大規模かつ高解像度三次元解析手法により疲労亀裂の成長メカニズムを解明

～航空機エンジン用部品の信頼性確保に光明～

配布日時：2022 年 10 月 28 日 14 時

国立研究開発法人物質・材料研究機構

概要

1．国立研究開発法人物質・材料研究機構　（以下、NIMS）の研究チームは、大体積を扱う新たな 3D 解析手法を活用することにより、ミクロな疲労亀裂の成長メカニズムが、金属結晶の特定の面に沿ったすべりにより成長することを解明し、金属疲労の分野で 50 年にわたる課題を解決しました。従来、亀裂は ”引張り力” によって成長すると考えられてきましたが、亀裂をすべらせる力である ”せん断力” が、亀裂成長の大部分を支配することを明らかにしました。

図　3D 解析の概要と、明らかとなった亀裂成長メカニズムの模式図。

2．繰返し力を受けることで起こる金属の疲労破断は、機械の破損事故の多くに関与しており、そのメカニズムの解明は重要な研究課題です。疲労寿命、すなわち、使用中に繰返し力を受ける材料が破断するまでの期間は、ミクロな亀裂が発生し成長する過程です。疲労過程初期の亀裂の発生メカニズムと、後期の大きくなった亀裂の成長メカニズムは 50 年以上前に明らかにされましたが、その中間過程におけるミクロな亀裂の成長メカニズムは、材料寿命の大部分を占めるにも関わらず、長い間不明確なままでした。その一因は、最も重要な、大きさ 200 μm 前後の亀裂の観察の難しさにありました。

3．今回、電子顕微鏡をベースとした 3D 組織解析手法を高度化して、大体積（従来比 100 倍）の金属組織の高解像度解析を可能としました。この方法を、航空機エンジン用耐熱合金の疲労亀裂に適用することで、世界で初めて、大きさ 200 μm 前後の疲労亀裂の高解像度な三次元解析を実現しました。これにより、亀裂の成長経路と金属の結晶方位の関係を広範囲で定量的に解析することが可能となり、従来の認識と異なる亀裂成長メカニズムの存在が明らかとなりました。

4．金属の疲労寿命の管理や予測は、疲労破断のメカニズムに立脚して構築されてきました。前提となるメカニズムが明確となれば、より正確な寿命の予測が期待できます。例えば、特に高い安全性が求められる航空機用材料の開発・実用化には、高精度な寿命予測が不可欠です。本成果は国産合金の信頼性確保および実用化促進に大きく貢献すると期待出来ます。

5．本研究は NIMS 構造材料研究拠点の疲労特性グループの西川嗣彬主任研究員、古谷佳之グループリーダー、超耐熱材料グループの長田俊郎主幹研究員、川岸京子グループリーダー、および構造材料組織解析技術グループの原徹グループリーダーによって実施されました。また、本研究は内閣府 戦略的イノベーション創造プログラム「統合型材料開発システムによるマテリアル革命」（国立研究開発法人科学技術振興機構）の一環として行われました。本研究では、航空機エンジン用耐熱合金の中でも NIMS が開発したタービンディスク用 Ni-Co 基超合金を対象としました。

6．本研究成果は、Scripta Materialia 誌（Vol. 222）で 2022 年 9 月 5 日にオンライン公開されました。

研究の背景

金属疲労（金属材料が繰返し力を受けることで破断する現象）は、日航ジャンボジェット機の墜落事故（１９８５年）や高速増殖炉もんじゅのナトリウム漏洩事故（１９９５年）のような社会的に重大な事故に代表されるように、機械の破損や事故の多くに関与してきました。このような事故を教訓として、高い信頼性が要求される航空機部品や原子力機器の安全性が向上してきました。

金属疲労を防ぐためには、材料がいつ疲労破断するのか、すなわち材料の疲労寿命を推定することが重要です。そのためには、疲労寿命に至る過程で材料に何か起こっているのか、そのメカニズムを知ることが重要な研究課題です。金属疲労に関する初期の研究において、疲労破断がミクロな亀裂の発生と成長により起こることが認識されました（図１）。その後、疲労過程初期の亀裂の発生メカニズムと、疲労過程後期の大きな亀裂の成長メカニズムは、１９７０年代に走査型電子顕微鏡（SEM）の普及によって明らかとなりました。さらにこれらのメカニズムを前提に、疲労亀裂の成長を力学的に記述する研究が広く行われ、疲労寿命の予測精度や機械設計の信頼性は格段に向上しました。

