

## 「疲労」が材料を強くする

～き裂“発生”の抑制がカギ 高強度鋼の疲労限度を2倍化する新手法を開発～

NIMS は、材料にあらかじめ疲労変形を与えると、かえって疲労限度が向上する現象を見出しました。さらに、この発見に基づいた新手法「予疲労トレーニング」を開発し、高強度鋼のき裂の発生を抑えることで、疲労限度を2倍化することに成功しました。予疲労トレーニングは、焼き戻し熱処理とは異なり引張強度をほとんど低下させずに疲労限度を向上させられるため、従来より優れた強化手法としての応用が期待されます。本成果は、6月30日に Advanced Science 誌に掲載されました。

### 研究成果の概要

#### ■ 従来の課題

何回負荷を繰り返し与えても材料が破断しない応力の上限值（疲労限度）は引張強度に比例して上昇します。しかし、引張強度が約 1.4GPa（ギガパスカル）を超えると疲労限度がそれ以上向上しない、もしくは低下する“頭打ち”状態となります。たとえば、代表的な高強度鋼であるマルテンサイト鋼は、最も高強度な“焼き入れまま”状態では疲労限度が低いため、一般的に“焼き戻し熱処理”により強度を低下させた状態で用いられています。疲労限度が頭打ちになる詳しい仕組みはわかっておらず、この頭打ちを打破するための材料設計指針が求められてきました。

#### ■ 成果のポイント

当研究グループは、引張強度 1.6GPa の“焼き入れまま”マルテンサイト鋼に対して、あらかじめ試料に疲労変形を加える「予疲労トレーニング」を適用することで、引張強度をほとんど低下させず疲労限度を2倍化し、“頭打ち”を打破することに成功しました。この現象を詳細に分析した結果、高強度鋼の疲労き裂発生 of 支配要因は、結晶粒界での弾性ミスフィット（荷重方向に生じるひずみの大きさの不整合）であることを明らかにし、従来材料を壊れやすくするとされてきた疲労変形が実は疲労き裂発生を抑制することを世界で初めて示しました。

#### ■ 将来展望

予疲労トレーニングは、焼き戻し熱処理とは異なり引張強度をほとんど低下させることなく疲労限度を向上させられるため、一般的な鋼材への応用が期待できます。さらに今回、高強度鋼の疲労限度向上において、これまで注目されてきたき裂の「停留」ではなく、き裂を「発生」させないことが重要であることを示しました。今後、この「き裂を発生させない組織学」を発展させ、鉄鋼材料を含めた様々な材料の破壊現象に展開することで、超高強度材料の社会実装への貢献が期待されます。

