

チタン合金の低周波振動切削における工具摩耗生成メカニズムの分析

中央大学 ○寺谷浩登, ◎高橋幸男, 矢野礼緒, 鈴木教和

要旨

難削材であるチタン合金のドライ切削において、低周波振動切削は優れた工具摩耗の抑制効果を発現する。一方で、振動条件が工具摩耗に及ぼす影響は明らかにされていない。本研究では、振動振幅が工具摩耗に及ぼす影響を分析する。切削実験の結果、高振幅条件で工具摩耗が進展しやすい現象が確認された。切削力と工具軌跡および逃げ面摩耗との相関関係を分析した結果、工具逃げ面での接触が工具摩耗の進展速度に影響する現象を確認した。

1. 緒言

チタン合金は比強度が高く、高温強度に優れていることから、自動車産業や航空宇宙産業など幅広い分野で使用されている。しかしながら、熱伝導率が低いことから刃先に熱が溜まりやすく、工具摩耗が進展しやすい難削材である。そのため熟を効率的に排出する切削方法が求められている。また、近年、環境問題やコストの観点からドライ加工の需要が高まっている。

そこで、シチズンマシナリー製の低周波振動切削技術(以下『LFV』)に着目した。LFVとは、切削送り方向に振動する加工技術であり、振動し空振り時間を設けることで切りくずを断続的に排出することができ、平均切削抵抗と平均切削温度の低減効果により¹⁾、工具摩耗抑制が期待できると考えられている。筆者らは、チタン合金のドライ切削での工具摩耗の抑制効果について報告してきた²⁾。しかしながら、振動条件が工具摩耗に及ぼすメカニズムについては明らかにしていない。本報告では、振動振幅が工具摩耗に及ぼす影響を評価した結果、高振幅条件で工具摩耗が進展しやすい現象が確認された。さらに、切削力と工具軌跡および逃げ面摩耗との相関関係を分析し、工具逃げ面での接触が工具摩耗の進展速度に影響する現象を確認したので報告する。

2. 工具摩耗と切削モデルの検討

2.1 工具軌跡に伴う切り厚さの変化

LFVにおける切り厚さは、図1に模式的に示すような振幅比率 Q 値と一回転あたりの振動回数 D 値に従い変化する^{3), 4)}。よって、工具に生じる応力や温度は逐次変化することとなり、このようなプロセスが摩耗進展に影響を及ぼすこととなる。

本報告では、工具軌跡から幾何学的に決定される切り厚さと切削力の関係に着目して分析を行う。正確な切り厚さの変化を捉えるため、加工中に工作機械のサーボデータ情報(工具位置情報、主軸回転情報のフィードバック値など)と動力計データを同期して取得することとした。なお、収集されたデータはMatlabにて処理を施した。図2に例として、切削速度 V_c 100m/min、振動振幅 Q 1.0における切り厚さと切削力の変化を示す。同図の黒線が切り厚さで、振幅に応答するように切削抵抗の主成分成分が変化することがわかる。一方で、送り分力と背分力の変化は極めて小さいことがわかる。

2.2 エッジフォース係数と工具摩耗

動力計によって得られる切削抵抗値は、切りくず生成に関与する比切削抵抗成分と工具切れ刃稜先端に及ぼされる押込み力(Ploughing force)であるエッジフォース成分の和で構成される⁵⁾。

$$F_p = K_{pc}wt_u + K_{pe}w \quad (1)$$

$$F_t = K_{tc}wt_u + K_{te}w \quad (2)$$

$$F_r = K_{rc}wt_u + K_{re}w \quad (3)$$

ここで、 $F_p, F_t, F_r, K_{pc}, K_{tc}, K_{rc}$ および K_{pe}, K_{te}, K_{re} はそれぞれ実測された切削抵抗値、比切削抵抗とエッジフォース係数の、主分力・送分力・背分力方向成分である。 t_u は切り厚さ、 w は切削幅である。図3は図2で示した同切削条件における切削抵抗値3成分と切り厚さのリサージュ波形をプロットしたものである。図中の点線で示す傾きは比切削抵抗値を意味し、切片($t_u = 0$)がエッジフォース係数を表している。工具切れ刃稜に及ぼされるエッジフォースは、工具切れ刃丸みや逃げ面摩耗幅といった工具形状に影響を受けることになる。すなわち、丸味や摩耗幅の増加に伴って、エッジフォース係数も変化し大きくなるものと考えられる。

