ノート

難削材の加工技術研究

須藤　貴裕[*]　相田　収平[**]　石川　淳[**]　中川　昌幸[*]　樋口　智[*]
白木　和範[***]　久保　知巳[***]　深堀　英明[***]

A Research of High Speed Milling of Titanium Alloy

SUTOH Takahiro[*]，AIDA Shuhei[**]，ISHIKAWA Atsushi[**]，NAKAGAWA Masayuki[*]，HIGUCHI Satoru[*]，
SHIRAKI Kazunori[***]，KUBO Tomomi[***]and FUKABORI Hideaki[***]

1. 緒　　言

近年，医療産業や航空機産業およびエネルギー産業などで多く使用されているチタン合金の切削加工技術が注目されている。チタン合金は難削材であり，切削加工においては，高トルクタイプの主軸を搭載した高剛性の工作機械を用い，大量の冷却液を用いた加工が常識となっている。こうした加工では，荒加工から仕上加工に至るまでに何十種もの工具を使用することも少なくなく，また高トルクタイプの主軸により強引に切削するため，工具寿命も短く，同じ工具を何本も用意し，次々と工具を交換することもしばしばである。これは，工具費の増加はもちろん，多種類の工具を使用するために多くの時間を CAM 操作に費やすことになり，低コスト化を進めるうえで重大な課題となっている。

本研究では，これまで蓄積した小径ボールエンドミルによる金型の高速ミーリング加工技術の知見をもとに，荒加工から仕上加工まで必要最小限の工具種類で加工する同技術をチタン合金に適用し，実加工時間や工具費の低減はもとより，CAM 操作に費やす時間の大幅な低減に取り組んだ結果を報告する。

2. チタン合金の切削性

表 1 に代表的なチタン合金である α—β 型のチタン合金（Ti-6Al-4V）と鉄の物理的性質を示す。チタン合金は鋼などの鉄系材料に比較して耐食性，耐熱性，引張強さなどで優れた性質を持っている反面，切削加工する場合はこれらの特性が工具寿命を短くする原因となる。具体的な特徴を以下に示す。

1) 高温強度が高いことから切削抵抗・切削温度が高く，また切削応力が切れ刃近傍に集中する
2) 熱伝導率が低いために刃先に熱が蓄積し，さらに化学的に活性であるため凝着摩耗が進行しやすい
3) ヤング率が鋼の約1/2と低い上に，鋸状切り屑の発生に伴ってびびり振動が生じやすい

チタン合金の切削で特に問題となるのは切削に伴う熱である。図 1 に切削により発生する熱とその流れを模式的に示す。チタン合金を切削したときの切削温度は，同一切削条件で S45C を切削した場合に比較すると約 200℃も高い[1)]。また，チタン合金は熱伝導率が小さいために切削熱が工具に蓄積しやすい。超硬工具による切削の場合, S45C では発生した熱が工具側と切り屑側に伝わる比率は 1 : 1 であるのに対して，チタン合金の場合は 4:1 と工具側に伝わる比率が非常に高いことが知られている[2)]。以上の点から，チタン合金の切削では切削速度を低くして切削温度を下げること，また大量の冷却液を用いて工具の温度上昇を防ぐことなどが重要とされてきた。

[*] 研究開発センター
[**] 下越技術支援センター
[***] 株式会社山之内製作所

表 1　チタン合金と鉄の物理的性質

	チタン合金 (Ti-6Al-4V)	鉄
比重	4.42	7.9
溶融点（℃）	1,540 - 1,650	1,530
ヤング率(Gpa)	113	192
熱伝導度（W/m℃）	7.5	62
熱膨張係数 ($\times 10^{-6}$/℃)	8.8	12