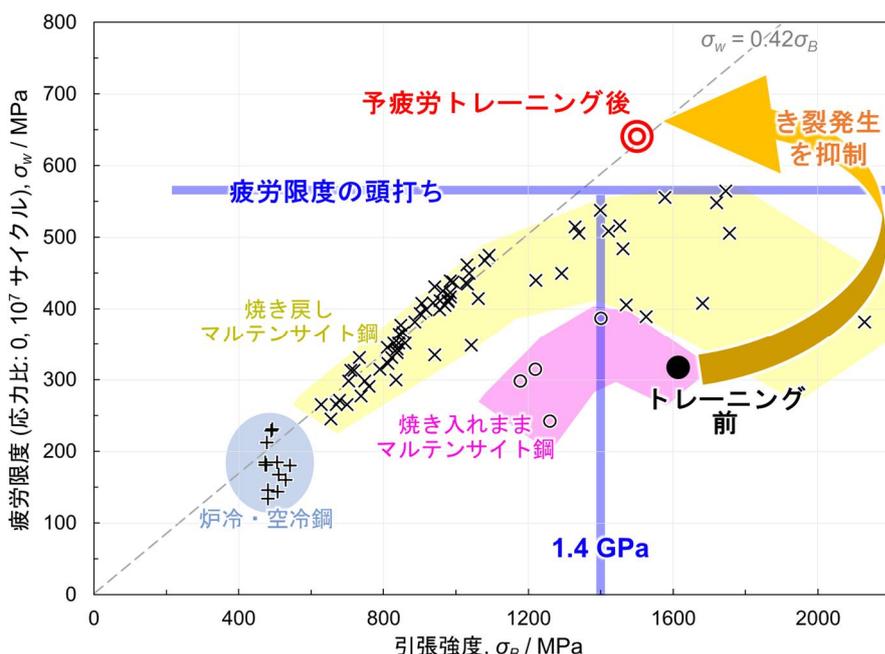


図1：鉄鋼材料の引張強度と疲労限度の相関

## ■その他

- (1) 本研究は、NIMS 構造材料研究センター鉄鋼材料グループの岡田和歩 主任研究員、津崎兼彰 元フェロー、仲川枝里氏、柴田暁伸 上席グループリーダーからなる研究チームによって、JST 戦略的創造研究推進事業 ACT-X「トランススケールな理解で切り拓く革新的マテリアル」領域（課題番号：JPMJAX23D5）の一環として行われました。
- (2) 本研究成果は、2025年6月30日に Advanced Science 誌のオンライン版に掲載されました。

## 研究の背景

近年、燃費向上を目的とした輸送機器の軽量化が急務となっており、できる限り高強度な構造用金属材料を幅広く社会実装することが求められています。そのため、高強度鋼では引張強度を向上させるために“焼き入れ”（高温に保持した後に急速に冷却する）熱処理が行われます。しかし、自動車の足回り部品などの繰り返し負荷を受ける材料にとって最も重要な力学特性の一つである疲労限度<sup>(1)</sup>が引張強度約 1.4GPa で頭打ちとなるため、高強度と高疲労限度を両立する金属材料の設計指針が求められてきました。一般に、疲労限度はき裂発生限界<sup>(2)</sup>とき裂停留限界<sup>(3)</sup>のうち高い方に対応しますが、従来の疲労研究の多くは「き裂停留限界」に着目しており、引張強度 1.4GPa 以上での高い疲労限度の実現には約 1 $\mu$ m 以下のき裂停留が必要であることが示唆されています（図 2）。しかし結晶粒よりも微小なき裂の停留は非常に困難であり、この限界が疲労限度の頭打ちと対応すると考えられます。そこで、疲労限度の頭打ちを打破するには「き裂発生限界」の向上がカギとなりますが、「疲労き裂が発生しにくい組織形態とは何か？」に対する答えは明らかになっていませんでした。また代表的な高強度鋼であるマルテンサイト鋼<sup>(4)</sup>は、最も高強度な“焼き入れまま”状態での疲労限度が低いため、“焼き戻し”熱処理（焼き入れ後に再加熱し、粘り強さを高める）により強度を（場合によっては半分以下まで）低下させた状態で一般的に用いられてきました。材料強度を犠牲にせず、なおかつ疲労限度を強化できる材料設計指針を提案できれば、超高強度材料の社会実装化へ大きく貢献します。

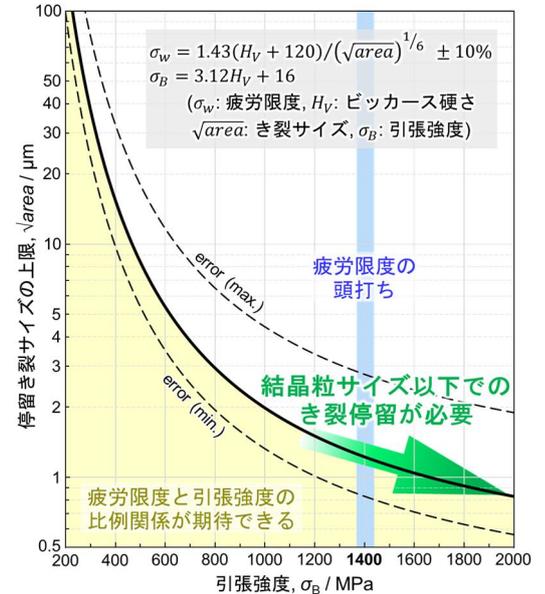


図 2：疲労限度と引張強度の比例関係の維持に必要な疲労き裂の停留サイズ上限

## 研究内容と成果

本研究では、炭素を 0.2wt%（読みは重量パーセント）含有する一般的な低炭素マルテンサイト鋼を用いました。“焼き入れまま”の試料（未変形材、図 3 黒）に対して、き裂が発生しない条件下で予疲労トレーニング<sup>(5)</sup>を行った予疲労材（図 3 青）と、予疲労材と同一の最大応力・時間にて繰り返しではなく定荷重の負荷を行った予定荷重材（図 3 緑）を作製しました。これらの試料を研磨して予変形によって形成された表面凹凸を除去した後、疲労試験を行ったところ、予疲労材の疲労限度が未変形材から著しく向上し、繰り返し変形が疲労限度向上に有効であることが示されました。さらに、10<sup>7</sup> サイクル後に未破断であった予疲労材に対し、

