

研究領域「力学機能のナノエンジニアリング」事後評価（課題評価）結果

1. 研究領域の概要

本研究領域では、超スマート社会や持続可能で豊かな社会を実現するための基幹技術である材料開発をターゲットとして、材料の基本物性である力学特性の発現機構をナノスケールから理解することや、ナノスケールの変形や構造変化に由来する力学特性を利用した新たな材料機能を創出すること（ナノエンジニアリング）によって、発展性の高い材料設計指針を獲得することを目指します。

具体的には、各種材料（金属材料、無機材料、有機材料など）において、強度特性等を決定している支配因子やそのメカニズムについてのナノスケールからの解明と、それに基づく機能創出を進めます。また、同スケールにおける力学特性を主とした他の物理特性（熱物性、磁性、導電性など）との相関性に着目した新奇な機能創出も対象に含めます。これらの目的の達成のため、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等を発展させ、ナノ材料からマクロ材料の共通基盤であるナノスケールの力学学理の展開と多様な特性解明への解析評価技術の確立を推進します。さらに、基礎研究の結実として、材料の高機能化や新機能創出につながる材料設計指針を獲得することを目指します。

物理学や化学等のナノスケールの現象への理解に特長がある研究分野と機械工学や材料工学等の機能の発現機構や構造の理解に特長がある研究分野の融合を通じて、異種材料間の相違点や共通点を見出すことでナノ材料力学に関する普遍的な学理構築や新分野の開拓に貢献します。

2. 事後評価の概要

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(先端的低炭素化開発を除く。)の実施に関する規則」における「第4章 事業の評価」の規定内容に沿って実施した。

2-2. 評価対象個人研究者及び研究課題

2020年度採択研究課題

- (1) 市川 裕士（東北大学大学院工学研究科 准教授）
固相粒子接合界面のナノメカノケミストリー
- (2) 伊藤 伸太郎（名古屋大学大学院工学研究科 准教授）
界面相互作用計測による高分子境界膜の潤滑機構解明
- (3) 菊池 将一（静岡大学工学部 准教授）
周期マイクロ強度勾配制御による多機能材料設計
- (4) 木村 康裕（名古屋大学大学院工学研究科 助教）
電子流による原子拡散に基づくナノワイヤ結晶性デザイン
- (5) 塩澤 大輝（神戸大学大学院工学研究科 准教授）
接着接合ナノ構造の非破壊力学強度解析技術の確立
- (6) 柴田 暁伸（物質・材料研究機構構造材料研究拠点 上席グループリーダー）
高強度鋼における水素脆性クラック伝播挙動のマルチスケール解析
- (7) 高橋 航圭（北海道大学大学院工学研究院 准教授）
ナノ界面の疲労損傷検出と抑制による複合材料の超長寿命化技術
- (8) 中島 祐（北海道大学大学院先端生命科学研究院 准教授）
未踏高分子材料群「極限伸長網目」の学理構築
- (9) 中田 伸生（東京工業大学物質理工学院 教授）
ナノスケール内部応力制御による鉄鋼強靱化

(10) 楽 優鳳 (産業技術総合研究所電子光基礎技術研究部門 主任研究員)
層構造を持つソフトマテリアルの力学特性と革新的機能創出

2-3. 事後評価の実施時期

2024年2月 各研究者からの研究報告書に基づき研究総括による事後評価

2-4. 評価者

研究総括

北村 隆行 京都大学 総長特別補佐

領域アドバイザー

荒井 政大 名古屋大学大学院工学研究科 教授

幾原 雄一 東京大学大学院工学系研究科 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

岩崎 富生 (株)日立製作所研究開発グループ 主管研究員

加藤 仁一郎 AJS (株) デジタルイノベーション事業部 理事・事業部長

栗村 隆之 三菱重工業 (株) 総合研究所 主席研究員

志澤 一之 慶応義塾大学理工学部 教授

澁谷 陽二 大阪大学大学院工学研究科 教授

田中 勝久 京都大学大学院工学研究科 教授

津崎 兼彰 物質・材料研究機構 フェロー

西脇 眞二 京都大学大学院工学研究科 教授

平山 朋子 京都大学大学院工学研究科 教授

吉江 尚子 東京大学生産技術研究所 教授

外部評価者

該当なし

3. 総括総評

本領域の特徴

優れた機能や潜在力を有する個別の材料については、従来から深い研究がなされてきている。一方、力学は強度特性を軸として、異なる材料に共通する法則を探求する指向性を有している。また、力学が深く関与する現象は多岐にわたり、そこに用いられる材料の機能は複雑なメカニズムの下に発現している。本領域の特徴は、力学を横断的学術基盤として材料機能をナノスケールから理解して、力学特性を中心とする新たな材料設計指針を研究しようとするところにある。

