

## 平成 21 年度『大阪大学工業会賞』受賞研究

## 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

大阪大学大学院工学研究科  
機械工学専攻 榎本研究室

杉原 達哉

### 1. 緒言

近年、切削加工の分野においては加工の高能率化のために高速切削が、また環境負荷の低減のために切削液を用いないドライ加工や極微量切削液供給加工 (MQL: Minimum Quantity Lubrication) <sup>(1)</sup> の実現が強く求められている。いずれの加工においても切削工具へ極めて高い機械的・熱的負荷が加わることから、工具の耐摩耗性・耐熱性を高め、あるいは高負荷にならないように工具表面を低摩擦・高潤滑にすることが必要とされている。そこでこれらの要求に応えるために工具へのコーティング技術や工具すくい面の平滑化などの表面処理技術、切削油剤の種類やその供給方法など、数多くの研究がなされてきた。しかしながら、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 MQL 加工においては工具表面の潤滑性が不十分になりやすいため一部の加工現場のみへの導入にとどまっており、上記の諸技術で応えることは極めて困難な状況となっている。

筆者らはこの現状を打破するために、切削加工において極めて重要なファクタである工具刃先表面の構造に着目し、工具表面にナノ～マイクロメートルオーダの微細な三次元周期構造を形成することで高い耐凝着性・耐摩耗性・潤滑性といった様々な機能を発現する工具、すなわち微細表面構造を有する高機能切削工具の開発を行っている。従来の切削工具では工具と被削材間の潤滑性を高めることを目的に、研磨仕上げなどにより工具表面の平滑化が行われてきた。しかしながら本研究はそうした従来技術とは全く逆に、工具表面に微細な所定の粗さ、形状を付与するという、極めて独創的かつ斬新な切削工具の開発を目的としており、従来の切削加工の限界を打ち破ることのできる加工技術の創出・構築を目指している。本研究では特に、工具表面への切りくずの凝着が問題となるアルミニウム合金の切削加工、および工具表面の摩耗が問題となる鉄鋼材料の切削加工において、それぞれ耐凝着性、耐

摩耗性を高めた切削工具の開発を行ったので以下に述べる。

### 2. ナノ～マイクロ構造を表面に有する切削工具

展延性に富むアルミニウム合金の良好な切削加工の実現には、工具への切りくず凝着の抑制が不可欠である。この問題を解決するため、先行研究において工具すくい面にセグメント状の DLC 膜を形成した工具を開発し、その結果、従来の工具に対してすくい面の潤滑性が向上したものの工具への被削材の凝着は依然として生じ、いまだ問題のあることが判明した <sup>(2)</sup>。この問題を解決するため、工具すくい面と被削材との接触面積、および工具すくい面に形成した微細構造の寸法などを考慮して微細構造の再設計を行い、数百 nm 間隔のナノ～マイクロ極微細溝構造が耐凝着性の向上には有効であることを明らかとした。

ここで、切削工具の素材である超硬合金に狭間隔、すなわち nm～ $\mu\text{m}$  レベルの幅・間隔からなる微細溝をチップングなく形成する方法としてフェムト秒レー

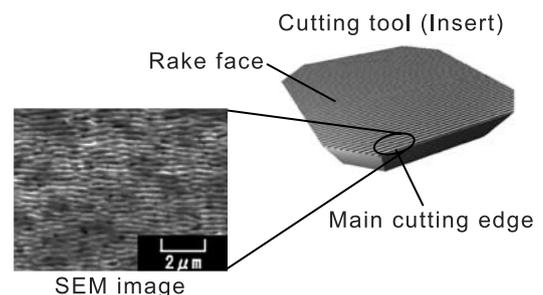


図 1 Developed cutting tool with nano/micro grooves textured by femtosecond laser

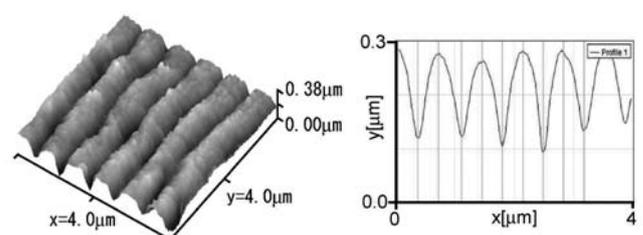


図 2 AFM image and profile of the rake face of the tool

表 1 Cutting conditions

Workpiece	A5052 W 75 mm - L 210 mm		
Tool (Insert)	Cemented carbide K10 SEKN42M, Sumitomo Electric Hardmetal		
Tool geometries	Axial rake angle $\theta_A$		20°
	Radial rake angle $\theta_R$		-3°
	True rake angle $\alpha$		12.4°
	Corner angle $\gamma$		45°
	Cutter diameter D		80 mm
Cutting speed	380 m/min (1500 rpm)		
Depth of cut	3 mm		
Feed rate	0.12 mm/rev.		
Cutting fluid	Emulsion type (JIS A1)		
	Finecut CFS-100, NEOS		
Supply rate	12.6 L/min		

