

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月28日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21560123

研究課題名（和文）

ナノマイクロ構造による機能性表面を有する切削工具技術の開発に関する研究

研究課題名（英文）

Development of cutting tool with functional surface by nano/micro texture

研究代表者

榎本 俊之 (ENOMOTO TOSHIYUKI)

大阪大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：20403149

研究成果の概要（和文）：本研究は、切削工具の表面に微細な凹凸を持った三次元周期構造を付与することで、高い耐凝着性や耐摩耗性、潤滑性といった様々な機能を発現する切削工具を開発することを目的としている。そして、数ミクロンオーダーのストライプ状周期構造、すなわちマイクロストライプ構造を表面に有する切削工具を開発した結果、開発工具がアルミニウム合金や鉄鋼材料の加工において、極めて優れた耐凝着性や耐摩耗性を発現することを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：In order to improve cutting tool performances including anti-adhesive property and tool wear resistance, we have adopted surface engineering approach, namely, a functionalization of tool surfaces by textures. In this study, cutting tool with micro stripe texture was newly developed to improve anti-adhesion in dry cutting of aluminum alloy. As a result, we found that the newly developed tool significantly decrease chip adhesion on the tool rake face. In addition, the tool wear resistances of developed tools were also evaluated.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2010年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：精密加工

科研費の分科・細目：機械工学・生産工学・加工学

キーワード：切削加工，工具，テクスチャ，微細構造

1. 研究開始当初の背景

(1) 近年 切削加工の分野においては、高能率化を目的とした高速切削加工、環境負荷低減を目的としたドライ・ニアドライ加工の導入が強く求められている。しかしながら、いずれの加工においても切削工具には極めて高い熱的・機械的負荷が加わるため、工具表面を低摩擦・高潤滑性にする必要があるとさ

れている。そこでこれらの要求に応えるため、工具表面へのコーティング処理や工具表面の平滑化処理といった研究開発がなされているが、量産加工プロセスからの要求レベルの高度化はとどまるところを知らず、特にドライ・ニアドライ加工は一部の現場のみへの導入にとどまっている。

(2) この現状を打破するために、研究代表

者は 切削工具の表面に微細な凹凸を持った三次元周期構造を付与することで、高い耐凝着性や耐摩耗性、潤滑性といった様々な機能を発現する切削工具の研究に着手し、実施してきた。そして、これまでに本研究技術のフィジビリティを検証してきたが、実用に近づけるためには開発工具の更なる高機能化を行い、適用範囲を拡大していくことが不可欠である。

2. 研究の目的

本研究は、微細表面構造を有する切削工具技術を飛躍的に高め、実用化の目途を明確にするため、以下の事項の実現を目指す。

(1) アルミニウム合金の切削加工における最重要課題の一つが、ドライ加工の実現である。そこで、切りくず凝着の成長機構に着目し表面テクスチャの最適化を行い、ドライ加工において優れた耐凝着性を発現する切削工具の開発を行う。

(2) アルミニウム合金と比較して高硬度である鉄鋼材料の切削加工においては、工具摩耗が切削工具の寿命を大きく左右する。そこで、開発工具を鉄鋼材料の切削加工に適用し、その耐摩耗性を評価するとともに、表面テクスチャによる耐摩耗性向上メカニズムについて検討する。

3. 研究の方法

(1) アルミニウム合金のドライ加工時における切りくず凝着の成長機構に着目し、新たな微細表面構造の設計を行うとともに、フェムト秒レーザを使用して設計した切削工具の開発を行う。

(2) 新たに開発した工具を使用してアルミニウム合金 A5052 のドライ加工切削実験を行うことで、開発工具の耐凝着性をはじめとした加工特性を評価する。

(3) テクスチャのディメンジョンを変化させて実験を行うことで、最適なテクスチャ寸法についての指針を得る。

(4) 微細表面構造を有する切削工具の摩耗に対する特性を評価するために、これまでに開発した工具を用いて鉄鋼材料 S53C の切削加工実験を行う。そしてその耐摩耗性を評価するとともに、工具摩耗抑制メカニズムについての検討を行う。

