材料強度学（1）

材料強度学

参考書：

William D. Callister, Jr　**著**
“**MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING　An introduction**”
JOHN WILLEY & SONS, INC.

入戸野　修　監訳、熊井真次　ほか　訳
「材料の科学と工学　第2巻　金属材料の力学的性質」
培風館

入戸野　修　監訳、熊井真次　ほか　訳
「材料の科学と工学　第4巻　材料の構造・製法・設計」
培風館

加藤雅治、熊井真次、尾中　晋　著
マテリアル工学シリーズ　3　「材料強度学」
朝倉書店

材料の変形 ＜ 弾性変形
塑性変形　永久変形　（強さ、硬さ）

負荷応力に対して多くの原子が集団運動

⇧

転位（線状の格子欠陥）運動

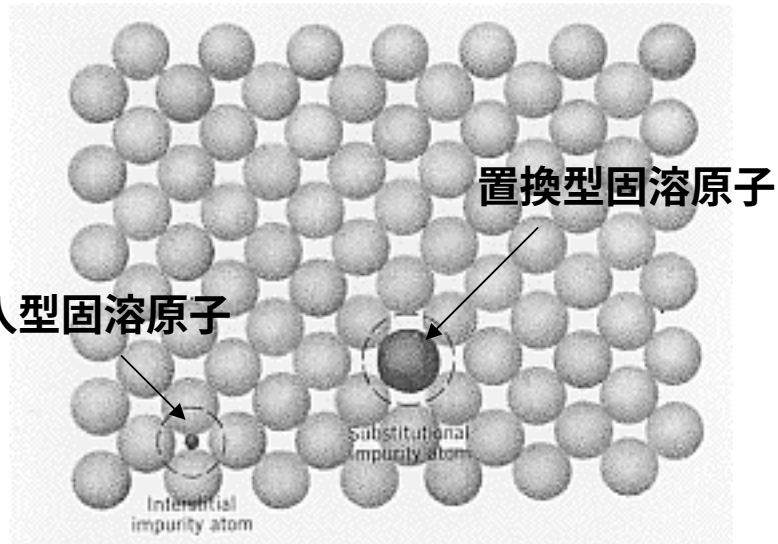
○　転位の性質と転位が塑性変形で果たす役割

