

2.6.2 積層造形・レーザ加工

(1) 研究開発領域の定義

近年、重要性を増している多品種少量生産やカスタムメイド生産の高効率化、製品の高付加価値化をめざす技術を研究開発の対象とする領域である。積層造形は、立体物を水平に輪切りにした断面データをもとに、樹脂や金属粉などを用いて薄い層を積み上げて立体物を製作する技術であり、3Dプリンティングとも呼ばれる。最近ファイバーレーザなどの近赤外域レーザの普及により、レーザ方式の積層造形も広がりを見せている。一方レーザ加工は、金属、セラミックス、半導体、ガラス、樹脂、生体などのさまざまな材料に対し、除去（切削・切断、穴あけ）、塑性（曲げ）加工、接合加工や表面加工（改質、パターン化、マイクロ・ナノ構造化）、内部・体積加工を施すものである。短パルスレーザによる非熱的加工は、仕上がり精度が高いという利点があり、産業利用がさかんになってきている。

(2) キーワード

3Dプリンティング、粉末床溶融結合、指向性エネルギー堆積、結合剤噴射、材料押出、溶融・凝固現象、プロセスモニタリング、シミュレーション、ファイバーレーザ、半導体レーザ、切断加工（切削加工）、接合加工、純銅、品質保証、短波長レーザ、連続波（CW）レーザ、フェムト秒レーザ、炭酸ガスレーザ、エキシマレーザ、固体レーザ、ビーム整形、除去（切削・切断）加工、塑性（曲げ）加工、接合加工、表面加工（改質）、3次元加工、表面微細構造、品質保証、その場/オペランド計測、サイバー・フィジカルシステム（CPS）、デジタルツイン、人工知能（AI）、多光子励起、トンネル励起、緩和過程、マルチスケール、マルチフィジックス、2温度モデル、分子動力学、流体力学、時間依存密度汎関数法、電磁場解析

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

積層造形は、学術用語としてはAdditive Manufacturing（AM、和訳は付加製造）と呼ばれる。AMは、設計の自由度が大きく、トポロジー最適化やラティス構造などを適用した従来の加工法では不可能な形状品を造形できることから、軽量化や高機能化を大幅に改善した製品を一体化して製造できるなどの特徴を有している。このため、航空・宇宙分野、医療分野などの製品に適用されている。金属を対象とすると、これまで主に粉末床溶融結合によるジェットエンジン部品などの航空・宇宙分野、インプラントなどの医療分野、金型などが主体であったが、ここ数年で結合剤噴射や材料押出による小型精密部品への展開も可能となってきており、とりわけ自動車分野への展開が期待されている。また、従来造形が難しかった高強度アルミニウム合金や純銅、さらには耐熱・耐食材料や高融点材料などもAM装置の高機能化と材料開発により可能となっている。

加えて、AMはデジタル・マニュファクチャリング技術であることから、IoTやAIとの整合性が極めて良く、次世代のものづくりにおける重要な加工技術の1つとして、すでに海外ではスマート工場のモデル化が進行している。米国、欧州、中国などにおける研究開発が実用化段階を迎えており、また昨今の新型コロナウイルス感染症流行拡大によってサプライチェーンが混乱し、3Dプリンタの有用性が再認識されたことを考えると、わが国においても積極的に導入を行うことが重要である。

20世紀の最高の発明の1つにあげられるレーザは、現在多様な分野で利用されている。その中でもレーザ加工はもっとも重要な応用の1つである。実際、レーザ加工は自由度に富み、金属、セラミックス、半導体、

ガラス、樹脂、生体などの材料に対して、除去、付加、改質、接合、微細構造化などの多様な加工が行なえるだけでなく、高品質、高解像度の空間選択的加工も実現する。また多くの場合、特殊な環境（真空、雰囲気ガス）を必要とせず、プロセス工程も削減できるため、薬品などの使用量が削減できて環境にも優しい。実際、レーザ加工は、自動車、鉄鋼、造船、航空産業などにおける厚鋼板の溶接・切断といったマクロ加工用途から、エレクトロニクス、オプトエレクトロニクス産業などにおける微細穴あけ、スクライビング、マーキング、リソグラフィといったマイクロ加工用途まで広範囲な領域で実用化されている。近年は、新しい光源の開発、レーザ発振器の高出力化・高性能化に加えて、ビーム整形技術、加工光学系やロボット、加工装置などの周辺機器の進歩も著しく、その重要性はますます増大している。

