

## 基礎材料組織学 第5回

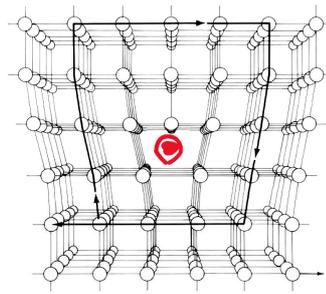
- 前回 :
- 理想変形強度
  - 金属の結晶構造
  - 格子欠陥
  - 転位とは



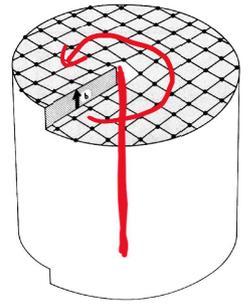
- 今回 :
- 転位とは (続き)
  - 転位の運動と特徴
  - パイエルス応力

5.1 転位とは(4.4の続き):

- 転位線: 転位による原子配列の乱れを中心線
- ・刃状転位: 余分の半原子面の下立端
- ・らせん転位: らせんを伴う原子のずれの中心



刃状転位



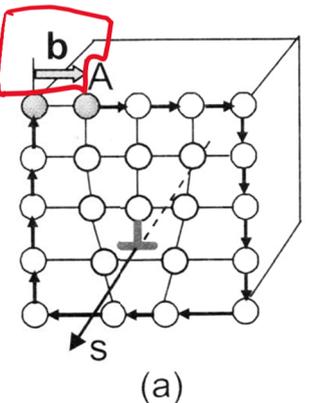
らせん転位

図 5.1 転位の中心  
[入門 転位論, 裳華房]

転位の移動により原子位置がずれた部分と、まだずれていない部分の境界線

- バーガースベクトル: 転位によって生じる原子のずれの方向と大きさを規定するベクトル。「 $b$ 」で表わす。  
刃状転位:  $b$ と転位線が垂直  
らせん:  $b$ と転位線が平行

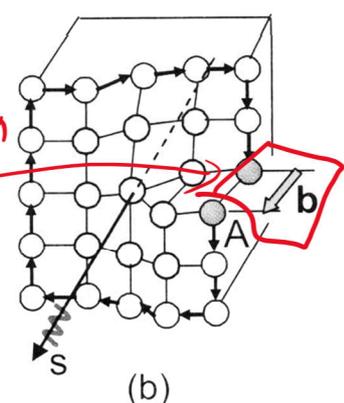
刃状転位のバーガースベクトル



(a)

- すべり面: 転位が運動する (= 原子の移動力がはいる) 特定の結晶面のこと。

らせん転位のバーガースベクトル



(b)

- ・転位の記号: 「 $\perp$ 」 — 余分の半原子面がある方  
で刃状転位を表わす。  
(らせん転位の記号は無い)

図 5.2 バーガースベクトル  
[入門 転位論, 裳華房]

5.2 転位の運動:

