

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 22 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2014

課題番号：24656098

研究課題名(和文) 機械加工の高効率化と環境負荷低減の両立を実現する高機能工具表面の創製

研究課題名(英文) Development of functional cutting tool to realize high efficient process and low environmental load

研究代表者

杉田 直彦 (Sugita, Naohiko)

東京大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：70372406

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、(1)切削抵抗や温度のセンシングを可能とする工具一体型極微小センサ・アレイを構築し、さらに切削抵抗および温度の低減を実現するために(2)工具表面3次元マイクロ・テクスチャを研究した。それぞれの研究では、まず理論を確立し、数mmの拡大モデルを用いて実証実験を行った後、微細加工技術を用いてマイクロ構造体を制作して評価した。

研究成果の概要(英文)：This study proposed (1) a micro sensor array integrated on the cutting tool to measure the cutting force and temperature, and (2) 3 dimensional micro texture on the cutting tool to decrease the cutting force and temperature. Theoretical part was investigated at first, and then some experiments were conducted with a enlarged model. Finally, a micro structure was manufactured on the cutting tool, and the performance was evaluated.

研究分野：生産加工

キーワード：工具 環境負荷低減 極微小センサ マイクロ機能表面 精密加工

1. 研究開始当初の背景

製造プロセスでは、CO₂排出削減の観点から環境にやさしい機械加工の実現が望まれてきた。加工中の温度測定は、適切な加工条件を設定可能とし、無駄なエネルギーの消費を防ぐ。微細加工技術を用いた微小なセンサ構造による解決が期待されるが、摩擦特性や、適用範囲の拡大が課題となっている。

加工機は工場のエネルギー消費の約 80% を占めており、工具の高機能化に伴う加工制御により切削油を供給する動力などを低減することが期待される。そこで申請者のこれまでの成果を用いて、工具に in-situ 計測高精度化(センサ)・加工の負荷低減(テクスチャ)・高寿命化(コーティング)の機能からアプローチする。

2. 研究の目的

本研究では、環境負荷を低減する機械加工を目指して、マイクロ構造体による工具表面の高機能化を行う。

具体的には、切削抵抗や温度のセンシングを可能とする工具一体型極微小センサを搭載するとともにアレイ化することで適応制御加工へと発展させる。また、加工中の工具と工作物間は高摩擦・高温の非常に厳しい環境下にあるため、理論に基づいて設計された3次元マイクロ・テクスチャを工具表面上に構築することで切削抵抗・切削温度の低減や溶着の防止を可能にする。

このように、工具上にマイクロ機能表面を構築することにより高効率・精密加工と環境負荷低減を両立する

3. 研究の方法

3.1 工具一体型極微小センサ・アレイ

センサ構造の提案および試作：センサ構造として、工具材料であるタングステン・カーバイドが負の大きな熱電能をもつことに着目し、WCを熱電対の-脚とした極小熱電対搭載工具を提案する。厚さ0.1 μ mのSiO₂を絶縁材料とし、厚さ0.1 μ m×幅75 μ mのCrを熱電対の+脚および信号線とする。センサ構造の試作を行い、校正実験・二次元切削実験を通じて有効性を検証する。

極小センサ・アレイの開発：開発した温度センサをアレイ化することにより、工具すくい面上の温度分布測定を実現する。切込み2mm、送り0.2mm/revまでの旋削を想定し、10点以上のセンサを工具表面上に構築することで加工中の温度分布を測定する。また、回転工具に実装することで、エンドミル加工など複雑な加工においても温度測定が可能となる。

3.2 マイクロ・テクスチャによる工具表面の機能化

工具上の切りくず接触面に3次元マイクロ・テクスチャを構築することで摩擦の低減

を試みる。摩擦の低減は、切削抵抗や切削温度が減少し、加工に要するエネルギー消費の削減をもたらすことが期待される。どのような形状の構造体が加工中の摩擦低減に最も適しているかはほとんど解明されていないため、まずは幅0.6 μ m、深さ1.5 μ mの溝とし、ピッチを10,20,30,40,60,80 μ mで可変させながらシミュレーションや理論解析などを通じて最適な3次元形状を検討していく。

