

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4報） —コーテッド超硬エンドミルによるチタン合金の効率的切削加工技術の開発—

大塚裕俊・水江宏・重光和夫・橋口智和・伊野拓一郎
機械担当

Study on end milling difficult-to-machine alloys (the 4th report) - High efficient machining with coated carbide endmills -

Hirotooshi OHTSUKA・Hiroshi MIZUE・Kazuo SHIGEMITSU・Tomokazu HASHIGUCHI・Takuichiro INO
Mechanics Engineering Group

要 旨

難削性金属材料の切削加工技術の高度化のため、エンドミルの切れ刃形状を変化させた不等リードエンドミルを用いて、チタン合金 (Ti-6Al-4V) 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不等リードエンドミルでは切削距離が伸びる結果が示された。また、加工条件の厳しい波形工具パスなどによる切削加工実験を行った結果、急峻な切削抵抗の増減を多く伴う工具パスの方がチタン合金 (Ti-6Al-4V) では工具寿命が大幅に減少することがわかった。

1. はじめに

近年、航空機産業では省エネルギー化の要求に伴い、機体の軽量化と強度保持とを同時に実現できるような素材が求められるとともに、リブ形状等をもつ加工除去率の大きい複雑形状部品の加工が必要となっている。

なかでも航空機の骨組みを支える構造材や高温になるエンジン部品等で、現在多用される代表的な金属材料 (チタン合金、ニッケル合金等) は難削性材料とされており、その切削加工では、エンドミルなどの工具寿命が短く加工面品質の保持が難しい等の問題がある。したがって、航空機産業等でこれから需要がますます大きくなる難削材の切削加工技術を、コストに見合った技術として確立することは重要な課題となっている。

そこで今回は、チタン合金を対象として、コーテッド超硬エンドミル工具 (不等リードエンドミルを含む) を加工実験に適用する。また加工形状としては、実際の部品加工を想定した、工具にとって負荷の大きな波型パス・ジグザグパス等 (非直線状工具パス) による切削加工を実施する。

本研究では、被削材の加工効率向上の手段として、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。前回のステンレス加工で有効性が確かめられた本工具を用いて通常のエンドミルと比較試験を行い、工具寿命向上についての有効性を検討する。また、工具寿命に影響を与える切削抵抗の変動に注目して波型パス・ジグザグパス等による工具寿命の比較実験を行い、工具寿命向上のための工具パス設計の要点について検討する。

さらに、得られた知見をもとに工具パスや加工条件を適切に与えてチタン合金を切削加工し、複雑形状部品を製作し形状精度等の評価を行う。

2. 実験装置と方法

2.1 切削工具と被削材

工具として、ねじれ角が交互に 43° と 46° 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: Fig. 2) を用いる (A 社製: 以下エンドミル (A))。その比較対照用として、ねじれ角がすべて 45° の超硬ストレートエンドミルを用いる (A 社製: 以下エンドミル (B))。工具母材は超微粒子超硬合金である。なお被削材はチタン合金 (Ti-6Al-4V) 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 1, 2 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 1 は工具寿命試験に用いられ、被削材 2 は 3 成分工具動力計上に保持され切削抵抗の測定に用いられる。

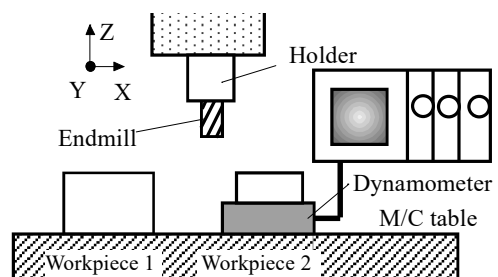


Fig. 1 Setup for experiment

切削抵抗の測定は Table 1 右の 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直線端面切削により行う。工具寿命試験の標準切削条件も Table 1 左に示す。切れ刃や切りくずの外観についても適宜に観察する。

