

溶接しても超長疲労寿命な第二世代FMS合金を開発

～耐荷重性の高い十字型溶接が可能に 長周期地震動に強い新型制振ダンパーの普及に貢献～

配布日時：2021年3月10日14時

国立研究開発法人 物質・材料研究機構

概要

1. NIMSは、地震から建物を守る制振ダンパー用に開発された、従来比10倍の疲労耐久性を示すFMS合金について、疲労耐久性はそのままに、FMS合金同士を溶接しても割れが発生しない新成分の合金を開発しました。合金を十字やH字に接合できるようになることで、より高い荷重に耐えられるなど制振ダンパーの高性能化が期待されます。

2. 鋼材制振ダンパーは、地震時に弾塑性変形することで地震のエネルギーを熱エネルギーに変換して揺れを抑え、建物を地震から守ります。東日本大震災で問題になった長周期地震動など、繰り返しの弾塑性変形に対する耐久性を高めるため、NIMSはこれまで株式会社竹中工務店、淡路マテリア株式会社との共同研究により、疲労耐久性10倍のFe-Mn-Si系合金（FMS合金）を開発し、2014年、非溶接のFMS合金板を制振ダンパー心材に用いて、せん断パネル型制振ダンパーとして超高層ビル「JPTower名古屋」に初適用しました。また、FMS合金と溶接構造用鋼の異材溶接技術を開発し、溶接ブレース型制振ダンパーとして、2018年、大規模展示場「Aichi Sky Expo」に第二の実用化を果たしました。さらなる実用化に向けて、超高層建物に求められる耐荷重性を高めるために、制振ダンパー心材であるFMS合金を十字、H字に溶接して大面積化することが求められています。しかし、FMS合金同士の溶接は、高温割れ（凝固割れ）が発生しやすいため、制振ダンパー心材を十字、H字にするには、緻密な溶接施工条件の構築が必要とされていました。そこで高い荷重を負担する大断面の高耐力ブレースの活用展開を加速するために、溶接しても割れが発生しない、つまり溶接施工性がよい新しいFMS合金の開発が望まれていました。

3. 今回、NIMSの研究チームは、高い疲労寿命を得るための成分設計と、高温割れ（凝固割れ）を防ぐための成分設計を組み合わせた第二世代のFMS合金開発を行いました。そして、添加するニッケル（Ni）とクロム（Cr）の成分比をわずかに調整することで、室温での変形が可逆的に生じつつ、溶接時の割れが起きにくい結晶構造の変化が起こり、溶接しても超長疲労寿命を示す新合金の開発に成功しました。新合金は、第一世代のFMS合金とほぼ同性能の疲労寿命を示しつつ、実際に溶接しても割れが発生しないことを実験で確認しました。

4. 本研究成果を元に、第二世代FMS合金の溶接構造体化、部材化に関する事業「超長疲労寿命の溶接構造による高耐力ブレース型建築用制振ダンパーの開発」（事業代表：株式会社竹中工務店井上泰彦研究主任）が、2020年科学技術振興機構（JST）「研究成果最適展開支援プログラム（A-STEP）産学共同 [本格型]」に採択されました。今後、このプロジェクトのもとで、この第二世代FMS合金を用いて、心材の断面を十字やH字に接合した大断面溶接構造制振ダンパーの開発を進めます。

5. 本研究は国立研究開発法人物質・材料研究機構 構造材料研究拠点 振動制御材料グループ 澤口孝宏グループリーダー、溶接・接合技術グループ中村照美グループリーダーらからなる研究チームによって行われました。本研究成果は、*Scripta Materialia* 誌にて、2021年2月24日にオンライン掲載されました。

研究の背景

建築構造物を地震から守るため、建物の揺れを吸収する制振ダンパーや、地盤の揺れが建物に伝わるのを防ぐ免震支承が使われています。鋼材制振ダンパーは、鋼材の弾塑性変形によって地震のエネルギーを熱エネルギーに変換して揺れを抑えます。NIMS、株式会社竹中工務店、淡路マテリア株式会社からなる共同研究チームは、繰り返し弾塑性変形に対する耐久性を高めるため、疲労耐久性に優れたFe-Mn-Si系合金（FMS合金）を開発しました。FMS合金は繰り返し弾塑性変形に対して可逆的な変形を示すことで従来比10倍の疲労寿命を示します。2014年、超高層ビル「JPタワー名古屋」に初適用されました。また、共同研究チームは、大量生産に適したFMS合金の連続鋳造技術と、FMS合金と溶接構造用鋼の異材溶接技術を開発し、2018年、溶接ブレース型FMS合金制振ダンパーを、大規模展示場「Aichi Sky Expo」に適用しました。

