AM (Additive Manufacturing) 技術の動向と国産3Dプリンター

早野 誠治

(株)アспект (〒206-0802 東京都稲城市東長沼3104-1-101)

The Market Trends of Additive Manufacturing and Japanese Powder Bed Fusion Apparatus

Seiji HAYANO

Aspect Inc., 3104-1-101 Higashi-Naganuma, Inagi, Tokyo 206-0802

(Received July 29, 2014)

The paper reviews technology developments and market trends surrounding Additive Manufacturing (AM, also known as 3D Printing), which has received much interest and attention in the past year from variety of audiences both industrial users and non-industrial users. The paper will also explain the development history and characteristics of RaFaEl, an original Japanese powder bed fusion system developed by Aspect, Inc. Major focus of development was to improve productivity from Aspect's previous powder bed fusion systems by two times.

Key Words: Laser, AM (Additive Manufacturing), 3D Printer

1. はじめに

1980年の小玉 秀男氏による特許出願から始まった Additive Manufacturing (AM, 3Dプリンター, 付加製造) 技術は, 人類の加工技術としての第三番目の加工法として発明された. 第一の加工法である除去加工がマイナス加工, 第二の加工法である成形加工を变形加工というのであれば, AM技術はプラス加工と言い換えることができるだろう.

日本国内では光造形法や積層造形法と呼ばれていた AM技術は, 欧米ではRapid Prototypingと呼ばれていた. しかし, 2009年1月にフィラデルフィアで開催された ASTM国際会議に於いて, 当該技術の呼称はAdditive Manufacturing (AM) 技術に統一された. そして, AM技術の定義もプラス加工法を用いてコンピュータ上のモデルから立体を作るプロセスであることが規定された. また, その後に開催された会議で, AM技術は以下の7つの分類に分けられることも規定された.

- 液槽光重合: Vat Photo-polymerization
槽の中の光硬化性樹脂をUVレーザー等で選択的に硬化することで付加する方法
- シート積層造形法: Sheet Lamination
紙などのシート材料を積層して切削する方法
- 結合剤噴射: Binder Jetting
槽の中の粉末材料に糊を選択的にインクジェットで塗布することで付加積層する方法
- 材料押出: Material Extrusion

熔融させた材料を押出ノズルから選択的に付加堆積させる方法

- 材料噴射: Material Jetting
液化させた材料をインクジェットで選択的に付加堆積させる方法
- 粉末床熔融結合: Powder Bed Fusion
槽の中の粉末材料をレーザーや電子ビームで選択的に焼結・熔融させ付加積層する方法
- 指向性エネルギー堆積: Directed Energy Deposition
粉末材料をレーザーで熔融させながら選択的に付加堆積させる方法

米国オバマ大統領の2013年の「3Dプリンターによるモノづくり大国復権宣言」, またニール・カーシェンフェルド氏の「Fab」(ものづくり革命)やクリス・アンダーソンの「Makers」が出版されたことが, 3Dプリンターの知名度を上げることになった. 更に, マスコミも当該技術を3Dプリンターとして報道したことで, AM技術は3Dプリンターとして広く認識されることになったが, 3DプリンターはAM技術の単なる愛称である. しかし, 3Dプリンターを取って定義するのであれば, 結合剤噴射法や材料押出法を用いた個人向け普及版AM装置のことを指している.

尚, 米国での3Dプリンターによる銃製造の報道や日本国内での銃製造事件により, だれでも簡単に銃が作れるような間違ったイメージが植え付けられたように思う. しかし, ものづくりは簡単なものではなく, また日本では銃の製造や所持は違法行為であることを再認識す

るべきである。そして、銃の製造や著作権の侵害等のAM装置の不正使用が、新しいものづくり装置の普及や正当な応用開発を妨げる行為であることを訴えたい。

2. AM技術の動向

1995年以降の世界レベルでのAM業界の大きな潮流は、5万ドル以下の低価格装置を市場に投入することだった。2000年頃から低価格装置であるStratasys社のGenisysやZ社のZ402が市場に投入された。それ以降もEnvisionTec社やDWS社が次々と低価格装置をデビューさせた。そして、2009年にStratasys社の材料押出法の特許が終了した以降は、50万円を切る個人向け3Dプリンターが数多く市場に投入された。

