

2.6.2 トライボロジー

(1) 研究開発領域の定義

トライボロジーは相対運動をしながら互いに影響を及ぼしあう2つの表面に起こるすべての現象を対象とする科学技術で、潤滑、摩擦、摩耗などを取り扱う分野である。ここでは、省エネルギー的観点からの摩擦メカニズム、接触表面状態、潤滑剤の影響など基礎的トライボロジー研究や、環境エネルギー機器・輸送機器分野への応用・実用化を見据えた研究開発の動向を対象とする。

(2) キーワード

摩擦、摩耗、焼付き、表面損傷、潤滑、潤滑剤、コーティング、表面分析、表面テクスチャリング、トライボケミストリー、機械要素

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

トライボロジーはギリシャ語の $\tau\rho\iota\beta\omicron\sigma$ (tribos: 摩擦する) を基にした造語であり、1966年に英国のH. P. Jostによる報告書で初めて使用された¹⁾。トライボロジー技術の適用範囲は、可動部を有する機器全てに渡り、固体同士の間摩擦を軽減させるものである。機器は小型～大型の移動体 (エンジン、モーター軸受け、トラスミッション等)、発電機器 (タービン軸受け、モーター軸受け、ポンプ、電気接点等)、電力機器 (空調機器、ヒートポンプ等)、産業機械、電子機器と幅広い。トライボロジーは、既存技術の改良や改善だけでも波及効果と即効性の高い工学技術であり、環境負荷低減への貢献が極めて大きい。一方、摩擦・摩耗は固体表面・潤滑剤など多くの要素が界面において複雑に絡む動的プロセスであるため、物理、化学、材料科学等による基本現象とそれらの相互依存関係の理解を必要とする。機械設計は軸受 (ベアリング)、歯車、ねじなどの機械要素を組み合わせることにより行われるが、トライボロジーが支配的な機械要素 (部品) はトライボ機械要素とも呼ばれる。

[研究開発の動向]

技術の経緯

- ・摩擦・潤滑の利用や研究の基礎は産業革命前後 (1750年から1900年頃) の研究に負うところが大きく、それをもとに流体潤滑理論の構築、ストライベック曲線 (軸受けの条件と摩擦係数の関係性)、境界潤滑 (薄い潤滑油膜下での接触現象) など、現在の概念や理論に発展してきた²⁾。
- ・トライボロジーの先端研究は、米ソ冷戦時代の宇宙開発競争にしのぎを削る米国航空宇宙局 (NASA) を中心とした米国を舞台とし、また、モータリゼーションの到来とともに、自動車関連を軸にドイツ、フランス、日本などへと発展の場を広げていった。一方、1980年代のIT分野の急発展を背景に、磁気記録装置に最先端のトライボロジーが活用され、“マイクロトライボロジー”が新たな領域として確立され、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、現在も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取り組み、“バイオトライボロジー”という医工連携の新しい領域を開拓した。
- ・1990年代にはトライボ現象に特有な化学反応に着目した“トライボケミストリー”の分野や、地球環境問題を背景とした冷凍機の代替フロン対応の潤滑油の開発などが新たに注目された。
- ・2000年以降は、ナノテクノロジーやトライボケミストリーに代表される表面・界面の観察評価法の進歩を背景に、DLC (ダイヤモンドライクカーボン: ダイヤモンドに近い特性を持つ非晶材料) 膜のトライボロジー特性向上や液体添加剤との組み合わせによる低摩擦発現、表面テクスチャリングによる潤滑性能向上、樹脂複合材料の適用拡大、機械加工油の使用量を大幅に削減するMQL (minimal quantity

lubrication) 技術、生分解性潤滑剤の開発といった、省資源・低排出を目指した技術開発に進展が見られた。近年の表面計測・分析技術や分子シミュレーション、トライボシミュレータなどの解析技術は、その精度やモデルの精緻度だけでなく、利用のし易さの点でも著しい進化を遂げており、それらを活用して、ポリマーブラシ、イオン液体、潤滑油添加剤、コーティング膜などの新規材料開発が精力的に進められている。

