

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

●「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（硬さ）の試験、およびその結果からの材料特性評価法のこと。

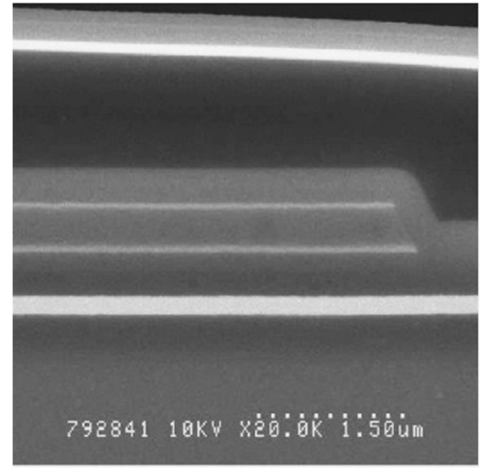
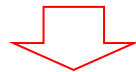


図 9.1 有機 EL 回路の断面 SEM 写真

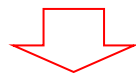
●機能性デバイス／材料の開発とその材料特性評価の必要性

例①: nm ~ μm レベルの機能性生薄膜

例②: 微粒子 (nm レベル) を分散強化させた複合材料



- ・ 一般的な材料特性試験（引張試験等）では評価不可能
- ・ 従来の硬さ試験（ビッカース、ロックウェル等）でも試験実施は困難

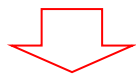


① 押し込み対象領域が小さすぎる

→ 微小領域のみの特性として抽出することが困難

② 仮に微小荷重で硬さ試験をしたとしても、くぼみの観察に手間がかかる

→ 電子顕微鏡による
可能性がメリットが
失われる



圧子にかかる試験力と押し込み深さを連続的に計測し、得られた「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"

- ・ +1. インデントーションに限らず、幅広い試験力に対応
- ・ 硬さ値に限らず、他の機械的特性値の言平価も可能 (押込み弾性率... ヤング率に相当)

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	押込み深さ
h_c	F_{max} 時の接触深さ
h_{max}	F_{max} 時の最大押込み深さ
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}	押込み弾性率
H_{IT}	押込み硬さ
HM	マルテンス硬さ

・問い: 計装化押込み試験方式によるメリットは?

- ・ 微小な試験力にも対応できる.
- ・ 個人誤差が少ない
- ・ 試験の自動化が可能 etc...

9.3 計装化押込み試験による硬さ評価

- 押込み硬さ (Indentation hardness) H_{IT}

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

F_{max} : 最大試験力 [N]
 A_p : 投影接触面積 (mm^2)

注: H_{IT} は SI 単位の「圧力・応力」の次元であり、
 単位として「Pa / MPa」を付ける。 (HV, HB とは異なる!)

●圧子の接触投影面積 A_p

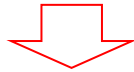
最大試験力 F_{max} 負荷に生じる変形の内部

① 試験片と圧子の接触部に生じる塑性変形 (図中b)

② 圧子と試験片の接触周囲部における弾性変形

実際に圧子と試験片が接触している領域の変形

上から



ビッカース
→ 接触面積

「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 : 圧子形状により決まる定数、ビッカース圧子は 29.50

