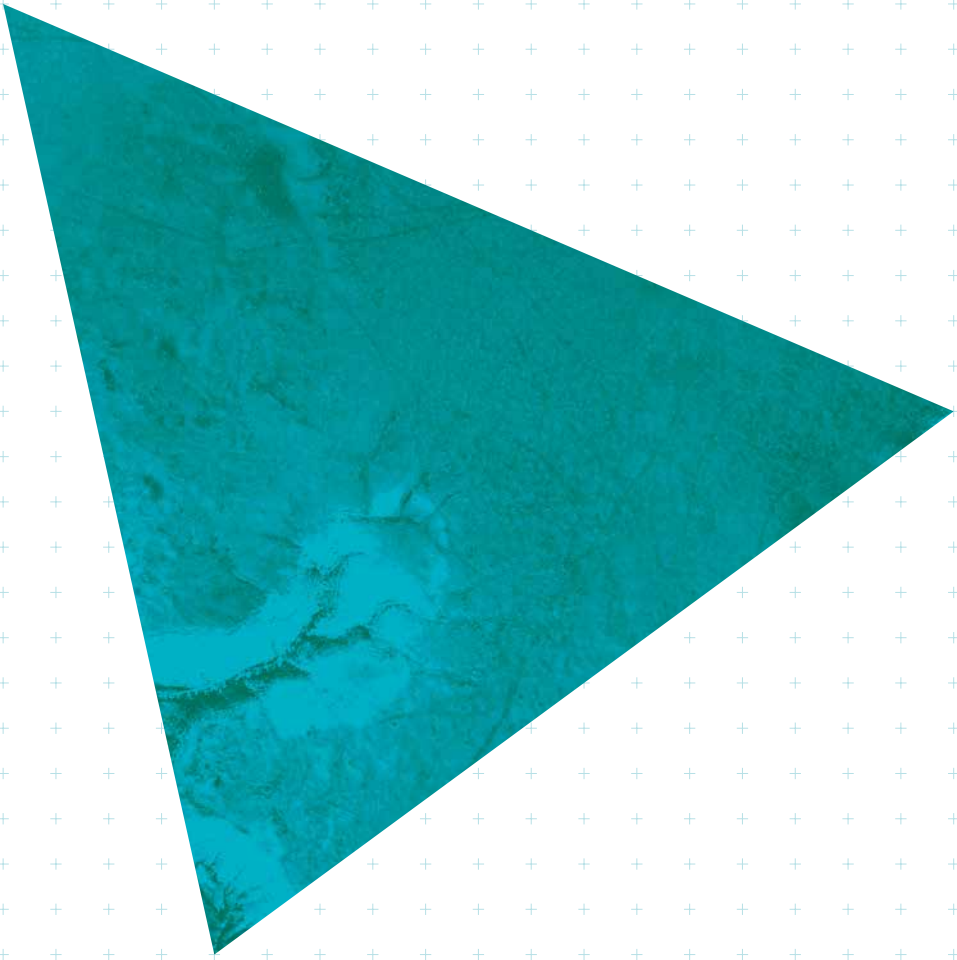
ワークショップ報告書
CRDS-FY2021-WR-10

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



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

エグゼクティブサマリー

本報告は、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）が2021年12月10日に開催した科学技術未来戦略ワークショップ（WS）「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」に関するものである。

破壊現象は、機器に使用する材料や形状のみならず製作時の加工プロセスや使用環境にも大きく影響を受ける複雑な現象である。破壊現象の中でも実際の機器の破損の多くの要因となっている疲労破壊については、極めて単純化された系以外にはその発現機構、現象がほとんどわかっていない。このため、実際の機器の設計では、長い時間をかけて取得した多くの疲労実験データを基に、経験的・統計的手法で、個別問題として対応している状況である。疲労破壊現象の統一的・包括的理解は、依然として困難な研究課題である。

近年、計算機能力の飛躍的発展や解析手法の進展に伴い、マルチスケール・マルチフィジクスシミュレーションにより破壊現象を統一的に理解しようとする取組が活性化している。また、マイクロメカニクスや計測技術の発展に伴い、破壊の始まりに関連する微視的なサイズでの力学特性に関する実験が大きく進展している。更に欧米では、機械学習等のデータ科学的手法を用いたアプローチや、数学者や理論物理学者が参画して、破壊現象を普遍的に理解する試みやプロジェクトが進められている。

以上の背景を踏まえて、本ワークショップでは、疲労破壊および関連する研究について、専門家より話題提供をいただき、疲労破壊現象の一層の理解のために今後我が国として取り組むべき研究開発の方向性、研究課題、推進方法・体制、人材育成などについて議論を行った。

疲労破壊の研究課題としては、微視的な初期現象の理解と、初期現象のようなミクロな現象と実際の破壊というマクロな現象の間を橋渡しする部分が重要なテーマとの共通認識を得た。前者については、近年大きく進展した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計測技術、あるいは計算機の飛躍的発展に伴う計算能力の向上や解析技術の進展が、従来できなかった疲労破壊の初期現象の解明の突破口となる可能性がある。初期現象の理解には、よく考えられた実験により、しっかりと現象を観察して知ることが必要であり、実験、数値解析（シミュレーション）、数学・数理科学の研究者が連携して検討を進めることが重要である。

後者については、ミクロからマクロに繋げるための均質化のアイディア、数理科学的なアイディアが鍵となる。そこには本質的な要素を残して情報を落としていく過程が必要であり、最終的に実際の社会に実装する段階では、設計という最も簡略化されたモデルとする必要がある。情報を落としていく方法としては、現象の物理モデル・数理モデルをベースとした機械学習などが候補となる。

また、き裂が大きく進展した段階においても、き裂の最先端は、結晶の構造や組成などの影響を受けながらき裂が拡大していく微視的な現象であることから、初期現象における微視的き裂の進展の理解は、巨視的き裂の進展現象に関する理解をも深め、疲労破壊全体の理解の深化にも極めて重要との認識を得た。

この分野は社会との関連が深く、我が国の産業競争力をさえる工学基盤の一つでもあることから、アカデミアと産業界の連携が不可欠であり、人材交流も含めて、現在低迷している相互のコミュニケーションの再構築が重要である。その意味でも実際の機器における破壊現象の本質的な問題を共有した上で、基礎研究に反映することの重要性と、アカデミア（基礎研究）と産業界（応用）の両方を理解・解釈して結びつける人材、「インタープリター」の必要性を強く認識した。

上記を踏まえ、研究推進体制の第一段階では、日本では非常に不足している「インタープリター」となり得る人材をアカデミア及び産業界の双方に育成することが必要である。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はあるが、特にこの破壊関係の分野は深刻であり、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、優秀な人材が集まり難い状況が続いている。この研究分野の核となる人材育成を兼ねた研究プログラムの必要性が示された。

本ワークショップを通して得られた各種知見・情報や議論内容については、戦略提言を目指す今後の調査活動の参考とするとともに、その他のCRDSの各種活動にも最大限活用していく予定である。

目次

1 ｜ ワークショップ開催概要 …… 1

2 ｜ 趣旨説明 …… 2

2．1　開催挨拶
佐藤 順一（科学技術振興機構 研究開発研究センター（CRDS）上席フェロー）…… 2

2．2　趣旨説明
竹内 良昭（科学技術振興機構 研究開発研究センター（CRDS）フェロー）…… 3

3 ｜ 第一部 …… 8

3．1　疲労破壊現象の解明に関する課題と方策
北村 隆行（京都大学 理事・副学長）…… 8

3．2　疲労現象学と疲労工学のためのマルチスケール解析
渋谷 陽二（大阪大学 大学院工学研究科 教授）…… 13

3．3　材料研究における数学の応用
中川 淳一（東京大学 大学院数理科学研究科 特任教授）…… 18

3．4　機械学習を自然現象の理解・発見に使いたい人に知っておいてほしいこと
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）…… 22

3．5　コメンテータからのご意見
津﨑 兼彰（物質・材料研究機構 フェロー）…… 27
岸本 喜久雄（東京工業大学 名誉教授）…… 30

4 ｜ 第二部 …… 33

4．1　疲労破壊の現象解明に関する最近の研究の進展について
島村 佳伸（静岡大学 大学院総合科学技術研究科 教授）…… 33

4．2　マイクロ材料試験による疲労き裂伝播初期過程の解明
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）…… 38

4．3　超高サイクル疲労における内部微小き裂の非破壊評価
中村 孝（北海道大学 大学院工学研究科 教授）…… 45

4．4　疲労データベースの構築と課題
古谷 佳之（物質・材料研究機構 構造材料研究拠点グループ長）…… 52

4. 5　コメンテータからのご意見
三浦 直樹（電力中央研究所 首席研究員）…… 58
宮崎 克雅（（株）日立製作所 研究開発グループ 主管研究長）…… 61
高梨 正祐（（株）IHI 技術開発本部技術基盤センター 主任研究員）… 63

5 ｜ 総合討論 …… 64

6 ｜ まとめ …… 66

付録 …… 67

付録 1　**プログラム** …… 67
付録 2　**ワークショップ参加者リスト** …… 68

1 ｜ ワークショップ開催概要

■はじめに

科学技術振興機構（JST）研究開発戦略センター（CRDS）では、国内外の社会、科学技術イノベーションの動向及びそれらの政策動向を俯瞰調査・分析して、国として重要な研究開発領域、課題の抽出やその推進方法などについて戦略プロポーサルとしてまとめて発信している。今般、機器の破損事故の多くの要因となっている疲労破壊に関する研究開発について、その動向や今後の在り方についての検討を深めるために、科学技術未来戦略ワークショップを開催した。

■背景

エネルギーや運輸関連などの機器の軽量化・高効率化は、産業競争力の点で、また近年のカーボンニュートラル社会に向けた取組みの点でも重要なテーマの一つである。しかしそれは安全性と両立が不可欠である。安全性を高めるためには、機器の破壊現象のより一層の理解は欠かせない。

破壊現象は、機器の材料や形状のみならず、製作時の加工プロセスや使用環境にも大きく影響を受ける複雑な現象である。破壊現象の中でも疲労破壊については、極めて単純化された系以外には現象がわかっていない。このため、多くの実験データを基に、経験的・統計的手法で、個別問題として対応している現状がある。疲労破壊現象の統一的・包括的理解は、依然として困難な研究課題である。

近年、計算機の飛躍的発展に伴い、マルチスケール・マルチフィジクスシミュレーションにより破壊現象を統一的に理解しようとする取組が活性化している。また、マイクロメカニクスや計測技術の発展に伴い、破壊の始まりに関連する微視的なサイズでの力学特性に関する実験や計測が大きく進展している。更に欧米では、機械学習等のデータ科学的手法を用いたアプローチや、数学・数理科学者や理論物理学者が参画して、破壊現象を普遍的に理解する試みやプロジェクトが進められている。

■目的

以上の背景を踏まえて、本ワークショップでは、疲労破壊研究を取り巻く我が国の現状と今後の課題について専門家を交えて議論を行い、疲労破壊・寿命予測の高度化に資する疲労破壊現象の普遍的・包括的理解のために、今後国として取り組むべき研究開発の方向性や具体的な課題、その推進方法について示唆を得ることを目的とする。

■開催日時

日時：2021年12月10日（金）13：00–18：00

場所：Teamsによるオンライン開催

2 ｜ 趣旨説明

2.1 開催挨拶

佐藤 順一（JST-CRDS 上席フェロー）

本日は、科学技術未来戦略ワークショップと称して、「破壊・寿命予測の科学技術基盤の構築、疲労破壊の普遍的現象の解明に向けて」というワークショップを開催したいと思います。

疲労破壊はこれまでにたくさんの研究が行われており、この分野の研究は全て終わっている、あとは企業側の努力だけだ、と言われる方が省庁には多くいらっしゃいます。これは、企業から見ても大学から見ても非常にゆゆしき問題だと思っています。実際には非常に特殊な環境での実験データや解釈しかないというのがこの分野です。海外の先端機器を見ると、疲労破壊を根本的に理解して、その理解を色々な機器の開発に役立てているように思います。

我々、環境・エネルギーユニット関連分野で必要な良い技術をつくり出すのは、ほとんどが機械です。太陽電池でもその製造装置は機械です。そういう観点で見ますと、例えば現在、日本は風力発電機を大量に導入しようとしています。しかし、日本では恐らくそのギアを設計製作することはできません。それは、極端な変動荷重下での疲労が、ギアに及ぼす影響、疲労破壊等がきちっと分かっていないからです。ドイツはその点、かなり基礎的な研究を行っており、その成果を取り入れています。ここに日本が技術立国、大国だと言っているのは本当かなと疑わせるところがあります。

また、最新のジェットエンジンに関しても、疲労要求を満たした上であれほど軽いものを開発設計することを、日本はとてもできません。また、加工法は疲労破壊に大きな影響を及ぼしますが、その加工法も非常によく考えられています。このことから、恐らくアメリカの疲労研究は、基礎段階の研究を行うことで考え方を明らかにし、そのような設計ができているのだと思います。

今、日本の現状を見ますと、各大学でも工学部、特に基礎工学系が非常にシュリンクしていっています。多分、それは非常に古い学問であるという認識から来るのだと思います。確かにこの世の中に機械ができて以来、疲労破壊はつきものでしたので、その破壊現象の解明、疲労の解明に関しては多くの研究が行われています。しかし、それは全て、研究がやりやすいところが行われただけで、本当のところはまだ分かっていないということがあると思います。

この分野を今後、日本としてどうやっていくかについて、皆様と是非議論したいと思います。それが日本の学の力を強め、日本の産業の力を強めるものと確信しています。今日は活発な討論をお願い申し上げます。

2.2 趣旨説明

竹内 良昭（JST-CRDS フェロー）

開催の趣旨について簡単に説明する。 CRDSでは、我が国が取り組むべき研究開発に関する政策提言として、戦略プロポーザルを毎年数件発行している。本件もこの戦略プロポーザルの検討に関するワークショップとの位置づけで開催している。

産業競争力強化やカーボンニュートラル社会の実現の取組の中で、原動機などのエネルギー機器や自動車、航空機などの輸送機器の軽量化・高効率化の要求が高まっている。安全性の確保の点から、機器の設計では安全係数として強度上の様々な余裕が追加されているが、軽量化や高効率化のためには、安全係数をできる限り小さくする必要がある。そのためには破壊現象のより一層の理解は欠かせない。

破壊現象の中でも、実際の機器の損傷事故の多くに関わっていると言われる疲労破壊は、多層的で多様性に富み、本質的に複雑な現象であることから未だ多くのことが分かっていない。鉄鋼材やアルミ合金など構造材に用いられる金属材料の疲労破壊については、き裂の初生、微小き裂の進展、巨視的き裂の進展、の大きく3つの過程からなることが知られている。この内巨視的き裂の進展については多くの研究からある程度体系化されている。しかし、その始まりの部分、き裂の初生から微小き裂が進展する初期現象部分については、現象の解明が十分ではない。このことが、疲労破壊現象全体の理解や機器の寿命予測の精度向上のボトルネックとなっていると考えている。

そこで疲労破壊を対象に、その包括的な理解に向けて取り組むべき研究開発群とその推進方法について検討し、研究開発プロポーザルとして取り纏めることを目指している。現在、解明がほとんどできていない破壊の初期現象をできる限り普遍的に捉え、それを基に疲労破壊現象全体の理解を深化させる、さらにこの分野では欠かせないと考える応用先である実機での疲労破壊現象の本質を理解した上で、基礎研究に取り組むことができる研究人材の育成も推進する、そのような内容を考えている。このような取組が、この分野の科学技術基盤を強化し、ひいてはこれまでよりも高度な破壊、寿命予測を可能にするものと考えている。

関連する研究の現状の認識としては、シミュレーションでは、現象のモデル化にはまだ課題があるものの、計算機能力の飛躍的向上と計算手法の進展により、マルチスケール・マルチフィジクスシミュレーションにて破壊現象を統一的に理解しようとする取組が活性化している。また実験・計測技術においては、微視的な力学特性を把握するための実験や非破壊、in-situ計測技術の進展により、微視的なスケールで破壊現象を観察することが可能となってきている。さらに、まだ実例は少ないが、機械学習や応用数学の適用なども徐々に試みられてきている状況にある。

その中で注目すべき点は、微視的なサイズの実験ができるようになったことで、実験の試料の大きさとシミュレーションが可能な空間スケールの大きさが近づき、シミュレーションの結果を実験で直接的に検証可能となりつつあることである。このことは、これまで理解が不十分であったき裂の初生や微小き裂の進展という疲労破壊の初期現象を理解するための強力なツールになると期待される。

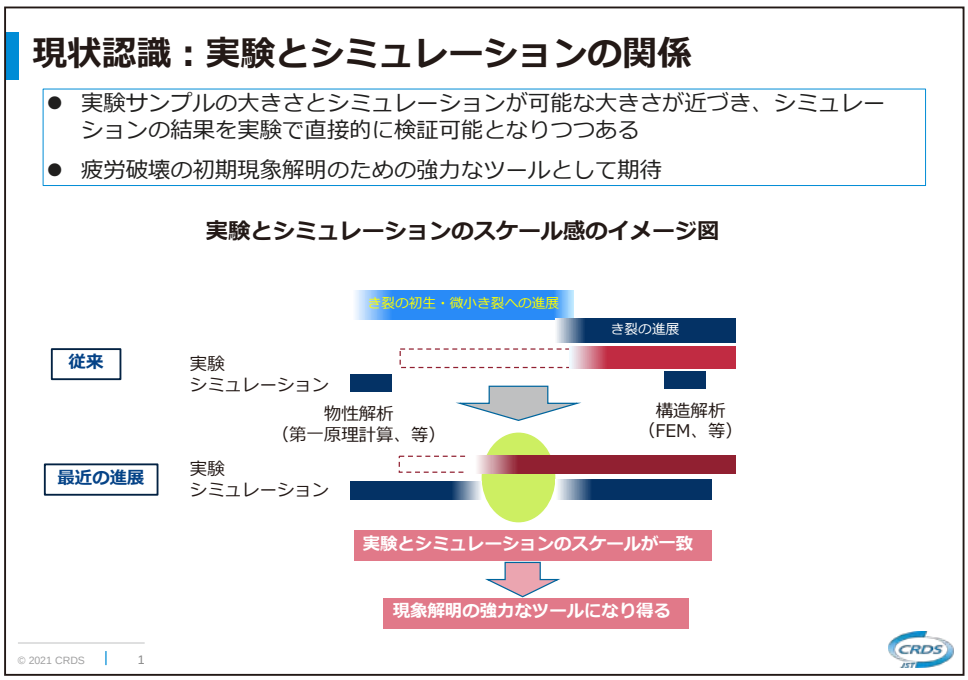


図 2–2–1　　現状認識：実験とシミュレーションの関係

問題点として、日本では、破壊関連の研究のほとんどが、機器や材料研究の中の一項目として実施されている結果、個別問題として対応している傾向にあり、数学者や物理学者などが参画して、横串を通すことで破壊現象の普遍的な理解やモデル化を行う取組が、欧米に比べてまだ弱いという点である。また、この分野は特に実機の破壊現象を理解して基礎研究に反映することが重要と考えるが、欧米に比べて日本は大学と企業の間の交流が希薄で実機における本質的な問題が共有され難いこと、アカデミアと企業の両方を理解して橋渡しができる人材が少ないことが挙げられる。

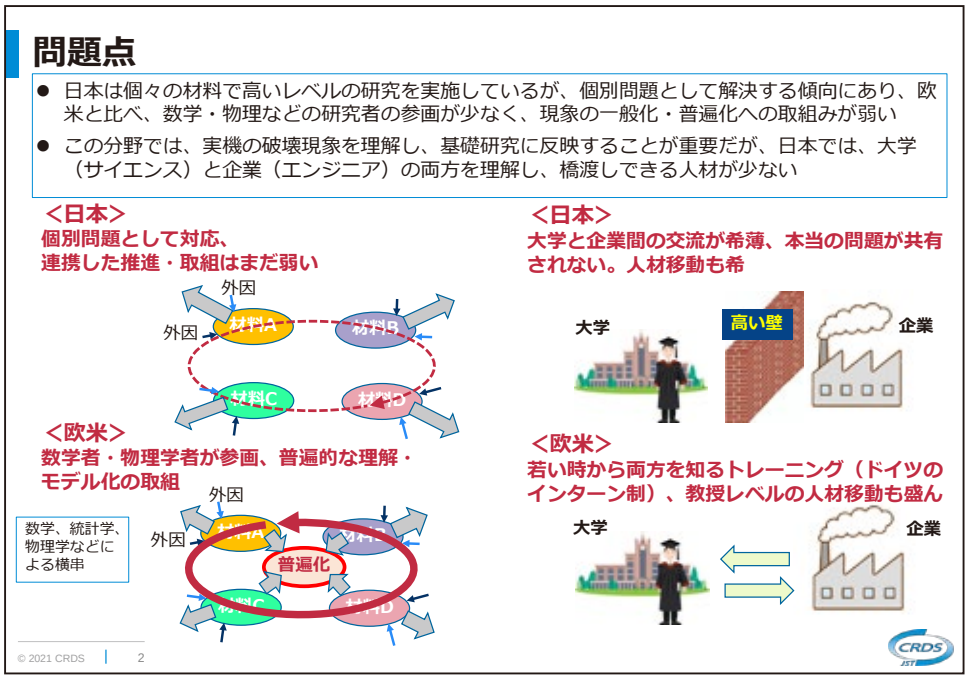


図 2–2–2　　問題点

検討している研究開発の概要を図2-2-3に示す。まず、鉄鋼材などの既存の金属材料について、荷重条件などの外的要因も含めて、初期現象に関連する微視的なスケールで実実験とシミュレーションを行い、それぞれの材料の初期現象の理解を深めるとともに、これらの個々の現象について、理論の横串でモデル化を図り、初期現象をできる限り普遍的に捉える。この初期現象の理解を基に、破壊現象全体の理解の進化を深め、更に機械学習なども組み合わせることで、多様な材料への展開やこれまでよりも格段に少ない実験数で、疲労破壊および寿命予測を可能とする。そのような研究開発を考えている。

左側の微小な現象と右側部分の巨視的な現象を結びつけるというところは、非常に重要なテーマとなる。さらに疲労現象に大きく影響を与える、使用環境や部品の加工プロセス、応力などの実機に加わる外的作用の本質を理解して、初期現象の解明にフィードバックして取り組むことが重要である。このように実現象で起こることを理解して基礎研究に反映することが、アカデミアと産業界の壁を取り除くためも必要と考える。

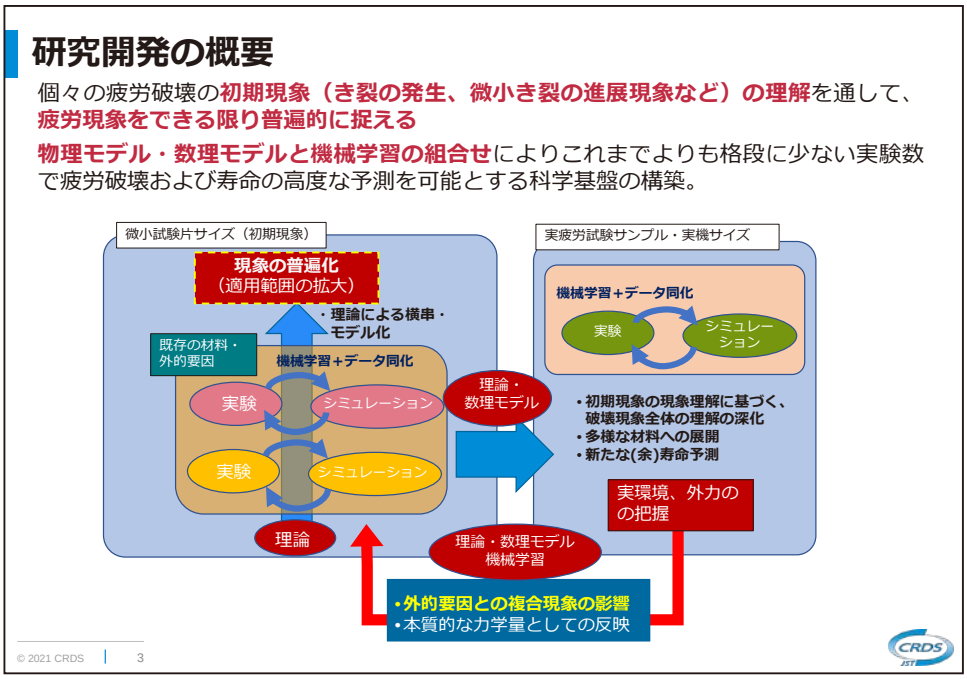


図2-2-3　　研究開発の概要

図2-2-4に現在検討している具体的な研究課題の例を示す。例えば疲労破壊初期現象の理解、普遍化のためには初生や、欠陥の相互作用から微小き裂に至る現象の解明、整理が必要であろう。加えて加工プロセスや使用環境など、多種多様な外的な要因の初期現象への作用なども検討する必要があると思われる。

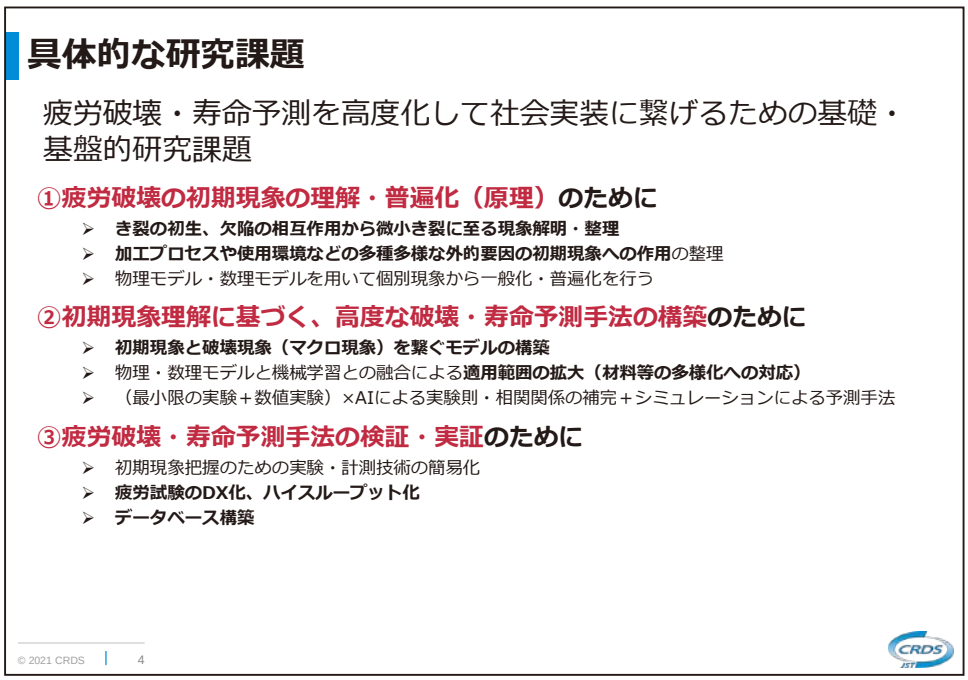


図 2–2–4　　疲労破壊の過程

そのための研究体制として、まず、大学、国研から多様な分野の研究者が集まり、企業の研究者も参画してネットワークを構築し、その中で本当に取り組むべき課題について議論、共有化した上で進める必要がある。このネットワークの中での議論が、企業とアカデミアをつなぐ人材の育成にも繋がると考えている。その後拠点化により加速し、成果を社会への還元することが必要と考えている。この点についても論点として本日議論させていただきたい。

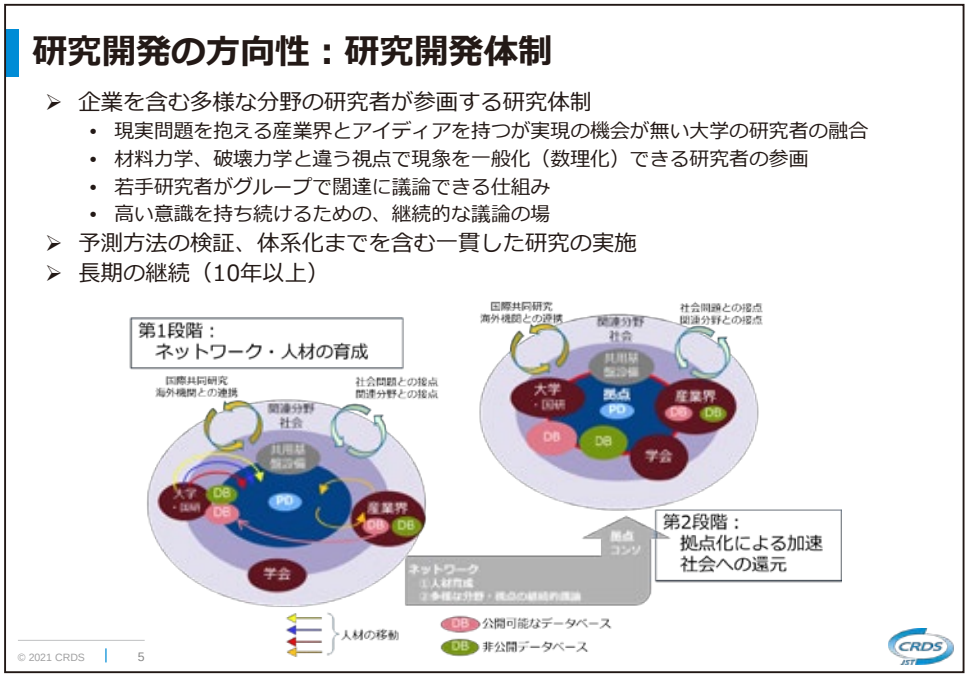


図 2–2–5　　研究開発の方向性：研究開発体制

我々が考えている研究開発を進めるための仮説を図2-2-6に示す。この仮説の正しさも含め、本日のワークショップでは、日本の弱みと考えている疲労破壊の包括的な理解へ取組、産学の連携の強化などのために、どのような研究アプローチや研究推進体制が必要かなどについて、具体的に掘り下げて討論していただきたいと考えている。

