2.1.16 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摩擦メカニズム、接触表面状態、潤滑剤の影響などの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

（3）研究開発領域の概要

［本領域の意義］

トライボロジーが対象とする摩擦低減技術は、あらゆる産業分野、生活環境における効率的エネルギー活用に不可欠であり、低炭素社会実現において極めて重要である。また摩耗などの表面損傷の低減技術も、機械システムの耐久性と信頼性を向上させ効率的エネルギー活用につながる。

トライボロジーはギリシャ語のτριοσ（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)]。その中で、潤滑改善による経済効果が英国においては年間5億ポンド（当時）に相当する、というトライボロジーの大きな社会的・経済的意義が報告された。その後、我が国でもトライボロジーの経済効果として、2002年度で8.6兆円、対GDP比1.7%という試算が出されている[2)]。

2015年12月のCOP21でのパリ協定の合意を受け、世界各国で更なるCO_2排出削減努力が必要となっているが、このなかで輸送分野におけるエネルギー効率向上が非常に重要である。現在の自動車は燃料の約1/3がエンジンや変速等、タイヤなどにおける摩擦損失によって浪費されており、最新のトライボロジー技術を適用することで5～10年の短期レンジで18%、15～25年の長期レンジでは61%もの損失削減が可能という報告がある[3)]。後者を世界全体でのCO_2排出量として換算すると9億6000万トンの削減に上り、我が国の年間CO_2総排出量にほぼ匹敵する。また全世界の全エネルギー消費における、トライボロジー問題によるエネルギー損失は23%（119EJ）であり、15年の長期レンジで摩擦損失を40%低減できれば全エネルギー消費を8.7%削減可能との試算もある[4)]。これらと類似の調査は日本や米国でも行われている[5), 6)]。

このようにトライボロジーは、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、地球環境問題解決への貢献が極めて大きいと期待される。一方で、例えば摩擦・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り、機械工学だけでなく化学、材料科学、物理学など多くの分野の専門知識に基づいた理解が必要である。しかし、いまだ未解明の部分があり、また知識の統合に至っておらず、従来の機器設計は主に経験的な蓄積に基づくものに留まっている。今後は多様な分野の知見を統合した合理的な設計論構築の加速が重要とされている。

［研究開発の動向］

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、流体潤滑理論の構築、ストライベック曲線の提案、境界潤滑の用語の導入など、現在も使われている概念や

理論体系、経験式が当時既に提案されている。さらに20世紀の半ばには真実接触の概念に基づく摩擦の凝着理論が英国ケンブリッジ大学のバウデンとテーバーによって確立され、その後1966年に誕生した“トライボロジー”として、現代的な研究開発分野に発展してきた[7)]。

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とともに、自動車関連のトライボロジーを軸にドイツ、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として、磁気記録装置の開発に最先端のトライボロジー技術が導入された。磁気記録の技術とともに、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確立した。これはその後、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、“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で特有な化学反応に着目した“トライボケミストリー”のテーマや、地球環境問題を背景として冷凍機の代替フロンの潤滑や、無段変速機の潤滑問題が登場した。これらの動向とともに、弾性流体潤滑（EHL）の研究、各種機械要素や潤滑剤、新規コーティング材料などの開発は脈々と続けられ、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関わりながら発展してきた。

2000年以降のトライボロジー領域における研究開発は、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）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によるすべり軸受の耐摩耗性向上と摩擦損失低減、最小油量で潤滑するMQL（minimal quantity lubrication）、風力発電装置のギアボックスの軸受損傷機構解明、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が行われている。これらの研究開発において、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と、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が進化している。

自動車の省資源・省エネルギーに対するトライボロジー技術の貢献は、現在も研究のターゲットとしては主流であり[8)]、SIP（戦略的イノベーション創造プログラム）の「革新的燃焼技術」における「機械摩擦損失低減の研究」（研究期間：2014～2018年度）[9)] は、その発展として複数の組合やコンソーシアムやプロジェクトにおいて、研究開発が続けられている[10), 11), 12)]。

