

微小テクスチャ金型の開発とその応用

— 圧子の稜を用いた微小切削によるテクスチャパターンの複雑化 —

茨城大学 工学部技術部 山本武幸

Development of Microtextured Mold and Its Application
- Complicating Texture Patterns by Microcutting Using Indenter Edge -

College of Engineering Ibaraki University Technical Services Division, Takeyuki YAMAMOTO

Improving materials surface functions using micro-textures is of great interest in various fields. The authors have also performed to improve the photocatalytic surface functions by introducing the microcutting textures and achieved an improvement in the hydrophilicity, which is one of the photocatalytic functions, due to the increase in the real surface area. In this report, vibration assisted microcutting was conducted on a pure aluminum workpiece using an edge of the diamond indenter as the tool rake and a depth of cut of less than zero in order to fabricate finer and more complicated micro-texture. As a result, finer and more complicated microcutting surface texture composed of numerous plastically deformed micro embossments, impressions and flat portions was successfully fabricated on the workpiece.

1. 緒言

反射防止構造をはじめ、材料表面にマイクロないしナノメートルオーダーの凹凸を設け、表面機能の発現ないし改善を目指す例は多くなっている¹⁾。著者も純チタン薄板に無数のマイクロ切削溝を創成し、それを陽極酸化することによって酸化チタン膜を製作した。そして、その濡れ性評価試験の結果、光触媒機能の一つである親水性が改善されることを明らかにし、これが無数の切削溝で構成される表面テクスチャによる実表面積増大の効果によるものと論じた。さらに、酸化チタン膜の例のような直接加工に限らず、表面テクスチャ創成用の金型製造への展開を見据え、表面積のさらなる増大やより緻密なテクスチャパターンを創成するため、FTS (Fast tool servo) を用い、 μm オーダの振動を工作物表面に対し垂直に付加しつつ正面旋削することにより、より複雑な工具軌跡による切削テクスチャ創成も試みている。それによりこれまでに、数～数十 μm 周期・規模の複雑テクスチャを取得している^{4),5)}。

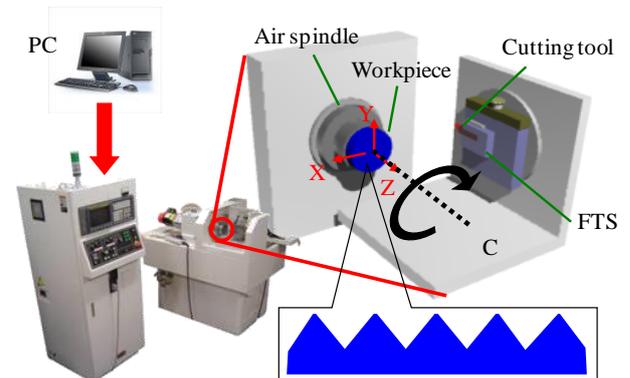
本報では、ダイヤモンド圧子の稜をすくい面とした微小振動切削によって、微細かつ複雑な表面テクスチャの創成を試みた結果について報告する。

2. 実験装置および微小テクスチャの創成と評価方法

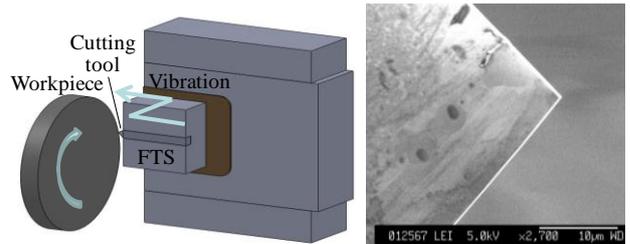
振動切削実験には、X, Z, C 軸に NC 制御可能な精密三軸同時制御加工装置 (東芝機械社製 ULG-100 の改良品) に、FTS (ナノコントロール製 NS6141) を搭載したものを利用する。加工装置の概略を Fig. 1(a) に示す。ここでは、Fig. 1(b) に示すように、FTS を用いて工作物表面に対し垂直な方向に微小振動を与えながら切削することにより、正弦波状に切込み深さが変化する正面旋削を試みる。FTS による工具への振動付加時は、内臓する静電容量式変位センサからの信号をもとにしたフィードバック制御 (PID) により、振動振幅の安定化も図れるようになっている。本研究では、 μm ないしそれ以下のオーダーの寸法を有する切削溝の集合による複雑な表面微小テクスチャを創成したいため、切削工具には Fig. 1(c) に示すように、微小硬度計に用いられる鋭利な先端を持つ三角錐形状の単結晶ダイヤモンド圧子を用いる。より複雑なテクスチャ創成のため、三角錐圧子の稜側をすくい面とした検討を実施する。まずは、基本特性把握のための単線切削を実施し、その知見を参考にテクスチャ創成を試みる。単線・テクスチャ切削により得られた加工面の観察・計測には、レーザ顕微鏡 (島津製作所製 OLS4000-SMT) を用いる。

