

## 工具鋼粉末のレーザ積層造形

### Direct Selective Laser Sintering of Tool Steel Powder

研究代表者	工学部知能機械工学科	教授 京極 秀樹 Hideki Kyogoku
共同研究者	工学部機械工学科	准教授 生田 明彦 Akihiko Ikuta
	工学部機械工学科	准教授 上森 武 Takeshi Uemori
	工学部機械工学科	学生 柿迫 健 Ken Kakisako
	(独) 理化学研究所	共同研究員 吉川 研一 Kenichi Yoshikawa
	(独) 理化学研究所	主任研究員 大森 整 Hitoshi Omori

In this study, the fabrication conditions of tool steel by direct selective laser sintering were investigated. The effects of powder size, additives such as Cu and Ni powders, and laser sintering conditions on the state of laser-scanned body were examined to fabricate a sound laser-scanned body of tool steel. The optimum laser power, scan speed and scan pitch were examined by experiments. As a result, it was found that the continuously smooth single-scan track can be obtained at wider range between laser power and scan speed by using SKD11 powder below 45  $\mu\text{m}$ . The smooth surface of the laser-scanned body could be fabricated at a laser power of 10 W, a scan speed of 10 mm/s and a scan pitch of 0.08 mm by using SKD11 powder below 45  $\mu\text{m}$ .

#### 要旨

本研究では、レーザ積層造形技術を用いて、これまでほとんど研究報告例のない工具鋼 SKD11 を対象として、そのレーザ積層造形技術を確立して高硬度金型の作製を行うための基礎的研究を行った。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。以上のように、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。

#### 1. はじめに

CAD データから直接製品を迅速に製造できるラピッドプロトタイプング (RP : Rapid Prototyping) 技術 (2009 年に ASTM で、AM (Additive Manufacturing) と呼ぶことが決定され、欧米では AM と呼ばれてきている。) の一つである「レーザ積

層造形」技術が、自動車や電気製品の試作段階において利用されている<sup>(1)</sup>。最近では、工具鋼粉末や M2 粉末などの開発も行われ、金型への適用に関する研究が行われてきている<sup>(2)</sup>。

炭素鋼および工具鋼関連に関しては、多くの報告がなされている。Simchi と Pohl<sup>(3)</sup>は、水アトマイズ鉄粉末を用いて、直接レーザ焼結による緻密化挙動と組織形態について検討している。ここでは、レーザ積層造形において重要なパラメータであるレーザ出力、走査速度、走査ピッチおよび積層ピッチを変化させて、緻密化挙動および組織形態に及ぼす影響について入力エネルギー  $\phi$  というパラメータを導入して検討している。この結果、焼結体の密度は臨界入力エネルギー  $\phi \sim 0.2 \text{ kJ/mm}^3$  まで急激に上昇し、これに伴って凝固形態が異なるため組織の形態も変化する。その後飽和状況となり、入力エネルギー  $\phi \sim 0.8 \text{ kJ/mm}^3$  では、ほぼ相対密度 75%と報告している。低炭素鋼粉末のレーザ積層造形については、Nakamoto ら<sup>(4)</sup>が炭素量 0.33~1.05mass%の粉末を用いて、炭素量が焼結条件に及ぼす影響を詳細に検討している。この結果、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

一密度は熔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。

合金工具鋼については、Niu と Chang<sup>(6)(7)</sup>により、高速度工具鋼を対象として報告されている。ここでは、レーザ照射の際に起こるトラックのポーリング現象や凝集現象の機構について検討している。凝集現象は Rayleigh による液柱の不安定モデルにより説明でき、レーザ出力の上昇あるいは走査速度の低下に伴って凝集は大きくなること、ポーリング現象は酸素量に大きな影響を受けること、トラックの形態は Marangoni 対流の影響を受けることなどを報告している。Asgharzadeh と Simchi<sup>(8)</sup>は、M2 高速度鋼を対象として、炭素添加、焼結条件および雰囲気の影響について検討している。緻密化には、走査速度が大きく影響し、炭素添加量が多くなるほど有効であると報告している。