本領域では異なる分野の研究者が参加することから、「一步外へ」を合言葉に、自分の専門領域外の材料特性やその力学概念および実験・解析技術に関心を持ち、他研究者の考え方を知って知識を広めながら、自己の研究課題の基礎をしっかりと固めつつ発想豊かに実際の研究を進めることを、研究者育成方針とした。

採択課題の選考

2期生は、1期生の研究課題の分布を考慮して、複雑現象へのチャレンジに重点を置くことにした。多くの応募から採択した中には、近年の観察・計測設備の急速な発展による精密実験技術や独自デバイス技術を背景とした優れた提案も含まれていた。選考は、「研究領域の概要」で期している目標について、研究内容の独創性や挑戦度合、専門分野におけるベースとなる考え方や知識、ナノ材料力学領域の学術的発展への寄与度、などを総合的に考慮して決定した。

バーチャル研究所としての運営

2期生はコロナ禍での研究開始であったため、全体としての考え方の浸透やコミュニケーションに大きな困難があった。また、個々の研究者についても設備等の使用や研究運営に大きな支障があったことが報告されている。遠隔会議システムの利用を含めて、できる限りの対策は行った。(1) 領域会議を地区ごとに人数制限を設けてリアル(他の研究者はリモート参加)で行う、(2) サイトビジットは各研究者3回ずつ行い、個別の研究課題について集中的な議論を行う、(3) 徹底討論会(1人1時間講演1時間討論)をリモート開催して、出席者全員が必ず議論に参加する、(4) 壁に突き当たっている研究者への個別アドバイスを実施する、(5) 学会誌(日本材料学会)に各研究者のレビュー論文特集号を企画して研究の考え方を記述する、(6) 学会での特別セッションを通じての講演会の企画・実行、などの工夫をして、1期生とともに「一步外へ」の精神に基づいて研究進展をきめ細やかに支援するように心がけた。幸い2期生の最終年は通常の運営が可能になり、密な育成ができるようになった。

研究の成果

コロナ禍のために研究実行への支障を懸念したが、結果的には当初のねらいどおり優れた成果をあげた。個々の研究課題についての成果の詳細については、各研究課題の事後評価に示している。基礎的な知見を基に、実際的かつ具体的な材料設計方法の提示に至っているものもあり、産業界から多くの相談が寄せられている研究課題もある。複雑現象を対象とする場合には、現象やその微視メカニズム・メカニクスに対する観点を明確に持つことが大切である。初期段階においてこの点を繰り返し強調して、学術の視点からの果敢な挑戦によってその将来基盤を提示した研究課題がいくつもある。また、これらの考え方を領域研究者全員が共有できたことも大きな成果であり、将来の協働への基盤財産を形成することができた。なお、コロナ禍のために国際的な活動が制限されたことは、各研究者の発展を考えると、大きな痛手であった。

今後への期待

力学という固有の材料や特定の現象を越えた学術を横断的基盤とすることによって、自己の研究の殻を破ろうとする発想が生まれつつある。さきがけ研究者の間で材料を越えた自主的研究会が形成されており、新たなプロジェクト形成へ活動も生まれ始めている。また、CREST「ナノ力学」の若手研究者との研究会を開催して、分野発展の熱気を全員が感じることができた。CREST研究者との交流を通じて材料力学分野の発展および活性化を期待したい。

学会等におけるオーガナイズド・セッションや招待講演を通じて、本研究領域に寄せられる学術界や産業界からの強い期待を実感している。これに応えるべく、各研究者が本研究領域での経験を基盤として、他分野他技術への好奇心やコミュニケーション能力を発揮し、PIとしてナノ材料力学研究分野をリードすることによって学術発展および社会貢献に邁進することを望む。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 固相粒子接合界面のナノメカノケミストリー

