

# マイクロフォームローリングによる 自由曲面の微細テクスチャリング

京都工芸繊維大学 機械工学系  
教授 太田 稔

(平成 26 年度一般研究開発助成 AF-2014014)

キーワード：マイクロフォーミング，微細テクスチャリング，自由曲面

## 1. 研究の目的と背景

部品表面に微細構造を形成することによって、さまざまな表面機能が発現されることが知られている。その一つに、摺動部品の摩擦低減機能がある。摺動部品の表面に微細な凹凸を付与することで摩擦低減をはかることができる。摺動部品に多く用いられる金属部材の表面に微細凹凸形状を付与する有効な手法として、微細塑性加工技術がある。微細塑性加工による微細構造創成に関する研究では、平面への塑性加工の例が多く、曲面に対する微細構造創成の研究例はほとんど見られない。しかしながら、各種ジョイントや医療用関節機構部品などでは曲面形状をもつ部品が多く、プレス金型などでは複数の平面や曲面をもつ複合曲面を有している。これらの自由曲面や複合曲面への微細テクスチャリング技術を開発できれば、新たな塑性加工の未来を切り拓くことができる。

筆者らは、平面や円筒外周面などに微細テクスチャを施す方法として、「マイクロフォームローリング (Micro Form Rolling, 以下 MFR と呼ぶ)」法を開発したり、そこで、自由曲面に対して微細テクスチャを施すことができる方法として、MFR 法を進化・発展させることを考えた。本研究では、MFR 法の定圧転動コンセプトを維持しながら、3 次元自由曲面に対応するために、工具としてボール工具を用いた微細塑性加工法を開発する。すなわち、微細構造を付与したボール工具を、工作物に一定の荷重で押付け、工作物の表面形状に沿って転動させることで、自由曲面の表面に微細形状を形成する新たな方法を開発することを目的とする。

## 2. マイクロフォーミングによる微細テクスチャリング

工作物表面に微細塑性加工によって微細テクスチャを加工する方法を総称してマイクロフォーミング (Micro Forming) と呼ぶ。マイクロフォーミングには工具を工作物に一方から押込むプレス方式、工具を回転させるローリング方式がある。筆者らは、前述のように円筒形状等に対応できる微細塑性加工法として、MFR 法を考案した。MFR 法の加工原理を図 1 に示す。MFR 法では外周

にマイクロメートルオーダーの微細構造を有するローラ工具を用いる。ローラ工具を工作物に定圧で押付け、工作物を一定方向に送る、または回転させることによって、ローラ工具をつれ回り回転させ、ローラ工具外周面の微細構造を工作物に転写する。MFR 法では、ローラ工具の外周面微細構造を変更することによって、さまざまな形状やパターンの微細テクスチャを施すことができる。MFR 法に用いる MFR 装置の概要図と外観写真を図 2 に示す。MFR によって微細形状深さ数マイクロ～数百ナノメートルオーダーの微細周期構造の創成に成功したり<sup>2)3)</sup>。しかしながら、MFR 法ではローラ形状の工具を用いることから、加工方向が 1 方向だけであること、工作物の形状が平面および円筒形状に制限されるなどという問題がある。

