

ATTAATC A AAGA C CTAAC TCTCAGACC
AAT A TCTATAAGA CTCTAACT
CTCGCC AATTAATA
TTAATC A AAGA C CTAAC TCTCAGACC
AAT A TCTATAAGA CTCTAAC
TGA C CTAAC TCTCAGACC

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

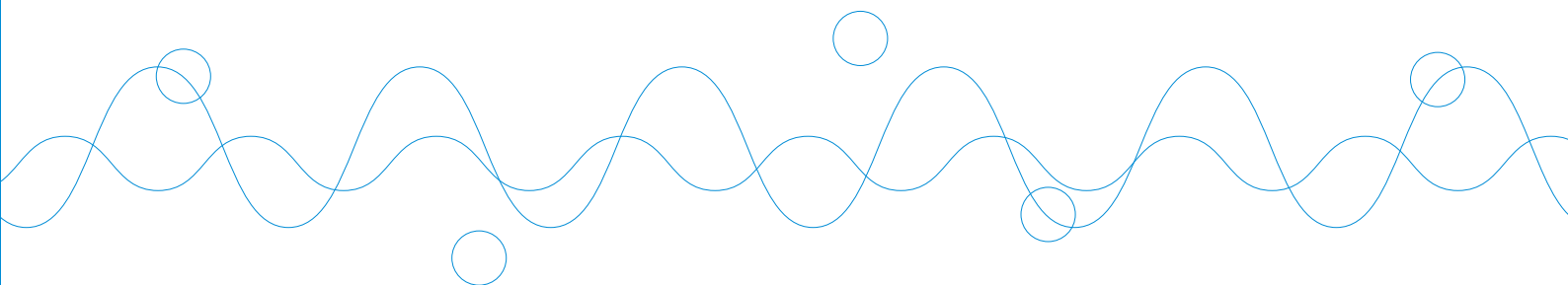
～マクロな力学現象へのナノスケールからのアプローチ～

STRATEGIC PROPOSAL

Materials Innovation by Trans-scale
Mechanical Control

- Exploration of Macroscale Mechanofunctions through Understanding
Nanoscale Dynamics -

111 0101 00001
001101 0001 0000110
0101 11
0101 000111 0101 00001
001101 0001 0000110
0101 11
00110 11111100 00010101 011



研究開発戦略センター（CRDS）は、国の科学技術イノベーション政策に関する調査、分析、提案を中立的な立場に立って行う公的シンクタンクの一つで、文部科学省を主務省とする国立研究開発法人科学技術振興機構（JST）に属しています。

CRDSは、科学技術分野全体像の把握（俯瞰）、社会的期待の分析、国内外の動向調査や国際比較を踏まえて、さまざまな分野の専門家や政策立案者との対話を通じて、「戦略プロポーザル」を作成します。

「戦略プロポーザル」は、今後国として重点的に取り組むべき研究開発の戦略や、科学技術イノベーション政策上の重要課題についての提案をまとめたものとして、政策立案者や関連研究者へ配布し、広く公表します。

公的な科学技術研究は、個々の研究領域の振興だけでなく、それらの統合によって社会的な期待に応えることが重要です。「戦略プロポーザル」が国の政策立案に活用され、科学技術イノベーションの実現や社会的な課題の解決に寄与することを期待しています。

さらに詳細は、下記ウェブサイトをご覧ください。
<http://www.jst.go.jp/crds/about/index.html>

エグゼクティブサマリー

本提言では、材料の力学特性に立脚することでこれまでの構造材料や機能性材料、有機材料や無機材料、金属材料、半導体材料といった既存の枠組を超えた材料全般に共通するコンセプトを提示し、ナノスケールにおける諸現象の理解を通じたマクロな力学特性発現メカニズム解明を目指す。これを基に新しい材料設計指針の構築、および材料イノベーションを指向した研究開発戦略を提案する。

わが国の輸出品目の上位は、自動車およびその部品、半導体をはじめとする電子部品、鉄鋼、原動機、プラスチック、科学光学機器、有機化合物など材料デバイスや製品が占め、素材産業および機械産業がわが国を支えているのが現状である。近年、CO₂ 排出量削減や低消費電力化など、持続可能社会実現に向けた要求がますます高まる中、素材や部品、デバイスレベルからそれらの要求に応えることが求められている。特に電子デバイスにおいては、ムーアの法則の限界が見え始めている一方で、IoT の進展や人工知能 (AI)、自動運転の開発加速など、世界的に半導体需要が拡大し、半導体チップのさらなる高集積化・高性能化・高機能化が強く望まれている。自動車や航空機などの輸送機器においても、軽量・高強度・低摩擦材料の採用による低燃費化、すなわち CO₂ 排出量削減へのニーズが高い。また、高度経済成長期に集中的に建設された橋梁や高速道路などの社会インフラの多くが既に建設後 50 年を経過し、その安全性が社会的な課題になっている。このような社会的な要求を満たすためには様々なマクロな材料特性に関して、ナノスケールにまで立ち戻り、これまで取り扱いが困難であった非平衡・散逸・非定常状態も含めた現象メカニズムの解明、さらに、そこを起点としてメソスケール、マクロスケールへと繋げる、トランススケールなアプローチによる総合的な解析手法の確立が必要になっている。これを通じて新たな材料設計指針を構築し、既存材料では実現不可能な高機能・新機能をもつ革新材料やマクロな材料特性の制御技術および寿命や信頼性、耐久性に関わる評価技術を開発することが可能になると考えられる。

本提言においては、マクロな力学特性に関する広範な応用技術領域の中から社会的要請の強い代表例として、「接着・接合・剥離」「摩擦・摩耗」「自己修復」の3つを取り上げる。

CO₂ 排出量削減の要請から輸送機器における燃費向上が強く求められ、特に自動車における燃費効率の改善が大きな課題となっている中、「軽量化」「高強度化」「マルチマテリアル化」が重要な技術要素となっている。例えば軽量高強度材料の代表でもある炭素繊維強化プラスチック (Carbon Fiber Reinforced Plastics: CFRP) では、製造コストが高いことや成形が難しいこと、信頼性が定量的に担保できないことなどが原因で、ごく一部の輸送機器にしか普及していない。このような状況を打破するためには、ナノスケールにまで立ち戻って材料特性の発現機構を理解することが必須となっている。また、自動車の車体重量のさらなる軽量化のためには、軽量材料と高強度材料の接着・接合 (マルチマテリアル化) が重要となるが、その実現には接着・接合界面における本質的な接着メカニズムの解明が不可欠である。さらに、燃費向上の鍵を握る重要な技術が「摩擦・摩耗」であり、これらの現象メカニズムを解明することで様々な動力機器のエネルギー損失の低減および故障頻度の減少へと繋がることが期待されている。加えて、半導体デバイスにおいてはムーアの法則の限界が近づきつつある今、2次元面内での集積度向上は物理的に

困難になり、3次元方向へ半導体チップを積み上げることで時代が要請する大量の情報処理が実行可能になると期待されている。すなわち、半導体素子の集積化・高性能化・高機能化には複数の半導体素子を3次元的に集積するための接合技術の高度化が必要になっている。

人為的な修理が困難な宇宙機器や航空機エンジン用の耐熱材料に対する「自己修復機能」に注目が集まっている。最近では自動車の塗装、スマートフォン筐体や画面にできた擦り傷や凹みの修復など、我々にとって身近なところにまで対象が広がってきている。また、老朽化が進む橋梁や高速道路などの社会インフラに対しても長寿命化する一つの方法として自己修復機能を付与することが期待されている。このように用途によって反応速度や機能発現条件が異なるものの、共通的な課題として自己修復機能の発現メカニズムの本質的な理解が必要となっている。

上記のような背景の下、「接着・接合・剥離」「摩擦・摩耗」「自己修復」それぞれに特化した課題を克服しつつ、非平衡・散逸・非定常状態までを含めたナノスケールにおける現象理解を可能とする新しい理論的枠組みやシミュレーション技術を確立し、そこを起点として如何にマクロスケールにおける力学特性の理解に繋げていくかが重要な課題になっている。その解決には、共通基盤技術である「トランススケール力学の学理構築」「トランススケール力学シミュレーション技術の構築」「ナノ構造およびマクロ構造のオペランド計測評価技術の開発」を軸として様々な研究開発課題を捉え直し、ナノスケールで何が起きているのか、それがメソスケール、マクロスケールにどのように繋がっているのかをスケール間の壁を越えて、一気通貫に解析するトランススケールなアプローチを確立する必要がある。

本提言の研究開発を進めるにあたっては、ナノスケール側とマクロスケール側の関連する産学官の研究者・技術者・開発者が「持続可能社会構築に向けてどんな課題を克服し、何を実現すべきなのか」といった目標を共有し、関連学術分野や学会、応用分野、産業界の研究者・技術者・開発者が集まって議論する場と、常に情報共有を可能にするネットワーク環境を構築することが必要である。

従来、化学や物理などのナノスケールでの機能特性の原理解明を主目的とする分野においては、ある性能についてのピーク値を重要視し、その発現メカニズムの解明を通して、さらにピーク値を向上させる方向に興味を偏りがちである。そこでは信頼性や耐久性、量産（スケールアップ）という要求項目が十分考慮されないまま研究が進展する傾向にある。他方、機械工学や流体力学などのマクロスケールな機械特性を扱う学問分野においては、性能ピーク値の追求よりも、むしろどんな環境においてもある一定以上の性能を維持できるように信頼性や耐久性を最優先して機械設計を行うことが求められる。このように基本的な研究の方向性や考え方が異なるため、これらの分野をつなぐトランススケールな異分野連携・融合はほとんど進んでこなかった。この状況を打破するためには、ナノスケール、マクロスケール各々の研究者・技術者・開発者が持つ学術的好奇心と実用化への方向性を意図的に合致させる政策的な仕組みを構築することが必要である。

Executive Summary

In this proposal, we present a concept common to all materials based on the mechanical properties of materials that exceeds existing frameworks for present structural materials, functional materials, organic materials, inorganic materials, metallic materials, and semiconductor materials. We propose research and development strategies aiming at establishing novel guidelines for materials design and innovation by elucidating the macroscopic mechanical properties through an understanding of diverse phenomena at the nanoscale.

The top export items in Japan are occupied by materials, devices and related products such as automobiles, electronic components including semiconductors, steel, motors, plastics, organic compounds, and optical equipment for scientific research. It is the present status of Japan that the materials industries, electrical/electronic industries, and the machinery industries sustain economy of this country.

In recent years, demands for realizing a sustainable society through reducing CO₂ emissions and saving energies are increasing, and extracting the potential of materials and devices to the utmost is being highly required. In fact, in the transportation equipment, such as automobiles and airplane, higher fuel-efficiency, i.e. lower CO₂ emission is highly demanded by introducing lighter-weight and higher-strength materials for their bodies. In the electronic devices, although the limitation of Moore's law has become apparent, global demand for semiconductors has been also increasing due to the appearance of IoT and artificial intelligence (AI), and accelerating development of self-driving, etc. In these movements, it is strongly desired to realize higher integration, higher performance and higher function of semiconductor chips.

In addition, social infrastructure such as bridges and expressways constructed intensively during the period of high economic growth in Japan has already been 50 years since the construction, and its safety has become a serious social issue.

In order to satisfy such social demands, we should return to the nanoscale structure of materials to clarify the mechanism of complex phenomena appearing in the materials including non-equilibrium, dissipative, and unsteady state ones, which had been difficult to handle so far. Furthermore, it becomes necessary to establish a comprehensive analytical method based on a trans-scale approach that enables the understanding of mesoscale and macroscale phenomena from the nanoscale mechanisms. These approaches will make it possible to establish new materials design guidelines, by which development of innovative materials with high and novel functionalities that may not be realized with existing materials will become possible through the development of controlling technology for macroscopic material properties, and evaluation technology related to lifetime, reliability, and durability.

In this proposal, we take up “adhesion / bonding / removing”, “friction / fatigue”, and “self-repairing” as strong social demands from a wide range of technology fields concerning macroscopic mechanical properties.

Improvement of fuel efficiency in transportation equipment, automobiles in particular, is strongly demanded to reduce CO₂ emission. From such a standpoint, “light weight”, “high strength” and “multi-materialization” are important technical elements to be developed. For example, carbon fiber reinforced plastic (CFRP), which is representative of lightweight and high strength material, is used only partially in the transportation equipment due to a high manufacturing cost, difficulty in forming, difficulty in securing reliability quantitatively. In order to overcome such a situation, it is important to understand the material properties from the nanoscale. For further reduction of the weight of the car body, multi-materialization where different materials are adhered and bonded is required. For this purpose, it is indispensable to elucidate the intrinsic adhesion mechanism at bonding interface.

Bonding technology is also important in semiconductor devices, including solar cells and three dimensional integrated circuits. As expectations for solar cells, which is an effective renewable energy source as a measure to mitigate global warming, are rising, low cost and high efficiency of solar cells are strongly desired. In order to meet the needs, multi-junction systems that laminate in three-dimensional direction are attracting attention. In addition, three-dimensional stacking of semiconductor integrated circuits is expected to execute an information processing of large amount of data with high speed and low power consumption, since it becomes physically difficult to increase the integration density in the 2-dimensional plane due to the limits of Moore’s law for semiconductor devices. In these applications, sophistication of bonding technology for three-dimensional integration of plural semiconductor elements is required in order to realize higher integration and higher performance of semiconductor devices, and to enhance their function.

Another important element to improve fuel efficiency in transportation and mechanical equipment is “friction / fatigue”, and it is expected that elucidation of the mechanisms in these phenomena leads to reduction of energy loss of various mechanical devices and decrease of their failure frequency.