その一方で、疲労過程初期~中期の亀裂の成長メカニズムは、観察の難しさから、曖昧なまま残されてきました。さらにこの時期の亀裂成長が、力学で十分に説明できないことが問題（”微小疲労亀裂問題”）とされ（図１）、１９８０～９０年代に盛んに研究されました。その結果、微小疲労亀裂の成長が、疲労過程の半分以上を占める重要なプロセスであること、金属ミクロ組織（結晶方位や結晶粒界）[1] の影響を受けやすいこと、などが共通認識となりました。このため、微小亀裂の特異性を理解するために、亀裂とミクロ組織[1] の関係を調べた多くの研究が報告されました。しかしながら、疲労寿命への寄与が特に大きい 200 μm 程度の亀裂を高精度に解析する方法が無かったことで、メカニズムの理解は十分に進みませんでした。例えば、２０００年以降多くの分析に使われた電子顕微鏡による結晶方位解析法（SEM/EBSD）には、２次元解析であるが故の不確かさがありました。最近では、大型の粒子加速器を用いて高エネルギーX 線で材料内部を透視し、亀裂とミクロ組織[1] の関係を三次元観察することが可能となりましたが、微小亀裂の観察には、やや空間分解能が足りませんでした。

図１　疲労亀裂の発生、成長過程とミクロ組織[1] の模式図。金属が繰返し力を受けるとミクロな亀裂が発生、成長することで疲労破断が起こります。金属が繰返し力を受けると、疲労過程の初期にミクロな亀裂が発生します（初期）。その後、亀裂はミクロ組織[1] の影響を受けながら徐々に成長します（初期~中期）。そして、亀裂が大きくなるにつれて成長は加速し（後期）、最終的な破断に至ります。疲労過程初期~中期の亀裂は微小疲労亀裂と呼ばれています。

研究内容と成果

高解像度で亀裂の三次元解析を行う手法としては、電子顕微鏡とイオンビームによる微細加工を組合せた方法（FIB-SEM [3]）が最も有望でしたが、観察体積が不十分でした。今回、研究チームは、近年実用化されたハイスループットの微細加工技術（PFIB-SEM [4]）を活用し、微細な亀裂を高精度に撮影する技術や、亀裂成長経路の結晶方位を解析する技術を構築することで、微小疲労亀裂と金属ミクロ組織の関係を大体積かつ高解像度で 3D 解析することに、世界で初めて成功しました。この方法で、特に高い安全性が要求される航空機エンジン用耐熱合金の微小疲労亀裂を解析した結果、従来認識されてきたものと異なる亀裂の成長メカニズムが働いていることを発見しました。

図２　PFIB-SEM[4] による 3D 解析手法の模式図。材料に繰返し力をかける実験により亀裂を成長させた後（図左）、イオンビームにより、亀裂部分を切り出します。抽出した試料で、イオンビームによるスライスと、電子顕微鏡による撮影を繰返すことで、亀裂と結晶方位の 3D 情報を取得します。

これまで、多くの研究者は疲労過程後期の亀裂成長と似たメカニズム（１９７０年代に解明）が働いていると考えていました。しかしながら、今回の大規模な３D 解析によって、せん断型のメカニズムが支配的であり、従来の認識と異なることが明らかとなりました（図３右下）。このメカニズムは、むしろ、亀裂発生のメカニズムとして知られていた現象に近いものでした。疲労過程の初期でのみ起こると考えられてきた現象が、疲労過程の大部分で支配的であることが明らかとなりました。５０年にわたって解明されないまま残されてきた微小疲労亀裂の成長メカニズムが、大規模かつ高解像度な３D 解析が実現したことによって、初めて明確に示されました。

