

## 解説



## Review

# 切削加工におけるトライボロジー

中村 隆\*

## Tribology in Cutting Processes

Takashi Nakamura

### Synopsis

*On basis of chip formation mechanisms, tribology in cutting processes is described summarily in this review. Contacting pressure on a tool surface is extremely high and the contacting surface is fresh in the cutting processes. So, friction in the cutting is classified on a severe category in tribology field. Functions of cutting fluid are surveyed on shearing area, rake face friction area and flank friction area respectively, where cutting energy is converted into heat. Environmental measures of the cutting fluid are introduced and experimental results of a new technology are explained from the viewpoint of cooling ability. Finally, experimental tests, which can simulate the rake face friction, are introduced and effects of cutting temperature and surface roughness of the rake face on the lubrication ability are discussed on the basis of the experimental results.*

### 1. はじめに

優れた材料とは、それが製品として使われる時に求められる性能を満足していることだけでなく、それを製品にするときの加工性が良いことも条件であり、後者の点で鉄鋼材料は極めて優れた材料である。優れた材料であるからこそ古代から文明を支える素材として鉄鋼材料が利用されてきた。しかしながら、近年の高度な材料開発により鉄鋼材料の中にも極めて加工の困難なものも製品として使われるようになり、加工技術のさらなる発展が求められている。加工技術の中で、常に課題となるのがトライボロジーの問題である。

トライボロジーとは「摩擦・摩耗・潤滑」を扱う学術分野であり、その中心で議論されているのは軸受などの機械要素のトライボロジーである。本稿で扱う切削加工のトライボロジーはトライボロジー社会の中では異端といえるかもしれない。ここでは切削加工に関する摩擦の基礎について概説し、その摩擦を低減する潤滑油剤の環境対応技術を紹介する。また、工具すくい面での油剤の働きを直接観察

した結果について解説する。

### 2. 切削加工のトライボロジーの位置づけ

切削加工のトライボロジーがトライボロジー社会において異端なのは、摩擦条件が極めて厳しいことによる。Fig.1 はトライボロジーに関連する機械要素と、塑性加工、切削加工などの加工プロセスを摩擦の厳しさでマッピングしたものである。横軸には接触部の面圧を材料の降伏応力で割った値をとり、縦軸には接触面の新鮮さをとっている。接触面の新鮮さとは、酸化膜あるいは潤滑剤で覆われている場合を「新鮮さが低い」、接触面が活性な状態で相手面と接触している場合を「新鮮さが高い」と評価している。このマップでは、右上にいくほど厳しい摩擦であるといえる。

トライボロジーに関連する機械要素と加工のトライボロジーは、その目的をして明確に左右に分かれる。機械要素は可能な限り長期間の利用を目的としていることから、それを構成する部材材料の降伏応力に比べて接触面圧は

2007 年 4 月 14 日受付

\* 名古屋工業大学大学院工学研究科産業戦略工学専攻, Ph.D. (Ph.D., Nagoya Institute of Technology, Graduate School of Engineering, Department of Techno-Business Administration)

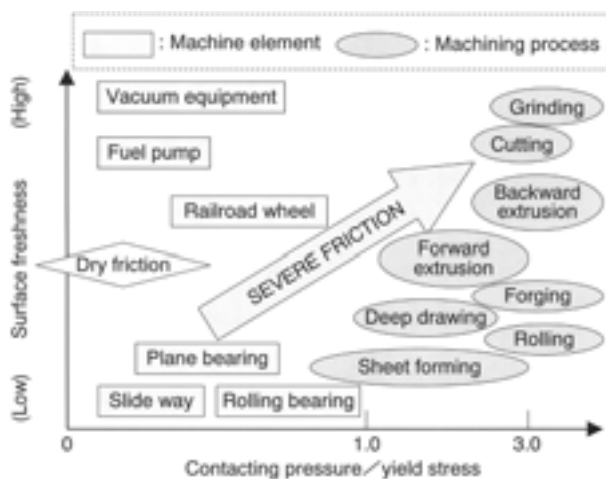


Fig.1. Friction severeness map of machine elements and machining processes.

低く設定され図の左に位置する。これに対して、加工プロセスでは、被加工材料の降伏応力を超える接触面圧を加えたときのみ加工が成立することから図の右に位置する。

接触面の新鮮さは大気中ドライでの摩擦を標準として配置した。鉄道のレールと車輪の摩擦がほぼそれに相当している。真空環境で使われる機器はトライボロジー的に厳しく、人工衛星のパネルが開かない事故もこれが原因である。これに対し加工プロセスは図の右に位置するものの上には広く分布し、新鮮さはさまざまである。自動車外装板金などの板成形（プレス）は、加工面積全体での平均面圧は低く、比較的低粘度の潤滑油で加工が行われている。圧延工程では、材料とともに引き込まれた油剤が材料表面凹部から染み出ることによって潤滑を保っている。熱間、温間鍛造ではグラファイトによる潤滑が主流である。冷間鍛造ではリン酸塩処理と金属石けん皮膜による優れた潤滑方法が用いられてきたが、処理の煩雑さと環境問題から吸着性の優れた潤滑剤の適用が試みられている。後方押し出しでは、材料内面の表面積が大きく拡大するため潤滑不足となりやすい。

