

戦略プロポーザル

疲労破壊現象の包括的理解と
その革新的な応用に向けた
科学技術基盤の構築

STRATEGIC PROPOSAL

Establishment of scientific and technological
basis for comprehensive understanding of
the fatigue and fracture mechanics

エグゼクティブサマリー

本プロポーザルでは、機器の損傷事故の多くに関連している疲労破壊現象を対象に、その包括的な理解のために取り組むべき研究課題群とその推進方法について提言する。疲労破壊の起点となる初期現象には未解明のことが多い。これまで力学的な機構がほとんど解明されていなかった疲労破壊の初期現象の理解とそれに基づく疲労破壊現象全体の理解を深化させ、疲労破壊現象に関する新機軸の科学技術基盤の構築を目指す。

カーボンニュートラル社会の実現に向けた取り組みの中で、エネルギー機器（原動機）や輸送機器（自動車、鉄道、航空機、船舶）の軽量化・高効率化の要求は高まっている。しかし信頼性・安全性を確保する点から、これらの機器は安全係数を乗じて設計されており、軽量化や高効率化の更なる追求には、疲労破壊の物理現象の理解に立脚した新しいアプローチが必要である。疲労破壊現象の全容の理解が進むことで、製品の市場投入までの開発期間の短縮や開発費用の削減が可能になる。また他国に先駆けて適切な信頼性を有する新製品を市場に投入できるようになり、我が国の産業競争力向上に繋がることが期待される。これらのためには疲労破壊現象のより本質的な理解と破壊現象学・破壊工学の科学技術基盤の構築・強化が必要である。

疲労破壊については、微小き裂の発生（初生）から微小き裂の成長までの初期現象の力学的な機構がほとんど解明されておらず、現象の理解、モデル化ができていないため、予測が難しい状況にある。現状では、膨大な疲労試験のデータを積み上げ、統計的・経験的手法から、疲労破壊に耐えうるよう機器に必要な強度が計算されている。このため、近年の疲労破壊に関する研究は、ほとんどが新規の機器や材料開発の一項目として実施され、個々の材料の特性の検討に留まっている。このような状況から脱するためには、機器や材料開発のための副次的な研究ではなく、疲労破壊現象の理解そのものを目的とした、未解明の初期現象の理解を進める研究が必要である。

疲労破壊の初期現象の微視的な機構や力学を解明し、それに基づく疲労破壊の科学技術基盤の構築を図るために、具体的な研究課題として、以下の2つを提案する。

- ① 疲労破壊の初期現象の法則性の発見
- ② 疲労破壊の初期現象の理解に基づく疲労現象学と疲労工学の構築

近年、破壊の初期現象の解明に関わる微視的サイズでの力学特性・疲労試験特性に関する実験や非破壊・in-situ計測技術が大きく進展している。計算機能力の飛躍的発展に伴い、マルチスケール・マルチフィジックスシミュレーションによる破壊現象の統一的な理解への取り組みが進展している。機械学習や深層学習等のデータ科学的手法による、予測やツールとしての活用も期待されている。このような実験計測手法、数理解析手法、数理科学的手法を組み合わせることにより、疲労破壊の初期現象の法則性を見だし、疲労破壊の初期現象の理解に立脚した新機軸の疲労現象学と疲労工学を構築する。

推進方法としては、まず大学・企業の枠を越えた分野横断的なネットワークを形成することが重要である。そこでは、疲労破壊の初期現象の法則性の発見に主眼をおいた基礎的な研究と実機の破壊現象の両方を理解する核となる人材を育成する。次に持続的な研究環境を構築するために拠点化を推進する。ここでは多様で複雑な疲労破壊の初期現象の法則性を解明し、それに基づく新機軸の疲労現象学・疲労工学の構築を目指す。本分野は国の安全を守る、あるいは国を維持するための基盤となる科学技術分野のひとつであり、国

として中長期的かつ継続的な視点に立って研究開発を推進することが重要である。

Executive Summary

This is a proposal of research topics and approaches to promote them for comprehensive understanding of the fatigue and fracture mechanics that relates to numerous accidents caused by mechanical damage. Initial phenomena as an origin of fatigue fracture are often unexplained. This proposal is aimed at establishing a new axis of scientific and technological basis with regard to the fatigue fracture by deepening the understanding of its initial phenomena of which the mechanical mechanism is largely unknown and the understanding of the whole fatigue fracture based on it.

In the efforts to achieve a carbon-neutral society, there is a rising demand for weight saving and higher efficiency of energy equipment (prime movers) and transport equipment (automobiles, trains, aircraft and ships). However, from the perspective of ensuring reliability and safety of the equipment, these devices are designed by multiplying a safety factor. Therefore, a new approach based on the understanding of physical phenomena of the fatigue fracture is necessary for further pursuit of weight saving and higher efficiency. Deeper understanding of the fatigue fracture phenomena enables shortened development time-to-market and reduction in the development costs. It also allows marketing of a new product with adequate reliability earlier than any other countries, which can lead to improvement of Japan's industrial competitiveness. Hence, it is necessary to understand the fatigue fracture phenomena more substantively as well as establish and strengthen the scientific and technological basis for the fracture phenomenology and fracture engineering.

It is difficult to predict fatigue fracture because the dynamic mechanism of the initial phenomena from microcrack initiation to microcrack growth has hardly been elucidated or the phenomenon is not understood or modeled. Under the current circumstances, strength required for equipment to withstand the fatigue fracture is calculated from statistical and experimental methods by using massively accumulated fatigue test data. Therefore, most of the recent researches on the fatigue fracture are undertaken as part of the development of new equipment and materials and remain as studies on properties of individual materials. In order to break away from such circumstances, it is necessary to conduct research to advance the understanding of the fatigue and fracture mechanics that have not yet been elucidated.

We propose the following two specific research topics to elucidate the microscopic mechanism and mechanics of the initial phenomena of the fatigue fracture and thereby establish the scientific and technological basis.

- ① Discovering the law of the initial phenomena of the fatigue fracture
- ② Establishment of the fatigue phenomenology and the fatigue engineering based on the understanding of the initial phenomena of the fatigue fracture

Significant progress has recently been made in experiments and in the non-destructive/in-situ

measurement techniques for the mechanical characteristics and the fatigue characteristics in microscopic size that relate to elucidation of the initial fracture phenomena. With exponentially developed performance of computing machineries, efforts have been progressing towards unified understanding of the fracture phenomena by multi-scale multi-physics simulation. Data science such as machine learning and deep learning are expected as a tool for prediction. By combining these experimental methods, measurement methods and mathematical methods, it is proposed that the law of initial phenomena of the fatigue fracture should be figured out and that a new axis of the fatigue phenomenology and the fatigue engineering should be established based on the understanding of the initial phenomena of the fatigue fracture.

As a first approach for promotion of the above, it is important to form a cross- disciplinary network beyond boundaries of academia and industry, where core human resources should be developed who have understanding of both the basic research focused on the discovery of the law of initial phenomena of the fatigue fracture and the fracture phenomena of actual equipment. As a second approach, creation of a center of excellence should be promoted as a sustainable research environment. The aim of the center is to elucidate the laws of the initial phenomena of the fatigue fracture, which are diverse and complex, and to establish a new axis of the fatigue phenomenology and the fatigue engineering based on it. This field is one of the fundamental scientific and technological fields to protect and maintain national security. Therefore, it is important for the government to promote research and development in this field from a medium-to long-term and continuous perspective.

目次

1	研究開発の内容	1
2	研究開発を実施する意義	3
2.1	現状認識および問題点	3
2.2	社会・経済的効果	9
2.3	科学技術上の効果	11
3	具体的な研究開発課題	12
3.1	疲労破壊の初期現象の法則性の発見	12
3.2	疲労破壊の初期現象理解に基づく疲労現象学と 疲労工学の構築	15
4	研究開発の推進方法および時間軸	16
4.1	研究開発の推進方法	16
4.2	時間軸	18
付録 1	検討の経緯	20
付録 2	国内外の主な研究開発プロジェクトの動向	23
付録 3	用語解説	29

1 | 研究開発の内容

本プロポーザルは、機器の破損事故の多くに関連している疲労破壊現象を対象に、その包括的な理解のために取り組むべき研究課題群とその推進方法について提言する。これまで力学的な機構がほとんど解明されていなかった疲労破壊の初期現象の理解とそれに基づく疲労破壊現象全体の理解を深化させ、疲労破壊現象に関する新機軸の科学技術基盤の構築を目指す。また応用（実機の破壊現象）を理解した上での基礎研究に取り組むことができる研究体制を構築・推進し、この分野での核となる人材の育成と研究基盤の強化にも繋げる。なおここで対象としている機器は、火力発電や風力発電などのエネルギーを生み出す機器（原動機）や、自動車、航空機、鉄道などの輸送機器などであり、対象とする材料は鉄鋼材やアルミ合金などの構造材に使われる金属である。また初期現象とは、微小き裂の初生、微小き裂の成長までを指し、結晶粒や結晶粒界などの周囲の組成の不均一性が成長にバラツキを与えるサイズのき裂までが目安である。

多くの機器の破損事故に関わっている疲労破壊については、破壊の起点の発生メカニズム（初生）、そこから微小き裂に成長する過程の力学的な機構・現象がほとんど解明されていない。微視的なサイズの現象であり、研究手段も限られていたことから、これまで体系的な研究がされていなかったことが要因のひとつにある。この初期現象の本質的理解ができていないことが、機器の設計寿命評価に影響を与えている。初期現象の本質的な解明と、それに基づく疲労破壊全体の理解の深化は、科学的にも工学的にも重要な意味を持つ。

近年、ナノサイエンス・エンジニアリング関連の研究推進により、微視的な力学特性や組織の変化を把握するための実験や非破壊・in-situ計測技術が大きく進展し、従来はできなかった疲労破壊の初期現象の微視的な構造や組成の変化を観察できるようになってきた。サブミクロン程度の微小なサイズの試験片での力学特性実験や疲労試験ができるようになっている。また、計算機能力の向上と計算手法の進展は、シミュレーション（数値実験）の活用範囲を飛躍的に拡大している。このような実実験とシミュレーション双方の発展は、両者が実施可能な空間サイズを近づけ、実実験とシミュレーションの結果を直接的に比較・検証できるレベルになってきており、疲労破壊の初期現象解明のための強力なツールとして期待できる状況になっている。また、特に欧州では、数学・数理科学や理論物理などの研究者が破壊関係の研究に加わり、複雑な破壊現象の普遍的な側面を捉えて、その統一的・包括的な理解を進めるための取り組みも行われている。

本提言での研究概要を図1-1に示す。具体的な研究課題として、以下の2つを挙げる。

1. 疲労破壊の初期現象の法則性の発見

疲労破壊の初期現象は階層的で多様性のある複雑な現象である。疲労破壊の初期現象の解明に資する微視的な実験データを得るため、実実験、数値実験（シミュレーション）、数学・数理科学の研究者が連携して、既に得られている知見も活用して十分な検討を行って物理モデルを作り、精緻な実験でその検証を行う仮説検証型のプロセスに取り組む。そして、いくつかの物理モデルに対し、数学・数理科学、物理理論などを用いて、それぞれの物理モデルに属する実験データに共通する特徴量を抽出し、各物理モデルを決めている法則性、支配パラメータを見いだす。また、抽出された法則性について適用範囲を確認するプロセスやそのための初期現象の実験データの補完・拡充を行う。さらに、実実験とモデルを反映した数値実験、機械学習を連携して進めることで、モデルと法則性の適用範囲の検証を行い、その適用範囲の拡大を検討する。

2. 疲労破壊の初期現象の理解に基づく疲労現象学・疲労工学の構築

微視的な初期現象（マイクロ）と実際の破壊現象に直結する巨視的き裂（マクロ）を接続し、微小き裂の発生から巨視的き裂の進展・破壊に至るまでの一貫した破壊現象のモデルを構築する。離散的で非均質なマイクロ現象をモデル化・パラメータ化して、連続的で均質なマクロ現象に繋げる数理モデルを構築する。また、実際に工学的に利用するために、最も簡略化されたマクロな解析モデルに繋げる方法を検討し、初期現象の理解に基づく疲労工学を構築する。

