

自己治癒力を有する超低摩擦システムの創成 —基礎研究と社会実装のつなぎ目—

Ultra-Low Friction Systems with Self-Healing Capabilities

-The interface between fundamental research and practical implementation-



足立幸志*

Prof. Koshi ADACHI

To bridge the gap between basic research and practical implementation in tribology, this paper proposes leveraging tribochemical reactions during running-in to create self-forming low-friction interfaces. Optimizing running-in conditions, surface texturing, and novel coatings actively induces the formation of functional tribofilms. Furthermore, we demonstrate a self-healing system where an ultra-thin low-shear interface continuously regenerates to a constant thickness during sliding. Use of friction energy for self-healing interfaces provides a practical strategy to enhance mechanical system reliability and durability.

Key Words: running-in, tribochemical reaction, self-healing, low-friction

1. はじめに

ノーベル賞を受賞した青色LEDの発明。もし「実験室で光った」という基礎研究の成果のまま放置されていたら、今日の省エネ照明やスマートフォンの鮮やかな画面は存在していない。発見された現象や解明された原理を基に誰でも安価に安全に使える製品にする「社会実装」は極めて重要である。しかし、基礎研究と社会実装の間には、コスト・量産化・安全性・耐久性といった異なる次元の難しさがあり、それを克服する「技術の架け橋」が必要となる。

一方、物質の性質である「ヤング率」や「電気伝導率」等は、いつどこで測定しても同じ値を示すのに対し、「摩擦」や「摩耗」はそうはいかない。これらは材料固有の物理量ではなく、様々な要素が複雑に影響し合う「システムの応答特性」だからである（図1）。

具体的には、以下のような多種多様な因子に強く左右される。

- ・ 力学的因子：荷重、滑り速度等
- ・ 材料因子：相手材料、表面粗さ、機械的・化学的特性等
- ・ 潤滑因子：基油、添加剤等
- ・ 環境因子：雰囲気温度や湿度等

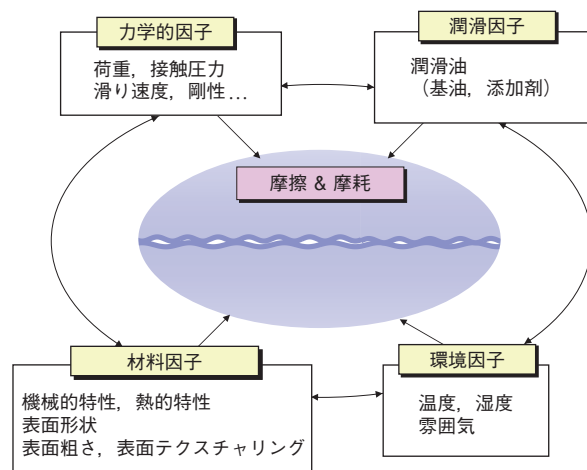


図1 システムの応答特性である摩擦と摩耗
Friction and wear as system response characteristics

さらに、摩擦や摩耗が起きている現場（摩擦界面）は、刻一刻と変化するため、「ナノスケール（原子・分子レベル）での科学的知見」と「マクロ（実質的な機械）で発生する摩擦・摩耗を制御する技術」の間には大きな乖離が存在する。

それゆえ、実験室の試験で優れた低摩擦や耐摩耗性が得られ、異なる機構を持つ実機システムに導入しても、現象が再現せず、耐久性の確保が難しくなるケースが多々発生する。これこそが、トライボロジー分野の基礎研究と社会実装の間にある本質的なギャップであり、強

*東北大学大学院工学研究科 教授

力な「技術の架け橋」が求められる理由である。

本稿では、このトライボロジー特有のギャップをいかにして埋め、基礎的知見を実機の信頼性向上へとつなげていくか—その解決策として当研究室が取り組んでいる「摩擦エネルギーによる超低摩擦発現界面の自己形成とその継続性」に関する研究の概要を紹介する。

