

生体用チタン合金のボールエンドミル加工における工具摩耗に関する研究

— 切削工具と被削材の接触位置が工具摩耗に及ぼす影響 —

機械電子科 是永宗祐 本多正計

Tool wear characteristics in ball end milling of Ti-6Al-4V ELI alloy

— Relationship between tool-workpiece contact region and tool wear —

Sosuke KORENAGA and Masakazu HONDA

Titanium alloys are applied in implants for surgery due to their high specific strength and corrosion resistance. However, these alloys are well known as poor machinability materials, severe tool wear tend to occur in end milling of these alloys. Severe tool wear may result in increased machining cost and unacceptable surface roughness of a workpiece.

In addition, implants for surgery have various inclined or curved surfaces. In milling of these surfaces using ball end mills, contact region between the cutting tool edge and the workpiece surface are changed with tilting angle of workpiece surface. Therefore, it is probable that change of tool-workpiece contact region influence on wear characteristics of ball end mill.

In this study, ball end milling was carried out using Ti-6Al-4V ELI alloy which were tilted various angle in order to investigate the relationship between tool-workpiece contact region and tool wear. When tilting angle of workpiece was 0 degree (center of cutting tool was contacted with workpiece), cutting force was extremely high in comparison with other tilting angle, and it led to severe tool wear. In milling with 5-axis machining center, it is important to avoid contact between center of cutting tool and workpiece for better productivity. In case of 3-axis machining center, tool-workpiece contact region is not controlled, it is necessary to find out cutting condition to reduce tool wear when center of cutting tool is contacted with workpiece.

Keywords : Ti-6Al-4V alloy, ball end milling, tool wear, tool-workpiece contact region

キーワード : チタン合金、ボールエンドミル加工、工具摩耗、工具と被削材の接触位置

1 はじめに

チタン合金は高比強度で耐食性が高く、生体アレルギーを起こしにくい等の優れた特性を有しており、整形外科用インプラント等の医療部品に多く用いられている。しかし、チタン合金は加工が難しい材料として知られており、切削加工においては切削工具の摩耗が進行しやすく、加工コストが増大することが問題となっている^{1, 2)}。このような背景から、チタン合金の平面切削加工においては工具摩耗が進行しにくい最適な切削条件を明らかにするための研究が多くなされている³⁻⁸⁾。

しかしインプラントは、実際の関節や骨格のように自由曲面を有した複雑な形状であるため、3次元曲面を作り出す自由曲面切削によって加工される。自由曲面切削では、切削工具（図1に示す球状の底刃が付与されたボールエンドミル）が3次的に動きながら切削

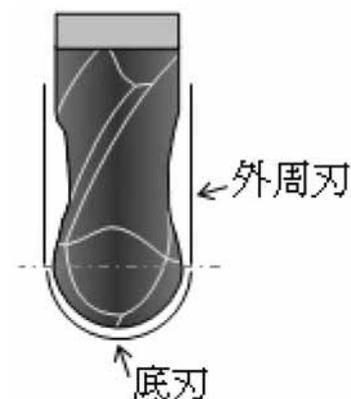


図1 ボールエンドミルの概略

が行われる。このため、切削工具の動きが複雑で、平面切削には見られない特有の現象が生じ、これまでの平面切削に関する研究だけでは自由曲面切削における最適な切削条件を見出すことは難しい。自由曲面切削に特有の現象として、加工経路（切削工具の動き方）によって被削材と接触する刃の位置が変化することが挙げられる。例えば、図2に示すような自由曲面の切削を行う場合、図2aの加工経路では被削材の上面を加工するため、被削材の傾斜がほとんどなく底刃による切削が行われる。これに対し、図2bの加工経路では被削材の傾斜が大きいため、外周刃による切削が行われる。高価な5軸制御の工作機械では、切削工具または被削材を傾けることで、被削材と刃の接触位置を任意に制御できるものの、安価な3軸制御の工作機械では、被削材と刃の接触位置を任意に制御することができず、切削工具の摩耗現象に強く影響を及ぼす可能性が高い。

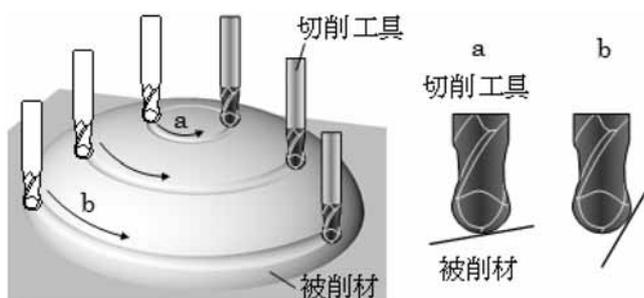


図2 自由曲面切削加工の概略

したがって、自由曲面切削加工において工具摩耗が進行しにくい最適な加工を行うためには、接触位置によって変化する工具の摩耗状態をあらかじめ詳細に把握しておく必要がある。そこで本研究では、チタン合金の自由曲面切削加工において、被削材と切削工具の接触位置が切削工具の摩耗に及ぼす影響について検討する。

