様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９　（共通）

科研費
KAKENHI

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

平成 ２９ 年　 ６ 月 ２０ 日現在

機関番号：３３３０２
研究種目：基盤研究(C)（一般）
研究期間：2014～2016
課題番号：２６４２００６２

研究課題名（和文）骨に近い低弾性率を有する超弾塑性ベータ型チタニウム合金の微細加工技術の構築

研究課題名（英文）Construction of the micro milling of super elasto-plastic beta type titanium alloy which has a young's modulus near 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）　　3,900,000円

研究成果の概要（和文）：超弾塑性型チタニウム合金は細胞毒性が極めて少ないだけでなく皮質骨に近い縦弾性係数を有する材料であり，インプラント材料としての利用が期待されている．本研究では小径ボールエンドミルを用いて超弾塑性型チタニウム合金のミーリング加工を行った．切削速度の違いが加工変質層に及ぼす影響においては，切削温度が相変態温度を超える切削速度16m/sでは2.5μm以上の厚い加工変質層が確認され，大きな切削力を付加した条件では0.7μmであった．加工変質層の主要因が切削温度であることを明らかとした．また，検討結果を踏まえ加工変質層低減とか加工能率を向上できる最適切削条件も明らかとしている．

研究成果の概要（英文）：The super elasto-plastic titanium alloy has stable mechanical property and superior biocompatibility. And also has low young’s modulus too. However, this characteristic is lost by severe heat environment and external force. Therefore, there is possibility that the advantageous characteristics may be lost during cutting. In this study, the effect of cutting temperature and cutting force on the affected layer was investigated by milling with small ball end mill tool. At the cutting speed of 16.0m/s, the thickness of the affected layer exceeded 2.5μm because of increasing of cutting temperature that approached to the neighborhood of transition temperature of this alloy. On the other hand, the affected layer was observed for the cutting condition of high cutting force by increasing feed rate of a tooth, depth of cut and pick feed, the thickness of the affected layer was 0.7µm .So, the affected layer was dominant by the influence of cutting temperature.

研究分野：工学，生産工学・加工学，切削加工

キーワード：超弾塑性β型チタニウム合金　低弾性率　難加工性　人工歯根　合金組織　微細加工　表面変質層

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。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。さらに、人工歯根は顎骨に固定されるため、咀嚼時の衝撃が直接伝わり、過大な応力が発生するため人工歯根本体のゆるみを生じるなどの安定的使用における問題が指摘されている。このため、生体適合性だけではなく広い温度範囲において人骨に近い低弾性率（約 50GPa）や低熱膨張率を有し、変形に対して形状保持が可能な超弾塑性β型チタニウム合金が有効な材料として期待されている。しかしながら、β型チタニウム合金の特有の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。加えて、成形加工中に高い温度環境や大きな外力が作用することにより合金組織が変化し、上述の人骨に近い低弾性率が喪失するため、加工後の材料組織の信頼性確保が重要となる。

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超弾塑性β型チタニウム合金材料を使用し、加工表面の材料組織的な信頼性向上を図るため、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。①微細加工における表面変質層の発生機構の解明を試みる。加えて、②微細表面加工における切削条件（切削温度）の違いが表面変質層に及ぼす影響を明らかとすることにより、これを考慮した最適微細加工条件の選定を試みる。

３．研究の方法

使用被削材はβ型の超弾塑性型チタニウム合金である．使用工具は，膜厚約 1μm の AlCrSiN 被膜を施した 2 枚刃超微粒子超硬合金製ボールエンドミル工具であり工具半径 0.5mm，シャンク径 4.0mm，首下長さ 5.0mm のロングネックタイプのものを用いた．実験には高速電動スピンドルを取り付けた立型マシニングセンタを用い，図 1 に示すように，斜面切削にて行う．切削条件は切削速度(V)を 4 条件，一刃当たりの送り量(Sz)を 4 条件，切込み深さ(Rd)を 2 条件に変化させ，ピックフィード(Pf)は 30μm，切削方式は下向き湿式切削とした．なお，切削油剤はエマルジョンタイプの水溶性クーラントを 20 倍希釈し 0.5MPa の圧力で外部供給した．工具寿命は無

