

超合金のレーザ積層造形

Direct Selective Laser Melting of WC Cemented Carbide

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 講師 上森 武
Takeshi Uemori
工学部機械工学科 学生 白地 貴之
Takayuki Shirachi
(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 WC cemented carbides by direct selective laser melting were investigated. The effects of additives, such as Co, Cu-20%Sn and Cu powders, and laser melting conditions on laser scanning process were examined to fabricate a sound laser-scanned body of WC cemented carbides. The optimum laser power, scan speed and scan pitch were found out by experiments. It was found that the continuously smooth single-scan track can be obtained at a lower laser power and a higher scan speed by the addition of 30% Cu powder. The smooth surface of the laser-scanned body could be fabricated at a laser power of 9 W, a scan speed of 20 mm/s and a scan pitch of 0.05 mm.

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 WC-Co 系超合金を対象として、そのレーザ積層造形向けの材料設計および積層造形技術を確立することを目的とした。材料設計の上で重要な添加粉末の影響について検討するとともに、その積層造形条件を詳細に検討した結果、Cu 粉末 30% 添加において、低レーザ出力・高走査速度で、高密度の積層造形体を得られることを見出した。これにより WC-Co 系超合金を対象とした基礎的レーザ積層造形技術を確立することができた。

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⁽¹⁾。最近では, 金型への適用も図られてきている。従来, 本技術の適用は, ステンレス鋼や銅

系合金に限られていたが, 例えば EOS 社では工具鋼粉末や M2 粉末などの開発も行われ, 金型への適用が行われてきている⁽²⁾。

超合金のレーザ積層造形については, Leuven 大学のグループが先駆的に研究を行い, Wang ら⁽³⁾ は, 直接選択的レーザ積層造形による WC-Co 超合金の実験とシミュレーションに関する報告を行っている。この報告によれば, レーザ積層造形だけでは高密度の焼結体は得られず, 溶浸を施す必要がある。Cu を溶浸することにより真密度となり, 降伏強さ 424 MPa, 硬さ 85 HRB の製品が得られたと報告している。Kumar⁽⁴⁾ は WC-Co 粉末を用いた選択的レーザ積層造形による研究を行っている。積層造形のままで相対密度約 60% で, 溶浸後に WC-9%Co で相対密度 96% の積層造形体を作製している。この造形体の硬さは 242 HB, 曲げ強さ 714 MPa で工具鋼に匹敵する特性が得られたと報告している。Gu ら⁽⁵⁾⁽⁶⁾ は, WC-Co 粉末に Cu を混合して直接選択的レーザ積層造形における焼結機構を検討するとともに, WC-Co/Cu 複合体を作製している。これらの研究においては, Cu 添加量が 30% 以上と多いため, 十分な硬さは得られていないが, Cu30%

添加の場合には、硬さ約 400 HV の結果を報告している。Gu と Meiners⁹⁾は、W, Ni およびグラファイト粉末を用いて直接選択的レーザー積層造形により、相対密度約 96%、硬さ 1870 HV の積層造形体を作製している。このように、超硬合金のレーザー積層造形に関する研究が行われているが、最終製品として金型などに利用できる状況には至っていないのが現状である。

本研究では、金型への応用を考慮した WC 系超硬合金のレーザー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 WC-10%Co 粉末の積層造形条件を検討し、さらに添加剤として Co 粉末、Cu-20%Sn 粉末および Cu 粉末の影響についても検討した。この際、レーザー積層造形において重要なレーザー出力、走査速度、走査ピッチおよび走査パターンの積層造形条件を詳細に検討した。

2. 実験方法

本研究では、粉末には平均粒径 9 μm の WC-10%Co 混合粉末、平均粒径 10 μm の Cu-20%Sn 青銅粉末および平均粒径 10 μm の Cu 粉末を用いた。図 1 に粉末の SEM 写真を示す。

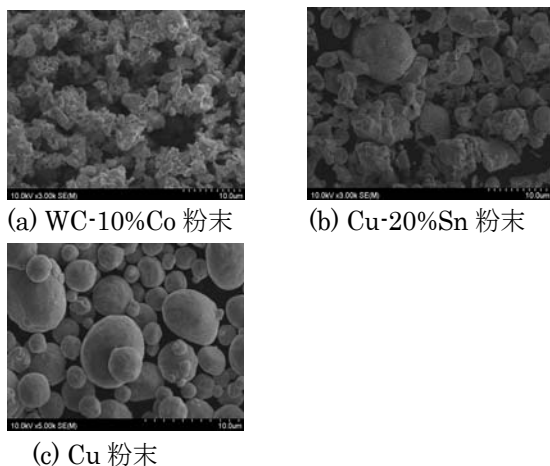


図 1 粉末の SEM 写真

粉末混合は V 型混合機で行い、混合粉末を図 2 に示すレーザー積層造形装置により、試験片作製用トレイに充填して、レーザー照射を行って試験片を作製した。なお、本装置のレーザーには、最大出力 50 W のファイバーレーザーが搭載されており、レーザースポット径は 170 μm である。また、レーザー走査はガルバノメータミラー方式に依っている。