- ・第4回世界トライボロジー会議 (World Tribology Congress IV、2009年京都) における“Green Tribology”の提唱など、本領域では環境への対応が重要視されている。さらにカーボンニュートラル社会に向けて、自動車業界の動きは活発である。例えば、電気自動車 (EV) では低騒音化の重要性から歯面の仕上げ精度が重要になるため、モーターと歯車工作機械メーカーが垂直統合を図るなどの動きも見られる。

開発ロードマップ

- ・日本トライボロジー学会の「トライボロジー・ロードマップ研究会」では、2012-2013年度の活動期間に、トライボロジーに関わる機械システム、サブシステム、トライボロジー要素の階層構造を整理したトライボロジー技術俯瞰図を提示した^{3), 4)}。自動車、鉄道、航空機、発電、医療機器、宇宙機などシステム・コンポーネント側からの要請と、軸受、シール、材料・表面処理、潤滑剤、シミュレーション、分析技術などの要素技術の側の双方向から見た取り組むべき技術課題を整理している。
- ・米国の学会 Society of Tribology and Lubrication Engineers では、主に米国内の先端技術と市場動向の調査にもとづいて、トライボロジーの今後の課題に関する調査報告書 Emerging Trends in Tribology を3年毎に発行している。2020 Report Emerging Issues and Trends in Tribology and Lubrication Engineering⁵⁾ では、輸送、エネルギー、製造、医療/健康の4分野と、労働力問題、研究費、材料コストと入手可能性、安全性、環境、基本的な人間のニーズ、政府規制の項目について調査結果を以下のようにまとめている。

- ①運輸分野：潤滑油の低粘度化等による内燃機関の性能向上に加えて、EV、燃料電池車、および自動運転車等への対応が必要である。例えば、EVでは専用グリース、潤滑剤の冷却機能の強化などが期待される。加工油の削減は共通の課題である。
- ②エネルギー分野：再生可能エネルギー利用の拡大に対応して、クリーン燃料燃焼、風車など機器のトライボ設計の高度化が継続して求められる。
- ③製造分野：製造の自動化、積層造形 (Additive Manufacturing : AM、※3Dプリンター技術を応用した立体造形法) の活用が重要になる。人工知能の普及により機械には迅速な意思決定、性能の最適化、メンテナンスの最小化がもたらされることになり、達成のためにはトライボ要素に遡り対応が求められる。
- ④材料分野：現在の潤滑剤の材料コストと入手可能性にはリスクがあり、金属資源のリチウム、希土類金属、コバルト、化石資源に依存しない基油、環境負荷の少ない殺生物剤など、代替品の探索が進むであろう。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

機械要素設計の基礎と応用に関する新たな動向

- ・転がり軸受：転がり軸受けは転動体 (玉やころ) を2つの部品の間置くことで荷重を分散して支持する軸受であり、回転機器において幅広く用いられる機械要素である。内部起点の疲労寿命に関しては、白色組織の形成を伴うはく離現象について、鋼の組織変化、応力とひずみ、潤滑剤の分解による水素発生など様々な観点からの研究が精力的に行われており、模擬欠陥による介在物起点の損傷の再現なども