2.3 実験条件

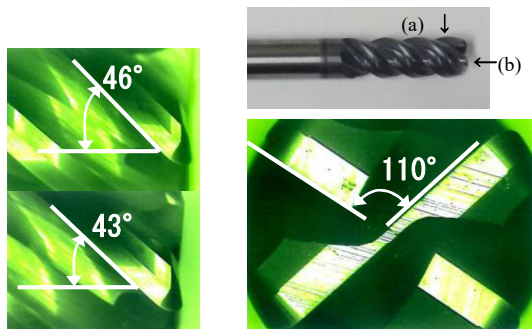
工具寿命試験に用いる切削条件を Table 1 左に示す。この条件で Fig. 3(a) (b) (c) に示す工具パスを用いて端面切削を繰り返し行うが、ある切削距離ごとに切削抵抗の測定と切れ刃や切りくずの観察を行う。切削抵抗の測定は Table 1 右に示す直線切削による切削条件によって行う。

Table 1 Cutting conditions for experiments

Experiment	Tool wear experiment (Workpiece1)	Cutting force Measurement (Workpiece2)
Cutting conditions		
Cutting speed V m/min (Spindlespeed) S min ⁻¹	75 3000	75 3000
Feed per tooth f_z mm/tooth	0.06 (Wave shape & Zigzag)	0.06 (straight)
Cutting direction	Down cut	Down cut
Free length of tool mm	24	24
Tool runout	$\leq 6 \mu\text{m}$	$\leq 6 \mu\text{m}$
Radial depth of cut R_d mm	0.4 (Standard)	0.4 (Constant)
Axial depth of cut A_d mm	8	8
Workpiece	Ti-6Al-4V	Ti-6Al-4V
Coolant	Dry air	Dry air

Table 2 Coated carbide endmills ($\phi 8\text{mm}$, 4 flutes) used for experiments

Manufacturer	Company A (commercial product)	Diameter	Corner R
Cutting edge			
Variable helix endmill	Endmill(A) 43°, 46°	8mm	1mm
Normal endmill	Endmill(B) 45°	8mm	0mm



(a) Side edge (b) Bottom edge
Fig. 2 Variable helix endmill (Endmill(A))

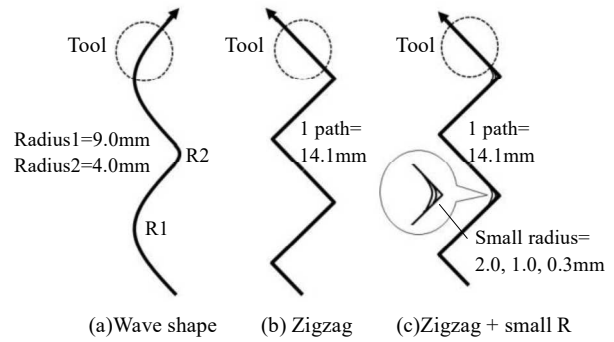


Fig. 3 Tool paths used for tool wear experiment

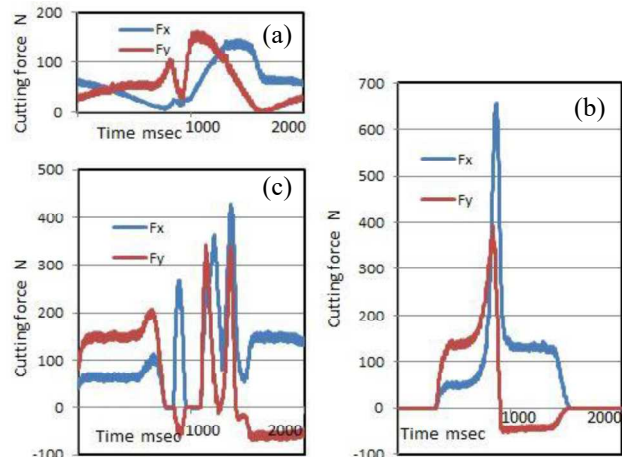


Fig. 4 Measured cutting force using 3 tool paths (Endmill(A) Workpiece: Ti-6Al-4V)