2. 境界潤滑・無潤滑状態における低摩擦と耐久性

2.1 低摩擦発現のための必要条件

マクロな現象としての摩擦は、「真実接触部の面積」とその「接触部のせん断強度」の積で理解されるため、低摩擦発現のためには、以下の3条件が必要となる。

- (1) 摩擦界面に低せん断強度を有する層または膜が存在すること
- (2) 真実接触面積が小さいこと（接触する両固体の硬度が高く、かつ低せん断強度を有する膜が薄いこと）
- (3) 二つの固体が(1)の膜により直接接触をしないこと

これらの条件から、科学的知見に基づく低摩擦のための設計指針は、「硬い表面上に薄く軟らかい潤滑膜を形成すること」と整理される。

2.2 耐久性確保に向けたトレードオフ（二律背反）

2.1 を満たすナノメートルオーダーの薄い潤滑膜は、優れた性能を発揮する一方で、その薄さ故に短期間で摩擦減する。そのため長期間の低摩擦を維持（耐久性を確保）するには、その潤滑膜の厚さの増加が必要となる（図2）¹⁾。しかし、膜を厚くすると柔らかい潤滑膜の変形により接触面積が増加するため、摩擦が大きくなる。つまり、「低摩擦化」と「耐久性（膜厚）」の間には、強いトレードオフ（二律背反）が存在する。この課題を解決するアプローチが、本稿で取り上げる「自己治癒力を有する超低摩擦システム」である。

3. 低摩擦発現のための「なじみ」

3.1 トライボ化学反応に起因したなじみ過程

機械部品の使用の初期段階において、摩擦摩耗特性における適合性が向上し、初期の高摩擦が徐々に低下し、低く安定した摩擦に移移する過程を一般的に「なじみ（running-in）」という。この摩擦初期の過渡的な状態は、表面の幾何形状の変形と摩耗により安定した定常状態へ

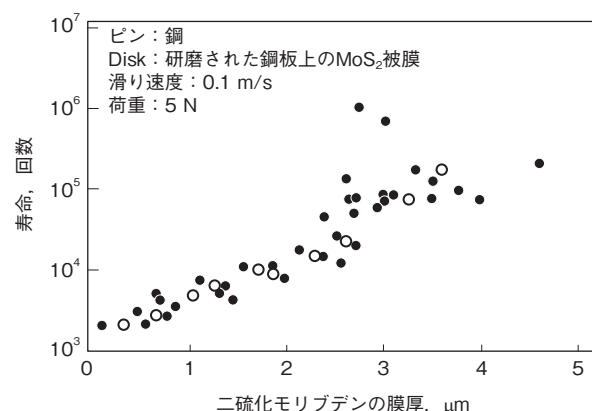


図2 固体潤滑材の膜厚に伴う寿命の増加¹⁾

Increase in lifetime with coating thickness of solid lubricant film

と移行することが多いため、「なじみ運転」は「運転中に接触面の表面損傷が発生しないように、完全な油膜形成を早期に実現するために適正な条件の下で運転し、表面粗さを押しつつ滑らかにするための予備運転」と定義され²⁾、安定した低摩擦となる流体潤滑状態を実現するための予備運転と認識されることが多い。

これに対し我々は、「摩擦エネルギーによって表面が化学反応（トライボ化学反応）を起こし、自ら理想的な潤滑膜を作り出すプロセス」を広義のなじみと再認識し、研究をすすめている。

例えば、水中でケイ素系セラミックス同士をすべらせると、摩擦初期は高摩擦であるものの、水との化学反応によって表面に厚さ約2 nmの親水性膜（コロイダルシリカ等を含むトライボフィルム）が形成され³⁾、最終的に摩擦係数0.01以下の超低摩擦状態へ移行する（図3⁴⁾、図4）。また、基油（PAO8）中およびモリブデンジチオカーバメート（MoDTC）添加油中における窒化クロム（CrN）膜と軸受鋼の摩擦においても、添加剤（MoDTC）の化学反応によって二硫化モリブデン（ MoS_2 ）の薄膜が自己形成され、安定した低摩擦（摩擦係数約0.04）が実現する（図5⁵⁾、図6⁵⁾）。