一方、欧州では2000年頃からAM装置で最終製品を製造しようと粉末床溶融結合技術の研究がFraunhofer研究所を中心に進められた。その結果、欧州を中心に入れ歯やクラウンの製造や宝飾品の製造が盛んに行われるようになった。更に、ジェットエンジンの金属部品製造への応用研究開発も進み、将来はジェットエンジン部品の50%がAM技術を用いて作られるだろうと言われている。現在、欧州企業7社が粉末床溶融結合装置を発売している。また、指向性エネルギー堆積技術も実用化段階に入っており、注目が集まっている。

更に、粉末床溶融結合技術に使用可能なポリアリルエーテルケトン(PAEK)系として知られるポリエーテルエーテルケトン(PEEK)やポリエーテルケトン(PEKK)と言われるスーパーエンブラ材料の粉末が手に入れやすくなり、これ等材料や金属材料で小ロットの最終製品やスベアパーツを直接製造しようとする研究が進んでいる。その研究活動の一つに、Fig. 1のDirectSpareがあった。2012年にDirectSpareが組織され、MIMや切削加工で製造される金属部品をAM技術で製造し、スベアパーツとして使用しようとする研究であった。しかし、DirectSpareの活動自体が破綻・崩壊したそうである。しかし、プロジェクト自体は意味のあるものだったと思う。もし、AM技術で製造された部品がスベアパーツとして利用できるのであれば、金型やスベアパーツの保管

Fig. 1 Direct Spare Project.

Fig. 2 NAMII's Nickname and Mark.

が必要なくなり、コストの大幅な削減をもたらすことは明らかであるからだ。

米国での動向と言えば、米国内で3Dプリンターバブルが発生したことを背景として、Stratasys社と3D Systems社の2社が積極的にM&Aを行い、統合化と寡占化が進みつつある。Stratasys社は、Objet社やSolidScape社、そしてMakerBot社を吸収合併した。3D Systems社は、Z社やPhenix Systems社を吸収し、AM技術の多様化をM&Aにより実現しようとしている。

また、AM技術に関する研究機関NAMII(National Additive Manufacturing Innovation Institute)が設立され、積極的に3Dプリンターの実用化への道を構築しようとしていることも大きな動向として挙げられる。尚、NAMIIは米国内の同等名称の組織と区別するためにFig. 2に示される新たな愛称「America Makes」とマークが付与された。

米国でのAM技術動向の更なる注目点は、主要な米国特許が失効し始めたことであろう。Stratasys社の材料噴射法の基本特許ともいえるノズル構造に関する特許が2009年に失効したことで、個人向けAM装置(3Dプリンター)を開発するベンチャー企業がたくさん誕生している。

この様なベンチャー企業は、中国、台湾、シンガポール、インドでも登場している。しかし、装置の品質は高いとは言えず、数年後には3Dプリンターの大半はごみ箱行きとなっているかもしれない。

また、3D Systems社の液槽光重合法の重要な特許やテキサス大学の粉末床溶融結合法の基本特許が、2014年2月に失効した。もちろん、周辺特許が未だ有効であるため、クローン装置を米国で製造したり、販売したりできるわけではないが、市場への参入障壁であった特許の失効が米国内外での競合他社の登場を促すことは間違いなく、今後の展開から目が離せない。

さて、AM技術の発祥の地である日本は、欧米に比べAM技術の多様化と応用開発に遅れを取るようになった

- Metal 3D Printer Project - \$37 million**
- Powder Bed Fusion + Electric Beam
 - Powder Bed Fusion + Laser Beam
 - Directed Energy Deposition
 - Binder Jetting for Sand Mold

Fig. 3 METI's Big Project on AM technology.

が、Fig. 3の経済産業省の大型プロジェクトが、2014年からスタートした。本プロジェクトにより遅れを取り戻すだけでなく、AM技術で世界を再びリードできるレベルになるには、「AM装置+ソフトウェア+材料+アプリケーション」一体の開発が求められていると思う。単に研究開発しましたと言うことにならない様に願うのみである。

3. AM技術の市場

まず、1988～2012年の世界におけるAM装置の販売台数を以下のFig. 4に示す。

1991年までは底に張り付いたような横ばい傾向であったが、1992年から黎明期を脱し、市場が立ち上がり始めたのが見て取れる。2003年からは本格的な普及期に入り、一段と普及速度が加速し始めるが、これは各種廉価版装置の登場によるところが大きい。また、2008年から2009年はリーマンショックによる経済の落ち込みの影響が色濃く出ているのがはっきり見て取れるが、あくまでも一時期のものであり販売台数の伸びが堅調であることが分かる。