図 2 レーザ積層造形装置の外観

装置内は酸化防止のため Ar 雰囲気(酸素量: 1%程度)とし、レーザー出力、走査速度および走査ピッチを変化させて、実験を行った。レーザー出力および走査速度の範囲は、レーザー出力: 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、最適な積層造形条件を検討した。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。

3. 実験結果および考察

レーザー積層造形を可能とするためには、レーザー出力と走査速度の関係を明らかにし、それを示すマップを作成する必要がある。この図から滑らかな線状の熔融体(ビード)を作製する条件を見出すことにより造形が可能となる。

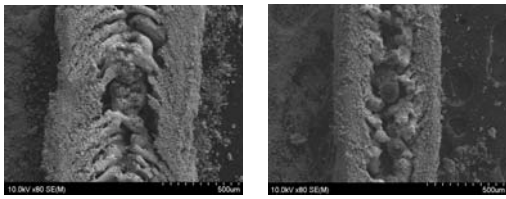
本研究では、まず基礎となる WC-10%Co 粉末のみでのレーザー積層造形を試みた。その結果を以下に述べる。

3.1. WC-10%Co のレーザー積層造形

一般的に用いられている超硬合金 WC-10%Co 粉末を対象として、レーザー出力および走査速度を、それぞれ 10~40 W および 5~30 mm/s の間で変化させて積層造形条件の検討を行った。

WC-10%Co 粉末のみのトラックの例を図 3 に示す。これからわかるように、WC-10%Co 粉末のみでは、いずれの条件でも連続した滑らかなトラックを得ることができないことがわかった。

このため、Co 粉末を 30%まで添加を行ったが、10%の場合と同様に連続した滑らかなトラックを得ることができなかった。



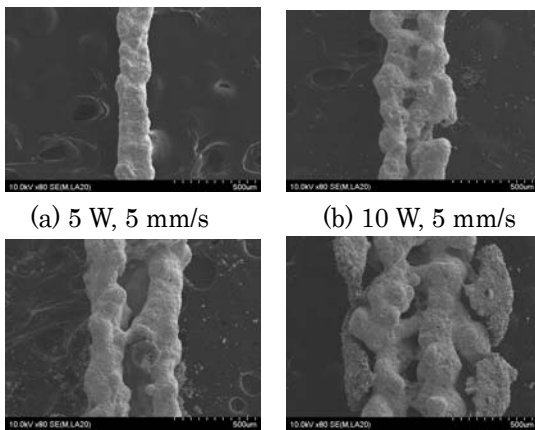
(a) 10 W, 5 mm/s (b) 30 W, 30 mm/s
図3 WC-10%Co 粉末のみのトラックの状況

3.2. Cu-Sn 粉末を添加した場合のレーザー積層造形

(1) レーザ出力と走査速度の関係

つぎに、レーザー積層造形に添加剤としてよく利用されている Cu-20%Sn 粉末を 30% 添加した場合の結果について、以下に述べる。

レーザー出力および走査速度を、それぞれ 5~20 W および 5~30 mm/s の間で変化させて積層造形条件の検討を行った例を図4に示す。これからわかるように、レーザー出力 5 W および走査速度 5 mm/s の場合には、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、それ以外の条件では、WC-10%Co 粉末の場合と同様に、エネルギーの吸収量が大きく、溶融幅も大きくボール状となっている。



(a) 5 W, 5 mm/s (b) 10 W, 5 mm/s
(c) 15 W, 5 mm/s (d) 20 W, 5 mm/s
図4 Cu-20%Sn 粉末を 30% 添加した場合のトラックの状況

また、この図に示すように溶融体の形態は、つぎの3つに分類される。

- (a) 連続した線状の形態 (図4(a))
 - (b) 線状とボール状が連続している形態 (図4(c)および(d))
 - (c) 溶融したボール状の形態 (図4(b))
- これらの形態をレーザー出力と走査速度の関係として