転位の運動に伴い、結晶中の原子が逐次的に移動する。

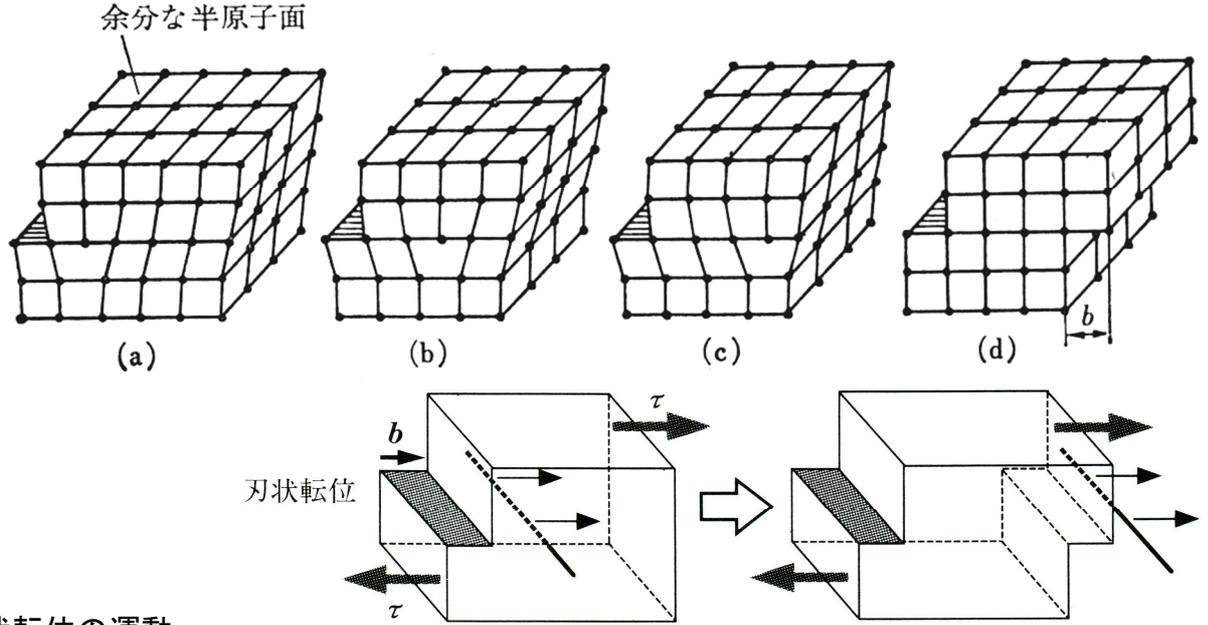


図 5.3 刃状転位の運動

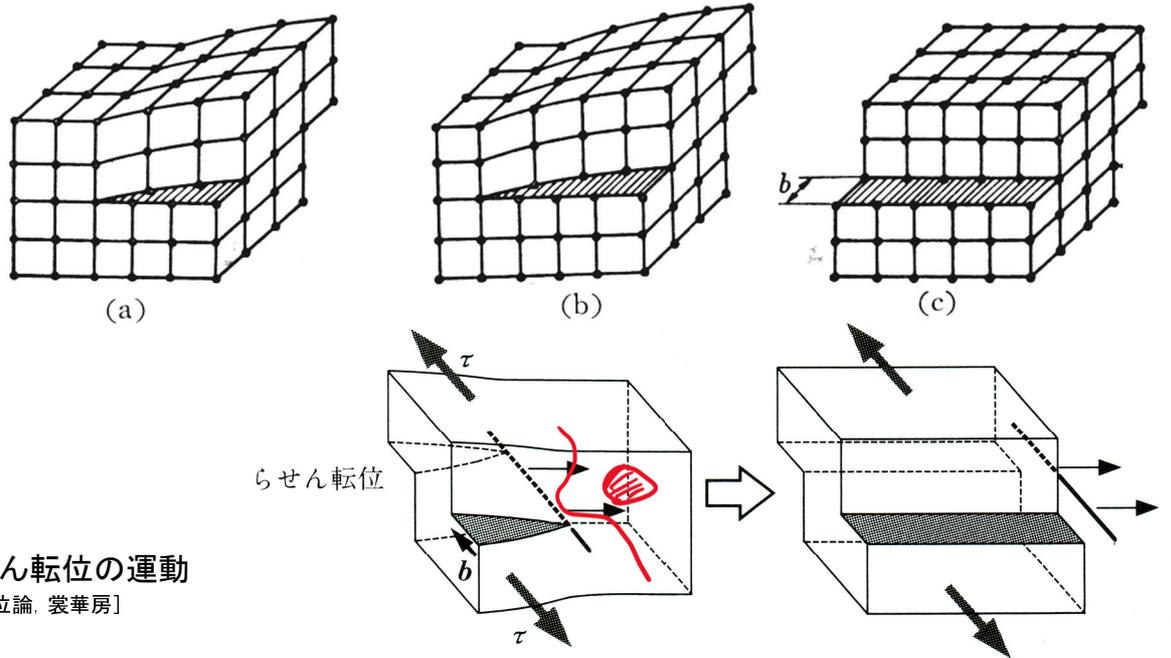


図 5.4 らせん転位の運動

[入門 転位論, 裳華房]

●転位の運動のまとめ

- ・刃状転位: 転位線の運動方向と原子の移動方向  
(=バースベクトル) が平行(同一)
- ・らせん転位: 〃 が垂直(同一ではない)
- ・いずれの転位でも... 通過後にすべり面の上下でバースベクトル分の原子の移動がはいる

