オイルミスト供給による高速エンドミル加工時の 工具摩耗への影響*

笹原 弘之** 水谷 文則*** 堤 正 臣†

Effects of Oil-Mist Supply on Tool Wear at High-Speed Milling

Hiroyuki SASAHARA, Fuminori MIZUTANI and Masaomi TSUTSUMI

Oil-mist lubrication system supplies very small quantity of oil with compressed air to endmill from a nozzle. Vegetable oil without any harmful substance is used in this paper. Thus troubles such as environmental pollution or deterioration of working environment caused by using large amount of cutting fluid are hardly caused by using this lubrication method. In this paper, this oil-mist lubrication is applied to high-speed milling of S45C steel in which cutting speed is over 2000 m/min. Then effects of its lubrication on tool wear are discussed. As a result of cutting tests, by using proposed oil-mist lubrication, tool wear becomes small compared with the case of no lubrication if cutting speed is lower than 750 m/min under the settled cutting conditions. It was also clarified that oil-mist supplying position affects tool wear. Tool life becomes longest when oil-mist is supplied at the disengage point in milling. And tool wear suppression effect of oil-mist becomes larger if the quantity of oil supplied from the pump increases up to 0.5mL/min. But tool wear rate doesn't become small if more quantity of oil-mist is supplied.

Key words: cutting, tool wear, minimum quantity lubrication, oil-mist lubrication, high-speed milling, MQL

1. 緒 言

切削油剤は、切りくず排出作用や冷却・潤滑作用を確保するために用いられ、必要な加工精度や仕上げ面粗さを確保し、工具寿命を延長するために必要な場合が多い。しかし、近年の環境問題への関心の高まりに伴い、切削油剤の使用による作業環境の悪化や、使用後の切削液の廃棄処理費用の増加が問題となり、切削油剤を用いない加工^{2,3)}や、微量の切削油剤を圧縮空気とともにオイルミストとして供給する加工^{4,5)}が注目されている。

オイルミストの供給により潤滑と冷却の効果が作用すれば工具寿命の延長が期待され、旋削の場合については冷却作用、潤滑作用とも機能していることが報告されている⁶⁾。しかし、機械加工にオイルミスト供給を適用することに関する研究や実用化の歴史は浅く、断続切削となるエンドミル加工やオイルミストの供給が容易ではないドリル加工といった加工法ごとの特性の差異、スピンドルスルーあるいは外部ノズルといった供給方法やその供給位置による影響、工具材や被削材の組合せによる有効な切削条件の設定など、効果的な利用に関して不明な点が多い。

一方、高速加工機が開発され、生産性向上のため高速エンドミル加工に対する関心が高まっている⁷⁾。そこで本研究では、切削速度2000m/minまでの鋼の高速エンドミル加工を対象とし、オイルミストの供給方法による工具摩耗への影響について検討することを目的とする。本研究では、外部ノズルよりオイルミストを供給する方法を採ったが、ノズルの設置位置により工具摩耗に差が生じた。また、切削油剤を用いない場合に比べ、オイルミストの供給により、S45Cのエンドミル加工において切削速度750m/min程度までは工具寿命延長の効果がみられたの

Fig. 1 Oil-mist supply system

で報告する。

2. オイルミストの供給と工具への付着量

図1に本研究で用いたオイルミスト発生装置の概略を示す。コンプレッサで発生した圧縮空気はエアドライヤを経てオイルミスト発生装置(TACO(株)MCA)に導かれ、ここで発生したオイルミストと混合し管を経てノズルより噴出する。オイルミストは一定間隔でポンプが作動することにより供給され、その量は0.1～2.0mL/minの範囲で設定することができる。生成したオイルミストのうち直径の大きなものは重力で油槽に戻り、直径2μm前後のミスト状の油滴が吐出される⁸⁾。また、オイルミスト発生装置から噴出ノズルまでは内径6mm、長さ3mの管で接続されており、オイルミストが管の内壁に付着し直ちにはノズルから噴出されない分も想定される。そこでまず、オイルミスト発生装置からパイプ、ノズルを経て速やかに吐出されるオイルミストをろ紙に吸着させその重量変化を測定した。ろ紙は直径60mmの円形で、ノズル先端から10mmの位置に設置した。なお、本研究では油剤には塩素やりんなどを含まない植

