

画像計測を利用した鉛の力学特性の把握

吉田純司¹・阿部雅人²・Alessandro BEGHINI³・藤野陽三⁴・横川英彰⁵

¹正会員 博士(工) 山梨大学講師 工学部土木環境工学科 (〒400-8511 山梨県甲府市武田 4-3-11)

²正会員 Ph.D. 東京大学助教授 工学系研究科社会基盤工学専攻
(〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

³学生員 修士(工) 東京大学 工学系研究科社会基盤工学専攻 (同上)

⁴フェロー会員 Ph.D. 東京大学教授 工学系研究科社会基盤工学専攻 (同上)

⁵正会員 修士(工) オイレス工業株式会社 支承設計部 (〒105-8584 東京都港区芝大門 1-3-2)

鉛は、免震・制振デバイスに広く利用されているものの、大変形下において局所変形が著しいため変形を計測する手段がなく、その力学特性は不明な点が多い。本研究では、非一様に変形する鉛の変位場を計測する手法を確立し、鉛の力学特性を把握することを目的とする。まず、3次元的に変形する鉛の変形を把握するための画像解析手法を提案する。本手法は、定義された物質点を初期の段階で2次元の画像に射影して変形を追跡し、その後変形場を統合して3次元の変形場を得ている。次いで鉛の引張り試験を行い、試験片の変位場を本手法により精緻に計測し、鉛の力学特性を詳細に把握する。これらの実験結果は今後、鉛を応用したデバイスを合理的に設計するための基礎データとなる。

Key Words: lead, necking phenomena, image processing, three-dimensional measurement, strain field, stress-strain relation, rate dependency, cyclic behavior

1. はじめに

鉛材料は、エネルギー吸収材料としてこれまでダンパーや鉛プラグ入り積層ゴム支承など免震・制振デバイスに広く利用されている。鉛は金属特有の履歴によるエネルギー吸収性能に加え、柔軟で延性に富み、常温で再結晶する性質を有する材料^{1), 2)}である。そのため鉛材料は、免震・制振デバイスに生じる大変形にも追従して有意なエネルギー吸収性能を示すことが可能となる。また、変形後には再結晶化することで、材料の残留応力が時間とともに緩和し、最終的には完全な無応力状態に戻る。具体的には20℃付近において1時間に全体の約50%が再結晶することが知られている¹⁾。このことから地震後においても材料の損傷が大きい場合には、交換の必要がなく、デバイスの維持管理が容易である。

以上のように鉛は、免震・制振デバイスの材料として優れた性質を有しており、実際に広く利用されている^{1), 3), 4)}。

一方、これらのデバイスは、数十%以上の大ひずみ下において利用されることを想定している。このような大変形下においては、材料の製作段階におい

て生じる不均一性が原因となり、くびれ現象などの著しい局所変形を生じる。くびれは、鉛のみならず、鋼、銅およびアルミニウムなど金属の引張り試験において、材料が破断する直前に現れる現象として知られている^{5), 6)}。このような局所変形の影響で材料試験では変位場が不均一に分布する。しかし、これまで不均一な変位場を空間的に計測する手段がなく、材料試験から得られるデータは大きく限定されていた。特に、ヤング率や降伏応力など微小変形の範囲での材料定数は、既往の実験から明らかにされている^{2), 7)}ものの、材料の

- a) 精緻な応力-ひずみ関係
- b) 繰り返し載荷時の挙動
- c) 破断に至るまでの大ひずみ下での挙動
- d) 応力-ひずみ関係の速度依存性
- e) 疲労特性

については、これまで実験的検討は行われておらず、鉛を利用した免震・制振デバイスを設計するための十分な基礎データが得られているとは言い難い。このことからこれらのデバイスの設計は、デバイスレベルにおいて手間・費用をかけ載荷実験を行い、その結果を基に経験的に行われてきた。

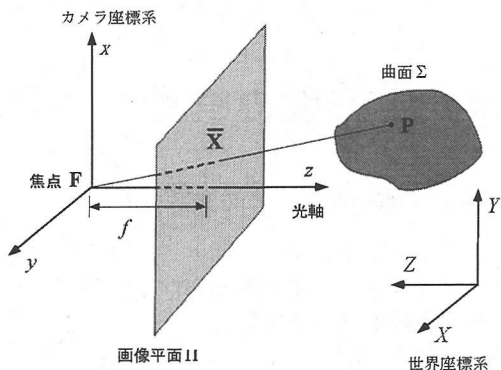


図-1 画像計測における各座標系の幾何学的関係

ここ 10 年におけるデジタル機器の著しい発展から、高精度の画像を高速度で取得できるようになってきた。画像は可視できる情報を空間的に把握できるという利点を有していることから、変形量に関わらず空間的に対象の変形を把握することが可能であり、これまで流れの可視化、コンピュータビジョンなどの分野に主として応用されてきた。3 次元計測においては、計測対象を複数のカメラにより記録し、これらの画像から得られる情報を統合して変形場を計測している。

Nishino 他^{8),9)}は 3 台のビデオカメラにより流れ場を記録し、流速場の 3 次元計測を行っている。3 次元の計測手法としては、記録された 3 つの画像中において流体中に混入される粒子について計測対象からカメラの焦点への射影線を求め、3 つの線が交わる点を粒子の 3 次元位置としている。除¹⁰⁾は複数の画像から対象の形状を復元し、3 次元視するシステムを構築している。具体的には、画像間の対応付けを相関法により行い、その後、射影方程式を連立して解き対象の 3 次元位置を算出している。

これらの手法は汎用的であるものの、各時刻で画像間の対応付けや射影線の算出を行う必要があり、画像が高精度である場合には手間・計算時間ともに膨大なものとなる。

本研究では、3 次元的に大変形する対象を簡易にかつ精度よく計測する手法を確立し、それを応用して鉛材料の力学特性の基礎的データを得心することとした。

まず、初期形状が既知であるものを対象として、3 次元的な変形場を計測する手法を提案する。本計測手法は、

- 1) 計測対象に物質点を定義し、それを画像平面上に射影する。
- 2) 射影された点に画像計測手法を適用して、物質点の 2 次元的な変形を追跡する。

3) 得られた 2 次元の変位場を統合して、3 次元の変位場を算出する。

である。そのため複数のカメラにより記録された画像では、3 次元的に分布する物質点を初期の段階で各々の画像平面上に射影することで、自動的に対応付けすることが可能となる。また、射影は初期に一度行うのみのため、計算時間を大幅に短縮できる。

次に鉛の力学挙動を把握するために、材料の引張り試験を行う。特に材料の破断特性、速度依存性、大ひずみ下での挙動および繰り返し載荷挙動を把握する。この試験では上述した画像解析手法により計測した変形場から、精緻な応力-ひずみ関係を把握している。なお、鉛は常温で再結晶化し、時間が十分経過すると過去に経験した変形あるいは応力の影響が除去される。このことから鉛の疲労特性は免震・制振デバイスの実用上、影響が小さいものと考え、本研究では検討していない。

2. 画像解析を応用した計測手法

以下では、初期形状が既知である対象に対する 3 次元の画像計測手法について述べる。本手法は、計測精度を向上するために、文献 13) で示した手法を発展させたものである。

(1) 計測対象の画像平面への射影

3 次元的に分布する物質点を定義するために、射影幾何の概念を応用し、カメラ座標系と世界座標系との間の射影を考慮して物質点を定義する。また、カメラはピンホールカメラとしてモデル化し中心射影を用いる^{11),12)}。ここに世界座標系とは、計測対象において位置を特定するための右手系直交座標系であり観測者が任意に設定することができる。

中心射影を行うために、図-1 のように世界座標系を $\mathbf{X}=(X, Y, Z)$ 、カメラ座標系を $\mathbf{x}=(x, y, z)$ とおく。o はカメラ座標系の原点を表しカメラの焦点 $\mathbf{F}=(X_f, Y_f, Z_f)$ と一致するものとする。また、 f はカメラの焦点距離を表すものとする。

