

工具鋼粉末のレーザ積層造形 (第2報)

Direct Laser Sintering of Tool Steel Powder

研究代表者 工学部ロボティクス学科*1 教授 京極 秀樹
Hideki Kyogoku
共同研究者 工学部機械工学科*2 准教授 生田 明彦
Akihiko Ikuta
工学部機械工学科*2 准教授 上森 武
Takeshi Uemori
工学部機械工学科*2 学生 山根 卓也
Takuya Yamane
(独) 理化学研究所 共同研究員*3 吉川 研一
Kenichi Yoshikawa
(独) 理化学研究所 主任研究員*3 大森 整
Hitoshi Omori

In this study, the fabrication conditions of tool steel by direct selective laser sintering were investigated using two kinds of $-45\ \mu\text{m}$ and $-105/+45\ \mu\text{m}$ SKD11 powders. The effect of powder size on the state of laser-scanned body was examined to fabricate a sound laser-scanned body of tool steel. Moreover, the measurement of a simple shaped product fabricated under the optimum condition was performed to determine whether it conforms to the design specification. The optimum laser power, scan speed, scan pitch, and layer thickness were obtained by experiments. As a result, a simple shaped product could be fabricated successfully under the optimum condition by using $-105/+45\ \mu\text{m}$ powder.

Keywords: Additive Manufacturing, Selective Laser Sintering, Tool Steel, Accuracy

1. はじめに

最近では、工具鋼や M2 粉末などのレーザ積層造形技術の開発が行われ、金型への適用に関する研究も行われてきており、射出成形用金型などへ適用されている⁽¹⁾。

前報⁽²⁾では、工具鋼 SKD11 粉末を対象としたレーザ積層造形について、添加剤の影響、粒径の影響およびその積層造形条件を系統的に検討した。その結果、レーザ出力と走査速度の関係を示すプロセスマップを作成し、連続した滑らかなトラックを作製できる条件を見出すことができた。また、粒径の違いによるレーザ積層造形条件を検討した結果、粒径 $45\ \mu\text{m}$ の粉末で最も連続した滑らかなトラックを作製でき、その範囲も広いことがわかった。このように、レーザ積層造形条件を詳細に検討することにより、工具鋼 SKD11 を対象とした基礎的レーザ積層造形条件を明らかにすることができた。

本報では、前報⁽²⁾に引き続いて、工具鋼粉末のレーザ積層造形技術の開発を目的として、粉末粒径の影響を中心に検討を行うとともに、三次元形状の試作品の作製を行った。まず、 $-45\ \mu\text{m}$ および $-105/+45\ \mu\text{m}$ SKD11 粉末の積層造形条件を検討した。この際、レーザ積層造形において重要なレーザ出力、走査速度、走査ピッチおよび積層ピッチの積層造形条件を詳細に検討し、最適な積層造形条件を調査した。つぎに、最適な積層造形条件により単純形状の三次元積層造形体を作製し、その形状測定を行い、変形状態についても調査した。

2. 実験方法

本研究では、粉末には $45\ \mu\text{m}$ および $-105/+45\ \mu\text{m}$ の粒径の異なる 2 種類のガスアトマイズ SKD11 粉末を用いた。図 1 に、両粉末の SEM 写真を示す。

積層造形は、前報⁽¹⁾と同様にレーザ積層造形装置（経済産業省地域新生コンソーシアム事業により開発）により行った。なお、本装置には、最大出力 50 W の Yb-ファイバーレーザが搭載されており、レーザスポット径はほぼ $170\ \mu\text{m}$ である。また、レーザ走査はガルバノメータミラー方式に依っている。装置内は酸化防止のため Ar

*原稿受付 2013 年 5 月 13 日

*1 〒739-2116 東広島市高屋うめの辺 1 番

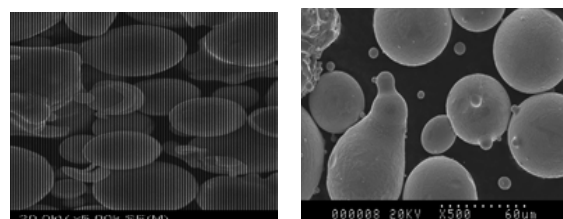
E-mail kyogoku@hiro.kindai.ac.jp

*2 〒739-2116 東広島市高屋うめの辺 1 番

*3 〒351-0106 埼玉県和光市広沢 2-1

雰囲気(酸素量:1%以下)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、それぞれレーザ出力:2~50 W、走査速度:2~50 mm/sとした。走査ピッチについては0.1~0.3 mm、積層ピッチについては0.4~0.7 mmの間で検討した。

