



Title	合金の形状記憶効果
Author(s)	清水, 謙一
Citation	大阪大学低温センターだより. 1977, 17, p. 3-5
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/12441
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

合金の形状記憶効果

産業科学研究所 清水 謙一 (吹田 3555)

「低温センターだより」に形状記憶効果について書いて欲しいと編集委員の方から話があったとき、それが低温に特有の現象というわけでもないので、さてどうしたものかと迷った。しかし合金によっては液体窒素温度などのサブゼロ温度で変形したあと室温に放置すると、昇温とともに変形前の形状に完全に戻ってしまう場合(表紙の組写真)があるので、その性質(形状記憶効果)は低温装置のどこかの部品に利用される可能性があり、またそのような利用法を考えて頂く良い機会にもなると思って引き受けることにした。

通常の金属は引張ったり曲げたりの外力によって難易はあっても変形し、弾性限度を越えていればその変形は外力を除去しても恢復しない。勿論温度を変えても恢復しない。このような変形は塑性変形と言われ、外力によって金属結晶内の転位がすべり面を動き結晶表面に抜け出ることによって行われる。転位の運動は非可逆過程であるから、外力を除いても一旦変形した形状は決して恢復しない。

ところが、弾性限度を越えて塑性変形が起きても、外力を除去するかあるいはそのあと少し高い温度に加熱すると、変形前の形状に完全に戻るという奇妙な現象が相当数の合金に見い出されるようになった。外力除去だけによる形状恢復現象には超弾性(superelasticity)と言われる場合と、ゴム弾性(rubber-like behavior)と言われる場合とがある。総称して擬弾性(pseudoelasticity)と言うが、二つの場合の塑性変形および形状恢復機構は後述するように異なる。外力除去後の加熱による形状恢復現象を形状記憶効果(shape memory effect)と言ひ、これに類する現象は1955年頃すでに見い出されていたが、Ni-Ti合金にも見い出されて、それが月面アンテナ材として宇宙工学に実際に利用された1960年頃から多くの注目を集めるようになった。これらの効果における塑性変形は転位の運動による真のものではなく、外力除去あるいは加熱によって恢復できる、転位以外の原因による見かけ上のものと考えなければならない。

ここで、合金における相転移の代表的な型式であるマルテンサイト型相変態について説明しなければならない。転位以外の原因による見かけの塑性変形および外力除去あるいは加熱による形状恢復の原因が、この相変態と密接に関係しているからである。ある種の合金を高温から室温に急冷(合金によっては徐冷でもよい)するか更にサブゼロ冷却すると、合金に固有の温度で原子の拡散を伴わずに原子の協力的な運動にもとづくせん断機構による格子変態が起き始める(この開始温度を M_s 点と言う)。この無拡散・せん断格子変態をマルテンサイト型相変態と言ひ、低温相をマルテンサイトと言ひ。したがって、マルテンサイトに変態した部分はせん断歪量に応じた形状変形を受ける。しかし、通常はいろいろな方位のマルテンサイトが多数形成するので、試料全体としてのマクロな形状変化はない。外力を負荷

するなどの特別な条件下で変態させると、特定方向の形状変形を伴ったマルテンサイトが優先的に形成するので試料全体としてのマクロな形状も変化する。また、せん断機構による相変態であるため、 M_s 点の上下の温度で母相に応力を負荷してもマルテンサイトが生じる。これを応力誘起変態と言っているが、 M_s 点より上の温度で応力誘起されたマルテンサイトは熱力学的には不安定であるから、応力を除去すると逆変態して母相に戻る（鋼では逆変態開始温度 A_s 点が非常に高いため容易に戻らずに分解を起こす。また加工温度が A_s 点以下の場合も戻らないが、 A_s 点以上に加熱すれば戻る）。マルテンサイト型相変態に付随した多くの特徴のうち、擬弾性および形状記憶効果に関連したもう一つの重要な性質は、結晶構造の異ったマルテンサイトと母相との境界面を無歪にするためにマルテンサイト内に格子不変歪としての双晶欠陥などの格子欠陥が導入されているということである。

