

# 金属粉末光造形複合加工における 小径ボールエンドミルの切削性能

上田隆司\*1, Abdullah YASSIN\*2, 古本達明\*1, 細川 晃\*1, 田中隆太郎\*1, 阿部 諭\*3

Cutting performance of small ball end mills in milling-combined laser metal sintering

Takashi UEDA, Abdullah YASSIN, Tatsuaki FURUMOTO, Akira HOSOKAWA, Ryutaro TANAKA and Satoshi ABE

金属粉末をレーザー光で焼結した材料を小径ボールエンドミルで切削したときの切削特性を切れ刃温度の観点から検討した。その結果、焼結材料の表面は硬さが高くなるが、1mm 程度内部になるとほぼ均一な材質となる。硬さの高い SCM 粉末が付着しているためであり、表面を切削するとき切れ刃温度は高くなる。切削速度が切れ刃温度に及ぼす影響は大きく、速度が増すに伴い切れ刃温度は上昇するが、送りや切込みの影響は小さい。径の異なるボールエンドミルで加工した場合、回転数が同じであれば切れ刃温度は大きく影響を受けない。焼結材料の熱伝導率が低いことが、切れ刃温度に大きく影響すると考えられる。

Key words: laser metal sintering, ball end mill, tool temperature, infrared radiation pyrometer

## 1. 緒言

金属粉末にレーザーを照射しながら粉体を焼結して積層していく光造形法では、必要な分量の粉体を固めていくことから、製造時間を大幅に短縮することができる。ところが、寸法精度において、レーザービーム径などに依存した誤差を生じることになり、薄い金属粉末焼結層を積層していく過程でエンドミルによる加工を行い、薄い積層の寸法精度を上げて行く方法が本研究で用いる金属粉末光造形複合加工である<sup>1)</sup>。

ところが、500 $\mu\text{m}$  程度の厚みのレーザー焼結層を切削するとき、寸法精度を上げるにはできるだけ径の小さいボールエンドミルを使う必要があるが、径が小さくなるにしたがいエンドミルの切削性は低下してくる。エンドミルの摩耗や破損は形状精度に大きく影響するだけでなく、製品の製作時間にも決定的な影響を与えることになり、金属粉末光造形法の根幹に影響を及ぼすことになる。

本研究では、焼結材料に対する小径ボールエンドミルの切削性能について検討した。一般に研究で用いられているブロック状の金属材料と異なり、焼結材料はレーザー照射条件によって大きくその物性を変化させるとともに異方性が大きい場合があり、これらの点に十分考慮する必要がある。また、小径ボールエンドミルで切削しようとするとき、実用的な切削速度を得るためには 10000rpm 以上が必要とされている。ところが、高速

で変動する切削抵抗を精度よく測定できる手段がなく、切削状態を細かく観察できないことが小径ボールエンドミルの研究を難しくしている<sup>2)</sup>。

そこで、著者らが開発した光ファイバ型赤外線温度計を使うことにより<sup>3)</sup>、高速回転する小径ボールエンドミルの切削状態を切れ刃温度の観点から検討することにした。この温度計は広い周波数帯域を持っており、高速で回転するエンドミルの切れ刃温度を測定することにも十分な精度で適用することができる。

## 2. 実験方法

### 2.1 加工材料

加工材料には、レーザーの照射エネルギーを変化させて焼結した 3 種類の焼結材料、および比較用として炭素鋼 S55C を用いた。

#### 2.1.1 金属粉体の物性

焼結に使用した金属粉体を表 1 に示す。材料には、クロムモリブデン鋼粉末、ニッケル粉末、銅粉末を混合して用いている。粒径はいずれも 30 $\mu\text{m}$  であり、球形に近い形状をしている。各粉末の特性を表 1 に、その写真を図 1 に示す。

#### 2.1.2 焼結方法

窒素雰囲気中で金属粉体をレーザー焼結した。レーザーには

表 1 金属粉末の物性

材 質		SCM	Ni	Cu
平均粒径	$\mu\text{m}$	30	30	30
かさ密度	$\text{kg}/\text{m}^3$	4690	4040	4690
比 熱	$\text{J}/\text{g}\cdot\text{K}$	0.45	0.49	0.38
熱伝導率	$\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$	0.13	0.17	0.17

\*1 金沢大学理工研究域: 〒920-1192 石川県金沢市角間町  
Institute of Science and Engineering, Kanazawa University

\*2 金沢大学大学院: 〒920-1192 石川県金沢市角間町  
Graduate School of Natural Science and Technology, Kanazawa University

\*3 パナソニック電工(株): 〒571-8686 大阪府門真市大字門真1048  
Panasonic Electric Works Co., Ltd.