カメラ座標系と世界座標系はどちらも右手系直交座標系であるとする、両者は回転と平行移動を行うことで一致させることができる。これを数式で表すと次のようになる。

$$\mathbf{x} = \mathbf{R} \cdot \mathbf{X} + \mathbf{t} \quad (1)$$

ただし、

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0 & \cos \beta & \sin \beta \\ \cos \alpha & -\sin \beta \sin \alpha & \sin \alpha \cos \beta \\ \sin \alpha & \cos \alpha \sin \beta & -\cos \alpha \cos \beta \end{bmatrix} \quad (2a)$$

$$\mathbf{t} = (-Y_f, -X_f, Z_f)^T \quad (2b)$$

上式において α および β は、カメラ座標系 $\mathbf{x}(x, y, z)$ において、それぞれ x - z 平面および y - z 平面でのカメラの回転角を表す。

世界座標において、以下の式で表される任意の曲面 Σ を考える。

$$Z_p = g(X_p, Y_p) \quad (3)$$

ただし、 g は凸型で連続な関数であるとする。また、式(3)において $\mathbf{P} = (X_p, Y_p, Z_p)$ は、曲面 Σ の任意の点を表すものとする。

ここで画像が写像される平面を Π とおくと、世界座標系およびカメラ座標系においては、画像平面はそれぞれ以下のように表される。

$$X \sin \alpha + Y \cos \alpha \sin \beta - Z \cos \alpha \cos \beta = f - Z_f \quad (4a)$$

$$z = f \quad (4b)$$

点 \mathbf{P} の Π への射影を $\bar{\mathbf{X}}$ とすると、 $\bar{\mathbf{X}}$ は図-1 より直線 \mathbf{PF} と画像平面の交点である。一般に直線は、2つの平面の交線として定義することが可能である。従って直線 \mathbf{PF} を世界座標系において数学的に記述するために、以下に示す2つの平面の式を用いる。

$$(Y_f - Y_p)X + (X_p - X_f)Y = X_p(Y_f - Y_p) - Y_p(X_f - X_p) \quad (5a)$$

$$(Z_f - Z_p)Y + (Y_p - Y_f)Z = Y_p(Z_f - Z_p) - Z_p(Y_f - Y_p) \quad (5b)$$

ただし式(5a)および(5b)はそれぞれ XY 平面および YZ 平面に垂直な平面を表している。式(5a)および(5b)で表される直線と、式(4a)の交点を求めると、以下のような線形問題に帰着する。

$$\mathbf{A} \cdot \bar{\mathbf{X}} = \mathbf{b} \quad (6)$$

ただし

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} Y_f - Y_p & X_p - X_f & 0 \\ 0 & Z_f - Z_p & Y_p - Y_f \\ \sin \alpha & \cos \alpha \sin \beta & -\cos \alpha \cos \beta \end{bmatrix} \quad (7a)$$

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} X_p(Y_f - Y_p) - Y_p(X_f - X_p) \\ Y_p(Z_f - Z_p) - Z_p(Y_f - Y_p) \\ f - Z_f \end{bmatrix} \quad (7b)$$

である。式(6)において $|\mathbf{A}| \neq 0$ である場合には、

$$\bar{\mathbf{X}} = \mathbf{A}^{-1} \cdot \mathbf{b} \quad (8)$$

より解を得ることができる。一方、 $Y_f = Y_p$ あるいは $X_f = X_p$ の場合には、 \mathbf{A} が特異になり式(6)のように解を得ることができない。この場合には、直線 \mathbf{PF} を定義する平面として、 XZ 平面に垂直な平面を1つ選ぶことにより、 \mathbf{A} を正則行列とすることができる。また、 $Y_f = Y_p$ かつ $X_f = X_p$ の場合には、式(8)の解 $\bar{\mathbf{X}} = (\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z})^T$ は、

$$\bar{X} = X_f \quad (9a)$$

$$\bar{Y} = Y_f \quad (9b)$$

$$\bar{Z} = -\frac{(f - Z_f) - Y_f \cos \alpha \sin \beta - X_f \sin \alpha}{\cos \alpha \cos \beta} \quad (9c)$$

となる。

以上のように式(6)で示される式から $\bar{\mathbf{X}}$ を求めることができる。 $\bar{\mathbf{X}}$ は世界座標系における点であることからこれをカメラ座標系での位置 $\bar{\mathbf{x}}$ に変換する。 $\bar{\mathbf{x}}$ は画像平面上の点であることから、式(1)を用いて以下のように表すことができる。

$$\bar{\mathbf{x}} = (\bar{x}_w, \bar{y}_w, f)^T = \mathbf{R} \cdot \bar{\mathbf{X}} + \mathbf{t} \quad (10)$$

ここで式(10)の射影は、以下のような2つの項に分割することができる¹⁰⁾。

$$\bar{\mathbf{x}} = \bar{\mathbf{x}}_w + \mathbf{c} \quad (11)$$

ただし、 \mathbf{x}_w は以下の式より YZ 平面と曲面 Σ の交点を画像平面に射影したものである。

$$\begin{aligned} \mathbf{P} \in (XY \cap \Sigma) &\Rightarrow \mathbf{P}(X_p, Y_p, 0) \\ &\Rightarrow \mathbf{c}|_{z_p=0} = \mathbf{0} \Rightarrow \bar{\mathbf{x}}|_{z_p=0} = \bar{\mathbf{x}}_w \end{aligned} \quad (12)$$

以上より $\bar{\mathbf{x}}_w$ は曲面 Σ 上の点を弱中心射影¹²⁾したものであるとみなすことができる。この弱中心射影においては、奥行き方向すなわち光軸方向(z 軸)の影響を考慮せず、任意の点 \mathbf{P} において $\mathbf{c} \approx \mathbf{0}$ と近似した射影である。

式(11)において弱中心射影に対する補正項 \mathbf{c} は、曲面 Σ の奥行き方向の影響を表している。ここで式(2a)の回転行列 \mathbf{R} において $|\sin \alpha| \ll 1$ 、 $|\sin \beta| \ll 1$ を満足する十分小さい α と β を考える。このとき、

$$\cos \alpha \approx 1, \sin \alpha \approx \alpha \quad (13a)$$

$$\cos \beta \approx 1, \sin \beta \approx \beta \quad (13b)$$

のように近似でき、式(11)より

$$\mathbf{c} = \begin{bmatrix} c_x \\ c_y \\ c_z \end{bmatrix} = \bar{\mathbf{x}} - \bar{\mathbf{x}}_w = \gamma \begin{bmatrix} \alpha \beta X_p^{(r)} + (\beta + 1) Y_p^{(r)} \\ X_p^{(r)} (\alpha^2 + 1) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

となる。ただし、

$$\gamma = \frac{Z_p (\alpha X_f + \beta Y_f - f)}{(\alpha X_p^{(r)} + \beta Y_p^{(r)} + Z_f) (\alpha X_p^{(r)} + \beta Y_p^{(r)} + Z_f - Z_p)} \quad (15a)$$

$$X_p^{(r)} = X_p - X_f \quad (15b)$$

$$Y_p^{(r)} = Y_p - Y_f \quad (15c)$$

$$Z_p^{(r)} = Z_p - Z_f \quad (15d)$$

である。ここで c_z が零となっているのは、対象としている問題が2次元の画像平面上の問題であり z 軸成分の補正は意味がないためである。さらに式(14)において $\alpha = 0$ 、 $\beta = 0$ とすると

$$\mathbf{c}|_{\alpha=0, \beta=0} \equiv \mathbf{c}_0 = \begin{bmatrix} c_x^{(0)} \\ c_y^{(0)} \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{Z_p f}{Z_f (Z_f - Z_p)} \begin{bmatrix} Y_p - Y_f \\ X_p - X_f \\ 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