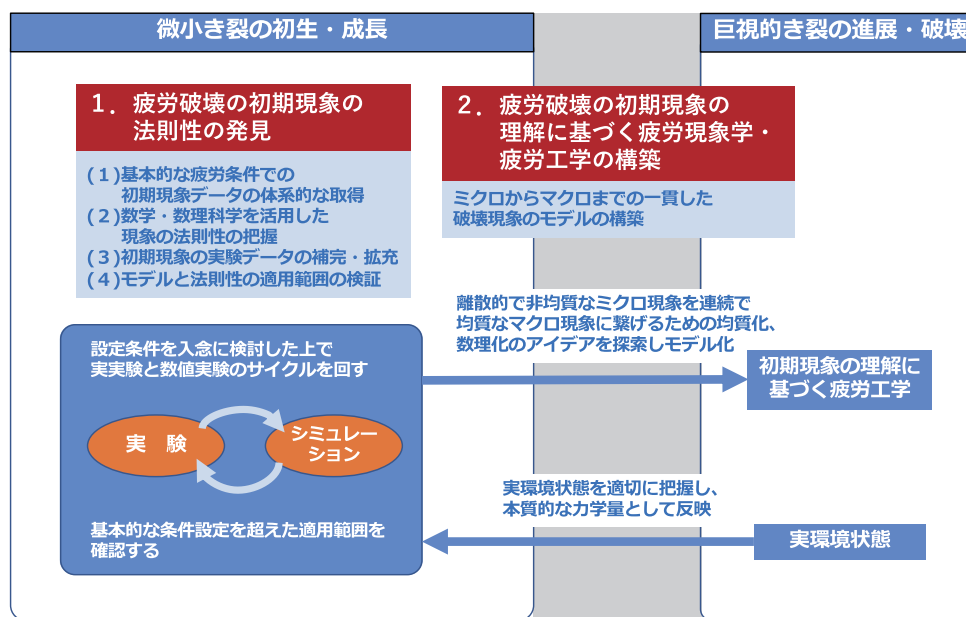


図1-1 研究開発の概要

実際の疲労破壊は、幾つもの要因が複合している複雑な現象である。このため、研究開発の推進においては、実機の破壊現象の本質的な問題を理解し、初期現象解明のための基礎研究に反映することが重要であり、産業界の理解と連携が不可欠である。また、機械系や材料系の研究者だけでなく、数学・数理科学、データ科学など分野を超えた多様な研究者が協力して研究課題に取り組む必要がある。アカデミアと産業界の枠を越え、分野を超えて連携したネットワークを形成し、疲労破壊の初期現象の法則性の発見に関する研究と、高い意識を持つ核となる研究人材の育成を2つの柱として推進する必要がある。ここでの核となる人材とは、実機の破壊現象を理解し、その現象を引き起こしている力学的特性の本質を理解して、アカデミアにおけるサイエンスと企業等におけるエンジニアリングの間を繋ぐことが出来る人材である。

疲労破壊の複雑な初期現象の解明は、疲労破壊の防止において最も重要であり、社会に還元するところまでに取り組む必要がある。疲労破壊全体の科学を深化させ、新たな知見に基づく疲労破壊に関する科学技術基盤の構築に向けて長期的な視野に立ち、一貫した研究と人材、研究インフラなどの基盤強化が実現できる推進体制が必要である。

2 | 研究開発を実施する意義

2.1 現状認識および問題点

◆ 疲労破壊に関する科学および工学の状況

機器の破損は、人的にも経済的にも大きな損害を与える。溶接学会誌に掲載されたデータには、機器の破壊現象の8割は疲労破壊が関連していることが示されている¹。これは1992年の古いデータではあるが、現在でも依然として疲労破壊が機器の損傷の主因であると言われている。

疲労破壊は、1回の負荷（静的負荷）では破損しなくとも、負荷が多数繰り返し加わることにより破損に至る現象である。繰り返し負荷が加わる場合は、材料的には壊れない十分な強度があるように設計した構造体でも突然壊れる場合がある。この現象は狭義での固体力学では説明できない。

このような背景から、機器に関わる工学の科学技術基盤のひとつとして破壊力学という学問分野が生まれてきた。破壊力学では材料には潜在的な欠陥があり、その欠陥が成長するという概念を基に、欠陥もしくはき裂が成長して破壊に至ると考える。き裂先端の力学場（応力状態）が部材の強度を決めると考え、機械や構造部材について、破壊の機序とき裂の進展現象を力学量により定量的に予測するといった工学的な手法をとる。原子力発電設備や航空機など、破壊すると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、破壊力学的手法を基に高度な信頼性を確保することが求められている。

金属に代表される単純材料・単純な繰り返し負荷条件の下での疲労破壊の過程は、転位組織（線状の結晶欠陥）が形成され、それが微小き裂になり（き裂の初生）、その微小き裂が成長して巨視的き裂になり（微小き裂の進展）、最終的には破壊に至る。この段階的な過程については共通の理解ができていく（図2-1-1）。

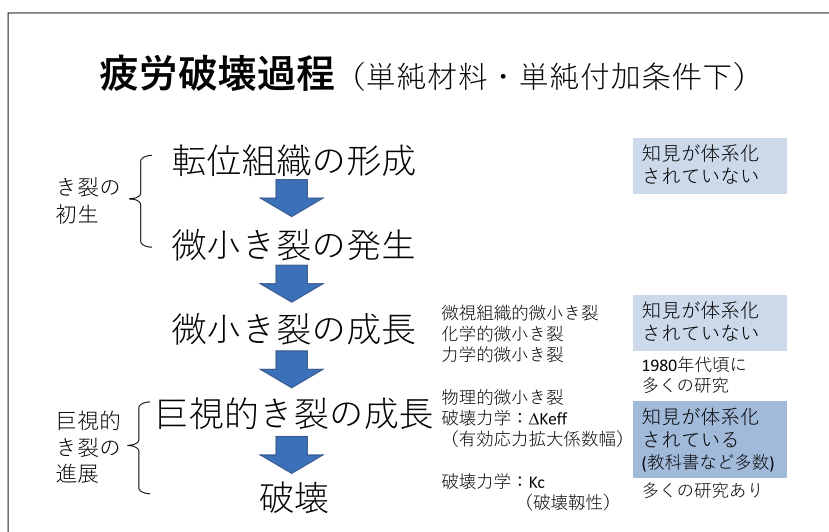


図2-1-1 疲労破壊の過程の例²

- 1 S, Nishida, Failure Analysis in Engineering Applications, (1992), 3, Butterworth Heinemann Ltd.
- 2 JST-CRDS 科学技術未来戦略ワークショップ「機器の安全性を高める破壊・寿命予測の科学技術基盤の構築」(2021/12/10 実施) 京都大学 北村理事・副学長 提供資料を元にCRDSにて作成

しかし、単純材料であっても、き裂の初生、微小き裂の進展に関しては、現象がほとんど解明されていない。どのような力学場が作用して、き裂の初生や微視的き裂の成長を支配しているかの理解、モデル化ができていないためである。例えば、図2-1-2に示すように、き裂の起点（微小き裂の初生の源）となり得る箇所は、結晶粒界や結晶内の析出物（不純物）、結晶中の欠陥など様々であり、その大きさも色々である。また、微小き裂の進展においては、結晶粒や結晶粒界など周囲の微視的な組織構造が影響を与える。このような複雑性、多様性が理解、モデル化の妨げとなっている。

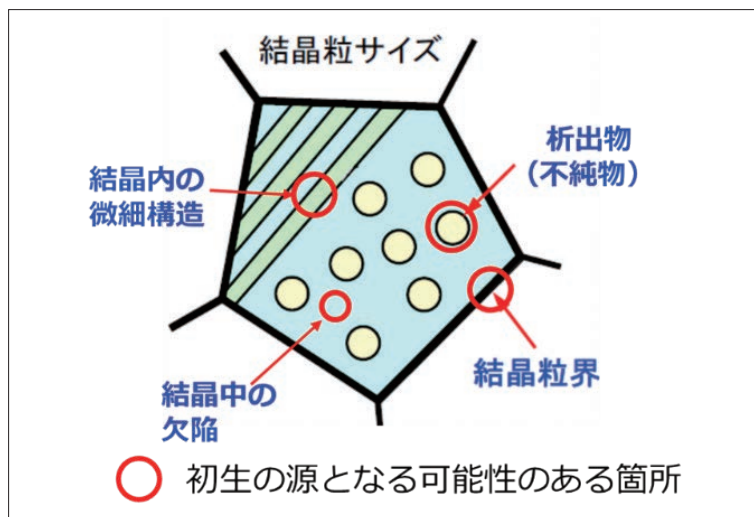


図2-1-2 き裂の起点の多様性

図2-1-3に示すように、疲労破壊までの寿命時間は、微小き裂の発生（初生）までの時間、できた微小き裂が巨視的き裂に成長するまでの時間、および巨視的き裂が成長し破壊に至るまでの時間の和で表される。この中で、巨視的き裂の成長に関しては、多くの研究があり、それに基づき破壊力学で定式化された力学量から、き裂の進展の時間をある程度予測できるようになっている。しかし、微小き裂の初生と微小き裂が巨視的き裂に成長するまでの時間は、前述のように現象の理解、モデル化ができていないため、予測が難しい状況にある。

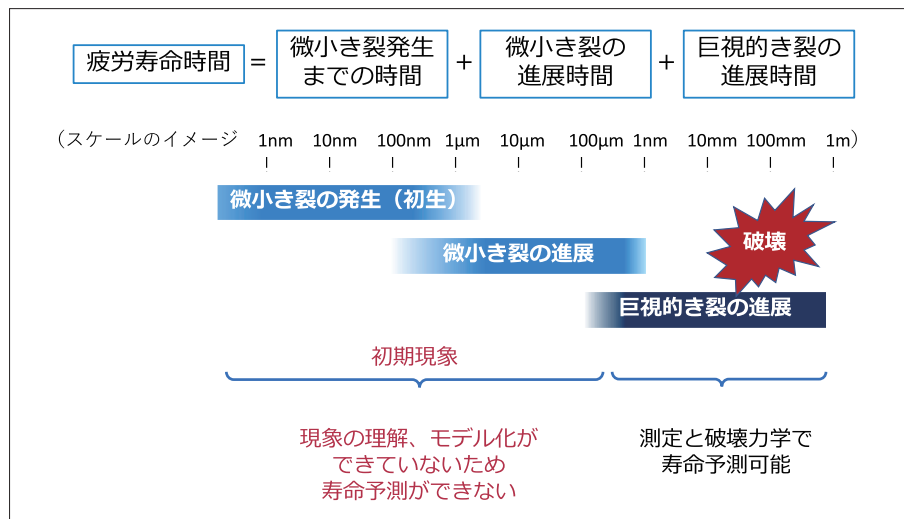


図 2-1-3 疲労破壊までの時間の概念図

現状の破壊力学では初期現象部分の予測が困難なため、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。金属材料に関する基本的な疲労試験のデータベースとしては、国内では国立研究開発法人物質・材料研究機構（NIMS）が無機材質研究所時代から40年以上にわたり蓄積している疲労データシートがあり、国内外から高い評価を得ている。しかし現在は、疲労データを取得する中で新たな重要な知見が得られているにもかかわらず、その活動は大幅に縮小しており、継続さえ困難な状況となりつつある。それゆえ疲労破壊そのものに着目して新たな疲労データを数多く取ることも難しくなっている（コラム1参照）。

近年の疲労現象に関する研究は、経験則としての側面が強いことから、ほとんどが機器や材料研究の一項目として実施され、個々の材料の特性の検討に留まっている。実際の製品設計においては、わからない部分も全て包含する形で膨大な疲労試験のデータを積み上げて、そこから破壊力学に基づく検討と、統計的・経験的手法から、疲労破壊に耐えうるよう機器に必要な強度を計算し、安全係数を乗じて設計している。しかしながらこのような方法は製品としては安全側の評価になるが、軽量化や高性能化の追求は犠牲となっている。また経験則に基づく知見は、それを逸脱した範囲（例えば加工プロセスや実環境など）では活用ができないという問題もある。加えて、近年、機器の使用条件はより過酷になる方向にある。例えば発電機器の高効率化では、燃焼条件はより高圧・高温化する傾向にあり、カーボンニュートラルの取り組みの中で、炭素を含まない燃料として期待されている水素も超高压や極低温での使用が想定されている。このような実機と同じ環境下での疲労試験が難しい場合も増えてきている。

