

トライボロジーとは？

東京理科大学 工学部 機械工学科 教授 ^{さ さ き} 佐々木 ^{しん や} 信也

はじめに

トライボロジー (Tribology) とは、摩擦・摩耗・潤滑の科学を扱う学術領域である。

そもそも“Tribology”は、“擦る”を意味するギリシャ語“tribos”と、学問を意味する“ology”とをつなぎ合わせて作られた造語である。英国の教育・科学省の要請を受けたピーター・ジョスト (Peter Jost) 教授が、「英国における潤滑に起因する経済的損失の調査と産業界へのその必要性の提案を行うための報告書 (通称JOSTレポート)」を1966年にまとめた際、その中で初めて“Tribology”という言葉を使っている。

OECD (経済協力開発機構) の用語集には、「the science and technology of interacting surfaces in relative motion and of related subjects and practices (相対運動をする2物体間の相互作用を及ぼし合う表面、およびこれに関連する諸問題と実地応用に関する科学と技術)」と定義され、1986年にはOxford英語辞書に、我が国でも1991年に広辞苑に新語として採択されている。このような経緯のもと1992年には、「日本潤滑学会 (1956年設立)」が「日本トライボロジー学会」へと名称を変更している。

トライボロジーの歴史

有史以前より人類は、摩擦や摩耗に係わる問題に悩み、これを克服するための試行錯誤による工夫を重ね、逆にこれらの現象を利用することによって、今日の文明を築き上げて

きた。

紀元前2400年頃、古代エジプトのサッカラで建設された墓の壁画には、墓の主とされるティの像を運搬するそりの前で、壺から潤滑剤を注いでいる人が描かれている (図1)。「History of Tribology」の著者ダウソン (D. Dowson) 教授によれば、この人物こそが最初に記録されたトライボロジスト (トライボロジーに係わる技術者) であるという。このような古代の記録は、近代の潤滑理論が確立される遙か以前より、潤滑によって摩擦を下げる知恵と技が使われていたことを証明する貴重な証拠といえる。

「摩擦」という現象に初めて科学の光を当てたのは、ルネッサンス時代のイタリアが生んだ天才、レオナルド・ダ・ビンチ (Leonardo da Vinci) であると言われている。図2は、レオナルド・ダ・ビンチの残したスケッチをもとに復元された軸受の模型である。トライボロジー分野においても、ダビンチは摩擦や摩耗に関する研究や軸受の材料の開発、転がり軸受の考案など数多くの成果を残しており、それらの業績も再評価されようとしている。

Friction (摩擦) という用語をはじめて文献の中で使ったのはニュートン (I. Newton) であるとされるが、今日でいうところの「摩擦」の研究が表舞台に出るのは、17世紀末の物理学者アモンソン (G. Amontons) の業績によるところが大きい。

アモンソンは、摩擦の原因が表面の凹凸の

噛み合いにあるとし、摩擦係数が接触面積に依らないことを示すなど、摩擦の研究の発展に大きく貢献した。この「摩擦の凹凸説」に対し、「摩擦の凝着説」を提唱したのは英国のデザギュリエ (J. T. Desaguliers) である。ニュートンの友人でもあったデザギュリエは、2 固体は接触させるだけで凝着が起こり、これを引き千切るのが摩擦抵抗であるとし、すべり面が平滑になるほど摩擦力が増加するという記録を残している。18世

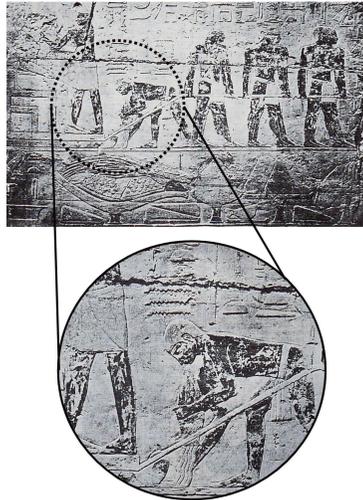
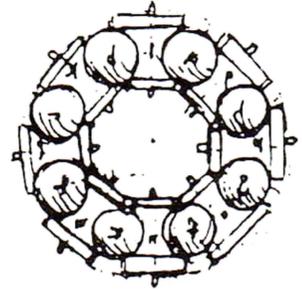


図1 記録に残る人類最古の
トライボロジスト



Handwritten text in Italian, likely a note or description related to the bearing design shown in the diagram above.

