

氏名	小澤 匡史
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博甲第1082号
学位授与の日付	平成21年3月23日
学位授与の要件	課程博士(学位規則第4条第1項)
学位授与の題目	極微量オイルミスト供給による旋削加工 —ファイバ連結型2色温度計を用いた工具切れ刃温度の測定—
論文審査委員(主査)	細川 晃(理工研究域・教授)
論文審査委員(副査)	上田 隆司(理工研究域・教授), 門前 亮一(理工研究域・教授), 平尾 政利(理工研究域・教授), 浅川 直紀(理工研究域・准教授)

Studies on Minimum Quantity Lubrication Turning  
— Measurement of tool temperature using fiber-coupled two-color pyrometer —

This paper discusses the MQL (Minimum Quantity Lubrication) turning using specified MQL turning tools. The tool holder has branched oil holes that extends to two nozzles near the flank face and the rake face of the insert. Oil mist is thus supplied directly to both the flank-work and rake-chip contact zones. In this study, tool temperature at the flank face is measured using a newly developed fiber-coupled two-color pyrometer, and the effect of oil mist on cutting force, surface roughness and tool wear are also examined. In MQL turning, tool temperature decreased drastically compared to dry cutting when the oil mist diameter is appropriately controlled. This effect enables the high speed cutting as far as the tool temperature is lower than a critical value. With regard to the cutting force in MQL turning, the oil mist supplied to the rake face is more effective. On the other hand, the surface roughness of the workpiece is improved by the oil mist supplied to the flank face over a wide cutting speed range. Finally, a multi-nozzle MQL system in which different types of oil are supplied to tool rake and flank faces individually is developed. This innovative method is effective in reduction of tool temperature where tool temperature at the tool flank face is more than 150°C lower than that in dry cutting.

## 1. 緒言

切削加工のなかでも、工作物を回転させて切削する旋削加工は円筒加工を中心として様々な用途の部品の加工が可能であり、今日の生産加工には欠かせない加工法となっている。連続加工である旋削においては、工具刃先は常に高温、高圧の条件下に置かれることになるため、工具寿命の延長、仕上げ面粗さの改善などを目的として切削液が広く使用されている。しかしながら、大量の切削液は自然環境や作業環境への負荷はもとより、廃液処理コストの増加など多くの問題が発生する。そのため、極微量の切削油をミスト状にして供給するMQL切削(Minimum Quantity Lubrication)が注目されている。

MQLの有効性について議論するには、切削点に供給されるオイルミストの潤滑効果および工具冷却効果を定量的に検証することが不可欠である。しかしながら、工具損耗に直結する工具冷却効果に関しては、切削温度測定が容易でないという理由から詳細な研究が少ない。そこで、本研究は旋削加工におけるMQLの潤滑ならびに冷却効果をより詳細に検証することによって、MQL旋削の有効性を明確にすることを目的とする。MQL切削では、オイルミストの供給方法によってその効果は大きく異なるため、まず第一にミストホール付MQL専用バイトを用いたMQL旋削システムの構築について検討し、噴霧状態の安定化を図っている。

まず、工具温度測定に関しては、旋削加工における工具逃げ面温度の測定を可能にするため、ファイバ型赤外線2色温度計を改良したファイバ連結型2色温度計を構築し、回転する工作物内部から工具刃先温度を直接測定することに成功している。この温度測定方法を用いて、MQL旋削加工の有効性について、主として切削点に供給されるオイルミストの潤滑作用・冷却作用を統括的に検討することを目的とし、オイルミストが切削抵抗、仕上げ面粗さ、工具逃げ面温度および工具摩耗に与える影

響を明らかにしている。

さらに、本研究では工具すくい面および逃げ面に供給されるオイルミストがそれぞれ切削性能(切削抵抗、仕上げ面性状、工具温度など)に与える影響を個別に検討し、より詳細にMQLの効果を実証している。工具すくい面および逃げ面に供給されるオイルミストの役割を明らかにし、両方で油剤の種類を検討することで、より効果的なMQL切削システムを構築することが可能となるからである。その後、工具すくい面および逃げ面に異なる種類の油剤を供給する複合オイルミスト供給法の効果を検討し、主として切削時の工具温度抑制に効果的な油剤の組み合わせを明らかにしている。