提案した3次元構造を工具上に実現し、有効性の評価を行なっていく。切削抵抗の減少は、加工の高効率化を促進し、工程時間の短縮、すなわち、加工機によるエネルギー消費の低減が期待される。また、切削温度の減少は、潤滑油の消費を抑えることができるため、ドライ加工の実現が期待される。

4. 研究成果

4.1 工具一体型極微小センサ・アレイ

(1) 工具一体型センサの構築

超硬工具の主成分であるタングステンカーバイドが持つ負の高い熱電能に着目し、工具を片脚としたWC-Cr熱電対構造を構成した。具体的には、以下に示す図1のように、まず工具表面に絶縁膜を成膜し、その上からクロム金属線を積層することによって、測温点でのみ工具とクロム金属線が接触するようにした。

測温部の微小化により熱容量を小さくすることで高速応答化を図った。また、工具と金属線で熱電対を形成することで非導電性被削材への適用を実現し、熱電対をアレイ化することで高空間分解能を確保し擬似的に分布情報を取得する。埋込構造により切りくず摩擦による測温部の破壊を抑制し、従来の積層構造において応答遅れの要因となりうる保護膜を用いることなくセンサの高寿命化を図る。

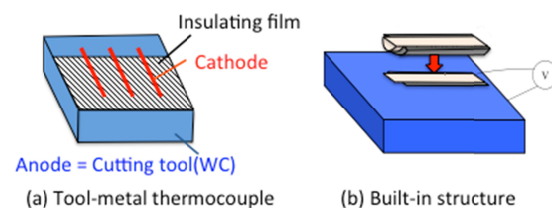


図1. 提案工具

工具表面へ提案構造を試作した。チップブレードの無い旋盤用スローウェイチップ(京セラ製TCGW110304、一辺約10.4mmの三角柱上)を用いた。全体の試作フローを図2に示す。

センサを構成するための溝加工には、フェムト秒レーザー加工機(サイバーレーザー製Ifrit)とフェムト秒レーザー微細描画装置(ネオアーク製DB-FS-TU-W)を用いた。サブマイクロオーダーでの微細加工が可能であり、マスクを用いずにCAD図の再設計のみで容易に設計変更が可能である。

絶縁膜にはアルミナセラミックス(Al₂O₃)

をスパッタリングによって成膜し、熱電対の片脚となる金属線にはクロム(Cr)を蒸着によって成膜した。Crを成膜する前に、レーザーによって溝部の先端のみ Al₂O₃膜を破壊することで、切りくず接触領域に高温接点を構築する。

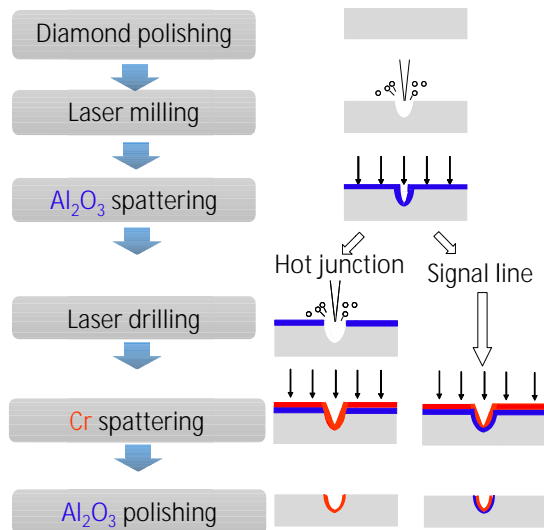


図2. 試作フロー

最後に、WCよりわずかに硬いアルミナ砥粒を用いて溝部以外の薄膜を選択的に研磨除去した。

図3に試作工具の全体像・拡大図・写真を示す。切り込み2mm、送り0.2mm/revの二次元切削における切りくず接触領域中に測温点を10点配置した(切りくず排出方向に平行方向に200μm、垂直方向に300μm間隔)。導線接続用の電極部は800μmとした。顕微鏡下での位置決め・圧着で導線の接続を試みた。測温点3, 6, 7, 10で実験を行った。

