



S. Sasaki

摺動表面のトライボロジー特性向上を目的とした レーザプロセッシングによるマルチスケール・ テクスチャリング技術に関する研究

佐々木 信也*

1. まえがき

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ならびに信頼性の向上と高機能化および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。トライボロジー・システム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おり、これらを同時に解決する手段として表面改質技術に寄せられる期待は大きい。そもそも、構造部材として材料に求められる性質と、外部との境界を成す材料表面に求められる性質とは必ずしも一致せず、場合によっては相反する特性が求められることもある。そこで、表面に必要とされる性質を内部とは独立に付与し、機能の役割分担による材料全体での高性能化を図る手段として、表面改質は理に適った材料創製技術であると言える。一方で、表面改質技術は多岐に渡り、また目的は同じであっても技術体系の異なる手法間での性能比較等はあまり行われていないのが実情で、日進月歩の最新技術を網羅するような技術の体系化は進んでいない。

表面テクスチャリングは、表面改質の中でもっともシンプルであり、かつ如何なる場合にも必須となる表面処理プロセスである。特に表面形状や表面粗さは、機械部品の表面仕上げを規定する機械設計の基本中の基本とも言えるパラメータであるが、トライボロジー特性との相関やその影響については、未だに油膜パラメータ Λ を、流体潤滑状態を判断する上での指標として論ずる程度に留まっている。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製品を作り出している。しかしながら、トライボ理論に基づく合理的な設計手法では、表面テクスチャの指針すら提示することが難しいというのが実情である。

そこで本研究では、レーザ微細加工技術と DLC コーティング技術によって、摺動表面に様々な形状のレーザ・サーフェス・テクスチャリング (LST) を施した摩擦表面を作製し、流体潤滑状態ならびに境界潤滑条件下における摩擦特性への影響を調べ、テクスチャリングによる摩擦低減効

果を確認した。また、潤滑下での摺動特性を最適化するためのテクスチャ形状を設計するための CFD 解析を実施した。その結果、表面テクスチャリングの効果は、単に流体潤滑膜における動圧発生効果のみによるのではなく、境界潤滑状態における表面のなじみや、摩耗粒子の補足効果、さらには摩擦表面におけるトライボケミカル反応の促進によってもたらされることが明らかとなった。また、創製したマイクロな表面テクスチャ構造を維持する上で、耐摩耗性に優れる DLC コーティングを施すことにより、耐久性を大幅に向上できることを明らかにした。本報告では、トライボロジー特性改善のための表面テクスチャ創製における、レーザプロセッシングの役割と重要性についても言及する。

2. マルチスケール・テクスチャリングの概念

2.1 表面テクスチャリングの効果

摺動特性を考えた場合、表面テクスチャリングに期待される主な効果⁽¹⁾としては、

- 1) 動圧の発生
- 2) 摺動面への潤滑油の供給
- 3) 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、これらは定性的な一般論であって、定量的に予測ができるのは、流体潤滑下で発生する一部の動圧のみである。これが理論的な解明に限界をもたらす原因である。

図.1 に示したような一般的なストライバック曲線で考えれば、トライボ要素表面のほとんどは、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を認識しなければならない。すなわち、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、表面テクスチャリング効果の発現が期待されるのであり、効果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。

このような背景のもと、“なじみ”という切り口から表面テクスチャリングの効果を検討しようとする試みは、まさに学術的なアプローチから合理的に現実解を導くため

* 東京理科大学工学部 機械工学科 教授

の方策として、その展開が期待されるものと言える。“なじみ”に着目することの重要な点は、最初に創製したテクスチャが摩擦のプロセスを経る過程で変化すること、そして安定状態に至ったテクスチャこそが、改善効果をもたらすメカニズムを担うということを明確に認識することにある。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。

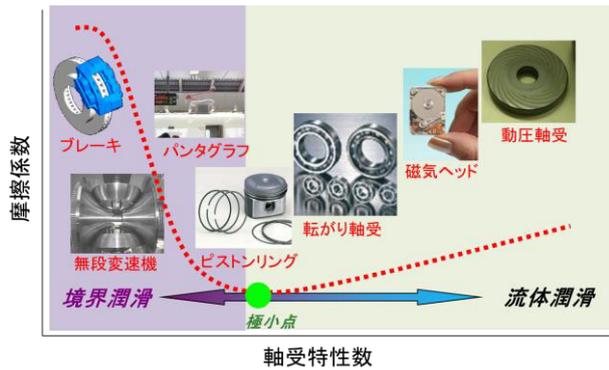


図1 ストライベック曲線と各トライボ要素の潤滑状態

2.2 マルチスケール・テクスチャリング

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が必要とされる。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れるため、テクスチャリング表面の設計に当たっては、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。図2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ものが、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²⁾。

