

## 2.4.3 ナノ力学制御技術

### (1) 研究開発領域の定義

ナノ力学制御技術とは、材料の力学特性発現機構をナノスケールまで立ち戻って理解し制御することを目的とした研究開発領域である。材料が本来持つ力学機能を最大限まで引き出し、これまで実現できなかった高性能・高機能・高耐久な材料の開発および新しい材料設計技術を構築するために重要な技術である。以下では、マクロな材料力学特性に関して社会的要請が強い応用技術領域を代表するものとして、「接着」「摩擦・摩耗」「自己修復」の3つを主に取り上げる。

### (2) キーワード

マルチスケール解析、ナノ構造、ナノ界面、オペランド計測、ナノ計測、接着界面、分子接着技術、マルチマテリアル化、キッキング・ボンド、トライボケミカル反応、表面テクスチャ、コーティング、固液界面、超低摩擦、自己修復、水素結合、動的架橋、超分子

### (3) 研究開発領域の概要

#### [本領域の意義]

材料が本来持つ力学機能を最大限まで引き出すためには、従来行われてきた現象論・経験則によるアプローチに加え、ナノスケールにおける相互作用を出発点としてマクロな力学特性の発現メカニズムを体系的に理解することが重要である。それによって、これまで実現できなかった高性能・高機能な材料開発および新しい材料設計技術を構築することができるようになる。ナノスケールにおける非平衡・散逸・非定常状態も含めた現象メカニズムの解析起点とし、ナノスケール～メソスケール～マクロスケールの各階層構造をつなぐトランススケールな視点を持った研究開発を行うことが重要である。

#### • 接着

次世代モビリティ、特に自動車や航空機などの輸送機器における軽量化ならびに高強度化のため、部材のマルチマテリアル化が進められており、このためのキーテクノロジーとして異種材料接着に注目が集まっている。しかし、現状では接着の信頼性が十分ではなく、依然としてスチール製のボルト・リベットの使用が継続されている。今後、接着剤の安全性・信頼性をいかに担保するかが重要である。

また、自動車製造工程における炭酸ガス排出の約半分が塗装工程であるとも言われており、塗装を低温・短時間で可能な接着技術で代替できれば、大きな環境低負荷に繋がる。さらに、高強度な接着界面を自在に剥離できれば廃車時の部材リサイクル効率も向上する。

これらを実現するためには、接着剤自身の高性能化・高機能化はもちろん、接着剤がなぜくっつくのか、壊れるのか、どのくらいで壊れるのかといった動作機構を明らかにし、接着の学理を構築することが必要となる。

#### • 摩擦・摩耗

機械システムがその機能を実現するために動く箇所には必ず「摩擦」が発生し、それはエネルギー損失の大きな要因となる。現在の自動車において、燃料の約1/3はエンジンや変速機、タイヤなどにおける摩擦損失によって消費されている。摩擦制御技術は、自動車、家電、情報機器、産業用ロボットなど機械産業機器、生活環境におけるエネルギー高効率化の鍵を握る。一方、機械システムの故障や寿命の原因の75%は摩擦により引き起こされる「摩耗」に起因していると言われ、耐摩耗技術は、コスト損失や時に重大事故の抑制など機械システムの信頼性と耐久性の鍵を握る。

しかし、摩擦と摩耗は、個別の材料の特性ではなく、システムの応答特性であり、接触条件や環境など多

様な因子に敏感に左右される動的変化を伴う複雑系の現象であるため、ナノスケールでの構造や挙動に関する科学的知見とマクロな摩擦摩耗現象を制御する技術開発の間には大きな乖離がある。マクロスケール現象のナノスケールまで立ち戻っての科学的理解を基盤とする合理的な設計論による開発の加速が重要となる。

#### • 自己修復

材料の自己修復が可能になれば、メンテナンスの費用が大幅に削減できるだけでなく、材料の長寿命化を通じてCO<sub>2</sub>の削減にも大きな効果が期待される。また、宇宙空間や深海など、通常のメンテナンスが困難な応用先では特に重要な技術と考えられる。