一方、ドイツのIndustrie 4.0やわが国のSociety 5.0による超スマート社会実現のためのものづくり革新において、収集データのAI処理による知のデジタル化に注目が集まっている。多くの加工パラメータの最適化が必要なレーザ加工においても、AIや深層学習との融合や、理論計算・シミュレーションにもとづいた学理解明が重要な課題として注目され、研究開発が進められている。

フェムト秒やアト秒といった極短パルスレーザによる加工は、光の伝搬、光吸収による電子励起、励起電子-格子相互作用、エネルギー輸送、加工（破壊）という異なる物理過程が、時間経過に応じて連続的に起きる。これらは違う分野として扱われてきた現象であるが、それらが連続的に起きるために、高エネルギー物理学を除くあらゆる物理過程を考慮しなくてはならないのがレーザ加工研究の理論的難しさである。このような融合は各分野の研究者が扱いにくさのために避けられてきたものである。レーザ加工という現象を扱うことで新しい分野横断的研究領域が形成され、新しい科学研究の芽がそこから生まれることが期待される。

〔研究開発の動向〕

金属のAMにおいて用いられる代表的な方法は、現状においても粉末床溶融結合と指向性エネルギー堆積である。粉末床溶融結合における装置開発の最近の動向をみると、熱源としてレーザの高出力化や多光源化により大型・高速化をめざした装置開発が引き続き進められている。これは、ジェットエンジンやロケットエンジンなどの航空・宇宙関連部品やタービンブレードなどエネルギー・産業機器分野に対応した大型製品が多くなってきていることに起因する。このため、深さ方向を1 m以上とした専用機の開発などが行われ、GE Additiveではジェットエンジンのハウジング造形用の特殊装置開発も行っている。

粉末床溶融結合においては、熱源としてレーザが主流であり、炭酸ガスレーザから波長1070 nmのYbファイバーレーザに主流が移り変わったことにより、造形品質の安定化と鉄系合金やニッケル基超合金などに加え、アルミニウム合金の造形が可能となり、実用に供されるようになった。しかし、今後の自動車の電動化などを見据えた際に重要な純銅の造形は、ファイバーレーザでは吸収率が低いことから難しく、短波長のレーザを適用する必要がある。最近、緑色レーザを搭載した装置開発も行われており、純銅の高密度での造形も可能となっている。また、ファイバーレーザの高出力化と低コスト化が進んだことにより多光源化も進んでいる。4台のファイバーレーザを搭載した、大面積の造形面を有する大型装置が開発されており、高速化が進んでいる。さらに、従来の装置では割れの発生しやすい高炭素濃度の鉄系材料やニッケル基合金などは造形が難しかったが、最近ではベースプレート温度を従来の200°Cから500°C、さらには700°Cまで加熱可能な装置開発が行われたことで、熱変形を抑えるとともに、割れの発生防止が可能となっており、これに伴って適用材料の範囲も大幅に広がってきた。併せて、品質の安定化を図るためのモニタリング機能を搭載した装置が増えているが、フィードバック機能については研究段階である。

電子ビームを搭載した装置はほぼ1社の独占であったが、経済産業省およびNEDOのプロジェクト

(2014～2018年度)で技術研究組合次世代3D積層造形技術総合開発機構 (Technology Research Association for Future Additive Manufacturing: TRAFAM)が開発した2機種 of 装置のうち、1機種の装置の販売が2019年より始まった。電子ビームの装置は、TiAlなどの酸素を嫌う高融点材料や溶接で割れが発生する材料などへの適用が有利であり、今後の展開が期待される。

一方、指向性エネルギー堆積は、これまで熱源としてレーザーを使用し、粉末供給して造形する装置が多かったが、近年、熱源としてアーク放電を利用してワイヤを送給して造形する装置や、アルミニウムと銅系に限定されるもののコールドスプレイによる方式の装置が注目されている。指向性エネルギー堆積法は、これまで通り、その製法の特徴から単純形状で大型製品へ適用されている。わが国ではTRAFAMによるプロジェクトにおいて、指向性エネルギー堆積法の装置2機種が開発されており、500 cc/時間での高速造形が可能となっている。さらに、メルトプールの形状や温度をモニタリングすることでフィードバック制御を可能とした装置の開発も行われており、造形品質の安定化につながると期待されている。

最近、従来の方式に加えて、結合剤噴射および材料押出による造形法が注目されており、装置が安価であることから装置販売の台数も大幅に伸びている。結合剤噴射はMITにより開発された技術であり、2000年頃に金属用として実用化されたが、その後は鑄造用砂型の造形に利用されている。AMの自動車分野への展開では、大手メーカーとドイツの自動車メーカーが開発を開始したことから再び注目を浴びている。製品は小型部品が中心で、造形体の密度も98%程度で材質も限定されるが、大量生産可能なことから今後大きな伸びが予測される。また、材料押出による金属材料への展開も注目されているが、いずれの方式も成形後の脱バインダ・焼結工程が必要なことに注意すべきである。すでに、金属粉末射出成形 (Metal Injection Molding: MIM) 技術を有している企業にとっては、新たな製品展開の有効な手段となりうる。

