Dプリンタの開発状況(仮題)	近畿大学	京極秀樹
平成31年1月29日	口頭発表(ISAM2019-3RD INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ADDITIVE MANUFACTURING)講演会)	最新AM技術とその適用化拡大	三菱重工業	石出孝
平成31年1月29日	JAXAワークショップ「宇宙機へのAM技術の適用に向けた品質保証の取り組み」での講演(口頭発表)	基調講演(題目未定) TRAFAM活動およびISO/TC261 動向の紹介	TRAFAM本部	佐藤昌宏
平成31年1月31日	TCT Japan 2019	AM国際標準化の最新動向と国内審議会での取り組み状況	産総研	芦田極
平成31年1月30日～2月1日	TCT Japan 2019	金属技研の金属積層造形の取り組み	金属技研	増尾大慈
平成31年1月30日～2月1日	TCT Japan 2019	アトマイズ粉末に関する展示パネル(添付参照)、造形サンプルの展示。	山陽特殊製鋼	柴田・安藤
平成31年2月5日	粉体粉末冶金協会粉末製造委員会	山陽特殊製鋼における3D用金属粉末の開発動向	山陽特殊製鋼	相川芳和
平成31年2月6日～8日	次世代3Dプリンタ展	金属技研の金属積層造形の取り組み	金属技研	増尾大慈

(2) 特許等

(平成29年度、平成30年度出願済特許等リスト)

出願日	受付番号	出願の係る特許等の表題	出願人
平成30年3月	PCT/JP2018/009108	粉末材料の評価装置、粉末材料の評価方法および粉末材料の評価プログラム	TRAFAM
平成30年8月	PCT/JP2018/031389	情報処理装置、情報処理方法、情報処理プログラム、積層造形装置およびプロセスウィンドウ生成方法	TRAFAM
平成30年9月	PCT/JP2018/034700	金属積層造形用粉末およびその製造方法と、積層造形装置およびその制御プログラム	TRAFAM
平成30年9月	PCT/JP2018/034701	金属積層造形用粉末の評価方法、評価プログラムおよび製造方法、情報処理装置および金属積層造形装置	TRAFAM
平成31年2月	PCT/JP2019/004121	3次元積層造形装置	TRAFAM

(3) その他の公表 (プレス発表等)

成果普及のための活動

【シンポジウム開催】

「ひらめきを形に！設計が変わる新しいモノづくり」第3回シンポジウム

主 催：技術研究組合次世代3D積層造形技術総合開発機構(TRAFAM)

共 催：国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)

開催日時：平成29年8月23日 10:00～17:30

開催場所：東京都新宿区市谷 TKP 市ヶ谷カンファレンスセンター

参加者：200名

発表内容：平成28年度、新しく得た成果、高速・高精度な積層造形装置の開発進捗について報告

「ひらめきを形に！設計が変わる新しいモノづくり」第4回シンポジウム

主 催：技術研究組合次世代3D積層造形技術総合開発機構(TRAFAM)

共 催：国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)

開催日時：平成30年8月23日 10:00～17:35

開催場所：TKP ガーデンシティ PREMIUM 京橋

参加者：200名

発表内容：平成29年度に新しく得た成果及び高速・高精度な積層造形装置の開発進捗について報告

契約管理番号	17100279-0
--------	------------

平成 26 年度～平成 28 年度出願の登録特許リスト

出願日	受付番号	出願に係る特許等の表題	出願人
平成 26 年 12 月	PCT/JP2014/ 84653	3次元造形装置、3次元造形装置の制御方法および制御プログラム	TRAFAM
平成 27 年 1 月	PCT/JP2015/50460	電子銃、電子銃の制御方法および制御プログラム並びに3次元造形装置	TRAFAM
平成 27 年 1 月	PCT/JP2015/52762	3次元造形システム、情報処理装置、3次元造形モデル配置方法および3次元造形モデル配置プログラム	TRAFAM
平成 27 年 2 月	PCT/JP2015/54882	光加工ヘッド、光加工装置およびその制御方法ならびに制御プログラム	TRAFAM
平成 27 年 2 月	PCT/JP2015/55483	光加工ヘッド、光加工装置および光加工方法	TRAFAM
平成 27 年 2 月	PCT/JP2015/55484	光加工用ノズルおよび光加工装置	TRAFAM
平成 27 年 2 月	PCT/JP2015/55964	粉末リコータ	TRAFAM
平成 27 年 2 月	PCT/JP2015/55965	粉末リコータ	TRAFAM
平成 27 年 3 月	PCT/JP2015/56349	加工ノズル、加工ヘッド、加工装置、その制御方法および制御プログラム	TRAFAM
平成 27 年 3 月	PCT/JP2015/56883	有機バインダ、粒状材料、3次元積層造形鑄型の製造装置および3次元積層造形鑄型の製造方法	TRAFAM
平成 27 年 3 月	PCT/JP2015/56884	粒状材料、3次元積層造形鑄型の製造装置および3次元積層造形鑄型の製造方法	TRAFAM
平成 27 年 3 月	PCT/JP2015/57074	光加工ヘッド、光加工装置およびその制御方法ならびに制御プログラム	TRAFAM
平成 27 年 3 月	PCT/JP2015/56929	光加工ヘッドおよび3次元造形装置	TRAFAM
平成 27 年 3 月	PCT/JP2015/56930	高出力光用減衰器、測定装置および3次元造形装置	TRAFAM

