

経常研究

# 超音波振動を援用したチタン合金の MQL エンドミル加工に関する研究

近藤 弘康\* 山下 健介\*

Study on Ultrasonic Vibration-Assisted MQL End Milling of Titanium Alloys  
KONDO Hiroyasu and YAMASHITA Kensuke

チタン合金の MQL 加工において工具寿命延長効果が得られるエンドミルとノズルの距離を延長するため、工具刃先と被削材切削面の摩擦抵抗を低減できる超音波振動に着目し、超音波振動が切削力や凝着の除去に与える影響を調査した。超音波振動を付与した際に工具と被削材が連続接触する条件で圧延 64 チタンの側面切削における主分力を評価した結果、超音波振動の有無で切削力の値に顕著な差は見られなかった。一方、切削力に微振動が見られ、その振動周期は超音波振動の周波数と一致した。また、MQL の工具寿命延長効果が損なわれるノズル距離で工具すくい面の凝着を比較した結果、超音波振動の付与で凝着が低減した。

Key words: 超音波振動、エンドミル加工、チタン合金、切削力、凝着

## 1 はじめに

ボーイング 787、エアバス 350 等の新型航空機では、機体の軽量化等を目的とした CFRP の利用増に伴い、熱膨張率や電蝕の問題から CFRP と接する金属部材にチタン合金が多用されている。

チタン合金は熱伝導率が小さく、切削時の刃先温度が高温になる等の要因のため工具寿命が著しく短く、部品製造コストの工具費の割合が高くなっており、工具の長寿命化によるコスト低減が求められている。

工具の長寿命化のため、微量の切削油剤を圧縮空気とともにオイルミストとして供給する MQL (Minimal Quantity Lubrication) 加工をチタン合金に用いたところ、加工機の差異に関係なく、従来用いられている高圧クーラントに比べて 10 倍以上の工具寿命が得られた<sup>1)</sup>。また、エアブロー衝撃力評価手法を用いてノズル形状等を選定し、エンドミルとノズルの距離（以下、ノズル距離）が 120 mm においても工具寿命延長効果が得られる MQL 供給システムの開発を実現した<sup>2)</sup>。

これらの成果は加工現場に適用を進めているものの、現場の作業性向上や更なる大型部品への適用のため、更なるノズル距離延長のニーズがある。

チタン合金の MQL 加工は刃先に発生する凝着をエアブローで除去することで工具の長寿命化を実現していると考えられる<sup>3)</sup>。そのため、刃先の摩擦係数を低減し凝着の結合を抑制することで、ノズル距離が大きくエアブロー衝撃力の小さい条件においても凝着を除去し、工具寿命延長効果を得ることが期待できる。

そこで本研究では、工具刃先と被削材切削面の摩擦抵抗を低減できる超音波振動に着目し、超音波振動が切削力や凝着の除去に与える影響を調査した。

## 2 研究の方法

### 2. 1 超音波振動条件が側面切削に与える影響の調査

#### 2. 1. 1 超音波スピンドルの振動振幅の評価

超音波切削加工は切削抵抗の低減や加工面品質の向上などの効果が知られており、脆性材料や難削材等の加工に多くの事例が報告されている。超音波振動条件のうち、振動周波数と振動振幅は工具振動の瞬間最大速度 $V_c$ を決定するパラメータであり、切削速度 $V$ よりも $V_c$ が大きい場合、工具刃先は加工物から瞬間的に離れるが、 $V$ よりも $V_c$ が小さい場合、工具刃先は加工物と連続接触することが知られている<sup>4)</sup>。

そこで、本研究で使用する超音波スピンドル（アリュージ DUS シリーズ）の切削状態を把握するため、レーザードップラー振動計（Polytec NLV-2500-2）を用いて、加工段取りにおける工具の軸方向振動の振動振幅の測定を行った（図 1）。

なお、当超音波スピンドルは、工具長・材質等から決定される工具の共振周波数を 18-40 kHz の周波数範囲で自動調整するため、安定して共振がなされた 26 kHz を振動周波数とし、超音波スピンドルに供給する高周波電気出力を装置最大で設定した。また、工具は径 4 mm、1 枚刃の超硬エンドミルを用い、突き出し長さ 20 mm で評価を行った。なお、当工具は工具振れの影響を抑えるため、2 枚刃の工具から 1 枚刃を削り取ったものである。

