

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

● 押込み-除荷データより,

- ・ 除荷曲線は直線ではなく、ヘンリー則に従う曲線状である。
- ・ 除荷中の接触剛性は一定ではなく連続的に変化した。

||

- ・ フラットヘッドによる近似は適当ではない。

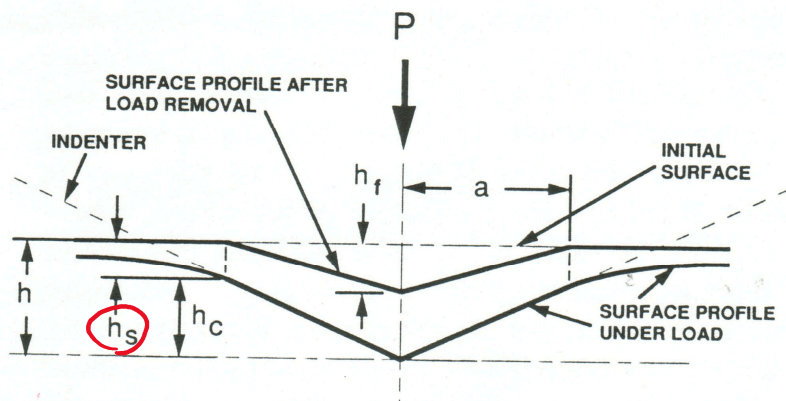


図 4.8 押込み過程の模式図

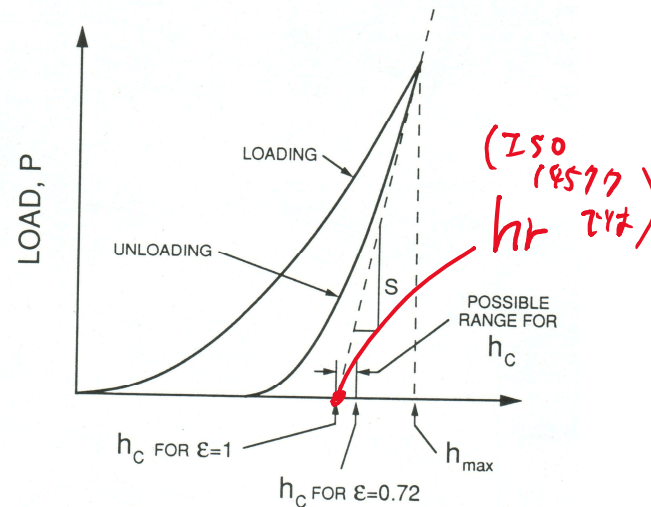


図 4.9 押込み線図の模式図

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

圧子の接触周辺表面の弾性変形 → 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)式と(7)式に代入, から除荷の初期挙動を導くため $h \rightarrow h_{\max}, P \rightarrow P_{\max}$ とする。

$$\therefore h_s = \frac{2(\pi-2)}{\pi} \frac{P_{\max}}{S} \quad (9)$$

圧子係数 ϵ , 円錐: $\frac{2(\pi-2)}{\pi} = 0.72$
回転放物面・球: $= 0.75$

$$\epsilon = 1 \text{ のとき } h_s = \frac{P_{\max}}{S} \therefore h_c = h_{\max} - \frac{P_{\max}}{S} \quad \text{フラットヘッド} = 1$$

