CVD ダイヤモンド膜の研磨に関する研究 (第3報) *

—砥粒レス超音波研磨法による平面研磨の試み—

横沢 毅** 高木純一郎*** 片岡征二† 田中信一††

Study on Polishing of CVD Diamond Film (3rd report)

-An attempt of polishing flat surface with non abrasive ultrasonic vibration polishing -

Tsuyoshi YOKOSAWA, Jun-ichiro TAKAGI, Seiji KATAOKA and Shinichi TANAKA

“Non abrasive ultrasonic vibration polishing” had been proposed as a new polishing method of CVD diamond film and it was clarified that CVD diamond film can be polished smoothly and continuously by using pure titanium as tool material and spreading thin oil film on work surface. In order to apply this method to practical use such as low friction forming tool, polishing of plane surface with this method was attempted and following results are obtained. (1)Combination of tool feed direction and ultrasonic vibration direction influences the roughness of polished surface, (2) It is possible to polish plane area of CVD diamond film by overlapping linear polishing mark in perpendicular to tool feed direction, (3)CVD diamond film can be polished homogeneously by the combination of polishing direction,(4)Roughness of CVD diamond film polished by this method reaches $0.06\mu\text{m}$ to $0.08\mu\text{m}$ in Ra, $0.4\mu\text{m}$ to $0.5\mu\text{m}$ in Rz.

Key words: CVD diamond film, ultrasonic vibration polishing, non abrasive polishing, titanium tool

1. 結 言

ダイヤモンドの研磨方法として、ダイヤモンド砥粒や砥石を用いた機械的な研磨方法がこれまで最も一般的であった。しかし、この方法は非常に時間を要するという短所がある。このような短所を克服し効率的にダイヤモンドを研磨する方法として、これまでダイヤモンドと鉄系金属との熱化学反応を利用した研磨法¹⁾²⁾や高速摺動研磨法³⁾⁴⁾、あるいはチタン金属間化合物砥石を用いた研磨法⁵⁾が提案されている。

一方著者らは、3次元形状を有するプレス金型にコーティングされたCVDダイヤモンド膜の研磨方法として、超音波による摩擦熱を利用した砥粒レス超音波研磨法を提案し、その効果について検討してきた^{6)~13)}。またこのとき工具と被研磨物との片当たりを防ぐとともに接触面に熱エネルギーを集中させる目的から、工具と被研磨物とを点接触させるために工具、被研磨物共に円筒形状にし、さらにそれらを直行させ研磨を行ってきた。

その結果、油を塗布したCVDダイヤモンド膜に超音波振動する純チタン工具を接触させ、その状態で工具送りをかければ、幅 0.6mm ~ 1mm 程度の線状の連続的で滑らかな研磨面が得られることを確認した。さらに、研磨の進みやすさや、研磨面の表面粗さは振動振幅、研磨荷重、工具送り速度、同一研磨面上の研磨回数といった研磨条件に影響を受け、適切な研磨条件を選べば、研磨は進みやすくなり、また良好な研磨面が得られることも確認した^{9)~13)}。

そこで本研究では、平面にコーティングされたCVDダイヤモンド膜を砥粒レス超音波研磨法によって研磨することを目的に、工具にピックフィードをかけ線状の研磨痕を重ね合わせるこ

Fig.1 Schematic of polishing set up

で平面研磨する方法を提案し、その可能性を検討した。なお、プレス金型にCVDダイヤモンド膜をコーティングし無潤滑プレスを行う場合、最大高さ粗さが $0.5\mu\text{mRz}$ 以下であれば十分実用に供せるとの報告¹⁴⁾があることから本研究において目標とする研磨後の表面粗さを最大高さ粗さで $0.5\mu\text{mRz}$ 以下とする。

2. 研磨装置と研磨法

2.1 研磨装置

実験装置の概略図を図1に示す。本機はNCフライスの主軸に、工具を縦振動させる超音波振動系を装着している。超音波振動系は、超音波振動子、コーン、ホーンおよび工具から構成されている。振動子、コーン、ホーンおよび工具はそれぞれねじで固定されている。超音波振動系の発振周波数は 20.5kHz 一定であり、振動振幅はホーン形状を変えることによって、 $4\mu\text{m}_{pp}$