〈学会受付日: 2008年7月17日〉

表 2 実験条件

工具径	$\phi$ 0.6, 1.0, 2.0, 6.0 mm
工具回転数	$N$ 20000 - 40000 rpm
切削速度	$V$ 56 - 376 m/min
切り込み	$R_d$ 0.08 - 0.4 mm
1刃当たりの送り量	$f$ 0.01 - 0.04 mm/tooth
ピックフィード	$P_f$ 0.02 - 0.2 mm
軸方向切り込み	$A_d$ 0.1, 0.4, 1.2 mm
切削材料	
	$E_l$ 211
ビッカース硬度	$E_m$ 275
	$E_h$ 270
かさ密度	$E_l$ 6950 kg/m <sup>3</sup>
	$E_m$ 7680 kg/m <sup>3</sup>
	$E_h$ 7680 kg/m <sup>3</sup>

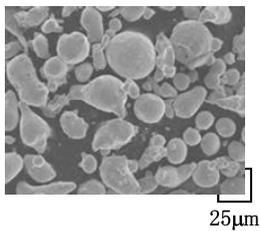


図 1 金属粉末の SEM 画像

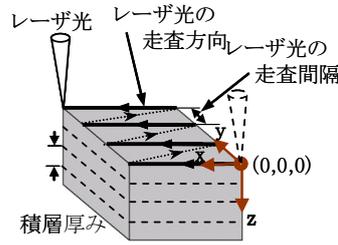


図 2 金属粉末の焼結方法

連続発振のファイバレーザ(Yb レーザ:波長 1.07μm, 平均出力 200W, ビームスポット径 94μm)を用いており, エネルギー密度を変化させて焼結した. 図 2 に示すように, 金属粉末厚さ 50μm の層とし, その層の表面にレーザ光を走査することにより焼結層を形成した. 全面の焼結が終了後, その上にさらに厚さ 50μm の粉末層を形成し, レーザ光を照射して粉末を焼結し, この操作を繰り返して金属層を積層していくことによって 10mm 角のブロック状の 3 次元焼結体を製作した.

2. 1. 3 焼結材料の物性

焼結材料の密度, 硬さを表 2 に示す. レーザパワーを低レベル  $E_l$ , 中レベル  $E_m$ , 高レベル  $E_h$  の 3 通りに変化させている.  $E_l$  ではエネルギー密度が低く粉末は溶融していないため焼結は十分でなく, 密度は 6950 kg/m<sup>3</sup>, 硬さが Hv 211 と低い.  $E_m$  になると金属粉末は溶融して焼結しており, 密度は

7680kg/m<sup>3</sup>, 硬さが Hv275 と高くなっている. さらに  $E_h$  と上げてもほとんど変化なく,  $E_m$  レベルのレーザエネルギーで焼結は十分に行われる. また, 焼結材料の曲げ強度は  $E_m$  で最大となり, 1000MPa となる<sup>5)</sup>. 以上の結果より, 金属粉末の焼結にはレーザエネルギーは中レベル  $E_m$  で十分であり, 本研究では  $E_m$  による焼結材料を標準材料と考えることにする.

図 3 に各材料の焼結面の SEM 写真を示す.  $E_l$  材料では金属粉末が十分に溶けておらず, 表面には多数の気孔が観察され, 材料密度が低い様子がわかる.  $E_m$  材料になると粉末は完全に溶融して表面に気孔はほとんど観察されず, 十分に材料密度が上がっていることがわかる.  $E_h$  材料では, さらに表面は滑らかとなっている. 図 3(d)は焼結材料の側面の SEM 写真である. 積層した面(y=0)であり, 焼結面である図 3(b)(z=0)と比べると面が粗くなっている. 全面に金属粉末が付着した状態にあることがわかる.

焼結材料では一般に材質の均一性が問題となることが多い. そこで, 焼結材料の均一性を調べた結果が図 4 である. 10×10×10mm のブロックを 2.1.2 節に示した方法で焼結している. 図のように, x 軸, y 軸, z 軸をとると, いずれの方向においてもほぼ同じ傾向を示していることがわかる. すなわち, 材料表面で硬さが高くなっているが, 表面下 1mm になると硬さは低下して, ほぼ一定値に収束している. また, x, y, z 方向で大差がなく, ほぼ同じ硬さとなっている. したがって, 焼結材料は, 表面層において硬さが高いが, 表面下 1mm になればほぼ均一な材料であることがわかる.

