第１１章　強化機構

11.1 材料のさまざまな強化法

構造材料はもちろんのこと機能材料においても材料の高強度化は時代の要請するところとなっている．表 11.1 のように材料の強化は様々な方法で行うことができるが，強化機構を理解するためには今まで学んだような力学や転位論の知識が必要となる．表 11.1 に示されている強化法のうち，加工硬化と結晶粒微細化による材料強化については前章ですでに触れられており，それぞれベイリー・ハーシュの関係(10.12)，およびホール・ペッチの関係(10.13)によって記述される．

表 11.1　さまざまな材料強化法

強化法	特　　　徴
固溶強化	置換型または侵入型固溶原子の導入による
析出強化	主に時効熱処理によって，微細な第２相析出物を分散させる
	広義にはスピノーダル分解による強化も含まれる
分散強化	酸化物などの粒子を散りばめる
加工硬化	塑性変形によって転位密度を高める
結晶粒微細化強化	結晶粒の大きさを小さくする
複合材料強化	異なる材料を複合化する

材料強化の指針の１つは，微視的な障害物を導入することによって転位の運動を抑制することにある．材料内に障害物が多数存在すればするほど，そして障害が強固なものであればあるほど，個々の転位のすべり運動は困難になり，材料を塑性変形させるためにはより大きな応力が必要となる．材料強化のもう１つの指針は，強固な第２相（強化相）を導入し材料を巨視的に複合化することである．これによって材料中の強化相により多くの応力を負担させ，母相に加わる応力を母相のみの場合に比較して低減させることができる．表 11.1 の固溶強化（solid-solution strengthening）と析出強化（precipitation strengthening）は前者の指針に従うもので，複合材強化（composite strengthening）は後者の指針に従う．分散強化（dispersion strengthening）では２つの指針が共存して材料の強化が達成される．

本章ではそれぞれの強化法の詳細よりも，むしろ基本的概念を述べる．固溶強化，析出強化，分散強化において障害物の種類は異なるが，微視的な障害物の導入による材料強化については，少なくとも一部分ではかなり統一的な理解が可能となっている．さまざまな強化機構の理論が互いに関連して系統的に構築されていることを学びとって欲しい．

11.2　障害物を乗り越える降伏過程

11.2.1　障害物の強弱

多くの転位のうちの１本のみが運動しても，それによるせん断変形量はわずかなもので，材料の巨視的な降伏は起こりそうもない．したがって，材料の巨視的な降伏応力（臨界分解せん断応力）とは，多数のすべり転位が様々な障害物に打ち勝って長距離運動を起こすのに必要な最小の外部せん断応力のことであると考えることができよう．しかし，もし多数のすべり転位のどれもが材料内で同じような環境にあるときは，代表として１本の転位を選び，それが長距離運動可能かどうかを知れば，その材料の塑性変形が起こる（降伏する）かどうかを議論することができる．

障害物のうち，結晶粒界については前章で学んだので，以下の障害物は結晶粒内のものに限ることにする．それでも障害物が巨大な場合（たとえば大きな第２相や双晶など）は，転位が障害物にぶつかると，そこでどんどん堆積してしまうかもしれない．この場合は本質的に結晶粒界と同様になる．したがって，この章では複合材強化以外はそれほど巨大ではない，微視的な障害物を対象とする．

今, 障害物がすべり面上に平均間隔 L_o で分布しているとする．そして，１本のすべり転位を考え，その上に障害物が平均間隔 L で存在しているとする．後述するように，この L は一般には L_o とは等しくない．外部せん断応力 τ を加えて転位を動かそうとすると，図 11.1 のように転位の運動は障害物のところで阻止され，障害物の間で転位の張り出しが起こる．転位の自己エネルギーが転位の種類によらないと近似すると，この張り出した転位の形は円弧状である．

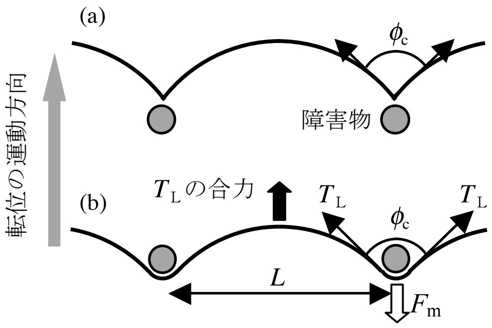

図 11.1　障害物間を張り出す転位．転位と障害物の相互作用は　(a) 引力型，(b)斥力型

ここで，転位が障害物のところで，ある臨界角度 ϕ_c をなすように曲がったら, 図 11. 1 の ϕ_c を挟む矢印のような転位の線張力 T_L の合力の方が障害物からの抵抗力より大きくなって，転位が障害物から外れて先に進むことができると考える．障害物が強いものであるほど ϕ_c は小さくなる．障害物が絶対的なピン止め点の場合は，9. 1 節と同様に張り出しは半円形になるまで起こるので，このときは $\phi_c = 0$ となる．