上述のように、き裂の初生や微視的き裂の成長を支配している力学場の作用や初期現象の理解が十分にできていないことから、工学的には予測できない疲労破壊の初期現象も包含する形で多くの実験を行い、経験則と安全係数で製品を作っているが、この手法も限界がきている。初期現象の科学的理解ができていないために、どのような実験が的確に疲労破壊の予測につながるかも明確ではない。このような状況から脱するためには、機器や材料開発のための副次的な研究ではなく、疲労破壊現象の理解そのものを目的とした、未解明の初期現象の理解を進める研究が必要である。初期現象を理解し、信頼性の高い基本的な疲労試験で、少ない試験回数でも疲労強度評価ができるような、破壊の物理現象の理解に立脚した新しいアプローチが必要である。

◆ 疲労破壊現象に関するシミュレーションおよび実験・観察技術の進展

図2-1-1に示すように、疲労破壊現象を深く理解するための微小き裂の発生から成長に関する研究は、

1980年頃には行われていた。しかしながら初生や微小き裂の進展などの初期過程は複雑で非常に難しかったため、個々の材料や条件に関する研究例はあっても、体系的にまとめた書物はほとんど存在していない。このサイズの領域では実実験およびシミュレーションの双方とも難しかったことも大きな原因の一つである。

近年、コンピュータの計算能力の向上により、マルチスケール・マルチフィジックスシミュレーションを用いて、破壊現象を統一的に理解しようとする取り組みが活性化している。フェーズフィールド法による微視組織形成計算など、多くの解析手法も開発されている。階層的な破壊の物理現象に対して、それぞれの階層で様々な解析手法が提案されている。しかしながら階層間を繋ぐモデル化にはまだ大きな課題がある。また繰り返し加わる負荷によって発生する疲労現象に対しては、時間スケールの問題からほとんど解析されていない状況にある。

実実験面では、革新的な材料創出を目的としたナノスケールレベルから力学特性機構を解明する研究³などの推進により、微視的な力学特性を把握するための実験や非破壊・in-situ計測技術が大きく進展した。従来はできなかった破壊の初期現象に関連する微視的なサイズや解像度で、構造や組成の変化を観察できる実験が可能となってきている。また、疲労の初期現象に着目した、ナノ・マイクロサイズの試験片を用いた疲労試験も取り組まれている。

このように実実験面とシミュレーション双方の進展により、実験とシミュレーションが可能な大きさが近づき、シミュレーション結果を実験で直接的に検証可能になりつつある。このような実験とシミュレーションのコンビネーションが、疲労破壊の初期現象解明のための強力なツールとして期待できる状況にある（図2-1-4）。

ナノスケールレベルでの力学特性の把握に関する研究では着実に成果が出始めている。個々の材料の特性としての検討から一歩進んで、疲労破壊現象という視点で捉えて、疲労破壊の初期現象に関する体系的な理解とそれに基づく疲労破壊全体の理解の深化について取り組みが行える素地ができつつある。

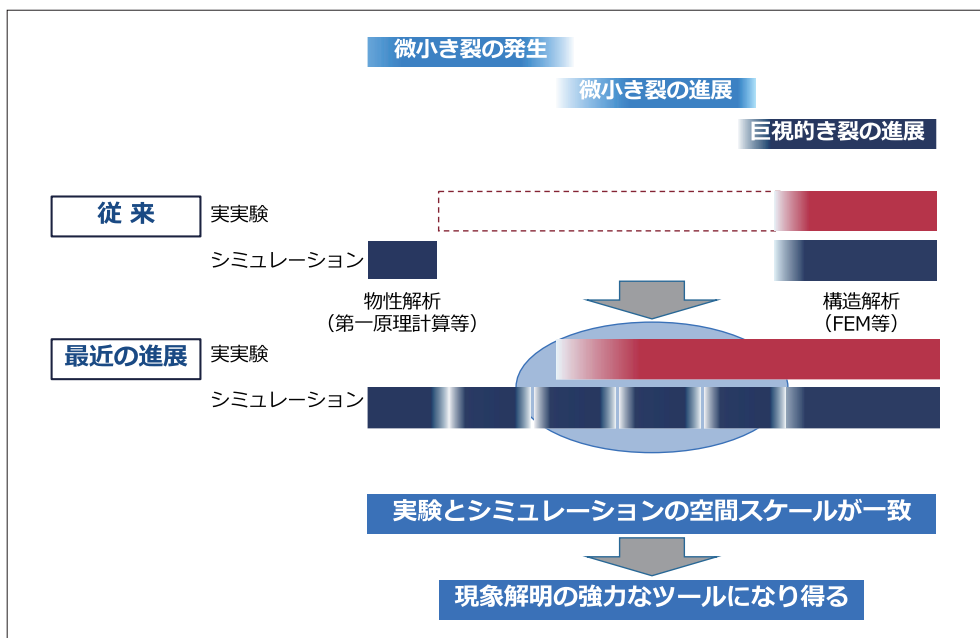


図2-1-4 実実験とシミュレーションができる空間スケールの関係

3 JST 戦略的創造研究推進事業 CREST「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（ナノ力学）」など

◆ 日本における産学連携の現状

疲労破壊に限らず破壊現象は、材料、加工方法、形状、使用環境に大きく影響を受ける。このためこの分野では、実機の破壊現象を理解し、その本質的な要素を基礎研究に反映することが重要となる。欧米では、産学の人材の実質的な交流が盛んであり、大学が企業での実問題を解釈・咀嚼し、基礎研究の問題に反映することで、この分野の科学技術基盤を維持・強化する仕組みや環境が根付いている⁴。破壊現象モデルの普遍的な部分を導き出すためにも、実機の破壊現象を理解・解釈し、基礎研究に反映することが重要である。しかし我が国では、現状企業と大学間の相互の人的交流が希薄である。大学では基礎研究を行う研究者が減少し、破壊の機構や力学に関する基盤研究が減少している。短期間で論文にできる課題に集中する傾向にあり、それが企業が必要とする内容とマッチングしなくなっていることも要因と考えられる。また、大学の多くの研究者は、実機での複雑な破壊現象に対する経験が不足している問題もある。一方、企業では、設計・製品に直結する短期間で成果が得られる研究に集中する傾向にある。実機の課題を企業内で本質的な問題に落とし込み、大学等の研究者と対等な科学的議論ができる水準の高度人材が、大幅に減ってきており、そのことが企業の基礎研究の理解への低下にも繋がっていると言われる。産と学の知識を持ち寄って問題を解決することが重要であるが、大学等での基礎研究と企業等での開発・設計・製造の相互の橋渡しの円滑化を可能とする、両サイドを理解できる高度人材の育成ができていないという問題がある。

コラム1

NIMS 疲労データシート

国立研究開発法人物質・材料研究機構（NIMS）は、40年以上にわたって金属材料の疲労特性データを取得・蓄積してデータシートとしてデータベース化している。主要な鉄鋼材料、アルミニウム合金、チタン合金が網羅され、これまでに出版されたデータシートは125冊を数える。試験条件を厳密に統一して系統的に取得された疲労データは極めて信頼性が高く、世界的にも高く評価され、産業界において機械・構造物の強度設計における設計応力の設定や材料選択のための基盤的データとして活用されている。

一方、予算と人員の不足による存続の危機に何度も見舞われている。1995年にNIMSのデータシート作成事業は一旦休止され、1997年に再開されたが、再開後は長期疲労をテーマに対象が絞られた。また、データシートの作成開始から2011年までは基準疲労特性（室温大気中での基準的な疲労特性）、高温疲労特性（高温環境下における疲労特性）、溶接継手の疲労特性の3種類の疲労データシートが作成されたが、2012年以降は高温疲労特性と溶接継手の疲労特性は休止され、現在は基準疲労のみ存続している。

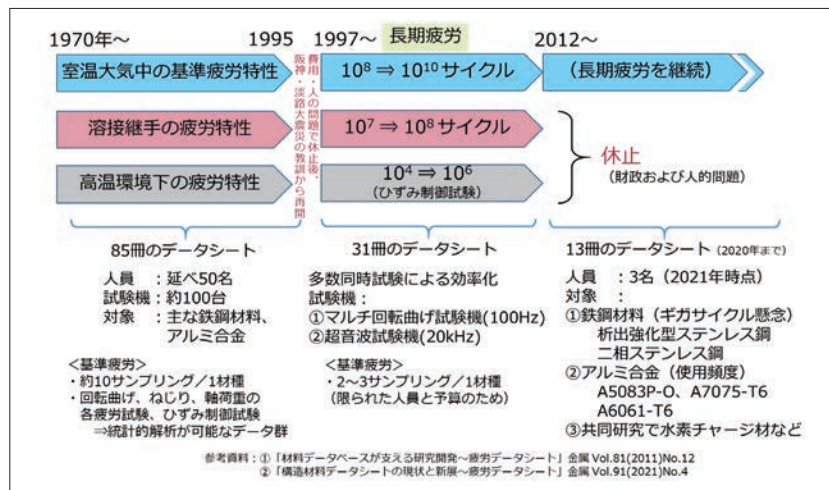
疲労データシートの作成は研究開発要素が少ないと見られがちであるが、従来試

4 JCT-CRDS 調査報告書「環境・エネルギー分野における非連続的なイノベーションを支える工学基盤研究強化」（CRDS-2020-RR-02、2020年7月）

験が困難であった条件下においてデータの取得を可能にする技術の開発や、その結果得られたデータからの新発見など、実際には学術上の価値も高い。たとえば、 10^{10} 回のギガサイクル疲労試験は、周波数100Hzで3年を要するが、これを1週間でこなうことが可能な20kHzの超音波疲労試験機による加速試験法が開発された。3年をかけておこなった通常の疲労試験の結果と比較することで、高強度の金属材料（高強度鋼、チタン合金など）の加速試験がギガサイクル疲労特性の評価に有効であることが示され、データシートの充実につながっている。また、ギガサイクル疲労試験からは、新しい知見も見出されている。それまでアルミニウム合金では疲労限は不明瞭であると考えられていたが、他所では実施が困難なギガサイクル疲労試験の遂行によって、アルミニウム合金であっても疲労限を示す材料のあることが初めて明らかになった⁵。

近年注目を集めるデータ駆動型研究に疲労データを適用する試みも進められている。データ駆動型研究によって疲労寿命を予測するには、疲労データシートに掲載されている疲労特性データだけではなく、微小き裂の発生や伝播など疲労の過程についてのデータが必要であり、NIMSではそれを自動で測定する実験装置を新たに開発して微小き裂の発生・進展のデータベースを作成している。このように、データ駆動型研究に特化したデータベースを構築することも、新しい研究開発課題の一つになっている。

前述の通りNIMSの疲労データシート事業は縮小の一途を辿っているが、データ駆動型研究の進展などにより、良質なデータベースを構築し維持することの重要性は一段と増している。何より基本的な疲労データの取得・維持は、国の産業競争力や安全保障にも関係する重要な問題である。DX化の潮流と歩調を合わせて試験効率とデータの質の両立を図ることで、疲労データシートが一層拡充されることが望まれる。



図コラム1-1 NIMSにおける疲労データシートの取得の経緯

5 JST-CRDS 科学技術未来戦略ワークショップ報告書「機器の安全性を高める破壊・寿命予測の科学技術基盤の構築」(CRDS-FY2021-WR-10) NIMS 古谷グループリーダ 発表資料

2.2 社会・経済的效果

本プロポーザルの研究開発を実施することにより、疲労破壊に関して、体系的な理解に基づく科学技術基盤が構築できる。安全性を維持したまま、機器の軽量化・高効率化が可能になる。更には、機器の革新的な構造や構成の実現にも結びつく可能性もあることから、機器の開発・設計において大きな変革をもたらすことが期待できる。本プロポーザルの成果が社会に実装されることで、産業競争力強化、安全・安心な社会構築、およびカーボンニュートラル社会実現、の3点への貢献が考えられる。

