

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

東京理科大学 工学部第一部 機械工学科
教授 佐々木信也
(平成 21 年度一般研究開発助成 AF-2009215)

キーワード：トライボロジー，レーザ加工，表面テクスチャリング，DLC，省エネルギー

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、表面改質は実に理に適った材料創製技術であると言えよう。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。ここに、学術的知見と実用技術との間の乖離があると言えよう。例えば、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、そのような経験則に基づいて作られた表面の性能を超えることはもちろん、表面テクスチャの指針すら提示できないというのが実情である。表面テクスチャによって改善を期待する効果が、どのようなメカニズムに起因するものなのか？また、どのように改善したいのか？まずは、これらの点を明確にした上で、表面テクスチャリングを考えることが重要になる。

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、摺動表面にマルチスケール・テクスチャを付与する加工技術の開発を行った。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、耐摩耗性に優れた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。

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とともに、どうしてもテクスチャリングのデザインをノウハウに頼らざるを得ない状況を生み出している。しかしこれで済ましては、学術とエンジニアリングとの溝は埋まらない。

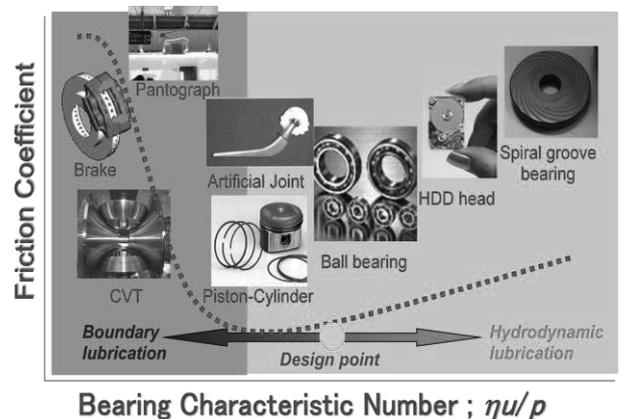


Fig.1 Condition of tribo-elements on Stribeck curve

Fig.1 に示したような一般的なストライベ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すべきである。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。

このような中、“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解明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。

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。このように、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¹⁾。

テクスチャリングの単位スケールとその創製方法を Fig.2 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、そしてレーザーや電子・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。

本研究の目的は、レーザー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にある。

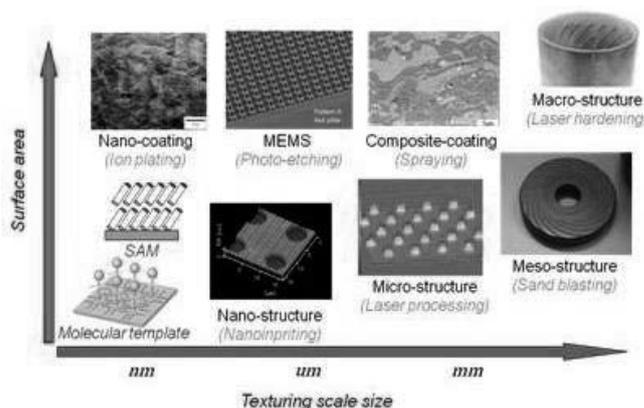


Fig.2 Surface treatment processes for multi-scale texturing

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 YVO4 パルスレーザー(波長 532nm, 7W@30kHz)を光源とし、ガルバノヘッドによりレーザービームを 50×50mm の範囲でスキャン可能なレーザー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 10 μm 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

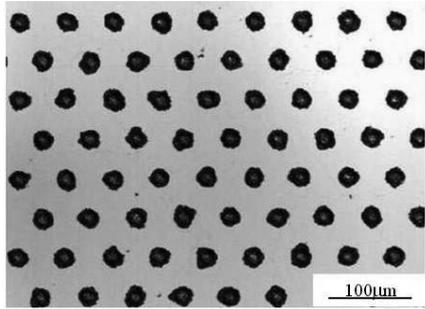
本研究では、環境負荷の少ない潤滑システムの実現を目指し、摺動材料には窒化ケイ素および DLC コーティング膜を選定した。窒化ケイ素は、水潤滑下において超低摩擦を示すことが知られており、また、DLC コーティングは添加剤フリー潤滑油でも摺動特性が優れることが知られているが、トライボ要素への実用化に際しては、高荷重・低摩擦速度領域での摺動特性の改善が必須となっている。

Table 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。シ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。

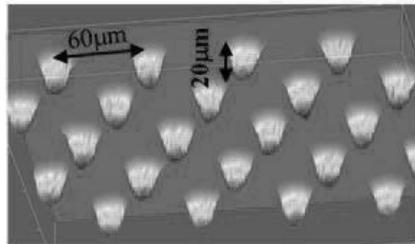
Table 1 Dimple patterns on Si₃N₄ disk specimen by LST