障害物が絶対的なピン止め点より弱い場合を考えてみよう．１つの障害物が転位に作用する最大抵抗力を F_m (>0) とすると，転位を障害物から外して長距離動かすのに必要な外部せん断応力（臨界分解せん断応力） τ_m は，

$$\tau_m bL = F_m \tag{11. 1}$$

で与えられる[1]．また，障害物から外れる直前には F_m と図 11. 1 の転位の線張力の合力が釣り合うはずだから転位は

$$F_m = 2T_L \cos(\phi_c / 2) \tag{11. 2}$$

の関係で決まる角度 ϕ_c だけ曲がることになる. 絶対的なピン止め点のように F_m が非常に大きいときは, (11. 2)式で $\phi_c = 0$ として τ_m を見積もる．すなわち，(11. 1)，(11. 2) より $F_m / (2T_L)$ の意味のある最大値は 1 である．

以上のことから, 種々の転位運動に対する障害物を２種類に分ける. もちろん中間的なものもある．

・強い障害物・・・ $F_m / (2T_L) \approx 1$， $\phi_c \approx 0$　（転位は半円形まで張り出す）

・弱い障害物・・・ $F_m / (2T_L) << 1$， $\phi_c \approx \pi$　（転位は半円形になる前に障害物に打ち勝つ）

強い障害物のときは転位は半円形まで張り出し，弱い障害物のときは転位はあまり張り出すことなく，障害物から外れる．形式的にはこれだけの話であるが，問題は F_m （または臨界角 ϕ_c ）や L の値がわからなければ降伏応力（臨界分解せん断応力） τ_m がわからないことにある．

11. 2. 2　転位上の障害物間隔 L の評価

L の値は F_m に依存して変化する．この様子を図 11. 2 に示す．すなわち，強い障害物であれば，転位は障害物間で大きく張り出すので，L はすべり面上の障害物の平均間隔 L_o と同程度の長さになるであろう．一方，弱い障害物で ϕ_c が π に近ければ，転位はあまり曲がっておらず，転位上の平均障害物間隔 L_1 は L_o より大きくなるであろう．中間的な強さの障害物の場合には， $L_o < L < L_1$ となるであろう．

---

[1]　7.1 節から，単位長さの転位に働く力は $\tau_a b$ となる．転位の張り出しが怒った場合，障害物間の転位の長さは L より長くなるが，転位に働く力は常に転位線に垂直なので， $\tau_a bL$ と表すことが正しいことになる．

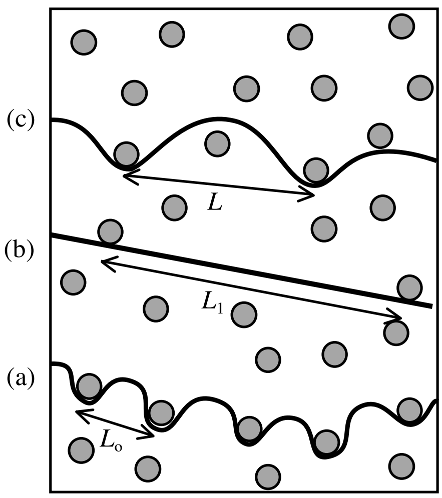

図 11.2　すべり面上の障害物の平均間隔が L_o のとき，(a) 強い障害物，(b) 弱い障害物，(c) 中間的な強さの障害物による転位の曲がり方と転位上の障害物の平均間隔の相異

