

# 学位論文の要旨

## マイクロフィードエンドミル加工における切削抵抗を用いた切削油剤の潤滑性評価法 (Performance Evaluation Method for Cutting Fluids using Cutting Force in Micro-Feed End Milling)

氏名 北村 友彦

切削油剤は潤滑、冷却作用によって、仕上げ面粗さの改善や工具損傷の抑制などの加工性能を向上させる効果があり、現在、多くの金属加工における現場で使用されている。しかし、切削加工における油剤の優劣を正確に予測するための簡便な評価法は確立されておらず、切削油剤の開発や選定には、多くの実加工試験による検証のために多大な労力を要している。さらに難削材加工における工具寿命の延長、加工精度の向上や環境保全などの観点から、新たな高機能切削油剤の開発が求められ、この様な油剤開発や適油選定のために、切削油剤の加工性能を簡易的に正確に評価する試験法の確立が望まれている。切削油剤の作用のうち、冷却に関しては、油剤の熱伝達率の違いが大きくても工具の冷却能の差は僅かであることから、加工性能には切削油剤の潤滑性の影響が大きい。そのため本研究では、切削油剤の簡便な潤滑性評価法の構築を目指した。

加工中の切削油剤の作用部位を考えると、切れ刃先端の極端な高温・高圧、凝着の著しい工具-被削材間の接触部位まで切削油剤が浸透することは、切りくず流れによる逆くさび効果も考慮すると考え難い。そのため、工具すくい面の切りくず離脱点近傍のような不安定な接触領域（弾性変形領域）に油剤が浸透し、その付近の摩擦力が減少することで、せん断角の増大、切りくず厚さや、すくい面の切りくず接触長さの減少が生じて、仕上げ面粗さや工具損傷なども変化する。これらを考慮すると、切削油剤の評価として、被削材の新生面が露出した直後の活性な金属面と工具との摩擦であり、切削加工と同様な高速のすべり速度かつ弾性変形域内の応力における摩擦係数を測定することが必要である。このような摩擦環境を実現するうえで、アップカットのエンドミル加工に着目した。この加工では、弾性変形（上滑り）領域を経て、工具すくい面前方に被削材の盛り上がりが生じる塑性変形領域、切りくずが生成する切削領域といった3つの領域が存在する。この加工開始直後の上滑り領域中の切削抵抗を用いて、切削油剤の摩擦係数  $\mu$ -MFM を算出し、切削加工の仕上げ面粗さや工具輪郭形状の転写誤差との関連性を検討した。

第2章「旋削加工の仕上げ面における切削油剤の効果」では、切削油剤の潤滑性と加工性能の関連性を検討するための予備段階として、様々な加工条件で旋削加工の仕上げ面粗さや工具輪郭の転写誤差に及ぼす切削油剤の影響を調査した。その結果、低切削速度や低送りの乾式切削のような仕上げ面粗さが理論値を大きく超える切削条件において、切削油剤を供給すると仕上げ面粗さを著しく低減させた。高切削速度の乾式のように理論粗さに近い粗さが得られる加工条件では、仕上げ面粗さに切削油剤の有無や種類の影響は認められなかった。しかし、仕上げ面粗さの数値が小さいことのみで良好な切削加工が行われたとは判断できないため、理論粗さに近い粗さが得られる加工条件では、工具輪郭の転写誤差  $\sigma_T$  により切削油剤の影響を評価した。高送りの条件では  $\sigma_T$  に切削油剤の影響は認められなかったが、切取り厚さが薄くなる低送り条件では、乾式より湿式の  $\sigma_T$  が大きくなった。また、湿式では仕上げ面における工具刃先の送りマークが明確に現れておらず、油剤による工具形状の転写精度の低下が明らかであった。このことから、切取り厚さが薄い条件では切削油剤の潤滑作用により工具食付き性が低下する可能性があることが分かった。

第3章「マイクロフィードエンドミル加工の切削抵抗を用いた切削油剤の摩擦係数  $\mu$ -MFM の評価方法」では、アップカットのエンドミル加工における切削抵抗から潤滑性の指標となる特性値を算出する方法を検討した。上滑り領域を積極的に発現させるため、エンドミル加工における最大切取り厚さは刃先丸み半径より小さく設定した。工具回転円の中心方向の分力を  $F_n$ 、接線方向の分力を  $F_t$  とすると、工具が被削材に接触した直後に  $F_t/F_n$  は僅かな時間、一定の値を示した。この弾性変形域の  $F_t/F_n$  の平均値を  $\mu$ -MFM と定義し、切削油剤の潤滑性を示す指標とした。 $\mu$ -MFM では、切削油剤の動粘度や組成（鉱物油とエステル）の違いが明確に現れ、切削速度への依存性があることが明らかになった。

