

東北大学創造工学センターにおける 体験学習の取り組み ～子ども科学キャンパス～

大 沼 郁 雄* 伊 藤 聡**

1. はじめに

東北大学創造工学センター(発明工房: Innovation Plaza)は、工学の基礎実験と演習の体験を通じて、創造性豊かな学生を育成することを目的として平成13年度に設置されました。これまで大学1年生を対象とした創造工学研修、学生・教職員が基本的な実験技術・技能を習得するための教育、さらには地域社会への科学・工学に関する情報発信や小・中・高校生向けの自然科学教育などに広く利用されています。毎年、夏休みと秋休み期間中の各2日間、仙台市内の小学6年生を対象として、仙台市教育委員会と東北大学の主催により「夏休み・秋休み子ども科学キャンパス」を年間400名の定員で実施しており、平成26年度までに夏休みは14回、秋休みは9回実施しています。これまで約3900名の児童が最先端の実験器具を使って本格的な実験に取り組み、科学の楽しさとおもしろさを体験しています。体験プログラムではA～Cの3コースに各2つのテーマを設け、参加者が事前にコースを選択し、1クラス20名程の小学生が午前と午後1テーマずつ約2時間の実験を行います。平成25年度と26年度は、表1に示したテーマを設けて、多くの小学生が悪戦苦闘しながら各課題に取り組みました。著者らは、平成24、25年度の2年間、「君も魔法使い?形状記憶合金君、ちゃんと形を憶えてね!」のテーマで、ニチノールのワイヤーを題材とした実験と授業を行い、好評を博しました。本稿では、実験の内容とその手引きに沿って、小学生向けに工夫したポイントなどを紹介します。

2. 導入実験

実験を始める前に、事前に用意したニチノールのばねを用

表1 秋休み子ども科学キャンパスの体験コース(平成25・26年度).

コース	テ ー マ
A コース	君のアイデアで色んなものを測ってみよう(H25)
	「いもの」ってなに?溶かして流す「いもの」体験(H26)
	温度によって変わる不思議な磁石の力(H25・H26)
B コース	キミも建築デザイナー～夢の建物をCGで描いてみよう～(H25・H26)
	君も魔法使い?形状記憶合金君、ちゃんと形を憶(おぼ)えてね!(H25)
	不思議なうすい板を使って発電してみよう(H26)
C コース	コンピュータでかっこいいコマを作ろう(H25・H26)
	野菜や花から遺伝子を取り出してみよう(H25・H26)

いて、通電加熱によって形状が回復する様子や、ニチノール薄板の2方向の形状回復について観察・体験してもらい、テーマに対する興味を深めてもらいます。実験には、(株)古河テクノマテリアルより提供して戴いた、直径0.6mmのニチノールの線材を用いました。12～15cm程度に切断し、参加者に、伸線加工上りのワイヤー(図1(b)、形状未記憶材)と事前に直線状に形を記憶させたワイヤー(図1(c)、直線記憶材)をそれぞれ1本ずつと、高温での形状記憶処理に用いる長さ12～15cm、内径1mmの銅製パイプ(図1(a))を配布します。体験実験を始める前に導入実験を行います。図2(A)のように、銅製パイプに図1(b)のワイヤーを挿入して、まっすぐにした状態で450°C程度の温度で熱処理後冷却し(図2(B))、マルテンサイト変態させたものが、図1(c)の直線記憶ワイヤーであることを説明します。その後、図2(C)のようにワイヤーを自由に曲げてもらって、それをお湯に放り込みます(図2(D))。曲がっていたワイヤーが勢い良くまっすぐに

* 東北大学准教授;大学院工学研究科金属フロンティア工学専攻, ** 東北大学准教授;大学院工学研究科創造工学センター副センター長(〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-02)

Children Science Campus in the Innovation Plaza of Tohoku University; Ikuo Ohnuma*, Satoshi Itoh**(*Department of Metallurgy, Graduate School of Engineering, Tohoku University, Sendai. **Innovation Plaza, Graduate School of Engineering, Tohoku University, Sendai)

Keywords: materials science education, shape memory alloy, nitinol, martensite transformation, phase transformation, heat treatment, microstructure

2015年1月5日受理[doi:10.2320/materia.54.142]

