マイクロ・ナノテクスチャを有する小径ドリルを用いた
アルミニウム合金の穴あけ加工*川 堰 宣 隆^{*1}, 杉 森 博^{*2}, 森 本 英 樹^{*3}
森 田 昇^{*4}, 堀 功^{*5}Drilling Aluminum Alloy Using Small-Diameter Drills
with Micro/Nanometer-Scale TexturesNoritaka KAWASEGI^{*6}, Hiroshi SUGIMORI, Hideki MORIMOTO,
Noboru MORITA and Isao HORI^{*6} Planning and Management Department, Toyama Industrial Technology Center,
150 Futagami-machi, Takaoka-shi, Toyama, 933-0981 Japan

This study aims to develop novel cutting tools that have either microscale or nanoscale textures on their surfaces. Texturing microscale or nanoscale features on a solid surface allowed us to control the tribological characteristics of the tool. In this report, the textures were applied to drills with the diameter of 0.5 mm and drilling experiments of aluminum alloy were performed to evaluate the developed tools. The texture decreased thrust and its fluctuation range under the high feed rate conditions. This effect depended on the direction of the texture and lower thrust was observed when the texture was perpendicular to the chip flow direction rather than the parallel. The breakage resistance could be improved utilizing this phenomenon. These results indicate that the developed tool is effective as a drill for small holes.

Key Words: Small-Diameter Drill, Micro/Nanometer-Scale Texture, Drilling, Femtosecond Laser, Micro Machining, Aluminum Alloy, Cutting Force

1. 緒 言

近年, 各種デバイスの小型化, 複雑化や加工材料の多様化にともない, 小径工具による微細加工技術が必要とされている. このような背景から, 小径ドリルを用いた微細穴あけ加工に関する研究が盛んに行われている^{(1),(2)}. 小径ドリルによる加工では, 高能率・高精度の微細加工が可能である. その反面, 工具剛性の低さから, 切りくずのつまりや切削抵抗の増加にともなう工具の折損などが問題となってくる. とくに, アルミニウム合金などの溶着しやすい材料の加工では, この問題が顕著に現れる. このため, 安定した加工を実現するためには, 工具の加工性や切りくず排出挙動の

改善が重要な課題となってくる. これを解決するためには, 工具表面の摩擦特性を変化させ, その加工性を改善することが有効であると考ええる.

本研究は, 工具表面にマイクロ・ナノメータオーダの微細なテクスチャを作製し, そこで発現する摩擦の低下の作用を応用することで, 優れた加工性を持った切削工具を開発することを目的としている⁽³⁾⁻⁽⁵⁾. 既報⁽³⁾ではフェムト秒レーザを利用して, 表面にマイクロ・ナノメータオーダの微細なテクスチャを持った切削工具を新規開発した. これを用いてアルミニウム合金の旋削加工を行った結果, テクスチャの作製は工具すくい面の摩擦の減少にともなう切削抵抗の低下や被削材の溶着の減少などの点で効果があることがわかった⁽⁵⁾.

本報ではこれらの結果を応用して, 表面にマイクロ・ナノメータオーダの微細なテクスチャを持った小径ドリルを作製した. これを用いてアルミニウム合金の穴あけ加工を行い, 加工条件およびテクスチャ形状依存性の観点から, その効果について検討を行った.

2. 工具の作製

本研究では, 工具表面にマイクロ・ナノメータオーダ

* 原稿受付 2009 年 5 月 21 日.

^{*1} 正員, 富山県工業技術センター企画管理部(☎ 933-0981 高岡市二上町 150).^{*2} 正員, 富山県工業技術センター機械電子研究所(☎ 930-0866 富山市高田 383).^{*3} 富山県工業技術センター中央研究所.^{*4} 正員, 富山大学大学院理工学研究部(☎ 930-8555 富山市五福 3190).^{*5} (株) 不二越(☎ 930-8511 富山市不二越本町 1-1-1).