“Self-repairing” attracts interest as a main research subject for special applications such as instruments used in space that are difficult to repair artificially and equipment used in advanced fields such as turbine engines in the aircraft. Recently, the target has been expanding to repair scratches and dents of the equipment familiarly used in our daily life, such as car painting, smartphone housing, and the display screen. In addition, it is expected to add self-restoring capability to social infrastructures such as aging bridges as a way to extend their lifetime. Basic understanding of the mechanism of self-repairing function is needed as a common issue to these cases, even though the reaction rate and the condition to arise the repairing process differ depending on the application as described above.

Under such background, it is important not only to overcome individual problems concerning “adhesion/bonding/removing”, “friction/fatigue”, and “self-repairing”, but also to establish a new theoretical framework and simulation technology that enables understanding of these phenomena from the nanoscale considering the physics of non-equilibrium, dissipation, and non-steady state, and leads to the understanding of the dynamic characteristics on the macroscale. In order to provide technical solutions to these

requirements, it is necessary to make clear various research and development tasks centering on “construction of the theoretical principle for trans-scale mechanics”, “construction of trans-scale mechanical simulation technology” and “development of operando measurement/evaluation technology of nanostructure and macrostructure”, and to establish a trans-scale approach to analyze comprehensively what is going on at the nanoscale and how it is connected to the mesoscale and macroscale phenomena, by getting over the scale barriers.

In conducting research and development of this proposal, scientists and engineers of relevant industry, academia, and government on the nanoscale side and the macroscale side should share the issues to be tackled collaboratively and goals to be realized toward building a sustainable society, and construct a forum where those scientists and engineers gather and discuss them, and establish a network environment that enables information sharing among those scientists and engineers.

Traditionally, scientists who have a mission of elucidating the origin of material properties at the nanoscale, such as chemists and physicists, have a tendency to pursue the ultimate performance of the materials even though it is realized only under special conditions, and to conduct research and development without full consideration of other requirements such as their reliability, durability, and mass productivity. On the other hand, researchers in the field such as mechanical engineering and fluid engineering who deal with macroscale mechanical characteristics put stress on achieving the best performance in a given environment under the condition of required reliability and durability, rather than pursuing the ultimate performance of the materials. As described above, since the direction and the way of conducting research differs basically in those fields, almost all of trans-scale collaboration and integration connecting these different fields have not advanced. In order to overcome this situation, it is necessary to construct a scheme politically to intentionally match the academic curiosity of researchers with the direction toward practical application.

目 次

エグゼクティブサマリー	i
Executive Summary	iii
1. 研究開発の内容	1
2. 研究開発を実施する意義	4
2-1. 現状認識および問題点	4
2-2. 社会・経済的効果	9
2-3. 科学技術上の効果	12
3. 具体的な研究開発課題	14
3-1. 社会的な要請が強い応用技術領域における課題	14
3-2. 共通基礎基盤技術	17
3-3. 新材料開発への展開	19
4. 研究開発の推進方法および時間軸	20
4-1. 目標の共有	20
4-2. 分野融合・産学連携を加速するための方策	20
4-3. 時間軸	21
付録1. 検討の経緯	24
付録2. 国内外の状況	28
付録3. 専門用語説明	32

1. 研究開発の内容

本提言では、これまでの構造材料や機能性材料、有機材料や無機材料、金属材料、半導体材料といった既存の枠組を超えた材料全般に共通するコンセプトとして、材料の力学特性に立脚した次世代材料科学技術の確立、および材料イノベーションを目指した研究開発戦略を提案する。図1に本提言の概略図を示す。



図1 概略図

ここでは、材料の持つマクロな材料力学特性を、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を目指す。それによって材料が本来持つ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ことが本提言の目的である。そのためには、材料が有するマクロな力学特性に関して、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必要である。本提言では、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・接合・剥離」「摩擦・摩耗」「自己修復」の3つを取り上げる。さらに、これらの代表例に留まらない広範な応用技術領域に共通的な基礎基盤技術、およびそこから得られた新知見・新技術を既存複合材料の高度化やその他の新規力学材料へ展開する際に必要となる研究開発課題について概説する。

1. 社会的な要請が強い応用技術領域における課題（詳細については第3章を参照のこと）

(1) 接着・接合・剥離

自動車や航空機のボディは、省エネルギー化の要請から軽量化が求められている。そのためのキーテクノロジーが材料の多様化と複合化、いわゆるマルチマテリアル化である。電子デバイス産業においても、更なる高機能化・高性能化を求めて、部品単体実装ではなく、異なる機能を持つコンポーネントの複合化・モジュール化が進展している。このような複合化による高機能・高性能を実現するために欠くことのできない技術が接着・接合技術である。

現状では、接着・接合技術は熟練者の勘と経験に基づく範囲にとどまりがちであり、科学的知見に基づいた設計・制御が可能な接着・接合・剥離技術の構築が求められている。このための課題として、ナノスケールの界面科学に立脚しマクロな接着力につながるナノ・メソ・マクロのスケール横断的な学理構築、多様な外部刺激を利用した解体性接着現象の実現、半導体デバイスに関する接合・剥離技術の確立、などが挙げられる。

(2) 摩擦・摩耗

機械機器のエネルギー損失、故障、さらには、寿命の支配要因の一つである摩擦・摩耗現象は、材料特性だけでなく、荷重やすべり速度といった機械的要因、温度や湿度などの環境要因などの複合的な要素が複雑に絡み合って生じる現象である。従来、摩擦・摩耗のメカニズムはマクロな現象論で理解されてきたが、現状を根本的に変革するためには、化学反応まで考慮した原子・分子レベルでの動的挙動を科学的に理解する必要がある。そのために必要な課題として、例えば、接触界面における現象理解と実用機器への展開、「なじみ」現象の物理的・化学的解明と低摩擦設計手法の確立、などが挙げられる。

(3) 自己修復

材料内に生じる小さな損傷は、やがて材料にとって致命的な破壊につながる可能性があり、それを克服する機能として自己修復に注目が集まっている。材料の長寿命化や機器・構造の保守性の向上、環境適合性といった観点で、致命的破壊に至る前に損傷を自ら修復・治癒する自己修復材料開発が必要である。自己修復の方法としては、材料中にあらかじめ修復エージェントとなる反応物を埋め込み、損傷が生じると温度や外気に触れることで生じる生成物によって損傷を埋めるもの、水素結合や分子間力などの分子の動的、可逆な結合を利用して修復界面における分子結合の切断と再形成を行うものなどがある。損傷界面における原子・分子の動的挙動を理解・制御することで、修復後の材料強度の回復や回復に要する時間・温度といった機能設計が可能になると考えられる。さらに、自己修復力をどう定量的な指標で表すのかといった課題もある。

2. 共通基礎基盤技術

(1) トランススケール力学の学理構築

材料は一般にナノスケールからマクロスケールにわたる階層構造を持つが、現状ではそれぞれ異なる力学体系で記述され、それらの間はパラメータを介し連結しているため、本質がブラックボックス化されてしまい、ナノスケールでの現象理解とマクロスケールの現象理解が直接つながっていない。新材料開発には、材料の力学特性と機能の関係をナノスケールとマクロスケールとで結び付けて本質的に理解することが重要である。そのためには、これまで取り扱いが困難であったナノスケールにおける非平衡・散逸・非定常状態を

も含めた現象メカニズムを解明し、そこを起点としてスケール間に渡る現象を構造と結び付けて解明するトランススケール力学体系の構築が不可欠である。

(2) トランススケール力学シミュレーション技術の構築

スーパーコンピュータ「京」に代表されるハイパフォーマンスコンピューティングの性能向上により、マルチスケール・マルチフィジックスシミュレーション技術が向上しつつあるものの、依然として原子・分子レベルからメートルレベルまでの幅広い空間スケールを一気通貫で解析することは困難である。また、一般にナノスケールでの材料の様々な機能と力学場（対象となる領域にどのような力が加わっているか）をつなげる問題は非線形性が強く時間依存の問題も存在するため、経験則に基づく予測は困難である。

その根本的解明には、第一原理的な電子、原子、分子レベルの動的解析による理解と、それをメートルレベルのマクロスケールへつなげるトランススケールなシミュレーション技術の確立が不可欠である。その際、材料の機能発現の時間スケールは、ナノスケールシミュレーションが対象とする時間スケール（通常はフェムト秒～ナノ秒）よりも遙かに長く、場合によっては秒や時間、年単位にまで及ぶため、この時間スケールのギャップをどう埋めていくかも大きな課題である。また、シミュレーションを実行する際に用いる初期モデルをどのように構築するのも重要な課題となる。

(3) ナノ構造およびマクロ構造のオペランド計測評価手法の開発

材料特性が発現している最中の組織構造、特に本質となる原子・分子の構造の解明と、ナノスケールを中心に各スケールでの力学場（対象となる領域にどのような力が加わっているか）の把握、さらには化学反応の理解が不可欠であるが、そのための3次元リアルタイムのオペランド計測を実施する場所が一部の放射光施設に限られ、現状では不十分である。

例えば、光の届かない接着界面で適用できる陽電子・中性子など高エネルギー粒子による新たな計測手法の開発や、実環境下における材料の挙動をナノスケールで観測する計測評価技術の開発が重要である。

3. 新材料開発への応用

(1) 複合材料の高度化

複合材料の特長を最大限に活かす構造の設計技術の開発が必要である。例えば、炭素繊維強化プラスチック（CFRP）の強みである部材の機械的特性の異方性を十分に活かした設計・成形技術の確立が挙げられる。また、複合材料における破壊機構の解明も未だ不十分であり、複合材料部材の寿命などの性能を評価する手法の開発、マトリックスとフィラー間の界面の解析・制御をはじめとするナノスケールでの現象解明が必要である。

(2) 様々な力学特性に関連する研究シーズの応用展開

近年、化学分野で発見された金属錯体や液晶材料における発光性メカノクロミズム現象を活用したアプリケーションの開発、有機物における超弾性現象を用いた新規形状記憶材料の開発など、材料の力学特性に関連する様々な研究シーズの応用活用とその機能発現メカニズムの解明を同時並行的に実施することも重要な課題である。

2. 研究開発を実施する意義

2-1. 現状認識および問題点

わが国の輸出品目の上位は、自動車およびその部品、半導体をはじめとする電子部品、鉄鋼、原動機、プラスチック、有機化合物など材料デバイスや製品が占め、素材産業および機械産業がわが国を支えているのが現状である。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 CO₂ 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。電子デバイスにおいては、ムーアの法則の限界が見え始めている一方で、IoT の進展や人工知能 (AI)、自動運転の開発加速など、世界的に半導体需要が拡大している。さらに、膨大な情報の高速処理を実現するためには半導体チップの貼り合わせなどによる、さらなる高集積化・高機能化が強く望まれている。

このように、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を構築し、材料イノベーションを通じて従来の機械機器設計に革新を起す必要がある。

(1) 自動車における環境負荷低減

CO₂ 排出量削減の要請から、輸送機器における燃費向上が強く求められ、中でもわが国の CO₂ 排出量の約 15% を占める自動車に対する燃費効率の改善が大きな課題となっている。燃費効率の改善には、エンジンや変速機、駆動系などのパワートレイン関連の改良、車体の軽量化などいくつかのオプションがある。従前はパワートレイン関連の改良による燃費向上への貢献が大きかったが、近年、特に乗用車に対する安全性や快適性への要求が大きくなる中、装備拡充によって車体重量が増加傾向にあり、パワートレインの改良だけでは CO₂ 排出量削減に限界が近づきつつある。さらに、電気自動車やハイブリッド車などの電動化が進むことによって、電池搭載による車体重量の大幅増加も見込まれており、今後は必要な強度・安全性を満たしつつも車体重量の軽量化への必要性がますます増していく傾向にあると言える。

軽量化にあたっては、自動車重量の約 7 割を占める鉄の使用量削減に加え、アルミニウムや樹脂などの鉄を代替する軽量素材の使用比率を増加させるマルチマテリアル化が進展していくと予想される。軽量材料の代表として、炭素繊維強化プラスチック (CFRP) が挙げられる。CFRP の強度を支える炭素繊維の生産量では日本メーカー 3 社で 6 割超の世界シェアを持つが、部材・製品事業では 2 割以下となり欧米企業の後塵を拝している。この状況を打破するためには製造、加工、接着などに関する新しい技術開発が必要である。実際、CFRP はスポーツ用品、一部の航空機や超高級自動車への採用が進んでいるものの、製造コストが高い、成形が困難、信頼性が定量的に担保できない等の課題があるため、現状では量産の自動車用途への市場は広がっていない。さらに、マルチマテリアル化においては、鉄とアルミニウム、アルミニウムと樹脂といった異種材料間の接着・接合技術が重要な要素技術となる。より軽量化を実現するためには接着剤のみの異種材料接合が有効であるが、現状では接着接合の信頼性に関する知見が未だ十分ではないため、軽量化を犠牲にして接着剤とボルト・リベットを併用している。また、材料によって融点や熱膨張率が異なるため、異種材料の接合は温度履歴を受けると亀裂や変形が生じてしまうという課題

もある。これらの課題を解決するためには、異種材料接合界面の接着・接合メカニズムを科学的に原理解明することが必要である。

さらに自動車における燃費向上の鍵を握る重要な要素として摩擦・摩耗現象が挙げられる。摩擦は様々な機械機器における可動部分で生ずるが、摩擦が大きければ、その部分で熱が発生し機械を動かすためのエネルギーにロスが生じる。実際に、自動車はじめ様々な工業製品の中で起こる摩擦によるエネルギー損失は国民総生産（Gross Domestic Product: GDP）の3%とも言われ、ガソリン車においては、燃料から得られるエネルギーの30～40%が摩擦によって失われていると考えられている。また、機械機器の故障や寿命の原因の75%が摩耗に起因すると言われている。摩擦や摩耗のメカニズム解明が期待されているものの、実際のものづくり現場においては、技術者による試行錯誤の積み重ねによる経験則に基づいた機械設計が主流である。そのため、過剰な安全係数を設定することを余儀なくされ、製造プロセス等に余分なコストがかかっている。科学的なアプローチによって摩擦現象や摩耗のメカニズムを明らかにすることが可能になれば、燃料エネルギーの飛躍的な高効率利用、低摩擦実現による機械の信頼性の保証や正確な寿命予測が可能になると考えられる。