テクスチャリングの単位スケールとその創製方法を図3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・高効率プロセスを比較的容易に組み合わせることも可能となっている²⁾。対象とするトライボ要素に合わせ、これに適したマル

チスケール・テクスチャを設計し、具現化していくことが求められている。

本研究では、レーザ微細加工技術を用い、数10ミクロンレベルでの表面テクスチャ構造を摺動表面に創製することにより、このようなメゾスケールのテクスチャが摺動特性に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。

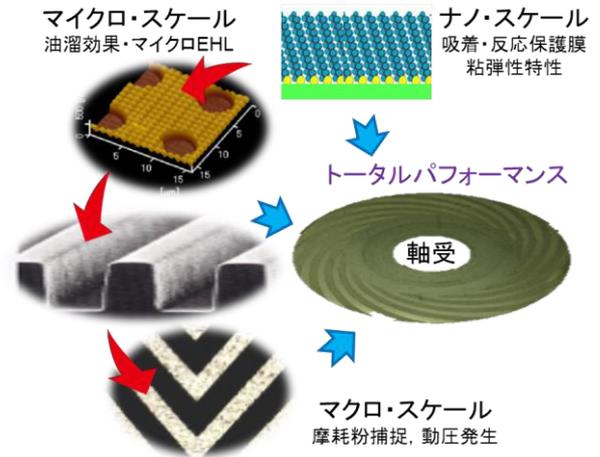


図2 マルチスケール・テクスチャリングの概念

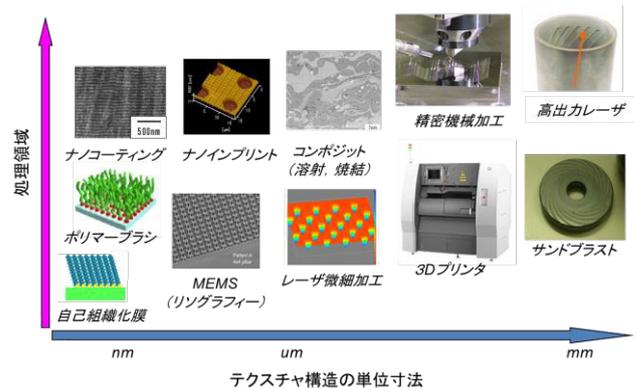


図3 表面テクスチャ創製プロセス

3. 実験方法

3.1 レーザ微細加工による表面テクスチャの創製

グリーン光 YV04 パルスレーザ（波長 532nm, 7W@30kHz）を光源とし、ガルバノヘッドによりレーザビームを 50×50mm の範囲でスキャン可能なレーザ微細加工装置を開発し、これを用いて表面テクスチャを摺動サンプル表面に施した。最小加工穴径は約 10μm であるため、これよりも大きなディンプルやライン等からなる様々なパターンを作製し、摺動評価試験に供試した。

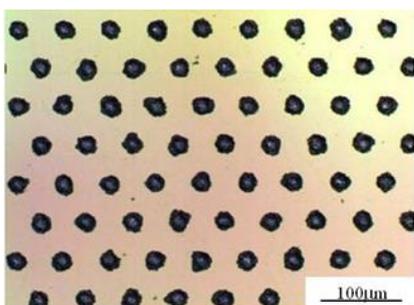
3.2 摺動材料

本実験では、環境負荷の少ない潤滑システムの実現を目指し、摺動材料には窒化ケイ素および DLC コーティング膜を選定した。窒化ケイ素は、水潤滑下において超低摩擦を示すことが知られており、また、DLC コーティングは添加

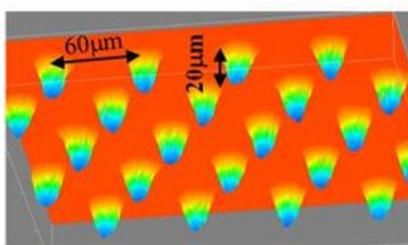
剤フリー潤滑油でも摺動特性が優れることが知られているが、トライボ要素への実用化に際しては、高荷重・低摩擦速度領域での摺動特性の改善が必須となっている。