(1) 産業競争力強化への貢献

疲労破壊現象の理解が十分ではないため、多くの機器では、万が一にも壊れないように経験的・統計的に導出される必要強度に対し、更に構成材料の板厚を厚くするなど、大きな余裕（安全係数）を加味して設計されている。本プロポーザルによる研究開発を推進することにより、初期現象に基づく疲労破壊全体の体系的な理解が深化でき、安全係数の過剰部分をそぎ落として適正な値にスリム化でき、安全性を維持したまま機器の軽量化、更には高効率化が可能となる。初期現象の発現に関わる主要なパラメータが明確になれば、設計としての対処方法が創出でき、機器の構造も含めてこれまでよりも格段に壊れにくい製品が製造できるようになる。

また、新しい材料の適用や、新たな使用環境での運用を行う場合、開発段階において多くの疲労試験を行いデータを蓄積した上で、設計を行うために時間も労力もかかる。初期現象の解明により疲労破壊現象の全容の理解が進むことで、疲労評価試験の回数や期間を大幅に減らすことができる。製品の市場投入までの開発期間の短縮や開発費用の削減になり、最終的には製品コストの低減にも繋がる。また他国に先駆けて適切な信頼性を有する新製品を市場に投入できるようになり、国際市場でのシェアの獲得・拡大において優位に立てることが期待できる。その結果として、我が国の産業競争力向上につながる。

その直接的な経済効果を定量的に予測することは難しいが、内閣府の機械受注統計調査報告⁶では、エネルギー機器（原動機）、運輸機器（自動車、鉄道、航空機、船舶）の受注額は、約1.7兆円（機種別全体の約24%）、年間で約6.8兆円であり、本プロポーザルで対象としているエネルギー機器、運輸機器は大きな市場であることがわかる⁷。

(2) 安全・安心な社会構築への貢献

工業製品など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る。破壊現象を的確にとらえ、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、機器の社会受容性を得るための必須の条件である。機器の損傷事故の多くに関係しているとされる疲労破壊現象の理解の深化は、機器の損傷を大幅に減らし、その本質的な安全性の向上につながる。

疲労破壊の初期現象の理解は、何を計測すれば破壊現象の前兆をとらえることができるかの理解にもつながり、従来に比べてより正確で革新的な計測機器、破損の事前検知手法への道が開ける。また、延命のための的確な処置、手法も生み出せる可能性もあり、機器の耐用年数の長期化につながる。このように本プロポーザルの研究開発は、予測手法、保全手法の開発にも及び、安全・安心でかつ持続的な社会の構築へ貢献できる。

6 内閣府、統計表一覧：機械受注統計調査一覧、
<https://www.esri.cao.go.jp/jp/stat/juchu/juchu.html>（2022年12月20日アクセス）

7 2018年4月から2021年9月までの四半期毎の機種別の平均値、季節調整無しの数値

疲労破壊現象の理解の深化が関わる産業分野は非常に幅広く、原子力発電、火力発電、風力発電などのエネルギー機器、航空宇宙機器や船舶、自動車などの運輸機器、更には橋梁などを含む建造物、電気・ガス・水道等の社会インフラなどにも及ぶ。これらの信頼性・安全性を確保し、安心で持続的な社会の構築のために重要な意義を持っている。

(3) カーボンニュートラル社会実現への貢献

疲労現象の理解を応用し、より経済的・合理的な機器を開発することが可能となり、これはカーボンニュートラル社会の実現にも貢献する。再生可能エネルギーの導入に伴う洋上風力や火力発電を例に挙げる。

2020年度の我が国のCO₂総排出量は11億5,000トンと推計されており、その内、エネルギー転換部門は4億2,200万トン、全体の40.4%を占めており⁸、再生可能エネルギーの導入が必須となっている。洋上風力に関して、日本政府は、2030年までに10GW、2040年までに30～45GWの導入目標を明記している。実現には大変な努力が必要となっているが、政府目標が実現できれば、2030年までの10GW導入分だけでも直接投資が5～6兆円と試算されており、その経済波及効果は大きい。一方、風車は、日本のメーカーが撤退し国内製造拠点が不在であるため海外からの輸入に依存しているのが現状である。このため、電力安定供給や経済波及効果といった観点から、日本国内に強靱なサプライチェーンを形成して、2040年には国内での関連部品の調達比率を約60%にする目標が掲げられている⁹。そこでは、発電機、増速機、ベアリングなどの国内調達も必要となってくる。我が国では欧米に比べ風向・風速の変動が大きいと、増速機のギアなどにかかる負担が大きくなり、破損の確率が高まるリスクがある。本プロポーザルによる研究開発の成果により破損しないための高度な設計方法の提供が可能になると期待できる。

再生可能エネルギーの導入量の増加に伴い、電力の安定供給のために、2050年においても供給力や調整力、慣性力といった機能を持つ火力発電が一定容量必要とされており、その脱炭素化は不可欠となっている。天然ガスなどの化石燃料を使用する場合は、CCS（Carbon dioxide Capture and Storage、二酸化炭素回収貯留）の設置が必須であるが、貯留分を少しでも減らすように、ガスタービンなどの更なる高効率化は欠かせない。一方、変動する再生可能エネルギーの電力と協調・補完して安定な電力を供給するためには、これまで定格・定常運転がベースであった火力発電に対しても、起動・停止を含む急速な負荷変動運転が余儀なくされる。不規則な変動負荷運転は、機器への負担を増加させることから、これまで想定していなかった疲労破壊現象への対応も必要になってくる。本プロポーザルによる研究開発で得られる成果は、経済的・合理的な発電機器の高効率化や新たな運転条件での疲労破壊の防止への貢献が期待できる。

運輸部門においては、電動化が推進されている。しかし、航空機は電動化が難しく、バイオジェット燃料を含む持続可能な航空燃料（Sustainable Aviation Fuel：SAF）などの代替燃料への転換が検討されているが、燃料コストが問題となっている。本プロポーザルによる研究開発の成果によって、航空機の軽量化、燃費向上、使用燃料量の削減につながることから、航空機からのCO₂排出量削減への貢献も期待される。

8 環境省、2020年度（令和2年度）温室効果ガス排出量（確報値）全体版、
<https://www.env.go.jp/content/900445425.pdf>（2022年12月22日アクセス）

9 洋上風力の産業競争力強化に向けた官民協議会、「洋上風力産業ビジョン（第1次）」、
<https://www.mlit.go.jp/kowan/content/001382705.pdf>（2022年12月22日アクセス）

2.3 科学技術上の効果

(1) 疲労破壊に関する科学技術基盤の強化

未解明の疲労破壊の初期現象を解明し、それをベースとした疲労現象全体の学理を構築することで、階層的で多様性のある複雑な破壊現象の過程・機構の包括的かつ本質的な理解が深まり、新たな疲労現象学・疲労工学の科学技術基盤が形成される。その結果、機器の構造や新規材料の研究プロセスにも革新を引き起こし、エネルギーや輸送など様々な機器にイノベーションをもたらすことが期待できる（図2-3-1）。初期現象に関わる支配パラメータが明確になることで、効率的な疲労試験が可能となる。また、物理・数理モデルとデータ科学的手法により、実験則・経験則を補完できるようになり、破壊・寿命に関してこれまでよりも格段に少ない実験データや短い期間で高度な予測が可能となる。

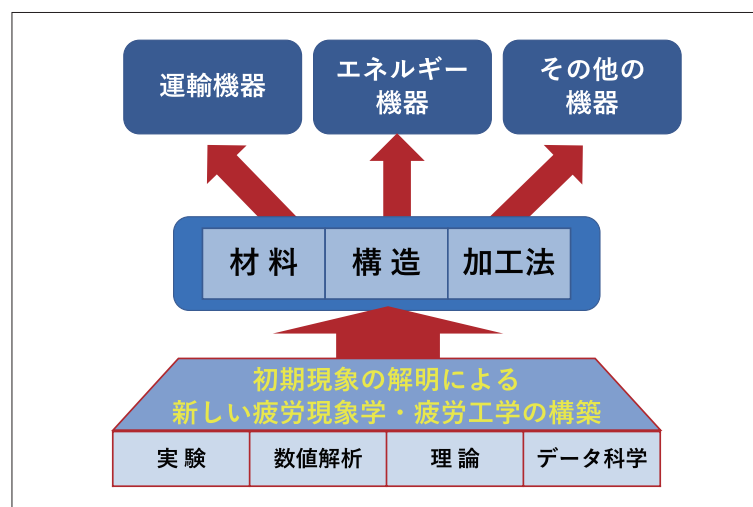


図2-3-1 初期現象の解明による疲労破壊の科学技術基盤構築

(2) 産学の垣根を越えた学際的ネットワークの構築と人材の育成

アカデミアおよび産業界から様々な分野の研究者が参画する中長期の研究により、産学を越えた学際的なネットワークが構築され、疲労破壊に関する研究開発分野の活性化が図れる。また、この分野の核となる基礎研究と適用される製品の両方を理解する人材が継続的に輩出される。その結果としてサイエンスとしての疲労破壊研究とエンジニアリングとしての疲労破壊研究がともに発展し、この分野の科学技術基盤が強化される。

3 | 具体的な研究開発課題

巨視的き裂形成までの過程に着目した初期の破壊現象の微視的な機構や力学を解明し、それに基づく疲労破壊に関する科学技術基盤の構築を図るために、以下の2つの具体的な研究開発課題に取り組むことを提案する。

- 疲労破壊の初期現象の法則性の発見
 - (1) 基本的な疲労条件での初期現象データの体系的な取得
 - (2) 数学・数理科学を活用した現象の法則性の把握
 - (3) 初期現象の実実験データの補完・拡充
 - (4) モデルと法則性の適用範囲の検証
- 疲労破壊の初期現象の理解に基づく疲労現象学・疲労工学の構築

3.1 疲労破壊の初期現象の法則性の発見

(1) 基本的な疲労条件での初期現象データの体系的な取得

疲労破壊の初期現象は階層的で多様性のある複雑な現象である。例えば図2-1-2で示したように、き裂の起点（微小き裂の初生の源）となり得る箇所は、結晶粒界や結晶内の析出物（不純物）、結晶中の欠陥など様々であり、その大きさも色々である。この内どれが起点となり微小き裂に成長するかを予測するためには、外部から負荷に対してどのように力学場が応答して非平衡となり、結果として転位や変形が生じるかなどを知る必要がある。しかし初期現象に関するデータは現時点で十分にはなく、また、疲労試験そのものが時間を要する試験であることから簡単にデータを増やせる状況にはない。このため、実実験、数値実験（シミュレーション）、数学・数理科学の研究者が連携して、既に得られている知見も活用して十分な検討を行って物理モデルを作り、精緻な実験にてその検証を行う（図3-1-1）。ここでの物理モデルは、力学場として捉えることにより、どのような外力ないしは摂動の寄与により平衡が乱れ、初期現象が進展するかの視点で捉えるものである。実実験および数値実験を相互補完して物理モデルを検証できるように、実験のデザイン、検証に適切な加重条件、温度や雰囲気などの環境条件、試料や解析モデルの材料・材質、全体形状や表面形状、計測項目などの境界条件など、実実験、数値実験の設定条件を予め入念に検討した上で実験を行う。こうして得られたデータに基づき、物理モデルの適合性や適用範囲を把握し、必要に応じてモデルを修正していくことが、疲労の初期現象の理解に繋がる。また、このように詳細かつ体系的に検討された実実験や数値解析のデータが、この後の機械学習を適用する場合でも非常に有用なデータとなる。

なお設定する条件に関しては、最初は単純な条件から開始すべきである。例えば、荷重条件としては、

- (ア) 一定振幅荷重の基礎的な条件における初期現象の理解
- (イ) (ア) を基にした変動荷重や環境条件への拡充

というステップで行うことが考えられる。(ア) の一定振幅条件は、通常のマクロな疲労試験に繋がる条件であり、(イ) は実機の実環境へ対応するためのモデル試験となる。まず(ア) にて、微小き裂が発生し、その微小き裂が進展して巨視的き裂へ発展するまでのプロセスを系統的に知ることがベースとなる。なお、一定振幅荷重においても、その荷重方向（引っ張り方向、圧縮方向、剪断方向）や、平均荷重がゼロかプラスかマイナスかによっても実際の疲労現象が異なり複雑であることから、荷重条件の選定は重要である。また、(イ) の変動荷重にお

