

2. 単結晶の塑性変形 (1)

2.1 臨界分解せん断応力

前回では、転位がある特定の結晶面（すべり面）上で特定の方向（すべり方向）に移動することによって塑性変形が生じることを説明する。結晶性材料が塑性変形するか否か、塑性変形する際のすべり面とすべり方向の特定、またすべりに必要な応力を理解するためには、一般に単結晶を用いる。今回の講義では、単結晶の塑性変形（すべり）と強度（すべりに要する応力）を説明する。

図 2.1 に、(a) 引張変形後の純亜鉛単結晶試験片の光学顕微鏡写真と(b) 引張変形によって単結晶がすべりを起こした模式図を示す。単結晶を塑性変形させると、図 2.1(a)に示すように試料表面にすべり線が観察される。このすべり線は、特定のすべり面に沿った転位の移動によってすべり面が出現し、段差になった結果（前回講義資料の図 1.5 を参照）であることに対応している。なお、方位を特定した丸棒試験片を用いると、すべり面だけでなくすべり方向も特定可能である。

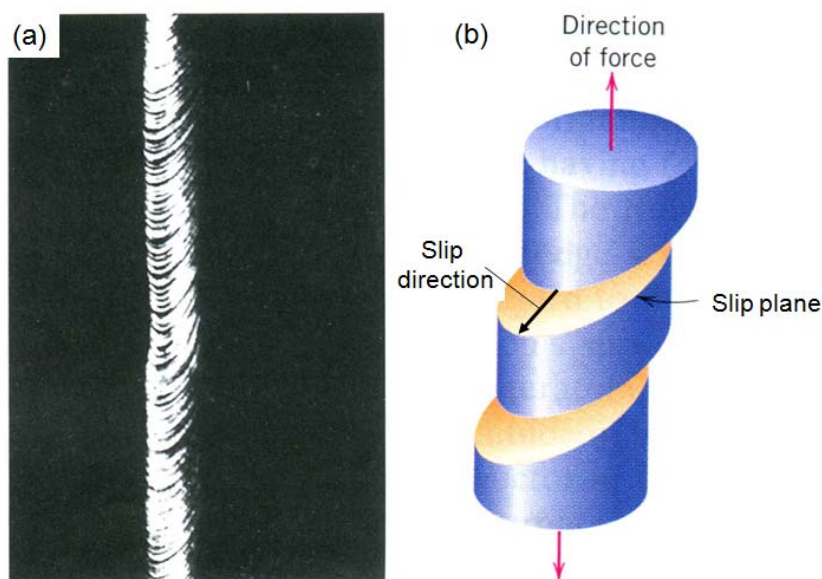


図 2.1 (a) 引張変形後の純亜鉛単結晶試験片の光学顕微鏡写真と(b) 単結晶のすべりによる塑性変形[1]

図 2.2 に示すように、断面積 A の丸棒単結晶試験片の変形を考える。試験片の上下方向に力 F を負荷したとする。結晶内の転位はすべり面に沿って移動し、塑性変形する。ここで、引張方向とすべり面及びすべり方向の角度を考慮すると、 ϕ は引張方向とすべり面法線方向の成す角度、 λ は引張方向とすべり方向の成す角度と定義する。これらを用いて、すべり面の面積 A_s 、すべり方向に働く力を F_s は以下のように表される。

$$A_s = \frac{A}{\cos\phi} \quad (2.1)$$

$$F_s = F \cos \lambda \quad (2.2)$$

したがって、結晶のすべり面上のすべり方向に働くせん断応力 τ_r は以下のように表される。

$$\tau_r = \frac{F_s}{A_s} = \frac{F}{A} \cos \phi \cdot \cos \lambda \quad (2.3)$$