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

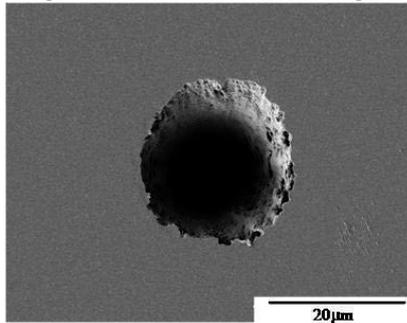
Fig.3 に窒化ケイ素加工表面の SEM 写真を示す. なお, 窒化ケイ素の場合は, レーザ光を窒化ケイ素表面に直接照射してディンプルを作製し, レーザ照射痕周囲のデブリ等の除去処理は行わず, そのまま摺動試験に用いた³⁾.



(a) Optical micrograph of dimple pattern



(b) 3-D images of confocal laser scanning microscopy



(c) SEM micrograph of dimple

Fig.3 Dimple pattern on Si₃N₄ disk specimen

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 Table2 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.

Table 2 に作製した各テクスチャ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, 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. Fig.4 に示すように, DLC コーティングの場合には, 断面形状に矩形のものと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. Fig.5 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. Table 3 にアスペクト比 (H/W) を変えた, 各テクスチャ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方向, 摺動方向の幅は 200µm とした. 面積率は 8.3%である. Table 4 に面積率 (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.

Table 2 Texture patterns on DLC disk by LST

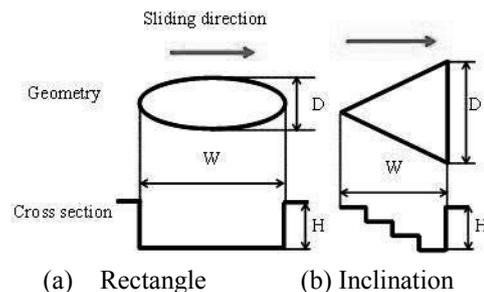
Pattern	1	2	3	4
Geometry	Triangle	Triangle	Ellipse	Ellipse
Sliding direction	Top to Base	Base to Top	Long side	Short side
Width/Diameter [µm]	380	380	450	150
Area ratio[%]	13	13	13	13
Depth[µm]	10	10	10	10
Pattern	5	6	7	8
Geometry	Circle	Dimple	Triangle	Triangle
Sliding direction	-	-	Top to Base	Base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

Table 3 Triangle patterns with each aspect ratio

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	

Table 4 Triangle patterns with each area ration

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



(a) Rectangle (b) Inclination

Fig. 4 Schematic of cross sectional structure

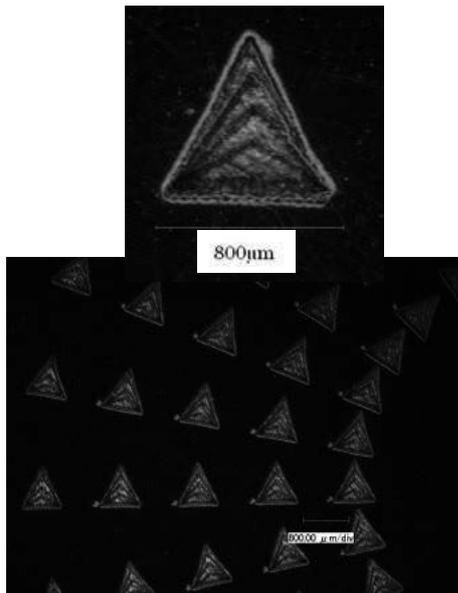


Fig.5 Schematic of LST pattern(No. 8) on DLC disk

3.3 摺動試験

摩擦試験機の概略を Fig.6 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。

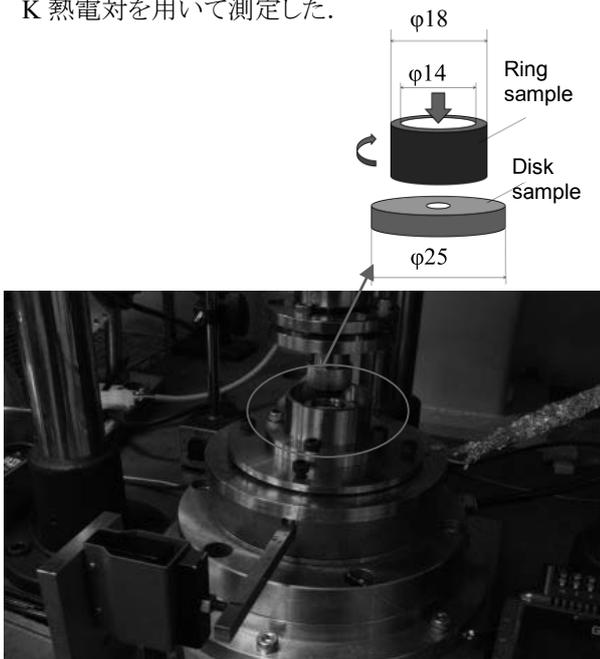


Fig. 6 Schematic of sliding test apparatus

3. 実験結果

3.1 水潤滑下における窒化ケイ素の摺動特性

Fig.7 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⁵⁾。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 $30\mu\text{m}$ でピッチが $150\mu\text{m}$ 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推察された。