- 試みられている。表面起点については、省エネルギー観点からの低粘度油の導入に伴い顕在化するピーリング損傷の発生メカニズムやその対策などの検討が進んでいる。風車は低速高荷重での運転となるためフレッチングコロージョン（金属の擦れ合いによる表面損傷）の課題があり高速回転の機器とは異なる取り組みが必要となる。損傷機構の解明が進み、各社対応を進めているものと推察される。
- 自動車関連では、エンジンの軸受やピストンリングなどの摩擦低減のため潤滑油の低粘度化への対応として潤滑油配合技術、表面改質技術が進化している。電動化の拡大においてもトランスミッションの効率向上技術は重要であり、再び目が向けられている。
 - 表面テクスチャリング：実用機械への応用も進んでおり、フェムト秒レーザーの適用を始めとしたパターン形成技術の向上とともに、テクスチャリングによる潤滑向上のメカニズム探究が進んでいる。近年では単純な規則的パターンだけでなく、マルチスケールのパターン付与や、スケールごとの作用の違いなどが報告されている。
 - その他の機械要素：AMでは、いわゆる3Dプリンターを応用した機械要素設計により、基本機能の強化、軽量化などを狙った研究が見られる。また自己潤滑機能の付与や潤滑に適した表面構造の形成に関する研究も進められている。
 - DLC膜の高度化：耐摩耗性や信頼性を向上させる多層構造や傾斜機能、潤滑油添加剤との相互作用などの研究開発が進み、実用範囲を広げている。従来は困難と思われていた転がり軸受への応用も進められている。
 - 高エントロピー材料：高温環境下での構造材として期待される高エントロピー合金材料の摩擦摩耗特性などが調べられている。
 - ソフトマター：生体材料にヒントを得たゲルなどの軟質材料、表面構造、複合材料、生体皮膚の模倣や触覚の研究などの研究が活発化しており、実用化が期待されている。
 - グリース潤滑：基油と増ちょう剤から成り、固体と液体の中間の挙動を示すグリースの潤滑メカニズムは不明な点が多々あった。最近の研究で、蛍光レーザーや原子間力顕微鏡を用いた増ちょう剤の挙動解明や、見かけの粘度にもとづく潤滑理論により理解が進んでいる。これらにより、転がり軸受の長寿命化への対応、高速回転に適した低損失グリースの開発が進んでいる。
 - ナノ粒子：ナノダイヤモンド添加による潤滑下での低摩擦発現条件、潤滑メカニズムに関する研究が行われ、実用化が模索されている。すべり要素への適用が主体であったが、転動要素（ころがり）への適用が見られるようになった。
 - 摩擦・摩耗が支配的な機械要素は機械設計への影響が大きく、トライボ機械要素とも呼ばれる。計算工学、マルチボディダイナミクスの利用で外力の予測精度が向上している。機械要素とトライボロジーは一体で考えるべきものである。

データ科学・シミュレーションに関する技術動向

- その場観察技術：摩擦する固体面をX線、電子線、中性子、赤外線などの分光分析によりリアルタイムに計測するオペランド観察手法が進歩しており、トライボロジーの微小で複雑なプロセスの解明がなされている。また、摩擦現象の観測に古くから用いられているアコースティックエミッション技術も、データ処理技術の進展に伴って、その場観察への適用が進められている。
- AI・データ活用：深層学習モデルによる振動加速度のデータに基づいた転がり軸受のはく離検知やニューラルネットワークを利用した潤滑不良の早期検知などメンテナンスの領域においてデータ活用が先行して進められている⁶⁾。
- 分子シミュレーション：潤滑油に関して低粘度基油に対する添加剤の開発、基油分子による熱伝導メカニズムの分子動力学による評価とそれに基づくトランスアクスル油の開発、地球温暖化係数が低い冷媒に対する冷凍機油の開発等がなされている。古典分子動力学の範囲で扱うことができる反応力場

(Reactive Force Field)の考案や計算機能力の向上によって、摩擦面で生じる化学プロセスのシミュレーションが可能になり、添加剤の反応、高分子の移着、摩擦などの研究開発で活用されている。

- ・ **マテリアルズ・インフォマティクス**：高い粘度指数を有する潤滑油基油の分子構造の予測、植物由来の潤滑油に対する添加剤の配合条件探索などの検討例も出始めており、より広い分野で活用が広がる可能性がある。
- ・ **トライボシミュレータ**：設計工学的な手法であり、企業、研究開発業務において活用が進んでいる。汎用コードを自社製品の設計に使えるよう調整でき、分野によっては標準的なトライボ設計ツールが市販されている。例えば、エンジンの潤滑状態や摩耗の推定などを行うシミュレータは、学会等で多く引用されている程度オーソライズされている潤滑・接触理論を標準実装しており、利用者側が必要に応じてカスタマイズできるように工夫されている。欧州では解析ソフトの開発メーカーやコンサルタント会社が積極的に取り組んでいる。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

