

金属用 3 次元プリンタを用いた機能性摺動表面の開発

東京理科大学 機械工学科

教授 佐々木 信也

(平成 26 年度一般研究開発助成 AF-2014216)

キーワード：金属 3D プリンタ，トライボロジー，表面テクスチャ，キャピラリー構造

1. 研究の目的と背景

近年、機械部品等の形状創製において、従来の除去加工や変形加工に代わる付加製造 (Additive Manufacturing) 技術に注目が集まっている。具体的には、光造形法によるラピッドプロトタイピングからラピッドマニュファクチャリングとして積層造形技術が進歩する中、実用的な金属 3D プリンタの出現により、このような付加製造技術がものづくり革命をもたらす新しい技術潮流を先導するものとして大きな関心と期待が寄せられている。

金属 3D プリンタの応用例としては、複雑な 3 次元構造を有する金型やチタンや耐熱合金製の航空宇宙用などの特殊部品類が取り上げられることが多い。これは現状の高い製造コストを踏まえ、より付加価値が高くしかも従来の除去加工や変形加工では困難とされる製品製造において、その技術的優位性を示すことが目的であるためである。しかし近い将来、技術としての完成度が高まり普及も進めば、

特殊な部品に限定されることなく利用可能な製造技術になるものと考えられる。このような背景のもと筆者らは、3D プリンタの特長を表面テクスチャ創製プロセスとして活用することにより、新しいタイプのトライボシステムの創造を目指した研究開発を開始した。

図 1 に AM 法の 1 つである選択的レーザー溶融 (Selective laser melting: SLM) 法の概略を示す。金属プリンタによる形状創製における特長は、除去可能では困難とされる工具が届かない内部構造を一体で作製可能な点にある。また、ラティス構造を、部品内部に創製することにより、軽量かつ十分な強度を有する部品を製造することも可能である。現在の SLM 式金属プリンタ技術では、数十ミクロンの球状金属粒子を原料として、サブミリ程度の精度で 3 次元構造を造形することが可能である。

機械要素の摺動面において、潤滑不良は故障の一因となるため、これを改善する様々な対策が行われている¹⁾。その手法の 1 つに表面テクスチャリングがある。表面テクスチャリングとは、摺動表面に微細な幾何形状を施すことで、基材や潤滑油を変更することなく摩擦特性を改善する技術であり²⁾、例えばテクスチャとしての微小ディンプルに潤滑油を保持することで、境界・混合潤滑下における油切れ防止効果が発現することが知られている³⁾。しかしながら、従来のテクスチャリングでは、よりシビアな摺動条件下における油切れを防止することは限界があり、摺動特性のさらなる改善を目的とした新たな機能性表面の創製が期待されている。

実際のトライボロジー要素は、運転状況によって潤滑状態が変化するとともに、なじみ後に続く安定状態にあってもその表面は変化を免れない。特に混合・境界潤滑状態においてテクスチャリング効果を発現させるためには、予め初期のテクスチャが変化することを織り込んだ表面設計、すなわち摺動面アーキテクチャが重要となる。トライボロー挙動は、表面の極微小な領域での特性によっても支配さ

