

トライボロジー性能向上のための表面テクスチャリング

Surface Texturing for improvement of Tribological performance

東京理科大学（正） 佐々木信也

Shinya Sasaki

Tokyo University of Science

1. はじめに

トライボロジーにおいて、摩擦の制御が最重要課題であることは言うまでもない。摩擦抵抗の発生原因が表面の凹凸にあるとする“摩擦の凹凸説”が定着する遙か昔より、人々は摩擦抵抗を減らすためには滑らかな表面を、高い摩擦抵抗を得るためにには粗い表面を利用してきた。“摩擦の凝着説”が“凹凸説”を包含した現代においても、表面の凹凸、言い換えれば表面テクスチャリングが、摩擦の制御において重要な役割を果たしていることには変わりはない。摩擦の制御に関しては、地球環境問題を背景に機械システムにおけるエネルギー損失抑制を目的とする摩擦低減技術が大きな注目を集めてきたが、動力伝達機構やブレーキなど一定の摩擦力を発現させるための制御も重要な技術的課題である。今後に目を向ければ、人とロボットの共生による協創社会の実現に向か、生体と人工物の界面における摩擦を能動的に制御する技術も必要不可欠なものになると考えられる。ここでは、摩擦制御のための表面テクスチャの役割と可能性、そして今後の動向について展望する。

2. テクスチャ表面の創製プロセス

2.1 表面テクスチャの設計

トライボロ特性は、様々なスケール階層で起こる現象が複合化されて発現する。境界潤滑特性は真実接触部となる表面のナノ領域の特性によって大きく影響を受け、その真実接触状態は上の階層となるマイクロ構造により支配され、さらに固体接触割合はマクロな力学的釣合いによって決定される。すなわち、しゅう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俯瞰し、階層ごとの役割を理解する必要がある。そして、各階層において必要なテクスチャ構造を最適統合することにより、トータルでの性能向上を図るのが、マルチスケール・テクスチャリングの概念である[1]。

表面はしゅう動過程で変化する。実際のしゅう動特性を支配するのは“なじみ表面”あり、当初のテクスチャ形状とは異なる場合が多い。また、実際のしゅう動面は、潤滑状態が変化するため、“なじみ表面”が安定的に維持されることは限らない。そのため、表面テクスチャの設計では、初期に付与する形状だけではなく、形状に加え組成などの経時変化も考慮する必要がある。ただし“なじみ表面”は摺動条件によって一律に決まるものではなく、初期の表面テクスチャに大きく依存する[2]ため、付与する表面テクスチャの設計が重要であることに変わりはない。すなわち、表面テクスチャの設計には、3次元の幾何形状に加えてトライボ膜の形成や組成、そしてこれらの時間変化といった多次元的な視点が必要不可欠となる。

2.2 テクスチャ表面の創製プロセス

マルチスケール・テクスチャリングの概念を具現化するためには、ナノスケールからマクロスケールまでのテクスチャ付与が必要になり、以下のような多種多様な創製プロセス技術から最適な組み合わせを選択することになる。ナノスケールでは、表面化学修飾による自己組織化膜 (SAM) [3] やポリマーブラシ [4]、材料創製におけるナノ粒子分散 [5] やナノ積層膜 [6] などが利用できる。サブミクロンスケールでは、LIGA (フォトリソグラフィー) プロセス [7] に代表される MEMS プロセス [8] が利用、ナノインプリント [9] を活用すれば大面积化への展開も可能となる。マイクロスケールでは、超精密機械加工 [10] やレーザ [11, 12] による除去加工に加え、めっき [13] や溶射 [14] などコーティング法による付加加工プロセスが利用できる。なお、通常のレーザ加工では、その空間分解能はミクロンオーダー [15] であるが、フェムト秒レーザはサブミクロンオーダーの微細構造創製に有効である [16]。マクロスケールでは、サンドブラスト [17] や研磨・研削、切削等の機械加工 [18] などの低コスト・高効率プロセスを利用することができます。さらに、微細な3次元構造の創製技術として、3次元プリンタの応用にも期待が寄せられている [19]。