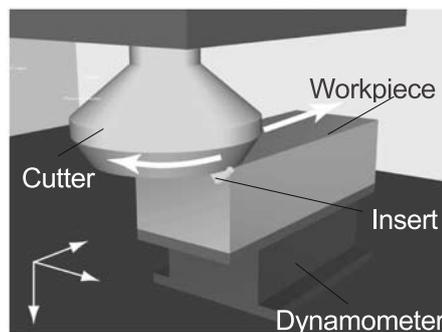


図 3 Experimental setup of face milling tests

加工が挙げられる。沢田らはフェムト秒レーザーを用いたサブ  $\mu\text{m}$  寸法を有する微細周期構造の形成技術の開発しており、優れたしゅう動特性を示すことを報告している (3)。そこで、この方法を用いて工具すくい面に溝深さ 150 nm、溝間隔 700 nm の微細な周期溝構造 (ナノ-マイクロ構造) を形成した工具 (図 1、図 2) を開発した (4)。溝方向については、溝方向と摩擦しゅう動特性の関係についての従来研究を参考に、主切れ刃に対して平行な方向に溝を形成した。なお工具すくい面はダイヤモンド砥粒にて予め鏡面 (表面粗さ P-V 40 nm) に研磨仕上げした。また工具表面の耐凝着性を高めるために、微細構造形成後にプラズマ CVD 法により DLC コーティングを行った。

加工実験には図 3 に示す立形マシニングセンタ (ヤマザキマザック製 AJV-18) を使用し、1 枚刃にて中心削りで正面フライス切削した。主な実験条件を表 1 に示す。

図 4 (a) および (b) に、すくい面を研磨した後に DLC コーティングを施した従来の工具 (Polished tool) と開発工具 (Tool with grooves) を用いたときの加工結果 (切削距離 1800 m 時) として、工具すくい面切れ刃近傍の SEM 画像、EDX 分析によるアルミニウムの分布、および断面形状を示す。同図に示すとおり、従来のすくい面を研磨した工具 (Polished tool) では、工具すくい面上の切れ刃の先端部分に、高さ  $0.5 \mu\text{m}$ 、幅  $150\text{--}200 \mu\text{m}$  ほどの切りくずの凝着が生じている。それに対し、微細溝を有する開発工具 (Tool with grooves) では、1800 m 加工後においても、凝着が大幅に抑制されていることがわかる。さらに、EDX 分析の結果においてアルミニウム原子数濃度を比較することで、開発工具が優れた耐凝着性を有する

