

## ニアドライ加工における潤滑剤のトライボロジー的作用 Tribological Action of Lubricants in Near-dry Machining

香川大（名誉）\*若林 利明

Toshiaki Wakabayashi\*

\*Kagawa University

### 1. はじめに

ニアドライ加工は、完全なドライ切削ではなく、それに近い状態を維持しつつ切削油の使用量を最小化し、環境への負荷をできるだけ小さくしようと開発されたエコマシニング技術であり、この加工法の成否は、当然のことながら、切削点近傍へ供給する極微量の潤滑剤がもつトライボロジー特性に左右される。そうした観点から、著者らはこれまで、ニアドライ加工における油剤の作用機構解明と切削性能の向上を目的に検討を行ってきており<sup>1~7)</sup>、その一部について、すでに何度かトライボロジー会議のシンポジウムでも報告している<sup>8~12)</sup>。本報では、ニアドライ加工の代表例である MQL 加工を対象にした潤滑剤のトライボロジー的作用に関する著者らの研究結果について、とくに潤滑剤化合物の金属新生面への吸着挙動に着目して整理し、紹介する。

### 2. MQL 加工と切削油剤

ニアドライ加工の代表例に極微量潤滑油供給（Minimal Quantity Lubrication）方式を用いた MQL 加工がある。MQL 加工は、毎時数〜数十 ml 程度の極めて微量の潤滑剤を切削油としてミスト状に微粒化し、これを搬送するための多量の気体（キャリアガス、通常は圧縮空気）とともに加工点へ供給するもので、極微量の油剤が潤滑を行い、キャリアガスが切りくずの排出と加工点の冷却を部分的に担当する。この加工は、大量の切削油を使用する従来型の湿式加工に比べると数千から数万分の 1 程度と極めて少ない潤滑剤量にもかかわらず、切削抵抗の低減、工具摩耗の抑制、製品精度の向上等の点で遜色がなく、とくに鋼の加工を対象に生産現場への適用が進められてきた<sup>13, 14)</sup>。

MQL 加工用油剤として当初は、環境適合性の観点から植物油ベースのものが主流であったが、植物油は酸化安定性に劣り、長期の使用で粘着性劣化物質を生成するなど作業環境に悪影響を与える。この対策として、より安定性が高く、生分解性を有する合成系ポリオールエステルをベースに、安全かつ切削性能に優れる画期的な MQL 加工用の潤滑剤が開発され<sup>15, 16)</sup>、この加工技術の普及に貢献した。

### 3. 金属新生面に対する潤滑剤の吸着挙動

エステルは金属表面に吸着膜を形成し、潤滑効果をもたらす。そこで、エステルなど潤滑剤化合物の金属新生面への吸着挙動を調べ、その化合物のトライボロジー的作用を検討した。Figure 1 は検討に用いた雰囲気制御切削試験機<sup>2, 3)</sup>の模式図で、 $10^{-4}$ Pa まで切削室を真空にした後、目的とする化合物の気体を所定圧力で一定となるように導入し、この化合物が切削によって生じた金属新生面にどのように吸着するかを質量分析計で定量的に測定できる。ただし、実験では、実際の加工に用いる潤滑剤ではなく、気体として導入可能な低蒸気圧のモデル化合物を用い、その導入圧は  $10^{-1}$ Pa である。また、森らの方法<sup>17)</sup>を適用して金属新生面への“吸着活性”を求め、これが高いほど表面への吸着能に優れるとした。

Figure 2 は、被削材に JIS SCM435 鋼を用い、モデル化合物について吸着活性の値を求めた結果である。まず、基油のモデル化合物とした n-ヘキサンの場合、この分子が極性部をもたないため吸着は起こらず、吸着活性はゼロであった。一方、エステルのモデル化合物として用いたプロピオン酸メチルは比較的高い吸着活性を示すが、エステルの切削室内分圧を揃えるためアルゴンと酸素をそれぞれ  $10^{-1}$ Pa 共存させた場合で吸着活性の値に差が生じる結果となった。ここで、アルゴンは化学的に不活性なことから、これを共存させてもエステル単独と同等の吸着挙動になると予想される。すなわち、Fig. 2 の結果から、エステル自身の吸着活性は酸素の共存によって上昇するという興味深い実験事実が得られた。

