



機能性金属材料の開発と相変態

清水 謙 一*

近代工業国では国民総生産の5分の1が金属および金属製品で占められているというから、もし金属材料が存在しなかったら現代社会は成り立たないだろう。それほどに金属材料は近代文明に重大な役割を果たしている。またそれ故にこそ、金属材料に関係した研究者は、その性能向上あるいは新しい機能をもった材料の開発に生きがいを感じながら、たゆまざる努力を続けているのである。

日本刀の優れた切れ味と強さからも分かるように、日本人は古くから鋼の強靱化にひいでた技術をもっていた。その優れた性質は刀鍛冶が代々にわたって熱処理と鍛錬の仕方いろいろな工夫をこらしてきた成果である。それらの工夫はそれぞれの刀鍛冶の秘伝ともされてきたわけだが、現代風にいえば、赤熱した鋼のオーステナイト状態で適度の浸炭と加工（オースフォームングという）を行なった結果、そのあとの水焼き入れの際に生じるマルテンサイトが適度に微細になったり内部格子欠陥を含むようになったため、刀としての性質も良くなったのである。このオーステナイトからマルテンサイトへの相変態は、日本刀に限らずほとんどすべての鋼材において、その性質に多大の影響をもたらしている。最近、高張力鋼とか超強靱鋼と言われている鋼材の多くは、オーステナイトを加工したあとにマルテンサイトに変態させたり（オースフォーム鋼）、マルテンサイト変態後に微細析出物を生成させたり（マルエージング鋼）して、相変態を利用した強靱化が図られている。しかしながら、加工と相変態によって強度を1桁上げるということは容易なことではない。そのために複合材料の開発ということが一

方では試みられているのである。

電気通信技術の分野では、トランジスタやダイオードなどの発明によって整流・増幅作用の能力が数桁も向上したため、革命ともいべき大発展を遂げた。金属材料においても、その程度とは行かないまでも、鋼の強靱化以上に性能を向上させたり新しい機能を見い出すことが出来たらと期待するのは筆者だけではない。日頃金属における相変態を研究している筆者は、相変態をそのような材料開発に利用できないかとまず考えるわけである。最近になって、金属の種類によってはマルテンサイト変態が機能性に富んだ性質をもたらす、その性質を利用することによって従来の金属材料では期待し得なかったような新しい種類の製品を作れる可能性のあることが分かったので、以下に紹介する。

図1は Cu-Al-Ni 合金の単結晶の応力-歪曲線を試験温度の関数として示したものである。曲線の形が試験温度とともに著しく変化しているが、これらの変化はマルテンサイト変態が開始する温度 (M_s)、それが終了する温度 (M_f)、加熱に際して逆変態が開始する温度 (A_s) およびそれが終了する温度 (A_f) と密接に関係している。 A_f 温度より高いか近傍の試験温度での (a) および (b) では、弾性変形の直線領域につづいて降伏が起り見掛けの塑性変形が起きている。しかし、その変形歪は応力の除去とともに消失している。この見掛けの塑性変形は応力によってマルテンサイトが誘起されたからであり、また応力除去とともに歪が消失しているのは、応力誘起マルテンサイトが応力ゼロの状態では熱力学的には不安定なため、除荷によってマルテンサイトが逆変態して母相に戻ってしまうからである。このような見掛けの塑性歪が除荷によって消失する現象を広く擬弾性と呼んでいる。擬弾性には駆動力の違いに

