

環境に優しい MQL 加工におけるトライボロジーの役割

The Role of Tribology in Environmentally Friendly MQL Machining



若林利明*

Toshiaki WAKABAYASHI

Minimal quantity lubrication (MQL) machining has been recognized as a representative and successful environmentally friendly cutting operation. Specific synthetic polyol esters are optimal cutting fluids for MQL machining because of their high biodegradability, excellent oxidation stability and satisfactory cutting performance, and can effectively lubricate the vicinity of cutting zones with a very small amount. The cutting performance of those esters is in close connection with the tribological behavior based on the adsorbing characteristics of the ester and atmospheric gases onto nascent clean metal surfaces. In particular, the presence of oxygen is preferable in the case of machining steel, whereas oxygen causes unfavorable cutting situations in the case of machining aluminum.

Key Words: MQL, machining, environment, ester, tribology

1. はじめに

トライボロジーは従来から、摩擦の低減、摩耗の抑制という形で省エネルギーや省資源に貢献してきた。この技術によって、たとえば自動車の燃費が大きく向上し、今後もさらなる改善が見込まれている。これは CO₂ 排出量削減に直結し、地球温暖化の防止対策として有効な手段のひとつである。すなわち、トライボロジーは持続可能な低炭素社会を実現させるために必要なキーテクノロジーといっても過言ではない。

モノづくりの根幹技術である切削加工においても、トライボロジーはさまざまな場面で重要な役割を演じてきた。工具をみても、優れた摩擦特性と耐摩耗性を付与する各種の表面コーティング手法と材料が開発され、最近の工具性能は飛躍的に進歩している¹⁾。また、古くは硫黄快削鋼に代表される、特定の元素等を添加することで工作物の被削性を高める方法は、今日でも加工現場での生産性の確保に役立つ技術と言える。そして切削油剤は、切りくず生成時のせん断および切削部の摩擦に対して、その潤滑作用と冷却作用によって効果的に働くとともに、切りくずの流出も助け、順調な切削には不可欠な存在であろう。

しかしながら、活発化する温暖化防止対策への取組みの中で、製造技術についても各種の見直しが迫られ、一部には切削油剤による作業環境の悪化やその廃液処理にともなう環境への悪影響といった問題が浮上したことから、ドライ切削化に関する研究開発ならびに現場への適用が進められている^{2,3)}。切削油剤を一切用いないドライ切削は、もちろん環境問題の解決につながる方策のひとつであるが、生産効率を犠牲にせざるを得ない、あるいは製品精度が低下するなどのデメリットをもち、適用範囲も限定されたものになる。他方、有効な油剤を必要なだけ使い、それによる周囲の汚染を防止し、最後は正しく廃棄できる一連のプロセスを完成すれば、むしろ切削油剤を用いた方が製造の高効率化と製品の高精度化がはかれ、全体として環境に優しい製造技術となりうる。

そこで本稿では、環境に優しい切削加工、いわゆるエコマシニングの代表的成功例である MQL (Minimal Quantity Lubrication, 極微量潤滑油供給) 加工を取り上げる。具体的には、MQL 加工に用いる油剤の切削性能を、金属新生面への吸着特性からみたトライボロジー挙動と関連づけて検討してきた著者らの研究結果を中心に紹介し、これを通じて MQL 加工におけるトライボロジーの役割と重要性について述べる。

*香川大学工学部 材料創造工学科 教授 工学博士

2. MQL加工と切削油剤

2.1 MQL 方式によるニアドライ加工

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剤の使用量を最小化する方法を総称してニアドライ (Near-dry) 加工と呼び、MQL 加工もそのひとつである。ちなみに、国内ではニアドライよりもセミドライ加工という呼び方が普及しているが、正しい英語表記としては前者を用いたい。

MQL 加工は、毎時数～数十 mL 程度のごく微量の切削油剤をミスト状に微粒子化し、多量の圧縮ガス (キャリアガス) とともに加工点に供給する方法で、ごく微量の油剤が潤滑を行い、キャリアガス (通常は空気) が切りくずの排出と加工点の冷却を部分的に担当する。この加工法は、油剤の供給量が大量の切削油剤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、環境対応型切削加工として実際の生産現場への適用も着実に進んでいる^{3~7)}。