以上の工具パスをエンドミル(A) (B)と組み合わせた 4 通り工具寿命試験を行う。実験は①(B)-(a), ②(A)-(a), ③(A)-(b), ④(A)-(c)の 4 ケースとする。①②では波形パスによる不等リードエンドミルと通常エンドミルとの工具寿命の比較が可能となる。③④では工具パス(a) (b) (c)による工具寿命の比較が可能となる。Table 2 と Fig. 2 にエンドミルのねじれ角と外観を示す。

工具への負荷を事前把握するため測定した工具パス(a) (b) (c)による切削抵抗を Fig. 4 に示す。いずれも工具パスの凹部で切削抵抗が増加しているが、(b)では 1 回、(c)では 3 回の急峻な切削抵抗の増加が生じている。その最大値は(b)が最も大きい。

3. 実験結果と考察

3.1 工具摩耗・切削抵抗・切りくずの変化

チタン合金 Ti-6Al-4V は航空機構造材料等で広く利用されている。本研究では、まずエンドミル(A) (B)を用いて波形工具パスによる切削加工を行い、工具寿命等について比較評価を行った (実験①②)。

不等リードエンドミル(A)の結果 (実験②) について

は, Fig. 4 に見られるように, 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 180m 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細かいチッピングが起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, 被削材の溶着が発生し切れ刃全面にわたり摩耗やチッピングが大きくなった. そして最後は刃先が赤熱して工具寿命を迎えた.

ま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. 7). 切りくず形状については, 新品工具時は光沢のある細いカール形状を呈するが, 切削距離の増大とともに, 徐々に切りくずが千切れはじめた. さらに切削距離 30m を過ぎると切りくずが細かく千切れるようになり, 工具寿命時には切りくずのさらに細かい破断やむしれとともに粉状の切りくずが増大した (Fig. 6).

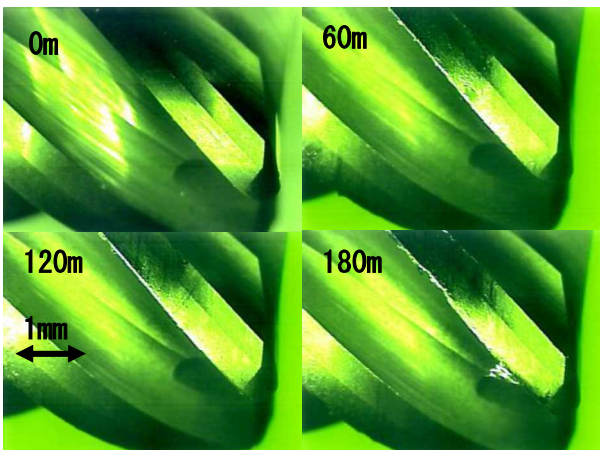


Fig. 5 Photographs of cutting edge (experiment② Endmill(A) Workpiece: Ti-6Al-4V)

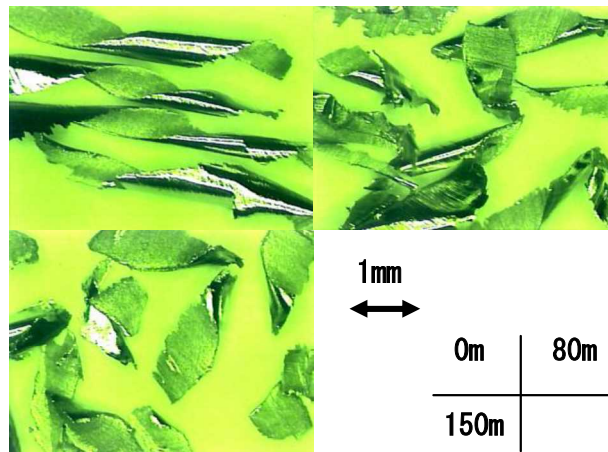


Fig. 6 Photographs of chip (experiment② Endmill(A) Workpiece: Ti-6Al-4V)

通常のエンドミル(B) について同じ条件で実験したが (実験①), 切削抵抗の測定値 (法線方向成分 F_x) については, 切削距離の増大とともにほぼ同様の変化が見られた. 切削距離については, Fig. 8 ①②の結果から不等リードエンドミル(A)の切削距離が通常のエンドミル(B) よりも 20%程度伸びていることがわかる.