を得る。式(16)は、 α および β の同定が不要という点において簡便である。後述する実用例においては、

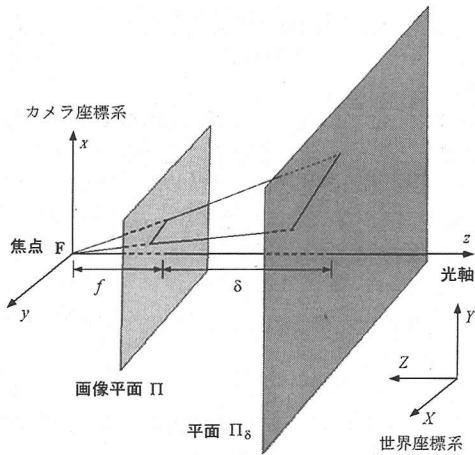


図-2 画像平面Piと平面Pi_δの幾何学的な関係

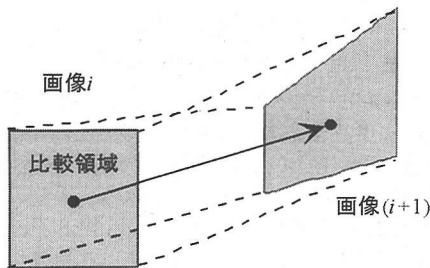


図-4 相関法を用いた画像計測アルゴリズム

c と c₀ の誤差が

$$\left| \frac{c_i - c_i^{(0)}}{c_i^{(0)}} \right| \leq 0.05 \quad (i = x, y) \quad (17)$$

であり、c₀ は精度の高い近似として成立する。

ここで図-2 に示すように焦点が同一である場合、すなわち同一のカメラ座標系を有しかつ光軸からの距離が異なる画像平面Pi_δを考える。カメラ座標系における画像平面Pi_δの方程式は、

$$z = f + \delta \quad (18)$$

であるとする。同一の対象である曲面Σを対象とし、そのPi_δへの射影をx̄_δとすると

$$\bar{x}_\delta = \left(1 + \frac{\delta}{f} \right) \bar{x} = \lambda (\bar{x}_w + c) \quad (19)$$

ただし

$$\lambda = \left(1 + \frac{\delta}{f} \right) \quad (20)$$

が成立する。上式より、画像平面Pi_δと同様にして新たな平面Pi_{δ1}およびPi_{δ2}を定義すると、

$$\bar{x}_{\delta 1} = \left(\frac{f + \delta 1}{f + \delta 2} \right) \bar{x}_{\delta 2} \quad (21)$$

を得る。画像解析においては、2次元の画像上で解析が成される。従って、画像平面状の奥行き方向(z

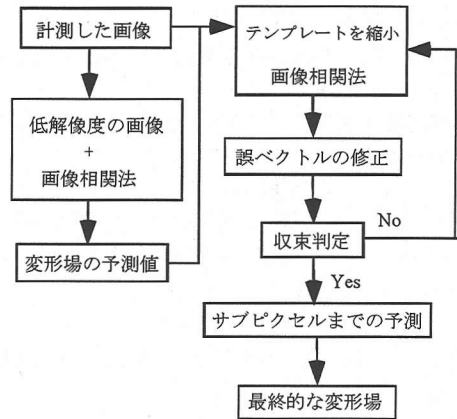


図-3 相関法を用いた画像計測アルゴリズム

方向)を無視することで、上式では次元数が3次元から2次元に縮退されることになる。

(2) マッチング法¹³⁾

a) 画像相関法

本計測手法においては画像表面にランダムな模様を作成し、それを一連の画像に記録してパターンマッチング法により追跡する。

パターンマッチングのアルゴリズムとしては、ノイズなどの影響を受けにくい相関係数を指標とした。また、マッチングに利用するテンプレートのサイズを縮小して繰り返し計算を行い、局所的な変形を追跡した。なお、物質点を逐次追跡することで集積する誤差を抑えるためにサブピクセルレベルまでの追跡を行っている。図-3に本研究で利用したアルゴリズムの流れを示す。

b) テンプレートの変形の追跡

マッチングの対象となる2つの画像間で変形が著しい場合においては、テンプレートは平行移動のみならず、剛体回転や変形を生じる。そこで本計測手法では、射影変換を利用し、テンプレートの平行移動のみならず、剛体回転およびせん断変形、引張り圧縮変形などを任意の変形を追跡している。図-4に射影変換によるテンプレートの変形の一例を示す。

(3) 3次元変位場の復元

計測した画像から3次元変位を求めるためには、2つ以上の異なるカメラで記録された画像に共通部分を有している必要がある。

そこで2つのカメラでの共通部分を記録している場合を考える。この2つのカメラの記録画像においては、それぞれ

1) 画像平面に計測対象上の物質点を本節(1)で述べた手法により投影し、

2) 本節(2)で述べた計測手法により2次元の変位場が得られている

ものとする。以下では、2つのカメラを区別するためのそれぞれカメラ1, カメラ2と呼ぶことにする。また、カメラ1およびカメラ2に関する量については、それぞれ右肩に(1)あるいは(2)を付けるものとする。

カメラ*i* (*i*=1,2)の焦点は、世界座標において $\mathbf{F}^{(i)} = (X_F^{(i)}, Y_F^{(i)}, Z_F^{(i)})^T$ のように定義する。時刻*t*にカメラ*i*により曲面 Σ を記録した画像において、曲面上の点 \mathbf{P} の射影を $\tilde{\mathbf{x}}^{(i)}$ とする。また、世界座標系において両カメラの画像平面を $\Pi^{(i)}$ とする。

まず以下で定義する $\Pi_F^{(i)}$ に射影することを考える。

$$\Pi_F^{(1)} : z^{(1)} = Z_F \Rightarrow \delta^{(1)} = Z_F - f^{(1)} \text{ or } Z = 0 \quad (22a)$$

$$\Pi_F^{(2)} : z^{(2)} = Y_F \Rightarrow \delta^{(2)} = Y_F - f^{(2)} \text{ or } Y = 0 \quad (22b)$$

ただし $f^{(i)}$ は各カメラの焦点距離である。また $\delta^{(i)}$ は、カメラ*i*の原点から平面 $\Pi_F^{(i)}$ までの距離と $f^{(i)}$ との差を表す。なお、 $\Pi_F^{(i)}$ への曲面 Σ への射影を $\tilde{\mathbf{x}}_F^{(i)}$ とすると、式(18)~(21)より $\tilde{\mathbf{x}}_F^{(1)}$ と $\tilde{\mathbf{x}}_F^{(2)}$ の間には

$$\tilde{\mathbf{x}}_F^{(1)} = \lambda^{(1)} \tilde{\mathbf{x}}_F^{(2)} \quad (23a)$$

$$\lambda^{(1)} = 1 + \frac{\delta^{(1)}}{f^{(1)}} \quad (23b)$$

の関係が成立する。

式(22)より、2つのカメラそれぞれのカメラ座標系において画像平面 $\Pi_F^{(i)}$ への点 \mathbf{P} の射影 $\tilde{\mathbf{x}}_F^{(i)}$ は、以下のようになる。

$$\tilde{\mathbf{x}}_F^{(1)} = (\tilde{x}_F^{(1)}, \tilde{y}_F^{(1)}, Z_F)^T \quad (24a)$$

$$\tilde{\mathbf{x}}_F^{(2)} = (\tilde{x}_F^{(2)}, \tilde{y}_F^{(2)}, Y_F)^T \quad (24b)$$

次いで上式を式(1)に適用して、世界座標系における画像平面 $\Pi_F^{(i)}$ への点 \mathbf{P} の射影 $\mathbf{P}^{(i)}$ は、

$$\mathbf{P}^{(1)} = (X_p^{(1)}, Y_p^{(1)}, 0)^T \quad (25a)$$

$$\mathbf{P}^{(2)} = (X_p^{(2)}, 0, Z_p^{(2)})^T \quad (25b)$$

となる。

式(25)のように世界座標系における点 \mathbf{P} の射影を求めることができた。従って点 \mathbf{P} の世界座標は、直線 $\mathbf{P}^{(1)}\mathbf{F}^{(1)}$ と直線 $\mathbf{P}^{(2)}\mathbf{F}^{(2)}$ の交点として算出できる。