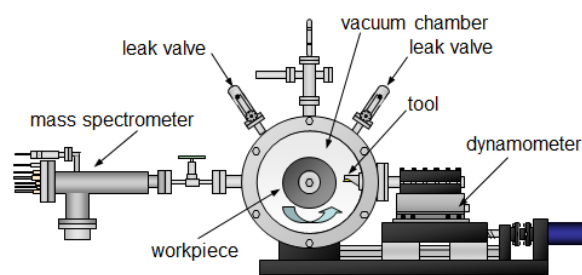


Fig. 1 Controlled atmosphere cutting apparatus

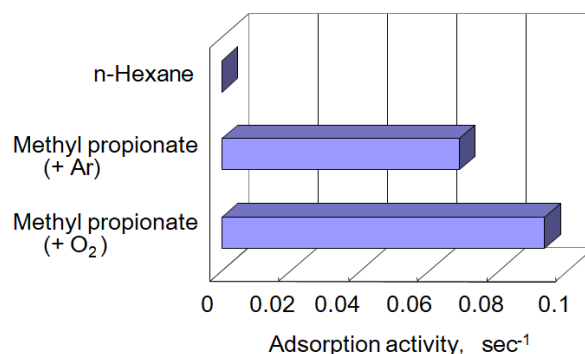


Fig. 2 Values of adsorption activity with different introduced gases

#### 4. MQL 加工の切削性能に対するキャリアガスの影響

Figure 2 の実験事実から、周囲に酸素が存在するとエステルの吸着能が向上すると推測され、より強固な吸着による良好な潤滑膜形成につながると考えられる。そしてこの現象は、実際の MQL 加工時にも生じている可能性が高い。言い換えると、通常給油の場合、加工部近傍は主として切削油に囲まれた状態であるのに対し、MQL 供給の場合には、加工部近傍は酸素を含む大量の空気と潤滑剤粒子が共存する環境にある。したがって、この潤滑剤がエステル有的时候には、その吸着能が空気中の酸素の助けで一段と向上するため、極微量にもかかわらず、優れた切削性能を与えると推定できる<sup>1)</sup>。

以上のような雰囲気の影響にとまなうエステルの吸着挙動および切削部近傍での働きに対する想定が正しければ、MQL 加工では油剤とともにキャリアガスも切削性能に影響をおよぼすはずである。これを確かめるため、JIS S45C 鋼の二次元切削にポリオールエステル油剤を MQL 供給し、キャリアガスを酸素、空気（通常の MQL）、窒素と変えたときの切削抵抗を測定した。その結果が Fig. 3 で、たしかにキャリアガス中の酸素濃度が高いほど切削抵抗は減少し、酸素の存在が実際に切削性能を向上させるとわかった<sup>3)</sup>。ところが、Fig. 4 に示したとおり、被削材を鋼から JIS A6061 アルミニウム合金に変えてポリオールエステル油剤を供給した MQL 加工では、鋼の場合と反対に、酸素が少ないほど切削抵抗は低下し、切削性能が良好になるというまったく異なった傾向になり、酸素の存在は好ましくないことが実証された<sup>3)</sup>。

#### 5. 潤滑剤の吸着挙動にもとづくチタン合金の MQL 加工

硬度が高く熱伝導率が低いといった難削性を持つチタン合金に対しては、従来の湿式加工を MQL 方式の適用といったニアドライ加工へと見直す取り組みが遅れており、この実現には、極微量の油剤がより一層効果的に働いて優れた切削性能を発揮する必要がある。ここで、チタン合金と似た工具との親和性をもつアルミニウム合金の MQL 加工では、含酸素化合物として、鋼に効果的なエステル油剤のほかにアルコール、脂肪酸が高い潤滑性を有すると報告されている<sup>5)</sup>。この知見をもとに、チタン合金 Ti-6Al-4V の MQL 加工に同様な油剤を適用した旋削を行い、逃げ面摩耗が 0.2mm に達した時の切削距離を求め、これを工具寿命として切削性能を評価した。用いた油剤は、MQL 加工用ポリオールエステル (PE)、オレイルアルコール (AL)、オレイン酸 (AC) と、PE に AL および AC をそれぞれ 10 質量%ずつ混合した EAL および EAC で、乾式 (DRY) 加工とも比較した<sup>18)</sup>。