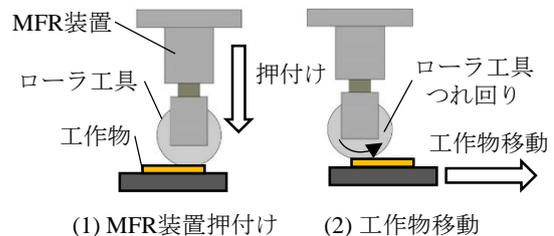


図 1 MFR 法による加工

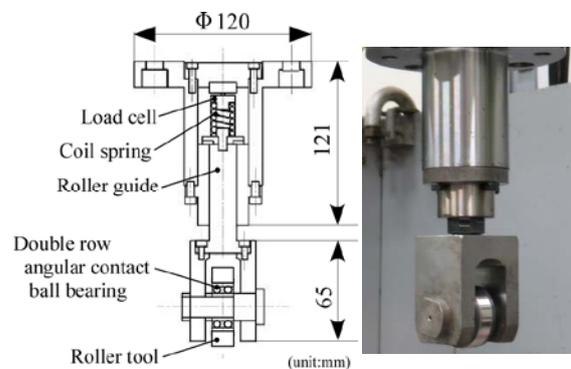


図 2 MFR 装置の概要図と外観

そこで、新たな加工法として、「マイクロボールフォーミング (Micro Ball Forming, 以下 MBF と呼ぶ)」法を考案した<sup>4)</sup>。MBF 法の加工原理を図 3 に示す。MBF 法では外周面に微細構造を有するボール形状の工具を用いる。このボール工具を任意の荷重で工作物に押付け、工作物の表面形状に沿ってつれ回りをさせながら移動させ、ボール工具外周面の微細構造を工作物に転写させる加工法である。ボール形状の工具を使用することにより、ローラ形状の工具と違い回転方向に制限がなくなり、自由曲面に適用可能となる。

### 3. マイクロボールフォーミング (MBF) 装置の開発

#### 3.1 MBF 装置の製作

まず、MBF 法を実現するための MBF 装置の開発を行った。MBF 装置のコンセプトを以下に示す。

- ① ボール工具の自由回転を可能とする流体保持機構
- ② 工作物表面の形状精度の影響を低減する定圧機構
- ③ 汎用の工作機械主軸に取付け可能

コンセプトに基づいて設計した MBF 装置の概要図と製作した MBF 装置の外観写真を図 4 に示す。自由回転を可能とするボール工具の保持方法として、静圧効果を利用した流体保持機構を採用した。油圧ポンプにより加圧された流体を MBF 装置の給油口より流入して、ボール工具保持部まで流して保持する仕組みとした。ボール工具を工作物表面に定圧で押付ける機構として、コイルスプリングとローラガイドを使用した。これにより、工作物のうねりなどの表面形状の影響を低減することができる。また、ロードセルを内蔵しているため、加工中の荷重を計測することが可能である。MBF 装置は、汎用性を高めるために汎用テーパホルダーを介して工作機械主軸に取付けられる。本報では、主軸テーパ BT40 のマシニングセンタ (NVX-5080, DMG 森精機製) に対応した取付けホルダーとした。

#### 3.2 ボール工具

焼入れ鋼などの高硬度金属材料に対応できるように、

直径 10 mm の窒化ケイ素球をボール工具として用いた。ボール工具表面への微細形状の加工には、マシニングセンタ主軸に取付けたファイバー導光式ナノ秒パルスレーザー装置 (スペクトロニクス製) を用いた。図 5 に、ボール工具表面へのレーザー微細加工の様子を示す。ボール工