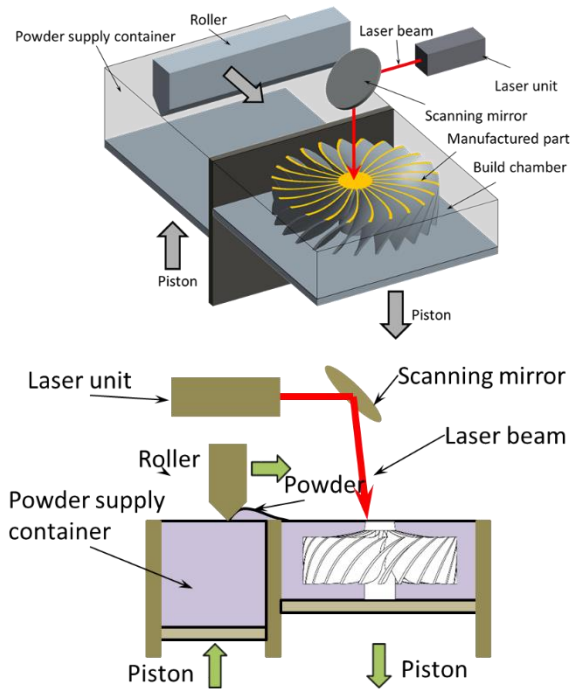


図 1 SLM 式金属 3D プリンタの造形法の概略

れるため、摺動面アーキテクチャの構築に当たっては、表面の形状及び組成の空間分布をナノ・マイクロからマクロレベルまでの連続したスケールで扱うことも重要な視点である。そこで、シームレスなスケールにおいて支配的となるトライボロジー現象を階層的に捉え、それぞれに対応した適切なテクスチャを統合することによりトータルとしての性能向上を図るというのが、筆者らの提案したマルチスケール・テクスチャリングの概念である⁴⁾。さらに、表面損傷の進行や摩擦環境の変化に能動的に対応するためには、自己適応 (self-adaptive) する機能表面の創製が必要となる。これには、マルチスケール・テクスチャリングの概念を発展させた、自己修復性と環境適応性を有する生体皮膚などを模倣 (バイオミメティクス) する摺動面アーキテクチャを構築する必要がある。

筆者らは、バイオミメティクスによる摺動面アーキテクチャを実現する鍵は、摺動部に必要とされる物質を適宜供給可能なしくみを表面の構造として構築することと考えた。そして、物質輸送のための微細3次元構造の創製に、新しいものづくり技術として注目されている金属3Dプリンタの活用を提案し⁵⁾、その1つの具体例として、毛細管現象を利用した潤滑油循環システム (キャピラリー構造) を考案した。キャピラリー構造とは、摺動面外に排出された潤滑油を回収し、毛細管現象により3次元微細配管を通して再び摺動表面へ潤滑油の供給を可能とする構造である。しかしながら、従来の除去加工や成形加工ではキャピラリー構造の実現は困難であったため、造形形状精度の高いSLM式金属3Dプリンタによるキャピラリー構造を有した機能性摺動表面の創製を試みた。

本研究では、SLMによりキャピラリー構造を有する試験片を作製し、潤滑油供給機能ならびに摺動特性について調査した結果を報告する。

2. 実験方法

2.1 キャピラリー構造の原理

図2に毛細管現象の概念図を示す。毛細管現象とは、液体が表面張力により細管の内部を浸透する現象である⁽⁵⁾。液体の表面張力を γ 、液体の表面と細管の表面が成す接触角を θ 、液柱高さを h 、細管半径を r 、液体の密度を ρ とする。管内の液面は、表面張力の合力と液柱に作用する重

力が釣りあう高さまで上昇することから

$$2\pi r \gamma \cos\theta = \pi \rho h r^2 g \quad (1)$$

という関係式が得られ、液柱高さ h は、

$$h = \frac{2\gamma \cos\theta}{\rho g r} \quad (2)$$

と表すことができる。

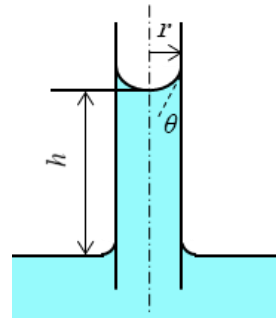


図2 毛細管現象の概念

式(2)で与えられる液柱高さを算出するために、潤滑油基油 (Poly-alpha-olefin4 ; PAO4) の表面張力 γ およびPAO4の金属表面 (SUS 630) に対する接触角 θ を接触角計 (Phoenix, メイワフォーシス) により測定した。算出した液柱高さの妥当性については、図3に示す液柱高さ評価試験片を作製して検証を行った。液柱高さ評価試験片は、潤滑油を表面に供給するパスと潤滑油貯蔵部を有しており、両者は試験片内部で繋がっている。パスの直径は0.4 mm, 0.8 mm, 1.6 mm, 2.0 mmとし、それぞれの深さを15 mm, 20 mm, 25 mm, 30 mm, 35 mm, 40 mm, 50 mmとした。PAO4を潤滑油貯蔵部が満たされるまで注入し、PAO4液面が表面まで到達することを以って液柱高さを評価した。

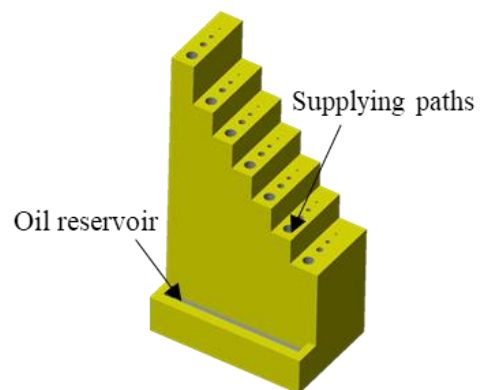


図3 液中高さ評価試験片の外観

2・2 摩擦試験片

キャピラリー構造を有する試験片は、SLM 式金属 3D プリンタ (ProX 300, 3D Systems, US) により作製した。試験片材料には SUS630 を用いた。図 4 に作製した試験片の概略を示す。

