

研究が活発化する 鉄系超弾性合金

大きな変形を与えても力を除けば元の形状に戻る性質を持つ超弾性合金。

近年、鉄系超弾性合金を利用する研究が活発化している。

形状記憶合金を含めて、最新の研究開発例を中心に紹介する。

世界に注目される鉄系超弾性合金

「新しく開発された超弾性合金は一体どんな性質を持つのか?」

最近、海外からこのような問い合わせが増えているのは東北大学大学院工学研究科金属フロンティア工学専攻の大森俊洋准教授らが開発した鉄系超弾性合金についてである。

形状記憶合金は大きな変形を与えても加熱すると元の形状に戻る特性を持つが、なかでも「超弾性効果」を示すものは、加熱しなくても力を除くだけで元の形状に戻る。一般の金属材料では約0.5%を超える歪を与えると、力を除いた後に歪が残るが、超弾性合金では数%~10%程度の変形を与えても、元の形状に復元する(図1)。この超弾性合金を橋梁の耐震部材に利用しようという試みが米国を中心に始まっている。現状の橋は地震時に倒壊は免れても損傷もありすぐに使用することはできないが、超弾性合金を利用すれば地震後の残留変形を抑制し、地震直後に橋を使用できるようになるのではと期待が高まっている。これまで眼鏡フレームや医療用ガイドワイヤ等実績のあるTi-Ni合金は高い超弾性効果を持つものの、材料コストや加工コストが高いことが採用の障壁になっている。そこでコストを抑えられる鉄系超弾性合金に関心が集まっているのである。

これまで低コスト化が望める鉄系形状記憶合金の多くは、形状記憶効果は示すものの超弾性効果が得られな

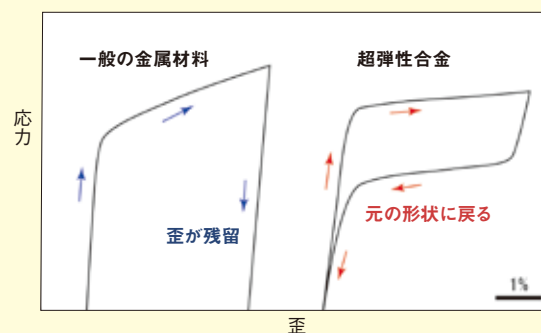


図1 一般の金属材料と超弾性合金の歪と応力の関係

かった。しかし2010年代に入り、東北大で鉄系では世界初の超弾性効果を得ることに成功し、鉄系超弾性合金は世界の研究者が注目する存在となっている。

実用化を視野に開発が進む鉄系超弾性合金

開発された鉄系超弾性合金はFe-Ni-Co-Al系とFe-Mn-Al系合金で、特にFe-Mn-Al系合金は極低温から200℃まで強度がほとんど変化しないという、温度変化の影響を受けない特性が2020年8月に発表され、注目を集めている(図2)。通常、超弾性合金は温度が高くなると変形強度が高くなり、力学特性が安定しない。超弾性効果が発現する温度範囲は狭く、

−263℃～200℃における超弾性効果

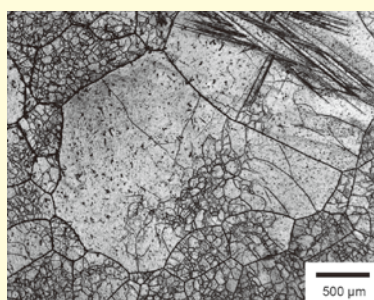


図2 温度依存性のない鉄系超弾性合金の特長

開発した鉄系超弾性合金の外観



サイズは直径約20mm、長さ約110mm。



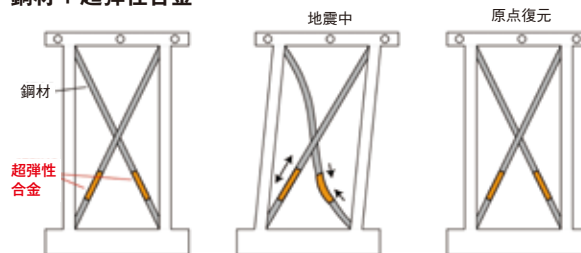
サイクル熱処理により生じたFe-34Mn-15Al-7.5Ni合金の異常粒成長。α相における異常粒成長の光学顕微鏡写真



