

# 高精度テクスチャを高能率に創成可能な超音波援用転写加工法の開発

東京工業大学 ○劉 士豪, 東京電機大学 酒井 康徳, 東京工業大学 ◎田中 智久, 都立産業技術高専 青木 繁

## 要旨

物体表面に微細テクスチャを付与することで、摩擦を低減することができる。しかし、既存技術では、大面積の摺動面へテクスチャ付与は困難である。そこで本研究では、耐摩耗性が高い微細テクスチャを大面積の摺動面へ高能率に創成を目指し、超音波と転写加工を複合した新たな加工技術を開発する。試作した加工機で実験を行った結果、超音波によりテクスチャの形状精度の向上や加工力の低減が可能となることが明らかとなった。

## 1. 緒言

表面テクスチャリングとは、パターン化された微細な凹凸（テクスチャ）を物体表面に設けることである。テクスチャを摺動面に設けると、潤滑剤の貯蔵や摩耗粉の逃げ溝となり、摺動時の摩擦・摩耗特性が変化する<sup>[1]</sup>。テクスチャの溝形状やパターンを変えることで摩擦・摩耗特性を制御可能となる<sup>[2],[3]</sup>。

従来のテクスチャ加工技術として、レーザやマイクロ切削、エッチング、転写加工（ローレット加工）などが存在する。しかし、それぞれの技術には加工コストや加工精度、加工後の表面状態などに課題があり、すべり案内面や金型内面といった耐摩耗性が要求される大面積摺動面への高精度・高能率テクスチャ加工は困難である。

そこで、本研究では、耐摩耗性が要求される大面積摺動面へのテクスチャ加工を実現するため、超音波を複合した新たな転写加工技術（超音波援用塑性加工技術）を開発する。本報では、試作した加工機を用いて提案手法の加工原理を検証し、超音波の有無が転写加工したテクスチャに及ぼす影響を評価する。

## 2. Micro Ultrasonic Knurling の提案

本研究で提案する技術を「マイクロ超音波転写加工：Micro Ultrasonic Knurling (MUK)」と呼ぶ。MUK では、図 1 に示すように、所望の微細テクスチャパターンを有する円筒状工具を加工面に押し付け、送り方向へ回転・移動させることで工具の表面形状を材料表面に転写する。この時、工具を押し付け方向に向かって高周波（超音波）加振した状態で加工を行う。

旋盤加工技術である従来のローレット転写加工では、工具-工作物間での過大な摩擦力によって塑性流動が偏るため形状精度が低いことが問題であった。また、円筒外周面にしか凹凸を創成できず、自由平面への加工は困難である。

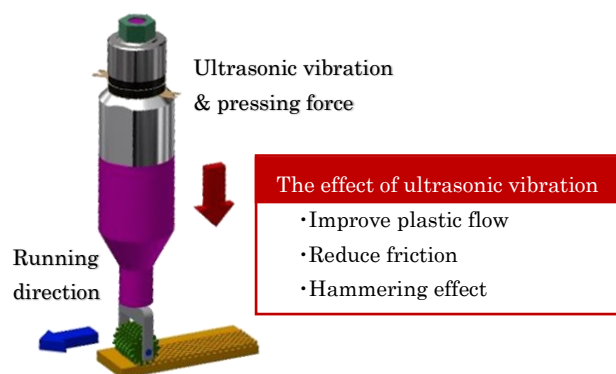


Fig. 1 The concept of MUK

MUK は、超音波を工具及び工作物へ印加することで、工作物の変形抵抗を大幅に低減（Blaha 効果）させると共に、工具-工作物間で生じる摩擦を低減させることが可能となる。また、超音波によって押付力が周期的に変動するため、打撃効果が得られる<sup>[4]</sup>。

超音波によってもたらされるこれらの効果の相乗により、形状転写精度や加工能率の向上、加工機械の小型・省エネルギー化や潤滑油の使用量削減による環境負荷の低減、工具摩耗の抑止、残留応力を加工面に付与することによるテクスチャ面の耐摩耗性の向上などが期待できる。