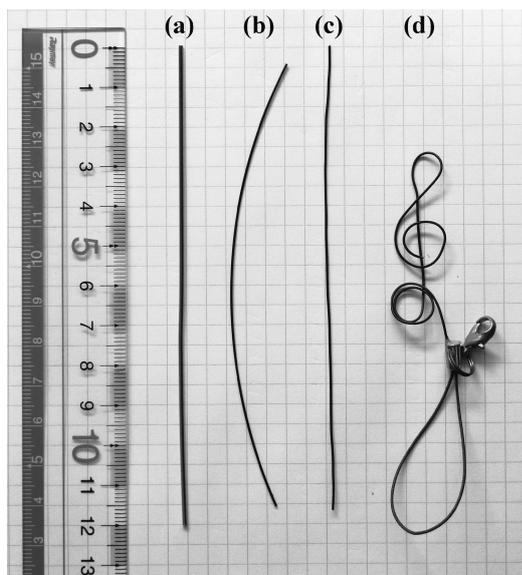


図1 実験用試料と完成品の一例 (a) 銅製パイプ, (b) ニチノール線(伸線加工上り), (c) ニチノール線(直線記憶), (d) ト音記号(完成品).

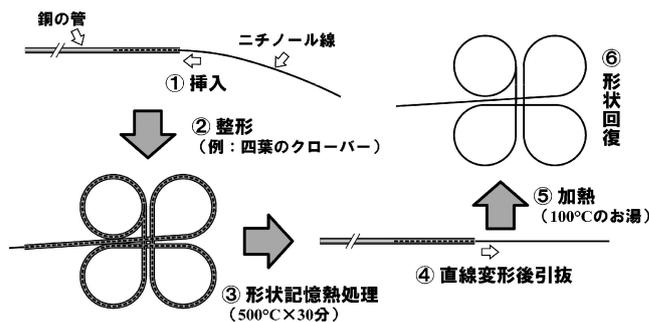


図3 体験実験の概要.

矯正用ワイヤー, ブラジャーのフレーム, 眼鏡のフレームなどに用いられています.

実験Ⅰ: 形状記憶合金に触ってみる(導入実験: 図2C&D)

- (1) ニチノールワイヤー(直線記憶材)の形を変える.
- (2) お湯に入れて形状が元に戻る様子を観察する.
- (3) いろんな形状記憶合金に触ってみる.

子ども科学キャンパスの体験実験では, 図3に示した概要の①から⑥までのそれぞれの過程で, ニチノールの金属の内部に生じる結晶構造の変化を理解し, 形状記憶効果が現れるメカニズムについて考えます.

実験Ⅱ: ニチノール線に形状を記憶させる(図3①~③形状記憶処理)

- (1) ニチノールワイヤー(形状未記憶材)を銅のパイプに入れる(図3①).
- (2) 自分の好きな形に変形する.(例: 図3②四葉のクローバー. その他, 渦巻き, ばね, ト音記号(図1(d))など, 角の無い形が好ましい.)
- (3) 500°Cの電気炉に入れて30分間熱処理する(図3③).

QUESTION 1: 変形や熱処理の間にニチノールの内部で何が起こっているのでしょうか?

(2) 相変態のメカニズム

水の状態(相)が温度の上昇とともに固体-液体-気体に変化する(水の三態)と同様に, 金属も図4に示すように温度によって相が変化します. これを相変態と称しますが, 図4に例示した鉄(Fe)は固体の状態でも温度によって結晶構造が変化します. これを固相変態と称します. 形状記憶効果は, 原子の移動(拡散)を伴わないオーステナイト相からマルテンサイト相への無拡散の固相変態に伴う現象です.

実験Ⅲ: マルテンサイト変態のその場観察 光学顕微鏡・走査型電子顕微鏡(SEM)

- (1) Fe-30Ni-0.2C(mass%)合金の試料表面を光学顕微鏡で観察する.
- (2) 液体窒素(-196°C)で冷却する.
- (3) マルテンサイト変態が起こる瞬間を観察する.
- (4) 電子顕微鏡(卓上SEM)で試料の表面起伏(表面の凹凸)を観察する.

POINT: 変態は一瞬で終了するので見逃さないこと.

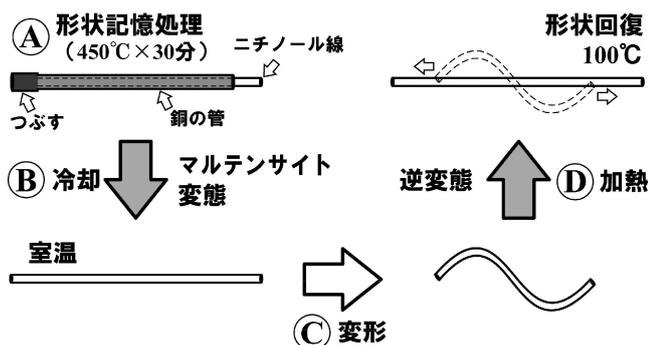


図2 導入実験の概要.