表1 LSTによるディンプルパターン

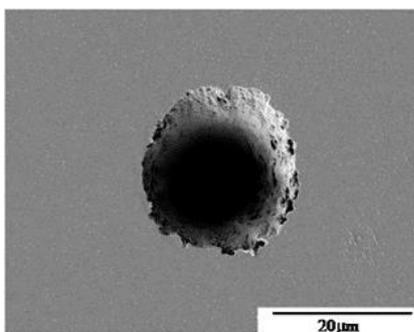
| Disk No | Dimple pitch [μm] | Dimple diameter [μm] | Dimple area ratio [%] |
|----------|-------------------|----------------------|-----------------------|
| Original | 0 | 0 | 0 |
| P60-D11 | 60 | 11 | 3 |
| P60-D20 | 60 | 20 | 11 |
| P60-D30 | 60 | 30 | 23 |
| P80-D11 | 80 | 11 | 2 |
| P80-D22 | 80 | 22 | 7 |
| P80-D31 | 80 | 31 | 14 |
| P100-D21 | 100 | 21 | 4 |
| P100-D25 | 100 | 25 | 6 |
| P100-D31 | 100 | 31 | 9 |
| P120-D21 | 120 | 21 | 3 |
| P120-D25 | 120 | 25 | 4 |
| P120-D35 | 120 | 35 | 8 |



(a) ディンプルパターンの光学顕微鏡像



(b) レーザ顕微鏡によるディンプルの3次元形状



(c) ディンプル周辺のSEM像

図4 窒化ケイ素表面に作製したディンプルパターン

表1に窒化ケイ素ディスクに施したディンプルパターンの詳細を示す。ディンプルの直径およびディンプル間のピッチを変えて12種類の表面テクスチャを作製した。ディンプルの深さは20 μmとした。表面に占めるディンプルの面積割合は2~14%であった。

図4に窒化ケイ素加工表面のSEM写真を示す。なお、窒化ケイ素の場合は、レーザー光を窒化ケイ素表面に直接照射してディンプルを作製し、レーザー照射痕周囲のデブリ等の除去処理は行わず、そのまま摺動試験に用いた⁽³⁾。

DLCコーティングの場合には、コーティング後にレーザー加工を施すと、照射ダメージによりDLC膜の剥離が起こり易くなることが判った。そこで、ディスク基板の軸受鋼にLSTにより表2に示す各種パターンを加工し、加工痕周辺のデブリ等をラッピング処理により除去した後、UBMS(アンバランスドマグネトロンスパッタリング)法により、DLCコーティングを施した。DLCコーティング膜の厚さは、約2 μmであった。テクスチャの基本パターンは三角形、楕円、円を用い、全てのパターンにおいて面積率を約8%に揃えた。図5示すように、DLCコーティングの場合には、断面形状に矩形のものに深さにグラデーションを施したものの2通りの形状を採用した。パターン7, 8は摺動方向に深さのグラデーションを施したものである。

図6にDLCコーティングディスクの一例として、パターン8の光学顕微鏡写真を示す。三角形の凹形状は、常に摺動方向に対して同じ角度となるよう円周上に並べられている。表4にアスペクト比(H/W)を変えた、各テクスチャパターンのパラメータを示す。テクスチャの形は三角形であり、摺動方向は底辺から頂点への方向、摺動方向の幅は200 μmとした。面積率は8.3%である。表4面積率(凹部の面積/加工面の全面積)を変えた、各テクスチャパターンのパラメータを示す。テクスチャの基本パターンは三角形である。パターン16~21は断面が矩形、パターン22~27は断面が深さにグラデーションを施したものである。

表2 DLCコーティングディスク上のパターン

| Pattern | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Geometry | Triangle | Triangle | Ellipse | Ellipse |
| Sliding direction | Top to Base | Base to Top | Long side | Short side |
| Width/Diameter [μm] | 380 | 380 | 450 | 150 |
| Area ratio[%] | 13 | 13 | 13 | 13 |
| Depth[μm] | 10 | 10 | 10 | 10 |
| Pattern | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Geometry | Circle | Dimple | Triangle | Triangle |
| Sliding direction | - | - | Top to Base | Base to Top |
| Width/Diameter [μm] | 300 | 40 | 800 | 800 |
| Area ratio[%] | 13 | 13 | 14 | 14 |
| Depth[μm] | 10 | 10 | - | - |