鉄系超弾性合金の結晶粒を170 mmまで巨大化できた。

写真提供：(株)古河テクノマテリアル

鋼材＋超弾性合金



Cu系超弾性合金は筋交いに適用され、国土交通大臣認定を取得した。



写真提供：(株)古河テクノマテリアル

図3 超弾性合金単結晶大型部材の開発

Ti-Ni合金では温度が1℃高くなると応力が約6 MPa高くなり、実用的に超弾性を利用できる温度範囲はおおよそ−20℃～100℃と限られている。今回開発された超弾性合金はFe-Mn-Al系合金にNi、Crを添加したもので、−263℃～200℃まで温度が変化しても強度（応力）がほとんど変化しない。これは地球上での使用はもちろんのこと、激しい温度変化に曝される月や火星などでも利用可能という。

鉄系超弾性合金は安価な原料で構成されるため、大型部材としての利用が期待できる。特に建物や橋梁等が巨大地震に襲われた際、地震後の残留変形を抑制する制震材として超弾性合金を利用する研究が活発化している。実現すれば、地震による被害を軽減し、迅速な災害復旧が可能になると、期待が高まっている。

そこで課題となるのが超弾性合金の大型部材化である（図3）。現在、実績のあるTi-Ni合金はごく小さい製品への適用に

限られている。Ti-Ni合金は、超弾性効果を得るために結晶粒を粗大化させる必要はないが、その代わりに加工熱処理が重要となり、ある程度、細くなるまで加工をする必要がある。そのため、太径では十分な加工を与えられずに良好な超弾性効果を得られないという問題がある。一方、Fe-Mn-Al系合金は変態歪の異方性が大きく、超弾性効果は結晶粒径に大きく影響される。優れた超弾性効果を得るには、結晶粒径が棒や板の断面以上のサイズになるか、単結晶にする必要がある。そのためミクロ組織を制御し、超弾性合金の結晶粒径を巨大化させる必要がある。

すでにCu系超弾性合金（Cu-Al-Mn合金）では、冷却・加熱といったサイクル熱処理によって巨大な結晶粒（異常粒）を成長させ、長さ700 mmの単結晶をつくることに成功している。通常、結晶粒は数十μm～1 mm程度であるから、非常に大きな結晶粒サイズを実現できたといえる。この単結晶化は熱処理

だけで済むため、量産に向けて高度な設備を必要としないことも利点である。このCu系単結晶超弾性合金は、ハウスメーカー等との共同開発により、木造住宅用の鋼製の筋交い(たすき掛けの斜材)の一部に使用され、2019年10月に国土交通大臣認定を取得している。超弾性合金を使用しない場合は地震

の強い揺れにより筋交いが緩み、抵抗力が低下するが、超弾性合金を利用した場合は、強い揺れで変形が生じても回復するため筋交いが緩むことはなく、大地震が繰り返し発生しても抵抗力を発揮し続ける。

このCu系超弾性合金の研究成果を活かして、メカニズムを

実用化が進む鉄系形状記憶合金

■ 接続部材として実用化が進むFe-Mn-Si系合金

近年、実用化が着実に進んでいるのが鉄系形状記憶合金である。代表的なのはFe-Mn-Si系合金で、耐食性を向上させるためこれにCrやNiを添加した合金も開発されている。Fe-Mn-Si系合金は変形と加熱を繰り返すと回復特性が向上する「トレーニング効果」があり、このトレーニング効果を利用すると、室温で6%程度変形した際に最大で約4%の回復歪が得られる。Ti-Ni合金のように完全には回復しないが、用途によっては十分有効な回復量となる。原料が安価で、一般鋼材と同じ生産設備で製造可能という利点や、一度形状回復した後は加熱冷却による形状変化は生じないという特徴を活かし、実用化が進んでいる。一般的には継手のような接続部材に適しており、特に比較的大きな部材の締結用途でコスト優位性が大きくなる。なかでも製鉄所構内のクレーンレール用継目板は近年、最も実績の多い用途となっている(図4)。