●圧子の接触深さ h_c

h_c は押し込み曲線から得られるパラメータを用いた次式から求める。

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

ϵ : 圧子形状により決まる定数、ビッカース圧子は $3/4 = 0.75$

h_r : 除荷開始時の除荷曲線の接線と横軸の交点、「接触深さ」

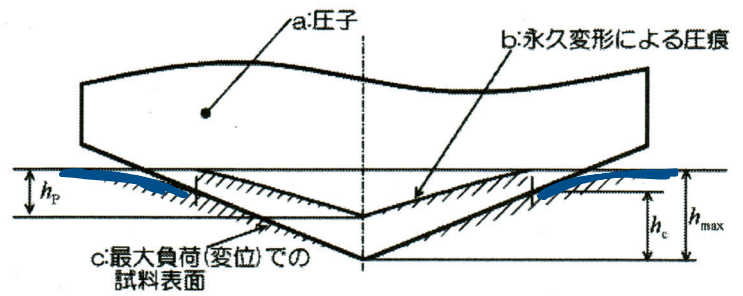


図 9.2 押し込み状態の模式図

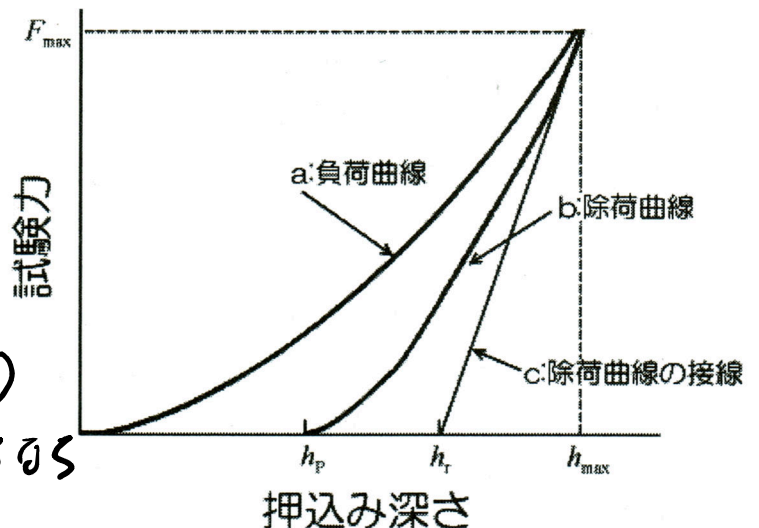


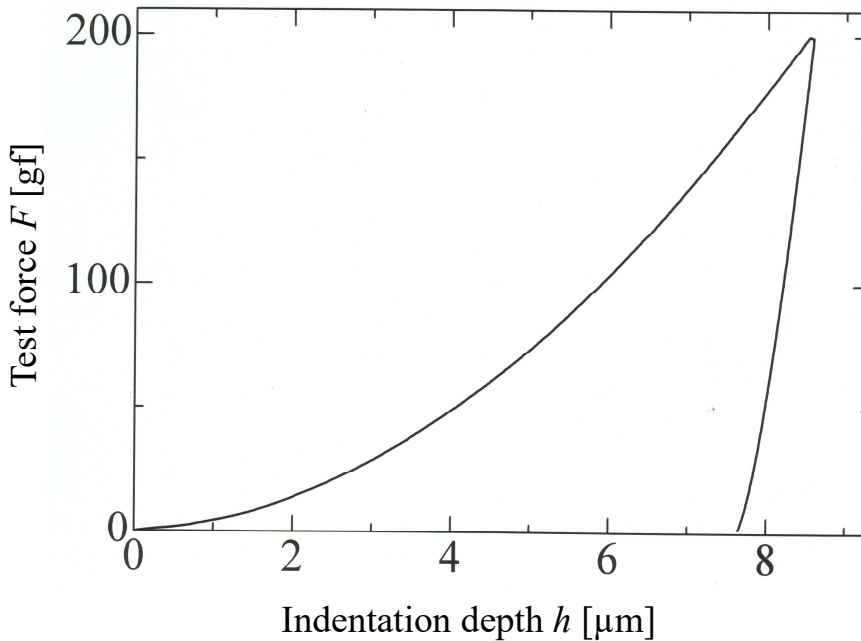
図 9.3 押し込み曲線の模式図

● H_{IT} 算出手順

- ① 押し込み曲線から F_{max} , h_{max} , h_r を求める。
- ② (3) 式より h_c 算出
- ③ (2) 式より A_p ..
- ④ (1) 式より 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。