学会の主要な動きとして、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」、「オープンイノベーションを目指した技術動向調査研究会」及び「新領域・新分野開拓研究会」の活動が挙げられる。「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。この技術俯瞰図において空白のマトリックスの技術・研究課題を埋め、それらの課題を分類整理し、分類された課題ごとに10年後の予測を行い、順次20年、50年へと可能な範囲で拡大することによってロードマップを作製できるようにまとめた報告書を公開している[13), 14)]。また自動車、鉄道、航空用エンジン、発電用ガスタービン、医療機器、宇宙機などシステム・コンポーネント側からのトップダウンのロードマップと、軸受、シール、材料・表面処理、潤滑剤、シミュレーション、分析技術など要素からのボトムアップのロードマップを紹介している。「オープンイノベーションを目指した技術動向調査研究会」では、2015-2017年度の活動期間に、トライボロジー分野での技術連携と実用化の創出を目的とし、Society5.0の各項目と上記トライボロジー技術俯瞰図との関連づけにもとづいて、「社会的要請とトライボロジー技術の関係」と、産業界におけるオー

プンイノベーションの取り組みについて報告書にまとめた[15)]。「新領域・新分野開拓研究会」では、2018-2019年度の活動期間に、現在は主流ではないが今後の発展が期待できる分野を探索しており、最終的に新領域の研究会を立ち上げる予定である[16)]。

一方、米国の学会Society of Tribology and Lubrication Technology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年毎に発行しており、2020年5月に最新版2020 Report Emerging Issues and Trends in Tribology and Lubrication Engineeringが発行された[17)]。2020年版では、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がまとめられている。

トライボロジーに関わる国際的な動向に目を向けると、2010年代半ばまでの流れについては、「研究開発の俯瞰報告書　エネルギー分野（2017年）」の「3.29 トライボロジー」に記載されているとおり[18)]、第4回世界トライボロジー会議（WTC IV、2009年京都）における“Green Tribology”の提唱、2010～2015年に総額59百万ユーロが投入されたトライボロジーも基幹テーマに含むオーストリアのCOMET（Competence Centers for Excellent Technologies）プロジェクト、2008年からの5年間に総計9.7百万ポンドの研究資金を集めた英国サザンプトン大学のnCATS（national Centre for Advanced Tribology at Southampton）設立、米国エネルギー省（DOE）による次世代先進自動車開発への175 百万ドルの投入（うち4.7百万ドルが潤滑油関連プロジェクトへ配分）などがある。最近では、EUのHorizon2020として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を目指したプロジェクトi-TRIBOMAT[19)]（2019～2022年）が開始した。

トライボロジーにおける国際的な動きとして、中国の台頭も顕著である。同国では、清華大学と蘭州化学物理研究所がトライボロジー分野での国家重点実験室に指定され、研究資源の重点配分のもと活発な研究活動を展開しており、それが奏効した形で中国の台頭を象徴した催しが第6回世界トライボロジー会議（2017年9月17-22日、北京）であった。世界トライボロジー会議（WTC：World Tribology Congress）は国際トライボロジー評議会（ITC：International Tribology Council）が統轄し、開催国持ち回りで4年ごとに開かれるトライボロジー分野の一大イベントであり、第1回が1997年にロンドン、第4回は2009年に京都で開催された。2017年北京の第6回会議は、8件の基調講演に加え、オーラルおよびポスターでのプレゼンテーションを合わせると1000件以上の発表を集め、過去最大級の規模で開催された。

一方、日本トライボロジー学会では、上述のWTCとは別に4年毎に国際トライボロジー会議（International Tribology Conference, ITC）を主催しており、2019年9月17-21日に仙台で開催したITC Sendai 2019では、参加者数900名のうち外国人485名、講演件数642件のうち外国人による講演が304件と、海外からの参加、講演がいずれも半数以上を占めており、当該分野で日本が世界から注目されていることをよく示している。

（4）注目動向

［新展開・技術トピックス］

・エンジン潤滑：エンジン回転時の軸受やピストンリングなどの摩擦抵抗を抑えるため潤滑油のさらなる低粘度化が進んでおり、低速時・停止始動時の摩擦上昇と摩耗などの表面損傷を防ぐための潤滑油添加剤技術、表面技術が進化している。研究開発においては、種々の化学分析手法による基礎現象解明の貢献が大きい。

・その他の自動車技術：エンジン以外の動力伝達部での摩擦低減や耐久性の向上、電気自動車向けの軸受

やシールの研究開発が進められている。

・表面テクスチャリング：実用機械への応用も進んでおり、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、3Dプリンタによる付加加工技術の応用などが報告されているが、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今後の課題である。

・転がり軸受の早期はく離：風力発電装置の増速装置に用いられている転がり軸受や歯車は、ひとたび損傷が起きれば交換のために多大の時間と経費が必要となるため、トライボ損傷の未然の防止が最重要課題である。転がり軸受ではいわゆる白色組織の形成をともな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、実用範囲を広げており、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。