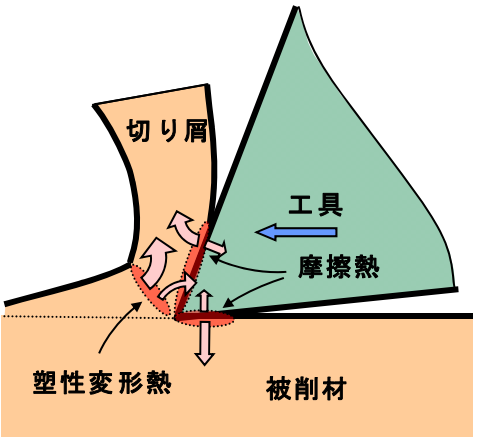


図 1　切削により発生する熱とその流れ

図 2　ボールエンドミルによる切り屑形状

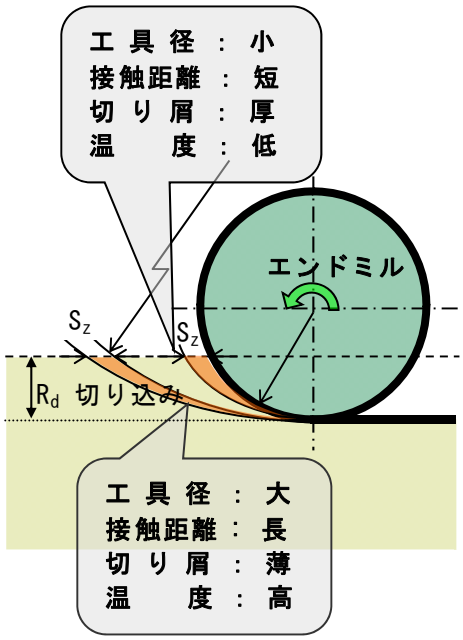


図 3　工具径の違いによる切り屑の模式図

3.　小径ボールエンドミルの適用

金型など高硬度材の加工においては，小径ボールエンドミルによる高速ミーリングが大きな効果を持つことが明らかにされているが [3]，チタン合金の切削においてはボールエンドミルが使用されることは少ない。これは自由曲面の創生が求められる場合以外はそれを積極的に活用する必然性がないこと，また中心に切れ刃を持つボールエンドミルの切削機構が複雑であり，加工精度や加工品質の点で問題視されやすいことなどによる。しかし，その複雑な切削機構を逆手にとれば，問題解決の有効な手立てになる。図 2 にボールエンドミルによる切り屑形状を示す。ボールエンドミルでは切れ刃の幾何学的な形状から切削速度と切り屑厚さが連続的に変化するため，切込み深さや 1 刃当たりの送りを変えることで，切削による熱の発生量とその流れを細かくコントロールすることが可能である。

つづいて，図 3 に使用する工具径の違いによる切り屑の模式図を示す。切れ刃 1 枚あたりの送り量を一定としたとき，比較的大径のエンドミルを用いた場合には，切れ刃と被削材の接触距離が長くなり，生成される切り屑厚さが薄くなる。一方，小径エンドミルを用いた場合には，接触距離が短くなるとともに，切り屑厚さが厚くなることがわかる。このことから，小径エンドミルを適用することにより，切削による熱の

発生量を少なくすることができるほか，切り屑厚さを厚くすることで切り屑の熱容量が大きくなり，より多くの熱を切り屑へ伝導させることができる。

こうした点からチタン合金に小径ボールエンドミルを適用した場合，従来の加工法のように大量の冷却液を必要とせず，ドライまたはセミドライによる加工が可能であるほか，工具や被削材に切削による熱が蓄積しないことから，切削速度を高めた高速ミーリングが可能と考えられる。

4. 研究内容

4.1 切削加工条件の検討

チタン合金の高速ミーリングに適した切削加工条件を検討するため，切削速度の違いによる工具寿命を比較した。一辺が 43mm，深さ 15mm のポケット形状を加工することで行った。なお，工具の突き出し長さは 20mm とした。加工には主軸に空気静圧スピンドルを搭載した NC フライス盤を用いた。NC フライス盤の主な仕様を表 2 に示す。工具は TiAlN 系コーティングを施した市販の直径 6mm のボールエンドミルを使用した。切削速度は基準となる条件 1 の切削速度を 1.0 とした場合，条件 2 は 1.4，条件 3 では 1.8 とした。送り速度は 1 刃あたりの送り量が一定となるように設定し，オイルミストを使用したセミドライ加工とした。なお，ここで設定した切削速度と送り速度はエンドミルの一般的な推奨加工条件と比較すると数倍以上の値である。工具寿命の判断には切削に用いたフライス盤の主軸動力値と工具の逃げ面摩耗幅の両方を用いた。主軸動力値は，各条件において最初の切削距離 50m における主軸動力の最大値を 100 とする値で表し，120 を超えた時点で寿命と判断した。