(2) 半導体デバイスの高集積化・高機能化

今後のスマート社会における家電製品の一層の低消費電力化、スマートフォンなど誰もが使いやすい情報端末の情報処理能力の向上など、半導体デバイスの高集積化・高機能化に対する要望はますます強くなっている。これまではムーアの法則に代表される二次元的なスケーリングによりトランジスタの微細化、高速化、低消費電力化を実現することで半導体デバイスの高集積化・高機能化を進めてきた。しかし、近年は物理的にも経済的にも微細加工技術が限界を迎えつつあり、それを打開する技術として、異なる機能を持つ半導体や異種材料の3次元積層やインターポーザルを介した2.5次元集積化が注目を集めている。通常、Siなどの半導体基板上に異なる半導体材料を積層する技術として、CVD法（Chemical Vapor Deposition：化学気相成長）などで結晶成長を行う方法がよく知られている。しかしながら、異なる半導体同士かつ格子定数や熱膨張係数が大きく異なる場合は、均一な結晶成長が難しく、積層した半導体の結晶構造の乱れや格子欠陥が発生し、十分な電気的な特性や物性を得ることが困難である。また、金属-金属間のように、異なる材料同士の接合技術においては、よく知られる接合技術として、自動車のフレームを接合する電気溶接や半導体チップを実装するはんだバンプを用いたフリップチップ実装があるが、これらの接合技術は一般的に高温・高圧のプロセスにより異なる金属間の接合を行うものでありコストが高くなるという課題がある。半導体同士を低コストで直接接合する技術や半導体基板の自由な深さで剥離する技術開発が求められている。

(3) 社会インフラメンテナンスの効率化

2012年12月に発生した笹子トンネル崩落事故に代表されるように、高度経済成長期に集中的に建設された橋梁や高速道路などの社会インフラが既に建設後50年を経過している。国土交通省の調査によると、全国の橋梁約70万橋のうち建設後50年を超えた橋梁（2m以上）の割合は、2013年に18%、2023年に43%、2033年に67%と増加すると言われている。そのような中、橋梁をはじめとする社会インフラの余寿命予測や信頼性・耐久性をどのように評価するのが大きな課題となっている。それらの解決策の一つとしてメンテナンス・モニタリングの効率化が取り組むべき課題として挙げられるが、現状では遠望目視や近接目視点検、打音検査など、人の技

量により結果が異なるような定量性・客観性に欠けた検査手法を用いている。どこまで亀裂や腐食が進めば崩壊に繋がるのか等に関する科学的知見の不足が、余寿命の予測を困難にしており、結果として、たとえ余寿命が十分に残っていたとしても定期的にメンテナンスをせざるを得ない状況が生じている。必要なときに必要な箇所だけメンテナンスもしくは更新するためには、社会インフラ材料に対する腐食・疲労等の根本的原理の解明と余寿命の予測精度向上、定量性かつ客観性のある新しい検査・モニタリング技術の開発もしくはそれを補強するコーティング材料の開発が必要である。また、最近では、社会インフラ材料中に予め自己修復をもたらす機能を埋め込んでおき、亀裂が進展した際に自己修復される手法が考えられているが、コストと耐久性の面で実用化に向けた大きな課題が残っている。

上述した課題を克服するためには、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る。しかしながら現状では、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・研究分野が同じ目標に向かって協働するためのスケールの壁を越えたトランススケールな研究分野が発展しているとは言えない状況である。ただし、たとえばトライボロジー分野においては、過去数年にわたって、東北大学を中心にマクロ側とナノ側の研究者が一緒になって摩擦や摩耗などの現象の理解を進めようとする動きも見られる。また SIP「革新的構造材料」や ImPACT「しなやかタフポリマー」などのプロジェクトにおいても、データ科学やシミュレーション技術を駆使してナノとマクロの両方からのアプローチによって革新材料の創製を目指している（関連する研究プロジェクトの詳細は付録2を参照）。このように、個別の研究プロジェクト単位ではあるが、トランススケール科学の実現に向けた研究が徐々にではあるが開始されつつある。

【コラム1 炭素繊維強化プラスチック (CFRP) 半世紀の歴史】

炭素繊維強化プラスチック (Carbon Fiber Reinforced Plastics: CFRP) は、炭素繊維と樹脂を組み合わせで作られる複合材料である。「アルミニウムよりも軽く、鉄よりも強い」次世代素材として注目されており、航空機用途から産業用途への拡大とともに、着実に普及し始めている。炭素繊維市場の90%を占めるPAN (ポリアクリロニトリル) 系炭素繊維は、東レ、帝人、三菱ケミカルの日本3社が世界で圧倒的なシェアを占めている。その中でも東レは世界シェア No.1 の地位を維持しているが、ここに至るまでの道のりは決して平坦なものではなかった。

炭素繊維のルーツは19世紀末にさかのぼる。トーマス・エジソンとジョセフ・スワンが電球に使ったのが竹を焼いて作られた炭素繊維のフィラメントである。その後、電球のフィラメントにはタングステンに取って代わり、炭素繊維は世の中から徐々に忘れられていく。

その存在が再び注目されるようになったのは、1950年代、高い耐熱性が要求されるロケットの噴射口に最適な材料として、アメリカで炭素繊維の研究開発が急速に進められたことが契機である。日本では1959年にPAN (ポリアクリロニトリル) 繊維を炭化することによって炭素繊維を製造する方法が大阪工業技術試験所の進藤昭男博士によって発明された。これをきっかけに日本国内でも炭素繊維の研究開発と製品化が進む。

炭素繊維は強度特性が優れ、複合材料の高機能素材として最適であった。1967年、航空機用エンジンメーカーのロールス・ロイス社はCFRPをジェットエンジンへ採用すると発表。ほぼ同時期に、東レは、アクリル繊維「トレロン」を使った炭素繊維の開発をスタート、1970年に進藤博士が持つ特許の実施許諾を取得した。東レは炭素繊維を用いたCFRPという新素材の将来性を信じて、生産体制を整備することが重要であると判断、大胆な投資に踏み切る。

翌1971年、東レはPAN系高強度炭素繊維「トレカ®T300」の製造・販売を開始した。同社は、その明確な使用用途は決して明らかにならなかったにも関わらず、世界最大の年間12トンもの製造能力を持つ新工場を建設した。この大英断の背景には「本質的に強いものは、必ずいつか認められる」という確固たる信念があった。さらに「黒い炭素繊維を用いたCFRPで作られた黒い飛行機をいつか飛ばしたい」という経営陣の夢もあった。ちょうどその頃は、CFRPを使ったロールス・ロイス社の航空機用ジェットエンジンの製造が行き詰まり、その取り組みが失敗に終わった時期でもあった。

東レの炭素繊維を使った最初の市販製品は、1972年の鮎釣り用の釣り竿であった。軽量化による高い操作性が評価され、高価格ながらも市場に受け入れられることとなった。さらに同年、プロゴルファーのゲイ・ブリューワー氏が、CFRP製のブラックシャフトのクラブを使って太平洋マスターズ大会で優勝したことをきっかけとして、一気に認知度が高まった。その後、テニスラケットにもCFRPが採用されるなど、徐々に世の中に浸透していくこととなる。しかしながら、娯楽・スポーツ用途が中心だったため流通量は限られていた。

転機が訪れたのは、1975年であった。1973年のオイルショックにより、航空機メーカー各社では低燃費実現のための機体軽量化が最重要課題となり、運航の安全性に直接影響を与えるリスクの少ない二次構造部材にCFRPが採用されることになったのである。東レとしては念願であっ

た「航空機用部材への CFRP の適用」という夢がようやく叶った瞬間であった。その後、ボーイング社に加えてエアバス社でも航空機用部材としての CFRP の採用が進み、1988 年までにはトレカ®の炭素繊維の累積生産量は 10,000 トンを超えるに至った。当時、イギリスやアメリカなどの海外素材メーカーの多くが CFRP の事業から撤退していた。長期的な視点で技術を伝承していく日本企業は、引き続き高性能炭素繊維を用いた CFRP の開発および製造に取り組み、2010 年度には、日本の炭素繊維メーカーが世界シェアの約 7 割を占めるに至った。

1990 年、炭素繊維にエポキシ樹脂を組み合わせたトレカ®プリプレグ（シート状 CFRP）がボーイング社の航空機本体の一次構造材（運航の安全性に直接影響する重要部材）に採用されたことで、CFRP が高い信頼性を持つ高機能材料であるというお墨付きを得ることに成功した。炭素繊維と樹脂の複合材料である CFRP は、鉄と比較して約 4 分の 1 の軽さでありながら、鉄の 10 倍以上の引張強度と優れた疲労強度を持ち、さらにいろいろな形に成形できるという大きなメリットを持っていた。2003 年に開始されたボーイング 787 プロジェクトでは、航空機の一次構造材として胴体や主翼など機体重量の約 50%に CFRP が採用され、その存在感は揺るぎないものとなっている。2006 年には東レとボーイング社の間で CFRP 供給に関する長期包括契約が締結され、2021 年まで一次構造部材を提供することが決定している。

2010 年代に入ると、世界的に CFRP に対する需要が一気に拡大。風力発電機のブレード、ルーフやフード、ドライブシャフトなどの自動車部品、天然ガス自動車や燃料電池自動車のタンク、液晶基板搬送用のロボットフォーク、高速列車の車体、パソコンの筐体など、従来のスポーツ用途、航空機用途に加えて、実に多種多様な産業に使用され始めることとなる。

東レの炭素繊維複合事業は、戦略的拡大事業に位置づけられている。自動車、航空機、新エネルギー産業などの成長産業における需要拡大を狙い、経営資源を重点的に投入しており、2020 年には北米でさらなる追加投資を行い、同地でのビジネスを拡大する予定という。現在の炭素繊維の強度は理論値の 10 分の 1 程度であるとされ、さらなる高強度化の余地が十分に残されている。また、現在は高価な素材であるが故に、なかなか市場に浸透しないという課題にも直面している。今後自動車パーツとしての採用が増えていくと見込まれ、量産化効果による大幅なコストダウンも相まって、近い将来一気に需要が拡大する可能性を秘めている。

【参考文献】

三菱マテリアル HP、「東レ 素材を信じて世の中を変える、CFRP 半世紀の歴史」、
http://carbide.mmc.co.jp/magazine/article/vol05/tec_vol05（2019 年 1 月 30 日アクセス）

2-2. 社会・経済的効果

本提言の力学機能制御による材料イノベーションを実現する研究開発を推進することによって、様々な力学特性に関してナノスケールからマクロスケールに至る階層構造にとらわれないトランススケールな理解が可能となり、材料における余寿命予測や信頼性・耐久性の定量的評価に基づく様々な産業応用が考えられる。将来期待される社会・経済効果が期待できる領域として、例えば(1)低燃費化・軽量化が進展することで世界市場が増加する自動車用材料、(2)スマートフォンやIoTの進展、人工知能(AI)や自動運転の開発加速などによる市場拡大が見込まれている半導体、(3)建設後50年を経過し、維持管理・更新費用が社会的な問題になっている社会インフラ材料、などが挙げられる。以下では上記3つの領域を代表例として社会・経済効果を記載する。最後に、本提言の研究開発によって実現されそうな新技術・新材料のイメージを示す。

(1) 低燃費化・軽量化に向けて代替が進む自動車用材料

自動車用材料に対しては、低燃費実現のため車体の軽量化が進められ、環境対策の一環としてHV、EVなど環境対応車の生産比率が高められている。さらに、ガソリン車やディーゼル車などの内燃機関車でも低燃費化を実現させるため軽量素材を採用することで、2016年に約22.2兆円だった自動車用材料の世界市場は2030年には約33.6兆円に成長すると考えられている(富士キメラ、2017、図2-2-1参照)¹⁾。そのうち、鉄/非鉄金属を除く約11.3兆円が汎用樹脂やエンブラ、熱硬化樹脂、合成ゴム、エラストマーなどの軽量素材が占めるが、本提言の研究開発が実施されることで軽量素材に対する信頼性や耐久性の定量的な理解が進展し、さらに市場を増加させる影響を与えることが予想される。

また、PAN(ポリアクリロニトリル)系複合材料(炭素繊維強化プラスチック:CFRP/炭素繊維強化熱可塑性樹脂:CFRTP)に関して、既存材料の代替、採用アプリケーションの増加、マテリアルベースでの低コスト化、短時間成形加工技術開発の進展を見込むことで、2030年の世界市場は2016年比3.4倍の4兆3864億円、自動車用途が6.9倍、航空機用途が3.2倍に伸長するとの予測がなされており(富士経済、2018年)²⁾、本提言の研究開発の成果によってさらに加速されることが期待できる。

加えて、自動車材料の軽量化およびマルチマテリアル化による省エネ効果としては、現状の安全性を確保したまま車体の超軽量化が実現し、例えば車体重量を1/2にすることができれば、燃費が2倍、CO₂排出量が1/2に減少する。2016年時点でわが国における自動車からのCO₂排出量は約1億8000万トン(全体の約15%に相当)³⁾であったが、単純計算で約9000万トンにまで減少すると期待される。さらに、自動車においては摩擦によって30~40%のエネルギー損失が生じている⁴⁾と言われているが、摩擦現象の理解によって、自動車内の様々な機械機器のエネルギー損失の大幅低減が期待される。また、自動車含め機械機器の故障の原因の75%が摩耗に起因すると言われており、摩耗現象の理解によって故障頻度の減少および余寿命予測の高精度化が実現され、結果として機械機器のメンテナンス費用削減効果も期待される。

