



# 旋削加工におけるMQLの効果\*

— ファイバ連結型2色温度計を用いた工具刃先温度の測定 —

細川 晃\*\* 小澤匡史\*\*\* 田中隆太郎\*\* 古本達明\*\* 上田隆司\*\*

Effect of Minimum Quantity Lubrication on Turning Characteristics

— Measurement of Tool Flank Temperature in Turning Using Fiber-Coupled Two-Color Pyrometer —

Akira HOSOKAWA, Masahito OZAWA, Ryutarō TANAKA, Tatuaki FURUMOTO and Takashi UEDA

In this paper, the MQL turning of two types of ferrous metals: chromium-molybdenum steel SCM440H and pearlite malleable cast iron FCMP: is dealt with. The appropriate generating system of oil mist is constructed and the specified turning tool with oil hole is used. In order to verify the cooling effect of MQL, the tool temperature at the flank face is measured using a newly assembled fiber-coupled two-color pyrometer. In this new technique, a sensing fiber is inserted into a small hole that extends to the outer surface of the tubelike workpiece and it rotates with the workpiece. The thermal radiation accepted by a sensing fiber is noncontactly transmitted to the other fixed fiber and led to the two-color detectors. As for cutting force in turning of SCM440H, MQL is more effective in low cutting speed below 100 m/min. The tool temperature in MQL turning is approximately 100°C lower than that in dry turning over the wide range of 30–300 m/min. In the case of FCMP, the tool temperature in dry turning at a cutting speed of 600 m/min reaches as much as about 1040°C, but it drops 920°C in MQL turning.

**Key words :** MQL, oil mist, cutting temperature, turning, two-color pyrometer

## 1. 緒 言

旋削加工においては、工具寿命の延長、仕上げ面粗さの改善、加工精度の向上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、近年、地球環境への配慮や切削液の処理、コスト低減などの理由から、切削液を使用しない乾式切削や極微量の切削液を用いるセミドライ加工への移行が進められている<sup>1)2)</sup>。このうち、乾式切削は切削温度が極めて高くなるためその適用には自ずと限界があり、研究の主眼は耐熱性工具の開発に置かれている。そのため、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) 切削が注目され、高能率化への期待が高まっている<sup>3)4)</sup>。

このような背景の下、MQL加工について多くの研究が行われており、例えば、エンドミル加工においては工具摩耗の抑制に効果的なオイルミストの噴射方向を示した研究<sup>5)</sup>、ドリル加工におけるMQLの有効性を示した研究<sup>6)7)</sup>、さらにはMQL溝入れ加工における刃先近傍の流体解析から工具摩耗の抑制に及ぼす流れ場の影響を検討した研究などがある<sup>8)</sup>。一方、本研究が対象としている旋削加工については主として仕上げ面粗さや工具摩耗の面から検討したものが多く<sup>9)–12)</sup>、一定の効果があることが報告されている。しかしながら、著者らの研究も含め、旋削などの連続加工ではオイルミストが加工点に供給されにくくMQLの効果が小さいという報告もあり<sup>13)</sup>、その有効性については必ずしも評価が定まっていない。また、工具損耗に直結する工具冷却効果についても、切削温度測定が容易でないなどの理由により、詳細な研究は少ないようである。

そこで本研究では、旋削加工におけるMQLの効果を実証するため、機械的特性が異なる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)を対象に、MQL加工の潤滑・冷却効果を詳細に検討している。著者らのこれまでの研究<sup>13)</sup>より、MQL切削ではオイルミスト流量、油滴径、供給方向などによってその効果が大きく左右されることから、ここではミストホール付きのMQL専用工具を使用してミスト噴霧状態の安定化を図るとともに<sup>14)</sup>、効果的なオイルミスト供給システムの構築も行っている。さらに、新しい試みとして、回転する工作物内部から工具逃げ面温度の測定を行う方法を提案し、切削温度に及ぼすMQLの冷却効果をより総括的に検討している。

## 2. MQL旋削システム

### 2.1 オイルミスト発生装置とミストホール付バイト

本研究で用いたオイルミスト発生装置を図1に示す。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(㈱荏原エコミスト ZELS MBM02)に供給される。表1にオイルミストの生成条件を示す。

ところで、前述したように、MQL切削ではオイルミストの噴霧位置(ミストの供給方向やノズルからの距離)によってミストの供給効果が大きく変化する。特に、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<sup>13)</sup>、効果的な供給方法が必要とされる。そこで本実験では、ミストホール付きMQL専用バイト(EBtool, フジBC技研㈱)を使用した。図1に示すように、この工具は前逃げ面およびすくい面の両方にピンポイントでオイルミストが供給される構造になっている。実際に噴霧される油滴の量や大きさは、オイルミストの搬送経路(長さ、断面形状)やノズル出口の断面積などによって変化する。

### 2.2 オイルミスト流量とミスト粒径

一般に、MQL加工における油剤の供給量は1~50 ml/h程度であるとされているが<sup>4)</sup>、旋削加工のような連続切削において有

\* 原稿受付 平成20年2月1日

\*\* 正会員 金沢大学大学院自然科学研究科(金沢市角間町)

