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

佐々木 信也

東京理科大学 工学部 機械工学科(〒125-8585 東京都葛飾区新宿 6-3-1)

Surface Texturing for Improvement of Tribological Properties

Shinya SASAKI

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Tokyo University of Science(6-3-1, Nijjuku, Katsushika-ku, Tokyo 125-8585)

Keywords : Surface Texturing, Tribology, Surface Modification, 3D Printing, Laser Processing

1. はじめに

環境問題への意識の高まりや製造業の国際競争力強化を背景に、輸送機械や産業機械等のさらなる熱効率向上と高付加価値化が求められている。トライボロジーは、これらの課題解決を担う基盤技術であると同時に、他の容易な追従を許さないコア・テクノロジーとして、より高度な技術的要求への対応が求められている。過酷な環境下での摺動が余儀なくされるトライボ要素が増える中、これらの開発に当たってはコスト低減や性能向上はもとより、環境負荷の少ない摺動材料、潤滑剤および製造プロセス等の採用が必須条件となっている。このような中、摺動面のトライボロジー特性改善の手法として、表面テクスチャリングが注目を集めている。

摩擦・摩耗メカニズム¹⁾から摺動材料に求められる特性を考えた場合、もっとも重要な物性は表面の硬さである。なぜなら硬さは、凝着摩擦や凝着摩耗挙動を支配する真実接触部における凝着面積を決定するとともに、アブレシブ摩耗においては突起先端部の押込み量を定める因子となるからである。すなわち、硬い表面ほど、凝着摩擦抵抗は低減し、凝着摩耗とアブレシブ摩耗は抑制されることとなる。この硬さに着目すれば、窒化クロムや窒化チタンに代表される硬質セラミックスコーティングやアルミナや炭化タングステン系サーメットの溶射膜などが、そして最近では、ダイヤモンドライクカーボンなどの硬質膜コーティング技術が表面技術として急速に適用範囲を拡大している理由も頷ける。しかしながら、潜在的に摺動材料としての高いポテンシャルを有し利用の進む硬質膜であるが、これだけでは十分な性能を満たさないケースも増えている。そこで、硬質膜の特徴を活かしつつトライボロジー特性をさらに改善する手法として、表面テクスチャリングとの融合による相乗効果の発現が期待されている。

機械要素の表面改質技術には、熱処理やコーティング、ショットピーニングによる機械的処理などがあるが、表面テクスチャリングもその1つとして位置付けられ、中でもっともシンプルかつ如何なる場合にも必須となる表面処理プロセスと言える²⁾。表面性状は、機械部品の表面仕上げを規定す

る機械設計で基本中の基本とも言えるパラメータであるが、これも広義の表面テクスチャリングとして捉えることができる。また、工作機械等の案内面に施すきざ加工やシリンドライナー内面のホーニング加工など、積極的に表面の微細形状を制御することにより必要な表面性能を発現させる手法は、古くから経験的に積み上げられた表面テクスチャリング技術の代表的な例である。ものづくり現場の機械設計者や技術者らは、豊富な経験を踏まえたノウハウをもとに、対象とする摺動表面の最適な表面形状や粗さを決定し、必要とされる性能を持った製品を創り出してきたのである。一方の学術面では、流体潤滑に及ぼす表面粗さの影響を論じた Patir-Cheng³⁾の研究が有名であるが、30年を経て数値流体解析技術が大きく進んだ現在でも、未だにその域を出るような成果は得られていない。表面性状とトライボロジー特性との関係については、最小油膜厚さ h と二乗平均平方根粗さ σ の比で定義される油膜パラメータ $\Lambda(h/\sigma)$ を、流体潤滑状態の指標として用いる程度に留まっている。その原因は、連続流体を前提にした潤滑理論では、固体間の狭い隙間の流れや不連続な固体接触の発生には対応できないことにある。すなわち、境界潤滑状態を決定論的に扱えない現状では、学術的知見をもとに表面テクスチャの設計指針を示すことは出来ず、実際のものづくりは技術的なノウハウに頼らざるを得ない。

