

2.1.17 破壊力学

（1）研究開発領域の定義

破壊力学は、き裂に代表される欠陥を有する機械・構造部材について、破壊の機序と進展現象を力学量により定量的に予測する工学的手法の一つである。原子力発電設備や航空機など破壊により人命に関わる甚大な被害が発生する機器の設計および保守管理においては、破壊力学に基づく手法で高度な信頼性を確保することが求められている。ここでは、従来の経験則により保証された力学的手法に加え、破壊の素過程を科学的に考究するミクロスケールでの基礎的研究をメゾからマクロ領域まで拡張するマルチスケールでの破壊現象の力学モデル化に関する研究や、それらを基盤とした機械・構造物の強度と疲労寿命に関する信頼性評価手法の開発、環境エネルギー機器・輸送機器分野への応用・実用化を見据えた研究開発などの動向を対象とする。

（2）キーワード

強度、寿命、き裂、欠陥、損傷、破壊靱性、クリープ破壊、疲労寿命、水素脆性、有限要素法、マルチスケールシミュレーション、破面観察、非破壊検査

（3）研究開発領域の概要

【本領域の意義】

工業製品等において破損事故を未然に防ぐことは、品質の根幹をなす最も主要な要素であり、工業立国たる我が国の国際競争力にもつながる最重要事項の一つである。特に、原子力プラントや航空機などでは、破損事故は即座に多くの人命を危険に晒し、甚大な社会的損害に繋がることになる。そのような状況に陥ることを防ぎ、且つ機器の経済性も確保するためには、破壊現象を的確にとらえて、設計および維持管理を通じて、その防止のための適切な措置を講じることが、機器の社会的受容性を得るための必須の条件である。その措置の適切さを科学的に保証し、機器の破損を予防することを主目的とする破壊力学の社会的・科学技術的意義は極めて大きい。

この領域に係わる産業分野は幅広く、原子力発電、火力発電、石油貯槽、液化天然ガス貯槽などのエネルギー機器や、航空宇宙機器や船舶、自動車などの輸送機器、家電製品等の一般工業製品、さらにはビル等の建造物、電気、ガス、水道等の社会インフラ、最近注目され始めている再生可能エネルギーのエネルギーキャリアとしての水素のマネジメント等までに及び、これらの信頼性確保のための重要な役割を担っている。

【研究開発の動向】

破壊力学手法はき裂周りの応力場を数学的に解析できたことを契機として学術進展が図られ、その応力場を特徴付ける「応力拡大係数」により、破壊進展挙動を予測可能であることが実験を通じた経験則により確認できたことで技術的応用が飛躍的に進んだ。設計段階でのき裂進展解析により長期信頼性を確保し、保守点検時の非破壊検査によりき裂位置と寸法を計測して余寿命を確認することが、機械・構造物の信頼性を確保する手段として確立されている。エネルギー機器の高効率化を目指して、圧力、温度に関わる使用条件の一層の激化、航空機の軽量・低燃費化を目指す複合材料の活用、水素を媒体とするエネルギーマネジメントでの高圧水素材料適合性検証など、技術革新に伴い破壊力学により解決すべき課題が山積しつつある。その解決策として、これまでの方法論を踏襲して、実環境に近い条件下での試験片を用いた試験により破壊に関

わるデータを蓄積し、経験則の充実を図る動きがある。一方、一般に、我々が直接観察できるマクロスケールにおける材料・構造の挙動は、その内部のミクロスケールにおいて発生している現象の帰結として発現していると言える。従来は、マクロスケールにおける現象とミクロスケールにおける現象をそれぞれ別々に取り扱うことが主であったが、それらが独立して発生しているわけではなく、原因と帰結の関係にある以上、互いにリンクさせて同時進行的に解析を進めることで、現象へのより深い理解が得られるとの考えに至ることは必然である。このような背景から、破壊現象の素過程を捉えることで、より正確に強度評価を行うとの研究動向が主流となりつつある。これまで実績のあるマクロな応力場評価に基づくき裂進展評価につなげようとの試みが2000年以降盛んになり、マクロとミクロの因果関係を陽に考慮して行うマルチスケール解析の研究開発が近年急速に進展している。しかしながら、実用的成果を得るまでには至っていない。原子スケールのミクロモデルと、応力解析の経験則を積んできたマクロモデルをつなぐ、メゾスケールでの破壊モデルが未整備となっているためである。そのスケールでの破壊現象を記述するため、様々なモデル化手法の研究開発が進められている。ミクロスケールにより近い領域で分子動力学モデルとマクロスケール破壊モデルを連結させる目的で開発が進められているのが、Quasi-continuum (QC) 法、Peridynamics 法、結合力モデルによるアプローチである。マクロスケールに近い領域で、き裂進展を表現するのが、フェイズフィールド法やメッシュフリー有限要素法によるアプローチである。また、モデルによらない機械学習により破壊現象を予測するとのアプローチも試みられている。得られた成果のうち、有限要素法との整合性が高いものについては商用ソフトウェアへの組み込みもなされている。

マルチスケール解析を支えるのが、破壊現象を観測する技術と大規模並列計算機を活用したシミュレーション技術である。高輝度X線やElectron backscatter diffraction (略称: EBSD) 法によるき裂端の観測を行い、第1原理計算や分子動力学シミュレーションにより原子レベルでの破壊現象をモデル化する方法論が提案され、理論・解析手法の開発が進んだ。また、計算機性能が著しく向上したことに依るところも大きい。折しも我が国では、京から富岳へと基幹スーパーコンピューターが代替わりしたところであり、その利用も含め今後ますます発展が期待される分野である。

破壊力学研究の目指すところは、統一的な手法とパラメータによる破壊現象の記述である。その理想に向かい基礎研究はなされているが、機器の使用環境により異なる主たる破損形態を特定して現実的な研究成果を得ているのが現状である。主要機器における研究開発の動向は以下のとおりである。

• エネルギー機器

原子力発電機器が破壊力学の研究成果を適用すべき最重要分野である。高温高圧となる圧力容器および配管の長期にわたる構造信頼性評価に基づく設計手法、保守点検における非破壊検査による欠陥検出手法に関する技術開発が求められ、その必要性に迫られた研究開発が行われてきた。高温クリープによる材料劣化の評価と寿命予測、欠陥を起点とする疲労き裂の進展予測、超音波探傷による欠陥位置と大きさの計測精度向上が研究課題である。また火力発電機器においては、近年700℃で35MPaの先進超々臨界圧 (Advance-Ultra Super Critical, A-USC) 蒸気タービンの開発が進められている。各国の研究動向はエネルギー政策と密接に関係している。原子力発電を推進する中国などの国々においては、高温クリープ関係の研究開発が未だに盛んであるが、積極的推進を行っていない欧米と日本においては研究活動が低調である。A-USC 蒸気タービンに関しては、超高温に適用できる新種の材料であるNi基合金の開発と、破壊力学手法適用の基礎となる高温クリープ破断強度のデータ取得が旧来の手法に則って進められている。