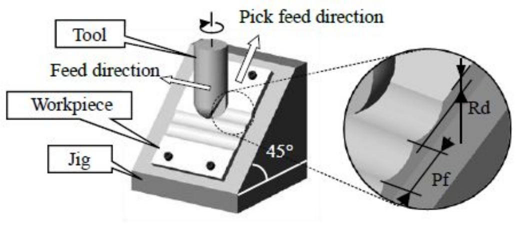

図１ 実験のセットアップ

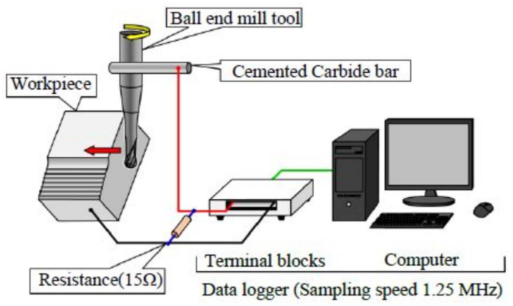

図２ 切削温度の測定方法

摩耗時の切れ刃稜線から逃げ面摩耗幅が 20μm 以上に達した時と定義した．加工表面粗さについては，歯科用インプラントにおいて表面粗さが 0.8μmRz を超えるとバクテリアが繁殖しやすい環境となるという報告がされていることから，Rz：0.8μm を閾値とした．

加工変質層厚さ(t)の評価方法は，加工後の被削材を切り出し，カーボンとタングステンの順番で保護膜を施す．次に集束イオンビーム(FIB)加工装置を用いて段階的に薄膜化した後，被削材断面方向に対して加工表面直下から被削材内部まで透過型電子顕微鏡(TEM)により電子線回折を行う．以上の手順で合金組織の変化を調べて加工変質層厚さを求めた．

図２は，切削温度測定装置の構成である．切削温度の測定には，工具―被削材間熱電対法を用いた．絶縁処理を施した工具をスピンドルに取り付け，工具シャンクに超硬合金製の丸棒を接触させる．導線と工具，被削材に断熱材を塗布することで冷接点とし，加工点を高温接点とする超硬合金－チタニウム合金熱電対が形成される方法とした．なお，空転時の波形の乱れを安定させるため，各導線間に 15Ωの炭素抵抗を接続することでバーンアウト回路を形成した．測定値は熱電対より電圧で出力され，出力された電圧値は A/D ボードを介し，パソコン用解析ソフト(National Instruments 製 LabView2016)で収集及び処理を行った．また，事前に超硬合金―チタニウム合金熱電対の較正式を求め，切削時の熱起電力(E)を切削温度に換算し，工具逃げ面温度(θ)とした．

４．研究成果

4.1 熱による被削材組織の変化

被削材組織の変化として，被削材の熱による影響を明らかとするために，熱処理前後の合金組織を比較した．なお，熱処理は 973K ま

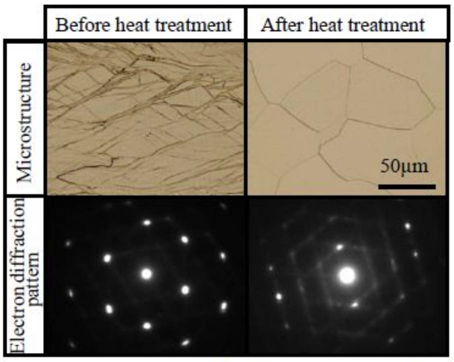

図 3　熱処理前後の材料組織と電子線回折結果の比較

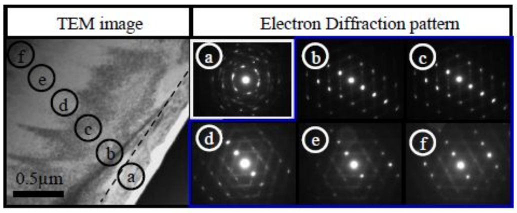

図 4　断面方向の TEM 観察結果（V1.5m/s）

で加熱後 10 秒間保持し，その後水冷することで行った．図 3 は熱処理前後における被削材組織と電子線回折パターンの変化を示す．図より，標準である熱処理前の組織では超弾塑性型チタニウム合金特有のマーブル状組織となっているのに対し，熱処理後の組織は結晶粒が明瞭な一般的な合金組織となっていることが確認できる．この熱処理後の合金組織は冷間強加工前の組織に酷似していることから，熱処理によって冷間強加工によって得られる諸特性が失われていると考えられる．また，電子線回折パターンを比較すると，熱処理前の合金組織と熱処理後の合金組織では電子線回折パターンが異なることが明らかである．以上の結果を踏まえ，電子線回折パターンの変化を観察することで加工変質層厚さを測定する．

