

令和 2 年 7 月 7 日現在

機関番号：33302

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06095

研究課題名(和文) 骨に近い低弾性率を有するニオブチタン合金の微細加工技術の構築

研究課題名(英文) Construction of microfabrication technology for niobium titanium alloy with low elastic modulus similar to bone

研究代表者

加藤 秀治 (Kato, Hideharu)

金沢工業大学・工学部・教授

研究者番号：90278101

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：Nb-Ti合金はNbとTiの2元素で構成されており、細胞毒性が極めて低く、インプラント材料として優れた特性を有していることから、期待されている。しかし、しかしながら、高い凝着特性や低い熱伝導率が原因となり、切削加工を施した場合には工具寿命が短く極めて高い難加工性を示す。本研究では、小型ボールエンドミル工具を用いたNb-Ti合金のミーリング加工を行い、ダイヤモンド被覆工具の刃先処理を施した工具が有用であることと、損傷機構の解明を試みることで、切削速度15.0m/sの条件においてが工具寿命の延長が可能であることを明らかとしている。

研究成果の学術的意義や社会的意義

Nb-Ti合金材料の微細加工技術の開発においては、(a) 最適工具材料の選定と形状成形、(b) Nb-Ti合金材料の微細切削機構の解明が必要なポイントであり、本研究ではダイヤモンド被膜工具の刃先処理を施した工具が有効であることを明らかとしており、最適条件を選定するうえで必要となる切削機構の解明を行った。これにより、生体適合性に優れ低弾性率を有するNb-Ti合金材料の微細加工の高効率化が可能となり、人工歯根部品などへの適用への可能性を高められた。

研究成果の概要(英文)：The Nb-Ti alloy considered herein has a relatively low young's modulus of about 60GPa. In addition, the alloy is composed two elements of Nb and Ti, which have extremely low cytotoxicity, and has excellent properties as an implant material. Although manufacturing and shaping implants requires cutting processes to be performed, there has been no research on the cutting of Nb-Ti alloy. In the present study, the influences of tool film material and cutting speed on tool life were investigated by milling of Nb-Ti alloy using a small ball end mill tool. The results of these investigations indicate that the tool life can be extended by using a diamond-coated tool and that a cutting speed of 15.0 m/s provides the longest tool life.

研究分野：生産加工・加工学

キーワード：ニオブチタン合金 低弾性率 難加工性 微細加工 合金組織

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、口腔外科分野において、事故や疾患により歯を喪失した場合に人工歯根(インプラント)を用いた外科的治療方法が行われており、ブリッジ法や入れ歯治療に比べ咬合機能の回復に有効と言われている。また、3次元立体画像が表示できるCT装置の活用など周辺技術の進歩が術式の安全性を担保し、手術数が年々増加する傾向にある。治療に使用される人工歯根材料は、生体適合性に優れていることや金属元素の溶出が原因となる細胞死や臓器への蓄積などの細胞毒性の観点からバナジウム元素を含まない医療用チタニウム合金が使用される傾向にある。しかし、この合金材料は弾性率が人骨(20~40GPa)に比べ100GPa程度と高く、応力遮蔽に起因する破骨細胞の作用によって人工歯根周囲の骨吸収が生じる問題を抱えていた。これまでに、人骨に近い低弾性率(約60GPa)や低熱膨張率を有する超弾塑性型チタニウム合金を用いて問題解決に取り組んできたが、超弾塑性型チタニウム合金材料は成形加工中に高い温度環境や大きな外力が作用すると合金組織が変化し、低弾性率が喪失する問題を抱えており、加工能率を向上させる場合には切削条件の調整のみでは加工後の材料組織の信頼性を損なうケースも発生している。一方、前述のX線3D-CTなどの最新診断装置の普及に伴い、短時間で患者の顎骨形状が入手できることから幹部形状に合わせたカスタムメイド型の人工歯根の供給も望まれている。このためNb元素の含有量次第で人骨の縦弾性係数に近い値を確保できることや、超弾塑性型チタニウム合金のように加工中に合金組織が変化することがないニオブチタン(Nb-Ti)合金材料が大変期待されている。しかしながら、高い凝着特性や低い熱伝導率が原因となり、切削加工を施した場合には工具寿命が短く極めて高い難加工性を示す。