積層造形体の造形状況についてはEDX付走査型電子顕微鏡(SEM/EDX, Hitachi S-4800)を用いて観察した。



(a) -45 μm (b) -105/+45 μm

図1 SKD11粉末のSEM写真

3. 実験結果および考察

3.1 粒径-45μm粉末のレーザ積層造形

前報²⁾においては、-45 μmのSKD11粉末を用いて、レーザ積層造形条件を検討したが、レーザ出力は12 Wまでの低出力の範囲であった。本報では50 Wまでの高出力の範囲についても検討した。

図2に-45 μmに粉末を用いた場合の代表的なトラックの例を示す。この図に示すように、トラックの形態はつぎの3つに分類される。

- (a) 連続した太い線状の形態(図2(a))
- (b) 連続した細い線状の形態(図2(b))
- (c) 線状とボール状が連続している形態(図2(c))

これらの形態をレーザ出力と走査速度の関係をマップとして示したのが図3である。図中に示した数値は、次式で求めたトラック表面の単位面積当たりのエネルギー密度 E_2 の値である。

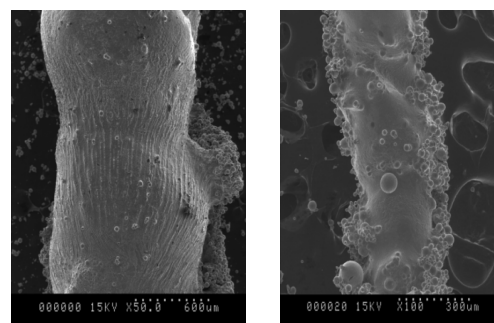
$$E_2 = P / (vd) \text{ [J/mm}^2\text{]} \quad (1)$$

ここで、 P はレーザ出力、 v は走査速度、 d はレーザスポット径170 μmである。

図3に示すレーザ出力と走査速度のマップからわかるように、連続したトラックが得られる条件は、ほぼ破線で示す領域レーザ出力5 W以上、走査速度8 mm/s以上、エネルギー密度約10 J/mm²以上の場合である。特に、実線で示す領域では、図3(b)に示すように、連続したほぼ滑らかなトラックが得られた。この領域におけるエネルギー密度は、ほぼ10~15 J/mm²である。それ以外の

条件では、連続した滑らかなトラックの形態を得ることができないことがわかった。また、レーザ出力10 W以下では、ほとんど焼結せず、連続したトラックを得ることはできなかった。

このように、プロセスマップを作製することにより、連続した滑らかなトラックが得られる条件を明らかにできた。

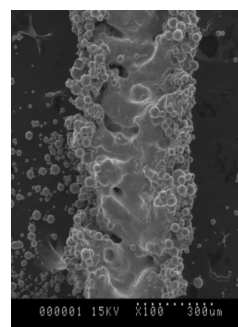


(a) 45 W, 2 mm/s

(132 J/mm²)

(b) 20 W, 10 mm/s

(14.7 J/mm²)



(c) 5 W, 2 mm/s

(14.7 J/mm²)

図2 -45μm粉末におけるトラックの形態

図4に、エネルギー密度とトラック幅の関係を示す。この図からわかるように、エネルギー密度とトラックの幅は全体的には指数関数的な変化を示しているが、エネルギー密度が小さい範囲ではトラック幅はほぼ直線的に変化している。前報²⁾においても、15 J/mm²程度まではほぼ直線関係を示しており、本報においてもほぼ同様の結果が得られた。このように、エネルギー密度により、トラック幅をある程度制御できることがわかる。これは、面作製において重要な知見である。それ以上のエネルギー密度では、トラック幅は飽和する傾向を示している。また、上述したように連続した滑らかなトラックは、エネルギー密度10~15 J/mm²で得られ、その幅は0.3~0.4 mmであることがわかる。