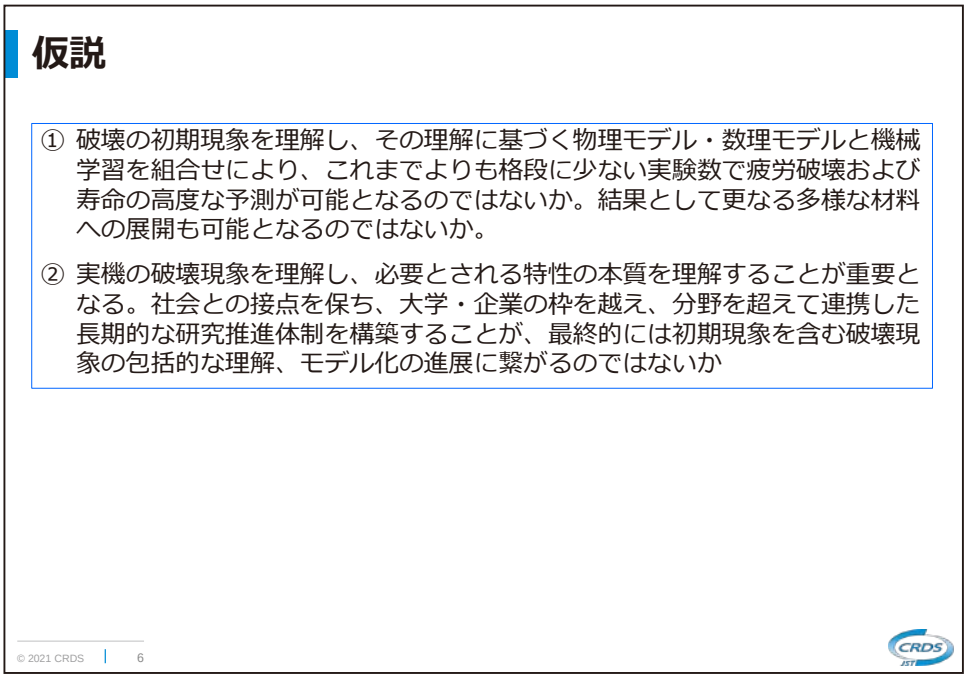


図2-2-6　　検討中の仮説

3 ｜ 第一部

3.1 疲労破壊現象の解明に関する課題と方策

北村 隆行（京都大学 理事・副学長）

疲労の研究はこれまで多く行われてきたが、この10年、20年程の間に非常に弱くなっている印象がある。再興するには、従来から国のプロジェクトで行われてきた先端技術開発とは異なる考え方で、研究プログラムをつくっていく必要があるだろう。

まず、疲労破壊現象が解明されない理由としてメカニズムやメカニクスの複雑性を挙げることができる（図3–1–1）。複雑である原因は、幾つもの要因が複合しているためである。図3–1–2に示すように、たとえ単純材料の単純負荷下であっても破壊過程はいくつもの段階から構成される。一般には、これに加えて、図3–1–1中の他の要因との複合効果を理解しなければならない。

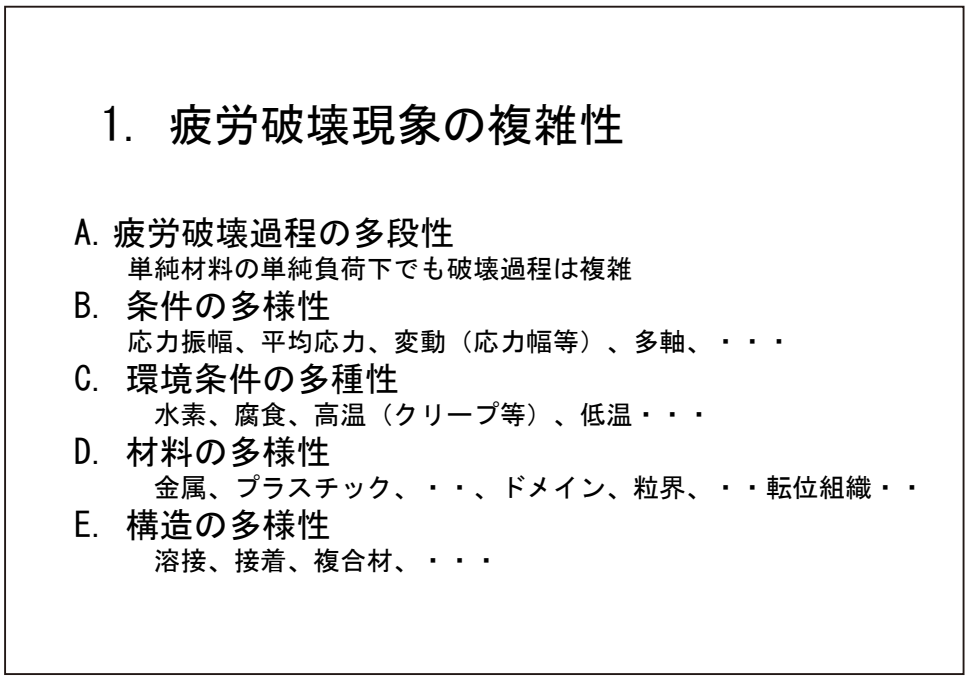


図3–1–1　　疲労破壊現象の複雑性

単純材料の単純負荷下でも、様々な機構を取るため各々の過程によって特性が異なり、過程によってモデル化に大きな相違がある。図3–1–2の右側に研究知見の蓄積状況を示した。研究例はあっても、初生や微小亀裂の発生伝播などの初期過程は非常に難しく、文献も多くは存在しない。

次に、研究の現状の問題点について述べる。近年の傾向として、疲労研究に関して大学側では基礎研究者の減少が見られる。これは予算獲得のしづらさに起因し、結果として時間や労力を多く要する破壊機構や力学に関する研究が非常に少なくなっている。企業側においても設計に直接繋がる研究への集中が見られる。すなわち、設計規定等に即した入出力、ひずみ範囲あるいは応力範囲に着目して、境界条件をふまえ破損寿命を出力する、いわばオン・オフ（壊れるか壊れないか）のみの研究が多く行われている。そのため途中経過

（プロセス）が分からない。したがって、類似の条件下においては対応能力があるものの、新規な機器開発の際に重要となる未知の環境における疲労設計の有効性や不具合対応に問題が生じている。このように、現状決定的に欠けているのは、多様で本質的に複雑な破壊現象の過程・機構・力学の理解へのアプローチである。

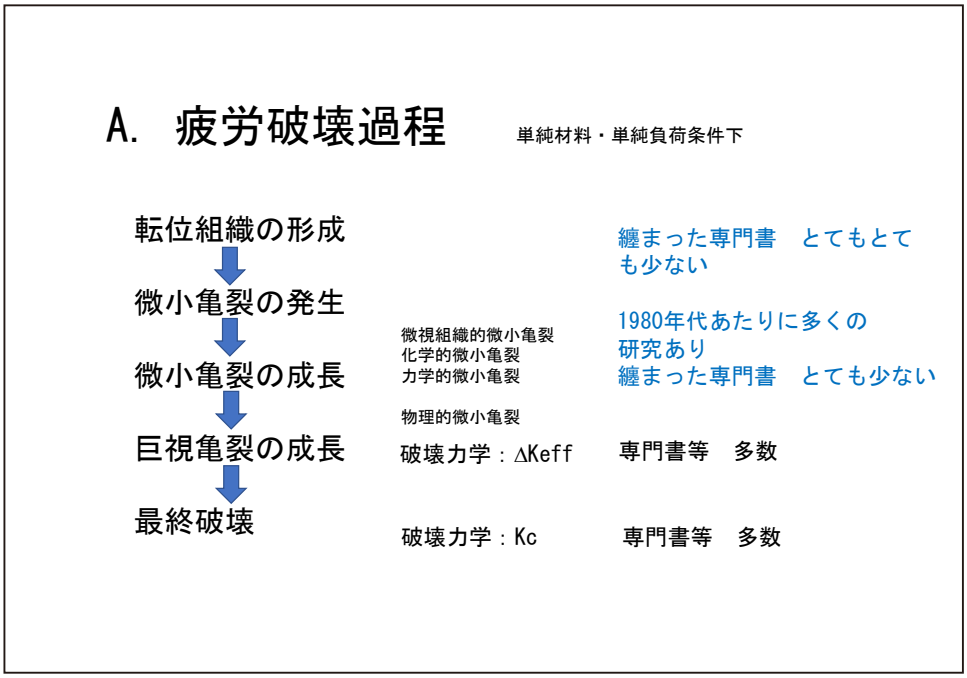


図3-1-2　　疲労破壊の過程

基盤形成再興のためには、過去の知見も大切にしなければならない（図3-1-3）。新しい研究では3つのタイプがあると考える。一つ目は現象の機構力学を理解し、その上でモデル化するものである。二つ目では、材料に着目する。例えば、近年ドイツをはじめとして、プラスチックや複合材料などの高機能材料の疲労現象に注目が集まっている。三つ目として、新手法開発の一環の中で、その一部として疲労現象への適用を考えるという形もあり得る。新手法としては、例えばシミュレーション等の様々な原子レベルの観察などが挙げられる。以上3つのタイプがあるが、基本的にここではタイプ1を対象とし、材料の実用性によってタイプ2を含むか否か判断すべきである。

以上を踏まえ、どのような研究プログラムがよいか考える。図3-1-4において赤字で示した箇所が重要だろう。最も大切なのは人を育てることである。企業側の研究者と大学・国立研究開発法人の研究者の能力を高めるプログラムが必要であり、若手研究者の育成が特に重要である。現在、本研究分野で力が弱っている大きな原因として、シニアレベルの研究者層が非常に薄くなっているという点が挙げられる。若手研究者を育てるためには、個人研究のバーチャル研究所を作り、情報および人の流動性を高め能力を上げることが必要だ。そのためには5年程度の研究期間が必要であり、これがCRDSからの趣旨説明でも示された第一フェーズに当たる。一旦力がついた研究者が出てくれば、第二フェーズに移るだろう。

3. 基盤形成に必要な研究課題

・疲労現象解明には、巨視亀裂形成までの過程に着目した微視機構・力学の理解が必要である。過去の知見も大切にする。
・近年の実験計測手法や数理解析手法の発展が、従来はできなかった新機軸の疲労破壊現象解明の突破口をもたらす。

Type 1a　基礎的な条件における新機軸を用いた疲労破壊現象の機構・力学研究
　　1b　Type 1aを基にした変動応力や環境条件への拡大研究
Type 2　高機能材料（例：プラスチックや複合材料）の疲労破壊現象研究
Type 3　新手法（例えば、原子レベル観察）開発の一環としての疲労破壊現象への適用研究

基盤技術形成への重要度は、Type 1が高い。Type 2の重要度は材料の実用性によって判断すべきである。Type 2とType3は先端研究プログラムの一部の方が相応しい場合がある。

図 3-1-3　　基盤形成に必要な研究課題

5. 研究プログラム

基盤を再形成するプログラム　　5年程度の研究期間が必要
　疲労破壊現象のメカニズム・メカニックスを解明する研究内容
　すでに得られている知見の体系的理解とその前進研究
企業研究者および大学・国研研究者の基盤学術・技術を高めるプログラム
　意欲の高い核となる研究者の育成
　若手研究者の育成
情報および人の流動性を高めるプログラム
　基盤知識に関する情報交換の活発化
　専門領域職としての基礎形成

例えば、特定***先進学術分野***の若手研究者を育成する「さきがけ」（個人研究、バーチャル研究所）プログラムの枠組みが参考になる。（「さきがけ」は、実質的に企業研究者の参加は難しい）
ただし、基盤技術分野に相応しい内容・方法が必要である。

図 3-1-4　　研究プログラム

ここで大切になるのは選抜方法である。企業の理解と協力がまず肝要である。大学には自由度があり、例えば予算や場を与えられると個人の研究趣向に応じた発展が見られやすいが、企業では会社全体としてのミッションがそれぞれにあるため、自由度を上げる基礎研究を行うには企業側の十分な理解が必要である。理解や協力の具体事例を図 3-1-5 に示す。

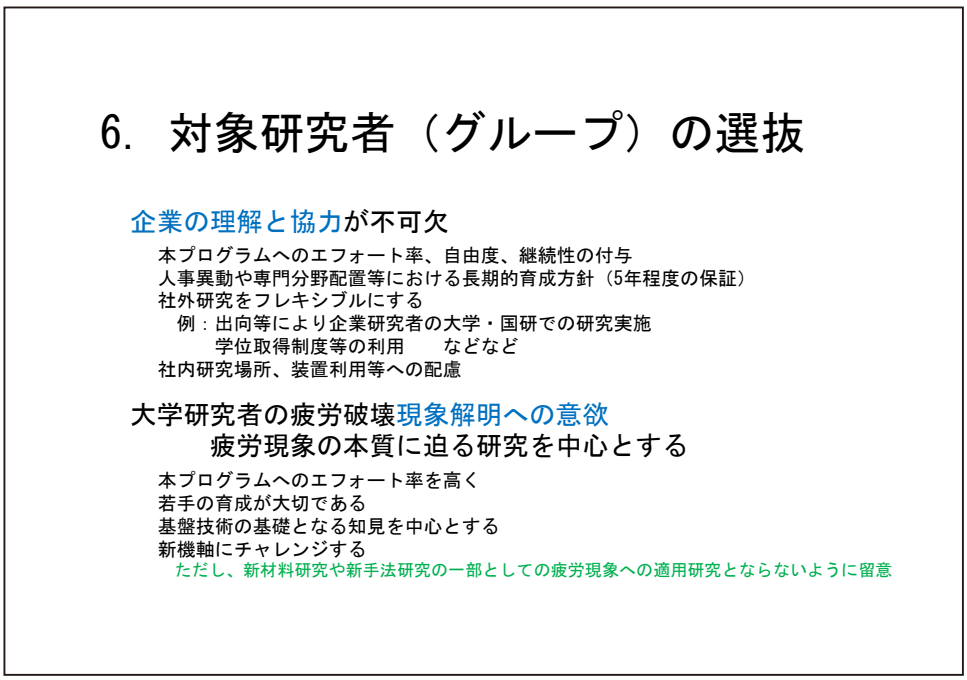


図3-1-5　　対象研究者の選抜

大学側では現象解明への意欲が不可欠である。疲労現象の本質解明に意欲を持って取り組む必要がある。新材料研究や新計算手法、新実験手法の一環として様々な研究開発に取り組み、その一部として疲労現象への適用を行う提案も一般に多く見受けられるが、疲労現象の研究の回復という目的においては、幾つもの要因が複合した複雑な疲労現象の本質を捉えきれない可能性が高いためこのような研究は避けるべきだろう。

プログラムの運営にあたって、企業側・大学側の若手研究者に力をつけてもらうには、ある程度のシニアの研究者で統括やボードなどの組織を作り、個々に丁寧なアドバイスをする必要がある。同じ研究を繰り返さないためにも、過去のよい研究を知った上で新機軸に挑戦するべきである。

そのためには情報交換の機会が大切である。一例として、戦略研究推進事業「さきがけ」での例を紹介する。年に2回「領域会議」という合宿形式の会議を行い、全員が発表し懇親会を設け、様々な情報交換の場としている（コロナ禍のため現在は実施していない）。また、「サイトビジット」と称し、各研究者の研究現場に赴き、2時間程度議論を行っている。これは研究総括が訪問するが、領域アドバイザーが同行する場合もある。加えて「徹底討論」と称し1回に2名程度が1時間発表し1時間以上討論する場を設け、ある課題について徹底的に論ずる試みを全員参加で行っている。

その他、学術的または精神的な困難も含め、必要に応じて、随時1時間程度の個人面談を行いサポートしている。様々な機会を通じ、統括側と研究者側の情報交換が日常的に行われるようになるのが最も大切だと考えている。

研究の評価にあたっては、基盤となる科学技術の復活・発展が重要となるため、新規性・発見性（オリジナリティ）より現象理解の深度・体系性（考え方）を理解・展開したかが重要になるだろう。単純なインパクトファクターや特許等で評価することは避けたい。一方で、外部の専門家の目は重要であり、学会・協会における発表は大切である。企業から参画する場合も想定し、英文・和文は問わず内容を重視すべきである。

統括側のアドバイスや指導が不可欠であり、若手研究者の展開力強化にあたっては中間評価がとりわけ重要になってくるだろう。

一方、最近は実験技術や解析技術が格段に向上しつつある。これらの高度で新規な方法を積極的に取り入れることによって、従来は知ることが出来なかった疲労破壊現象の解明が進むと考えられる。そこで、最後に、私たちのチームで取り組んでいる疲労試験用装置の開発について紹介する。図3–1–6のように、電子顕微鏡の中で小さな疲労試験装置を作製し、6自由度の制御が可能なモーターをつけ、1μm程度の試験片を中央に置き左右から掴む。軸が曲がらないように、銅の単結晶の柔らかい試験片を使用する。これで引っ張り圧縮を行うが、このような小さい試験片の場合は軸を保つことが大切である。試験の様子をその場観察すると、負荷10サイクルくらいまでに滑りが観察できる。このような初期の過程が電子顕微鏡で十分に観察できるようになり、サイトとして最も重要である表面のき裂発生などにも応用できると期待している。

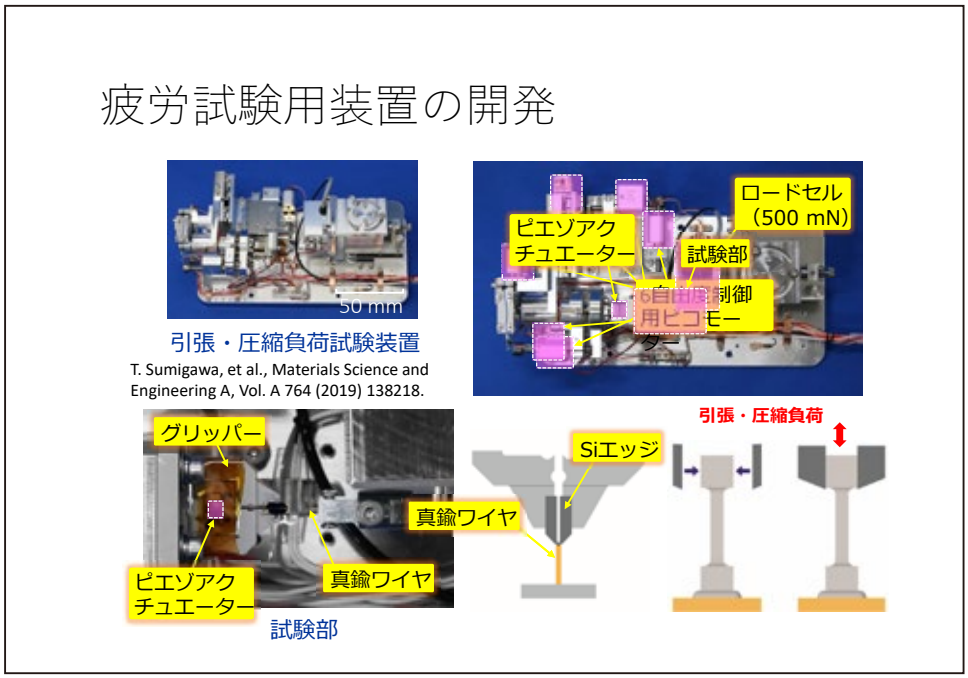


図3–1–6　　疲労破壊の過程

3.2 疲労現象学と疲労工学のためのマルチスケール解析

渋谷 陽二（大阪大学 大学院工学研究科 教授）

R. Hillの“Mathematical Theory of Plasticity”（Oxford Univ. Press, 1950）に代表される従来の塑性力学では、現象論的な構成式の研究や開発が行われてきた。一方、マクロな現象や特性を理解するには、材料の根源的な原子や電子からの理解が不可欠で、30年くらい前に分子動力学法や第一原理計算といった原子・電子シミュレーションが固体力学の分野に導入された。しかし、同じ材料であるからには、離散的で長時間・集団平均的描像のミクロと、平均場としての連続体的挙動のマクロを結びつける中間の存在、すなわちメゾといった固有の領域があるはずで、それは何かということを学会誌などに寄稿した（図3-2-1）。その現象に適する典型的な例が疲労と考えている。疲労の力学挙動は極めて複雑な階層性をもつ現象でありながら、一方で安全・安心な社会インフラ創出には不可欠な工学的観点を持つ。言い換えると、疲労の問題には現象学としての捉え方と、工学として捉え方の両面が不可欠であるということになる。

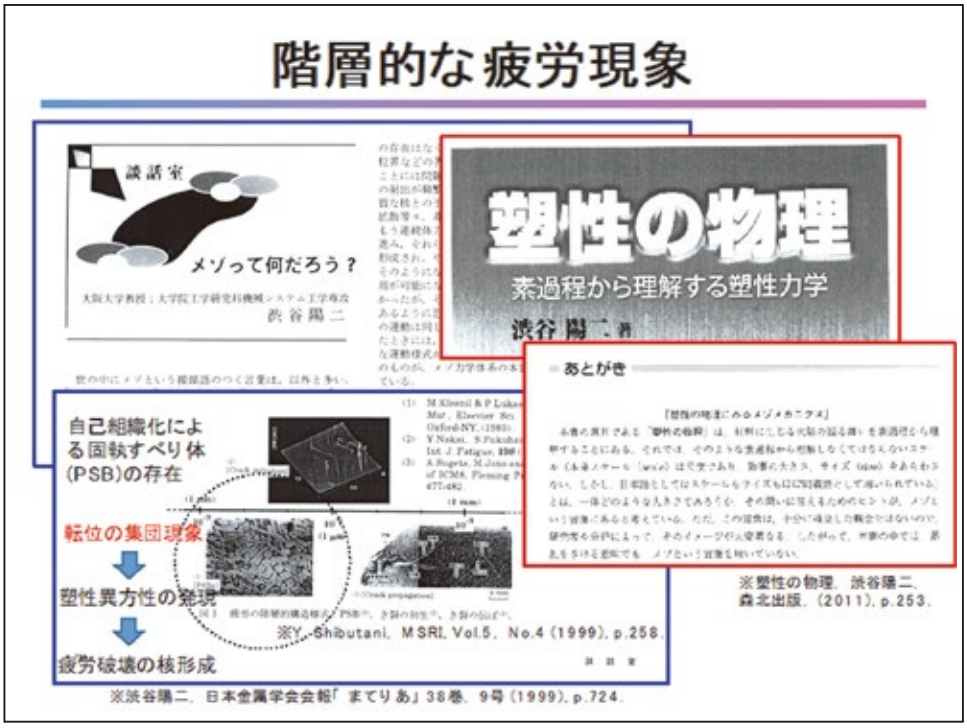


図3-2-1　　疲労現象におけるメゾメカニクス

元々固体力学の分野では、A. C. Eringenが代表体積素（RVEと称される）を変化させたときに物質の密度がどうように変化するかを模式的に示し、ミクロとマクロに関する階層性・不連続性、そして連結する領域（当時はメゾという言葉を用いていない）の存在を踏まえたマルチスケール性を提案していた[1]。疲労現象についても、その階層性の解釈ができる（図3-2-2）。転位が塑性変形の素過程であり、転位と材料内の他の欠陥、例えば粒界との相互作用により転位の堆積による加工硬化現象が見られ、さらなる負荷とともに高転位密度状態になる。繰返し負荷による転位の対消滅や系全体のひずみエネルギーの安定化から内部構造の遷移・分

1　Fracture - An Advanced Treatise, Vol. II, Academic Press (1968), p.623

岐現象がみられ、その一例が固執すべり帯、いわゆるPSB（Persistent Slip Band）の転位組織の自己組織化である。 PSBは表面近傍で生成することが一般的で、変形の異方性を導き、疲労き裂の初生としての入り込み・突き出し（intrusion & extrusion）が生じる。このき裂の核形成からき裂の初生、そしてき裂の伝ぱに遷移し、マクロな疲労寿命予測に深く関わる疲労工学に連結する。このプロセスが、いわゆる疲労現象の階層性である。こうしたことはM. Klesnil & P. Lukášの本[2]にも記載されているが、時空間のスケールを亘る物理的なメカニズムはまだよくわかっていない。

種々の時空間で材料強度に関わる研究が行われてきたが、そこで議論している領域のサイズには大きな違いが見受けられる。どれくらいのサイズを持つRVEの現象を議論しているのか、そしてそこには現象を駆動する応力場がどのように作用しているのかといった視点が重要である。例えば、転位と粒界の相互作用を取り上げると、この相互作用における活性化障壁の解析によって、転位と粒界の反応を示す活性化体積が基本単位となるb^3（転位のバーガースベクトルbの3乗）の50倍程度ということが最近わかってきた。そして、この反応を駆動する、つまり転位と粒界の相互作用を律している作用応力場というのはb^3の1,000倍ぐらいの領域と予想される。すなわち、現象が可観測なサイズとそれを駆動する可視化できない応力場のサイズは異なっていることに気づく。

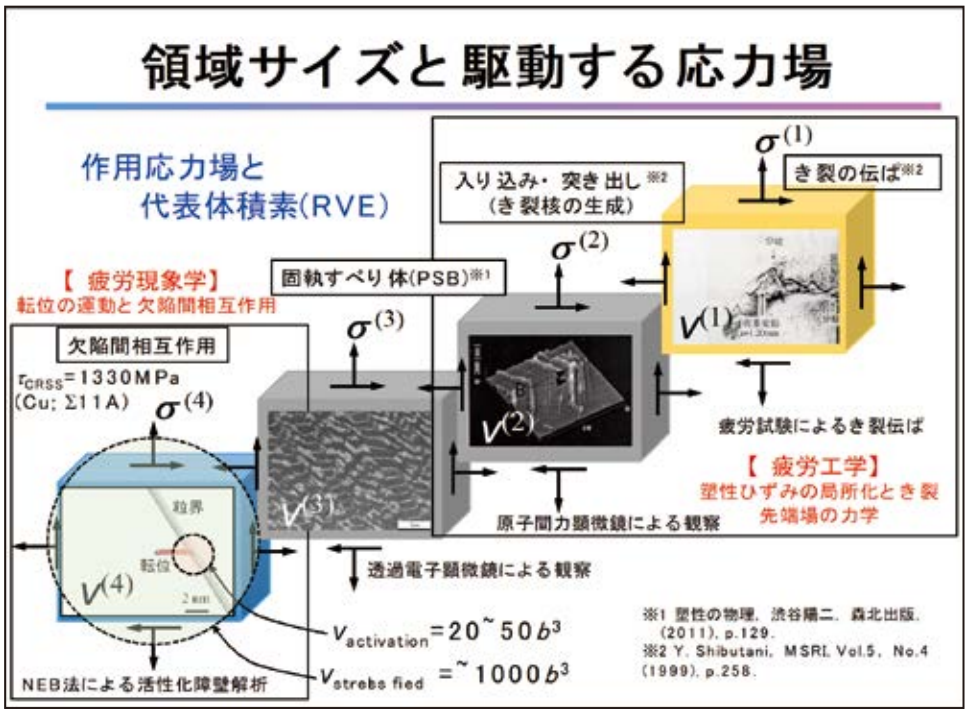


図3-2-2　　疲労現象の階層性

まず、各階層の疲労現象に対して理解を進めていくことが、マルチスケール的な疲労現象学と疲労工学を結びつける一つの論点と考える。き裂の生成や伝ぱなど、疲労工学に関するデータというのは非常に多くの蓄積がある一方、疲労現象学と疲労工学の間にあって、例えば両者の中間にあるPSBの理解はまだ十分でない。これまで、この現象に対して非線形科学を適用しようとした試みがあった（図3-2-3）。当時、自然現象や生命現象のパターニングに対して、そのメカニズム理解のために反応拡散方程式を適用した事例である。不動

2　Fatigue of Metallic Materials, Elsevier Sci. Pub. Company, 1980（荒木透，堀部進共訳，養賢堂）

転位密度と可動転位密度の拡散係数の比を横軸に取り、縦軸には反応係数を取る。セルオートマトン法を用いた発展挙動の解析により、チューリング分岐が起きてパターニングを示す領域の存在が認められ、PSBの生成する分岐条件が求められる。また、２次元解析では、拡散係数の比によって色々な自己組織化のパターニングが形成される。ただ、この解析には力学場が入っていないので、メタファー（隠喩）モデルから力学場への拡張と、関連する係数の物理的解釈の課題が残されている。

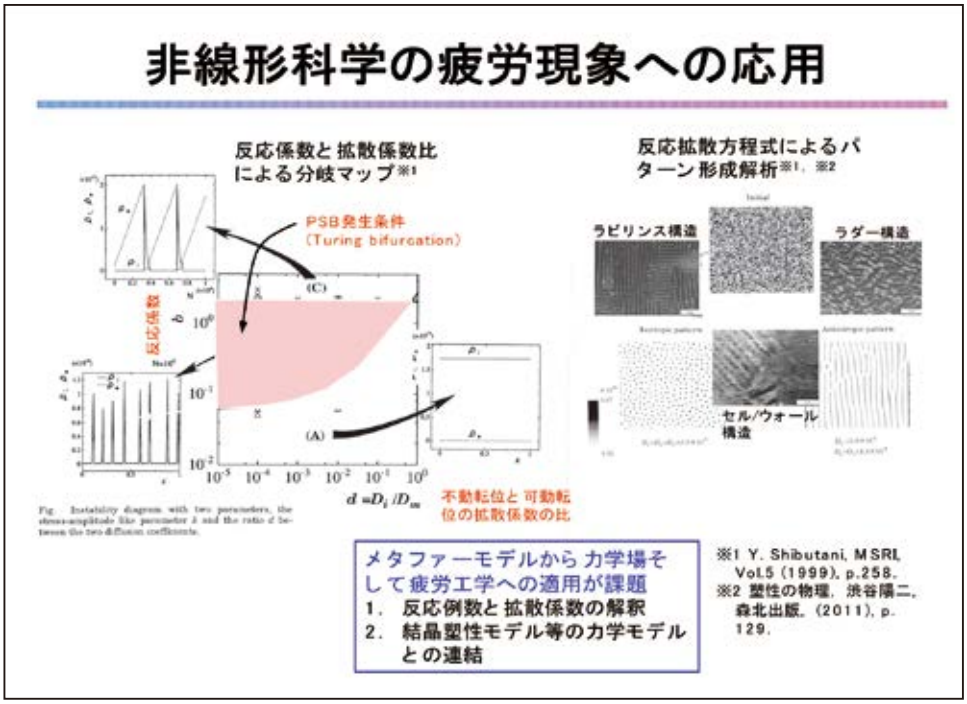


図3–2–3　　非線形科学による転位組織の自己組織化解析

力学場におけるマルチスケール解析には、現在種々な方法論が提案されている（図3–2–4）。一般には、ミクロからマクロに向かうボトムアップ形式のモデリングが行われてきた。これは、統計熱力学におけるエルゴード性を考えると、長時間におけるダイナミクスの１場面（スナップショット）の同定や無限に近い統計集団の規定をマクロ場から行うことは不可能である。加えて、力学現象のサイズ効果は内包する材料欠陥の多様性の存在を認識することであり、その欠陥のマルチスケール性も別途考えなければならない点にある。したがって、疲労寿命予測の高精度化といった安全・安心な社会に対する貢献を最優先事項に考えると、図3–2–4の右上から左下に向かうトップダウン形式の方法論の開発が今後大きく期待される。

