

材料評価学 第4回

- 前回：
- 引張試験における
 - ・ 真ひずみの意義
 - ・ 降伏現象
 - ・ 耐力
 - ・ 材料の変形挙動



- 今回：
- 引張試験における
 - ・ 加工硬化指数
 - ・ くびれ発生時の応力とひずみ
 - ・ 材料の破壊

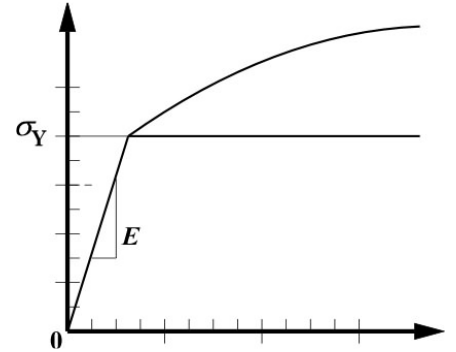
4. 引張試験 3

4.1 加工硬化指数

・問い: 降伏応力は塑性変形(=転位運動)に必要な下限応力である, では降伏応力以上の一定応力を負荷すれば塑性変形は進行するか?

・塑性変形を進行させるための応力は上昇していく

↓
加工硬化により材料の強度が
上昇していくため



$$\sigma_n = k \epsilon^n$$

k: 塑性係数
n: 加工硬化指数

加工硬化則

表 4.1 各金属材料における加工硬化指数

材	料	n
18-8	ステンレス鋼	0.53
七三	黄銅 焼なまし	0.48
六四	黄銅 "	0.39
	Cu "	0.34
	Al "	0.25
軟	鋼 0.05% C	0.25
	0.12% C	0.25

・加工硬化指数: 加工硬化の
度合いを示す.

・鉛などの軟金属

・既に十分加工硬化した材料

} n = 0 (加工硬化しない)

・18-8 ステンレス鋼や黄銅 [fcc]

n 高

・軟鋼等 [bcc]

n 低

●くびれ発生時における加工硬化指数および真ひずみの関係

くびれ発生時(=公称応力-公称ひずみ線図における引張強さを示す時点)における真
 σ_B

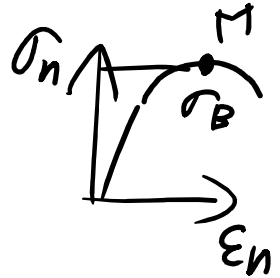
ひずみ ϵ_x は加工硬化指数 n 値と一致する.

導出 $\sigma_x = k \epsilon_x^n \quad \leftarrow \sigma_x = \sigma_n(\epsilon_{n+1}), \epsilon_x = \ln(\epsilon_{n+1})$

$$\sigma_n = \frac{k}{\epsilon_{n+1}} \{ \ln(\epsilon_{n+1}) \}^n$$

$$\frac{d\sigma_n}{d\epsilon_n} = \frac{k}{(\epsilon_{n+1})^2} \{ n - \ln(\epsilon_{n+1}) \} \cdot \{ \ln(\epsilon_{n+1}) \}^{n-1} \quad \leftarrow \frac{d\sigma_n}{d\epsilon_n} = 0$$

$$0 = \frac{k}{(\epsilon_{n+1})^2} \cdot \{ n - \ln(\epsilon_{n+1}) \} \cdot \{ \ln(\epsilon_{n+1}) \}^{n-1}$$

