鋼の強化組織と耐破壊特性*

荒 木 透**

1. 結 言

鉄鋼材料は、その実用性を高めるために強度を上昇させると同時に安全性、信頼性、加工性などその用途からくる要求に沿った特性をあわせ備えることによって、用途と使用量を拡大し、発展してきた。

鋼の強化としては、材料として設計上重要視される外力に耐え永久変形を起さない弾性限・降伏点の向上がまず考えられ、鋼への合金元素の添加、熱処理、加工等の効果の組合せによって強化を達成することができる。その際、合金元素の選択、熱処理、加工履歴の設定等によって得られる強化組織には、同時に、使用状態において過負荷や動的な荷重、時間効果、環境などの影響が附加することによって破壊することがないように“破壊に耐える諸特性”が求められる。一般に延性、靱性、疲労特性などの諸パラメータがこれである。

この前者の強化機構については、従来からも微視組織構造との関係についての基礎的アプローチが行われてきている。一方後者の耐破壊特性については、材料の不純物や溶解・造塊などの生れにも強く関連する「構造に敏感な性質」であり、また使用状態の材料の形態、応力の3軸的分布と経時の変化などに対応して変化する「多面的性質」であるため、金属学的、学術的取扱いを確定することが極めて難しい。しかし技術上、材料の研究開発に際して基礎的な指針を与えるために、これらの特性と鋼の微視的組織との関係についての主として経験的な知見を整理検討して理論的根拠に結びつける努力を重ねることは重要なことと思われる。本講では、鋼の微視的強化機構についての素分類にもとずき類別した各種組織について、これら諸特性との関連を考察し、若干の例によって検討を加えてみたい。

2. 鋼の強化機構

まず、鋼の微視的強化機構をつぎのように、関連する格子欠陥の性状によって素分類を行うこととする。(A₁)等の記号は、以下述べるところで簡略化に用い、これらの機構がそれぞれ作用していることを表わすこととする。

微視的強化機構の素分類としては、表1に示すものがあり、強化の機構的解説については前講⁽¹⁾にゆずって省略する。

表1 微視組織的強化機構の素分類。

(A) 固 溶 強 化	点 欠 陥
(A ₁) 置換型固溶強化	
(A ₂) 侵入型固溶強化	
(B) 転 位 強 化	線 欠 陥
(B ₁) 均質転位強化	
(B ₂) 不均質転位強化	
(C) 粒 界 強 化	界面欠陥
(C ₁) 大傾角粒界強化	
(C ₂) 小傾角粒界強化	
(D) 粒子(分散)強化	体積欠陥
(D ₁) 整合粒子強化	
(D ₂) 非整合粒子強化	

以上の各素機構は、それぞれ強化の寄与の程度が異なるが、通常単一とみられる組織(たとえばフェライト、マルテンサイト等)においても2種以上多種類の機構が重畳して作用しているものである。さらにフェライト・パーライト組織に見るように強度の異なった別種の(相)組織が“複合”して強化組織を形成するものがある。この後者の場合は、主に光学顕微鏡観察以上のオーダーでの複合強化機構(composite strengthening mechanism)として区別して考える必要がある。

3. 耐 破 壊 特 性

鋼の耐破壊特性としてここでは、代表的に延性(伸び、絞り)、靱性、疲れ特性をとりあげて考察する。

** 金属材料技術研究所長

* 第23回本多記念講演(昭和53年4月4日、東京、東京大学)
Relation of Strengthened Microstructure of Steel to its Fracture-resistant Properties; Toru Araki (National Research Institute for Metals, Tokyo)
1978年7月28日受理

(1) 延 性

延性としては静的引張りにおける伸び(均一伸び, 破断伸び)および絞り(がまず対象となる。伸びは実用面から安全設計の立場のみならず材料の被加工性の要求に対しても重要な指針になるパラメータである。これに対して絞りは試片内部の延性き裂の成長-破断に関係したもので靱性とも関連した延性とみられる。

(A_1)より(D_2)に至る各種の強化の素機構が延性にどのように作用するかについては, 前講⁽¹⁾でも簡単に触れている。一般的にいって, 強化にともなって伸び, 絞りは単調に低下するが, 強化の効果のとくに強い侵入型固溶強化(A_2), 整合粒子強化(D_1)などでは低下が著しい。以下主として, *bcc*のフェライト, マルテンサイトを対象に概略を述べる。

(A_1)の置換型固溶は, 緩やかな強化をもたらす, 延性の劣下は少ない。むしろ, 固溶により転位が交差すべし難く planar な挙動になる場合には, 加工硬化挙動(とくに, $n=d \log \sigma / d \log \epsilon$)を増すために, 加工性を重視する場合, 均一伸び(δ_u)が良好となる⁽²⁾ため他の強化機構より延性が有利となる。一方転位挙動が交差すべしやすく wavy な場合は, 絞りや靱性など設計安全性の面で有利となる。