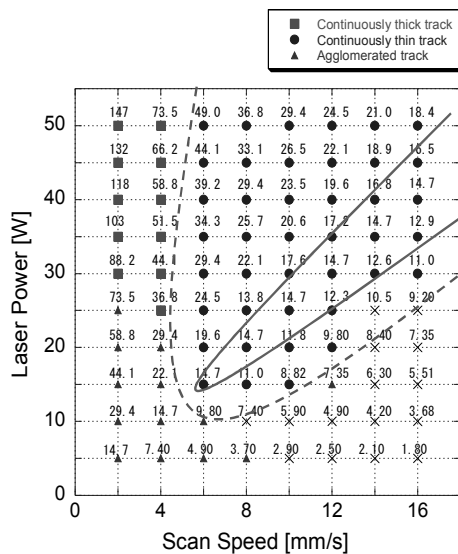


図3 -45 μm 粉末におけるレーザ出力と走査速度の関係

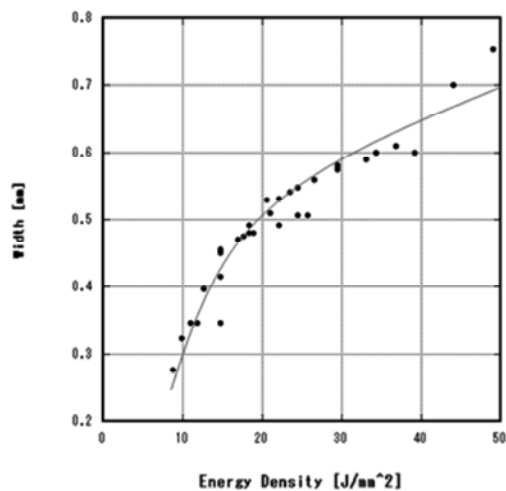
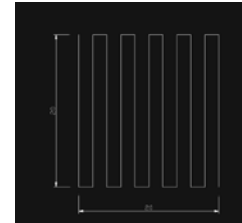


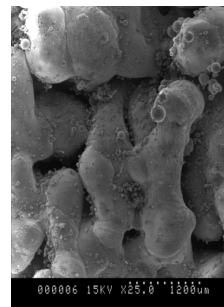
図4 -45 μm 粉末におけるエネルギー密度とトラック幅の関係

連続した滑らかなトラックが得られたレーザ出力と走査速度の範囲で、面の作製を行った。その走査パターンおよびレーザ出力 15 W、走査速度 10 mm/s での面の形態を図 5 に示す。この際には、図に示すようにトラック幅を考慮して、走査ピッチを 0.05 mm から 0.15 mm に変化させた。この図からわかるように、いずれの場合にも焼結はされているものの、空隙の多い凝集した面の状況となっている。このような面の状況については、Niu と Chang⁽³⁾ など他の研究においても報告されている。

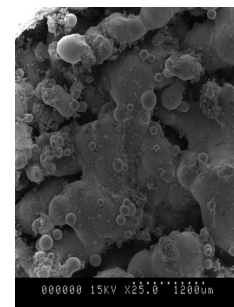
このように、前報のレーザ出力が低い場合と比べて、レーザ出力が高い場合には、トラック幅が広がるため、面の状況も凝集状になり易かったためと考えられる。



走査パターン



(a) 0.1 mm



(b) 0.2 mm

図5 -45 μm 粉末における面の形態
(レーザ出力 15 W、走査速度 10 mm/s)

3.2 粒径-105/+45 μm 粉末のレーザ積層造形

つぎに、粒径-105/+45 μm 粉末の場合の結果を述べる。

この場合には、まずレーザ出力 2~12 W、走査速度 2~12 mm/s の間で検討した。代表的なトラックの形態を図 6 に示す。また、これらの形態をレーザ出力と走査速度の関係として示したのが図 7 である。図中には、式(1)で求めたエネルギー密度 E_d の値を示している。

図 6 に示すように、粒径-105/+45 μm 粉末の場合には、-45 μm 粉末の場合とは異なり、図 6(a) に示すレーザ出力 2 W、走査速度 2 mm/s においては、溶融不良状態となっていることがわかる。これは、粒径の大きさに関係していると考えられる。これに対して、レーザ出力およびエネルギー密度とも高い、図 6(c) に示すレーザ出力 12 W、走査速度 2 mm/s においては、連続したトラックとなっていることがわかる。図 7 に示すように、レーザ出力 8 W 以上および走査速度 6 mm/s 以下で、エネルギー密度約 8 J/mm² 以上で連続したトラックを得ることができることがわかる。しかし、レーザ出力が低く、エネルギー密度も低いために、トラックの形態は焼結状況を残した形態となっている。