## 2. 実験方法

### 2.1 ファイバ連結型2色温度計

工作物が回転する旋削加工においても工具逃げ面温度を測定することが可能なファイバ連結型2色温度計を開発し、工具逃げ面温度を測定した。図1に温度測定法の詳細を示す。円筒状の工作物径方向に測定孔( $\phi 1.1$  mm)を貫通させ、ファイバ-Aを挿入する。このとき、ファイバ端面と工具刃先の距離は0.5 mmになるよう調節する。ファイバ-Aの一端は工作物端面に取り付けられたファイバカップラに挿入され、工作物とともに回転する。切削時、回転ファイバ-Aの入射端面が工具刃先前方を通過する際工具逃げ面からのふく射エネルギーを受光し、非接触光カップラを介してファイバ-Bに伝送される。ファイバ-Bに受光されたふく射エネルギーが最終的に2色素子に伝送される。2色素子とは分光感度波長域がそれぞれ $1\ \mu\text{m}\sim 3\ \mu\text{m}$ および $3\ \mu\text{m}\sim 6\ \mu\text{m}$ と異なるInAs色素子およびInSb色素子を同一光軸上で積層構造にしたものである。工具の温度は2色素子の出力比から求めるため、両ファイバの軸芯のずれやファイバ間距離などのカップリング内の設定誤差は測定精度に影響されない特徴を持っている。

## 2.2 実験方法

図2に実験装置の概略を示す。実験にはオークマ(株)製複合加工機 (Mac Turn30) を用いた。切削抵抗はひずみゲージ式3分力動力計 (サトーマシナリー(株), AST-TTH) を用い、主分力 $F_x$ 、背分力 $F_y$ および送り分力 $F_z$ を測定した。工具温度測定は前節で説明したようにファイバ連結型2色温度計を用いている。ところで、工具が測定孔上部を通過する前後では切りくずなどからの熱パルスも観測される。そこで、図2に示すようにバイトホルダに加速度ピックアップを取り付け、測定孔上部を切削する際の振動を感知して温度パルスの同定を行っている。工作物としては、被削性が大きく異なる2種類(クロム-モリブデン鋼:SCM440H, パーライト可鍛鋳鉄:FCMP)を選び、SCM440HにはTiCN-コーテッドサーメット工具、FCMPにはアルミナ系セラミックス工具を選定した。表1に主たる実験条件を示す。

## 3. MQL旋削の基本性能

### 3.1 ミストホール付バイトを用いたMQL旋削システム

切りくずが連続的に生成される旋削加工では加工点にミストが浸透されにくく、効果的な供給方法が必要とされる。そこ

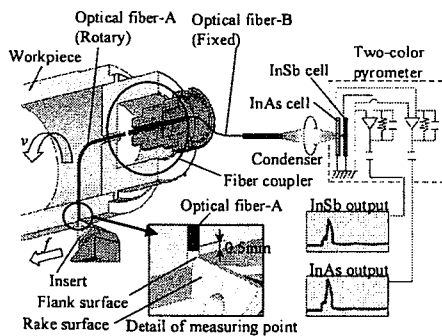


Fig.1 Structure of fiber-coupled two-color pyrometer equipped for turning

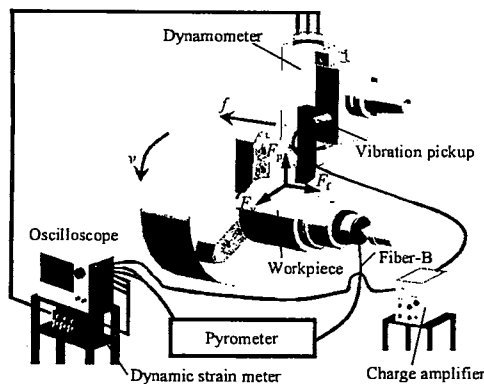


Fig.2 Schematic illustration of experimental setup

Table 1 Experimental conditions

Workpiece: SCM440H (350HV0.5)	
Cutting tool	TNGM 160408 Nose radius: 0.8 mm, Rake angle: $-6^\circ$ Insert: TiCN-coated cermet
Cutting speed	$v = 30\text{--}300$ m/min
Depth of cut	$a = 0.5$ mm
Feed	$f = 0.3$ mm/rev
Workpiece: FCMP (310HV0.5)	
Cutting tool	DNGA 150408 Nose radius: 0.8 mm, Rake angle: $-6^\circ$ Insert: Alumina ceramics
Cutting speed	$v = 100\text{--}600$ m/min
Depth of cut	$a = 0.15$ mm
Feed	$f = 0.15$ mm/rev