すべり面上の原子が全て揃って移動した状態と同一。

### 5.3 転位の特徴

① 転位周辺において力の作用が働く

・例: 刃状転位

→ 余分の半原子面が存在する上側  
は水平方向の圧縮応力が、  
下側には引張応力が作用する。

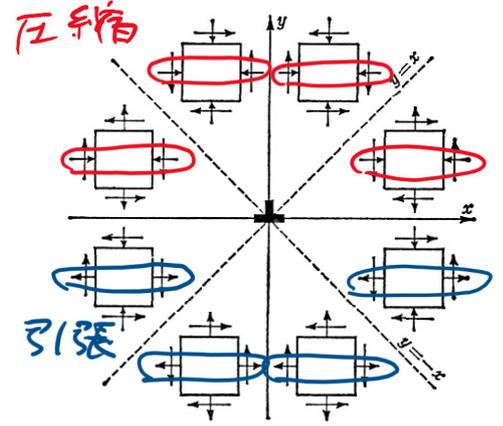


図 5.5 刃状転位周辺の応力場  
[金属材料工学 改訂・SI版, 森北出版]

② 転位は伸縮する

・決して直線形状のみではない

→ 転位の伸び長にはエネルギーが必要となる。

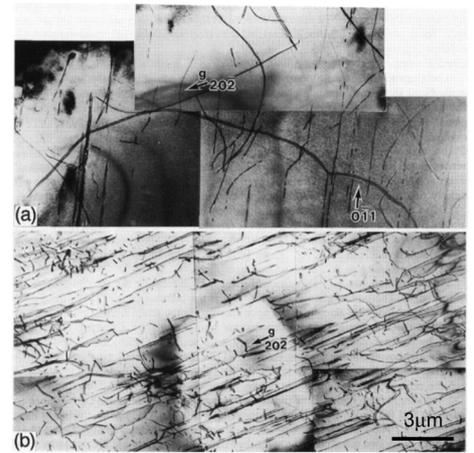


図 5.6 転位の透過電顕画像

③ 転位は増殖する

・転位の伸び: 転位密度の増加

単位体積あたりに  
存在する転位の  
総長さ

・代表的な転位増殖機構: フランクリード源

塑性変形の進行に伴い、転位密度は  
増加する。

④ 転位同士で相互作用が働く

・正の刃状転位が同一すべり面上にある場合

→ 反発し合う

・正の刃状転位が異なるすべり面上にある場合

→ 上下の配列になるよう  
引き寄せ合う。

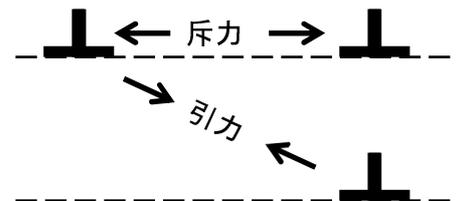


図 5.7 転位同士の相互作用

5.4 パイエルス応力

●パイエルス応力：転位の運動に対して、結晶が示す抵抗

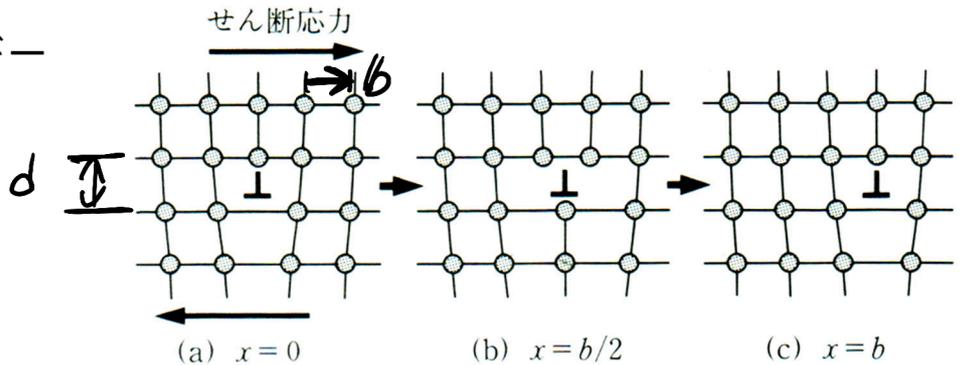
結晶中の転位運動に必要なせん断応力の理論値

