

旋盤用チャックを用いた面内 2 軸引張試験装置の開発

Development of Simple Biaxial Tensile Testing Apparatus Using Lathe Chuck

坂本 誠¹⁾

Makoto Sakamoto¹⁾

Abstract: In recent years, the desired accuracy and the forming difficulty of the product size in the fabricating operation of a plate material are increasingly severe. For example, the automotive industry environmental concerns, the problem of fuel efficiency and weight reduction and so on. Reducing the weight of automobiles is one of the primary concern by which their fuel efficiency is lowered. The two basic approaches are in automotive design and in materials selection, and they are closely related. As a countermeasure, the demand of high-tensile steel or aluminum alloy sheet is increasing rapidly. Because the press forming can produce cheap parts in large quantities, it is used for the processing of the automotive material. The biaxial tensile testing apparatus of the hydraulic control for which the estimation method of material used cruciform specimen is already developed. This apparatus has measured the forming limit and yield loci of various materials with sufficient accuracy. However, in order to pursue performance, apparatus is large-sized and is complicated. Development of a simple and accurate evaluation technique is desired in small and medium enterprise or a manufacturing site. Using the scroll chuck used for a lathe, we developed the simplified biaxial tensile testing apparatus. Then, independent chuck by which each axis is independent and operates, arbitrary stress ratio condition are made to act on a specimen, and this study aims at measuring the plastic deformation characteristic with high precision of the apparatus and strain ratio after fraction of sheet metal.

Keywords: Plastic deformation, Biaxial tensile test, Forming limit diagram, Large strain, 3D-CAD

1. 緒言

板材の成形加工において、製品寸法の要求精度と成形難易度はますます厳しくなっている。自動車为例にとると、地球温暖化対策として燃費向上、CO₂ 排出量の削減などの社会的要請に伴い、車体重量の軽量化が急がれている。金属のプレス加工は、安価な部品を大量に生産できるため、自動車用部材の加工などに適用されているが、プレス加工時に割れ・しわ・スプリングバックなどの成形不良が生じやすいため、これが試作期間およびコストの増大の原因となっている。そのため、金属材料の破断現象の解明、および成形限界の予測は、塑性加工の分野における重要な技術課題のひとつとなっている。

材料の成形限界予測には、十字型試験片を用いた面内 2 軸負荷試験が行われている。これには油圧制御 2 軸引張試験装置があり、成形限界線図の作成や降伏曲面の同定などで成果を挙げている¹⁾。また他にも同様の研究は多数あるが、本研究のように、剛性のある旋盤用チャックを用いたスクロールチャック機構に着目した等 2 軸引張試験装置²⁾やインディペンデントチャック機構に着目した簡便な面内 2 軸引張試験装置³⁾を開発している研究はない。このように汎用的

な旋盤用チャックに脱着式のモータを用いて面内 2 軸負荷引張試験を行うことは、大規模な装置を製作しなくても材料の成形限界曲線や降伏曲面の同定などが可能となり、中小企業においても自前で材料負荷試験を行う事ができることを意味する。すなわちプレス現場での材料評価が可能となり、試作工程の短縮、ひいては地球環境の改善に貢献できるものである。

上述したような背景から本研究室において簡便な 2 軸引張試験装置の開発を行い、成果をあげてきたが、従来の試験片把握装置(旧装置)は、その設計上の問題によって測定精度に影響がでることがわかった。そこで本紀要においては旧装置把握部の概要を示し、その剛性を明らかにした後に、新装置把握部の高剛性化を目指した設計・製作について示し、新装置把握部の高剛性化について報告する。

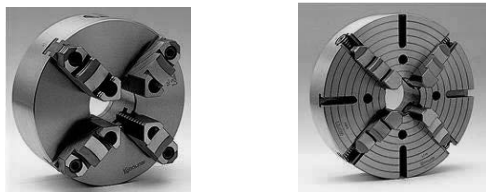
2. 旋盤用チャックを用いた面内 2 軸引張試験装置

Fig.1(a)に示すスクロールチャックを用いて面内等 2 軸引張試験機を開発を行った。スクロールチャックはハンドルでサイドにあるピニオンを回すことで内部の渦巻きネジが