4.5 解析の実行

●圧子形状と除荷曲線近似の選択

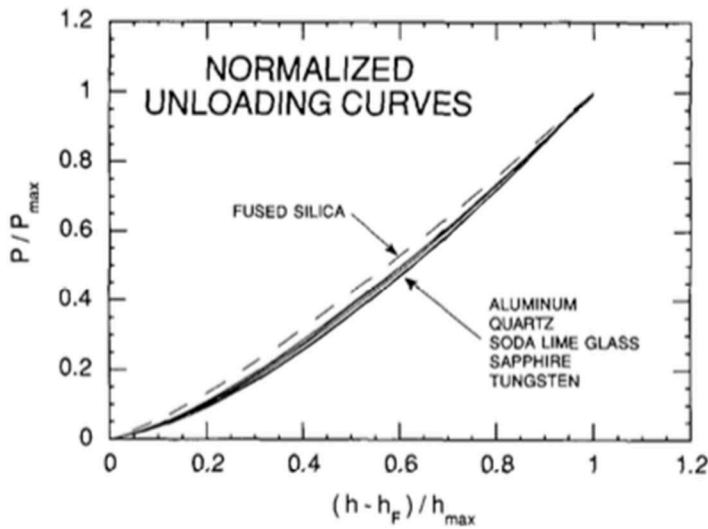


図 4.10 正規化された除荷曲線

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。

・本論文における使用圧子(角錐)の ϵ 値: 表 4.3 より、 m 値に基づき回転放物面の $\epsilon = 0.75$ を採用した。

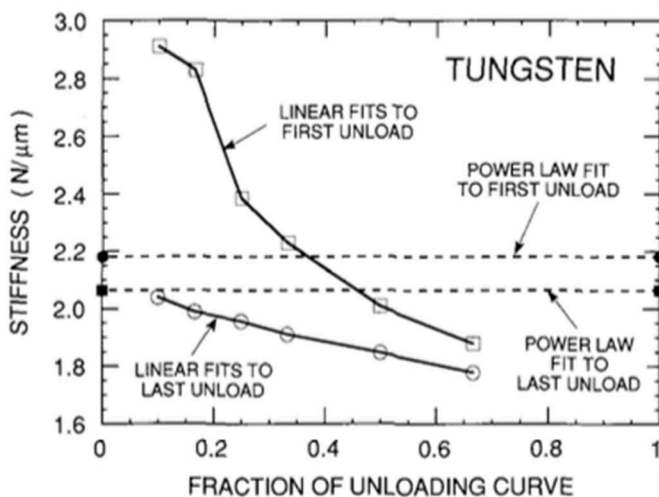


図 4.11 除荷曲線の直線近似とべき乗則近似の比較

・除荷曲線の近似方法

→ 線形近似(第 4 章)では除荷曲線の近似範囲や負荷サイクルの違いで接点剛性 S が大きく変化してしまう

→ べき乗則 $[P = A(h - h_f)^m]$ で近似し、 $P_{max} - h_{max}$ 時点で微分して求めた S は点線の値となる。

↓
べき乗則が適切。

● フレームコンプライアンスと圧子面積関数の決定

→ 試験片の機械的性質（荷重をかけたときの弾性変形に C に C_f ）の逆数、圧込みデータに反映している。

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

弾性接触中の接触面積 S の逆数 $\rightarrow S = \frac{dP}{dh} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} E \sqrt{A}$ (11)

$$\therefore C = C_f + \frac{\sqrt{\pi}}{2E_r} \frac{1}{\sqrt{A}} \quad (12) \quad \dots \quad C \text{ に対する } \frac{1}{\sqrt{A}} \text{ のプロットは直線となり、}$$

ゆえにこの切片として C_f が決定できる。

- ・ 手順 ①: Al 試験片に対する 6 段階の荷重による圧込み実験
- ②: (12) 式より $A(h_c) = 24.5 h_c^2 \dots (13)$ (理想的形状) において高荷重側 2 段階のデータを用いて $C - \frac{1}{\sqrt{A}}$ プロットを作成、切片から C_f 決定 (初期値)

③: $A = \frac{\pi}{4} \frac{1}{E_r^2} \frac{1}{(C - C_f)^2} \quad (14) [(12) \text{ 式の変形}]$ より全段階の荷重の試験データから、 $A - h_c$ プロットを作成、そのプロットに対して

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

の多項式近似を行うことで圧子面積関数 $A(h_c)$ を決定。

- ④ 得られた $A(h_c)$ を用いて ② → ③ を収束するまで繰り返し可。

＋
他材料データも適用

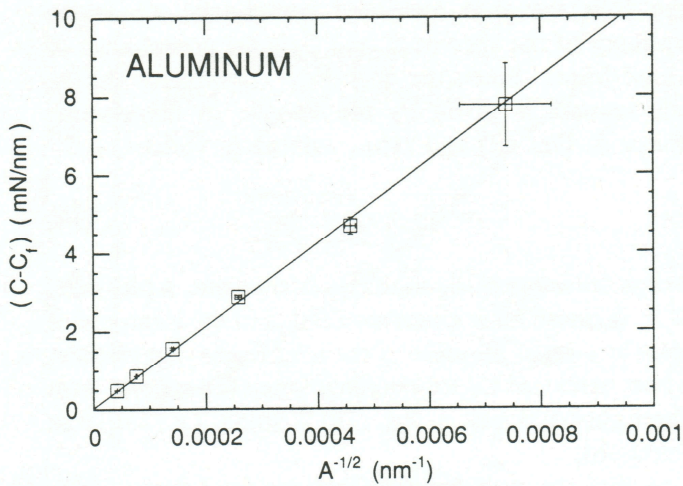


図 4.12 フレームコンプライアンス補正の検証

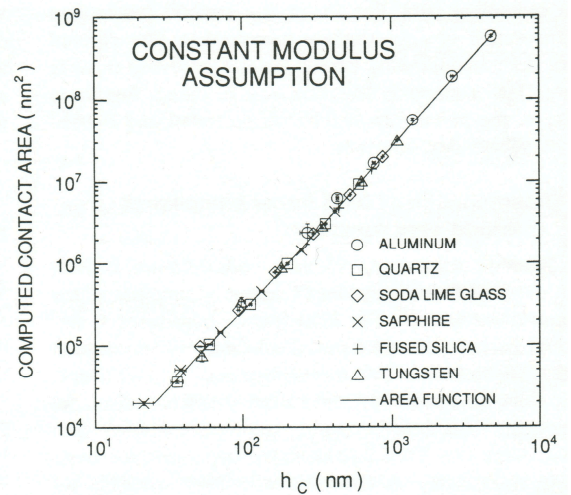


図 4.13 圧子接触面積関数の検証

- 図4.12より、補正済コンプライアンス $(C - C_f)$ と $A^{-1/2}$ のプロットは直線であったことがわかる。
- 図4.13より、試料から計算された接触面積と、決定された面積関数は、荷重により一致した。