固溶体が, 長範囲の規則格子形成の傾向が強い場合, これによって転位のすべりの困難性が増し強化されるが, 同時に延・靱性の低下が著しい⁽³⁾⁽⁴⁾。一方, クラスター形成傾向の場合, 微視的相分離による強化がみられる時も同様である。固溶強化によって変形双晶を生じやすくなる固溶体も延・靱性は一般的にいってよくない⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

以上のことから, 延性, 靱性を保ちながら強化する機構としては, 無秩序型の置換型固溶による緩やかな強化が設計安全性からみた特性に有利であるということがいえる。

転位密度の上昇による強化(B)は, 冷間加工のように強い塑性ひずみにより転位を増殖した組織の場合には延性は一般に著しく低下する⁽⁷⁾。それに比較して, 易動度のよい転位を比較的多く含むマルテンサイト変態組織の場合には, 降伏後流動塑性変形がより容易に行われて絞りで代表される延性が良い。何れの場合も, 侵入型固溶(A_2)との相互作用が強く作用する場合に強化が著しく同時に延性の低下も著しくなる。

結晶粒の微細化による粒界強化(C)はフェライトの降伏点を高めるにかかわらず δ_u は変らない⁽⁸⁾, 絞りや衝撃値などで表わされる延・靱性がよくなることはよく知られている。結晶粒界は転位の移動に対する抵抗となり強度を高めるだけでなく, すべり変形を限定, 均質化し, ミクロき裂の発生と伝ばを阻む方向に作用する。

したがって最も有利な機構で強化と耐破壊特性の向上に同時に寄与することができる。しかし, 各結晶粒は方位がランダムで粒径がそろっていることが最も望ましく, 方位差の少ない粒界や引張応力に弱い脆化粒界の存在確率の多いことは望ましくない。

粒子の分散による強化(D)は, 母相と異なった構造の粒子(析出物等)による転位の運動の阻止によるものであり, 相境界の特性(整合性, 安定度)ならびに粒子の強さ(すべり抵抗)によって強化の度合ならびに延性が異なってくる。

整合粒子の場合(D_1)は, 一般に粒子径の微小な場合が多く, 粒子の構造が著しく強くない限り転位が内部を貫通せん断する⁽⁹⁾。この場合母相のすべり面の分布がこのようなせん断面に集中しやすく, すべりが均一微細に分布する場合に比べてき裂の発生, 伝ばに結びつき易く, 靱・延性が悪い。しかし, ある臨界の粒径以上では粒のせん断が行なわれない(Orowan 型)強化となり, 比較的均一な塑性変形が行なわれ, 延性は強化によってあまり害なわれない。

非整合粒子強化(D_2)の場合, 粒子の分布によって転位との相互作用による強度, 延性への影響はつぎのように考えられる。

(i) 塑性変形によって増殖する転位のからみ合いによって, 粒子間隔にみ合ったセル状転位分布が形成され, この過程が比較的高い変形率まで持続する。したがって加工硬化現象が高ひずみ量まで持続し, n, δ_u が比較的高くなり, 延性には望ましいこととなる。

しかし, 粒子が数 μm のオーダー以上にも粗大化すると, 延性破壊での伸び, 絞りともに強度とは関係なく劣下する。たとえば破断伸び ϵ_f と粗大粒子の容積含量比 f との間には,

$$(\epsilon_f + K_1)(f + K_2) = c \quad (1)$$

ただし, K_1, K_2, c は定数

の相反関係がある⁽¹⁰⁾。

(ii) 静的引張試片の場合, δ_u を過ぎたあとの絞り伸びは, 局部集中変形による多軸引張応力によって起るき裂の発生と伝ば成長→空隙の拡大連けい→破断の過程をたどる。このとき, 母相の加工硬化の余力と同時に粒子界面の強さ, 粒子の破断に対する強さが靱・延性に大きく影響する。また強化機構とは別の μm オーダー以上の非金属介在物その他のセミマクロの欠陥の役割割りも大きくきいてくる。

(iii) 分散粒子は, その平均間隔を λ とすると, 母相の塑性変形中に発生するミクロき裂の成長を λ にみ合った範囲内に限定することによって一たん成長を阻止する効果が考えられ, 強化(Orowan 型において K/λ に相当)によって著しく靱・延性が害なわれない可能性がある。

表 2 強化機構と延性、靱性への影響。

	強さ σ_y	延性 δ	絞 φ	シャルピー 靱性	破壊靱性
(A _{1p}) 置換型固溶(直線の転位)	+	0	—	—	—
(A _{1w}) 置換型固溶(波状転位)	+	—	— 0	0 +	0
(A ₂) 侵入型固溶	+++	—	—	—	—
(B ₁) 転位強化(均一)	++	—	—	—	—
(B ₂) 転位強化(不均一)	+	(—)	(—)	—	—
(C ₁) 大傾角粒界強化	++	0	0 +	+	0
(C ₂) 小傾角粒界強化	+	0	0	0 +	0
(D ₁) 整合粒子強化	+++	—	—	—	—
(D _{2f}) 非整合粒子強化(微粒)	++	— 0	0	0	0 —
(D _{2c}) 非整合粒子強化(粗粒)	+	—	—	— 0	—

