

5 軸複合加工機を活用したマイクロボールフォーミングによる 機能性インプラントの開発

京都工芸繊維大学 機械工学系

准教授 山口 桂司

(2022 年度 奨励研究助成 (若手研究者枠) AF-2022037-C2)

キーワード：微細塑性加工，工作機械，医療用インプラント，テクスチャリング

1. 研究の目的と背景

高齢化の進行が非常に大きな社会問題になっている昨今，高齢者の生活レベルの改善などのために人工関節や人工骨，人工血管などのインプラントの需要が高まっている．インプラントに使用されるさまざまなバイオマテリアルの中でも，Ti-6Al-4V 合金は極めて優れた生体適合性を有するほか，軽量で耐食性が高く，力学的強度も優れるなどの特徴から，今後ますます用途が広がると予想される．一方，他の金属系バイオマテリアルと比較すると耐摩耗性が低く，摺動面で生じる摩耗粉がインプラント周辺の骨溶解などを引き起こすことがある．摺動面の摩擦摩耗特性を改善する方法のひとつに微細テクスチャリングがある．筆者らは，過去の研究において面積率数%のマイクロディンプルを形成することで，とくに境界潤滑から混合潤滑の領域において摩擦係数を低減する効果が得られることを明らかにしている¹⁾．大きな荷重を支える人工股関節などにおいては境界潤滑に近いと考えられ，Ti-6Al-4V 合金に対してもテクスチャリングの効果が期待できる．また，インプラントに要求される機能のひとつに生体骨との密着性が挙げられる．生体骨との密着性を改善するために，プラスト加工やプラズマスプレー，3D プリンティングなどの手法によってインプラント表面に微細構造を付与することが行われる．しかしこれらの手法では，表面に残留異物が存在することや，熱影響が避けられないなどの課題が報告されている²⁾．

筆者らは，これまでに微細塑性加工を応用したマイクロボールフォーミング (Micro Ball Forming: MBF) 法を開発した³⁾．本手法は，図 1 に示すように，表面に微細構造を有する硬質球 (以下，ボール工具と称す) を工作物に一定の荷重で押し付け，工作物表面に倣って移動させてボール工具を従動 (つれ回り運動) させることで，ボール工具表面の微細構造を工作物表面に転写する手法である．工具が球体であるため回転方向に制限がなく，自由曲面に対して加工が可能である．また微細塑性加工によるテクスチャリングのため残留異物や，熱影響がほとんど生じず，圧縮の残留応力を付与できるなどの利点がある．これまでの研究において，MBF 法を実現するための加工ユニット (以下，MBF ユニットと称す) を製作し，MBF 法の可能性を明らかにした．

本研究では，工作物形状の自由度を飛躍的に向上させる

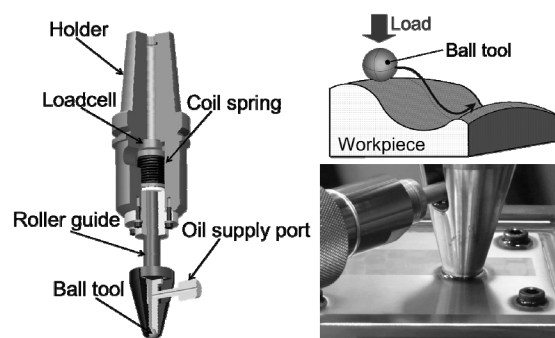


図 1 MBF ユニットの模式図および MBF 法の概要

ため，5 軸複合加工機を使用した MBF 法を試みた．また，MBF 法における材料の変形の様子を可視化するため，有限要素解析を実施した．さらに，Ti-6Al-4V 合金に対して MBF 法によって微細構造を付与し，骨芽細胞成長性に対する影響を評価した．