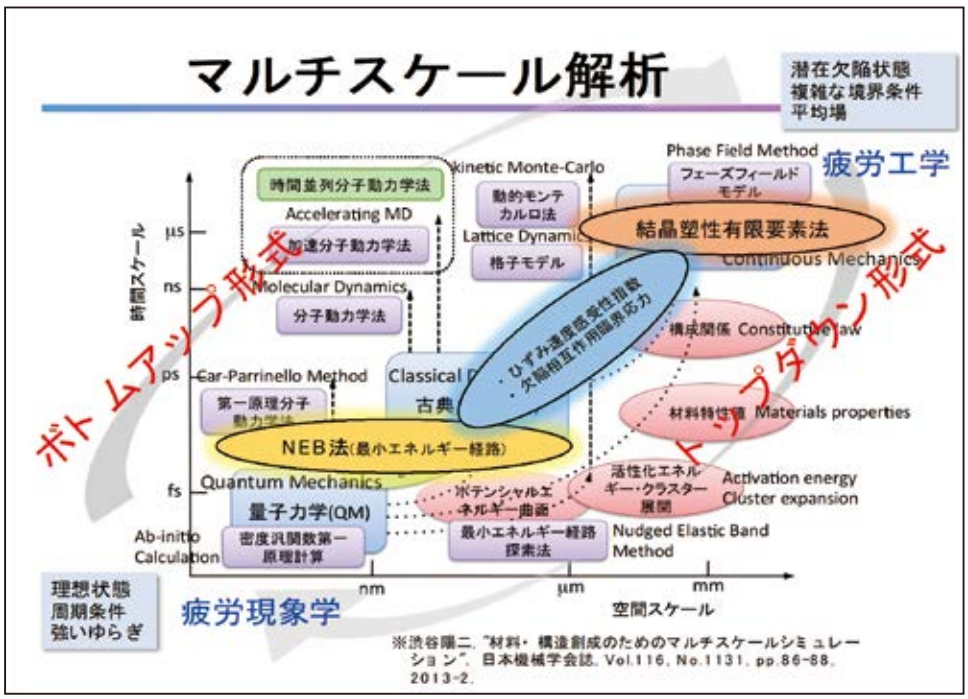


図3-2-4　　時空間スケールにおけるマルチスケールモデリング

現在、産学連携（大阪大学JSOL次世代CAE共同研究講座[3]）の枠組みで検討されている例として、結晶塑性有限素法をベースに、適宜ミクロな情報をオフライン的に情報伝達させるトップダウン形式の方法がある。具体的な進め方の一例を図3-2-5に示す。まずは結晶学的データを電子線後方散乱回折解析（EBSD）から、そして単結晶の力学特性をマイクロピラー試験によって求め（一連の試験方法をメゾテスティングと称している）、臨界分解せん断応力（CRSS; Critical Resolved Shear Stress）を同定する。また、双結晶マイクロピラー試験から粒界モデルの妥当性を検証する。疲労き裂の生成に寄与するひずみ勾配に対してはMicropolar結晶塑性理論を導入し、より高精度な結晶塑性構成式を提案し、マクロ場の評価には均質化モデルを用いる。繰返し応力-ひずみ曲線に基づく材料特性から実用的な疲労寿命の推定手法を提案するといったことも今後考えられる。ただし、これは大学だけで閉じて実施できる話ではない。提案した手法がどのように使われるのか、どのような寿命予測が必要なのかということを多種多様な機械構造物を対象にする企業の人たちと近い距離で常日頃から議論する必要があり、そのような環境の提供が不可欠である。

研究者には、忘れることができない言葉というのが幾つかある。30年程前に、ある大型プロジェクトの審査ヒアリングで口火を切った審査員の一言というのが今でも忘れられない。「疲労ですか」という一言だが、この語尾の持つニュアンスから、我々日本人はその言葉の裏を理解できる。破壊現象が重要で疲労破壊のもたらす社会的損失がいかに甚大かをいくら説明しても、残念ながらプロジェクトは通らなかった。「たら・れば」を言うのは研究者らしくないが、もし30年前に始めていれば、今の疲労現象学はもう少し進んでいたかも知れないことを最後に申し上げておきたい。

3　http://jsol.jrl.eng.osaka-u.ac.jp/index.html（2022年3月14日アクセス）

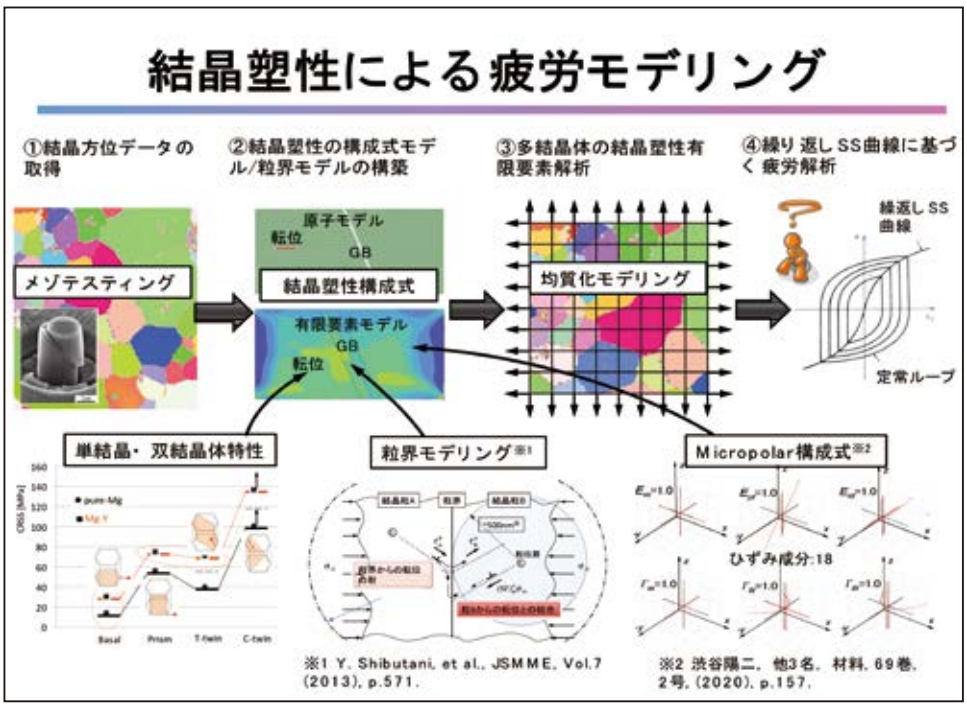


図3-2-5　マイクロピラーを用いたメゾテスティングに基づく結晶塑性マルチスケールモデリング

3.3 材料研究における数学の応用

中川 淳一（東京大学 大学院数理科学研究科 特任教授）

私からは、数学の観点から、疲労破壊というものの出口についての考え方を述べたいと思う。

図3–3–1にあるように理論主導の数理モデルで、破壊現象の理解と寿命診断をいかに考えるかを数学の視点から考えたい。上段の図は異なるスケールで見たときの鉄鋼材料の転位の様子と最終的な機械的な性質である。ここでの視点は三つある。一つは①ナノで離散の世界、これは転位である。二つめは②ミクロで連続の世界、転位密度が代表的な物理量である。三つ目はこれらの結果として発現する③塑性という材料の特性であり、ひずみと応力の関係が上段の最右図のようになる。これらが実験データとして得られると理解している。

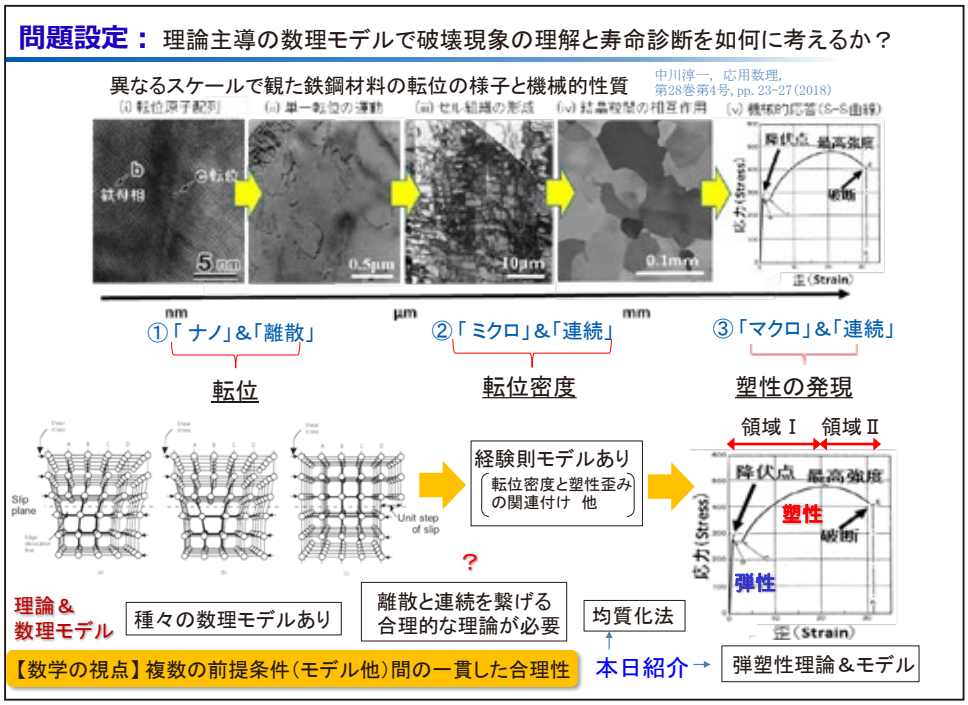


図3–3–1　問題設定：理論主導の数理モデルで破壊現象の理解と寿命診断を如何に考えるか

理論と数理モデルの観点からこれら物理現象を俯瞰する。転位は数学モデルも含めて種々のモデルがある。転位密度も経験則のモデルはある。また、マクロで連続の世界では弾塑性の構成則モデルがある。問題はこれらのつなぎのところである。例えば②番と③番のつなぎのところには均質化法がある。しかし、①と②の離散と連続のつなぎは数学的にも非常に難しく、合理的な理論が必要と認識している。

このように種々の前提条件から導出された理論やモデルが階層ごとにある。これらを一貫した論理の下で合理的にどのようにつなぐかが数学の視点になる。本日は、弾塑性理論とモデル、及び、均質化法に焦点をあて、数学的な見地から見たときに、これらが破壊現象とどのように関係するかを簡単に紹介する。

図3–3–1の下段右図の引っ張り試験の中で最大応力に達するまでを領域Ⅰ、最大応力から破断に至るまでを領域Ⅱ、とここでは定義する。

図3-3-2は領域Ⅰの理論および数学モデルである。①で歪みを弾性ひずみと塑性ひずみの和で定義する。②でフックの法則を導入する。③で塑性ひずみをモデル化する。ここでfが相当塑性ひずみに対応するもので、モデル化の対象である。そうすると、①、②、③から④弾塑性の構成則が導出できる。

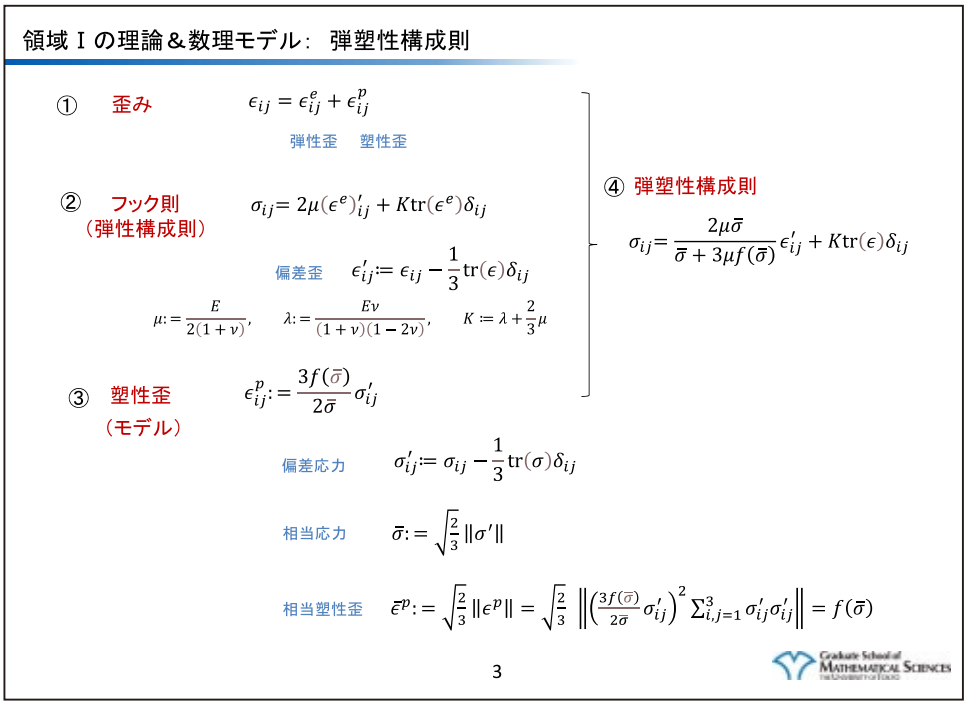


図3-3-2　　領域Ⅰの理論＆数学モデル：弾塑性構成則

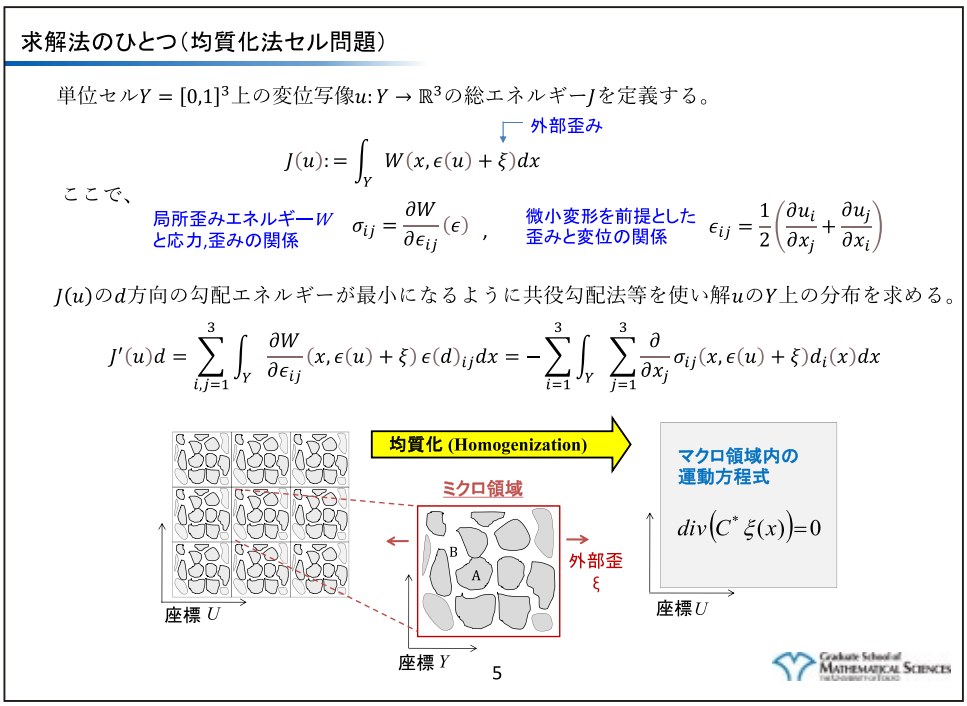


図3-3-3　　求解法のひとつ（均質化法セル問題）

相当塑性ひずみのモデル化の事例として、例えば加工硬化なしのケースでは応力が降伏点を超えると降伏応力で幾らでも材料が伸びる。それが完全塑性モデルである。通常は、図3–3–1の右下図の領域Ⅰの加工硬化のカーブをべき乗則で近似するというのが一般的である。

図3–3–3が求解法の一つとしての均質化法である。ここではYという単位セルが無限に周期的に連結されていることが前提条件である。そして外部歪みξをYに付与したときのひずみの総エネルギーJを定義する。 WはYの中の局所歪みエネルギーであり、微小変形を前提にする。そうすると、dという引っ張り方向のJの勾配エネルギーが最小になるように例えば共役勾配法などの方法を用いて、Y内の変位の分布を求めることができ、歪みと応力の分布が得られる。ここまでは一般の問題である。

領域Ⅱの数理モデルに関しては、10年前にフランスの研究者達が発表している研究例を紹介する。

彼らは仮想ボイドを考えている（図3–3–4参照）。弾塑性構成則は図3–3–1の領域Ⅰのケースと同一概念であり、Kinematicsと弾性構成則がある。 Yield condition（降伏条件）の定式化が彼らのオリジナルであり、降伏面に関して新しい数理モデルの概念が導入されている。

図3–3–4で**P**がEshelby–Hill tensors、いわゆるボイドが介在することによってひずみ場が変化することを記述した理論である。Yield conditionの数式で、fはボイド率、w1、w2は楕円形状ボイドのアスペクト比、**n**はボイドの方位である。そして、仮想ボイドの時間発展モデルとしてボイド率、ボイド形状、ボイド方位の時間発展モデルがある。これらを連成させて仮想ボイド入りの弾塑性構成則を導出して、それを均質化法で解を求めている。

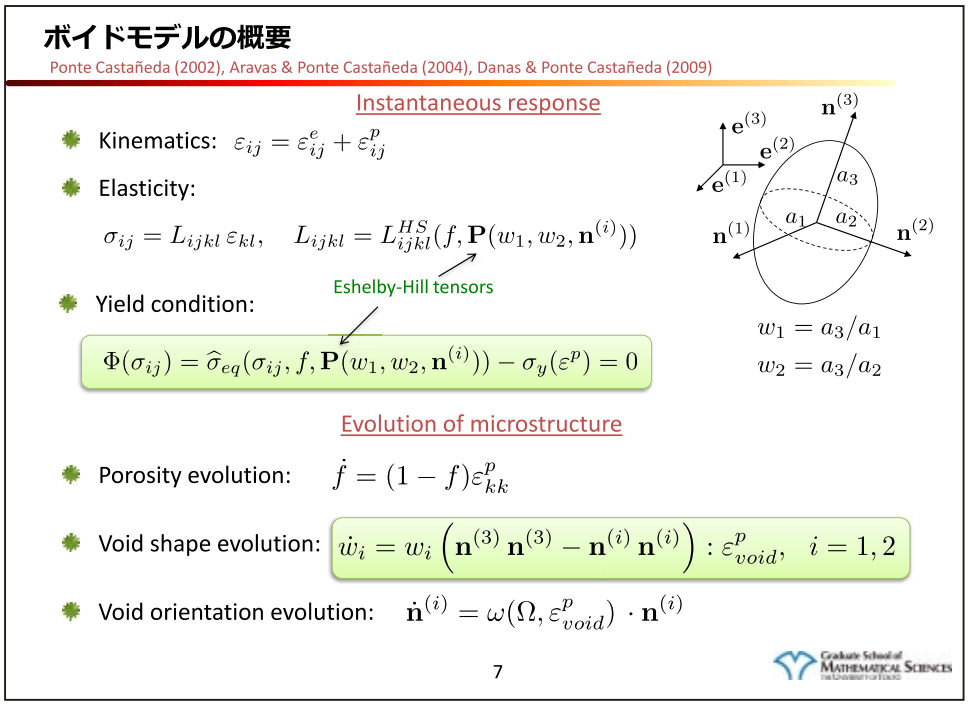


図3–3–4　　ボイドモデル概要

ここで相当応力の新規概念として、ボイド形状で変化する降伏面がある。いわゆるσ eという相当応力とσ mという静水圧応力でなす降伏面がボイドの形状によって大きく変化するというのが彼らのモデルの主張である。

彼らの荷重条件は２種類ある。一つは応力３軸度、すなわち、静水圧応力と相当応力の比率で定義される物理量である。もうひとつは、ロードアングルであり、先ほどの主応力のかかる方向の組合せで定義される。例えばL=–1のときは、ロードアングル０度に対応しσ３だけの引っ張りである。また、L=1のときはロードアングル60度に対応しσ２のみが圧縮になる。

シミュレーションの条件としてボイドの初期条件は材料の中に体積率１％の仮想ボイドを分散させている。ボイドの初期形状は全て球にしている。応力３軸度が0.1、いわゆる剪断応力支配のケースの均質化法による計算結果で、第２軸、横方向だけが圧縮で、ほかの方向が全部引っ張りの場合では、ボイドのアスペクト比が第２軸方向に潰れる。その結果として、応力、ひずみのカーブがすとんと落ちる。この落ちるというところがひょっとすると破壊に関連していると考えている。しかし、彼らはこのモデルで破壊までは扱っていない。

ロードアングルが −1、垂直軸方向だけが引っ張りで、ほかの軸は全部圧縮の場合では、ボイドは非常に緩く成長するが、ボイドの大きな変形は起こらずに、前述の応力、ひずみのカーブがすとんと落ちるという現象も起きない。

一方、応力３軸度が1.0、すなわち静水圧応力支配のときのケースでは全てのロードアングルにおいてボイドは増加する。その結果、ソフトニングが非常にゆっくり起こる。多分、このときは破壊には至らないと想像される。

これが最後の結論であるが、彼らはこのモデルを実際に有限要素法の中に組み込んで、いろいろシミュレーションを行っている。ここでの一つの予想として応力３軸度、ロードアングルという２種類の荷重の履歴を管理すれば、実機で疲労破壊に至るまでのシミュレーション診断のようなものができるのではないかと思う。

3.4 機械学習を自然現象の理解・発見に使いたい人に知っておいてほしいこと

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）

現在北大WPIで機械学習を道具とした化学反応の開発の拠点に関わっている。また、理研でも機械学習の研究と同時に幹細胞生物学を研究している。疲労のような難しい現象でも機械学習が使えるのか、どのようなところに使えそうかなど、ヒントになればということで、今日は機械学習を紹介する。

機械学習は、データを予測に変える道具である。例えばリンゴとミカンを仕分ける規則のように、データをたくさん集めると統計的なパターンが見えてくる（図3-4-1）。従って、重さと高さを測って赤い領域に落ちたらミカンで、緑の領域に落ちたらリンゴという予測プログラムにできる。見本例ではないデータに対して予測するというのが一番大きい特徴で、こう考えると機械学習はコンピュータのプログラムの新しいつくり方である。プログラムをシミュレーションのように理論からつくるのではなく、入力に対する出力の見本例を大量に与えることによって間接的につくるプログラミングで、自然科学でよく見られる、入力と出力の関係がよく分からないような場合には有効な方法である。図3-4-2に挙げた例は、機械学習が非常に成功して実用化され、スマートフォンなどに既に搭載されている技術である。

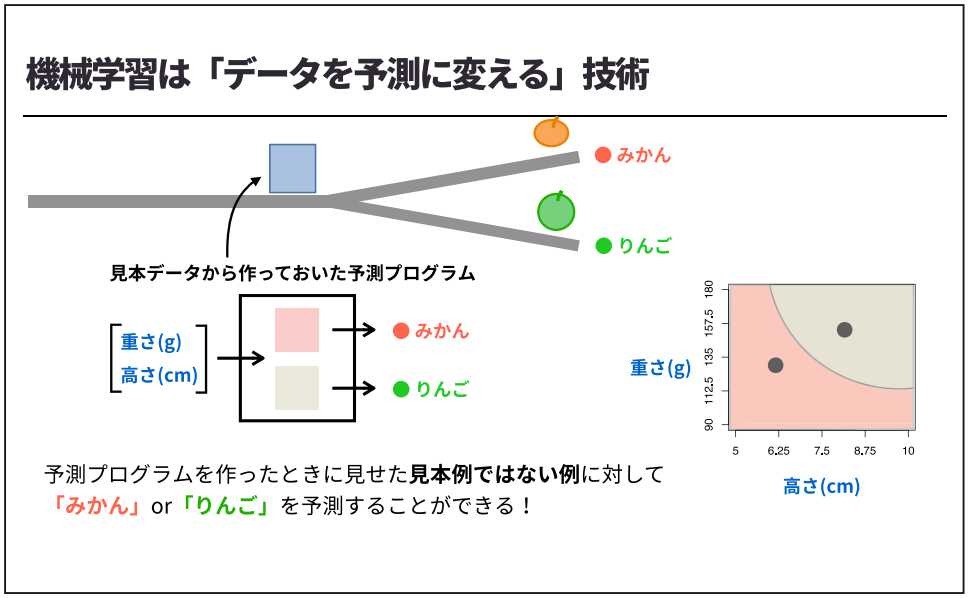


図3-4-1　　機械学習は「データを予測に変える技術」

この仕組みをどこに使うかがポイントで、いろいろな使い方がある。疲労現象のシミュレーションで使う、実機のデータで使う、シミュレーションと実データのギャップを埋めるなど、いろいろな使い方があるので、そのヒントになればと思う。機械学習のアルゴリズムは境界線の引き方の方針の数だけある。ただ、共通する原理は簡単で、例えば赤と青をわけるという例なら、赤を1に置いて青を0に置き、曲面のようなモデルをフィッティングすれば、その曲面がどの入力を与えても赤っぽさを算出する。

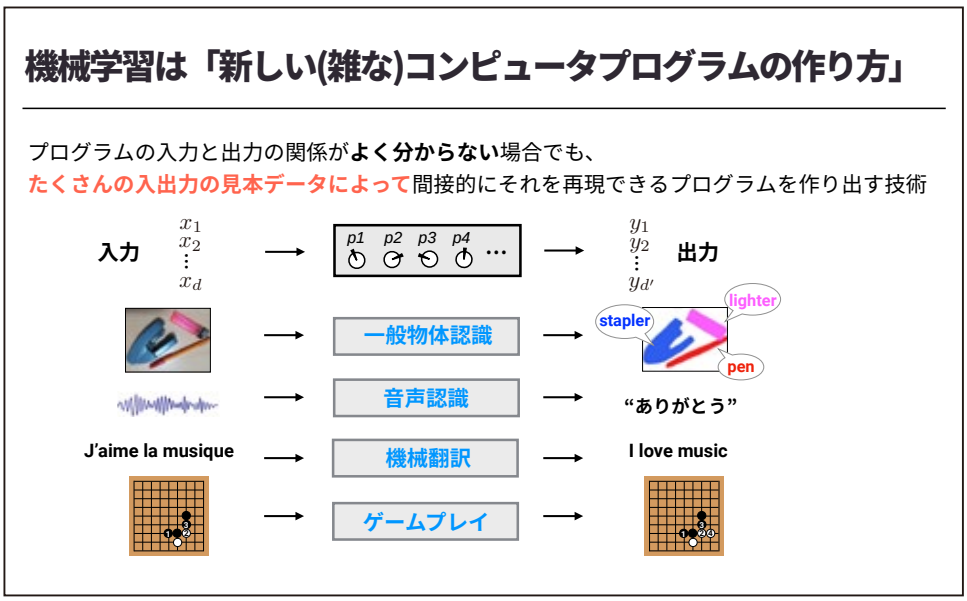


図3–4–2　　機械学習は「新しい（雑な）コンピュータプログラムの作り方」

各曲面モデルは内部パラメーターを持っていて、この値を変えると曲面の形状が変わる。与えられた見本に対してフィッティングするように、曲面の形をパラメーターを変えることで調節している。機械学習はこの曲面を使ってデータを内挿して予測にする（図3–4–3）。

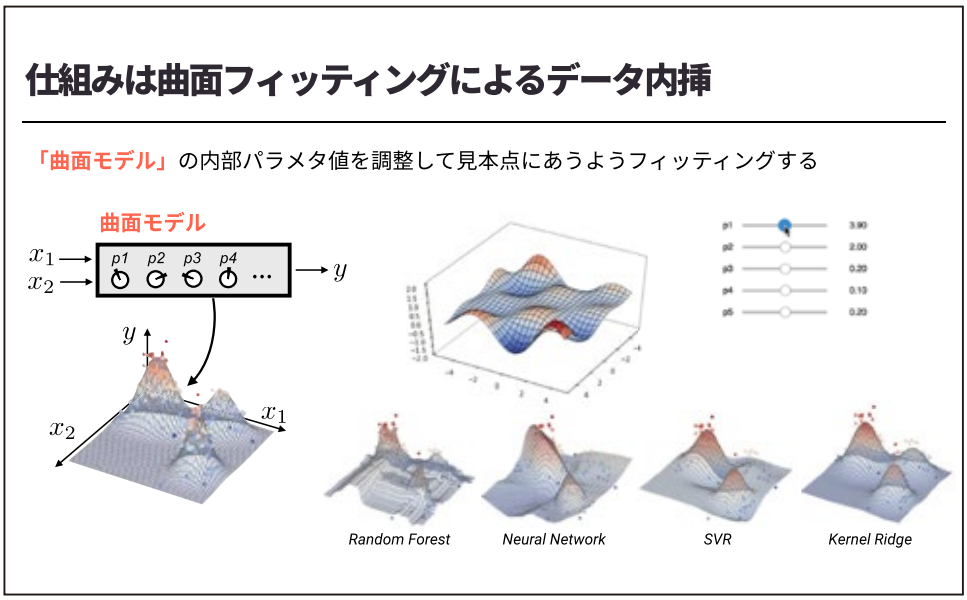


図3–4–3　　仕組みは曲面フィッティングによるデータ内挿

機械学習を使おうと考えている人は、どれぐらいデータが必要かと最初に気になると思う。例えば、あらかじめ求めたい関数が二次関数的だと分かっていれば10点程度でも形状が推定できるかもしれないが、一般には多因子だったら多変数のフィッティングが必要となる。従って、もう少し必要とか、そもそも入力と出力の関係がよく分からないところに使う場合がほとんどなので、その場合はもっと多数のデータが必要であることが想像できる。

材料研究では、今ない材料の予測をしたいという場合も多い。その場合には曲面が起こり得る全域で概形を知る必要がある。その場合は、データは満遍なく取るほうがいいというのが実験計画法の基本である。

機械学習の仕組みから、与えられた見本例の再現は当たり前で、見本例として与えていないデータをどれぐらい正しく予測できるかの観点で検証する必要がある。予想が当たるかどうかの検証にもデータが必要で、一般にこの判断は非常に難しく、注意と労力を要する。

これを勉強に例える。機械学習はまず例題を与え、それが正しく解答できるようにトレーニングする。その後、例題とは違う問題を出題し、どれぐらい解答できるかで、どれぐらい理解しているかを評価する。あまりよくなかったら、トレーニングをやり直すというフェーズを経て、例題と違う問題も解けるようになった段階でテスト本番に臨む。テスト本番で出た問題が例題や演習と全然違った場合に起こる不幸は、機械を学習させる場合でも人間を学習させる場合でも同じなので、注意する必要がある（図3-4-4）。

