

平成21年度教員免許更新講習

「技術 いろいろな、ものづくり」
(材料技術領域)

2009.6.20 10:30～11:50
長崎県立大村工業高等学校

担当
古谷吉男
(長崎大学 教育学部)

金属とは

金属結合により金属原子（イオン）が凝集した物質

金属結合における凝集力は金属イオン（正）とそれらを包む自由電子雲（負）間の相互作用力（引力）。

金属結晶

金属イオンが空間的に規則正しく集合した固体

多結晶体 多くの結晶粒からなる固体

単結晶体 単一の結晶粒からなる固体

金属の主要な結晶構造（単位格子、単位胞）

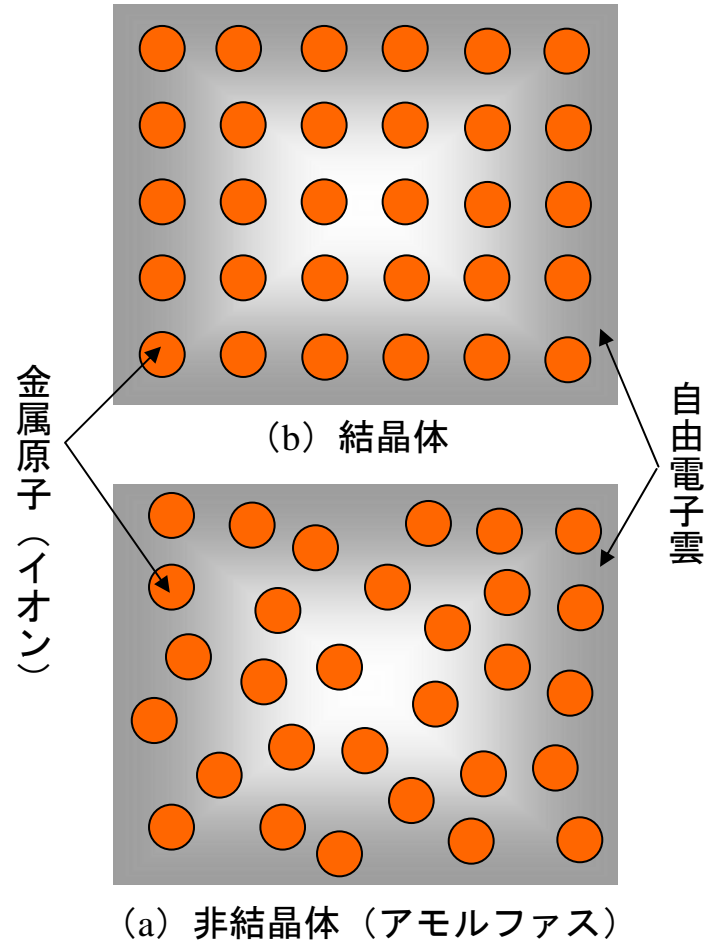
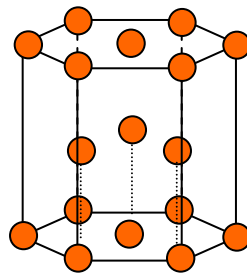
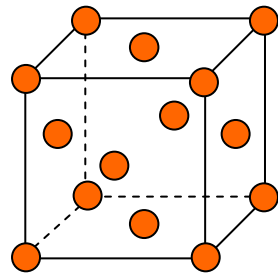
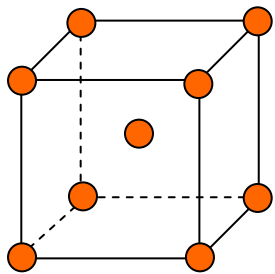


