

令和元年6月15日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06044

研究課題名(和文) 切削工具に特化した摩擦試験法の開発と新しい仕上げ面評価法による検証

研究課題名(英文) Development of friction test specializing in cutting tool and verification by newly surface roughness evaluation method

研究代表者

田中 隆太郎 (TANAKA, Ryutaro)

広島大学・工学研究科・准教授

研究者番号：60361979

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：スローアウェイ工具とそれと同形状の被削材サンプルを用いたマシニングセンタ上における摩擦試験における摩擦温度に関する調査を行った。最高温度は35Aで550℃、60Aでは600℃に達した。ただし、熱電対の位置が測定温度へ大きな影響をおよぼすため再現性を高く保つのが難しい。切削温度は、切削速度100m/minでは、最大切り取り厚さが100μmで約400℃であるのに対し、20μmでは約200℃であった。仕上げ面を想定した摩擦試験を行う際の摩擦温度は200～300℃を実現できればよいと考えられる。また、工具輪郭形状と仕上げ面上の送りマークの転写誤差を算出するプログラムを作成した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

スローアウェイ工具とそれと同形状の被削材サンプルを用いたマシニングセンタ上における摩擦試験を提案した。接点を通電加熱した摩擦試験での接点の最高温度は600度であった。また、切削加工中の仕上げ面生成領域の温度は接触領域全体の平均温度よりかなり低いことが分かった。したがって、提案した方法を用いれば特別な装置を用いなくても仕上げ面生成領域を想定した摩擦試験を行うことが可能である。切れ刃形状がどれくらい正確に転写されるかを定量的に評価できるようになった。

研究成果の概要(英文)：Friction temperature of a contact area between a throwaway insert and a work material sample which has the same shape as throwaway insert was measured in proposed friction test on a machining center. The maximum temperature was almost 550℃ at 50A, 600℃ at 60A. However, the position of thermocouple strongly influences on the measured temperature, so keeping the reproducibility was difficult. Cutting temperature at maximum uncut chip thickness 100, 20μm were 400, 200℃. It will be enough if friction temperature in friction test simulating surface roughness reaches 200～300℃. Furthermore, the program calculating the error between tool edge shape and feed mark in finished surface.

研究分野：機械加工学

キーワード：仕上げ面 切削温度 摩擦特性

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

1. 研究開始当初の背景

切削現象を理解するには、切りくずがどのように生成されるのか(切りくず生成機構), 工具がどのように摩耗するのか(工具摩耗機構), 仕上げ面がどのように生成されるのか(仕上げ面生成機構), の3つの機構を解明・理解することが重要である。このためには、「切削温度」「切削抵抗」「工具-被削材間の溶着・凝着現象」言い換えると「温度」「応力」「摩擦」を明らかにした上で議論する必要がある。温度、応力については、様々な方法(実測や計算)で測定・推定が可能となっている。しかし、摩擦については様々な方法が提案・実施されているが、高温下では試験片が容易に変形するため接触応力を高く保つことが困難なため切削加工特有の高温・高応力を同時に実現することは容易ではない。そのため切削実験から得られたデータから摩擦特性を推定するという「逆解析」に頼っているのが現状である。既存の摩擦試験では先端が球形状のような特殊形状の試験片が必要であることが多く、切削工具を対象とした摩擦試験では工具素材そのものが高硬度であるため、試験片の作成自体が容易ではない。

切削加工を、「入力」「加工現象」「出力」と分けて考えると、加工面の粗さや寸法精度は最も重要な出力であるとともに加工状態の推定が可能な最も直接的な証拠である。旋削加工における理論粗さは、工具の輪郭形状が正確に被削材に転写されたときの表面粗さを示しているが、多くの場合において理論粗さよりも大きくなる。旋削加工における粗さは切削方向の粗さと送り方向の粗さに分けることができる。切削方向については、切削機構(被削材の変形機構)、構成刃先、切削系の振動など、送り方向については、～に加え理論粗さ、被削材のかえり、工具摩耗、工具と被削材の親和性、に影響されると言われているが、表面粗さ生成機構についてはあまり明らかとなっていないのが現状と思われる。切削加工の目的は「所定の寸法精度、表面粗さおよび表面特性を持った部品を加工すること」であり、得られた表面粗さや寸法精度が要求を満たせない場合、何が原因でどのように入力条件を変更すればよいかを明らかにする必要がある。また切削工具や切削油剤の開発では、刃先の輪郭形状を長く保ち(摩耗や損傷が少なく)、優れた転写性を確保する工具材種や切削油剤が求められており、これらはどちらかという加工現象の安定化を主眼にしたものである。このような場合、Ra や Ry, Rz だけで議論したのでは、工作機械の精度や剛性あるいは被削材の剛性など加工システムの不安定が原因なのか、あるいは構成刃先を代表とする被削材の工具への凝着など加工現象の不安定が原因なのかを明らかに出来ないため対応策の方針を立てることも出来ない。

