ドライ切削の被削性及び経済性評価*

(第2報, 中炭素鋼と合金工具鋼のエンドミル及びドリル加工)

大島 郁也^{*1}, 前川 克廣^{*1}, 古神 久士^{*2}

Machinability Experiments and Economical Considerations of Dry Machining

(2nd Report, End Milling and Drilling of Medium Carbon and Alloy Steels)

Ikuya OHSHIMA^{*3}, Katsuhiro MAEKAWA and Hisashi KOGAMI

^{*3} Department of Mechanical Engineering, Ibaraki University,
4-12-1 Nakanarusawa, Hitachi-shi, Ibaraki, 316-8511 Japan

This paper deals with the elimination of water-based cutting fluid based on machinability tests and economical considerations when plain medium carbon steels and an alloy steel are machined with a coated carbide end mill or a carbide drill. In end milling, no remarkable difference between dry and wet machining is recognized in terms of chip disposability, machining accuracy, cutting force, tool life and production cost. Besides, dry machining yields a low production cost at low cutting speeds of less than 90 m/min for S45C steel and 20 m/min for SKD61. In drilling, dry machining is not as good as wet machining with respect to machinability, but the cost analysis shows that dry machining is preferable at low cutting feeds of less than 200 mm/min for S50C steel. From an environmental point of view we should take a positive attitude to introduce dry machining as far as its advantages on machinability and economics are recognized.

Key Words: Dry Machining, Cutting Fluid, End Milling, Drilling, Carbon Steel, Tool Life, Machinability, Production Cost

1. 結 言

環境保全と省資源化⁽¹⁾および ISO 14000 の認証取得, 維持のため, 生産システム的大幅な見直しが進められている。なかでも切削油剤は各種の機械加工において多用されているが, 作業環境に対する悪影響⁽²⁾や廃棄処理の困難さから使用の低減化が図られている。しかし, 切削工具が高機能化しているにも拘わらず, 油剤が慣習的に使用されている場合が多い。

本研究は, このような“常識”を打破するために, 切削油剤を全く使用しない完全ドライ切削の可能性を検討することを目的としている。前報⁽³⁾では, 中炭素鋼の超硬合金工具による連続旋削加工を対象として, 切削油剤を全く使用しない完全ドライ切削条件を, 被削性と加工の経済性の観点から検討した。その結果, ドライ切削時の工具寿命は湿式に比べて劣るものの, 表面粗さや切屑処理性に問題はなく, 加工費用も湿式

のそれと大差がないことから, 中炭素鋼のドライ切削は可能であることを示した。また, 切削油剤による熱伝達が工具温度に及ぼす影響を有限要素切削シミュレーション法により解析し, 切削油剤が工具-切屑接触域に侵入しなければ大きな冷却効果が見込めないことを明らかにした。

本報告では, 市販の回転工具による鋼材の切削加工を取り上げ, 切削油剤の有無が被削性及び加工の経済性に及ぼす影響を実験的に検討し, 完全ドライ切削の適用条件を明らかにする。検討対象は, マシニングセンタによる機械構造用炭素鋼 S40CL, S45C, S50C および合金工具鋼 SKD61 のエンドミル加工とドリル加工である。

2. エンドミル加工のドライ化

2.1 実験方法

被削材は, JIS 規格に適合する化学組成を持つ S45C と SKD61 で, 60×100×30mm の試験片寸法に加工して使用する。工具は図 1 に示すφ10mm のコーテッド超硬スクエアエンドミルを用いる。表 1 に実験条件と

* 原稿受付 2000 年 10 月 10 日。

^{*1} 正員, 茨城大学工学部(〒316-8511 日立市中成沢町 4-12-1)。

^{*2} 日立工機(株)(〒312-0025 ひたちなか市武田 1060)。
E-mail: oshima@mech.ibaraki.ac.jp

Fig. 1 Shape of end mills used

Table 1 Cutting conditions used in machinability tests

Materials cut	S45C	SKD61
Cutting speed, V m/min	62, 157, 251	60, 120, 240
Feed, f mm/teeth	0.06	0.06
Depth of cut, $a_d \times a_r$ mm	5.0×0.2	5.0×0.2
End mill	Tool A	Tool B
Number of teeth	6	4
Helix angle, deg	45	30