2 方法

2.1 実験用テストピースの設計

本研究では、実際のインプラントで行われる自由曲面切削加工を、傾斜角が異なる被削材を用いて被削材と切削工具の接触位置を変化させることで再現した。被削材の傾斜角は、被削材と切削工具の接触状態が下記の3種類となるように選択した。

- ・傾斜角0°：切削工具の回転中心（底刃）が被削材と接触（図3a）

- ・傾斜角30°：切削工具の回転中心から遠い底刃が被削材と接触（図3b）

- ・傾斜角60°：切削工具の回転中心から遠い底刃と外周刃が共に被削材と接触（図3c）

なお、被削材には医療部品等で一般的に用いられているTi-6Al-4V ELI合金（以下、チタン合金）を用いた。

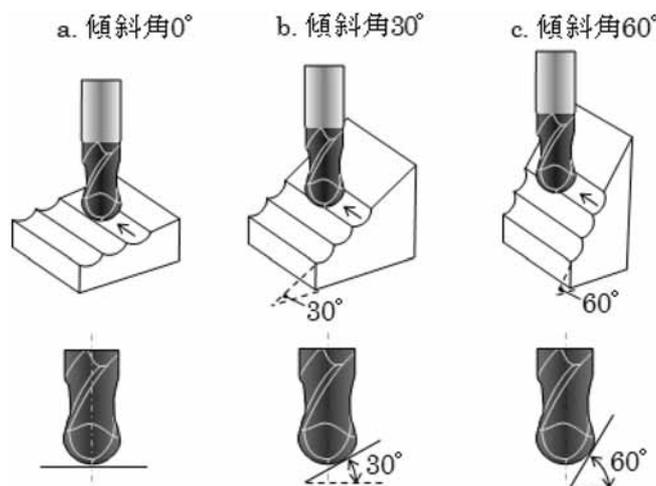


図3 本研究の加工形状

2.2 切削加工実験

実験装置の概略を図4に示す。工作機械には3軸制御の立形マシニングセンタ V33（株牧野フライス製作所）を用いた。切削工具には、直径6mm、2枚刃で(Al, Ti)Nコーティングが施された超硬合金製のボールエンドミル MS2SBR0300S06（三菱マテリアル(株)）を用いた。傾斜角が0°、30°、60°の3種類の被削材を表1に示す切削条件で加工した。加工中の切削工具に作用する力（切削力）は切削動力計 9129AA（日本キスラー(株)）で測定し、図4に示すx、y、z方向の合力の最大値で評価した。切削加工面については、デジタルマイクロスコープ VHX-900（株キーエンス）による観察および、表面粗さ・輪郭測定機 SV-C624（株ミツトヨ）による表面粗さ測定で評価した。なお、表面粗さの測定方向は図4に示す工具の送り方向と同方向とした。

【報告】

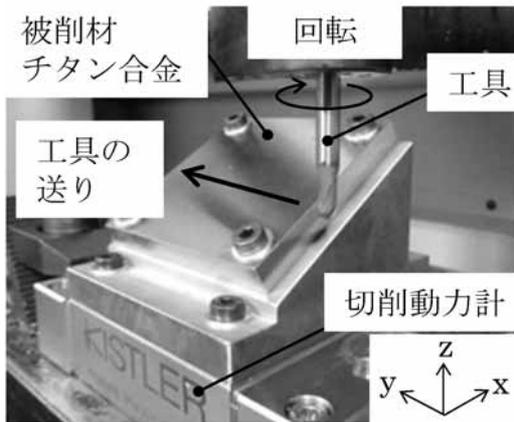


図4 実験装置概略

表1 切削加工条件

被削材の傾斜角	0°、30°、60°
主軸の回転数	4,000rpm
一刃あたりの送り	0.04mm/tooth
深さ方向切込み	0.5mm
ピックフィード	0.5mm
切削雰囲気	エアブロー
切削距離	800mm (80mm×10path)

2.3 工具摩耗の評価

切削工具の摩耗評価は、図5に示すように切削工具の底刃および外周刃の逃げ面における最大摩耗幅をデジタルマイクロスコープ VHX-900 (キヤノン) で測定することでを行い、被削材と切削工具の接触位置が切削工具の摩耗特性に及ぼす影響について調査した。