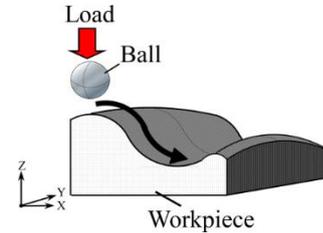


図 3 MBF 法の原理

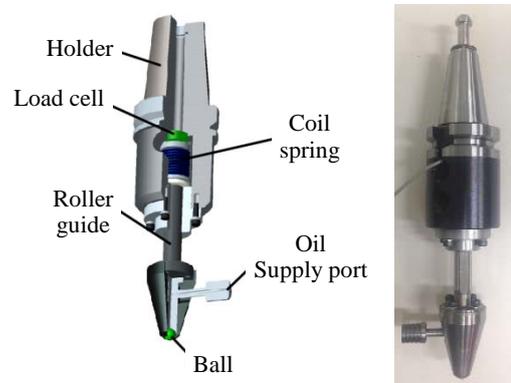


図 4 MBF 装置の概要図と外観

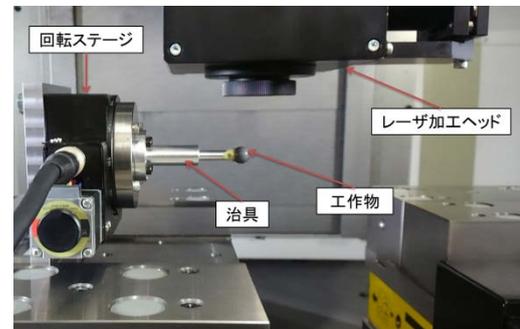


図 5 ボール工具表面へのレーザー微細加工

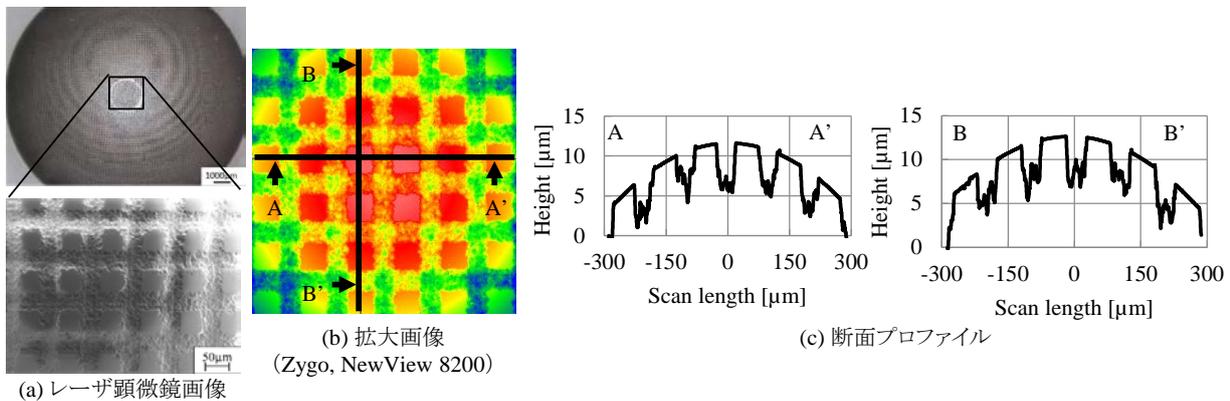


図 6 ボール工具表面の微細構造

具全周面への微細形状の加工は以下の方法により行った。ボール工具表面の  $5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$  を 1 区画の加工面として、ボール工具全周面を 6 区画に分けたうえで、5 区画目までを 2 軸回転テーブルの制御により加工し、その後、ボール工具を取付け直して最後の 1 区画を加工した。図 6 に、ボール工具表面に加工した微細構造を、レーザ顕微鏡(VK-X200, KEYENCE 製)で観察した画像、および非接触式表面形状粗さ測定機 (New View 8200, Zygo 製, 以下 Zygo と呼ぶ) で拡大観察した画像と断面プロファイルを示す。ピッチ  $100\text{ }\mu\text{m}$ 、突起高さ約  $5\text{ }\mu\text{m}$ 、突起幅約  $50\text{ }\mu\text{m}$  の周期的な微細突起が確認できる。前述の加工方法では、各区画の境界は一律な微細突起にはならないが、本手法によって、約 85% 程度の面積率で周期的な微細突起を形成できた。

### 3.3 MBF 装置の基礎特性

設計・製作した MBF 装置の基本性能を確認するため、単純押し込み実験を行った。工作物材料として A5052, SUS304, 純チタンを用いた実験を行ったが、ここでは代表例として SUS304 に対する押し込み実験の結果を示す。実験では、油膜が形成される油圧と押し込み荷重の関係、押し込み荷重が微細加工痕形状に与える影響を明らかにする。工作物である SUS304 の表面粗さは  $Ra\ 0.02\text{ }\mu\text{m}$  以下とした。油膜の確認方法としては、ボール工具を保持している油膜を MBF 装置内で直接計測することが困難であるため、間接的に油膜が形成された量について計測することとした。図 7 に油膜確認実験の様子を示す。油膜厚さは図 8 に示すように、油圧を付加した状態におけるそれぞれの押し込み荷重時の MBF 装置の基準面の高さの差を分解能  $1\text{ }\mu\text{m}$  のダイヤルゲージによって測定した。

