

研究領域「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」中間評価（課題評価）結果

1. 研究領域の概要

本研究領域は、材料技術の発展により、持続可能で新たな産業が創出される社会の実現に資するため、物質の内部や界面で生じる原子・分子の運動、微細組織の構造変化や化学変化等のナノスケール動的挙動を解析・評価する技術を発展させ、マクロスケールの力学特性を決定している支配因子を見出し、その作用機構の解明を行うとともに、新たな力学特性を有する革新的力学機能材料の設計指針を創出することを目指します。

具体的な研究分野としては、金属材料、無機材料、有機材料、およびそれらの複合材料などの各種材料において、マクロな力学特性とナノスケール動的挙動の相関に基づき、接着・摩擦・摩耗・劣化・破壊等の作用機構や新たな力学特性について解明することに加え、そのために必要なナノスケールの動的挙動や化学変化等を可視化するためのその場計測・マルチシミュレーション技術等の開発なども対象とします。

これら各種研究分野の複合的な連携や、金属材料、無機材料、有機材料、複合材料などの各種材料で得られた知見を融合することによって、これまで未解明であった各種材料における力学特性発現機構の解明や特定の材料に依存しない共通的な学理を構築するとともに、トレードオフ関係にある力学特性を両立する材料や新たな力学機能をもつ材料の設計指針の創出に取り組みます。

2. 中間評価の概要

2-1. 評価の目的、方法、評価項目及び基準

戦略的創造研究推進事業・CRESTにおける中間評価の目的、方法、評価項目及び基準に沿って実施した。

2-2. 評価対象研究代表者及び研究課題

2019年度採択研究課題

- (1) 大塚 英幸（東京工業大学物質理工学院 教授）
動的共有結合化学に基づく力学多機能高分子材料の創出
- (2) 酒井 崇匡（東京大学大学院工学系研究科 教授）
ゲルのロバスト強靱化機構の解明と人工腱・靱帯の開発
- (3) 陣内 浩司（東北大学多元物質科学研究所 教授）
原子分解能観察によるソフト/ハード界面の接着・破壊機構の解明
- (4) 辻 伸泰（京都大学大学院工学研究科 教授）
異種変形モードの核生成制御による高強度・高延性金属の実現
- (5) 戸田 裕之（九州大学大学院工学研究院 教授）
ナノ～マクロを繋ぐトモグラフィ：界面の半自発的剥離
- (6) 吉田 英弘（東京大学大学院工学系研究科 教授）
セラミックス粒界・界面における強電界ナノダイナミクス

2-3. 中間評価会の実施時期

2022年11月19日（土曜日）

2-4. 評価者

研究総括

伊藤 耕三	東京大学大学院新領域創成科学研究科 教授
領域アドバイザー	
岡崎 進	東京大学大学院新領域創成科学研究科 特任教授
川田 達也	東北大学大学院環境科学研究科 教授
河村 能人	熊本大学先進マグネシウム国際研究センター センター長
北村 隆行	京都大学 理事・副学長
栗原 和枝	東北大学 未来科学技術共同研究センター 教授
グン 剣萍	北海道大学大学院先端生命科学研究院 教授
目 義雄	物質・材料研究機構グローバル中核部門 参事役
高原 淳	九州大学ネガティブエミッションテクノロジー研究センター 特任教授
竹内 久雄	東京大学大学院工学系研究科 特任教授
錦織 貞郎	(株) IHI技術開発本部 技師長
御手洗 容子	東京大学大学院新領域創成科学研究科 教授

外部評価者

該当なし

研究課題別中間評価結果

1. 研究課題名： 動的共有結合化学に基づく力学多機能高分子材料の創出
2. 研究代表者： 大塚 英幸（東京工業大学物質理工学院 教授）
3. 中間評価結果

ナノスケールの動的共有結合化学を基盤として、複数のマクロな力学機能を示す多機能高分子材料の創出を目的として研究開発を進めている。代表的な研究成果としては、力学的刺激を光学的応答に変換するメカノクロミズム特性と、高分子鎖間の架橋反応に基づく高強度化を同時に実現する力学多機能高分子材料を開発したことが挙げられる。また、蛍光性の力学機能分子を結晶性高分子の分子鎖内に導入することで、蛍光顕微鏡観察による高分子結晶化を可視化するなど、順調な進捗が見られる。分子設計も含めた計算科学、合成、成形加工の密接なチーム内連携が成果につながっている。