以上の各強化の素機構に別けて延性、靱性に関する寄与を定性的にまとめて表現すると表 2 のようになる。なお、靱性についての解説は次節で行なう。

(2) 靱性、破壊靱性

靱性という概念は工学的に用い慣らされてきた広い意味をもっており、単一の測定値やパラメータのみで定義するのは適当でないが、代表的には次の表 3 に示すように 3 つの段階に別つことができる⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。

表 3 靱性の概念と表示。

(i) 静的引張試片(平滑)の場合：

$$\text{全破壊エネルギー} \Sigma E = \int (\text{応力}) d\delta$$

(ii) 切欠試片 - 高ひずみ速度/低温の破壊挙動：

(1) 破壊エネルギー：シャルピー値、シェルフエネルギー、その他

(2) 延性破壊 - 脆性破壊：せん移温度 T_{ss}

(iii) 破壊されつの挙動

(1) されつの発生挙動または先在する欠陥のされつへの成長

(2) されつの成長 - 伝ば - 不安定成長条件：破壊靱性

(i) の平滑試片を用いる静的引張試験による破壊エネルギーは、材料の靱さを感覚的に表わす最も簡単な表現である。さらに、実用される材料の破壊に耐える安全性の評価につながるものとしては、(ii) の切欠き試片による応力集中と多軸応力の影響、ひずみ速度、温度の影響に関連した破壊エネルギーまたは破壊挙動の変化を表わすパラメータが用いられ、また (iii) のされつの成長 - 伝ば挙動については破壊力学的な測定、計算手法によるパラメータ：破壊靱性値 (K_{IC} , G_{IC} , J_{IC} 等) が用いられる。

(ii) の代表的なシャルピーエネルギー値またはせん移温度については、表 2 に示すように強化の素機構によってかなりの差がある。(C₁) の大傾角粒界強化は低温、高ひずみ速度でのされ発生を抑え、この靱性を高めかつ強化を果すことができる有効な手段である。回復 - 再結晶(静的ないし動的)の過程に得られる小傾角粒界強化(C₂)も

ミクロ的にランダムな配向の場合は強化とともにこの意味の靱性を増すことができる⁽¹²⁾。低温靱性への Ni の固溶の効果 ((A_{1w}) : wavy な転位挙動) も強化と靱化を同時に果す種類のものである。

(iii) の破壊靱性による評価は、(ii) の靱性がされつの発生・成長と(延性 - 脆性)拡大に関係しているのに対して、先在するされつの不安定な拡大伝ばの条件に関係するものであるため、強化機構に対する対応は異なっている。高強度の場合、粒界は必ずしもされつの伝ばの有効な障害とはならないため破壊靱性は粒界機構(C₁)に依存しないことも多い。非整合の微細な粒子強化(D_{2f})や wavy な転位挙動を促す固溶強化(A_{1w})は破壊靱性に著しい負の影響はないといえよう。

ここで、靱性に及ぼす微視組織的素要因について、さらに粒界脆化におよぼす影響をも含めて要点を集約して示すと表 4 のようになる。

(i) のマトリクスについての要因としては、前述の各種の強化機構によって引き起される微視的な応力集中/応力緩和現象の影響、加工・ひずみ硬化挙動ならびに塑性不安定の起る条件の影響などが靱性を左右するが、本質的には格子形、原子間結合の強さによる因子が基底となっている。

各強化の素機構が重畳して作用する場合には、それぞれの機構の間の相互作用によって延性、靱性に及ぼす影響は必ずしも相加的、直線的にならない場合も多い。しかしこれを解析すると、マトリクスについては以上に述べた要因への影響によってかなり説明される可能性がある。また(ii)の粒界に及ぼす影響の著しい場合は、粒界破壊の発生が起り、これによって靱性が左右される場合もある。

(3) 疲れ破壊特性

(i) 疲れによる損傷 - 破壊現象の内容

鋼の繰返し応力による疲れ破壊現象を強化組織に対応して考察する場合、(1) 疲れによる微視的損傷(damage)

表4 靱性に及ぼす微視的要因.

(i) マトリクス要因		(C)	(D ₁)	(A ₁)
①	応力集中	粒の大きさ, 分散粒子, 双晶変形傾向 じり面の選択(直線の転位/波状転位, 規則/不規則) 可動転位の量とその易動度(B)		
	応力緩和			
② ひずみ硬化と塑性不安定(指数: n , 各種介在物および界面の特性, 不均質性)				
③ 格子の結合強度(へき開/すべり……………固溶(A)の本質的影響)		<i>bcc / fcc</i>		
(ii) 粒界の要因				
① 粒界の塑性挙動(粒界の構造と安定度, 剛性)				
② 粒界の析出物(析出物の性質, 界面ならびに配列の様式)				
③ 粒界偏析元素の影響(C, B 強化 / P, As, Sb, Sn, S 脆化)				

表5 疲れ損傷-きれつ-破壊現象.

