

金属材料の引張試験

1 目的

荷重負荷とともに、弾性変形から塑性変形、さらに破断へと到る金属材料の荷重～変形挙動を実際に観察し、材料の引張特性を確認する。具体的には、金属材料の引張試験を行い、応力-ひずみ線図を描くとともに、各種機械的性質(降伏点(耐力)・引張強さ・真破断応力・破断伸び・絞り・ヤング率・ポアソン比など)を求める。

2 試験の意義と理論

機械を設計し、また生産する際には機械部品の強度計算や加工条件の選定、使用中の変形予測を行う必要がある。強度計算には降伏点(材料によっては耐力)や弾性係数の値が必要となる。機械部品の加工時の予測には変形応力が基準となり、加工中に破壊やくびれを生じさせないためには、伸び・絞りや加工硬化指数と呼ばれる n 値を適切に設定しなければならない。また、切欠きのある部品や構造物に対しては、伸びや絞りの小さい材料の使用は避けなければならない。引張試験は下記の表にある材料の機械的性質を求めることが出来るため、非常によく使われる試験方法である。

表 1: 引張試験により求められる材料の機械的性質の代表例。

諸量	記号	定義
比例限度	σ_P	応力とひずみが比例する領域での最大応力
上降伏点	σ_{SU}	降伏の始まる時の応力
下降伏点	σ_{SL}	降伏開始後に荷重が下がったときの応力
0.2% 耐力	$\sigma_{0.2}$	降伏点が明らかでない材料において、0.2% の塑性ひずみを生じる応力
引張強さ	σ_B	公称応力-ひずみ線図における最大応力
ヤング率	E	比例限以下での応力とひずみの比
破断伸び	δ	破断時における公称ひずみ

図 (a) に示すように、断面積 A_0 、標点距離 l_0 の試験片の引張りを考える。試験片に荷重 P が作用すると、平行部分は一様に伸びて l_0 は l に、 A_0 は A になる (図 (b))。さらに試験片を伸ばすと、平行部の一部が伸びて細くなり、これ以外の部分は変形しない (図 (c))。この現象がネッキングである。ネッキングが発生すると荷重は低下し始める。さらに変形をさせると、ネッキング部の材料内にき裂やボイドが発生し、最終的には破断する (図 (d))。

応力とは単位面積あたりの内力であるので、断面に内力が一様に分布している時には応力 σ は定義通り以下の形で与えられる。

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (1)$$

しかし、断面積 A は試験中に変化するので、これを測定するのは難しい(不可能ではない)。簡単のため、 A の代わりに初期断面積 A_0 を用いて応力を計算する。

$$\sigma_n = \frac{P}{A_0} \quad (2)$$

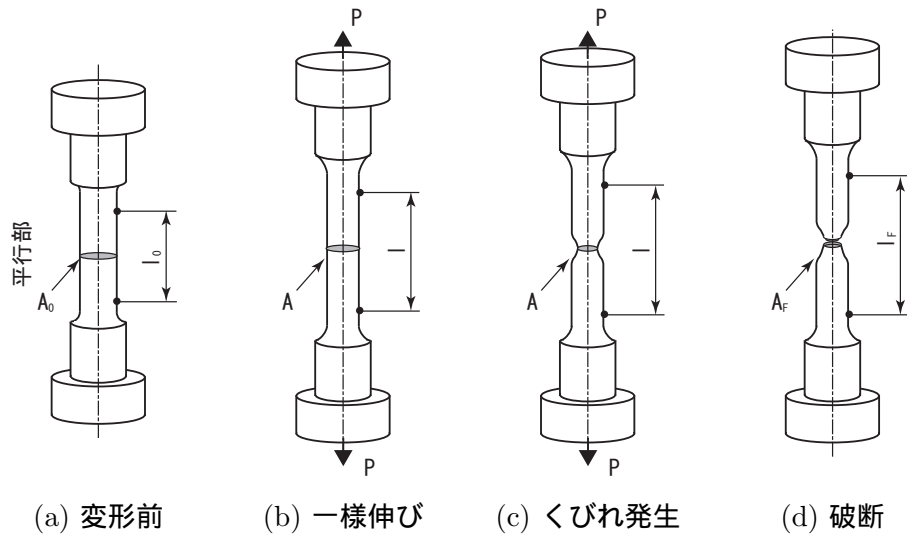


図 1: 引張試験片の変形

σ_n を公称応力 (normal stress) とよび、これと区別するために応力 σ_t (true stress) を真応力とよぶ。ひずみにも 2 つの定義がある。