製鉄所構内のクレーンレールは2枚の一般鋼材から成る継目板をボルトで接合する方式が標準であるが、ボルトとボルト孔の間に隙間があることでレール同士の繋ぎ目にも隙間が生じる。隙間が生じると、クレーンの車輪とレール端部が衝突し、振動や衝撃が起こったり、レール端部が摩耗して凹んだり欠けが発生し、クレーンの走行に障害を起こす場合がある。

そこで開発されたのがFe-28Mn-6Si-5Cr合金を使用した継目板である。これはあらかじめ強制的に引張変形を加えておいた2枚の継目板でレール継目部を挟み込んでボルトで固定し、継目板を加熱することで形状記憶効果により収縮してレールを引き寄せ、遊間(隙間)を消滅させる。遊間が消滅した後も継目板はさらに収縮しようとするため、レールとレールを押し付ける締結力が発生する。この締結力をクレーンがレール走行時に発生するレールを引っ張る力よりも大きく設計することで、引張力を打ち消して遊間の再発生を抑制することができる。施工においては継目板を均一に加熱する施工方法を確立することで、熟練工を必要とせず、1か所10分程度と短時間で接続することが可能となっている。2004年の初適用から製鉄所構内の天井クレーンで2200箇所以上採用され、クレーンが継目部を通過した際の振動が大幅に減ったと報告されている。初適用から17年経過したが、現在も問題なく使用されている。

■ 優れた疲労耐久性を持つ制振ダンパー

Fe-Mn-Si系合金は二つの特性を持つ。一つは形状記憶効果、もう一つは非常に優れた疲労耐久性である。この疲労耐久性を活かして、2014年に制振ダンパーが実用化され、注目されている(図5)。

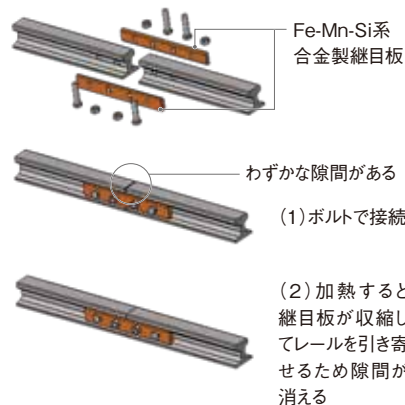
制振ダンパーは、地震時に構造物の変形を集中的に受けることで地震エネルギーを吸収し、揺れを低減することで主要構造部材の損傷を抑える役割



レール継目部の損傷状況

(出典：新日鉄住金技報第405号(2016)72-80)

Fe-Mn-Si系合金製継目板によるレールの締結



Fe-Mn-Si系合金製継目板の外観



クレーンレールのみならず、ランウェイガーダーや天井クレーンの長寿命化にも効果があると言われている。

図4 多数の実績を持つ製鉄所構内クレーンレール用継目板

明らかにするとともに熱処理プロセスの最適化を進め、鉄系超弾性合金への応用が進められている。科学技術振興機構（JST）の研究成果最適展開支援プログラム「大地震後の建造物の機能維持に向けた鉄系超弾性合金単結晶大型部材

の開発」（東北大と（株）古河テクノマテリアル）では、鉄系超弾性合金の結晶粒を170mmまで巨大化できた。さらには実用化を視野に入れ、超弾性合金を使用した部材の耐震性の評価等が行われている。

●取材・資料協力 東北大学大学院工学研究科金属フロンティア工学専攻 大森俊洋准教授 ●文 藤井 美穂

をする。制振ダンパーは主にオイル系や粘性系、鋼材系ダンパーがある。低降伏点鋼の弾塑性変形を利用する鋼材ダンパーは低コストで汎用性があり、最も高いシェアを持つ。近年、海洋型巨大地震や長周期・長時間地震動、巨大余震などの大振幅、多数回の繰り返し変形など、従来の想定をはるかに上回る地震に備える必要性が高まり、この鋼材系ダンパーのさらなる疲労耐久性向上が望まれている。