2. 個人研究者名

市川 裕士（東北大学大学院工学研究科 准教授）

3. 事後評価結果

粒子の高速衝突による基材との固相接合で起こる接着過程を、力学および化学の観点から実験によって解明することを目的としている。特に、速度を制御した単粒子衝突実験を実施して、粒子金属および表面酸化層の変形破壊と接合挙動に関する微視的な詳細観察を行っている。これと合わせて、単粒子の高速圧縮実験によってその過程の詳細観察と分析に成功している。

アルミ単粒子の基材への高速衝突実験により、固相界面状態から適切な接着条件が狭い範囲に限定されることを発見している。また、その過程をエネルギー論的に解析できる可能性として示したことは、目指すナノメカノケミストリー研究分野の開拓として高く評価する。また、脆性的と考えられている微細な表面酸化層が高速変形においては延性的な変形挙動を示すことの実見は、固相接合に留まらず基礎的な知見として発展性が高い優れた成果である。インデンテーション法による実験と合わせた研究を高く評価する。

衝撃および準静的ナノインデンテーション実験による単粒子の高速変形・破壊実験観察によって、金属粒子の高速大塑性変形の様相、および、酸化層の破壊様相の詳細観察による機構の解明への基礎的な取組みは、ナノレベルの各過程の詳細を明らかにするものであり、有効性が高い。

今後の展開と期待

複雑な粒子の高速衝突による固相接合現象に関して、精緻な分析に基づいてその微視的詳細メカニズムおよびメカニクスを戦略的にアプローチしてきた研究進展はきわめて優れており、研究者としての今後の発展が大いに期待できる。特に、材料力学の基盤的観点に気づいて変形・破壊・接着を基礎から検討するための将来発展性を見出したことは、微粒子の高速衝突現象に関するメカノケミストリーとしての新分野を拓くことであり、工学的側面のみならず工業的な応用面での画期的な突破口となることを期待している。

また、ナノスケールの変形・破壊特性については未解明なことが多くあり、条件によって多くの発見や機能開拓が今後も期待できる。高速変形・破壊は、その一つの有効分野である。本来の力学分野に関する基礎的な研究発展性も高く、リーダーとしての今後の活躍を大いに期待している。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 界面相互作用計測による高分子境界膜の潤滑機構解明

2. 個人研究者名

伊藤 伸太郎 (名古屋大学大学院工学研究科 准教授)

3. 事後評価結果

固体表面に形成された高分子の吸着膜は、高い潤滑性をもつことが知られている。本研究は、高分子境界膜の力学物性を実験的に定量計測する方法を確立して、潤滑性との相関からその微視的メカニクスを明らかにすることを目的としている。さらに、X線や中性子線を用いた界面ナノ構造の観測法を確立することによって、潤滑過程の微視メカニズムの詳細を解明して、それに基づいた高分子境界膜の高機能材料設計へと展開することを意図している。

MPC ポリマーブラシ膜に対して、独自に開発した手法によって粘弾性応答を定量評価して、せん断隙間によって潤滑メカニズムが変化することを解明したことを、高く評価する。2つの領域において特に低摩擦であることを発見するとともに、ブラシ膜の柔軟性が効果を発するメカニズムと摩擦界面の水が潤滑性に寄与することを明らかにしている。

浮遊ポリマーとブラシ膜の相乗効果による水和潤滑性の向上を実証している。さらに、独自開発手法で力学計測を行うとともに、中性子反射率法等による界面構造計測によってそのメカニズムを明らかにしたことを、高く評価する。潤滑に関わる高分子の基礎的な知見として材料設計への発展が期待できる。

また、ポリマー添加による境界潤滑の向上に着目し、独自開発手法によって高分子添加潤滑油のナノ隙間での粘弾性を測定している。添加した浮遊ポリマーによってポリマー吸着膜が支配的であったナノ隙間において粘度が上昇することを実証し、さらにエントロピー弾性が発現することを解明したことを、評価する。

今後の展開と期待

独自に開発したナノレオロジー計測法の強みを活用してナノスケールの隙間領域の力学特性に成功して複雑な現象である高分子境界膜の潤滑に基礎的な進展を得ていることは、複雑現象に関する分析力とそれに基づく着想力に優れていることを明確に示しており、その将来発展を大いに期待している。特に、微視メカニズムやメカニクスの基礎学理の解明から実際的な材料設計までを考察する構想力があり、将来の発展が楽しみである。

