

令和 3 年 6 月 10 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K13666

研究課題名（和文）濡れ性勾配のワンパス加工を実現する超音波援用切削法および3次元接触角解析法の開発

研究課題名（英文）Development of ultrasonic-assisted cutting for gradient wettability in a one-pass process and three-dimensional contact angle analysis

研究代表者

嶋田 慶太（Shimada, Keita）

東北大学・工学研究科・助教

研究者番号：30633383

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）：正面フライス加工に超音波振動を援用した切削法により加工面内には半径方向に一樣ではない微細構造が形成でき、その微細構造の違いに起因して濡れ性勾配を生じさせることができた。また楕円振動切削装置により創成した微細構造ではピラミッド形状よりも台部の小さい台錐形状のほうが水滴の接触角が大きかった。これはピン止め効果により液滴が台部に留まり溝部への侵入を阻害したと考えられる。ただし、台部の拡大に従い平滑面に近づく傾向が確認できた。加えて熱力学的接触角解析では液滴の微細構造への侵入深さを計算することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

超音波振動切削を用いることにより機械加工により微細構造の創成すること、そしてその構造が濡れ性へ影響を与えること、およびその程度について評価を行った。この加工は精度を追及する技術とは異なり機能性を与える手法として用いることができる可能性を示したものでありこの後の応用性を示した意義は大きい。一方、現時点および本研究での機械加工のみを用いての濡れ性制御できる程度については接触角で40度程度が上限であったことも利用の範囲を示した点で意義がある。

研究成果の概要（英文）：Wettability gradient structures were achieved with ultrasonic-assisted face-milling process that fabricated a surface with varying microtexture that affected the wetting characteristics. The elliptical vibration cutting fabricated micropyramid and microfrustum arrays (MPA and MFA) and they were more hydrophobic than a flat surface. Additionally, the MFA surface was more hydrophobic than MPA when their top surfaces were small compared with the depth; the wettability became close to that of a flat surface when the top surfaces became larger. The thermodynamic contact angle analysis computed the penetration depth of droplet into the grooves.

研究分野：加工学および生産工学関連

キーワード：超音波援用切削 表面微細構造 濡れ性

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

濡れ性の決定する因子は、表面の化学的性質と微細構造とに大別できる。化学的性質は固気、固液、気液の3界面の表面張力の釣り合いとして接触角が生じることを説明したYoungの式により表現され、微細構造の影響を加えた式として微細構造内面まで液体が侵入する場合のWenzelの式、気体が構造にトラップされる場合のCassie-Baxterの式が一般的に知られている。これらの式は等方的な化学的性質・微細構造を仮定しており、濡れや滑落の異方性を狙った加工やコーティングを行うための定性的な指針を得ることは可能であるが、定量的な解析は不可能であり、試行錯誤を繰り返すことが必要となる。そこで研究開始の当時は熱力学的接触角解析と呼ばれる表面自由エネルギーを考慮して液滴の形状と濡れ広がりを解析する手法が研究され、また、格子ボルツマン法により液滴内での流動を解析し動的な濡れを取り扱う試みがなされていた。

一方、現在の濡れ性の制御の手法を考えると、化学的性質を変化させる場合は蒸着や表面酸化、表面窒化による改質、安価な手段としては市販の撥水スプレーによるコーティングなどでも改質が可能である。また大気圧プラズマ照射により表面の汚染有機物を除去してヒドロキシル基を修飾することによる親水処理も知られている。微細構造創成による濡れ性の制御に関しては、リソグラフィによる微細パターン創成やレーザ、超精密切削等を用いた表面の除去、もしくは自己組織化による高分子フィルムの創成などが報告されている。

2. 研究の目的

申請者らはこれまでに構造による制御について検討を進めており、超音波援用切削を用いた複合微細構造を有する表面（以下、単に複合構造面）の創成法を提案し、工具軌跡の検証することにより100 μm 、10 μm 、1 μm オーダの親・子・孫の3世代構造の創成を達成している。また複合構造面の断面ごとに熱力学的接触角解析を用いて濡れ性の解析を行っている。しかし解析の結果は定性的な一致を見たものの、構造に空気がトラップされる箇所と全面的に濡れる箇所が生じることから定量的な解析には至っていない。また構造のみによる濡れ異方性は接触角で20°程度の差を生じさせる程度であり、一層の異方性を発現させるためには化学的な改質を機械的な加工を施した箇所に対して選択的に行うことが求められる。本研究での目的をより現実的・実現可能なレベルの2点 (1) 3次元的な濡れや滑落異方性を表現できる解析手法について開発すること、および(2) 微細構造の創成と化学的な表面改質を同時に達成する手法を開発することである。

