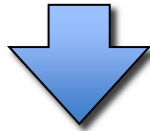


機能性材料評価学特論 第4回

前回：計装化押込み試験による材料特性評価理論
(その2, Oliver & Pharr 法について)



今回：計装化押込み試験による材料特性評価理論
(その2, Oliver & Pharr 法について) 続き

4. 計装化押し込み硬さ試験による材料特性評価理論（その2） 続き

(Oliver & Pharr 法の 1992 年の論文)

4.4 解析の新手法

●押し込み-除荷データより,

- ・ 除荷曲線は 線形ではなくベキ乗則に従う曲線形状である
- ・ 除荷剛性は一定ではなく連続的に変化している

- ・ フラットパッチでの近似 (Doerner & Nix) は適当ではない。

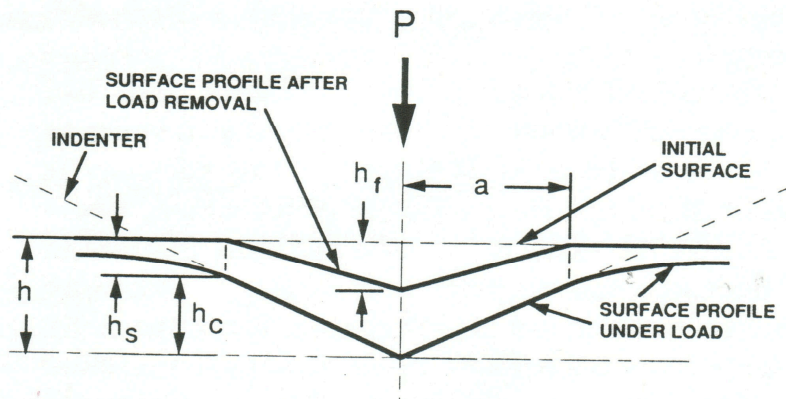


図 4.8 押し込み過程の模式図

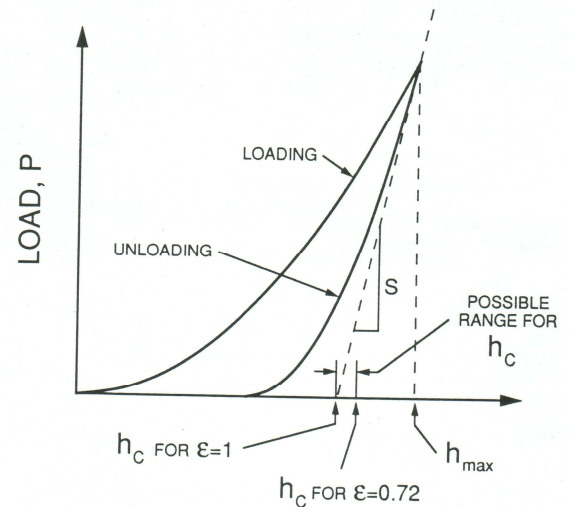


図 4.9 押し込み線図の模式図

$$h = h_s + h_c \rightarrow h_c = h - h_s \quad (6)$$

Sneddon の円錐圧子における弾性解を利用

$$h_s = \frac{\pi-2}{\pi} (h - h_f) \quad (7) \quad \text{and} \quad (h - h_f) = 2 \frac{P}{S} \quad (8)$$

- ・ (8)式を(7)式に代入、かつ 除荷の初期音Pに対応するh

$$\therefore h_s = \frac{2(\pi-2)}{\pi} \frac{P_{max}}{S} \quad (9) \quad h \rightarrow h_{max}, P \rightarrow P_{max}$$

圧子形状係数 ε とする。

$$\text{円錐: } \frac{2(\pi-2)}{\pi} = 0.72$$

$$\text{回転放物面 (球状含む): } 0.75$$

$$\text{フラットパッチ: } 1$$

$$\varepsilon=1 \text{ のとき, } h_s = \frac{P_{max}}{S} \rightarrow h_c = h_{max} - \frac{P_{max}}{S}$$