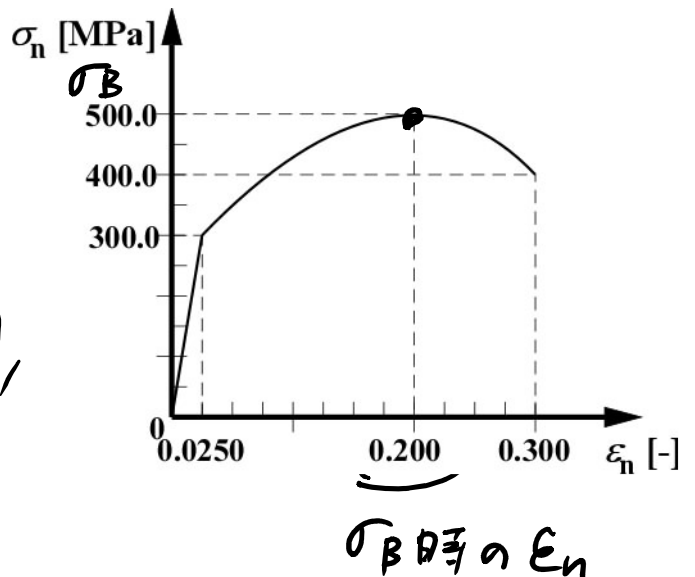


$$n - \ln(\epsilon_{n+1}) = 0$$

$$n = \ln(\epsilon_{n+1}) = \epsilon_x$$

- 加工硬化指数を実験的に求めるためには、くびれ発生時 ($\sigma_n = \sigma_B$ の時)の ϵ_n と応力-ひずみ線図から読み取り、 ϵ_x へ換算すればよい。

例題:ある材料に引張試験を行った結果、図のような応力-ひずみ線図が得られた。この材料の加工硬化指数 n を求めよ。



$$n = 0.182$$

$$\epsilon_x = \ln(\epsilon_{n+1}) = 0.182 = n$$

4.2 くびれ発生後の応力とひずみ

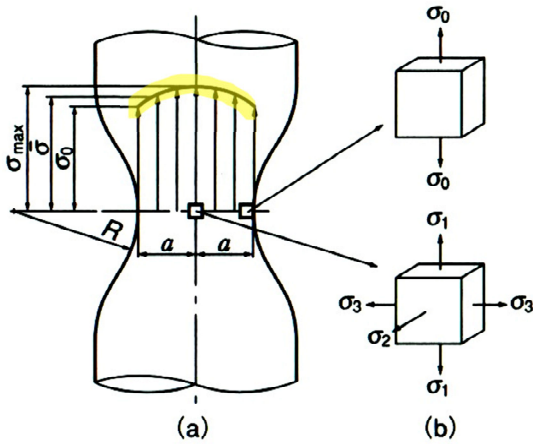
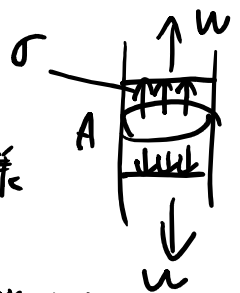


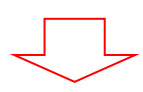
図 4.1 くびれ発生領域における応力状態

●くびれ発生後の応力

- 1): くびれ断面上の応力は一様ではなく分布を持っている。
 - 2): 応力状態が単軸応力状態から多軸... に変化する。
- ・最小断面の表面部: → 単軸応力状態
 - ・ " の中央部: → 多軸 ...



- ・ 平均応力としての公称応力 σ_n よりも真応力 σ_t が意味をたもたなくなる。



・ 問い: 降伏応力 σ_Y は単軸応力状態と多軸応力状態で変化するか?

↳ 変化する、多軸応力状態では σ_Y は上昇する。

・ くびれ部の表面応力 σ_0 :
$$\sigma_0 = \frac{W/A_0}{1 + (a/4R)}$$

●くびれ発生後のひずみ:

- ・ 均一な伸びではなく、くびれ部において局所的な伸びを生じる



- ・ 真ひずみの定義式 $\epsilon_x = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right)$ にあたる長さ基準ではなく、断面積を基準として $\epsilon_x = \ln\left(\frac{A_0}{A_x}\right)$ を用いる。

4.3 材料の破壊

- 材料が示す強度：「塑性変形のしにくさ」 + 「破壊のしにくさ」
- 破壊とは：物体が「破断面」を形成して2つ以上に分離する現象
- 破壊形態の分類

- ・巨視的形態による分類
 - 延性破壊：大きな塑性変形を伴う破壊
→金属材料、高分子材料
 - 脆性破壊：塑性変形を伴わずに生じる破壊
→ガラス、セラミックス

