

## 2.5.8 ナノ力学制御技術

### (1) 研究開発領域の定義

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・高機能な材料開発および新しい材料設計技術を構築するため、力学特性の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。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つを取り上げる。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、そこを起点としてマクロスケールにおける力学特性の理解への橋渡しなどの研究開発課題がある。

### (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、トライボ化学反応、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から脱し、ナノスケールにおける力学的な相互作用にまで立ち戻り、それ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結果を起点とし、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の枠を超えたトランススケールな解析を行うことが重要である。本章では、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つを取り上げる。

#### • 接着

次世代型の自動車や航空機などの輸送機器におけるCO<sub>2</sub>排出量の削減を目的として、マルチマテリアル化による軽量化を実現するためのキーテクノロジーとなる異種材料接着に注目が集まっている。しかし、現状では信頼性の観点から、ボルト・リベット等を併用せざるをえず、軽量化効果が不十分である。界面の直接評価法の確立や、官能基レベルから巨視的なサイズまでの空間スケールに時間を考慮した4次元マルチスケール解析にもとづく、材料の寿命評価と信頼性確保が実現されると軽量化が実現し、燃費向上による省エネ化、低炭素化への貢献が大きい。

また、次世代接着技術として、タフネス性、自己修復性や易解体性等の新しい機能の付与、さらには、接着剤の脱石油化をめざした研究開発も必要とされる。接着技術に関連するユーザー企業は多種多様であり、自動車、車載機器、ディスプレイ、ジェルネイル、衛生材料、衣服や瓶のラベルなど、その出口は多岐に渡る。

#### • 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」に起因しており、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、接触条件や環境など多様な因子に敏感に左右されるシステムの応答特性であり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。マクロスケールの現象をナノスケールでの現象まで立ち戻っての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時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」の時代に突入しつつある今、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、機械工学や流体工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。個々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。

#### • 接着

接着では、被着体の表面と接着剤が密接に接触しているにもかかわらず「キッシング・ボンド」と呼ばれる弱い結合状態の影響や長期使用等による接着界面の劣化によって破壊強度が大幅に低下する場合がある。しかしながら、接着界面の状況を外から直接観測することが困難なため信頼性を担保できないという大きな課題を抱えている。また、接着界面を分子からマクロまでのマルチスケール、さらには、時間を考慮した4次元で解析する技術も達成されていない。これらの状況が、接着界面での破壊挙動はもちろん、接着機構すら理解できていない状況を生んでいる。人命にかかわるモビリティ分野をはじめ、幅広い分野に接着技術を導入

するには、学理にもとづく強度や耐久性の保証およびそれらにもとづいた健全性や信頼性が求められる。具体的には、接着現象を、分子中の官能基の配向状態から巨視的な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する必要がある。これらを分子設計に活かすことで、これまで達成できなかったレベルの接着が可能となる。さらには、高強度や高耐熱性はもちろん、全く新しい機能、例えば、タフネス性、自己修復性、易解体性なども接着技術に導入されることが期待される。これらの新しい知見を、これまで蓄積してきた構造接着分野のさまざまな知見と融合させることで基盤技術として体系化し、社会実装に応用することが望まれる。

#### ・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擦の要求が、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では、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、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。すでに各自動車メーカーからトップコートのオプションとして高級車に導入されており、最近では携帯電話などにも展開している。このような自己修復コーティングのほぼ全ては、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。化学的な自己修復のなかには、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。典型的な例として、完全に切断した後、切断面を密着すると、比較的短い時間と室温程度のマイルドな条件で元の強度まで修復する材料が多数、報告され大きな注目を集めている。

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

接着現象においてその理論強度は、界面における接着剤と被着体の分子間相互作用に帰属するが、接着剤の架橋反応によって誘起されるメゾスケールでの不均一構造による応力集中は接着強度を低下させる。また、剥離過程での亀裂の進展速度は、接着界面の破壊靱性に影響を与える。このように、接着メカニズムを理解するためにはマルチスケール解析が必要になる。