・転位芯の部分のエネルギー

変化に着目

$d$  : 原子間距離

$b$  : バーガースベクトル



● 転位の周囲の原子配列の相違

・ 転位のポテンシャルエネルギーの本質

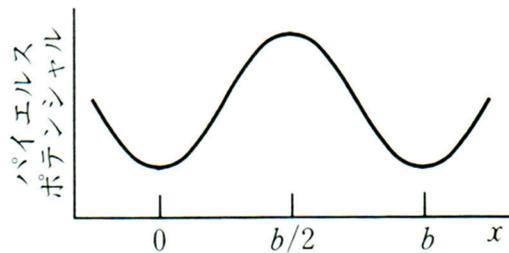


図 5.8 パイエルス応力の概念  
[入門 転位論, 裳華房]



周期的ポテンシャルエネルギーの変動  
「ハイルスポテンシャル」

● 転位が (b) の状態を乗り越えるためのエネルギーを外力が供給する必要がある。

→ 必要なせん断応力：パイエルス応力

$$\tau_p = \frac{2G}{1-\nu} \exp \left\{ -\frac{2\pi d}{(1-\nu)b} \right\}$$

e<sup>x</sup> 4

G : せん断弾性係数  
ν : ポアソン比

- ・例題:  $G = 80.0 \text{ GPa}$ ,  $\nu = 0.300$ ,  $d/b = 1$  としたときのパイエルス応力  $\tau_p$  を求めよ. また理想変形強度(第3回で説明)  $\tau_{\max} = G/(2\pi)$  も併せて求め,  $\tau_p$  と比較せよ.

$$\tau_p = \frac{2 \times 80.0}{1 - 0.300} \cdot \exp \left\{ -\frac{2\pi}{(1 - 0.300)} \cdot 1 \right\}$$

