鋼のダイヤモンド切削における工具摩耗の抑制
(浸炭した鋼の組織が及ぼす影響)辻野 元大^{*1}, 古城 直道^{*2}, 山口 智実^{*2}, 廣岡 大祐^{*2}
松田 茂敬^{*3}, 岩佐 康弘^{*3}, 寺内 俊太郎^{*3}Suppression of tool wear in diamond turning of steel
(Effect of microstructure of carburized steel)Genta TSUJINO^{*1}, Naomichi FURUSHIRO^{*2}, Tomomi YAMAGUCHI^{*2}, Daisuke HIROOKA^{*2},
Shigetaka MATSUDA^{*3}, Yasuhiro IWASA^{*3} and Shuntaro TERAUCHI^{*3}^{*1} Graduate School of Science and Engineering, Kansai University

3-3-35 Yamate-cho, Suita-shi, Osaka 564-8680, Japan

^{*2} Department of Mechanical Engineering, Kansai University

3-3-35 Yamate-cho, Suita-shi, Osaka 564-8680, Japan

^{*3} Osaka Yakin Kogyo Co., Ltd.

4-4-28 Zuiko Higashiyodogawa-ku, Osaka-shi, Osaka 533-0005, Japan

Received: 7 April 2017; Revised: 5 June 2017; Accepted: 4 July 2017

Abstract

Diamond cutting tools show severe wear in turning of steels. In previous paper, it was shown that carbides on ferrite phase, which were precipitated by carburization, suppressed the diamond tool wear. In this paper, detailed distribution of constituents of the carbides was analyzed by EDS (energy-dispersive X-ray spectroscopy). In addition, characteristics of each carbide such as occupancy, diameter, and degree of circularity were measured. Results indicate that those characteristics of the carbides influence suppression of the tool wear.

Keywords : Single crystal diamond tool, Wear, Steel, Ultra-precision cutting, Carburizing, Carbide, Grain boundary

1. 緒 言

近年、非球面形状および自由曲面上に多様な回折格子をもつ光学素子は、モールド技術によって量産するため、金型の精度が重要である。そのため、高い加工精度および優れた仕上げ面を得ることができる鋭利で輪郭精度の高い切れ刃を持つダイヤモンド工具を用いた超精密切削加工が望ましい。しかし、ダイヤモンド工具で加工できる材料は無電解 Ni-P メッキのような非晶質合金や軟質金属に限られ、鋼はほとんど利用されない。これはダイヤモンド工具を用いて鉄系材料を切削すると、鉄中への拡散が顕著であるため、工具が激しく摩耗するという問題があるからである (Ikawa and Tanaka, 1971, Paul et al., 1996, Shimada et al., 2004, 樋口, 2004, Lane et al., 2013)。一方、鋼のダイヤモンド切削において、超音波楕円振動切削は工具摩耗を大幅に減少する効果がある (Shamoto and Moriwaki, 1999, Brehl and Dow, 2008, 社本, 2014)。しかし、低い切削速度など加工条件において制限がある。

ここで、鋼は熱処理や合金元素により組織を多様な性質に変化させ、用途に適した性能を持たせることが可能である。筆者らは、これまでに鋼の熱処理や合金元素により組織が変化する特徴に着目し、ダイヤモンド切削において工具摩耗を抑制し、工具寿命を長くする鋼について検討してきた。まず、ダイヤモンド工具を摩耗させるにくくする要因を明らかにするために、種々の実用鋼材の超精密切削を行い、ダイヤモンド工具の摩耗量を比較し

No.17-00161 [DOI: 10.1299/transjsme.17-00161], J-STAGE Advance Publication date : 18 July, 2017

本論文は、第11回生産加工・工作機械部門講演会 講演論文集(2016), No.C03の掲載内容に基づいた論文である。

^{*1} 関西大学大学院理工学研究科 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町 3-3-35)^{*2} 正員, 関西大学 システム理工学部機械工学科^{*3} 大阪冶金興業 (株) (〒533-0005 大阪府大阪市東淀川区瑞光 4-4-28)