\*\*\* 学生会員 金沢大学大学院自然科学研究科(金沢市角間町)

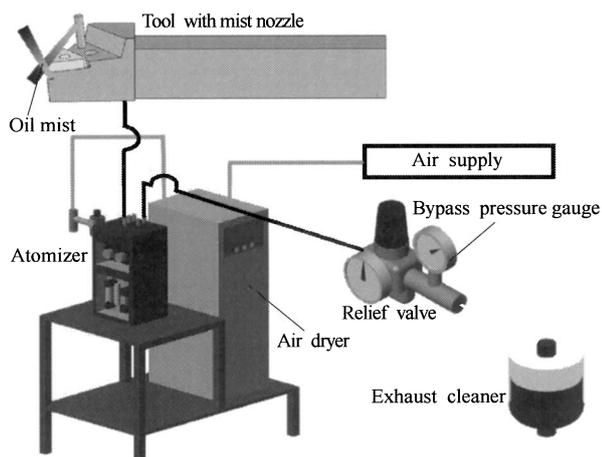


Fig.1 Generating system of oil mist connected to specified turning tool holder with oil hole

Table 1 Supply conditions of oil mist

Atomizer	Ebara Ecomist ZELLS MBM02
Air pressure	0.7 MPa
Mist pressure	0.6 MPa
Bypass pressure $p_b$	0 - 0.1 MPa
Oil	Vegetable oil

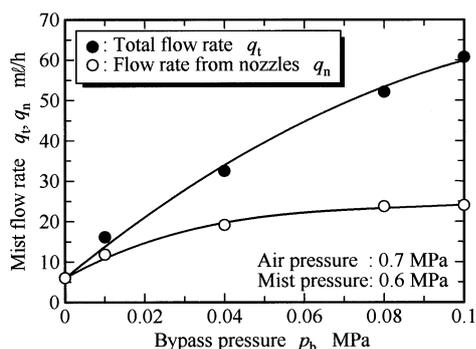


Fig.2 Influence of bypass pressure on oil mist flow rate

意な冷却効果を期待するとすると、数十 ml/h 程度の流量は確保する必要がある<sup>13)</sup>。また、圧縮空気とともに吹き付けるため、工具や工作物に付着して潤滑膜として作用するためには、ある程度大きな油滴径にして吐出させる必要がある。本節では、ミスト流量を調節する方法を検証するとともに、実際にノズルから発生するミスト粒径について検討を加えている。

後述するが、バイト内のミストホールは断面積が小さいため、オイルミストの流れが抑制されており十分な流量が得られない。そこで、図1に示すように、ミスト噴霧装置にバイパス回路を構築し、バイパス圧力を調整することによってミスト濃度の改善を図っている。なお、バイパス回路からオイルミストが大気に解放される手前にはエキゾーストクリーナを設置して清浄化を行っている。

図2にバイパス圧力  $p_b$  とミスト流量の関係を示す。流量測定はミストホール付きバイトを密閉したアクリル容器内に格納し、容器の重量変化を測定することで流量を算出している。図にみるように、バイパス回路がない場合にはミスト流量は6 ml/h 程度であるが、リリーフ弁を開放してバイパス圧力を上げることによって流量が増加し、 $p_b=0.1$  MPa でバイトからの吐出量  $q_n$  は25 ml/h に達している。ミスト流量の効果については第4章

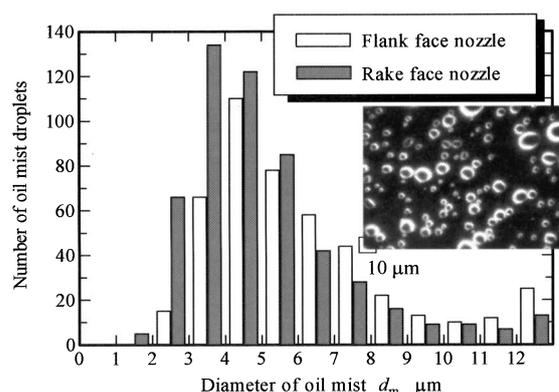


Fig.3 Diameter distributions of oli-mist droplets

Table 2 Characteristics of fiber-coupled two-color pyrometer

Two-color detector	Photovoltaic (InAs, InSb)
Detectable wavelength	InAs: 1 - 3 $\mu\text{m}$ InSb: 3 - 6 $\mu\text{m}$
Optical fiber	Chalcogenide glass
Core diameter	Rotary: 400 $\mu\text{m}$ Fixed: 500 $\mu\text{m}$
Numerical aperture	NA=0.4
Frequency response	400 kHz

