

令和 5 年 5 月 13 日現在

機関番号：33302

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04200

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高効率加工技術の構築

研究課題名(英文) Development of highly efficient machining technology for niobium-titanium alloys 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) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：ニオブチタン(Nb-Ti)合金材料は細胞毒性が低いNbとTiの2元素で構成される材料である。また、人骨に近い弾性率を有しており、かつ精密鑄造法により一次成形品が供給しやすい材料のため、インプラント材料として期待されている。しかし、高い凝着特性や低い熱伝導率が原因となり、工具寿命が短く極めて高い難加工性を示し、高能率加工が難しい材料である。本研究では、丸駒チップや円筒端面外周部を有するロータリ工具を駆動させヘール加工と併用することにより、高能率加工を可能とした。また、オイルミスト供給環境下において工具の長寿命化を実現している。さらに、本手法の切削機構について検討し、有用性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合金材料の高効率加工技術の開発においては、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)極薄厚さの切りくずを生成する加工条件の把握と切削機構の解明が必要なポイントである。本研究ではシリンダ形状の円筒端面外周部を切れ刃とするロータリ工具を用いて切取り厚さを薄く制御することとヘール加工を組み合わせた加工法を提案し、切削温度を低減した高能率加工が可能であることを明らかにしている。これにより、生体適合性に優れ低い弾性率を有するNb-Ti合金の人工骨への適用への可能性を高められた。

研究成果の概要(英文)：Niobium-titanium (Nb-Ti) alloy materials are composed of two elements, Nb and Ti, with low cytotoxicity. It is also expected to be used as an implant material because it has an elastic modulus close to that of human bone and is easy to supply primary molded products by precision casting methods. However, due to its high cohesion characteristics and low thermal conductivity, it has a short tool life and extremely high machinability, making it difficult to perform highly efficient machining. In this study, a rotary tool with a round insert or cylindrical end face periphery was driven and used in combination with hail cutting to enable highly efficient machining. In addition, a longer tool life is achieved in an environment with an oil mist supply. Furthermore, the cutting mechanism of this method is investigated and its usefulness is clarified.

研究分野：生産加工・加工学

キーワード：駆動型ロータリ工具 ニオブチタン合金 ヘール加工 高能率加工 切削機構 チタニウム合金

1. 研究開始当初の背景

近年、日本人の平均寿命の延長に伴って後期高齢者人口も増加しており、変形性股関節症などの関節疾患が増加するものと考えられる。この治療法として外科的治療方法である人工股関節置換術が行われており、除痛効果が高いため患者の生活の質(QOL)の回復に有効とされている。また、3次元立体画像が表示できるCT装置の活用などによる幹部形状にマッチしたステムの提供や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骨材料には、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リスクを軽減するためバナジウム元素を含まない医療用チタニウム合金が生体適合性の点で有効であり、特にステム材料として多用されている。しかし、この合金材料は弾性率が人骨(20~40GPa)に比べ100GPaと高く、応力遮蔽に起因する破骨細胞の作用によってステム周囲の骨吸収が生じステム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。しかし、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、人骨に近い低弾性率が喪失する問題や、供給材料は小さい形状のものに制限されるためステムのサイズには対応できない。ニオブチタン(Nb-Ti)合金材料は精密鋳造法により比較的大きなサイズで一次成形品が供給しやすく、Nb元素の含有量次第で人骨の縦弾性係数に近い値(約60GPa)を確保できることや、超弾塑性型チタニウム合金のような加工中の合金組織変化を生じない特性を有している。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。さらに、三次元的に複雑なステムの形状成形の高効率化も求められている。

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Nb-Ti合金材料を対象とした高能率加工を実現する新規加工技術の構築を行う。丸駒チップ工具やシリンダ形状の円筒端面外周部を切れ刃とするロータリ工具を用いて切り取り厚さを薄く制御することとヘール加工を組み合わせたハイブリッド型の加工方法を提案し、切削特性の検討や工具損傷機構の解明を試みる。

