入門講座
鉄鋼材料における析出物の利用－8

析出物による強化機構

Strengthening Mechanism by Precipitates

高木節雄 九州大学 名誉教授
Setsuo Takaki

1 緒言

金属材料の降伏は転位の運動によって生ずるので、材料を強くするには転位を動き難くすればよい。転位の運動を妨げる方法としては、障害物で転位をピン止めするPinning強化と障害物で転位を堆積させるPile-up強化の二種類がある。具体的な強化機構としては、前者を利用した固溶強化、転位強化、粒子分散強化と後者を利用した結晶粒微細化強化が挙げられる。高強度化という観点からすると粒子分散強化が最も効果的であり、様々な高強度鋼にその強化機構が利用されている。析出物によって材料が硬化する現象は“析出硬化”として知られているが、析出硬化とは、材料を強化する手段や強化現象を言い、強化機構を意味する言葉ではないので注意すべきである。析出物が母相に対して整合析出している場合には析出物の周囲に整合ひずみが存在することがあるが、本稿ではその影響を無視して、粒子の大きさや体積率と強化機構の関係に的を絞って解説する。

2 外力と転位に加わるせん断応力の関係

転位は縮もうとする力（線張力:T）を有しており、それは、材料の剛性率Gと転位のBurgersベクトルbの関数として次式で与えられる。

$$T\,[\mathrm{N}] = \beta G b^2 \quad (1)$$

βは転位の線張力係数であり、転位の性質や分布の影響を受けて変化するが、一般的な混合転位で、転位密度が十分に低い場合には0.5程度の値となる[1]。鉄の場合、$G≒80$GPa、$b≒0.25$nmなので、転位の線張力は約2.5×10^{-9}Nと見積もることができる。材料に引っ張り応力σを加えると、転位にはせん断応力τが加わる。τは、Taylor因子Mを介して、$\tau=\sigma/M$で与えられる。Mの値は、引っ張り応力の方向、原子のすべり方向、すべり面の面方位の関係で決定され、2から3.676の間で変化する。多結晶のbcc金属については、Taylor因子の平均値として2.75という値が用いられる[2]。転位を動かすためには、加えられたせん断応力τがあるしきい応力（臨界分解せん断応力：τ_0）を上回る必要がある。τ_0は、温度やひずみ速度、材料の化学成分などによって変化し、室温（20～25℃）で10^{-4}/s程度のひずみ速度を前提条件とした場合、純鉄のτ_0は20 MPa程度の値となる[3]。多結晶体の強度を引っ張り応力で評価した場合、τ_0に対応する値は摩擦力（Friction stress：σ_0）と言われ、純鉄多結晶の場合、40～60 MPa程度の値となる。転位を動かすために実際に作用する応力は有効せん断応力（$\tau-\tau_0$）であり、本稿ではこれを$\Delta\tau$とする。材料に引っ張り応力σを加えた時、$\tau=\sigma/M$という関係を介して、単位長さの転位に加わる力は$\Delta\tau b$［N/m］で与えられる。

3 分散粒子の平均自由行程と粒子分散強化量の関係

転位が運動するすべり面上に強固な粒子が存在する場合、転位は粒子間を張り出して前進しようとする。このような転位の運動様式はOrowan modelと言われている。転位は自ら縮もうとする性質があるため、粒子間で転位を張り出すためには付加的なせん断応力が必要となる。転位が粒子間を張り出す様子を模式的にFig.1に示している。すべり面上での粒子間の平均隙間間隔λは、正式には平均自由行程（Mean Free Path：MFP）と言われており、長さがλの転位に加わる力は$\Delta\tau b\lambda$なので、図（a）のような状態については、線張力Tとの釣り合い（$2T\sin\theta=\Delta\tau b\lambda$）から次式が得られる。

$$\Delta\tau = 2\beta G b \sin\theta / \lambda \quad (2)$$

$\Delta\tau$は、図（b）に示すように$\theta=\pi/2$となった時に最大とな

る。$\Delta\sigma = M\Delta\tau$、$\sin\theta = 1$と置いて式（2）を書き換えることによって、次のような粒子分散強化の式が得られる。