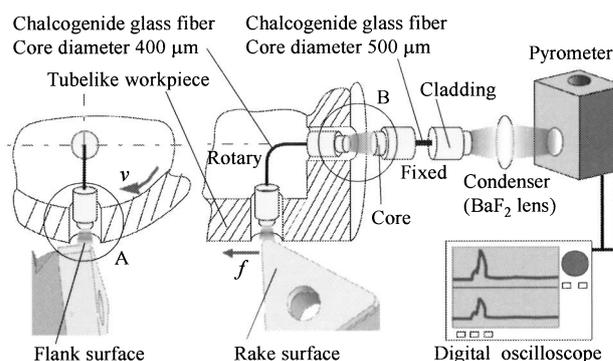


Fig.4 Structure of fiber-coupled two-color pyrometer equipped for turning

に示しているが、 $q_n=6$  ml/h と 25 ml/h では切削抵抗、仕上げ面粗さおよび切削温度に明確な違いが表れている。したがって、以降の切削実験はすべて  $q_n=25$  ml/h ( $p_b=0.1$  MPa) で行った。

図3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。ミスト採集方法の詳細は省略するが、極短時間にガラスプレートに付着した油滴を顕微鏡で撮影して粒径を測定したものである(図中の顕微鏡写真参照)。なお、ミストの採集は逃げ面とすくい面側両方から噴霧した状態で行っており(片方をマスキングすることはしない)、切削時と同じ状態である。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おり、前者が3~8  $\mu\text{m}$ 、後者が2~6  $\mu\text{m}$  の範囲に集中している。また、油滴の総数より判断して、流量はすくい面側がやや多いものの、ほぼ均等に噴射されていると言える。大量の圧縮空気とともに噴射されるため、2  $\mu\text{m}$  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。

### 3. 光ファイバ連結型2色温度計による工具温度測定法

MQL切削におけるミストの冷却効果を論じるためには、切削温度の測定が不可欠である。旋削加工においては工具-工

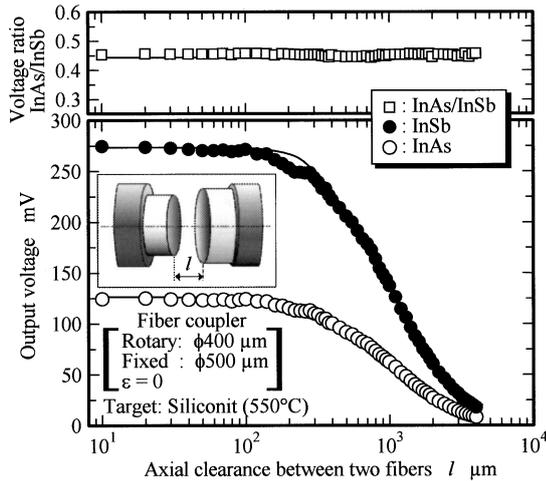


Fig. 5 Influence of axial displacement between two fibers on outputs of fiber-coupled two-color pyrometer

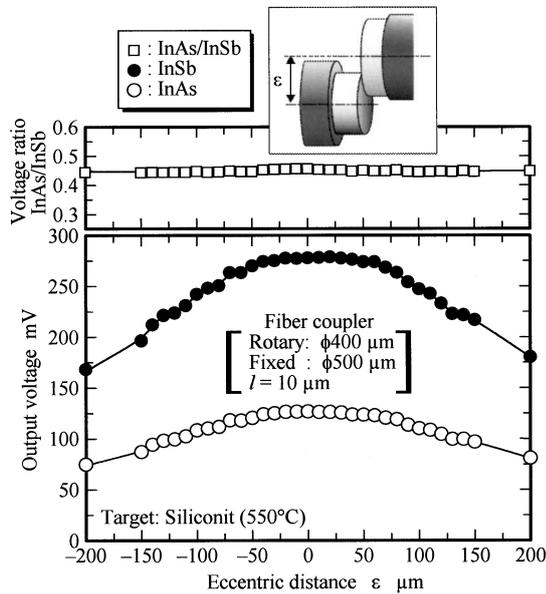


Fig. 6 Influence of transverse displacement between two fibers on outputs of fiber-coupled two-color pyrometer

作物熱電対法によって切削点の温度を測定する方法が一般的であるが、セラミック工具やコーティング工具などの非電導体工具には適用できない。そのため、著者らは工具のすくい面近傍まであけた小孔に光ファイバを挿入し、工具を透過した赤外線を受光することによって工具すくい面の温度を測定した<sup>13)</sup>。しかし、この方法も光透過性のある工具に限定される。著者らはこれまで、光ファイバ型2色温度計を開発し、エンドミル加工やドリル加工における温度測定に適用している<sup>7)15)</sup>。これらの方法は工作物加工表面まであけた測定孔に光ファイバを挿入し、測定孔上部を通過する工具の温度を測定するため、工作物が回転する旋削加工に適用するのが難しい。

そこで本研究では、佐藤らが考案した光ファイバ連結型放射温度計の原理を利用して工具逃げ面温度を測定した<sup>16)</sup>。この方法は、回転型光カプラによって非接触で光(ふく射エネルギー)を伝送するものである。