E-mail: kawasegi@itc.pref.toyama.jp

Fig. 1 Schema showing the developed tool with (a) perpendicular and (b) parallel textures. The arrows denoted by A and B indicate perpendicular and parallel laser scanning directions, respectively. (c) SEM image of a drill with the perpendicular texture patterned using femtosecond laser at a scanning pitch of 5 μm . (d) Enlarged image of the textured area. The laser was scanned perpendicular to the laser polarization direction.

のテクスチャを作製する手法として、フェムト秒レーザーによる微細加工法を提案している⁽³⁾。フェムト秒レーザーは、パルス幅が数百 fs の超短パルスレーザーであり、熱影響の極めて小さな微細加工を行うことができる⁽⁶⁾。使用したフェムト秒レーザーは、サイバーレーザー社製 IFRIT1.0W (波長: 780 nm, 繰り返し周波数: 1 kHz, パルス幅: 160 fs) である。レーザー照射ではビーム径を数十 μm に設定し、一定の間隔で走査することでテクスチャを作製する。その結果、レーザーの入射光と表面散乱光の干渉によって、大きさ数百 nm オーダの周期構造が作製される^{(6),(7)}。同時にレーザーの走査間隔ごとに、深さ数百 nm ～数 μm のうねり状のテクスチャが作製される^{(3)~(5)}。

既報⁽⁵⁾では、旋削工具のすくい面にテクスチャを作製することで、工具・被削材間の摩擦特性が変化し、被削性を改善できることを示した。また、ドリル加工ではドリル溝部の摩擦によって、被削性が変化するとされている^{(8),(9)}。本報ではこれらの結果を考慮し、ドリルの溝部分について、とくに切れ刃周辺部にテクスチャを適用し、その効果について検討した。

図 1(a)と(b)は、テクスチャ作製領域の模式図である。工具には、直径 0.5 mm の高速度工具鋼のドリルを用いた。テクスチャの方向は切れ刃から被削材が排

Table 1 Drilling conditions

Tool material	High speed steel
Tool diameter (mm)	0.5
Work material	Aluminum alloy A5052
Spindle speed (rpm)	5000, 10000, 15000
Cutting speed (m/min)	7.9, 15.7, 23.6
Feed rate ($\mu\text{m}/\text{rev}$)	3, 6, 12
Depth of hole (mm)	2.5, 3.0
Lubrication method	Wet

出される方向を基準とし、それに対して垂直方向と平行方向の 2 種類とした。また、その作製領域は切れ刃部分から 400 μm までとし、垂直方向、平行方向の場合に、それぞれ図 1(a), (b)のように設定した。同図(c)と(d)は、作製した工具の SEM 観察像である。レーザーの走査間隔は、5 μm である。レーザー照射部には、レーザーの干渉によってピッチ 800 nm, 深さ 150 nm のテクスチャが作製される。同時に、レーザーの走査間隔と同様のピッチで、うねり状のテクスチャが作製されることがわかる。旋削工具による実験では、大きさ数 μm オーダのうねり状のテクスチャが、摩擦の減少の点で効果があることを示した⁽⁶⁾。このため、本実験ではレーザーの干渉により形成されるテクスチャの方向を垂直方向に一定として、走査間隔ごとに形成されるうねり状のテクスチャの影響について検討した。

3. 実験方法および条件

穴あけ加工実験には、卓上型 NC 加工機 (PMT 社製, MC-2) を用いた。被削材はアルミニウム合金 A5052 とし、テクスチャの形状および加工条件が被削性に及ぼす影響について検討した。加工実験では、深さ 0～0.5 mm, 0.5～1.5 mm, 1.5～2.5 mm の 3 段階のステップ送りにより、深さ 2.5 mm の穴あけ加工を行った。また加工実験は、切削液の供給による抵抗測定時のノイズの影響を避けるため、被削材を切削液に浸漬させた状態で行った。表 1 は、加工条件である。スラストは、深さ 2.0～2.5 mm 間の値を測定し、3 回穴あけ加工した時の平均値を示した。

