

新しい疲労緩和メカニズムの発見と製造技術のブレークスルー

1. 新合金の特性

金属の疲労耐久性を評価する試験方法の一つに、一定のひずみ振幅で弾塑性変形を繰り返して、疲労破壊するまでのサイクル数（疲労寿命）をカウントする低サイクル疲労試験があります。疲労寿命とひずみ振幅の間には相関関係があり、ひずみ振幅が大きくなるほど疲労寿命は短くなります。

共同研究グループが行った低サイクル疲労試験では、従来のダンパー鋼材（LY225、LY100）が千サイクル未満で破断する厳しい変形条件に対し、新合金は 1 万サイクルを超える長寿命を達成しました（図 1）。実用金属材料としては世界最高峰の疲労耐久性です。

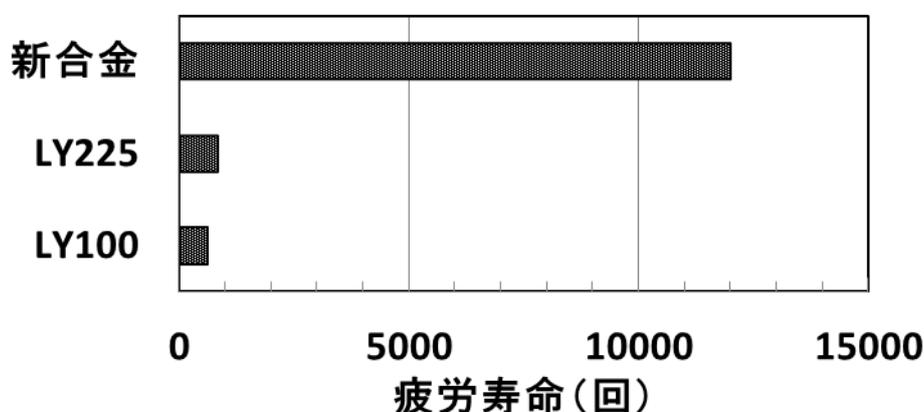


図 1. 新合金の低サイクル疲労寿命

2. 形状記憶合金で見つかった新しい疲労緩和メカニズム

開発のヒントは、鉄を主成分とする形状記憶合金として知られる Fe-Mn-Si 系合金（以下、FMS 合金）^{※1}を用いた基礎研究の中から生まれました。図 2 は表面を鏡面に研磨仕上げした FMS 合金を引張・圧縮した際に、表面に発生する起伏パターンが可逆的に変化する様子を原子間力顕微鏡で観察したものです。形状記憶合金の塑性変形は、合金内部の結晶配列が将棋倒しのように連鎖的に変化する「マルテンサイト変態」によって進行しますが、加熱するとこれが逆変態して、原子が元の位置に戻ることで形状が回復します。これが形状記憶のメカニズムですが、同じ現象は逆応力を負荷することによっても生じることが初めてわかりました。

このような可逆的な変形メカニズムにより、FMS 合金は繰り返し変形に対する追随性が高く、優れた疲労耐久性を示します。この合金を制振ダンパーの心材に用いれば、弾塑性変形による高いエネルギー吸収を長期間発揮させることが可能です。この発見をベースに、対象成分範囲を拡大して様々な合金を作製し、耐疲労特性を調査した結果、形状記憶合金とは異なる最適成分範囲が存在することもわかり、いくつかの新成分も見出されました^{※2}。

※1. 1982 年、東工大が最初に報告した日本発祥の形状記憶合金。バーナー加熱によりクレーンレールを短時間で強固に締結する継目板が、2004 年、淡路マテリアにより製品化されています。

※2. 平成 18 年度新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）産業技術研究助成事業による補助の下行われました。各種成分の試作は NIMS 材料創製ステーションが行いました。