3. 研究の方法

被削材はTi-6Al-4V合金である。形状は直径50mmの中実丸棒の外周面に予め平面加工部(30mm×222mm)を形成した。工具は超微粒子超硬合金(Z01)製で、切れ刃稜線に半径20μmの丸ホーニングを施した直径4mmの円筒型ロータリ工具を用いた。本加工法は旋盤をベースとした工程集約型複合加工機を使用しており、被削材を両側チャックにて固定させ、45°傾けた加工面に対して工具回転軸にて駆動させたロータリ工具と加工面方向に工具を機械送りさせるヘール加工を組み合わせたハイブリッド加工方式である。切削条件は工具周速(Vt)を50m/min、送り速度(F)を3000、6000、9000mm/minの3条件に変化させ、ピックフィード(Pf)と切り込み量dは、0.1mmに固定した。切削環境は湿式及び、オイルミスト供給(MQL)を用いた。湿式環境では20倍希釈した水溶性クーラント(エマルジョンタイプ)をフラッド供給した。MQL環境は動粘度5(38mm²/s)の植物油を15ml/hの流量でノズルから外部供給した。工具寿命は、逃げ面摩耗幅(VB)が100μmに達した場合、切削に支障をきたす損傷が刃先に生じた場合、加工面の最大高さ粗さRz6.3μmを超える場合とした。なお、本実験における切削距離(L)の定義は工具回転に伴う切れ刃の擦過距離ではなく、工作物の加工長を累計した切削長とした。切削抵抗の測定は水晶圧電式の4成分センサ(kisler 9297)を用いて行った。主分力と背分力は加工中のX軸、Z軸成分の抵抗を工具主分力方向及び、背分力方向に分解して算出した。

4. 研究成果

4.1 ハイブリッド加工における高能率化の検討

図1は各送り速度の湿式環境における切削距離と逃げ面摩耗幅の関係である。図より、送り速度9000mm/min条件が最も長寿命を示した。3000mm/min条件は切削距離500mではく離により工具寿命を迎え、6000mm/minと9000mm/min条件は漸進的に摩耗が進行し、それぞれ切削距離1400mと1900mにおいて粗さの閾値を超え寿命に至った。図2は各送り速度条件の切れ刃の変化について切削距離を遡ってまとめたものである。図2(a)の3000mm/min条件では、切削距離500mではく離が発生し、寿命に至っている6000mm/minと

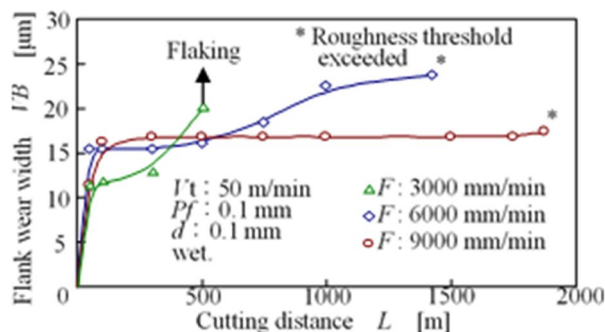


Fig. 1 Relationship between cutting distance and flank wear width in each feed speed

9000 mm/min 条件は、3000 mm/min 条件で寿命に至った切削距離 500 m においても寿命を決定する損傷は見られなかった。また、図 2(b)の 6000 mm/min 条件では、切削距離 1000 m で切れ刃に欠けが発生しているのに対して、9000 mm/min 条件では工具損傷の発生は遅く、切削距離 1500 m で切れ刃の欠けが現れた(図 2(c)参照)。いずれの条件においても凝着物の発生後に工具損傷が生じていることから凝着物の生成脱落の繰り返しによってはく離や欠けが生じ、これが進行し寿命に至る損傷となったものと考えられる。そこで、9000 mm/min 条件を用いて切削初期、切削中期、工具寿命直前の切削距離における切れ刃状態をそれぞれ再現した。図 3 は切れ刃状態を再現した際の工具断面の観察結果と工具寿命時の切れ刃全体写真である。図より、切削距離の増加に伴い欠けが生じ、進行していく様子が確認できる。また、損傷部の上に凝着物が存在していることから湿式環境下の工具損傷の要因は、凝着物の生成脱落によるものであることが明らかである。加えて、寿命時は切れ刃全周に切りくず凝着が生じた(図 3(d)参照)ことから、凝着物の生成脱落によって刃先の欠けが進行することで凝着現象が著しく現れることが読み取れる。また、前述した切れ刃損傷が発生するタイミングは送り速度の増加に伴って遅くなる(切削距離が長くなる)傾向を示している。ハイブリッド加工は工具が一定周速で回転しながら送り速度を与えている。このため、低送り速度ほど切れ刃 1 点の擦過距離が長くなり、凝着物の生成脱落回数が増加し、早期寿命に至ったと考えられる。