今後の発展のためには、構造分析等への踏み出しのように、新しい方法や知識への積極的なアプローチを望んでいる。そして、複雑現象に対する材料機能設計に集約するためには高分子への深い知識など他分野の専門家との協働が大切となる。本研究を通じて他分野研究者とのコミュニケーションの経験を心得ており、それを活かしてスケールの大きな研究リーダーに成長することを期待している。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 周期マイクロ強度勾配制御による多機能材料設計

2. 個人研究者名

菊池 将一（静岡大学工学部 准教授）

3. 事後評価結果

大きな結晶粒群をネットワーク状の小さな結晶粒群で包む微視的強度分布によって、強度と延性のトレードオフを克服することができる。本研究はこの知見に基づいて、微視的強度分布の制御によって複雑な破壊過程を示す疲労における損傷抵抗性が格段に高い材料微視組織を開発することを目的としている。さらに、その微視的メカニズムとメカニクスを、切欠き試験片を用いた詳細な疲労過程の実験観察より明らかにするものである。

オーステナイト系ステンレス鋼や工業用純チタンについて、エネルギーボールミルによって粉末表面の結晶粒のみを微細化させた後、放電プラズマ焼結（SPS）することにより精密な結晶粒微視ネットワーク構造の制御に成功した。さらに、ハイエントロピー合金やチタンの窒化相による微視的強度分布の制御に成功したことを、評価する。

応力集中係数の異なる切欠き試験片における疲労限度の実験より、微視的ネットワーク組織の強度分布が疲労き裂発生抵抗を大きく改善することを見出すとともに、結晶粒の分布に踏み込んだ微視的力学解析によってその疲労き裂発生抵抗性の発現メカニズムを解明したことを、高く評価する。意図的な不均一微視組織の力学特性についての新たな可能性を見出しており、その観点は将来発展性が高い。

今後の発展と期待

材料組成と微視的幾何学要因を組み合わせ、複雑な強度現象に対する新規力学特性開発へチャレンジする発想力と実行力に優れている。特に、意図的に微視組織の均一性を崩すことによって、力学機能のみならず多様な特性を産み出す方向性は金属材料に限らず大きな潜在力を秘めている。発展を大いに期待している。

材料（ガラス、高分子、金属）を横断して不規則微視組織の研究グループを組織したことや、ナノ力学全体の学会活動を運営するなど、他者とのコミュニケーション能力に優れている。今後も横断分野を牽引する役割を担い、その研究分野が大きく発展することを望んでいる。

金属材料の疲労強度は長い歴史があるため解明されている部分も多い反面、微視力学的には不明点も数多く残されている。派手さはないが、基盤分野としての重要度は極めて高い。前者の知識を十分に活かして、長期レンジでの発展を支える支柱になることを期待している。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 電子流による原子拡散に基づくナノワイヤ結晶性デザイン

2. 個人研究者名

木村 康裕（名古屋大学大学院工学研究科 助教）

3. 事後評価結果

高密度電子流に起因する原子拡散（エレクトロマイグレーション）による新たな金属ナノワイヤ製法を開発するとともに、その形成微視メカニズムおよびメカニクスを解明することを目的としている。特に、下部組織である結晶構造の制御までを視野に入れた原子拡散に関する理論的考察を基にして、実験観察と数値シミュレーションによって総合的にアプローチするところに大きな特徴がある。

電場下で誘起される拡散によるナノワイヤの成長駆動力は、電位勾配、温度勾配、静水圧応力勾配、原子濃度勾配であり、電場・熱・応力場の連成した複雑な現象である。連続体力学に基づいたこれらの場の丁寧な解析の結果、原子拡散によるアルミニウムのワイヤー生成・成長過程を再現する方法を開発し、実験結果との比較からその微視メカニズムを明らかにしたことを、評価する。微小材料の作製加工法の基礎過程の一つとしての基盤である。

