

2.6.3 破壊力学

(1) 研究開発領域の定義

本領域は材料システムに発生したき裂が進展して破壊に至るまでの過程を取り扱い、機械・構造物についての設計・保守・管理に関する理論と手法に関する研究開発動向を含む領域である。その範囲には、材料内部あるいは材料同士の組み合わせからなる界面に発生したき裂が進展するか否かを判断するための理論と手法、種々の材料に対するき裂進展則に基づいた寿命予測技術の開発、重要なき裂の寸法と形状を把握するための非破壊検査手法の開発などがある。さらには、物理現象としてのき裂発生・進展の素過程の解明に関する実験的、数値解析的手法の技術開発も含む。

(2) キーワード

き裂、欠陥、破壊靱性、異種材料界面、疲労、クリープ破壊、水素脆化、き裂発生・進展、応力拡大係数、寿命予測、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、工業立国たる日本の国際競争力にもつながる最重要事項の一つである。航空機、高速鉄道、自動車などの輸送分野での破損事故は大切な人命を危険に晒し、甚大な社会的損害に繋がるため、新構造や新材料、新システムを導入した場合は、破損を未然に防ぐための技術が必要不可欠である。一方で有限で貴重な資源を有効に活用して安全性と経済性を両立するために寿命予測の高度・高精度化も必要とされている。また、昨今、電気・ガス・水道、さらには、道路・橋梁・トンネルなどのコンクリート構造物等の社会インフラ設備の老朽化が顕在化してきている。限られた予算や人手でこれら老朽化した設備を適切な寿命予測により効率的に維持管理するために、き裂を精度良く検出・計測する非破壊検査技術も求められている。これら社会の要請に応えるために、科学的根拠に基づいた設計・維持管理手法の構築が以前にも増して必要とされている。

本領域は機器構造物をはじめとする材料システムのき裂発生・進展の素過程を解明し、さらには力学量と関連づけることで健全性を評価し、破壊、寿命を予測するための学術基盤を構築するものであり、社会的・科学技術的意義は極めて大きい。

[研究開発の動向]

破壊力学は、構造内部や表面からのき裂発生・進展を扱う。特に、疲労き裂進展による寿命予測が可能となったことで、発電プラントや航空機などの設計・保守管理に積極的に利用され発展してきた。最近では、汎用構造解析ソフトウェアに「応力拡大係数」や「J積分」などの破壊力学パラメータを計算できる機能も実装されており、手法としてはほぼ完成されている。

シミュレーションを正確に行うためには、材料データが必要である。様々な材料の組み合わせからなる材料システムの健全性評価のために、その対象は多様化してきている。また材料システムが使用される環境も益々過酷になり、高温、水素環境における破壊現象の理解も重要である。さらにカーボンニュートラルの実現に向けて材料システムの軽量化が重要な課題とされており、そのために複合材料や積層造形材料の利用が拡大してきている。また寿命予測の高精度化のために、根拠となるき裂情報を取得するための非破壊検査技術の進歩も重要である。効率的なデータ取得、データ精度向上のために、機械学習・深層学習を援用した技術開発が世界中で展開されている。

材料のミクロ組織がマクロな材料特性を決定づけるため、第一原理を用いた原子レベルの材料探索から、ユニットセルモデルでメゾスケールを扱う均質化モデル、さらには大規模構造解析へとつなぐマルチスケール

解析手法の開発が引き続き行われている。スーパーコンピュータ富岳を有効活用した計算破壊力学分野の益々の発展が期待されている。破壊現象をモデル化する手法として、マルチフィジックスな扱いができ、エネルギーの観点から破壊を論じることができるフェーズフィールドき裂進展解析手法が注目されている。ここ数年解析手法の発展が著しく、従来の有限要素法では再現できない現象を扱えるようになってきている。また、マクロスケールで生じる破壊現象をミクロスケールで解釈するためにナノ・マイクロ材料を対象とした実験と解析に関する研究が行われている。

金属の積層造形法 (AM: Additive Manufacturing) が発展してきており、日本も技術研究組合次世代3D積層造形技術総合開発機構を中心に研究開発が進められている。主に、製造方法や合金開発に関する基礎研究が多い。一方、世界的には航空宇宙分野や医療分野など高付加価値な製品を中心として量産化が始まりつつあり、品質保証の観点から、内部欠陥の分析、欠陥を起点とした疲労き裂進展の評価、さらには、疲労設計法の規格化に関する議論も進められている。

電気自動車 (EV) の普及に伴い、Li-Ionバッテリーの安全性に関する研究が米国、中国を中心に推進されている。自動車事故の際、衝撃負荷時のバッテリー内部の破壊現象の解明、リチウムイオン電池の電気化学反応を考慮した構造-電気-化学のマルチフィジックス解析手法の研究開発が必要とされており、カーボンニュートラルを背景に急速に普及している電気自動車の信頼性確保には重要な課題とされている。一方、日本では燃料電池自動車 (FCEV) のためのCFRP水素貯蔵タンクの研究開発が進められており、水素社会を実現するために安全性の確保と低コスト化が課題となっている。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

• ナノスケールの力学的特性

戦略的創造研究推進事業「さきがけ」、「CREST」では、ナノスケールでのメカニズム解明、ナノスケールの力学的特性を利用した材料設計、また、関連する評価・解析技術やマルチフィジックスへの展開等を目指し研究が進められている。破壊力学との関連が深い内容として、ナノスケールでの変形、疲労、摩耗、界面などが取り上げられているほか、新たな機能性の発現も試みられている。また、これらの研究を進めるため、シミュレーションや機械学習など情報工学との融合が進められており、新しい破壊力学の創出が期待される。