次に、長寿命を示した 9000 mm/min 条件の工具寿命時の工具上の凝着物を酸洗いで除去した後の切れ刃状態と加工面状態を図 4 に示す。図 4(a)より、すくい面の凝着物を除去した切れ刃形状は、溶着脱落により広範囲で切れ刃稜線が喪失していることが明らかである。また、前出の図 3(d)の酸洗い前の切れ刃においては、切りくずの一部が残存していることが明らかであり、工具の欠けた箇所に残りくずの一部が残存し、その状態で加工が行われたものと考えられる。このため、著しく形状を損なった切れ刃上に残存した切りくずが次の加工の際に加工面に噛みこむことによって、再凝着物の形で加工面に偏在するため、図 4(b)に示すような工具寿命時の著しい加工面の悪化を招いていると考えられる。以上のことから、湿式環境における高送り速度を用いた加工は可能となるが、凝着物の生成脱落に伴う工具損傷によって加工面精度の悪化を招く結果となった。

4.2 切削環境の違いが加工特性に及ぼす影響

図 5 は、切削環境とオイル供給位置の違いにおける工具寿命距離と加工面の最大高さ粗さ(Rz)の比較である。図より、MQL 環境を用いることで湿式環境と比べ著しい寿命改善が

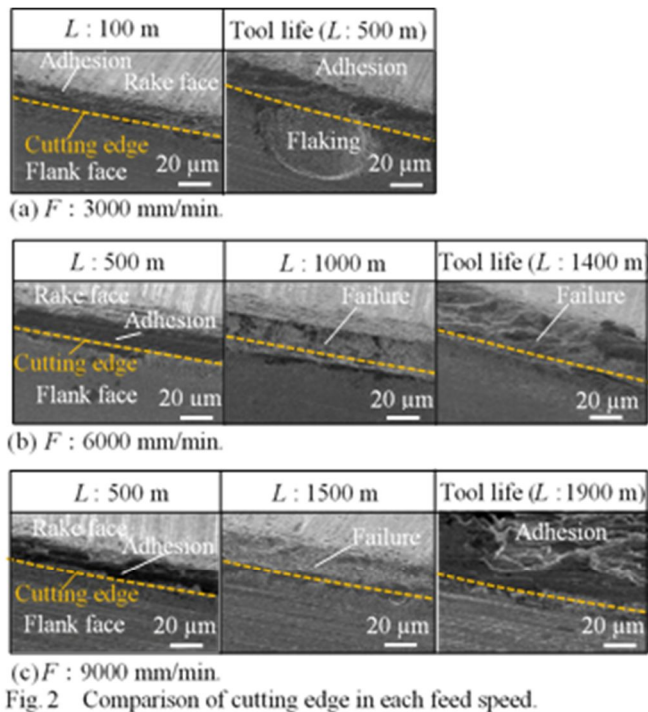


Fig. 2 Comparison of cutting edge in each feed speed.

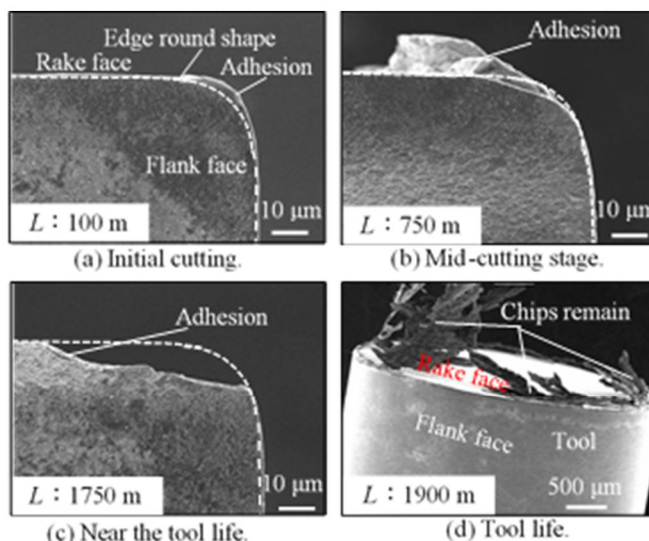


Fig. 3 Effect of adhesions on tool damage with increasing cutting distance in cross-sectional and overall observations.