* 原稿受付 平成17年11月18日

** 正会員 都立産業技術研究所 (東京都北区西が丘3-13-10)

*** 正会員 横浜国立大学 (横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5)

† (財)東京都中小企業振興公社 (東京都大田区南蒲田1-20-20)

†† 正会員 日本電子工業㈱ (東京都品川区小山2-8-18)

～35 μm_{pp} まで変化させることができる。加工中の振動振幅の値は、あらかじめ振動振幅と超音波発振器の出力電流との関係を調べておき、超音波発振器の出力電流値から校正した。

超音波発振器は、ボルト締めラジバン型振動子をもちい、振動系の共振周波数を自動追尾でき、負荷変動に関わらず振動子の振動振幅を一定に制御できる機能を備えている。

テーブル上に固定されたキスラーの動力計は研磨荷重を測定するためのものである。ここで研磨荷重とは、工具の被研磨物への押し付け荷重のことである。

本研究では、平面を研磨することを目的としているが、これまで同様、工具と被研磨物との片当たりを防ぎ、熱エネルギーを狭い面積に集中させるために工具は被研磨物に点接触させる^{9)~13)}必要がある。そのため工具先端は図1に示すように球状とした。

工具長さは、発振周波数を振動系の共振周波数に同調させるために、工具波長を λ とすると $\lambda/2$ の長さが必要になる。本研究において使用する超音波振動系は第2報¹²⁾で用いたものと同様のものであり、工具長さを125mmとした。工具は先端が球状になっているが、発振周波数を振動系の共振周波数に同調させるのに影響を及ぼすほどの大きさでないと判断した。なお、工具先端の球形状の半径は6mm、被研磨物に接触する位置は工具底面から2mmの位置、工具ストレート部分の直径は12mmである。

被研磨物の形状は20×20×50mmの直方体であり、先端20mmの部分にCVD法によって膜厚15 μm のダイヤモンド膜がコーティングされている。また、研磨前の表面粗さを調べるために使用する10本の被研磨物の任意面を、それぞれ5箇所ずつ測定方向を直交させて測定をした。このとき測定方向の違いによる表面粗さの違いはなく、測定値をすべて平均した結果、研磨前の被研磨物の表面粗さは算術平均粗さで0.2 μmRa 、最大高さ粗さで

Fig2 Two type of polishing system

Table1 Polishing condition

Vibration amplitude (μm_{pp})	5.5, 7.9, 11
Polishing load (N)	5, 10, 15, 20
Tool feed velocity (mm/min)	2, 4, 6, 8, 10, 20, 30, 40, 50
Polishing distance (mm)	4
Tool material	Pure titanium
Applied oil	Vegetable oil

1.3 μmRz であった。

2.2 研磨方法

図2は工具送り方向と振動方向の関係を示したものである。(a)に示すように工具送り方向と振動方向が一致する研磨法を「平行研磨法」、(b)に示すように工具送り方向と振動方向が直交する研磨法を「直交研磨法」とよぶことにする。

いずれの研磨方法においても、工具に超音波を印加するタイミングは、工具を被研磨物に押し付け、所定の研磨荷重になった時点である。その後、工具に送りをかけ、所定の距離移動させたところで、工具を被研磨物から逃がし、超音波を止める。

常に新しい工具面で研磨を行うために、超音波を止めた時点でわずかに工具を回転させ、研磨のたびに工具の接触点を変えた。なお、研磨中は工具を回転させず、静止した状態で研磨を行った。

油の塗布は、工具を被研磨物に押しつける前に、被研磨物にのみ刷毛を用いて行った。また工具が被研磨物から離れ超音波を止めた時点で、工具、被研磨物に付着した油および研磨粉をアセトンによって拭き取った。なお本実験で用いた油は前回と同様の植物油である。

