ドリル加工における MQL の効果 (第 1 報)*

—加工穴の特徴—

横山 正** 関谷克彦*** 山田啓司*** 山根八洲男***

Effects of MQL on Drilling (1st Report)

- Features of Drilled hole -

Tadashi MAKIYAMA, Katsuhiko SEKIYA, Keiji YAMADA and Yasuo YAMANE

The paper deals with the effects of an MQL (Minimum Quantity of Lubrication) process on drilling of 0.5% carbon steel. In drilling, discharge of chips from a hole drilled, tool wear, accuracy and surface roughness of the hole are the biggest problems, especially in deep drilling. MQL process gives fairly good results about these problems if suitable cutting conditions are selected. However the mechanisms have not been clarified yet. In this study, drilling tests with different lubrications, i.e. dry, MQL and wet, were carried out on the steel using solid carbide twist drills having two through holes. Tool life, cutting forces, profile and surface roughness of inside wall of drilled hole, enlargement and cylindricity of drilled holes were examined. Results obtained were as follows. (a) The longest tool life and the best quality of the drilled hole were obtained in MQL process. (b) Diameters of drilled holes in MQL process were larger than those in other process, while cylindricity of the hole in MQL process is better than that in other process. (c) The maximum torque in MQL process is smaller than that in other process.

Key words : MQL, minimum quantity of lubrication, drilling, surface roughness

1. 概 要

MQL (Minimum Quantity Lubrication) は、極微量の霧状油剤と圧縮空気の混合流を加工部に供給する加工法であり、広義には乾式加工の範疇とされ¹⁾²⁾。湿式加工と比較して大幅に油剤使用量を低減できることから、油剤使用にかかるコスト、環境負荷、作業者への影響を抑制する効果が大きく³⁾⁴⁾、注目されている。切削油剤の効果⁵⁾としては、潤滑作用、冷却作用、切くず排出作用および防錆作用が期待されているが、MQL 加工法における微量油剤の効果については多くの検討が行われており^{6)~9)}、微量油剤によって潤滑作用、圧縮空気によって冷却と切くず排出作用を得ていると考えられている¹⁰⁾。

一般に、鋼材を対象とした小径深穴加工では、大量の切削油剤を噴射したりステップ加工を行うことで切れ刃部やマージン部の潤滑・冷却ならびに切くずの排出を向上させているが、MQL の適用により切くずが短く分断して¹¹⁾¹²⁾排出性が改善されるため顕著な高能率化が図れるほか、工具寿命も向上する³⁾¹³⁾とされている。したがって油穴付きドリルを使用した MQL ドリル加工の実用化は進んでいるが、工具への凝着抑制効果などの詳細については未だ不明な点が多い。

本研究では、安定したミスト供給量制御の可能な内部ミキシング機構を用い、油穴付きドリルによる MQL 穴あけ加工を行い、その効果について検討する。本報においては、炭素鋼を対象とした止まり穴形成についての MQL の特性を明らかにするため、工具寿命、仕上面性状、穴の形状精度等について乾式、湿式加工と比較し MQL 加工の特徴を明らかにした。

2. 実 験 方 法

工作機械として主軸端が BT40 の横型のマシニングセンタを用いた。MQL の切削油剤供給システムの概略図を図 1 に示

す。本システムの最大の特徴は切削油剤と圧縮空気を混合するためのミキシングノズルを主軸の先端中心部に配置しており主軸内部に独立に供給された切削油剤と圧縮空気が経路の途中で停滞することなく主軸モータや主軸を経由して直接ドリルの油穴近傍まで搬送されることにある。このため微量の切削油剤であっても精度良く計量し刃部に到達させることができる。MQL ではポンプからの一回の吐出量が 0.002ml 程度の極微量を制御の対象としているので切削油剤を正確に供給することが特に重要である。切削油剤と圧縮空気の供給は、プログラマブルコントローラ (PLC) を介して CNC 装置により制御した。切削油剤の吐出量は計量ポンプの動作周波数により決定され、圧縮空気の吐出圧力はミキシングノズル部に設けられた自動圧力調整弁によりあらかじめ定められた値に自動制御した。乾式切削および湿式切削の場合には同一の工作機械を使用し、切削油剤供給システムのみ交換して実験を行った。