E-mail of corresponding author: furusiro@kansai-u.ac.jp

た. これより, α 相に炭化物が析出する鋼材はダイヤモンド工具を摩耗させにくいことを明らかにした (高橋他, 2010) (寺内他, 2011). そこで, 炭化物を析出させる浸炭処理に着目し, 熱間ダイス鋼 SKD61, 窒化専用鋼 SACM645 および炭素工具鋼 SK105 に浸炭処理を施し, α 相に炭化物を析出させた鋼材の切削実験を行った. その結果, 工具摩耗が減少した (乾他, 2011, Furushiro et al., 2011). しかし, その効果は鋼種によって異なっていた. これは, 浸炭処理によって析出する炭化物が工具摩耗に影響を及ぼしているためであると考えられる. しかし, その影響は明らかでない. そこで, 本報では, 浸炭処理によって析出した炭化物の割合, 寸法, 形状を定量的に分析することで, 炭化物が工具摩耗に及ぼす影響を検討した.

2. 実験方法

2・1 実験鋼材

工具摩耗と炭化物の関係を検討する上で, 鋼材間の化学成分の違いによる影響は避けたい. そこで, 実験鋼材は一種とし, 浸炭によって深さ方向に変化するミクロ組織に対して段階的に切削実験を行うことで, 炭化物と工具摩耗の関係を検討する. そのため, 浸炭による深さ方向への組織の変化が大きい鋼材が望ましく, 熱間ダイス鋼 SKD61 を実験鋼材として用いた. SKD61 の化学成分を表 1 に示す. 表より, 炭化物を生成する合金元素として Cr, V, Mo, Mn が含まれていることから, 浸炭処理によってこれらの炭化物が析出すると推測される. 同一の鋼材から試料を 3 個切り出し, 調質後に $1000^{\circ}\text{C} \times 5$ 時間の固体浸炭を施して炉冷した後, 焼入れ, 焼戻しを行って炭化物を析出させた. 表 2 に調質条件, 表 3 に浸炭条件を示す.

浸炭処理を行うことで, 表面から深さ方向に硬さおよび炭素濃度が変化する. 硬さの測定には, 微小圧縮試験機 (島津製作所製, MCT-W500-J), 炭素濃度の測定にはエネルギー分散型 X 線分析装置 (Energy Dispersive X-ray Spectrometry, 以下 EDS) を用いた. また, 鋼材の組織観察には, ショットキー電界放出型走査電子顕微鏡 (Field Emission Scanning Electron Microscope, FE-SEM) (日本電子株式会社製, JSM-7100F) を用いた.

調質後と浸炭後における表面付近のミクロ組織画像を図 1 に示す. 図より, 浸炭後の組織に析出物が確認できる. これらの鋼材の組織構成相を特定するため, X 線回折装置 (Rigaku 製, RINT2000) を用いた. 図 2 に, 調質鋼および浸炭鋼の X 線回折パターンを示す. 図より, 調質鋼は $\alpha\text{-Fe}$ のみで構成されている. 一方, 浸炭鋼は母相が $\alpha\text{-Fe}$ であり, Fe_3C および Cr_{23}C_6 が析出していると推測される. したがって, 図 1 のミクロ組織により観察された析出物は, これらの炭化物であると考えられる.

2・2 切削実験方法

切削実験には, 超精密旋盤 (豊田工機製, AHP-20-25N) を用いた. 図 3 に, 長さ 10mm の $\square 5\text{mm}$ 角柱状試験片を乾式正面旋削している様子を示す. ダイヤモンド工具の諸元および加工条件を表 4 に示す. 工具は, 天然単結晶ダイヤモンド Ia 型を刃先角 130° , すくい角 0° , 逃げ角 7° に精密研磨して用いた. 切削後のダイヤモンド工具の一例を図 4 に示す. 工具摩耗は, コーナ摩耗幅 VB_C および境界摩耗 VB_N によって評価した.

Table 1 Chemical compositions of SKD61 steel. (at%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	V	Fe
1.73	1.83	0.43	0.19	0.02	0.05	5.40	0.68	0.02	0.89	88.77

Table 2 Heat treatment condition for SKD61 steel.

Quenching	Tempering
$1035^{\circ}\text{C} \times 1\text{h}$	$560^{\circ}\text{C} \times 4\text{h}$

Table 3 Carburizing heat condition for SKD61 steel.

Carburizing	Quenching	Tempering
$1000^{\circ}\text{C} \times 5\text{h}$	$830^{\circ}\text{C} \times 0.5\text{h}$	$550^{\circ}\text{C} \times 3\text{h}$

Fig. 1 SEM micrographs showing microstructures of (a) heat treated SKD61 steel and (b) carburized one.