図2 レオナルド・ダ・ビンチの
考案した軸受

紀になり、これら凹凸説と凝着説の相反する摩擦の機構に決着をつけようとしたのが物理学者クーロン (C. A. Coulomb) である。摩擦の近代的研究は、クーロンによる「摩擦の基本法則 (アモントン-クーロンの法則)」が確立されたことで一応の完成をみることとなった。

しかし、当初は主流であった「摩擦の凹凸説」も、産業技術が進歩するにつれて次第に矛盾を呈するようになった。極めて平滑な面では、摩擦がなくなるどころか、むしろ凹凸説に反して高くなることが実験的にも確かめられるようになったのである。また、ラングミュア (Irving Langmuir) やハーディー (William Bate Hardy) らによる界面化学的アプローチにより、固体表面に吸着した有機分子層が固体間の凝着を妨げ、これにより摩擦が低減されることが明らかにされた。さらに、ホルム (Ragnar Holm) によって提唱された真実接触面積の概念は、英国ケンブリッジ大学のパウデン (Frank Philip Bowden) とテーバー (David Tabor) をして新しい形の摩擦の凝着理論を確立させるに至り、凹凸説に代わって「摩擦の凝着説」が広く認められることになったのである。なお、ケンブリッジ

大学キャベンディッシュ研究所は、マックスウェル (J. C. Maxwell) を初代所長として1871年に設立されて以来、数多くのノーベル賞受賞者を輩出している物理学研究のメッカであるが、第2次世界大戦後に現代トライボロジーの礎となる研究がこの場所で行われたことは大変興味深い。

トライボロジーの先端研究はその後、米ソ冷戦時代の宇宙開発競争にしのぎを削るNASA (米国航空宇宙局) を中心とした米国に舞台を移し、さらにモータリゼーションの到来を背景として自動車関連のトライボロジーを中心に、ドイツ、フランス、日本などへと発展の場を広げていった。

一方、IT分野では情報処理量の爆発的な増加に対応するため、磁気記録装置の性能向上が急務となり、ハードディスク装置の開発には最先端のトライボロジー技術が次々と導入されることになった。米国IBMなどを先導役とした技術開発競争の最中、微細加工技術の進歩と相まって、“マイクロトライボロジー”が新たなテーマとして取り上げられるようになった。さらに今日では、高度な表面分析技術と計算科学を融合した“ナノトライボロジー”へと発展し、最先端研究の一翼を

担っている。医療分野では、英国リーズ大学を中心とするグループが、トライボロジーの視点から人工関節の開発に精力的に取り組み、性能の向上に大きく寄与するとともに、“バイオトライボロジー”という医工連携の新しいテーマを開拓した。このほか、レイノルズ (O. Reynolds) にはじまる流体力学理論、各種機械要素や潤滑剤の発明や普及、そして新しいコーティング材料など、トライボロジーはそれぞれの時代の産業技術の隆盛と深く係わりながら発展してきた。

学際領域分野のトライボロジー

トライボロジーが扱う対象は、図3に示すように、原子・分子レベルでの摩擦現象から、ハードディスクのスライダヘッド、自動車の駆動部品やタイヤ、発電タービンの軸受、電気接点、人工関節、地震予知や人工衛星など、一般の工業製品に留まることなく、たいへん多岐に渡っている。そのため、トライボロジーが関連する学問は機械工学を本拠

としながらも、物理学や化学などの基礎分野から、材料、電気、土木・建築、航空・宇宙などの工学分野、エネルギー・環境や防災に係わる応用領域、さらにはナノテクノロジー、バイオテクノロジーといった新融合領域に至るまで、非常に幅広い範囲に跨がっている。

このようにインターディシプリナリー (学際的) な科学・技術の典型とも言えるトライボロジーは、一方では専門が細分化された今日の大学教育にあって、ポジショニングが難しいという側面も併せ持っている。そのため、「トライボロジー」を講義科目として開設していない理工系大学も少なからずある。エンジニアになってはじめて、トライボロジーという言葉を知る人が多いのもこのためである。