4. 実験結果および考察

4・1 テクスチャの効果の加工条件依存性 テクスチャによる効果の加工条件依存性について検討した。工具には、図 1 と同形状のものを使用した。うねり状のテクスチャの深さは、2.0 μm である。

図 2 は、切削速度 15.7 m/min, 送り量 12 $\mu\text{m}/\text{rev}$ で穴あけ加工したときの、加工深さ 1.5～2.5 mm における代表的なスラスト波形である。この条件は送り量

Fig. 2 Comparison of thrust between nontextured and textured tools, at a cutting speed of 15.7 m/min and feed rate of 12 $\mu\text{m/s}$. The thrust is at the depth of hole from 1.5 mm to 2.5 mm. Ranges denoted by A and B indicate fluctuations of thrust in the depth of hole from 2.0 mm to 2.5 mm.

Fig. 3 SEM images of a cutting chip generated while drilling aluminum alloy using (a) nontextured and (b) textured tools, at a cutting speed of 15.7 m/min and feed rate of 12 $\mu\text{m/rev}$.

が大きく、厳しい切削条件となる。テクスチャを作製しない場合、深さの増加にともないスラストは大きくなる。また加工中にスラストは大きく変動しており(図中、A部)、不安定な切削状態にあるといえる。一方、テクスチャを作製することで、スラストは減少した。また、加工中のスラストの変動幅(図中、B部)も小さくなる。すなわち、小径ドリルにテクスチャを適用することで、穴あけ加工性を改善できることがわかる。

図3は各工具で加工したときの、代表的な切りくずのSEM観察像である。テクスチャのない工具の場合、切りくずの幅は一定ではなく、その端部は荒れた状態となっている。また切りくずの厚さも、不規則に変化していることがわかる。これは切れ刃部の摩擦や溶着により、切りくずの排出挙動が不安定であることを示唆している。一方、テクスチャを作製した工具の場合、幅、厚さが一様な切りくずが形成された。テクスチャを作製

Fig. 4 Comparison of thrust between nontextured and textured tools at various feed rates.

Fig. 5 Comparison of fluctuation ranges of thrust between nontextured and textured tools at various feed rates.

することで、切れ刃部の摩擦や溶着が減少し、切りくずの排出挙動が安定したためと考える。これは、旋削加工と同様の接触面積の変化⁽⁵⁾や油だまりとしての効果⁽¹⁰⁾などに起因すると考える。

図4は、切削速度 15.7 m/min で加工したときの、送り量に対するスラストの変化である。送り量が 6 $\mu\text{m/rev}$ 以下の場合、スラストに大きな差は見られない。送り量が 12 $\mu\text{m/rev}$ になると、テクスチャを作製した場合にスラストが小さくなることがわかる。この傾向は加工深さが深くなるにつれて、強く現れた。これは、送り量とテクスチャの大きさの関係に起因すると考える。送り量が小さい場合、テクスチャが一刀あたりの送りに対して大きく、その効果が現れにくい。送り量が大きくなると、一刀あたりの送りがテクスチャに対して十分な大きさとなり、その効果が現れると考える。すなわち、加工単位に合わせた大きさのテクスチャの作製が必要となることがわかる。また加工穴の位置精度は、いずれの条件においても大きな違いが見られなかった。

つぎに、図4のグラフ中の各プロットについて、スラストの変動幅(図2、A部、B部に対応)の比較を行った。図5は、各送り量におけるスラストの変動幅である。

Fig. 6 Comparison of thrust between nontextured and textured tools at various cutting speeds.

Fig. 7 Comparison of fluctuation ranges of thrust between nontextured and textured tools at various cutting speeds.