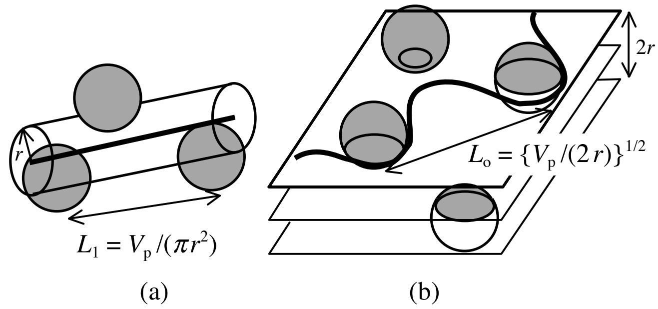

図 11.3　転位線上の平均粒子間隔. (a) 直線転位の場合（L_1）, (b) 完全にフレキシブルに曲がる転位の場合（L_o）

L_o や L_1 は以下のように求めることができる．簡単のために障害物を半径 r の球粒子とし，その体積率を f とすると，粒子 1 個の占める体積は $V_p = 4\pi r^3/(3f)$ で表される．図 11.3(a)のように転位が完全に直線状（$\phi_c = \pi$）ならば，転位の周りの半径 r の円筒内に中心をもつ粒子は転位と交わるから，転位線上の平均粒子間隔は

$$L_1 = 4r/3f \tag{11.3}$$

で与えられる．一方，図 11.3(b)のように転位が完全にフレキシブルに曲がる（$\phi_c = 0$）ときは，転位線上の平均粒子間隔は L_o そのもので，これは

$$L_o = \sqrt{\frac{2\pi}{3f}}r \approx \sqrt{\frac{2}{f}}r \tag{11.4}$$

となる．L_o は L_1 よりおよそ $\sqrt{f}$ の因子だけ小さい．このように，F_m や L を簡単に評価できる場合の考察は単純となり，そうでない場合は複雑となるわけである．単純な場合の代表例は以下の分散強化である．

11.3　分散強化理論（強い障害物）

分散強化では，酸化物などの粒子を結晶母相中に分散させ，転位に対する障害物とする．分散粒子は母相に比べて硬く塑性変形しにくいものであり，転位運動に対する絶対的なピン止め点と考えられる．すなわち(11.1)，(11.2)で $F_m/(2T_L) = 1$，$\phi_c = 0$ の強い障害物の代表例であり，転位は大きく曲がる．このときは L を平均の分散粒子間隔 L_o(11.4)と等しいと置いて(11.2)より

$$\tau_m = \tau_{OR} = \frac{2T_L}{bL_o} = \frac{\mu b}{L_o} \tag{11.5}$$

が成り立つ．ここで式(6.8)より $T_L = \mu b^2/2$ とした．この臨界分解せん断応力 τ_{OR} をとくにオロワン応力（Orowan stress）と呼ぶ．(11.5)は，やはり絶対的なピン止め点を考えた式(9.2)のフランク・リード機構の場合と同形であり，転位は半円形になるまで張り出す．この機構をオロワン機構（Orowan mechanism）と呼ぶ．転位は張り出した後，分散粒子を迂回し，粒子の周りに転位ループ（オロワンループ，Orowan loop）を残して運動する（図 11.4）．

分散強化の強化量は本質的には(11.5)が全てで，簡単明瞭である．(11.5)に(11.3)を代入すると次式を得る．

$$\tau_{\mathrm{OR}} = \frac{\mu b}{L_{\mathrm{o}}} \approx \frac{0.7\mu b\sqrt{f}}{r} \tag{11.6}$$

以上では r に比べて L_{o} が十分大きいときの分散強化合金による強化量 τ_{OR} を求めたが，分散粒子が密に存在するときは，すべり面上の分散粒子間を張り出す転位の最小半径は $L_{\mathrm{o}}/2$ ではなく $(L_{\mathrm{o}} - 2\bar{r})/2$ となるであろう．ここで $\bar{r}$ は粒子とすべり面との交わる円の平均半径で，ランダム分布の場合 $\bar{r} = (\pi/4)r$ である．このことや，転位の種類による線張力の相違，粒子の統計的分布の考慮などを行った後，(11.5)に相当するより詳しい式の一例として次のような式も提案されている．

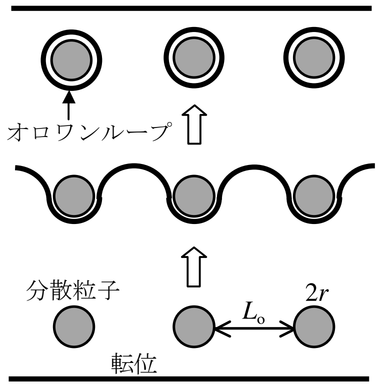

図 11.4　分散強化のオロワン機構

$$\tau_{\mathrm{OR}} = 0.84\frac{\mu b}{2\pi(1-\nu)^{1/2}(L_{\mathrm{o}} - 2\bar{r})}\ln\left(\frac{2\bar{r}}{r_{\mathrm{o}}}\right) \tag{11.7}$$

ν はポアソン比，r_{o} は転位芯の半径である．