図 9 に油膜形成確認実験の油圧と油膜厚さの関係を示す。ばね定数  $15.0\text{ N/mm}$  の場合、油圧  $0.5\text{--}2.0\text{ MPa}$  で油膜厚さは最大約  $25\text{ }\mu\text{m}$  であった。ばね定数  $39.2\text{ N/mm}$  の場合、油圧  $2.0\text{--}3.0\text{ MPa}$  で油膜厚さは最大約  $28\text{ }\mu\text{m}$  であった。また、A5052 の実験では、ばね定数によらず油圧が増加するとともに、ばらつきは小さくなったが、SUS304 の実験では、ばね定数が小さいときには同様の傾向を示したが、大きいときには異なる傾向を示した。これは工作物硬さが大きくなると荷重が大きくなり油膜が安定しにくくなることによるものと考えられる。図 10 に油圧と荷重の関係を示す。荷重の測定値は油膜が切れる直前の値を 3 分力動力計 (9122AA, KISTLER 製) で読み取ったものである。油圧の増加とともに荷重も増加していることがわかる。また、油膜が切れる直前の荷重はばね定数に依存せず、油圧と荷重の関係で決まることがわかる。以上の結果から、微細形状を付与したボール工具においても、油圧と荷重を制御することで油膜が形成される条件が存在し、MBF 装置の流体によるボール工具保持機構が機能することがわかった。

図 11 に、油圧と微細形状高さの関係を示す。微細形状高さは、ボール工具表面の微細突起の押し込みによる転写

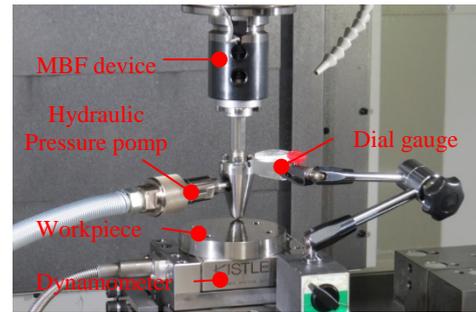


図 7 油膜確認実験の様子

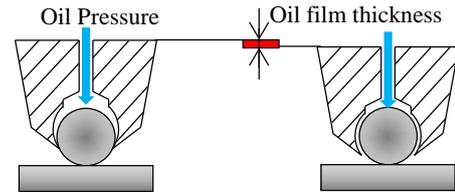


図 8 油膜厚さの測定

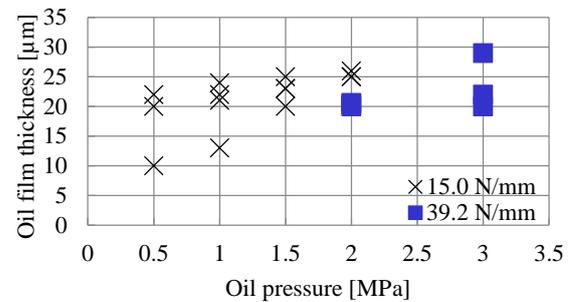


図 9 油圧と油膜厚さの関係

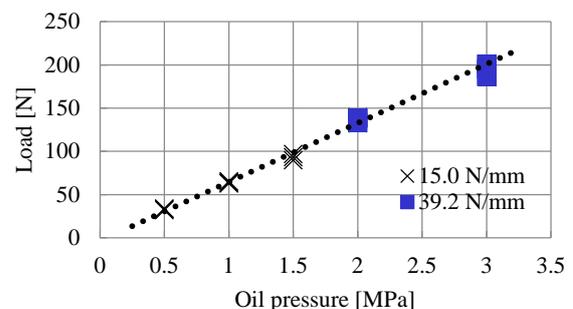


図 10 油圧と荷重の関係

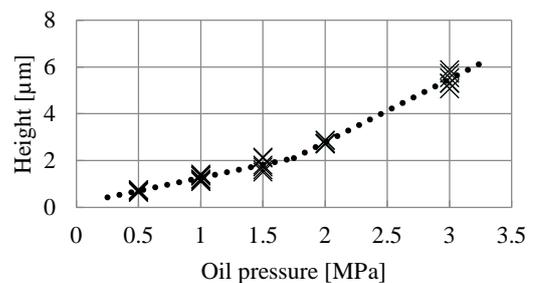


図 11 油圧と微細形状高さの関係

痕からの微細形状の盛り上がり高さとした。油圧の増加とともに微細形状高さも増大していることがわかる。また、図中で傾きが変化している傾向が読み取れる。これは、油圧 1.5 MPa までは微細突起のみの押し込みによって微細形状が形成され、2 MPa 以上では、ボール工具の外周形状も転写されることによって生じた現象である。