3. 被削材および実験方法

切削実験には、LFVを搭載したシチズンマシナリー製NC旋盤「VC03」を用い、外周切削を実施した。主な切削条件を表1に示す。目標の切削速度に近くなるように D 値の整数部を選択し、NCプログラムにて調整した。なお、比較のために振動なしの慣用切削(CC: Conventional cutting)も併せ実施した。被削材は直径30mm

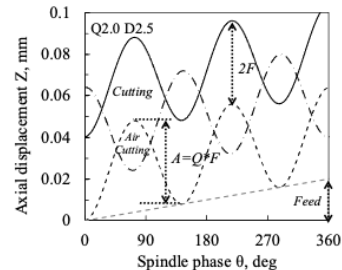


Fig.1 Schematic of cutting edge trajectory in LFV cutting

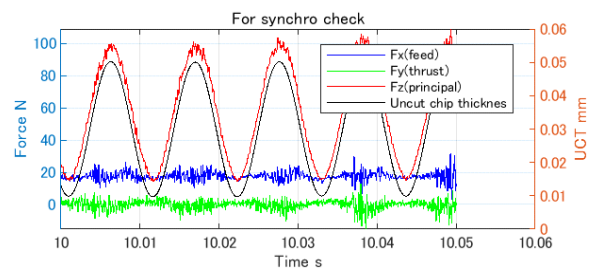


Fig.2 Variation in uncut chip thickness (UCT) and cutting force at 100m/min, 0.03mm/rev, Q1.0 after cutting length 75m

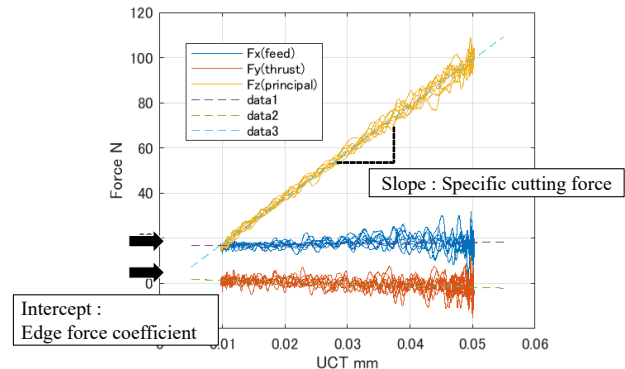


Fig.3 Variation in specific cutting force and edge force coefficient with UCT at 100m/min, 0.03mm/rev, Q1.0 after cutting length 75m.

Table 1 Cutting conditions

Work piece	Ti-6Al-4V (Dm30mm)	
Tool material	DCGT11T302R-F Non-coated Cemented carbide K10 Rake angle 15° Relief angle 7° Inclination angle 6°	
Cutting speed V_c	m/min	100
Mode	LFV	CC
Feed rate F	mm/rev	0.03
Amplitude/feed rate Q	-	1.0, 2.0
Vibration times/rev D	-	1.5, 2.5, 3.5, 4.5
Depth of cut w	mm	1.0
Atmosphere	Dry	

の Ti-6Al-4V の丸棒である。予め別のインサートにて最外周表皮を除去したのち、摩耗実験用インサートに交換して切削実験を実施した。切削中における工具軌跡や主軸回転情報を取得するため、

X 軸, Z 軸, 主軸のサーボ情報を CNC から取得した。また, 切削抵抗値は, 動力計(Kistler 製, 9119AA2)を用いて振動解析システム(小野測器製, DS5000)にて収集し, サーボ情報と同期して分析した。切削後に得られたインサートに対して, 共焦点レーザ顕微鏡(Olympus 製, OLS-4100) および走査型電子顕微鏡 (FEI 製, Quanta250) にて観察および摩耗幅を測定した。

