チタン合金の超精密切削仕上面粗さに及ぼす切削油剤供給効果*

坂本 重彦** 安井 平司** 川田 昌樹†

Effect of Cutting Fluid on Surface Roughness Formed by Ultra-precision Cutting of Titanium Metal

Shigehiko SAKAMOTO, Heiji YASUI and Masaki KAWADA

In the previous report, we have found that the TiCN PVD-coated carbide tool is useful for ultra-precision cutting of titanium metal. This report aims to clear the effect of cutting fluid on surface roughness formed by ultra-precision cutting of titanium metal with the coated carbide tool. Cutting fluids used are kerosene for general ultra-precision cutting of soft metals, and three kinds of water-immiscible cutting fluids, which consist of fats and oils, fats and oils with special additives, fats and oils with extreme additives of sulfur type, respectively. The surface roughness formed using the water-immiscible cutting fluids is better than kerosene. The additives contained in the water-immiscible cutting fluid have the great influence on the surface roughness. The mist fluid supply method in which the fluid is supplied together with compressed air to the cutting point, is superior in getting the smooth surface roughness to the spray fluid supply method. The finished best surface roughness obtained using the best water-immiscible cutting fluid, which consists of fats and oils with special additives is about 60nm(P-V) for α - β titanium alloy.

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

1. 結 言

純チタン・チタン合金やスレンレス鋼等の難削材に対する超精密切削は、ダイヤモンドバイトではその工具摩耗のために非常に困難である。そこで一部の研究者らは、振動切削法など特殊な装置および方法で試みている^{1),2)}。しかしながら、最大仕上面粗さ100nm以下を実現した難削材の超精密切削に関する事例はほとんど例がみられない^{3),4)}。そうした中、筆者らは、これまでチタン金属を対象に、通常に用いられる超精密旋盤で、各種切削バイトによる超精密正面旋削加工を行い、100nm(P-V)以下の良好な仕上面粗さを目標に、実験的検討を行ってきた。その結果、市販される一般切削用コーティング超硬バイトで、チタン金属に対して切削距離2,000mm以上まで、最大仕上げ面粗さ $R_z=200\text{nm(P-V)}$ 以下を実現できることを見出した⁵⁾。

本研究では、引き続き、純チタンおよび代表的な2種類のチタン合金について、PVD法によるTiCN系コーティング超硬バイトによる最適な超精密切削加工条件の構築を目的として、切削油剤の供給効果を実験的に検討した。この検討は、チタン金属の熱伝導率がアルミニウムなど他の金属と比較して非常に小さいため、チタン金属の超精密切削加工中に発生する切削熱の大きな割合が工具側に伝わり、工具寿命や仕上面粗さに大きな影響を及ぼす可能性があると考え、その低減に切削油剤の供給効果が大きな影響を及ぼすことを視野に入れたものである。その結果、切削油剤の種類や供給方法が仕上面粗さに大きく影響することがわかったので、以下に報告する。

2. 実験方法および条件

超精密切削加工実験は、超精密旋盤(ULC-100A, 東芝機械(株))を使用し、図1(a)に示すように正面旋削で行った。被削

Fig.1 Experimental setup

材は、純チタンJIS 2種、 β 型チタン合金Ti-22V-4Al、 α - β 型チタン合金Ti-6Al-4Vの3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。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の部分で連続切削で行った。主軸回転数は100-1,500rpm、切込み深さは $d=5\mu\text{m}$ 、主軸1回転あたりの送り量は $f=2-30\mu\text{m/rev}$ とした。

使用した工具は、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、コーティング超硬バイトの2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 $R=0.5\text{mm}$ 、すくい角 0° 、逃げ角 7° である。コーティング超硬バイトは、ノーズ半径 R のみ 0.2mm でダイヤモンドバイトとは異なる。コーティングは、PVD法によるTiCN層で $5\mu\text{m}$ 程度の膜厚である。

