

平成30年 5月28日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K14134

研究課題名（和文）極低周波数域の振動を援用したチタン合金の高エネルギードライ切削加工

研究課題名（英文）Ultra-low-frequency vibration assisted machining for dry machining of Ti alloys

研究代表者

杉原 達哉（Sugihara, Tatsuya）

大阪大学・工学研究科 ・講師

研究者番号：90637539

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,900,000円

研究成果の概要（和文）：加工が極めて困難な代表的な難削材であるチタン合金の高速・高エネルギー加工の実現を目的に、従来の振動切削加工法の限界を打破しうる新たな加工方法として、数Hz程度の極めて低い振動数域の振動を援用した振動切削加工法（極低周波振動切削加工法）の提案、開発を行った。その結果、提案手法はチタン合金の高速切削加工条件下（切削速度100 m/min～）において優れた摩耗抑制効果を発現することを示すとともに、その摩耗抑制メカニズムを明確化した。さらに、明確化したメカニズムに基づき、一振動中の加工時間/非加工時間に着目した振動条件最適化を行うことで、本提案手法の有用性を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：In order to achieve high performance machining of Ti alloys, this study proposed a new cutting method employing ultra-low-frequency (ULF) vibration of less than several Hz generated by using a numerically controlled machine tool axis and an NC program. The results of turning experiments showed that the developed method significantly reduces crater wear in machining of Ti-6Al-4V even under the dry machining conditions. Moreover, the mechanism that ULF vibration affects and the influence caused by actual cutting time and non-cutting time in each individual vibration period on the amount of crater wear were investigated. As a result, it was found that the developed process is a promising method for achieving a high performance dry machining of titanium alloys.

研究分野：生産加工・切削加工学

キーワード：高速切削 難削材 トライボロジー 振動切削

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 優れた比強度, 耐食性, 耐熱性を有するチタン合金は様々な分野で活用されており, 特に近年では航空・宇宙分野での需要が急増している. その一方で, 熱伝導率が低い, 加工硬化を生じやすい, 化学的に活性であるという性質から, 切削加工が極めて困難な代表的な難削材として知られており, 特に切削油剤を用いないドライ加工においては著しい工具摩耗が発生することが問題となっている.

(2) こういった難削材加工に対する有効な手段の一つが, 振動切削加工法である. 振動切削加工法に関する研究は従来から盛んに行われており, それらの手法は主に (a) 切削方向と平行方向の振動と, (b) 切削方向と垂直方向の振動の2種類に分類され, いずれの場合においても, 振動の付与によって工具-切りくず・被削材の接触が断続的になることで, 様々な効果が得られることが知られている. 一方で, 振動によって加工を断続化するためには, いずれの方向の振動を付与した場合においても, 臨界切削速度, 臨界切込み量などの臨界条件以下で加工を行うことが必須であり, 現状の振動切削加工法は, 切削速度や切込みが比較的小さく加工能率が低い条件への適用に留まっている.

### 2. 研究の目的

(1) 本研究ではチタン合金の高能率ドライ切削加工の実現を目的に, 数 Hz 程度の極めて低い振動数域の振動を援用した新たな振動切削加工法 (極低周波振動切削加工法, Ultra-Low-Frequency (ULF) vibration assisted machining,) の提案, 開発を行う.

(2) 切削加工実験の実施によって, 提案手法による工具摩耗抑制効果を評価するとともに, 摩耗抑制メカニズムの明確化を図る. さらに, それらの結果に基づいた振動条件の最適化を試みることで, 本提案手法の有用性を確立する.

### 3. 研究の方法

#### (1) 極低周波振動切削加工法の基礎的加工特性の評価

本研究で提案する極低周波振動切削加工法を実現するため, 工作機械の数値制御軸と NC プログラムによる振動付与方法を検討するとともに, 任意の波形を生成する手法を確立する. さらに, 提案手法をチタン合金のドライ切削加工に適用することによって, ごく低周波数域の振動が工具摩耗に及ぼす影響を明確化する.

#### (2) 極低周波振動の付与による摩耗抑制メカニズムの解明

切削抵抗や加工点温度の評価, 加工雰囲気異なる環境下での切削加工実験を行うことによって, 極低周波振動がもたらす効果を明確化し, チタン合金のドライ切削加工における摩耗抑制メカニズムを明らかにする.

### (3) 振動条件の最適化

解明した摩耗抑制メカニズムに基づき, 特に一振動中の加工時間/非加工時間に着目した検討を行うことによって, 振動条件の最適化を試みる. さらに, 最適化した条件での切削加工実験を行うことによって, 本手法の有用性を示す.