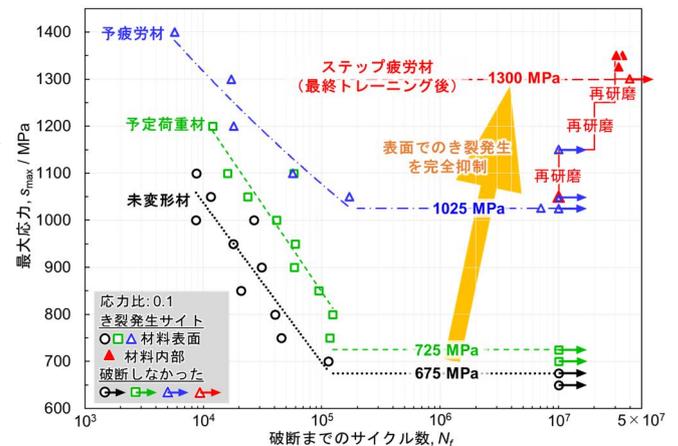


図 3：疲労寿命線図

再研磨と段階的に最大応力を上昇させた予疲労トレーニングを繰り返し継続したところ、繰り返し変形の最大応力を 1300 MPa（メガパスカル）まで引き上げても破断しませんでした（ステップ疲労材、図 3 赤）。これは、ステップ疲労材の疲労限度と対応する最大応力が 1300MPa に達し、疲労限度の頭打ちを打破したことを意味します。上記 4 試料の引張強度は 1.5～1.6GPa で大きく変化しておらず、予疲労トレーニングは強度を犠牲にしない強化法となり得ることが示されました。また、いずれの

未破断試料にも表面き裂が観察されず、焼き入れままマルテンサイト鋼の疲労限度はき裂発生限界と対応していました。さらに、き裂発生サイトが表面（未変形材）から内部の介在物（ステップ疲労材）に変化しており、予疲労トレーニングによって表面でのき裂発生が完全に抑制されていました。以上から、従来材料を壊れやすくするとされてきた疲労変形がき裂発生限界の向上に有効であることが世界で初めて明らかになりました。さらに、高強度鋼の疲労き裂発生において荷重方向へのヤング率<sup>(6)</sup>の差（弾性ミスフィット）が支配因子となることが初めて実験的に示されました。

図 4 に示すように、未変形材では、弾性ミスフィットが大きい結晶粒界に生じる特異応力場が塑性変形（除荷しても元に戻らない変形）を促進し、形成された表面凹凸に追加的に応力集中することでき裂発生に至ることがわかりました。一方でステップ疲労材では、弾性ミスフィットが大きい結晶粒界、つまり潜在的き裂発生サイトの近傍は予疲労トレーニングでの凹凸形成時に加工硬化されたためにその後の疲労試験中にはもはや塑性変形ができず、き裂発生が抑制されます。さらに予疲労トレーニングで形成された表面凹凸は再研磨で除去されるので、応力集中が生じません。すなわち、疲労変形が材料を壊れやすくする原因は表面凹凸と結果的な局所応力集中であり、表面凹凸というき裂の前駆体を除去すれば、疲労変形の本質的な材料強化効果（潜在的き裂発生サイトの選択的強化）

を狙って発現させることができるのです。類似する現象に、負荷応力を段階的に増加しながら疲労変形を加えると材料の疲労限度が向上するコーキング効果がありますが、炭素鋼におけるコーキング効果はき裂先端のひずみ時効硬化<sup>(7)</sup>によるき裂停留限界の向上に起因しており、疲労限度の上昇は段階ごとに 5MPa ほどです。本研究の予疲労トレーニングによる疲労限度向上はき裂発生限界の向上に起因しており、疲労限度の上昇は段階ごとに 100 MPa と非常に大きく、従来のコーキング現象とは全く異なります。