図３　3D 解析の概要と、亀裂成長メカニズムの模式図。PFIB-SEM の画像データから抽出した、亀裂の形状データと材料の結晶方位データ（図左）を用いて、亀裂成長経路の結晶方位を解析しました（図右上）。図の亀裂は、亀裂が通過した結晶面[2] の方位に応じて配色されています。従来の認識であれば、亀裂は赤く表示される結晶面[2]（{001}面）を通過すると考えられましたが、大部分が青く表示される結晶面[2]（{111}面）を通過していました。大体積の 3D 解析が実現したことで、従来考えられていた引張り型ではなく、せん断型のメカニズムが支配的であることが明らかとなりました。

今後の展開

機器の信頼性を担保する疲労寿命の予測方法は、疲労破断のメカニズムに立脚して構築されています。したがって、メカニズムが明確となることで、より高度な寿命予測が可能となることが期待できます。引張り力が亀裂成長の駆動力であることが前提の従来の寿命予測に替わって、本質的な駆動力がせん断力であることを明らかにした今回の成果は、寿命予測のコンセプトの高度化に繋がります。特に、航空機エンジンの材料には、非常に高い信頼性が要求されます。寿命の予測精度が高まれば、適切なタイミングでの

部品交換などを通してその安全性を高めることができます。

今回の研究では、NIMS で開発したタービンディスク用の Ni-Co 基超合金を用いました。航空機エンジン部品のほとんどが欧米の認証の元で製造される中、日本独自の信頼性技術を持つことは、国産合金の開発力・競争力の向上に繋がります。今後、今回の成果に基づいた高精度な疲労寿命予測方法を構築することで、国産合金の信頼性向上と実用化促進に貢献することを目指します。この成果は 2022 年 NIMS WEEK でも発表します。

事業詳細

本研究の一部は、内閣府 戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)「統合型材料開発システムによるマテリアル革命」(三島 良直 プログラムディレクター、毛利 哲夫 サブプログラムディレクター)の一環として実施されました。A 領域課題「先端的構造材料・プロセスに対応した逆問題 MI 基盤の構築」(研究責任者:物質・材料研究機構 出村雅彦 部門長)において得られた成果です。

掲載論文

題目： Three-dimensional high-resolution crystallographic observation of the entire volume of microstructurally small fatigue cracks in Ni-Co based superalloy

著者： Hideaki Nishikawa, Yoshiyuki Furuya, Toshio Osada, Kyoko Kawagishi, Toru Hara

雑誌： Scripta Materialia

掲載日時： 2022 年 9 月 5 日

用語解説

(1) 金属ミクロ組織：金属は、結晶粒と呼ばれる数 μm～数百 μm の粒の集まりです。金属の結晶は、結晶面と呼ばれる周期的な原子の並びが作る面の集まりでできています。結晶面の方向を結晶方位、結晶粒と結晶粒の境界を結晶粒界と呼びます。このようなミクロな特徴は、金属ミクロ組織と呼ばれ、その金属の強さを決める重要な要素となります。

(2) 結晶面：周期的な原子の並びが作る面を結晶面と呼びます。特定の結晶面は、その法線ベクトルにより表示されます。例えば、{111}面は結晶のすべり面と呼ばれ、外力によって金属が変形するとき、{111}面に沿って原子が動くことが知られています。

(3) FIB - SEM（Focused Ion Beam - Scanning Electron Microscope）：集束イオンビームによる微細加工と走査型電子顕微鏡を組み合わせた装置。通常はガリウムをイオン源として用います。この装置により加工と撮影を繰返すことで、高精細な材料の 3D 組織解析を行うことができます。

(4) PFIB - SEM（Plasma Focused Ion Beam - Scanning Electron Microscope）：キセノンプラズマによる集束イオンビームによってハイスループットな微細加工を可能にした FIB - SEM。

本件に関するお問い合わせ先

（研究内容に関すること）
国立研究開発法人物質・材料研究機構　構造材料研究拠点　疲労特性グループ
主任研究員　西川 嗣彬（にしかわ ひであき）
E-mail: NISHIKAWA.Hideaki@nims.go.jp
TEL: 029-859-2796
URL: https://samurai.nims.go.jp/profiles/nishikawa_hideaki?locale=ja

（報道・広報に関すること）
国立研究開発法人物質・材料研究機構　経営企画部門　広報室
〒305-0047　茨城県つくば市千現 1-2-1
TEL: 029-859-2026, FAX: 029-859-2017
E-mail: pressrelease@ml.nims.go.jp