



UDC 669.018 : 539.371 : 669.017.3

## 記憶材料の応用

本間 敏夫\*

## Applications of Memory Materials

Toshio HONMA

## 1. 緒言

当協会の編集関係の方から表記の形状記憶合金についての解説の執筆をというお話のあつたとき、形状記憶効果と鉄鋼がどうも結びつかず途方にくれる面もあつた。残念ながら現在までのところ、鉄合金で典型的な形状記憶効果を示すものは見つかつていない。

しかしながら、形状記憶効果の本質を考えると、これはマルテンサイト型変態の逆変態過程で現れる現象であつて、周知のとおりマルテンサイト変態といえば炭素鋼がその元祖である。そもそも今世紀初頭に焼入れした炭素鋼に出現する笹の葉状組織にマルテンサイトと名付けたのがはじまりである。以後数多くの研究者によつて、このマルテンサイトなる組織の本質が解明されて、個々の原子の拡散を伴わない結晶変態をマルテンサイト型変態と総称するようになり、炭素鋼、ニッケル鋼などの鉄合金のほか、コバルト合金、チタン合金、数々の銅合金などのマルテンサイト型変態が研究されるようになった。

以上のように考えてくると、鉄鋼と形状記憶は決して無縁ではなく、マルテンサイト変態という点で固く結び合っていると云つてもよい。事実、形状記憶性の良否をあまり問題にしない研究者は、Fe-Pt, Fe-Mn, Fe-Niなども形状記憶合金の仲間数えているし、今後の研究によつては鉄合金でも優れた形状記憶性を示すものが見出される可能性も十分にある。

どの教科書にも書いてあるように、マルテンサイト変態の特徴のひとつとして、変態の温度履歴があげられる。すなわち、冷却してマルテンサイト変態の起きはじめる温度 ( $M_s$ ) と加熱してマルテンサイトが母相に逆変態しはじめる温度 ( $A_s$ ) は大きく異なつており、温度ヒステリシス ( $A_s - M_s$ ) は高 Ni の Fe-Ni 合金では 400 °C 以上にもなる。これはマルテンサイト変態を起こすためにはかなり余分の自由エネルギー (300 cal/mol 程度) が蓄えられるまで過冷 (あるいは過熱) されなければ、

変態が生起できないことを示す。ところが、ある種の合金では、上記の自由エネルギー差 (通常これを変態の駆動力と呼んでいる) が非常に小さくなり、変態温度ヒステリシスが 10~20°C 程度のものや、ほとんど可逆的なものも見出されている。このような特殊なマルテンサイト変態を熱弾性型マルテンサイトと呼んで区別している。すなわち、きわめて小さな駆動力でマルテンサイトが生成したり消滅したりでき、その相境界の移動にも大きな駆動力を必要としない変態である。

この種のマルテンサイト変態は、すでに GRENINGER らが 1938 年に Cu-Zn 合金の相変態で見出しており、形状記憶を示す合金はすべてこの型のマルテンサイト変態を起こすことが知られている。

形状記憶効果の最初のデモンストレーションはイリノイ大の Read グループによつて Au-Cd 合金の単結晶試料を用いてなされた。

しかし上記のデモンストレーションは単に学問的な興味をひいただけで、特に世間の注目を集めることはなかつたが、1962 年に米国の Naval Ordnance Laboratory の Buehler グループによつて多結晶 Ni-Ti 合金の形状記憶効果が発表されるにおよび、その広範な応用の可能性が示され、この NiTi に発見した研究所の頭文字をつないでニチノール (Nitinol) という商品名で世界的な注目をあびるようになった。

## 2. 形状記憶効果

ニチノール (TiNi) は本来金属間化合物であるにもかかわらず、たいへん加工性が良好で、強度や耐蝕性なども非常に優れている。この材料はいろいろな変わった性質をもっているが<sup>1)</sup>、その中でも特筆すべきことは自分の昔 (高温状態) の形を憶えていることで、我々はこれを形状記憶効果 (shape memory effect) と呼んでいる。

この現象の理解をたすけるため数枚の写真を示そう。写真 1 (a) は高温状態で直線状の TiNi 針金を室内で曲げた写真である。これにライターの炎を近づけると瞬

昭和 55 年 6 月 23 日受付 (Received June 23, 1980) (依頼解説)

\* 東北大学選鉱製錬研究所 理博 (Research Institute of Mineral Dressing and Metallurgy, Tohoku University, 2-1-1 Katahira Sendai 980)