さて、Terry Wohlers氏の販売台数の統計データから7種類のAM装置を評価すると、結合剤噴射装置と材料押出装置、材料噴射装置の3種類のAM装置の存在感がその他に比べ圧倒的に高い。

これは、他のAM装置がレーザーやガルバノメーターミラー等の高額部品を使用しているのに対し、インクジェット等の比較的安価なデバイスを使用していることから装置の販売価格を安く抑えることができ価格競争力を持てたことが理由である。

しかしながら、このことが直ちに液槽光重合装置が衰退していることを意味しているわけではない。液槽光重合装置の用途は透明な樹脂で模型が造形できることであり、面粗度が他の手法に比較して勝っていることから、将来においてもその用途が失われることはない。この為、ハイエンド液槽光重合装置は、減少傾向を示してはいないが、増加傾向にもない。EnvisionTec社やDWS社の500万円程度の廉価版液槽光重合装置がデビューし、ハイエンド液槽光重合装置の市場を侵食しているからである。液槽光重合装置でさえも、高額部品を使用してい

Fig. 4 Industrial AM system unit sales.

ない安価な装置がシェアを拡大してきているのである。

3.1 AMの市場予測

2013年12月にTerry Wohlers氏のシンポジウムでFig. 5のAM装置の市場規模予測が発表された。

Terry Wohlers氏の言うところのAMの市場とは、装置販売、材料販売、保守そして受託造形サービスの売上を合計したものである。このグラフから2013年が2,500億円、2014年は3,000億円程度の市場規模と言うことである。2013年のStratasys社と3D Systems社等のAMメーカーの売上が大凡700～800億円であるのに対し、サービスビューローの売上は1,500億円と約2倍である。つまり、AM事業は装置を販売するメーカーよりもそれを使って付加価値を付与するサービスビューローの方が収益と利益を出せるという構造なのである。

一方、AM装置を用いることで発生したアプリケーションである補聴器ビジネスや歯列矯正ビジネスは、Terry Wohlers氏の表には含まれていない。これらのアプリケーション・ビジネスを含めると2016年に2.7兆円規模の産業になるのではないかとコンサルタント会社のマッキンゼーが予測している。

3.2 個人向けAM装置(3Dプリンター)

個人向けAM装置(3Dプリンター)の発生は、2009年にStratasys社の創業者であるScott Crumpのノズルに関する特許が失効したことによる。特許の失効を待って、材料押出装置のキットが販売されるようになる。このようなキットを購入して3Dプリンターを組み立てることができるのだが、個人向け3Dプリンターの製品化を図る企業が登場してきた。

Fig. 6に個人向けAM装置(3Dプリンター)の販売台数を示す。尚、Terry Wohlers氏のいう個人向けAM装置とは、\$5,000以下の装置のことである。

この新たなベンチャービジネスの旗手として登場したのが、MakerBot社である。MakerBot社のReplicatorが市場に投入されると、3年で約15,000台を販売し、フォード自動車も各エンジニアに一台ずつ採用すると決定した。そのすぐ後にMakerBot社は、Stratasys社により買収されてしまう。しかし、個人向けAM装置を新たなビジ

Fig. 5 Future size of AM industry.

Fig. 6 Personal 3D printers unit sales.

ネスチャンスと捉え、名乗りを上げるベンチャー企業は枚挙にいとまがない。現在全世界では50社を超えているのではないだろうか。

一方、老舗の3D Systems社もBits From Bytes社やCube社を傘下に収め、個人向けAM装置ビジネスに参入している。

3.3 企業向けAM装置

高精度・高機能モデルが造形できるEDENやCONNEXの様な材料噴射装置は、光硬化性樹脂にフィラーを混入することで物性を改良したり、2種類の材料の混合比率を塗布する量で物性を変更できるようにしたりすることで高機能化が図られた。その結果、企業向けAM装置の中では、材料噴射装置が主流である。しかし、材料が光硬化性樹脂である以上、造形後にも重合反応が発生し経時変化することから、試作品の領域を超えて使用するには限界がある。