表 1 に切削条件を示す。ドリルは直径 6.8mm、溝長 77mm 全長 130mm の油穴付き二枚刃超硬コーティングドリルで、工具

Fig. 1 Inside mixing MQL system for machining center

* 原稿受付 平成 18 年 6 月 2 日

** 正 会 員 ホーコス (株) (福山市草戸町 2-24-20)

*** 正 会 員 広島大学大学院 (東広島市鏡山 1-4-1)

Table 1 Cutting conditions

Drill	TiAlN Coated Carbide with two through holes 6.8mm in Diameter/130mm in Length
Depth of holes	20.4mm
Work material	0.5% Carbon steel(Hv269-316)
Cutting speed	120m/min
Feed Rate	0.2 mm/rev
Lubricant	Dry MQL(Ester Oil 5ml/h) MQL(Ester Oil 10ml/h) Wet(10% Emulsion with external nozzle)

Fig. 2 Effect of lubrication system on drilled hole length

表面にTiAlNのコーティングが施されているものを使用した。なおドリルは先端角140度、Xシンニングが施されており、バックテーパーは0.3/100である。形状のばらつきを最小とするために同一ロットで製作されたドリルを実験に用いた。被削材は0.5%の炭素鋼(JIS-S50C)を調質処理したものでビッカース硬さがHv269-316の板材を使用した。切削速度は120m/min、送り量を0.2mm/revとし、加工深さはM8タップの下穴を想定し加工径の3倍に相当する20.4mmの止まり穴とした。以上の条件を共通として、乾式切削、MQL、湿式切削を行った。MQLはエステルを5ml/h供給した場合と10ml/h供給した場合の2条件としいずれも圧縮空気の供給圧力は0.5MPaとした。湿式切削ではMQL加工が普及する以前に一般的に用いられていた、アルミ・アルミ合金・鋼一般加工用水溶性切削油剤(JIS K2241-1986 W1種1号相当)を体積濃度10%となるように希釈したものを外掛けノズルにより供給した。

3. 実験結果

3.1 工具寿命

いずれの実験も加工の継続が困難あるいは不可能になるまで行った。乾式切削およびMQLでは工具寿命の直前になると加工中にしだいに連続的な火花を発するようになり同時に細かい糸状の切りくずがドリルシャンク部に巻きつくという特徴が見られた。この現象は緩やかに進行したので工具寿命が徐々に近づいていることを認識することができた。一方湿式切削では加工中にドリルが予兆なく突然折損し実験の続行が不能になるという特徴が見られた。

図2に寿命直前までの各方式の総切削長を示す。総切削長はそれまでに加工した穴数の総数に加工深さ20.4mmを乗じた値を示す。乾式切削の場合が最も短く、31.7m(1554穴)であっ

Fig. 3 An example of recorded torque during drilling

Fig. 4 Influence of drilled hole length on the maximum torque in drilling

た。これは他の条件と比較して潤滑・冷却作用が劣ることに起因していると考えられる。MQLではエステルを5ml/h供給した場合の実験を2回行い、57.1m(2799穴)および78.3m(3838穴)であったが、10ml/hの場合には215.4m(10559穴)の長寿命を示した。いずれの場合も圧縮空気の供給圧力と供給量は同等であるので、この結果はMQLでは切削油剤の供給量が工具寿命に大きな影響を及ぼし、本実験の条件下では5ml/hの微量MQLでも湿式加工と同等以上の工具寿命が得られることがわかる。湿式切削では実験を2回行い、結果は50.8m(2490穴)及び61.1m(2995穴)であった。水溶性切削油剤は外掛けノズルにより供給したので、他の供給方法と比較して刃部の潤滑と冷却がドリル加工の前後に急激かつ繰り返し行われる状態であった。

3.2 切削トルク

図3に一穴加工中の切削トルクの変化を示す。トルクは3軸モータアンプが出力した電流をもとに換算し、主軸空転時の摩擦トルクを相殺するため加工直前の空転時の値を0とした。横軸は時間(秒)を示し縦軸に切削トルク(Nm)を示す。通常、止まり穴のドリル加工では穴深さが増加するにつれ、切りくずが排出され難くなると同時に、穴壁とドリルマージン部の摩擦も大きくなるため主軸トルクは穴底付近で最大値を示す傾向にあるが、本実験でも乾式切削では同様の傾向が見られた。しかしながら本実験では加工穴深さは直径の3倍と浅