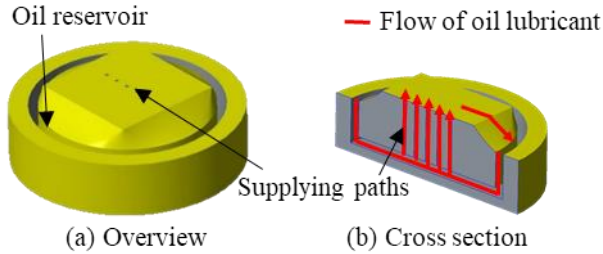


図 4 キャピラリー構造試験片

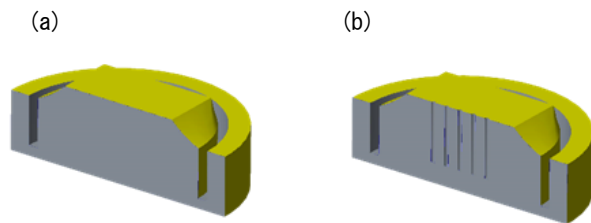


図 5 比較試験片
(a)ノンテクスチャ, (b)ディンプル

キャピラリー試験片は潤滑油を摺動面に供給する細管と、摺動面から漏出した潤滑油を保持する潤滑油貯蔵部を有しており、両者は試験片の内部で繋がっている。細管の直径および深さはそれぞれ $\phi 0.4$ mm, 6.9 mm とし、直線上に 1.5 mm の間隔で 5 つ配置した。また、潤滑油の供給が毛細管現象により行われていることを確認するため、潤滑油貯蔵部の深さを 4.9 mm とし、細管深さより 2 mm 低く設計した。また、摩擦特性の比較材料として、図 5 に示すような摺動面にディンプルを有していないノンテクスチャ試験片と細管-貯蔵部間が繋がっていない(従来型ディンプル)試験片を金属プリンタにて作製し比較評価した。

2・3 細管による供給機能

試験片の潤滑油貯蔵部に潤滑油 PA04 を 300 μ L 潤滑油貯蔵部に注入し、摺動面に潤滑油が存在しない状態で摺動試験を行った。摺動試験にはパウデン・レーベン型往復動摩擦試験機を使用し、PA04 が摺動面に供給される様子をビデオカメラにより撮影した。

2・4 焼付き試験

図 6 に示す往復動摩擦試験機 (SRV4, Optimol, GE) を使用し、シリンダー・オン・ディスク型摩擦試験にて焼付き試験を行った。潤滑油 PA04 を潤滑油貯蔵部に 300 μ L 注入後、さらに摺動面に 50 μ L 滴下した。表 1 に摺動条件を示す。試験は 5 分毎に荷重を 5 N ずつ 100 N まで上昇させた。今回、摺動試験開始から摩擦係数が 0.3 以下で安定するまでをなじみ過程とし、なじみ過程後の摩擦挙動が安定的に経過する中で、摩擦係数が急上昇し 0.4 を超える高い値が 3 秒以上継続した場合を焼付きと判断し、摩擦試験を終了した。

