

令和元年6月24日現在

機関番号：51201

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K17954

研究課題名（和文）超音波振動を制御した高速切削による高品位テクスチャの加工

研究課題名（英文）High quality texturing process by high speed ultrasonic turning

研究代表者

原 圭祐 (Hara, keisuke)

一関工業高等専門学校・その他部局等・准教授

研究者番号：30515812

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、高速超音波切削技術により、難削材加工の高品位化・高効率化、切削面への規則テクスチャを創生する加工技術の構築を目的に行われた。はじめに、難削材である、電磁ステンレス鋼（K-M38）に対し、高速超音波切削を行い、切りくずの処理性の向上、加工面への規則テクスチャ創生を認めた。また、これによって得た規則テクスチャ面の摩擦試験を行った結果、平均摩擦係数、最大摩擦係数ともに通常の切削面に比べ低減することを確認した。続いて、難削材として知られる、チタン合金の高速超音波切削試験を行った。その結果、びびり振動の抑制、工具摩耗低減、比切削抵抗の減少といった効果を認め、規則テクスチャ加工の実現を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、一般的に加工が難しいとされる、特殊ステンレス、チタン合金の加工性を向上できることを確認した。また、切削性能を改善すると同時に、切削面に規則的な凹凸（テクスチャという）を同時に生成することが可能となり、製品の外観・質感を超音波切削により意図的に変えたり、摩擦特性を改善できるようになった。これにより、機能性表面の生成を切削加工と同時に行えるため、工程数・時間の短縮にも寄与できると考える。本技術は、金型加工や転写ローラーなどへの技術展開も可能と考えており、これらを活用した新たな技術の発展に貢献できると考える。

研究成果の概要（英文）：In this research, to establish high speed ultrasonic turning technique which improves cutting performances and generates periodical texture on the machined surface was studied. 1st step, turning experiments of electromagnetic stainless steel were carried out. As results, the technique can improve chip discharge properties and generate periodical texture on the machined surface. Tribological properties (average and maximum friction coefficients) of the generated textures were improved compared with ordinary turning. Next, high speed ultrasonic turning experiments for titanium alloy which is known as difficult to machine material were carried out. As results, high speed ultrasonic turning can improve cutting performance (reduce chatter vibration, tool worn out and cutting resistance). And the technique can generate periodical texture on the machined surface simultaneously.

研究分野：機械加工，精密計測

キーワード：超音波切削 トライボロジー 規則テクスチャ 難削材

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

超音波振動援用加工は、工具と加工物の間に超音波領域の相対振動を与え加工する技術である。この方法は難削材加工の実現、加工精度の向上、工具寿命延命などの効果が知られ、様々な応用研究が行われている。しかし、この技術には超音波振動付与の効果が無効となる「臨界切削速度」の存在が知られており、超音波振動援用加工は、「切削速度を高められず、加工効率が低い」とされている。しかし、当研究グループでは臨界切削速度を大幅に超過した SUS304 の「高速超音波切削」を実現、高速超音波切削により、びびり振動、工具摩耗の原因となる切りくずの凝着を抑制する効果が見られたほか、カットマークの周期的条痕が生じることも認めた。この周期条痕(以下、規則テクスチャと称する)を意図的につけることで、製品の外觀・質感、手触り、摩擦特性を変えられるため、超音波切削技術に新たな付加価値を生み出せると考えた。本研究課題では、高速振動切削による、「難削材の高効率・高品位切削」の実現と「規則テクスチャの同時生成とその制御」を実現することを目的とする。

2. 研究の目的

本研究では、規則的な微細な凹凸(規則テクスチャ)を、超音波高速旋削により、高速かつ高精度に生成する付加価値のある加工技術の構築を目指す。本研究の主な目的を下記に示す。

- (1) 高速超音波切削時による凹凸の発生現象を解析し、求めたいテクスチャ(加工面凹凸のピッチ、高さ、負荷曲線)を得るための切削条件の設定方法、振動の制御方法を開発する
- (2) 高速超音波ダイヤモンドバイト切削により、銅合金、ニッケルメッキ面などへより高品位な転写加工を実施、評価を行う。また、工具寿命の向上、難削材への展開も同時に検討する
- (3) 産業への展開として、加工品のトライボロジー性能を評価し、摺動製品の機能向上やナノテクスチャ成型への応用を目指す