¹⁾東京都立産業技術高等専門学校 ものづくり工学科、生産システム工学コース

回り、外爪が半径方向に等変位する機構となっている。この外爪に変えて試験片を掴むチャックを用いれば、試験片に面内 2 軸等変位を作用させる事ができる。Fig.1(b) はインディペンデントチャックを示す。これも(a)と同様に、外爪に試験片を掴むチャックを装着する。インディペンデントチャックは各チャックを独立で動かすことができるため、その移動量によって様々な負荷経路を材料に与えることができる。

Fig.2 にインディペンデントチャックに掴み部を装着した旧装置の概要を示す。図の中央にあるのがインディペンデントチャックで、その下左右にモータ (MUSCLE Cool Muscle Servo System by Muscle Co.) が取り付けられている。図中央上部にあるのが試験片を取り付ける把握部となる。この把握部によって十字型試験片の上下左右端を固定し、パーソナルコンピュータで制御されたモータでチャックの爪を動かす。旧装置の掴み部の寸法を Fig.3 に示す。図の中央にある試験片を引っ張るために、内向きに F なる荷重が



(a) Scroll chuck (b) Independent chuck

Fig.1 View of Lathe chuck

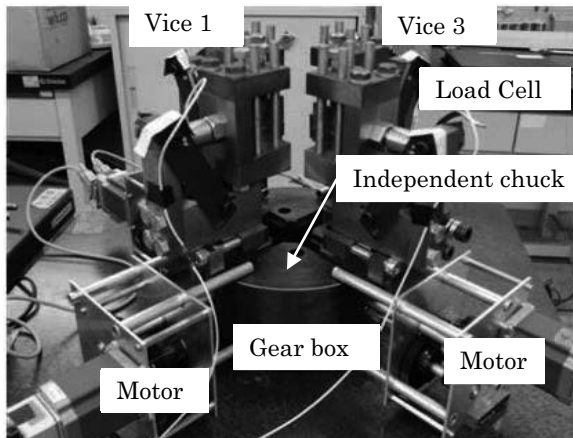


Fig.2 Old Simple biaxial tensile testing apparatus

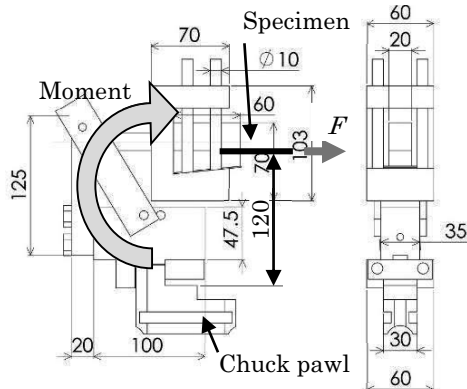


Fig.3 Size of biaxial tensile testing device

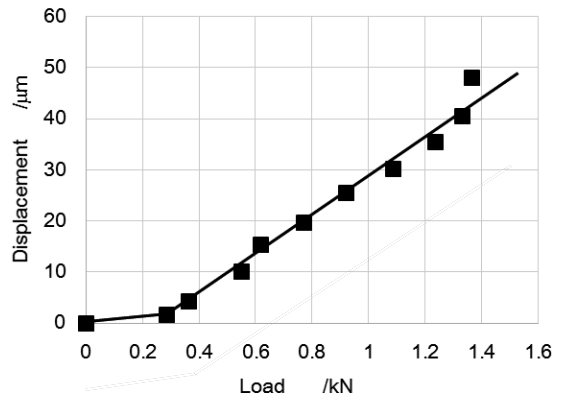


Fig.4 Load-displacement curve

掴み部には掛かる。また外爪にある把握部取付け金具から試験片までの距離が 120mm あるために、試験を行うと 120 Nmm のモーメントが旧装置掴み部に作用していることがわかる。そこで、実験を行った際にこのモーメントによって試験片把握部がどの程度、装置内側に変位をしているかを測定した。実験は Vice1-3 で短冊状の試験片を掴み、チャック爪の変位と掴み部後端の変位差をダイヤルゲージにて測定した。実験は 5 回行い、その平均結果を Fig.4 に示す。図より 0.28kN までは装置のガタツキによる変位が発生しているが、それ以降は線形に 37.4 $\mu m/kN$ の傾きで装置内側方向に試験片掴み部の剛性不足による変位が発生していることがわかる。すなわちインディペンデントチャック本体は高剛性であるが、旧装置掴み部の剛性はそれほど高くはないことがわかった。