$$F_{max} = 1.96 \text{ N}$$

横軸の最小目盛: $1 \mu m$

$$h_r = 7.8 \mu m$$

$$h_{max} = 8.6 \mu m$$

$$h_c = h_{max} - \varepsilon (h_{max} - h_r)$$

$$= 8.0 \mu m$$

$$= 8.0 \times 10^{-3} \text{ mm}$$

$$A_p = 24.50 \times h_c^2$$

$$= 1.568 \times 10^{-3} \text{ mm}^2$$

$$H_{IT} = \frac{1.96}{1.568 \times 10^{-3}}$$

$$= 1250 \text{ N/mm}^2$$

$$= 1.3 \times 10^3 \text{ MPa}$$

$$HV = 0.0945 \times 1250$$

$$= 118.125$$

$$= 1.2 \times 10^2 [-]$$

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

- ・式が色々出たのでしっかり理解する, HIT の算出方法やグラフの読み方を復習しておく, 用語の復習も行う, 覚えるべきところが多かったので復習に力を入れる, 記号がややこしいのでしっかり覚える, HIT と HV・HBとの違いを区別して覚えたい, 有効数字が不安なのでしっかり復習する, 単位が曖昧なので復習する:17
- ・公式に加えてグラフの正確な読み取りも重要であることを理解した, 計装化押込み試験のメリットを聞いて組み合わせることも重要と感じた, 計装化押込み試験について興味を持った, HIT の求め方がわかった, これまでの硬さ試験との違いについて理解できた, 実際に例題を解いてみることで理解が深まった気がする, 数値を求めた後に他の値に変換するので式を覚えるのが大変だ, 材料科学実験と関連のありそうな内容で面白かった, 実験レポートと同様の内容を学んで予習復習ができた:12
- ・小テストで毎回穴埋め問題で点数を落としてしまう, 難しくなかった, 完全ではなかった, 解きやすかった, 難しかった, 復習が足りなかったと実感した, 難易度は適切だった, 用語の穴埋めができなかった:11←今回の小テストは平均 7.7 点, 満点 17 名でした. 2 問目で何人かは HV と σ の関係式から算出していましたが, 設問はあくまで「換算表から求めよ」ですので, 減点としました.
- ・進行スピードはちょうど良かった, いつもより集中できた, 式や図の説明がわかりやすく理解しやすかった, スライドが見やすかった, 動画と例題の解説がわかりやすい, スライドの倍率によっていつもより見やすくなった, スクリーンの大きさはちょうど良かった:7←倍率を少し落としたことで見えにくくなったという人はおらず, 数名から見やすくなったという意見がありましたので, 次回以降も今回の条件で表示することとします.
- ・計算が長くなると計算ミスが起きやすいので注意する, 最後の例題で有効数字をミスしたので注意する, 目盛の読み取りと計算で有効数字が絡んでくるので注意する:3←有効数字については実験レポート等でも常に注意すべき点ですので, 普段から意識することが大事ですね.
- ・前回の事情について理解した←分かってもらえてよかったです.
- ・そろそろ期末試験に向けた勉強を始める←他の科目もあるでしょうから早めに始めておくのがいいですね.
- ・挙手して自分の考えを発表することができたので今後も積極的に授業に参加したい←ぜひ!

●質問

- ・圧子形状による定数はあったが圧子材質による影響は式に含まれないのか?←押し込み弾性率 EIT を求める式には圧子の弾性特性(ヤング率およびポアソン比)も式に含まれますが, 塑性特性の反映である押し込み硬さに関しては特に考慮しません.
- ・今回の小テストで HV と σ_B の関係式を用いても良いのか?←上でも書いたように, 問題で「換算表から求めよ」と書かれているのに関係式を使うのはおかしいですよ. ですので減点にしました.
- ・テストの際にフリーハンドで書いた接線で求めた値を使って計算しても良いか?←望ましくはないですが, 原理的に誤りが無い(接線の引き方や読み取り方)場合は減点にはしません.
- ・HV への換算式について HIT は MPa 単位のまま代入すると HV が kgf/mm² の値で出てくるのか?←その通りです. そのまま代入してください(もちろん求めた HV には単位は付けません).
- ・ビッカースの時 ε が $3/4$ となるのはどうしてか?←うーん, これは元々は円錐圧子を用いた押し込みの理論計算から得られた値ですので, それを解説するのは弾性論の理解も必要となるため授業では割愛しました. ちなみに円錐では $2(\pi-2)/\pi \approx 0.73$, フラットパンチ(円柱)では 1 となります.

