

低周波振動切削による骨適合性を考慮したチタン合金の表面形状の制御

中央大学 ○藤田晴渡, 高橋幸男, 古牧久登, 山賀恭介, 石川広希, 宋 小奇, ◎井原 透

要旨

チタン合金は優れた機械的特性, 生体適合性を有し骨適合性に優れていることから, 人工関節などの生体材料に活用されている。埋め込まれるチタン合金の表面形状は細胞の接着性や成長などに影響を与えることから, 幅のある仕上げ面粗さが求められる。しかしながら, 従来の切削加工では単調な表面形状のみしか得られない。そこで本研究では低周波振動切削を用いることで, 多様性のある表面形状を制御することを目的とした。

1. 緒言

チタン合金は酸化被膜による高耐食性, 高い比強度など優れた機械的性質を持っていることから, 航空宇宙分野や海洋開発, 自動車部品など幅広い分野で使用されている。また, 生体適合性及び骨適合性に優れていることから, 人工関節や歯科用インプラントなどの生体材料に活用されている¹⁾。生体材料として埋め込まれるチタン合金の表面性状や形状は細胞の接着, 伸展, 配列, 集積, 分化に影響を及ぼす²⁾。生体材料表面のマクロ的な溝は, この溝に沿って細胞が進展するのを促進させ, 骨芽細胞は平滑面よりも粗面で多くのコラーゲンの新生と石灰化を示す³⁾ことから, ミクロ的な表面粗さが細胞の接着性に影響を及ぼす。これらのことから多様性のある表面が求められる。この要件を満たすには従来の切削加工では単調な表面形状のみしか得られないため, 加工後の表面にブラスト処理や溶射によるチタンコーティング, 酸エッチングなどの表面処理が施されるが万能な手法は存在せず, 課題も多い⁴⁾。

そこで低周波振動切削加工に着目した。低周波振動切削とは, 送り方向に振動する加工方法である。図1は低周波振動による工具軌跡を模式的に示したものであるが, 切削中に工具の“空振り”時間を設けることで切りくずを細かく分断させて排出することができる。また, 実質的な一回転一刃当たりの送りが各主軸位相角で異なる特徴を有している⁵⁾。これが仕上げ面の形状に影響すると考えられる。そこで本研究では低周波振動切削を用いることで, 多様性のある表面形状を制御することを目的とした。

2. 被削材及び実験方法

被削材は, 直径 30mm の Ti-6Al-4V の丸棒とし, 低周波振動切削機 (シチズンマシナリー(株)製, VC03)を用いて慣用切削(以下, CC と表記)モード及び LFV (低周波振動切削) モードにて外周切削を行った。切削動力計(Kistler 製, 9119AA2)を用いて切削抵抗を測定し, 共焦点レーザー顕微鏡 (OLYMPUS 製, OLS-4100) を用いて仕上げ面を観察・計測し, 真円度測定機 (Taylor Hobson 製, Talysron 565LI) を用いて仕上げ面を立体的に観察した。また SEM (FEI 製, Quanta250) を用いて工具面上の凝着物を観察した。

切削条件を表1に示す。 Q と D はそれぞれ LFV の振動条件を決定するパラメータのひとつである。 Q は送り量 f に対する振動振幅の比であり, D は主軸一回転あたりの振動回数である。なお, 加工径が変わっても空振り時間を確保し効率良く切りくずを分断させるために, LFV の切削・振動条件を切りくずの長さを 20mm 程度になるように設定した。環境負荷低減と安全衛生の観点からドライ切削で行う。一般的に表面粗さに影響を与える送り量 f を 2段階に変化させて切削した。

3. 実験結果・考察

3.1 切削抵抗の変化

図2に各条件における切削抵抗を示す。LFVにおける切削抵抗はCCに比べ, 最大切削抵抗は大きい, 平均切削抵抗は小さくなった。 f の増加により, 全体的に抵抗値が上がったが同様の傾向を示した。LFVの平均切削抵抗が, 送りの増大により単位切削堆積あたりのエネルギー(比切削抵抗)が減少することによるものと考えられる⁶⁾。最大切削抵抗は, 振幅 $f*Q$ の振動により送り量によって切り取り厚さが増加するため大きくなっており, この傾向は既に報告されているLFVの特徴⁴⁾と一致している。

