

第33回 超弾性形状記憶合金ばねによる振動と衝撃の絶縁

京都工芸繊維大学 増田 新

1. はじめに

形状記憶合金とは形状記憶効果を有する合金の総称である。形状記憶効果とは、力を加えられることによって変形した材料が、温められるだけで元の形状に戻る性質である。形状記憶合金には超弾性という性質もあり、通常の金属なら塑性変形してしまうような8%もの大ひずみを与えられた材料が、除荷のみで元の形状に戻ってしまう。

形状記憶合金の応用は形状記憶効果を使ったアクチュエータ型のもの、超弾性を利用したばね型のものに大別できるが、金属でありながらしなやかさとエネルギー吸収能を持った超弾性材の特性は力の伝達抑制や振動の絶縁に極めて有効である。ここでは、まず形状記憶合金の性質について簡単に述べた上で、超弾性形状記憶合金の特性を利用した振動や衝撃の絶縁デバイスの研究について紹介する。

2. 形状記憶合金について

形状記憶合金において形状記憶効果と超弾性が発現するメカニズムは、いずれも同じ「熱弾性型マルテンサイト変態」と呼ばれる相変態による。マルテンサイト変態とは、金属の原子が拡散をとまわずせん断的に移動して新しい結晶構造に変化する相変態の一種で、合金を変態温度以下に冷却することによって生じる。特に熱弾性型マルテンサイト変態では、変態時の体積変化が少なくマルテンサイト相と母相との整合性がよいため、変態に際して転位がほとんど導入されない。このため、熱弾性型マルテンサイト変態は結晶学的に可逆であり、いったん変態した材料は加熱によって逆変態して元の母相に戻ることができる(図1の経路2)。さらにマルテンサイト変態時の結晶構造には24通りの等価なバリエーション(兄弟晶)が存在し、異なるバリエーション間の移動は低応力で行われるため、マルテンサイト状態の形状記憶合金は非常に軟らかく、変形は除荷後も保持される(図1の経路1)。変態温度以下にある合金が鉛のごとく大変形し、変態温度以上への加熱によって元の形状に直ちに回復する形状記憶効果はこのようにして生じる。

マルテンサイト変態は冷却だけではなく応力の負荷によっても進行する。これを応力誘起マルテンサイト変態という。変態温度以上の合金(母相)に応力をかける

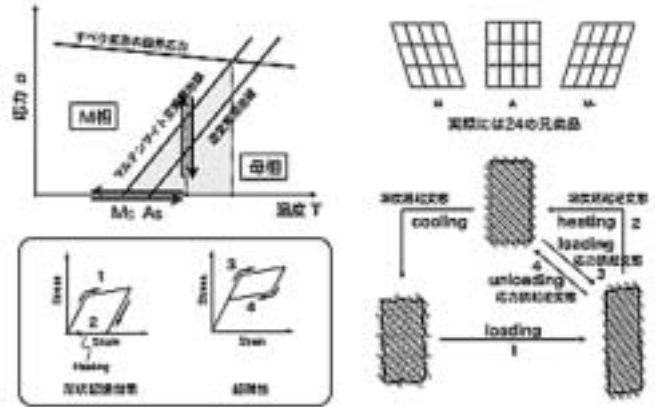


図1 形状記憶効果と超弾性

と応力誘起変態が起こり、負荷状態においてマルテンサイト相が成長する。このとき24のバリエーションのうち、応力を緩和する方向のバリエーションが優先的に生成するため、合金は巨視的に大変形する(図1の経路3)。しかしそもそも変態温度以上では母相が安定であるので、生成したマルテンサイト相は除荷とともに逆変態して可逆的に母相に戻る(図1の経路4)。これが超弾性である。

超弾性形状記憶合金の変態・逆変態のサイクルにおいては、応力ひずみ線図は図1に示すようになる。応力をゼロから次第に増加すると、まず母相が弾性変形する。変態開始応力に達すると応力誘起変態が始まるが、変態の進行中は応力がひずみの増加に依存せずほぼ一定になる。変態が終了しマルテンサイト相が100%になった時点で除荷すると、今度はまずマルテンサイト相の弾性ひずみが緩和し、応力が逆変態開始応力に達すると逆変態が始まる。逆変態中も応力はほぼ一定であるが、その応力は変態中の応力より小さい。すなわち変態・逆変態のサイクルはヒステリシスを描き、大きなエネルギーの散逸をとまう。

3. 動的ばね材料としての超弾性形状記憶合金

超弾性を示す形状記憶合金をばね材として見たときには、以下のような特長がある。まず、変態中の応力が一定となる力の飽和特性である。これはソフトばね特性と言い換えてもよく、超弾性材特有のしなやかさはこの性質に起因する。変形が進んでも保持力が変わらないため、歯列矯正ワイヤやブラジャーのワイヤなどに利用されている。また、しなやかで大変形から回復可能

