

材料評価学 第9回

- 前回：
- 硬さ試験における
 - ・ロックウェル硬さ試験
 - ・硬さ換算表
 - ・硬さ値と機械的特性の関係



- 今回：
- 硬さ試験における
 - ・計装化押し込み試験

9. 硬さ試験 3

8.5 計装化押し込み試験

- 「ナノ・インデンテーション」とは? :
 - ごく微小な領域に対する、ごく微小な荷重による押し込み (石工) 試験、およびその結果から材料特性の評価。

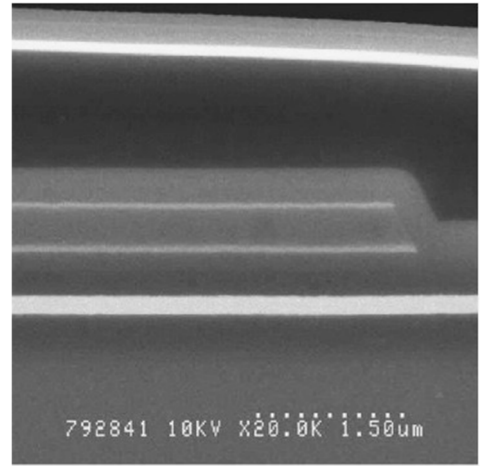


図 9.1 有機 EL 回路の断面 SEM 写真

●機能性デバイス/材料の開発とその材料特性評価の必要性

- 例①: nm ~ μm レベルの機能性薄膜
- 例②: 微粒子 (μm レベル) を分散強化させた複合材料

- ・ 一般的な材料特性評価試験 (引張試験) では評価不可能
- ・ 従来の石工試験 (ブリネル・ビッカース) でも評価は困難

- ① 押し込み対象領域が小さすぎる (荷重が不適合)
 - 微小領域のみの特性と抽出することが難しい
- ② くぼみの光学的観察が困難
 - 電子顕微鏡を使用すれば可能だが手間がかかる。

- 圧子にかかる試験力、およびそれにより圧子が材料に押し込まれる深さ (押し込み深さ) を計測し、そのデータ (押し込み曲線) から材料特性評価を行う ... 「計装化押し込み試験」

9.2 計装化押込み試験の国際規格

- ISO14577; "Metallic materials—Instrumented indentation test for hardness and materials parameters"

- ・ T1・インデントーションに限らず、幅広い試験余力・深さ範囲に対応
- ・ 硬工に限らず、他の機械的特性値も評価可能
- ・ 2002年に規格化(2015年に改訂)

表 9.2 ISO14577 で使用される記号一覧

表 9.1 ISO14577 の適用範囲区分

	試験力	押し込み深さ
ナノレンジ	—	< 0.2 μm
マイクロレンジ	< 2 N	0.2 μm <
マクロレンジ	2 N <, < 30 kN	—

h	押し込み深さ
h_c	F_{max} 時の接触深さ
h_{max}	F_{max} 時の最大押し込み深さ
h_p	除荷後の永久くぼみ深さ
h_r	F_{max} 時の除荷曲線の接線と押し込み深さ軸との交点
$A_p(h_c)$	深さ h_c 時の圧子の接触投影面積
$A_s(h)$	深さ h 時の圧子の表面積
E_{IT}	押し込み弾性率
H_{IT}	押し込み硬さ
HM	マルテンス硬さ

・ 問い: 計装化押し込み試験方式によるメリットは?

