

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2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・橋口智和
機械・金属担当

Study on end milling difficult-to-machine alloys(the 2nd report)

-High efficient machining with coated carbide endmills -

Hirotooshi OHTSUKA・Hiroshi MIZUE・Tomokazu HASHIGUCHI
Mechanics and Materials Engineering Division

要 旨

難削性金属材料の切削加工技術の高度化のため、前年度に開発された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探索を行った。その結果、ダイス鋼（SKD61）では一刃送り量について切削体積を最大にする最適値が存在することがわかった。また不等リードエンドミルを用いて、ステンレス鋼・ダイス鋼など難削材の切削加工実験を行った結果、通常のエンドミルに比較して切削距離が伸び、表面粗さや形状精度においても一部改善される結果が示された。

1. はじめに

ダイス鋼やステンレス鋼は、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おり、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、前年度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を行うことにより効率的な加工条件の研究を継続して行う。また難削性金属材料の加工効率向上への一手段として、今回一刃ごとにねじれ角を変化させた不等リードエンドミルを適用する。昨年度の結果による知見により調整した標準切削条件を基準として通常のエンドミルとの比較試験を行い、工具寿命や加工品質の向上についての有効性を示す。

2. 実験装置と方法

2.1 切削工具と被削材

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を用いる（(株)信栄製作所で開発：以下エンドミル(A)とする）。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。

また別に、ねじれ角が交互に 40° と 42° である直径 8mm, 4 枚刃の(Ti, Al)N コーティングされた超硬

ストレートエンドミル（不等リードエンドミル：市販品：Fig.2）を用いる（以下エンドミル(B)とする）。なおこの工具の比較対照用として、材質がほぼ同等の超硬ストレートエンドミル（ねじれ角がすべて 45°）を利用する（以下エンドミル(C)とする）。

被削材としては、ダイス鋼 SKD61(硬さ HRC53) ダイス鋼 HPM31(SKD11 改良鋼) ステンレス鋼 SUS304, SUS410, SUS430 を用いる。

2.2 実験装置と手順

Fig.1 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て XY 平面内での直線端面切削により行い、切れ刃や切りくずの外観について適宜に観察する。

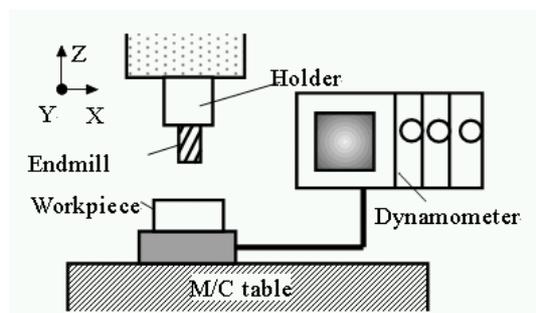


Fig.1 Setup for experiment

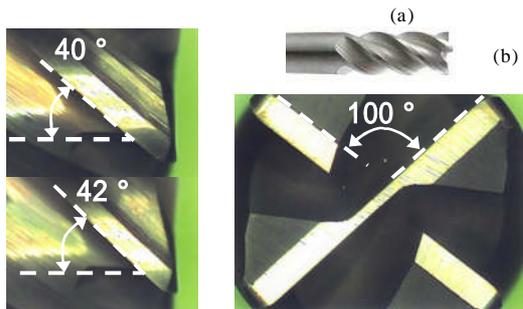
Table 1 Cutting conditions for experiment

Tools	Endmill(A) (SHIN-EI SEISAKUSHO Co., Ltd.)	Endmill(B) (Unequal helix Angle) Endmill(C)
	Cutting speed V m/min (Spindlespeed) S min ⁻¹	75* 3000*
Feed per tooth f _z mm/tooth	0.03, 0.06*, 0.09, 0.18	0.03**+
Cutting direction	Down cut	Down cut*** Up cut
Free length of tool mm	24	24
Tool runout	6 μm	6 μm
Radial depth of cut R _d mm	0.2*	0.2**+, 1.0 ⁺
Axial depth of cut A _d mm	4	4
Workpiece	SKD61	HPM31 SUS304 SUS410 SUS430
Coolant	Dry air	Dry air