1 Doerner & Nix 論文における
 $h_{plastic}$ と同一の定義。

4.5 解析の実行

●圧子形状と除荷曲線近似の選択

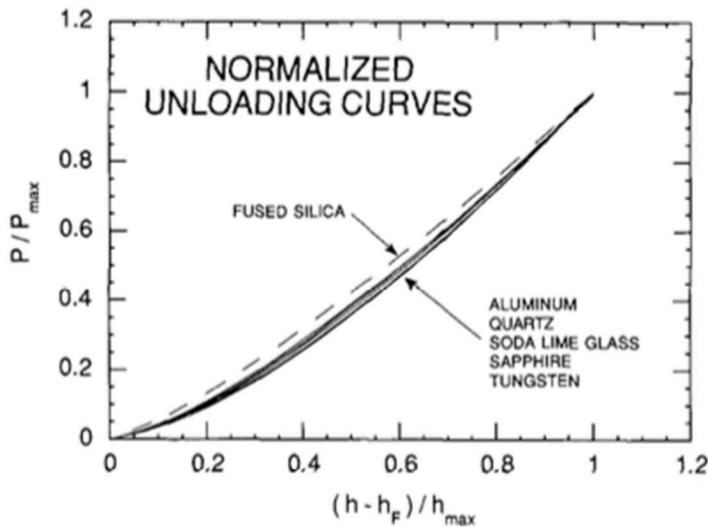


図 4.10 正規化された除荷曲線

本論文におけるその決定:
表2によるの結果から,
バーコック圧子の $m=0.75$
と決定.

表 4.3 圧子形状毎の各指数の比較

Punch geometry	ϵ	m
Flat	1	1
Paraboloid	0.75	1.5
Conical	0.72	2

・図 4.10 より, どの材料の除荷挙動も正規化
すればほぼ同一

・材料に応じて圧子を変える
必要はなく, 単一の圧子で
材料の除荷挙動を
表わせる.

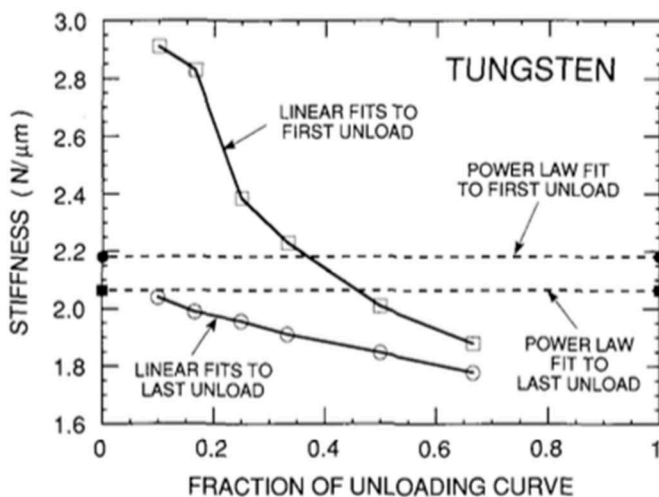
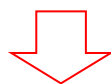


図 4.11 除荷曲線の直線近似とべき乗則近似の比較

・除荷曲線の近似方法

→ 線形近似(実線)では除荷
曲線の近似範囲や
負荷サイクルの回数
の違いで接触固り性
が大きく変化する.

→ ベキ乗則を用いる手法
では, 接触固り性の
変化はごく小さい.



ベキ乗則近似がより適切である.

● フレームコンプライアンスと圧子面積関数の決定

言式馬原才幾周リナ生 (荷重をうけたときの弾性変形のしにC2) の逆数、押込み言式馬原データに内包されている。

$$\text{測定される全コンプライアンス } C = \underbrace{\text{試験片と圧子の接触コンプライアンス } C_s}_{\text{弾性接触中の接触弾性率 } S \text{ の逆数}} + \text{試験装置のフレームコンプライアンス } C_f \quad (10)$$

$$S = \frac{dP}{dh} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} E_r \sqrt{A} \quad (11)$$

$$\therefore C = C_f + \frac{\sqrt{\pi}}{2E_r} \frac{1}{\sqrt{A}} \quad (12) \quad \dots \quad C \text{ と } \frac{1}{\sqrt{A}} \text{ のプロットは直線となり、y軸との切片として } C_f \text{ を決定できる}$$