\* 栃木県産業技術センター 機械電子技術部

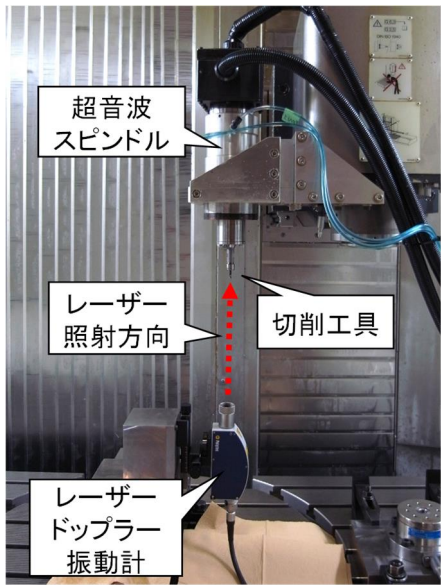


図1 超音波スピンドル軸方向振動測定段取り

2. 1. 2 側面切削試験

超音波振動の有無がチタン合金のMQL加工における切削力や加工面性状に与える影響を評価するため、加工現場におけるチタン合金の仕上げ加工に相当する表1の条件で5軸マシニングセンタ（DMG 森精機 DMF180）に取り付けた超音波スピンドルを用いて、64 チタン圧延材（AMS4911）の切削試験を実施した（図2、3）。

なお、切削力は切削抵抗測定装置（日本キスラー 9257B）を用いて測定し、加工面の表面粗さは非接触表面粗さ測定機（Taylor Hobson CCI-MP）を用いて測定した。

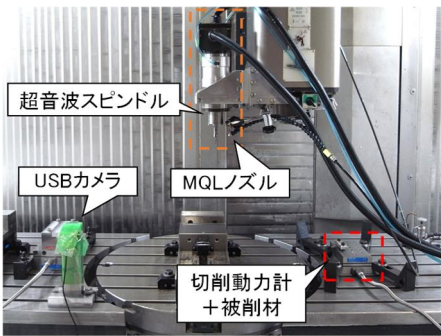


図2 側面切削試験段取り

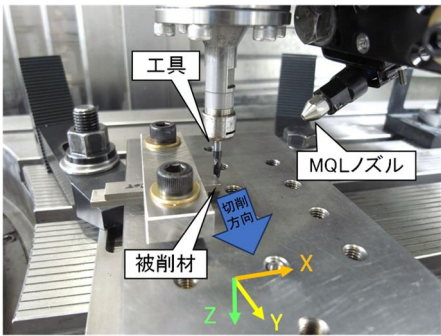


図3 側面切削試験段取り（拡大）

表1 側面切削試験条件

|       |         |              |    |
|-------|---------|--------------|----|
| 工具    | 径       | 4 mm         |    |
|       | 形状      | ラジアスエンドミル    |    |
|       | コーティング  | TiAlN        |    |
|       | 母材      | 超硬           |    |
|       | 刃数      | 1 枚刃         |    |
| 切削条件  | 切削速度    | 50 m/min     |    |
|       | 1 刃送り   | 0.1 mm/tooth |    |
|       | 軸方向切込み  | 3.2 mm       |    |
|       | 半径方向切込み | 0.1 mm       |    |
| 超音波条件 | 超音波振動   | あり           | なし |
|       | 振動周波数   | 26 kHz       | —  |
|       | 電気出力    | 装置最大         | —  |
| MQL条件 | ノズル距離   | 50 mm        |    |
|       | ノズル角度   | 30°          |    |
|       | ノズル口径   | 2 mm         |    |
|       | エアー入力圧  | 0.7 MPa      |    |
|       | エアー流量   | 145 L/min    |    |
|       | 油供給量    | 30 ml/h      |    |
|       | 使用油     | BLUEBE LB-1  |    |