工学的観点から捉えた場合、トライボロジーの制御対象は、① 摩擦の制御、② 摩耗の制御、③ エミッションの制御の3つに大別される。

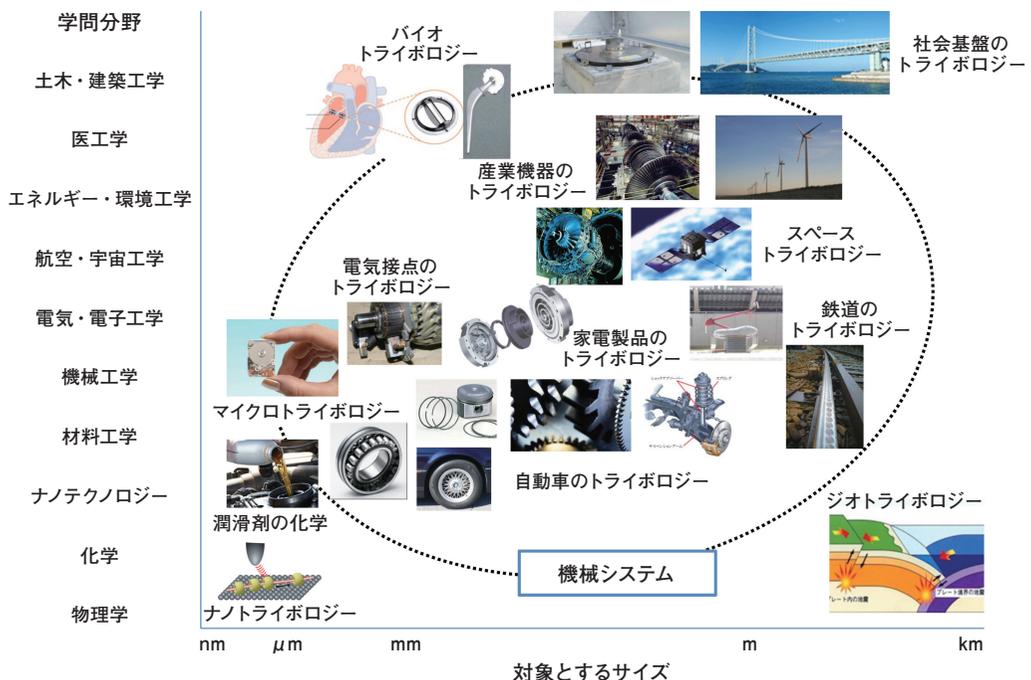


図3 トライボロジーに関連する学術領域と対象

摩擦の制御では、例えば、自動車用エンジンのピストンとシリンダー間の摩擦の場合、エネルギー損失を抑え高速回転を可能にするため、より低い摩擦係数の実現が要求される。一方で、自動車のブレーキシステムの場合には、高い摩擦係数を安定して発生させるための技術が必要とされる。マクロな摩擦現象を扱う場合でも、原子・分子レベルで起こる自然現象の制御が必要になることがある。

摩耗の制御では、一般にしゅう動部品の長寿命化や信頼性向上のため、摩耗の抑制が課題となる。ただし、切削や研磨などの除去加工プロセスにおいては、プロセス効率を向上させるために、被加工表面の摩耗を促進させることが求められる。摩耗を抑制あるいは促進する場合のいずれでも、摩擦の制御同様に表面の機械的特性が大きな役割を果たすとともに、摩擦表面における化学反応が重要な鍵を握っている。

エミッションの制御では、摩擦現象に起因する振動や騒音など、機械システムの性能に係わる因子の抑制に加え、環境問題への意識の高まりを背景に、潤滑油や摩耗粉等の環境への拡散防止が求められている。一方、エミッションの利用という点からは、楽器の音色向上や地電流による地震予知に関する研究なども行われている。

機能表面の設計と創製

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、トライボロジー特性を支配する表面機能に着目し、必要とされる性質を内部とは独立に表面に付与することで、全体として性能向上を図るのが表面改質技術の考え方である。

なかでも表面テクスチャリング (Surface texturing) は、主に表面の流体抵抗低減や濡れ性の制御、光の反射・吸収特性の改善など

に用いられてきた手法であるが、最近のレーザー技術の進展による加工コストの低減とも相俟って、しゅう動表面の設計および創製 (トライボ・アーキテクチャ, Tribo-architecture) 技術の中核を担うものとして再認識されつつある。工作機械の動圧すべり案内面に施される“きさげ”は、古くからある表面テクスチャリングの一例と考えることができる。また、レシプロエンジンのシリンダーボア内面に施されるホーニング加工も典型的な成功例と言えよう。

表面テクスチャリングによるトライボロジー特性向上に期待される効果としては、① 潤滑油溜まりによる油切れの改善、② 異物の捕捉による3次元アプレシブ摩耗の抑制、③ 流体潤滑域の拡大が挙げられる。表面にミクロンサイズの微細テクスチャを施すためには、レーザー微細加工、マイクロサンドブラスト加工、精密機械加工、湿式/ドライエッチング加工など適用可能な手法はさまざまであるが、面積の広いしゅう動面に実用化する場合にはコストがネックとなるケースもある。最近では、レーザー技術の汎用化と低コスト化が進み、レーザー表面テクスチャリング (LST, Laser Surface Texturing) 法の利用が増えている。