表 1 各種形状記憶合金の変態温度

合金系	組成	Ms(°C)	As(°C)
Ti-Ni	Ti-50Ni(at%)	60	78
	Ti-51Ni(at%)	-30	-12
Ni-Al Ag-Cd	Ni-36.6Al(at%)	60±5	—
	Ag-45.0Cd (at%)	-74	-80
Au-Cd	Au-47.5Cd (at%)	58	74
Cu-Al-Ni	Cu-14.5Al- 4.4Ni(wt%)	-140	-109
	Cu-14.1Al- 4.2Ni(wt%)	2.5	20
Cu-Au-Zn	Au-21Cu-49Zn (at%)	-153	—
	Au-29Cu-45Zn (at%)	57	—
Cu-Sn Cu-Zn	Cu-15.3Sn(at%)	-41	—
	Cu-39.8Zn (wt%)	-120	—
In-Tl In-Cd	In-21Tl(at%)	60	65
	In-4.4Cd(at%)	40	50
Ti-Ni-Cu	Ti-20Ni-30Cu (at%)	80	85
Ti-Ni-Fe	Ti-47Ni-3Fe (at%)	-90	-72
Cu-Zn-Al	Cu-27.5Zn-4.5 Al(wt%)	-105	—
	Cu-13.5Zn-8Al (wt%)	146	—

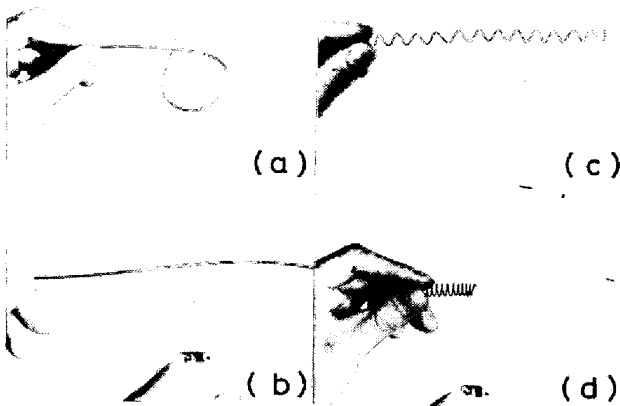


写真 1 TiNi 線の形状記憶効果の実例

時に元の直線状に戻つて写真 1 (b) のようになる。また、写真 1 (c) は高温状態でコイル状にした TiNi 線を室温で引張つた状態の写真であつて、これにライターの炎を近づけると写真 1 (d) のように瞬間的に縮んで元どおりのコイル状に戻つてしまう。

それゆゑ、ニチノール (TiNi) で自動車のボディを作れば、ぶつかつてへこんでも、お湯をかけると瞬時に元どおりの形に戻つてしまうことになる。

この形状記憶の生ずる温度は、研究の初期の頃はいろいろ議論があつたが、TiNi の Ni の濃度を変えたり、あるいは Fe, Co などを微量添加すれば、好きな温度に下げることができることがわかつてきた。ただし TiNi の形状記憶温度 (100~120°C) よりも高温に上げることは成功していない。

では、このような形状記憶は TiNi だけの独自の性質かということではいろいろの合金系を調べてみると、Cu-Zn-Al, Cu-Al-Ni, 前記の Au-Cd, Ag-Cd など類似の現象を示す合金が次々と見つかつてきた。

これらはいずれもマルテンサイト変態に付随して形状記憶効果を示すので、このような合金を総称して marmem 合金と呼んでいる。marmem とはマルテンサイトメモリーの略称である。

表 1 に種々の marmem 合金の例と変態温度 (Ms) を示してある。

ではなぜ上記の合金のみが形状記憶効果を示すのであろうかという点をすこし詳しく検討してみよう。

前述の合金ではマルテンサイト変態がいずれも熱弾性型であるという点と、たいてい高温相が体心立方で CsCl 型規則格子を組んでいるという共通の特徴がある。

形状記憶効果の生ずる主な変形様式は次の 3 通りが考えられる。すなわち、1) 応力によつて誘起されるマルテンサイト (一般に SIM と略称) による変形、2) マルテンサイト変態のパリアント相互の食い合いによる変形、3) マルテンサイト晶内の双晶の移動による変形などが主なものである。これらはたいてい重複して生じて

いる。

通常、材料に外力を加えると転位の移動に基づく塑性すべりを生じて永久変形してしまう。ところが熱弾性型マルテンサイトを生成する材料は、ある特定の温度範囲では、すべり変形を起こすかわりに上記の 3 つの変形機構が優先する場合がある。すなわち、転位を動かす臨界応力より上記 3 つの変形を起こさせる臨界応力が小さい場合があつて、これが形状記憶効果の原因となる。

一般に母相からマルテンサイトが生成するとき、そのでき方は 1 通りではなく、結晶学的に同等の 24 通りの異なつた方位のマルテンサイトが、お互い変態のさい生ずる歪みを小さくするように組み合わせつて生成する。これらをマルテンサイトの兄弟晶 (variant) と呼んでいる。