### 4. 研究成果

#### (1) 極低周波振動切削加工法の基礎的加工特性の評価

従来の振動切削加工法では, 圧電素子や磁歪素子, リニアモータなどの付加的な装置を用いることで, 工具あるいは被削材に振動を付与している. こういった従来手法とは異なり, 本提案手法では工作機械の数値制御軸と NC プログラムを用いることによって, 数 Hz 程度の振動を生成する手法を提案・構築した. 図1に実験装置の概要を示す. 同図に示すように, 外周旋削加工において極低周波振動切削加工を行う場合は, 工具送り方向の振動が NC 旋盤の Z 軸によって付与される. 正確な振動波形を把握するため, 工作機械の NC コントローラを PCMCIA-LAN を介して PC に接続し, サーボ調整ソフトウェアを用いることで, 振動切削加工中の正確な工具位置の検出を行っている. また, 切削加工実験を行うにあたっては, 工具ホルダ下に三分力動力計をセットすることで加工中の切削抵抗を, 工具刃先に放射温度計をセットすることで加工中の工具温度をそれぞれ測定した.

図2に本提案手法を用いた場合の工具軸の動作例を示す. 同図に示すように, 振動の付与によって1振動中に加工時間 (Actual cutting time) と非加工時間 (Non-cutting time) が存在することとなり, 本来連続切削である旋盤加工を断続切削とすることが可能になる. 本提案手法では, NC プログラム中の4つの入力パラメータ (amount of feed, feed speed, amount of return feed and return feed speed) の

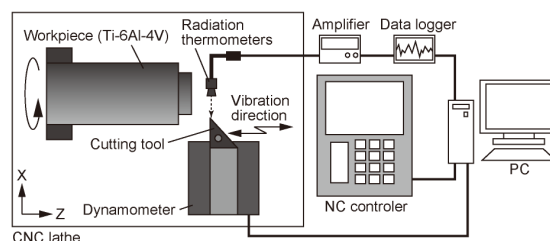


図1 実験装置の概要

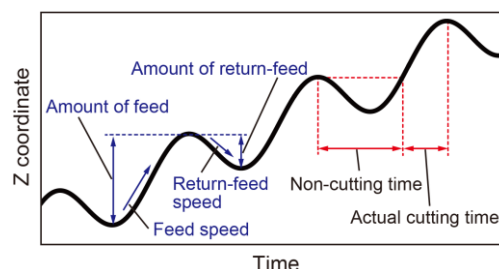


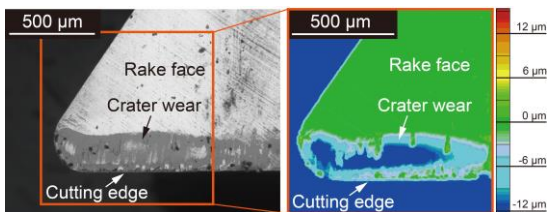
図2 極低周波振動付与時の工具軌跡

調整によって、加工時間、非加工時間を含む振動波形を任意に変更することができる。

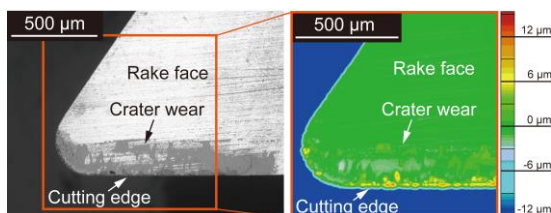
本研究では、提案手法がチタン合金のドライ切削加工にもたらす効果を評価するため、まず表 1 に記した条件で Ti-6Al-4V 合金に対する外周旋削加工実験を行った。本実験では、極低周波振動切削加工における振動条件は、1 振動中の加工時間が 0.15 秒、非加工時間が 0.40 秒となるように波形を決定している。図 3 は、振動を付与していない慣用切削、および極低周波振動切削における切削距離 100 m の時点での工具すくい面の SEM (Scanning Electron Microscope) 観察像および三次元形状を示している。同図(a)に示すように、慣用切削では深さ 15  $\mu\text{m}$  程度の著しいクレータ摩耗が発生している。一方で、同図(b)からわかるように、極低周波振動を付与した場合のすくい面上の最大クレータ摩耗深さは 3  $\mu\text{m}$  程度であり、極低周波振動切削加工はチタン合金のドライ切削加工におけるクレータ摩耗を著しく抑制できていることがわかる。ここで、切削加工に対して超音波～低周波数域の振動を付与することによって、加工における様々な特性が大きく向上することは従来から広く知られているものの、その効果は主に非加工時間中に工具-切りくずの界面へ切削液が流入することが要因でもたらされるとされてきた。こういった従来知見とは異なり、提案手法では切削液の効果を得ることなく摩耗を抑制できていると言える。

