チタン合金のコーティング工具による超精密切削加工*

安井 平司** 坂本 重彦** 川田 昌樹***

Ultra-precision Cutting of Titanium Alloys by Using Coated Carbide Bite

Heiji YASUI, Shigehiko SAKAMOTO and Masaki KAWADA

This paper deals with the experimental investigation for the ultra-precision cutting of titanium alloys. Titanium alloys, which are well-known as difficult-to-cut materials, have excellent mechanical and chemical properties. In order to produce the value-added high quality components of titanium alloys, the productive cutting technique of high dimension accuracy with high smoothness surface has been strongly required. The cutting technique, however, has not progressed well because the surface roughness and product accuracy become over the necessary finished values in the extremely short cutting length due to rapid cutting tool wear. The research aims to develop the practical ultra-precision cutting technique of titanium alloys. In the experiments, the β titanium alloy and α - β titanium alloy are face-turned by various kinds of commercial cutting bites such as a single crystal diamond bite, carbide bite, cermet bite and coated carbide bite. From the experimental results, a coated carbide bite is found available for ultra-precision cutting of titanium alloys. Over the cutting length of 2,000 μ m which is enough length to produce some high quality components of β titanium alloy, the cutting tool wear is little and the finished surface roughness, which includes the step over 100 nm between the crystal grain boundaries, is kept smoother than 200nm(P-V). The best finished surface roughness obtained by using TiCN coated carbide bite is about 60nm(P-V) for α - β titanium alloy.

Key words: ultra-precision cutting, surface roughness, titanium alloy, diamond bite, coated carbide bite, cutting fluid

1. 結 言

超精密旋盤とダイヤモンドバイトを用いた超精密切削加工は、印刷用ドラムやレーザー用ミラー、コンピュータ周辺機器用部品等の製作に広く実用化されている。これら部品材料は、使用されるダイヤモンドバイト摩耗が小さい易削材のアルミニウムや無酸素銅等の軟質金属や高分子材料である。物理的・化学的特性に優れるチタン合金、ステンレス鋼、インコネル等難削材については、バイト摩耗が大きくなるため、超精密切削加工が難しい。現在、難削材の高精度加工に関する研究^{1)~3)}における仕上面粗さは、ほとんどがサブミクロンオーダーの議論に留まっており、あまり進展していない。しかし、旋削加工法による難削材の超精密部品・機器等の製作技術は、今後の国内製品における高付加価値化に大いに貢献すると考えられ、その構築は重要である。

そこで、本研究では、難削材を対象として、最大仕上げ面粗さ R_z を最低 100nm(P-V) 以下を目標とし、出来れば 50nm(P-V) 程度を得ることが可能な超精密切削加工法の検討を試みることにした。この際、工具寿命は、超精密切削による部品仕上加工が可能な距離として、切削距離で 2,000 μ m 以上を想定した。加工時間で言えば、30 分を超える寿命を想定している。本報告では、その第1段階としてチタン合金を対象に、まず、軟質金属の超精密切削で使用されているダイヤモンドバイトによる適用の可能性を検討したが、摩耗が非常に早く、適していないことを確認した。次いで、市販の超硬バイト、サーメットバイト、PVD法によるTiCN系コーティング超硬バイトを用いて、超精密切削加工を行い、仕上面粗さを実験的に検討した。その結果、コーティング超硬バイトで 60nm(P-V) 程度の仕上面粗さが得られたので、その仕上面の生成機構を検討した結果と合わせて報告する。

2. 実験方法および条件

超精密切削加工実験は、図1に示す超精密旋盤 (ULC-100A, 東

* 原稿受付 平成 14 年 1 月 23 日

** 正 会 員 熊本大学工学部 (熊本市黒髪 2 - 39 - 1)

*** 学生会員 熊本大学大学院 (現、ソニーセミコンダクタ九州㈱)

Fig.1 Experimental setup

芝機械㈱)を使用し、正面旋削で行った。旋盤の主軸は超精密空気軸受を使用し、主軸中心の振幅は 0.4 μ m の精度で、送り案内軸の繰返し位置決め精度は $\pm 0.05\mu$ m、進直度は 0.1 μ m/150mm である。主な実験条件を表1に示す。切削加工は、工作物中心から半径 10-20mm の部分を連続で行った。主軸回転数は 500rpm、切込み深さは $d=5\mu$ m、主軸 1 回転あたりの送り量は $f=2\mu$ m/rev とした。