図1 金属原子（イオン）の凝集状態

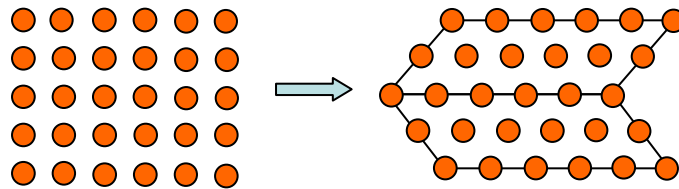
金属の結晶格子欠陥

結晶格子欠陥の種類

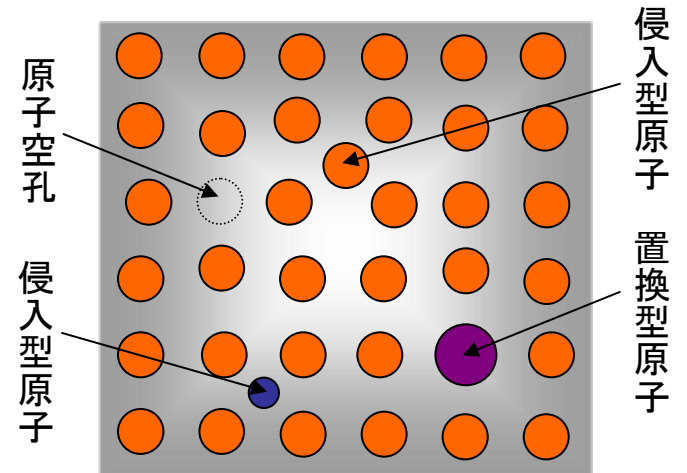
- 点状欠陥 原子空孔 侵入型原子 置換型原子 など
 (フレンケル型、ショットキー型)
- 線状欠陥 転位 (dislocation ディスロケーション)
 刃状転位 らせん転位 混合転位
- 面状欠陥 積層不整 表面 粒界 析出物界面 など

結晶の変形

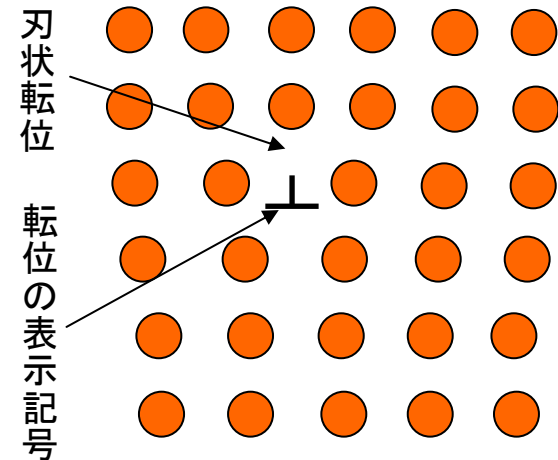
- 弾性変形 原子間距離の変化による変形 (応力作用中)
- 塑性変形 (永久変形)
 - すべりによる変形
 原子の集団的剪断すべり移動による変形
 転位の運動が関与
- 双晶による変形



- 相変態による変形
- 結晶構造転移による変形



(a) 点状欠陥



(b) 線状欠陥 (刃状転位)

図2 結晶格子欠陥のモデル例

金属の強化機構

金属を強化するにはその塑性変形抵抗能を高めれば良い。

通常、金属材料中には $10^5 \sim 7$ 本/cm² 程度の転位が存在し、その数は加工や熱処理により増減する。最も一般的な変形は転位の運動によるすべり変形である。そこで、固体内に転位が運動し難い条件を与え強化を図る。