* 原稿受付 平成11年6月1日

** 正会員 東京農工大学工学部(小金井市中町 2-24-16)

*** 学生会員 東京農工大学大学院(現、ホンダエンジニアリング(株); 栃木県芳賀郡芳賀町芳賀台6-1)

† 正会員 東京農工大学大学院

Fig. 2 Relationship between oil supply and output quantity

Fig. 3 Measurement of oil quantity spread on rotating tool

Fig. 4 Nozzle positions

Fig. 5 Oil-mist quantity spread on rotating tool at different nozzle positions

物油脂⁷⁾を用いた。また、ノズル出口直径は2.0mmとし、圧縮空気⁸⁾の流量は120NL/min、吐出圧力は0.35～0.4MPaとした。

図2にオイルミスト発生装置のポンプからのオイル供給量に対する、実際にノズルから吐出されるオイルミスト量の関係を示す。オイル供給量が2.0mL/minで約1.5%、0.1mL/minで約6%が吐出オイルミストとして測定された。ろ紙に吸着せずに空気

Table 1 Experimental conditions	
Workpiece	S45C (HV270)
Tool	φ 16mm square end mill (throwaway type) Axial rake angle 5°, Radial rake angle 3-6°, TiN / TiC / TiN coated carbide, 1 tooth
Spindle speed min ⁻¹	10000, 15000, 20000, 40000
Cutting conditions	Radial depth of cut: 0.3 mm Axial depth of cut: 5.0 mm Feed rate: 0.1mm/tooth Down cut
Lubrication	Oil-mist with air, Air

中に飛散した分もあるが、油槽への戻りや管壁への付着などによりオイルミストとして吐出される量はポンプからの供給量に比べてかなり少なくなっていることがわかる。

実際のエンドミル加工時には、工具は回転しており、回転中のエンドミルへのオイルの付着量がどの程度確保されるのかが潤滑機能に影響すると考えられ、これは外部ノズルからの供給を行う場合には特に重要な問題である。そこで、高速回転中のエンドミルにオイルミストを噴出し付着量を調べた。図3に示すように、直径16mmのスローアウェイエンドミルのチップのすくい面上と、逃げ面側となるシャンク部とに6mm×8mmのろ紙を貼付し、回転中にノズルからオイルミストを吐出して、ろ紙の重量変化を測定した。なお、ノズルは水平面から30°傾け、図4に示すように3方向からの噴射について検討した。ダウンカットの肩削りを想定し、刃先が被削材に食いつく直前の位置をEn、刃先が被削材から離脱してから180°回転した位置をMd、刃先が被削材から離脱した直後の位置をExとする。

ノズルからの噴出や工具回転に伴う空気流れが実際の切削時に近い状況となるよう、工具を回転させたまま被削材に接する直前まで近づけ、送り停止して測定した。ノズル先端から工具までの距離は10mm、ポンプからのオイル供給量は2.0mL/minとした。図5に付着オイル量の測定結果を示す。まず、供給位置により差があり、同図(a)Enではすくい面側には付着量が特に少ない。これは、吐出方向が工具回転方向に対向していないためであると思われる。Ex、Mdではすくい面側、逃げ面側で付着量に大差はない。また、回転速度の変化によって付着量には多少のばらつきがあるが、40000min⁻¹までは極端に付着量が減少することはなかった。従って、高速回転する工具まわりの空気流に妨げられることなく、外部ノズルからの供給法でも工具へオイルの供給が可能であることがわかる。ただし、工具への付着量が多ければ、工具摩耗低減に有効であるという単純な関係にはないことを後述する。

3. 高速エンドミル加工時のオイルミスト供給の効果

上記のようなオイルミストを切削速度2000m/min程度までの高速エンドミル加工時に供給し、切削速度、オイルミスト量、噴射ノズルの位置による工具摩耗への影響について検討した結果を以下に示す。

3.1 切削速度による工具摩耗への影響

表1に示す条件でエンドミル加工を行い、工具逃げ面の最大摩耗幅の変化を調べた。切削速度は503m/min、754m/min、1005m/min、2010m/minと使用した工具の推奨条件より高く設定し、高速回転、高切削速度でのオイルミスト供給の効果を調べることをここでの目的としている。図6に実験の概略を示す。エンドミルのスローアウェイチップは1個だけ取り付け、1枚刃として使用した。被削材の初期寸法は100mm×80mm×