基盤となる多結晶太線から単結晶ワイヤー成長が開始する部分に選択性が大きいことに着目し、その詳細な成長初期の実験における下部組織観察に基づいて、太線内の粗大粒が成長開始に寄与していることを明らかにしている。また、その基盤の微視組織の電場負荷による変化を考察してワイヤー初期形成過程を解明したことを、高く評価する。さらに、この基礎的知見を敷衍して、アルミニウム薄膜表層に粒拡大処理を施して、従来に得られているものを大きく越えるナノワイヤの高密度生成に成功している。工業的発展性に新たな扉を開く大きな成果である。

今後の発展と期待

比較的制御の容易な電場を用いて一次元材料を大量生成する着想力に優れていたが、当初は基礎的解析に難があった。本研究開始後にその基礎理論の重要性を深く認識し、実験・解析ともに大きな進展が見られる。特に、実験手法について優れたセンスを有しており、基礎メカニズムおよびメカニクスに基づく解析による知見や予測を併用することによって大きな進捗があったので、他材料への拡張などを含めて、一層の発展を期待している。

学術的寄与とともに、本研究で得た発生密度に限らずナノ構造体の成長制御は工業的発展性を有している研究分野である。本研究の考え方は、ナノスケールの低次元の空洞内の金属埋め込みなどナノデバイス等への多様な潜在力を有している。原子拡散は対象部品が微小なほど形状・組織変化への影響は大きいことから、ナノ形状加工としての将来性を秘めている。微視組織制御とともに形状制御に関しても発展性があり、応用研究としての発展も大いに期待している。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 接着接合ナノ構造の非破壊力学強度解析技術の確立

2. 個人研究者名

塩澤 大輝（神戸大学大学院工学研究科 准教授）

3. 事後評価結果

接着高分子材料の疲労過程においては、局所に微細なき裂が発生し、それが成長して全体構造の破壊をもたらす。本研究は、微細なき裂発生メカニズムを明らかにするため、試験体表面全体の非破壊非接触計測が可能なテラヘルツ、赤外線、可視光を用いることによって、局所損傷を抽出してき裂発生場所や時期を予測する手法を開発するとともに、高分子材料における微小き裂発生過程の微視損傷メカニズムの解明を目的としている。

赤外線サーモグラフィ計測が本目的に適合していることを見出すとともに、接着材料（エポキシ樹脂接着剤）における疲労の進行に伴う熱弾性温度変化の試験体表面全域その場観察によって、局所における微細なき裂の発生および初期成長を応力増大部として検知できると示したことを評価する。

さらに、繰り返し負荷1サイクル中の温度変化を試験片全面において精密に観測する装置の整備を進め、その信号処理によって試験片局所における2次・3次変動成分を明らかにする解析技術の開発に成功している。高調波の解析により、疲労き裂発生前にその局部においてエネルギー散逸が生じていると明らかにしたことを高く評価する。これは、局所の損傷現象である疲労き裂発生の場所・時期の予測が可能であることを示す発見であるとともに、架橋などの局所微視構造の不可逆な変化に起因するものであることを示している。

今後の展開と期待

本研究で開発した接着材料に関する疲労における損傷・破壊過程の微視観測システムは、幾つかの有力な発展の方向性を有している。

まず、接着材料の疲労き裂をもたらす局所メカニズムと考えられる高分子の構造変化に関する基礎研究としてのアプローチである。それは、構造等の強化機構の異なる高分子の疲労の微視損傷過程に関する研究の有力な端緒となる。また、異材の接着界面の強度に関する微視的メカニズム解明や、高分子基複合材料における疲労破壊過程の解明など、高分子材料の破壊に関するナノ力学についての進展が大いに期待できる。さらに、微細な疲労き裂の検出手法は、製品使用時の信頼性確保の点から工業的応用の方向性も有力である。

本研究において、装置の不調などの多くの困難に直面しながら複雑な接着材料の疲労破壊の微視過程観察の成功まで結びつけた粘り強い努力を高く評価する。この経験を活かした高分子材料の疲労微視メカニズムの基礎的な研究の発展を大いに期待する。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 高強度鋼における水素脆性クラック伝播挙動のマルチスケール解析