自己修復現象はマクロな力学特性であるが、それを実現するためには、ナノおよびマイクロスケールの原子・分子の構造または高次構造と、そのダイナミクスが決定的な役割を果たす。したがって自己修復現象を科学的に理解し、その修復の程度や速度を制御するためには、ナノとマクロをつなぐ空間の階層構造に関する学理、それぞれの時空間スケールをカバーする測定手法の開発、マルチスケールシミュレーションなどの基礎研究が必要となる。

#### [研究開発の動向]

持続可能社会を実現するためには、素材産業や機械産業に対するCO<sub>2</sub>排出量削減や低消費電力化などの環境低負荷に向けた要求がますます高まり、素材が持つ性能を極限まで引き出す機械機器設計が求められている。いわゆる「限界設計」の時代に入つつある今、社会的な要求を満たすためには、高性能な材料開発はもちろんのこと、それらの機能発現メカニズムの本質的な理解を通じた材料の余寿命予測技術の確立、さらに最終製品の信頼性や耐久性を担保できる新しいサイエンスが求められている。そのため、現象論的なマクロ特性の解析のみならず、ナノスケールにまで掘り下げた詳細な機能発現の原理解明が必要となり、機械工学や流体力学などのマクロスケール現象を取り扱う研究者・研究分野と、化学や物理学などのナノスケール現象を取り扱う研究者・研究分野の協働が重要になってきている。それぞれの研究分野においては、データ科学やシミュレーション技術も駆使してナノとマクロの両方からのアプローチをすることによって革新材料の創製をめざす動きが徐々に始まっている。

論文数や特許数は全体として近年増加傾向にある。論文数・特許数どちらも中国の伸びが大きく、日本・米国・欧州はほぼ横ばいである。(詳細は「研究開発の俯瞰報告書 論文・特許データからみる研究開発動向(2024年)」を参照)

ナノとマクロの両方からのアプローチによる革新材料創製に関する重要な研究成果は、これまで主に日本・米国・欧州で生まれてきたと思われるが、今後は中国の動向にも注意が必要である。

#### • 接着

接着技術の安全性・信頼性を向上させるためには、学理に基づく強度や耐久性の保証が求められる。しかし、接着層は両側を固体で挟まれた薄い層であり、外から直接観測することが困難なため、実接着界面での接着機構や破壊挙動が明確になっていない。また、強度設計の系統的な指針や環境による劣化原因究明も十分ではない。

高温下、湿度下、変形下など多様な条件での接着剤の高性能化には、マテリアルズインフォマティクス(MI)の手法が有効である。ただし、現在、接着強度に関する現在の評価は破壊試験がメインであり、データのばらつきが大きく、多くの試験回数を要する上に、疲労試験は長期間を要するという問題がある。このため、接着現象を、分子中の官能基の配向状態や接着剤の硬化反応の空間不均性から、巨視的な剥離・破壊など力学強度までのマルチスケールな空間で、かつ時間変化で包括的に解析し、その発現機構を明らかにし、それを分子設計に活かすことが重要になる。

近年では、硬化収縮の起こりにくい接着や温度・湿度変化とその繰り返しに耐え得る接着等の設計が開始

されている。また、界面にクラック等の初期破壊が起こってもそれを修復する接着、部材のリサイクルを考え  
た際の易解体性接着、環境に優しいバイオベース接着なども重要である。

#### • 摩擦・摩耗

1980年代末頃の磁気記憶装置の急速な発展時の小さな接触面でのゼロ摩耗の要求が、マイクロおよびナ  
ノスケールでの摩擦・摩耗制御技術と原子・分子レベルでの摩擦・摩耗メカニズムの科学的解明に取り組む  
きっかけとなっている。ものづくりとして実用化される表面は均質な表面であることはなく、また取り巻く環境  
はさまざまであり、さらに、摩擦エネルギーにより表面は常に変化するため、実際の表面では科学と技術の  
ギャップは大きい。特に、摩擦および摩耗過程では、環境の影響も相まってさまざまな化学反応（トライボケ  
ミカル反応）が発生する。その結果として形成されるナノメートルオーダーの表面層の理解が、摩擦・摩耗解  
明のためには不可欠となる。また、摩擦と摩耗の動的な現象を真に理解するためには、in situ 観察技術が必  
要であり、光干渉法、分光法、TEM、振動分光法、その場放射XRD等の最先端の表面評価装置と摩擦摺  
動部を組み合わせた摩擦界面のin situ 観察技術の開発が国内外で進んでいる。