直線 $\mathbf{P}^{(1)}\mathbf{F}^{(1)}$ を表現するために、式(5)と同様に以下の2つの平面を用いて定義する。

$$(-Z_F^{(1)})Y + (-Y_F^{(1)} + Y_F^{(1)})Z = -Z_F^{(1)}Y_F^{(1)} \quad (26a)$$

$$A_1X + B_1Y + C_1Z = 1 \quad (26b)$$

ただし、

$$A_1 = \frac{(Z_F^{(1)} - Z_F^{(2)})Y_F^{(1)} + Y_F^{(1)}Z_F^{(2)} - Z_F^{(1)}Y_F^{(2)}}{\Delta_1} \quad (27a)$$

$$B_1 = \frac{(Z_F^{(2)} - Z_F^{(1)})X_F^{(1)} - X_F^{(1)}Z_F^{(2)} + Z_F^{(1)}X_F^{(2)}}{\Delta_1} \quad (27b)$$

$$C_1 = \frac{(Y_F^{(1)} - Y_F^{(2)})X_F^{(1)} + (X_F^{(2)} - X_F^{(1)})Y_F^{(1)} - Y_F^{(1)}X_F^{(2)} + X_F^{(1)}Y_F^{(2)}}{\Delta_1} \quad (27c)$$

$$\Delta_1 = (-X_F^{(1)}Z_F^{(2)} + Z_F^{(1)}X_F^{(2)})Y_F^{(1)} + (Y_F^{(1)}Z_F^{(2)} - Z_F^{(1)}Y_F^{(2)})X_F^{(1)} \quad (27d)$$

である。ここに式(26a)は、YZ平面に垂直な平面の1つであり、式(26b)は $\mathbf{F}^{(1)}$ 、 $\mathbf{F}^{(2)}$ および $\mathbf{P}^{(1)}$ を通る平面である。

一方、直線 $\mathbf{P}^{(2)}\mathbf{F}^{(2)}$ は、式(26)と同様に以下以下の2つの平面により定義できる。

$$(Z_F^{(2)} - Z_F^{(2)})Y + Y_F^{(2)}Z = Z_F^{(2)}Y_F^{(2)} \quad (28a)$$

$$A_2X + B_2Y + C_2Z = 1 \quad (28b)$$

ただし

$$A_2 = \frac{(Y_F^{(1)} - Y_F^{(2)})Z_F^{(2)} + Y_F^{(2)}Z_F^{(1)} - Z_F^{(2)}Y_F^{(1)}}{\Delta_2} \quad (29a)$$

$$B_2 = \frac{(Y_F^{(2)} - Y_F^{(1)})X_F^{(2)} - X_F^{(1)}Y_F^{(2)} + Y_F^{(1)}X_F^{(2)}}{\Delta_2} \quad (29b)$$

$$C_2 = \frac{(Z_F^{(1)} - Z_F^{(2)})X_F^{(2)} + (X_F^{(2)} - X_F^{(1)})Z_F^{(2)} - Z_F^{(1)}X_F^{(2)} + X_F^{(1)}Z_F^{(2)}}{\Delta_2} \quad (29c)$$

$$\Delta_2 = (-X_F^{(1)}Y_F^{(2)} + Y_F^{(1)}X_F^{(2)})Z_F^{(2)} + (-Y_F^{(1)}Z_F^{(2)} + Z_F^{(1)}Y_F^{(2)})X_F^{(2)} \quad (29d)$$

である。ここに式(28a)は、YZ平面に垂直な平面の1つであり、式(28b)は $\mathbf{F}^{(1)}$ 、 $\mathbf{F}^{(2)}$ および $\mathbf{P}^{(2)}$ を通る平面である。

求めるべき点 \mathbf{P} は、式(26a,b)および式(28a,b)の4つの式を満足する。しかし実際には、計測したデジタル画像における量子誤差および数値誤差の影響により、この4つの方程式が完全に満足されることはない。そこで、式(26a,b)で表される直線上の任意の点と、式(28a,b)で表される直線上の任意の点において、両者を結ぶ線分の長さを最小とする位置を求め、その中点を点 \mathbf{P} とみなした。

3. 鉛の材料試験

以下では上述した画像計測手法を用いて鉛の引張り試験を行い、材料の力学特性を把握した。これらの試験において、鉛は数十パーセント以上の大ひずみ下において局所変形を生じるため、鉛の変位場を画像計測した。以下ではまず詳細な実験内容について説明し、次いで実験結果と考察を述べる。

(1) 試験片

本試験では、JISの規格にある円形断面を有するダンベル形状のものを用いた。鉛の材質としては純度99.99[%]以上のものを用いている。図-5に引張り試験片の概略図を示す。なお、図-6の写真(下)に示す

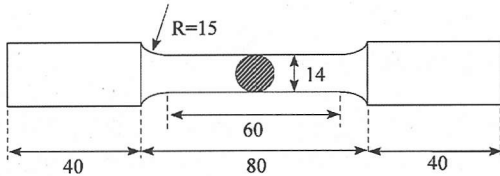


図-5 引張り試験片の寸法 (単位 [mm])

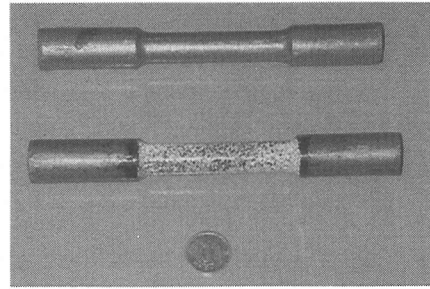


図-6 試験片の写真：[上] 着色前，[下] 白色の下地に黒色のランダムな模様を着色後

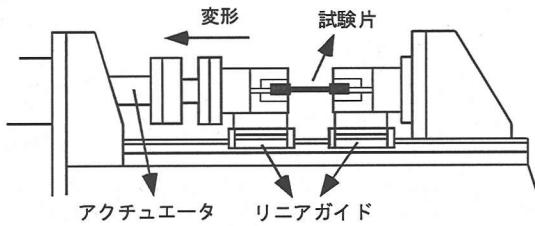


図-7 実験に用いた載荷装置

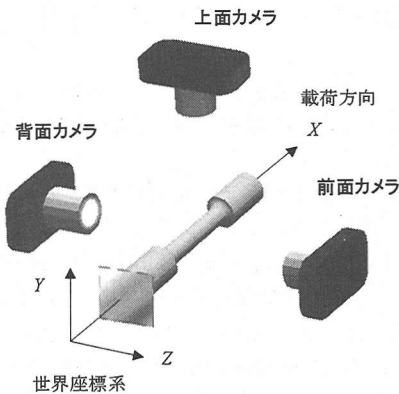


図-8 引張り試験における座標系とカメラの設置

ように実際に使用する試験片には、画像計測を行うためにランダムな模様を作成してある。

(2) 試験装置

a) 載荷装置

図-7 に本材料実験で使用した載荷装置の概略を示す。図-7 に示すように載荷装置では、アクチュエータの中心軸と平行にリニアガイドを設置し、それに試験片を固定する治具を取り付けている。そのため、試験片に回転やねじれを与えることなく試験片の中心軸に載荷することが可能である。

使用しているアクチュエータは、荷重容量 ± 20 [kN]、最大ストローク ± 100 [mm]であり、静的載荷から数十ヘルツ程度の動的載荷まで可能である。なお、リニアガイドによる摩擦力は最大で 0.06 [N]程度

表-1 画像解析に用いたカメラの性能

画像記録デバイス	中版アナログカメラ
フィルムサイズ	6×4.5[cm]
時間分解性能	1 [frame/sec]
レンズの歪み	画角端部で最大 0.05[%]
撮影素子	モノクロ
デジタル化の方法	フィルムスキャナー 解像度：4000 [dpi]

であり、例えば試験片の初期降伏荷重と比較して $1/200$ 以下と微小である。そのため、計測した荷重から摩擦力分を差し引くなどの後処理は行っていない。

b) 画像計測装置

画像計測では、 6×4.5 [cm]の中判フィルムを有するアナログカメラを用いた。また、アナログカメラで記録した画像はネガに変換後、フィルムスキャナーによりデジタル化し、8bit グレースケールのビットマップファイルとして用いた。表-1にこれらのデバイスの性能を示す。なお、表-1に示すように本研究で用いたカメラのレンズによる歪み量は、画角の端部において最大 0.05 [%]と非常に微小であることから、レンズの歪みによる誤差は考慮しないものとした。