いても、その繰り返し周波数、荷重のパターンによってマクロな疲労現象が大きく変わることが知られており、その本質に迫るために、前述のように設定条件を予め十分に検討して実行することが重要である。

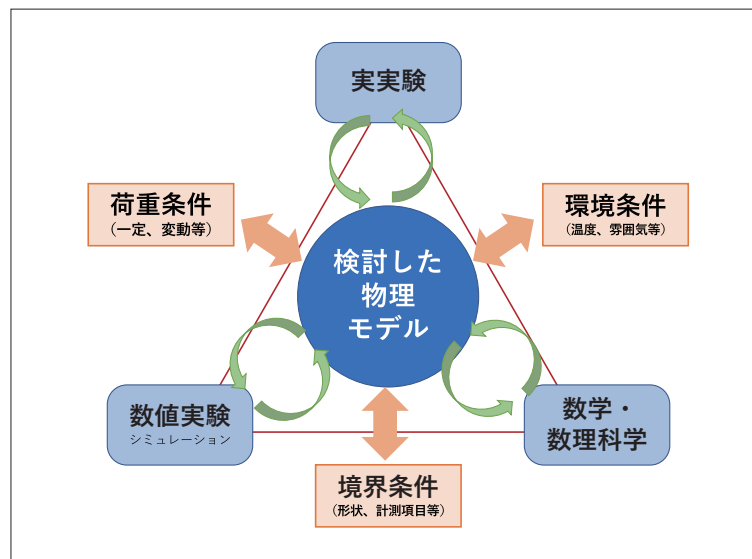


図3-1-1 初期現象理解のための検討プロセス

（2）数学・数理科学を活用した現象の法則性の把握

（1）で検討した基本的な疲労条件での初期疲労の物理モデルは、一つのモデルに統一できれば良いが、実際には、荷重条件、境界条件、環境条件により、いくつかの物理モデルができることになると予測される。それらの物理モデルに対し、数学・数理科学、物理理論などを用いて、それぞれの物理モデルに属する実験データに共通する特徴量を抽出し、各物理モデルを決定している法則性、支配パラメータを見いだす。例えば結晶組織の構造、結晶粒の構成、微視的な力学場の特性などから、共通点と差異を数理的に明確にすることなどである。また、複数の物理モデルの中で共有される特徴量も抽出する。全てに共通する普遍的な法則性は見いだせなくとも、いくつかのパターンに分類することが可能となる。

（3）初期現象の実実験データの補完・拡充

法則性を確認するためには、多くの事象の中でどの範囲でその整合性が成り立つかを確認するため、実実験のデータの補完・拡充を行う。（2）で得られた法則性に影響する重要な因子が確認できて数値実験との対比が可能な範囲で、簡略化した実験や計測手法を図3-1-1のように検討を実施する。

なおその際、荷重の繰り返し周波数の高速化や同時に多数の試験サンプルの疲労試験を行う方法の開発や、加工しやすく設定が容易な試料形状¹などの検討も重要になる。例えば、繰り返し周波数に関しては、その周波数を上げると実験そのものの時間は短くなるが、過度な高速化は疲労破壊に至る繰り返し数を変えることが知られている。それに対し、（1）において、影響を与える物理機構が明らかになれば高速化が可能となる。微小き裂の発生・成長への影響の度合いに応じ、周波数を能動的に変更して試験を早める方法などが考えられる。

¹ 疲労試験では、一方向の応力が均等に加わるような試料の形状が求められる。図3-1-2に示すように、ナノ・マイクロレベルの実験で狙った結晶組織の中からサンプルを取り出して実験を行う場合、均等な応力が印加されるようにするためには、イオンミリング装置（FIB）を用いて、幅と同程度に薄く削って作成する必要があるため、試験サンプルの作製に時間を要する。

(4) モデルと法則性の適用範囲の検証

多くの実実験データ、数値実験データとの比較により、法則性の適用範囲を確認する。このため、(1)での基本的な条件以外で、(2)で抽出した特徴量と同じ特性を持つ材料や条件において法則性が成り立つかどうかを確認する。法則性が成り立たない条件・範囲には、再度(1)および(2)の検討・実験を行い、物理モデルを補正し、そのモデルでの法則性を整理することで、適用範囲が拡大できないかなどを検討することが望ましい。物理モデルを組み込んだ機械学習モデルにより、初期疲労を精度良く予測できるか確認することも方法のひとつである。実実験とモデルを反映した数値実験、機械学習を連携して進めることで、法則性やその適用範囲がより明確になると期待できる。機械学習は予測だけでなく計算負荷の削減やデータ量の削減のための強力なツールになることが期待される。

上記の(1)～(4)を実施するために、実実験、数値実験、数学・数理科学において以下の内容に取り組む必要がある。

<実実験>

実実験での初期現象を捉えるための実験方法の検討が課題である。それには近年進展したナノ・ミクロンサイズの実験技術、および分析性能が向上した後方散乱電子回折（Electron Back Scatter Diffraction：EBSD）などの微視的組織観察手法の活用が鍵となる。例えば図3-1-2に示すように、予めEBSDなどで面内の微視的な組織を把握した上で、微細加工で試験サンプルを作り疲労試験を行うことで、組織単位での材料強度特性、疲労特性を把握する。その上で試料を大きくして疲労特性を計測し、構成する組織の影響を把握する方法などが考えられる。ここで対象とする微細組織、試験サンプルの大きさ、その中に含有する組織などが数値実験や物理モデルの検討と大きく影響することから、重要な因子となる。

疲労試験中はサンプルの変形状態を連続的な画像データとして取り込む。このデータをスパースモデリングを用いて高解像度化し、変形と組成との関係を詳細に分析するなど、画像データの有効活用なども検討に値する。

詳細な疲労試験は時間がかかるため、工夫して効率的に実実験を遂行する。ただし現象がよく分からない段階では、安易な簡易試験や加速試験は本質的な現象を捉えない可能性があるため避けるべきである。例えば詳細な実実験を一つの機関ではなく、分散して行いデータを増やす方法などが考えられる。

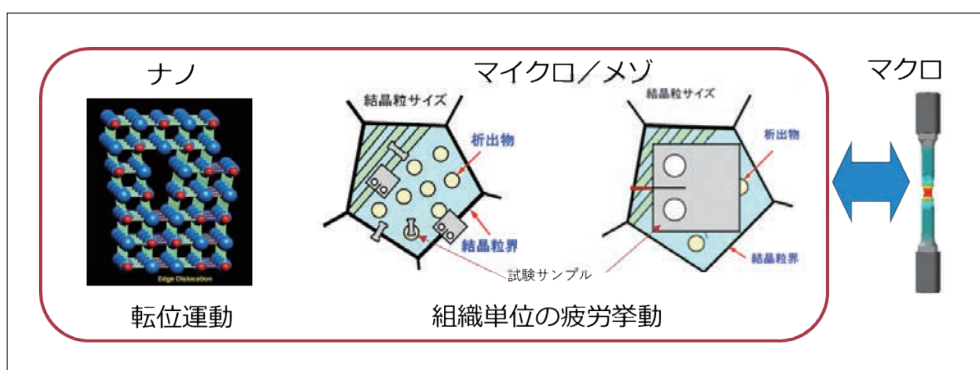


図3-1-2 疲労破壊現象の多様性・階層性と各サイズでの疲労特性の把握²

2 JST-CRDS 科学技術未来戦略ワークショップ報告書「機器の安全性を高める破壊・寿命予測の科学技術基盤の構築」（2021/12/10実施）熊本大学 高島勉点長・卓越教授 提供資料を基にCRDSにて作成

<数値実験>

数値実験解析においては、実現象との時間スケールとの差異を埋めるシミュレーションとき裂の初生から微小き裂の進展に至る階層的現象間を接続するシミュレーションが課題である。前者については、シミュレーションで微小組織が変化する状況を詳細に解析できるのは、マイクロ秒程度の時間である。それに対し実実験での疲労試験で微小き裂が発生・進展するには、遙かに長い時間がかかる。変動する荷重が積み重なることにより現れる疲労現象としての微視的な組織の変化やき裂の進展、そこに働く力学量を、数値実験（シミュレーション）とどのように対応させるかが課題となる。また、後者のマルチスケール・マルチフィジックスな疲労現象を接続するシミュレーションは、疲労現象のメカニズムを理解する上で非常に重要な部分である。実実験で観察される現象を理解した上で、数理・解析モデルを構築していく必要がある。

<数学・数理科学>

モデルの構築と数学的解法の検討と現象を支配するパラメータの検討が課題となる。いくつかの物理モデルに分類された実験データから特徴量、支配パラメータを抽出し、法則性を見いだすために適切な数学・数理科学的手法のアイデアを創出する。例えば、結晶組織の構成や結晶構造の変化（転位組織の再構成）などの幾何学的特徴との関係は、パーシステントホモロジーなどのトポロジ的概念が適用できる可能性がある。

3.2 疲労破壊の初期現象理解に基づく疲労現象学と疲労工学の構築

微視的な初期破壊現象（ミクロ）と実際に目に見える破壊現象として現れる巨視的き裂（マクロ）を繋ぎ、き裂の発生から巨視的き裂の進展に至るまでの一貫した疲労現象として理解することが必要である。微小き裂が巨視的なき裂に成長する過程においては、周囲の結晶粒や結晶粒界などのミクロ組織の多様性に影響を受けるため、き裂の進展は一樣ではなく、バラツキが発生する。このバラツキのある、離散的で非均質なミクロな現象を、連続で均質なマクロな現象に繋げるための均質化、数理化のアイデアを探索することは、最終的には疲労破壊の理解にも深く関わる部分である。巨視的き裂に進展した後もそのき裂の先端を微視的にみればミクロな現象であり、新たな均質化、数理化のアイデアは、巨視的き裂進展の理解の進化にも繋がる。このため、例えば、図3-1-2のように、様々な結晶粒、および粒界を跨ぐ疲労試験のデータを取得した上で、そのデータを基にした確率論的マルチスケールシミュレーションによるバラツキを含めた微小き裂の進展の予測などが考えられる。科学的にも工学的な応用においても、合理的な数理科学モデルを構築することが必要であり、実現象を理解した上で数学・数理科学者が中心となって検討することが肝要である。

工学として活用するには、初期現象の理解に基づく疲労現象の物理・数理モデルを、本質的な要素を落とさずに簡略化していく過程が必要である。最終的に実際の機器設計に用いられるのは最も簡略化されたマクロな解析モデルであるため、何段階かで情報量を落としていく方法が課題となる。その方法としては機械学習が候補であり、得られた法則性などを予測モデルに組み込んだ機械学習モデルの適用性検証などを行う。このような機械学習システムの構築によって、少ない疲労実験数での高精度の疲労寿命予測が期待できる。簡略化の方法を研究するには、実機の実現象と微小な現象の両方の理解が非常に重要となる。

実製品の疲労破壊においては、腐食などいくつかの現象が重畳して起こる場合が多い。そのような複合現象における疲労の初期現象の理解は、実際の機器では非常に重要な知見となる。企業の競争力の源泉にもなることから、企業が主体となって研究を行うことが望ましい。その中で科学的に重要度が高く共通性のある基礎的な内容については、法則性の適用範囲を拡大する視点からもアカデミアと共同して取り組みむべきである。

4 | 研究開発の推進方法および時間軸

4.1 研究開発の推進方法

疲労破壊の初期現象の解明により、疲労破壊全体の理解の深化を深め、最終的に社会に還元して社会・経済的課題の解決に結びつく科学技術基盤とするためには、実際の機器の本質的な問題を理解して研究開発に取り組む必要がある。そのためには基礎研究と応用の両方を理解した人材の育成が重要である。我が国ではそのような人材が不足しているが、そもそも破壊の研究分野全体の研究人材が多くはない。研究人材の減少は日本の工学基盤関連の研究分野に共通する問題であるが、特にこの分野では、機器や材料の開発の一部としての研究がほとんどであったり、疲労試験は成果がでるまでに時間がかかったり、既に成熟した分野で先進的ではないとの誤った認識などから、人材が集まり難い状況が続いている。人材育成も兼ねたプログラムが必要である。