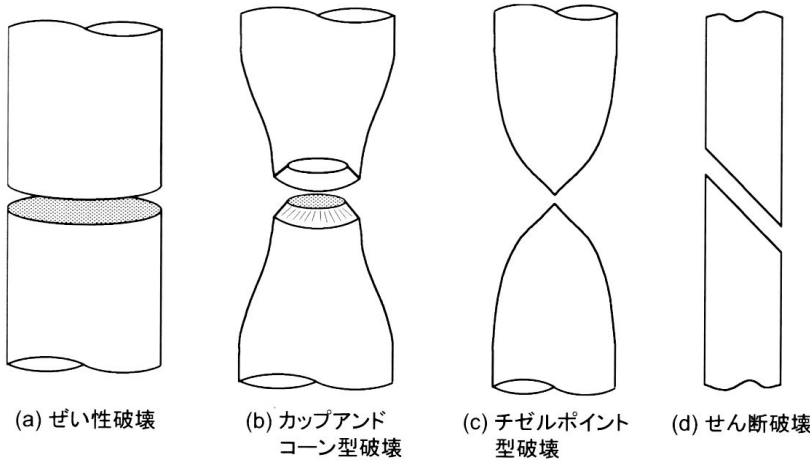


図 4.2 巨視的破壊形態

↓
条件がそろえば金属材料でも脆性破壊を生じる。

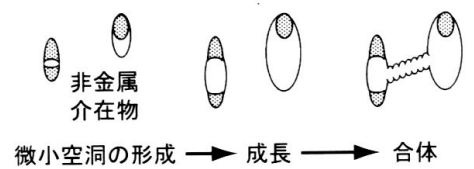
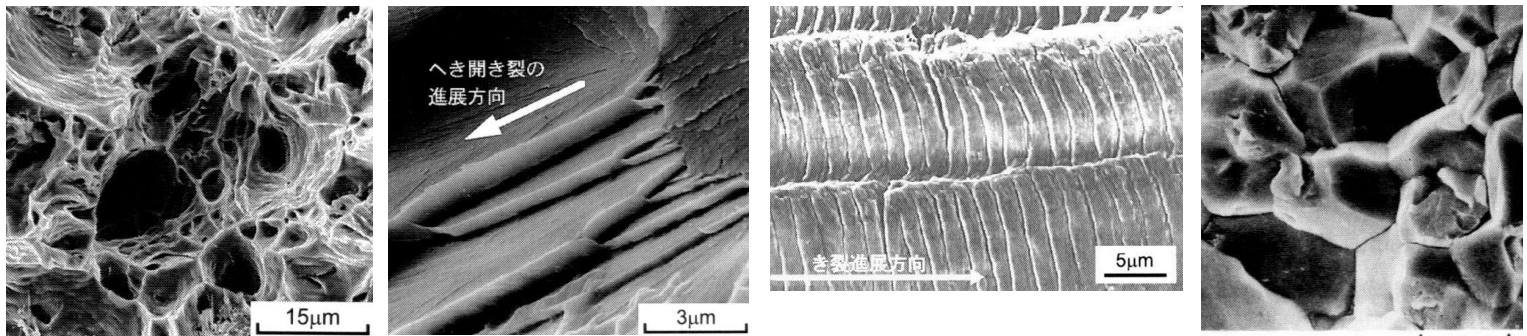


図 4.3 ボイド成長・合体

- ・微視的形態による分類
 - 粒内破壊
 - 微小空洞(ボイド)合体型
微視的延性破壊
 - へき開型
微視的脆性破壊
 - 疲労型
特定の結晶面(へき開面)で発生する
 - 粒界破壊
 - 面間隔が小さい