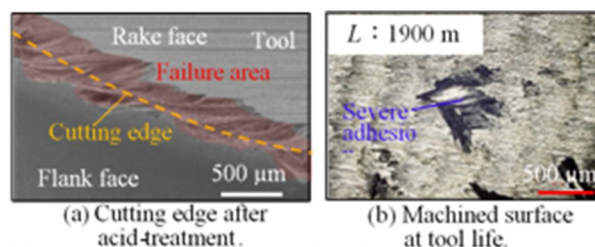


Fig. 4 Photograph of machined surface and cutting edge at tool life.

得られ、粗さに関しても MQL 環境が優れることが明白である。また、すくい面からオイルを供給する Type B が良好な値を得ていることも確認できる。図 6 は各オイル供給位置における実験終了時の切削距離 6000 m の切れ刃全周写真である。図より、両供給法において切削距離 6000 m に至っても湿式環境の切れ刃写真(図 3(d)参照)と比べ、凝着が抑制されており、寿命を決定する欠けも生じていない。これは、動粘度が低く浸透性の高いオイルを供給し、工具と被削材の摩擦係数を軽減できたためと考えられる。加えて、損傷のない良好な切れ刃が加工面に転写したため湿式環境よりも良好な粗さが得られたと考えられる。そこで、摩擦係数測定試験を今回の切削条件を考慮した形で実施した。湿式環境の摩擦係数は 0.44 であったのに対し、MQL 環境では 0.35 と摩擦係数が低下しており、潤滑効果の高い MQL 環境を用いることが、ハイブリッド加工における凝着物抑制に有効である。しかし、MQL 環境において、図 7 に示すように供給方法の異なる場合の詳細観察を行った結果、逃げ面にオイルを供給する Type A では、Type B より逃げ面摩耗は抑えられるものの、逃げ面側において凝着物が確認された(図 7(a))。加えて、図 7(b)に示す加工面の比較において、Type A の場合には加工表面にうろこ状のフィードマークが確認されたのに対して、Type B ではピックフィードに沿った等間隔のピッチが確認された。これは切りくずとの擦過が生じるすくい面側にオイルを直接供給する Type B の方が切りくず・工具界面の潤滑がうまく働き、主軸振れの少ない加工が行われたためだと考えられる。

以上の結果から、 $F: 9000 \text{ mm/min}$ 、Type B 条件を用いることで、良好な切れ刃形状を維持しながら、高送り速度加工と良好な加工面を得ることが可能である。

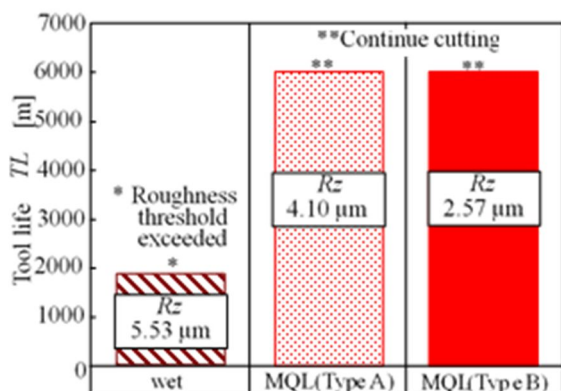


Fig. 5 Comparison of tool life and surface roughness in each cutting environment and oil supply type.

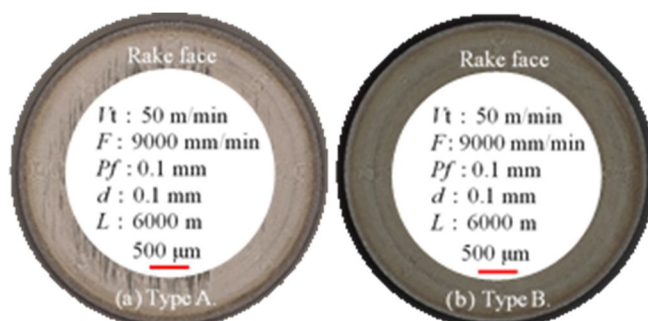


Fig. 6 Photograph of the circumference cutting edge in each oil supply type.

