レーザ誘起表面周期構造体による鏡面仕上げ加工*

沢田 博司** 川原 公介** 森 淳暢†

Mirror finishing Using Laser-Induced Periodic Surface Structures

Hiroshi SAWADA, Kosuke KAWAHARA and Atsunobu MORI

This paper proposes a mirror finishing process using laser-induced periodic surface structures. Grate-shape minute periodic structures can be formed on various kinds of materials by linearly polarized femtosecond laser pulses with low fluence that is slightly above the ablation threshold. The spacing of the periodic structures is about the same as the laser wavelength. Taking advantage of this phenomenon, a multi-edged tool made of sintered tungsten carbide can be easily obtained. A series of mirror finishing experiments using the multi-edged tool has been carried out. As a result, it has been shown that the multi-edged tool with laser-induced periodic surface structures has high performance for mirror finishing. Surface roughness finished by this processing method reaches 5nm Ra.

key words: femtosecond laser, laser ablation, periodic structure, finishing, multi-edged tool

1. 緒 言

現在、砥粒加工が表面仕上げ加工の主流となっている。しかし、遊離砥粒による研磨加工では、軟質研磨パッドの変形に起因する形状精度の低下や廃液処理の高環境負荷が問題となっている。また、固定砥粒による研削加工では、砥粒の形状や分布の不均一さに起因する精度低下の発生および脱落した砥粒によるスクラッチや被削材への埋め込みなどが問題となっており、新しい仕上げ加工法の開発が望まれている。そこで、砥粒を使用せず、切れ刃形状やその密度、配列を制御したシリコンマイクロ多刃工具¹⁾やダイヤモンドアレイ工具²⁾等による加工法が提案されている。

一方、直線偏光のフェムト秒レーザを加工しきい値近傍のフルエンスで照射すると、入射光と基板の表面に沿った散乱光^{3,4)}またはプラズマ波⁵⁾の干渉により、レーザの波長と同程度のピッチを持つグレーティング状の周期構造が自己組織的に偏光方向に直交して形成されることが知られている。また、同位置に照射されるショット数が数十パルスになるようにオーバーラップさせながらフェムト秒レーザを走査することで、これらの周期構造を広範囲に形成することができる⁶⁾。この加工法を用いると、超硬合金や工具鋼に対しても容易に微細な周期構造を形成できる。また、この加工法は通常行われる複数光軸による干渉加工と違い、1 光軸のみのレーザ照射で加工を行うため、加工深度が深く、複雑な工具形状にも周期構造の形成が可能である。周期構造を切れ刃とみなすと、超微粒砥石と同等の数百 nm の切れ刃サイズとなることから、周期構造を形成した工具は砥粒加工の代替工具として期待できる。

そこで、本研究ではフェムト秒レーザによりナノスケールの微細周期構造を形成した超硬合金基板を加工ツールとして鏡面仕上げ加工を行い、その加工特性を調べた。

2. フェムト秒レーザによる周期構造

材料表面に直線偏光のフェムト秒レーザを照射すると、入射光と材料表面の欠陥や異物を基点とする表面散乱光等の干渉により、レーザ照射領域内にレーザ波長の周期でエネルギーの粗密が生じる。このとき、レーザのフルエンスを加工しきい値近傍に設定することで、エネルギー強度の高い部分だけが選択的に加工される。その結果、レーザ波長と同程度のピッチをもつ周期構造が形成される。偏光方向による加工特性の違いから、周期構造は図1に示すように偏光方向に直交したグレーティング状の構造となる。この周期構造は、シーム溶接のようにレーザをオーバーラップさせながら走査することで連続的に形成することができる。シリンドリカルレンズで線状に集光したレーザを走査すると、数 mm 幅の帯状の領域に周期構造を形成することができる。さらに、このグレーティング状の周期構造に直交する第 2 の周期構造を重ね合わせて加工し、図2に示すような突起状の周期構造を形成することも可能である⁷⁾。第 2 の周期構造形成には、第 1 の周期構造に損傷が入らないように第 2 高調波を用いるなどレーザ波長を変更することが望ましい。