示したのが図5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。

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

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

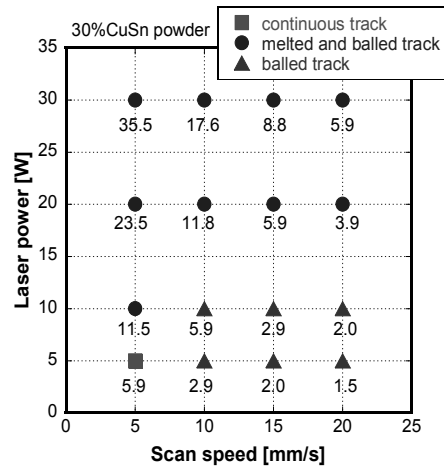


図5 Cu-20%Sn 粉末を 30% 添加した場合のレーザー出力と走査速度の関係 (プロセスマップ)

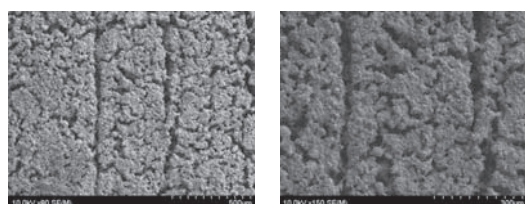
エネルギー密度で検討してみると、エネルギー密度が 5.9 J/mm² より小さな値では、トラックが連続した滑らかな形状ではなく、ボール状に繋がった状態になっている。これに対して、エネルギー密度が 5.9 J/mm² より大きな値では、溶融しすぎて溶融部がボール状に繋がった状態になっている。このように、連続した滑らかなトラックが得られる条件は、レーザー出力 5 W および走査速度 5 mm/s でエネルギー密度 5.9 J/mm² の 1 条件であった。

(2) 面の作製条件の検討

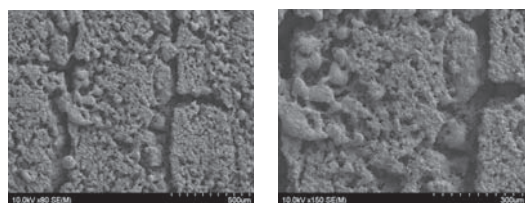
上述した条件下で、面の作製を試みた。その結果を図6に示す。(a)は走査ピッチ 0.1 mm で、ほぼ 1 トラックの 1/2 が重なる状態、(b)は走査ピッチ 0.06 mm で、ほぼ 1 トラックの 2/3 が重なる状態である。いずれの場合にも、割れが発生しており、滑らかな面は得られていないことがわかる。また、得られた面は、脆い状態であった。

このように、Cu-20%Sn 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

の作製においては十分な結果が得られなかった。



(a) 走査ピッチ 0.1 mm



(b) 走査ピッチ 0.06 mm

図 6 面の作製状況 (レーザー出力: 5 W, 走査速度: 5 mm/s)

3.3. Cu 粉末を添加した場合のレーザー積層造形

(1) レーザ出力と走査速度の関係

Cu-20%Sn 粉末添加によっても、滑らかな積層造形面を作製できなかったため、Cu 添加を行った。以下に、Cu 粉末を 30% 添加した場合の結果について述べる。

Cu 粉末添加の場合においても、図 7 に示すように、Cu-20%Sn 粉末の場合と同様に、3つの熔融体の形態が見られた。これらの形態をレーザー出力と走査速度の関係として示したのが図 8 である。図中に示した数値は、上式で求めたエネルギー密度 E の値である。

図 8 に示すように、Cu-20%Sn 粉末添加の場合とは異なり、レーザー出力および走査速度の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た。これから、レーザー出力が小さく、走査速度が速いほど、すなわちエネルギー密度が小さいほど連続した滑らかなトラックが作製できることがわかった。この傾向は、Cu-20%Sn 粉末添加の場合と異なり、エネルギー密度が、約 4 J/mm^2 以下の場合に作製できることがわかった。

図 9 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直線関係となっており、エネルギー密度を変化させることにより、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。