• 航空機

機体の軽量化を目指した炭素繊維強化プラスチックの適用、ジェットエンジンの高効率化を目指した耐熱性セラミクス複合材料など、金属材料を代替する複合材の開発と評価が主たる研究の方向性となっている。航空機産業において優位に立つ欧米において先導的研究がなされていると思われるが、応用に近い部分では成果の公開を抑える傾向にあり、公表されている成果のみで測ることは難しい。中国やインドのような後進的ではあるが航空機開発を積極的に進める国においても、それら複合材料の強度評価に関わる研究が盛んに試みられている。日本においては航空機産業に関わる研究者が少なく、特に基礎研究に関しては諸外国に水をあけられている状況である。

• 高圧水素機器

次世代のエネルギーマネジメント技術の中核を担うと期待される高圧水素機器に関しては、日本の基礎研究が世界を先導している。燃料電池自動車の開発においては日本の自動車メーカーの技術力が優位に立っており、それを支える基礎技術として、高圧水素により誘発される破壊促進現象を捉える試みが盛んにおこなわれている。水素脆化と呼ばれる現象は古くより知られており、強度の高い鋼材を機器に適用する際には、その健全性を確保するため必須の検討事項ではあるが、そのメカニズムは複雑であり、解明されたとは言い難い。高圧化では水素の材料への侵入速度が増すので、破壊促進現象がこれまで観測されたものとは異なる可能性もある。その物理現象を明らかにする試みが進められている。

材料の視点で工業的に極めて重要であり、また本領域における代表的な解析対象材料でもある金属材料と複合材料の破壊現象に対するマルチスケール解析の現状を簡単に以下にまとめる。

• 金属材料

金属材料は歴史の長い材料であり、今日なお最も主要な工業材料である。中でも鉄鋼材料は、埋蔵量、生産量、性能、コスト、リサイクル性等のバランスが良好であることから、数ある工業材料の中でも最も使用されている優れた材料である。また、鉄鋼材料は、結晶粒サイズ等のミクロ組織をコントロールすることにより高性能化が可能であり、現在もその研究開発が盛んに進められている。材料学的な見地から、ミクロ組織をどのようにすれば鉄鋼材料の強度特性の向上につながるかに関してはかなり研究が進められてきた。また、実験的観察により、ミクロ組織においてどのように破壊現象が発生・進展するかという、いわゆる破壊の素過程についてもかなり明らかになってきている。すなわち、鉄鋼は主にフェライト相（Fe）とセメンタイト相（Fe₃C）からなるが、セメンタイト相でミクロな割れが生じ、き裂の核生成がなされ、やがてき裂がフェライト相に伝播、さらに隣接するフェライト相に粒界を超えて伝播するといった過程をたどる。

しかし、それらのミクロ組織や破壊素過程がどのような力学的相互作用により、どれほどの特性向上をもたらすかについては未だ解明されていない部分が多い。その理由として、鉄鋼材料のミクロ組織のサイズがマイクロメートルオーダーであるのに対して、実構造物はメートルオーダーであり、そのスケール差が著しいことが挙げられる。そこで近年、それらを相互に関連付けて解析できる鉄鋼材料のマルチスケール破壊解析手法の開発、およびそれを用いた鉄鋼部材・実構造物の破壊挙動の定量的解析への試みが精力的になされている。

• 複合材料

近年、複合材料の市場は急速に拡大している。航空機・自動車等の輸送機器分野や、風力発電機等のエネルギー分野、さらには建設分野など、複合材料の適用範囲はますます広がりを見せており、それに伴いその研究開発が盛んに展開されている。最も代表的な複合材料は炭素繊維強化プラスチック（Carbon fiber-

2.1

俯瞰区分と研究開発領域 エネルギー区分

reinforced plastic：CFRP）である。CFRP積層板が、米国ボーイング社の最新旅客機であるB787の機体構造で多用されたが、主翼・中央翼・胴体の一部など約35%程度を三菱重工等の国内重工メーカーが製作するとともに、材料自体は東レが供給しており、我が国のプレゼンスが卓越した分野である。

複合材料は、意図的に複数の材料を混ぜ合わせて製作することから、従来の金属材料と異なり本来的に不均質性や欠陥を含み、金属材料を凌駕する複雑な破壊素過程が存在する。例えば上述したCFRP積層板は、直径5～10マイクロメートル程度の炭素繊維で樹脂を一方向に強化したプリプレグと呼ばれる厚さ100マイクロメートル程度のシートを多方向に向けて積層したものであり、その破壊の素過程には、樹脂の損傷・破壊や繊維樹脂界面のはく離、それらを起点とした樹脂中のき裂の発生・進展、き裂がプリプレグ同士の接着面（層間）に到達することで発生する層間のはく離等があり、これらの過程が進行することで炭素繊維の荷重負担が過度となって破断に至り、やがて材料・構造全体が破壊する。もう一つの代表的な複合材料である織物複合材料は、数千～数万本の繊維を束にして織り込んだ織布を積層し、樹脂を含浸させて製作することから、繊維と樹脂からなるマイクロメートルオーダーのミクロ構造に加えて、ミリメートルオーダーの織構造（メゾ構造）、さらにメートルオーダーのマクロ構造があり、その損傷・破壊過程はさらに複雑なものとなる。

上述した鉄鋼材料と同様に、複合材料の各破壊素過程自体はすでに実験的に観察されているが、それらを陽につなぎ合わせ、複合材料からなるマクロ構造の破壊現象まで捉えることは容易ではなく、それに向けた試みが世界中でなされている。アプローチとしては、ミクロ構造のモデル（ユニットセルモデル）において繊維・樹脂等の強度特性を考慮した上で複合材料としての強度特性を解析・取得し、その特性をマクロ構造の解析モデルに与えて解析することで、複合材マクロ構造の破壊挙動をシミュレーションするというものである。これに加えて、メゾレベルである層間や織構造における破壊挙動も考慮可能な手法が開発されており、特に層間のはく離を模擬できる結合力モデル（Cohesive zone model：CZM）は、金属材料の場合とは異なる発展を遂げている。ただし複合材料では、従来の金属材料における破壊力学の知見が必ずしもそのまま適用できないため、残された課題は多い。まだまだ発展途上の分野ではあるが、近年の複合材料の市場拡大を考えると、学術界のみならず産業界にも大きなインパクトを与える展開と言える。

（4）注目動向

〔新展開・技術トピックス〕

・鉄鋼材料のマルチスケール破壊解析技術

鉄鋼材料について近年、ミクロ組織における劈開破壊、き裂発生から、その進展、ならびにマクロ鋼構造の破壊挙動までを完全にリンクしたマルチスケール破壊解析手法の開発が進んでいる。これにより、ミクロ組織、結晶粒径、結晶方位のばらつき等と鉄鋼材料の強度特性（破壊靱性等）との関係の解明、ならびに鋼構造自体の破壊の定量的な予測が可能となる状況が実現しつつある。このような手法を用いることで、鉄鋼材料のミクロ組織の最適化や性能向上へのヒントがもたらされることが期待されている。