切削加工や研削加工では材料内部から削り出された新生面が工具（研削では砥粒）表面と接触するため、最も新鮮さが高い摩擦状態となり、工具には可能な限り高強度の材料が用いられてきた。そこでのトライボロジーは接触面圧が高く、接触面の新鮮さも高いことから最も厳しい摩擦に位置づけられ、トライボロジー社会の異端となっている。しかしながらここで見られる摩擦現象はあくまでトライボロジー全般での摩擦現象の延長線上にあるものであり、ここで得られた技術は多くの分野で利用可能である。例えば超硬工具や硬質被覆切削工具の技術は塑性加工の

分野だけでなくトライボロジー機器の長寿命化に大いに貢献している。

### 3. 切削における発熱源と切削式

切削工具刃先での切屑生成モデルと、切削熱発生源をFig.2に示す。すくい角  $\alpha$  の切削工具に対し、水平方向右に被削材料が移動している。材料は刃先から  $\phi$  の角度で示されるせん断面で大きなせん断変形を受け、切屑になる。実質的な材料変形はこのせん断面においてのみであり、切削に要するエネルギーの多くはここで熱となり（Ⅰ：せん断発熱域）、切屑と被削材料に流入する。工具からの加工力  $R$  は切屑を介してせん断域に伝わるため、工具すくい面と切屑の間では、高い面圧（材料の降伏応力の3～5倍）が加わりながらの摩擦となる。摩擦仕事が熱となるため（Ⅱ：すくい面発熱域）すくい面上の切屑温度はさらに上昇し、刃先からの距離が切込み厚さ程度の高さのすくい面上が最も高温となる。高速切削ではこの部分の工具材料が切屑側に拡散し、クレータ状の摩耗が発生する。また切屑側はしごき加工に似た材料2次変形が生じ、すくい面側が押しつぶされることで切屑が湾曲し、すくい面から離れる。Ⅲは工具逃げ面と仕上げ面が接触して摩擦することによる逃げ面発熱域である。ここでは主にアブレイシブ摩耗が発生し、接触している幅を逃げ面摩耗幅と呼び工具摩耗量の指標としている。

これらの発熱域で発生した熱は、工具、切屑、被削材料に伝わるが、切屑へ流入する熱量の割合が最も大きく、速度とともにその割合は増加し、高速切削では8割を超える熱が切屑に持ち去られる<sup>1)</sup>。赤熱した切屑の出ている加工条件でも工作物の温度上昇は比較的少ないのはこの理由による。工具側も同様に熱流入割合が少ないが（高速切削

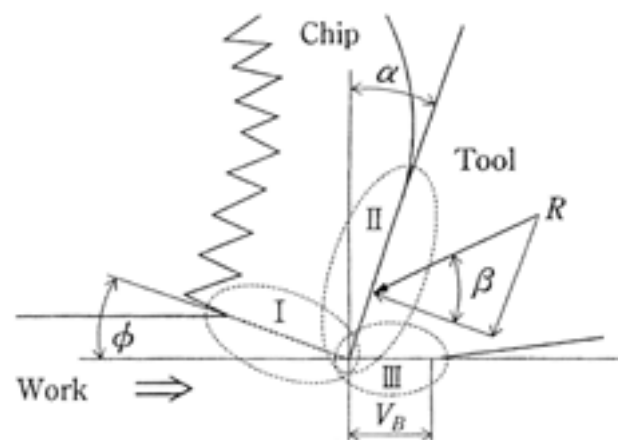


Fig.2. Heat generation areas in cutting process and two dimensional cutting model.

では1割程度), 連続的な熱流入と熱容量の少なさから高温となり, 工具摩耗が促進される。たとえ一定量の摩耗を許すとしても工具材料の熱軟化点までの温度上昇が高速切削の限界である。

切削現象を理解する上で重要なのがせん断角  $\phi$  であり, これを予測する古典的な切削式に, 以下の Merchant の式<sup>2)</sup>がある(切削動力最小の仮定を基にして導いた式)。

$$2\phi = \alpha - \beta + \pi/2 \dots\dots\dots (1)$$

ここで  $\beta$  はすくい面の摩擦角である。近年では材料物性を計算に組み込み, 刃先における要素分割を繰返し修正する数値解析が行われているが, すくい面での摩擦力の値やその分布は不確定な要素として残され大きな課題となっている。この分野に携わる者としてつらいところであるが, 大気中の酸素量を変えるだけで摩擦力が大きく変化するなど, 一筋縄ではいかない相手なのである。すくい面での摩擦力が切削過程に与える影響を定性的に議論するのであれば式(1)で十分に理解できる。摩擦角が小さくなれば  $\phi$  は大きくなり, せん断面積は減少し加工力が減少する。また切屑厚さが薄くなるためすくい面の接触長さが減少し, すくい面での応力増大に伴い摩擦角が減少する(摩擦応力に限界があるため)。これが循環されるため, わずかな摩擦角の減少が加工力の大きな減少を導くことになる。この循環効果が切削加工において潤滑油剤を使用する1つの理由である。