3.2 切りくず形態

図3に切りくずの様相を示す。CCでは切りくずが連続的に排出され, 被削材に絡まってしまう場合がほとんどであった。しかしながら, LFVではすべての切削条件で加工径が変わっても, 同様な長さを持った切りくずが分断されて排出された。仕上げ面に対して悪影響を及ぼさない特徴が認められた。

3.3 表面テクスチャと断面形状

図4に $f0.02$ の LFV によって得た表面テクスチャを示す。なおこの図内のスケールは統一してある。各主軸位相で異なる形状を示しており, 同図における縦軸の奥から手前方向が送り方向で, 横軸は被削材径の外周である。送り方向に対して垂直方向には振動にともなう工具軌跡が現れているのがわかる。また, 送り方向に平行して山と谷が送り方向に連なっている。これは切削負荷が大きいところでの工具側がたわみ, 工具先端が食込むことによるものと考えられる。またこの山と谷の連なりはそれぞれ D の2倍の数, 生成される。

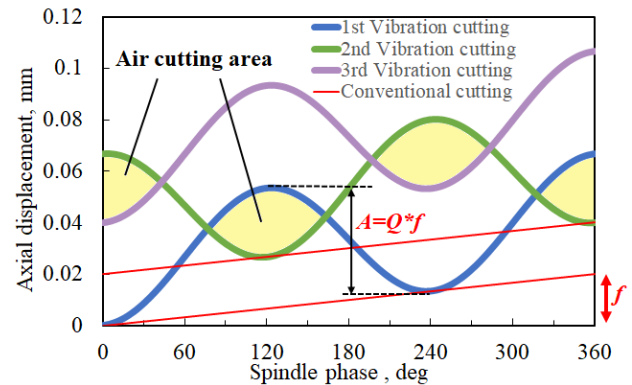


Fig.1 Schematic of Low Frequency Vibration cutting (LFV)

Table1 Cutting conditions

	LFV	CC
Cutting tool	DCGT11T302N-AG H1	
Cutting speed V (m/min)	100	
Feed rate f (mm/rev)	0.02,0.03	
Depth of cut a_p (mm)	1.5	
Amplitude per feed rate Q	2.0	-
Vibration times per revolution D	2.5,3.5,4.5	-
Lubrication	Dry	

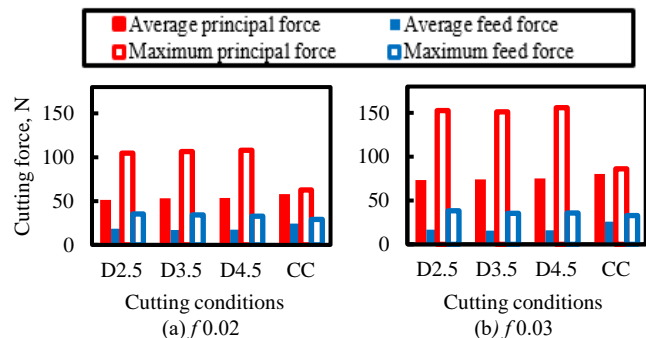
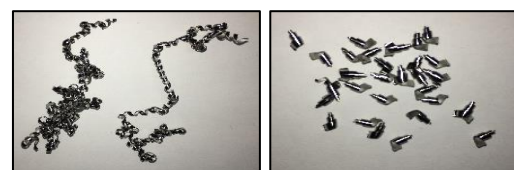