(3) 画像計測手法の適用

a) 座標軸ならびに計測カメラの設置

画像計測では、本文2節で述べた手法が適用できるように世界座標系ならびにカメラを設置する必要がある。

具体的には、まず試験片に対し図-8のように世界座標系を設置する。この世界座標系においては、試験片の中心軸と、 X 軸が一致するように定める。次いで、前面カメラによる画像平面への射影を行うために、前面および背面のカメラを、両者の画像平面が、世界座標系の Z 軸と直交するように設置する。また、上面のカメラは、画像平面が世界座標系の Y 軸と直交するように設置する。具体的にカメラを設置する際には、レーザー光照射装置を用いた。この装

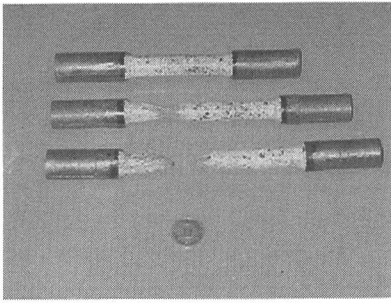


図-9 引張り試験における試験片の変形過程

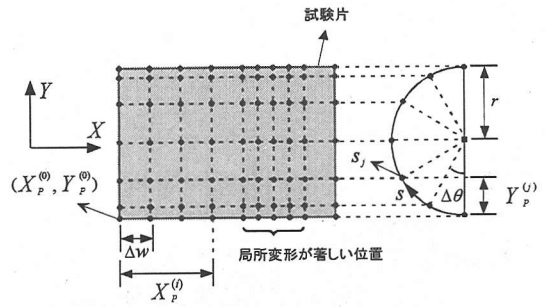


図-10 円筒部における物質点の定義

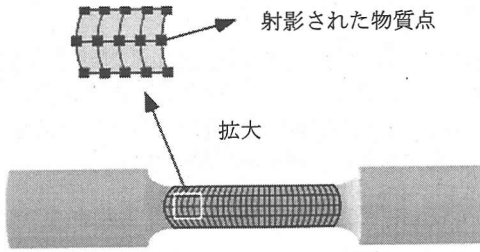


図-11 画像上に射影された物質点の概念図
(射影点はグリッドの交点)

置は直交する3本の赤外光ラインを同時に発生させることが可能である。そこで、本研究では

- 1) 3本のラインの1つが荷重方向と一致するように照射装置を設置する。
- 2) 荷重方向と直行する面を作るラインと、カメラの中心線が一致するように3台のカメラを設置する。
- 3) 2)の条件を満足し、かつ各カメラのレンズの中心点が試験片の軸線の位置に来るように微調整する。

のようにカメラを設置した。

なお、試験治具の関係上、カメラは3台であるため、試験片下部のZ方向については、変位場を計測できない。そこで本研究では、下部におけるZ方向の変位場を上部と同一値であると仮定して3次元変位場を復元した。後述する計測結果からこの仮定により生じる誤差を定量的に示すことはできないが、図-9に示すように局所変形部も含め変形が荷重軸に対し概ね軸対称であったことから本仮定を用いた。

b) 物質点の定義

本研究では、本文2節で述べた画像解析手法を適用し、鉛試験片の変形場を計測する。ここでは、そのための物質点を定義する手法について述べる。各物質点は、以下に示すように試験片表面に記したランダムな模様上に規則的な配置で定義していく。

計測対象である曲面 Σ は、引張り試験片の中心部の円筒であるものとする。このとき、前面のカメラ

ラに着目すると、式(3)における関数 g は以下のように記述できる。

$$Z_p = \sqrt{r^2 - Y_p^2} \quad (30)$$

ただし r は円筒断面の半径、 L は円筒の長さである。実際には、試験片中心の円筒部を計測対象とし、 $r = 7$ [mm], $L = 40$ [mm]を用いた。

式(28)で定義された曲面上に物質点を定義する。

図-10に示すように、左下の点の世界座標系における (X, Y) の位置を $(X_p^{(0)}, Y_p^{(0)})$ とおく。まず、円筒の軸方向(X軸方向)の物質点の位置 $X_p^{(i)}$ を以下のように定める。

$$X_p^{(i)} = (i-1)\Delta w + X_p^{(0)} \quad (i=1, 2, \dots, N_x) \quad (31)$$

ただし、

$$\Delta w = \begin{cases} \Delta w_0 / 2 & \text{if } X_p^{(i)} \in \mathbf{Q} \\ \Delta w_0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (32)$$

であり Δw_0 は定数、 N_x はX軸に沿った物質点の数である。また、 \mathbf{Q} は円筒部のうち局所変形が著しい領域におけるX座標の集合を表し、上式で定義される $X_p^{(i)}$ では、局所変形が著しい場所に2倍の密度で物質点を配置している。

次に物質点のY座標を定める。円筒の周に沿った曲線座標系を s とし、円周を角度 $\Delta\theta$ で分割した場合の各 s の位置を s_j 、 s_j をXY平面に射影した値を $\Delta Y_p^{(j)}$ とする。すると図-10の関係より、物質点のY座標 $Y_p^{(j)}$ は以下のように表される。

$$Y_p^{(j)} = \Delta Y_p^{(j)} + Y_p^{(0)} \quad (j=1, 2, \dots, N_y) \quad (33)$$

ただし、

$$\Delta Y_p^{(j)} = r \cos\{(j-1)\Delta\theta\} \quad (34)$$

であり r は円筒の半径、 N_y はY方向の物質点の数を表す。

最後に物質点のZ座標 $Z_p^{(ij)}$ は、式(31)および式(33)で定義した $(X_p^{(i)}, Y_p^{(j)})$ を式(30)に代入して算出した。

以上のように式(30)で定義した曲面上に、物質点 $(X_p^{(i)}, Y_p^{(j)}, Z_p^{(ij)})$ を作成した。作成した物質点に式(11)を適用して、前面カメラにおける画像平面に射影を行った。画像平面に射影された物質点の概念図を図-11に示す。なお、上面、背面のカメラについては、

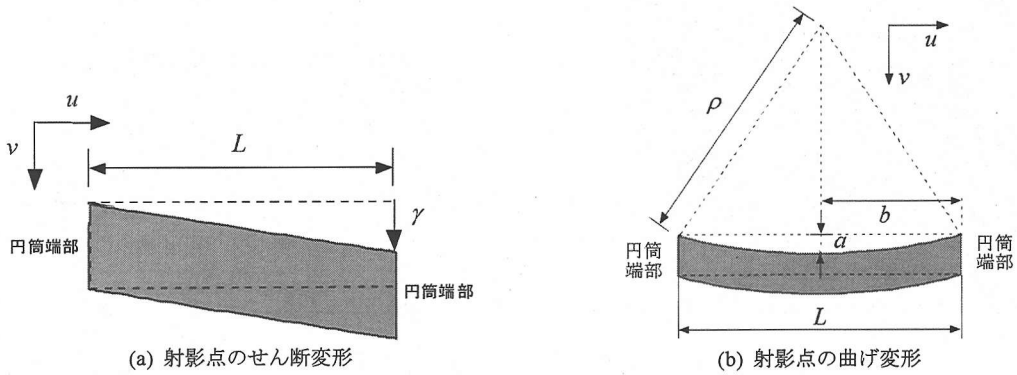


図-12 鉛試験片の初期変形による射影点の移動

世界座標系を X 軸回りに回転させ、 Z 軸の正方向が各カメラ座標系 z 軸の負方向とを一致するように設置することで、同一の方法により物質点を各画像平面へ射影することができる。

c) 試験片軸線の非直線性を考慮した射影点の補正

実際の試験片は、完全に円筒形状というわけではなく、初期状態においてもわずかながら変形している。そのため、本節 b) で定義した物質点は、必ずしも画像中における試験片上に配置されない場合がある。そこで、本研究では精緻な計測を行うために、試験片の初期形状に、以下に示す 2 種類の変形に類似した非直線性が含まれているものと考え、本節 b) で定義した物質点の位置を補正した。