2. 2 実験装置

図 5 に切削加工の実験装置主要部を, 表 2 に実験条件を示す. 加工材料はキスラー動力計の上に固定されており, ボールエンドミルで切削するときの切削抵抗 3 分力を測定することができる. また, 切削点から  $\psi=180^\circ$  回転した位置に光ファイバが設置されており, ボールエンドミルの切れ刃温度を測定することができる. ボールエンドミルには直径 6mm, 2mm, 1mm, 0.6mm の 4 種類を用いており, 実験では主に 2mm のボールエンドミルを用いた. 回転数は 4000rpm~40000rpm の間で変化させた. エンドミルはすべて 2 枚刃であり, 送りを 1 刃当たり 0.01mm, 半径方向の切込み  $R_d$  を 0.1mm, 軸方向の切込み  $A_d$  を 0.1mm と一定にした. 加工は乾式でダウンカットで行っており, ボールエンドミルの底刃を使う“平面切削”と側

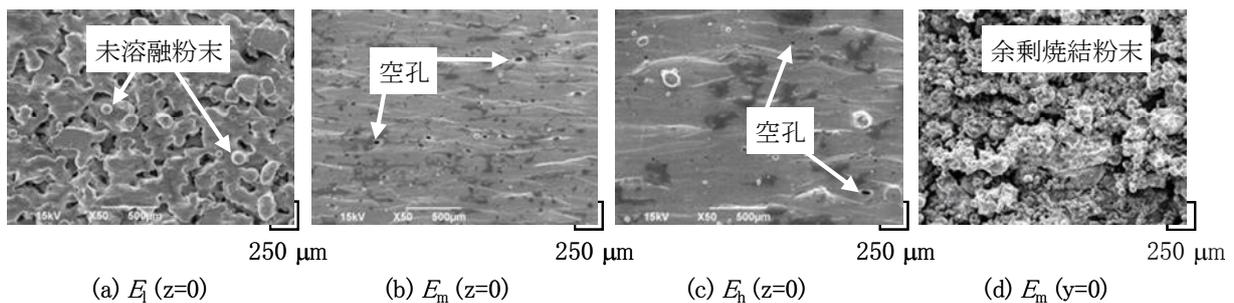


図 3 焼結材料表面の SEM 画像

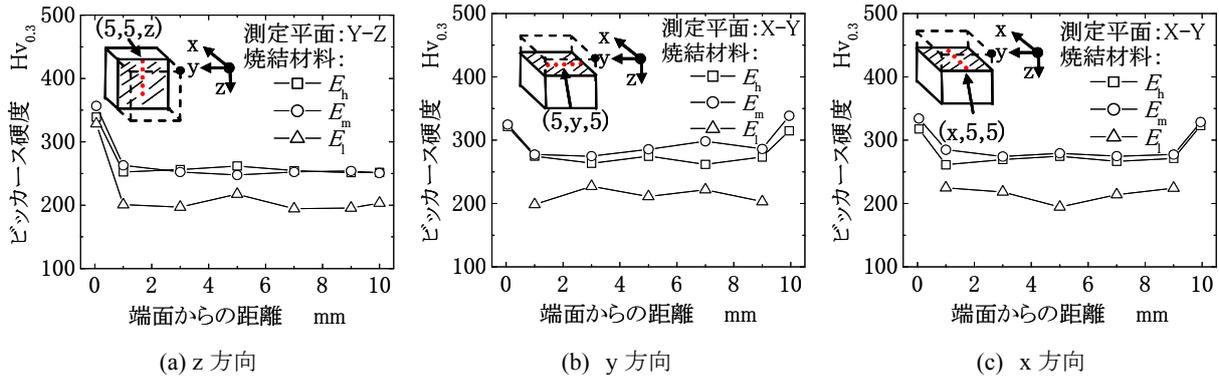


図4 焼結材料内部の硬度分布

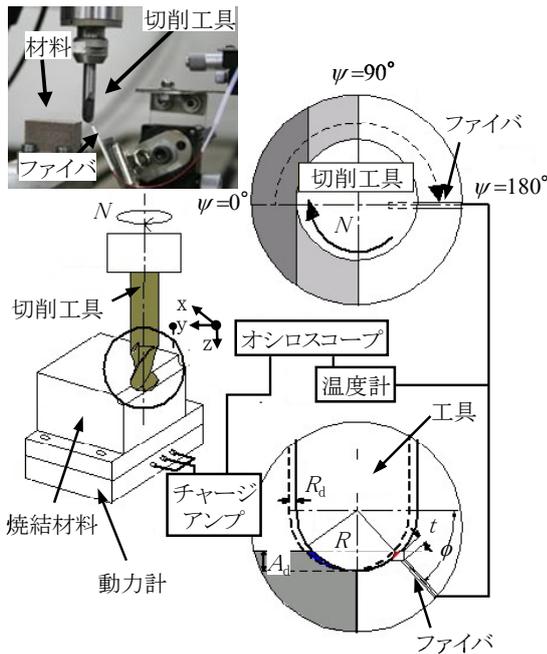


図5 実験装置の主要部

面の刃を使う“側面切削”を行っている。

切れ刃の温度測定は光ファイバ型 3 色温度計を用いて行った。図 5 において、光ファイバ受光面と切れ刃の間距離は 0.5mm であり、高温の切れ刃が光ファイバの受光面を横切るとき切れ刃逃げ面から放射された赤外線を受光する。受光した赤外線は 3 色素子に伝送され、電気信号に変換した後、波形記憶装置に記録した。3 色素子は InSb セル、InAs セル、MCT セルで構成されており、これらのセルからの出力比を取ることによって温度を測定することができる。高温域では InAs と InSb の出力比、低温域では InSb と MCT の出力比を使っている。温度計の周波数特性を調べたが、200KHz までフラットな特性を持ち、500KHz においても 1dB 程度の低下であることから十分な応答速度を持っており、本研究の実験条件の範囲で切れ刃温度を測定することができる。

