

難削性金属材料の切削加工技術の高度化に関する研究（第1報） コーテッド超硬エンドミルによる難削材の効率的切削加工技術の開発

大塚裕俊・水江宏
機械・金属担当

Study on End Milling Difficult-to-Machine Alloys (the 1st report) - High Efficient Machining with Coated Carbide Endmills -

Hirotooshi OHTSUKA · Hiroshi MIZUE
Mechanical and Metallurgical Engineering Gr.

要 旨

難削性金属材料の切削加工技術の高度化のため、開発されたエンドミル工具を用いて、ステンレス鋼、ダイス鋼など難削材の切削加工実験によりその効率的な加工条件の探索を行った。その結果、適切な加工条件により本エンドミルがステンレス鋼・ダイス鋼（SKD11系）に適用可能であるが、ダイス鋼（SKD61）において最も切削距離が延びることが示された。なおダイス鋼（SKD61）では、切削速度や径方向切込量を適正値より大きくすると急激に切削距離が減少するが、一刃送り量については切削体積と生産性を最大にする最適値が存在することがわかった。

1. はじめに

ダイス鋼やステンレス鋼は金型や機械部品等に多く利用されているが、その硬度や材料特性に起因する難削性の解消が常に課題となっている。とりわけ近年エンドミルによる切削加工が一般的となっているため、エンドミル加工における被削性の向上が求められている。今回、これら難削性金属材料の切削加工技術の高度化のため、新たに開発されたコーテッド超硬エンドミル工具を用いて、難削材の切削加工実験によりその効率的な加工条件の研究を行う。そしてあらかじめ設定した標準切削条件を基準として本エンドミルの工具寿命試験を行うことにより、工具寿命や生産性を大きくできる適切な加工条件について示す。

2. 実験装置と方法

2.1 被削材と切削工具

工具として直径 8mm、4 枚刃、ねじれ角 30° の(Ti, Al)N コーティングされた超硬ストレートエンドミル（新たに（株）信栄製作所で開発）を用いる。工具の形状を Fig.1 に示す。なおエンドミルの母材はチップングに強い超微粒子超硬合金を用い、従来の AlTiN コーティング材料等に比較して硬度や耐酸化性が向上した被膜を用いている。

被削材として ステンレス鋼 SUS440C, SUS304 ダイス鋼 SKD11(硬さ HRC60), HPM31(SKD11 改良鋼) ダイス鋼 SKD61(硬さ HRC53)を用いる。

2.2 実験装置と手順

Fig.2 に用いる実験装置の概略を示す。上記の材料から作製した被削材を立形マシニングセンタ(MC)のテーブル上に取り付ける。被削材は圧電素子を用いた3成分工具動力計上に保持され、工具寿命試験と切削抵抗の測定に用いられる。試験および測定は Table 1 中の R_d , A_d に示されるように、被削材についてエンドミルの軸方向と径方向に一定の切込み量を与え、XY 平面内での直線端面切削により行う。



Fig.1 Coated carbide endmill

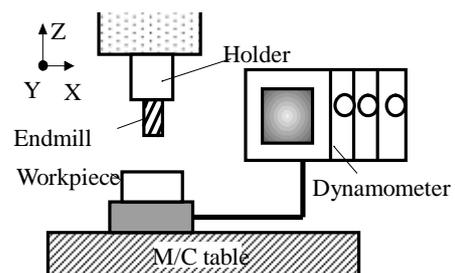


Fig.2 Setup for experiment

Table 1 Cutting conditions for experiment

Cutting speed (Spindle speed)	S V	75*, 113, 150 m/min 3000*, 4500, 6000 min ⁻¹
Feed per tooth	f_z	0.03*, 0.09, 0.18 mm/tooth
Cutting direction		Down cut
Free length of endmill		24 mm
Tool runout		4 μ m
Radial depth of cut R_d		0.2*, 0.4, 0.6 mm
Axial depth of cut A_d		8 mm
Workpiece		SUS440C, SUS304 SKD11, HPM31 SKD61
Coolant		Dry air