(添付資料4) 特許リスト

平成 27 年 3 月	PCT/JP2015/58624	光加工ヘッド、光加工装置、その制御方法及び制御プログラム	TRAFAM
平成 27 年 3 月	PCT/JP2015/58627 ※)	加工ノズル、加工ヘッド、加工装置、加工ノズルの制御方法および制御プログラム	TRAFAM
平成 27 年 3 月	PCT/JP2015/58627 ※)	加工ノズル、加工ヘッド、加工装置、加工ノズルの制御方法および制御プログラム	TRAFAM
平成 27 年 3 月	PCT/JP2015/58784	レーザ加熱制御機構、レーザ加熱制御方法、レーザ加熱制御プログラムおよび3次元造形装置	TRAFAM
平成 27 年 3 月	PCT/JP2015/59003	加工ノズル、加工ヘッド、加工装置	TRAFAM
平成 27 年 3 月	PCT/JP2015/59004	3次元造形システム、3次元造形物の製造方法、情報処理装置、3次元造形物の放熱用構造生成方法及び3次元造形物の放熱用構造生成プログラム	TRAFAM
平成 27 年 3 月	PCT/JP2015/59005	粉末供給装置、粉末供給装置の制御方法、粉末供給装置の制御プログラムおよび3次元造形装置	TRAFAM
平成 27 年 3 月	PCT/JP2015/59006	3次元造形システム、3次元造形物の製造方法、情報処理装置、3次元造形物の収縮抑制構造生成方法及び3次元造形物の収縮抑制構造生成プログラム	TRAFAM
平成 27 年 9 月	PCT/JP2015/75654	ラインインクジェットヘッドの洗浄装置、洗浄方法および洗浄プログラム	TRAFAM
平成 27 年 11 月	PCT/JP2015/81725	加工用ノズル、加工ヘッドおよび光加工装置	TRAFAM
平成 27 年 11 月	PCT/JP2015/81726	加工用ノズルおよび光加工装置	TRAFAM
平成 27 年 11 月	PCT/JP2015/81727	加工用ノズルおよび光加工装置	TRAFAM
平成 27 年 11 月	PCT/JP2015/81970	3次元積層造形装置、3次元積層造形装置の製造方法および3次元積層造形装置の製造プログラム	TRAFAM