4.2　切削速度の違いが加工変質層厚さに及ぼす影響

切削速度の違いが加工変質層厚さに及ぼす影響を検討するため，一刃当たりの送り量を 6.0μm/　tooth，切込み深さを 50μm とし，切削速度を 1.0m/s から 4.0m/s まで変化させ加工変質層厚さの観察を行った．図 4 は切削速度 1.5m/s における被削材断面の TEM 観察結果を示す．TEM 像からは加工表面から破線までの範囲において斑模様の様相となっていることが確認できる．また，電子線回折パターンからは a 領域では六角形の電子線回折パターンを示しているのに対し，b から f 領域においてはひし型の電子線回折パターンを示していることが明らかである．この b から f における電子線回折パターンは，加工前の被削材を電子線回折した際に得られるパターンと同様のものであることから，a 領域において合金組織が変化していることが明

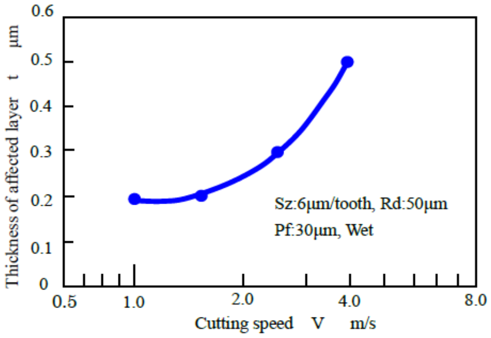

図 5　切削速度と変質層の関係

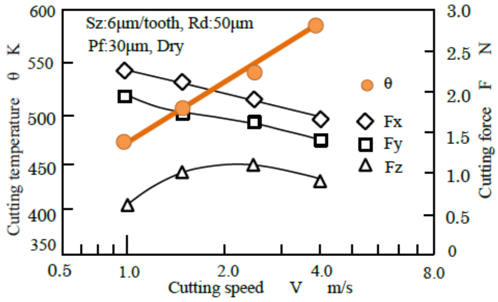

図 6　切削速度の増加に伴う切削温度及び切削抵抗の変化

らかである．以上の結果より，TEM 像と電子線回折パターンの変化から切削速度 1.5m/s における加工変質層厚さは約 0.2μm であると考えられる．図 5 は同様の方法を用いた各切削速度における加工変質層厚さの評価結果である．図より，切削速度の増加に伴って加工変質層厚さは増加傾向にあることが確認できる．しかし，加工変質層厚さは最大でも約 0.5μm であり，非常に薄くなっていることが明らかである．

4.3　切削温度及び切削抵抗の違いが加工変質層厚さに及ぼす影響

加工変質層の生成に支配的な要因を明らかにするため，切削温度および切削抵抗が加工変質層に及ぼす影響について検証した．図 6 は切削速度の変化に伴う切削温度及び切削抵抗の変化を示したものである．平均切削温度は切削速度の増加に伴って増加しており，切削速度 1.0m/s と 4.0m/s では約 120K の温度差がある．一方，切削抵抗は切削速度の増加に伴って減少傾向を示し，切削温度のと反対の傾向を示していることが明らかであり，その差も 0.5N 程度と非常に小さい．そこで，切削温度及び切削抵抗の影響が顕著に生じている加工面に対して TEM 観察を行い，それぞれが加工変質層に及ぼす影響について調査した．切削温度の影響については，切削速度 16m/s とした高速条件（A 条件とする）で加工した際の被削材断面を観察することで検証した．A 条件における切削温度を測定したところ約 900K となり，いずれの切削速度と比べて著しく高温となっていることが明らかである．図 7 は A 条件における被削材断面の TEM 観察結果を示す．TEM 像からは視野