3. 新 2 軸引張試験装置の設計・製作

3-1. 新装置の設計・製作

前述のように、旧装置掴み部に低剛性のところが見つかった 2 軸引張試験装置に対して、チャック爪と試験片取り付け位置の距離をできる限り短くするように新装置の設計・製作を行った。

すなわち、前述の旧装置把握部がもつ性能を下回ることなく、問題とされている面内直角方向に対してのモーメントを減少させるために設定する。また試験片の脱着もしやすいような設計とした。上記のプランを元に新しくデザインされた新装置掴み部を Fig.5 に、3D イメージを Fig.6 に示す。設計には本学に設置してある 3D-CAD ソフトを用い、

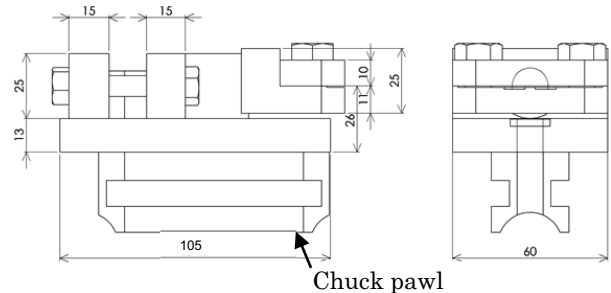


Fig.5 Design of new device for testing apparatus

製作には FMS に設置してあるマシニングセンターによって行った。実際に製作した掴み部を Fig.7 に示す。

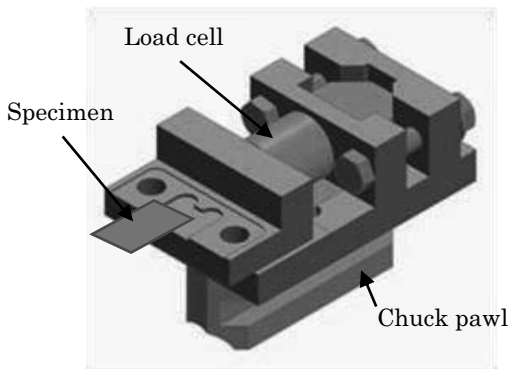


Fig.6 3D view of new device

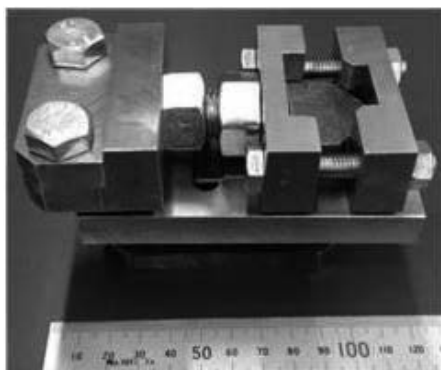


Fig.7 Manufactured new device

3-2. 新装置の剛性の検証

旧装置の剛性を検証した実験を新装置でも実施し、掴み部の剛性がどれくらい向上したかを検証した。Fig.8 はその時の実験の様子を示す。

変位量の測定にはレーザー式変位計(株式会社キーエンス,LK-010)を用いた。結果を Fig.9 に示す。同時に旧装置の結果も示す。図より装置の剛性変位の傾きは $1.2\mu\text{m}/\text{kN}$ となり、旧装置の $37.4\mu\text{m}/\text{kN}$ と比較して、31.5 倍の剛性の向上に成功した。

