

最近のレーザ積層造形技術の開発動向

工学部機械工学科 教授 京極 秀樹

1. はじめに⁽¹⁾

我が国の製造業においては、加工技術・金型製造技術に関して優れた技術を有しているものの、グローバル化の中で製品に対する厳しいコストダウンと短納期化、さらには高機能化への対応などの問題を抱えている。これらの問題を解決する有力な手段の一つとして、CADデータから直接試作品を迅速に作製できるラピッドプロトタイピング (RP: Rapid Prototyping) 技術の導入がある。その代表が1980年代に開発された光造形法で、CADデータに基づきレーザ光を走査して光硬化樹脂を硬化させて所望の試作品を製作する方法で、自動車や電気製品などの製品開発の試作段階において利用されている。しかし、RPとしては、紙積層法や熔融物堆積法 (FDM: Fused Deposition Modeling) などの技術が開発され、最近では大型のABS樹脂製自動車用ドアパネルなどの試作品の作製に利用されている。しかしながら、この方法では形状確認にとどまるため、実用的な樹脂粉末や金属粉末を利用した積層造形法が開発された。最初に実用機として開発されたのは、アメリカ・テキサス大学オースティン校で研究開発された選択的レーザ焼結 (SLS: Selective Laser Sintering) 技術を、当大学のベンチャー育成プログラムにより設立されたDTM社 (現在、3Dシステムズ社に合併) が1992年に製品化した装置である。その後、1995年にドイツ・EOS社が直接レーザ焼結法による装置を開発した。日本では、松浦機械・松下電工などのグループにより金属光造形複合加工機が開発された。しかし、これらの装置では、高速で高密度・高精度の金属製品を製作することは難しく、製品もブロンズ系、ステンレス鋼など特定の材質に限られていた。

最近、高性能なファイバーレーザの開発や粉末材料の開発などに伴い、高速で高密度・高精度の金属製品、とりわけこれまで難しいとされていたアルミニウムやチタン合金の製品や高硬度材料による金型などを製作できる装置の開発が、コンセプト・レーザ社やEOS社において行われ、ラピッドマニュファクチャリング (RM: Rapid Manufacturing) 技術、すなわち造形物をそのまま製品として利用できる技術として利用が拡大してきている。

このような中、2009年にASTMにおいてF42委員会が設置され、いわゆる除去加工に対して、積層を繰り返して付加していく加工という意味でアディティブマニュファクチャリング (AM: Additive Manufacturing) と呼ぶことが決定された⁽²⁾。現在、Test Methods, Processes, Materials, Design Executive, Terminologyの4つの小委員会も設置され、一部規格も制定されてきていることから、今後設計・製造分野での役割がますます大きくなると考えられる。

本稿では、最近のレーザ積層造形技術の開発動向について述べるとともに、著者らが文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業 (平成21年度～25年度) の研究プロジェクトの中でも実施しているこれまでの研究成果と今後の展開について紹介する。

2. レーザ積層造形の現状と課題

レーザ積層造形法の代表である選択的レーザ焼結の方法を図1に示す。まず、製品を造形するコンテナに粉末をリコータにより均一に敷き、つぎにCADデータに基づきガルバノメーターミラーを通してレーザを照射し、照射部分のみを固化する。この操作を繰り返して積層することにより、三次元複雑形状品を製作する。これによれば、切削法をはじめとする他の加工法では不可能な製品（図2）を製作できる。また、多品種少量生産において重要なツールである金型（図3）を迅速かつ低コストで製作可能、人工骨など生体材料のテーラーメイドの製品の製作が可能などの特長を有する。