Fig. 2 X-Ray diffraction patterns for (a) heat treated SKD61 steel and (b) carburized one.

Fig. 3 Machining set-up for diamond tool wear experiments.

Fig. 4 SEM micrograph of diamond tool after turning of SKD61 steel specimen (3). (Depth of 1000μm)

Table 4 Machining parameters used to assess the flank wear on diamond tools.

Cutting tool		Cutting conditions	
Material	Monocrystalline diamond Ia	Cutting speed	3.3 m/s
Crystallographic orientation	(100) rake face/ (110) flank face	Feed rate	3.1 μm/rev
Included angle	130°	Depth of cut	3.5 μm
Rake angle	0°	Cutting length	16 m
Clearance angle	7°	Nominal thickness of cut	1.3μm

3. 実験結果

3・1 組織観察

図 5 に、浸炭鋼における深さ方向のビッカース硬さおよび炭素濃度の変化を示す。図より、表面から深さ 500μm までは 550HV 以上であり、浸炭処理による有効硬化層と考えられる。深さ 500μm 以降は硬さが低くなり、深さ 1000μm 以降はほぼ一定になっていることから、母相であることがわかる。また同図の炭素濃度の変化より、表面付近は炭素濃度が高く、深さ方向に減少していることから、各深さで析出する炭化物の大きさや個数が異なると考えられる。

そこで、各深さに対しマイクロ組織観察を行った結果を図 6 に示す。図より、硬さがほぼ一定である有効硬化層においても、炭化物の大きさや形状、個数が異なることがわかる。また、母相である深さ 1000μm 以降は小さな炭化物のみが析出していることがわかる。このように、同じ硬さでも炭化物の析出状態が異なるため、各深さで

切削実験を行うことで、ミクロ組織が工具摩耗に及ぼす影響を検討する。切削実験は、有効硬化層である深さ 100 μm , 250 μm , 500 μm と、母相である深さ 1000 μm , 1500 μm で行った。

Fig. 5 Vickers hardness and carbon concentration of carburized SKD61 steels as a function of distance from surface.

Fig. 6 SEM micrographs showing microstructure of carburized SKD61 steel specimen (1).

3・2 工具摩耗

図 7 に、各深さで切削実験を行った後の工具刃先の SEM 画像を示す。図より、各深さでコーナ摩耗幅が異なり、有効硬化層では逃げ面の横切れ刃側にアプレシブ摩耗が確認できる。一方、母相では、すくい面と逃げ面の横切れ刃側に顕著な境界摩耗が確認でき、有効硬化層と母相では摩耗形態が異なることがわかる。図 8 に、各試料の表面からの深さとコーナ摩耗幅 VB_c および境界摩耗 VB_N の関係を示す。図より、コーナ摩耗幅 VB_c は、深さにより様々である。一方、境界摩耗は深さ方向に増大していることがわかる。これらの工具摩耗が仕上げ面に及ぼす影響を調査するため、レーザ顕微鏡 (Olympus 製, OLS4100) を用いて観察を行った。

3・3 仕上げ面

図 9 に、各深さの切削後の仕上げ面画像を示す。図より、深さ 500 μm では大きなむしれが生じており、切削時に析出した炭化物が脱落したことで生じたと考えられる。母相においてもむしれは確認できるが、深さ 500 μm に比べて小さい。これは、母相では小さな炭化物のみが析出していたためと考えられる。また、深さ 1500 μm では表面付近に比べて、押しならされた面となっている。これは、深さ 1500 μm では工具摩耗が増大し、刃先の鋭利性が低くなったためと考えられる。ここで、有効硬化層と母相のそれぞれにおいて、同じ硬さであっても工具摩耗が異なることから、ミクロ組織が影響していると考えられる。そこで、各組織に析出する炭化物を定量的に分析することで工具摩耗とミクロ組織の関係を検討する。

Fig. 7 SEM micrographs of flank of diamond tools after turning of carburized SKD61 steel specimen (1).

$V=3.3\text{m/s}$, $f=3.1\mu\text{m/rev}$, $d=3.5\mu\text{m}$, $L=16\text{m}$

Fig. 8 Comparison of corner wear and boundary wear as a function of distance from surface.

Fig. 9 Micrographs of finished surfaces of carburized SKD61 steel specimen (1).