図 5 において、光ファイバの設定座標は角度  $\psi$ ,  $\phi$  で表している。回転方向では切削点から  $\psi=180^\circ$  離れた位置に設置し

ており、切削後の切れ刃温度を測定している。したがって、切削終了から温度測定までわずかな時間遅れがあり、工具回転数に依存して変化する。このわずかな時間の中に切れ刃が冷却されて温度が低下するため、測定温度を検討するときには冷却時間の影響を考慮する必要がある。角度  $\phi$  方向において、 $\phi=0^\circ$  がエンドミル外周、 $\phi=90^\circ$  がエンドミル中心を表すことになり、本研究では切りくず厚さが最大となる位置を加工条件より算出して、その位置に光ファイバを設置している。切削抵抗の測定にキスラーの動力計を使用した。周波数特性に注意する必要があるが、本研究で用いた実験装置の周波数特性を調べたところ、y 軸方向の固有振動数が最も低く 4000Hz であることから、切削抵抗はこの条件を満足する低速回転で測定した。

### 3. 実験結果

#### 3.1 温度計の出力波形

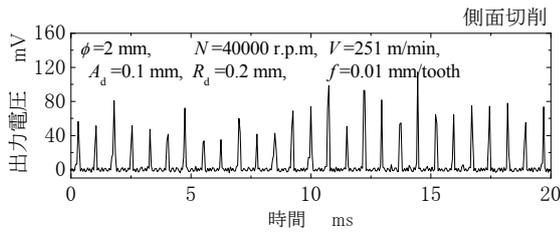
図 6 に温度計の IbSb 素子の出力波形を示す。1 つのパルスが切れ刃 1 個からの出力であり、振幅が温度に相当している。(a)が  $E_m$  材料の焼結表面 ( $x=0$  平面)を、(b)が S55C をそれぞれ径 2mm のボールエンドミルで“側面切削”したときの波形である。 $E_m$  材料加工では S55C を加工した場合と異なり、出力が大きく変動している。これはエンドミル切れ刃の切削状態が 1 回転ごとに変動していることを表している。焼結表面には図 3(d)の SEM 写真に見るように、金属粉末が付着して不均一な面となっている。これら粉末の中には硬度が高い SCM 粉末も含まれており、この粉末を切削するとき出力が大きくなり、切れ刃温度も高くなる。したがって、焼結表面の切削はエンドミルにとって変動の激しい過酷な加工状態にあることがわかる。ここには掲載していないが、焼結表面から内部の加工に移ると出力波形はほぼ均一になり、炭素鋼と同様の波形が得られる。この傾向は“平面切削”の場合も同様である。