(a)ボイド型(ディンプル) (b)へき開型(リバーパターン) (c)疲労型(ストライエーション) (d)粒界破壊

図 4.4 微視的破壊形態

4.4 第4回講義に関する意見・感想・質問のまとめ

●意見・感想

- ・小テストの内容は難しくはなかったが理解不足のため解けなかった、小テストで思った結果を出せなかった、単位変換を間違えてしまった、時間に追われて有効数字の扱いが雑になってしまった、勉強をしっかりと臨めた、小テストの解説をしてほしい、分からない部分があった、難しく感じた、MPa→N/mm² の関係を忘れていて単位を間違えた、ヤング率を理解していなかった、Eを使う式も覚えていなかったし kgf などの単位もあやふやだった、全然できなかった、次元を疎かにしてしまい間違えた、ゆっくり考えたら分かるのにぱっと式が出てこないことが多い、重力加速度の値がなかなか思い出せなかった:23←今回の小テストは平均4.9点、満点17名でした。「難しかった」というコメントが多いですが、考え方をきちんと理解していない人が多いようです。ヤング率は「弾性変形領域における σ と ε の比例係数」でしかないので、そこから「塑性変形をしないという条件」とは結び付けられません。降伏応力 σ_Y こそが「塑性変形する応力の下限值」な訳ですから、発生する応力が降伏応力に達しないようにするには荷重か断面積(→部材直径)のいずれかで調整しなければなりません。今回の問題は荷重が与えられていますので、あとは直径 d を応力の式から逆算すればいい、ということになります。
- ・真ひずみと加工硬化指数の導出がうまくできなかったので復習する、広範囲に復習する、定義からしっかりと理解する、覚えることが多いのでしっかり復習する、去年の授業の内容が抜けていた、昨年度の復習をよくやっておく、前回だけでなく前々回の復習も必要、真応力や真ひずみの式は今後も使いそうなのでいつでも導出できるようにしておきたい:18
- ・破壊についてよく分かった、巨視的および微視的に様々な種類があることが分かった、加工硬化指数についてよく分かった、くびれなどの材料の破壊に関する発生条件を理解できた、自力で導出できるようにしたい、金属疲労以外での破壊の種類を知った、断面の中央部の方が応力大きいことやポイド成長の流れがイメージしやすく理解できた、図や写真があつて分かりやすかった、微視的破壊形態が破壊に関して大きな情報を与えることが分かった:14
- ・くびれの表面付近で材料中心に向かう力がかかっていないことを不思議に感じた、より深い材料の強度の話で面白かった、実験の話聞いてくびれの実験してみたいと思った、破壊を巨視的にイメージするのは容易だが微視的な破壊形態はイメージしにくく難しそうだと感じた、くびれ発生時の真ひずみが加工硬化指数と一致することが直感的にありえないと思っていたが導出できて興味深かった、条件によってぜい性破壊する条件を生かして物を作るのも面白そう、実際に n が大きい金属が変形する様子を体験したい:7←応力が発生するためには「拘束」が必要となります。例えば丸棒の両端を壁に固定した状態で加熱すると、本来は熱膨張により丸棒の長さは伸びるはずですが両端を壁に固定されていて伸びれない(これが拘束です)ため、材料内部に応力が発生します。仮に両端を固定しないまま加熱すれば、棒は自由膨張する代わり応力は発生しません。これと同じで、表面付近はくびれ形成による変形が拘束なく生じているので応力は発生せず、通常の単軸応力状態のままとなります。
- ・小テストの残り時間が分かりづらいので残り時間を画面上で示してほしい←これは確かに、定期試験時にも関係してくると思いますのでまずは学務係に時計の掲示位置を前に変えてもらうよう話してみます。
- ・出入り口の開閉 閉めてる方がいい:4 開けてる方がいい:1←今回の意見で「閉めてる方がいい」が多数となりましたので、今後は閉めたまま授業を行うこととします。

●質問

- ・くびれ発生前後の応力とひずみの公式をどう定義すればいいのかわかりたい←くびれ発生前はべき乗硬化則で定義されます。発生後は授業でも話したようにそもそも応力自体が一様ではない(=どこの応力を代

表値として取るべきか、から考える必要がある)ため、単純な応力-ひずみの関係式は定義できません。
 ・真ひずみと加工硬化指数の導出が分からなかった:2←下記の通りです。あと、板書した2ページ目の式の一部に誤りがありましたので修正しました。