摩擦がゼロに近づく現象およびそのアプローチを超潤滑（Superlubricity）と呼び、マイクロ・ナノスケ  
ールにおいて多くの注目を集め数多くの研究が推進されてきた。その発現機構については科学的な解明が進む  
一方で、超潤滑の最終的な目的である超低摩擦と超低摩耗を備えた有望な機械システムの設計への展開は依  
然として困難な状況であり、大きな課題となっている。

#### • 自己修復

自己修復材料の対象は、有機・高分子材料と無機材料に大別できる。

有機・高分子材料の自己修復としては、もっとも大きな応用分野が自動車などの自己修復コーティングであ  
る。軽微な擦り傷が時間とともに修復するものであり、変形した高分子の形状が自然に元に戻る物理的な自  
己修復である。ヤング率が低い柔らかい高分子では当然のことであるが、比較的硬いコーティング用の高分  
子材料で実現することに意義がある。しかし、硬い高分子材料で高い復元性と速い復元速度を低温で両立す  
ることは今でも困難であり、架橋密度の制御、水素結合の部分的導入、トポロジカル超分子の利用など新し  
い技術を導入しながら現在もさかんに研究されている。これに加えて最近では化学的な自己修復が注目されて  
いる。水素結合、疎水性相互作用、結晶化、ホストゲスト相互作用などのさまざまな非共有性相互作用を用  
いるものや、エステル交換反応、Diels-Alder反応などの動的結合を利用するものなどさまざまな研究成果が  
報告されている。

無機材料分野である自己治癒セラミックスの研究開発については、おおむね3世代に分けることができる。  
第1世代は、亀裂の入ったセラミックスを再焼結することによる亀裂の再接合の現象解析を中心に研究開発  
が行われた。この段階は自己治癒性を積極的に活用した材料設計がなされたわけではない。第2世代は、  
SiC粒子の高温酸化を利用した自己治癒セラミックスなどであり、粒子分散材と分散質の化学反応を活用した  
亀裂の再接合現象を中心に研究開発が行われている。第3世代は想定される用途に合わせて自己治癒機能を  
発現する最適な化学反応を選定し材料設計を実施するものであり、長繊維強化自己治癒セラミックスが代表  
例である。

### (4) 注目動向

#### [新展開・技術トピックス]

##### • 接着

新構造材料技術研究組合（ISMA）は自動車を中心としたモビリティの軽量化に向けた技術開発を推進し  
ており、物質・材料研究機構（NIMS）と共同で、代表的な熱硬化性樹脂であるエポキシ樹脂を分解する資  
源循環システムを提案している。これにより、炭素繊維強化プラスチック（CFRP）の再利用の促進が期待で

きる。

産業技術総合研究所 (AIST) は、接着技術の基礎から応用に至る幅広い分野を対象として研究開発を行う接着・界面現象研究ラボを設立し、また、産官学の連携構築の場として、接着接合基盤技術共同研究体 (ABC-U) および接着・接合技術コンソーシアムを設立している。ここでは、異種材料接着接合技術 (構造接着技術) の開発を目指し、接着界面の分析技術、接着剤の開発、接合部の強度評価および耐久性予測技術、接着・接合のための金属やプラスチックの表面処理技術など様々な取り組みが行われている。また、接着接合の信頼性向上に繋がる評価技術の開発と国際標準化、および企業への橋渡しにも取り組んでいる。

九州大学は、次世代接着技術研究センターを設立し、接着機構の分子論的解明と熱硬化における基礎物性の理解を掲げ、社会実装に向けた開発研究に必要な知見を蓄積するとともに、接着寿命の予測解析の高速化、接着界面にタフネス性・自己修復性・易解体性を付与することやバイオベース化にも取り組んでいる。また、これらの技術を、企業の開発目標を達成するための共通基盤技術として位置づけ、界面マルチスケール4次元解析に加えて、数理統計・MIに基づき接着現象を本質的に理解するとともに分子接着技術を導入することで、これまで達成できなかったスペックの接着を可能とし、バリューチェーンを意識しながら社会実装に展開していく特徴ある活動をしている。