Fig.5 Surface profile of drilled hole wall

いことから、切りくずの排出性は比較的良好であり、加工穴深さの増加に伴う切削トルクの上昇は、主として穴壁とマージン部との摩擦の増加によるものと考えられる。一方 MQL (10ml/h) ではトルクは平坦部を示しており、加工中の一方的な増加は見られず、穴壁とマージン部との摩擦など、トルクが増大する要因がほとんどないことを示している。なお、図には示されていないが、湿式加工時のトルクは不安定で乾式と MQL の中間値を示した。

図 4 に加工距離の増加に伴う最大トルクの変化を示す。図から明かなように、乾式切削でトルクは最も高く、次に MQL (5ml/h) と湿式切削がほぼ同程度を示し、MQL (10ml/h) の場合は工具寿命直前まできわめて低い値を示した。またいずれの場合も、工具寿命直前でトルクが増加する現象が見られるが、MQL や湿式での実験結果を考えると、本実験条件では最大トルク 4Nm が一つの目安と考えられ、最大トルクを連続監視することにより切削状態や寿命が推定できる可能性を示している。

3.3 仕上げ面性状および表面粗さ

図 5 に、仕上げ面の断面形状の測定結果と測定箇所を示す。測定には表面粗さ測定機を使用した。測定位置と方向は穴の口元から 8mm の壁面から口元に向かって 2.5mm の間とし、同一条件で円周数カ所について測定した。断面形状は一穴目と工具寿命に至るまでの中間と工具寿命の直前の三段階について代表的なものを示す。中間のものはそれぞれの潤滑油剤供給方法における代表的な断面形状を示しており、寿命に至るまでの間はほぼ類似した形態を示した。断面形状はおおきく三つのグループすなわち、滑らかな面、安定した送りマークが見られる面、不規則に粗い面、に分けることができる。滑らかな面は主として湿式加工の場合に見られ、これはドリルマージン部と仕上げ面との間の摩擦によるバニシング作用に起因すると考えられる。一般にドリルのマージンには仕上げ面との過大な接触を避けるために外径がシャンクに向かって漸減するバックテーパーが設けられているが、穴内面の平滑化はドリ

Fig. 6 Influence of drilled hole length on surface roughness of hole's wall

ルのバックテーパーが有効に作用していないことを示している。一方安定した送りマークがみられる面 (MQL (5ml/h) および MQL (10ml/h) における寿命の中間点) は、ドリルのマージンと仕上げ面との間の摩擦が過度に生じていないことを示している。ただし、これらはいずれも送りマークは 5 山/1mm となっており、送り速度 (0.2mm/rev) からすると穴壁の仕上げ面の創成は片方の片刃によるものと思われる。また不規則に荒い面は切削が安定して行われていないことを示しており、その原因としてはドリルの振動や構成刃先の発生あるいはドリルのマージンと仕上げ面との間への切りくずの噛み込みなどが考えられる。

図 6 に総切削長さに対する仕上げ面の算術平均粗さ (Ra) の変化を示す。Ra の値が最も小さいのは湿式の場合であり、次に MQL (5ml/h) と乾式が続く、MQL (10ml/h) が最も大きくなった。湿式で Ra が小さくなった原因はバニシング作用の結果と考えられる。MQL (10ml/h) では Ra が大きくなったが、仕上げ面の断面形状は比較的安定しており、工具寿命も他と比べ最も長い結果を示していることから、必ずしも Ra の大小での比較