3. 実験結果および考察

Table 1 に微小振動切削実験における各種条件を示す。単線切削では、振動周波数 5 kHz、振幅 2.3 μm とし、平均切込み深さを -0.5 ~ 2.5 μm に変化させ、切込み深さが切削溝



(a) 3-axis NC lathe system attached with FTS

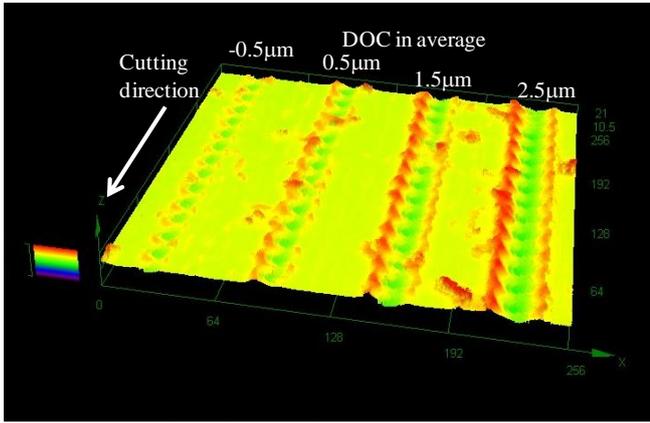


(b) Machining method (c) SEM image of cutting tool tip

Fig. 1 Experimental setup, machining method and cutting tool

Table 1 Vibration assisted cutting conditions

Workpiece	Pure aluminum
Cutting tool	Monocrystalline diamond
Three edge angle	90° (Triangular indenter)
Edge radius	1.2 μm (A little bit worn)
Tool rake direction	Edge
Depth of cut in average	-0.5, 0.5, 1.5, 2.5 μm (Single) -0.5 μm (Texture)
Cutting speed	7.5 m/min (Single) 1.4 m/min (Texture)
Feed for texturing	5 $\mu\text{m}/\text{rev}$
Vibration frequency	5 kHz
Vibration amplitude	2.3 μm
Environment	MQL (Plant oil)



(Area: 256μm x 256μm)

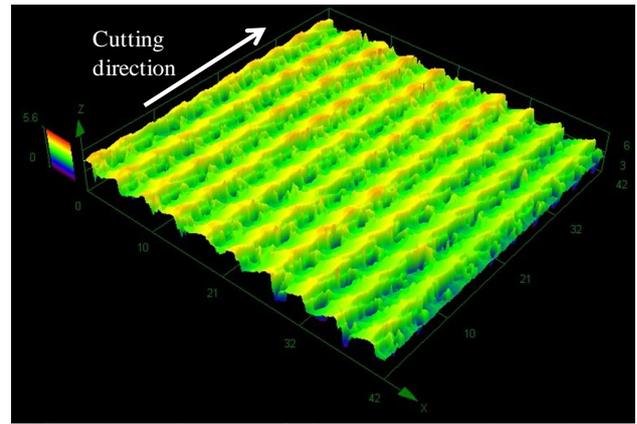


Fig. 5 Laser micrograph of micro-texture (Area: 42μm x 42μm)