#### • 摩擦・摩耗

摩擦・摩耗を制御するための高性能・高機能な材料開発および新しい材料設計技術を構築するため、マイクロ・ナノスケールの現象解析に基づいた設計論構築への橋渡しが強く求められている。特に実用機械システムにおいては信頼性と耐久性は極めて重要であり、今後は低摩擦発現機構のみならず、摩耗機構に基づいた低摩擦の信頼性と耐久性の評価が必要となる。

摩擦過程、特に摩擦初期のなじみ過程においては、摩擦下での化学反応 (トライボケミカル反応) により常に摩擦面が変化することが知られており、このトライボケミカル反応を制御することが、安定した低摩擦の発現の鍵を握ると考えられている。東北大学の久保百司らのグループは、摩擦下での化学反応ダイナミクスを解明可能な反応力場分子動力学シミュレータにより、摩擦下で発生するトライボエミッション現象のメカニズムを解明し、ダイヤモンドライクカーボン (DLC) のナノレベルの摩耗現象を明らかにしている。今後は、摩耗しにくい材料・表面に加え、摩擦エネルギーによって摩擦界面の良好な状態を継続的に自己形成させる技術、すなわち摩擦界面の自己治癒技術が重要になると考えられ、関連する研究が始まっている。

材料研究のトピックスとしては、濃厚ポリマーブラシの潤滑効果の研究が挙げられる。濃厚ポリマーブラシは、固体表面の表面修飾、低摩擦化材料や生体内潤滑モデルとして世界的に大学を中心に研究されてきているが、耐荷重性に乏しく実用化には限界があった。これに対し、京都大学の辻井敬亘らのグループは濃厚ポリマーブラシの厚膜化に成功し、膨潤溶媒としてイオン液体や潤滑油を利用することも可能になり、実用化を視野に入れ、摩耗の学理構築とそれに基づく新機能開拓を目指した研究が進められている。

#### • 自己修復

有機・高分子材料の自己修復としては、動的結合を利用したものがさかんに研究されている。LeiblerらフランスCNRSのグループのエステル交換反応で自己修復するヴィトリマーと呼ばれる熱硬化樹脂や、東京工業大学の太塚英幸らのグループのジアーレルビベンゾフラノンの動的結合を利用した例などがあげられる。また、水素結合を利用した自己修復材料では、理化学研究所の相田卓三らのグループが、ガラス状の硬い自己修復材料の合成に成功した。従来の有機・高分子の自己修復材料は、弾性率が低い柔らかい材料に限定されていたが、ポリエーテルにチオ尿素を導入することで、硬い材料でありながら、室温で数時間圧着するだけで強度が元に戻るものが実現できている。ちなみに水素結合を用いた自己修復材料としては、Leiblerらと共同しながらアルケマ社が「Reverlink®」という製品を実用化している。

岐阜大学の三輪洋平らのグループでは、ポリマーに少量付加したフッ素成分が集まる性質に着目し、新し

いタイプの自己修復エラストマーを開発した。切断した傷口は自己修復により瞬時に接合し、15分程度で元通りに回復する。単純な分子構造で自己修復機能が実現する点に特徴がある。東京大学の吉江尚子らのグループでは、ビシナルジオールを用いたエラストマーの自己修復に成功している。ビシナルジオールの結合・解離の緩和時間は25分程度と人間の時間感覚と同程度にあることや、エントロピー駆動で自己修復が起こることなど、これまでの自己修復とは異なる新しい技術や観点として注目されている。

無機材料系自己治癒材料の研究開発において注目される動向として、自己治癒機能を力学機能の一機能として有限要素法モデルなど構造物の連続体モデルへ組み込む試みがある。横浜国立大学の尾崎伸吾らのグループは、セラミックスの自己治癒速度を温度、酸素分圧の関係式として有限要素法モデルに組み込み、有限要素法解析内で、クラックが自己治癒されていく挙動および強度が回復されていく挙動を模擬している。また、サーキュラーエコノミーに対応する材料技術として、無機材料の自己治癒技術を使用済み部材の再利用、再資源化技術として転用することが注目されており、産業界の関心が極めて高い。