3.2 工具パスによる工具寿命の比較

続いて, エンドミル(A) (B) を用いてチタン合金 Ti-6Al-4V の波型パス・ジグザグパス等 (非直線状工具パス) による切削加工を行い, 工具寿命等について比較評価を行った (実験②③④).

実験②③④とも, 工具摩耗・切削抵抗・切りくずとともに工具寿命に至るまでほぼ同様の変化を示した. ただし切削距離については, Fig. 8 ②③④に示すとおり②>③>④の結果となった. これによれば, 工具パス凹部での急峻な切削抵抗の増加が切削距離に大きく影響していることがわかる. とりわけ急峻な切削抵抗の増加箇所が多いケースほど切削距離が著しく減少しており, 工具寿命への影響が大きいことがわかる.

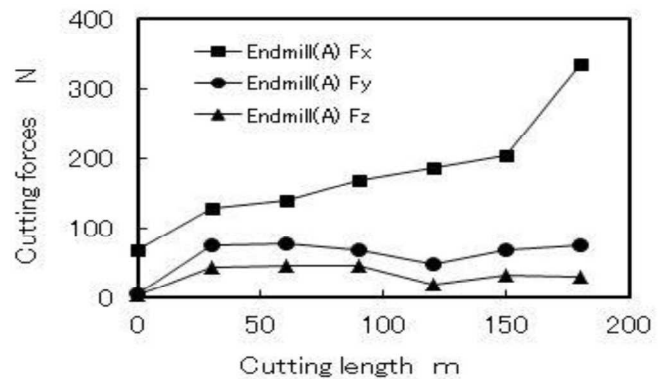


Fig. 7 Relation between cutting length and cutting force (experiment② Endmill(A) Workpiece: Ti-6Al-4V)

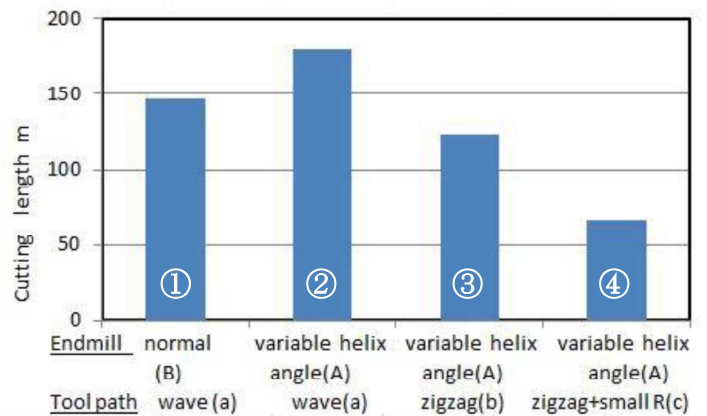


Fig. 8 Cutting length in each experiment (①~④)

4. 薄肉形状部品加工への適用

4.1 加工対象の形状と切削加工

ドローン用に設計されたプロペラ形状の 1/2 モデルを加工対象とする（プロペラ半径=200mm）。プロペラ断面は最大厚部分が 2mm 程度の薄翼型であり、典型的な薄板曲面形状をもつ難加工部品である。薄板形状の高精度加工では、被削材の剛性が低下してその効率的な切削加工の実現が課題となるため、適切な薄板曲面形状の高精度加工法を見出して加工しなければならない。

今回は立形マシニングセンタ (MC) を用いて、決定されたプロペラ形状を 3 次元直彫りによりチタン合金 (TI-6AL-4V) のブロック材から切削加工により試作した。なお粗加工での加工条件については、前章で得られた工具寿命に関する知見を利用して適切に決定した。