図 8 に、エネルギー密度とトラック幅の関係を示す。この図からわかるように、-45 μm 粉末の場合と同様にエ

エネルギー密度とトラックの幅は全体的には指数関数的な変化を示しているが、エネルギー密度は小さい範囲ではトラック幅はほぼ直線的に変化している。-45 μm 粉末の場合と同様に、15 J/mm^2 程度まではほぼ直線関係を示しており、エネルギー密度により、トラック幅をある程度制御できることがわかる。それ以上のエネルギー密度では、トラック幅は飽和する傾向を示している。トラックの幅は、粉末粒径が大きいために、-45 μm 粉末の場合よりもかなり狭く、エネルギー密度 30 J/mm^2 においても、0.35 mm 程度である。

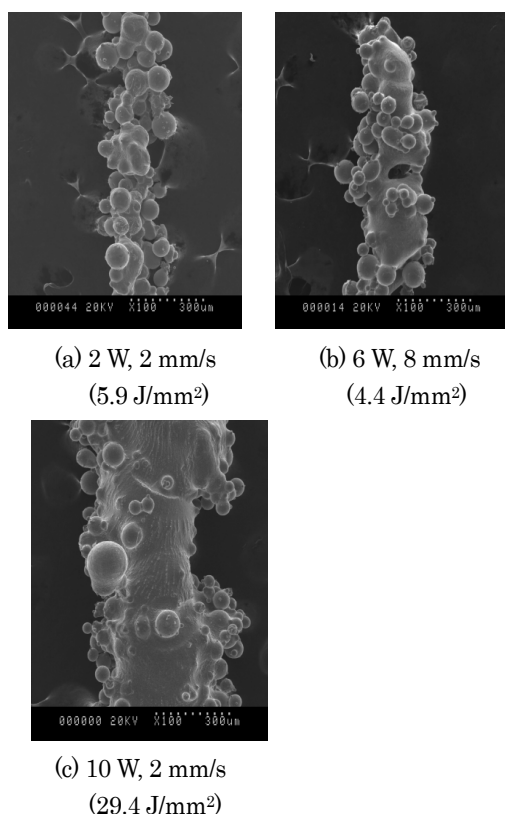


図 6 -105/+45 μm 粉末のトラックの形態

上述したように、連続した滑らかなトラックが得られる条件は、レーザ出力が高く、エネルギー密度が高い場合であることがわかった。このため、面の作製においては、レーザ出力 10~50 W および走査速度 15~50 mm/s の広い範囲を採用して行った。また、走査ピッチは、0.1 mm~0.3 mm の範囲で検討した。その例として、レーザ出力 20 W、走査速度 25 mm/s の面の状況を図 9 に示す。走査ピッチ 0.2 mm では、ほぼ滑らかな面の状況を呈しているのに対して、0.3 mm では空隙が多く、凝集状の面を呈していることがわかる。これは、本条件では、トラック幅がほぼ 0.2 mm でトラック同士がうまく接合し、

滑らかな面を呈したのに対して、0.3 mm ではトラックが離れすぎていたため、このような凝集状の面を呈したものと考えられる。なお、0.1 mm の場合には、逆にオーバーラップし過ぎて、凝集状を呈した。