本研究では、金型への応用を考慮した工具鋼のレーザ積層造形技術の開発を目的として研究を行った。まず、一般的に利用されている工具鋼 SKD11 粉末の積層造形条件を検討し、また添加剤として Cu 粉末および Ni 粉末の影響についても検討した。さらに、粉末粒径の影響についても検討した。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、走査ピッチおよび走査ピッチの積層造形条件を詳細に検討し、積層造形体として引張試験片を作製した。

## 2. 実験方法

本研究では、粉末には平均粒径 10 μm、粒径-45 μm および粒径+105/-45 μm の粒径の異なる 3 種類のガスアトマイズ SKD11 粉末を用いた。また、添加粉末として平均粒径 10 μm のガスアトマイズ Cu 粉末および平均粒径 5 μm のカーボニル Ni 粉末を用いた。図 1 に、平均粒径 10 μm の SKD11 粉末の SEM 写真を示す。

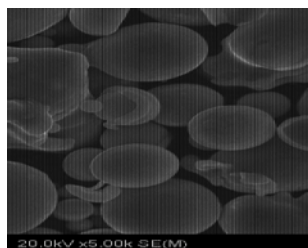


図 1 SKD11 粉末の SEM 写真

積層造形は、図 2 に示すレーザ積層造形装置により、試験片作製用トレーに充填して、レーザ照射を行って試験片を作製した。なお、本装置のレーザには、最大出力 50 W の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 170 μm 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 雰囲気（酸素量：1%以下）とし、レーザ出力、走査速度および走査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：2~40 W、走査速度：2~10 mm/s とした。走査ピッチについては、0.02~0.3 mm の間で検討した。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。



図 2 レーザ積層造形装置の外観

## 3. 実験結果および考察

### 3.1. 平均粒径 10μmSKD11 粉末のレーザ積層造形

本研究においては、まず平均粒径 10μm の SKD11 粉末を用いて、レーザ積層造形条件を検討した。

図 3 に平均粒径 10μm の SKD11 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) 連続した線状の形態 (図 3(a))
- (b) 線状とボール状が連続している形態 (図 3(b)および(c))
- (c) 溶融したボール状の形態

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 4 である。図中に示した数値は、次式で求めたエネルギー密度  $E$  の値である。

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

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  $\mu\text{m}$  である。

図 4 に示すマップからわかるように、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 2 W、走査速度 2 mm/s、エネルギー密度 5.9 J/mm<sup>2</sup> の場合のみで、それ以外の条件では、線状とボール状が連続している形態を示した。また、レーザ出力 10 W 以上では、ポーリング現象を起こして連続したトラックを得ることはできなかった。

唯一連続した滑らかなトラックが得られたレーザ出力 2 W、走査速度 2 mm/s の条件で、面の作製を行った。その走査パターンおよび面の形態を図 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 0.05mm から 0.15mm 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<sup>6)</sup> など他の研究においても報告されている。

このように、平均粒径 10 $\mu\text{m}$  の SKD11 粉末の場合には、連続した滑らかなトラックが得られる範囲は、非常に狭く、空隙の多い面しか作製できないことがわかった。このため、一般的に緻密化のためによく利用されている Cu 粉末、Ni 粉末の添加剤および SKD11 粉末の粒径の影響について検討した。

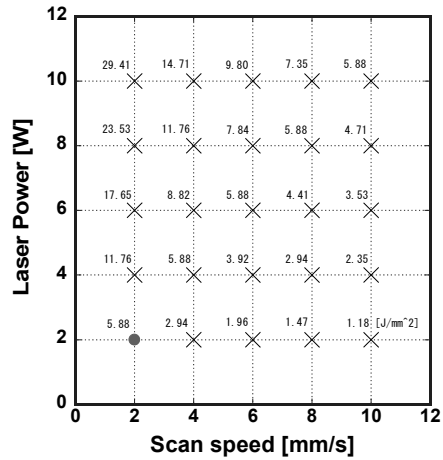
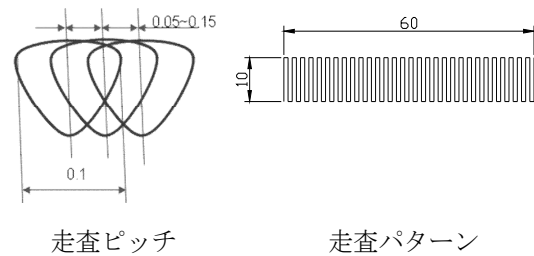