使用した被削材は、 β 型チタン合金 Ti-22Al-4V と α - β 型チタン合金 Ti-6Al-4V の 2 種類とした。直径 50mm の棒材から厚さ 20mm の円板状にし、取付治具を介してワーク主軸に真空チャックで固定した。また、使用した切削工具は市販されるスローアウェイチップである。工具材は、単結晶ダイヤモンド、超硬、サーメット、コーティング超硬バイトの 4 種類である。単結晶ダイヤモンドバイトの形状は、丸形でノーズ半径 $R=0.5$ mm、すくい角 0° 、逃げ角 7° である。その他 3 種類のバイトは、ノーズ半径 R のみ 0.2mm でダイヤモンドバイトと異なる。超硬は、粒径 1 μ m 程度の粒子が焼結されたものである。またコーティングは、PVD 法による 3 μ m 程度の TiCN 層である。

切削油剤は、不水溶性切削油剤を用いた。切削点より 10mm 離れた位置より、圧縮空気を用いて、不水溶性切削油剤を加工点近傍にミスト供給することで、切削温度の低下と工具摩耗の抑制を

Table 1 Experimental conditions

Machine tool:	Ultra-precision Lathe ULC-100A, Toshiba Machine CO.,LTD.
Cutting tool:	Single crystal diamond bite Nose radius: $R = 0.5 \text{ mm}$ Cemented carbide bite Cermet bite Coated cemented carbide bite Nose radius: $R = 0.2 \text{ mm}$ Rake angle: 0 deg, Relief angle: 7 deg
Workpiece material:	Ti-22V-4Al (β titanium alloy) Ti-6Al-4V (α - β titanium alloy)
Cutting fluid:	Oil type cutting fluid
Cutting conditions	Cutting speed: $V = 31\text{-}63 \text{ m/min}$ Depth of cut: $d = 5 \text{ }\mu\text{m/rev}$ Feed rate: $f = 2 \text{ }\mu\text{m/rev}$

図った。油剤成分は、油脂に極圧添加剤等を加えたものである。

切削仕上面の性状は、ノマルスキー式微分干渉顕微鏡を使用し観察した。仕上面粗さは光干渉式非接触表面形状測定装置(WYKO)および触針式表面粗さ計にて測定した。なお、最大仕上面粗さは、JIS B 0601(2001)より R_z とされたが、従来の表記法と混乱するため、単位を nm(P-V) とした。なお、本論文中使用する R_z とは、工具送り方向への $250\text{ }\mu\text{m}$ 長の2次元仕上面粗さとする。一方、 $R_{z(3D)}$ は、WYKOによる $\square 256\text{ }\mu\text{m}$ の3次元仕上面粗さとする。また、工具先端部の摩耗等は、走査型電子顕微鏡(SEM)で観察した。