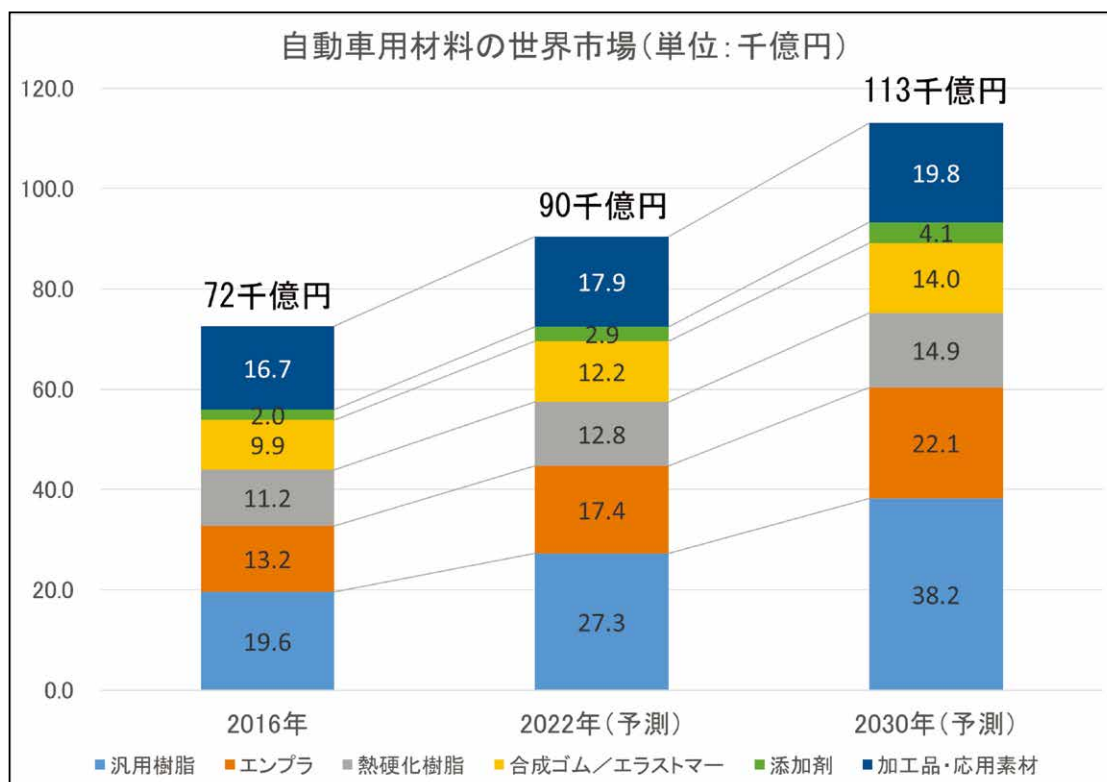


図 2-2-1 自動車材料の世界市場 (鉄/非鉄金属除く)

(出典：富士キメラ総研の調査結果を基に CRDS が作成)

(2) 車載用および IoT 向けとして期待される半導体

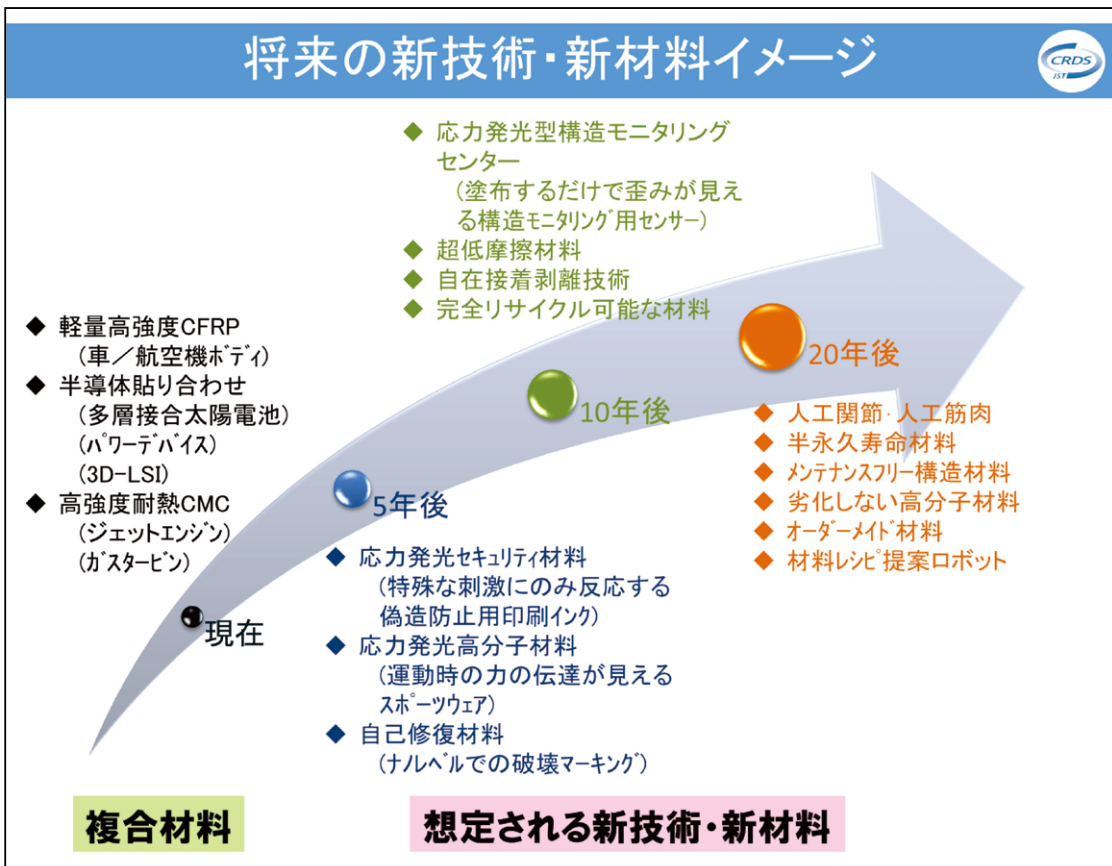
スマートフォンでの動画視聴や IoT の進展、人工知能 (AI) や自動運転の開発加速などを背景に、世界的に半導体需要が拡大しており、集積回路 (5.3%増、2016 年時点で 7 年連続増加) や半導体製造機器 (18.0%、2016 年時点で 3 年連続増加) の貿易が高い伸びを見せている (ジェトロ、2017 年⁵⁾)。そのような中、半導体のアプリケーション適用分野として最も高い成長を遂げるのは車載および IoT 向けと予測されている (IC Insights、2017 年⁶⁾)。車載向けとしては、自動運転車やその他の自動車に搭載される半導体は 2016 年に 229 億ドルであったものが、2021 年には 429 億ドル (年平均成長率 13.4%) に達すると見込まれている。また、IoT 向け半導体は、2016 年に 184 億ドル規模だったものが 2021 年には 342 億ドル (年平均成長率 13.2%) に達するとの予測である。本提言で注目する接着・接合技術が高度化し、半導体同士の直接接合や常温接合が低コストで実現できれば、さらなる成長率の上昇へと貢献することができると考えられる。

加えて、2021 年には 7 兆円規模に成長することが見込まれている市場を持つ⁷⁾ 接着接合技術に対しては、接着接合メカニズム解明および寿命や信頼性の定量評価技術が確立できれば、自動車や航空機へのマルチマテリアル化による軽量化への貢献など、市場をさらに成長させる源泉となりうると期待される。また、剥離技術の高度化にもつながると予想され、産業的には機器のリサイクルが容易になり、省エネの観点からも重要な貢献が可能である。

(3) 老朽化が深刻な社会インフラの安全性の確保

橋梁や高速道路などの社会インフラの維持管理・更新費用は、現在の技術を前提にすると

2023年には約4.3～5.1兆円、2033年には約4.6～5.5兆円になると言われている⁸⁾。これは現状のメンテナンスやモニタリング技術が基本的には人依存で定量性・客観性に欠けたものであることに一因がある。例えば、ナノスケールのクラックや亀裂とマクロな構造物の破壊メカニズムとの関係性を明らかにし、余寿命予測や信頼性・耐久性の定量評価などの技術開発が進展すれば、必要ときに必要ところだけを修復もしくは更新できるようになり、メンテナンスコストの大幅削減および安全性が担保されることが期待される。また新しい耐腐食材料や自己修復材料の開発により、メンテナンスフリーの社会インフラ材料開発へと繋がる可能性がある。



引用先

- 1) 株式会社富士キメラ総研、自動車用ケミカル&マテリアル市場調査総覧 2017、
<https://www.fcr.co.jp/report/171q15.htm>、2017年
- 2) 株式会社富士経済、炭素繊維複合材料 (CFRP/CFRTP) 関連技術・用途市場の展望 2018、2018年
- 3) 国土交通省、運輸部門における二酸化炭素排出量、
http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei_environment_tk_000007.html
- 4) 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>
- 5) 日本貿易振興機構 (JETRO)、「ジェトロ世界貿易投資報告」2017年版～転換期を迎えるグローバル経済～総論編 概要、
https://www.jetro.go.jp/ext_images/_News/releases/2017/7aea93e5ad0dc1c8/2.pdf、2017年

- 6) IC Insights, Integrated Circuit Market Drivers 2018, 2017
- 7) MarketsandMarkets, Adhesives & Sealants Market by Technology (Water-based, Solvent-based, Hot-Melt, Reactive), Chemistry Type (PAE, PVA, VAE, EVA, SBS, Synthetic Rubber, Polyamide, Polyurethane, Epoxy, Cyanoacrylate), Application, and Region -Global Forecasts to 2021, 2017
- 8) 社会資本整備審議会・交通政策審議会技術分科会技術部会「社会資本メンテナンス戦略小委員会」での審議を踏まえ、国土交通省による試算結果、
http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/maintenance/02research/02_01_01.html

2-3. 科学技術上の効果

(1) 学術的・技術的な発展

本提言の研究開発を推進することで、数桁にも及ぶ空間スケール・時間スケールを自由に解析可能なトランススケール動力学が確立され、新たな異分野融合・連携領域が形成されることが期待できる。具体的には、構造材料における変形や破壊などのマクロスケールの現象を研究対象としてきた機械工学、流体工学、材料工学などの研究分野と、物質の電子的・磁氣的・電気的な性質を扱ってきた化学や物理などの研究分野の融合・連携である。それぞれの分野に他方からの知見が入ることで新しい理論・技術・考え方が導入されると考えられる。

例えば、どんな材料でも接着可能、かつ、用途に応じていつでも容易に剥離できる接着・剥離技術の研究開発を推進することで、機械分野と化学分野間の共同研究が生まれ、既存の高分子接着材料や液晶接着材料の飛躍的な性能向上だけではなく、接着・剥離に関する新原理の発見や新材料の開発へと繋がることを期待できる。摩擦・摩耗などを扱うトライボロジー分野においては、機械分野の研究者と化学・物理分野の研究者との共同研究によって摩擦面における化学反応や電子論的理解が進み、様々なマクロ現象の原理が解明されることが期待される。それによって、「なじみ（摩耗によって表面を平滑化され摩擦が小さい状態に改善される過程）」といった従来は経験的に使われていた技術概念が科学的に理解できるようになり、様々な機械機器の長寿命化、寿命予測の精度向上に繋がると考えられる。自己修復に関しては、高分子材料やセラミックス材料において、トランススケール動力学制御による自己修復性の飛躍的向上に加え、刺激応答型の自己修復性の実現など用途に応じた機能を有する自己修復材料の開発が見込まれる。

また、従来は機械機器の設計の際には、十分な科学的知見が不足していたために過剰な安全評価基準設定がなされていたが、本提言の研究開発の進展によって今後は実使用環境に応じて科学的根拠に裏付けされた安全評価基準が構築され、製造コストの低減や製造プロセスの省エネルギー化に貢献することが期待できる。

さらにその場計測・分析技術の進展によって、接着や摩擦などの機能が発現している界面において、マクロスケールでの力学的挙動と原子・分子レベルでの散逸プロセスを含む動力学との関係が明らかになることが期待される。その上、既存材料における解析結果のデータベース化、マルチスケール・マルチフィジックスシミュレーション技術の向上により、新物質・新材料の発見やそれら新材料を用いた際の機械機器の寿命予測なども可能になると考えられる。ここではナノスケールやメートルスケールといった空間スケールだけではなく、フェムト秒スケールやミリ秒スケールといった時間のスケールについてもトランススケールを意

識することが重要であり、時空間を自在に粗視化できるトランススケールシミュレーション技術が開発されると考えられる。

(2) 人材育成、学際的ネットワークの構築

本提言の研究開発を実施するには、機械工学・流体工学・材料工学といった古典ニュートン力学に基づくマクロな材料特性を扱う研究者と、化学・物理学といった量子力学に基づくミクロな物質機能を扱う研究者との異分野連携・融合が不可欠であるため、両スケールに跨がる学際的な人材の育成、ネットワーク構築が進展すると考えられる。この際、既存学協会にとらわれずに共通の課題について議論する研究会のような組織体が形成されることが期待される。関連する学協会として、例えば日本機械学会、日本金属学会、日本鉄鋼協会、日本材料学会、計測自動制御学会、応用物理学会、日本化学会、高分子学会、日本物理学会などが挙げられる。