図 4 平均粒径 10 $\mu\text{m}$ SKD11 粉末におけるレーザ出力と走査速度の関係



走査ピッチ 走査パターン

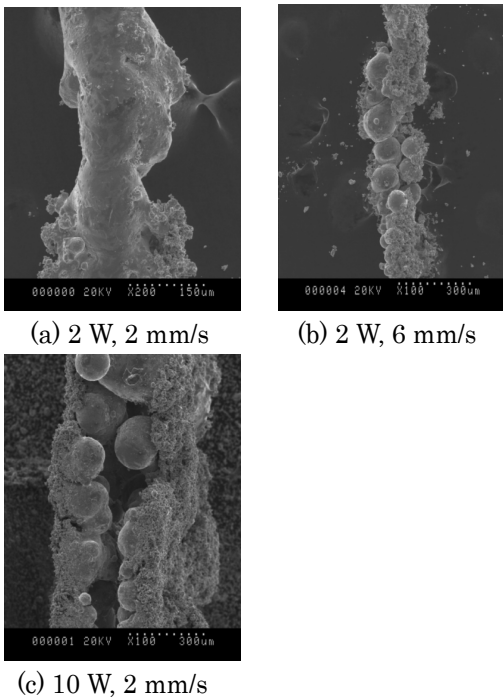


図 3 平均粒径 10 $\mu\text{m}$ SKD11 粉末のトラックの形態

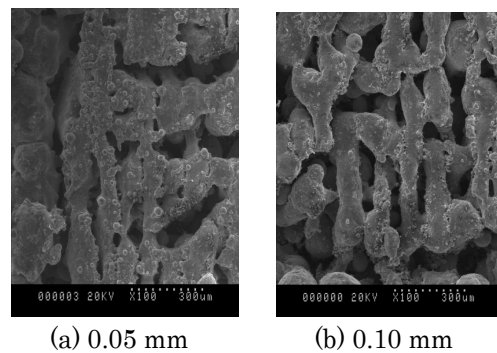


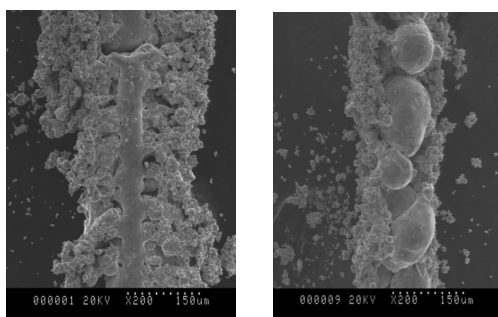
図 5 平均粒径 10 $\mu\text{m}$ SKD11 粉末の面の形態

### 3.2. Cu および Ni 粉末を添加した場合のレーザ積層造形

積層造形体の緻密化を図るために、添加剤としてよく利用されている Cu 粉末または Ni 粉末を、平均粒径 10 $\mu\text{m}$ SKD11 粉末に 30% 添加した場合の結果について、以下に述べる。