続いて具体的な手法について挙げる。解析では現在、気液や固液の境界問題、相変態問題等を解析する際にも用いられており、液滴のようなメゾスケールの現象の解析を得意とする格子ボルツマン法を用いる。固体面に微細構造を模擬して濡れ広がる力を気液固の3重界面に与えることで3次元的な濡れ広がりを検証する。2次元的な解析で完全平面への液滴の接触を解析する先行研究はあるものの、3次元的に複合構造面を含めた濡れ性を解析した例はなく独自の研究である。実験では超音波援用切削を用いた複合構造面の創成を基本プロセスとし、潤滑材に対して酸化チタンペースト等の濡れ性に親水・疎水性の特徴を持つ材料の加える。材料除去部における高温・高圧および超音波援用によるソノケミカル反応を生じさせ改質層を形成させることにより、ワンパス加工で濡れ性勾配を有する構造を創成させる。

3. 研究の方法

(1) 3軸振動装置による正面フライス方式

デスクトップ型4軸加工機(Trider-X, 新世代加工システム)に3軸超音波振動装置(SC-45 SP-H24, 多賀電気株)を取り付け、そこにダイヤモンド工具(榊アライドマテリアル)を装着して超音波振動を印加した。実験のセットアップと工具の寸法は図1の通りである。