■国内プロジェクト

・ **経済産業省「次世代自動車等の開発加速化に係るシミュレーション基盤構築事業費補助金」(2020年～)**
2019年度まで行われた戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 革新的燃焼プログラムの後継として、燃焼分野とトライボロジー分野が参画している。トライボロジーではテクスチャ表面による摩擦低減とオイル流れの可視化・モデリングなどをテーマとして複数の機関が連携している。

・ **JST-CREST「革新的力学機能材料の創出に向けたナノスケール動的挙動と力学特性機構の解明」⁷⁾(2019年～)**

ナノスケール動的挙動を解析・評価する技術を発展させ、マクロスケールの力学特性を決定している支配因子を見出し、その作用機構の解明を行うとともに、新たな力学特性を有する革新的力学機能材料の設計指針を得ることを目指している。「氷-ゴム界面摩擦機構のマルチスケール解明」、「階層的時空構造と動的不均一性から紡ぐナノ力学機構の理解と制御」、「トライボケミカル協奏反応の制御による超低摩擦界面の継続的創成と長期信頼性機械の設計基盤の構築」、「超低摩擦ポリマーブラシの摩耗現象の階層的な理解と制御」などの研究課題が採択されている。

・ **JST-さきがけ「力学機能のナノエンジニアリング」⁸⁾(2019年～)**

ナノスケールの変形や構造変化に由来する力学特性を利用した新たな材料機能の創出を目指している。「界面相互作用計測による高分子境界膜の潤滑機構解明」、「ハイドロゲル摩擦のナノ潤滑機構の流体力学的解析」、「疲労摩耗のスケールアップ過程のマルチモーダル計測」などの研究課題が採択されている。

・ **NEDO「長寿命高圧水素シール部材・継ぎ手部材及び機器開発に関する研究開発」⁹⁾(2018～2022年)**
シール材の劣化等に関する取り組みが行われ、機器の信頼性(寿命)向上にトライボロジー技術が貢献している。

■国外プロジェクトおよび主要拠点

・ **Intelligent Open Test Bed for Materials Tribological Characterisation Services (i-TRIBOMAT)¹⁰⁾**

トライボ材料の評価データに関するオープンイノベーションの構築と、ヨーロッパの産業における研究開発の加速を目的に、国の研究機関と大学、及び民間企業が参画している。

・ **Imperial College London, Tribology Group (イギリス)¹¹⁾**

トライボロジーの分野で世界をリードし、基礎実験から応用研究、シミュレーションにわたり幅広く研究を行っている。研究グループ内に世界最大の軸受メーカーSKF社のUniversity Technology Center(UTC)と、石油大手のShell社のUniversity Technology Center(UTC)を擁し、産業界との連携も強い。

- **Austrian Excellence Center for Tribology (オーストリア)¹²⁾**

トライボロジーにおける新しい学際的かつ総合的な知識の創出のために設立されたプロジェクト拠点であり、スマート材料、表面およびコーティング、潤滑剤および潤滑システム、摩擦および摩耗プロセスのシミュレーションなど精力的に研究が実施されている。

- **Ecole Centrale de Lyon, Tribology Laboratory (フランス)¹³⁾**

フランス国立科学研究センターの関連研究ユニットになる表面技術研究所が母体であり、表面とトライボロジーの物理化学を基礎として、固体と振動力学の新しいトピックスも統合し、産学連携で基礎研究と応用研究に取り組んでいる。

- **ミュンヘン工科大学機械要素研究所 (ドイツ)¹⁴⁾**

歯車研究センターとも呼ばれ、歯車と伝動要素の疲労寿命、効率、振動特性の信頼性の高い測定方法とツールの開発などの研究活動が業界との密接な連携のもとで行われている。

- **清華大学摩擦学国家重点実験室 (State Key Laboratory of Tribology, Tsinghua University)¹⁵⁾**

1986年の設立以来、多岐にわたる研究と人材育成を精力的に行っており、基礎から応用まで広く領域をカバーしており、中国のトライボロジーを牽引している。

- **蘭州潤滑化学研究所固体潤滑国家重点実験室 (State Key Laboratory of Solid Lubrication, Lanzhou Institute of Chemical Physics)¹⁶⁾**