### 3.1 温度計の構造と旋削加工への適用

図4にファイバ連結型2色温度計の構造を示す。測定対象物からふく射された赤外線を光ファイバで受光し、2色素子に伝

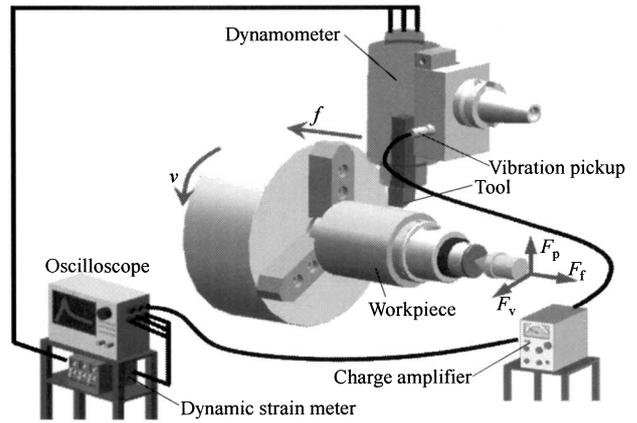


Fig. 7 Schematic illustration of experimental setup

Table 3 Experimental conditions

Workpiece: SCM440H (350HV0.5)	
Cutting tool	TNGM 160408 Nose radius: 0.8 mm, Rake angle: -6° 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° Insert: Alumina ceramics
Cutting speed	$v = 100\text{--}600$ m/min
Depth of cut	$a = 0.15$ mm
Feed	$f = 0.15$ mm/rev

送して温度を測定する。2色素子とは感度波長域の異なる2つの光電素子を積層構造にしたもので、本温度計はInAsとInSbから構成されている。温度は両素子の出力信号比から求めるため、原理上温度計の測定精度が測定物体のふく射率に依存しない特長を持っている<sup>15)</sup>。

図4に示すように、厚肉円筒状の工作物の1箇所半径方向に貫通する測定孔( $\phi 1.1$  mm)をあけ、コア径400  $\mu\text{m}$ のファイバ-1(回転ファイバ)を挿入する(図4-A部)。ファイバ-1の一端は工作物端面の中心軸にあけた小孔に挿入されている(図4-B部)。したがって、このファイバ-1は工作物とともに回転することになる。一方、コア径500  $\mu\text{m}$ のファイバ-2(固定ファイバ)は、ファイバ-1と軸心が一致するように僅かな間隙(50  $\mu\text{m}$ 程度)をあけて工作物端面の外側に固定され(図4-B部)、その他端は温度計に導かれている。この図4-B部が非接触光カプラであり、工作物(ファイバ-1)が回転してもファイバ-1から出射される光をファイバ-2で受光することが可能になる。すなわち、旋削時に測定孔の上部を切れ刃が通過するとき、工具逃げ面からふく射される赤外線を受光して温度を測定する。表2に2色温度計の仕様を示す。

### 3.2 温度計の特性

非接触光カプラは、原理上2つのファイバの軸心が一致し、両者の距離も一定が前提となっている。エネルギーを受け取る側のファイバ-2のコア径を大きくしたり、振れ回り精度にすぐれた軸受けを組み込んでカプラを製作しているが、ファイバが工作物内部にあるため、切削時において両ファイバの位置関係が変動することも考えられる。そこで、本節では、両ファイバ間の距離 $l$ および軸ずれ $\epsilon$ の影響を実験的に調べている。

図5は光カプラ内の両ファイバ間距離の影響を調べた結果である。図にみるように、ファイバ間の距離  $l$  がおよそ  $100 \mu\text{m}$  までは素子の出力が低下しておらず、伝送エネルギーに損失はないものと考えられる。 $l$  がそれ以上大きくなると両素子の出力は減少するが、出力比はすべての範囲でほぼ一定値を示していることがわかる。本実験では  $l = 50 \mu\text{m}$  に設定しており、 $l$  の影響はないものと考えられる。

一方、図6は両ファイバの軸ずれ  $\varepsilon$  の影響を調べた結果である。これはファイバ間距離  $l = 10 \mu\text{m}$  の場合であるが、ファイバ-1のコア断面 ( $\phi 400 \mu\text{m}$ ) がファイバ-2のコア ( $\phi 500 \mu\text{m}$ ) 断面をはみ出さない範囲である  $\varepsilon = \pm 50 \mu\text{m}$  程度までほぼ一定の出力が得られているのがわかる。さらに  $\varepsilon$  を増加させると出力電圧は低下するが、出力比に関しては図5と同様に  $\varepsilon$  に関係なくほぼ一定の値が得られている。

以上の結果から、旋削加工時においてファイバカップリング部に多少の偏心やファイバ間距離の変動があったとしても、温度計の精度に影響しないことが確認された。

#### 4. MQL旋削加工実験

##### 4.1 実験方法および実験条件

MQLの効果を検証するため、旋削加工における切削抵抗、仕上げ面粗さおよび工具逃げ面温度の測定を行った。実験には複合加工機(オークマ製, Mac Turn30)を用いた。図7に示すように、切削抵抗はひずみゲージ式3分力動力計(サトーマシナリー製, AST-TTH)を用い、主分力  $F_v$ 、背分力  $F_p$  および送り分力  $F_f$  を測定した。