3. 実験結果

3.1 線状研磨痕の観察

3.1.1 研磨法の違いと表面粗さの関係

Fig.3 Relationship between vibration amplitude and surface roughness

Fig.4 Relationship between polishing load and surface roughness

Fig.5 Relationship between tool feed velocity and surface roughness

Table2 Relationship between polishing system and tool feed velocity

Amplitude	Tool feed (mm/min)	10	20	30	40	50	60	70
	Polishing type							
15 μm_{pp}	Parallel	+	+	+	+	+	-	-
	Perpendicular	+	-	-	-	-	-	-
20 μm_{pp}	Parallel	+	+	+	+	+	+	-
	Perpendicular	+	+	-	-	-	-	-

最初に、平行研磨法と直交研磨法で研磨をしたときの研磨面性状の違いを検討するために、それぞれの研磨法で研磨を行い、表面粗さを測定した。このとき、表1に示すように超音波振動振幅、研磨荷重、工具送り速度の各研磨条件を変化させた。

表面粗さの測定方向は工具送り方向であり、測定位置および距離は研磨痕のほぼ中央部分の1.25mmの距離を測定した。また、表面粗さの比較は算術平均粗さRaで行った。

結果を図3から図5に示す。図3に振動振幅と表面粗さの関係を示す。平行研磨法で研磨した場合には、振動振幅の増加にともなって表面粗さは減少し、振動振幅が7 μm_{pp} のとき最も小さな値をとるが、振動振幅がさらに増加すると表面粗さは徐々に大きくなる傾向を示した。一方、直交研磨法で研磨した場合には振動振幅の増加にともない表面粗さは徐々に小さくなる傾向を示す。図4に研磨荷重と表面粗さの関係を示す。平行研磨法で研磨した場合には、研磨荷重の増加にともなって表面粗さは徐々に大きくなる傾向を示す。一方、直交研磨法で研磨した場合には研磨荷重の増加にともなって表面粗さは徐々に小さくなる傾向を示した。図5に工具送り速度と表面粗さの関係を示す。平行研磨法、直交研磨法のいずれで研磨した場合にも工具送り速度の増加にともない表面粗さは徐々に小さくなる傾向にあり、平行研磨法では工具送り速度が10mm/minから30mm/minのとき、直交研磨法では工具送り速度が4mm/minのときに最も小さくなる。しかし、工具送り速度がそれ以上になると表面粗さは徐々に大きくなる傾向にある。

3.1.2 研磨法の違いと研磨速度の関係

平行研磨法、直交研磨法において、研磨可能な送り速度について検討した。このときの研磨条件は振動振幅15 μm_{pp} 、20 μm_{pp} 、研磨荷重10N、研磨距離4mmである。工具送り速度は10mm/minから10mm/minずつ増加させ、研磨不能となる速度を求めた。研磨が可能であるか否かは、研磨面をSEMで観察し、連続的な研磨面が確認できるか否かで判定した。連続的な研磨面が確認できれば+、確認できなければ-とした。

結果を表2に示す。直交研磨法では振動振幅15 μm_{pp} のとき、工具送り速度20mm/minで連続的な研磨面が確認できなくなった。さらに、超音波振動振幅を20 μm_{pp} としても工具送り速度30mm/minで連続的な研磨面は確認できなくなった。一方、平行研磨法では、超音波振動振幅15 μm_{pp} のとき、50mm/minまで連続的な研磨面が確認された。また、超音波振動振幅20 μm_{pp} では、60mm/minまで連続的な研磨面が確認された。このことから、同じ条件で研磨した場合、平行研磨法の方が直交研磨法に比べ効率的に研磨ができることが確認できる。

Fig.6 The influence of polishing method and pick feed on polished surface

3.2 研磨面の観察

3.2.1 研磨方法およびピックフィードピッチの影響

工具にピックフィードを与え、平行研磨法、直交研磨法それぞれの研磨方法で平面研磨したときの研磨面の状態を検討した。研磨条件は、超音波振動振幅11 μm_{pp} 、研磨荷重10Nである。また工具送り速度は、図5の結果から平行研磨法においては30mm/min、直交研磨法においては4mm/minとした。ピックフィードのピッチは、この条件で研磨したときの線状研磨痕の幅が、平行研磨法で研磨した場合にはおよそ0.3mm~0.4mm、直交研磨法で研磨した場合にはおよそ0.1mm~0.3mmであることから、そのピッチを0.1mm、0.3mmとして比較を行った。なお、このとき4mm×4mmの正方形部分を研磨した。その結果を図6に示す。平行研磨法、直交研磨法のいずれの場合でも、ピックフィードピッチを小さくした方が均一に研磨される傾向にある。また、ピックフィードのピッチに関わらず平行研磨法の方が、直交研磨法に比較すると均一に研磨される傾向にある。

