

Study on the Sintering Characteristics of the Mixed Metal Powder with Yb Fiber Laser : Evaluation of the Adhesion Force of the Sintered Material on the Different Surface Plate

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-10-03 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.24517/00008037

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 International License.



Yb ファ이버レーザによる 混合金属粉末の焼結特性に関する研究*

－プレート面性状の違いによる焼結物の密着性評価－

古本達明** 上田隆司** 細川 晃** Abdullah Yassin** 阿部 諭***

Study on the Sintering Characteristics of the Mixed Metal Powder with Yb Fiber Laser
- Evaluation of the Adhesion Force of the Sintered Material on the Different Surface Plate -

Tatsuaki FURUMOTO, Takashi UEDA, Akira HOSOKAWA, Abdullah Yassin and Satoshi ABE

In order to manufacture the part of a small lot at lower cost and shorter lead-time, various techniques, such as a rapid tooling, reverse engineering and high speed milling, are proposed. Recently, milling-combined laser metal sintering system, which is the device of sintering the metal powder and milling the sintered metal with end mill at the one process, has been developed to produce the injection molding dies. In this report, the sintering characteristics of the metal powder used for rapid tooling with Yb fiber laser are described. Relationship between the scanning speed of laser beam and the width of sintered material on the different surface plate are investigated. Moreover, the cross section of sintered material is analyzed with EPMA and cutting force is measured by the dynamometer in the various conditions.

As a result, it was shown that the suitable irradiation energy for laser sintering should be selected to obtain the good shaped structure, which is occurred the melting, the cohesion and the solidification of the metal powder repeatedly. The shape of sintered material is formed like a spherical in the conditions of too much energy supply, and not formed partially in the conditions of a little energy supply. The melted metal powder with the generated heat by laser irradiation alloyed with the plate surface on the process of the solidification. The specific cutting force of sintered material on the surface with sandblast is quite larger than that on the standard surface by the difference of the wetting of melted metal powder.

Key words: rapid tooling, Yb fiber laser, mixed metal powder, laser sintering, specific cutting force

1. 緒 言

市場ニーズが多様化するにつれて、情報端末や家電製品の開発サイクルはますます短くなっており、他品種少量生産を短期間かつ低コストで実現するため、様々な取り組みが行われている。生産現場においては、PC端末の処理能力が飛躍的に向上したことにより、3次元CAD/CAM/CAEシステムが急速に普及し、3次元データの共有によるコンカレントエンジニアリングの実現によって、設計・製造プロセスの工程短縮が可能となっている¹⁾。特に、3次元データを基にして、その形状を短時間で得ることができる積層造形装置は、工程短縮のための必要不可欠なツールとしてその地位を確固たるものとしている。代表的な積層造形手法としては、レーザ照射によって光硬化性樹脂を反応させる光硬化方式や²⁾、金属粉末を溶融・固着する粉末焼結方式などがある³⁾。しかしながら、これらの手法は造形精度や造形物強度に課題を有しており、高精度を必要とする製品の実造形へは応用されなかった。

その中で近年、積層造形手法の課題の一つである造形精度を解決するため、金属粉末をレーザ焼結しながら積層させた後、造形物表面を切削して仕上げ加工を行う複合加工機が開発され、注目を集めている⁴⁾。この手法は、放電加工による型彫りが必要

とせず、また、複雑形状の射出成形金型が短時間かつ低コストで製作可能となるなどの利点を有する。これまで、金属粉末の焼結には炭酸ガスレーザが適用され、ガルバノミラーを用いてレーザ光の照射位置を制御しながら造形が行われてきた。しかしながら、ガルバノミラーを介した炭酸ガスレーザのスポット径は0.4 mm程度と大きく、微細なリブ構造を造形することが困難である等の課題を有していた。