このような状況で、表面テクスチャリング技術が再び注目されている背景には、レーザに代表される表面微細加工技術の進歩と相俟って、ますます過酷になる摺動条件に対応できるトライボ要素の開発への強いニーズがあるためである。そこで本稿では、筆者らの研究成果をもとに、トライボロジー特性向上のためのテクスチャ表面の役割とその創製プロセスについて概観し、トライボロジー特性向上のための表面テクスチャリング技術の今後について展望したい。

2. 表面テクスチャリングに期待される効果

摺動面におけるトライボロジー特性を考えた場合、表面テクスチャリングに期待される主な効果としては、

①動圧の発生

②潤滑油の供給

③摩耗粉・異物の排出やトラップ

の3つが挙げられる。

もう少し広く見ると、表面の濡れ性や流体抵抗の変化なども、テクスチャリングがもたらす効果として知られている。ただし、これらの中で定量的に予測ができるのは、流体潤滑下における一部の動圧発生効果のみである

各種トライボ要素の摺動表面のほとんどは、図1に示すような一般的なストライベック線図で考えれば、流体潤滑以外の潤滑状態での摺動が余儀なくされることがわかる。ピストン-シリンダー間の摩擦においても、上死点と下死点では相対摩擦速度が0となり、部分的な境界潤滑状態が避けられない。また、完全な流体潤滑状態にある動圧軸受においても、停止・再起動時にはどうしても境界潤滑状態を避けることは出来ない。そして、摺動面のトラブルは、このような境界潤滑下で起こることが圧倒的に多いのである。これまで表面テクスチャリングは、流体潤滑領域で機能するものとして扱われて来たところもあるが、乾燥摩擦や混合潤滑を含む広義での境界潤滑状態においてこそ、大きな効果の発現が期待されるのである。上記の3つの効果についても見方を変えれば、境界潤滑状態で摺動する表面にテクスチャを施すことにより、より良好な潤滑状態である流体潤滑域に近づけるために有効に作用するものと捉えることができよう。テクスチャ効果が期待される潤滑状態、そしてその発現のメカニズムを明らかにすることによって、テクスチャ表面の設計指針を確立し、表面改質の一つとして技術の体系化を図っていく必要がある。

表面テクスチャリング効果を考える上でもう一つ重要となるのは、表面の経時変化である。最初に創製したテクスチャは摺動過程で変化し、安定状態に至った表面状態(テクスチャ)が、その後の摺動特性を支配することになる。ある摺動条件下において安定状態に至ったテクスチャこそが“なじんだ表面”であり、このときのテクスチャとは、単なる物理的な形状を意味するのではなく、化学組成やその表面近傍における空間分布の状態を包括したものを意味することになる。ただし、なじみ過程で形成される“なじんだ表面”は、摺動条件によって一律に決まるものではなく、最初のテクスチャ表面によって大きな影響を受けることになる。

図2は、初期の表面粗さが異なる軸受鋼を用いたときの、往復動ボールオンディスク摩擦試験における摩擦係数の経時

変化を示したものである⁴⁾。ディスク表面の粗さは、エメリー紙とダイヤモンド砥粒を用いた研磨によって調整した。表面粗さがRa 0.0031 μm の場合は、試験時間とともに摩擦係数は上昇し、約0.180で値が安定した。一方、Ra 0.0375 μm と表面粗さが若干大きい場合には、時間とともに摩擦係数は低下し、約0.125の低い値で摩擦係数は安定した。摩擦後の表面粗さは、ともに初期の値よりも大きくなったが、2つのディスク表面の粗さは逆転した。このように初期の表面粗さが摩擦挙動に影響を及ぼすことは、境界潤滑下での摩擦試験では良く経験するところである。この原因の1つとしては、表面粗さの違いによる摩擦面への潤滑油の供給状態の違いにあるものと考えられる。つまり、なじみ過程における表面粗さによる潤滑状態の違いが、その後の安定状態の摩擦挙動を大きく支配することということになる。また、このような境界潤滑下のなじみ過程では、摺動表面で起こるトラボケミカル反応および反応生成物の形成にも表面テクスチャが影響を及ぼすことが指摘されている⁵⁾。なじみを伴う摺動条件では、摺動プロセスにおけるテクスチャ表面の変化とその役割を考慮した上で、初期表面のテクスチャを考えなければならない。