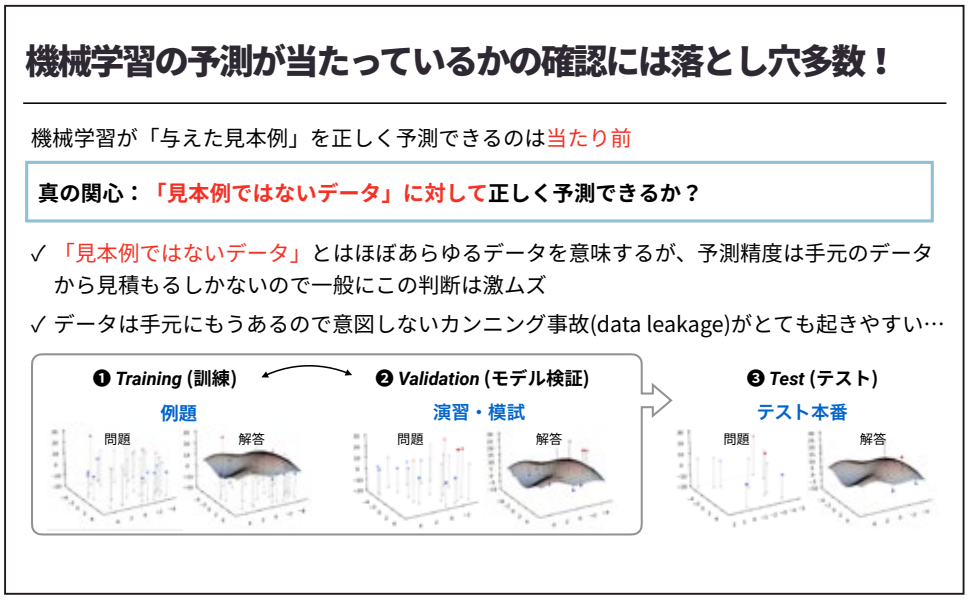


図3-4-4　　機械学習の予測が当たっているかの確認には落とし穴多数！

以上のようなシステムは、ドラえもん的なAIとはかなりかけ離れているが、このような技術がAI技術として日常的に使われている。人工知能や機械学習といった用語は50年くらい前からある用語で、希望的なものが入っている。

深層学習は境界線を引くときに新しい観点を入れている。機械学習は、あたえられた点を分ける境界線として数学的なフィッティングを行っているが、深層学習はフィッティングの前に、いい感じの表現に変換し、フィッティングをシンプルにする。このようなよい表現を変換して学習するところに一番の特徴があり、何かパラメーターで与えられていることになる。従って、最終的には全体のパラメーター調節の問題になる。その結果、今の機械学習モデルはうまく動作させるために大量のデータが必要になる。

AIには入力されていない情報を酌み取る機構は全く入っていないため、関係していそうな量を入力変数として入れるので入力変数が多くなる。極端な場合、画像そのものを入れると何百万変数となる。また、それら変数に対してフィッティングするためには、モデル自体も何千万というパラメーターを内部で機械的に調節する。パラメーターが多いモデルとなるので、状況としては面を点に当てにいっているだけでも、面が何千万個の自由度を持ち、なおかつ、そのフィッティングを何百万という次元で行っている。

機械学習の予測に対する確証を得るにもデータが必要である。統計的に十分な量のデータがあれば、機械学習のモデルはどれを選んでも大体問題ないが、実際はデータが足りていない状況で機械学習に適用するた

め、使ったモデルによって結論も異なる。ミスリーディングにならないようにするためには、データの解釈としては複数の手法で多角的に見ることが鉄則である。

機械学習の研究としては、高次元性をどうするかがメインにある。例えば量子力学といった基礎的な物理モデルもあるので、自由度が高すぎる曲面と、物理モデルやシミュレーションの知見とを融合することによりうまいモデルをつくろうという方向が、一番盛んである（図3-4-5）。

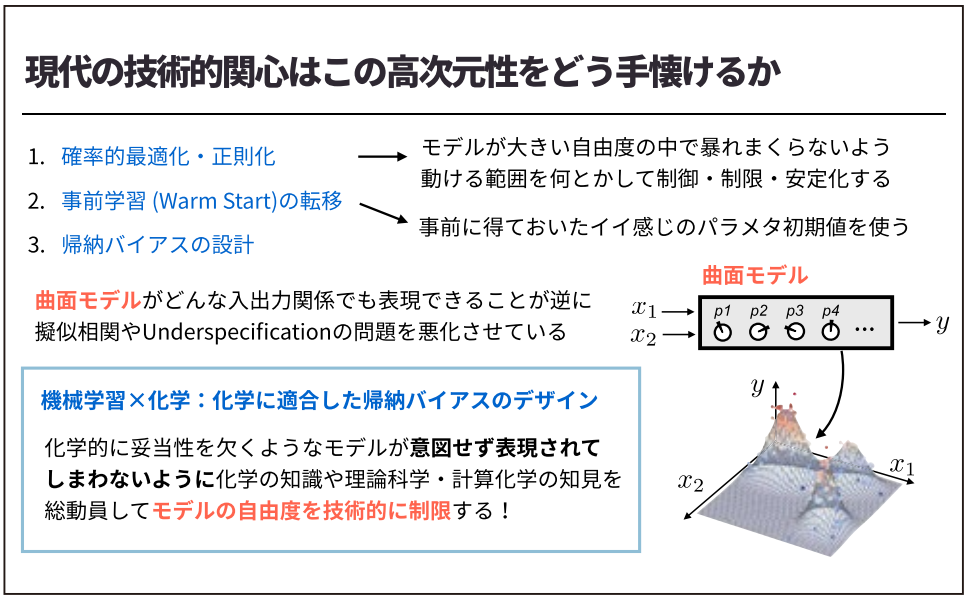


図3-4-5　　現代の技術的関心はこの高次元性をどう手懐けるか

機械学習は本質的にたくさんデータがあれば非常にパワフルであることを念頭に、２番目の事例を紹介する。例えば自分の顔を認識するスマホのアプリをつくろうと思ったら、自分の顔画像が100万枚ではなく、５枚とか10枚あればつくれる。その背景にあるのが大規模な事前学習である。大規模なデータを用意していい感じの変数に変換する変換器をつくって獲得しておけば、個々の事例のケースではすごく少ないサンプルでもうまくいくという成功例がある。従って、疲労のような分野でも、中長期的にコミュニティ全体でそのようなデータを収集して皆で活用するという方針も大事である。

疲労などのゴールに対して機械学習はデータを予測に変えるが、予測ができることは理解ができるとか、発見ができることを直接は意味しない。ここで挙げた例は、機械学習で高い予測はできるが、物がどうやって見えるかとか、音声をどうやって我々が理解するかとか、言語を理解するかというのは理解がそのまま深まるということは意味しない。従って、予想が正しいかどうかは必ず実験する必要がある。機械学習によるデータの解析と予測と、実際の実機での系による実験をうまく組み合わせることで、理解を深めていく必要がある（図3-4-6）。

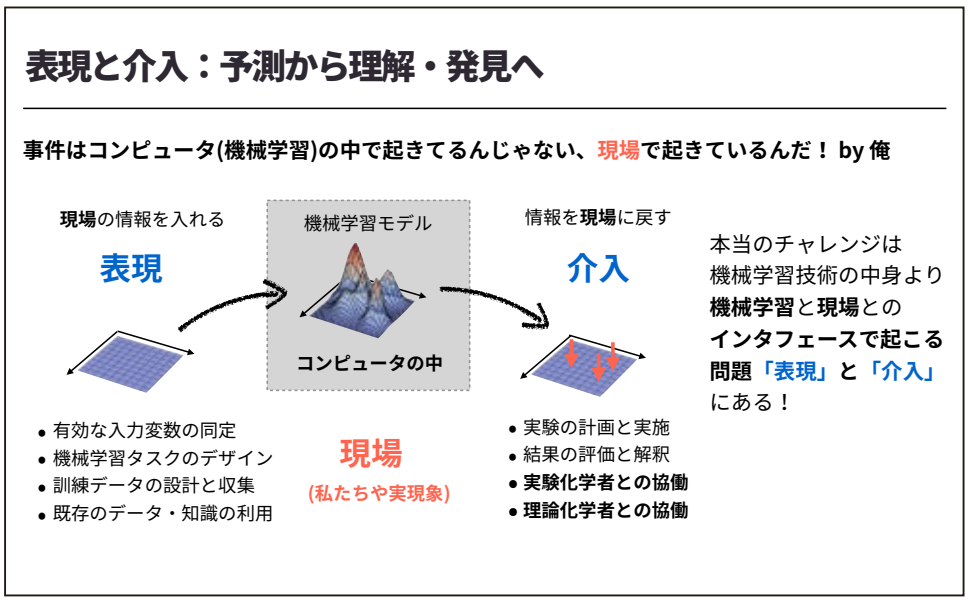


図3-4-6　　表現と介入：予測から理解・発見へ

結論として、機械学習単体で投じるとか、AIに任せればオーケーではなく、現場の情報をAIに入れるときの表現の問題に関わる問題と、AIによる予測を現場に戻すときにどう現場で生かすかを考えるには、専門家と機械学習を担当する技術屋が一緒に考える必要がある。機械学習をどう活用したいかは、法則の問題ではなく道具の使い方の問題である。したがって、我々コミュニティの科学の研究のやり方の問題である。データを一部しか手にできない前提で、我々の許容限界に生かすようなデータを予測に変える道具の使い方をコミュニティで考えることが大事である（図3-4-7）。

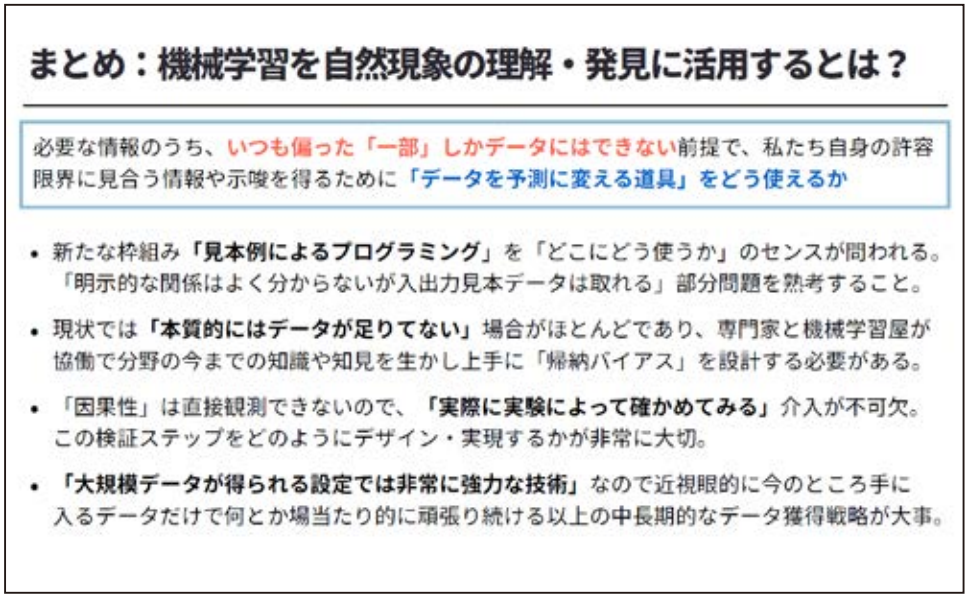


図3-4-7　　まとめ：機械学習を自然現象の理解・発見に活用するとは？

3.5 コメンテータからのご意見

津﨑 兼彰（物質・材料研究機構 フェロー）

鉄鋼材料組織学の一研究者の視点から、鉄鋼・疲労研究の重要性と新奇性について述べる。鉄鋼は19世紀後半から社会の近代化にとって不可欠な材料として貢献してきている。生産量は21世紀に入り再び急増し、2019年度18.7億トン、2020年度18.6億トンである。

疲労研究の重要性については既に言及があった通りで、破壊事故の8割は金属疲労に起因し、社会的に重要な問題となっている。長寿命社会では、機械システムの長寿命化技術、寿命予測技術がますます重要になる。しかし、学理の視点で見ると、疲労研究に対して間違った認識が存在している（図3-5-1）。「疲労には数多くの経験則があり、新たな現象の発見はない」、「疲労き裂進展・停留の力学的解釈・制御に関する学問的研究は成熟している」、これらの認識は間違っている。例えば、従来の主たる研究対象材料は、炭素鋼（BCC相）とアルミ合金（積層欠陥エネルギーが高いFCC相）であり、変形機構はいずれも滑り系が多く交差滑りが容易で、塑性変形の異方性が小さい。これは、金属として科学的に捉えると特殊なことであり、鉄鋼やアルミ合金のことを、たくさん使われている材料だから普通と考えるのは誤りである。誤解を恐れずに言えば、限られた特殊材料のデータに基づいて体系化がされている。したがって、怖いのは想定外の事故であり、これを起こさないために普遍性ある学理構築が必要である。

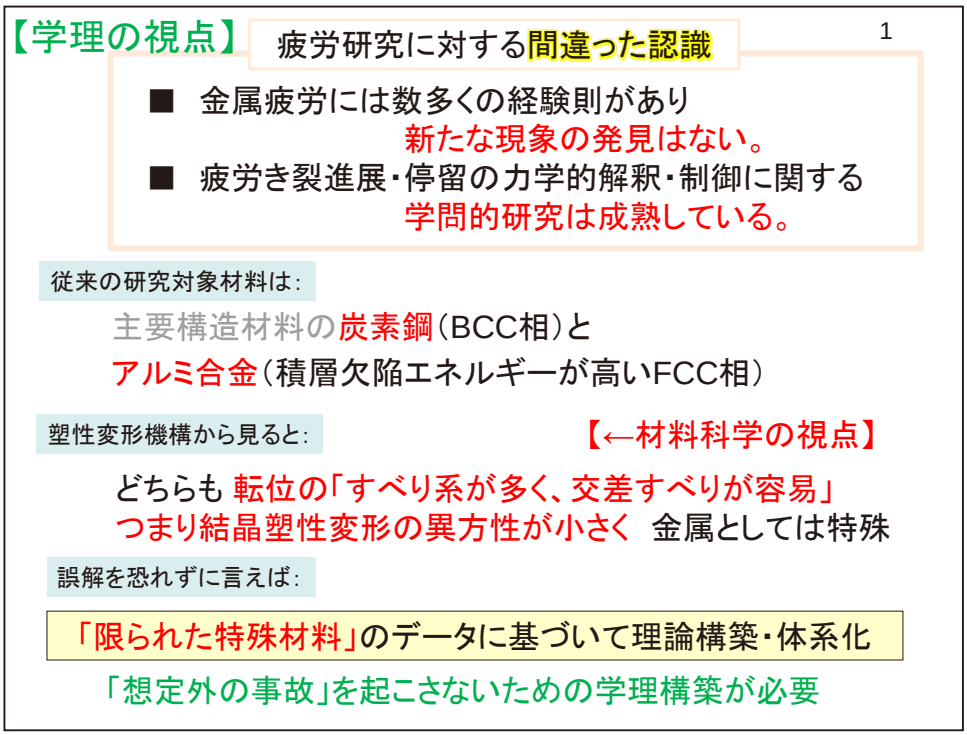


図3-5-1　　学理の視点

そこで、私自身が注目しているのは微小き裂進展である（図3-5-2）。理由は、疲労寿命の大半を占める重要現象であり、ミクロ組織の影響が大きい、すなわち材料科学の働きどころである。また、研究論文数を見ると、き裂発生と長いき裂の伝播に関する論文は多いが、微小き裂については少なく、新しい研究領域になっている。狙いは微小き裂の進展を能動的に抑制して疲労特性を向上させることで、長寿命化技術、寿命予測

技術の鍵になると考えている。実際に新発見もあり、Impact Factorの高い雑誌に論文を出せている。ただし、単に寿命を見るのではなく、き裂がどのように進展するかを金属ミクロ組織と紐づけてしっかりと見て、科学的に興味ある現象として示す必要がある。

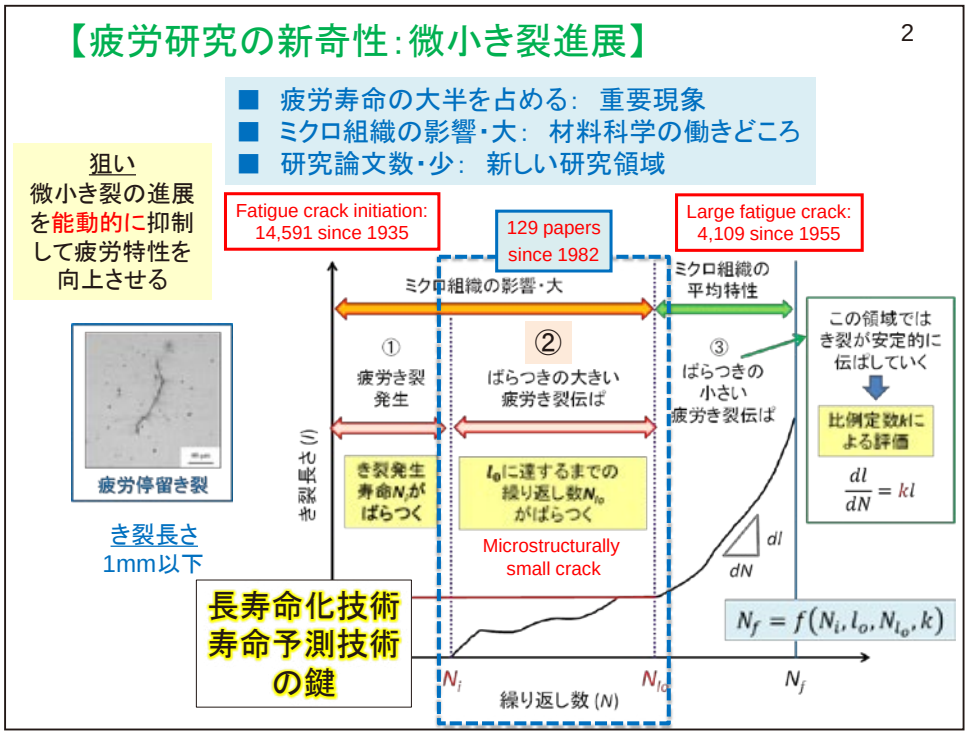


図3-5-2　　疲労研究の新奇性：微小き裂進展

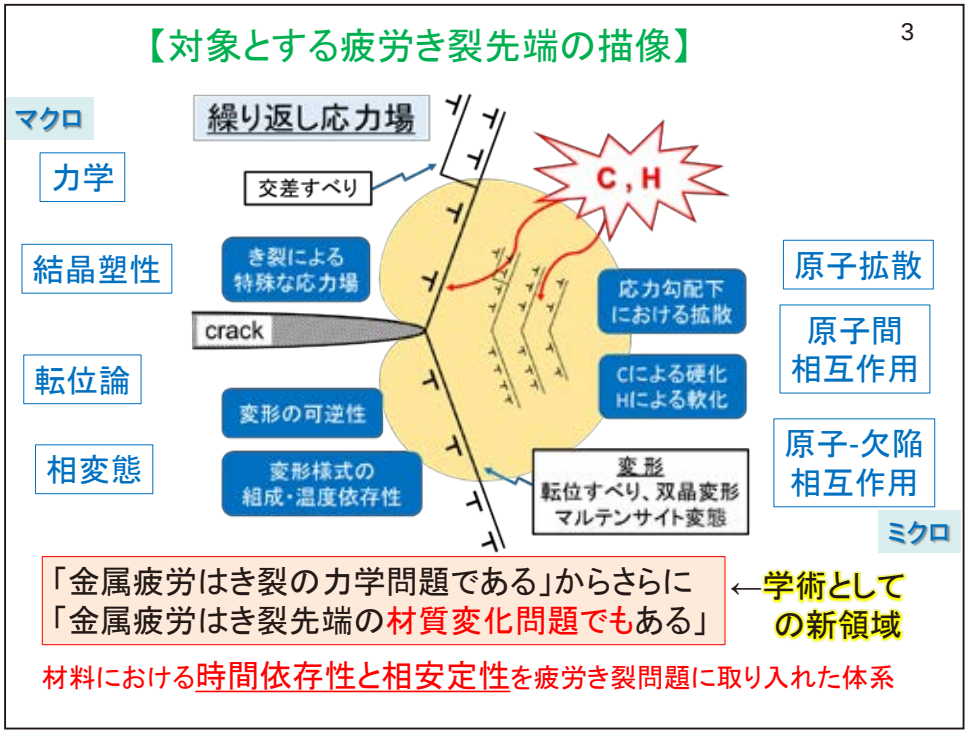


図3-5-3　　対象とする疲労き裂先端の描像

図3-5-3に対象とする疲労き裂先端の描像を示した。ここで言いたいのは、金属疲労はき裂の力学問題であるという従来の考え方から拡張して、金属疲労をき裂先端の材質変化の問題として捉えるということである。材料における時間依存性と相安定性を疲労き裂問題に取り入れた体系として、鉄鋼やアルミ以外にも対象を広げて取り組めば、説得力あるプロポーザルになるのではないかと考える。

岸本 喜久雄（東京工業大学 名誉教授）

疲労破壊現象の理解の深化というテーマのワークショップということで、産業分野の成長の視点からコメントさせていただきたい。

図3-5-4に示すように、疲労き裂の発生から最終破壊までの過程については共通の理解が形成され、これらの理解が機器設計やメンテナンスの基盤的知識となっている。き裂ができるところはミクロの現象だとよく言われているが、実際にき裂が進んでいるところ（巨視的き裂進展）もき裂先端で起きている実際の現象は微視的なメカニズムが関与している。それは疲労き裂の進展に対する抵抗であるということから、実際には系で測るなどを行っている。それが何で起きているかということの本質的な理解は非常に大切であり、まだ学術的に多くのことが残されていると理解した方がよいのではないかと考えている。疲労き裂の最初から壊れるまでの全体を通じて、微視的なメカニズムの理解は不可欠である。

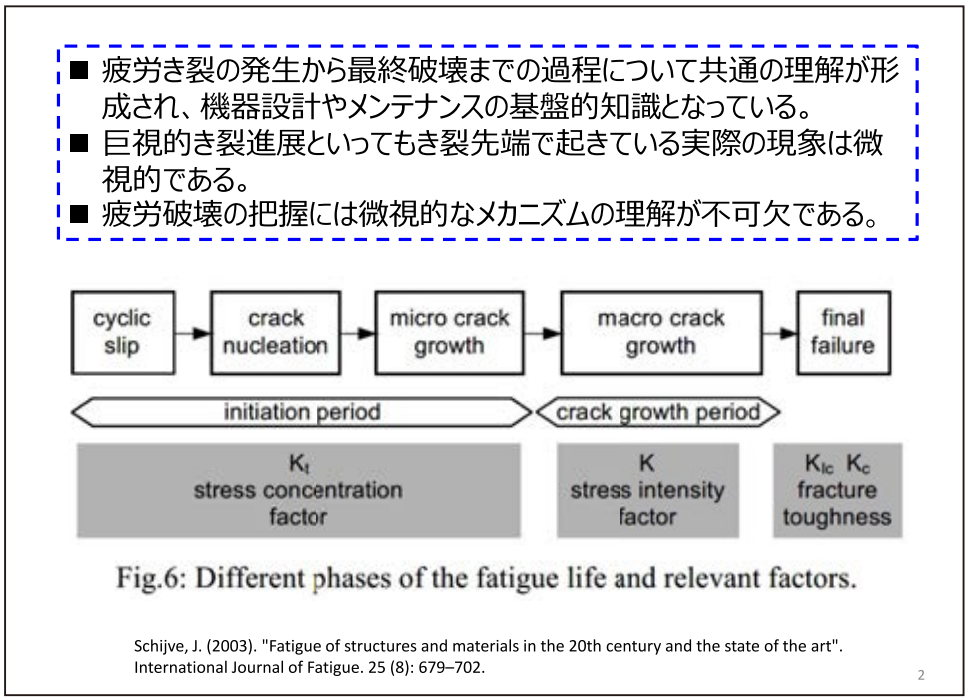


図3-5-4　　疲労き裂の発生から最終破壊までの過程

もう一つは、どのくらいの寿命がどのくらいのき裂寸法や欠陥寸法になっているかを考えたときに、例えば表面からのき裂の成長だとすると、き裂になって実際にき裂の進展をコントロールできるというのは寿命のわずかなところである。実際に疲労寿命期間の大部分は微視的な寸法のところにあり、疲労寿命を考える際に微視的な状態で疲労現象をコントロールすることが大切である。この微視的メカニズムについては、皆さんがおっしゃられているようによく分からないことが多く、一部の知識しか今のところはないのではないかと考えている。

一方で、図3-5-5は疲労強度設計を行おうとしたときの図である。どのくらいの疲労寿命があるかと考えたときに、実際にはどういうデザインでその構造物ができているかということと、寿命を予測するには多様な影響因子があるということである。例えば、表面がどうなっているか、どういう過程を経てその機器ができているかというようなことが必要であるし、さらにその構造物にどういった荷重がかかるか、荷重のかかる順番や大きさが変動することによって疲労き裂の進展も変わってしまうだろうということ、さらには環境の影響を大き

く受けるということがある。すなわち荷重の条件や環境、さらにどういう形でそのものができているかを含めて疲労強度が決まるということになると、これを正確にやろうとすると莫大な量のデータが必要になってくる。

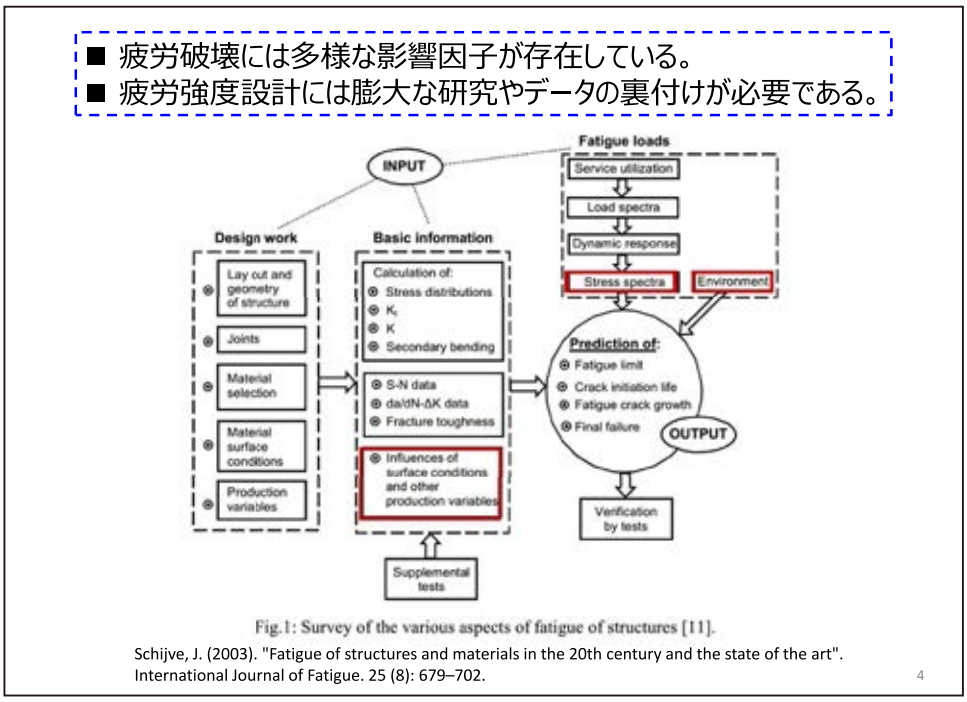


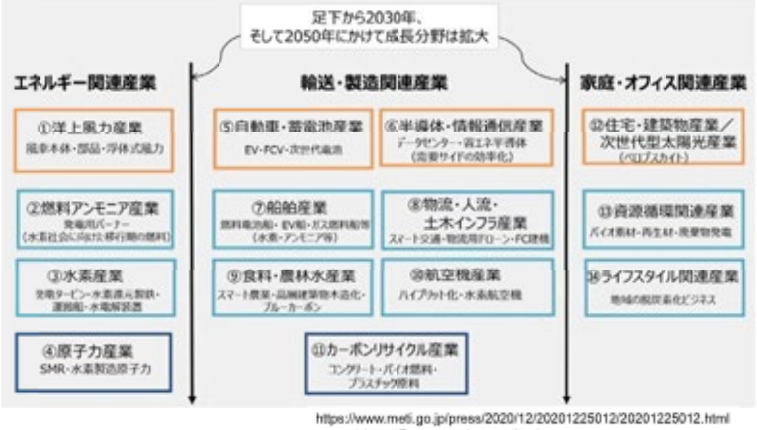
図3-5-5　　疲労破壊と多様な影響因子

データを全部揃えてから設計することはできないため、様々な簡便な方法が出てきている。そうはいっても様々な環境状態で物事をつくっていく、さらにはできるだけ最適化しようとすると、足りないところをどうデータを埋めていくのか、あるいは先ほどお話があったような人工知能を使って内挿していくのかというようなことも含めて、この膨大なデータを整理していかないと、きちんとした疲労設計はできないのではないかと言える。

もう一つは、材料の使い方が歴史とともに変わってきていることである。疲労破壊の研究には長い歴史があるが、1950年代以降に電子顕微鏡等の機器の進歩に伴って、疲労破壊への理解が急速に進んだ。そこでは主に金属材料を中心に、それも限られた材料を中心に進んできたが、現在は多くの材料が使われている中で、特に複合材料については疲労の研究がまだまだ未熟である。こういったところも含めて考えると、知識が十分に整備されているとは言えない状況にある。

また一方、今、日本ではカーボンニュートラル2050年を目指すことで、図3-5-6に示す14分野が成長分野と言われている。しかし、新しい環境や新しい現象に対して物をつくっていくということになると、材料、特に疲労がどういうところに関与するかということについては知識が足らない。また、今回は強度の話だけをしていたが、例えば半導体や蓄電池でも、機能の寿命と疲労現象との関わりが出てくる。しかし、そういった複合的な劣化メカニズムについては知識体系ができていない。日本の中ではほとんどそういった研究が今はなされていない。これらを含めて考えると、オールジャパンの体制を取って、疲労破壊現象に対する包括的な研究や知識の整備・体系化が必要だと言える。

■ 従来想定してきた環境とは異なる場面での疲労挙動の理解が求められる。
■ 力学特性だけではなく他の物性との連成も含めた複合的な劣化メカニズムついての理解も求められる（疲労のマルチフィジックス）。
■ 疲労破壊についての知識やデータは公開されているものばかりではない。
■ 我が国において疲労破壊現象に対する包括的な研究や知識の整備・体系化が求められる。



