



“キントレ”による耐破壊金属材料の創製

き裂“発生”の抑制による高強度鋼の疲労限度 2 倍化

岡田和歩 Kazuho OKADA

疲労限度の頭打ちが超高強度鋼の社会実装を阻んできた。筆者らは、従来材料の劣化原因とされてきた疲労変形を、逆に強化に活用する「予疲労トレーニング」という革新的加工概念を開発し、き裂発生抑制により疲労限度の頭打ちを打破した。本稿では、予疲労トレーニングによりナノ・ミクロスケールの「疲労き裂が発生しにくい微視組織形態」を形成して疲労限度（マクロ特性）を飛躍的に向上させるトランススケールな材料設計戦略を概説する。

高強度鋼と疲労破壊

疲労破壊とは、繰り返し負荷によって材料にき裂が発生・進展して破壊が生じる現象であり、日本航空123便墜落事故に代表されるような構造物破壊事故原因の約8割を占める。安心・安全な社会の実現のためには疲労破壊しにくい材料開発が喫緊の課題である。

材料の破断に要する負荷の繰り返し回数は、材料を一度で引きちぎる引張強度から負荷が低下するほど増加し、やがて1000万回以上繰り返しても破断しない疲労限度が現れる（図1）。疲労限度は、自動車のサスペンション部品や車軸などの振動に曝される構造材料を長期間安全に使用するために最重要の力学特性である。近年、燃費向上を目的とした輸送機器の軽量化のため、高い引張強度と疲労限度を両立した鉄鋼材料が求められているが、引張強度と疲労限度の比例関係が引張強度1400MPa程度で頭打ちとなる課題があった（図2a）。本稿では、金属にとっての“キントレ（金トレ）”である「予疲労トレーニング」を開発し、上記の頭打ちを打破した筆者らの最近の研究成果¹⁾を紹介する。

一般に、疲労限度はき裂発生限界とき裂停留限界のうち高い方に対応する（図1）。き裂発生限界とは、材料にき裂が全く発生しない負荷の上限である。き裂停留限界とは、き裂は発生するが材料内部で停留して破断には至らない負荷の上限である。比較的低強度な従来の鋼材では、停留限界と疲労限度が対応するとき

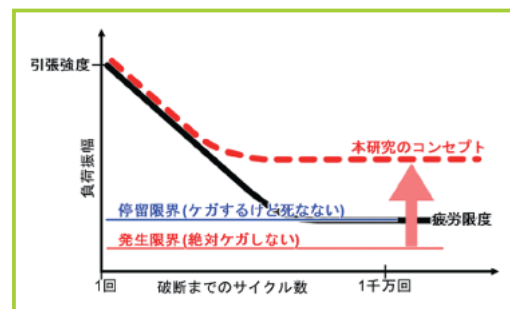


図1 疲労寿命線図の模式図

れ、停留限界に関する研究が主流であった。同じ外力でも、長いき裂ほど先端への応力集中が大きいため、き裂が短いうちに停留するほど疲労限度にとって有利となる。結果として、低強度域の引張強度と疲労限度の比例関係を実現するには、引張強度が上昇するほど小さいき裂での停留が必要となる。特に1400MPa以上では、結晶粒よりも小さい1μm以下のき裂停留が必要となるが、これは非常に困難である。つまり、疲労限度の頭打ちは停留限界の頭打ちとも捉えられ、さらなる疲労限度向上にはき裂発生限界の向上がカギとなる。

予疲労トレーニングによる疲労限度 2 倍化

材料を人間に例えるならば、き裂はケガであり破断は死を意味する。つまり、き裂発生限界と停留限界は、それぞれ“絶対にケガをしない”負荷と“ケガはするが死にはしない”負荷の上限であるともいえる（図1）。ケガ上等と酷使できることが、生命ではない金属の利点ではあるが、絶対に失いたくない自分の身体であれば、ケガ（欠陥）の発生予防による長寿命化が最善と考えるのは自然である。例えば、進行した虫歯も削って詰めることで治療できるが、虫歯予防の方が歯の寿命を延ばす。しかし、金属材料のき裂発生限界の向上に挑戦する基礎研究は主流ではなかった。そこで筆者は、金属材料のケガ予防研究を発展させたいと考えた。

おかだ・かずほ
物質・材料研究機構構造材料研究センター 主任
研究員
〔経歴〕2022年京都大学大学院工学研究科材料工
学専攻博士後期課程修了、博士（工学）。同年物
質・材料研究機構構造材料研究センター研究員、
25年より現職。〔専門〕構造用金属材料、破壊解
析。〔趣味〕筋トレ、宝石研磨。
E-mail: okada.kazuho@nims.go.jp