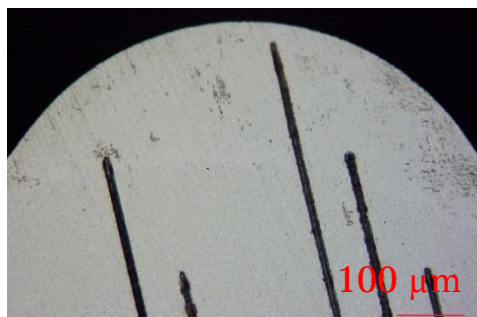
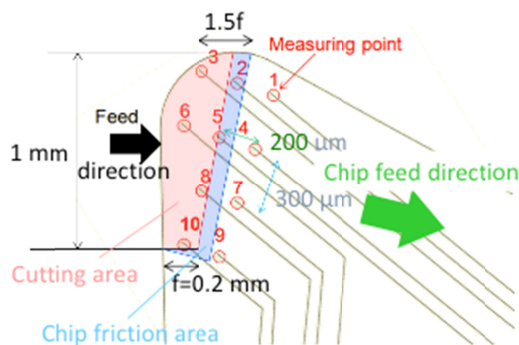


図3. 構築した試作工具

(2) 評価実験

提案構造によって、高速応答性、耐久性、多点での温度の同時取得可能性が実現されるかどうかを検証するために、MCナイロンの旋削実験を行い、熱起電力を取得した(図4)。その際、校正実験によって得た温度熱起電力特性を用いて、各測温点の温度を算出した。なお、切削条件は表1の通りである。その結果、図5のとおり、4つの測温点全てが同時に機能することが確認され、切りくず摩擦によって破損することもなかった。また、切削実施中は温度が上昇し、切削終了時から温度が下降していることから、応答性についても良好な結果が得られたと見られる。

切削開始の時点で4つの測温点に約3のばらつきが見られる点については、これらが約1mm²の領域に集約されていることを考慮すると不自然である。そのため、取得温度の妥当性については検討の余地があると考えられる。

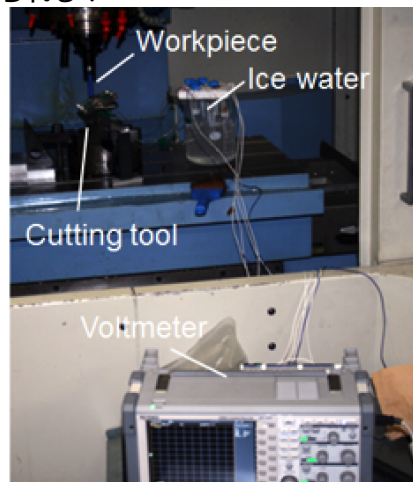


図4. 実験風景

表1. Machining conditions

Spindle speed	1000 rpm
Cutting speed	50 mm/min
Depth of cut	1 mm
Feed rate	0.25 mm/rev

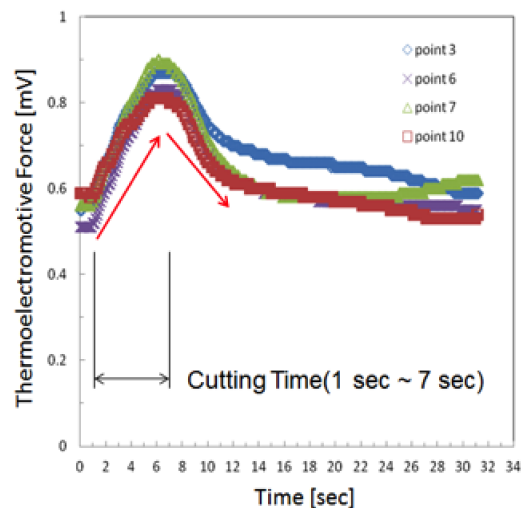


図5. 実験結果

4.2 マイクロ・テクスチャによる工具表面の機能化

(1) テクスチャ工具の製作

まず、切削用チップに超硬 K10 種(京セラ TCGW-110304)を用い、その表面にフェムト秒レーザ(サイバーレーザ Ifrit)で平行溝をチップ先端から 20 - 1300 μm の範囲で作製した(図 6 左)．作製した工具を用いて NC 旋盤(OKUMA LB15)でアルミニウム合金 A5052 の旋削加工を行い加工中の切削力を力センサ(KISTLER 9601A3)で測定した(図 6 右)．工具すくい角 0° ，切削速度 314 mm/min，切り込み量 0.075 mm，送り速度 0.10 mm/rev として乾式及び湿式加工にて実験を行った．