表 2 NC フライス盤の主な仕様

主軸形式	空気静圧スピンドル
主軸回転数 (min-1)	5,000～50,000
最大切削送り速度 (mm/min)	20,000
制御装置	TOSNUC-888.2
移動指令最小値(mm)	0.001

各加工条件における切削距離と主軸動力値および逃げ面摩耗幅の関係を図 4 に示す。切削速度が最も遅い条件 1 では切削距離 1,000m において，主軸動力値および逃げ面摩耗幅ともほとんど増加せず，相当な長寿命が期待できる。条件 1 と比較して 1.4 倍の切削速度とした条件 2 では，切削距離の増加に伴い緩やかに主軸動力値，逃げ面摩耗幅とも増加しているが，切削距離が 2,900m におよぶまでの主軸動力値は 120 に到達していない。条件 1 と比較して 1.8 倍と最も高速な切削速度である条件 3 では，切削距離の増加に伴い，急激に主軸動力値と逃げ面摩耗幅が増加していることがわかる。切削距離 450m において主軸動力値が 120 を超えたため寿命と判断した。前述のとおり，条件 1 では条件 2 を超える相当な長寿命が期待できるが，実際の加工において工具費と単位時間当たりの機械費を考慮すると，トータルでの加工費低減にはつながらないと判断し，実験を中断した。図 5 に実験を終了した時点での工具切れ刃部分の写真を示す。条件 1 では切れ刃部分は初期摩耗程度である。条件 2 では，境界部での摩耗が進行しており，条件 3 の工具では，先端部，境界部ともに摩耗が進んでいる。

ここで、図 6 に各加工条件において、部品加工にかかる加工費を試算した結果を示す。部品の加工に要する切削距離を 9,000m とし，工具費は 5,000 円/本，機械費は 3,000 円/hr とそれぞれ仮定した。なお，条件 1 では，相当な工具寿命が期待できるため，工具寿命を 9,000m とし，工具は 1 本のみですべて加工できるものと仮定した。図に示したとおり，条件 3 では加工時間は短く機械費は最も安くなるが，工具寿命が短いために工具費が著しく増大し，トータルでは最も高価になった。一方，条件 1 では工具費は最も少なくなるものの，加工時間が増大するために機械費が増大する。条件 2 においては，工