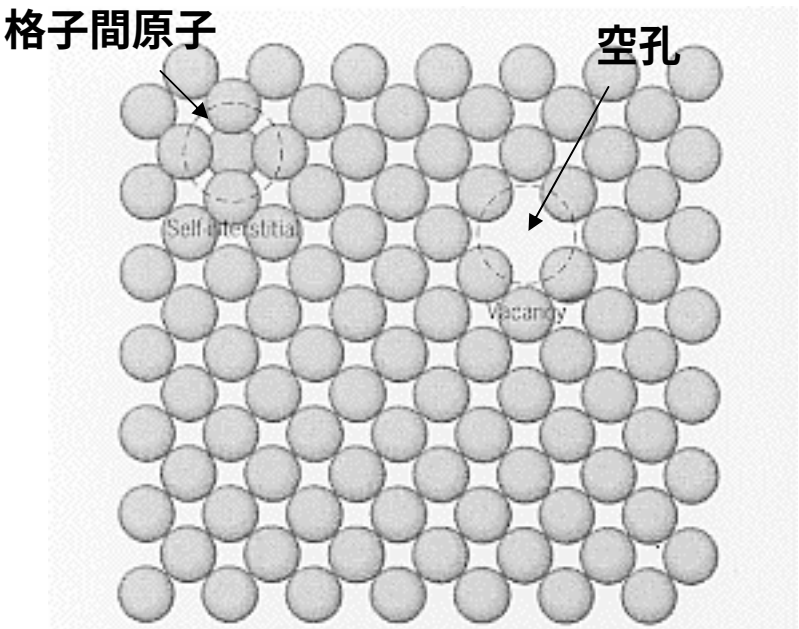
○　単相金属の強化手法

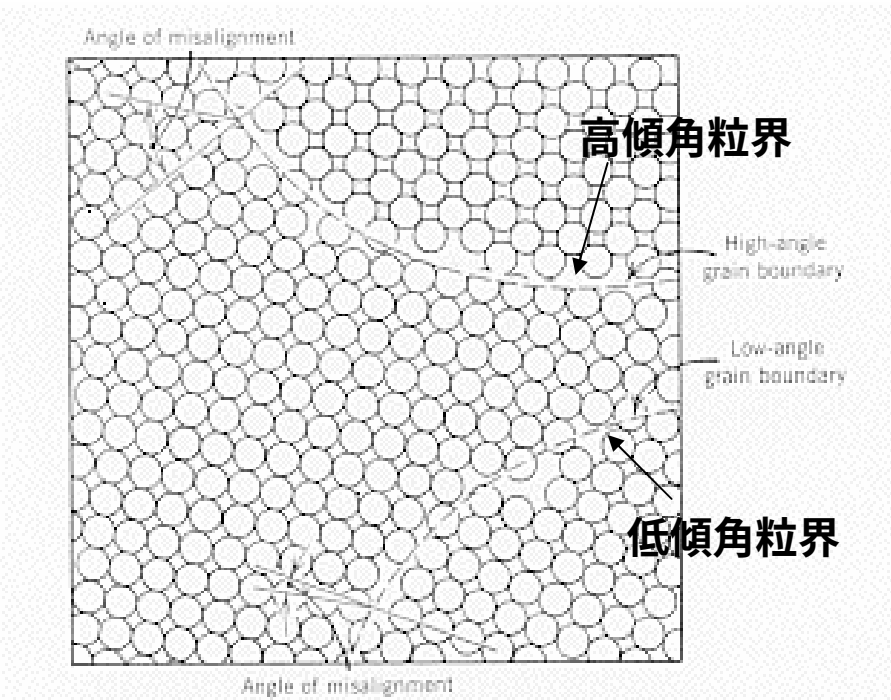
○　回復、再結晶

格子欠陥の種類

- 点欠陥（空孔、格子間原子）
- 線欠陥（転位）
- 面欠陥（粒界、表面）







材料強度に関する研究の黎明期

完全結晶の理論的強度 ⟷ 現実の結晶の強度

大きな食い違い

○ 転位という概念の導入

○ 電子顕微鏡による転位の直接観察

↓

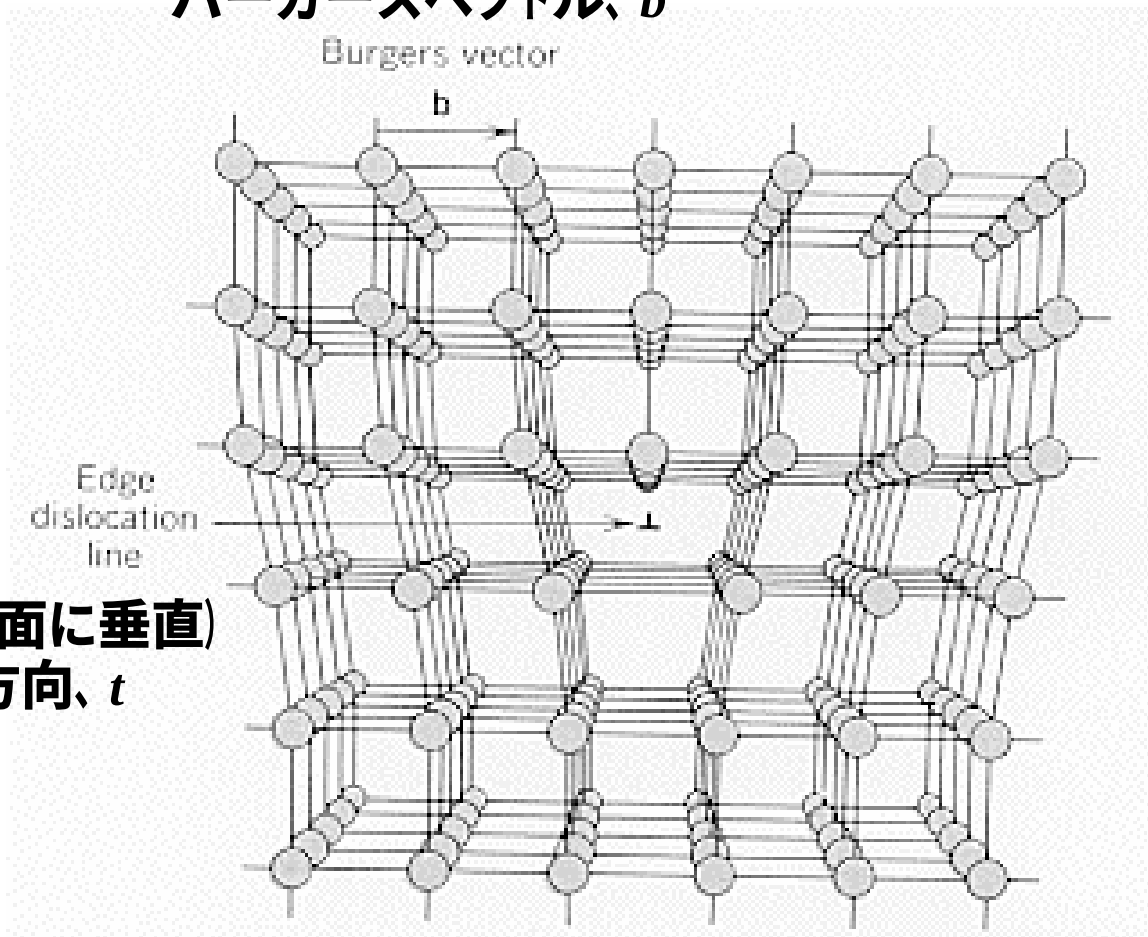
転位論の誕生

Figure 4.6 A transmission electron micrograph of a titanium alloy in which the dark lines are dislocations. 51,450×. (Courtesy of M. R. Plichta, Michigan Technological University.)