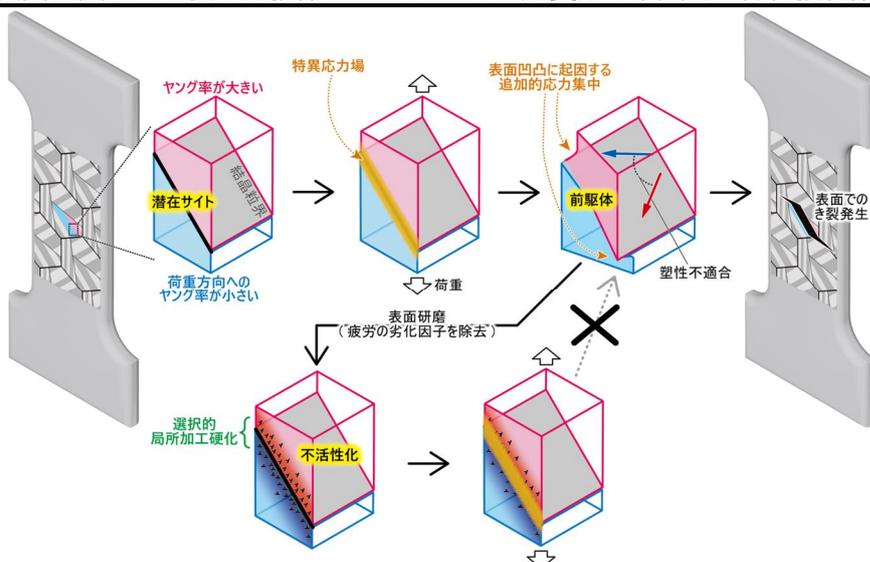


図 4：疲労き裂発生および発生抑制メカニズムの模式図

従来の研究で注目されてきたき裂停留は、材料内部のいたるところで生じ得るため、き裂停留限界は材料の硬さや引張強度などの巨視的特性と良い相関があります。一方で、き裂発生は材料中の最弱サイトで起こるため、き裂発生限界は巨視的特性では整理できません。疲労き裂が発生しない組織とは、き裂発生の前駆体になり得る特定の潜在サイトに塑性変形が集中しにくい組織であると言えます。本研究では、き裂発生抵抗を強化するための体系的な考え方として、き裂発生現象を“潜在サイト（き裂が発生しやすい組織単位）→前駆体（き裂のもととなる初期損傷）→き裂”と段階的に分け、“潜在サイト→前駆体”の変化に対する抵抗値の統計分布を制御することで、前駆体の形成を抑制するという「き裂発生の組織学」を新たに提案しました。この理論に基づくと、潜在サイトの表面凹凸形成に対する抵抗の強さはある統計分布を有していますが、予疲労トレーニングによって抵抗値が低い潜在サイトを選択的に強化し不活性化することで、引張強度などのマクロな材料特性を変えずにき裂発生限界を引き上げることができます。

## 今後の展開

予疲労トレーニングは、焼き戻し熱処理とは異なり引張強度をほとんど低下させずに疲労限度を向上させられるため、従来より優れた強化手法として一般的な鋼材への応用が期待できます。さらに、図 3 に示すように、予疲労トレーニングは、疲労限度を 2 倍化しただけでなく、疲労寿命（き裂の発生から進展して破断に至るまでの寿命の合計）をも 10 倍程度向上させました。今後は、疲労寿命の向上メカニズムを解明するため、予疲労トレーニングがき裂の進展に及ぼす影響についても検証していきます。

近年、高強度な材料、すなわち高い荷重応力でも破壊しない材料へのニーズがあらゆる分野で高まっています。き裂は材料の

“弱点”であり、その先端への応力集中によりき裂は加速的に進展します。き裂先端への応力集中はマクロ応力に比例するため、高強度な材料ほど従来の「き裂を停留させる材料設計」が困難になります。したがって、今回の「き裂を発生させない組織学」を発展させ、鉄鋼材料を含めた様々な材料の破壊現象に展開することで、超高強度材料の社会実装への貢献が期待されます。

## ■掲載論文

題目	Fatigue limit doubling in high-strength martensitic steel through crack embryo engineering–cyclic-training-driven self-optimization
著者	Kazuho Okada*, Kaneaki Tsuzaki, Eri Nakagawa, Akinobu Shibata
雑誌	Advanced Science
DOI	10.1002/advs.202504165
掲載日	2025年6月30日