3. ダイヤモンドバイトによる超精密切削加工

チタン合金の切削加工において、親和性が低い工具材種は超硬K種とダイヤモンド工具^{4,5)}と言われている。そこで、軟質金属の超精密切削加工と同様に、単結晶ダイヤモンドバイトを用いて、 β 型チタン合金の超精密切削を行った。図2にその場合の仕上面の微分干渉顕微鏡写真とWYKO像を示す。主な切削条件は、切削速度 $V=60\text{m/min}$ 、切込み深さ $d=5\text{ }\mu\text{m}$ 、送り量 $f=2\text{ }\mu\text{m/rev}$ とした。切削距離 $L=60\text{m}$ である。図2(a)の顕微鏡写真で、上下方向への規則的な切削条痕を持つ仕上面が観察される。詳細を図2(b)に示すWYKO像で観察すると、切削方向への条痕が明確に確認され、 $\square 256\text{ }\mu\text{m}$ の3次元仕上面粗さ $R_{z(3D)}$ は 300nm(P-V) 程度、算術平均粗さ R_a で見れば、 35nm と比較的良好な仕上面が得られた。しかし、図2の切削条件から求められる理論仕上面粗さ $h=(f/8R) \times 10^3$ は 1nm であり、 β 型チタン合金の超精密切削加工後の仕上面粗さは、理論粗さの約300倍に達しており、本研究で目標とする仕上面粗さ $R_z=100\text{nm(P-V)}$ をはるかに越えている。

単結晶ダイヤモンドバイトのすくい面を観察した微分干渉顕微鏡写真を図3に示す。非常に短い切削距離 $L=60\text{m}$ にもかかわらず、単結晶ダイヤモンドバイトの刃先摩耗と β 型チタン合金の凝着が理論接触幅 $140\text{ }\mu\text{m}$ 全体で観察される。ダイヤモンドはチタン金属との親和性が低いと言われているが、切削温度上昇等の原因によって、ダイヤモンドに工具摩耗が起こると、チタン合金の摩耗部への凝着が生じ、切削中に凝着と脱落が繰り返され、ダイヤモンドバイトの摩耗量を増加させていると推測される。単結晶ダイヤモンドバイトは、チタン合金の超精密切削加工で、切削距離が 100m 未満の時点で工具摩耗を起こしており、仕上面粗さ R_z も 100nm(P-V) を越えている。また、さらに超精密切削を続けると、バイト摩耗量が増加し、仕上面は $R_z=1,000\text{nm(P-V)}$ を越

Fig.2 β titanium alloy surface face-turned by diamond bite ($V=60\text{m/min}$, $d=5\text{ }\mu\text{m}$, $f=2\text{ }\mu\text{m/rev}$, $L=60\text{m}$, Oil type cutting fluid)

Fig.3 Single crystal diamond bite after face-turning β titanium alloy and contact length between bite and workpiece ($V=60\text{m/min}$, $d=5\text{ }\mu\text{m}$, $f=2\text{ }\mu\text{m/rev}$, $L=60\text{m}$, Oil type cutting fluid)

えるほど悪くなる結果が得られた。したがって、本研究目的を考えると、工具寿命の観点から、ダイヤモンドバイトは、難削材であるチタン合金の超精密切削加工に適さないと判断できる。

4. 各種切削工具の適用と仕上面粗さの生成機構

4.1 各種切削工具による超精密切削加工

工具の寿命と仕上面粗さの向上を目的として、ダイヤモンドバイトの代替に、チタン合金やステンレス鋼等難削材の普通切削に使用される市販の工具を検討した。工具材種は、超硬(K種)、サーメット、TiCN系コーティング超硬バイトの3種類である。

3種類の工具を用いて、 β 型チタン合金を超精密正面旋削加工して得られる仕上面を、図4(a)～(c)に示す。なお、得られたバイト送り方向の2次元仕上面粗さ R_z を図中に記す。超硬バイトによるチタン合金の仕上面は、図4(a)のように切削条痕が粗く、かつ、深く見られ、2次元仕上面粗さは $1,500\text{nm(P-V)}$ に近い仕上面粗さで、目標とする 100nm(P-V) よりはるかに悪い仕上面である。同様に、サーメットバイトでも、図4(b)に示すように $1,500\text{nm(P-V)}$ を越える非常に悪い仕上面となっている。