4. 研究成果

(1) マイクロストライプ構造を有する切削工具の開発

アルミニウム合金のドライ加工において切削工具の耐凝着性を向上させることを目的に、本研究では新たにマイクロストライプ構造を表面に有する切削工具を開発した。

フェムト秒レーザを加工閾値近傍のフルエンスで走査させると、波長オーダーの溝深さ、

溝間隔を有するグレーティング状の周期構造が自己組織的に形成される。そして、周期構造が形成された部分は、全体が 200 nm 程度の深さを持つ凹形状となる。したがって、同一範囲にレーザを複数回照射することで、任意の深さをもつ凹形状が形成可能となる。この方法を用い、深さ 5 μm、間隔 20 μm の周期溝構造 (マイクロストライプ構造) を工具すくい面上へ形成した (図 1)。また溝方向と耐凝着性の関係を明らかにするため、切りくず流出方向と垂直方向の溝を有する工具 (MS-1)、および平行方向の溝を有する工具 (MS-2) の 2 種類のものを作製した。

工具すくい面上に生成する切りくず凝着は、その成長する過程においては切りくず流出方向に沿って樹枝状に成長することが知られている。マイクロストライプ構造の矩形溝構造は凝着が成長する足場となるエリアを分断することで、凝着が切りくず流出方向に沿って成長することを阻害する効果が期待できる。さらに、マイクロストライプ構造は表面の形状がもたらす効果によって耐凝着性を向上させるため、切削液を供給しないドライ加工環境下においても効果が発現すると予想される。

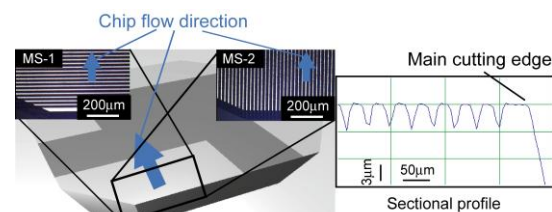


図 1 マイクロストライプ構造を有する切削工具

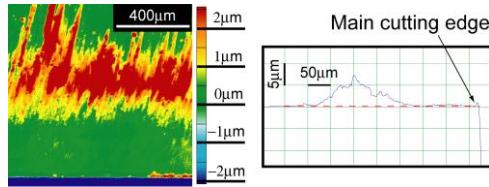
(2) マイクロストライプ構造を有する切削工具の耐凝着性

開発工具のドライ加工環境下における耐凝着性を評価するため、アルミニウム合金 A5052 を被削材として一枚刃による正面フライス切削加工実験を行った。

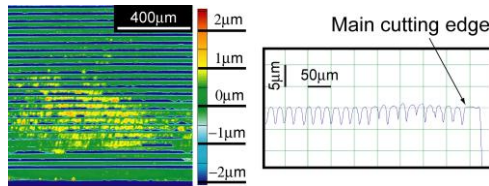
図 2 は切削距離 3600 m の時点における各工具のすくい面の三次元形状、および二次元断面形状である。図 2 (a) に示すように、通常の平滑なすくい面を有する切削工具の場合、工具すくい面上の切れ刃から 200 μm 程度の部分に著しい切りくず凝着が生じている。それに対し、切りくず流出方向と直交方向にマイクロストライプ構造を形成した MS-1 は部分的な凝着は見られるものの、ドライ加工環境下においても切りくず凝着を著しく抑制できることがわかった (図 2 (b))。また図 2 (c) に示した MS-2 については、通常の工具とほぼ同程度の切りくず凝着が生じている。これは、溝方向と切りくず流出方向が一致する場合、切りくずが溝に倣って変形することで溝の内部に侵入してしまうこと、凝着の成長方