図 12 に、代表的な押し込み痕の微細構造の観察結果を示す。ボール工具の微細突起形状が明瞭に転写されていることがわかる。ボール工具の突起部高さ約 5  $\mu\text{m}$  に対して微細形状深さは約 2  $\mu\text{m}$  であった。赤色線はボール工具の推定押し込み位置を示す。以上のことから、MBF 装置の基礎特性を確認でき、荷重と油圧の制御によって、加工される微細形状を制御できることがわかった。

次に、工作物表面に沿ってボール工具がつれ回り回転しながら、ボール工具の微細突起形状を工作物に転写できるかどうかを確認した。SUS304 の板材を直線的に動かすことによって、微細構造を有する溝を創成する実験を行った。本実験では、ボール工具に付与した微細突起の位置決めを行うことができなかったため、加工痕の微細形状はランダムな方向に加工される。

図 13 に SUS304 を用いた溝創成実験の代表例として、油圧 1.5 MPa および 3.0 MPa、送り速度 120 mm/min の加工痕の画像と断面プロファイルを示す。微細構造を有する溝が形成されていることがわかる。特に、図 13(1)で頭

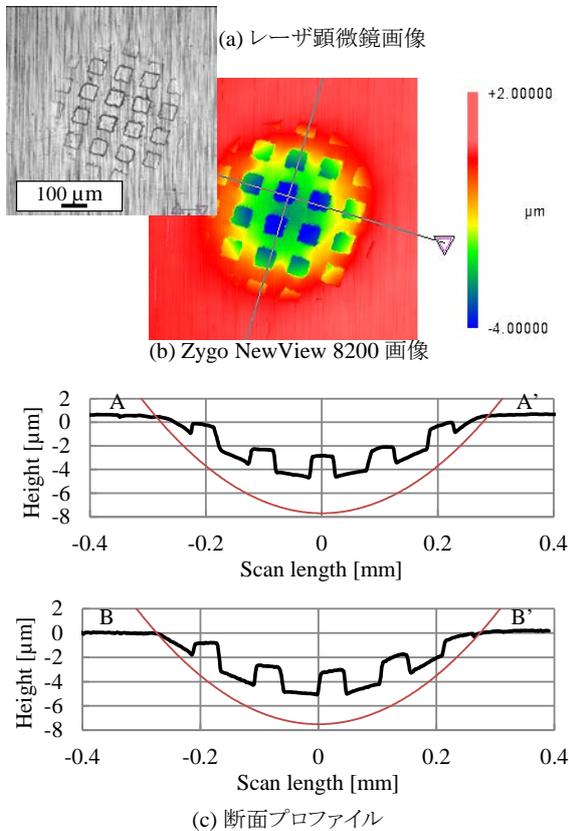
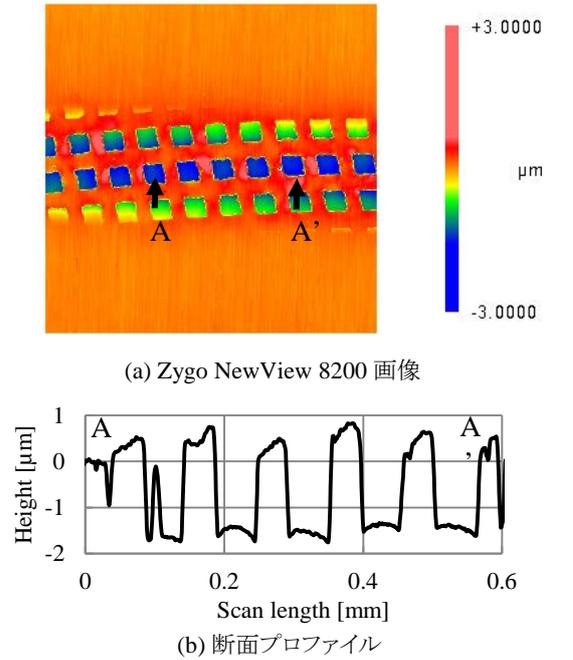
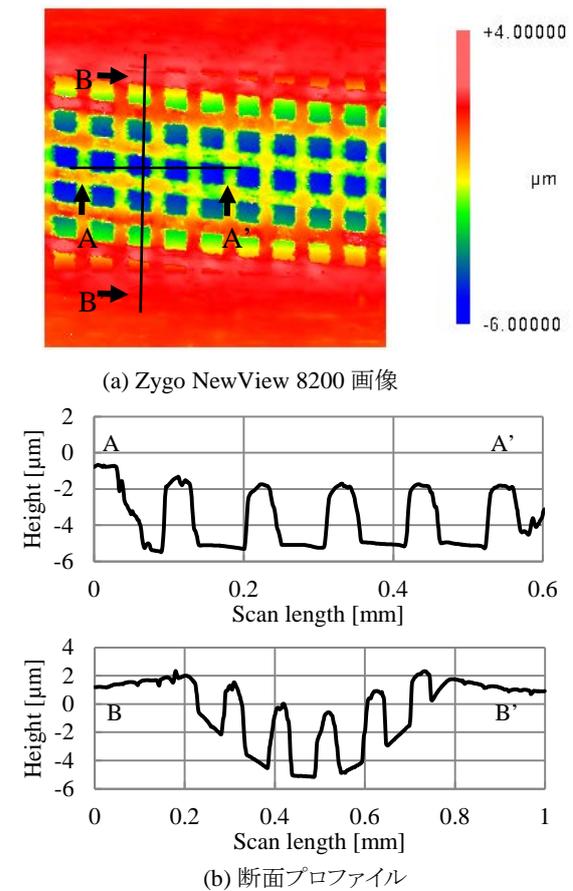