この τ_r は分解せん断応力 (Resolved Shear Stress: RSS) と定義される。また、(2.3)式において、引張応力 $\sigma (=F/A)$ と τ_r との比を m で表しシュミット因子 (Schmid factor) と定義される。

$$m = \frac{\tau_r}{\sigma} = \cos \phi \cdot \cos \lambda \quad (2.4)$$

この式より、 $\phi = \lambda = 45^\circ$ のときシュミット因子は最大値となる (0.5)。したがって、分解せん断応力も最大値 (負荷引張応力の 1/2) となる。

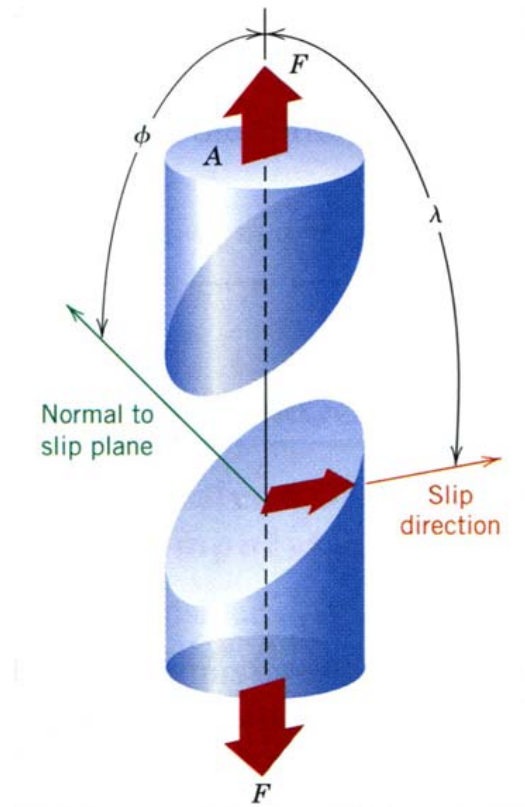


図 2.2 単結晶の引張変形における応力軸とすべり面法線方向 (ϕ)・すべり方向 (λ) の関係[1]

また、 $\phi = 90^\circ$ (すべり面が引張方向に平行である場合)、 $\lambda = 90^\circ$ (すべり方向が引張方向に垂直である、すなわちすべり面が引張方向に垂直である場合) のとき、シュミット因子は 0、すなわち τ_r は 0 となるため、そのすべり面上の転位を稼働させる応力は作用しない。この場合、結晶はすべりを起こさず、弾性変形後破壊に至る。

以上のように，分解せん断応力が転位を動かすのに必要なある臨界の値に達したとき，単結晶のすべり変形が開始するという法則がシュミットの法則と呼ばれる．また，転位がすべり面上で活動し始める応力を**臨界分解せん断応力（Critical Resolved Shear Stress: CRSS）**と定義される．

2.2 すべり系と結晶構造

結晶中の転位がどの面，どの方向に移動する（すべる）かは結晶構造に依存する．このすべり面（slip plane），すべり方向（slip direction）と引張方向の角度によって塑性変形に要する一軸応力（2.1 の場合は引張応力 σ ）が決定される．一般的に金属のすべり面は原子が最も密に並んだ面（面間隔が最も大きい），すべり方向は原子が最も密に並んだ方向（最も近接している原子の方向）に対応する．このすべり面とすべり方向の組み合わせを，**すべり系（slip system）**と呼ぶ．

図 2.3 に，面心立方晶（Face-Centered Cubic），体心立方晶（Body-Centered Cubic）及び六方最密充填（Hexagonal Close-Packed）の結晶構造を示す．また，表 2.1 にそれらの結晶構造を持った金属材料のすべり系を示す．