(1) 疲れ軟化(疲れ損傷)		(観察される現象, 特徴)
(a) 巨視的な繰返しひずみの増加……(すべり帯→固執化)		
(b) 微視的な塑性ひずみの変化………ミクロ硬さの変化, 強化組織の変化→弱化, 転位の増加とからみ合い, セル構造形成, 点欠陥の増加(転位の上昇), 交差すべり, 可動転位の増加, 転位のシンクの役割		
(c) バウシinger効果(応力の減少)……粒界, セル境界の効果, 粒子-母相の非整合境界の役割		
(2) きれつの発生		
(a) きれつの発生………応力集中場所, 粗大じり帯, 介在物, 不均質部		
(b) きれつの生成………せん断によるきれつ生成(第1段階)		
(3) きれつの伝ば		
(a) 初期のきれつ進展………組織敏感な破面(モードI)		
(b) 定常的なきれつの伝ば………		$\left\{ \begin{array}{l} \text{速度} \frac{da}{dN} = f(a, \sigma, \dots) \\ \text{ストライエーション形成} \end{array} \right. = C(\Delta K)^m$
(c) 急速な伝ば→破断		

の進行, (2)疲れきれつの発生, (3)きれつの伝ば過程の3つの段階に別けて考えることができる.

表5には, 以上のそれぞれの過程の内容を記した. まず巨視的には, 表面のすべり帯が顕著化し, 増加しさらに粗大すべり帯(persistent slip band)となることが軟質の母相の場合には観察される. 強度の高い組織構造の場合は巨視的な欠陥が明らかに現れない.

上述の表面に現われる損傷に併行して母相の微視的な変化は, ミクロ硬度の変化によってその一面を覗くことができる. 軟質のフェライト母相は, 一応ミクロ硬度測定によると疲れによって硬化を示す. これは下部組織の転位密度の増加, さらに一般的には疲れ独特のセル構造の生成に対応している. この段階では必ずしも微視的には“損傷”という言葉があまり適合しないようにも思われるが, 同時に微視的な塑性ひずみを増加するような変化も起っている. 点欠陥の増加による転位の上昇運動の促進, 負荷応力に従う方向への可動転位の増加などは軟化の方向に作用するであろう. バウシinger効果は繰返し応力-ひずみの過程での軟化現象につながるものである.

各種の強化の素機構によって強化された鋼の**bcc**母相が, 疲れ損傷現象に対してどう挙動をするか,

とすることは, 強化した組織構造が繰返しの微視的塑性ひずみによって変化(主として弱化)を受ける程度によって評価することができる. 一般的に冷間加工による転位強化(B₂)や不安定な析出物による粒子強化(D₁)は疲れによる強化機構の消失ということが起りやすく, 軟化損傷を受けやすいとされる⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾.

つぎに, 第2の段階は疲れによるきれつの発生である. まずきれつの核は, マクロ的, ミクロ的な応力集中部や偏析等による脆弱部位, 非金属介在物などの内部破損や介在物-母相の境界のはく離部, 表面の粗大すべり帯等によって生じた応力集中部にポイドあるいはきれつとして発生するが, 直ちに大きな疲れきれつに成長するとはかぎらない.

成長-伝ばするきれつ生成は, 軟質フェライト相の場合, さらにせん断のないいわゆる“きれつの第1段階”の進展を経て主きれつとなる. 同時に発生する他のきれつが存在するとそれは副となり, また孤立し停留して残ることが認められる. このようにきれつの発生-生成の段階には, 微視的構造組織よりはむしろ, 光学顕微鏡のオーダーのミクロ欠陥が重要な役割を果す⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾. この過程はその潜伏段階に相当する疲れ損傷の過程の進行の影響を受けて, それら要因のある限界条件によって生成に

至るものと考えることができる⁽¹⁷⁾。

さらに、第3のきれつの伝ば過程は、(a)初期のきれつ進展、(b)進展速度の定常的なきれつの伝ば過程、(c)急速なきれつの伝ばを経て破断する過程、の3つの段階にわけて考えられる。通常(b)が長く解析しやすい過程であり、もっぱら実験観察の対象となり、疲れ強度や耐久限度との関連が研究される。この過程は微視的な構造との関連は比較的少なく、マクロ的、力学的な性質要因(たとえば繰返しひずみによるひずみ硬化指数等)が支配する現象と考えられる⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾。

以上に述べた疲れ損傷の現象よりきれつ発生-破壊に至る過程にみられる微視的な現象ないしその特徴の内容が表5に示してある。

(ii) 耐疲れ破壊特性と強化機構

材料の疲れ破壊に耐える特性は必ずしも材料の強さ、硬さや性質とはそのまま対応しない。したがって微視的な強化機構がそのまま耐疲れ破壊特性を高めることにはならない。疲れ現象を上述のように分けて考えた場合、強化の素機構によってどのように変化するかを材料の耐久性に好影響(+)か悪影響(-)かという観点から考察して大まかにまとめると表6のようになる。