・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、実際への応用が期待されている。

・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。

研究手法に関する新たな技術動向

・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。

・分子シミュレーション：化学反応を古典分子動力学の範囲で扱うことができる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。分子スケールの結果をどうマクロに展開し、現象理解につなげるかが課題である。

・トライボシミュレータ：企業の設計において開発されている。その詳細は明らかではないが、エンジンの潤滑状態や摩耗の推定などへの適用が進んでいる。欧州では解析ソフトの開発メーカ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

- **「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」（経済産業省、2020年～）**
  2019年度までのJST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。

- **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コンソ）（2020年～）[12)]**
  モビリティのゼロエミッション化を目指し、アカデミアとAICE（自動車用内燃機関共同研究組合）を中心

とする企業メンバーによるエンジンシステム等の研究での産学連携。

- **自動車用動力伝達技術研究組合（TRAMI）（2018年～）[11)]**
  自動車業界と経済産業省により発足した動力伝達技術の高度化に向けた産学連携プロジェクトである。

- **「超低摩擦機械システムのためのトライボ化学反応を制御したナノ界面創成」（JST CREST, 2013-2019）[20)]**
  超低摩擦を持続するナノ界面の自己形成過程の探究と制御に関する実験、分子シミュレーション、及び膜生成を通じた研究を実施している。

- **「中性子とミュオンの連携による「摩擦」と「潤滑」の本質的理解（TRIMN）」（文部科学省, JST, 2013-2017年）[21)]**
  中性子やミュオンなどのビームによる先端計測を用いたトライボロジー現象の探究。

■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）[19)]**
  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を構築し、ヨーロッパの産業における研究開発を加速させる。国の研究機関と大学、及び民間企業が参画。

- **Imperial College Tribology Group（イギリス）[22)]**
  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SKFのUniversity Technology Center（UTC）と、石油大手のShell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）[23)]**
  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）[24)]**
  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）[25)]**
  歯車延久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）[26]**
  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、中国のトライボロジーをリードしている。

- **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 Lubrucation, Lanzhou Institute of Chemical Physics）[27]**
  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）[28]**
  深圳の清華大学に新たに設置された超潤滑に関する研究センター。

- **Center for Nano-Wear, Yonsei University（延世大学）[29]**
  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

（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 μm^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。この分析・観察技術が確立することが、マルチスケール・マルチフィジックスのトライボロジー・モデルの構築につながり、さらには計算機シミュレーションによる数値解析技術の妥当性検証等においても重要となる。

- **シミュレーション技術**
  上述のとおり、トライボロジーの諸現象の十分な理解のためには現象の観測が最重要である。しかしこれを補うべき理論解析技術の向上が必要である。上述の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必要があるが、当該分野での現在の解析技術はやや遅れていると言わざるを得ない。一方、製品設計においても、支配的因子、支配的プロセスを考慮したモデルと数値解析技術の向上が必要である。

- **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が、実用技術の観点での課題となっている。実機における多様な環境、非定常な動き、接触状態の変化のもとでの摩擦や摩耗の挙動は、ラボ試験からはず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有効であるが、絶対値の推定が容易ではなく、したがって実機における精度の高い比摩耗量の評価はいまだ困難である。

• 耐久性と信頼性

上述のとおり省エネの観点で摩擦低減は重要であるが、長期的、工学的視点からは、摩擦材料の信頼性と耐久性を向上させることも重要な課題である。より厳しい接触条件のもとで比摩耗量を下げて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

エネルギー・環境の観点で、人類の向かう方向は脱炭素化と再生エネルギーの利用であり、そのなかで水素はエネルギー媒体として期待されている。トライボロジーの諸現象は周囲の気体環境に大きく依存するため、水素利用機器のさらなる普及において、トライボロジーの知見が必要不可欠である。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）での、水素トライボロジーの研究が挙げられる。

• IoT、AIなどとの関係

近年、機械学習がさまざまな場面で取り入れられているが、トライボロジーではメンテナンストライボロジーの分野で研究が進んでいる[30), 31)]。今後トライボロジーの様々な場面での活用が期待される。

（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。このように分野融合の科学・技術の典型であるトライボロジーであるが、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、そのような取り組みが可能になるような体制の構築が求められる。

・個人会員の約2/3が企業の所属という日本トライボロジー学会の会員構成を見ても明らかなように、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り、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」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、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味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

理工系大学も少なからずある。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状況となっている。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ている。