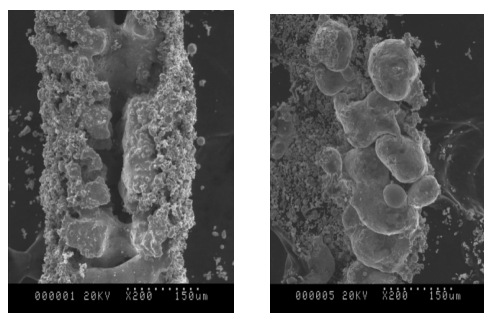
レーザ出力および走査速度を、それぞれ 2~10 W

および 2~8 mm/s の間で変化させて積層造形条件の検討を行った。Cu 粉末添加および Ni 粉末添加におけるトラックの形態をそれぞれ図 6 および図 7 に示す。これからわかるように、Cu 粉末添加の場合には、レーザ出力 2 W および走査速度 2 mm/s において連続した滑らかなトラックが形成されているのがわかる。しかし、Ni 粉末添加の場合には、連続した滑らかなトラックは作製できなかった。また、Cu 粉末添加の場合のレーザ出力と走査速度の関係を図 8 に示す。これからわかるように、Cu 粉末添加の場合には、平均粒径 10 $\mu$ m SKD11 粉末のみの場合より、図中に●印で示す連続した滑らかなトラックが得られる範囲が広がっているが、大きな効果は得られていないことがわかる。



(a) 2 W, 2 mm/s (b) 2 W, 10 mm/s

図 6 Cu 粉末を 30% 添加した場合のトラックの形態



(a) 2 W, 2 mm/s (b) 2 W, 8 mm/s

図 7 Ni 粉末を 30% 添加した場合のトラックの形態

上述した連続した滑らかなトラックが得られるレーザ出力 2 W および走査速度 2 mm/s において、面の作製を試みた。その例を図 9 に示す。走査ピッチは、トラックの幅が 0.04~0.05 mm と非常に狭いために、0.02 mm から 0.05 mm の範囲で変化させた。

走査ピッチ 0.02 mm では、割れが発生しており、0.05 mm では空隙が多く、滑らかな面は得られていないことがわかる。また、得られた面は、いずれも脆い状態であった。

このように、Cu 粉末を 30% 添加しても、連続した滑らかなトラックは作製できるものの、面の作製においては滑らかな面が得られなかった。このため、粉末粒径を大きくして検討を行った。

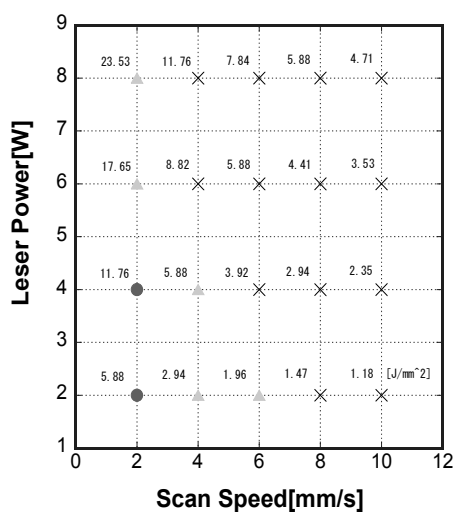
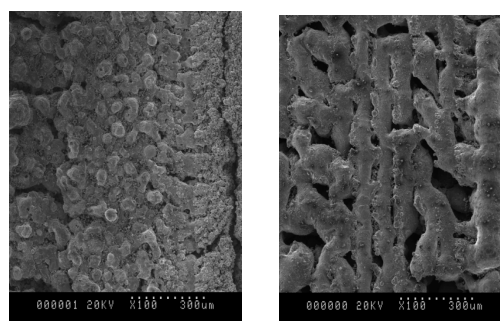


図 8 Cu 粉末を 30% 添加した場合のレーザ出力と走査速度の関係



(a) 0.02 mm (b) 0.05 mm

図 9 面の作製状況 (レーザ出力: 2 W, 走査速度: 2 mm/s)

### 3.3. 粒径-45 $\mu$ m 粉末の場合のレーザ積層造形

上述したように、平均粒径 10 $\mu$ m の粉末では、滑らかな積層造形面を作製できなかったため、粉末粒

径を大きくして積層造形条件を検討した。以下に、粒径-45 $\mu\text{m}$  粉末の場合の結果を述べる。

粒径-45 $\mu\text{m}$  粉末の場合においても、レーザ出力 2 ~ 10 W, 走査速度 2~10mm/s の間で検討した。代表的なトラックの形態を図 10 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 11 である。図中には、式(1)で求めたエネルギー密度  $E$  の値を示している。