工具の諸元を示す。

工具寿命試験は、立型マシニングセンタ (MSJ25, 牧野フライス精機製) を使用し、試験片をテーブル上の圧電式動力計 (9257A, キスラー製) に固定し、ダウンカットにより 1 ストローク 100mm の側面切削 (5.0×0.02 mm) を繰り返す。実験では一定切削距離ごとに切削抵抗を測定し、また主軸回転を止め CCD カメラを用いて切屑形状の観察と刃先摩耗の測定を行う。工具寿命の判定は、主に送り方向に垂直な切削抵抗成分 F_y の急増点までの切削時間とするが、工具の逃げ面摩幅や切屑の変色等も参考にする。

Fig. 3 Cutting force progress diagram

Fig. 4 Relation between tool life and cutting speed

湿式切削では水溶性エマルジョン (JIS W1 種 1 号を水道水で 20 倍に希釈) を、刃先部に 10 ℓ /min で供給する。乾式切削では切削油剤を一切用いていない。

2.2 被削性評価実験

図 2 は、工具が定常摩耗域に入った状態での切屑形状を示す。S45C, SKD61 のいずれも湿式切削の場合に切屑は短くなる傾向にある。工具形状の違いにより、切屑断面積は SKD61 が大きく、S45C では小さく針状のものも見られる。他の切削条件でも状況は変わらず、切屑処理性については問題はない。

図 3 は S45C の切削抵抗 F_y の経過曲線の例を示す。○は乾式切削、●は湿式切削であるが、切削抵抗の差は比較的小さい。図示の矢印は判定した寿命であるが、これを境に切削抵抗の増加が激しくなっている。

Fig. 2 Chip morphology

Fig. 5 Cutting force progress diagram

Fig. 6 Relation between tool life and cutting speed

Table 2 Constants in Taylor's equation

	Dry machining		Wet machining	
	n	C	n	C
S45C - Tool A	1.363	8025.0	2.759	7.540×10^5
SKD61-Tool B	1.892	59040.0	2.976	5.570×10^6

図4はS45Cの工具寿命曲線を示す。切削速度 V と工具寿命時間 T の関係を両対数グラフ上にプロットしたもので、 $VT^n = C$ の Taylor の寿命方程式が成り立つ。低速域では乾式の方が長寿命となっており、ドライ切削が有利であることがわかる。

図5はSKD61の切削抵抗 F_y の経過曲線の例を示す。切削抵抗はS45Cより大きい。切削時間の増加に伴う切削抵抗値の変動は小さい。工具寿命を逃がし面摩耗幅で判定することもできるが、チッピングや溶着物のために、信頼性のあるデータが得られなかった。

図6はSKD61の寿命曲線を示す。湿式切削の場合の直線の傾きは、S45Cと同様に大きい。これは、高速域で切削油剤の冷却効果を受けて寿命が長くなる一方、低速域では切削温度が比較的低く、かつ切れ刃が乾式切削時にも空冷作用を受けて摩耗が抑制されたためと考えられる。

表2は図4と図6から得られる Taylor の寿命方程式の定数を示す。

切削油剤が加工精度に及ぼす影響も調べてみた。エンドミル軸方向の被削面のたおれ、すなわち過切削量を乾式と湿式で比較した。SKD61では切削初期で0.01 mm、寿命時には0.015 mm程度であり、乾式の場合にやや大きい。乾式と湿式の差は顕著には現れなかった。

2.3 ドライ切削の経済性評価

エンドミル加工の切削費用計算は、Taylorの寿命方程式が得られていることから前報で用いた次式⁽⁴⁾が利用できる。

Table 3 Parameters used in cost analysis

Overhead and labor cost	$k_1 = 200 \text{ ¥/min}$
Tool cost (Tool A)	$k_2 = 10000 \text{ ¥}$
(Tool B)	$k_2 = 10000 \text{ ¥}$
Tool-replacement time	$\tau_0 = 2.0 \text{ min}$
Preparation time	$t_3 = 1.0 \text{ min}$

$$c = \{S/Vfd\} \{k_1 + (k_1\tau_0 + k_2)C^{-1/n}V^{1/n}\} + k_1t_3 \quad (1)$$

ただし、 c は加工費用、 S は除去体積、 f は送り、 d は切込みである。 $S=1\text{cm}^3$ を加工する費用を乾式と湿式で比較してみる。加工費用の計算に用いる定数を表3に示す。工具費用(k_2)は定価とし、人件費+設備費(k_1)等は機械加工現場での値を参考にした。