原子・官能基スケールでは、イオンスパッタリングを併用したX線光電子分光 (XPS) および放射光を用いたXPS測定による接着界面の化学状態とその空間分布の分析や和周波発生 (SFG) 分光測定による官能基の配向状態分析が実施されている。また、理論接着強度は第一原理計算にもとづく検討が始まっており、密度汎関数 (DFT) 計算による接着界面の構造最適化や反応の遷移状態解析、接着界面の結合エネルギーなどによる金属やフィラーと高分子あるいは高分子同士等の異種・同種材料間での理論接着強度が明らかにされている。

ナノスケールでは、化学状態の面内分布を非破壊で評価するための新しいX線イメージング法や共焦点レーザーラマン分光等の解析技術を動的過程にも適用することで、劣化や破断等による接着界面の変化をその場観察する試みが始まっている。また、全原子分子動力学 (MD) により、分子配向の面内分布を評価し、計算結果と実験結果を比較検討することで、接着界面における現実的な化学状態が明らかになりつつある。

メゾスケールでは、接着剤の架橋反応により生じた界面不均一構造は、量子ビーム (放射光・中性子) を用いた散乱・反射率測定による逆空間観測、走査・透過電子顕微鏡 (SEM、TEM) を用いた実空間観察、および粗視化MD計算による評価が始まっている。

マクロスケールにおいては、電子顕微鏡内に力学試験機を導入し、マイクロビームX線などにより界面剥離のその場観察を行うことで、亀裂進展と構造変化の関係が検討され始めている。また、ミクロスケールの力学応答を与えるシミュレーション手法も開発し、これに有限要素解析 (FEM) を適用することで、破壊過程の再現が試みられている。

接着現象の本質的理解にもとづく、さらなる耐熱化・高強度化のための接着剤の分子設計も進んでいる。また、しなやか・タフネス性や自己修復性は、耐熱サイクルや振動外乱対策における新たな設計概念であり、マルチマテリアル化を加速させるために重要である。易解体性の実現は、部材組立時の歩留まり向上や使用後部材のリサイクル化の意味で重要である。また、バイオベース接着剤の開発は、エネルギーアクセスや環境問題に直結する。

###### • 摩擦・摩耗

中性子測定とミュン粒子測定を組み合わせることによって摩擦現象の解明をめざす研究や、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明らかにする研究が実施されている。

また、超低摩擦現象については、摺動面の直接観察にもとづき相界面の構造、機構を解明し制御すること

によりマクロな摩擦特性の制御を試みた研究や、摩擦によって自己形成されるナノ界面に着目した研究が実施されている。後者では、機械、材料、計測、計算分野の融合による摩擦現象の解明による低摩擦の合理的な設計が推進されている。

材料としては、濃厚ポリマーブラシやイオン液体による潤滑効果の研究が進められている。濃厚ポリマーブラシは、固体表面の表面修飾、低摩擦化材料ならびに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るものであった。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、膨潤溶媒にイオン液体や潤滑油を利用することも可能になり、実用化に向かって進展している。

#### • 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リー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ことができる。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。

一方、超分子の包接錯体やロタキサンを利用した自己修復材料が大阪大学の原田明らのグループによって開発されている。ゲルやエラストマーで完全に切断した状態で、切断面に少量の水分を与えると瞬時に接合し、ほとんど元の強度を回復する。その他、理化学研究所の侯召民らのグループでは、希土類金属触媒を用いた極性オレフィンとエチレンとの精密共重合によりランダムブロックコポリマーを用いた自己修復材料の合成に成功した。これは水中でも自己修復する点に特徴があり、耐環境性に優れていることから、様々な分野での応用展開が期待されている。

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、自己治癒材料の微構造制御を積極的に取り入れるアプローチがある。横浜国立大学の中尾航らが発表した長繊維強化自己治癒セラミックスは、自己治癒エージェントを強化材であるセラミックス繊維束と母材との界面に偏在化させることにより、強度、破壊靱性と自己治癒機能との共生を可能としている。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、外因的刺激を受けて自己治癒機能を発現する材料が再注目されている。特定の外因的刺激（高電圧負荷やマイクロ波照射）などを行うことで、部材を再度健全な状態に戻すことが可能であるため、再利用が可能になる。

#### [注目すべき国内外のプロジェクト]

##### • 接着

[日本] CO<sub>2</sub>削減の重要性が世界規模で取り上げられ、自動車や航空機など輸送機器の軽量化のために「接着」にかかわる取り組みがさかんである。

NEDOの「革新的新構造材料等研究開発」(2011～2022年度)では、新構造材料技術研究組合 (ISMA) において接着関連技術の研究開発が行われている。特に、異種材料接合のための構造材料用接着技術の開発を進め、2023年以降の事業化をめざしている。