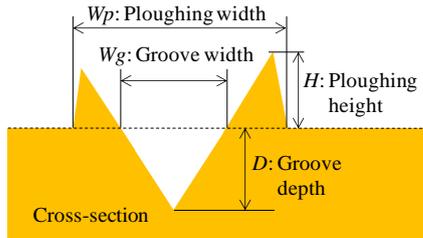


Fig. 3 Definition of groove geometries

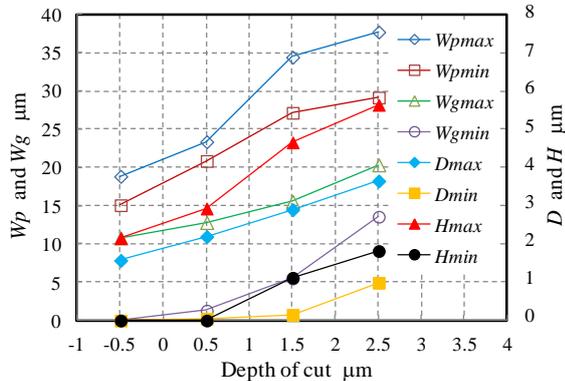


Fig. 4 Comparison result of cutting groove geometries

の各部の寸法に及ぼす影響を調べた。

Fig. 2 に、単線振動切削により得られた切込み深さの異なる 4 本の切削溝のレーザ顕微鏡観察結果を示す。各溝とも切込み深さ方向の微小振動を反映した溝寸法の連続的な変化をよく表している。切込みの増加に伴い、溝深さと周囲の塑性盛り高さは増大している。また、切込み-0.5 μm の場合、凹みを生成した直後に塑性盛りが溝の両脇に出ている様子や、振動のため切込みが最小となる領域において溝が形成されない様子が見られる。一方、切込みがそれを超過すると、正弦波状に高さが変化する塑性盛りを生成する様子が見られる。

溝の各部の寸法を定量的に把握するため、Fig. 3 に切削溝断面の各部寸法の定義を、Fig. 4 に切削溝の各部寸法の測定結果をそれぞれ示す。Fig. 4 から、各部寸法とも切込み深さにほぼ比例して増加していること、切込み深さが-0.5 μm の場合に溝深さおよび塑性盛り高さがゼロとなっていることがわかる。一方、切込み深さが 0.5 や 1.5 μm の場合は、幾何学的にみれば、切込みが最小となる点近傍において溝が形成されないことになるが、Fig. 4 の結果からは、最小溝深さ・盛り高さともゼロを超える値を示していることがわかる。これは、その領域を工具が通過する前に生じていた塑性流動がその領域にも変形を及ぼしたことに起因すると考えられ、これには稜切削のために面切削よりも切りくずが排出されにくいことも影響していると考えられる。

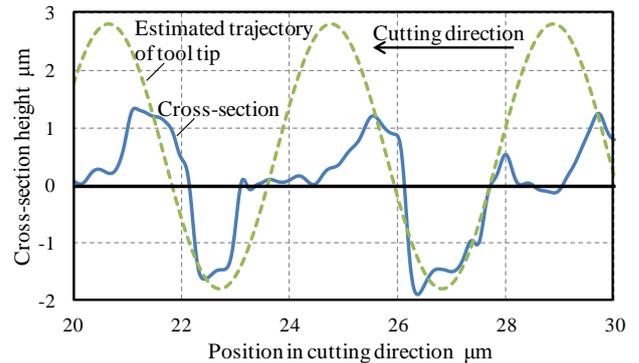


Fig. 6 Cross-section of cutting groove along its center line

これらの結果を参考に、テクスチャ創成では溝創成されない(未切削)領域を伴う、平均切込み深さ-0.5 μm を選定した。

Fig. 5 は前述のテクスチャ創成用の条件で加工されたテクスチャのレーザ顕微鏡観察結果であり、Fig. 6 は切削溝の中心線を通る断面の一部分を例示した結果である。