補正前の画像座標系における射影された物質点の位置を (u, v) とおく。試験片が図-12(a) に示すように画像に対し鉛直方向にせん断変形していると考えると、 (u, v) は以下に示す点 (u_s, v_s) に移動する。

$$u_s = u \quad (35a)$$

$$v_s = v + \frac{\gamma}{L}u \quad (35b)$$

ただし γ はせん断変位である。

一方、試験片中心部が、図-12(b) に示すような半径 ρ の円弧の一部となっている変形を考える。このとき射影点 (u, v) は、以下のような点 (u_b, v_b) に移動する。

$$u_b = u - \left(\frac{\rho}{\sqrt{\rho^2 + u^2} - 2bu} - 1 \right) (b - u) \quad (36a)$$

$$v_b = v - \left(\frac{\rho}{\sqrt{\rho^2 + v^2} - 2bv} - 1 \right) \sqrt{\rho^2 - b^2} \quad (36b)$$

ここに

$$b = \frac{L}{2} \quad (37a)$$

$$\rho = \frac{a^2 + b^2}{2a} \quad (37b)$$

である。

式(35)および式(36)の変換式に従い、射影点の補正を行った。ただし、式(35)の γ の値は画像上での試験の両片端部の位置から、式(37)の a の値は画像上での試験片中央部と端部の相対位置から算出した。

(4) 試験方法

a) 引張り破断実験

本実験では、単調荷重により試験片に引張り変形を与え、材料が降伏した後のひずみ硬化について把握することを目的とした。本試験では、以下の引張り方向のみの繰り返し荷重を行った。また、ここでは特に比較的低速領域における材料の速度依存性を詳細に把握するために、0.015, 0.045, 0.075, 0.15, 0.45 および 0.90 [mm/sec] の速度での荷重を行った。

b) 繰り返し引張り圧縮試験

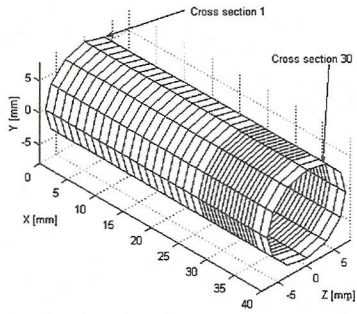
本実験では、繰り返し荷重を行い、材料の有する履歴特性、ひずみ硬化などを把握することを目的とした。ただしこの試験片では、鉛に約 2% 以上の圧縮変形を与えると試験片中心部付近に座屈が起こり、曲げ変形モードが現れてしまう。そこでこの試験では周期 100 [sec]、振幅 1.25 [mm] のサイン波を用いて繰り返し荷重を行った。

c) 除荷を含む引張り方向の繰り返し荷重実験

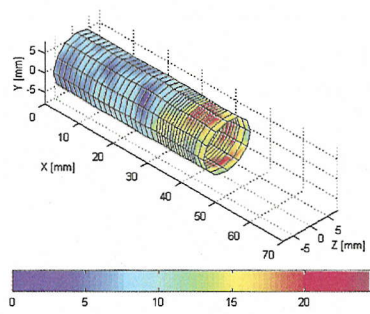
上述したように繰り返し試験においては、圧縮方向に荷重をかけると座屈が生じるため、大きな塑性変形を生じる場合の実験データを得ることができない。そこで荷重制御により引張り荷重のみの経路を設定し、繰り返し荷重実験を行った。ただし本試験では、一定の荷重速度 0.06 [KN/sec] により準静的な荷重を行っている。

d) 応力緩和試験

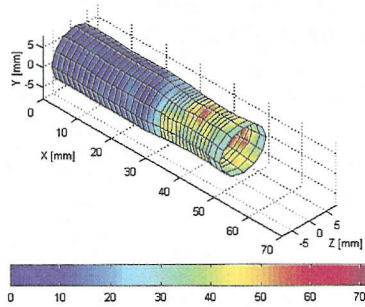
材料の粘性・速度依存性を把握するために、応力緩和試験を行った。本実験では、引張り方向に一定速度 0.5 [mm/sec] で 8 [mm] の変位を与え、その後、最終的な変形を 10 分間維持して材料の荷重が緩和するのを考察した。



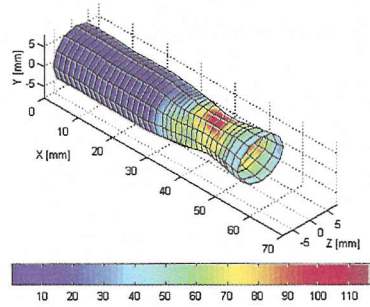
(a) 初期状態(無変形状態), 平均ひずみ 0 [%]



(b) 変位 7.20[mm], 平均ひずみ 11.3 [%]



(c) 変位 13.3[mm], 平均ひずみ 20.0 [%]



(d) 変位 18.0[mm], 平均ひずみ 26.2 [%]

図-13 速度 0.045[mm/sec]で载荷した実験における画像計測した試験片のひずみ場 (引張り方向の真ひずみ [%])

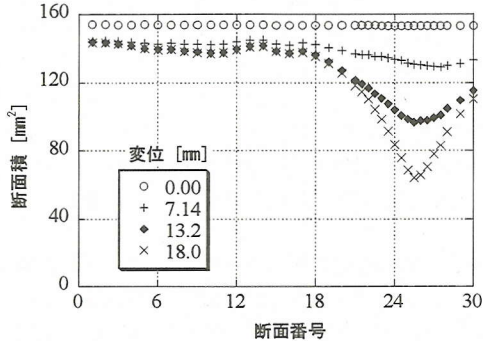


図-14 試験片の各断面における面積

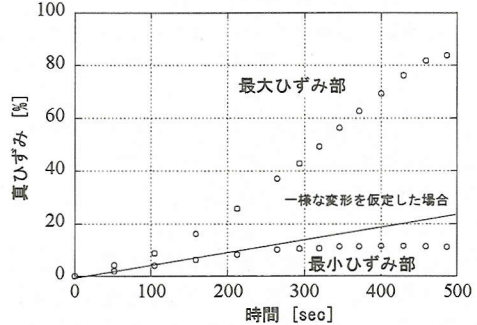


図-15 最大・最小のひずみを有する断面における
载荷時間とひずみの関係

(5) 実験結果と考察

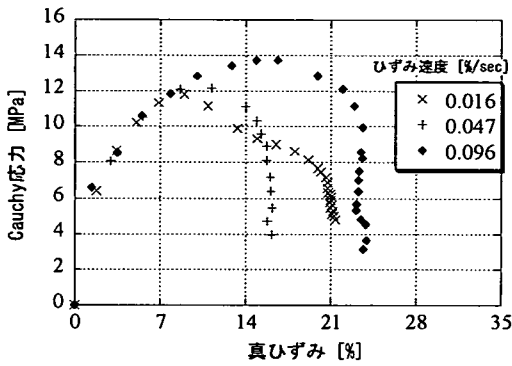
a) 引張り破断試験

図-13 に画像計測した試験片のひずみ場を示す。ただし、図中において平均ひずみとは、試験片に与えた変位により、試験片の有効長さ 60[mm]に一樣な引張り変形が生じていると仮定した場合の真ひずみである¹⁴⁾。

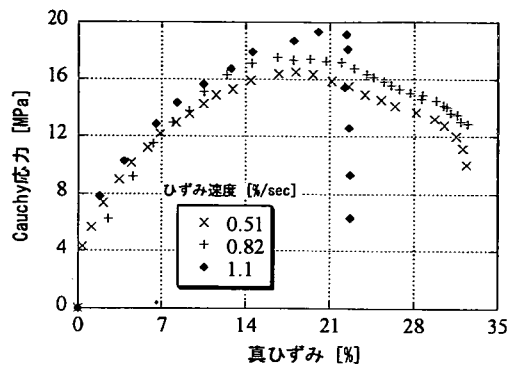
図-13 をみると試験片は、一樣には変形せず明確な局所的変形を示し、かつその変形が変位の増加につれて著しく増大していく様子がわかる。また、本試験を通して、局所変形が生じる位置は試験片によ