Fig.2 Cutting forces for CC and LFV



(a) CC (b) LFV

Fig.3 Chip forms under CC and LFV

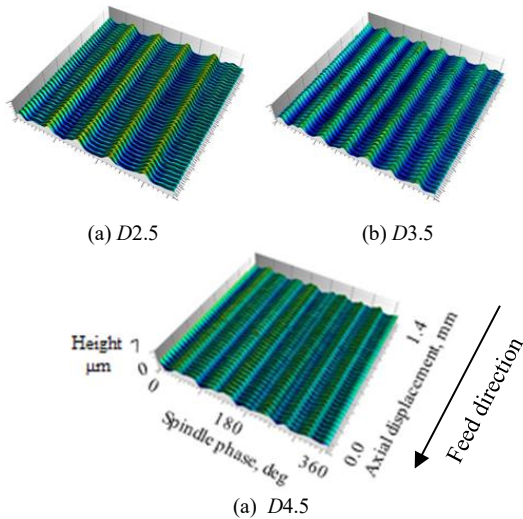


Fig.4 Machined surface texture

3.4 仕上げ面断面プロファイル

ここで、図4で示した表面テクスチャに対して、工具刃先によって形成された断面形状について評価する。図5に $f0.02$ における断面プロファイルを示す。CCは断面の形状が単調なものとなったが、LFVは送り量と振動振幅の比に対応した山谷とその谷部には微細な凹凸形状が認められた。特にD4.5でこれが明瞭に表れている。また、図6には送り量が断面形状に及ぼす影響としてD4.5を例として示した。 f の増加に伴い、山谷の間隔が広くなり、最大高さも増加した。また、谷部における微細な凹凸形状が増え、その深さも深くなり、ばらつきがある。図7に図5の断面プロファイルから得た高さ方向のパラメータを示す。Dの増加に伴って最大高さが増加している。

各条件によって谷部の形状が異なっている。谷部の微細な凹凸形状は工具切れ刃の凝着物が仕上げ面に転写され、加工中、凝着物が切れ刃に代わって切削していると考えられる⁷⁾。したがって、この形状差は凝着物の付き方の違いによるものである。そこで $f0.02$ におけるD3.5とD4.5の条件でのノーズ部分の切れ刃をSEMにて観察したものを図8に示す。D3.5に比べ、D4.5のほうが切れ刃近傍に多くの凝着物が付着していた。またD4.5においては、部分的に凝着物が大きく成長しており、これにより断面プロファイルにおける谷深さが深くなり、谷部の微細な凹凸形状が多くなったと考えられる。したがって、多様性のある表面形状をLFVによって得られ、切削条件を変えることで形状を制御できることがわかった。

4. 結言

- (1) LFVを用いることで切りくずが分断でき、慣用切削と比較して平均切削抵抗が低減することが認められた。
- (2) Dの変化により切削負荷が大きいとこの位の位相が変化することで表面テクスチャに影響を及ぼすことがわかった。
- (3) 送り量 f の増加に伴って、工具送り方向の断面形状が変わることが認められた。
- (4) 送り量 f と振動振幅の比 Q に対応した山谷形状が得られ、さらにその谷部には微細な凹凸形状が多く認められた。
- (5) D4.5, $f0.03$ における仕上げ面の表面は他の条件と比べて最大高さが最も大きくなっていた。
- (6) 以上の結果から、幅のある仕上げ面粗さが求められる人工股関節システム部などの生体材料の表面形状として有効なものであると考えられる。

参考文献

- 1) 日本チタン協会編：現場で生かす金属材料シリーズチタン，工業調査会，(2007) 25.
- 2) 埴：材料と生体組織との接合，表面技術，63, 12, (2012) 733.
- 3) J. Y. Martin et al.: Effect of titanium surface roughness on proliferation, differentiation, and protein synthesis of human osteoblast-like cells (MG63), J. Biomed. Mater. Res, 29, 389, (1995).
- 4) 西村ら：人工関節の生体活性化表面処理，表面技術，67, 6, (2016) 18.

- 5) 三宅ら：旋削加工における送り方向への低周波振動の効果，2015年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文，(2015) 421.
- 6) 杉田ら：基礎切削加工学，共立出版，(1984).
- 7) 關谷ら：SUS304旋削時に生じる凝着，生産加工・工作機械部門講演会，11, (2016) 191.