「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」2020年12月

図3-5-6　　2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略と疲労破壊現象

4 ｜ 第二部

4.1 疲労破壊の現象解明に関する最近の研究の進展について

島村 佳伸（静岡大学 大学院総合科学技術研究科 教授）

最初に破壊力学部門委員会について紹介する。次に、今年開催した破壊力学シンポジウムなど、幾つかの国際会議を踏まえた最新動向を紹介する。最後に、産業界にも役立つ疲労破壊の包括的な理解を深めるために必要なサイエンスに関して、個人的なコメントを述べる。

私が委員長を務めている材料学会の破壊力学部門委員会は、基本的には研究者同士の勉強会だ（図4-1-1）。人数は150名程度で、おおよそ3分の2が大学、3分の1が会社のメンバーである。理論的、実験的に破壊の問題に取り組む研究者が多く、数値計算を主とする方はあまりいない。

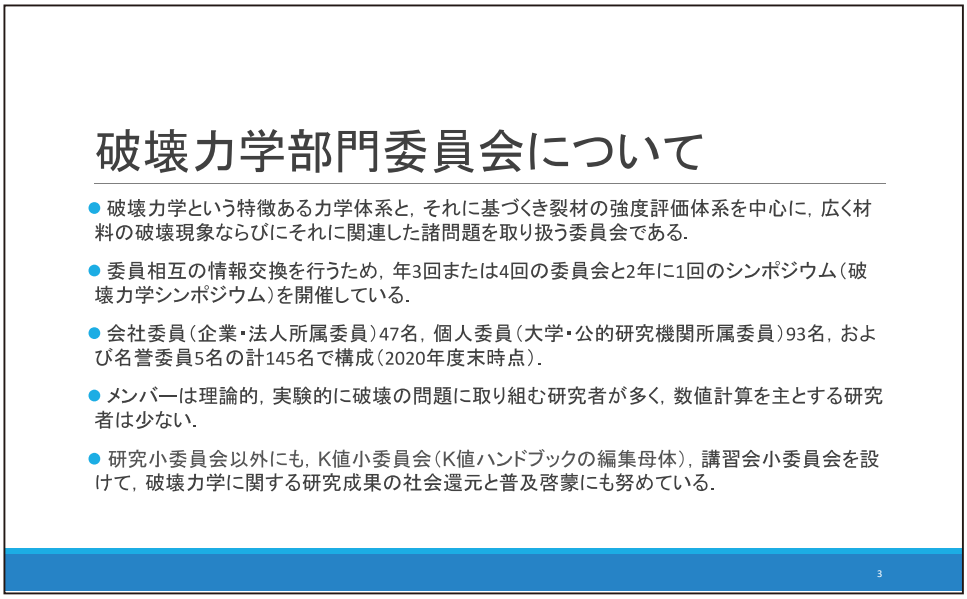


図4-1-1　　破壊力学部門委員会について

11月に開催した破壊力学シンポジウムは参加者約100人で、近年では盛況だった（図4-1-2）。

基調講演と一般講演で50件弱あった講演のおよそ半分が、疲労関連の講演だった（図4-1-3）。材料種別で、疲労関連の講演の約半分が鉄鋼材料だった。鉄鋼以外の金属が5件で、繊維強化プラスチックが4件、ほかは接着剤等だった。これは世の中の動向をそのまま反映していると思う。

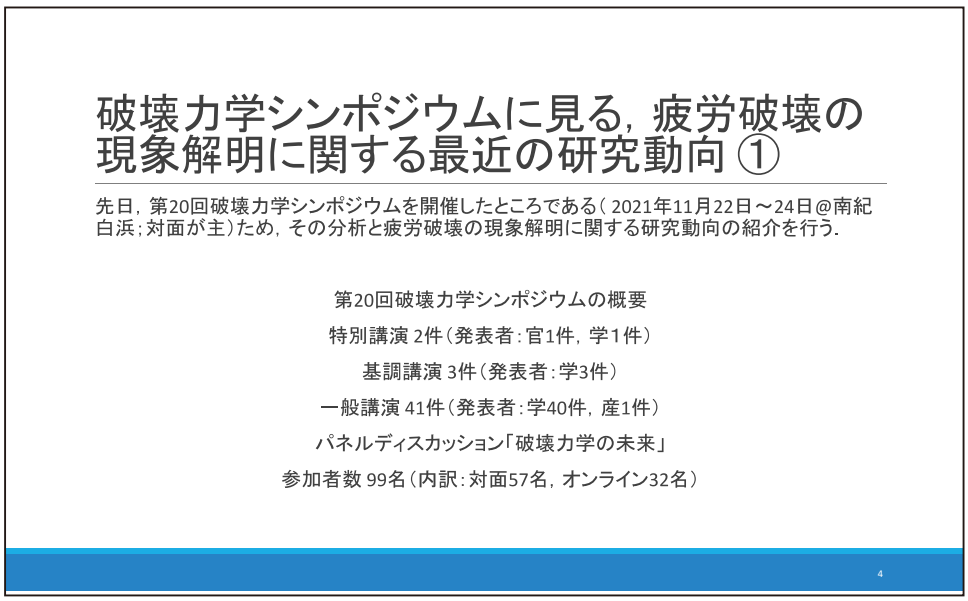


図 4-1-2　　破壊力学シンポジウムに見る最近の研究動向①

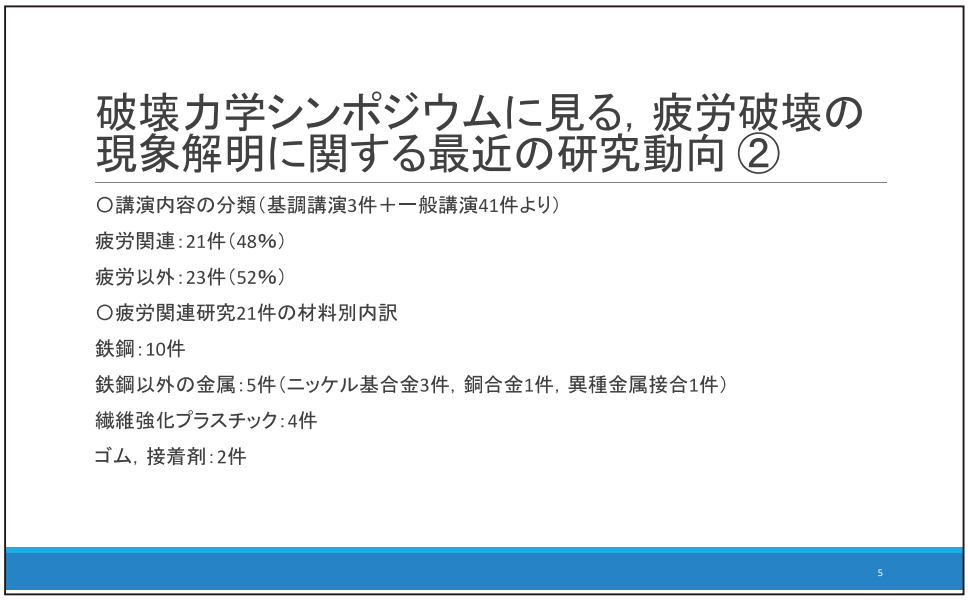


図 4-1-3　　破壊力学シンポジウムに見る最近の研究動向②

疲労関連の講演のうち、疲労破壊の現象解明に関する研究を選ぶと10件だった。基本的に、疲労研究の半分ぐらいはまだまだ疲労破壊の現象解明に関する研究をしているといえる。ただし、今回、疲労破壊の現象解明に関する研究を材料種別でみると、鉄鋼の研究の比率が下がってきている。鉄鋼が3件、鉄鋼以外の金属が3件、強化プラスチックが3件、フィラー充填エラストマー1件だ。鉄鋼関係はかなり昔から研究されている面はあるのだが、鉄鋼が分かったからといって、そのほかの材料が分かるかといえば、そうではない。近年、開発されている材料や新素材では疲労破壊の機構はまだまだよく分からないのが正直なところだと思われる。

それぞれの内容を簡単に紹介する。鉄鋼関係では、私の研究室の報告から紹介する。ばね鋼にねじり疲労を加えたときに、平均ねじり応力は疲労強度には効かないはずだというのが従来の常識だ。ところが、実際

に試験をすると強度が低下するという結果だったことを私の大学から報告している。このように、疲労現象でも実は、新しい現象がまだまだたくさん出てくると感じている。この現象を発生機構や微小き裂の進展機構から見ていこうという研究を地道に行っている。我々は大型装置をもっていないのだが、いわゆるレプリカ法などで対応できる。

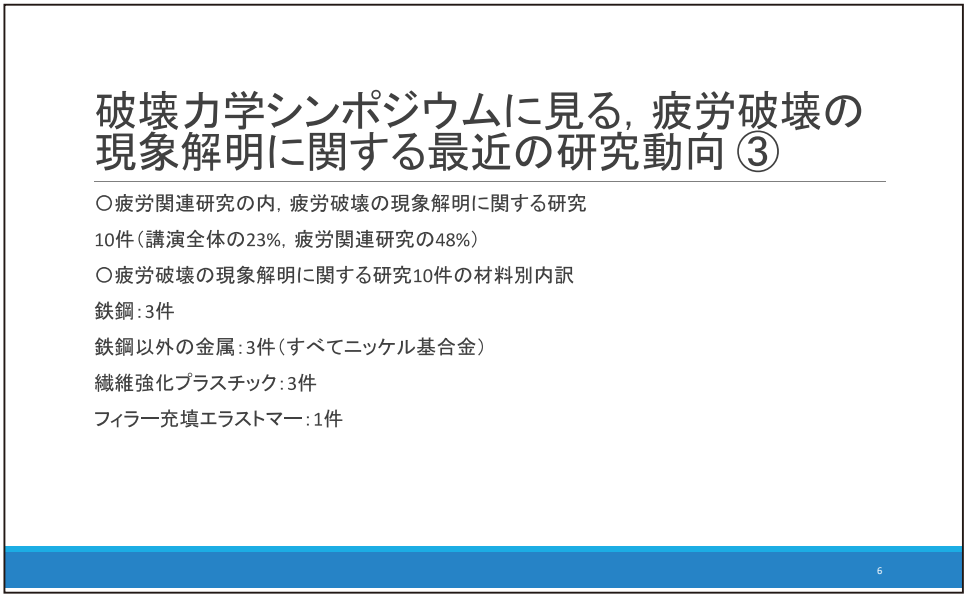


図4–1–4　　破壊力学シンポジウムに見る最近の研究動向③

ニッケルベースの合金の報告では、EBSDで結晶方位解析をして組織を見た上で赤外線カメラによるエネルギー散逸の計測などを見ている。新しい装置の導入によって、従来はできなかった視点で研究ができているという事例だった。

繊維強化プラスチックの講演は、本日、御講演される中村孝先生の研究室の高橋准教授の報告があった。SPring–8で繊維強化プラスチックの繊維の剥離が生じている様子を撮影したものだ。この研究は、かなり画期的で、こういう放射光X線イメージングの有効性がわかる。

現象解明という意味で、X線CTや放射光CT、陽電子消滅法といった新しい内部観察の技法が発達している。私は詳しく説明しないが、おそらく、中村孝先生が詳しくご紹介されると思う。これらの新技術によって従来になかった全く新しい知見が提供されている（図4–1–5）。

金属に関しては、FIB（Focused Ion Beam）やEBSDが最近、とても有用だ。疲労起点近傍の詳細な組織観察が可能となったことはかなり画期的だ。また、DIC（Digital Image Correlation：デジタル画像相関法）や顕微サーモグラフィといった新しい技術は、疲労破壊の現象解明に対して、従来になかった切り口を与えている。

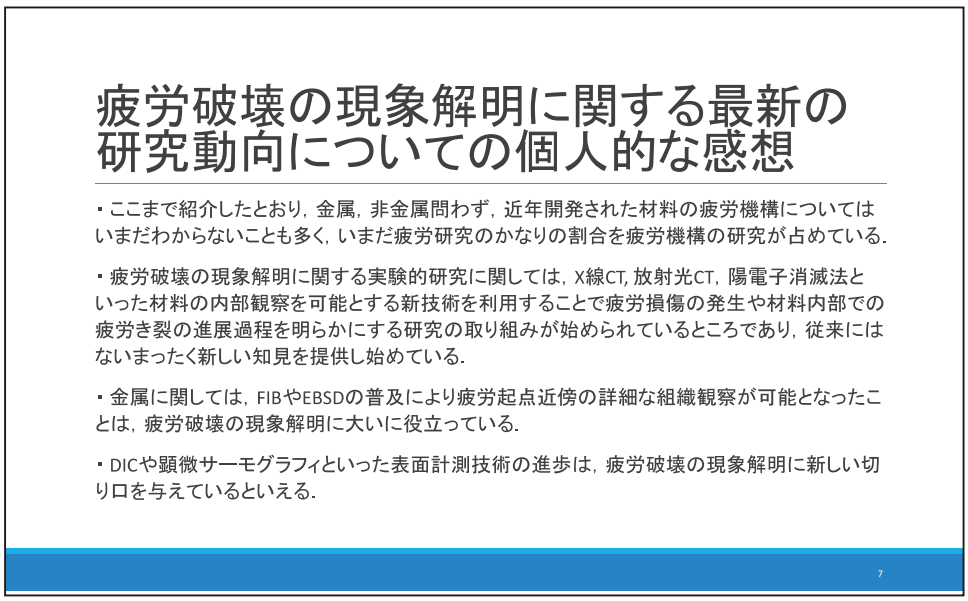


図4-1-5　　最新の研究動向についての個人的感想

最後に、CRDSから事前に頂いた宿題について考えたことを説明する（図4-1-6）。まず、最新の検査技術や観測技術の活用は、耐疲労性に優れた材料開発に資する新しい研究につながる。

フレッティング疲労や環境疲労、接着剤の疲労、変動荷重下における寿命予測など産業上とても重要な課題はまだたくさん残っているのだが、大学側でこれらの課題にしっかり取り組むことができる研究者がなかなかいない。特に、若い研究者だとさらに少なくなる。なぜかという話はいろいろあるのだが、この点は割愛して、必要なサイエンスという観点でみれば、この分野はある意味で境界分野でもある。異分野との協業でブレークスルーを目指す必要があると思っている。

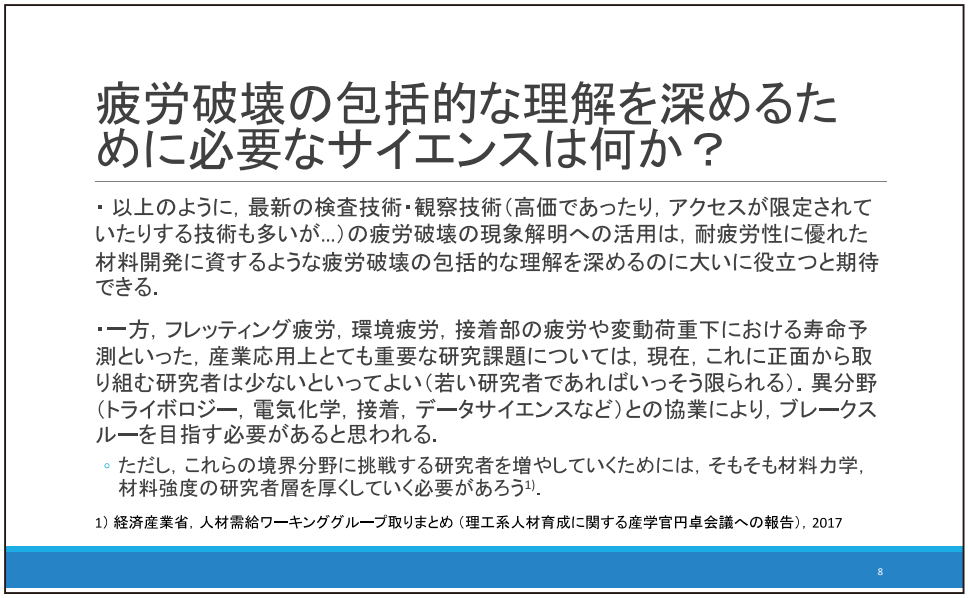


図4-1-6　　疲労破壊の理解のためのサイエンスとは？

ただし、こういう境界分野に挑戦する研究者を増やしていくには、そもそも人材の数がないといけない。材料強度で博士号を出せるような研究室がそもそも減ってきている。そもそもの人材層が薄いという基本的な問題があり、そこをどうにかしていかないと、なかなか難しい。

ヨーロッパではどのようなことをやっているか紹介する。先日、超高サイクルの国際会議に出た際、幾つかの論文がファンドを取っているという話があったので調べてみた。フランスでは約２億円のプロジェクトで超高サイクル疲労の疲労強度をサーモグラフィのような観察技術の研究と、転位動力学のような頭を使う研究との両方が組み合わさって、何とか予測できないかと取り組むプロジェクトが動いていることがわかった。これは正直に言って、たいへん羨ましく、参考にすべきかと思われた。

4.2 マイクロ材料試験による疲労き裂伝播初期過程の解明

高島 和希（熊本大学 国際先端科学技術研究機構 研究機構長・卓越教授）

金属材料の疲労き裂伝播の初期過程の解明に向けた、マイクロ材料試験の適用について紹介する。我々はサイズが10μm程度の微小寸法材料の機械的性質評価を行っているが、元々はMEMS（Micro-Electro-Mechanical System）用材料の力学特性評価装置として開発を行ったものである。 MEMSは可動部を含む微小な機械であり、信頼性・耐久性に優れるMEMSデバイスの設計には、通常の機械構造物と同様に、使用される部材の機械的性質を知ることが重要である。また、計測する試験片のサイズが小さいことから、通常サイズの試験片に比べて、試験片の作製、軸合わせ等を含めた試験片の装着が重要になることから、そのような点を規定した国際標準規格を策定し、MEMSの信頼性・耐久性向上へ向けた取組を行ってきた。

一方、MEMSの代表的なサイズは1～10μm程度であり、このサイズは材料を構成している微視組織要素（結晶粒径、析出物等）のサイズとほぼ同等である。材料のマクロな変形挙動を支配するのは、金属材料ではナノレベルである転位の運動に基づいているが、マイクロ／メゾレベルである構成組織要素レベルでの力学特性も非常に重要な因子である。したがって、機械的性質に優れる構造材料の開発を行うためには、材料の構成組織要素レベルの力学物性を解明し、その結果をマルチスケール的に展開することが重要となる。そこで、我々は微小試験片の局所領域における変形挙動の観察・解析が行える試験機及び試験法の開発を行ってきた。

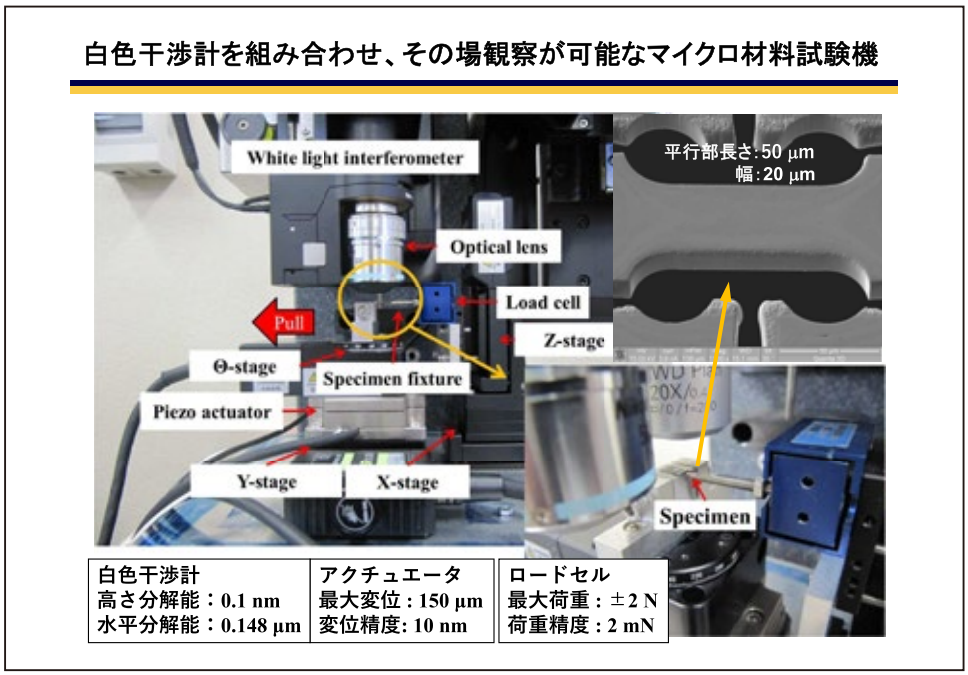


図4-2-1　その場観察が可能なマイクロ材料試験機

開発した試験機の一例を図4-2-1に示す。この試験機の一つの特徴は、白色干渉計を組み合わせている点にある。白色干渉計を用いることで、微小引張試験における試験片表面の3次元的な変形挙動を高精度かつその場で観察できる。たとえば、金属材料では塑性変形に伴うすべり線の発生・伝播に加え、すべり線の方向及び断面プロファイルから、どのすべり系が活動しているかを同定することが可能となる。また、微小サイズの材料試験では軸合わせが重要となるが、本試験機では計5軸のステージを装着することで、きわめて精度の高い試験片の位置合わせ及び軸合わせを可能としている。

さらに、DIC計測手法を応用することで、切欠き先端の微小領域における3次元的なひずみ分布が測定できることに加え、図4–2–2に示すように、切欠き先端での塑性変形挙動やき裂伝播の連続的な観察も可能となる。

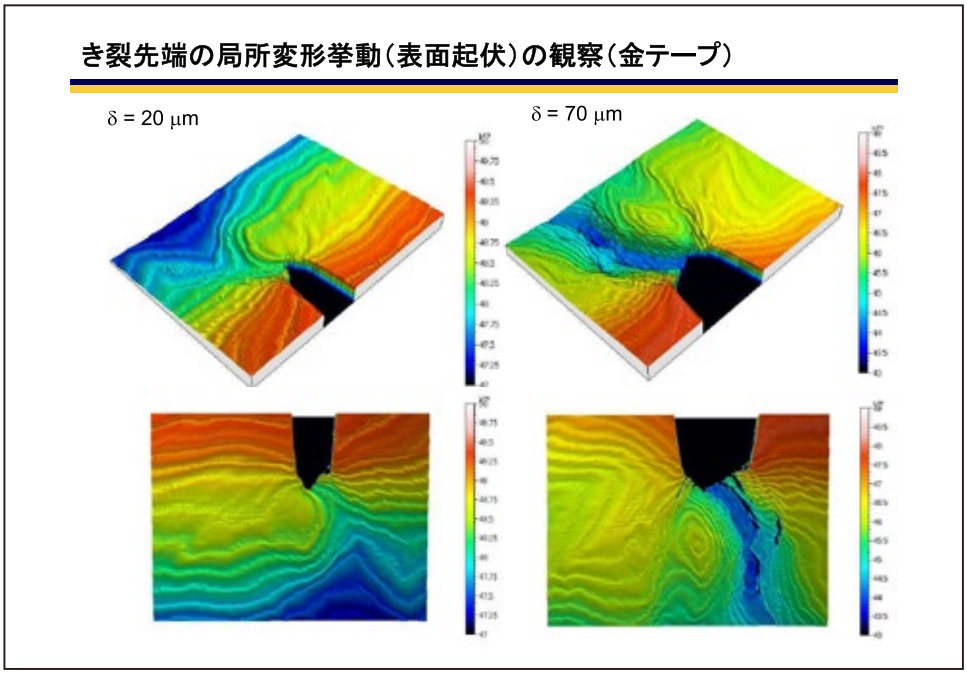


図4–2–2　　白色干渉計によるき裂先端の局所変形挙動の観察

我々は、この実験装置を用い、鉄鋼材料からチタン合金、マグネシウム合金など、様々な金属材料の構成組織ごとのマイクロ材料試験を行ってきたが、疲労の話題に繋がる一例として、鋼のラスマルテンサイト組織の引張試験の結果を紹介する。ラスマルテンサイトは階層的な組織構造を呈しており、サイズが大きい方から、旧オーステナイト粒、その中にパケット、パケット内にブロックがあり、その中に一番小さい構成組織要素であるラスが存在する。そこで、この階層的組織要素の中で、どの組織要素がマルテンサイトの優れた力学的特性を主として支配しているのかを、実際に引張試験を行って調べようと考えた。我々の試験装置では対象とする試験片の代表寸法が10 μm程度であるため、1つのラス自体の引張試験はできないが、ブロックは、ほぼ同じ方位のラス（サブブロックも含めて）で構成されていることから、一つのブロックをマルテンサイトの基本要素と考え、単一ブロックから微小試験片を切り出し、引張試験を行った。その結果を図4–2–3に示すが、ブロック単体の試験片においても、降伏強度は高く、しかも降伏後に大きく塑性変形が生じており、強度と延性を兼ね備えていることが判明した。また、引張特性はマルテンサイトの晶癖面方位に大きく依存しており、晶癖面外すべりが主としてはたらく場合に強度が高く、晶癖面内すべりが主としてはたらく場合に低くなっている。

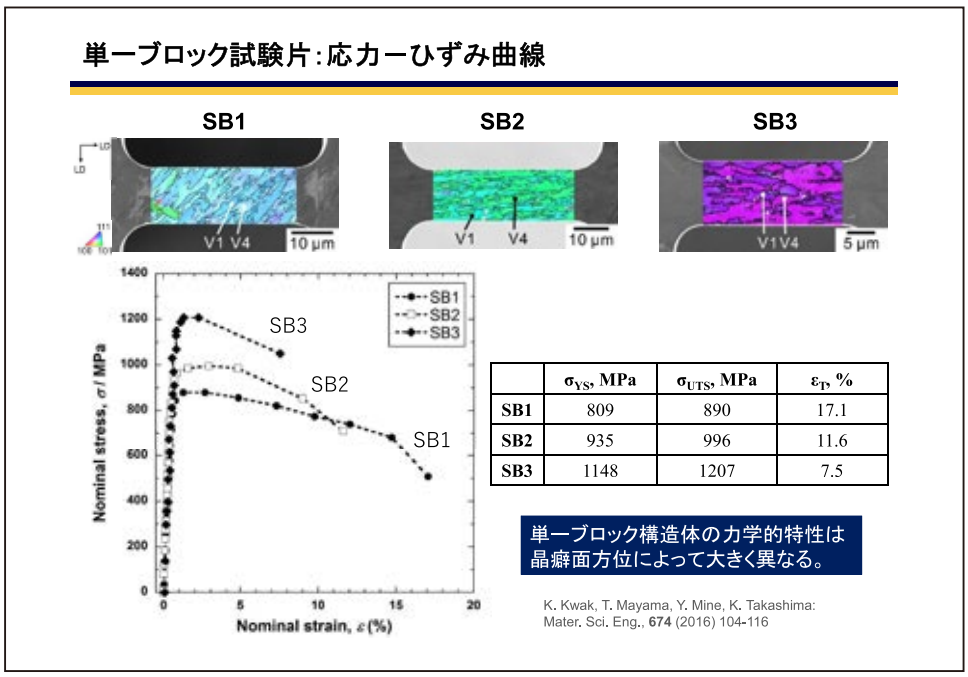
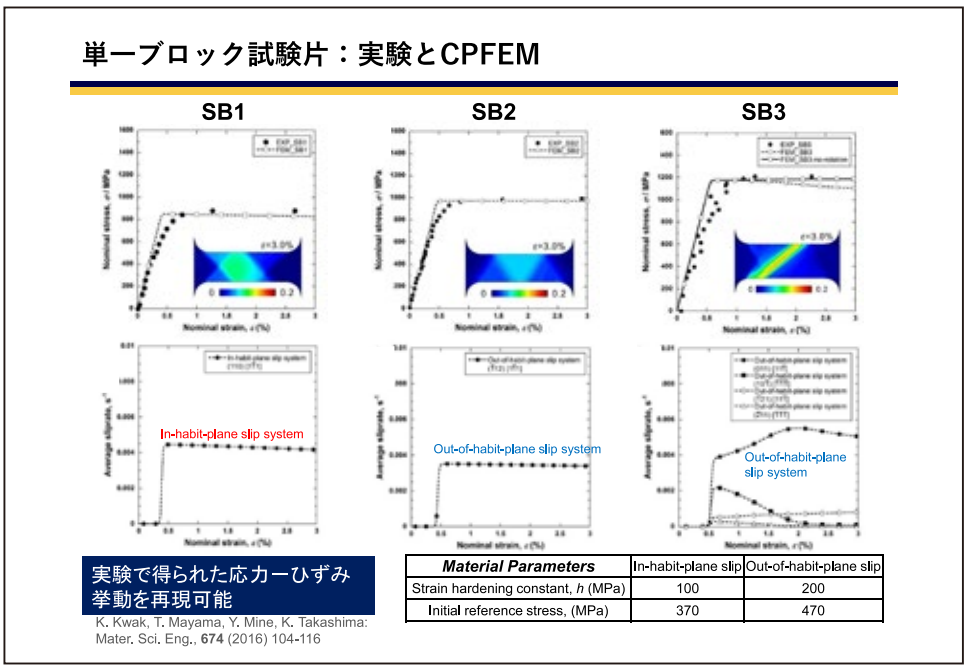


図4−2−3　　単一ブロック試験片の応力―ひずみ曲線

このようにラスマルテンサイト組織におけるブロック単体での機械的性質を明らかにできたが、マルテンサイトの組織構造全体としては、複数のブロックから構成されるパケット、また、複数のパケットから構成される旧オーステナイト粒、さらにマクロ的には、それらを含む多くの旧オーステナイト粒から構成されている。このように、マルテンサイトは階層的な構造であるため、その機械的性質をブロック単体の機械的性質から推測することは難しい。そこで、結晶塑性有限要素法（CPFEM）を利用して、マルチスケール的な強度・変形挙動の評価が行えないかの検討を行った。その第一歩としてブロック単体の力学特性について、CPFEMにおけるパラメーターを最適化フィッティングさせると、実験で得られた応力―ひずみ挙動をうまく再現することができた（図4−2−4）。そこでこの結果を利用して、複数のブロックから構成されるパケットの機械的性質をCPFEMによりシミュレートした結果、単一パケットから切り出した微小試験片の力学特性を完全に再現することができた。現在、複数のパケットから構成される旧オーステナイト粒の機械的性質についてCPFEMを用いることで検討を進めている。この成果を展開させることで、バルクのマルテンサイト組織鋼についても、シミュレーションのみによって機械的性質を再現することが可能になり、マルチスケール的展開に繋がると期待される。