2. 研究の目的

本研究では、生体適合性に優れ低い弾性率を有するNb-Ti合金材料を使用し、加工表面の材料組織的な信頼性を担保した上で、回転工具を用いて切取り厚さを薄く制御することによる微細加工技術の構築を試みる。Nb-Ti合金材料の材料特性の把握と基礎的な切削性の検証を実施する。切削条件(切削温度)の違いが工具損傷機構に及ぼす影響を明らかとすることにより、最適微細加工条件の選定を試みる。また、オリジナルの工具形状を提案する。

3. 研究の方法

使用被削材はニオブチタン合金(Nb含有量55wt.%Ti含有量45wt.%)である。使用工具は工具直径0.5mm、2枚刃のボールエンドミル工具であり、特性の異なる被膜を施した4種類の工具を用いた。各被膜工具の膜厚は、A工具が1.9 μ m、B工具が2.3 μ m、C工具が2.2 μ m、D工具が20.0 μ mである。なお、D工具はすくい面上の被膜をレーザーにより除去し鋭利な切れ刃を形成させたものである。従って、いずれの工具の場合も切れ刃丸みはほぼ2 μ m以下となり、良好な切れ刃状態である。実験は小径工具を用いるため、高速電動スピンドルを立型マシニングセンタの主軸に取り付け、傾斜切削を行った。切削条件は、切削速度(V)を1.5、3.0、4.0、5.0、8.0、15.0m/sの6条件に変化させ、一刀当たりの送り量(Sz)は6.0 μ m、ピックフィード(Pf)は30 μ m、切込み深さ(Rd)は50 μ mとした。また、切削方式は下向きのステップアップ方式を採用し、動粘度5 \times 10⁻⁶(m²/s at 38 $^{\circ}$ C)のオイルミストを外部供給した。工具寿命は無摩耗時の切れ刃稜線から被膜摩耗部下端までの逃げ面摩耗幅(VB)が20 μ mを超えた場合と定義した。

切削温度はV溝加工を施した被削材にセラミック被膜を施したクロメル線を挟みこむことでニオブチタン合金-クロメル熱電対を作成する手法を用いた。

4. 研究成果

4.1 工具被膜材種の違いが工具寿命に及ぼす影響

図1は各工具における切削距離と逃げ面摩耗幅の関係を示したものである。図より、A工具とB工具は切削距離2mと非常に短い距離において、工具寿命の閾値である逃げ面摩耗幅20 μ mを超え、工具寿命に達している。また、C工具においても切削距離5mで工具寿命に至っている。これに比べ、D工具は切削初期である切削距離10mにおいても逃げ面摩耗幅が5 μ m以下であり、切削距離300mまで工具寿命が延長している。図2は切削初期の2mにおけるA、B、C工具の切れ刃の観察結果である。図より、A工具は逃げ面摩耗幅が著しく進行しており、切れ刃近傍の被膜が剥離し、母材が露出したとみられる損傷が確認できる。A工具のDLC被膜は硬度に優れるが母材と被膜間の密着強度が低いため、切削早期に被膜剥離が生じ、母材が露出したことで工具寿命が短くなったと考えられる。一方、B工具は工具すくい面上に多量の溶着物が確認され、被膜摩耗部下端においては被膜が剥離したような跡(図中破線で示す)が観察される。また、C工具は逃げ面摩耗部に溶着物が観察される。そこで、切削初期の2mにおけるB工具とC工具の切れ刃をフッ硝酸を用いて酸処理を施し、観察および分析を行った。図3は酸処理後におけるB工具の観察および分析結果である。図中の分析結果より、逃げ面の摩耗部においてWやCoが検出されるため、母材が露出していることが明らかである。図4はC工具の観察および分析結果を示す。図より、すくい面上に母材と被膜との境界を示す段差があり、被膜剥離を伴っていることが観察される。しかし、図中の分析結果より、逃げ面の摩耗部では被膜が残存していることが明らかである。C工具は密着強度に優れるため、逃げ面の被膜剥離を伴わず、摩耗により工具寿命に至ったと考えられる。