で本実験では、ミストホール付MQL専用バイト (EBtool, フジBC 技研(株)) を使用した。図3にMQL旋削システムを示す。エアコンプレッサで圧縮した空気はエアドライヤー (RDG-37, Anest Iwata) によって水分とゴミを除去され、さらに、フィルタ・レギュレータで所定の空気圧に調整された後、超微粒オイルミスト噴霧装置 (株) 荏原エコミスト, ZELS MBM02) に供給される。生成されたオイルミストはバイト内部の管路を經由して工具逃げ面およびすくい面の両方にピンポイントで供給される。

表2にオイルミストの生成条件を示す。用いる切削油は動粘性係数が $35\text{ mm}^2/\text{s}$ の植物油である (以後動粘性係数によりOil-35と称す)。ここで、断面積の小さいミストホールから十分なオイルミスト量を確保するため、図3に示すように噴霧装置にバイパス配管を構築することでミスト濃度改善を図っている。リリーフバルブを開放し、バイパス圧力 $p_b$ を $0.1\text{ MPa}$ に設定することでオイルミスト総流量 $25\text{ mL/h}$ を確保している (実験はこの流

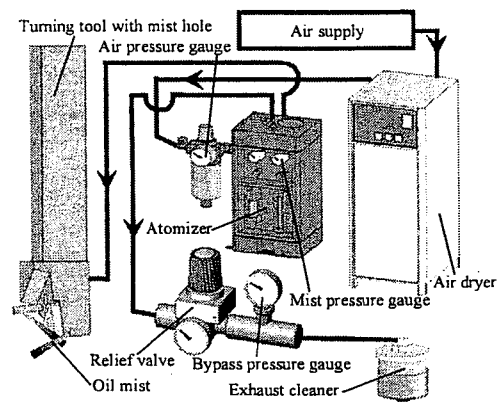


Fig.3 Generating system of oil mist connected to turning tool holder with oil hole

Table 2 Oil mist generating conditions

Cutting fluid	Oil-35 (Vegetable oil)
Kinematic Viscosity	$35\text{ mm}^2/\text{s}$ ( $40^\circ\text{C}$ )
Air pressure	$0.7\text{ MPa}$
Mist pressure	$0.6\text{ MPa}$
Bypass pressure $p_b$	$0.1\text{ MPa}$

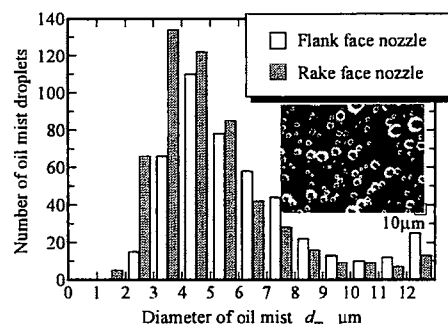


Fig.4 Diameter distributions of oil-mist droplets

量で行っている)。

図4は実測したオイルミストの粒径分布を示したもので、それぞれ逃げ面側、すくい面側のノズルより噴射されたミストの結果である。図にみるように、ミスト粒径は逃げ面、すくい面側ともほぼ同様の分布を示している。また、大量の圧縮空気とともに噴射されるため、 $2\text{ }\mu\text{m}$ より細かなオイルミストは工具に付着せず飛散したものと考えられる。したがって、オイルミストが工具に付着して潤滑膜として作用するにはある程度の大きさのオイルミストが必要だと言えよう。

### 3.2 MQLの工具摩耗抑制効果

図5はSCM440Hにおける工具逃げ面温度 $\theta$ と切削速度 $v$ との関係である。図にみるように、切削速度の増加にともなって工具温度は上昇するが、MQL加工では低速から高速域まで100°C程度工具温度が低く抑えられている。ここで図5より、一般的な切削速度 $v=150$  m/minにおいて、MQL加工での工具温度は約800°Cであるが、同じ工具温度で切削を行うとすれば乾式では $v=90$  m/minとなる。すなわち、MQL加工では乾式に比較しておよそ150/90=1.7倍の能率で切削することが可能となる。そこで、MQL