切削速度 80m/min、送り 0.15mm/rev で得られた工具寿命による切削性能の評価結果を Fig. 5 に示す。DRY 加工と比べて PE の MQL 加工では、工具寿命に至るまでの切削距離が、切込み 0.5mm では約 1.5 倍、1.0mm では約 2 倍程度伸び、チタン合金でも MQL 加工は有効であった。また、仕上げ条件に相当する切込み 0.5mm の場合には、アルコールが単独、エステルとの併用のどちらも工具寿命をかなり延長し、チタン合金の MQL 加工にアルコールが効果的であると確認できた。

この結果を潤滑剤のトライボロジー的作用の面から解釈するため、チタン合金 Ti-6Al-4V の新生面に対する含酸素化合物の吸着挙動を調べた<sup>19)</sup>。含酸素化合物として検討したエステル、アルコール、脂肪酸のモデル化合物には、それぞれプロピオン酸メチル、1-プロパノール、プロピオン酸を用いた。これら化合物について、チタン合金新生面への吸着活性の値を求めた結果が Table 1 で、アルコール>酸>エステルの順に吸着活性は高くなり、この序列は、Fig. 5 で切込み 0.5mm の場合に、脂肪酸やエステルよりアルコールを使用した方が工具寿命を延長するとの結果と符合する。すなわち、脂肪酸やエステルに比べて吸着活性が高いアルコールは良好な潤滑膜を形成できると期待され、チタン合金の MQL 加工においては、これを活用して切削性能を向上できる可能性がある。

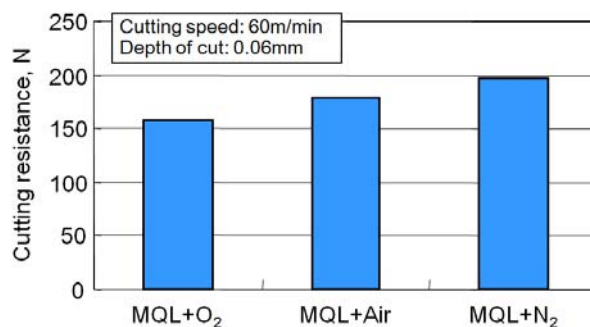


Fig. 3 Values of cutting resistance with different carrier gases when cutting JIS S45C steel

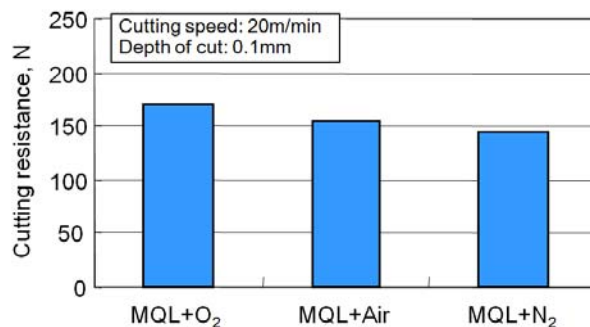


Fig. 4 Values of cutting resistance with different carrier gases when cutting JIS A6061 Al Alloy

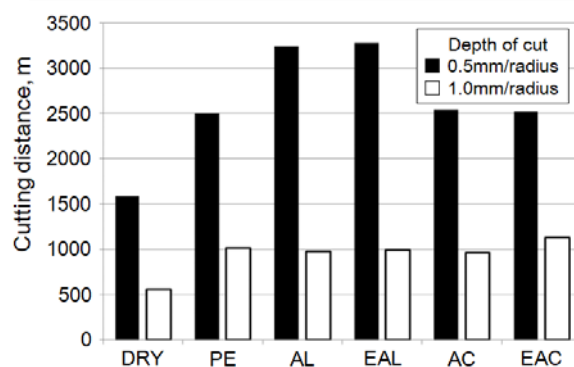


Fig. 5 Results of cutting distance after tool life judgment under various lubricating conditions