内閣府戦略的イノベーションプログラム (SIP) では、「革新構造材料」(2013～2019年度) や「革新的設計生産技術」(2014～2018年度) の取り組みが行われており、軽量で耐熱・耐環境性に優れた材料の開発と航空機等への実機適用が検討されている。さらに、産総研に接着・界面現象研究ラボを設立し、接着・接合技術コンソーシアム (T-CAB) が動き出し、接着界面の分析や強度・信頼性評価への取り組みが行われている。

JST 未来社会創造事業における「Society 5.0の実現をもたらす革新的接着技術の開発」(2018年度～) では、接着界面における分子描像を明らかにしてマルチスケールかつ時間軸を含めた4次元で接着機構の原理解明に取り組んでいる。

その他、産総研を中心とした NEDO 「超先端材料超高速開発基盤技術プロジェクト」(2016～2021年度) や 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」(2019～2026年度)、さきがけ「力学機能のナノエンジニアリング」(2019～2024年度) における接着・破壊機構の解明に向けた取り組みがある。

[海外] 米国では、オークリッジ国立研究所 (ORNL) に低コスト炭素繊維の開発・製造を目的としたコンソーシアム (2009～2022年) やミシガン州立大に類似・異種材料接合技術の実現に向けたイノベーションセンター (2013～2016年) が設立されている。

欧州では、ドイツが接着分野における研究開発を先導している。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、接合強度向上に取り組んでいる。同じくフラウンホーファー研究機構が中心となり、欧州の自動車企業が参画したプロジェクト ENLIGHT において自動車の軽量化に取り組んでいる。

中国では、中国製造2025の10の重点分野の中の素材テーマにおいて接着に関する研究が行われている。韓国では世界市場先占十大中核素材開発事業 (WPM) で、接着剤・複合材のテーマが設定されている。

#### • 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 「光・量子融合連携研究開発プログラム」(2013～2017年度) において、中性子測定とミュオン粒子測定を組み合わせることによる「摩擦」と「潤滑」の本質的理解をめざす研究が行われた。また、JST さきがけ「エネルギー高効率利用のための相界面科学」(2013～2018年度) では中性子反射率計や赤外分光計などを導入した独自の測定技術による摺動面の直接観察にもとづき超低摩擦特性を発現する相界面の構造、機構を解明し制御することによりマクロな摩擦特性の制御を試みた研究が実施された。さらに、JST-CREST 「エネルギー高効率利用のための相界面科学」(2013～2018年度) では、炭素系硬質薄膜やセラミックス等の硬質材料において、摩擦によって自己形成されるナノ界面に着目し、機械のみならず材料、化学、物理の視点から摩擦により誘起されるトライボ化学反応を解明し制御することにより、マクロな摩擦特性の制御を試みた研究が実施された。機械、材料、計測、計算分野の融合による摩擦現象の解明にもとづく低摩擦の合理的な設計が推進されている。

また、JST-ACCEL では「濃厚ポリマーブラシのレジリエンシー強化とトライボロジー応用」(2015～2019年度) が実施され、濃厚ポリマーブラシの厚膜化に成功し、膨潤溶媒も水に加えイオン液体や潤滑油が可能になり、実用化の可能性のある日本独自の技術展開につながっている。

[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ボローニャ大学 (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。

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 Nano-Wear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」(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、2019年度より始まった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」およびさがけ「力学機能のナノエンジニアリング」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 IFAM、ライプ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、ライプ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、2019年は横浜で開催された。

### (5) 科学技術的課題

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・健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、数学や機械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、機械や物理、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。

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、昨今の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、その意義があまり注目されていない研究領域であり、その重要性和その成果を世の中に訴求する必要がある。

この他、接着剤では薬品規制への対応の課題がある。接着剤には多くの反応性物質が含まれているが、多価アミンやビスフェノールA、ジイソシアネートなど、最近の規制強化により使用が制限された成分もあり、これらの代替研究も必要になっている。また、接着信頼性を確保するために、接着工程のプロセス管理という考え方もあり、欧州では接着業務作業者の資格取得を義務化する動きがあり、日本国内でも対応が必要となる可能性がある。