工作物として、被削性が比較的大きく異なる2種類の鉄系材料(クロムモリブデン鋼: SCM440H, パーライト可鍛鋳鉄: FCMP)を選び、前者は  $30 \sim 300 \text{ m/min}$  の低～中切削速度域、後者は  $100 \sim 600 \text{ m/min}$  の中～高切削速度域を検討範囲としている。工具はそれぞれ異なり、SCM440HにはTiCN-コーティングサーメット工具、FCMPにはアルミナセラミック工具を選定した。なお、実験は3分間捨て切削し、工具が安定摩耗域に入った後に行っている。表3に主たる実験条件を示す。

##### 4.2 工具逃げ面温度の測定

図4に示すように、実験ではファイバを工作物にかけた貫通穴 ( $\phi 1.1 \text{ mm}$ ) に挿入して穴上部を通過する工具逃げ面の温度を測定する。今、送りを  $f = 0.3 \text{ mm/rev}$  とすると、計算上工具は穴上部を  $1.1 / 0.3 \approx 3$  回程度通過することになる。しかしながら、ファイバは受光角内の光を感知すること(図4参照)、工作物と接触する刃先部より大きい範囲で温度が上昇すること、すくい面近傍に切りくずが存在することなどにより、工具が穴上部を通過する前後を含め多くのパルスが観測される。そこで、図7に示すように、切削動力計を固定しているバイトホルダに加速度ピックアップを取り付け、工具が穴を通過して再切削する瞬間の振動を検知して、温度計からの信号を同定している。

図8は実験時に観測される温度計と振動波形の一例を示したもので、上から(a)InAs-素子、(b)InSb-素子、(c)加速度ピックアップの信号である。図にみるように、加速度ピックアップの信号は穴の部分を通じたときのみ観測されていること、温度計の波形と同期していることがわかる。図8-(d)は一つの波形を拡大したのものであるが、工具逃げ面からの熱ふく射パルスを感じた直後に加速度信号が観測されていることが確認できる。以上の結果より、加速度信号と同時に測定された2色素子の出力(1~3パルス)から工具逃げ面の温度を算出している。

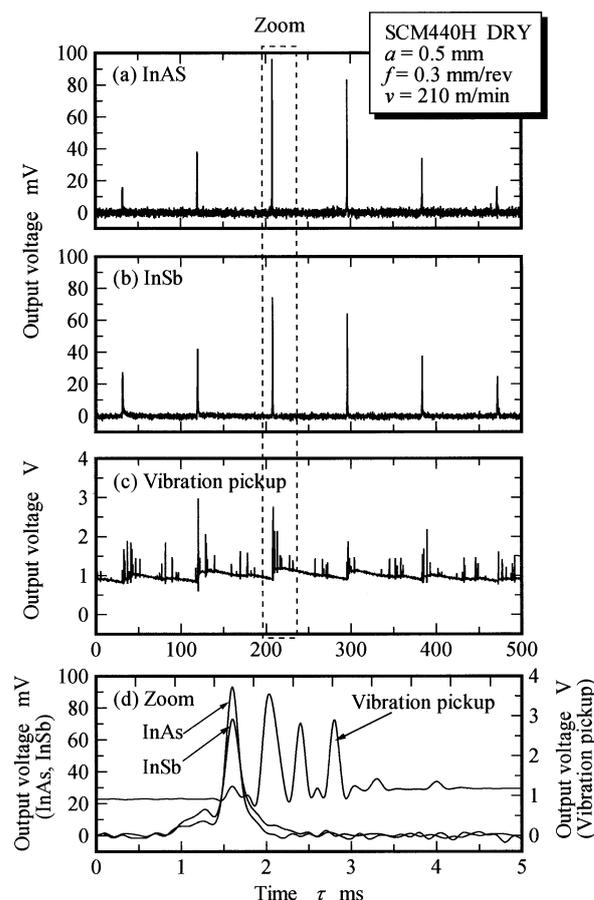


Fig.8 Identification of tool flank temperature in turning

##### 4.3 実験結果

###### 4.3.1 クロム-モリブデン鋼

図9に切削速度  $v$  を  $30 \text{ m/min}$  から  $300 \text{ m/min}$  まで変化させた時のSCM440Hの乾式およびMQLの切削抵抗測定結果を示す。図にみるように、切削速度の上昇とともに切削抵抗が減少しているのがわかる。特に、 $v$  が  $30 \text{ m/min}$  から  $100 \text{ m/min}$  の間で急速に低下し、 $100 \text{ m/min}$  を超える高速域ではほぼ安定した切削状態を維持している。MQLの効果については、主分力  $F_v$  および背分力  $F_p$  で顕著にみられ、特に低切削速度域でオイルミストによる動力低減効果が表れている。これは低温域で発生しやすい切りくずの凝着がオイルミストによって抑制されていることが考えられる。図は省略するが、 $v$  と切りくず厚さの関係も図9と同様な傾向を示し、高切削速度域およびMQL切削でせん断角が増大している。このことは、切りくずが折れにくくなり、切りくず処理性という点では若干課題も出ようが、本実験では特に問題は生じなかった。