加工は正面フライス加工に超音波振動を重畳した加工により微細構造を創成し図2のような

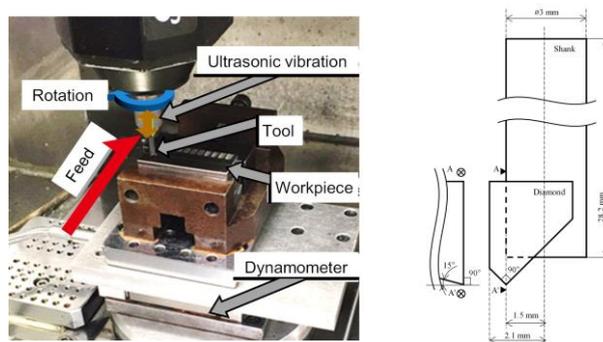


図1 実験セットアップ (左) および工具寸法

表面形状の創成を試みた．この微細構造では刃物の切削する軌跡の密度が加工域内で異なることにより微細構造に変化を与えることができる．

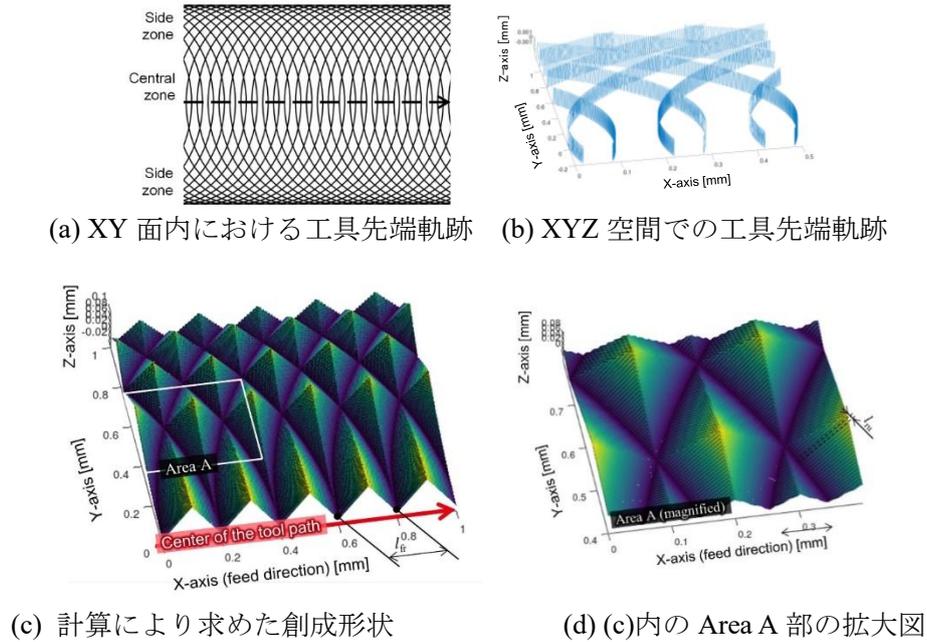


図 2 計算により求めた工具軌跡と創成形状

(2) 楕円振動切削装置による超精密切削方式

楕円振動切削装置 (EL-50Σ, 多賀電気株式会社) を超精密5軸移動機構 (MIC-300, 株式会社ナガセインテグレーション) に固定しV形状ダイヤモンド工具 (株式会社アライドマテリアル) により切削して複合微細構造を創成した．切削実験の構成は図3(a)のようにSUS430母材にニッケルリンめっき (株式会社ナクロ) を施した工作物をマグネットチャックにより固定し，移動機構のY軸への平削りとX軸へのピックフィード，およびC軸の回転を用いて行った．

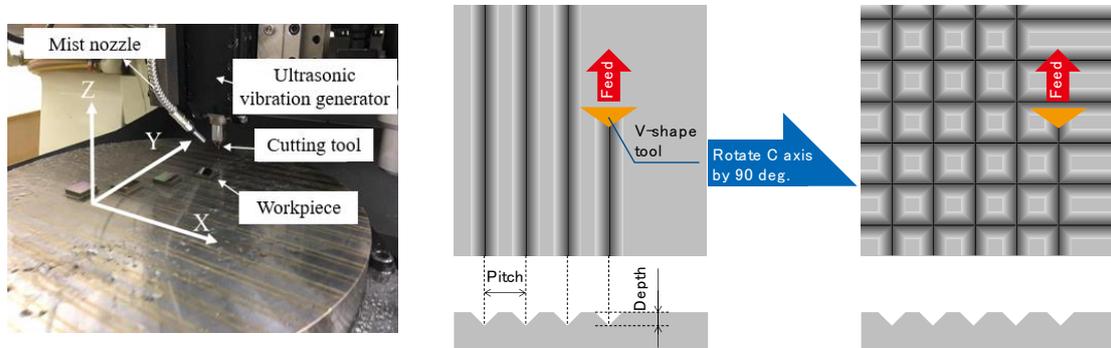


図 3 超精密切削による微細構造創成加工のセットアップおよび加工法

加工パスは図3(b)のように平行溝を十字に重ねることで台錐アレイもしくはピラミッドアレイ構造とし，構造による濡れ性の制御に焦点を当てて検証を行った．濡れ性は接触角計 (協和界面科学, DM-501Hi) を用いて接触角により評価した．

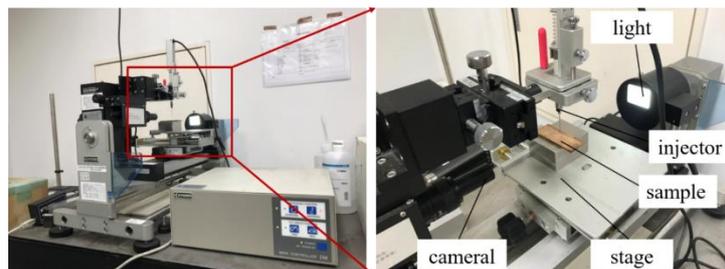


図 4 接触角測定装置

(3) 熱力学的接触角解析

濡れ性の解析は GNU Octave/MATLAB を用いて固液気三態での表面エネルギーを用いた接触角解析を行った。図5に示すように、ある状態での固液気三態の濡れと表面エネルギーを計算し、順次液滴を前進させて表面エネルギーが安定する状態を見つける。

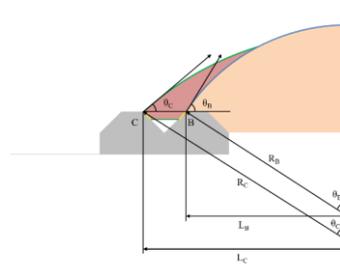
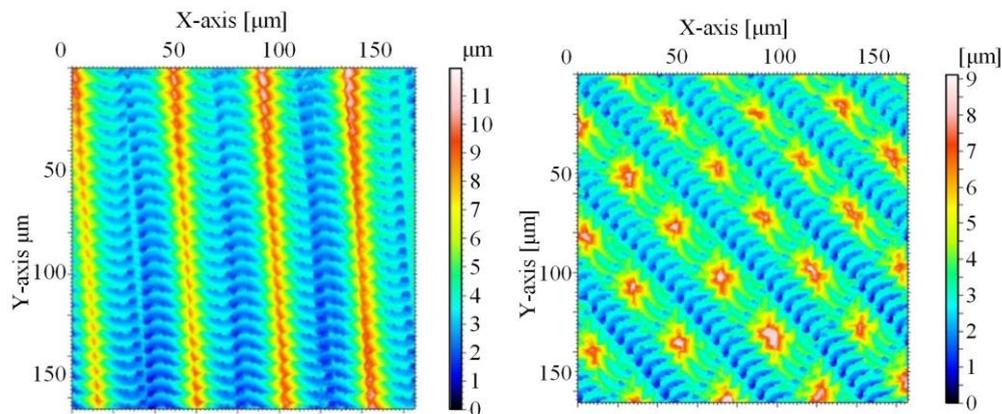