図 12 押し込み痕の微細構造 (SUS304, 油圧 3 MPa)



(1) 油圧 1.5 MPa, 送り速度 120 mm/min



(2) 油圧 3.0 MPa, 送り速度 120 mm/min

図 13 溝創成実験における加工痕の観察

著なように、加工された微細溝間の盛り上がりは回転方向の前後で非対称になっていることがわかる。これは微細構造を加工する際に生じる摩擦の影響であると考えられる<sup>5)</sup>。以上の結果より、製作した MBF 装置が流体保持機構によってボール工具を保持し、つれ回りによる回転によって工作物表面に微細構造を転写できる基本性能を有していることが確認できた。

#### 4. MBF による微細テクスチャリング

##### 4.1 平面への微細テクスチャリング

送り方向に垂直にピッチを与えることで、平面の微細テクスチャリングを試みる。本実験では SUS304 板材を工作物として、加工面積  $3 \times 3$  mm の部分に、**図 14** のような工具軌跡を適用した。ピッチは  $0.3$  mm として、溝が重なる場合と重ならない場合の加工痕に与える影響を調査した。**図 15** に油圧  $3.0$  MPa、送り速度  $60$  mm/min の場合の加工痕の画像と断面プロファイルを示す。溝の加工深さは押し込み実験および溝創成実験の加工深さと同程度であった。また、各条件で形成された画像を比較すると微細構造は重ならず、ボール工具に付与した微細形状が転写されていた。これらの結果からピッチを与えて連続して双方向に溝を加工することで微細構造を有する平面の創成を行うことができることがわかった。また溝を重ねるようにピッチを与えた場合、材料流動によって加工深さにはばらつきが生じ、送り方向から断面を見ると中凸形状になることが明らかになった。溝を重ねずに微細構造を有する面を加工する場合は、材料流動による影響を受けずに均一な加工深さの微細構造を有する平面を創成できた。

##### 4.2 自由曲面への微細テクスチャリング

自由曲面に対して MBF を行い、微細構造の創成が可能であるかを調査する。**図 16** に、自由曲面に対する微細テクスチャリング実験の工具軌跡を示す。工作物は球半径  $40$  mm の凸曲面 3 箇所と  $20$  mm の円弧を直線でつなげた形状とした。**図 17** に MBF によって加工された工作物の外観写真、レーザ顕微鏡画像および Zygo 観察画像と断面プロファイルを示す。工作物表面の白く曇りがかかっている部分は微細構造が創成された部分である。工作物表面に微細構造が創成できていることがわかる。また、微細構造は工作物表面に沿って創成されていることがわかり、その微細構造の高さは  $3 \mu\text{m}$  程度であった。このことから自由曲面に対しても微細構造が創成できることが明らかになった。また、**図 17** で確認できる滑り痕は、ボール工具表面に微細突起が形成されていない部分によって起きたものである。この滑りを解決するにはボール工具全周面に微細形状を付与する必要がある。また、平面への微細構造創成実験では工作物に対して垂直にボール工具を押付けることができたが、自由曲面を持った工作物に対して X、Y、Z の 3 軸を用いた加工では垂直にボール工具を押付けることができなかった。そのため