そこで筆者らは、表面テクスチャをより能動的に活用する方策として、例えば生体皮膚のように、表面への物質供給による環境適応性、自己修復機能を有した自己応答性(self-adaptive)を、3次元微細構造を表面に創製することによって実現しようという試みを始めた。この場合、生体であれば血管やリンパ管に相当する物質輸送パスを摺動表面下に形成することにより、摺動表面に必要とされる添加剤等を適宜供給するというものである。この3次元微細構造による自己応答性表面の概念については後述する。

3. 摺動面アーキテクチャと表面創製プロセス技術

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。トライボロジー挙動は、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

図1 ストライベック線図における各トライボ要素の摺動状態

図2 初期表面粗さが摩擦挙動に及ぼす影響

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。図3に示すように、それぞれのスケールレベルで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テクスチャを統合することによってトータル性能の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⁶⁾。

表面テクスチャの単位スケールとその創製プロセスを図4にまとめた。近年の加工プロセスや材料創製技術の進歩によって、SAM(自己組織化膜)やナノコンポジットといったナノスケールの表面制御から、ナノインプリントやLIGA(フォトリソグラフィ)プロセスのようなサブミクロンスケールの表面構造創製プロセス、そしてレーザや電子・イオンビームなどによるミクロンレベルの高エネルギー加工プロセス、そしてサンドブラストや化学エッチング、精密機械加工といった低コスト・高効率プロセスなど、多種多様な創製プロセス技術を比較的容易に組み合わせて用いることが可能となっている。中でもレーザ加工は、高密度エネルギーの制御性が良く、また電子ビームやイオンビームのように高真空環境を必要としないことから、今後の利用が拡大するものと期待されている。その理由として、近年のレーザ技術の進歩には目覚ましいものがあり、高出力化、短波長化、短パルス化、高パルス周波数化、長寿命化、高効率化といった新しい機能と性能を有した様々な製品が、市場に次々と提供されていることが挙げられる。一般的なレーザ加工では、その空間分解能はミクロンオーダーであるが、沢田ら^{7),8)}によるフェ

ムト秒レーザを使ったナノ周期構造の創製では、サブミクロンオーダーの微細構造を表面に創製することが可能であり、実用性にも優れたプロセスである。このようにレーザ加工にも様々な特徴があり、創製可能な構造やサイズもプロセスごとに異なる。そのため、各種レーザの特徴を生かした複数のレーザプロセスの組み合わせにより、マルチスケールをカバーする複合加工の利用が期待される。さらに、最近ものづくり技術として注目されている3次元プリンタ技術は、3次元微細構造の創製により摺動面アーキテクチャを具現化するプロセス技術として、今後の利用が期待される。

4. 表面テクスチャリングによるトライボ特性の向上

トータルでのトライボロジー特性を考える上では、ナノ・マイクロからマクロまでのマルチスケールでの表面構造の構築が必要になる。そして、機械要素の現実的な表面テクスチャリングとしては、サブ μm ～サブ mm オーダーの表面構造の創製が中核を担うものになると考えている。このスケール領域では、LST(Laser Surface Texturing)法が1つの有力なプロセスとなる^{9),10)}。図5に窒化ケイ素の水潤滑特性の解析LST法によるトライボロジー特性改善例¹¹⁾を示す。窒化ケイ素や炭化ケイ素等のシリコン系セラミックスは、トライボケミカル反応によって摩擦表面にシリコン水和物を形成し、これによって水中で優れた低摩擦特性が得られることが知られている^{12),13)}。しかし、摩擦開始直後や高荷重・低摩擦速度領域では、水和物による低摩擦効果が発現し難いため、これを改善するための方策が模索されてきた¹⁴⁾。そこで、窒化ケイ素セラミックスの水潤滑特性向上を目的として、表面にLST法によりディンプルパターンを形成してトライボロジー特性への影響を調べた。LST法にはグリーン光YVO₄レーザ(波長532 nm, 出力7 W@30 kHz)とガルバノヘッドからなる微細加工装置を用い、ディンプルの直径、深さ、配列方法、面割合をパラメータとして様々なパターンを形成