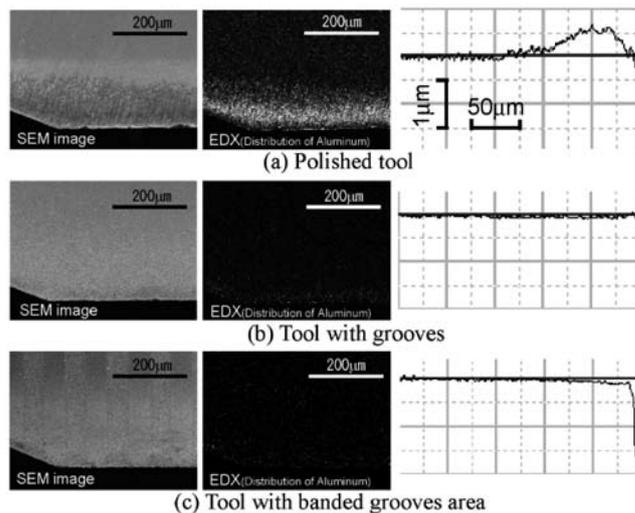


図 4 Rake face of the cutting tool after cutting

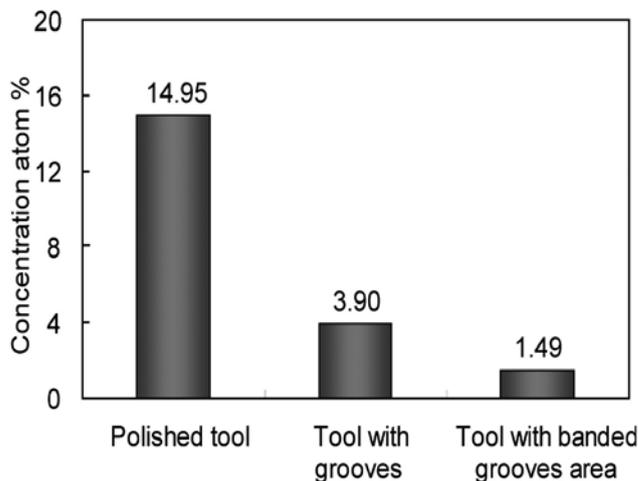


図 5 Atom concentration of aluminum on raked face

ことが定量的にも明らかになった (図 5)。

ここで、開発工具の加工後のすくい面の状態を拡大して観察した SEM 画像および EDX 分析の結果を図 6 に示す。SEM 画像からわかるように、1800 m 加工後においてもすくい面に形成した微細溝は明瞭に確認することができ、凝着によって覆われていないことが確認できる。しかしながら、EDX 分析結果が示すようにアルミニウム合金の凝着はわずかながら発生して

いる。したがって、すくい面上に施した微細溝は切削距離の増加に伴い凝着によって埋もれてしまう可能性があるため、耐凝着性をさらに高める必要があると言える。

### 3. ストライプ状ナノ-マイクロ構造を表面に有する切削工具

工具すくい面に形成した微細なテクスチャは、(1) 微細溝部が切削液や空気の Micro Pool としての役割を果たすことで、工具表面と切りくず、被削材間の潤滑性を高め、さらに切りくずの溶着や凝着を抑制し、(2) 工具表面と切りくず、被削材間との接触面積を減少させることで、その間の摩擦を低減させる、といった効果をもたらすことが期待できる。ここで、これらの効果の中で、アルミニウム合金の切削加工において凝着を抑制する上で最も重要な要素を明らかにするためドライ加工実験を実施した。そしてその結果から、ナノ-マイクロ構造を表面に有する切削工具の耐凝着性向上の要因が、すくい面上の切削液保持性の向上効果によるものであることを明らかとした。そこで、耐凝着性をさらに向上させるために、鏡面研磨した工具すくい面に微細溝を幅  $50\mu\text{m}$  の帯状に形成した切削工具 (Tool with banded grooves area) を新たに開発した (図 7)。微細溝形成部分を鏡面部分ではさむことで切削液が溝部から外部に流出するのを抑制し、さらに微細溝形成部分は全体が  $100\sim 200\text{nm}$  程度の深さを持つため、工具面上における切削液の保持量を増加させることが期待できる。また既報<sup>(1)</sup>で開発した工具ではその微細溝部に凝着が生じてしまったが、今回の開発した工具の溝内部の極微細溝は上記したように凝着を大幅に抑制することが期待できる。

実験の結果を図 4 (c) および図 5 に示す。同図のように、ストライプ状に微細溝を形成した工具は全面に微細溝を形成した工具よりもさらに優れた耐凝着性および潤滑性を有することがわかった。さらに、顕微鏡写真から画像解析により求めた切りくず凝着面積の変化を図 8 に示す。同図に示すとおり、新たに開発したストライプ状にナノ-マイクロ構造を形成した工具の切りくず凝着面積は、すくい面全面にナノ-マイクロ構造を形成した工具の約  $1/2$  程度となっており、この結果からも開発工具が極めて優れた耐凝着性を示すことが明らかとなった。

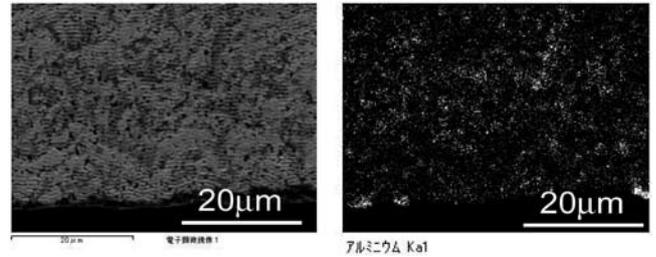


図 6 Enlarged rake face of cutting tool with grooves parallel to edge (left: SEM image; right: EDX-Al image).