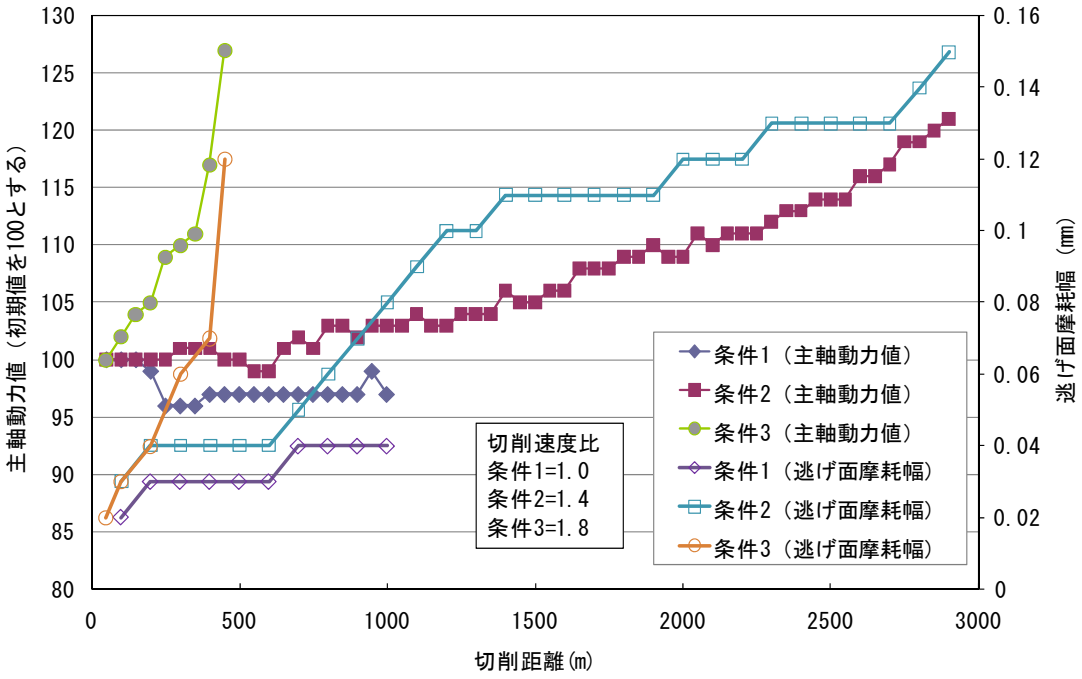
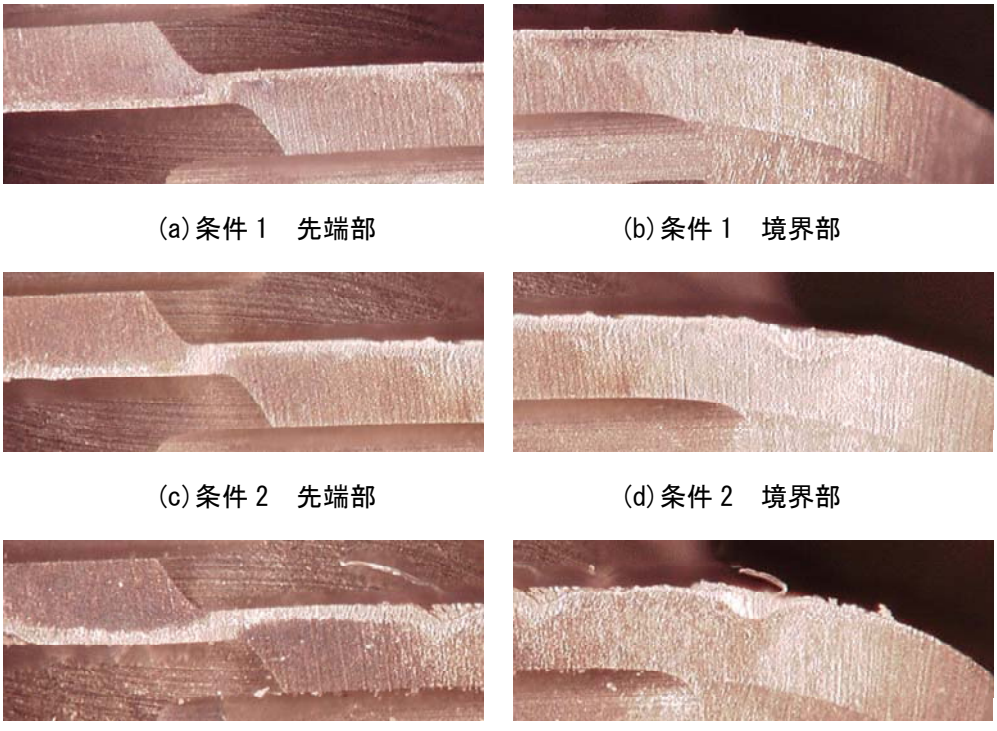


