

第9章 転位の増殖と切り合い

9.1 転位の増殖

焼鈍によって十分に軟化させた金属では、 $\rho = 10^{10} \sim 10^{11} \text{ m}^{-2}$ 程度の転位密度を持つが、塑性変形によって強加工された金属では転位密度が増大し、 $\rho = 10^{14} \sim 10^{15} \text{ m}^{-2}$ 程度の値にまで達する。このことは、塑性変形中に転位が増殖 (multiplication) することを意味している。

転位の増殖機構を理解するために、まず曲がった転位に働く力を考えてみよう。7.1 節のピーチ・ケーラーの式で学んだように、すべり方向へのせん断応力を τ と書くと、単位長さの転位に働く力は $f = \tau b$ となり、常に転位線に垂直に働く。図 9.1 のような転位線の一部 Δs に着目すると、その両端の転位の線張力 T_L は (6.8) 式で与えられる。曲がった転位の曲率半径を r 、図の角度を 2θ とすると、両端での線張力の合力は曲率中心 C の方向を向き、その大きさは θ が小さいとき $2T_L \sin \theta \approx 2T_L \theta$ となる。この力と長さ Δs の転位部分に働く力 $\tau b \Delta s$ が釣り合っているのだから、 $\Delta s = 2r\theta$ より単位長さの転位に働く力の釣り合いの式

$$\tau b = T_L / r, \quad \text{すなわち} \quad \tau = T_L / rb \approx \mu b / (2r) \quad (9.1)$$

を得る。(9.1) は、転位をさらに曲げる (r を小さくする) ためには、より大きな力を加えなければならないことを意味している。

ここで、図 9.2 のように、転位線の一部 AB (間隔を d とする) を考える。よく焼鈍された金属中の転位は粗い網目を組んでいると考えられるが、線分 AB の部分の転位が主すべり面上に乗っているものとする。これに対して、たとえば線分 BC 部はすべり面上にない転位部分で、このような転位を林立転位 (forest dislocation) という。点 A と B は転位網の節のために、外力を加えても容易には動くことができない。このような点をピン止め点 (pinning point) とよぶ。この状況で外力を加えると転位は AB 間で円弧状に張り出し始める。

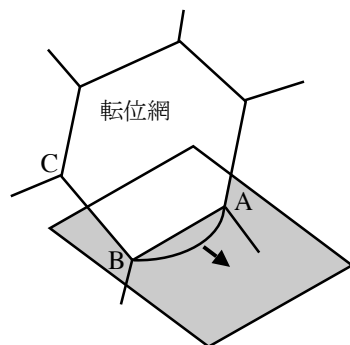


図 9.3 は転位の張り出しの様子を段階に分けて示したものである。図 9.2 より、曲率半径 r が最も小さいときに最大の応力が必要であるが、張り出し。A, B はピン止め点。それは図 9.3 の 3 の状況であることがわかる。このとき、張り出した転位はちょうど半円形となり、 $2r_3 = d$ が成り立つ。(9.1) から、これを実現するためには、少なくとも次式の τ_{FR} 以上のせん断応力を加える必要があることになる。

$$\tau_{FR} = \frac{\mu b}{2r_3} = \frac{\mu b}{d} \quad (9.2)$$

図 9.3 の 4 の状況では、曲率半径は 3 の状況より大きくなる。したがって、4 の状況を作るために必要な応力は (9.2) より小さい。言い換えれば、

(9.2) だけの応力を加えれば 3 から 4 への張り出しは自動的に起こることになり、3 の状況が、転位の張り出しの臨界段階となる。

さらに張り出しが続くと、図 9.4(a) の 5 → 6 のようになる。6 の段階まで進むと、もともと線分 AB のみの転位部分であったものが、増殖によって線分 AB に円 6 (転位ループ) が加わったものとなっている。線分 AB には再び張り出しが起

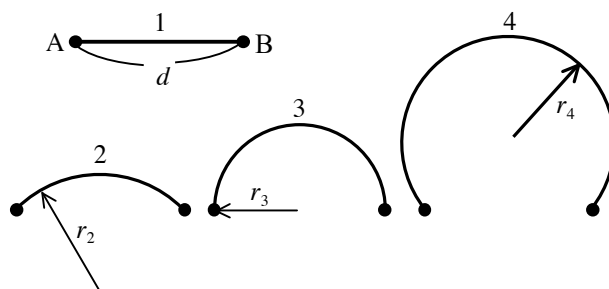


図 9.3 ピン止め点 A, B 間の転位の張り出し

こるので、この増殖は何回も繰り返され、図 9.4(b) のように転位がどんどん生成する。これをフランク・リードの増殖機構 (Frank-Read multiplication mechanism) とよび、線分 AB のような増殖の基になる転位部分をフランク・リード源 (Frank-Read source) とよぶ。

