

巨大地震に耐える新鋼材：優れた耐久性と変形の仕組みを解明

～溶接性×疲労耐久性を両立した新鋼材の、疲労特性の理解を深化～

NIMS は、巨大地震から建物を守る鋼材ダンパーの高性能化に向け、2021 年に溶接時に割れにくい新鋼材、FMS 合金 (Fe (鉄) -Mn (マンガン) -Si (シリコン) 合金) を開発しました (2021 年プレスリリース「[溶接しても超長疲労寿命な第二世代 FMS 合金を開発](#)」)。本研究では、幅広い変形レベルに対して優れた耐久性を示すこの新鋼材の変形の仕組みを明らかにしました。この成果は鋼材ダンパーの長寿命化・高耐力化・汎用性向上につながり、巨大地震に備える安全で強靭な都市インフラの実現に大きく貢献するものです。本研究成果は 2025 年 11 月 19 日付で国際科学誌『Materials Science and Engineering: A』に掲載されました。

研究成果の概要

■ 従来の課題

鋼材ダンパーは、地震の際に変形することで揺れのエネルギーを吸収し、建物の損傷を抑える部材です。その耐久性は「繰り返される変形（金属疲労）にどれだけ耐えられるか」で決まります。特に、長く続く大きな揺れが懸念される巨大地震に備えるには、きわめて高い耐久性が求められます。NIMS ではこれまで、疲労耐久性に優れ、かつ建物部材として組み立てやすい溶接性を兼ね備えた新鋼材を開発してきましたが、地震の規模によってダンパーの変形量は大きく変わるため、どのような揺れに対しても安定した性能を発揮できるかを実験で確かめることが、実用化に向けた課題でした。

■ 成果のポイント

今回、新しく開発した鋼材に対して、さまざまな変形レベルで繰り返し変形を与える試験（疲労試験）を行いました。その結果、小さな変形から大きな変形までの幅広い条件で耐久性を維持できることがわかりました。特に巨大地震を想定した条件では、一般的な鋼材と比べて最大約 20 倍の耐久性を示すことが確かめられました。また、金属疲労プロセスにおける金属内部組織の変化を詳細に解析することで、新鋼材に特異的にみられる破断まで緩やかに繰り硬化が、徐々に進行する結晶構造の変化とそれに伴う組織の微細化に起因することを解明することにも成功しました。この知見は今後のダンパー設計に大きく貢献する重要な成果です。

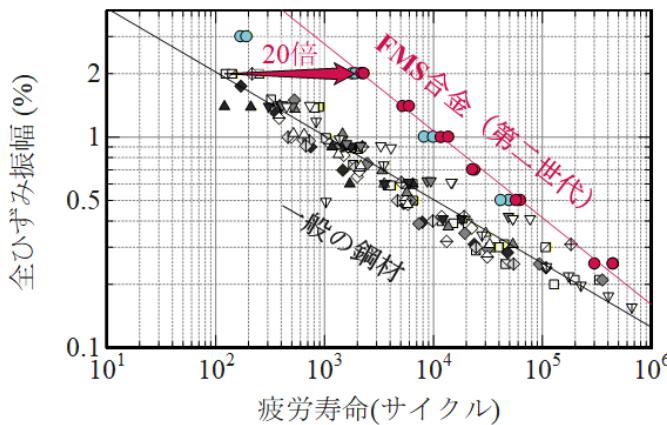


図 1 変形の大きさ（全ひずみ振幅）と耐久性（疲労寿命）の関係：新鋼材である第二世代 FMS 合金は優れた耐久性を有する。

■将来展望

今後、溶接を含めた鋼材ダンパーの製造、実機での評価を進め、社会への実装を目指します。幅広い変形条件で安定した耐久性を示す新鋼材を活かすことで、巨大地震にも耐える、安全で強靭な都市インフラの実現に貢献します。

