

平成 28 年度 公益財団法人 溶接接合工学会 第 27 回セミナー
～3次元造形(3DP、RP、AM)の最前線～

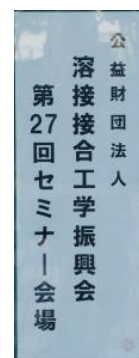
日時； 平成 28 年 10 月 18 日(火) 13:00~19:30

場所； 日本精工(株)3階ホール A

主催； 公益財団法人 溶接接合工学会

共催； 公益財団法人 国民工業振興会

後援； 一般社団法人溶接学会、一般社団法人日本溶接協会
公益社団法人日本技術士会



開会挨拶
司会

東京大学名誉教授
大阪大学接合科学研究所 准教授

野本敏治氏
桐原聡秀氏



野本敏治氏 東大名譽教授



桐原聡秀氏
大阪大学接合科学研究所 准教授



野本先生の開会挨拶

開催主旨説明

(株)神戸製鋼所

清水弘之氏

セミナー開会にあたり、本セミナー開催の狙いを説明された。3次元造形については、2012年に米国でベストセラーとなったクリス・アンダーソン著「MAKERS」や、2013.2.13(火)に米国のオバマ大統領がワシントンで行った一般教書演説の中で3Dプリンターに言及し、3つの製造業ハブを立ち上げて積層造形に焦点を当てると話したことから、国内外で関心が高まっている。3次元造形技術は、1980年に名古屋市工業研究所の児玉英雄氏によって発明された光硬化性樹脂に紫外線を照射して造形する技術に始まり、その後、米国において実用化された技術であり、航空機産業他で代表される高付加価値、特殊、多品種、少量生産の金属部品の実生産も始まっている。



現在、樹脂等の造形技術は、熱溶解積層法(FDM)の基本特許の一部が終了し一般利用ができるようになり、更に、選択的レーザー焼結法(SLS)の特許の一部も終了し、金属粉末を用いた安価な装置も市販され始めようとしている。

本セミナーでは、3次元造形の歴史を振り返り、樹脂から金属、更に傾斜材料への広がり、国内・外の技術動向、特に経済産業省のTRAFAM（技術研究組合次世代3D積層造形技術総合開発機構）の活動状況の現状紹介後、レーザー、電子ビーム、超音波及びアークをエネルギー源とした3次元造形について事例を挙げての解説、及び今後の課題と発展性について各講師から報告を戴くとの趣旨説明が行われた。

(第1部) 3次元造形技術の発展と国際動向

1.3 次元造形の歴史

大阪大学接合科学研究所

桐原聡秀氏

グラフィックス技術を用いてバーチャルに設計した3次元構造に数値演算を施して2次元断面の集合体に変換したデータを基に薄い断面を加工しながら積層することで複雑な構造体を製造する発想は、ラピッド・プロトタイプングと呼ばれ、電気製品の試作品の高速成型や流体力学用モデル作成などに用いられている。



3Dプリンター技術は、グラフィックで表現された立体構造を精密かつ高速に樹脂モデルへ変換できることから、工業分野のみならず、医療や教育などの様々な領域において急速に導入が進められている。断面パターンを次々に積層し接合することで複雑な立体モデルを得る方式であるため、従来の型を用いる成型法では実現し得ない複雑に入り組んだ構造体も実現できるのが魅力である。

樹脂粉末を部分的に熔融し凝固させるレーザープリント方式や加熱されたノズルから溶融した樹脂を吐出するインクジェット方式などが相次いで考案されている。複数色の樹脂素材を用いてモデルの成型と着色を同時に実現することも可能となっており、寸法的な精度

のみならず視覚的な正確さも兼ね備えた新しいシステムが比較的安価に多数市販されている。

積層造形技術も目覚ましい発展を遂げており、実用的な金属やセラミックス部材の成型も十分可能になってきた。これは材料素材を順次付加して立体構造を形成する手法のため、アディティブ・マニュファクチュアリングと呼ばれている。金属やセラミックスの粉体にレーザを照射し部分的な焼結または熔融凝固を連続的に繰り返しながら精密成型を実現する「直接的な手法」をはじめ、液体樹脂に金属やセラミックス粉体を分散しレーザ走査による連続硬化や細孔ノズルからの吐出により前駆体を成型した後に脱脂及び焼結する「段階的な手法」が実施されている。