2. 個人研究者名

柴田 暁伸（物質・材料研究機構構造材料研究拠点 上席グループリーダー）

3. 事後評価結果

高い引張強度を有する鋼の実用上での重大な欠点である水素脆性について、破壊をもたらす原因であるき裂進展の微視メカニズムを明らかにすることを目的としている。特に、マクロな力学特性を把握するとともに、X線CT、FIB-SEM シリアルセクションニング、STEM 観察を用いたき裂とその近傍の微視組織の詳細観察により、マルチスケールの視点から破壊進展様相を解明して、力学解析を援用しつつ複雑な微視的破壊メカニズムとメカニクスに挑戦している。

水素脆性破壊においても安定き裂成長があることを見出してマクロな伝ば抵抗曲線を導出するとともに、最新鋭の X 線 CT による 3 次元詳細観察によって材料内部を含むき裂形状の精密同定に成功している。特にき裂先端近傍部の観察に基づいて、微視組織による力学的局所要因が水素侵入による複雑で特異なき裂様相を産み出していることを明らかにしたことを高く評価する。

FIB-SEM シリアルセクションニングによって、粒界に生じたき裂後方にナノメートルオーダーのブリッジングが小角粒界セグメントにおいて形成されており、き裂伝ばの抵抗を高める有力な微視組織的力学因子であることを明らかにしたことを評価する。また、STEM によりき裂先端領域における微視組織の変化の詳細も明らかにしている。

微視組織の影響をシミュレーションするための力学モデルの構築に取り組んでおり、連続体解析によってき裂の幾何学的因子がき裂伝ばに大きな影響を与えていることを解明したことを、高く評価する。また、この成果よりマルチスケール解析の基盤について深く考察を進めていることは、将来発展性が高いと判断する。

今後の発展と期待

微視組織が破壊に強い影響を及ぼしていることは良く知られているが、その複雑性のために有効なアプローチがなされてこなかった。最新鋭の観察装置を駆使した本研究のき裂と微視組織の関連性についての研究は、これに対する突破口となる有力な基礎研究であり、さらなる発展を強く期待している。そのためには、微視組織要因に関する統計的な情報も含めた力学モデルの構築および数値シミュレーションを含む力学解析へ展開が重要であろう。

また、鋼の破壊過程を考慮するとき、微細なき裂発生・伝ばに対する微視組織の影響（微視組織的微小き裂）に関する力学的研究への発展可能性も高い。力学的考察法を会得しつつあり、材料研究に留まらず、微視的視点での材料学と力学の融合した学理への発展を望む。その意味で、水素脆化のみならず多様な強度現象への発展を期待する。

ここで開発された観察手法は、多様な材料の破壊過程に展開が可能である。他材料や他破壊現象の研究者との協働による発展も期待している。優れたリーダーシップを有しており、鋼のみならず材料全体の強度分野を牽引してゆくスケールの大きなリーダー人材としての将来発展にも期待している。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： ナノ界面の疲労損傷検出と抑制による複合材料の超長寿命化技術

2. 個人研究者名

高橋 航圭（北海道大学大学院工学研究院 准教授）

3. 事後評価結果

高分子複合材料の疲労破壊では、母材と繊維の界面における微小なき裂の発生・成長を破壊力学の視点から解明することが必要である。本研究では、疲労き裂発生・成長過程の詳細を放射光 X 線 CT によってその場観察するとともに、複雑な高分子の疲労における非弾性変形特性をモデル化して、き裂発生・成長をナノ破壊力学の観点から解明することを目的としている。

SPring-8 のビームライン上に設置できる小型・軽量化した疲労試験装置を開発し、界面き裂のその場観察を可能にした。さらに、繊維数を限定した試験体に対する実験観察から明瞭なき裂発生・成長のその場観察画像が得られることを実証したことを、評価する。また、疲労負荷の実験により、繊維束の外縁に微小なき裂が発生・成長しやすいことや、その界面疲労き裂が発生後に減速して停留に至る特異な成長挙動を示すことなどの、基本的な特性を詳細な連続観察から発見したことを、高く評価する。

さらに、フランスへの留学によって高分子材料（エポキシ）の界面近傍における繰り返し負荷における応力・ひずみ関係を再現できる構成式取得に成功し、複合材料の有限要素法解析ができるモデル化を行ったことは、今後の力学解析に大きく貢献する成果であると評価する。非線形力学解析に基づく発展性が高い成果である。