* Standard cutting conditions for workpiece

** Standard cutting conditions for workpiece

+ Standard cutting conditions for workpiece



(a) Side edge

(b) Bottom edge

Fig.2 Unequal helix angl endmill (Endmill(B))

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。被削材ごとに*印等で示す標準切削条件を用いる。エンドミル(A)による被削材 SKD61 の切削実験については、後述のように一刃送り量 f_z を比較のため標準切削条件から変化させて実験を行う。またエンドミル(B)による被削材 SUS304 の切削実験については、切削速度 V (主軸回転数 S) を比較のため標準切削条件から変化させて実験を行う。同じく被削材 にはエンドミル(B)(C)による比較を行って不等リードエンドミルによる効果を検証する。実験では、いずれも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。なおエンドミル(B)(C)では工具新品時の形状精度についても測定する。

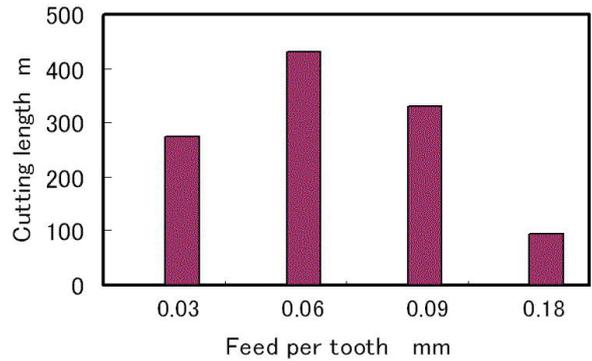


Fig.3 Relation between feed per tooth and cutting length (Endmill(A) Workpiece: SKD61)

3. 実験結果と考察

3.1 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エンドミル(A)による試験を行い、被削性等について比較評価を行った。

標準切削条件 (Table 1 *印) での工具寿命試験では、Fig.4 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 200m 付近から境界部での摩耗と切れ刃に沿った小さなチップングが目立ちはじめ。そして切削距離 320m 付近で境界部にやや大きなチップングが発生した後、これが次第に成長していき、やがて切れ刃が崩壊して切削距離 432m 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ていった (Fig.6)。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り、切削距離の増大とともに、徐々にカールが開き端面に細かいギザギザが発生した。さらに切削距離 120m を過ぎると色が赤紫色に変化して、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 300m 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濃青色となった。切りくず形状も工具摩耗時にはほとんど断裂した形状となった (Fig.5)。

3.1.1 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工具寿命までの切削距離の比較を Fig.3 に示す。Fig.3 によれば、一刃送り量 $f_z=0.06\text{mm}$ 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

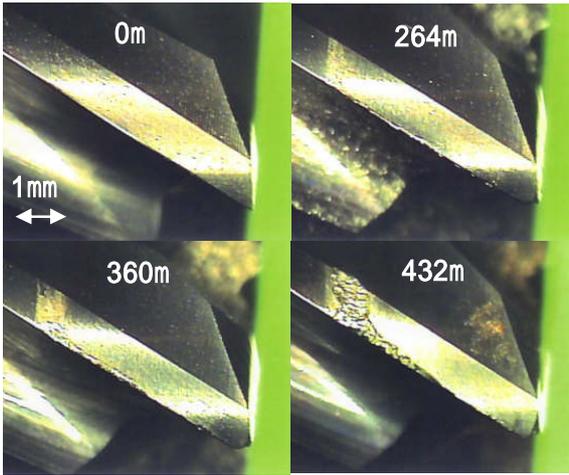


Fig.4 Photographs of cutting edge (Endmill(A) Workpiece: SKD61)

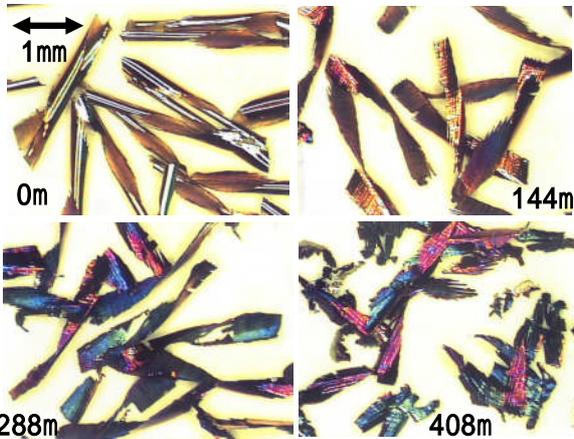


Fig.5 Photographs of chip (Endmill(A) Workpiece: SKD61)