固溶による強化（固溶硬化）

固溶元素による格子のひずみ 転位の固着

加工による強化（加工硬化）

導入欠陥 増殖した転位のタングリング

結晶粒の微細化による強化

転位の移動距離減 粒界障壁

析出物の生成による強化（析出硬化 時効硬化）

分散化した析出物による障壁

相変態を利用した強化

結晶構造の変化に伴う内部残留応力による格子ひずみ

導入欠陥（転位、双晶等） 不連続相界面

鉄-炭素系 平衡状態図

純鉄の変態点と結晶構造

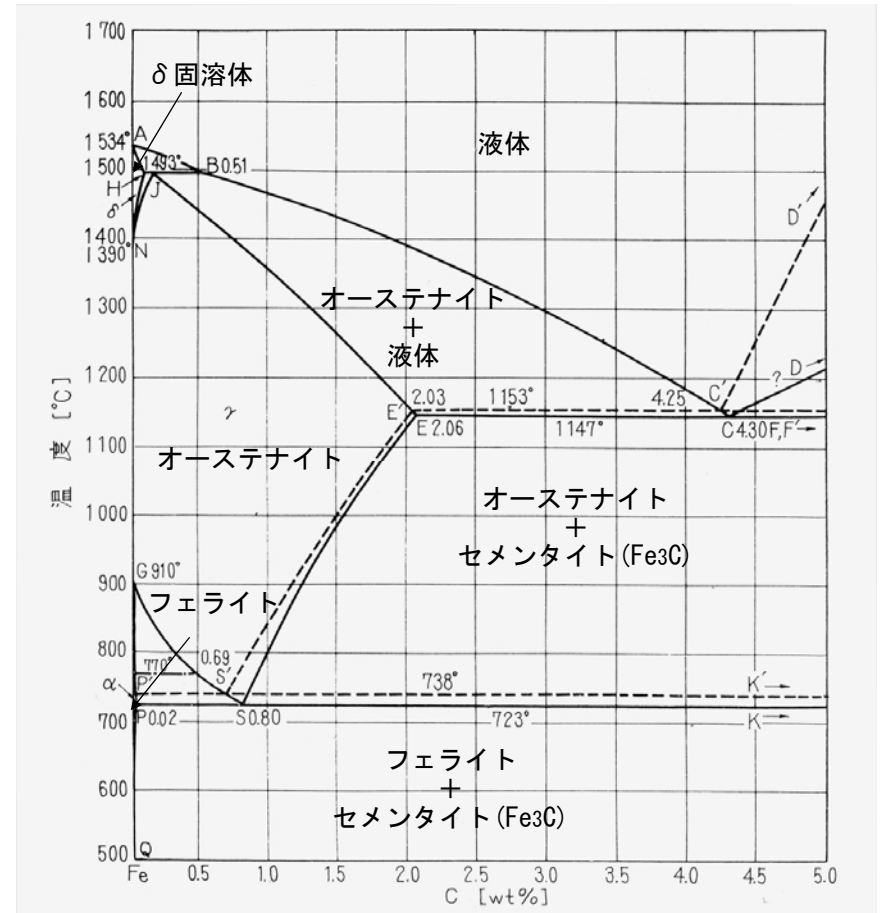
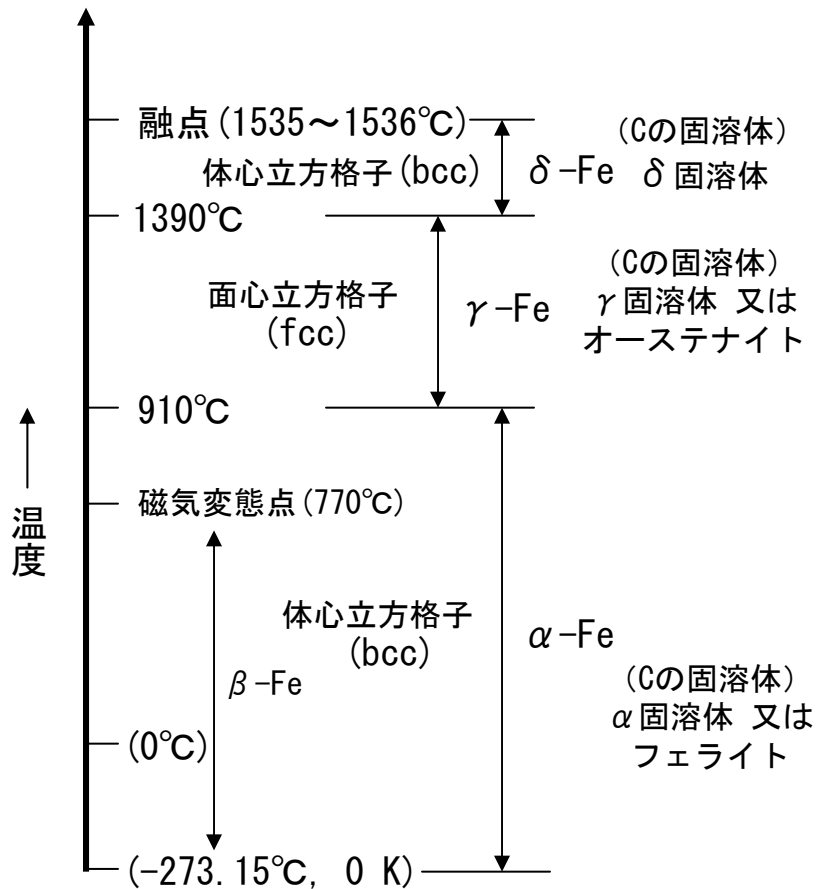