• データサイエンスによる材料開発と損傷、き裂進展予測

複合材料においては、母材に粒子や繊維を混合して剛性や強度といった機械的特性を向上させている。ミクロスケールの材料構造とマクロスケールの機械的特性を関連づけるマルチスケール解析手法が開発されてきた。一方、最近、材料配置の画像から機械的特性と関連づけ、さらには、応力・ひずみ分布、損傷予測をするための機械学習、深層学習といったAIを活用する技術が提案されている。また、繰り返し負荷を受ける疲労き裂においても、過去のデータベースを機械学習することで、疲労き裂進展挙動を予測する手法の開発も行われている。

• Additive Manufacturing (AM、積層造形)

いわゆる3Dプリンタを利用して材料を付加することで形状を作り出す方法であり、世界中で活発に研究が行われている。AM法は、従来の除去加工では作れないような形状を一体成型品として作ることができるため、トポロジー最適化手法と組み合わせると軽量かつ高剛性・高強度な部材を作ることができる。構造部材としての応用では、特に、金属材料 (ステンレス鋼、アルミニウム合金、チタン合金等) についての研究が注目されている。金属3Dプリンタ装置およびその関連技術に関しては、研究・開発、生産システム構築、実用化のいずれも海外の方が進んでいる。日本ではNEDO (国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構) 「次世代型産業用3Dプリンタの造形技術開発・実用化事業」などを通じた装置の実用化が進められた。また、

「積層造形部品開発の効率化のための基盤技術開発事業」では、プロセスモニタリング技術や欠陥発生予測技術などの開発が進められ、破壊力学を応用することで強度・寿命の予測に繋がっている。

生産性に関しては従来の金属加工技術と比べて金属3Dプリンタは劣る場合が多く、マスプロダクションとは異なる高付加価値製品、たとえば医療分野や航空分野などの適用例が多く報告されている。これらは同時に高い強度信頼性が求められるため、強度・寿命の予測・制御技術は重要とされている。

金属3Dプリンタ装置は、造形プロセスに依存して特徴があり、「高精度化」と「高速度（高生産性）化」の技術開発トレンドがみられる。現状、実用部品を製造するためには、ほとんどの場合には熱処理や切削加工などの二次工程が必要であり、これらは当然ながら部材の強度にも関連する。プロセスから構造解析までを通貫した強度・寿命予測技術が必要とされている。

3Dプリンタでなければ実現できない構造、たとえば軽量かつ高剛性を両立させる中空微細構造、機械的性質に任意の異方性を付与した構造、ネガティブなポアソン比を有する構造などを応用した製品の実用化が期待される。これらの実現のためには、情報工学と融合した設計技術および、設計から構造までの一貫した解析技術、それを実現する3D積層造形のためのプロセス解析技術が重要とされている。学協会でも、破壊力学に関連した金属積層造形の研究は増加しており、材料組織、機械的性質、熱ひずみ・残留応力、疲労強度¹⁾などについて検討されている。

海外の動向も活発であり、IIW (International Institute of Welding) の雑誌“Welding in the World (Springer)”では2020年にAMの特集号 (“Additive Manufacturing – Processes, Simulation and Inspection”)²⁾を発行している。また、IIWとEWF (European Welding Federation) が共同で International Additive Manufacturing Qualification System (IAMQS)³⁾を進めている。

• 異材接合・積層パネル

カーボンニュートラルの実現のためには材料システムの軽量化が欠かせず、飛行機や自動車といった移動体等において、従来の金属材料から複合材料などのより軽量な材料への転換が進められている。また、これまでにない革新的な構造の実現や新しい機能性発現のため、異材接合技術が開発されている。これら様々な異種材料からなる界面は材料的にも力学的にも不連続であり、破壊力学の適用性の検証が行われているが材料・接合プロセス、力学・評価のいずれにおいても課題がある。たとえば、異種金属界面での金属間化合物の生成挙動、異材接着界面端での特異応力場の問題などが、実験的、解析的に検討されている。マルチスケールでの材料解析および数値解析技術が、プロセス技術や強度評価技術と融合することで実用化が加速されると考えられる。

実用化においてとくに重要な強度信頼性に関しては、様々な接合部へ適用できる統一的な強度評価試験法や評価パラメータはなく、個別に検討が必要な状況である。異材接合の実用化のためには、これらの確立が重要とされており、破壊力学の果たす役割は大きく、実用的な試験・評価法の開発が望まれる。また、規格戦略的にも、試験法規格の国際標準化も重要であり、コーティング材の界面強度評価法 (ISO 20267、ISO 19207) の例のように、日本が主導する破壊力学パラメータに基づいた異材界面の強度評価法の提案・国際規格化なども進める必要がある。

異材接合では、接着接合や機械締結も多く適用されている。これらに接合部の強度信頼性に関しても破壊力学の役割は大きく、前述の特異応力場の問題、締結・接合部からの疲労き裂発生・進展の問題、異材界面の物理的・材料的な欠陥の評価技術など、様々な技術開発が進められている。

• 車載用バッテリーの破壊とマルチフィジックス解析

二酸化炭素 (CO₂) 排出規制のために、自動車の電動化が進められており、ハイブリッド車・電気自動車が急速に普及している。現在、車載用バッテリーの多くには、リチウムイオン電池が用いられており、自動車事故の際に、バッテリーが変形し、電極のショート・加熱により自動車火災に至ることが懸念されている。そ