切削油剤は、ダイヤモンドバイトによるアルミニウムのような軟質金属の超精密切削に用いられる灯油⁶⁾と不水溶性切削油剤を用いた。不水溶性切削油剤の成分は、油脂分のみのType Sと油脂に特殊添加剤等を加えたType Y、油脂に硫黄系極圧添加剤等を加えたType Kの3種類である。切削油剤の供給は、加工点近傍に対して、図1に示す圧縮空気を用いたミスト供給装置によるミスト供給法およびスプレーによる噴霧供給法とした。

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

* 原稿受付 平成14年7月17日

** 正会員 熊本大学工学部(熊本市黒髪2-39-1)

† ソニーセミコンダクタ九州(熊本県菊池郡菊陽町大字原水4000-1)

Fig.2 Influence of cutting fluid on face-turned pure titanium surface
(V=60m/min, d=5 μ m, f=2 μ m/rev, L=100m)

Table 1 Experimental conditions

Machine tool:	Ultra-precision Lathe ULC-100A, Toshiba Machine CO.,LTD.
Cutting tool:	Single crystal diamond tool Nose radius: R = 0.5 mm Coated cemented carbide tool Nose radius: R = 0.2 mm Rake angle: 0 deg, Relief angle: 7 deg
Workpiece material:	Pure titanium (JIS class 2) Ti-22V-4Al (β titanium alloy) Ti-6Al-4V (α - β titanium alloy)
Cutting fluid:	Kerosine Water-immiscible cutting fluid Type S Water-immiscible cutting fluid Type Y Water-immiscible cutting fluid Type K
Cutting conditions	Cutting speed: V = 10-160 m/min Depth of cut: d = 5 μ m/rev Feed rate: f = 2-30 μ m/rev

して観察した。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。最大仕上面粗さは、JIS B 0601 (2001)より Rz 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、本論文で使用する Rz とは、工具送り方向への 250 μ m 長の 2次元仕上面粗さとする。さらに、WYKO による 250 μ m の 3次元仕上面粗さは、Rz_(3D) と表記する。また、工具先端部の凝着物に関する成分分析は EPMA で行った。

3. 切削油剤の種類が仕上面粗さに及ぼす影響

灯油と不水溶性切削油剤 Type K および Type S の 3 種類を用いて、純チタンの超精密正面旋削をコーティング超硬バイトで行った。微分干渉顕微鏡で観察した仕上面写真および触針式粗さ計または WYKO による仕上面粗さの測定結果を、図 2 にまとめて示す。実験は切削速度 V=60m/min、切り込み深さ d=5 μ m、送り量 f=2 μ m/rev で行った。切削油剤の供給方法は、軟質材料の超精密切削と同様に、切削加工点近傍へ圧縮空気 0.2MPa でミスト供給した。灯油と不水溶性切削油剤 Type K をそれぞれ供給したときに得られた仕上面は、図 2(a), (b) に示すように不規則な濃淡となる切削条痕が観察され、所々が斑点状の荒い

仕上面となった。触針式粗さ計で測定した仕上面の 2次元最大仕上面粗さは、灯油の Rz=1,150nm(P-V)に対して、水溶性切削油剤 Type K では 415nm(P-V) まで向上した。そして不水溶性切削油剤 Type S の供給では、図 2(c) に示すように切削条痕が明瞭で、仕上面の曇りが少なく、WYKO による測定で 3次元最大仕上面粗さ Rz_(3D)=296nm(P-V) となった。このことから、不水溶性切削油剤は、純チタンの超精密切削で灯油と比較して良好な切削仕上面創成に効果的であると言える。また、硫黄系極圧添加剤等を含む不水溶性切削油剤 Type K を用いたとき、仕面上に灯油の場合とは異なる図 2(b) に示す粒状の黒い影が仕上面に確認された。これは、添加剤を含まない不水溶性切削油剤 Type S を供給した場合に付着物が生じていないことから、硫黄系極圧添加剤等による影響ではないかと推測される。

