薄肉超小型試験片の単軸駆動式二軸引張試験方法の開発

花房 泰浩*・瀧澤 英男**・桑原 利彦***

Journal of The Japan Institute of Light Metals, Vol. 64, No. 4 (2014), 142-148

© 2014 The Japan Institute of Light Metals

Development of uniaxially driven biaxial tensile testing method using microminiature specimen of thin thickness

Yasuhiro HANABUSA*, Hideo TAKIZAWA** and Toshihiko KUWABARA***

We have established a biaxial tensile test method suitable for the measurement of the local plastic deformation characteristics of a hard aluminum alloy sheet 3104-H, which is a typical material for aluminum can bodies, as a representative of the low work hardening materials. The present method consists of the following: (1) a microminiature cruciform specimen, (2) a newly designed linkage mechanism mounted on a uniaxial tensile testing machine, and (3) the loading path diagram as an experimental method to measure the biaxial stress-strain curves accurately from the biaxial tensile tests with linear displacement paths of the chucking jigs. The following are drawn from the biaxial tensile tests for the thin test material: (i) using the proposed biaxial tensile testing apparatus, we measured a contours of plastic work, and it was in good agreement with that measured using the conventional linear stress path tests, (ii) we were successful to determine the real yield points for various biaxial tensile states using the loading path diagrams and to measure the contour of plastic work corresponding to the maximum equivalent plastic strain of 0.0012, and (iii) the contour of plastic work is well approximated using the Yld2000-2d yield function with an exponent of 7.78.

(Received September 26, 2013 Accepted December 18, 2013)

Keywords: *biaxial tensile test, cruciform specimen, contours of plastic work, hard aluminum alloy sheet, yield criterion*

1. 緒 言

飲料用アルミニウムDI缶（以下アルミ缶）は、省資源・省エネルギーの観点から高強度化による軽量化が進められている¹⁾。一方で、製品差別化のための意匠としてアルミ缶側壁部に凹凸形状を加工する場合がある。このような薄肉化、形状の複雑化に対応する強度設計および加工条件の適正化のためには、アルミ缶側壁部の塑性変形特性の正確な把握が求められる。

著者らは既報において、任意の応力・ひずみ経路を円管材に負荷することができる軸力-内圧型二軸応力試験機を用いて、アルミ缶側壁部の変形特性や破断挙動の異方性を明らかにした²⁾。この試験方法において測定される管体の塑性変形特性は、缶側壁部中央部のそれであり、かつ円周方向に平均化された測定値である。しかし、塑性異方性を持つ圧延板からDI加工によって成形されるアルミ缶の場合、側壁の機械的特性は、円周方向および缶軸方向のいずれの位置においても異なる塑性変形特性を持つ。よって上記の試験方法は、缶体の塑性変形特性の異方性評価方法としては完全ではない。

二軸応力場における板材の塑性変形特性を測定する試験法には、桑原ら³⁾によって提案された十字形試験片を用いる方法がある。この方法を用いれば、試験片を小型化することで二軸応力下での局所的な塑性変形特性を測定することができる。しかしながら、アルミ缶側壁部から切出す試験片は、小型・薄肉であることに加え、加工硬化が小さいことから、試験片形状の追加検討およびひずみゲージによらないひずみ測定が必要不可欠である。

また、一般に十字形試験片を用いる二軸応力試験には直交する二軸負荷を制御する特殊な専用試験機が必要となる。これに対して永安ら⁴⁾は圧縮試験機を用いた二軸試験装置を開発しており、一般的な単軸試験機による二軸試験を可能にした。しかし、この装置は高張力鋼板などを対象とした大きな荷重容量の試験装置であり、薄肉材の小型試験片は対象としていない。

本研究では、負荷荷重が小さいことを考慮し、汎用の単軸引張試験機を駆動源とする簡便さはそのままに、新たな等変位機構を実現するリンク機構を用いた二軸引張試験方法を提案する。そしてこの試験装置を用いて、加工硬化の小さい