$$\Delta\sigma = 2M\beta Gb / \lambda \, (\text{Orowan model}) \quad (3)$$

結晶構造がbccの多結晶フェライト鋼については、$M=2.75$、$G=80$ GPa、$b=0.25$ nm、$\beta \fallingdotseq 0.5$という値を代入して、式（3）は次のように簡略化できる。

$$\Delta\sigma[\text{Pa}] \fallingdotseq 55 / \lambda \quad (4)$$

すなわち、粒子間の平均隙間間隔λが分かれば粒子分散強化量$\Delta\sigma$が簡単に求まるわけである。λについては、すべり面上での粒子の平均分散間隔Lと平均粒子径dから次式で与えられる。

$$\lambda = L - d \quad (5)$$

単位面積のすべり面上に存在する分散粒子の数n［個/m^2］を“面積数密度”と定義すると、粒子1個当たりの占有面積は$1/n$で与えられ、それを半径が（$L/2$）の円の面積に等しいとすると次式が得られる。

$$1/n = (\pi/4)L^2 \quad (6)$$

一方、粒子の体積率をf（$0<f<1$）とすると、“第二相が三次元的に均一に分布している場合、任意の切断面上に現れる第二相の面積率は体積率に等しい”という組織学の定理がある。すべり面上の粒子の平均切断面積は（$\pi/4$）d^2なので、上記の定理により、fとdの間には次の関係が成り立つ。

$$f = (\pi/4)d^2 \times n \quad (7)$$

式（6）ならびに（7）を式（5）に代入することにより、最終的に次式が得られる。

$$\lambda = (4/\pi)^{1/2}\left(1 - f^{1/2}\right)n^{-1/2} \quad (8)$$

つまり、すべり面上の粒子の面積数密度nが大きいほど、また粒子の体積率fが大きいほどλの値は小さくなり、粒子分散強化量は大きくなるわけである。

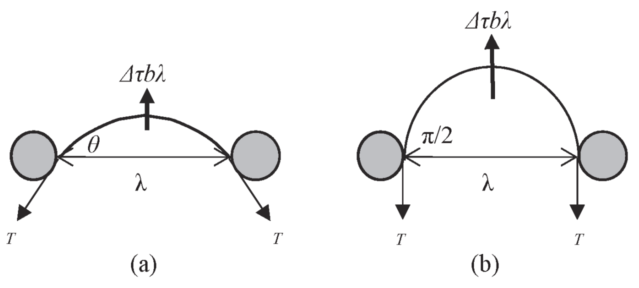

Fig.1 Schematic illustration showing the relation between the line tension of dislocation T and the shear forth $\Delta\tau b\lambda$ that is applied to bowing dislocation. $\Delta\tau$, b and θ denote the applied effective shear stress, Burgers vector of dislocation and bowing angle of dislocation, respectively.

4 統計学的手法による分散粒子の体積数密度の見積もり方

粒子の体積率fについては、分散粒子の化学組成や密度などからその値を決定できる。したがって、すべり面上の粒子の面積数密度nが分かれば、式（8）によりλの値を計算で求めることができる。“実測した粒子の粒度分布が真の粒度分布を反映している”という条件が満たされている場合、nの値は、以下のような統計学的な手法により求めることができる。N'個の粒子について粒子の直径d_iを測定した場合のデータ例をTable 1に示す。実測した粒子の平均直径d_a'は次式で与えられる。

$$d_a' = \sum^{N'} d_i / N' \quad (9)$$

上記の条件が満たされている場合、真の平均直径d_aはd_a'に等しいと考えて良い。粒子の形状を球体と仮定すると、直径がd_iの粒子の体積v_iは（$\pi/6$）d_i^3で与えられ、測定した粒子の総体積V'は次式で与えられることになる。

$$V' = \sum^{N'} v_i \quad (10)$$

一方で体積率fの値は分かっているので、V'に対する比をω（$=f/V'$）と定義すると、単位体積中の粒子数N［個/m^3］は次式で与えられる。

$$N = \omega \times N' \quad (11)$$

本稿では、Nを粒子の“体積数密度”と言うことにする。粒

Table 1 Example of data list on the particle diameter d_i.