*清水謙一 (Ken'ichi SHIMIZU), 大阪大学産業科学研究所, 金属結晶部門, 教授, 理博, 金属結晶工学

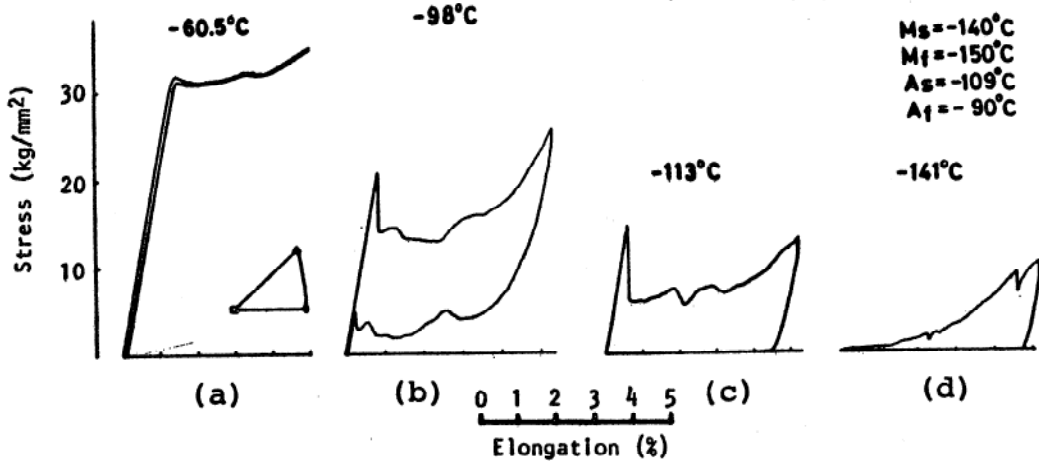


図1 Cu-14.5% Al-4.4% Ni (wt) 合金単結晶における応力-歪曲線の温度による変化

よって幾種類かがあるが、上述のような応力誘起マルテンサイト変態とその逆変態に起因するものを特に超弾性と呼んでいる。同じ超弾性でも (a) と (b) とで形が異なるのは応力誘起されたマルテンサイトの結晶構造が異なるためである。As 温度と Ms 温度の間の (c) では応力誘起されたマルテンサイトが応力ゼロでも安定に存在し得るため除荷しても歪が残留している。また (d) の Ms 温度以下では見掛けの塑性変形がすでに生成しているマルテンサイト内の双晶の境界移動あるいは兄弟晶間の界面移動によって進行するが、マルテンサイトが安定に存在する温度領域のために歪は残留する。これら (c) および (d) における残留歪は、Ar 温度以上に試料を加熱すると母相への逆変態が起きて消失する。これが形状記憶効果と呼ばれる現象であり、通常の金属には見られない奇妙とも思える性質である。超弾性も形状記憶効果も逆変態という同一の駆動力によって引き起こされている。どちらの現象が起きるかは、試験温度と

As あるいは Ar 温度との相対関係によって定まる。

超弾性は母相に応力を負荷したときだけでなく、単一バリエーションのマルテンサイトに Ms 温度以下で応力を負荷したときにも観察される。図2の (a) はそれを示したもので、図1の (a) あるいは (b) と同様に弾性変形による直線領域につづいて降伏が起き、見掛けの塑性変形が起きている。しかし、この場合には変形が2段階に進行している。これら2段階の変形は結晶構造の異なる他の2つのマルテンサイトが相次いで応力誘起されたために生じたものであるが、それら2つのマルテンサイトは応力ゼロでは安定に存在しないから、除荷の際に最初のマルテンサイトに逆変態して歪は消失してしまう。図2の (b) のように母相に応力を負荷しても、応力を高くすれば2つのマルテンサイトが相次いで応力誘起され、除荷すると逆変態を起こして同じく2段階の超弾性を示す。

バネ材の代表として知られる Cu-Be 合金の

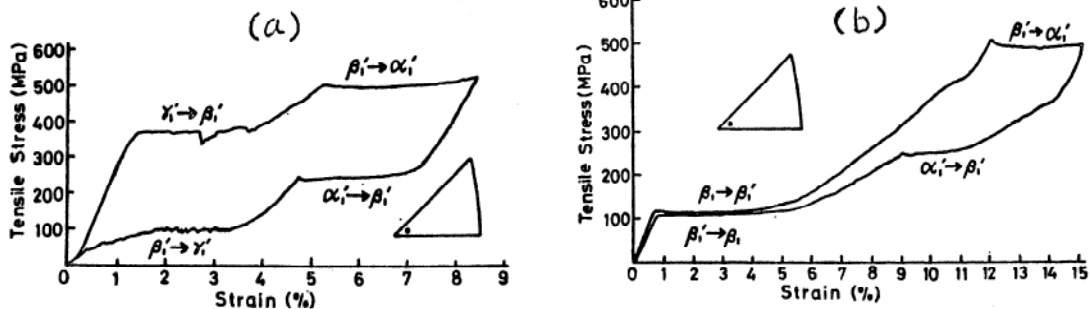


図2 3つのマルテンサイト間 (a) および母相と2つのマルテンサイト間 (b) の変態にともなう2段階超弾性

弾性歪は0.5%程度であるから、図1および2におけるような数%から10数%にもおよぶ歪が除荷あるいは加熱によって消失してしまうという超弾性および形状記憶効果は、従来の金属という概念からは到底理解することの出来ない不思議な性質と言わざるを得ない。形状記憶効果は月面アンテナ、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。マルテンサイトと母相とでは電気抵抗などの物理的性質も異なる

るので、変態にともなうそれらの性質の変化を超弾性あるいは形状記憶効果と組み合わせて利用すれば、機能性のある画期的な金属製品あるいは装置をも作ることは可能である。変態に関係した M_s などの温度は、材料の成分によっては数100度から可成りの低温にわたっているので、広い温度範囲にわたって超弾性および形状記憶効果を実現させることが出来る。機能的な製品あるいは装置の出現を期待しながら、更に他の機能性を見い出すべく相変態の研究は続けられている。