(添付資料4) 特許リスト

平成 27 年 11 月	PCT/JP2015/81971	3次元積層造形装置、3次元積層造形装置の制御方法および3次元積層造形装置の制御プログラム	TRAFAM
平成 27 年 11 月	PCT/JP2015/81972	3次元積層造形装置、3次元積層造形装置の制御方法および3次元積層造形装置の制御プログラム	TRAFAM
平成 27 年 12 月	PCT/JP2015/ 84249	3次元造形装置、3次元造形装置の制御方法および3次元造形装置の制御プログラム	TRAFAM
平成 27 年 12 月	PCT/JP2015/86304	3次元積層造形装置、3次元積層造形装置の制御方法および3次元積層造形装置の制御プログラム	TRAFAM
平成 27 年 12 月	PCT/JP2015/86305	3次元積層造形装置、3次元積層造形装置の制御方法および3次元積層造形装置の制御プログラム	TRAFAM
平成 27 年 12 月	PCT/JP2015/86306	3次元積層造形装置、3次元積層造形装置の制御方法および3次元積層造形装置の制御プログラム	TRAFAM
平成 27 年 12 月	PCT/JP2015/86431	3次元積層造形装置、3次元積層造形装置の制御方法および3次元積層造形装置の制御プログラム	TRAFAM
平成 27 年 12 月	PCT/JP2015/86432	3次元積層造形装置、3次元積層造形装置の制御方法および3次元積層造形装置の制御プログラム	TRAFAM
平成 28 年 1 月	PCT/JP2016/51656	3次元造形装置、3次元造形装置の制御方法および3次元造形装置の制御プログラム	TRAFAM
平成 28 年 3 月	PCT/JP2016/57434	3次元積層造形システム、3次元積層造形方法、積層造形制御装置およびその制御方法と制御プログラム	TRAFAM
平成 28 年 3 月	PCT/JP2016/58202	光加工ヘッドおよび光加工装置	TRAFAM
平成 28 年 3 月	PCT/JP2016/58203	光加工用ノズルおよび光加工装置	TRAFAM
平成 28 年 3 月	PCT/JP2016/58204	光加工装置および造形装置	TRAFAM
平成 28 年 3 月	PCT/JP2016/59642	3次元積層造形装置、3次元積層造形装置の制御方法および3次元積層造形装置の制御プログラム	TRAFAM

(添付資料4) 特許リスト

平成 28 年 3 月	PCT/JP2016/59643	3次元積層造形装置、3次元積層造形装置の制御方法および3次元積層造形装置の制御プログラム	TRAFAM
平成 28 年 3 月	PCT/JP2016/59644	3次元積層造形装置、3次元積層造形装置の制御方法および3次元積層造形装置の制御プログラム	TRAFAM
平成 28 年 3 月	PCT/JP2016/59645	3次元積層造形装置、3次元積層造形装置の制御方法および3次元積層造形装置の制御プログラム	TRAFAM
平成 28 年 3 月	PCT/JP2016/59763	3次元積層造形装置、3次元積層造形装置の制御方法および3次元積層造形装置の制御プログラム	TRAFAM
平成 28 年 3 月	PCT/JP2016/59764	3次元積層造形装置、3次元積層造形装置の制御方法および3次元積層造形装置の制御プログラム	TRAFAM
平成 28 年 3 月	PCT/JP2016/59765	3次元積層造形装置、3次元積層造形装置の制御方法および3次元積層造形装置の制御プログラム	TRAFAM
平成 28 年 3 月	PCT/JP2016/59766 ※)	3次元積層造形装置、3次元積層造形装置の制御方法および3次元積層造形装置の制御プログラム	TRAFAM
平成 28 年 3 月	PCT/JP2016/59766 ※)	3次元積層造形装置、3次元積層造形装置の制御方法および3次元積層造形装置の制御プログラム	TRAFAM
平成 28 年 3 月	PCT/JP2016/59767 ※)	3次元積層造形装置、3次元積層造形装置の制御方法および3次元積層造形装置の制御プログラム	TRAFAM
平成 28 年 3 月	PCT/JP2016/59767 ※)	3次元積層造形装置、3次元積層造形装置の制御方法および4次元積層造形装置の制御プログラム	TRAFAM
平成 28 年 3 月	PCT/JP2016/59768	3次元積層造形装置、3次元積層造形装置の制御方法、3次元積層造形装置の制御プログラムおよび治具	TRAFAM
平成 28 年 4 月	PCT/JP2016/62506	粒状材料、粒状材料の製造方法、3次元積層造形鋳型の製造装置および3次元積層造形鋳型の製造方法	TRAFAM
平成 28 年 5 月	PCT/JP2016/66058	3次元積層造形システム、3次元積層造形方法、積層造形制御装置およびその制御方法と制御プログラム	TRAFAM
平成 28 年 5 月	PCT/JP2016/66059 ※)	3次元積層造形システム、3次元積層造形方法、積層造形制御装置およびその制御方法と制御プログラム	TRAFAM