* Standard cutting conditions

2.3 実験条件

工具寿命試験および切削抵抗測定について用いる切削条件（直線切削）を Table 1 に示す。このうち*印が標準切削条件であり、すべての被削材に共通に用いられる。被削材 SKD61 においては、後述のように切削速度 S（主軸回転数 V）、一刃送り量 f_z および径方向切込量 R_d を比較のため標準切削条件から変化させて実験を行う。実験では、工具寿命となるまで直線端面切削加工を繰り返し行って切削抵抗を測定するとともに、切りくず・切れ刃の摩耗などを観察する。

3. 実験結果と考察

3.1 ステンレス鋼

金属組織がそれぞれマルテンサイト系の SUS440C とオーステナイト系の SUS304 を用いて、標準切削条件のもとでのステンレス鋼の工具寿命試験および切削抵抗測定を行い、被削性等について比較評価を行った。ステンレス鋼はさまざまな用途に広く利用されているが、一般に靱性が大きく加工硬化を起こしやすい性質などから、その被削性に問題があり切削加工効率の向上が課題となっていた。

まず SUS440C では、Fig.3 に示すように切削距離の増大とともに工具摩耗が次第に進展し、切削距離 72m で工具寿命となった。工具摩耗の特徴は、切れ刃先端形状が逃げ面とすくい面を含めて面取り状に鈍化していくように摩耗が進展していく点である。また境界部において工具摩耗がやや大きくなった。また切削距離が大きくなると切れ刃への被削材の溶着が一部発生した（Fig.3 切削距離 56m）。

切削抵抗の測定値については、切削距離とともに被削材に対する法線方向成分 F_x が他成分と比べて切削距離とともに顕著に増大しているが、これは工具摩耗の増大に対応している（Fig.4）。

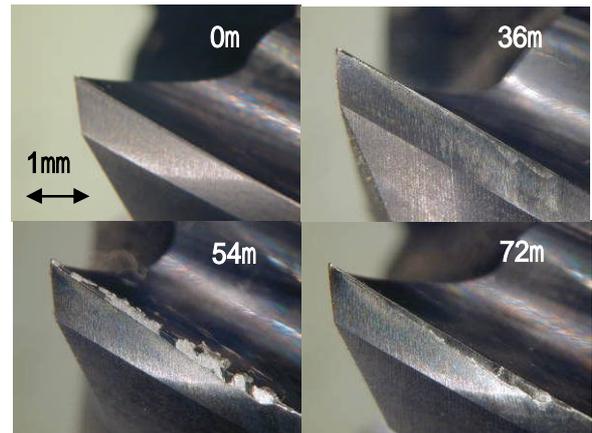


Fig.3 Photographs of cutting edge
(Workpiece: SUS440C)

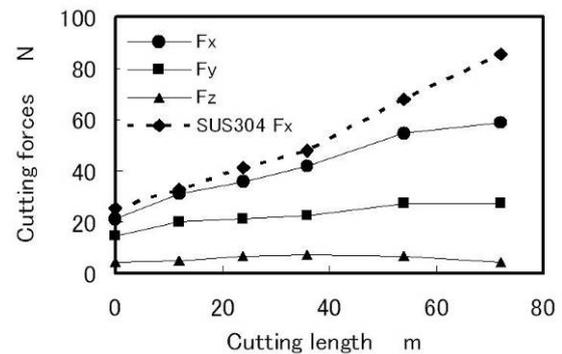


Fig.4 Relation between cutting length and cutting force
(Workpiece: SUS440C)

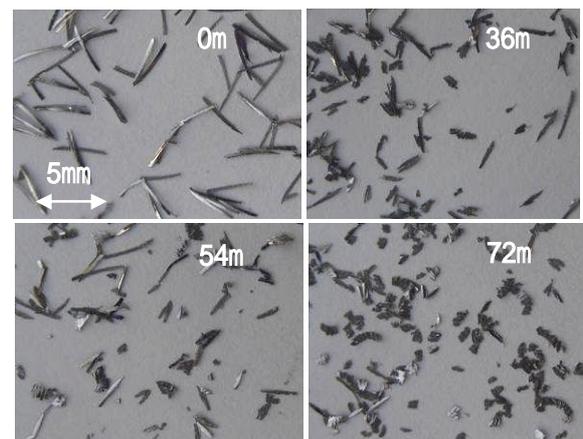


Fig.5 Photographs of chip (Workpiece: SUS440C)