表6の(1)疲れ損傷は疲れきれつ発生前提条件となるものである。これを疲れ軟化の見地から考察すると各種強化機構によって貢献の度合にかなり差がある。固溶強化では靱性の場合とは異なり、wavyな転位挙動よりplanarな挙動を促すものがよい。また侵入型固溶の場合は効果が大きい。とくに粒界と共存する(C₁)・(A₂)強化が有効である。転位強化(B₂)に対しても同様のことがいえる。

きれつの発生については、前述のように介在物などの数 μm オーダ以上の欠陥の役割りが大きく、これと疲れ損傷とのかね合いの条件できまると考えられる。さらにきれつが成長し伝ばする過程は、初期に組織(構造)に敏感な範囲があり、定常的な伝ばの間にはあまり組織の種類によって影響されなくなる(ただし強化ないしひ

ずみ硬化の力学的効果には対応する)。これらを概括して表6に示してある。

疲れによる破壊に耐える特性の1つの指標として疲れ耐久限度 σ_w がある。 σ_w の内容は、 10^8 以上の繰返しによる疲れによって、きれつが発生伝ばし破壊に至らない限度の繰返し応力を示すもので、上述の(1)の現象に対する強化機構およびきれつ発生サイトの提供の原因、すなわち介在物、偏析その他の応力集中源の存在がこれに関連する。一方 10^4 など有限の繰返し数(寿命)を問題にする高応力(または低サイクル)の疲れ破壊の場合は、きれつの発生までの繰返し数 N_0 およびそれ以後きれつの伝ばにより破断に至る繰返し数 N_f の2つの部分に別けて破壊に耐える特性を評価することができる。

何れにしても、疲れによる破壊に耐えるために、微視的強化機構がそれぞれどのように貢献するかということを考える場合、主として表6に示した(1)の項目がその目安を与えることになる。

4. 実用鋼強化組織と耐破壊特性

(1) フェライト基質鋼

フェライト基質を主体として用いられる実用鋼について、低炭素系の非調質高張力鋼やフェライト系ステンレス鋼等を例にとりて、強化と延性、靱性等の挙動の実例を考察してみよう。

(i) 非調質高張力鋼は、軟鋼より降伏応力を高めてなお耐破壊特性もすぐれ、その他溶接性、成型加工性などの実用性をも保有しようとしたもので、しかも“焼入れ焼もどし”の調質処理を施さずにこれを達成するために、パーライトを極小としたフェライト母相の鋼組成を有するものが一般である。

この場合利用される強化機構の主体は、置換型固溶強化(A₁)と大傾角粒界強化(C₁)であり、何れも延性、靱性に有利な手段であることが表2に示したところからも理解される。具体的には、通常C=0.15%、Mn=0.4%でいどの軟鋼に対してMn、Siを高め、Al、Nb、V、Ti

表6 疲れ特性と微視的強化の素機構。

記号	微視的強化機構	疲れ軟化損傷 (1)	きれつの成長伝ば
(A _{1p})	固溶強化(直線の転位)	++	(+)
(A _{1w})	固溶強化(波状転位)	(+)	(+)
(A ₂)	固溶強化(侵入型固溶)	++	++
(B ₁)	転位強化(マルテンサイトの)	+	+
(B ₂)	転位強化(低間加工の)	0-	0
(C ₁)	粒界強化(高傾角粒界)	0	0
(C ₁)・(A ₂)	粒界強化(C固溶共存)	++	(+)
(C ₂)	重粒界強化	+	+
(D ₁)	粒子強化(整合粒子)	{ ++ (安定) 0- (不安定)	+
(D _{2f})	粒子強化(非整合粒子)	++	+
(D _{2c})	粒子強化(粗大粒子の場合)	0	0-

などの微量添加の効果あるいは制御圧延技術によって微粒のフェライト組織として高張力鋼が得られる。

成型加工用薄板高張力鋼板の例⁽²⁰⁾によると、Mn の 3 %、Si の 1 % または P の 0.1 % の合金元素の単独添加によってかなりの固溶強化がえられるが、これらの場合常温での塑性加工 (5~10 %) によって微視組織に観察される転位が直線的に配列しセグメントを形成する傾向が強くなっていることがみられる。さらにそれ以上の歪みをうけると転位はからみ合いによるセル状組織を生成する傾向を示すが、これらの元素を含まない場合に比べてセル壁はあまり明りょうに認められない。これは転位が固溶の効果により交差すべりの困難を増した結果と考えられる。このような場合、鋼は降伏強さ σ_y が上昇すると同時に加工硬化が顕著になり、結果として均一伸び δ_u 、全伸び δ_t などの延性が良好となるため成型加工性の良い高張力鋼板が得られる。このような強化は疲れ特性にも好い結果をもたらすことが表 6 によっても予想される。

微細結晶粒によって得られる高降伏強度鋼は低温靱性において優れている。Al を十分に用いた Al キルド鋼は、AlN の析出によるオーステナイト微粒化、したがって変態フェライト組織の微粒化を招き、また侵入型固溶窒素を析出物として除くために低温の破壊特性が優れている。Ni の固溶は極低温まで転位の交差すべりを盛んとし wavy な挙動を保持して靱性を保つ。このため極低温用高張力鋼として Ni を 9 % まで含んだ Al キルド合金鋼が用いられる。