表 1 摩擦試験条件

荷重 [N]	5~100
温度 [°C]	80
ストローク [mm]	1.0
速度 [Hz]	10

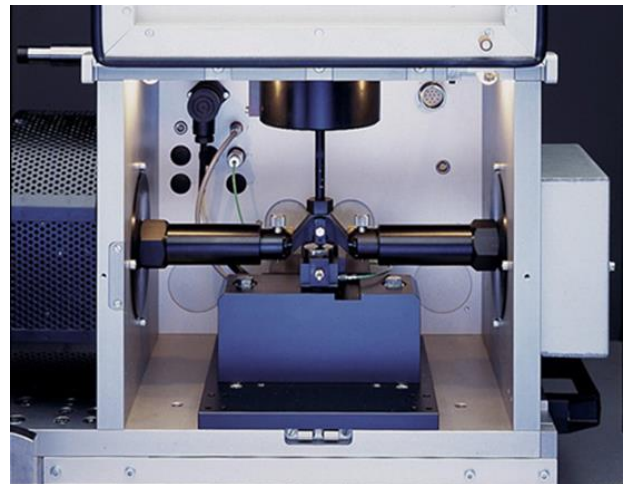
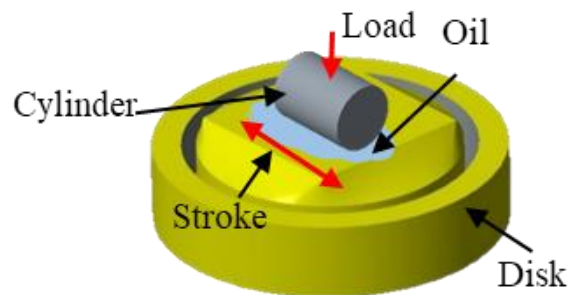


図 6 往復動摩擦試験による焼付き試験の概略

3. 実験結果

3.1 毛細管現象の検討

接触角計による測定結果を以下に示す. PAO 4 の表面張力 γ は 26 mN/m とした, PAO 4 の SUS 630 に対する濡れ性は良好であり, 接触角 θ は濡れ性測定器において評価が出来なかったため, θ は 0 とした. また PAO 4 の密度 ρ は 0.82 g/cm³ とした. 以上の結果から, 直径 0.4 mm のパスにおける PAO 4 の液柱高さは, 式(2)より

$$h = \frac{2\gamma \cos\theta}{\rho g r} = \frac{2 \times 26 \times 10^{-3} \times \cos 0}{0.82 \times 10^3 \times 9.8 \times 0.2 \times 10^{-3}} = 32 \times 10^{-3} \quad (3)$$

32mm と算出された. 液柱高さ評価試験の結果を表 2 に示す. 表 2 中の○は PAO 4 が表面に供給されたことを表し, ×は供給されなかったことを表す. パスの直径が 0.4 mm の場合は液柱高さが 30 mm 以上, 35 mm 未満であり, パスの直径が 0.8 mm の場合は液柱高さが 15 mm 以上 20 mm 未満であることが確認された. パスの直径が 1.2 mm, 1.6 mm においては供給が確認されなかった. 以上の試験結果から, 式(2)で算出される液柱高さは, 表 2 で示した液柱高さの範囲内であり適切であることが確認された.

表 2 液中高さの評価結果

		高さ [mm]						
		15	20	25	30	35	40	50
直径 [mm]	0.4	○	○	○	○	×	×	×
	0.8	○	×	×	×	×	×	×
	1.2	×	×	×	×	×	×	×
	1.6	×	×	×	×	×	×	×

3.2 細管による潤滑油供給機能

図 7 に摺動中の潤滑油の挙動を観察した画像を示す. 図 7 (a)より, 試験開始時では表面にメニスカスは確認されなかった. 次に, 図 7 (b)より, 摺動に伴いシリンダーとディスク表面間にメニスカスの発生が確認された. これは毛細管現象により潤滑油が貯蔵部から摺動表面まで供給されたことによるものと考えられる. また図 7 (c)より, 摺動開始時と同一の位置においても PAO 4 由来のメニスカスが確認された. これらのことから, キャピラリーを通して潤滑油がディスク表面全体に供給されたものと考えられる. この結果からキャピラリー構造試験片は潤滑油の回収および供給に有効であると考えられる.