のため、衝撃負荷時のバッテリー内部の破壊現象の解明、リチウムイオン電池の電気化学反応を考慮した構造-電気-化学のマルチフィジックス解析手法の研究開発が、米国、中国を中心に取り組まれている。

• 非破壊検査の DX

繰返し荷重が負荷される部材に生じる疲労き裂の非破壊検査技術は、部材の余寿命を正確に予測するために重要な技術である。導電性のある金属や強化繊維複合材の場合、電気抵抗値からき裂長さを同定することが可能であるが、コンクリートや樹脂などの絶縁材料の場合は適用が困難であった。DX（非破壊検査分野においては特にNDE4.0と呼称される）の流れを背景に正確な欠陥、損傷状況の把握のために画像を用いた診断、あるいは複数のセンサを併用したモニタリングに関する研究が行われている。近年、深層学習手法を用いた機械学習によるき裂検出技術の開発が盛んに行われており、高架橋、トンネル、道路床板のき裂検出に適用されている。さらに、画像関連法を用いて、変位・ひずみ分布からき裂長さを求める手法も開発されている。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

■国内

- NEDO「積層造形部品開発の効率化のための基盤技術開発事業」2019～2023年度、2021年度予算:2.0億円

金属製品のものづくりに活用が始まりつつある積層造形技術に対して、日本は世界に対して後塵を拝している。積層造形品の品質保証を確保するためには、金属積層造形における溶融凝固現象を解明し欠陥発生を予測するとともに、プロセス中での高度な計測・機械制御技術を開発する必要がある。技術研究組合次世代3D積層造形技術総合開発機構が主体となって、金属の積層造形部品等の品質の確保及び開発の効率化を目指している。破壊力学の適用先としては、内部欠陥を起点とした破壊、疲労などに関連が深い。

- NEDO「革新的新構造材料等研究開発」2014～2022年度、2022年度予算：24億円

本事業では、エネルギー使用量及びCO₂排出量削減を図るため、その効果が大きい輸送機器（自動車、鉄道車両等）の抜本的な軽量化に繋がる技術開発等を行っている。輸送機器の原材料を革新的新構造材料等に置き換えることで、抜本的な軽量化（自動車車体の場合50%軽量化）への取り組みが期待されている。破壊力学の適用先としては、CFRPの損傷・破壊、マルチマテリアル接合部の破壊などに関連が深い。新構造材料技術研究組合（ISMA）が主体となり活動。

■国外

- Reliability-oriented Lightweight Optimization Framework for Intelligent Design of Material-structure Integration, H2020-EU.1.3. - EXCELLENT SCIENCE - Marie Sklodowska-Curie Actions Intelligent lightweight design of multiscale lattice structures made from porous materials, 2022/9/1-2024/8/31, 212 933,76 EURO, CARDIFF UNIVERSITY, UK,

軽量で十分な強度を持ち、さらに柔軟性も有するマルチスケール格子構造の設計手法および積層造形による実現を目指すプロジェクトである。

- Voxel Based Material Design: Amalgamation of Additive Manufacturing and Scanning Electron Microscopy, H2020-EU.1.1. - EXCELLENT SCIENCE - European Research Council (ERC) , Electrons that wear two hats support aerospace additive manufacturing, 2021/11/1-2026/10/31, 2 945 003,00 EURO , FRIEDRICH-ALEXANDER-UNIVERSITAET ERLANGEN-NUERNBERG,

GERMANY,

複雑形状の航空宇宙部品の性能向上を目指し、パウダーベット型に電子ビーム加熱を採用し、理想の局所材料特性を発現するための積層造形手法を開発することを目的としている。

- **Artificial Intelligence driven topology optimization of Additively Manufactured Composite Components, H2020-EU.1.3. - EXCELLENT SCIENCE - Marie Sklodowska-Curie Actions, New components of improved fracture toughness, 2021/9/1-2023/8/31, 160 085,44 EURO, ETHNICON METSOVION POLYTECHNION, GREECE,**

欧州の航空輸送機器分野では、積層造形で作られた複合材料が導入されつつあるが、複雑な形状や脆性的な損傷破壊を起こすことが問題となっている。このプロジェクトでは、トポロジー最適化を用いたサロゲートモデルを構築し、高破壊じん性値を有する部材を開発することを目的としている。

- **Green Additive Manufacturing through Innovative Beam Shaping and Process Monitoring, HORIZON.2.4 - Digital, Industry and Space, 2022/6/1-2025/3/31, 6 771 803,25 EURO, TECHNISCHE UNIVERSITAET MUENCHEN, GERMANY + Netherlands + France + Italy + Spain + Sweden + Israel,**

航空宇宙、エネルギー、自動車分野において、最新のパウダーベット型金属積層装置の開発とそのデモンストレーションを行うことを目的としている。

(5) 科学技術的課題

- **非破壊検査技術の高度化**

非破壊検査分野においてもデジタル化（NDE4.0）が進んでおり、ディープラーニングやAI技術を活用した手法が開発されている。一方、その背景にある物理現象の理解とモデル化についても並行した研究が必要とされている。

- **接合部/接着層の品質向上と長寿命化**

材料システムに使用される材料種類の多様化により、その性能と信頼性の鍵を握る異種材料同士の接合/接着界面の評価が益々重要な課題となってきている。新しい高強度・長寿命接合/接着技術の開発に加えて、当該界面の強度を正確に評価するための破壊力学的手法の開発と進展が望まれる。