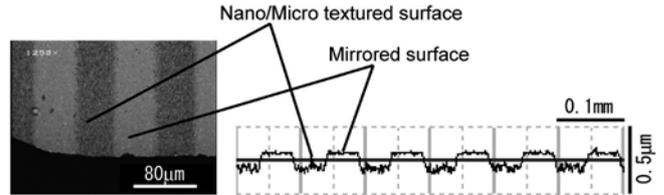


図 7 Developed cutting tool with banded grooves area

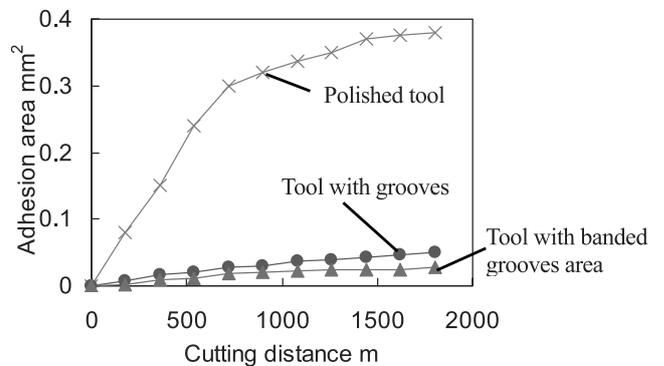


図 8 Changes in adhesion area on rake face with cutting distance

### 4. マイクロストライプ構造を表面に有する切削工具

切りくずの凝着が問題となったアルミニウム合金に対し、硬度が高く加工点が高温度となる鉄鋼材料の切削加工では、工具の長寿命化において、機械的な磨耗や切削熱の上昇を抑制することが重要となる。したがって、要求される機能を果たすテクスチャの形状・寸法は、アルミニウム合金の切削加工において必要とされるものとは大きく異なる。実際に、ナノ-マイクロ構造を有する切削工具を用いて鉄鋼材料 (S53C) を加工した場合、通常の工具と同程度の工具磨耗が発生し、アルミニウム合金の切削加工において被削材の凝着を著しく抑制した同工具を用いても、工具磨耗の抑制は不可能となっている (図 9)。

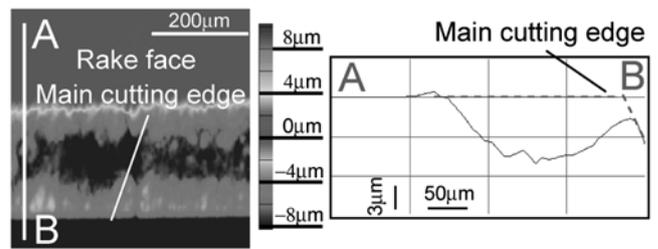
鉄鋼材料の切削加工において工具の磨耗を抑制するためには、工具表面に加わる熱的、機械的な負荷を低減させることが必須である。そこで、工具の耐磨耗性を向上させる微細表面構造として、(1) 切削液による冷却効果を高めるため、より多くの切削液を工具すくい面上に保持することが可能な、より深く幅の広い溝

を有する構造、(2) 機械的な磨耗を抑制できるように、切りくずと接触する凸部がフラットとなる構造、が必要であると考えられる。

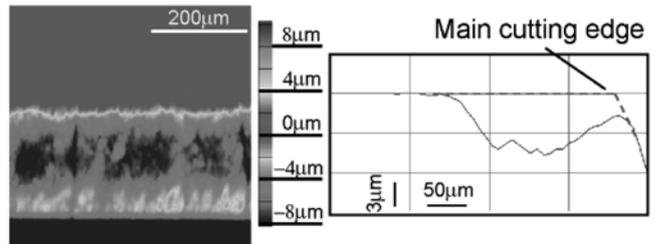
また加工後に摩耗した工具すくい面を詳細に観察したところ、**図 10** に示すように数ミクロンオーダの粒子が脱落して摩耗が進行していることがわかった。切削加工における工具-切りくず間のような過酷な潤滑環境下では、脱落した構成刃先や摩耗粉、被削材に含まれる硬質粒子といった摩耗粒子や硬質突起の掘り起こしが工具表面の摩擦摩耗状態に大きく影響することが知られている<sup>(5), (6)</sup>。したがって、こうした数マイクロメートルオーダの摩耗粒子をトラップする役割も工具表面のテクスチャには求められる。