$$= 0.02889 \text{ GPa}$$

$$= \underline{28.9 \text{ MPa}},$$

$$\therefore \frac{\tau_p}{\tau_{\max}} = 0.00227 \dots$$

$$\approx \frac{1}{439}$$

$$\tau_{\max} = \frac{80.0}{2\pi} = 12.73 \text{ GPa}$$

$$= \underline{1.27 \times 10^4 \text{ MPa}},$$

## 5.5 第5回講義に関する意見・感想・質問のまとめ

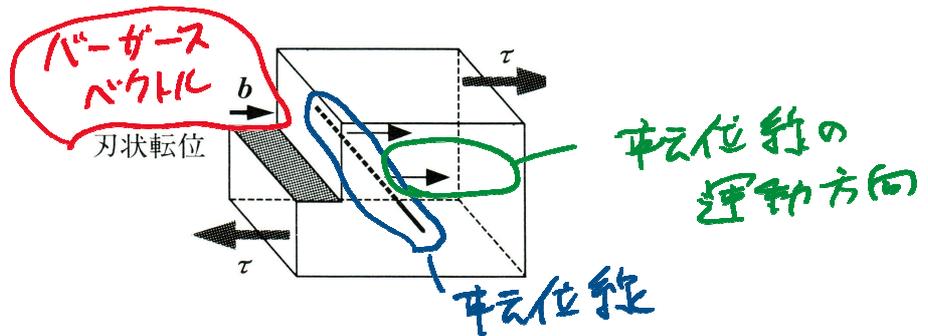
### ●意見・感想

- ・転位の運動が図で説明されていてわかりやすかった, 刃状転位とらせん転位について今回の講義でクリアになった, パイエルス応力について理解できた, 既存の知識から本格的な材料組織へ移ったと認識できる内容だった, 転位がどのように移動するのかが理解できた, 転位同士の相互作用について説明を聞いて納得した, 説明がわかりやすかった, 転位の特徴について理解できた, :20
- ・転位が色々混ざってわからなくなりそうなので整理する, パイエルス応力に関する理解が不十分なので復習する, 転位に関する新たな専門用語が多く出てきたので整理する, 内容が複雑になってきたのでしっかり復習する, 転位同士の相互作用について直感的に理解するのが難しかった, パイエルス応力の式を正しく覚えたい, パイエルス応力の式を理解するのが難しかった:11
- ・小テストは対策をすれば解けた, 毎回の小テストはHPから勉強すればある程度解けていると感じる, 小テストでフックの法則の復習ができた, 次々回くらいから参考問題がなくなるので復習の時間を増やす必要がある, 小テストに思った以上に時間がかかり間に合わなかったので次回からはHPを見て確実に学習しておく:5←今回の小テストは平均6.5点, 満点28名でした. 第2回以降, 少しずつですが平均点も満点の人数も増加傾向にあります. ちゃんと勉強をする人が増えている, ということでしょう.
- ・関数電卓でのexpの使い方に慣れておく必要がある, 関数電卓で $e^x$ の出し方がわからなかった, 関数電卓の機能を使いこなすのが難しかった:3←これは本当に大事で, せっかく買った自分の関数電卓なのですからちゃんと説明書を読んで使い方をマスターしておいた方がいいです.
- ・刃状転位を表す記号が垂直記号にしか見えなかった, 刃状転位の記号の意味がわかりスッキリした:2
- ・小テストにて断面積Aを $\pi d^2/4$ とおいて文字式を変形してから計算すればもっと楽にできた, 次回も頑張る, 内容理解が難しくなっているので復習する, バーガスベクトルがよくわからなかった, 小テストで時間が足りなくなった, 小テストで回りくどいことをしてしまったので復習する, 転位について徐々に理解できてきた, とてもわかりやすかった, 語句理解に努める, 新しい計算式を小テストでもできるようにする, 転位の図がわかりやすかった, バーガスベクトルの復習になった←再履修の皆さん, 引き続き頑張ってください!ただ毎回「わかりやすかった」と書くわりには点数が取れてない人は, どうなってるのかなと正直不思議に思っちゃいますが.
- ・授業速度はちょうどよかった
- ・最後の例題の有効数字が3桁であるとわかり安心した
- ・期末試験についても少しずつ復習していく←まだ1月以上先ですが, それくらい計画的に勉強できればバッチリでしょうね.
- ・少しスライドの速度が早くてノートに書けない部分があった←そういう時のためのwebアップロードです!
- ・途中の演算が苦手なのでクリニックに行く←「クリニック」とは何でしょう?計算専門で練習できるようなところがあるのか, それとも本当の意味のクリニックなのか?
- ・段々と有効数字の計算ができるようになってきた←それは良かったです!
- ・原子もずれたりするのだなと思った←素直な感想ありがとうございます.
- ・材料力学で使われている公式がここでも使われていることに気づいた←マクロでもマイクロでも, 「応力」の考え方は同一で重要です.

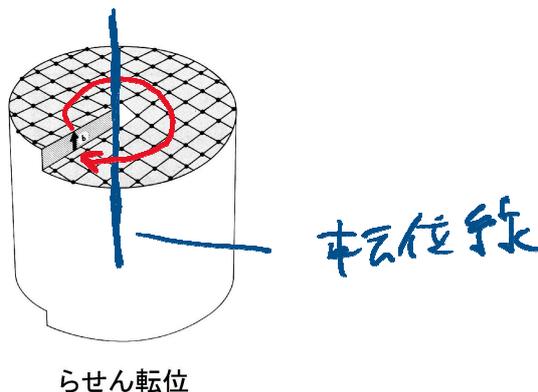
### ●質問

- ・転位が具体的な材料にどのように作用するのか?←何回も説明していますが, 転位の運動が介在して材料内の原子の移動(=塑性変形)が進行します.