$V=3.3\text{m/s}$, $f=3.1\mu\text{m/rev}$, $d=3.5\mu\text{m}$, $L=16\text{m}$

4. ミクロ組織と工具摩耗

4・1 炭化物の定量分析方法

3.1 の組織観察から、浸炭処理によって析出した炭化物は Fe_3C および Cr_{23}C_6 であることがわかった。しかし、ミクロ組織画像からこれらの炭化物分布を特定することはできない。そこで、EDS によるマッピング分析を行い、各元素の分布情報を得た。図 10 に、深さ $100\mu\text{m}$ における SEM 画像と C, Cr, V, Fe の元素分布図を示す。図より、SEM 画像において炭化物と考えられる部分の C の濃度が高いことがわかり、Cr および V の濃度もこれらの箇所で高くなっていることがわかる。一方、Fe の元素分布図を見ると、Cr, V の位置で濃度が低くなっているが、Cr が存在する位置には Fe も存在していることがわかる。これは Fe_3C に Cr が固溶し、Fe と一部置換して、 Fe_3C と共存した状態で析出していることを示しており、Cr 炭化物と考えられる部分には Fe_3C も存在していると考えられる。したがって、Cr と V の元素分布図に対して画像解析を行うことで炭化物を定量的に測定することが可能である。

画像解析を行うために、2 値化処理を行った。図 11 に、Cr および V の元素分布図に対し 2 値化処理を行った結果を示す。また、図 11 の Cr および V の 2 値化画像において、炭化物が占める割合（面積率）、炭化物の個数、および炭化物が占める面積を図中の右に示す。図より、V 炭化物に比べ Cr 炭化物の面積の方が大きく、炭化物が占める割合も大きいことがわかる。ここで、各画像の観察範囲は $24 \times 18\mu\text{m}$ 、画像サイズは 1024×768 画素より、1 画素の寸法は $23.4 \times 23.4\text{nm}$ である。次節に述べる形状による分析を行うため、2 値化された領域の最小面積は約 $0.07\mu\text{m}^2$ （128 画素）とした。また、分析箇所ごとのばらつきを少なくするため、各深さで 5 箇所ずつ EDS 分析を行った。

Fig. 10 SEM micrographs showing element distribution of carburized SKD61 steel specimen (1). (Depth of $100\mu\text{m}$)

Fig. 11 Binarized image of Cr and V distribution of SKD61 steel specimen (1). (Depth of $100\mu\text{m}$)

4・2 炭化物の定量分析結果

図 12 に、各深さに析出した炭化物の個数と面積率を示す。図は Cr と V の合計を示している。同図(a)の炭化物の個数から、いずれの組織においても $1\mu\text{m}^2$ 未満の炭化物が多く析出していることがわかる。また、深さ $500\mu\text{m}$

において炭化物の個数が最も少なくなっている。次に、同図(b)の炭化物の面積率から、深さ 500 μm の面積率は、母相である深さ 1000 μm および 1500 μm に比べ高いことがわかる。これは、図 6 にも示したように、深さ 500 μm では 2 μm^2 以上の粗大な炭化物が析出しているためである。

次に、これらの炭化物の大きさと形状の関係を調査するため、各炭化物の円形度を式 (1) によって求めた。

$$\text{Circularity} = 4\pi \cdot \frac{\text{Area}}{\text{Perimeter}^2} \quad (1)$$

図 13 に、炭化物の面積と円形度の関係を示す。同図(a)より、有効硬化層では 1 μm^2 以上の炭化物が多く析出し、炭化物の面積が大きいほど、円形度が低い傾向にある。一方、同図(b)の母相では、ほとんどが 1 μm^2 未満の炭化物で構成されており、円形度は様々である。このことから、炭化物の面積と円形度の関係についても、有効硬化層と母相では異なることがわかる。これらの炭化物の定量分析結果を元に、工具摩耗に及ぼす炭化物の要因を検討する。

Fig. 12 The number and occupancy carbides in carburized SKD61 steel specimen (1).

Fig. 13 Relationship between circularity and area of carbides in carburized SKD61 steel specimen (1).