Fig. 6 Experimental setup

Fig. 7 Effect of oil-mist and cutting speed on flank wear

80mmであり、100mmの刃を一方に繰り返して切削する。長時間の切削により管壁に付着した油分が徐々に噴出して吐出オイル量が変化することがないように、切削長0.5mごとに切削を中断し、オイルミストを発生せずに圧縮空気のみを流して管壁の油分を排出させた。ノズルの先端部は図4(a)のEnの向きに設定し、オイルミスト発生装置のポンプからのオイル供給量は2.0mL/minとした。

高速切削に適するよう小さな半径方向切込みを設定しており⁸⁾、設定の切削条件ではすくい面のクレータ摩耗に比べ逃げ面摩耗が顕著に進行し、時には欠損を伴って工具寿命に至る場合がほとんどであった。したがって、工具逃げ面摩耗の変化を調べることにした。図7に工具逃げ面の最大摩耗幅の推移を示す。切削速度が増すほど摩耗速度が大となることがわかる。また、同じ切削速度の条件でオイルミストの供給の有無により摩耗量を比較すると、503m/min、754m/minでは、明らかにオイルミストを供給した場合が摩耗量は小さい。図8に切削速度754m/min、切削長6.0mでの境界部とコーナ部の逃げ面の様子を示す。境界摩耗が急速に進行することなく、ほぼ一様な幅の逃げ面摩耗が生じている。

また、切削速度1005m/minでは、切削長3m程度まではオイルミストを供給することにより摩耗低減の効果が見られるようであるが、図9に示すような他に比べて摩耗が進行する部分が生じやすく、それ以降は急速に摩耗が進行する。さらに高い切削速度2010m/minでは摩耗の進行は急激であり、オイルミスト供給の有無による差は確認できない。さらに詳細に検討する必要があるが、摩耗幅が広がることにより摩擦熱による温度上昇が生じ、摩耗速度が増大するという悪循環が、切削速度1000m/

Boundary (a) Air Corner

Boundary (b) Oil-mist with air Corner

Fig. 8 Appearance of tool wear
Cutting length 6.0m, cutting speed 754m/min

Cutting length : 3.5 m Cutting length : 4.5 m

Fig. 9 Propagation of flank wear
Cutting speed 1005m/min

min程度以上において起きているようである。一方、本実験の条件が実用的か否かは別として、750m/min程度の切削速度までは、オイルミストの供給により工具摩耗低減の効果があることが分かる。一般に鋼のエンドミル加工の際、湿式切削では工具の加熱・冷却が繰り返され熱き裂の発生が誘起されるため、乾式切削の方が工具寿命が長い場合が多いが、用いたオイルミスト供給によって、乾式より長い工具寿命が得られることがわかった。

3.2 供給オイルミスト量による工具逃げ面摩耗への影響

オイルミスト供給において、作業環境の保全のためには最小のオイル量で効果を上げることが望まれる。そこで、オイル供給量を変化させて前節と同様にエンドミル加工を行い、工具摩耗への影響について検討した。ここでは切削速度をオイルミスト供給の効果が見られた上限の754m/minとし、オイルミストのポンプからの供給量は、0.0mL/min(オイル供給なし)、0.1mL/min、0.2mL/min、0.5mL/min、1.0mL/min、2.0mL/minの6種類とし、図4(c)のExにノズルを設置した。他の切削条件は前節と同様である。図10に逃げ面最大摩耗幅の変化、図11にそれぞれのオイル供給量における工具逃げ面の写真を示す。供給オイル量の増加に伴い、逃げ面最大摩耗幅は小さくなっていることがわかる。その際、供給オイル量が0.5mL/min以下の場合はその傾向は明らかであるが、0.5mL/min以上の場合では摩耗経過曲線に大きな差は見られない。実際には工具材のばらつきによると思われるが、0.5mL/minと1.0mL/minで摩耗量が逆転して