## 4. 切削加工における潤滑油剤の働き

切削加工における発熱源を示した Fig.2 を使い, 潤滑油剤の働きを説明する。(I) のせん断面発熱域では被削材表面に塗布された油剤が表面エネルギーを減少させ, せん断の「表面への抜け」を容易にしてせん断角を増大させる<sup>3)</sup>。延性材の低速切削においてその影響は顕著であり, せん断角の増大を引き金として前述した循環効果が働き加工力が減少する。(II) のすくい面発熱域では直接的にすくい面摩擦を減少するが, 安定した連続切削では高い面圧のすくい面に切屑流れに逆らい浸入することはできない。効果があるのは切屑がすくい面と離れる境界部分のみと考えられているが, わずかな摩擦低減が先の循環効果を導き, 加工力の低減, 工具寿命の延長に貢献している。さらに, エンドミル加工のような断続切削では, すくい面上に油剤が直接塗布されるため潤滑効果は大きい。(III) の逃げ面発熱域では加工仕上げ面と工具逃げ面が接触していることから, 潤滑は製品品位の確保に効果的である。

潤滑油剤の供給により上記の発熱域での摩擦が減少すれば発熱量が減少するが, 直接的に冷却する働きもあるこ

とから, 水溶性加工液をクーラントと呼んでいる。大量のクーラントを高圧で加工点に供給する高圧クーラントは, 特に超高速切削での工具寿命延長が得られる。ただし, 高圧クーラントに必要な設備とコスト, 加工点の視認性の問題などから特殊な用途にのみ使われている。

## 5. 環境対応としての油膜付き水滴加工液

切削油剤は生産能率, 加工精度の向上を目的として多量に使われてきたが, 近年の環境意識の高まりに伴いその使用量を削減する方向が主流となっている。廃液処理などのコスト削減が可能な対応技術が多数開発されてきたことがその背景にある。

### 5.1 極微量潤滑油剤切削 (MQL)

切削油剤を大幅に削減する技術として開発され広く使われているのが MQL (Minimal Quantity of Lubricants) 加工であり, 極微量のミスト状油剤を圧縮空気と共に加工点にピンポイントで供給する。極微量の油剤が潤滑作用を, また圧縮空気が切りくずの除去と加工点の冷却を行う。このミスト状油剤を加工点に供給する技術は, もともとは ITW 社(米)が超高速ミーリングでの油剤供給を効果的とするために始めたものであり, 環境対応に積極的なドイツや日本においてこれを油剤削減技術として研究が行われてきた<sup>4)~8)</sup>。従来のエマルジョン加工液やシンセティック加工液を MQL 加工に切り替えたときの利点としては以下がある。

- 1) 油剤の使用量を 1/30 程度に削減できる。
- 2) 油剤供給や循環, 再生処理装置などの消費電力を大幅に削減できる。
- 3) 切り屑に油剤がほとんど付着しないのでリサイクルが容易である。
- 4) 工作物への油剤付着も少なく洗浄が容易である。
- 5) 油剤は基本的に使いきりであり, 油剤管理, 廃液処理が不要である。
- 6) 加工点の視認性が良く, 「見える化」が図られる。
- 7) 加工液の全体使用量が少ないため工場がクリーンとなり, エステル系油剤を使うため匂いも気にならない。

逆に MQL 加工に転換した場合の不利な点は,

- 1) 従来設備のままでは, 切りくずの搬出が困難。
- 2) 重切削加工では冷却性が不足。

がある。従来型加工液で切りくずを押し流していたアルミ合金加工の既存設備において, 加工液を MQL に置き換えるとパレットやスカート部に切りくずが堆積し生産性が

低下することがある。間欠的にフラッシングクーラントを流すなどの対策が効果的であるが、最近の工作機械メーカーはMQL加工を意識して、バレットを（工作物も）上下逆向きに配置する機種や、スカート傾斜を大きくした改良型を市場に出し始めた。

## 5.2 油膜付き水滴加工液

MQLに冷却性を付与する簡便な方法として、著者らは油膜付き水滴加工液（OoW：Oil on Water）を考案した<sup>9)</sup>。OoWの概念図をFig.3に示す。油剤としてはMQLで使われるエステル系生分解性油を同じく極微量使用し、これを比較的粒径の大きい水滴の表面に油膜として付け、加工点に供給することからMQLの一手法といえる。水滴は極微量の油剤を的確に加工域に運搬し付着させることと、付着後は加工域を冷却する役割を担う。

油膜付き水滴加工液の特徴を明確とする実験結果の一例を紹介する。アルミニウム合金（A6063A）を比較的厳しい条件でエンドミル加工したときの加工力を、加工液を色々と換えて測定した。測定結果をFig.4に示す<sup>10)</sup>。加工

