

不均質化された摺動面の摩擦特性 Friction properties of heterogeneous surface

名城大・理工（正）*宇佐美 初彦

Hatsuhiko Usami*

*Meijo University

1. はじめに

テクスチャリングは摩擦低減安定に関して、凹部が摩耗粉を含む異物捕集の役割を担うことが知られている。DLCコーティングにおいても膜形状をセグメント化することで摩耗粉を含む異物捕集の効果が指摘されている¹⁾。セグメント化によって、摩擦面は連結された凹部（溝）と頂部が平坦化な突起群から構成されるテクスチャ（以降、凸テクスチャと称する）となり、表面形状としては不均質な状態となる。

軸受材料は多結晶体でありその組織構造は複数の組織から構成され、より硬質な材種と組み合わせられ実用に供されるのが一般的である。中でも鋳鉄は黒鉛層と素地から構成される不均一組織を呈し、黒鉛が表面を被覆し素地が荷重を支持することで低摩擦特性を発現する²⁾。不均質な組織構造が鋳鉄の低摩擦特性発現の条件であり、表層に黒鉛層が均質に存在しても密着強度が十分ではなく直ぐに摩耗し自己潤滑性は喪失する。

上述のように、接触面の不均質化は組織面および表面形状の観点からも摩擦特性に大きく影響するが、その寸法との関係を調査することは、摺動面設計において重要な問題である。例えば、フレットィングのように工程の短い摺動においても直交溝（凸テクスチャ）の付与が摩耗の抑制に寄与することが報告されている³⁾。また、凝着成長抑制の観点からも摺動面の不均質化の評価は表面設計に関して重要な指針を与えることが期待される。

本報告では、接触面の不均質化と摩擦特性の影響について、接触面形状と表面近傍の組織構造の側面からの検討事例を紹介すると共に、その代表寸法について凝着成長の観点から検討した結果を報告する。具体的には表面形状では凸テクスチャリング、組織構造では表面の非平衡組織化の影響である。

2. 凸テクスチャの摩擦特性

凸テクスチャの場合、凹部が連結しており異物を効率よく排出できるものの、油剤も流出しやすい環境となる。マイクログループ軸受⁴⁾やスクロールコンプレッサのスラスト軸受⁵⁾のように、潤滑油量が十分な場合には摩擦低減や初期なじみの促進に有効である。一方、自動車エンジンのタイミングチェーンの位相同期に使用が検討されている機械式テンションのように、油剤供給が十分でない環境でも、振動減衰を担う板バネ間の摩擦特性に関して、摺動面に微細突起から構成される凸テクスチャを付与することで、異物の排出が促進され減衰特性が大幅に安定化することが報告されている⁶⁾。

凸テクスチャの一例が Fig. 1 である。これは光硬化性樹脂で被覆した炭素鋼 S45C ディスクにレーザーを照射し一部を除去した後に電解研磨によって凸テクスチャを付与した事例である。電解研磨を適用することで高さの非常に小さい突起群から構成される凸テクスチャが形成可能である。相手材を S45C 焼入リングとして、潤滑油を 0.4mL 供給した際の摩擦特性が Fig. 2 である。突起高さが 20 μm の摩擦係数は実験開始直後には不安定であり脈動も伴う。突起高さの減少に伴い摩擦係数は実験開始直後から低く安定し、同 2 μm の場合の摩擦係数は実験開始直後から 0.005 程度で安定している。

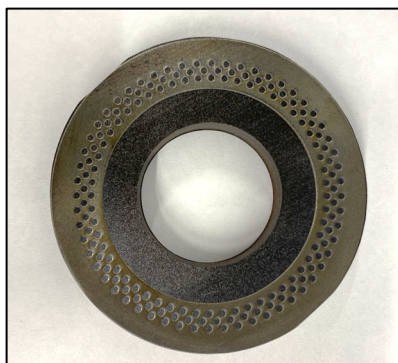


Fig. 1 Overview of bump aligned convex textured S45C surface (Disc diameter was 44 mm)

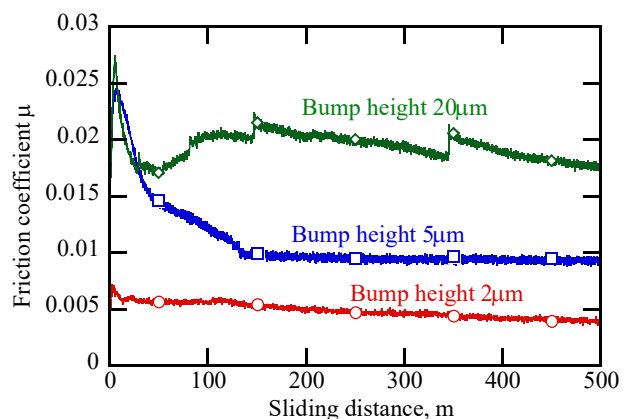


Fig. 2 Friction coefficient of various bump height textured surface (250N, 0.25 m/s, mineral oil lubrication)

摩擦面の光学顕微鏡像が Fig. 3 である。摩擦面の損傷状態は摩擦係数の大きさに対応しており、突起高さ $2\mu\text{m}$ の場合には細かい条痕が数本形成されるのみであり、相手材表面の損傷もほとんどない。一方、同 $20\mu\text{m}$ の摩擦面突起中央部は黒色に変色している。この変色部は周囲の平坦部よりも $1\mu\text{m}$ 程度の高い。同領域の微小硬さは 600HM であり、下地硬さ 250HM に比して大幅に硬質化されている。同領域には $1\mu\text{m}$ 以下の微細な摩耗粉の圧入も確認されたが、硬質化は固体接触による加工硬化の可能性が示唆される。相手面にも筋状の移着層が密に形成されている。したがって、段差の小さい凸テクスチャの付与は摩擦係数の低減安定化に寄与するといえる。同様な摩擦低減効果はアルミニウム (A1070) と焼入炭素鋼でも確認されている⁷⁾。今後、CFD 解析によりテクスチャ形状を適正化することでさらなる特性改善を検討する予定である。