一方、図10は仕上げ面粗さ(中心線平均粗さ  $R_{a75}$ , 最大高さ  $P_t$ ) と切削速度  $v$  の関係である。粗さは工作物長手方向に測定した5カ所の平均値である。MQL方式については、通常のMQL切削であるミスト流量  $q_m = 25 \text{ ml/h}$  に加え、 $q_m = 6 \text{ ml/h}$  の結果も併せて示している。乾式、MQLにかかわらず、 $v$  の上昇とともに仕上げ面が良好になっている。これは、 $v$  の増大によって加工点の温度が上昇し、安定した連続的な切りくずが生成された結果と考えられる。また、明らかにMQLの効果がみられ、乾式に比較して仕上げ面粗さが大きく改善されていることがわかる。そして、その効果は切削抵抗が乾式とそれほど変わらな

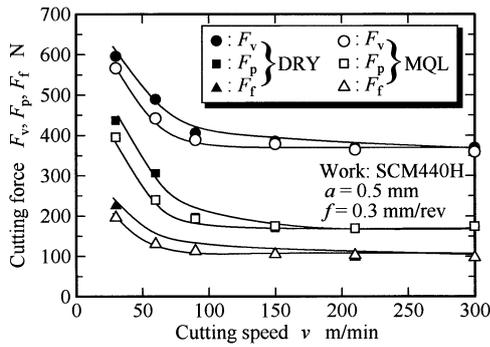


Fig.9 Effect of MQL on cutting forces in turning of chrome-molybdenum steel

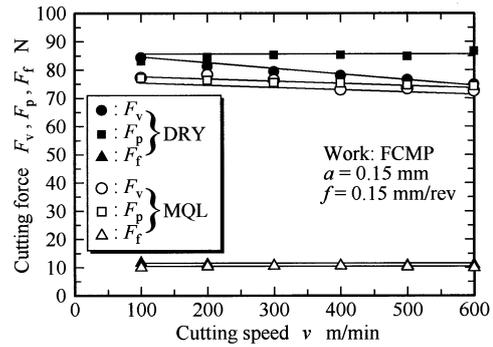


Fig.12 Effect of MQL on cutting forces in turning of pearlite malleable cast iron

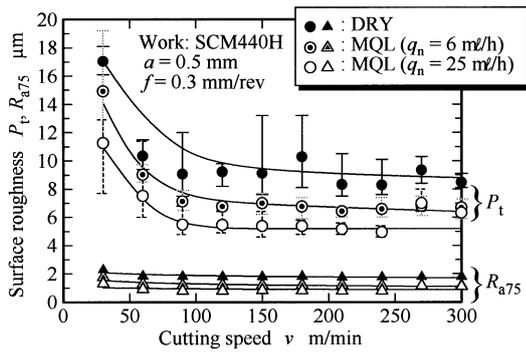


Fig.10 Change of surface roughness with cutting speed in dry and MQL turning of chrome-molybdenum steel

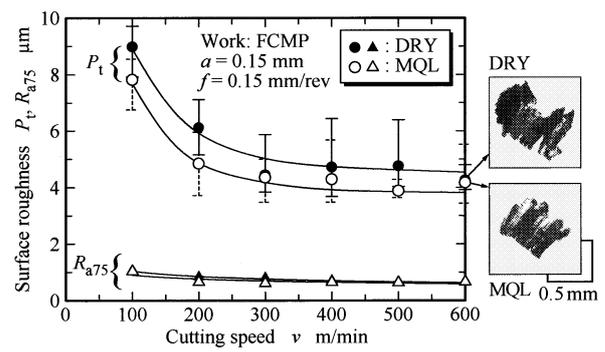


Fig.13 Change of surface roughness with cutting speed in dry and MQL turning of pearlite malleable cast iron

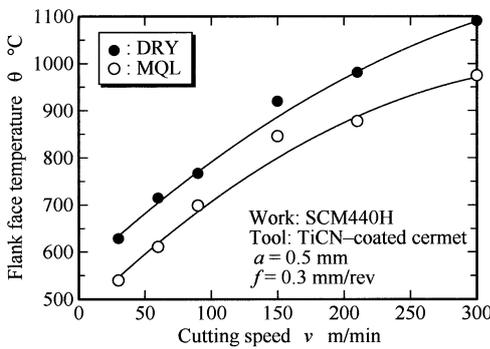


Fig.11 Effect of MQL on tool flank temperature in turning of chrome-molybdenum steel

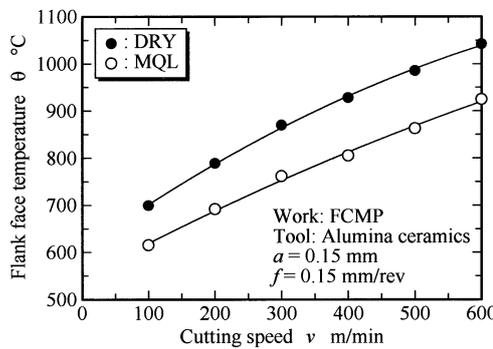


Fig.14 Effect of MQL on tool flank temperature in turning of pearlite malleable cast iron