4. 実験結果および考察

4.1 切削距離に伴う工具摩耗の進展過程

図 4(a)~(c)に切削距離に伴う摩耗量の変化を示す。なお, 図 4(d)に摩耗幅 VB の推移を示す。同図から, $CC < Q1.0 < Q2.0$ の順に摩耗幅 VB が小さい結果となり, 振幅比率の高い条件下で工具摩耗が進展しやすい傾向が確認された。一方, 境界摩耗は LFV の方が抑制されている。ノーズ摩耗を比較すると, LFV の高振幅条件で摩耗進展が最も著しい。以上の工具摩耗を包括的に考えると LFV の低振幅条件でも最も工具寿命が長くなると考えられる。境界部やノーズ部の工具切れ刃形状の変化もプロセスの変化に影響を及ぼすものと考えられるが, これら摩耗機構の詳細については今後検討することとする。

4.2 逃げ面摩耗進展に伴う比切削抵抗・エッジフォースの変化

図 5 に切削距離に伴う比切削抵抗とエッジフォース係数の変化を示す。主分力および, 送り分力方向の比切削抵抗値は $Q1.0, Q2.0$ ともに摩耗幅が進展しても概ね一定となることがわかる。一方で, エッジフォース係数は主分力および送り分力方向ともに増加する傾向にある。特に送り分力方向では, 摩耗があまり進展していない $Q1.0$ で変化が小さいのに対し, 摩耗幅が進展している $Q2.0$ では変化が大きいことから, 逃げ面摩耗の進展と送り方向のエッジフォース係数の増加には強い相関があることがわかる。

4.3 逃げ面摩耗と送り分力のヒステリシスループ現象

図 6 に, 切削距離 4000m 時点で計測された切り厚さと切削抵抗値のリサージュ波形を示す。同図より送り分力成分に着目すると, 摩耗幅 VB が $100\mu\text{m}$ であった $Q2.0$ の場合は, エンゲージしてからの下降運動領域で約 110N となり, ディスエンゲージまでの上昇運動領域では約 80N となる。すなわち, 送り分力成分に運動方向依存性が生じることで, 図中の赤い破線で示すようなヒステリシスループとなって現れたと考えられる。ここで, 工具逃げ面と振動軌跡の関係について考える。工具逃げ面が摩耗すると, 摩耗部の逃げ角は実質的に 0 となる。このとき, 図 1 に示した軌跡のように, 工具が切り込む方向に移動すると摩耗部が被削材と接触しながら切削すると考えられる。この逃げ面干渉作用の影響で逃げ面摩耗が促進され, 送り分力方向のエッジフォース成分が増大したと考える。

4.4 逃げ面摩耗と軌道角の関係

工具軌跡と逃げ面接触力の関係を考察する。見かけの切削方向に対して工具と被削材と相対的な運動軌跡がなす角度を軌道角 ξ と定義する。軌道角 ξ は式(4)により得られる。

$$\xi(t) = \tan^{-1} \dot{Z}(t) / V_c \quad (4)$$

ここで, $\dot{Z}(t)$ は工具振動速度, V_c は見かけの切削速度である。これら速度情報はサーボ情報から得た。

図 7 に送り方向のエッジフォース成分と軌道角の関係を示す。エッジフォース成分は, 図 5 および図 6 より計算した比切削抵抗と切り厚さを用いて, 式(2)より抽出する。エッジフォースが小さい領域は実質的には非接触状態であり無視することができる。ここで, 最小軌道角から最大軌道角へと変化する際のエッジフォース成分を直線近似し, その傾きを α_1 , 切片を α_0 とする。ほぼ新品の状態である 75m の場合は, α_1 は 0 に近くエッジフォースは軌道角に依存しない。一方, 摩耗が進展した 4000m の場合は, 軌道角が最小の時に 110N , 最大の時に 80N と変化して, 負の傾き α_1 を示している。なお, 軌道角のもとと小さい $Q1.0$ の条件においては, この傾きがゼロのまま成長しないことが認められた。すなわち, 軌道角が大きくなる高振幅条件ほど, 工具の逃げ面干渉を生じやすいことが, $Q2.0$ の条件において逃げ面摩耗が大きい理由であると考える。