3.2.2 平行研磨法による1回の研磨による研磨面

図6の結果より、ピックフィードピッチを0.1mmとし、平行研磨法によって研磨を行ったときに最も均一な研磨面が得られたことから、その研磨面をSEM観察と表面粗さ測定によって検討した。表面粗さは算術平均粗さRaと最大高さ粗さRzで評価した。表面粗さの測定方向は、工具送り方向とピックフィード方向である。なお、SEM像中、黒色部分が研磨された部分であり、灰色部分が研磨されなかったCVDダイヤモンド膜である。

結果を図7に示す。SEM像においては、工具送り方向に明瞭な線状痕が認められ、表面粗さはピックフィード方向の値が0.146 μmRa 、0.895 μmRz 、工具送り方向の値が0.064 μmRa 、0.435 μmRz とピックフィード方向の表面粗さの方が工具送り方向の表面粗さに比較して大きかった。このことから工具送り方向は滑らかで、ピックフィード方向には凹凸の起伏が生じるというように、研磨面の状態には方向性があることが確認できる。

3.2.3 工具送り方向を変え2回研磨したときの研磨面状態

3.2.3.1 研磨方法

工具送り方向にのみ滑らかであることから、研磨面の表面状態を均一に滑らかにする目的で、平行研磨法で研磨した面を、工具送り方向が1回目の研磨の工具送り方向と直交するようにして平行研磨法、直交研磨法で研磨を行った。すなわち、図8に

Fig.7 Surface appearance polished by parallel polishing system

(a) Parallel polishing after parallel polishing

(b) Perpendicular polishing after parallel polishing

Fig.8 Method for overlapping tool feed

(a) Surface finished by parallel polishing system

(b) Surface finished by perpendicular polishing system

Fig.9 Appearance of finish surface polished by overlapped tool feed

示すように 2 回目に平行研磨法で研磨する場合には, (a)に示すように, 被研磨物を 90° 倒し, 1 回目と同じ工具送り方向, 振動振幅方向で研磨を行った。また, 2 回目に直交研磨法で研磨する場合には工具送り方向を 1 回目の工具送り方向に対して直交させ, 1 回目と同じ被研磨物固定位置, 振動方向で研磨を行った。

結果を図 9 に示す。このとき, それぞれの研磨面の SEM 観察および表面粗さ測定を行った。表面粗さは算術平均粗さ Ra と最大高さ粗さ Rz で評価した。SEM 撮影に際しては, 1 回目の撮影と同じ方向から電子線をあて撮影を行った。また, 平行研磨法で研磨する面と直交研磨法で研磨する面とは異なるものであるが, いずれの面の表面状態および表面粗さも図 7 で得られた結果とほぼ同程度のものであった。したがって 2 回目の研磨面を 1 回目の研磨面と比較する場合には, 図 7 の研磨面との比較にする。

3.2.3.2 研磨結果

平行研磨法で研磨した場合, 工具送り方向の表面粗さは $0.062\mu\text{mRa}$, $0.405\mu\text{mRz}$, ピックフィード方向の表面粗さは $0.186\mu\text{mRa}$, $1.105\mu\text{mRz}$ であった。また SEM 像においては図 7 に比較して明瞭ではないが, 工具送り方向に線状痕が観察される。