転位の種類

刃状転位　　$b \perp t$

バーガースベクトル、b



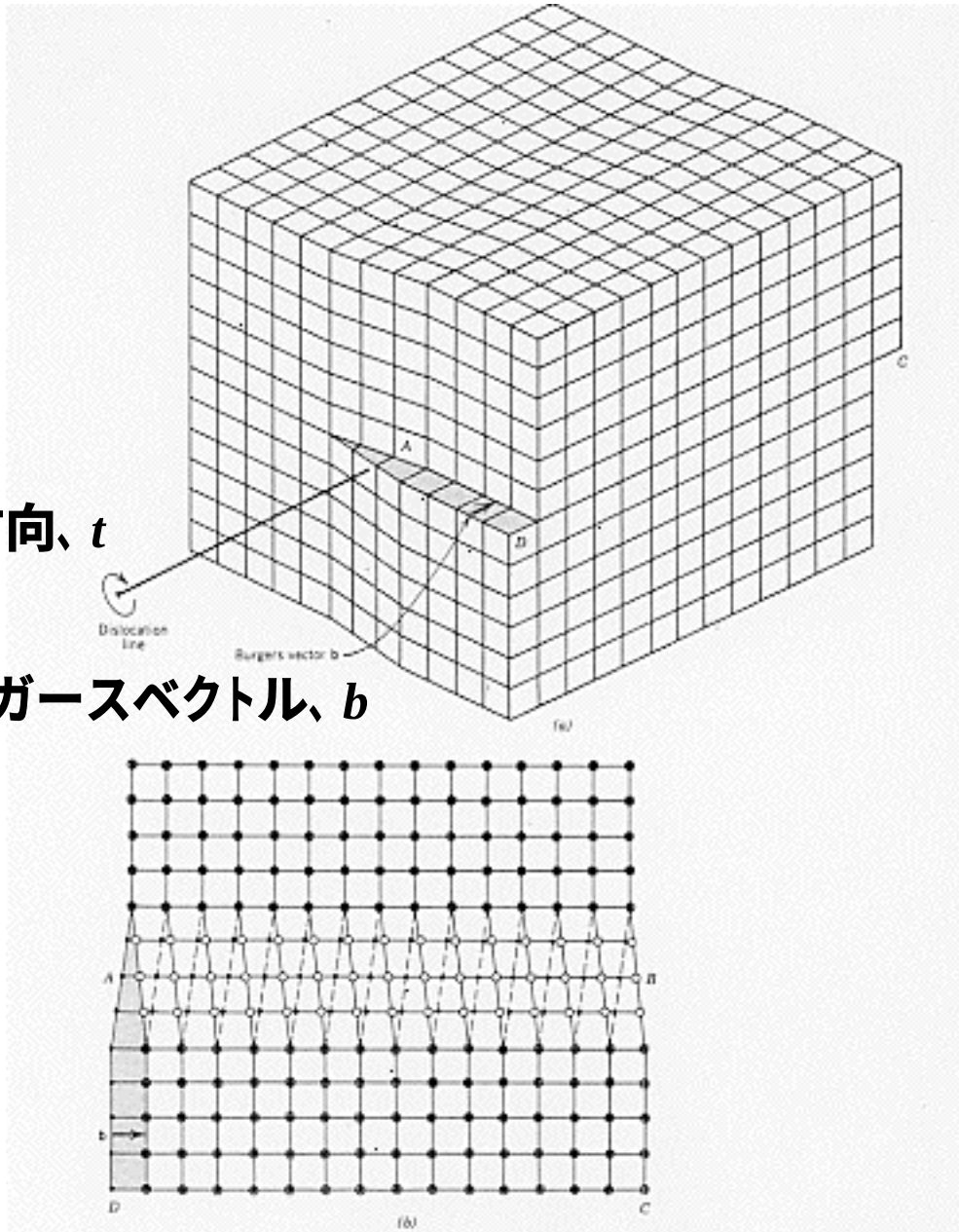
転位線（紙面に垂直）
転位線の方向、t

らせん転位

$\boldsymbol{b} \,//\, \boldsymbol{t}$

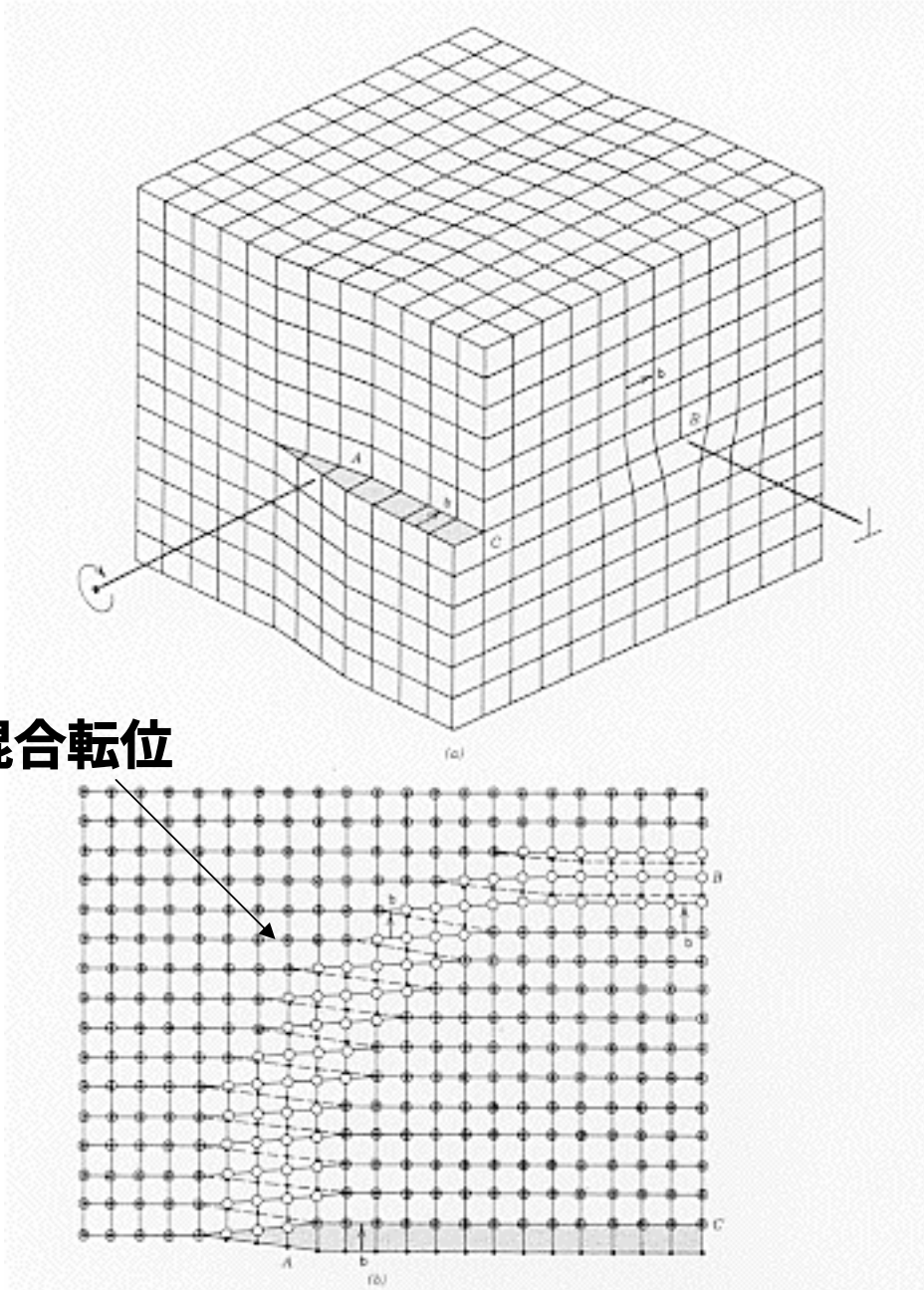
転位線の方向、$\boldsymbol{t}$

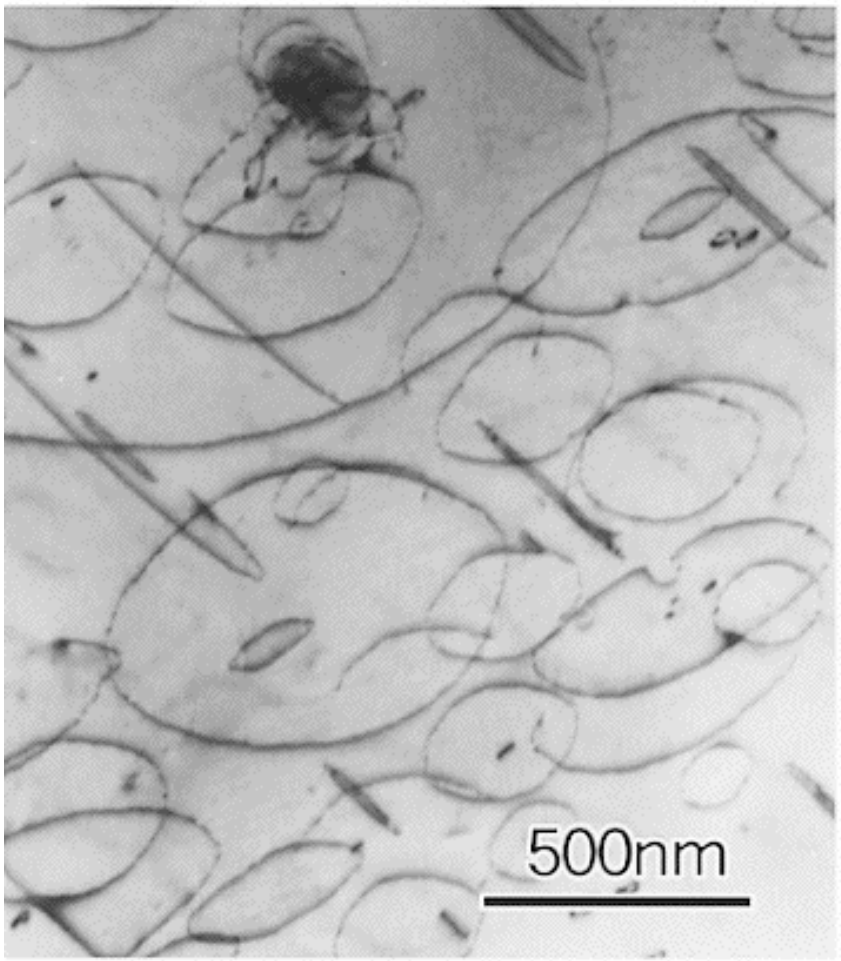
バーガースベクトル、$\boldsymbol{b}$



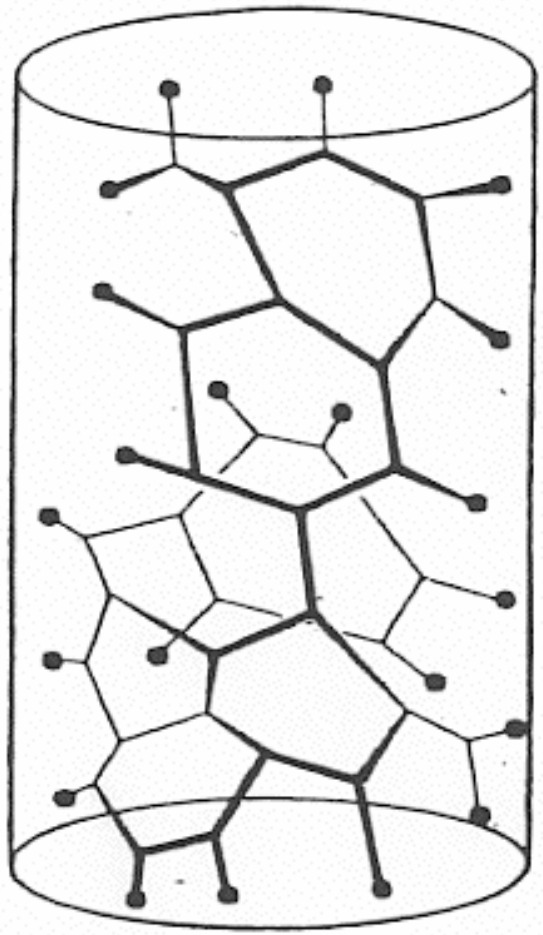
混合転位

曲線状の転位のときは、転位の場所によって刃状、らせん、混合転位の部分をもつ





