# 機能性材料評価学特論　第 6 回

前回：計装化押込み試験による材料特性評価理論
（その 3，フレームコンプライアンス補正について）



今回：計装化押込み試験による材料特性評価理論
（その 4，パイルアップ補正および Oliver-Pharr 法の改善について）

# 6. 計装化押込み硬さ試験による材料特性評価理論（その 4）

**“Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology”, W.C. Oliver and G. M. Pharr, J. Mater. Res, 19(1) (2004) 3-20**

## 6.1 要約

- 1992年の著者論文以降の計装化押込みにおける研究成果について言及、特に「有効圧子形状」「パイルアップによる誤差」「β係数による補正」について詳述
  Tudoba-Jennett論文で示した可変β係数と同じ概念 →ここでは省略
- 1992年の著者論文で示した解析手法について、その欠点を示したうえで現在著者らが実行している改良された解析手法を示した.

## 6.2 パイルアップによる誤差

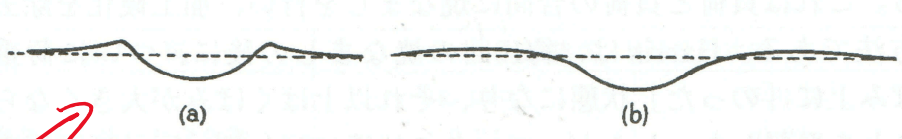
**●1992 年の論文で示された解析手法（Oliver-Pharr 手法）の重大な問題点：**
圧痕周辺のパイルアップを考慮していない.
(弾性接触では シンクインしかはじない)
理論解における弾性変形のみの変形挙動 →

・パイルアップに関連づけられる材料特性:

(a) 複合弾性率と降伏応力の比 Eeff/σy
一般的にはEr

(b) 加工硬化挙動

注: 本来の「シンクイン」は、塑性流動により圧子近傍に限定されない陥起を生じる現象.




実際の材料で生じる塑性変形を伴う変形挙動 →

図 6.1 「Piling-up」と「Sinking-in」（再掲）

## 6.2 （続き）

・パイルアップが大きい：$E_{eff}/\sigma_Y$ が大きい＋加工硬化がしにくい・しない材料
- 軟質金属
- 既に十分加工硬化した材料

・押込み中の変形による加工硬化：→ パイルアップを抑制

**●剛体円錐をモデルとした FE シミュレーション**

**①パイルアップ挙動に及ぼす材料パラメータの影響**

- $E = 70\,\mathrm{GPa}$, $\nu = 0.25$
- $\sigma_Y$ を 0.114 ～ 26.62 GPa で変化
- 加工硬化率 $\eta$ として
  $\eta = 0$（弾-完全塑性体）
  $\eta = 10\sigma_Y$（線形硬化）
  の 2 条件を設定

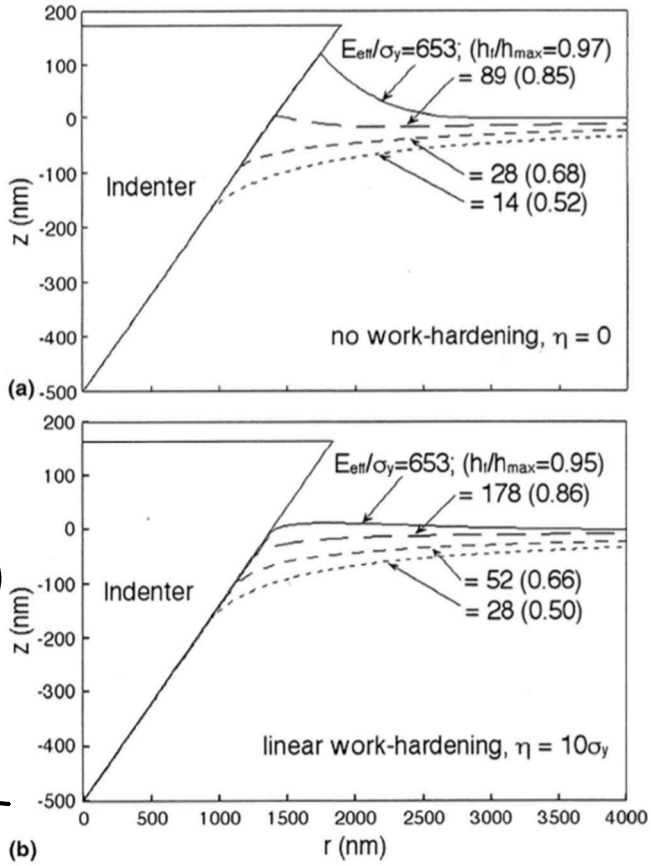
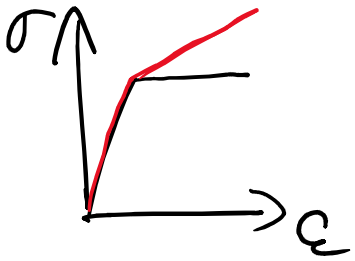