各バーの縦軸方向の幅は、加工深さ 2.0～2.5 mm におけるスラストの変動幅を示している。すなわち、バーの上端と下端は、それぞれスラストの最大値と最小値となる。スラストが小さな送り量 6 $\mu\text{m}/\text{rev}$ 以下の場合、テクスチャの有無による大きな差は見られない。スラストに差が生じる送り量 12 $\mu\text{m}/\text{rev}$ になると、テクスチャを作製した場合にスラストの変動幅が小さい。すなわち、テクスチャを作製することで、高送り条件においてスラストと同時にその変動幅を小さくできることがわかる。

つぎに、テクスチャによる効果の切削速度依存性について検討した。図 6 は、切削速度に対するスラストの変化である。切削速度が変化しても、スラストに大きな差は見られない。一方、切削速度がいずれの場合でも、送り量が大きくなるとテクスチャを作製した工具でスラストが小さくなる。すなわち、本実験条件下では切削速度が変化しても、テクスチャの大きさに対して十分な送り量で加工した場合に、テクスチャによる効果を得られることがわかる。

図 7 は、テクスチャの有無によってスラストに差が生

Fig. 8 Comparison of thrust at various directions of the texture.

Fig. 9 SEM images of a cutting chip generated while drilling aluminum alloy using a textured tool with parallel direction, at a cutting speed of 15.7 m/min and feed rate of 12 $\mu\text{m}/\text{rev}$.

じた送り量 12 $\mu\text{m}/\text{rev}$ のときの、各切削速度におけるスラストの変動幅である。切削速度がいずれの条件でも、テクスチャを作製した工具の場合にスラストの変動幅は小さくなる。すなわち、テクスチャを作製することで、図 6 で示したスラストと同様に、その変動幅も大きく改善できることがわかる。

以上の結果より、ドリルの溝部にテクスチャを作製することで、送り量が大きな条件でスラストおよびその変動幅が小さくなることがわかった。すなわち、送り量が大きな条件でも切削状態を安定させることができる。これによって、加工能率の向上が可能になると考える。

4.2 テクスチャの方向依存性 テクスチャの方向による影響について検討した。図 8 は、うねり状のテクスチャの方向に対するスラストの変化である。送り量が 12 $\mu\text{m}/\text{rev}$ の場合、テクスチャを垂直方向に作製することで、スラストは減少する。一方、テクスチャが平行方向の場合、送り量が大きな条件でもスラストに変化は見られない。この結果は、旋削加工時のそれ⁽⁵⁾と同様の傾向であり、大きさ数 μm オーダのうねり状のテクスチャの方向がその効果を決定するうえで重要な因子となることを示唆している。

図 9 は、テクスチャを平行方向に作製した工具を用いて送り量 12 $\mu\text{m}/\text{rev}$ で加工したときの、切りくずの SEM 観察像である。図 3(a)と同様に、切りくず端部

Fig. 10 SEM images of the textured area on a drill surface prepared by a femtosecond laser with various irradiation conditions. (a) Nontextured surface. Textured surfaces with the depths of (b) 1.5 μm , (c) 2.7 μm and (d) 3.4 μm .

は荒れており、切削状態は不安定であるといえる。

以上の結果より、テクスチャによる効果はその方向によって変化し、テクスチャを垂直方向に作製することで効果が現れることがわかった。

4・3 テクスチャの深さ依存性 本研究では、テクスチャを作製する手法として、フェムト秒レーザを使用する。このため、レーザの加工条件によって、テクスチャの形状を変化させることができる。ここでは、レーザの照射条件を変化させてテクスチャを作製し、テクスチャの形状による加工性の変化について検討した。

図 10 は、テクスチャを作製した領域の SEM 観察像である。テクスチャのピッチは、10 μm とした。レーザ照射前のドリル表面には、ドリル作製時の研削痕が存在している。テクスチャが浅い場合、レーザ加工前の研削痕とテクスチャが混在した状態にある。テクスチャが深くなると、加工前の研削痕は消滅する。さらに深い条件では、レーザ照射部周辺にはデブリが生じることがわかる。これらのテクスチャを作製したドリルを用いて加工実験を行い、その影響について検討した。

図 11 は、各種テクスチャを作製した工具で加工したときの、スラストである。切削速度は、15.7 m/min とした。テクスチャの深さが 1.5 μm 、2.7 μm の場合、工具がいずれの場合でも送り量が 12 $\mu\text{m}/\text{rev}$ の条件でテクスチャによる効果が現れ、スラストは減少した。また、これらの値に大きな差は見られない。一方、テクスチャの深さが 3.4 μm になると、テクスチャの無いものと比較して逆にスラストは大きくなった。テクスチャ周辺部に存在するデブリが逆に抵抗として作用するようになり、スラストが大きくなったと考える。すなわち、デブリの生じない条件下でテクスチャを作製することで、

Fig. 11 Comparison of thrust at various shapes of the texture.