一方、コーティング超硬バイトによる仕上面は、図4(c)に見られるように、非常に良好な仕上面となった。仕上面粗さをWYKOにて測定すると、 $\square 256\text{ }\mu\text{m}$ の3次元仕上面粗さ $R_{z(3D)}$ は 150nm(P-V) 程度で、算術平均粗さ R_a が 21nm と良好である。切削条痕も規則正しく良好な面である。ただし、結晶粒が仕上面上に観察されている。WYKOでの測定結果図4(d), (e)より、本実験で使用した被削材である β 型チタン合金は、径 $100\text{ }\mu\text{m}$ 以上の結晶粒を持ち、その結晶粒界の段差は 100nm を越えることも測定された。その結果、仕上面粗さは、結晶粒界段差の影響を大きく受ける。したがって、上述の本被削材での仕上面粗さ $R_z=110\text{nm(P-V)}$ は結晶粒界段差を考慮すると、非常に良好な仕上面と言える。

しかしながら、 R_z は最低目標値 100nm(P-V) を越えている。そこで、結晶粒が小さく、結晶粒界段差の生成が小さいと考えられる α - β 型チタン合金をコーティング超硬バイトで切削してみた。切削条件は図4と同じである。図5にその仕上面とWYKO像を示

Fig.4 β titanium alloy surface face-turned by commercial bites ($V=60\text{m/min}$, $d=5\mu\text{m}$, $f=2\mu\text{m/rev}$, $L=100\text{m}$, Oil type cutting fluid)

す。図5左図の仕上面は、 β 型チタン合金と同様に比較的規則的な切削条痕で形成される。また、結晶粒は観察されず、3次元仕上面粗さ $Rz_{(3D)}$ も 60nm(P-V) 以下であり、最低目標値 100nm(P-V) をはるかに越え、 50nm(P-V) の到達目標値に近づいている。この結果から、コーティング超硬バイトは、本研究目的であるチタン合金の超精密切削加工に使用できる可能性が強いと考えられる。

4.2 各種切削工具における刃先摩耗と凝着

図6に、図4で用いた各種工具刃先をSEMで観察した結果を示す。図6(a)は超硬バイトの場合である。バイト刃先のSEM像では、使用前が左図に、切削加工後が右図に示されている。刃先稜は、研削により仕上げられており、研削条痕が逃げ面およびすくい面上に存在する。なお、刃先稜には、未使用時から粒子の脱落による微細破壊が見られ、単結晶ダイヤモンドバイトより明らかに悪い。これら微細破壊の深い箇所は、加工後の摩耗したバイト刃先にも残るほど大きなものである。切削加工後の刃先稜は、図6(a)右図の通り、チタン合金の超精密切削過程で大きく摩耗しており、摩耗幅は $50\mu\text{m}$ を越えている。設定切り込み量を $d=5\mu\text{m}$ とした本切削条件では、理論接触幅が $89\mu\text{m}$ となるので、摩耗領域は接触幅全体にわたっていると考えられる。

次に、サーメットバイトは、図6(b)左図に示すように、加工前の時点ではホーニング処理された丸味のある刃先を持つ。加工後のバイト刃先は、図6(b)右図に見られるように、理論接触幅 $89\mu\text{m}$ 全体で摩耗している。さらにチタン合金の凝着が、微細破壊された部分の穴中に堆積しているのが見出される。サーメットも、超硬と同様に粒子を焼結したものであるため、刃先および逃

Fig.5 Face-turned α - β titanium alloy surface ($V=60\text{m/min}$, $d=5\mu\text{m}$, $f=2\mu\text{m/rev}$, $L=100\text{m}$, Oil type cutting fluid)

Fig.6 Cutting edge of the three kinds of commercial bites before/after face-turning β titanium alloy ($V=60\text{m/min}$, $d=5\mu\text{m}$, $f=2\mu\text{m/rev}$, $L=100\text{m}$, Oil type cutting fluid)

げ面、すくい面に微細破壊が生じていると考えられる。このことから、刃先稜粗さには、微細破壊が関係すると考えられる。

最後に、PVD皮膜を持つコーティング超硬バイトの切削前における状態は、図6(c)左図に示される。切削加工後の刃先には、図6(c)右図から分かるように、コーティング層の摩耗が観察されるが、超硬およびサーメットバイトと比較して、刃先摩耗量がかなり小さいことがわかる。