・水素利用分野における破壊力学

我が国をはじめ各国で、次世代エネルギー政策として水素社会の実現が掲げられている。再生可能エネルギーの余剰電力を水素に転換して循環させるとの枠組みを設定し、先導役である燃料電池自動車の普及を加速する動きが世界規模で進められている。日本では新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）が中核となり、普及のために必要な技術開発を支援している。破壊力学の学術振興との観点からは、高圧水素による金属材料の劣化促進メカニズムに関する研究が進められている。また燃料電池自動車にも必要な水素貯

蔵技術として、軽量・高強度なCFRP製高圧水素タンクの開発が注目を集めている。タンクは炭素繊維束をフィラメントワインディング法により巻き付けて製作するものであり、非常に複雑な内部構造を有するが、繊維束の破壊挙動（メゾ破壊挙動）を陽に考慮した上でタンク全体の破壊挙動をマルチスケールシミュレーションする大規模有限要素解析技術が実現しつつある。このように破壊メカニズムを適切に捉えて設計に反映させようとの試みが企図されている。欧州においても Horizon 2020 下での支援が行われている。

・蓄電システムの長期信頼性評価技術

自動車の電動化も環境問題への解決策として有望視する国が多い。ボーイング787の蓄電システムにおいても問題となったが、普及を進める上で蓄電池の長期信頼性評価が重要である。諸外国においては、リチウムイオン電池などの欠陥や劣化による損傷について、破壊力学の方法論を適用する試みがなされている。国内においては、科学技術振興機構（JST）によるさきがけプログラム「力学機能のナノエンジニアリング」が、その解決策の提示を志向するプロジェクトとなっている。

・輸送機器における複合材料の活用技術

自動車の軽量化を目標に、新構造材料技術研究組合（Innovative Structural Materials Association：ISMA）が中心となり、鋼材から炭素繊維強化プラスチックまで多様な材料の開発プロジェクトが進行している。実用化をにらみ異材を接合して一層の効果をj得る試みもなされ、接合強度の評価と設計への展開に関する研究が進められている。

また、エネルギーの有効利用と環境負荷の軽減を目指し、世界的に航空機ジェットエンジンの軽量化が取り組まれている。このため、従来金属材料により製作されていたファンブレード等のエンジン部品を複合材料製に置き換えるための研究開発が進められており、マルチスケール解析技術が活用されている。

・鉄鋼系材料巨大構造物の微小き裂進展挙動予測技術

原子力プラント等に代表される鉄鋼系材料による巨大構造物において、構造物全体に比して微小なき裂を有する場合のき裂進展挙動を調べる問題が、主に大規模有限要素解析により取り組まれている。金属材料とはスケール感が異なるが、構造全体が巨大である分、相対的にき裂は非常に微小であることから、広義にマルチスケール解析となっている。このような問題では、全体構造が巨大であるため有限要素分割数が膨大となるが、それに加えてき裂を考慮する箇所に極めて微細な有限要素メッシュを用意しなくてはならない。このため、解析領域を適切に分割し、スーパーコンピューター等で並列計算する手法である領域分割法を用いた高効率大規模並列シミュレーションがキーテクノロジーの一つとなる。

このように全体構造の有限要素分割サイズとき裂部の有限要素分割サイズが大きく異なる場合に有用な手法として、全体構造の有限要素メッシュと注目部（き裂部）の有限要素メッシュを別々に用意し、それらを重ね合わせて解析することができる重合メッシュ法も効果的な手法として取り組まれている。さらに、有限要素メッシュにおいてはき裂形状を陽には考慮せず、有限要素そのものにき裂の特性を埋め込んだ拡張有限要素法（Extended finite element method：X-FEM）も有用な手法として盛んに研究されている。

・超並列計算機によるシミュレーション能力向上

超並列計算機「富岳」の本格的利用開始を目前に控え、強度評価モデル開発での活用が高まっている。原子スケールで行い得る破壊シミュレーションの規模が飛躍的に上昇し、モデルの検証が進み、実問題解決

の強力なツールになると期待される。

・非破壊検査技術

高輝度X線やテラヘルツ波を活用し破壊現象のその場観察を行い得ると期待される。戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）や新構造材料研究組合のプロジェクトにおいても技術開発が支援されている。

・工学シミュレーションに対する品質保証

近年、工学シミュレーションの品質保証という概念が世界的潮流となっており、米国機械学会（ASME）、英国NAFEMS、我が国では日本計算工学会等が「工学シミュレーションのVerification & Validation（V&V）」として率先して取り組んでいる。従来の工学シミュレーションでは、一般に決定論的解析により結果が一意に定まるものであったが、現実には対象材料は強度・欠陥等のばらつきや内部構造の不整といった「不確かさ」を内包しており、それらが全体構造の強度特性のばらつきとして発現する。このことから、工学シミュレーションのV&Vにおいてはそのような不確かさを考慮した解析の実施が要請されている。これを受けてマルチスケール解析の分野においても、例えば複合材料の破壊現象に対してミクロ構造における不確かさがどれほど影響し得るか等を解明可能な理論・手法の開発が進展しつつある。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

・新構造材料技術研究組合（ISMA）による「革新的新構造材料等研究開発」

自動車を中心とした輸送機器の抜本的な軽量化（半減）に向けて、主要な構造材料の高性能化とマルチマテリアル化技術開発を一体的に推進している。

・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」（内閣府、科学技術振興機構（JST））

軽量・高強度で耐熱性に優れた革新的材料を開発することで、輸送およびエネルギー産業での実機適用、およびエネルギー転換・利用効率向上を目指した大規模プロジェクト。「樹脂・CFRP」「耐熱合金・金属間化合物」「セラミックス基複合材料」「マテリアルズインテグレーション」の四つの分野を柱に、複合材料、金属材料から樹脂、セラミックスまで、幅広い材料研究・開発・応用を行うものである。複合材料分野を中心にマルチスケール解析技術が生かされている。

・ポスト「京」プロジェクト重点課題（7）「次世代の産業を支える新機能デバイス・高性能材料の創成」（文部科学省）

スーパーコンピューター「富岳」を用いて難問に取り組むポスト「京」プロジェクトの重点9課題のうち、重点課題（7）「次世代の産業を支える新機能デバイス・高性能材料の創成」において、鉄鋼材料の強度・信頼性の向上を目指したマルチスケール解析への取り組みがなされている。電子・原子レベルからマクロ特性までをカバーする。

・未来社会創造事業探索加速型「持続可能な社会の実現」領域「モノの寿命の解明と延伸による使い続けられるものづくり」（科学技術振興機構（JST））

経済・社会的にインパクトのあるターゲットを見据えた技術的にチャレンジングな目標に対する研究開発を後押しするプロジェクト。多くの斬新なアイデアを公募より取り入れる「探索加速型」と、将来の基盤技術と

なる技術テーマの研究開発に集中的に投資を行う「大規模プロジェクト型」があるが、このうち探索加速型の「持続可能な社会の実現」領域の令和元年度重点公募テーマ「モノの寿命の解明と延伸による使い続けられるものづくり」において、複合材料のサステナビリティに関する研究開発テーマが複数採択されている。これらにおいてもマルチスケールのアプローチが用いられている。

