

博士論文

高硬度金型鋼の高精度楕円振動切削に関する研究

名古屋大学大学院工学研究科機械理工学専攻

齊藤 寛史

平成 29 年 3 月

DOCTORAL THESIS

Study on high-precision elliptical vibration cutting of  
hardened die steels

Department of Mechanical Science and Engineering,  
Graduate School of Engineering  
Nagoya University

Hiroshi Saito

March, 2017

# 目次

<b>第1章 序論</b>	<b>1</b>
1.1 研究の背景	1
1.2 超音波振動切削加工	6
1.2.1 直線型振動切削	6
1.2.2 楕円振動切削	8
1.2.3 楕円振動切削加工の課題	14
1.3 研究目的	15
1.4 本論文の構成	17
<b>第2章 コーティング工具の転写性評価</b>	<b>18</b>
2.1 楕円振動切削における切れ刃形状の転写性	18
2.2 楕円振動切削による平削り実験	20
2.2.1 実験方法	20
2.2.2 相関係数による転写性の評価	21
2.2.3 コーティング工具の表面性状	23
2.2.4 実験結果	25
2.3 ナノインプリントによる転写実験	30
2.3.1 実験方法	30
2.3.2 実験結果	32
2.4 結言	34
<b>第3章 コーティング工具の摩擦係数と切削機構</b>	<b>35</b>
3.1 切削抵抗の解析	35
3.2 プラウイング成分と工具の摩擦係数	35
3.2.1 プラウイング成分の分離方法	35
3.2.2 摩擦係数の解析方法	38
3.2.3 加工実験	39
3.2.4 実験結果	40
3.3 切削機構の考察	44
3.3.1 切りくずの評価	44
3.3.2 仕上げ面の評価	48
3.4 コーティング工具の耐久実験	50
3.4.1 実験方法	50
3.4.2 実験結果	52
3.5 コーティング工具の特性の比較	56
3.6 結言	58

<b>第4章</b>	<b>ダイヤモンドコーティング工具の鋭利化処理</b>	<b>59</b>
4.1	Pulse Laser Grinding による鋭利化処理.....	59
4.1.1	鋭利化処理方法 .....	60
4.1.2	鋭利化した切れ刃の評価 .....	62
4.2	PLG で鋭利化した工具による加工実験 .....	63
4.2.1	実験方法 .....	63
4.2.2	実験結果 .....	65
4.3	結言 .....	70
<b>第5章</b>	<b>楕円振動切削による高硬度金型鋼の鏡面切削</b>	<b>71</b>
5.1	合金成分とダイヤモンド工具摩耗.....	71
5.2	楕円振動切削実験による摩耗量の比較.....	71
5.2.1	加工実験方法 .....	71
5.2.2	高硬度金型鋼と純金属の加工ワーク .....	73
5.2.3	炭化物の解析 .....	74
5.2.4	工具摩耗量の評価 .....	76
5.3	実験結果 .....	78
5.3.1	比切削抵抗と工具摩耗 .....	78
5.3.2	仕上げ面の表面粗さ .....	82
5.3.3	チッピングと炭化物の関係 .....	84
5.3.4	工具摩耗と合金成分の関係 .....	91
5.4	合金成分の化学結合状態.....	93
5.4.1	XRD による化合物の同定.....	93
5.4.2	EPMA 元素マッピング .....	94
5.4.3	摩耗に影響を与える元素の化学結合状態.....	96
5.5	結言 .....	97
<b>第6章</b>	<b>結論</b>	<b>98</b>

謝辞

参考文献

関連発表論文



## 第1章 序論

### 1.1 研究の背景

我々の生活は、家電製品や自動車等の様々な製品によって支えられており、これらの機能や品質を向上するため、製造業では日々開発が進められている。製品を構成する部品の多くは、生産性やコストの面から金型によって量産されることが多く、金型の精度や製造コストは、量産品の品質および価格に大きな影響を与える。金型は、加工する素材や加工原理によって、大きく6種類に分類できる。日本金型工業会りの資料をもとに分類した図が Fig. 1.1 である。プレス用の金型は金属の板を打ち抜いたり曲げたりするための金型で、金属の塑性加工法の1つである。自動車の外装部品をはじめ、幅広い製品に利用される。鍛造用の金型も塑性加工法の1つであるが、こちらは金属に圧力を加えながら形状を創成する方法で、金属の結晶を微細化し、製品の強度を高めることができる。成形する素材や形状によって、熱間鍛造または冷間鍛造の2種類に分類される。鋳造用は、熔融した銅合金やアルミ合金を成形するための型で、主に砂を固めて作る砂型が用いられる。鋳造用の中でも、熔融したアルミ合金等に圧力を加えて成形する金型をダイカスト金型と呼ぶ。プラスチック用は、熱により流動性を持たせた樹脂を、射出成形や圧縮成形で形状を転写する金型である。これらの金型その他、ガラス用やゴム用の金型もあり、用途によって金型の材質や構造、表面の硬度等が異ってくる。

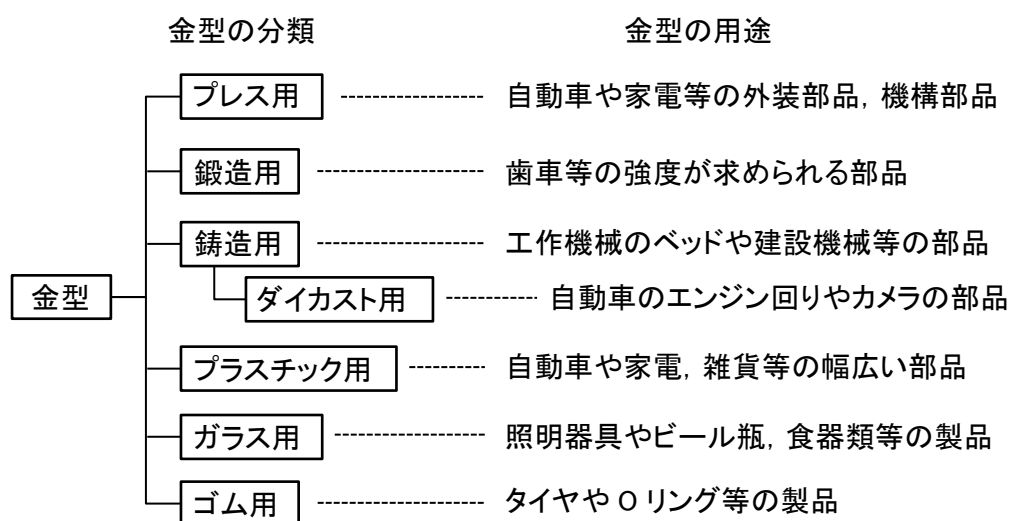
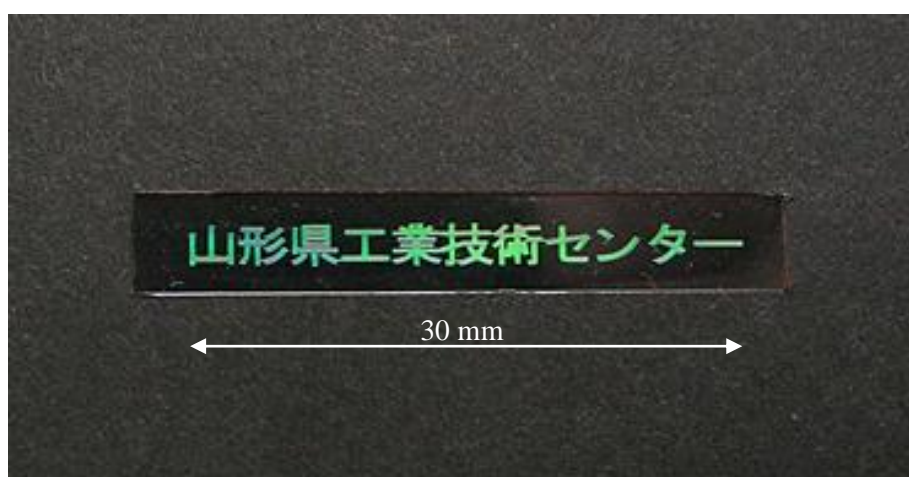


Fig. 1.1 Classification of dies and molds<sup>1)</sup>.

国内の金型産業に目を向けると、アジア諸国における加工技術の向上を背景に激しい競争が続いており、付加価値の高いものづくりによる海外との差別化が不可欠な状況にある。中小企業庁が示す特定ものづくり基盤技術の高度化に関する指針<sup>2)</sup>によると、金型に関する高度化目標の1つとして、高い意匠性を付加する金型及び成形技術の向上、平面および3次元曲面の鏡面仕上げ技術の高度化が挙げられている。

鏡面加工が求められる金型として、ここではプラスチック用の金型とプレス用の金型を取り上げる。プラスチックの射出成形は、金型の表面性状が精度よく転写されるため<sup>3)</sup>、製品の外観部品を製造する金型では、鏡面仕上げや意匠性の高い加工面が求められる。プレス用の金型においても、製品の精度向上や成形性向上のため、鏡面仕上げが求められているが<sup>4)</sup>、金型に求められる硬度や強度は、プラスチック用よりもプレス用の金型の方が高いことが一般的である。金型の製造工程は、放電加工や切削・研削加工で行われるが、鏡面が求められる場合は、未だに磨き仕上げが多く行われている。しかし、この磨き仕上げには多くの時間を要する上、作業者の技能により品質が左右されやすく、形状のだれが生じる懸念もある。

意匠性の金型加工では、コスト削減や環境負荷の観点から、プラスチックを成形した後の印刷工程や塗装工程を削減する技術が注目されている。金型表面に微細加工を施し、成形品の一部、例えば企業のロゴマーク部分の光の反射や散乱を変化させることにより、成形のみで意匠性の高い部品を製造する技術が求められている<sup>5)</sup>。Fig. 1.2は、ナノインプリントで樹脂フィルムに微細溝を転写したサンプルである。光の回折を利用することにより、印刷・塗装レスで文字を浮かび上がらせた事例である。



**Fig. 1.2** Photograph of nanoimprinted film whose letter shapes are formed into diffraction grating.

### 磨きレス鏡面加工への取組み

ナノレベルの分解能を有する超精密加工機が開発され、機械加工のみで鏡面を実現する研究が多くなされてきた。研削による鏡面加工について述べると、GE社によって合成ダイヤモンド砥粒やCBN（立方晶窒化ホウ素）砥粒が開発され<sup>6)</sup>、これらの砥粒を焼結した超砥粒研削砥石が実用化されたことにより、超精密研削加工の可能性が大きく広がった。Fig. 1.3 に超砥粒研削砥石の写真を示す。現在では、金田らの報告<sup>7,8)</sup>にあるとおり、高硬度な金型鋼の他、超硬合金やガラスなどの脆性材料に対しても、ナノレベルの表面粗さが実現している。Fig. 1.4 に、超砥粒研削砥石を用いた脆性材料の鏡面研削事例を示す。一方で、微細な砥粒が焼結された研削砥石は、目つぶれや目詰まりが生じやすく、ドレッシングと呼ばれる切れ刃を再生する作業が重要となる<sup>9)</sup>。この研削加工におけるドレッシングの作業効率を向上させる技術として、大森らが開発したELID研削<sup>10,11)</sup>が挙げられる。電解インプロセスドレッシングと呼ばれるこの技術は、研削加工を行うと同時に、電解作用によるドレッシングも同時に行う研削技術である。使用する砥石は、通電できるメタルボンド砥石を用いることとなるが、加工時間の短縮や、平面研削におけるエッジ部のだれの改善が期待できる。電解作用は加工機本体にも及ぶ可能性があり、テーブル等の腐食に配慮が必要であるが、脆性材料等の難加工材に対する高能率研削加工において、有効な加工技術と言える。



Fig. 1.3 Photograph of superabrasive wheels composed of diamond or CBN abrasives.

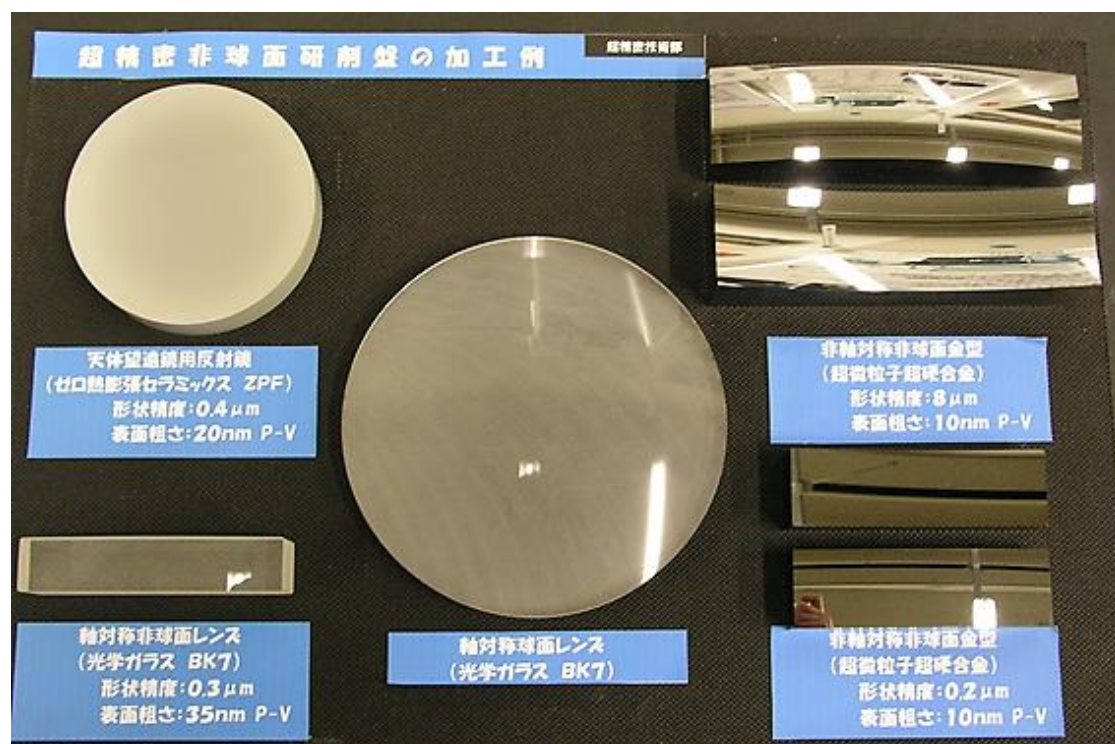


Fig. 1.4 Photograph of workpieces finished by ultra-precision grinding.

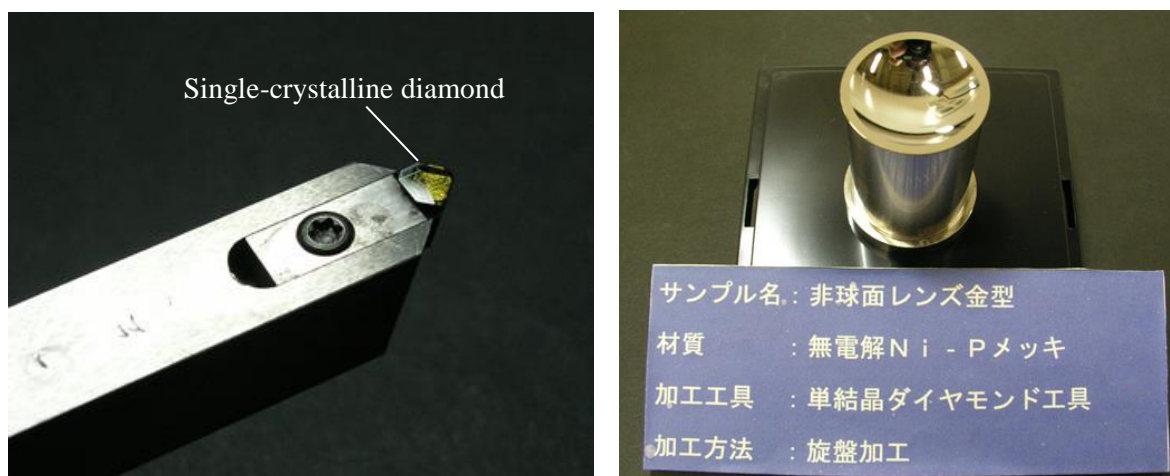
切削による鏡面加工に関する研究も多くなされてきた。研削加工と同様に、切削加工も工具の形状をワークに転写する工程であるため、工作機械の運動精度と切削工具の輪廓精度をナノレベルまで高める必要がある<sup>12)</sup>。この超精密加工用の工具として代表的なものが、Fig. 1.5 に示す単結晶ダイヤモンド工具である。樹脂製光学部品等、表面粗さと形状精度が要求される金型加工において、有効な工具である<sup>13-15)</sup>。しかし、この単結晶ダイヤモンド工具の最大の欠点と言えるのが、鉄系材料の加工において、熱化学的な激しい摩耗が生じることである<sup>16-18)</sup>。島田や Paul ら研究<sup>19,20)</sup>にあるように、ダイヤモンドの熱化学的な摩耗は、ダイヤモンドの酸化、炭化、被削材への拡散により進行することが知られており、鉄系材料の加工ではダイヤモンドの拡散が摩耗の主な原因と言われている<sup>21)</sup>。この熱化学的な摩耗を抑制し、金型鋼を直接鏡面に仕上げる加工技術を確立するため、様々な研究が報告されている。

Brinksmeier, Wang, 畠中らの研究では、窒化処理した鋼材の窒化層（表面から数十 μm の深さに生成される窒素の拡散層）を切削することにより、ダイヤモンド工具の摩耗を効果的に抑制できることを明らかにした<sup>22-24)</sup>。切削できる総切込み量が、窒化層の深さに限定されるという制限があるものの、特別な装置を必要とせずに鋼材をダイヤモンド切削できる点で高いアドバンテージがある。しかし、通常ガス軟窒化



等の手法では、表面に硬質な化合物層が生成されるため、ダイヤモンド工具のチップングが懸念される。西口らは、ダイヤモンドに次ぐ硬度を有し、高温硬さに優れる cBN 工具をノーズ半径 0.5 mm の単結晶 cBN で作製し、SUS420 に対する加工実験を行った<sup>25)</sup>。しかし、工具寿命が短く、1000 mm<sup>2</sup>以下の小さな面積において適用可能であると報告している。Casstevens や鴨居らの報告<sup>26,27)</sup>では、メタンや二酸化炭素雰囲気中で鋼材をダイヤモンド切削し、工具摩耗の抑制について検討した。また、磯部らの研究<sup>28,29)</sup>では、切れ刃高さを揃えたダイヤモンド電着砥石に軸方向の超音波振動を付与し、金型鋼の NAK80 に対し鏡面切削を実現した。これらの技術は、ダイヤモンド工具摩耗の抑制に効果が得られるものの、実用化に向けて工具寿命の更なる改善が期待される。

金型鋼のダイヤモンド切削における熱化学的な工具摩耗の課題解決を大きく進展させたのが、超音波振動切削である。振幅数  $\mu\text{m}$  の超音波振動を工具に付与しながら切削する技術で、単結晶ダイヤモンド工具の摩耗を抑制し、金型鋼の鏡面切削を実現した。初期の振動切削では、一方向の振動を付与する直線型振動切削が開発され、更に社本らにより 2 自由度または 3 自由度型の楕円振動切削へと発展した。詳細は次項で述べる。



**Fig. 1.5** Photographs of single-crystalline diamond tool and electroless nickel plating finished by this tool.

### 意匠性金型加工への取組み

意匠性が求められる金型加工では、金型に数  $\mu\text{m}$  間隔の微細な溝やドット形状を規則的に創成し、光の回折を発現させる報告がなされている。鈴木らの研究<sup>30)</sup>では、マシニングセンタの主轴に piezo 素子を利用した振動子を取り付け、ワークにマイクロインデンテーションを行った。ドットの間隔が 3, 5  $\mu\text{m}$  のときに良好な虹面が得られ

た一方で、掘り込み深さを  $3\ \mu\text{m}$  以下で行う必要があり、精密な段取りが要求されると考えられる。Guo らの研究<sup>31)</sup>では、楕円振動切削を利用し、積極的に虹面を創成する手法を検討している。傾斜した楕円形状の軌跡で工具を超音波振動させ、くさび型のブレーズド回折格子に近い形状をサブミクロン間隔で創生できることが報告されている。この研究で使用している工具は単結晶ダイヤモンド工具であるのに対し、本研究では、より安価なダイヤモンドコーティング工具を利用し、光の回折を発現する意匠性金型加工の実現に取り組む。

## 1.2 超音波振動切削加工

### 1.2.1 直線型振動切削

単結晶ダイヤモンド工具は、超精密加工を実現する鋭利な切れ刃を有する一方で、金型鋼等の鉄系材料を加工した場合、化学的親和性により激しく摩耗し、通常の切削技術では鏡面に仕上げことが困難である。この問題に対し大きな前進を可能にしたのが、超音波振動切削技術である。1991年に森脇らが発表した論文<sup>32)</sup>では、ホーンの先端に固定した単結晶ダイヤモンド工具を、ボルト締めランジュバン型振動子

(BLT)により加振し、周波数約  $40\ \text{kHz}$ 、振幅  $6\ \mu\text{m}_{\text{p-p}}$ の振動をすくい面に対し垂直方向に与えながらステンレス鋼 (SUS303Se) の旋盤加工実験を行った。超音波振動によるカッターマークの微細化と表面粗さの低減を目的に、1980年代に開発されたそれまでの振動装置<sup>33,34)</sup>に対し、約2倍の共振周波数で加振している点も、鏡面切削に向けた改善点の1つである。実験において使用した振動子の概略図を Fig. 1.6 に示す。この振動切削が狙うプロセスは、すくい面で切りくずを生成する過程と、工具とワークが乖離する過程を繰り返す断続切削である (Fig. 1.7)。したがって、前述の振動条件における超音波振動の最大速度約  $45\ \text{m/min}$  よりも遅い速度で振動子とワークを相対運動させることがポイントとなる。結果の一例を Fig. 1.8 に示すと、切削距離約  $1600\ \text{m}$  においても表面粗さ  $R_{\text{max}}\ 0.1\ \mu\text{m}$  以下が得られており、実用的なステンレ

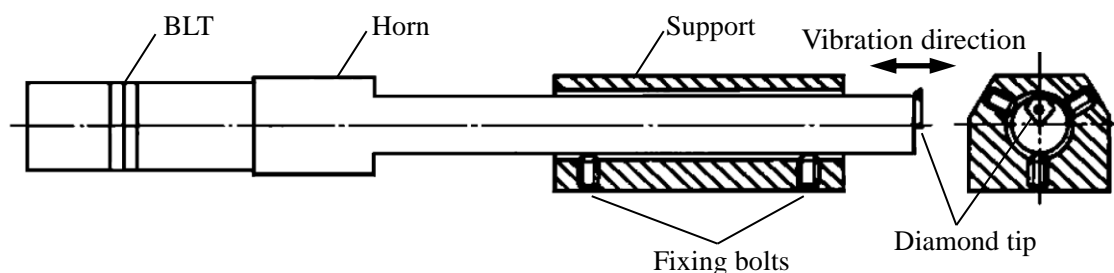


Fig. 1.6 Schematic drawing of linear vibration system<sup>35)</sup>.

ス鋼の鏡面切削が実現した。その他の応用例として、同じ振動装置を使用したソーダガラスの延性モード切削が検討されており<sup>35)</sup>、流れ型の切りくずが排出される延性モード切削の臨界切込み量が約7倍増加したことが報告されている。また、Brinksmeierらは、ワークの内部に対する振動切削の効果を検証するため、無酸素銅の加工変質層を同定する手法を提案し、直線型振動切削と従来切削とで比較を行った<sup>36)</sup>。この様に、超音波振動切削は、鉄系材料の鏡面切削や脆性材料の延性モード切削に対するブレイクスルーとして注目されてきた。

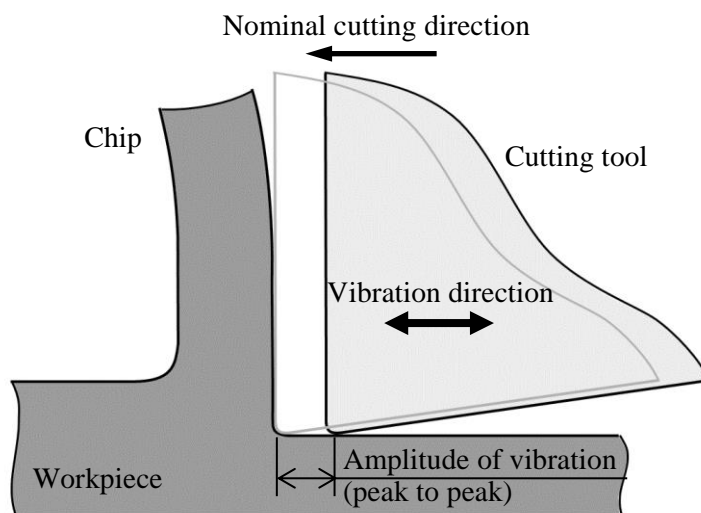


Fig. 1.7 Linear vibration cutting process.

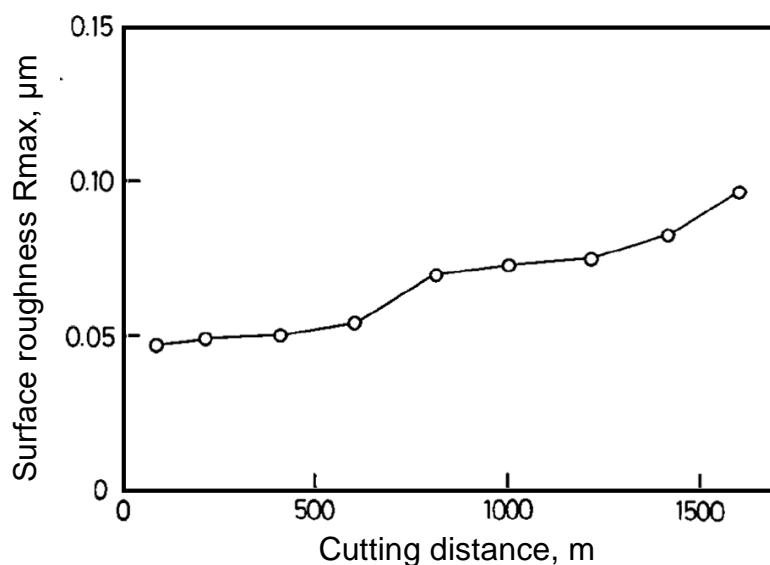
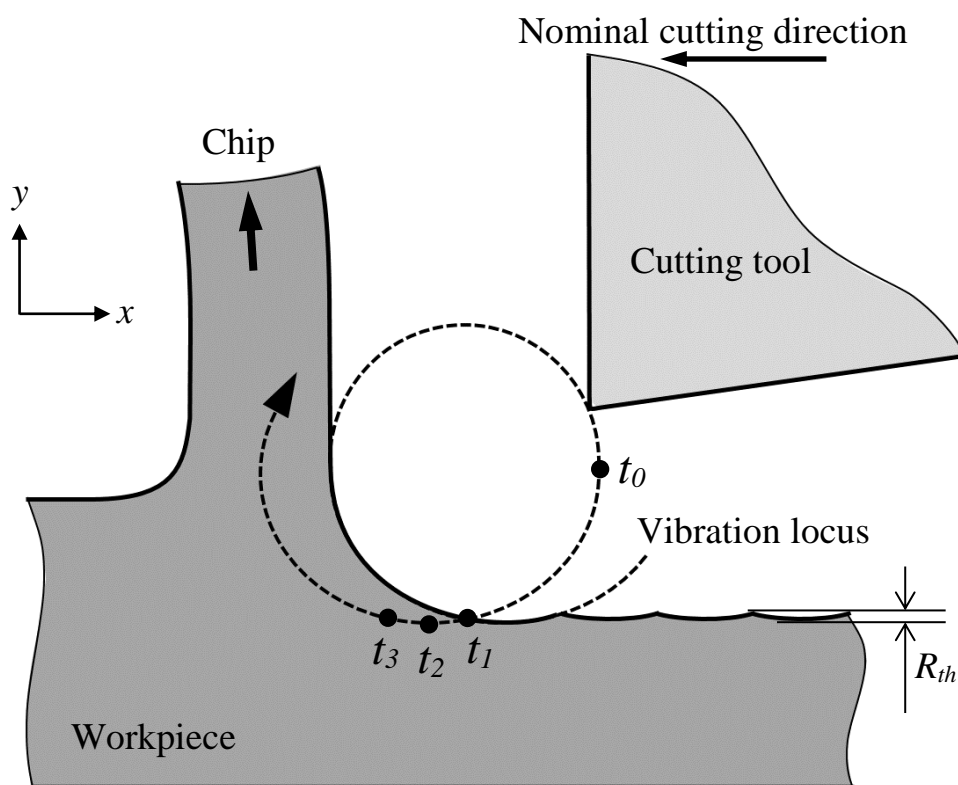


Fig. 1.8 Surface roughness Rmax of stainless steel SUS330Se machined by using linear vibration cutting with single-crystalline diamond tool.

### 1.2.2 楕円振動切削

直線型振動切削で得られた工具摩耗抑制等の様々な優れた特性を更に向上させた技術が、社本らが開発した楕円振動切削である<sup>37-41)</sup>。これまでの1方向の振動から、円または楕円形状の振動に発展させたものである。楕円振動切削の加工プロセスを Fig. 1.9 に示す。円または楕円で振動する工具は、工具とワークが当たり始める時点  $t_1$  から切削を開始し、切りくずを引き上げる方向に移動した後、切りくずから一度離れ、円を描きながら再び切削開始点に向かって移動する。この振動により、すくい面での摩擦を利用して切りくずを引き上げる力が作用し、せん断角の上昇、切削抵抗の大幅な低減等の優れた効果が得られる。結果として、これまでの直線型振動切削を超える工具摩耗の抑制が実現した。その一方で、振動が2次元になったことにより、振動に



- $t_0$ :  $t=0$
- $t_1$ : Beginning of cutting
- $t_2$ : Bottom of locus
- $t_3$ : End of finished surface generation
- $R_{th}$ : Theoretical roughness

Fig. 1.9 Elliptical vibration cutting process<sup>40)</sup>.



起因する粗さ成分が切削方向に転写されることとなる。この楕円振動切削特有の切削方向の粗さについては、以下の手順で求めることができる<sup>40)</sup>。

Fig. 1.9 の振動成分を、見かけ上の切削方向を  $x$ 、切込み方向を  $y$  で表すと、

$$x = a \cos(\omega t), \quad y = b \cos(\omega t + \varphi) \quad (1-1)$$

となる。ここで、 $a, b, t, \omega, \varphi$  は、それぞれ切削方向振幅、切込み方向振幅、時間、角速度、2方向間の位相差を表す。切削開始点を  $t_1$ 、仕上げ面の端点（次の周期での切削開始点）を  $t_3$  とすると、切削方向の粗さのピッチ  $2\pi v/\omega$  は、 $t_1$  から  $t_3$  の間に工具とワークが相対的に移動する距離に等しいので、

$$a \cos(\omega t_1) - a \cos(\omega t_3) + (t_3 - t_1) = 2\pi v/\omega \quad (1-2)$$

ここで、 $v$  は見かけ上の切削速度である。 $t_1$  と  $t_3$  は  $y$  方向の高さが等しいので、

$$b \cos(\omega t_1 + \varphi) = b \cos(\omega t_3 + \varphi) \quad (1-3)$$

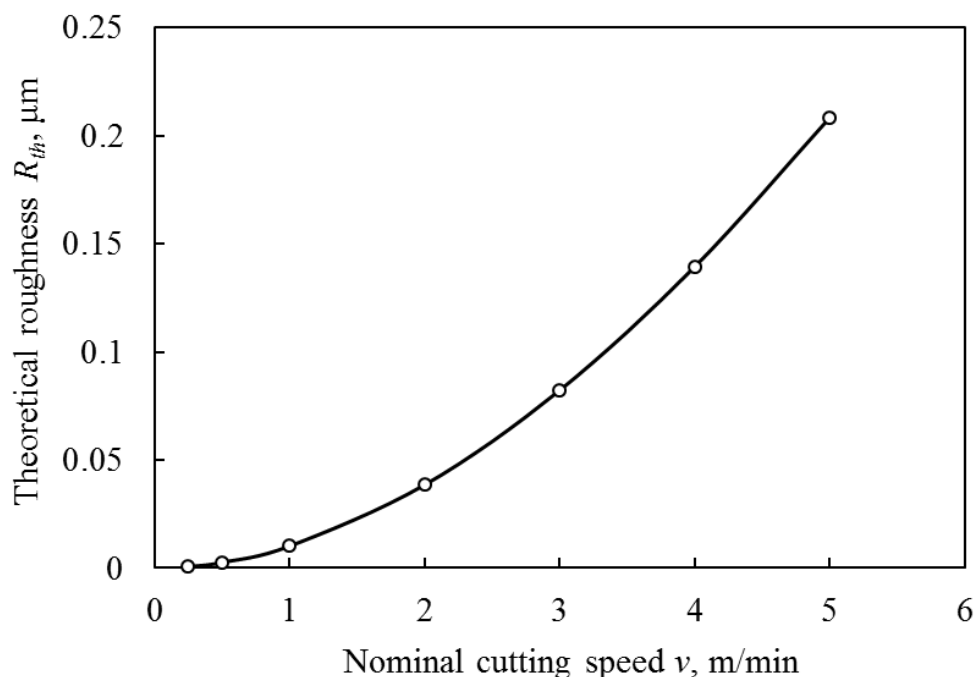
となる。 $t_1$  と  $t_3$  は、式(1-2)と式(1-3)を連立方程式で解くことにより求めることができ、社本らの報告では、ニュートン・ラプソン法による数値的解法が提案されている。振動の最下点  $t_2$  は、 $y$  方向の変位が  $-b$  に等しいことから、

$$b \cos(\omega t_2 + \varphi) = -b \quad \therefore t_2 = (\pi - \varphi)/\omega \quad (1-4)$$

となる。以上の計算で求められる  $t_1$  と  $t_2$  から、切削方向の理論粗さ  $R_{th}$  は

$$R_{th} = b \cos(\omega t_1 + \varphi) - b \cos(\omega t_2 + \varphi) \quad (1-5)$$

と求められる。式(1-5)をもとに切削方向の表面粗さ  $R_{th}$  を計算した一例を Fig. 1.10 に示す。計算に用いた楕円振動条件は、周波数 40 kHz、振幅  $4 \mu\text{m}_{p-p}$ 、位相差  $90^\circ$  の円形状の振動である。横軸の切削速度 3 m/min で  $R_{th}$  は  $0.1 \mu\text{m}$  以下であり、切削方向の粗さは鏡面レベルであることがわかる。楕円振動切削の効果を得るためには、見かけ上の切削速度  $v$  に対して、振動の切削速度を十分大きくすることが重要で、社本らの研究<sup>41)</sup>では、速度比 6 以上においてバリの抑制等に高い効果が得られるとの報告がある。後述するとおり、20 kHz や 40 kHz 等の高周波の楕円振動装置は共振を利用しており、周波数を変更することができないため、実用上は見かけ上の切削速度で速度比を調整することとなる。Fig. 1.10 の条件では、 $v = 5 \text{ m/min}$  のときの速度比がおよそ 6 で、この振動条件での切削速度はこのあたりが上限と思われる。

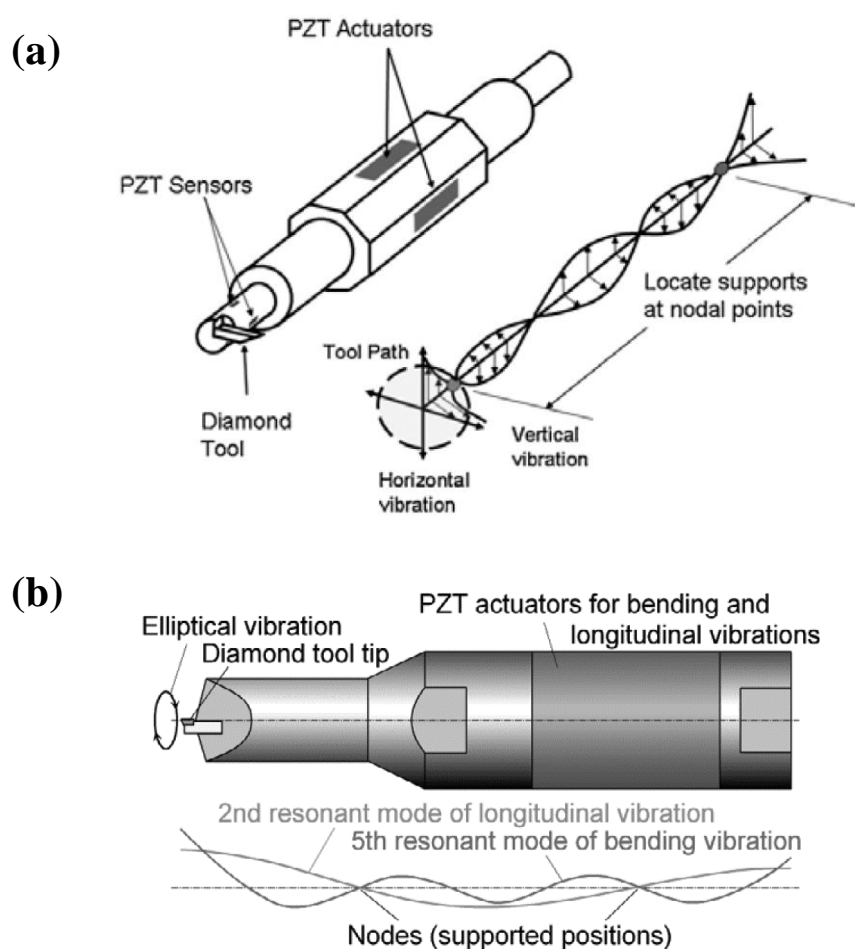


**Fig. 1.10** Relationship between nominal cutting speed and Theoretical roughness in cutting direction. Elliptical vibration conditions: frequency = 40 kHz, amplitude = 4  $\mu\text{m}_{p-p}$ , phase shift = 90° .

この様に、楕円振動切削の特性（切削抵抗の低減や工具摩耗の抑制等）を十分得るためには、振動の速度に対して振動子とワークの相対速度（見かけ上の切削速度）を十分遅くする必要がある。即ち、加工能率を向上させるためには、楕円振動装置の高速化が重要となる。当初開発された楕円振動装置は、ピエゾ素子の共振を用いずに工具を振動させるシステムであった<sup>37)</sup>。この構成では、周波数や振幅を大きく変動させることが可能な一方で、10 Hz 未満の低周波であることや振動子の剛性不足により、実用性に課題があった。Brehl らの研究グループも、同様な原理に基づく楕円振動切削装置を開発し、周波数を 200~4000 Hz に可変できる装置を開発した<sup>42)</sup>。しかし、加工能率の面では更なる高速化が求められる。

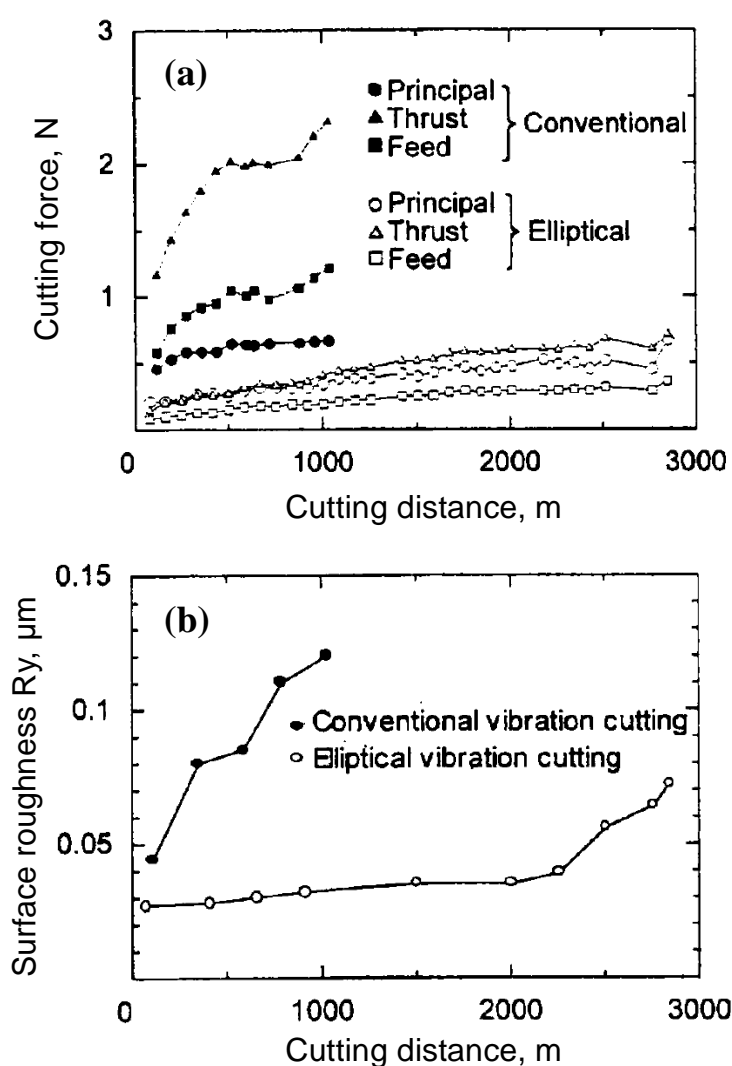
一般に、超音波振動子は、共振周波数を利用することにより、高効率で高振幅を得ることが可能となる。共振型の楕円振動装置を実現するためには、2方向の振動の共振周波数と節の位置が一致する振動子を設計する必要がある。また、切込み方向の振幅の変動が、切込み量の変動に直結する。したがって、楕円振動切削で超精密加工を実現するためには、振幅の安定化が不可欠である。鈴木らの研究により、2方向の振動間における干渉の回避や<sup>43,44)</sup>、共振周波数の自動追尾等の高度な制御技術<sup>45)</sup>が確立

され、現在では、切削抵抗等の外乱に対しナノレベルの振幅制御を実現した共振型の楕円振動切削装置が実用化されている<sup>46)</sup>。これまで開発された代表的な共振型の楕円振動子の概略図を Fig. 1.11 に示す。Fig. 1.11(a)は共振周波数が約 20 kHz、振幅が約  $10 \mu\text{m}_{\text{p-p}}$  未満の振動子で、2方向とも曲げ振動を利用した振動子である<sup>38,43)</sup>。これに対し Fig. 1.11(b)は、2次の曲げ振動と5次の軸振動を利用した振動子で、共振周波数が約 40 kHz、振幅が約  $4 \mu\text{m}_{\text{p-p}}$  の振動子である<sup>47,48)</sup>。現在では、後者の振動子が主流となっており、金型産業において一部実用化されている。



**Fig. 1.11** Two types of elliptical vibration system whose resonant frequencies are (a): 20 kHz<sup>38,43)</sup>, (b): 40 kHz<sup>47,48)</sup>.