図 1 は上記の事情を単純化して示したもので、説明を

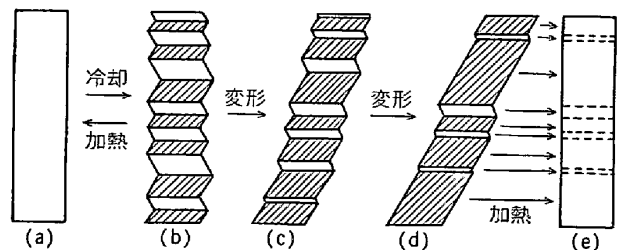


図 1 形状記憶効果の生因の概念図

母相 (a) を冷却すると、マルテンサイト (b) に変態これを変形 (e), (d) しても加熱すると (c) すなわち母相 (a) に戻る

簡単にするため図(b)では2組だけの兄弟晶を示してある。(b)のマルテンサイト状態の結晶に外部から応力が加えられると、(b)→(c)→(d)のように変形は兄弟晶間の遷移によつて進行してゆく。すなわち、変形に適合した斜線で示した兄弟晶が白で示した兄弟晶を食つて変形過程が進行してゆく。

応力誘起マルテンサイトのときは、白い部分が残留母相であつて、変形過程は全く同じと考えてよい。(d)のような状態のマルテンサイトが加熱されて、全く前と逆の過程で母相に逆変態すれば(e)のように元の形状に戻つてしまう。これが形状記憶効果である。

ではなぜ特定の合金だけが形状記憶効果を示すのかという点であるが、図1の(a)から(d)までの事情は、マルテンサイト変態を生ずるすべての合金におおよそ共通した性質であるが、一般の合金では(d)から(e)の過程が完全には実現されない。すなわち、母相に帰る場合、結晶学的に同等な24通りの帰り方があるため完全には元どおりの形状には戻らないことが、Fe-Ni合金などで明らかにされている。

marmem合金の特徴は、前にも述べたように母相が規則格子構造であることである。このことは(d)→(e)の過程で規則格子構造をこわすような過程は、母相の自由エネルギーを大きくするため、すべて実現不可能となり、結局前に来た路を帰つてゆく結果になり、形状記憶効果を示すのである。

形状記憶合金のCu-Zn-Al, Cu-Al-Ni, Au-Cdなどすべて高温相がCsCl型体心立方構造をもっている。Fe-25%Pt合金も不規則状態ではFe-Ni合金と同じような並のマルテンサイト変態をするけれども、高温で長時間加熱して規則構造にすれば、マルテンサイトは熱弾性型となり、形状記憶を示すようになる。これが鉄合金で今まで形状記憶を報告された唯一の例であるが、実用的には不適な合金である。

もしmarmem合金のAf(逆変態終了温度)より高くMd(応力によつてマルテンサイトが誘起される最高温度)より低い温度範囲で外力を加えると、変形はすべりでなく変態によつて進行する。

この場合、外力がなくなるともともと母相の方が熱力学的に定常な温度領域なので、外部応力が0になると変形は消失して元どおりになつてしまう。ちょうど強力なゴムのような変形挙動を示す。このような変形挙動を擬弾性(あるいは超弾性)と呼んでおり、これは形状記憶効果とは親せきのように密接な関連のある現象である。TiNiでもNiが52at%ぐらいになると室温で擬弾性を示すようになる。