図5 熱力学的接触角解析の概要

4. 研究成果

(1) 3軸振動装置による微細構造について

図6は送り速度 $v_f = 40 \text{ mm/min}$ 、工具回転速度 $f_t = 1000 \text{ min}^{-1}$ と設定した際の加工面の白色光干渉計像である。図中の高い箇所に着目すると、左図では溝構造内部にさらに微細な溝が形成されているのに対して、右図では頭頂部を残したドット構造が形成され、図2で計算した構造が再現された。



$v_f = 40 \text{ mm/min}, f_t = 1000 \text{ min}^{-1}$

図6 接触角計測結果

これらの構造の違いに対して濡れ性の変化を検証した結果を図7に示す。箇所1-5ではいずれも平滑面よりも撥水性を示した。これは微細構造内部に空気をトラップするCassie-Baxter状態となったこと示しているといえる。また加工パス中央の計測箇所1と比較して箇所3-5では接触角が増加し、撥水性を示した一方、加工パス端部の箇所6では接触角が減少し親水側に転じた。この結果は微細構造の形状が平行溝のような箇所1と比較して箇所3-5では切削溝が交差する構造となり構造内に空気をとらえやすくなったことを示唆している。また箇所6では切削が多重に複合しなり材料が押し出されてバリとなる箇所であることから濡れ性が変化したと考えられる。

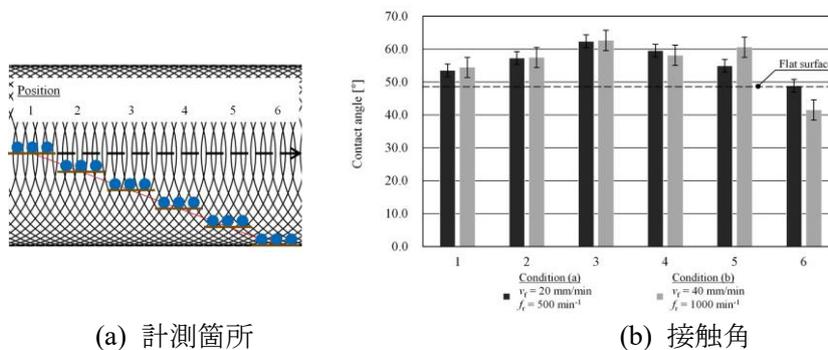


図7 接触角計測結果

本手法で創成できる微細構造のみで濡れ性を制御できる範囲にはある程度の限度があるものの、他の手法との組合せによって制御の範囲を広げることができるといえる。

(2) 楕円振動切削装置による微細構造について

図8が創成した複合微細構造の走査型電子顕微鏡 (SEM) 像である。切り込み深さを $8\mu\text{m}$ に固定し、X軸方向へ異動させるピッチ量 p を変化させることにより(a)のピラミッドアレイおよび(b)の台錐アレイを創成した。

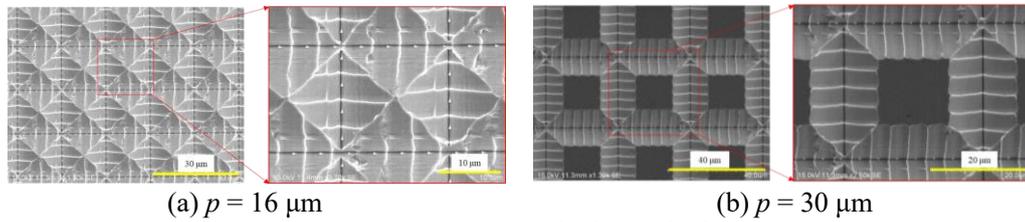


図8 楕円振動切削により創成した複合微細構造

図9はピッチと接触角の関係であり、複合微細構造を有する表面のほうが平滑面よりも接触角が増加した。これは図7と同様、微細構造に空気をトラップできるようになることから撥水性を示すようになったと考えられる。また $p = 16\mu\text{m}$ と設定して創成したピラミッドアレイ構造よりも $p = 20$ および $30\mu\text{m}$ のほうが高い平均接触角を示しており、撥水性向上の可能性を示唆している。この要因として台錐の天板部で液滴が留まることにより、微細構造への液体の侵入が抑制できることが考えられる。

