

機能性材料評価学特論 第 12 回

前回：計装化押込み試験による材料特性評価理論
(その 5, 可変 ε 係数補正および半径変位補正について)



今回：計装化押込み試験による材料特性評価理論
(その 6, 押込み寸法効果について)

9. 計装化押込み硬さ試験による材料特性評価理論 (その6)

“Indentation Size Effects in Crystalline materials: A Law for Strain Gradient Plasticity”, W. D. Nix and H. Gao, J. Mech. Phys. Solids, 46(3) (1998) 411-425

9.1 要約

●結晶性材料において観察される「押込み寸法効果(Indentation Size Effect, ISE)」について、「幾何学的に必要な転位(Geometrically Necessary Dislocation, GN 転位)」の概念を用いて理解できることを示した

・ ISE を言い述べるモデルとして以下の式と導出した。

$$\frac{H}{H_0} = \sqrt{1 + \frac{h^*}{h}}$$

H : 与えられた深さ h における硬さ。
 H_0 : 無限深さでの硬さ。
 h^* : 圧入形状やせん断弾性係数、 H_0 に依存する特徴長さ。

・ 状態の異なる金属やその他の材質の言式実験結果が上式により一致することを示した。

9.2 「GN 転位」とは？

- Q. {
- 塑性変形のメカニズムに伴う転位密度の変化
 - 結晶粒界が転位運動に及ぼす影響
 - 塑性変形は転位の運動に伴って進行する
 - の進行により転位密度は増加する (転位の伸長や増殖)
- A. {
- 多結晶の場合、すべり系が異なる隣接結晶粒に転位は移動できない

↓
 粒界近傍での転位の集積
 → 多結晶材料において、個々の結晶の塑性変形の程度や方向は異なるため、全体としての変形と、の不連続性が生じてしまう。

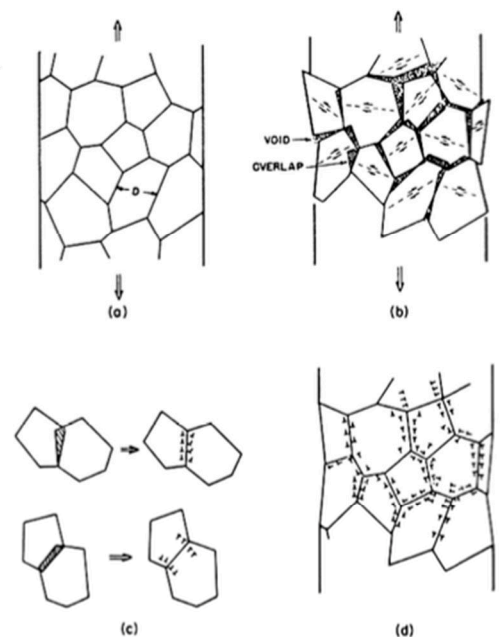


図 9.1 GN 転位の概念

9.2(続き)

- この不連続性を解消するため： $\downarrow$ 粒界近傍では局所的な塑性変形 (ひずみ勾配) が存在し、
「GN転位」 $\leftarrow$ それと対応して局所的な転位の集積があると考え。

9.3 本論文におけるモデル

- 焼きなまし済(111)単結晶銅および冷間加工済多結晶銅に対する押込み試験
結果 (バーコビッチ圧子)