3 結果および考察

チタン合金を加工した後の工具摩耗幅を図6に示す。工具摩耗幅は、傾斜角0°、30°、60°でそれぞれ

70 μm、20 μm、20 μmとなり、傾斜角0°では傾斜角30°、60°と比較して工具摩耗が著しく大きくなった。

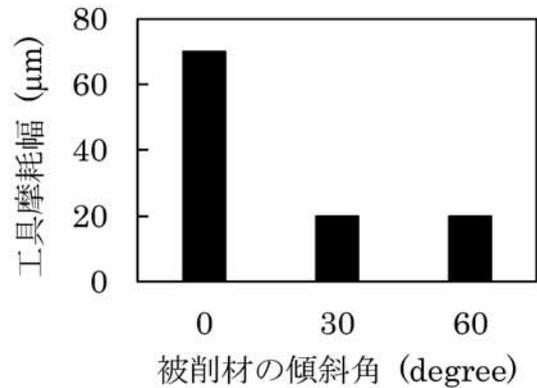


図6 工具摩耗幅

つぎに、加工面の算術平均粗さRaを図7に示す。加工面の算術平均粗さRaは、傾斜角0°、30°、60°でそれぞれ0.28 μm、0.19 μm、0.20 μmとなった。算術平均粗さRaが大きい傾斜角0°の加工面には、図8に示すような円弧状のむしれが観察され、加工面品位が悪化した。傾斜角30°、60°ではむしれは確認されず、良好な加工面となった。