### 3. 形状記憶合金の応用

#### 3.1 一般工学的応用例

形状記憶というまことに奇妙な性質を示す合金の利用

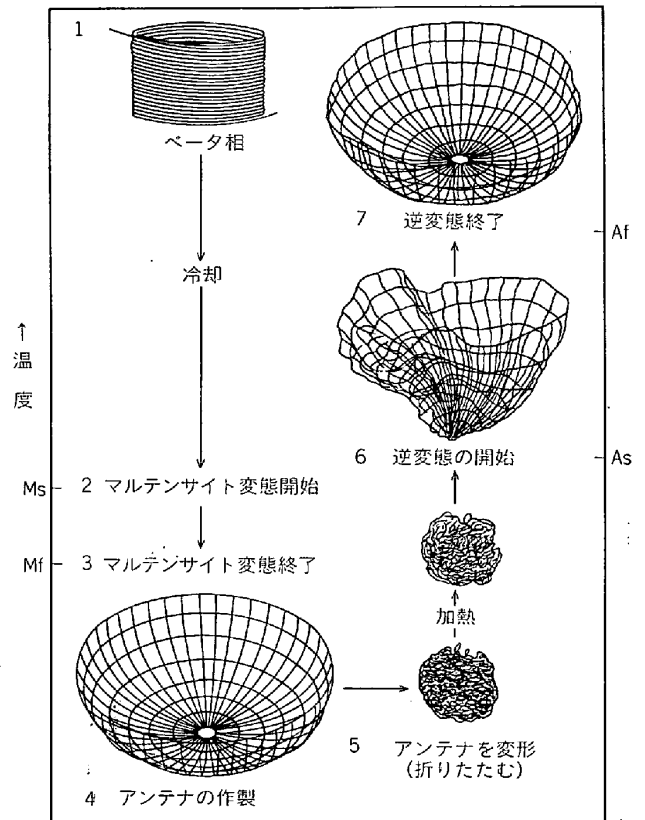


図2 ニチノール月面アンテナの作製手順と変態過程<sup>2)</sup>

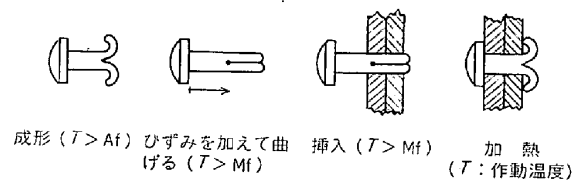


図3 ニチノールの締め付けピンとしての応用<sup>3)</sup>

についてはいろいろ考案されているが、読者もそれぞれ専門に応じていくらかでも新しい応用を考察することができるであろう。現在実用に供せられている記憶合金は、Ti-Ni合金とCu-Zn-Al合金が主なものである。ここでは今まで報告されている応用例の中のいくつかを紹介することにする。

最初に報告されたのは(i)月面アンテナである。TiNi線で組み立てたかなり大きな半球状ネットを小さく折りたたんで月面に運びセットする。太陽光をうけて温度が上がるとまた元の大きな半球状アンテナになるので、それを通信に利用しようとするアイデアである。図2にアンテナの作製の手順をわかりやすく示した<sup>2)</sup>。

次に図3のような(ii)締めつけピン<sup>3)</sup>としての利用がなされている。内部に直接手をふれられない状態でも利用できるのも便利であるし、締めつける力も大きい。アメリカでは建築の分野でかなり用いられている。このように直接手でふれなくても板をとめたりできるので、強

い放射能をもっている材料を取り扱う場合にも便利であつて、将来原子力工業での遠隔操作による組み立て作業などにも非常に有望であると考えている。

同じような利用として(iii)クランプが考えられている。これはレイケム社(米)で開発したもので現在は主にCu-Zn-Al合金(ベータロイ)が用いられている<sup>4)</sup>。形状記憶効果では2.で説明したようにマルテンサイトを起こす温度とその逆変態を起こす温度の二つの異なる温度があつてはじめて作動することを念頭におかねばならない。一般に材料を室温で使用する場合は圧倒的に多いので、たいていは低温で変形させて室温で元に戻るような利用法が大部分である。TiNiが液体空気の温度でも20~30%の変形が可能であるということが、このような応用を可能にしている。

特殊な(iv)継ぎ手としても利用されている。継ぎ手の内径を、使用温度ではパイプの外径よりわずかに小さく成形しておき、接着のときは低温で機械的に押し広げて、二本のパイプを挿入したのち、室内に放置しておく、温度が上がつてパイプはしつかりと接着される。締めつけ力もたいへん大きく、溶接困難のパイプの接着に非常に有効である。F-14戦闘機の油圧システムの継ぎ手として、1970年以来10万個以上も使用されており、これまでひとつの油洩れも破損もないと報告されている。このようなパイプの固定法はかなり以前から米英の海軍でも採用され、実績も豊富である。また沿岸輸送パイプや海底パイプの接合にも有力で、6インチ径の炭素鋼パイプを300フィート深さの海底で取付ける実験も行われている。

同様な使い方に(v)電気回路などのコネクタがある。図4はその概念図で、液体空気温度で数%押し広げたような形のTiNiバンドの内側にあるソケットにピンを挿入して接続する<sup>5)</sup>。電気が流れて温度が上がれば接触はますます確実となる。このため接触不良による故障はほとんどないと報告されている。

### 3.2 熱機械的応用例

英国のデルタ・メタル社が精力的に開発を進めており、主にCu-Zn-Al合金が使用されている。図5は(i)温室用の窓の開閉器としての応用である<sup>4)</sup>。常に窓が閉じるようなバイヤススプリングをつけておき、18°C