切りくず形状については、切削距離 12m程度までは銀色の短冊状切りくずであるが、切削距離 36mになって切りくずの千切れが多くなっており、この段階で切れ刃に大きなチップングは見られないことから刃先の細かいチップングが成長した結果として切りくずの千切れが

起こってきたものと考えられる．工具摩耗時にはほとんど切片状に断裂した切りくずとなり，切りくずの色も銀色から鈍い色に変化した（Fig.5）．

これに対し SUS304 では，切れ刃の摩耗形態は SUS440 とほぼ同様であり，工具寿命までの切削距離もほぼ同じであった．切削抵抗の工具寿命までの増加傾向も SUS440 とほぼ同様であったが，切削抵抗値は SUS304 の方がやや高く（Fig.4），その工具摩耗は切れ刃全体にわたって均一に早く進行し，切りくずも工具摩耗時にはほとんど断裂状となった．

3.2 ダイス鋼（SKD11 系）

ダイス鋼 SKD11 は金型用鋼材として広く利用されているが，これまで被削性に問題があり切削加工効率の向上が課題となっていた．そのため組織の炭化物を微細かつ均一に分散させるなど改良を施した SKD11 系の新種鋼材が開発され普及している．本研究ではその例として日立金属（株）製の冷間ダイス鋼 HPM31 をとりあげた．そして SKD11 と HPM31 について標準切削条件のもとで試験を行い，被削性等について比較評価を行った．

まず SKD11 では，切削距離 5m 付近で刃先に比較的大きなチッピングが発生し，刃先が急激に摩耗して切刃に大きな火花を巻くようになり，大きな溶着を起こして切削不能となり切削距離 8m 程度で工具寿命に至った（Fig.7 点線）．

これに対し HPM31 では，Fig.6 に見られるように，切削距離の増大とともに切れ刃の均一な摩耗進行と溶着の発生があったが，切削距離 12m 付近までは比較的安定した切削が可能であった．しかしその後切れ刃各部にチッピングが発生してそれが成長し，切削距離 36m 付近で境界部に大きなチッピングが発生し切刃に大きな火花を巻くようになり溶着を起こして工具寿命となった．

切削抵抗の測定値については，切削距離とともに被削材に対する法線方向成分 F_x が他成分と比べて切削距離とともに顕著に増大したが，工具寿命に近づくにつれ増加傾向は小さくなった（Fig.7）．

切りくず形状については，新品工具時は金色で細く大きなカール形状であったが，切削距離の増大とともに，徐々にカールが開き色が深青色に変化していった．そしてチッピングの発生と成長につれ切りくずの千切れが発生し，細かい切りくずの破断片が発生するようになった．最終的には切りくずは不定形に千切れて散乱した．また色が一部深青色から青白色へと変化した．また工具摩耗の増大とともに，切りくずのカール内側の色は深青色に変化していき，その後深青色から青白色へと変化した．エンドミル切刃の崩壊とともに工具寿命を迎えた（Fig.8）．

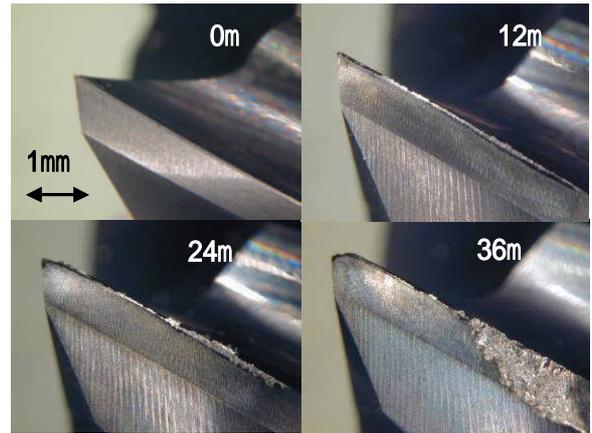


Fig.6 Photographs of cutting edge (Workpiece: HPM31)