であることを生かして、携帯電話のアンテナ、メガネフレームなどにも多く利用された実績がある。

ところで、(1)力の飽和特性、(2)大変形から除荷のみで回復可能、(3)大きな散逸エネルギー、という超弾性形状記憶合金の特長は、力の伝達抑制、なかでも振動や衝撃の絶縁用途にぴったりであると考えられる。ただし、超弾性域における疲労寿命は $10^3 \sim 10^4$ と短く、定常的大振幅振動の絶縁には向かない。形状記憶合金の特性を利用して振動の絶縁を行うアイデアが最初に示されたのは1991年のGraesser & Cozzarelliによる免震デバイスの提案であり、以来いろいろな研究が行われている。しかし静的な前述が先に述べたように広く実用化されているのに対して、このような動的用途は未だチャレンジングなテーマである。詳しくは参考文献(1)を参照されたい。

4. 座屈型超弾性ばねによる振動の絶縁

先に述べた超弾性形状記憶合金の特長をそのまま生かすためには、たとえばワイヤ材を引張方向に変形させて使用すればよいが、使用する材料の長さあたりのストロークはたかだか8%と非常に小さく空間効率の悪いデバイスになってしまう。ワイヤ材やりボン材を曲げ変形させて使用すると空間効率は向上するが、うまく変形様式を選ばないと復元力の飽和特性や散逸エネルギー特性を損なってしまう。

筆者らはワイヤ材を座屈様に変形させることにより、空間効率と復元力特性を両立された座屈型超弾性ばねを提案している。このばねは図2のように2本の超弾

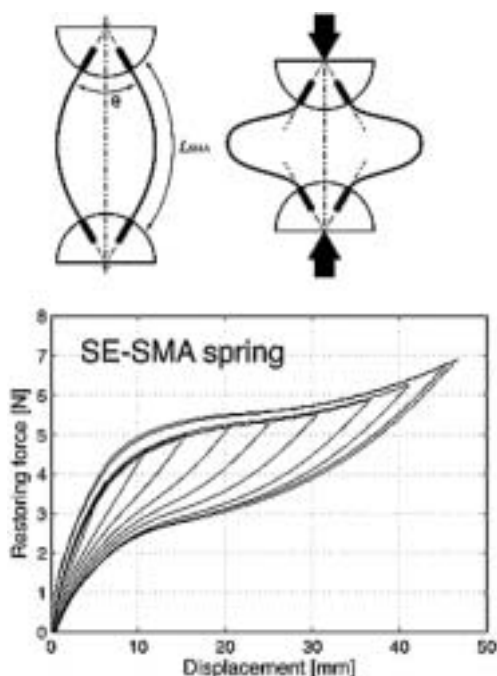


図2 座屈型超弾性ばねとその特性

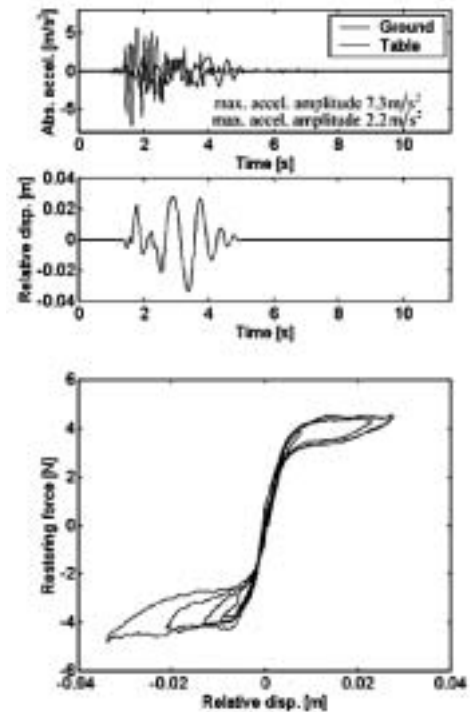


図3 地震応答の一例

性ワイヤを円弧状に対向して配置したものであり、圧縮ばねとして用いる。ワイヤの長さの60%程度のストロークを確保でき、なおかつ、超弾性材の材料非線形性に座屈変形の幾何学的非線形性を加えることで明瞭な力の飽和特性を実現している。このばねを2つ対向して使用して、小型の免震装置を作成し、水平加振台から地震波形を入力して免震特性を評価したところ、兵庫県南部地震の場合で最大加速度応答を30%まで低減することができた(参考文献(2))。

5. おわりに

超弾性形状記憶合金の振動・衝撃絶縁デバイスへの応用について述べた。この分野はこれまでに様々な検討がされているが、残念ながら実用に供されている物はほとんどない。理由は様々考えられるが、大きな問題は材料コストの高さと加工技術が限定的である点であろう。また、材料の温度が上昇したりひずみ速度が増加すると変態開始応力が上昇してしまうが、この問題はスケールの大きなデバイスや緩衝器などの高速動作デバイスで顕在化してくると予想される。高速動作時のばね特性を適切に予測できる解析・設計技術の進歩が望まれる。

参考文献

- (1) S.Saadat, et al., Smart Materials and Structures, Vol.11, pp.218-229, 2002.
- (2) 山下・増田・他, 日本機械学会論文集, C編, 73(727), 716-723, 2007.