さらに不水溶性切削油剤の供給効果を確認するため、純チタンおよび 2 種類のチタン合金を、不水溶性切削油剤 Type S および Type Y のミスト供給で超精密正面旋削した。得られた 3 種類のチタン金属仕上面における 250 μ m の 3次元仕上面粗さ Rz_(3D) は、図 3 にまとめられる。加工条件は、前実験と同一である。純チタンの 3次元仕上面粗さ Rz_(3D) は、2 種類の不水溶性切削油剤ともに 200nm(P-V) を越える仕上面粗さではあるが、いずれも良好な仕上面を得られた。 β 型チタン合金では、切削油剤 Type S および Type Y を使用したときの 3次元仕上面粗さはそれぞれ Rz_(3D)=230nm(P-V) および Rz_(3D)=160nm(P-V) となった。同様に、最も良好な仕上面となった α - β 型チタン合金においても、それぞれ Rz_(3D)=120nm(P-V) と Rz_(3D)=70nm(P-V) となった。不水溶性切削油剤 Type S の供給は、純チタン以外のチタン金属にも有効であることが実験的に確認された。また、不水溶性切削油剤 Type K とは異なる特殊添加剤を含む不水溶性切削油剤 Type Y を用いたときに、油脂分のみの不水溶性切削油剤 Type S を用いた場合より、仕上面粗さが向上したことから、不水溶性切削油剤に添加されている各種成分は、切削工具の摩擦抑制やチタン金属の仕上面創成などに影響を及ぼす可能性があると考えられる。

次に、これまでの実験で最も良い仕上面粗さが得られた α - β 型チタン合金の超精密切削加工において、バイト送り量と仕上面粗さの関係を明らかにするため、不水溶性切削油剤 Type Y をミスト供給して実験的な検討を行った。バイト送り量を 2-

Fig.3 Comparison of the 3D surface roughness for pure titanium and titanium alloys face-turned using the cutting fluid type Y with the cutting fluid type S ($V=60\text{m/min}$, $d=5\mu\text{m}$, $f=2\mu\text{m/rev}$, $L=100\text{m}$)

Fig.4 Relationship between 2D surface roughness R_z of α - β titanium alloy and feed rate

($V=60\text{m/min}$, $d=5\mu\text{m}$, $f=2\text{--}30\mu\text{m/rev}$, $L=100\text{m}$, Cutting fluid Y)

30 $\mu\text{m/rev}$ と変化させたときに、得られた2次元仕上面粗さ R_z は図4にまとめられる。また、バイト刃先稜の形状を円弧と仮定して求められる理論仕上面粗さ $R_{z(th)}$ は、 $f/8R$ (f : 工件物1回転当たりのバイト送り量, R : バイトノーズ半径) となり、図4中に破線にて示される。実験で得られた2次元仕上面粗さ R_z は、理論仕上面粗さ $R_{z(th)}$ と比較して200nm以上も大きな値となったが、バイト送り量と仕上面粗さの関係は定性的に同様な傾向を示している。ただし、図4からわかるように、バイト送り量 $f=2\mu\text{m/rev}$ においては、 $f=4\mu\text{m/rev}$ 以上の送り量と比較して、非常に良好な $R_z=100\text{nm(P-V)}$ 以下の仕上面が得られた。チタン合金の超精密切削仕上面は、切り屑排出の後、バイト刃先稜からバイト逃げ面にかけてのパンシッシュで生成されていると考えている⁵⁾。つまり、稠密なコーティング層で形成されるバイト逃げ面の粗さは、バイト送り量と同じ2 μm の範囲で捉えた場合、大きな凹凸を持たないため、仕上面に大きな粗さを転写していないと考えられる。図5に示すコーティング超硬バイトの刃先稜近傍を無酸素銅に転写した面のAFM測定した結果からも、測定区間A-A'の測定長2 μm では、2次元最大高さ粗さが $R_z=30\text{nm}$ 程度と比較的良好な粗さを示す。しかしながら、2 μm よりも広い範囲で工具刃先の形状を議論すると、円弧とは言い難い刃先稜であることがわかる。つまり、市販のコーティング超硬バイトを用いて、目標仕上面粗さ100nm(P-V)以下を達成するためには、バイト刃先稜および逃げ面の転写する領域を小さくするように、送り量を設定する(本実験では $f=2\mu\text{m/rev}$)ことで対応できると考えられる。