鋼の圧延加工において、熱間圧延の温度ならびに圧下率をコントロールして微細なフェライト結晶組織を持った極低炭素の高降伏強度鋼を得る制御圧延法 (controlled rolling) は、高靱性の溶接用高張力鋼を製造する技術として近年発達してきた。この製法では、一般に動的ならびに静的再結晶がオーステナイト (および変態後のフェライト) で行なわれ、大傾角結晶粒界にかこまれた微細なポリゴナルフェライト組織が得られる。しかし変態途中ないし変態後の圧延を含んだ特殊な制御圧延を行なう場合には、亜粒界にかこまれた $0.5 \mu\text{m}$ 程度の極微粒の動的回復組織が得られ、高い降伏強さと低温靱性が得られる。この場合の亜粒界は近接粒がランダムに近い方位分布であることが優れた低温靱性に必要な強化機構 (C_2) の条件であると思われる⁽¹²⁾。

非調質高張力鋼に微量添加される微粒化処理用の元素は、鋼材圧延後の冷却過程の調節や時効処理によって整合析出する炭・窒化物粒子の分散によって (D_1) 強化することができる。しかし、一般に延性、靱性を著しく減じる難点があり、後述するマルテンサイト母相の場合と同じく析出相の種類や形態、したがって時効のていどが耐

破壊特性の適合上の難しい課題となる。

(ii) フェライト系ステンレス鋼ないし耐熱鋼の場合、耐食性、耐酸化性を高めるため Cr を 25~30 % まで高く含有するものが用いられる。Cr は置換型固溶元素として作用するが、フェライト相に対して原子寸法効果、化学的效果などの点で強化機能が極めて少ない。一方、高率の Cr の固溶はフェライト固溶体の 2 相分離 (クラスタ) の傾向をうながし、延性、靱性の低下への影響が認められる。このことは、 475°C 時効による脆化のあらわれる現象観察によって明らかにされる。この場合、時効の進行に伴って微細組織の転位挙動ならびにマクロ的なすべり線観察に、wavy な挙動から均一直線的な様相へ変換することがみられる⁽²¹⁾。

(2) マルテンサイト基質鋼

通常、調質高張力鋼、機械構造用合金鋼等、強靱鋼と称せられる鋼に用いられるマルテンサイト組織は、適量の炭素を含み、焼もどし処理によって析出分散した炭化物粒子強化 (D_2) と回復前の高転位密度 (B_1) の亜粒組織 (C_2) を持った微視的構造を有している。前オーステナイト粒界の影響 (C_1) は強度的には意味を持たないが、絞りやシャルピー靱性に対しては一般に表 2 に示したような効果が認められる。焼もどし含炭素マルテンサイトには、さらに Cr、Mo、W、V などカーバイト形成元素の含有によって整合炭化物の析出分散による (D_1) 焼もどし 2 次硬化が重要な役割を果す鋼種 (工具鋼、超強力鋼等) がある。

これらの焼もどしマルテンサイト鋼は、通常顕微鏡的に均質な組織をもち、上述の多くの強化機構がバランスよく重畳して作用して、高い強度と、延性、靱性、さらに耐疲れ特性を発揮するため、高品質の特殊鋼として代表的なものとして用いられる。

この鋼種は低合金鋼の範囲では、耐破壊特性が、主として組織内のマルテンサイト (ないし下部ベイナイト)⁽²²⁾ の構成率に依存しており、焼入れ (quench-harden) により、どれだけマルテンサイトによって硬化した組織を得られるかという、いわゆる焼入性 (hardenability) が強靱鋼としての品質に第 1 義的に関連している。これは焼入れ不完全のときに生じる初析のフェライト、上部ベイナイト等の組織が、マルテンサイトに混在 (複合) することによって、焼入組織ならびに、焼もどし後も、降伏強さを下げると同時に、絞り、靱性、疲れ特性をともに劣下させるためである。

マルテンサイト系強靱鋼に対する置換型固溶合金元素の作用 (A_1) は、靱性ならびに疲れ特性に関するものが重要である。 (A_1) としてかなり多く配合されるものに Ni、Mo 等がある。また Cr、Mn は安価で焼入性を高める元素として有効に用いられ、Si は降伏比を高め、また

耐焼もどし性を高めるなどの効果で用いられる。しかし合金元素として固有の固溶強化と同時に、耐破壊特性を附与させる元素は Ni の低温靱性、Mo の焼もどし脆性を改良する効果等が著しい。Ni をとくに多く含むこの種の含炭素合金鋼では、変態点 (Ms) が過度に低下するのを調整する Co を併用して、マルテンサイト組織を確保することによって、10% Ni-6% Co のような高合金強靱鋼が開発されている。