さて、超弾性効果は、 M_s 点より高い温度で応力誘起されたマルテンサイト変態に伴う形状変形、すなわち見かけの塑性変形が、応力除去のさいの母相への逆変態に伴う逆向きの形状変形によって消滅する現象として理解できる。このように理解すると、超弾性効果は M_s 点以上の温度での加工に限ったものでなく、完全にマルテンサイトの状態でも起こりうる。何故ならば M_f 点（変態完了温度）以下に冷却して生じたマルテンサイトに応力を加えると、応力負荷状態でのみ安定に存在しうる別の結晶構造のマルテンサイトに変態する合金もあるからである。この場合も応力を除去すると初めのマルテンサイトに逆変態して、正変態のときに生じた見かけの塑性変形が回復する。ゴム弾性効果は M_f 点以下の完全にマルテンサイトの状態で見られる現象で、上述の超弾性効果とは機構を異にしている。すなわち、マルテンサイト内の格子不変歪である内部双晶の境界が外力によって移動して見かけの塑性変形が起き、それが応力除去に伴う逆向きの移動によって消滅する現象として解釈されている。しかし超弾性効果ほどには明確にされていない。

次いで、形状記憶効果は母相の一部あるいは全部がマルテンサイトに変態した試料を変形したときに見られる現象で、一部が変態したときは、外力によってマルテンサイトが応力誘起され、そのときの形状変形によって見かけの塑性変形がおきる。全部が変態したときは、マルテンサイト内の双晶の境界が移動したり、マルテンサイト間の境界が移動することによって見かけの塑性変形が起きる。マルテンサイトが安定に存在しうる温度範囲での塑性変形であるから、応力を除去しただけではそのまま残留歪として残る。しかし、 A_s 点以上の温度に加熱すれば母相への逆変態が起きるので残留歪は無くなって変形前の形状に復する。これが形状記憶効果のからくりであるが、母相の元の方位を記憶しているかの如く逆変態することが必要で、この現象の名称の由来もここにあるわけである。問題は母相の方位を記憶したかの如き逆変態がなぜ、どのようにして行われるかである。これについては必ずしも一致した解釈がなされていないが、マルテンサイト変態が熱弾性型であるときに記憶する条件が最も良く満たされている。このため熱弾性型マルテンサイト変態の本性究明ということが最近の世界的な傾向になっている。加熱によって変形前の形状に復するだけでなく、それを再び M_s 点以下に冷却すると変形したときの形状にも復するという可逆形状記憶効果 (reversible shape memory) も見出されている。マルテンサイト状態での最初の変形量に依存する現象で、この機構についてもいろいろな説明がある。

形状記憶効果は、これまで以前述の月面アンテナ、パイプの接合、締め付けピン、電気ソケット、集積回路のハンダ付けなどに実際に利用され、また医療器具や発電機としての利用も試みられている*。

* これらの利用法は末尾文献に詳述あり。

マルテンサイトと母相とは電気抵抗などの物理的性質が異なるので、変態に伴うそれら性質の変化を上
述の擬弾性、形状記憶あるいは可逆形状記憶効果における奇妙な機械的性質と組み合わせて利用すれば、
機能性のある画期的な装置を作ることも可能のように思われる。

利用法を考えて頂くための資料として、ほとんど完全な形状記憶効果を示す合金の代表的なものとし
ての M_s 点を最後に表記する。

合 金	M_s
Cu-14%Al-4%Ni	-150°C~室温
Cu-39%Zn	~-80°C
Cu-39%Zn-3%Al	-80°C~室温
Ni-50%Ti	-150°C~50°C
Ni-37%Al	-150°C~室温
Au-47.5%Cd	~60°C
Fe-25%Pt	-100°C~-50°C

濃度は大体のもので、この近傍で濃度を調節すれば M_s 点を適当な所を選べる。 M_s 点に温度範囲が
あるのはそのためである。

頁数が限定されているので大雑把な記述にならざるを得なかった。興味ある方は末尾文献のなかの参
考文献を見て頂きたい。利用法を考えつかれた方は是非連絡して下さいようお願いして筆をおくことに
する。

参 考 文 献

- (1) Proc. of Intern. Symp. on "Shape Memory Effects in Alloys" ed. by J. Perkins,
Plenum Publ. Co., (New York) (1975).
- (2) 清水 謙一, "金属物理セミナー" vol. 1 (1976), p.55.
- (3) 大塚 和弘・清水 謙一, "生産と技術" vol. 9 (1971), p. 24.
- (4) 清水 謙一・大塚 和弘, "熱処理" vol. 12 (1972), p. 107.