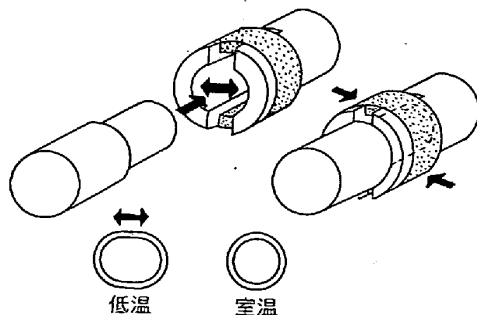


図4 ピンとソケットのコネクタとしての応用<sup>5)</sup>

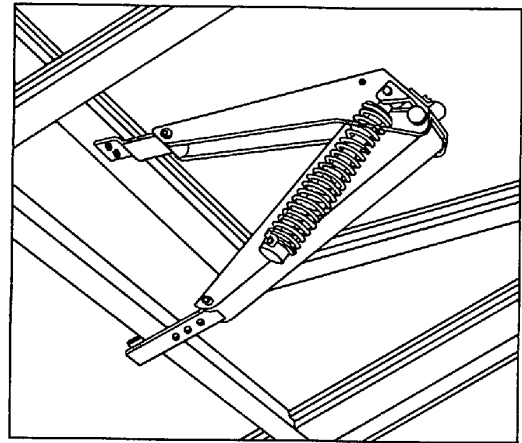


図5 形状記憶スプリングを利用した簡易窓開閉器<sup>2)</sup>

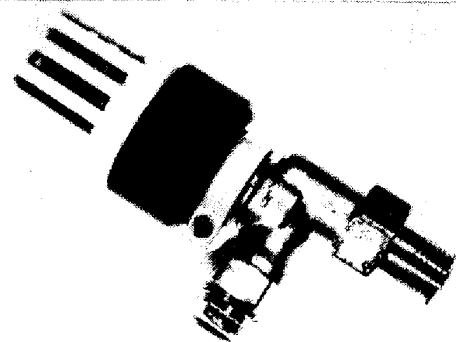


写真2 ベータロイ製バネを用いたラジエーターバルブ<sup>4)</sup> (Delta Memory Metal社製)

以上になると形状記憶効果による収縮力がバイヤスに打ち勝つて開くようになつている。類似の応用として(ii)温水加熱システムの形状記憶温度調節バルブがある。写真2にこの型のバルブを示す<sup>4)</sup>。室温が上昇すると形状記憶合金アクチュエーターが膨張してバイヤススプリングに打ち勝ち温水系バルブを閉じる仕組みである。同バルブは1個の値段が1.6ドルと安価で、部品構成も単純という利点をもっている。

その他自動クラッチファン、自動車のキャブレターにも形状記憶合金が使用されている。

また(iii)サーモスタットとしても使われている<sup>4)</sup>。写真3がその外観であつて、温度制御用のマイクロスイッチ、形状記憶合金製コイルばね、バイヤスコイルばねで単純に構成されている。この装置は5万回の作働に耐えることが立証されている。そのほか(iv)加熱冷却制御装置、(v)防火ドア、(vi)電気回路のブレーカー等数々の用途が考えられている。

この節の最後に(vii)レコーダーのペンを駆動するサーボ機構に用いられている例を示そう。写真4はこの種のサーボ駆動ユニットの写真であつてFoxboro社の開発したものである<sup>4)</sup>。これは引張り応力状態のニチノール線の形状記憶を利用するものであつて、入力信号は誘導

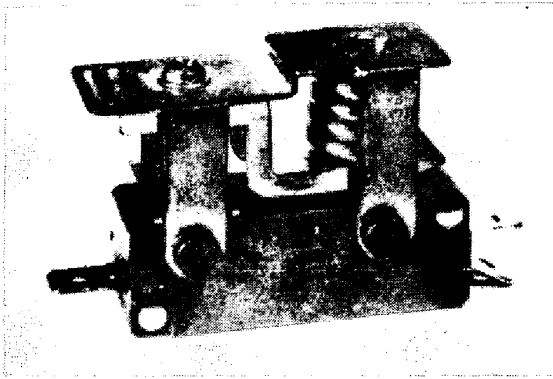


写真3 ペータロイ製パネを用いたサーモスタット<sup>4)</sup> (Delta Memory Metal 社製)

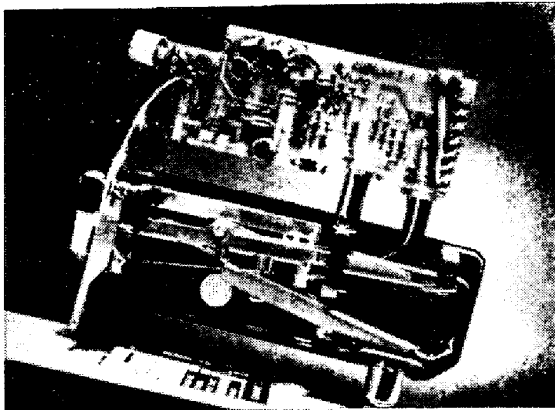


写真4 ニチノール線を用いたサーボ駆動ユニット<sup>4)</sup> (Foxboro 社製)