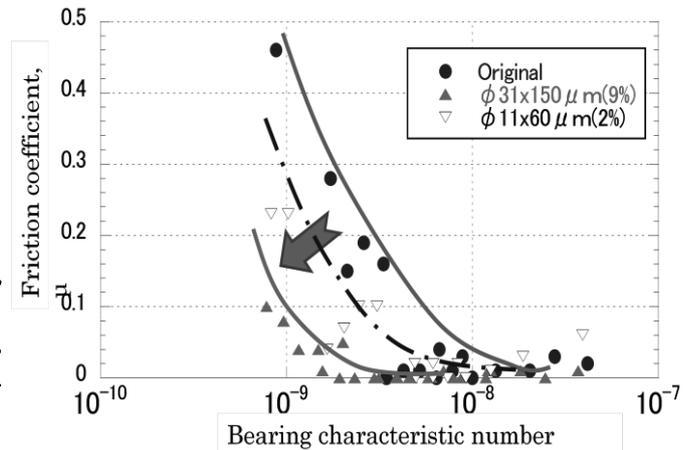


Fig.7 Effect of laser surface texturing on friction behavior of Si_3N_4 under lubrication with water

摩擦面の SEM 観察および SEM-EDX 分析を行ったところ、Fig.8 に示すように、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口によって埋まり、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。

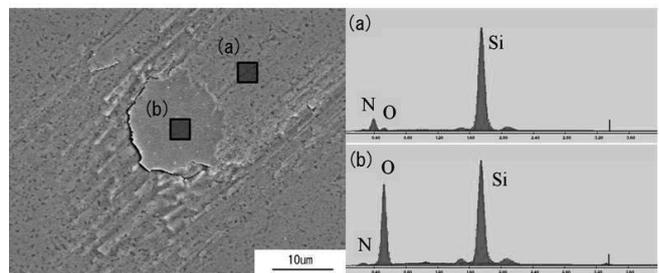


Fig.8 SEM-EDX spectrum of textured surface after sliding test ;
(a) Sliding surface around dimple,
(b) Sediment in dimple

以上より、表面テクスチャの効果は、表面のなじみや、摩擦粒子の補足効果、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⁴⁾。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連している可能性も考えられる。

3.2 表面テクスチャを施した DLC 膜の摺動特性

摩擦試験後の DLC テクスチャ表面の SEM 写真を Fig.9 に示す。摩擦面には、相手摺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、ディンプルが摩擦粉で埋まるような様子も見られなかった⁶⁾。

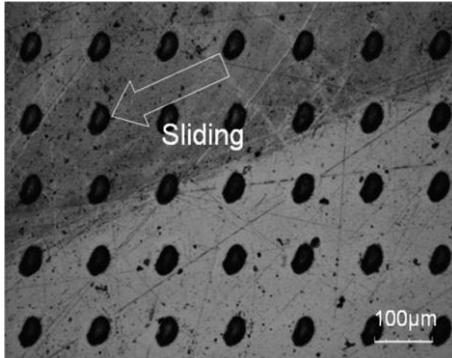


Fig.9 SEM-image of sliding surface of LST-DLC

パターン 17 と 27 について、テクスチャ無しの DLC 膜と摺動特性を比較した結果を Fig.10 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。

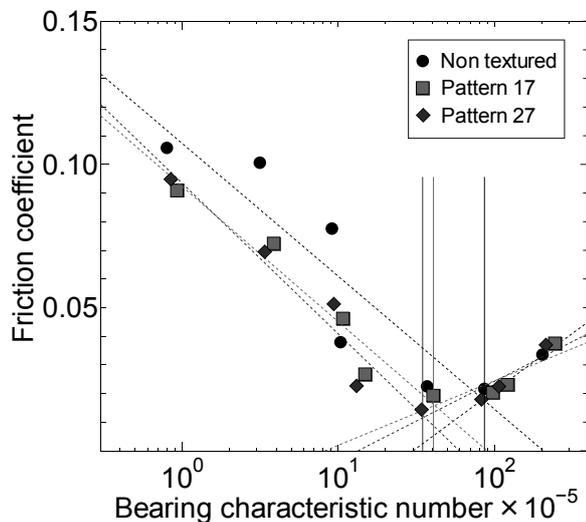


Fig.10 Effect of LST on friction behavior of DLC

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 Fig.11 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摺動方向、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、Fig.11 に示したプロットは、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、摺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。