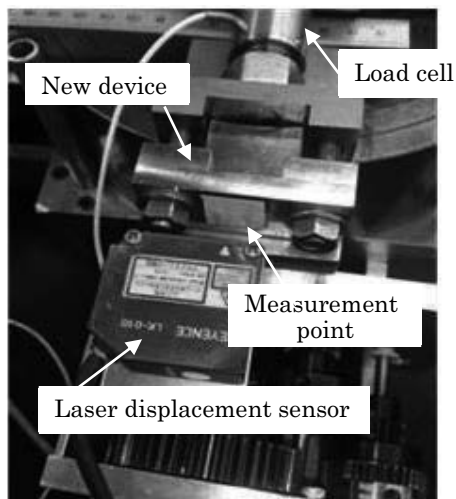


Fig.8 Experimental setup by new device

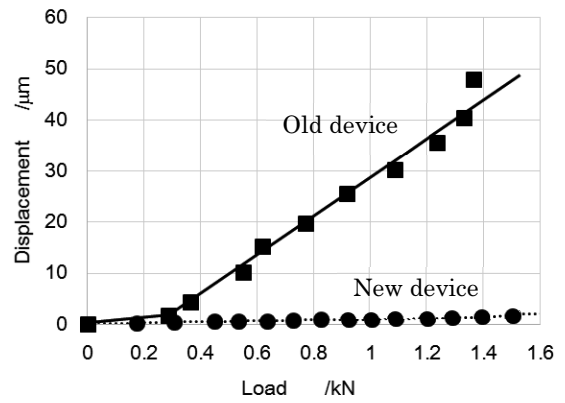


Fig.9 Load-displacement curve

4. オーバーラップサークルにおけるひずみ算出

4-1. 楕円境界の検出

実験においてひずみの算出には Fig.10 に示すオーバーラップサークルを試験片に印刷してその変形を追う。 9×9 画素のマスクパターンを用いて、変形前の円の交点 ABCD を求める⁴⁾。 Fig.11(a)に示す重なり合う円との交点 A を出発点として、点 D まで移動しながら y 方向に走査をし、円の境界線の検出を行う。同じように D から B, A から C, C から B についても走査をした後、最小二乗法によって、その境界を楕円近似する。試験片上の全ての円について近似式を求めた後、各円との交点を改めて点 a,b,c,d(Fig.11(b))のように求める。この際、交点は 4 点求められるため、それらを平均した点 e を注目する物体点とする。このようにして求めた物体点 A,B,C,D を用いてひずみを求める。なおこの物体点は、たとえば全体にしきい値を小さく設定して近似した場合 (Fig.11(b) の点線) においても、4 点の平均を取ることで輝度の変化による影響を受けにくい効果がある。

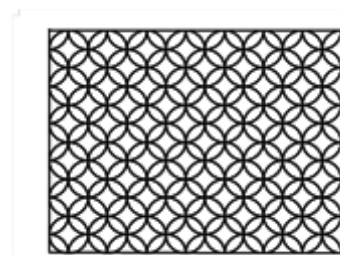


Fig.10 Overlapped circles

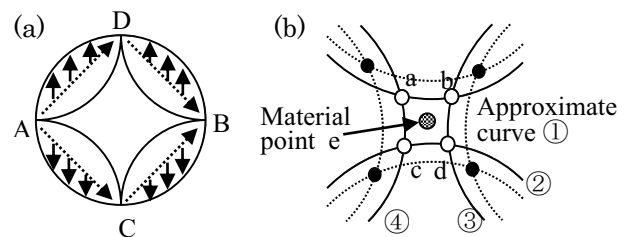


Fig.11 Process to detect the boundary of circles (a) and definition of a material point (b)

4-2. ひずみ解析方法

材料に標識としてサークルグリッドを用いるが、それには2つの理由がある。第1に本来増分ひずみ Δd はある変形段階の区間で線形であると規定されていることから、材料の物体点が線形変換される範囲内で挙動するという前提を、サークルを適用するための判断基準とすることができる。第2に画像処理としてイメージセンサカメラで標識を取り込んだ後、追及する物体点を決定する際、第1の理由により楕円という近似度の高い曲線を用いて測定精度を上げることができることである。