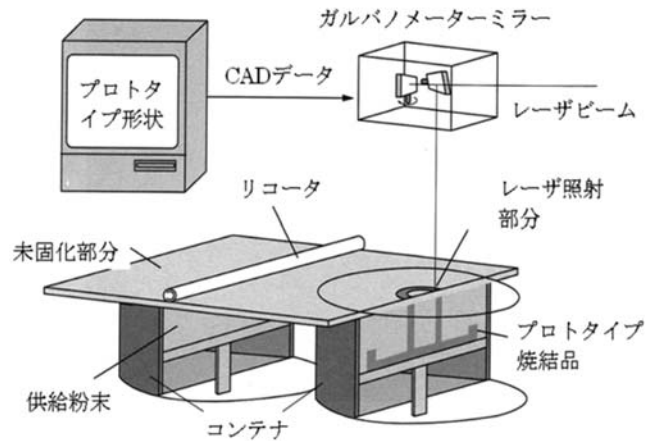


図1 選択的レーザ焼結法（Bourell 教授の好意による）

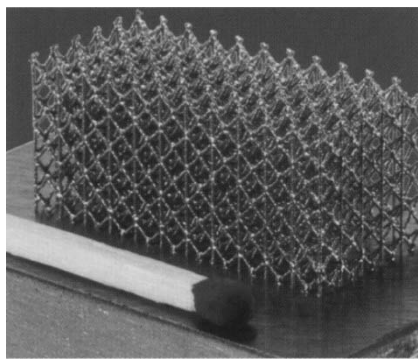


図2 アルミニウム製超軽量構造
（3D システムズ社ホームページ）



図3 射出成型金型（EOS ホームページ）

上述したように、高性能なファイバーレーザの開発や粉末材料の開発などに伴い、高速で高密度・高精度の金属製品やアルミニウムやチタン合金の製品を製作できる装置が2008年に各社から発表された⁽¹⁾。これらの新たに開発された装置の特長の一つは、高密度・高精度化を狙ってスポット径の小さいファイバーレーザを利用している点である。また、アルミニウムやチタン合金のレーザ焼結を可能とするためには酸素量の大幅な低減を図る必要があることから、これまでの装置と比べて造形領域を小さくし、密閉度の高いチャンバーを採用している点である。

金型については、図3に示すように本法による射出成型用金型への適用が行われているが、最近直接レーザ積層造形法によりM2粉末を用いて、硬さ55HRC以上の高硬度金型の作製などが可能となってきた⁽³⁾。今後は、精度等を含めた金型設計への適用が期待される。また、積層造形機能と切削加工機能の両方を搭載した金属光造形複合加工機装置による金型製作技術の開発が金型メーカーで実施されている。この開発では、冷却管を最

適配置できるなどのレーザ積層造形の特徴を生かした金型設計技術の開発が行われており、金型の高度化が図られてきている⁽⁴⁾。

レーザ積層造形品の精度については、金属材料ではないが、樹脂粉末を利用した高精度加工技術も可能となってきた。これは、レーザビーム径をファイバーレーザを用いることにより小さくするとともに、ナイロン粉末粒子を $20\mu\text{m}$ 程度にし、ランバート・ベールの法則に従ってレーザ吸収剤を添加することにより、最小肉厚 0.2mm を実現している⁽⁵⁾。

さらに材質についてみると、これまで実績のあるステンレス鋼については、ほぼ 100%の相対密度が得られると報告されるなど、ここ 10 年間のレーザ積層造形技術の進歩は目覚ましいものがある。これまで難しいとされていたチタンやアルミニウムの研究も実施されている。チタンについては、多くの研究がなされており、最近の研究では三浦ら⁽⁶⁾は生体材料への適用を試みているが、強度等については十分な結果は得られていない。また、Traini ら⁽⁷⁾は図 4 に示すような歯科用インプラントを EOS 社製の装置により作製している。このように、チタンについてもレーザ積層造形が可能となってきた。