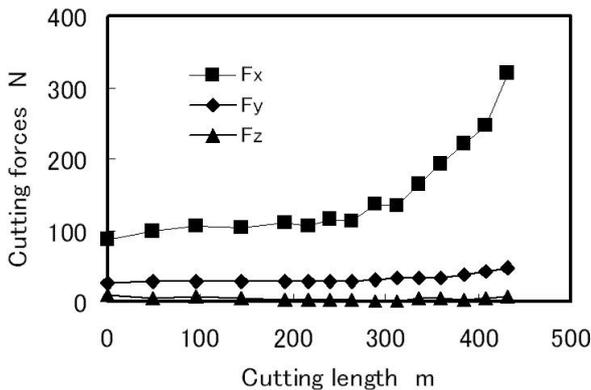


Fig.6 Relation between cutting length and cutting force (Endmill(A) Workpiece: SKD61)

では切削距離は減少することがわかる．すなわち一刃送り量 f_z について，切削体積を最大にする最適値が存在することがわかる．よって今回の標準切削条

件での一刃送り量 $f_z=0.06\text{mm}$ は，生産性を最大化する観点からはほぼ適切な値である．

3.2 ダイス綱 (SKD11系)

本研究では SKD11 系の新種鋼材として日立金属 (株) 製の冷間ダイス鋼 HPM31 をとりあげ，標準切削条件 (Table 1 **印) のもとでエンドミル(C)との比較試験を行い，被削性等について比較評価を行って不等リードエンドミルによる効果を検証した．

不等リードエンドミル(B)の結果については，まず切れ刃の変化では，Fig.7 に見られるように，切削距離の増大とともに切れ刃の先端に沿って小さなチッピングや挟れるような形でコーティングの小さな剥離が進行していったが，切削距離 150m 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，切れ刃境界部のチッピングが次第に大きく成長して切削距離 210m 付近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顕著に増大したが，切削開始から一貫してほぼ同じ割合で増加していくという特徴的な傾向が見られた (Fig.9) ．

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端面に一部ギザギザが発生していた．切削距離の増大とともに，徐々にカールが開き端面のギザギザが大きくなった．さらに切削距離 25m を過ぎると色が赤紫色に変化して，切りくずの千切れが発生するようになった．そして切削距離 90m を過ぎると切りくずの色が全体的に濃青色に変化した．その後しだいに部分的に青白色に変化しながら色が薄くなっていき工具寿命を迎えた．切りくず形状も工具摩耗時にはかなり断裂した形状となり，表面には細かい皺状の筋が多く見られた (Fig.8) ．

以上の不等リードエンドミル(B)の結果と比較のためエンドミル(C)について同じ条件で実験した際の切削抵抗の測定値 (法線方向成分 F_x) の変化を Fig.9 中の 印で示す．これによれば不等リードエンドミルが切削距離 210m とエンドミル(C)よりも 70%以上伸びていることがわかる．またエンドミル(B)と同様な特徴的な切削抵抗の増加傾向を示すことがわかる．

また標準切削条件を軸方向切込み量 $A_d=8\text{mm}$ に変えて加工した表面形状の軸方向測定結果を Fig.10 に示す．主軸回転数 $S=6000$ とした結果も同時に示す．エンドミル(B)において， $S=3000$ では細かい表面凹凸が大幅に改善されたが， $S=6000$ では大きな形状変化 (うねり) の差以外では細かい表面凹凸に顕著な変化は認められなかった．