い  $v=100$  m/min 以上の高速域にまで及んでいる。特に  $P_t$  に着目すると、粗さのばらつきが小さく加工が安定していることが推察される。さらに、オイルミストの供給量の影響も顕著に表れており、旋削加工では数 ml/h 程度の極微量の供給では効果が小さいと言える。

以上の結果より、凝着物の付着しやすい低速域ではオイルミストによって凝着を抑制することで切削抵抗が減少すること、さらに全切削速度領域でオイルミストの潤滑作用によって仕上げ面性状が改善されることがわかる。

図 11 は乾式と MQL において工具逃げ面温度を切削速度との関係で比較したものである。図にみるように、切削速度の増加とともに乾式ではおよそ  $630^{\circ}\text{C} \sim 1090^{\circ}\text{C}$  と  $460^{\circ}\text{C}$ 、MQL では  $540^{\circ}\text{C} \sim 970^{\circ}\text{C}$  と  $430^{\circ}\text{C}$  程度工具温度が上昇している。すなわち、MQL 加工では低速から高速域まで  $100^{\circ}\text{C}$  程度工具温

度が低く抑えられており、切削液の使用量からすると、その効果は大きいと言える。例えば切削温度を  $700^{\circ}\text{C}$  とすると、乾式では  $v=50$  m/min、MQL では  $v=95$  m/min とほぼ 2 倍の加工能率を得ることができ、切削抵抗も小さくなる(図 9 参照)。

以上の結果より、クロム-モリブデン鋼の旋削において、オイルミストの潤滑・冷却の両作用が確認でき、MQL 加工によって工具の長寿命化が期待できる。なお、工具摩耗については、逃げ面側およびすくい面側からのオイルミストの個々の作用機構とともに、次報で報告する予定である。

#### 4.3.2 パーライト可鍛鋳鉄

図 12 に切削速度  $v$  を  $100$  m/min から  $600$  m/min まで変化した時の FCMP の乾式および MQL の切削抵抗測定結果を示す。SCM440H の場合と異なり、切削速度によらず切削抵抗はあまり変化していないが、乾式に比べ、MQL 切削によって切

削抵抗, 特に  $F_v$  と  $F_p$  が低下していることがわかる. FCMP は細かい不連続型切りくずを発生して比較的被削性が良好なため, すくい面上にオイルミストが供給されやすく, 全体的に切削抵抗が改善されたものと考えられる.

図13は仕上げ面粗さ ( $R_{a75}, P_t$ ) と切削速度  $v$  の関係である. 送り速度  $f$  が小さいため SCM440H に比べ全体的に粗さは小さくなっているが, SCM440H と同様の傾向がみとれ,  $v$  の上昇によって  $P_t$  とそのばらつきが小さくなっていることがわかる. また, オイルミストの供給効果も 100 m/min から 600 m/min まですべての切削速度域でみられ, MQL 切削が有効であることがわかる. FCMP の場合 SCM440H のように連続型切りくずが生成されないため, せん断角の変化を算出することはできないが, 図中に示した切りくずの写真から, 高切削速度域の MQL 切削で加工が安定していることが推察される.

図14は乾式と MQL において工具逃げ面温度を切削速度  $v$  との関係で比較したものである.  $v=100 \sim 600$  m/min 範囲でみると, 乾式ではおよそ  $700^\circ\text{C} \sim 1040^\circ\text{C}$ , MQL では  $615^\circ\text{C} \sim 920^\circ\text{C}$  となっている. すなわち, オイルミストの供給によって工具温度が  $100 \sim 120^\circ\text{C}$  程度低下しており, その冷却効果は高切削速度域で若干大きいことがわかる. 図12の切削抵抗の結果と併せて考察すると, MQL 加工によって工具寿命が増大することが推察される. なお, FCMP 切削時の工具摩耗については, 加工量の増加にともなう形状精度の変化の面から検討し, 次報で報告する予定である. 以上の結果より, パーライト可鍛鉄の旋削においても, MQL 加工の潤滑・冷却の両作用が確認できた.

## 5. 結 言

ファイバ連結型 2 色温度計を利用して円筒外周切削時の工具逃げ面温度を測定し, 旋削加工における MQL 加工の冷却・潤滑効果を実験的に検討した. その結果, 機械的特性が異なる 2 種類の鉄系材料 (クロムモリブデン鋼, パーライト可鍛鉄) に対し, MQL 加工の効果が確認された. 以下に結果をまとめる.