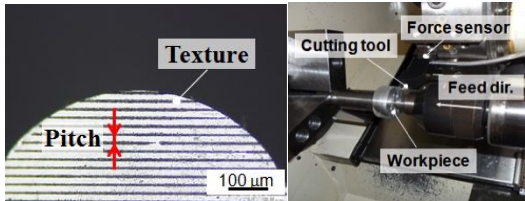
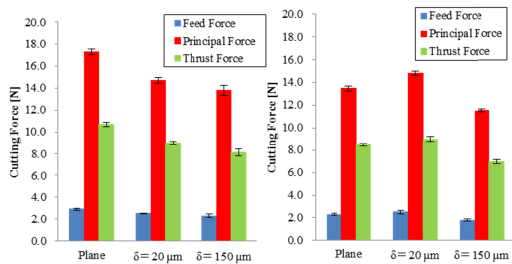


図 6 . テクスチャ工具の製作

切込み部分のテクスチャの有無による切削力の比較実験を行った．テクスチャの作製範囲を刃先先端から 20 - 1300 μm と 150 - 1300 μm に分けることで、切込み部分でのテクスチャの有無を区別した．ピッチはそれぞれ 20 μm である．

乾式・湿式加工における刃先先端からのテクスチャ開始距離と切削力との関係を、それぞれ図 7 に示す．

切込み部分にテクスチャが存在する場合、湿式にて切削力の増加が確認された．一方、切込み部分にテクスチャが存在しない場合、湿式では 15 %程、乾式では 20 %程切削力が減少し、切込み部テクスチャが悪影響を及ぼしていると言える．



(a) Dry (b) Wet

図 7 . テクスチャ開始距離と切削力との関係

(2) テクスチャピッチと主分力の関係

凸部の幅を 50 μm に固定し、溝部の幅を 10-100 μm で変化させることで溝部の幅に関する検証を行った．

溝部の幅と主分力との関係と、切削後のすくい面の状態をそれぞれ図 8, 9 に示す．図 8 における width = 0 μm はすくい面にテクスチャがない状態を表している．

乾式加工では、溝部の幅が大きくなるほど切削力が小さくなっていることが確認でき

る．このことから接触面積が切削力を低減させる要因の 1 つであると考えられる．一方、湿式加工では、テクスチャの溝幅が大きいほど切削力が増加した．そこで工具すくい面の観察を行うと切込み部分直後の領域にて溝内部へ被削材が溶着し、溝の幅が大きくなるほど溝内部への溶着が激しいことが見て取れ、溝内部への被削材の侵入が切削力を増大させていると考えられる．