今後の展開と期待

疲労実験装置の作製を含めた疲労その場観察システムの開発は、様々な力学実験への適用によって、破壊機構の微視レベルでの格段の発展が期待できる。観察精度等に大きな長所がある一方で使用時間や試験体寸法等の制限があるシステムであるため、力学解析や他実験結果との併用によって、複合材料のナノ破壊力学への総合的な貢献を期待する。

き裂先端近傍の応力・ひずみ場に関する非線形破壊力学に関する理論を基に、微小き裂の界面経路におけるナノ力学への展開に高い将来性がある。地道な分野基盤であるが、これを確実に進めることによって将来の大きな成果に結実すると考えられる。着実な進展を望んでいる。

高分子材料の構成式の知識の必要性を理解して直ちに専門機関へ留学するなどの積極的な研究姿勢や国際的活動を高く評価する。分野を牽引する能力やアイデアがあり、学術的視点を強固にして積極性や国際性を活かすように伸びることを大いに期待している。

留学等によって得た力学知識を加えて実験結果との統合を基にした今後の展開を望んでいる。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 未踏高分子材料群「極限伸長網目」の学理構築

2. 個人研究者名

中島 祐（北海道大学大学院先端生命科学研究院 准教授）

3. 事後評価結果

ゴム様高分子材料は、高い運動性を有する高分子鎖が 3 次元網目を形成する微視構造を有している。通常材料では高分子鎖は縮んでおり、柔軟性・大変形性といったこれらの材料特有の力学特性の起源となっている。一方、極限まで伸長させた高分子鎖は剛性等に優れていることが予想され、極限伸長高分子鎖で構成した網目構造を有する高分子材料には特異な力学特性の発現が期待できる。本研究は、その系統的な作製法を見出すとともに、力学特性に関する学理を構築することを目的としている。

ゲルに直鎖高分子を導入して浸透圧に起因してゲルを膨潤させることによって、網目構造の高分子鎖を伸長させることができる。その膨潤過程を繰り返すことによって極限伸長網目構造を実現する方法を開発した。また、極限以上の導入によるゲル材料の破壊の実証等によって、浸透圧と弾性圧の釣り合いに基づく極限伸長網目作製の学理に発展させたことを、高く評価する。

作製した極限伸長網目構造は、単位高分子密度あたりのヤング率が 1000 倍以上となる特異な力学特性を見出すとともに、その変形時の応力の温度依存性も小さいことを明らかにした。この結果によって通常のゲルが示すエントロピー弾性に対して、高分子鎖の伸び切りによってエネルギー弾性の出現による新奇力学特性を実証したことを、評価する。

極限伸長網目を変形させることによって鎖中の結合に大きな力学的エネルギーが加わることを利用し、網目内の化学反応の促進を実現するとともに、その解析による学理構築への貢献を、高く評価する。

今後の発展と期待

材料の微視構造がその力学特性に強い影響を及ぼすことは良く知られている。一方、高分子鎖網目の幾何学的形状に踏み込んで、新たな力学特性開発に取り組んだ積極性はとても優れている。特に、微視構造を制御するという発想力のみならず、それを具体的に実現する方法を開発するとともにその特性の実証も綿密に行っていることが、高い研究能力を実証している。構造解析に不向きな材料であるからこそ、未開拓の研究課題が残されている。能力を活かした一層の発展を強く期待している。

一方、変形と破壊は力学的に基本的な考え方が大きく異なる現象である。また、多軸や繰り返しなど負荷等についても多様な条件が考えられる。多段のスケールの観点も含めた全体学理の構築に向けて、他の力学解析専門家を含めた研究グループを率いて分野としての学理を構築する活躍を強く望んでいる。

さらに、微視組織等に起因する力学特性と他の化学的・物理的特性との協働は、今後の材料機能開発の大きな鍵を握ると想像される。その面でも本研究の成果は大きな潜在力を秘めており、発展を期待している。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： ナノスケール内部応力制御による鉄鋼強靱化

2. 個人研究者名

中田 伸生（東京工業大学物質理工学院 教授）

3. 事後評価結果

マルテンサイト鋼の微視的な内部応力を精密に測定し、その巨視的力学特性への影響を明らかにすることを目的としている。同鋼は、マルテンサイト変態によって微細かつ複雑な微視組織が形成されるため、内部応力もそれに対応した微視的分布を持つ。この局所の内部応力を、デジタル画像相関法を援用した直接ひずみ解析法によって評価する。また、そのモデル化を通じて、巨視的力学特性の解析へと展開している。