Table 1 Measured values of adsorption activity

	Adsorption activity, s <sup>-1</sup>
Methyl propionate	0.0372
1-Propanol	0.1105
Propionic acid	0.0602

## 6. おわりに

ニアドライ加工の代表に MQL 加工を取り上げ、この加工に対して、エステルなどの含酸素化合物が潤滑剤として有効に働くトライボロジー的作用について整理し、紹介した。潤滑剤の切削性能は金属新生面への吸着挙動と密接に関連しており、鋼の MQL 加工では雰囲気中存在する酸素の助けを借りてエステルが効果的に金属新生面へ吸着し、優れた切削性能を示す。一方で、アルミニウムの MQL 加工では酸素の存在が不利に働くという実験事実も興味深い。また、難削材であるチタン合金の MQL 加工においては、この合金に高い吸着活性をもつアルコールが良好な潤滑膜を形成し、切削性能を向上できる可能性がある。

## 文献

- 1) T. Wakabayashi et al.: Tribological Characteristics and Cutting Performance of Lubricant Esters for Semi-dry Machining, *Annals of the CIRP*, 52, 1 (2003) 61.
- 2) S. Min et al.: Investigation of Adsorption Behavior of Lubricants in Near Dry Machining, *Proc. IMechE (B): J. Eng. Manufacture*, 219, (2005) 665.
- 3) 藤村智志ほか: ニアドライ加工の潤滑機構に関する研究, *日本機械学会論文集(C)*, 73, 730 (2007) 1883.
- 4) T. Wakabayashi et al.: Importance of MQL Media Composition in Near-Dry Machining of Aluminum, *Key Eng. Materials*, 407-408 (2009) 329.
- 5) T. Wakabayashi et al.: Cutting Performance of Oxygen-including Compounds in MQL Machining of Aluminum, *Key Eng. Materials*, 523-524 (2012) 967.
- 6) T. Wakabayashi et al.: Near-dry Machining of Titanium Alloy with MQL and Hybrid Mist Supply, *Key Eng. Materials*, 656-657 (2015) 341.
- 7) 若林利明: チタン合金のニアドライ加工性能に及ぼす切削油剤の影響, *トライボロジスト*, 62, 9 (2017) 550.
- 8) 若林利明: 潤滑油からみた環境負荷低減に貢献するトライボロジー技術, *トライボロジー会議 2008 春 東京 予稿集*, E19, 283.
- 9) 若林利明: MQL 加工油の切削性能に及ぼす雰囲気の影響, *トライボロジー会議 2010 秋 福井 予稿集*, E25, 389.
- 10) 若林利明: エコマシニングにおける境界潤滑の役割, *トライボロジー会議 2012 秋 室蘭 予稿集*, A26, 51.
- 11) 若林利明: チタン合金の MQL 加工性能におよぼす油剤の影響, *トライボロジー会議 2016 春 東京 予稿集*, F22, 381.
- 12) 若林利明: ニアドライ加工におけるトライボロジーの役割, *トライボロジー会議 2020 秋 別府 予稿集*, B5, 81.
- 13) 稲崎一郎: MQL 切削の技術動向, *トライボロジスト*, 47, 7 (2002) 519.
- 14) K. Weinert et al.: Dry Machining and Minimum Quantity Lubrication, *Annals of the CIRP*, 53, 2 (2004) 511.
- 15) 須田聡: MQL 切削用油剤の動向, *トライボロジスト*, 47, 7 (2002) 550.
- 16) 須田聡: 環境に優しく高性能なセミドライ加工用切削油の開発, *潤滑経済*, 482, 3 (2006) 20.
- 17) S. Mori et al.: Chemisorption of Organic Compounds on a Clean Aluminum Surface Prepared by Cutting under High Vacuum, *ASLE Transactions*, 25, 2 (1982) 261.
- 18) 若林利明ほか: チタン合金の MQL 加工に対する含酸素化合物の効果, *日本機械学会第 10 回生産加工・工作機械部門講演会講演論文集*, (2014) 51.
- 19) T. Wakabayashi et al.: Investigation on Action Mechanism of Lubricants based on Their Adsorption Behavior in Near-dry Machining of Titanium Alloy, *Proc. 8th International Conference of Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology (ASPEN 2019)*, (2019) E07.