*ユニバーサル製缶(株)開発部（〒410-1392 静岡県駿東郡小山町菅沼1500）。Development Department, Universal Can Corporation (1500 Saganuma, Oyama-cho, Sunto-gun, Shizuoka 410-1392). E-mail: hanabusa@unican.co.jp

**日本工業大学機械工学科（埼玉県南埼玉郡）。Mechanical Engineering Department, Nippon Institute of Technology (Minami-Saitama-gun, Saitama).

***東京農工大学大学院工学研究院先端機械システム部門（小金井市）。Division of Advanced Mechanical Systems Engineering, Institute of Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology (Koganei-shi, Tokyo).

A3104-H板材から切出した薄肉・超小型の十字形試験片を用いて、二軸応力下での塑性変形特性を測定することに成功したので報告する。

2. 二軸引張試験方法の開発

2.1 単軸引張試験機を用いた二軸引張試験装置の開発

本節では、負荷荷重が小さい二軸引張試験に適するよう開発したリンク装置を説明する。水平方向 (x 方向) と鉛直方向 (y 方向) に等二軸変位 (変位比 $U_x:U_y=1:1$) を付与するリンク機構を Fig. 1(a) に示す。この機構では、最上部にある継手部を単軸引張試験機のクロスヘッドに取付け、これを上昇させることにより、駆動リンクを介して回転板を時計回りに回転させる。この回転により、90度間隔で等分に配置された4つの従動リンクが、直交する二軸上でスライダを四方に広げるように水平・鉛直方向へ移動させる。このスライダに取付けたチャックが十字形試験片の4つの腕部を引張り、等二軸変位を付与することができる。また、Fig. 1(b) に示すように水平方向変位 U_x を生じさせる従動リンクの長ささと回転板上での接続位置を変更することによって、変位比を $U_x:U_y=2:1$ へ容易に変更することができる。なお、水平方向変位 U_x を生じさせる従動リンクを回転板から外し、チャックをスライダ上で固定すれば、変位比 $U_x:U_y=0:1$ の試験も可能である。

さらに本試験機の特長は、試験開始から終了まで変位比 $U_x:U_y=n:1$ を一定に保つことができる点である。この原理を Fig. 2 に示す変位比 $U_x:U_y=2:1$ のリンク機構模式図を用いて説明する。図中の添字0は初期配置を、添字1は変位後の状態を示し、リンク機構の各諸元を次のように定める。

L_c : 駆動リンクの長さ。

L_s : 鉛直方向変位を生じさせる従動リンクの長さ。

L_d : 水平方向変位を生じさせる従動リンクの長さ。 $L_d=nL_s$ 。

r : 鉛直方向に変位する従動リンクの回転板取付け点と中心 O を結ぶ長さ。

R : 水平方向に変位する従動リンクの回転板取付け点と中心 O を結ぶ長さ。また、 R を示す直線と r を示す直線は直交し、 $R=nr$ という関係がある。

α : 駆動リンクの回転板取付け点と中心 O を結ぶ直線が鉛直方向となす角度。

φ : 鉛直方向に変位する従動リンクが鉛直方向となす小さい方の角度。

試験開始前における、回転板中心 O から各従動リンク端点

Fig. 1 Linkage mechanism.