転位ループ



転位網

転位運動の力学（刃状転位の例）

余分な原子半面Aがせん断応力によってB→C→Dと移り変わる
（原子結合が分断し、上半分の面が原子間隔分だけ移動する）

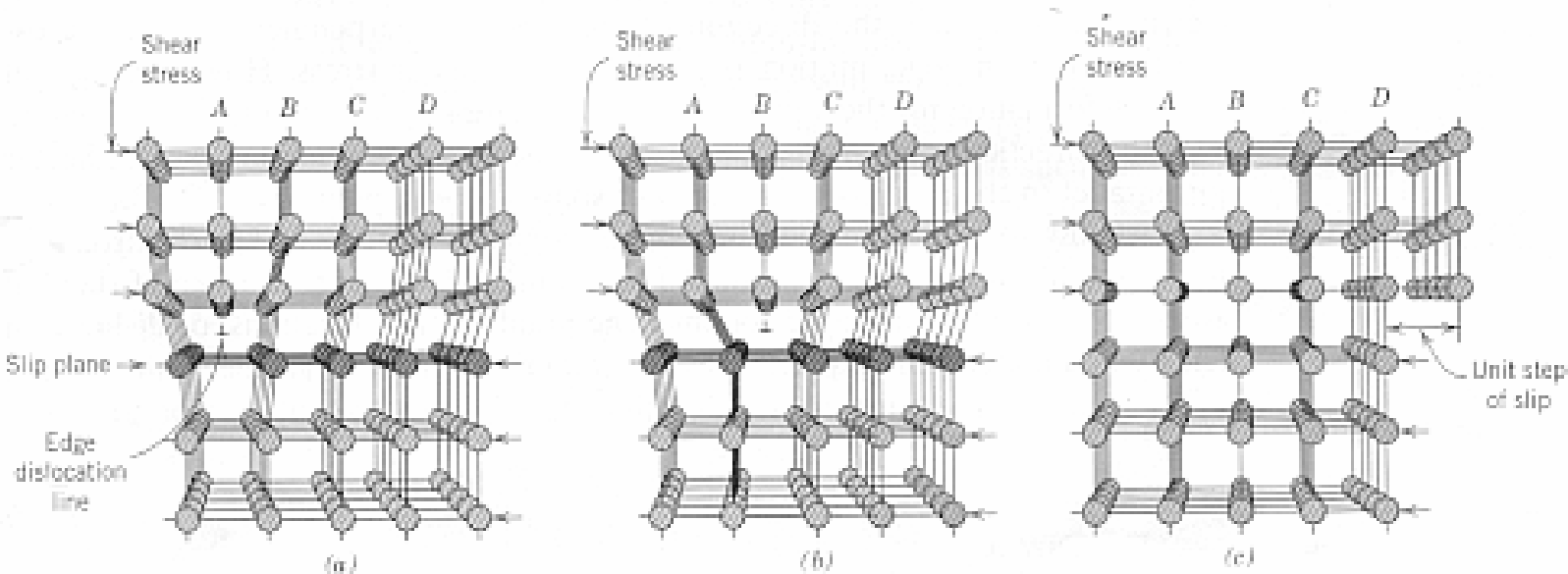


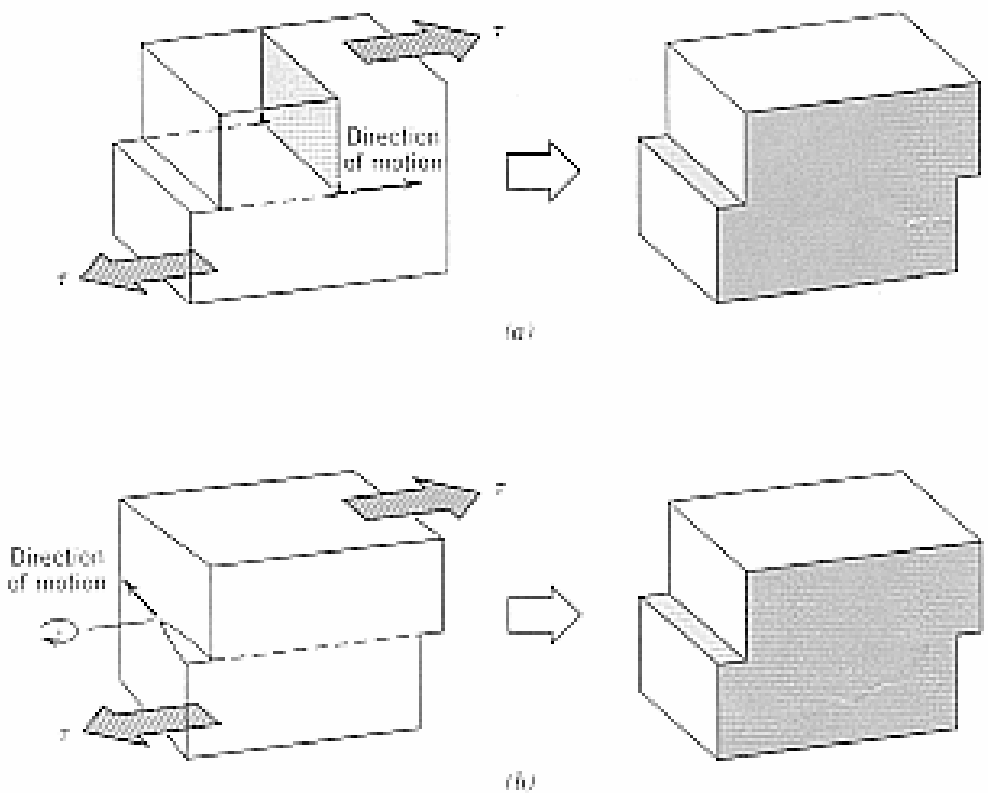
FIGURE 7.1 Atomic rearrangements that accompany the motion of an edge dislocation as it moves in response to an applied shear stress. (*a*) The extra half-plane of atoms is labeled *A*. (*b*) The dislocation moves one atomic distance to the right as *A* links up to the lower portion of plane *B*; in the process, the upper portion of *B* becomes the extra half-plane. (*c*) A step forms on the surface of the crystal as the extra half-plane exits. (Adapted from A. G. Guy, *Essentials of Materials Science*, McGraw-Hill Book Company, New York, 1976, p. 153.)