4.3 コーティングバイトによる超精密切削仕上面の生成機構

上記のように工具材種によって、仕上面粗さが大きく変化する。そこで、チタン合金の超精密切削仕上面生成機構を検討してみる。超精密切削加工の仕上面粗さには、基本的に、1) 刃先先端形状の転写、2) 結晶粒界段差、3) 工作機械精度、4) 環境（振動や温度変化）等の影響が考えられる⁶⁾。このうち、3) 工作機械精度や4) 環境の影響については、別報⁷⁾で報告している軟質金属やプラスチックの超精密切削で、数 nm(P-V) の仕上面粗さが得られていることから、本実験でのチタン合金の仕上面粗さには大きな影響を及ぼしていないと考えられる。また、2) につい

Fig.7 Predictive model of surface roughness in the face-turning titanium alloy by coated carbide bite

では、同じ被削材を切削した場合には、工具材種によって大きな差が生じるとは考えられない。これらに対して、1)の刃先稜は工具材種によって大きく変化し、加えて刃先には工作物凝着物も見られるので、仕上面粗さへの影響が大きいと考えられる。図4(a)や(b)の超硬バイトやサーメットバイトで、仕上面粗さ R_z が1,500nm(P-V)を越えているのは、大きな粗さを持つバイト刃先稜の形状転写が影響していることが考えられる。というのは、超硬やサーメットバイトでは、それらを構成する粒子が1 μ m程度もあり、粒子の脱落によって、刃先稜粗さは1 μ mを容易に越えることが推測されるためである。

これに対してダイヤモンドバイトの初期切削過程やコーティング超硬バイトでは、仕上面粗さが $Rz_{(3D)}=300\text{nm(P-V)}$ 以下の高平滑面に留まっている。そこで、次にその仕上面生成機構を考えてみる。図2や図5のチタン合金をダイヤモンドバイトやコーティング超硬バイトで切削した結果を見ると、図7(a)で示される理論仕上面粗さ $h=1\text{nm}$ に比較して大きく、その仕上面は、図7(b)に示すように、送り量 $f=2\mu\text{m/rev}$ よりも相当大きな溝幅である10数 μm 程度の切削条痕で形成されている。図7(c)は、バイト刃先での切り屑排出状態を模式的に推測したものである。ただし、コーティング超硬バイトでも、図5で示したように α - β 型チタン合金で3次元仕上面粗さ $Rz_{(3D)}$ が 60nm(P-V) 以下のものが得られていることから、バイト送り量 $f=2\mu\text{m/rev}$ に対応するバイト刃先稜 $2\mu\text{m}$ 強の長さにおいては、バイト刃先稜が数 10nm 以下のマイクロチップングしかない、滑らかなものと仮定している。コーティング超硬バイトでこのような滑らかなバイト刃先稜を考