切削油剤費用の算定は次のように考える。工作機械の稼働時間を6.8 h/日、週5日で8000 min/月とし、月1回は切削油剤を交換する。また、水溶性エマルジョンを5 l/月、5000円で購入し、これを希釈して使用する。さらに、廃油の処理費用は100 l/月で20000円と考えると、切削油剤関係の費用は3.125円/minとなる。その他にも油剤の運搬費用等も必要であるが、ここでは湿式切削の場合には、 k_1 に3円加算し計算する。

図7は加工費用 c と切削速度 V の関係を示す。エンドミル加工の場合、加工費用を最低とする最適加工条件は存在せず、加工速度を大きくすればするほど加工費用は安くなる。これは、寿命曲線の傾きが大きいためである。表2の n の値が1以上の場合には、加工費用を最少とする最適切削速度 V_o と最適工具交換時間 T_o は、式(1)からは得られない。

しかし、常用の切削条件の範囲について傾向をみると、S45Cの場合は $V=90\text{m/min}$ 以下で、SKD61では $V=20\text{m/min}$ 以下では乾式の方が切削費用は安くなり、ドライ切削が有利となる。高速域では湿式の方が加工費用は安くなる。特に高硬度のSKD61の場合には湿式切削の優位性が認められる。

Fig. 7 Relation between production cost and cutting speed in dry/wet machining

3. ドリル加工のドライ化

3.1 実験方法

被削材として機械構造用炭素鋼 S40CL (HRC6) と S50C (HRC11) を使用する。S40CL は 0.17% の鉛が添加された快削鋼である。いずれも化学組成は JIS 規格に適合している。S40CL についてはドリル直径の 2 倍の深さ (10m) の止まり穴加工, S50C は厚さ 10mm の板の貫通穴加工を行う。

用いた工具は, 図 8 に示す市販の $\phi 5$ コーテッド超硬およびハイスのストレートドリルである。

表 4 に実験条件を示す。立型マシニングセンタ (牧野フライス精機製 MSJ25) を使用し, テーブル上に寿命試験用の被削材と切削抵抗測定用の被削材を別々にバイスで固定する。所定の加工穴個数ごとに動力計 (AST-BHS, 三保電気製) で切削抵抗のトルクとスラストを測定し, 次に主軸の回転を止めて CCD カメラを用いて切屑形状の観察と刃先摩耗の測定を行う。湿式切削では水溶性エマルジョン (JIS W1 種 1 号) を水道

水で 20 倍希釈し, これを加工部に 2 ℓ/min で供給した。乾式切削では切削油剤を一切用いない。

工具寿命は, 切削抵抗, 刃先の摩耗幅, 切屑形状と色および穴の拡大代から総合的に判定する。

3.2 被削性評価試験

S40CL のドリル加工では, 寿命試験中トルクとスラストはほぼ一定の値をとり, 切削抵抗からは工具寿命を判定できなかった。図 9 は加工穴の拡大代の経過曲線を示す。工具摩耗に伴う拡大代変化は顕著に現れ, 1100 穴を寿命と判定をした。

図 10 は工具寿命曲線を示す。両対数グラフ上で送り速度 F と寿命 T との間に直線関係が得られ, Taylor の寿命方程式 $FT^n=C$ が成り立つ。

S40CL は快削成分が有効に働き, 乾式切削でも十分にドリルの寿命が長いので, 湿式での寿命試験は行わなかった。切削条件は異なるが, ハイスドリルによる乾式切削でも 580 穴の加工が可能であった。

Fig. 8 Shape of used drill

Table 4 Cutting conditions used in the experiment

Materials cut	S40CL	S50C
Coated carbide drill		
Cutting speed, V m/min	60, 90, 120	60, 90, 120
Feed, f mm/rev	0.15	0.10
HSS drill		
Cutting speed, V m/min	30	30
Feed, f mm/rev	0.15	0.10