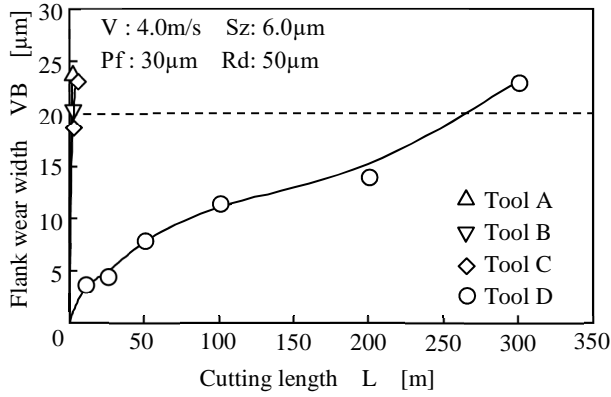


図1 各工具の切削距離と逃げ面間幅の関係

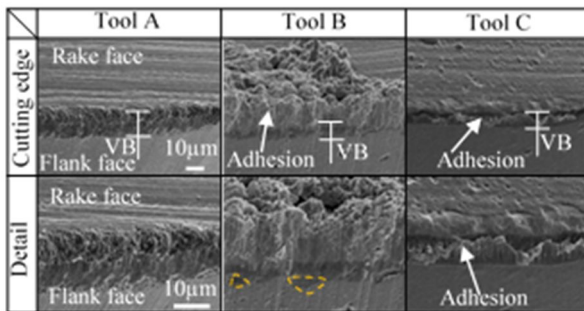


図2 切削距離 2km における切れ刃の比較

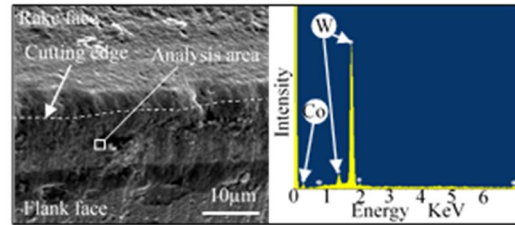


図3 切削距離 2km における B 工具の切れ刃の SEM 像と逃げ面摩耗部分分析結果比較

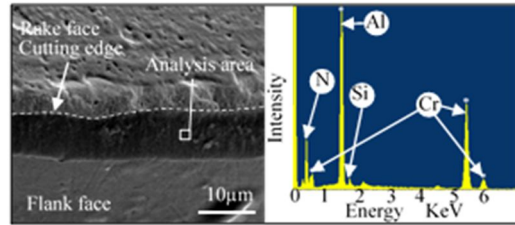


図4 切削距離 2km における C 工具の切れ刃の SEM 像と逃げ面摩耗部分分析結果比較

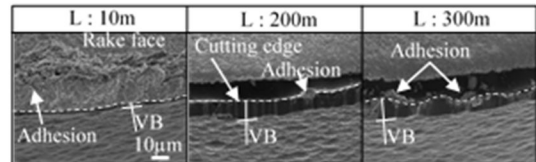


図5 切削距離の増加に伴う D 工具の切れ刃の比較

次に良好な結果が得られた D 工具について切削距離を追って観察したものを図 5 に示す。図より、切削距離 10m において、すくい面上に多量の溶着物が確認されるが、切削距離 200m では切れ刃近傍の一部に付着している程度である。また、逃げ面摩耗は切削距離の増加に伴い漸進的に進行している。D 工具はすくい面上の被膜をレーザ処理により除去し、工具逃げ面側に残った膜部分を用いて鋭利な切れ刃を形成している。そのため、すくい面上に多量の溶着物が付着するが、通常の被膜工具のような被膜剥離は生じない。また、切削距離の増加に伴い、工具すくい面は切りくずが流出しやすい形状に変化していくため、切削距離 200m 以降では著しい溶着は確認されず、良好な加工が行われたと考えられる。以上より、工具寿命の観点からダイヤモンド被膜工具がニオブチタン合金の切削加工に優れていることが明らかである。

4.2 切削速度の違いが工具寿命に及ぼす影響

図 6 は D 工具における各切削速度における切削距離と逃げ面摩耗幅の関係を表したものである。図より、切削速度 1.5m/s において、最も逃げ面摩耗幅の進行が早く、切削距離 200m で工具寿命に至っていることが確認できる。また、それ以上の高切削速度条件において、逃げ面摩耗幅の進行は遅くなる傾向を示す。切削速度 3.0m/s では切削距離 250m、切削速度 5.0m/s では切削

