4.4　結晶への転位の導入

すべり面上で，すでにすべった領域とすべっていない領域との境界線が転位であるならば，完全結晶に転位を作るには，結晶の一部をすべらせれば良い．図 4.5(a)のように，まず完全結晶にすべり面となる切れ目を入れる．切れ目の先端（必ずしも直線である必要はないが，図では簡単のために直線にしてある）は結晶の内部に留めておく．次に力を加えて切れ目の上部の結晶に下部の結晶に対してベクトル **b** だけのすべり（せん断ずれ）を起こさせる． ここで **b** の大きさと方向は，すべり面に平行である限り任意であるが，図 4.5(b)，(c)には切れ目の先端の直線に垂直な場合と平行な場合が示されている．

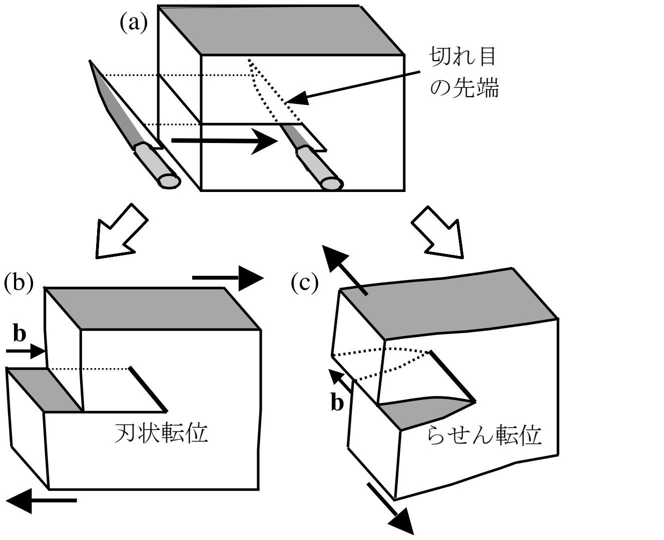


図 4.5　完全結晶への転位の導入．切れ目を入れた完全結晶(a)の切れ目の部分をすべり面に平行にせん断変形した後，切れ目を糊付けする．せん断変形の方向によって(b)刃状転位，(c)らせん転位，を生じる．

すべりを起こさせた後，切れ目を再び糊付けすると，力をはずしても元の完全結晶には戻らない．その結果，切れ目の先端部に転位が生じたことになる．切れ目の先端の直線方向（これを転位線の方向とよぶ）と **b** が垂直な場合は刃状転位（edge dislocation）が，平行な場合はらせん転位（screw dislocation）が生じる．もし垂直でも平行でもない場合は混合転位（mixed dislocation）が生じる．

それぞれのせん断ずれがさらに進行するように（切れ目をさらに大きくするように）外力を加えると，図 4.5(b)，(c)どちらの転位も右方向に動き，やがて，この箱型結晶全体にすべりが起こると，転位は右側面で結晶から離脱して消滅する．らせん転位の運動方向（右方向）は外力の方向とは異なるので，理解しにくいかもしれない．図 4.5(c)をよく見て，ちょうどさきイカを引き裂くような，あるいは紙を引きちぎるような状況になっていることを理解してほしい．

ところで，上で「**b** の大きさと方向は任意」と述べたばかりであるが，これは結晶を連続体と考えた図 4.5 のようなときの話であって，原子配列まで考えた結晶中では，全く任意というわけではない．その理由は，**b** だけのすべりが起こっても，結晶構造自体が変化することはないからである．すべりが起こることで結晶構造が変わってしまったら困るであろう．結晶構造を変えないためには，**b** は結晶の並進ベクトルの１つと一致する必要がある．ここで，並進ベクトルとは，そのベクトルだけ結晶を平行移動させても，平行移動前後で原子位置（格子点）が完全に一致するようなベクトルのことである．これを念頭において図 4.5 の(b)，(c)の図に原子配列まで描いた模式図が図 4.6(a)，(b)である．余計分かりにくくなっている恐れもないではないが，**b** の