Fig. 5 より、切削・送り方向ともに 5 μm 周期で、ただし切削方向には押し込みと除荷が、送り方向には塑性盛りがそれぞれ強調されたようなテクスチャが創成されていることがわかる。テクスチャの起伏はミクロンオーダーである。さらに、Fig. 6 からわかるように、押し込み痕と塑性盛りと平坦部が組み合わせられるなど、複雑な様相を呈していることがわかる。

4. 結言

緻密な表面テクスチャ創成のため、数μm 振幅の高周波微小振動を加工面の垂直方向に付加しつつ微小硬度計用圧子の稜をすくい面として平均切込み深さをゼロ未満として微小切削する検討を行った。その結果、数μm の高低差の押し込み痕と塑性盛り、さらには平坦部が組み合わせられた溝パターンによる複雑な表面テクスチャが得られた。

謝辞 研究の一部は、学振の科研費基盤研究(C)(No. 25420043, No. 22560134)を受けたことを記し、ここに感謝申し上げる。

参考文献

- 1) 諸貫信行: 微細構造から考える表面機能, 森北出版, (2011).
- 2) J. Shimizu, L. Zhou, K. Takamori, H. Ojima, T. Yamamoto, H. Huang: Materials Science Forum, 654-656, (2010) 1784.
- 3) J. Shimizu, G. Kobayashi, N. Hasegawa, T. Yamamoto, H. Ojima, T. Onuki, L. Zhou: Materials Science Forum, 706-709, (2012) 2646.
- 4) 山本武幸, 清水 淳, 周 立波, 尾島裕隆, 小貫哲平, 長谷川直美: 精密工学会秋季大会講演論文集, (2012) 877.
- 5) 清水 淳, 山本武幸, 周 立波, 尾島裕隆, 小貫哲平, 永岡駿一: 精密工学会春季大会講演論文集, (2013) 311.

微小テクスチャ金型の開発とその応用

— 圧子の稜を用いた微小切削による
テクスチャパターンの複雑化 —

茨城大学 工学部技術部 モノづくり部門
山本武幸

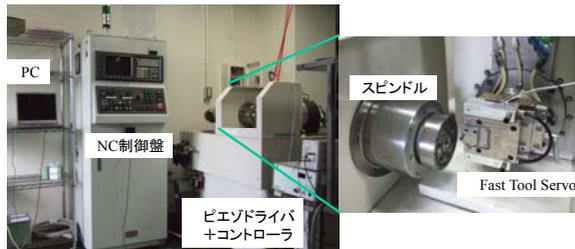
Lab (Nano-Engineering Laboratory)

研究の背景

- ・微小テクスチャ創成による表面機能向上は、多くの分野において活用
ex. 反射防止、表面積増、親水・疎水性制御...
- ・微小テクスチャ創成法も様々
ex. リソグラフィ、腐食、転写加工、塑性加工、機械加工、レーザ加工、粒子集積、...
- ・発表者らも、①純チタンの微小切削＋陽極酸化
⇒ 微小テクスチャ付き酸化チタン膜
- ・さらに、②切込み深さ方向への振動付与による微小テクスチャ金型製作

Lab (Nano-Engineering Laboratory)

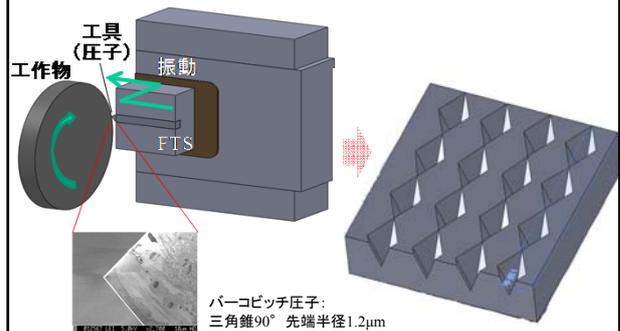
加工装置



	X軸	Z軸	C軸	FTS
送り速度	1~1260[mm/min]	1~1260[mm/min]	1~50000[mm/min]	
位置制御の分解能	0.00001[mm]	0.00001[mm]	0.00001[deg]	3[μm]
ストローク	60[mm]	150[mm]		30[μm]