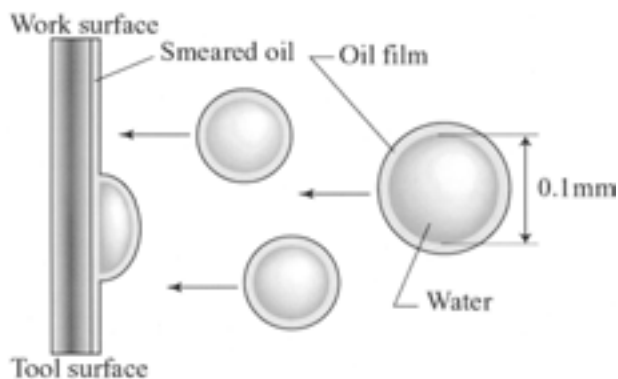


Fig. 3. Concept of oil film on water droplet (OoW) machining fluid.

液により潤滑性が変化し、潤滑性が良いほど加工力は小さくなる。従来型のエマルジョン加工液では本条件で200Nの加工力となったが、環境対応型の加工液でも同等の値となれば使用可能といえる。

従来型のエマルジョン加工液と比べ、植物油系あるいは合成エステル油剤（10 cc/h）を水滴（1000 cc/h）の表面に付けたOoWは同等かそれより小さい加工力となった。エマルジョン加工液では水の中に油剤が分散しているのに対し、OoWでは水滴の表面に油剤が付いていることが効果的な潤滑性能を示した理由と考えられる。これに対して、供給条件、ノズルも同じにして油剤を鉱油系の実用切削油とした場合は加工力が大きく、実際には切りくずが仕上げ面に溶着して焼付き状態となった。鉱油では水滴の表面に油膜を形成せず（油剤の分子構造の違いによるもので、水との界面張力にその差が現れる）ミスト状の油滴と水滴が別々に供給されたためであり、圧倒的多量（100倍）の水に加工状態が支配される。水だけをミスト供給した場合は潤滑性が皆無のため最も切削力が大きい。一方、水を供給せず精製なたね油のみをミスト供給した場合（通常のMQL加工と同等）も、エマルジョンと比べ加工力が大きくなった。これは加工液の冷却性が実験結果に現れたもので、ここでの加工条件では切りくずや工具の温度上昇が大きく、冷却性不足により油剤が働きにくくなったのが原因である。

油膜付き水滴加工液の冷却性能を、他の加工液と比較するため矩形ブロック材料からエンドミル山加工で円柱形状を削りだし（Fig.5）、加工後の円柱直径を測定した<sup>11)</sup>。測定結果と製品・工具の温度上昇から計算した寸法誤差をFig.6に示す。測定は製品を加工機から取外し、恒温室内

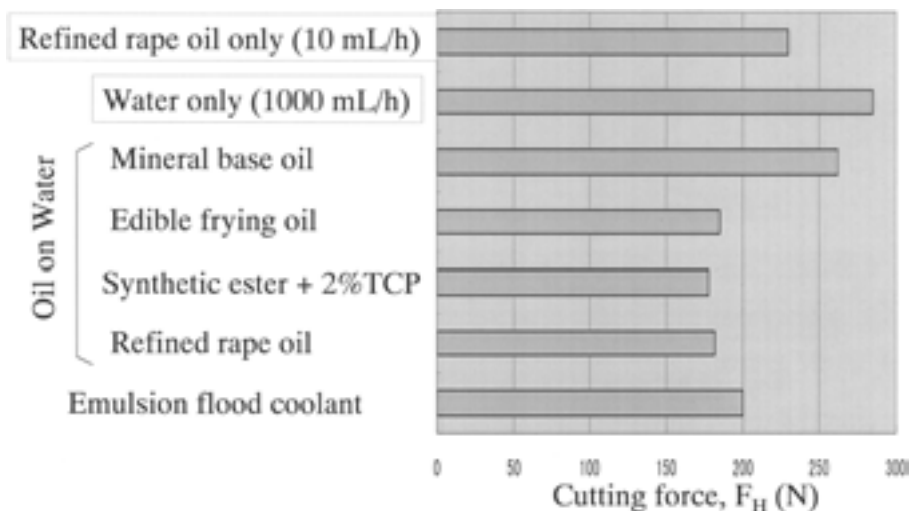


Fig. 4. Experimental results of cutting force with changing cutting fluids

の3次元測定器で行ったため、加工中の温度上昇が製品の寸法誤差として現れる。水溶性加工液をフラッドに供給した場合は寸法誤差が少ないのに対し、センタースルーのMQLあるいは外掛けのオイルミストでは大きな寸法誤差が発生した。また円柱の直径誤差には、工具（超硬）の熱膨張の影響が大きいことがわかる。一方、油膜付き水滴加工液では水溶性には及ばないものの寸法誤差が小さく、その冷却性が示されている。