図3 鉄-炭素系の平衡状態図 (Hansen)

実線 Fe-Fe₃C系 (準安定系)

破線 Fe-C系 (安定系)

マルテンサイト変態の特徴とその利用

焼き入れ硬化した鋼中の微細組織を、最初の発見者（マルテンス）の名に因み、オズモンドがマルテンサイトと命名(1895)。

マルテンサイト組織および変態は最初に鋼中で見出された原子の拡散を伴わない変態（無拡散変態）であるが、現在では、そのような変態は非鉄系合金等でも認められており、材料の強靱化や機能性発現の基になる。

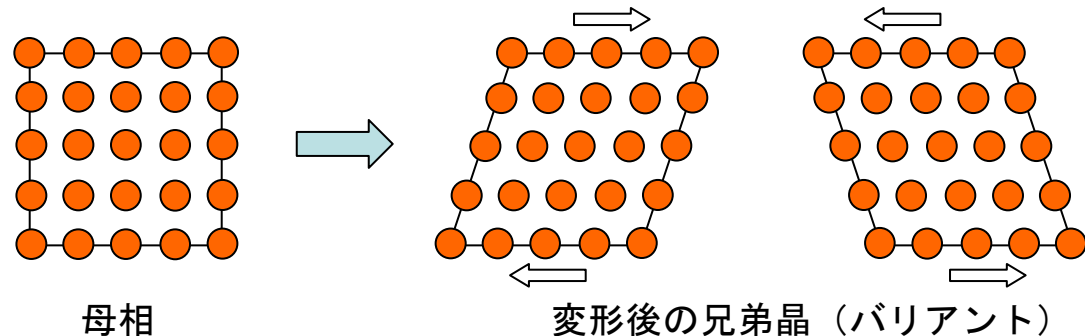
マルテンサイト（型）変態とは

原子の連携運動によって引き起こされる原子無拡散*のせん断変形による構造相転移

*原子無拡散 原子的尺度での大きな拡散移動をせず、母相との相対的な位置関係を保持した状態での移動。

変態開始温度： M_s 変態終了温度： M_f 逆変態開始温度： A_s 逆変態開始温度： A_f

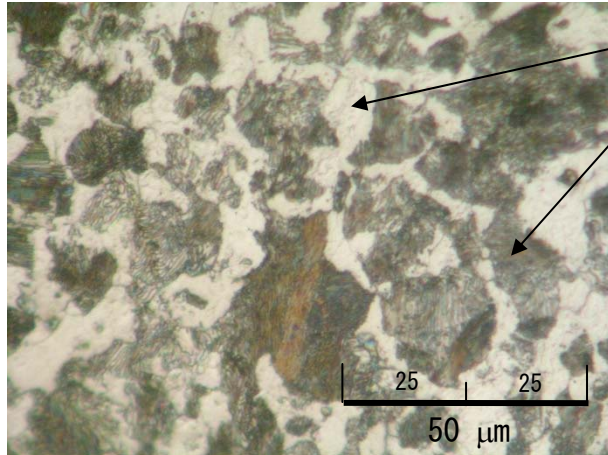
せん断変形の例



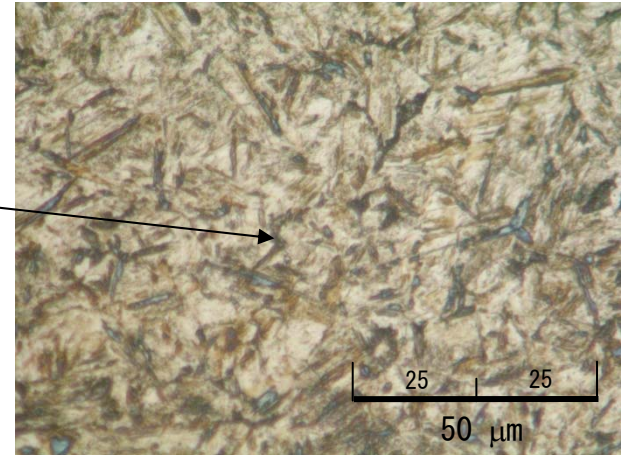
マルテンサイト変態の特徴とその利用1

鉄鋼材料におけるマルテンサイト変態

硬度 : Hv=179



硬度 : Hv=707



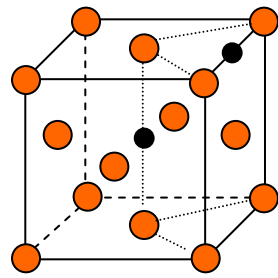
S45C 焼鈍し (850°C、炉冷)