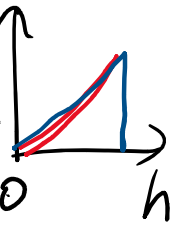

図 6.2 パイルアップに及ぼすパラメータの影響

(1)パイルアップ挙動と関連するパラメータとしての hf/hmax 比を定義



- 自己相似圧子（円錐か角錐）では $h_f/h_{max}$ は押込み深さに依存しない．
- $h_f/h_{max}$ の取る範囲：0 ～ 1
  （完全弾性）（完全塑性）

(2) hf/hmax 比に基づくパイルアップ挙動解析




- $h_f/h_{max}$ が 1 に近い＋加工硬化が小さい：パイルアップ大
- $h_f/h_{max} < 0.7$：加工硬化挙動に係らずパイルアップしない．

## 6.2 （続き）

### ②パイルアップ挙動と接触面積との関係

・$A_{true}$: FEシミュレーションでの圧痕形状から直接求めた接触投影面積

・$A_{expt}$: FEシミュレーションで得られた押込みデータを解析手法に適用して予測した接触投影面積

・$A_{af}$: パイルアップやシンクインがない状態での接触投影面積

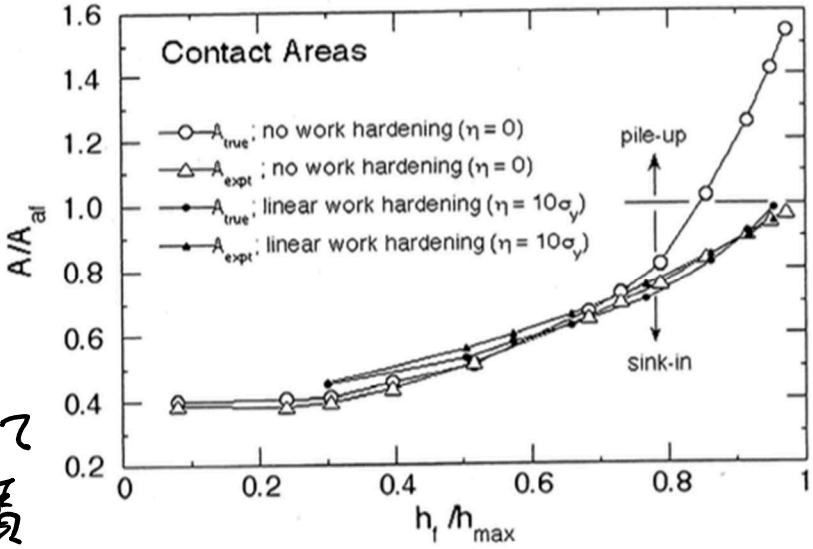



図 6.3 パイルアップ挙動と接触面積との関係

$A/A_{af} > 1$：パイルアップ

$< 1$：シンクイン

⇩

・パイルアップが大きい材料（hf/hmax が 1 に近い＋$\eta$=0）：解析手法は接触面積を過小評価（$h_f/h_{max}$=1では50%過小）

・加工硬化する材料（$\eta$=10・$\sigma_y$）：解析手法の予測精度は高い

注：試験力－深さデータのみに基づいて材料が加工硬化するかどうかを予測することは不可能

⇩

$h_f/h_{max} > 0.7$ かつ加工硬化しやすい材料の場合，圧痕の画像化によりパイルアップの程度を評価し，真の接触面積を決定することを推奨．

## 6.3 パイルアップの補正

**●圧痕の画像化を伴わないパイルアップ補正手法の開発：**

計装化押込みに関する研究の1つの「ゴール」

**●Cheng らによる研究：** 加工硬化指数の異なる様々な弾-塑性材料に対するFEシミュレーション，「押込み仕事」に基づく解析

・$W_{tot}$: 押込みによる全仕事