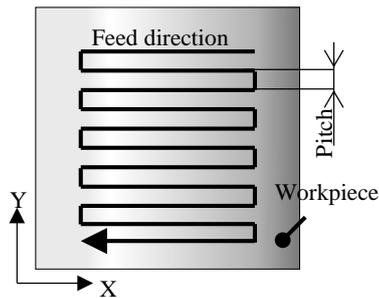
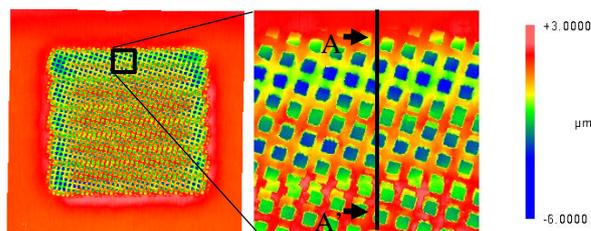
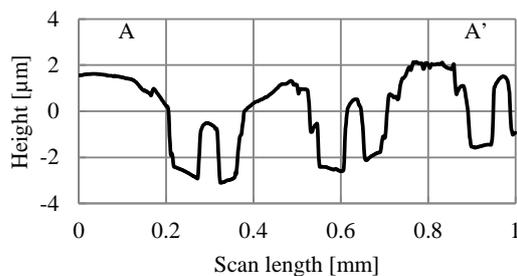


図 14 平面への微細テクスチャリング実験の工具軌跡



(a) Zygo NewView 8200 画像



(b) 断面プロファイル

図 15 平面の微細テクスチャの観察  
(油圧  $3$  MPa、送り速度  $60$  mm/min)

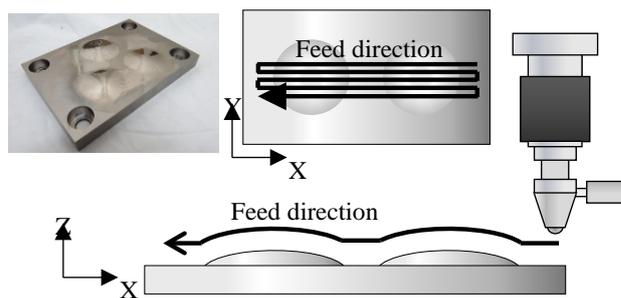


図 16 自由曲面に対する微細テクスチャリング実験に用いた工作物と工具軌跡

ボール工具と工作物が接触する面は、ボール工具の底面ではなく側面で接触する部分が存在したため滑りが生じたと考えられる。工具全周面への微細構造の加工および工作物の曲面の垂直方向からボール工具を押付けることは、いずれも 5 軸加工機を用いることによって解決できると考えている。