向と溝方向とが一致するために溝の凸部および凹部で凝着の成長が生じてしまうことが原因であると思われる。

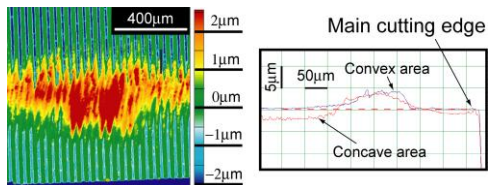
以上のように、マイクロストライプ構造を有する切削工具はアルミニウム合金のドライ加工において極めて優れた耐凝着性を発現し、またその耐凝着性はテクスチャの溝方向に強く依存することを明らかにした。



(a) Conventional tool



(b) MS-1



(c) MS-2

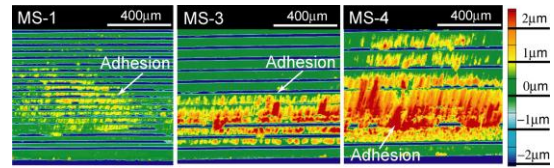
図 2 加工後の工具すくい面

(3) テクスチャディメンジョンの検討

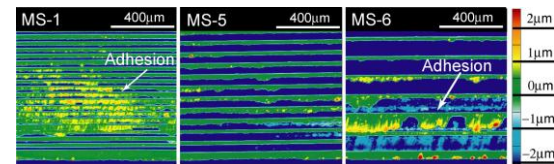
マイクロストライプ構造の寸法が耐凝着性に与える影響を評価するため、溝の凸部幅および凹部幅を変更した工具を新たに作製し、加工後の凝着量を評価した。新たに用意した工具は、凸部幅 $20\ \mu\text{m}$ 、凹部幅 $20\ \mu\text{m}$ の MS-1 を基準とし、凸部幅および凹部幅をそれぞれ $20\ \mu\text{m}$ ~ $100\ \mu\text{m}$ に変化させ、工具名をそれぞれ MS-3~MS-6 とした。溝方向については、(1) の結果から全て切りくず流出方向と直交方向となるように形成した。

図 3 (a) がテクスチャ凸部幅を変化させた結果である。同図に示すように、テクスチャ凸部幅の増加に伴って切りくず凝着量が増加していることがわかる。これは、テクスチャの凸部幅が広い場合、凸部上で凝着が成長しやすくなったことが原因であると思われる。それに対し、テクスチャ凹部幅の影響を示したものが図 3 (b) である。テクスチャの凹部幅の変化によっても凝着量は大きく変化し、本実験条件下においては凸部幅 $20\ \mu\text{m}$ 、凹部幅 $50\ \mu\text{m}$ の MS-5 が最も優れた耐凝着性を示している。これは、MS-1 のように MS-5 と比較して溝幅が狭い場合は、わずかな凝着量によって溝が埋まってしまうこと、逆に広

い溝幅を有する MS-6 は、切りくずが溝の内部まで侵入してしまい、図 3 (b) 右端に示したように溝の内部で著しい凝着が生じてしまうことが原因であると言える。



(a) テクスチャ凸部幅の影響



(b) テクスチャ凹部幅の影響

図 3 テクスチャ寸法の影響

(4) 微細表面構造を有する切削工具による工具耐摩耗性の向上

微細表面構造を有する切削工具を高硬度材料の切削加工に適用し、工具の耐摩耗性を評価した。実験は被削材を鉄鋼材料 S53C とした湿式切削により行い、先行研究で開発したナノマイクロ構造を有する切削工具 (図 4)、およびマイクロストライプ構造を有する切削工具を用いて行った。