- 水素利用技術研究開発事業（国立研究開発法人新エネルギー産業技術総合開発機構（NEDO））

燃料電池自動車（Fuel cell vehicle：FCV）と水素供給インフラの本格普及に向け、水素ステーションの設置・運用に係る規制の見直しやコストの削減、構成機器のさらなる低コスト化を目指したプロジェクト。本プロジェクトにおいて、CFRP製高圧水素タンクの最適設計に向けた繊維束/樹脂のメゾメカニクスの研究および実証的検証が行われ、メゾスケールにおける破壊現象を陽に考慮したマルチスケール大規模有限要素解析により、CFRP水素タンクの強度特性を調査することに初めて成功している。

- 燃料電池等利用の飛躍的拡大に向けた共通課題解決型産学官連携研究開発事業（国立研究開発法人新エネルギー産業技術総合開発機構（NEDO））

上記の水素利用技術研究開発事業の後継として2020年度から開始したプロジェクト。本プロジェクトにおいては、内容をさらに深め、CFRP製高圧水素タンクに対してミクロ・メゾ・マクロの三つのスケール階層を考慮するとともに、ミクロ構造における材料特性や構造のばらつきを考慮した上で、水素タンクの強度解析のみならず寿命評価までもマルチスケール的に実施する試みである。また、CFRP水素タンクの国際標準化にも取り組んでいる。

- aFJR（高効率軽量ファン・タービン技術実証）プロジェクト（国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構（JAXA））

航空機エンジンの効率および燃費性能の飛躍的向上のため、ファンやタービン等のエンジン構成要素の軽量化ならびに高効率化を目指したプロジェクト。本プロジェクトにおいては、CFRP製ファンブレードの研究開発が実施され、バードストライクを受けた場合を想定したファンブレードの層間ばく離解析を中心にマルチスケール解析への取り組みがなされた。マルチスケール解析にはスーパーコンピュータ京が用いられた。

- Fracture across Scales：Integrating Mechanics、Materials Science、Mathematics、Chemistry、and Physics（German Research Foundation（Deutsche Forschungsgemeinschaft：DFG））

主に金属材料に対するマルチスケール破壊解析への取り組みを行うプロジェクト。原子スケールからマクロスケールまでをカバーするとともに、力学のみならず、材料科学、数学、化学、物理学からも専門家を招集し、分野横断型で研究を進めている。また、若手研究者の育成に力を入れているところも特筆すべき特徴である。

（5）科学技術的課題

新たな材料、新種の機器を開発し実用に供する際には、長期信頼性の確保が課題となり、破壊力学の立場からは疲労強度評価手法の高度化が必要となる。金属材料に関する疲労強度評価は、試験片を用いた疲労試験データの蓄積により経験的に支えられてきた。CFRPに代表される新種の複合材料に関しては、金属材料とは異なり材料内部の非均質性が破壊メカニズムを複雑にしており、既往の方法論の適用を困難にしている。また既往の方法論に則れば、高温環境や高圧水素環境など、機器の使用条件がより過酷になれば、疲

劣試験を行う環境も同様の過酷さとする必要がある。そのような環境下での試験は現実的ではないことが多く、試験の繰り返しにより破壊データを蓄積する方法論から脱却し、破壊の物理現象そのものに迫るアプローチが必要となると考えられている。

• 金属材料の長期信頼性評価技術の開発

A-USC 蒸気タービンの開発など、新種のエネルギー機器開発においては、超高温環境下に長時間晒される材料のクリープ強度評価が課題である。温度を上昇させて加速試験を行い、時間的な外挿によりクリープ寿命を予測する手法が執られてきたが、その方法では長寿命側に予測がシフトし、危険な予測となることがわかってきた。Ni 基合金などの新規材料に関して、長時間のクリープ試験を行い、データを蓄積することも必要であるが、クリープ破壊の物理モデルを構築することが予測精度の向上につながる。高温下での破壊現象を原子レベルで観測できる技術およびシミュレーション技術の開発が課題である。

高圧水素機器の開発においては、金属材料の強度評価に関して、高圧水素による劣化促進機構を物理現象として解明することが課題である。これまで種々のいわゆる「水素脆化」モデルが考案されてはいるが、高圧水素下での実験や観察が難しいこともあり、物理の解明にまでは至っていない。現象の観測技術、水素と金属の相互作用を正確に再現するシミュレーション技術が必要である。

鉄鋼材料におけるマルチスケール破壊解析手法の開発はかなりの発展を見せているが、依然として未解決の部分も多く、例えば破壊素過程から鋼構造全体の破壊現象を本質的に3次元解析する技術の発展等が望まれる。また、金属材料に対するマルチスケール破壊解析においては、主要な金属材料である鉄鋼材料に対する研究開発が先行しているが、鉄鋼材料に限らず、他の金属材料へのマルチスケール解析のさらなる展開も必要とされている。

• セラミックス基複合材の強度発現メカニズムの解明

ガスタービンやジェットエンジンの高効率化を目指し、ガス温度の上昇とファンの軽量化に有効なセラミックス基の複合材やコーティング技術が開発されている。その歴史は1990年代まで遡るが、合理的な寿命予測と設計が行われているとは言い難い。セラミックスと金属界面の接合強度に関する高温環境下での劣化モデルの構築が必要であり、前記の金属材料同様に、高温下での破壊現象観測技術およびシミュレーション技術の開発が課題である。

• 炭素繊維強化プラスチックの長期信頼性評価技術

自動車の車体や航空機体、さらにはジェットエンジンのファンブレードにまで適用範囲を拡大し、軽量化を目的としたCFRPの金属代替が進められようとしている。この材料の疲労強度評価方法に関しては適切な法補論が得られていない。既往の金属材料に対する方法論を踏襲して試験片を用いた疲労試験を試みてはいるが、積層構成や炭素繊維の体積含有率など、炭素繊維と樹脂のなすメゾ構造に依存して破壊進行形態が異なり、統一的な疲労損傷モデルを得るには至っていない。CFRPの疲労寿命を支配するのは炭素繊維ではなく樹脂であると考えられる。その仮説に従えば、樹脂単体の疲労試験データを蓄積する必要があるが、全世界的にみても、だれもがアクセスできるデータとしてまとまっているものはない。複合材料は、航空機のような少数生産品に加えて自動車のような大量生産品へと適用範囲が拡大しており、新規樹脂材料が次々と開発されていることから、樹脂の非弾性特性および破壊特性などの基礎データの取得は喫緊の課題である。また、CFRPだけで構造体を構成することは難しく、金属材料との接合による組み合わせを行うことが一般的である。

2.1

俯瞰区分と研究開発領域
エネルギー区分

接合の強度モデルに関しては、界面の力学として体系建てられてはいるが、弾性学の一領域にとどまっている。破壊現象との相関を検討するためには、破壊の素過程に立ち入った物理モデルの検討が必要と思われる。