表3 アスペクト比の異なる3角形状パターン

| Pattern | 9 | 10 | 11 | 12 |
|---------------|-------|-------|-------|-------|
| Aspect ratio | 0.033 | 0.038 | 0.046 | 0.061 |
| Area ratio[%] | 8.3 | 8.3 | 8.3 | 8.3 |
| Depth[μm] | 6.5 | 7.6 | 9.2 | 12.1 |
| Pattern | 13 | 14 | 15 | |
| Aspect ratio | 0.097 | 0.122 | 0.174 | |
| Area ratio[%] | 8.3 | 8.3 | 8.3 | |
| Depth[μm] | 19.4 | 24.3 | 34.8 | |

表4 面積比率の異なる3角形状パターン

| Pattern | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Area ratio[%] | 3.3 | 4.3 | 5.8 | 8.3 | 10.3 | 16.8 |
| Aspect ratio | 0.033 | 0.033 | 0.033 | 0.033 | 0.033 | 0.033 |
| Pattern | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 |
| Area ratio[%] | 3.3 | 4.2 | 5.8 | 7.9 | 10.3 | 16.1 |

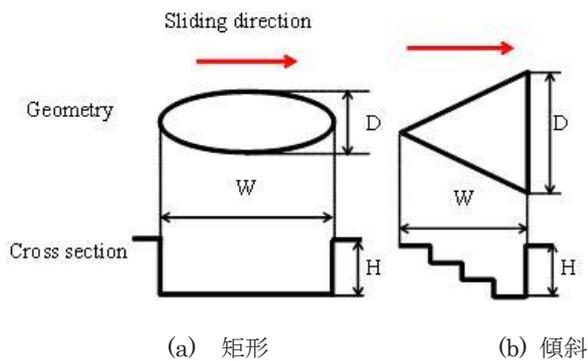


図5 ディンプルの断面形状

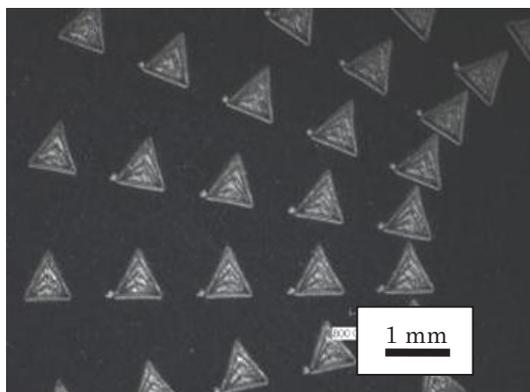


図6 DLCコーティング表面のテクスチャの様子

3.3 摺動試験

摩擦試験機の概略を図7に示す。本摩擦試験機は、モーター側の軸に固定されたリング試験片の端面を、潤滑油で満たしたカップ内のディスク試験片に押し付け、荷重制御機構により一定荷重をかける構造となっている。カップを静圧軸受で支えることで、カップ固定台から伸びた梁により摩擦係数測定用ロードセルを押す力の高精度測定が可能である。摩擦試験における荷重は100, 200, 500Nとし、回転速度は30, 50, 70, 200, 500rpmとした。リング試験片には、窒化ケイ素を用いた、ディスク試験片には、テクスチャを施した窒化ケイ素とDLCコーティングを用いた。潤滑油は、窒化ケイ素の場合には水を、DLCコーティングの場合には無極性無添加潤滑油としてスクアランを用いた。試験中の潤滑油の温度は、K熱電対を用いて測定した。