図3 境界・混合潤滑下での各スケールにおける表面テクスチャの役割

図4 表面テクスチャの単位寸法と創製プロセス

図5 LST法による窒化ケイ素の水潤滑特性の改善

し、広範に渡る摺動条件のもとで改善効果を評価した。その結果、ディンプル形状のテクスチャを施した表面では、軸受特性数の小さい領域(低速・高荷重域)において摩擦低減効果が顕著に現れることが確認された。これは表面に付与したディンプルが、摩耗粉のトラップによるアプレシブ摩耗の抑制と、ディンプルに蓄積された水和物を摩擦面に適度に供給する効果によるものと考えられる。なお、ディンプルの最適配置に関しては、パターンの数値化による指標作りが喫緊の課題であると考えている¹⁵⁾。

初期に付加したテクスチャは、摺動時間とともに変化する。LST加工を施した窒化ケイ素摺動面では、図6に示すように摩耗粉や反応生成物によって埋まってしまうケースも確認さ

図6 摺動による表面テクスチャの変化
(a)窒化ケイ素摺動前、(b)窒化ケイ素摺動後、
(c)DLC摺動後

図7 自己修復性 Mo-Cu ナノ積層コーティング膜
(a)摺動面の LFM (摩擦顕微鏡像)、
(b)断面 SEM 像

れた。そこで、テクスチャの埋滅を抑制する方策として、窒化ケイ素の相手面に耐摩耗性に優れた DLC 膜を適用し、これにディンプル加工を施すことを検討した。原理的には、DLC 膜に直接レーザ加工を施してディンプルを形成することも可能であるが、除去周辺部の変質物が DLC 膜の剥離や耐摩耗性に悪影響を及ぼすことが懸念されたため、基板にディンプル加工を施した後に DLC 膜を成膜することとした。この際、複雑形状にも均一な成膜が可能な PBI&D 法(プラズマイオン注入成膜法)を用いて DLC の成膜を行った。その結果、DLC 膜平滑面と比べディンプル形状付与による摩擦特性の向上が見られるとともに、図6に示すように DLC 膜の損傷はなく長時間の摺動に対してもディンプルが摩耗粉等によって埋滅する様子は観察されなかった¹⁶⁾。このように、硬質コーティングと表面テクスチャのハイブリッド化はトライボ特性のさらなる向上をもたらすものとして、今後の展開が期待される。

コーティング技術は、テクスチャ表面の保護膜としての役割以外に、表面に組成の違いによる微細構造を創製する手法としての応用も期待される。具体的には、ナノ積層コーティングを応用することでテクスチャを自己修復する表面の創製することが可能である。図7に示すように相互溶解度の低いモリブデンと銅の2種類の金属元素を、 μ オーダーの凹凸形状を有する表面にナノオーダーの膜厚で交互積層すれば、組成分布により摺動面に木目状のテクスチャ構造を常に再生する非凝着性摺動面を形成することができる¹⁷⁾。30 nm の Mo と Cu の薄膜をそれぞれ 50 層積層し、さらにその表面にレーザ微細加工を施したナノ積層膜を作製して摩擦・摩耗特性を評価した結果、単層膜に比べて大きなトライボ特性向上効果が確認された。このように単に初期形状だけではなく、組成や機械的性質などの空間分布を利用する自己修復・自己保持可能な表面の創製は、表面テクスチャリング技術の普及を図る上での重要な表面技術となると考えられる。