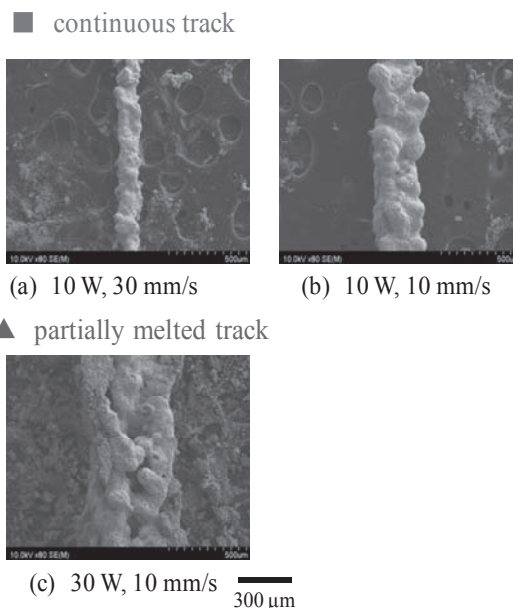


図 7 Cu 粉末を 30% 添加した場合のトラックの状況

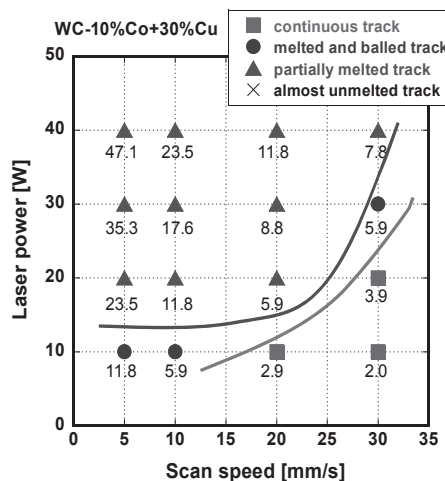


図 8 Cu 粉末を 30% 添加した場合のレーザー出力と走査速度の関係 (プロセスマップ)

(2) 面の作製条件の検討

つぎに、プロセスマップより明らかになったレーザー出力および走査速度の範囲で作製した面の状況を図 10 にマクロ写真で示す。このように、マクロ的には、滑らかな面を作製できることがわかる。

さらに、面作製のための走査ピッチについて検討を行った結果を図 11 に示す。走査ピッチについては、図 11(a)に示すように、オーバーラップさせない場合、1/3 あるいは 2/3 オーバーラップさせた場合の 3 種類を検討した。レーザ照射は、図 11(b)に示すようなパターンとした。その結果、図 11(c)に示すように、2/3 オーバーラップさせた場合に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。

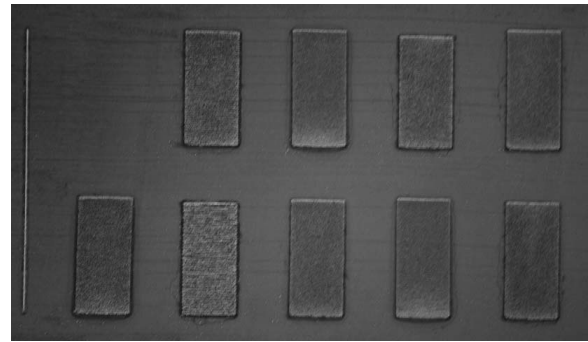
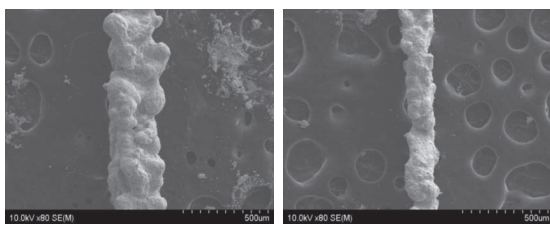
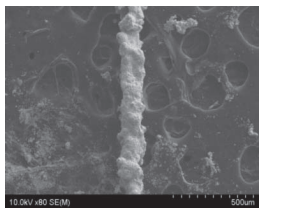


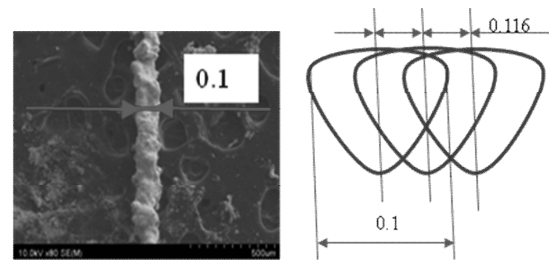
図 10 面作製状況



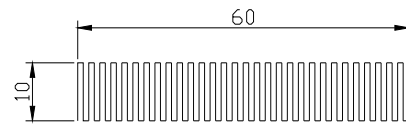
(a) 10 W, 10 mm/s (5.9 J/mm²) (b) 10 W, 20 mm/s (2.9 J/mm²)