AMは、Industrie 4.0において重要な加工法として位置づけられているため、装置の周辺技術である搬送装置やロボットとの統合化をめざしたモデルシステムの構築が進められ、ドイツの自動車産業においては積極的な導入が検討されている。また、将来を睨んでサイバーフィジカルシステム (CPS) を取り入れた新しい技術開発への挑戦も行われている。将来のものづくりにおいて極めて重要な技術であり、すでに欧米の大手企業がAMを活用したデジタルツインの開発を行っている。

レーザー加工は、自動車、造船産業などにおける厚鋼板の溶接・切断といったマクロ加工用途から、エレクトロニクス、オプトエレクトロニクス産業などにおける微細穴あけ、スクライビング、マーキング、リソグラフィといったマイクロ加工用途まで広範囲な領域で利用されている。レーザー加工の市場動向は、わが国の経済動向と密接に連動している。すなわちレーザー加工分野は、1990年度以降長期経済低迷により厳しい状況にあったが、1995年度頃からIT産業に支えられ、エキシマレーザーリソグラフィの実用化もあり、急速に成長した。その後はわが国の経済状況に連動して多少の増減を繰り返すものの、これまで順調に成長を続けている。レーザー加工分野の市場において、もっとも大きなシェアを占めるのはエキシマレーザー加工であり、約50%を占める。一方、EUVリソグラフィの実用化も現実的となりつつある。EUVリソグラフィ用光源の駆動用レーザーには、炭酸ガスレーザーが採用される予定である。炭酸ガスレーザー加工は、10年近く前まではエキシマレーザーに次いで2位の約1/4のシェアを誇っていた。しかし、小型・堅牢、高輝度、低環境負荷の特長を有するファイバーレーザーが台頭してくるにつれ、炭酸ガスレーザーによる加工は年々市場が小さくなり、ついに数年前にファイバーレーザー加工とシェアが逆転した。特に、溶接・接合分野やマーキング分野での炭酸ガスレーザーからファイバーレーザーへの置き換わりが著しい。YAGやYVO₄に代表される固体レーザーも、溶接・接合分野やマーキング分野でファイバーレーザーへの置き換わりが進展しているが、半導体基板、自動車、スマートフォン、ディスプレイの部品・デバイス用途の微細切断・穴あけ分野では、固体レーザーの需要は拡大している。またフェ

ムト秒レーザやピコ秒レーザといった超短パルスレーザ加工も実用化されつつある。半導体レーザ加工の市場規模はまだ小さいが、年々着実に市場を拡大している。特に高輝度半導体レーザの開発や青色半導体レーザの加工への応用は、今後の成長を後押しすることが期待される。

基礎研究においては、特にマイクロ・ナノ加工において精力的に研究が進められている。そのうちフェムト秒レーザを用いた研究が60%以上を占めている。フェムト秒レーザ加工の研究分野は、3次元加工・内部加工、精密微細加工、表面マイクロ・ナノ構造化、穴あけ、切断・ダイシング、スライシング、接合、ナノ材料創成など多岐にわたる。1980年代後半から1990年代に盛んに用いられたエキシマレーザは、今日では基礎研究にはほとんど用いられていない。紫外ナノ秒レーザ光による加工は、多くの場合Qスイッチ固体レーザの3次、4次高調波が用いられる。一方、近年リソグラフィ用に開発された高出力のエキシマレーザを、加工に応用しようといった動きもある。

現在、主なレーザ加工シミュレーションは2温度モデルを基本としてKeldysh理論や電磁場解析、プラズマ物理の知見を取り入れた確率方程式を用いることが多く、ドイツのフラウンホーファー研究所のQuCutなどが代表的な公開コードである。2温度モデルは格子温度を扱うため古典分子動力学計算（古典MD）と相性のよい理論モデルである。古典MDは格子の熱を基本とした運動の記述が主であり電子から格子への熱移行を記述する2温度モデルとは自然な形で融合が可能である。特に電子励起過程が線形過程である金属については多くの報告がなされている。また、電磁場ダイナミクスや流体力学などの視点から加工現象を取り扱う流れもある。電磁波の波としての振る舞いや流体力学を利用するため、一般的な確率方程式のみによるアプローチより計算コストはかかるが、近接場といった物質構造に由来する励起場所の解析や熱伝搬の正確な記述などの利点がある。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