このように、初期段階では低摩擦条件を満たしていなくても、摩擦に伴う化学反応を活用することで、環境に応じた最適な低摩擦界面を「能動的に創り出す」ことが可能である。このメカニズムを解明し制御することが、基礎研究と社会実装をつなぐ極めて有効な戦術となる。

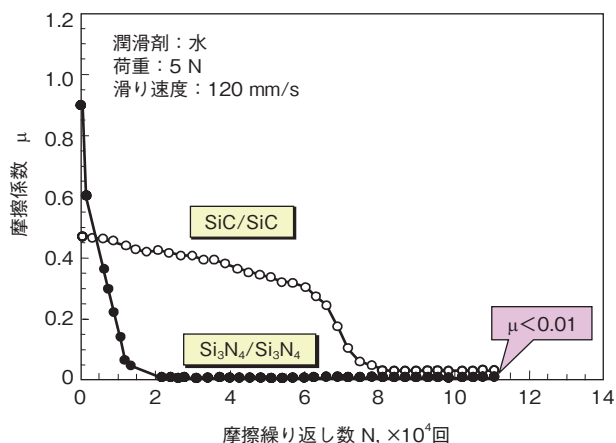


図3 水中における炭化ケイ素および窒化ケイ素同士の摩擦特性⁴⁾

Frictional properties of silicon carbide and silicon nitride in water

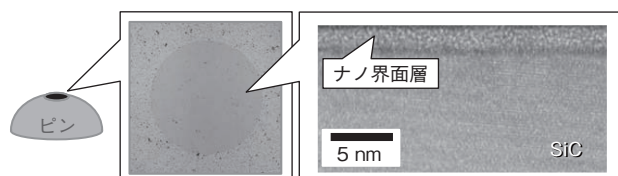


図4 水中での炭化ケイ素同士の摩擦における超低摩擦発現時のボール摩痕の光学顕微鏡像および断面TEM像

Optical microscope image and cross-sectional TEM image of ball wear scar during exhibition of ultra-low friction in silicon carbide sliding against itself in water

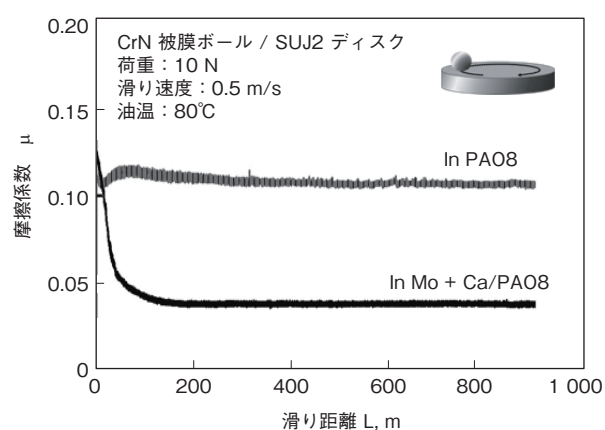


図5 油中における窒化クロムコーティングと軸受鋼の摩擦特性⁵⁾

Frictional properties of chromium nitride coating sliding against bearing steel in oil

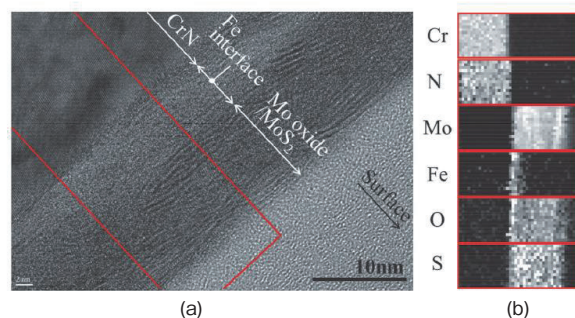


図6 図5の定常状態時の窒化クロムコーティングを施したボール摩痕断面の (a)TEM 像と (b)EDX による元素マッピング像⁵⁾

(a) TEM image and (b) EDX elemental map of cross-section of chromium-nitride-coated ball wear scar in steady state shown in Fig. 5

4. 超低摩擦発現界面形成のための表面処理技術(なじみ処理・表面テクスチャリング)