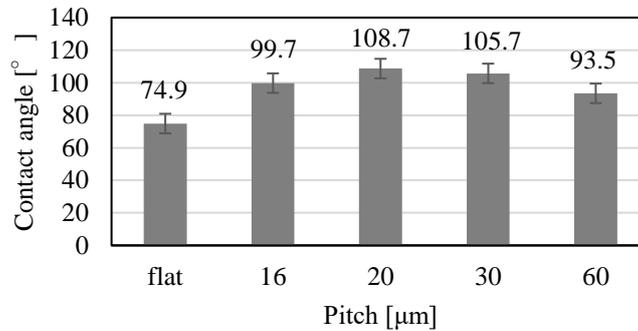


図9 接触角計測結果

(3) 熱力学的接触角解析との関係

図10は切り込み深さを $2\text{--}7\mu\text{m}$ に変化させて作成したピラミッドアレイ形状の接触角である。同図からピラミッド形状での接触角は切り込み深さにあまり依存しないことが確認される。

このデータを用いて、液滴の微細構造への侵入深さを熱力学的接触角解析により求めた結果が図11である。同図より侵入深さは線形的に増加していることが分かる。すなわち、本手法により液滴はWenzel状態とCassie-Baxter状態の中間の状態であり、その程度を得ることができた。

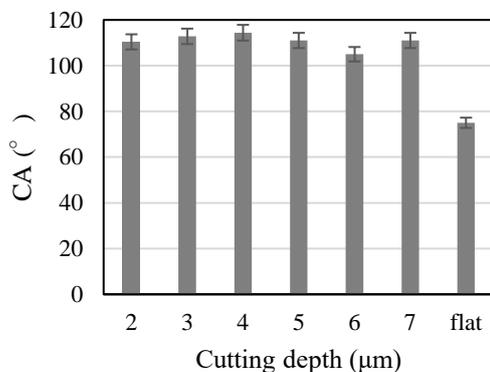


図10 接触角計測結果

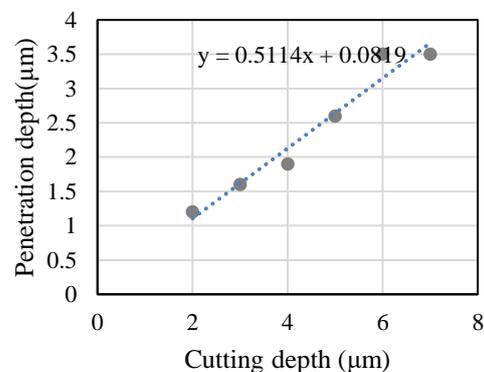


図11 接触角計測結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Shimada Keita, Chen Ziqi, Mizutani Masayoshi, Kuriyagawa Tsunemoto, Graduate School of Engineering, Tohoku University 6-6-01 Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-8579, Japan, Graduate School of Biomedical Engineering, Tohoku University, Sendai, Japan	4. 巻 14
2. 論文標題 Ultrasonic-Assisted Face Milling for Fabricating Hierarchical Microstructures	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Automation Technology	6. 最初と最後の頁 238 ~ 244
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20965/ijat.2020.p0238	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 -

1. 著者名 Keita Shimada, Takuya Hirai, Masayoshi Mizutani, and Tsunemoto Kuriyagawa	4. 巻 13
2. 論文標題 Unidirectional Wetting Surfaces Fabricated by Ultrasonic-Assisted Cutting	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Journal of Automation Technology	6. 最初と最後の頁 191-198
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20965/ijat.2019.p0191	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 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Keita Shimada, Ziqi Chen, Masayoshi Mizutani, Tsunemoto Kuriyagawa
2. 発表標題 Micrometer-scaled hierarchical structures fabricated by ultrasonic-assisted cutting
3. 学会等名 The 15th China-Japan International Conference on Ultra-Precision Machining Process (国際学会)
4. 発表年 2019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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------