3. 研究の方法

(1) 背分力方向振動切削システムの構築

テクスチャ創生のため、切削に用いる超音波振動の方向を、振動装置を傾斜させる方法、振動体のモード変換を用いる方法などにより制御する方法を構築する。振動方向制御の詳細は下記の通りである。

振動装置傾斜による振動方向の制御: 超音波振動体はその主振動方向のほかに、ポアソン変形による横方向振動が生じるため、振動方向は主振動方向と平行にはならない。この横方向振動は、振動装置の傾斜により調整可能であるため、この角度を調整し求める振幅を得る。

振動体モード変換による振幅の調整: 前述のポアソン変形による横方向振動のほか、工具ホルダーである振動体に取り付ける切削チップの向きにより振動モードが変化し、横方向振動の振幅およびその主振動方向に対する振動位相の調整ができる。この応用で、複雑な制御系を用いなくとも、テクスチャ生成に必要な背分力方向振動を得られると考える。

(2) 規則テクスチャの創生加工実験

構築した振動切削システムを用い、高速超音波切削による微細テクスチャの生成実験を行う。切削速度は、振動切削装置の最大振動速度の 10 倍程度の 300m/min を想定する。加工面のテクスチャは、切削条件と工作機械精度の影響を大きく受けるため、求めるテクスチャ形状に応じた適切な加工条件を選定する方法の構築を目指す。主な開発内容は下記の通りである。

旋盤の刃物台に振動切削装置を取り付け、工具を主分力方向、背分力方向に振動させ切削する。被削材は、ステンレス鋼(SUS304, K-M45 など、配管部品、電磁バルブを想定)チタン合金(難削材として選定)を用いる。

切削面は、3次元形状粗さ測定器、レーザ顕微鏡による立体形状の測定、SEM によるテクスチャの観察により評価を行う。

切削速度、送り速度、振動振幅などのパラメータを変化させて切削実験を行い、得られる加工面の性状が理論通りに得られるか評価する。また、むしろ、びびりが発生する場合は、切削条件の見直しを行う。

(3) 規則テクスチャのトライボロジー特性評価試験

先に構築した技術を用い、微細テクスチャ加工した試料を複数用意し、微細テクスチャ面の摺動試験を行い、その特性を評価する。より高品位の微細テクスチャを得るためには高速超音波切削の切削性を評価、改善することが重要である。切削抵抗を計測し、切削性の評価に用いる。特に、電磁ステンレス鋼(K-M38, K-M45)はその優れた特性から各種電磁バルブへの使用が期待されるが、工具摩耗が激しく、切りくずの巻き付きが問題となり、加工困難な材料として知られ、超音波切削により切削性が改善されることが事前の研究で確認されている。そのため、高速超音波切削による切削挙動を実験データから詳細に検討するものである。

4. 研究成果

初めに、研究に供するための精密切削試験装置の設計、製作を行った。本試験装置では、任意の切削面テクスチャを得るため、切削速度を自在に変えられる市販の高速スピンドル、送りステ

ージを用い、超音波切削工具の傾斜角度を容易に調整できる構造の装置を構築した。図 4-1 に製作した切削装置の外観図を示す。

規則テクスチャ切削実験装置は、市販の高速スピンドルと電動送りステージを用い、小型自動旋盤形態の加工機を製作している。これに、超音波切削装置を組み合わせ、規則テクスチャ加工機とした。超音波切削装置は、市販の超音波駆動電源、振動素子に、独自設計の工具ホルダーを取り付け、工具選択の自由度を高めている。現在までに製作したホーンでは、TNGG110304 形状の超硬合金チップの振動に成功している。以上のように要素された装置で、アルミニウム合金、ステンレス鋼ならびにチタン合金の試験切削を行ったところ、当初は剛性面で問題があったが、改良により安定した切削が可能となった。