（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	◎	↗	●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） ●トライボロジーにおける低摩擦の発現現象や焼付き及びなじみのメカニズム、カーボン系炭素膜等多くの基盤技術が大学をはじめとする研究機関で推進されている。（CREST、ACCEL他）
	応用研究・開発	◎	↗	●近年の自動車の燃費向上の大きな部分が、低摩擦化技術の向上によっている。過去20年間で15%[32] と燃費向上が実現している。 ●各機械要素技術（部品）の低摩擦・耐久性技術は現状でも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。SIPにおける乗用車エンジンでのトライボロジー研究の推進等。
米国	基礎研究	◎	→	●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。一方、NASAの研究センターは減衰している。 ●大学において学生の参画が活発である。
	応用研究・開発	◎	→	●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が販売）。
欧州	基礎研究	◎	↗	【EU】 ●欧州全体としては、本文中にも記載したとおり数か所の拠点があり、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。 ●EUの一員として、基礎研究に先導的な役割を果たしている。近年、ヨーロッパ最大の国際会議を主催してきたTechnishe Akademie EsslingenがドイツのトライボロジーGfTと連携を始めた。 【フランス】 ●Ecole Cntrale de Lyon,University de Poitierなどトライボロジーの拠点的大学で精力的に研究されている。 【英国】 ●Imperial College, Leeds University, University of Southampton, University of Sheffieldに研究者が集中し、世界をリードする研究が続けられているが、統一的な動きはない（以前はIMechEのUK Tribologyが存在したが）。
	応用研究・開発	◎	→	【EU】 ●産学の連携が強い。添加剤におけるエボニック、機械要素におけるSKF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（FVV, i-TRIBOMAT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、AVL、RICARDO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。

				【ドイツ】 ●産学連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系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。 【英国】 ●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	◎	↗	●摩擦研究拠点が、北京と蘭州にある（State Key Laboratory of Tribology, Tsinghua University（1986年創立）; State Key Laboratory of Solid Lubrication, Lanzhou Institute of Chemical Physics, the Chinese Academy of Science（1987年創設）。ともに百人規模の研究者を擁する大規模な組織。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として研究を率いている。研究テーマも現代的であり、以前は追随型の傾向があったが、最近は新規テーマへの取り組みがいくつかみられる。 ●上記2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、研究者の数、国際ジャーナルの論文数ともに、世界一であり、他国を大きく引き離している。
	応用研究・**開発**	○	↗	●欧州や日本の部品がその基本設計の主体と考えられ、特筆する応用研究はないが、基礎研究の状況から今後の応用研究レベルの向上が考えられる。
韓国	基礎研究	△	→	●トライボロジー分野の研究者は少なく、ひとり延世大学の金教授がコーティング膜の分野で気をはいている。
	応用研究・**開発**	○	→	●欧州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（転がり軸受など）の自国生産のための研究体制を整備している模様。 ●材料科学研究所（昌原市）においてDLCの多層膜による厚膜化の研究が進められている。

（註1）フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

（註2）現状　※日本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

◎：特に顕著な活動・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　※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

・ナノ力学制御技術（ナノテク・材料分野　2.5.8）

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）, https://ci.nii.ac.jp/ncid/BA58280700