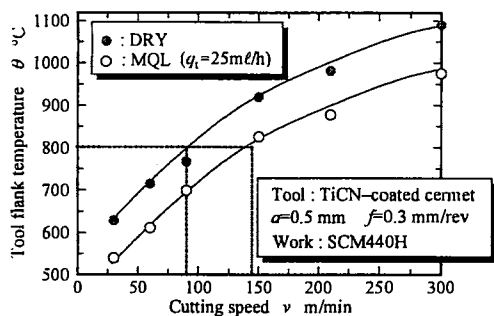


Fig.5 Effect of MQL on tool flank temperature in turning of SCM440H

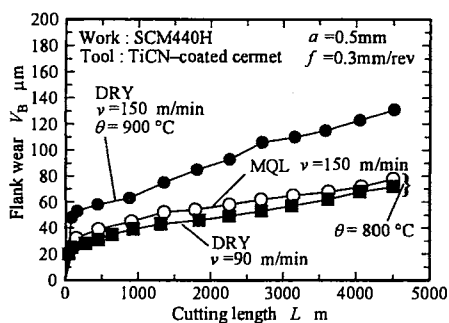


Fig.6 Effect of tool temperature on tool wear in turning of SCM440H

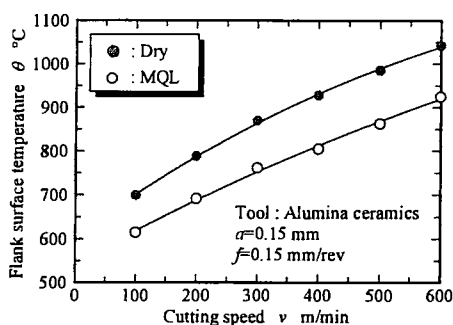


Fig.7 Effect of MQL on tool flank temperature in turning of FCMP

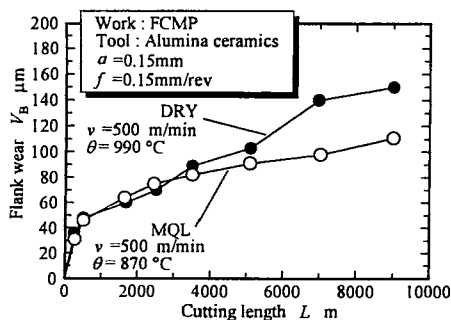


Fig.8 Effect of tool temperature on tool wear in turning of FCMP

加工の工具摩耗への影響について、主として工具温度との関係で検討した。

図6に、SCM440Hにおける切削距離 $L$ と工具逃げ面摩耗 $V_b$ の関係を示す。一般的な中切削速度 $v=150$  m/minにおいて乾式(●)とMQL(O)を比較すると、乾式では切削実験終了時( $L=4500$  m)には摩耗幅は $V_b \approx 130$   $\mu$ mに達している。一方、MQL加工では初期摩耗も小さく、切削終了時の逃げ面摩耗幅もおよそ80  $\mu$ mに抑制されていることがわかる。ここで、 $v=150$  m/minのMQL切削と工具逃げ面温度がほぼ800°Cと等しくなる $v=90$  m/minの乾式の結果(■)をみると、MQL加工とほぼ同じ摩耗曲線を得ていることがわかる。このことから、SCM440Hの切削においては、工具逃げ面摩耗は主として工具逃げ面温度に関係すると言える。したがって、MQLの冷却作用によって乾式に比較しておよそ1.7倍の加工能率が得られることが明らかになった。