2. 研究の目的

そこで本研究では、仕上げ面粗さプロファイルから、仕上げ面粗さの低下の原因が工作機械の運動精度や工具ホルダーの振動など加工システムの不安定性にあるのか凝着現象による実際に作用する切れ刃形状の変化など加工現象の不安定性にあるのかを区別し、加工現象の不安定性(工具輪郭の転写誤差の程度)のみを定量的に評価できる方法を提案する。

最終的な目標として、摩擦試験から得た“摩擦温度と摩擦特性値の関係”と切削実験から得た“切削温度と工具形状の転写誤差の関係”を比較し、開発中の摩擦試験法の妥当性を検討するとともに工具刃先転写性と高い相関をもつ摩擦特性値を見つけ出し、これを利用して簡易的に最適な工具被膜・切削油剤・温度域の組み合わせを推定できる摩擦試験法を確立する。ここで得られる知見は切削工具用コーティング被膜や切削油剤の開発に大いに貢献できるものと考えられる。

3. 研究の方法



図1 研究の流れ

切削時の工具-被削材間の摩擦現象を明らかにするため、市販の工具が利用できる高温・高応力下における摩擦試験方法を開発する。高応力は曲率半径の小さな円筒面同士の接触により、高温は工具-被削材間の交流電による加熱により実現する。開発中の装置で予備実験をおこない常温で摩擦係数を測定したところ、振動が抑えられ動作が安定し再現性に優れることが確認されている。本研究では開発中の装置を発展させ以下の条件を最低限満足する試験法を確立する。

接触応力は被削材の塑性域であること

摩擦温度を被削材の仕上げ面を生成する工具逃げ面の温度域に設定可能であること

油剤の評価にも適応出来るよう、摩擦面に切削油剤の供給が可能であること

市販の切削工具が利用できること

垂直力・摩擦力の測定には市販の工具動力計を使用する

摩擦試験の相対運動には工作機械の主軸頭の水平運動を使用する

～ については切削現象を対象とした摩擦試験を考えると最低限満足すべき条件である。ま

た についても特殊な試験片（例えばボールやピンあるいは平板）を摩擦試験のために新たに作ることは非効率であり，一般に入手可能な工具で試験できることが望ましい．さらに については切削加工を行っている研究機関や開発担当の部署では通常標準的に備えている装置であり，これが利用できれば摩擦試験のために新たに大がかりな装置を導入する必要はない．

(実施項目)

- 1) 熱電対による温度測定方法の確立とサーモカメラ，FEM や移動熱源理論による理論的検証
- 2) 試行実験による再現性の確認

2. 仕上げ面粗さにおける加工システムの不安定性および加工現象の不安定性の分離手法の確立

切削加工した被削材の仕上げ面粗さプロファイルから振動や送りの不安定性など加工システムの不安定性を分離し，工具刃先の輪郭形状の転写精度へ影響をおよぼす加工現象の不安定性のみを取り出し定量的に評価する手法を確立したうえで，データを効率的に解析するためのプログラムを作成する．

(実施項目)

- 1) 評価値算出のアルゴリズムの検討
- 2) 実測データに基づく評価値の算出と仕上げ面粗さプロファイルとの比較による検証
- 3) ソフトウェアの作成

3. “マシニングセンタを利用した摩擦試験から得た摩擦温度と摩擦特性値の関係”と“切削実験から得た切削温度と工具形状の転写誤差の関係”を比較および転写誤差と高い相関を持つ摩擦特性値の探索

切削加工により得られるデータと比較することで摩擦試験の妥当性を評価する．また切削現象と挙動が一致する合理的な摩擦特性値を見出す．

(実施項目)