以上の含炭素マルテンサイト系とは別の途を歩んで、全く炭素を含まない、マルエージ型強靱鋼が開発され、降伏比が高く、絞りと破壊靱性の優れた超強力鋼を可能とした。Ni, Co, Mo を主合金成分とするマルエージ鋼は、置換型固溶合金元素によって得られる立方晶マルテンサイト組織をもち、 $(A_1) \cdot (B_1) \cdot (C_2)$ の強化に加えて 500°C 辺の時効によって金属間化合物 (Ni_3Mo , Fe_2Mo 等) 粒子の析出分散 (D_2) が強力に働く組織を得ている。これによって、2000 MPa を超える超強力鋼が得られ、とくに耐破壊特性に優れているのは、侵入型固溶の強化 ($A_2) \cdot (B_2)$ によらない立方晶マルテンサイトの強靱な母相に、適当な時効析出による粒子強化が重畳した機構によるものと考えられる。

ここで、18% Ni マルエージ鋼 (実用鋼には Ni-(Co)-Mo-Ti 系のものが多い) の時効析出の過程と強度、延、靱性の変化についての概観を表 7 に示す。降伏強さの最高を示す非整合型金属間化合物の析出分散時 (peak-age: 4) には δ_u は最低を示すが、絞りや、破壊靱性は適度な値を保持している。前オーステナイト粒が細粒の場合、絞り値が優れているが、 K_{IC} はあまり影響を受けない。やや過時効とした場合、析出物中に逆変態オーステナイト (γ_u) の微細析出が分散すると、伸び (とくに δ_u) が

基に Mo, Ti, Al をそれぞれ別個に数原子%を配合した試片に、peak のマルエージ処理をした場合、約 4% の塑性変形を与えると、含 Mo マルテンサイトは非常に微細均一な転位のすべり挙動が、透過電子顕微鏡によって観察されるが、含 Al マルテンサイトでは、小傾角ラス境界はもちろん、パケット境界を横切ってすべり線がみられ、塑性変形が局在したすべり挙動によることがみられる⁽²³⁾。含 Ti マルテンサイトには、これらの中間の挙動がみられる。これらのことは、合金元素の母相に対する影響 (A_1) と同時に析出物の物性、形状、界面、分布等の状況とともに、析出と同時にされる Ni の放出拡散の有無と逆変態オーステナイトの析出などが関連しており複雑であるが、何れにせよ Mo が靱性の高い粒子強化 (D_2) を得るのに適当な合金元素であることが判断できる。

5. 結 言

以上、微視的強化機構の種類によって耐破壊特性がどう異なるかということについて、*bcc* 系の鋼を例として考察した。それぞれの素機構は運動する転位の動的な挙動⁽²⁴⁾によって延・靱性、疲れ特性などに結びついていますが、耐破壊特性を予見的に考察することは現状ではまだ経験的定性的な段階といえよう。とくに実用鋼は、これら強化の素機構の重畳した母相に他の強化相また介在物等の欠陥を複合した形になっており、これらの総合した効果として解析することが必要である。

今後さらに実験的事実を体系的に整理し、論理的裏づけを積み重ねて集大成することができればこのような知識を実際に役に立つものに育てることとなるものと思われる。

表 7 マルエージ鋼の時効過程の微視的变化と延、靱性。

時 効 過 程	析出物 (金属間化合物)	寸法 (nm)	σ_y	δ_u	φ 細 粒	φ 粗 粒	K_{IC} 粗 粒	K_{IC} 粗 粒
未 熟 時 効	1 ゾーン, クラスタ	≤ 1	小	大	大	中	(遅れ破壊傾向)	
"	2 整合 (不安定) 析出物	$3 \sim 6$	中	中	大	中	(小中)	中
"	3 半整合 (準安定) 析出物	≤ 10		中	大	中	(小中)	中
ピーク時効	4 非整合 (準安定) 析出物	$\sim 100 + \gamma_v$	大	(小中)	大	中	中	中
過 時 効	5 非整合 (準安定) 析出物	$\sim 100 + \gamma_w$	中	中	↓	↓	中	(小中)
"	6 非整合 - 安定析出物	$> 100 + \gamma_w$	↓	↓	↓	↓	中	(小中)
"	7 安定 - 粗大析出物	数百 $+ \gamma_e$	小	大	中	小	(中小)	小

著増するが、絞りや靱性には大きな変化がない。とくに過時効した安定析出物や焼入前からの残留析出物の存在は破壊靱性に有害である。また一方、時効初期の (under-age) 組織は遅れ破壊の傾向が強く、好ましくない。

マルエージ鋼の Fe-Ni 系母相マルテンサイトに対する析出粒子強化 (D_2) の耐破壊特性に及ぼす効果は、合金元素の種類によってかなりの差がある。Fe-18% Ni を

文 献

- (1) 荒木 透：日本金属学会会報，16(1977)，610。
- (2) 今村 淳，早川 浩，速水哲博：鉄と鋼，60(1974)，A 150。
- (3) N.S.Stoloff and R.G.Davis：Acta Met., 12(1964)，473。
- (4) T.L.Johnston, R.G.Davis and N.S.Stoloff：Phil. Mag., 12(1965)，305。