「LFV」はシチズン時計株式会社の登録商標です。

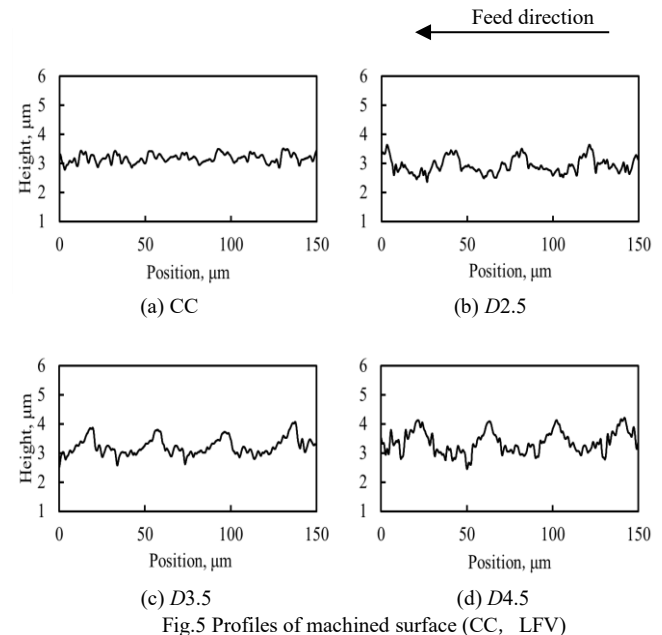


Fig.5 Profiles of machined surface (CC, LFV)

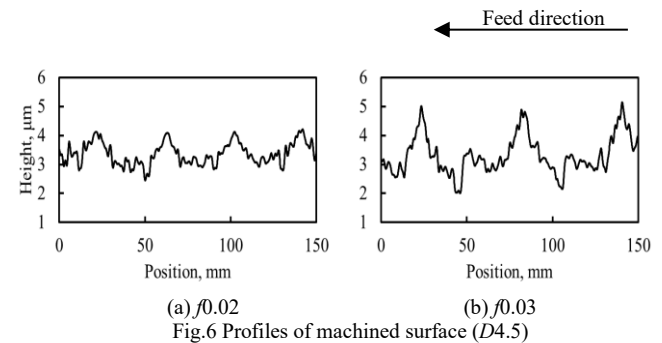


Fig.6 Profiles of machined surface (D4.5)

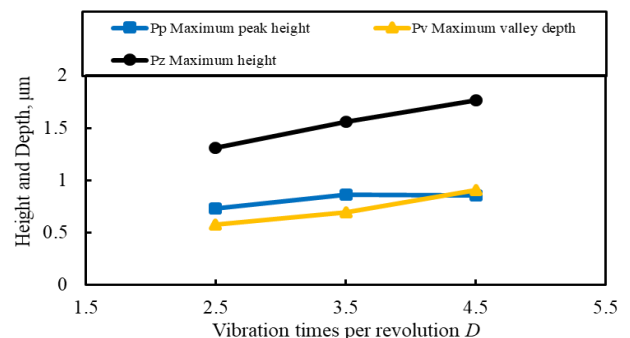


Fig.7 Variation of height and depth with D

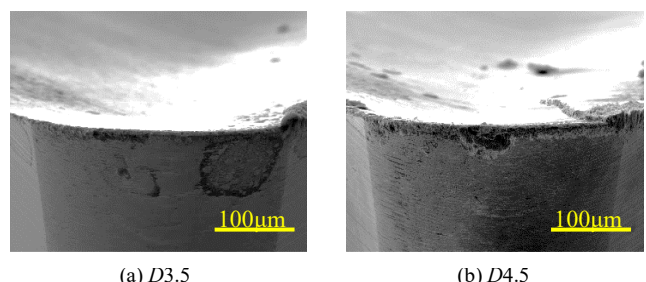


Fig.8 SEM images around tool nose