ここで、前述のアルミニウム合金エンドミル加工において、OoW加工液の油剤供給量は一定として、水の供給量を変化させた時の加工力測定結果をFig.7に示す<sup>12)</sup>。加工力は水の供給量を0とし、油剤のみ供給した時の加工力を1として表してある。また、横軸は単位時間に供給した水が蒸発潜熱により奪い去ることのできる熱量と切削仕事

率との比で表してある。実験結果より総切削仕事の15%程度の熱を奪えるだけの水を供給すれば切削抵抗を低下できることが分かる。切削エネルギーのうち工具へ流入するのは高速切削条件であれば高々10%程度であるから、この時、工具表面は十分に冷却され、油剤の潤滑性が確保されたと考えられる。

## 6. すくい面における潤滑油作用機構

前章で示したように、エンドミル加工のような断続切削では極微量の潤滑油剤でも切削抵抗を大きく減少させることがわかった。そこで油剤および冷却性による加工力の変化を詳細に調べるため次の実験を行った。

### 6.1 断続切削における油剤と加工力

旋削加工において被加工物形状を四角形としてFig.8に

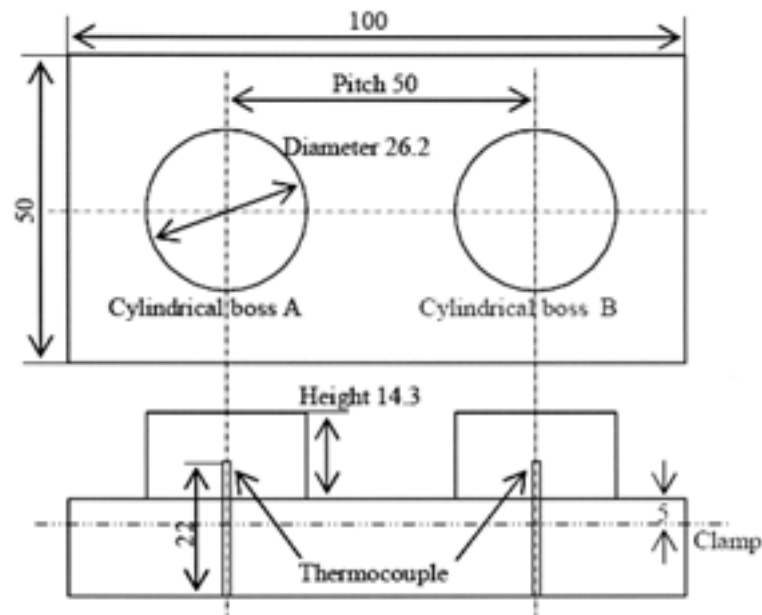


Fig. 5. Machined product for machining accuracy tests.

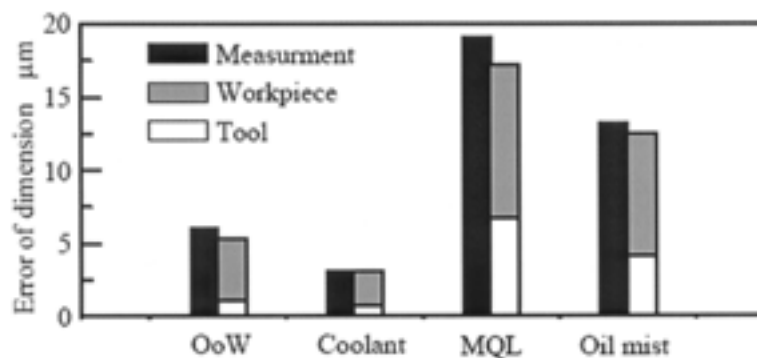


Fig. 6. Measured results of dimensional error of diameter and calculated results.

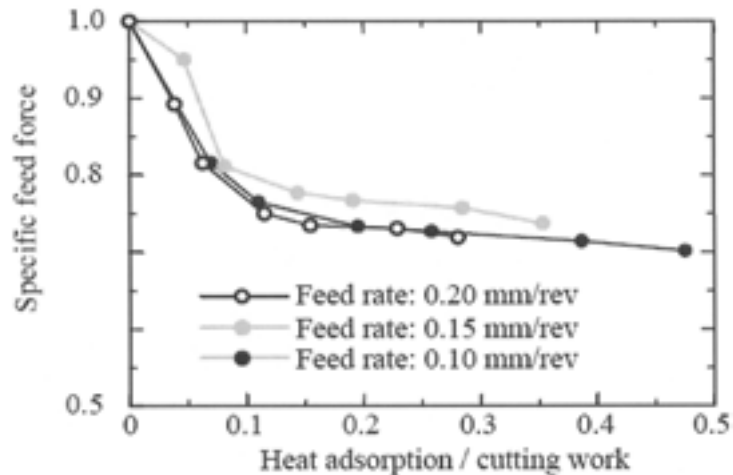


Fig. 7. Measured feed forces with changing supplied water amount.