No.	Diameter	Volume
1	d_1	v_1
2	d_2	v_2
3	d_3	v_3
4	d_4	v_4
5	d_5	v_5
.	.	.
.	.	.
.	.	.
.	.	.
i	d_i	v_i
.	.	.
.	.	.
.	.	.
N'	$d_{N'}$	$v_{N'}$
	$\sum^{N'} d_i$	$\sum^{N'} v_i$

子の体積数密度Nが決まれば、以下に述べる要領で、すべり面上の粒子の面積数密度n［個/m^2］を求めることができる。直径がd_iの粒子が一つのすべり面で切断される確率は（d_i/1）なので、すべり面上の粒子の面積数密度nは次式で与えられる。

$$n = \sum^N d_i \quad \cdots\cdots (12)$$

一方、粒子の平均粒子径d_aは次式で定義されている。

$$d_a = \sum^N d_i / N \quad \cdots\cdots (13)$$

したがって、式（12）と式（13）より、次のような関係式が得られる。

$$n = d_a \times N \quad \cdots\cdots (14)$$

すなわち、粒子の体積数密度Nに平均粒子径d_aを掛けた値が面積数密度nに相当するわけである。析出物の粒子径測定は手間がかかるが、Image J[4]などの解析ソフトを利用すると便利である。

5 粒子分散強化に関する計算値と実験値の比較

析出反応を利用して第二相を分散させた例として、ここではFe-0.194mass％ C-0.96mass％ V合金について紹介する。CとVの原子量はそれぞれ12.0107と50.9415なので、VCの炭素含有量は19.08％である。すべてのCがVC炭化物（密度：5.48g/cm^3）を形成するために消費されていると仮定すると、フェライトの密度（7.874g/cm^3）との関係から、粒子の体積率は0.01455と見積もられる。VC粒子の形態は球状であり[5]、313個の粒子について電子顕微鏡を用いて計測した粒子径の粒度分布をFig.2に示す。析出反応を利用した場合、粒度分布は、この図に示すような対数正規分布を呈することが多いが、分散粒子がオストワルド成長を起こすようになると次第に正規分布へ移行する[6]。ここに示した例では、計測した粒子の総体積V'は1.087×10^{-20}m^{3}であった。したがって、式（11）の係数ωは1.339×10^{18}となり、粒子の体積数密度Nは4.190×10^{20}個/m^{3}と見積もられる。平均粒子径は36.3 nmなので、式（14）に基づいてすべり面上の粒子の面積数密度nを計算すると、1.521×10^{13}個/m^{2}という値が得られる。この値を式（8）に代入して、λ＝254.4 nmという結果が得られ、これを式（3）に代入して、粒子分散強化量は約216MPaと見積もられる。後述するように本鋼の摩擦力は71.0 MPaなので、降伏応力は約287 MPaになると予想される。実際に引っ張り試験で得られた公称応力-ひずみ曲線をFig.3に示す。引っ張り試験で得られた降伏応力は約290 MPaであり、計算値とほぼ一致している。計測する粒子の数が多いほど解析精度は高くなるが、時間的な制約から計測数にも限界がある。計測数の妥当性については、“粒度分布を滑らかな対数正規分布や正規分布で近似できるか否か”で一応判断できるが、計測数を増しながらλの値を計算し、その値が一定値に収束したことで評価すると良いであろう。

過飽和固溶体からの析出反応を利用する場合、析出物の体積率を10％程度にまで大きくすることは困難であるが、粉末冶金的な方法を用いると多量の硬質粒子を分散させた鋼を製造できる。製造方法については省略するが、著者らは、粉末冶金法で製造したTiO_2粒子分散鋼、ならびにFe_3C析出鋼についても分散粒子の粒度分布を調査している[6]。フェライト鋼の摩擦力σ_0は、固溶した侵入型元素（C+N）[7]や置換型元素[8-10]の影響を受けて変化するが、20～25℃で10^{-4}/s程度のひずみ速度という条件下では、おおよそ次式で見積もることができる。ただし元素量は質量％である。