S45C 焼入れ (850°C、水冷)

図4 熱処理した炭素鋼の光学顕微鏡組織

鉄鋼材料中のマルテンサイト相の結晶構造

- C原子
- Fe原子

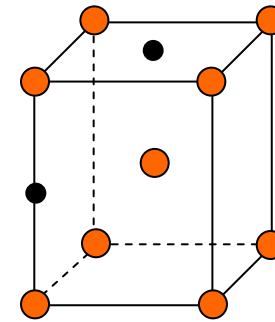


面心立方格 (fcc)

炭素原子を固溶したオーステナイト相の単位胞



急冷
(焼入れ)



体心正方格 (bct)

炭素原子を固溶したマルテンサイト相の単位胞

鉄鋼の強靱化とマルテンサイト変態

一硬くて脆いマルテンサイト相を如何に利用するかー

- ・一部フェライト化と微細セメンタイト (Fe_3C) の分散析出 (焼き戻し処理)
- ・変態時に導入された多数の格子欠陥 (転位、双晶) の活用

強靱化した鋼材例

連続冷却低炭素強靱鋼

疑似マルテンサイト相 (多欠陥のフェライト相主体) に分散した微細 Fe_3C 。

2相鋼

フェライト中に微細なマルテンサイト相を分散 (5~20%)。 Fe_3C は含まない。

自動車用薄板鋼

マルエージング鋼

低炭素合金鋼 (Fe-Ni系) の焼入れと時効析出 (~500°C)。

マルテンサイト相に加え、析出した金属間化合物 (Ni_3Ti , Ni_3Al , Fe_2Mo など)

による分散強化。(200kg/mm²の引っ張り強度) (参考: 高炭素鋼圧延材 ~100kg/mm²)