示すような断続切削を行った<sup>13)</sup>。加工条件を Table 1 に示す。刃物台には動力計 (Kystler 9257B) を取付け加工力を測定するとともに、高速度鋼工具のすくい面下 1.0 mm と 2.0 mm に埋め込んだ熱電対により温度を測定し、定常熱伝導を仮定して工具すくい面温度を算出した。油剤をミスト供給として加工したときの加工力 (送り分力) の測定結果 (切り込み量 1.5 mm) を Fig.9 に示す。四角形加工物の 4 すみを繰返し切削することで、しだいに実質切削距離が長くなる。加工し始めを同じ位置として測定結果を重ねて示してある。油剤として鉱油 (無添加) を使用した場合は、加工し始めから一定の加工力を示すが、植物油の場合は加工力が徐々に増大し、一定となった後も鉱油の場合に

比べれば小さい値を示している。断続切削では空転時にすくい面上に塗布された油剤が摩擦力を減少させるが植物油のように吸着力を持つ油でなければその効果が無いことがわかる。

工具温度の測定のために切込みを 3 mm として、OoW の水供給量を変化させたときの送り分力 (平均) とすくい

Table 1. Intermittent cutting conditions.

Tool material	Carbide (G10)
Work material	Aluminum alloy (A6063)
Tool geometry	Rake angle: $-5^{\circ}$ , Nose R: 0.4 mm
Feed rate	0.1 mm / rev
Depth of cut	1.5 mm, 3.0 mm
Cutting speed	200 m/min

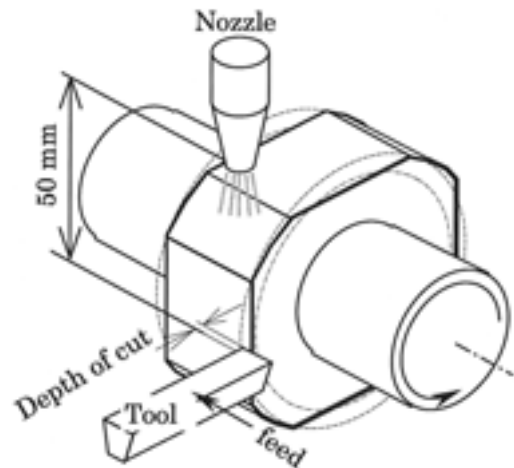
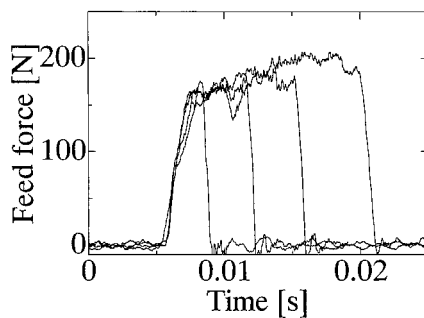
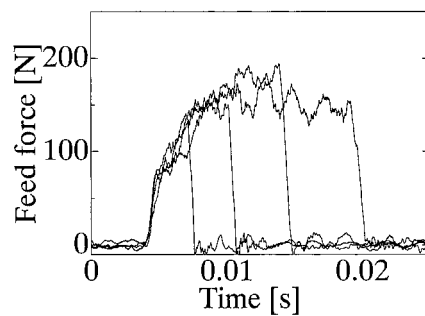


Fig.8. Machining test of intermittent cutting.



(a) With mineral oil



(b) With refined vegetable oil

Fig. 9. Feed force variations with time in MQL intermittent cutting.

面表面温度（算定値）の測定結果を Fig.10 に示す。水の供給を 0 とした場合は、送り分力は 300 N、すくい面温度は 200 °C を示すが、水を供給すると加工力、温度ともに減少し、水供給量 10 ml/min 以上ではほぼ一定値となる。切削加工においても油剤（植物油）の効果には温度が直接的に影響していることがわかる。

## 6. 2 すくい面摩擦のモデル試験

すくい面上での油剤の働きを詳細に調べるため、Fig.11 に示す実験装置を制作した。旋盤の刃物台を改良し、刃物を瞬間的に移動して 1 回だけの切削を行い、その時の加工力が測定できるようにした。また刃物には負の逃げ角を与え、切削直後の材料と工具表面との摩擦が再現できるようにした。工具ホルダにはヒーターを取付け温度による油剤の効果への影響を調べた。測定結果を Fig.12 に示す。吸着活性の低い鉱油（無添加）では摩擦力は低温域から無潤滑と同等の高い値を示すのに対し、吸着活性の高いエステル系の油剤である植物油やポリオールエステル（POE）では、200 °C 付近まで低摩擦が維持されている。それ以上の温度では摩擦力が急激に増加し、転移温度が存在していることが分かる。これらの結果から、実切削においても水などによる冷却により油剤の転移温度以下に工具表面が維持されるならば、潤滑効果が発揮されると予想できる。