このため、本プロポーザルの研究開発は、図4-1-1に示すように最初はネットワーク形成・人材育成を主眼とした取り組みを進め、次に拠点化して加速し、社会に還元する取り組みへ移行する二段階の推進が有効と考えられる。

第一段階では、大学と産業界の枠を越えた分野横断的なネットワークを形成する。この分野の研究人材が少ないことから、最初は拠点型ではなく、比較的体制が作りやすいネットワーク型の研究組織での推進が妥当と考えられる。そこでは、基本的な疲労条件における初期疲労の法則性の発見を主眼においた基礎的な研究と、核となる人材の育成を二つの柱として推進する。

基本的な疲労条件での初期疲労の法則性の発見に関する研究は、5年程度を目途に推進する。この部分は現象解明やモデル化など基礎的な研究フェーズにあたることから、文部科学省やJSTの事業などで戦略的に進めることが有効と考えられる。関連が深い既存のプログラムやプロジェクト、例えばJST戦略的創造研究推進事業CREST・さきがけの「ナノ力学」領域とも連携して推進することが望ましい。

人材に関しては、アカデミアからは材料系や機械系の研究者だけではなく、数学・数理科学、データ科学などの多様な研究者が加わることが不可欠である。そこでは現状関係が希薄な数学・数理科学関係のコミュニティとの連携を深めることが必要である。数学的な定式化がまだ難しくとも、情報や問題点を共有することが先決であり、例えばJSTが主催している「数学領域未解決問題ワークショップ」のような取り組みなどが参考になる¹。

産業界からも若手研究者が参画し、公開可能なデータを共用し、議論しながら疲労の初期現象の研究を実施する。基礎研究と応用の両方を理解する人材の育成は重要である。産業界から参画した研究者が企業内の研究を支える人材になり、本分野の産業界での研究基盤も強化される。さらに、企業が抱える実機での疲労破壊の本質的な問題を解釈して、大学への基礎研究に反映するというプロセスが強化されることが期待できる。

また、この分野で高い研究レベルを維持している欧米の研究機関との連携や国際共同研究も検討に値する。ただし、疲労破壊に関する先端研究はその国の経済安全保障とも関係しているため、海外の研究機関と研究を実施しても、本質的な部分はブラックボックスであったり、重要なデータは非公開であったりとの問題もある。

¹ 数学領域の研究者が、現在課題と考えている未解決問題を持ち寄り、それぞれの問題の背景、意義等を説明した後、参加した若手数学者を含むグループで問題に取り組み、それぞれの知見を出し合い、また、その場でシミュレーション等を含む共同研究を行い、解決への糸口を見つける取り組みを行う合宿形式のワークショップ。
<https://www.jst.go.jp/report/2021/211206.html>（2022年12月22日アクセス）

海外との共同研究は内容を十分に検討し、本質的な部分については国内で研究を実施することが必要と思われる。

若手研究者の育成という点では、例えば、JST 戦略的創造研究推進事業のさがけのようなプログラムが参考になる。ただし、実態としてさがけには産業界からの参加はほとんどない。障壁が何かをしっかりと分析して、産業界からも参画しやすい仕組み作りが必要である。また、完全な個人研究ではなく、図3-1-1に示すように、実実験、数値実験（シミュレーション）、数学・数理科学の研究者が連携して十分な検討を行って物理モデルを作り、精緻な実験にてその検証を行うプロセスが構築できるようにしなければならない。また、プロジェクトや研究グループの中で自由に議論できる仕組みや、定期的な研究会の開催など、高い意識を持ち続けるための継続的かつ闊達な議論の場を提供することが重要である。そのためには、目指すべきリーダー像として、本分野に深い造詣があり、幅広い分野の若い研究者を束ねる力量が求められる。

ネットワークの形成および核となる人材の育成に目処がついた後には、第二段階として持続的な組織を運営し、研究環境を構築するために拠点化を推進する。ここでは破壊の初期現象の理解とそれに基づく疲労破壊現象全体の理解の進化が創出する新機軸の疲労現象学・疲労工学の構築に向けた研究や法則性の適用範囲の拡大に関する研究を推進する。時間がかかる疲労試験を迅速かつ効率的に実施するために共用の実験設備を拠点となる大学や研究機関へ導入することも検討する必要がある。また、科研費などで実施される、ナノ・マイクロ領域での力学場の計測などの革新的な観察・計測手法の成果は積極的に取り入れていくことが望ましい。初期のネットワーク型の研究組織で取得した実験データや知見を拠点に集約するとともに、初期現象の法則性の適用範囲の拡大や機械学習などのデータ科学的手法が活用できるように、疲労の初期現象のデータベースを継続的に充実・拡充していくことが必要である。

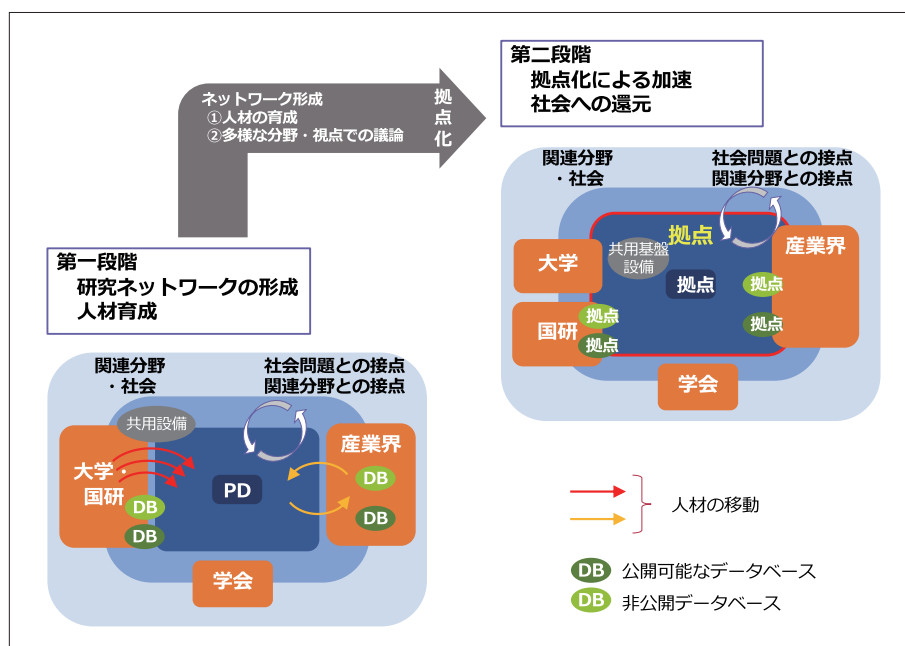


図4-1-1 研究開発の推進方法

初期現象の理解のために取得した様々なデータからなるデータベースは、実際の機器への展開のための疲労現象工学にも非常に重要である。新知見となる可能性が高い初期現象に関するデータであれば、なおのこと貴重であり、機器や材料の開発競争力の源泉ともなる。これまで個別の機器や材料の開発の下で行われていた疲労破壊の研究データは、そのプロジェクトの範囲での活用であり、その後忘れられたり、失われてしま

うこともあった。科学技術の進展のためには、そのような重要なデータの永続的な維持・管理と公開や情報共有が必要不可欠である。疲労データシートの取得で実績のあるNIMSのような国立研究機関が、データベースの維持・管理に関わる必要がある。そのためにも中長期に渡りデータベースをメンテナンスし、情報の悪用を防止しつつ、公開する範囲、秘匿する範囲を明確にして活用するためのマネジメントやファンディングの仕組みが必要である。

このような研究推進体制には、研究開発のマネジメントを取りまとめるプログラムディレクター（PD）が不可欠である。プログラムの進行状況に合わせ、適宜軌道修正をして疲労の初期現象の普遍的な理解という目標達成に導くなど、PDには統合力や指導力が求められる。産学の連携や融合が重要であることから、アカデミア、産業界それぞれから選任されたPDの2名体制で推進することが望ましい。

評価方法については、特に第一段階においては人材育成を目標とした評価も加えることが望ましい。中間評価においては、研究継続可否のための評価ではなく、研究が発展していくためのアドバイスの視点が必要であり、当初の計画段階から柔軟に戦略の変更を可能とする仕組みも必要である。

4.2 時間軸

研究推進の時間軸を図4-2-1に示す。この分野は国の安全を守る、あるいは国を維持するための基盤となる科学技術分野のひとつであり、レベルを維持しながら実力を積み重ねなければならない分野である。国として中長期的に且つ継続的に研究開発を推進していく必要がある。新機軸の疲労現象学・疲労工学を体系化し、産業界にフィードバックできるまでには10～15年程度が必要と考えられる。まずは早期にネットワーク型の研究組織を立ち上げ、疲労破壊の初期現象の理解に向けた初期現象の法則性を見いだすための基礎的な研究を推進し、大学と産業界の核となる研究人材の育成を行うことが肝要である。拠点化後もサイエンスとしての研究は継続することから、引き続き文部科学省等のファンドも活用しつつ進めることが望ましいが、研究が進展して応用に近い課題となった部分では、経済産業省やNEDO等の関連する省庁・機関のプロジェクトに移行すべきである。特に実機の疲労破壊においては、疲労の初期現象（複合検証における疲労の初期現象含む）の理解は非常に重要な知見かつ企業の競争力の源泉にもなることから、NEDOプロジェクトなども活用して企業が主体となって研究を行うことが望ましい。その中で科学的に重要度が高く共通性のある基礎的な内容については、法則性の適用範囲を拡大する視点からもNEDOプロジェクトなどと併行して取り組みむべきである。国として研究開発が実機に適応できる段階まで継続・完遂するような施策が必要である。

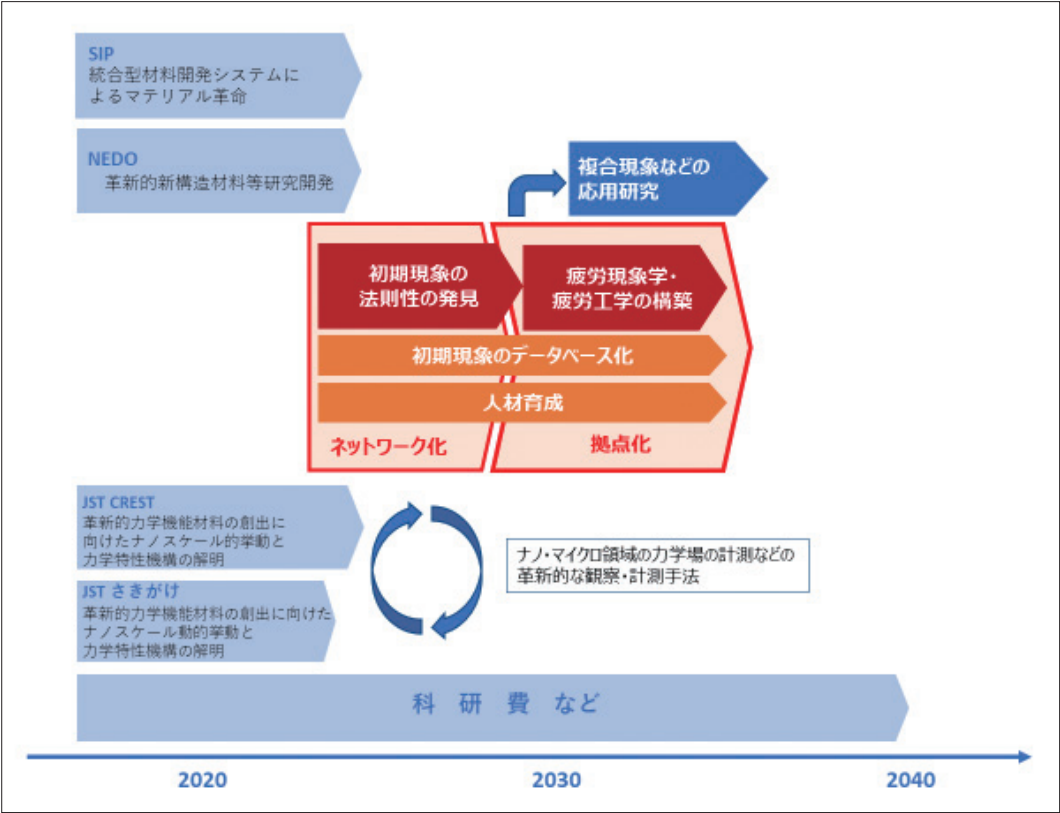


図 4-2-1 研究開発の時間軸

付録1 検討の経緯

- 国立研究開発法人科学技術振興機構（JST）研究開発戦略センター（CRDS）では、2021年度の戦略スコープ検討委員会において、戦略プロポーザルを作成すべきテーマの一つとして本テーマを選定した。
- これを受けて検討チーム（破壊・寿命予測チーム）を発足させ、2021年5月から活動を開始した。チーム活動では、有識者インタビュー、文献調査、講演会等からの情報収集、およびセミナーやワークショップを開催し、本テーマを取り巻く現状の把握・分析、今後の研究開発の方向性等について議論・検討を深めた。これら一連の活動の概要を以下に示す。