3. 新たな展開

工学の世界では、古くより“生物に学ぶ”ことによって技術の向上を図ってきた。近年では、“バイオミメティックス”や“バイオインスパーカード”との名の下、トライボロジーに関係するものでも、鮫肌を模した表面テクスチャによる流体抵抗の低減 [20]、ヤモリの足毛を模擬した凝着面の創製 [21]、アメンボの撥水脚の構造 [22]、ヘビの皮膚を模擬した摩擦面 [23] など、数多くの研究が行われている。詳しくは関連するいくつかの総説 [24, 25, 26, 27] を参照されたい。

これまでの研究では、どちらかというと優れた機能を発揮している生物表面の微細構造に着目し、構造による機能発現メカニズムの解明と人工物表面への再現に力点が置かれてきた感がある。しかし、生物におけるしゅう動面と人工物との最も大きな違いは、表面の自己修復性と環境応答性にあると考えられる。この点においては、未だ“バイオミメティックス”と呼ぶにふさわしいしゅう動表面は創製されるには至っていない。構造材料の分野では、自己修復材料[28]と呼ばれるものも早くから注目されてきたが、その成果を見れば、“自己再生表面”的構築までの道のりは遠いことが判る。再生には物質の移動や反応を伴う組織構築が必要になるため、生物のような血管などを通した物質輸送機構や細胞に埋め込まれた自己組織化プログラムなどを人工物で模擬できるまでには、現在の技術水準は至っていないのである。これに対し“環境応答性”に関しては、表面形状や物質供給を制御することにより、人工物での機能発現が可能であると考えている。例えば、生物に見られる、うろこの動きによる摩擦力および異方性の制御や分泌物による摩擦制御などは、人工物においても機能の再現が期待できる。その際に鍵を握るのが、3次元表面微細構造の創製技術である。

4. おわりに

表面に適当な粗さやテクスチャリングを施すことにより、トライボロジー特性を改善することができることは、すでに実用上の経験から広く知られていることである。また、表面テクスチャに関する基礎研究や技術開発も、この20年間に大きく進展した。しかしながら、多くのレビューなどでも指摘されている通り、最適な表面テクスチャを理論的に導くことは依然として難しいのが現状である。ただし、これをトライボロジー現象そのものの複雑性に起因するものとして片付けてしまっては進歩がない。

表面テクスチャをより積極的なトライボロジー特性向上技術として発展させるためには、しゅう動面アーキテクチャという新たな設計概念の確立が必要になる。ここでは、数値解析のための安易な現象の簡素化は許されないため、複雑系であることを前提とする解析手法の適用が必須となる。AI (Artificial Intelligence) を活用するMI (マテリアルズ・インフォマティックス) はその一つの解決策になるものと期待される。MIを有効に活用するためにはデータの記述子が重要な鍵を握るとされるが、それ以前の問題として解析に足る十分な情報量の担保が喫緊の課題と言えよう。トライボロジー関係者が協力し、解析目的に合致する質の高いデータを集めよう試みがあっても良い。