2. 2 ノズル距離が凝着に与える影響の調査

超音波振動により工具刃先と被削材切削面の摩擦抵抗が変化する場合、刃先への凝着の付着に差が生じると考え、表2のとおり、超音波振動ありはノズル距離 150 mm、超音波振動なしはノズル距離 120 mm、150 mm の2条件で 64 チタン圧延材（AMS4911）の切削試験を行った。なお、工具、切削条件は表1の条件を用いた。

また、工具は条件毎に新品工具を用い、繰り返し5回側面切削を実施した後、走査型電子顕微鏡（日立ハイテック SU3800）を用いて工具のすくい面における凝着の観察を行った。

表2 凝着確認試験条件

|       |        |             |             |
|-------|--------|-------------|-------------|
| 超音波条件 | 超音波振動  | あり          | なし          |
|       | 振動周波数  | 26 kHz      | —           |
|       | 電気出力   | 装置最大        | —           |
| MQL条件 | ノズル距離  | 150 mm      | 120, 150 mm |
|       | ノズル角度  | 30°         |             |
|       | ノズル口径  | 2 mm        |             |
|       | エアー入力圧 | 0.7 MPa     |             |
|       | エアー流量  | 145 L/min   |             |
|       | 油供給量   | 30 ml/h     |             |
|       | 使用油    | BLUEBE LB-1 |             |

### 3 結果及び考察

#### 3. 1 超音波振動条件が側面切削に与える影響の調査

##### 3. 1. 1 超音波スピンドルの振動振幅の評価

レーザードップラー振動計で測定した振動速度を図4に示す。振動周波数が一定の場合、変位は速度 $\div 2\pi f$  ( $f$ :振動周波数)の関係が知られているため、速度振幅のピーク平均から算出した振動振幅  $A$  は  $0.68 \mu\text{m}$  と算出できる。また、文献5)で示された工具振動の瞬間最大速度  $V_c$  の算出式(1)を用いると、 $6.7 \text{ m/min}$  よりも大きい切削速度の場合、工具刃先は加工物と連続接触すると考えられる。

$$V_c = 2\pi f A \quad (1)$$

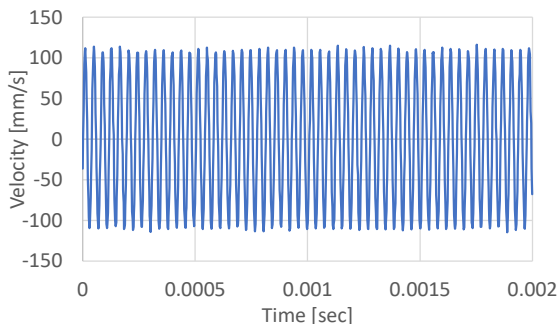


図4 振動速度測定結果

##### 3. 1. 2 側面切削試験

主成分 (X 方向) の切削力測定結果を図5に示す。1切込み毎のピーク平均 ( $n=6$ ) を比較すると、超音波振動ありは  $39.46 \text{ N}$ 、超音波振動なしは  $39.55 \text{ N}$  であり、顕著な差は見られなかった。

次に同試験の1切込みの切削力主成分を図6、FFTによる周波数スペクトルを図7に示す。超音波振動ありは切削力に微振動が見られ、周波数スペクトルに超音波スピンドルの振動周波数である  $26 \text{ kHz}$  にピークが見られる。これは試験条件の切削速度は  $50 \text{ m/min}$  であり、工具振動の瞬間最大速度  $6.7 \text{ m/min}$  よりも大きいため、工具刃先は加工物と連続接触している一方、超音波振動により切削速度が変動することから、この結果が得られたものと考えられる。また、表面粗さは、超音波振動ありは  $R_z 1.87 \mu\text{m}$ 、 $R_a 0.25 \mu\text{m}$  に対し、超音波振動なしは  $R_z 1.84 \mu\text{m}$ 、 $R_a 0.25 \mu\text{m}$  であり、ほぼ同程度であった。