そこで、切れ刃温度は、出力の大きい方からパルスを 10 個選び、その測定値を平均して求めることにした。

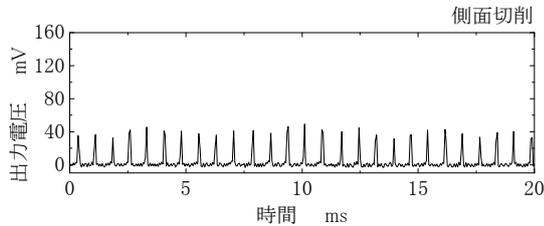
#### 3.2 切れ刃温度

##### 3.2.1 焼結材料の被削性

図 7 に焼結した  $E_m$  材料を加工したときの切れ刃温度を切



(a)  $E_m$  ( $y=0$ )



(b) S55C

図6 InSb 素子からの出力波形( $\psi=180^\circ$ )

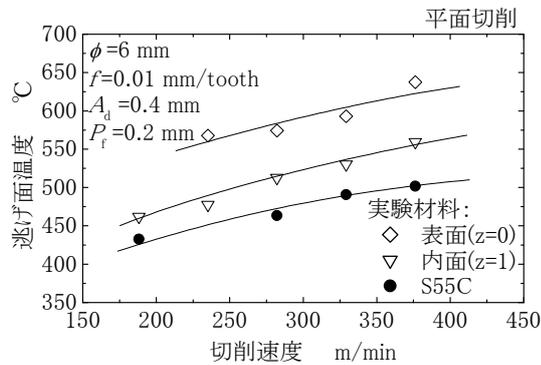


図7 表面と内部の比較

削速度で整理した結果を示す。焼結表面 ( $z=0$  平面) と  $z=1\text{mm}$  平面を“平面切削”しており、炭素鋼 S55C を加工した場合と比較している。 $z=0$  面の切削において切れ刃温度が最も高く、次いで  $z=1\text{mm}$  面となり、S55C で最も低くなっている。

その第一の原因は材料の硬さにあり、図4に見るように、焼結表面で硬さが高くなっている。硬さの高い SCM440 粉末が表面に多数付着しているためである。第二の原因として、材料の熱伝導率の影響が考えられる。図4において、焼結材料の内部になると硬さが Hv250 程度と S55C と大差ないが、図7に見るように切れ刃温度は S55C より高くなっている。S55C の熱伝導率が  $53\text{W/mK}$  であるのに対し、 $E_m$  では  $0.14\text{W/mK}$  とはるかに小さく<sup>6)</sup>、このため材料や切りくずに逃げる熱量が少なくなり、切れ刃温度が高くなったものと考えられる。

図8は焼結した  $E_h$ ,  $E_m$ ,  $E_l$  材料を切削したときの切れ刃温度を比較した結果である。比較のため、S55C の結果を載せているが、S55C が最も低く、次いで  $E_l$ ,  $E_m$  の順に高くなっている。 $E_h$  は  $E_m$  とほぼ同じであり、この両者の材質的な差は小さ

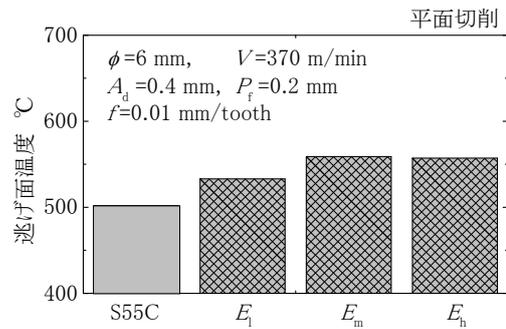


図8 焼結材の切削温度の比較 ( $z=1$ )

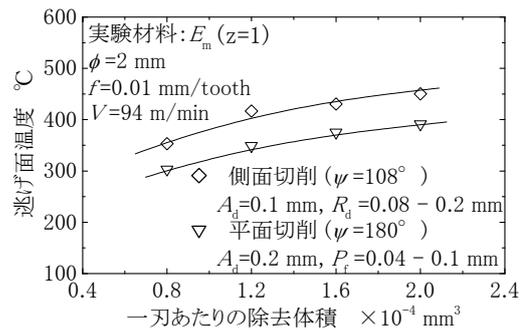


図9 平面切削と側面切削の比較

いといえる。したがって、工具摩耗に大きく影響する切れ刃温度で比較すると、焼結材料はいずれも炭素鋼 S55C より被削性が劣るといえる。ところが、これらの材料の比切削エネルギーを比較した図13(後出)では、これらと異なる結果が得られている。