• AMにおけるプロセスモニタリングとシミュレーション

海外では、AMにおけるプロセスモニタリングとシミュレーションによる品質保証技術が重要な研究開発課題であり、装置・計測機器・ソフトウェアメーカーと大学、国立研究所がプロジェクトを組んで実施されている。溶融凝固現象については、米国のNISTをはじめとする国立研究所が中心となり、高速度カメラやサーモビューワによるメルトプールのその場・オペランド計測、さらには超短パルスX線による表面や内部の構造変化の実時間計測を実施し、欠陥発生メカニズムが明らかになってきたが、これらの結果に基づいた品質保証のためのフィードバック制御までにはいたっていない。わが国ではTRAFAMのプロジェクトにおいて、レーザおよび電子ビームを熱源としたパウダーベッド方式における溶融凝固現象やパウダーベッドの状況を詳細にモニタリングできるテストベンチを開発し、これらのデータにもとづくフィードバック制御技術の開発をめざしており、同様の研究開発が欧米でも検討されている。

シミュレーションに関しては、溶融凝固現象にとどまらず、組織、熱変形予測に関してマルチスケール、マルチフィジックスをベースとした開発が行われている。熱変形予測は重要であるが、現状では多くの材料に対するデータが不足しているとともに、これらの現象を体系化したソフトウェアは開発途上である。今後、AM向けシミュレーション技術の開発は、製品の品質安定化と併せて、将来のデジタルツイン実現のための大きな課題の1つである。

• CPS化による効率的加工技術の急速な進展

米国のGeneral Electric (GE) は、航空機産業にCPSの概念を取り入れた先駆者で、部品のデジタル設

計データをクラウド上に送信しそれをもとに細部にまで造形された構造物を作成するシステムを構築している。GE 以外に、AM 事業において多くの産業部品を手がけてきた米国のストラタシスも航空機部品のデジタル製造に乗り出している。ドイツのシーメンスは、AM とデジタルツインを連携したシステム構築を行っている。

• 4次元プリンティング

3次元プリンティングはレーザー加工の重要な応用分野の1つである。3次元プリンティングは3次元の構造物を構築するが、4次元プリンティングでは構築した3次元構造物を、熱、湿度、pHといった周囲の環境変化や、電流、光などの外部刺激により、時間とともに形状や機能を変化させることができる。4次元プリンティングが提唱されたのはごく最近であるが、研究開発が活発化している。4次元プリンティングは単一材料でも複数の材料の組み合わせでも実現できるが、複数の材料を用いそれぞれの造形箇所を3次元空間的に制御して物体を作製できれば、より多様で自由度の高い4次元動作が得られる。フェムト秒レーザーを用いた2光子造形は多種類の材料を空間選択的に造形することが可能で、加工解像度がきわめて高い。それによりマイクロ・ナノスケールの異種物質からなる4次元プリンティングを実現でき、マイクロアクチュエータやマイクロロボット、さらには全く予想もつかないような応用が期待される。

• 複合加工技術

加工の形態は、付加加工（薄膜堆積、3Dプリンティングなど）、除去加工（エッチング、アブレーションなど）、無変形加工（改質、表面マイクロ・ナノ構造化など）の3つに分類される。それぞれの加工形態には異なった特徴があり、異なる加工形態を組み合わせることで、より複雑な構造を有する物体や、より高機能な物質の創成が期待される。金属のAMにおいては、他技術との複合化により、造形物の加工面の平坦化や構造のリペア、コーティングが行われている。2光子造形においては、より複雑で微細な3次元構造を実現するため、フェムト秒レーザーナノアブレーションとの組み合わせが試みられている。フェムト秒レーザー3次元加工では、除去加工によって作製されたマイクロ流体デバイスに、無変形加工により光導波路を集積化、あるいは付加加工（2光子造形）によりポリマーマイクロ機能素子を集積化した高機能バイオチップの作製が試みられている。このように加工技術の複合化は、これまでの単一の技術では実現できなかった構造や機能を持つ物質を作製でき、今後ますます重要になる。