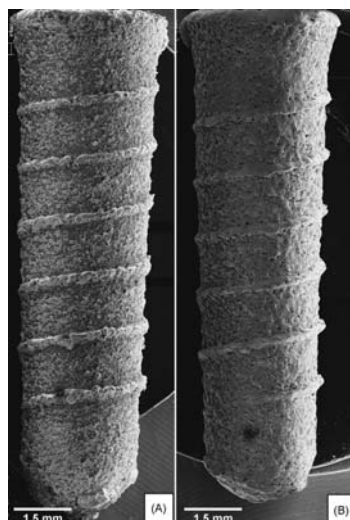


図 4 歯科用インプラント

アルミニウムのレーザ積層造形については、Sercombe ら^{(8),(9)}による樹脂コーティング粉末を用いた選択的レーザ積層造形による研究報告のみである。この方法では、樹脂部の焼結を行った後、 N_2 中で脱バインダするため、アルミニウム粉末表面が窒化され、これがスケルトン構造を作り溶浸中に形状を保つ役割を果たして、相対密度 95%の造形体が得られると報告されているが、健全な焼結体は得られていない。Taminger ら⁽¹⁰⁾と Mahale ら⁽¹¹⁾は、電子ビーム積層造形によるアルミニウム合金の積層造形を試みている。Mahale らの報告では、相対密度 90%以上の造形体を作製している。アルミニウムあるいはアルミニウム合金の直接レーザ積層造形については、著者らの報告^{(12),(13)}以外には、Olakanmi ら⁽¹⁴⁾が 200W の CO_2 レーザを利用した Al-12Si 粉末に関する報告を行っている。

このように、最近のこの分野における動きは目覚ましく、さらなる発展が期待される。これら研究動向の詳細は、レーザ積層造形に関するレビュー⁽¹⁵⁾などを参照されたい。

3. アルミニウム合金のレーザ積層造形技術開発

ここで紹介する内容は、経済産業省平成 18・19 年度地域新生コンソーシアム研究開発事業に応募・採択され「自動車用軽量化部材のラピッドプロセス技術の実用化開発」を実施し、レーザ積層造形装置の開発とともに、アルミニウム合金のレーザ積層造形技術の開発を行ったもので、その後補完研究を実施して私立大学戦略的研究基盤形成支援事業の研究プロジェクトに引き継いでいる内容である。本稿では、そのプロジェクトの成果の概要を紹介しておく。なお、詳細は「型技術」2010 年 8 月号⁽¹⁶⁾ならびに著者の報告^{(12),(13)}を参照願いたい。

本プロジェクトでは、「レーザ積層造形技術」を中核として自動車用を中心とした軽量・高機能部材を高速で製造できるシステムの構築を目的として、

- ① 軽量化部材の代表であるアルミニウム合金のレーザ積層造形技術の開発
- ② 軽量化部材用レーザ積層造形装置の設計・開発

の2つの課題を実施した。

本プロジェクトでは、真空チャンバーを用いた実験用レーザ積層造形装置ならびにレーザ積層造形装置を開発するとともに、開発した装置によりアルミニウム合金 Al-12Si 粉末を用いた積層造形品を作製するために、まず、レーザ出力、走査速度、走査ピッチ、走査パターン、積層ピッチの積層造形条件などを詳細に検討した。つぎに、得られた積層造形条件により、1/3 モデルの変速機部品試作品の作製を行った。

3.1 レーザ積層造形装置の設計・開発

本プロジェクトでは、最終的に表 1 に示す仕様のレーザ積層造形装置を開発した、造形室は高密閉構造とし、不活性ガスを導入できる構造とした。レーザには精度を向上させるために Yb ファイバーレーザ（最大出力：50W、波長：1090nm）を採用し、ガルバノメーターミラーを用いてレーザ照射を行う方式とした。積層造形にはブレード方式を採用し、中央部を 300×300 mm の造形部、両側を粉末供給部とした。開発した装置の外観を図 5 に示す。



図 5 開発したレーザ積層造形装置

表 1 レーザ積層造形装置の仕様

有効ワークエリア	X:300×Y:300×Z:400 mm
最小積層ピッチ	0.05 mm
造形室構造	高密閉構造
材料酸化防止方式	不活性ガスボンベ (Ar) より充填
粉末積層機構	ブレード方式
粉末材料供給方式	専用カートリッジ脱着方式
搭載レーザ	空冷式ファイバーレーザ 50W (SPI 社製)
レーザビーム走査	ガルバノミラー方式 (リニアトランスレータ付き)
機械制御装置	プログラマブルコントローラ
データ処理装置	デスクトップ PC DELL PRECISION 1707FP
アプリケーションソフトウェア	SEMware, SEMtool, WinMCLtest32
入力データ	STL フォーマット, GCX ファイル