様々な造形システムが考案される中で、最も重要なことは、ユーザー自身が何を作ろうかと明確に発想し、最適となる造形手法を選択することで、更に溶接・接合分野においては、関連するプロセスの実践にとどまらず、「どのように材料界面が形成され溶接接合が達成されているのか」などの理解を深めることが重要である。

2. Additive Manufacturing の 鋳造技術への応用と砂型用高速積層造形装置の開発 産業技術総合研究所 岡根利光氏

砂型造形用 3D プリンター技術について、次世代の鋳造用鋳型を造形するための積層造形装置、それに用いる材料開発並びに鋳造プロセスの開発を目指して、経済産業省において「超精密三次元造形システム技術開発プロジェクト」が平成 25 年 7 月に開始された。積層装置メーカー、素材メーカー、鋳造メーカー、ユーザー企業、大学、公設試験研究機関がコンソーシアムを構築し、平成 26 年 4 月には、技術研究組合次世代 3D 積層造形技術総合開発機構 (TRAFAM) が発足、量産に応えられる生産性、鋳造メーカーが導入できる低価格のシステムを目標に、次の課題について開発を進めている。



1) **積層造形技術の高速化** 複雑形状高性能部材の数千個/月程度の量産適用を目指して、オリジナルの装置開発を行う。造形速度の 10 倍高速化(10 万 cc/h)を目標とする。

2) **耐熱積層鋳型による高融点金属鋳造の実現** 上記高速鋳造装置に対応した高性能鋳型材料を目指してバインダ及び材料開発を行う。耐熱性向上による高融点金属鋳造の実現や向きバインダ適用による環境対応化を目標とする。

3) **局所的冷却性能制御技術の開発** 傾斜構造鋳型の実現など、積層造形物の機能化を目指して複数種類の材料の複層化技術開発を行う。指向性凝固の実現により欠陥低減に伴う鋳造品の品質向上、高信頼性、生産性向上、歩留まり向上に伴う溶解プロセスの省エネ化、CO₂ 排出削減等の効果実現を目指す。

開発では造形速度が速い、装置大型化が可能、サポートが不要という特徴から、バイン

ダージェット法が採用され、付随した材料開発が行われ、試作型の製作だけでなく、量産用鋳型への活用を想定して開発が進められている。

講演では、自動車部品の製造用鋳型による製品例、発電用鋳造部品への応用例、積層造形による 3D 砂型開発例、次世代 3D 積層造形技術総合開発機構 (TRAFAM) での実施体制の詳細を説明され、3D プリンターの今後の展開についても解説された。

3. レーザービーム積層造形の基礎的検討

近畿大学 3D 造形技術研究センター 京極秀樹氏

高品質の造形体を作成するために重要であるレーザービーム積層造形における溶融・凝固現象の検討、最適造形条件の検討、造形条件による造形体の特性の違いなどの基礎的事項について講演された。

レーザ照射時の溶融・凝固現象解明のために、高速度カメラとサーモビューワーを備えた設備により調査し、造形条件の最適化を図っている。金属積層造形では、最適な造形条件の設定が重要で、適切な条件でない場合には、未溶融・融合不良、空隙・ポロシティ、亀裂、残留応力、表面粗さ不良等が発生するので、造形条件の最適化が重要である。基本的には、レーザ出力と走査速度が重要な因子で、その指標としてエネルギー密度がよく使用される。(エネルギー密度(E ; J/mm³)=レーザパワー(W)/走査ピッチ(mm)・積層ピッチ(mm)・走査速度(mm/sec)) また、インコネル 718 のプロセスマップの作成例が示され、最適範囲が求められている。



造形体の特性評価については、引張試験では、造形方向を変化させた試験片の作成が規定されており、ASTM 規格では、通常、造形面に対して、0°、45°、90° の試験片の作成が求められている。また、航空宇宙関連分野では、造形体の疲労強度、クリープ強度、破壊靱性などの検討も必要である。さらに、重要部品については、マイクロ X 線 CT などによる品質保証も必要である。

積層造形における代表的なアルミニウム合金(Al-10Si-0.4Mg)の造形体の組織と応力-ひずみ曲線を示され、また、Ti-6Al-4V、Al-10Si-0.4Mg 及び Inconel 718 の造形体及び熱処理材の機械的性質についても説明された。