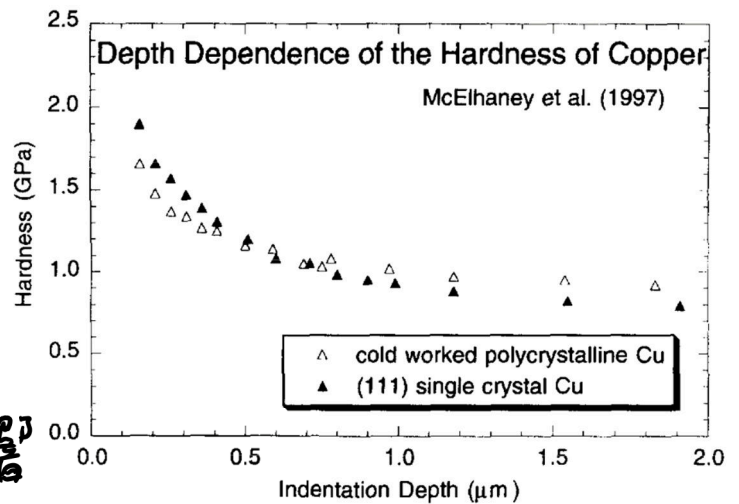


図 9.2 押込み寸法効果

- ・ 圧子と言試片間の接触面積について

- パイルアップ・シンラインの影響は考慮されている。
→ 接触面積決定に伴う誤差では無い $\downarrow$

実際の材料挙動が原因

- GN転位を用いてISEを記述するためのモデル

- ・ 剛性円錐圧子による押込み
・ 押込みによる塑性変形が、表面に垂直なバーガースベクトルを持つループ下のGN転位によりなされると仮定
・ 圧子と表面のなす角： θ
接触半径： a
圧痕深さ： h

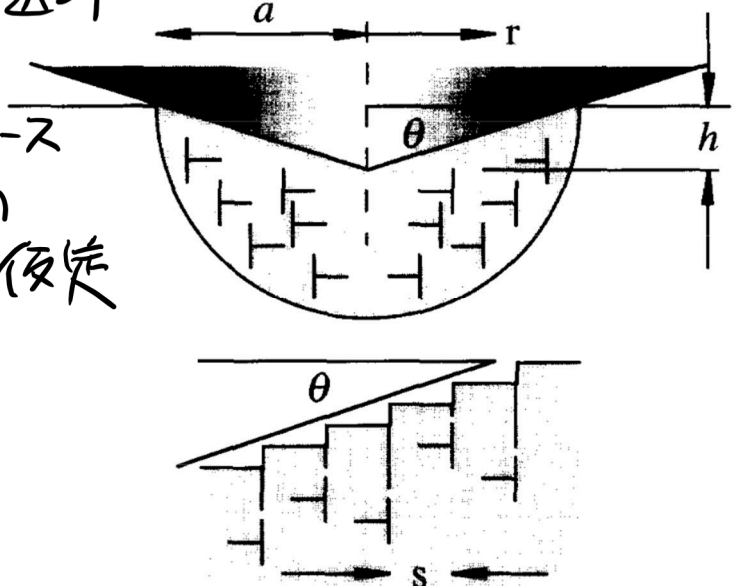


図 9.3 押込みによるGN転位形成モデル

9.3(続き)

- ・もし個々の転位ループが表面に沿って等間隔 S で存在していると仮定

$$\tan \theta = \frac{h}{a} = \frac{b}{S} \rightarrow S = \frac{ba}{h} \quad \dots (1)$$

- ・塑性変形領域内の全 GN 転位長さ: λ

$$d\lambda = 2\pi r \frac{dr}{S} = 2\pi r \frac{h}{ba} dr \quad \dots (2)$$

$$\lambda = \int_0^a \frac{h}{ba} 2\pi r dr = \frac{\pi cha}{b} \quad \dots (3)$$

- ・塑性変形領域: 接触半径 a で定義される半球の体積 $V = \frac{2}{3}\pi a^3 \quad \dots (4)$

$$\text{GN 転位密度 } \rho_G = \frac{\lambda}{V} = \frac{3}{2} \frac{h}{ba^2} = \frac{3}{2} \frac{1}{bh} \tan^2 \theta \quad \dots (5)$$

- ・せん断応力 τ と転位密度の関係 (ペイリーハーシュの関係):

$$\tau = \alpha \mu b \sqrt{\rho_T} = \alpha \mu b \sqrt{\rho_G \rho_s} \quad \dots (6)$$

α : 定数

b : バーガーズベクトル

μ : せん断弾性係数

「統計的に蓄積した転位
(SS転位)」

↓
局所的なGN転位とは
異なり、全体的な塑性
変形に関する転位。

- ・垂直応力とせん断応力の関係 (von Mises の関係):

$$\sigma = \sqrt{3} \tau \quad \dots (7)$$

- ・硬さと垂直応力 (引張強さ) の実験的關係:

$$H = 3\sigma \quad \dots (8)$$

- 式(5)~(8)より次式(9)が求まる

$$\frac{H}{H_0} = \sqrt{1 + \frac{h^*}{h}} \quad \dots (9)$$

ここで $H_0 = 3\sqrt{3} \alpha \mu b \sqrt{\rho_s} \quad \dots (10)$

$$h^* = \frac{\sigma}{2} b \alpha^2 \tan^2 \theta \left(\frac{\mu}{H_0} \right)^2 \quad \dots (11)$$

9.4 試験結果との比較

●図9.2のデータを式(9)の形式に従い $(H/H_0)^2$ と $1/h$ の関係としてプロットすると直線が得られる

→ 切片が1, 傾きが h^* と示す.