り異なり、必ずしも中心部付近に生じるとは限らないことがわかった。このことから、上述した平均ひずみと、荷重を試験片の初期断面積で除した近似的な Cauchy 応力とを用いる従来の手法^{14), 15)}では、材料本来の力学特性を得られていないことが明らかである。

このような局所変形は、大きさに差はあるものの鉛に限らず、鋼、銅、アルミニウムおよびステンレスなど他の金属材料にもみられる現象である。そのため、本文 1 節で述べたようにこれらの材料において、数十%以上の大ひずみ領域までの力学特性を引

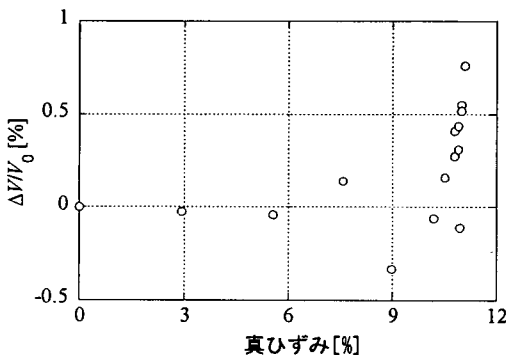


(a) 低ひずみ速度での応力-ひずみ関係

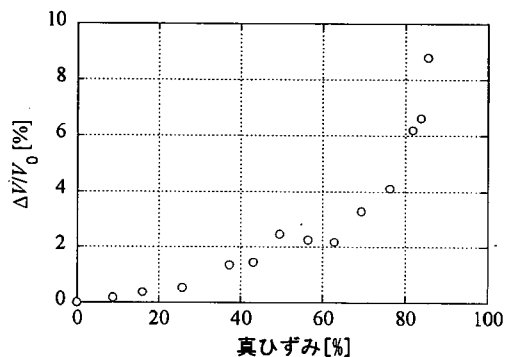


(b) 高ひずみ速度での応力-ひずみ関係

図-16 引張り破断試験から得られた応力-ひずみ関係 (引張り方向の Cauchy 応力と真ひずみ関係)



(a) 小ひずみ領域における体積変化



(b) 大ひずみ領域における体積変化

図-17 引張り破断試験における体積の変化とひずみの関係

張り試験において把握するためには、従来のひずみゲージによる計測に代わり、本研究で提案したような空間的な計測手法が必要であることがわかる。

画像計測結果を用いると、図-14 に示すように試験片の断面積が任意の位置で計算可能である。試験片の断面積が得られることにより、Cauchy 応力を各断面で計測することができる。特に大ひずみの問題においては、物理的意味の明確な Cauchy 応力を利用する機会が多いことを考えると、本研究で得られた結果は貴重なものである。ただし、局所変形している断面においては、主として引張り変形が生じているものの、わずかながらせん断変形やねじれ変形なども併せて生じ、多軸変形状態となっている。そのため、ここで示す Cauchy 応力とは、主たる引張り変形のみに着目した平均的な値である。

次いで、図-16 に本画像計測手法を用いて計測した鉛試験片の Cauchy 応力と真ひずみの関係を示す。ただし試験片は局所変形していることから、図-15 に示すように、各断面により、時間とひずみ量の関係は、大きく異なる。なお、図-15 中において「一

様な変形を仮定した場合」とは、試験片に与えた変位により、試験片の有効長さ 60[mm]に一樣なひずみを生じると仮定した場合の真ひずみの時間増加率である。

本研究では、連続する 2 つの断面に挟まれた領域のうち、時間とひずみ量の相関係数が最も高い領域、すなわち時間とひずみの関係が最も直線に近い領域を選択し、その領域から得られる応力-ひずみ関係、およびひずみ速度を用いた。図-16 より以下のことがわかる。

- 1) ひずみが約 10%以下の範囲においては、明確なひずみ硬化を示す。その後、応力値が 10~14[%]程度のひずみでピークに達すると、挙動は一変し負勾配を有するようになる。この現象は、ピークを過ぎると変形がくびれ部に集中し、くびれ部以外の位置でのひずみ速度が著しく減少するために発生したものと考えている。ひずみ速度が減少した部分では、除々に応力の緩和が始まり、最終的にはほとんど変形が進行せず応力のみが低下している。

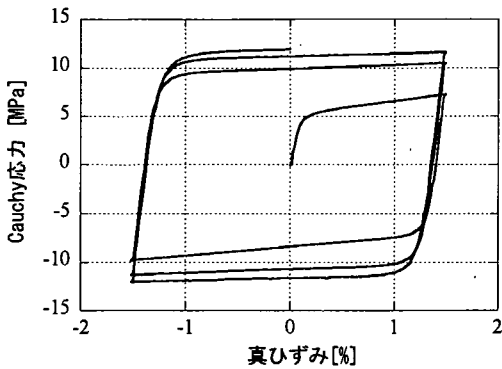


図-18 引張り圧縮繰返し載荷実験結果から得られた応力-ひずみ関係

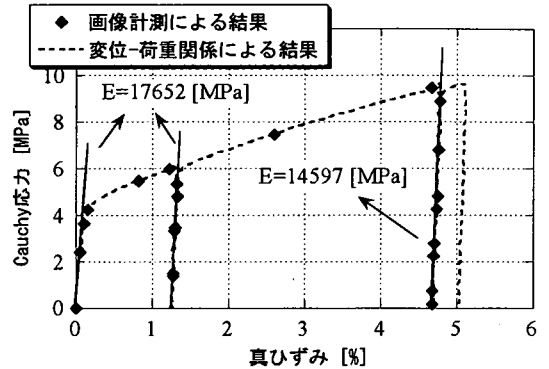


図-19 除荷を含む引張り方向の繰返し載荷実験から得られた応力-ひずみ関係

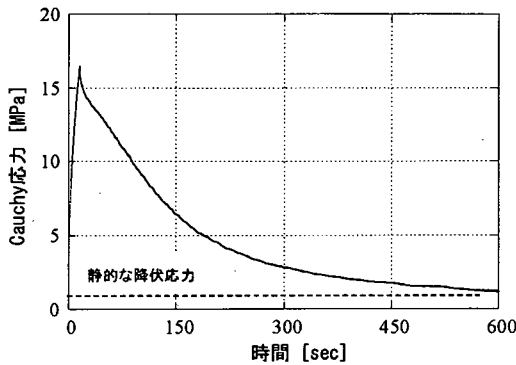


図-20 応力緩和試験から得られたの応力と時間の関係

- 2) 本実験において対象としたひずみ速度において速度依存性を示す。ひずみが比較的一定とみなせるピーク前の範囲においては、応力値は、ひずみ速度の増加に従って大きくなっている。ピークでの応力値は、今回対象とした速度範囲において 12~19[MPa]の範囲にある。このことから鉛が速度依存性を有していることがわかる。

次に図-17に、最も大きく変形した断面間でのひずみ量と体積変化率との関係を示す。ただし図-17において縦軸は、体積変化量を無変形状態の体積により除した値である。図-17をみると、10[%]以下のひずみ量では、体積変化は微小であり一定の傾向はみられない。この原因は、変形が微小であることから、画像計測での量子誤差が影響しているものと考えられる。一方、10[%]以上のひずみ量では、体積変化率はひずみの増加に従って単調に増加し、90[%]のひずみを生じている時点では、約9[%]にも及んでいる。通常、鉛の塑性変形が大ひずみ領域においても非圧縮である¹⁾ことを考慮すると、この体積の増加は、材料内部において空隙が成長、生成する現象が起こっているものと考えている。このことは、现阶段では推測の域をでないが、今後、鉛の構成則を

構築する上で、ハイブリッド解析手法¹⁶⁾などを用いてその妥当性を検討していくつもりである。

b) 繰返し圧縮引張り試験

図-18に繰返し引張り圧縮試験から得られた引張り方向のCauchy応力と真ひずみの関係を示す。ただし、本試験ではひずみが微小であったため、画像計測結果と変位-荷重関係から得られる応力-ひずみ関係が概ね一致していた。そこで図-18では、サンプリング数が多い、変位-荷重関係から算出される応力-ひずみ関係を示している。