コイルを通じて電流となり、そのジュール熱で上記のワイヤー長さを変化させる。1972年に開発されて以来すでに50万台も生産されている。

### 3.3 医療用応用例

医療用材料としてもニチノールは種々の用途に使用されている。すでに手術で使われているものとしては、(i)脊椎矯正棒がある<sup>6)</sup>。回復手術で湾曲した脊椎に合わせて取り付け、縫合後、体力の回復を待つて、外部より高周波や赤外線などを当てて加熱し、少しずつ脊椎の湾曲を直そうというものである。従来のステンレス矯正棒と違って、無理なく矯正できるという点で注目されている。

米国では(ii)人工心臓、(iii)人工関節、(iv)歯列矯正リング、(v)血栓防止フィルターなどが考えられている。

我国で開発されたものとしては、(vi)着脱可能脳動脈瘤手術用V型クリップがある<sup>7)</sup>。脳動脈瘤とは図6に示すようなもので、脳動脈にコブができると、血液が流れこんで風船のようにどんどん膨らんで、周囲の血管や神経を圧迫して障害を生じ、やがて破裂すると人生一巻の終わりとなる。そこで、頭蓋骨を切開し、動脈瘤柄部を図中に示したV字型の金属クリップで押えると、血流は入りこまず、やがて瘤は収縮して組織化してしまう。このV字型クリップには一般にAgやTaが使用されて

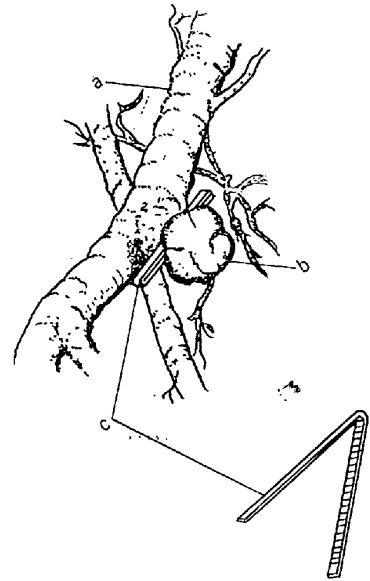


図6 脳動脈瘤とTiNiV型クリップ<sup>7)</sup>  
a: 脳動脈, b: 動脈瘤, c: V型クリップ

いる。

しかし脳内には多数の細かい血管や神経があり、鉗子でV字形クリップを装着する場合、誤まって他の細かい血管や神経と一緒にクリップすることがある。このような場合、V字形クリップをピンセットで取り外して、再びかけ直すのであるが、非常に困難で危険な作業となる。そこでTiNi製のV字形クリップを用いるとその形状記憶効果によつて簡単に着脱ができるというのである。現在はAgクリップに細いTiNi線を溶接した接合クリップも試作されている<sup>7)</sup>。またつい最近、東大の舟久保教授が(vii)人工腎臓用小型ポンプの開発に成功した<sup>8)</sup>。

### 4. エネルギー変換材料的応用例

Nitinol heat engine と呼ばれる、お湯をかけると高速回転するエンジンが開発され我国でも大きな注目をあびている。

我国のエネルギー資源は極めて貧弱と言われているが、微少温度差の低質エネルギー源は膨大なものである。たとえば、製鉄所や発電所の温排水や温泉流などは膨大な量にのぼる。しかし、現在はほとんど無為に投棄している現状である。そこで上記ニチノールの形状記憶効果を利用して、微少温度差で作動する固体エンジンを作製し、この投棄している膨大な量の熱エネルギーからいくらかでも電気エネルギーの形で回収しようとする試みが東北大選研でなされている。このような計画は、カリフォルニア大学のローレンス・パークレイ研究所で最初に実行され、太陽熱とニチノールエンジンを組み合わせたプロジェクトが進められており、Banksエンジン<sup>9)</sup>と呼ばれるリング回転式のエンジンをすでに開発している。