マルチスケール破壊解析の視点では、ミクロ構造およびミクロ材料特性から複合材料としての破壊特性を把握し、それをマクロ構造解析に適用するという、いわゆる片方向連成型のマルチスケール解析で主であった。しかし実際は、ミクロ現象とマクロ現象が相互に力学的作用を及ぼし合いながら破壊が進んでいくから、これを本質的に解析・解明するためには、ミクロとマクロを完全に連成した双方向連成型マルチスケール破壊解析の研究開発が必須である。また、工業的に需要の高い疲労破壊シミュレーションや成型シミュレーションに対するマルチスケール解析手法の開発は未着手の部分が多く、この分野の発展が望まれる。この課題は、ここ数年の間にますます顕在化してくる可能性があり、中長期的にも積極的に取り組むべき課題と考えられる。

- 電子機能材料の長期信頼性評価技術

輸送機器に多用されているリチウムイオン電池に代表される電子機能材料の破壊に関する検討においては、力学的評価のみならず機能に関する評価も必要となる。そのため、原子スケールでの検討が先行しているが、実部品で発生する欠陥のスケールとの乖離が大きく、それを埋めるためのマルチスケールシミュレーション手法の開発が求められている。力学的評価に量子的評価も加える必要があるため、計算負荷は高くなるが、真の意味でのマルチスケール・マルチフィジックスシミュレーション手法の開発が必要である。

- 被災建物等の安全性評価

我が国では、地震や津波・洪水等の災害が多くなっており、そのような際に過剰な外力を受けた構造物等は、弾性のみならず弾塑性き裂を生じる可能性がある。これまでの線形破壊力学や非線形破壊力学の範疇では十分にカバーできないような弾塑性き裂進展問題等を考慮可能なマルチスケール破壊解析手法への取り組みが求められる。近年ますます増加する災害に備え、本領域が貢献すべき中長期的重要課題である。

- 超並列計算機による原子スケール破壊シミュレーション手法

上記の破壊力学に関するいずれの課題においても、破壊の物理をシミュレーションするための大規模な原子スケールシミュレーションの実施が必要となる。超並列計算機ハードウェアの開発が進み使用環境も整備されつつあるが、それを使いこなすシミュレーション結果から必要な情報を適切に抽出するための技術が必要となっている。シミュレーションにより得られるデータは膨大なものとなるので、研究者が直接的にハンドリングすることは現実的ではない。そのデータを破壊モデルの構築に必要な情報に変換し、研究者の検討を促進するためのソフトとハード両面からの支援技術が必要と考えられる。大規模破壊シミュレーションを現実的なものとするためには、対象とする領域の拡大とともに、様々な不確定性をモデル化して取り込む必要がある。確率論を基軸とするそのようなモデル化の検討は、日本国内において非常に遅れており、学術的な進展が望まれる。

- 非破壊検査技術

機器の観測精度の向上により、材料内部の欠陥位置と寸法を精緻に得る技術は飛躍的に向上している。その情報を破壊モデルと連携させ、寿命予測につなげることが課題となっている。それぞれの材料に対する物理的破壊モデルの構築と歩を一にして、測定データによるモデルの検証と洗練を行う必要がある。

(6) その他の課題

破壊力学の進展に必要な材料データは、その材料が新規であれば非常に貴重なものとなり、機器開発競争力の源泉ともなる。そのため、私企業の立場からは公開を抑制することが一般的に行われている。特に日本国内の企業においては、過去において材料情報の海外流出により損害を被った経験があり、その傾向が強い。科学技術の進展のためには、そのような重要なデータの公開と情報共有が不可欠であり、情報の悪用を防止しつつ活用をマネジメントする機関やしくみが必要とされている。

材料強度に関する研究は、機器開発のプロジェクトに付随して実施されることが多い。国のプロジェクトは基本的には期間が決まっているため、プロジェクトを通じて得られた成果の管理が、終了後におろそかになりがちである。そのような成果を蓄積し一元的に管理し公開する機関やしくみが必要とされている。

我が国では、複合材料等の新材料を用いた製品の社会実装において、しばしば法規制が障壁となる。欧州では、車体構造全体が複合材料からなるような斬新な市販車をいち早く製作・市場投入するなどしており、一般に欧米はこのような動きに寛容であると言われている。また、既述したCFRP製高圧水素タンクについても、法規制が追いついていないと言われている。安全性確保は最優先であるが、技術の進歩に合わせてフットワークを軽くして対応することで国際競争力が高められる。なお、CFRP製高圧水素タンクについては、我が国に限らず世界的に見ても法規制や標準化は未整備だが、タンク自体の研究開発については我が国が世界に先行している部分がある。このような先行分野においては特に法規制・標準化等も含めて積極的に先手を打っていくような動きを行うことが効果的である。NEDOのプロジェクトではそのような兆しも見られる。

(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 (マルチ スケール解析)	△ (◎)	↘ (↗)	●研究資金の多くが材料開発のプロジェクトとして投入されており破壊力学手法の基礎研究に対する支援は低調である。複合材料の破壊過程を高輝度X線で観測する先駆的な試み¹¹⁾もなされているが、基礎研究に関しては海外に依存する部分が大きい²⁾。 ●鉄鋼材料のマルチスケール破壊解析の理論および解析手法の構築が精力的に行われている³⁾。また、重合メッシュ法やX-FEMの研究も進められている⁴⁾。 ●文部科学省ポスト「京」プロジェクトにおいて、鉄鋼材料の強度・信頼性の向上を目指したマルチスケール解析への取り組みがなされている⁵⁾。 ●JST、NEDO、JAXA等のプロジェクトにおいて、複合材料のマルチスケール破壊解析に関する取り組みが多数なされている⁶⁾⁻⁹⁾。
	応用研究・開発	○	→	●エネルギー機器分野では、原子力発電関連の研究は滞っている。A-USCに関しても破壊力学に関して特筆すべき成果が得られてはいない。 ●航空機分野では、材料開発を目的としたSIP革新的構造材料¹⁰⁾で、破壊力学に関わる成果も得られている。JAXAのプロジェクトで、CFRPのマルチスケール解析技術が航空機エンジンのファンブレード開発⁹⁾への適用が試みられている。 ●高圧水素機器では、NEDOの技術開発プロジェクトにより、金属材料の水素脆化に関する成果が得られている^{12), 13)}。また、FCV向けのCFRP製高圧水素タンク開発へのマルチスケール解析の適用も見られるが、応用・開発についてはこれからの部分もある。
米国	基礎研究	◎	↗	●政府および軍により、高温クリープ強度¹⁴⁾、航空機用複合材料^{15), 16)}、破壊素過程のモデル化¹⁷⁾、先進的非破壊検査^{18), 19)}など、破壊力学に関する幅広い基礎研究分野の支援がなされている。