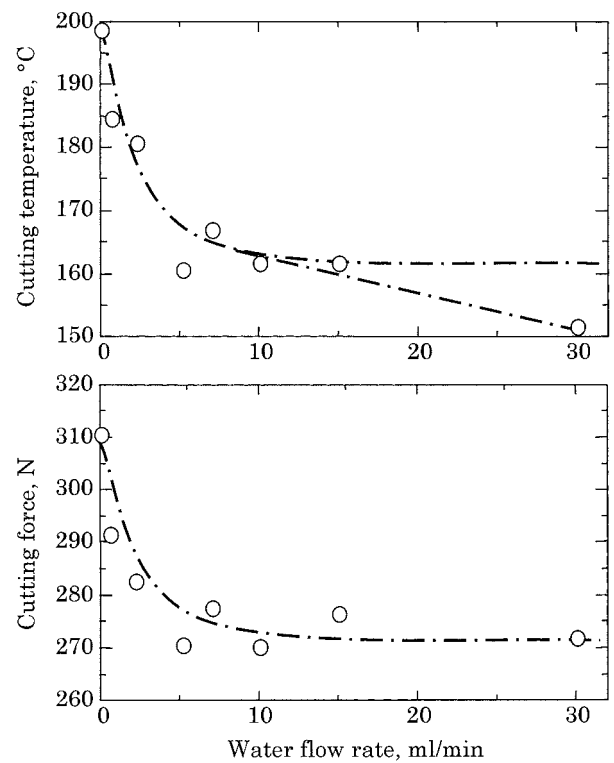


Fig.10. Tool surface temperature and feed force variations with changing water supply amount.

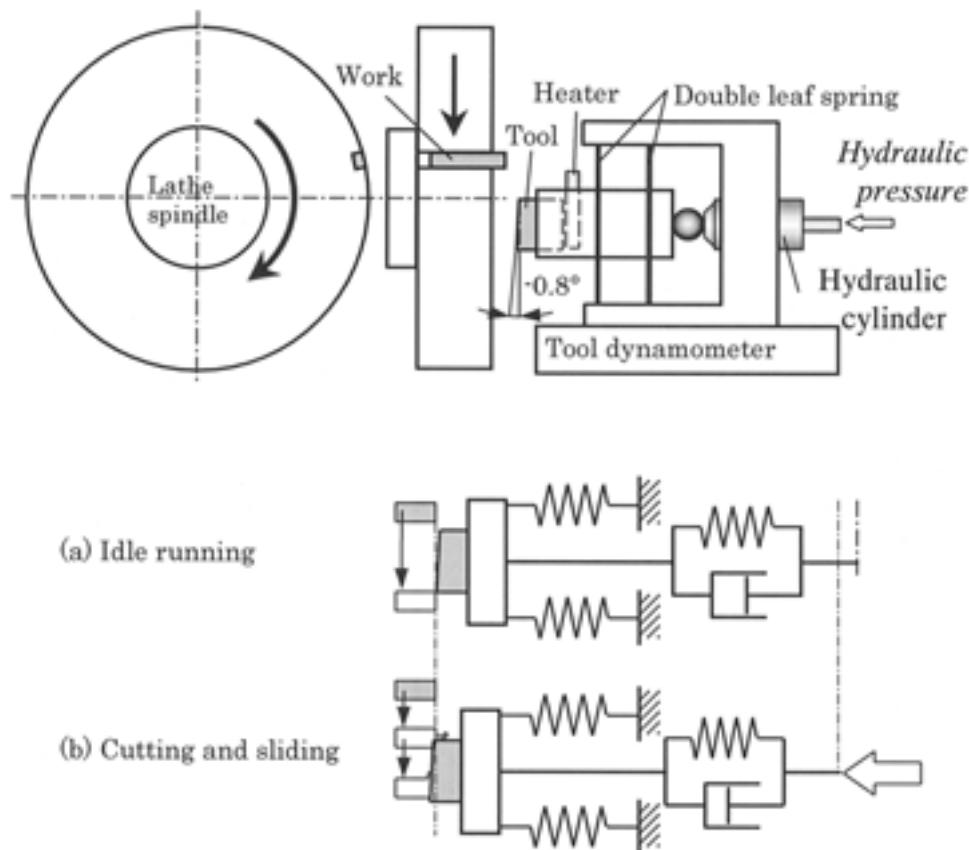


Fig.11. Schematic illustration of simulation test for rake face friction.

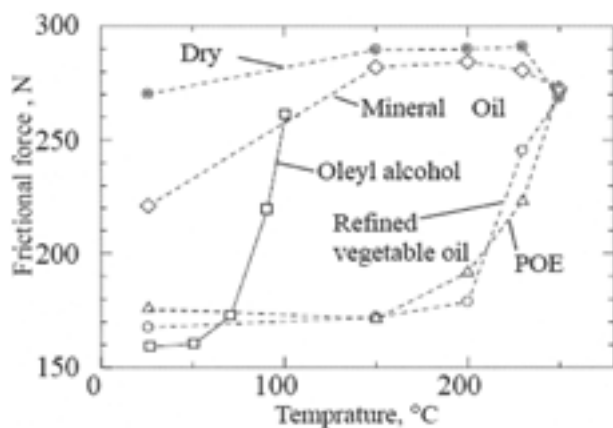


Fig.12. Measured friction force with changing tool surface temperature.