3. 具体的な研究開発課題

2章で記載した社会・経済的効果および科学技術上の効果を実現するためには、これまで現象論的な理解にとどまっていた材料が有するマクロな力学特性に関して、原子分子レベルにまで立ち返ることが重要である。これまで取り扱いが困難であったナノスケールにおける非平衡・散逸・非定常状態をも考慮した複雑な現象メカニズムの解明、それを起点としてメソスケール、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い、マクロな力学特性や材料における余寿命、信頼性、耐久性を根本から理解することが必要となる。そのためには新たな理論体系・シミュレーション技術の開発に加えて、力学特性が発現している最中の界面やバルクの状態を直接観測する新技術の開発が重要となる。以下では、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・接合・剥離」「摩擦・摩耗」「自己修復」の3つを取り上げる。さらに、これらの代表例に留まらない広範な応用技術領域に共通的な基礎基盤技術である「トランススケール力学の学理構築」「トランススケール力学シミュレーション」「ナノ構造およびマクロ構造のオペランド計測」、加えて、そこから得られた新知見・新技術を既存複合材料の高度化やその他の新規力学材料へ展開する際に必要となる研究開発課題について詳述する。

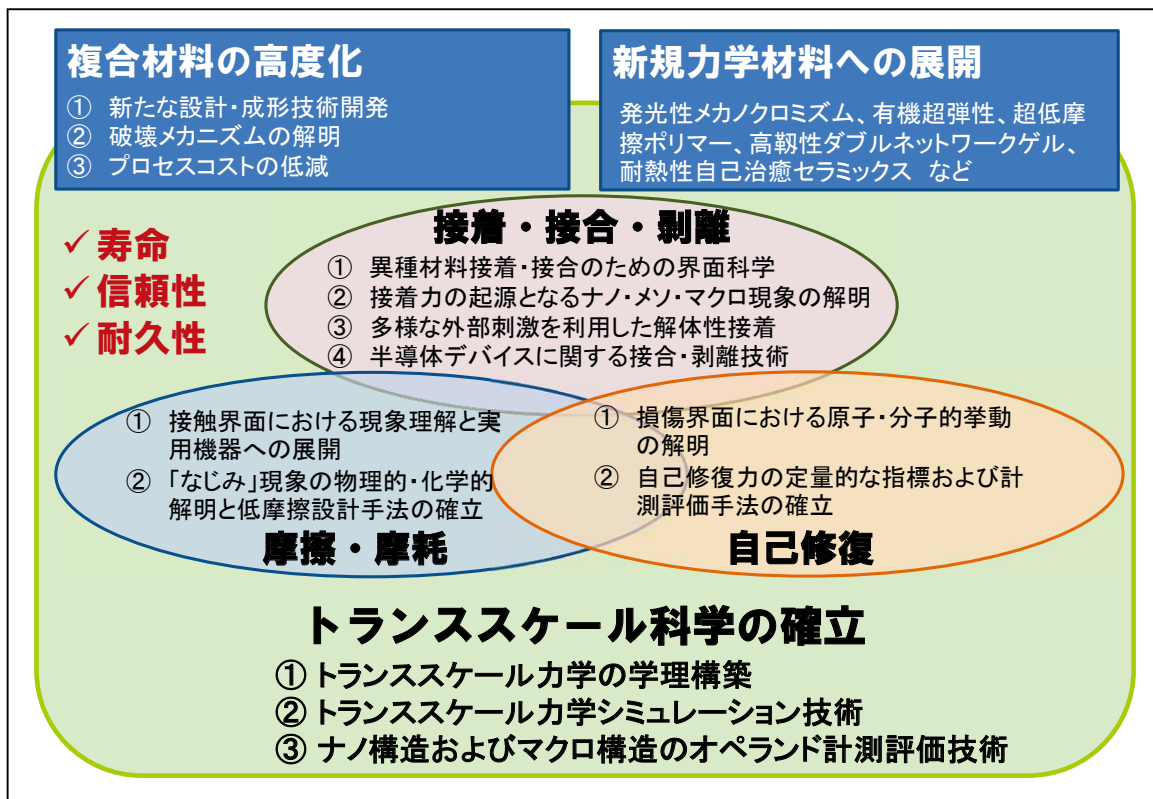


図3 具体的な研究開発課題の概略図

3-1. 社会的な要請が強い応用技術領域における課題

(1) 接着・接合・剥離

(ア) 異種材料接着・接合のための界面科学の学理構築

異種材料接着・接合手法として、熔融接合法、摩擦攪拌接合法、摩擦接合法、ろう付け、接着、

機械的締結などが適用されているが、各手法における信頼性を確立するためには、異種材料接合機構、強度発現機構の解明が必要である。接合界面の微視的構造と局所的接合強度を厳密に対応づける手法の確立、もしくは異種材料接合部の強度、破壊挙動の解明およびそれに基づくマルチシミュレーションの確立も重要である。

さらに、接着・接合技術の性能を予測・保証するためには非定常・非平衡である複雑な接着・接合現象を物理現象として把握・理解することが必要である。マイクロ秒、ナノ秒オーダーでの時間・空間分解能を有する高精度な計測・解析技術によって接着・接合界面を理解するとともに、その知見に基づいて物理モデルを構築し、接着・接合界面を再現・予測するためのシミュレーションや余寿命予測手法の確立が必要である。オペランド計測、センシング技術と情報処理技術を組み合わせるなど、多角的な接着・接合技術開発を進めることがものづくり分野の競争力向上のために重要である。

(イ) 接着力の起源となるナノ・メソ・マクロスケール現象の解明

接着剤による接着機構は、被着体表面の微細凹凸への接着剤の入り込みによる機械的結合（アンカー効果）、被着体と接着剤との化学的結合、分子間力による結合が考えられている（図3-1-1）。しかしながら、エネルギー論的に推測される接着力と実際の接着力とは大きくかけ離れるなど、機構の詳細はいまだ不明である。また接着界面を非破壊的に実環境で見ることができていない。接着界面及びその近傍における接着剤と被着体との相互作用と分子構造との関係を明らかにすることで、強い接着力と易剥離性を両立する接着剤や材料種を問わない接着剤などの設計指針の確立に大きく寄与することが可能になる。

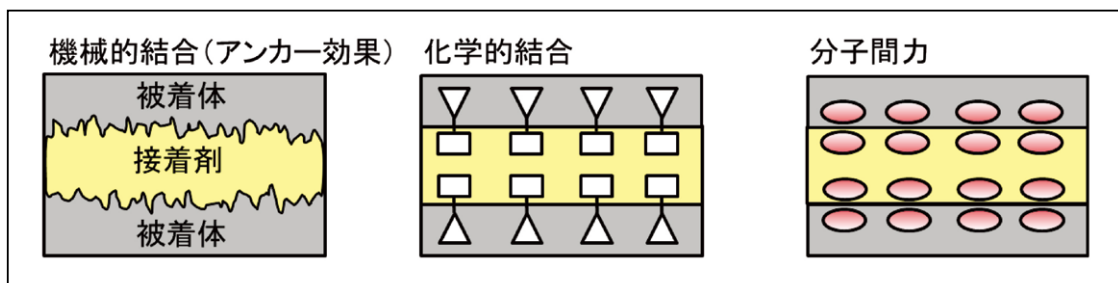


図 3-1-1 想定される接着機構の模式図

(ウ) 多様な外部刺激を利用した解体性接着の実現

必要な時に何らかの外部刺激によって剥離を容易にすることができる接着を解体性接着と呼ぶが、リワークやリペア、部品のリユースやリサイクルなど、被着体材料の有効利用を可能とする。すなわち、接着時には十分な強度を保っているものの、特定の外部刺激を与えることで強度が下がるといった材料の開発が必要となる。例えば、接着力に優れており、かつ外部刺激応答性の高い反応性高分子を開発することなどが考えられる。

(エ) 半導体デバイスに関する接合・剥離技術の確立

例えばニューロモルフィックデバイスを3次元で積層することで100億のニューロンを実装したコグニティブ・コンピューティングの実現など究極の実装技術を実現するため、近年では常温接合技術が注目を集めている。常温接合は、真空中で材料の表面を清浄化・活性

化し、その表面同士を常温で重ね合わせる接合方法であり、表面活性化常温接合法（Surface Activated Bonding: SAB）とも呼ばれる。金属だけではなく、半導体、セラミックス、プラスチックなどの様々な材料へ適用可能である。既に液体窒素温度での表面活性化接合が可能となっているが、一方で、 SiO_2 のような非晶質材料の接合は不十分で課題として残されている。また、超高真空でのプロセスが必要であり、コスト上昇の要因となる。応用によっては超高真空を用いない、より簡便な接合手法の開発が求められている。

剥離は接合に比べ、分離のためのエネルギーが必要となり、より難しいプロセスになる。これまで水素イオンの高密度注入、その後の加温剥離を用いたスマートカット法、あるいは化合物半導体の成長時に溶液エッチングが可能な ALAs を挿入して剥離する Etching Lift Off (ELO) 法などが用いられてきた。しかしながら、剥離工程によるデバイスへのダメージや、化学的処理により、剥離に長時間を要するなどの課題がある。極めて薄い薄板状のデバイス作製やウェアラブルデバイスを目指した有機薄膜デバイス実現のためには、対象となる材料や実現しようとする応用デバイスに対応した、最適の剥離プロセスを追求することが必要である。

(2) 摩擦・摩耗

(ア) 接触界面における現象理解と実用機器への展開

機械機器のエネルギー損失や故障の支配要因の一つとして摩擦・摩耗現象がある。この現象は材料の機械的特性や表面形状などの材料特性だけではなく、荷重やすべり速度といった力学的要因、温度や湿度などの環境要因、化学反応、帯電などの電気的作用、摩擦熱などの熱的作用など複数の要因が絡み合った複雑かつ動的な現象である。これを理解するためには、ナノ・マイクロスケールでの実際の接触界面（真実接触界面）で起きている現象（物理的、化学的、電気的、熱的相互作用）を把握することが重要である。さらに得られた知見がマクロスケールでの界面現象とどう繋がっているかを解明し、それらを工学的に実用機器へ展開する必要がある。

(イ) 「なじみ」現象の物理的・化学的解明と低摩擦設計手法の確立

2つの物質が接したときに、摩擦や摩耗によって接触状態が改善される過程を「なじみ」現象と呼ぶ。従来、「なじみ」現象は摩耗による表面平滑化だと考えられてきたが、単なる形状変化だけではなく、自発的に低摩擦面を形成する化学反応が起きているということがごく最近わかってきた。また、理論計算上は接触面が原子レベルで平らになればゼロ摩擦が実現できるという示唆もあるが、実際に原子レベルで表面を平らにすることは不可能であり、理論計算と実際とのギャップを如何に埋めていくかが大きな課題である。接触面における原子・分子スケールの現象をモデル化し、それがマクロななじみ現象にどう繋がっているのか、低摩擦状態にどう寄与しているのかを詳細に解析する必要がある。

(3) 自己修復

材料内に生じる小さな損傷は、やがて材料にとって致命的な破壊につながる可能性があり、それを克服する機能として自己修復に注目が集まっている。材料の長寿命化や保守性の向上、環境適合性といった観点で、致命的破壊に至る前に損傷を自ら修復・治癒する自己修復材料開発が望まれる。自己修復の方法としては、材料中にあらかじめ修復エージェント

となる触媒などを埋め込み、損傷が生じると温度変化や外気に触れることで生じる反応物によって損傷を埋めるもの、水素結合や分子間力などの分子の動的、可逆な結合を利用して修復界面における分子結合の切断と再形成を行うものなどがある。例えば、動的結合を用いた高分子材料や犠牲結合を用いたゲルにおける自己修復に関しては、応力・ひずみ曲線を用いて自己修復していることは確認されているものの、実際に分子同士がどのように結合して自己修復を実現しているのかを直接観測するには至っておらず、新しい計測評価手法の開発が必要である。損傷界面における原子・分子の挙動を理解・制御することで、修復後の材料強度の回復や回復に要する時間・温度といった機能設計を明らかにすることができると期待される。加えて、自己修復力をどう定量的な指標で表すのかといった標準化も重要な課題となる。

自己修復機能が求められる用途として、例えば、一度使われると修理が著しく困難となる宇宙機器や原子炉機器などがある。ここでは強い放射線や大きな温度差への影響を明らかにすること、何らかの事象に対して瞬時に反応して迅速に修復すること、などが要求される。一方で、社会インフラ材料における自己修復においては反応速度を求められることは少ないが、極めて長期に及ぶ信頼性が求められる。また、室温程度の環境下でも修復反応を進めるための工夫が必要となる。

このように自己修復に対しては、自己修復のメカニズム解明に加えて、時間軸や反応速度についても用途に応じた研究開発を進めることが重要である。

3-2. 共通基礎基盤技術

(1) トランススケール力学の学理の構築

材料は一般にナノスケールからマクロスケールにわたる階層構造を持つ。ナノスケールにおける力学的現象は化学結合、分子間力など量子力学による理解が進んでいる。一方、マクロスケールにおける力学的現象は、連続体力学、熱力学による理解が進んでいる。現状では、ナノスケールとマクロスケールはそれぞれ異なる力学体系で記述され、それらの間はパラメータを介してつながられている。例えば、金属、無機材料のように比較的規則的な構造を持つ系で変形を考える場合、原子配列における格子欠陥、転位運動、転位間相互作用、単結晶変形挙動、多結晶変形挙動とそれぞれのスケールに対し、量子力学や分子動力学、転位動力学から得られるパラメータを用いて単結晶の応力ひずみ関係を記述し、さらにそこで得られたパラメータを用いて多結晶体としてマクロな挙動を有限要素法等により解析を行っている。