■その他

- ・本研究は、NIMS 構造材料研究センター加工熱処理プロセスグループの吉中奎貴主任研究員、澤口孝宏上席研究員、江村聰主幹研究員、同センター溶接・接合技術グループの柳樂知也グループリーダー、NIMS 技術開発・共用部門材料溶解創製ユニットの高森晋主任エンジニア、株式会社竹中工務店技術研究所からなる研究チームによって行われました。
- ・本研究は、JST 研究成果最適展開支援プログラム A-STEP (JPMJTR203B)、JSPS 科学研究費助成事業若手研究 (23K13227)、池谷科学技術振興財団研究助成の支援の下で行われました。
- ・本研究成果は、2025 年 11 月 19 日に Materials Science and Engineering: A 誌にオンライン掲載されました。

研究の背景

南海トラフ地震に代表される大規模地震の発生が懸念されるなか、近年、特に長周期地震動⁽¹⁾への対策が大きな課題となっています。長周期地震動はゆっくりと大きな揺れが長時間続くのが特徴で、震源から遠く離れた場所まで伝わるため、広範囲の建物に深刻な被害をもたらす恐れがあります。特に、超高層ビルや石油タンクのような建物は長周期地震動と共振してきわめて大きく揺れる可能性があり、早急な対策が求められています。

このような地震の揺れを吸収するため、阪神・淡路大震災以降、多くの建物で「制振ダンパー⁽²⁾」の導入が急ピッチで進められてきました。鋼材ダンパーはその代表例で、地震時に鋼材自身が繰り返し変形して揺れのエネルギーを熱に変換し、吸収します。しかし、金属は繰り返し変形を受けると疲労し、最終的には破壊に至ります。長周期地震動にさらされた場合、従来の鋼材ダンパーでは疲労による破壊が懸念され、継続的な使用に問題が生じかねません。そのため、疲労耐久性に優れた新しい鋼材と、それを用いた耐疲労鋼材ダンパーの開発が求められていました。

NIMS では、繰り返し変形に耐える金属の変形の仕組みを研究し、疲労耐久性に優れた鋼材の開発に取り組んできました。そのなかで、引張と圧縮の変形を繰り返す際に、元々の結晶構造（原子の並び方の規則）から異なる結晶構造へ変化することで変形が生じ、変形方向が反転すると結晶構造が元に戻る、可逆的な変形メカニズムが存在することを発見しました。この変形メカニズムを生じるように開発された鋼材が FMS (Fe (鉄) -Mn (マンガン) -Si (シリコン) 合金⁽³⁾です。FMS 合金は、一般の鋼材の約 10 倍もの疲労耐久性を示します。

FMS 合金を用いた鋼材ダンパーは、すでにいくつかの建物に導入され、巨大地震対策に貢献しています。一方で、マンガンを多量に含む鋼材は溶接の条件が厳しくなる場合が多く、FMS 合金をより扱いやすい鋼材として完成させるためには、溶接性の追求が課題でした。そこで NIMS では、溶接性と疲労耐久性を両立する材料設計に着手し、第二世代 FMS 合金を新たに開発しました。この新鋼材は溶接時に割れにくい性質を持つことが確かめられています（図 2）。しかし、実際にダンパーとして使用するためには、さまざまな大きさの地震に対して安定して耐久性を発揮できるかを明らかにする必要があります。これまで、第二世代 FMS 合金の耐久性と変形の大きさの関係は十分に解明されていませんでした。

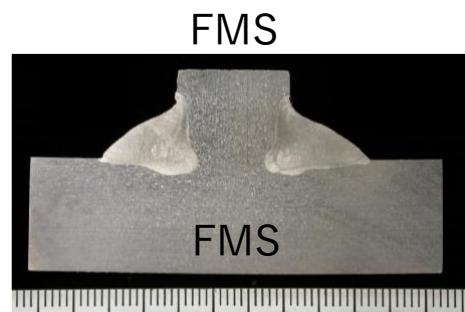


図 2 第二世代 FMS 合金の溶接継手

研究内容と成果

NIMS と竹中工務店の研究グループは、第二世代 FMS 合金の金属疲労に対する耐久性（疲労寿命）を調べるため、「軸ひずみ制御疲労試験⁽⁴⁾」を実施しました。まず、将来的な社会実装を見据えて、第二世代 FMS 合金 (Fe-15wt%Mn-