さらに、自己修復性と環境適応性を有する生体皮膚を模倣

図8 3D プリンタで創製した3次元ネットワーク孔構造を有する表面の摩擦特性

(バイオミメティックス)した摺動面アーキテクチャが、近い将来の課題となるものと考えている。バイオミメティックスの鍵は、複雑な微細3次元構造表面の創製であり、これに新しいものづくり技術として注目されている3次元積層造形技術(通称3Dプリンタ)の応用が考えられる。基礎的な検証実験として、皮膚汗腺をモデルとした単純な3次元ネットワーク孔構造表面を作製して摺動特性を評価したところ、図8のように摩擦面への効率的な潤滑油供給効果により、摩擦特性の大幅な改善が可能であることが確認された¹⁸⁾。

4. おわりに

摺動面アーキテクチャの構築に当たっては、これまでの蓄積されたノウハウや表面粗さや表面形状の影響を考慮しつつ、テクスチャ表面とトライボロジー特性との関係を基礎メカニズムから解明し、体系化していくことが必要である。また、トライボ要素毎に摺動面アーキテクチャの最適化を図るためには、境界潤滑から流体潤滑までの広い範囲でのシームレスなシミュレーション解析技術の開発が求められる。さらに、摺動面アーキテクチャを製品に具現化するためには、種々の加工技術の中から適したプロセスを選択し、場合によっては複数のプロセスを組み合わせた表面加工技術の開発が必須となる。表面テクスチャリングは、古くより着目され実用に供されてきた技術ではあるが、機械要素、そして機械システムの高度化を図る上では、まだ多くの解決すべき課題と発展の可能性が残されている。

(Received November 6, 2014)

文 献

- 1) 佐々木信也ほか; はじめてのトライボロジー(講談社, 2013).
- 2) 佐々木信也; 潤滑経済, 2010年10月号(No.542), 2 (2010).
- 3) N. Patir, H. S. Cheng; *Journal of Tribology*, **101**, 220 (1979).
- 4) K. Yamaguchi, C. Sasaki, R. Tsuboi, M. Atherton, T. Stolarski, S. Sasaki; *Journal of Engineering Tribology*, **228**, 1015 (2014).
- 5) 中村貴洋, 久保朋生, 七尾英孝, 森 誠之; トライボロジー会議(2010春 東京)予稿集, F25, p.359 (日本トライボロジー学会, 2010).
- 6) S. Sasasaki; *Journal of Mechanical Science and Technology*, **24**, (1), 67 (2010).
- 7) 沢田博司, 二宮孝文; トライボロジスト, **55**, (2), 71 (2010).
- 8) 沢田博司, 川原公介, 二宮孝文, 森 淳暢, 黒澤 宏; 精密工学会論文集, **70**, 133 (2004).
- 9) A. Kovalchenko, O. Ajayi, A. Erdemir, G. Fenske, I. Etsion; *Tribology International*, **38**, 219 (2005).
- 10) I. Etsion, E. She; *Tribology International*, **42**, 542 (2009).
- 11) H. Yamakiri, S. Sasaki, T. Kurita, N. Kasashima; *Tribology International*, **44**, 579 (2011).
- 12) T. E. Fisher, H. Tomizawa; *Wear*, **105**, (1-2), 29 (1985).
- 13) S. Sasaki; *Wear*, **134**, 185 (1989).
- 14) X. Wang, K. Adachi, K. Otsuka, K. Kato; *Applied Surface Science*, **253**, 1282 (2006).
- 15) Y. Kuroiwa, A. Amanov, R. Tsuboi, S. Sasaki, S. Kato; *Jurnal Teknoloji*, **66**, (3), 81 (2014).
- 16) 佐々木信也; トライボロジー会議(2012秋 室蘭)予稿集, A25, p.49 (日本トライボロジー学会, 2012).
- 17) 古山道生, 坪井 涼, 佐々木信也; 第4回マイクロ・ナノ工学シンポジウム予稿集, OS-2-7 (日本機械学会, 2012).
- 18) 杉山 寛, 田所千治, 佐々木信也; トライボロジー会議(2014秋 盛岡)予稿集, B34 (日本トライボロジー学会, 2014).