戻の様子を実際に観察すると, 驚きの声が上がります. この導入実験によって, 材料科学にほとんどなじみの無い小学生の興味を引きつけることができ, 体験学習の正否を大きく左右します. その後, 以下に示す実験の手引きに沿って, プロジェクターを用いた説明, 光学顕微鏡によるマルテンサイト変態のその場観察, 卓上SEMを用いたマルテンサイト組織の表面起伏観察などの実験を行い, 形状記憶合金に関する理解を深めさせます.(次頁以降の※部は実施上の補足説明)

3. 体験実験の手引き

(1) 形状記憶効果・形状記憶合金とは?

形状記憶効果とは, 高温(400~500°C)で形状を記憶させた合金を, 低温(室温以下)で変形させた後100°Cのお湯で加熱すると, 高温で記憶させた形に戻る現象です. 現在, チタン(Ti)とニッケル(Ni)を原子の数ではほぼ同じ量を混ぜ合わせた合金であるニチノール(Nitinol)が形状記憶合金として広く利用されています. カテーテルのガイドワイヤー, 歯の

QUESTION 2 : どうして表面がでこぼこになるのかな？

※実験では、Fe-30 mass%Ni-0.2 mass% C 合金のマルテンサイト変態に伴う試料表面の変化を光学顕微鏡で観察します。表面を鏡面研磨した Fe-Ni-C 合金試料をスチール容器(底が浅い缶の蓋など)に磁石で固定します。光学顕微鏡で観察した試料表面像をスクリーンに映し、スチール容器に液体窒素(沸点が-196°C)を注ぐと、試料が冷却され、平滑・鏡面状の試料表面が突然凸凹に変

化します。20名の参加者のうち数名は瞬時の変化を見逃してしまいますので、複数回観察できるように試料は多めに用意しておきます。Fe-Ni-C 合金の代わりに、Cu-17 at%Al-10 at%Mn 合金を用いると、その M_s 点(マルテンサイト変態が始まる温度)が約-20°C、 A_s 点(マルテンサイトからオーステナイトへの逆変態が始まる温度)が約0°Cなので、液体窒素を冷媒とした冷却・加熱ステージを用いるとマルテンサイト変態とその逆変態の繰返しを観察できます。実験で用いるニチノールは M_s 点と M_f 点(マルテンサイト変態が終わる温度)がともに室温以上なので、室温ではニチノールはマルテンサイト相になっていることを理解してもらいます。

相変態の例

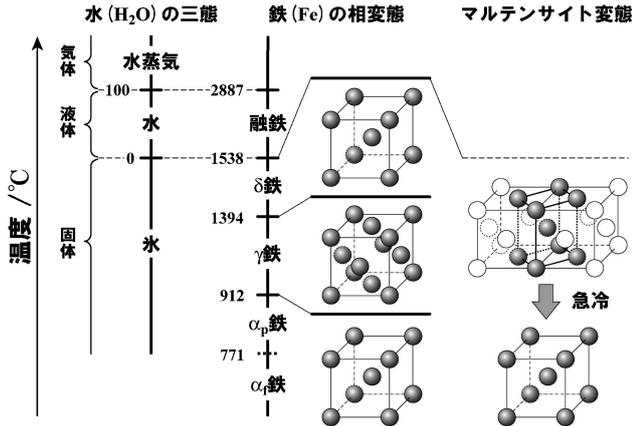
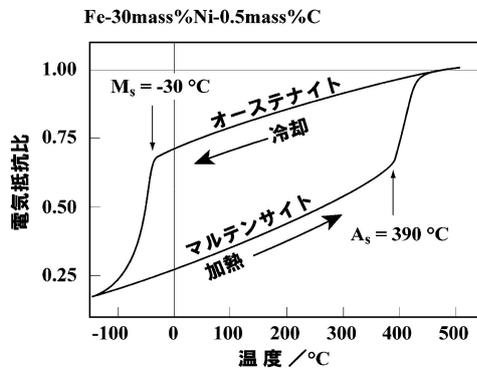


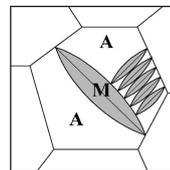
図4 水と鉄の相変態とマルテンサイト変態.