オースフォームド鋼

加工熱処理によるオーステナイト相の微細化および格子欠陥の導入。

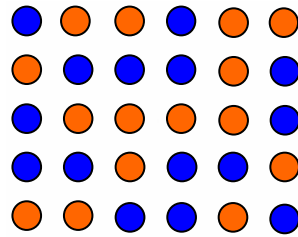
マルテンサイト相の微細化。

マルテンサイト変態の特徴とその利用3

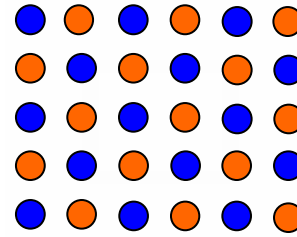
非鉄金属材料におけるマルテンサイト変態 ～Ti-Ni合金を中心に～

Ti-Ni合金の結晶構造

チタン (Ti) とニッケル (Ni) の組成比が1に近い場合、互いの原子が規則的に配列した構造を持つ規則合金になる。



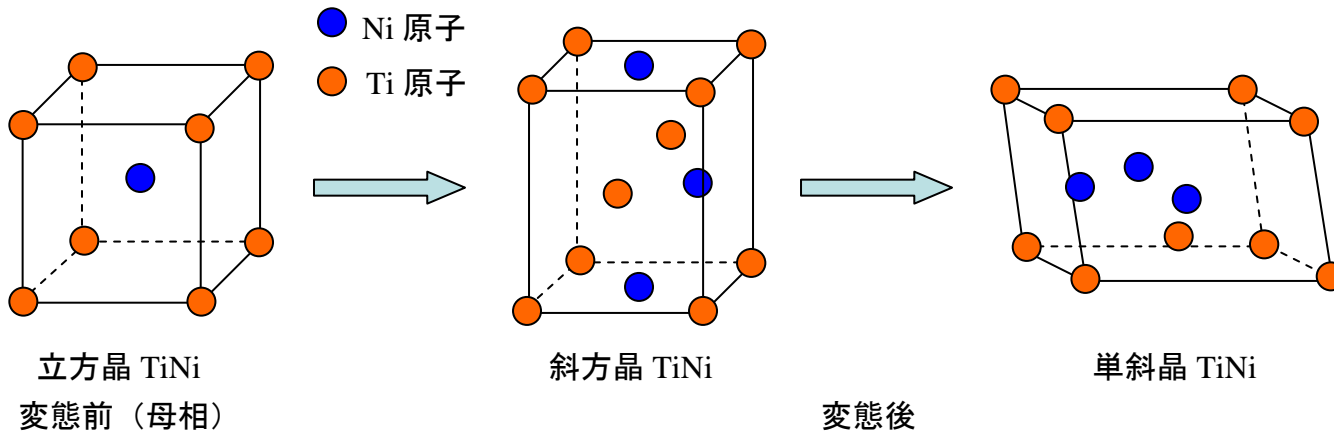
不規則構造の例



規則構造の例

- A元素の原子
- B元素の原子

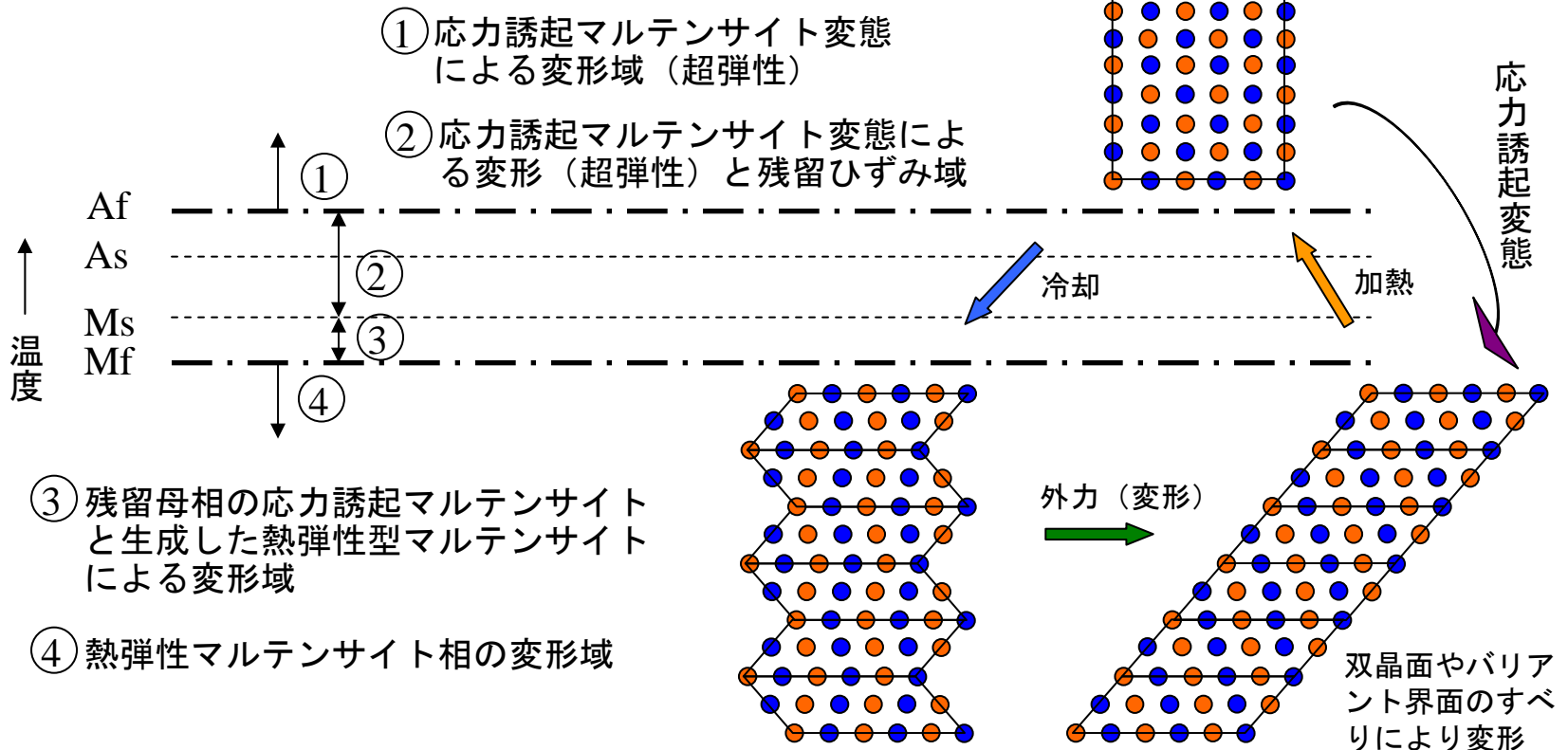
マルテンサイト変態による結晶構造の変化と単位胞



形状記憶効果と超弾性

形状記憶効果と超弾性は、変態開始温度 (M_s)、変態終了温度 (M_f)、逆変態開始温度 (A_s)、逆変態開始温度 (A_f) の相対的關係から区別できる。非鉄材料においては M_s - A_s 間のエネルギー差が極めて小さくなる ($\sim 20\text{K}$ 、鉄鋼では 400K 以上)。
熱弾性型変態と呼ばれる所以となっている。

なお、 M_s 、 M_f 、 A_s 、 A_f の値は、素材の履歴と焼き入れ処理温度等により変動する。



マルテンサイト変態の特徴とその利用5

熱弾性型マルテンサイト変態による形状記憶効果を示す合金系（井口）

合金	組成	Ms 点
Ag—Cd	44~49 at% Cd	-190 ~ -50 °C
Au—Cd	46.5~50 at% Cd	30 ~ 100 °C
Cu—Al—Ni	14~14.5 wt% Al 3~4.5 wt% Ni	-140 ~ 100 °C
Cu—Au—Zn	23~28 at% Au 45~47 at% Zn	-190 ~ 40 °C
Cu—Sn	~15 at% Sn	-120 ~ 30 °C