4・3 炭化物と工具摩耗の関係

浸炭によって α 相に炭化物を析出させた鋼は工具摩耗を抑制させることが明らかにされている(乾他, 2011, Furushiro et al., 2011). よって、析出する炭化物の面積率が高いほど、工具摩耗が抑制されると考えた。また、ミクロ組織の観察および切削実験の結果より、有効硬化層と母相では工具摩耗の要因が異なると考えられる。図 14 に、有効硬化層と母相における炭化物の面積率とコーナ摩耗幅の関係をそれぞれ示す。図より、有効硬化層では炭化物の面積率とコーナ摩耗幅の関係は見られない。一方、母相では炭化物の面積率が高いほどコーナ摩耗幅が抑制される傾向にあることがわかる。ここで、4.2 の図 12, 13 より、母相では 1 μm^2 未満の炭化物の占める割合が非常に高かった。したがって、1 μm^2 未満の微細な炭化物の面積率は摩耗抑制効果を向上させる要因となる。

その一方で、 $1\mu\text{m}^2$ 以上の粗大な炭化物の面積率が工具摩耗抑制に及ぼす影響は小さいと考えられる。ここで、粗大な炭化物が析出する組織ほど工具摩耗が進行することが明らかとなっている（山崎他, 2013, 2015, Furushiro et al., 2013）。これより、 $1\mu\text{m}^2$ 以上の炭化物では、面積が大きいほど工具摩耗が進行すると考えた。そこで、面積 $1\mu\text{m}^2$ 以上と $1\mu\text{m}^2$ 未満のそれぞれの炭化物について、炭化物の平均面積とコーナ摩耗幅の関係を図15に示す。同図(a)より、面積 $1\mu\text{m}^2$ 未満の炭化物では、平均面積とコーナ摩耗幅の関係は見られない。一方で、同図(b)より $1\mu\text{m}^2$ 以上の炭化物では、平均面積が大きいほどコーナ摩耗幅が進行する傾向にあることがわかる。ここで、4.2の図13より、 $1\mu\text{m}^2$ 以上の炭化物は面積が大きいほど円形度が低い傾向にあった。これは、炭化物の形状が工具摩耗に影響を及ぼしている可能性を示している。そこで、面積 $1\mu\text{m}^2$ 以上の炭化物において、円形度が0以上0.2~0.8未満の範囲における炭化物の円形度とコーナ摩耗幅の決定係数を求めた。その結果を図16に示す。

Fig. 14 Relationship between occupancy of carbides and corner wear of carburized SKD61 steels.

Fig. 15 Relationship between average area of carbides and corner wear of carburized SKD61 steels.

図16より、円形度0以上0.5未満の炭化物の平均円形度とコーナ摩耗幅の決定係数が最も高かった。このことから、炭化物の円形度が工具摩耗に及ぼす影響が大きいことがわかる。次に、面積 $1\mu\text{m}^2$ 以上かつ円形度が0以上0.2~0.8未満の範囲における炭化物の平均面積とコーナ摩耗幅の決定係数を図17に示す。図より、平均円形度と同様に、円形度0以上0.5未満の炭化物の平均面積とコーナ摩耗幅の決定係数が最も高い。また、円形度の範囲を設けなかった、つまり円形度0~1とした図15(b)に比べ、わずかに決定係数が高くなっている。

これらの炭化物が工具摩耗に及ぼす影響を検討するため、面積 $1\mu\text{m}^2$ 以上かつ円形度0以上0.5未満の炭化物の平均面積および面積 $1\mu\text{m}^2$ 以上かつ円形度0以上0.5未満の炭化物の平均円形度を説明変数として、目的変数であるコーナ摩耗幅に対して重回帰分析を行った。その結果を表5および図18に示す。重回帰分析により得られた回帰式を式(2)に示す。

$$VB_C(\text{Observed value}) = 9.32 \times (\text{Average circularity})^{0.64} \times (\text{Average area})^{0.32} \quad (2)$$

図 18 より，決定係数は 0.78 であることから，得られた重回帰式の精度は高いことがわかる．表 5 より，各説明変数の p 値は低く，係数は有意である．また，各係数が正の値であることから，面積 $1\mu\text{m}^2$ 以上，円形度 0 以上 0.5 未満の炭化物の平均面積および平均円形度が大きくなると，コーナ摩耗が進行し，平均面積および平均円形度が小さいと，コーナ摩耗が抑制されることがわかる．

Fig. 16 Relationship between average circularity of $1\mu\text{m}^2$ or more carbides and corner wear in carburized SKD61 steels.