図 5 は通常の切削工具、およびナノマイクロ構造を有する切削工具の切削距離 $300\ \text{m}$ の時点における工具すくい面を示している。同図に示すように、通常の切削工具ではすくい面上に深さ約 $8\ \mu\text{m}$ 程度のクレータ摩耗が生じているのに対して、ナノマイクロ構造を有する切削工具も通常の工具と同程度の摩耗が生じている。これは、ナノマイクロ構造は溝幅・溝間隔 $700\ \text{nm}$ 、溝深さ $100\sim 150\ \text{nm}$ 程度の非常に微細な構造であり、あまりに微細なため切削液の保持効果といった効果が得られなかったと共に、加工直後にテクスチャが摩滅し、通常の工具と同様の状態になってしまったことが原因として考えられる。また、表面テクスチャによって摩耗を抑制するためには、摩耗粉などの硬質摩耗粒子をテクスチャ凹部にトラップし、硬質摩耗粒子によるアブレイブな摩耗を防ぐことが重要である。ここで、摩耗した工具の表面を SEM によって詳細に観察した結果 (図 6)、工具の摩耗は数ミクロンオーダーの微細な粒子の脱落が伴っており、硬質摩耗粒子も数ミクロンオーダーであることが予想される。したがって、そのような粒子をテクスチャによってトラップするためには、少なくとも数ミクロンから数十ミクロン程度の大きさを持った溝構造が必要と言える。

それらの結果に対し、図 7 はマイクロスト

ライブ構造を表面に有する切削工具の加工後の工具すくい面である。同図に示すように、マイクロライブ構造を有する切削工具は切削距離 300 m の時点においてもクレタ摩耗は深さ約 3 μm 程度であり、通常の工具と比較して摩耗を約 60%程度抑制できている。これは、マイクロライブ構造が上述の摩耗粒子をトラップしうる溝構造であること、また多くの切削液をすくい面上に保持できるため、切削液の潤滑・冷却効果が強まったことが原因であると考えられる。

以上のように、適切な表面構造を選択することで、工具表面テクスチャによって工具摩耗を抑制できることを明らかにした。

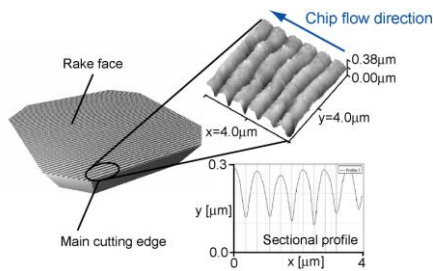
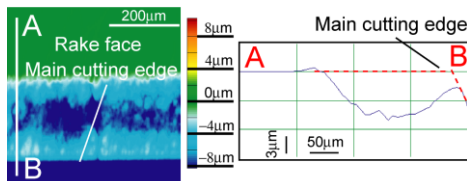
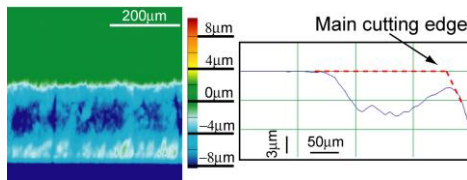


図 4 ナノ-マイクロ構造を有する切削工具



(a) Conventional tool



(b) ナノ-マイクロ構造を有する切削工具
図 5 加工後の工具すくい面

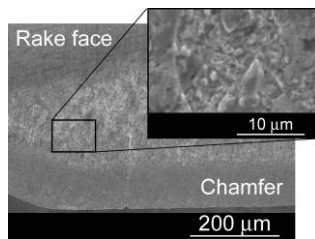


図 6 摩耗部分 SEM 像

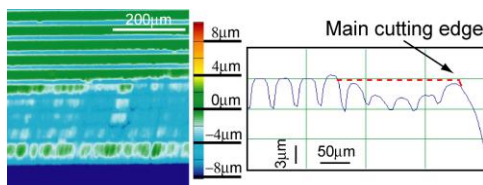


図 7 マイクロライブ構造を有する切削工具のすくい面

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5 件)