4. 金属積層造形技術の最新動向と将来展望

東北大学金属材料研究所 千葉晶彦氏

金属積層造形技術は、製造部品の 3 次元 CAD データにより金型を使用しないでデザインの制約なしに造形ができるネットシェイピング技術で、同時に金属合金部品の高強度化にとって必須の金属組織制御が可能な加工プロセスである。電子ビーム・レーザービーム等の熱源のエネルギー密度、走査速度、走査間隔などの条件や走査パターンなどを熱流動解

析や凝固学的手法に基づいて最適化することで、これまで複雑な冶金学的なプロセス、例えば、熱間鍛造加工でしかなしえなかった組織微細化や偏析除去などの組織制御が可能である。また、単結晶の金属部品製造プロセスとしての機能があることも最近明らかになっている。

本講演では、電子ビーム積層造形技術に見いだされる“組織制御機能”に着目して、既存の金属加工技術との違い、金属積層造形技術の“革新性”を概説された。



金属積層造形は、従来の大量に熔融金属を製造して一度に大型の鋳塊を得る従来のプロセスとは異なり、局所領域の熔融凝固現象を高精度に制御して積み上げる鋳造技術の一種である。熔融池に発生する欠陥や凝固の際の微細結晶構造までをも制御して、各種の素形材製品や機械部品を自由な形状デザインにネットシェイプで生産する新規な加工プロセスとして進化させることが可能である。

電子ビーム積層造形の熔融プロセスでは、パウダーベッド層の熔融とパウダーベッドの直下の既熔融凝固層の再熔融プロセスが同時に起こることが最大の特徴で、残留応力の発生が少なく、造形中の変形や反りの発生、内部亀裂の発生がない。本法は、形状付与と同時に組織制御もできる新たな革新的な金属加工プロセスとして、発展の可能性を有している。

講演では、人工膝関節、航空宇宙分野での適用例を説明され、電子ビーム積層造形プロセスにおける革新性、展望、10年後の製造業のサプライチェーンの変化等について、詳細に説明された。

(第2部)各種熱源からみた3次元造形技術

5.アーク溶接による造形の試み～アーク放電を用いた熔融金属積層による迅速な高強度3次元造形～

東京農工大学 笹原弘之氏

アーク放電によりワイヤ金属を熔融・凝固させる技術により、熔融金属を造形物の輪郭に沿って積み重ねていくワイヤ+アーク放電技術による金属材料のアクティブ・マニファクチュアリングについて詳細に講演された。



アーク溶接により熔融・固化・積層する技術は、熱源が単純かつ低廉で、エネルギー効率も高い。溶接ワイヤは、ワイヤ送給装置から連続的に送給されて溶着金属を形成し、適正な溶接条件を採用することにより健全な溶接金属が得られる。溶接のままの外観は、凹凸が見られるが、表面を機械加工すれば欠陥や層間の境界などの見られない溶接部が得られる。

適用例として、アルミ合金の造形例、中空のタービンブレード造形例、マグネシウム合

金の造形例、軟鋼材のリブを有するシェル構造例、ドーム形状例、エルボ管形状の造形例を示され、積層部の強度、造形物の外観への積層温度の影響、積層部の金属組織、積層方向と強度の関係、積層中の造形物温度分布、造形物の残留応力分布、仕上げ加工における変形等について詳細に説明された後、2種類の金属材料を使い分けて造形した例(造形物表面は Inconel 600、内部は SUS304L)を説明され、外部の Inconel 600 では高耐熱・耐食性、内部の SUS304L では材料コスト低減を図り、内部構造のリブ構造により軽量化・高強度化した例を解説された。

6.超音波接合を利用した金属積層法

東北大学 藤井啓道氏

固相接合技術を利用したユニークな金属成形プロセス、「超音波積層造形法(UAM ; Ultrasonic Additive Manufacturing)」が米国で開発された。その技術は、超音波積層造形法(UAM)と呼ばれ、超音波接合を利用して金属箔材を積層して、3次元の金属部材を直接成型する画期的な金属成形技術である。



本プロセスは、変形抵抗の小さい Al 合金、Cu 合金等には容易に適用可能であるため、ラピッドプロトタイピング、金属皮膜、材料の埋め込み等において幅広く応用されることが期待されている。金属材料の超音波接合では、ホーンと呼ばれる共鳴体を介して、

20KHz の超音波振動を被接合材に伝達することにより、接合界面において微視的変形や摩擦熱を生じさせることで接合が達成される。超音波接合におけるホーンをソノトロードと呼ばれる超音波振動子を備えた金属ローラーに置き換え、厚さ 100~200 μ m 程度の金属テープのシーム接合を繰り返して積層することにより UAM プロセスを実現し、3次元 CAD 等で作成した設計図に基づき金属部材が成型される。UAM 装置は、9KW まで高出力化した装置が主流となっており、現在 1.5m³ の立方体が 1 時間程度で製作可能となっている。

