

# 形を覚えることができる合金(形状記憶合金)とは？

高橋研究室

## 1．形状記憶合金とはどんなもの？

形状記憶合金（Shape Memory Alloys）と呼ばれる合金は、形を覚えさせるための熱処理を施しておく、その合金の化学組成などから決まるような「ある温度」より低い温度で変形しても、その「ある温度」以上に加熱すると、覚えさせられた（記憶している）形に復元してしまうという特別な性質を持つ金属材料です。「ある温度」が我々の身のまわりの温度（室温）より高い温度（例えば 60℃）なら、室温で曲げる・折りたたむなどの変形を加えても、熱いお湯につけるなどすると、高温側で「記憶」している形に復元するわけです。その様子を模式図で表した図1（a）では、横軸が材料に加えられたひずみ、縦軸が材料に加えられた力（応力）を示しています。形状記憶合金で回復できるひずみはせいぜい数%程度までで、大きなひずみを加え過ぎると元に戻りきれなくなります。一方、形状記憶合金のもう一つの特徴には「超弾性（Superelasticity）」があります。これは、「ある温度」よりも高い温度で力を加えると、図1（b）のように、ばねのような可逆的な変形が生じる現象です。

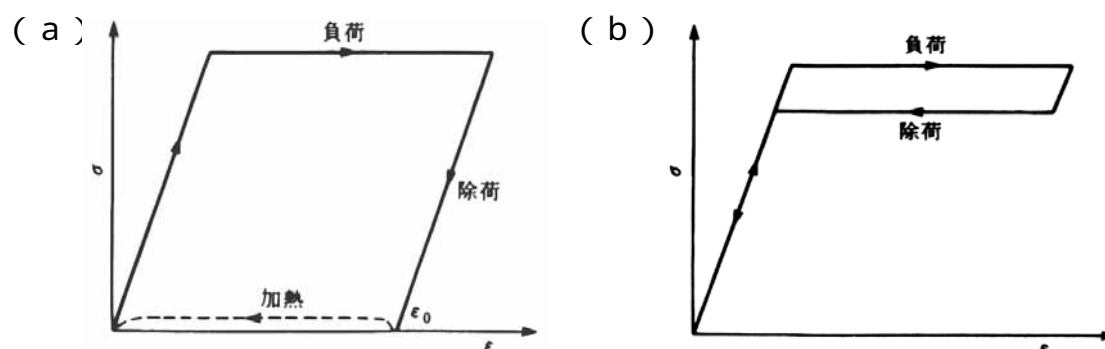


図1 形状記憶合金の応力ひずみ線図<sup>(1)</sup> (a) 形状記憶効果 (b) 超弾性

## 2．形状記憶合金にはどんな使い道があるのでしょうか？

形状記憶合金では、「もとの形に戻る」回復のひずみとその時の力が利用されます。このような使い道の例をいくつか示しておきましょう。

### もとに戻る力で締め付ける

「ある温度」が室温より低い形状記憶合金で作ったパイプ継ぎ手に、その温度より低い温度で変形を加えて広げ、内側にパイプをはめてつなぐと、室温にもどる時に継ぎ手はもとの寸法に収縮し、大きな力でパイプを締め付けるので、ねじ止めなどを使わない簡素な構造の配管が実現できるそうです。油圧関係の配管に使われた例では高い信頼性と点検修理の容易さが示されているそうです。

## 熱エンジンへの応用の可能性

熱効率が低いことなど、まだまだいろいろな課題が残されていますが、今までに熱エネルギーとして利用されていなかったような低い温度差で形状記憶合金を作動させることによって熱エンジンを構成することができます。ただ、実用性は疑問？

## 家庭用電気製品の中で活躍しています

エアコンの吹き出し口が温風の時に下向きに冷風の時に上向きになるように切り換えるしくみ、お湯が十分沸いてからドリップを始めるためのコーヒーマーカの弁、電気炊飯器の圧力弁にも形状記憶合金のばねが使われています。

## 電流で加熱してロボットの腕を動かす

形状記憶合金に位置や力のセンサの働きを組み合わせると、通電加熱による駆動で制御できるアクチュエータができます。このメカニズムは単純で小型化に適することから、ロボットなどのメカトロニクス分野での応用が期待されます。その他、

医学方面への応用も広がっています。体の中にテレビカメラを送り込んで診断したり、病気の部分を摘出して検査したりする時に使われる内視鏡では、その先端部分を能動的に動かすアクチュエータに利用されています。