Fig.5 Cutting edge contour of coated carbide tool transcribed to oxygen free copper, measured with AFM

4. 切削油剤ミスト供給法の効果

チタン金属の超精密切削における不水溶性切削油剤の供給効果は、灯油との比較実験により確認された。実験的に最も効果が確認された不水溶性切削油剤Type Yを用いて、切削油剤の供給法が仕上面粗さに及ぼす影響を検討していく。本実験では、油剤供給法の効果を判別しやすくするため、チタン金属の超精密切削において摩耗が早い、形状の整えられた単結晶ダイヤモンドバイトを用いた⁵⁾。さらに、切削で生じるダイヤモンドバイトへの凝着物も分析する。工件物は、良好な仕上面を得ることができる α - β 型チタン合金とした。比較する切削油剤の供給法とは、油量を多く供給するスプレーによる噴霧供給と図1に示した圧縮空気を用いたミスト供給の2種類である。2種類の切削油剤供給法で得られた仕上面について、微分干渉顕微鏡写真およびWYKOによる測定像を図6にまとめる。油剤をスプレーにて噴霧供給したときに得られる仕上面では、図6(a)のように切削条痕の深さが所々ばらつき、3次元仕上面粗さが $R_{z(3D)}=144\text{nm(P-V)}$ と大きくなった。一方、油剤をミスト供給したときに得られる仕上面は、図6(b)に示す通り非常に良好な仕上面となり、切削条痕の深さに大きな差が無く、3次元仕上面粗さ $R_{z(3D)}=91\text{nm(P-V)}$ となっている。これらの仕上面は切削距離 $L=60\text{m}$ と非常に短いときに得られたもので、この後、切削距離の増加に伴って、仕上面粗さは急速に悪化してしまう。

次に、切削距離60mの超精密正面旋削後における単結晶ダイヤモンドバイトについて、すくい面を微分干渉顕微鏡で観察した。いずれの切削油剤供給法を用いた場合でも、ダイヤモンドバイトには、図7に示すようにバイトすくい面先端部の摩耗およびチタン合金の凝着と思われる付着物が確認された。特に、切削油剤をスプレーで噴霧供給したとき、図7(a)のように、バイト先端部の広範囲に大きく凝着が見られ、刃先稜は非常に粗くなっている。一方、100nm(P-V)以下と良好な仕上面が得られた、ミスト供給時のダイヤモンドバイトは、図7(b)に示すように、バイト先端部の微小領域でのみ凝着が確認された。これら凝着物が α - β 型チタン合金であることを確認するために、凝着物の多い、スプレー噴霧供給時に使用したダイヤモンドバイトをEPMAで成分分析した。単結晶ダイヤモンドバイトの主成分である炭素Cが、図8(a)下側の凝着物のない箇所に確認された。一方、 α - β 型チタン合金Ti-6Al-4Vの主成分であるチタンTiとアルミニウムAlは、図8(b), (c)に示すようにバイト

Fig.6 Comparison of α - β titanium alloy surface face-turned by single diamond tool using mist fluid supply method with spray fluid supply method ($V=60\text{m/min}$, $d=5\mu\text{m}$, $f=2\mu\text{m/rev}$, $L=60\text{m}$, Type Y)

先端部に確認される。このことから、切削油剤のスプレー噴霧供給法では、供給圧力が小さく、切削加工中に切削点近傍まで切削油剤が十分に供給されず、バイト先端部における潤滑および冷却効果が低いため、熱伝導率が低いチタン合金に対して、単結晶ダイヤモンドバイト先端部が高温となり、刃先からすくい面の広範囲に渡ってチタン合金が凝着し、バイト刃先の摩耗が生じたと考えられる。一方、ミスト供給法は、油剤が圧縮空気とともに切削点近傍で強制的に循環供給されるため、切削熱を効率的に除去し潤滑効果を高めて、工作物と工具との間の凝着を抑制したと推測できる。さらに、圧縮空気が切り屑の排出性も良好にするなど、効果的な供給法であると考えられる。しかし、不水溶性切削油剤Type Yのミスト供給法でも、ダイヤモンドバイトの刃先は切削距離 $L=60\text{m}$ で摩耗し、チタン合金の凝着を伴うため、チタン金属の超精密切削にダイヤモンドバイトが工具寿命の観点から実用的ではないと確認できる。

