

切削工具の工具寿命に関する研究（第1報）

加賀忠士*、横山貴広*

Study on tool life of cutting tool (I)

KAGA Tadashi* and YOKOYAMA Takahiro*

本研究では、切削油剤における工具摩耗の影響を調査する。本年度は基礎実験として、切削油剤の違い、切削速度変化、送り変化そして径方向切込み変化による切削抵抗及び工具刃先温度の関係を把握した。その結果、切削速度が増加すると切削抵抗は減少、工具刃先温度は増加している。1刃あたりの送りが増加すると切削抵抗は増加、工具刃先温度も増加する。径方向切込みが増加すると切削抵抗は増加、工具刃先温度も増加することがわかった。なお今回の実験結果では、エマルジョン形とソリューション形の明らかな差異はなかった。

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。現状、チタン合金の切削加工では、低速加工を採用しており、加工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。しかし、生産現場では、さらなる加工能率の向上が求められており、高能率切削加工の最適条件を求める方法が望まれている。

岐阜県産業技術総合センターでは、令和3年度から令和5年度にかけて、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、工具摩耗予測式を導き出した。この工具摩耗予測式は、切削条件の切削速度、送り量、及び径方向切込みを入力すると、工具摩耗の進行の早さを結果として出力することができる式である。この工具摩耗予測式を用いることで、工具摩耗の進行が現状と同じであっても、加工能率を最大限に高める切削条件の提案が可能となった¹⁾³⁾。

切削条件の一つである切削油剤を用いると、切削抵抗と切削温度が低下することで、工具摩耗が低減する。その結果、工具寿命が長くなる効果がある。切削油剤には、潤滑作用を主目的として原液で使用する「不水溶性切削油剤」と、冷却作用を主目的として水に希釈して使用する「水溶性切削油剤」の二つに大別できる。近年、環境や省資源の観点より不水溶性切削油剤から水溶性切削油剤への切り替えが進んでいる⁴⁾。そこで、本研究では、水溶性切削油剤に着目し、切削油剤における工具摩耗の影響を調査する。なお、チタン合金の切削に適用した水溶性切削油剤を調査したところ、エマルジョン形とソリ

ューション形があることを確認した。エマルジョン形は水、油及び界面活性剤で構成されており、油の粒子が大きい（粒子径：2～5 μm）のが特徴である。一方ソリューション形は、油を全く含まず、水と溶解物質で構成されており、その粒子径が非常に小さい（粒子径：0.001 μm以下）のが特徴である⁵⁾。本年度は基礎実験として、エマルジョン形及びソリューション形の切削油剤の違い、切削速度変化、送り変化そして径方向切込み変化による切削抵抗及び工具刃先温度の関係を把握したのでその結果を報告する。

2 実験

2.1 温度測定方法

工具刃先温度の測定は、工具・被削材熱電対法を採用した。これは切削加工中の工具と被削材間に発生する熱起電力を利用して切削温度を測定する手法である。この手法の原理となるゼーベック効果とは、2種類の金属棒でループをつくり、両端の接点間に温度差を与えた場合、接点間に起電力（熱起電力）が生じ、ループに電流が流れる現象である。この熱起電力は接点間の温度差と金属の材質によって決まるため、予め作成した温度校正曲線