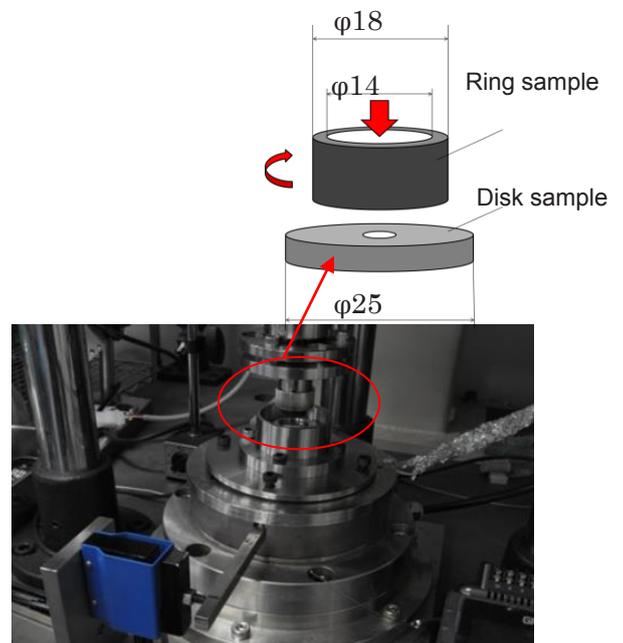


図7 リングオンプレート型摩擦試験機の概略

4. 実験結果

4.1 水潤滑下における窒化ケイ素の摺動特性

図8にテクスチャを施した窒化ケイ素の水潤滑下での摩擦特性の一例を示す。研磨面オリジナルに比べ、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確認された。また、ディンプル形状は、直径30μmでピッチが150μmの面積率9%の表面の方が、潤滑性向上効果が大きいことも判った。尚、効果が見られた潤滑領域は、境界潤滑から混合潤滑の領域で顕著であったことから、テクスチャリングの効果は、単に流体潤滑膜における動圧発生効果のみによるのではなく、境界潤滑状態における摩擦低減効果が発揮されたものと考えられる。

摩擦面のSEM観察およびSEM-EDX分析を行ったところ、図9示すように、窒化ケイ素ディスク摩擦面のディンプルには、摩擦時間の経過とともに摩擦排出物によって埋まり、ディンプル形状が消滅している様子が確認された。また、

ディンプルを埋めている物質は、窒化ケイ素と水との反応により形成されたと考えられるシリコン酸化物もしくは水和物であることが判った。

以上より、表面テクスチャの効果は、表面のなじみや、摩耗粒子の補足効果、さらには摩擦表面におけるトライボケミカル反応によってもたらされるものと考えられる。特に、ディンプル形状を施した摩擦表面では、ディンプル内で負圧によるキャビテーションの発生が予測されることから、キャビテーションの生成・消滅に起因するソノケミストリーによる化学反応促進効果が表面テクスチャ効果に関与している可能性も考えられる。

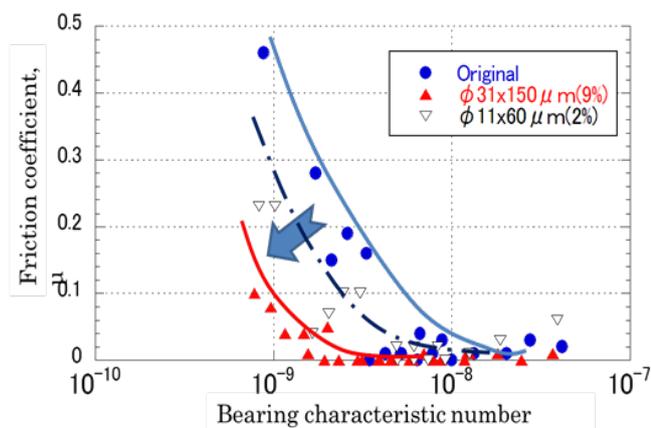


図8 LSTによる窒化ケイ素の水潤滑特性改善効果

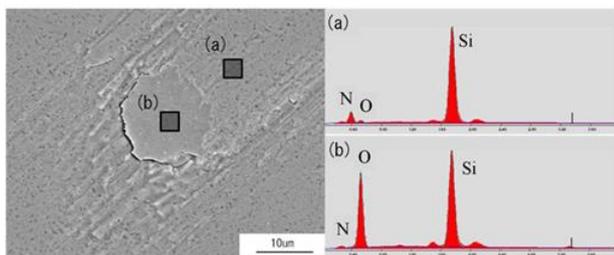


図9 摩擦面のSEM-EDX分析結果

- (a)ディンプル周辺の撓動表面
- (b)ディンプル内埋詰面

4.2 表面テクスチャを施したDLC膜の撓動特性

摩擦試験後のDLCテクスチャ表面のSEM写真を図10に示す。摩擦面には、相手撓動材料の窒化ケイ素移着物が見られたが、DLC膜の剥離等の損傷は観察されなかった。また、ディンプルが摩耗粉で埋まるような様子も見られなかった⁽⁴⁾。