B_0, C_0 までの長さは以下のように表される。

$$\overline{OB_0} = L_s \cos \varphi_0 + r \cos \alpha_0$$

$$\overline{OC_0} = L_d \cos \varphi_0 + R \cos \alpha_0$$

変位後の回転板中心 O から各従動リンク端点 B_1, C_1 までの長さは同様にして次式によって求めることができる。

$$\overline{OB_1} = L_s \cos \varphi_1 + r \cos \alpha_1$$

$$\overline{OC_1} = L_d \cos \varphi_1 + R \cos \alpha_1$$

水平方向変位 U_x 、鉛直方向変位 U_y は次式より求める。

$$U_y = \overline{OB_1} - \overline{OB_0}$$

$$= (L_s \cos \varphi_1 + r \cos \alpha_1) - (L_s \cos \varphi_0 + r \cos \alpha_0)$$

$$= L_s (\cos \varphi_1 - \cos \varphi_0) + r (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_0)$$

$$U_x = \overline{OC_1} - \overline{OC_0}$$

$$= (L_d \cos \varphi_1 + R \cos \alpha_1) - (L_d \cos \varphi_0 + R \cos \alpha_0)$$

$$= L_d (\cos \varphi_1 - \cos \varphi_0) + R (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_0)$$

$L_d=nL_s, R=nr$ なので、次式に示すように α や φ によらずチャックの変位比は常に保たれる。

$$U_x = n \{ L_s (\cos \varphi_1 - \cos \varphi_0) + r (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_0) \}$$

$$= n U_y$$

Fig. 2 Schematic diagram of linkage mechanism on $U_x:U_y=2:1$. The index 0 means initial configuration (a), and the index 1 means current configuration (b).

Fig. 3 Biaxial tensile apparatus in tensile testing machine.

ただし、変位比 $U_x:U_y=0:1$ の試験では $\overline{OC_0}=\overline{OC_1}=\text{const.}$ となるため $U_x=0$ となる。

開発した試験装置は、Fig. 3に示すように汎用の引張試験機へ直立型で設置する。本試験機では荷重の対称性を確認するために、上下および左右の合計4つのチャックすべてに小型のロードセル（最大荷重20kN）を設置している。単軸変位を二軸変位に変換する機能は、すでに提案されている簡易型二軸引張試験装置^{4),5)}と同様だが、本試験機は、直立型にすることで試験片正面を開放しているため、CCDカメラを用いた非接触ひずみ測定が可能である。また、正面を開放することで試験片設置の作業性も大幅に改善できる。

2.2 超小型薄肉試験片の形状

Fig. 4(a)に十字形試験片の諸寸法を示す。これらは応力測定誤差を最小化するための形状として著者が検討した結果⁶⁾にもとづいて定めた。

一般に十字形試験片では、二軸応力場となる応力測定部（中心の正方形領域）よりも単軸応力場となる腕部が先に降伏する。加工硬化が大きい材料では、腕部が加工硬化することで応力測定部を塑性変形させることができる。しかし、H材は加工硬化が小さいため、腕部での十分な強度増加を望めない⁶⁾。そこで本試験片では、スリットをファイバレーザ⁷⁾で加工することで、スリット幅 w_s を $50\mu\text{m}$ として、荷重を負担する腕部の断面積の減少を必要最小限に抑制した。また、スリット長さ L を応力測定部の幅 B の2倍として、腕部の曲げ変形抵抗を抑制することで、腕部に発生する付加的な応力が小さくなるよう工夫した。

2.3 CCDカメラによる非接触ひずみ測定方法

超小型薄肉試験片では、試験荷重が小さいため、ひずみ

(a) Geometry of cruciform specimen

(b) Dimensions of the gauge mark after testing

Fig. 4 Geometry of the cruciform specimen for the biaxial tensile tests.

ゲージ自体の剛性および強度が試験片の応力測定部の変形に及ぼす影響を無視できない。このため、本試験ではCCDカメラを用いた非接触ひずみ測定を行う。

著者らは応力測定誤差が最小となるひずみ測定位置を提案しているが^{6),8)}、超小型試験片においては、局所的なひずみを測定することは困難である。そこで、Fig. 4に示すように応力測定部の直交する負荷軸上に適切な標点距離を考え、この標点距離の変化（標点の変位）により、ひずみを算出する。水平方向および垂直方向の標点距離をそれぞれ C_{0x} および C_{0y} とする。また、試験後の水平方向および垂直方向の標点距離をそれぞれ C_x , C_y とする。これらの標点距離から対数ひずみ ϵ_x , ϵ_y および真応力 σ_x , σ_y は以下の式で表される。ここで F_x および F_y は試験荷重、 t_0 は初期肉厚、 B は応力測定部の幅を示す。