2.2 MQL 加工用切削油剤

2.2.1 二次性能

切削油剤の実用性能には、切削性能を意味する一次性能と、皮膚刺激性、臭気、耐腐敗性など安全性や作業性に関わる二次性能があり、両者に優れることが求められる。特に MQL 加工用の切削油剤の場合、ミスト化した油滴が外部へ放出されることによる環境への負荷を最小限にとどめるため、二次性能として油剤が生分解性をもつことが必要である。通常入手が可能な油剤の中で高い生分解性をもつものには植物油があり、一部のエステル類 (主として多価アルコールに由来するポリオールエステル類) も良好な生分解性を示す。

一方、微粒子化した油滴はわずかずつ工作機械内部壁面などに付着、残留して、薄い油膜を形成する。このような薄い油膜は酸素の影響によって劣化しやすく、しばしば粘着性の物質に変化して作業環境を悪化させるため、MQL 加工用油剤には、高い酸化安定性が不可欠である⁹⁾。これを実験的に確かめるため、各種油剤をアルミシャーレ上で薄膜状にして 70℃、168 時間加熱した後、油剤の酸化劣化による分子量 (重量平均分子量 Mw および数平均分子量 Mn) を調べ、加熱前の分子量に対する変化率として求めたものが図 1 である⁹⁾。通常、

この変化率が 10% を越えると、粘着性劣化物質の生成が顕著となる。ここで選定した三種の油剤 A, B, C は、いずれも生分解性を有する合成ポリオールエステルをベースに開発したものであり、植物油に比べてほとんど分子量の変化がない。すなわち、高い酸化安定性をもつことから、MQL 加工に適した切削油剤として期待できる。

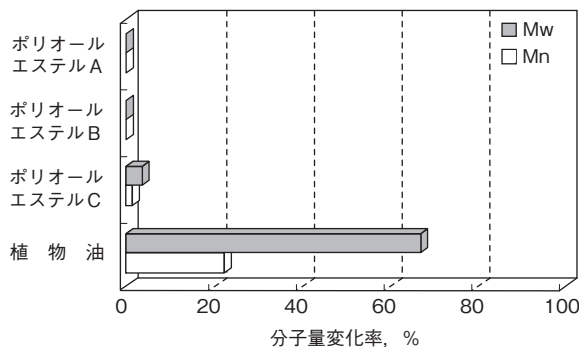
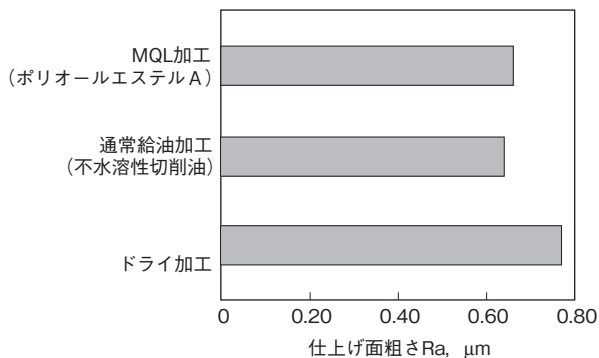


図 1 酸化劣化による分子量の変化
Changes of molecular weight by oxidative degradation

2.2.2 切削性能

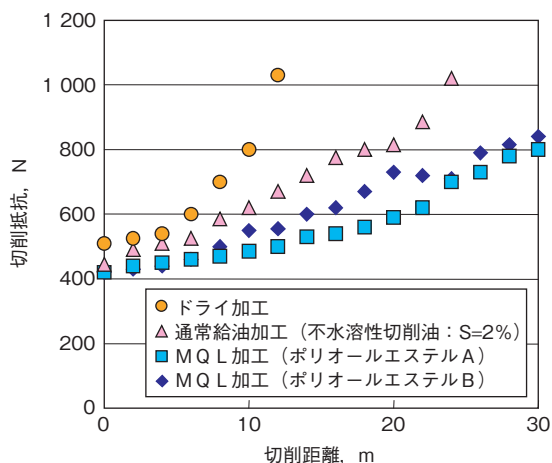
MQL 加工用油剤の選定には、従来の切削油剤の場合以上に生分解性や酸化安定性といった二次性能の良否が大切であるが、一次性能としての切削性能も重要な選定基準であることに変わりはない。たとえば、図 2 は旋削後の仕上げ面粗さを、MQL 加工、通常給油加工、ドライ加工について比較した結果であり、MQL 加工で得られた仕上げ面は通常給油の場合とほぼ同等の表面粗さを示すことがわかる。図 3 はエンドミルによる側面加工時の切削抵抗を、MQL、ドライおよび通常給油加工について比較したものである。ドライ加工ばかりでなく、切削性能向上に優れる極圧添加剤の硫黄化合物を含む切削油で通常給油加工したものと比べても、ポリオールエステルを用いた MQL 加工時の切削抵抗が明らかに低く、断続切削であるエンドミル加工に対しては、むしろ MQL を適用する方が好ましいという結果が得られた。