各スケールにおけるモデル化の段階で特性をパラメータに落とし込むことでスケール間をつなぐため、現象がブラックボックス化されている。例えば、高分子系においても、分子鎖の側鎖運動、主鎖運動、セグメント運動からマイクロ相分離、マクロ相分離構造のような階層構造を持つ。さらに結晶性のドメインと非晶性のドメインが混在するなど、複雑、かつ非平衡であるために組織構造の形成および力学挙動の学理が未成熟であるだけでなく、その制御理論も金属、無機材料と比べるとほとんど確立されていない。

また、物質に作用する力は変形のみではなく、同時に電子構造の変化、活性化エネルギーの変化を通じて電磁気、光、熱、化学反応といった機能にも変化を及ぼし、その逆も然りである。材料に加わる力と機能の関係をナノスケールとマクロスケールとで結び付けて理解す

るためには、各スケールでの力学的現象とともにスケール間に渡る現象を構造と結び付けて説明することが必要であり、それを記述するためのトランススケール力学体系の構築が不可欠である。そのためには、これまで取り扱いが困難であったナノスケールにおける非平衡・散逸・非定常状態も含めた複雑な現象メカニズムを解明し、そこで得られた結果を基にトランススケールによってマクロスケールの力学的現象の解明へと繋げていくことが大きな課題である。

(2) トランススケール力学シミュレーション技術の構築

スーパーコンピュータ「京」に代表されるハイパフォーマンスコンピューティングの性能向上により、マルチスケール・マルチフィジックスシミュレーション技術が向上しつつあるものの、依然として原子・分子レベルからメートルレベルまでの幅広い空間スケールを解析するマルチスケールシミュレーション技術の実現は困難である。

また、一般に材料の様々な機能と力学場（対象となる領域にどのような力が加わっているか）とをつなげる問題は非線形性が強く、時間依存の問題も存在するため、経験則に基づく予測は困難である。このため、その根本的解明には、第一原理的な電子、原子、分子レベルの動的解析による理解と、それをメートルレベルのマクロスケールへつなげるトランススケールなシミュレーション技術の確立が不可欠である。その際、材料の機能発現の時間スケールは、ナノスケールシミュレーションが対象とする時間スケール（通常はフェムト秒～ナノ秒）よりも遙かに長く、分・時間・年となることもあり、この時間スケールのギャップをどう埋めていくかも大きな課題である。

さらにトランススケール力学シミュレーションにおいては、初期状態としてどのようなモデルを設計するかが非常に重要な課題である。一般にシミュレーションを実行する際にはある特定の状況を仮想的に作った上でモデルを構築し、そのモデルに基づいて実際の系がどのように応答するのかを計算することになる。そのため、当然、同じシミュレーション手法を用いたとしても初期モデルが異なると結果も違ってくる。つまり、原理解明したい現象の中でキーとなるパラメータをどのように設定すべきか、どうやれば正しく解析できるモデルが構築できるのかについて検討することも重要な課題である。

(3) ナノ構造およびマクロ構造のオペランド計測評価技術の開発

材料特性が発現している最中の組織構造、特に原子・分子の高次構造の解明と、ナノスケールを中心に各スケールにおける力学場（対象となる領域にどのような力が働いているか）の把握、さらに化学反応の理解や力学特性の定量化に関する評価・分析が不可欠であるが、そのためのリアルタイムのオペランド計測を実施できる場所が一部の放射光設備に限られ、現状では不十分である。

高分子の高次構造解析は近年、放射光 X 線、中性子散乱技術による研究が進んでいる。表面や界面における分子の配向を評価するものとしては非線形光学効果を利用した振動分光法があり、光を利用していることから液体と固体の界面や固体中に埋もれた界面での評価も可能である。しかしながら通常の接着界面で想定されるような光の届かない界面には適用できないため、これを解決するための新たな計測手法の開発が必要である。ナノスケールでの力の測定では、原子間力顕微鏡（Atomic Force Microscope : AFM）を用いた方法や光ピンセット法と呼ばれるレーザ光による粒子の操作により 1 分子鎖にかかる力の測定が試みられ

ている例があるが、特殊環境下での計測であり、実環境下における材料内のありのままの挙動とは異なる。

このように、光の届かない界面で適用できる陽電子・中性子などの高エネルギー粒子による新たな計測手法の開発や、実動作下における材料の挙動をナノスケールで観測する計測評価技術の開発が必要である。

3-3. 新材料開発への展開

(1) 複合材料の高度化

CFRPをはじめとして複合材料の特長を最大限に活かす構造の設計技術の進化が必要である。未だ多くの場面で機械的特性が均一の金属材料の代替を前提とした構造設計がなされているが、例えば、CFRPでは部材内部で機械的特性の分布を変化させることができることが強みであり、その強みを十分に活かすことができる設計・成形技術を確立することが重要である。それによってさらなる軽量化、プロセスコストの削減が期待される。

また、複合材料においては破壊機構の解明も不十分であるため、結果的に部材として使用する際には板厚を増す、接着とボルト接合を併用するなど、軽量化を犠牲にして安全率を高くする構造を選択する場合が多い。それを克服するためには複合材料部材の寿命などの性能を評価する手法の開発が必要である。特に、複合材料のマトリックスとフィラー間の界面の解析・制御をはじめとするナノスケールでの現象解明とマクロな力学特性との関係性を明らかにすることが重要である。さらに経年劣化等の時間変化も含めた材料設計指針を構築することも必要である。

(2) 様々な力学特性に関連する研究シーズの創出

近年、化学分野で発見された発光性メカノクロミズム現象は、機械的刺激（こする、など）を印加することによって固体や液晶材料の発光特性を変えることができる現象であり、セキュリティインクや応力発光材料の候補として期待されている。また、これまで主に金属材料で研究が進められてきた超弾性現象がごく最近有機物においても発現することが発見され、新規形状記憶材料の開発への期待が高まっている。このような様々な研究シーズの応用開拓とその機能発現原理の解明を同時並行的に実施することも将来へ向けた力学特性制御による材料イノベーションの視点で重要な課題である。

4. 研究開発の推進方法および時間軸

4-1. 目標の共有

材料の力学特性をナノスケールからマクロスケールまでの一貫通貫で理解しようとする動きはこれまでは大々的には見られなかった。その理由としては、ミクロとマクロをつなぐための科学と技術が未熟・未発達であったこと、機械特性における原理解明に対してナノスケールに至るまでの理解を必要としなくても応用ニーズに応えられていたこと等が挙げられる。しかしながら、例えばパリ協定におけるCO₂排出量削減目標達成に向けた輸送機器軽量化へのニーズの増大、Society5.0が目指す社会の基盤技術として電子デバイスにおける3次元集積回路の接合/剥離技術への期待など、多様化する社会ニーズに対して、現在の信頼性を確保しつつ求められる機能を限界まで向上させ、かつ開発スピードも向上させなければ要求を満足させることが難しくなっている。

そのような背景の下、近年ではナノスケールとマクロスケールをつなぐトランススケール力学に基づく科学的・技術的手法や知識などが徐々に蓄積されつつある。加えて、力学特性をナノスケールにまで遡って理解することで試行錯誤の状況から脱却しようとする動きが活発化しつつあることから、本提言の研究開発を本格的に開始すべき時期にきていると言える。

本提言の研究開発を実行するにあたり、最も重要なことは研究開発によって何を実現するのかといった目標を、ナノスケール側とマクロスケール側の両者が共有することである。ナノスケールにおける原子・分子の力学挙動を明らかにしようとする研究者とマクロスケールにおける材料特性を理解しようとする研究者は基本的な研究の方向性や考え方が異なっているが、その現状を打破し、スケールに捕らわれずに材料特性の発現原理をトランススケール力学に基づいて統一的に理解し、科学的根拠に基づいた材料設計指針を得ることが重要である。そのためにも、関連する産学官の研究者・技術者・開発者が目標を共有することが不可欠である。

研究開発の目標としては、高機能・高性能な新規物質を開発することだけではなく、なぜその機能が発現しているのか、信頼性や耐久性がどれくらい担保されているのか、量産の可能性はあるのか、など、ナノ側の主張とマクロ側の主張がすれ違わないよう、常に意識合わせしながら進めていくための工夫が必要である。

4-2. 分野融合・産学連携を加速するための方策

本提言の研究開発を実施するためには、新しい研究コミュニティの形成・発展が重要であり、既存学問分野の垣根を越えた異分野融合・連携の実現が不可欠である。

具体的には、ナノスケールにおける原子・分子の挙動解明を起点として材料創成を志向する化学や物理学を中心とするボトムアップ的な研究分野と、機械工学・流体力学などの実材料におけるマクロスケールな機能特性をスケールダウンして原理解明を志向するトップダウン的な研究分野が、互いに目的を共有し同じ方向を向いて研究開発を行う場を設定することである。

従来、化学や物理学などのナノスケールでの機能特性の原理解明を主目的とする分野においては、ある性能についてのピーク値を重要視し、その発現メカニズムの解明を通して、さらにピーク値を向上させる方向に興味を偏りがちである。そこでは信頼性や耐久性、量産(スケールアップ)という要求項目が十分に考慮されないまま研究が進展する傾向にある。他方、機械工学や流体力学

学などのマクロスケールな機械特性を扱う学問分野においては、性能ピーク値の追求よりも、むしろどんな環境においてもある一定以上の性能を維持できるように信頼性や耐久性を最優先して機械設計を行うことが求められる。このように基本的な研究の方向性や考え方が異なるため、これらの分野をつなぐトランススケールな異分野連携・融合はほとんど進んでいなかった。

そのような状況を打破するためには、例えば以下に示す関連学術分野や学会、応用分野、産業界の研究者・技術者・開発者が集まって議論する場と、常に情報共有を可能にするネットワーク環境の構築が必要である。

【学術分野】

機械工学、流体力学、材料工学、熱工学、化学、物理学、量子科学、物質科学、光科学

【学協会】

日本機械学会、日本流体力学会、日本材料科学会、日本伝熱学会、日本金属学会、日本鉄鋼協会、日本化学会、日本物理学会、応用物理学会、高分子学会

【応用分野】

輸送機器、社会インフラ、エレクトロニクス（3次元集積回路、フレキシブル有機材料）、ロボティクス、ヘルスケア

【産業界】

化学メーカー、機械メーカー、自動車メーカー、半導体メーカー、計測機器メーカー

研究実施体制としては必ずナノスケールとマクロスケールの研究者の共同研究が含まれることを公募の条件にするなど、意図的に異分野融合・連携を促進する仕組みが必要である。また、学会レベルでは学会の枠を超えた共同研究会のような体制を構築し、様々な社会的課題に対して各分野において解決すべき課題の洗い出し、複数分野にまたがる共通課題の認識等について定期的に議論・意見交換する場を設定することが重要である。最初は言葉が通じなかったとしても継続して議論し続けることで分野特有の考え方の違いを相互理解し、協働すべき課題が見えてくるのではないかと考えられる。

4-3. 時間軸

3-2. に記載した3つの共通基礎基盤技術「トランススケール力学の学理構築」「トランススケール力学シミュレーション技術の構築」「ナノ構造およびマクロ構造のオペランド計測」は様々な応用技術領域に共通するボトルネック解消へと繋がるため、公的資金によって行われる段階にある。関連する機関としては、内閣府、文部科学省、経済産業省、JST、NEDO等が想定される。特に、これまでナノスケール、マクロスケールそれぞれの分野で蓄積・発展してきた科学的知見や材料創製技術を互いに共有し、相乗効果を発揮する形で発展させることが必須である。

したがって、まずは文部科学省やJSTによる公的資金によって5～10年程度の目的基礎研究を実施することが必要である。この間にナノスケールとマクロスケールの各分野の考え方を共有し、学際研究を加速させる。また、特に社会経済的インパクトのあるターゲットに関してはPOC（Proof of Concept）を目指したバックキャスト型の研究開発を同時進行で実施することも想定される。また研究途中で応用・実用化研究にスピニングアウトすべき研究開発成果が創出された際には経済産業省やNEDOに橋渡しするような柔軟な制度設計が有効である。

一方、応用技術領域の研究開発に関しては、現状においてそれぞれの研究開発フェーズが異なるため、研究開発を進める際の時間軸としては以下の3つに分類することが適切であると考えられる（それぞれのイメージを図4に示す）。

- ① ニーズプルの研究開発課題であり、既に学术界・産業界が参画するコンソーシアムが構築されている場合

例えば、「接着・接合」に関しては、既に産業技術総合研究所の接着・界面現象研究ラボを中心に、産学官連携のコンソーシアムが形成され、情報収集や共同研究提案、国際標準化などの取り組みが行われている。また2018年度よりJST未来社会創造推進事業大規模プロジェクト型「革新的接着技術」の公募が開始され、公的資金と産業界の資金を合わせたPOC（Proof of Concept）を目指した研究開発が実施されることから、上記のラボやコンソーシアムと連携しながら推進することが重要である。

- ② ニーズプルの研究開発課題であるが、主に学术界が中心となって研究開発が行われている場合

例えば、摩擦や摩耗を含むトライボロジーに関連する研究開発に対しては、過去に東北大学を中心に化学と機械工学の融合を図る研究開発プロジェクトが実施され（詳しくは付録2を参照のこと）、ある程度のトランススケールな異分野融合・連携体制の構築および目標の共有がなされていると考えられる。また、2018年度より「トライボロジー融合研究会」が発足し、これまで培われてきた学術的知見や技術をさらに発展させるとともに、得られた科学的根拠を機械機器の性能向上に結びつける情報共有の場になると期待される。上記研究会において産学連携の可能性について検討し、5～10年後に産学官連携のコンソーシアムを形成することも一つの方策であると考えられる。