$$\epsilon_x = \ln(C_x/C_{0x}), \quad \epsilon_y = \ln(C_y/C_{0y})$$

$$\sigma_x = F_x \exp(\epsilon_x)/Bt_0, \quad \sigma_y = F_y \exp(\epsilon_y)/Bt_0$$

応力測定部の幅 B に対する標点距離の比 C_{0x}/B , C_{0y}/B は $0.3 \sim 0.8$ の範囲では各軸方向の応力-ひずみ関係へほとんど影響しないことを有限要素解析によって確認している⁹⁾。そこで本研究では、標点マーキング（標点距離を辺とする矩形領域をマスキングして外側に黒色塗料をスプレーで塗布）の作業性から標点距離を $C_{0x}=C_{0y}=0.7B$ とした。

2.4 実験例と弾性域の取扱い

本節では、ここまで述べた試験方法によって得られた実験結果の例を示す。

変位比 $U_x:U_y=2:1$ の二軸引張試験において、各チャックに取付けたロードセルによって測定された荷重の関係を Fig. 5に示す。上下および左右の荷重はほぼ同じ測定値を示しており、十字形試験片は装置中心で均等にそれぞれの方向へ引張られていることが確認できた。

変位 $U_x=4.3\text{mm}$ ($U_y=2.15\text{mm}$) を与えたときの応力測定部の標点マークの変形の様子を Fig. 6に示す。マーキングされた領域はほぼ矩形を維持して拡大している。

変位比 $U_x:U_y=2:1$ の二軸引張試験で得た応力-ひずみ曲線を Fig. 7に示す。水平方向の応力-ひずみ曲線の拡大図では、弾性域におけるひずみ測定値が大きく変動する。これは、本試験装置で用いるCCDカメラ像の分解能が低いことに起因する。また、別の問題として、応力-ひずみ曲線は原点を通らない。これは、試験片取付け時に生じる面外方向のたわみを除去するために、予荷重を負荷しているためである。

これらの問題に対し、降伏点を基準とし、既定のヤング率 E 、ポアソン比 ν を用いて、ひずみ測定値を以下の手順によ

Fig. 5 Loading paths measured for $U_x:U_y=2:1$.

Fig. 6 Gauge mark on the cruciform specimen (CCD image).

Fig. 7 Biaxial stress-strain curves obtained by the proposed apparatus.

り修正する。

- ・実験より得た最大主応力方向の公称応力-公称ひずみ曲線より降伏点Yを定める。
- ・ひずみ0から降伏点Yまでの公称ひずみ e_x, e_y については、実験より得た公称応力 s_x, s_y を用いて、次式により求める。

$$e_x = (s_x - v s_y) / E$$

$$e_y = (s_y - v s_x) / E$$

- ・降伏点から破断までに測定した全ひずみ e_x, e_y については、降伏点での公称ひずみの測定値から修正後の降伏点における公称ひずみの差を加える。

上記の手順によって、予荷重の影響とひずみのばらつきを修正した応力-ひずみ曲線をFig. 7の拡大図に示す。

3. 本二軸引張試験方法の妥当性評価

開発した変位比一定型二軸引張試験装置を島津製作所製

Fig. 8 Specimen for uniaxial tensile test.

Fig. 9 Measured stress points forming contours of plastic work. Each symbol corresponds to a work contour for a particular value of ϵ_0^p . The short lines attached to the stress points indicate the measured directions of the plastic strain rates at the associated stress points.