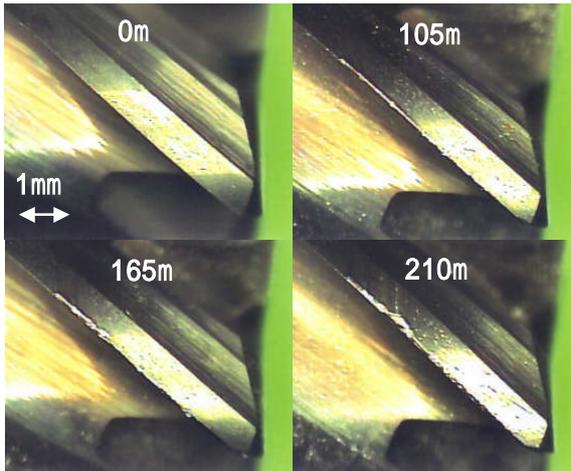


Fig.7 Photographs of cutting edge (Unequal helix Angle Endmill(B) Workpiece: HPM31)

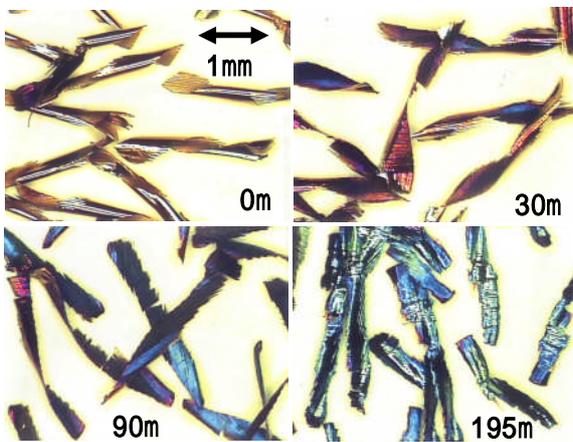


Fig.8 Photographs of chip (Unequal helix Angle Endmill(B) Workpiece: HPM31)

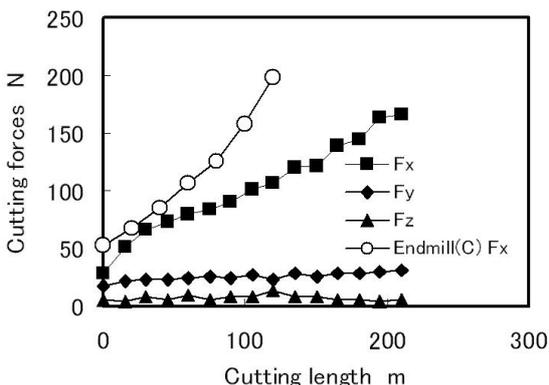


Fig.9 Relation between cutting length and cutting force (Unequal helix Angle Endmill(B) Workpiece: HPM31)

3.3 ステンレス鋼

ステンレス鋼は各種用途に広く利用されているが、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。本研究では、金属組織がそれぞれオ

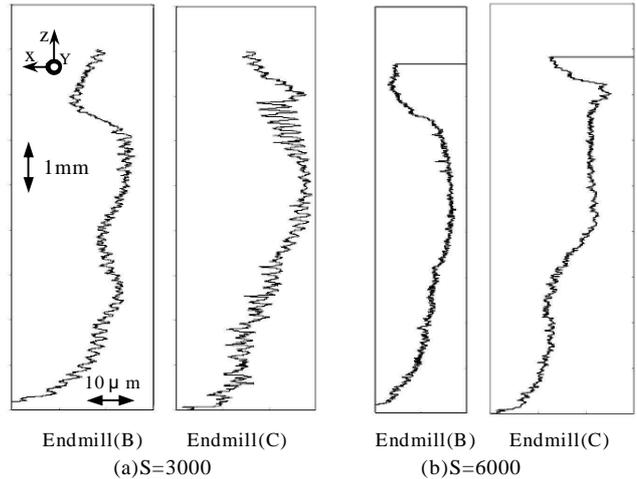


Fig.10 Measured surface profiles (Axial direction Workpiece: HPM31)

ーステナイト系の SUS304，マルテンサイト系の SUS410 およびフェライト系の SUS430 を用いて、標準切削条件 (Table 1 +印) 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、被削性等についてエンドミル(B)による評価を行った。なお SUS304 についてはエンドミル(C)との比較評価を行って不等リードエンドミルによる効果を検証した。