2. 5 軸複合加工機を用いた MBF 法

2.1 実験方法および実験条件

これまでの研究では，3 軸のマシニングセンタを使用して MBF 法を実施していた．比較的小さな形状や傾斜には追従してテクスチャリングできていたものの，工作物表面の傾斜が大きくなると MBF ユニットとの干渉が生じる，ボール工具を押し付ける角度が主軸方向から大きくずれることで十分な荷重が得られないなどの課題があった．そこで本研究では，5 軸複合加工機 (NTX1000, DMG 森精機(株)製) を使用した MBF を試みた．表 1 に実験条件を示す．工作機械への負荷を考慮し，工作物は比較的低荷重でテクスチャリングが可能なアルミニウム合金 (A5052) とした．直径 50 mm の丸棒先端を SR25 mm の球面状に切削し，続けて MBF 法によるテクスチャリングを実施した．工作物の回転数は

表 1 5 軸複合加工機を使用した
MBF 法の実験条件

荷重	50 N
工作物回転数	20 min ⁻¹
油圧	1.0 MPa
工作物材料	A5052
ボール工具材料	Si ₃ N ₄

50 min⁻¹とし、工作物の軸に対して90° から10° まで10° 間隔で同心円状にテクスチャリングを施した。図2に実験の様子を示す。工作物主軸に工作物を把持し、工具主軸にMBFユニットを装着した。MBFユニットに供給する油圧油は外部から供給した。

2.2 5軸複合加工機を使用したMBF法によるテクスチャリング実験の結果

図3にテクスチャリング後の工作物を光学式3Dプロファイラ（NewView8200, ZYGO社製）によって計測した結果を示す。それぞれの角度は工作物主軸方向を0°とした際の工具主軸の角度である。すべての角度において矩形の窪みが形成できており、5軸複合加工機がMBF法と非常に親和性が高いことが明らかである。令和6年度までの研究では、工具主軸は割り出し機能によって角度を固定し、工作物の球面上に同心円状にテクスチャを施した。今後は、全軸を同期させて連続でテクスチャリングを試みる。また、単純な球面ではなく、複雑な3次元形状、例えば人工大腿骨などの製作を実施したい。

3. 有限要素法を用いたMBF法の変形挙動の可視化

3.1 ローラ工具による基礎検討

有限要素法を実施するにあたり、形状が比較的単純なローラ状の工具に関するシミュレーションを実施し、基礎的な検討を行った。筆者らはMBFの他にもマイクロフォームローリング（Micro Form Rolling, MFR）法も開発済みであり、実験結果との比較を行うことで解析の妥当性を評価した。表2に解析条件を示す。ソフトウェアには市販の解析ソフトであるSimufact.Forming2020を使用した。ローラ工具およびマスタープレートは剛体、工作物のみを弾塑性体として取り扱った。荷重は実験と同様の荷重3パターンで解析を実施した。

図4に解析結果と実験結果を重ねて示した。これらの結

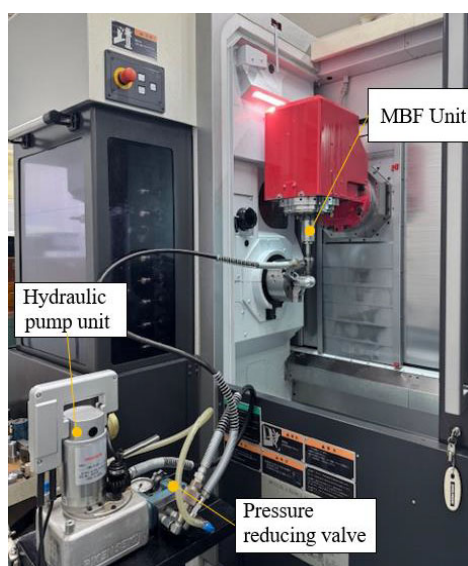


図2 複合加工機を使用したMBFの様子

果より、いずれの荷重においても解析結果が実験結果とよく一致していることがわかる。一方、溝上端部の角部の形状が解析では丸みを帯びており、実験結果とやや乖離している。これは、解析時のメッシュサイズが形状に対して大きく、リメッシュが行われる際に微細な形状が失われたためと考えられる。ただし、角部以外は極めてよく一致していることから、十分な精度で解析ができていると判断した。