一方、FMS合金同士の同材溶接については、高温割れ（凝固割れ）が発生しやすいことが課題でした。制振ダンパー基の負荷荷重を増加させるため、制振ダンパー心材断面を十字やH字に溶接組み立てして大断面化することが求められていますが、そのためにはFMS合金同士の同材溶接が必要です。しかし、第一世代のFMS合金は、溶接部に凝固割れの原因となる不純物が偏析しやすい性質がありました。凝固割れを防ぐためには、溶接部の凝固偏析を防止することが有効です。そのためには、従来比10倍の超長疲労寿命を得るための成分設計指針と、溶接時の凝固挙動を制御する成分設計指針を組み合わせる成分再設計した、新しい第二世代FMS合金の開発が必要でした。

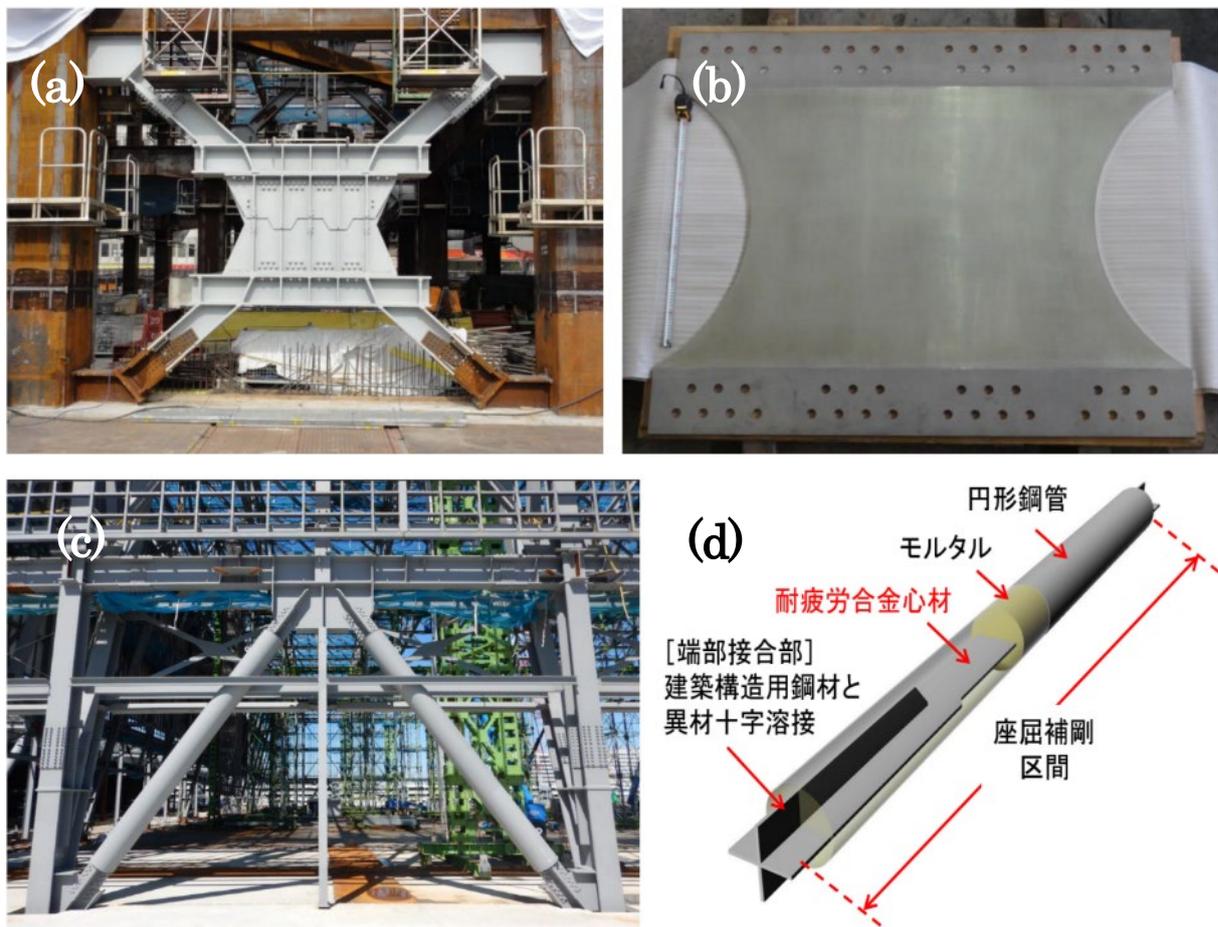


図1. FMS合金制振ダンパー。(a)せん断パネル型制振ダンパー(2014年開発)、(b)せん断パネル型制振ダンパー心材、(c)接合部溶接ブレース型制振ダンパー(2018年開発)、(d)接合部溶接ブレース型制振ダンパーモデル図。