- **Additive Manufacturing (AM)**

金属材料の積層造形法は、自由な形状設計ができることから、トポロジー最適化手法と組み合わせ、高付加価値製品を生み出すことができ、世界的には航空宇宙分野や医療分野を中心に製品の量産化が始まっており、日本では金型への応用が期待されている。エネルギー関連機器・高温機器に関しては、革新的な構造の実現による高信頼性・高機能の実現が期待される。

この研究・開発には設計、材料、プロセス、装置など、さまざまな技術が高次元で融合することが求められる。設計に関しては、トポロジー最適化による強度・構造に関する開発が進んでいるが、積層造形の利点を十分に活かした革新的な構造を実現するためには、強度だけではなく機能性も含めた設計手法の開発がキーポイントとなる。たとえば高温で作動するエネルギー関連機器などを想定した場合、熱、流体、振動、摩擦・摩耗などを総合的に評価する必要がある。そのためには、個別の専門分野だけではなく、広く機械工学、材料工学、情報・制御を俯瞰できる設計人材の育成が必要とされている。たとえばスウェーデンの University West では、AMに関する修士課程コースが設置されており、産学連携による人材育成が進められている。

材料面では成形中に生じる空孔や欠陥、熔融・凝固に伴う熱残留応力、材料の異方性などが生じる問題がある。これらと成形品の静的・動的強度、疲労強度とを関連づける研究が盛んに行われており、空孔や欠陥から生じるき裂は破壊力学的手法での評価が試みられており、強度、耐久性、健全性を評価する上で、破壊力学の果たすべき役割は大きく、今後の発展が期待される。

金属積層造形材料のさらなる実用化に対する課題はまだ多く、今後、高精度化、造形プロセスの高速度化とともに、インプロセスでの熱ひずみ・残留応力や欠陥発生低減技術とそれらの予測技術、金属積層造形材料の強度・寿命予測技術、マルチスケールでの機械的特性の制御技術が必要とされている。金属積層造形は、ネットシェープ、もしくはニアネットシェープが実現できるが、上記のような問題のほか、たとえば大型の構造物を考えた場合に全てを3Dプリンタで造形することは適切ではなく、その場合には、金属積層造形と従来のプロセスで製造された部材を溶接・接合する必要がある。溶接・接合部は、材料的にも力学的にも不連続であり、破壊事故につながる原因箇所となることが多い、したがって金属積層造形溶接材の強度評価および高信頼性実現のための溶接・接合プロセスの開発が求められる。他にも、エネルギー機器の高寿命化、稼働期間の長期化のためには、3Dプリンタを利用した補修技術の開発も有効と考えられる。造形プロセス中に複数の材料を供給する装置も開発されており異種金属接合界面の強度信頼性評価は重要となる。

積層造形プロセスの詳細が明らかになることで、装置のインプロセス制御技術が発展するほか、欠陥発生メカニズム、熱ひずみや残留応力の発生メカニズムの解明にも繋がり、設計、材料、プロセス、装置のいずれに対しても技術発展が期待される。

• 破壊じん性値データベースの拡充

破壊力学研究の手法は確立しているが、対象となる材料は日進月歩で開発されており、また、経年劣化や環境によってもき裂発生・進展特性は変化する。シミュレーションで評価する際にはこれらの条件下での破壊じん性値が必要であるが、一般的には入手しにくいのが現状である。国立研究開発法人物質・材料研究機構や独立行政法人製品評価技術基盤機構で行われた金属材料や樹脂の破壊じん性データベースが公開されているが、このような材料データベースの拡充が今後期待される。

• マルチスケール・マルチフィジックス破壊力学

マテリアルインフォマティクス (MI) による材料探索が精力的に行われており、それらをもとに新規材料開発が行われている。一方、破壊現象は原子結合だけで決まるわけではなく、応力腐食割れに代表されるように、その材料がおかれる環境、負荷形態、時間など様々な因子が影響する。これらを包括的に扱うために、マルチスケール・マルチフィジックス破壊力学の更なる発展が期待されている。

(6) その他の課題

• 法整備・標準化

法整備・標準化は国際競争力の要であるが、日本の競争力は国際的に十分な水準にあるとは言い難い。例えばJIS規格はISO/IECと整合化が図られているが、重要なこの作業は関連する研究者や技術者のボランティアに依存しているところが少なくなく、このための予算の拡充が望まれている。

• 若手人材の育成

日本の就労者人口が減少する中で、今後も老朽化した施設・設備の管理・保守業務が増加することが予想され、破壊力学を専攻する若手人材の確保・育成は、安全・安心の社会を維持するために重要な課題とされている。さらに、機械・構造物に関する保守・点検に関しては、機械学習やAIといった情報技術の導入が進められていることから、情報系分野の素養を持つ人材の育成も重要な課題とされている。