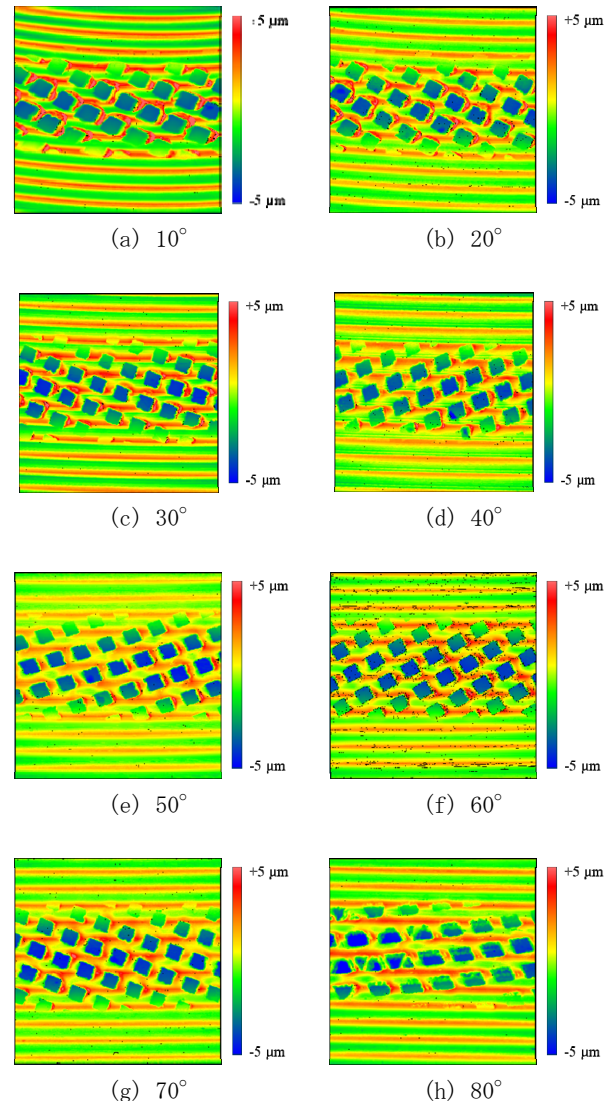
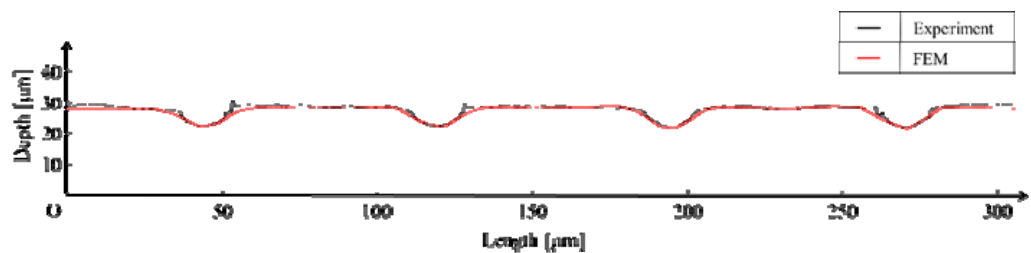


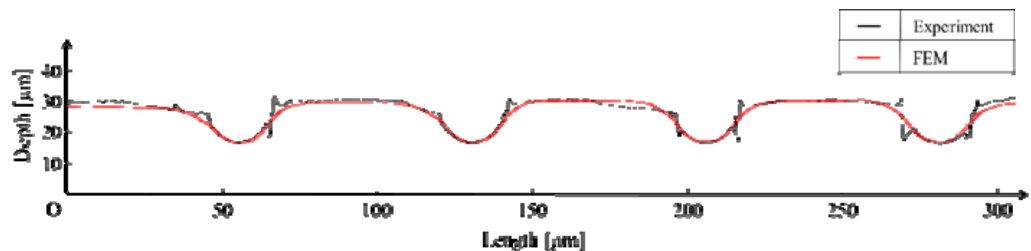
図3 5軸複合加工機を使用してMBFによるテクスチャを施した工作物表面の測定結果