次に、マイクロ材料試験の疲労研究への展開について述べる。金属材料における疲労過程は、疲労き裂の発生、伝播、最終破壊の三段階に分けることができるが、我々はこの中で、き裂の伝播に注目し、その伝播機構の解明について取り組んできた。ところで、繰返し負荷１回あたりのき裂の進展量は10^{-6}～10^{-3} mm程度と非常に小さく、１つの結晶粒内で起きることから、バルクの単結晶を対象として研究を行ってきたが、単結晶を作れない材料も多く存在する。たとえば、前述のマルテンサイトをはじめとして、階層的組織構造や複相合金など微細構造が複雑な材料の場合、単結晶を作製して疲労挙動を調べることはほぼ不可能である。そこで我々はこれまでとは逆のコンセプトで、試験片の方を小さくすることで、構成組織レベルでの疲労き裂伝播機構を解明することにした（図4−2−5）。



Material Parameters	In-habit-plane slip	Out-of-habit-plane slip
Strain hardening constant, h (MPa)	100	200
Initial reference stress, (MPa)	370	470

図 4–2–4　　単一ブロック試験片の引張試験結果とCPFEMによる結果の比較

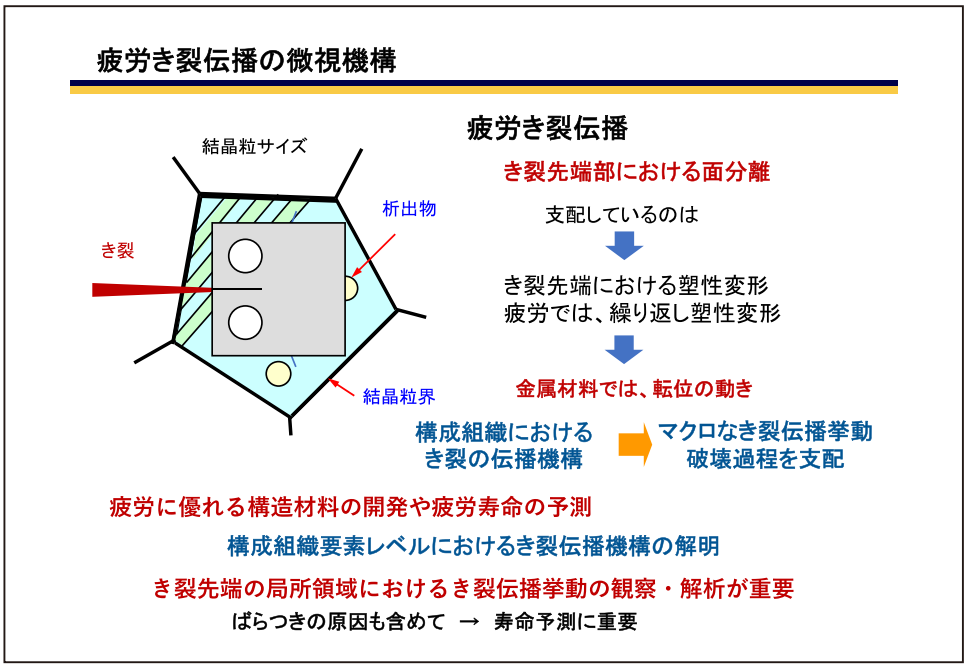


図 4–2–5　　疲労き裂伝播の微視機構解明のためのマイクロ疲労試験の概念図

ここでは、前述のラスマルテンサイト組織鋼の単一パケットにおける疲労き裂伝播の解析例を示す。供試材には炭素の影響をできるだけ少なくしたいため極低炭素鋼を用い、焼入れにより全面ラスマルテンサイト組織に調整したものを用いた。この試料について、図 4–2–6 に示すように一つのブロックに切欠きを導入した。この際、マルテンサイトの晶癖面に対して、切欠き面とその方向を変えて微小CT試験片を切り出した。疲労き裂伝播の場合、き裂先端のみに注目すれば良いため、試験片のサイズ（W）は1 mmとし、厚さ（B）のみ一つのパケットのみが含まれるサイズとした。これに適合する疲労試験機の開発を行い、疲労き裂伝播試験を行った。

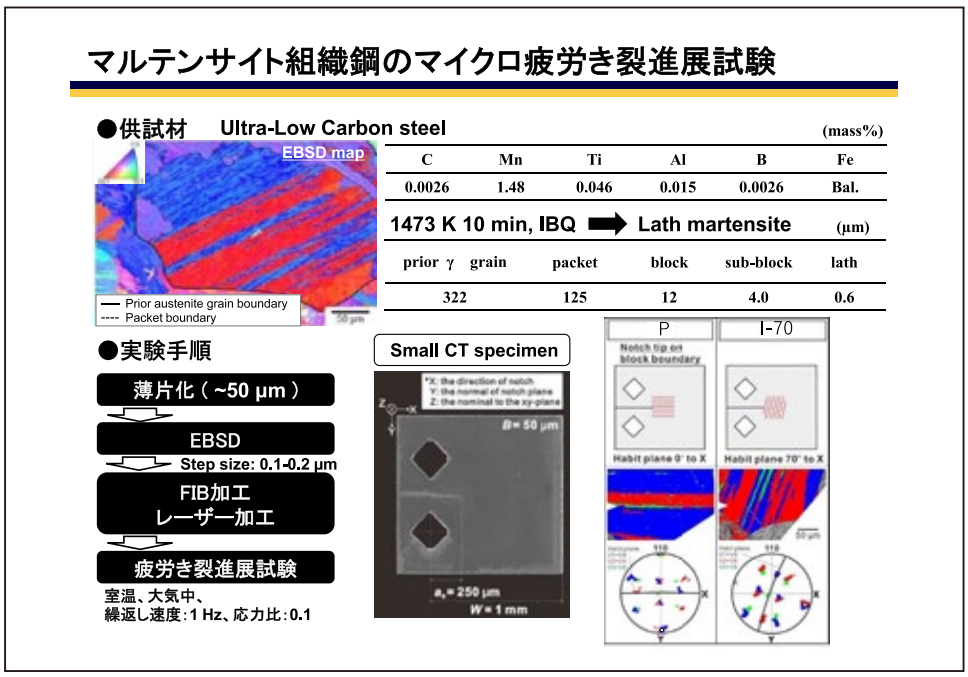


図 4–2–6　　マイクロ疲労亀裂進展試験

図 4–2–7 に得られ疲労き裂伝播抵抗曲線（da/dN − ΔK 曲線）を示す。き裂伝播抵抗は切欠き方位に依存しており、き裂が晶癖面に対して平行な方位（P 試験片）の方がき裂伝播抵抗は高くなっている。これは引張試験の結果と一致しており、き裂先端で作用するすべり面に対する臨界分解せん断応力が高くなるためである。き裂伝播抵抗が Paris 則にしたがっている領域（図 4–2–7 中、ΔK が 7 MPa $m^{1/2}$ 以上の範囲）では、き裂はき裂先端の繰り返し塑性変形に基づいてき裂が伝播しており、それに基づいたき裂伝播のモデルを提案している。

一方、低ΔK 領域ではき裂伝播速度が大きく上下している。この領域は Short Crack の伝播挙動に深く関係するとみられ、これを詳しく検討することでき裂伝播の初期過程を調べられると考えている。

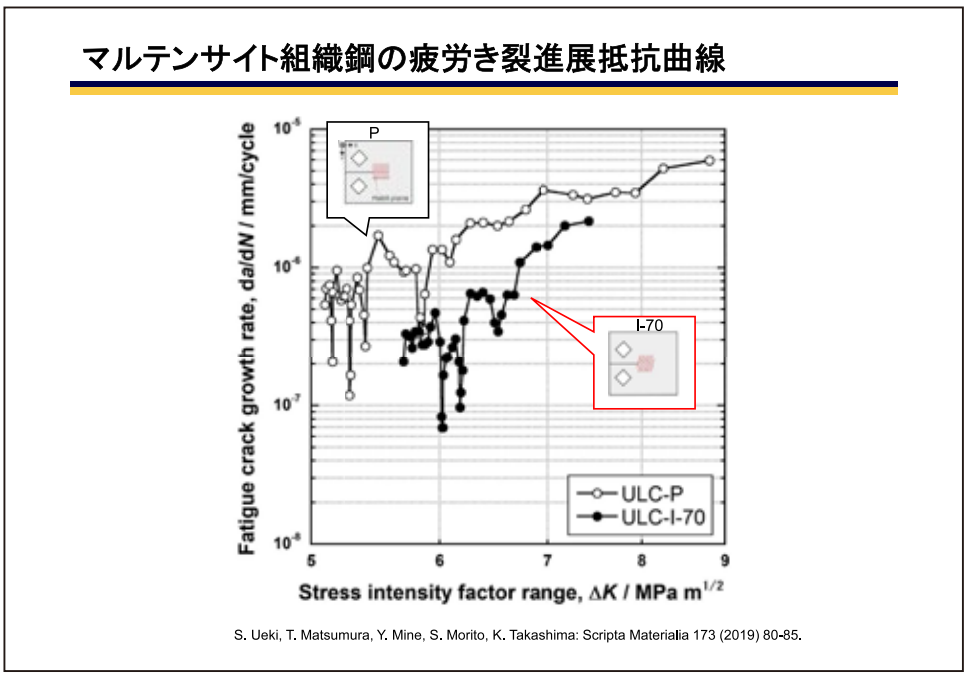


図4–2–7　　疲労き裂進展抵抗曲線（1）

また、図4–2–8中「Long Crack?」と記した範囲は、実質的なき裂長さとしては非常に短く、一般的にはShort Crackになるが、き裂の長さが短いためCrack Wakeの影響を殆ど受けないことから、intrinsicなき裂伝播抵抗を示していると推測できる。

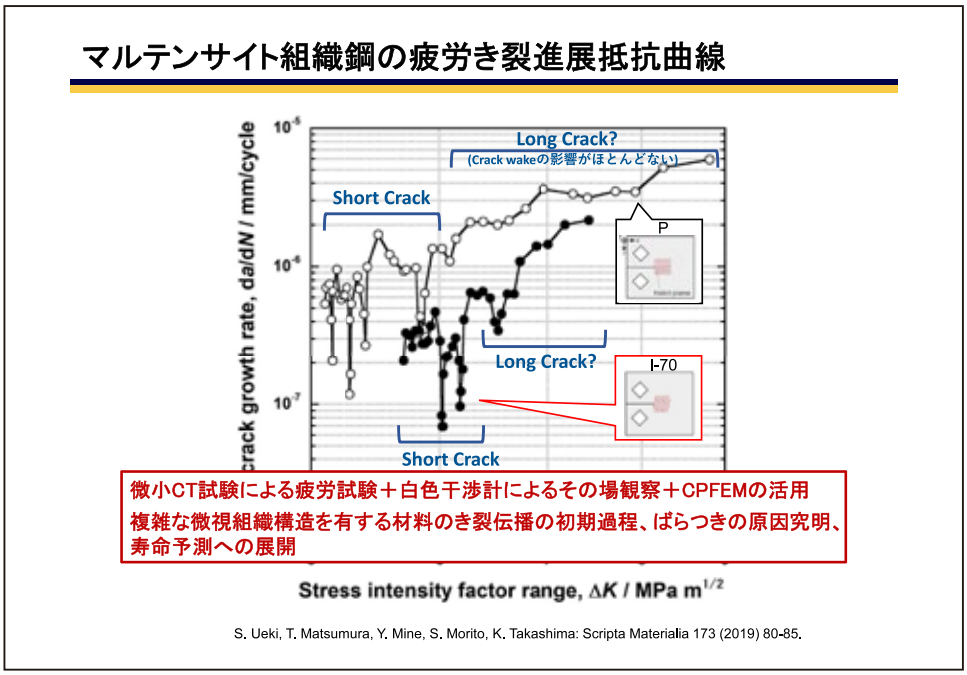


図4–2–8　　疲労き裂進展抵抗曲線（2）

加えて、この領域はバルク試験片でのき裂伝播の第Ⅱa段階から第Ⅱb段階に遷移する過程に相当しているとも言えることから、ここで示した微小疲労試験法は、この領域におけるき裂伝播機構の検討にも有益であると言える。

一方、データサイエンスに基づいた疲労寿命予測のためには、迅速な試験法、疲労試験のハイスループット化などが必要になると考えられ（図4–2–9）、現在、このような条件を満足できる試験法の開発を進めているところである。

付録：データサイエンスに基づいた疲労寿命予測のための迅速試験法

データサイエンス（データベース）を活用した疲労寿命予測のためには、基礎データとなる疲労試験を数多く行う必要がある。

問題点：疲労試験には時間がかかる

↓

疲労試験のハイスループット化

1. **荷重繰り返し周波数を上げる** 超音波疲労試験は× 試験片の小型化
2. **一度に多くの試験片で疲労試験を行う** 通常は試験片1つに試験機1台
3. **試験片は単純形状（一度に多数の試験片を作製）** CT試験片は×
4. **試験片の取り付け、負荷方法も簡単に** 引張ー引張試験は×
5. **既存の試験機でも使用できる**
6. **き裂伝播試験も可**

上記をすべて満足できる試験法が求められる。

図4–2–9　疲労寿命予測のための迅速試験法

我々はこれまで、微小寸法材料の機械的性質及び変形挙動の評価が可能な試験機の開発を世界に先駆けて行うとともに、その試験法の国際標準化を進めてきた。さらに、材料を構成する階層的組織から微小試験片を切り出した材料試験を行うことで、構成組織レベルの局所的な変形挙動及びメカニズムを明らかにしている。これらの成果は、マクロとミクロの機械的性質をつなぐマルチスケール的な材料強化設計の基盤構築へと繋がっており、複層組織材料の設計を大きく革新させる手法として期待される。

また、本研究で提示した微小CT試験による疲労試験、白色干渉計によるき裂先端のその場観察に加え、結晶塑性有限要素法をうまく活用することによって、複雑な微視組織構造を有する材料のき裂伝播の初期過程の解明、ひいては最終的には寿命予測への展開が可能ではないかと考えている。

本研究に関連する参考文献は、下記のresearchmapを参照願いたい。
https://researchmap.jp/read0059068（2022年3月14日アクセス）

4.3 超高サイクル疲労における内部微小き裂の非破壊評価

中村 孝（北海道大学 大学院工学研究科 教授）

「超高サイクル疲労における内部微小き裂の非破壊評価」というタイトルで話題提供を行う。初めに超高サイクル疲労に関する特徴と課題、そして、国内外の研究情勢について簡単に説明した後に、我々の研究成果の幾つかを紹介する。

図4–3–1はいわゆるS－N曲線であり、通常の高サイクル疲労（灰色の実線）の領域では10^7回程度で試験を打ち切り、それまでのデータから疲労限度を求めることが行われる。しかし、この様にして得られた疲労限度より低い応力においても、10^7回程度を超える領域まで実験を続けていくと、いずれ破壊が生じる（赤い実線）という現象が近年報告されるようになった。これが超高サイクル疲労あるいはVery high cycle fatigueと呼ばれる問題である。超高サイクル疲労は、高強度鋼、チタン合金あるいは強度を高めた鋳鉄など、高強度材料に共通して現れ、材料の内部を起点として破壊が生じるという特異性を有する。

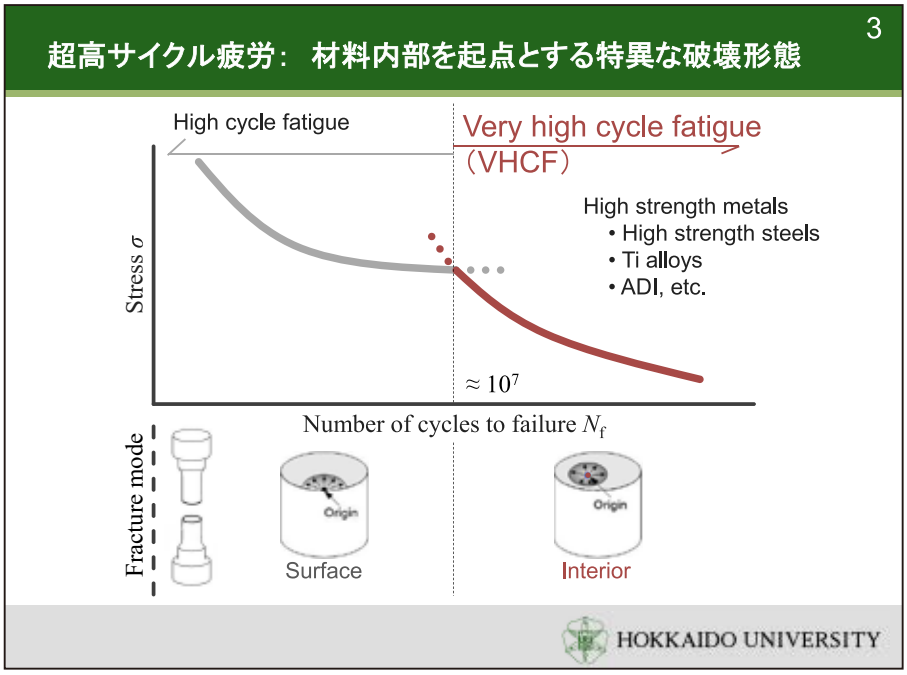


図4–3–1　　超高サイクル疲労：材料内部を起点とする特異な破壊形態

図4–3–2は超高サイクル疲労により、材料内部から破壊した（$\alpha+\beta$）チタン合金の破面写真である。試験片の内部に起点があり、これを拡大すると10 μmぐらいの小さな平坦面（ファセット）が観察される。これは組織のα相に対応しており、基本的にこのようなα相が破壊の起点になると考えられている。しかし、破面観察だけでは、どのα相が試験片を破断させる主き裂の起点になっているか、また、いつき裂が発生し、どのように進展しているかは全く分からない。これらを明らかにすることが我々の研究目標の一つである。

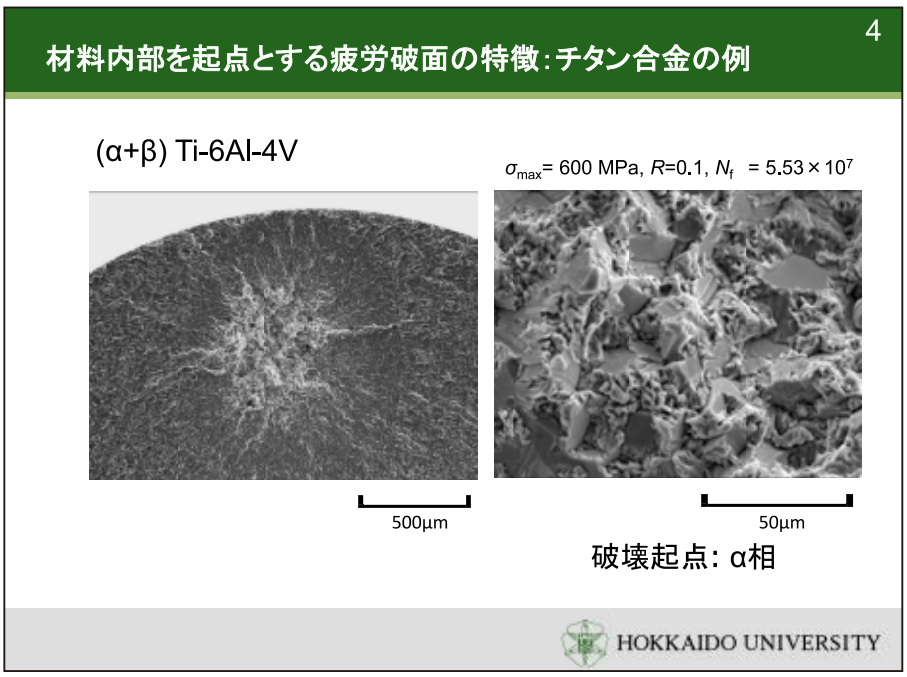


図4–3–2　　材料内部を起点とする疲労破面の特徴：チタン合金の場合

超高サイクル疲労の場合、試験機の繰返し速度を30 Hzとしても、10^9回のデータを得るためには1年以上かかり、実験を効率的に行うには高速の疲労試験技術が必要となる。また、材料の内部からき裂が発生するために、その観察を行うには高解像度の非破壊検出技術が必要である。これに対して我々はSPring–8の放射光X線CTを利用している。また、内部き裂は大気中とは異なる環境、恐らく真空に近い環境で進展していると我々は考えている。その確認のために超高真空疲労試験を行い、真空中で材料表面から発生するき裂のデータと、放射光X線CTで得た材料内部から発生するき裂のデータを比較する検討を行っている。実験技術の向上が研究の進展にダイレクトに寄与する。

国内外の研究情勢であるが、超高サイクル疲労の問題は日本ではかなり早くから検討され始め、1990年代にはすでに幾つかの研究会が設立されていた。先ほど島村先生からVHCF（International Conference on Very High Cycle Fatigue）という国際会議を紹介頂いたが、これは1998年にフランスで行われた後、ほぼ3年毎に開催され、3回目は日本の草津で行われた。このときは日本の研究者も非常に多く参加し、活発な議論が行われている。その後、中国、ドイツなどが主催した後、17年ぶりに今年、札幌でオンラインにて行われた。この分野の研究は、現在、中国、ドイツ、フランスなどで精力的に行われているが、この理由として、これらの国ではVHCFの研究に助成するファンドの効果が大きいのではないかと思っている。

この分野で論文誌として重要なIJF（International Journal of Fatigue）やFFEMS（Fatigue & Fracture of En–gineering Materials & Structures）において、時々、VHCFの特集号が刊行される。図4–3–3に示した赤字が日本人のチームの投稿件数で、黒字がそのトピックの件数である。最近日本では、この分野の研究が活発には行われなくなりつつある。

図4-3-3　　国内外の研究情勢

これらの状況を踏まえ、放射光CTによる内部き裂の非破壊評価に関する我々の研究例を幾つか紹介したい（図4-3-4）。これまで我々はSPring-8のビームライン20XUを使い、このビームラインの研究者と共同研究を行ってきた。最近では空間分解能がサブミクロンレベルに達するナノCTが開発されており、マイクロCTとナノCTを随時切り替えた観察ができるようになっている。試験片からディテクターまでの距離が約160 mになるので、このシステムは世界最大の顕微鏡と言われている。観察の流れとしては、ビームライン上で試験片を回転させながらX線を照射し、初めにマイクロCTを用いてき裂の試験内での位置や分布を測る。次に、注目するき裂を選択し、そこをナノCTにより高い分解能（100 nm程度）で観察する。き裂の形状、CTOD（Crack Tip Opening Displacement、き裂先端開口変位）、およびこれらの組織との対応などを調べる。マイクロCTとナノCTを切り替えながら、このような観察・実験を繰返すことで内部き裂における発生・進展メカニズムの検討を行っている。

供試材としては、デュアルフェーズのチタン合金とシングルフェーズのチタン合金（この2種類は、前述した結晶粒に対応するファセットを起点としてき裂が発生するタイプ）、および析出硬化型ステンレス鋼（これは超高張力鋼の一種であり、材料に含まれる微小な介在物が起点となるタイプ）の3種類を代表として用いる。これらにおける個々の疲労破壊のメカニズムを明らかにすることにより、最終的には、材料によらない普遍的な評価法の確立を目指している。

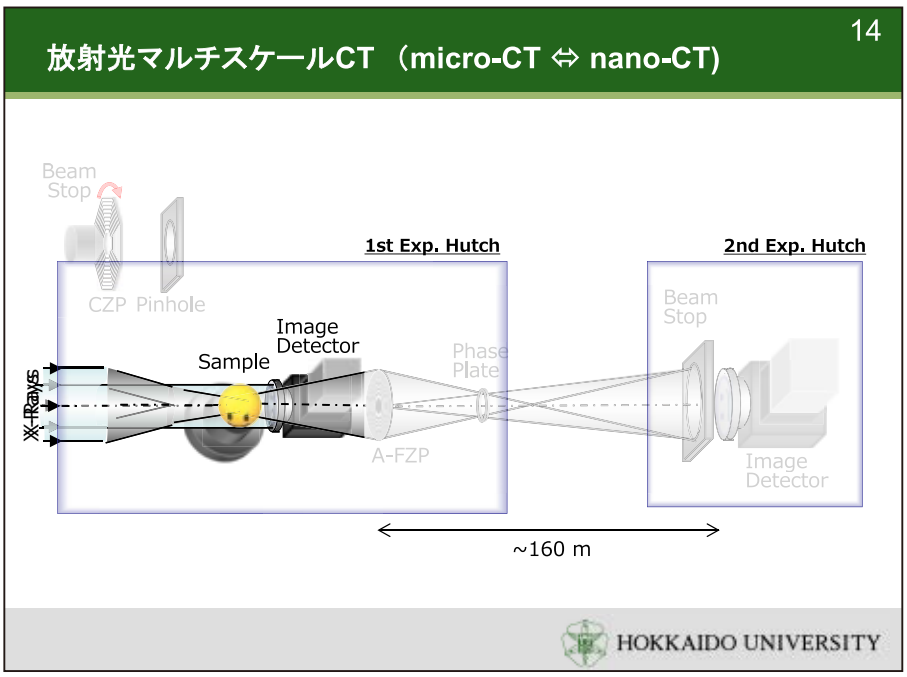


図4–3–4　　放射光マルチスケールCT

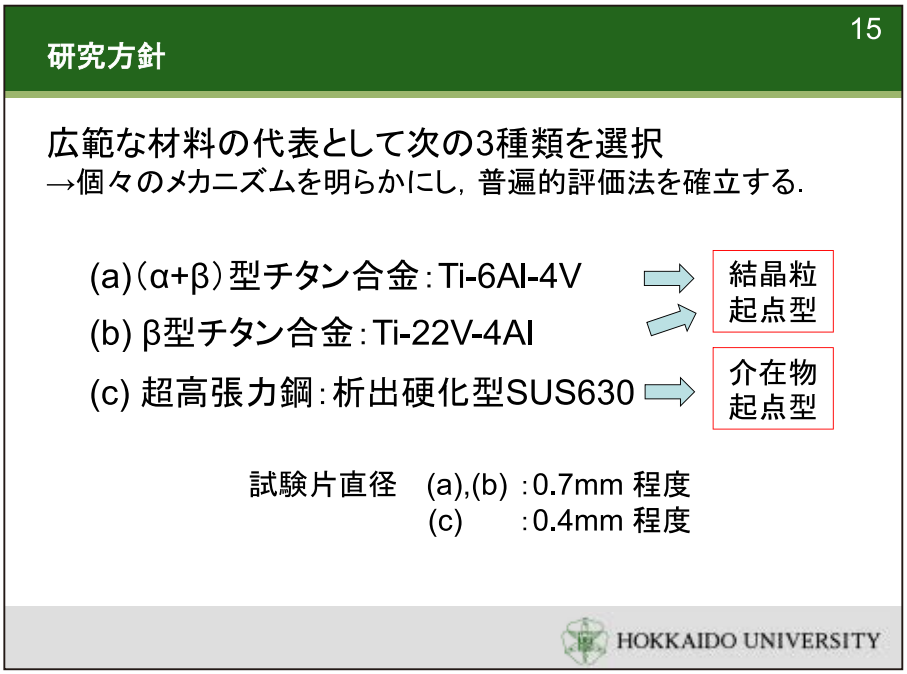


図4–3–5　　研究方針

並行して、高速ピエゾ疲労試験機を開発している。これは修士の学生が2年間かけて設計・開発したものであり、疲労試験中でのin–situ観察を可能としている。 SPring–8のビームライン上に設置し、疲労試験と観察を繰返すことができる。今年より稼働を始めているが、チタン合金では直径0.7 mm程度、SUS630の場合は直径0.4 mm程度の小径疲労試験片を用いる必要がある。

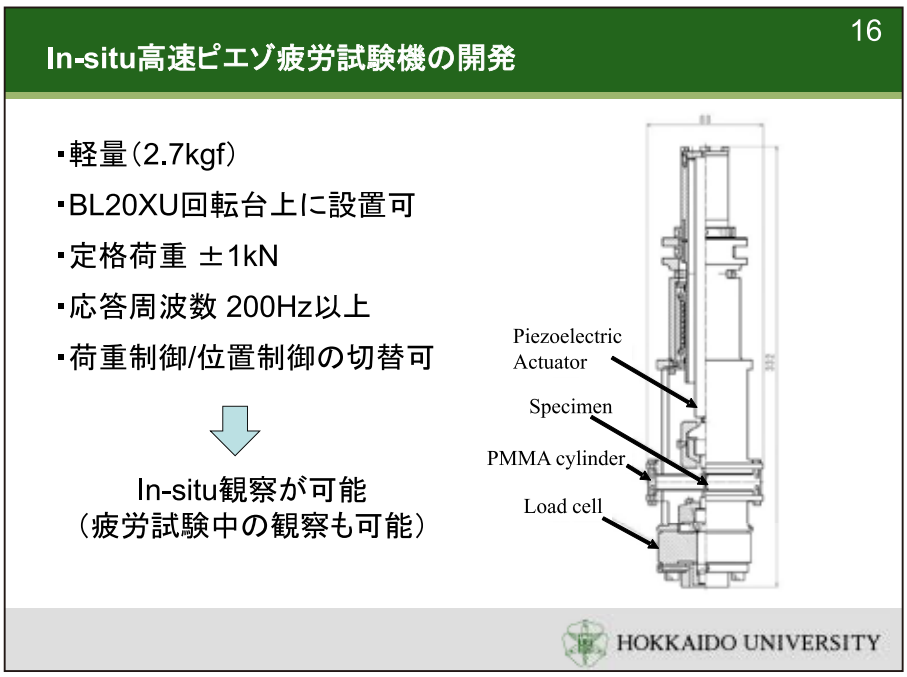


図4–3–6　　In–situ高速ピエゾ疲労試験機の開発

図4–3–7はナノCTによる3Dイメージで、表面き裂と内部き裂の観察例である。内部き裂も表面き裂も荷重軸とある程度、傾いた平坦な様子が観察される。これらが先ほど述べた微小平坦面（ファセット）に対応することがよく分かるようになった。