Fig. 17 Relationship between average circularity of $1\mu\text{m}^2$ or more carbides and corner wear in carburized SKD61 steels.

Table 5 Multiple regression analysis of relationship between average circularity and average area of $1\mu\text{m}^2$ or more carbides in effective case layer of carburized SKD61 steels.

	Regression coefficient	p-value
Average circularity [-]	0.64	0.11
Average area [μm^2]	0.32	0.07

Fig. 18 Multiple regression analysis of observed value and predicted value of corner wear in effective case layer of carburized SKD61 steels.

4・4 炭素濃度と工具摩耗

炭化物の定量分析を行うことで，浸炭処理によって析出する炭化物が工具摩耗に及ぼす影響を検討することができた．ところで，浸炭処理を行った鋼材では表面から深さ方向にかけて炭素濃度が減少している．また，鉄系材料のダイヤモンド切削において，工具摩耗の主要因はダイヤモンド中の炭素の拡散であるから，被削材の炭素濃度の変化が工具摩耗に影響を及ぼしていないのか疑問が残る．そこで，有効硬化層と母相のそれぞれにおいて，各深さの炭素濃度とコーナ摩耗幅の関係を検討した．その結果を図 19 に示す．図より，母相では炭素濃度が高いほどコーナ摩耗幅が抑制される傾向にある．一方で，有効硬化層では炭素濃度が工具摩耗に及ぼす影響は小さい．これより，炭素が飽和している有効硬化層では炭素濃度の影響は小さいが，浸炭効果の小さい母相では炭素濃度の影響が大きくなると考えられる．ここで，母相を切削した場合，図 7 に示したように，工具刃先の逃げ面横切れ刃側に顕著な境界摩耗が生じた．各深さにおける炭素濃度と境界摩耗の関係を図 20 に示す．図より，炭素濃度が高いほど境界摩耗が小さくなることがわかった．

Fig. 19 Relationship between carbon concentration and corner wear of carburized SKD61 steels.

Fig. 20 Relationship between carbon concentration and boundary wear of carburized SKD61 steels.

5. 考 察

ミクロ組織の観察・分析および切削実験の結果より、面積 $1\mu\text{m}^2$ 以上かつ円形度 0 以上 0.5 未満の炭化物が工具摩耗に影響していることがわかった。ここで、図 21 にミクロ組織を低倍率で観察した SEM 画像を示す。図より、粗大かつ円形度が低い炭化物は粒界付近に析出していることがわかる。ここで、粒界拡散は格子拡散に比べ 4~8 桁大きい拡散速度である（小岩、中島、2009）ことから、粒界付近の析出物がダイヤモンド工具と粒界の接触を防ぐ働きをし、工具摩耗を抑制させた（畠中他、2015）と考えられる。一方、炭化物が粒界付近に析出した場合でも、面積が大きく円形度が高い炭化物は摩耗を進行させる要因となった。ここで、切り取り厚さに着目すると、表 4 に示したように、本研究では約 $1.3\mu\text{m}$ である。炭化物の形状を楕円と仮定すると、炭化物の面積 $5\mu\text{m}^2$ 、円形度 0.5 の場合、長径が約 $5.2\mu\text{m}$ 、短径が約 $1.2\mu\text{m}$ となる。このとき、工具は粒界で切り取り厚さ程度の炭化物と長時間接触することで、切削熱が上昇し（狩野、2011）、その状態で粒内を切削することで摩耗が進行すると考えられる。

Fig. 21 SEM micrograph showing microstructure of carburized SKD61 steel specimen (1).

6. 結 言

浸炭した熱間ダイス鋼 SKD61 に対しミクロ組織観察および炭化物の定量分析を行い、ミクロ組織がダイヤモンド切削における工具摩耗に及ぼす影響を調査した。

得られた結果を以下に示す。

- (1) 有効硬化層を切削後の工具刃先の逃げ面横切れ刃側にはアブレシブ摩耗が生じ、母相では顕著な境界摩耗が生じる。
- (2) 粒界付近に析出する粗大な炭化物は、面積が小さく円形度が低いと工具摩耗抑制効果を向上させる。
- (3) 母相において炭素濃度が高いほど、逃げ面横切れ刃側の境界摩耗は抑制される。

