

難削材の高能率切削加工に関する研究（第3報）

加賀忠士*、佐藤丈士*

Study on high-efficiency cutting of difficult-to-machine materials (III)

KAGA Tadashi* and SATO Joji*

本研究では、チタン合金における高能率切削加工の最適条件を求める手法を検討してきた。本年度は、昨年度までに実施してきた実験に径方向切込みの条件を加え、工具摩耗進展速度の評価、次にこの工具摩耗進展速度を予測する手法を検討した。その結果、径方向切込みが大きくなると、切削可能距離が短くなり、工具摩耗進展速度は大きくなる。工具摩耗進展速度への影響は切削速度のパラメータが最も強く、続いて1刃あたりの送り、次に径方向切込みの順になることがわかった。また、昨年度提案した工具摩耗進展速度の予測式に、径方向切込みのパラメータを加えた予測式は、実験結果と強い相関があることを確認した。

1 はじめに

航空機産業分野では炭素繊維強化プラスチックの利用拡大と共にチタン合金の利用が拡大している。このチタン合金の切削では、切削熱が刃先近傍に集中し、局部的に切削温度が上昇すること、そして刃先が高温になるため、工具の摩耗が加速するといった問題が挙げられている。そのため、チタン合金の切削加工では、低速加工を採用し、能率を上げるためには、送りを増加して高トルクで削る方法が経験的に行われている。

本研究では、チタン合金における高能率切削加工の最適条件を求める手法を検討してきた。令和3年度は、切削速度、1刃あたりの送りの条件について、同じ能率となる切削実験を行い、工具摩耗への影響を調査した。続いて令和4年度は、切削速度、1刃あたりの送りの条件を変化させた切削実験を引き続き行い、工具摩耗進展速度の評価、次にこの工具摩耗進展速度を予測する手法を検討した。本年度は、これまでに実施してきた実験に径方向切込みの条件を加え、工具摩耗進展速度の評価、次にこの工具摩耗進展速度を予測する手法を検討したのでその結果を報告する。

2 実験

本年度の実験パラメータを径方向切込みとし、令和3年度及び令和4年度の実験¹⁾²⁾と同様の方法で進めた。実験の概要を図1、実験条件を表1に示す。評価は昨年度と同様、工具摩耗進展速度で行った。一例として、切削速度120m/min、1刃あたりの送り0.45mm/tooth、径方向切込み12.5mmにおける工具底面側から見た逃げ面の摩耗の様子を図2に示す。この逃げ面の中で最大の摩耗幅を摩耗測定値とする。次に切削距離に対する最大摩耗幅の関係をグラフ化し、最大摩耗幅が200 μ mに達する前後の測定結果を直線補間することで最大摩耗幅が

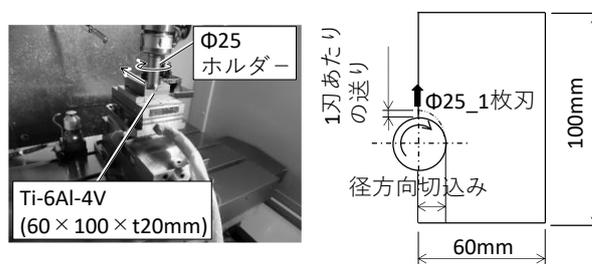


図1 実験の概要

表1 実験条件

実施年度	R04	R03	R04	R03	R04	R03	R03	R05	R05
切削速度 m/min	45	60	90	90	90	120	180	60	60
1刃あたりの送り mm/tooth	0.9	0.9	0.45	0.6	0.9	0.45	0.3	0.9	0.9
送り速度 mm/min	516	688	516	688	1031	688	688	688	688
径方向切込み mm	12.5						8	17	
軸方向切込み mm	0.6								
工具送り方向	ダウンカット								
冷却方法	ウェット								

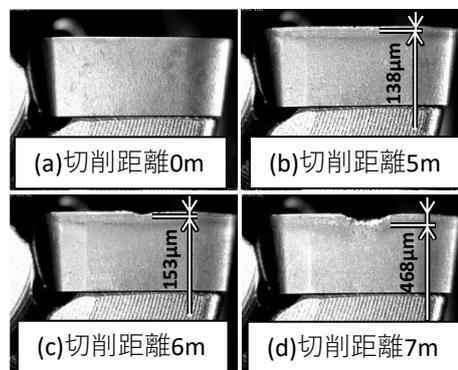


図2 工具摩耗の様子

(切削速度120m/min、1刃あたりの送り0.45mm/tooth、径方向切り込み12.5mm)