Fig. 9 Dimensional error of hole progress diagram

Fig. 11 Cutting force progress diagram

Fig. 10 Relation between tool life and cutting speed

Fig. 12 Relation between tool life and cutting speed

図 11 は S50C の貫通穴加工時のトルク経過曲線を示す。超硬ドリルの場合、乾式切削で 600 穴、湿式切では 1300 穴を工具寿命と判断した。

図 12 は超硬ドリルの寿命曲線を示す。S40CL と同様に Taylor の寿命方程式が成り立つ。湿式切削の工具寿命は乾式切削に比べて 2 倍以上も寿命が延びており、切削油剤の効果は大きい。なお、ハイスドリルの場合でも乾式切削の工具寿命は 170 穴に対し、湿式切削では 400 穴であった。S40CL の乾式切削に比べて工具寿命が短いのは、切削抵抗が大きく送りも小さいことから切削熱の増大、すなわち刃先部の温度上昇が激しかったものと推定される。図 10 および図 12 から得られる Taylor の寿命方程式の定数を表 5 に示す。

図 13 には工具寿命時のドリル刃先と切屑の写真を示す。乾式と湿式では刃先の摩耗位置が異なっている。乾式では外周部の逃げ面やランド部の摩耗が激しく、切削速度の大きいドリル外周部の発熱が原因と考えられる。外周部ではチッピングが観察された場合もあった。湿式ではチゼル部付近の摩耗が比較的に大きい。これは切削油剤がチゼル部まで侵入がなかったためと考えられる。切屑形状を見ると、湿式切削では螺旋状につながったもの、乾式切削では短く切断されたものが多い。

3.3 ドライ切削の経済性評価

ドリル加工でもエンドミル加工と同様に Taylor の寿命方程式を用いて経済性計算が行える。ただし、ドリル加工の場合の除去量は穴の体積となるので、ドリル外周の切削速度ではなくドリルの送り速度 F (m/min)

Table 5 Constants in Taylor's equation

	Dry machining		Wet machining	
	n	C	n	C
S40CL-Carbide	0.404	2.678	—	—
S50C-Carbide	0.567	5.859	0.721	2.212

(a) S40CL-Carbide

Fig. 13 Drill wear and chip morphology

S50C, $V=120$ m/min

を用い、準備時間を除外した 1 穴の加工費用 c を式 (2) から求める。

$$c = \{S/\pi r^2 F\} \{k_1 + (k_1 \tau_0 + k_2) C^{-1/n} F^{1/n}\} \quad (2)$$

ただし、 F は送り速度、 r はドリル半径である。表 6 に計算に用いた定数を示す。準備時間として工具交換以外のドリルの戻りや穴の位置決め時間は作業設計に依存するので含めていない。このため湿式切削の k_1 は乾式切削の 20% 増と仮定した。最適送り速度 F_c 、最適工具交換時間 T_c は式 (3) と (4) により求まる。

$$F_c = C / \{(\tau_0 + k_2/k_1)^n (1/n - 1)^n\} \quad (3)$$

$$T_c = (\tau_0 + k_2/k_1) (1/n - 1) \quad (4)$$

図 14 は 1 穴 ($\phi 5 \times 10$ mm) を除去するのに要する加工費用と送り速度の計算結果である。得られた曲線は凹型となり最適送り速度 F_c が存在する。表 7 に式 (3)、(4) および (2) から求めた最適切削速度 V_c 、最適工具交換時間 T_c および最少加工費用 $c_{\min}$ を示す。S40CL では F_c は 0.623 m/min で、 $c_{\min}$ は 1 穴 4.872 円と安く、快削材の優位性が現れている。

S50C の場合には乾式切削では低い送り速度が好ま

(b) S50C-Carbide

Fig. 14 Relation between production cost and cutting speed in dry/wet machining

Table 6 Parameters used in cost analysis

Overhead and labor cost	$k_1 = 150 \text{ ¥/min}$
(with fluid)	$k_1 = 180 \text{ ¥/min}$
Tool cost	$k_2 = 5000 \text{ ¥}$
Tool-replacement time	$\tau_0 = 2.0 \text{ min}$

しく、 $F=0.21\text{m/min}$ 以下では湿式より有利である。湿式切削では $F=1\text{m/min}$ 付近の高速送り速度が最適であり、低価格域が広く存在していることから加工条件選定範囲は広い。

4. 考 察

エンドミル加工については、切込み $d=5.0 \times 0.2\text{mm}$ 、送り $f_z=0.06\text{mm/刃}$ 一定とし、切削速度すなわちエンドミルの回転数が工具寿命に及ぼす影響を乾式と湿式で比較した。いずれの場合も寿命曲線の傾き n が 1 を越え、切削速度の影響は小さい。湿式切削では傾きがさらに大きく、寿命曲線は乾式よりも高速側にある。切削抵抗は図 3 と図 5 に見るように同程度であることから、切削発熱量は同じと考えられるので、工具寿命の延長は切削油剤による冷却効果と判断できる。