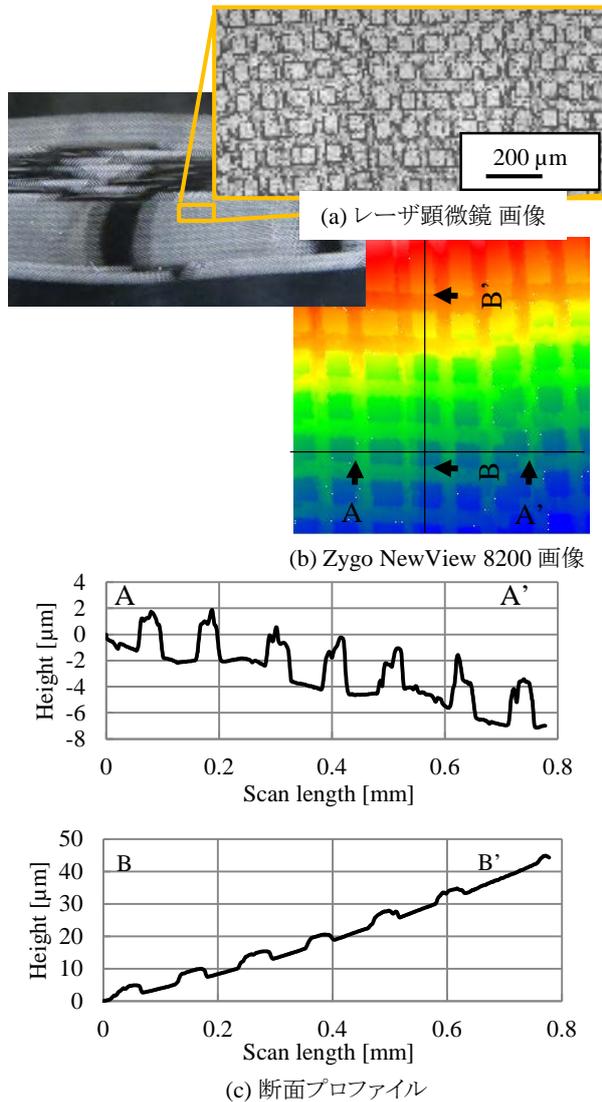


図 17 自由曲面の微細テクスチャの観察  
(油圧 3 MPa, 送り速度 240 mm/min)

## 5. 結言

本研究では、自由曲面への微細テクスチャリングを可能とする方法として、MFR 法を進化・発展させた MBF 法を考案し、MBF 装置を設計・製作した。さらに、MBF 装置により、自由曲面への微細テクスチャリングを試みた。得られた研究結果の概要を以下に示す。

- (1) 流体保持機構によってボール工具を保持し、曲面に沿って定圧で加工を行うことが可能な MBF 装置を開発した。
- (2) MBF 装置に取付ける微細構造付きボール工具を製作した。ファイバー導光式ナノ秒パルスレーザを用い

て、直径 10mm の窒化ケイ素球の表面に、突起高さ約 5 μm、ピッチ 100 μm、突起幅約 50 μm で面積率 85% 程度を有する微細構造を加工できた。

- (3) 微細突起を有するボール工具でも、MBF 装置の流体保持機構により油膜が形成されることがわかった。また、直線的に動かす溝加工実験により、良好なつれ回り性能を有していることが確認でき、開発した MBF 装置が微細テクスチャリングに適用できる基本性能を有していることがわかった。
- (4) 平面に対して送りとピッチを与える方法で、加工面全面に微細構造が転写されることを明らかにした。
- (5) 自由曲面に対する微細構造創成を試みて、ボール工具表面に微細突起が付与されている部分では良好な転写が行われ、自由曲面に対して微細テクスチャリングが可能であることが実証できた。

## 謝 辞

本研究は、公益財団法人天田財団 2014 年度一般研究開発助成より支援を受けて行われました。記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) M. Ota, T. Nakayama, T. Nanbu and Y. Yasuda: Novel Microsurface Machining Techniques for Improving the Traction Coefficient, SAE Technical Paper Series, 01-0414 (2008).
- 2) T. Tsuji, M. Ota, K. Yamaguchi, Y. Fukutomi and Y. Uehara: Micro Cyclic Structuring using Micro Nano Form Rolling, Proceedings of International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century, 3241, CD-ROM (2011).
- 3) Y. Uehara, M. Ota and T. Nanbu: Three-Dimensional Micro-Texturing Technology Using Micro Form Rolling, Journal of the Japan Society for Abrasive Technology, Vol. 57, No. 12 (2013), pp. 32-35.
- 4) Takeshi NAKANO, Koki MAEDA, Minoru OTA, Kai EGASHIRA, Keishi YAMAGUCHI and Yoshitaka UEHARA, Developed Micro Ball Forming device to produce microtexture on curved surface, Proceedings of 16<sup>th</sup> International Conference on Precision Engineering, USB (2016).
- 5) Y. Masato and T. Kuwabara: Effects of Machine Suiffness on Imprinting Ability of Microgrooves, Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity, Vol. 49, No. 570 (2008), pp. 680-685.