$$\epsilon_n = \frac{l - l_0}{l_0} \quad (3)$$

$$\epsilon_t = \ln \frac{l}{l_0} = \ln(1 + \epsilon_n) \quad (4)$$

ϵ_n を公称ひずみ (normal strain) とよび、 ϵ_t (true strain) を真ひずみとよぶ。引張試験に関しては、JIS による規定があり、試験方法、試験片の形状、試験機が定められている。

引張試験で直接的に得ることができる値は荷重と伸びであり、荷重 - 伸び線図は比較的簡単に作成することが出来るが、その値は試験片の寸法、形状に依存する。そのため、一般に応力 - ひずみ線図にてデータを解析する。図 2 に公称応力 - 公称ひずみ線図の代表的な例を示す。図 2 (a) は軟鋼のように降伏点現象が現れる場合の例であり、図 2 (b) は銅のように降伏点現象が現れない場合の例である。両図とも OP 間は直線的であり、応力とひずみが正比例する。この範囲はフックの法則が成立する範囲であり、この直線の傾きからヤング率を求めることができる。正比例する最大応力を比例限度 (P) という。

負荷した後、静かに応力を除荷して零とした際に、それまでに生じた歪みが零になる応力の限度を弾性限度 (S) という。軟鋼の場合、弾性限度は比例限度のわずかに上か、それと一致するため、弾性限度と比例限度を区別しない場合がある。

材料が塑性変形を開始するときの応力を降伏応力という。図 2 において、U 点を超えると応力の増加無しにひずみが急激に増加する。この点の応力が降伏応力である。突然応力が下降する点の応力を上降伏点 (Y_U)、下降した点の応力を下降伏点 (Y_L) という。一方、図 2 (b) のように降伏点が明瞭でない金属材料では、所定の塑性ひずみ (例えば、 $\epsilon = 0.2\%$) が生じる時の応力を耐力 $\sigma_{0.2}$ と定義し、降伏応力 (Y_P) として用いる。

降伏点を超えて塑性変形を進めると、荷重は増加し、やがて最大荷重に達する。図 2 における M がこれに対応し、このときの公称応力を引張強さという。

点 M までは標点間の塑性変形は一様であり、その伸びを一様伸びという。最大荷重点を過ぎると、

試験片の一部にくびれが生じ、変形はこのくびれ部に集中する。くびれの成長とともに荷重は減少し、やがてくびれ部から破断する。くびれ後の伸びを局所伸びという。

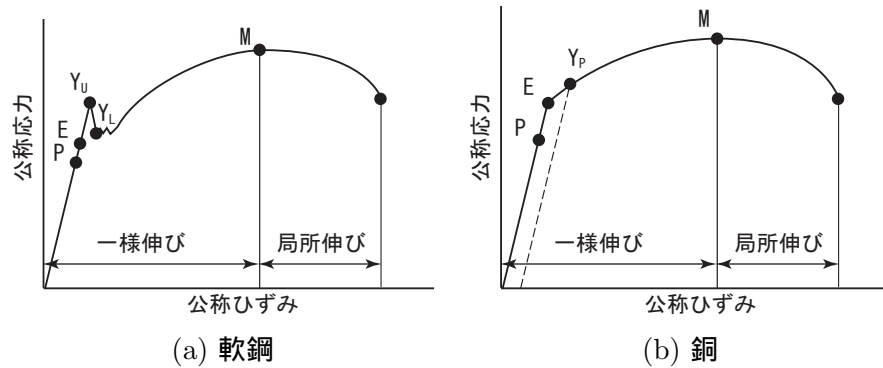


図 2: 公称応力 - 公称ひずみ線図の一例

応力を公称応力ではなく、真応力として、真応力 - 公称ひずみ線図を描くと図 3 のようになる。試験片は破断時に最も大きな応力を示しており、最大の引張抵抗を示すことがわかる。このときの応力を真破断力という。