- ③ シーズプッシュの研究開発課題であり、今後社会ニーズが明確化していくと考えられる場合

発光性メカノクロミズム、有機超弾性など、研究シーズはあるものの社会ニーズが未だ顕在化していない研究課題に関しては、共通基礎基盤技術とともに、5～8年程度の公的資金による研究プロジェクトによって実用化へ繋がる道筋を示し、産業界のニーズに応える研究成果が創出された際には速やかにNEDOや産業界へ橋渡しすべきである。

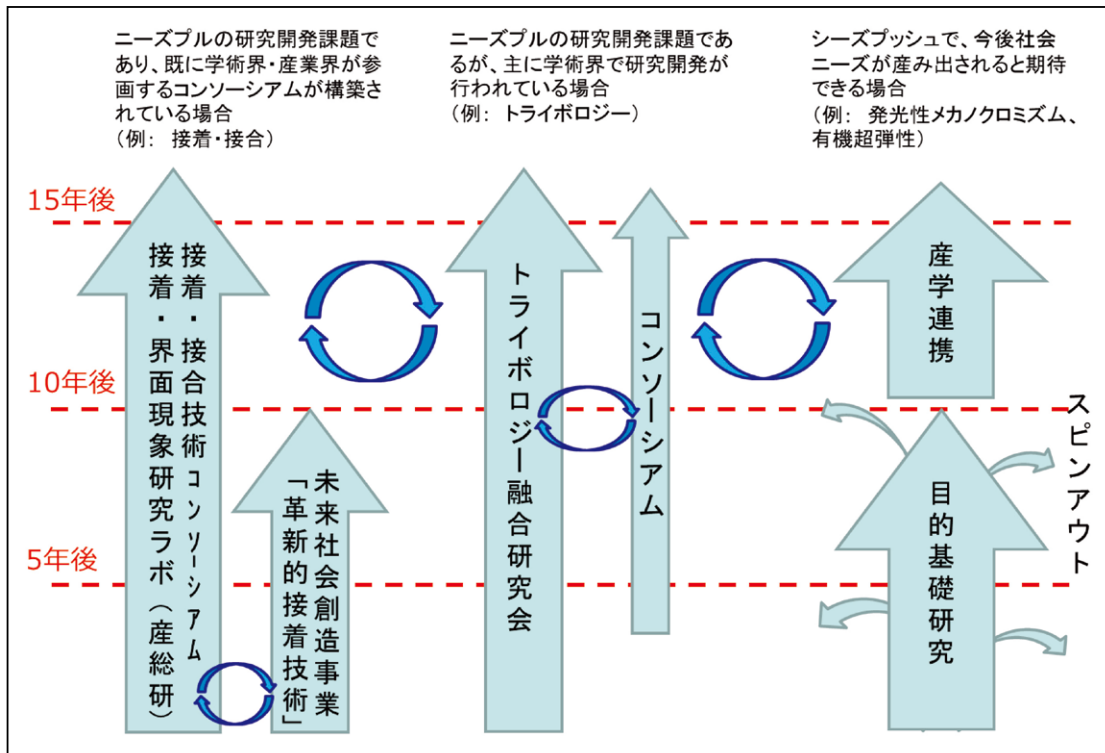


図 4 研究フェーズに応じた研究開発の時間軸イメージ

1 研究開発の内容

2 研究開発を実施する意義

3 具体的な研究開発課題

4 研究開発の推進方法および時間軸

付録

付録 1. 検討の経緯

- ・ JST 研究開発戦略センター（CRDS）では、平成 29 年度に戦略プロポーザルを作成すべきテーマの候補を CRDS 戦略スコープ 2017 策定委員会において指定し、平成 29 年 4 月に CRDS 内にプロポーザル作成のための検討チームを発足させた。その後、チームにおいて提言作成へ向けた調査・分析・検討を重ねた。
- ・ チームでは、調査によって国内外の研究開発動向・技術水準を明らかにしながらスコープの焦点を絞り、その過程において提言の方向性を検討するため、以下の有識者との意見交換・インタビューを実施した。
- ・ その上で、CRDS が構築した仮説を検証する目的で、科学技術未来戦略ワークショップを開催した（次々頁参照）。
- ・ CRDS では以上の調査・分析の結果と、ワークショップにおける議論等を踏まえてさらに提言内容について検討を重ね、平成 31 年 2 月に本戦略プロポーザルを発行するに至った。

■ 意見交換・インタビューを実施した識者

（所属・役職は実施時点）

氏名	所属・役職
足立 幸志	東北大学トライボベーストデザイン研究センター センター長／大学院工学研究科 教授
安藤 泰久	東京農工大学大学院工学研究院 教授
秋山 陽久	産業技術総合研究所機能化学研究部門 主任研究員
磯貝 明	東京大学大学院農学生命科学研究科生物材料科学専攻 教授
伊藤 耕三	東京大学大学院新領域創成科学研究科 教授／内閣府 革新的研究開発推進プログラム（ImPACT） プログラム・マネージャー
伊藤 肇	北海道大学大学院工学研究院有機プロセス工学部門 教授
猪熊 泰英	北海道大学工学研究院応用化学部門有機工業科学分野 准教授
大谷 伸二	リコー株式会社 APT 研究所材料技術開発センター 室長
大花 継頼	産業技術総合研究所製造技術研究部門 研究グループ長
大村 孝仁	物質・材料研究機構 構造材料研究拠点 副拠点長
尾方 成信	大阪大学大学院基礎工学研究科 教授
加藤 仁一郎	株式会社旭化成株式会社 上席理事／同社研究・開発本部 研究開発センター長
加藤 隆史	東京大学大学院工学系研究科 教授
川井 茂樹	物質・材料研究機構国際ナノアーキテクトニクス研究拠点 主幹研究員
河崎 雅行	日本製紙株式会社研究開発本部 CNF 研究所 所長
北川 宏	京都大学大学院理学研究科化学専攻 教授

北野 彰彦	東レ株式会社 常任理事・A&A センター所長
久保 百司	東北大学金属材料研究所 教授
龔 劍萍	北海道大学大学院先端生命科学研究院 教授
齊藤 尚平	京都大学大学院理学研究科 准教授
齋藤 平	トヨタ自動車株式会社基盤材料技術部 グループ長
佐藤 絵理子	大阪市立大学大学院工学研究科 准教授
佐藤 千明	東京工業大学科学技術創成研究院 准教授
佐藤 知哉	産業技術総合研究所構造材料研究部門 研究員
澤村 正也	北海道大学大学院理学研究院 教授
汐月 大志	トヨタ自動車株式会社 基盤材料技術部 主任
宍戸 厚	東京工業大学科学技術創成研究院 教授
須賀 唯知	東京大学大学院工学系研究科 教授
高見澤 聡	横浜市立大学大学院生命ナノシステム科学研究科 教授
竹村 誠洋	JST SIP「革新的構造材料」参事役
田中 敬二	九州大学大学院工学研究院 教授
塚本 建次	昭和電工株式会社 特別顧問
辻井 敬亘	京都大学化学研究所 教授
永井 希世文	リコー株式会社 CIP 開発本部 技師長
中尾 航	横浜国立大学大学院工学研究院 教授
原田 明	大阪大学理学研究科基礎理学プロジェクト研究センター 特任教授
一杉 太郎	東京工業大学物質理工学院応用化学系 教授
日向 秀樹	産業技術総合研究所構造材料研究部門セラミック組織制御グループ グループ長
古川 英光	山形大学大学院理工学研究科 教授
古川 裕一	昭和電工株式会社小山事業所技術統括部
穂積 篤	産業技術総合研究所構造材料研究部門 研究グループ長
三宅 晃司	産業技術総合研究所製造技術研究部門 グループ長
宮田 博之	宇部興産株式会社研究開発本部企画管理部 部長
矢野 浩之	京大生生存圏研究所生物機能材料分野 教授
吉江 尚子	東京大学生産技術研究所 教授

1 研究開発の内容

2 研究開発を実施する意義

3 具体的な研究開発課題

4 研究開発の推進方法および時間軸

付録

■ 科学技術未来戦略ワークショップ「メカノファンクショナルマテリアル」

開催日時：2017年12月21日（木）10：00～17：50

開催会場：国立研究開発法人科学技術振興機構 東京本部別館2階セミナー室

プログラム：

オーガナイザー 曾根 純一（JST-CRDS）
 ファシリテーター 清水 敏美（JST-CRDS、産総研）
 司会 宮下 哲（JST-CRDS）

10:00～10:05 開会挨拶 曾根 純一（JST-CRDS）

10:05～10:20 ワークショップ趣旨説明 宮下 哲（JST-CRDS）

先行施策の状況と将来展望、ニーズ

10:20～10:40 「ImPACT タフポリマーから見えてきた発展の方向性」
 伊藤 耕三（東大/JST）

10:40～11:00 「ソフトクリスタル力学特性の課題と方向性」
 伊藤 肇（北大）

11:00～11:20 「将来のモビリティと未来材料への期待」
 齋藤 平（トヨタ自動車）

11:20～11:40 「半導体実装で求められる材料機能」
 須賀 唯知（東大）

メカノファンクショナルマテリアルのトレンド・課題・将来展望

13:00～13:20 「高分子機能材料の精密制御と新機能付加の可能性」
 田中 敬二（九大）

13:20～13:40 「分子を使った機能接着と分子レベルでの力の理解」
 齊藤 尚平（京大）

13:40～14:00 「高分子材料開発と刺激応答の新しい方向性」
 佐藤 絵理子（大阪市大）

14:00～14:20 「非線形マルチスケール・マルチフィジック現象モデルからの材料設計」
 尾方 成信（大阪大）

14:20～14:40 「マルチスケールシミュレーションが拓く材料現象」
 久保 百司（東北大）

14:40～15:00 「物質材料トライボロジーのマルチスケール制御」
 足立 幸志（東北大）

15:10～15:30 「動的結合・自己修復性高分子の課題と可能性」
 吉江 尚子（東大）

15:30～15:50 「自己治癒セラミックス材料の最新研究動向と課題」
 中尾 航（横国大）

15:50～17:50 総合討論（ファシリテーター 清水 敏美）

論点1. 提言の骨子の妥当性

2. 取り組むべき研究開発課題と時間軸

3. ナノからマクロまでの相互に接続させる連携・融合の方策、産学連携の課題

4. 目標とするゴール、研究開発のアウトピットとアウトカム、・ビジョン

17:50～ 閉会挨拶 曾根 純一（JST-CRDS）

ワークショップ参加識者

(発表者)

- ・足立 幸志 東北大学トライボベーストデザイン研究センター センター長／大学院工学研究科 教授
- ・伊藤 耕三 東京大学大学院新領域創成科学研究科 教授／内閣府 革新的研究開発推進プログラム (ImPACT) プログラム・マネージャー
- ・伊藤 肇 北海道大学大学院工学研究院 教授
- ・尾方 成信 大阪大学大学院基礎工学研究科 教授
- ・久保 百司 東北大学金属材料研究所 教授
- ・齋藤 尚平 京都大学大学院理学研究科 准教授
- ・齋藤 平 トヨタ自動車株式会社 基盤材料技術部 グループ長
- ・佐藤 絵理子 大阪市立大学大学院工学研究科 准教授
- ・須賀 唯知 東京大学大学院工学研究科 教授
- ・田中 敬二 九州大学未来化学創造センター センター長／大学院工学研究院 教授
- ・中尾 航 横浜国立大学大学院工学研究院 教授
- ・吉江 尚子 東京大学生産技術研究所 教授

(コメンテーター)

- ・大村 孝仁 物質・材料研究機構 構造材料研究拠点 副拠点長
- ・加藤 仁一郎 旭化成株式会社 上席理事／研究・開発本部 研究開発センター長
- ・宍戸 厚 東京工業大学科学技術創成研究院 教授
- ・日向 秀樹 産業技術総合研究所 構造材料研究部門 研究グループ長
- ・古川 英光 山形大学大学院理工学研究科 教授／ライフ・3D プリンタ創成センター センター長
- ・古川 裕一 昭和電工株式会社 小山事業所 技術統括部
- ・宮田 博之 宇部興産株式会社 研究開発本部 企画管理部 部長

付録2. 国内外の状況

以下、本提言に関連する研究プロジェクトを中心に国内外の研究動向について記載する。

(1) 日本の状況

わが国においては、構造材料や有機材料、トライボロジー、接着・接合といった個別のテーマごとには産学連携を含む研究プロジェクトが遂行されているが、本提言の趣旨とするトランススケールという観点を前面に押し出した包括的な研究開発プロジェクトは未だ実施されていない。

内閣府

- ・革新的研究開発推進プログラム (ImPACT) 「しなやかタフポリマーの実現」(PM: 伊藤耕三、研究期間: 2014～2018年度) においては、自動車部品や輸送機器の性能を飛躍的に向上させるために、タフネス性・柔軟性・自己修復性という特徴を有し、かつ、従来の限界を超える薄膜化と強靱化を同時に達成する「しなやかタフポリマー」の実現を目指している。
- ・戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 「革新的構造材料」(PD: 岸輝雄・東京大学名誉教授、研究期間: 2014～2018年度) において、強く、軽く、熱に耐える革新的材料を開発し、航空機を始めとする輸送およびエネルギー産業での実機適用、エネルギー転換・利用効率向上を目指した研究開発が開始されている。