規則テクスチャは、超音波振動の条件により変えられることがわかっている。この装置で、主にチタン合金の高速切削試験を行った。切削試験片の外観および顕微鏡観察像を図 4-2 に示す。試験の結果、チタン合金を超音波なしの通常切削を行うとびびり振動を引き起こしたが、超音波切削でこれを大幅に減少できることを認めた。また、規則テクスチャは、チタンでもアルミニウムやステンレス鋼と同様に得られることを確認した。このほか、より凹凸の大きな規則テクスチャを得ることを目的に、超音波振動に同期した半径方向振動を与えられる装置の開発を試みたが、こちらは満足のいく性能を得ることはできなかった。基礎試験として、生成される規則テクスチャが切削条件から得られる理論と一致するか試験切削し、生成された規則テクスチャの形状を評価した。図 4-3 に得られたテクスチャの断面曲線と理論計算で求めた形状を示す。この図より、凹凸の高さ、ピッチともにほぼ理論通りの形状を得られることを確認できた。

続いて、トライボ特性の評価試験装置の設計・製作・整備を行った。本試験装置は、市販の3分力ロードセルと測定物に相対運動を与える駆動機構を組み合わせたものである。試験装置の外観図を図 4-4 に示す。ピンを外周切削面に押し当て、軸方向に往復運動させて外周旋削面の摩擦特性を評価できる装置を構成した。電磁ステンレス鋼を超音波振動の有無で旋削した試験片のトライボ特性を測定した結果を図 4-5 に示す。超音波振動なしの試験片に比べ、超音波切削した規則テクスチャの付いた試験片は平均摩擦係数が低減 ($\mu=0.151 \rightarrow 0.139$) すること、また摩擦のばらつきが少なく安定した摺動面となることを確認した。摩擦痕を観察した結果、超音波切削した規則テクスチャ面では通常の切削面に比べて摩擦部が少ないことも確認している。これは、規則テクスチャにより潤滑が促進されたことが主要因ではないかと考えている。