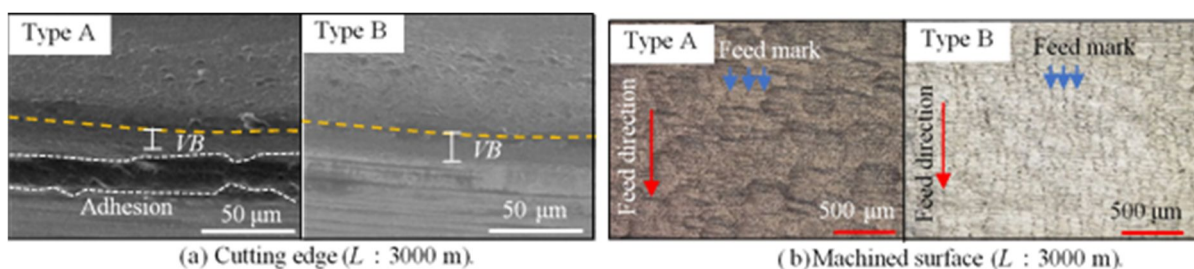


Fig. 7 Photograph of cutting edge and machined surface in each oil supply type.

4.3 ハイブリッド加工の切削機構に関する一考察

前節ではハイブリッド加工を $V_t: 50 \text{ m/min}$ 、 $F: 9000 \text{ mm/min}$ 、Type B 条件下で行うことにより、工具損傷の抑制と良好な加工表面を実現することが可能であることを述べた。本節では運動学、切りくず形状、切削抵抗、加工方法の観点から前節の結果に対する考察を行った。Shaw らは、工具と被削材の両方が回転するロータリ加工が被削材と工具の 2 方向の速度ベクトルにより傾斜角(i)を持った傾斜切削として見なせることを報告している。ハイブリッド加工においても、ロータリ工具の回転ベクトル(V_t)とヘール送りによる送り速度ベクトル(F)が与えられていることから、傾斜切削挙動を示すと考えられる。ここで、ハイブリッド加工の傾斜角(i)は、工具周速(V_t)と送り速度(F)の比によって式(1)で導かれる。

$$i = \tan^{-1} \frac{V_t}{F} \quad (1)$$

V_t : 50 m/min, F : 9000 mm/min を代入すると i : 79 ° となり傾斜角は非常に大きい . また , 傾斜切削の場合 , 有効すくい角 (e) が存在し , 傾斜角 (i) , 切りくず流出角 (c) , 工具すくい角 (n) を用いて式 (2) で有効すくい角 (e) が導かれる . なお , 工具すくい面の擦過痕よりハイブリッド加工の切りくず流出角 (c) は 75 ° を示すことを確認した .

$$\alpha_e = \sin^{-1}(\sin \eta_c \sin i + \cos \eta_c \cos i \sin \alpha_n) \quad (2)$$

式 (2) より有効すくい角 (e) は 67 ° となりみかけのすくい角が大きくなる . 図 8 は , ハイブリッド加工の傾斜切削モデル (工具の曲率は無視) である . 図より , 被削材は , 79 ° の傾斜がついた状態で刃先に向かうため , せん断時の切れ刃と被削材の接触幅が変わり , 薄い切りくずが排出されることが読み取れる . 実際に , Type B 条件で得られた切りくず断面 (図 9 参照) からは切りくず厚みが非常に薄いことが確認される .

さらに , ハイブリッド加工を模した切削抵抗測定試験を試みた結果 , 平均主分力が 28 N , 平均背分力が 38 N となり , 非常に小さい数値を示すことから切れ刃にかかる負荷もかなり小さく抑えられていることが考えられる . また , 提案しているハイブリッド加工の主たる加工速度は , 機械送りにより与えられている . 実際の送り速度 F は 9000 mm/min (9 m/min) であることから , チタン合金の旋削加工やミーリング加工に採用される切削速度 (超硬合金工具 : 60 m/min) よりも遥かに遅い速度域となる . これは切削温度の上昇を抑制する点からチタン合金の加工においては極めて有効である . 一方 , 提案手法と一般的な超硬ボールエンドミル加工による加工能率を , シミュレーションを用いて比較した結果 , 約 6 倍の加工能率向上を確認している .