今後の課題として基礎研究という観点では、より一層学問的深化を加速するために高分子構造・物性などの高分子物理の研究者との連携が重要と考えられる。また、本研究で合成された様々なメカノフォアの力学特性と光物性の相関を定量化し、高分子材料の破壊や劣化の定量的な評価に応用するなど、「多機能」の中から特に将来イノベーションが期待される機能に絞り込み集中することも検討してほしい。さらに、未開拓分野と思われるガラス状高分子並みの弾性率と強度を有する高分子材料への動的共有結合化学の展開にも期待している。

研究課題別中間評価結果

1. 研究課題名： ゲルのロバスト強靱化機構の解明と人工腱・靱帯の開発

2. 研究代表者： 酒井 崇匡（東京大学大学院工学系研究科 教授）

3. 中間評価結果

腱や靱帯のように絶え間なく衝撃が加わる過酷な環境下においても常に一定の力学応答を示し（力学的ロバスト性）、かつ高い生体親和性を有する新規ハイドロゲル材料の開発を目的として研究開発を進めている。代表的な研究成果としては、「ゲルにおける負の弾性エネルギーの発見」、「ゲルにおける伸長誘起結晶化の発見と様々な強靱化ゲルの創出」、「DNA 二重らせん構造で架橋された新規ハイドロゲルの合成」などが挙げられる。この中には従来のゲルについての教科書を書き換える成果が含まれており、全体として順調に進捗している。またチーム内の若手研究者の活躍が特に顕著に見られる。

今後の課題として、人工靱帯という高い目標設定に関しては、生体中での力学物性の自在制御、材料の強度増強、疲労予測、長期安定性、生体への固定法確立などが必要となるので、残りの研究期間内で解決すべき課題を整理し、研究開発を集中・加速することが重要である。将来の臨床応用を目指し、シミュレーションや合成グループとの連携もより一層強化し発展させながら研究開発を推進することを期待する。

研究課題別中間評価結果

1. 研究課題名： 原子分解能観察によるソフト/ハード界面の接着・破壊機構の解明

2. 研究代表者： 陣内 浩司（東北大学多元物質科学研究所 教授）

3. 中間評価結果

最先端電子顕微鏡法による計測と理論計算を有機的に組み合わせ、高分子/無機界面について化学接着と物理接着の機構を独立して検討し、接着・剥離現象の起源を包括的に理解することを目的として研究開発を進めている。代表的な研究成果としては、化学接着機構のみに焦点を絞るため、超平滑なエポキシ/シリコン基板の界面に集中して研究開発に取り組んだ結果、基板の表面状態が接着強度に与える影響を原子・分子レベルで明らかにし、異種界面の化学接着について分子レベルでの描像を提案した点が挙げられる。また、計測と計算の融合により計画どおりに順調に進捗している。

今後の課題として、接合界面の化学的解析に加えて物理接着に影響を及ぼす形状の効果についても検討する計画であるが、あまり複雑な系に進むと研究チームのポテンシャルを十分に生かせない懸念もある。表面の形状については応力分布も十分に考慮した適切なモデル系を設定する必要がある。また STEM-EELS 法による界面の原子レベルの化学解析に成功しているので、化学接着機構の解明を他の超平滑な高分子/無機界面へ展開することも継続して検討してほしい。異種界面の接着は基礎と応用の両面で重要な分野であることから、化学接着と物理接着を明確に切り分けた接着機構の総合的な解明を通じて、接着の学理構築と科学技術イノベーションへの貢献を期待している。