MQL 加工による製品製造の成否は、言うまでもなく、こうした極微量で切削部近傍を潤滑しなければならない切削油剤の効果に大きく依存する。換言すれば、従来の通常給油加工に比べて MQL 加工では、切削現象の中で、油剤がもたらすトライボロジー的な挙動の影響が格段に重要度を増すことになる。そこで、この挙動の解明を目的に、以下のような検討を行った。



[切削条件]
 工具 : WC (TiCN-Al₂O₃-TiNコーティング)
 被削材 : JIS S45C, 切削速度 : 200m/min
 切込み : 1.0mm, 送り : 0.1mm/rev
 M Q L : Air=0.3MPa, Oil=25ml/h, 外がけ供給

図2 旋削後の仕上げ面粗さ
 Surface finish roughness after turning



[切削条件]
 被削材 : JIS S55C 鋼, 工具 : 超硬合金 (φ10mm)
 切削速度 : 60m/min, 送り : 0.1mm/tooth
 軸切込み : 4.0mm, 半径切込み : 1.0mm
 MQL : Air=0.2MPa, Oil=15ml/h, 外がけ供給

図3 エンドミル加工時の切削抵抗
 Cutting force during end milling

3. MQL加工におけるエステル油剤の作用機構

3.1 雰囲気制御切削試験

エステルは金属表面に吸着膜を形成し、潤滑効果を発揮することが知られている¹⁰⁾。そこで、図4の雰囲気制御切削試験機を用い、エステルなどの吸着挙動を調べた結果について紹介する¹¹⁾。その実験条件を表1に示す。この実験では、10⁻⁴Pa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する。その後、鋼の切削を開始すると、導入した化合物が鋼の新生面に吸着する場合には、質量分析計で測定した気体圧力が図5(a)のように変化する。この測定結果に森らの方法¹²⁾を適用すれば、図5(b)の関係の

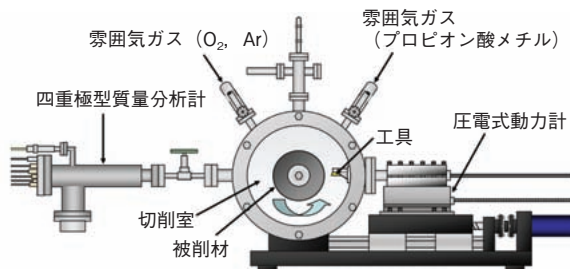
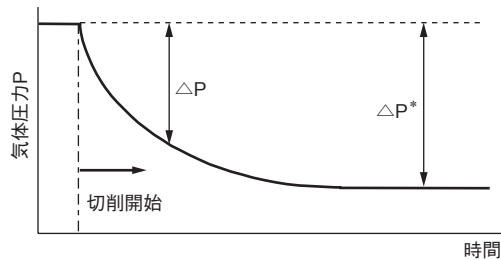


図4 雰囲気制御切削試験機

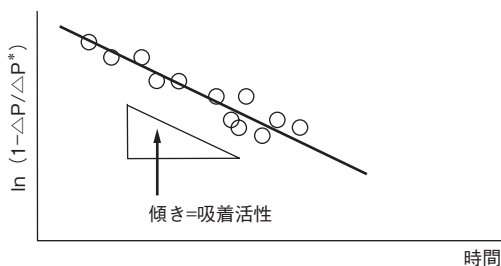
Controlled atmosphere machining apparatus