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。重要部材に応用するためには、損傷が始まって最終破壊までの猶予を確保しているという新たな安全性指針を構築する必要がある。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	◎	↗	接着については、JST未来社会創造事業において、接着界面における分子描像を明らかにして接着機構の原理解明に向けた研究が加速している。摩擦についても、近年、化学、計測、計算分野の研究者の参画が増加したことにより、マイクロ・ナノスケールの現象の解明が進んでいる。また、濃厚ポリマーブラシ、トライボ化学反応を制御した低摩擦ナノ界面創成などの研究も進んでいる。自己修復材料では、有機・高分子材料、無機材料ともに高いレベルにあり、新しいコンセプトを提示している。ただし、個々の研究者が行っている状況で、研究拠点あるいは自己修復材料に特化したプロジェクトは存在しない。
	応用研究・開発	◎	↗	SIPやNEDOのプロジェクトにおいて、接着・接合技術の向上と信頼性の担保に向けた研究が進められている。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。



米国	基礎研究	◎	↗	Materials Genome Initiative (MGI) の波及効果として接着・接合技術の研究環境が整備されている (オークリッジ国立研究所、ミシガン州立大など)。Carpickら (ペンシルベニア大学) が最新の研究成果を加えた摩擦・摩耗に関するテキストを出版。自己修復材料では、特に有機・高分子材料の分野で高いレベルにあり、新しいコンセプトを提示し、世界をリードしている。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。
	応用研究・開発	◎	→	接着分野では、MGIの成果の企業への移転が行われている。米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。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。
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。 [ドイツ] フラウンホーファー研究機構が推進するFlexHyJoinプロジェクトが接着分野をリードしている。 [フランス] Ecole Centrale de Lyonのトライボロジー研究グループでは、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。 [オランダ] デルフト工科大学で10年間、自己修復コンクリートのプロジェクトが実施された。
	応用研究・開発	○	↗	接着技術の自動車の軽量化への応用が盛ん。EUCARの下のENLIGHTやALIVEプロジェクトやBMWで研究が進められている。自己修復材料については、フラウンホーファーやアルケマ社での研究がさかん。
中国	基礎研究	○	↗	国家政策としての中国製造2025の下、研究拠点が設立されている。清華大学摩擦学国家重点実験室を軸に、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が急速に進んでいる。
	応用研究・開発	○	↗	新エネルギー車などの重点分野が設定され、軽量化のため接着分野の応用研究が加速されている。 Institute of Superlubricity Technology, Shenzhen, China (超潤滑技術研究センター、深圳、中国) の設立が2019年10月に発表されている。
韓国	基礎研究	○	→	MGIの韓国版、クリエイティブ・マテリアルズ・ディスカバリー・プロジェクトが進められている。
	応用研究・開発	○	→	韓国政府の主導で、接着剤・複合材の研究が加速している。