表2 MFR法における解析条件

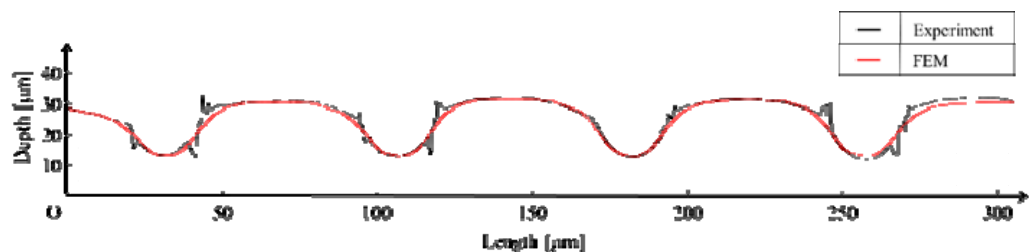
ソフトウェア	Simufact.Forming	
ローラ工具	剛体	
マスタープレート		
工作物	タイプ	弾塑性体
	材質	A5052
摩擦係数	0.5	
工具送り速度	5000 mm/min	
荷重	105, 200, 275 N	



(a) 105 N



(b) 200 N



(c) 275 N

図 4 MFR 法の有限要素解析結果

3.2 MBF 法の有限要素解析

前節の MFR 法の有限要素解析を参考にして MBF 法の有限要素解析を試みた。Simufact.Forming では、2 軸以上の回転を伴う解析ができないため、ボール工具の自由な回転を模擬できない。したがって、ここではボール工具表面に形成された微細構造と同じ向きに転がす条件で解析を行った。ボール工具は剛体として取り扱い、計算コスト削減のため図 5 に示すようにボール工具の一部のみを使用して解析を試みた。表 3 に解析条件を示す。工作物は Ti-6Al-4V 合金とし、ソフトウェアに内蔵されていた材料データを使用した。送り速度は 480 mm/min とし、荷重を変化させた。

図 6 に解析結果および実験結果の加工痕深さをまとめた。図中の色は使用したボール工具の種類を示しており、微細構造の大きさが異なる 3 種類を使用した。また、塗りつぶしのプロットが解析結果、白抜きプロットが実験結果を表している。プロットの判別を容易にするため解析結果をマイナス側に、実験結果をプラス側にシフトして示した。この図より、解析結果による加工痕深さは実験結果と比較的よく一致していることがわかる。ただし、実験ではボール工具の向きを制御することができないため、送り方向と加工痕の向きが不一致であることは考慮する必要がある。

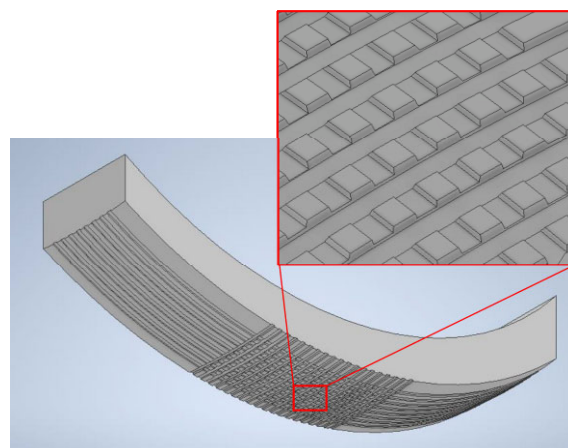


図 5 解析に使用したボール工具の 3D モデル

表 3 MBF 法における解析条件

ソフトウェア		Simufact.Forming
ボール工具		剛体
工作物	タイプ	弾塑性体
	材質	Ti-6Al-4V 合金
摩擦係数		0.5
送り速度		480 mm/min
荷重		150, 200, 250 N

ある。令和6年度までの研究では、解析の妥当性を判断するまでにとどまっている。今後、加工中の材料の流動の様子等を可視化し、MBF法における変形挙動を明らかにする。

4. MBF法によるテクスチャリングが骨芽細胞成長性に与える影響

MBF法によるテクスチャリングが骨芽細胞成長性に与える影響を評価するため、Ti-6Al-4V合金表面にMBF法によってテクスチャを施した試験片を製作し、骨芽細胞KUSA-A1を培養するcell counting試験を行った。