しかしながら、このような工具寿命の差は、図 6 に見るように加工の経済性にはさほど影響しない。低速切削域では完全ドライ化しても乾式と比べて加工費用に差がないか逆転する場合もある。また、切屑処理性や加工精度に関しても実験の範囲内では大差なかった。したがって、エンドミル加工においても積極的に完全ドライ化を図るべきである。仕上げ加工では切削熱が工作物の寸法精度に及ぼす影響は無視できないが、切削後の熱処理や研削などの後処理加工によって克服できるものと考えられる。

S40CL 快削鋼のドリル加工では、鉛の快削作用により被削性のみならず加工の経済性においてもよい結果が得られた。しかし、最近は環境問題から鉛介在部品は受け入れられない状況にある。鉛に代わる快削添加物の開発が望まれる。鉛快削鋼に対してはハイスドリルによる加工も 1 条件ずつではあるが行い、乾式でもドリル寿命は長かった。工具価格が超硬ドリルの 1/20 前後であること、再研削も容易であること等を考慮すると、加工費用の面からはハイスドリルの使用もドライ切削化の一つの有効手段と考えられる。

これまでのような切削油剤の大量使用を見直し、切削油剤の適量化、微量化、供給場所のピンポイント化等によって削減していくこと⁽⁵⁾⁽⁶⁾は歓迎されるものの、環境保全や省資源化の観点からは本質的な解決にはならない。むしろ被削性と経済性の観点から現状で完全

Table 7 Optimum cutting conditions

		S40CL		S50C	
		Dry	Wet	Dry	Wet
F_c	m/min	0.623	—	0.341	1.005
T_c	min	52.13	—	26.99	11.52
c_{min}	¥/cm ³	4.872	—	10.03	6.415

ドライ化が可能な切削条件を明らかにし、湿式に比べて優位性が認められれば積極的に切削条件の変更を図るべきである。一方では、ドライ切削用の工具形状や工具材質の開発、地球環境に優しい快削鋼の開発、ドライ切削に適した切削技術の検討も望まれる。

5. 結 言

機械構造用炭素鋼および合金工具鋼 SKD61 鋼材のエンドミル加工とドリル加工を取り上げ、切削油剤の有無が被削性及び加工の経済性に及ぼす影響を実験的に検討した。得られた主な結論を以下に示す。

- (1) エンドミル加工に関しては、乾式、湿式切削ともに切屑処理性は良好であり、加工精度にも大きな差はない。乾式切削の工具寿命は高切削速度域においては湿式切削に比べて 50%程度短くなるが、低切削速度域ではその差は小さい。その結果、低切削速度域(S45C の場合は $V=90\text{m/min}$ 以下、SKD 61 では $V=20\text{m/min}$ 以下)で乾式の方が加工費用はやや低くなり、優位性が認められる。
- (2) ドリル加工に関しては、工具寿命はすべての条件において乾式の方が短く、高速切削になるほどその差は大きくなる。摩耗形態は湿式と乾式で異なり、湿式はチゼル部、乾式は切れ刃外周部側に集中して発生する。S50C の場合、加工費用の面では低送り速度域の $F=200\text{mm/min}$ 以下では湿式より乾式の方が有利である。
- (3) 完全ドライ加工が優位なあるいは湿式と同程度の被削性と経済性を与える切削条件が存在するので、環境保全や省資源化の観点から本質的な解決策として、ドライ切削化を積極的に導入すべきである。

文 献

- (1) 岩田一明,小野里雅彦,精密工学会誌, 62 (1996.1), 13.
- (2) 例えば, Mackerer C.R, Toxicology and Industrial Health, (1989.5), 429-440.
- (3) 大島郁也,前川克廣,後藤陽一, 日本機械学会論文集(C編), 67.661 (2001.9)
- (4) 人見勝人, 生産システム工学, 共立出版, (1983), 105.
- (5) 田辺郁夫,Minh TRUONG HONG,吉井一夫, 日本機械学会論文集(C編), 66.643 (2000.3), 1026-1030.
- (6) 奥村成史,横川和彦,清水茂夫,横川宗彦, 日本機械学会論文集(C編), 66.643 (2000.3), 1037-1042.