まず SUS304 では、Fig.11 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 84m 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チップングが起こり摩耗が進行していく点である。そして切削距離とともに、境界部よりも切れ刃中央部において工具摩耗やチップングが大きくなった。そして刃先が赤熱して切れ刃への被削材の溶着が発生し、工具寿命を迎えた。

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 がゆるやかに増大していき、工具寿命が近づくとその増加率が大きくなった (Fig.13)。

切りくず形状については、当初は銀色の短冊状切りくずであるが、切削距離 20mを過ぎて切りくずの千切れが多くなった。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やや鈍い色に変化した (Fig.12)。

これに対し SUS410, SUS430 では、切れ刃の摩耗形態は SUS440 とほぼ同様であり、切削抵抗の工具寿命までの増加傾向も SUS304 とほぼ同様であったが、工具寿命までの切削距離は SUS410 が最も長く、ついで SUS430, SUS304 の順となった (Fig.14)。エンドミル(C)について同じ条件で実験した際の切削抵抗の

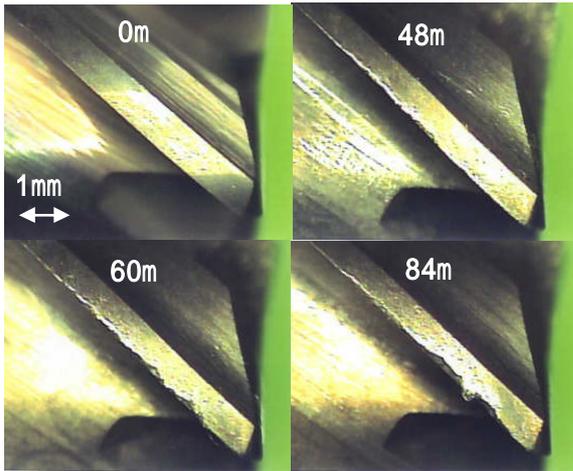


Fig.11 Photographs of cutting edge (Unequal helix Angle Endmill(B) Workpiece: SUS304)

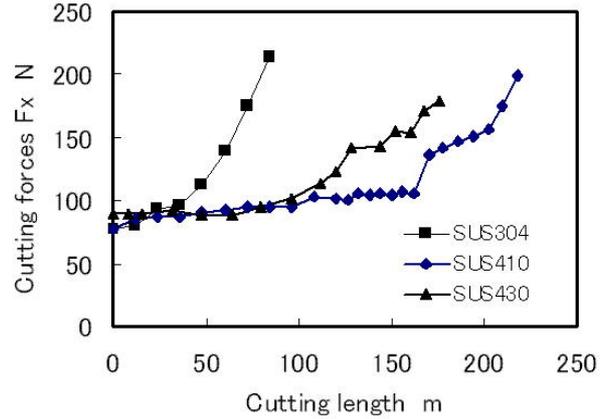


Fig.14 Relation between cutting length and cutting force Fx (Unequal helix Angle Endmill(B) Workpiece: group)

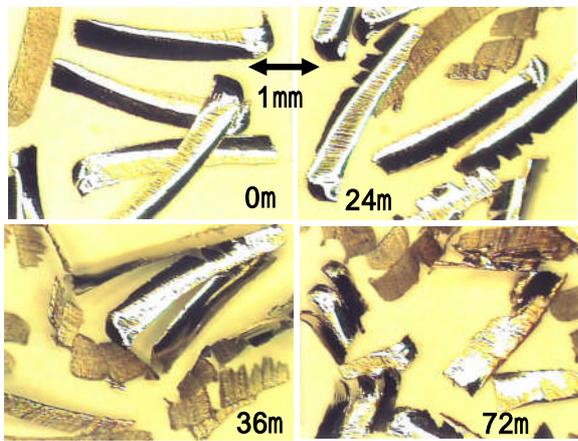


Fig.12 Photographs of chip (Unequal helix Angle Endmill(B) Workpiece: SUS304)