文部科学省

- ・東北発素材技術先導プロジェクト「超低摩擦技術領域」(研究代表者: 栗原和枝・東北大学教授、研究期間: 2012～2016年度) において、機械分野と材料分野の研究者、ならびに産業界の技術者が協働し、従来まで経験的であった摩擦低減技術に対して科学的なアプローチを駆使した技術開発を行い、摩擦低減技術の開発を加速することを目的に研究開発が行われた。
- ・大学発グリーンイノベーション創出事業「グリーン・ネットワーク・オブ・エクセレンス」(GRENE) 事業先進環境材料分野において、「グリーントライボ・イノベーション・ネットワーク」(研究代表者: 栗原和枝・東北大教授、研究期間: 2011～2015年度) において、超潤滑を発現する材料(コーティング及び潤滑油)を創製し、その摩擦メカニズムを物理・化学的に理解して最適化することにより、機械システムにおいてエネルギーを最大活用する「グリーントライボロジー技術(摩擦を大幅に低減できる表面界面構造制御技術)」の実現を目指した研究開発が実施された。
- ・科学研究費助成事業・新学術領域「ソフトクリスタル」(領域代表者: 加藤昌子・北海道大学・教授、研究期間: 2017～2021年度) において、蒸気にさらず、擦る、回すなどの極めて弱いマクロな刺激に応答して、発光や光学特性などの「目に見える」性質が変化する新奇物質群「ソフトクリスタル」の学理の確立と、これに基づく全く新しい機能性素材の開拓を目指して研究開発を実施している。

科学技術振興機構 (JST)

- ・戦略的創造研究推進事業 (CREST) 「エネルギー高効率利用のための相界面科学」研究領域 (研究総括: 花村克悟・東京工業大学教授、研究期間: 2011～2018年度)

における研究課題「超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」(研究代表者:足立幸志・東北大学教授、研究期間:2013～2018年度)、戦略的創造研究推進事業(ACCEL)における研究開発課題「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」(研究代表者:辻井敬亘・京都大学教授、プログラムマネージャー:松川公洋・JST ACCELプログラムマネージャー、研究期間:2015～2019年度)、先端的低炭素化技術開発(ALCA)実用技術化プロジェクト「省エネルギー社会に向けた革新的軽量材料の創製」領域(運営総括:原田幸明・物質・材料研究機構アドバイザー、研究期間:2010～2019年度)における研究課題「自己治癒機能を有する革新的セラミックスタービン材料の開発」(研究代表者:中尾航・横浜国立大学教授、研究期間:2012～2019年度)など、研究課題レベルでは本提言に含まれる研究内容に取り組んでいるものの、力学機能に立脚した研究プロジェクトは実施されていない。

新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)

- ・「革新的新構造材料等研究開発」(PL:岸輝雄・新構造材料技術研究組合理事長、研究期間:2014～2022年度)において、自動車、航空機、鉄道車両等の抜本的な軽量化に向けて、革新的なアルミニウム材、チタン材、マグネシウム材、鋼板、炭素繊維及び炭素繊維強化樹脂(CFRP)、これらの材料を適材適所に使うために必要な接合技術の開発等を目的として実施している。上記の内閣府SIP「革新的構造材料」と連携しつつ進めている。
- ・「超先端材料超高速開発基盤技術プロジェクト」(PL:村山宣光・産業技術総合研究所理事、研究期間:2016～2021年度)において、有機系機能材料を対象にマルチスケールシミュレーション等の計算科学を活用して、現在不足している材料の「構造」と「機能」を結びつけたデータ群を作り出し、マテリアルズインフォマティクスと融合することで革新的な機能性材料の創成・開発の加速化を目指して研究開発が実施されている。
- ・「次世代構造部材創製・加工技術開発」(PL:青木隆平・東京大学教授、研究期間:2015～2019年度)において、航空機の燃費改善によるエネルギー消費量とCO₂排出量の削減、整備性向上、安全性の向上ならびにわが国の部素材産業及び加工・製造産業の国際競争力の強化を目指して、複合材料及び軽金属材料等の関連技術開発を実施している。

上述の研究プロジェクトの他、例えば、2015年に産業技術総合研究所に設立された「接着・界面現象研究ラボ」(研究ラボ長:佐藤千明)においては、エレクトロニクスから航空機に至るまでの広範な工業製品に使用されている接着技術に対して、接着界面の分析、新規接着剤材料の開発、接着接合部の強度評価および信頼性評価、表面処理の開発、検査手法の開発などの重点的な研究を通して、次世代接着に必要とされる基盤技術に関してその基礎からアプリケーションにいたる幅広い分野を対象として、産学官の連携を図りつつ研究開発を進めている。2016年には、産学官の垣根を越えた連携構築の場として「接着接合技術コンソーシアム」が設立されている。

また、2018年5月には自動車のCO₂排出抑制や価値の多様化に向けて、動力伝達技術の産学連携の基礎研究による学のサイエンス進展・産学人材育成を通して、日本の産業力の底上げと持

統的な科学技術の発展に貢献することを目的として、国内の自動車関連企業 11 社で自動車用動力伝達技術研究組合 (Transmission Research Association for Mobility Innovation : TRAMI) が設立されている。

さらに化学分野においては、光で剥がせる接着液晶材料 (齊藤尚平・京都大学准教授)、超弾性を示す有機物質 (高見澤聡・横浜市立大学教授)、発光性メカノクロミズム物質 (伊藤肇・北海道大学教授、加藤隆史・東京大学教授)、超低摩擦ポリマーブラシ (辻井敬亘・京都大学教授)、高靱性ダブルネットワークゲル (グンチェンピン・北海道大学教授)、自己治癒セラミックス (中尾航・横浜国立大学教授)、AFM による超精密機械特性測定 (川井茂樹・物質材料研究機構主任研究員)、撥水性・光浸透性・柔軟性を備えたエアロゲル (依田智・産業技術総合研究所研究グループ長)、暗室下での異常可塑性を示す無機半導体 (松永克志・名古屋大学教授) など、力学特性に関連する多数の新技术・新物質が生まれている。

このようにわが国においては、構造材料、機能性材料、摩擦や接着などの機能に特化した研究開発プロジェクトや研究実施体制は既にあるものの、それらに横串を刺すような横断的なプロジェクトは存在しない。第 3 章に記載した 3 つの共通基礎基盤技術を核にして、トランススケールな研究領域を世界に先駆けて構築することが、現状の日本の材料研究の強みを将来にわたって持続していくためにも必要である。

(2) 諸外国の状況

米国

- ・材料科学会 (Materials Research Society : MRS) においては、「Stimuli Responsive Organic and Inorganic Nanomaterials for Biomedical Applications and Biosafety」「materials under Mechanical Extreme」「Size Effects and Small-Scale Mechanical Behavior of Materials」「Shear Transformation Mechanisms and their Effect on Mechanical Behavior of Crystalline Materials」など、複数の関連セッションはあるものの、力学特性やマクロな機械刺激によって機能発現する新規材料開発をトランススケールな考えに基づいて統一的に理解しよとする研究開発は未着手である。
- ・デラウェア大学複合材料センターでは、各種成形技術および材料設計技術、生産ライン最適化技術の開発を進めている。「材料・合成 (materials and synthesis)」「機械・デザイン (mechanics and design)」「多機能材料 (multifunctional materials)」「性能 (performance)」「プロセス科学 (processing science)」「センシング・制御 (sensing and control)」の 6 つの研究領域に分け、学際的な研究・教育、技術移転を中心として、国際的な活動を行っている。コンソーシアムも形成され、日本企業も参画している。
- ・エジソン溶接研究所においては、金属-CFRP の接着・接合技術を中心に研究開発が行われている。

欧州

- ・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 (Institute for Manufacturing Technology and Advanced Materials: IFAM) は「成形と機能的材料」および「接着接合技術と表面」の 2 つの研究部門から構成され、素材成形、表面改質、接着接合等の応用研究技術をコア分野として、欧州における自動車、航空機、鉄道等

における産業分野の研究開発に貢献している。

- ・ 英国では、航空機宇宙産業に有用な複合材料の研究開発を積極的に進めており、CATAPULT プログラムの一環として、ブリストル大学を中心に国立複合材料センター（National Composite Centre : NCC）を設立し、産学官コンソーシアムを形成している。
- ・ 欧州 Horizon2020 の枠組の中で「Self-healing geological construction materials and structures : GEOHEAL」プロジェクトが進行しており、主にコンクリートなどの構造材料に対して、自己修復のメカニズム解明およびそれを誘発する方法を特定・評価することを目的としている。

中国

- ・ 2017年7月、中国における炭素繊維複合材料製品のリーディングカンパニーである中国恒瑞有限会社（Hengri Corporation）は、常熟国家ハイテク技術産業開発区との合意の下、ドイツ・フラウンホーファー化学技術研究所（Institute for Chemical Technology : ICT）と共同で先進的複合材料技術センター（Advanced Composite Technology Center）を設立した。欧州における成熟した炭素繊維複合材料の研究開発の成果と技術をシステムチックに中国に導入し、中国内の複合材料の研究および応用レベルを引き上げることを目的としている。
- ・ 中国科学院力学研究所の非線形力学国家重点実験室、精華大学航天航空学院の計算動力学研究室、および同大学機械工学部のトランススケール（跨尺度）材料計算センターでは、まだ研究室レベルではあるものの、非平衡問題や力学特性に関してトランススケールな考えに基づいたシミュレーション技術開発が進められている。中国政府としては未だトランススケール力学制御という大きな枠組の研究資金投資を開始しているわけでないものの、アカデミアでは本分野の重要性が認識され研究コミュニティが形成されつつある。中国における製造業振興長期プランである「中国製造 2025」でも、先進材料や航空機関連領域が重点分野に含まれていることから、本分野の動向を注視しておく必要がある。

付録3. 専門用語説明

持続可能社会

地球環境や自然環境が適切に保全され、将来の世代が必要とするものを損なうことなく、現在の世代の要求を満たすような開発が行われている社会。2015年の国連総会で採択された「持続可能な開発目標 Sustainable Development Goals: SDGs」は貧困や格差をなくし、持続可能な社会を実現するために2030年までに世界が取り組む行動計画となっている。

Society 5.0

サイバー空間（仮想空間）とフィジカル空間（現実空間）を高度に融合させたシステムにより、経済発展と社会的課題の解決を両立する、人間中心の社会。狩猟社会、農耕社会、工業社会、情報社会に続く、新たな社会を意味し、第5期科学技術基本計画においてわが国が目指すべき未来社会の姿として初めて提唱された。

マルチマテリアル化

特性が異なる金属や材料などを組み合わせ併用すること。主に自動車や航空機などで、従来は単一の鋼材が用いられていた部分に、鉄・アルミニウム・チタン・炭素繊維強化プラスチック（CFRP）などの複数の材料を併用することで軽量化や高強度化を実現する手法である。

マルチスケール・マルチフィジックスシミュレーション

超高速・大容量計算機環境と精緻なモデル化・統合化によって、複数の現象が相互に影響しあうマルチスケール・マルチフィジックス現象を高精度に解析するシミュレーション手法。支配因子が未知あるいは不確定性を含む現象やスケールが極度に異なる現象を原理的に理解することを目的とする。

オペランド計測

実使用環境下で材料やデバイスの各種計測を行うことであり、刻々と変化し続ける現象を直接観測することによって機能との相関を見出すことを目的としている。オペランド計測によって、より小さいものをより短い時間スケールで観測することによって、動作中の現象を正確に計測することが可能となる。なお、「オペランド (Operando)」という言葉は、ラテン語で「working」「operating」を意味し、2002年頃に触媒研究の分野で使われ始めた言葉とされている。

パリ協定

2015年にパリで開催された第21回気候変動枠組条約締約国会議（COP21）において採択された気候変動抑制に関する多国間の国際的な協定（合意）。1997年に採択された京都議定書以来、18年ぶりとなる気候変動に関する国際的枠組であり、気候変動枠組条約に加盟する196カ国全てが参加する世界初の枠組みである。

なじみ現象

接触する面がこすり合わされていくにつれて接触面が平滑化され、摩擦が小さくなっていく現象。

■戦略プロポーザル作成メンバー■

曾根 純一	上席フェロー	(ナノテクノロジー・材料ユニット)
宮下 哲	フェロー・リーダー	(ナノテクノロジー・材料ユニット)
伊藤 哲也	フェロー	(ナノテクノロジー・材料ユニット) ~平成 30 年 3 月
	調査役	(イノベーション拠点推進部) 平成 30 年 4 月~
大平 竜也	フェロー	(環境・エネルギーユニット)
小名木伸昭	フェロー	(ナノテクノロジー・材料ユニット)
佐藤 勝昭	フェロー	(ナノテクノロジー・材料ユニット) ~平成 30 年 3 月
	特任フェロー	(ナノテクノロジー・材料ユニット) 平成 30 年 4 月~
永野 智己	フェロー	(ナノテクノロジー・材料ユニット)
前野 仁典	主任調査員	(戦略研究推進部) ~平成 30 年 12 月

※お問い合わせ等は下記ユニットまでお願いします。

CRDS-FY2018-SP-05

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

~マクロな力学現象へのナノスケールからのアプローチ~

STRATEGIC PROPOSAL

Materials Innovation by Trans-scale Mechanical Control

- Exploration of Macroscale Mechanofunctions through Understanding

Nanoscale Dynamics -

平成 31 年 2 月 February 2019

ISBN 978-4-88890-618-0

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

ナノテクノロジー・材料ユニット

Nanotechnology/Materials Unit,

Center for Research and Development Strategy, Japan Science and Technology Agency

〒102-0076 東京都千代田区五番町 7 番地

電話 03-5214-7481

ファックス 03-5214-7385

<http://www.jst.go.jp/crds/index.html>

© 2018 JST/CRDS

許可無く複写／複製することを禁じます。

引用を行う際は、必ず出典を記述願います。

No part of this publication may be reproduced, copied, transmitted or translated without written permission.
Application should be sent to crds@jst.go.jp. Any quotations must be appropriately acknowledged.