パターン17と27について、テクスチャ無しのDLC膜と撓動特性を比較した結果を図11に示す。潤滑油には無極性基油のスクワランを用いた。一連の実験においては、DLC膜にテクスチャを施したすべてのパターンにおいて同様の傾向、すなわち、境界潤滑領域と混合潤滑領域において摩擦係数が低減し、流体潤滑領域が拡大することが確認さ

れた。このような潤滑性向上効果を定量的に評価するため、ストライベック線図において、境界・混合潤滑と流体潤滑領域における摩擦データをそれぞれ線形に近似し、2直線の交点の軸受特性数を混合潤滑から流体潤滑へ遷移する軸受特性数を遷移軸受数と定義した。

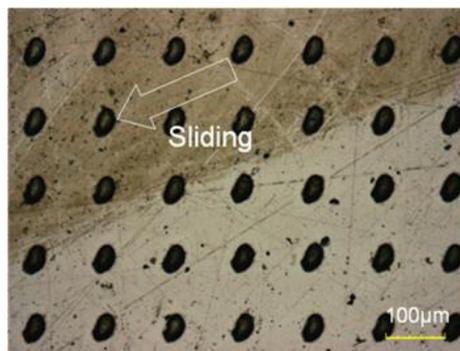


図10 テクスチャ付与DLC摩擦面のSEM像

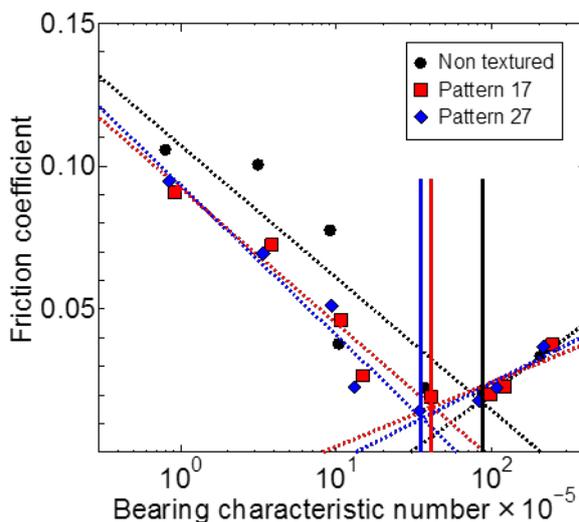


図11 DLCの摩擦特性に及ぼすLSTパターンの影響

各表面テクスチャパターンにおける遷移軸受数をまとめたものを図12に示す。棒グラフは三角形のテクスチャの遷移軸受数を示し、三角形のテクスチャは撓動方向、断面形状に関わらず、 40×10^{-5} 以下のほぼ同じ数値を示した。テクスチャのない表面の遷移軸受数が約 90×10^{-5} であるので、これよりも低い値を示した表面テクスチャは、流体潤滑領域の拡大効果があると判断できる。また、図12示したプロットは、円や楕円形状の遷移軸受数を縦軸のW/Dでまとめたものである。この図より、撓動方向に長い形状のものほど遷移軸受数が低く、流体潤滑領域の拡大に効果のあることが確認された。

テクスチャ断面のアスペクト比、面積率を変化させた場合の撓動特性への影響を図13に示す。アスペクト比が減少するにつれ、遷移軸受数は低下する傾向があることが分かった。アスペクト比0.03~0.04では遷移軸受数が 40×10^{-5} 以下となり、流体潤滑領域の拡大に効果があることが

確認された。また、面積率が増加するにつれ、遷移軸受数は低下する傾向があることが分かった。断面が矩形のものは面積率 4.3%以上、深さにグラデーションを施したものは面積率 7.9%以上で遷移軸受数が 40×10^{-5} 以下となり、流体潤滑領域の拡大に効果があることが確認された⁽⁶⁾。