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ●積層造形された機能性合金の疲労き裂進展評価が行われている¹⁾。 ●次世代放射光施設計画 (Super Lightsource for Industrial Technology, Japan)
	応用研究・開発	△	↘	<ul style="list-style-type: none"> ●NEDOのインフラ維持管理・更新等の社会課題対応システム開発プロジェクト (2014～2018年度)以降、後継プロジェクトが充足しておらず、検査・モニタリング技術の開発は低調とみられる。 ●NEDOのプロジェクト下で、技術研究組合次世代3D積層造形技術総合開発機構が主体となって、積層造形製品における欠陥発生分析や対策についての検討が行われている。
米国	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●ディープラーニングを活用した天然ガスパイプラインの広域検査について検討されている⁴⁾。また非線形超音波により大型積層造形材料内部の接合不良部を検出する手法について検討している⁵⁾。 ●University of MemphisにおいてAM法で製造したTi合金の多軸疲労き裂進展の研究が行われている⁶⁾。また、米国エネルギー省 (DOE) のプロジェクトとして、University of Tennessee, KnoxvilleでX線による破壊過程の内部観察実験が行われている⁷⁾。さらに、米国DOE、the Office of Naval Researchのプロジェクトとして、The Pennsylvania State Universityで304Lステンレス鋼、Inconel625耐熱合金の研究が行われている^{8), 9)}。 ●Army Research Office, the Office of Naval Research, AFOSR-MURI, 米国DOE Basic Energy Sciences Grantのもと、機械学習、深層学習を援用した複合材料の性能予測や、データ駆動型の破壊予測の研究が行われている^{10), 11)}。
	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●積層造形により作製した、高比強度な銅合金格子構造の力学特性について調査している¹²⁾。 ●Ti合金の修理の研究がUniversity of Akronで行われている¹³⁾。Auburn UniversityにNational Centerが設置され、NASA, US Army, Boeingなど航空宇宙分野での応用を中心に産学官連携でAMに関連する破壊研究が行われている¹⁴⁾。Georgia Institute of Technologyでは、米国DOEの“Digital Twin Model for Advanced Manufacture of a Rotating Detonation Engine Injector”というプロジェクトで研究が進められている¹⁵⁾。 ●AVL, Hyundai, Murata, Tesla, Toyota North America, Volkswagen/Audi/Porsche, and other industrial partners through the MIT Industrial Battery Consortiumにて、Li-ionバッテリーの破壊、マルチフィジックス解析に関する研究が行われている^{16), 17)}。National Renewable Energy Laboratoryにおいて 米国DOEのプロジェクトでLi-Ionバッテリーの破壊に関する研究が行われている¹⁸⁾。
欧州	基礎研究	◎	→	<p>【EU】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●EUにおける破壊力学に関する研究・規格は、European Structural Integrity Society (ESIS)にて議論されており、隔年で国際会議が開催されており、2022年に“ECF23, European Conference on Fracture 2022”がポルトガルで開催された。 <p>【英国】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●ディープラーニングを活用して超音波画像等のデータからノイズやアーチファクトの影響を低減し、検査精度を向上する取り組みがなされている¹⁹⁾。 <p>【イタリア】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●基材へのレーザーテキスチャリングによりポリイミド接合部の静的および疲労強度が向上することを報告している²⁰⁾。 ●チタン合金の欠陥から発生する疲労き裂進展に関する研究が、接合研究所構造物健全性研究センターで行われている²¹⁾。チタン合金のAM材の微視組織からPeridynamics法による疲労き裂進展を予測する研究がUniversity of Strathclydeにて行われている²²⁾。低炭素鋼はCranfield Universityで行われている²³⁾。

2.6 エネルギー分野の
基盤科学技術

2.6 エネルギー分野の
基盤科学技術

				<p>【ドイツ】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●ガラス繊維複合材料の3Dプリント材の破壊研究が、University of Siegenで行われている²⁴⁾。 <p>【フランス】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●Ecole Polytechnique Institute Polytechnique de Parisで316L stainlessの研究が行われている²⁵⁾。
	応用研究・開発	◎	→	<p>【EU】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●欧州諸国で連携して現代の重要な課題の解決を目指すプログラム「Horizon Europe」が進行中である。 ●European XFELが2017年より稼働を開始している。 ●Horizon2020の下で、スウェーデンのLinköping University、UKのManufacturing Technology CentreにてAM材の疲労破壊に関する研究が行われている²⁶⁾。 <p>【英国】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●UKの接合研究所構造物健全性研究センターを中心に、Horizon2020 CleanSky2プロジェクトのもと、シミュレーションと合わせたAM材の変形・欠陥予測の研究が行われている²⁷⁾。 <p>【ドイツ】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●非破壊検査分野におけるデジタル化（NDE4.0）によるAI等の活用と、従来の欠陥検出の確率（POD）に基づく評価とのベストミックスについて検討している²⁸⁾。またNDE4.0に関する国際会議が2022年10月にベルリンで開催された（https://conference.nde40.com/）。 ●Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)にて、AM金属の疲労損傷許容設計に関する国際シンポジウムが開催された²⁹⁾。 ●AM金属の高サイクル疲労に関する統一的な損傷許容設計法の提案がなされている³⁰⁾。 <p>【フランス】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●複雑対象物を高精度に積層造形するダイナミックモデリング法が開発されている³¹⁾。 ●Institut de Recherche Technologique SystemXのプロジェクト（https://www.irt-systemx.fr/en/projets/was/）で、ワイヤー積層造形に関する産学官研究が行われている。
中国	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●ディープラーニングを活用してアクティブ赤外線サーモグラフィ画像から非平面CFRPの欠陥を検出する方法や³²⁾、CTデータから積層造形材料内部の欠陥を検出する手法について検討している³³⁾。中国では、National Natural Science Foundation, National Key Research and Development Program, National Science and Technology Major Projectなどのファンドで実施されている。 <p>【データサイエンス関連】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●脆性材料の破壊強度を深層学習で予測する研究がTsinghua Universityで行われている³⁴⁾。疲労き裂進展寿命の予測する研究がBeihang University, Beihang University, Southwest Jiatong Universityで行われている^{35), 36), 37), 38)}。 <p>【Li-Ion 関連】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●Li-ionバッテリーの破壊、マルチフィジックス解析に関する研究が、北京科学技術大学、北京航空航天大学、上海交通大学で行われている^{39), 40), 41)}。 <p>【AM 関連】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●Inconel718耐熱合金のAM法による製造と強度の異方性について研究がTsinghua Universityで行われている⁴²⁾。Al合金に関してはBeihang Universityで行われている⁴³⁾。Ti合金に関してはAECC Beijing Institute of Aeronautical Materialsで行われている⁴⁴⁾。 <p>【き裂検出関連】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●リアルタイムかつその場で疲労き裂長さを測定する手法がBeihang Universityで開発されている⁴⁵⁾。