表1 雰囲気制御切削試験機による実験条件
 Experimental conditions with controlled atmosphere machining apparatus

[モデル化合物]
エステル : プロピオン酸メチル C ₂ H ₅ COOCH ₃
炭化水素 : n-ヘキサン C ₆ H ₁₄
共存ガス : 酸素 (純度 99.9%)
[切削条件]
被削材 : JIS SCM435 鋼
工具 : 超硬合金
切削速度 : 12m/min



(a) 吸着による気体圧力の時間変化



(b) 吸着活性の導出

図5 吸着活性の導出方法

Measurement method of adsorption activity

傾きから吸着活性が求まる。吸着活性は、傾きが大きいほど金属新生面と吸着分子との化学的親和性が高いことを意味する。ただし、導入可能な蒸気圧の制限から、実際に加工で用いる油剤ではなく、モデル化合物として、エステルにはプロピオン酸メチル、炭化水素である基油にはn-ヘキサンを使用した。

なお、この試験機には2つのリークバルブが備わっており、同時に2種類の気体を導入することが可能なため、エステル吸着活性はアルゴンあるいは酸素が共存する場合について実験を行った。周知のとおり、アルゴンは不活性ガスであり、通常は金属新生面に吸着しない。一方、酸素は反応性に富み、金属新生面に対して速やかに吸着し反応する。したがって、アルゴンが共存する場合はエステル単独の吸着挙動が、酸素が共存する場合はエステルと酸素相互の影響による吸着挙動が観察できる。なお、エステル単独の挙動を調べる実験でアルゴンを共存させた理由は、切削室内にエステルの共存相手の分圧がなくなることによる吸着挙動への影響を避けるためである。

3.2 モデル化合物の吸着活性と MQL 加工

モデル化合物を 10^{-1} Pa となるように導入したときの鋼新生面に対する吸着活性の値を図6に示す。まず、基油のモデル化合物である n-ヘキサンの場合、この分子が極性基をもたないため吸着は起こらず吸着活性はゼロである。一方、エステル単独(アルゴン 10^{-1} Pa と共存)では、比較的高い吸着活性が得られる。さらに酸素 10^{-1} Pa が共存すると、その影響によってエステル自身の吸着活性が上昇するという実験事実が得られており、非常に興味深い。

そこで、切削を開始する前の酸素の存在量を変化させ、エステルと酸素両者の吸着活性を求めたところ、図7のような結果となった。なお、この図の横軸は質量分析計で検出されるイオン強度で、物質ごとに定まる校正係数のもとで切削室内の圧力と比例する。すなわち、酸素の量が増えるほどエステルと酸素それぞれの吸着活性が上昇することから、互いの吸着挙動は相補的であることが分かる。

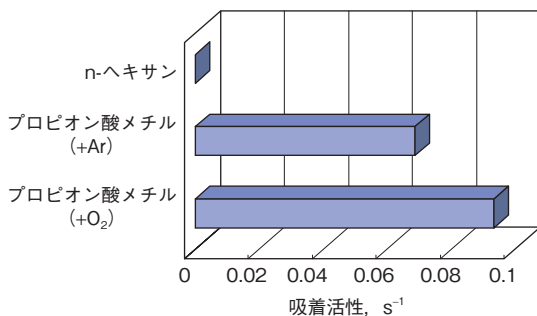


図6 モデル化合物の吸着活性
Values of adsorption activity for model compounds

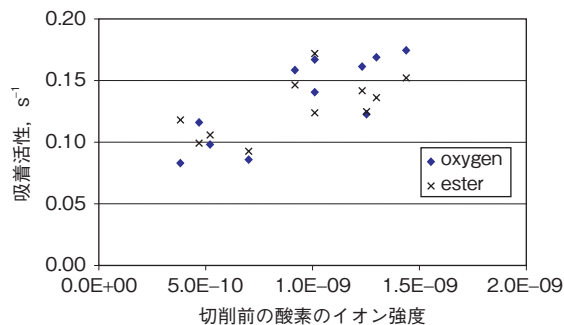


図7 吸着活性に及ぼす酸素イオン強度の影響
Influence of ion current intensity of oxygen on adsorption activity