表 1 加工条件

Workpiece	Ti-6Al-4V alloy	
Tool	Cemented carbide P10, KW10 DCGW11T302 (Non-coated) (KYOCERA Corp.)	
Tool geometry	Rake angle	0 degrees
	Clearance angle	10 degrees
Cutting speed	100 m/min	
Depth of cut	1 mm	
Feed rate	0.10 (mm/rev)	
Cutting fluid	Dry	



(a) 慣用切削



(b) 極低周波振動切削

図 3 加工後の工具すくい面

## (2) 極低周波振動の付与による摩耗抑制メカニズムの解明

### ① 工具表面温度への影響

提案手法の工具摩耗抑制メカニズムを明確化するため、まず放射温度計を用いた工具表面温度の評価を行った。図 1 に示したように、放射温度計を工具刃先に照射することで、工具が被削材から離脱した直後の工具表面温度の測定を行った。図 4 に、慣用切削時、極低周波振動時(実加工時間 0.15, 0.80 sec/vib)の工具表面の最高温度を示すが、実加工時間の短い振動条件下で若干の温度低減が見られるものの、両者にほとんど差がないことがわかる。以上の結果は、従来の振動切削加工法と比べて比較的長い実加工時間を有する極低周波振動切削では、1 振動中に工具温度が慣用切削時の定常温度まで達してしまっていることを示している。一方で、図 5 は非加工時間中の工具表面温度の推移を示しており、いずれの振動条件においても、工具表面の温度は工具が被削材から離脱した直後から急速に低下していることがわかる。この結果から、従来の振動切削と比較して比較的長い非加工時間を有する極低周波振動切削加工では、1 振動中に工具表面温度が大気温度近くまで低減していることが予想される。

これらの結果を踏まえ、図 6 に従来の振動切削および提案手法において予想される工具の温度推移を示す。同図に示すように、従来の振動切削加工では、振動を与えることによって加工中のピーク温度自体を低減させる効果があることが報告されている。これらとは対照的に、極低周波振動切削加工ではピーク温度自体に大きな差はないものの、非加工時間中に工具表面温度を十分に低減することが可能であり、結果として熱的な摩耗の抑制に繋がっていると考えられる。

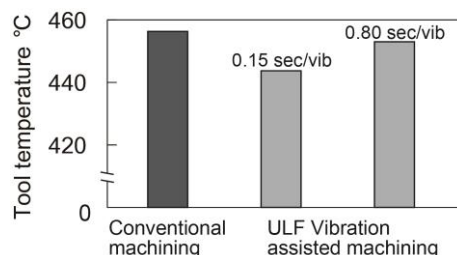


図 4 工具表面温度

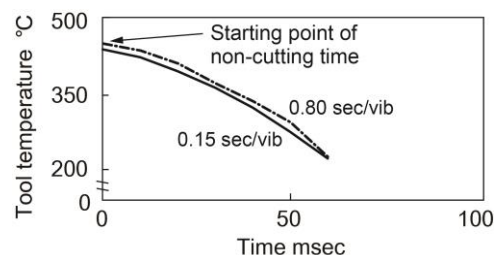


図 5 非加工時間中の工具表面温度推移

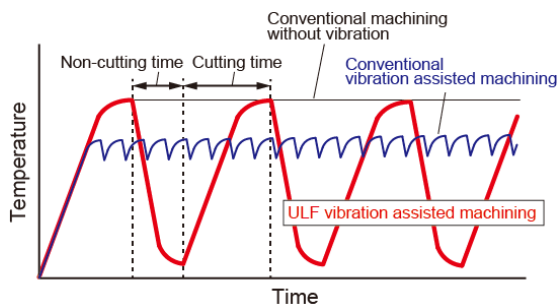


図6 工具温度推移の予想図

## ② 切削抵抗への影響

図7は、測定した切削抵抗から導出した工具すくい面に対し鉛直方向の力  $F_p$ 、平行方向の力  $F_q$  の推移をそれぞれ示している。図7(a)からわかるように、 $F_p$  のピーク値については慣用切削、極低周波振動切削の間ではほとんど差は見られない。一方で、 $F_q$  のピーク値については慣用切削時と比較して極低周波振動切削時がわずかながら小さな値を示している(図7(b))。ここで、すくい面に対して平行方向の切削抵抗成分である  $F_q$  は、工具-切りくず間の摩擦特性の影響を大きく受けることから、 $F_q$  がより小さい極低周波振動切削では、慣用切削時と比較して工具-切りくず間の摩擦係数が低減していることを意味している。従来は振動切削時における工具-切りくず間の摩擦係数低減効果は、主に非加工時間中における界面への切削油剤の流入効果によって説明がなされてきたが、上述の実験結果は本提案手法がドライ加工環境下においても摩擦係数を低減しうることを示している。