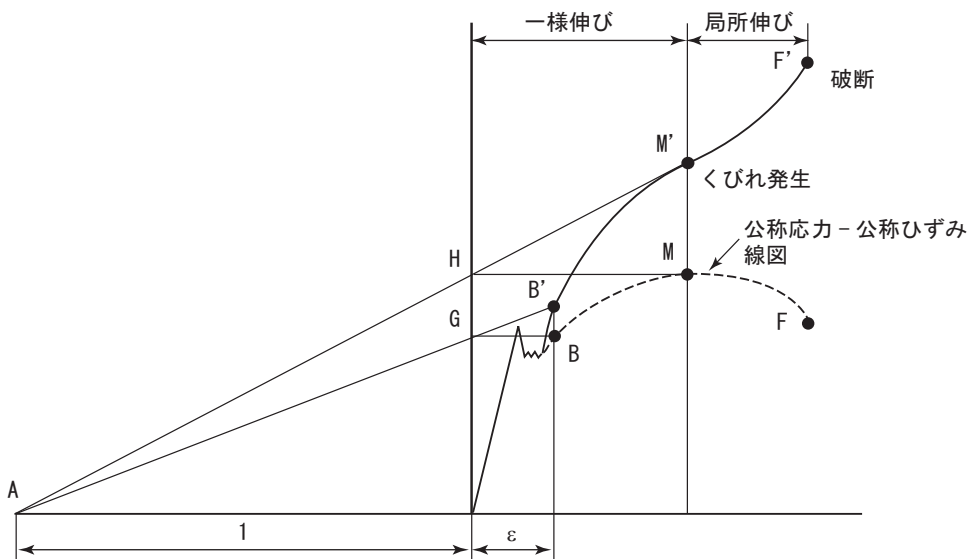


図 3: 真応力 - 公称ひずみ線図とその作図法

3 試験内容

1. 油圧式強度試験機にて，金属製の試験片に引張荷重を負荷し，ひずみゲージによってひずみを計測するとともに，伸び計を使って荷重と伸びの関係を求める．
2. 荷重とひずみおよび伸びから，公称応力・真応力・公称ひずみ・真ひずみを求め，各種の応力 - ひずみ線図を描く．
3. 降伏点（耐力）・引張強さ・真破断応力・破断伸び・絞り・ヤング率・ポアソン比などを各種機械的性質求める．

4 試験方法

4.1 引張試験片

4.1.1 材質および形状

試験片の材質として，明確な降伏点を有する JIS G3101 に準拠した一般構造用圧延鋼材 SS400 製試験片 1 本と，降伏点を有さない材料として JIS G4051 に準拠した機械構造用炭素鋼 S45C もしくは JIS H4040 に準拠したアルミ合金 A7075-T651 のいずれか 1 本，計 2 本の試験片を用いる．その機械的性質の規格値を以下に示す．また，試験片の形状と寸法を図 4 に示す．

表 2: SS400 の規格値

降伏点	245 MPa 以上
引張強さ	400 MPa 以上
破断伸び	20% 以上

表 3: S45C (焼入れ・焼戻し材) の規格値

耐力	490 MPa 以上
引張強さ	690 MPa 以上
破断伸び	17% 以上

表 4: A7075 (T651 材) の規格値

耐力	505 MPa 以上
引張強さ	570 MPa 以上
破断伸び	11% 以上

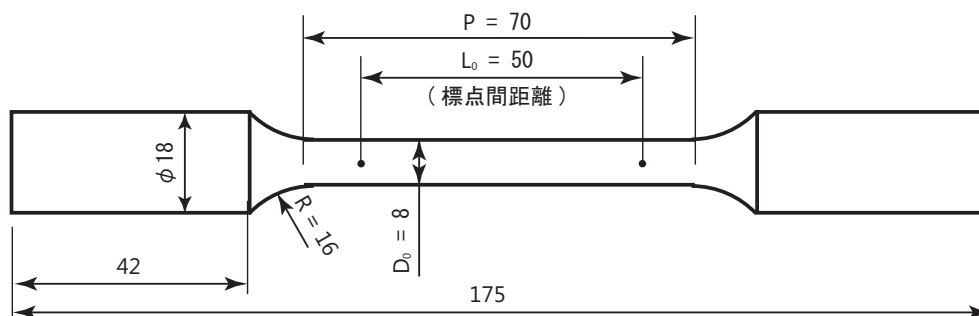


図 4: 供試引張試験片 (JIS14A 号)