11wt%Cr（クロム）-7.5wt%Ni（ニッケル）-4wt%Si、wt%は重量%）の板材を商用溶解炉による大規模溶解により製造しました。この板材から丸棒疲労試験片を切り出し、長さ方向の変形量（軸ひずみ）を制御して繰り返し引張-圧縮変形させる試験を行いました。巨大地震の揺れによるダンパーの変形の大きさを想定して、軸ひずみの絶対値の最大値が0.25%から2%の範囲で疲労試験を実施しました。

その結果、第二世代 FMS 合金（図 1 赤丸）は、調査したすべての「ひずみ振幅」で一般の鋼材よりも長寿命であることがわかりました。また、第一世代 FMS 合金（図 1 青丸）と同等の耐久性を示すことも確認されました。特に大きなひずみ条件では、一般鋼材に比べてひずみ振幅 2%で約 20 倍、1%で約 11 倍もの疲労耐久性を示しました。このことは、巨大地震が発生した際にも、鋼材ダンパーの機能を維持するために十分な安全マージンを確保できることを意味します。

さらに、図 1において一般鋼材は強度や延性の違いにかかわらず、疲労寿命とひずみの関係を概ね一本の線で表現することができます。つまり、所定のひずみにおける疲労寿命は材質の影響を受けにくいというのが従来の常識でした。一方、FMS 合金は同じひずみで比べた時に一般鋼材よりも明らかに長寿命を示しています。また、近年開発が進む TRIP/TWIP 鋼⁽⁵⁾は、特に優れた強度延性バランス⁽⁶⁾を有していますが、これらと比べても FMS 合金の疲労耐久性は特異的に高いことがわかりました（図 3：図中には TRIP/TWIP 鋼およびその他のオーステナイト鋼に関するデータを比較対象として示しています）。

また、金属材料は、繰り返し変形を受けるとその回数に応じて強度が変化する（硬くなったり軟らかくなったりする）ことが知られています（これを繰り返し硬化・軟化と呼びます）。この挙動を理解することは、ダンパーの設計に不可欠です。図 4 は繰り返し硬化・軟化挙動を調べた結果です。本研究により、第二世代 FMS 合金はすべてのひずみ振幅で繰り返し硬化（所定のひずみを発生させるために必要な力が大きくなる）を示すことがわかりました。繰り返し負荷数の少ないごく初期には顕著な硬化が見られますが、それ以降は破断まで緩やかに硬化する傾向が認められました。このような硬化挙動を生じるメカニズムを明らかにするために、所定の繰り返し数での材料内部の構造を、電子顕微鏡を用いて観察しました。その結果、疲労初期には、元の結晶構造で生じるすべり変形⁽⁷⁾が硬化の主な要因であるのに対して、繰り返し数が増えると異なる結晶構造が徐々に形成されていくことで、緩やかな硬化が続くことが明らかになりました。この知見は、ダンパーを複数回の地震にわたって運用する際の性能の理解にもつながる重要な情報です。

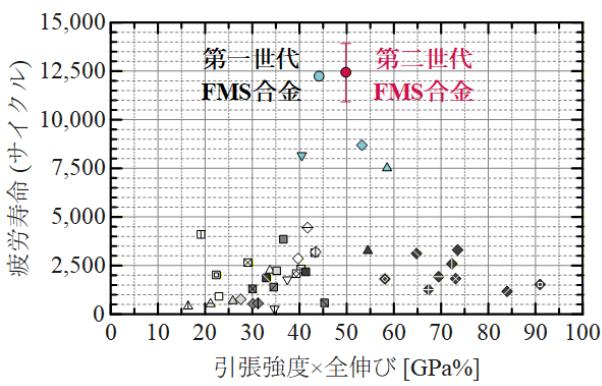


図 3 強度-延性特性と疲労寿命の関係：横軸は強度と延性を掛けた値で、強度-延性バランスの評価指標として用いられ、値が大きいほど優れた特性を有します。青丸と赤丸がそれぞれ第一世代および第二世代 FMS 合金で、そのほかの青色で示されているものは FMS 合金の開発時に作製したモデル材です。また、モノクロで示されているのは TRIP/TWIP 鋼およびその他のオーステナイト鋼です。FMS 合金の強度-延性バランスは良好であるものの、他により優れた特性を有する鋼材が存在しています。しかし、FMS 合金はそのような鋼材と比べても卓越した疲労耐久性を示しています。