ここで図 7 に比較して線状痕が明瞭でないのは, SEM 撮影に際して 1 回目の撮影と同じ方向から電子線をあてているからであると考えられる。したがって, 2 回目に 1 回目の工具送り方向と直交するように工具送りをかけ, 平行研磨法で研磨した場合, 1 回目に研磨した研磨面に比較して滑らかな方向と凹凸の起伏の方向とが 90° 入れ替わっただけである。すなわち, 2 回目の研磨痕が表面性状を支配するために研磨面の状態は 1 回目の研磨のそれと変わらなかった。

直交研磨法で研磨した場合, 工具送り方向の表面粗さは $0.066\mu\text{mRa}$, $0.425\mu\text{mRz}$, ピックフィード方向の表面粗さは $0.076\mu\text{mRa}$, $0.44\mu\text{mRz}$ であった。また SEM 像においては, ピックフィード方向即ち 1 回目の研磨面の工具送り方向に線状痕が観察されるものの, 1 回目の研磨面と比較すると 2 回目の研磨面の方が滑らかである。したがって, 2 回目に 1 回目の工具送り方向と直交するように工具送りをかけ直交研磨法で研磨した場合, 滑らかで均一な面に仕上げることができる。また, その表面粗さは最大高さ粗さで $0.5\mu\text{mRz}$ 以下であり, 例えばプレス金型にコーティングされた CVD ダイアモンド膜の研磨に本研磨法を適用した場合にも十分実用に供せるものであると考えられる¹⁴⁾。

4. 考 察

4.1 研磨面との工具側接触部分の観察および定性分析

平行研磨法と直交研磨法によって得られたそれぞれの研磨面状態に違いが認められたことの原因を検討する目的で, 工具側の研磨面との接触部分の定性分析を行った。なお定性分析はエネルギー分散型分光器によるものであり, このときの加速電圧は 10keV である。また分析面を 1000 倍から 2000 倍に拡大して分析を行った。

図 10 に定性分析を行う接触面の SEM 像を示す。図 10(a)に示す平行研磨法で用いた工具の研磨面との接触部の A 領域には, 全体的に掘り起こされ引きちぎられたような跡が認められる。一方(b)に示す直交研磨法で用いた工具の研磨面との接触部には, B1 領域に掘り起こされ引きちぎられたような痕と, B2 領域に平滑なバニッシュ面とその表面に擦過痕が認められた。

ここでそれぞれの領域の定性分析を行った結果を図 11 に示す。平行研磨法による接触面全体に C と Ti のピークが顕著に現れた。一方, 直交研磨法による B1 領域では C と Ti のピークが顕著に認められたが, B2 領域では C のピークがほとんど認められなくなり, Ti のピークのみが顕著に認められた。

なお, O のピークがいずれの領域でも顕著に認められなかったが, これは油膜によって酸素の研磨面への流入が遮られている

Fig.10 Appearance of contact point of titanium tool after polishing

(a) Area A

(b) Area B1

(c) Area B2

Fig.11 Quality analysis of area contacted with CVD diamond film

ためと考えられる。

4.2 平行研磨法および直交研磨法のメカニズムの違い

図12に平行研磨法、直交研磨法における経時変化に伴う工具軌跡を示す。このとき、図中の V を工具送り速度、 Y_1 を任意の点とする。

平行研磨法は、(a)に示すように経時変化に伴って工具はその移動方向と同一方向に超音波による往復運動をしながら移動していく。さらに、工具送り速度は超音波振動速度に比較しては

(a) Tool track of parallel polishing system

(b) Tool track of perpendicular polishing system

Fig.12 Relationship tool track and time

Fig.13 Typical surface profile polished by parallel polishing system

るかに小さいことから、工具の移動距離が任意の一点 Y_1 に到達する前後で工具の同一面がCVDダイアモンド膜上の任意の一点 Y_1 を複数回通過している。従って、CVDダイアモンド膜と工具の接触面全体でCVDダイアモンド膜中のCと工具材とが反応しやすい温度に効率的に上昇し、急激にCVDダイアモンド膜中のCと工具材が反応し、凝着磨耗が起ることでCVDダイアモンド膜の研磨が進んでいる⁸⁾¹²⁾と考えられる。このことは接触面全体からCのピークが顕著に認められ、さらに接触面全体が引きちぎられ掘り起こされたような痕になっていることから裏付けられる。