	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●積層造形したニッケル基超合金の異方性損傷について検討している⁴⁶⁾。 ●次世代ダイアタッチ材料の候補である多層カーボンナノチューブを添加した焼結銀のせん断破壊靱性値について報告している⁴⁷⁾。 ●Joint Fund of Large-scale Scientific Facility of National Natural Science Foundation of China (U2032121) and the National Key R & D Program of China (2016YFB1200602-17)。疲労データが磁気浮上車両の開発に使われている⁴⁸⁾。 ●State Key Lab of Ocean Engineering, Shanghai JiaoTong Universityにて、企業で製造した海洋構造物における疲労き裂進展について機械学習から予測する手法の開発が行われている⁴⁹⁾。
韓国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ●Korea Institute of Machinery & Materials grant funded by the Korea government (MSIT), Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP), the Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE) のプロジェクトで、アコースティックエミッションとディープラーニングを組み合わせたAM材の欠陥検出技術の開発が行われている⁵⁰⁾。
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ●Sejong Universityにて、Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement (KAIA) grantで、道路インフラにおけるき裂検出技術に関する調査がまとめられている⁵¹⁾。
その他の国・地域 (任意)	基礎研究	○	↗	<p>【豪州】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●Monash UniversityにてAM法で作成されたステンレス鋼の疲労き裂進展に関する研究が行われている⁵²⁾。Ti合金の破壊靱性値の異方性に関する研究がThe University of New South Walesで行われている⁵³⁾。
	応用研究・開発	—	—	

(註1)「フェーズ」

「基礎研究」：大学・国研などでの基礎研究レベル。

「応用研究・開発」：技術開発（プロトタイプの開発含む）・量産技術のレベル。

(註2)「現状」 ※我が国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価。

◎：他国に比べて特に顕著な活動・成果が見えている ○：ある程度の顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない ×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3)「トレンド」

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

- 火力発電（環境・エネ分野 2.1.1）
- 原子力発電（環境・エネ分野 2.1.2）
- 金属系構造材料（ナノテク・材料分野 2.4.1）
- 複合材料（ナノテク・材料分野 2.4.2）
- ナノ力学制御技術（ナノテク・材料分野 2.4.3）
- ナノ・オペランド計測（ナノテク・材料分野 2.6.2）
- 物質・材料シミュレーション（ナノテク・材料分野 2.6.3）

参考・引用文献

- 1) 清水利弘, 他「Additive Manufacturingで作製した機能性合金における疲労き裂進展挙動の鍛造および鋳造材との比較」『鉄と鋼』108 巻 3 号 (2022) : 191-198., <https://doi.org/10.2355/tetsutohagane.TETSU-2021-084>.
- 2) International Institute of Welding (IIW), “IIW Annual Report 2020”, <https://cld.bz/W9w88cp>, (2023年1月30日アクセス) .
- 3) International Institute of Welding (IIW), “IIW Annual Report 2021”, <https://cld.bz/0m6Mpuu>, (2023年1月30日アクセス) .
- 4) Subrata Mukherjee, et al., “Inline Pipeline Inspection Using Hybrid Deep Learning Aided Endoscopic Laser Profiling”, *Journal of Nondestructive Evaluation* 41 (2022) : 56., <https://doi.org/10.1007/s10921-022-00890-1>.
- 5) Sina Zamen, et al., “Characterization of nonlinear ultrasonic waves behavior while interacting with poor interlayer bonds in large-scale additive manufactured materials”, *NDT & E International* 127 (2022) : 102602., <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2022.102602>.
- 6) Niloofar Sanaei and Ali Fatemi, “Defect-based multiaxial fatigue life prediction of L-PBF additive manufactured metals”, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures* 44, no. 7 (2021) : 1897-1915., <https://doi.org/10.1111/ffe.13449>.
- 7) Hahn Choo, et al., “Deformation and fracture behavior of a laser powder bed fusion processed stainless steel: In situ synchrotron x-ray computed microtomography study”, *Additive Manufacturing* 40 (2021) : 101914., <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.101914>.
- 8) Shipin Qin, Zhuqing Wang and Allison M. Beese, “Orientation and stress state dependent plasticity and damage initiation behavior of stainless steel 304L manufactured by laser powder bed fusion additive manufacturing”, *Extreme Mechanics Letters* 45 (2021) : 101271., <https://doi.org/10.1016/j.eml.2021.101271>.
- 9) Shipin Qin, et al., “Plasticity and fracture behavior of Inconel 625 manufactured by laser powder bed fusion: Comparison between as-built and stress relieved conditions”, *Materials Science and Engineering: A* 806 (2021) : 140808., <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.140808>.
- 10) Zhenze Yang, Chi-Hua Yu and Markus J. Buehler, “Deep learning model to predict complex stress and strain fields in hierarchical composites”, *Science Advances* 7, no. 15 (2021) : eabd7416., <https://doi.org/10.1126/sciadv.abd7416>.
- 11) Xing Liu, et al., “Knowledge extraction and transfer in data-driven fracture mechanics”, *PNAS* 118, no. 23 (2021) : e2104765118., <https://doi.org/10.1073/pnas.2104765118>.
- 12) Kavan Hazeli, et al., “Mechanical behavior of additively manufactured GRCo-84 copper alloy lattice structures”, *Additive Manufacturing* 56 (2022) : 102928., <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102928>.
- 13) Sulochana Shrestha, et al., “Fracture toughness and fatigue crack growth rate properties of AM repaired Ti-6Al-4V by Direct Energy Deposition”, *Materials Science and Engineering: A* 823 (2021) : 141701., <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.141701>.
- 14) P. D. Nezhadfar, Nima Shamsaei and Nam Phan, “Enhancing ductility and fatigue strength of additively manufactured metallic materials by preheating the build platform”, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures* 44, no. 1 (2021) : 257-270., <https://doi.org/10.1111/ffe.13372>.