・ 手順 ①: A 材料に対する 6 段階の荷重での試験実施

→ ②: (12)式と $A(h_c) = 24.5 h_c^2$ (理想的圧子形状), よって高荷重側 2 段階のデータを用いて C- $\frac{1}{\sqrt{A}}$ プロットを作成 → C_f の初期推定値

③: $A = \frac{\pi}{4} \frac{1}{E_r^2} \frac{1}{(C - C_f)^2} \quad (14) [(12) \text{式の変形}]$, よって全段階の荷重でのデータを用いて $A - h_c$ プロットを作成、そのプロットに対して

$$A = \boxed{24.5 h_c^2} + C_1 h_c^1 + C_2 h_c^{1/2} + C_3 h_c^{1/4} + \dots + C_8 h_c^{1/128} \quad (15)$$

の多項式近似を行い、圧子面積関数 $A(h_c)$ を決定する。

④ 得られた $A(h_c)$ を用いて、 C_f と $A(h_c)$ が収束するまで反復計算を行う。

⑤ 他材料データへの適用。

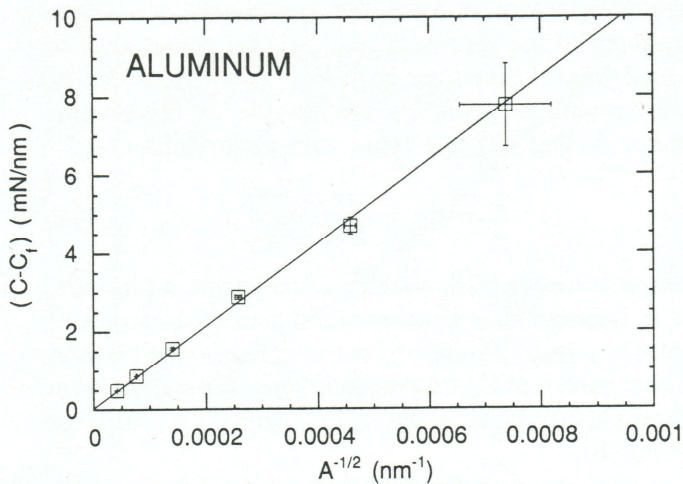


図 4.12 フレームコンプライアンス補正の検証

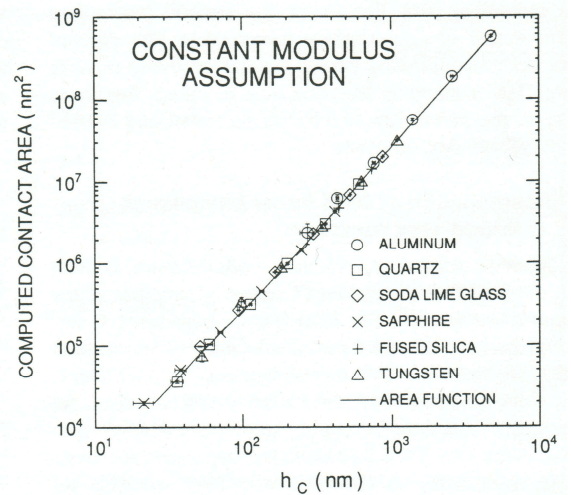


図 4.13 圧子接触面積関数の検証

- ・ 補正したコンプライアンス $(C - C_f)$ と $\frac{1}{A}$ のプロットが線形になった切片 0 となった。→ 適正な C_f である
- ・ 実験データから求めた接触面積と、本手法によって決定された面積関数は、材質も荷重にもよらず一致した。