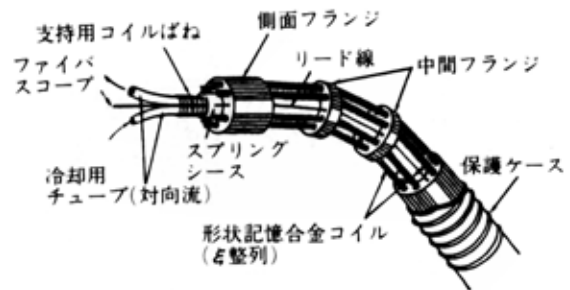


図2 内視鏡への利用<sup>(2)</sup>

## 歯科への応用やもっと身近なものも

形状記憶合金の整形外科への応用として、骨折した骨の内部にピンとして挿入し骨を固定するものや、骨の結合用に使われるものがあるそうです。また、歯列矯正用には、歯が痛くない程度のほど良い力を加えられる超弾性ワイヤが使われます。超弾性線としては、ご婦人方が最も身近につけるブラジャーのワイヤーがありますが、この用途が形状記憶合金の量的に最も大きな使い道だそうです。

幾つかの種類合金でこの「形状記憶効果」が生じることがわかっていますが、実用化されているものは Ni-Ti 合金と Cu-Zn-Al 合金の 2 種類だけと言って過言ではありません。実際に何かの実用に使われている形状記憶合金はほとんど Ni-Ti 合金です。形状記憶現象が初めて発見されたのは 1951 年で、Ni-Ti 合金で形状記憶効果が見つかったのは 1962 年のこととされているようです。1970 年代以降、この現象の仕組みが詳しくわかってきました。熱弾性型マルテンサイト変態と呼ばれる結晶構造の変化と、結晶方位の異なるマルテンサイトとマルテンサイトの界面が外力で容易に移動できる性質を持つことが、形状記憶現象が生じるもとであると考えられていますが、その機構についてはこの後の項で少し詳しく説明します。

### 3 . 形状記憶効果と超弾性のしくみは？

金属や合金は結晶を持った固体です。合金の結晶の形は、合金の化学組成と温度(と圧力)によって決まります。絶対零度から融けて液体になるまで一通りの結晶でいるものもあれば、温度によって結晶の形が変わるもの、また、力によって結晶の形が変わるものも有ります。専門的な言葉で「熱弾性型マルテンサイト変態」と呼ばれる結晶構造の変化(変態)が、形状記憶効果ならびに超弾性の発現機構に関係しているものと考えられています。

図3は形状記憶効果と超弾性における原子の移動を示した模式図です。正方形の格子(母相)は高温側での結晶を示し、互い違いのひし形の格子は、低温側で現れるマルテンサイトの結晶を示します。図の中で互い違いに積み重なっている領域はお互いに兄弟の関係にあり、その境界はごく小さな力で移動できると考えられています。マルテンサイトができる時には、兄弟関係の領域が互いに協調して外形変化が小さくなるような変化をするため全体の形はもとと同じ長方形です。これに力を加える時、兄弟領域の間の境界が移動して、