Fig.8 Schematic model of coated layer on coated carbide bite

えられるのは、図8に示すように、コーティング層が非晶質の非常に稠密な層で構成されているためである。

先ず、図7で示したダイヤモンドバイトで生成される仕上面粗さを考えてみる。ノーズ半径 $R=0.5\text{mm}$ のバイト刃先は、送り量 $f=2\mu\text{m/rev}$ で移動する一方、切削方向へは、相対的に高速で移動する。その際、バイト刃先稜のうち、バイト送り方向側の切り込み深さ f_p の大きい部分で切削を行う。一方、バイト刃先稜の先端近傍となる中央部付近では、切り込み深さ f_p が小さくなるため、図7(c)2)の右上図に示すように、パニシングを行い、すくい面前面では、盛り上がり形成を行うと考えられる。そして、被削材が回転し、切削距離が増加するにつれて、バイト中央部前面の盛り上がりは徐々に増大する。また、盛り上がりの一部は、幾何学的には、切削には関与しないバイト中央部よりも、よりバイト送り後端側(図7(c)下図のバイト左側)にも流れ、仕上面粗さとして残存する。バイト中央部前面の盛り上がり量が切り屑形成のための最小切削深さと一致する切削加工点 $(n)_m$ の位置にバイトが来たとき、盛り上がりは、図7(c)1)の上图に示すように、バイト中央部前面でも刃先端 $(E)_m$ によって切り屑として排出される。その結果、図7(c)2)のように、次に被削材が1回転してきた位置の $(n)_{m+1}$ では、バイト中央部前面の盛り上がり量が小さくなり、次の盛り上がりの増大過程に移る。仕上面粗さは切削加工点 $(n)_m$ と $(n)_{m+1}$ との盛り上がり過程で発生すると考えられ、ダイヤモンドバイトの初期切削過程では、 300nm(P-V) になると考えられる。ダイヤモンドバイトの刃先稜で、工作物との間に 300nm 程度の隙間ができる領域は、理論的に先端中央から $17\mu\text{m}$ の位置であり、仕上面粗さの送り量 $f=2\mu\text{m/rev}$ より大きな周期である 10 数 μm とほぼ一致する。ただし、このようにダイヤモンドバイトの滑らかな刃先稜が維持されるのは、切削距離 $L=100\text{m}$ 未満の極めて短い間に過ぎない。切削距離の増加にしたがって、ダイヤモンドバイトの摩耗量が増加し、超硬バイトと同様に、刃先稜に大きな粗さを生じる。そのため、仕上面粗さは、上述したように、短い切削距離で $1,000\text{nm(P-V)}$ を越える。

このようなチタン合金の平滑な仕上面生成機構は、図2に示したダイヤモンドバイトによるβ型チタン合金仕上面より平滑な $Rz_{(3D)}=148\text{nm(P-V)}$ の図4(c), (d)に示した仕上面が得られたことから、バイト刃先稜が滑らかであると考えられるコーティング超硬バイトでも、同様であると考えられる。

5. コーティングバイトの寿命特性

コーティング超硬バイトは、コーティング層の特性により、チタン合金の超精密切削加工に向いていることが分かった。そこで、このコーティング超硬バイトについて、工具寿命を検討し

Fig.9 Variation of coated bite edge with cutting length after face-turning β titanium alloy
($V=60\text{m/min}$, $d=5\mu\text{m}$, $f=2\mu\text{m/rev}$, Oil type cutting fluid)

た。β型チタン合金の超精密正面旋削において、1回の切削距離300m程度ごとに、バイト刃先の摩耗をSEMで確認しながら、実験を繰り返した。図9に各切削距離におけるバイトSEM像を示す。図中には、各切削距離での仕上面粗さも合わせて示す。図9(c)の切削距離 $L=2,100\text{m}$ まで、大きな摩耗も見られず、刃先先端が極僅かに摩耗した状態が維持されている。工作物仕上面粗さとしても、2次元仕上面粗さ R_z で 200nm(P-V) 以下を維持している。このような良い仕上面粗さが持続するのは、コーティング層が摩耗しても滑らかなバイト刃先稜を持続するとともに、チタン合金との被凝着性に優れるため、盛り上がり生成形態も大きな変化をしないことによるものと考えられる。

切削距離をさらに増加すると、徐々に仕上面精度は悪化し始め、切削距離 $L=5,400\text{m}$ の時点で、図9(d)に示すように切削加工点におけるコーティング層が摩耗してしまい、仕上面粗さも $R_z=1,000\text{nm(P-V)}$ を越えてしまった。コーティング超硬バイトのすくい面をポリシングしてコーティング層の厚みを調べた。図10の結果からわかるように、コーティング層は、超硬バイトの母材上に $3\mu\text{m}$ 程度の皮膜である。このコーティング層が除去されると、超硬バイトが露出する状態となり、図4(a)で示したような超硬バイトによる仕上面粗さと同一になり、目標仕上面粗さの観点からバイト寿命となる。この寿命までの切削距離は、 $5,000\text{m}$ を越える距離であり、本研究目標には到達している。