謝 辞

本研究は、JSPS 科研費 25870932 の助成を受けて行われたものであり、ここに謝意を示す。

文 献

- Brehl, D.E. and Dow, T.A., Review of vibration-assisted machining, *Precision Engineering*, Vol.32, No.3 (2008), pp.153-172.
- Furushiro, N., Yamaguchi, T., Terauchi, S., Matsuda, S. and Shimada, S., Suppression of tool wear in diamond turning of steels by surface modification—Effect of carburizing—, *Proceedings of ASPE 2011 Annual Meeting* (2011), pp.345-348.
- Furushiro, N., Hirooka, D., Yamaguchi, T., Terauchi, S., Iwasa, Y. and Matsuda, S., Suppression of tool wear in diamond turning by surface modification of steels—Effect of carbides in carburized steels—, *Proceedings of ASPE 2013 Annual Meeting* (2013), pp.385-388.
- 畠中佑斗, 古城直道, 廣岡大祐, 山口智実, 松田茂敬, 岩佐康弘, 寺内俊太郎, *ダイヤモンド切削における工具摩耗を抑制する窒化した鋼の分析*, 2015 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集 (2015), pp.215-216.
- 樋口誠宏, *超精密加工におけるダイヤモンド工具とその使い方*, *機械と工具*, Vol.48, No.7 (2004), pp.14-19.
- Ikawa, N. and Tanaka, T., Thermal aspects of wear of diamond grain in grinding, *Annals of the CIRP*, Vol.19, No.1 (1971), pp.153-157.
- 乾裕美子, 古城直道, 樋口誠宏, 山口智実, 寺内俊太郎, 松田茂敬, *表面改質した鋼のダイヤモンド切削における工具摩耗抑制—浸炭の効果—*, 2011 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集 (2011), pp.857-858.
- 狩野勝吉, *難削材・新素材の切削加工ハンドブック*, 森北出版 (2011), pp.59-60.
- 小岩昌宏, 中島英雄, *材料における拡散*, 内田老鶴圃 (2009), p.168.
- Lane, B.M., Dow, T.A. and Scattergood, R., Thermo-chemical wear model and worn tool shapes for single-crystal diamond tools cutting steel, *Wear*, Vol.300, No.1-2 (2013), pp.216-224.
- Paul, E., Evans, C.J., Mangamelli, A., McGlaulin, M.L. and Polvani, R.S., Chemical aspects of tool wear in single point diamond turning, *Precision Engineering*, Vol.18, No.1 (1996), pp.4-19.
- Shamoto, E. and Moriwaki, T., Ultraprecision diamond cutting of hardened steel by applying elliptical vibration cutting, *Annals of the CIRP*, Vol.48, No.1 (1999), pp.441-444.
- 社本英二, *振動切削—基礎と応用—*, *精密工学会誌*, Vol.80, No.5 (2014), pp.457-460.
- Shimada, S., Tanaka, H., Higuchi, M., Yamaguchi, T., Honda, S. and Obata, K., Thermo-chemical wear mechanism of diamond tool in machining of ferrous metals, *Annals of the CIRP*, Vol.53, No.1 (2004), pp.57-60.
- 高橋功奈, 古城直道, 樋口誠宏, 山口智実, 杉本隆史, 寺内俊太郎, 松田茂敬, 島田尚一, *鋼のダイヤモンド切削における工具摩耗*, 2010 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集 (2010), pp.17-18.
- 寺内俊太郎, 松田茂敬, 古城直道, 杉本隆史, *ダイヤモンド工具の摩耗に及ぼす鋼材組織の影響*, *鉄と鋼*, Vol.97, No.12 (2011), pp.35-40.
- 山崎智史, 古城直道, 廣岡大祐, 山口智実, 松田茂敬, 岩佐康弘, 寺内俊太郎, *表面改質した鋼のダイヤモンド切削における工具摩耗抑制 (第3報) —浸炭鋼において炭化物が及ぼす影響—*, 2013 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集 (2013), pp.217-218.
- 山崎智史, 古城直道, 廣岡大祐, 山口智実, 松田茂敬, 岩佐康弘, 寺内俊太郎, *浸炭した鋼のダイヤモンド切削において炭化物が工具摩耗抑制に及ぼす影響*, 2015 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集 (2015), pp.301-302.