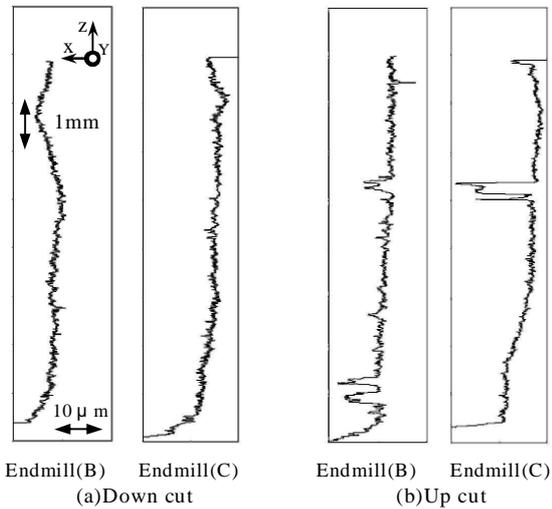


Fig.15 Measured surface profiles (Axial direction Workpiece: SUS304)

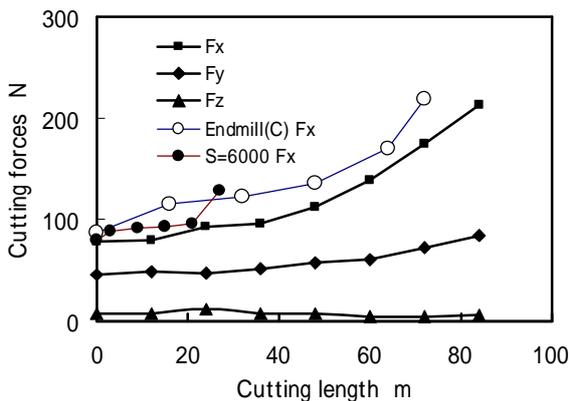


Fig.13 Relation between cutting length and cutting force (Unequal helix Angle Endmill(B) Workpiece: SUS304)

測定値（法線方向成分 Fx）の変化を Fig.13 中の 印で示す．これによれば不等リードエンドミルでは 10%程度切削距離が伸びていることがわかる．

また標準切削条件を軸方向切込み量 $A_d=8\text{mm}$ ，径方向切込み量 $R_d=0.2\text{mm}$ に変えて加工した表面形状の軸方向測定結果を Fig.15 に示す．エンドミル(B)において，ダウンカットでは細かい表面凹凸が若干改善された．アップカットでは表面にむしれが生じたが，エンドミル(B)の方がその高さは小さくなった．

3.3.1 切削速度による工具寿命の変化

SUS304 について主軸回転数を 2 倍の $S=6000$ にし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 Fx）の変化を Fig.13 中の 印で示す．変形前の切りくず形状は同じとなる条件とした．Fig.13 によれば，不等リードエンドミルでも切削速度が 75m/min より大きくなると工具寿命までの切削距離が急激に減少することが推察できる．

4. おわりに

開発されたエンドミルや不等リードエンドミルを用いて、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) 開発されたエンドミルのダイス鋼 (SKD61) 切削では、標準切削条件のもとで一刃送り量 $f_z=0.06\text{mm}$ 付近で切削体積が最大となることがわかった。
- (2) 不等リードエンドミルの HPM31 切削では、標準切削条件において切削距離 210m となり、比較したエンドミルの切削距離 120m に対して 70%以上工具寿命が延びた。
- (3) HPM31 の切削では、切れ刃境界部のチッピングが大きく成長して工具寿命に至った。また切削抵抗の被削材に対する法線方向成分 F_x が、切削開始から一貫してほぼ同じ割合で増加していくという特徴的な傾向が見られた。
- (4) 不等リードエンドミルの HPM31 切削では、加工面の細かい表面凹凸が主軸回転数 $S=3000$ では大幅に改善された。
- (5) 不等リードエンドミルの SUS304 切削では、標準切削条件において切削距離 84m となり、比較したエンドミルの切削距離 72m に対して工具寿命が 10%程度延びた。
- (6) ステンレス鋼の切削では、標準切削条件において SUS304, SUS430, SUS410 の順に切削距離が長くなった。また切れ刃先端が面取り状に鈍化していく摩耗形態を示した。切削抵抗の被削材に対する法線方向成分 F_x が、工具寿命が近づくに従い増加率が大きくなった。
- (7) 不等リードエンドミルの SUS304 切削では、ダウンカットで細かい表面凹凸が若干改善され、アップカットで表面のむしれ高さが小さくなった。

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 23 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。