次に、コーティング超硬バイトを用いて、不水溶性切削油剤Type Yのミスト供給によって得られたチタン金属の仕上面顕微鏡写真およびWYKO像を図9に示す。図9(a), (b)の3次元仕上面粗さ $Rz_{(3D)}=222\text{nm(P-V)}$ の純チタンおよび 148nm(P-V) の β 型チタン合金の仕上面には、結晶粒が観察される。純チタンの結晶粒は粒径 $100\mu\text{m}$ を越え、 β 型チタン合金でも粒径が $100\mu\text{m}$ 程度の大きさであり、WYKOの3次元測定像でも結晶粒界の段差が明白に現れている。結晶粒界の段差は、バイト送り量 $f=2\mu\text{m/rev}$ とほぼ一致する切削条痕による盛り上がりよりも顕著に大きく、仕上面粗さに大きな影響を及ぼしている。そのため純チタンおよび β 型チタン合金ともに、目標値とした仕上面粗さ $Rz=100\text{nm(P-V)}$ を超えている。一方、最も良好な3次元仕上面粗さ $Rz_{(3D)}=58\text{nm(P-V)}$ となった α - β 型チタン合金の顕微鏡写真は、前者の2種類よりも明らかに平滑な仕上面となっている。図9(c)右図に示すWYKO測定像からも結晶粒は観察されず、仕上面が切削条痕とバイト刃先で切り屑とならず盛り上がりとして仕上面に残された不規則な粗さで構成されている。

3種類のチタン金属について、結晶粒の存在を確認するため、切削仕上面を腐食液によって30秒腐食させた。使用した腐食液は、純水(95%)：塩酸(1.5%)：硝酸(2.3%)：60%フッ化水素

Fig.7 Variation of the edge wear of single crystal diamond tool with the fluid supply method after face-turning α - β titanium alloy ($V=60\text{m/min}$, $d=5\mu\text{m}$, $f=2\mu\text{m/rev}$, $L=60\text{m}$, Cutting fluid type Y)

Fig.8 EPMA analysis of the edge wear surface of single crystal diamond tool with the spray fluid supply method after face-turning α - β titanium alloy ($V=60\text{m/min}$, $d=5\mu\text{m}$, $f=2\mu\text{m/rev}$, $L=60\text{m}$, Cutting fluid type Y)

酸(1%)の溶剤である。腐食後の切削仕上面は、微分干渉顕微鏡で図10に示すように観察される。純チタンおよび β 型チタン合金については、既に確認されていた結晶粒がそれぞれ図10(a)および(b)に示す通りより鮮明になった。一方、 α - β 型チタン合金も、図10(c)のように小さい結晶粒が確認された。さらに高倍率にして観察した図10(d)から、粒径が数 μm 程度の結晶粒がわかる。つまり、チタン金属の超精密切削では、要求される仕上面粗さを実現するために、金属組織の結晶粒を把握し、その粒界段差を考慮することが必要である。

5. ミスト供給圧力が仕上面粗さに及ぼす影響

チタン金属の超精密切削で、不水溶性切削油剤のミスト供給法が、仕上面粗さの向上に効果的であることがわかった。しかし、これまでは切削油剤のミスト供給圧力は、アルミニウムなど軟質金属の超精密切削の際に灯油を供給するときと同じ 0.2MPa に固定していた。そこで、ミスト供給法における圧縮空気の圧力が、仕上面粗さに与える影響を検討するため、3種類のチタン金属について、切削油剤の供給圧力を 0.12 - 0.29MPa と変化させて超精密正面旋削を行った。その他の実験条件はこれまでと同様で、不水溶性切削油剤Type Yを用いた。3種類のチタン金属仕上面における2次元仕上面粗さ Rz は図11にまとめられ、ミスト供給圧力が高いほど、一様に仕上面粗さが良好になる傾向を確認した。