Reference

- Brehl, D.E. and Dow, T.A., Review of vibration-assisted machining, *Precision Engineering*, Vol.32, No.3 (2008), pp.153-172.
- Furushiro, N., Yamaguchi, T., Terauchi, S., Matsuda, S. and Shimada, S., Suppression of tool wear in diamond turning of steels by surface modification—Effect of carburizing—, *Proceedings of ASPE 2011 Annual Meeting* (2011), pp.345-348.
- Furushiro, N., Hirooka, D., Yamaguchi, T., Terauchi, S., Iwasa, Y. and Matsuda, S., Suppression of tool wear in diamond turning by surface modification of steels—Effect of carbides in carburized steels—, *Proceedings of ASPE 2013 Annual Meeting* (2013), pp.385-388.
- Hatakenaka, Y., Furushiro, N., Hirooka, D., Yamaguchi, T., Matsuda, S., Iwasa, Y. and Terauchi, S., Quantitative analyses of nitrided steels suppressing tool wear in diamond turning, 2015 JSPE Autumn Conference (2015), pp.215-216 (in Japanese).
- Higuchi, M., *Chouseimitsukakou ni okeru diamond kougu to sono tsukaikata*, *Kikai to Kougu*, Vol.48, No.7 (2004), pp.14-19

(in Japanese).

- Ikawa, N. and Tanaka, T., Thermal aspects of wear of diamond grain in grinding, *Annals of the CIRP*, Vol.19, No.1 (1971), pp.153-157.
- Inui, Y., Furushiro, N., Higuchi, M., Yamaguchi, T., Terauchi, S. and Matsuda, S., Suppression of tool wear by surface modification in diamond turning—Effect of carburizing—, 2011 JSPE Spring Conference (2011), pp.857-858 (in Japanese).
- Karino, K., *Nansakuzai shinsozai no sessaku kakou handbook*, Morikita Publishing (2011), pp.59-60 (in Japanese).
- Koiwa, M. and Nakajima, H., *Zairyou ni okeru kakusan*, Uchida Rokakuho Publishing (2009), p.168 (in Japanese).
- Lane, B.M., Dow, T.A. and Scattergood, R., Thermo-chemical wear model and worn tool shapes for single-crystal diamond tools cutting steel, *Wear*, Vol.300, No.1-2 (2013), pp.216-224.
- Paul, E., Evans, C.J., Mangamelli, A., McGlaufflin, M.L. and Polvani, R.S., Chemical aspects of tool wear in single point diamond turning, *Precision Engineering*, Vol.18, No.1 (1996), pp.4-19.
- Shamoto, E. and Moriwaki, T., Ultraprecision diamond cutting of hardened steel by applying elliptical vibration cutting, *Annals of the CIRP*, Vol.48, No.1 (1999), pp.441-444.
- Shamoto, E., Vibration cutting—Fundamentals and application, *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, Vol.80, No.5 (2014), pp.457-460 (in Japanese).
- Shimada, S., Tanaka, H., Higuchi, M., Yamaguchi, T., Honda, S. and Obata, K., Thermo-chemical wear mechanism of diamond tool in machining of ferrous metals, *Annals of the CIRP*, Vol.53, No.1 (2004), pp.57-60.
- Takahashi, K., Furushiro, N., Higuchi, M., Yamaguchi, T., Sugimoto, T., Terauchi, S., Matsuda, S. and Shimada, S., Tool wear in diamond turning of steel alloys, 2010 JSPE Spring Conference (2010), pp.17-18 (in Japanese).
- Terauchi, S., Matsuda, S., Furushiro, N. and Sugimoto, S., Influence of microstructure of steel on diamond tool wear, *Tetsu-to-Hagane*, Vol.97, No.12 (2011) pp.35-40 (in Japanese).
- Yamazaki, S., Furushiro, N., Hirooka, D., Yamaguchi, T., Matsuda, S., Iwasa, Y. and Terauchi, S., Suppression of tool wear by surface modification in diamond turning (3rd report)—Effect of carbides in carburized steel—, 2013 JSPE Spring Conference (2013), pp.217-218 (in Japanese).
- Yamazaki, S., Furushiro, N., Hirooka, D., Yamaguchi, T., Matsuda, S., Iwasa, Y. and Terauchi, S., Effect of carbides in suppression of tool wear in diamond turning of carburized steel, 2015 JSPE Spring Conference (2015), pp.301-302 (in Japanese).