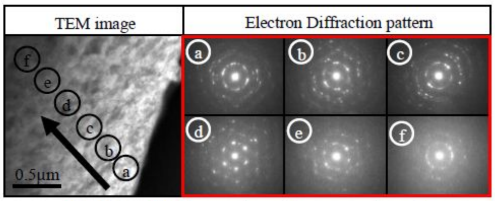

図 7　断面方向の TEM 観察結果（A 条件）

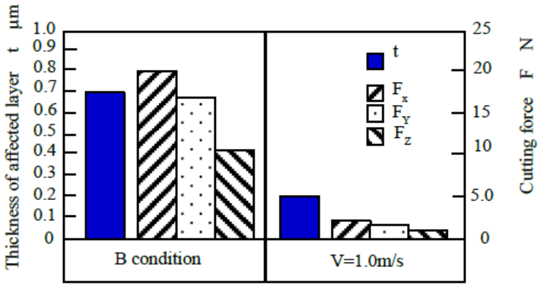

図 8　変質層厚さと切削抵抗の比較

全体が斑模様の様相を示していることが確認できる．また，電子線回折結果からは視野すべての領域において，六角形の電子線回折パターンを示しており，加工前に得られる電子線回折パターンと異なっている．以上の結果から，高速条件においては 2.5μm 以上の加工変質層が生成されていると考えられる．静的加熱実験における本被削材の変態点は 1000K[7]であることから，A 条件においては平均切削温度が変態点付近まで上昇することにより，加工変質層厚さが増大したと考えられる．次に切削抵抗の影響については，切削温度の影響を極力抑えるために切削温度の低い切削速度 0.5m/s 条件を用い，一刃当たりの送り量：50μm/tooth，切込み深さ：200μm ピックフィード：100μm と大きくした高負荷環境（B 条件とする）における被削材断面を観察することで検証した．図 8 は B 条件と，最も切削抵抗の大きかった切削速度 1.0m/s における加工変質層厚さ及び切削抵抗の比較を示す．B 条件における切削抵抗は，切削速度 1.0m/s と比較して 10 倍以上となっている．また，この際の加工変質層厚さを同様に観察すると，B 条件における加工変質層厚さは 0.7μm であった．B 条件における加工変質層厚さは，切削抵抗の増大により厚くなっているものの，切削温度の著しく高温となった A 条件における加工変質層厚さの方が著しく増大していることが明らかである．以上の結果から，加工変質層には切削抵抗より切削温度の影響が支配的であることが明らかである．そのため，加工変質層の低減には切削温度の低い，低切削速度域での加工が望ましいといえる．