Fig. 10 Effect of oil-mist supply on flank wear

Fig. 12 Effect of nozzle position on flank wear

Fig. 11 Appearance of tool wear affected by oil-mist supply

いるところも見られる。したがって、本条件下では、ポンプからの供給オイル量を0.5mL/min以上に増加させても工具摩耗低減の効果はそれ以上大きくはならないといえる。なお、2章に示したようにポンプからの供給オイル量0.5mL/minのときに実際にノズルから噴出されているオイル量は0.01mL/minであり、工具に付着するオイル量はさらに少量である。このような微量のオイル量で摩耗低減の効果が飽和する傾向が生じる理由についてはさらに検討する必要があるが、使用するオイル量をできる限り削減したいという当初の目的からすれば望ましい特徴であると考えられる。

3.3 噴射ノズル位置による工具摩耗への影響

図5に示したように噴射ノズルの位置によって工具へのオイルの付着量に差が見られた。また、エンドミル加工は断続切削であり、工具は被削材に食いつき、切削を行い、被削材より離脱して空転し、再び被削材に食いつくというサイクルを繰り返すから、オイルミストを含む圧縮空気を断続切削のどの時点に噴射するかによって、その効果に違いが生じることが予想される。そこで、図4と同じく、刃先が被削材に食いつく直前の位置(En)、刃先が被削材から離脱してから180°回転した位置(Md)、刃先が被削材から離脱した直後の位置(Ex)の3通りに噴射ノズル位置を設定し、工具摩耗への影響を調べた。ポンプからの供給オイル量は2.0mL/min、切削速度754m/minとし、他の切削条件は表1の通りである。

Fig. 13 Effect of air blowing and oil-mist supply from two nozzles

図12に結果を示す。Exの離脱点にオイルミストを供給した場合が、他の条件と比べ最も逃げ面摩耗は小さくなっている。オイルミストを供給した場合、逃げ面側から食いつき時に供給しているEnでは図5に示したようにオイルの付着量は少ないが、Mdよりも摩耗量は小となった。一方、オイルミストを供給せず圧縮空気のみ供給したものを比較しても、En、Mdに比べExが最も摩耗が少ない。Exから圧縮空気だけを供給することにより、オイルミストをEn、Mdから供給した場合と同程度の摩耗を示している。よってオイルの付着量だけでなく、ノズル位置が大きな影響を及ぼしていることがわかる。そこで、ノズル位置の影響をなくすため、Ex、Mdにそれぞれノズルを設置し、圧縮空気は両者とも供給しながら、オイルミストをExからだけ噴出させた場合と、Mdからだけ噴出させた場合とを比較した。結果を図13に示す。圧縮空気の供給状態は同じであるが、明らかにExからオイルミストを供給した場合に工具摩耗は小さくなる結果が得られた。図5でEx、Md両者は同程度のオイル付着量が測定されているから、図13に表れた差異はオイルミストを供給する位置による影響と考えることができる。しかし一方では、実切削時には図5の測定時に用いたろ紙のような付着オイルを保持するものがないため、いったん工具面に付着したオイルは遠心力によって飛散してしまい、工具が切削する時点では有効な量のオイルが工具面に存在しない可能性も考えられ、この点についてはさらに検討を要する。

また、Exからオイルミストを供給した場合の工具摩耗が他と比べて小さい原因の一つとして、工具面への切りくずの凝着が少ないことが挙げられる。Exからオイルミストを供給した場合以外の条件では、切削長1.0～2.0m以降において、図14に示

Fig. 14 Adhesion of chip on tool rake face

Fig. 15 Effect of nozzle position on flank wear when enough oil is applied

ような工具面への切りくずの凝着が見られたが、それに対し Ex からオイルミストを供給した場合では切削長 8.0m まで凝着が生じなかった。加工硬化した凝着物が、断続切削時に工具と切りくず、被削材間にかみ込み、逃げ面摩耗を促進した可能性が考えられる。断続切削時の工具面の温度は切削時に急速に上昇し、切れ刃が離脱後急速に低下するから、生じた凝着物との結合力も温度低下とともに強固になっていくと考えられる。したがって、温度低下がわずかな離脱直後であれば圧縮空気の噴射によりその除去が可能なのではないかと推測される。よって、必要最低限の油剤を供給することに加えて、効果的に凝着物や切りくずを除去する機能が、工具摩耗抑制のためには必要であろう。