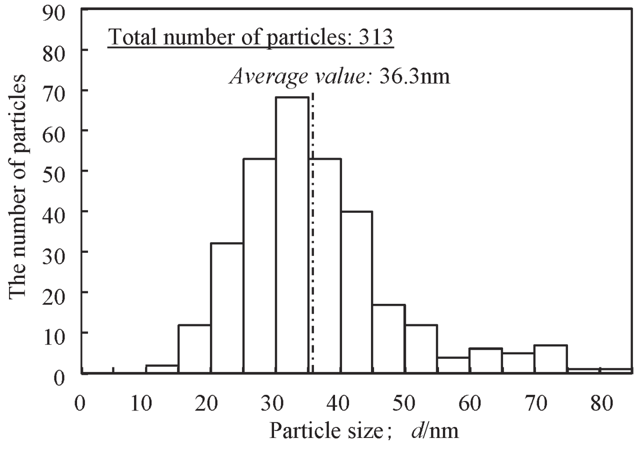

Fig.2 Size distribution of VC-precipitates in a ferritic steel（Fe-0.194%C-0.96%V alloy）.

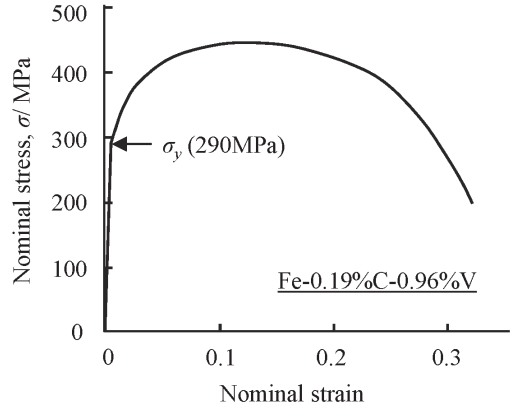

Fig.3 Nominal stress-strain curve in a ferritic steel containing VC precipitates（Volume fraction；f=0.01455）.

$$\sigma_0[\mathrm{MPa}] = 50+4500(\%C+\%N)+720(\%Be)+155(\%Si) +114(\%Ti)+61(\%Al)+60(\%Mn) +40(\%Mo)+42(\%Ni)+24(\%W) +21(\%V)+14(\%Co)+10(\%Cr) \quad (15)$$

著者らがこれまでに使用した鋼の化学成分から見積もった摩擦力の値をTable 2に示す。摩擦力の見積もりにおいて注意すべきことは、元素の含有量ではなく固溶量を採用せねばならないことである。例えばVC steelの場合、Vの含有量は0.96%であるが、0.82%のVはVCの形成に使用されているため、固溶しているVの量は0.14%と見積もられる。当然、炭素はすべてVCを形成するために消費されているので、固溶炭素量はゼロと見做してよい。

Fig.4は、上記のVC析出鋼も含めて、計算で見積もったλの値と引っ張り試験で求めた0.2%耐力の関係を示す。なお、摩擦力については、Table 2で示した値をプロットしている。いずれにせよ摩擦力をσ_0 [MPa] とすると、0.2%耐力$\sigma_{0.2}$ [MPa] についてはいずれも次式で与えられることが分かる。

$$\Delta\sigma_{0.2}[MPa] = \sigma_0 + 55/\lambda[\mu m] \quad (16)$$

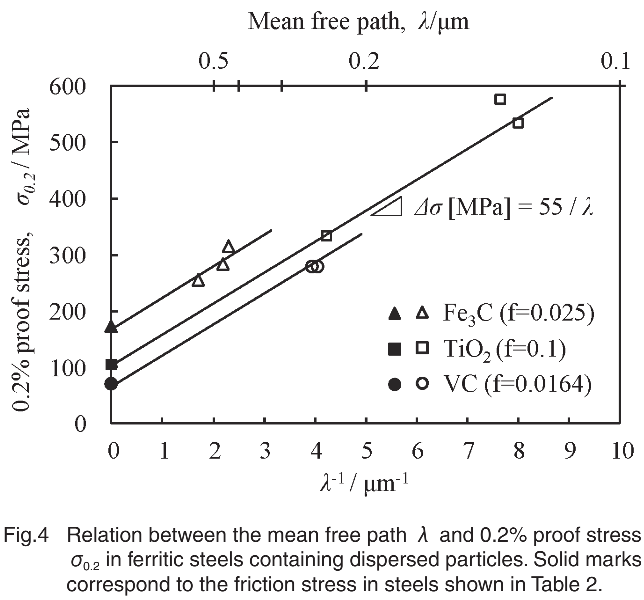

Fig.4 Relation between the mean free path λ and 0.2% proof stress $\sigma_{0.2}$ in ferritic steels containing dispersed particles. Solid marks correspond to the friction stress in steels shown in Table 2.