- 15) Richard W. Neu, et al., “Evaluation of HCF strength of Alloy 625 with non-optimum additive manufacturing process parameters”, *International Journal of Fatigue* 162 (2022) : 106978., <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.106978>.
- 16) Tobias Sedlatschek, et al., “Large-deformation plasticity and fracture behavior of pure lithium under various stress states”, *Acta Materialia* 208 (2021) : 116730., <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2021.116730>.
- 17) Juner Zhu, et al., “Mechanical Deformation of Lithium-Ion Pouch Cells under In-Plane Loads—Part I: Experimental Investigation”, *Journal of The Electrochemical Society* 167 (2020): 090533., <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ab8e83>.
- 18) Anudeep Mallarapu, et al., “Modeling extreme deformations in lithium ion batteries”, *eTransportation* 4 (2020) : 100065., <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2020.100065>.
- 19) Sergio Cantero-Chinchilla, Paul D. Wilcox and Anthony J. Croxford, “A deep learning based methodology for artefact identification and suppression with application to ultrasonic images”, *NDT & E International* 126 (2022) : 102575., <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2021.102575>.
- 20) Adrian H. A. Lutey, et al., “Static and fatigue strength of laser-textured adhesive-bonded polyamide 66 (PA 66) joints”, *International Journal of Adhesion and Adhesives* 116 (2022) : 103155., <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2022.103155>.
- 21) Emre Akgun, et al., “Fatigue of laser powder-bed fusion additive manufactured Ti-6Al-4V in presence of process-induced porosity defects”, *Engineering Fracture Mechanics* 259 (2022) : 108140., <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2021.108140>.
- 22) Olena Karpenko, Selda Oterkus and Erkan Oterkus, “Peridynamic analysis to investigate the influence of microstructure and porosity on fatigue crack propagation in additively manufactured Ti6Al4V”, *Engineering Fracture Mechanics* 261 (2022) : 108212., <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2021.108212>.
- 23) Anna Ermakova, et al., “Fatigue crack growth behaviour of wire and arc additively manufactured ER70S-6 low carbon steel components”, *International Journal of Fracture* 235 (2022) : 47-59., <https://doi.org/10.1007/s10704-021-00545-8>.
- 24) Mohammad Reza Khosravani, et al., “Fracture studies of 3D-printed continuous glass fiber reinforced composites”, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics* 119 (2022) : 103317., <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2022.103317>.
- 25) Pierre Margerit, et al., “Tensile and ductile fracture properties of as-printed 316L stainless steel thin walls obtained by directed energy deposition”, *Additive Manufacturing* 37 (2021) : 101664., <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101664>.
- 26) Mikael Segersäll, et al., “Fatigue response dependence of thickness measurement methods for additively manufactured E-PBF Ti-6Al-4 V”, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures* 44, no. 7 (2021) : 1931-1943., <https://doi.org/10.1111/ffe.13461>.
- 27) Sadik L. Omairey, et al., “Design against distortion for aerospace-grade additively manufactured parts - PADICTON”, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 1226, (2022) : 012003., <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1226/1/012003>.
- 28) Vamsi Krishna Rentala, Daniel Kanzler and Patrick Fuchs, “POD Evaluation: The Key Performance Indicator for NDE 4.0”, *Journal of Nondestructive Evaluation* 41 (2022) : 20., <https://doi.org/10.1007/s10921-022-00843-8>.