Lab (Nano-Engineering Laboratory)

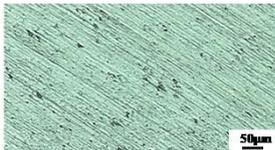
微小振動援用切削の概要



Lab (Nano-Engineering Laboratory)

① 工具軌跡制御と表面構造 (Ti)

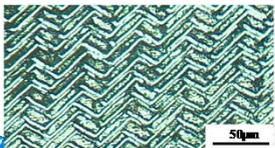
(a) 鏡面切削面 (Ti)



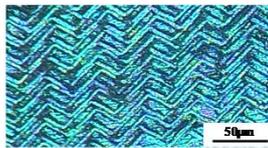
(b) 非同期制御切削面 (Ti)



(c) 同期制御切削面 (Ti)

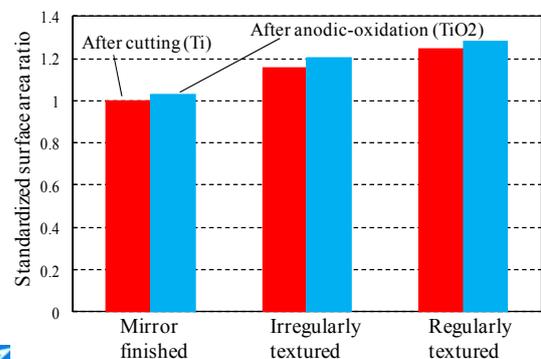


(d) 同期切削＋陽極酸化 (TiO₂)



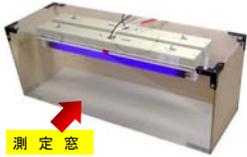
Lab (Nano-Engineering Laboratory)

表面積比



Lab (Nano-Engineering Laboratory)

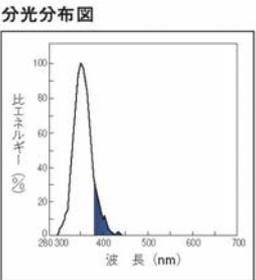
親水性評価試験装置(光触媒)



測定窓

試験条件

温度	25±5℃
湿度	50±10%
水量	4μl
光源	紫外線蛍光灯

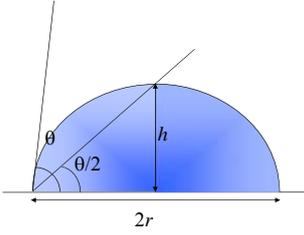


分光分布図

東芝ランプ総合カタログ2007 P.161

Lab (Nano-Engineering Laboratory)

親水性評価方法



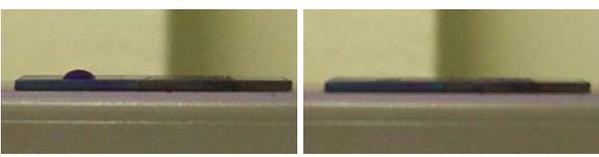
接触角 θ :

$$\theta = 2 \tan^{-1}(h/r)$$

h : 液滴高さ
 r : 液滴径

Lab (Nano-Engineering Laboratory)

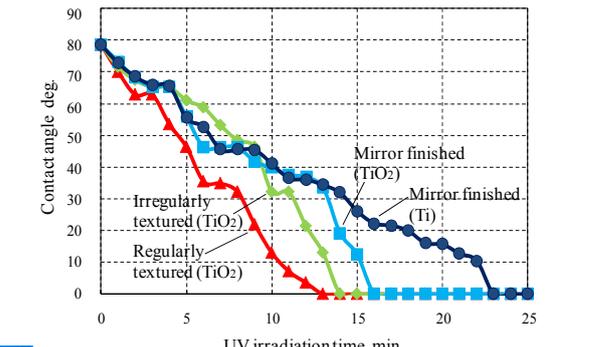
親水性試験



12分後

Lab (Nano-Engineering Laboratory)