Fig. 1 Laser-Induced Periodic Surface Structures formed on silicon

* 原稿受付 平成 19 年 4 月 9 日

** 正 会 員 キヤノンマシナリー(株) (草津市南山田町 85)

*** 正 会 員 元関西大学工学部 (吹田市山手町 3-3-35)

Fig. 2 Laser-Induced projection structures formed on titanium

Fig. 3 Sintered tungsten carbide before fabrication of periodic structures

Fig. 4 Grating structures formed on sintered tungsten carbide

3. 実験方法

3.1 加工ツール作製

Ti:Sapphire レーザ（パルス幅 120fs，中心波長 800nm，繰り返し周波数 1kHz，パルスエネルギー 300 μJ）を f=100mm のシリンドリカルレンズを用いて図3に示す超硬合金基板（平均粒径 2 μm）に集光し，走査速度 1mm/s で帯状の領域にグレーティング状の周期構造（周期間隔：約 700nm，溝深さ：約 200nm）を形成した．図4に超硬合金基板に形成されたグレーティング状の周期構造（以下，グレーティング構造）を示す．使用した超硬合金の結晶粒径が粗いため，グレーティング構造に乱れが生じているが，微細な切れ刃は多数形成されている．

Fig. 5 Experimental setup

Table 1 Experimental conditions

Tool material	Sintered tungsten carbide
Work material	SUJ2 (HRC65)
Work diameter	2.5mm
Load	30N
Sliding stroke	10mm
Sliding speed	1, 10mm/s
Lubricant	Turbine oil (VG32)

さらに，このグレーティング構造に直交する第 2 のグレーティング構造を波長 400nm の第 2 高調波を用いて加工し，突起状の周期構造（以下，突起構造）も形成した．この第 2 のグレーティング構造の周期間隔（周期間隔：約 350nm，溝深さ：約 100nm）は第 2 高調波を用いたため，第 1 のグレーティング構造の半分となる．したがって，1mm² 当たりの突起数は 400 万個以上に達する．

3.2 仕上げ加工方法

図5に示すように，グレーティング構造および突起構造を形成した超硬合金基板に対し，被削材である φ 2.5mm の SUJ2（Ra 0.2 ～ 0.3 μm，Ry 2.0 ～ 2.5 μm）を押し当て，往復しゅう動させて鏡面仕上げ加工を行った．グレーティング構造の方向は，しゅう動方向に対して直交および平行の 2 種類とした．突起構造はしゅう動方向に平行のグレーティング構造（周期間隔：約 700nm，溝深さ：約 200nm）に直交する第 2 のグレーティング構造（周期間隔：約 350nm，溝深さ：約 100nm）を重ね合わせて加工したものを用いた．しゅう動面には 100mg のタービンオイル（粘度：VG32）を供給し，しゅう動ストロークは 10mm，垂直荷重は 30N で加工を行った，実験条件を表1に示す．

加工後の表面性状はレーザ顕微鏡にて測定した．加工深さの評価は被削材の特徴的な傷（各サンプル 6 ケ所）に着目し，加工前後における傷深さの変化から算出した．また，鏡面化された領域の表面粗さ（評価領域：5 μm 角）は，各サンプル 4 ケ所の平均値とした．

4. 実験結果および考察

4.1 グレーティング構造による加工特性

しゅう動方向に直交および平行のグレーティング構造を形成した超硬合金基板を用いて，しゅう動速度 1mm/s で加工した際の被削材の仕上げ面を図6および図7に示す．どちらのグレーティング構造でも加工が進行していることがわかる．グレーティング構造には適度な乱れ（図 4 参照）があるため，しゅう動方向に平行のグレーティング構造でも加工が進行する．しゅう動

Fig. 6 Test piece surfaces slid perpendicular to grating structures

Fig. 7 Test piece surfaces slid parallel to grating structures

Fig. 8 Micrographs and cross section profiles of test pieces

前およびしゅう動後（しゅう動距離：100m，グレーティング方向：平行）の被削材の顕微鏡写真およびプロファイルを図8に示す。プロファイルに示したAおよびBの領域は加工深さの評価に用いた特徴的な傷の1例である。断面プロファイルの変化から、グレーティング構造により被削材の鏡面化が進行していることが認められる。また、鏡面化のメカニズムは表面の塑性変形ではなく、除去加工であることがわかる。鏡面化された面積率（鏡面化率）は鏡面領域と非鏡面領域の反射率の違いを利用して求めることができる。しゅう動方向に直交および平行の

Fig. 9 Change in mirror finished area ratio by grating structures (Sliding speed: 1mm/s)

Fig. 10 Change in grinding depth by grating structures (Sliding speed: 1mm/s)