## [注目すべき国内外のプロジェクト]

### [日本]

内閣府 戦略的イノベーションプログラム (SIP) では、「革新的構造材料」(PD: 岸輝雄、2013～2019年度) および「革新的設計生産技術」(PD: 佐々木直哉、2014～2018年度) において、軽量かつ耐熱・耐環境性に優れた材料開発が行われた。「統合型材料開発システムによるマテリアル革命」(PD: 三島良直、2018～2022年度) においては、欲しい性能から材料・プロセスをデザインする逆問題に対応した次世代型マテリアルズインテグレーションシステムを活用して、競争力ある革新的な高信頼性材料の開発や設計・製造・評価技術の確立を目指した取り組みが推進された。ターゲットとして発電プラント用材料や航空用材料を選び、先端的な構造材料・プロセスの事業化を目指したものであった。

産業技術総合研究所 (AIST) は、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) から委託を受けた「車体接着長期安定化のための界面設計技術開発」(2021～2024年度) をドイツ・ブラウンシュバイク工科大学と共同で推進している。

JST 未来社会創造事業 大型プロジェクト型 技術テーマ「Society5.0の実現をもたらす革新的接着技術の開発」(PM: 田中敬二、2018年度～) では、先端解析ならびに原子・分子レベルの材料設計がもたらす革新的な接着素材やプロセスの開発を目指し、アカデミアに加え我が国を代表する化学・素材メーカーが参画している。ここでは、各企業単独では達成し得ない成果を創出・確立し、現場で実装可能な接着剤あるいは接着プロセス技術として熟成させ、部品メーカーや自動車OEM等のユーザーへ導入していくことも視野に入れたプロジェクトとなっている。

また、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」(研究総括: 伊藤耕三、2019～2026年度) やJST-CREST「分解・劣化・安定化の精密材料科学」(研究総括: 高原 淳、2021～2028年度)、JST さきがけ「力学機能のナノエンジニアリング」(研究総括: 北村隆行、2019～2024年度)、JST さきがけ「持続可能な材料設計に向けた確実な結合とやさしい分解」(研究総括: 岩田忠久、2021～2026年度) においても、接着に関連したテーマが採択されている。

### [海外]

ドイツのフラウンホーファー研究機構は、欧州企業を含む10社が参画するプロジェクト「FlexHyJoin」(2015～2030年) を主導し、鋼板とプラスチックの接合技術に関し、軽量化、コストと時間の効率化、接合強度の向上に取り組んでいる。また、欧州内外の自動車メーカー14社が参画する欧州共同研究開発機構 (EUCAR) では、4つの研究開発クラスター SEAM (SafeEV、ENLIGHT、ALIVE、MATISSE) が推進されている。この内、EV車両の軽量化を扱うプロジェクトはENLIGHTとALIVEで、それぞれ軽量化材料の性能向上とそれらを加工・接合する技術の開発が主に行われている。

米国および中国では、環境にやさしいバイオベース接着剤の研究が活発化している。

韓国では、次世代二次電池の分野で2030年に世界トップを目指すK-バッテリー発展戦略を掲げ、その中で素材と接着剤の開発が進んでいる。

## • 摩擦・摩耗

### [日本]

マイクロ・ナノスケールにおける現象解明にもとづく摩擦摩耗の理論的設計をめざすプロジェクトとして以下のものをあげることができる。

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」(研究総括：伊藤耕三、2019～2026年度)では、高分子化学の視点において低摩擦を実現する厚膜濃厚ポリマーブラシの開発がなされている。また、氷とゴムの界面に発生する摩擦を支配する要因をナノスケールで解析することで、摩擦機構を解明し摩擦予測モデルを提案するとともに、摩擦最適化と省エネルギーを両立する革新的なゴム材料の分子設計の指針を目指した研究が進められている。さらに、摩擦界面におけるトライボケミカル反応を設計・制御することにより、超低摩擦界面が継続的に自己形成させる「自己治癒型超低摩擦システム」の設計指針の構築を目指す研究も推進されている。