アルミニウム合金の切削加工において開発したナノ-マイクロ構造は、凹部のサイズ、体積とも小さく、また凸部はフラットではなく正弦波状となっており、鉄鋼材料切削における耐摩耗性向上には適していなかったと考えられる。そこで新たに**図 11** に示すような数十マイクロメートルオーダ幅・間隔のストライプ状の周期溝（マイクロストライプ構造）を工具すくい面に形成した、マイクロストライプ構造を表面に有する切削工具を考案した。工具への微細構造の形成にはフェムト秒レーザを使用した。フェムト秒レーザの照射により周期構造が形成された部分は、全体が200nm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 $\mu\text{m}$ の周期溝を20 $\mu\text{m}$ 間隔で工具すくい面上へ形成した。また溝の方向の違いによる影響を検討するため、それぞれの溝深さについて切りくずの流出方向に対して垂直方向（主切れ刃と平行方向）に溝を形成したもの、平行方向（主切れ刃と垂直方向）に溝を形成したものの2種類の工具を開発した。

加工後の工具すくい面の三次元形状および断面形状を**図 12** に示す。同図 (a) からわかるように、主切れ刃と平行方向に溝を形成した工具のすくい面磨耗は最も深い箇所でも3 $\mu\text{m}$ 程度と、従来の工具 (**図 9 (a)**) と比較して磨耗を大きく抑制できた。主切れ刃と垂直方向に溝を形成した工具 (**図 12 (b)**) については、磨耗量は従来の工具と同程度であり、さらに溝の底部で磨耗が生じてしまった。これは同工具では溝方向と切りくず流出方向が平行となるために、切りくずが溝の形状に倣って変形し、溝の内部まで侵入したためと

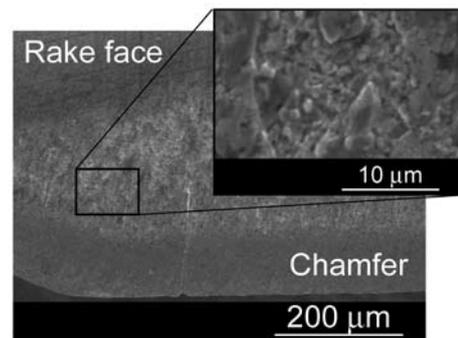


(a) Conventional tool

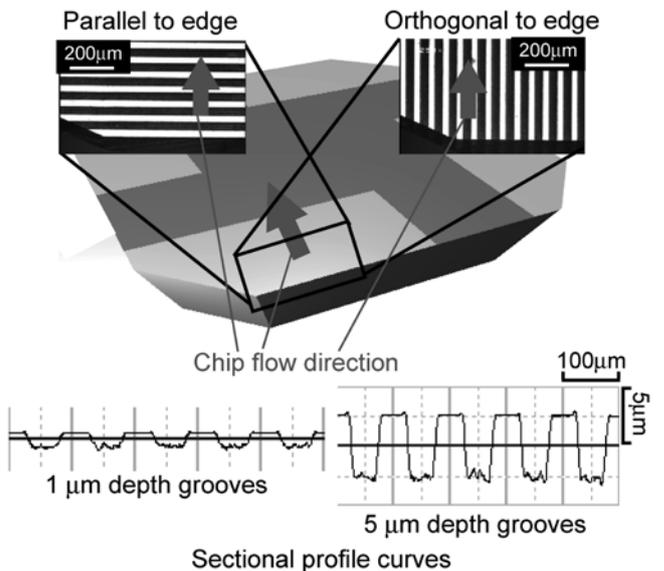


(b) Tool with nano/micro-textured surface

**図 9** Rake face of the cutting tools after cutting



**図 10** Surface of tool with nano/micro-textured surface after cutting



**図 11** Newly developed tool with micro-stripe texture

考えられる。また、溝方向が摩擦しゅう動特性に及ぼす影響についてはすでに多くの研究<sup>(3), (7)</sup>があり、無潤滑状態や境界・流体潤滑状態においてしゅう動方向に対し溝方向を直交させると良好な特性が得られる

とされている。本研究で得られた溝方向と磨耗量の関係は、こういった従来研究と一致する結果となった。

以上のように、開発した工具は切削距離 300m の時点で磨耗の進行を約 60% 程度抑制することができたが、工具磨耗量は切削距離に比例して漸増した。ここで、市販工具と開発工具（主切れ刃と平行方向）の切削距離とすくい面磨耗最大深さ  $KT$  の関係を図 13 に、切削距離 600m 時のすくい面の状態を図 14 に示す。これらからわかるように、切削距離 600m の時点では開発工具は磨耗によってすくい面のテクスチャが消失しており（図 13 (b)）、切削距離 300m から 600m にかけては通常の工具とほぼ同様に工具磨耗が進行した（図 12）。