・$W_u$: 除荷による弾性回復分の仕事

図中の $W_{elast}$

・$W_{tot} - W_u$: 不可逆仕事（塑性変形分の仕事）

図中の $W_{plast}$

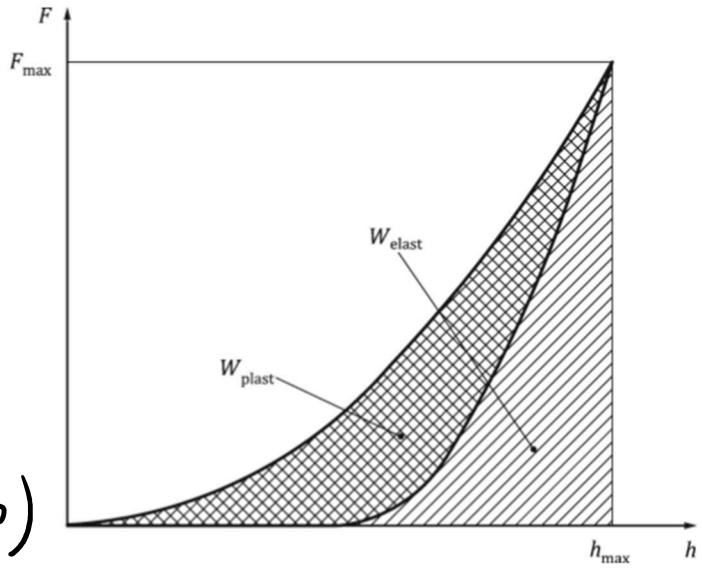



図 6.4 押込み仕事[ISO14577-1:2015 から引用]

① $\frac{W_{tot}-W_u}{W_{tot}}$ とEは加工硬化指数に影響されず，$E_{eff}/H$ の関数であると提案

$$\frac{W_{tot}-W_u}{W_{tot}} = 1 - 5\frac{H}{E_{eff}} \quad (18)$$ … 論文中の式番号

② (5)式 $H = \frac{P_{max}}{A}$ と (6)式 $S = \beta\frac{2}{\sqrt{\pi}}E_{eff}\sqrt{A}$ を組み合わせる

$\beta = 1$ として次式を導出

$$\frac{4}{\pi}\frac{P_{max}}{S^2} = \frac{H}{E_{eff}^2} \quad \cdots (19)$$

**6.3 （続き）**

③ $W_{tot}$, $W_u$, $P_{max}$, $S$ ：全て押込みデータから得られる

→ (18)(19)式に上記パラメータを代入して連立

→ $H$ および $E_{eff}$ の決定

④ 求めた $H$ および (5)式から $A$ を逆算

→ パイルアップの影響を含む「真の接触面積」

**●本補正方法の問題点（Oliver-Pharr の指摘）：**

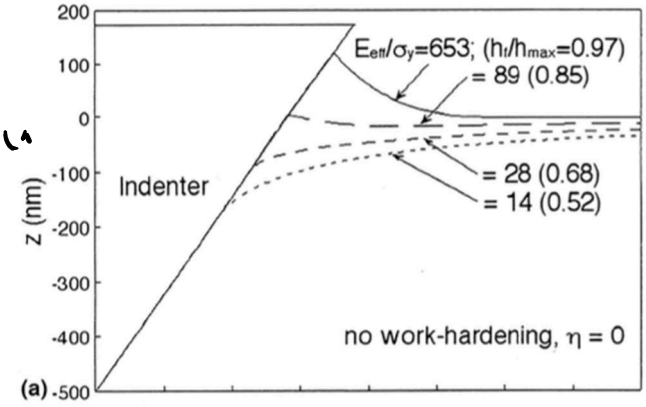



図 6.2（再掲）

- パイルアップは $E_{eff}/\sigma_y$ が大きい条件下で顕在化する.

↕

- Cheng らの (18)式導出のためのデータにおいて、上の条件が当てはまる領域では $\frac{W_{tot}-W_u}{W_{tot}}$ 比が加工硬化挙動と完全に独立ではない可能性を指摘.