一方、図7はFCMPにおける工具逃げ面温度 $\theta$ と切削速度 $v$ との関係である。MQLの効果によって、 $v=100 \sim 600$  m/minの範囲で工具温度が100~120°C程度低下しており、工具摩耗の抑制が期待された。そこで、FCMPにおいても同様に工具摩耗実験を行った。図8に切削距離 $L$ と工具逃げ面摩耗 $V_b$ の関係を示す。本実験では仕上げ加工を対象としているので、図8で示される $V_b$ は刃先部の摩耗幅である。図にみるように、MQL加工(O)では乾式(●)に比べて逃げ面摩耗が抑制されていることがわかる。しかしながら、FCMPは連続型切りくずを排出するSCM440Hとは異なり細かい不連続型切りくずが発生すること、使用したセラミックス工具自体がより耐熱性を持つことなどを理由とし、工具摩耗抑制に及ぼす熱的影響がそれほど顕著に現れなかった。

## 4. 管路独立型バイトを用いたMQL旋削

### 4.1 管路独立型バイトを用いたMQL旋削システム

MQL旋削の性能を明らかにしていく過程で、工具逃げ面・すくい面上のオイルミストの作用をふまえ、供給する油の種類を検討することでより効果的なMQL切削が実現出来得るとの認識を得た。そこで、工具すくい面および逃げ面に個別にオイルミストを供給できる管路独立型バイトを製作し、MQL旋削システムを構築した。図9に概略図を示す。図にみるように、管路独立型バイトは逃げ面ノズルおよびすくい面ノズルまでの管路がそれぞれ独立しており、それぞれに個別にオイルミストを供給することが可能である。このバイトを用いて工具すくい面および逃げ面上のオイルミストの作用を明らかにしている。

表3はオイルミスト供給条件である。MQL切削油は動粘性係数の異なる植物油2種類(Oil-35, Oil-20)と、冷却効果の期待された(水+油)型のOil-8の3種類を選定した。これらの油を用いてオイルミスト供給方向および油の種類を検討している。さらに、工具逃げ面温度の抑制に効果的な油の組み合わせについて最終的に提案する。オイルミスト流量はすくい面側 $q_t=11$  ml/h、逃げ面側 $q_r=16$  ml/hで一定とした。

### 4.2 工具すくい面および逃げ面のオイルミストの作用

クロム-モリブデン鋼を用い、工具すくい面・逃げ面に供給されるオイルミストの潤滑・冷却効果を個別に検証した。図10に切削速度 $v$ と切削抵抗の関係を示す。乾式加工、すくい面MQL、逃げ面MQLおよび両面MQLのOil-35における測定結果を比較している。MQLの効果については、 $F_t$ および $F_p$ で顕著にみられ、低切削速度域でオイルミストによる切削抵抗低減効果が現れている。とくに、 $v=30$  m/minでは工具すくい面にオイルミストを供給した場合に大きな減少がみられる。このことから、低温度域で発生しやすい切りくずの凝着が、工具すくい面に作用するオイルミストによって抑制されていることが推察される。

図11はOil-35を用いた場合の切削速度 $v$ と仕上げ面粗さ(最大高さ $P$ )の関係である。粗さは長手方向に測定した5カ所の平均

値であり、ばらつきをエラーバーで示している。図にみるように、乾式加工においても $v$ の増大とともに仕上げ面は良好になるが、MQL方式と比較すると値、ばらつきともに大きいことがわかる。MQLの効果に関してはすくい面、逃げ面、両面の順に

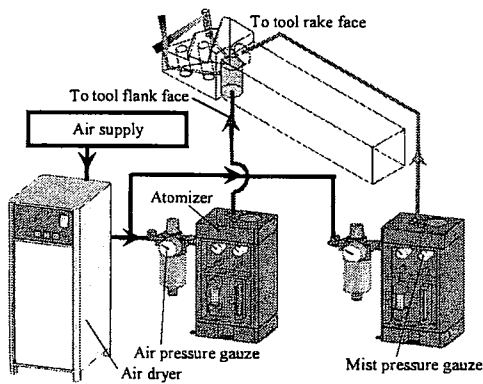


Fig. 9 MQL turning system using specified tool with separated mist holes

Atomizer	Ebara Ecomist ZELLS MBM02
Air pressure	0.7 MPa
Mist pressure	0.6 MPa
Flow rate of oil mist	
Flank face	$q_f = 16 \text{ ml/h}$
Rake face	$q_r = 11 \text{ ml/h}$
Cutting Oil	Oil-35 (35mm <sup>2</sup> /s, Vegetable oil) Oil-20 (20mm <sup>2</sup> /s, Vegetable oil) Oil-8 (8.2mm <sup>2</sup> /s, Water-included oil)
Supplying style	Rake face, Flank face, Both faces
Rake face MQL	
Flank face MQL	
Both faces MQL	