3.2 実験方法

粉末には、平均粒径 60μm の Al-12Si(45～150μm)粉末とレーザ光吸収剤を用いた。粉末混合は、V 型混合機または遊星ボールミルで行った。装置内は酸化防止のため Ar 雰囲気とし、レーザ出力、走査速度、走査ピッチおよび積層ピッチを変化させて、実験を行った。

レーザ出力および走査速度の範囲は、レーザ出力：10～50 W、走査速度：5～20 mm/s とした。走査ピッチについては、0.1～0.3 mm の間で検討した。積層ピッチについては、0.1～0.4 mm の間で検討し、最適な積層造形条件を調査した。なお、積層造形体の造形状況については SEM を用いて観察した。

3.3 レーザ積層造形条件の検討

(1) レーザ出力と走査速度の関係ならびにレーザ吸収剤添加量の影響

レーザ積層造形を可能とするためには、まず、レーザ出力と走査速度の関係を明らかにする必要がある。この中で、滑らかな線状のトラックを作製する条件を見出すことにより、積層造形が可能となるため、まず基本となるレーザ出力と走査速度の関係を詳細に検討し、マップを作成した。なお、図中の数値はエネルギー密度 E (J/mm²) を次式により求めた値である。

$$E = \frac{P}{v \cdot d} \text{ [J/mm}^2\text{]}$$

ここで、 P : レーザ出力(W)、 v : 走査速度(mm/s)および d : レーザスポット径(mm)である。

レーザ吸収剤を添加しない場合には、図 6 の写真に示すような球状あるいは焼結・溶融しない状態となった。これは、アルミニウム粉末がレーザを反射して熱として吸収されにくいことと併せて、熱伝導率が高いためと考えられる。このため、レーザ吸収剤を添加して、レーザ出力と走査速度の関係を検討した。吸収剤添加量が少ない場合には、溶融部がほとんど繋がらない状況あるいは球状となるが、添加量を 0.5 mass% 以上添加すると、レーザ出力と走査速度の関係で線状の溶融体を作製できることがわかった。レーザ吸収剤添加量 2.0 % の例を図 6 に示す。これからわかるように、レーザ出力 30 W 以上、走査速度 15 mm/s 以下できれいに連続したトラックが作製できることがわかった。また、エネルギー密度 10 J/mm² 以上必要であることもわかった。