材料の粒子が変形前後において線形変換が成り立つとき、変形前に直線であったものは変形後も直線を保ち、平行線は平行線を保つ。したがって変形前の楕円は変形後においても楕円に変換され、その楕円内では均一なひずみとなる。しかしたとえば変形前に楕円主軸上にあった物体点は変形後一般的には主軸上にない。すなわち、この剛体的回転角が従来のひずみの算出法では無視されていた。線形変換が成り立つとき、Fig.12において楕円内の任意の直線ABとCDは変形後A'B',C',D'に移して考えることができる。ここで実際の測定においては各点AとB、CとDはサークル上の注目する物体点とする。このとき各変形段階の間におけるひずみ増分は次のようになる。

$$\begin{aligned} \Delta x_{AB} &= x_B - x_A, \quad \Delta y_{AB} = y_B - y_A \\ \Delta x_{CD} &= x_D - x_C, \quad \Delta y_{CD} = y_D - y_C \end{aligned} \quad (1)$$

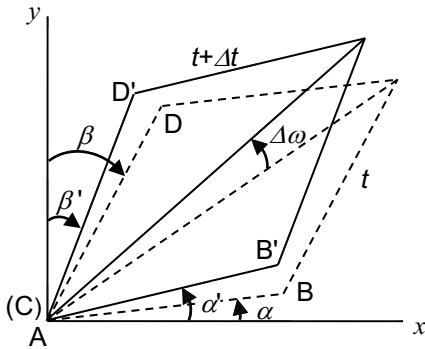


Fig.12 Angle of line segment between material points

変形後の各点A',B',C',D'についても同様にとると、図より

$$\begin{aligned} \alpha &= \tan^{-1} \frac{\Delta y_{AB}}{\Delta x_{AB}}, \quad \beta = \tan^{-1} \frac{\Delta x_{CD}}{\Delta y_{CD}} \\ \alpha' &= \tan^{-1} \frac{\Delta y_{A'B'}}{\Delta x_{A'B'}}, \quad \beta' = \tan^{-1} \frac{\Delta x_{C'D'}}{\Delta y_{C'D'}} \end{aligned} \quad (2)$$

剛体的回転角は

$$\begin{aligned} \omega &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) \text{ より近似して} \\ \Delta \omega &\cong \frac{1}{2} \{ \alpha' - \alpha - (\beta - \beta') \} \\ \omega &= \Sigma \Delta \omega \end{aligned} \quad (3)$$

標点間距離 l_{AB}, l_{CD} が変形により変化するので

$$\begin{aligned} \Delta x_{A'B'} &= l_{A'B'} \cos(\alpha' - \omega), \quad \Delta x_{C'D'} = l_{C'D'} \sin(\beta' + \omega) \\ \Delta y_{A'B'} &= l_{A'B'} \sin(\alpha' - \omega), \quad \Delta y_{C'D'} = l_{C'D'} \cos(\beta' + \omega) \end{aligned} \quad (4)$$

ひずみ成分については

ここで、実測する際の測定値は高々3桁までのため、ひずみ

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta u}{\partial x} &\cong \frac{\Delta x_{A'B'} - \Delta x_{AB}}{\Delta x_{AB}} \\ \frac{\partial \Delta u}{\partial y} &\cong \frac{\Delta x_{C'D'} - \Delta x_{CD}}{\Delta y_{CD}} \\ \frac{\partial \Delta v}{\partial x} &\cong \frac{\Delta y_{A'B'} - \Delta y_{AB}}{\Delta x_{AB}} \\ \frac{\partial \Delta v}{\partial y} &\cong \frac{\Delta y_{C'D'} - \Delta y_{CD}}{\Delta y_{CD}} \end{aligned} \quad (5)$$

増分間隔は大きくなる。そこで式(2)の角度と式(6)のAlmansiのひずみテンソルを用いてひずみを求める。

$$\Delta e_{ij} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\partial \Delta u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial \Delta u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial \Delta u_k}{\partial x_i} \frac{\partial \Delta u_k}{\partial x_j} \right\} \quad (6)$$