本研究では、ファイバーレーザを搭載したレーザ焼結型積層造形装置を用いて金属粉末を高精度に焼結し、微細で複雑な射出成形金型を製作することを目的としている。ファイバーレーザを用いることでスポット径が0.1mm以下に絞れるため、本手法が微細金型の造形に適用可能となることが期待できる。そこで、まず初めにファイバーレーザの照射条件と金属粉末の焼結性との関係について調べると共に、焼結を行うプレート面性状の違いによる焼結物の密着性について調べたので、以下に報告する。

2. 金属粉末の焼結実験方法

2.1 実験装置

金属粉末のレーザ焼結装置の概要を図1に、実験に用いるレーザの仕様を表1に示す。実験装置は、波長が1070nmの連続発振ファイバーレーザ(SUNX(株)製: LP-F10)と金属粉末の焼結ユニットで構成されている。焼結ユニットの上面は、図1に示すように近赤外光を透過する石英ガラス窓が付いており、発振し

* 原稿受付 平成19年10月9日

** 正 会 員 金沢大学大学院 (石川県金沢市角間町)

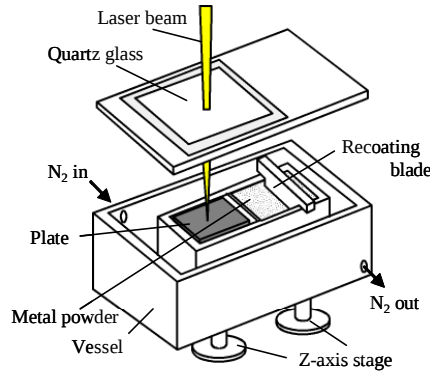
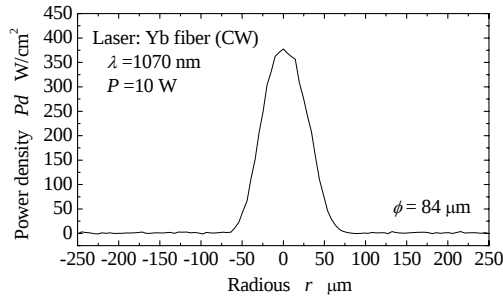
*** 正 会 員 松下電工(株) (大阪府門真市大字門真 1048)

Table 1 Specification of the Yb fiber laser

Laser type		Yb fiber (CW)
Beam diameter	ϕ	84 μm
Wavelength	λ	1070 nm
Maximum output energy	P	40 W
Scanning speed	F	1-3000 mm/s

Table 2 Specification of the metal powder

Material	SCM, Cu, Ni
Shape	Irregular
Particle mean diameter	30 μm
Bulk density	4190 kg/m ³
Absorption ratio (1070 nm)	25%
Thermal conductivity	0.14 W/mK

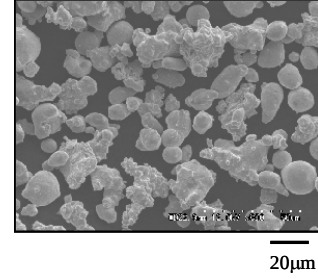
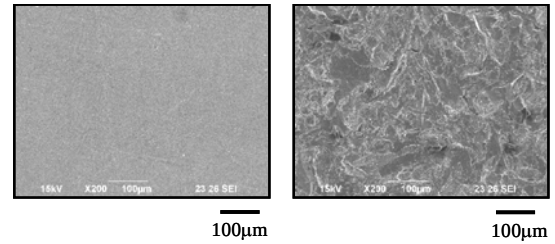
**Fig.1** Schematic illustration of the sintering unit**Fig.2** Beam profile at focus spot

たレーザー光を密閉容器内部に導くことができる。レーザー光の最大出力は40Wであり、発振されたレーザー光はガルバノミラーを介してステージ上を最大3000 mm/sで走査させることができる。また、容器内部には高さ方向に移動可能なステージ、およびステージ上に堆積させた金属粉末を一定な厚みにならすためのブレードが取り付けられており、ステージ上の各位置にレーザー光の焦点を結ばせることができる。なお、金属粉末表面が酸化することを防ぐため、焼結ユニット内部は窒素ガスが充填されている。