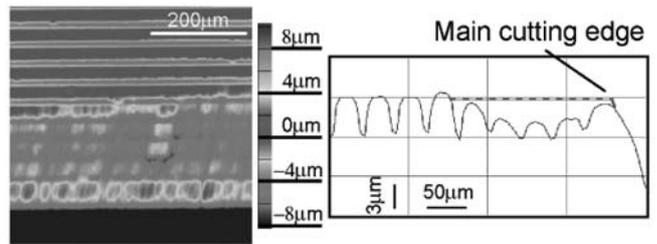
以上のように工具すくい面に形成したマイクロストライプ構造は工具の耐摩耗性を高められたものの、その効果が発現されるのは切削距離にして約 300m 程度しかないことがわかった。

## 5. マイクロストライプ構造を表面に有する

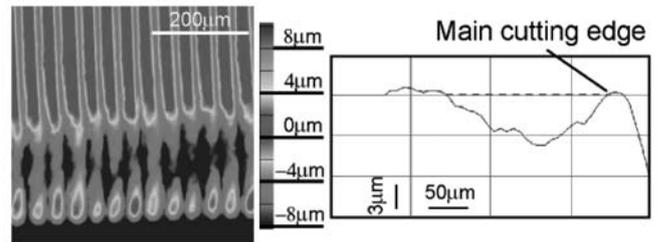
### TiAlN コーテッド切削工具

開発工具の耐摩耗性をさらに高めることを目的に、工具へテクスチャを形成した後に、コーティングを施すこととした。第 2 章で述べたナノ-マイクロ構造を有する切削工具も、テクスチャ形成後に DLC コーティングを施すことで工具の耐凝着性を著しく高められたことから、微細表面構造とコーティングを組み合わせることでその機能を著しく高められることが期待できる。そこで高硬度、高耐熱性を有し、鉄鋼材料の切削加工において広く使用されている TiAlN コーティングを行った。工具へのコーティングはマイクロストライプ構造形成後に PVD 法（膜厚  $2.4\mu\text{m}$ ；蛍光 X 線装置で測定）により行った。なお、このコーティングはすくい面に形成した微細構造に追従して形成され、コーティングの前後で溝の深さは変化しなかった。

まず通常の工具に TiAlN コーティングを施した切削工具について評価した結果、切削距離 300m、600m 加工後とも、切れ刃の先端部分で切りくずの凝着と磨耗が発生した（図 15）。そして磨耗が発生している部分を SEM（日立ハイテクノロジー製 S-3400NX）および EDX（EDX；Energy Dispersive X-ray Spectrometry）により詳細に観察を行った（図 16）。図 16 (b) の EDX 像における白い点は、工具母材である超硬合金に含まれる W、Co の分布を示して



(a) Developed tool with 20  $\mu\text{m}$  interval grooves parallel to edge



(b) Developed tool with 20  $\mu\text{m}$  interval grooves orthogonal to edge

図 12 Developed tool with 20  $\mu\text{m}$  interval grooves orthogonal to edge

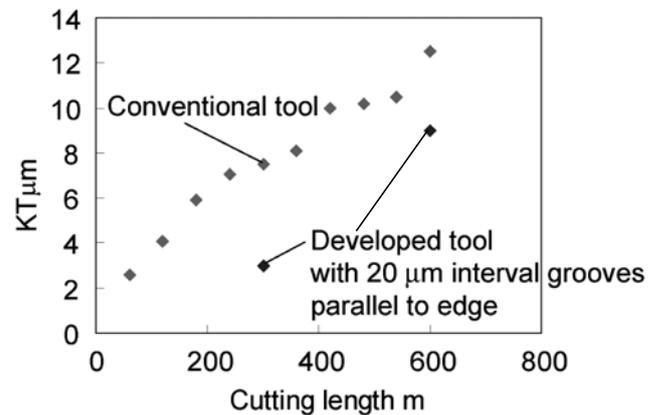
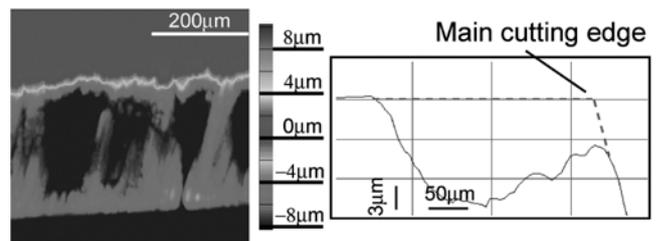
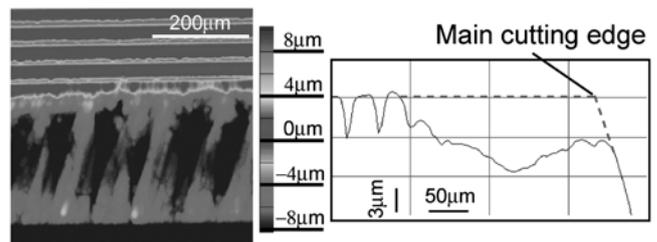