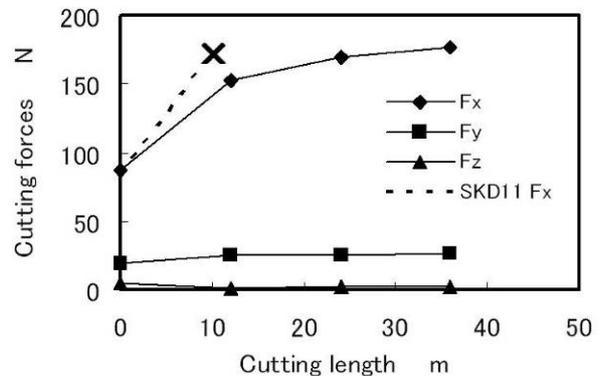


Fig.7 Relation between cutting length and cutting force (Workpiece: HPM31)

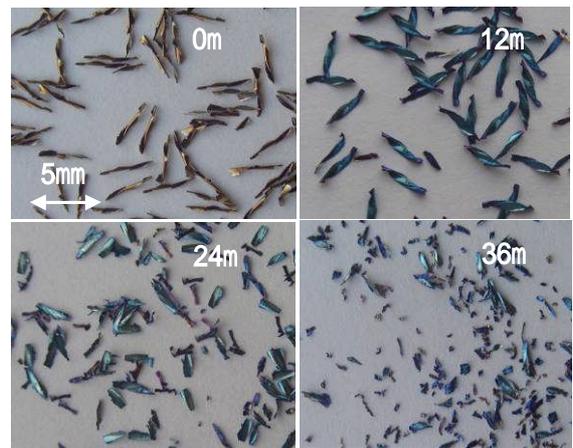


Fig.8 Photographs of chip (Workpiece: HPM31)

以上の結果から SKD11 の材質を改良した HPM31 について，その被削性向上が本実験により裏付けられた．また本エンドミルについて，別の実験結果から従来の AlTiN コーテッド超硬エンドミルよりも切削距離が延びており，工具のコーティング材料の改良も SKD11 系金型用鋼材のエンドミル切削に有効であると考えられる．

3.3 ダイス鋼 (SKD61)

ダイス鋼 SKD61 は金型用鋼材として広く利用されている。本研究では標準切削条件と、比較のため標準切削条件から変化させた条件の両方で試験を行い、被削性等について比較評価を行った。

まず標準切削条件での工具寿命試験では、Fig.9 に見られるように、切削距離の増大とともに切れ刃各部に均一な摩耗が進行した。その後切削距離 72m 付近から境界部での摩耗とチップングが目立ちはじめ溶着が見られるようになった。そして切削距離 260m 付近で境界部に大きなチップングが発生し直後に切れ刃が崩壊して切削距離 280m で工具寿命となった。

切削抵抗の測定値については、切削距離とともに被削材に対する法線方向成分 F_x が他成分と比べて切削距離とともにゆるやかに増大したが、工具寿命に近づくにつれ急激に増大した (Fig.10)。

切りくず形状については、新品工具時は金色で細く大きなカール形状であったが、切削距離の増大とともに、徐々にカールが開き端面にギザギザが発生しこのささくれが切削距離とともに大きくなった。さらに切削距離 140m をすぎると一部色が赤紫色に変化しはじめ、切りくずの干切れが発生するようになった。そして切削距離 200m を過ぎると切りくずの色が全体的に赤紫～青紫を含む濃い色に変化し、最終的に工具寿命時には青色となった。切りくず形状も工具摩耗時にはほとんど断裂状となった (Fig.11)。