以上の結果から , ハイブリッド加工は傾斜切削によるすくい角の鋭化に伴う薄い切りくずの生成と極低速加工が組み合わさることで , 工具損傷の抑制を可能にするとともに高能率・高精度加工を実現できる加工方法と考えられる .

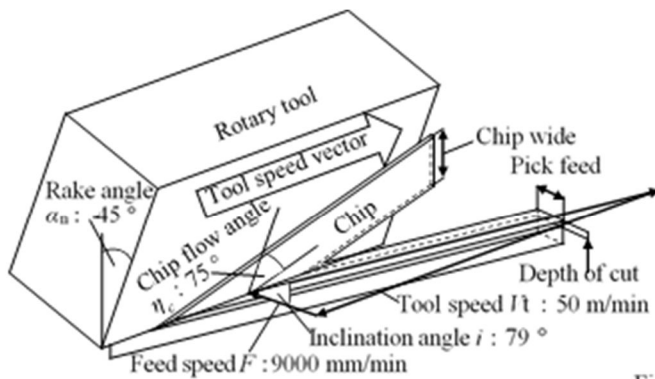


Fig.8 Oblique cutting model of hybrid machining.

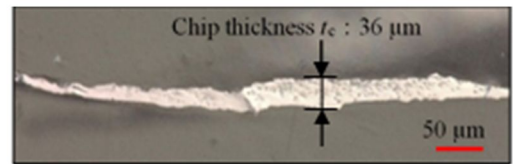


Fig.9 Photograph of chip thickness in hybrid machining

4.4 まとめ

駆動型ロータリ工具とハール加工併用したハイブリッド加工の高能率・高精度化及び , 切削機構の検討を行った結果以下の結言を得た .

- (1) 湿式環境では , 切削距離の増加に伴う凝着物の生成脱落回数が増え , 広範囲で切れ刃の欠けが生じる .
- (2) 湿式環境において , 高送り速度を用いた加工は可能となるが , 凝着物の生成脱落に伴う工具損傷によって加工面精度の悪化を招く .
- (3) MQL 環境では , 潤滑作用により切りくず-被削材間の摩擦係数が低減することで , 凝着物が抑制され著しい寿命改善が得られる .
- (4) ハイブリッド加工は , 見かけ上のすくい角が大きくなることで , 薄い切りくずの生成が可能となる .
- (5) ハイブリッド加工は , 非常に遅い速度域による加工が行われるため切削温度の上昇を抑制する点で非常に有効であると考えられる .

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Yuto Yamazaki, Tetsuo Takada, Hideharu Kato, Shigehiko Sakamoto	4. 巻 Vol.16 No.5
2. 論文標題 High-efficiency machining of titanium alloy using combined machining method of driven rotary tool and hale machining	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of Automation Technology	6. 最初と最後の頁 .
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Yuto Yamazaki, Tetsuo Takada, Hideharu Kato
2. 発表標題 High-efficiency machining of titanium alloy using combined machining method of driven rotary tool and hale cutting
3. 学会等名 The 10th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21St Century November 14 to 18,2021 Kitakushu,JAPAN（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 川原直人, 加藤秀治
2. 発表標題 ダイヤモンド被膜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 2021年度精密工学会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高田哲生, 加藤秀治
2. 発表標題 駆動型ロータリー工具を用いたチタニウム合金のヘール加工に関する研究
3. 学会等名 2021年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 川原直人、山崎悠登、加藤秀治
2. 発表標題 ニオブチタン合金の高効率加工に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会北陸信越支部第58期総会・講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高田哲生、加藤秀治
2. 発表標題 チタニウム合金を対象とした駆動型ロータリー工具を用いたヘール加工法に関する研究
3. 学会等名 2020年度精密工学会北陸信越支部学術講演会
4. 発表年 2020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)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------