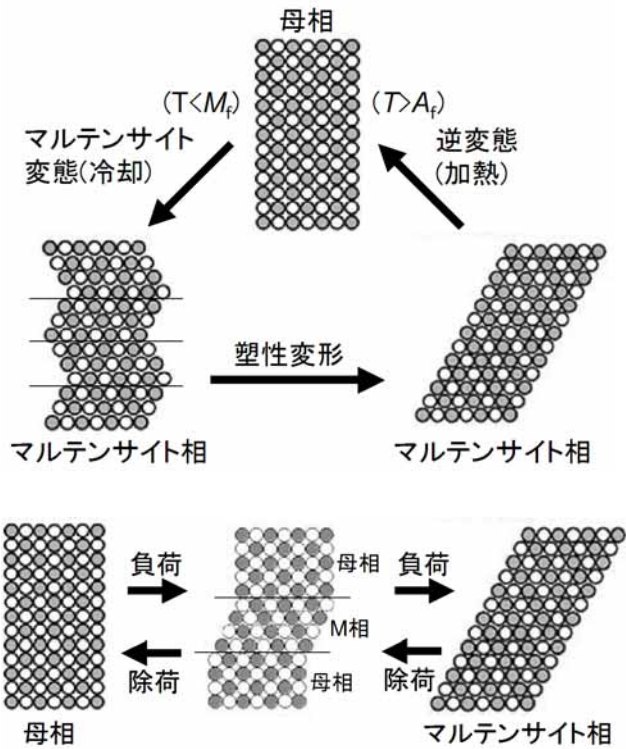


図3 形状記憶効果と超弾性の機構の模式図

図の右に示したような平行四辺形にひずみます。この後、もとの結晶に戻る温度以上に加熱する時、兄弟領域が同じ母相に戻るために形状記憶効果が生じるのです。また、マルテンサイトが母相に戻る温度より高い温度で力を加える時、可逆的な「応力誘起マルテンサイト変態」で変形が生じ、力を除くと母相に戻るので超弾性が生じます。このようなマルテンサイト変態の起こり易さ、界面移動の生じ易さが、形状記憶効果と超弾性のもとなのですが、なぜそうなのかについては未解明の部分も残っています。

### 4 . 体験研究で実験すること

Ni-Ti系の形状記憶合金(約1:1の金属間化合物)の市販品(直線の形を記憶したものの、形状記憶処理を加えてないもの、超弾性線の3種類)の線材を使用します。形状記憶処理をしてない線を変形し、その形を覚えさせるにはどんな温度で熱処理を加える必要があるのか調べてみましょう。形状記憶効果と超弾性の性質について実際

に手で触れて観察してみましょう。また、これらの材料の中味（組織、構造）がどのようなになっているのかを詳しく調べる方法についても紹介します。また市販品と同様の素材を研究室内で溶解し、自前の材料で形状記憶効果や超弾性が現れるかどうかも確認してみることにしたいと考えています。

## 5 . このテーマに関連した事柄について

【形態安定シャツ】: 最近、形態安定という機能をうたった衣類が現われています。これは、繊維に化学的あるいは熱的な処理を施して、繊維にしわがでにくくしたものです。ワイシャツのしわを取るためのアイロンかけが不要になるので便利です。衣服にしわがでにくくする方法として、繊維をふくらませるような処理をして、繊維のしわをあらかじめ引き伸ばしてしまうものがあるそうです。空気でふくらんだ風船が、力を受けて形が変わっても元の形に戻るのと同じことでしょう。

【ゴムの弾性】: ゴム風船の例を出しましたが、天然のものにしる合成のものにしる、ゴムも外から力を加えると伸びるなどして形が変わり、力を取り除くと元の形に戻る性質を持っています。これを「弾性」と呼びます。外から加えられた仕事はゴムの中に「弾性エネルギー」として貯えられ、模型プロペラ飛行機の動力にもなります。ゴムの弾性は、ちぢれた炭化水素高分子の鎖を引き伸ばすことに関係するものです。

【金属の弾性と塑性】: 金属は原子が規則正しく配列した結晶をとりますが、結晶中の原子の間にも互いに引き合う「原子間力」が働いていて、その結合は「ばね」にたとえられます。互いに近づき過ぎると反発し合うので、ある一定の間隔でつりあいます。金属結晶では結合のばね定数がゴムのばね定数に比べて桁違いに大きく、金属の弾性伸びはあまり大きくなりません。金属結晶のもう一つの重要な性質は、ある決まった限界値「降伏強さ」より大きな応力が加わると、「結晶すべり」という不可逆的な現象が起こり、元の形に戻らなくなることです。この振舞いは「塑性」と呼ばれ、「転位」という結晶中のしわのようなものが運動する結果として生じます。塑性は金属を加工するためになくしてはならない性質です。この性質のために人類は文明を手に入れることができたわけです。

【金属間化合物】: Ni-Ti 系の形状記憶合金はニッケルとチタンの原子が約 1 : 1 の比をとりながら、規則正しく並んだ結晶をとります。これは金属間化合物の一つです。形状記憶効果をもたらす「熱弾性型マルテンサイト変態」が生じるかどうかの鍵がこの規則的な構造に隠されているのですが、まだ、つきとめられていない点があります。脆くて扱いにくいものが多い金属間化合物の中にあって、Ni-Ti 系の形状記憶合金は破壊しにくく安定した性質を示す優等生です。金属間化合物には、この他にも優れた性質や特別な機能を示す材料がいろいろあります。

このテキストの作成にあたっては、下記のような文献を参考にしました。

- ( 1 ) 新素材ハンドブック編集委員会編 新素材ハンドブック (丸善)
- ( 2 ) 田中喜久昭、戸伏壽昭、宮崎修一共著 形状記憶合金の機械的性質 (養賢堂)
- ( 3 ) 日本金属学会 講座・現代の金属学 材料編 5 非鉄材料
- ( 4 ) 山口正治、馬越佑吉共著 金属間化合物 (日刊工業新聞社)