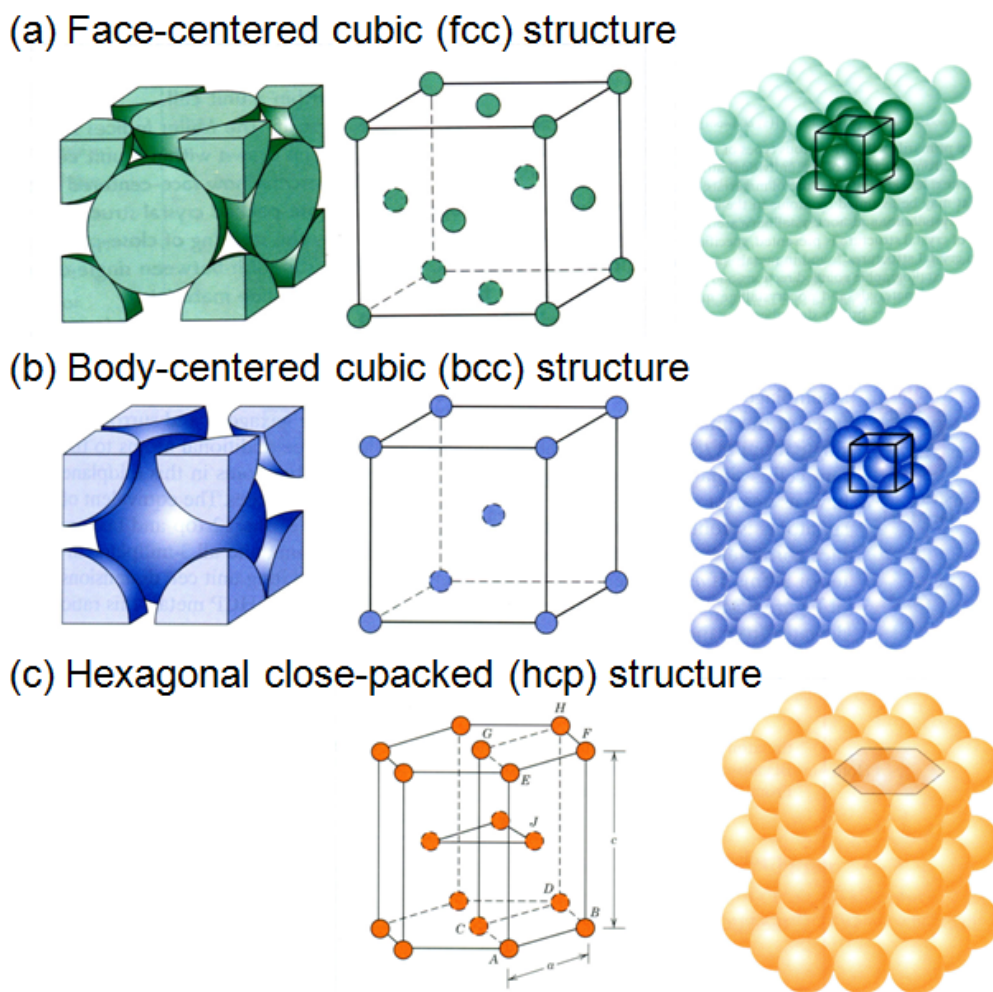


図 2.3 (a) 面心立方晶，(b) 体心立方晶及び(c) 六方最密充填の結晶構造[1]

表 2.1 結晶構造の異なる金属材料のすべり面，すべり方向，すべり系の数[1]

<i>Metals</i>	<i>Slip Plane</i>	<i>Slip Direction</i>	<i>Number of Slip Systems</i>
	Face-Centered Cubic		
Cu, Al, Ni, Ag, Au	{111}	$\langle \bar{1}10 \rangle$	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

これらの中から，fcc 金属を考えてみる．図 2.4 に fcc 結晶格子の(011)面及び[011]方向とその原子面を投影した模式図を示す．すべり系を理解するためには，これらのミラー指数による結晶面方位，結晶方向を理解しておく必要がある．これらの詳細は他の教科書 [1,2] もしくは結晶学に関する講義を復習しておく必要がある．