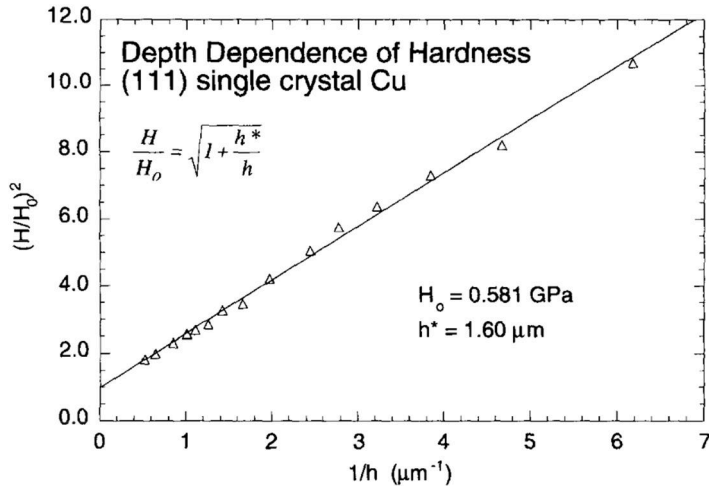


図9.4 式(9)の適用[(111)単結晶銅]

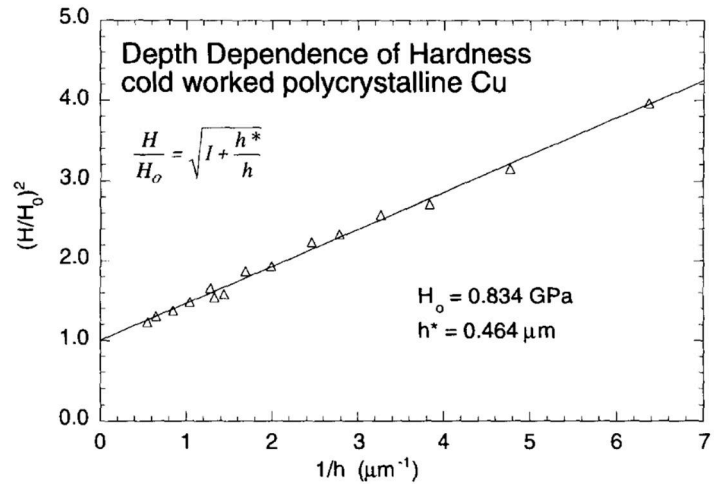


図9.5 式(9)の適用[冷間加工多結晶銅]

- ・ 約0.1 μm以下のデータ: 上図, および図9.2からも元々省かれている.
- 圧子先端形状の不確かさを排除するため.
- ・ いずれの試料においても、(9)式との一致を示した.

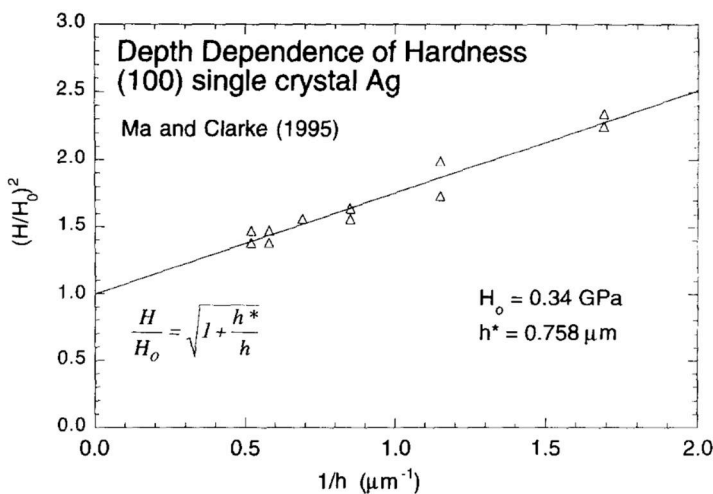


図9.6 式(9)の適用[他者, (100)単結晶銀]