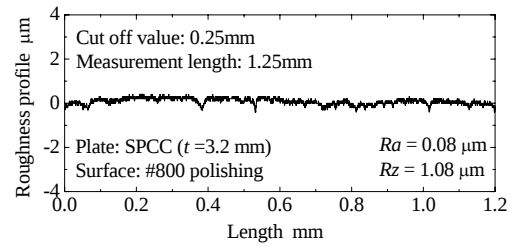
図2は、本実験で用いるファイバーレーザーについて、ビームプロファイラ(SPIRICON製: LBA-FW)で焦点位置のプロファイルを測定した結果である。レーザー光の照射パワーが10 Wのときにおける結果である。ガルバノミラーを介して集光しているためレンズによる集光径より大きくなるが、ビーム形状がガウシアン形状を呈しており、 $1/e^2$ におけるビーム径は $\phi=84 \mu\text{m}$ となった。本実験では、レーザー光の焦点位置が焼結する金属粉末の表

Table 3 Experimental conditions

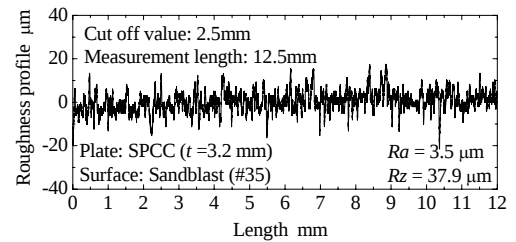
Powder thickness	d	50 μm
Scanning speed	F	10 - 1000 mm/s
Sintering surface		Sandblast (#35)
		Standard (#800)

**Fig.3** SEM image of the metal powder

(a) Standard (b) Sandblast

Fig.4 SEM image of the plate surface for sintering

(a) Standard



(b) Sandblast

Fig.5 Roughness profile of the plate surface for sintering

面となるように調整して照射することとする。

2.2 実験方法および条件

実験に用いる金属粉末の物性を表2, 電子顕微鏡(日本電子(株)製: VSM-6290LVU)で撮影した金属粉末の画像を図3に示す。粉末は、金属光造形で一般的に用いられる鉄系粉末、銅系粉末、ニッケル系粉末などから構成される混合粉末であり、その平均粒径は30 μm である⁵⁾。また、粉末の堆積時に上面からの加圧は行わず、粉末の自重のみで堆積させた状態を標準状態とした。

Table 4 Cutting conditions for sintered material

Tool material		Solid carbide
Diameter	ϕ_t	6 mm
Shape		Flat end mill
Cutting speed	V	75.4 m/min
Feed rate	f	0.01 mm/tooth

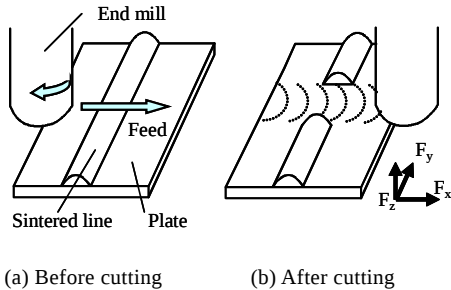


Fig.6 Schematic illustration for the measurement of cutting force

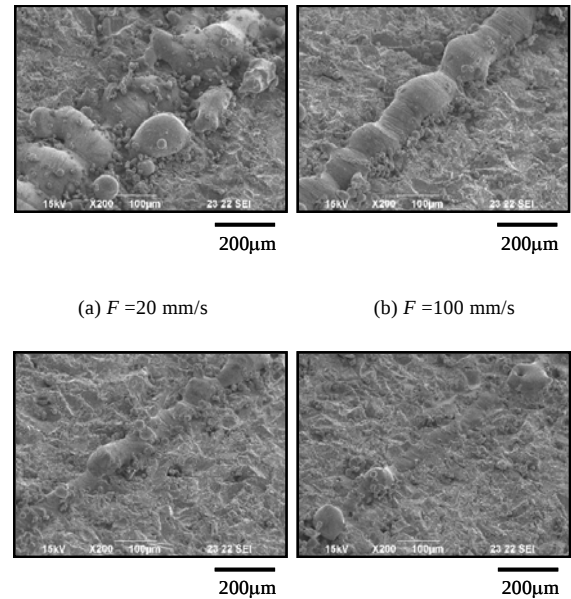
このときのかさ密度を測定したところ 4190 kg/m^3 となり、真密度と比較して 50%程度となることがわかっている⁶⁾。