以上の実験事実から、周囲に酸素が存在するとエステルの吸着性能が向上すると推測され、これが原因となって、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。すなわち、図8に示すように、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 の場合には、加工部近傍は酸素を含む大量の空気と潤滑油粒子が共存する環境にある。したがって、この潤滑油がエステルのときには、空気中の酸素の助けによってエステルの吸着性能が最大限に活かされ、その結果、極微量にもかかわらず、予想以上の優れた切削性能が得られるものと推定される¹⁾。

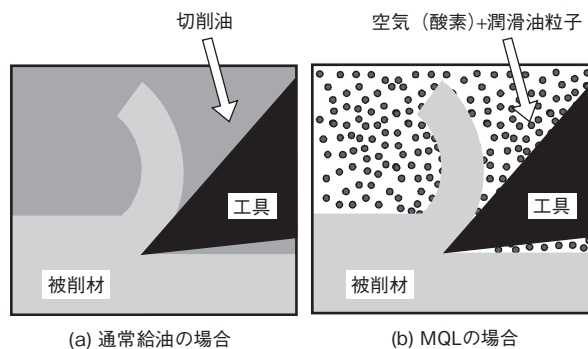


図8 (a)通常給油と(b)MQLにおける油剤供給状態の比較

Schematic illustration of the difference between (a) conventional supply and (b) MQL supply

3.3 MQL 加工時のキャリアガスの影響

以上のような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推測から、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及ぼすと予想される。これを確かめるため、JIS S45C 鋼の二次元切削に

MQL加工を適用し、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。その結果を図9に示す。この図で明らかのように、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、酸素の存在が切削性能を向上させることが分かった。

さらに興味深いことに、このMQL加工で被削材を鋼からアルミニウム合金に変えると、まったく異なる傾向が得られる。その結果を図10に示すが、アルミニウム合金の場合、切削抵抗は、鋼の切削とは反対に、キャリアガス中の酸素が少ないほど低下する。言い換えれば、アルミニウム合金の切削の場合には、空気中の20%程度の酸素でも、その存在が好ましくなく、酸素をいかに排除するかが鍵になる。

なお、鋼とアルミニウムどちらの場合も、エステルが存在しないキャリアガスだけの供給では切削抵抗が上昇し、切削性能が低下するため、円滑な切削現象を得るためには、エステルの潤滑効果が必須である¹³⁾。また、鋼とアルミニウムのMQL加工で酸素の影響が逆の傾向を示した理由については、今のところ次のように考えている。

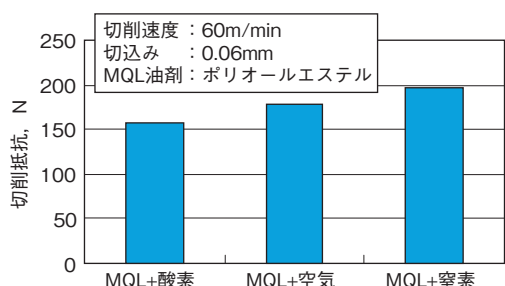


図9 MQL加工時の切削抵抗に対するキャリアガスの影響（被削材：JIS S45C 鋼）

Influence of carrier gases on cutting force of MQL machining (workpiece: JIS S45C steel)

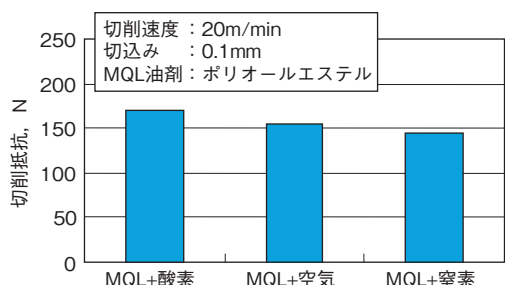


図10 MQL加工時の切削抵抗に対するキャリアガスの影響（被削材：JIS A6061 アルミニウム合金）

Influence of carrier gases on cutting force of MQL machining (workpiece: JIS A6061 aluminum alloy)

すなわち、酸素は切削によって生じた金属新生面へ吸着反応し、そこで酸化物の被膜を形成すると思われる、エステルの吸着による潤滑膜の効果ばかりでなく、この酸化膜の潤滑挙動もMQL加工時の切削性能に影響する。このとき、鋼の切削では酸化鉄が生成することになり、この化合物はせん断強度が比較的低いため、しばしば鋼の摩擦において固体潤滑剂的な働きをもつ。