\*責任著者

## ■用語解説

- (1) **疲労限度**：引張強度以下の負荷であっても、これを繰り返し負荷することにより材料にき裂が発生・進展して破壊が生じる現象を疲労破壊と呼び、構造物破壊事故原因の約8割を占めます。一般的に $10^7$ 回以上の負荷を繰り返しても材料が破断しない応力の上限を疲労限度と呼び、構造材料を長期間安全に使用するために最も重要な力学特性の一つです。
- (2) **き裂発生限界**： $10^7$ 回以上の負荷を繰り返しても材料にき裂が発生しない応力の上限です。
- (3) **き裂停留限界**：疲労変形中にき裂が発生するものの、材料内部でき裂が停留して破断に至らない応力の上限です。比較的強度な従来の鋼材では、き裂停留限界がき裂発生限界より高く、き裂停留限界と疲労限度が対応すると報告されてきました。
- (4) **マルテンサイト鋼**：鉄-炭素合金の結晶は、高温ではオーステナイト相（面心立方構造）が、常温ではフェライト相（体心立方構造）が安定です。フェライト相はオーステナイト相と比べ少量の炭素しか固溶できないため、高温からゆっくり冷却すると炭素がフェライト相から追い出され、炭化物が析出します。一方で、炭素が十分に拡散できない速度で急冷すると、炭素が過飽和固溶したマルテンサイト組織へと変態します。急冷したまま（焼き入れまま）のマルテンサイトは硬い代わりに破壊し易いため、数百℃の温度に保持する焼き戻し熱処理を行い、過飽和炭素を微細な炭化物として析出させます。焼き戻しにより強度が低下する一方で破壊耐性が向上するため、現在社会実装されているマルテンサイト鋼のほとんどが焼き戻し熱処理済のものです。
- (5) **予疲労トレーニング**：最大応力 1000MPa、応力振幅 50MPa にて  $10^7$  サイクルの繰り返し変形を行いました。
- (6) **ヤング率**：フックの法則が成立する弾性範囲における荷重軸方向のひずみと応力の比例定数です。ヤング率が大きいほど、同一負荷応力におけるひずみが小さくなります。
- (7) **ひずみ時効硬化**：塑性変形した金属材料を、ある程度の時間放置すると硬化する現象をひずみ時効硬化といいます。炭素鋼の場合、塑性変形の担い手である転位に炭素原子が固着し、転位が動きにくくなることで硬化します。

## 本件に関するお問い合わせ先

研究内容について	NIMS 構造材料研究センター 鉄鋼材料グループ 主任研究員 岡田和歩 E-mail : okada.kazuho[at]nims.go.jp TEL : 029-859-2630 URL : <a href="https://samurai.nims.go.jp/profiles/okada_kazuho?locale=ja">https://samurai.nims.go.jp/profiles/okada_kazuho?locale=ja</a>
----------	--

<b>報道・広報について</b>	<b>NIMS 国際・広報部門 広報室</b> 〒305-0047 茨城県つくば市千現 1-2-1 E-mail: <a href="mailto:pressrelease[at]ml.nims.go.jp">pressrelease[at]ml.nims.go.jp</a> TEL: 029-859-2026, FAX: 029-859-2017
	<b>科学技術振興機構 広報課</b> 〒102-8666 東京都千代田区四番町 5 番地 3 E-mail: <a href="mailto:jstkoho[at]jst.go.jp">jstkoho[at]jst.go.jp</a> TEL: 03-5214-8404, FAX: 03-5214-8432
<b>支援事業について</b>	<b>科学技術振興機構 戦略研究推進部 先進融合研究グループ</b> <b>原田千夏子</b> 〒102-0076 東京都千代田区五番町 7 K's 五番町 E-mail: <a href="mailto:act-x[at]jst.go.jp">act-x[at]jst.go.jp</a> TEL: 03-6380-9130, FAX: 03-3222-2066

## NIMS とは？

NIMS（ニムス）は、国内で唯一、物質・材料科学の研究に特化した国立研究開発法人です。世界を構成する様々な「物質」。その中で私たちの生活を支えているのが「材料」です。その材料も、大きくは有機・高分子材料、無機材料に分類でき、無機材料はさらに金属材料とセラミックス材料とに分けられます。石器時代から産業革命を経て現代まで、人類の発展はこの材料の進歩とともにありましたが、近年では、地球規模の環境や資源問題の解決手段のひとつとしても注目が高まっています。NIMS はその物質・材料に関する研究に特化した国立研究開発法人として、「材料で、世界を変える」をテーマに、未来を拓く物質・材料の研究に日々取り組んでいます。

### 【NIMS を掴む参考ページ】

NIMS はこんな研究所! <https://www.nims.go.jp/nims/introduction.html>

NIMS ビジョン <https://www.nims.go.jp/nims/profile.html#vision>