6. 結 言

実用的に使用できるチタン合金の超精密切削加工法の構築を目的として、各種市販工具による切削仕上面を実験的に検討し、以下の結果が得られた。

- (1) β型チタン合金の超精密切削において、単結晶ダイヤモンドバイトでは、切削距離 $L=60\text{m}$ と短い場合には、仕上面粗さが $R_z=300\text{nm(P-V)}$ と比較的良好いが、それ以上になると急速に悪化し、 $R_z=1,000\text{nm(P-V)}$ を越えるようになる。超硬バイトやサーメットバイトでは、切削距離が $L=100\text{m}$ と非常に短い切削距離で $R_z=1,500\text{nm(P-V)}$ を越える。
- (2) これに対して、コーティング超硬バイトでは、切削距離が少なくとも $L=2,000\text{m}$ 程度まで、 $R_z=200\text{nm(P-V)}$ 以下の仕上

Fig.10 Investigation on the thickness of coated layer due to polishing rake face of coated carbide bite

面が持続して得られた。この仕上面粗さ $R_z=200\text{nm(P-V)}$ には、 100nm 程度の大きな結晶粒界段差が影響している。結晶粒界段差が小さい α -β型チタン合金では、 $L=100\text{m}$ で $R_{z(\text{BD})}=60\text{nm(P-V)}$ の仕上面粗さが得られた。

- (3) 単結晶ダイヤモンドバイト、超硬バイトおよびサーメットバイトで、仕上面粗さ $R_z=1,000\text{nm(P-V)}$ を越えるようになるのは、ダイヤモンドバイトでは刃先摩耗により、また、超硬バイトおよびサーメットバイトでは、その組成により、刃先稜粗さが、 $R_z=1,000\text{nm(P-V)}$ を越えて非常に粗くなるためと考えられる。
- (4) この一方、コーティング超硬バイトでは、摩耗し難いとともにコーティング層の組成により、滑らかな刃先稜を維持するため、長い切削距離まで高平滑面を持続することができると考えられる。

謝 辞

最後に本研究を遂行するにあたり、ご支援ご協力いただいた東芝機械(株)、(株)アライドマテリアル、ユシロ化学工業(株)、(株)UEX、大同特殊鋼(株)、東芝タンガロイ(株)に感謝いたします。また、本研究の一部は平成9・10年度科学研究費補助金基盤研究(C)[No. 09650142]と平成12・13年度科学研究費補助金奨励研究(A)[No. 12750100]によって行われたものである。

参考文献

- 1) Shamoto E, Moriwaki T: Ultraprecision Diamond Cutting of Hardened Steel by Applying Elliptical Vibration Cutting, CIRP Ann, Vol.48, No.1, (1999) 441.
- 2) Ekkard Brinksmeier, Ralf Gläbe: Basic studies on the wear behaviour of modified and coated diamond tools for precision machining of ferrous materials, Initiatives of precision engineering at the beginning of a millennium, 10th ICPE, (2001) 174.
- 3) 古沢利明, 日野裕, 中村示, 辻新次: チタンアルミナイド金属間化合物の高精度切削加工, 日本機械学会論文集 (C編), vol. 64, 8, (1998) 3191.
- 4) Narutaki N, Murakoshi A and Motonishi S: Study on Machining of Titanium Alloys, Ann. CIRP, 32, 1, (1983) 65.
- 5) 臼杵年, 鳴瀧則彦, 山根八洲男: Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zrの旋削加工, 精密工学会誌, vol. 61, 7, (1995) 1003.
- 6) 安井平司, 遠藤貴徳, 近藤純久, 黒田龍一: 超精密切削加工における仕上面粗さの実験的検討—無酸素銅の場合—, 日本機械学会講演論文集 No. 968-2[‘96-7-18, 九州支部熊本地方講演会], 193.
- 7) 佐伯守彦, 安井平司, 近藤純久, 川田昌樹, 細川晃: プラスチックの超精密切削における仕上げ面粗さの実験的検討, 精密工学会誌, vol. 67, 2, (2001) 311.