長年にわたり潤滑における材料科学と化学の研究を行っており、最近では海洋開発に関連して海水中での低摩擦、耐摩耗材料の研究が精力的になされている。

- **超潤滑技術研究センター (Institute of Superlubricity Technology) (中国政府と深圳)¹⁷⁾**

深圳と北京に設置された超潤滑に関する研究センターである。

- **Center for Nano-Wear, Yonsei University (延世大学)¹⁸⁾**

ナノ、マイクロ、バイオなど様々なスケールのトライボロジーを扱うトライボロジー分野で韓国最大の予算規模をもつ研究センターである。

(5) 科学技術的課題

- **基礎と計測手法**

トライボロジーにおいては、摩擦・摩耗・潤滑の基礎メカニズムを理解することが最も重要な課題である。しかし、トライボロジー現象は、真実接触部と言われる固体間に挟まれた $1\mu\text{m}^3$ 未満の空間領域において、長くても1ms程度の短時間に起こる現象(温度・圧力変化、表面原子・分子構造変化、化学反応など)を捉えることが必要とされる。したがって計測・分析技術として、極めて高度な「その場観察技術(in-situ)」が要求される。現在、様々な表面分析技術が開発されているが、未だに十分な時間分解能や感度を有し、摩擦界面の「その場観察」に決定的な有用性をもたらす技術は開発されていない。

- **シミュレーション技術**

真実接触部における現象が観測できたとしても、現実には複数の物理現象によって構成されていると考え、実社会で観測可能なトライボロジー現象を表現するための、空間・時間の粗視化に対する考え方に難しさがある。分子シミュレーションとマクロな連続体力学のシミュレーションの融合を図り、理論面からの理解を深める事に関しては暗中模索の状況であり、新しい提案が期待される。一方、製品設計レベルにおいても、支配的因子、支配的プロセスを考慮した合理的なモデルと、それを必要なスケールと精度で計算可能にする数値解析技術の向上が必要である。

- **データ科学、計算科学**

メンテナンストライボロジーの分野でデータ科学、計算科学の検討が進んでいる。トライボロジー現象を定

性的に理解する上で規則性やトライボ要素の設計指針に気づきを与えてくれるなどの効用が見られ始めているが、定量性はまだ乏しい。計測手法の精度向上と相まってデータ科学、計算科学の深化が期待される。

• 実用への展開

ラボ試験結果と実機の性能の有効な対応づけに関する方法論の確立は、いまだ実用技術の観点での大きな課題である。実機における多様な環境、非正常な動き、接触状態の変化のもとでの摩擦や摩耗の挙動は、ラボ試験データの統計的バラツキを考慮してもなお予測から外れることがしばしばある。そのため、ラボ試験結果は複数の材料の序列づけにはある程度の有効性は認められているものの、絶対値の推定が容易ではなく、実機の設計に試行錯誤を持ち込む原因となっている。また、進展著しいテクスチャリング技術の適用拡大に際しては、時々刻々変化する摺動条件のもとでのテクスチャの振る舞いや、形状と材料組成の空間分布の相互作用は未解明であり、テクスチャリングのトライボロジー理論の体系づけが課題である。

• 耐久性と信頼性

省エネの観点で摩擦低減が求められる一方で、長期的、実用的視点からは、摩擦材料の信頼性・耐久性の向上が求められ、両者はしばしばトレードオフの関係にある。より厳しい接触条件のもとで比摩耗量を下げ、耐久性を上げること、焼付きなどの突発的な表面損傷を回避して信頼性を上げるための、表面材料、潤滑剤、設計の技術開発が今後ますます重要になる。

• 水素、新エネルギーへの対応

水素利用機器においてもトライボロジーの知見が必要不可欠である。トライボロジーの諸現象は気体の状態に大きく依存する。水素脆性など特有の課題への対応も必要となる。先駆的取り組みとして、2006年に九州大学に設置された産業技術総合研究所水素材料先端科学研究センター（現九州大学水素材料先端科学研究センター）¹⁹⁾での水素トライボロジーの研究が挙げられる。アンモニア、水素の新たな火力発電においても、基本はリークを防ぐこと、流量を管理することであるが、加えてトライボロジー要素としてシール、バルブに対する材料技術が重要になる。ポンプや圧縮機では防爆に配慮した材料の選定、中小型では駆動機（モーター）の内蔵化などに対応した機械要素開発が求められる。