- (1) 旋削加工のような連続切削において有意な MQL の効果を出すためには, 25 m/h 程度のオイルミスト流量が必要である. また, 大量の圧縮空気とともに吹き付けたオイルミストが工具や工作物に付着して潤滑膜として作用するためには, ある程度大きな油滴径が必要である.
- (2) バイト内にミストホールを有するミストノズル一体型バイトは, 工具の逃げ面とすくい面にオイルミストを効果的に供給することができ, 比較的安定した冷却および潤滑効果を示す. この一体化ノズルから供給されるオイルミストの粒径はおよそ  $2 \sim 8 \mu\text{m}$  であった.
- (3) ファイバ連結型 2 色温度計を用いることで, 旋削加工における工具逃げ面温度の測定が可能になった. すなわち, 厚肉円筒状の工作物内部から加工表面まであけた測定孔に挿入した光ファイバ (回転ファイバ) が工具逃げ面からの赤外線を受光し, 僅かな間隙をあけて同軸上に配置したファイバ (固定ファイバ) に伝送する方法である.
- (4) クロム-モリブデン鋼 (SCM440H) の切削では, 切削速度  $v$  が 100 m/min 以下の領域で MQL の潤滑効果が顕著に

なり, 乾式切削に比べて切削抵抗が  $10 \sim 20\%$  程度減少する. 一方, 仕上げ面粗さと工具逃げ面温度は  $v=30 \sim 300$  m/min すべての領域にわたって MQL の効果がみられ, 工具逃げ面温度はおよそ  $100^\circ\text{C}$  低下する. 切削抵抗と切削温度を同程度に保ちながら切削するとすれば, MQL 加工によって加工能率を大きく改善することが可能である.

- (5) パーライト可鍛鉄 (FCMP) の場合, 不連続型切りくずが生成するためすくい面上にオイルミストが供給されやすく, 切削速度に関わらず切削抵抗が減少する. 同様に, 仕上げ面粗さと工具逃げ面温度も  $v=100 \sim 600$  m/min すべての速度域でにわたり MQL の効果がみられる. 工具逃げ面温度は乾式に比べおよそ  $100 \sim 120^\circ\text{C}$  低下し, その冷却効果は高切削速度域で若干大きい.

## 謝 辞

本研究の遂行にあたり, 複合加工機をご寄贈いただいたオークマ株式会社ならびに MQL 切削オイルをご提供いただいた株式会社荏原エコミストに深謝する.

## 参 考 文 献

- 1) 松原十三生: 環境対応加工技術の現状と課題, 精密工学会誌, **68**, 7 (2002) 885.
- 2) 笹原弘之: オイルミスト供給エンドミル加工, 精密工学会誌, **68**, 7 (2002) 895.
- 3) 鈴木康夫: ミスト切削加工技術の最新動向, 機械の研究, **53**, 12 (2001) 33.
- 4) 峯川洋己, 稲崎一郎, 中村誠, 鈴木繁, 上間丈司, 横田秀雄: 極微量切削液供給法による切削加工 — フライス加工に関する基礎的研究 —, 日本機械学会論文集 (C), **66**, 646 (2006) 324.
- 5) 笹原弘之, 水谷文則, 堤正臣: オイルミスト供給によるエンドミル加工時の工具摩耗への影響, 精密工学会誌, **66**, 1 (2000) 80.
- 6) 横山 正, 関谷克彦, 山田啓司, 山根八州男: ドリル加工における MQL の効果 (第 1 報) — 加工穴の特徴 —, 精密工学会誌, **73**, 2 (2007) 232.
- 7) Ueda, T., Nozaki, R., Hosokawa, A.: Temperature Measurement of Cutting Edge in Drilling — Effect of Oil Mist —, Annals of the CIRP, **56**, 1 (2007) 93.
- 8) 釜田康裕, 帯川利之: MQL 溝入れ加工におけるミストの流れと工具摩耗, 精密工学会誌, **71**, 6 (2005) 734.
- 9) 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), **62**, 604 (1996) 272.
- 10) Dhar, N.R., Kamruzzaman, M., Ahmed, M.: Effect of Minimum Quantity Lubrication (MQL) on Tool Wear and Surface Roughness in Turning AISI-4340 steel, Journal of Materials Processing Technology, **172**, (2006) 299.
- 11) Dhar, N.R., Ahmed, M.T., Islam, S.: An Experimental Investigation on Effect of Minimum Quantity Lubrication in Machining AISI-1040 steel, International Journal of Machine Tools & Manufacture, **47**, (2007) 748.
- 12) 陳 徳 成, 鈴木康夫, 酒井克彦: 複合ミスト供給法による旋削加工の研究, 精密工学会誌, **67**, 6 (2001) 922.
- 13) Ueda, T., Hosokawa, A., Yamada, K.: Effect of Oil Mist on Tool Temperature in Cutting, Trans. ASME, **128**, (2006) 130.
- 14) Ozawa, M., Hosokawa, A., Tanaka, R., Furumoto, T., Ueda, T.: Minimum Quantity Lubrication Turning of Ferrous Metals — Measurement of Tool Temperature Using Fiber-Coupled Two-Color Pyrometer —, Proc. 4th Int. Conf. on LEM21, (2007) 339.
- 15) 細川 晃, 岡田将人, 北川修介, 田中隆太郎, 上田隆司: cBN 工具によるハードミリング — 高速エンドミル加工に関する研究 (第 2 報) —, 精密工学会誌, **73**, 2 (2007) 226.
- 16) 佐藤昌彦, 上田隆司, 田中久隆: ファイバ連結型熱放射温度計によるバインダレス cBN エンドミル加工温度の測定, 精密工学会誌, **71**, 11 (2005) 1437.