●解析手法の妥当性の評価

①圧子接触面積関数

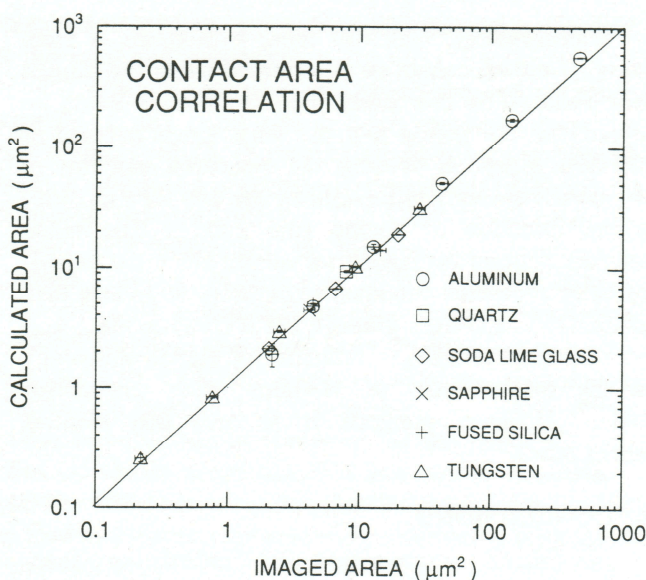


図 4.14 圧子接触面積と圧痕観察結果との比較

- 圧痕のSEM観察結果と解析により得られた接触面積結果との比較、試料種類別、荷重により一致した。

②硬さ

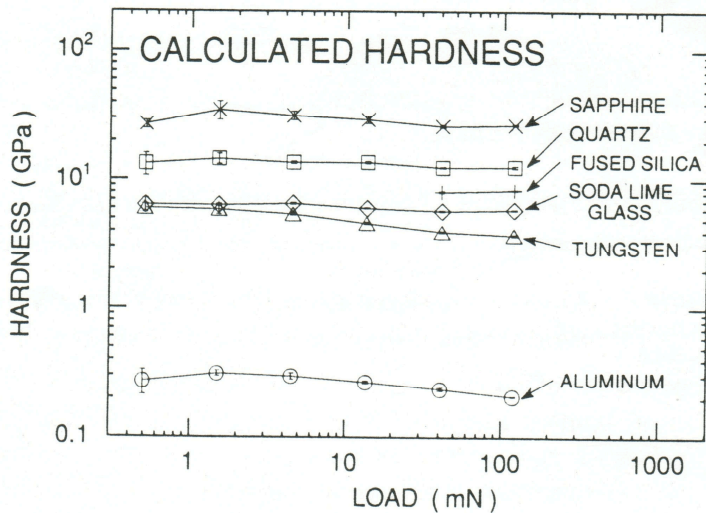


図 4.15 算出硬さ値と試験荷重の関係

- ・ 硬さ $[H = \frac{P_{max}}{A}]$ 結果:
アルミとタンクステンで
低荷重域におけるH上昇
が見られた。
- ・ 他の材料種では押し込み
寸法効果はほぼ見られ
ない。

③弾性係数

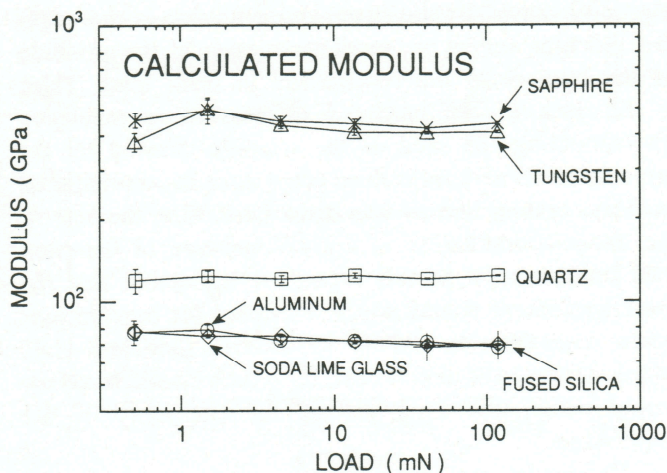


図 4.16 算出弾性係数と試験荷重の関係

- ・ 弾性係数

$$\left[\begin{array}{l} \text{寸法} E_L \text{ から } \frac{1}{E_L} = \frac{1-\nu_s^2}{E_s} + \frac{1-\nu_L^2}{E_I} \\ \text{より } E_s \text{ 算出} \end{array} \right]$$
- ・ 押し込み寸法効果はほぼない。
- ・ 等方性金属材料では文献値
と良い一致
- ・ 異方性金属材料では9~30%
の誤差。

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