Fe-C 合金などでは、マルテンサイト変態に伴う形状変化が、図4に示すように急冷によって瞬時に結晶構造が変化することで、オーステナイト相との界面での原子間の結合が切断されるため、温度を上げてオーステナイト相に戻しても元の形状には戻りません。このような変態を非熱弾性型マルテンサイト変態と言います(図5(a))。電気抵抗を測定しながら試料を冷却すると、 M_s 点(-30°C)で電気抵抗が大きく低下し始めます。この電気抵抗の低下がマルテンサイト変態の開始に対応しています。試料を更に冷却して、完全にマルテンサイト相に変態させた後試料を加熱すると、 A_s 点

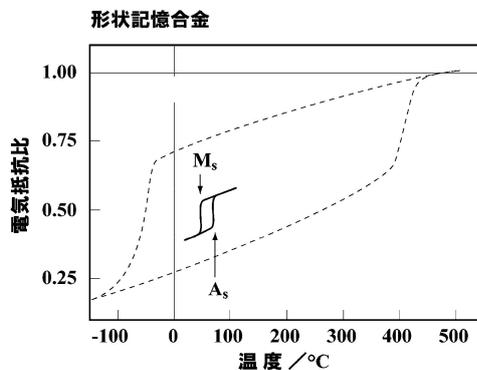
(a) 非熱弾性型マルテンサイト変態



レンズ状マルテンサイト



(b) 熱弾性型マルテンサイト変態



板状マルテンサイト

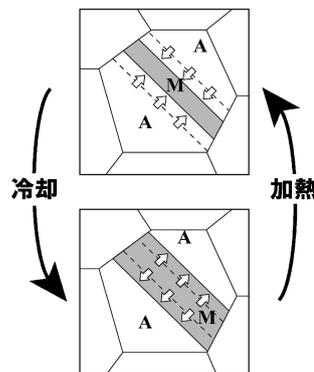


図5 (a) Fe-Ni 合金における非熱弾性型マルテンサイト変態と(b) 形状記憶合金(Au-Cd 合金)における熱弾性型マルテンサイト変態⁽¹⁾。

(390°C)で電気抵抗が大きく上昇し、マルテンサイト相からオーステナイト相への逆変態の開始と終了(A_f 点)を知ることができます。非熱弾性型マルテンサイト変態の特徴として、 A_f と M_s の差(温度ヒステリシス)が大きいことが挙げられます。一方、ニチノールやCu-Al-Mnなどの形状記憶合金におけるマルテンサイト変態は、生成したマルテンサイト相が温度の低下とともに徐々に成長して変態終了温度(M_f 点)に達すると全体がマルテンサイト相となります。マルテンサイト相(図5のM)とオーステナイト相(図5のA)の界面では、結晶格子の連続性が保たれており、温度を上昇させると界面が逆方向に移動してマルテンサイト領域の収縮が始まります。このような変態を熱弾性型マルテンサイト変態(図5(b))と言い、温度ヒステリシスが小さい特徴を示します。形状記憶特性はこの熱弾性型マルテンサイト変態によって起こる現象です。次に、普通の材料の変形と形状記憶合金の変形の違いについて説明します。

(3) 変形と逆変態⇒形状回復(図3の④~⑥)

金属を一定の方向に引張ると、はじめのうちは各原子間の

距離が僅かに伸びて全体が変形しますが、力を取り除くと元に戻ります。このような変形を弾性変形と言います(図6(a))。しかし、さらに大きな力で引張ると、原子の結合が切れて結晶がすべり変形するため元の状態には戻らなくなります。このような変形を塑性変形と言います(図6(b))。

ニチノール(Ni-Ti合金)は、 A_f 点より高い温度ではオーステナイト相という結晶構造になっています。これを M_f 点以下に冷やすとマルテンサイト相に変態します。このマルテンサイト相に外部から力を加えると、すべり変形ではなく、結晶の対称性を保った状態で双晶界面が移動することで材料の変形が進行します(図6(c):変形マルテンサイト)。これを加熱すると、マルテンサイト変態させる前の結晶構造(オーステナイト相)に戻るため形状も回復します(図6(c):オーステナイト)。

(4) 形状記憶熱処理(図3の①)

常温でマルテンサイト状態のワイヤーを銅のパイプに挿入し、パイプごとワイヤーを自分の好みの形に曲げます。そのときワイヤーの内部では、形に合わせてマルテンサイト相の双晶界面が移動します。

QUESTION 3: この状態で試料を500°Cに加熱すると何が起こるでしょうか?