2.1

俯瞰区分と研究開発領域
エネルギー区分

				●他国研究者との協力にも積極的であり^{21), 20), 21)}、機械学習の応用²²⁾も試みている。 ●US Association for Computational Mechanics (USACM) が主催するUS National Congress on Computational Mechanics (USNCCM) において、金属材料や複合材料のマルチスケール解析に関する議論が行われている²³⁾。 ●Air Force Research Laboratory、NASA等で複合材料のマルチスケール破壊解析に関する基礎的研究が取り組まれている²⁴⁾。
	応用研究・開発	○	→	●航空機分野では、U. S. Air Force Research Laboratory (AFRL)¹⁵⁾ やU. S. Air Force EOARD¹⁶⁾ による研究支援により基礎研究から応用まで幅広い支援が行われているが、公表されているものは少ないように思われる。 ●Boeing、Lockheed Martin等の航空機メーカーや、General Electric、Pratt & Whitney等のジェットエンジンメーカーを数多く擁する米国は、複合材料の実用化への取り組みが顕著で、CFRP製のファンブレードやファンケース等をいち早く製品化している²⁵⁾。機密により明らかでない部分も多いが、様々なマルチスケール破壊解析がなされていると言われている。
欧州	基礎研究	○	→	【EU】 ●European Research Council Starting Independent Research GrantによるQC法の破壊問題への展開支援²⁶⁾ やEuropean RFCS (Research Fund for Coal and Steel) によりマルチスケール破壊モデル²⁷⁾ に関する基礎研究の支援が行われている。各国の科学技術支援もEU域内の共同研究を促進する枠組みが設定されている。 ●European Structural Integrity Society (ESIS) が主導して破壊力学研究が進められており、European Conference on Fracture (ECF) 等を通じて金属材料や複合材料のマルチスケール解析が議論されている²⁸⁾。 【ドイツ】 ●German Research Foundation Priority Programme PP 2020 により破壊シミュレーションに関わる基礎研究²⁹⁾ の支援がなされている。アーヘン工科大学において機械学習の破壊問題への応用³⁰⁾ が試みられている。 ●German Research Foundation (Deutsche Forschungsgemeinschaft: DFG) の出資により、主に金属材料を対象とした脆性破壊等に関するマルチスケール解析に関するプロジェクトが進行している³¹⁾。 【フランス】 ●French National Research Agency (Agence nationale de la recherche: ANR) の出資により、金属材料および複合材料のマルチスケール解析に関するプロジェクトが多数遂行中である^{32), 33)}。著名なマルチスケール理論の一つである数学的均質化法が開発された国の一つでもあり、マルチスケール解析の基礎研究に秀でている。 【英国】 ●Imperial College LondonにComposite Centreが設立されており、複合材料のマルチスケール破壊解析手法の開発が精力的に進められている³⁴⁾。 【オランダ】 ●デルフト工科大学により複合材のマルチスケール破壊モデルの研究³⁵⁾ がなされている。 【ポルトガル】 ●Universitiy of Portoを中心に複合材料の基礎研究が盛んに進められており、マルチスケール解析も取り組まれている³⁶⁾。

	応用研究・開発	○	→	【EU】 ●2014～2020年の7ヶ年計画である科学技術計画Horizon 2020において、低環境負荷自動車開発への応用を目指した複合材料に関する研究が推進され成果を得ている。 ●EUは、Airbus、Rolls-Royce等の航空機メーカーや、ESA（欧州宇宙機関）を擁している背景から、新材料に対する応用研究・開発力が高く、当該領域の研究も盛んに進められている。 【ドイツ】 ●耐熱部材であるセラミックス複合材料³⁷⁾など、実用化を目指した研究開発が進められているように思われるが、公表されているものは少ない。 ●ドイツは水素利用先進国であり、FCVと水素ステーションの全国的な普及を目指しインフラ整備を進める「H₂ Mobility」プロジェクトが運用されている³⁸⁾。これを受けて、多数の企業等がCFRP製高圧水素タンクを製作・販売しており、その研究開発にマルチスケール解析が利用されている³⁹⁾。また、BMWがいち早く複合材料製の市販車を製造するなど、合材料研究への取り組みが顕著である。 【フランス】 ●ONERA（フランス国立航空宇宙研究所）等の国立研究機関でマルチスケール解析の研究が進められ、航空宇宙機器等への適用が推進されている⁴⁰⁾。 【英国】 ●University of NottinghamおよびUniversity of Bristolを中心にCentre for Innovative Manufacturing in Composites（CIMComp）が設立され、航空分野、輸送機器分野等における複合材料製品の製造に関する研究開発がなされており、マルチスケール解析が取り組まれている⁴¹⁾。また、University of BristolとAirbusがパートナーシップ協定を締結するなど⁴²⁾、この分野における産学連携も積極的に進められている。
中国	基礎研究	◎	↗	●National Science and Technology Major ProjectやNational Key Research and Development Programmeによる研究拠点形成、National Natural Science Foundationによる基礎科学振興により、複合材への展開を想定したマルチスケールモデル化手法⁴³⁾、Peridynamics法⁴⁴⁾、結合力モデル⁴⁵⁾、フェイズフィールド法⁴⁶⁾、メッシュフリー有限要素法⁴⁷⁾や非破壊検査⁴⁸⁾に関する基礎研究が推進されている。 ●マルチスケール解析の研究がNational Natural Science Foundation of China（NSFC）の出資により一定程度進められているが、日欧米程盛んではない。
	応用研究・開発	◎	↗	●基礎研究同様の支援体制により、超高温火力発電への応用につながるNi基合金を対象とした研究^{20), 49)}、ガスタービンへの応用を想定した耐熱合金⁵⁰⁾、セラミックス複合材料⁵¹⁾の研究が推進されている。 ●新材料の適用対象としては建設・インフラ分野が多く、マクロ的視点の研究開発が主流である。環境問題への対応から2030年までにFCVを100万台普及させるとしており⁵²⁾、今後当該分野の研究開発が加速すると思われる。
韓国	基礎研究	×	↘	●公表されている成果は少なく低調である。 ●Korea Advanced Institute of Science and Technology（KAIST）等でマルチスケール解析への取り組みが見られるが⁵³⁾、それほど多くは見受けられない。
	応用研究・開発	×	↘	●電気自動車への応用を目指しリチウムイオン電池の破壊強度評価⁵⁴⁾に関する新分野の開拓に取り組んでいる。エネルギー政策は不透明で、そのほかの応用研究を推進する状況にない。

(註1) フェーズ”

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

○：顕著な活動・成果が見えている

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

- ・ 火力発電（環境・エネ分野 2.1.2）
- ・ 原子力発電（環境・エネ分野 2.1.3）
- ・ 計算工学（環境・エネ分野 2.1.18）
- ・ 構造材料（金属）（ナノテク・材料分野 2.4.1）
- ・ 構造材料（複合材料）（ナノテク・材料分野 2.4.2）

- 1) Toshiaki Watanabe et al., “Nanoscale in situ observations of crack initiation and propagation in carbon fiber/epoxy composites using synchrotron radiation X-ray computed tomography”, *Composites Science and Technology*, 197 (2020) : 108244, <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2020.108244>
- 2) Bo Ren, C.T. Wu, and Dandan Lyu, “An h-adaptive meshfree-enriched finite element method based on convex approximations for the three-dimensional ductile crack propagation simulation”, *Computer Aided Geometric Design*, 76 (2020) : 101795, <https://doi.org/10.1016/j.cagd.2019.101795>
- 3) Shibanuma, K. et al., “A model of cleavage crack propagation in a BCC polycrystalline solid based on the extended finite element method”, *Acta Materialia* 176 (2019) : 232-241, doi : [10.1016/j.actamat.2019.07.013](https://doi.org/10.1016/j.actamat.2019.07.013)