大きくなり、逃げ面に供給されたオイルミストが主に粗さ改善効果を担っていることがわかる。また、すくい面・逃げ面に併せて供給することで、最大高さ $P_t$ は理論最大高さ(実測した工具形状より求めた粗さ)に近づいており、すくい面側のオイルミストも切削の安定から粗さ改善に寄与していると推察される。

図12は乾式と各MQL切削における工具逃げ面温度を示している。MQLの効果はすくい面、逃げ面そして両面の順に大きくなっていることがわかる。すくい面にオイルミストを供給した場合、 $v=30\sim 300 \text{ m/min}$ の範囲で工具温度は580°C~1060°Cであり、乾式加工と比較して全体的に30°C程度の冷却効果であった。一方、工具逃げ面にオイルミストを供給すると工具温度は570°C~1010°Cであり、切削速度域全般にわたっておよそ70°C温度が低くなっている。このことから、逃げ面側に供給したオイルミストが工具冷却に大きく寄与していると言える。当然ながら、工具すくい面・逃げ面同時に供給すれば工具温度は両者の冷却効果をそのまま加算した100°C程度の低下となっている。

#### 4.3 供給する切削油の影響

工具すくい面・逃げ面に供給するに適した切削油を検討するため、異なる種類の切削油を用いて実験を行った。図13は低速域での切削抵抗( $F_c$ および $F_f$ )の比較である。切削抵抗低減に効果的であったすくい面MQLのOil-35およびOil-20の結果をそれぞれ比較している。図にみるように、 $v$ が30 m/minと90 m/minのいずれにおいてもOil-35とOil-20の効果に違いが現れており、その効果は中粘度のOil-20を供給した場合に大きくなっている。

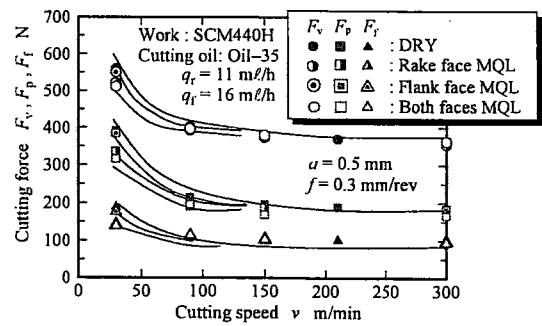


Fig.10 Cutting force in various cutting styles of MQL in which Oil-35 is used for cutting oil

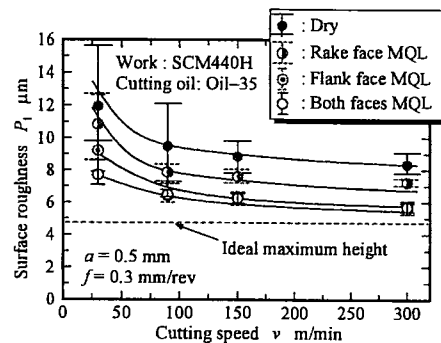


Fig.11 Surface roughness in various cutting styles of MQL in which Oil-35 is used for cutting oil

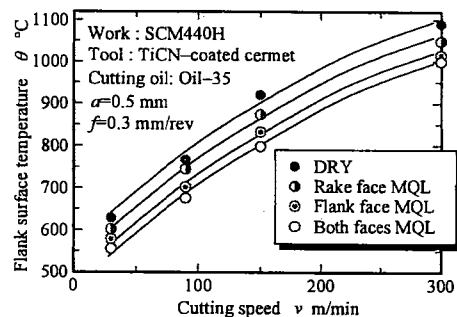


Fig.12 Effect of oil mist supplied to tool rake and flank faces on tool flank temperature in the case Oil-35 is used for cutting oil