### 3.2.2 側面切削と平面切削の比較

本研究のように薄い層状の焼結材料を切削して寸法精度を出そうとする加工ではエンドミルの側面刃を使って側面切削する機会が多い。そこで、焼結材料  $E_m$  を  $2\text{mm}$  径のボールエンドミルで“側面切削”した場合と“平面切削”した場合を比較した結果が図9である。切削方式が異なるため、冷却時間が同じになる位置  $\psi$  に光ファイバを設置して測定しており、温度は一刃当たりの除去体積で整理した。除去体積が同じ場合、全体的に側面切削で切れ刃温度が高くなっている。当然のことながら、側面切削では最外周の切れ刃で切削が行われているが、平面切削では中心に近い切れ刃で切削しているため、同じ回転数でも切削速度は低くなってしまふ。すなわち、同じ切削条件で加工した場合、側面切削で切れ刃温度が高くなることから工具摩耗が進行しやすく、エンドミルの側面刃の摩耗に注意する必要がある。

### 3.2.3 切削条件の影響

$E_m$  材料を  $2\text{mm}$  径のボールエンドミルで側面切削したとき、切削条件が切れ刃温度に及ぼす影響を調べた結果が図10である。焼結材料の焼結表面 ( $y=0$  平面)、および表面下  $1\text{mm}$  ( $y=1\text{mm}$  平面) を切削している。

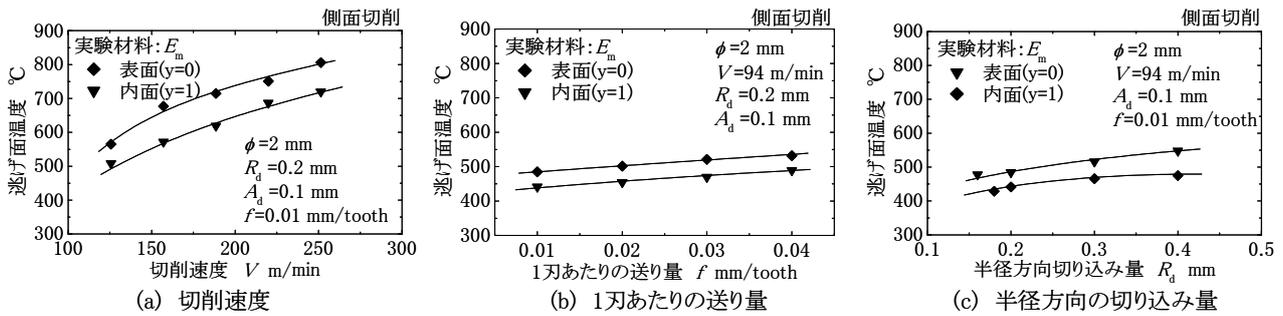


図 10 切削条件の影響

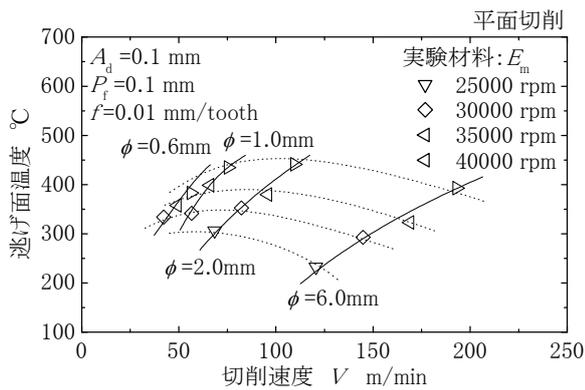


図 11 工具径の影響

## (a) 切削速度の影響

図 10(a)に示すように、切削速度を125m/minから250m/minまで変化させているが、切削速度が増すに伴い切れ刃温度は上昇している。125m/minで600°Cであったものが250m/minでは800°Cにまで上昇しており、切削速度が刃先温度に及ぼす影響は大きいことがわかる。y=1mmになると切れ刃温度は80°C近く低下しており、焼結表面の切削が工具摩耗に大きく影響してくる。