- ・ 個人誤差が入らない。
- ・ 他の特性値と硬工を関連づけやすい。
- ・ 自重力で交力率が良い。
- ・ T1・インデントーションに対応できる

9.3 計装化押し込み試験による硬さ評価

- 押し込み硬さ (Indentation hardness) H_{IT}

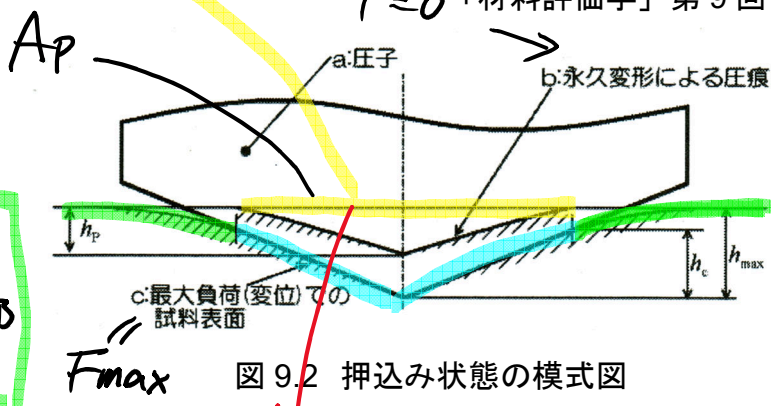
$$H_{IT} = \frac{F_{max}}{A_p} \quad \dots (1)$$

F_{max} : 最大試験余力 [N]
 A_p : 投影接触面積 [mm²]

注: H_{IT} は「単位面積あたりの力」の次元 (応力・圧力と同じ) であり、単位として Pa / MPa を用いる。

● 圧子の接触投影面積 A_p

・ 最大試験力 F_{max} 時に生じる変形



① 圧子と試験片の弾性接触による、圧子周縁部の弾性変形

② 試験片と圧子の接触部の塑性変形

・ F_{max} 時の「圧子と試験片が接触している領域」が永久変形(くぼみ)と対応している



の深さ: h_c 「接触深さ」

・ 「実際に圧子と試験片が接触している領域の変形」を基準として、次式で「実際に圧子と試験片が接触している領域の投影面積: A_p 」を求める。

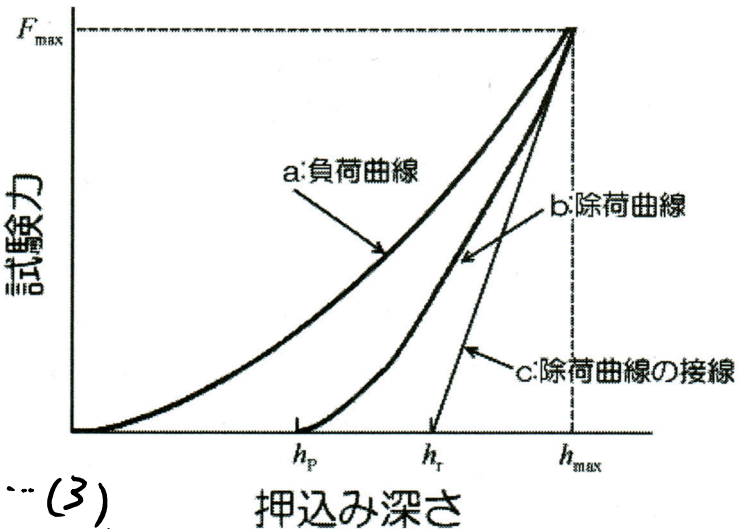
$$A_p = k \cdot h_c^2 \quad \dots (2)$$

k : 圧子形状による係数 (ピッカース正四角錐では24.50)