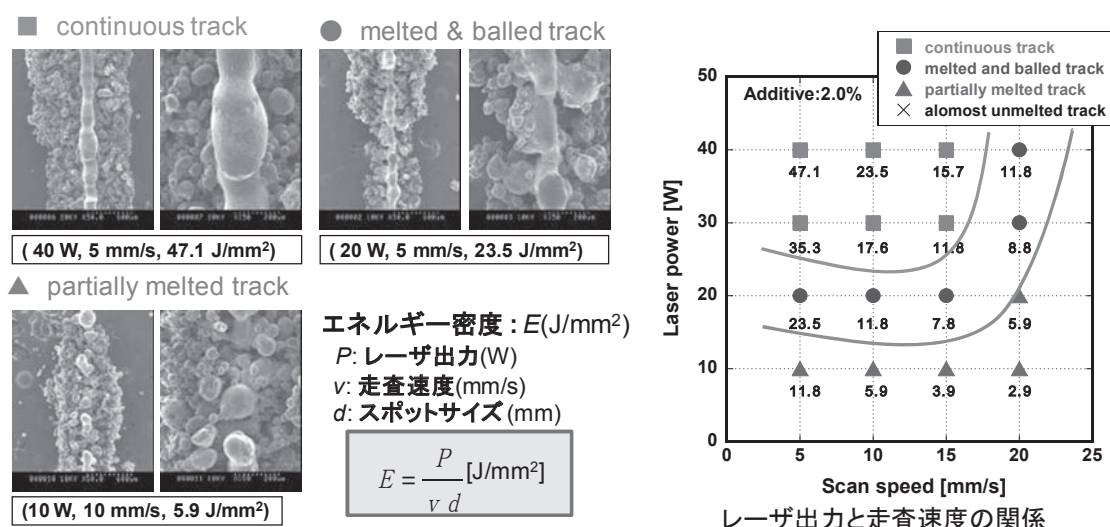


図 6 レーザ出力と走査速度の関係

(2) 走査ピッチの検討

つぎに、面を作製するために走査ピッチについて検討した。その例を図 7 に示す。走査ピッチについては、 $0.1\sim0.3\text{ mm}$ の間で検討し、その走査パターンは図 7 に示すとおりである。この結果、レーザビームのスポット径が 0.17 mm であることから、ほぼ $1/3$ オーバラップするピッチがよいことがわかった。これは、一般的に行われている値と同様である。

(3) 積層ピッチの検討

三次元製品製造のためには、積層ピッチの検討も重要で、 $0.1\sim0.4\text{ mm}$ の間で検討した。積層ピッチについては、試験片の段階では、 0.25 mm のピッチが最適であることがわかった。しかし、試作品の段階では、変形の問題等が出てきたため、さらに積層ピッチを小さくして、ほぼレーザビームスポット径にあたる 0.18 mm とした。これにより、ほぼ積層部分の積層間にも割れの出ない積層造形品を作製できた。

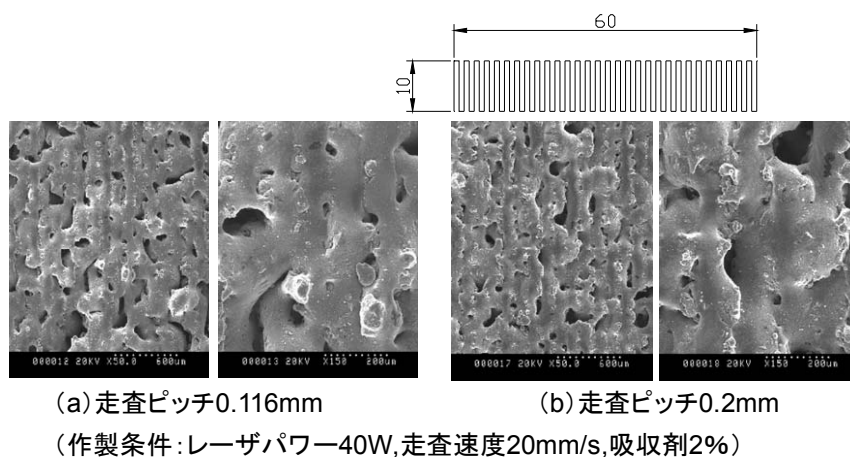


図 7 走査ピッチの影響

3.4 アルミニウム合金試作品の作製

上述した積層造形条件で、図 8 に示す $1/3$ モデル変速機部品を対象として試作を行った。積層造形においては、熱変形や粉末積層の際のずれの問題などが起きるため、これらについても検討を行った。