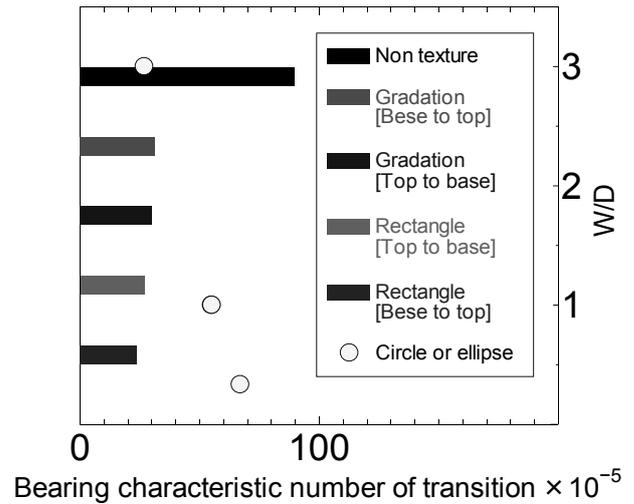


Fig.11 Effect of LST pattern on transition of lubrication range

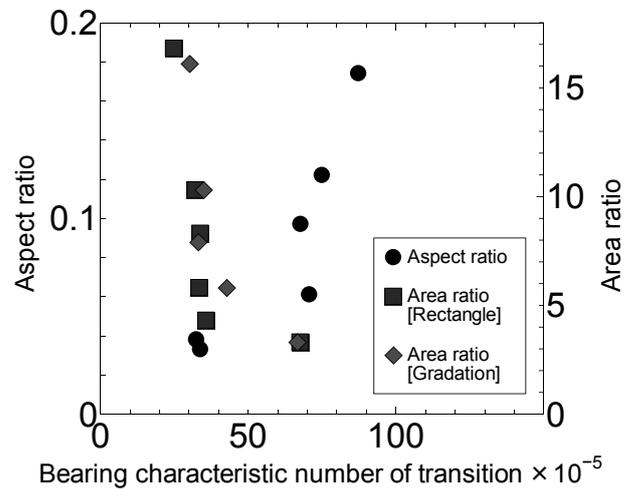


Fig.12 Effect of aspect and area ratio on transition of lubrication range

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摺動特性への影響を Fig.12 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。

4. まとめ

レーザー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が大幅に改善されることを確認した。
- (2) 窒化ケイ素の摺動特性は、本実験で作製したパターンの中では、ディンプルの直径 $30 \mu\text{m}$ でピッチが $150 \mu\text{m}$ の場合にもっとも改善効果が見られた。
- (3) 窒化ケイ素同士の水潤滑の場合、すべてのパターンで摺動特性の改善は見られたものの、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。
- (4) 耐摩耗性に優れる 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。
- (5) スクアラン潤滑した LST-DLC 膜の摺動試験では、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。また、流体潤滑領域の拡大には、三角形形状ならびに摺動方向に長い楕円形状が効果的であることが判った。
- (6) 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。

5. おわりに

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。その原因の一つに、材料加工、流体解析、トライボロジーおよび機械要素設計等の多岐に渡る専門家の連携不足が挙げられる。地球環境問題を背景に機械システムの摩擦損失低減が喫緊の課題となっている現状を踏まえ、表面テクスチャリングに関する知見を蓄積することにより、設計指針の体系化に積極的に取り組む必要がある。

謝辞

本研究は、(財)天田金属加工機械技術振興財団からの研究助成 (AF-2009215) の交付により推進されたものです。ここに深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 佐々木信也：“トライボロジー特性改善のための表面テクスチャリング”，潤滑経済，542，(2010) 2-7.
- 2) H.Ogawa, S.Sasaki, A.Korenaga, K.Miyake, M.Nakano:” Effect of surface texture size on tribological property of slideway”, 224, 9 (2010) 885-890.
- 3) H.Yamakiri, S.Sasaki, K.Kurita, E.Kasashima:” Effects of laser surface texturing on friction behavior of silicon nitride under lubrication with water”, Tribology International, 44 (2010) 579 – 584.
- 4) K.Yamaguchi, R.Tsuboi, S.Sasaki:” Effects of geometrical product specification on tribological properties of steel under boundary lubrication”, Proc. of the 4th International Conference on Manufacturing Machine Design and Tribology, (2011) 131-132.
- 5) S.Sasaki:” Laser surface texturing of silicon nitride under lubrication with water”, Proc. of ECOTRIB (2011) 289-291
- 6) S.Sasaki:” Effect of Laser surface texturing on DLC under lubrication with water”, Proc. of the 4th International Conference on Manufacturing Machine Design and Tribology, (2011) 100-101.