研究課題別中間評価結果

1. 研究課題名： 異種変形モードの核生成制御による高強度・高延性金属の実現

2. 研究代表者： 辻 伸泰（京都大学大学院工学研究科 教授）

3. 中間評価結果

バルクナノメタルに代表されるナノ・マイクロ組織を高度に制御した金属材料において、特に鉄鋼材料を中心に、変形モードの新たな核生成機構と、その結果生じる加工硬化の再生機構を通じて、高強度と高延性を両立した構造材料の創製を目的として研究開発を進めている。代表的な成果としては、「TWIP鋼における粒界からの変形双晶の核生成機構と加工硬化向上機構の解明」、「DP鋼、TRIP鋼などの優れた加工硬化能に及ぼす硬質相と軟質相の力学的相互作用の解明」、「異種変形モードの順次核形成による超高強度・高延性合金の発見」などが挙げられる。引張変形中の電子顕微鏡観察や構造解析、シミュレーションの密接な連携により、チーム全体として計画通り順調に進捗している。

今後の課題としては、高い目標でもある「伸長下で異なる変形モードが逐次核形成する材料」の実現に向けて、当該基礎研究で解明された加工硬化機構の理解を深化させ有効利用することが必要と考えられる。一部その端緒は見えてきているが、まだ十分とは言い難い。次世代構造用金属材料は、高強度化とともに高延性化、高靱性化がますます強く求められることから、本研究の成果によって次世代構造材料についての基礎的な設計指針が得られることを期待している。

研究課題別中間評価結果

1. 研究課題名： ナノ～マクロを繋ぐトモグラフィー：界面の半自発的剥離

2. 研究代表者： 戸田 裕之（九州大学大学院工学研究院 教授）

3. 中間評価結果

本研究では、当初の目標を「アルミニウムの非整合界面における自発的界面剥離によるマクロ物性の制御」においていたが、その効果が想定されるほど顕著ではないことが放射光などを用いた実験と理論計算の検討により明らかになった。そのため、研究対象を粒子内部への水素吸蔵効果にも広げ、アルミニウムの水素脆化の問題を界面とバルクの両面から精力的に取り組んだ結果、アルミニウムの水素脆化を防止できる、水素トラップエネルギーの大きな粒子を発見した。研究計画は一部見直しがあったものの、前倒しで目標を達成したテーマも見られ、全体として順調に進捗している。柔軟な研究体制の見直しや産業界とのネットワークを形成しながら研究開発を進めている。

今後の課題としては、水素脆化の学術的理解と抑止の指導原理の確立を目指し、使用される環境での長期耐久性も考慮に入れた合金設計指針を提示できるよう、得られた成果を学理へとさらに深化させることが重要である。特に近年、水素エネルギーの重要性が増す中で、アルミニウムにおける水素脆化機構の解明は、構造物の信頼性向上、長寿命化の観点から極めて重要な研究課題であることから、超高強度/耐水素脆性アルミニウム合金の開発を目指した今後の研究成果を期待する。

研究課題別中間評価結果

1. 研究課題名： セラミックス粒界・界面における強電界ナノダイナミクス

2. 研究代表者： 吉田 英弘（東京大学大学院工学系研究科 教授）

3. 中間評価結果

セラミックスを対象として、粒界・界面といったナノスケール局所領域における高温強電界下での動的挙動・力学応答を強電界ナノダイナミクスととらえ、強電界下での異常な力学挙動の起源解明を目的として研究開発を進めている。主な成果としては、「強電界室温下での ZrO_2 における室温擬弾性の発現および高温塑性変形能の大幅な向上」、「強電界印加による酸素空孔導入」、「強電界を用いたセラミック部材の低温高速亀裂修復および接合」などが挙げられる。これらの成果は、セラミックの劇的な加工性向上やセラミック部材のメンテナンスおよび信頼性の向上に繋がることから、セラミック材料の作製・利用時における CO_2 削減にきわめて重要であり、新産業創出や科学技術イノベーションへの展開が期待される。

今後の課題としては、当初の目標にもなっている、セラミックにおける強電界効果のマルチスケールでの包括的な機構解明が挙げられる。そのためには、シミュレーションも含めた理論計算が重要であるが、その際に何らかの仮説あるいはモデルの提示が必要と考えられる。研究対象となっている現象は国際的にもユニークで基礎と応用の両面で革新性が見られることから、今後の展開を期待している。