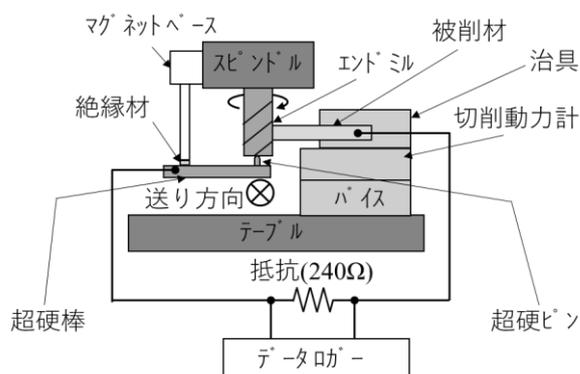


図1 熱起電力測定の概要

* 機械部

から切削温度を求めることができる⁶⁾。熱起電力測定の概要を図1に示す。本実験では、回転する工具から電圧を測定するために、エンドミルの底面中心にくぼみを持たせ、そこにテーパ形状のφ2 mmの超硬ピン(K40UF)を押し当てることで、熱起電力の測定を可能とした。また、工具空転時は回路が開放され、ノイズの影響で大きな電圧が測定されてしまうため、240 Ωの抵抗を挿入している。そして、主轴が回転すると弾性流体潤滑状態となり、軸受間の潤滑油の影響で主轴とマシニングセンター本体が短絡状態から絶縁状態になる現象を積極的に活用することで、被削材を絶縁しない状態で実験を行った。なお、熱電対の内部抵抗を測定した結果は1.6 Ωであり、今回用いた並列抵抗の抵抗値240 Ωに対し十分小さい。そのため熱起電力測定における内部抵抗の影響を無視することとした。

なお、工具材の超硬K40UFと被削材のチタン合金Ti-6Al-4Vの組み合わせにおける温度校正曲線は、令和3年度名古屋大学との共同研究で得られたものを用いた。下記にその換算式を示す。

$$T = 7 \times 10^{-9} V^3 - 7 \times 10^{-5} V^2 + 3.17 \times 10^{-1} V \quad (1)$$

T: 温度(°C)

V: 電圧(μV)

2.2 切削実験

切削実験の概要を図2、実験条件を表1に示す。被削材はチタン合金Ti-6Al-4V(60×100×t2 mm)、実験装置は3軸マシニングセンター(ブラザー工業(株)S300X2)、切削工具は超硬K40UFの無垢でφ10 mmの1枚刃エンドミルを使用した。加工機のテーブル上に切削動力計(Kistler 9257B)を配置し、その上に治具を介して被削材を固定した。実験は切削速度45.2m/min、60.0m/min、90.1m/min、1刃あたりの送り0.1 mm/tooth、0.2 mm/tooth、0.3 mm/tooth、径方向切込み1 mm、2 mm、5 mm、軸方向切

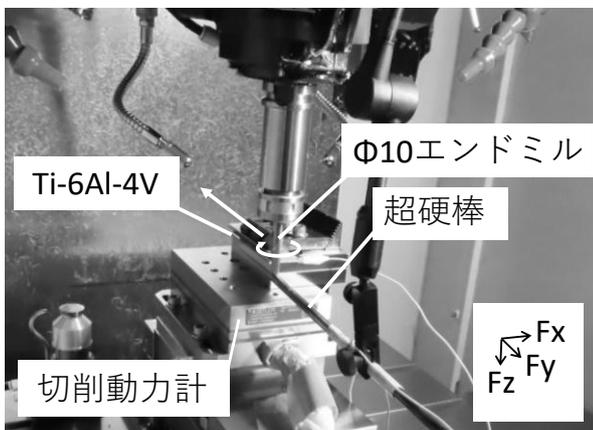


図2 切削実験の概要

込み2 mm、工具送り方向はダウンカット、切削油剤はエマルジョン形とソリューション形の10倍希釈をそれぞれ被削材に塗布し、被削材長さ100 mmの方向を直線に走らす加工を1パスとして行った。

なお、切削抵抗については切削時に切削動力計から得られるFx、Fy、Fzそれぞれの値を合力に変換し、この合力を1パス(100 mm)で平均して評価を行った。次に、切削温度については切削時に発生する熱起電力を1パス(100 mm)で平均した値を用い、この平均値を換算式で温

表1 実験条件

切削速度 m/min	45.2, 60.0, 90.1
1刃あたりの送り mm/tooth	0.1, 0.2, 0.3
径方向切込み mm	1, 2, 5
軸方向切込み mm	2
工具送り方向	ダウンカット
切削油剤塗布	エマルジョン/ソリューション

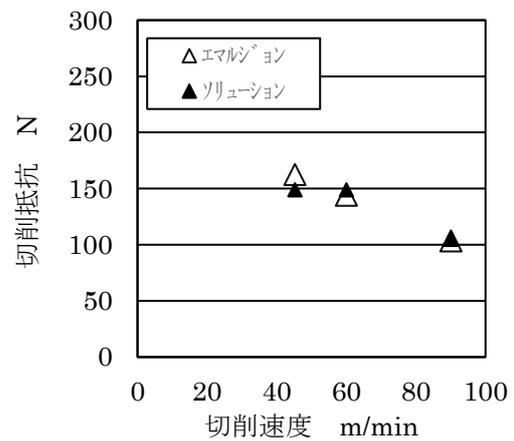


図3 切削速度と切削抵抗の関係
(送り0.2 mm/tooth、径方向切込み2 mm)