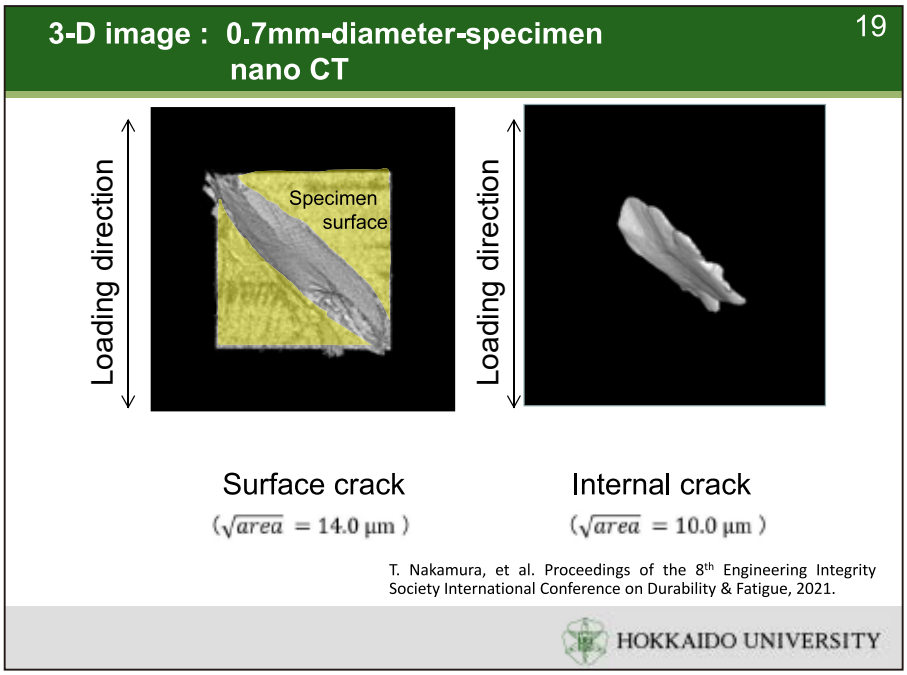


図4–3–7　　3次元イメージ：直径0.7 mmの小径疲労試験片のナノCT像

図4-3-8は内部き裂のナノCT像（右）とSEM組織写真（左）を比較した例である。内部き裂はα層の中に発生し粒界付近で止まっている様子が認められる。β層も識別できており、SEMに近いレベルで内部き裂の非破壊観察ができるようになっている。

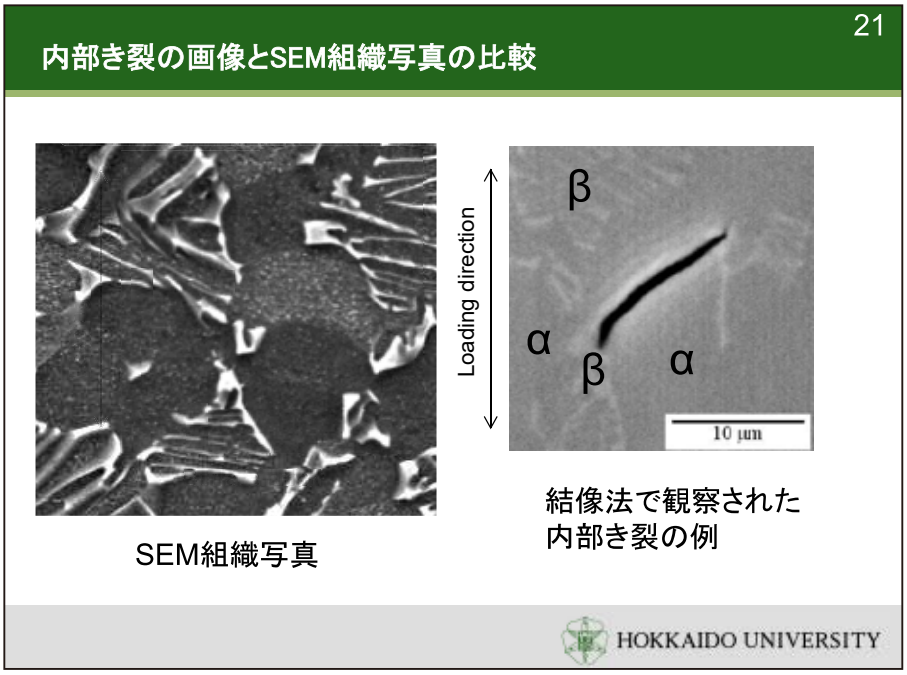


図4-3-8　　内部き裂の画像とSEM組織写真の比較

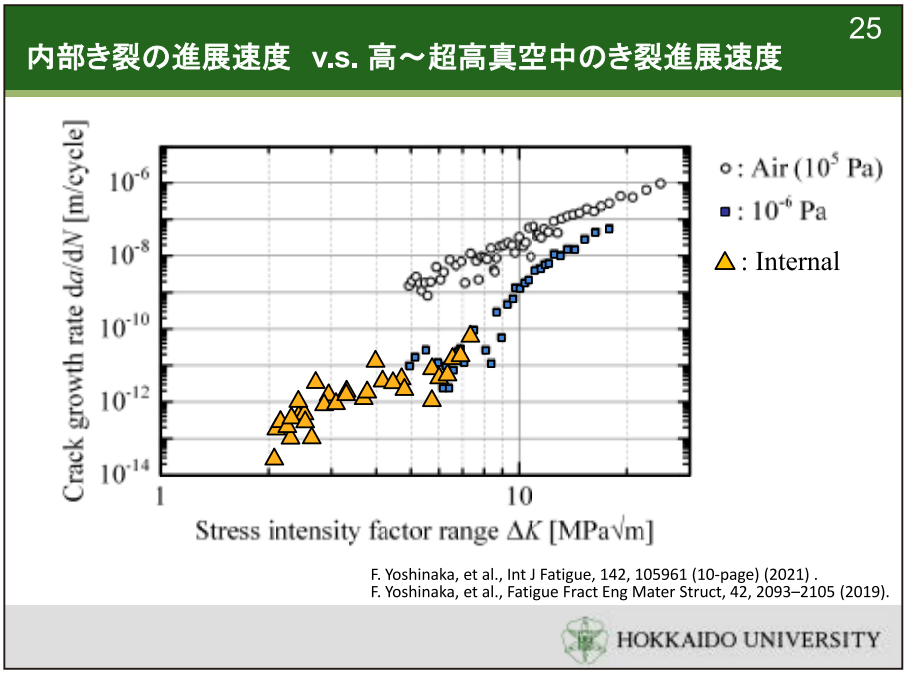


図4-3-9　　内部き裂の進展速度 vs 高～超高真空中のき裂進展速度

超高真空疲労試験機で得た、表面き裂の真空中での進展速度を測定した結果を図4-3-9に示す。○が大気中で、■が真空中（10^{-6} Pa）である。 SPring-8で測定した内部き裂のデータをここに載せると、10^{-6} Paの真空圧力のき裂伝播速度のデータとほぼ一致する。このため、このような高真空中での疲労試験により、内部き裂の進展特性が模擬できると考えている。

このようなことをいろいろと行っているが、今後はβチタンや析出硬化ステンレス鋼にも適用していく予定である。我々のような実験的研究は、実験を行って現象を観察・把握し、仮説を立てて、その普遍化を目指すという流れで行われる。この中でも、特に、①実験をきちんと行う、②現象をしっかり観察し把握する、③現象に基づいた仮説を立てる、④普遍化を真剣に目指す、ということが重要である。例えば①では、荷重は正確に試験片に負荷されているか、曲げ応力を発生させずに真っすぐ引張圧縮できているか、などの基礎的な部分をしっかりと詰める必要がある。このあたりは研究の本質とは関係ない試行錯誤の世界のように思われることもあるが、我々はこのような部分こそ泥臭いが重要なプロセスであると考えている。当研究室では、このようなプロセスを学生の教育に積極的に利用している。ただし、こういうところを自分たちできちんと行おうとすると、お金もかかるし、時間もかかるので、なかなか、やりにくくなってきているのが現状である。

我々は、上記の中で①や②くらいまでは何とかできるようになったと思う。しかし、今後、③、④をきちんと行なうには、材料力学や材料強度学が専門の我々の他に、多くの分野の研究者・技術者の協力が不可欠であり、また、予算的な支援もさらに必要になってくると考えている。

4.4 疲労データベースの構築と課題

古谷 佳之（物質・材料研究機構 構造材料研究拠点 グループ長）

疲労データベースという観点から、構築と課題について話をする。内容としては、まず我々の疲労データシートの概要を説明した後、それに関連する研究と、課題について説明する。

我々の疲労データシートという事業は、プロジェクトとして40年以上継続しており、かなり歴史の長いプロジェクトである。代表的な材料、実際に使われているもののほとんどを網羅できている（図4–4–1）。

ただ、このプロジェクトは40年間順風で進んできた訳ではなく、例えば1995年には一度やめている。その後やはり必要ということになり再開した。その後も維持はするが補強はしない状態で徐々にじり貧になっていっている状況である。2012年には高温と溶接継ぎ手の2つについては維持できず休止となり、現状は基準疲労だけを行っている状況である。

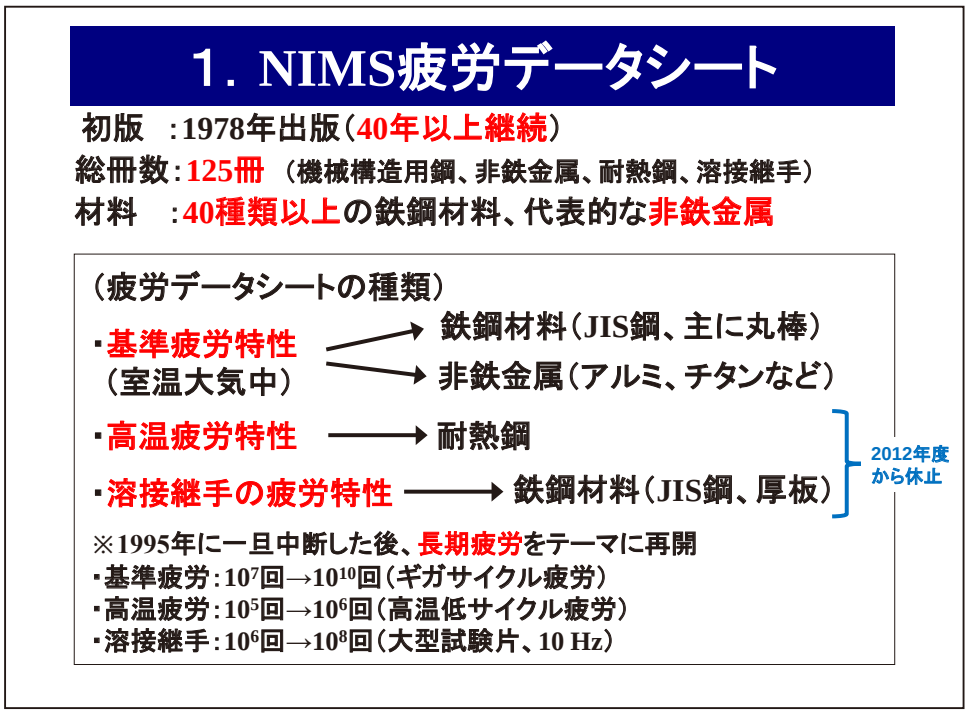


図4–4–1　　NIMS疲労データシート

データベースをつくることは、データをつくる工場みたいなものなので、研究要素があまり少ないとのイメージがあり、このため研究者としてはとっつきにくい。しかし、データベースづくりにもいろいろな研究要素はあることをお話ししたい。

今までやったことのない条件でのデータが欲しいときに、その条件で実験をするための実験技術が必要になり開発要素が生まれてくる。例えばギガサイクルまでの実験では加速試験の開発を行ない、これをデータシートづくりに実際に応用している。図4–4–2のように10^{10}回の疲労試験を行うには、100 Hzでは3年掛かるが、20 kHzだと1週間で取得できる。高強度の金属材料（高強度鋼、チタン合金、etc）では、加速試験の有効性が確認されている。

またデータが出てくれば、それを解析することによりいろいろな学術的な知見、例えば予測式とか、そういったものを導き出す研究も当然考えられる。

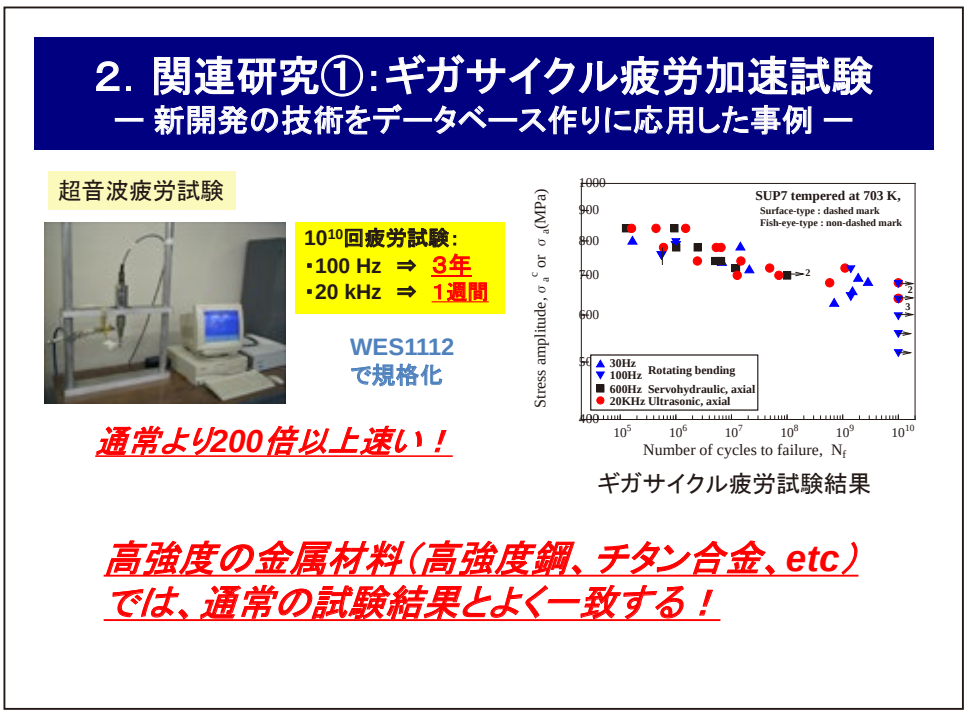


図4–4–2　　関連研究①：ギガサイクル疲労加速試験

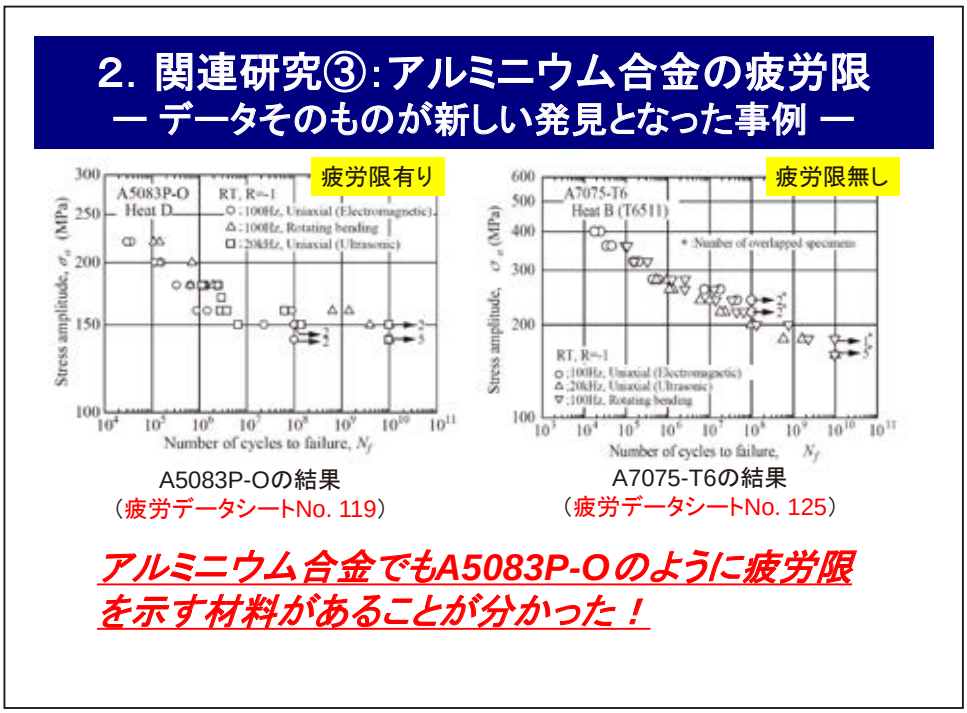


図4–4–3　　関連研究③：アルミニウム合金の疲労限

次に、今までやったことのない条件や材料での実験を行うので、当然それ自体で新しい発見が見いだされることもある。例えば図4–4–3はアルミニウム合金の疲労試験の結果であるが、従来疲労限度はないと言われていたアルミニウム合金に対し10^{10}回まで3年間かけて実験すると、ある材料ではきれいに疲労限が現れるが、別の材料では従来どおり疲労限はないことが判った。このように新しい知見が出てくるようなこともある。

10年ほど前にSIPの研究を始めたときから、データ駆動型研究のような計算との融合の観点からの研究も

始めた。実際にやってみると既存のデータでは足りないところがたくさん出てきて、例えば疲労寿命予測をしようとした場合には、個体の疲労寿命だけではなくて、途中の微小き裂の発生とか、微小き裂の伝播とか、そういった途中過程のデータも必要という話になった。

ただ、き裂発生や微小き裂の伝播などの観測は大変な手間がかかるため、それを自動でできる実験装置を開発するところから始めた。図4-4-4に示す自動で観測できる装置をつくって、通常の疲労試験を行いながら同時に微小き裂の発生や伝播のデータも押さえていき、微小き裂の発生・進展のデータベースをつくることができた。

つまり、データ駆動型の寿命予測や計算との融合というのは、比較的最近になって注目されるようになったトピックであるが、そのようなものにデータベースを活用するためには、既存のデータをそのままではなくカスタマイズする必要がある。それに特化したデータベースを新たにつくる部分に研究要素も出てくることが分かった。

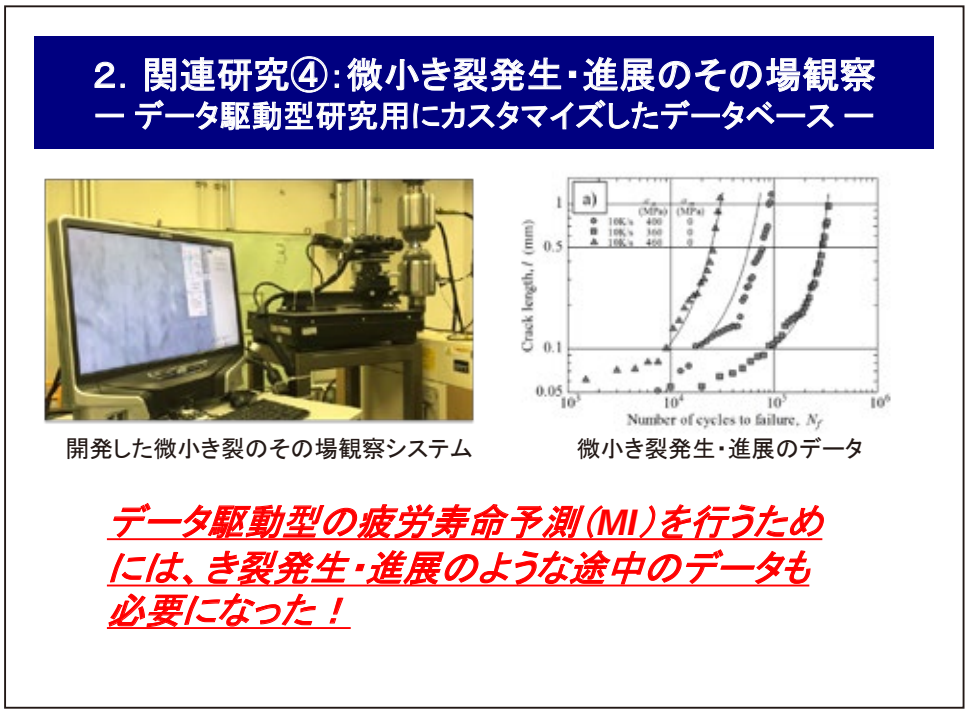


図4-4-4　　関連研究④：微小き裂発生・進展のその場観察

関連研究についてのこれまでの話をまとめると、図4-4-5に示すように、要は最もオーソドックスなやり方としては、技術開発、試験技術の開発を行い、それでデータベースをつくり、そのデータを使って寿命予測技術をつくる形である。しかし計算との融合という点で考えると、それに特化した、カスタマイズしたデータベースが新たに必要となるので、いろいろな試験技術の開発も必要となり、実験も必要になる。

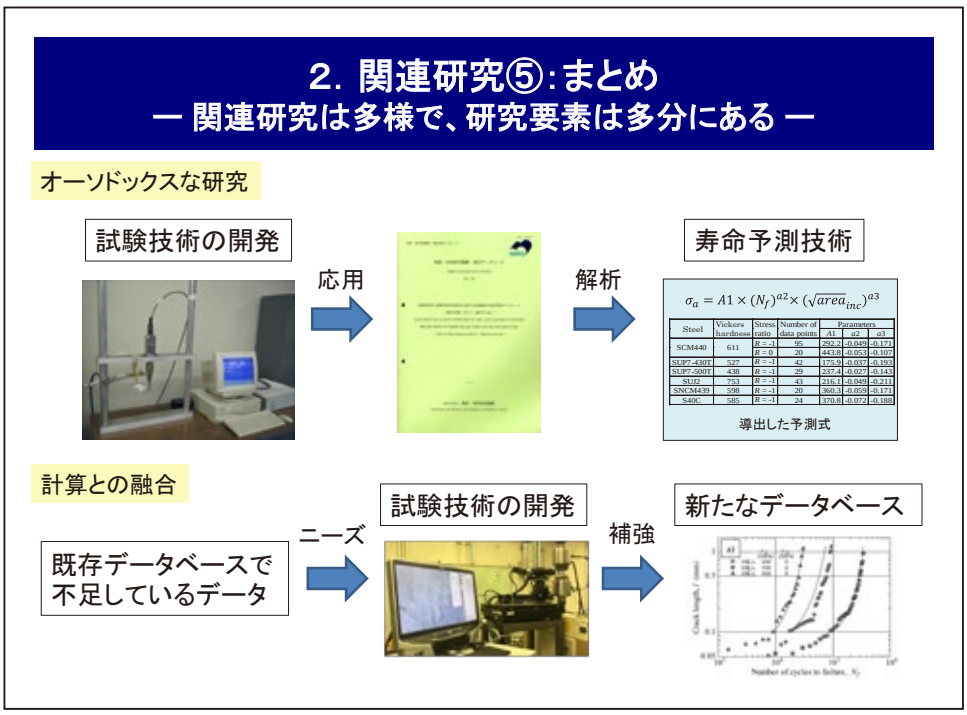


図4-4-5　　関連研究⑤：まとめ

メインポイントだと思うが、課題についてお話ししたい。我々が今、抱えている一番の悩みは人手である。疲労データシートに記載されているエグゼクティブスタッフの数は、単調に減少していて絶滅曲線をたどっている状況である。内訳としては、研究者ももちろん少なくなっているが、大きいのは実験を補助するテクニカルスタッフ、大学でいえば助教の先生、むしろ技官のような人員と思うが、そういうテクニカルスタッフの数が少なくなっている。そこもなかなか補強してもらえないところが一番きついところである。

恐らく大学の講座で疲労研究を行っているところが少なくなり、学生自身の数が減っていることもあるとは思うが、多分、助教の先生もなかなかつけてもらえず、技官などは到底夢また夢みたいな状況もあるのではないかと思う。そのような補助していただける人たちの人員の減少、ここが非常に大きいのではないかと思っている。

次に、もう少し研究の中身のほうに入っていくと、データベースという観点で考えたときには画像データが一つの着眼点になると思っている。従来、我々がデータベースとして取得しているのは基本数値データになるが、写真などの画像データもある。数値データは劣化せずそのままデジタル化できるが、破面写真や組織写真などは経年劣化する。そもそも古い画像データは解像度が低いというような問題もあるので、そのような画像のデータをデータベース化していくところで課題があると感じている。例えばフラクトグラフィを行うには、破面のデータのデータベースが必要になるが、こういったものを再構築していくことも必要であろう（図4-4-6）。また、これを解析して自動判別機をつくるような研究もあり得るだろうと思っている。

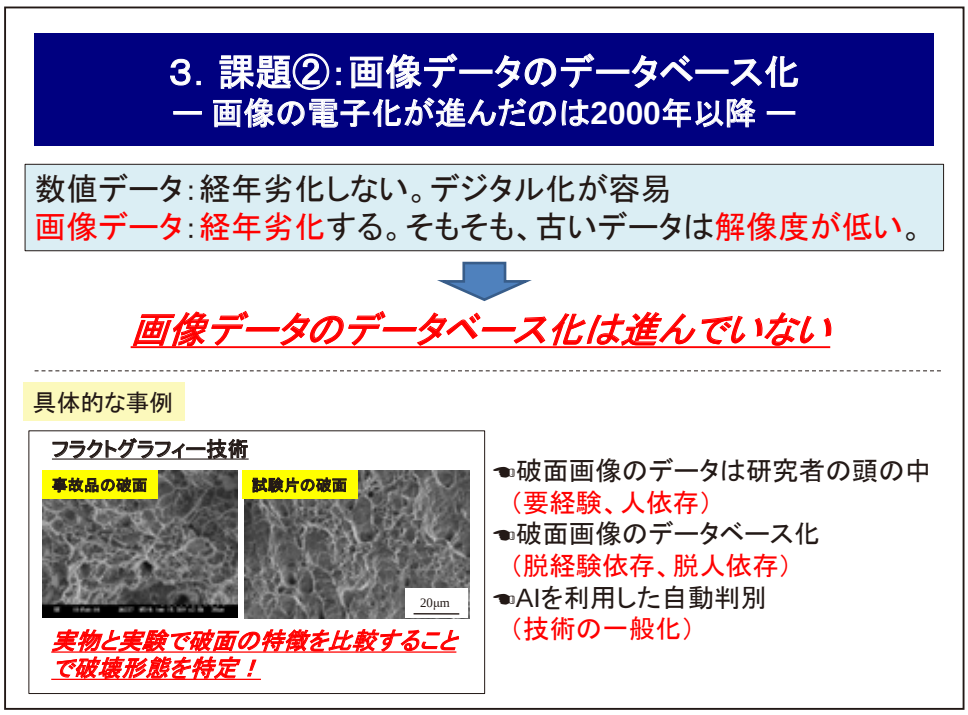


図 4–4–6　　課題②：画像データのデータベース化

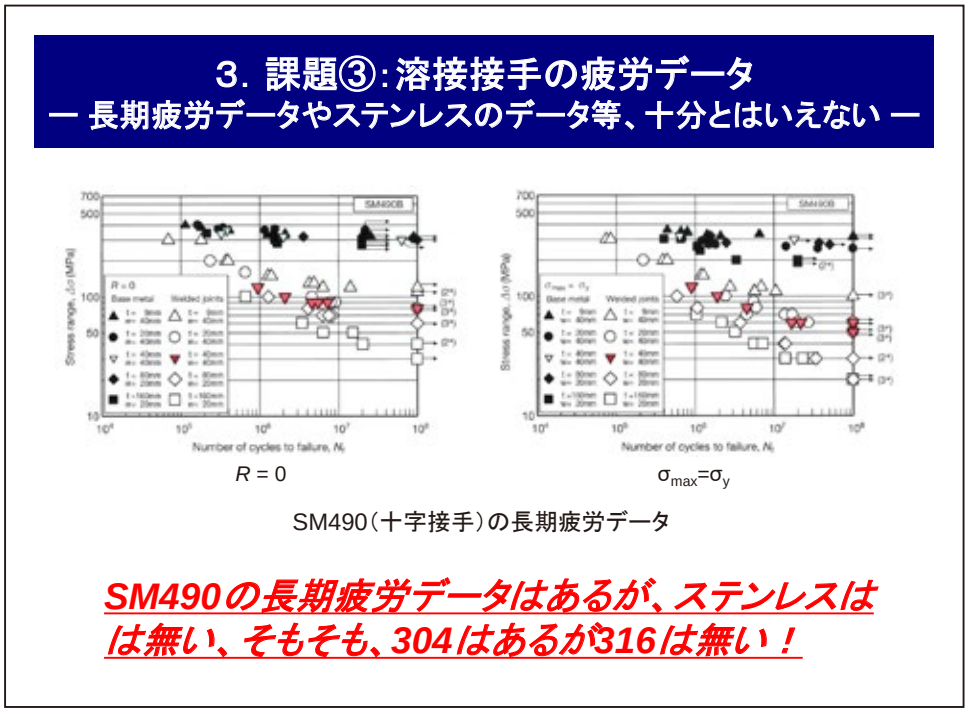


図 4–4–7　　課題③：溶接接手の疲労データ

具体的な研究課題として、材料方面では、今の状況で考えると思い付くのは積層造形材などであるが、もっとベーシックなところにも研究課題はあると思っている。その一つとして例えば溶接継ぎ手などもある。溶接継ぎ手の研究はかなり膨大にされていて、データも膨大にある。しかし実際には、例えば図 4–4–7 に示すように、SM490 のようなフェライト系の溶接継手の疲労データはたくさんあるが、ステンレスのオーステナイト系の 304 や 316 などはフェライト系に比べると少ない。そのような観点から考えると、304 や 316 のような研究

をテーマとして取り上げるのもあると考えている。

まとめると、図4–4–8に列挙する3項目となる。

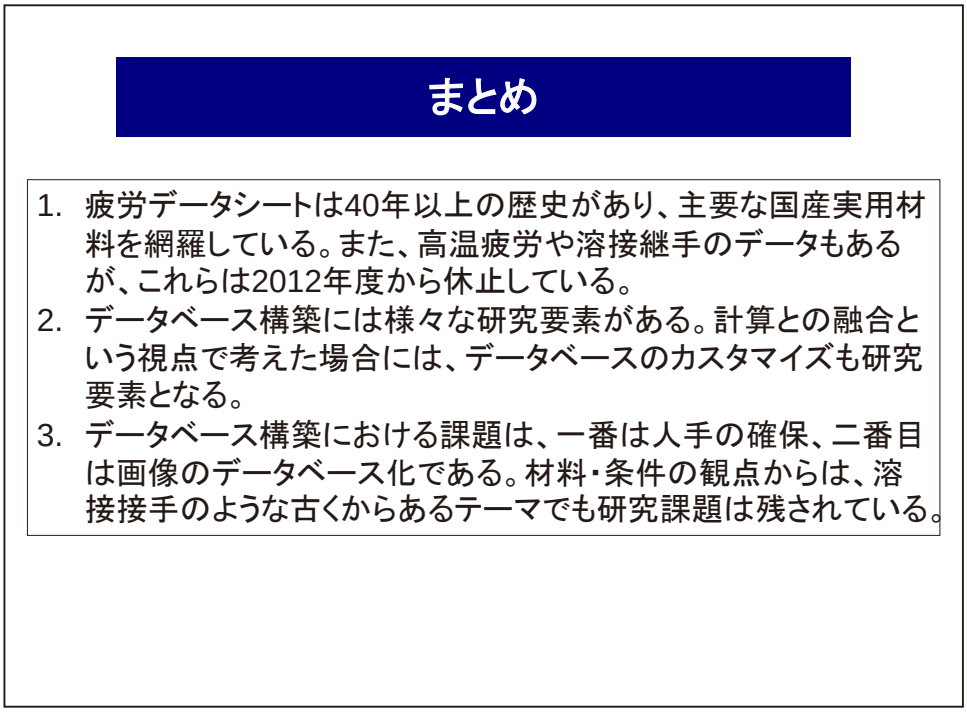


図4–4–8　　まとめ

【質疑応答】

Q：先生から人が減っているという生々しいデータを見せていただいたが、疲労を行なう人材が減っているということは実験技術のスキルそのものも失われつつあるという理解でよいか？