3.3.1 切削速度による工具寿命の変化

切削速度 S を変化させて工具寿命試験を行った際の切削抵抗の測定値 (法線方向成分 F_x) の変化を比較して Fig.12 に示す。切削速度 S を標準切削条件 (75m/min: 主軸回転数 3000rpm に対応) を含む 3 通りに変化させて実験を行ったが、変形前の切りくず形状はいずれも同じとなる条件とした。Fig.12 によれば、切削速度 S が 75m/min より大きくなると急激に工具寿命までの切削距離が減少することがわかる。これより標準切削条件での切削速度 S がほぼ適切な条件に含まれることが推察できる。

3.3.2 径方向切込量による工具寿命の変化

径方向切込量 R_d を変化させて工具寿命試験を行った際の切削抵抗の測定値 (法線方向成分 F_x) の変化を比較して Fig.13 に示す。径方向切込量 R_d を標準切削条件 (0.2mm) を含む 3 通りに変化させて実験を行った。Fig.13 によれば、径方向切込量 R_d が 0.2mm より大きくなると急激に工具寿命までの切削距離が減少することがわかる。これより標準切削条件での径方向切込量 R_d がほぼ適切な条件に含まれることが推察できる。

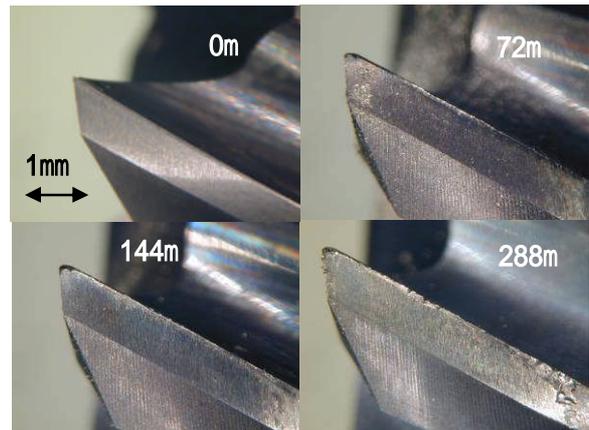


Fig.9 Photographs of cutting edge (Workpiece: SKD61)

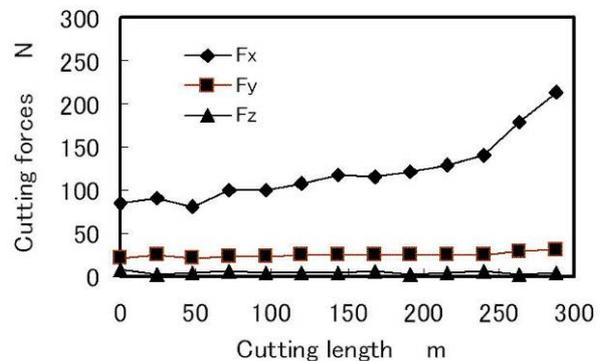


Fig.10 Relation between cutting length and cutting force (Workpiece: SKD61)

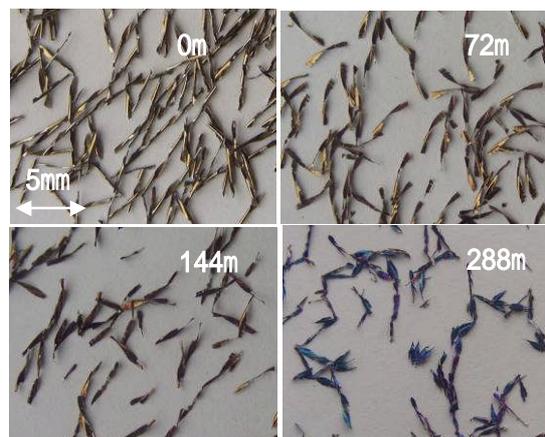


Fig.11 Photographs of chip (Workpiece: SKD61)