講演では、超音波積層造形法の内容、装置と製品例、これまでの研究内容、UAM プロセスの界面現象、熱サイクル、接合界面近傍における軟化現象、接合界面近傍における塑性流動、接合界面での酸化皮膜、接合メカニズム等について解説された。

今後の展開としては、既存の技術では不可能であった複雑な形状の金属製品を低環境負荷・低コストで製造することが可能であり、電子産業、自動車産業をはじめとする多くの工業分野において技術革新がもたらされると期待される。

7.光造形法による機能的な幾何学構造の作成 大阪大学接合科学研究所 桐原聡秀氏

講演者の研究グループでは、液体樹脂に金属やセラミックス粒子を分散させてペースト素材を調剤し、導電体誘電体などの複雑構造を自在造形する新しい造形方法として確立している。講演では、レーザ描画ならびにパターン露光方式の光造形システムを活用した一

連の研究成果から、電磁波回析格子、医療用人工骨や固体電解質電極を開発した事例を紹介された。

レーザ描画方式の光造形では、まず 3D 構造をコンピュータ・グラフィックスで設計し、スライス処理により 2D 断面の集合体に変換して造形用データとし、光造形樹脂に紫外線を照射することで重合して固体へと変化させる。ステージ上に第 1 層を形成した後、ステージを 1 段下げて第 2 層を形成すると同時に第 1 層と接合させ、このような積層工程を繰り返して高分子材料で造形することが可能である。



パターン露光方式の光造形では、粉体粒子を分散した樹脂ペーストを素材として、ガラス基板上に吐出し、機械制御のナイフエッジで薄く平滑に塗布する。樹脂液面にマイクロパターンを紫外線露光して 2D 硬化層を形成し、積層工程を繰り返すことで、複合材料の 3D 構造を作成する。

講演では、これらのプロセスの詳細な例及び将来展望についても詳細に説明された。

(第 3 部) 3次元造形技術の実用例

8.欧米における AM 技術の市場動向と実用例 愛知産業(株) 金安 力氏

愛知産業(株)は、80 年にわたる溶接関連技術、最近では 5 軸マシニングセンターなどの工作機械ビジネスに加え、「ものづくり」に必要な情報とノウハウを提案してきた技術商社で、現在、注目される技術として、金属 3D 積層技術があげられる。



講演の冒頭で、3D 関係の最近の話題として、9/7 に公表された米国 GE 社による SLM 社、アーキャム社の買収情報を説明された。GE 社では、AM 技術でものづくりを変える確信を得ており、自社用途で約 1000 台が必要としている。金属 AM 装置の市場予測としては 2015 年には最大 950 台、2025 年には 6,500 台の需要が見込んでいる。

金属積層造形 AM の種類(実用化レベル)について説明され、熱源として、レーザ、電子ビーム、アークがあり、愛知産業で取り扱っている種類、メーカーとの対応例が示された。愛知産業は、独国トルンプ社の製品導入に始まり、英国 LPW 社、独国 SLM 社、米国 SCIAKY 社と販売元の Efest 社との間に日本総代理店契約を締結している。

同社で取り扱っている独国 SLM 社製 3D 金属積層造形機の特徴、英国 LPW 社の金属粉末の概要、航空宇宙分野、航空機分野、自動車分野の市場動向、世界の 3D 産業用プリンターの実績、金属用 3D プリンターの出荷台数、市場動向を説明され、また、英国 LPW 社から供給される金属パウダーの特徴と重要性を解説された。最後に、金属造形に関する勉強会の例が紹介された。

9.国内における 3次元造形技術の実用事例

3次元造形(3DP,RP,AM0)の最前線

(株)コイワイ

小岩井修二氏

講演の冒頭に、同社で実用されている 3D 積層砂型装置(5 台)として、レーザ焼結形式(1 種 2 台)(砂種 ; レジンコーテッド)と、インクジェットプリント形式(2 種 3 台)(砂種 ; フラン自硬性タイプ)を紹介された。

現在、保有している 3D プリンターは、電子ビーム方式(2 台)とレーザービーム方式(2 台)が稼働しており、3D データがあれば直接最終製品形状を造形できる特徴がある。同社では、国内では早い段階から金属造形装置を導入して、受託加工事業を展開しており、多数の造形製品を製造するとともに、多くのノウハウを蓄積している。