(6) その他の課題

- ・トライボロジーが扱う対象は、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、多岐にわたっている。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、計測や分析等に関する分野、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。このようにトライボロジーは分野融合の科学技術の典型であり、世界的には大規模なトライボロジー研究拠点が各国に存在する。一方で、日本のトライボロジー研究は大学の研究室単位で実施されている場合がほとんどであり、基礎と技術課題の融合研究を推進するのに十分な体制にはない。先進的なトライボロジー研究を推進するには、多岐にわたる分野の研究者による異分野融合的な取り組みが必須であり、研究開発体制の強化が求められる。
- ・トライボロジーと産業界のつながりはきわめて緊密であるが、国際競争力を高める観点からも、大学や公的研究機関の研究者と民間技術者との協働による研究開発力の強化が期待される。「超潤滑」（摩擦の消失）のような革新的技術の製品適用のためには、大学等で継続的に実施される基礎研究に加えて、製造技術、実装設計技術まで含めた産学共同での実用化研究が不可欠であるが、実用成果に至るまでに時間を要する場合が多い。このため、産学連携の進展には、大学等の研究者に対する研究論文数以外

の評価軸への配慮がさらに重要になると考えられる。

- ・トライボロジー分野のような産業界においても地道な分野の研究領域については、当該分野における成果の社会的認知度を向上させるなどにより、若い研究者を惹きつけなければ、世界をリードできる総合力を有する優秀な研究者が育たず、新技術を担う人材が枯渇するリスクもある。現実にトライボロジー分野の研究室は、主要国立大学において減少する傾向にあり、「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学部も少なからずある。高信頼性・高効率な機械を実現するための新技術開発に対する研究リソースが減少し、産業界への優秀な人材の輩出も困難になる恐れがある。古くて新しい当該分野を推進するための環境整備が望まれる。

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ●基礎分野の研究者の参画により、摩擦・潤滑研究の新しい展開が出ている。特に、物理、化学、材料、計測の研究者の融合研究への参画が進んでいる。(東北大学「トライボロジー融合研究拠点プロジェクト」、東京理科大学「トライボロジーセンター」等) ●中国で開催された2017年WTC、フランスで開催された2022年WTCのいずれにおいても、開催地域に次いで国別発表数で3位に入っている。
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ●各機械要素技術(部品)の低摩擦・耐久性技術は、高い品質管理技術と相まって、世界トップクラスである。これらが変わらず高品質の機械システムを支えている。 ●自動車用動力伝達技術研究組合(TRAMI)²⁰⁾、自動車用内燃機関技術研究組合(AICE)²¹⁾、ゼロエミッションモビリティパワーソース研究コンソーシアム(ZEM)²²⁾等で応用研究が実施されている。
米国	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ●大学、エネルギー省関連の国研、民間企業の研究施設において、基礎研究は高いレベルで維持されており、伝統的な新分野創出の気風も健全である。
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ●産学連携を基本とした基礎と応用研究の循環がスムーズである。ベンチャーから生み出された摩擦試験機が世界標準機になっている(現在はBruker社が販売、試験受託)。 ●先端分野のみならず、産学連携の中、すべり軸受や歯車技術などの一見古い技術にもしっかり目が向けられており、トライボロジー分野を扱う高等教育機関の数も多い。
欧州	基礎研究	◎	→	<p>【EU】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●欧州全体として数か所の拠点が、近隣の複数国持ち回りによる国際会議やシンポジウムの開催や共同しての若手育成などを連携して進めている。産業界との連携も強い。 ●東欧、北欧などでも、従来より着実な研究活動がおこなわれてきており、基礎研究の領域で一定の存在感がある。 <p>【ドイツ】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●ミュンヘン工科大学機械要素研究所¹⁴⁾が基礎研究に強みをもつ。 <p>【英国】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●Imperial College, Leeds University, University of Southampton, University of Sheffield¹¹⁾が基礎研究に強みをもつ。 <p>【フランス】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●Ecole Centrale de Lyon, University de Poitiers¹³⁾が基礎研究に強みをもつ。 <p>【オーストリア】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●Austrian Excellence Center for Tribology¹²⁾が基礎研究に強みをもつ。