一方、直交研磨法は、(b)に示すように経時変化に伴って工具はその移動方向に直交する方向に超音波による往復運動をしながら移動していくことから、CVDダイアモンド膜上の任意の一点 Y_1 を工具の同一面が通過するのは1回のみである。従って、

Fig. 14 Schematic of polished surface

はじめ工具はCVDダイアモンド膜中のCと工具材とが反応するに十分な温度に達していないことから、B2領域においてCVDダイアモンド膜の凹凸に擦られるのみである。しかし時間の経過に伴ってCVDダイアモンド膜中のCと工具材とが反応するに十分な温度となったB1領域において、CVDダイアモンド膜中のCと工具材が反応をし、凝着磨耗が起こることによってCVDダイアモンド膜の研磨が進んでいる⁸⁾¹²⁾と考えられる。このことはB2領域ではCのピークがほとんど認められず、パニッシュ面とその表面に擦過痕が認められ、一方B1領域ではCのピークが顕著に認められ、引きちぎられ掘り起こされたような痕になっていることから裏付けられる。

4.3 研磨メカニズムと研磨面性状

以上のことから、図3から図5に示す結果が得られたのは次の理由によるものであると考える。工具の同一面が任意の一点 Y_1 を複数回通過している平行研磨法は直交研磨法に比較すると工具の同一面がCVDダイアモンド膜上の任意の一点を通過する回数が多いことから、CVDダイアモンド膜中のCと工具材が反応しやすいという長所がある一方で、ダイアモンド膜にダメージを与えやすいという短所もある。従って図3に見られるように振動振幅が $7\mu\text{m}_{\text{pp}}$ を超えると表面粗さが大きくなり、また図4に見られるように研磨荷重の増加にともなって表面粗さが大きくなるのは、振動振幅や荷重が増えることでCVDダイアモンド膜へのダメージが増幅され、図13に示されるような大きくぼみができることによるものであると考えられる。また、図5に見られるように工具送り速度の増加にともない一旦改善された表面粗さが再び劣化するのは、図12(a)に示すように工具送り速度の増加によって工具の同一面がダイアモンド膜の任意の一点を通過する回数が減り、Cと工具材との反応が進みにくくなることで研磨が進みにくくなったことによるものと考えられる。なお図13は平行研磨法によって振動振幅 $11\mu\text{m}_{\text{pp}}$ 、研磨荷重20N、工具送り速度2mm/minで研磨したときの粗さ曲線である。このようにくぼみの発生は、平行研磨法で振動振幅および研磨荷重

の値が大きいとき、工具送り速度が小さいときに認められた。

一方、図5および表2に見られるように平行研磨法が直交研磨法に比較して工具送り速度を上げてでも研磨ができるのは、平行研磨法が直交研磨法に比較してCVDダイアモンド膜中のCと工具材が反応しやすいという効果によるものであると考えられる。また、図6の結果に見られるように平行研磨法が直交研磨法に比較して研磨されていない領域が少ないのも同様の理由によるものであると考えられる。

図9に見られるように、平行研磨法で研磨した後に直交研磨法で研磨を行った方が均一な研磨面が得られるのは、次の理由によるものであると考える。

ここで図14に平行研磨法で研磨した後に平行研磨法、直交研磨法それぞれで研磨したときの研磨面の模式図を示す。

平行研磨法は、直交研磨法に比較してCVDダイアモンド膜中のCと工具材が反応しやすいために、研磨が進み易く図14(a)に示すように1回目の研磨で得られた研磨条痕の凹部分の底よりも深い部分が研磨されるために図14(b)のような研磨面になるものと推察される。

一方、直交研磨法は平行研磨法に比較して、CVDダイアモンド膜中のCと工具材が反応しにくいために、研磨の進みが遅く、図14(a)に示すように研磨条痕の凸部分のみが研磨されるために(c)のような研磨面になるものと推察される。したがって、直交研磨法で仕上げた方が平行研磨法で仕上げたときよりも、滑らかで均一な研磨面に仕上げることができると考えられる。