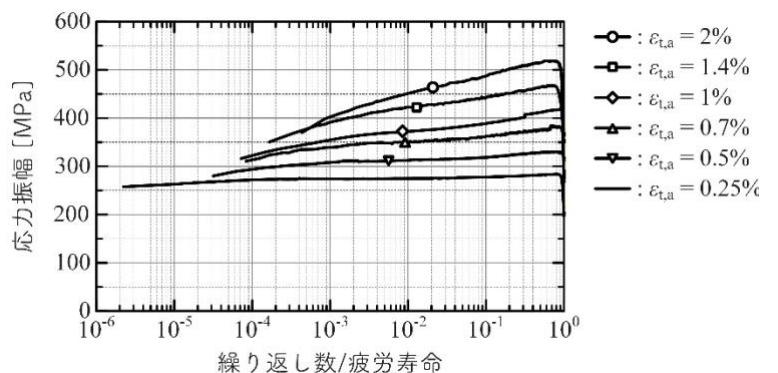


図 4 繰り返し硬化挙動：横軸はそれぞれの全ひずみ振幅において繰り返し与えた負荷の回数で、全ひずみ振幅ごとに疲労寿命が異なることから、疲労寿命で割った値（つまり寿命に対する比率）として示しています。縦軸は制御値である全ひずみ振幅を生じさせるために必要な力の大きさを示しており、繰り返し数の増加に伴い第二世代 FMS 合金が硬化することによって、同じひずみを生じさせるのに必要な力の大きさが大きくなっていく様子を示しています。

今後の展開

本研究は、世界最高峰の耐久性を持ち、溶接組み立ての施工性も考慮した革新的な制振ダンパー用鋼材を対象に、その優れた金属疲労特性を明らかにしたものです。本研究により新開発鋼材の特性が示されたことは、鋼材ダンパーとしての利用の基礎となる重要な成果です。今後は、大型実験施設や先端解析機器を用いて、結晶構造の変化が疲労にどのように影響するのかを、より詳細に解析します。

材料の疲労は、鋼材ダンパーだけでなく、あらゆる機械・構造物において問題となる現象です。合金設計によって疲労耐久性の改善に成功した本研究の成果は、革新的な耐疲労合金を創出するための新たな筋道を示すものであり、疲労耐久性が求められる多様な分野への波及効果が期待されます。

■掲載論文

| | |
|-----|---|
| 題目 | Low cycle fatigue and microstructures of Fe-15Mn-11Cr-7.5Ni-4Si alloy |
| 著者 | Fumiyo Yoshihara, Takahiro Sawaguchi, Tomoya Nagira, Susumu Takamori, Satoshi Emura, Yasuhiko Inoue |
| 雑誌 | Materials Science and Engineering: A |
| DOI | https://doi.org/10.1016/j.msea.2025.149457 |
| 掲載日 | 2025年11月19日 |

■用語解説

(1) 長周期地震動：地震によって発生する揺れのうち、ゆっくりとした長い周期で繰り返される揺れのことです。地震の規模が大きく、震源が浅い場合に強い長周期地震動が発生しやすくなります。地震波の経路上に軟らかい地盤などがあると伝播されやすく、増幅される場合もあります。また震源から遠方においても減衰されにくく、被害が広範囲に及ぶ恐れがあります。特に、固有周期の大きい超高層ビルや石油タンクなどは共振することで大きな揺れを生じる可能性があります。

(2) 制振ダンパー：地震や風のエネルギーの吸収部材として働き、建物本体の損傷を低減するために建物に組入れられる部材です。揺れの種類や建物の構造、コストなどに応じてさまざまな種類のものが用いられます。代表的なものに鋼材ダンパー、オイルダンパー、ゴムダンパーなどがあります。これらのうち鋼材ダンパーは、建物に振動が入力された際に、主要構造体に優先して変形を生じることで、エネルギーを熱に変換して吸収します。

(3) FMS 合金：Fe（鉄）、Mn（マンガン）、Si（シリコン）を必須元素とする鉄系合金で、優れた疲労耐久性を有する鋼材として開発されました。制振ダンパー用に開発された第一世代 FMS 合金の化学組成は Fe-15wt%Mn-10wt%Cr-8wt%Ni-4wt%Si です。可逆的な結晶構造（原子の並び方の規則）の変化によって繰返し変形を生じることで、金属疲労のダメージが蓄積することを防ぐように成分設計されています。第二世代 FMS 合金は Cr（クロム）と Ni（ニッケル）の量を微調整することで、溶接時の溶けて固まるプロセスにおいて割れを生じにくい特性が付与されています。