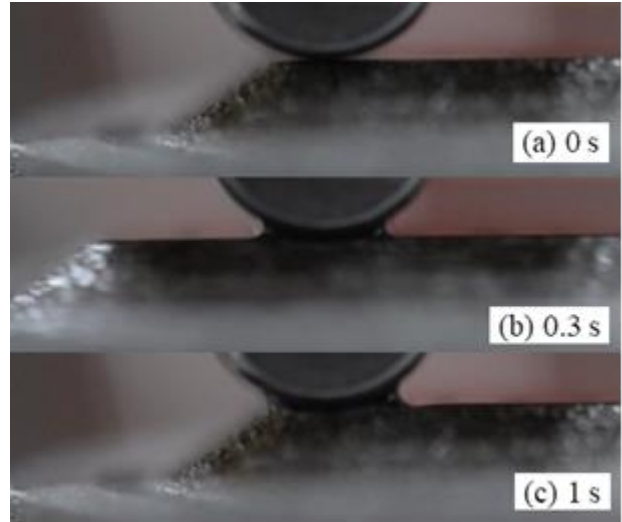


図 7 摺動中の摩擦界面における潤滑油挙動

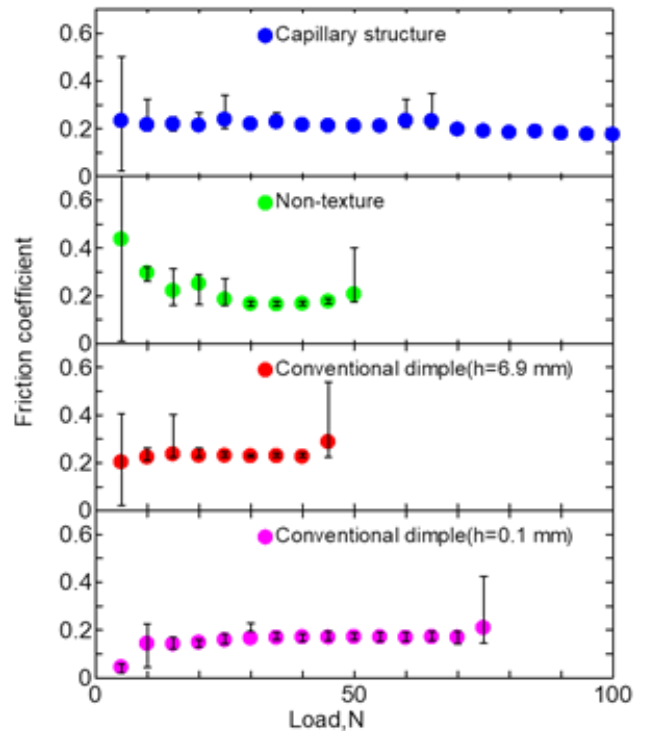


図 8 各試験片の焼き付き荷重

3.3 焼き付き性能

図 8 に SRV 摩擦試験機による焼き付き試験の結果を示す. なじみ過程終了後, ノンテクスチャおよび従来型ディンプル試験片はそれぞれ 50 N, 45 N において, 摩擦係数の急上昇が確認された. 一方で, キャピラリー構造試験片では, 0.4 を超える急激な摩擦係数の上昇は確認されず, 試験終了時まで比較的安定した摩擦挙動を示した. 尚, 焼

付き荷重は、従来型ディンプルなどの同一形状サンプル内ではばらつきが見られたが、キャピラリー構造試験片においては、ばらつきはほとんど見られなかった。これらの結果から、従来の表面テクスチャリングと比較して、キャピラリー構造は耐焼付き性の向上に有効であると考えられる。キャピラリー構造による潤滑油の安定的な供給によって、焼付きが抑制されたものと推察される。

4. 結論

SLM 式金属 3D プリンタにより潤滑油循環摺動面を作製し、潤滑挙動の観察および焼付き性評価を行った結果、以下の知見を得た。

- 1) キャピラリー構造は、潤滑油の供給および潤滑油回収機能を有する。
- 2) キャピラリー構造による潤滑油循環機構は、従来の表面テクスチャリングと比較し、耐焼付き性の向上に有効である。

今後は、青銅などの摺動部材として一般的な素材について、SLM 方式金属 3D プリンタによる造形技術を確立することにより、3次元微細テクスチャ構造の機械システム摺動面への展開を図る予定である。

謝 辞

本研究は、公益財団法人天田財団からの一般研究開発助成 (AF-2014216) により実施した研究に基づいていることを付記するとともに、同財団に感謝いたします。

参考文献

- 1) 佐々木:” マルチスケール表面テクスチャリングによるトライボロジー特性の制御について”, 塑性と加工, 56, 657 (2015) 49-53
- 2) H.Yamakiri, et.al.: “Effects of laser surface texturing on friction behavior of silicon nitride under lubrication with water”, Tribology International, 44 (2010) 579 – 584.
- 3) 佐々木:” 表面テクスチャリングによるトライボロジー特性の向上”, 表面技術, 65, 12 (2014) 568-572
- 4) 佐々木: “しゅう動面アーキテクチャとマルチスケール・テクスチャリング”, トライボロジスト, 60, 4 (2015) 241-248
- 5) 佐々木: “3D プリンティングによる表面テクスチャ創製とトライボロジー”, 月刊トライボロジー, 329(2015)33-41