2）後藤建夫,「ST/GSC技術開発プログラム構想-ST戦略の具体化に向けて-」『GSCN ニュースレター』

16号（2005）, http://www.jaci.or.jp/gscn/page_04/newsletter/newsletter-No16.pdf（2020年12月26日アクセス）※注）ST：Sustainable Technology, GSC：Green Sustainable Chemistry
3）K. Holmberg, P. Andersson and A. Erdemir, “Global energy consumption due to friction in passenger cars”, *Triblogy International* 47（2012）：221-234, doi：10.1016/j.triboint.2011.11.022
4）H. Holmberg and A. Erdemir, "Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions", *Friction* 5, no. 3（2017）：263-284, doi：10.1007/s40544-017-0183-5
5）中村隆,「トライボロジー技術の進展による自動車の省エネ」『トライボロジスト』61巻2号（2016）：65-70, doi：10.18914/tribologist.61.2_65
6）P. M. Lee and R. Carpick, “Tribology Opportunities for Enhancing America's Energy Efficiency：A Report to the Advanced Projects Agency-Energy at the U.S. Department of Energy”, ARPA-E, https://alliance.seas.upenn.edu/~carpickg/dynamic/wordpress/wp-content/uploads/2012/03/TribologyARPAE_FINAL.pdf（2020年12月27日アクセス）
7）D. Dowson, History of Tribology 2nd Edition（USA and Canada：Wiley, 1998）, https://www.wiley.com/en-us/History+of+Tribology%2C+2nd+Edition-p-9781860580703
8）一般社団法人日本トライボロジー学会,「特集・創立60周年記念　自動車の省資源・省エネルギー」『トライボロジスト』61巻2号（2016）：64-115,
doi：10.18914/tribologist.61.2_K2
9）革新的燃焼技術 損失低減チーム,「戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）：排気エネルギー有効利用と機械摩擦損失低減」『国立研究開発法人科学技術振興機構』, https://www.jst.go.jp/sip/k01_team4.html（2020年12月26日アクセス）
10）AICE自動車用内燃機関技術研究組合, http://www.aice.or.jp/index.html（2020年12月26日アクセス）
11）自動車用動力伝達技術研究組合, https://trami.or.jp（2020年12月26日アクセス）
12）Power Source Research Consortium「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/articles（2020年12月26日アクセス）
13）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」,　https://www.tribology.jp/unit/s-101/fso4p100000005rj-att/jr41mf00000000e0.pdf（2020年12月26日アクセス）
14）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, doi：10.18914/tribologist.61.1_9
15）オープンイノベーションを目指した技術動向調査研究会,「「オープンイノベーションを目指した技術動向調査研究会」活動報告」『トライボロジスト』64巻11号（2019）：683-690, doi：10.18914/tribologist.64.11_683
16）一般社団法人日本トライボロジー学会,「日本トライボロジー学会 第64期 研究会報告」『トライボロジスト』65巻6号（2020）：383-392, doi：10.18914/tribologist.65.06_383
17）Society of Tribology and Lubrication Engineering, 2020 Report on Emerging Issues and Trends（Park Ridge, IL：STLE, 2020）
18）国立研究開発法人科学技術振興機構研究開発戦略センター,「研究開発の俯瞰報告書　エネルギー分

野（2017年）」（CRDS-FY2016-FR-02）（2017）：502-511, https://www.jst.go.jp/crds/report/report02/CRDS-FY2016-FR-02.html
19）Intelligent Open Test Bed for Materials Tribological Characterisation Services, “About i-TRIBOMAT”, i-TRIBOMAT, https://www.i-tribomat.eu/index.html（2020年12月26日アクセス）
20）足立幸志,「超低摩擦機械システムのためのトライボ化学反応を制御したナノ界面創成」『戦略的創造研究推進事業（CREST）』, https://www.jst.go.jp/kisoken/crest/project/31/31_01.html（2020年12月26日アクセス）
21）中性子とミュオンで調べる摩擦と潤滑（TRIMN）, http://trimn.kek.jp/purpose/tribology/（2020年12月26日アクセス）
22）Imperial College London, "Tribology Group”, https://www.imperial.ac.uk/tribology（2020年12月26日アクセス）
23）Austrian Excellence Center for Tribology, “Austrian Excellence Center for Tribology：Welcome in the world of friction, wear and lubrication research”, https://www.ac2t.at/en/ac2t/（2020年12月26日アクセス）
24）Ecole Centrale de Lyon, Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systemes, “De l’infiniment petit a l’echelle de l’objet”, LTDS, http://ltds.ec-lyon.fr/spip/spip.php?rubrique1&lang=en（2020年12月26日アクセス）
25）Chair of Machine Elements of Technical University of Munich, “Institute of Machine Elements”, Technical University of Munich, https://www.mw.tum.de/en/fzg/home/（2020年12月26日アクセス）
26）清華大学摩擦学国家重点実験室, https://sklt.tsinghua.edu.cn/publish/sklt_en/index.html（2020年12月26日アクセス）
27）蘭州化学物理研究所, http://english.licp.cas.cn/（2020年12月26日アクセス）
28）超潤滑技術研究センター,「最近の事象：超滑り技術アイデア募集会議」『超潤滑（SUPERLUBURICITY）』, http://superlubricity.com/default.aspx（2020年12月26日アクセス）
29）Center for Nano-Wear, Yonsei University, https://cnw.yonsei.ac.kr/cnw/About%20CNW.htm（2020年12月26日アクセス）
30）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, doi：10.1299/transjsme.18-00275
31）鈴木厚,「自動車の省資源・省エネルギー予測」『トライボロジスト』61巻2号（2016）：109-115, doi：10.18914/tribologist.61.2_109