酸化チタン膜の濡れ性試験結果



UV irradiation time (min)	Mirror finished (TiO ₂)	Mirror finished (Ti)	Irregularly textured (TiO ₂)	Regularly textured (TiO ₂)
0	80	80	80	80
5	70	70	65	65
10	55	55	45	45
15	40	40	25	25
20	25	25	10	10
25	10	10	5	5

Lab (Nano-Engineering Laboratory)

研究の目的

振動援用切削による微小テクスチャ金型の製作と転写加工への応用

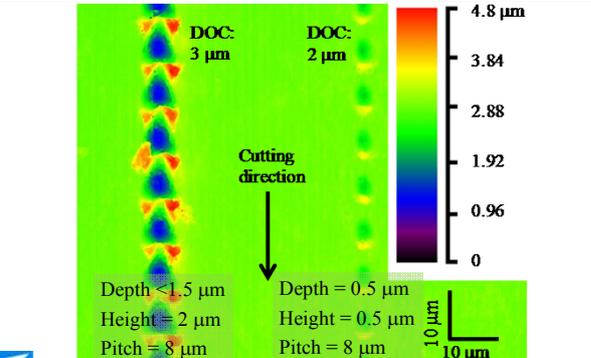
ここでは

圧子の面側・稜側をすくい面として塑性盛りを強調することで、限られた面積により微細で複雑なテクスチャの制作

(純Alを対象にテクスチャ創成)

Lab (Nano-Engineering Laboratory)

② 圧子の面側による単線振動切削



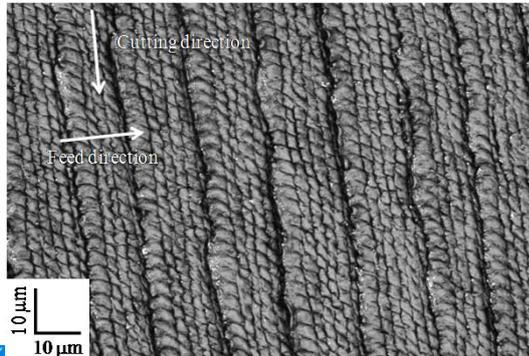
DOC: 3 μm DOC: 2 μm

Cutting direction

Depth < 1.5 μm Depth = 0.5 μm
Height = 2 μm Height = 0.5 μm
Pitch = 8 μm Pitch = 8 μm

Lab (Nano-Engineering Laboratory)

テクスチャ創成結果(圧子の面側利用)



Lab (Nano-Engineering Laboratory)

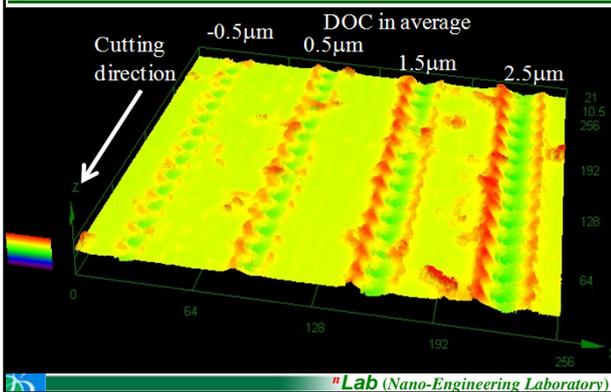
振動切削条件(単線)

工作物	純アルミニウム
工具	単結晶ダイヤモンド圧子(三角錐)
工具先端半径	1200 nm(若干の摩耗あり)
工具切込み	-0.5, 0.5, 1.5, 2.5 μm
切削速度(平均)	7.5 m/min
工具振動振幅	2.3 μm
工具振動周波数	3 kHz
工具の向き	稜切削
加工環境	MQL(植物油)

前加工: 切込み 2 μm, 送り 0.5 μm

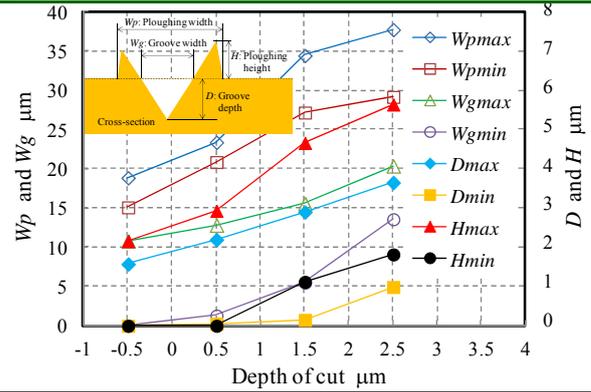
Lab (Nano-Engineering Laboratory)