5. 新装置での検証実験

Fig.13にインディペンデントチャックに取付けられた新しい2軸引張試験装置を示す。材料はアルミニウムA1050-O材を用いて、通常の引張速度を5mm/minとし実験を行った。スクライブドサークルの変形前の直径は4mmのものを用いた。

Fig.14に単軸および2軸引張試験に用いた試験片形状を示す。単軸試験はVice1と3を使ってFig.14(a)の試験片を掴み、破断するまで引張る。またFig.14(b)の十字型試験片は圧延方向をY軸と定めて、面内2軸引張試験を行った。ひずみは前述の方法によって求め、その最大ひずみ、最小ひずみを求める。各軸ひずみ比は $\epsilon_x:\epsilon_y = 1:1, 2:1, 3:1, 3:2$ として成形限界線図を作成した。Fig.15は等2軸引張試験の際の破断前後の試験片を示す。図の円で囲んでいる部分から破断が起きていることがわかる。

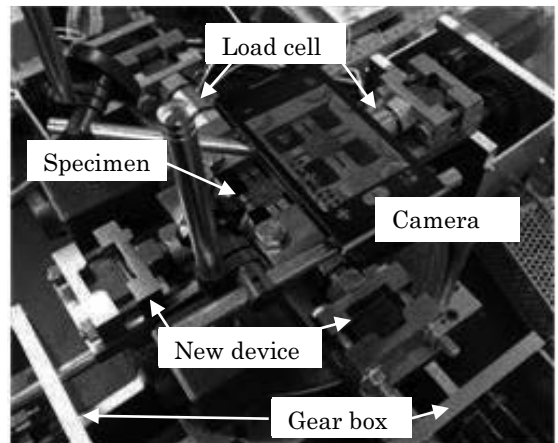


Fig.13 New simple biaxial tensile testing apparatus set on the independent chuck

Fig.16 は等 2 軸引張試験における荷重とひずみの時間経過線図を示す。図より荷重 1,2 がほぼ等しく材料に掛かっている事で等 2 軸負荷が実現できていることがわかる。また荷重が急激に落ちる地点におけるひずみを破断ひずみとして、その前後の画像からスクライブドサークル法によってひずみを算出した。これらの結果をまとめて成形限界線図を作成したものを Fig.17 に示す。一般の純アルミ試験片よりも単軸試験を除く破断ひずみが小さくなってはいるが、概ね文献通りの値になっていることが分かる。ひずみ値を過小評価してしまった原因としては、スクライブドサークル法のサークル直径が影響しているものと考えられる。しかしながら本装置によって成形限界線図を簡便に得られることは確認できた。また Fig.18 は単軸試験の結果を示すが、掴み部の剛性を向上させたことにより、繰返し実験における測定の信頼性が向上した。

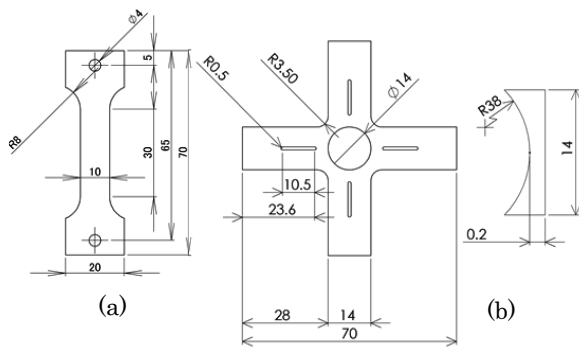
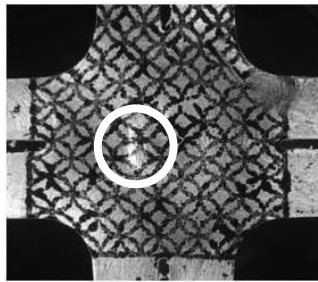
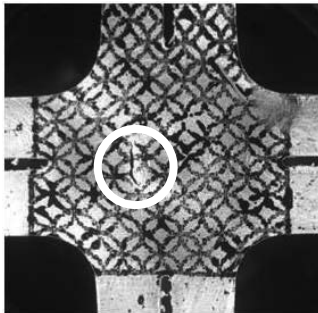