Fig. 7 Influence of drilled hole length on enlargement of hole's diameter

は有効とは限らない。なお、いずれの場合も切削長が長くなるにつれRaは大きくなる傾向が見られる。

3.4 加工穴の幾何形状

図7に、総切削長さに対する穴口元と穴底部における穴拡大代を示す。なお穴拡大代は新品時のドリル直径(6.8mm)を基準とした。従って測定値が6.8mmよりも大きい場合は穴が拡大したことを意味する。乾式、湿式およびMQL(5ml/h)の場合は最初の穴目で穴底が約20 μmの拡大代を示しているのに対し、MQL(10ml/h)では35 μmとこれらに比べ1.5倍の拡大代となっていることが特徴である。また、乾式、湿式およびMQL(5ml/h)はいずれも穴入口に比べ穴底の方が拡大代が大きくなっているのに対し、MQL(10ml/h)では1穴目および寿命の中間点付近で穴底に比べ入口の方が大きくなっていることが特徴である。またいずれも加工が進行するにつれ拡大代は小さくなる傾向が見られる。この理由としては切削の進行に伴い切刃外周コーナ部の摩耗の進行によるものと考えられる。

一般的に穴径の拡大原因としては、ドリルの回転中の振れ、外周コーナの構成刃先、あるいは加工中におけるドリルの熱膨張などが考えられ、穴径の縮小原因としては、外周コーナ部の摩耗や加工後に工作物の温度低下による熱収縮が原因であると考えられている。穴入口の拡大代が小さくなることは穴入口付近で穴壁とドリルマージン部の摩擦が大きくなることを意味し、特に拡大代が0あるいはマイナス締め付けが発生することから問題となるが、この件については考察で検討する。

Fig. 8 Influence of drilled hole length on roundness of holes drilled

図8に、総切削長さに対する穴の真円度の変化を示す。値が最も小さく安定しているのはMQLの場合であり、安定した切削が行われていると考えられる。特にMQL(10ml/h)では寿命近くまで安定した真円度を示している。一方、値が最も大きいのは寿命直前の湿式加工の場合であるが、乾式と湿式のいずれも全体的に値が大きくばらつく結果となっている。乾式、湿式、MQL(5ml/h)ではいずれも寿命近くで急激に真円度が悪化しているが、これは寿命近くになると切刃の摩耗の増大により二枚の刃の切削抵抗のバランスが崩れ、ドリルが半径方向に押されたまま回転することになり真円を保つことが出来なくなったためと考えられる。なお、MQL(10ml/h)では寿命近くで

も真円度が低下していないが、この理由はMQL(10ml/h)の場合は工具摩耗が緩やかに進行したため最後まで切削抵抗のバランスが崩れにくかったとも考えられるが原因は不明である。

図9に総切削長さに対する穴の円筒度の変化を示す。円筒度についても真円度と同様MQL特に(10ml/h)で安定した小さな値を示していることがわかる。湿式では円筒度が非常に悪化しており、乾式はこれらの中間的な値となっている。

4. 考 察

乾式, MQL(5ml/h), MQL(10ml/h)および湿式加工を行った結果, MQL(10ml/h)の条件で切削した場合, 他の条件に比べ,

- ①工具寿命が2倍以上伸びた。
 - ②一穴切削中のトルク上昇が他の条件に比べ少ない。
 - ③比較的明瞭な送りマークが認められる。
 - ④平均粗さRaは他の条件に比べ大きい。
 - ⑤穴拡大代が他の条件と比較して大きい。また他と異なり入口 $\geq$ 穴底部となる場合が見られる。
 - ⑥真円度・円筒度のいずれも優れた値を示した。
- という特徴を持つことがわかった。これらの現象から以下のような推測が出来る。
- ⑦真円度・円筒度が安定して優れていることはドリルのふれ回り等はあまりない。
 - ⑧送りマークが認められることはドリルマージン部と穴壁との摩擦も少ない。
 - ⑨穴拡大代(入口 $\geq$ 穴底部)も穴壁との摩擦が少なくなることを意味する。
 - ⑩一穴加工中のトルク上昇が少ないことも穴壁との摩擦が少ないことを意味する。

上記⑧-⑩はいずれも穴壁との摩擦であるが、この摩擦はドリル加工における最も大きなトラブル¹⁴⁾の要因の一つであり、本実験で行ったMQL(10ml/h)での加工が他の条件での加工よりも特に工具寿命において優れた結果が得られたのは、穴入口から内部にかけて安定した穴拡大代が得られたことにより穴壁との摩擦が低減したためと考えられる。