- 4) Yumoto, Y. et al., “An s-version finite element method without generation of coupling stiffness matrix by using iterative technique”, *Mechanical Engineering Journal*, 3 (2016) : 16-00001, doi : 10.1299/mej.16-00001
- 5) 文部科学省, 「ポスト「京」プロジェクト重点課題 (7) 「次世代の産業を支える新機能デバイス・高性能材料の創成」, <https://cdmsi.issp.u-tokyo.ac.jp/> (2021年2月13日アクセス)
- 6) 国立研究開発法人科学技術振興機構 (JST), 「未来社会創造事業」, <https://www.jst.go.jp/mirai/jp/> (2021年2月13日アクセス)
- 7) 国立研究開発法人新エネルギー産業技術総合開発機構 (NEDO), 「水素利用技術研究開発事業」, https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100448.html (2021年2月13日アクセス)
- 8) 国立研究開発法人新エネルギー産業技術総合開発機構 (NEDO) 「燃料電池等利用の飛躍的拡大に向けた共通課題解決型産学官連携研究開発事業」, https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100182.html (2021年2月13日アクセス)
- 9) 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構 (JAXA), 「aFJR (高効率軽量ファン・タービン技術実証プロジェクト)」, <http://www.aero.jaxa.jp/research/ecat/afjr/> (2021年2月13日アクセス)
- 10) 国立研究開発法人科学技術振興機構, 「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」, <https://www.jst.go.jp/sip/k03.html> (2021年2月13日アクセス)
- 11) Ito Hiroaki et al., “Multiscale model prediction of ferritic steel fatigue strength based on microstructural information, tensile properties, and loading conditions (no adjustable material constants) ”, *International Journal of Mechanical Sciences* 170 (2020) : 105339, <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.105339>
- 12) Hina Najama et al., “Strain rate and hydrogen effects on crack growth from a notch in a Fe-high-Mn steel containing 1.1 wt% solute carbon”, *International Journal of Hydrogen Energy* 45 (2020) : 1125-1139, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.10.227>
- 13) Yuhei Ogawa et al., “Hydrogen-assisted fatigue crack-propagation in a Ni-based superalloy 718, revealed via crack-path crystallography and deformation microstructures”, *Corrosion Science* 174 (2020) : 108814, <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2020.108814>
- 14) Shank S. Kulkarni, and Alireza Tabarraei, “An ordinary state based peridynamic correspondence model for metal creep”, *Engineering Fracture Mechanics* 233 (2020) : 107042, <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2020.107042>
- 15) Timothy Artza et al., “Computational model for oxidation-assisted rupture of ceramic matrix composites”, *International Journal of Solids and Structures* 202 (2020) : 195-207, <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2020.05.009>
- 16) R.M.Sencu et al., “Multiscale image-based modelling of damage and fracture in carbon fibre reinforced polymer composites”, *Composites Science and Technology* 198 (2020) : 108243, <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2020.108243>
- 17) Bang He, Louis Schuler, and Pania Newell, “A numerical-homogenization based phase-field fracture modeling of linear elastic heterogeneous porous media”, *Computational Materials Science* 176 (2020) : 109519, <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2020.109519>
- 18) Rodolfo Ledesma, Frank Palmieri, and John Connell, “Laser induced breakdown spectroscopy

of polymer matrix composites for real-time analysis of trace surface contaminants : A review”, *International Journal of Adhesion and Adhesives* 98 (2020) : 102528, <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2019.102528>

- 19) Shenli Peiet al., “Mechanical properties prediction of injection molded short/long carbon fiber reinforced polymer composites using micro X-ray computed tomography, Composites Part A”, *Applied Science and Manufacturing* 130 (2020) : 105732, <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.105732>
- 20) Xiaotan Yuan et al., “Nondestructive effect of the cusp magnetic field on the dendritic microstructure during the directional solidification of Nickel-based single crystal superalloy”, *Journal of Materials Science & Technology* 62 (2021) : 52-59, <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.05.059>
- 21) Haicheng Yu and Shaofan Li, “On energy release rates in Peridynamics”, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 142 (2020) : 104024, <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2020.104024>
- 22) Yu-Chuan Hsu, Chi-Hua Yu and Markus J. Buehler, “Using Deep Learning to Predict Fracture Patterns in Crystalline Solids”, *Matter* 3 (2020) : 197-211, <https://doi.org/10.1016/j.matt.2020.04.019>
- 23) 15th US National Congress on Computational Mechanics (USNCCM15) , <http://15.usnccm.org/> (2021年2月13日アクセス)
- 24) Bhattacharyya, and R., Basu, P.K., “Multiscale progressive damage analysis of CFRP composites using a mechanics based constitutive relation”, *Composite Structures* 235 (2020) : 111759, DOI : 10.1016/j.compstruct.2019.111759
- 25) GE Aviation , “New GENx Engine Advancing Unprecedented Use of Composites in Jet Engines”, <https://www.geaviation.com/press-release/genx-engine-family/new-genx-engine-advancing-unprecedented-use-composites-jet-engines> (2021年2月13日アクセス)
- 26) Li Chen, et al., “Generalized quasicontinuum modeling of metallic lattices with geometrical and material nonlinearity and variability”, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 366 (2020) : 112878, <https://doi.org/10.1016/j.cma.2020.112878>
- 27) Fengbo Han, Franz Roters, and Dierk Raabe, “Microstructure-based multiscale modeling of large strain plastic deformation by coupling a full-field crystal plasticity-spectral solver with an implicit finite element solver”, *International Journal of Plasticity* 125 (2020) : 97-117, <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2019.09.004>
- 28) 22nd European Conference on Fracture (ECF22) , <http://www.ecf22.rs/> (2021年2月13日アクセス)
- 29) Stefan Loehnert, and Lukas Munk, “A mixed extended finite element for the simulation of cracks and heterogeneities in nearly incompressible materials and metal plasticity”, *Engineering Fracture Mechanics* 237 (2020) : 107217, <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2020.107217>
- 30) Arnd Koeppe, Franz Bamer, and Bernd Markert, “An intelligent nonlinear meta element