図 13 Changes of maximum depth of crater wear with cutting length



(a) Conventional tool



(b) Developed tool with 20  $\mu\text{m}$  interval grooves parallel to edge

図 14 Rake face of the cutting tools after 600 m cutting

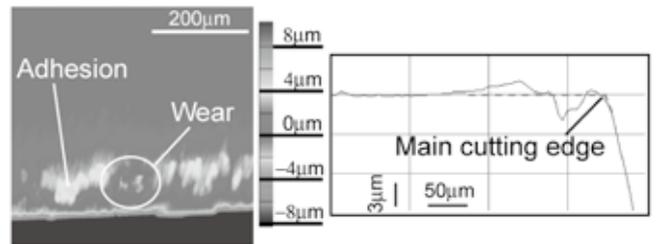
いる。同図中の枠線部分で示したように、摩耗が生じている部分では工具母材である超硬合金が露出しており、コーティングの剥離が生じていることがわかった。また、600m加工後の結果（図15(b)）から、この切りくず凝着、コーティングの剥離および工具摩耗は加工の進行にともない増大していることがわかった。特に断続切削では工具が工作物から離脱する時に凝着物が脱落し、その際にコーティングの剥離が発生する<sup>(8)</sup>ため、コートド工具の摩耗を抑制するためにはこの切りくずの凝着の抑制が極めて重要である。

次に、新たに開発した工具では切れ刃先端付近にサーマルクラックが見られるものの、600m加工後も凝着およびそれにとまなうコーティングの剥離や摩耗はほとんど生じていない（図17）。これは、工具すくい面にマイクロストライプ構造を形成することで、すくい面上に切削液が良好に保持され潤滑性が向上し、また切りくずと工具すくい面との接触面積が減少したためと考えられる。

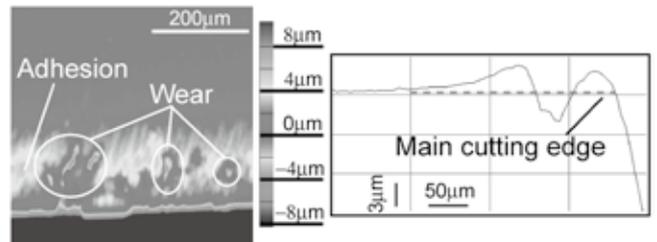
## 6. 結 言

切りくずの凝着や工具磨耗といった工具損傷の抑制を目的に、微細表面構造を有する切削工具の提案および開発を行った。そしてナノ-マイクロ構造を表面に有する切削工具、およびマイクロストライプ構造を表面に有する切削工具を提案、開発した結果、次のような結論を得た。

- (1) フェムト秒レーザーで溝深さ100～150nm、溝間隔700nmからなる微細溝周期構造（ナノ-マイクロ構造）をすくい面に形成した後にDLCコーティングを施した工具を開発し、アルミニウム合金の切削加工において優れた耐凝着性を実現できた。
- (2) 耐凝着性向上の要因がすくい面に形成した微細構造による切削液保持性の向上効果であることを明らかにし、ストライプ状ナノ-マイクロ構造を有する切削工具を新たに考案、開発し、工具の耐凝着性をさらに高めることができた。
- (3) 溝間隔20 $\mu\text{m}$ 、溝深さ5 $\mu\text{m}$ のマイクロストライプ構造を主切れ刃に平行方向に形成した工具を開発し、鉄鋼材料の切削加工において工具磨耗を従来の市販工具に比べて約60%抑制することができた。
- (4) 工具すくい面にマイクロストライプ構造を形成し