水潤滑システムは、水の低粘性を活かして従来の潤滑油では実現できない超低摩擦を期待できるため、医療機器、食品製造、半導体製造といった特殊環境で強く求められている。しかし最大の課題は、低粘性ゆえの許容荷重（低摩擦を維持できる臨界荷重）の低さであり、「低摩擦」と「耐荷重性」の両立が社会実装の大きな障壁となる。

これに対し、初期の「なじみ処理」の最適化によって、同じ材料・同じ摩擦条件であっても、理想的な界面を自己形成させ、低摩擦と耐荷重性を高次元で両立できることを明示している（図7⁶⁾、図8⁷⁾）。さらに、マイクロからナノメートルレベルで制御されたマルチスケールテクスチャリング⁸⁾を施すことで、トライボ化学反応が摩擦面内で均一に促進され、その結果、極めて高い許容荷重を確保しつつ、摩擦係数 0.0001 オーダーという超低摩擦を実現することに成功している（図9⁹⁾）。これは、親水性に優れたトライボフィルムや、せん断抵抗の低いコロイダルシリカの形成を、なじみ処理と表面加工によって能動的に誘起した成果である³⁾。

続いて、エンジン油中におけるアルミ合金と軸受鋼の滑り接触において、レーザー表面処理を施した例を図10¹⁰⁾に示す。レーザー照射条件によって、「アルミの凝着の有無」や「添加剤による潤滑膜の形成状態」が変化し、なじみ過程が大きく左右される。最適な条件では、最終的に摩擦係数約 0.04 という安定した低摩擦が得られる。図10に示す三つの摩擦モードはレーザー照

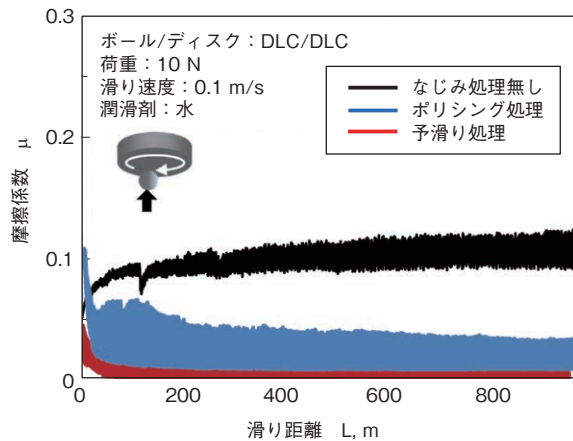


図7 なじみ処理による水中 DLC 同士の低摩擦発現⁶⁾
Low friction of DLC/DLC in water by running-in treatment

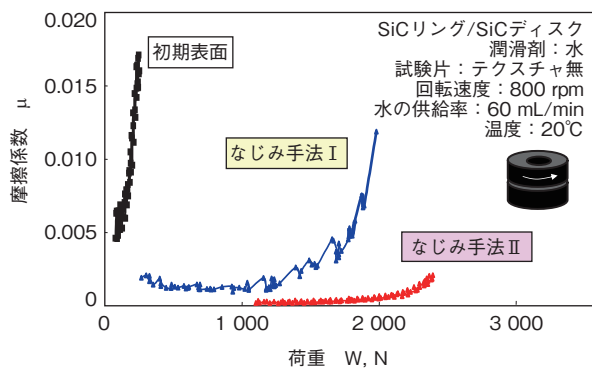


図8 なじみ処理の最適化による低摩擦と耐荷重性の両立⁷⁾
Low friction and high loading capacity using optimized running-in treatment

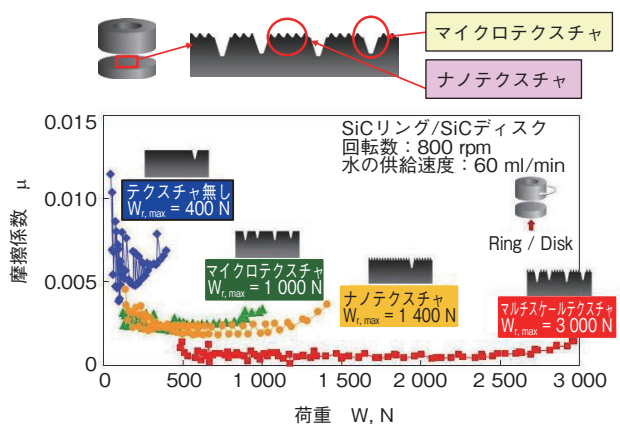


図9 表面テクスチャリングの最適化による低摩擦と耐荷重性の両立⁹⁾
Low friction and high loading capacity using optimized surface texturing