図 4　各加工条件における切削距離と主軸動力値および逃げ面摩耗幅の関係



(a) 条件 1　先端部　　(b) 条件 1　境界部

(c) 条件 2　先端部　　(d) 条件 2　境界部

(e) 条件 3　先端部　　(f) 条件 3　境界部

図 5　試験終了時の工具

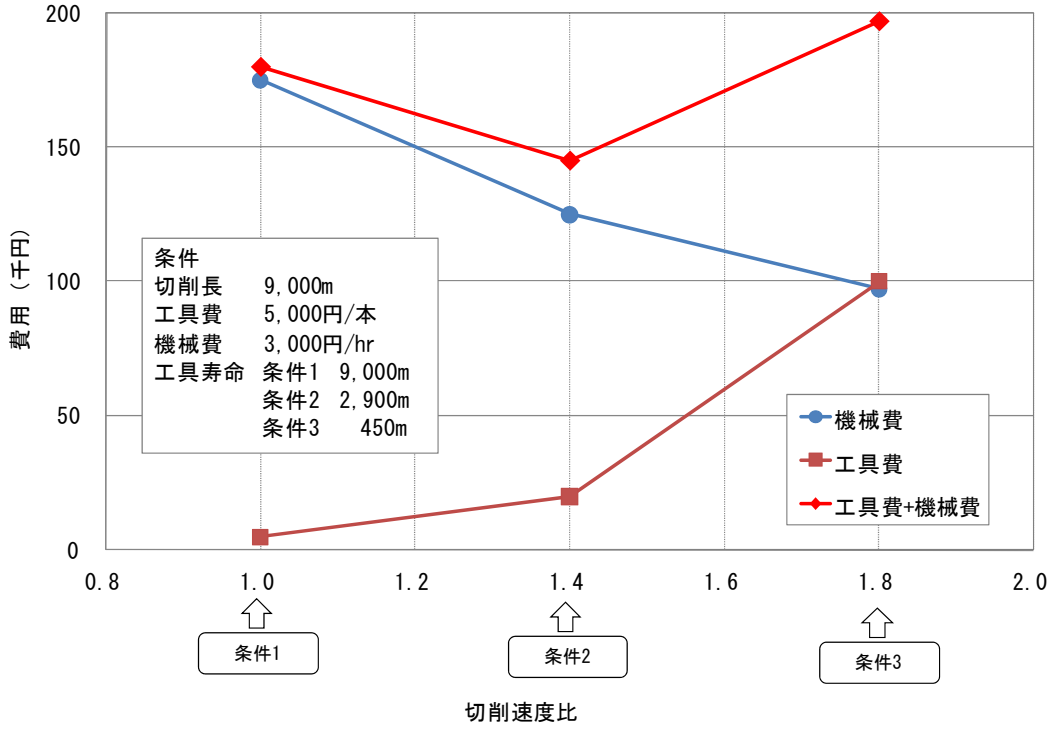


図 6　各加工条件における加工費の試算

具費および機械費とも中間的な値であるが，トータルでは最も安価となった。よって条件 2 が最適な条件であると判断した。なお，CAM 操作にかかる費用はどの条件においても 1 種類の工具による加工であるため，同一であると仮定し除外した。

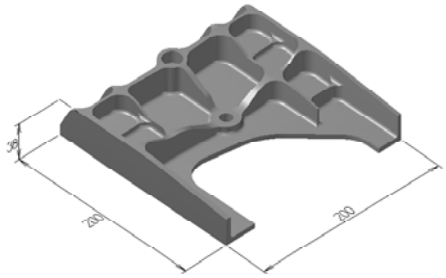


図 7　加工する部品の CAD モデル

4.2　部品加工による検証

4.2.1　ツールパス作成

最適化した加工条件をもとに，チタン合金製部品を想定した形状をモデリングし，それを加工するツールパスを作成した。図 7 に加工する部品の形状を示す。外形寸法は 200mm×200mm×38mm である。使用する工具の種類を 1 種類とし，加工条件は前述の条件 2 を選択した。加工に用いる NC プログラムは使用する工具の種類の数が必要であり，従来の加工法では相当数の NC プログラムを作成する必要があった。しかし，本加工法では工具を 1 種類とすることで，作成する NC プログラムは荒加工用 1，仕上加工用 1 の合計 2 つを必要とするのみであり，従来法と比較して，CAM 操作に費やす時間を大幅に短縮することができた。

4.2.2　部品加工

先にモデリングした形状を加工し，従来の加工法に対する優位性を検証した。総切削距離は約 1,500m，除去体積は約 700ml である。図 8 に加工した部品の写真を示す。使用した工具は 1 種類で，荒加工を 1 本のみで終了することがで

図 8　加工した部品

きた。仕上加工では新品の工具を使用したが，合計で 2 本の工具を使用したのみで加工を完了することができた。従来の加工法では，同程度のサイズの部品を加工するために 10 数時間を要しているが，本加工法での加工時間は 8 時間であり，加工時間についても短縮することができた。

5. 結　　言

チタン合金加工に対して，小径のボールエンドミルを用いた高速ミーリングの適用を試みた結果，CAM 操作の負担軽減，切削時間の短縮，使用工具種類の削減などによる工数の大幅な削減が可能であることを明らかにした。

参考文献

1) N.Narutaki, A.Murakoshi, S.Motonishi, “Study on Machining of Titanium Alloys”, *Annals of the CIRP*, Vol.32, No.1, 1983, p65-69.
2) Mustafizur RAHMAN, Yoke San WONG, A.Rahmath ZAREENA, “Machinability of Titanium Alloys”, *JSME International Journal*, *Series C*, Vol.46, No.1, 2003, p107-115.
3) 嶽岡悦雄，宮口孝司，“新潟における高速ミーリング研究の動向”, 機械と工具, Vol42, No.4, 1998, p24-29.