1. 有識者インタビュー

本戦略プロポーザルの作成にあたり、国内外の研究状況、ボトルネック課題の抽出、具体的な研究開発課題、科学技術上の効果等についての調査分析を行うため、関連分野の有識者にインタビューを実施した。2021年6月～11月までの間に実施したインタビューでは、破壊力学、特に疲労破壊を中心として、材料、機械工学、モデリング・シミュレーション、応用数学、情報科学等の関連分野の32名（大学：17名、国研：8名、産業界：7名）の有識者にヒアリング、意見交換を実施した。

2. セミナー

7月にクロースド形式により下記のセミナーをオンラインで開催し、実際の機器の損傷事例、破壊・寿命予測に関わるエンジニアリングの現状や課題、企業がアカデミアの研究に対する期待や要望などについて理解を深めた。

開催日時：2021年7月21日（水）13:10-15:30

開催場所：オンライン開催（Teams）

<講演>

「破壊・寿命予測に関するエンジニアリングの現状」 講演者：株式会社IHI 高梨 正祐 主任研究員

<招聘有識者>

山田 剛久 株式会社IHI 技術開発本部 技術基盤センター 材料・構造グループ グループ長

高梨 正祐 株式会社IHI 技術開発本部 技術基盤センター 材料・構造グループ 主任研究員

北村 隆行 京都大学 理事・副学長

3. 科学技術未来戦略ワークショップ「機器の安全性を高める破壊・寿命予測の科学技術基盤の構築」

調査分析を進め、問題点やとりまとめの方向性がある程度定まってきた段階で、その内容の妥当性を確認し、議論をより一層深めるため、ワークショップを企画・開催した。以下に概要を示す。

なお、本ワークショップの詳細については、「科学技術未来戦略ワークショップ報告書『機器の安全性を高める破壊・寿命予測の科学技術基盤の構築』」として取り纏めて発行した（2022年3月CRDS-FY2021-WR-10）

開催日時：2021年12月10日（金）13:00-17:30

開催場所：オンライン開催（Teams）

<プログラム>

時 間	内 容
13:00-13:15	開会挨拶（佐藤上席フェロー）・趣旨説明（竹内フェロー） JST-CRDS
13:15-14:13	<第一部> 1. 疲労破壊の現象解明に関する方策 京都大学 北村 隆行 理事・副学長 2. 疲労現象学と疲労工学のためのマルチスケールシミュレーション 大阪大学 大学院工学研究科 渋谷 陽二 教授 3. 材料研究における数学の応用 東京大学 大学院数理科学研究科 中川 淳一 特任教授 4. 材料研究における機械学習の適用と限界 理化学研究所 革新知能統合研究センター 瀧川 一学 研究員 ・コメンテータ 物質・材料研究機構 津崎 兼彰 フェロー 東京工業大学 岸本 喜久雄 名誉教授
14:13-15:00	総合討論（1）
15:10-16:13	<第二部> 1. 疲労破壊に関する最近の研究の進展について 静岡大学 工学部機械工学科 島村 佳伸 教授 2. マイクロ材料試験による疲労き裂伝播初期過程の解明 熊本大学 国際先端科学研究機構 高島 和希 機構長・卓越教授 3. 超高サイクル疲労における内部微小き裂の非破壊評価 北海道大学 大学院工学研究科 中村 孝 教授 4. 疲労データベースの構築と課題 物質・材料研究機構 構造材料研究拠点疲労特性グループ 古谷 佳之 グループ長 ・コメンテータ（コメント5分）15分 電力中央研究所 三浦 直樹 首席研究員 (株) 日立製作所 宮崎 克雅 主管研究員 (株) IHI 高梨 正祐 主任研究員
16:25-17:55	総合討論（2）
17:55 18:00	閉会挨拶

<WS参加者>

【招聘有識者】（敬称略、五十音順）

北村 隆行	京都大学 理事・副学長
岸本 喜久雄	東京工業大学 名誉教授
渋谷 陽二	大阪大学 大学院工学研究科 教授
島村 佳伸	静岡大学 工学部機械工学科 教授
高島 和希	熊本大学 国際先端科学研究機構 機構長・卓越教授
高梨 正祐	(株) IHI 技術開発本部 技術基盤センター 材料・構造グループ 主任研究員
瀧川 一学	理化学研究所 革新知能統合研究センター 研究員
津崎 兼彰	物質・材料研究機構 フェロー
中川 淳一	東京大学 大学院数理科学研究科 特任教授
中村 孝	北海道大学 大学院工学研究科 教授
古谷 佳之	物質・材料研究機構 構造材料研究拠点 疲労特性グループ グループ長
三浦 直樹	電力中央研究所 首席研究員
宮崎 克雅	(株) 日立製作所 研究開発グループ 生産・モノづくりイノベーションセンター 主管研究員

【JST-CRDS 検討メンバー】

佐藤 順一	JST CRDS 環境・エネルギーユニット 上席フェロー	※チーム統括責任者
竹内 良昭	JST CRDS 環境・エネルギーユニット フェロー	※チームリーダー
荒岡 礼	JST CRDS ナノテクノロジー・材料ユニット フェロー	
大山 みづほ	JST CRDS 企画運営室/ナノテクノロジー・材料ユニット フェロー	
岡部 成光	JST 産学連携展開部研究支援グループ 主任調査員	
佐川 みすず	JST 研究プロジェクト推進部グリーンイノベーショングループ 主任調査員	
長谷川 景子	JST CRDS 環境・エネルギーユニット フェロー	
松村 郷史	JST CRDS 環境・エネルギーユニット フェロー	
吉脇 理雄	JST CRDS システム・情報科学技術ユニット フェロー	

付録2 国内外の主な研究開発プロジェクトの動向

■海外の関連プロジェクト

1. 欧州

EU（欧州連合）では研究・イノベーション枠組みプログラムとしてフレームワークプログラム（FP: Framework Program）である Horizon 2020（2014～2020年）や Horizon Europe（2021～2027年）が実施されている。Horizon 2020は3つの大きな柱とその他の取り組みからなり、第一の柱として「卓越した科学」、第二の柱として「産業リーダーシップ」、第三の柱として「社会的課題への取り組み」が実施されている。Horizon2020における破壊力学関係へのプロジェクトの状況を付表2-1に示す。破壊靱性の微視的起源やナノスケールの破壊プロセスの理解に基づく新バルク材料の開発、低炭素化自動車開発への応用を目指した複合材料の応用研究などに資金が投入されている。

また、欧州構造物安全性学会（ESISが主催する学会の European Structural Integrity Society）が主導して破壊力学に関する研究が推進されており、ESISが主催する学会の European Conference on Fracture（2年毎に開催、2020年はコロナ禍により中止）等を通じて成果の発表や議論が行われている。ESISには、2022年3月時点で19の技術委員会があり、「TC3/FATIGUE OF ENGINEERING MATERIALS AND STRUCTURES」にて、疲労破壊に関する理解を深めるための材料や構造物の疲労特性評価方法などの研究開発が促進されている¹。

付表2-1 Horizon2020における破壊力学関係のプロジェクト²

分類	プロジェクト略称・概要	プロジェクト費	代表国・代表機関
第1の柱 卓越した科学 (ERC)	• microKlc き裂先端の微視的なプロセスの詳細な理解に基づく破壊靱性マイクロメカニカルモデルの開発	€ 1,996,570	ドイツ (FRIEDRICH-ALEXANDER-UNIVERSITAET)
	• TUGHIT ナノスケールの破壊プロセスの理解に基づく、高強度と高靱性のバルク材料の開発	€ 1,960,985	オーストリア (MONTANUNIVERSITAET LEOBEN)
	他1件	合計 € 5,635,880	

1 <https://sites.google.com/structuralintegrity.eu/tc03>（2022年12月22日アクセス）

2 CORDISにて‘Fracture Mechanics’により検索した19件（建築や地震関係などのプロジェクトを除く）
<https://cordis.europa.eu/search?q=%27Fracture%20Mechanics%27&p=1&num=10&srt=Relevance:decreasing>
 （2022年12月22日アクセス）

第1の柱 卓越した科学 (Marie Skłodowska-Curie Actions)	• NEWFRAC 有限破壊力学と破壊の位相場モデルを融合した破壊予測計算ツール開発	€ 3,359,824	スペイン (UNIVERSIDAD DE SEVILLA) 7カ国9機関
	• ATHOR 耐火材の破壊挙動、耐熱衝撃性などの物性に対するマルチスケールモデリング	€ 3,737,239	フランス (UNIVERSITE DE LIMOGES) 6カ国6機関+8パートナー
	• BriCoFra 疲労破壊の数学的・機械的な定式化への取り組み	€ 173,076	フランス (COLE POLYTECHNIQUE)
	他 8 件	合計 € 15,753,382	
第2の柱 産業リーダーシップ	• DACOMAT 橋梁、風車ブレードなど大型構造物における複合材料の損傷制御 (インフラ関係)	€ 5,873,915	ノルウェー (SINTEF AS)
	他 1 件	合計 € 11,791,306	
第3の柱 社会的課題への取り組み (Smart, Green And Integrated Transport)	• AMATHO 積層造形の特徴を活かした新しいティルトローターの設計/評価/製造	€ 3,321,160	イタリア (POLITECNICO DI MILANO)
		€ 3,321,160	
Euratom programme for nuclear research and training	• ATLASplus 原子炉の長期運転のための経年劣化の管理手法開発 • FRACTESUS 小試験片による原子炉圧力容器鋼の破壊力学試験	€ 7,195,162	フィンランド (TEKNOLOGIAN TUTKIMUSKESKUS VTT OY)
		€ 4,666,061	ベルギー (STUDIECENTRUM VOOR KERNENERGI)
		合計 € 11,861,223	

2. ドイツ

ドイツ研究振興協会 (DFG: German Research Foundation) の優先プログラム「Variational Methods for Predicting Complex Phenomena in Engineering Structures and Materials」の中で、数学と工学の両分野の専門家の協力による破壊問題に対する数理的な取り組みが行われている³。

また、DFGの出資により、分野を横断した学際的な研究推進体制により、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人材育成・教育を兼ねて進行している (コラム2 参照)。

3. 英国

University of NottinghamおよびUniversity of Bristolが中心となって、2011年6月に複合材料の革新的製造センター (Centre for Innovative Manufacturing in Composites: CIMComp、520万ポンド/5年、約7.9億) を設立した。その後、英国工学・物理科学研究会議 (EPSRC: Engineering and Physical Sciences Research Council) の出資 (1,030万ポンド、約15.6億) により、2017年より13大学が参画してFuture Composites Manufacturing Research Hubに拡大し、航空分野、輸送機器分野等における複合材製品の製造に関する研究開発が行われており、その中で破壊に関するマルチスケール解析の研究が行われている⁴。

また、Imperial College LondonのComposite Centreにおいて、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。Composite Centreは、航空学/化学工学/化学/土木工学/ダイソ