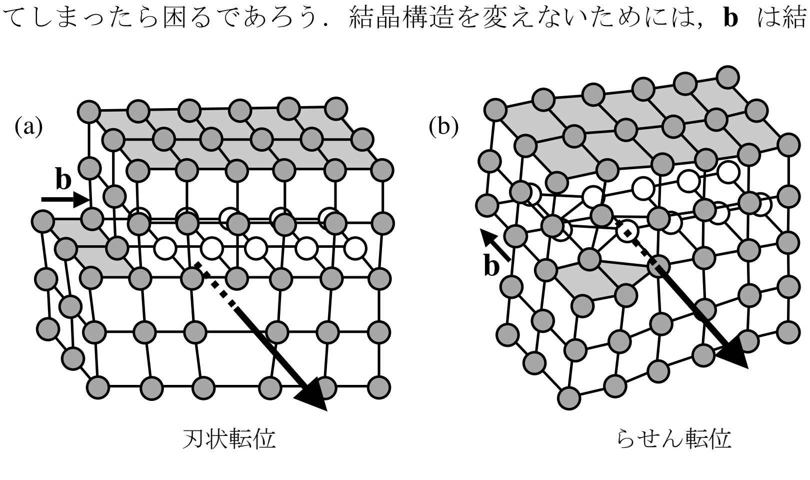


図 4.6　結晶中の刃状転位(a)とらせん転位(b)の模式図

大きさは最近接原子間距離と等しくなっていること，また，すべりが起こっても転位の周りの原子配列が局所的に乱れているだけで，全体としての結晶構造そのものには変化がないことがわかるであろうか？

4.5　転位の運動と巨視的変形との関係

転位は結晶中に線状につながった欠陥（線欠陥）なので，結晶中に含まれる転位の量は，

$$\rho \equiv \text{（単位体積の結晶中に含まれる転位の全長）} \tag{4.9}$$

で表すことができる．これを転位密度（dislocation density）という．ρ の単位は $[\mathrm{m/m^3}]=[\mathrm{m^{-2}}]$ である．

ここで図 4.7 のように，高さ h，幅 w，厚さ l の結晶を考えよう．この結晶内で長さ l の転位 n 本が左から右へと距離 w だけ動いたとすると，それによって生じる結晶の巨視的な（工学）せん断ひずみ（定義は後に述べる）は $\gamma = nb/h$ である．ただし，上述のベクトル $\mathbf{b}$ の大きさを b とした．もしこれらの転位が距離 w ではなく，平均的に x（$x <$ w とする）動いたとすると，そのときに生じる巨視的せん断ひずみは，比例配分の考え方から $\gamma = (nb/h)(x/w)$ と考えることができる．ここで，転位密度の定義（4.9）より $\rho = nl/hwl = n/hw$ なので次式を得る．

$$\gamma = \rho b x \tag{4.10}$$

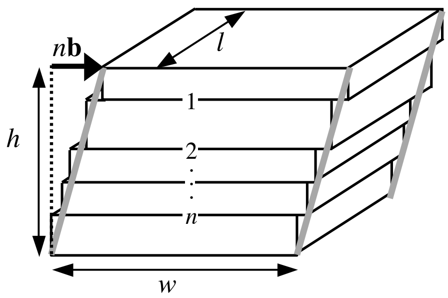


図 4.7　転位の運動と結晶の巨視的なせん断変形の関係

この式は転位の運動と巨視的な結晶の変形を結びつける重要な式でオロワン(Orowan)の式とよばれることがある．

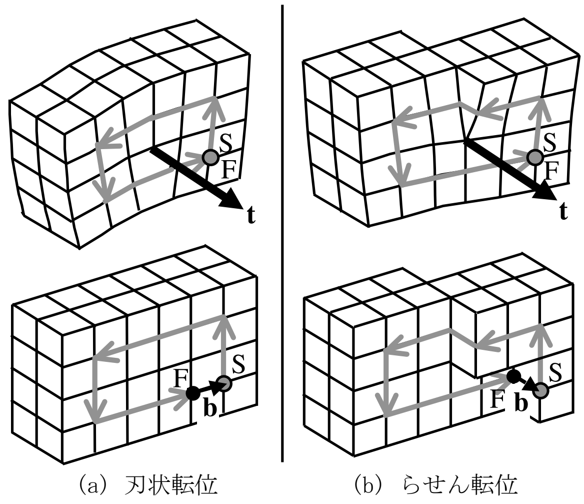
4.6　転位の種類とバーガースベクトル

図 4.4 から図 4.6 に示したベクトル $\mathbf{b}$ は，１本の転位が動くことによって生じるすべり変形の大きさと方向を表すもので，転位が与えられれば決まる固有のベクトルである．すなわち，転位の性質の多くは $\mathbf{b}$ を通じて決まる．これを転位のバーガースベクトル（Burgers vector）という．転位線の方向（曲がった転位のときは，転位線の接線方向）を表す単位ベクトルを $\mathbf{t}$ と書いて，前に述べたことを繰り返すと，

（a）刃状転位： $\mathbf{b} \perp \mathbf{t}$ ，　（b）らせん転位： $\mathbf{b} \,//\, \mathbf{t}$ ，（c）混合転位： それ以外