Fig.14 Geometry of (a) uniaxial and (b) biaxial tensile specimen



Strain ratio 1:1
Before fracture



Strain ratio 1:1
After fracture

Fig.15 Before and after fracture of specimen

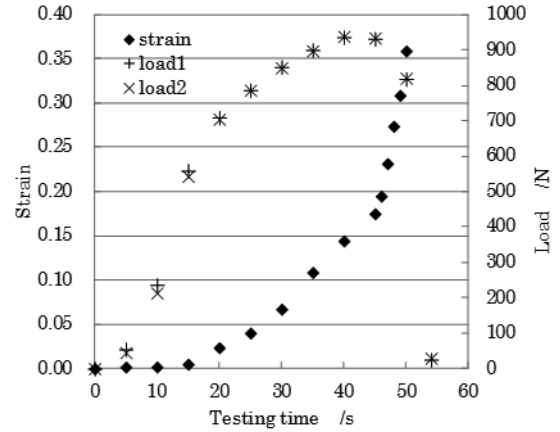


Fig.16 Relationship between strain and loads

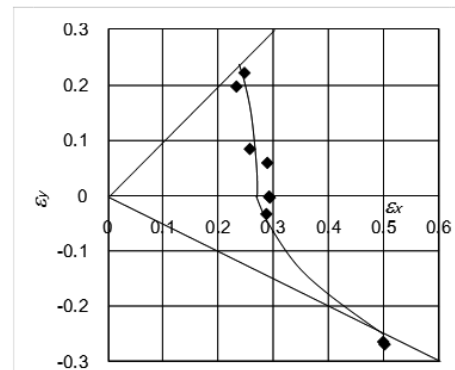


Fig.17 Forming limit diagram

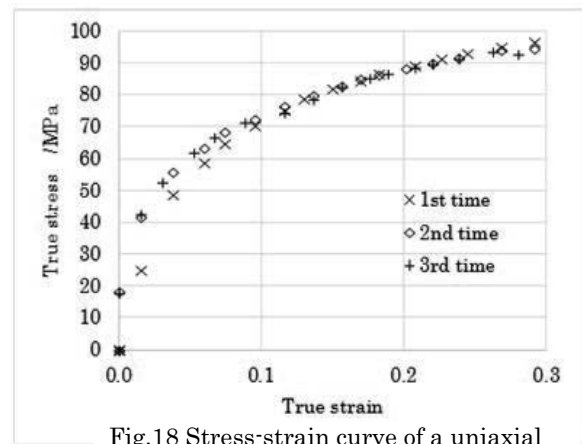


Fig.18 Stress-strain curve of a uniaxial tensile test

6. 結言

本装置の掴み部について設計変更を行うことによって、装置掴み部の剛性を旧装置の傾き $37.4\mu\text{m}/\text{kN}$ から $1.2\mu\text{m}/\text{kN}$ と 31.5 倍近く向上させることに成功した。それによってより精度の高い単軸および面内 2 軸引張試験が可能となった。

新装置においても材料の 2 軸引張試験を行い、成形限界曲線を得られることを示した。今後、材料の降伏曲面の同定までもができるように、装置をより高精度に改良していく予定である。

参考文献

- [1] Kuwabara, T., Ikeda, S. and Kuroda, T. : Measurement and Analysis of Differential Work Hardening in Cold-Rolled Steel Sheet under Biaxial Tension. , J. Material Process. Technol., 80/81, pp.517-523, 1998.
- [2] 西村進一, 坂本誠 : 旋盤用チャックを用いた簡易式 2 軸引張試験装置の開発, 平成 21 年度塑性加工春季講演論文集, pp.331-332, 2009.
- [3] Sakamoto, M., Ono, M., and Hiroi, T. : Development of Simple Biaxial-Tensile-Testing Apparatus Using Lathe Chuck, ASPE2012, pp.240-243, 2012.
- [4] Sawada, T., Sakamoto, M. : Measurement of plastic strain by scribed circle method using image-sensing camera, AEPA '92, pp.1021-1028, 1992.
- [5] 薄板成形技術研究会編 : プレス成形難易ハンドブック, 日刊工業新聞社, pp.11-82, 1987