4.1.2 試験前計測

試験片の伸びを計測するために、試験片平行部に 2 つの標点を設定しなければならない。その間の距離を標点距離と呼ぶ。これは、伸び測定の基準となる長さであり、JIS により規定されている。本試験では、事前にポンチで評点を記してある試験片を用いる。標点距離 L_0 はノギスを用いて 0.05 mm の数値まで測定する。

平行部の原断面積 A_0 は、評点距離の両端部および中央部の 3 箇所において、直交する 2 方向で原直径 D_0 を測定し、その平均値 (全体平均値) を用いて求める。直径はマイクロメータを用いて 0.01 mm の数値まで測定する。

各測定器の使用方法は配布資料 (測定器の使い方 (ノギス・マイクロメータ編)) を参照のこと。

4.2 試験装置と計測システム

試験装置には島津製作所製のねじ棒式精密万能試験機、オートグラフ (AGX-50kN 形) を用いる。最大荷重は 50 kN である。

また、伸び計とひずみゲージを用いてデータの計測を行い、荷重およびストロークを含めた各種データの収録には共和電業製のユニバーサルレコーダ (EDX-200A) を用いる。伸び計には、島津製作所製のひずみゲージ式伸び計 (SG-50-50) を用いる。適用標点距離は 50 mm である。試験片に取り付けられた伸び計は試験片の伸びとともに発生するひずみを伸び計内部のひずみゲージにより換算して標点間距離の伸びを出力する。計測した伸びはデータ収録装置に記録される。

装置のストロークと試験片の伸びを計測してはいるが、金属材料の弾性範囲は非常に短く、より精度の良い測定が必要となる。そこで、弾性領域の計測にはひずみゲージを試験片に直に貼付けて行わなければならない。ひずみゲージは共和電業製の抵抗線式 2 軸ひずみゲージ (KFG-1-120-D16-11) を用いる。ここでいう 2 軸とは、周方向と軸方向である。

4.3 実験方法 (ストローク制御)