乾燥状態でも凸テクスチャの摩擦安定化機構が確認されている⁸⁾。これは黄銅に凸テクスチャを付与し、クロム軸受鋼 (SUS2) と摩擦した結果、突起前方に微細な摩耗粉が堆積凝集しその一部は突起に付着しているが、これは平坦部に形成された移着層が突起により掻き落とされ突起前方に堆積した可能性が示唆されている。この掻き落としにより凝着部の成長が抑制されることで、摩擦係数および摩耗粉の成長は抑制される。

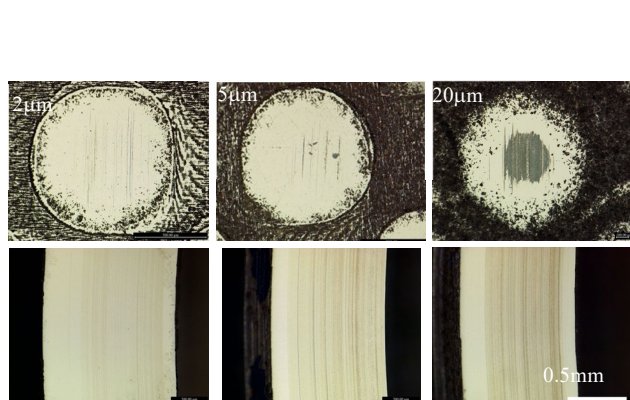


Fig. 3 Optical microscope image of bump (upper) and mated ring surface (lower)

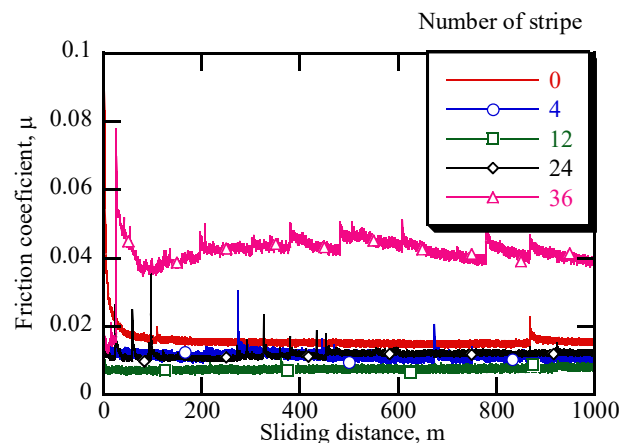


Fig. 3 Friction coefficient of non-uniform structured Sn based surface (400 N, 0.25 m/s, mineral oil lubrication)

3. 組織構造の不均質化

摺動面の組織構造を制御することで、硬さや剛性率といった摩擦面の組織構造を不均質化できる。青銅上にスズ (Sn) を成膜した後レーザーを放射状に照射し表面を不均質化し摩擦特性を評価した結果が Fig. 4 である。照射部は未照射部 (Sn 鍍金膜) に比して 10 倍程度硬質化した。未照射面の摩擦係数は 0.02 程度であるが脈動を伴う。照射部が 12 本の摩擦係数は実験初期から 0.01 以下で安定している。照射本数が 24 本や 36 本の摩擦係数は増加に転じ脈動も伴う。摩耗面の観察結果からは軟質なレーザー未照射部の流動が硬質な照射部によって抑制されることも確認されたことから、組織構造の不均質により摩擦係数の低減安定化できることが確認された。

4. まとめ

接触面の不均質による摩擦摩耗の効果について、表面形状 (テクスチャ) と組織構造の観点から検討した。テクスチャ、組織構造ともに適当な寸法を付与することで、摩擦特性の低減安定化に寄与することが確認されたが、これは凝着成長の抑制に起因する可能性が示唆された。

文献

- 1) 大竹 尚登：表面微細構造を有する DLC のトライボロジー特性，トライボロジスト，55，2 (2010) 89-94
- 2) A. Hase: Visualization of the tribological behavior of graphite in cast iron by in situ observations of sliding interfaces, Tribology International, 138(2019)40-46
- 3) M. Okamoto et al. : Role of cross-grooved type texturing in acceleration of initial running-in under lubricated fretting, Tribology International, Tribology International, 100(2016)126-131
- 4) 熊田 喜生 他：円周方向にマイクログループをもつすべり軸受の特性，トライボロジスト，43，6 (1998) 456-461
- 5) 河緒 実昌：スクロールコンプレッサにおけるテクスチャリング，トライボロジスト，60，4 (2015) 268-273
- 6) H. Seki et al. : Applicability of Convex and Concave Shaped Surface Texturing to Improve Damping Performance of Mechanical Tensioner for Timing Chain of Internal Combustion Engine, Tribology Online, 19, 2(2024)138-148
- 7) 石本 晟也 他：配列された突起群から構成されるテクスチャのトライボロジー，日本機械学会 2025 年度年次大会予稿集，S113-14
- 8) H. Usami: Effects of scrapping transfer layer off the mating surface on stabilizing friction resistance in convex surface texture, Proceedings of 2nd JSME International Conference on Materials & Processing, November 3-6 2025, Guam, USA
- 9) 大野 智寛 他：レーザーアニール処理された Sn 薄膜の摩擦特性，日本機械学会 2025 年度年次大会予稿集，S113-23