実験条件を表 3 に示す。実験は、ステージ上に取り付けた鋼材プレート(SPCC, $t=3.2 \text{ mm}$)に、スキージングブレードを用いて厚みが $50 \mu\text{m}$ で均一となるように金属粉末を堆積させ、ライン状にレーザ光を走査して粉末を焼結した。このとき、レーザ照射条件の違いによる焼結特性を調べるため、レーザ走査速度を $F=20\sim 1000 \text{ mm/s}$ で変化させ、得られた焼結物を実体顕微鏡((株)ニコン製: SMZ1500)で真上から観察してその幅を調べた。焼結幅は、ライン状焼結物に対して測定用細線を平行移動し、細線が焼結物の最外部に位置したときの細線間距離として定義した。なお、焼結物の長さ方向における評価長さは 1.2mm で統一した。

また、プレートの表面状態の違いによる焼結特性を比較するため、標準プレート面と標準プレート面を WA 砥粒(#35)でサンドブラスト処理した面上に焼結実験を行った。なお、標準プレートの表面状態を均一とするため、表面を #800 の研磨紙で仕上げたプレートで実験した。各プレート表面を SEM で観察した結果を図 4 に、表面粗さプロファイル((株)東京精密製: SURFCOM)の測定結果を図 5 に示す。各プレート表面の粗さは、標準プレート面が $Ra=0.6 \mu\text{m}$ 、サンドブラスト面が $Ra=3.5 \mu\text{m}$ となった。

次に、レーザ照射による金属粉末の熔融・凝固メカニズムを検討するため、プレート上に造形したライン焼結物をファインカットで切断・研磨した後、切断面を EPMA(日本電子(株)製: JXA-8100)を用いて分析した。焼結物は、サンドブラスト面上に $F=100 \text{ mm/s}$ の走査速度で焼結したものを用いた。

さらに、各プレート面に対する焼結物の密着性を評価する試みとして、表 3 に示す焼結条件で造形したライン焼結物をエンドミル加工して、そのとき生じる切削抵抗を切削動力計(日本キスラ(株)製: 9251A)で測定した。実験方法の概略図を図 6、実験条件を表 4 に示す。実験に用いる工具は、 $\phi_t=6 \text{ mm}$ の超硬フラットエンドミルであり、刃先のねじれ角は 30° のものを使用した。実験は、まずライン焼結したプレートを切削動力計に固定し、図 6(a)に示すように工具送り方向をライン焼結物に対して垂直になるように調整した。次に、工具先端とプレート表面を接触させ、図 6(b)に示すようにプレート上の焼結物のみを切削するときに生じる切削抵抗を測定した。そして、得られた測定結果から比切削抵抗を算出し、プレート面の違いによる比切削抵抗



(a) $F=20 \text{ mm/s}$ (b) $F=100 \text{ mm/s}$
(c) $F=500 \text{ mm/s}$ (d) $F=800 \text{ mm/s}$