(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

・トライボロジー (環境・エネ分野 2.1.16)
---------------------------

## 参考・引用文献

- 1) JST CRDS 戦略プロポーザル「トランススケール力学制御による材料イノベーション」(CRDS-FY2018-SP-05) <https://www.jst.go.jp/crds/report/report01/CRDS-FY2018-SP-05.html>
- 2) 森誠之「せん断場におけるマイクロ・ナノ薄膜のその場観察」『トライボロジスト』51巻9号(2006) : 621-626. <https://ci.nii.ac.jp/lognavi?name=web&lang=ja&tourl=8096691&naid=10018266641>
- 3) 三宅晃司他「特集：摩擦界面のその場観察技術の進展」『表面科学』38巻3号(2017) : 104-134. doi : 10.1380/jsssj.38.104
- 4) C. A. Volkert et al., "In Situ Tribology", *MRS Bulletin* 33, no. 12 (2008) : 1132-1208. doi : 10.1557/mrs2008.233
- 5) J. Xu and J. Li, "New Achievements in Superlubricity from International Workshop on Superlubricity : Fundamental and Applications", *Friction* 3, no. 4 (2015) : 344-351. doi : 10.1007/s40544-015-0100-8
- 6) P. Cordier et al., "Self-healing and thermoreversible rubber from supramolecular self-assembly", *Nature* 451, no. 7181 (2008) : 977-980. doi : 10.1038/nature06669
- 7) M. Damien, "Silica-like malleable materials from permanent organic networks", *Science* 334, no. 6058 (2011) : 965-968. doi : 10.1126/science.1212648
- 8) T. L. Sun et al., "Physical hydrogels composed of polyampholytes demonstrate high toughness and viscoelasticity", *Nature Materials* 12, no. 10 (2013) : 932-937. doi : 10.1038/nmat3713
- 9) T. Kakuta et al., "Preorganized hydrogel : self-healing properties of supramolecular hydrogels formed by polymerization of host-guest-monomers that contain cyclodextrins and hydrophobic guest groups", *Advanced Materials* 25, no. 20 (2013) : 2849. doi : 10.1002/adma.201205321
- 10) M. Burnworth et al., "Optically healable supramolecular polymers", *Nature* 472, no. 7343 (2011) : 334-337. doi : 10.1038/nature09963
- 11) X. Chen et al., "A thermally re-mendable cross-linked polymeric material", *Science* 295, no. 5560 (2002) : 1698-1702. doi : 10.1126/science.1065879
- 12) K. Imato et al., "Self - Healing of Chemical Gels Cross - Linked by Diarylbibenzofuranone - Based Trigger - Free Dynamic Covalent Bonds at Room Temperature", *Angewandte Chemie International Edition* 51, no. 5 (2012) : 1138-1142. doi : 10.1002/anie.201104069
- 13) Y. Chen et al., "Multiphase design of autonomic self-healing thermoplastic elastomers", *Nature Communication* 4, no. 6 (2012) : 467-472. doi : 10.1038/nchem.1314
- 14) Y. Yanagisawa et al., "Mechanically robust, readily repairable polymers via tailored noncovalent cross-linking", *Science* 359, no. 6371 (2018) : 72-76. doi : 10.1126/science.

aam7588

- 15) H. Wang et al., "Synthesis of Self-Healing Polymers by Scandium-Catalyzed Copolymerization of Ethylene and Anisylpropylenes", *Journal of American Chemical Society* 141, no. 7 (2019) : 3249-3257. doi : 10.1021/jacs.8b13316
- 16) Yang Wang et al., "Triboemission of Hydrocarbon Molecules from Diamond-like Carbon Friction Interface induces Atomic-Scale Wear", *Science Advances* 5, no. 11 (2019) : eaax9301. doi : 10.1126/sciadv.aax9301
- 17) Mika Aoki et al., "Segregation of an Amine Component in a Model Epoxy Resin at Copper Interface", *Polymer Journal* 51, no. 3 (2019) : 359-363. doi : 10.1038/s41428-018-0129-4
- 18) Manabu Inutsuka et al., "Adhesion Control of Elastomer Sheet on the Basis of Interfacial Segregation of Hyperbranched Polymer", *ACS Macro Letters* 8, no. 3 (2019) : 267-271. doi : 10.1021/acsmacrolett.8b00971
- 19) Yuta Tsuji et al., "Adhesion of Epoxy Resin with Hexagonal Boron Nitride and Graphite", *ACS Omega* 4, no. 3 (2019) : 4491-4504. doi : 10.1021/acsomega.9b00129
- 20) Mika Aoki et al., "Mesoscopic Heterogeneity in the Curing Process of an Epoxy-Amine System", *Macromolecules* 52, no. 5 (2019) : 2075-2082. doi : 10.1021/acs.macromol.8b02416
- 21) Ayuko Tsuruoka et al., "Fusion of Different Crosslinked Polymers Based on Dynamic Disulfide Exchange", *Angewandte Chemie International Edition* 59, no. 11 (2020) : 4294-4298. doi : 10.1002/anie.201913430
- 22) Eriko Sato et al., "Thermal Latent Reductants for Controlled Degradation of Polyperoxides and Their Application to High Performance Dismantlable Adhesives", *ACS Applied Polymer Materials* 1, no. 8 (2019) : 2140-2148. doi : 10.1021/acsapm.9b00422
- 23) C. Mathew Mate and Robert W. Carpick, *Tribology on the Small Scale : A Modern Textbook on Friction, Lubrication and wear*, Second Edition (Oxford : Oxford University Press, 2019).