実験は以下の手順で行う。

1. 試験片の寸法計測を行った後、ひずみゲージを貼り付ける (試験前計測)。
2. 試験機の始動準備を行い、試験片を取付ける。

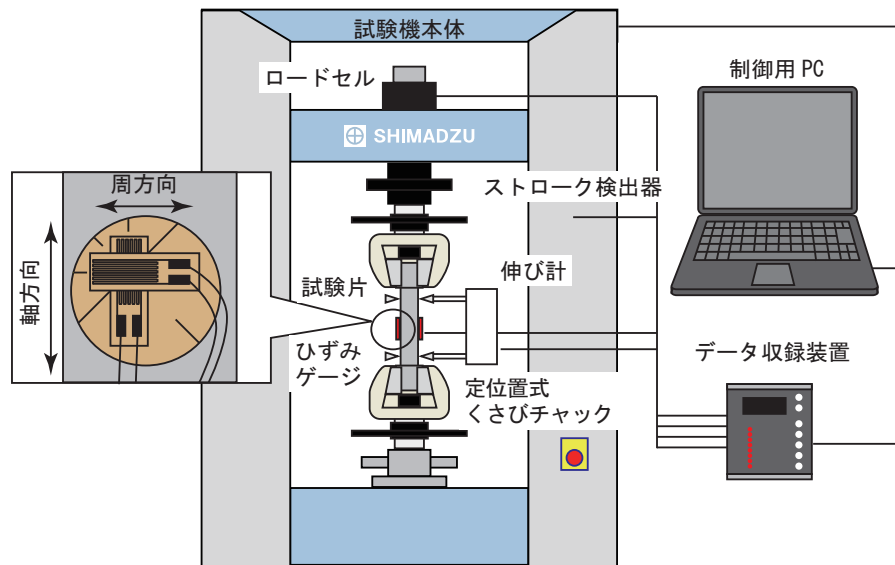


図 5: 計測システム

3. 伸び計を取付ける．
4. 試験条件 (制御条件) を設定する．
 - (a) 原点調整, ストローク制御, ランプ負荷．
 - (b) ストロークレンジ : 50 mm
 - (c) ストローク速度 : 0.025 mm / sec
5. データ収録装置を設定する．
 - (a) サンプリング周期 : 100 msec
 - (b) 荷重, 伸び, ストロークおよびひずみのモニター, データ記録のための設定であり, サンプリング周期毎にこれらのデータを記録する．
6. 引張試験スタート
 - (a) モニターグラフにて, 荷重 ~ 伸び, ひずみ, ストロークの状況を観察．
 - (b) 制御装置のストローク値, 荷重値を観察．
7. 破断前に伸び計を取り外す (破断時の衝撃による伸び計の損傷を防ぐため) ．
8. 破断 試験機の停止
 - (a) 試験片の取外し．
 - (b) データの取得 : モニターグラフのプリント, 数値データの書出し
9. 破断後, 試験片の寸法計測を行う．

4.4 データ整理

実験データは膨大なデータ数となるため、次に示す実測データを抽出しデータ抽出点として整理する。データ抽出点を基にデータ整理により各種機械的性質の算出を行う。詳しくは当日配布資料(データ整理の方法)を参照のこと。

表 5: データ抽出点の選び方(降伏点を有する場合)。

領域	抽出点数
① スタート点 ~ ①' ゲージ限界点	中間 6 点 (7 等分割)
①' ゲージ限界点 ~ ② 上降伏荷重点	中間 1 点 (2 等分割)
② 上降伏荷重点 ~ ③ 下降伏荷重点	中間 1 点 (2 等分割)
③ 下降伏荷重点 ~ ④ 硬化開始点	中間 2 点 (3 等分割)
④ 硬化開始点 ~ ⑤ 最大荷重点	中間 7 点 (8 等分割)
⑤ 最大荷重点 ~ ⑦ 破断点	中間 6 点 (7 等分割)

表 6: データ抽出点の選び方(明確な降伏点を有さない場合)。

領域	抽出点数
① スタート点 ~ ①' ゲージ限界点	中間 6 点 (7 等分割)
①' ゲージ限界点 ~ ② 硬化開始点	中間 1 点 (2 等分割)
② 硬化開始点 ~ ③ 最大荷重点	中間 12 点 (13 等分割)
③ 最大荷重点 ~ ⑤ 破断点	中間 6 点 (7 等分割)

4.4.1 試験片の寸法測定結果

- 測定結果をデータシート [1] の左半分に記入する。
- 破断後データをデータシート [1] の右半分に記入する。
 - 断面積 A_F は試験片の破断面を注意して突き合わせ、直交 2 方向 (X 方向, Y 方向) で最小断面の直径 D_F をポイントマイクロメータにて 0.01 mm の数値まで測定し、その平均値を用いて求める。
 - 標点間の長さ L_F は 0.05 mm の数値までノギスを用いて測定する。

4.4.2 荷重 - 伸び線図 (F- ΔL 線図) の作成

- 抽出点の決定。データ抽出のために、図 6, 7 に記した代表点を抽出する。実測データ (約 9000 点) から担当指導教員の指示する要領にてデータを抽出して、データシート [2] に荷重 F' , ストローク S' , 伸び $\Delta L'$, ひずみ ϵ_l' , ϵ_θ' の実測値を記入する。荷重は 1 N, 伸びとストロークは 0.001 mm の数値までを記録する。

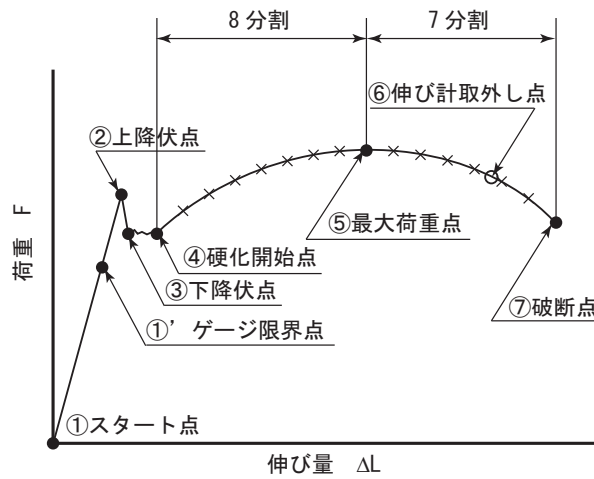


図 6: データ抽出点 (降伏点を有する場合)