マルテンサイト組織の同定の後に局所内部応力を精密に測定して、変態による格子変形が内部応力の主因であることを実証するとともに、それがラスマルテンサイトの変態下部組織である Bain ユニットを単位として微視的に分布していると解明したことを評価する。微視組織の力学的特性の解析手法としての一般的な有効性も示している。

さらに、破壊試験片における破面部の詳細微視組織分析によって、分布する引張り内部応力がそのへき開破壊に強く影響していることを定量解析によって明らかにしたことを高く評価する。微視組織によって微妙な異方性が産み出され、それがマルチスケールの巨視特性に繋がる機構は、微視組織効果の一つとして解明の意義が高い。

内部応力の影響を組み込んだ連続体解析モデルを作製し、数値シミュレーションによってへき開破壊への影響を検証している。精密な力学解析が今後の材料設計に不可欠であることを見出しており、将来性を高く評価する。

今後の発展と期待

微視組織の巨視力学特性への影響因子は多様なものがある。本研究では、その中で微視的内部応力に関して精密な実測・分析による優れた成果が得られている。変態による複雑な微視組織に関する経験と知識を背景として、巨視的力学特性と微視組織因子の関係についてのさらなる発展を期待する。そのためには、疲労特性など他の巨視的力学特性への展開が興味深い。

マルチスケール視点を充実させるためには、微視的に複雑分布する力学量を適切に表現するモデル化が鍵であり、幾何学的・統計的な展開が必要である。本研究を通じて数値解析を援用に成果をあげており、実験との両輪としての発展を強く期待している。

リーダーとして優れた素質を有しており、複雑組織への実験・数値解析を用いた果敢な挑戦により新たな視点による鉄鋼材料の力学領域の開拓を期待したい。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 層構造を持つソフトマテリアルの力学特性と革新的機能創出

2. 個人研究者名

楽 優鳳（産業技術総合研究所電子光基礎技術研究部門 主任研究員）

3. 事後評価結果

ゲルやポリマー積層材料に関する力学特性を基盤とした新機能開発が本研究の目的である。具体的には、優れた強度特性を有する積層ゲル材料の層構造のメカニズムやメカニクス解明、光刺激によって粘着性を制御する光応答ポリマーの機能開発、有機二分子層構造材料を基板としたナノ金属粒子の作製、を行った。

層構造を有するゲルの力学特性について系統的な検討を行い、不均一な構造と比べて破壊靱性を向上できることを解明した。さらに、力学特性が硬軟ゲル材料の積層構造に強く依存することを明らかにし、それを精密に制御することによって優れた特性の材料設計が可能であると解明したことを、評価する。

光刺激による分子レベルの構造変化によってガラス転移温度や粘弾性が変化することに着目して、光によって粘着性を変化させるポリマーフィルムを見出した。さらに、そのフィルムを用いて接着性制御を実証したことは、高く評価できる。光による力学機能の制御の一つとして、工業的な発展性も期待できる。

基板ポリマーを工夫することによって金属粒子成長を制御し、様々な形状および構造を制御できることを示した。

今後の発展性と期待

複数の課題に精力的に取り組み、そのいずれの課題においても詳細な実験の積み重ねによって特徴的で有用な機能開発に成功している。材料機能開発に関する優れたセンスとともに、研究に対する努力と熱意を持っており、今後の発展を大いに期待している。

層構造を有する材料の設計に関しては影響因子が多彩であることから、変形や破壊の素過程のメカニズムやメカニクスの解明が不可欠である。マクロ特性と合わせてミクロなレベルにおける構造についての洞察を深めて材料力学の観点から解明を進めることを期待する。

様々な物理刺激による新奇な材料特性（特に、力学特性）や既知材料特性の構造は、材料力学の有力な将来発展方向である。また、金属等の他材料との相互作用も大きな将来性を秘めている。積極的な研究姿勢を継続して、これらの新分野を開拓してゆくことを強く望んでいる。他分野へのアピールを工夫することによって、大きな伸長が可能になる。