ここで、表3からOil-35とOil-20の動粘性係数を比較すると、Oil-35は35mm<sup>2</sup>/sであり、Oil-20は20mm<sup>2</sup>/s (40°C)である。一般的には動粘性係数の大きなOil-35がより優れた切削抵抗低減効果を発揮するものと考えられるが、得られた結果は逆であった。その理由として次のような事が考えられる。オイルミストが、工具一切りくず接触領域に侵入して有効に作用するためには、接触領域への浸透性能も大きく影響していると考えられる。図14に示すように、Oil-35とOil-20を用いた場合のすくい面側のミスト径分布は中粘度のOil-20がより値の小さい範囲に集中していることがわかる。したがって、粒径の小さなOil-20は工具一切りくず接触領域への浸透が比較的容易となり、切削抵抗低減に効果的であったと推察される。また、図は省略するが、すくい面MQLにおける仕上げ面粗さ改善効果と工具冷却効果も浸透性能に優れたOil-20が最も効果的であった。

一方、図15は工具温度抑制に効果的であった逃げ面MQLにおいて、3種類の切削油を用いた場合の工具温度を比較したものである。図にみるように、工具冷却効果はOil-35、Oil-20、そして(水+油)型のOil-8の順に大きくなっており、Oil-8の工具冷却効果が最も優れていることがわかる。

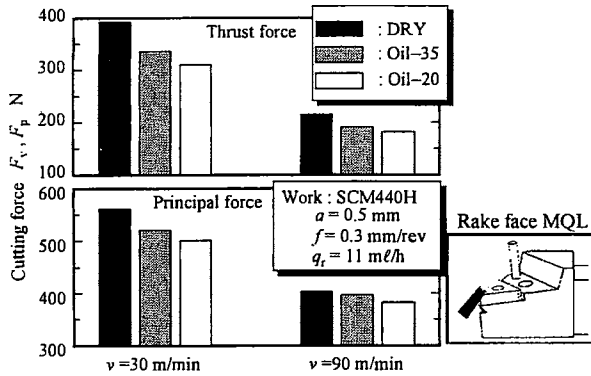


Fig.13 Comparison of cutting force between two cases when Oil-35 and Oil-20 are used for cutting oil

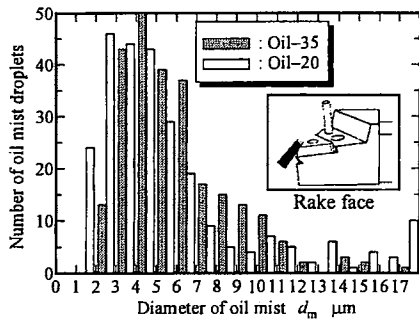


Fig.14 Comparison of oil-mist droplets diameter

#### 4.4 複合オイルミスト供給による工具温度抑制

前節の結果から、工具すくい面側および逃げ面側に供給する最適な油を考察すると以下のように決定する。すくい面に作用するオイルミストは、工具一切りくず接触域に作用し、切削抵抗低減および仕上げ面粗さ改善効果をもたらすため、最も効果的なOil-20を供給することが望ましいと言える。一方、工具逃げ面に供給されるオイルミストは工具-工作物接触領域に作用し、仕上げ面粗さ改善効果および工具冷却効果をもたらす。ここで、3.2節の結果から、クロム-モリブデン鋼の切削においては工具逃げ面摩耗は工具温度の影響を直接的に受けやすいため、主として工具冷却の点から油を選定すると、Oil-8が有効だと考えられる。本節では、以上の油の組み合わせによる複合オイルミスト供給法を提案し、主として工具冷却効果を検証する。そしてより効果的なMQL加工の可能性を検討する。

図16は複合オイルミスト供給旋削加工における工具温度を示している。乾式加工および工具逃げ面温度抑制に顕著な効果があったOil-20との比較である。複合オイルミスト供給はすくい面側がOil-20、逃げ面側がOil-8である。それぞれのミスト流量はこれまでと同様、 $q_r=11\text{ ml/h}$ 、 $q_f=16\text{ ml/h}$ である。すくい面側、逃げ面側ともに冷却効果の最も大きかった油を供給する複合オイルミスト供給においては、乾式と比較して工具温度は全体的に150°C程度低下し、顕著な冷却効果を示している。Oil-20のみを両面に供給した場合と比較するとさらに工具温度は低下しており、工具冷却という点においては複合オイルミストの可能性を実証できたと考えている。本実験では工作物の都合から工具摩耗抑制効果については検証できなかったが、140°C以上の冷却効果を考慮すると、工具摩耗抑制に効果的であり、工具寿命延長が期待される。