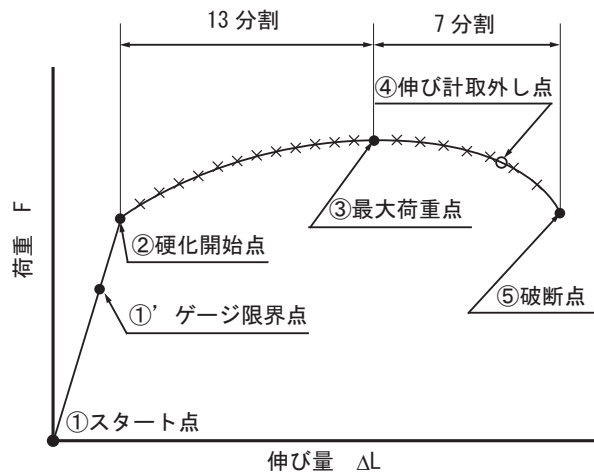


図 7: データ抽出点 (明確な降伏点を有さない場合)

2. 抽出データの補正．抽出したデータに対して，下記 (a) ~ (d) の補正を行い，データシート [2] の補正データ欄に補正した荷重 F ，ストローク S ，伸び ΔL ，ひずみ $\epsilon_l, \epsilon_\theta$ の値を記入する．

(a) 原点補正．スタート点の荷重 F_1' ，ストローク S_1' ，伸び $\Delta L_1'$ ，ひずみ ϵ_{l1}' ， $\epsilon_{\theta 1}'$ の値を用いて，スタート点 ~ 破断点の全ての抽出点における荷重 F_N' ，ストローク S_N' ，伸び $\Delta L_N'$ ，ひずみ ϵ_{lN}' ， $\epsilon_{\theta N}'$ の値から減じ，補正する．

- $F_N = F_N' - F_1$
- $S_N = S_N' - S_1$
- $\Delta L_N = \Delta L_N' - \Delta L_1$
- $\epsilon_{lN} = \epsilon_{lN}' - \epsilon_{l1}$
- $\epsilon_{\theta N} = \epsilon_{\theta N}' - \epsilon_{\theta 1}$

実験結果のとりまとめは、補正後のデータ荷重 F_N 、ストローク S_N 、伸び ΔL_N 、ひずみ ϵ_{LN} 、 $\epsilon_{\theta N}$ を用いて行う。

- (b) 伸び計取外し点 ~ 破断点の範囲の伸びの決定。伸び計取外し後は伸びの実測データがないため、ストロークの実測データをシフトさせて補正を行い、伸びのデータとする。
- 伸び計取外し点直前の抽出点におけるストロークのシフト量 Δ を
 $\Delta = \text{ストローク } S \text{ (原点補正後)} - \text{伸び } \Delta L \text{ (原点補正後)}$
 から算出して決定する。 Δ は一定値である。
 - 伸び計取外し点 ~ 破断点における伸び ΔL は
 $\Delta L = \text{ストローク } S \text{ (原点補正後)} - \text{シフト量 } \Delta$
 から算出して決定する。
- (c) ひずみ ϵ_{LN} 、 $\epsilon_{\theta N}$ の測定値を $\times 10^{-6}$ 倍し、元の値に戻す。
- (d) 荷重 - 伸び線図の作成。補正したデータを用いて、荷重 - 伸び線図 (F- ΔL 線図) を描く。

これらを 2 本の試験片それぞれに対して行う。

4.4.3 応力およびひずみの計算。

公称応力、公称ひずみ、真応力、真ひずみを計算してデータシート [3] に記入する。公称ひずみ ϵ_n は下記による。

- スタート点 ~ ゲージ限界点 : $\epsilon_n = \epsilon_l$
- ゲージ限界点 ~ 破断点 : $\epsilon_n = \Delta L / \text{標点距離 } L_0$

5 報告内容 (実験結果として記載)