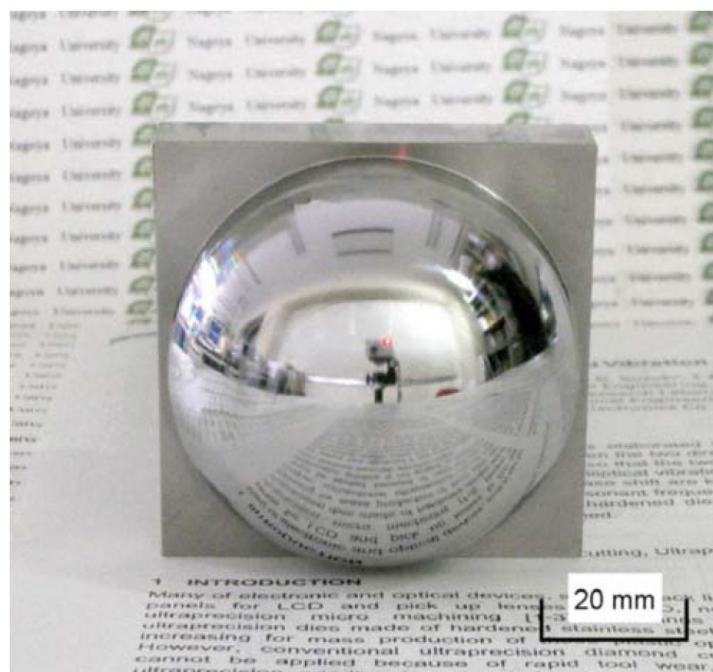
これらの楕円振動切削装置を利用した加工技術は様々報告されている。Fig. 1.12 はステンレス鋼 SUS420J2 に対する実験結果である<sup>38)</sup>。ノーズ半径 1 mm の単結晶ダイヤモンド工具で楕円振動切削した結果、切削距離約 3000 m で鏡面レベルの表面粗さ  $R_y$  が  $0.1 \mu\text{m}$  以下が得られている。これは、Fig. 1.8 で示した直線型の振動切削と比較し、およそ 2 倍の切削距離が実現している。切削抵抗の変動を見ても、通常の切削加工より安定していることがわかる。また、鈴木らの研究では、脆性材料の単結晶ゲルマニウムやフッ化カルシウムに対しても、臨界切込み量の増加が得られた他<sup>49,50)</sup>、Ma らの研究<sup>51)</sup>ではアルミニウムの切削におけるバリの抑制も報告されている。



**Fig. 1.12** Changes in cutting forces (a) and surface roughness  $R_y$  (b) during the elliptical vibration cutting of stainless steel SUS420J2 (Rockwell hardness: 39 HRC)<sup>38)</sup>.

Cutting tool: single-crystalline diamond tool with nose radius of 1 mm, frequency of vibration: 20.4 kHz, amplitude:  $7 \mu\text{m}_{p-p}$ .

実際の金型で磨きレス加工技術として活用するためには、3次元的な曲面加工に対応する必要がある。楕円振動切削は、加工機の動作としては引き切り（シェーパー加工）と同じ動作になるため、通常のボールエンドミル加工のように自由なアプローチで加工すると、逃げ面の干渉による工具の欠損が避けられない。これに対し、社本・鈴木らの研究<sup>52-54)</sup>では、楕円振動切削に特化したポストプロセッサを開発し、自由曲面に対応したツールパスの生成に成功している。加えて、3自由度の楕円振動切削装置も開発し、加工する曲面ワークの法線方向に対して適切な楕円振動を発生できるシステムが開発された。これらの研究により、Fig. 1.13に示すような曲面形状でも楕円振動切削による金型鋼（NAK80，硬度40 HRC）の鏡面切削が実現している。



**Fig. 1.13** Spherical steel mirror finished by 3 degrees of freedom (DOF) elliptical vibration cutting<sup>54)</sup>.

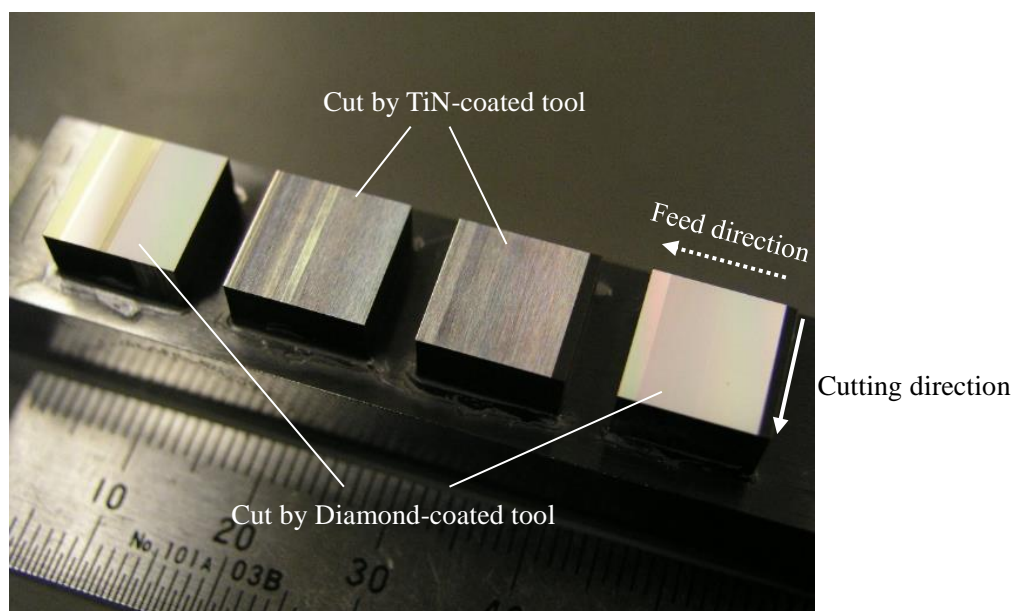
### 1.2.3 楕円振動切削加工の課題

これまで述べたとおり、楕円振動切削はそれまでの直線型振動切削を発展させ、実用的な鋼材の鏡面切削、脆性材料の延性モード切削を実現してきた。一方で、楕円振動切削には課題も残されている。鋼材の鏡面加工で用いる単結晶ダイヤモンド工具は、一般の切削工具と比較して高価であるため、より安価な工具でこれまでと同等の高精度加工を実現することができれば、金型産業への更なる普及が期待できる。Rahman らの研究グループは、単結晶ダイヤモンド工具に代わる低コストな工具として、PCD（多結晶ダイヤモンド）工具を楕円振動切削に使用した研究を行った<sup>55,56</sup>。ステンレス鋼や超硬合金に対し、鏡面レベルの表面粗さが得られているものの、コスト面で一般の切削工具と比較すると、PCD 工具より更に安価な工具が望まれる。そこで本研究で注目したのが、ダイヤモンドコーティング工具である。超硬合金の母材に多結晶ダイヤモンド被膜を被覆したダイヤモンドコーティング工具は、これまでのダイヤモンド工具と比較し低コストで耐摩耗性が高く<sup>57,58</sup>、アルミ合金に対し低摩擦であることが報告されている<sup>59,60</sup>。渡邊らの研究<sup>61</sup>では超硬合金の直彫り加工に、羽生らの研究<sup>62</sup>や Durante らの研究<sup>63</sup>では、アルミシリコン系の合金や金属とセラミックスの複合材料である金属基複合材料（MMC, Metal Matrix Composites）に対し、ダイヤモンドコーティング工具の有効性が示されている。これらの難削材に対し優れた特性を有するダイヤモンドコーティング工具を、楕円振動切削による金型鋼の加工に適用することにより、低コストで高精度な加工が期待できる。

耐摩耗性が要求されるプレス金型や一部の射出成形金型では、ロックウエル硬度 60 HRC を超える高硬度金型鋼が用いられている。しかし、表面硬度が高いため、磨き工程に長い時間が必要とされ、機械加工による鏡面加工のニーズが高まっている。楕円振動切削は、実用的な切削距離で金型鋼の鏡面加工を実現してきたが、この場合の金型鋼は主にステンレス系の鋼材である。プレス金型で用いられる高硬度金型鋼には、合金元素が多量に含まれており、硬質な炭化物も基地中に析出している。この高硬度金型鋼を単結晶ダイヤモンド工具で楕円振動切削した場合、チップングや工具摩耗が早期に発生し、鋼材によっては実用的に十分な工具寿命が得られないことが明らかとなってきたが<sup>64</sup>、この工具損耗に関する研究が十分になされていないため、工具損耗の原因解明と、高硬度金型鋼の鏡面切削加工技術の確立が求められている。

### 1.3 研究目的

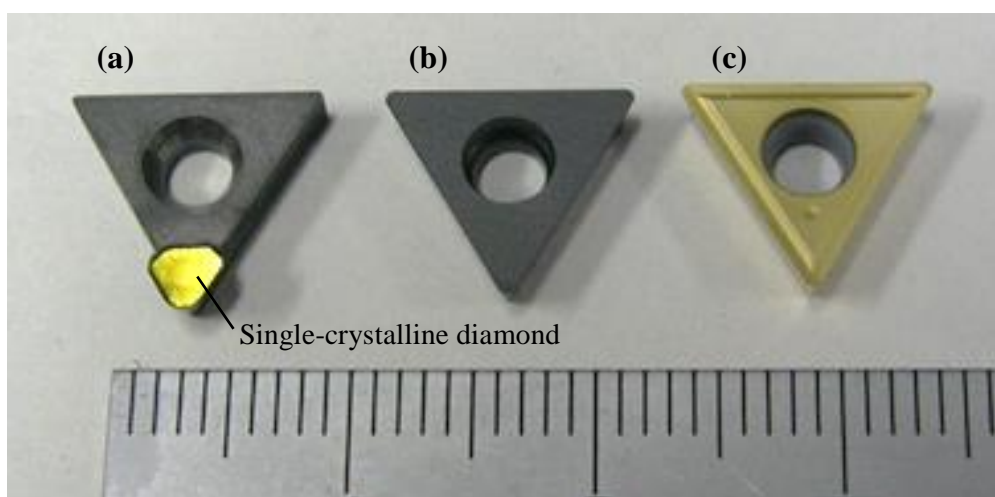
1.3項で述べた楕円振動切削にかかわる課題を解決し、当該加工技術の高度化と更なる金型産業への普及を図るため、以下の研究に取り組む。1点目は、低コストな工具としてダイヤモンドコーティング工具を使用し、意匠性金型に向けた虹面加工や、鏡面加工を実現する。虹面加工、すなわち光の回折が発現する加工面を得るためには、均一なカッターマークを作ることが重要である。Fig. 1.14は、ダイヤモンドコーティング工具と、従来から幅広く使用される窒化チタン (TiN) コーティング工具で加工した予備実験<sup>65)</sup>の加工ワークである。ダイヤモンドコーティング工具による加工面では、光の回折が発現しているが、これは、カッターマークの均一性に依存すると考えられる。本研究では、まずカッターマークの繰り返し性を定量的に比較する手法を提案し、続いてコーティング材種によって切削性が異なる理由について明らかにする。楕円振動の有無や加工液の有無で耐久実験も行い、実用的な加工条件を検証し、それぞれのコーティング工具に適した加工用途について示す。また、安価なコーティング工具による鏡面加工を目的に、ダイヤモンドコーティング工具の切れ刃をパルスレーザーによる研磨技術<sup>66-68)</sup> (Pulse Laser Grinding, 以下 PLG) で鋭利化し、加工面の表面粗さを評価する。



**Fig. 1.14** Photograph of hardened steels Stavax cut by diamond-coated tool and TiN-coated tool.

2点目は、ニーズが高まっている高硬度金型鋼の鏡面加工を実現するため、単結晶ダイヤモンド工具による高硬度金型鋼の楕円振動切削実験を行い、工具損耗の評価とその原因の調査を行う。工具損耗は、機械的に切れ刃が欠損するチップングと、ワークとの熱化学的な作用で切れ刃が後退する摩耗との2種類に分けることができる。高硬度金型鋼6種類に対し楕円振動切削実験を行い、工具損耗について定量的に調べ、チップングと摩耗の原因について明らかにする。実験結果をもとに、楕円振動切削による鏡面切削に適した高硬度金型鋼を提案し、鏡面加工の実現可能性を示す。

Fig. 1.15 は、本研究で使用する工具の写真である。Fig. 1.15 (a)は単結晶ダイヤモンド工具で、超硬合金の台金にダイヤモンドがろう付けされている。Fig. 1.15 (b), (c)はダイヤモンドコーティング工具と TiN コーティング工具で、母材の超硬合金に硬質なコーティングが被覆されている。これらの工具を楕円振動切削装置に取り付け、加工実験を行った。



**Fig. 1.15** Photograph of cutting tools. (a): single-crystalline diamond tool, (b): diamond-coated tool, (c): TiN-coated tool.



## 1.4 本論文の構成

本論文は6章で構成される。第1章が序論、第2章から第5章までが楕円振動切削実験にかかわる内容で、第6章が結論である。

第1章の序論では、本研究の加工技術が応用される金型についてその種類と用途をまとめ、金型産業における加工技術のニーズと、超精密加工にかかわるこれまでの研究について述べた。各種加工技術との比較の中から、本研究の楕円振動切削の特徴を明らかにし、楕円振動切削で解決すべき課題と、本研究の目的を述べる。

第2章から第4章では、楕円振動切削のダイヤモンドコーティング工具とTiNコーティング工具の実験について述べる。第2章では、虹面加工の実現において重要なカッターマークの均一性を評価する手法として、加工面の表面粗さを相関係数で定量的に評価する方法を述べる。また、コーティング工具で加工した虹面金型をナノインプリントで樹脂に転写する実験も行い、実用性を検証する。

第3章では、第2章の実験で明らかになったコーティング材種による加工面性状の違いについて原因を調べるため、コーティング材種による切削現象の違いを議論する。工具に加わる切削抵抗をもとに工具とワークの摩擦係数を実験的に算出し、コーティング材種や加工条件を変化させたときの、摩擦係数・切りくずの状態・加工面性状・切削抵抗等を比較する。また、実用的な加工条件を示すため、工具の耐久実験も実施する。

第4章では、安価なコーティング工具で金型鋼の鏡面切削を実現するため、パルスレーザーを用いてダイヤモンドコーティング工具の切れ刃を鋭利化し、金型鋼の楕円振動切削実験を行う。鋭利化していないダイヤモンドコーティング工具でも実験し、加工面の表面粗さを比較する。

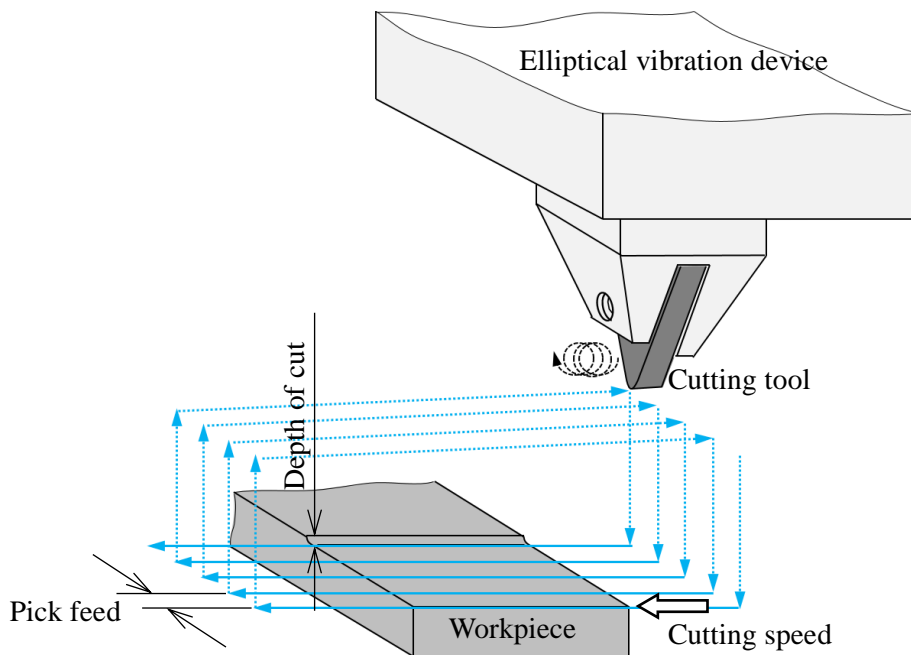
第5章では、ロックウェル硬度60HRCを超える高硬度金型鋼6種類に対し、単結晶ダイヤモンド工具による楕円振動切削実験を行い、切れ刃に生じるチップングと摩耗の原因を明らかにする。析出している炭化物の量や硬度、合金成分の化学結合状等を解析し、工具損耗との関係を定量的に議論する。解析の結果から、楕円振動切削に適した高硬度金型鋼を明らかにし、鏡面切削の可能性を示す。

最後に第6章の結論では、本研究で得られた知見をまとめ、今後の展望について述べる。

## 第2章 コーティング工具の転写性評価

### 2.1 切削加工における切れ刃形状の転写性

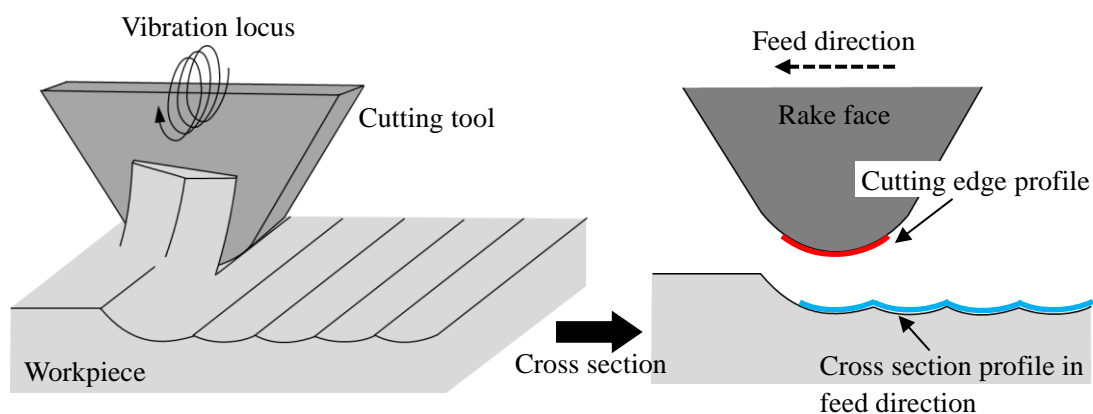
第1章の Fig. 1.14 で示したとおり，ダイヤモンドコーティング工具による加工面は虹面が得られることがわかった．虹面は，繰り返しの高い微細な凹凸により光が回折することで得られると考えられる．本研究で行う楕円振動切削による平削りの動きを Fig. 2.1 に示す．直線状に工具とワークを相対運動させる動作を，ピックフィード（送り量）だけ隣に移動しながら繰り返す．光の回折を生じる微細な凹凸パターンは，工具が通過した際に残るカッターマークにより作られ，加工面の状態から，2種類のコーティング工具ではカッターマークの繰り返しの異なることが予想される．工具によって切削性が異なる理由については第3章で考察するとして，第2章では，カッターマークの繰り返しの性を定量的に評価する方法を検討する．



**Fig. 2.1** Schematic drawing of planing experiments using elliptical vibration cutting.

Fig. 2.2 は、コーティング工具による楕円振動切削の様子と、送り方向の断面形状を表した概略図である。繰り返し性の良いカッターマークを得るためには、工具の輪郭形状が安定してワークに転写される必要がある。すなわち、工具の輪郭形状 (Fig. 2.2 の赤線) と、ワークの断面形状 (Fig. 2.2 の青線) を比較することにより、工具の転写性を評価できると考えられる。しかし、実際の測定では、ワークに転写した切れ刃の部分特定し、輪郭形状を正確に測定することは困難を伴う。田中らの研究<sup>69)</sup>では、送り方向にワークの断面形状を測定し、1 パスごとに生成されたカッターマークから工具のノーズ半径に該当する近似円を求め、近似円の位置ずれ等を解析した。この方法は、解析に用いる工具のノーズ半径が毎回変化する点、カッターマークが明瞭に確認できない微細な送り量で加工した面には適用が難しい点において、問題を伴う。井川らの研究<sup>70)</sup>では、超精密加工における転写性について議論しているが、送り方向の断面形状を観察することとどまり、定量的な評価には至っていない。

そこで本研究では、カッターマークの繰り返し性を比較するため、ワークの断面形状を相関係数で評価し、工具の転写性を表す指標とする新たな方法を提案する。



**Fig. 2.2** Schematic drawing of elliptical vibration cutting and cross section of finished surface in feed direction.

## 2.2 楕円振動切削による平削り実験

### 2.2.1 実験方法

実験装置の写真を Fig. 2.3 に示す. ナガセインテグレックス製の超精密加工機 N2C-53US4N4 に多賀電気製の楕円振動切削装置 EL-50Σ を固定し, 周波数約 40 kHz, 振幅  $4 \mu\text{m}_{\text{p-p}}$  の円軌道で工具を振動した. 使用したワークは, Uddeholm 製の金型鋼 Stavax (SUS420J2 相当) で, ロックウエル硬度 54 HRC に焼入れして実験に供した. ワークは Kistler 製の工具動力計 9256C に固定し, 加工中の切削抵抗を測定した. 本研究では, 切削抵抗は全て同じ機種 of 工具動力計で測定したが, 約 40 kHz の超音波振動には追従できないため, 見かけ上の平均的な抵抗を測定することとなる. 使用した工具は, ダイヤモンドコーティング工具と TiN コーティング工具の 2 種類で, いずれもノーズ半径 0.4 mm, 工具の母材は超硬合金である. 加工液としてパレス化学製の油性切削液ナノカット 9 をミスト状に供給した. 加工条件を Table 2.1 にまとめた. 加工後は, 送り方向の表面粗さを Zygo 製の非接触表面形状測定機 NewView7300 で測定し, 微分干渉顕微鏡 (Carl Zeiss, LSM5PASCAL) による観察も行った. 本研究では, 表面粗さは全て Rt を用いて表すが, これは Zygo 製の非接触表面形状測定機で測定した最大高さの数値を表す.

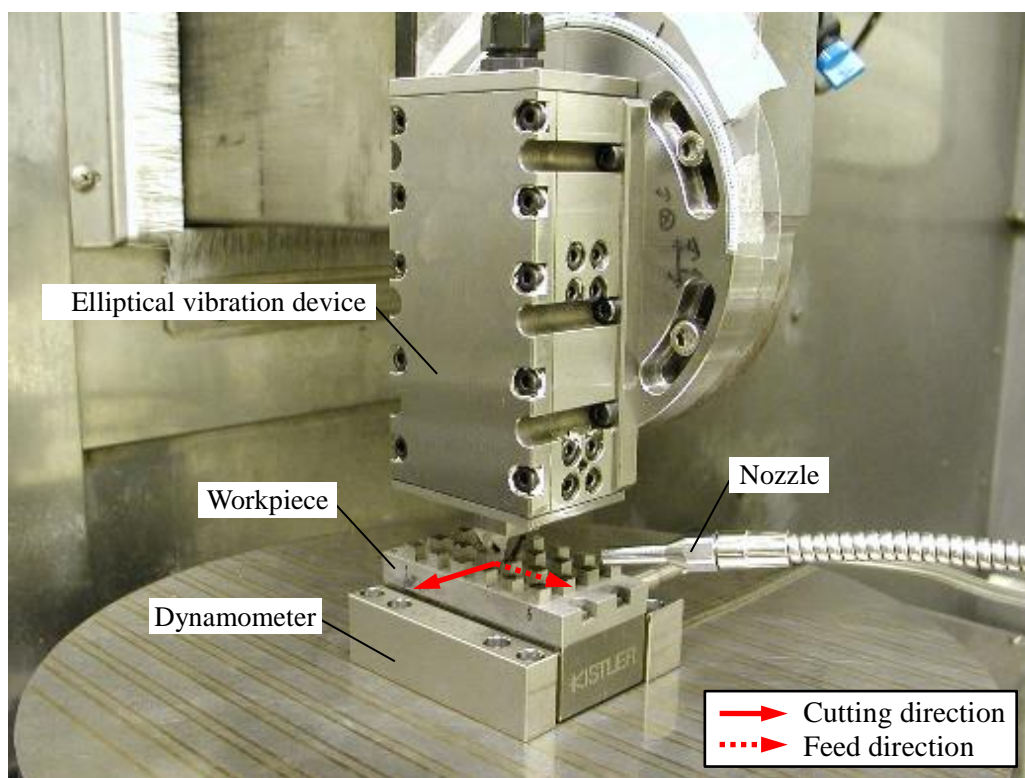


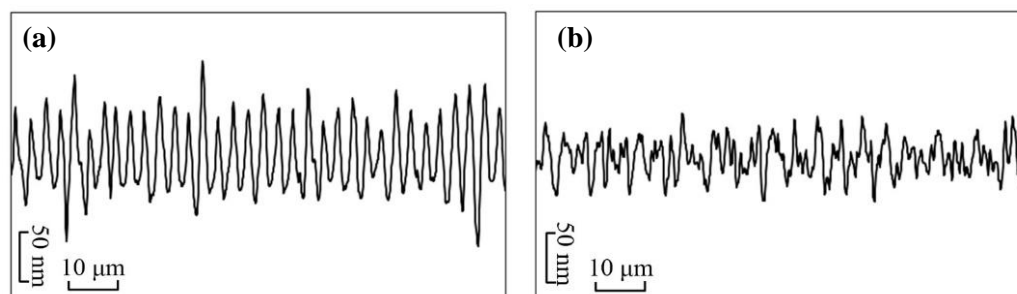
Fig. 2.3 Experimental setup for fundamental planing experiments.

**Table 2.1** Cutting conditions of fundamental planing experiments.

Machining conditions	
Cutting tool	Diamond-coated tool TiN-coated tool
Workpiece	Stavax (Modified SUS420J2) Rockwell hardness: 54 HRC
Depth of cut [ $\mu\text{m}$ ]	10
Pick feed [ $\mu\text{m}$ ]	3,5,10,20,40,60
Cutting speed [m/min]	1
Cutting fluid	Oil mist (Palace chemical, Nano-cut 9)
Elliptical vibration conditions	
Frequency [kHz]	About 40
Amplitude [ $\mu\text{m}_{p-p}$ ]	4
Phase shift [deg.]	90 (Circle)

### 2.2.2 相関係数による転写性の評価

2.1 節で述べたとおり，工具の転写性を評価するためには，本来は切れ刃の形状と加工面の形状を比較するべきであるが，加工面を創成した切れ刃の位置を正確に特定することは困難である．そこで本研究では，加工面の表面粗さを2つのセグメントに分割し，両者を相関係数で解析する新たな手法を行った．送り量  $3\ \mu\text{m}$  で加工した加工面の送り方向の粗さ曲線を Fig. 2.4 に示す．TiN コーティング工具で加工した粗さ曲線よりも，ダイヤモンドコーティング工具の方が周期的なカッターマークが明瞭に



**Fig. 2.4** Roughness profiles at pick feed of  $3\ \mu\text{m}$  finished with (a): diamond-coated tool, (b): TiN-coated tool.

確認できる。これは、ダイヤモンドコーティング工具の方がカッターマークの安定性が高く、転写性が高いことを示唆している。

表面粗さの測定データは、測定装置から 2 次元の点群として出力される。サンプリング周期にあたる測定データの間隔は、送り量 1 周期あたり 12 点以上のデータ数となるよう、装置の対物レンズを選択した。測定した点群の概略図を Fig. 2.5 に示す。粗さ曲線を 2 つの点群データ  $\mathbf{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n\}$  と  $\mathbf{y}_j = \{y_{1+j}, y_{2+j}, \dots, y_{i+j}, \dots, y_{n+j}\}$  に分割し、 $\mathbf{y}_j$  を  $j = 0, 1, 2, \dots$  と 1 点ずつ移動させながら、式(2.1)により相関係数を計算した<sup>71)</sup>。

$$R_{xyj} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_{i+j} - \bar{y}_j)}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{i+j} - \bar{y}_j)^2}} \quad (2.1)$$

ここで、点群データの長さは、 $\mathbf{x}$ 、 $\mathbf{y}_j$ 共に送り量の 50 倍の長さとした。また、 $\bar{x}$ 、 $\bar{y}_j$ は  $\mathbf{x}$ 、 $\mathbf{y}_j$ の平均値をそれぞれ表す。式(2.1)は、 $\mathbf{x}$ と $\mathbf{y}_j$ の標準偏差で除することにより規格化されている。したがって、仮に $\mathbf{x}$ と $\mathbf{y}_j$ が完全に一致する場合、相関係数は 1 となる。これは、工具の形状が毎回同じ形状で被削材に転写されていることを意味する。

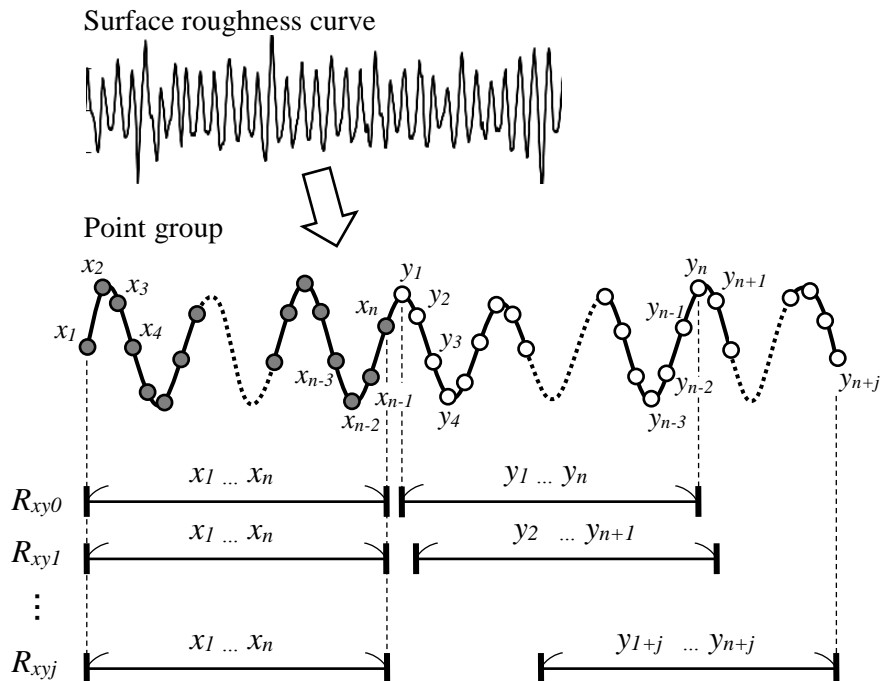


Fig. 2.5 Definition of {x} and {y}

Fig. 2.6 は、送り量  $3 \mu\text{m}$  のときの相関係数である。ダイヤモンドコーティング工具の相関係数は周期的に変化しており、極大値がおよそ 0.5 で推移しているのに対し、TiN コーティング工具の場合は極大値がおよそ 0.1 で推移している。すなわち、ダイヤモンドコーティング工具の方が良好な転写性を有することを数値的に比較することができる。送り方向に測定した表面粗さには、送り量に対応した周期的な Cutter マークが表れるため、これらの点群データから計算した相関係数も送り量と同じ周期で変動する。この周期的に変動する相関係数の極大値 20 点を平均し、その送り量での転写性を表す指標として定義した。前述のとおり相関係数は規格化されているため 0 から 1 の範囲で変動し、1 の場合は毎回同じ Cutter マークが仕上げ面に転写されていることを表す。

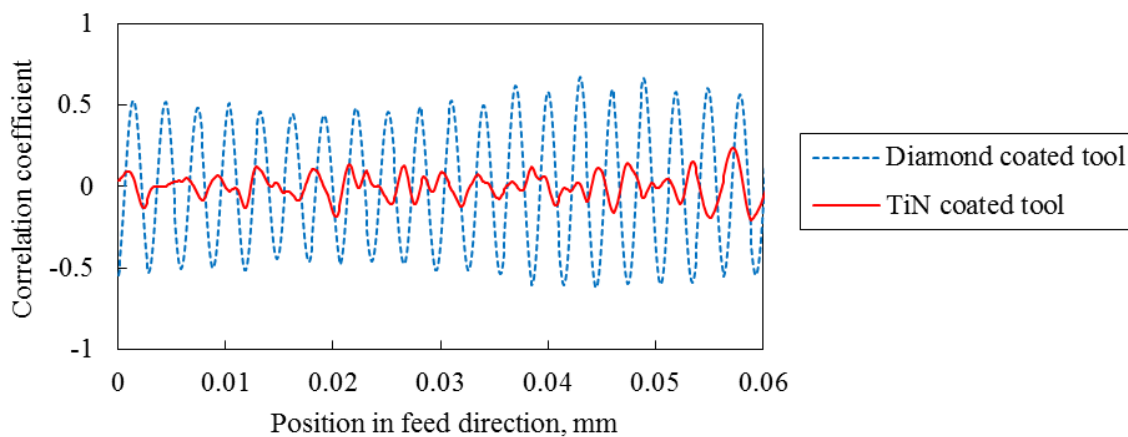


Fig. 2.6 Correlation coefficient at pick feed of  $3 \mu\text{m}$ .

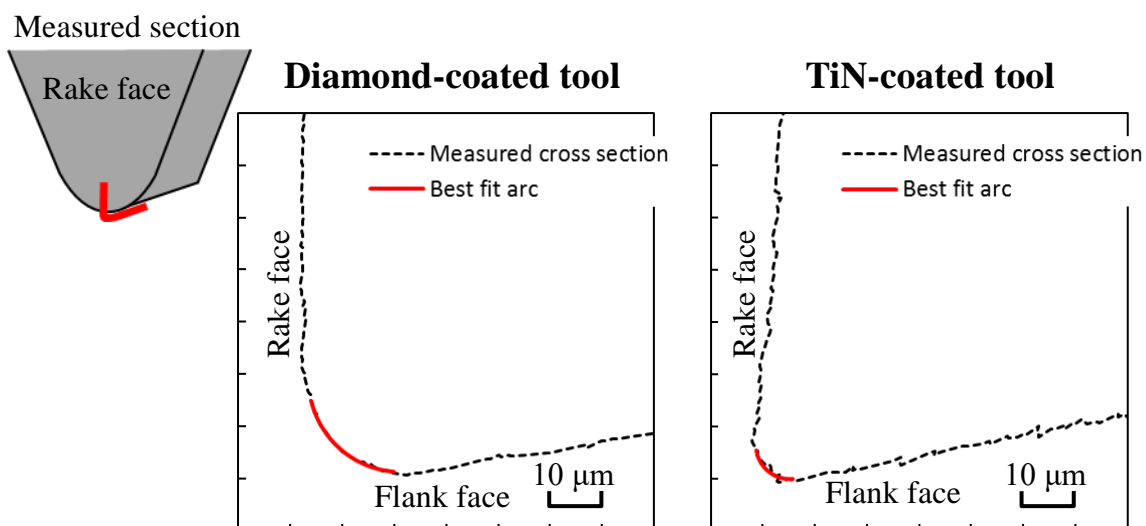
### 2.2.3 コーティング工具の表面性状

コーティング工具の切れ刃を、切れ刃に対し垂直方向に測定した断面形状を Fig. 2.7 に示す。測定には非接触表面形状測定機 NewView7300 を使用した。すくい面と逃げ面の稜線には、主にコーティングの厚さに起因すると考えられる丸みが存在する。この丸みの半径について断面曲線から最小二乗円を計算し、各コーティング工具 9 個の平均値を求めた。その結果、TiN コーティング工具の切れ刃丸み半径は  $5.8 \mu\text{m}$  であったのに対し、ダイヤモンドコーティング工具の丸み半径は  $16.3 \mu\text{m}$  であり、ダイヤモンドコーティング工具の方が厚い被膜を有すると予想され、丸み半径が大きいことがわかった。

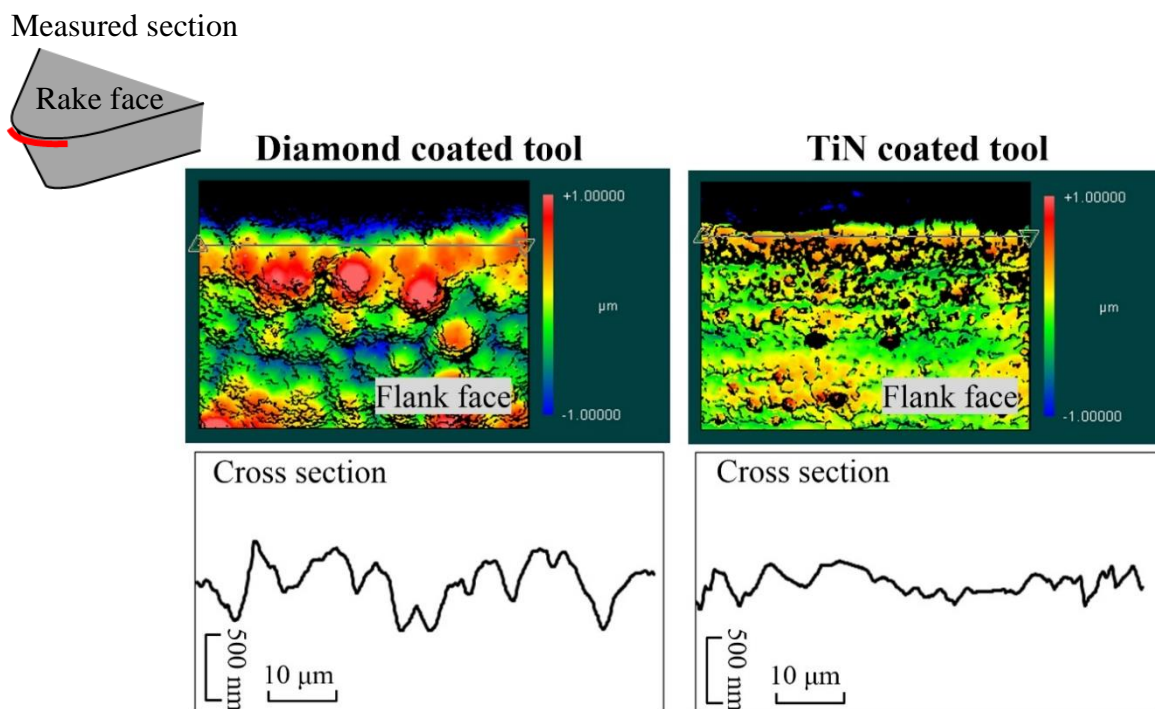
仕上げ面を創成する切れ刃の場所を特定することは困難であるが、逃げ面の表面粗さも加工面の表面粗さに影響する重要な要素である。Fig. 2.8 は、切れ刃に沿って測



定した逃げ面の表面粗さである。ダイヤモンドコーティング工具の表面粗さは  $Rt\ 0.75\ \mu\text{m}$  で、TiN コーティング工具の  $Rt\ 0.5\ \mu\text{m}$  よりも大きいことがわかった。



**Fig. 2.7** Cross sections of coated carbide tools perpendicular to the cutting edges. (R: radius of circular arc fitted by least-squares method).



**Fig. 2.8** Roughness profiles of the flank faces measured along the cutting edge.



### 2.2.4 実験結果

Fig. 2.9 は送り量を  $3\ \mu\text{m}$  から  $60\ \mu\text{m}$  の間で変化させたときの表面粗さ  $R_t$  の変化である。何れの送り量でも、TiN コーティング工具で加工したワークの表面粗さの方が、ダイヤモンドコーティング工具で加工したワークよりも小さく、TiN コーティング工具の送り量  $20\ \mu\text{m}$  以下のとき  $R_t 0.5\ \mu\text{m}$  以下が得られたのに対し、ダイヤモンドコーティング工具では  $R_t 0.8\ \mu\text{m}$  以上であった。点線はスキヤロップ高さ、すなわち工具のノーズ半径と送り量から幾何学的に求められる理論粗さであるが、TiN コーティング工具の結果でも、送り量にかかわらず理論粗さより大きい。主な原因は、Fig. 2.7 に示した逃げ面の表面粗さが影響したと考えられる。ダイヤモンドコーティング工具による加工面の表面粗さが TiN コーティング工具の場合より大きくなった原因は、逃げ面の表面粗さ  $R_t 0.75\ \mu\text{m}$  に加え、Fig. 2.11, 2.12 で示すバリの影響と考えられる。

Fig. 2.10 は、送り量を変化させたときの転写性を表す相関係数である。表面粗さの結果とは反対に、何れの送り量でもダイヤモンドコーティング工具の方が TiN コーティング工具よりも高い相関係数が得られており、ダイヤモンドコーティング工具の方が高い転写性を有することがわかった。特に送り量  $3, 5\ \mu\text{m}$  の相関係数は、TiN コーティング工具が  $0.09, 0.31$  であるのに対し、ダイヤモンドコーティング工具は  $0.54, 0.75$  であり、 $2.4\sim 6$  倍大きい。ここで、粗さ曲線から算出した相関係数には、機械の運動精度のばらつきも含まれる。すなわち、表面粗さの凹凸に対し無視できないレベルの運動誤差が生じる場合は、カッターマークの繰り返し精度が悪くなり、相関係数が小さくなる方向にシフトする考えられる。また、凝着などによってカッターマークに変化が生じた場合、凝着による凹凸の絶対値が同じでも、表面粗さが小さいほど凝着に

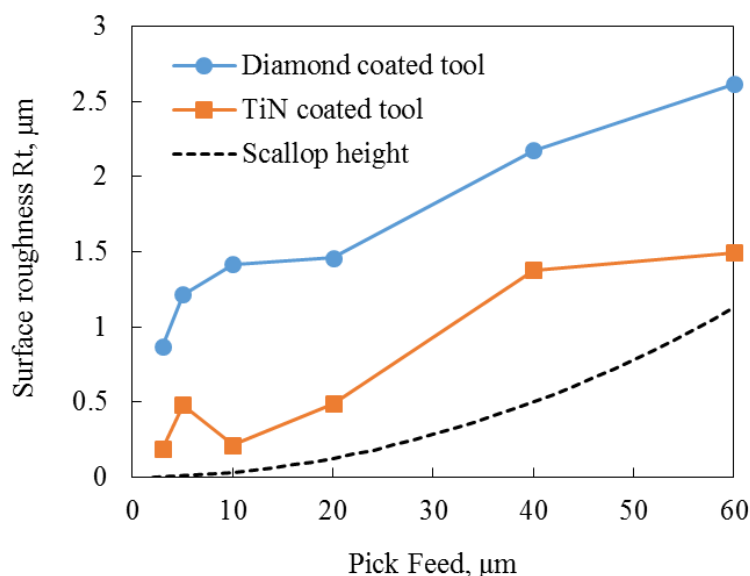


Fig. 2.9 Surface roughness  $R_t$  measured at various pick feeds.

よる凹凸が表面粗さに占める割合が大きくなり、相関係数の低下が大きくなる。以上を踏まえると、TiN コーティング工具よりも表面粗さが大きいダイヤモンドコーティング工具は、凝着などによる変化に対して相関係数が影響を受けにくいと言える。

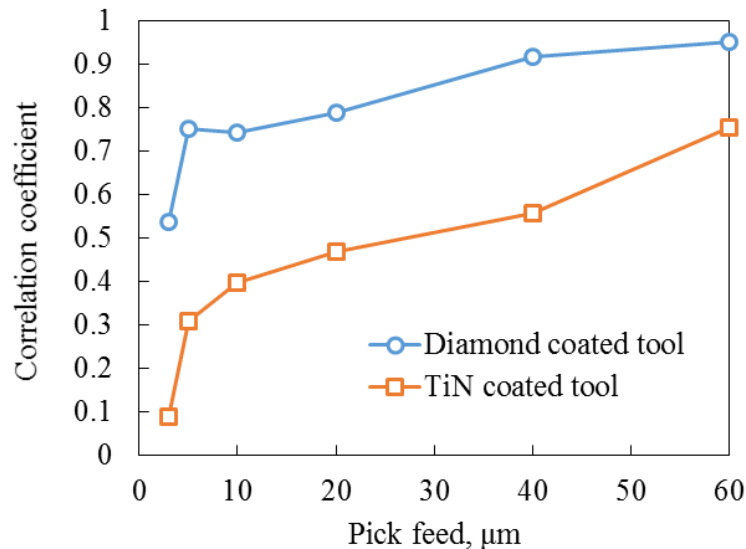


Fig. 2.10 Correlation coefficients obtained at various pick feeds.