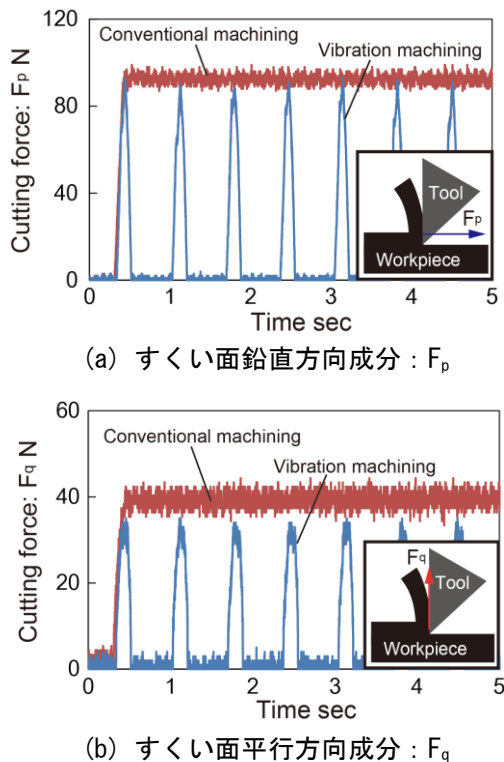


図7 切削抵抗の推移

## ③ 酸化皮膜生成への影響

図3で示したように、化学的に極めて活性であるTi-6Al-4V合金の加工では、工具表面に著しい切りくずの凝着が発生し、凝着摩擦や拡散摩擦が生じることによって摩擦が進行することが知られている。ここで、極低周波振動切削加工において期待される効果の一つが、非加工時間中におけるTi-6Al-4V合金の凝着物表面への酸化皮膜の生成と、それともなう摩擦抵抗 ( $F_q$ ) の低減である。

そこで、酸化被膜生成への影響を明かにするため、不活性ガス環境下におけるTi-6Al-4Vのドライ加工実験を行った。本実験では、工具すくい面側および逃げ面側の二ヶ所から、アルゴンガスを吐出圧力0.4 MPaで噴霧しながら加工を行い、切削抵抗を測定した。図8は不活性ガス環境下における慣用切削時および極低周波振動切削時の  $F_q$  を示している。同図に示すように、大気環境下では慣用切削時と比較して小さな値を示していた振動切削時の  $F_q$  が、不活性ガス環境下ではほぼ同程度のピーク値を示していることがわかる。以上の結果は、非加工時間中の工具表面上の凝着物への酸化被膜生成効果が、極低周波振動切削加工における摩擦抑制効果の一因であることを示していると言える。

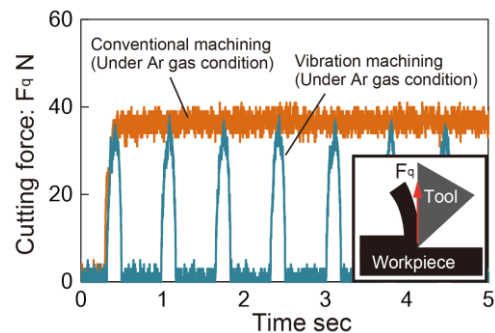


図8 不活性ガス環境下における切削抵抗推移

## (3) 振動条件の最適化

加工中に非加工時間が存在する提案手法は、切削速度などの加工条件が等しい場合の慣用切削と比較すると、加工能率は低くなる。したがって、本提案手法によってチタン合金の高効率ドライ切削加工を実現するためには、振動条件の最適化が重要となる。そこで、本研究では1振動中の実加工時間および非加工時間の長さがクレータ摩耗量におよぼす影響を明かにすることで、振動条件の最適化指針の明確化を図った。

### ① 実加工時間の影響

図9は、異なる3つの非加工時間(0.40, 0.50, 0.60 sec/vib)について、1振動中の実加工時間の長さと同切削距離100 mの時点におけるクレータ摩耗量の関係を示したものである。同図に示すように、クレータ摩耗量は実加工時間の長さには

