ふれまわり放電加工による 小径穴内面テクスチャリング*

Micro-structuring on Inner Surface of Small Hole with Whirling Electrical Discharge Texturing

太田 稔**
Minoru OTA

Key words micro-structuring, whirling electrical discharge texturing, inner surface, friction characteristics

1. は じ め に

部品表面に微細構造を施すことによって、トライボロジ機能、熱機能、光学機能、電磁気機能などの表面機能を制御する技術が注目されている。部品表面に微細テクスチャを加工する方法としては、切削・研削加工、ブラスト加工、塑性加工などの機械的なエネルギーを用いる方法から、レーザー加工、放電加工、電解加工、エッチングなどの熱エネルギーや化学反応を利用した方法など多くの方法が考えられる。しかしながら、焼入れ鋼などの高硬度材料でできた部品の小径穴内面に対しては、加工エネルギーや作業スペースによる理由から、微細テクスチャリングの方法が制限される。そこで、筆者らは、小径穴の内面にも微細テクスチャを施すことができる、ふれまわり放電加工による微細テクスチャリング法を開発した^{1)~3)}。本稿では、開発したふれまわり微細テクスチャリング法の概要、テクスチャリング特性およびテクスチャ表面性状などについて述べる。

図1 パルス放電によるクレータ形成

2. ふれまわり放電テクスチャリング装置の開発

放電加工では単発放電によって放電痕（以下、クレータ）が発生し、加工面は梨地状になる。梨地状の加工面においては、クレータの密度を制御することは極めて困難である。摩擦係数を制御するために、クレータの密度を制御することは有効であるが、そのためには、単発放電の回数やエネルギーを制御する必要がある。図1に、単発放電による平坦面へのクレータ形成の概念を示す。相対運動する工具電極と工作物の間に単発放電を発生させ、パルス間隔を適度に設定することによって、移動速度とパルス間隔によって制御されるクレータが形成される。所望の表面全面にわたって走査を行えば、表面にテクスチャが創成される。この方法を放電テクスチャリング (Electrical Discharge Texturing, EDT) と呼ぶ。しかしながら、EDTでは、工具電極と工作物間の放電間隙をきちんと制御しなければならない、高度な制御装置を必要とする。そこで、厳密な放電間隙の制御を必要としない方法として、ふれまわり放電現象を応用した、ふれまわり放電テクスチャリング (Whirling Electrical Discharge Texturing, WEDT) 法を考案した。この方法は、図2に示すように、軸を回

図2 軸のふれまわり現象を利用した放電加工の概念

*原稿受付 平成 27 年 8 月 22 日

**正 会 員 京都工芸繊維大学機械工学系（京都市左京区松ヶ崎御所海道町）

図3 ふれまわり放電テクスチャリング装置

転させることによってふれまわり現象を起こさせ、工具電極先端と工作物内面との間で発生した単発放電によって、工作物表面にクレータを形成しようとするものである。しかしながら実際には、必ずしも計算されたパルス放電間隔で放電が発生するわけではなく、また、ふれまわり現象による工具電極先端の振れの大きさも一定に制御できるわけではなく、ある程度のばらつきをもっている。このばらつき（あいまいさ）が、小径穴内面の形状精度のばらつきと相まって、クレータの大きさや深さ、さらには密度分布がランダムなテクスチャを形成することになる。すなわち、WEDTによる微細テクスチャは分布状態と個々のクレータ形状がそれぞればらつきをもつランダム・テクスチャとなる。

図3に、製作したふれまわり放電加工装置を示す。モータに直結したスピンドル先端にコレットチャックを装着し、タングステン製のふれまわり軸を絶縁体を介して把持する。ふれまわり軸先端には、工具電極ホルダーが取り付けられ、ホルダーに直径 $\phi 0.3$ mmのタングステンワイヤが装着されている。X-Yテーブルで位置決めを行い、Z軸テーブルで工作物を軸方向に移動させる。放電電源により、印加する電圧値、電流値、放電時間等の制御を行い、モータ回転数の制御とZテーブル軸方向送り速度の制御を合わせることによって、さまざまなクレータ密度、クレータの大きさ等の制御が可能である。