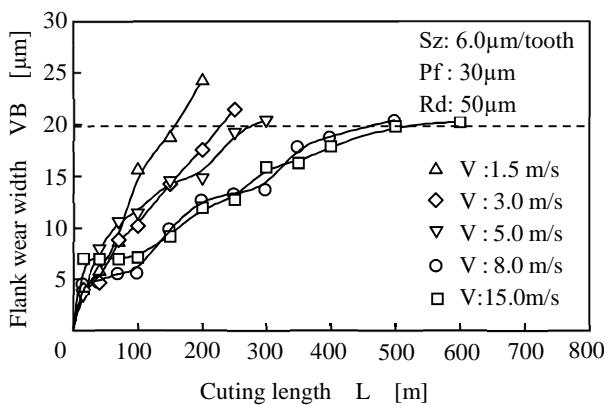


図6 切削速度を変化させた場合の耐摩耗性

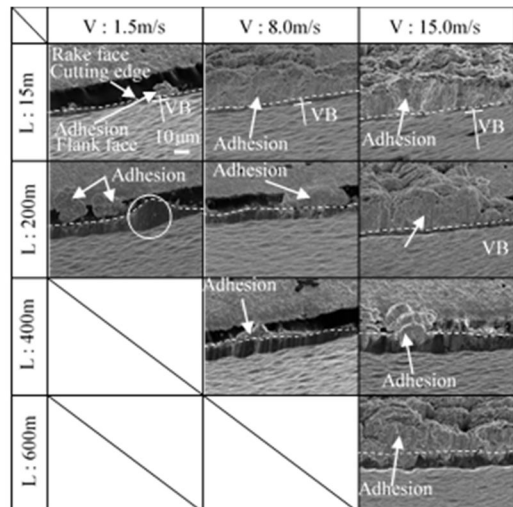


図7 各切削速度における切れ刃の変化の比較

距離 300m, 切削速度 8.0m/s では切削距離 500m で工具寿命に至っており, 最も高速である切削速度 15.0m/s において切削距離 600m まで工具寿命が延長している. 次に, 切削速度の違いによって逃げ面摩耗幅の進行に大きな差が生じた要因を検討するため, 代表的な切削速度における工具切れ刃の損傷状態を観察した. 図 7 は代表的な切削速度 1.5, 8.0, 15.0m/s について切削距離の増加に伴う工具損傷状態を比較したものである. 図より, 切削速度 1.5m/s はいずれの切削距離においても溶着物が少ないが, 切削距離 200m において切削に關する切れ刃と被削材と干渉しない切れ刃との境界付近において, 切れ刃の後退が著しく, それに伴い逃げ面摩耗幅が増大していることが確認できる(図中の丸印で示す). 切削速度 8.0m/s は切削初期において, 工具すくい面上に多量の溶着物が確認されたが, 切削距離の増加に伴い溶着物は減少し, 切削距離 400m 時点では切れ刃の一部に付着している程度であることが確認できる. 一方, 切削速度 15.0m/s はいずれの切削距離においても工具すくい面上に多量の溶着物が観察されるため, 切削温度上昇の影響を受けていると考えられるが, 逃げ面摩耗は漸進的な摩耗を示している.

4.3 工具損傷要因の検討

図 8 は切削速度と切削温度の関係を示したものである. 図より, 平均切削温度は切削速度の増加に伴って増加する傾向にあり, 切削速度 1.5m/s で約 200, 切削速度 8.0m/s で 400 と 200 程度の温度差がある. また, いずれの条件においてもダイヤモンドの酸化開始温度 699 (7) を下回る結果となった. 図 9 は代表的な切削速度 1.5, 8.0, 15.0 m/s における切削距離 100m 時の切れ刃を酸処理したものである. 図より, 切削速度 1.5m/s では部分的に著しく切れ刃稜線が後退し(図中白色の矢印で示す), その部分の逃げ面摩耗幅が増大しているため, 切れ刃稜線は大きな波形状を呈している. 切削速度 8.0m/s では, 逃げ面摩耗部に筋状の摩耗が観察される(図中黒色の矢印で示す)が, 切れ刃稜線には切削速度 1.5m/s の場合のような大きな波形状が現れていない. さらに, 高速条件の切削速度 15.0m/s では逃げ面摩耗幅が小さく, 切れ刃稜線も小さな波形状を示す程度であることが確認できる. 次に, 各工具におけるすくい面の比較を行う. 図 10 は酸処理を施した各工具のすくい面を比較したものである. 図より, 切削速度 1.5m/s の場合は切れ刃稜線の後退により膜厚が薄くなっていることと, 前述したように切れ刃の後退が著しい箇所(図中白色の矢印で示す)が観察できる. 一方, 切削速度 8.0m/s と 15.0m/s ではクレータ摩耗が確認され(図中黒色の矢印で示す), すくい面表面も滑らかである. この傾向は切削速度 15.0m/s において顕著に表れている. しかし, 前述のようにいずれの条件においても熱的影響が顕著に表れる温度域に達していない. 一般的には切削速度を上げるとそれに伴い切削温度も上昇して, 摩耗の主要因が機械的摩耗から熱的摩耗へと遷移し, 工具寿命は短くなる傾向を示し, 遷移点付近の切削速度において最も摩耗が抑制(長寿命)されることが知られている.