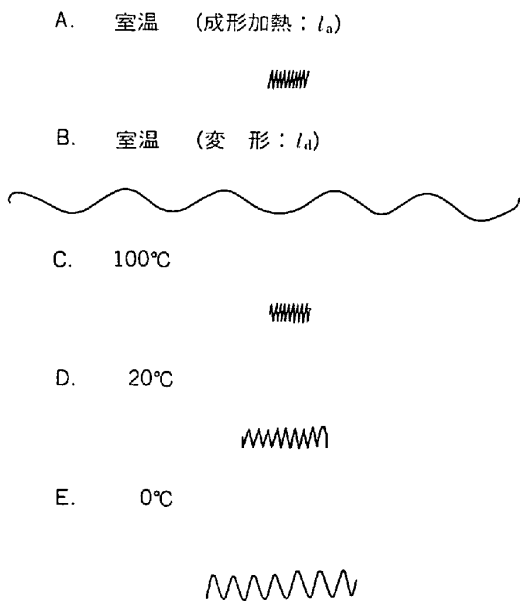


図7 コイル状に記憶させたニチノール線の温度による長さ変化<sup>10)</sup>

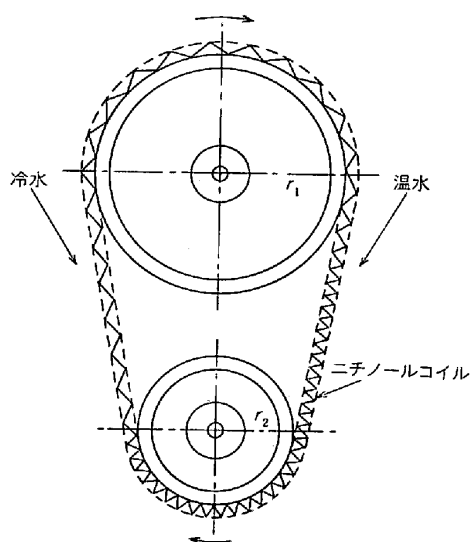


図8 ニチノール熱エンジンの作動原理<sup>10)</sup>

しかし我々の研究室では、最も構造の単純な TiNi ヘリカルワイヤーを用いた流湯式縦型エンジンを作製し、すでに毎分 750 回転というかなり大きな回転速度を得ている。

このエンジンの原理をすこし詳しく説明すると次のようなことになる。いま、高温でコイル状の形を記憶させた 0.5 mm の TiNi ワイヤーを、室温で引張つてほぼ直線状にして、熱湯につけると図 7 の c に示すように元のコイルに戻る。これを 20°C の水、さらに氷水に順次急冷すると、写真の D、E のようにそれぞれ伸びが認められ、この現象を部分的可逆形状効果と呼んでいる。このように高温相状態の形状のみならず、変形下のマルテンサイト相状態の形状をも記憶している場合を記憶が

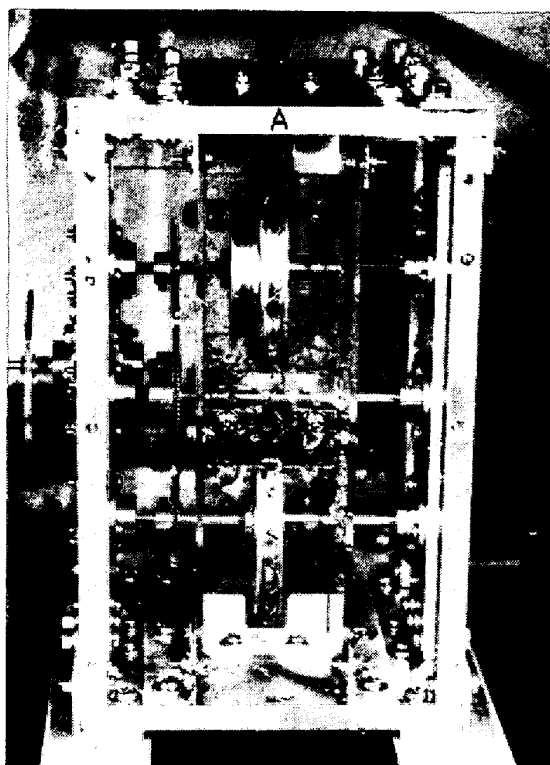


写真5 流湯式縦型ニチノール熱エンジン<sup>10)</sup>

two way であると表現することもある。いま、図 8 のように径の異なる二つのプーリーにこのヘリカルワイヤーをかけ、右方から温水、左方から冷水をかけると、温水部でワイヤーループは元のコイルになるよう急激な収縮を起し、上下二つのプーリーのトルク差によつて時計まわりの回転運動を生ずる。

写真 5 に我々の作製した縦型エンジンを示す。プーリーの回転数は湯温に比例して大になり、90°C の湯をかけると 750 rpm 位の値に達し、かなり大きな回転速度が得られる。