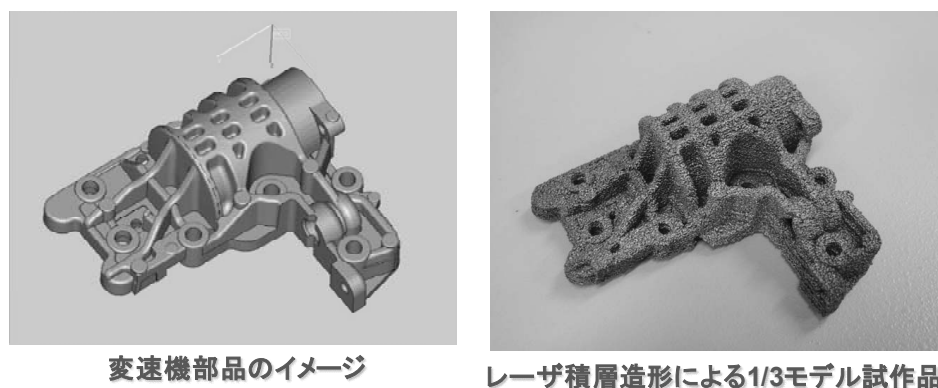


図 8 アルミニウム合金試作品

4. おわりに

本稿では、レーザ積層造形技術の研究動向について紹介するとともに、著者らのアルミニウム合金の積層造形に関する研究状況を紹介した。上述したように、ファイバーレーザの利用や粉末製造技術の進歩と相俟って、ここ数年で積層造形品の高密度化・高精度化、新材料への対応などレーザ積層造形技術の新たな展開がおこっている。また、テキサス大学オースティン校の Bourell 教授を中心にしたアメリカにおける本技術のロードマップ “Roadmap for Additive Manufacturing – Identifying the Future of Freeform Fabrication Process –”⁽¹⁷⁾の作成も行われ、図 9 のような構想も提案されており、アメリカにおける本技術に対する展開の意欲がうかがえる。

研究面においても、アメリカはもとより、ヨーロッパにおいても積極的に研究開発が行われている。これらは、これまで毎年テキサス大学オースティン校で開催され、すでに 21 回を数える SFF シンポジウムやヨーロッパで開催され始めたシンポジウムなどを通じて紹介されてきている。我が国では、これまで型技術協会による RP シンポジウムが開催されているが、本年 2 月には東京大学生産技術研究所において第 1 回 AM シンポジウムが開催され、最近の研究についての報告が行われた。このような取り組みを繰り返すことにより、我が国における研究開発と併せて本技術の導入も進むものと期待される。

本稿で紹介した研究プロジェクトにおいても、本地域における製造技術の高度化につながるように、金型のレーザ積層造形に関する研究開発を進めている。研究成果については、引き続き研究所報告を通じて紹介していきたいと考えている。

おわりに、本技術に関する多くの情報を提供頂いたテキサス大学オースティン校・Bourell 教授、東京大学生産技術研究所・新野俊樹准教授ならびに（株）アспект・萩原正氏に深謝の意を表する。