研究内容と成果

超長疲労寿命で凝固割れしない第二世代FMS合金は、超長疲労寿命化のための第一の成分設計指針と、高温割れ（凝固割れ）を防ぐための第二の成分設計指針を組み合わせることで開発されました（図2）。

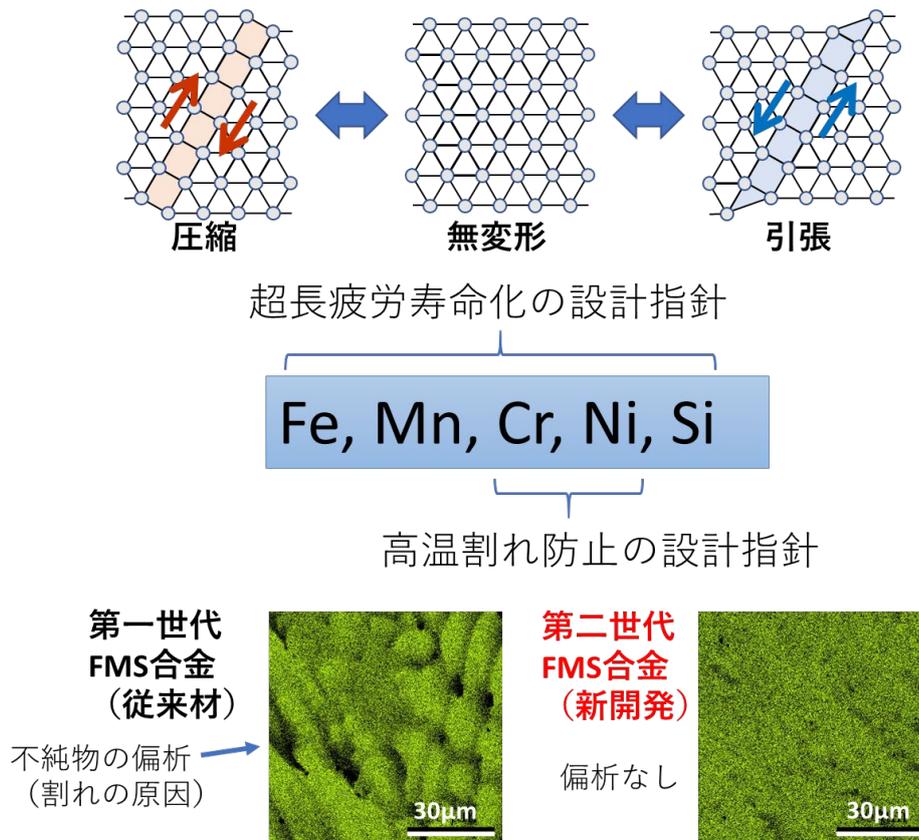


図2. 超長疲労寿命で高温割れしない第二世代FMS合金の設計指針。

第一の成分設計指針として、NIMS振動制御材料グループ澤口孝宏グループリーダーらは、FMS合金の超長疲労寿命が可逆的な原子の運動（図2上段）に起因することに着目し、成分から疲労寿命を予測する手法を開発しました。この手法により、FMS合金の基本構成元素であるFe、Mn、Siに加えて、添加元素のCr、Niをどのような配合比にすれば、可逆的な変形機構を発現させることができるのか予測が可能となりました。