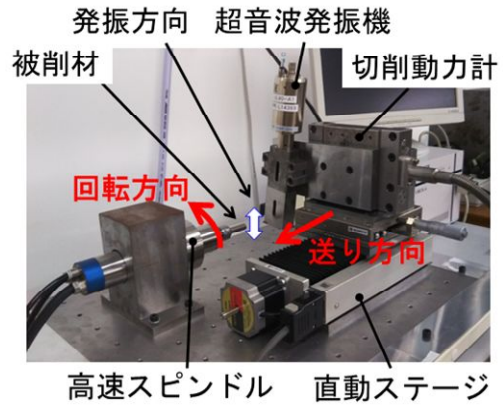


図 4-1 規則テクスチャ切削実験装置

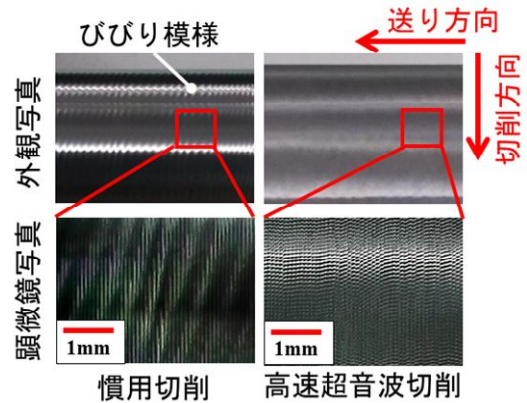


図 4-2 Ti 合金切削面の観察画像

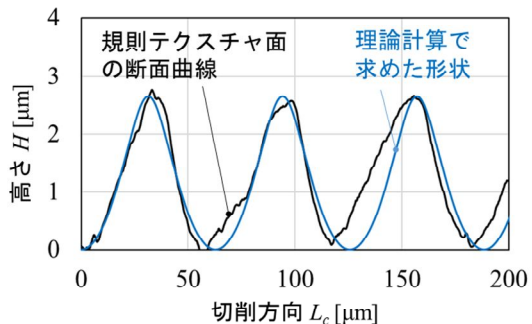


図 4-3 規則テクスチャ面の実測値と理論値の比較

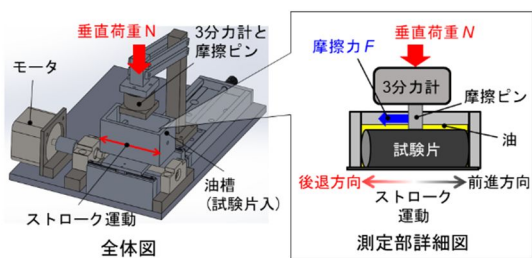


図 4-4 トライボ特性測定装置概要図

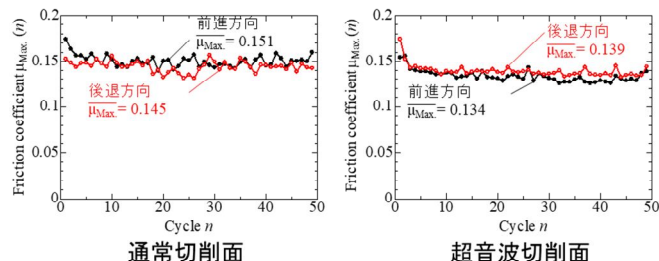


図 4-5 トライボ特性の測定試験結果

5 . 主な発表論文等
〔雑誌論文〕(計1件)

Keisuke Hara and Hiromi Isobe

Effect of Cutting Speed on Ultrasonically Added Turning in Soft Magnetic Stainless Steel,
Advances in Abrasive Technology XVIII, 査読有, 2016, 390-393
DOI : <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1136.390>

〔学会発表〕(計10件)

Keisuke Hara, Ryo Sasaki, Toshihiko Koiwa and Hiromi Isobe

Effect of cutting speed on ultrasonically added turning in soft magnetic stainless steel
The 18th International Symposium on Advances in Abrasive Technology (ISAAT2015), 2015

原 圭祐, 佐々木涼, 磯部浩已

ステンレス鋼の超音波切削における切削速度の影響,
2015年度砥粒加工学会学術講演会, 2015

佐々木涼, 原 圭祐, 磯部浩已

超音波振動援用高速切削に関する研究(第6報)-電磁ステンレス鋼旋削時の切りくず
排出挙動の検証-, 2015年度精密工学会秋季学術講演会講演論文集, 2015

原 圭祐

超音波高速切削における工具振動方向と切削チップ形状の影響,
2016年度砥粒加工学会学術講演会, 2016

Keisuke Hara, Ryo Sasaki and Hiromi Isobe

Machinability Improvement on High Speed Ultrasonic Turning - The Effect of Tool Oscillating
Direction and Tool Chip Shape, The 19th International Symposium on Advances in Abrasive
Technology (ISAAT2016), 2016

Keisuke Hara and Hiromi Isobe,

High Speed Surface Texturing Process by Ultrasonic Turning for Improve Tribological Properties
The 20th International Symposium on Advances in Abrasive Technology (ISAAT2017), 2017

福田英勲, 原 圭祐

超音波振動援用高速切削に関する研究(第7報) チタン合金の高効率・高品質加工の
実現, 2017年度精密工学会秋季学術講演会講演論文集, 2017

Keisuke Hara, Kyosuke Taguchi and Hiromi Isobe,

Investigation of tribological properties on ultrasonic turned surfaces
The 21st International Symposium on Advances in Abrasive Technology (ISAAT2018), 2018

福田英勲, 原 圭祐, 田口恭輔, 磯部浩已

超音波振動援用高速切削に関する研究(第8報)-小型超音波切削加工装置による難削材
加工の実現-, 2018年度精密工学会秋季学術講演会講演論文集, 2018

福田英勲, 原 圭祐, 磯部浩已

高速超音波切削によるチタン合金の高効率・高品質加工の実現
2018年度精密工学会東北支部学術講演会, 2018

〔図書〕(計1件)

磯部浩已, 原 圭祐

超音波振動加工技術 ~装置設計の基礎から応用~, 科学技術出版, 2017

〔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：
国内外の別：

取得状況（計 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6．研究組織

(1)研究分担者
なし

(2)研究協力者
なし