図 10 に示すように、粒径-45 $\mu\text{m}$  SKD11 粉末の場合には、平均粒径 10 $\mu\text{m}$  粉末の場合とは異なり、レーザ出力 2 W, 走査速度 2 mm/s においては、凝集状に焼結されたトラックとなっており、熔融状態となっていないことがわかる。同じエネルギー密度でも、レーザ出力が高い 10 W では、熔融して連続した滑らかなトラックが得られている。図 11 に示すように、平均粒径 10 $\mu\text{m}$  の場合とは異なり、レーザ出力および走査速度の非常に広い範囲で連続した滑らかなトラックを得ることができることがわかる。

このように、粒径-45 $\mu\text{m}$  SKD11 粉末を用いることにより、連続した滑らかなトラックを作製できることがわかった。また、平均粒径 10 $\mu\text{m}$  の場合と同様に、最適なエネルギー密度は約 6 J/mm<sup>2</sup> であることがわかった。

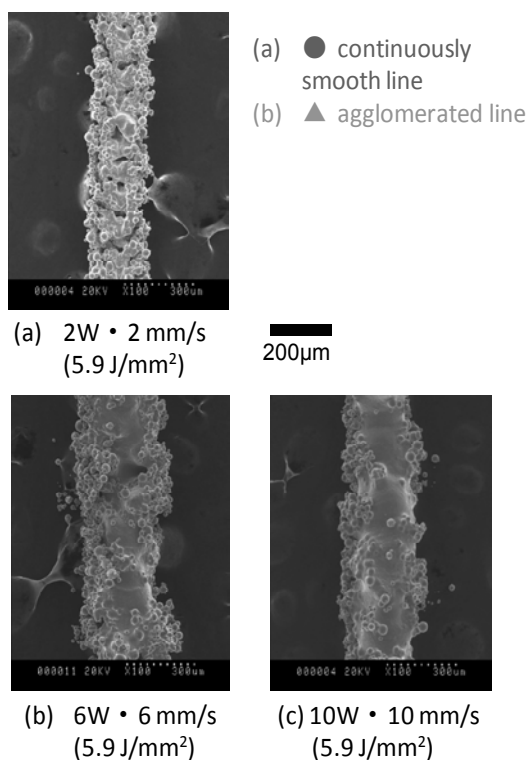


図 10 粒径-45 $\mu\text{m}$  SKD11 粉末のトラックの形態

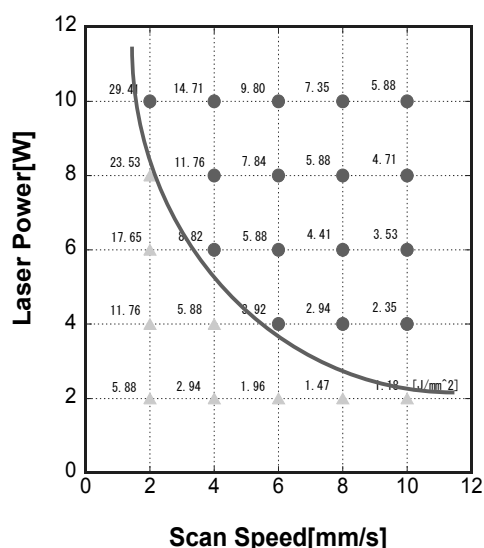


図 11 粒径-45 $\mu\text{m}$  SKD11 粉末のレーザ出力と走査速度の関係 (プロセスマップ)

図 12 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幅はほぼ直線関係を示し、エネルギー密度により、トラック幅を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。また、連続した滑らかなトラックは、5~10 J/mm<sup>2</sup> で得られ、その幅は 0.2~0.3 mm であることがわかる。