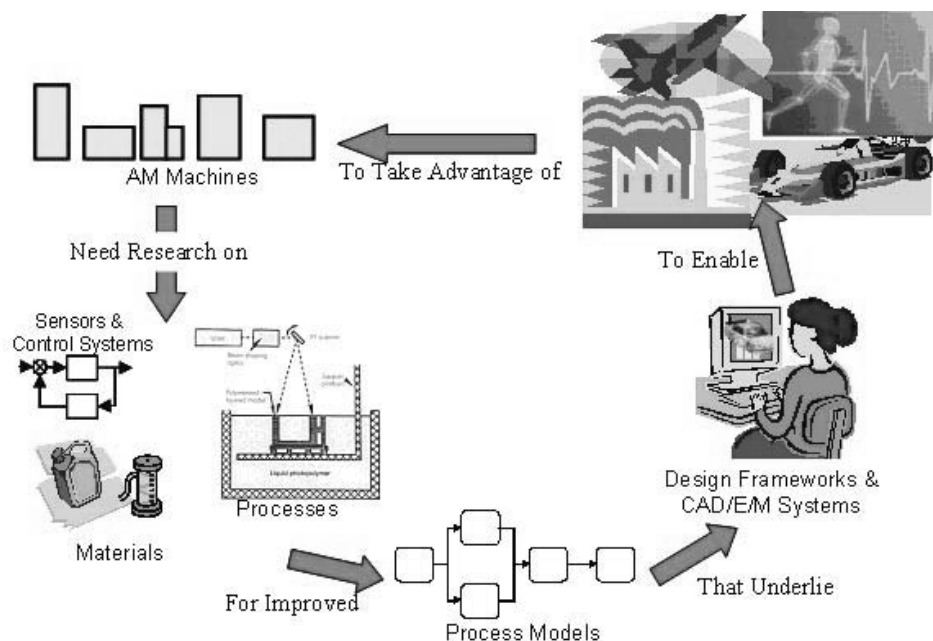


図 9 National Testbed Center Concept⁽¹⁷⁾

参考文献

- (1) 京極秀樹, “最近のレーザ積層造形技術の開発状況”, 日本機械学会誌, Vol.111, No.1081(2008), p.1002.
- (2) 新野俊樹, “積層造形技術の最新動向と期待”, 型技術, Vol.25, (2010), pp.18-22.
- (3) 橋爪康晃, “EOSINT/FORMIGA の特長と活用”, 型技術, Vol.25, (2010), pp.43-46.
- (4) <http://www.matsuura.co.jp>
- (5) 早野誠治, “粉末焼結積層造形装置「SEMplice」の高精細化研究”, 型技術, Vol.25, (2010), pp.38-42.
- (6) 三浦秀士, 他 6 名, “レーザによるチタン合金粉末積層造形技術の構築 (第 3 報)” 粉体および粉末冶金, Vol.55,(2008), pp.738-742.
- (7) Traini, T., Mangano, C., Sammons, R.L., Mangano, F., Macchi, A. and Piattelli, A., “Direct Laser Metal Sintering as a New Approach to Fabrication of an Isoelastic Functionally Graded Material for Manufacture of Porous Titanium Dental Implants”, Dental Materials, Vol.24, (2008), pp.1525-1533.
- (8) Sercombe, T. B. and Schaffer, G. B., “Rapid Manufacturing of Aluminum Components,” Science, Vol.301(5637), (2003), pp.1225-1227.
- (9) Sercombe, T. B. and Schaffer, G. B., “On the Role of Tin in the Infiltration of Aluminum by Aluminum for Rapid Prototyping Applications,” Scripta Materialia, Vol.51(9), (2004), pp. 905-908.
- (10) Taminger, K. M. B. and Hafley, R. A., “Characterization of 2219 Aluminum Produce by Electron Beam Freeform Fabrication,” Proceedings of Solid Freeform Fabrication Symposium 2002(CD-ROM), Austin, TX, (2002).
- (11) Mahale, T., Cormier, D., Harrysson, O. and Ervin, K., “Advances in Electron Beam Melting of Aluminum Alloy,” Proceedings of Solid Freeform Fabrication Symposium 2002(CD-ROM), Austin, TX, (2007).
- (12) Kyogoku, H., Hagiwara, M., Yoshida, T., Ikuta, A. and Y. Yasojima, “Direct Selective Laser Melting of Aluminum Alloy”, Proceedings of 2010 ISFA(CD-ROM), Tokyo, (2010)
- (13) Kyogoku, H., Hagiwara, M. and Shinno, T., “Freeform Fabrication of Aluminum Alloy Prototypes Using Laser Melting”, Proceedings of Solid Freeform Fabrication Symposium 2010(CD-ROM), Austin, TX, (2010).
- (14) Olakanmi, E.O., Cochrane, R.F. and Dalgarno, K.W., “Densification Mechanism and Microstructural Evolution in Selective Laser Sintering of Al-12Si Powders”, J. Materials Processing Technology, Vol.211, (2011), pp.113-121.
- (15) Kruth, J.-P., Levy, G., Klocke, F. and Childs, T.H.C., “Consolidation Phenomena in Laser and Powder-bed Based Layered Manufacturing”, Annals of the CIRP, Vol.56, (2007), 730-759.
- (16) 京極秀樹, “アルミニウム合金による積層造形”, 型技術, Vol.25, (2010), pp.23-27.
- (17) Bourell, D.L., Leu, M.C. and Rosen, D.W., “Roadmap for Additive Manufacturing – Identifying the Future of Freeform Fabrication Process –” (2009).