- 1) 仕上げ面粗さプロファイルの採取とそのときの切削温度の測定
- 2) 粗さ測定における温度範囲を含む摩擦温度域における摩擦力の測定および評価値の算出
- 3) 工具刃先形状の転写誤差の評価値の算出
- 4) 摩擦試験から得られたデータから幾つかの摩擦特性パラメータを作成して，工具刃先形状の転写誤差の評価値の比較による転写誤差の関係と比較・検討して，どのパラメータが転写誤差と高い相関を持つのか明らかにする．

4. 研究成果

図2にR.Tにおける工具-被削材間の摩擦係数を示す．TiAlN S45Cの組み合わせでは接触時間中に摩擦係数の変動はほとんど見られずリサージュ表示すると円に近い形状を示すことが分かる．K15 Ti-6Al-4Vの組み合わせでは工具もしくは被削材上において接触部の移動速度が小さいときに摩擦係数が大きくなりことが分かる．また，回転数が多くなると摩擦係数が増加している．

図3に工具-被削材間の通電加熱による摩擦係数の違いを示す．常温ではリサージュ表示でほぼ円に近い形状であって接点を通電加熱すると摩擦係数が大きくなり形状も円から崩れることが分かる．

図4に転写誤差と刃先輪郭の推定位置を示す．粗さ曲線から，一刃（一山）のごとの輪郭形

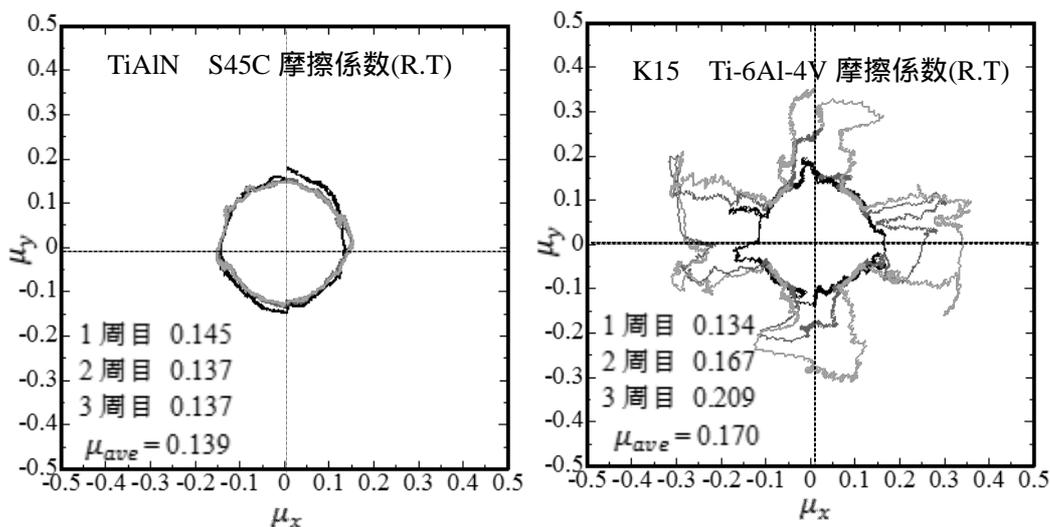


図2 R.Tにおける工具-被削材間の摩擦係数

状からのずれを定量的に計算することにより加工現象の不安定性を、隣り合った山谷から工具刃先半径の中心位置のずれを定量的に求めることによりシステムの不安定性を推定することが可能である。一つ一つの送りマーク毎に工具の理想輪郭形状を X 方向に少しずつシフトさせたのち両者の Y 方向の二乗誤差の総和が最小となるような Y 位置を探索する。この最小二乗誤差が最小となる X に刃先輪郭形状を固定し評価値を算出する。 σ_T が平均転写誤差(μm)、 σ_F が平均送り誤差(μm)、 σ_D が平均送り誤差(μm)を示す。

表 1 に各種コーテッド工具で切削したときの粗さおよび転写誤差を示す。既存の粗さ R_a 、 R_z が小さい場合でも必ずしも刃先転写誤差が小さいとは限らないことが分かる。したがって仕上面性領域の状態を検討するには刃先転写誤差を用いることが適切であると考えられる。