Fig.7 Photo of the sintered line on the sandblast surface

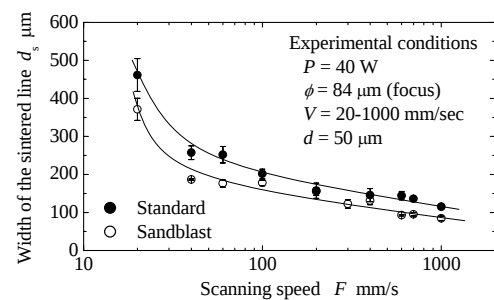


Fig.8 Relationship between scanning speed and width of the sintered line

を比較した。なお、測定に用いる切削動力計の固有振動数は、実験条件に対して十分に大きく、用いる切削動力計が実験条件内において十分安定した出力が得られることを確認している⁷⁾。また、切削動力計からの出力は、工具送り方向に生じる分力を F_x 、工具送り方向に対して垂直に生じる分力を F_y 、工具の軸方向に生じる分力を F_z と定義して実験を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 レーザ照射条件と焼結幅との関係

各走査速度におけるサンドブラスト面上の焼結物を SEM 観察した結果を図 7 に、レーザ光の走査速度と焼結幅との関係を図 8 に示す。なお、各 SEM 画像はライン焼結物を斜め 45° 上方から観察したものである。各プレート面における焼結物は、いずれも走査速度が遅いとき幅が大きくなるが、走査速度の上昇につれて幅が小さくなっている。サンドブラスト面上の焼結物の場合、レーザ走査速度が $F=20 \text{ mm/s}$ のとき幅は $d_s=460 \mu\text{m}$ となり、レーザスポット径 $\phi=84 \mu\text{m}$ の 5 倍以上の幅が形成されているが、 $F=1000 \text{ mm/s}$ になると幅は $d_s=115 \mu\text{m}$ となり、ほぼレーザスポット径に近い幅となっている。

これらの変化は、走査速度の違いによって金属粉末の焼結状態に違いが生じるためと考えられる。金属粉末のレーザ焼結は、

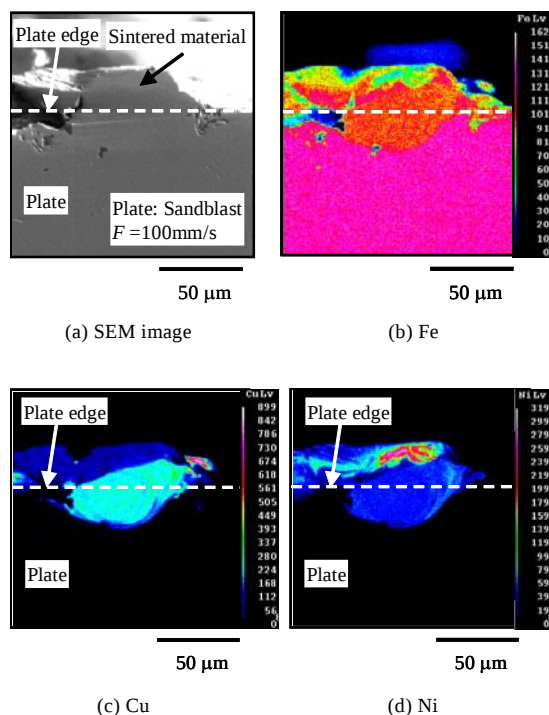


Fig.9 EPMA analysis of cross section of the sintered line

レーザ照射で生じた熱で金属粉末が溶融する領域と、溶融した粉末同士の表面張力に起因した凝集力に大きく影響を受ける。プレート上の金属粉末にレーザ照射すると、粉末はレーザ照射で生じた熱で加熱・溶融し、次第に溶融領域が周辺に広がっていく。このとき、溶融した粉末同士はお互いに凝集して大きな溶融物へと変化していく。走査速度が遅いとき、粉末が溶融する領域は広がるため、溶融した粉末の凝集によってより大きな溶融物を形成し、それらがレーザ光の通過と共に凝固したため焼結幅が大きくなったと考えられる。このときの焼結状態を図 7(a)に示すが、大きな球状凝固物がプレート上に点在して形成されていることがわかる。