射エネルギーの大きさと整理でき (図11¹⁰⁾), その物理的メカニズムを理論解明することで, 社会実装に直結する「摩擦制御のための表面処理設計指針」を得ることが可能となる。

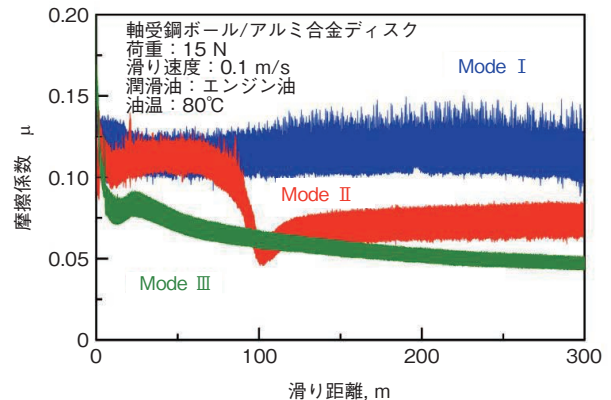


図10 アルミ合金へのレーザー照射による摩擦特性の制御¹⁰⁾
Control of friction properties of aluminum alloy by laser irradiation

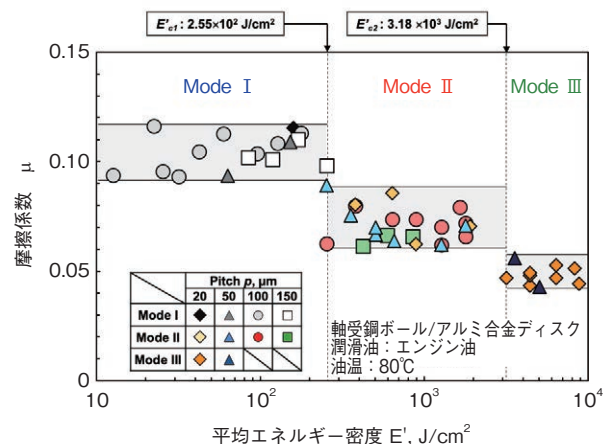


図11 レーザー照射されたアルミニウム合金における平均エネルギー密度が平均摩擦係数に及ぼす影響¹⁰⁾
Effect of average energy density on average friction coefficient and friction modes of laser-irradiated aluminum alloy

5. 超低摩擦発現界面形成のための新規コーティング

本節では, 前節の知見に基づき, 「なじみ過程でトライボ化学反応を積極的に起こし, 自ら超低摩擦界面を作り出す」というコンセプトで開発した新規材料 (コーティング) の例を紹介する。

水潤滑において, 従来の SiC 同士の接触では摩擦が

増加する「境界潤滑領域」においても、新規コーティングを適用したストライバック曲線（図12）では、スムーズになじみが発生し、結果としてより低い摩擦を実現できることが確認されている。

また、代表的な固体潤滑剤である MoS_2 は、ナノオーダーの薄膜で優れた潤滑性を示す一方で、耐久性向上を狙って厚膜化すると、摩擦係数は0.05程度まで上昇する（図13）。これに対し、なじみ期間に摩擦界面に数層の MoS_2 膜が自己形成され続けることを目的とした MoS_2 含有硬質膜を導入することにより、極めて低い摩擦が長期間維持されることが実証されている（図13）。