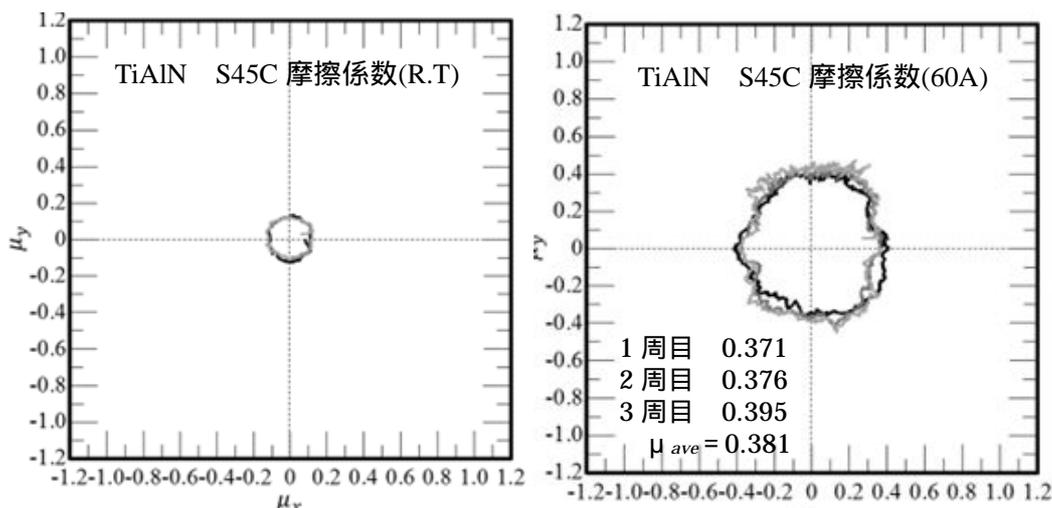


図 3 工具-被削材間の通電加熱による摩擦係数の違い

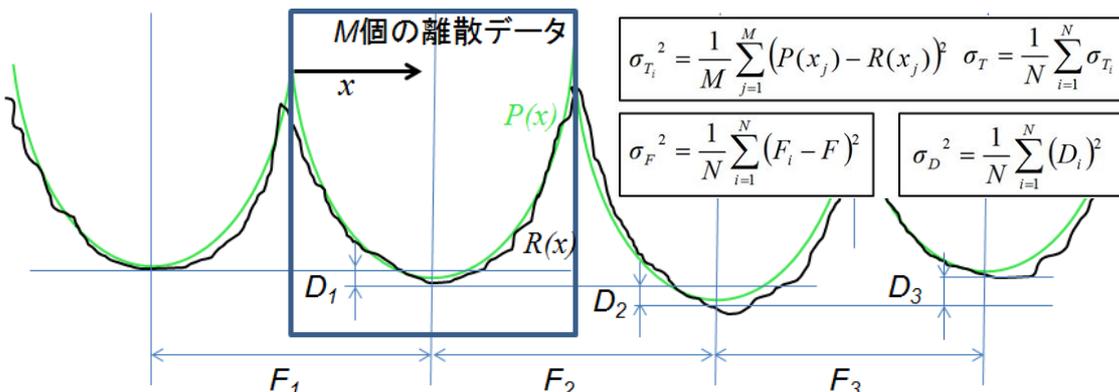


図 4 転写誤差と刃先輪郭の推定位置

表 1 各種コーテッド工具で切削したときの粗さおよび転写誤差

	R_a	R_z	R_{ave}	σ_T	σ_F	σ_D
ノコート	1.12	6.51	3.13 (0.80)	0.37	2.99	0.45
TiN	1.56	8.04		0.87	5.04	0.47
CrN	1.12	6.06		0.31	4.21	0.45
AlCrN	0.87	5.62		0.48	4.28	0.46
AlCrN(PT)	0.77	5.07		0.46	2.74	0.36