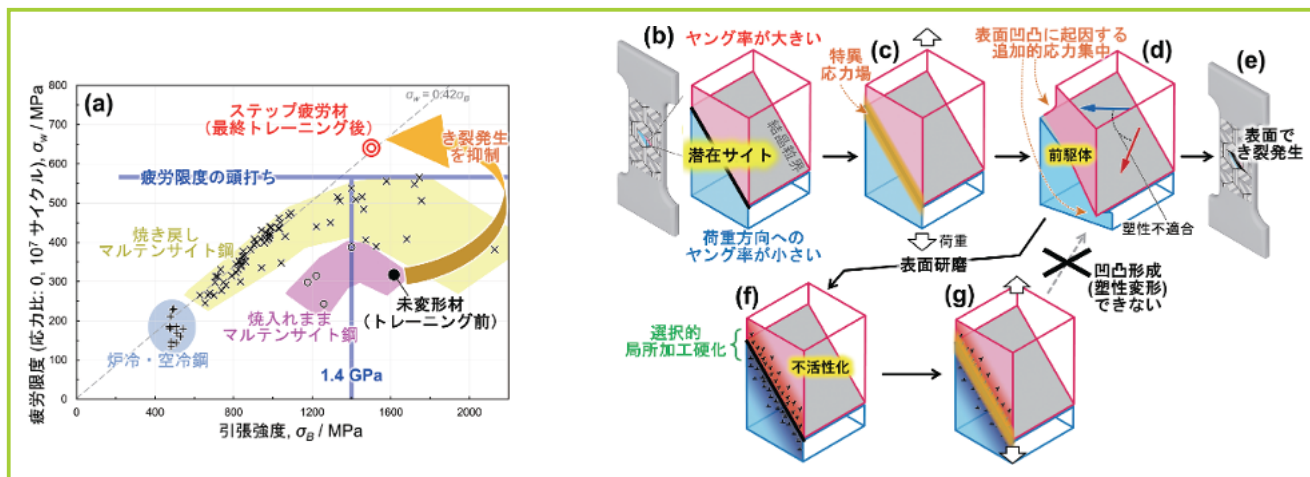


図2 (a) 疲労限度の模式図, (b)~(g) 疲労き裂発生および発生抑制メカニズムの模式図

人間がより高い負荷に適応するには筋トレが有効である。そこで、金属材料にも同様の“筋トレ”を適用しようと考えた。人間の筋トレでも、初心者が重すぎるダンベルを扱うとケガをする。ぎりぎりケガをしない重量で筋トレを行い、その後適切な回復を行うことで筋肉が強化される。そこで“筋トレ”においても、き裂発生限界以下で疲労変形を行い、疲労変形に由来する損傷を除去すれば、き裂発生を抑制できるのではないかと創案した。このき裂が発生しない条件で行う疲労変形こそが、筆者らの開発した予疲労トレーニングであり、従来材料に損傷を与えるとされてきた疲労変形を逆に強化に活用する革新的なアイデアである。

図2aに、一般的な低炭素マルテンサイト鋼（炭素：0.2 mass%，引張強度：～1600 MPa）に予疲労トレーニングを適用した成果を示す。マルテンサイトは、鉄-炭素合金を1000℃程度の高温から急冷する（焼き入れる）ことで形成される硬い組織であるが、焼き入れ直後の“焼き入れまま”状態での疲労限度が低く、“焼き戻し”熱処理（焼き入れ後に数百℃まで再加熱して粘り強さを高める）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る。もし、マルテンサイト鋼の高強度を犠牲にせず疲労限度を強化できれば、超高強度材料の社会実装化へ大きく貢献できる。本研究では、焼き入れままの試料（未変形材）に対して、予疲労トレーニングを行った後に再研磨して表面凹凸を除去するという工程を、トレーニングの負荷レベルを段階的に上昇させながら繰り返した（ステップ疲労材）。その結果、引張強度をほとんど犠牲にせず、疲労限度を2倍化でき、従来の頭打ちを打破した。1000万サイクル後に未破断であったいずれの試料にも表面き裂が観察されず、疲労限度はき裂発生限界と対応していた。すなわち、疲労変形がき裂発生の抑制に極めて有効たり得ることが世界で初めて実証された。

筆者らは、予疲労トレーニングによるき裂発生抑制

メカニズムも解明した。未変形材では、荷重方向へのヤング率の差（弾性ミスフィット）が大きい結晶粒界に特異応力場を生じる（図2b, c）。特異応力場が粒界近傍の局所塑性変形を促進し、表面凹凸を形成する。凹凸の幾何学形状が表面近傍にさらなる局所応力集中を招き、塑性変形を加速することでき裂発生に至る（図2d, e）。一方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（潜在的き裂発生サイト）近傍は予疲労トレーニングでの凹凸形成時に選択的に加工硬化されている。さらに、トレーニング中に形成された表面凹凸がき裂に至る前に再研磨で除去されているため、幾何学形状に起因した力の集中が生じない（図2f, g）。その結果、「トレーニング+再研磨」後の疲労試験中に潜在サイトが塑性変形することができず凹凸形成とき裂発生が抑制される。すなわち、予疲労トレーニングが“筋トレ”に相当し、その後の再研磨が“回復”に相当する。

おわりに

本研究は、高強度鋼の疲労限度向上における“き裂発生抑制”の有効性を実証した。き裂発生は最弱部で生じるため、ナノスケールの潜在的き裂発生サイトを制御することで「疲労き裂が発生しにくい微視組織形態」を形成して疲労限度（マクロ特性）を向上させるトランススケールな材料設計戦略が求められる。予疲労トレーニングは、材料強度を犠牲にせず潜在的き裂発生サイトを選択的に強化してき裂発生を抑制する点で、従来の焼き戻し熱処理とは全く異なるアプローチの強化手法として一般鋼材への応用が期待できる。今後、様々な材料・破壊現象にケガ予防研究を展開することで、超高強度材料の社会実装へ貢献する新たな学理を構築していきたい。

1) K. Okada, K. Tsuzaki, E. Nakagawa, A. Shibata, *Adv. Sci.* **2025**, *12*, e04165.