## 3. MUK 加工機の開発

MUK の加工原理を検証するため、図 2 に示す加工機を設計・試作した。本加工機では、Y 軸送りテーブル上に圧電式三分力動力計を介して工作物をボルトで締め付けて固定する。動力計を用いて加工中に生じる押付力と摩擦力を測定できる。押し付け工具は、ボルト締めランジュバン型超音波振動子（共振振動数：28 kHz）、鋼製ホーンおよび格子状テクスチャを有する転写工具から構成される。押し付け工具は、2 軸（X・Z）ステージ上に固定されたホルダにボルトで締め付けて固定してある。各送りステージはサーボモータで駆動されており、速度制御が可能である。また、押し付け方向となる Z 軸ステージ用モータは電流制御することで、工具の押付力を可変とした。

超音波加工機では、所望の振動特性（固有振動数、振動モード）を得られるように工具形状を設計することが重要である。そこで、有限要素解析ソフト（COMSOL Multiphysics®）を用いた周波数応答解析で、工具の形状やホルダへの固定方法を決定した。

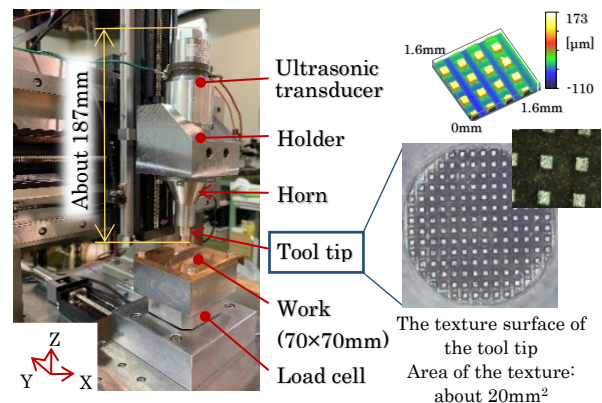


Fig. 2 The processor designed and made for MUK

振動子は高周波電源から給電することで駆動した。このとき、実際に振動子へ入力している電圧および電流をオシロスコープで測定し、供給電力が最大となる周波数（工具の共振周波数）で振動子を駆動した。

以下では、金属平板への工具を押し当てることでテクスチャリングを行い、超音波の有無が形状転写性に及ぼす影響を検討する。

#### 4. 実験方法

超音波の有無が転写加工に及ぼす影響を検討するため、超々ジュラルミン（A7075P）と銅（C1100P）に対して転写加工実験を行った。実験条件は表 1 に示す。工具の慣性力が加工力変動や精度に及ぼす影響を除外するため、十分低速で工具を工作物へ押し付けた。また、各加工条件について、それぞれの条件で 3 回実験を行った。

Table 1 Experimental condition

No.	Material	Pressing force	With/without ultrasonic
1	A7075P	700N	Without
2			With
3	C1100P		Without
4			With

#### 5. 実験結果および考察

まず、転写加工後の試験片表面を光学顕微鏡及び非接触粗さ測定器で観察し、転写範囲全体および溝一つの加工痕を観察した。超々ジュラルミンに加工した結果を図 3 に、銅に加工した結果を図 4 に示す。

図 3 に示す超々ジュラルミンのテクスチャ面を見ると、超音波を印加したことで広い領域にはっきりとしたテクスチャが形成されている。さらに、溝部分を拡大すると、より深く、はっきりとした圧痕が形成されていることが分かる。また、図 4 に示す銅の