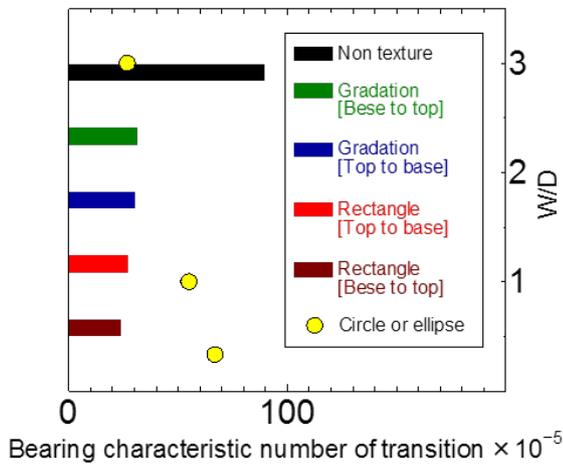


図 12 潤滑状態遷移に及ぼす LST パターンの影響

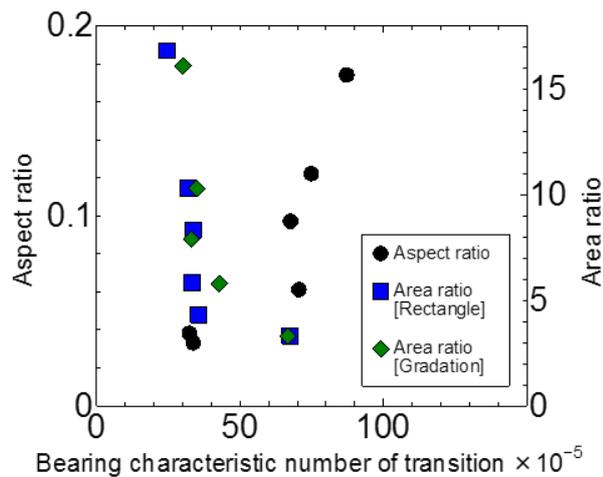


図 13 潤滑状態遷移に及ぼす三角形パターンのアスペクト比ならびに面積比率の影響

5. まとめ

レーザ微細加工法を用いて、窒化ケイ素および DLC コーティングの摩擦表面に各種テクスチャを施し、摺動特性改善効果を調べた結果、以下の知見を得た。

- (1) 窒化ケイ素にディンプル加工を施すことにより、水潤滑下における境界・混合潤滑領域における摩擦特性は大幅に向上し、本実験で作製したパターンの中では、ディンプル直径 $30 \mu\text{m}$ 、ピッチ $150 \mu\text{m}$ の場合にもっと

も改善した。ただし、トライボケミカル反応によるシリコン酸化物もしくは水和物がディンプルを埋めることにより、表面テクスチャが消失することが確認された。

- (2) 耐摩耗性に優れた DLC コーティングを LST に適用した結果、膜の剥離は観察されず、摩耗による表面テクスチャ消滅も抑制されることが確認された。
- (3) スクアラン潤滑した LST-DLC 膜の摺動試験においては、全てのテクスチャパターンにおいて、境界潤滑領域・混合潤滑領域での摩擦低減効果が見られた。流体潤滑領域の拡大には、三角形ならびに摺動方向に長い楕円形状が有効であった。また、テクスチャを形成するディンプルのアスペクト比の小さいものほど、また凹部の占める面積率が大きいものほど、混合潤滑から流体潤滑への潤滑状態の変化を表す遷移軸受数は低下する傾向を示し、流体潤滑領域の拡大に効果的であることが判った。

6. あとがき

表面テクスチャリングによって摩擦特性を改善する試みは古くよりあるが、ナノ・マイクロサイズのパターンをミリサイズパターンと融合し、実用部品サイズに適用・評価する研究は行われていない。レーザプロセッシング技術は、ナノからマクロまでの広い領域において、高効率で高精度な加工を可能とするものであり、摺動表面へのマルチスケール・テクスチャリング技術を適用、展開していく上で重要なツールになるものと考えられる。また、単なる除去加工に留まらず、局所的な熱処理加工や、3次元形状付加加工への利用⁽⁶⁾も大いに期待される。今後はさらに、レーザプロセッシングの持つ高いポテンシャルを活用し、トライボロジー特性に優れた実用的な摺動表面の開発に取り組んでいく予定である。

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-2009215) 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: トライボロジスト, 60, 4 (2015) 241-248
- 2) 佐々木: 日本塑性加工学会誌, 56, 657 (2015) 49-53
- 3) H.Yamakiri, S.Sasaki, K.Kurita, E.Kasashima, Tribology International, 44 (2010) 579 - 584.
- 4) 佐々木: 表面技術, 65, 12 (2014) 568-572
- 5) S.Sasaki, Proc. of ECOTRIB (2011) 289-291
- 6) 佐々木: 月刊トライボロジー, 239(215)33-41