- ・ ε や K は覚える必要があるのか問題で与えられるのか？ ← 少なくとも次回の小テストでは ε や K は問題で与えられていますが、HV への換算式の係数は覚えておく必要があります。
- ・ HV は整数値だが今回のように計算で求める場合は有効数字の表記を優先するのか？ ← HV そのものの値として小数位は表記しないということです。有効数字的な観点から指数表示にするのは問題ありません。
- ・ 最後の例題は桁落ちが生じて 1 桁になるのでは？ ← 以下の通りで、括弧内は確かに桁落ちしますが最後は減算ですので最小桁の位取りを合わせることになりますから、計算結果は 2 桁のままです。今一度有効数字の考え方を復習しておいてください。

$$h_c = h_{max} - \varepsilon (h_{max} - h_v)$$

$$= 8.6 - \frac{3}{4} (8.6 - 7.8)$$

$$= 8.6 - \frac{3}{4} \cdot (0.8)$$

$$= 8.6 - 0.6$$

とくに小数
第1位

$$= 8.0$$

2桁
小数第1位

1桁
減算 → 計算する値の最小桁の
位取りの下の方に答えの
最小桁を合わせる

9.5 第8回小テスト解答

Q.1 硬さ換算表について、空欄に当てはまる語句を解答欄に記入せよ。[各1点, 計4点]

硬さ試験においては、[(a)]の異なる様々な試験方式が存在するため、一律での比較は[(b)]である。そこで、同一の試験片に対してそれぞれの硬さ試験を実施し、得られた硬さ値を横並びにすることで便宜的にある硬さ値から他の硬さ値への[(c)]を可能としている。また、硬さの異なる試験片から得られた硬さ値を[(d)]にすることで、各硬さ試験における硬さ値の変化に対応可能となっている。

A.1

- (a)[定義, 定義式, 方式, 規格, 物理的意味 のいずれでも可] (b)[不可能 or 困難]
 (c)[比較, 変換, 換算 のいずれでも可] (d)[縦並び]

Q.2 炭素鋼試験片においてビッカース硬さ試験を行ったところ、 $HV = 304$ が得られた。この結果および以下の硬さ換算表から、引張強さ σ_B [MPa]へと換算せよ。[6点]

A.2 換算表の該当箇所より、 $\sigma_B = 950 + 4 / 10 \times 30 = 962$ MPa
 (関係式から算出した場合は-3点)

ビッカース硬さ	ブリネル硬さ 10mm球・ 荷重3000kgf		ロックウェル硬さ(2)				ロックウェルスーパーフィシャル硬さ ダイヤモンド円錐圧子			ショアラ硬さ	引張強さ (近似値) MPa (1)	ビッカース硬さ
	標準球	タングステンカーバイド球	Aスケール 荷重60kgf ダイヤモンド円錐 圧子	Bスケール 荷重100kgf 径1.6mm (1/16in)球 圧子	Cスケール 荷重150kgf ダイヤモンド円錐 圧子	Dスケール 荷重100kgf ダイヤモンド円錐 圧子	15 - N スケール 荷重15kgf	30 - N スケール 荷重30kgf	45 - N スケール 荷重45kgf			
320	303	303	66・4	(107・0)	32・2	49・4	76・2	52・3	33・9	45	1005	320
310	294	294	65・8	—	31・0	48・4	75・6	51・3	32・5	—	980	310
300	284	284	65・2	(105・5)	29・8	47・5	74・9	50・2	31・1	42	950	300
295	280	280	64・8	—	29・2	47・1	74・6	49・7	30・4	—	935	295
290	275	275	64・5	(104・5)	28・5	46・5	74・2	49・0	29・5	41	915	290
285	270	270	64・2	—	27・8	46・0	73・8	48・4	28・7	—	905	285
280	265	265	63・8	(103・5)	27・1	45・3	73・4	47・8	27・9	40	890	280
275	261	261	63・5	—	26・4	44・9	73・0	47・2	27・1	—	875	275
270	256	256	63・1	(102・0)	25・6	44・3	72・6	46・4	26・2	38	855	270
265	252	252	62・7	—	24・8	43・7	72・1	45・7	25・2	—	840	265