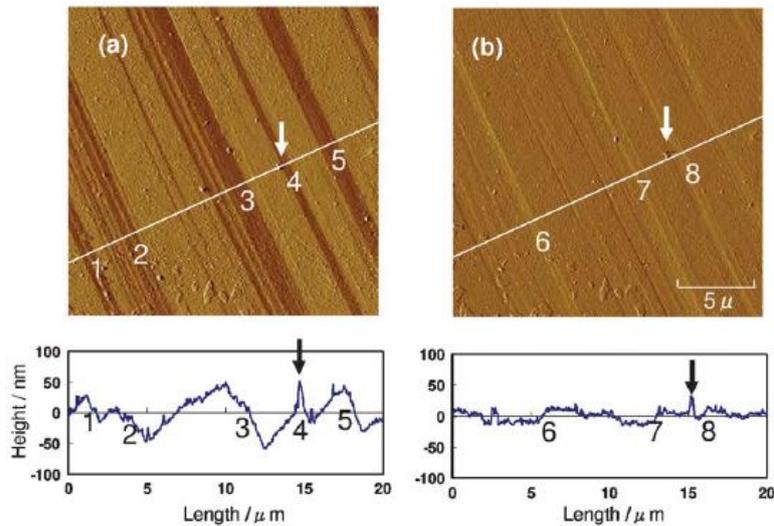


図2. Fe-Mn-Si 形状記憶合金の可逆的な塑性変形を表す原子間力顕微鏡写真. 引張変形後に形成されたバンド状表面起伏(a)が、逆応力で圧縮すると、元のフラットな表面状態(b)に戻る。(T. Sawaguchi, P. Sahu, T. Kikuchi, K. Ogawa, S. Kajiwara, A. Kushibe, M. Higashino, T. Ogawa. "Vibration mitigation by the reversible fcc/hcp martensitic transformation during cyclic tension-compression loading of an Fe-Mn-Si-based shape memory alloy." Scripta Materialia ; 54 巻, 2006 年, 1885 頁~1890 頁)

3. 製造技術課題解決の取り組み

FMS 合金の製造には複数のプロセス課題があります。普通の鋼材では 1~2wt%程度の少量しか使わないマンガンを、FMS 合金では 10~30 wt%の範囲で多量に添加する必要があります。しかしマンガンは溶解中に蒸発しやすいため、高濃度のマンガンを含む組成の合金を得るには、溶解方法やマンガン原料の検討が必要です。

また、熱間鍛造・熱間圧延などの 1 次加工においては、加熱温度に通常の鋼材とは異なる制限があり、最適温度範囲を外れて圧延するとバラバラに破断してしまうこともある難しい材料です。最終加工工程においては、形状記憶合金としての特殊な性質のために、加工中の熱や荷重による予想外の反りや曲りが発生し、寸法精度の確保に大きな障害となります。

共同研究チームは、加熱温度範囲の最適化や部材化のための各種加工技術の改良を進め、FMS 合金製のプロトタイプ制振ダンパーを製造しました。しかし、実大建築用ダンパーを複数製造するためには、数 10 トン規模以上の電気炉溶解が必要であり、そのためには Mn 濃度を大幅に低下させる必要があるなど、既存の FMS 合金成分では限界がありました。

4. 第二世代 FMS 合金の開発

合金成分の抜本的な見直しには新しい合金設計指針が必要です。共同研究チームは、合金成分と疲労特性の関係を系統的に調査するとともに、変形によって合金中に発達する微細結晶組織を観察して特性変化の規則性を探りました。その結果、変形を担うマルテンサイト結晶が、図3に示すような複雑な幾何学パターンを示す場合に優れた疲労耐久性を示すことが判明し、このような微細結晶組織発達におよぼす添加元素の役割も次第に明らか

になりました。

1980年代から2000年ごろにかけて開発された各種FMS系形状記憶合金を第一世代のFMS合金とするならば、今回新たに開発したのは、疲労緩和構造（Fatigue Mitigation Structure）によって疲労耐久性を改善した第二世代FMS合金です。新しい合金設計コンセプトは、単一の合金成分開発にとどまらず、用途に応じた複数の特性バランスも可能にしました。「JPタワー名古屋」に適用するのは、電気炉溶解可能な濃度までMnを低減するとともに、強度、加工性、衝撃靱性、耐食性などの総合性能も改善させた実用型ステンレス鋼タイプです。新成分に対応させた設備改良によりFe-Mn-Si系としては世界初の電気炉溶解にも成功しました。ダンパー心材として開発した新材料は優れた機械的特性も兼備していることから、疲労耐久性に優れた建築用鋼材として利用の途が開かれました。

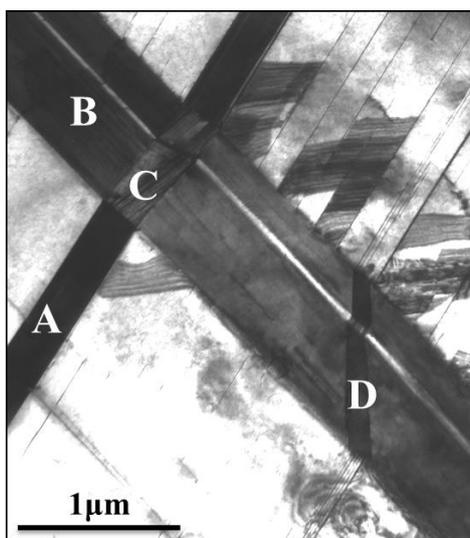


図3. FMS合金が示す微細結晶構造。A～Dは、変形に対して柔軟に結晶構造や結晶配列を変化させてできる微細マルテンサイト結晶である。(X. Zhang, T. Sawaguchi, K. Ogawa, F. Yin, X. Zhao, “A structure created by intersecting epsilon martensite variant plates in a high-manganese steel.” *Philosophical Magazine* ; 91 巻, 2011 年, 4410 頁～4426 頁)

【問合せ先】

この件に関するお問い合わせは下記にお願いいたします。

○新合金について

(独) 物質・材料研究機構 企画部門広報室 TEL 029-859-2026

○新合金の製造・加工技術について

淡路マテリア(株) 東京支社 広報担当 TEL 03-3295-1732