³ DFG SPP 2256, <https://spp2256.ur.de/> (2022年12月22日アクセス)

⁴ CIMComp EPSRC, <https://cimcomp.ac.uk/> (2022年12月22日アクセス)

ンデザインスクール/材料/機械工学の7学部に跨がる組織として1988年に設立されている⁵。

4. フランス

Horizon2020のプロジェクトとして、欧州研究評議会（ERC:European Research Council）の資金によりフランス国立科学研究センター（CNRS）が中心となって、超高サイクル疲労の加速試験に関する研究が行われている（Fast determination of fatigue properties of materials beyond one billion cycles、2017～2022年（180万ユーロ、約2.5億円））⁶。

フランス国立研究機構（ANR:Agence nationale de la Recherche）の資金によりEcole PolytechniqueとEcole des Mines de Parisで、低応力三軸における破壊の発生を特徴付ける信頼性の高い新しい実験技術の開発や破壊を予測するための構成モデルの構築を目指した研究（LOTÉRIE）が行われている⁷。フランスは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は強く、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。

5. 米国

政府および軍により、高温クリープ強度、航空機用複合材料、破壊素過程のモデル化、先進的非破壊検査など、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。航空機分野では、空軍研究所（AFRL: Air Force Research Laboratory）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。

米国立科学財団（NSF:National Science Foundation）では、工学分野のDivision of Civil, Mechanical and Manufacturing Innovation（CMMI）プログラムにて、将来の自動車用の軽量構造材料として潜在的用途が見込まれている六方最密充填構造の金属の破壊現象の理解と破壊予測モデル構築に関する研究（2017年5月～2023年8月、532,000ドル/2017年～2020年）、積層造形についての材料-欠陥-形状-荷重-疲労の関係を理解するための疲労試験と欠陥の特性評価、評価結果に基づき開発した深層学習モデルを活用して多軸荷重が加わる複雑な疲労特性を予測するための研究（2021年9月～2023年8月、498,762ドル/2021年）などが支援されている。

エネルギー高等研究計画局（ARPA-E）のプログラムでは、洋上向けの超大型風力発電機の開発の中で疲労破壊に関する研究も行われている⁸。

5 Imperial College Longdon : The Composites Centre,
<https://www.imperial.ac.uk/composites-centre/>（2022年12月22日アクセス）

6 EC CORDIS, <https://cordis.europa.eu/project/id/725142/de>（2022年12月22日アクセス）

7 ANR Ductile fracture at low stress triaxialities – LOTÉRIE,
<https://anr.fr/Project-ANR-11-BS09-0008>（2022年12月22日アクセス）

8 Atlantis, <https://arpa-e.energy.gov/technologies/programs/atlantis>（2022年12月22日アクセス）

コラム2

ドイツ・アレクサンダー大学における破壊現象解明に関する研究と若手育成プログラム

DFG Research Training Group 2423
Fracture across Scales: Integrating Mechanics, Materials Science,
Mathematics, Chemistry, and Physics
(助成期間：2019年1月～2023年6月（第1期）、初年予算：550万ユーロ）

ドイツ・フリードリヒ・アレクサンダー大学では、ドイツ研究振興協会の助成により、破壊に関する Research Training Group（RTG）を設立して、脆性異種材料における破壊の理解を深めるためのマルチスケールシミュレーション手法の研究開発と若手研究者の育成を行っている。

特定の種類の材料や特定の時間・長さスケールに対して破壊を記述する様々なシミュレーション手法が存在するが、特に不均質な材料の破壊プロセスを様々な長さ・時間分解能で捉えることができる統合的かつ包括的なアプローチはまだ不十分な状況にある。量子力学、分子力学、メソスコピックアプローチ、連続体力学の概念に基づいたモデリングアプローチとシミュレーションツールにより、サブ原子サイズから原子、分子、メソスケールからマクロの次元に至るマルチスケール・マルチフィジックスシミュレーションを開発して、脆性破壊の根底にあるメカニズムを統合的・包括的に解明することを目的としている。その結果は、材料の最適化や実験数の削減に適用することを目指している。機械工学、力学、材料科学だけではなく、数学、理論物理学、化学も加えた学際的な専門家から構成される分野横断型の研究組織となっていることが特徴である。

RTGでは、博士課程の学生が博士号を取得することができ、ポスドクも独立した研究活動に従事できるようになっている。さらに研究職や高等教育職のための専門知識を強化するためのスキルプログラムなどもあり、若手研究者の育成ができるようになっている。

このような学際的な研究組織体制による破壊現象のマルチスケール性・マルチフィジックス性の包括的な解明に関する取り組みと、若手研究者の育成も兼ねた研究プログラムは、我が国としても参考にすべきであろう。

■国内の関連プロジェクト

破壊現象や寿命予測に関する研究開発プロジェクトは、ほとんどが機器や材料開発研究の一部として実施されている状況にある（付図2-1）。

1. JST 未来社会創造事業「モノの寿命の解明と遠心による使い続けられるものづくり」（2018-2021年度）

複合材を対象として、複合的な現象である疲労・劣化の原理や破損・破壊につながる機構を解明して、製品に残された寿命（余寿命）を高精度に推定する技術の確立するための研究を実施している。継続使用・再使用の促進、限界設計による必要最小限の資源利用、より長寿命かつ高機能な素材設計等の達成を目指している。

2. JST 戦略的創造研究推進事業 CREST「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」

物質の内部や界面で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ている。その中で、ナノ～マイクロ材料への疲労実験を実現し、ナノ力学の観点から疲労メカニズムを同定する研究が推進されている。

3. JST 戦略的創造研究推進事業 さきがけ「力学機能のナノエンジニアリング」

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ている。

4. SIP「革新的新構造材料」（2016～2020年度）

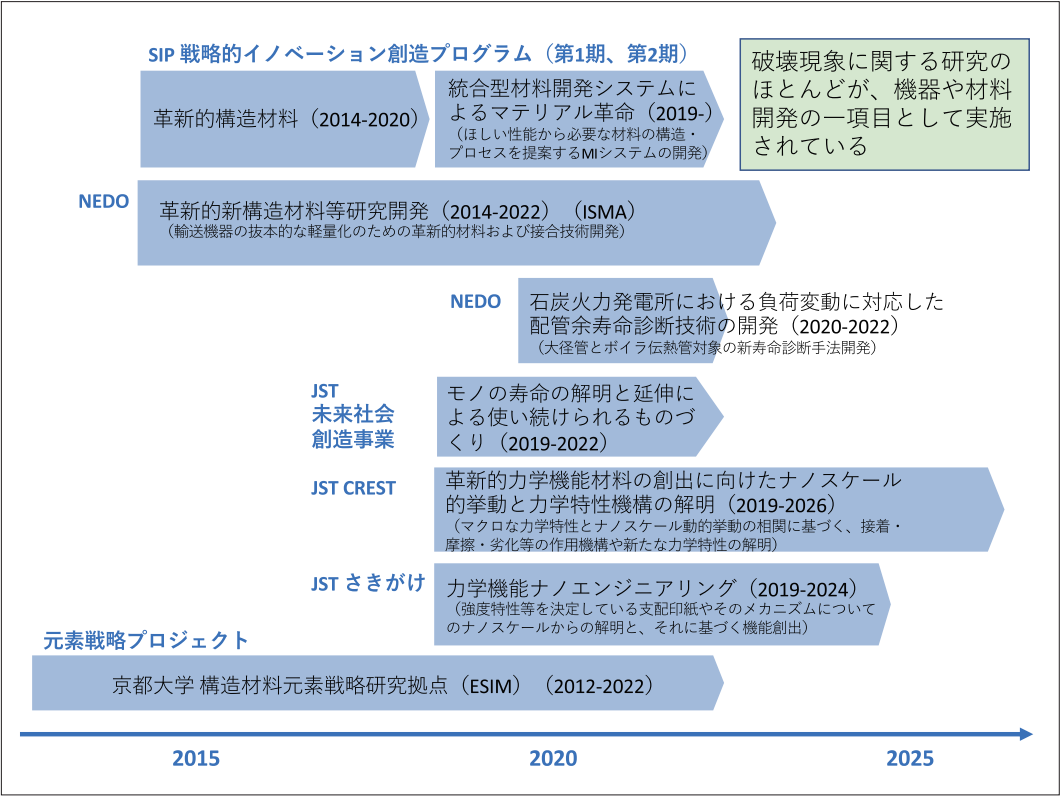
研究開発項目の中の一つであるマテリアルインテグレーションにおける「性能予測システムの開発」にて、構造材料の疲労、クリープ、水素脆性、脆性破壊などの時間依存性能を予測するシステムを開発している。

5. NEDO「革新的新構造材料等研究開発」（2014～2022年度）

エネルギー使用量及びCO₂排出量削減を目的として、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として、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、および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行っており、その中で、疲労などの長期性能に関わる研究開発も実施している。

6. NEDO「カーボンリサイクル・次世代火力発電等技術開発/次世代火力発電基盤技術開発/石炭火力の負荷変動対応技術開発」「石炭火力発電所における負荷変動に対応した配管余寿命診断技術の開発」

再生エネルギーの出力変動を調整するために必要な火力発電の負荷変動運転に対応するための、大径管とボイラ伝熱管を対象とした新たな寿命診断手法を開発を行っている。



付図 2-1 国内の関連プロジェクト

付録3 用語解説

■画像相関法（Digital Image Correlation）

物体表面に描かれたランダムパターンと呼ばれる模様の変化を変形前後で比較し、物体表面の移動量（変位）を調べる手法。デジタル相関法、デジタル画像相関法、デジタル像相関法、DIC、DCM、Digital Speckle Correlationとも呼ばれる。

■後方散乱電子回折（Electron BackScatter Diffraction:EBSD）

測定対象の物質に電子線を照射して各結晶面で回折電子から生じた後方散乱回折を解析して結晶性材料の構造などを調べる手法。試料表面から約50nm以下の領域の情報が得られる。EBSP（Electron BackScattering Pattern:EBSP）とも呼ぶ。

■疲労限度

疲労限度とは、材料が振幅一定の繰返し応力を受けるとき、無限回数の繰返し応力を加えても疲労破壊が起きない、あるいはそのように見なされる上限の応力値。疲労限、疲れ限度、耐久限度、耐久限などとも呼ぶ。

作成メンバー

総括責任者	佐藤 順一	上席フェロー	環境・エネルギーユニット
リーダー	竹内 良昭	フェロー	環境・エネルギーユニット（～2022年3月）
メンバー	長谷川 景子	フェロー	環境・エネルギーユニット
	松村 郷史	フェロー	環境・エネルギーユニット
	荒岡 礼	フェロー	ナノテクノロジー・材料ユニット（～2022年3月）
	大山 みづほ	フェロー	ナノテクノロジー・材料ユニット/連携担当（～2022年3月）
	吉脇 理雄	フェロー	システム・情報科学技術ユニット
	岡部 成光	主任専門員	産学連携展開部研究支援グループ
	佐川 みすず	主任専門員	研究プロジェクト推進部グリーンイノベーショングループ

戦略プロポーザル

CRDS-FY2022-SP-04

疲労破壊現象の包括的理解と その革新的な応用に向けた科学技術基盤の構築

STRATEGIC PROPOSAL

Establishment of scientific and technological basis for comprehensive understanding of the fatigue and fracture mechanics

令和 5 年 3 月 March 2023

ISBN 978-4-88890-826-9

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

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

〒102-0076 東京都千代田区五番町7 K's 五番町

電話 03-5214-7481

E-mail crds@jst.go.jp

<https://www.jst.go.jp/crds/>

本書は著作権法等によって著作権が保護された著作物です。

著作権法で認められた場合を除き、本書の全部又は一部を許可無く複写・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。

This publication is protected by copyright law and international treaties.

No part of this publication may be copied or reproduced in any form or by any means without permission of JST, except to the extent permitted by applicable law.

Any quotations must be appropriately acknowledged.

If you wish to copy, reproduce, display or otherwise use this publication, please contact crds@jst.go.jp.

FOR THE FUTURE OF
SCIENCE AND
SOCIETY



CRDS

<https://www.jst.go.jp/crds/>