- ① T. Sugihara, T. Enomoto : Improving anti-adhesion in aluminum alloy cutting by micro stripe texture, *Precision Engineering*, Vol. 36, No. 2 (2012) pp. 229-237, 査読有
- ② 杉原達哉, 榎本俊之 : 微細表面構造を有する高機能切削工具の開発 (鉄鋼材料切削における耐摩耗性の向上), *日本機械学会論文集 C 編*, Vol.76, No.771 (2010) pp.3119-3125, 査読有
- ③ T. Enomoto, T. Sugihara : Improving anti-adhesive properties of cutting tool surfaces by nano/micro textures, *Annals of the CIRP*, Vol.59 (2010) pp. 597-600, 査読有
- ④ T. Sugihara, T. Enomoto : Development of a cutting tool with a textured surface for dry cutting of aluminum alloys, *International Journal of Automation Technology*, Vol.3, No.2 (2009) pp. 199-203, 査読有
- ⑤ T. Sugihara, T. Enomoto : Development of a cutting tool with a nano/micro-textured surface -Improvement of anti-adhesive effect by considering the texture-, *Precision Engineering*, Vol. 33, No. 4 (2009) pp. 425-429, 査読有

[学会発表] (計 12 件)

- ① 杉原達哉, 雪永敏志, 榎本俊之 : 微細表面構造を有する高機能切削工具の開発に関する研究 -複合テクスチャによる高機能化-, 2012 年度精密工学会春季大会学術講演会, 2012 年 3 月 14 日, 首都大学東京
- ② T. Sugihara and T. Enomoto : Improvement of Ant-Adhesive Properties of Cutting Tool by Nano/Micro Textures and its Mechanism, 1st CIRP Conference on Surface Integrity, 2012 年 2 月 1 日, Bremen
- ③ T. Sugihara, T. Enomoto : Improvement of tool wear resistance in steel cutting by textured surface, 26th Annual Meeting of the American Society for Precision Engineering, 2011 年 11 月 15 日, Denver
- ④ T. Sugihara, T. Enomoto : Improvement of tool wear resistance in steel cutting by textured surface, International Tribology Conference, 2011 年 10 月 31 日, Hiroshima
- ⑤ 杉原達哉, 榎本俊之 : 微細表面構造を有する高機能切削工具の開発に関する研究 -テクスチャ最適化とドライ加工への適用-, 2011 年度精密工学会秋季大会学術講演会, 2011 年 9 月 20 日, 金沢大学
- ⑥ 杉原達哉, 榎本俊之 : 微細表面構造を有する切削工具による切りくず凝着抑制に関する研究, 日本機械学会 2011 年度年次大会, 2011 年 9 月 14 日, 東京工業大学

⑦ 杉原達哉, 榎本俊之 : 微細表面構造を有する高機能切削工具の開発に関する研究—凝着メカニズムについての考察—, 2011年度精密工学会春季大会学術講演会, 2011年3月14日, 東洋大学

⑧ T. Sugihara , T. Enomoto : Improving anti-adhesive properties of cutting tool for aluminum alloy by nano/micro textures , 6th International Conference on Micro Manufacturing, 2011年3月8日, Tokyo

⑨ T. Sugihara , T. Enomoto : Improving anti-adhesive properties of cutting tool surface by nano-micro textures -Considering texture patterns-, 25th Annual Meeting of the American Society for Precision Engineering, 2010年11月2日, Atlanta

⑩ 杉原達哉, 榎本俊之 : 微細表面構造を有する高機能切削工具の開発に関する研究—微細表面構造の効果に関する考察—, 2010年度精密工学会秋季大会学術講演会, 2010年9月24日, 名古屋大学

⑪ 杉原達哉, 榎本俊之 : 微細表面構造を有する高機能切削工具の開発に関する研究—工具耐摩耗性向上に関する検討—, 2010年度精密工学会春季大会学術講演会, 2010年3月16日, 埼玉大学

⑫ 杉原達哉, 榎本俊之 : 微細表面構造を有する高機能切削工具の開発に関する研究—鉄鋼材料の切削—, 2009年度精密工学会秋季大会学術講演会, 2009年9月11日, 神戸大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

榎本 俊之 (ENOMOTO TOSHIYUKI)

大阪大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号 : 20403149