- 29) Uwe Zerbst, et al., “Damage tolerant design of additively manufactured metallic components subjected to cyclic loading: State of the art and challenges”, *Progress in Materials Science* 121 (2021) : 100786., <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2021.100786>.
- 30) Jochen Tenkamp, et al., “Uniform fatigue damage tolerance assessment for additively manufactured and cast Al-Si alloys: size and mean stress effects”, *Additive Manufacturing Letters* 3 (2022) : 100076., <https://doi.org/10.1016/j.addlet.2022.100076>.
- 31) Edwin-Joffrey Courtial, Arthur Colly and Christophe Marquette, “Dynamic Molding: Additive manufacturing in partially ordered system”, *Additive Manufacturing* 51 (2022) : 102598., <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102598>.
- 32) Yuntao Tao, et al., “Automated Defect Detection in Non-planar Objects Using Deep Learning Algorithms”, *Journal of Nondestructive Evaluation* 41 (2022) : 14., <https://doi.org/10.1007/s10921-022-00845-6>.
- 33) Zhiwei Zhang, et al., “Intelligent Defect Detection Method for Additive Manufactured Lattice Structures Based on a Modified YOLOv3 Model”, *Journal of Nondestructive Evaluation* 41 (2022) : 3., <https://doi.org/10.1007/s10921-021-00835-0>.
- 34) Bo-Wen Xu, et al., “Deep learning method for predicting the strengths of microcracked brittle materials”, *Engineering Fracture Mechanics* 271 (2022) : 108600., <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2022.108600>.
- 35) Zhixin Zhan, Weiping Hu and Qingchun Meng, “Data-driven fatigue life prediction in additive manufactured titanium alloy: A damage mechanics based machine learning framework”, *Engineering Fracture Mechanics* 252 (2021) : 107850., <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2021.107850>.
- 36) Zhixin Zhan and Hua Li, “Machine learning based fatigue life prediction with effects of additive manufacturing process parameters for printed SS 316L”, *International Journal of Fatigue* 142 (2021) : 105941., <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.105941>.
- 37) Hongyixi Bao, et al., “A machine-learning fatigue life prediction approach of additively manufactured metals”, *Engineering Fracture Mechanics* 242 (2021) : 107508., <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2020.107508>.
- 38) Jianqiang Zhang, et al., “A machine learning-based approach to predict the fatigue life of three-dimensional cracked specimens”, *International Journal of Fatigue* 159 (2022) : 106808., <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.106808>.
- 39) Ruixiao Xue, et al., “Phase field model coupling with strain gradient plasticity for fracture in lithium-ion battery electrodes”, *Engineering Fracture Mechanics* 269 (2022) : 108518., <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2022.108518>.
- 40) Lubing Wang, et al., “Deformation and failure behaviors of anode in lithium-ion batteries: Model and mechanism”, *Journal of Power Sources* 448 (2020) : 227468., <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.227468>.
- 41) Ping Li, et al., “Fracture behavior in battery materials”, *Journal of Physics: Energy* 2, no. 2 (2020) : 022002., <https://doi.org/10.1088/2515-7655/ab83e1>.
- 42) Changhao Pei, et al., “Anisotropic damage evolution and modeling for a nickel-based superalloy built by additive manufacturing”, *Engineering Fracture Mechanics* 268 (2022) : 108450., <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2022.108450>.
- 43) Jianguang Bao, et al., “The role of defects on tensile deformation and fracture mechanisms

- of AM AlSi10Mg alloy at room temperature and 250 °C”, *Engineering Fracture Mechanics* 261 (2022) : 108215., <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2021.108215>.
- 44) Bingqing Chen, et al., “Experimental study on mechanical properties of laser powder bed fused Ti-6Al-4V alloy under post-heat treatment”, *Engineering Fracture Mechanics* 261 (2022) : 108264., <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2022.108264>.
- 45) Yan Zhao, et al., “High resolution and real-time measurement of 2D fatigue crack propagation using an advanced digital image correlation”, *Engineering Fracture Mechanics* 268 (2022) : 108457., <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2022.108457>.
- 46) Changhao Pei, et al., “Anisotropic damage evolution and modeling for a nickel-based superalloy built by additive manufacturing”, *Engineering Fracture Mechanics* 268 (2022) : 108450., <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2022.108450>.
- 47) Yanwei Dai, et al., “Shearing fracture toughness enhancement for sintered silver with nickel coated multiwall carbon nanotubes additive”, *Engineering Fracture Mechanics* 260 (2022) : 108181., <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2021.108181>.
- 48) Feng Guo, et al., “A time-domain stepwise fatigue assessment to bridge small-scale fracture mechanics with large-scale system dynamics for high-speed maglev lightweight bogies”, *Engineering Fracture Mechanics* 248 (2021) : 107711., <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2021.107711>.
- 49) Li Sun and Xiaoping Huang, “Prediction of fatigue crack propagation lives based on machine learning and data-driven approach”, *Journal of Ocean Engineering and Science* (2022), <https://doi.org/10.1016/j.joes.2022.06.041>.
- 50) Seong-Hyun Park, Sungho Choi, and Kyung-Young Jhang, “Porosity Evaluation of Additively Manufactured Components Using Deep Learning-based Ultrasonic Nondestructive Testing”, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology* 9 (2022) : 395-407., <https://doi.org/10.1007/s40684-021-00319-6>.
- 51) Son Dong Nguyen, et al., “Deep Learning-Based Crack Detection: A Survey”, *International Journal of Pavement Research and Technology* (2022), <https://doi.org/10.1007/s42947-022-00172-z>.
- 52) Rhys Jones, et al., “Damage tolerance assessment of AM 304L and cold spray fabricated 316L steels and its implications for attritable aircraft”, *Engineering Fracture Mechanics* 254 (2021): 107916., <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2021.107916>.
- 53) M. Tarik Hasib, et al., “Fracture toughness anisotropy of commercially pure titanium produced by laser powder bed fusion additive manufacturing”, *International Journal of Fracture* 235 (2022) : 99-115., <https://doi.org/10.1007/s10704-021-00601-3>.