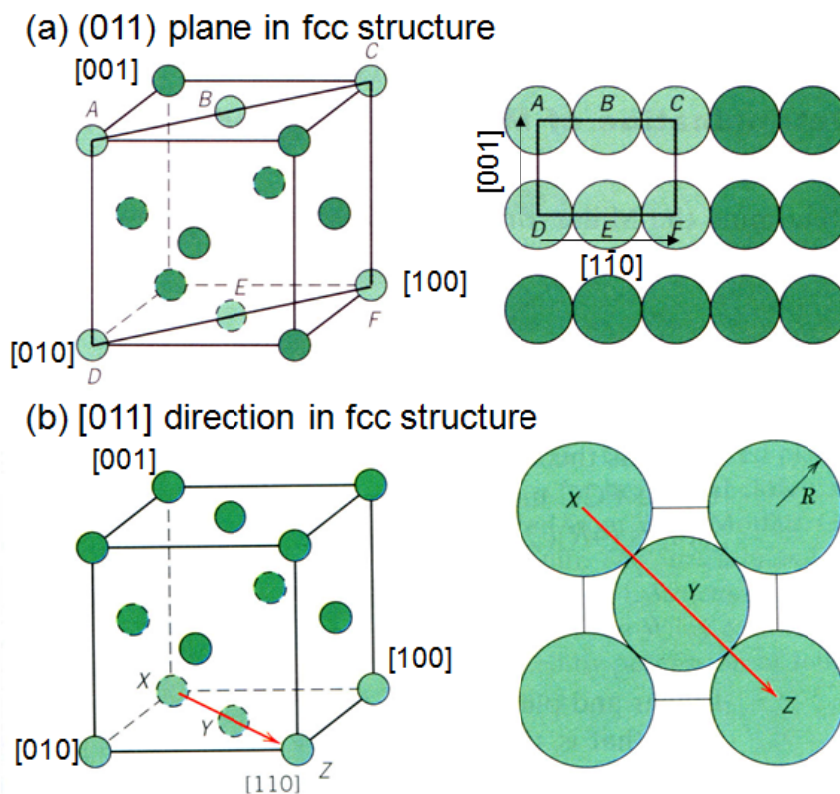


図 2.4 fcc 結晶格子の(011)面及び[011]方向 [1]

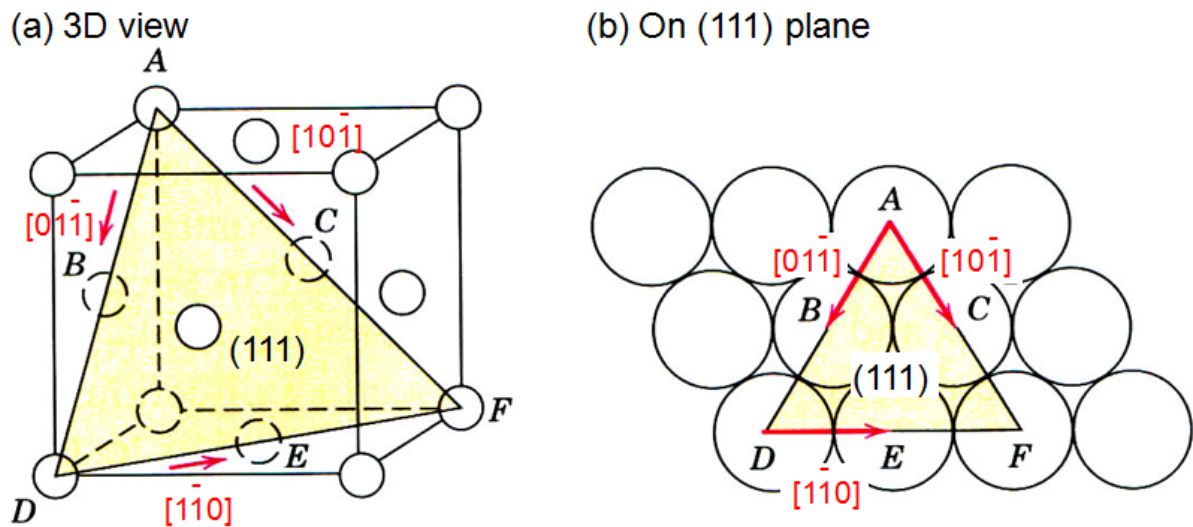


図 2.5 fcc 結晶中の 1 つの(111)面における 3 つの<011>方向 [1]