## (b) 送りの影響

図 10(b)は1刃当たりの送りの影響を調べた結果である。送りが大きくなって温度上昇はわずかであり、送りの影響は小さいことがわかる。

## (c) 切込みの影響

半径方向の切込みの影響を調べた結果が図 10(c)である。この場合も切れ刃温度に及ぼす影響は小さく、切込みの増加に伴ってわずかに温度上昇するだけである。

## (d) ボールエンドミル径の影響

エンドミル径が刃先温度に及ぼす影響を調べるとき注意がある。(a)の結果より、切削速度が切れ刃温度に及ぼす影響が大きいことから、同じ回転数で切削しても、径によって切削速度が大きく異なることになり、切削温度を単純に比較することができない。切削速度を同じにしようとするれば、径の大きなエンドミルでは回転数を大幅に低く設定しなければならず、実

際の加工条件から大きく外れてしまう。そこでここでは、各径のエンドミルが実際に使用されている回転数で加工することにした。このため、切削速度はエンドミルによって大きく異なることになる。図 11 は径 0.6mm, 1mm, 2mm, 6mm のエンドミルを回転数 25000rpm~40000rpm で変化させて切削した結果である。横軸には切削速度をとっている。

加工条件を同じに設定していることから、回転数が同じであれば単位時間当たりの切りくず除去量は同じになる。したがって、径の大きなエンドミルは軽い切削状態となり、径の小さなエンドミルでは過酷な加工条件となる。また、同じ回転数であれば、切削終了後から温度測定までのいわゆる冷却時間が同じになり、切れ刃温度の比較がしやすい。

図より明らかなように、いずれの径のエンドミルにおいても、切削速度が速くなるにしたがって切れ刃温度は直線的に上昇している。しかし、切れ刃温度はいずれも 250°C~450°C の範囲に入っており、エンドミル径による差は高々 80°C 程度と大差がないことがわかる。すなわち、同じ回転数で切削する限りエンドミル径が異なっても切れ刃温度は大きく変化しないということになる。この現象に関して、今後詳細に検討する必要がある。

図 12 は冷却時間が切れ刃温度に及ぼす影響を調べた結果である。τ=0 が切削終了時を表している。切削終了直後に 600°C であった切れ刃が 1ms 後には 500°C 以下まで低下しており、冷却が急激に進んだことがわかる。

## 3.3 比切削エネルギー

動力計の固有振動数が高くないことから、回転数の高い状態で切削抵抗を測定することができない。このため、エンドミルの回転数を「4000rpm」に落とした状態で切削している。図 13 は 3 種類の焼結材料を切削したときの切削抵抗を測定し、比切削エネルギーを求めた結果である。E<sub>n</sub> と E<sub>m</sub> 材料ではほぼ同じ比切削エネルギーを示しており両材料の被削性には大差がなく、また S55C より被削性が劣ることがわかる。ところが、E<sub>l</sub> 材料になると比切削エネルギーが大きく低下し、S55C よりはるかに小さくなっている。すなわち、材質的には S55C よりもはるかに被削性がよい材料であることがわかる。ところが、図 7 や図 8 に示したように切れ刃温度は S55C よりも高温となっている。これは材料の熱伝導率の影響と考えられ、S55C の熱伝

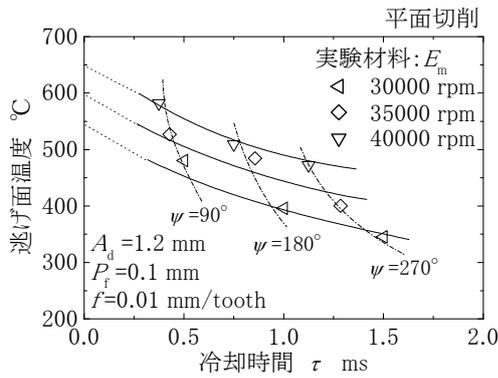


図 12 冷却特性

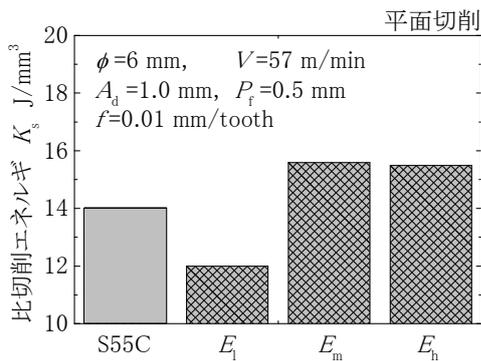


図 13 比切削エネルギー ( $z=1$ )