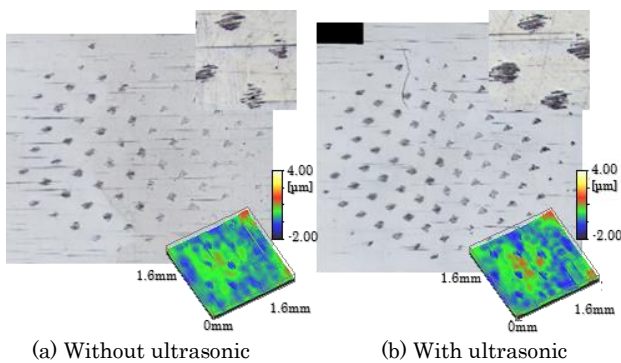


Fig. 3 Texture formed on A7075P

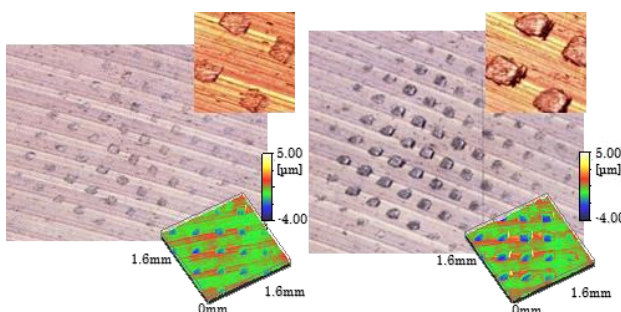


Fig. 4 Texture formed on C1100P

テクスチャ面を見ると、ジュラルミンと同様、超音波を印加することで、広範囲に深いテクスチャが形成されている。

実験では、押し付け力を一定としていることから、超音波を印加したことで、より大きな塑性変形を生じさせることができたといえる。これは、超音波の Blaha 効果によって材料の変形抵抗が低減したことに起因すると考えられ、超音波印加による塑性加工の高効率化ができることを示唆している。

図 3 と図 4 を比較すると、超々ジュラルミンよりも、銅のほうが超音波による影響がより顕著に表れていることが分かる。これは、材料硬さなどの物性や結晶構造などの違いにより、Blaha 効果による塑性流動性向上効果にも差異が生じるためである。超音波の効果を十分に発揮させるには、異なる材料に対し、それに適した超音波の印加が必要であると考えられる。

#### 6. 結言

本研究では、大面積摺動面への高効率かつ高精度なテクスチャ加工を実現するため、超音波と転写塑性加工を複合した新たな加工技術 MUK を提案し、超音波が転写加工精度に及ぼす影響を検討した。以下に得られた知見を示す。

- 1) 超音波を印加することで、同等な力で大きな塑性変形を発生させることができ、転写性の向上が見られた。これは、転写加工機の小型化・省エネルギー化に寄与する。
- 2) 超音波による転写性に及ぼす影響の程度は、材料によって相違がある。これは、Blaha 効果による塑性流動促進作用が材料によって異なることを意味している。

今後は、回転する転写工具を用いて、MUK による微細表面テクスチャの高効率加工に挑戦する。また、超音波が塑性加工時の物理現象に及ぼす影響は不明な部分が多いため、それらを解明することによって、超音波応用転写加工の高度化を図ってきたい。

#### 登壇者が本研究への貢献

登壇者は、本研究の推進にあたり下記を主体に実施した。

- 塑性加工や超音波に関する先行研究調査と研究計画決定
- 試作加工機の仕様、機械要素の選定、FEM を用いた部品設計、組み立て、MATLAB を用いた制御系の設計・実装
- 実験及び得られたデータに対する考察

#### 謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP18K03890 の助成を受けた。

#### 参考文献

- [1] 梅原 徳次: 機械部品の表面テクスチャによる摩擦機能の向上, 日本機械学会誌, Vol.112, No.1086 (2009), pp.406-409
- [2] T. Sugihara, T. Enomoto: Performance of cutting tools with dimple textured surfaces: A comparative study of different texture patterns, Precision Engineering, Vol.49 (2017), pp.52-60.
- [3] M. Qiu, B. R. Minson et al.: The effect of texture shape on the friction coefficient and stiffness of gas-lubricated parallel slider bearings, Tribology International, Vol.67 (2013), pp.278-288.
- [4] 日本塑性加工学会編: 超音波応用加工, 森北出版 (2004), pp.39-44