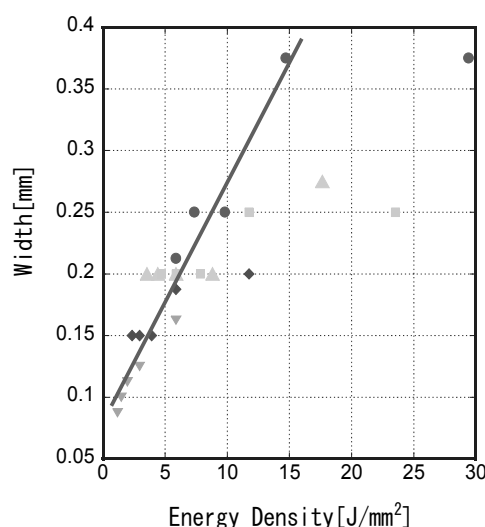
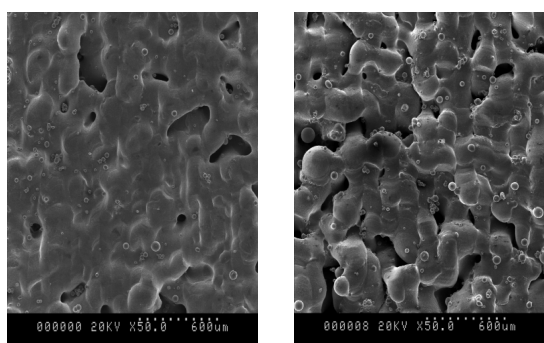


図 12 エネルギー密度とトラック幅の関係

トラック幅を考慮して面作製のための走査ピッチについて検討を行った結果の例を図 13 に示す。走査ピッチについては、図 13(a)にほぼ 2/3 オーバラップさせた場合、(b)にほぼ 1/3 オーバラップさせた場合の面の形態を示す。これからわかるように、ほぼ 2/3 オーバラップさせた場合に空隙の少ない滑らかな面が得られることがわかった。

このように、面製作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。



(a) 0.08 mm (b) 0.15 mm

レーザ出力 10 W, 走査速度 10 mm/s,

図 13 走査ピッチを変化させた場合の面の形態

以上のように、工具鋼 SKD11 粉末のレーザ積層造形条件を詳細に検討することにより、滑らかな面を有するレーザ積層造形体を得ることができた。

#### 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、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。得られた結果は、次のとおりである。

- (1) 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た結果、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。
- (2) Cu 粉末あるいは Ni 粉末を添加した場合には、Cu 粉末添加により、連続した滑らかなトラックが得られるレーザ出力と走査速度の範囲がわずかに広がるが、大きな効果はないことがわかった。
- (3) 粒径の違いによる積層造形条件を検討した結果、粒径-45 $\mu\text{m}$  の粉末で最も滑らかな連続した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、添加剤の効果および粒径の影響について明らかにした点は、新たな知見である。今後は、

レーザ積層造形条件についてさらに検討を行い、高密度・高硬度金型への適用を試みる予定である。

#### 謝辞

本研究は、公益財団法人ひろしま産業振興機構広島産業科学研究所平成 23 年度探索研究ならびに文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業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。

#### 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), 23-27.
- (2) EOS ホームページ (<http://www.eos.info>)
- (3) A. Simchi and H. Pohl, “Effects of laser sintering processing parameters on the microstructure and densification of iron powder”, Materials Science and Engineering, A359 (2003) 119-128.
- (4) 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) 5653-5660.
- (5) 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) 67-72.
- (6) H.J. Niu and I.T.H. Chang, “Selective laser sintering of gas and water atomized high speed steel powders”, Scripta Materialia, 41, (1999) 25-30.
- (7) H.J. Niu and I.T.H. Chang, “Instability of scan tracks of selective laser sintering of high speed steel powder”, Scripta Materialia, 41, (1999) 1229-1234.
- (8) H. Asgharzadeh and A. Simchi, “Effect of sintering atmosphere and carbon content on the densification and microstructure of laser-sintered M2 high-speed steel powder”, Materials Science and Engineering, A 403 (2005) 290-298.