上式で粒子分散強化量を与える係数は式（4）と同じであり、この結果は、転位の線張力係数に関して$\beta \fallingdotseq 0.5$という設定が妥当なことを示唆している。ただし、$\beta \fallingdotseq 0.5$という関係は、転位密度が低い場合にのみ成り立ち、転位密度が高いマルテンサイト鋼などには適用できないので注意が必要である。βの値に及ぼす転位密度や転位分布の影響については、今後の検討課題として残されている。

6 Orowan modelが成立する臨界粒子径の見積もり

分散粒子の体積率fが一定であれば、粒子径が小さいほど粒子分散強化量は大きくなる。また、平均粒子径は同じであっても、粒度分布の分布幅が狭いほど粒子の体積数密度Nは大きくなるので、粒子分散強化量は大きくなる。ここでは、現象を簡略化するために、“すべての分散粒子の大きさが同じ”という理想状態を仮定して、粒子の大きさと粒子分散強化量の関係を説明する。粒子の直径をd_pとすると、粒子1個の大きさは（π/6）d_p^3なので、理想状態での粒子の体積数密度N_tは次式で与えられる。

$$N_t = 6f/(\pi d_p^3) \quad (17)$$

ちなみに、f＝0.01455、d_p＝36.3nmとしたとき、N_t＝ 5.810×10^{20} [個/m^3] という値になるが、前述のように、粒度分布がある場合にはN＝ 4.190×10^{20} [個/m^3] という結果が得られている。N/N_tを分散効率として定義すると、Fig.2に示した試料の分散効率は0.72ということになる。粒度分布の幅が狭いほど分散効率は高くなるため、分散粒子の体積率が同じであってもより高い強度が期待される。

理想状態を想定した場合、すべり面上の粒子の面積数密度n_tについては、$n_t = d_p \times N_t$で与えられるので、次式が成立する。

$$n_t = 6f/(\pi d_p^2) \quad (18)$$

式（18）を式（8）に代入することでd_pとλの関係が得られ、λを式（16）に代入することにより、d_pと$\sigma_{0.2}$の関係を求めることができる。f＝0.01として計算した結果をFig.5に示す。ここに示した値は、あくまでも粒度分布が全くない状態を想

Table 2 Chemical composition（mass%）and the friction stress；σ_0 estimated by Eq. 15.

Steel	C	Si	Mn	Ni	Cr	V (Solute V)	σ_0 [MPa]
Fe_3C steel	0.16	0.45	0.47	0.5	0.4	0	173.0
TiO_2 steel	0	0.18	0.45	0	0	0	104.9
VC steel	0.194	0.08	0.09	0	0	0.96 (0.14)	71.0

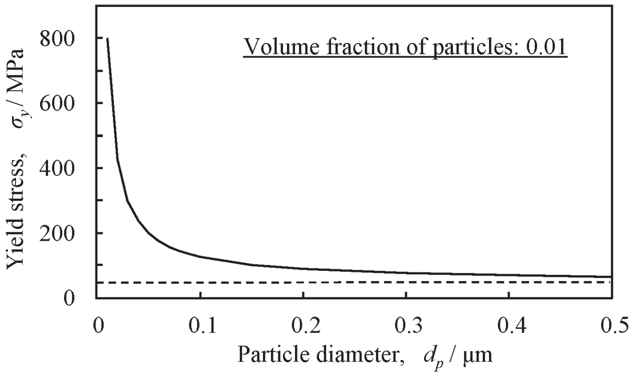

Fig.5 Effect of particle size d_p on the yield stress σ_y in ferritic steel. Friction stress is shown by the broken line (50 MPa).