被削材：SUS304，切削速度：120m/min，切込み：0.1mm，送り：0.1mm，乾式

図5にコーテッド工具とSUS304摩擦試験(通電電流60A)における熱電対からの出力を示す。スローアウェイ工具とそれと同形状の被削材サンプルを用いたマシニングセンタ上における摩擦試験における摩擦温度に関する調査を行った。被削材サンプル(SUS304)に直径0.5mmの小孔を摩擦面に垂直に明け外径0.5mmのシース熱電対を挿入し隙間をはんだで埋めた。サンプル間に電流を流した状態で相対円運動させながら工具の回転中心を1回転するごとに被削材の稜線方向へわずかに移動させることを繰り返した。最高温度は35Aで550℃, 60Aでは600℃に達した。摩擦試験に関しては摩擦領域が幅約0.1mmと小さいため熱電対を挿入する穴位置のわずかな違いにより測定温度が大きく変わることが分かった。正確な摩擦温度の測定については今後も新たな方法を模索するが、仕上げ面生成領域に近い温度は十分に実現できていると判断できるためサンプルの損傷を抑制できる最小限の通電で実験を実施したい。

また、切れ刃輪郭形状の転写誤差について切り取り厚さによって弾性変形量が異なるため切れ刃丸みに対する仕上げ面生成領域の切り取り厚さの影響を考慮する必要があることが分かってきた。

仕上げ面生成領域の温度を推測するために、ノーズRを持つ工具を用いた長手旋削で切り取り断面内の最大切り取り厚さを、仕上げ面生成領域内の最大切り取り厚さと同程度となるような切削条件を選び、工具切れ刃から輻射された赤外線が被削材の内部に埋め込んだ光ファイバで受光し受光感度の異なる積層した赤外線検出素子へ伝送する方法で刃先温度を測定した。切削速度100m/minでは、最大切り取り厚さが100μmにおいて約400℃であったのに対し、最大切り取り厚さが20μmにおいては約200℃であった。これは切れ刃に沿う方向の熱の伝達がないとの仮定の上では、切り取り断面内で温度分布が存在し、最も厚い切りくずが生成される部分と仕上げ面が生成される部分では数百℃の温度差があることを意味する。

したがって、切れ刃に沿う方向に熱の伝達が多少あるにせよ仕上げ面を想定した摩擦試験を行う際の摩擦温度に関しては200~300℃を実現できればよいと考えられ、現状の装置でも十分に実現可能と思われる。

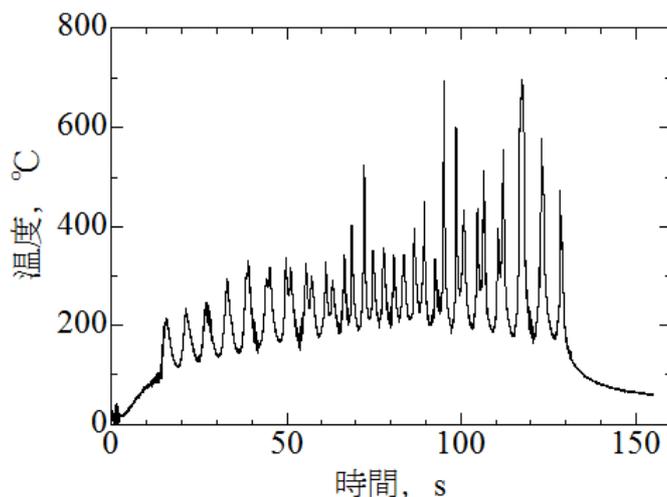


図5 コーテッド工具とSUS304摩擦試験(通電電流60A)における熱電対からの出力

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計0件)

〔学会発表〕(計4件)

吉岡 龍一, 田中隆太郎, 關谷 克彦, 山田 啓司
微小送りエンドミル加工における切削抵抗を用いた切削油剤評価の試み
2018年度精密工学会中国四国支部香川地方講演会

杓谷 明彦, 田中隆太郎, 關谷 克彦, 山田 啓司
エンドミル加工における送り方向と送り速度が工具摩耗へおよぼす影響
2018年度精密工学会中国四国支部香川地方講演会

山崎 慶祐, 田中隆太郎, 山根八洲男, 關谷 克彦, 山田 啓司
2016年度精密工学会中国四国支部 - 山口地方学術講演会 -

今村 崇, 田中隆太郎, 小島 祐人, 關谷 克彦, 山田 啓司
2017年度精密工学会中国四国支部鳥取地方講演会

〔図書〕(計 0 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：
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：
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

研究分担者氏名： なし

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号(8桁)：

(2) 研究協力者

研究協力者氏名： なし

ローマ字氏名：

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。