第4章「切削油剤の摩擦係数  $\mu$ -MFM と仕上げ面粗さ、転写誤差の関係」では、マイクロフィードエンド

ミル加工における切削抵抗より算出した摩擦係数  $\mu$ -MFM と切削加工の仕上げ面粗さおよび工具輪郭形状の転写誤差との関係性を検討した。その結果、切削油剤の  $\mu$ -MFM が低くなるほど、エンドミル、リーマ、旋削加工の仕上げ面粗さが小さくなった。また、 $\mu$ -MFM は、従来の摩擦試験値（振子試験の摩擦係数、曾田四球試験の焼付き荷重、シェル EP 試験の溶着荷重）と比べ、切削加工の仕上げ面粗さと高い相関性を示した。これは  $\mu$ -MFM が加工中に切削油剤が作用している部位の潤滑性を従来の摩擦試験値よりの確に現わしているためと考えられる。旋削加工における仕上げ面粗さでは、乾式で理論仕上げ面粗さが得られる切削速度において、低送り条件では切削油剤の  $\mu$ -MFM が低い（潤滑性が高い）ほど工具輪郭の転写誤差  $\sigma_T$  が増加した。

第5章「マイクロフィードエンドミル加工の切削抵抗を用いた切削油剤の工具食付き性評価方法」では、低送り条件で仕上げ面への工具輪郭の転写誤差  $\sigma_T$  が油剤により増加するのは、切取り厚さが薄い領域における工具切れ刃の食付き性に起因するものと考え、この食付き性を評価するための特性値として、アップカットのエンドミル加工における  $1\text{cut}$  内の切削抵抗の不安定性を定量化し、これを CFIR と定義した。S45C や SUS440C のエンドミル加工において、 $\text{MUCT}$ （最大切取り厚さ）/ $\text{RCER}$ （刃先丸み半径）比が低いほど CFIR は増加し、切削油剤の供給により、その傾向が顕著となった。したがって、 $\text{MUCT}/\text{RCER}$  比が低い場合に、切削油剤の潤滑によって工具の食付き性が低下すると考えられる。転写誤差の増加の原因が切れ刃の食付き性に起因すること、切削条件に応じた加工精度の評価法としての有効性を検証するため、CFIR と旋削加工の仕上げ面における  $\sigma_T$  との関係性を検討した。なお、評価条件は、被削材毎に理論粗さに近い仕上げ面が得られる切削速度とした。S45C や SUS440C では、旋削加工の仕上げ面生成域の  $\text{MUCT}/\text{RCER}$  比が低い場合、その比に応じた CFIR が高い切削油剤ほど、転写誤差  $\sigma_T$  が増加した。

以上より、マイクロフィードエンドミル加工における切削抵抗より算出した摩擦係数  $\mu$ -MFM は、切削油剤の加工性能の優劣を従来の摩擦試験値に比べ適切に判定できる。さらにアップカットのエンドミル加工における切削抵抗の不安定性 CFIR は工具食付き性の指標となり、切削油剤の加工精度への影響を切取り厚さに応じて評価可能な特性値であることが示された。

本手法は、微小送りで被削材の消耗が少なく、汎用のスローアウェイチップを用いるため、さらに特殊な治具や摩擦試験機が不要で、試験方法を標準化すれば簡便に実施でき、切削条件に応じて適切な切削油剤の選定・開発に役立つ技術であることから、既存の切削油剤の性能評価法と比べても優れており、ものづくり現場の生産性や加工精度の向上に寄与することが期待できる。

今後の展望として、本研究では、検討した切削油剤の組成や切削条件が未だ限られており、今後も引き続き、評価方法の有効性・適用範囲、試験方法の改善の必要性について、油剤開発や適油選定などに実際に運用しながら、検証を続ける必要がある。また、本手法は工具-被削材間の摩擦係数を簡易的に測定することができるため、潤滑性を最大限に高める工具のコーティングと切削油剤の組合せ技術、潤滑性を発揮しながら工具の食付き性を確保するための工具との組合せなど、切削油剤の評価だけでなく、工具と最適に組合せる技術も検討することで、ものづくり現場のイノベーションに向けたさらなる技術向上に役立つものと考えられる。