	応用研究・開発	◎	→	<p>【EU】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●産学の連携が強い。添加剤におけるエボニック社、機械要素におけるSKF社など世界的な企業が研究をリードしている。 ●機械システム及びその課題を明確化した産学官の連携体制（欧州FVV, i-TRIBOMAT¹⁰⁾等）。エンジン設計に有用な解析モデルでは世界有数の企業（FEV社、AVL社、RICARDO社等）があり、世界の自動車企業のエンジン開発のサポートを行っている。 <p>【ドイツ】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●産学連携がもともと高いレベルで行われており、トライボロジー関連では自動車の内燃機関係に関わる共同研究プラットフォームとしてFVVが発足し、ドイツ国内に研究拠点を有する自動車メーカーと部品メーカー、大学等が参画している。 <p>【英国】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●産学連携が活発に行われ、例えばImperial Collegeには企業講座が2つ設立されており、応用・開発をめざした研究がなされている。また、ベンチャーから生み出された各種試験機が世界標準機になっている。
中国	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●1986年創設の清華大学摩擦学国家重点実験室（State Key Laboratory of Tribology, Tsinghua University）¹⁵⁾、1987年創設の蘭州潤滑化学研究所固体潤滑国家重点実験室（State Key Laboratory of Solid Lubrication, Lanzhou Institute of Chemical Physics, the Chinese Academy of Science）¹⁶⁾はともに100人規模の研究者を擁する大規模な組織である。欧米で教育あるいは研究経験を積んだ中堅研究者がリーダーとして研究を率いている。研究テーマも現代的であり、先進テーマへの取り組みでも世界最先端の一翼を担っている。 ●超潤滑技術研究センター（Institute of Superlubricity Technology）¹⁷⁾も拠点となっている。 ●上記拠点以外にも全国的にトライボロジーの研究室が拡大しており、研究者数、国際ジャーナルの論文数ともに世界トップである。
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●欧州や日本の部品がその基本設計の主体と考えられ、特筆すべき応用研究はないが、基礎研究の状況や他の技術分野における著しい進化からみると、いずれ大きく進展してくるものとみられる。
韓国	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ●トライボロジー分野の研究者が少なくなり、一時みられていた勢いは感じられなくなったが、延世大学がCenter for Nano-Wear¹⁸⁾を主宰して活動している。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ●欧米や日本の部品がその基本設計の主体と考えられるが、戦略的部品である基本的機械要素（転がり軸受、気体軸受など）の自国生産のための研究体制を整備している模様。コーティング技術などを海外へライセンスする企業も現れている。

(註1)「フェーズ」

「基礎研究」：大学・国研などでの基礎研究レベル。

「応用研究・開発」：技術開発（プロトタイプの開発含む）・量産技術のレベル。

(註2)「現状」 ※我が国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価。

◎：他国に比べて特に顕著な活動・成果が見えている ○：ある程度の顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3)「トレンド」

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

- ・ 風力発電 (環境・エネ分野 2.1.4)
- ・ 水素・アンモニア (環境・エネ分野 2.2.2)
- ・ 破壊力学 (環境・エネ分野 2.6.3)
- ・ 金属系構造材料 (ナノテク・材料分野 2.4.1)
- ・ ナノ力学制御技術 (ナノテク・材料分野 2.4.3)
- ・ ナノ・オペランド計測 (ナノテク・材料分野 2.6.2)
- ・ 物質・材料シミュレーション (ナノテク・材料分野 2.6.3)