* 機械部

- 切削速度180m/min_送り0.3mm/tooth_径方向切込み12.5mm
- 切削速度120m/min_送り0.45mm/tooth_径方向切込み12.5mm
- 切削速度90m/min_送り0.6mm/tooth_径方向切込み12.5mm
- ▣ 切削速度60m/min_送り0.9mm/tooth_径方向切込み12.5mm
- 切削速度45m/min_送り0.9mm/tooth_径方向切込み12.5mm
- 切削速度90m/min_送り0.9mm/tooth_径方向切込み12.5mm
- 切削速度90m/min_送り0.45mm/tooth_径方向切込み12.5mm
- △ 切削速度60m/min_送り0.9mm/tooth_径方向切込み8mm
- △ 切削速度60m/min_送り0.9mm/tooth_径方向切込み17mm

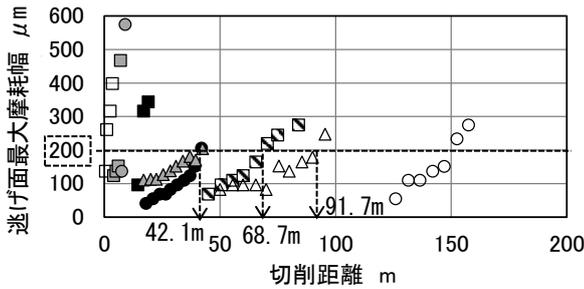


図3 各切削条件における切削距離と工具摩耗との関係

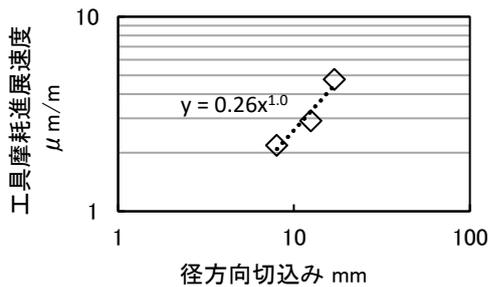


図4 径方向切り込みと工具摩耗進展速度との関係

200 μm に達する切削距離を算出し、この切削距離を切削可能距離としている。次に工具摩耗進展速度の定義について説明する。工具摩耗進展速度 W_r は逃げ面最大摩耗幅 VB_{max} を切削可能距離 L_c で除した値であり、切削可能距離 L_c は逃げ面最大摩耗幅 VB_{max} が工具使用の限界と判断する幅に達した時の切削距離である。この計算式を式(1)に示す。

$$W_r = \frac{VB_{\text{max}}}{L_c} \quad (1)$$

- W_r : 工具摩耗進展速度 ($\mu\text{m}/\text{m}$)
- VB_{max} : 逃げ面最大摩耗幅 (μm)
- L_c : 切削可能距離 (m)

本研究では、逃げ面最大摩耗幅が 200 μm に達するまで

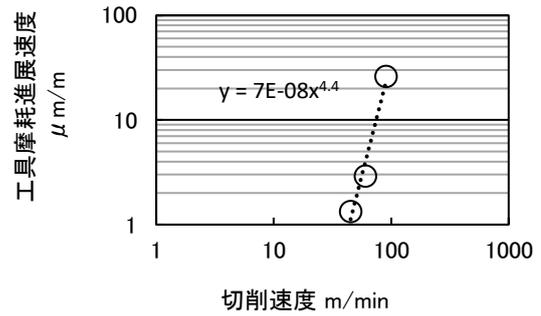


図5 切削速度と工具摩耗進展速度との関係

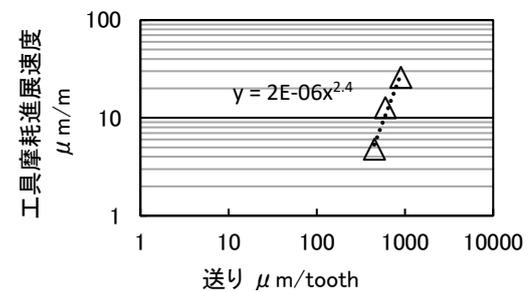


図6 1刃あたりの送りと工具摩耗進展速度との関係

の切削距離を切削可能距離としている。例えば、切削可能距離 100m、125m、150m の場合の工具摩耗進展速度は、それぞれ 2 $\mu\text{m}/\text{m}$ 、1.6 $\mu\text{m}/\text{m}$ 、1.3 $\mu\text{m}/\text{m}$ となる。

3 結果及び考察

3.1 工具摩耗測定結果

令和3年度から本年度までの9条件の実験から得られた各切削条件における切削距離と逃げ面最大摩耗幅の関係を図3に示す。切削速度 60m/min、送り 0.9mm/tooth における径方向切り込み 8mm、12.5mm、17mm の切削可能距離は、それぞれ、91.7m、68.7m、42.1m の結果を得た。この結果から、径方向切り込みが増加すると、切削可能距離が短くなることがわかった。回転工具は常に切り厚さが変動している。今回の実験のように径方向切り込みが増加すると、切削中における平均的な切り厚さが増加する。また、回転工具において、径方向切り込みが増加するという事は、工具1回転周期中における切削の比率が大きくなる。これらの影響により、工具刃先の温度が上昇し、これにより工具摩耗が促進し、その結果切削可能距離が短くなったと考えられる。