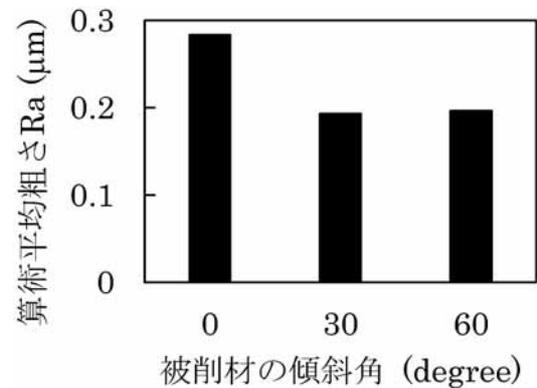


図7 加工面の粗さ

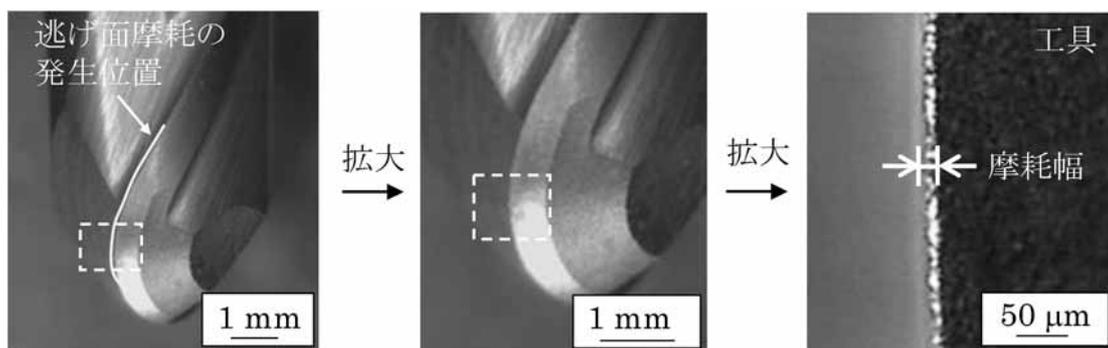


図5 工具摩耗幅の測定

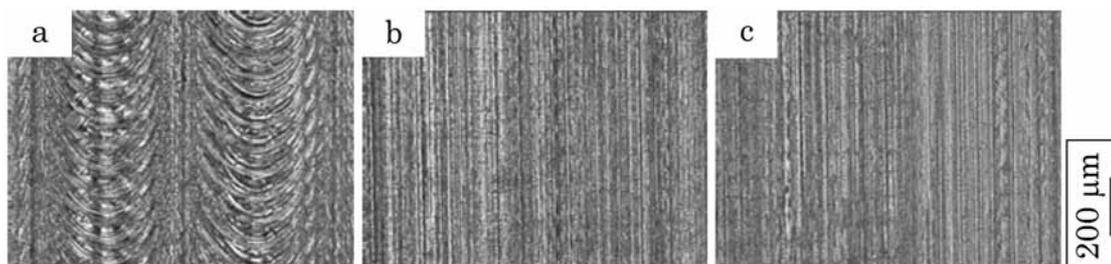


図8 加工面の観察結果

被削材の傾斜角 a : 0°、b : 30°、c : 60°。

つづいて、加工中の切削力を測定した結果を図9に示す。切削力は傾斜角0°、30°、60°でそれぞれ61N、38N、25Nとなった。ここで、傾斜角0°では工具の回転中心が被削材と接触しており、工具の回転中心では周速（切削速度）はゼロとなる。被削材の傾斜角が大きくなると工具と被削材の接触位置は、工具の回転中心から離れて周速（切削速度）は速くなる。一般的には切削速度の上昇に伴って切削力は減少する傾向があり、チタン合金の切削においても、工作機械に旋盤を用いた単純な基礎実験系では、これと同様の傾向が見られることが既に報告されている⁹⁾。旋盤加工に比べて、ボールエンドミルを用いた自由曲面切削加工は、工具と被削材の接触位置によって周速（切削速度）が変化する複雑な加工方法であるものの、切削速度と切削力の関係は旋盤加工の基礎実験と同様の傾向を示し、周速（切削速度）の増加に伴って切削力は減少することがわかった。

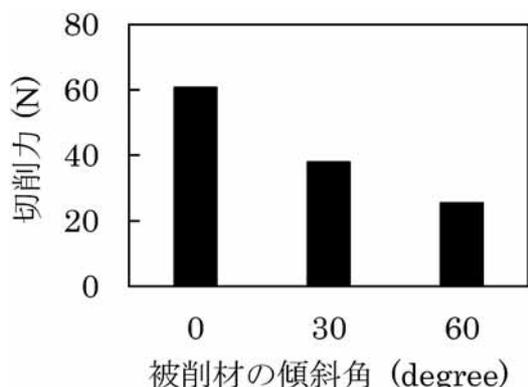


図9 切削力

以上より、切削工具の回転中心が被削材に接触する傾斜角0°では、切削力が大きくなったことで、工具刃先にかかる負荷が増大し、工具摩耗の進行につながったと考えられる。さらに、工具摩耗が進行し、刃先が損傷している状態で加工を行ったため、傾斜角0°では加工面にむしれが発生し、表面粗さが増大し

たとえられる。このことから、切削工具と被削材の接触位置を任意に制御できる5軸制御の工作機械では、工具回転中心の接触を避けて加工することで工具摩耗の低減が期待できる。しかし、3軸制御の工作機械では、切削工具と被削材の接触位置を任意に制御できないため、切削工具の回転中心が被削材に接触するときの工具摩耗を低減する手法を検討する必要がある。

4 まとめ

チタン合金の自由曲面切削加工における工具摩耗の低減を目的とし、本研究では被削材と切削工具の接触位置が工具摩耗に及ぼす影響について検討した。その結果、被削材の傾斜角が小さく、切削工具の回転中心が被削材に接触する場合に工具摩耗が著しく大きくなることがわかった。このことから、切削工具と被削材の接触位置を任意に制御できる5軸制御の工作機械では、工具回転中心の接触を避けて加工することで工具摩耗の低減が期待できる。しかし、3軸制御の工作機械では、切削工具と被削材の接触位置を任意に制御できないため、切削工具の回転中心が被削材に接触するときの工具摩耗を低減する手法を検討する必要がある。

参考文献

- 1) 江村聡 他：元素戦略，「チタンの基礎・加工と最新応用技術」，初版（㈱シーエムシー出版，東京），新家光雄 監修，pp.1-6 (2009).
- 2) 本西英 他：機械加工，「チタンの加工技術」，初版（㈱日刊工業新聞社，東京），(社)日本チタン協会 編集，pp.19-26 (1992).
- 3) 是永宗祐 他：切削抵抗解析によるチタン合金のエンドミル加工における条件選定手法の提案. 2014年度精密工学会秋季学術講演会講演論文集，p.225-226，鳥取 (2014).
- 4) 是永宗祐 他：切削抵抗解析によるチタン合金

【報告】

- のエンドミル加工における条件選定手法の提案（第2報）．2015年度精密工学会春季学術講演会講演論文集, p.1023-1024, 東京 (2015).
- 5) 関谷克彦 他：Ti-6Al-4V合金の高速エンドミル加工.精密工学会誌, 70(3), 438-442 (2004).
- 6) 臼杵年 他：コーテッド超硬工具によるチタン合金の高速ドライエンドミル加工．精密工学会誌, 71(4), 491-495 (2005).
- 7) 臼杵年 他：ハイス工具によるチタン合金の高速ドライエンドミル加工．砥粒加工学会誌, 49(9), 496-501 (2005).
- 8) 臼杵年 他：難削材料の雰囲気制御エンドミル加工．精密工学会誌, 71(9), 1120-1124 (2005).
- 9) 山崎隆夫 他：Ti-6Al-4V合金の冷風切削．軽金属, 53(10), 416-420 (2003).