Fig. 2.11 は、送り量  $5\ \mu\text{m}$  から  $40\ \mu\text{m}$  の加工面を光学顕微鏡で観察した結果である。ダイヤモンドコーティング工具による加工面を見ると、特に送り量  $5, 10\ \mu\text{m}$  のときに顕著にバリが見られるものの、送り量  $10\ \mu\text{m}$  以上では切削方向に均一なカッターマークが転写されている。TiN コーティング工具の加工面を見ると、何れの送り量でもバリは見られないが、明瞭なカッターマークは確認できない。Fig. 2.12 は、微小な凹凸を強調するため、微分干渉顕微鏡で観察した結果である。ダイヤモンドコーティング工具の加工面は、Fig. 2.11 の観察で述べたとおり、何れの送り量でもバリが確認された。また、送り量  $5\ \mu\text{m}$  のときは、微小な凹凸も部分的に確認された。切削方向のカッターマークを比較すると、ダイヤモンドコーティング工具では、逃げ面の粗さが転写されたと思われる筋が一樣に見られる。一方 TiN コーティング工具による加工面では、切削方向にスクラッチ痕があり、送り量  $40\ \mu\text{m}$  のときは、逃げ面に付着したものが潰された様な痕跡も見られる。TiN コーティング工具による切削は、逃げ面の状態が不安定であることが伺える。

以上をまとめると、粗さ曲線の相関係数ではダイヤモンドコーティング工具の方が高い値を示したが、バリによる表面粗さの増加が相関係数には優位に働いた可能性がある。しかし、加工面の観察結果から、バリ以外の部分、すなわち底刃で加工した溝底の部分は、カッターマークが安定していることが確認された。

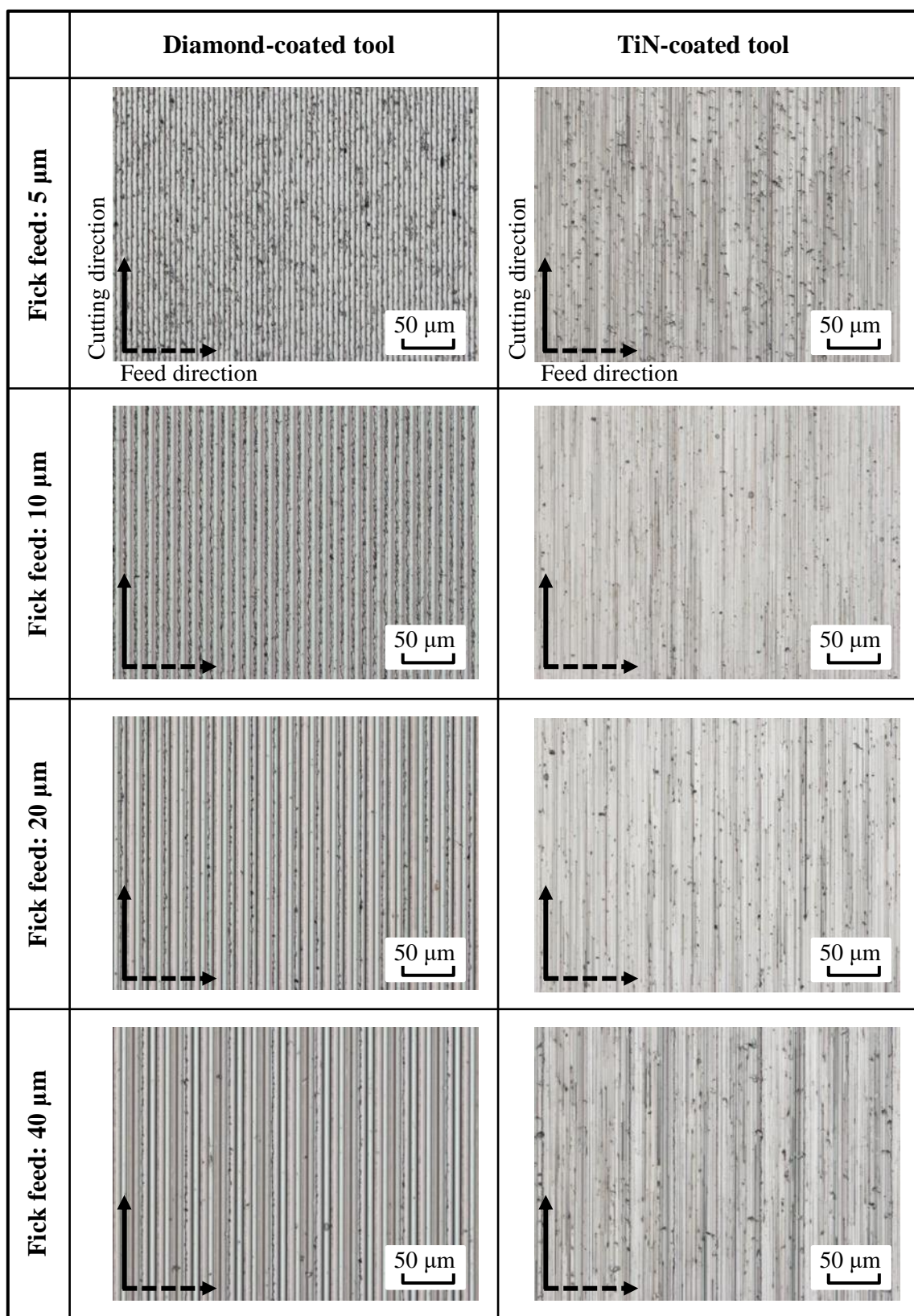


Fig. 2.11 Photomicrographs of finished surfaces at pick feeds of 5, 10, 20, and 40  $\mu\text{m}$ .



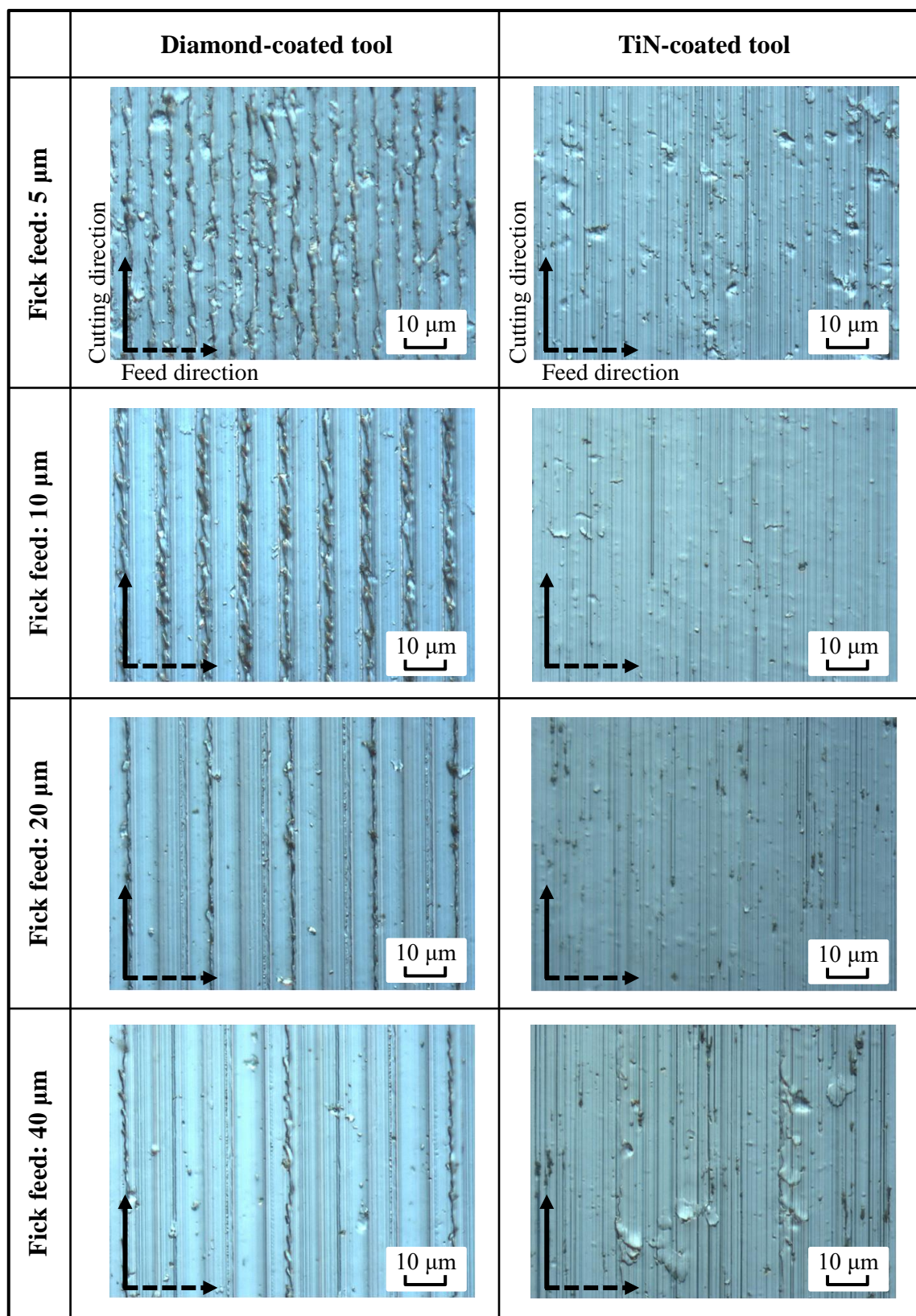
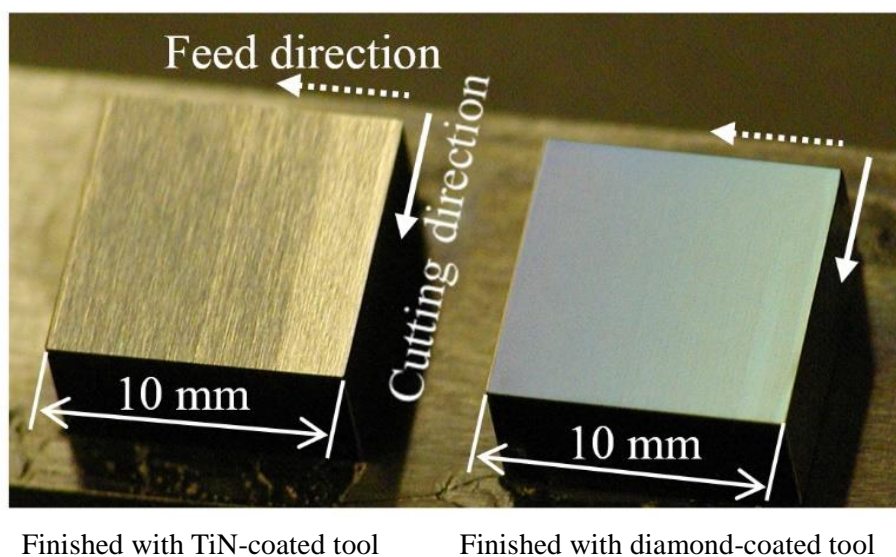


Fig. 2.12 Nomarski photomicrographs of finished surfaces at pick feeds of 5, 10, 20, and 40  $\mu\text{m}$ .

Fig. 2.13 は、ダイヤモンドコーティング工具と TiN コーティング工具により送り量  $5\mu\text{m}$  で加工した金型鋼 Stavax の写真である。ダイヤモンドコーティング工具による加工面は、光の回折が発現している。これは、安定して転写されたカッターマークが回折格子として機能したためと考えられる。



**Fig. 2.13** Surfaces of hardened die steel finished with TiN-coated tool and diamond-coated tool (depth of cut:  $10\mu\text{m}$ , pick feed:  $5\mu\text{m}$ ).

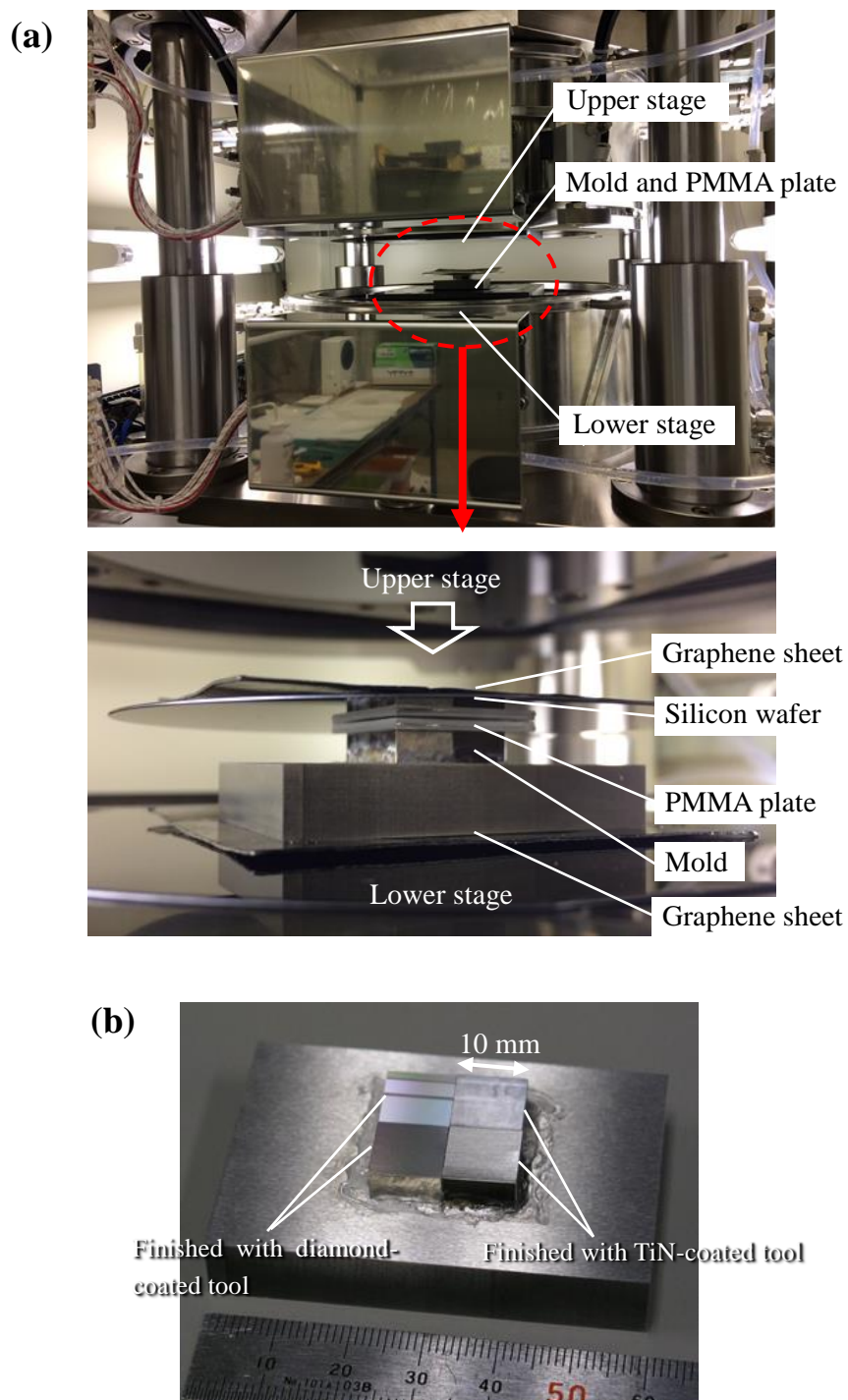
## 2.3 ナノインプリントによる転写実験

### 2.3.1 実験方法

2.2節で加工したワークの表面構造を樹脂に転写し、意匠性金型としての実用性を検証するため、熱式ナノインプリント装置で転写実験を行った。装置の写真を Fig. 2.14 に示す。熱式ナノインプリント装置は、精密な位置決め、荷重制御、温度制御が可能なステージを有し、樹脂等の板材に対し熱による樹脂の流動性を利用して金型の表面性状を転写する装置である。ステージの上にシリコンウエハを介して金型、転写させる板材（主にプラスチック）、シリコンウエハ、グラフェンシートを設置し、樹脂のガラス転移温度 ( $T_g$ ) 以上に加熱した上下ステージでプレスする。グラフェンシートは、金型等の平行度のずれを吸収し、均一にプレスするために使用する。ナノインプリントで使用した金型は、ダイヤモンドコーティング工具と TiN コーティング工具により、送り量 5, 10, 20, 40  $\mu\text{m}$  で楕円振動切削した金型鋼 Stavax である。金型には、あらかじめフッ素系の離型材を塗布した。転写するプラスチックは、厚さ 1.6 mm の透明なアクリル板 (PMMA) である。PMMA は 100°C 前後から軟化が始まるため、転写する際のステージ温度は上下とも 130°C とした。ステージを 130°C まで昇温した後、アクリル板を 2 MPa の圧力で加圧し、1 分間の保持時間を経て金型が室温まで冷却されるまで 2 MPa を維持した。ナノインプリントの条件を Table 2.2 にまとめた。

**Table 2.2** Experimental conditions for thermal nanoimprint process.

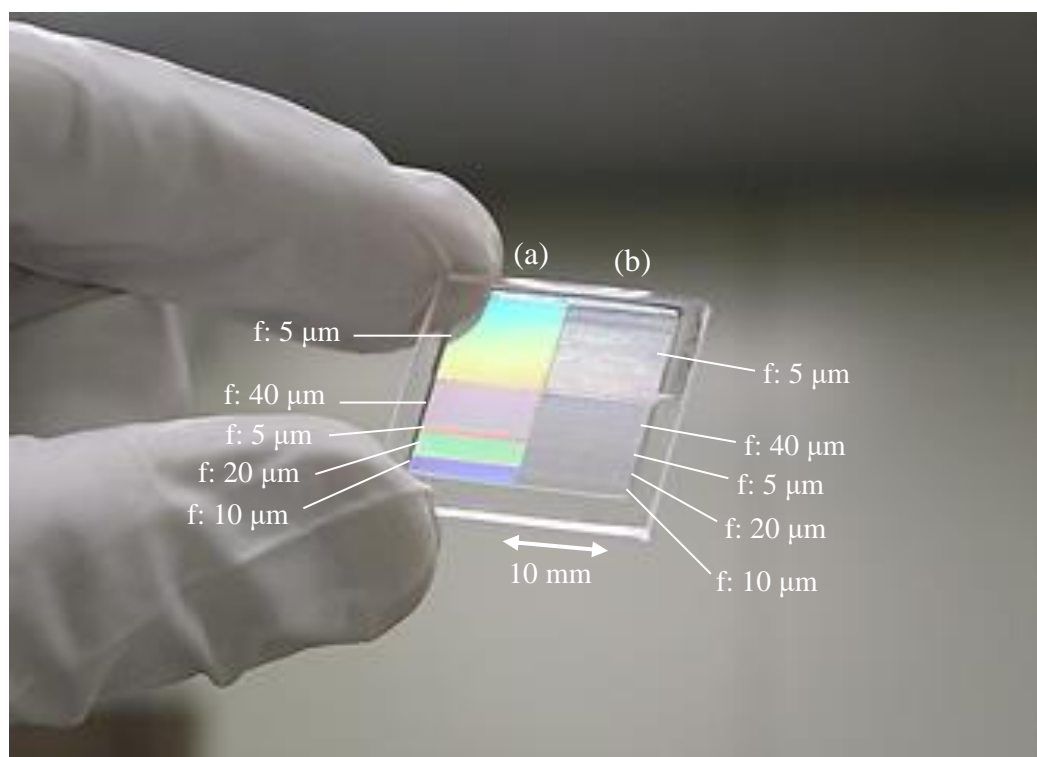
Nanoimprint system	SCIVAX Corporation, X300
Mold	Stavax (Modified SUS420J2), 20×20 mm
Plastic plate	PMMA, thickness: 1.6 mm
Stage temperature [°C]	130 (upper and lower stage)
Imprint pressure [MPa]	2
Holding time [sec]	60



**Fig. 2.14** Photographs of nanoimprint experiment. **(a)**: thermal nanoimprint system, **(b)**: mold for the nanoimprint finished by elliptical vibration cutting with diamond-coated tool and TiN-coated tool.

### 2.3.2 実験結果

転写したアクリルの写真を Fig. 2.15 に示す. (a)のダイヤモンドコーティング工具による加工面を転写した部分では, 光の回折が得られている. 対して, (b)の TiN コーティング工具による加工面を転写した部分は, ダイヤモンドコーティング工具の場合と同様に送り量を変えて加工したが, 光の回折は発現せず, 全体的に白濁して見える. 代表的な送り量 5, 10  $\mu\text{m}$  で加工した部分を転写したアクリルの表面性状を Fig. 2.16 に示す. ダイヤモンドコーティング工具による加工面を転写した部分は, バリの形状も転写されていることが確認された. バリによる離型性の悪さが懸念されたが, 離型は問題なく行うことができ, 転写した面でも光の回折が得られることが確認された.



**Fig. 2.15** Photograph of PMMA plate micro-structures of the molds finished with (a): diamond-coated tool, (b): TiN-coated tool are transferred by using thermal nanoimprint system.



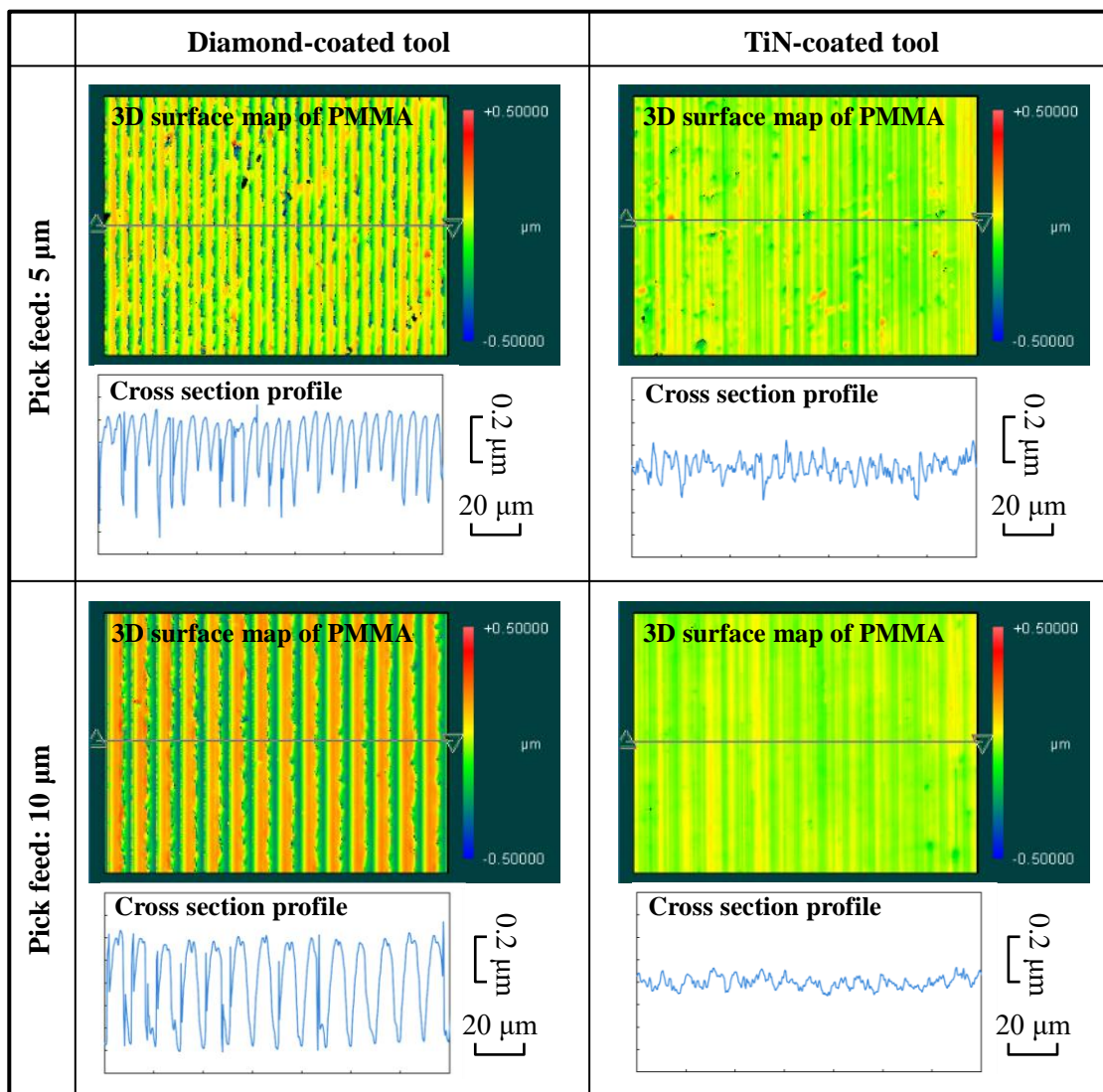


Fig. 2.16 3D surface maps and their cross section profiles of nanoimprinted PMMA.

## 2.4 結言

安価なコーティング工具による意匠性の高い虹面加工を目的に、虹面を得るために重要な切れ刃形状の転写性を表す指標として、ワークの粗さ曲線からカッターマークの安定性を評価する方法を提案した。ダイヤモンドコーティング工具と TiN コーティング工具による金型鋼 Stavax の楕円振動切削実験を行い、提案手法で加工面の状態を比較した。得られた結果を以下に示す。

- 1) TiN コーティング工具による楕円振動切削では、送り量  $20\ \mu\text{m}$  以下のときに表面粗さ  $Rt\ 0.5\ \mu\text{m}$  以下が得られたのに対し、ダイヤモンドコーティング工具では、 $Rt\ 0.8\ \mu\text{m}$  以上であった。主な原因として、TiN コーティング工具の切れ刃丸み半径が  $5.8\ \mu\text{m}$  であるのに対し、ダイヤモンドコーティング工具では丸み半径が  $16.3\ \mu\text{m}$  と大きいため、バリが発生した影響と考えられる。
- 2) 切れ刃形状の転写性を粗さ曲線の相関係数で比較した結果、ダイヤモンドコーティング工具の方が TiN コーティング工具よりも良好で、特に送り量が小さい  $3$  から  $5\ \mu\text{m}$  の場合、ダイヤモンドコーティング工具の転写性は  $2.4$  から  $6$  倍大きい結果となった。ただし、提案手法で転写性を比較する場合は、表面粗さが小さい粗さ曲線ほど、凝着などによる高さ方向のばらつきが大きく影響し、転写性の数値が低下することに配慮する必要がある。
- 3) ダイヤモンドコーティング工具の加工面では光の回折が発現した。これは、均一性の高いカッターマークが回折格子として機能したためと考えられる。熱式ナノインプリントでアクリル板に転写実験を行ったところ、バリの形状まで転写することができ、バリによる離型性の悪化は見られなかった。転写したアクリル板でも光の回折が得られることが確認された。

## 第3章 コーティング工具の摩擦係数と切削機構

### 3.1 切削抵抗の解析

第2章では、コーティング材種によって加工面への転写性が異なることを示したが、本章では、切削メカニズムについて検討し、実用性を検証するため耐久実験も行った。まず切削メカニズムの解明では、切削抵抗に含まれるせん断成分とプラウイング成分を解析した。せん断成分は、主せん断域でワークが塑性変形する過程と、すくい面と切りくずの摩擦により生じる2次的な塑性変形の過程で生じる力で、プラウイング成分は、切れ刃の下（逃げ面側）で生じるワークの弾性変形または塑性変形により生じる力である。プラウイング成分は、逃げ面とワークとの摩擦力と考えることができ、プラウイング成分を分離することができれば、工具とワークの摩擦係数を求めることができる。この摩擦係数に加え、切りくずや仕上げ面の観察も行い、コーティング工具による金型鋼の楕円振動切削における切削機構について検討した。

### 3.2 プラウイング成分と工具の摩擦係数

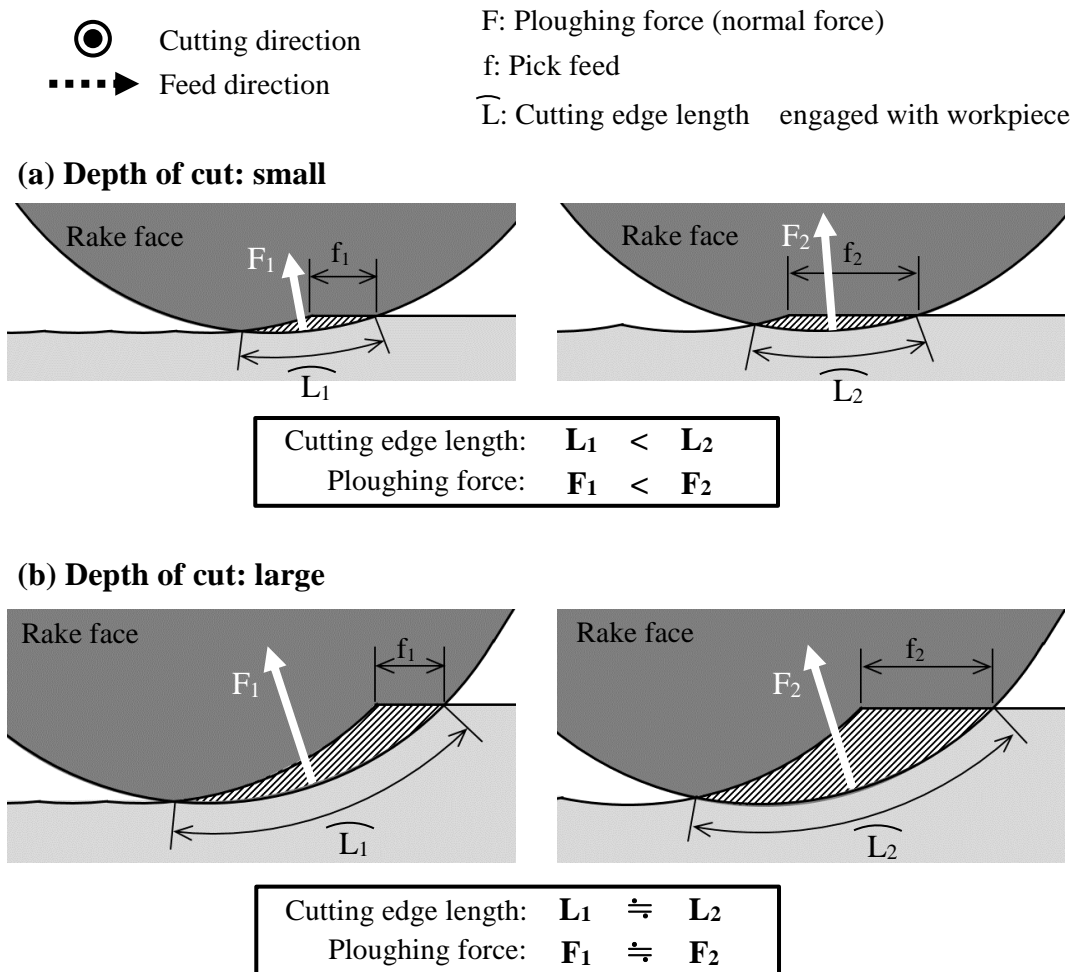
#### 3.2.1 プラウイング成分の分離方法

切削抵抗に含まれるプラウイング成分を求めるため、Table 3.1 に示す加工条件で送り量を変化させながら平削り実験を行った。使用したワークは、前章と同じくロックウエル硬度 54 HRC に焼入れした Uddeholm 製の金型鋼 Stavax である。Fig. 3.1 に、ワークに作用する切れ刃長さとプラウイング成分の関係を概略図で示す。プラウイング

**Table 3.1** Cutting conditions for evaluation of cutting forces

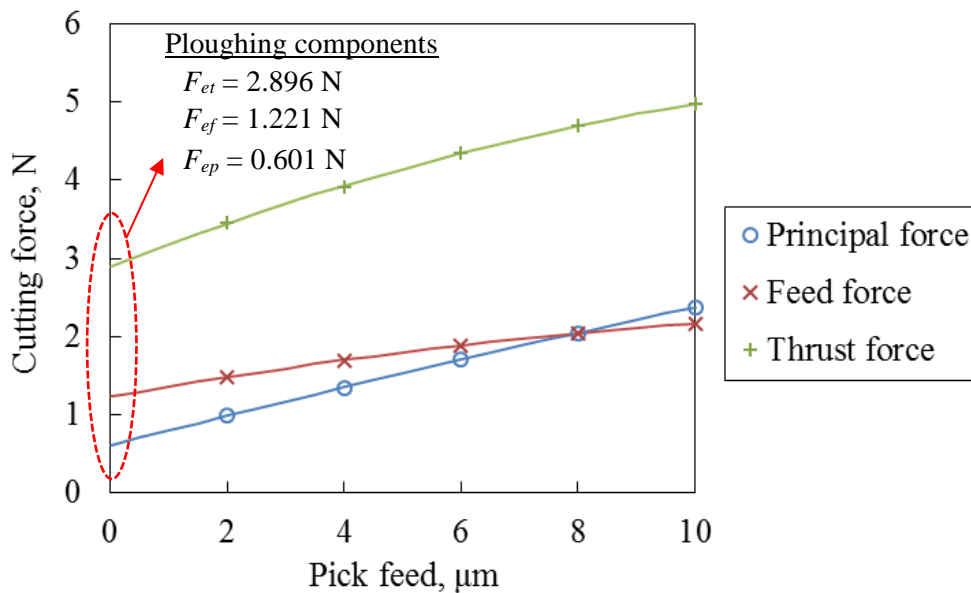
Cutting tool	Diamond-coated tool (nose radius: 0.4 mm), TiN-coated tool (nose radius: 0.4 mm)
Workpiece	Stavax (Modified SUS420J2) Rockwell hardness: 54 HRC
Depth of cut [ $\mu\text{m}$ ]	100
Pick feed [ $\mu\text{m}$ ]	2, 4, (5), 6, 8, 10
Cutting speed [m/min]	1
Cutting fluid	Oil mist (Palace chemical, Nano-cut 9)

成分は、逃げ面とワークに作用する摩擦力であるため、ワークと接する切れ刃長さが変化すると、プラウイング成分の大きさも変化することとなる。したがって、プラウイング成分の解析で誤差を小さくするためには、送り量等の条件を変化させても、ワークと接する切れ刃長さの変化が小さいことが望ましい。このことを踏まえ、今回の実験では、送り量 2, 4, 5, 8, 10 $\mu\text{m}$ （送り量 5 $\mu\text{m}$  は切りくずを採取するために実施）に対し、切込み量は 100 $\mu\text{m}$  と十分大きな値で実験した。これにより、送り量に対する切れ刃長さの変化の割合を最小限にし、最大切り取り厚さのみを優先的に変化させた。



**Fig. 3.1** Schematic drawing of the relationship between cutting edge length engaged with workpiece and ploughing force.

代表的な送り量と切削抵抗の関係を Fig. 3.2 に示す. 工具はダイヤモンドコーティング工具を使用し, 加工液としてミスト (パレス化学製の油性切削液ナノカット9) を供給しながら実験した. 図中の実線は, 2 次の多項式で近似した直線を示す. 楕円振動切削では, 送り量の増加に伴ない切り取り厚さが増加し, 楕円振動により切りくずを引き上げる力も増加する. したがって, 送り量が増加すると, 切削抵抗の増分が小さくなる. このことを考慮し, 楕円振動切削の場合は多項式で近似した. なお, 楕円振動を用いない通常の切削加工では, 線形近似した. この図において, 直線の切片がプラウイング成分を示しており, プラウイング成分を差し引いた切削抵抗がせん断成分となる. 主分力, 送り分力, 背分力方向のプラウイング成分をそれぞれ  $F_{ep}$ ,  $F_{ef}$ ,  $F_{et}$  とおくと, Fig. 3.1 の例では  $F_{ep} = 0.601 \text{ N}$ ,  $F_{ef} = 1.221 \text{ N}$ ,  $F_{et} = 2.896 \text{ N}$  となる.



**Fig. 3.2** Identification of ploughing components and shearing components from cutting forces measured at various pick feeds. (Cutting tool: Diamond-coated tool, coolant: oil mist)

### 3.2.2 摩擦係数の解析方法

切れ刃に作用するプラウイング成分  $F_{ep}$ ,  $F_{ef}$ ,  $F_{et}$  の概略図を Fig. 3.3 に示す。黄色の部分  
分が、切りくずとして除去する部分の断面形状である。主分力方向のプラウイング成  
分  $F_{ep}$  は、工具の逃げ面とワークの間に作用する見かけ上の摩擦力（測定する切削抵抗  
は、超音波振動する工具の平均的な力を測定するため、瞬間的な摩擦力とは異なる）  
と考えることができるため、工具とワークの摩擦係数  $\mu$  は式(3.1)で求めることができ  
る。

$$\mu = \frac{F_{ep}}{\sqrt{F_{ef}^2 + F_{et}^2}} \quad (3.1)$$

ここで、工具のノーズ半径が切れ刃長さに対し十分大きく、垂直抗力の方向は切れ刃  
に沿って一定であると仮定し、垂直抗力は  $F_{ef}$  と  $F_{et}$  の合成ベクトルで求めた。Fig. 3.1  
より求めたプラウイング成分から摩擦係数を求めると、ダイヤモンドコーティング工  
具で加工液を使用した場合の摩擦係数は  $\mu=0.191$  と算出された。同様の解析を、次項  
の Table 3.2 に示す6条件のもとで加工実験を行い、摩擦係数を計算した。

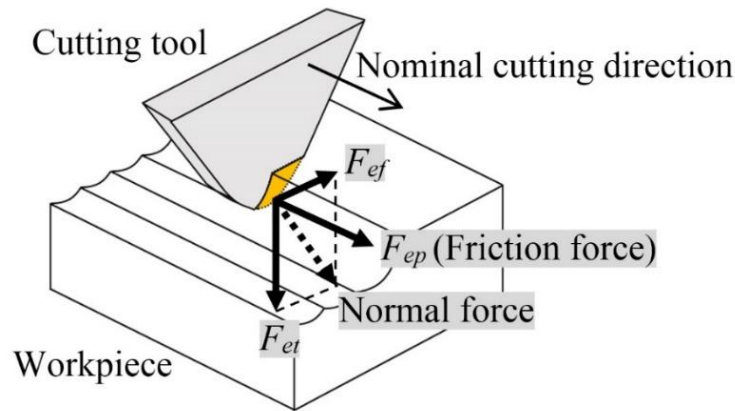


Fig. 3.3 Schematic illustration of ploughing force components acting on cutting edge.

### 3.2.3 加工実験

工具材種、楕円振動の有無、加工液の有無を変化させたときの切削性の違いを調べるため、Table 3.2 に示す6種類の条件のもとで加工実験し、プラウイング成分の解析と摩擦係数の算出を行った。実験の種類を表す記号は、DとTがそれぞれダイヤモンドコーティング工具とTiNコーティング工具、OnとOffが楕円振動の有無、WetとDryが加工液の有無を表す。Wetの場合は、前章と同じパレス化学製の油性切削液ナノカット9をミスト状に供給した。加工条件は、Table 3.1 に示す切込み量100 μm、送り量2~10 μm、切削速度1 m/minで実験した。ダイヤモンドコーティング工具の場合は、楕円振動を使用せずに加工した場合、データが不安定で摩擦係数の解析が困難であった。これは、激しい工具摩耗が原因と思われる、ここではD-Off-Wet/Dryについては取り扱わないこととする。(3.4節の耐久実験では、D-Off-Wetの条件を実施した)また、送り量5 μmで加工したときの切りくずを採取し、FEI製の走査型電子顕微鏡(SEM)FEI Quanta400で観察した。加工面の表面粗さは、Zygo製の非接触表面形状測定機NewView7300で最大高さRtを測定した。

Table 3.2 Various machining methods and their symbols.

Symbol	Coating of tool	Elliptical vibration	Cutting fluid
D-On-Wet	Diamond coating	On	Wet
D-On-Dry	Diamond coating	On	Dry
T-On-Wet	TiN coating	On	Wet
T-On-Dry	TiN coating	On	Dry
T-Off-Wet	TiN coating	Off	Wet
T-Off-Dry	TiN coating	Off	Dry



### 3.2.4 実験結果

代表的な送り量  $6\ \mu\text{m}$  における切削抵抗を Fig. 3.4 に示す。TiN コーティング工具の結果で楕円振動の有無で比較すると、楕円振動を使用した場合は3分力とも切削抵抗が低減されていることがわかる。これは、工具動力計は約  $40\ \text{kHz}$  の振動に追従できないため、平均的な切削抵抗が観測されることと、瞬間的な切削抵抗も楕円振動により低減されるためである<sup>37-38)</sup>。楕円振動を使用したときのコーティング材種で比較すると、ダイヤモンドコーティング工具“D”の切削抵抗が大きく、特に背分力が顕著に大きい。これは、第2章で示したとおり、ダイヤモンドコーティング工具の切れ刃丸み半径が大きいためと考えられる。すなわち、Fig. 3.4 の切削抵抗を測定した加工条件（ノーズ半径  $0.4\ \text{mm}$ ，切込み量  $100\ \mu\text{m}$ ，送り量  $6\ \mu\text{m}$ ）では、最大切り取り厚さが幾何学的に  $3.94\ \mu\text{m}$  であるのに対し、ダイヤモンドコーティング工具の切れ刃丸み半径は  $16.3\ \mu\text{m}$  と大きく、実際は負のすくい角で切削することとなり、背分力の増大につながったと言える。TiN コーティング工具のドライ切削、楕円振動 On の条件“T-On-Dry”では、切削抵抗が最も小さな値となり（主分力  $0.91\ \text{N}$ ，送り分力  $0.44\ \text{N}$ ，背分力  $0.84\ \text{N}$ ），特に背分力が他の条件と比較して小さい。一般的の切削加工では考えにくいこの特異的な結果については、次項で考察する。

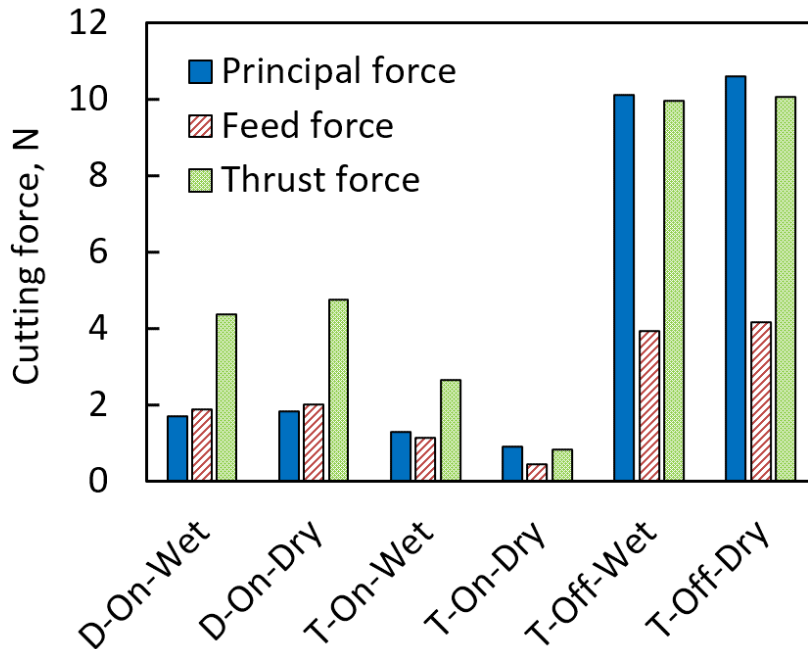


Fig. 3.4 Measured cutting forces at a pick feed of  $6\ \mu\text{m}$ .