である．転位線は必ずしも直線状である必要はないが，その場合は，１本の転位の場所場所によって刃状転位，らせん転位，混合転位の部分があることになる．

転位線ベクトル $\mathbf{t}$ とその転位のバーガースベクトル $\mathbf{b}$ の符号（向き）のとり方には任意性が残る．正負どちらの向きにとっても構わないのであるが，話の中での混乱は避けなければならない．そのためには，バーガース回路（Burgers circult）の概念が有用である．図 4.8 のように，まず，転位線の方向 $\mathbf{t}$ を決める．次に，任意の格子点 S を始点として $\mathbf{t}$ ベクトルの方向が進行方向となるような右ネジ回転によって転位の周囲に格子点を順次結んだ閉回路を作る．閉回路も任意のもので良いが，その終点 F は始点 S と一致させなければならない．次



（a）刃状転位　　　（b）らせん転位

図 4.8　バーガース回路とバーガースベクトル

に参照のための（転位を含まない）完全結晶を考える．そして，この完全結晶格子上に同じ回路を作る．すると，転位を含む結晶では完全な閉回路であったものが，参照の完全結晶ではそうはならないことがわかる．閉じていない部分（closure failure という）を終点 F から始点 S に向けてベクトルで結び，これをバーガースベクトル **b** と定める[1]．このバーガースベクトルはどのような形の閉回路を選んでも同じになることを確認してほしい．

一本の転位が動いたことによって生じるすべりの量と方向をバーガースベクトル **b** で表したのだから，与えられた転位に対して，バーガースベクトルはただ一つに決まり，転位のどの部分でバーガース回路を作って求めても同じベクトルとなる. これをバーガースベクトルの保存則(conservation law)という．この保存則はまた，転位は結晶内部に端点を持たないことも意味している．端点を持てば，そこでバーガースベクトルが **b** からゼロへと変化してしまい，保存則が成り立たなくなってしまうからである．

転位の定義として「すべり面上ですでにすべった領域とまだすべっていない領域の境界線である」と述べた．そしてこれが概念としての定義であることも述べた．２次元の有限の大きさの平面（すべり面）上に２つの異なる領域に分割する境界線を描くとき（図 4.9），境界線は平面の端まで届いているか(a)，または閉じたループの形となるか(b)のどちらかであることがわかる．もし境界線が平面上のどこかで終わってしまっているなら，分割は不可能である(c)．このことからも，転位の端点は結晶内部には存在せず，表面や結晶粒界でのみ存在することが理解できるであろう．実際，転位は材料の変形という問題にのみならず，数学や幾何学の分野でも興味ある学問テーマであるという．

今度は複数の転位（境界線）によって平面領域を３つに分割してみよう．この場合の例を図 4.10(a)ー(c)に示したが，これ以外にもさまざま考えられるであろう．(a)は２本の直線転位による分割，(b)は２つの転位ループによる分割である．どちらの場合でも，それぞれの転位のバーガースベクトルは保存する．ところが，(c)では，途中で転位が枝分かれしている．このようなことが可能であろうか？実はこれは可能である．ただし，バーガースベクトルの保存則が成り立つためには，図のように，転位のそれぞれの部分でのバーガースベクトルの間にベクトル和としての関係式が成り立つ必要がある．枝分かれが組合わさると，図 4.10(d)のように転位の網目構造が出来上がる．これを転位網（dislocation network）とよび，安定した転位配列の一つと考えられている．