原子が動ける500°Cに加熱すると、マルテンサイト相は高温で安定なオーステナイト相に変化します。銅のパイプによる拘束が無ければ、形が元に戻りますが、拘束のために、自由に形を変えることができません。銅のパイプの形に合わせてオーステナイト相に戻るために原子が動き出し、図6(d)に示したように所々に結晶格子のずれ(すべり)を入れることで形を調整し、ワイヤーは新しい形を記憶します。従って、形状記憶熱処理は、銅のパイプの形状に合わせてニチノール中の原子を並べ替えて形を記憶させる処理と言えます。

※弾性変形、塑性変形および双晶を介した変形の違いを理解するために、小学生20名とTA4名に原子配列を模して8名ずつ3列に並んでもらいます。結晶格子を模して規則正しく並んでもらうために、色違いのマットを床に敷いて利用します。原子の結合に見立てて手を繋いでもらいますが、小学6年生の男子と女子では手を繋ぐことにためらいがあるため、間にTAを挟んで原子の結合状態を再現します。弾性変形は繋いだ腕の伸び縮みとして説明します。列の前方と後方にせん断の力を加えると、一部の結合(繋いだ手)が途切れ、列の前方と後方にずれ(結晶のすべり)が生じ、再結合します(塑性変形)。このように変形した場合には、温度を変化させても形状記憶合金のように形が元に戻らないことが理解できます。形状記憶合金の場合、常温ではマルテンサイト状態を模して手を繋いだままジグザクに並びます。せん断力が加わると、繋いだ手はそのままでジグザクを徐々に一方に揃えながら変形が進むことを説明します。お湯の中で加熱された形状記憶合金の逆変態は、変形により斜め向きに並んだ状態から、まっすぐに整列し直すことで再現でき、形状が回復する仕組みが身を

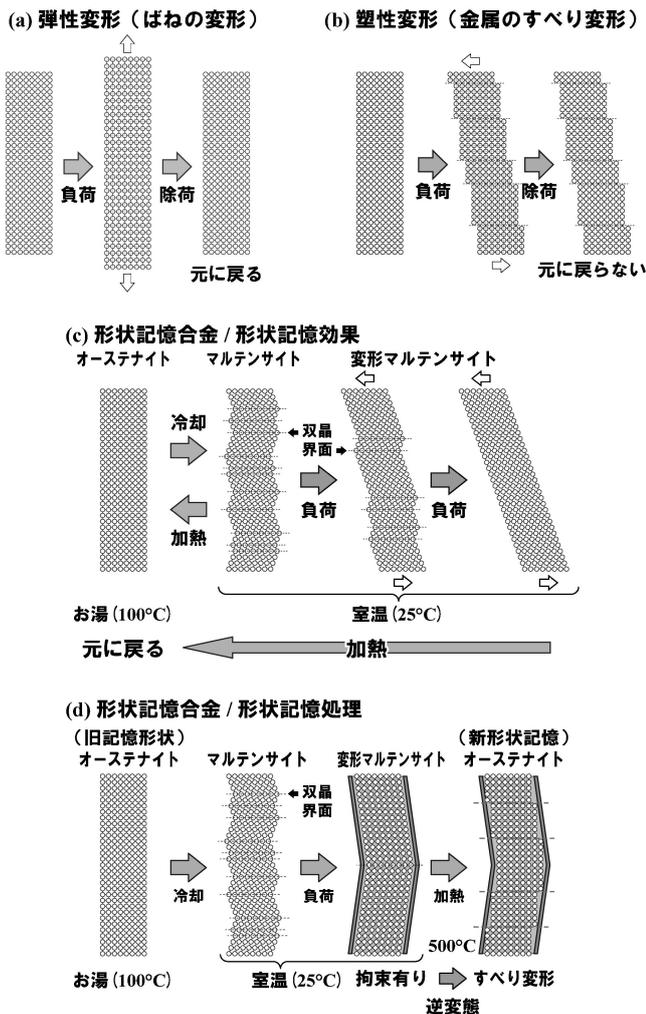


図6 金属の(a)弾性変形と(b)塑性変形、(c)形状記憶効果および(d)形状記憶処理。