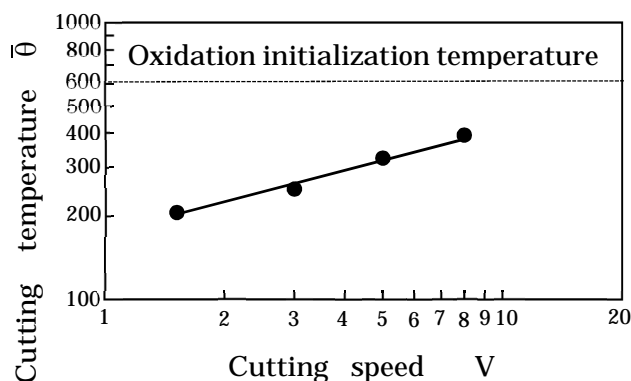


図 8 切削速度と切削温度の関係

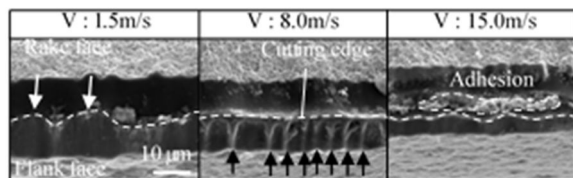


図 9 各切削速度における 100m の切れ刃の比較

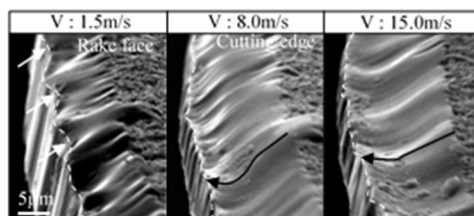


図 10 代表的な切削速度における切削距離 100m におけるサン処理後の切れ刃の比較

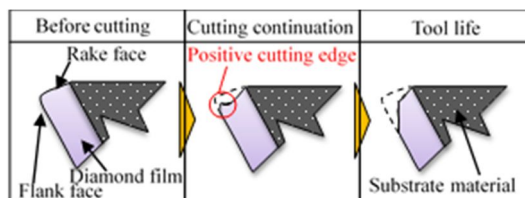


図 11 高速切削速度条件における工具損傷機構のモデル図

以上の結果を踏まえると, 本研究における切削速度の遅い 1.5m/s では, 切れ刃に加わる切削抵抗が大きく, 機械的な摩耗により部分的に切れ刃が後退することにより摩耗が進行し, 短寿命になったと考えられる. 一方, 切削速度の速い 15.0m/s においては, 図 11 に示すように切削温度の増加によりクレータ摩耗を生じることで, 見かけのすくい角が正となる. さらに, すくい角が大きくなることにより薄い切りくずが排出され, 良好な加工が行われる. そして, この状態で切削が継続された後, 切れ刃が部分的に欠け, 最初の切れ刃状態となることにより摩耗が進行し, 最終的に工具寿命に至ると考えられる.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Kazato NAKAMURA, KATO HIDEHARU, Momoko TAKIMOTO
2. 発表標題 A STUDY ON MILLING OF NIOBIUM-TITANIUM ALLOY WITH A SMALL BALL END MILL TOOL
3. 学会等名 International Symposium on Flexible Automation 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 瀧本桃子, 中村風人, 加藤秀治
2. 発表標題 ダイヤモンドコ-テッド工具を用いたニオブチタン合金のミーリング加工に関する研究
3. 学会等名 2019年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中村風人, 加藤秀治, 瀧本桃子
2. 発表標題 小径ボールエンドミル工具を用いたニオブチタン合金のミーリング加工 (切削速度の違いが工具寿命に及ぼす影響)
3. 学会等名 第12回 生産加工・工作機械部門講演会 (2018)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中村風人, 加藤秀治
2. 発表標題 小径ボールエンドミル工具を用いたNb-Ti合金のミーリング加工に関する研究
3. 学会等名 2017年度精密工学会北陸信越支部学術講演会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	森本 喜隆 (Morimoto Yoshitaka) (00290734)	金沢工業大学・工学部・教授 (33302)	
連携 研究者	新谷 一博 (Shintani Kazuhiro) (80139758)	金沢工業大学・工学部・教授 (33302)	
連携 研究者	池永 訓昭 (Ikenaga Noriaki) (30512371)	金沢工業大学・工学部・准教授 (33302)	