一方、直接製品を造形する企業向けAM装置である粉末床溶融結合装置は、エンジニアリング・プラスチックや金属を材料とできることから最終製品を造形できるラピッド・マニファクチャリング装置として最も注目されている技術である。まだ、製品価格や造形品の面粗度と物性、そして後処理に課題が残っており最終製品として使用できる分野や製品に限りがある。しかし、同装置でスーパーエンジニアリング・プラスチックを材料として使用できるようになると、本格的な普及期に入るとだろう。また、金属粉末を材料とする粉末床溶融結合技術は、2010年代に入って目覚ましい進歩を遂げている。使用できる金属材料もチタンからステンレス、コバルトクロム、アルミと一気に増えている。更に、指向性エネルギー堆積装置も金属部品造形ができることから、ラピッド・マニファクチャリング装置として注目されている。

最近、粉末床溶融結合加工と切削加工を行う松浦機械のLUMEXや指向性エネルギー堆積加工と切削加工を組み合わせた複合装置にも注目が集まっている。粉末床溶融結合加工や指向性エネルギー堆積加工で精度が出せないところを切削加工と組み合わせることで高精度な金属部品を造形しようとする装置は、今後企業向けAM装置市場の主役となるのだろうか。

4. AM技術の応用

AM技術の応用事例を振り返ってみよう。1990年代は、真空注型のマスターモデルとしての用途である。液槽光重合法の造形品は精度・面粗度に優れていたことから、シリコンでの型取りに適していたのである。しかし、光硬化性樹脂では、物性・価格の面から製品として直接使用するには限界があった。

その後は、試作用途に絞られ開発されたAM装置が人気を博したことにより、最終製品の造形研究はなおざりにされてきた。しかし、一部の企業や研究所では地道な基礎研究が行われ、医療への応用開発や小ロット製品への応用開発が継続された。既存のものづくりを代替えするのではなく、何かに使えないだろうかと考え、使えるように研究開発する真摯な姿勢を継続したということである。

人体や医療に関する応用開発を行うことで大きなビジネスとなった事例を挙げてみる。シーメンスはAM技術をカスタムメイドの補聴器製造に応用し、欧州で1,000万人のユーザーを持つ大きな市場を形成した。カスタムメイド補聴器は、高付加価値製品であり、1個の価格が30~40万円もするのである。

また、米国Align Technology社は、Invisalignと呼ばれる歯列矯正用マウスピースの製造にAM技術を応用し、1,700万人を超えるユーザーを得ている。歯列矯正は日本では100～120万円もするのであるから、非常に高価ではあるが、透明なマウスピースによる歯列矯正は、他人に矯正していることを気づかれにくい点が高付加価値なのである。

このように、今までには存在しなかった用途や付加価値を生み出すことで、市場を形成する時代が到来したと言えよう。

5. 粉末床熔融結合裝置RaFaEl

粉末床溶融結合装置は、エンジニアリング・プラスチックから金属の粉末を材料として使用できることから最終製品製造装置として期待されてきた。Fig. 7に粉末

Fig. 7 Apparatus of Powder Bed Fusion Technology.

Fig. 8 RaFaEl 300.

床溶融結合装置概要図を示す。

当社アспектは、2003年に東京大学生産技術研究所新野研究室の研究支援や東京都助成金を得て粉末床溶融結合装置SEMplíce 550の開発を開始し、2006年末から出荷を開始した。その後、2008～2010年に文部科学省の都市エリア産学官連携促進事業(横浜内陸部エリア)で横浜国立大学との共同研究により中型サイズのSEMplíce 300や小型サイズのSEMplíce 150が開発された。

RaFaElは、SEMplíceの第二世代装置として開発された。RaFaElシリーズの最大の特徴はSEMplíceシリーズの約2倍の生産性を実現したことである。しかも、従来よりもビーム径を約15～20%絞り込むことにより、高精細加工性をも改善し、世界一の粉末床溶融結合装置となった。これにより、SEMplíceとRaFaElシリーズの日本国内での販売台数が50台を超えた。Fig. 8にRaFaEl 300の外観を示す。

5.1 生産性の向上

RaFaElシリーズの生産性向上のための改良点は、次の通りである。

① 高出力レーザーとデジタル・ガルバノメーターミラーの採用

RaFaElでは、SEMplíceに比べ高出力レーザーと高走査速度のデジタル・ガルバノメーターミラーが採用されている。これにより、レーザーパワーは約2倍、レーザー走査の最高速度は1.5倍になった。

② レーザー走査露光方式の改良

RaFaElのレーザー走査露光の特徴は、塗り潰し露光にジグザグに走査する方式を採用している。レーザー走査露光では、走査ベクトルごとに加速・減速を繰り返しており、走査ベクトル数を削減することで造形時間を短縮できる。

従来のラスタ走査方式では、隣り合う線の走査露光を実施するためにジャンプ走査により移動しなければならなかった。そのため、露光走査⇒ジャンプ走査⇒露光

Fig. 9 RaFaEl-V150 & Build Part of AlSi10Mg.