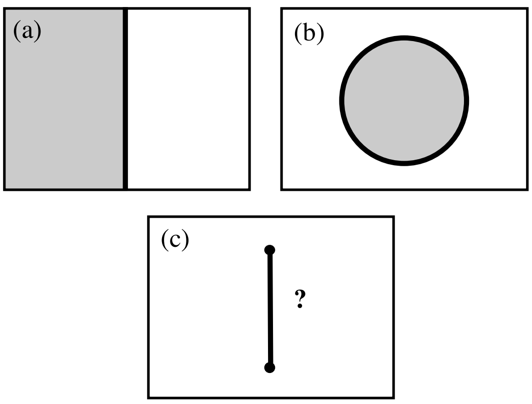


図 4.9　２次元平面を境界線（転位）によって２つの領域に分割する方法

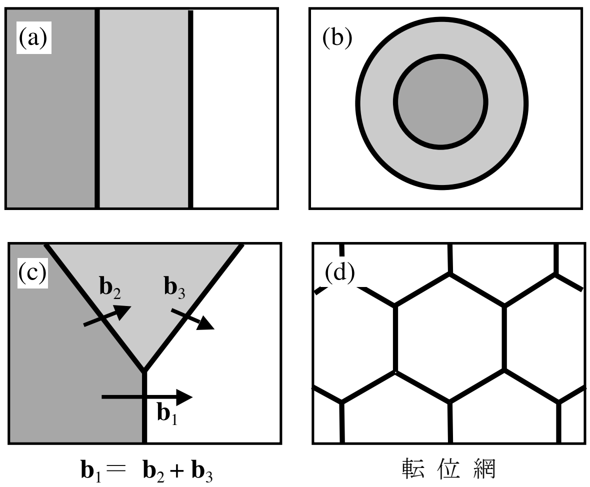


図 4.10　複数の転位による領域の分割

[1] 本によっては，異なる定義がなされているものもある．大事なことは，一度定義したら，それを首尾一貫して変えてはならないことである．

4．7　転位の観察（透過型電子顕微鏡による）

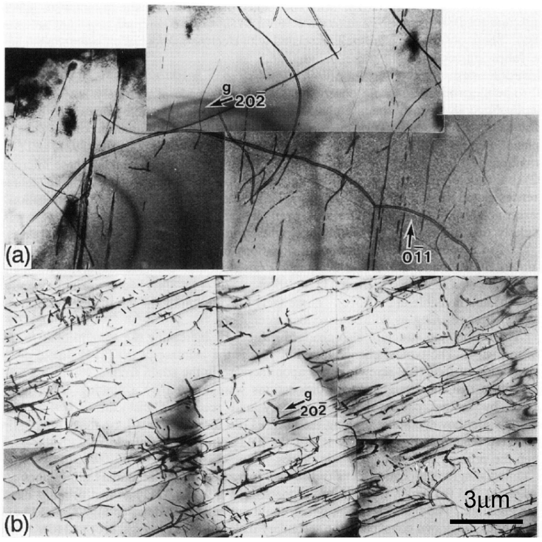


図 4.11　Ni_3Al 単結晶の変形後の転位組織
(a) 77K での変形，(b)室温での変形

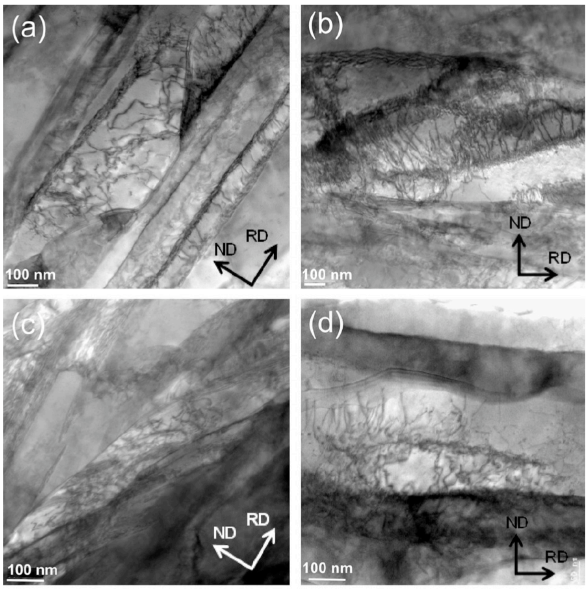


図 4.12　強加工された Cu および Cu-Si 合金
中の転位組織

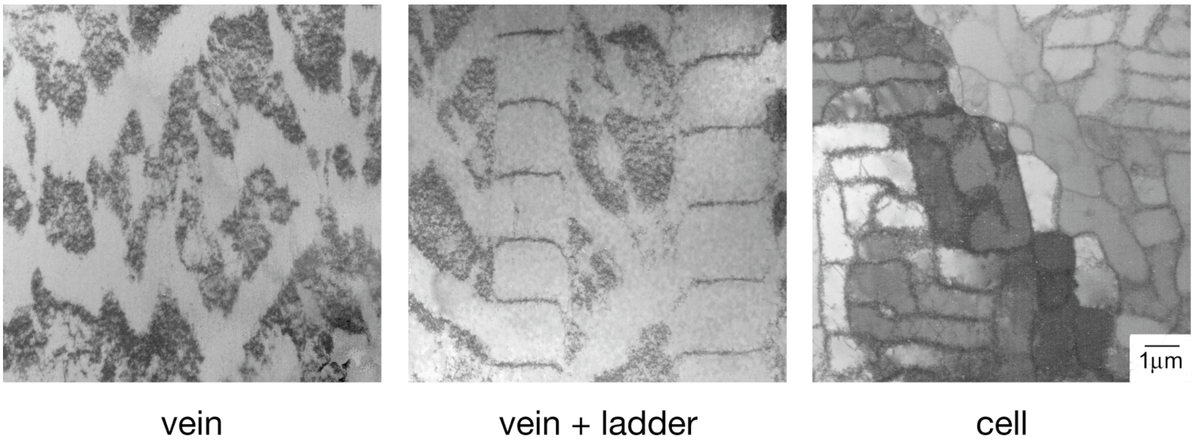


図 4.13　Cu 単結晶を用いて種々の繰り返し変形（疲労変形）を行った後の転位組織