これに対して、レーザ光の走査速度が速くなると、粉末が溶融する領域は次第に狭くなるため、溶融粉末の凝集によって形成される溶融物も小さくなる。そのため、レーザ光が通過するとき、粉末の溶融と凝集した溶融物の凝固が繰り返し行われるようになり、図 7(b)に示すようなライン状の焼結物が形成されることが考えられる。さらにレーザ光の走査速度を速くすると、粉末が溶融する領域はさらに狭くなるため、レーザ照射で生じた熱で十分な溶融領域が得られず、図 7(c)に示すように部分的に球状構造物が形成された焼結物や、図 7(d)に示すように焼結物が点在する状態となり、ライン状の焼結物が得られなくなる。

一方、プレート面の違いによる焼結幅を比較すると、各走査速度においてサンドブラスト面の焼結幅が広い。これは、凝集した溶融物が凝固するときのプレートに対するぬれ性に起因していると考えられる。サンドブラスト面上の溶融物は、圧延プレート上のそれと比較してぬれ性が良いと考えられる。そのため、凝固過程においてサンドブラスト面上の溶融物に対する表面張力の影響が小さくなり、その結果、プレートとの接触面積が大きくなって焼結幅が広がったと考えられる。

これらの結果から、プレート面上にライン焼結物を形成するには、金属粉末が溶融・凝集・凝固するための適切な投入エネルギーが必要であることがわかる。本実験において、このような

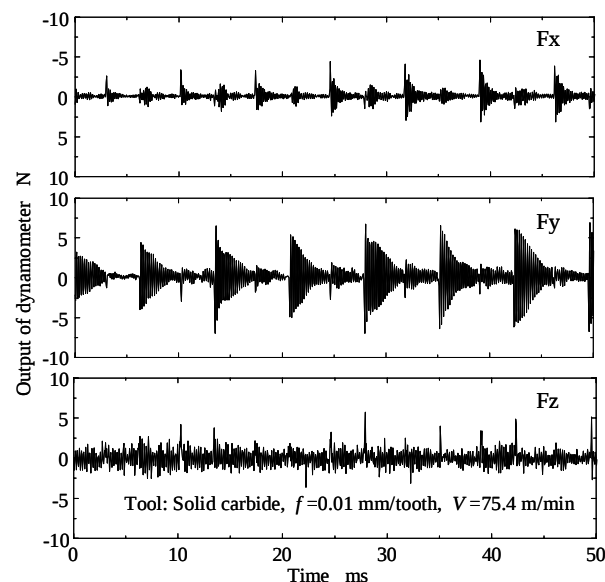


Fig.10 Waveform from the dynamometer
(Plate: Sandblast, $F=100$ mm/s)

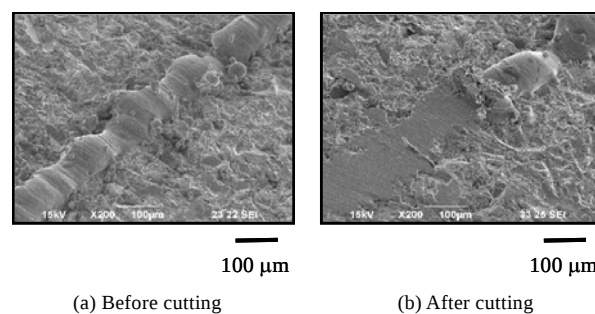


Fig.11 SEM image before and after cutting ($F=100$ mm/s)

焼結物が形成される条件は $F=100\sim 200$ mm/sであった。このとき、得られた焼結物の幅はサンドブラスト面の場合 $d_s=160\sim 200$ μm 、圧延プレート面の場合 $d_s=160\sim 180$ μm であり、いずれもレーザスポット径に対して 2 倍程度の幅となった。本手法は、ライン焼結物を適度に重ねながら層状の焼結物を造形し、それをさらに幾層にも積層して 3 次元形状を創成する機構となるため、図 7(b)に示すライン焼結物が形成されるレーザ照射条件が良好な条件といえる。このような条件を選択することで、高精度な 3 次元形状が造形できるようになる。