3. ふれまわり放電テクスチャリング特性

開発したふれまわり放電テクスチャリング装置を用いて、放電加工条件や工作物速度を変えて加工した。加工後の工作物の表面状態を観察・解析することにより、テクスチャリング特性を把握した。テクスチャ面の観察は、工作物を半割に切断し、デジタルマイクロスコープ（Hirox, KH-1300）、SEM（JEOL, JSM-7001F）、あるいは非接触3次元表面形状・粗さ測定機（ZYGO, NewView 7300）を用いて行った。

図4 テクスチャ表面観察の例
(ZYGO NewView 7300)

図5 クレータの断面プロファイルの例

図6 送り速度とテクスチャ面積率

テクスチャを施した表面から任意の箇所を抽出し、非接触3次元表面形状・粗さ測定機を用いて観察・解析した代表的な例を図4に示す。また、図5にクレータの断面プロファイルを示す。ランダムなクレータが形成されており、クレータ周辺部には盛り上がりが生じていることがわかる。このような盛り上がり部は、表面粗さの悪化を招き、摩擦係数を増大させるため、テクスチャリング後に表面仕上げを行い除去する必要がある。

次に、測定したクレータ部の総面積が測定表面積に占める割合（これをテクスチャ面積率と呼ぶ）を評価した。工作物送り速度とテクスチャ面積率の関係を図6に示す。図中には、工作物表面の顕微鏡写真を合わせて示す。工作

図7 送り速度とテクスチャ面積率

図9 送り速度とクレータ直径

図8 送り速度とクレータ深さ

図10 表面仕上げ前後のテクスチャ表面状態

物送り速度の増大に伴ってテクスチャ面積率は減少した。特に、工作物送り速度が0.125 mm/s から0.00167 mm/s に減少する際に、テクスチャ面積率が急激に増大していることがわかる。これは、工作物送り速度が小さくなると、クレータ周辺の盛り上がり部との放電間隙が小さくなり放電が集中することが原因と考えられる。

図6の結果から、工作物送り速度によってテクスチャ面積率を制御できる可能性が示された。また、得られたテクスチャ面積率は、おおよそのクレータの大きさとともに、摩擦係数を低減できる可能性がある範囲を含むものと考えられた。そこで、より詳細に、加工条件とテクスチャ表面性状の関係を検討した。図6の結果から、工作物送り速度は急激な変化が現れた低送り速度領域の条件とした。

表面性状の観察結果から、工作物送り速度とテクスチャ表面性状の関係を整理した。図7に、工作物送り速度とテクスチャ面積率の関係を示す。いずれの放電電流値においても、工作物送り速度の減少とともにテクスチャ面積率は大きくなった。すなわち、工作物送り速度および放電電流によってテクスチャ面積率が制御できることが示された。図8に、工作物送り速度とクレータ深さの関係、図9に、クレータ直径との関係をそれぞれ示す。クレータ深さおよびクレータ直径とも、工作物送り速度が小さくなるとともに、徐々に増大している。また、放電電流が大きくなるとクレータ深さ、クレータ直径ともに増大している。これは、工作物送り速度や放電電流が大きくなると放電エネ

ルギーが大きくなるためと考えられる。しかしながら、図8や図9において、電流値とクレータ深さやクレータ直径の関係は、必ずしも一定の傾向を示すとは限らず、ばらつきが生じている。この原因として、実験ごとのふれまわり挙動のばらつきや工具電極の突出量の変化などが起因しているものと考えられる。