Cu—Zn	38.5~41.5 wt% Zn	-180 ~ -10 °C
Cu—Zn—X	(X:Si, Sn, Al, Ga) 数 at% X	-180 ~ 100 °C
In—Tl	18~23 at% Tl	60 ~ 100 °C
Ni—Al	30~38 at% Al	-180 ~ 100 °C
Ti—Ni	49~51 at% Ni	-50 ~ 100 °C

形状記憶効果と超弾性の利用例

パイプ継ぎ手 歯列矯正用超弾性ワイヤー 各種アクチュエーター（エアコンのフラップなど）
ブラジャー用超弾性ワイヤー 携帯電話アンテナ 医療用ステントやガイドワイヤー
眼鏡フレーム マイクロマシン などなど

形状記憶、超弾性材料の今後

強磁性形状記憶効果による高効率アクチュエーターへの利用 薄膜化による複合材料化
センサー機能とアクチュエーター機能を併せ持つスマート材料としての発展
信頼性を高めるための材料特性の改善

まとめ

1世紀以上前に鉄鋼で見出されたマルテンサイト変態は、その後、鉄鋼の構造材料としてのより強靱化を図る立場からの中心的な研究対象として、その機構解明が進められてきた。フェライト、セメンタイトおよび種々の格子欠陥との相互作用性の制御にもとづいた多くの性質改善により、鉄鋼材料は利用範囲を拡大するとともに、安価性と加工性から、影の主演として現代文明を支えて来ている。もう一つの影の主演が、その鉄鋼の性質を支配する炭素であることを再認識して欲しい。

なお、鉄鋼中のマルテンサイト相は母相とは整合性が無く、相自体も極めて硬くなる（非熱弾性型マルテンサイト変態）。

1963年にBuehlerらによりTi-Ni合金において金属の形状記憶効果が発見されてほぼ半世紀になる。研究の結果、形状記憶効果や超弾性の挙動がマルテンサイト変態に由来することから、この変態様式の奥深さとその普遍性が明かになった。ここで生成するマルテンサイト相は母相と整合性が高く、かつ、柔らかい特徴が有る（熱弾性型マルテンサイト変態）。

今後、マルテンサイト変態とその制御は、スマート材料開発や材料の高機能化を図る上で、影の主演になる。

最後に形状記憶処理結果を確認しましょう！