3.2 焼結物断面の EPMA 分析

図 9 は、サンドブラスト面に $F=100$ mm/s のレーザ走査速度で造形した焼結ラインについて、その断面を EPMA で面分析した結果である。図 9(a)は分析を行った断面の SEM 観察画像、図 9(b)は鉄の成分、図 9(c)は銅の成分、図 9(d)はニッケルの成分をそれぞれ示している。また、各図中表示した点線はプレート端面のエッジを表している。

粉末およびプレートの主成分である鉄は、焼結物およびプレート共に強く検出されている。これに対して混合粉末の成分である銅とニッケルは、焼結物の断面から検出されているのに加えて、その領域がプレートのエッジ端面から 30 μm 程度下方にまで広がっていることがわかる。これは、レーザ照射によって金属粉末が溶融・凝集する過程において、レーザ光がプレート上に照射され、プレート表面も加熱・溶融したためと考えられ

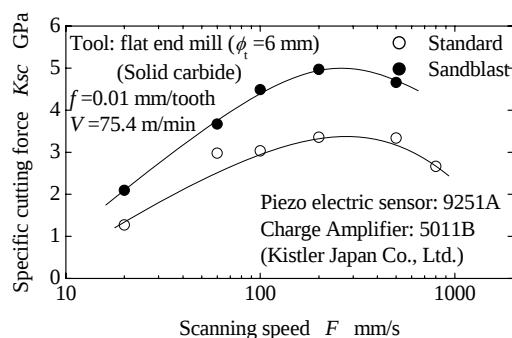
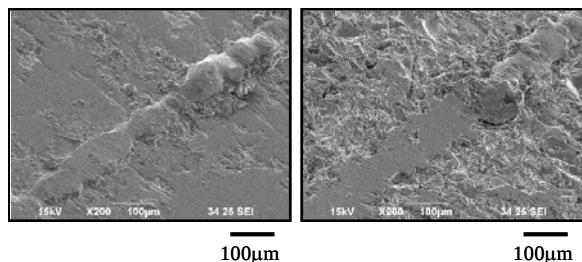


Fig.12 Specific cutting force of the sintered line at each surface



(a) Standard (b) Sandblast
Fig.13 SEM image of the sintered line after cutting

る。そして、それぞれの溶融物がレーザ光の通過と共に、合金化しながら凝固したためと考えられる。また、合金化した領域では、検出された銅とニッケルがほぼ一様に分布していることがわかる。

3.3 プレートに対するライン焼結物の密着性

ライン焼結物をエンドミル加工したとき切削動力計から出力された各分力の波形例を図 10、エンドミル加工前後のライン焼結物の様子を SEM 観察した結果を図 11 に示す。SEM 画像は、焼結物を斜め 45° 上方から観察したものである。切削動力計からの出力は、図 10 に示すように工具送り方向の分力 F_x と工具送り方向に対する垂直方向の分力 F_y において周期的なピークが確認できるが、工具の軸方向の分力 F_z はほとんどピークが確認できなかった。これらの結果は、全てのエンドミル加工実験において同様の結果となった。このことより、実験ではプレート表面の焼結物のみをエンドミル加工し、プレートは同時に切削していないことがわかる。また、図 10 に示す加工前後のライン焼結物の SEM 画像から、工具先端はライン焼結物とプレートとの境界付近を切削していることがわかる。全ての条件において加工前後の SEM 画像を観察し、いずれも焼結物とプレートとの境界付近を切削したことを確認した。

図 12 は、圧延プレート面およびサンドブラスト面上に焼結したライン焼結物についてエンドミル加工を行い、切削動力計からの工具送り垂直方向の分力 F_y の最大出力と、加工したライン焼結物の高さを実測定して、得られた結果から比切削抵抗 K_{sc} を算出した結果である。