3.4 工具摩耗に及ぼすオイルと圧縮空気供給の効果

上述のように、オイルミストを圧縮空気と共に工具離脱点付近に供給することが工具摩耗低減に有効であり、ノズルの位置によっては工具に付着したオイルが有効に作用していないことが示された。ここではオイルと圧縮空気の供給を分離し、十分なオイル量を供給した上で、ノズル位置を変えて圧縮空気の工具摩耗への影響を検討した。切削条件は前節と同じである。

オイルはあらかじめ切削面に塗布し、前出の En, Ex, Md のいずれかより圧縮空気だけを供給して切削を行った。ダウンカットを採っているため、切削面に塗布したオイル層を工具刃先が通過する際にオイルが付着し、切削が行われることになる。オイルミストとしては供給していないが、3.2 節に示したように工具摩耗に対して供給オイル量はある量以上では効果が飽和するから、ミストとして供給する場合より充分多量が付着するように配慮した。図 15 に結果を示す。ここでも、切削直後に圧縮空気を供給する Ex で最も摩耗が小さくなった。同図中に図 12 の Ex からオイルミストを供給した場合を◇で再掲

するが、それと同程度の摩耗経過を示しており、必要十分なオイル量が供給されていれば、Ex からの圧縮空気の供給により工具摩耗は低減することがわかる。En, Md については、切削時に充分なオイル量が確保されたことにより、図 12 のオイルミストを供給した場合よりも摩耗量は小さくなっていることがわかる。

実用的には位置を変えた複数のノズルから供給することも多い。しかし、それら複数のノズルからの供給が同じく効果があるわけではないことを以上の結果は示唆している。

4. 結 論

スローアウェイ工具を用いて高速エンドミル加工を行い、工具摩耗に及ぼすオイルミスト供給の効果について検討した。その結果を以下にまとめる。

- (1) 植物性油脂をオイルミストとして供給する油剤供給法は、S45C を被削材とした場合、切削速度 750m/min 程度までの高速エンドミル加工において、工具摩耗抑制の効果がある。
- (2) 供給オイルミスト量が増加すると、工具摩耗速度は小さくなっていく。しかし、ポンプからの供給量が 0.5mL/min (実際にノズルより噴出されるオイルミスト量は 0.01mL/min) 程度でその効果は頭打ちとなり、それ以上の供給量を与えても摩耗速度はあまり変わらない。
- (3) エンドミル加工において、オイルミストを噴射する位置により工具摩耗の抑制効果は変化し、エンドミルが被削材から離脱する点への噴射が工具寿命の延長に最も有効である。これは、切りくずの工具への凝着を防ぎ、効果的に切りくずを排出しているためと思われる。

本研究で用いた工具、被削材、切削条件は限られた範囲であり、さらに条件を広げて検討することを今後の課題としたい。

謝 辞

本研究の一部は平成 9～10 年度文部省科学研究費補助金奨励研究(A)、(財)工作機械技術振興財団第 19 次試験研究助成の援助により進めた。また、TACO (株) にはオイルミスト発生装置に関して、セイコー精機 (株) にはマシニングセンタスピンドルに関してご協力いただいた。ここに記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) W. Koening and S. Rummenhoelter: Ecological Manufacturing, Prod. Eng., **II**, 1 (1994) 1.
- 2) F. Klocke and G. Eisenblätter: Dry Cutting, Ann. CIRP, **46**, 2, (1997) 1.
- 3) 本間宏之、横川和彦、横川宗彦: 公害防止のための研削油剤を用いない CBN 冷風研削技術の研究, 精密工学会誌, **62**, 11 (1996) 1638.
- 4) 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) **62**, 604 (1996) 272.
- 5) U. Heisel, M. Lutz, D. Spath, R. Wassmer and U. Walter: Application of Minimum Quantity Cooling lubrication Technology in Cutting Process, Prod. Eng., **II**, 1, (1994) 49.
- 6) H. Schultz and T. Moriwaki: High-Speed Machining, Ann. CIRP, **41** (1992) 637.
- 7) MCA マニュアル, TACO (株), (1998) 1.
- 8) 例えば、埴淵俊夫: 高速加工による生産システムの変化, 精密工学会第 230 回講習会テキスト, (1996) 1.
- 9) 前川克廣、仲野義博、北川武揚: 切削熱挙動の有限要素解析 (第 2 報), 機械学会論文集 (C 編), **62**, 596 (1996) 1594.