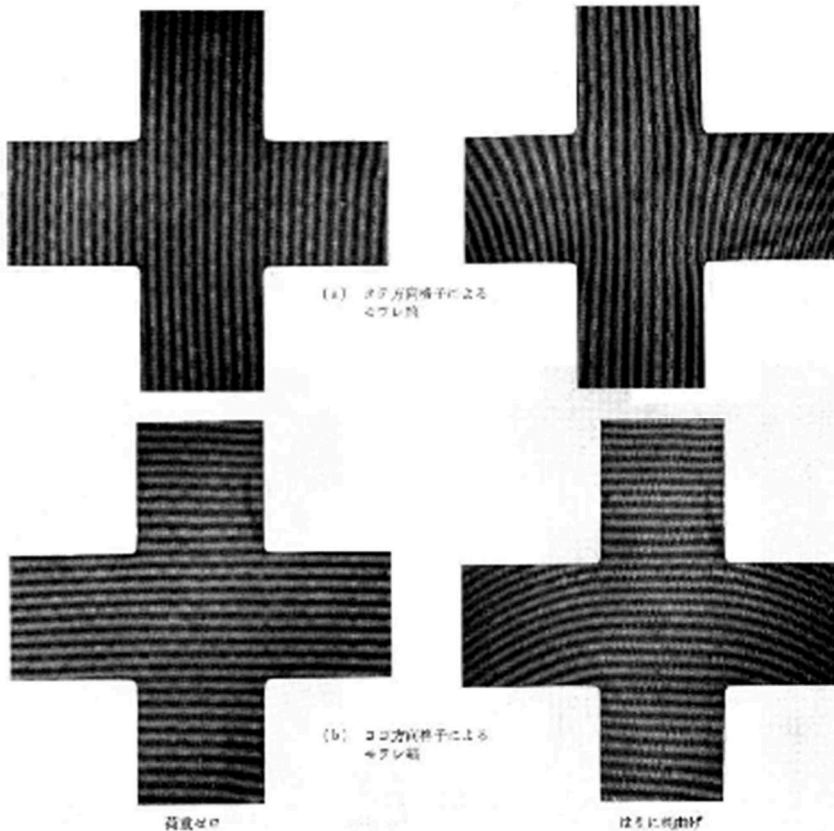
$$0 = \frac{k}{(\epsilon_{n+1})^2} \cdot \{n - \ln(\epsilon_{n+1})\} \cdot \{\ln(\epsilon_{n+1})\}^{n-1}$$

両辺に消える項の逆数を乗す。

$$\underbrace{\frac{(\epsilon_{n+1})^2}{k} \cdot \frac{1}{\{\ln(\epsilon_{n+1})\}^{n-1}} \cdot 0}_0 = \underbrace{\frac{(\epsilon_{n+1})^2}{k} \cdot \frac{k}{(\epsilon_{n+1})^2}}_1 \cdot \{n - \ln(\epsilon_{n+1})\} \cdot \underbrace{\frac{1}{\{\ln(\epsilon_{n+1})\}^{n-1}} \cdot \{\ln(\epsilon_{n+1})\}^{n-1}}_1$$

$$\therefore \underline{n - \ln(\epsilon_{n+1}) = 0}$$

・くびれ発生後の応力分布を実験でどのように把握するのか? ←応力は目に見えないので、目に見える変化であるひずみ(変形)を可視化し、そこから応力に変換することが必要となります。加えて丸棒であれば材料内部ですので、そこも難しい点です。今ならコンピュータによるシミュレーションで出してしまうと思いますが、それが無かった時代は例えば透明なプラスチック板を引張試験片形状に加工し(丸棒と平板という形状変化の影響は避けられませんが)、それに対して引張荷重を負荷し、そこで発生するひずみを「モアレ縞(干渉縞)」という縞状の模様の変化から読み取っていました。参考に、昔の文献を見てみるとこんな図が載っていました。



4.5 第3回小テスト解答

Q.1 降伏応力 $\sigma_Y = 500.0 \text{ MPa}$, ヤング率 $E = 70.0 \text{ GPa}$, 元の長さ $l_0 = 100.0 \text{ mm}$ の丸棒を引張荷重 $W = 100.0 \text{ kgf}$ で引張るとき, 塑性変形しないためには元の直径 d_0 がいくつ以上であれば良いか求めよ. [10点, 部分点あり]

A.1

$$\sigma_n = \frac{W}{A_0} < \sigma_Y, \quad A_0 = \frac{\pi d_0^2}{4} \Rightarrow \frac{W}{\frac{\pi d_0^2}{4}} < \sigma_Y$$

$$\therefore d_0 > \pm \sqrt{\frac{4W}{\pi\sigma_Y}}$$

$$\sigma_Y = 500.0 \text{ MPa} = 500.0 \text{ N/mm}^2$$

$$W = 100.0 \text{ kgf} = 980.7 \text{ N}$$

$$\rightarrow d_0 > 1.5802... \hat{=} 1.580 \text{ mm}$$