### 6. 3 すくい面のあらさと潤滑効果

Fig.11の実験において、すくい面上の油膜厚さを変えたときの摩擦力を測定した。実験ではマイクロシリンジを使い工具逃げ面に一様に塗布し、油膜厚さを算出した<sup>14)</sup>。工具逃げ面の表面あらさ(滑り方向あらさ)の大きさ(Rrms)に対する油膜厚さを油膜パラメータと定義すると、その値が1を超えると摩擦面に塗布された油膜は表面あらさに比べ十分厚いといえる。その油膜パラメータを横軸とし、無潤滑の摩擦力を基準値とした測定結果をFig.13に示す。油剤を鉱油とした場合は、油膜厚の増大にともない、わずかに摩擦力が減少するものの、その減少量は少ない。これに対し吸着活性の高い植物油では油膜パラメータが1になるまで大きく摩擦力が減少し、それ以上では一定値を示した。工具すくい面での油剤の働きでは、油剤の性質だけでなく、表面あらさも影響することがわかる。ダイヤモンド被覆ドリルでは、被覆の粒度を微細として表面あらさを小さくした場合、わずかな油剤供給によりアルミニウム合金の溶着を防ぎ、粒度の粗いダイヤモンド被覆工具に比べて数倍の寿命延長が得られている<sup>15)</sup>。

## 7. まとめ

切削加工のトライボロジーについて、切削の基礎から環境対応加工液、工具すくい面での油剤の作用を解説した。本稿の最初に説明したように切削加工では、常に要求される加工能率向上の結果、極限あるいは限界環境でのトライボロジーとなっているため、わずかな冷却能力の変化、材料特性の変化が工具寿命などを大きく左右させることになる。環境問題への対応が進む中で、切削加工におけるトライボロジーが再び争点となり、さまざまな研究が始まっている。ここでの成果は他の加工プロセスや機械要素のトライボロジーに生かされると期待する。

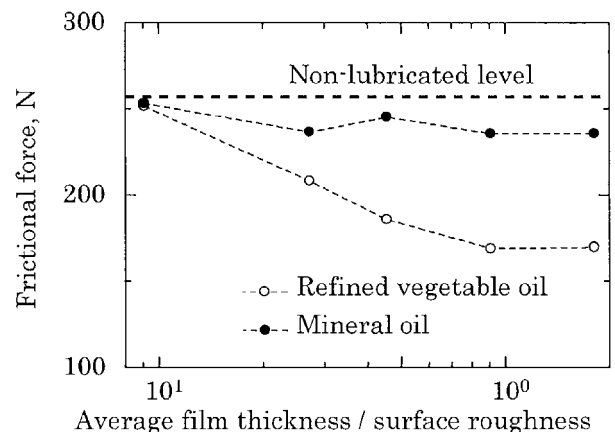


Fig.13. Measured friction force with changing oil film parameter at 150 m/min sliding speed.

(文 献)

- 1) A. O. Schmidt and J. R. Roubik: Trans, ASME., 71 (1949), 245.
- 2) M. E. Merchant: J. Appl. Phys., 19 (1945), 267.
- 3) 金枝敏明, 西田達哉: 2007年度精密工学会春季大会講演論文集, 2007, CD-ROM, G74.
- 4) R. B. Aronson: Manuf. Eng., 1995, 33.
- 5) U. Heisel, M. Lutz, D. Spath and R. Wassmer: U. Prod. Eng., II 1 (1994), 49.
- 6) H. Honma, K. Yokogawa and Y. Yokogawa: J. JSPE., 62 (1996), 11, 1638.
- 7) F. Klocke: Ann. CIRP., 46 (1997), 2, 514.
- 8) T. Wakabayashi, H. Sato and I. Inasaki: JSME. Int. J., Ser. C, 41 (1998), 1, 143.
- 9) 中村 隆, 松原十三生, 糸魚川文広, 丹羽小三郎: 1999年度精密工学会春季大会講演論文集, 1999, 550.
- 10) T. Nakamura, T. Matsubara and F. Itoigawa: Proc. of Int. Tribology Conf., 2000, 2269.
- 11) 河田圭一, 中村 隆, 松原十三生, 佐藤 豊: 精密工学会誌, 69(2003), 9, 1342.
- 12) 山田昌広, 中村 隆, 糸魚川文広, 吉村 宏: 生産と加工に関する学術講演会講演論文集, 04 (2004), 3, 87.
- 13) F. Itoigawa, D. Takeuchi, T. H. C. Childs and T. Nakamura: CIRP. 2<sup>nd</sup> Int. Conf. on High Performance Cutting, 2006, CD-ROM.
- 14) 糸魚川文広, 竹内大輔, 山本雅之, 中村 隆: トライボロジー会議2006春東京予稿集, 2006, 35.
- 15) 村上良彦, 福井康雄: トライボロジー会議2006春東京予稿集, 2006, 15.