表 2.1 より，fcc 金属は 12 のすべり系を持つ。これは fcc は 4 つの等価な{111}すべり面 ((111), (-111), (1-11)及び(11-1)) を持ち，ひとつの(111)面上に等価な<011>すべり方向 ([01-1], [10-1]及び[1-10]) が存在する (図 2.5 参照)。そのため， $4 \times 3 = 12$ となり，計 12 種のすべり系が存在することになる。

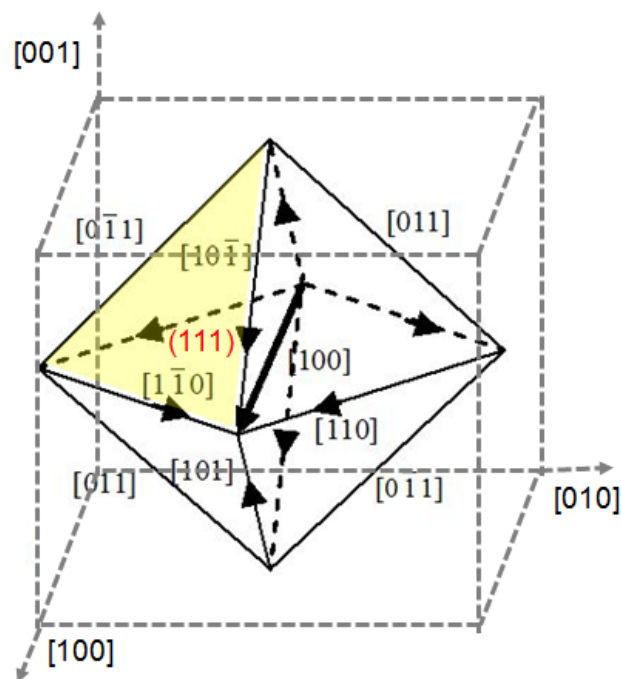


図 2.6 fcc 金属単結晶の[100]引張時に活動するすべり系

例えば，[100]方向に引張応力を負荷した場合の fcc 単結晶の活動するすべり面とすべり方向を考えてみる。(図 2.6) fcc の{111}すべり面は 3 つの<011>方向に沿って描くことのできる正三角形となり，そ

れらは8面体を形成する。いずれの{111}面（その法線方向）は引張方向[100]と同じ角度を持つ。また、単一の{111}面上にあるすべり方向の $\langle 011 \rangle$ と引張方向[100]の成す角度は2つが 45° 、1つが 90° である。（黄色の(111)面上であれば、[1-10]と[10-1]は 45° 、[0-11]は 90° となる）したがって、単一面におけるすべり系は2つが同じシュミット因子を持ち、1つは0（ $\lambda=90^\circ$ であるため）となる。これより、{111}面は4種であり、それぞれ活動する等価な2つのすべり方向を持つため、合計8種のすべり系が活動することになる。以上のように、応力を負荷するする方位によって結晶の活動するすべり系は変化するが、その応力負荷方向とすべり面・すべり方向を求めることによって、活動するすべり系を予測することができる。

参考図書

- [1] Materials Science and Engineering 8th edition, William D. Callister and David G. Rethwisch, Wiley (2011).
- [2] 金属物理学序論, 幸田 成康, コロナ社 (1973).
- [3] 結晶転位論 鉄から窒化ガリウムまで, 坂公恭, 丸善出版 (2015).