Fig. 3.5 は切削抵抗から分離したプラウイング成分と、プラウイング成分から算出した摩擦係数を示した図である。プラウイング成分についても、Fig. 3.4 の切削抵抗と同様に楕円振動を使用した場合に減少する傾向が見られ、TiN コーティング工具のドライ切削“T-On-Dry”のとき、プラウイング成分が最も小さい（主分力方向 0.37 N，送り分力方向 0.19 N，背分力方向 0.44 N）。送り量 6  $\mu\text{m}$  のときの切削抵抗 Fig. 3.4 に対する Fig. 3.5 のプラウイング成分が占める割合を Fig. 3.6 に示す。何れの条件でも、切削抵抗に対して背分力と送り分力の割合が高い。これは、プラウイング成分は、逃げ面の下でワークが弾性変形または塑性変形する現象（プラウイング）や、逃げ面と仕上げ面との間の摩擦に起因した成分であるためと考えられる。楕円振動を使用した場合は、楕円振動を使用しない“T-Off-Wet”，“T-Off-Dry”と比較し、背分力と送り分力に占めるプラウイング成分の割合が減少した。更に、“T-On-Dry”の条件では、背分力と送り分力に占めるプラウイング成分の割合がそれぞれ 53%，43%と他の条件より小さい。これは、Fig. 3.5 に示す摩擦係数が 0.77 と大きく、楕円振動により切りくずを引き上げる作用が強くなった結果と考えられる。

式(3.1)を用いて算出した工具の摩擦係数  $\mu$  を Fig. 3.5 に赤線で示す。ダイヤモンドコーティング工具の摩擦係数は、切削液の有無にかかわらず、約 0.2 と小さい値であった。三木らの研究<sup>72)</sup>では、CVD ダイヤモンド被膜と SUS440C との摩擦係数を求めており、0.23 以下という結果であった。本研究の結果ともおよそ同じ値であり、ダイヤモンドコーティング自身が低摩擦な特性を有していると考えられる。それとは異なり TiN コーティング工具の場合は、楕円振動と加工液を使用した“T-On-Wet”では摩擦係数が約 0.2 と小さいが、それ以外の条件、すなわち“T-On-Dry”，“T-Off-Wet”，“T-Off-Dry”では摩擦係数が 0.56 以上と大きい。これは、窒化チタンの被膜が鉄系材料と大きい摩擦係数を有していることを示唆する。同時に、加工液を供給することにより摩擦係数が約 0.2 まで低減することから、約 40 kHz で振動する楕円振動の周期が約 25  $\mu\text{s}$  と非常に短いにもかかわらず、切削液またはその蒸気が逃げ面と被削材との間に浸透していることを示している。しかし、第2章の Fig. 2.12 に示す TiN コーティング工具の仕上げ面にはスクラッチ痕が見られることから、加工液は逃げ面と被削材との間に完全には浸透できず、大きな摩擦係数により局所的かつ突発的な凝着と脱落が繰り返され、結果として TiN コーティング工具の低い転写性につながったと考えられる。

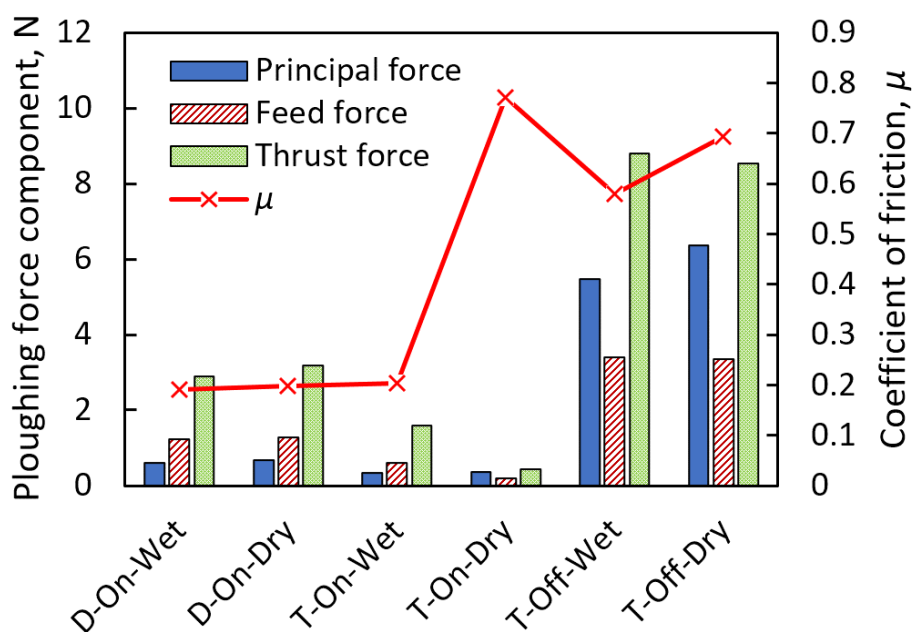


Fig. 3.5 Ploughing force components and friction coefficients.

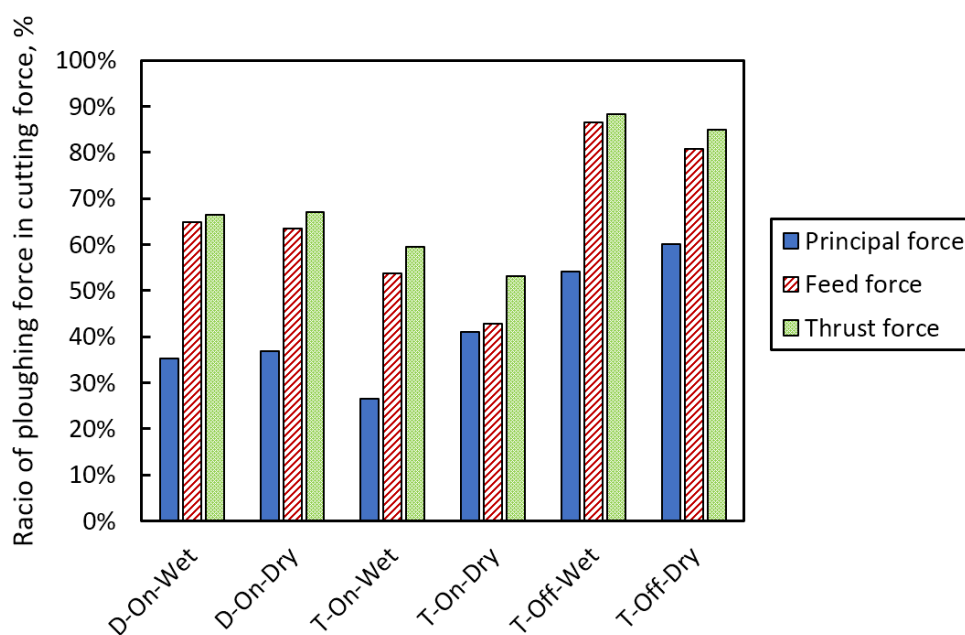
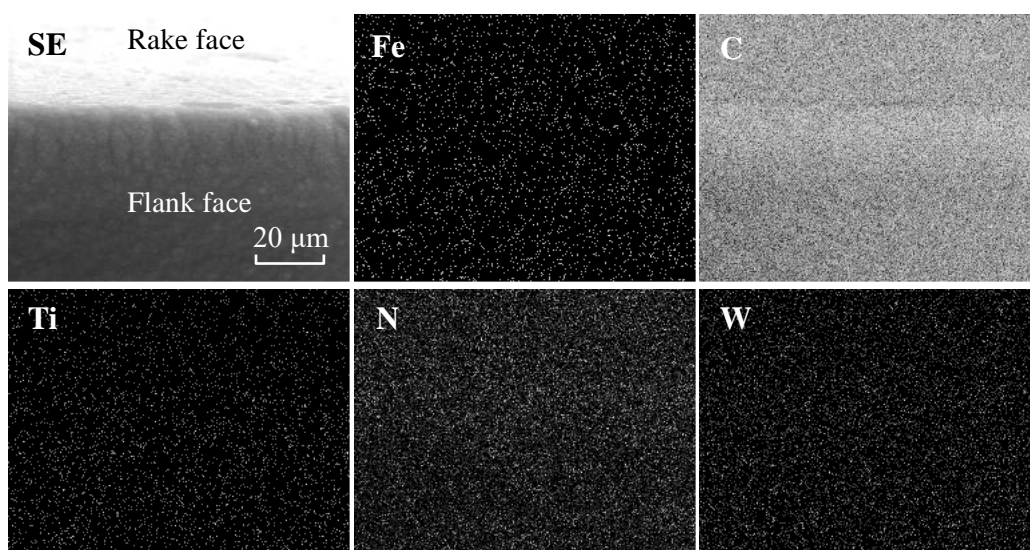


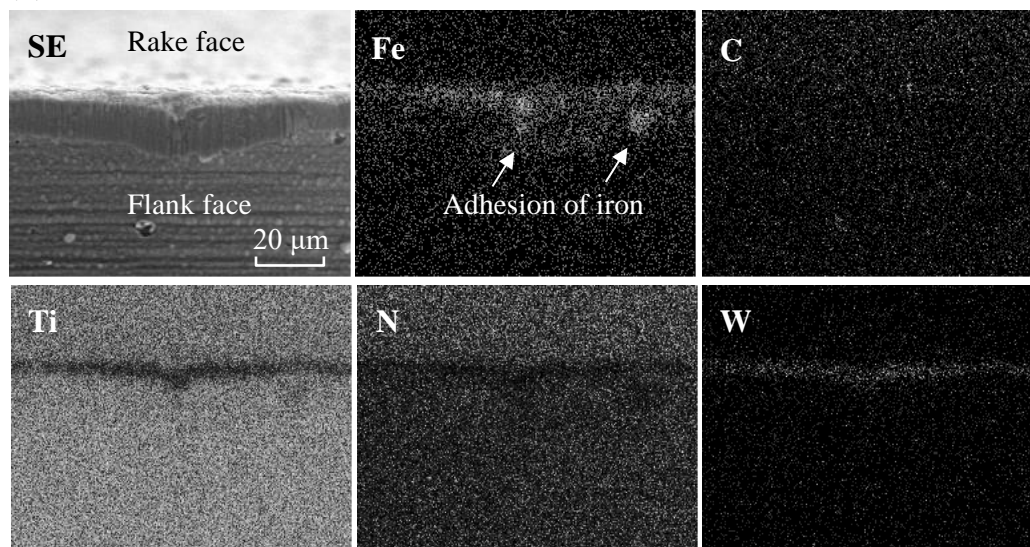
Fig. 3.6 Ratio of ploughing force in cutting force at a pick feed of 6 μm.

TiN コーティング工具で疑われる凝着について確認するため、加工後の工具の逃げ面を電子顕微鏡 (FEI 製 Quanta400) で EDS 元素マッピングを行った。何れの工具も、ミストを供給しながらの楕円振動切削で使用した。Fig. 3.7 に示すマッピングを見ると、ダイヤモンドコーティング工具は、切れ刃に大きな変化が見られず、鉄元素が凝集している部分が見られないのに対し、TiN コーティング工具は、逃げ面に摩耗が生じており、摩耗した部分で鉄元素の存在が確認できる。TiN コーティング工具は、ダイヤモンドコーティング工具と比較して鉄元素と凝着しやすい特性があることを補足する結果である。

**(a) Diamond-coated tool**



**(b) TiN-coated tool**

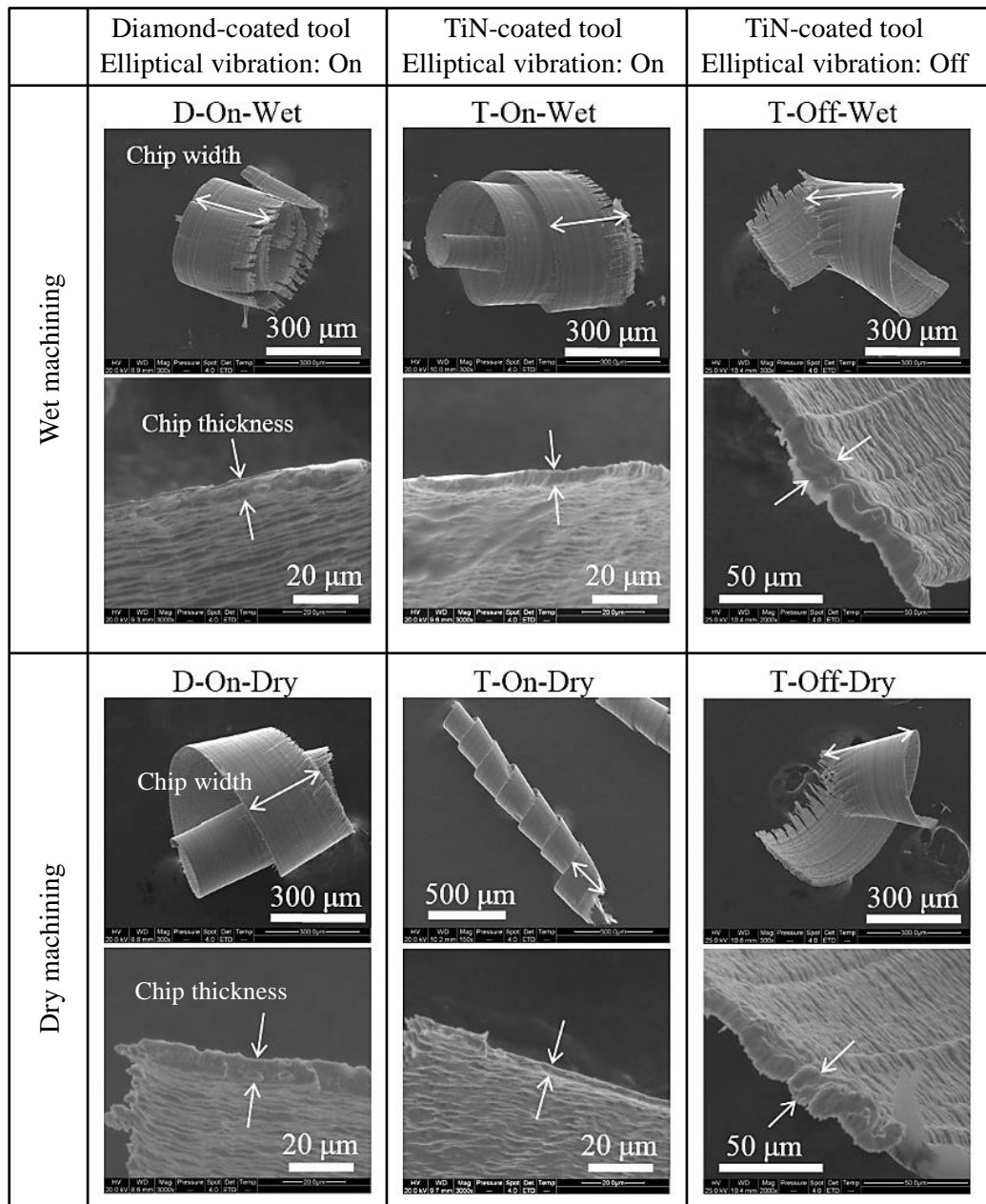


**Fig. 3.7** EDS element maps of flank face after scratch tests. SE: secondary electron image, Fe: iron, C: carbon, Ti: titanium, N: nitride, W: tungsten.

### 3.3 切削機構の考察

#### 3.3.1 切りくずの評価

切込み量 100  $\mu\text{m}$ , 送り量 5  $\mu\text{m}$  で加工した切りくずの SEM 画像を Fig. 3.8 に示す. 切削機構を検討するため SEM 画像をもとに切りくずの厚さと幅を測定した. 測定方法は, SEM 画像に対し切りくずの断面が垂直方向を向いている個所を探し, 3 点以上の平均値を求めた. 特に切りくずの幅は場所によってばらつきが大きい, その場合は幅が大きい方の部分で測定した. また, 測定した切りくずの断面は, 厳密な垂直方向



**Fig. 3.8** SEM images of chips (depth of cut: 100  $\mu\text{m}$ , pick feed: 5  $\mu\text{m}$ , cutting speed: 1 m/min).

を定義できるものではないため、コサインエラーを含む値であることに注意されたい。切りくずの厚さと幅の測定結果を Fig. 3.9, 3.10 にそれぞれ示した。TiN コーティング工具で楕円振動を使用したときのドライ切削“T-On-Dry”では、長くカールした切りくずが生成され、切りくずの厚さは実験中で最も薄い  $3\ \mu\text{m}$  であった。この結果は、Fig. 3.5 において“T-On-Dry”のプラウイング成分が特に背分力方向で著しく減少し、摩擦係数が約 0.77 と大きな値となった結果に対応する。通常の切削加工では、工具の摩擦係数が大きいほど薄い切りくずが生成されることは考えにくく、楕円振動する工具により切りくずを引き上げながら切削するために得られた結果と言える。すなわち、楕円振動切削では、振動する工具が切りくずから離れる直前に、切りくずを引き上げる方向に工具が振動する。これは、切りくずを生成する過程において、切りくずとすくい面の摩擦力が反転することを意味する。この反転した摩擦力により、通常の切削とは逆の傾向を示すこととなり、摩擦係数が大きいほど楕円振動で切りくずの生成を促す力が強くなり、前述のとおり切りくず厚と切削抵抗が減少した。ダイヤモンドコーティング工具では、切削液の有無によらず、切りくずの厚さが  $7\sim 8\ \mu\text{m}$  であった。これは、ドライ切削でも摩擦係数が約 0.2 と変化せず、楕円振動により切りくずを引き上げる力も変化しなかったためと考えられる。

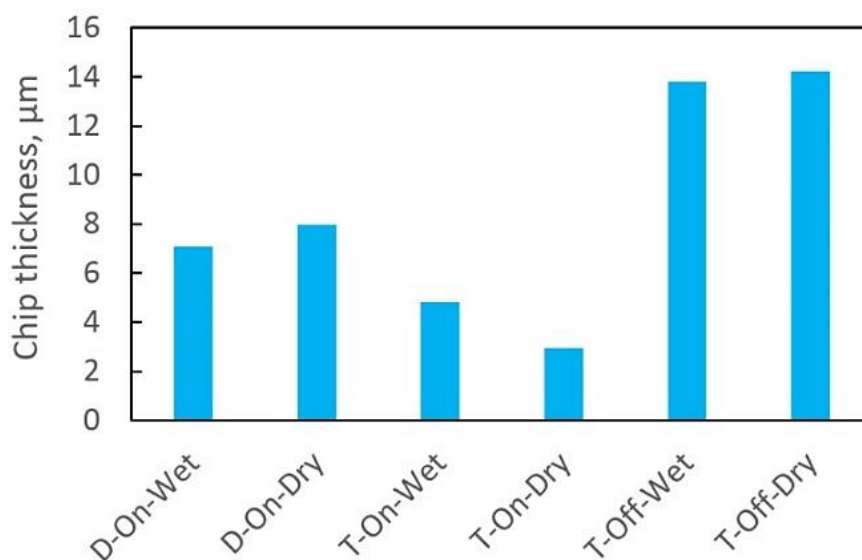


Fig. 3.9 Thickness of chips measured from SEM images.

切りくずの SEM 画像から測定した切りくずの幅を Fig. 3.10 に示す. 実験に使用した工具番号も図中に記した. 切りくずの幅の理論値は, Fig. 3.11 に概略図を示すとおり, 工具のノーズ半径, 切込み量, 送り量から切れ刃上の円弧の長さ  $291.6\ \mu\text{m}$  と求めた. この理論値と実測値を比較すると, 最大で  $40\ \mu\text{m}$  程度のずれが確認できる. この理論値とのずれは, 切れ刃形状の誤差とプラウイング成分による弾性変形に起因すると考えられるが, 同一の工具を使用した場合は, 切れ刃形状の誤差は同じであると考えるのが妥当である. ここで, TiN コーティング工具の“T-On-Wet”と“T-On-Dry”に着目すると, ドライ切削の“T-On-Dry”では切りくずの幅が  $290\ \mu\text{m}$  とほぼ理論値と同等であるのに対し, 加工液を使用した“T-On-Wet”では  $256\ \mu\text{m}$  と理論値より約  $36\ \mu\text{m}$  小さい. 両者の実験は同一の工具で実験したため, 切りくずの幅の違いは主にプラウイング成分による弾性変形に起因すると考えられる.

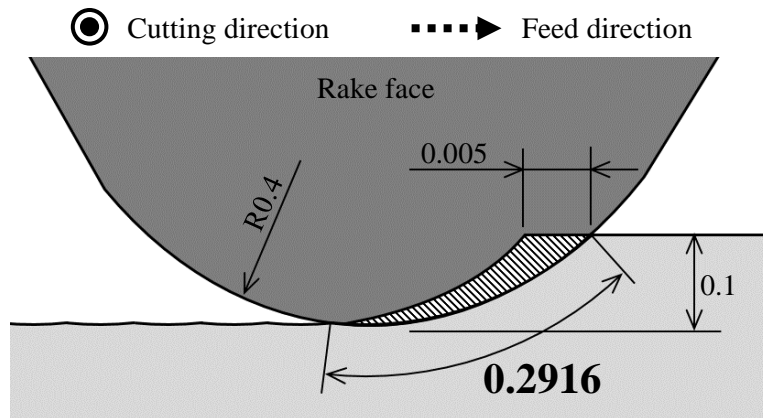


Fig. 3.11 Schematic drawing of chip width. (unit: mm)

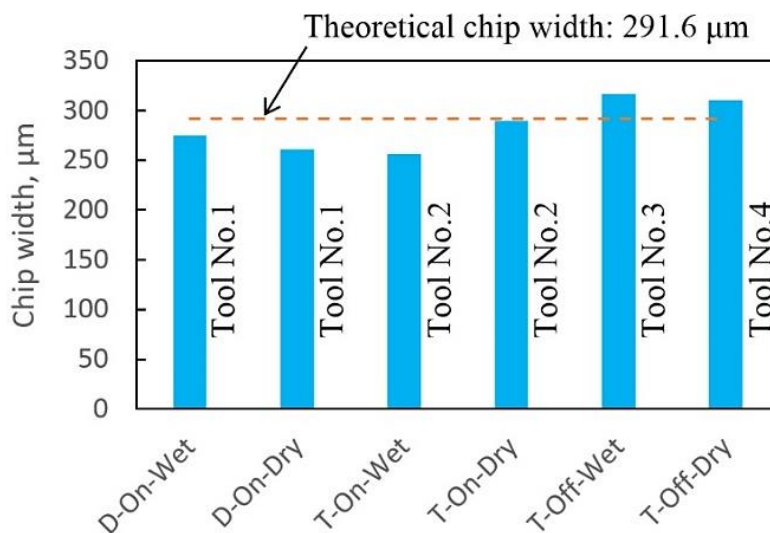


Fig. 3.10 Width of chips measured from SEM images.



“T-On-Dry”の条件で理論値に近い切りくずの幅が得られた理由を考察するため、Fig. 3.12 に2次元切削の概略図と切れ刃上のよどみ点 (Stagnation point) を示す。よどみ点とは、これまでの実験的な検証<sup>73-75)</sup>やFEM解析<sup>76)</sup>により、丸み半径を有する切れ刃で切削するとき、切りくずとして除去される材料と逃げ面の下にもぐり込み、弾性または塑性変形する材料とに分岐する点として知られている。ノーズ半径50mmの工具で高能率加工を検討したWangらの研究<sup>77)</sup>では、楕円振動切削においても、通常の切削加工と同様によどみ点を考えて、切削とプラウイングの境界について理論値と比較している。一方で楕円振動切削は、工具とワークが接触と乖離を繰り返すプロセスであるため、実際にはよどみ点も動的なものであると考えられる。Fig. 3.12 に楕円振動切削におけるよどみ点の概略図を示す。切削を終えた工具は、円または楕円軌跡で一度切りくずから離れる (Fig. 3.12(a))。空走した工具が再び切削を開始した直後は、切込み方向に工具を食い込ませる動作になるため、この時のよどみ点の位置は、通常の切削と同等であると考えられる (Fig. 3.12 (b))。工具が上昇に転じ、切りくずを引き上げる方向に移動すると、より多くの材料が切りくずとして排出されるため、よどみ点が下方に移動すると考えられる (Fig. 3.12 (c))。この様に、楕円振動切削におけるよどみ点は、動的なものであると考えられる。TiNコーティング工具を使用しドライで楕円振動切削した場合は、大きな摩擦係数により楕円振動で切りくずを引き上げる力が強まるため、より多くの材料が切りくずとして除去されることが考えられる。すなわち、楕円振動で工具が上昇する際に、Fig. 3.12(b)のよどみ点Sが、下方 (Fig. 3.12(c)におけるS')により大きく移動し、切りくずとして排出される領域が広がったため、理論値に近い幅の切りくずが生成されたと考えられる。Fig. 3.5で、背分力方向のプラウイング成分力が0.44Nと著しく小さいことも、この説明を裏付ける結果である。

TiNコーティング工具で楕円振動を使用せずに加工した“T-Off-Wet”と“T-Off-Dry” (通常の切削加工)における切りくずの幅は、310 $\mu\text{m}$ 以上と理論値の291.6 $\mu\text{m}$ より大きな値となった。Fig. 3.8に示す切りくず全体の画像を見ると、切りくずの流れ方向に沿って幅が変動している。これは、一刃の切り取り厚さと切りくずとして除去される領域、すなわち切れ刃上のよどみ点の変動していることを示唆する。この結果については、次項の仕上げ面の観察で考察する。

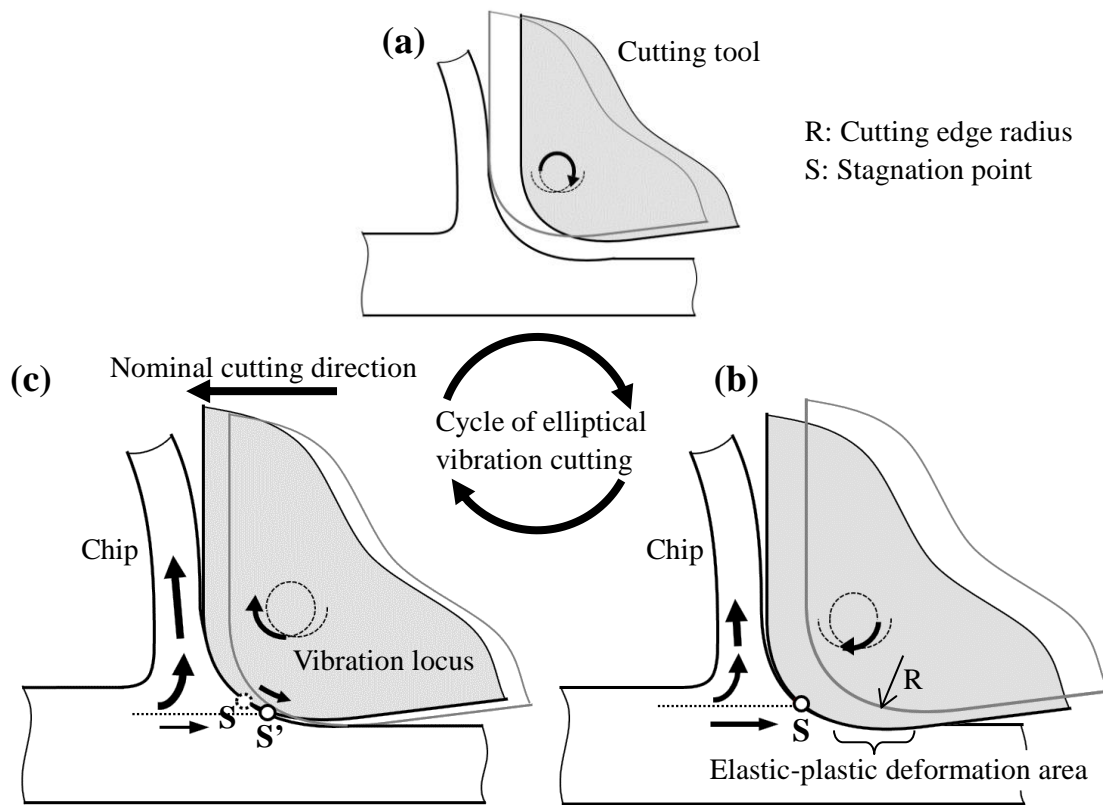
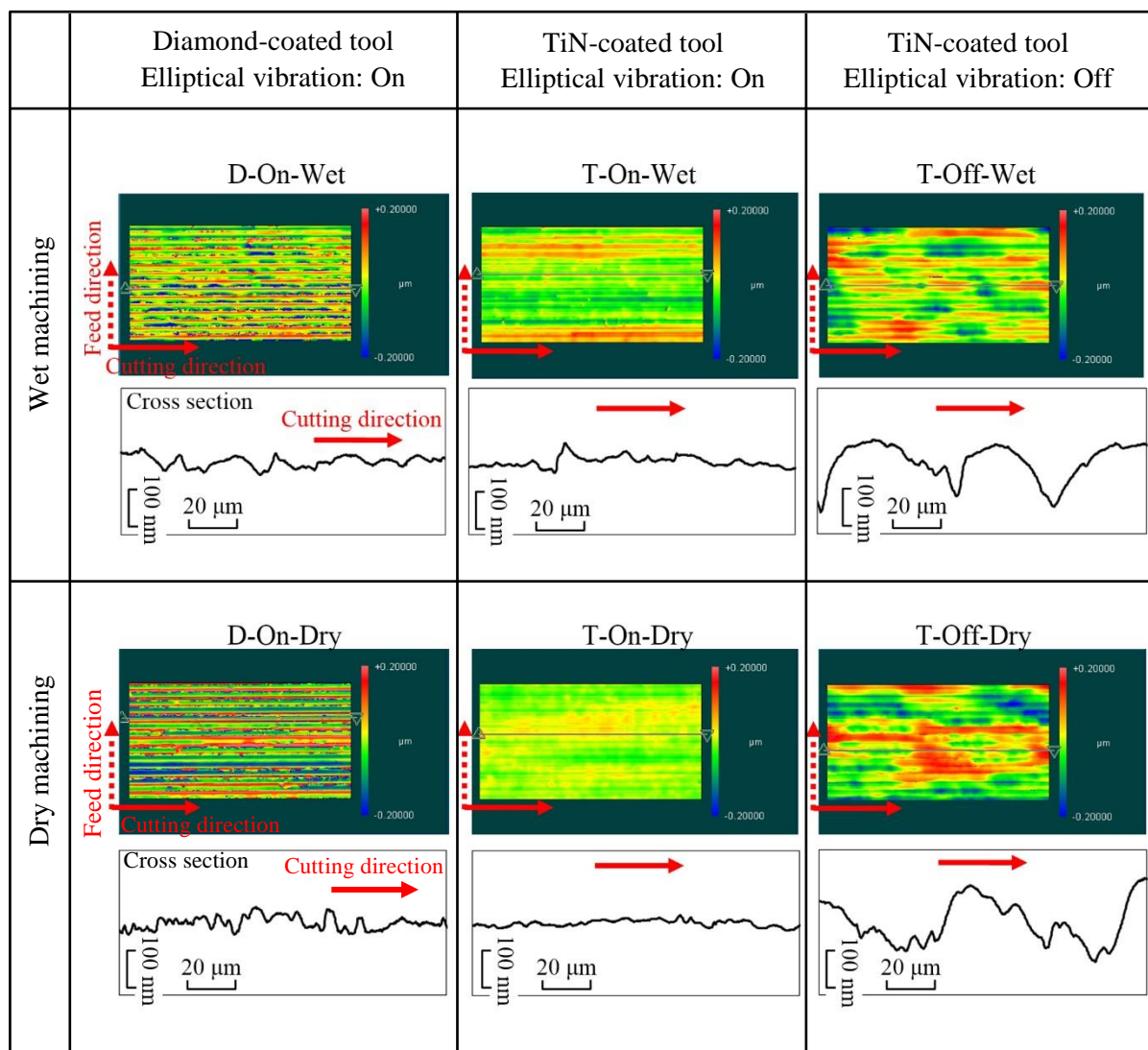


Fig. 3.12 Schematic illustration of stagnation point in elliptical vibration cycle.

### 3.3.2 仕上げ面の評価

Fig. 3.13 は、切込み量  $100\ \mu\text{m}$ 、送り量  $5\ \mu\text{m}$  で加工したときの面性状と、切削方向の表面粗さを表す。TiN コーティング工具による通常の切削加工、すなわち楕円振動を使用しない“T-Off-Wet”と”T-Off-Dry”では、切削方向の表面粗さが他の条件と比較して大きい。前項で述べたとおり、この条件では切りくずの幅が変動しており、切りくずとして除去される領域が切削中に変化した結果と考えられる。一方で、TiN コーティング工具を使用した楕円振動をドライで行った“T-On-Dry”では、切削方向の断面で鏡面レベルの表面粗さ  $Rt\ 0.044\ \mu\text{m}$  が得られた。この条件では、プラウイング成分が著しく減少し、理論値に近い幅の切りくずが生成されたことから、ワークと接する切れ刃上の材料が安定して除去されたと考えられる。ダイヤモンドコーティング工具の場合は、加工液の有無にかかわらず切削方向の表面粗さが TiN コーティング工具で切削液を使用した結果“T-On-Wet”と同等であったが、第 2 章の結果と同様に切れ刃丸みによるバリが確認された。



**Fig. 3.13** Surface profile of finished surface measured in the cutting direction.  
(depth of cut: 100  $\mu\text{m}$ , pick feed: 5  $\mu\text{m}$ , cutting speed: 1 m/min).

### 3.4 コーティング工具の耐久実験

#### 3.4.1 実験方法

プラウイング成分の解析を行った6種類の条件 (Table 3.2) の中から, “T-Off-Dry” を除いた5種類の条件と, ダイヤモンドコーティング工具で楕円振動を使用しない“D-Off-Wet” の合計6種類について耐久実験を行った. 実験条件を Table 3.3 にまとめた. “T-Off-Dry”, すなわち TiN コーティング工具を使用し, 通常の切削加工をドライで行うこの条件は, これまでの結果から摩擦係数や切削方向の表面粗さが大きく, 実用性が低いと予想されるため, 耐久実験は実施しないこととした. また, 前項まで行った摩擦係数の解析実験において, ダイヤモンドコーティング工具で楕円振動を使用しない条件を行わなかったのは, 摩耗が激しく安定した切削抵抗が測定できなかったため, 実施しなかった. 耐久実験で使用した装置の写真を Fig. 3.14 に示す. 使用した加工機は, ナガセインテグレックス製の超精密加工機 NIC-300 で, 多賀電気製の楕円振動切削装置 EL-50Σ を治具で固定して使用した. 楕円振動の条件は, これまでと同様に周波数約 40 kHz, 振幅 4  $\mu\text{m}_{\text{p-p}}$  の円軌道である. 加工したワークも前章と同じくロックウェル硬度 54 HRC に焼入れした金型鋼 Stavax で, Kistler 製の工具動力計 9256C に固定した. 加工条件は, 切込み量 100  $\mu\text{m}$ , 送り量 5  $\mu\text{m}$ , 切削速度 1 m/min 一定とし, 切削抵抗が初期の値に対し大幅に増加するか, コーティングの剥離などにより切削抵抗が急激に減少するまで行った. Table 3.4 に加工条件をまとめた. 実験後は, ニコン製の測定顕微鏡 MM-40/L3U で工具を観察した.

**Table 3.3** Various machining methods and their symbols for tool life tests.

Symbol	Coating of tool	Elliptical vibration	Cutting fluid
D-On-Wet	Diamond coating	On	Wet
D-On-Dry	Diamond coating	On	Dry
D-Off-Wet	Diamond coating	Off	Wet
T-On-Wet	TiN coating	On	Wet
T-On-Dry	TiN coating	On	Dry
T-Off-Wet	TiN coating	Off	Wet

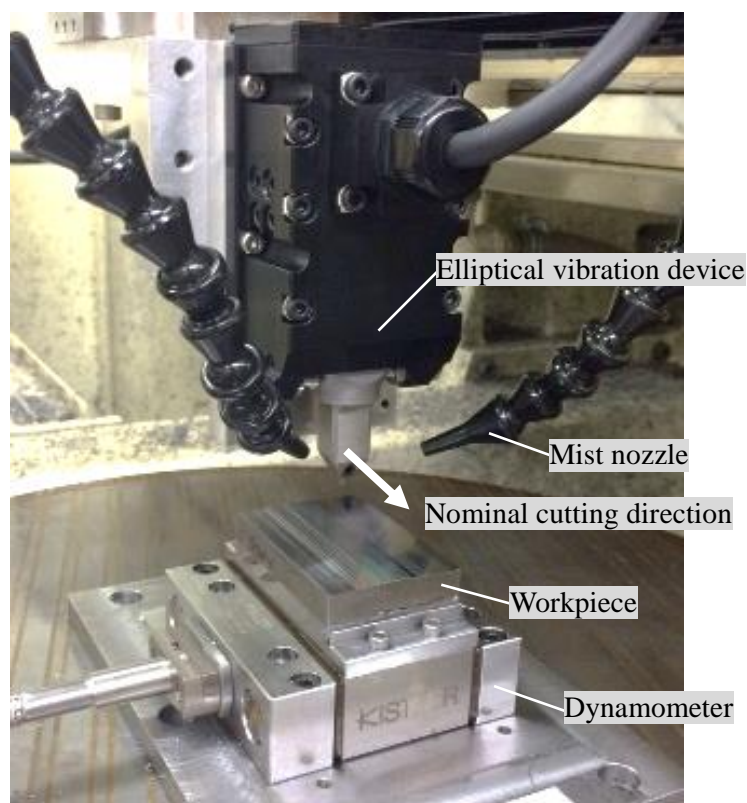


Fig. 3.14 Experimental setup for tool life tests.

Table 3.4 Cutting conditions of tool life tests

Cutting tool	Diamond-coated tool (nose radius: 0.4 mm) TiN-coated tool (nose radius: 0.4 mm)
Workpiece	Stavax (Modified SUS420J2) Rockwell hardness: 54 HRC
Depth of cut [ $\mu\text{m}$ ]	100
Pick feed [ $\mu\text{m}$ ]	5
Cutting speed [m/min]	1
Cutting fluid	Oil mist (Palace chemical, Nano-cut 9)

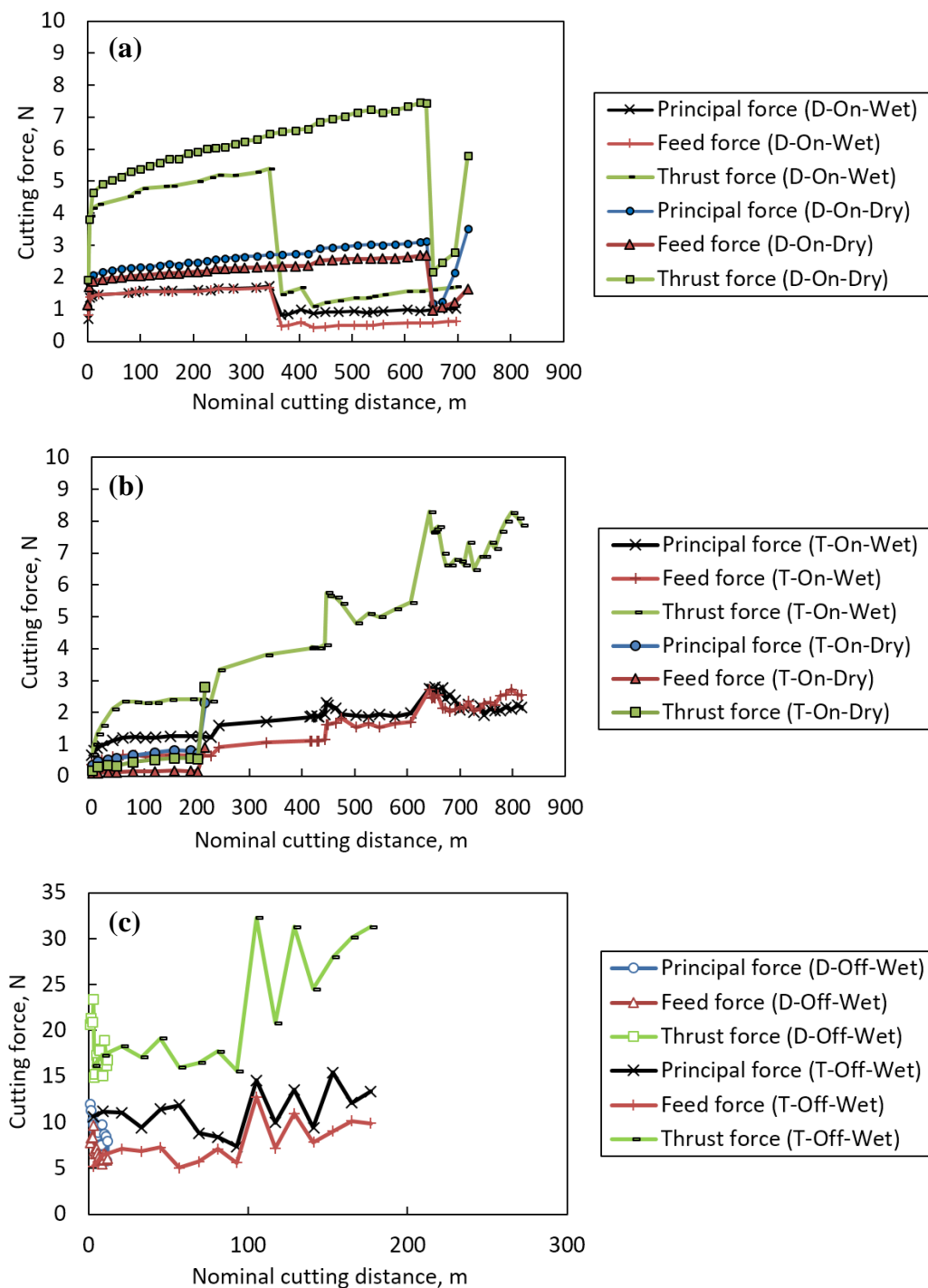
### 3.4.2 実験結果

Fig. 3.15 は見かけ上の切削距離に対する切削抵抗の推移である。見かけ上の切削距離とは、楕円振動の軌跡を考慮しない切削距離を意味し、加工した面積を送り量で除することで求められる。以降は、楕円振動を使用した場合でも見かけ上の切削距離で表すこととする。Fig. 3.16 は、加工後の工具をすくい面側と逃げ面側から測定顕微鏡で観察した結果である。図中の括弧の数値は、その工具で加工した切削距離を表す。また、逃げ面の画像から逃げ面摩耗量（切れ刃から最も摩耗した部分までの距離）を測定し、結果を矢印と共に示した。Fig. 3.15 (a)に示すダイヤモンドコーティング工具の切削抵抗を見ると、加工液の有無によらず切削距離 350 m までは同様の推移を示した。この結果は、これまで評価した切削抵抗およびブラウイング成分 (Fig. 3.4, 3.5)、摩擦係数 (Fig. 3.5)、切りくず (Fig. 3.8~3.10)、仕上げ面の状態 (Fig. 3.13) において、両者が類似した結果を示したことと一致する。それ以降は、加工液を使用した場合は切削距離 350 m、ドライの場合は 650 m の時点で切削抵抗が急激に減少しており、切れ刃に大きな変化が生じたことが推測される。加工後のダイヤモンドコーティング工具を見ると、コーティングの剥離が確認されることから、前述の切削抵抗の急激な減少は、コーティングの剥離によって切込み量が減少したことに起因すると考えられる。Fig. 3.15 (a)で加工液を使用した“D-On-Wet”の切削抵抗を見ると、剥離が発生したと考えられる 350 m 以降でも、1 N 程度の微小な切削抵抗が継続して観察された。“D-On-Wet”の剥離した工具を見ると、剥離は主にすくい面側で発生し、逃げ面側のコーティングは大部分が残っている。コーティングの厚さは、耐久実験の加工条件での最大切り取り厚さ 3.29  $\mu\text{m}$  よりも大きいため、逃げ面に残ったコーティングが新しい切れ刃として作用し、切削が継続したと考えられる。“D-On-Wet”の条件で使用したの工具の逃げ面を Fig. 3.16 で確認すると、切削距離 697 m まで継続して実験したにもかかわらず、逃げ面摩耗は TiN コーティング工具の“T-On-Wet”と比較して小さい。“D-On-Wet”での逃げ面摩耗量は、擦過した痕跡と思われる部分が約 30  $\mu\text{m}$  と他の条件より小さい値であった。金型鋼の楕円振動切削において、ダイヤモンドコーティング工具は高い耐摩耗性を有することが示された。剥離の抑制が今後の課題である。

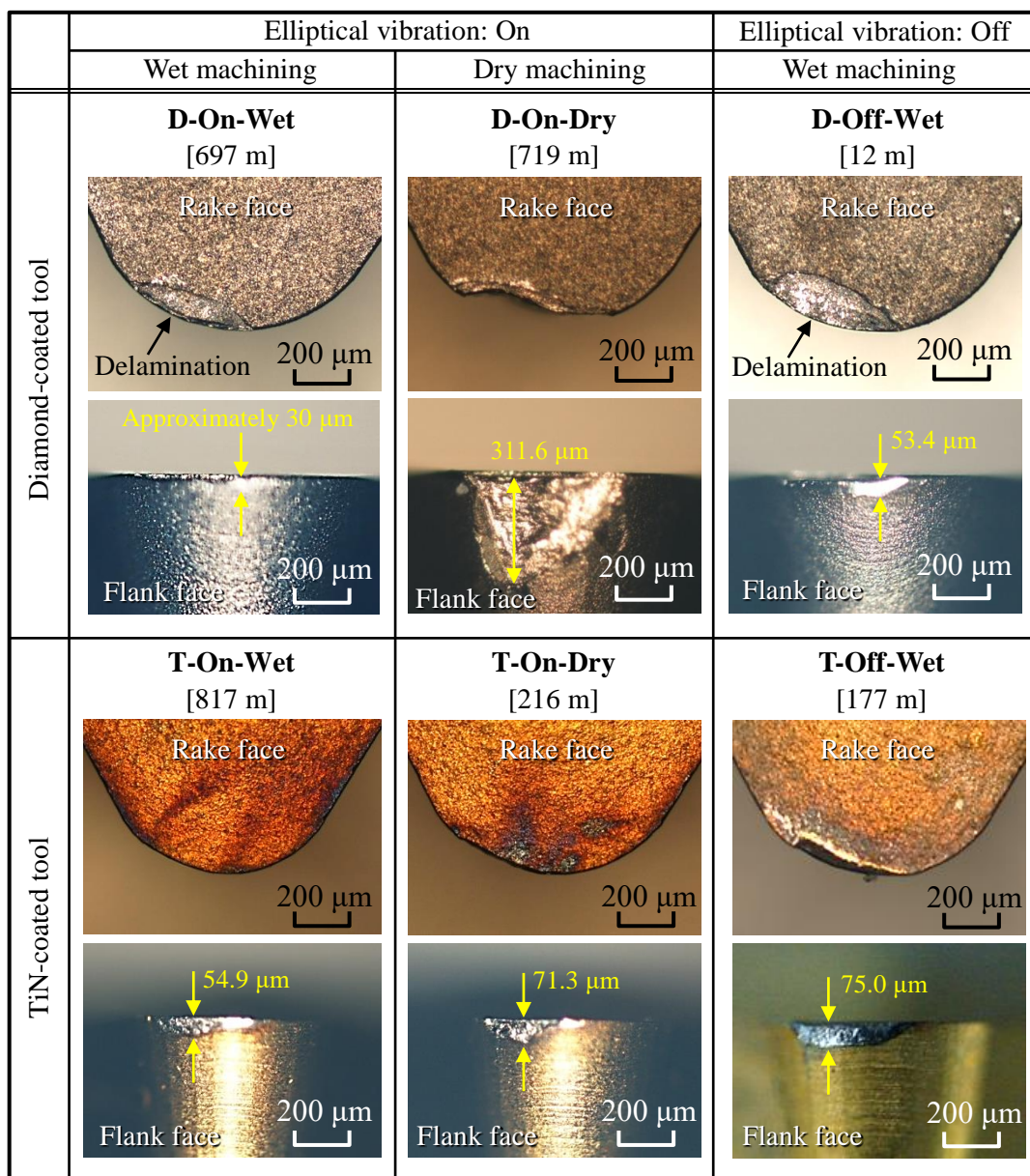
Fig. 3.15 (b), (c)に示す TiN コーティング工具の切削抵抗を見ると、切削液を使用した楕円振動切削“T-On-Wet”でのみ比較的良好な耐摩耗性を有しているが、切削抵抗は徐々に増加し、切れ刃丸みの大きいダイヤモンドコーティング工具と同等の値まで大きくなった。逃げ面摩耗量は 54.9  $\mu\text{m}$  で、前述の 697 m まで使用したダイヤモンドコーティング工具“D-On-Wet”よりも大きいものの、TiN コーティング工具で通常の切削加工を行った“T-Off-Wet”の 75.0  $\mu\text{m}$  と比較すると小さい。すなわち、楕円振動を使用

することにより切削抵抗が大幅に低減され、TiN コーティング工具でも工具摩耗の抑制に効果があることがわかった。切削液を使用しない“T-On-Dry”では良好な結果が得られず、切削抵抗は約 200 m の時点で急激に増加し、加工後の工具には 71.3  $\mu\text{m}$  の逃げ面摩耗が確認された。前項までの基礎実験では、“T-On-Dry”の条件は、Fig. 3.4 の切削抵抗の背分力が著しく小さく、Fig. 3.13 の表面粗さも鏡面レベルの良好な結果が得られたものの、耐久実験の結果から、工具寿命の観点では実用的な加工条件とは言えないことがわかった。Fig. 3.15 (c)はダイヤモンドコーティング工具と TiN コーティング工具で通常の切削加工を行ったときの切削抵抗である。縦軸と横軸のスケールが Fig. 3.15 (a), (b)とは異なることに注意されたい。加工開始時から切削抵抗が大きく、何れの工具でも背分力は約 15 N 以上と楕円振動を使用した場合より 1 桁大きい。ダイヤモンドコーティング工具の場合は、切削距離 3 m の時点で背分力が 23 N から 15 N まで急減した。Fig. 3.16 に示す加工後の工具は、切削距離 12 m にもかかわらず、コーティングの剥離と 53.4  $\mu\text{m}$  の逃げ面摩耗が確認された。島田らの報告<sup>19)</sup>にあるとおり、鉄系材料との熱化学的な親和性が原因と考えられる。TiN コーティング工具の場合は、切削距離約 100 m の時点で背分力が 32 N まで上昇した。加工後の工具には、切削距離が 177 m と短いにもかかわらず著しい工具摩耗（逃げ面摩耗量 75.0  $\mu\text{m}$ ）が確認された。Fig. 3.5 で摩擦係数が 0.5 以上と大きい“T-On-Dry”と“T-Off-Wet”の耐久実験では、いずれも工具寿命が短く、摩擦係数は工具摩耗に影響することが確認された。





**Fig. 3.15** Cutting forces plotted against nominal cutting distance. (a): Diamond-coated tools, (b): TiN-coated tools (elliptical vibration: On), (c): Diamond-coated and TiN-coated tools (elliptical vibration: Off).