JSTさきがけ「力学機能のナノエンジニアリング」(研究総括：北村隆行、2019～2024年度)では、過酷な摩擦条件においても高い潤滑性をもつ高分子の境界膜における低摩擦発現機構解明のために、多角的かつ階層的なアプローチでの低摩擦発現機能の解明を目指した研究を進めている。また、ハドロゲルにより実現される超低摩擦機構のナノスケールでの流体力学的解析を目指した研究も推進されている。

### [海外]

EUでは、リーズ大学(英国)でのイオン液体(IL)の潤滑剤としての応用やポローニャ大学(イタリア)でのエンジンオイル用の環境に優しい添加剤に関する研究があげられるが、どちらも界面における固体表面と潤滑剤分子の相互作用のメカニズム解明にもとづく合理的な設計をめざすものである。また、「Intelligent Open Test Bed for Materials Tribological Characterisation Services」(2019～2022年)においては、材料特性や摩擦摩耗特性の膨大なデータを人工知能によって解析することによるトライボロジー材料特性評価の世界初のオープンテストベッドの確立を目指した。

中国では、清華大学摩擦学国家重点実験室で、数十人規模の博士課程学生によりマイクロ・ナノスケールのトライボロジー現象の科学的解明のための研究が推進されている。韓国では、延世大学Center for NanoWearにおいて、実験的なアプローチに加えて、理論的解釈とシミュレーションなどを活用した幅広い研究がなされている。

## • 自己修復

### [日本]

内閣府「革新的研究開発推進プログラム(ImPACT)」の「超薄膜化・強靱化『しなやかなタフポリマー』の実現」(PM：伊藤耕三、2014～2018年度)において、有機・高分子の自己修復材料が取り上げられ、画期的な成果が得られている。また、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」(研究総括：伊藤耕三、2019～2026年度)およびさきがけ「力学機能のナノエンジニアリング」(研究総括：北村隆行、2019～2024年度)においても、自己修復材料は力学機能の1つとして有力な対象となっている。

### [海外]

自己修復材料を集中的に研究している組織として、米国のイリノイ大学アーバナ・シャンペーン校(UIUC)、

オランダのデルフト工科大学、ドイツのフラウンホーファー生産技術・応用マテリアル研究所 (IFAM)、ライブニッツ高分子研究所などが良く知られている。それぞれ中心としている研究対象は異なり、イリノイ大学では接着剤入りの微粒子を用いた高分子の自己修復樹脂、デルフト工科大学は自己修復コンクリート、フラウンホーファーはコーティング材料、ライブニッツ高分子研究所はタイヤを含むエラストマーなどに注力している。国際会議としては、International Conference on Self-healing Materials という国際会議が2年おきに開催されており、2022年はミラノで開催された。

### (5) 科学技術的課題

接着に関しては、接着現象の機構が理解できていないことに起因して、強度の支配因子が不明、環境劣化の理由不明、品質保証・安全性の指針がないなどの問題がある。これら問題を解決するための課題には、接着剤となる分子の設計・配合、接着界面解析、硬化樹脂の構造・物性解析と力学特性評価、さらには、プロセス設計など多様な要素があり、その解決には、化学・物理学・数学や、機械工学を代表とする工学等幅広い専門分野の連携が必要である。また、接着現象を正しく理解するためには、実試料での界面計測とシミュレーションをマルチスケール、かつ、時間を含めた4次元で行う必要がある。得られる情報を数理統計解析、また、データ科学を活用して包括的に解釈して、分子接着と構造接着を統合できる接着機構を解明する必要がある。

摩擦・摩耗に関しては、マイクロ・ナノスケールでの科学的な解明が進む一方で、それらの理解にもとづくマクロな摩擦摩耗の制御システムの合理的な設計と創成には未だ繋がっていない。今後は、これらの理解にもとづく実用機械システムへの発展とそのためのマイクロ・ナノスケールでの摩擦面の変化の理解を機械システム設計につなげる新しいアプローチが求められる。また摩耗機構にもとづいた低摩擦の信頼性と耐久性の評価が重要となる。