• マイクロ・ナノ表面階層構造の作製

直線偏光のパルスレーザー光を物質に照射すると、物質表面に周期構造（Laser-Induced Periodic Surface Structure：LIPSS）が形成されることはよく知られている。形成される構造の周期は、レーザー光照射条件（波長、パルス幅、フルエンスなど）、材料、照射雰囲気依存するが、波長～波長の1/10程度である。このうち波長～波長の1/2程度のは低空間周波数LIPSS、1/2波長～波長の1/10程度のは高空間周波数LIPSSと呼ばれている。特に高空間周波数LIPSSは超短パルスレーザーに特有の構造であり、2000年代前半にその形成が初めて報告された。LIPSSに関する研究は今日でも多くの研究者が携わっており、LIPSS形成のメカニズムと応用に2極化している。実用的な応用には大面積の処理が重要であるが、直描技術や多光束干渉技術を用いると、大面積処理が可能になるだけでなく、マイクロ・ナノ階層構造が構築され、材料表面を高機能化できる。さらに最近では、照射条件を調整することにより、LIPSS内にさらに周期の短い（50 nm以下、波長の数十分の1）超高空間周波数LIPSSや特異的な形状のナノ構造（人工擬似微細生物構造）も形成できることが報告されている。このようなマイクロ～ナノサイズの多様な構造から形成される階層構想は、これまでにない光学特性（着色、吸収、偏光依存性など）、濡れ性（超疎水性、超親水性）、抗菌、抗ウイルス、生体親和性などの機能を付与することが期待でき、この後さらに研究開発が活発化すると考えられる。

• ビーム整形加工技術

加工の高品質化、高効率化、高解像度化を実現するため、レーザービームを整形し加工を行うことが近年のトレンドとなっており、特に欧州では、国家的プロジェクトとして研究開発が進められている。ファイバーレーザーによる金属加工で、材質や板厚に応じてレーザー光を空間的に最適なビーム形状に制御することで、加工速度の向上、厚板の高速安定加工、ドロスの低減、ベベルの低減、面粗度の向上が実現した。また、集光したスポットが長い距離伝搬するベッセルビームの利用は、高アスペクト比穴あけ加工やガラス・半導体基板切断用途においてトレンドになっている。以上は、空間的なビーム整形の例であるが、時間的なビーム整形（パルス整形）も、高品質化、高効率化、高解像度化に有用である。特に、超短パルスレーザーのバーストモードは、加工の高品質・高効率化を実現し、広く研究開発が行われている。従来のバーストモードは、バースト内のイントラパルスの繰り返し周波数はMHz領域であったが、2016年にGHzバーストを用いたアブレーション冷却という概念が論文発表され、大きな話題となった。GHzバーストアブレーションでは、加工領域外に熱が拡散する前にレーザーエネルギーを全て物質に投与してアブレーションを完了することができ、ターゲット材料内部の平均温度を低下させる効果がある（アブレーション冷却）。この冷却効果により、最適条件では加工領域周辺部に発生する熱影響領域や損傷を回避することが可能となる。同時に、アブレーション閾値を下げる効果もあり、加工効率も改善される。この論文に触発され、現在GHzバーストモードアブレーション研究は活発化している。

• 電子-レーザー相互作用にもとづくレーザー加工シミュレーション

ここ10年ほどの間に、電子-レーザー相互作用の微視的記述にもとづいたレーザー加工シミュレーションが出現した。筑波大学が公開しているSALMONでは多電子ダイナミクスを記述できる時間依存密度汎関数法と電磁場ダイナミクスを記述するMaxwell方程式を融合したマルチスケール計算が可能であり、半導体誘電体表面および界面での電子励起過程を経験的パラメータ無しで計算することが可能である。2012年にSALMONの基本となる論文が出版されて以降、同手法を用いたレーザー加工シミュレーションが実施され、また同様のプログラムが幾つか提案されている。レーザー加工の初期過程解明や最適化に向けた強力なツールとなる可能性がある。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

国内におけるAMのプロジェクトでは、経済産業省からの受託によりTRAFAMが実施した「三次元造形技術を核としたものづくり革命プログラム（次世代型産業用3Dプリンタ技術開発及び超精密三次元造形システム技術開発プログラム）」（2014～2018年度）、NEDO「次世代型産業用3Dプリンタの造形技術開発・実用化事業」（2017～2018年度）、ならびに内閣府SIP「革新的設計生産技術」（2014～2018年度）の24課題が終了した。TRAFAMのプロジェクトにおいては、電子ビームPBF方式2機種とレーザーPBF方式1機種、ならびにレーザーDED方式の2機種を開発し、すでに3機種は販売を開始した。またSIPでは、大阪大学接合科学研究所を中心に青色半導体レーザーによるAM装置開発と純銅加工技術の開発が行われた。TRAFAMでは、AM技術の企業への展開を図るため、NEDO「積層造形部品開発の効率化のための基盤技術開発事業」（2019～2021年度）でモニタリング・フィードバック技術開発、ならびにデータベース構築を進めている。また、SIP「統合型材料開発システムによるマテリアル革命」（2018～2022年度）で、マテリアルズインテグレーション（MI）技術を三次元積層造形へ展開するためのプロジェクトが物質・材料研究機構を中心に実施されており、Ni基合金やTiAl合金を対象として、プロセスの最適化、MIによる最適合金設計、組織予測や強度予測などを可能とする研究開発が進められている。