図-18をみると、鉛は明確な弾塑性的挙動を有し、塑性変形後はひずみ硬化を示している。特に繰返し載荷に伴い降伏応力の増加が見られることから、ひずみ硬化のなかに等方硬化が含まれているものと考えられる。なお、移動硬化との割合については、今後、構成則を構築する上で明らかにしていくつもりである。

c) 除荷を含む引張り方向の繰返し載荷実験

図-19に本試験から得られた引張り方向のCauchy応力と真ひずみの関係を示す。この図では、画像計測と、変位-荷重関係から得られる応力-ひずみ関係の比較も併せて示している。また、図中のEは除荷時および再載荷時における弾性範囲でのヤング率を示しており、これらの値は弾性域での計測値から最小2乗法により求めた。

図-19をみると、ひずみが4.6%以下の範囲においては、従来の手法でも画像計測手法と概ね一致した応力-ひずみ関係が得られている。このことから、このひずみ範囲では、試験片は概ね一樣に変形し、かつ断面積の変化が応力の算出に与える影響も小さいことがわかる。次いで、除荷および再載荷時のヤング率に着目すると、ひずみ4%付近での除荷時のヤング率は、初期のヤング率を比較すると約16[%]減少していた。一方、ひずみ1%付近の除荷勾配は初期のものと同であった。この現象は1~4%程度の

ひずみ区間で、材料内部で空隙の成長・生成などが始まっているものと考えている。

d) 応力緩和試験

応力緩和試験から得られた時間と応力の関係について図-20 に示す。図-20 をみると応力の緩和率は、10 分経過した時点で、静的な初期降伏応力²⁾に漸近している。従って再結晶の影響を除くと、鉛の応力緩和の挙動は、通常の粘塑性体¹⁵⁾が示す挙動と同様であることがわかる。

4. まとめ

本研究では、大変形を含む変位場を 3 次元計測する手法を確立し、それを応用して鉛の力学特性に関する基礎的なデータを得ることを目的とした。得られた主たる知見は以下の通りである。

- 1) 画像解析を応用し、初期形状が既知である計測対象の変位場を計測する手法を提案した。本手法は対象の形状が既知であるという条件が必要となるものの、画像間の対応付け処理を初期に 1 度行うのみで 3 次元計測することができる。特に材料試験においては、試験片の形状がすでに規定されている場合が多い。従って今後、局所的な変形を示す試験であってもその変形場を計測することが可能となった。
- 2) 画像計測手法により得られた鉛の引張り試験片の変形場から、従来では得られなかった精緻な応力-ひずみ関係、さらには体積変化を把握することが可能となった。
- 3) 引張り破断試験より、鉛は約 10%以下のひずみ下においては、応力がひずみ硬化を示し、応力値が 12~19[MPa]でピークに到達する。ピークに到達するまでのひずみ硬化の割合は、ひずみ速度に依存する。また、ピークに到達後、応力-ひずみ関係は負勾配を示すようになる。
- 4) 引張り方向の繰り返し載荷試験結果から、4.6 [%]程度のひずみを経験した後、ヤング率が 16 [%]程度低下することがわかった。この現象は、材料が大ひずみを経験し材料内部に損傷受けたことが原因であると推測される。
- 5) 引張り破断試験、繰り返し引張り圧縮試験および応力緩和試験の結果より、鉛は速度依存性を有し、その挙動は粘弾塑性的であることがわかった。また降伏後は明確なひずみ硬化、特に等方硬化を含んでいることがわかった。

以上のように本研究では、鉛の精緻な応力-ひずみ関係を把握し、実験結果から速度依存性、破断に

至る大ひずみ下での挙動、および繰り返し挙動について明らかにした。これらの材料特性は、免震・制振デバイスを合理的に設計するための基礎データとなる。また、材料の構成則を構築する際にも有用なデータである。

謝辞: 材料試験に利用した試験片の設計・製作では、オイレス工業(株)の伊関治郎氏、下田郁夫氏および増田耕一氏に協力して頂きました。また、画像計測システムの構築および鉛の載荷実験では、元東京大学大学院(現、JR 東日本(株))の竹上浩史氏に多大な協力を賜りました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) R.I.スキナー, W.H.ロビンソン, G.H.マックベリー著, 川島一彦, 北川良和監訳: 免震設計入門, 鹿島出版会, 1996.
- 2) 日本亜鉛需要研究会編: 鉛ハンドブック 改訂版, 日本亜鉛需要研究会, 1992.
- 3) Robinson, W.H. and Cousins, W.J.: Lead Dampers for base-isolation, *Proceedings of 9th World Conference on Earthquake Engineering*, Tokyo and Kyoto, Japan, Vol.8, pp.427-432, 1988.
- 4) Robinson, W.H.: Lead Rubber Hysteretic Bearings Suitable for Protecting Structures from Earthquakes, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.10, pp.593-604, 1982.
- 5) Becker, R. and Needleman, A.: Effect of Yield Surface Curvature on Necking and Failure in Porous Plastic Solids, *Journal of Applied Mechanics*, ASME, Vol.53, pp.491-499, 1986.
- 6) 岡澤重信, 宇佐美勉, 野口裕久, 藤井丈夫: 3次元塑性不安定解析による引張り鋼材の局所くびれ挙動, 土木学会論文集, No.654/I-52, pp.285-296, 2000.
- 7) 高林勝人, 長松信裕, 八坂厚彦, 飯塚真臣, 笠井洋昭: FBRプラントへの免震構造適用性に関する研究 - その1 鉛ゴム支承の実験 -, 日本建築学会年次学術講演会梗概集, pp.983-984, 1986.
- 8) Nishino, K., Kasagi, N. and Hirata, M.: Three - Dimensional Particle Tracking Velocimetry Based on Automated Digital Image Processing, *Journal of Fluids Engineering*, ASME, Vol.111, pp.384-391, 1989.
- 9) 西野耕一, 笠木伸英, 平田賢, 佐田豊: 画像処理に基づく流れの三次元計測に関する研究, 日本機械学会論文集 (B編), 55巻510号, pp.404-412, 1989.
- 10) 徐剛: 写真から作る3次元CG-イメージベースドモデリング & レタリング, 近代科学社, 2001.
- 11) Gang Xu, Zhengyou Zhang: *Epipolar Geometry in Stereo, Motion and Object Recognition: A Unified Approach*,

- Kluwer Academic Publisher, 1996.
- 12) 徐剛, 辻三郎: 3次元ビジョン, 共立出版, 1998.
- 13) 吉田純司, 阿部雅人, 藤野陽三, Lewangamage, C.S.: 画像解析を利用した連続体の変形場の計測法, 土木学会論文集, No.710/I-60, pp.165-179, 2002.
- 14) 山田嘉昭: 有限要素法の基礎と応用シリーズ2 マトリックス法材料力学, 培風館, 1980.
- 15) Irving, H.S., and Francis, A.C.: *Elastic and Inelastic Stress Analysis*, Taylor & Francis, 1997.
- 16) 吉田純司, 阿部雅人, 藤野陽三: 高減衰ゴム材料の構成則, 土木学会論文集, No.710/I-60, pp.209-224, 2002.
- (2002. 3. 14 受付)

MECHANICAL PROPERTIES OF LEAD MEASURED BY THE IMAGE PROCESSING TECHNIQUE

Junji YOSHIDA, Masato ABE, Alessandro BEGHINI, Yozo FUJINO
and Hideaki YOKOKAWA

Mechanical properties of lead are studied experimentally with aid of image processing technique. At first, a new image processing technique is developed. In this method, three-dimensional material points are initially projected to the images and their displacements are traced in each image by a two-dimensional image processing technique. These displacement fields are combined to recover the three dimensional deformation. Then, the mechanical properties of lead are studied through material tests, in which the proposed image processing technique is applied. From these experiments, it is clarified that lead has rate dependency and that stress shows softening because of the accumulated damage in the large strain range.