**Fig. 3.16** Photographs of cutting edges after tool life tests (bracketed numbers show nominal cutting distances).

### 3.5 コーティング工具の特性の比較

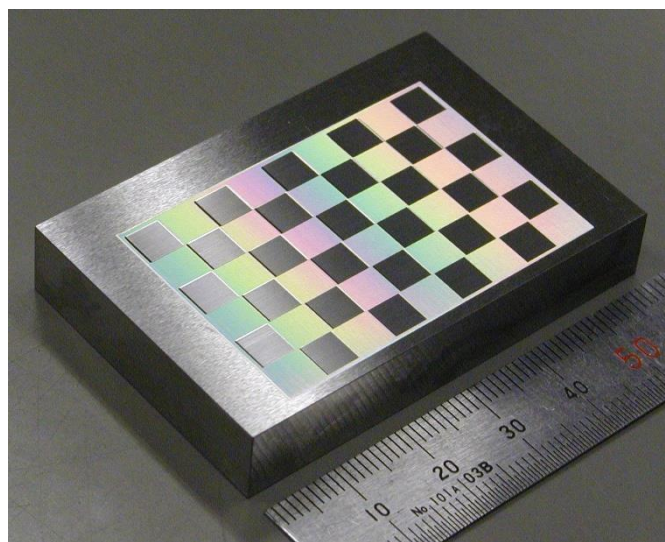
第2章と第3章では、金型鋼の楕円振動切削に2種類のコーティング工具を使用し、楕円振動の有無、加工液の有無で切削性や耐久性を比較した。実験結果から明らかになった各コーティング工具の長所と短所を、単結晶ダイヤモンド工具と比較しながらTable 3.4にまとめた。TiNコーティング工具は鉄系の被削材と大きい摩擦係数を有しており、ドライの楕円振動切削において特に背分力が小さくなることがわかった。これは、楕円振動切削によって切りくずが強く引き上げられるためである。背分力が小さくなるこの加工条件は、薄壁や細長い形状などの低剛性材料の加工において有効な加工手段として期待されるが、耐久実験の結果から、大きい摩擦係数により工具寿命が短いという問題がある。硬度の高い金型鋼などのワークに対しては、耐久性を考慮するとTiNコーティング工具は加工液と共に使用する必要がある。次に、ダイヤモンドコーティング工具は、楕円振動を使用することにより鉄系材料の加工における激しい摩耗を抑制でき、高い転写性や耐摩耗性を有することがわかった。しかし、仕上げ面の表面粗さは大きく、切削抵抗も大きい。切削距離数百mで発生したコーティングの剥離も課題の一つである。現時点では、完全な工具は存在せず、今後も課題解決に向けた取り組みが必要である。その一つとして、第4章で述べるダイヤモンドコー

**Table 3.4** Advantages and disadvantages of cutting tools in elliptical vibration cutting of die steel.

Cutting tool	Advantages	Disadvantages
TiN-coated tool	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Cheap</li> <li>● Fairly good surface roughness can be obtained in the wet elliptical vibration cutting</li> <li>● Cutting forces especially thrust force become small in the dry elliptical cutting because of the high friction property</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Bad transferability of cutting edge profile to workpiece</li> <li>● Low wear resistance especially in the dry elliptical vibration cutting</li> </ul>
Diamond-coated tool	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Lower manufacturing cost compared with other diamond tools</li> <li>● Good transferability of cutting edge profile to workpiece</li> <li>● Superior wear resistance against die steel</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Higher surface roughness of finished surface</li> <li>● Large cutting forces</li> <li>● Coating delamination on rake face after cutting of several hundred meters</li> </ul>
Single-crystalline diamond tool	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Mirror surface finish</li> <li>● Superior wear resistance against die steel</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Expensive</li> </ul>

ティング工具の鋭利化処理は、表面粗さの改善やコーティングの剥離抑制につながる技術として期待される。

以上の実験結果を踏まえ、加飾金型を想定した試作品の写真を Fig. 3.17 に示す。本章の加工実験と同じ金型鋼の Stavax に対し、ダイヤモンドコーティング工具による楕円振動切削で (Table 3.2 における“D-On-Wet”), 格子状に微細溝を加工した。加工形状は、5 mm 間隔の格子模様となる様に、互いに直交する方向に送り量 10  $\mu\text{m}$  で微細溝を切削した。高い転写性による均一なカッターマークが光の回折を発現し、切削方向の違いで光の回折が交互に現れている。金型産業における意匠性金型加工の一つとして応用が期待される。



**Fig. 3.17** Photograph of check pattern surface finished by the wet elliptical vibration cutting with diamond-coated tool (Stavax with hardness of 54 HRC, pick feed: 10  $\mu\text{m}$ ).

### 3.6 結言

金型鋼の楕円振動切削にダイヤモンドコーティング工具と TiN コーティング工具を使用したときの切削機構を明らかにするため、コーティング材種、楕円振動の有無、加工液の有無の組み合わせで加工実験を行った。切削抵抗に含まれるプラウイング成分の解析、工具の摩擦係数の算出、切りくずや加工面の解析を行い、各加工条件における切削機構について検討した。さらに、実用性を検証するための耐久実験も行った。以下に得られた結果を示す。

- 1) ダイヤモンドコーティング工具の摩擦係数は、切削液の有無にかかわらずおよそ 0.2 と小さい値であった。TiN コーティング工具は、楕円振動切削に加工液を供給した場合のみ摩擦係数が 0.2 と小さいのに対し、ドライ加工の場合は約 0.56 まで上昇した。これは、楕円振動の周期が 25  $\mu\text{s}$  と短いにもかかわらず、切削液またはその蒸気が工具とワークの間に浸透していることを示唆する。
- 2) TiN コーティング工具による楕円振動切削をドライで行った場合、切りくずの厚さと切削抵抗の背分力が減少し、鏡面レベルの表面粗さ Rt 0.044  $\mu\text{m}$  が得られた。ドライ加工の方が良好な表面粗さが得られるこの特異な現象は、楕円振動によって、すくい面と切りくずに働く摩擦力が反転し、切れ刃上のよどみ点 (Stagnation point) が変化することで説明できる。一方で、鏡面に近い表面粗さが得られるものの、工具寿命の観点からは実用的な加工条件とは言えない。
- 3) 耐久実験の結果、ダイヤモンドコーティング工具は、切削距離 350 m または 650 m でコーティングの剥離が発生した。剥離は主にすくい面で発生したため、逃げ面に残ったコーティングで切削距離 680 m まで加工が継続された。加工後の逃げ面摩耗量はおよそ 30  $\mu\text{m}$  で、TiN コーティング工具の逃げ面摩耗量 54.9  $\mu\text{m}$  よりも小さい結果であった。ダイヤモンドコーティング工具は高い耐摩耗性を有することが示された一方で、剥離抑制が今後の課題である。
- 4) 高い転写性を有するダイヤモンドコーティング工具を使用し、光の回折が交互に発現するよう切削方向を変えた格子状の加工サンプルを作製し、意匠性金型への応用事例を示した。

## 第4章 ダイヤモンドコーティング工具の鋭利化処理

### 4.1 Pulse Laser Grinding による鋭利化処理

第2章の結果より、金型鋼の楕円振動切削にダイヤモンドコーティング工具を使用した場合、切れ刃形状の転写性はTiNコーティング工具より高い結果が得られたものの、切れ刃には半径16 $\mu\text{m}$ 程度の丸みがあり、表面粗さはTiNコーティング工具より大きい結果であった。ダイヤモンドコーティング工具による加工面には一様なバリが生成され、表面粗さを悪化させる原因になったものの、同時に光の回折が得られることがわかった。一方で、ダイヤモンドコーティング工具で鏡面加工を目指す場合は、切れ刃の鋭利化が不可欠である。切削加工において、切れ刃の鋭利さや輪郭精度は、加工面に与える影響が大きいため、これまで多数の研究がなされてきた。鈴木らの研究<sup>78,79)</sup>では、ダイヤモンドの熱化学的な摩耗を逆に利用し、モリブデンをツルアとして利用して焼結ダイヤモンドを研磨した。CVDダイヤモンド被膜やダイヤモンドコーティング工具の研磨も検討されており、ツルアとして鉄系材料やチタン、ニッケルを用いる手法<sup>80,81)</sup>、ダイヤモンド砥石でダイヤモンドコーティング工具を研磨する手法<sup>82,83)</sup>、石英ガラスにUVをアシストして研磨する手法<sup>84)</sup>が報告されている。市販の単結晶ダイヤモンド工具もスカイフ盤とよばれる鉄製の円盤に押し当てて研磨すると言われ<sup>85)</sup>、熱化学的な作用を利用してツルアで研磨する手法は、滑らかな表面を得るために有効であると考えられるが、コーティング工具の場合は、機械的な負荷によるコーティングの剥離が懸念される。そこで近年注目されるのが、レーザーを用いた研磨技術である。レーザーを用いる場合は、ダイヤモンドの結晶方位によらず研磨できるため、単結晶ダイヤモンドのみならず、チップングに強いナノ多結晶ダイヤモンド工具の研磨にも用いられている<sup>86-89)</sup>。更に、機械的な研磨よりも小さい負荷で研磨できると考えられ、コーティング工具に適する手法と言える。本章では、安価なコーティング工具による金型鋼の鏡面切削を目的に、パルスレーザーを用いる手法でダイヤモンドコーティング工具を鋭利化し、金型鋼の楕円振動切削実験を行った。

### 4.1.1 鋭利化処理方法

Fig. 4.1 に本研究で使用した鋭利化方法の概略図を示す。パルスレーザーでダイヤモンドコーティングの被膜を平滑にする技術<sup>66-68)</sup> (Pulse Laser Grinding, 以下 PLG) で、研磨する面に対し浅い角度でレーザー照射し、面に沿ってレーザーを走査するのが特徴である。研磨する面に対し垂直方向からレーザーを照射する従来の方法<sup>90)</sup>に対し、加工能率、表面粗さにおいて優位性が高い方法と言える。パルスレーザーの条件を Table 4.1 にまとめた。光源には YAG レーザーを使用し、波長は 3 次高調波の 355 nm を使用した。この PLG によって、すくい面と逃げ面を平滑に研磨し、切れ刃を鋭利化した。Fig. 4.1 (a) はすくい面を研磨するときの概略図である。8° の浅い角度でレーザーを照射し、切れ刃と平行に走査した。Fig. 4.1 (b) は逃げ面を研磨するときの概略図である。逃げ面の場合は、レーザーの走査を、互いに 5° で交わる 2 方向に沿って行った。2 方向の走査によって、開き角 175° の直線切れ刃 2 本を有する切れ刃が得られる。ダイヤモンドコーティングの膜厚は 10 μm と仮定し、研磨の深さは 5 μm 程度を狙い、母材の超硬合金が露出しないように切込み量を制御した。Fig. 4.2 は鋭利化した切れ刃の SEM 画像である。母材が露出することなく、ダイヤモンドコーティングを平滑に研磨できていることが確認できる。処理前のすくい角と逃げ角はカタログ値で 0° と 11° であるため、PLG で研磨した切れ刃のすくい角は若干負の値となり、逃げ角は 0° に近い値となる。この 0° に近い逃げ角で加工すると、逃げ面がワークと干渉する

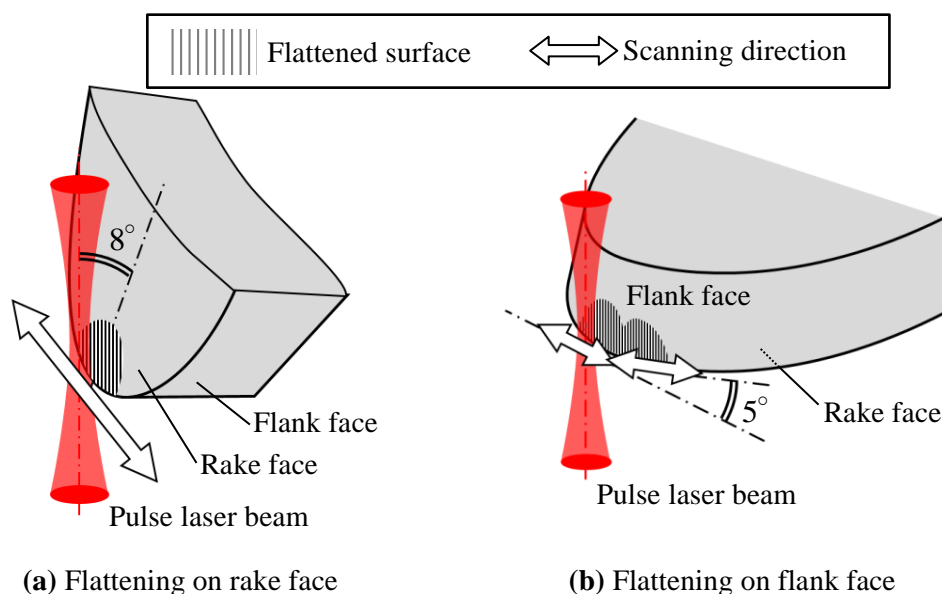


Fig. 4.1 Schematic illustration of PLG process.



ことが懸念されるため、加工実験の際は楕円振動装置を切削方向に  $10^\circ$  前傾させて実験した。

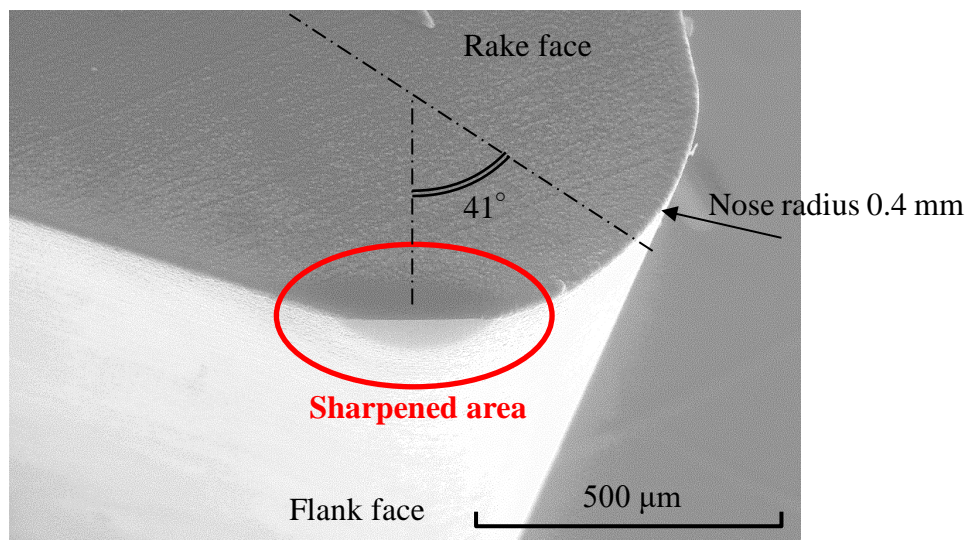


Fig. 4.2 SEM image of diamond-coated tool sharpened by PLG process.

Table 4.1 Pulse laser grinding conditions

Wave length [nm]	355
Pulse length [ns]	5
Frequency [Hz]	15000
Power [W]	2.8
Spot diameter [ $\mu\text{m}$ ]	20
Power density [ $\text{GW}/\text{cm}^2$ ]	11.8
Scanning speed [mm/s]	30
Number of scanning [times]	5

### 4.1.2 鋭利化した切れ刃の評価

PLG で鋭利化したダイヤモンドコーティング工具と通常のダイヤモンドコーティング工具の SEM 画像と切れ刃の断面形状を Fig. 4.3 に示す。断面形状は Zygo 製の非接触表面形状測定機 NewView7300 で測定した。断面 A は切れ刃に対し直角方向の断面形状を示す。通常のダイヤモンドコーティング工具の切れ刃には、半径 20  $\mu\text{m}$  前後の丸みがあるのに対し、PLG で鋭利化した工具は Fig. 4.3 の倍率では丸みが確認できない程度まで鋭利な切れ刃が得られている。また、レーザーを浅い角度で照射して研磨したため、すくい角は負の値となり、逃げ角はおよそ  $0^\circ$  となっていることが確認でき

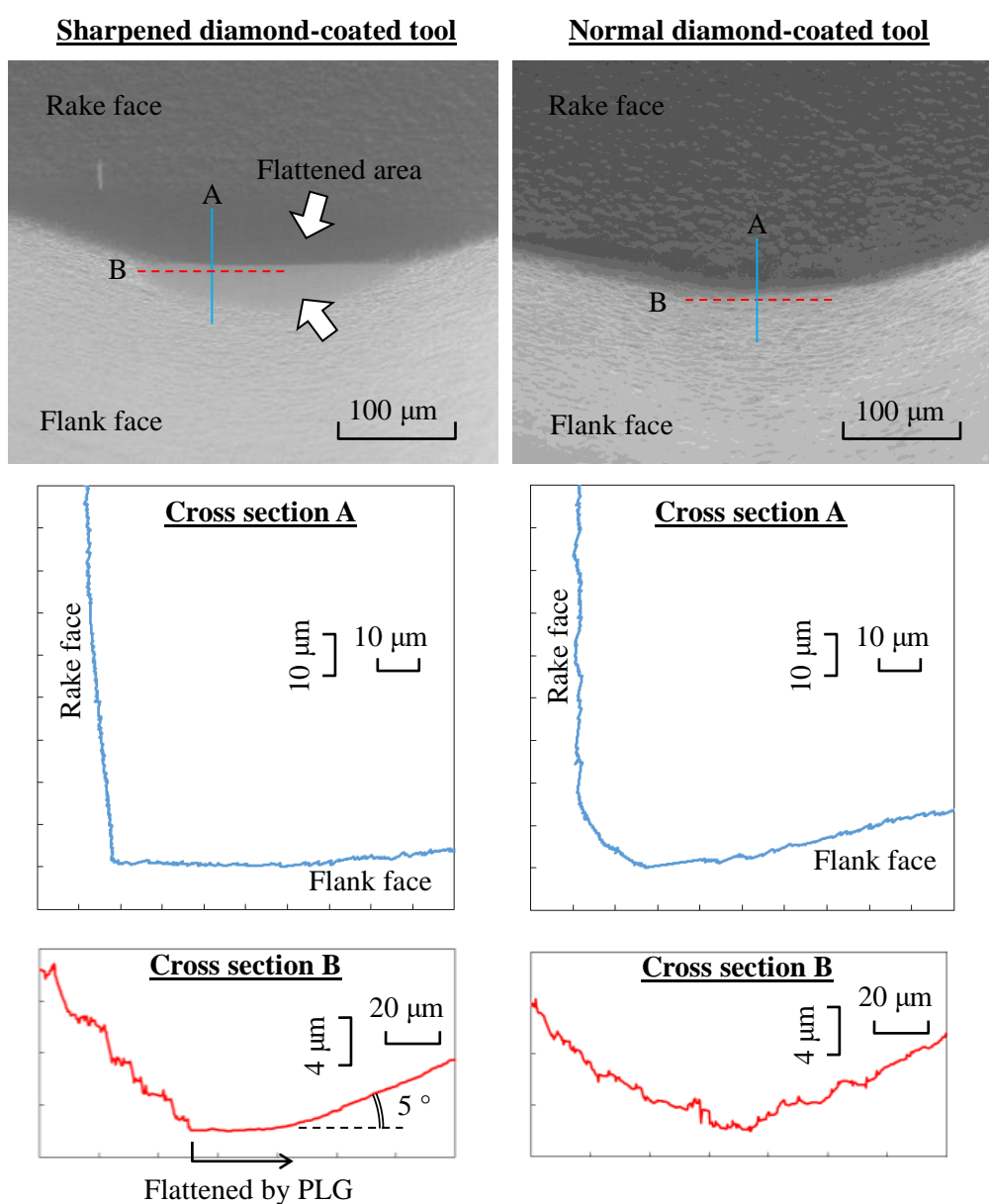


Fig. 4.3 SEM images and profiles of diamond-coated tools.

る。断面 B は切れ刃に対し平行な断面形状を示す。PLG で鋭利化した工具は、Fig. 4.1 (b)の狙いどおり、互いに  $5^\circ$  で交差する 2 つの平面が創生されていることが確認できる。通常のダイヤモンドコーティング工具の逃げ面には、 $\mu\text{m}$  オーダーの凹凸があり、第 2 章、第 3 章の実験結果から明らかなように、鋭利化しない状態では鏡面加工が難しいと言える。

## 4.2 PLG で鋭利化した工具による加工実験

### 4.2.1 実験方法

PLG で鋭利化したダイヤモンドコーティング工具を使用し、楕円振動切削による金型鋼の平削り実験を行った。Fig. 4.4 に実験装置の写真を示す。多賀電気製の楕円振動装置 EL-50 $\Sigma$ をナガセインテグレックス製超精密加工機 N2C-53US4N4 に治具で固定し、平面形状に楕円振動切削実験を行った。使用した工具は、PLG で切れ刃を鋭利化したダイヤモンドコーティング工具と、鋭利化していない通常のダイヤモンドコーティング工具の 2 種類である。PLG で鋭利化した工具は、Fig. 4.3 の断面 A に示すとおり逃げ角がおよそ  $0^\circ$  であるため、楕円振動装置を切削方向にリード角  $10^\circ$  で前傾させ、逃げ面の干渉を回避した。Fig. 4.2 に示すとおり、PLG で鋭利化した部分は、ノーズ半径の先端から約  $41^\circ$  の場所に位置する。この場所に創生された直線状の切れ刃を送り方向に対して平行にするため、楕円振動装置も同じ角度傾斜させて固定した。傾斜角度の調整では、無酸素銅のワークに対し試し加工を行い、鋭利化した直線切れ刃が数十 nm レベルで送り方向と平行になるように調整した。

楕円振動装置の角度調整を行った後、PLG で鋭利化したダイヤモンドコーティング工具と、ノーズ半径 0.4 mm の鋭利化していない通常のダイヤモンドコーティング工具の 2 種類を使用し、金型鋼 Stavax のワークに対し楕円振動切削実験を行った。ワークのサイズは  $20 \times 13$  mm、ロックウェル硬度は 54 HRC である。ワークは Kistler 製工具動力計 9256C に固定し、切削抵抗 3 分力を測定した。加工条件を Table 4.2 にまとめた。切込み量  $10 \mu\text{m}$ 、切削速度 1 m/min 一定とし、送り量を  $5 \mu\text{m}$  から  $80 \mu\text{m}$  に変化させて実験した。切削液はフジ BC 技研製の油性切削液 Bluebe LB-10 をミスト給油した。加工面の表面粗さは Zygo 製の非接触表面形状測定機 NewView7300 で最大高さ Rt を測定した。

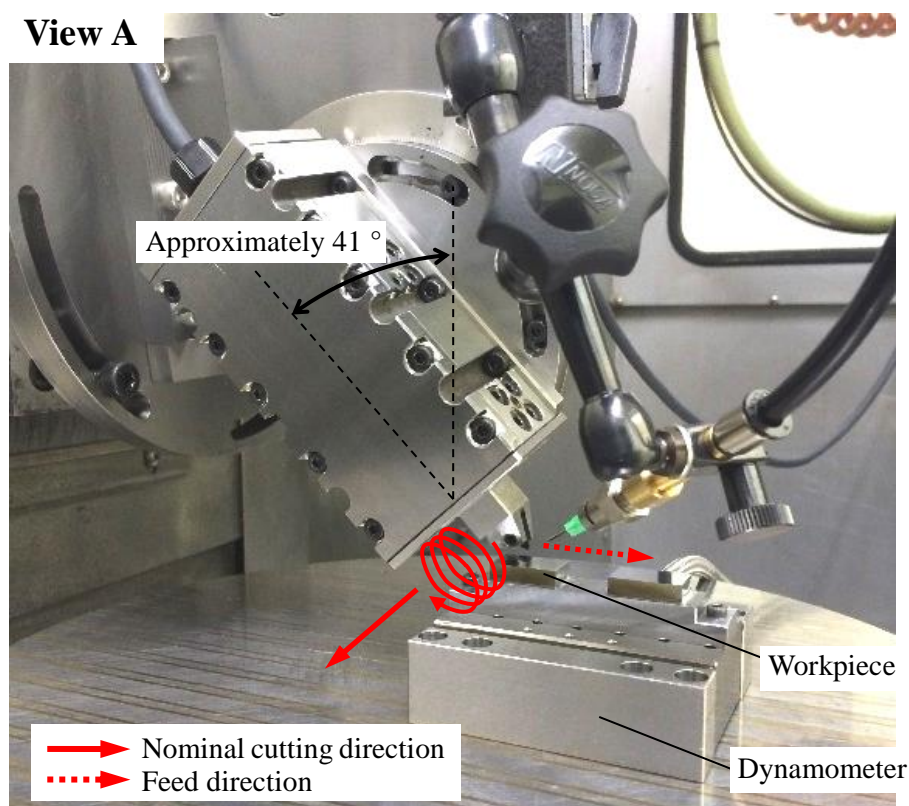
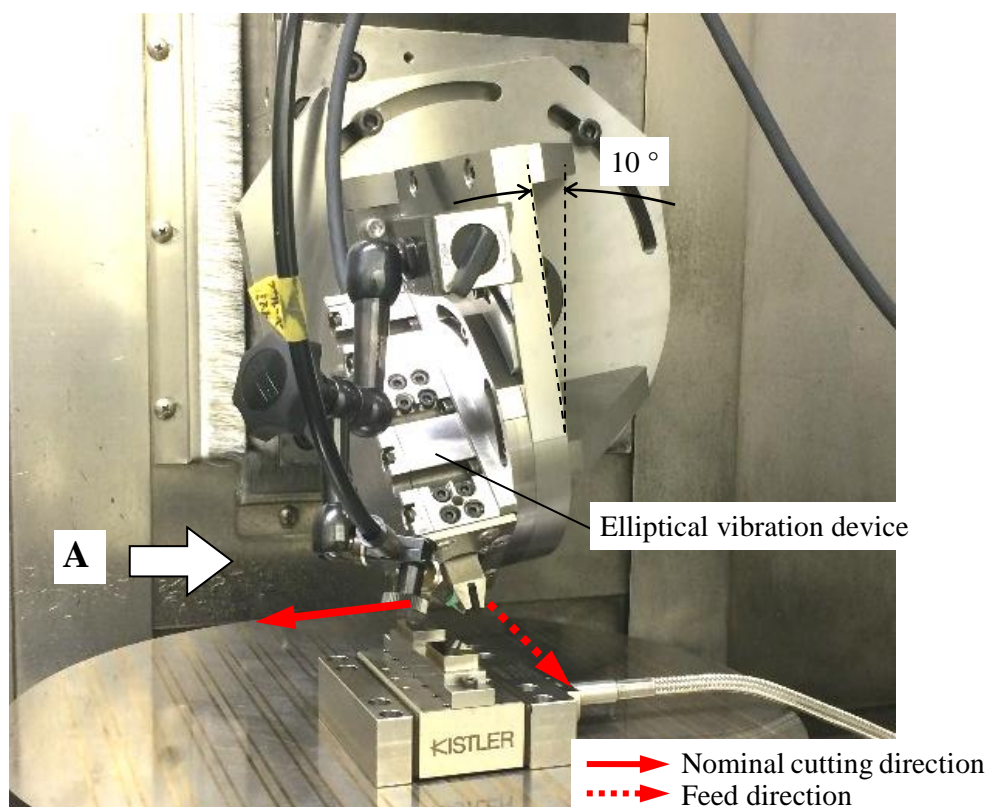


Fig. 4.4 Setup for planing experiments.

Table 4.2 Cutting parameters and vibration parameters

Cutting parameters	
Depth of cut [ $\mu\text{m}$ ]	10
Pick feed [ $\mu\text{m}$ ]	5,10, 20, 40, 60, 80
Cutting speed [m/min]	1
Coolant	Oil mist (Bluebe LB-10)
Vibration parameters	
Frequency [kHz]	Approximately 40
Amplitude [ $\mu\text{m}_{p-p}$ ]	4
Phase shift [deg.]	90 (circle)

#### 4.2.2 実験結果

Fig. 4.5 は送り量を変化させたときの切削抵抗である。通常のダイヤモンドコーティング工具と比較し、PLG で鋭利化した工具の切削抵抗は何れの送り量でも小さい。特に送り分力と背分力が小さく、鋭利化した工具の結果は通常の工具のおよそ 3 分の 1 である。鋭利化により切れ刃の丸みが減少したためと考えられる。さらに、鋭利化した工具により送り量 80  $\mu\text{m}$  で加工したときの送り分力は、平均で -0.005 N と負の値を示した (5 つのデータの平均値を示すが、何れのデータも -0.011 ~ -0.002 N の範囲であった)。これは、41° に傾斜した楕円振動により、切りくずの引き上げ力が送り方向にも働いたためと考えられる。

Fig. 4.6 は切削抵抗を切削断面積で除した比切削抵抗を示す。通常のダイヤモンドコーティング工具は背分力が大きく、送り量 5  $\mu\text{m}$  において背分力が 17400 MPa となった。切れ刃丸みに対し最大切り取り厚さが小さいため、負のすくい角で切削した影響と考えられる。送り量の増加に伴ない切れ刃丸みの影響も小さくなり、何れの工具でも比切削抵抗が減少する。PLG で鋭利化した工具は、送り量 80  $\mu\text{m}$  のときの主分力、送り分力、背分力がそれぞれ 1000, -5.7, 740 MPa まで減少した。

送り量と表面粗さ  $R_t$  の関係を Fig. 4.7 に示す。PLG で鋭利化した工具では、何れの送り量でも表面粗さが小さく、送り量 5  $\mu\text{m}$  の時に最も小さい表面粗さ  $R_t$  0.07  $\mu\text{m}$  が得られた。さらに、PLG で鋭利化した工具では、送り量を 40  $\mu\text{m}$  まで増加させても表面粗さが  $R_t$  0.14  $\mu\text{m}$  以下を維持した。鋭利化しない通常の工具では、同じ送り量において  $R_t$  0.64 ~ 1.40  $\mu\text{m}$  である。ここで、Fig. 4.7 に点線で示すノーズ半径 0.4 mm の場合の理論粗さと比較すると、第 2 章の Fig. 2.8 と同様に、鋭利化していないダイヤモンドコーティング工具では理論粗さより 0.6 ~ 2  $\mu\text{m}$  程度大きい。Fig. 4.8 (a), (b) に PLG によ

鋭利化前後での理論粗さの概略図を示す。PLGで鋭利化した工具は直線状の切れ刃を有するため、切れ刃の精度、工具の取り付け誤差、機械の運動精度が理想的な状態であると仮定すると、送り量が切れ刃長さの範囲内では、理論粗さが $0\mu\text{m}$ となる。しかし、実際にはこれらの精度には誤差があり、表面粗さは $Rt\ 0.07\sim 0.14\mu\text{m}$ となった。金型の曲面加工を考慮すると、将来的には、PLGによる鋭利化技術が曲率を持った切れ刃に適用されることが望まれる。ノーズ半径 $0.4\text{mm}$ での理論粗さをFig. 4.7に点線で示すとおり、送り量 $10\mu\text{m}$ 以下では、理論粗さは $0.03\mu\text{m}$ 以下と十分小さく、曲率を持った工具でも鏡面加工が実現すると考えられる。

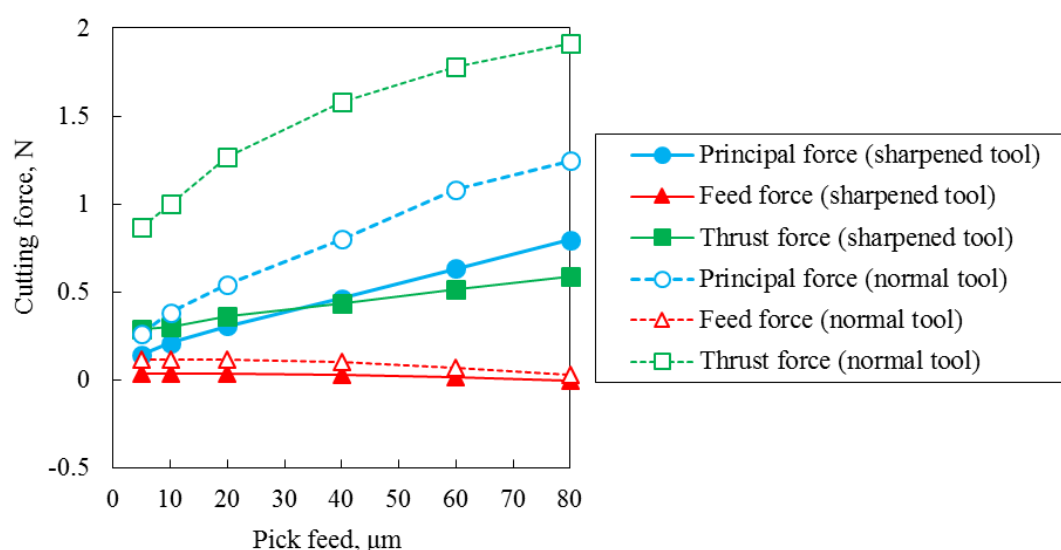


Fig. 4.5 Cutting forces measured at various pick feeds.

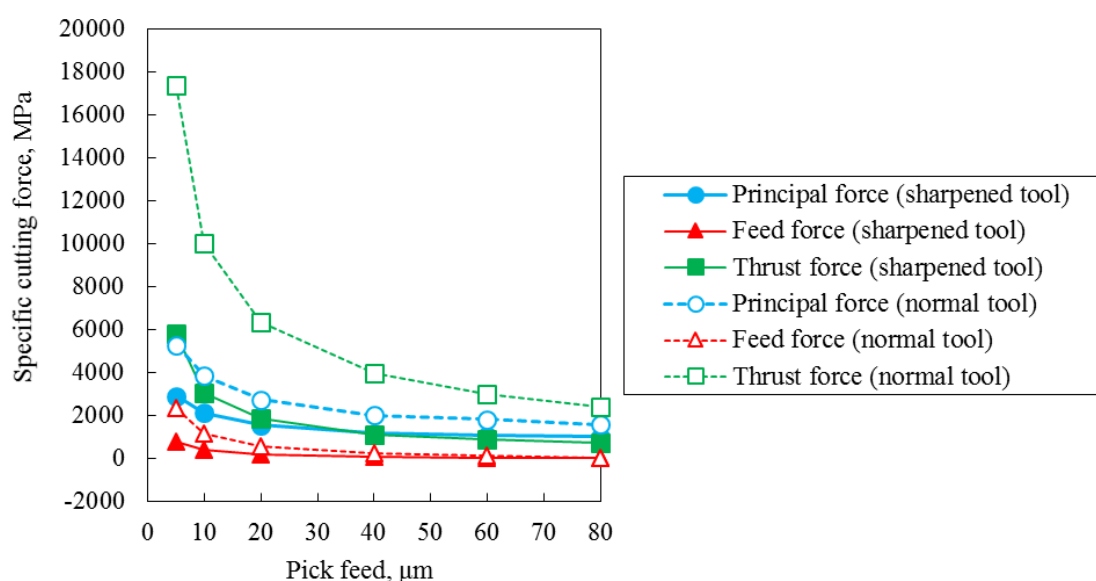


Fig. 4.6 Specific cutting forces measured at various pick feeds.



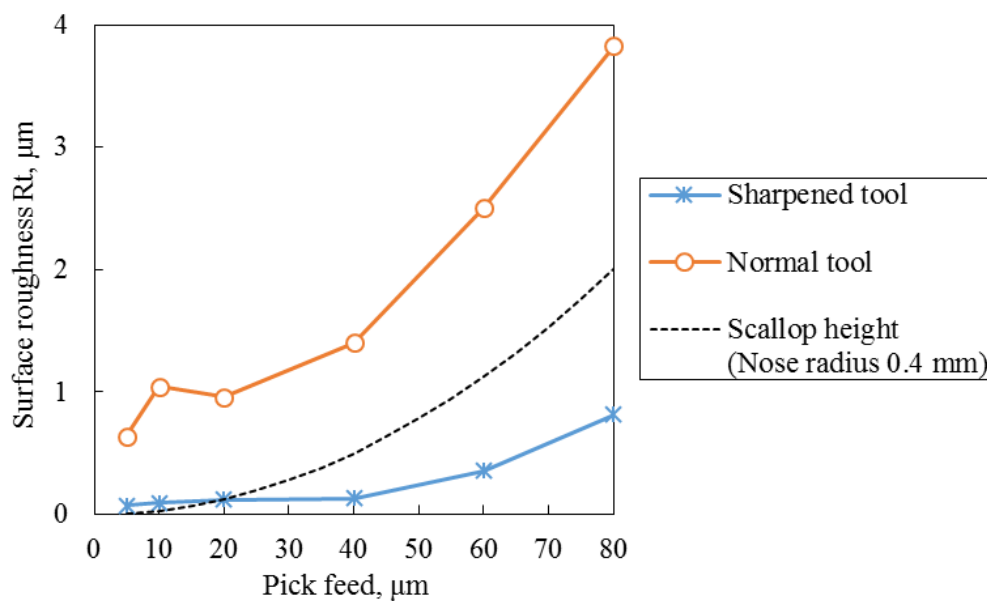


Fig. 4.7 Surface roughness  $R_t$  measured at various pick feeds.