一方、アルミニウム合金の切削では酸化アルミニウム、いわゆるアルミナが生成し、この化合物は高硬度材として知られるとおり、せん断強度も高く、摩擦低減の点からは好ましくない。したがって、鉄とアルミニウムとの間で、切削時の酸素の影響が異なるという結果は、上記のような酸化膜の潤滑挙動の違いに起因するものと考えられるが、さらなる潤滑メカニズムの究明については、今後の課題である。

以上の結果より、確かにキャリアガスがMQL加工の切削性能に影響を及ぼし、エステルの吸着能にともなう潤滑効果ばかりでなく、雰囲気での酸素の有無がMQL加工において重要な意味をもつことが実証できた。特に酸素の挙動が、鋼では好ましく、アルミニウムでは好ましくないという、まったく異なる傾向をもつ点については、実用的なMQL穴加工でも同様な結果が得られている¹³⁾。トライボロジー的な立場からの検討で得られたこれらの知見は、MQL加工における油剤の作用機構をさらに明らかにし、この環境に優しい加工法を一層進展させる上で有用と確信している。

4. おわりに

切削油剤使用量の大幅な削減が可能なMQL加工を取り上げ、この加工に対しては、生分解性をもつ合成ポリオールエステルをベースにした油剤が酸化安定性と切削性能の面から適しており、極微量で切削部近傍を効果的に潤滑していることを紹介した。さらに、このエステル油剤の切削性能が、エステル自身と雰囲気にあるキャリアガスそれぞれの金属新生面への吸着特性からみたトライボロジー挙動と密接に関連し、酸素の存在が鋼の切削では有利であるのに対し、アルミニウムでは不利に働くという、きわめて興味深い実験事実について説明した。

本稿が、環境に優しいMQL加工におけるトライボロジーの役割と重要性を理解する上で、少しでも役立てば幸いである。

参考文献

- 1) たとえば 狩野勝吉：データで見る次世代の切削加工技術，日刊工業新聞社(2000).
- 2) F. Klocke, G. Eisenblatter: Dry Cutting, Annals of the CIRP, vol. 46, no. 2(1997)519.
- 3) K. Weinert, I. Inasaki, J. W. Sutherland, T. Wakabayashi: Dry Machining and Minimum Quantity Lubrication, Annals of the CIRP, vol. 53, no. 2(2004)511.
- 4) U. Heisel, M. Lutz: Investigation of cooling and lubricating liquids, Production Engineering, vol. 2, no. 1(1993)23.
- 5) G. Byrne, E. Scholta: Environmentally clean machining processes - a strategic approach, Annals of the CIRP, vol. 42, no. 1(1993)471.
- 6) 佐藤潤幹, 稲崎一郎, 若林利明：極微量切削液供給による旋削加工, 日本機械学会論文集(C編), vol. 62, no. 604(1996)272.
- 7) 稲崎一郎：MQL 切削の技術動向, トライボロジスト, vol. 47, no. 7(2002)519.
- 8) 須田 聡：MQL 切削用油剤の動向, トライボロジスト, vol. 47, no. 7(2002)550.
- 9) S. Suda, H. Yokota, I. Inasaki, T. Wakabayashi: A Synthetic Ester as an Optimal Cutting Fluid for Minimal Quantity Lubrication Machining, Annals of the CIRP, vol. 51, no. 1(2002)95.
- 10) たとえば 日本トライボロジー学会編：トライボロジーハンドブック, 養賢堂(2001)598.
- 11) T. Wakabayashi, I. Inasaki, S. Suda, H. Yokota: Tribological Characteristics and Cutting Performance of Lubricant Esters for Semi-dry Machining, Annals of the CIRP, vol. 52, no. 1(2003) 61.
- 12) S. Mori, M. Sugino, Y. Tamai: Chemisorption of Organic Compounds on a Clean Aluminum Surface Prepared by Cutting under High Vacuum, ASLE Transactions, vol. 25, no. 2(1982)261.
- 13) 藤村智志, 稲崎一郎, 若林利明, 須田 聡：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編), vol. 73, no. 730(2007)1883.