第二の成分設計指針として、NIMS溶接・接合グループの中村照美グループリーダーらは、FMS合金の溶接時の凝固挙動に及ぼす成分の影響を明らかにしました。第一世代のFMS合金は、凝固時に偏析が生じてリンなどの不純物元素の濃度が増加し、割れやすくなるという欠点がありました。割れが生じにくい第二世代FMS合金の設計のためには、溶接時の凝固偏析が生じないように成分を調整する必要があります。凝固偏析を防ぐには、Cr、Niの配合比の調整が有効であることが知られていました。そこで、第二世代FMS合金の成分は、超長疲労寿命の条件（Fe、Mn、Cr、Ni、Siの配合比）を満足させながら、溶接時の凝固挙動に影響する条件（Cr、Niの配合比）を調整することで設計されました（図2下段）。

その結果、第一世代FMS合金とほぼ同等な疲労寿命を持ちながら、溶接による凝固時に偏析が生じず、割れも起きない新しい第二世代FMS合金の開発に成功しました。具体的には、重量比でCrを0.8%増やし、Niを0.65%減らすことで、第一世代のFMS合金と同様に市販のオーステナイト系316ステンレス鋼と比較して格段に優れた疲労耐久性を示しつつ（図3）、第一世代FMS合金が溶接部に高温割れ（凝固割れ）を示す厳しい溶接条件に対しても、第二世代FMS合金（では高温割れ（凝固割れ）が観察されないことを確認しました（図4）。

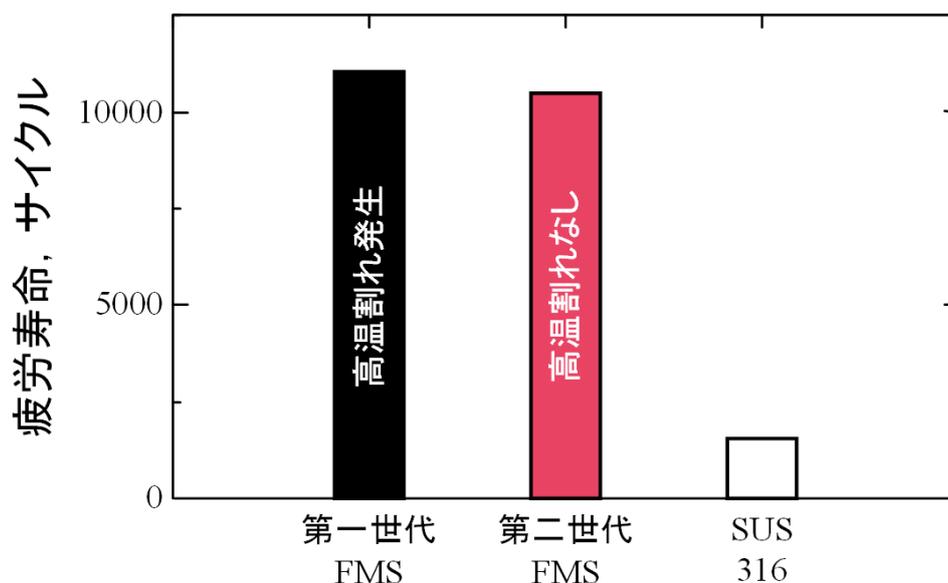


図3. 第二世代FMS合金の疲労寿命.

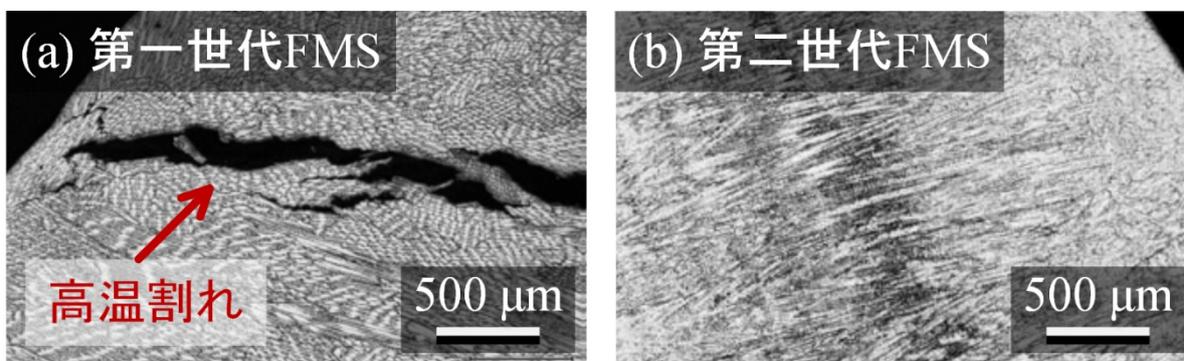


図4. (a)第一世代FMS合金と(b)第二世代FMS合金の溶接部組織.