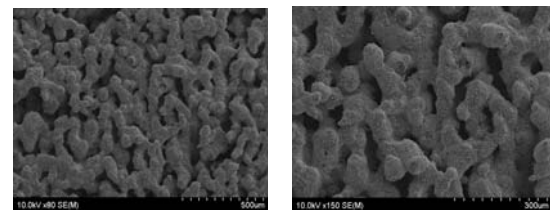
(c) 10 W, 30 mm/s (2 J/mm²) 300 μm



(a) 走査ピッチ



(b) レーザ照射パターン



(c) 積層造形面

図 11 面作製における走査ピッチの影響

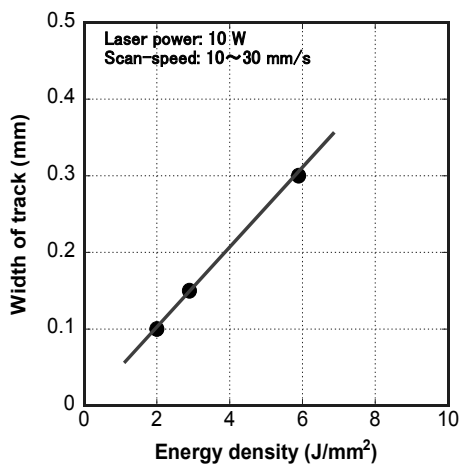
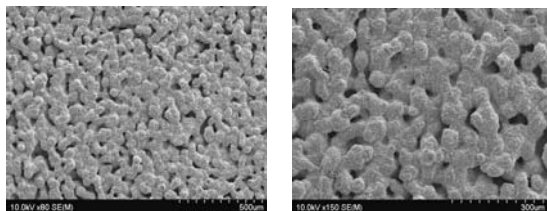


図 9 エネルギー密度とトラック幅の関係

さらに、密度を向上させるために、レーザ出力および走査速度の関係、走査ピッチの影響について詳細に検討を行った。その結果、図 12 に示すように、レーザ出力 9 W、走査速度 20 mm/s および走査ピッチ 0.05 mm で空隙の少ない面を作製できることがわかった。

以上のように、WC-Co 系超硬合金粉末に Cu を 30% 添加し、積層造形条件を詳細に検討することにより、レーザ積層造形体としては密度の高い積層造

形体を得ることができた。これにより WC-Co 系超硬合金を対象とした基礎的レーザー積層造形技術を確立することができた。



レーザー出力 9 W, 走査速度 20 mm/s,
走査ピッチ 0.05 mm
図 12 面の SEM 写真

4. まとめ

本研究では、WC-Co 系超硬合金を対象としたレーザー積層造形条件について、添加剤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) WC-10%Co のみでは、連続した滑らかなトラックを得ることができなかった。また、Co 粉末を 30% 添加しても、同様の結果となった。
- (2) Cu-20%Sn 粉末を添加した場合には、連続した滑らかなトラックが得られる条件を 1 条件ほど見出したが、面を作製した際には、滑らかな面を作製することはできなかった。
- (3) Cu 粉末を 30% 添加すると、Cu-20%Sn 粉末を添加した場合より連続した滑らかなトラックを作製できる条件がかなり広がった。また、面の作製条件を検討した結果、レーザー出力 9 W, 走査速度 20 mm/s および走査ピッチ 0.05 mm で滑らかな面を作製することができた。

このように、添加剤の効果および密度の高い積層造形体を得られる積層造形条件を見出したことは、新たな知見である。今後は、積層条件についてさらに検討を行い、高密度・高硬度超硬合金を作製し、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 22 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) X. C. Wang, T. Laoui, J. Bonse, J. P. Kruth, B. Lauwers and L. Froyen, “Direct Selective Laser Sintering of Hard Metal Powders: Experimental Study and Simulation”, International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2002), 19:351–357.
- (4) S. Kumar, “Manufacturing of WC–Co moulds using SLS machine”, Journal of materials processing technology 209 (2009), 3840–3848.
- (5) D. Gu and Y. Shen, “Processing and microstructure of submicron WC–Co particulate reinforced Cu matrix composites prepared by direct laser sintering”, Materials Science and Engineering A 435–436 (2006), 54–61.
- (6) D. Gu, Y. Shen, L. Zhao, J. Xiao, P. Wu and Y. Zhu, “Effect of rare earth oxide addition on microstructures of ultra-fine WC–Co particulate reinforced Cu matrix composites prepared by direct laser sintering”, Materials Science and Engineering A 445–446 (2007), 316–322.
- (7) D. Gu and Y. Shen, “Influence of reinforcement weight fraction on microstructure and properties of submicron WC–Cop/Cu bulk MMCs prepared by direct laser sintering”, Journal of Alloys and Compounds 431 (2007), 112–120.
- (8) D. Gu and Y. Shen, and J. Xiao, “Influence of processing parameters on particulate dispersion in direct laser sintered WC–Cop/Cu MMCs”, International Journal of Refractory Metals & Hard Materials 26 (2008), 411–422.
- (9) D. Gu and W. Meiners, “Microstructure characteristics and formation mechanisms of in situ WC cemented carbide based hardmetals prepared by Selective Laser Melting”, Materials Science and Engineering A 527 (2010), 7585–7592.