A：そのとおりである。非常に困っている。本当は絶滅寸前なので、残っているわずかな技術も失われる寸前だと思って良い。

4.5 コメンテータからのご意見

三浦 直樹（電力中央研究所 首席研究員）

産業界サイドの人間として、今回の検討に入れるとよいポイントを主に三つコメントする。

一つ目は新しいアプローチについてである（図4-5-1）。基本的な疲労の理解は確立していて、こういう理解をすれば疲労評価や寿命評価が可能だと言える現状かと思う。一方で、支配パラメーターは、それこそ無数にあり、その影響が体系的に明らかにされていない。こういう条件のときはこの因子が効いて、この因子は無視していい、というようなことが体系的には分かっていない現状だ。例えばモデルをつくる場合、モデルで考慮した因子の影響はモデルに反映されるが、モデルで考慮されていない因子をどう考えればいいのか。そもそも、それは考える必要があるのかどうか。そういうところがよく分かっていないと感じている。今回の検討の目玉として、例えば機械学習やデータ同化といった新しいアプローチが、それを埋めるのに役立つツールとなるのではないかと考えている。

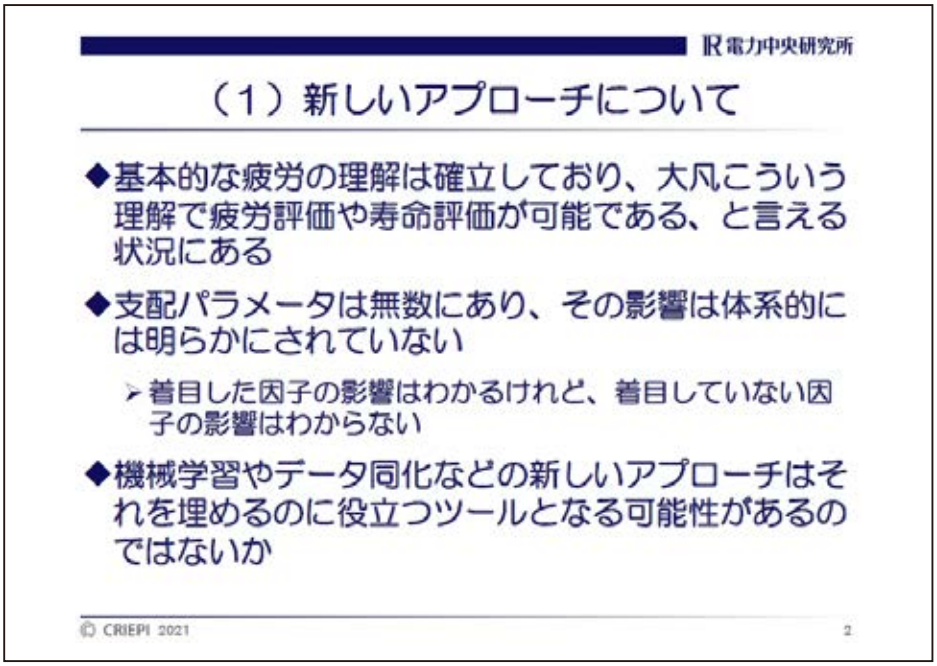


図4-5-1　　新しいアプローチについて

二つ目はばらつきの取扱いである（図4-5-2）。一つ目のコメントと相反する部分もあるが、仮に支配因子を全て理解できたとしても、再現性はおそらくないのではないかと思っている。これは疲労特性の本来的性質がばらつきにあることに起因している。評価法を精緻化して、ばらつきはそれなりに小さくできるけれども、小さくできるばらつきは限られている。ミクロ組織やナノ組織の多様性に起因する破壊の発生や、進行のばらつきは本質的にゼロにできないだろう。こういった現象をモデル化するとき、モデルの妥当性をどう担保するか。ばらつきを理論的、数学的にどう取り扱うかが重要な視点の一つだろう。

三つ目は活用できる成果の創出についてである（図4-5-3）。現場の発電設備のトラブルについて相談を受けることが時々ある。まだ現在でも現場で疲労が問題になることがある。しかし、教科書に載っているくらいの単純なロジックで問題になることはまずない。

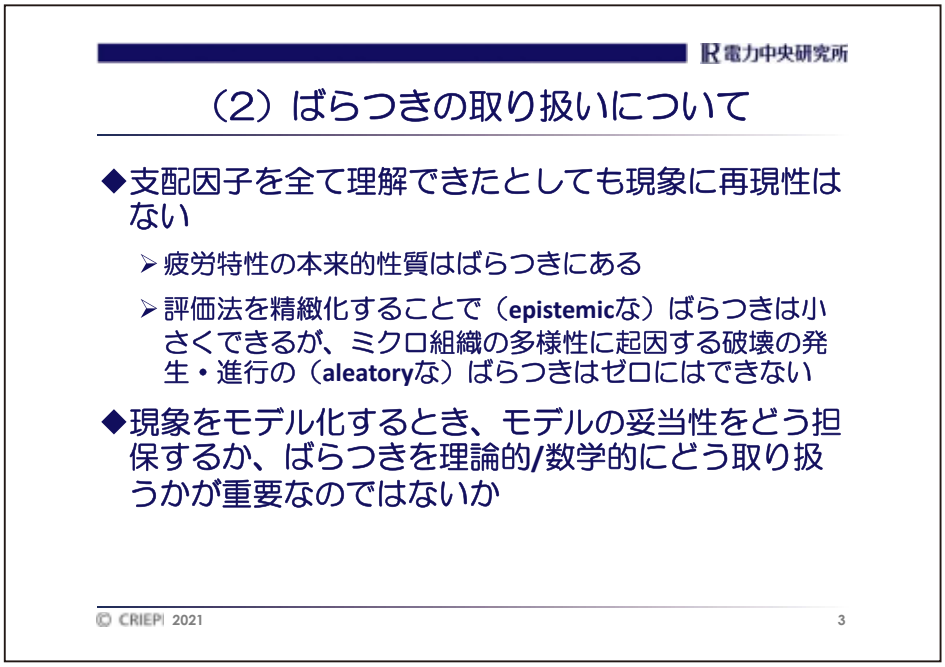


図4-5-2　　ばらつきの取り扱いについて

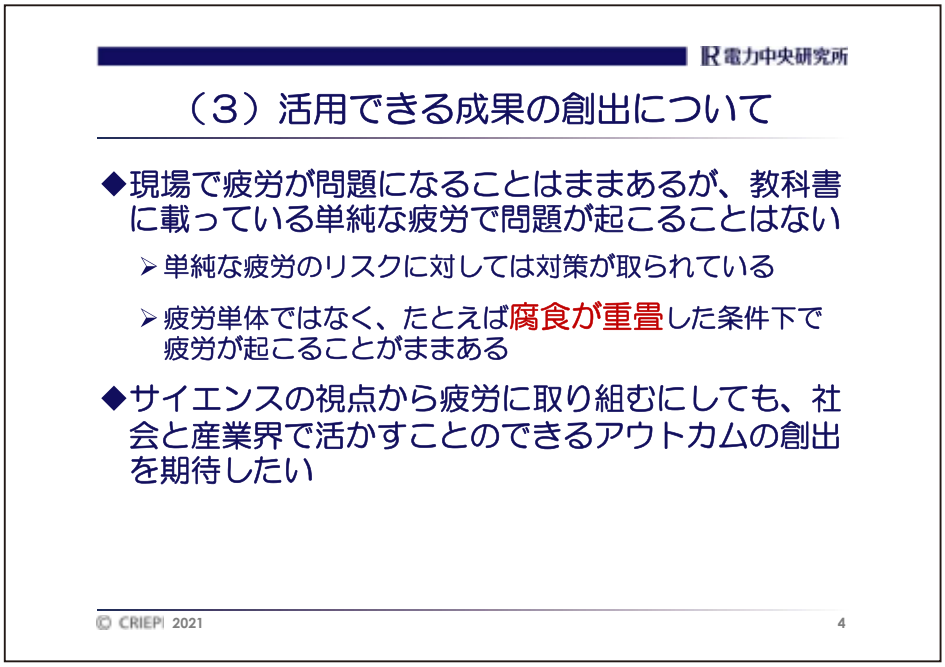


図4-5-3　　活用できる成果の創出について

これがリスクだねと思われるものは、当然ながら、あらかじめ設計や運転条件で対策が取られていて、問題にはなり得ない。実際に現場で起こっている問題はクリーンな状態での疲労ではない。もっと複雑で、さまざまな外乱が重畳したような状況だ。一例として、腐食環境で疲労が起こるとき、その寿命予測や破壊予測はどうするか。既往研究に基づいてこう考えられるといった単純な話ではなくなってきている。注意してほしいことだが、これは決してそういった実際の状況を考慮したメカニズムの解明でなければ意味がないと言っているわけではない。ただし、メカニズムの解明の先に、現場に適用する、あるいは社会に実装することを念頭に置く視点は必要だ。

宮崎 克雅（日立製作所 研究開発グループ 主管研究長）

私からは、普段、産業界に身を置く者として思うところをお話しさせていただこうと思う。特に、マテリアルに関して、サイエンスに基づく疲労設計の必要性について述べさせていただく。まず、産業界で一体どのように、疲労に関するナレッジを活用しているか、疲労設計を行っているか、また、その課題は何かという観点から御紹介させていただく。

プロダクトの疲労設計に活用する経験則の例：

我々、日立グループでは、様々な製品を製造している。原子力発電プラントから、昔は半導体、今はパワーデバイスまで、大きいものから小さいものまで設計、製造しており、モノづくりという観点で、コングロマリットディスカウントをコングロマリットプレミアムにするために、様々な研究開発を進めているという状況である。

このように、多くの製品、プロダクトを製造しているが、破損モードとして疲労を考えた際には、疲労設計に、多くの経験則に基づくナレッジを活用している。例えば、Mansonの共通勾配法により推定される疲労曲線、平均応力が作用した際には修正Goodman線図を活用する。また、これも一般的な知見であるが、例えば疲労限度は引張強さの半分程度といったような知見を使いつつ、疲労設計を行う場合もある。さらに、特にトラブル対応等に、村上敬宜先生が提案された$\sqrt{area}$パラメーターを用いて定式化された微小欠陥を含む部材の疲労限度評価式がある。この式を使って、トラブルの発生要因などの解釈を行う。プロダクトの疲労設計、特に設計疲労曲線の設定には、これまでの様々な研究で蓄積された知見に基づく経験則を、種々の場面で使用しているのが現状である。

溶接構造物の設計疲労曲線：

ただし、実際は経験則だけでは十分ではない。その例として、先ほどNIMSの古谷さんからもお話があった、溶接が一つのキーワードになる。溶接構造物の設計疲労曲線とは一体どのようなものか、ということを紹介させていただく。

溶接構造物の疲労設計には、継手の強度等級分類を用いる。この継手の強度等級分類は、日本鋼構造協会が鋼構造物の疲労設計指針に定めたものである。例えば、十字溶接継手を例にとると、強度等級としてDやE、Fがあり、その中に数字として100や80とある。これは継ぎ手の止端を仕上げた場合、もしくは仕上げなかった場合に対して、DやEという等級を使いなさい、ということを示している。このDやEの等級は溶接継手の疲労試験結果から定めており、数字は繰返し数200万回における疲労強度に相当する。

指針の解説には、実際に、継手の疲労試験の結果が示されているが、疲労の研究をされている先生であれば、疲労試験結果がこんなにばらついていていいのか、と思われるかもしれない。しかしながら、実際に溶接継手を製作して、多くの疲労試験を実施して、試験結果の下限に近いライン、もしくは95 %限界のラインから溶接継手の疲労曲線を設定しているのが、この業界の現状の方法である。この溶接継手の疲労設計の方法は、海外も同じ方法を適用している。国際溶接学会（IIW：International Institute of Welding）の方法を国内でも踏襲しながら、溶接継手の疲労曲線を定めている。

なお、これだけデータがばらつく理由は当然あり、例えばビード形状による局部的な応力集中、継手に含まれるような小さな傷の影響、応力の方向性、また強度レベルの違いの要因となる金属組織の影響、さらに、溶接残留応力の影響も、この設計疲労曲線に全て押し込んまれている。これが溶接継手の疲労設計に用いる設計疲労曲線である。一例だが、我々は、建設機械をはじめとした溶接構造物の疲労設計を、このような考え方で行っているのが実際である。

製造プロセスを考慮すべき疲労試験結果：

現状の疲労設計に対してサイエンスに基づくアプローチが必要であるということを話したい。我々の研究で

はなく大変恐縮だが、製造プロセスを考慮すべき疲労試験結果の例として、先ほど、古谷さんから御紹介いただいたNIMSの西川嗣彬さんの論文の一部を紹介する。

西川さんは、産業界の課題を理解した大変良い研究をしておられて、溶接継手の疲労評価にアプローチされている。溶接継手自身を試験片として用いるのではなく、例えば最高到達温度や冷却速度を制御したような熱処理を行って、溶接熱影響部（HAZ）を模擬した試験片を作って、その特性評価、さらにはサイエンスに基づくアプローチを進められている。例えば最高到達温度を変えたような試験片を準備して、EBSD（電子後方散乱回折法）により結晶粒のパターンを観察した結果が示されており、明らかに結晶粒の様相、結晶粒の大きさを含めて異なることが見て取れる。

これらの結果と今まで我々の知っている知見を比較すると、例えば引張強さと硬さの関係は、これまでの知見と同じような関係式で表現されるという結果を得ている。しかしながら、疲労限度と引張強さの関係になると、これまでの知見である疲労限度は引張強さの半分というものから逸脱したデータが出てくるということを確認している。

西川さんの考察によると、結晶粒サイズの影響を受けて、粗粒HAZの場合、初期き裂の進展速度が細粒HAZに比べて速い傾向を呈ことにより、このように疲労限度が低くなるような場合が出てくると結論付けられている。先ほどたくさんの疲労データから設計疲労曲線を設定する例を示したが、このようなサイエンスに基づくアプローチによって、現象を深く理解することができる。逆に言えば、経験則は万能ではなく、新しい材料、新しいプロセスに対して、サイエンスに基づくアプローチにより、疲労現象の理解をベースにした疲労設計を行う必要性が示唆される。

例えば金属付加造形（3Dプリンター）、アディティブ・マニュファクチャリングに代表されるような新たな加工プロセスに対しても、前述のサイエンスに基づく疲労設計、サイエンスベースドエンジニアリングの必要性が示唆される。

まとめ：

企業においては、プロダクトの設計に際して負荷に伴って発生する応力を、計算で評価している。それと同時に、疲労設計では、強度特性となる疲労曲線の設定に、材料力学をはじめとした知見を活用しているという状況である。ただし、経験則に基づく知見はそれを逸脱したような範囲、いわゆる加工プロセスや実環境という点で、これまでの知見を単純に活用することは難しい。その打ち手として莫大なデータを積み上げて拡張された経験則に頼っているというのが現状である。紹介した溶接継手の疲労設計指針は、まさにそのアプローチに相当すると私は理解している。

しかしながら、これに対して新たな打ち手が必要で、例えばサイエンスに基づく方法、すなわち、理論科学、実験科学、計算科学、データ駆動科学の4つのサイエンスに基づいて、疲労に関する支配パラメーターを同定することが期待される。これにより、効率的な疲労試験、ボリュームの少ない疲労試験が実現できるであろう。今後、新しい材料、新しい加工プロセス、さらには今後のプロダクトに想定されるアンモニア環境のような苛酷環境に応じた疲労曲線の効率的な設定に、このサイエンスに基づく方法を適用する必要があると思われる。疲労破壊防止に対しても、この役割を担うようなステークホルダーが一堂に会して、設定、共有した目標、ゴールを目指すコンソーシアムのような形が必要だと考える。もはや一民間企業で、この全てにアプローチすることには限界があると思われることから、コンソーシアム等を活用したアプローチが必要になると考える次第である。

高梨 正祐（IHI 技術開発本部技術基盤センター 主任研究員）

疲労に関しては民間企業の立場から、アプリケーション、研究成果をどうやって製品に適用するかが全てではないかと感じる。企業にとっては、出口を見据えることが必要である。これまでの話のとおり、全ての疲労に関する現象が解明されているわけではないが、それでも企業は製品を世に出さなければいけない。疲労の研究の成果を集めて製品にするが、全てが解明されていないため、どうしても不確実性がある。現状は過度に大きな安全率を製品に盛り込む。したがって、これでは競争にはならない。しかしながら、壊れるようなものを世に送り出せないので、分からないなりに安全係数を大きく取っている。

これに対して信頼性工学の視点がある。ばらつきの話。電力中央研究所の三浦先生からも話があったが、計算機の進歩とともに実験データが集まりつつあるので、信頼性工学が徐々に入ってきている。それでも自信を持ってこのくらいの破壊確率で壊れるとは言えないので、ある程度の不確実性を持って安全率を導入して製品を出すことになる。

そうした研究成果をいかに早く取り入れて、自社の製品に適用していくかが大事である。先ほどインタープリターという言葉があったが、同じことを感じている。技術の目利きができる人を企業内に育成できればいい。つまり、現状の研究成果がどこまで分かっていて、どこまでが分かっていないのか、どこまでなら適用しても安全なのか、そうした目利きを育成するのが大事である。

日立製作所の宮﨑さんの発表にもあったとおり、企業の中で特に基礎研究を実施するのは非常に困難なので、岸本先生もおっしゃっていた、若い人をドクターコースに入れて大学の先生と一緒に考えてみるような育成プログラムなどが必要である。

こうした目利きがいなくなると、環境の変化にも対応することができなくなる。金属材料の領域では、航空機エンジンに樹脂系の複合材料、セラミックス系の複合材料などが入ってきた。金属材料の延長線でいくのだろうが、目利きがいないと環境の変化にも対応できず、生き残れない。

最後にもう１点、分業化がものすごく進んでいる。実験、解析も完全に分かれてしまっている。特に、品質保証の観点から非常に厳しくなっている。従って、そのような分析や試験を大学の先生と一緒にできる、一緒に見る機会ができたらありがたい。

大学では基礎研究をずっとやるが、最後の出口としてアプリケーション、応用研究に特化した研究機関があると、企業としてもそこに乗りやすい。

5 ｜ 総合討議

総合討論では、主にこの分野の取り組むべき研究開発課題、研究推進体制、人材育成について討議を行った。主要な意見、コメントは以下の通りである。

■研究開発課題について

・疲労破壊を理解するためには、初期現象の解明、ミクロとマクロを繋ぐ部分の構築が重要という点は、コンセンサスが得られていると思う。少なくとも金属材料を対象とする場合はそこが問題である。現象が良く分かっていないので、モデル化も見えていないというのが現状ではないか。

・モデル化はひとつの知恵をまとめる作業であって、その前には現象を見ること、知ることが必要である。近年のナノ・マイクロレベルの微小領域の力学特性計測や組織分析の高解像度化などの実験・計測技術により、見ること、知ることができるようになったことが非常に大きい。

・現象が完全に分からなくとも、その現象の物理的な形態が分かり、関連するパラメーターが分かればある程度は推測でき、設計上の工夫もできるようになる。そうなれば、例えば疲労のあるものを設計する場合に、疲労試験の回数を減らすことができるかもしれない。そういうことが大きな技術的な発展だと思っている。そういう意味で基礎研究が重要で、企業とアカデミアの共同が必要である。

・疲労き裂は、き裂近傍の力学問題であることは間違いない。三次元的にき裂がどのように進展しているかを見ないと応力状態は分からないが、それが観察できていなかったところに今まで問題があった。それをブレークスルーできるツールが今あると思う。また微小き裂というのはミクロ組織に敏感であるが、そのミクロ組織の解析技術も今、格段に進歩している。これらをうまくコンビネーションさせた新しいツールによって疲労とは何かを正しく理解し、現象を把握した人たちが機器設計をしっかりするようになるという絵を望んでいる。

・モデル化の前ではしっかりとした実験を行い、現象を確実に把握することが重要であるが、現象が分かれば、その後は簡易的な手法と組み合わせて事例を増やしていくことも必要である

・数学との融合、モデルとのコンビネーションという意味では、先にある条件でのき裂のモデルを理論的に作り、条件の少し外側領域についてモデルから解を求めて、実験結果と突き合わせてモデルの適用範囲を検証・補正していく方法もあると思う。

・アカデミアでのモデル化は、フィジクスベースあるいはケミストリーベースのモデル化である。そこから如何に本質的な要素を落とさず、最終的には設計という最も簡略化されたモデルにするまでには、何段階か情報を落としていく過程が必要であり、そこは別の意味で非常に重要である。そこで活躍できる人材はどちらかというと企業の方が多いのではないかと思う。

・フィジクスベースのしっかりしたモデルがある程度できれば、それから情報量を落としていくのは機械学習などうまい方法があるのではないか。

■研究推進体制について（人材育成を含む）

・本当に製品の疲労破壊の問題を分かっている産業界とアカデミアが手を握って進めないと、個別問題の勉強だけで終わってしまうのではないかと危惧される。

・大学側が基礎を行って企業側がうまく使えば良いというのは駄目だと思っている。アカデミアの結果をいかにして実際の条件に当てはめてみるか、あるいはこれまでにない設計の条件をどのようにして基礎から立ち返って考え直すか、そういう部分が必要である。

・企業の人も参加してどのような環境、条件で疲労のメカニズムを見ていくかという議論ができることが必

要である。

・アカデミアと産業界を結びつけるには、双方の趣旨を解釈する人、「インタープリター」が必要である。アカデミアと産業界、それぞれ目的が違うので、ダイレクトに話をしても話の趣旨がずれてしまう部分がある。そういう意味で本当の問題を引き出すには、双方を理解して解釈する作業が必要である。

・企業での基礎研究が盛んだった頃に比べ、企業にアカデミアと互角に議論できるインタープリターとなり得る人材がいなくなっている。企業のインタープリターの育成は、産業競争力、基盤となる科学技術の飛躍的向上に繋がると思われる。

・今はアカデミアと企業の間でコミュニケーションがほとんどない。例えば企業の中の人材育成プロセスの一環で、若手がドクターを取るという観点で大学に入ってもらう。そうできれば、若い頃に大学の教員と一緒に仕事ができ、仕事を通して色々な物事の考えを双方で理解することができるのではないか。

・インタープリターの役割としては、アカデミアで創出された研究成果をこのようにして使うと産業界でもうまくいくという発進部分を大学側が行うことも必要ではないか

・本当の意味での人材の流動性をもう一度考える時期にあると思う。これは国が主導してもいいと思うが、大学だけではなく企業も含めて人材の流動を高める仕組みを本当に作らないと相互理解ができない。また非常に多様になっている問題に対して対処できなくなる。

・どんなスポーツもまずは素振りとか基本を知って、それから、それぞれに対処するように個人が動いていくものと思う。若い方は、素振りのような基礎となるものをしっかり身に付けることが大切で、そのための個人研究ができることが必要と思う。

・国の安全を守るための研究、国を維持するための研究である工学基盤は、常にデータを取りながら積み重ねなければならないが、日本は企業も含めて近年はそのような研究が維持できていない。今はまだ基盤研究をやっていた方々が残っているが、その人たちが引退してしまったら素振りを仕込む人もいなくなってしまう。やるなら今である。

・企業とアカデミアを繋ぐという点からも、推進体制として、まずはネットワークの構築とインタープリターの育成という段階が必要である。

・現象が可視化できるような共同設備があり、大学の先生と企業の若手のエンジニアが一緒に同じものを見ながら議論できる、そんな場があれば企業におけるインタープリターも育ちやすいのではないか。

・企業にも社内に専門家といわれる人が少なくなってきている。外部リソースを活用して育成もできるという意味でこういうプロジェクトには乗りたい。研究費などで企業からも参画し易すくなる制度も検討いただきたい。

・企業も余裕がないので、伸び盛りの優秀な若手を長期にアサインすることは厳しい。しかし、単純に目の前の経済的な視点ではなく環境という新たな価値が生まれ、新たなイノベーションを起こすことが必要とされている今だからこそ、企業からもこういうファンダメンタルな研究に人材を充てることもあり得ると思う。

・企業からは同一人物が長期に参加することは難しい。企業からは一人が3年程度で交代して継続するなど、参画しやすい仕組みが必要である。

・拠点長やプログラムディレクターなどプロジェクトのトップには、アカデミアと企業から一人ずつ参加してもらい顔となって頑張ってもらうことが必要である。

6 まとめ

本ワークショップでは、疲労破壊現象の一層の理解のために、今後我が国として取り組むべき研究開発の方向性、研究課題、推進体制、人材育成などについて議論を行った。

第一部では、疲労破壊の研究に関連する全体的な課題、シミュレーション、数理的科学理論、機械学習などの視点から話題提供をいただき、総合討論を行った。その後、第二部として、疲労破壊に関する最新の実験や学会の動きなどの話題提供をいただき、再度総合的な討論を行った。

本ワークショップで得られた知見、確認した共通認識、一致した意見などは以下の通りである。

疲労破壊の研究課題としては、微視的な初期現象の理解と、初期現象のようなミクロな現象と実際の破壊というマクロな現象の間を橋渡しする部分が重要なテーマとの共通認識を得た。前者については、近年大きく進展した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計測技術、あるいは計算機の飛躍的発展に伴う計算能力の向上や解析技術の進展が、従来できなかった疲労破壊の初期現象の解明の突破口となる可能性がある。初期現象の理解には、よく考えられた実験により、しっかりと現象を観察して知ることが必要であり、実験、数値解析（シミュレーション）、数学・数理科学の研究者が連携して検討を進めることが重要である。

後者については、ミクロからマクロに繋げるための均質化のアイディア、数理科学的なアイディアが鍵となる。そこには本質的な要素を残して情報を落としていく過程が必要であり、最終的に実際の社会に実装する段階では、設計という最も簡略化されたモデルとする必要がある。情報を落としていく方法としては、現象の物理モデル・数理モデルをベースとした機械学習などが候補となる。

また、き裂が大きく進展した段階においても、き裂の最先端は、結晶の構造や組成などの影響を受けながらき裂が拡大していく微視的な現象であることから、初期現象における微視的き裂の進展の理解は、巨視的き裂の進展現象に関する理解をも深め、疲労破壊全体の理解の深化にも極めて重要との認識を得た。

この分野は社会との関連が深く、我が国の産業競争力をさえる工学基盤の一つでもあることから、アカデミアと産業界の連携が不可欠であり、人材交流も含めて、現在低迷している相互のコミュニケーションの再構築が重要である。その意味でも実際の機器における破壊現象の本質的な問題を共有した上で、基礎研究に反映することの重要性と、アカデミア（基礎研究）と産業界（応用）の両方を理解・解釈して結びつける人材、「インタープリター」の必要性を強く認識した。

上記を踏まえ、研究推進体制の第一段階では、日本では非常に不足している「インタープリター」となり得る人材をアカデミア及び産業界の双方に育成することが必要である。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はあるが、特にこの破壊関係の分野は深刻であり、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、優秀な人材が集まり難い状況が続いている。この研究分野の核となる人材育成を兼ねた研究プログラムの必要性が示された。

本ワークショップを通して得られた各種知見・情報や議論内容については、戦略提言を目指す今後の調査活動の参考とするとともに、その他のCRDSの各種活動にも最大限活用していく予定である。

付録

付録1 プログラム

13：00–13：15　開会挨拶・趣旨説明 JST–CRDS

13：15–14：13　<第一部>

・話題提供者（発表9分+質疑応答3分）：48分

1. 疲労破壊の現象解明に関すると方策
   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（コメント5分）：10分

物質・材料研究機構（NIMS）津﨑 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>（63分）

・話題提供者（発表9分+質疑応答3分）：48分

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 大学院総合科学技術研究科 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
   NIMS 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 宮﨑 克雅 主管研究長

（株）IHI 高梨 正祐 主任研究員

16：25–17：55　総合討論（2）

17：55–18：00　閉会の挨拶

付録2 ワークショップ参加者リスト

＜WS参加者＞ （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 大学院総合科学技術研究科 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
・津﨑 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
・宮﨑 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 主管研究長

＜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

＜傍聴者＞（2021年12月9日時点（敬称略、順不同）

・石川 有希　文部科学省 研究開発局 環境エネルギー課 行政調査員
・野瀬 雅文　文部科学省 研究振興局 参事官（ナノテクノロジー・物質・材料担当）付調査員
・石正 茂　JST 監事
・中村 亮二　JST CRDS環境・エネルギーユニット ユニットリーダー／フェロー
・尾山 宏次　JST CRDS環境・エネルギーユニット フェロー
・馬場 寿夫　JST CRDSシステム・情報科学技術ユニット フェロー
・赤木 浩　JST CRDSナノテクノロジー・材料ユニット フェロー
・福井 弘行　JST CRDSナノテクノロジー・材料ユニット フェロー
・大濱 隆司　JST 研究プロジェクト推進部 部長
・大窪 宏明　JST 研究プロジェクト推進部 主任調査員
・菅原 雄二　JST 研究プロジェクト推進部 主任調査員
・南 孝幸　JST 研究プロジェクト推進部 主任調査員
・瀧川 久美子　JST 研究プロジェクト推進部 主任調査員

・西田 徹二　　JST 未来創造研究開発推進部 主任調査員
・服部 文秀　　JST イノベーション拠点推進部 主任調査員

ワークショップ企画・報告書編纂メンバー

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）
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）
	大山 みづほ	フェロー	（企画運営室／ナノテクノロジー・材料ユニット）
	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	主任調査員	（産学連携展開部研究支援グループ）
	佐川 みすず	主任調査員	（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）

科学技術未来戦略ワークショップ報告書 **CRDS-FY2021-WR-10**

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

令和 4 年 3 月　March 2022
ISBN 978-4-88890-781-1

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.

ISBN 978-4-88890-781-1

FOR THE FUTURE OF
SCIENCE AND
SOCIETY

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