グレーティング構造を用いて、しゅう動速度 1mm/s で仕上げ加工した際の鏡面化率の変化を図9に示す。グレーティング構造の方向を問わず、しゅう動距離の増加にともない鏡面化率も増加するが、鏡面化の進行により加工面圧が低下するため、鏡面化率の増加率は減少する。しゅう動方向に平行のグレーティング構造の方が鏡面化率が高く、100m のしゅう動距離で全面積の 82%が鏡面化されているが、直交のグレーティング構造で加工した場合は 65%であった。

しゅう動速度 1mm/s で仕上げ加工した際の加工深さの変化を図10に示す。しゅう動方向に直交方向のグレーティング構造では、しゅう動距離が 50m 以降はほとんど加工深さに変化が見られない。一方、しゅう動方向に平行のグレーティング構造は、しゅう動距離が 50m 以降も加工深さの増加が見られ、しゅう動距離 100m では直交のグレーティング構造の 2 倍程度の加工深さが得られている。

しゅう動方向に直交のグレーティング構造の方が加工深さや鏡面化率が劣る要因として、流体圧による負荷能力の差が挙げられる。しゅう動方向に直交方向のグレーティング構造は、くさび効果により平行方向のグレーティング構造より油膜が形成されやすく、油膜の荷重支持により加工に寄与する加工面圧が低下し、加工効率が低減していると思われる。

Fig. 11 Comparison of finish roughness by grating structures
(Sliding speed: 1mm/s)

Fig. 12 Grating structures after sliding for 50m

しゅう動方向に直交および平行のグレーティング構造による仕上げ面粗さの比較を図11に示す。しゅう動方向に直交方向のグレーティング構造で鏡面化された表面には黒い変色が見られ、表面粗さもしゅう動距離の増加とともに悪化の傾向が見られた。一方、しゅう動方向に平行のグレーティング構造で鏡面化した表面はしゅう動距離を増加させても $Ra \ 6nm$ の鏡面が安定的に得られた。

しゅう動方向に直交方向のグレーティング構造では、しゅう動距離 50m 以降で表面粗さの悪化傾向が見られるが、この要因は被削材の摩耗粉が排出されにくいこと、目詰まりしやすいことに起因していると思われる。図12にしゅう動距離 50m にお

Fig. 13 Effect of sliding speed on grinding depth (Parallel)

Fig. 14 Comparison of grinding depth (Sliding speed: 1mm/s)

るグレーティング構造の様子を示す。しゅう動方向に平行のグレーティング構造では、被削材の磨耗粉は潤滑剤を介して排出されるため、溝部や粒間に空隙が認められる。一方、直交のグレーティング構造では溝部や粒間が被削材の磨耗粉で目詰まりを起こしている。

しゅう動方向に平行のグレーティング構造により、1mm/s および 10mm/s のしゅう動速度で仕上げ加工を行った際の加工深さの比較を図13に示す。しゅう動速度を 10mm/s とすることで、単位しゅう動距離当たりの加工深さが大きく低下している。また、加工時間が同一となる 10mm/s で 100m しゅう動させた場合と 1mm/s で 10m しゅう動させた場合の加工深さを比較しても 10mm/s での加工深さが浅くなっていることから、しゅう動速度を 10mm/s とすることで、単位時間当たりの加工深さも低下していることになる。

本実験で用いたしゅう動方向に平行のグレーティング構造には図 4 や図 12(a)に示すように蛇行やピットが存在しており、しゅう動速度が高速になると流体圧による負荷能力が増加する。このため、しゅう動速度を 10mm/s にすると加工効率が低下していると思われる。流体潤滑理論から類推すると、単位時間当たりの加工深さを最大にするしゅう動速度は、面圧と潤滑剤の粘度の関数で決定されるものと思われる。

4.2 突起構造による加工特性

突起構造およびしゅう動方向に平行のグレーティング構造に

Fig. 15 Comparison of finish roughness (Sliding speed: 1mm/s)