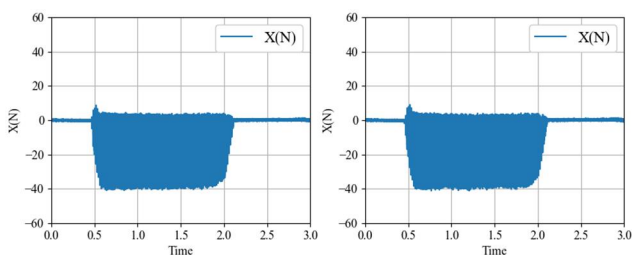


図5 切削力主成分

(左：超音波振動あり、右：超音波振動なし)

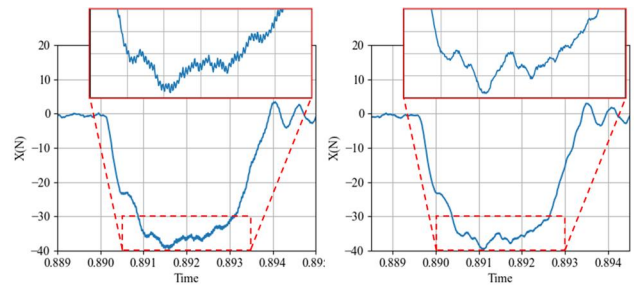


図6 1切込みの切削力主成分

(左：超音波振動あり、右：超音波振動なし)

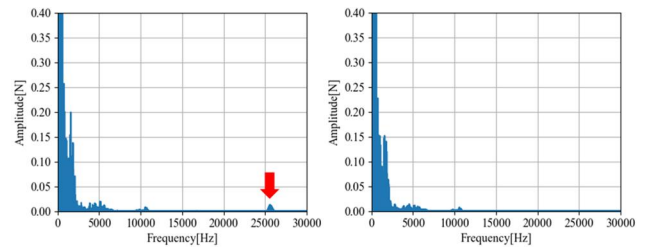


図7 周波数スペクトル

(左：超音波振動あり、右：超音波振動なし)

#### 3. 2 ノズル距離が凝着に与える影響の調査

図8～10に各条件の工具すくい面の観察結果を示す。超音波振動なしのノズル距離  $120 \text{ mm}$  (図8) と  $150 \text{ mm}$  (図9) を比較すると、ノズル距離  $120 \text{ mm}$  では凝着が見られないものの、ノズル距離  $150 \text{ mm}$  では広い範囲で刃先に凝着が見られる。これはノズル距離が大きくなることでMQLのエアブロー衝撃力が小さくなり、切削時に刃先に発生した凝着を除去できず、刃先に残存したのと考えられる。これは、過去の研究<sup>2)</sup>において、超音波振動なしの場合、ノズル距離  $120 \text{ mm}$  は長寿命である一方、ノズル距離  $150 \text{ mm}$  は短寿命であることから、MQLの工具寿命延長効果は刃先の凝着の有無と関連があることを裏付ける結果と言える。

一方、超音波振動ありのノズル距離  $150 \text{ mm}$  (図10) は、超音波振動なしと異なり、凝着は見られなかった。これは、超音波振動により、工具刃先と被削材切削面の摩擦抵抗が低減し、小さいエアブロー衝撃力でも刃先に発生した凝着を除去できた可能性が考えられる。そのため、当条件で工具摩耗試験を行う場合、超音波振動なしで工具寿命延長効果が損なわれるノズル距離  $150 \text{ mm}$  においても超音波振動によって刃先の凝着を低減し、工具の長寿命化が期待できる。