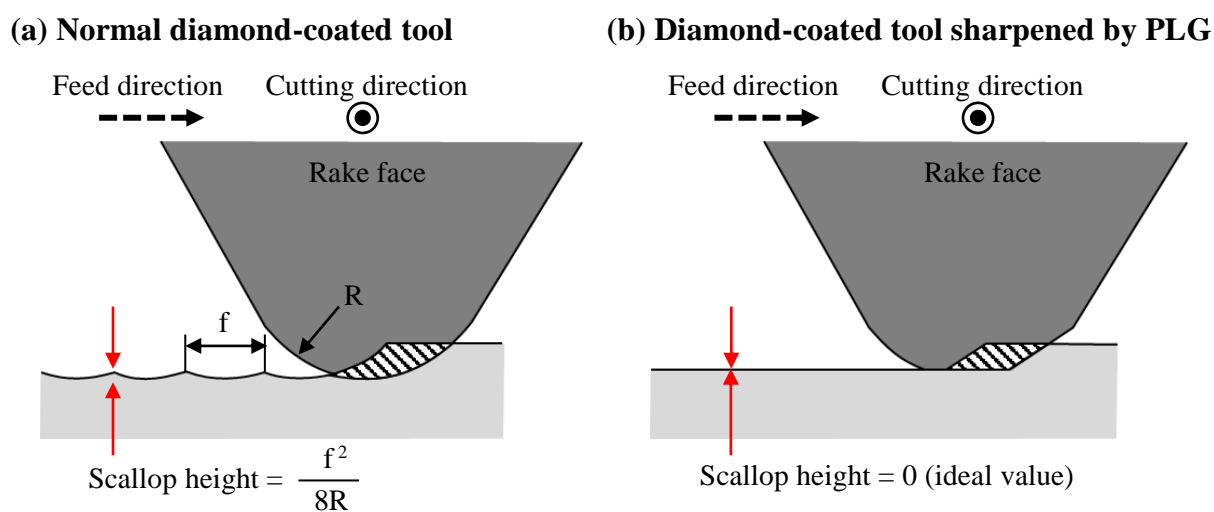
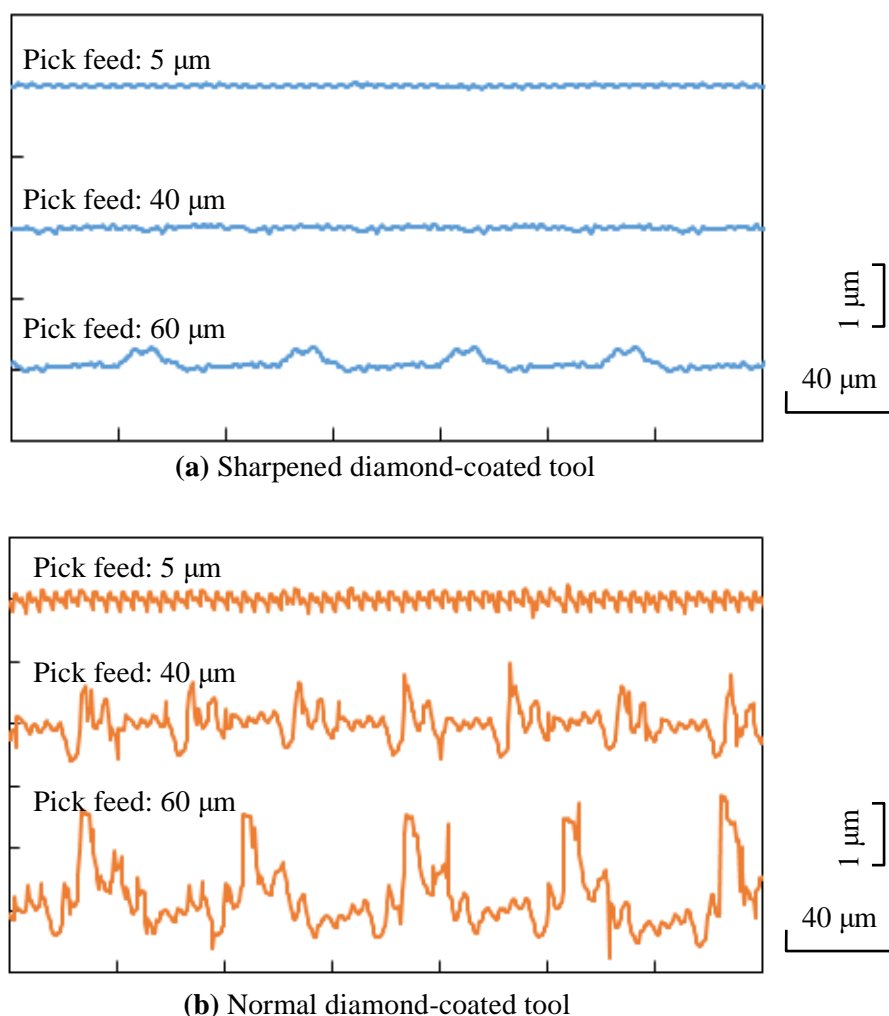


Fig. 4.8 Schematic drawing of scallop height. (a): normal tool, (b): sharpened tool.



代表的な送り量 5, 40, 60  $\mu\text{m}$  における送り方向の粗さ曲線を Fig. 4.8 に示す. PLG で鋭利化した工具では, 送り量 5, 40  $\mu\text{m}$  のときに平滑な断面が得られたのに対し, 送り量 60  $\mu\text{m}$  では, 周期的な凹凸が生じた. これは, 鋭利化した直線状の切れ刃長さよりも大きな送り量で加工したため, 鋭利化していない切れ刃形状が転写されたと考えられる. Fig. 4.8 (b)の鋭利化していない通常のダイヤモンドコーティング工具では, 何れの送り量でも鋭利化した工具より大きな凹凸が見られる.

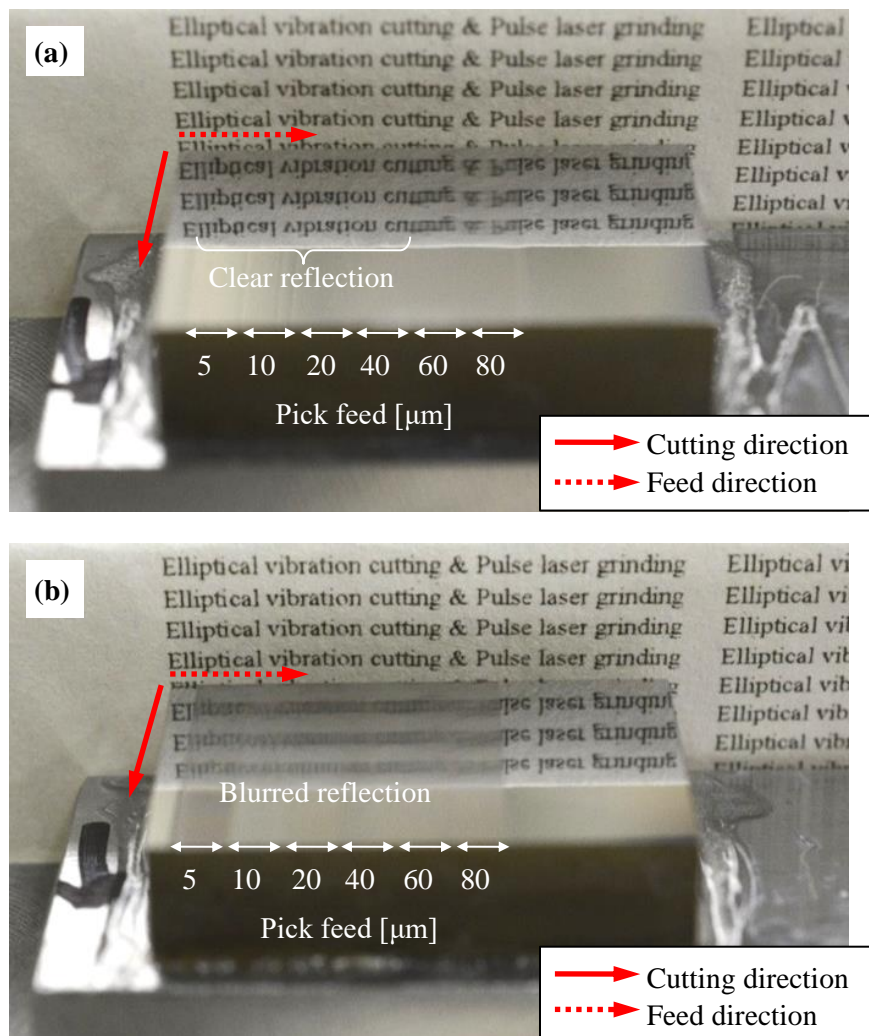
平削り実験で加工したワークの写真を Fig. 4.9 に示す. (a)の PLG で鋭利化した工具



**Fig. 4.8** Surface profiles of finished surfaces at typical pick feeds of 5, 40, and 60  $\mu\text{m}$  obtained with (a) sharpened diamond-coated tool, (b) normal diamond-coated tool.

で楕円振動切削した加工面は, 送り量が 40  $\mu\text{m}$  までは文字の映り込みが明瞭であり, 送り量が 60, 80  $\mu\text{m}$  では文字のにじみが生じた. Fig. 4.7 の送り量と表面粗さの結果と

一致する。一方で鋭利化していない通常の工具では、送り量  $5\ \mu\text{m}$  でも文字の文字の映り込みが滲んでおり、鏡面加工にはPLGによる鋭利化が有効であることが確認された。



**Fig. 4.9** Workpieces of typical hardened die steel, Stavax (size:  $20 \times 13\ \text{mm}$ , hardness: 54 HRC) finished with (a): sharpened diamond-coated tool, (b): normal diamond-coated tool.

### 4.3 結言

本章では、安価なダイヤモンドコーティング工具で金型鋼の鏡面切削を実現するため、パルスレーザー (PLG) で鋭利化したダイヤモンドコーティング工具を使用し、金型鋼 Stavax の楕円振動実験を行った。送り量を変化させたときの切削抵抗, 表面粗さ, 工具の耐久性について, 通常のダイヤモンドコーティング工具と比較し, 以下の結果が得られた。

- 1) パルスレーザーを  $8^\circ$  の浅い角度で照射し, 直線状に走査することにより, ダイヤモンドコーティング工具の表面を高精度に研磨できることを確認した。通常のダイヤモンドコーティング工具の切れ刃丸み半径は平均で  $16\ \mu\text{m}$  程度であるのに対し, PLG で鋭利化した丸み半径は  $\mu\text{m}$  オーダーかそれ以下まで減少した。
- 2) PLG で鋭利化した工具で金型鋼を楕円振動切削した結果, 送り量  $5\ \mu\text{m}$  のときに表面粗さ  $Rt\ 0.07\ \mu\text{m}$  の鏡面が得られた。これは, 表面に  $\mu\text{m}$  オーダーの凹凸があり, 切れ刃丸みが  $16\ \mu\text{m}$  程度ある通常のダイヤモンドコーティング工具による表面粗さと比較し, およそ9分の1である。
- 3) PLG で鋭利化した切れ刃が直線であるため, 切れ刃の長さを超えない送り量  $40\ \mu\text{m}$  まで表面粗さ  $Rt\ 0.14\ \mu\text{m}$  以下が得られた。

## 第5章 楕円振動切削による高硬度金型鋼の鏡面切削

### 5.1 合金成分とダイヤモンド工具摩耗

楕円振動切削は、鉄系材料の加工で生じるダイヤモンド工具の激しい摩耗を抑制し、金型鋼の鏡面切削を実現してきた。これまでの研究では、ワークの材質として主にステンレス系の鋼材やプリハードン鋼が用いられ、単結晶ダイヤモンド工具の摩耗を抑制し、直径約 60 mm の半球状の鏡面加工など、実用的な磨きレス鏡面加工を実現してきた<sup>52-54)</sup>。ステンレス系の鋼材に含まれる合金成分は、主にクロムやニッケルであるのに対し、金型産業で鏡面加工のニーズが高まっているロックウェル硬度 60 HRC を超える高硬度金型鋼は、タングステン、モリブデン、バナジウム、コバルト等の合金成分が多量に含まれている。鈴木らの研究では<sup>47,48)</sup>、ガラスレンズ金型用のタングステン合金を楕円振動切削した結果、Rz 0.1  $\mu\text{m}$  以下の鏡面が得られるものの、切削距離 50 m 程度で表面粗さが Rz 100 nm 以下から 300 nm 程度まで上昇し、ステンレス系の鋼材と比較し摩耗が早く進むことがわかった。また、本研究の予備実験<sup>64)</sup>においても、高硬度金型鋼を楕円振動切削した場合は、ダイヤモンド工具の摩耗やチッピングが促進され、鋼材によっては実用的な工具寿命が得られないことが明らかになってきた。本章では、高硬度金型鋼の楕円振動切削における単結晶ダイヤモンド工具のチッピングや摩耗の原因を調べ、実用的な工具寿命が得られる高硬度金型鋼について検討した。

### 5.2 楕円振動切削実験による摩耗量の比較

#### 5.2.1 加工実験方法

高硬度金型鋼 6 種類と、これらの合金成分と同じ純金属 4 種類をワークとして準備し、単結晶ダイヤモンド工具による楕円振動切削実験を行った。ワークの合金成分や硬度については、次項で説明する。楕円振動切削実験の様子を Fig. 5.1 に示す。不二越製の超精密加工機 NANO ASPHER ASP01UPX に多賀電気製の楕円振動装置 EL-50  $\Sigma$  を取り付け、平削り実験を行った。楕円振動装置はキスラー製工具動力計 9256C に固定し、切削抵抗を測定した。使用した工具は、ノーズ半径 1 mm の単結晶ダイヤモンド工具で、周波数約 40 kHz、振幅 4  $\mu\text{m}_{p-p}$  の円軌道で振動させた。切込み量と送り量は 10  $\mu\text{m}$ 、切削速度は 1 m/min とし、切削距離 108 m まで平削りを行った。加工条件を Table 5.1 にまとめた。高硬度金型鋼の YXR7 の実験では、工作機械の不具合により切削距離

77 m の時点で停止したため、そこまでの状態で評価した。加工後は、ワークの表面粗さを zygo 製の非接触表面形状測定機 NewView で最大高さ Rt を測定した。工具の切れ刃は、微分干渉顕微鏡で観察すると共に、摩耗した切れ刃の断面を、表面粗さ測定と同じ装置で測定した。

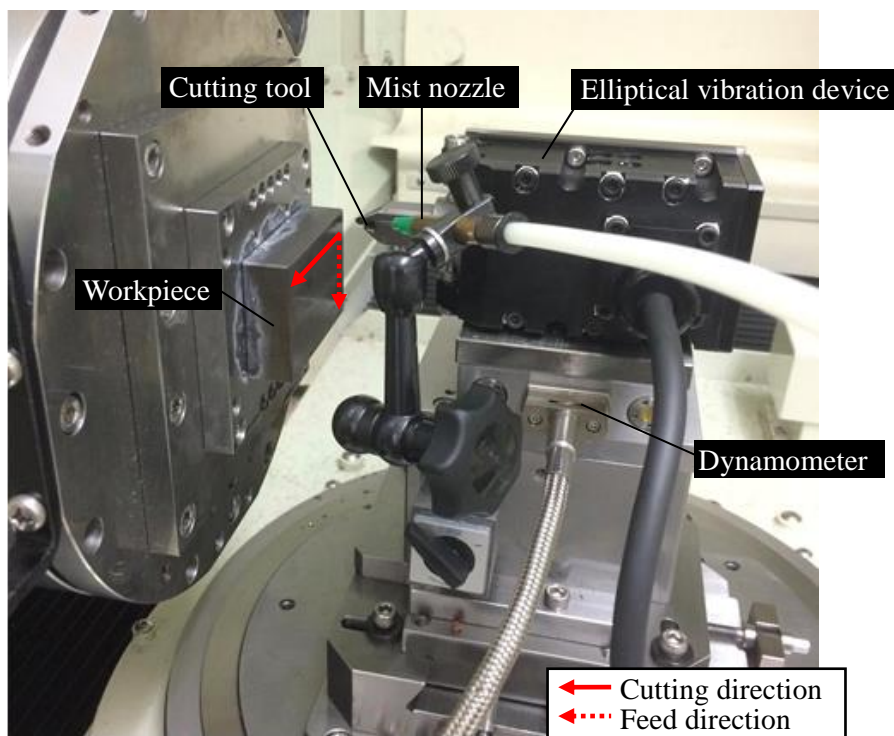


Fig. 5.1 Experimental set-up for elliptical vibration cutting experiments.

Table 5.1 Machining conditions.

<b>Cutting conditions</b>	
Cutting tool	Single crystalline diamond tool Nose radius: 1mm
Depth of cut,	10 $\mu\text{m}$
Pick feed	10 $\mu\text{m}$
Cutting speed	1 m/min
Coolant	Oil mist (Bluebe LB-10)
<b>Elliptical vibration conditions</b>	
Frequency	About 40 kHz
Amplitude	4 $\mu\text{m}_{p-p}$
Phase shift	90 deg. (circular locus)

## 5.2.2 高硬度金型鋼と純金属の加工ワーク

### (A) 高硬度金型鋼

ワークとして使用した6種類の高硬度金型鋼を Table 5.2 に示す。表中の硬度は、ロックウェル硬度試験機で5回測定した平均値を表す。何れの鋼材も60 HRC以上に焼入れして実験に供した。鋼材中の炭素量は堀場製作所製の炭素・硫黄分析装置 EMIA-920V により、その他の合金成分量はサーモフィッシャーサイエンティフィック製の ICP 発光分析装置 iCAP6500 DUO でそれぞれ分析した。大同特殊鋼の DC53 は、ダイス鋼 SKD11 の改質鋼で、本研究で使用した鋼材の中で最も多い 8.23 mass% のクロムを含有し、タングステンは含有しないのが特徴である。DC53 以外の鋼材5種類は、クロム、バナジウム、モリブデン、タングステン等の合金成分を含有するハイス鋼の中から選定した。ASP23 のみウッデホルム製の粉末ハイスで、それ以外は圧延ロールで製造されたハイス鋼である。粉末ハイスと圧延ロールを比較するため、ASP23 と同等の合金成分を含有する SKH51 も実験に供した。

**Table 5.2** Measured hardness of high-alloy steel workpieces and alloy elements.

High-alloy steels		Rockwell hardness, HRC	Alloy element, mass%						
Manufacturer's code	JIS code		C	Mn	Cr	V	Mo	W	Co
DC53 (Daido Steel)	SKD11 modified	62.2	0.98	0.52	8.23	0.22	1.99	-	0.01
YXR7 (Hitachi Metals)	-	62.7	0.77	0.57	5.00	1.15	5.66	1.18	0.18
-	SKH51	63.9	0.89	0.34	4.39	2.00	5.08	6.02	0.23
ASP23 (Uddeholm)	-	63.1	1.27	0.30	4.29	3.13	5.14	6.13	0.38
-	SKH2	62.1	0.80	0.36	4.24	1.06	0.23	17.59	0.09
-	SKH4	65.2	0.80	0.23	4.06	1.03	0.61	18.47	10.88

**(B) 純金属**

6種類の高硬度金型鋼に加え、合金成分の中からクロム、モリブデン、タングステン、バナジウムの4種類の純金属も楕円振動切削実験を行い、単結晶ダイヤモンド工具の摩耗量を比較した。各ワークのビッカース硬度を Table 5.3 にまとめた。クロムの場合は、厚さ 200  $\mu\text{m}$  のめっき層を加工し、それ以外の場合は、厚さ 0.5 mm の純金属の板材を加工した。高硬度金型鋼と同様に Table 5.1 の条件で加工実験を行い、切削抵抗、工具摩耗量、表面粗さを比較した。

**Table 5.3** Pure metal workpieces and their hardness.

Workpiece material	Hardness, HV
Cr (electroplating)	708
Mo (pure metal plate)	276
W (pure metal plate)	530
V (pure metal plate)	136

**5.2.3 炭化物の解析**

Fig. 5.2 は、高硬度金型鋼を 5% ナイタル液でエッチングした金属組織写真である。化学的に安定な化合物はエッチングされずに残るため、顕微鏡下で白く見える。5.4 節に示すとおり、これらの化合物は炭化物と同定されたため、以降は炭化物と記す。一般に炭素と金属元素が結合した炭化物は、硬度が高いことが知られており<sup>9)</sup>、硬質な炭化物粒子が基地に分散したワークは、単結晶ダイヤモンド工具の切れ刃にチップングを生じさせやすいと予想される。チップングと炭化物との関係を定量的に調べるため、炭化物粒子および基地の硬度を測定し、両者の硬度差とチップングの関係を調べた。測定にはマイクロビッカース硬度計を使用し、押し込み荷重 98.1 mN で試験を行った。小さい押し込み荷重で試験を行ったのは、炭化物粒子よりも小さい圧痕を残すためである。5 点以上の試験を行い、平均の硬度を求めた。粉末ハイスの ASP23 は、炭化物粒子の大きさが数  $\mu\text{m}$  と他の鋼材よりも小さく均一であるため、炭化物の硬度を測定することが困難である。したがって、前述のマイクロビッカース硬度計による硬度試験は、ASP23 を除く 5 種類の高硬度金型鋼で行った。

次に、炭化物と切れ刃に生じたチップングとの関係を調べるため、炭化物の粒径分布を求めた。はじめに、金属組織の写真を画像処理ソフト ImageJ により 2 値化し、白く見える炭化物とそれ以外の部分に分離した。例として DC53 の金属組織写真を 2 値



化した結果を Fig. 5.3 に示す. 炭化物の部分が黒い点として表されている. この2値化した画像をもとに, 画像処理ソフトで炭化物を表す黒い部分の大きさをリストアップし, 得られた炭化物粒子サイズの一覧から粒径分布を作成した.

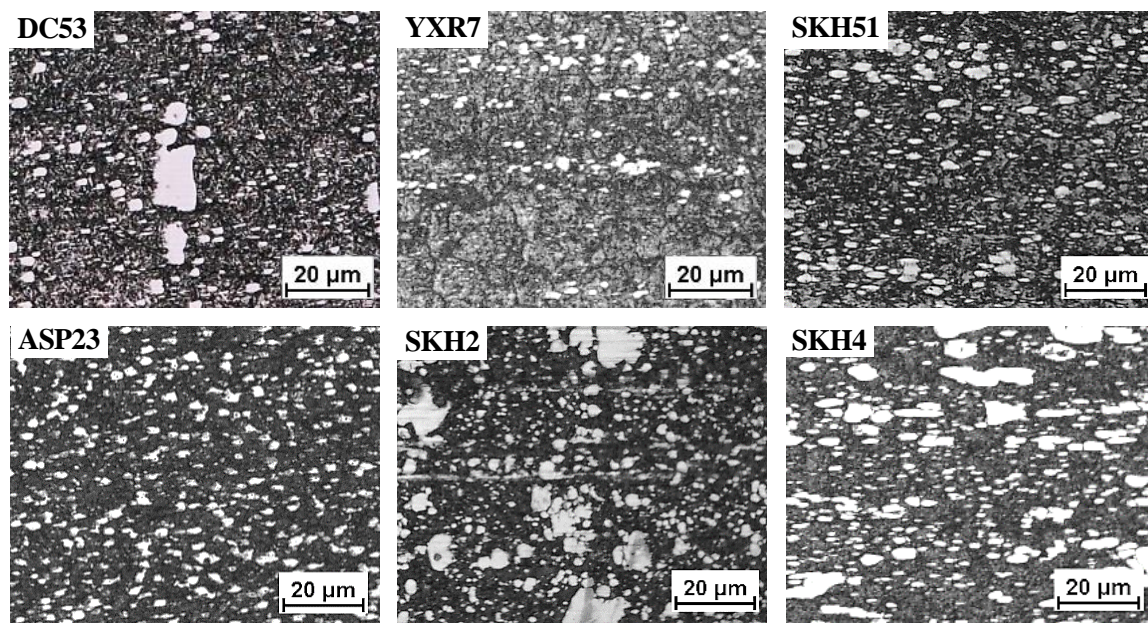


Fig. 5.2 Metallographic microscope images of high-alloy steels after Nital etching.



Fig. 5.3 Binary image of metallographic photograph of DC53.

### 5.2.4 工具摩耗量の評価

高硬度金型鋼の ASP23 を加工した工具の電子顕微鏡画像を Fig. 5.4 に示す。切れ刃にはチップングと摩耗がそれぞれ確認でき、これらが発生しやすい切れ刃上の場所には傾向が見られた。概略図を Fig. 5.5 に示すとおり、チップングは主にワークの仕上げ面を加工する先端部分に多く見られ、摩耗は切れ刃の送り方向に顕著に発生した。チップングと摩耗を定量的に評価するため、以下の方法でそれぞれ解析した。

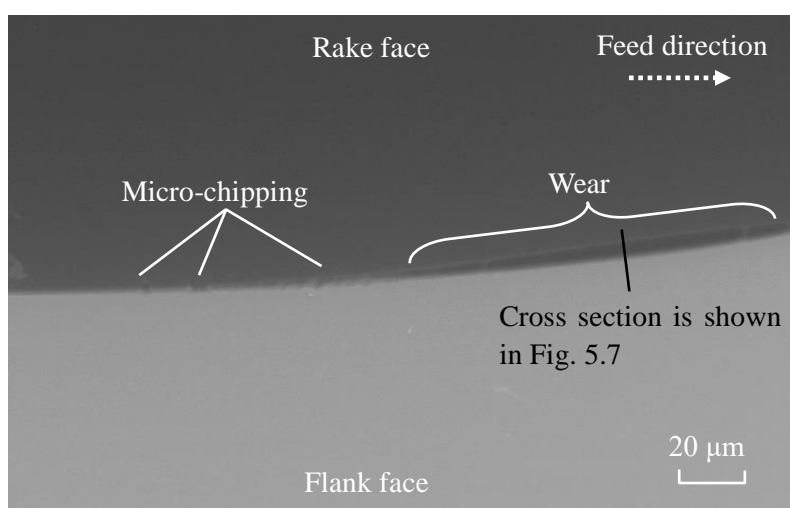


Fig. 5.4 SEM image of cutting edge after elliptical vibration cutting of ASP23.

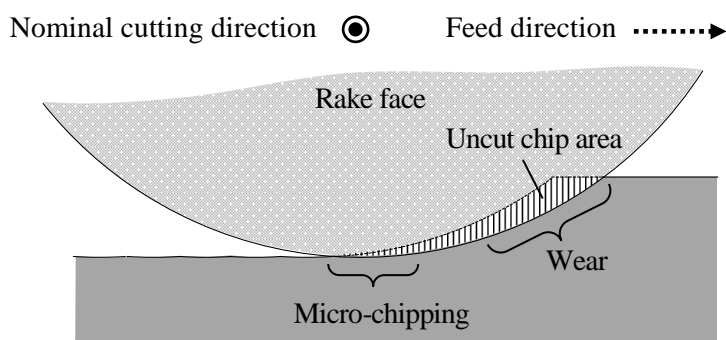
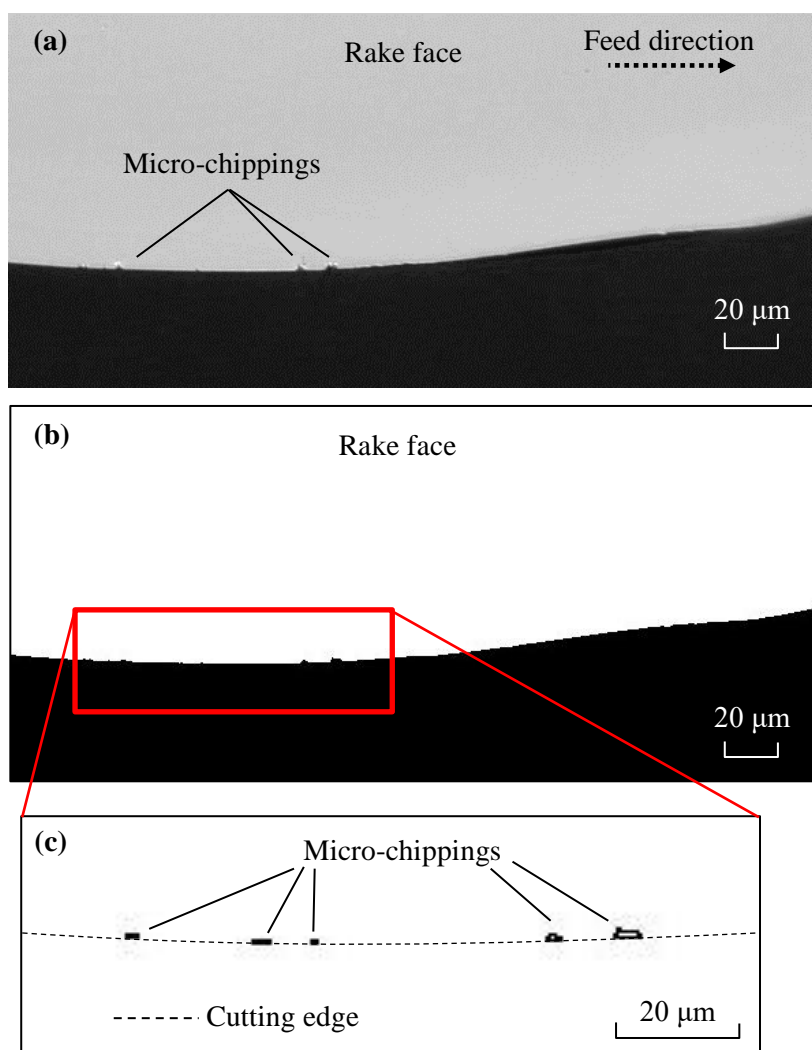


Fig. 5.5 Schematic drawing of micro-chipping region and wear region.

(A) チッピングの定量的評価

Fig. 5.6 (a)は、Fig. 5.4 に示す高硬度金型鋼 ASP23 を加工した工具を、微分干渉顕微鏡で観察した画像である。切れ刃の先端に生じたチッピングの面積を解析するため、この画像を炭化物の解析と同様に2値化し、チッピング部分の面積を求めた。Fig. 5.6 (b) が2値化後の画像で、切れ刃の輪郭の範囲内にあるチッピング部分を抽出した結果が Fig. 5.6 (c)である。この抽出されたチッピング部分の総面積を画像処理ソフトで算出し、チッピング量として定義した。



**Fig. 5.6** Micro-chipping on cutting edge after elliptical vibration cutting of ASP23.  
 (a): photomicrograph of cutting edge, (b): binarized image of photomicrograph,  
 (c): extracted micro-chipping area.

## (B) 摩耗量の定量的評価

切れ刃の送り方向に生じた摩耗を定量的に評価するため、切れ刃に対し直角方向の断面形状を zygo 製の非接触表面形状測定機で測定した。Fig. 5.7 は、Fig. 5.4 の電子顕微鏡画像上に直線で示される付近の切れ刃を測定した断面形状である。高硬度金型鋼の実験で使用した工具は、何れの鋼材でも摩耗部分の断面形状は同様の形状をしており、すくい面に対しおよそ  $40^\circ$  の角度で切れ刃が後退した。すくい角  $0^\circ$  と逃げ角  $10^\circ$  を表す赤色の点線と、摩耗した切れ刃を表す黒色の実線で囲まれた斜線部分が後退した切れ刃であり、この面積を摩耗量と定義した。

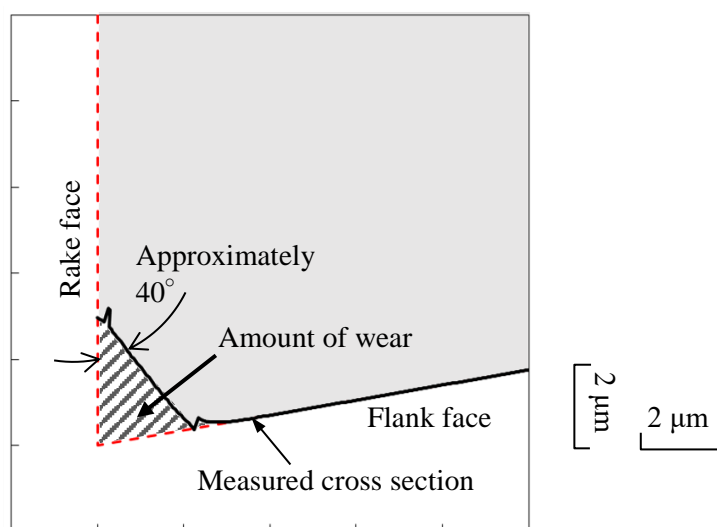


Fig. 5.7 Definition of amount of wear based on measured cross section of cutting edge.

## 5.3 実験結果

### 5.3.1 比切削抵抗と工具摩耗

高硬度金型鋼と純金属の加工実験における比切削抵抗を Fig. 5.8 と Fig. 5.9 にそれぞれ示す。比切削抵抗は、切削抵抗を切削断面積で除した値で、切削断面積は送り量と切込み量の積で求められる。本実験では、実験毎の切込み量のばらつきを考慮するため、以下の手順で実切込み量を計算した。加工実験は、あらかじめ平面研削したワークの一部を利用して実験したため、楕円振動切削した部分の前後に未加工部分が残る。この未加工部分を含む断面形状を送り方向に測定し、未加工部分に対する段差を実切込み量と定義した。本実験での送り分力は、最大でも 320 MPa と十分小さいため、主分力と背分力のみを示す。高硬度金型鋼の結果を見ると、SKH2 と SKH4 の背分力が大きく増加しており、SKH2 では加工開始時の 2700 MPa から 7900 MPa まで増加した。工具摩耗が大きいことを示唆している。一方で DC53 の背分力は 1100 MPa から 2200

MPa の間で推移しており、摩耗が少ないと予想される。Fig. 5.10 に工具の顕微鏡写真を示す。DC53 で使用した工具は、チッピングがなく、逃げ面摩耗も少ないことが確認できる。Fig. 5.9 の純金属の結果では、バナジウム の比切削抵抗が最も変動しており、主分力と背分力が 17700 MPa, 182000 MPa まで増加した。Fig. 5.11 に示す工具の顕微鏡写真を見ると、激しい工具摩耗により切込み量と同等に切れ刃が後退し、ワークの表面を逃げ面で擦る状態となったことが推測できる。タングステンの場合も主分力と背分力がバナジウムに次いで増加しており、主分力は 1300 MPa から 2700 MPa, 背分力は 1300 MPa から 4700 MPa まで増加した。一方で、クロム の場合は、主分力はほぼ一定で、背分力のみが増加した。これについて考察するため、純金属で使 用した工具の断面形状を Fig. 5.12 に示す。バナジウム の結果は、他の結果よりスケールが大きいことに注意されたい。タングステンとモリブデンを加工した工具は、摩耗した面がす くい角に対しおよそ  $45^\circ$  の角度であるのに対し、クロム の場合は摩耗面が切削方向に 前傾している。この前傾した摩耗面に加え、クロムはビッカース硬度が 708 HV と使用 した純金属の中で最も高いため、背分力がより顕著に増加したと考えられる。モリブ デン の場合は、比切削抵抗の増加量が 900 MPa 以下と小さく、工具摩耗も小さいと予 想される。

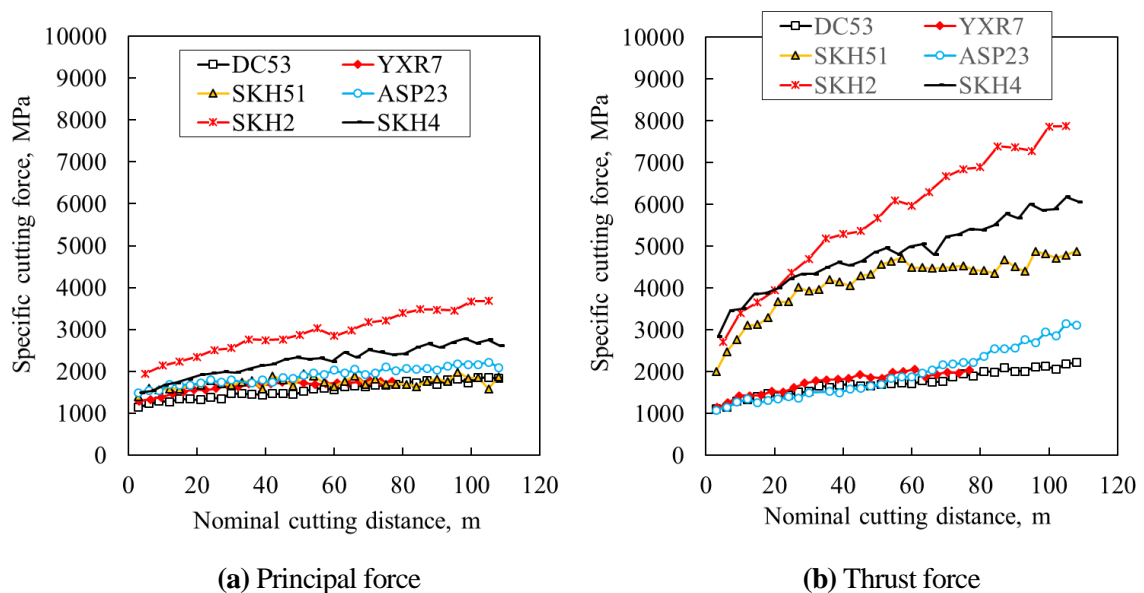


Fig. 5.8 Specific cutting forces in elliptical vibration cutting of high-alloy steels.



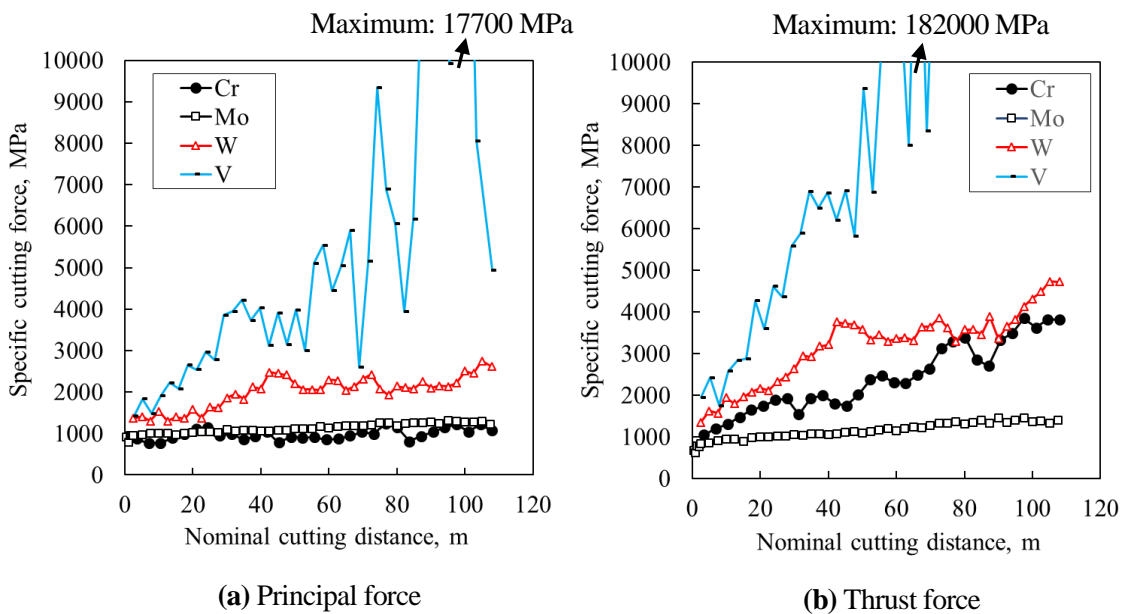


Fig. 5.9 Specific cutting forces in elliptical vibration cutting of pure metals.

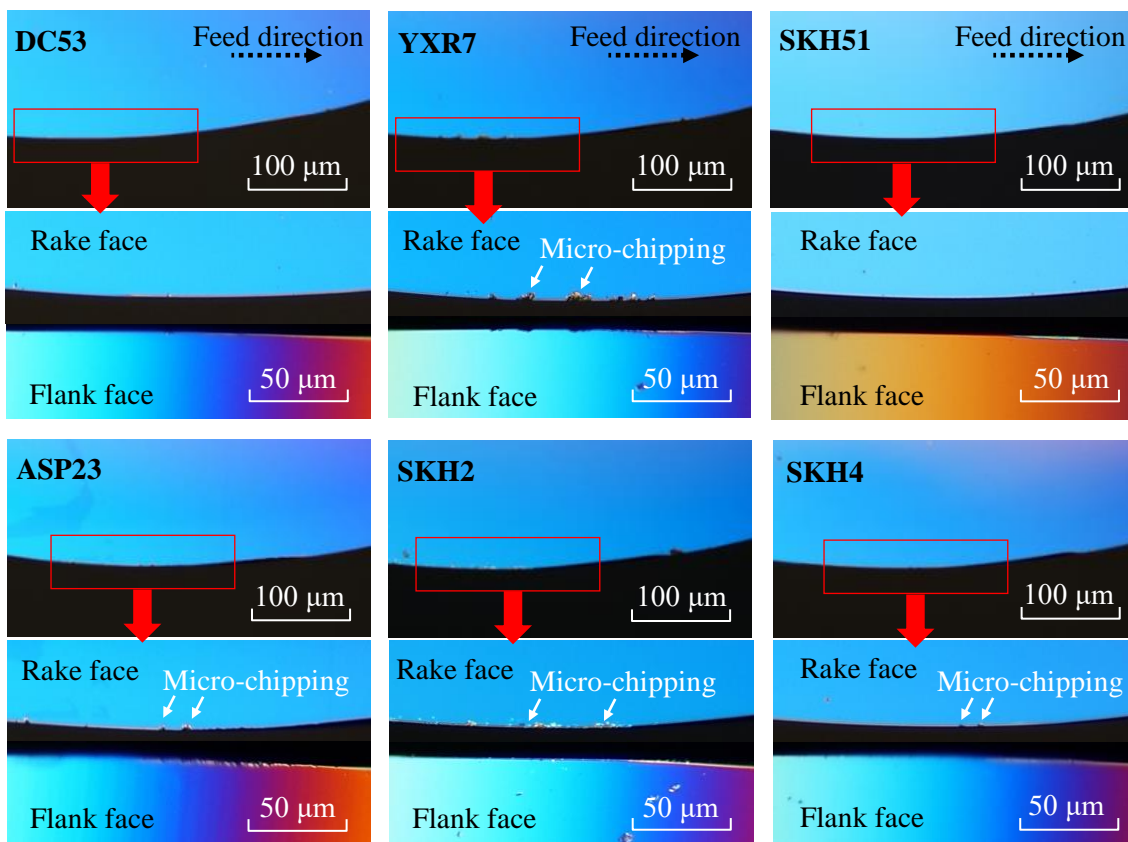


Fig. 5.10 Photomicrographs of cutting edges after elliptical vibration cutting of high-alloy steels.

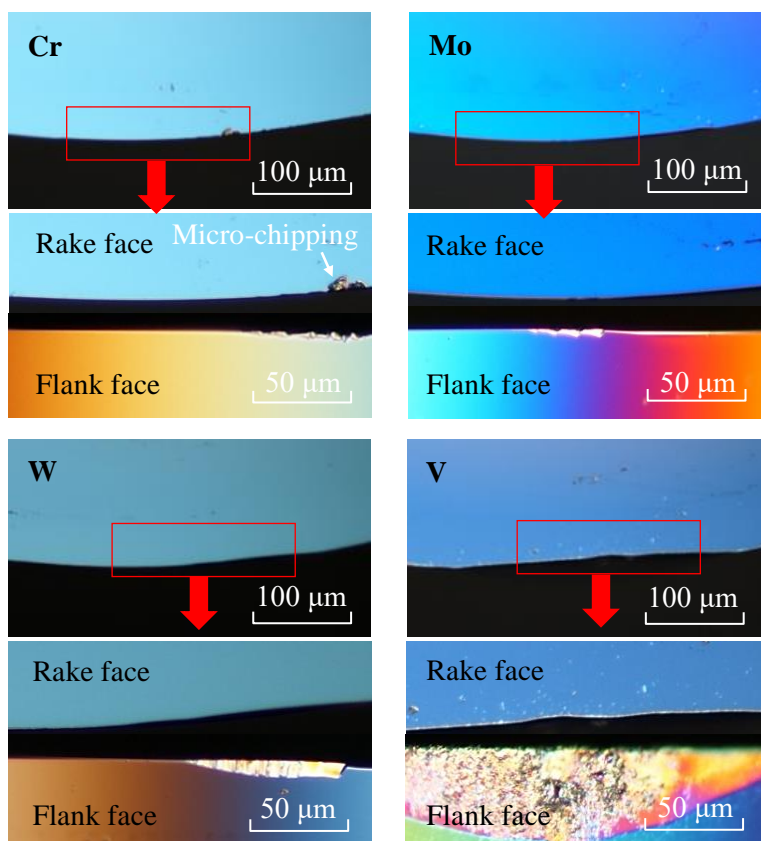


Fig. 5.11 Photomicrographs of cutting edges after elliptical vibration cutting of pure metals.