Fig. 16 Mirror finished surface by grating structures

より、しゅう動速度 1mm/s で仕上げ加工した際の加工深さの比較を図14に示す。加工初期では加工深さに差は無いが、しゅう動距離が長くなると突起構造の方がグレーティング構造より加工深さが深くなった。この要因は加工面圧の差であると思われる。加工初期では被削材の表面粗さが大きいことから、突起構造とグレーティング構造で油膜生成率に大きな違いはない。しかし加工が進行し、被削材の鏡面化率が高くなると、突起構造より接触面圧が低いグレーティング構造の方が油膜が形成されやすく、加工に寄与する加工面圧が低下するのに対し、突起構造では油膜破断の頻度がグレーティング構造より高いことから加工面圧の低下が起こりにくく、加工深さが深くなったものと思われる。特に、しゅう動速度がゼロとなるしゅう動端では、潤滑剤の流路面積の大きい突起構造の方が油膜の流出が生じやすく、加工深さに差が生じたものと考えられる。

突起構造およびしゅう動方向に平行のグレーティング構造により、しゅう動速度 1mm/s の条件で加工した仕上げ面粗さの比較を図15に示す。突起構造で得られた表面粗さは、しゅう動方向に直交のグレーティング構造によるものと同様 (図 11 参照) の Ra 8nm 程度となり、しゅう動方向に平行のグレーティング構造によるものより劣っていた。突起構造では、しゅう動方向

Fig. 17 Cross section profile of mirror finished surface

に並んだ突起間に被削材の磨耗粉が詰まりやすく、被削材に凝着することで表面粗さを劣化しているものと思われる。

4.3 仕上げ面評価

しゅう動方向に平行のグレーティング構造により、しゅう動速度 1mm/s、しゅう動距離 400m の条件で仕上げ加工を行うと被削材の鏡面化率が 100%となり、全面が鏡面化された。図16に被削材の仕上げ面を示す。また、仕上げ面のプロファイルを図17に示す。150 μm × 110 μm の領域で評価した表面粗さは Ra 10nm、表面に付着したパーティクルの影響を除くため 5 μm 角の領域で評価した表面粗さは Ra 5nm であった。

5. 結 論

本研究ではフェムト秒レーザーによりナノスケールのグレーティング構造および突起構造を形成した超硬合金基板を加工ツールとして鏡面仕上げ加工を行い、その加工特性を調べた。その結果、以下の結論を得た。

- (1) フェムト秒レーザーにより自己組織的に形成されるサブミクロンの間隔と溝深さを持つグレーティング構造および突起構造を加工ツールとして、鏡面仕上げ加工が可能である。
- (2) しゅう動方向に平行のグレーティング構造はしゅう動方向に直交のグレーティング構造より加工効率が高い。
- (3) しゅう動方向に平行のグレーティング構造で加工面の表面粗さが最も小さくなり、Ra 5nm の非常に平滑な鏡面が得られた。
- (4) しゅう動速度を 1mm/s から 10mm/s にすると単位しゅう動距離当たりの加工効率だけでなく、単位時間当たりの加工効率も低下した。
- (5) 突起構造はグレーティング構造より高い加工効率を得られた。

参 考 文 献

- 1) 山口智実, 樋口誠宏, 島田尚一, 加藤真也, 浅井邦彦: 異方性エッチングによるシリコンマイクロ多刃工具の開発 (第 1 報) - 工具の作製設計システムの構築 -, 精密工学会誌, **70**, 9 (2004) 1196.
- 2) 高野 登, 森田 昇, 林 弘樹, 川塚宣隆, 山田 茂, 大山達雄, 神田一隆, 高野茂人, 小幡 勤: シリコンモールドを用いたダイヤモンドアレイ工具の開発と応用 (第 1 報) - シリコンモールドによるダイヤモンドアレイ工具の作製 -, 精密工学会誌, **70**, 11 (2004) 1402.
- 3) D. C. Emmony, R. P. Howson, and L. J. Willis: Laser Mirror Damage in Germanium at 10.6 μm, Appl. Phys. Lett., **23**, (1973) 598.
- 4) A. E. Siegman, P. M. Fauchet: Stimulated Wood's Anomalies on Laser-Illuminated Surfaces, IEEE J. Quantum Electronics, **QE-20**, 8 (1986) 1384.
- 5) A. M. Bonch-Bruевич, M. N. Libenson, V. S. Markin and V. Trubaev: Surface electromagnetic waves in optics, Opt. Eng. **31**, (1992) 718.
- 6) 沢田博司, 川原公介, 二宮孝文, 黒澤 宏, 横谷篤至: フェムト秒レーザーによる微細周期構造の形成, 精密工学会誌, **69**, 4 (2003) 554.
- 7) 川原公介, 沢田博司, 二宮孝文: フェムト秒レーザーによる微細突起構造の形成, 2006 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (2006) 881.