このことは、1s 間にマルテンサイト変態と逆変態を 12 回もくり返していることになり、ワイヤーを、このような短時間内に完全に昔の自分の形を思い出す頭のよい材料にしておかねばならない。この頭のよし悪しは形状を記憶させる温度や時間によつて著しい影響を受けることが最近わかつてきた<sup>10)</sup>。結論だけを示すと、比較的低い温度 (200~300°C) で短時間 (30 min) 記憶させた方が高い温度 (500~700°C) で長時間記憶させたものより、元の形に戻る回復率も回復速度もずつと優れている。この原因の究明も行われているが、まだ完全には解明されていない。ただ電顕観察の結果、この形状処理 (形状を教える熱処理) が異なればマルテンサイトの morphogry がかなり異なつてくることが判明してきた。すなわち低温で処理したときのマルテンサイトは双晶が多数規則正しく配列しているが、高温処理したときにこの双晶構造が乱れてくるとともに、双晶の幅や間隔が大

きくなる。これが形状記憶性に大きな影響を与えていると考えているが、なぜ熱処理温度が異なるとマルテンサイトの内組織が変わってくるかが判明していない。

現在トルクを測定して、エンジンの出力を求めているが、0.5 mmφ のコイルを用いたこの型のエンジンではたかだか 0.4~0.5W の出力しか得られず、やつと小さな豆ランプがつく程度である。今後エンジンのパワーアップをはかるためには、太いニチノール線を用い、しかも形状回復応力を上昇させる方法をとらねばならない。

コイルの収縮力はたかだか 0.7 kg/mm<sup>2</sup> であり、線材のそれは 70 kg/mm<sup>2</sup> 程度もあるので今後はニチノール線の形状記憶を利用し、しかも多数の線を並列に使えるような型のものが開発されなければならない。またお湯も流すタイプではなく、太陽熱などで作ったお湯を貯えて利用する貯湯式横型エンジンがはるかに有利であり、近い将来我国でもこの型のエンジンの開発が期待されている。

## 5. 結 言

以上形状記憶合金の機能材料としての応用例をいくつか紹介してきたが、今後その応用範囲は更に拡大するであろう。現在実用に供せられているのはニチノール (TiNi) と Cu-Zn-Al 合金が主なものである。これは形状記憶を起こす温度や強度、耐疲労性などが適しているためである。一般にニチノール以外の材料では繰り返し使用中、結晶粒界からマイクロクラックが発生し粒界破壊現象を生ずる欠点がある。それ故、長時間の高速回転を行う熱エンジン材にはニチノール以外用いられていない。最近ではニチノールの Ni を Cu で 40~60% 置換した Ti<sub>50</sub>Ni<sub>50-x</sub>Cu<sub>x</sub> 合金が非常に注目されている。それは Ni を Cu でかなり置換しても形状記憶を起こす Af 温度がほとんど変化せず、しかも冷却と加熱のさいの変態温度の差 (As-Ms) が非常に小さくなる。すなわち、10~15°C という非常に小さな温度で熱エンジンが作動することが期待されるからである。Cu 系記憶合金についても、粒界破壊の欠点を克服するため、材料の結

晶粒を微細化する種々の試みが行われ、ある程度の成功を収めたとの報告もある。

すでに述べたように記憶合金の利用にはいろいろな場合があり、形状記憶が one way でなければならぬ利用もあるし、two way でなければならぬ利用法もある。例えばレコーダーのペン駆動に用いる場合は完全に two way でなければならない。それゆえ記憶材料を one way あるいは、two way にする処理方法を確立しなければならない。

おわりに今後の見通しであるが、一番魅力のあるのはニチノール熱エンジンによる発電であるが、記憶材料の使用量としてはパイプの継手などの利用が最も大きなものになることが予想される。

## 文 献

- 1) 本間敏夫: 日本金属学会会報, 12(1973), p. 157
- 2) L. M. SCHETKY: Science Amer., Nov. (1979), p. 68
- 3) W. J. BUEHLER and W. B. CROSS: Wire J., 2(1969), p. 41
- 4) G. M. WAYMAN: Some Applications of Shape Memory Alloys. Univ. of Ill. Jan. (1980). (Raychem Corporation, Delta Memory Metal Company, Foxboro Corporation のパンフレットの紹介を含む), 日本金属学会会報, 19 (1980), p. 323 (唯木次男による日本語版訳)
- 5) J. D. HARRISON and D. E. HOGDSON: Shape Memory Effects in Alloys, Plenum, New York, (1975), p. 517
- 6) H. A. SCHMERLING, M. A. WILKOV, A. E. SANDERS, and J. E. WOOSLEY: 同上, (1975), p. 563
- 7) 禰津信彦, 岩淵 隆, 本間敏夫, : 東北大学選研彙報, 34 (1978), p. 67
- 8) 舟久久照康: 日経メカニカル, 1-21 (1980), 表紙
- 9) R. BANKS: Shape Memory Effects in Alloys, Plenum, New York, (1975), p. 537
- 10) 本間敏夫, 禰津信彦: 東北大学選研彙報, 34 (1978), p. 105