その効果を得られることがわかる。

4・4 工具の耐折損性 ここまでの結果より、ドリルの溝部にテクスチャを作製することで、とくに高送り条件下でスラストが減少し、加工状態が安定することがわかった。そこで、テクスチャを作製した工具を用いたときの耐折損性の変化について検討した。工具にはテクスチャのない工具と、図 1 と同形状のテクスチャを作製した工具を用い、その耐折損性の違いについて比較を行った。加工条件は、切削速度 23.6 m/min、送り量 12 $\mu\text{m}/\text{rev}$ とした。加工穴深さは、ここまでよりも条件を厳しくするため、3.0 mm とした。また、加工実験は、テクスチャのない工具で 3 回、テクスチャを作製した工具で 2 回行った。本実験でのスラストの値は、深さ 2.5～3.0 mm の間の平均値とした。

図 12 は、各工具で加工したときの、穴あけ個数に対するスラストである。テクスチャのない工具の場合、穴あけ個数 6 穴目、8 穴目、104 穴目でドリルの折損が生じた。一方、テクスチャを作製した工具の場合、折損が生じるまでの穴あけ個数は増加した。一方は 565 個であり、他方は 1000 個に達しても折損が生じなかった。

本実験条件下では、工具がいずれの場合でも穴あけ個数によるスラストの増加傾向は見られない。工具が折損する際に、スラストが急増することがわかる。これより、加工中の工具の摩耗量は小さいと考える。また、加工中のスラストおよび切りくず形状は図 2、図 3 と同様な傾向を示し、テクスチャがない場合にスラストおよびその変動幅は大きく、切りくず形状も不安定であった。この結果は、加工中にすくい面の摩擦や溶着が大きなことを示唆している。以上の結果より、本実験条件下における工具の折損は、工具摩耗の進行よりも被削材の溶着や切りくずのつまりなどによる突発的なスラストの増加に起因すると考える。テクスチャのな

い工具では、すくい面の摩擦や溶着によって切りくずの排出性が悪く、スラストおよびその変動幅は大きくなる。同時に、被削材の溶着等が生じる確率も大きい。このため加工中にスラストは急増しやすく、ドリルの折損が生じやすいと考える。一方、テクスチャを作製することで切りくずの排出性は改善され、スラストおよびその変動幅は小さくなる。同時に、被削材の溶着等によるスラストの急増も生じにくくなる。またスラストが増加した場合でも、その値は小さいため、折損には至りにくいと考える。

図 13 は、1000 個穴あけ加工した後のテクスチャを作製した工具の SEM 観察像である。切れ刃周辺部のテクスチャ(図中、B 部)は、摩耗によって浅くなっていることが観察できる。一方、スラストの増加傾向は見られないことから、テクスチャが浅くなった状態でも十分な効果が得られていると考える。

以上の結果より、高送り条件で加工する場合、工具にテクスチャ適用することで、ドリルの耐折損性は向上することがわかった。

5. 結 言

本報では、フェムト秒レーザを利用して、表面にマイクロ・ナノメータオーダーの微細なテクスチャを有する小径ドリルを作製した。これを用いてアルミニウム合金の穴あけ加工実験を行い、その効果について検討した。本研究で得られた結果を、以下に示す。