自己修復材料においても、修復の分子的機構については、未だにほとんど理解が進んでいない。具体的には、自己修復の速度や回復率を決める要因が明らかになっていない。たとえば接着剤入りの微粒子を用いた自己修復性樹脂については、修復に時間を必要とし、また、元の強度までには完全に回復しないという問題があり、より高速で完全に強度が回復する技術開発が求められている。また、物理的な自己修復コーティング材料については、擦り傷程度は回復するが、材料の切断を伴うような大きな傷は回復できないことから、より強い負荷に対する自己修復性が求められている。さらに、動的結合や水素結合を用いた化学的な自己修復高分子材料の場合には、完全に切断しても、切断面を接合するだけで元の強度まで回復するが、回復に時間がかかるなどの問題を抱えている。今後は、自己修復メカニズムをナノスケールで集中的に研究することが重要であり、それによって、飛躍的な性能の向上や修復機能の制御、耐環境性の改善などが期待される。

ナノスケールでのその場計測下の力学実験技術、力学解析法、シミュレーション技術により、機能発現のメカニズムの理解を進める必要があること、そこを起点としてマクロスケールにおける設計へと繋がる技術体系とする必要があることなどが、接着、摩擦・摩耗、自己修復のいずれの領域にも共通する技術課題である。

### (6) その他の課題

ナノ力学制御技術は、力学的特性評価や界面分析、非破壊検査、表面処理、分子設計、プロセス設計など多様な要素があり、課題の解決には、機械工学や物理学、化学等幅広い分野の専門家の連携が不可欠である。また長年の実用実績によって支えられて発展してきた技術であるため、実経験のある研究者の協力も不可欠である。これらを取りまとめられる横断的な知見を有する優れたリーダーと、受け皿となる連携促進するための組織が求められる。一般論として、アカデミアは理想的で綺麗な実験系を好む一方、企業は社会実装を急ぐため、学理を追求することなく、目先の改良を優先する場合が多い。このようなギャップを、さまざまな産官学連携のプロジェクトを遂行することで徐々に克服していくことが期待される。

また、エネルギーの高効率利用による温室効果ガス排出削減、省エネルギー・省資源としての低炭素化社

会構築、安全安心な機械システム・社会構築、そしてその経済効果等、経済安全保障上のさまざまな社会要請に応える鍵を握る基礎科学技術の1つでありながら、十分注目されているとはいえ研究領域であり、その重要性とその成果を世の中に訴求する必要がある。また、今後を支える若い研究者・技術者の育成することも重要な課題である。

自己修復材料については、機械部品や構造材料として設計する際の指針が存在しないという課題もあげられる。従来、機械部品や構造材料は、十分な強度・耐久性を維持するように設計される。しかし、自己修復機能は、損傷が発生した後に効果が現れるため、現在の設計指針には考慮されていない機能である。自己修復機能を活用した新たな強度基準を提唱、実証し、法規制することが必要になっている。

(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	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>文科省戦略目標「ナノスケール動的挙動の理解に基づく力学特性機構の解明」のもとで実施されているJST-CREST、さきがけにおいて、接着・摩擦・摩耗、自己修復ともに取り組み、化学、計測、計算分野などの研究者の参画が増加し、マイクロ・ナノスケールの現象の解明が進んでいる。今後、論文・特許数などの増加が期待される。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>NEDOプロジェクト、JST未来社会創造事業、ISMAなどにおいて、産官学の連携による研究開発が加速している。</li> <li>日本の機械システムの信頼性の高さや優れた耐久性は、世界が認めるところであり、機械の摺動部における摩擦と摩耗の制御技術は世界トップのレベルにあるといえる。</li> <li>自己修復材料の主用途である耐傷性コーティングは自動車メーカーや化学メーカーを中心に研究開発がさかんに行われている。</li> </ul>
米国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>接着に関しては、Materials Genome Initiative (MGI) によって技術の研究環境が整備されている。</li> <li>摩擦・摩耗に関しては、Carpickら (ペンシルベニア大学) が最新の研究成果を加えた教科書を出版。</li> <li>自己修復材料ではリードしており、接着剤入りの微粒子を用いた自己修復材料では、イリノイ大学が世界的な拠点になっている。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>接着分野では、接着状態の変化に伴って着色する材料、異なる熱膨張係数を有する基板を接合する方法などが開発されている。</li> <li>摩擦・摩耗分野で、アルゴンヌ国立研究所は、低摩擦機構解明とともに低摩擦技術のための数多くの特許を取得している。</li> <li>自己修復材料では、接着剤入りの微粒子を用いた自己修復材料の実用化に向けた研究が進んでいる。</li> </ul>