4.4　加工変質層低減に向けた最適切削条件の選定

前述の結果より，加工変質層の低減には，切削温度が低くなる切削条件で加工することが望ましいことが明らかとなった．そこで，切削速度，一刃当たりの送り量，切込み深さ

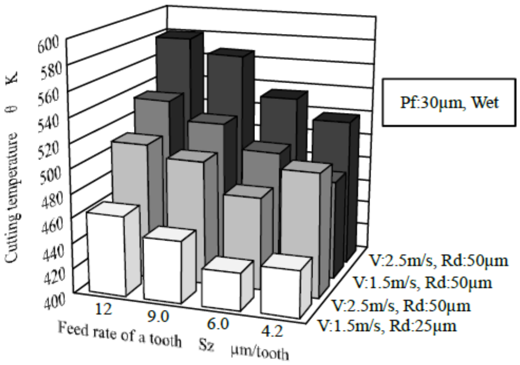

図 9　各条件における切削温度の比較

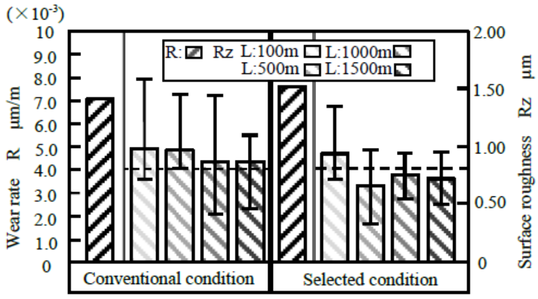

図 10　選定条件と従来条件における摩耗速度と表面粗さの比較

を変化させた際の切削温度の測定を行った．図 9 は切削条件の違いによる切削温度の変化を示す．切削温度は，一刃当たりの送り量，切込み深さが小さくなるほど減少する傾向を示していることが明らかである．また，両切削速度において，切込み深さを減少させた際の切削温度は約 60K 程度減少しており，同様の減少量となっている．これらの切削温度の変化は，一刃当たりの送り量や切込み深さが減少することで切り取り厚みが減少したためであると考えられる．しかし，一刃当たりの送り量，切込み深さ共に最も小さくした，Sz：4.2μm/tooth，Rd：25μm の条件においては，全体の傾向と異なり 6.0μm/tooth の切削温度より上昇している．これは切り取り厚みが極端に減少した結果，切れ刃先端のみで加工が行われるような状態となり，せん断角の減少に伴いせん断面積が増加したためであると考えられる．測定した範囲で切削温度が最も低減できる条件は切削速度 1.5m/s，一刃当たりの送り量：6.0μm/tooth，切込み深さ：25μm であることが明らかである．しかし，この条件では送り速度 F を減少させることとなり，低能率で加工することとなる．一方，切削速度 2.5m/s，一刃当たりの送り量 12μm/tooth，切込み深さ：25μm の条件に着目すると，加工変質層を評価した際の切削速度 2.5m/s と比べ約 30K 切削温度が減少しており，加工変質層厚さを切削速度 1.5m/s と同程度に抑制できると考えられる．また，本条件における送り速度は 1176mm/min となるため，切削速度 2.5m/s 条件の 2 倍の高能率化が実現できる．これは前述した 4.0m/s 条件を上

回る能率が確保できることとなる．これにより，加工変質層を抑制しつつ，最終仕上げ工程における高能率加工が可能となる．図 10は選定条件と，従来条件（V：2.5m/s，Sz：6.0μm，Rd：50μm，Pf：30μm）における摩耗速度と各切削距離における加工表面粗さを比較を示したものである．なお，図中の破線は閾値である 0.8μmRz を示している．図より，摩耗速度を観ると両条件はほとんど同様の値となっており，選定条件は従来条件と同等の耐摩耗性を示していることが明らかである．また，表面粗さを観ると，切削初期から安定して閾値と同程度の表面粗さを有しており，良好な表面粗さが得られていることが明らかである．

以上の結果より，選定条件は，耐摩耗性，表面粗さの観点からも良好であり，優れた加工特性を有することが確認された．そのため，切削速度：2.5m/s，一刃当たりの送り量：12μm/tooth，切込み深さ：25μm，ピックフィード：30μm が加工変質層の低減と高能率化の両立を可能とする最適切削条件であると考えられる．

５．主な発表論文等
（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 2 件）

1) Hitomi SAKAI, Hideharu KATO, Akihiro KITAMURA, Sota KOHATA, Noriaki IKENAGA:A Study on milling of super elasto-plastic titanium alloy using a small ball-end mill tool, The 15th International Conference on Precision Engineering,(2014),682-685.
2) Akihiro KITAMURA, Hideharu KATO, Noriaki IKENAGA, Hitomi SAKAI, Sota KOHATA: Influence of cutting conditons on surface integrity in milling for super elasto-plastic titanium alloy using small ball end mill tool, The 15th International Conference on Precision Engineering,(2014),640-643.

〔学会発表〕（計 4 件）

1) 北村明大，加藤秀治，池永訓昭，久保田和幸：著弾塑性を有するチタニウム合金を対象とした小径ボールエンドミル加工に関する研究　－工具被膜の最適化に関する検討－，一般社団法人日本機械学会 第 10 回 生産加工・工作機械部門講演会講演論文集，(2014)
2) 加藤秀治，伊藤江平，池永訓昭，北村明大，久保田和幸：小径ボールエンドミルを用いた超弾塑性型チタニウム合金のミーリング加工に関する研究－加工変質層を考慮した切削条件の選定－，2016 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，(2016)，689-690.
3) 伊藤江平，加藤秀治，池永訓昭：小径ボールエンドミルを用いた超弾塑性型チタニウム合金の微細加工に関する研究 －切削温度及び切削抵抗が加工変質層に及ぼす影響－，一般社団法人日本機械学会第 11 回 生産加工・工作機械部門講演会講演論文集，(2016)，49-50.
4) Kohei ITO, HIdeharu KATO, Noriaki IKENAGA, Akihirto KITAMURA, Kazuyuki KUBOTA：A study on micro machining for super elasto-plastic titanium alloy with small ball end mill tool -Influence of cutting temperature and cutting force on affected layer-, 31st ASPE Annual Meeting, (2016), 496-500.

〔図書〕（計　　件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計　0　件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況（計　0　件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

６．研究組織
(1)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

(2)研究分担者
森本喜隆(MORIMOTO YOSHITAKA)
金沢工業大学・工学部・教授
研究者番号：00290734

(3)連携研究者
新谷一博（SHINTANI KAZUHIRO）
金沢工業大学・工学部・教授
研究者番号：　80139758

(4) 連携研究者
池永訓昭（IKENAGA
金沢工業大学・工学部・講師
研究者番号：30512371