- ・図 5.2 の転位線にあたる線が  $S$  というベクトルになっているがこれは何なのか？ ←これはご指摘の通り転位線を表しています。転位線はベクトルではないので本来は矢印をつける必要はないですが、ここでは強調するために付けられたものと思います
- ・ $\tau_p / \tau_{max}$  が何を表しているのか？ ←比を出すことによる両応力の比較です。
- ・電卓での計算で小数ではなく分数で答えが出る時があるが分数での解答も可か？ ←一般的な電卓の機能として、「分数モード」と「小数モード」の切り替えが可能はずです。マニュアルを見て、小数モードに切り替えておいてください。
- ・期末試験の難易度は小テストと同程度か？ ←小テストには出さない記述問題も多少加えますが、基本的には同程度です。
- ・小テストや期末試験のテスト勉強は、配布プリントを復習する以外に何か問題を出すか？ ←出しません。
- ・転位がどのようなときに発生するのか？ ←そもそも金属が固体化(凝固)する過程で既に結晶内の欠陥として導入されます。
- ・web の記入済みファイルが重すぎてスマホだとエラーが出るのは仕様か？ ←またこれですか・・・うんざりですね。どうせここも見えてないんでしょうから、次回の講義の冒頭に口頭で説明します。
- ・「刃状転位は転位線とバーガスベクトルが垂直」というのと「刃状転位は転位線の運動方向とバーガスベクトルが平行」というのは何が違うのか？ ←「転位線自体」と「転位線の運動方向」の違いがわかりませんか？



- ・らせん転位の説明で「回転していく」がわからなかった ←転位自体が回転していくのではなく、転位線回りを辿って1周すると想定してみると原子のずれが1段発生している、その構造がらせん階段のように見える、という説明をしました。



## 5.6 第4回小テスト解答

- Q.1 ヤング率  $E = 70.0 \text{ GPa}$ , 元の長さ  $l_0 = 100.0 \text{ mm}$  の丸棒が垂直荷重  $700.0 \text{ N}$  で引張られるとき, 生じる伸びを  $\lambda = 1.00 \times 10^{-2} \text{ mm}$  以下に抑えるためには, 直径  $d \text{ [mm]}$  をどれくらいにすれば良いか求めよ. [10点, 部分点あり]

A.1 
$$\sigma = \frac{W}{A_0} = \frac{W}{(\pi d^2)/4}, \quad \varepsilon = \frac{\lambda}{l_0}, \quad \sigma = E\varepsilon, \quad \text{よって} \quad \frac{4W}{\pi d^2} = E \frac{\lambda}{l_0} \Rightarrow \lambda = \frac{4W}{\pi d^2} \cdot \frac{l_0}{E}$$

ここで,  $W = 700.0 \text{ N}$ ,  $l_0 = 100.0 \text{ mm}$ ,  $E = 70.0 \text{ GPa} = 70.0 \times 10^3 \text{ MPa} = 70.0 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$ ,  
また伸び  $\lambda < 1.00 \times 10^{-2} \text{ mm}$  …上式に代入

$$\therefore 1.00 \times 10^{-2} > \frac{4 \times 700.0}{\pi d^2} \cdot \frac{100.0}{70.0 \times 10^3}$$

$$d^2 > \frac{4 \times 700.0}{\pi \times 1.00 \times 10^{-2}} \cdot \frac{100.0}{70.0 \times 10^3}$$

$$d > 11.283\dots = 11.3 \quad (\text{有効数字 3 桁}) \dots d \text{ を } 11.3 \text{ mm 以上に}$$

## 参考問題

- Q. 転位と金属材料の強化機構について述べた以下の文章において、空欄[ A ]～[ J ]に当てはまる語句を答えよ。[FとGは順不同, 各1点]
- a) 転位は結晶中の[ A ]欠陥の一種である。せん断応力による原子の移動(=[ B ]変形)において、[ C ]面上の原子が全て同時に移動するのではなく、転位の運動を介した原子の逐次的移動が生じる。
- b) 転位を介した原子の逐次的移動により、通常の金属材料では[ D ]強度の数百～数千分の一の応力で[ B ]変形が進行する。
- c) [ E ]とは転位による原子配列の乱れの中心であり、原子が既に移動した部分とまだ移動していない部分の境界を示す。またバーガースベクトルとは、転位の運動によって生じる原子の移動の[ F ]と[ G ]を表すベクトルである。
- d) 転位の特徴として、①周辺と[ H ]の作用が働く、②運動に伴い伸縮や[ I ]をする、③転位同士の[ J ]が働く、といった点が挙げられる。

## 解答欄

A _____	B(2箇所) _____
C _____	D _____
E _____	F _____
G _____	H _____
I _____	J _____