切削油剤の作用には、①潤滑作用、②冷却作用、③切り屑排出作用、④切り屑の脆化作用、⑤構成刃先の抑制作用などが一般的に論じられている。熱伝導率の低いチタン金属において、加工熱に対する冷却作用や潤滑作用は、工具へのチタン金属の凝着および工具摩耗を抑制し、仕上面粗さの向上をもたらすと考えられる。さらに、切り屑排出作用においても、高圧な圧縮空気がより効果的に機能していると推測される。ただし、本実験で使用したミスト供給装置の性能上、 0.29MPa 以上の高圧条件について明らかになっていない。

Fig.9 Pure titanium and titanium alloys face-turned by coated cemented carbide tool using the cutting fluid type Y ($V=60\text{m/min}$, $d=5\mu\text{m}$, $f=2\mu\text{m/rev}$, $L=100\text{m}$)

Fig.10 Comparison of pure titanium and titanium alloys face-turned by coated tool after corroding the surface layer ($V=60\text{m/min}$, $d=5\mu\text{m}$, $f=2\mu\text{m/rev}$, $L=100\text{m}$, Cutting fluid type Y)

6. 結 言

各種チタン合金に対する実用的な超精密切削加工法の構築を目的として、切削油剤の供給が切削仕上げ面に与える影響を実験的に検討し、以下の結果が得られた。

- (1) チタン金属の超精密切削加工において、灯油よりも各種不水溶性切削油剤のミスト供給が、高平滑な仕上げ面の生成に効果的であることがわかった。
- (2) 不水溶性切削油剤のミスト供給効果は、チタン金属の工具への凝着および工具摩耗を抑制する。しかし、単結晶ダイヤモンドバイトは、このミスト供給下においても、非常に短

Fig.11 Influence of pressure of mist fluid supply on surface roughness of face-turned pure titanium and titanium alloys ($V=60\text{m/min}$, $d=5\mu\text{m}$, $f=2\mu\text{m/rev}$, $L=100\text{m}$, Cutting fluid type Y)

い切削距離 $L=60\text{m}$ の時点で、工具刃先部へのチタンの凝着および刃先の摩耗が生じ、工具寿命から実用的ではない。

- (3) これに対して、PVD法によるTiCN系コーティング超硬バイトは、ダイヤモンドバイトより良好な仕上げ面を生成した。本実験で使用した純チタンおよびβ型チタン合金では、粒径 $100\mu\text{m}$ 程度の結晶粒界の段差が仕上げ面粗さに大きく影響を及ぼし、それぞれの3次元仕上げ面粗さ $Rz_{(3D)}$ は 260nm(P-V) 、 160nm(P-V) 程度となった。一方、結晶粒径が数 μm と小さく、結晶粒界段差による影響が少ないα-β型チタン合金では、3次元仕上げ面粗さ $Rz_{(3D)}=58\text{nm(P-V)}$ と目標値を達成した。

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) 社本英二，森本祥之，森脇俊道：楕円振動切削加工法（第2報），精密工学会誌，vol. 65，3，(1999) 411.
- 2) 神雅彦，渡邊健志，村川正夫：超音波振動切削における工具欠損防止に関する研究，精密工学会誌，vol. 65，12，(1999) 1814.
- 3) 板倉勝利，黒田基文，重川英文，猪谷彦太郎，山本恵一，有浦泰常：超耐熱合金インコネル718の切削加工におけるコーテッド超硬工具の摩耗機構，精密工学会誌，vol. 65，7，(1999) 976.
- 4) 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.
- 5) 安井平司，坂本重彦，川田昌樹：チタン合金のコーティング工具による超精密切削加工，精密工学会誌，vol. 68，7，(2002) 928.
- 6) 小林昭，河西敏雄，森脇俊道：超精密生産技術体系 第2巻 実用技術，フジ・テクノシステム，(1994) 105.