転位運動による塑性変形のプロセス　　すべり

刃状転位とらせん転位

どちらの場合も正味の塑性変形は同じ

FIGURE 7.2 The formation of a step on the surface of a crystal by the motion of (*a*) an edge dislocation and (*b*) a screw dislocation. Note that for an edge, the dislocation line moves in the direction of the applied shear stress τ; for a screw, the dislocation line motion is perpendicular to the stress direction. (Adapted from H. W. Hayden, W. G. Moffatt, and J. Wulff, *The Structure and Properties of Materials*, Vol. III, *Mechanical Behavior*, p. 70. Copyright © 1965 by John Wiley & Sons, New York. Reprinted by permission of John Wiley & Sons, Inc.)



すべての結晶性物質は転位を含む

(原因) 凝固過程、塑性変形、急冷による熱応力

転位の量 (数) をどう表現するか？

転位密度　ρ

単位：m / m^3**または**m^{-2}　(mm / mm^3**または**mm^{-2})

単位体積あたりに含まれる転位長さの総和

ある任意の断面の単位面積と交わる転位の数

(例)

ゆっくりと凝固した金属結晶　$10^3\ mm^{-2}$

強加工された金属結晶　10^9〜$10^{10}\ mm^{-2}$

上記の熱処理後　10^5〜$10^6\ mm^{-2}$

転位の性質

○ 転位まわりのひずみ場

金属の塑性変形時：変形エネルギーの多くは熱として散逸するが一部（約5%）は結晶内部に蓄積

転位に起因する弾性ひずみエネルギー

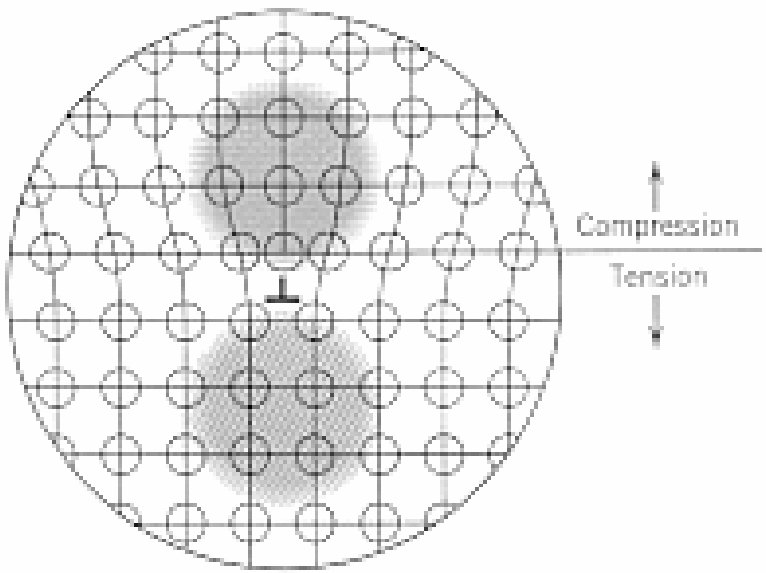


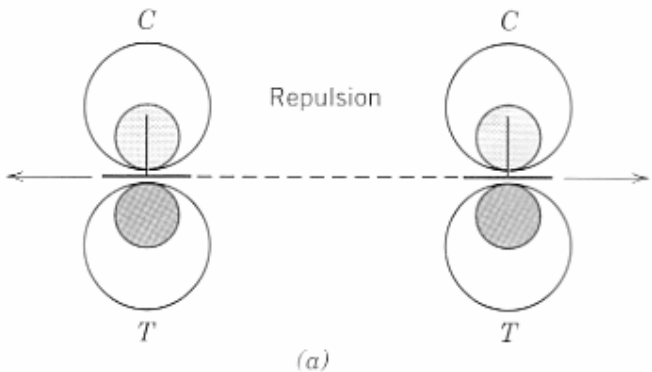
FIGURE 7.4 Regions of compression (dark) and tension (colored) located around an edge dislocation. (Adapted from W. G. Moffatt, G. W. Pearsall, and J. Wulff, *The Structure and Properties of Materials*, Vol. I, *Structure*, p. 85. Copyright © 1964 by John Wiley & Sons, New York. Reprinted by permission of John Wiley & Sons, Inc.)