2.1

俯瞰区分と研究開発領域
エネルギー区分

- for elastoplastic continua : deep learning using a new Time-distributed Residual U-Net architecture”, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 366 (2020) : 113088, <https://doi.org/10.1016/j.cma.2020.113088>
- 31) “Fracture across Scales”, *Integrating Mechanics, Materials Science, Mathematics, Chemistry, and Physics*, <https://www.frascal.research.fau.eu/> (2021年2月13日アクセス)
- 32) V. Lazarus, B. Prabela, T. Cambonie, and J.B. Leblond, “Mode I+III multiscale cohesive zone model with facet coarsening and overlap”, *Solutions and applications to facet orientation and toughening, Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 141 (2020) : 104007, <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2020.104007>
- 33) “Ductile Fracture at Low Stress Triaxialities”, <https://anr.fr/Project-ANR-11-BS09-0008> (2021年2月13日アクセス)
- 34) “The Composites Centre”, *Imperial Collage London*, <https://www.imperial.ac.uk/composites-centre/> (2021年2月13日アクセス)
- 35) Sergio Turteltaub, and Rubén Suárez-Millán, “Energetically-consistent multiscale analysis of fracture in composites materials”, *European Journal of Mechanics - A/Solids* 84 (2020) : 104079, <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2020.104079>
- 36) Prof. Pedro Camanho, University of Porto, https://sigarra.up.pt/feup/en/func_geral.formview?p_codigo=240020 (2021年2月13日アクセス)
- 37) Yong Chao, et al., “Multiscale investigations into the fracture toughness of SiC/graphene composites : Atomistic simulations and crack-bridging model”, *Ceramics International* (2020) , <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.08.082>
- 38) H₂ Mobility, <https://h2.live/en/h2mobility> (2021年2月13日アクセス)
- 39) CIKONI GmbH, “Development of CFRP Hydrogen Pressure Vessels”, <https://cikoni.com/en/development-of-cfrp-hydrogen-pressure-vessels> (2021年2月13日アクセス)
- 40) ONERA, “Materials and Structures”, <https://www.onera.fr/en/research/materials-and-structures-domain> (2021年2月13日アクセス)
- 41) CIMComp., “Centre for Innovative Manufacturing in Composites”, <https://cimcomp.ac.uk/> (2021年2月13日アクセス)
- 42) University of Bristol, “Aerospace Engineering”, <https://www.bristol.ac.uk/engineering/departments/aerospace/> (2021年2月13日アクセス)
- 43) Hong Yang, Sarkis Gavras, and Hajo Dieringa, “Creep Characteristics of Metal Matrix Composites”, *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering* (2021) , <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.11822-3>
- 44) N. Li, P.H. Chen, and X. Ling, “A microscopic elasto-plastic damage model for characterizing transverse responses of unidirectional fiber-reinforced polymer composites”, *Thin-Walled Structures* 154 (2020) : 106828, <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106828>
- 45) Qi Tong and Shaofan Li, “A concurrent multiscale study of dynamic fracture”, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 366 (2020) : 113075, <https://doi.org/10.1016/j.cma.2020.113075>

2.1

俯瞰区分と研究開発領域
エネルギー区分

- 46) Yu Gong et al., “A modified mode I cohesive zone model for the delamination growth in DCB laminates with the effect of fiber bridging”, *International Journal of Mechanical Sciences* 176 (2020) : 105514, <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.105514>
- 47) Lu Haia, Jian-Ying Wu, and Jie Lia, “A phase-field damage model with micro inertia effect for the dynamic fracture of quasi-brittle solids”, *Engineering Fracture Mechanics* 225 (2020) : 106821, <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2019.106821>
- 48) Dongdong Ye et al., “Characterization of thermal barrier coatings microstructural features using terahertz spectroscopy”, *Surface and Coatings Technology* 394 (2020) : 125836, <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.125836>
- 49) Junlei Ding, Tiantang Yu, Yin Yang, and Tinh Quo Bui, “An efficient variable-node XFEM for modeling multiple crack growth : A Matlab object-oriented implementation”, *Advances in Engineering Software* 140 (2020) : 102750, <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2019.102750>
- 50) Xiaoxiao Li et al., “Effect of boron addition on the microstructure and mechanical properties of K4750 nickel-based superalloy”, *Journal of Materials Science & Technology* 60 (2021) : 177-185, <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.02.079>
- 51) Kunming Pan et al., “Oxidation behavior of Mo-Si-B alloys at medium-to-high temperatures”, *Journal of Materials Science & Technology* 60 (2021) : 113-127, <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.06.004>
- 52) 環境省, 「国・地域別サマリ-中国」, https://www.env.go.jp/seisaku/list/ondanka_saisei/lowcarbon-h2-sc/overseas-trend/PDF/overseas-trend_02_china_20190902.pdf (2021年2月13日アクセス)
- 53) Mechanics&Materials Modeling Lab, Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST) , <https://sites.google.com/site/seunghwalab/> (2021年2月13日アクセス)
- 54) Noman Iqbal, Yasir Ali, and Seungjun Lee, “Analysis of mechanical failure at the interface between graphite particles and polyvinylidene fluoride binder in lithium-ion batteries”, *Journal of Power Sources* 457 (2020) : 228019, <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.228019>
- 55) M. Rouway et al., “Graphene and Carbon nanotubes reinforced ceramic nanocomposite TiO₂-MgO : Experimental and numerical study”, *Materials Today : Proceedings* (2020) , <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.177>
- 56) Aanchal Yadav, R.K. Godara, and Gagandeep Bhardwaj, “A review on XIGA method for computational fracture mechanics applications”, *Engineering Fracture Mechanics* 230 (2020) : 107001, <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2020.107001>
- 57) P. Kasirajan et al., “Phase field modeling of fracture in Quasi-Brittle materials using natural neighbor Galerkin method”, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 366 (2020) : 113019, <https://doi.org/10.1016/j.cma.2020.113019>
- 58) Priyank Upadhyaya et al., “Multiscale modeling of strength and failure behavior of carbon nanostructure reinforced epoxy composite adhesives in bonded systems”, *European Journal*

of Mechanics - A/Solids 80 (2020) : 103932, <http://eprints.gla.ac.uk/216436/> (2021年2月13日アクセス)

- 59) Sangeeta Das, and Shubhajit Das, “Properties for Polymer”, *Metal and Ceramic Based Composite Materials, Reference Module in Materials Science and Materials Engineering* (2021) , <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.11897-1>
- 60) Mohammad Khoshghadam-Pireyousefan et al., “Fundamentals of Spark Plasma Sintering for Metallic, Ceramic, and Polymer Matrix Composites Production”, *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering* (2021) , <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.11907-1>

【本文全般に対して参考とした文献】

- a) 村上敬宜, 「国内外の破壊力学研究の歴史と展望, 破壊力学の歴史と今後の展望 (その1)」『材料』 67 巻 (2018) : 401-406, doi : 10.2472/jsms.67.401
- b) 村上敬宜, 「国内外の破壊力学研究の歴史と展望, 破壊力学の歴史と今後の展望 (その2)」『材料』 67 巻 (2018) : 407-412, doi : 10.2472/jsms.67.407
- c) 村上敬宜, 「国内外の破壊力学研究の歴史と展望, 破壊力学の歴史と今後の展望 (その3)」, 『材料』 67 巻 (2018) : 487-492, doi : 10.2472/jsms.67.487
- d) 岸本喜久雄, 国内外の破壊力学研究の歴史と展望, 機械工学における破壊力学の展開と界面の力学, 『材料』 67 巻 (2018) : 574-579, doi : 10.2472/jsms.67.574

2.1

俯瞰区分と研究開発領域
エネルギー区分