図7に培養試験の結果を示す。図中のグラフは、培養に使用した液体の吸光度をまとめたものであり、吸光度が高いほど骨芽細胞が多く存在することを示している。図中のA～Fはボール工具の種類を示しており、微細構造の大きさが異なる計6種類のボール工具を使用した。またXはテクスチャを施していないTi-6Al-4V合金を使用した結果、+は培養前の骨芽細胞入り培養液、-は骨芽細胞なしの培養液のみの吸光度を表している。図より、テクスチャを施すことでテクスチャなしのXより吸光度が高くなっていることがわかる。したがって、MBF法によるテクスチャリングが骨芽細胞の成長性に効果的であることを実証した。

グラフの周辺に記載した写真は、培養後の試験片表面をレーザー顕微鏡で観察した結果である。いずれもMBF法によって形成された窪みに集中的に骨芽細胞が付着している様子が認められる。この結果から、骨芽細胞がテクスチャによってトラップされ、その細胞を起点として増殖を促す効果が表れたと考えられる。

5. 結言

本研究では、MBF法に関する複数の研究を実施した。得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 5軸複合加工機を使用することで、球面の広い範囲にMBFによるテクスチャリングが可能であることを実証した。
- (2) 有限要素解析によってMBF法のシミュレーションを実現した。ソフトウェアの仕様によってボール工具の回転方向に制限があるなどの制約がある一方、実験結果と比較して、加工痕深さがおおむね一致する結果が得られた。
- (3) MBF法によってテクスチャを施したTi-6Al-4V合金を使用して骨芽細胞を培養したところ、骨芽細胞の成長性がテクスチャリングによって飛躍的に改善されることが明らかとなった。

謝 辞

本研究は、公益財団法人天田財団による奨励研究助成（若手研究者枠）の助成を受けて実施されました。ここに記して厚く御礼申し上げます。

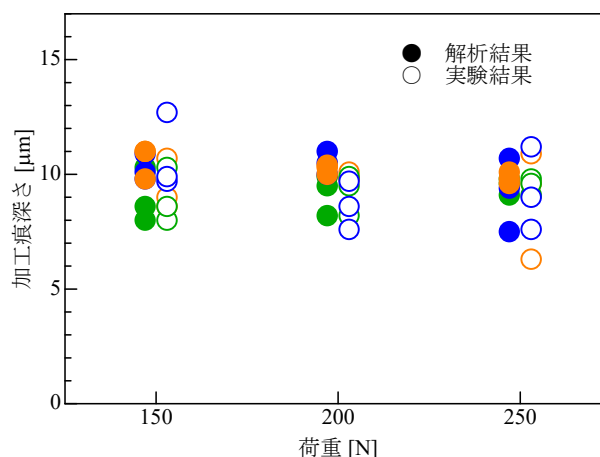


図6 MBF法による加工痕深さ

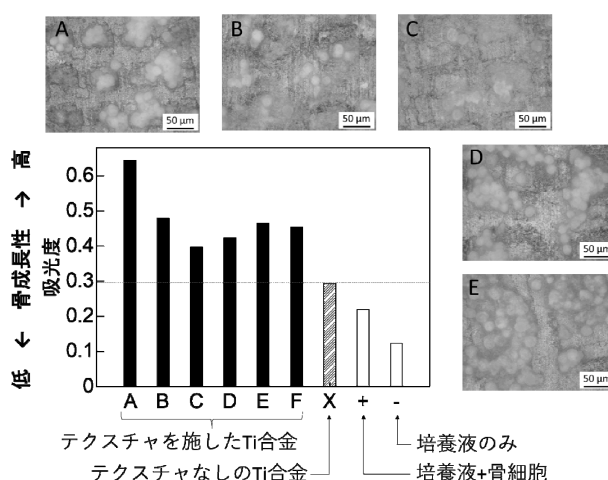


図7 MBF法によるテクスチャリングが骨芽細胞成長性に与える影響

参考文献

- 1) Keishi Yamaguchi, Yosuihiro Takada, Yuki Tsukuda, Minoru Ota, Kai Egashira and Tatsuro Morita: Friction characteristics of textured surface created by electrical discharge machining under lubrication, *Procedia CIRP*, 42 (2016), 662-667.
- 2) 塙隆夫: 材料と生体組織との結合, 表面技術協会小特集, 63-13 (2012), 733-738.
- 3) 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 16th International Conference on Precision Engineering*, USB (2016).