ば比例して増加しており、実加工時間が 0.80 sec/vib の場合の摩耗量は、慣用切削時の摩耗量とほぼ同程度となっていることがわかる。これは、実加工時間が増加することによって、1 振動中の工具-切りくず間の熱的・トライボロジ的環境が、慣用切削の状態に近づいてしまうことが原因であると考えられる。また、提案手法の摩耗抑制効果の一つとして酸化被膜の生成効果が挙げられるが、実加工時間が長い条件では生成した酸化被膜が加工中に完全に除去されてしまい、拡散・凝着摩耗の促進に繋がったと予想できる。

その一方で、図 9 より、異なる 3 つの非加工時間(0.40, 0.50, 0.60 sec/vib)の間では、クレータ摩耗量にほとんど差が見られないことも確認できる。

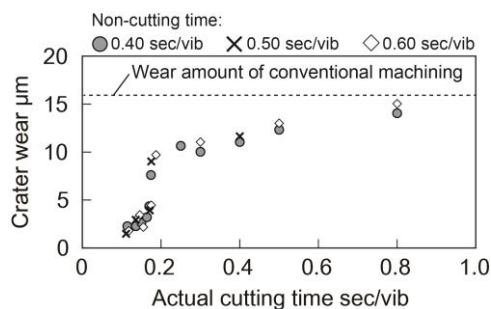


図 9 実加工時間とクレータ摩耗量の関係

## ② 非加工時間の影響

図 10 は異なる 3 つの実加工時間 (0.10, 0.15, 0.30 sec/vib) について、1 振動中の非加工時間の長さとの関係を示したものである。同図からわかるように、非加工時間が大きく変化しても摩耗量に大きな差は見られず、さらにクレータ摩耗量はほぼ 1 振動中の実加工時間のみ依存している。これは、図 5 に示したように、非加工時間中の工具表面温度は急速に低下することから、比較的短い非加工時間でも十分な温度低減効果が得られること、Ti-6Al-4V 合金が極めて活性であることから、工具が被削材から離脱した直後に凝着物表面に瞬時に酸化被膜が生成可能されることなどが要因であると考えられる。

以上の結果から、極低周波振動切削では非加工時間を比較的短く設定しても摩耗を抑制することが可能であり、その結果、摩耗抑制効果と加工能率向上の両立が可能となる。図 12 は最適化した振動条件の一つ (実加工時間 : 0.15 sec/vib, 非加工時間 : 0.10 sec/vib) を用いた場合のクレータ摩耗量を示している。同図からわかるように、同条件では慣用切削と比較した場合の加工能率の低下を 40%程度に抑制しつつ、クレータ摩耗量を 65%以上低減することができている。

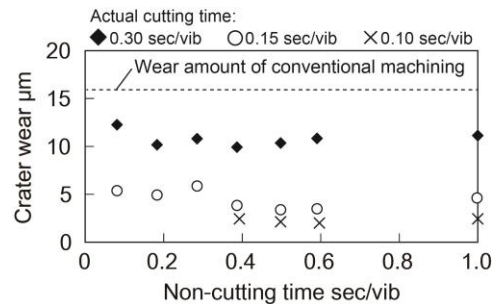


図 10 実加工時間とクレータ摩耗量の関係

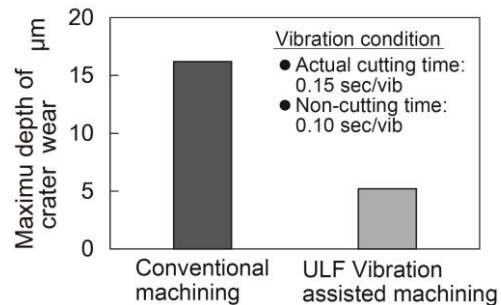


図 11 最適化条件におけるクレータ摩耗量

## 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 1 件)

- ① Tatsuya Sugihara, Toshiyuki Enomoto, Ultra-low-frequency vibration machining of Ti-6Al-4V alloy, International Journal of Automation Technology, Vol. 10, No. 4, pp. 647-653, 2016 (査読有)

[図書] (計 1 件)

- ① 杉原達哉, 榎本俊之, 極低周波数域の振動を援用したチタン合金のドライ切削加工, 超音波テクノ, Vol. 28, No. 6, pp. 18-23, 2016

[その他]

ホームページ等

<http://www-cape.mech.eng.osaka-u.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

杉原 達哉 (SUGIHARA TATSUYA)

大阪大学・大学院工学研究科・講師

研究者番号 : 90637539