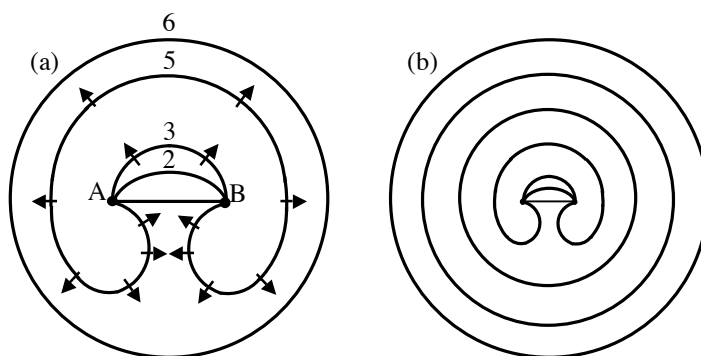


図 9.4 フランク・リードの転位増殖機構

フランク・リード機構のうち、臨界段階である図 9.3 の 3 の段階までの張り出しは、図 9.1 で述べたように、加えたせん断応力によって張り出そうとする力と、線張力の合力によって張り出しを戻そうとする力の間に釣り合いが生じており、転位は張り出しの形で安定である。一方、4 以降では、せん断応力の方が大きく、力の釣り合いが生じていない。したがって、転位はある位置で留まらずに、張り出しが進行して長距離運動を始める。このことは、結晶に巨視的な降伏が起こったことを意味する。すなわち、 τ_{FR} はこの材料の臨界分解せん断応力 (CRSS) である。

材料を塑性変形させると、すべり転位は運動中に転位網の節以外にもさまざまな障害物に出会う。障害物が強くてピン止め点となる場合は、フランク・リード機構が働いて転位の増殖が起こる。このようにして、塑性変形中に転位密度は増大していく。さらに、増殖した転位は互いにかみあったり相互作用力を及ぼし合ったりして、互いに互いの運動を妨害する。そのため、さらなる塑性変形のためにはより大きな応力を加える必要が生じる。これが加工硬化 (work hardening) の原因となる。

材料を塑性変形させると、すべり転位は運動中に転位網の節以外にもさまざまな障害物に出会う。障害物が強くてピン止め点となる場合は、フランク・リード機構が働いて転位の増殖が起こる。このようにして、塑性変形中に転位密度は増大していく。さらに、増殖した転位は互いにかみあったり相互作用力を及ぼし合ったりして、互いに互いの運動を妨害する。そのため、さらなる塑性変形のためにはより大きな応力を加える必要が生じる。これが加工硬化 (work hardening) の原因となる。

9.2 転位の切り合い

塑性変形によって増殖された転位は運動中にさまざまな障害物に出会うが、もし複数のすべり系が働いているならば、すべり面上にない林立転位とも頻繁に出会うことになる。図 9.5 において、らせん転位 A がすべり面上を移動する際に、林立転位 I (刃状転位) と II (らせん転位) に出会って切り合いが起こり、転位 B になったとしよう。切り合いの後には、一方の転位には他方の転位のバーガースベクトルに等しいだけの段差を生じる。段差のうち、元のすべり面上に形成されるものをキンク (kink) と言い、元のすべり面を離れるものをジョグ (jog) と言う。バーガースベクトルの

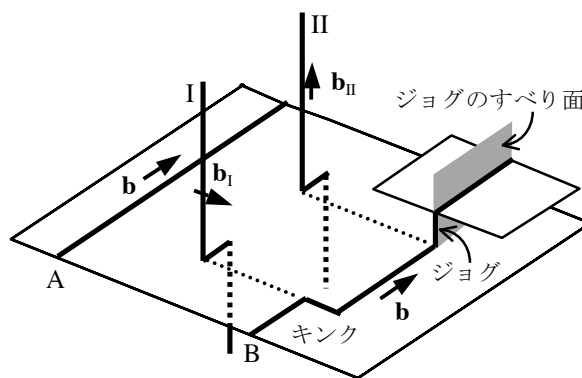


図 9.5 らせん転位 A と林立転位 I, II との切り合いによって生じるキンクとジョグ

保存則より転位 A と転位 B のバーガースベクトルは同一である。したがって、図 5.15 で転位 B に生じたキンク部もジョグ部も刃状転位であることがわかる。転位 B のさらなるすべり運動によってキンクは容易に消滅するが、ジョグ部の刃状転位のすべり面は元のすべり面と異なるため、ジョグは転位 B の運動方向にはすべり運動できない (高温では上昇運動によってジョグは転位 B と一緒に運動できるようになる)。したがって、らせん転位上のジョグは転位の運動に対する障害物 (ピン止め点) として働く。このように一般には運動転位と林立転位との相互作用によって障害物が形成される。これも加工硬化の原因となる。