走査⇒ジャンプ走査を繰り返しながら塗り潰し露光が実施されていた。そこで、ジグザグにレーザーを走査して塗り潰し露光を行う方式を採用することで、ジャンプ走査を排除でき、走査ベクトル数を約半減させ、走査露光時間を20～30%短縮することができた。

③ コアツヒーターの採用

従来のヒーターよりも波長の短いコアツヒーターを採用したことで、加熱速度を改善し、加熱時間を大幅に短縮した。

5.2 高精度化

RaFaElでは光学系の設計に改良を加えることにより、加工工具であるレーザービーム径を従来よりも約15～20%絞り抜き、微細加工性を高めた。

更に、RaFaElでは1,075 nm波長のファイバレーザーを搭載することも可能である。

5.3 最新の研究と開発

NEDOプロジェクトの「次世代レーザー加工技術研究」で、(独)産業技術総合研究所と真空下で溶融・焼結できる粉末床溶融結合装置RaFaEl-V150を共同開発し、Ti-Al6-V4粉末による造形実験を実施した。造形品は、テーブルに張り付けたり、サポートで支えたりすることなく造形し、99%を超える密度の造形サンプルを得た。現在当社では、粉末床溶融結合装置RaFaEl-V150/300を今年度中に上市すべく、量産機開発を実施している。

一方、当社ではAl粉末を用いた造形実験を実施している。Fig. 9に実験に用いたRaFaEl-V150の造形装置とAlSi10Mg造形品を示す。

6. 結 言

日本ではAM技術を製品に応用できる航空機、宇宙、武器等の小ロット産業は規模が小さく、自動車や家電、エレクトロニクス等の大量生産産業ではAM技術を試作以外には活用できなかった。これが、日本でのAM技術の多様化を阻害し、応用開発を停滞させた。しかし、世界では粉末床溶融結合装置や指向性エネルギー堆積装置に注目が集まっており、小ロット製品のラピッド・マニュファクチャリングを実現しようとする気運が高まっている。

粉末床溶融結合装置や指向性エネルギー堆積装置は高額なレーザーを採用するハイエンド装置群であり、技術

課題は造形精度と生産性にある。同装置群の高精度化と高出力化を考えると、ファイバレーザが採用される方向は間違いない。しかし、ビームプロファイルやCW化に関してAM装置向けに開発されたファイバレーザは存在しない。「AM装置+レーザ+材料」一体の開発が必要な時期が到来している。

参考文献

- 1) T. Wohlers: Wohlers Report 2013 (2013).
- 2) 丸谷 洋二, 早野 誠治: 解説 3Dプリンター(オプトロニクス社, 2014).

レーザーワード

AM技術(additive manufacturing technology)

コンピュータ上の三次元データを用い、付加加工で樹脂や金属の立体を製造するプロセスや技術を指す。一般的には3Dプリンターとも呼ばれ、日本では光造形法や積層造形法とも呼ばれていた技術である。AM技術は、次の7つの技術に分類される。

- 液槽光重合(Vat Photo-polymerization): 槽中の光硬化性樹脂をUVレーザ等で選択的に硬化付加する加工方法
- シート積層(Sheet Lamination): シート材料を積層して切削する加工法
- 結合剤噴射(Binder Jetting): 槽中の粉末材料に糊を選択的にインクジェットで塗布し固化する付加加工

法

- 材料押出(Material Extrusion): 溶融させた材料を押し出すノズルから選択的に堆積させる付加加工法
- 材料噴射(Material Jetting): 液体材料をインクジェットで選択的に堆積させる付加加工法
- 粉末床溶融結合(Powder Bed Fusion): 槽中の粉末材料をレーザや電子ビームで選択的に焼結・溶融させる付加加工法
- 指向性エネルギー堆積(Directed Energy Deposition): 粉末金属をレーザで溶融させながら選択的に堆積させる付加加工法 (早野 誠治)