(添付資料4) 特許リスト

平成 28 年 5 月	PCT/JP2016/66059 ※)	3次元積層造形システム、3次元積層造形方法、積層造形制御装置およびその制御方法と制御プログラム	TRAFAM
平成 28 年 6 月	PCT/JP2016/67278	3次元積層造形システム、積層造形制御装置、積層造形制御方法および積層造形制御プログラム	TRAFAM
平成 28 年 9 月	PCT/JP2016/75862	3次元積層造形装置、3次元積層造形装置の制御方法および3次元積層造形装置の制御プログラム	TRAFAM
平成 28 年 9 月	PCT/JP2016/77102	半導体レーザーモジュールおよび3次元積層造形装置	TRAFAM
平成 28 年 10 月	PCT/JP2016/79693	3次元積層造形装置、3次元積層造形装置の制御方法および3次元積層造形装置の制御プログラム	TRAFAM
平成 28 年 11 月	PCT/JP2016/54344	3次元積層造形鋳型製造用粒状材料の製造方法および3次元積層造形鋳型の製造方法	TRAFAM
平成 28 年 12 月	PCT/JP2016/87653	3次元造形装置、3次元造形装置の制御方法および3次元造形装置の制御プログラム	TRAFAM
平成 28 年 12 月	PCT/JP2016/88773	金属積層造形物、金属積層造形用アルミニウム系粉末およびその製造方法	TRAFAM
平成 28 年 12 月	PCT/JP2016/88768	金属積層造形用粉末およびその製造方法	TRAFAM

※) 日本特許査定時の分割出願

発表年月日	発表媒体	発表題目	発表者 (組織)	発表者 (氏名)
平成29年12月8日	JOM March2018 Vol.70, Issue3, pp396-400	Selective laser melting of pure copper	KINDAI UNIVERSITY	Ikeshoji, T.-T. Nakamura, K. Yonehara, M. Imai, K. Kyogoku, H.
平成30年12月	Materials Science Forum Vol.941 (2018), pp.1300-1305	Melting and solidification behavior of high-strength aluminum alloy during selective laser melting	KINDAI UNIVERSITY	Kyogoku, H. Yamamoto, K. Ikeshoji, T.-T. Nakamura, K. Yonehara, M.
平成30年7月15日	Journal of Japan Society of Powder Powder Metallurgy Vol.65, No.7 (2018), pp.383-388	Parameter optimization on the fabrication of Al-10Si-0.4Mg alloy using selective laser melting process,	TOHOKU UNIVERSITY	Araki, M. Kusaka, S. Nakamura, K. Yonehara, M. Ikeshoji, T.-T. Kyogoku, H.
平成29年10月25日	Materials Today: Proceedings Vol.4,ISSUE11,Part1,2017 11437-11440.	Characterization of powder bed generation in electron beam additive manufacturing by discrete element method (DEM)	TOHOKU UNIVERSITY	Y. Zhao Y. Koizumi K. Aoyagi K. Yamanaka A. Chiba
平成30年12月2日	Additive Manufacturing Vol.26, March2019, pp202-214	Molten Pool Behavior and Effect of Fluid Flow on Solidification Conditions in Selective Electron Beam Melting (SEBM) of a Biomedical Co-Cr-Mo Alloy	TOHOKU UNIVERSITY	Y. Zhao Y. Koizumi K. Aoyagi D. Wei K. Yamanaka A. Chiba
令和1年5月9日	Materialia Volume 6, June 2019, 100346	Comprehensive study on mechanisms for grain morphology evolution and texture development in powder bed fusion with electron beam of Co-Cr-Mo alloy.	TOHOKU UNIVERSITY	Y. Zhao Y. Koizumi K. Aoyagi D. Wei K. Yamanaka A. Chiba
令和1年7月19日	Materials Letters Volume 254, 1 November 2019 Pages 269-272	Manipulating local heat accumulation towards controlled quality and microstructure of a Co-Cr-Mo alloy in powder bed fusion with electron beam	TOHOKU UNIVERSITY	Y. Zhao Y. Koizumi K. Aoyagi K. Yamanaka A. Chiba
平成30年9月11日	JFST0010 2018, Vol.13 No.2 Online ISSN 1880-5558, https://doi.org/10.1299/jfst.2018jfst0010	Two-fluid model to simulate metal powder bed fusion additive manufacturing, Journal of Fluid Science and Technology	Mitsubishi Heavy Industries,Ltd.	Noriko WATARI Yuzuru OGURA Noriko YAMAZAKI Yukihiko INOUE Keisuke KAMITANI Yasuyuki FUJIYA Masahiko TOYODA Saneyuki GOYA Toshiya WATANABE
令和元年5月21日～24日	LAMP2019 http://www.jlps.gr.jp/en/proc/lamp/19/	Two-fluid model to simulate metal powder bed fusion additive manufacturing (II)	Mitsubishi Heavy Industries,Ltd.	N. Watari Y. Ogura N. Yamazaki T. Watanabe