レーザー加工に関しては、NEDO「高輝度・高効率次世代レーザー技術開発」(2016～2020年度)で、①深紫外・ピコ秒レーザーによる加工技術の開発、②高出力パルスレーザーによる新しい加工技術の開発、③次々世代加工光源技術の開発、④最適条件を導くレーザー加工プラットフォームの構築、⑤短波長レーザーによる加工技術の開発、の5テーマに取り組んでいる。SIP「光・量子を活用したSociety 5.0実現化技術」(2018～2022年度)では、①CPS型レーザー加工機システム研究開発、②空間光制御技術開発、③フォトリソグラフィの開発が進む。Q-LEAP「次世代レーザー：光量子科学によるものづくりCPS化拠点(STELLA)」(2018～2027年度)は、前半の5年はAI-CPS型レーザー加工技術開発、後半の5年は学理解明をもとに、学理CPS型レーザー加工技術の開発をめざしている。これら3プロジェクトは共通する点も多く、COIプログラム「コヒーレントフォトン技術によるイノベーション拠点」(2013～2021年度)やTACMIコンソーシアムも含めて連携を図ることで、Industrie 4.0やSociety 5.0による超スマート社会実現に向け、特にCPS型レーザー加工技術の実現に向けたシナジー効果が期待される。

米国では、America MakesのプロジェクトがAMの実用化を睨んだ研究開発に移行しているとともに、GE Additiveなど企業が中心となって実用化のための研究開発を実施している。

欧州では、Horizon 2020プロジェクト後のRoadmap 2030を作成し、AMへの取り組みが引き続き行われており、実用的なプロジェクトが数多く実施されているのが特徴である。レーザー加工に関しても、Horizon 2020で関連プログラムが提供されている。プロジェクトテーマは、超短パルスレーザー加工と応用、ビーム整形加工などであり、合計で年間約1億ユーロの資金が提供されている。2020年12月現在、次期フレームワークのHorizon Europeプログラムが議論されており、年間約1億ユーロがレーザー加工に配賦される予定であるが、実用的な応用とリンクしていることが要求される。さらに、欧州グリーンディールと完全なデジタル製造技術に対応する必要がある。ドイツでは、2012年にフォトリソに関する国家プログラムが、年間予算約1億ユーロの10年プログラムとして更新された。このプログラムは「Photonikforschung」と呼ばれ、超短パルスレーザーとそのマイクロ加工への応用、電気自動車製造応用の緑と青色高出力レーザー、積層造形用のプロセスチェーンなど、さまざまなホットピックを支援している。最新の公募(Effilas-program)は、材料加工用の新しいレーザー光源を対象としており、全体で11のプロジェクトがあり、各プロジェクトの研究開発費は平均で300万ユーロである。

中国では、National Key R&D Program“Additive manufacturing and laser manufacturing”(総額18億中国元、2016～2021年)が行われている。本プロジェクトでは、マクロスケールのAM、およびマクロ、ミクロ、マイクロスケールのレーザー加工に関し、基礎研究、応用研究、装置開発を展開している。本プロジェクトのテーマには、超短パルスレーザー加工とそのメカニズム解明も含まれる。

(5) 科学技術的課題

将来の“ものづくり”を見据えたうえで、デジタルツインは重要なテーマであり、デジタル・マニュファクチャリング技術であるAMとの連携は極めて重要であるが、それを実現するための基礎技術・データが不足している。なかでもモニタリング技術に関しては、粉末床や造形体におけるその場観察での欠陥検出技術、高精度・高速処理可能な画像処理技術、これに伴うフィードバック技術の開発、さらにはAIを利用した欠陥予測システムの開発などが重要な課題である。一方、シミュレーションに関しては、粉体レベルにおけるミクロ溶解凝固シミュレーション、組織予測シミュレーションおよび熱変形予測シミュレーションの開発を体系的に開発すること、およびシミュレーションに使用する材料物性値の取得が大きな課題である。

超短パルスレーザー加工では、現状ピコ秒レーザーが用いられることが多いが、今後はさらにパルス幅の短い

フェムト秒レーザに移行していくと思われる。フェムト秒レーザ加工の産業応用には、発振器の高信頼性、高安定性、高出力化と、フォトンコストの低減とともに、加工効率や品質の向上を実現する光学系や加工ステージを含めたシステムの開発が必要である。