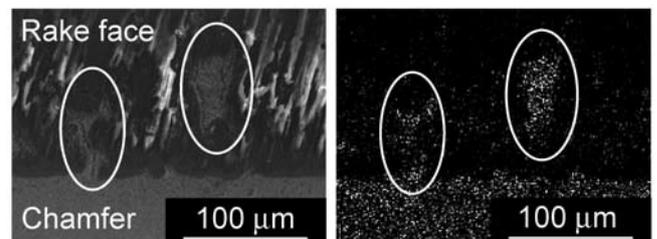


(a) Conventional TiAlN-coated tool after 300 m cutting



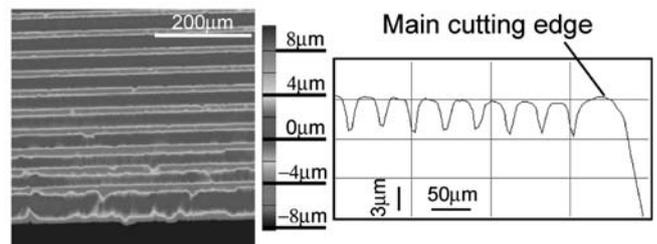
(b) Conventional TiAlN-coated tool after 600 m cutting

図15 Rake face of conventional cutting tool after cutting

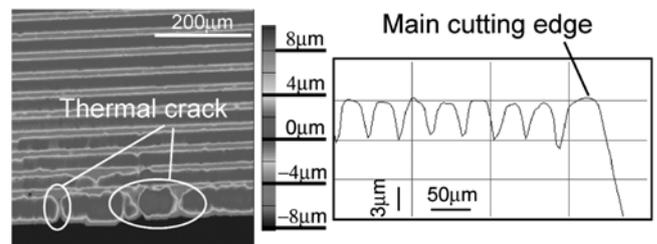


(a) SEM image (b) DX-W, Co image

図16 Rake face of the conventional TiAlN-coated cutting tool after 600 m cutting



(a) Developed TiAlN-coated tool after 300 m cutting



(b) Developed TiAlN-coated tool after 600 m cutting

図17 Rake face of the cutting tools after cutting

た後、TiAlNコーティングを施した切削工具を開発した結果、従来のTiAlNコートド工具では切りくずの凝着とそれにとまなうコーティングの剥離、および工具磨耗が発生したのに対し、開

発工具ではそれらを大きく抑制できることがわかった。

#### <参考文献>

- (1) Weinert, K., et al., Annals of the CIRP, 53, 2 (2004) pp.511-537.
- (2) Enomoto, T. et al., Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol.73, No.729 (2007), pp.1560-1565.
- (3) Sawada, H. et al., Journal of the Japan Society for Precision Engineering, Vol.69, No.4 (2003), pp.554-558.
- (4) Enomoto, T. et al., Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol.74, No.745 (2008), pp.2315-2320.
- (5) Suh, N. P. et al., Wear, Vol.69 (1981), pp.91-144.
- (6) Suh, N. P. et al., Annals of CIRP, Vol.63, No.1 (1987), pp.403-408
- (7) Shimura, H., et al., Journal of Japanese Society of Tribologists, Vol.25, No.1 (1980), pp.33-40. (in Japanese)
- (8) Itakura, K. et al., Journal of the Japan Society for Precision Engineering, Vol.65, No.7 (1999), pp.976-981. (in Japanese)



本研究は現在でも継続して行っており、トライボロジーの観点からの現象の解明、およびテクスチャの最適化を目指しています。

(機械 平成 20 年卒 22 年前期 後期 1 年在学中)

### 住所変更等のご連絡はお早めに！！

住所変更等の変更が生じた場合は、E-mail・FAX・郵送・電話により、なるべく早く事務局までお届け下さい。

**FAX・郵送の場合**は、同封の『変更届』に必要事項をご記入の上、お送り下さい。

**E-mailの場合**は、『変更届』の内容を直接メールにご記入いただくか、メールで様式をご請求下さい。従来どおり、お電話でも承っております。

\* 市町村合併や住居表示変更の場合も、一定期間を経過しますと、「宛所に尋ねあたらず」として返送されます。

\* ご自宅はそのままの場合でも、ご本人のみ転送届が出されていますと、1 年経過後に転送期間切れで返送されます。転送期間が切れる前にお忘れなく、ご連絡下さい。

『変更届』は、工業会会員データを正しく更新するためのもので、他の目的には使用いたしません。テクノネット「会員動静」欄への掲載についても、ご本人の意思確認ができたもののみ掲載いたしますので、『変更届』送付の際は、必ず掲載の可・不可をご記入下さい。