トライボロジー特性は、さまざまな階層で起こる現象が複合して発現する。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、その真実接触部の状態は上の階層となるマイクロ構造により支配され、さらに潤滑状態を決める境界潤滑と流体潤滑の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、トライボ・アーキテクチャにおいては、表面の構造およ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、理解した上で、階層的な役割の割付けが必要になる。これがマルチスケール・テクスチャリングの考え方である。

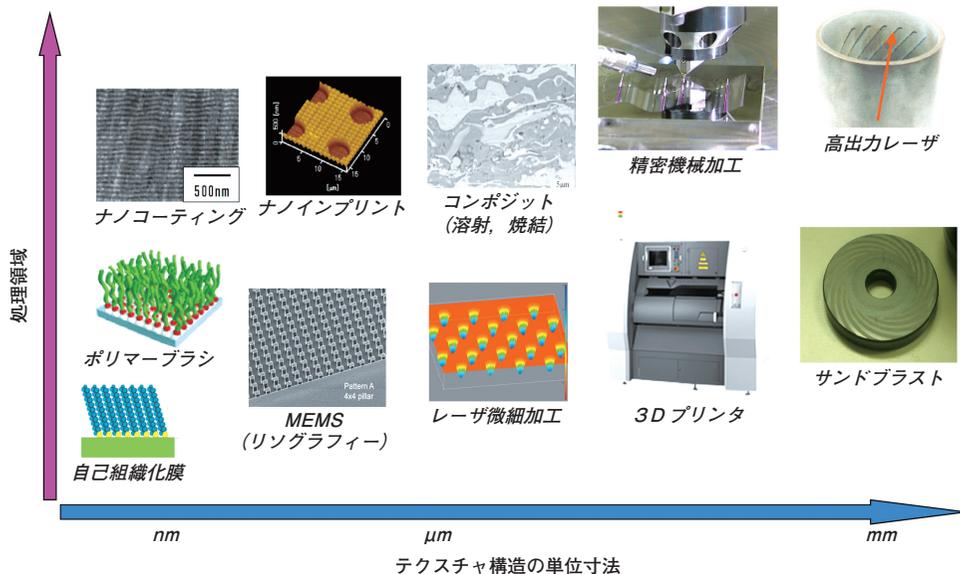


図4 表面テクスチャの創製プロセス

マルチスケール・テクスチャリングは、表面の形状およ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捉え、それぞれのレベルで支配的となるトライボロジー現象を包括的に扱うことによって、トータル性能の向上を目指すもので、表面改質すべてに共通する概念とも言える。

マルチスケール・テクスチャリングの究極の目標は、表面損傷の進行や摩擦環境の変化に能動的に対応して自己適応する機能表面の創製といえよう。これには、自己修復性と環境適応性を有する生体皮膚などの模倣（バイオミメティクス）が鍵を握るものと考えられる。バイオミメティクスにおいては、分子レベルでのボトムアップとマクロ構造でのトップダウンによる機能発現メカニズムのバランスが重要となる。

マルチスケール・テクスチャリングを実現するためには、図4に示すようなさまざまな加工プロセス技術を組み合わせることにより、シームレスな構造を創製するプロセス技術の開発が重要となる。最近では、付加製造（AM, Additive Manufacturing）法である3Dプリンターを利用した機械部品の造形に関心

が集まっている。3Dプリンターは、これまでにない3次元複雑構造を表面下に造形することを可能とするため、バイオミメティックスリゅう動表面の構築への活用が期待される。

トライボロジーが目指すもの

JOSTレポートによってトライボロジーという用語が定義されてから、約半世紀になろうとしている。この間に科学・技術は大きく進歩し、特に近年の情報技術の発展と普及は社会のグローバル化を一気に加速した。その一方で、地球環境問題やエネルギー問題など、地球規模での解決が求められる問題も浮き彫りになり、人類と自然との調和のとれた共存を可能とする持続可能な社会（Sustainable Society）の実現こそが、21世紀の科学・技術に課せられた重要な問題となっている。

“グリーントライボロジー”は、地球環境問題へのトライボロジーの貢献を象徴するテーマであるとともに、経済成長と環境保全を両立させる“グリーン経済（Green Economy）”や“グリーン成長（Green Growth）”に必要な技術イノベーションを創出する役割も担っている。