今後の展開

今後、この第二世代FMS合金を用いて、心材の断面を十字やH字に接合した大断面溶接構造制振ダンパーの開発を進めます。本研究成果を元に、第二世代FMS合金の溶接構造体化、部材化に関する事業「超長疲労寿命の溶接構造による高耐力ブレース型建築用制振ダンパーの開発」(産側研究代表:株式会社竹中工務店井上泰彦、学側研究代表:物質・材料研究機構中村照美)が、2020年科学技術振興機構(JST)「研究成果最適展開支援プログラム(A-STEP)産学共同[本格型]」に採択されました。

制振構造や免震構造は、日本国内のみならず、米国西海岸、台湾、東南アジア諸国、イタリアなどの地震国にも普及が展開しつつあります。また、制振ダンパーは地震のみならず、近年巨大化する台風災害の対策としても注目され始めています。

掲載論文

題目: Development of ferrous-based weldable seismic damping alloy with prolonged plastic fatigue life

著者: Fumiyoshi Yoshinaka, Takahiro Sawaguchi, Susumu Takamori, Terumi Nakamura, Goro Arakane, Yasuhiko

Inoue, Susumu Motomura, Atsumichi Kushibe

雑誌: Scripta Materialia, Volume 197, 113815

掲載日時: 2021年2月24日オンライン掲載

DOI: 10.1016/j.scriptamat.2021.113815

用語解説

- (1) 弾塑性変形：力を加えると変形するが、力を取り除くと元の形に戻る「弾性」と、力を加えて生じた変形が、力を取り除いても残る「塑性」の両方の性質を併せ持つこと。
- (2) 長周期地震動：地震で発生する約 2 - 20 秒の長い周期で揺れる地震動のこと。地震動の周期が地盤や建物などが構造的にもつ固有振動と共振を起し、構造物の振幅が増大することにより引き起こされる。長周期地震動は減衰しにくいいため、共振が長く続いて振幅が大きくなりやすい。
- (3) 制振ダンパー：地震による建物の揺れを吸収することを目的とする部材。オイルの粘性を利用するオイルダンパー、ポリマーやエラストマーなどの粘弾性体を利用する粘弾性制振ダンパー、鋼材の弾塑性変形を利用する鋼材制振ダンパーなどがある。
- (4) 鋼材制振ダンパー：鋼材の弾塑性変形を利用する制振ダンパー。建物本体よりも意図的に低強度に設計して制振ダンパー部に変形を集中させる。
- (5) FMS 合金：Fe（鉄）、Mn（マンガン）、Si（ケイ素）を必須元素とする耐疲労合金。制振ダンパー用に開発された第一世代 FMS 合金の組成は Fe - 1.5Mn - 1.0Cr - 8Ni - 4Si（質量%）であり、上記三元素の他に Cr（クロム）と Ni（ニッケル）を高濃度に含んでいる。振幅 1% のひずみ制御弾塑性変形の繰り返しに対する疲労寿命が平均 12,000 サイクル程度と、一般鋼材に対して約 10 倍の疲労寿命を示すことが特長である。

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 設計・創造分野 振動制御材料グループ
グループリーダー 澤口孝宏（さわぐちたかひろ）

E-mail: SAWAGUCHI.Takahiro@nims.go.jp

TEL: 029-859-2416

URL: <https://www.nims.go.jp/research/group/vibration-control-materials/index.html>

国立研究開発法人 物質・材料研究機構 構造材料研究拠点 接合・造形分野 溶接・接合技術グループ
グループリーダー 中村照美（なかむらてるみ）

E-mail: NAKAMURA.Terumi@nims.go.jp

TEL: 029-859-2113

URL: <https://www.nims.go.jp/research/group/welding-and-joining-technology/index.html>

（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