● 圧子の接触深さ h_c

・ 押し込み曲線から得られる h_{max} , (h_r) より下式から h_c を求める。

除荷曲線開始部の接線と横軸の交点、「接触深さ」



$$h_c = h_{max} - \epsilon (h_{max} - h_r) \quad \dots (3)$$

ϵ : 圧子形状による係数、ピッカース正四角錐では $\frac{3}{4} = 0.75$

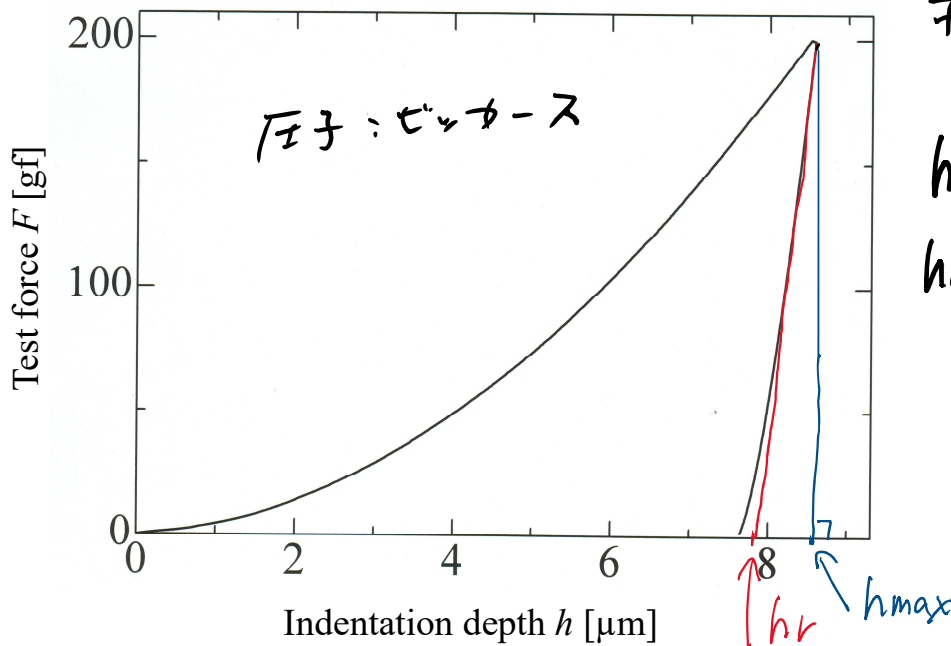
図 9.3 押し込み曲線の模式図

● H_{IT} 算出手順

- ① 手甲込の曲線から h_{max} , h_r , F_{max} 決定
- ② (3) 式より h_c 算出
- ③ (2) " A_p "
- ④ (1) " H_{IT} "

● $H_{IT} \rightarrow HV$ の換算式: $HV = 0.0945 H_{IT}$ (ビッカース圧子の場合)

例題: 図から h_{max} および h_r を読み取り, H_{IT} を算出せよ. また HV へと換算せよ.



$$F_{max} = 200.9 \text{ gf} \\ = \underline{1.96 \text{ N}}$$

$$h_r = 7.8 \mu\text{m}, h_{max} = 8.6 \mu\text{m}$$

$$h_c = h_{max} - \epsilon (h_{max} - h_r) \\ = 8.6 - \frac{3}{4} (8.6 - 7.8) \\ = 8.6 - \frac{3}{4} \times 0.8 \\ = 8.0 \mu\text{m} \\ = 8.0 \times 10^{-3} \text{ mm}$$

$$A_p = 24.50 \times h_c^2 \\ = \underline{1.568 \times 10^{-3} \text{ mm}^2}$$

$$H_{IT} = \frac{1.96}{1.568 \times 10^{-3}} = \underline{1250.89 \text{ N/mm}^2} = \underline{1.3 \times 10^3 \text{ MPa}}$$