- (1) アルミニウム合金の穴あけ加工において、ドリルの溝部にテクスチャを適用することで、スラストおよびその変動幅を減少させることが可能である。
- (2) テクスチャによるスラストの減少の効果は穴あけ加工の送り量によって異なり、送り量が大きな場合にその効果が現れる。一方、送り量が小さな場合、その効果は見られない。
- (3) テクスチャによる効果はその方向によって異なり、テクスチャが切りくず排出方向に対して垂直な場合に、その効果が現れる。
- (4) テクスチャの形状によって、その効果は変化する。フェムト秒レーザ照射時にデブリが生じる条件では、それが逆に抵抗として作用するようになり、スラストは増加する。一方、本実験条件下では、テクスチャの深さによるスラストの違いは見られなかった。
- (5) テクスチャによるスラストの減少の効果を応用することで、工具の耐折損性を向上させることができる。

今後は、テクスチャによってスラストが減少する要因および加工精度へ及ぼす影響について詳細に明らかにするとともに、工具の応用化について検討する。

Fig. 12 Changes in thrust while drilling aluminum alloy using nontextured and textured tools, plotted as a function of number of holes machined.

Fig. 13 SEM image of the textured tool after drilling 1000 holes. (a) Whole view and (b) enlarged image of the area denoted by A.

実験にご協力頂いた、福井工業大学の神田一隆教授、福井県工業技術センターの松尾光恭氏にお礼申し上げます。本研究の一部は、科学研究費補助金若手研究(B)および(財)工作機械技術振興財団試験研究助成 A を受けて行われたことを記して、お礼申し上げます。

参 考 文 献

- (1) Sugimori, H., Fujii, H., Teshima, S. and Kamiya, Y., Development of a drilling machine for a small hole (2nd report, Influence of the feed with vibration on the drilling performance), *Jpn. Soc. Prec. Eng. Spring Conf.* (2004) pp.633–634.
- (2) Ogawa, H., Masuda M., Oyama A. and Kogami Y., Effect of cavitation of cutting fluid in micro drilling (1st Report, Researches on applying ultrasonic vibration on machining fluid), *J. Jpn. Soc. Prec. Eng.*, **72** (2006) pp.626–630.
- (3) Kawasegi, N., Sugimori, H., Morimoto, H., Morita, N. and Hori, I., Development of a cutting tool utilizing control of surface function induced by micro/nanometer-scale texture, *Jpn. Soc. Prec. Eng. Autumn Conf.* (2007) pp.449–450.
- (4) Kawasegi, N., Sugimori, H., Morimoto, H., Morita, N. and Hori, I., Development of a cutting tool utilizing control of surface function induced by micro/nanometer-scale texture (2nd report, Dependence of the effect of the texture on the experimental conditions), *Jpn. Soc. Prec. Eng. Spring Conf.* (2008) pp.231–232.
- (5) Kawasegi, N., Sugimori, H., Morimoto, H., Morita, N. and Hori, I., Development of cutting tools with microscale and nanoscale textures to improve frictional behavior, *Prec. Eng.*, **33** (2009) pp.248–254.

- (6) Coyne, E., O'Connor, G.M., Mannion, P., Magee, J and Glynn, T.J., Analysis of thermal damage in bulk silicon with femtosecond laser micromachining, *Proc. SPIE*, **5339** (2004) pp.73–83.
 - (7) Sawada, H., Kawahara, K., Ninomiya, T., Kurosawa, K. and Yokotani, A., Precise periodic structuring with femtosecond-laser, *J. Jpn. Soc. Prec. Eng.*, **69** (2003) pp.554–548.
 - (8) Sekiguchi, T., Drilling technology for high precision and high efficiency, *NACHI-BUSINESS news*, **3A1** (2004).
 - (9) Inoue, N., Liu, M., Takagi, J., Tanaka, T. and Tukasaki, T., Study on dry drilling for aluminum alloy (4th Report), *Jpn. Soc. Prec. Eng. Spring Conf.* (2004) pp.626–625.
 - (10) Blatter, A., Maillat, M., Pimenov, S. M., Shafeev, G. A., Simakin, A. V., Lubricated friction of laser micro-patterned sapphire flats, *Tribo. Lett.*, **4** (1998) pp.237–241.
-