(6) その他の課題

AMのための設計技術者の育成とこの分野の研究・開発者が不足しており、人材育成が世界的に喫緊の課題となっている。とりわけ、金属AMにおいては、3D-CAD技術だけでなく、トポロジー最適化のような新しい設計技術、溶融・凝固現象を取り扱うのに要する材料学の知識や計測評価技術といった幅広い素養が必要となることから、実習を伴った教育が必須で、わが国独自の人材育成プログラムを開発することが必須である。

一方、レーザ加工分野でも若い人材の育成は急務である。もっとも大きな問題は、日本人学生が博士課程に進学しないことであり、多くの大学では、外国籍の博士課程の学生の割合が増えている。米国も同様の状況である。このような状況が続けば、本分野におけるわが国の科学技術力の低下は避けられない。これを打破するためには、日本人博士課程学生への経済的支援だけでなく、学位取得後安定したポジションに着任できるシステムの構築が求められる。

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↗	TRAFAMやNEDO、SIPプロジェクトなどにより、溶融凝固現象の解析やシミュレーション技術の開発など、学理解明にもつづいた積層造形・レーザ加工条件に関する基礎研究が実施され、成果が出始めている。また、SIPによりAMのためのCPSやMIに関するプロジェクトも開始された。フェムト秒レーザ加工において、世界トップレベルの研究成果があがっている。SIPやQ-LEAPによりCPS型レーザ加工の実現が期待される。
	応用研究・開発	○	↗	TRAFAMプロジェクトにおいて、指向性エネルギー堆積による装置2機種と電子ビーム粉末床溶融結合の1機種が開発され上市にいたっている。また、新たに2社のメーカーが指向性エネルギー堆積による装置2機種の販売を開始した。純銅などのレーザ加工に優位性を有する青色半導体レーザによる装置開発が行われた。レーザ加工分野は順調な成長を示している。
米国	基礎研究	○	→	ローレンスリバモア、NISTなどの各国立研究所が、大学や企業との連携によってテストベンチを利用した溶融凝固現象の解明、計測評価技術の開発、シミュレーション技術の開発などを実施している。持続的な推進によって、多くの成果が出てきており、活性度が高い。
	応用研究・開発	○	→	国立研究所・大学・企業による新たな製品開発プロジェクトを実施し、大きな成果が継続的に出ている。また、GE AdditiveやVelo 3Dが新たな装置開発を実施するなど、多くの応用研究・開発が積極的に進められている。結合剤噴射、材料押出によるAM装置開発もHPやDesktop Metal、Markforgedなどにより積極的に進められている。一方レーザ加工は、ドイツや中国に比べると大きな遅れをとっている。軍事や核エネルギー用途のレーザピーニングは数少ない成功例の1つ。

欧州	基礎研究	○	↗	AMについては、大学やフ라운ホーファー研究所などの研究機関が着実に研究開発を行っているが、以前と比べて目新しい研究開発が少ない。一方、レーザと物質の相互作用に関する理論および実験による研究は活発化が予想される。3次元加工、表面ナノ構造化、ナノ材料創成、ビーム整形加工、薄膜形成など、多種多様な研究が展開されている。特にパーストモードの研究は欧州が中心。
	応用研究・開発	◎	↗	レーザ熱源のAM装置については、大型化・高速化のための装置開発や専用機械のための技術開発を着実に実施しており、金属AMの分野で世界をリード。また、ドイツで緑色レーザ利用の装置開発が行われるなど動きは活発である。BMW、シーメンスなどを中心としてIndustrie 4.0の実現に向け、着実に研究開発を実施。レーザ加工でも、Horizon 2020やPhotonikforschungなどのプログラムによる支援のもと、超短パルスレーザ加工、ビーム整形加工、AMの実用化が進められている。
中国	基礎研究	◎	↗	AM、レーザ加工分野ともに巨額の投資が行われている。大学並びに大学発ベンチャーを中心に装置が導入されるとともに、非常に多くの特許・論文発表が行われている。超短パルスレーザ加工に関しても、大学における基礎研究が活発化している。一方、この分野への政府からの財政支援が大きいのは、将来の発展において不安材料。
	応用研究・開発	◎	↗	粉末床溶融結合、指向性エネルギー堆積とも、AM装置開発が積極的に行われており、多くの企業が設立されている。BLTは世界最大級の粉末床溶融結合装置開発を進めている。航空宇宙分野に加えて、大学に金型に特化した研究拠点も設置されている。また、AM用の粉末メーカーが非常に多い。中国産の安価な発振器や光学素子をもとに、レーザ加工産業も成長著しい。
韓国	基礎研究	△	↗	一部フレキシブルエレクトロニクスへの応用に関して良い成果がみられるものの、その他に顕著な研究成果はみられない。
	応用研究・開発	○	↗	Samsung、LG、Hyundaiなどを中心に、エレクトロニクス・オプトエレクトロニクスや自動車製造分野において、レーザ加工は不可欠な技術となっている。特に超短パルスレーザ加工の実用化には力を入れている。