単線の振動切削結果



Lab (Nano-Engineering Laboratory)

単線の振動切削結果



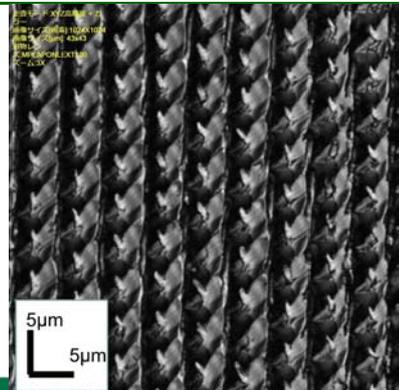
振動切削条件(テクスチャ創成)

工作物	純アルミニウム
工具	単結晶ダイヤモンド圧子(三角錐)
工具先端半径	1200 nm(若干の摩耗あり)
工具切込み	-0.5 μm
切削速度(平均)	1.4 m/min
送り	5 μm/rev
工具振動振幅	2.3 μm
工具振動周波数	3 kHz
工具の向き	稜切削
加工環境	MQL(植物油)

前加工: 切込み 2 μm, 送り 0.5 μm

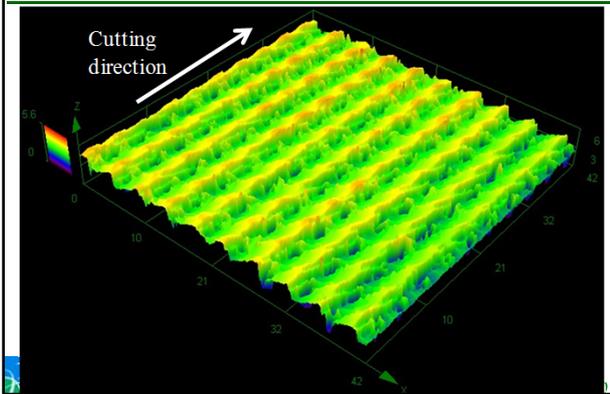
Lab (Nano-Engineering Laboratory)

テクスチャの振動切削実験結果

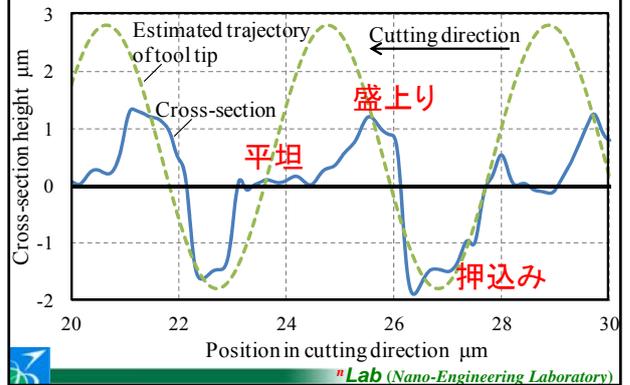


Lab (Nano-Engineering Laboratory)

テクスチャの振動切削実験結果



テクスチャの振動切削実験結果



まとめ

緻密な表面テクスチャ創成のため、数 μm 振幅の高周波微小振動を加工面の垂直方向に付加しつつ微小硬度計用圧子の稜をすくい面として平均切込み深さをゼロ未満として微小切削する検討を行った。その結果、数 μm の高低差の押し込み痕と塑性盛り、さらには平坦部が組み合わされた溝パターンによる複雑な表面テクスチャが得られた。

課題: サブ μm 規模・周期のテクスチャ創成

Lab (Nano-Engineering Laboratory)

Lab (Nano-Engineering Laboratory)

テクスチャの加工後の工具先端