(4) 軸ひずみ制御疲労試験：垂直荷重を作成させた方向に沿って生じる試験片の標点距離の変位範囲を制御した負荷により行われる疲労試験のことです。この時の標点距離に対する変位量は軸ひずみと呼ばれ、全ひずみ範囲（力を除くと元に戻る弾性ひずみ範囲と、残留する塑性ひずみ範囲の和）あるいは全ひずみ振幅（全ひずみの半分の値）や塑性ひずみ振幅（塑性ひずみ範囲の半分の値）を一定に保つ疲労試験が多く行われています。一方、荷重軸に垂直な方向（丸棒試験片の場合には径方向）の変位量を制御する試験方式は径ひずみ制御疲労試験と呼ばれます。

(5) TRIP/TWIP 鋼：Transformation Induced Plasticity 鋼と Twinning Induced Plasticity 鋼の略称およびこれ

らの総称です。従来は両立することが困難であるとされてきた強度と延性（用語解説(6)をご参照ください）を兼ね備えた鋼材として開発が進められてきた高性能なオーステナイト（面心立方格子の結晶構造を持つ相）鋼であり、前者はマルテンサイト変態を起こして変形を生じ、これにより大きな塑性を示すものを指し、後者は変形双晶によって大きな塑性を示すものを指します。FMS 合金は大別すると TRIP 鋼に分類されるオーステナイト鋼です。

(6) 強度延性バランス：金属材料に力が加わったときに、変形や破壊に耐えられる能力を示す「強度」と、破壊までにどれだけ変形を許容できるかを示す「延性」は、金属材料の性能を考えるうえで基本的な指標です。しかし、多くの金属材料では、強度を高めると延性が低下し、延性を高めると強度が低下するというトレードオフの関係が知られています。そのため、用途に応じて強度と延性を適切に両立させる「強度延性バランス」の最適化が重要となります。近年では、両者を高いレベルで兼備する新しい合金の開発が、国内外で活発に進められています。

(7) すべり変形：金属材料の塑性変形(力を取り除いても元に戻らない変形)の基本的な仕組みです。金属にある程度の大きさの力が加わると、結晶内の特定の面・方向に沿って原子配列の相対的なずれが生じます。これをすべりと呼びます。原子面は一度に全体としてずれるのではなく、配列の乱れ(転位)が移動することによって、すべり変形が進行します。

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 材料創製分野 加工熱処理プロセスグループ[®] 主任研究員 吉中奎貴 E-mail: YOSHINAKA.Fumiyo@nims.go.jp TEL:029-859-2642 URL: https://samurai.nims.go.jp/profiles/yoshinaka_fumiyo |
| 報道・広報について | NIMS 国際・広報部門 広報室 〒305-0047 茨城県つくば市千現 1-2-1 E-mail: pressrelease@ml.nims.go.jp TEL: 029-859-2026, FAX: 029-859-2017 |
| 支援事業について | 公益財団法人 池谷科学技術振興財団 〒102-0074 東京都千代田区九段南 1 丁目 6 – 5 九段会館テラス 1 階 E-mail: office@iketani-zaidan.or.jp TEL: 03-3580-1712 |

NIMS とは？

NIMS（ニムス）は、物質・材料科学の研究に特化した国立研究開発法人です。

エネルギー、環境、医療、インフラ、モビリティ——私たちの暮らしを支えるあらゆる技術は「物質」と「材料」で成り立っています。

NIMS はそれらの基礎・基盤研究だけでなく、成果の普及とその活用の促進まで総合的に行っています。

社会の発展は常に物質・材料科学の進歩とともにあり、いま、地球規模の環境・資源問題の解決に向けた力

ぎとして、その重要性はいっそう高まっています。

NIMS は「材料で、世界を変える」というビジョンのもと、持続可能で豊かな社会の実現を目指して、世界最先

端の研究を続けています。

【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>