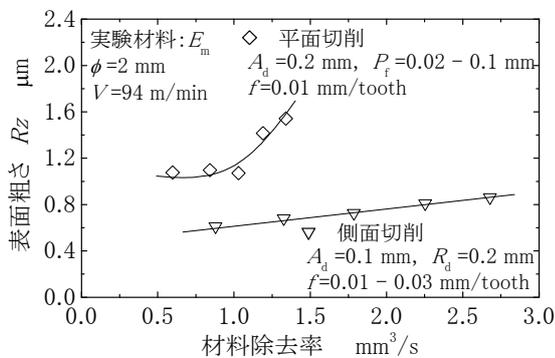


図 14 仕上げ面粗さへの影響

導率が 53W/mK であるのに対し、3.2 節で述べたように焼結材料の熱伝導率のはるかに小さく、このため材料や切りくずに逃げる熱量が少なくなり、切れ刃温度が高くなったものと考えられる<sup>6)</sup>。焼結材料の熱伝導率は一般に小さく、刃先温度に及ぼす影響が大きいと考えることができる<sup>6)</sup>。

### 3.4 表面粗さ

図 14 は  $E_m$  材料を平面切削、および側面切削したときの表面粗さを測定した結果である。単位時間当たりの切りくず体積で整理している。側面切削では、半径方向の切込みを変化させているが、 $Ra=0.6\sim 0.8\mu\text{m}$  程度の細かい面粗さが得られている。平面切削ではピッチフィードを変化させていることからそ

の影響は大きく、切りくず体積が大きくなるに従って急激に粗くなっている。

### 3.5 金属粉体の切れ刃温度への影響

複合加工機において、焼結材料はその製作方法のため金属粉体中に埋まっている。このため、焼結材料の周囲をボールエンドミルで切削するとき、エンドミルの周りは金属粉体に囲まれており、切削に影響することが考えられる。そこで、焼結材料を金属粉体に埋め込み、複合加工機と同じ状態を作り出して切削を行ったところ、30°C程度切削温度が高くなったが、全体として大きく切削性能に影響することはなかった。

## 4. 結言

金属粉末をレーザー光で焼結した材料を小径ボールエンドミルで切削したときの切削特性を切れ刃温度の観点から検討した。得られた結果をまとめると次のようになる。

- (1) 焼結材料の表面は硬さが高くなるが、1mm 程度内部になるとほぼ均一な材質となる。硬さの高い SCM 粉末が付着しているためであり、表面を切削するとき切れ刃温度は 80°C程度高くなる。
- (2) 切削速度が切れ刃温度に及ぼす影響は大きく、速度が増すに伴い切れ刃温度は上昇するが、送りや切込みの影響は小さい。
- (3) 径の異なるボールエンドミルで加工した場合、回転数が同じであれば切れ刃温度に大差がなく、大きく影響を受けない。
- (4) 本研究で用いた焼結材料の被削性は S55C に比べて劣り、切れ刃温度も高くなる。
- (5) 同じ条件で側面切削と平面切削を行った場合、エンドミルの外周刃で切削速度が速くなることから側面切削で切れ刃温度が高くなる。

## 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。

## 5. 参考文献

- 1) S.Abe, Y.Higashi, H.Togeyama, I.Fuwa, N.Yoshida: Development of Milling-combined Laser Sintering Method - Combination of laser-assisted metal sintering method and the milling in on machine, J. Jpn. Soc. Prec. Eng., 73, 8 (2007)912 (in Japanese).
- 2) T. Miyaguchi, E. Takeoka, M. Masuda and H. Iwabe: Dynamic Cutting Force in High-Spindle-Speed Milling Using Small Ball End Mill, J. Jpn. Soc. Prec. Eng., 67, 3(2001)450 (in Japanese).
- 3) T. Ueda, R. Nozaki, A. Hosokawa: Temperature Measurement of Cutting Edge in Drilling - Effect of Oil Mist-, CIRP Annals, 56, 1(2007)93.
- 4) 日本機械学会編: 機械工学便覧, 丸善, (1987)A6-176.
- 5) S.Abe: Studies on Development of Milling-Combined Laser Metal Sintering System and Production of Injection Molds, Doctoral Dissertation in Kanazawa University, (2008)71 (in Japanese).
- 6) T.Furumoto, T.Ueda, A.Hosokawa, S.Abe, T.H.C. Childs: Study on the Measurement of Physical Properties in the Metal Powder for Rapid Prototyping - Proposal of the Measurement of Thermal Conductivity and Absorption of Laser beam-, J. Jpn. Soc. Prec. Eng., 73, 5(2007)558 (in Japanese).