これは、2.2節で述べた「薄く軟らかい膜による低摩擦化」と「耐久性（膜厚）」というトライボロジーの本質的なトレードオフを突破する明確な解決策といえる。

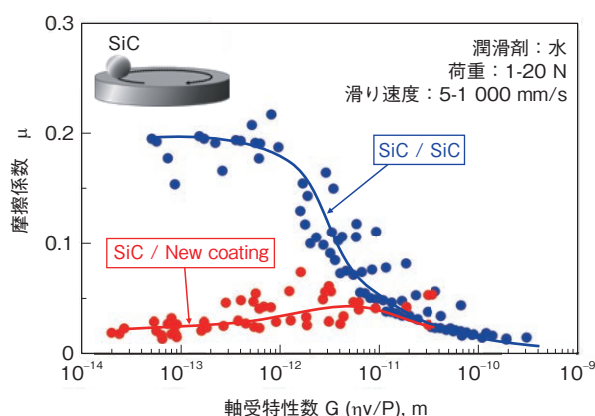


図12 新規コーティングによる水中での過酷な潤滑条件下での低摩擦の実現

Low friction under severe lubrication conditions in water achieved with novel coating

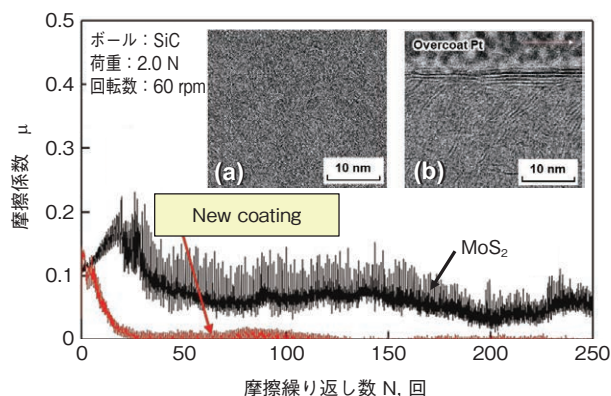


図13 真空中における MoS_2 膜と MoS_2 を含有した新規コーティングを用いた時の典型的な摩擦特性
Representative friction properties of MoS_2 films and novel MoS_2 -containing coatings in vacuum

6. 自己治癒型超低摩擦システムの可能性

これまで経験的に扱われてきた「なじみ期間」における界面の変化を、「低摩擦界面の能動的な自己形成プロセス」として再認識し、解明することで、これまでにない革新的な技術が拓かれる。

大気中において、窒化ケイ素 (Si_3N_4) の相手材に不純物を含む炭素系硬質薄膜を用いて摩擦させると、初期には存在しなかった超低摩擦ナノ界面がトライボ化学反応によって自己形成される。その結果、通常は0.1～0.2程度となる摩擦係数が、0.01以下という超低摩擦へと飛躍的に低減する（図14）。

詳細な構造解析に基づけば、この摩擦界面は最表面が水素終端された約5 nmのトライボ層で構成されている。さらに、摩擦の定常状態において表面が摩耗し続けているにもかかわらず、この低摩擦界面が常に一定の厚さを保ちながら自己更新（自己形成）し続ける現象¹¹⁾を見出している。

この現象は、機械システムが自ら低摩擦界面を修復する「自己治癒力を有する超低摩擦システム」そのものである。「極めて薄くせん断強度の低い潤滑膜を、摩耗させずに長期間維持する」という、従来の常識を覆す設計指針を示す結果といえる。

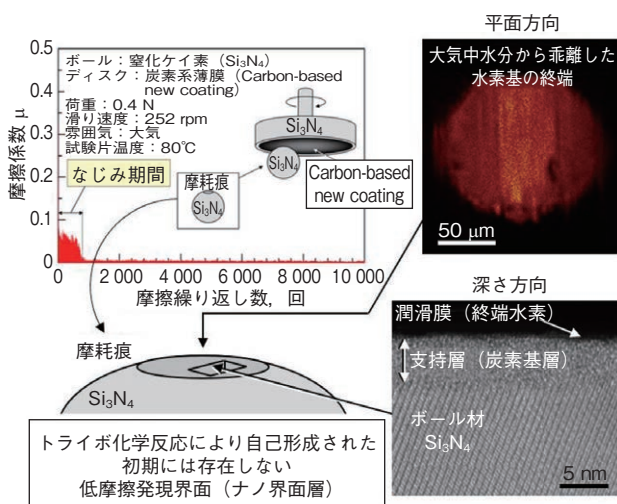


図14 摩擦初期のトライボ化学反応制御により形成された2層構造を有するナノ界面とその結果として実現される超低摩擦現象

Nano-interface with two-layer structure formed by controlling tribochemical reactions during initial stage of friction and resulting ultra-low friction