●解析手法の妥当性の評価

①圧子接触面積関数

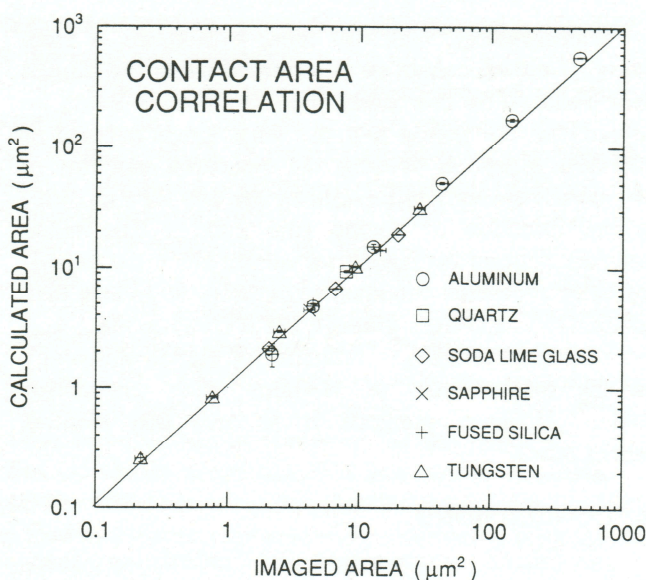


図 4.14 圧子接触面積と圧痕観察結果との比較

- ・ 圧痕の SEM 観察結果と本解析手法との比較：
材質・荷重によらず一致した。

②硬さ

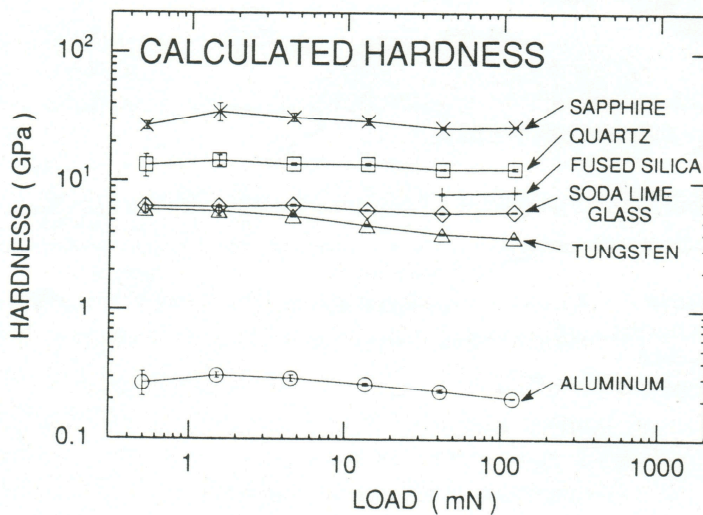


図 4.15 算出硬さ値と試験荷重の関係

- ・ アルミとタングステンで低荷重における硬度上昇が見られる。その他は押し込み寸法効果はほぼ見られない。

荷重低下 (= 押し込み深さや圧痕寸法の減少) に伴い、硬度が上昇する現象。

③弾性係数

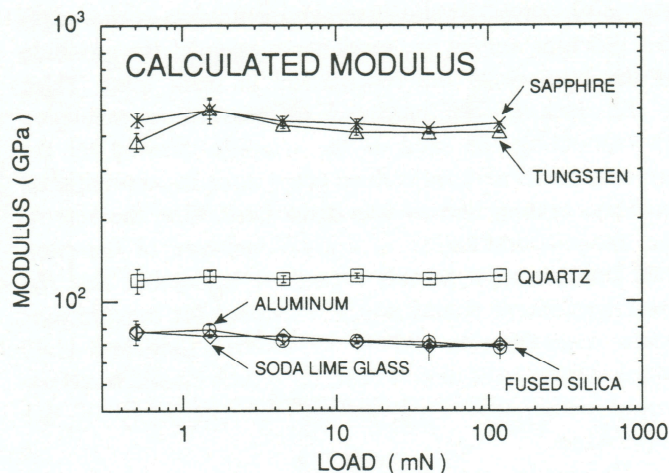


図 4.16 算出弾性係数と試験荷重の関係

- ・ 弾性係数は押し込み寸法効果はほとんど見られず、ほぼ一定値を示した。
- ・ 等方性材料 (Al, W, ガラス、石英) では文献値と 9% 以内の誤差、しかしセファイヤや水晶では 9~30% の誤差: 材料特性 (異方性) の影響?

表 4.4 算出弾性係数における弾性異方性の影響

Material	Experimental modulus (GPa)	Standard deviation (GPa)	Literature modulus (GPa)	Poisson's ratio	Reference
Aluminum	68.0	0.93	70.4	0.347	35
Quartz	124	0.54	95.0 (c-axis = 105)	0.077	35
Soda-lime glass	69.9	0.22	70.0	0.23	36
Sapphire	441	4.70	403 (c-axis = 499)	0.234	35
Fused silica	69.3	0.39	72	0.17	37
Tungsten	410	4.70	409.8	0.280	35