欧州	基礎研究	○	↗	[EU] ・摩擦・摩耗に関してERC (European Research Council) および Horizon 2020により計算の側面から優れた基礎研究が推進されている。 [英国] ・Imperial College Tribology Groupで基礎実験から応用研究、シミュレーションなど幅広く研究が行われている。また産業界との連携した研究が進められている。 [フランス] ・Ecole Centrale de Lyonでは、先端的解析・分析装置が継続的に開発されており、質の高い基礎研究を支えている。CNRSにおける動的架橋を用いた新規な自己修復材料など自己修復材料の研究をリードしている。 [オーストリア] ・Austrian Excellence Center for Tribologyにおいてスマート材料、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。
	応用研究・開発	○	→↗	・自動車をはじめとする機械システム分野において、産学官の連携体制は進んでいる。マイクロ・ナノスケールにおける現象解明に基づくモノづくりへのアプローチに関してはまだ目立った成果があるとは言い難い。
中国	基礎研究	○	↗	・接着に関しては、バイオ材料利用の研究が盛ん。 ・摩擦・摩耗に関しては、清華大学を軸に、マイクロ・ナノスケールのトライボロジー現象解明が急速に進んでいる。 ・自己修復に関しては、論文は非常に多いが、基本コンセプトは他国の成果をもとにしたものであったが、最近では独自のアイデアも見られるようになってきた。
	応用研究・開発	○	→	・マイクロ・ナノスケールのトライボロジー現象解明と実用展開のため、Institute of Superlubricity Technology (深圳) が設立されている。
韓国	基礎研究	△	→	・延世大学にCenter for Nano-Wearが設立され、独創的成果も見られるが、国全体として特筆すべき基礎研究はあまり見られない。
	応用研究・開発	○	→	・構造用接着剤、耐傷性コーティングなどの開発が見られる。

(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

## 参考・引用文献

- 1) 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「トランススケール力学制御による材料イノベーション～マクロな力学現象へのナノスケールからのアプローチ～」<https://www.jst.go.jp/crds/report/report01/CRDS-FY2018-SP-05.html>, (2022年12月22日アクセス) .
- 2) Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes (LTDS), <http://ltds.ec-lyon.fr/spip/?lang=fr>, (2022年12月22日アクセス) .
- 3) 清華大学摩擦学国家重点実験室, <https://sklt.tsinghua.edu.cn/>, (2022年12月22日アクセス)
- 4) Center for Nano-Wear, “About CNW,” <https://cnw.yonsei.ac.kr/cnw/About%20CNW.htm>, (2022年12月22日アクセス) .
- 5) Imperial College London, “Tribology Group,” <https://www.imperial.ac.uk/tribology>, (2022

年12月22日アクセス) .

- 6) AC2T research GmbH, “Austrian Excellence Center for Tribology: Welcome in the world of friction, wear and lubrication research,” <https://www.ac2t.at/en/>, (2022年12月22日アクセス).
- 7) Toshio Osada, et al., “Self-healing by design: universal kinetic model of strength recovery in self-healing ceramics,” *Science and Technology of Advanced Materials* 21, no. 1 (2020) : 593-608., <https://doi.org/10.1080/14686996.2020.1796468>.
- 8) Shingo Ozaki, et al., “Kinetics-based constitutive model for self-healing ceramics and its application to finite element analysis of Alumina/SiC composites,” *Open Ceramics* 6 (2021): 100135., <https://doi.org/10.1016/j.oceram.2021.100135>.