参考文献

- 1) 佐々木信也，“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
- 2) K. Yamaguchi, C Sasaki, R. Tsuboi, M. A therton, T. Stolarski, S. Sasaki, "Effect of surface roughness on friction behaviour of steel under boundary lubrication", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 228, 9 (2014) 1015-1019
- 3) 中野美紀，“有機分子自己組織化膜のトライボロジー特性”，表面科学, 31, 2 (2010) 106-112
- 4) J. Klein, E. Kumacheva, D. Mahalu, D. Perala & L. J. Fetters, "Reduction of frictional forces between solid surfaces bearing polymer brushes", Nature, 370, 25(1994) 634-636
- 5) 角谷浩, 河鰐実昌, 大見裕司, “無電解 Ni-P/PTFE 複合めつきのしゅう動部品への適用”, デンソー・テクニカルレビュー, 6, 2 (2001) 59-65
- 6) 山本兼司, “ナノ積層構造を有する複合硬質膜の合成と特性”, トライボロジスト, 59, 1 (2014) 13-
- 7) 服部正, “エッティングによる表面微細加工”, トライボロジスト, 55, 2 (2010) 83-88
- 8) M. Nakano, K. Miyake, A. Korenaga, S. Sasaki, and Y. Ando, "Tribological Properties of Patterned NiFe-covered Si Surfaces", Tribology Letters, 35, 2 (2009) 133-139
- 9) 谷口淳, “ナノインプリント技術とトライボロジー”, 月刊トライボロジー, 22, 2(2008) 24-26
- 10) 佐藤寿樹, 新美達也, 神田保之, 西尾悟, 早川昇吾, 宇佐美初彦, “微細断続切削によって付与したディンプル形状がアルミ合金の摩擦特性に及ぼす影響”, トライボロジスト, 63, 9 (2018) 629-640
- 11) I. Etsion & E. Sher: "Improving fuel efficiency with laser surface textured piston rings", Tribology International, 42 (2009) 542-547.
- 12) H. Yamakiri, S. Sasaki, T. Kurita, N. Kasashima : "Laser surface texturing of silicon nitride under lubrication with water", Tribology International, 44, 5(2011) 579-584
- 13) 平井 悠司, 藤浩, 海道 昌孝, 鈴木 厚, 下村 政嗣, “自己組織化を利用した銀メッキマイクロディンプル表面の作製と摩擦挙動”, 高分子論文集, 70, 5 (2013) 193-198
- 14) 佐々木信也, “溶射技術のトライボロジ一分野における利用”, トライボロジスト, 52, 1 (2007) 22-24
- 15) Y. Kuroiwa, A. Amanof, R. Tsuboi, S. Sasaki, S. Kato: "Effect of Surface Texturing Arrangement for Improving Anti-Seizure Property of Lead-Free Copper Alloy", Jurnal Teknoloji , 66, 3, (2014) 81-89
- 16) 沢田博司, 二宮孝文：“フェムト秒レーザによる表面微細加工”, トライボロジスト, 55, 2 (2010) 71-76
- 17) H. Ogawa, S. Sasaki, A. Korenaga, K. Miyake, M. Nakano, T. Murakami, "Effects of surface texture size on the tribological properties of slideways", Proc. IMech E Part J: J. Engineering Tribology,

- 224, 9 (2010) 880-890
- 18) 熊田喜生, “円周方向にマイクログループをもつすべり軸受の特性に関する研究”, 博士論文 (東京大学) 乙第 13192 号 (1997)
 - 19) 佐々木信也, “トライボロジーシステム構築のための金属 3D プリンタの活用”, 砥粒加工学会誌, 63, 7 (2019) 345-348
 - 20) Ball P. Engineering shark skin and other solutions. Nature, 1999, 400: 507-509
 - 21) Geim A K, Dubonos S V, Grigorieva I V, et al. Microfabricated adhesive mimicking gecko foot-hair. Nat Mater, 2003, 2(7): 461-463
 - 22) Gao X, Jiang L. Water-repellent legs of water striders. Nature, 2004, 432: 36
 - 23) CatherineTiner, Salil Bapat, Subrata Deb Nath, Sundar V. Atrec, AjayMalshe, “Exploring Convergence of Snake-Skin-Inspired Texture Designs and Additive Manufacturing for Mechanical Traction”, Procedia Manufacturing, 34(2019)640-646
 - 24) L. Ivanović, A. Vencl, B. Stojanović, B. Marković, “Biomimetics Design for Tribological Applications”, Tribology in Industry, 40, 3 (2014) 448-456
 - 25) R. Arvind Singh, Eui-Sung Yoon, “Biomimetics in Tribology- Recent Developments” , Journal of the Korean Physical Society, 52, 3(2008)661-673
 - 26) Zhendong Dai, Jin Tong, Luquan Ren,” Researches and developments of biomimetics in tribology” , Chinese Science Bulletin, 51(2006)2681-2689
 - 27) 平井悠司, 藤浩, 海道昌孝, 鈴木厚, 下村政嗣, “生物に学ぶ表面微細構造とトライボロジーとの関係 “, 表面技術, 64, 1 (2013) 38-41
 - 28) 新谷紀雄, “自己修復材料の研究開発の現状と今後期待される展開”, 表面技術, 65, 10 (2014) 464-469