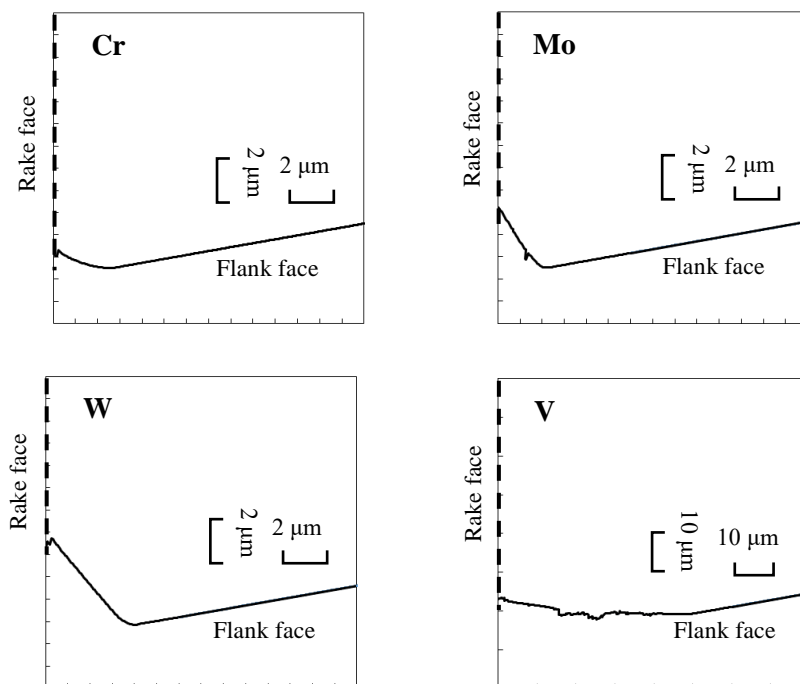


Fig. 5.12 Cross sections of cutting edges after cutting experiments on pure metals.



### 5.3.2 仕上げ面の表面粗さ

高硬度金型鋼と純金属の表面粗さ Rt を Fig. 5.13 に示す。加工開始側から終了側まで 11 カ所を測定した。平均値で比較すると、高硬度金型鋼の表面粗さは Rt 0.04  $\mu\text{m}$  から 0.08  $\mu\text{m}$  の範囲でばらついており、Fig. 5.8 の背分力の増加が 1100 MPa 以下と小さく、チップングも生じていない DC53 は、表面粗さが Rt 0.04  $\mu\text{m}$  と最も小さい。YXR7 の表面粗さは Rt 0.05  $\mu\text{m}$  と 2 番目に小さいが、使用後の工具を見ると (Fig. 5.10)、切れ刃の先端にはチップングが見られる。背分力の増加が大きい SKH2 と SKH4 は、表面粗さが Rt 0.07  $\mu\text{m}$  以上であった。表面粗さの違いを詳しく調べるため、仕上げ面の表面性状を Fig. 5.14 に示す。YXR7 の加工面は、チップングが生じたにもかかわらず良好な仕上げ面が得られている。Fig. 5.10 の切れ刃を見ると、チップングの部分以外は逃げ面摩耗が見られず、鋭利な状態を保っていると考えられる。今回の実験では平削りを行ったため、仕上げ面は 1 点の切れ刃で創生されることとなる。今回の YXR7 の実験では、チップングは仕上げ面に残らない部分の切れ刃で発生したと考えられる。しかし、実際の金型加工では曲面加工が必要とされ、この場合は曲率に応じた範囲で切れ刃を使用することとなる。したがって、曲面加工ではチップングの影響を受けやすくなるため、実際の金型加工を考えると、チップングの発生は好ましくない。SKH2 と SKH4 の仕上げ面 (Fig. 5.14) には、凹凸が無数に確認できる。大きさや分散状態から推測すると、硬質な炭化物が凸状に残ったものであると考えられる。凹凸の高さは小さいものの、加工開始時から同様の表面性状であったことが確認されており、炭化物が多く存在する鋼材はナノレベルの超精密加工には適さないと言える。同様の凹凸は、DC53 と YXR7 にも所々に確認できるが、凹凸の分布が少ないのが特徴である。粉末ハイスの ASP23 は、前述の炭化物による凹凸は確認されないものの、大きなカッターマークによって表面粗さの悪化につながった。ASP23 と同等の合金成分を有する SKH51 でも、同じようなカッターマークが確認された。

Fig. 5.13 で斜線の棒グラフで表される純金属の表面粗さは、バナジウムの場合が平均で Rt 2  $\mu\text{m}$  以上と大きく、逃げ面が擦る状態となったと考えられる。バナジウムに次いで比切削抵抗が大きいタングステンも表面粗さが大きく、平均で約 Rt 0.3  $\mu\text{m}$  であった。背分力のみが増加したクロムの表面粗さは純金属 4 種類の中で最も小さく、平均値で Rt 0.08  $\mu\text{m}$  であった。

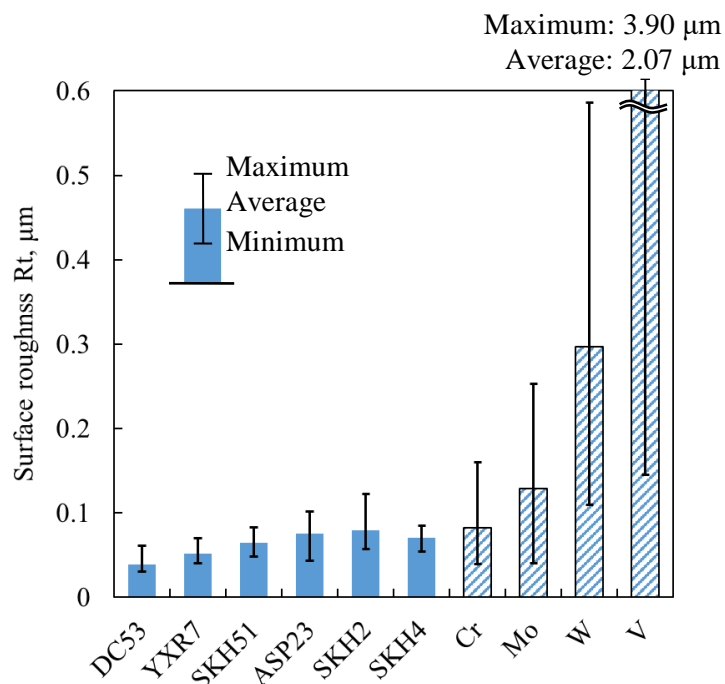


Fig. 5.13 Surface roughness Rt of high-alloy steels and pure metals. (High-alloy steels: solid bars, pure metals: shaded bars)

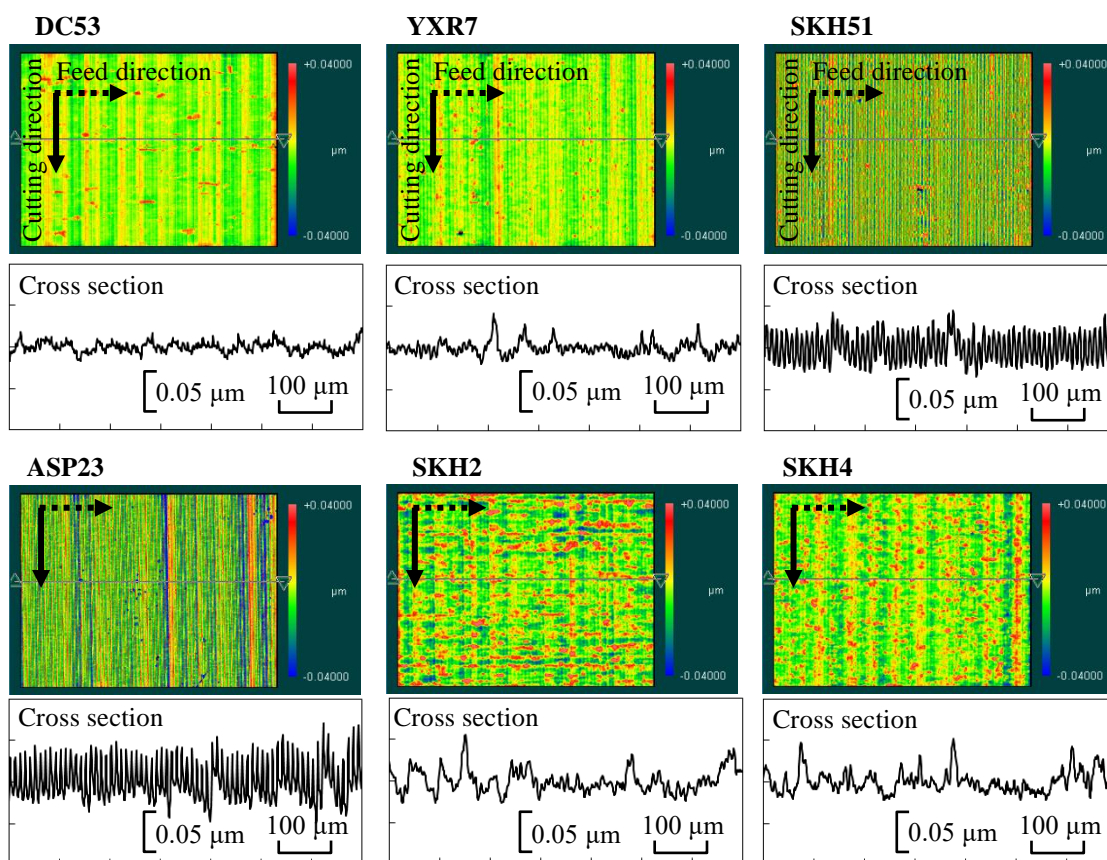


Fig. 5.14 Surface maps and cross sections of finished surfaces.

### 5.3.3 チッピングと炭化物の関係

はじめに、金属組織写真の画像から算出した炭化物の平均粒径および粒径分布の結果を Fig. 5.15, Fig. 5.16 にそれぞれ示す。Fig. 5.15 の平均粒径は DC53 が最も大きく約  $4.5\ \mu\text{m}$  で、粉末ハイス ASP23 の  $2.7\ \mu\text{m}$  が最も小さい結果であった。Fig. 5.16 の粒径分布は、何れの鋼材でも粒径  $2\ \mu\text{m}$  前後の微小な炭化物が最も多く存在し、粒径の増加と共に数量が減少し、粒径  $5\ \mu\text{m}$  で約  $1000\ \text{pcs}/\text{mm}^2$  程度である。DC53, YXR7, SKH2, SKH4 の粒径分布では、粒径  $10\ \mu\text{m}$  から  $40\ \mu\text{m}$  の範囲にもピークが見られ、粗大な炭化物が析出していることがわかる。SKH51 と粉末ハイスの ASP23 では、反対に粒径  $5\ \mu\text{m}$  以下のピークが大きいく、微細な炭化物が多く存在することを示す。Zhang らが行った超合金の楕円振動切削実験<sup>92)</sup>では、平均粒径  $1.3\sim 1.5\ \mu\text{m}$  の超合金でバインダーの有無で比較すると、バインダーがある方がチッピングの抑制に有利であると報告されている。これは、切削中に粒径数  $\mu\text{m}$  の硬質粒子がワークの表面から脱落すると、工具とワークの間で引きずられ、チッピングの原因となりうると考えられる。超合金は硬質な炭化タングステンを微量のバインダーで結合した素材であるのに対し、高硬度金型鋼は、硬質な炭化物に対して基地である鉄の占める割合が高く、素材の構造が異なる。しかし、チッピングは機械的な負荷により生じると考えられ、何らかの原因で切れ刃に負荷が加わったと考えられる。

原因を調べるため、炭化物と基地のビッカース硬度を測定し、両者の硬度差に着目した。想定されるチッピングのメカニズムは後述する。Fig. 5.17 に測定結果を示す。平均値で比較すると、炭化物の硬度は  $1260\ \text{HV}$  以上あるのに対し、基地の硬度は  $780\ \text{HV}$  から  $1050\ \text{HV}$  であり、炭化物の硬度が基地よりも高いことが確認された。

次に、粒径分布から得られた粒径  $5\ \mu\text{m}$  以下の微細な炭化物数と、炭化物と基地の硬度差に対するチッピング量を表した図が Fig. 5.18 である。チッピング量は円の大きさと表される。粉末ハイスの ASP23 は、炭化物の硬度を解析していないため、炭化物の量とチッピング量のみを数値で示した。図中の矢印が表すとおり、横軸の炭化物と基地の硬度差と、縦軸の微細な炭化物数が増加するほど、チッピング量も増加する傾向が確認された。

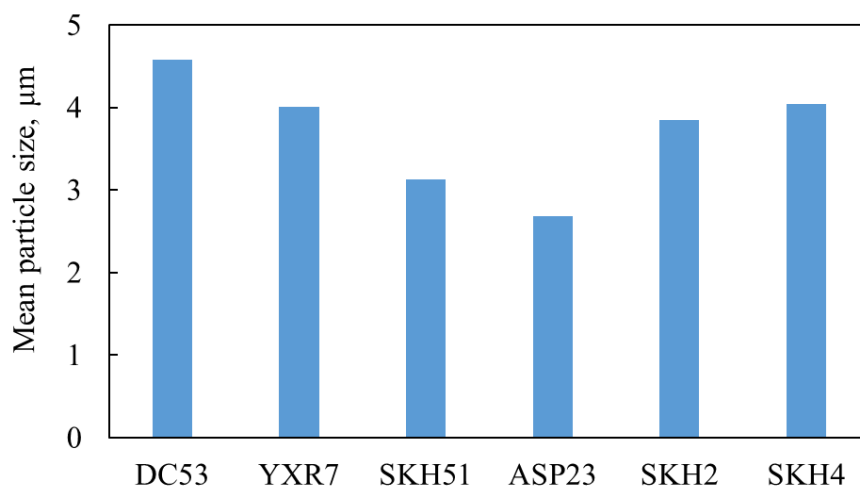


Fig.5.15 Mean particle sizes of carbides in high-alloy steels.

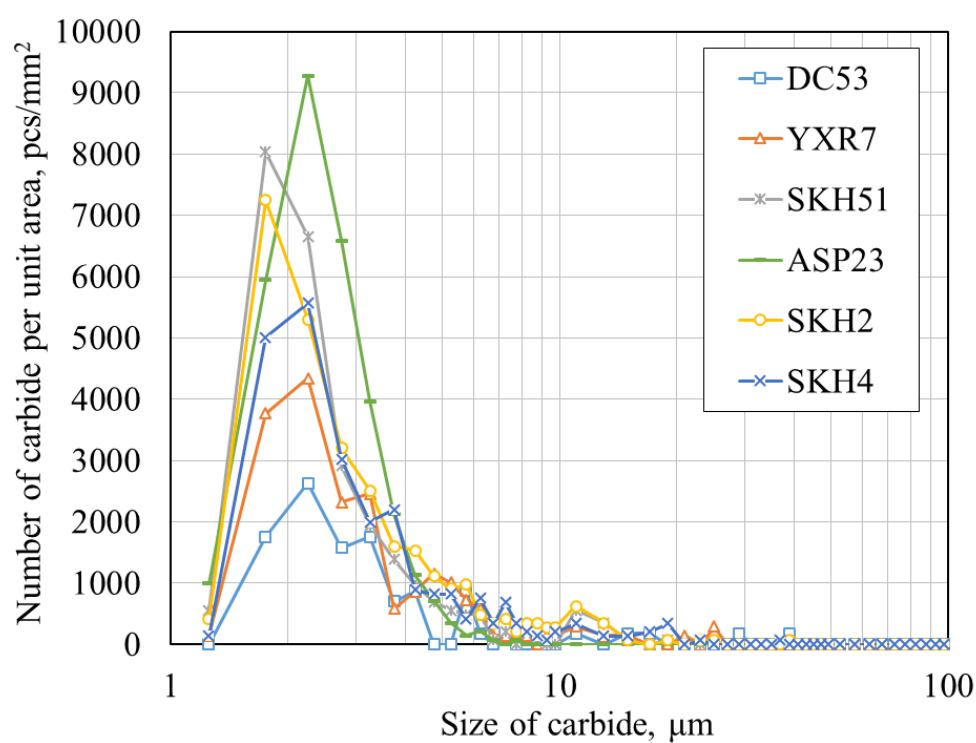


Fig. 5.16 Particle-size distributions of carbides in high-alloy steels.

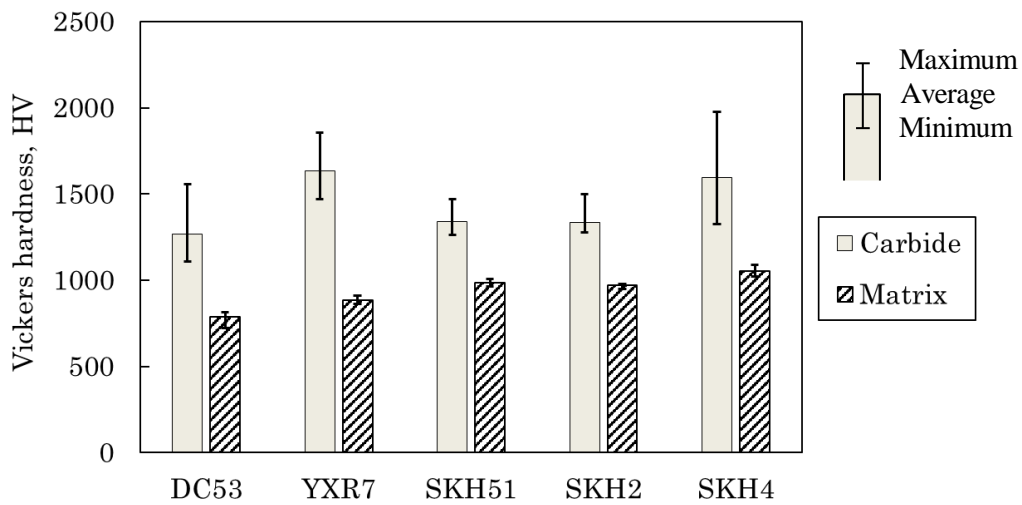
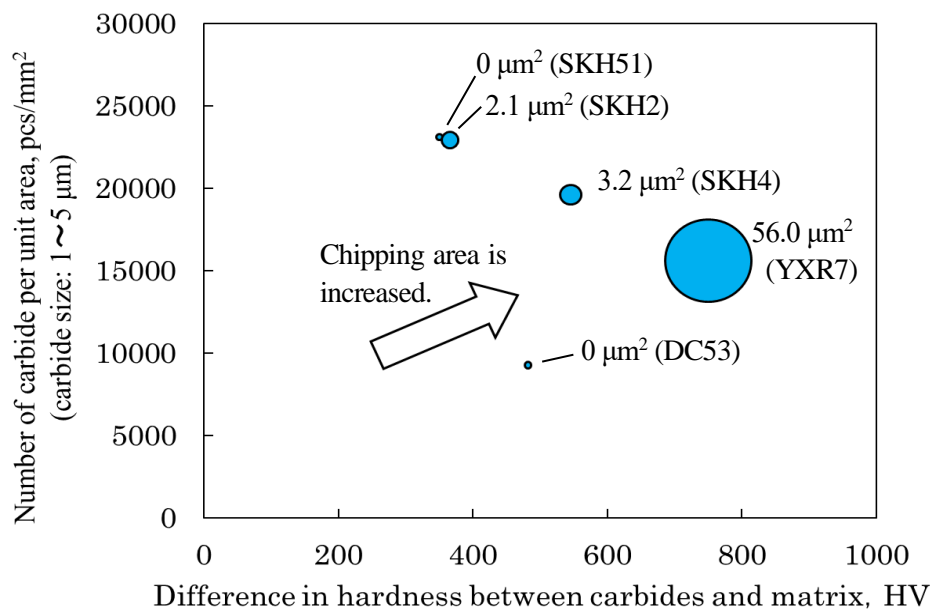


Fig. 5.17 Vickers hardness of carbides and matrices.



ASP23: Number of carbide: 30700 pcs/mm<sup>2</sup>, amount of chipping: 11.9 µm<sup>2</sup>

Fig. 5.18 Amounts of chipping on cutting edge drawn in bubble chart.

### 炭化物の切削メカニズム

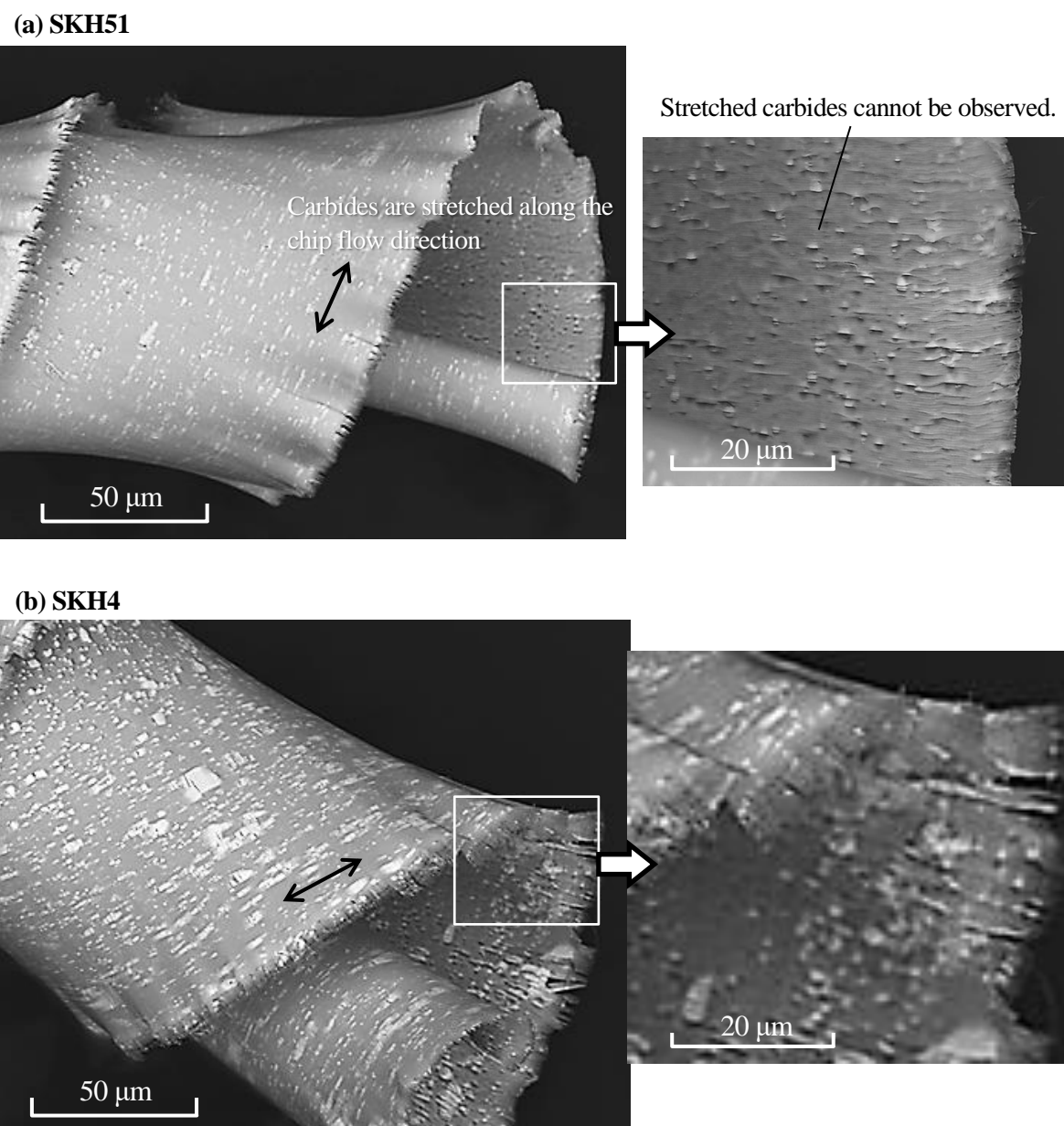
切削の状況を考察するため、高硬度金型鋼の切りくずと加工面の電子顕微鏡画像を Fig. 5.19, Fig. 5.20 にそれぞれ示す。観察では、組成の違いが顕著に表れる反射電子 (Back-scattered electron, BSE) を使用した。画像のコントラストは原子番号に依存し、重い元素は明るく、軽い元素は暗く見える。Fig. 5.18 の SKH51 と SKH4 の切りくずを見ると、白く見える部分が鉄より重い元素で、タンゲステンやモリブデン等を含む炭化物と考えられる。すくい面側の切りくずを見ると、白く見える炭化物が切りくず排出方向沿って伸びていることが確認できる。切削加工は、主せん断域とよばれる領域で工具が被削材を大きくせん断し、被削材の一部を切りくずとして排出する過程である<sup>93)</sup>。切削比は通常 1 より小さいため (切削前の切り取り厚さより切りくずの方が長くなる)、切りくずの長さ方向で考えると、切削した長さより切りくずの方が長くなることは考えにくい。したがって、炭化物が切りくず排出方向に沿って伸びる現象は、通常の切削とは異なる現象が想定される。切りくずのワーク側の面 (Fig. 5.19 右側の拡大図) を見ると、こちらの面では炭化物が伸びている状況は確認できない。また、切削後のワークでも同様に炭化物が切削方向に著しく伸ばされた形跡はない (Fig. 5.20)。

これらの観察から推定される切削の様子を表した概略図が Fig. 5.21 である。炭化物の硬度は周りの基地よりも高いため、炭化物は主せん断域ではほとんど塑性変形を受けず、工具のすくい面まで到達してから塑性変形が始まると想定される。そして、楕円振動切削の切りくずを引き上げる動作によって、振動の 1 周期ずつ薄く伸ばされ、切りくずのすくい面側でのみ炭化物が伸ばされたと考えられる。

### チッピング発生のメカニズム

上記の切削モデルは、切り取り厚さが大きい送り方向での切りくず排出の状況で、切れ刃先端、即ち切り取り厚さが小さく、切れ刃にチッピングが発生した場所では、状況が少し異なると考えられる。Fig. 5.22 に切れ刃先端で考えられる切削の状況を概略図で示す。切れ刃先端は切り取り厚さが小さいため、硬質な炭化物に切り込めず、工具の上滑りが発生すると考えられる。その痕跡を示す切りくずが Fig. 5.23 である。ASP23 を切削した切りくずは、所々で切りくずの厚さが薄くなっている部分を確認できる。これは、炭化物で上滑りしたために切りくずが薄くなった痕跡、または、何度か上滑りした後に炭化物に切り込んだ痕跡と予想される。この現象は、基地の弾性変形も関係すると考えられる。即ち、切削中のプラウイング成分により、炭化物が硬度の低い基地に沈み込むことが考えられる。この基地の弾性変形に伴う上滑りは、Fig.

5.17 の基地と炭化物の硬度差が大きいほど起こりやすいと予想され、その場合、上滑りから切削に切り替わった際に、大きく炭化物を切込むこととなり、突発的なチッピングに至ったと考えられる。Fig. 5.23 の切りくずの電子顕微鏡画像は、工具が炭化物の上を上滑りしたことを裏付けるには有効であるが、チッピングの発生を直接裏付けるものではなく、今後も更なる検証が望まれる。



**Fig. 5.19** SEM images of chips formed by elliptical vibration cutting. (back-scattered electron images)



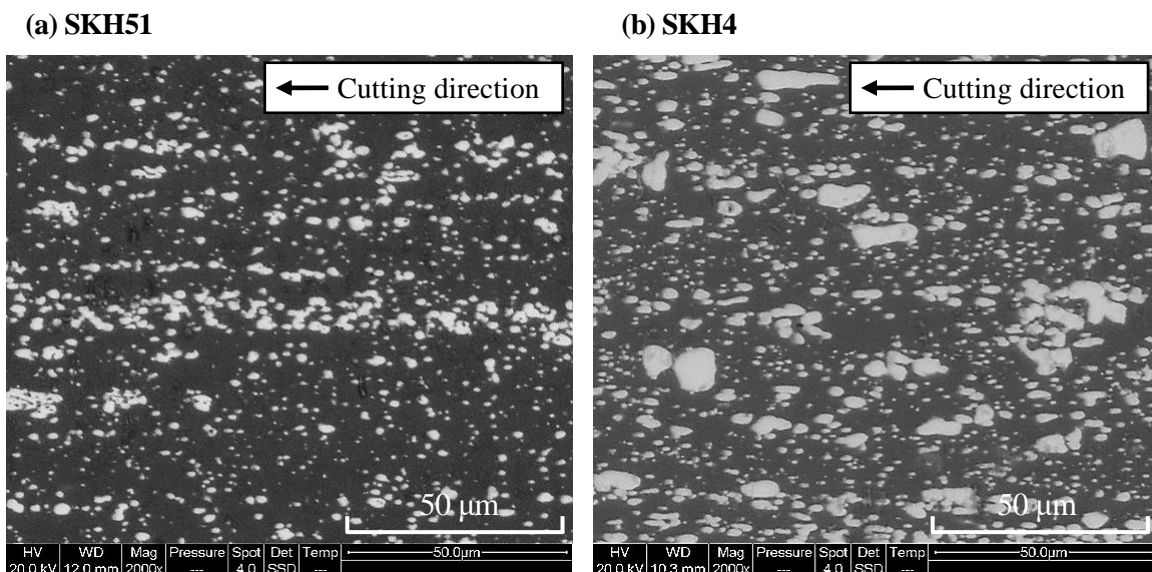


Fig. 5.20 SEM images of workpiece finished by elliptical vibration cutting. (back-scattered electron images)

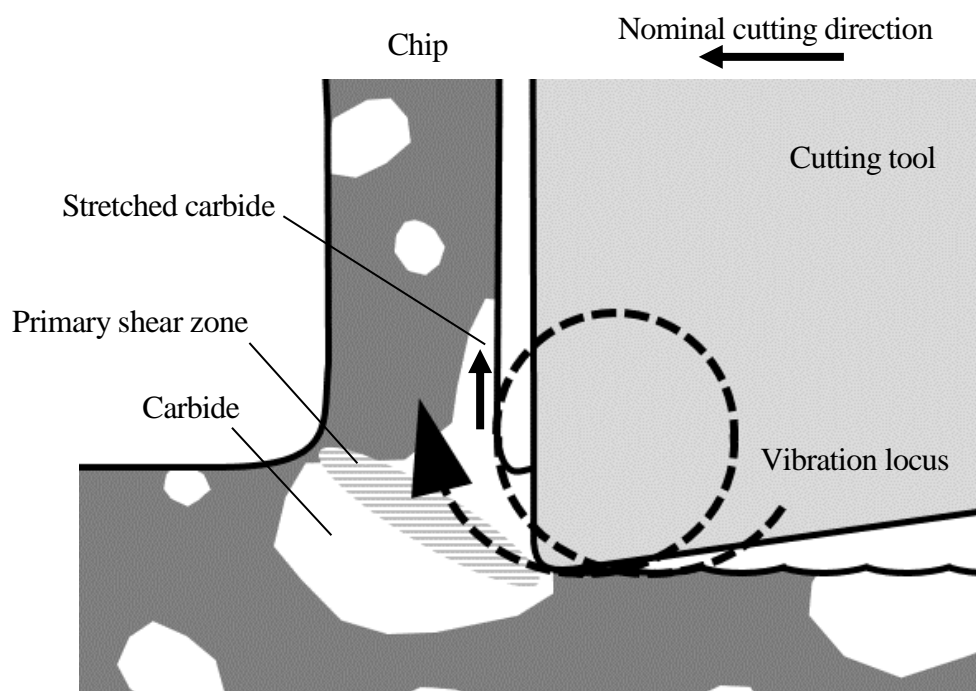


Fig. 5.21 Schematic drawing of chip formation in the elliptical vibration cutting of high-alloy steel.

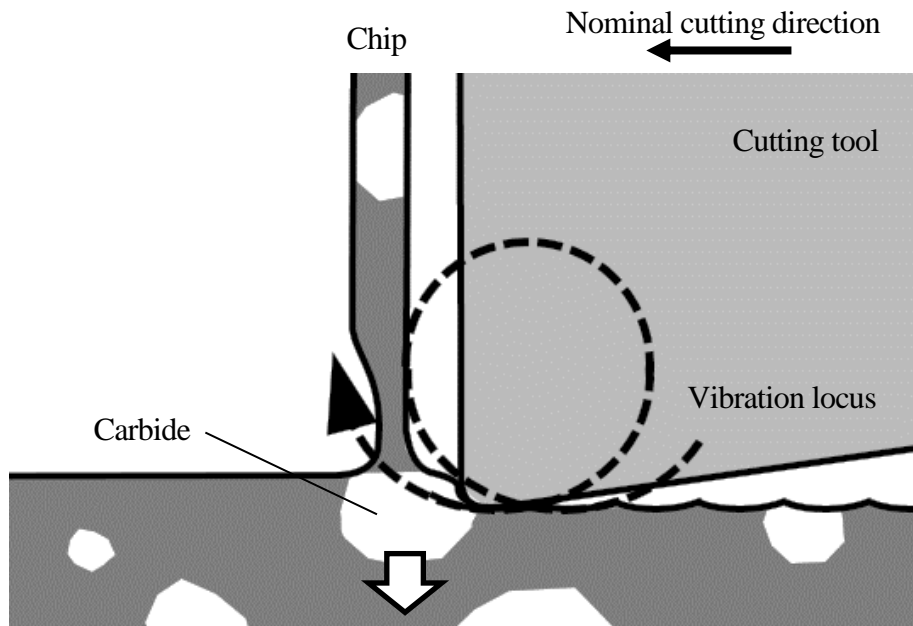


Fig. 5.22 Schematic drawing of slip of cutting tool due to hard carbide.

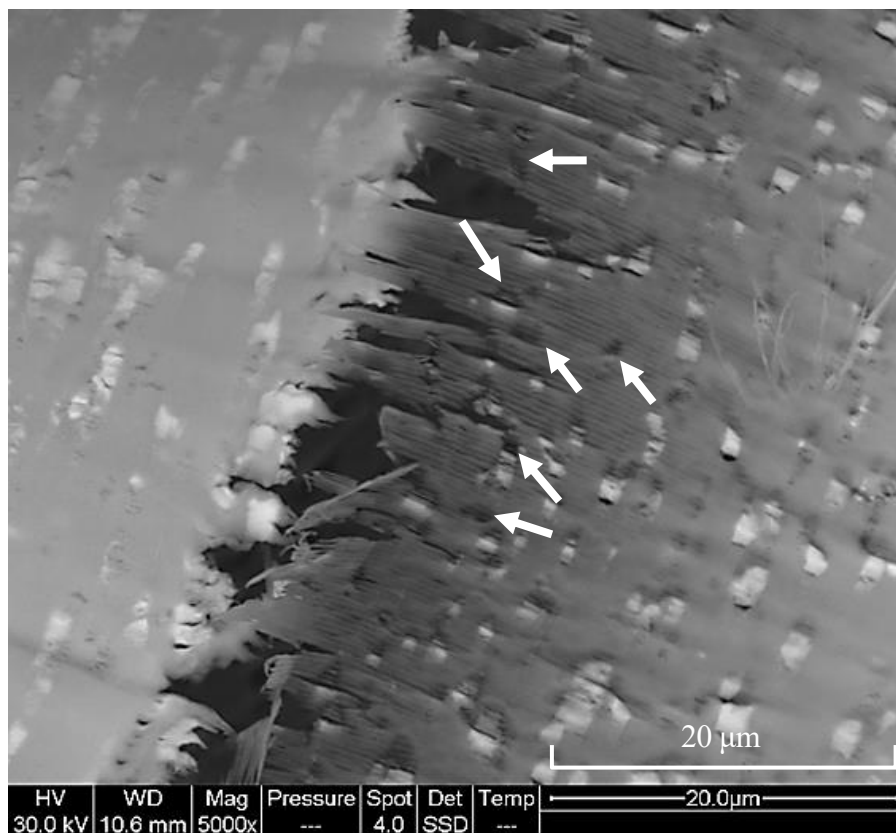
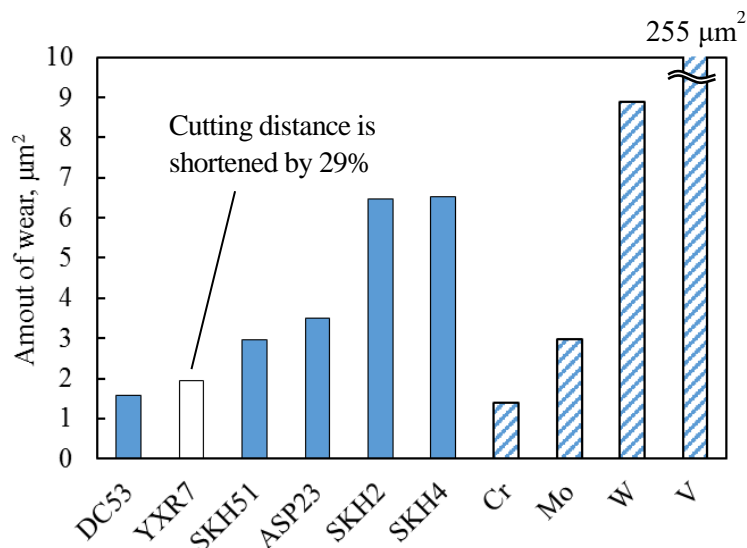


Fig. 5.23 SEM image of the chip of ASP23 formed by elliptical vibration cutting. (back-scattered electron images)

### 5.3.4 工具摩耗と合金成分の関係

Fig. 5.24 は、切削距離 108 m (YXR7 は 77 m) まで加工した後に、送り方向の切れ刃に生じた摩耗量である。無地のグラフは高硬度金型鋼の結果を示し、斜線のグラフは純金属の結果を示す。SKH2 と SKH4 はいずれも約  $6.5 \mu\text{m}^2$  と高硬度金型鋼の中で最も大きい摩耗量で、反対に DC53 は摩耗量が最も小さい  $1.6 \mu\text{m}^2$  であった。これまで示した切削抵抗 (Fig. 5.8)、表面粗さ (Fig. 5.13) の傾向と一致する。純金属の結果を見ると、タングステンとバナジウムの場合には摩耗量が  $8.9 \mu\text{m}^2$ ,  $255 \mu\text{m}^2$  と大きいのに対し、ビッカース硬度が 708 HV と今回使用した純金属で最も高いクロムの場合には  $3 \mu\text{m}^2$  と摩耗が小さい結果であった。この結果から、純金属のワークでは、硬度と単結晶ダイヤモンド工具の摩耗には関係が見られず、熱化学的な作用が強いと予想される。

単結晶ダイヤモンド工具の摩耗に影響を与える合金成分を明らかにするため、各合金成分の添加量と摩耗量の関係を Fig. 5.25 に示す。合金成分の種類は元素記号で表した。合金成分量と摩耗量の間に関係が見られたのはタングステンで、最小二乗法の近似直線 (点線) とよく一致する。さらに、タングステンにバナジウムを加えた場合 (W+V) も同様に摩耗量と相関が見られ、この 2 つの元素がダイヤモンド工具の摩耗を促進する可能性が高い。タングステンとバナジウムの加工では、比切削抵抗の増加が大きく、表面粗さも大きい結果であったことも、摩耗との関係を補足する結果である。



**Fig. 5.24** Amounts of wear after elliptical vibration cutting. (Solid bars: high-alloy steels, hatched bars: pure metals)

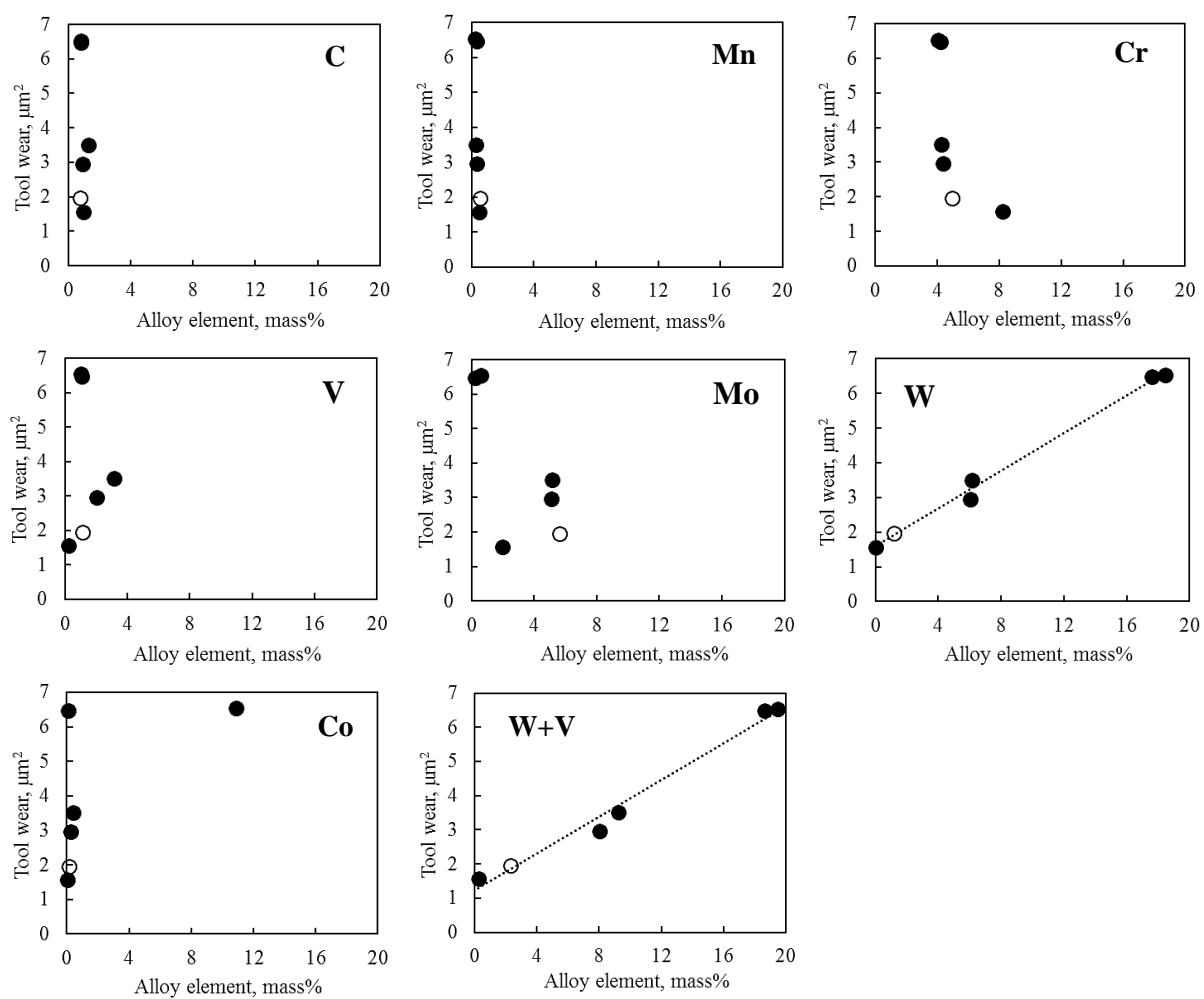


Fig. 5.25 Amounts of wear plotted against alloy elements. (The symbol “o” represents the result of YXR7, whose cutting distance is shorter by 29 % than the standard cutting distance of 108 m.)