講演では、使用する金属粉末、造形物の表面の状態、金属組織、材料強度、受注品の適用分野、国内での製作事例等について説明された後、3D プリンターのメリット、デメリットについて説明された。3D プリンターのメリットとしては、型などの準備が不要で、3D データがあればすぐに造形が可能であること、少量生産でも型を使用しないので、経済的に割が合うこと、複雑な形状の加工でも加工時間が増加しないこと、従来加工法(鋳造、鍛造、切削)の適用が困難な材料の造形が可能であることを挙げられた。また、デメリットとしては、生産性が低いこと、品質保証方法が確立していないことを挙げられている。



10.アーク溶接金属 3D プリンタによる造形例について

武藤工業(株) 村田英和氏

アーク溶接による造形を、東京農業大学との共同研究により開発しており、その内容を解説された。

アーク溶接方式(MIG/MAG)による溶接装置(MA5000-S1)を開発しており、その詳細および造形製品についてその仕様、特徴、応用分野、技術のポイント、今後の開発の方向について詳細に解説された。

現在の造形サイズは、500mmx500mmx500mm で、造形速度は通常、100~200cc/h で、軟鋼、ステンレス鋼、金型材(SKD61)、インコネル、チタン、アルミニウム、マグネシウム等が可能であり、その造形物の表面粗さは約 500 μ m (軟鋼造形時) とされ、自動水冷システムを装備しており、データ入力方式は STL とされる。

本装置の特徴は、高出力で高速造形が可能、バルク材と同程度の高強度、市販の溶接ワイヤが使用可能、既存部品に不可造形が可能で、マグネシウム等の可燃性材料にも適用できるとされる。また、本設備の応用分野としては、試作部品、金型の補修、改造、治具、小ロット鋳物部品の代替品、特殊金属の少ロット部品等に应用できるとしている。講演で



は、装置の技術ポイント、今後の開発方向を紹介され、大型化、5軸制御機、プロセスの洗練とソフトウェア化があげられた。さらに本装置で作成した数多くにサンプルを紹介された。

質疑応答

桐原准教授から、アクティブ・マニュファクチャリングの分類がスライドで示されたが、質疑応答は、時間の都合上、懇親会の席上で個別に行われることになった。

アクティブマニュファクチャリング分類表を次に示す。

	A 分類	B プロセス	C 素材	D 設備	E 原理	F 用途	G 造形
1	エネルギー供給方式	粉末積層造形	金属粉末	レーザー, 電子ビーム	熔融凝固	金型, 高温部材, 生体材料	直接
2		光造形	セラミックス粉末 液体樹脂	レーザー	接着	機能性複合材料	
3				レーザー加熱炉	接着焼結	電子デバイス, 生体材料	段階
4	マテリアル供給方式	肉盛溶接 溶射・コールドスプレー	金属ワイヤ セラミックス粉末	レーザー, アーク プラズマ, 高圧ガス	肉盛	各種コーティング皮膜	直接
5		インクジェット造形 ダイレクトライティング	熱可塑性樹脂	ディスペンサ	接着	工業用・医療用モデル	
6			金属粉末 有機溶媒			電子デバイス, 電子配線	
7			セラミックス粉末 有機溶媒			生体材料	
8				ディスペンサ 加熱炉	接着 焼結	機能性構造体	

閉会挨拶

東京大学名誉教授

野本敏治氏





熱心な聴講者

懇親会



司会 吉武進也氏
 (公益社) 日本技術士会
 参与
 (公益財) 溶接接合工学振興会
 専務理事

司会 南二三吉氏
 大阪大学接合科学研究所
 副所長 教授
 (一般社) 溶接学会 会長
 (公益財) 溶接接合工学振興会
 常務理事



開会挨拶

南先生のご挨拶



始めのことば

豊田政男氏

大阪大学名誉教授

大阪大学 男女協働推進センター

特任教授

国立研究開発法人 科学技術振興機構

産業連携アドバイザー

公益財団法人溶接接合工学振興会 理事



乾杯

水沼渉氏

一般社団法人日本溶接協会 専務理事
公益財団法人国民工業振興会 評議員

会食・懇談
中締め挨拶



青山和浩氏

東京大学大学院 工学系研究科 教授
公益財団法人溶接接合工学振興会 理事