3.3.3 送り量による工具寿命の変化

一刃送り量 f_z を変化させて工具寿命試験を行った際の切削抵抗の測定値 (法線方向成分 F_x) の変化を比較して Fig.14 に示す。一刃送り量 f_z を標準切削条件 (0.03mm) を含む 3 通りに変化させて実験を行った。Fig.14 によれば、一刃送り量 f_z が 0.09mm 程度までは

工具寿命までの切削距離が大きくなるが、それ以上では切削距離は減少することがわかる。一刃送り量 f_z を大きくできれば切削体積や生産性の増大が可能となるため、一刃送り量 f_z についてこれらを最大にする最適値が存在することがわかる。よって標準切削条件での一刃

送り量 f_z は、生産性の観点からはまだ大きくしてもよいことが推察できる。

4. おわりに

開発されたエンドミル工具を用いて、切削加工実験による難削材の適切な加工条件の研究を行って次の結果を得た。

- (1) ステンレス鋼では、標準切削条件において SUS440C が切削距離 72m, SUS304 が切削距離 40m となり、切れ刃先端が面取り状に鈍化していくような摩耗形態を示した。
- (2) ダイス鋼 (SKD11 系) では、標準切削条件において SKD11 が切削距離 8m, HPM31 が切削距離 36m となり HPM31 による被削性向上が裏付けられた。
- (3) ダイス鋼 (SKD61) では、標準切削条件において切削距離 280m となった。工具寿命に近づくほど切れ刃境界部での摩耗とチッピングが顕著となった。
- (4) ダイス鋼 (SKD61) では、標準切削条件から切削速度や径方向切込量を大きくすると急激に切削距離が減少した。なお一刃送り量については切削体積と生産性を最大にする最適値が存在する。

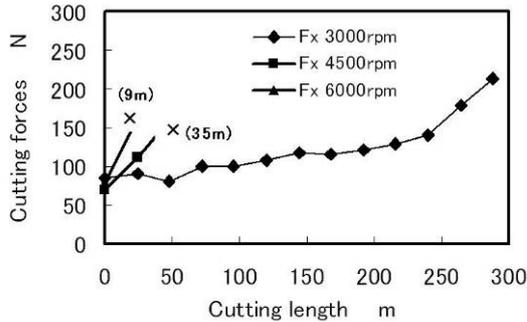


Fig.12 Relation between cutting length and cutting speed (Workpiece: SKD61)

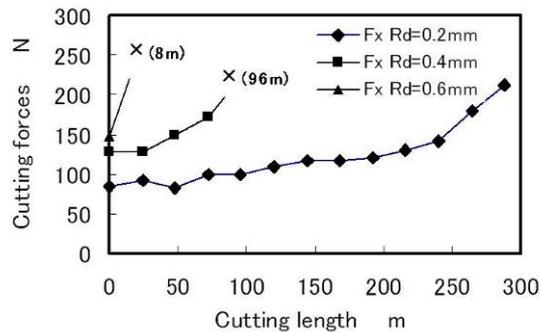


Fig.13 Relation between cutting length and radial depth of cut (Workpiece: SKD61)

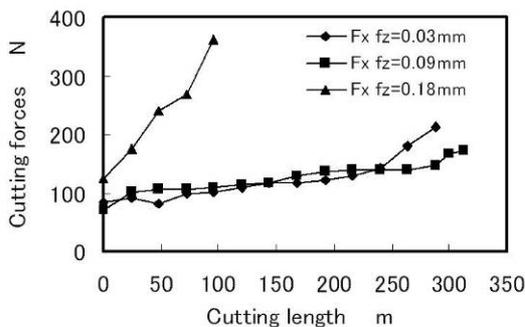


Fig.14 Relation between cutting length and feed per tooth (Workpiece: SKD61)

参考文献

- (1) 中川平三郎, 廣垣俊樹, 垣野義昭, 喜田義宏, 大塚裕俊: 金型用焼入れ鋼のエンドミル加工に関する研究 - SKD11 と SKD61 の比較 -, 精密工学会誌, 67, 5(2001) 834.

追記

本研究は、平成 22 年度の九州各県工業系公設試連携研究の一環として実施されました。