## 5.4 合金成分の化学結合状態

これまでの実験結果から、合金成分が多量に添加された高硬度金型鋼の楕円振動切削では、タングステンとバナジウムが単結晶ダイヤモンド工具の摩耗を促進することが示唆された。また、純金属の加工実験では、ワークの硬度と摩耗量との間に関係が見られず、熱化学的な作用が関係していると考えられる。そこで、高硬度金型鋼に含まれる合金成分の化学結合状態を調べるため、X線回折(XRD)による化合物の同定と、電子線マイクロアナライザ(EPMA)による元素マッピングを行った。X線回折に使用した装置はリガク製のX線回折装置RINT2500Vで、X線源にCu K $\alpha$ を使用し、 $\theta/2\theta$ 法で $20^\circ$ から $140^\circ$ の範囲で測定した。EPMA元素マッピングでは、島津製作所製のEPMA-1610を使用し、鉄、炭素、クロム、バナジウム、モリブデン、タングステンのX線強度をカラースケールでマッピングした。

### 5.4.1 XRDによる化合物の同定

Fig. 5.26はXRDによる高硬度金型鋼のX線回折結果である。何れの鋼材でも、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $82^\circ$ 付近に $\text{Cr}_{0.03}\text{Fe}_{0.97}$ のピークが検出され、元素の構成から基地の組成を表していると考えられる。その他のピークからは、 $\text{Cr}_7\text{C}_3$ 、VC、MoC、 $\text{Mo}_2\text{C}$ 、 $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$ - $\text{Fe}_4\text{W}_2\text{C}$ の5種類の炭化物が検出された。クロムの炭化物である $\text{Cr}_7\text{C}_3$ はDC53でのみ検出された。DC53は6種類の鋼材の中で最も多いクロム8.23 mass%が添加されており、さらにタングステンを含まないため、クロムの炭化物が析出したと考えられる。反対に、タングステンが添加された鋼材、すなわちDC53以外の5種類全てにおいて $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$ - $\text{Fe}_4\text{W}_2\text{C}$ が検出された。モリブデンの炭化物MoCと $\text{Mo}_2\text{C}$ は、1 mass%以上のモリブデンが添加されたDC53、YXR7、SKH51、ASP23の4種類で、バナジウムの炭化物VCは、約1.1 mass%のバナジウムが添加されたYXR7、SKH51、ASP23の3種類でそれぞれ検出された。SKH2とSKH4は、バナジウムが1.06 mass%、1.03 mass%それぞれ添加されているものの、バナジウム炭化物VCのピークは検出されなかった。この違いについては、次項のEPMA元素マッピングで考察する。

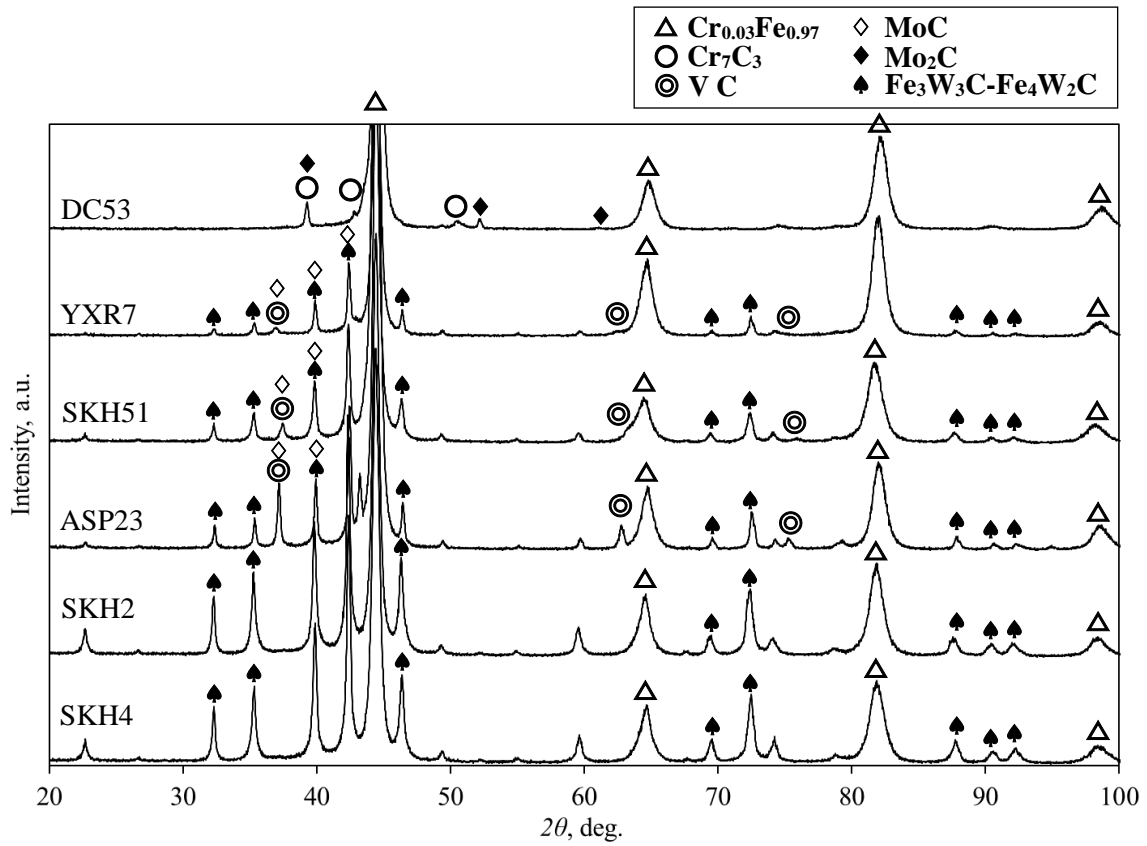


Fig. 5.26 X-ray diffraction patterns of high-alloy steels.

#### 5.4.2 EPMA 元素マッピング

Fig. 5.27 は EPMA 元素マッピングの結果である。解析した元素の種類は、元素記号で表した。DC53 の結果を見ると、炭素、クロム、バナジウム、モリブデンが概ね同じ場所に析出し、同時にこの部分は鉄の強度が低下している。XRD の結果を踏まえると、この部分には  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  と  $\text{Mo}_2\text{C}$  が共存していると考えられる。YXR7, SKH51, ASP23 の場合は、タングステンとモリブデンがほぼ同じ場所に析出しており、 $\text{MoC}$  と  $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C-Fe}_4\text{W}_2\text{C}$  が共存していることを示唆する。バナジウムが高濃度に存在する場所は炭素の濃度も高くなっており、 $\text{V C}$  の存在を示していると考えられる。これら 3 種類の鋼材 (YXR7, SKH51, ASP23) では、前述の  $\text{MoC}$  と  $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C-Fe}_4\text{W}_2\text{C}$  が共存している場所と  $\text{V C}$  が存在する場所は異なっており、 $\text{V C}$  は他の炭化物とは独立して析出する傾向が見られた。一方で SKH2 と SKH4 の場合は、炭素、タングステン、バナジウムがほぼ同じ場所に析出しており、 $\text{V C}$  が独立して析出する YXR7, SKH51, ASP23 とは異なる傾向を示した。XRD の結果からも、SKH2 と SKH4 では  $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C-Fe}_4\text{W}_2\text{C}$  のみが検出



され、VCを含む他の炭化物は検出されていないことから、SKH2とSKH4のバナジウムは、炭素のみと炭化物を形成しているのではなく、多元型の化合物として存在することが示唆された。

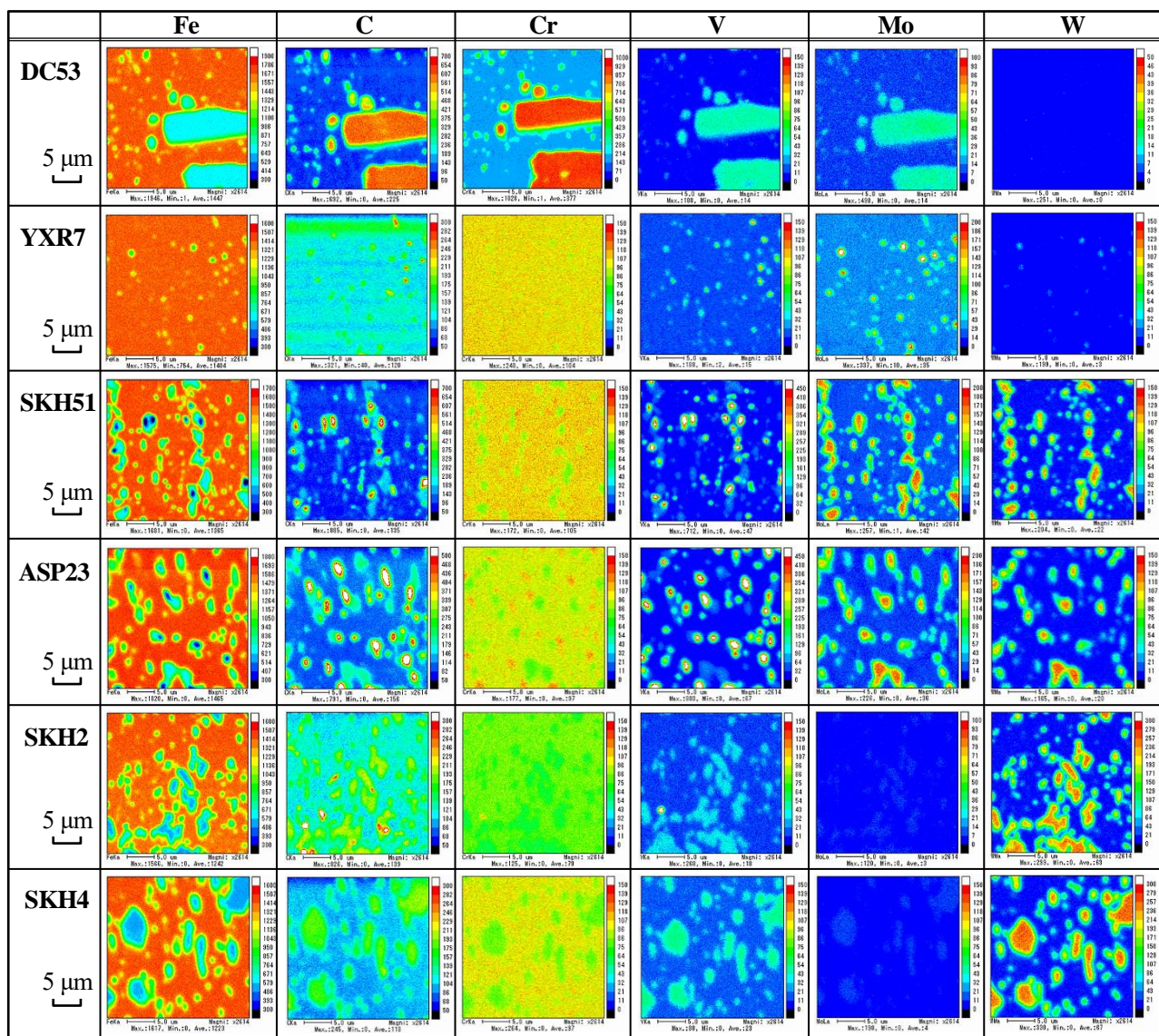


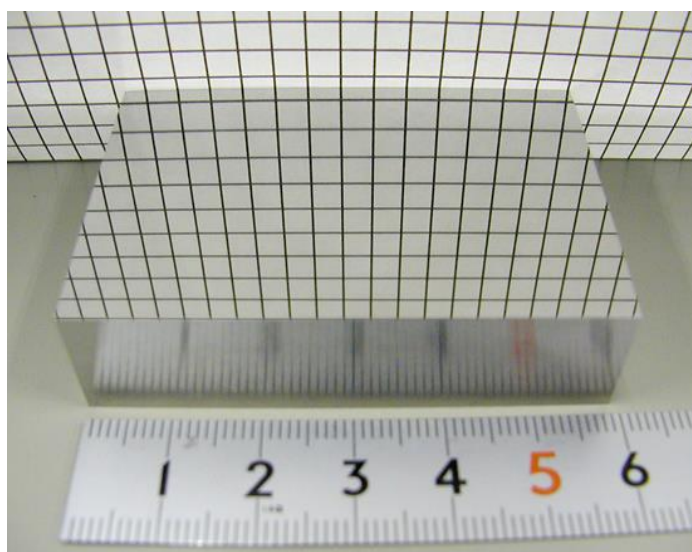
Fig. 5.27 EPMA element maps of high-alloy steels.



### 5.4.3 摩耗に影響を与える元素の化学結合状態

以上の XRD 解析結果と EPMA 元素マッピング結果より、多くの合金元素は炭化物として析出していると考えられる。一方で、佐藤らの研究<sup>94)</sup>では、一部の合金元素は基地中に鉄との合金として存在していると報告されている。例えば、SKH2, SKH4 と概ね同じ合金成分を有する 18-4-1 型の高速度鋼（タングステン:18%, クロム:4%, バナジウム:1%）では、6.2%のタングステン, 3.8%のクロム, 0.8%のバナジウムが基地中に含まれると報告されている。また、SKH51, ASP23 と概ね同じ合金成分を有する 5-4-3 型の高速度鋼では、3.5%のタングステン, 3.5%のクロム, 1.1%のバナジウムが基地中に含まれる。これらの基地中の合金成分を比較すると、18-4-1 型の基地中に含まれるタングステン量は、5-4-3 型のおよそ 2 倍である。Fig. 5.24 に示した工具摩耗量を比較すると、SKH2 と SKH4 の摩耗量は SKH51 と ASP23 の場合のおよそ 2 倍であり、基地中のタングステン量と一致する。また、純金属の加工実験において、バナジウムの場合が最も激しい工具摩耗が発生したことから、基地中に含まれるバナジウムも摩耗に作用すると考えられる。以上の結果から、基地中で炭素とは結合せずに存在するタングステンとバナジウムが、単結晶ダイヤモンド工具と化学的な相互作用を有しており、単結晶ダイヤモンド工具の摩耗が促進されると考えられる。

Fig. 5.28 は、本研究の実験結果をもとに、最も良好な切削性を示した高硬度金型鋼の DC53 を切削したサンプルの写真である。ロックウェル硬度 62.2 HRC に焼入れした鋼材に対し、表面粗さ Rt 0.05  $\mu\text{m}$  の鏡面が得られた。この加工技術が磨きレス加工技術として金型産業で応用されることが期待される。



**Fig. 5.28** Photograph of mirror surface of DC53 finished by elliptical vibration cutting with single-crystalline diamond tool.

## 5.5 結言

ロックウエル硬度 60 HRC を超える高硬度金型鋼の磨きレス鏡面加工を実現するため、単結晶ダイヤモンド工具による楕円振動切削実験を行い、単結晶ダイヤモンド工具の摩耗と合金成分の関係を調べた。加工中に生じる切れ刃のチッピングと炭化物の関係を調べるため、炭化物の粒径分布、炭化物と基地の硬度差に着目し、チッピングとの関係を調べた。また、切れ刃の摩耗と合金成分の関係を定量的に比較し、摩耗を促進する合金成分を明らかにするとともに、合金成分の化学結合状態について XRD と EPMA 元素マッピングで調べ、摩耗の原因を考察した。以下に得られた結果を示す。

- 1) チッピングは主に仕上げ面と接する切れ刃の先端部分に発生し、摩耗は主に送り方向の切れ刃に発生する。チッピングは微小な炭化物を噛み込むことで発生すると考えられ、炭化物と基地の硬度差が増加すると、また、粒径  $5\ \mu\text{m}$  以下の微小な炭化物の量が増加すると、チッピングの量も増加する傾向があることがわかった。
- 2) 純金属のタングステンとバナジウムを加工したときの摩耗量は、高硬度金型鋼の場合よりも多く、特にバナジウムの場合は他の純金属と比較し 28 倍から 160 倍の摩耗が発生した。
- 3) 過去の研究<sup>29)</sup>と比較すると、ロックウエル硬度 39 HRC の SUS420J2 の楕円振動切削では、初期の背分力約 0.3 N が、切削距離約 3000 m の時点でもおよそ 2 倍までしか上昇しないのに対し、摩耗の少ない DC53 で切削距離 100 m、摩耗の多い SKH2 では切削距離 40 m でそれぞれ背分力が 2 倍まで上昇し、高硬度金型鋼では摩耗の進行が 1 桁以上早いことがわかった。
- 4) 高硬度金型鋼に含まれる多くの合金成分は炭化物として析出しているものの、一部の元素は基地中に存在すると考えられる。基地中に存在するタングステン量とダイヤモンド工具の摩耗量が概ね一致することから、摩耗を促進する元素は基地中のタングステンと考えられる。さらに、純金属の加工実験より、基地中のバナジウムも同様な作用を有すると考えられる。
- 5) タングステンを含有せず、バナジウムの含有量が少ないダイス鋼の DC53 が単結晶ダイヤモンド工具による楕円振動切削に適しており、表面粗さ Rt 0.05  $\mu\text{m}$  の鏡面加工が実現した。

## 第6章 結論

本論文では、楕円振動切削技術の高度化を目的に、新たな工具材種や加工ワーク、切れ刃の鋭利化技術に関する実験的な研究を行った。第2章から第4章では、新たな工具材種としてダイヤモンドコーティング工具に着目し、一般の切削加工で広く利用される TiN コーティング工具と比較しながら、金型鋼の Stavax (硬度 54 HRC) に対する切削性の違いや加工のメカニズムを検討した。はじめに第2章では、安価なダイヤモンドコーティング工具による虹面加工を目的に、粗さ曲線の相関係数を用いた工具の転写性の評価方法を提案した。代表的な結果として、5  $\mu\text{m}$  以下の小さい送り量において、ダイヤモンドコーティング工具は TiN コーティング工具よりも 2.4 から 6 倍高い転写性を有することがわかった。ダイヤモンドコーティング工具による加工面は、一様にバリが生じており、表面粗さを悪化させる一方で、繰返し性の高いカッターマークにより光の回折が発現することがわかった。熱式ナノインプリントによるアクリル板への転写実験を行い、カッターマークを樹脂に転写できることを確認した。成形した透明なアクリル板においても、光の回折が得られた。

次に第3章では、コーティング材種によって転写性が異なる原因を明らかにするため、工具の摩擦係数を切削抵抗のプラウイング成分から算出し、切りくずや加工面の解析結果と合わせて切削メカニズムを検討した。また、実用的な加工条件を検討するため、楕円振動や加工液の条件を変えて耐久実験も行った。工具の摩擦係数を解析した結果、ダイヤモンドコーティング工具は加工液の有無にかかわらず約 0.2 と小さいのに対し、TiN コーティング工具の摩擦係数は、加工液を使用した場合のみダイヤモンドコーティング工具と同等に小さく、加工液を使用しないドライ切削の場合は約 0.56 まで上昇した。TiN コーティング工具で加工液によって摩擦係数が変化した結果は、楕円振動の周期が 25  $\mu\text{s}$  と短いにもかかわらず、切削液またはその蒸気が工具とワークの間に浸透していることを示唆している。しかし、TiN コーティング工具で加工したワークの表面には、スクラッチ痕が多数確認されたことから、逃げ面では部分的な潤滑不足による凝着と脱落が繰り返されたと考えられ、第2章で示した TiN コーティング工具の低い転写性につながったと考えられる。TiN コーティング工具の高い摩擦係数は、楕円振動が切りくずを引き上げる作用をより強くし、ドライの楕円振動切削で使用した場合、切りくずの厚さが減少し、鏡面レベルの表面粗さ Rt 0.044  $\mu\text{m}$  が得られることがわかった。これは、通常の切削加工では考えにくい特異な現象であ

り、切れ刃上のよどみ点 (Stagnation point) の変化で説明ができる。しかし、耐久実験の結果、摩耗の進行が早く、TiN コーティング工具によるドライ切削は実用的な加工条件とは言えない。ダイヤモンドコーティング工具の耐久実験では、金型鋼に対する高い耐摩耗性が示された。また、ダイヤモンドコーティング工具の楕円振動切削により、格子状の虹面加工サンプルを作製し、意匠性の高い金型加工への応用例を示した。一方で、切削距離 350 m または 650 m で発生したコーティングの剥離抑制が課題である。

第4章では、安価なダイヤモンドコーティング工具を Pulse Laser Grinding (PLG) で鋭利化することにより、金型鋼を鏡面レベルに仕上げることが可能であることを示した。鋭利化していないダイヤモンドコーティング工具には、半径 16  $\mu\text{m}$  程度の切れ刃丸みがあるのに対し、PLG で鋭利化した工具は、丸み半径が  $\mu\text{m}$  オーダーかそれ以下であることが確認された。鋭利化した工具で金型鋼の Stavax を楕円振動切削した結果、送り量 5  $\mu\text{m}$  のときに表面粗さ Rt 0.07  $\mu\text{m}$  の鏡面を得ることができた。

第5章では、耐摩耗性の高い金型材料であるダイス鋼やハイス鋼の磨きレス鏡面加工を目的に、ロックウエル硬度 60 HRC を超える高硬度金型鋼を単結晶ダイヤモンド工具で楕円振動切削した際のチッピングや摩耗について議論した。チッピングは主にノーズ半径の先端、すなわち仕上げ面を創成する付近の切れ刃に生じ、5  $\mu\text{m}$  以下の微小な炭化物量が多いほど、また、炭化物と基地との硬度差が大きいほど、チッピングが増加する傾向にあることがわかった。切れ刃の送り方向に生じる摩耗量は、合金成分のタングステンとバナジウムの量と相関が見られた。これらの純金属を楕円振動切削した場合も、高硬度金型鋼を加工した場合以上に摩耗が発生した。高硬度金型鋼に含まれる合金成分は、多くが炭化物として析出しているものの、一部は基地中に存在すると考えられ、摩耗に影響するのは基地中に存在するタングステンとバナジウムであることが示唆された。これらの結果より、タングステンを含有せず、バナジウムの含有量が少ないダイス鋼の DC53 が単結晶ダイヤモンド工具による楕円振動切削に適しており、表面粗さ Rt 0.05  $\mu\text{m}$  の鏡面加工が実現した。

以上の研究成果が、様々な種類の金型鋼に対する高精度加工技術、磨きレス鏡面加工技術として普及し、金型産業の競争力向上に寄与することを期待する。今後は、金型加工に必要な楕円振動切削専用のツールパス作成技術の開発によって、楕円振動切削の普及が更に加速すると考えられる。

## 謝辞

本論文は、名古屋大学大学院工学研究科機械理工学専攻 社本英二 教授のご指導のもと、山形県工業技術センターおよび名古屋大学にて実施した研究成果をまとめたものである。社本教授には、遠方からの入学をご快諾いただき、常に親身になってご指導いただいた。また、鈴木教和 准教授にも、楢円振動切削のご経験に基づいた貴重なご助言をいただいた。ここに記し、深甚な謝意を表す。名古屋大学 梅原徳次 教授、鈴木教和 准教授、名古屋工業大学 中村隆 教授には、副査として本論文の構成や研究内容を審査していただいた。副査の先生方にも心から謝意を表す。実験の遂行にあたっては、加工実験やその評価において、社本研究室 修士2年の鄭弘鎮 氏に多大なご協力をいただいた。また、秘書の石原朋子 氏、高谷めぐみ 氏には、日頃から事務手続き全般についてご支援いただいた。ここに記し、心から謝意を表す。

山形県工業技術センターの鈴木庸久 博士、金田亮 博士には、研究の進め方のみならず、ご自身の博士課程のご経験に基づくご助言をいただいた。中野正博 氏、藤野知樹 氏、加藤睦人 氏には、第5章で実施した化学分析を快くお引き受けいただいた。社会人コースの中で本研究を遂行するにあたり、日々の業務の調整は不可欠であり、小林庸幸 氏には日頃より多岐にわたるご支援をいただいた。ここに記し、各位に心から謝意を表す。

最後に、本研究の遂行を陰ながら支えてくれた両親と妻に心から感謝する。

本研究の一部は、知の拠点あいち重点研究プロジェクト「難加工性材料の超精密・高能率加工技術の開発」の支援により行われた。第2章から第4章で使用したダイヤモンドコーティング工具は、オーエスジー株式会社より特別に提供していただいた。第4章で実施した PLG によるダイヤモンドコーティング工具の鋭利化処理では、名古屋工業大学の糸魚川文広 教授のご協力により行われた。第5章で使用した高硬度金型鋼の一部は、大同 DM ソリューション株式会社より提供していただいた。ここに記し、関係各位に深謝する。

## 参考文献

- 1) 日本金型工業会ホームページ, <http://www.jdmia.or.jp/mold/>, (2017/3/1).
- 2) 中小企業庁 中小企業の特定期間のつくり基盤技術の高度化に関する指針, [http://www.chusho.meti.go.jp/keiei/sapoin/2012/0412Kiban\\_Shishin.htm](http://www.chusho.meti.go.jp/keiei/sapoin/2012/0412Kiban_Shishin.htm), (2016/3/1).
- 3) 金田亮, 高橋俊広, 滝口正康, 土方元治, 伊藤浩志. 高密度ポリエチレンの射出プレス成形. プラスチック成形加工学会第24回秋季大会 2016:B211.
- 4) 平林 巧造. 最先端プレス加工技術. 精密工学会誌 2011;77:652-5.
- 5) 柘田 正美. 機能表面. 精密工学会誌 2009;75:103-5.
- 6) 庄司 克雄. 研削加工の軌跡. 精密工学会誌 1999;65:31-6.
- 7) 金田 亮, 松田 丈, 櫻井 郁雄, 安孫子 律子, 木村 茂雄, 庄司 克雄. 石英ガラスの鏡面研削. 2008年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集 2008:525-6.
- 8) 松田 丈, 金田 亮. 超精密研削加工における超砥粒ホイールの高精度成形に関する研究. 2008年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集 2008:523-4.
- 9) 萩原 親作, 帯川 利之, 臼井 英治. ドレッシングにおける砥粒切れ刃の形状分布. 精密工学会誌 1990;56:164-8.
- 10) 大森 整. ELID 研削加工技術. 精密工学会誌 2004;70:757-60.
- 11) 大森 整, 山形 豊, 守安 精, 上原 嘉宏, 片平 和俊, 林 偉民. マイクロ研削加工. 精密工学会誌 2002;68:171-4.
- 12) 森脇 俊道. 切削加工の軌跡. 精密工学会誌 1999;65:25-30.
- 13) 山形 豊. 超精密切削加工とそのアプリケーション. 精密工学会誌 2008;74:1278-81.
- 14) 高橋 俊広, 小林 庸幸, 齊藤 寛史, 高谷 浩志, 栗野 裕介. 高アスペクト比微細溝の切削加工: マイクロ四角柱の製作. 2008年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集 2008:133-4.
- 15) Suzuki H, Okada M, Masuda Y, Namba Y, Miura K, Morita S, Yamagata Y. Ultraprecision Cutting of Nickel Plated Mold for X-Ray Mirror. Int J Autom Technol 2016;10:624-31.
- 16) 山地 祥隆, 古城 直道, 樋口 誠宏, 山口 智実, 島田 尚一, 田中 宏明. ダイヤモンド工具の摩耗メカニズムと摩耗形態. 2009年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集 2009:61-2.
- 17) Song Y, Nezu K, Park C, Moriwaki T. Tool wear control in single-crystal diamond cutting of steel by using the ultra-intermittent cutting method. Int J Mach Tools Manuf 2009;49:339-43.
- 18) 本田 索郎, 足立 和俊, 上田 順弘, 榮川 元雄, 山口 勝己, 宇田 豊, 島田 尚一.

鉄系材料の超精密切削加工におけるダイヤモンド工具の摩耗抑制. 2014 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集 2014:497-8.

- 19) Shimada S, Tanaka H, Higuchi M, Yamaguchi T, Honda S, Obata K. Thermo-chemical wear mechanism of diamond tool in machining of ferrous metals. *Ann CIRP* 2004;53:57-60.
- 20) Paul E, Evans CJ, Mangamelli A, McGlaufflin ML, Polvani RS. Chemical aspects of tool wear in single point diamond turning. *Precis Eng* 1996;18:4-19.
- 21) 古城 直道, 樋口 誠宏, 山口 智実 [他]. 炭素拡散に基づくダイヤモンド工具の熱化学研磨. *日本機械学会論文集* 2010;76:974-80.
- 22) Brinksmeier E, Gläbe R, Osmer J. Ultra-precision diamond cutting of steel molds. *Ann CIRP* 2006;55:551-4.
- 23) Wang Y, Suzuki N, Shamoto E, Zhao Q. Investigation of tool wear suppression in ultraprecision diamond machining of die steel. *Precis Eng* 2011;35:677-85.
- 24) 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 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集 2015:215-6.
- 25) 西口 隆, 榎田 正美. 単結晶 CBN 工具による鉄系材料の精密切削. *精密工学会誌* 1988;54:384-9.
- 26) Casstevens J.M. Diamond turning of steel in carbon saturated atmospheres. *Precis Eng* 1983;5:9-15.
- 27) 鴨居 佳輝, 奥田 孝一, 静 弘生, 布引 雅之. ダイヤモンド工具を用いた炭素鋼の超精密切削加工に関する研究. *砥粒加工学会誌* 2015;59:582-7.
- 28) 磯部 浩巳, 原 圭祐, 岳 義弘. 超音波援用研削加工による金型の鏡面仕上げ技術の開発. *砥粒加工学会誌* 2010;54:288-92.
- 29) 原 圭祐, 磯部 浩巳, 吉原 英雄, 久曾神 煌, 柳 和久. 超音波振動を援用した金型の鏡面仕上げ加工 (第 2 報). *精密工学会誌* 2007;73:460-4.
- 30) 鈴木 清, 井出 明, 濱下 勇樹, 上原 嘉宏, 深津 拓也, 平井 聖児, 植松 哲太郎. ピエゾ素子を利用した金型への虹面創成法. 1997 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集 1997:363.
- 31) Yang Y, Pan Y, Guo P. Structural coloration of metallic surfaces with micro/nano-structures induced by elliptical vibration texturing. *Applied Surface Science* 2017;402:400-9.
- 32) Moriwaki T, Shamoto E. Ultraprecision Diamond Turning of Stainless Steel by Applying Ultrasonic Vibration. *Ann CIRP* 1991;40:559-62.



- 33) Weber H, Herberger J, Pilz R. Turning of Machinable Glass Ceramics with an Ultrasonically Vibrated Tool. Ann CIRP 1984;33:85-7.
- 34) Takeyama H, Iijima N. Machinability of Glassfiber Reinforced Plastics and Application of Ultrasonic Machining. Ann CIRP 1988;37:93-6.
- 35) Moriwaki T, Shamoto E, Inoue K. Ultraprecision Ductile Cutting of Glass by Applying Ultrasonic Vibration. Ann CIRP 1992;41:141-4.
- 36) Schmütza J, Brinksmeier E, Bischoff E. Sub-surface deformation in vibration cutting of copper. Precis Eng 2001;25:218-23.
- 37) Shamoto E, Moriwaki T. Study on elliptical vibration cutting. CIRP1994;43:35-8.
- 38) Shamoto E, Moriwaki T. Ultraprecision diamond cutting of hardened steel by applying elliptical vibration cutting. CIRP 1999;48:441-4.
- 39) 社本 英二, 森本 祥之, 森脇 俊道. 楕円振動切削加工法 (第1報)-加工原理と基本特性-. 精密工学会誌 1996;62:1127-31.
- 40) 社本 英二, 森本 祥之, 森脇 俊道. 楕円振動切削加工法 (第2報)-振動条件の影響に関する検討-. 精密工学会誌 1999;65:411-7.
- 41) 社本 英二, 馬 春翔, 森脇 俊道. 楕円振動切削加工法 (第3報) -三次元切削への適用と実用的諸効果の検討-. 精密工学会誌 1999;65:586-91.
- 42) Brehl, D.E, Dow, T.A. Review of vibration-assisted machining. Precis Eng 2008;32:153-72.
- 43) Shamoto E, Suzuki N, Moriwaki T, Naoi Y. Development of ultrasonic elliptical vibration controller for elliptical vibration cutting. CIRP 2002;51:327-30.
- 44) 社本 英二, 鈴木 教和, 森脇 俊道, 直井 嘉和. 楕円振動切削加工法(第4報) -工具振動制御システムの開発と超精密切削への適用-. 精密工学会誌 2001;67:1871-7.
- 45) 浜田 晴司, 上山 崇. 楕円振動切削装置の開発. 精密工学会誌 2008;74:534-8.
- 46) 多賀電気(株) ホームページ, <http://www.tagaele.com/EL50presen/p06.html>, (2017/3/6)
- 47) Suzuki N, Haritani M, Yang J, Hino R, Shamoto E. Elliptical Vibration Cutting of Tungsten Alloy Molds for Optical Glass Parts. Ann CIRP 2007;56:127-30.
- 48) 鈴木 教和, 閻 甄敏, 針谷 誠, 楊 積彬, 浜田 晴司, 樋野 励, 社本 英二. 超音波楕円振動切削によるタングステン合金の超精密加工. 精密工学会誌 2007;73:360-6.
- 49) 鈴木 教和, 閻 甄敏, 社本 英二, 平原 靖大, 増田 忠志. 楕円振動切削による単結晶ゲルマニウムの延性モード加工. 2006 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集 2006:785-6.

- 50) 社本 英二, 鈴木 教和, 益田 真輔. 単結晶材料の延性モード超音波楕円振動切削加工. 2003 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集 2003:419.
- 51) Ma C, Shamoto E, Moriwaki T, Zhang Y, Wang L. Suppression of burrs in turning with ultrasonic elliptical vibration cutting. *Int. J. Mach. Tools Manuf* 2005;45:1295–300.
- 52) 社本 英二, 鈴木 教和, 土屋 英滋, 堀 康德, 稲垣 浩, 吉野 清. 楕円振動切削による金型鋼の自由曲面加工 (第 1 報). *精密工学会誌* 2006;72:1088-92.
- 53) 鈴木 教和, 樋野 励, 土屋 英滋, 社本 英二. 楕円振動切削による金型鋼の自由曲面加工 (第 2 報) -3 自由度超音波楕円振動工具の開発-. *精密工学会誌* 2007;73:117-23.
- 54) Shamoto E, Suzuki N, Tsuchiya E, Hori Y, Inagaki H, Yoshino K. Development of 3 DOF Ultrasonic Vibration Tool for Elliptical Vibration Cutting of Sculptured Surfaces. *Ann CIRP* 2005;54:321-4.
- 55) Zhang X, Senthil Kumar A, Rahman M, Nath C, Liu K. Experimental study on ultrasonic elliptical vibration cutting of hardened steel using PCD tools. *J Mater Process Technol* 2011;211:1701–9.
- 56) Nath C, Rahman M, Soon Neo K. Machinability study of tungsten carbide using PCD tools under ultrasonic elliptical vibration cutting. *Int J Mach Tools Manuf* 2009;49:1089–95.
- 57) Dismukes JP, Busch JV, Nallicheri NV, Walton KR. Economic assessment of CVD diamond synthesis technologies. *Mater Sci Monogr* 1991;73:635–44.
- 58) Karner J, Pedrazzini M, Reineck I, Sjostrand ME, Bergmann E. CVD diamond coated cemented carbide cutting tools. *Mater Sci Eng* 1996;209:405–13.
- 59) Torres CD, Heaney PJ, Sumant AV, Hamilton MA, Carpick RW, Pfefferkorn FE. Analyzing the performance of diamond-coated micro end mills. *Int J Mach Tools Manuf* 2009;49:599–612.
- 60) Huang TH, Kuo CT, Lin TS, Chang CS. Wear behaviour of various diamond-coated cutting tools under different deposition conditions. *Diam Relat Mater* 1993;2:928–32.
- 61) 渡邊 英人, 岡田 将人, 吉田 昭宏, 古本 達明, 浅川 直紀. ダイヤコート超硬エンドミルによる超硬合金の切削加工. *精密工学会誌*, 2014;80:615-6.
- 62) Hanyu H, Kamiya S, Odagi H, Murakami Y, Saka M. Development of high performance diamond-coated drills for cutting high silicon aluminum alloy. *Thin Solid Films* 2002;413:139–146.
- 63) S. Durante and G. Rutelli and F. Rabezzana. Aluminum-based MMC machining with diamond-coated cutting tools. *Surface and Coatings Technology* 1997;94-95:632–40.

- 64) 齊藤 寛史, 鄭 弘鎮, 社本 英二, 呉 宗哲, 簡 瑞廷. 単結晶ダイヤモンド工具による高硬度焼入れ鋼の楕円振動切削. 2015 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集 2015:195-6.
- 65) 齊藤 寛史, 社本 英二. ダイヤモンドコーティング工具による金型鋼の楕円振動切削. 2014 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集 2014:491-2.
- 66) 菅沼 慎也, 糸魚川 文広, 前川 覚, 早川 伸哉, 中村 隆. パルスレーザー研削(PLG)を用いた工具刃先の精密成形のための実験的研究. 2015 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集 2015:423-4.
- 67) 菅沼 慎也, 糸魚川 文広, 前川 覚, 早川 伸哉, 中村 隆. パルスレーザー研削(PLG)を用いた工具刃先の精密成形のための実験的研究. 2015 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集 2015:423-4.
- 68) 馬淵 雄丞, 糸魚川 文広, 河田 圭一, 菅沼 哲郎, 中村 隆. パルスレーザーを用いた cBN 工具エッジ成形と焼入れ鋼の研削レス化. 2014 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集 2014:759-60.
- 69) 田中 隆太郎, 山根 八洲男, 杉野 直規, 關谷 克彦, 山田 啓司. 旋削加工における仕上げ面粗さに関する一考察 . 2015 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集 2015:421-2.
- 70) 井川 直哉, 島田 尚一. 超精密切削加工の精度限界. 精密工学会誌 1986;52:2000-4.
- 71) 松田 稔. デジタル信号処理入門. 日刊工業新聞社, 1984, 218p.
- 72) 三木 寛之, 竹野 貴法, 高木 敏行. 低摩擦低摩耗摺動機器のための半鏡面研磨ダイヤモンドコーティングによる表面改質技術. 日本機械学会年次大会講演論文集 2009:395-6.
- 73) Malekian M, Mostofa M.G, Park S.S, Jun M.B.G. Modeling of minimum uncut chip thickness in micro machining of aluminum. J Mater Process Technol 2012;212:553-9.
- 74) Yuan Z.J, Zhou M, Dong S. Effect of diamond tool sharpness on minimum cutting thickness and cutting surface integrity in ultraprecision machining. J Mater Process Technol 1996;62:327-30.
- 75) Liu X, DeVor R.E, Kapoor S.G. An Analytical Model for the Prediction of Minimum Chip Thickness in Micromachining. J Mater Process Technol 2006;128:474-81.
- 76) Vogler M.P, DeVor R.E, Kapoor S.G. On the Modeling and Analysis of Machining Performance in Micro-Endmilling, Part I: Surface Generation. J Mater Process Technol 2004;126:685-94.

- 77) Wang Y, Shamoto E. Elliptical vibration cutting of hardened steel with large nose radius single crystal diamond tool. *Int J Autom Technol* 2014;8:820-6.
- 78) 馬越 聖剛, 鈴木 浩文, 山本 雄士, 沖野 正, 土方 祥男, 森脇 俊道. 焼結ダイヤモンド工具の高精度・高能率成形に関する研究. 2005 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集 2005:435-6.
- 79) 山本 雄士, 鈴木 浩文, 森脇 俊道, 沖野 正, 樋口 俊郎. マイクロフレネルレンズ成形型の超精密研削 (第 2 報) -モリブデン製ツルアによる鋭利なエッジを有する研削ホイールの精密ツルア加工とフレネル形状の研削加工の高精度化-. *精密工学会誌* 2007;73:688-92.
- 80) 横沢 毅, 高木 純一郎, 片岡 征二, 田中 信一. CVD ダイヤモンド膜の研磨に関する研究 (第 1 報). *精密工学会誌* 2005;71:1131-6.
- 81) 楊 政峰, 吉川 昌範. 熱化学反応によるダイヤモンド膜の研磨. *精密工学会誌* 1991;57:184-9.
- 82) 村上 良彦, 櫻井 正俊, 湯井 繁, 松橋 英明, 劉 浩, 河合 龍吾. ダイヤモンドコーティング切削工具の被膜研削技術および研削品の性能評価. *精密工学会誌* 2003;69:242-6.
- 83) 劉 浩, 羽生 博之, 杉田 博昭, 村上 良彦. ダイヤモンドコーティング切削工具の被膜研削によるワーク被削面粗さの向上. 2000 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集 2000:130-1.
- 84) 石丸 大祐, 坂本 武司, 神崎 成広, 峠 睦. UV アシスト研磨による CVD ダイヤモンド膜付超硬工具切れ刃の鋭利化と切削性能評価. *精密工学会誌* 2013;79:1235-9.
- 85) ダイヤモンド工業協会 編. *ダイヤモンド技術総覧*. エヌジーティー, 2007, 703p.
- 86) 鈴木 浩文, 藤井 一二, 岡田 睦, 古木 辰也, 中野 恵太. レーザ加工マイクロファブリケーションによる単結晶ダイヤモンド製マイクロフライス工具の試作と超硬合金の超精密切削. *機械材料・材料加工技術講演会講演論文集* 2012:912-1-912-2.
- 87) 鈴木 浩文, 藤井 一二, 岡田 睦, 古木 辰也. マイクロフライス工具による超硬合金の超精密切削:単結晶ダイヤモンド製マイクロフライス工具の試作と超硬合金の超精密切削の検証. 2012 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集 2012:821-2.
- 88) 大藤 弘明, 奥地 拓生, 小竹 翔子, 鍵 裕之, 長友 正平, 菅田 充, 角谷 均. ダイヤモンドのレーザー加工表面の微細組織・構造観察. *日本鉱物科学会年会講演要旨集* 2008:R6-P08.
- 89) 天本 祥文, 吉田 昌史, 仙波 卓弥, 角谷 均. ナノ多結晶ダイヤモンド製ノーズ R

- バイトに対するレーザ成形技術. 日本機械学会論文集(C編) 2012;78:3583-93.
- 90) 大崎 英樹, 鈴木 俊太郎, 新田 円空, 渡邊 英人. 硬質皮膜被覆切削工具. 特許 2013-226984. 2013.10.31.
- 91) 佐藤 知雄, 西沢 泰二, 石原 襄. 鉄鋼中の炭化物の硬度について. 日本金属学会誌 1959;23:403-7.
- 92) Zhang J, Suzuki N, Wang Y, Shamoto E. Fundamental investigation of ultra-precision ductile machining of tungsten carbide by applying elliptical vibration cutting with single crystal diamond. J Mater Process Technol 2014;214:2644-59.
- 93) 杉田 忠彰, 上田 完次, 稲村 豊四郎. 基礎切削加工学. 共立出版(株), 1984, 288p.
- 94) 佐藤 知雄, 西沢 泰二, 村井 弘佑. 高C高V高速度鋼中の炭化物について. 鉄と鋼 1959;45:511-6.

## 関連発表論文

### 1. 論文

(1) Saito H, Jung H, Shamoto E. Elliptical vibration cutting of hardened die steel with coated carbide tools. *Precis Eng* 2016;45:44-54.

(2) Saito H, Jung H, Shamoto E, Wu T.C, Chien J.T. Mirror Surface Machining of High-Alloy Steels by Elliptical Vibration Cutting with Single-Crystalline Diamond Tools - Influence of Alloy Elements on Diamond Tool Damage -. *Precis Eng* (In Press).

### 2. 国際会議

(1) Saito H, Jung H, Shamoto E, Suganuma S, Itoigawa F. Mirror Surface Machining of Die Steel by Elliptical Vibration Cutting with Diamond-Coated Tools Sharpened by Pulse Laser Grinding. The 16<sup>th</sup> International Conference on Precision Engineering (ICPE 2016). Hamamatsu, Japan, Nov. 14-16, 2016.

### 3. 学会発表

(1) 齊藤 寛史, 社本 英二. ダイヤモンドコーティング工具による金型鋼の楕円振動切削. 2014 年度精密工学会春季大会学術講演会. 東京大学本郷キャンパス, 2014/3/18-20.

(2) 齊藤 寛史, 工藤 博他, 石山 和浩, 社本 英二. コーティング工具による高硬度工具鋼の楕円振動切削. 2015 年度精密工学会春季大会学術講演会. 東洋大学白山キャンパス, 2015/3/17-19.

(3) 齊藤 寛史, 鄭 弘鎮, 社本 英二, 呉 宗哲, 簡 瑞廷. 単結晶ダイヤモンド工具による高硬度焼入れ鋼の楕円振動切削 -合金元素が工具摩耗に与える影響-. 2015 年度精密工学会秋季大会学術講演会. 東北大学川内北キャンパス, 2015/9/4-6.

(4) 齊藤 寛史, 社本 英二. 精密成形に向けたダイヤモンドコーティング工具による金型鋼の楕円振動切削. プラスチック成形加工学会第 24 回秋季大会 成形加工シンポジウム'16. 仙台国際センター, 2016/10/26-27.