$$HV = 0.0945 H_{IT} = \underline{118.125} = \underline{1.2 \times 10^2}$$

9.4 第9回講義に関する意見・感想・質問のまとめ

●意見・感想

- ・式がたくさん出てきたので復習する, 記号を間違えないよう覚える, HIT 算出の式をしっかりと定着させる, グラフの読み取りをしっかりと理解する, 補講で復習の間隔が狭いのでしっかりと行う, ただ式を覚えるだけにならないようにする, 今週も来週も週3で講義があるのでついていけるようにする, 理解が曖昧なところが多いので復習する, 図についても復習する:14←補講が2週連続になってしまい申し訳ないです…
- ・計装化押込みのメリットを学んだ, 硬さ試験それぞれに長所と短所があって興味深かった, HIT の求め方が面白かった, HIT 算出手順がかなり複雑, A_p が上から見た時の面積であるということを忘れない, 計装化押込み試験の有用性を理解した, HVとHITでの次元の有無がややこしい, 計装化押込み試験では塑性変形と弾性変形が同時に起こっているという話が面白く感じた:12←「同時に起こっている」という言い方は正確ではなかったですね, 順番としては必ず弾性変形の方が先に生じます. 言いたかったことは「押込み(負荷時)の変形には弾性変形と塑性変形が共に含まれている」ということです.
- ・語彙の問題でニュアンスが難しい問いが多くなっている, 小テストの点数が低い, 用語の問題で詰め甘さを感じた, 最近小テストがよくできてる気がする, 単位 MPa の問いなのに kgf/mm² で答えてしまった:8←今回の小テストは平均5.8点, 満点4名でした. 解答例にも記載したように, 問2で関係式の単位を取り違えている or 単位を記載していない人が非常に多く, それで満点が少なかったです.
- ・補講を危うく忘れかけていた, 講義室が変わっていることに直前で気づいた, 椅子が固かった, 講義室を間違えなくてよかった, 部屋が違って遅れそうになったので次からは確認する, 107 講義室だったがスクリーンが1枚だけだったので集中して授業を受けられた:7←私も一旦103に行ったらまだ人がいたので, そこで部屋変更を思い出しました…
- ・ミyakumiyak Tシャツが気になった, 万博に行った?:4←はい, 去年大阪で学会があったので寄りました!
- ・期末試験の勉強を早めにする, テストも近いので丁寧に勉強する:3
- ・実験で計装化押込みを行ったが今日の講義でより詳しく学べた, 実験で見た押込み曲線の見方を理解できた, 硬さ試験を実際にやってみたい:3
- ・急に暑くなった, 107 講義室に入った瞬間感じた空気で春夏の移り変わりを感じた:2←もうしばらく春を感じていたかったですね.
- ・先生の書く文字や図が大きくてきれいで見やすい, 図だけだと分かりにくかったが説明により理解できた:2←「字がきれい」とは客観的にはとても言えないとは思いますが(お気遣いありがとうございます), 少なくともちゃんと読める字を書こうとは思っています.
- ・接線を描くのが苦手←定規を使っても?
- ・他の人の発言を聞いて自分が思い付かなかった発想もありとても勉強になった←今後はぜひ自身でも!
- ・実験レポートが時間がかかることで机に向かう習慣が戻ってきた←いい習慣ですね!

●質問

- ・圧子の接触深さを求める式の係数はどうやって求めているのか, A_p や h_c がどうして(2)式や(3)式で求まるのかがわからない←これらの算出式は理論解析から導出されていますが, さすがにその説明は割愛しました.
- ・例題での丸めがわからなかった←有効数字(読み取った値)が2桁で, 計算式が乗除算なら答えは当然2桁になる, ということですが?
- ・全て計装化試験を導入すればよいのでは?←通常の硬さ試験機と計装化押込み試験機だと値段が一桁変わりますので, そうそう簡単には導入できません.

9.5 第8回小テスト解答

Q.1 ロックウェル硬さ試験について述べた次の文章中の、空欄に当てはまる語句を解答欄に記入せよ。[各2点, 計6点]

ロックウェル硬さ試験は、最初と最後の基準荷重の間の[(a)]の差を用いて硬さ値を算出する。利点として、圧子がある程度押込まれた状態を基準とするため、試料の[(b)]状態の影響を受けにくく、かつくぼみの観察を行わないことから[(d)]誤差の影響を回避できること、等が挙げられる。

A.1

(a)[くぼみ深さ(「押し込み深さ」は減点)] (b)[表面 or 仕上げ]
(c)[個人(「人的」「人為的」は減点)]

Q.2 焼入れした機械構造用炭素鋼 S45C に対してビッカース硬さ試験を行ったところ、 $HV = 244$ が得られた。ここで HV と σ_B の実験的關係を用いて、この材料の σ_B [MPa] を推定すると？ [4 点]

A.2 σ_B [MPa] = 3.3 HV より, $\sigma_B = 3.3 \cdot 244 = 805.2 = 805$ MPa

注: 単位の取り違えが非常に多い! [HV \cong 3 σ_B を MPa 単位として解答する, 等]