3.2 工具摩耗進展速度の評価

上記切削可能距離から式(1)を用いて求めたところ、径方向切り込み 8mm、12.5mm、17mm における工具摩

耗進展速度はそれぞれ、 $2.2\mu\text{m}/\text{m}$ 、 $2.9\mu\text{m}/\text{m}$ 、 $4.8\mu\text{m}/\text{m}$ の結果を得た。次に径方向切込みと工具摩耗進展速度の関係を両対数で示したグラフを図4に示す。この図から、径方向切込みが大きくなると、工具摩耗進展速度が大きくなること、また、両対数のグラフ上では線形の関係が得られており、径方向切込みと工具摩耗進展速度がべき乗の関係にあることがわかった。なお、昨年度に評価した切削速度と工具摩耗進展速度の関係を図5に、1刃あたりの送りと工具摩耗進展速度の関係を図6に再掲する。これらの図も両対数のグラフでみると線形の関係が得られており、べき乗の関係になっている。ここで、図4から図6に示す近似式の指数部分をみると、径方向切込みの指数は1.0、切削速度の指数は4.4、1刃あたりの送りの指数は2.4になっている。以上から、工具摩耗進展速度への影響は切削速度が最も強く、続いて1刃あたりの送り、次に径方向切込みの順になっていることがわかった。

3.3 工具摩耗進展速度の予測

図4の径方向切込みと工具摩耗進展速度の関係、図5の切削速度と工具摩耗進展速度の関係、図6の1刃あたりの送りと工具摩耗進展速度の関係について、これらは両対数のグラフにおいて線形の関係になることから、工具摩耗進展速度の対数を目的変数、切削速度の対数、1刃あたりの送りの対数、及び径方向切込みの対数を説明変数とした重回帰分析³⁾を行なった。その結果得られた工具摩耗進展速度の予測式を以下に示す。

$$\log(Wr) = -14.6 + 5.11\log(Vc) + 1.66\log(Ft) + 1.03\log(Ae) \quad (2)$$

Wr : 工具摩耗進展速度($\mu\text{m}/\text{m}$)

Vc : 切削速度 (m/min)

Ft : 1刃あたりの送り ($\mu\text{m}/\text{tooth}$)

Ae : 径方向切込み (mm)

この予測式の寄与率は0.96であり、予測式と実験結果が強い相関関係にあることを確認した。

なお上記予測式の活用事例を紹介する。例えば、仮に現状の加工条件が切削速度 $Vc=60\text{m}/\text{min}$ 、1刃あたりの送り $Ft=900\mu\text{m}/\text{tooth}$ 、径方向切込み $Ae=12.5\text{mm}$ とした場合、計算式(2)にあてはめると工具摩耗進展速度 $Wr=3.43\mu\text{m}/\text{m}$ が得られる。この摩耗進展速度は計算式(1)から切削可能距離58.3mということがわかる。

この現状に対し切削速度 $Vc=50\text{m}/\text{min}$ 、1刃あたりの送り $Ft=1300\mu\text{m}/\text{tooth}$ 、径方向切込み $Ae=17\text{mm}$ とした場合、同様に計算式(2)にあてはめると工具摩耗進展速度 $Wr=3.41\mu\text{m}/\text{m}$ が得られる。つまり、この予測式を使えば、切削速度を0.83倍、送りを1.44倍、径方向切り込みを1.36倍とした除去体積の能率を1.63倍にし

ても同じ工具摩耗進展速度になるといった、より高効率な加工条件を提案することができる。

4 まとめ

本年度は、令和4年度までに実施してきた実験に径方向切込みの条件を加え、工具摩耗進展速度の評価、次にこの工具摩耗進展速度を予測する手法を検討し、以下の結果を得た。

- 1) 径方向切込みが大きくなると、切削可能距離が短くなり、工具摩耗進展速度は大きくなる。
- 2) 工具摩耗進展速度への影響は切削速度のパラメータが最も強く、続いて1刃あたりの送り、その次に径方向切込みの順になっている。
- 3) 昨年度提案した工具摩耗進展速度の予測式に、径方向切込みのパラメータを加えた予測式は、実験結果と強い相関がある。

【謝 辞】

本研究の遂行にあたり、国立大学法人東海国立大学機構名古屋大学大学院工学研究科 社本英二教授に、ご助言をいただきましたことを深く感謝いたします。

【参考文献】

- 1) 加賀ら,岐阜県産業技術総合センター研究報告 No.3, pp5-6,2022
- 2) 加賀ら,岐阜県産業技術総合センター研究報告 No.4, pp3-4,2023
- 3) 小林龍一,相関・回帰分析法入門改訂版,日科技連出版社,1973