5. 結言

本報告では, チタン合金の低周波振動切削技術を用いたドライ切削において, 振動振幅, 切削力, 工具軌跡および逃げ面摩耗との相関関係を分析した結果, 軌道角が大きく振幅比率の高い条件ほど, 工具逃げ面との干渉が生じやすく, そのプロセスが工具逃げ面摩耗の進展を加速させるということがわかった。なお, 摩耗を抑制するには, 軌道角が小さくかつ断続切削を満たす条件を選択するのが望ましい。

※「LFV」はシチズン時計株式会社の登録商標です。

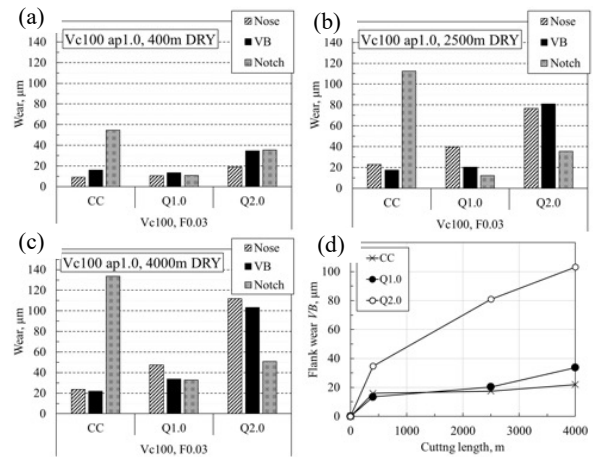


Fig.4 Variations in tool wear with cutting length.

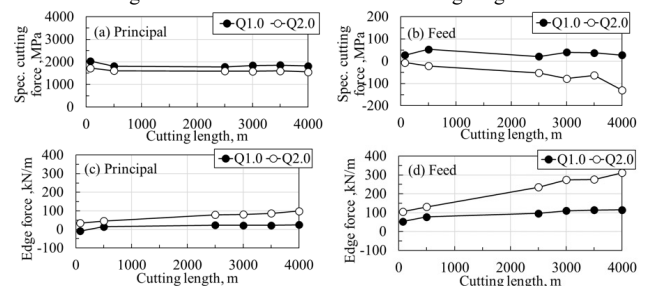


Fig.5 Variations in specific cutting forces and edge force coefficients with cutting length

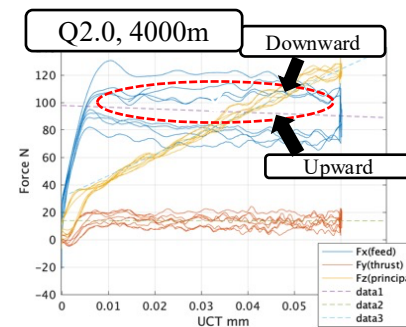


Fig.6 Cutting force variations v.s. UCT at 100m/min, 0.03mm/rev after cutting length 4000m.

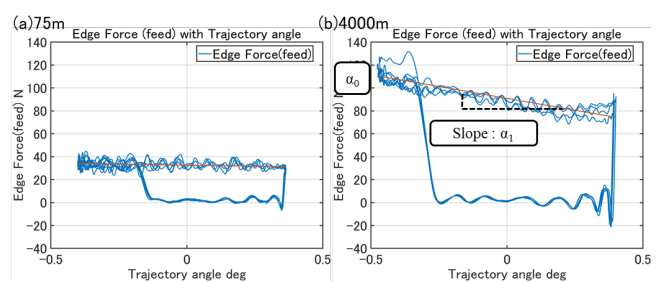


Fig.7 Relationship between trajectory angle and edge force (feed)

参考文献

- 1) 北風ら, 低周波振動切削技術「LFV」の開発, マイクロメカトロニクス, 60, 215 (2016) 2.
- 2) 佐藤ら, 低周波振動切削によるチタン合金のドライ加工の可能性について, 2020 年度精密工学会春季大会第 28 回卒業研究発表会, (2020) .64.
- 3) A. Miyake et al., Chip control in turning with synchronization of spindle rotation and feed motion vibration, Precision Engineering, 53, (2018).
- 4) 高橋ら, 低周波振動切削における工具摩耗の予測, 2021 年度精密工学会春季大会, (2021), 202.
- 5) Y. Altintas, Manufacturing automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design, Cambridge University Press, 2012.