そこで開発されたのがFe-15Mn-10Cr-8Ni-4Si（FMS）合金を使用した鋼材系ダンパーである。これは物質・材料研究機構、（株）竹中工務店、淡路マテリア（株）により共同開発された。開発された合金は低サイクル疲労寿命が従来の一般鋼材に比べて約10倍となる。これを制振ダンパーの芯材に用いると、制振ダンパーの低サイクル疲労寿命が従来鋼を芯材に用いたダンパーに比べ著しく向上する。芯材は板状になっており、芯材が面外に変形しないよう補剛板で覆ったせん断パネル型ダンパーや補剛鋼管で覆いモルタルを充填したブレース型ダンパーが実用化されている。

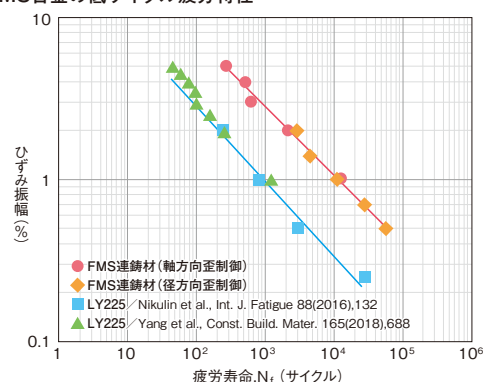
パネル型制振ダンパーが実用化された2014年以降、量産化を進めるため、合金の製造プロセスの改良と溶接技術の開発が行われた。当初は10t規模の溶解量の電気炉を用いて、特殊鋼の製造方法で製造していたが、その後の研究開発によって、60t規模の溶解量のステンレス鋼製造設備を使用し、連続製造によって厚板を製造することが可能となった（製造は日鉄ステンレス（株））。FMS合金はステンレス鋼に近いCr量とNi量を含有するが、同時にMnとSiも多く含有することから連続製造が可能かどうかの判断が難しく、溶融凝固した同材料の熱間加工性等を調査するなど、検討が行われた。また既存の溶接材料では溶接できなかったため、専用の溶接材料を開発することで接合部（建物とダンパーが接合する両端部分）に建築構造用鋼材のリブを隅肉溶接することが可能となった。

このような改良・開発を受けて2017年、愛知県国際展示場にFMS合金を使用した制振ダンパーが適用された。今後は高層ビルや大型施設のみならず、土木・橋梁構造物、一般住宅、既存建物の耐・制振補強などにも用途を拡げていく予定で、これまで建物を限定した指定建築材料の国土交通大臣認定を取得してきたが、建物を限定せずに一般材料としての国土交通大臣認定取得を急いでいるという。

Fe-Mn-Si系合金は1982年に発見されてからその後の開発、応用まで、主として日本で行われてきた合金である。最近では実用化例が着実に増えてきており、その優れた性能を活かして、様々な用途で活躍の場を拡げていくことを期待する。

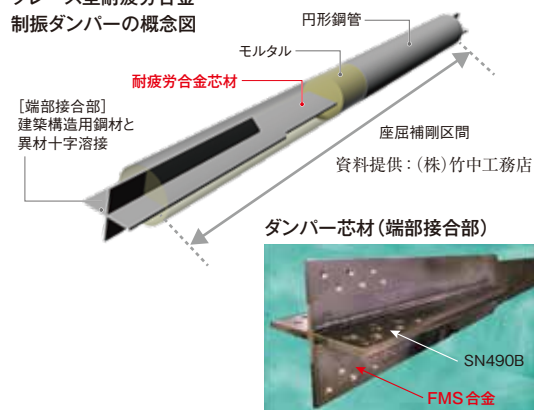
●取材・資料協力 淡路マテリア（株）

FMS合金の低サイクル疲労特性



低サイクル疲労寿命は低降伏点鋼（LY225）の約10倍となる。

ブレース型耐疲労合金
制振ダンパーの概念図



ダンパーの取付状況



資料提供：（株）竹中工務店

図5 FMS合金を使用した制振ダンパー