ドリル加工における加工穴の拡大の原因については、ドリルのふれ回りを除外すると、加工中のドリル先端(刃先外周部)の熱膨張や外周コーナ部の構成刃先、等幾つか考えられるが、加工中のドリル先端(刃先外周部)の熱膨張については、最も温度が高くなると想定される乾式切削で約20 μ mの拡大代であり、ドリル直径6.8mmを考慮すると超硬母材の線膨張係数を 5×10^{-6} とすれば約600℃の温度上昇となり可能性としては考えられるが、乾式よりも温度が低いと考えられるMQL(10ml/h)で比較的穴数の少ない加工初期の穴拡大代が乾式の場合よりも2倍近い40 μ m近くあり熱膨張のみで説明するには無理がある。

外周コーナ部の構成刃先に関しては、図5の仕上げ面形状の測定結果から、MQL(5ml/h)の寿命中間点付近で谷深さ約3 μ m程度の安定した送りマーク、MQL(10ml/h)の場合で約7 μ m程度となっており、構成刃先の発生の範囲内であるが、この件については、温度計測も含め次報以降で検討したい。

5. 結 言

ドリル加工におけるMQLの作用とメカニズムを明らかにするために、乾式, MQL, 湿式の各条件においてS50Cに対し油穴付き2枚刃超硬コーティングドリルで切削実験を行い、工具寿

Fig. 9 Influence of drilled hole length on of hole's cylindricity

命, 切削抵抗, 仕上げ面性状, 穴真円度, 穴径に与える影響について調べた。その結果, 以下の結論を得た。

- (1) MQL(10ml/h)では最も長い工具寿命と良好な真円度・円筒度を得ることができた。
- (2) MQL(10ml/h)では一穴加工中の切削トルクの上昇が他と比較して少なくなった。
- (3) MQL(10ml/h)では比較的明瞭な送りマークが観察された。
- (4) MQL(10ml/h)では穴拡大代が他と比較してやや大きくなる傾向となった。
- (5) 上記のMQL加工における, 優れた工具寿命, 切削トルク低減, 送りマークの残存, 優れた穴の幾何形状等は, 穴入口から底部にかけての様な穴拡大代が主因の一つと考えられる。

参 考 文 献

- 1) F. Klocke, Dry Cutting, Annals of the CIRP, **46**, 2(1997)519.
- 2) 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.
- 3) K. Weinert, I. Inasaki, J. W. Sutherland and Wakabayashi: Dry Machining and Minimum Quantity Lubrication, Annals of the CIRP, **53**, 2(2004)511.
- 4) 村上正一: 環境に対応した機械加工の現状と今後の課題, 2001年度精密工学会秋季大会シンポジウム資料(2001)145.
- 5) 中島利勝, 鳴瀧則彦: 機械加工学, コロナ社(1983).
- 6) 佐藤潤幹, 稲崎一郎, 若林利明: 極微量切削液供給法による旋削加工, 日本機械学会論文集(C), **62**, 604(1996)272.
- 7) 須田聡, 横田秀雄, 小松富士夫, 稲崎一郎, 若林利明: MQL加工における加工性能評価と極微量油剤の効果, 2001年度精密工学会秋季大会シンポジウム資料(2001)168.
- 8) 笹原弘之, 水谷文則, 堤正臣: オイルミスト供給による高速エンドミル加工時の工具損耗への影響, 精密工学会誌, **66**, 1(2000)80.
- 9) T. UEDA, A. HOSOKAWA, K. YAMADA: Effect of Oil Mist on Tool Temperature in Cutting, Trans. of ASME, **128**, 1, 2006, 130-135.
- 10) 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(2000)324.
- 11) 安岡学, 関口徹: 深穴の高速加工技術, 2003年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集(2003)136.
- 12) 宮崎国利, 奥川道隆, 小坂純文: 鋼セミドライ穴明けにおける切りくず分断メカニズム解析, TOYOTA Technical Review, **53**(2004)110.
- 13) 山本剛広: 鋼材穴あけ加工におけるMQLの優位性, 機械技術, **53**, 9(2005)40.
- 14) 臼杵年, 山根八洲男, 鳴瀧則彦: 焼入れ焼結鋼の穴加工, 精密工学会誌論文集, **71**, 8(2005)995.