4. 表面仕上げ後のテクスチャ表面性状

前述のように、放電テクスチャリング後にはクレータ周辺に数 μm 程度の盛り上がりが発生する。この盛り上がり部は摩擦係数の低減にとって重大な悪影響を及ぼす。そのため、放電テクスチャリング後には必ず盛り上がり部を除去するための表面仕上げが必要となる。そこで、放電テクスチャリング後、半割した工作物内面を平均粒径 $2\mu\text{m}$ のアルミナラッピングフィルムを用いて表面仕上げを行い、盛り上がり部除去前と除去後の表面性状を比較した。図10に放電電流4 Aのときの表面仕上げ後の表面SEM写真を示す。表面仕上げによって盛り上がり部が除去されていることがわかる。一方で、クレータ直径やクレータ深さも小さくなっていることが伺える。図11に工作物送り速度とテクスチャ面積率の関係を示す。テクスチャ面積率は表面仕上げ前後で大きく変化していない。これは、クレータ面積率が表面とほぼ同一面のクレータ口元の面積を測定しているため、表面仕上げによって盛り上がり部が優先的

図11 送り速度と表面仕上げ前後のテクスチャ面積率

図12 送り速度と表面仕上げ前後のクレータ深さ

に除去された結果と考えられる。図12に工作物送り速度とクレータ深さとの関係を示す。クレータ深さは表面仕上げによって大きく変化し、表面仕上げ代相当の深さが減少している。本実験では、1~2 μm 程度の除去量で表面仕上げが行われていることがわかる。しかしながら、クレータ直径は表面仕上げ前後で大きく変化しなかった。これは、テクスチャ面積率の結果からも理解できる。

5. 放電テクスチャによる摩擦低減効果

これまで、放電テクスチャリングによる基本的な加工特性について述べてきた。ここでは、放電テクスチャを施した表面の摩擦特性の評価の例として、ボールオンディスク試験による結果を述べる。図13は、テクスチャを施していない試験片（テクスチャなし）と3種類のテクスチャ面積率で加工した試験片（4%、6%、12%）において、摺動速度ごとの摩擦係数を測定した結果である。テクスチャなしに対して、テクスチャありの場合には、テクスチャ面積率によって摩擦係数の低減効果に差があった。すなわち、テクスチャ面積率4%、12%の試験片では、テクスチャなしの試験片より摩擦係数は大きくなり、6%の試験片では小さくなった。これは、テクスチャ面積率によって、真実接触面の圧力変化およびクレータの油保持能力の変化の相

図13 放電テクスチャによる摩擦低減効果

乗作用によって、油膜形成能力が決定されるためと考えられる。すなわち、摺動条件によって最適なテクスチャ表面性状が存在するということであり、テクスチャの摩擦低減効果を体系的に論じるためには、今後多くの詳細な検討が必要であろう。

6. おわりに

ふれまわり放電加工による小径穴内面のテクスチャリングについて、開発したテクスチャリング法の概要、テクスチャリング特性、および摩擦特性の評価の一例についても述べてきた。今後、さらに詳細にテクスチャ表面性状と摩擦特性の関係を検討し、硬質小径穴内面の摩擦特性の改善を図って行きたい。本稿が表面機能制御技術の進展の参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) V. Lertphokanont, et. al.: Surface Quality of Textured Surface on Cylindrical Inner Surface Using Whirling Electrical Discharge Texturing, *Advanced Materials Research*, **797** (2013).
- 2) V. Lertphokanont, et. al.: Development of Whirling Electrical Discharge Texturing on Inner Surface of Small Hole, *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, **7**, 4 (2013).
- 3) V. Lertphokanont, et. al.: Effect of Discharge Duration and Pulse Frequency on Surface Characteristics of Textured Surface Using Whirling Electrical Discharge Texturing, *Proceedings of the 7th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century*, (2013).

太田 稔

1997年東北大学大学院工学研究科博士後期課程修了。博士（工学）。研究内容は微細加工による高機能表面創成に関する研究、超多機能多工程集約複合加工機の開発。著書は「微細構造から考える表面機能」（森北出版）など。