4.2 結果と考察

試作品の削り出し加工では、チタン合金のブロック材中に薄肉で繋がった状態で製品を削り出し加工で残り、後工程で輪郭をワイヤ放電加工により切り出して完成させる方法を取った結果、エンドミル工具の選定や段取りの工夫により、最終的にはスムーズで高速・高精度な加工が実現できることがわかった。なお比較のためアルミ合金でも試作した。マシニングセンタによる切削加工状況を Fig. 9 に、完成した試作品を Fig. 10 に示す。

また、プロペラ形状の形状精度を 3 次元測定機を用いて測定し、曲面上の各点の垂直方向高さを設計値（片持ち梁モデルでの撓み量で補正）と比較した誤差を Fig. 11 に示す。これによれば、チタン合金ではアルミ合金の場合に比べて誤差の大きさが局所的に大きくなっていることがわかる。削り出し加工（前工程）終了後にブロック材に歪みが見られたことから、切削工程における熱歪みが最終的な製品形状に影響したと推察される。



Fig. 9 Direct endmilling using MC



Fig. 10 Finished propeller

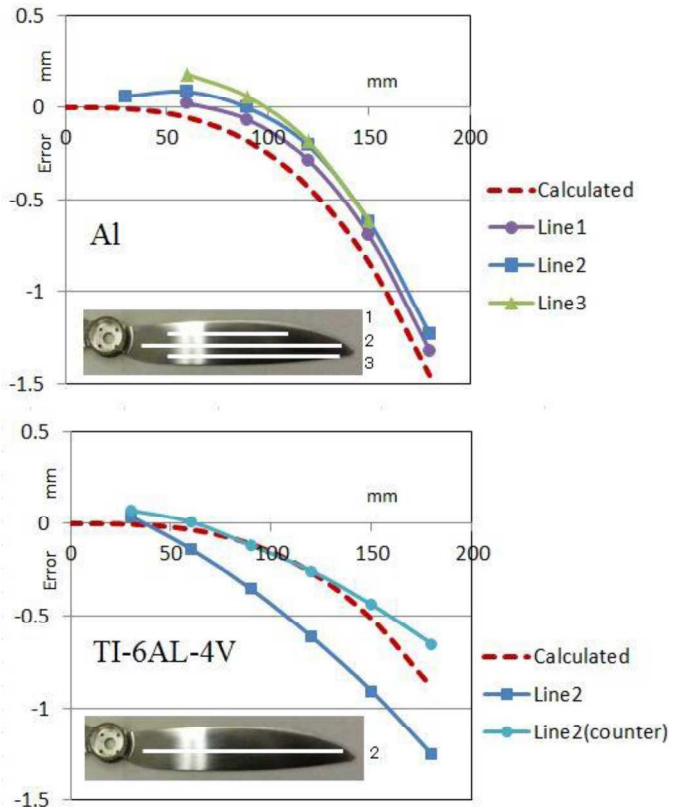


Fig. 11 Shape error (Z direction) of the propeller

5. おわりに

不等リードエンドミル等によるチタン合金 TI-6AL-4V の切削加工において、波型パス・ジグザグパス等（非直線状工具パス）加工条件が工具寿命に与える影響や実際の薄肉形状加工について検討を行い、次の結果を得た。

- (1) 不等リードエンドミルによるチタン合金 TI-6AL-4V の波型パス切削加工では、標準切削条件において切削距離 180m となり、比較した通常のエンドミルの切削距離に対して 20%程度工具寿命が延びた。
- (2) 不等リードエンドミルによるチタン合金 TI-6AL-4V の波型パス・ジグザグパス等による切削加工では、急峻な切削抵抗の増加箇所が多いケースほど切削距離が著しく減少し、工具寿命への影響が大きいことがわかった。
- (3) 薄肉形状部品（プロペラ）の加工を、エンドミル削り出しと放電加工を組み合わせた高速・高精度な加工法により実施した。チタン合金 TI-6AL-4V では切削工程における熱歪みによる形状誤差が生じており、加工法にさらなる改善が必要である。

追記

本研究は、平成 28 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。