5. 結 言

- (1) 平行研磨法か直交研磨法かで、超音波振動振幅、研磨荷重、工具送り速度による表面粗さの変化の傾向が異なり、平行研磨法の方が、直交研磨法より速い工具送り速度で研磨を行うことができる。
- (2) 工具に一定間隔でピックフィードをかけ、線状の研磨痕を重ねることによって平面研磨ができることを確認した。また、このときピックフィードピッチを小さくした方が研磨されていない領域が少なかった。
- (3) 平面研磨を行う場合、平行研磨法の方が直交研磨法よりも研磨されない領域が少なく、研磨面を均一に仕上げることができた。
- (4) 砥粒レス超音波研磨法でCVDダイアモンド膜の平面研磨を行った結果、算術平均粗さで $0.06\mu\text{mRa} \sim 0.08\mu\text{mRa}$ 、最大高さ粗さで $0.4\mu\text{mRz} \sim 0.5\mu\text{mRz}$ に仕上げる事ができた。

参 考 文 献

- 1) 楊政峰, 吉川昌範: 熱化学反応によるダイアモンド膜の研磨—最適研磨条件の選定, 精密工学会誌, **57**, 1 (1991) 184.
- 2) 楊政峰, 吉川昌範: 熱化学反応によるダイアモンド膜の研磨—研磨メカニズムについて, 精密工学会誌, **57**, 3 (1991) 504.
- 3) 鈴木清, 関洋子, 木村昌博, 安永暢男, 三宅正二郎, 阿部勝幸, 植松哲太郎: ダイアモンドの高速摺動研磨—(第2報) 高効率砥粒レス研磨の条件, 1996年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1996) 929.
- 4) 岩井学, 鈴木清, 植松哲太郎, 安永暢男, 三宅正二郎: ダイアモンドの高速摺動研磨法の研究—(第1報) 単結晶ダイアモンド研磨への適用, 砥粒加工学会誌, **46**, 2 (2002) 82.
- 5) 阿部利彦, 高木敏行, 内一哲哉, 孫正明, 橋本等: 鏡面ダイアモンドの利用, NEW DIAMOND, **20**, 2 (2004) 18.

- 6) 横沢毅, 高木純一郎, 片岡征二, 仁平宣弘, 長谷川徳慶: CVD ダイヤモンド膜の研磨—(第1報)超音波による摩擦熱を利用した研磨の検討, 2004 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (2004)533.
- 7) 横沢毅, 高木純一郎, 片岡征二, 仁平宣弘: 超音波援用による摩擦熱を利用した CVD ダイヤモンド膜研磨の検討, 平成 16 年度塑性加工春期講演会講演論文集, (2004)65.
- 8) 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)超音波振動の援用による砥粒レス超音波研磨法の検討, 精密工学会誌, 71, 9(2005)1131.
- 9) 横沢毅, 高木純一郎, 片岡征二: CVD ダイヤモンド膜の研磨—(第2報)工具材の凝着防止と研磨効率向上の検討, 2004 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (2004)381.
- 10) 横沢毅, 高木純一郎, 片岡征二: CVD ダイヤモンド膜の研磨—(第3報)研磨面性状向上のための研磨条件の検討, 2005 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (2005)629.
- 11) 横沢毅, 高木純一郎, 片岡征二: 砥粒レス超音波研磨法に CVD ダイヤモンド膜の研磨に関する研究—研磨面性状向上のための研磨条件の検討, 平成 17 年度塑性加工学会春季講演会講演論文集, (2005)45.
- 12) 横沢毅, 高木純一郎, 片岡征二: CVD ダイヤモンド膜の研磨に関する研究—(第2報)砥粒レス超音波研磨法による連続研磨の検討, 精密工学会誌, 71, 12(2005).
- 13) Tsuyoshi.Yokosawa, Jyun-ichiro, Tkagi, Seiji, Kataoka: An attempt to polishing CVD Diamond Film by Ultrasonic Vibration Polishing without Abrasive Grain, ASPE 2005 Annual Meeting Proceedings, (2005)508.
- 14) 片岡征二: 無潤滑プレス加工, プレス技術, 42, 12, (2004)39.