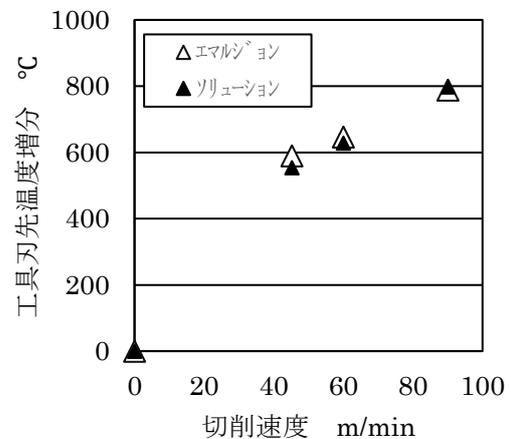


図4 切削速度と工具刃先温度増分の関係
(送り0.2 mm/tooth、径方向切込み2 mm)

度に変換した。この温度は、切削前の工具刃先温度を基準にし、切削時に上昇した工具刃先温度との差を示している。そのため、工具刃先温度は増分で評価を行った。

3 結果及び考察

3.1 切削速度変化

切削速度 45.2m/min、60.0m/min、90.1m/min と変化させたときの切削抵抗の関係を図 3、工具刃先温度増分との関係を図 4 に示す。切削速度が増加すると切削抵抗は減少、工具刃先温度増分は増加している。杉田らによれば切削速度を速くすると、すくい面の温度上昇をもたらし、すくい面上の摩擦力が減少、その結果せん断角が増加し切削抵抗を減少させる。また、温度上昇は被削材を軟化させ、せん断応力を下げる働きをする。他方でひずみ速度の上昇はせん断応力を上げるが、これらの効果を合成すると切削抵抗は切削速度の増加に従って減少する⁷⁾と示されており、実験結果はその傾向と一致してい

る。なお今回の実験結果では、エマルジョン形とソリューション形の明らかな差異はなかった。

3.2 送り変化

1 刃あたりの送り 0.1 mm/tooth、0.2 mm/tooth、0.3 mm/tooth と変化させたときの切削抵抗との関係を図 5、工具刃先温度増分との関係を図 6 に示す。1 刃あたりの送りが増加すると切削抵抗は増加、工具刃先温度増分も増加している。杉田らによれば切削抵抗は切削断面積に比例し⁷⁾、社本によれば切削温度は切り取り厚さ及び切削幅が増加する場合、せん断発熱の面積増大により上昇する⁸⁾と示されており、実験結果はその傾向と一致している。なお、今回の実験結果では、エマルジョン形とソリューション形の明らかな差異はなかった。

3.3 径方向切込み変化

径方向切込み 1 mm、2 mm、5 mm と変化させたときの切削抵抗との関係を図 7、工具刃先温度増分との関係を図 8 に示す。径方向切込みが増加すると切削抵抗は増加、

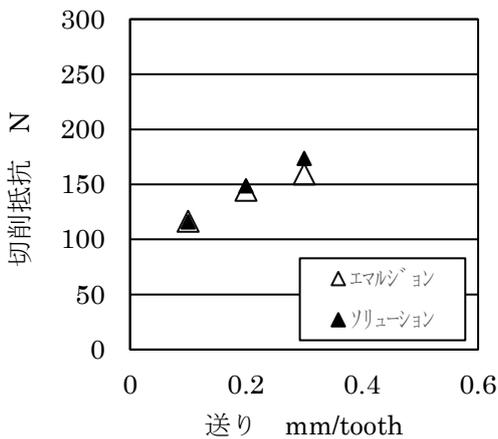


図5 送りと切削抵抗の関係
(切削速度 60.0m/min、径方向切込み 2 mm)

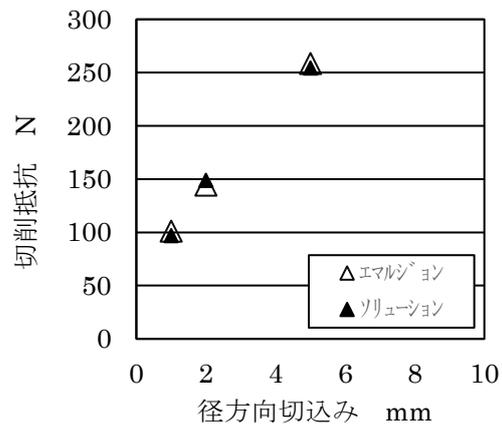


図7 径方向切込みと切削抵抗の関係
(切削速度 60.0m/min、送り 0.2 mm/tooth)