このように、面作製のためのレーザ出力、走査速度および走査ピッチを明らかにすることができた。

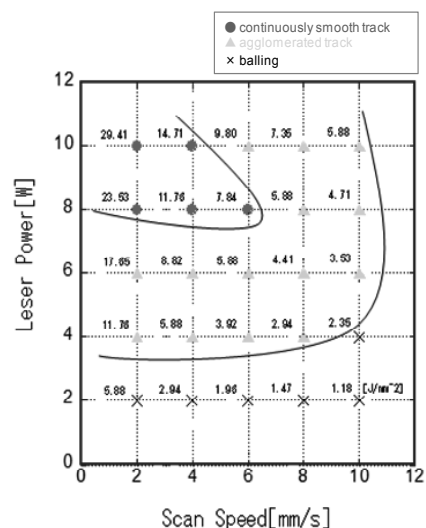


図 7 -105/+45 μm 粉末のレーザ出力と走査速度の関係

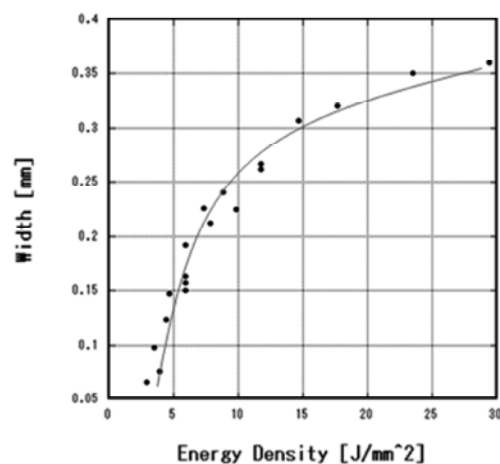
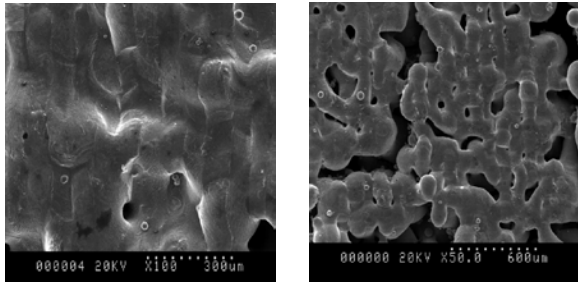


図 8 -105/+45 μm 粉末のエネルギー密度とトラック幅の関係

3.3 三次元レーザ積層造形品の試作

面作製による結果から、最も健全な面が焼結できる条件はレーザ出力 20 W、走査速度 25 mm/s、走査ピッチ 0.20 mm であった。この条件下で、図 10(a)に示す単純形状の三次元積層造形体の作製を行った。単純形状であ



(a) 走査ピッチ 0.2 mm (b) 走査ピッチ 0.3 mm

図9 -105/+45 μm 粉末による面の作製状況
(レーザー出力: 20 W, 走査速度: 25 mm/s)

るために、三次元的な収縮状況や、真直度などがわかりやすい試験片であり、積層造形体の形状測定を行い、変形状態についても調査した。

図10(a)に積層造形体のCAD図面を示す。積層造形において重要な因子は層と層の間隔である積層ピッチである。積層ピッチについては、0.4~0.7 mmの範囲で検討した。図10(b)に積層ピッチ0.7 mmの場合の結果を示す。積層ピッチが大きすぎて層同士が完全に接合できていなかったため、途中ではく離が起きて最終形状まで積層造形できなかった。このため、積層ピッチを0.5 mmとして積層造形した例を、図10(c)に示す。この場合には、図からもわかるように、はく離もなく積層造形を行うことができた。積層造形体の形状測定結果をみると、0.2 mm程度XY方向に広がっており、穴の深さが0.67 mm深くなっている。一般的に、金属粉末のレーザー積層造形においては、商用機による積層造形体の精度は100 μm 当たり ± 0.1 mm程度といわれており、若干精度が悪い。精度の確保については、今後の課題である。

また、三次元積層造形においては、Simchi⁽⁴⁾が提案している積層ピッチも考慮した、次式で示すトラックの単位体積当たりのエネルギー密度 E_3 で検討してみる。

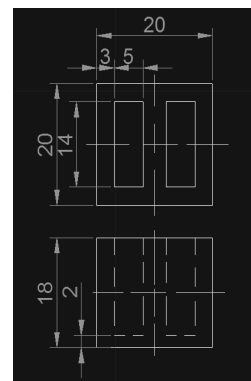
$$E_3 = P / (vwh) \text{ [J/mm}^3\text{]} \quad (2)$$

ここで、 P はレーザー出力、 v は走査速度、 w は走査ピッチ、 h は積層ピッチである。

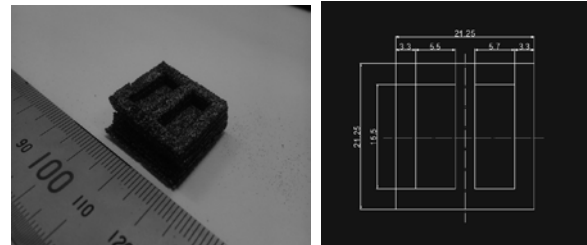
図10(c)に示した積層ピッチ0.5 mmの場合について、式(2)によりエネルギー密度 E_3 を計算すると、8.0 J/mm³である。Nakamoto ら⁽⁵⁾は、炭素量0.33~1.05 mass%の炭素鋼粉末を用いて、炭素量が焼結条件に及ぼす影響を詳細に検討している。その結果、高炭素鋼粉末においては、容易に相対密度100%に緻密化でき、エネルギー密度は溶融金属の濡れ性の向上のため炭素量増加とともに減少すると報告している。本研究で使用したSKD11粉