- (5) D.Hull: Acta Met., **8**(1960), 11.
- (6) C.N.Reid: J.Less-Common Metals, **9**(1965), 105.
- (7) 大久保忠恒: 金属塑性加工の進歩, コロナ, (1978), 52.
- (8) F.B.Pickering: *Toward Improved Ductility and Toughness, Intern'l Sympo., Kyoto*, (1971), 9.
- (9) G.Lütjering and E.Hornbogen: Z.Metallk., **59**(1968), 29.
- (10) 幸田成康: 鋼の強化組織と延性・靱性 (鉄鋼基礎共同研究会), (1975), 43.
- (11) 荒木 透, 同上, (1975), 205.
- (12) 荒木 透: 金属塑性加工の進歩, コロナ, (1978), 470, 472.
- (13) J.C.Grosskreuz: Met. Trans., **3**(1972), 1255.
- (14) 堀部 進, 佐川竜平, 藤田利夫, 荒木 透: 鉄と鋼, **64**(1978), 274.
- (15) T.Shih and T.Araki: Trans.ISIJ., **13**(1973), 11.
- (16) 角田方衛, 内山 郁, 荒木 透: 鉄と鋼, **57**(1971), 298, 335.
- (17) 荒木 透: 金属材料の疲労 (ミクロとマクロの結びつき), 日本金属学会, (1973), 21.
- (18) 横堀武夫: 材料強度学第2版, 岩波全書, (1974), 303.
- (19) 成本朝夫, 田中康治, 船越督己: 川鉄技報, **6**(1974), 38.
- (20) 増井浩昭, 武智 弘: 鉄と鋼, **60**(1974), 118.
- (21) 安中 嵩: Trans.ISIJ 投稿中
- (22) 邦武立郎, 寺崎富久長他: 鋼の強靱性, 国際シンポジウム, 京都, (1971), 83.
- (23) T.Araki: Proc. ICSTIS, Suppl. Trans. ISIJ., (1971), 1030.
- (24) A.J.McEvily Jr. and T.L.Johnston: Intern'l Journ. Fracture Mechanic, **3**(1967), 47.

談 話 室

生 体 磁 気 学
(Biomagnetism)

三 浦 維 四

東京医科歯科大学医工学研究所

生体と磁気との関係が学問的に興味を持たれるようになったのは、人類が宇宙を志したことから初まる。つまり地球上の生物は好むと好まざるとにかかわらず、かならず地磁気の影響を受けているが、宇宙に飛び立つと地磁気がゼロの環境に変化するので、この状態が生物、とくに人体にどのような影響を与えるかをしらべることが必要な問題となってくる。また、宇宙空間中にはどのような極強磁場が存在するかもしれない、一応これが人体にどのような影響を与えるかを予測することも必要である。この強磁場の問題は手近な例では磁気浮上列車の問題でも生ずることで、リニアモーターカーが設置されたとき、磁気が付近の住民にどのような影響を与えるかの環境アセスメントがぜひ必要である。

医学的な問題では磁場がガンにどのような影響を与えるかが研究されている。その結果によると効果があるという説と無いという説とがあるようである。どちらにせよ、現在の状態では著効はないといえそうであるが、今後どのように研究が進むかは予断を許さない。

磁気が生体に及ぼす現象としては動物実験によると、(1)末梢血液量が増える。(2)心拍数が増える。(3)尿

中の電解質分が上昇する。(4)じん臓の吸収機能が低下する。などがあるという。しかし、これらの影響は騒音、寒冷などの影響に比べると小さいといわれる。埼玉大の杉本教授によると、ある植物は発芽のときに磁場の影響を顕著にうけるという。また肥料に粒状のバリウムフェライトを混入するとリンゴや稲などの生長がよくなり、あるものは収穫が増すといわれている。さらに高血圧の予防にクルミ形のバリウムフェライト (表面磁場の強さ、約 500 G) を手のひらで握るようにすると磁気的作用により高血圧の予防と脳卒中の予防に効果があるという。同様の目的でバリウムフェライトの入った枕やマットレスが市販されている。

しかし、実際にかなりの大きさの市場規模となっている磁性材料として、磁気ネックレスや“うでわ”などの商品がある。この磁気ネックレスやうでわなどの効果について学問的にハッキリした結論を求めようとする動きがあり、研究会の組織までであるが、この問題については否定的な見解を持つものが少なくなく、未知の部分が多いため、学問的に証明されるかどうかが今後の問題であるといえそうである。

最近、わが国でも生体材料学会の設立予定があり、設立のあかつきには、この場でも磁性材料と生体との関係がとり上げられるであろうが、このように、工学、理学と医学との境界の場はお互いにとつき難いため、いろいろ面白い問題がまだまだ残されているといえそうである (なお、磁気と生体との問題については日本経済新聞 1978 年 7 月 17 日号の科学欄にわかり易い解説記事が載っているのも参考になると思われる)。