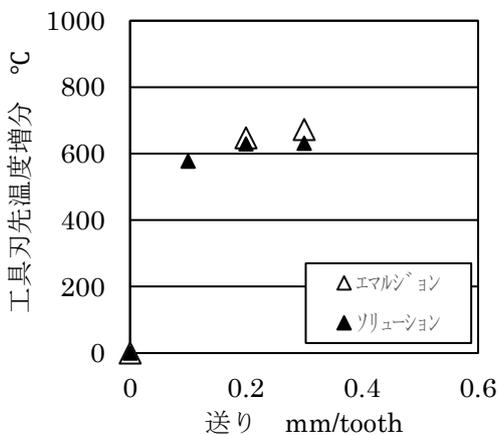


図6 送りと工具刃先温度増分の関係
(切削速度 60.0m/min、径方向切込み 2 mm)

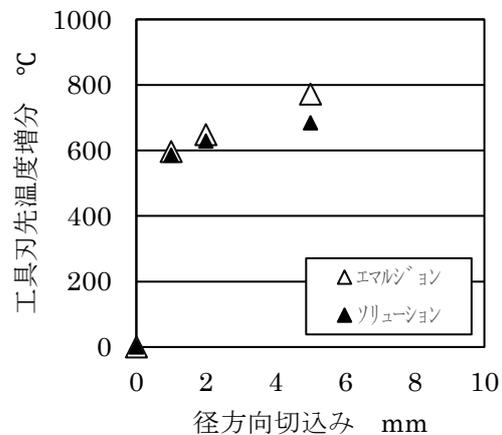


図8 径方向切込みと工具刃先温度増分の関係
(切削速度 60.0m/min、送り 0.2 mm/tooth)

工具刃先温度増分も増加している。上記の送り変化に対する考察と同様に、切削抵抗は切削断面積に比例し、切削温度は切り取り厚さ及び切削幅が増加する場合、せん断発熱の面積増大により上昇することから、実験結果はその傾向と一致している。なお、今回の実験結果では、エマルジョン形とソリューション形の明らかな差異はなかった。

今回実験に使用した水溶性切削液は、両方ともチタン切削に適したものを選択して用いていることから、切削抵抗、工具刃先温度に差異が認められなかったと考えられる。しかし、切削油剤への期待は、工具寿命の延長である。そのため、次年度は工具摩耗実験を行い、エマルジョン形、ソリューション形における工具寿命の差異を検証していく。

4 まとめ

本研究では、切削油剤における工具摩耗の影響を調査する。本年度は基礎実験として、切削油剤の違い、切削速度変化、送り変化そして径方向切り込み変化による切削抵抗及び工具刃先温度の関係を把握し、以下の結果を得た。

- 1) 切削速度が増加すると切削抵抗は減少、工具刃先温度は増加する。
- 2) 1 刃あたりの送りが増加すると切削抵抗は増加、工具刃先温度も増加する。
- 3) 径方向切込みが増加すると切削抵抗は増加、工具刃先温度も増加する。
- 4) 今回の実験結果では、エマルジョン形とソリューション形の明らかな差異はなかった。

切削油剤への期待は、工具寿命の延長である。そのため、次年度は工具摩耗実験を行い、エマルジョン形、ソリューション形における工具寿命の差異を検証していく。

【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) 加賀ら,岐阜県産業技術総合センター研究報告 No.5, pp4-6,2024
- 4) 協同油脂株式会社加工油技術部,やさしい切削油剤の話,株式会社潤滑通信社, pp14-15,2011
- 5) 海野,絵とき切削油剤の基礎のきそ,日刊工業新聞社, pp64,2009
- 6) 深見ら,日本機械学会 2020 年度年次大会講演論文集

No.20-1, S13310,2020

- 7) 杉田ら,基礎切削加工学,共立出版株式会社, pp106-108,2014
- 8) 社本,切削機構を理解しよう,日本機械学会講習会テキスト, pp6-7,2008