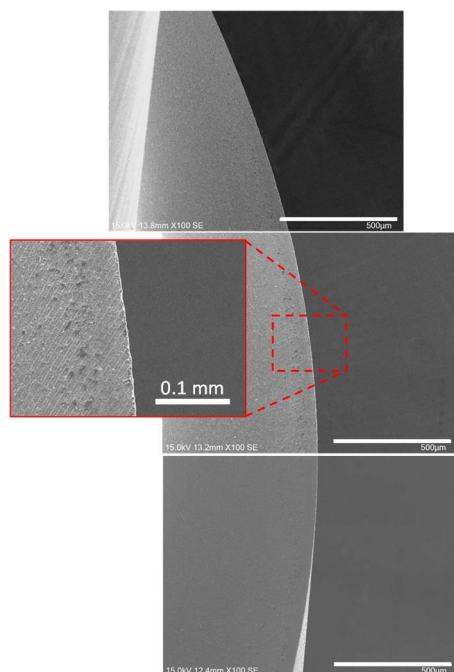


図8 すくい面観察結果（超音波振動なし、120 mm）

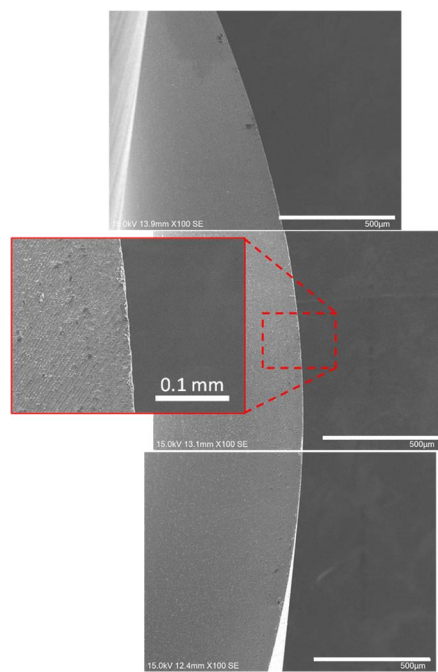


図10 すくい面観察結果（超音波振動あり、150 mm）

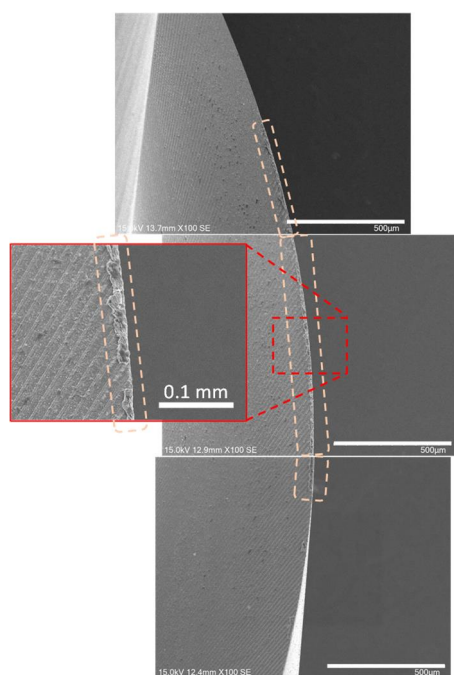


図9 すくい面観察結果（超音波振動なし、150 mm）

#### 4 おわりに

本研究では、圧延 64 チタン合金の MQL エンドミル加工において超音波振動が切削力や凝着の除去に与える影響を調査し、以下の知見を得た。

- (1) 本研究で用いた超音波スピンドルの変位振幅は約 0.68  $\mu\text{m}$  と小さいため、実施した切削条件 ( $V_c$  50m/min) では工具と被削材が連続接触する。
- (2) 側面切削における主分力を評価した結果、超音波振動の有無で切削力の大きさに顕著な差は見られ

なかった。一方、切削力に微振動が見られ、超音波振動の周波数と一致した。

- (3) MQL の工具寿命延長効果が損なわれるノズル距離 150 mm において工具すくい面における凝着を比較した結果、超音波振動の付与で凝着が低減した。

#### 謝 辞

本事業で用いた測定機の一部は公益財団法人 JKA の補助事業によるものであり、競輪マークを記して謝意を表する。

#### 参考文献

- 1) 近藤 弘康ほか：「栃木県産業技術センター研究報告」，19，1-5，(2022)
- 2) 近藤 弘康ほか：「栃木県産業技術センター研究報告」，21，1-7，(2024)
- 3) 笹原 弘之ほか：「精密工学会誌」，66 (1)，80-84，(2000)
- 4) 隈部 淳一郎：「精密加工振動切削-基礎と応用-」，実教出版，(1979)
- 5) 原 圭祐ほか：精密工学会学術講演会講演論文集 2013S，117-118，(2013)



本研究は、公益財団法人 JKA 補助事業により整備した機器を活用して実施しました。