(註1) フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

(註2) 現状 ※日本の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価

◎：特に顕著な活動・成果が見えている

○：顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド ※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

- ・ バイオ材料（ナノテク・材料分野 2.2.1）
- ・ ナノ・オペランド計測技術（ナノテク・材料分野 2.6.3）
- ・ 物質・材料シミュレーション（ナノテク・材料分野 2.6.4）

参考・引用文献

- 1) 一般財団法人日本規格協会 & 技術研究組合次世代3D積層造形技術総合開発機構 (原案作成) : JIS B 9441 : 2020 付加製造 (AM) — 用語及び基本的概念, 日本規格協会, 2020.
- 2) 国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 技術戦略研究センター : 金属積層造形プロセス分野の技術戦略策定に向けて, 技術戦略研究センターレポート TSC Foresight Vol.32, 2019.
- 3) R. Berger : Additive manufacturing : A game changer for the manufacturing industry?, 2013.
- 4) R. Berger : Focus Advancements in metal 3D printing : Beyond powder bed – Additive manufacturing on the brink of industrialization, 2018.
- 5) A.I. Aguilar-Morales, S. Alamri, A.F. Lasagni, “Micro-fabrication of high aspect ratio periodic structures on stainless steel by picosecond direct laser interference patterning”, *J. Mater. Process Technol.* 252, (2018) : 313-321. doi : 10.1016/j.jmatprotec.2017.09.039
- 6) D. Zhang, B. Ranjan, T. Tanaka, and K. Sugioka, “Carbonized Hybrid Micro/Nanostructured Metasurfaces Produced by Femtosecond Laser Ablation in Organic Solvents for Biomimetic Antireflective Surfaces”, *ACS Appl. Nano Mater.* 3, no. 2 (2020) : 1855-1871. doi : 10.1021/acsanm.9b02520
- 7) Z. Yao, L. Jiang, X. Li, A. Wang, Z. Wang, M. Li, and Y. Lu, “Non-diffraction-length, tunable, Bessel-like beams generation by spatially shaping a femtosecond laser beam for high-aspect-ratio micro-hole drilling”, *Opt. Express* 26, no. 17 (2018) : 21960-21968. doi : 10.1364/OE.26.021960
- 8) C. Kerse et al., “Ablation-cooled material removal with ultrafast bursts of pulses”, *Nature* 537, (2016) : 84-89. doi : 10.1038/nature18619
- 9) Y. Hu et al., “4D Printing : Botanical - Inspired 4D Printing of Hydrogel at the Microscale” *Adv. Funct. Mater.* 30, no. 4 (2020) : 2070026. doi : 10.1002/adfm.202070026
- 10) R. R. Gattass and E. Mazur, “Femtosecond laser micromachining in transparent materials” *Nat. Photonics* 2 (2008) : 219-225. doi : 10.1038/nphoton.2008.47
- 11) L.V. Keldysh, “Ionization in the field of a strong electromagnetic wave”, *Soviet Physics JETP* 20, no. 5 (1965) : 1307-1314.
- 12) I.S. Anisimov, L.B. Kapeliovich, and L.T. Perel'man, “Electron emission from metal surface exposed to ultrashort laser pulses”, *Soviet Physics JETP* 39, no. 2 (1973) : 375-377.
- 13) B. Rethfeld, “Unified Model for the Free-Electron Avalanche in Laser-Irradiated Dielectrics”, *Phys. Rev. Lett.* 92, no. 18 (2004) : 187401-1 – 187401-4. DOI : 10.1103/PhysRevLett.92.187401
- 14) S. Ono, “Thermalization in simple metals : Role of electron-phonon and phonon-phonon scattering”, *Phys. Rev. B* 97, no. 5 (2018) : 054310. doi : 10.1103/PhysRevB.97.054310
- 15) C. Wu and L.V. Zhigilei, “Microscopic mechanisms of laser spallation and ablation of metal targets from large-scale molecular dynamics simulations”, *Appl. Phys. A* 114, no.114 (2014) : 11-32. doi : 10.1007/s00339-013-8086-4
- 16) M. Noda, S.A. Sato, Y. Hirokawa et al., “SALMON : Scalable Ab-initio Light-Matter simulator for Optics and Nanoscience”, *Comput. Phys. Commun.* 235 (2019) : 356-365. doi : 10.1016/j.cpc.2018.09.018