結晶内に複数の転位がある場合

転位のまわりのひずみ場は相互作用し、各々の転位に力が加わる

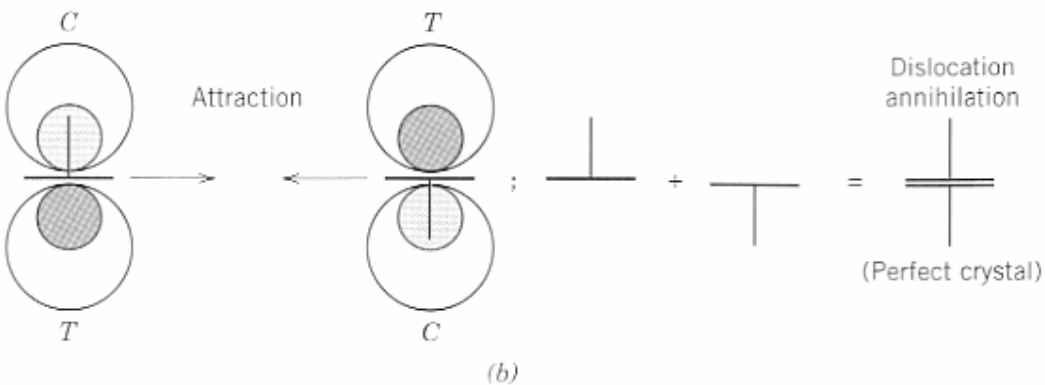
(a) **同一すべり面上にある同一符号の刃状転位**

転位間には斥力が働き、お互いを遠ざける



(b) **同一すべり面上にある異符号の転位**

互いに吸引し、1枚の原子面になる（転位の消滅）



転位の性質

○ 転位は増殖する

塑性変形中に転位密度は劇的に増加

焼き鈍し材　$\rho = 10^{5}\ \mathrm{mm}^{-2}$

被強加工材　$\rho = 10^{10}\ \mathrm{mm}^{-2}$

増殖の源

転位

結晶粒界、内部欠陥、表面の荒れ

すべり系

結晶にはすべりやすい面が存在し（すべり面）、すべりは、
その面上の特定の方向（すべり方向）に起こる

すべり面とすべり方向の組み合わせ　すべり系

すべり面：一般に原子の最密面（面密度最大の面）

すべり方向：原子の線密度最大方向

（例）FCC結晶

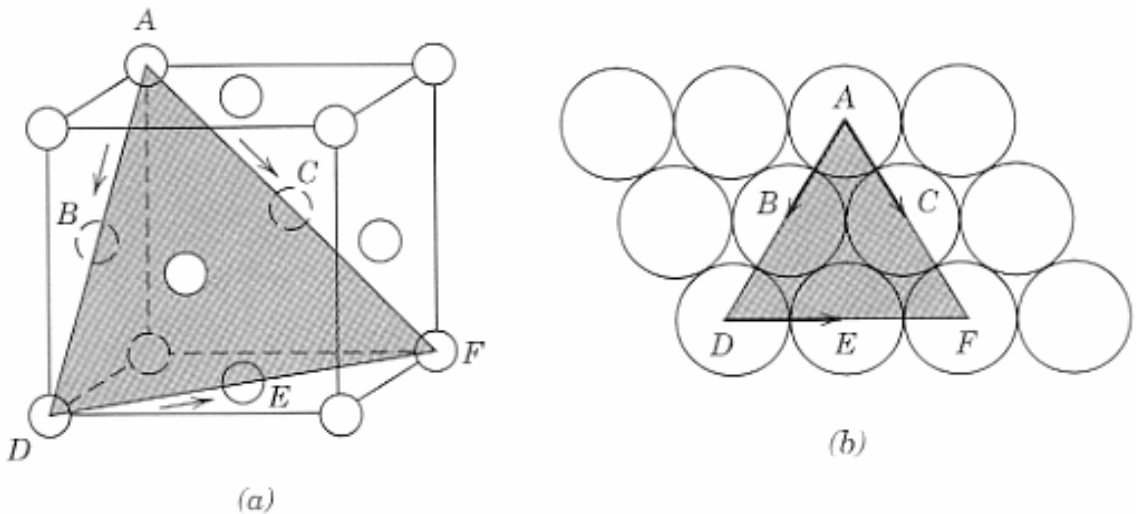


FIGURE 7.6 (*a*) A {111}⟨110⟩ slip system shown within an FCC unit cell. (*b*) The (111) plane from (*a*) and three ⟨110⟩ slip directions (as indicated by arrows) within that plane comprise possible slip systems.

すべり系：{111} <110>、すべり系の数　12

FCC、BCC、HCP金属のすべり系

- ○ BCC、HCPでは複数の面ですべりが可能
- ○ いくつかのすべり系は高温でのみ活動可能
- ○ FCC、BCCはすべり系の数が多い
- ○ HCPのすべり系の数は少ない

Table 7.1 Slip Systems for Face-Centered Cubic, Body-Centered Cubic, and Hexagonal Close-Packed Metals