末の炭素量1.5%についてはデータが報告されていないが、それに最も近い炭素量1.04 mass%では、エネルギー密度は約300 J/mm³となっており、本研究における値はこれよりはるかに小さい。このように、単位体積当たりのエネルギー密度が小さいため、密度がかなり低くなったと考えられる。これは、本研究で使用している装置では、最大レーザー出力が50 Wと低いことと、これに伴う表面状況の影響より積層ピッチを小さくできなかったことによるためと考えられる。

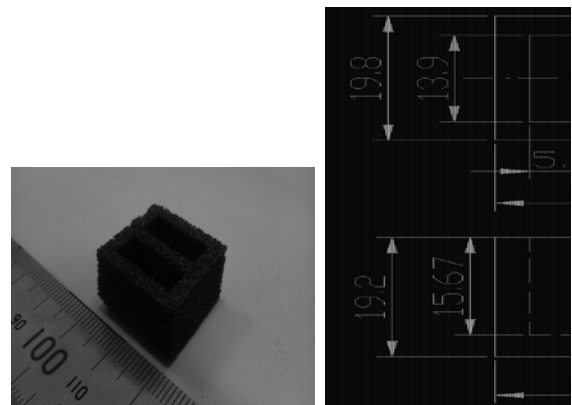
以上のように、工具鋼SKD11粉末のレーザー積層造形条件を詳細に検討することにより、密度は低い、かなりの精度で三次元積層造形体を作製できた。



(a) CAD図面



(b) 積層ピッチ 0.7 mm



(c) 積層ピッチ 0.5 mm

図10 積層造形体の試作結果 (レーザー出力: 20 W, 走査速度: 25 mm/s, 走査ピッチ: 0.2 mm)

4. まとめ

本研究では、工具鋼 SKD11 粉末を対象としたレーザ積層造形について、まず、2 種類の粒径の異なる粉末を用いて、レーザ積層造形において重要な因子であるレーザ出力、走査速度、走査ピッチおよび積層ピッチの積層造形条件を詳細に検討した。つぎに、最適な積層造形条件により単純形状の三次元積層造形体を作製し、その形状測定も行い、変形状態についての調査した。得られた結果は、次のとおりである。

- (1) -45 μm 粉末の場合には、広い範囲のレーザ出力と走査速度において連続したトラックは作製できるが、連続した滑らかなトラックは、単位面積当たりのエネルギー密度は 10~15 J/mm² で得られ、その幅は 0.3~0.4 mm であった。しかし、凝集状の面となりやすいために、三次元積層造形は難しかった。
- (2) -105/+45 μm 粉末の場合には、レーザ出力 20 W、走査速度 25 mm/s、走査ピッチ 0.2 mm で滑らかな面が得られた。この条件下において、積層ピッチ 0.4 mm で、密度は低い、かなりの精度で三次元積層造形体を作製できた。

以上のように、SKD11 粉末を用いてかなりの精度で三次元積層造形体を作製できたが、密度はかなり低い状況であった。これは、本研究で使用している装置では、最大レーザ出力が 50 W と低いことと、これに伴う表面状況の影響により積層ピッチを小さくできなかったことによるためと考えられる。

今後は、レーザ出力の高いファイバーレーザを搭載することと併せて、粉末の粒度分布を検討することにより粉末の積層ピッチを小さくすることが必要である。

謝辞

本研究は、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）ならびに公益財団法人ひろしま産業振興機構広島産業科学技術研究所平成 23 年度探索研究の一部として実施した内容である。ここに、関係各位に深謝の意を表する。

参考文献

- (1) 京極秀樹, “アルミニウム合金による積層造形”, 型技術, **25** (2010), pp.23-27.
- (2) 京極秀樹, ほか 5 名, “工具鋼粉末のレーザ積層造形”, 近畿大学次世代基盤技術研究所報告, Vol.3 (2012), pp.55-60.
- (3) H.J. Niu and I.T.H. Chang, “Liquid phase sintering of M3/2 high speed steel by selective laser sintering”, Scripta Materialia, **39** (1998), pp. 67-72.
- (4) A. Simchi, “Direct laser sintering of metal powders: Mechanism, kinetics and microstructural features”, Materials Science and Engineering, A **428** (2006), pp.148-158.
- (5) T. Nakamoto, N. Shirakawa, Y. Miyata, H. Inui, “Selective laser sintering of high carbon steel powders studied as a function of carbon content”, Journal of Materials Processing Technology, **209** (2009), pp. 5653-5660.