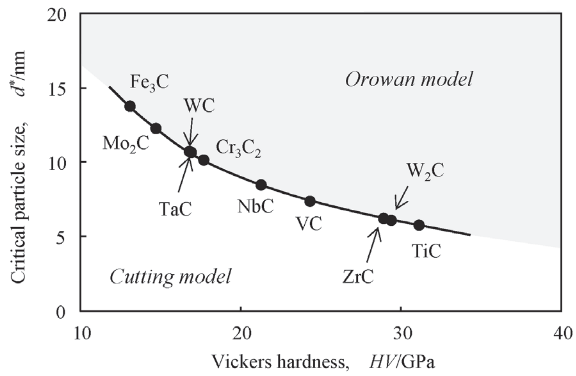

Fig.6 Relation between the critical particle size d^* and Vickers hardness HV in carbides.

定して得られた理想強度であって、粒子分散強化で期待される最大値と考えて良い。興味深い点は、粒子の大きさが0.1 μm以上ある場合には粒子分散強化の影響が小さいということである。言い換えれば、粒子分散強化を期待する場合、分散粒子の大きさは数十nmレベルにまで小さくしなければならない。Orowan modelが成立する条件下では、粒子の大きさが小さいほど粒子分散強化量が大きくなるが、粒子の大きさがあまりにも小さくなりすぎると、転位によって粒子がせん断されてしまうという事態が生ずる。以下、Orowan modelが成立するための臨界粒子径について検討する。

転位が粒子に及ぼす力の最大値は$2T$（$=2\beta Gb^2$）である。一方、すべり面上で直径がdの粒子をせん断するのに要するせん断力Fは次式で与えられる。

$$F = \tau^* b_p d \qquad (19)$$

ここでτ^*は粒子のせん断強度であり、粒子の硬さに比例する。b_pは粒子を構成する物質内での転位のBurgersベクトルであり、格子定数が母相とほぼ等しい場合には$b_p=b$と考えて良い。転位で粒子がせん断される臨界粒子径をd^*とすると、$2\beta Gb^2=\tau^* b_p d^*$という関係が成り立つので、$d^*$を与える式として次式が得られる。

$$d^* \fallingdotseq 2\beta Gb / \tau^* \qquad (20)$$

τ^*の値については詳細なデータはないが、硬さの1/3が引っ張り強さに相当し、引っ張り強さの約1/3がせん断応力に対応するという経験則から、ここでは硬さの1/9の値をτ^*として採用する。例えば、セメンタイトのビッカース硬さは約13.1 GPa-HVなので[11)]、τ^*の値は約1.46 GPaと見積もられ、この値を式 (20) に代入して$d^* \fallingdotseq 13.7$ nmという結果が得られる。つまり、鉄鋼材料でセメンタイトを分散粒子として利用する場合、粒子径が13.7 nm以上でなければOrowan modelが成立しないわけである。硬さが異なる様々な炭化物[12)]について同様にして求めた臨界粒子径の値をFig.6に示す。30 GPa-HV程度の硬さを有するTiCを利用した場合には臨界粒子径は約6 nmと見積もられ、粒子の体積率が同じであっても、セメンタイトを利用した場合に比べて遥かに高い強度が期待される。ただし、ここに示した臨界粒子径はあくまでも大雑把な仮定に基づいて得られたものであり、炭化物のせん断強度については今後詳細な調査が望まれる。

7 転位で粒子がせん断される場合の粒子分散強化

平均自由行程λについては、すべり面上の粒子の数密度nの関数として式 (8) で与えられるが、式 (7) を式 (8) に代入することにより、fをdの関数として次のように表すことができる。

$$\lambda = \left(f^{-1/2} - 1\right) d \qquad (21)$$

係数 ($f^{-1/2}-1$) は、分散粒子の体積率で決定される値であり、本稿ではこれをMFPパラメーターK_fということにする。K_fを用いて式 (21) を書き換えると次のようになる。

$$\lambda = K_f d \quad \left(K_f = f^{-1/2} - 1\right) \qquad (22)$$

すべり面上に存在する粒子をせん断する際の抵抗力は式 (19) で与えられ、その抵抗力が、長さがλの転位に加わっている力$\Delta\tau b\lambda$と釣り合っていると考えると次式が得られる。