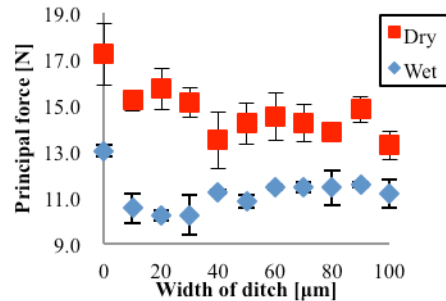


図 8 . ピッチと主分力の関係

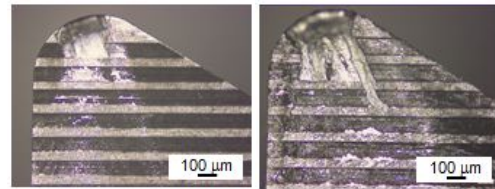


図 9 . 工具すくい面の状態

これまでの実験結果から図 10 に示すようなテクスチャ形状を提案することができる．この形状では

() テクスチャが切削力を増大させる領域

() 溝幅が大きいと内部に溶着しやすくなる領域

() 溝の内部への被削材の侵入がなく、接触面積のみが影響する領域

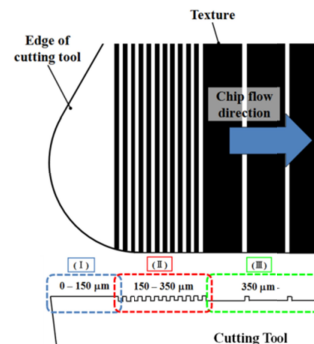
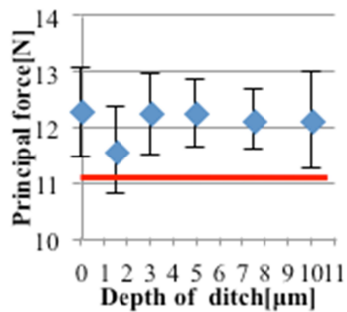


図 10 提案テクスチャ

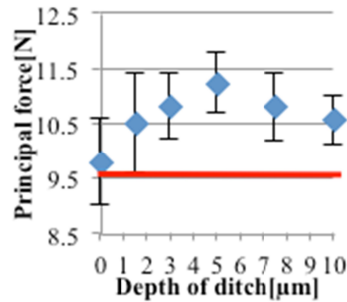
の 3 つの領域に分類し、() の領域にはテクスチャ設定せず、() の領域には溝幅の狭いテクスチャを、() の領域には溝幅の広いテクスチャを割り当てた．

提案工具と従来のテクスチャ工具との比較の為、溝幅の検証実験の中で最も低い切削力を得たテクスチャ形状を選択し、その形状のテクスチャ工具でも実験を行った．

切削中の主分力の結果を図 11 に示す．グラフ中の赤線は比較用工具の主分力である．また切削後のすくい面を図 12 に示す．共に左は乾式、右は湿式である．

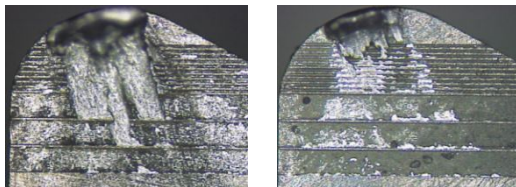


(a) dry



(b) wet

図 11 切削主成分



(a) dry

(b) wet

図 12 工具すくい面状態

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

- 1) Sugita Naohiko, Ishii Keigo, Furusho Tatsuo, Harada Kanako, Mitsuishi Mamoru, Cutting temperature distribution measurement by micro sensor array integrated on rake face of cutting tool, CIRP Annals - Manufacturing Technology, **64**, 1, pp.in press, 2015.

〔学会発表〕(計 4 件)

- 1) Ishii Keigo, Sugita Naohiko, Mitsuishi Mamoru, Micro Temperature Sensor Array Integrated on Rake Face of Cutting Tool, The 9th International Conference on MicroManufacturing (ICOMM 2014), 0128, Singapore, March 25-28, 2014.
- 2) 山口 景平, 杉田 直彦, 石川 眞達, 光石 衛, マイクロ機能表面工具の切削性向上に関する研究, 第 20 回精密工学会学生会員卒業研究発表講演会, 113-114, 東京, 3.13, 2013.
- 3) 石井 敬吾, 古庄 達郎, 杉田 直彦, 米谷 玲皇, 石原 直, 光石 衛, 工具すくい面上の温度分布取得を目的としたナノ温度センサアレイの開発, 日本機械学会第 4 回マイクロ・ナノ工学シンポジウム

プログラム, P-OS2-1, 北九州, 10.22-24, 2012.

- 4) 山口 景平, 石川 眞達, 杉田 直彦, 光石 衛, マイクロ機能表面工具の切削性向上に関する研究, 日本機械学会第 9 回生産加工・工作機械部門講演会, 267-268, 秋田, 10.27-28, 2012.

〔その他〕

<http://www.mfg.t.u-tokyo.ac.jp/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

杉田直彦 (SUGITA, Naohiko)

東京大学・大学院工学系研究科・教授

研究者番号: 70372406

(2)研究分担者

光石衛 (MITSUISHI, Mamoru)

東京大学・大学院工学系研究科・教授

研究者番号: 90183110

原田香奈子 (HARADA, Kanako)

東京大学・大学院工学系研究科・特任講師

研究者番号: 80409672