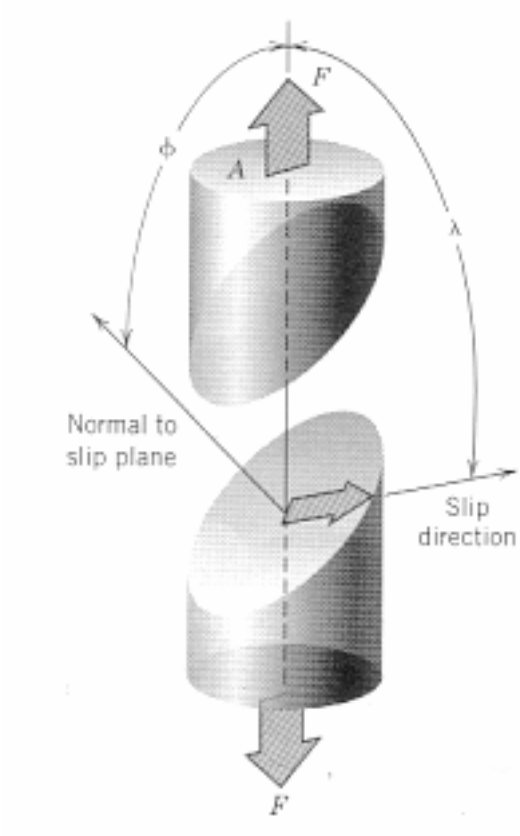
Metals	*Slip Plane*	*Slip Direction*	*Number of Slip Systems*
	Face-Centered Cubic		
Cu, Al, Ni, Ag, Au	$\{111\}$	$\langle 1\bar{1}0\rangle$	12
	Body-Centered Cubic		
α-Fe, W, Mo	$\{110\}$	$\langle \bar{1}11\rangle$	12
α-Fe, W	$\{211\}$	$\langle \bar{1}11\rangle$	12
α-Fe, K	$\{321\}$	$\langle \bar{1}11\rangle$	24
	Hexagonal Close-Packed		
Cd, Zn, Mg, Ti, Be	$\{0001\}$	$\langle 11\bar{2}0\rangle$	3
Ti, Mg, Zr	$\{10\bar{1}0\}$	$\langle 11\bar{2}0\rangle$	3
Ti, Mg	$\{10\bar{1}1\}$	$\langle 11\bar{2}0\rangle$	6

単結晶におけるすべり

せん断応力が負荷されると転位はすべり面をすべり方向に運動する

分解せん断応力（τ_R）：負荷応力のうちのせん断成分

負荷応力の大きさ、すべり面の方向、すべり方向によって変化



ϕ：応力軸とすべり面法線との間の角度
λ：応力軸とすべり方向との間の角度
$\phi + \lambda \neq 90°$
σ：F／A

$$\tau_R = \sigma \cos\phi \cos\lambda \qquad (1)$$

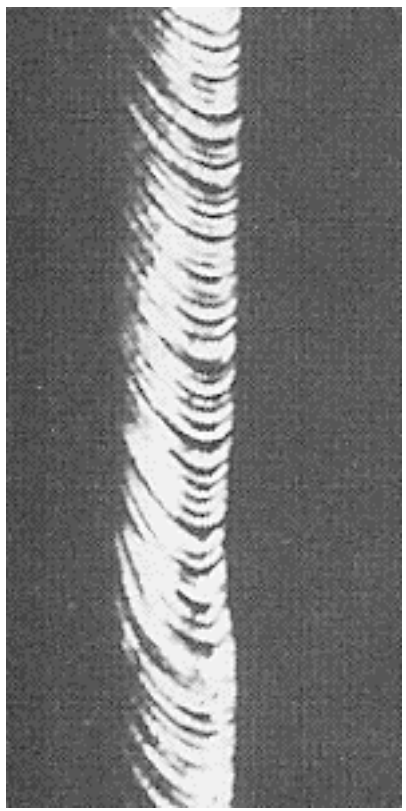
金属単結晶の各々のすべり系で応力軸に対する角度は異なっており、各々の分解せん断応力は異なるが、そのうちひとつのすべり系における分解せん断応力は最大となる（$\tau_{R(max)}$）

$$\tau_{R(max)} = \sigma (\cos\phi \cos\lambda)_{max} \qquad (2)$$

単結晶のすべり：負荷応力下で分解せん断応力が、ある臨界値に達したとき、最も都合のよい方位のすべり系で起こる。

臨界値：臨界分解せん断応力、τ_{crss}

$\tau_{R(max)} = \tau_{crss}$ **で、塑性変形を開始（降伏）**

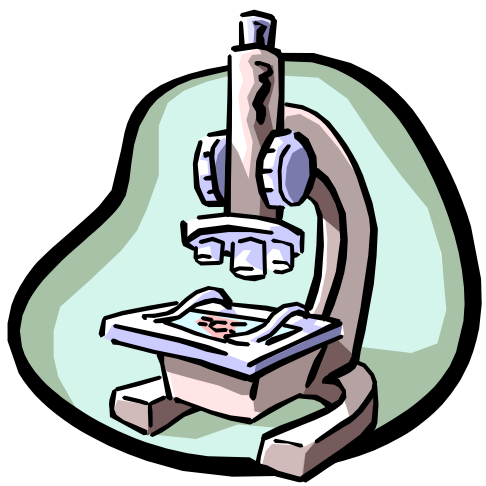


$$\sigma_y = \frac{\tau_{crss}}{(\cos\phi\cos\lambda)_{max}}$$

Zn**単結晶のすべり（試料表面に多くのすべりステップが観察される）**

演習問題

BCC鉄単結晶を[010]方向に引張る。

(a) 引張応力が52MPaであるとき、(110)面の$[1\bar{1}1]$方向すべりに対する分解せん断応力を求めよ。

(b) もしすべりが(110)面$[1\bar{1}1]$方向に起こり、その際の臨界分解せん断応力が30MPaであったとき、この試料を降伏させるのに必要な引張応力を求めよ。