$$\Delta\tau = \tau^* d\left(b_p / b\right) / \lambda \qquad (23)$$

このように、転位が分散粒子をせん断しながら運動する様式をCutting modelという。析出物と母相の格子定数に差はほとんどないものと仮定し、$b_p \fallingdotseq b$と置いて式 (22) を式 (23) に代入することで次式が得られる。

$$\lambda = K_f d \quad \left(K_f = f^{-1/2} - 1\right) \qquad (24)$$

引っ張り応力で評価した場合には、粒子分散強化量$\Delta\sigma$は、

Taylor因子をMとして次式で与えられることになる。多結晶のフェライト鋼について強化量を見積もる場合、M＝2.75と置けばよい。

$$\Delta\sigma = M\tau^{*} / K_{f}\left(\text{Cutting model}\right) \quad (25)$$

すなわち、分散粒子が転位でせん断される場合、粒子分散強化量は粒子の強度τ^*と体積率fにのみ依存し、粒子の大きさには依存しないという結論が得られる。一例としてセメンタイトの体積率が1%（f＝0.01）という場合を例に挙げると、K_f＝9、τ^*＝1.46 GPaなので、$\Delta\sigma$の値としては約446 MPaという結果が得られる。つまり、セメンタイト粒子を1%分散させたフェライト鋼における最大降伏応力は、摩擦力（50 MPa）を加算して約496 MPaと見積もることができる。

以上のように、“分散粒子が転位でせん断される場合には降伏応力は粒子径に依存しない“と言えるが、これは、分散粒子の粒子径が臨界粒子径よりわずかに小さい場合に成立する。前掲Fig.1で示したように、本来、転位は粒子を迂回して進もうとするが、粒子が臨界粒子径以下の大きさの場合、転位の張り出し角θがある臨界値に達した段階で転位による粒子のせん断が始まる。ここでは、その張り出し角を限界張り出し角θ_cということにする。θ_cの値は、粒子径が大きいほど大きくなり、粒子径が臨界粒子径の大きさに達した段階で$\pi/2$になる。ここで問題となるのは、θ_cの値によって転位と分散粒子の相互作用の仕方が変わることである。Fig.7は、θ_cの値が十分に大きい場合（a）と小さい場合（b）について、転位と分散粒子の相互作用の仕方を模式的に示している。θ_cの値が十分に大きい場合には、すべり面上の粒子が効率的に転位をピン止めするため、図（a）のようにλが転位のピン止め間隔に相当すると考えて良い。しかし、θ_cの値が小さい場合、図（b）に示すように、転位のピン止め間隔はλよりはるかに大きくなることが予想される。このような場合には、分散粒子による転位のピン止めが効率的に働かないため、降伏応力は、式（25）で得られる値よりはるかに小さくなる。

8 まとめ

析出強化鋼の場合、溶体化処理した材料を出発材として、時効処理によって析出反応を起こさせる。その際、粒子の大きさは、小さい方から大きい方へ連続的に変化していく。析出強化を利用した場合の降伏応力の変化をFig.8に模式的に示す。ここでは、析出物の体積率はすべて同じで、粒子径のみが次第に大きくなっていくものと仮定する。析出物の大きさが小さすぎると、上述のように分散粒子が転位のピン止めに効率的に働かないために粒子分散強化量はそれほど大きくないが、分散粒子が大きくなるにつれて転位のピン止めに寄与する粒子の数が増加し、降伏応力は次第に大きくなる（Stage 1）。分散粒子の大きさが十分に大きくなって転位のピン止め間隔がλと等しくなると、降伏応力は粒子の大きさに

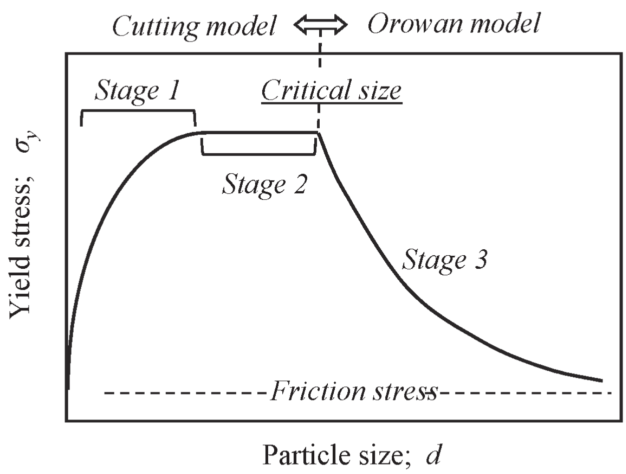

Fig.8 Change of yield stress σ_y as a function of particle diameter d.