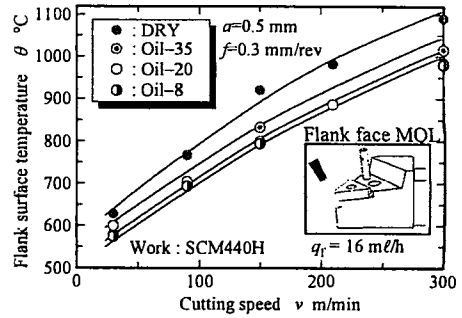


Fig.15 Effect of oil mist supplied to tool flank face on tool temperature

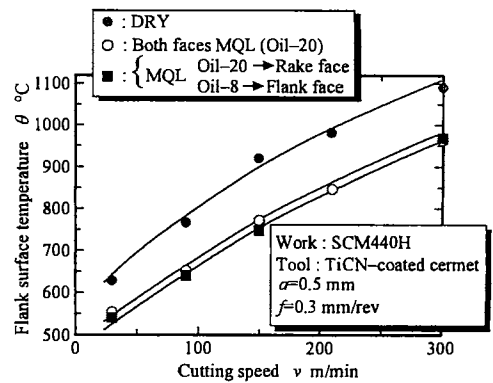


Fig.16 Effect of composite supplied oil mist on tool flank temperature

#### 5. 結 言

被削性の異なる2種類の鉄系材料(クロム-モリブデン鋼、パーライト可鍛鋳鉄)における工具摩耗を工具温度との関連で検討した。また、工具すくい面および逃げ面に供給されるオイルミストの作用を詳細に検討し、それぞれに異なる種類の切削油を供給する複合オイルミスト供給法の効果を実証した。以下に得られた結果をまとめる。

- (1) クロム-モリブデン鋼の切削では工具摩耗は熱的影響を受けやすい。したがってMQLの工具冷却効果が顕著に現れ、乾式と比較して約1.7倍の効率で加工が可能となる。一方、パーライト可鍛鋳鉄においてもMQLの摩耗抑制効果は確認できたが、その効果は工具温度低下から考慮するとあまり顕著ではない。
- (2) すくい面に供給されるオイルミストは、工具一切りくず接触域に作用し、切削抵抗低減および仕上げ面粗さ改善をもたらす。その効果は浸透性能に優れたOil-20が最も顕著であった。一方、逃げ面にオイルミストを供給した場合、工具冷却効果は顕著となり、(水+油)型のOil-8を供給することで、乾式と比較して100°C以上工具冷却される。
- (3) すくい面に中粘度のOil-20、逃げ面に(水+油)型のOil-8をそれぞれ供給することで工具逃げ面温度は乾式と比較して140°C~150°C程度低下し、個々の油を単体で用いた場合よりも優れた冷却効果を持つことがわかった。

## 学位論文審査結果の要旨

当該学位論文に関し、平成21年2月2日に第1回学位論文審査会を開催し、提出された学位論文および関連資料について詳細に検討した。更に、平成21年2月3日の口頭発表後、第2回審査委員会を開催し、慎重に協議した結果、以下の通り判定した。

本論文は、極微量の切削油をミスト状にして切削点に供給する MQL(Minimum Quantity Lubrication)加工の有効性を明らかにしたものである。まず、MQLの冷却効果を定量的に評価するため、旋削加工においてその測定が極めて困難であった切削温度を“非接触ファイバカプラ型2色温度計”という斬新な方法を提案して実測に成功している。そして、切削温度、切削抵抗、仕上げ面性状および工具損耗形態を詳細に検討することによって、MQL旋削における最適なオイルミストの流量、油滴径とその分布および供給方法を明確にし、これまで評価が定まっていなかった MQL 旋削の有効性を実証している。さらに、工具すくい面および逃げ面におけるオイルミストの作用形態を個別に明らかにし、それぞれ異なった特性をもつ油剤を独立に供給する革新的な“複合オイルミスト供給法”とそのための“マルチノズルツール”を提案し、その有効性を示している。

以上のように、本論文は工学の分野に対する貢献度が高く、また学術的価値が高いと評価でき、その内容は博士(工学)論文に値すると判定する。