参考・引用文献

- 1) UK. Department of Education and Science, *Lubrication (Tribology) : a report on the present position and industry's needs* (London: H. M. Stationary Office, 1966).
- 2) Duncan Dowson, *History of Tribology*, 2nd ed. (Wiley, 1998).
- 3) 一般社団法人日本トライボロジー学会「トライボロジーロードマップ研究会報告書 (第1版)」<https://www.tribology.jp/unit/s-101/fso4p100000005rj-att/jr41mf00000000e0.pdf>, (2023年2月27日アクセス) .
- 4) 中原綱光, 安藤泰久「トライボロジーロードマップの目的と報告書の概要」『トライボロジスト』61 巻 1号 (2016) : 9-15., https://doi.org/10.18914/tribologist.61.1_9.
- 5) Society of Tribology and Lubrication Engineering (STLE), *2020 Report on Emerging Issues and Trends in Tribology and Lubrication Engineering* (Park Ridge: STLE, 2020).
- 6) 橋本優花, 他「機械学習を用いたしゅう動面状態監視システムに関する研究」『日本機械学会論文集』84 巻 868号 (2018) : 18-00275., <https://doi.org/10.1299/transjsme.18-00275>.
- 7) 国立研究開発法人科学技術振興機構 (JST)「革新的力学機能材料の創出に向けたナノスケール動的挙動と力学特性機構の解明」CREST, https://www.jst.go.jp/kisoken/crest/research_area/ongoing/bunya2019-2.html, (2023年2月27日アクセス) .
- 8) 国立研究開発法人科学技術振興機構 (JST)「力学機能のナノエンジニアリング」さきがけ, https://www.jst.go.jp/kisoken/presto/research_area/ongoing/bunya2019-2.html, (2023年2月27日アクセス) .
- 9) 一般社団法人水素供給利用技術協会 (HySUT), 他「超高压水素インフラ本格普及技術研究開発事業/水素ステーションのコスト低減等に関連する技術開発/長寿命高压水素シール部材・継手部材及び機器開発に関する研究開発」国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO), <https://www.nedo.go.jp/content/100937551.pdf>, (2023年2月27日アクセス) .
- 10) AC2T research GmbH, “Intelligent Open Test Bed for Materials Tribological Characterisation Services (i-TRIBOMAT),” <https://www.i-tribomat.eu/index.html>, (2023年2月27日アクセス) .
- 11) Imperial College London, “Tribology Group,” <https://www.imperial.ac.uk/tribology>, (2023年2月27日アクセス) .
- 12) AC2T research GmbH, <https://www.ac2t.at/en/>, (2023年2月27日アクセス) .
- 13) Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systemes, <http://ltds.ec-lyon.fr/spip/spip.php?rubrique1&lang=en>, (2023年2月27日アクセス) .
- 14) Chair of Machine Elements of Technical University of Munich, “Institute of Machine Elements”, Technical University of Munich, <https://www.mec.ed.tum.de/en/fzg/home/>, (2023年2月27日アクセス) .

- 15) 清華大学摩擦学国家重点実験室, <https://sklt.tsinghua.edu.cn/>, (2023年3月3日アクセス) .
- 16) Chinese Academy of Sciences, “Lanzhou Institute of Chemical Physics,” <http://english.licp.cas.cn/>, (2023年2月27日アクセス) .
- 17) 深圳精華大学研究院, <https://en.tsinghua-sz.org/>, (2023年3月3日アクセス) .
- 18) Center for Nano-Wear, “About CNW,” Yonsei University, <https://cnw.yonsei.ac.kr/cnw/About%20CNW.htm>, (2023年2月27日アクセス) .
- 19) 九州大学水素エネルギー国際研究センター, <http://h2.kyushu-u.ac.jp/>, (2023年2月27日アクセス) .
- 20) 自動車用動力伝達技術研究組合, <https://trami.or.jp/>, (2023年2月27日アクセス) .
- 21) 自動車用内燃機関技術研究組合 (AICE) , <https://www.aice.or.jp/>, (2023年2月27日アクセス) .
- 22) ゼロエミッションモビリティパワーソース研究コンソーシアム, <https://zemconso.jp/>, (2023年3月3日アクセス) .

2.6

エネルギー分野の 基盤科学技術