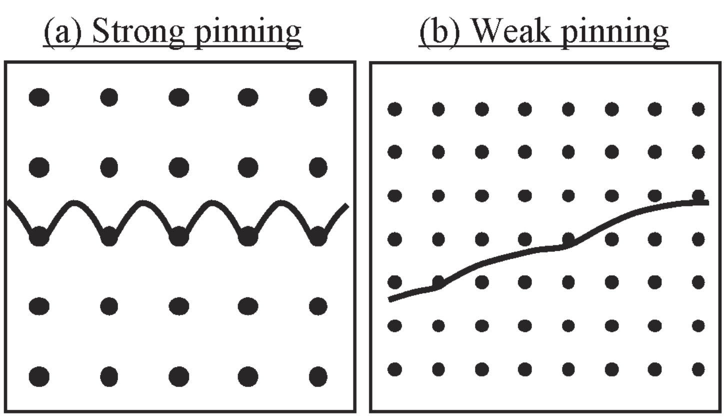

Fig.7 Schematic illustration showing the effect of pinning strength by dispersed particles on a moving dislocation.

依存せずに一定値となる（Stage 2）。Stage 1とStage 2については、転位と分散粒子の相互作用の仕方が異なるだけで、粒子分散強化のメカニズムはCutting modelに基づいている。そして、分散粒子の大きさが臨界粒子径を上回ると、粒子分散強化のメカニズムはOrowan modelに移行し、粒子径に逆比例して降伏応力は小さくなっていく（Stage 3）。Stage 2において最大強度が実現されるが、転位によって分散粒子がせん断されると局所的な不均一変形が誘発され、延性や靭性が低下してしまうといった問題が生ずるために、Cutting modelに基づいた強化機構は利用すべきではない。実用材料では、Stage 3の領域において、粒子径が臨界粒子径に近い状態で使用され、分散粒子の粗大化に伴う強度低下は、一般的に“過時効軟化現象”として知られている。

実用材料の熱処理では、分散粒子の体積率が次第に増大しながらFig.7に示したような変化が起こり、材料によっては、Stage 3の段階に至っても析出反応が完了しない場合もある。摩擦力については、すべての合金元素を固溶した状態で最大となり、析出物が形成されると摩擦力の値は連続的に低下する。粒度分布が降伏応力に顕著な影響を及ぼすことは前述の通りであるが、粒子の分布状態の均一性も降伏強度を左右する一因となる。とくに、結晶粒界に析出した粒子は、粒子分散強化に寄与する析出物の有効体積を減少させるので注意が必要である。

参考文献

1）高木節雄，土山聡宏：鉄と鋼，104（2018），117.

2）G.Y.Chin and W.L.Mammel：Trans. Met. Soc. AIME, 239（1967），1400.

3）K.Aono，K.Kitajima and E.Kuramoto：Scr. Metall.，14（1980），321.

4）Image J, http://rsb.info.nih.gov/ij/,（accessed 2019-09-30）

5）Y.Imanami，M.Murakami，N.Nakada，T.Tsuchiyama and S.Takaki：ISIJ Int.，49（2009），1225.

6）北浦知之，飛鷹秀幸，土山聡宏，高木節雄：鉄と鋼，91（2005），796.

7）A.Cracknell and N.J.Petch：Acta Metall.，3（1955），186.

8）C.E.Lacy and M.Gensamer：Trans. ASM，32（1944），88.

9）W.B.Morrison and W.C.Leslie：Metall. Trans.，4（1973），379.

10）矢島悦次郎ら：若い技術者のための機械・金属材料，丸善，（1995）

11）梅本実，土谷浩一：鉄と鋼，88（2002），117.

12）Japan New Metals Co. Ltd.，www.jnm.co.jp，（accessed 2019-07-31）

（2019年9月30日受付）