7. おわりに

あらゆる産業分野において、基礎研究と社会実装の間には大きなギャップが存在する。システムの応答特性を制御しなければならないトライボロジー分野も例外ではなく、両者をつなぐ強固な「技術の架け橋」が強く求められている。

摩擦初期のなじみ過程で生じる初期摩耗は、単なる体積減少ではなく、物理的・化学的な変化を伴って「低摩擦を発現する新しい摩擦界面」を創り出し、その後も継続的に再生させるプロセスである。このトライボ化学反応を制御し、なじみを最適化・促進させる技術が、本稿で提案する次世代の低摩擦技術である。

人間には、ケガや病気を自ら治す「自己治癒力」が備わっており、もし機械システムにも同様の自己治癒力を付与できれば、過酷な環境下でも高い信頼性と耐久性を保証できるようになる。そして、従来の「摩耗＝寿命」という概念そのものを根本から覆す、全く新しい機械システムを創成できる。

摩擦エネルギーを利用した「超低摩擦界面の継続的自己形成」は、まさに機械システムにおける自己治癒のひとつの具現化であり、基礎研究と社会実装のギャップを埋めるつなぎ目¹²⁾であり大きな架け橋の1つになると確信している。

参考文献

- 1) C. Muller, C. Menoud, M. Maillat, H. E. Hintermann: Thick compact MoS₂ coatings, Surf. Coat. Technol., 36(1988)351-359.
- 2) 日本トライボロジー学会編：トライボロジー辞典，養賢堂，(1995)183.
- 3) Yusuke Ootani, Jingxiang Xu, Fumiya Nakamura, Masayuki Kawaura, Shuichi Uehara, Koki Kanda, Yang Wang, Nobuki Ozawa, Koshi Adachi, and Momoji Kubo, Three Tribolayers Self-Generated from SiC Individually Work for Reducing Friction in Different Contact Pressures, J. Phys. Chem. C 2022, 126(2022)2728-2736.
- 4) M. Chen, K. Kato, K. Adachi: The Comparisons of Sliding Speed and Normal Load Effect on Friction Coefficients of Self-Mated Si₃N₄ and SiC under Water Lubrication, Tribology International, 35 (2002)129-135.
- 5) 小池，鈴木，栗原，足立：MoDTC 添加油中の硬質コーティングと金属の摩擦によるナノ界面形成，トライボロジスト，64，8(2019)504-512.
- 6) Y. Niiyama, N. Shimizu, A. Kuwayama, H. Okada, T. Takeno, K. Kurihara, K. Adachi: Effect of running-in for delamination and friction properties of self-mating diamond-like carbon coatings in water, Wear, 378-379(2017), 27-34.
- 7) 足立幸志：水潤滑システムにおける低摩擦発現のための表面テクスチャリング，日本フルードパワーシステム学会誌，48(2017)208-210.
- 8) X. WANG, K. ADACHI, K. OTSUKA & K. KATO : Optimization of the Surface Texture for Silicon Carbide Sliding in Water, Applied Surface Science, 253(2006)1282-1286.
- 9) Y. NISHIKAWA, K. NOGUCHI, T. TAKENO & K. ADACHI: Surface texture to improve friction properties by forming smoother surface on silicon-based ceramics in water, World Tribology Congress 2013(2013).
- 10) Kento Ihara, Koshi Adachi, Necessary conditions for low friction between laser-irradiated aluminum alloy and bearing steel in engine oil, Tribology International, 186(2023)108607.
- 11) Kazuya Kuriyagawa, Koshi Adachi, Durability of Super-Low Friction of Hydrogenated Carbon Nitride Coatings in High-Vacuum Environment, Tribology Online, 19, 1(2024)62-73.
- 12) 足立幸志：つなぎ目，日本機械学会，JSME 談話室「き・か・い」No. 174(2018).