比切削抵抗は、いずれのプレート面上の焼結物においても、レーザ光の走査速度が $F=200$ mm/s までは走査速度の上昇と共に大きくなっており、 $F=200$ mm/s のとき最大値となり、 $F=200$ mm/s を超えると減少する傾向が得られた。これらの結果は、前述した焼結幅の観察において、溶融・凝集・凝固が連続的に行われ良好なライン焼結物が得られるレーザ走査条件とほぼ一致

している。一方、プレート面の違いによる焼結物の比切削抵抗を比較すると、圧延プレート面と比較してサンドブラスト面上の比切削抵抗が全体的に大きい。レーザ走査速度が $F=200$ mm/s のとき、サンドブラスト面上の焼結物における比切削抵抗は $K_{sc}=4.9$ GPa であり、圧延プレート面上のそれにおける比切削抵抗は $K_{sc}=3.0$ GPa と 60% 程度大きくなっている。

また、図 13 は走査速度が $F=200$ mm/s のとき、各プレート面上の焼結物を切削実験後に SEM 観察した結果である。実験で切削された領域は、サンドブラスト面上の焼結物の方が大きいことが確認できる。

これらの結果より、各プレート面上の焼結物の切削実験において比切削抵抗に違いが生じたのは、前述したようにプレートに対する焼結物のぬれ性が異なるためと考えられる。サンドブラスト面上の焼結物のぬれ性が良く、金属粉末の溶融・凝固の過程においてプレートと合金化される領域が大きくなったためと考えられる。また、プレート面上の焼結物を切削実験することで、各プレート面に対する焼結物のぬれ性を評価でき、本手法が種々あるレーザ焼結条件を最適化するための有効な評価指標になる可能性が示された。

4. 結 言

本研究では、Yb ファイバーレーザによる金属粉末の焼結特性を知るため、焼結プレートの面性状の違いによる焼結幅や比切削抵抗を調べた。以下に、得られた結果を要約する。

- 1) レーザ照射によってプレート面上に良好なライン焼結物を造形するには、金属粉末が溶融・凝集・凝固するための適切な投入エネルギーが必要である。本実験では、レーザ光の走査速度が $F=100\sim 200$ mm/s の範囲において、良好なライン焼結物が造形可能であった。このとき、得られた焼結物の幅はレーザスポット径の 2 倍程度であった。
- 2) プレート上の金属粉末にレーザ照射すると、生じた熱で金属粉末と共にプレート表面も溶融し、冷却時にこれらが合金化されながら凝固する。
- 3) 各プレート面における焼結物は、プレートに対するぬれ性に起因して圧延プレート面よりサンドブラスト面の方が大きく、比切削抵抗を調べることでプレートに対する焼結物のぬれ性を評価でき、最適なレーザ焼結条件を知るための有効な評価指標になる可能性がある。

謝 辞

本研究は、地域新生コンソーシアム研究開発事業「金属光造形と成形技術の高度化による企業連携グリッドモデル構築」(H18-19)で得られた成果である。

参 考 文 献

- 1) 青島矢一: 日本型製品開発プロセスとコンカレントエンジニアリング-ボーイング 777 開発プロセスとの比較、一橋論叢, 120, 5 (1998) 711.
- 2) 丸谷洋二 他: 積層造形技術資料集, オプトロニクス社 (2002) 174.
- 3) IFUWA: Laser Sintering of Steel-based-powder, Proc. of 8th International Rapid Prototyping Symposium (2000)413.
- 4) 阿部 論, 東 喜万, 他: 金属光造形複合加工法法の開発, 精密工学会誌, 73, 8 (2007) 912.
- 5) 金属光造形用金属粉末, 特許第 3687667 号 (2005).
- 6) 古本達明, 上田隆司, 他: 積層造形用金属粉末の各種物性測定に関する研究-熱伝導率およびレーザ光吸収率の簡易測定方法の提案, 精密工学会誌, 73, 5 (2007)558.
- 7) 岡田将人: cBN およびコーティング工具によるハードミリング-工具の耐熱性評価と小型 2 色温度計の開発-, 金沢大学平成 18 年度学位論文, (2007)33.