以下の項目をまとめ、実験結果として記載すること。

1. 実測データ . 4.4 項にてまとめた結果 (データシート [1] ~ [3] および荷重 - 伸び線図) を添付する . (試験片 2 本分)
2. 応力 - ひずみ線図 . データシート [3] をプロットし , 以下の図を描く . (試験片 2 本分)
 - (a) 公称応力 - 公称ひずみ線図 ($\sigma_n - \epsilon_n$ 線図)
降伏点を有さない材料については , 0.2 % ひずみの点より , ヤング率と同一の傾きを持った補助線を描き , 0.2 % 耐力を求めよ .
 - (b) 真応力 - 公称ひずみ線図 ($\sigma_t - \epsilon_n$ 線図)
 - (c) 真応力 - 真ひずみ線図 ($\sigma_t - \epsilon_t$ 線図)
硬化開始点 ~ 最大荷重点の範囲データを使って , 両対数グラフ上に描く . 両対数上のグラフを直線とみなし , 最小自乗法を用いて n 乗硬化則 : $\sigma_t = a\epsilon_t^n$ の a と n を決定せよ .
 - (d) 公称応力 - 軸・周方向ひずみ線図 ($\sigma_n - \epsilon_l \cdot \epsilon_\theta$ 線図)
 - スタート点 ~ ゲージ限界点の範囲について , (ϵ_l, σ_n) および $(\epsilon_\theta, \sigma_n)$ の全データを 1 枚のグラフ上にプロットする (縦軸に σ_n , 横軸に ϵ) .
 - 最小自乗法により , それぞれ原点を通る 1 次式 : $\sigma_n = \alpha_l \epsilon_l$ および $\sigma_n = \alpha_\theta \epsilon_\theta$ を定め , 以下により , ヤング率 E とポアソン比 ν を求めよ .
 - $E = \alpha_l$
 - $\nu = -(\alpha_l / \alpha_\theta)$
 - 求めた 1 次式をグラフ上に描き , E と ν の値を記入せよ .
3. 観察 / スケッチ .
 - (a) 試験片の変形状況 (試験片 1 本分)
 - (b) 破断位置 (試験片 1 本分)
 - (c) 破断面の様相 (試験片 2 本分)
4. 試験結果の総括 . (試験片 2 本分)
以上の結果を用いて , 表 7 , 8 に示す引張強度特性に関する諸量の値を求めよ .

6 報告内容 (考察として記載)

以下の項目をまとめ、考察として記載すること。

1. 実験結果の定性的評価
5 項にてまとめた実験結果を基に , 本実験の妥当性を定量的に評価せよ .
2. 実験結果の定量的評価
5 項にてまとめた実験結果を基に , 本実験の妥当性を定量的に評価せよ .

表 7: 試験結果の総括表 (降伏点を有する場合) .

諸量	記号	計算式 / 決定方法	値	単位
① 上降伏点	σ_{SU}	F_{SU}/A_0		MPa
② 下降伏点	σ_{SL}	F_{SL}/A_0		MPa
③ 引張強さ	σ_B	F_{MAX}/A_0		MPa
④ 一様伸び	ϵ_u	引張強さ σ_B に関する公称ひずみ		%
⑤ 真破断力	σ_F	F_F/A_F		MPa
⑥ 破断伸び	δ	$(L_F - L_0)/L_0 \times 100$		%
⑦ 絞り	φ	$(A_F - A_0)/A_0 \times 100$		%
⑧ ヤング率	E	$\sigma_n = E\epsilon_n$		GPa
⑨ ポアソン比	ν	$\nu = -(\epsilon_l/\epsilon_\theta)$		-
⑩ n 乗硬化則	a n	$\sigma_t = a\epsilon_t^n$		MPa -

表 8: 試験結果の総括表 (降伏点を有さない場合) .

諸量	記号	計算式 / 決定方法	値	単位
① 0.2 %耐力	$\sigma_{0.2}$	$F_{0.2}/A_0$		MPa
③ 引張強さ	σ_B	F_{MAX}/A_0		MPa
④ 一様伸び	ϵ_u	引張強さ σ_B に関する公称ひずみ		%
⑤ 真破断力	σ_F	F_F/A_F		MPa
⑥ 破断伸び	δ	$(L_F - L_0)/L_0 \times 100$		%
⑦ 絞り	φ	$(A_F - A_0)/A_0 \times 100$		%
⑧ ヤング率	E	$\sigma_n = E\epsilon_n$		GPa
⑨ ポアソン比	ν	$\nu = -(\epsilon_l/\epsilon_\theta)$		-
⑩ n 乗硬化則	a n	$\sigma_t = a\epsilon_t^n$		MPa -

7 結言

今回の実験で得られた結果をまとめ、結言とせよ。