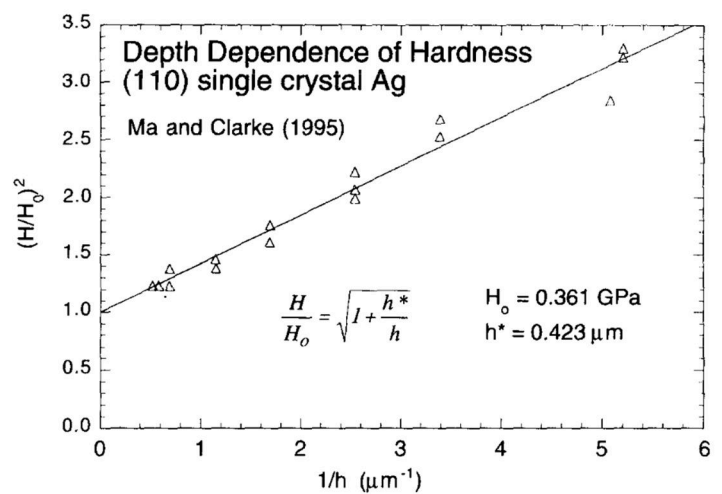


図9.7 式(9)の適用[他者, (110)単結晶銀]

- ・ 異なる材質の先行研究結果への適用
→ 良好な一致

9.4 (続き)

●このモデルにおける H_0 と h^* は式(11)により関連づけられる

→ H_0 が決定されたら、圧子形状による定数 α は、式(11)から h^* の予測値が求められる。

・本論文の押し込み試験の使用圧子(バーコビッチ圧子)の相当接触面積:

$$A_c = 24.5 h^2 = \pi a^2 \quad \dots (12)$$

・式(1)と(12)から: $\tan \theta = \frac{h}{a} = \sqrt{\frac{\pi}{24.5}} \div 0.358$

・式(11)に式(13)および既知の値を代入 → h^* の予測値を算出

表 9.1 h^* の測定値と予測値

Material	H_0 (GPa)	h^* (μm)	μ (GPa)	b (nm)	α	h^* (predicted) (μm)
(111) single crystal Cu (annealed)	0.581	1.60	42	0.256	0.5	1.73
Polycrystalline Cu (cold worked)	0.834	0.464	42	0.256	0.5	0.840
(100) single crystal Ag**	0.340	0.757	26.4	0.286	0.5	2.23
(110) single crystal Ag**	0.361	0.432	26.4	0.286	0.5	1.98

** Ma and Clarke (1995).

・ (111) 単結晶銅ではますます一致、しかし他の結果ではかなりの差が見られた。
→ α の値の影響

● H_0 が高い材料 (材料の本質的硬さが高い) の場合:

式(11)より, h^* が小さくなる

↓
GN転位による石炭の増分
(式(9)石炭)が1に近づく

↓
押し込み寸法効果は発現しない。

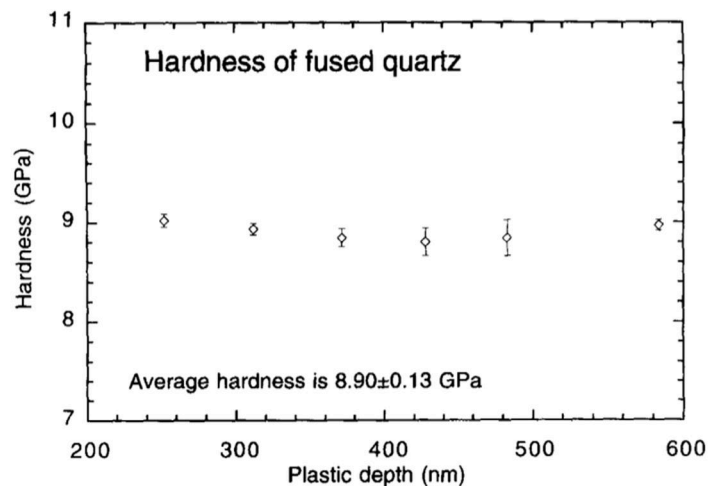


図 9.8 溶融石英の硬さにおける押し込み寸法依存性