オートグラフ (AG-50kNG) に取付けて二軸引張試験を行った。まず予備試験として、本二軸引張試験方法の妥当性を評価するために、十字形試験片腕部の加工硬化により応力測定部が塑性変形しやすいA3104-O材 (初期肉厚 $t_0=0.3\text{mm}$) を用いた。クロスヘッド速度は 1mm/min 、試験片の圧延方向を x 軸と一致させ、変位比は $U_x:U_y=1:0, 2:1, 1:1, 1:2, 0:1$ で実施した。また、Fig. 8に示す形状の試験片を用いて圧延方向および圧延直角方向の単軸引張試験も実施した。

アルミニウムの一般的なヤング率 $E=70\text{GPa}$ 、ポアソン比 $\nu=0.33^{10)}$ を用いて、試験結果から2.4節に記載した方法に則り、真応力・対数ひずみを定めた。

二軸引張応力下における加工硬化特性を定量的に評価するため、等塑性仕事面を測定した。等塑性仕事面は、以下の手順により求めた。まず圧延方向の単軸引張試験結果を用いて、測定ひずみ範囲 $\epsilon_0^p=0.01\sim0.05$ を0.01刻みとした既定の対数塑性ひずみ ϵ_0^p を考え、この値に達するまでになされた塑性仕事 W^p を求める。ついで、二軸引張試験および圧延直角方向の単軸引張試験結果から、 W^p と等量の塑性仕事を与える応力点 (σ_x, σ_y) を求める。このようにして求めた等塑性仕事面のプロット点をFig. 9に示す。同図には各仕事点における塑性ひずみ増分ベクトルの方向を併記する。等塑性仕事面上の任意の応力点において、その応力点に関連する降伏曲面は等塑性仕事面に接するというHillら¹¹⁾の推測を正しいものとし、かつ降伏曲面に法線則が成り立つ、すなわち降伏曲面を塑性ポテンシャルとみなせるならば、塑性ひずみ増分ベクトルの方向は、等塑性仕事面の外向き法線ベクトル方向と一致する。本研究の二軸引張試験により測定された塑性ひず

Fig. 10 Measured stress points forming the work contour for $\epsilon_0^p=0.03$ compared with those measured using the conventional linear stress path experiments.

み増分ベクトルの方向は等塑性仕事面の法線ベクトルとおおむね一致しているとみなせる。つまり、今回の測定結果においては、等塑性仕事面を塑性ポテンシャルとみなすことが可能である。

また、 $\epsilon_0^p=0.03$ における本試験結果と、桑原らによって開発された本研究よりも大きな試験片を対象とする応力比一定型の二軸引張試験機³⁾によって得た結果を重ねてFig. 10に示す。チャックの変位比が一定となる本試験装置によって得たデータは、実績のある応力比一定型の試験方法とほぼ同等の結果を示しており、本試験方法が妥当であることを確認した。

4. 負荷経路全図の提案

桑原らによる十字形試験片を用いた二軸引張試験³⁾では、応力測定部へ負荷する応力を応力比一定として制御する。一方本試験装置では、十字形試験片を把持するチャックの変位比は一定値に制御されるものの、応力測定部の応力比やひずみ比を直接制御できない。したがってこれらの比を一定に保つことはできない。このため、本試験方法から得た結果を、応力-ひずみ曲線、応力空間での経路図 (σ_x - σ_y)、あるいはひずみ空間での経路図 (ϵ_x - ϵ_y) として別々に表示しても、それぞれの対応を読取ることは難しい。

本試験結果を適切に明示するために、これらの負荷経路を同時に表示する方法（以下、負荷経路全図）を提案する。一例として、変位比 $U_x:U_y=2:1$ における負荷経路全図をFig. 11に示す。ここで示した曲線は von Mises の降伏関数を仮定した超小型十字形試験片の有限要素解析の結果を用いている。この曲線では、横軸右方向を正として x 方向応力 σ_x を、縦軸上方向を正として y 方向応力 σ_y を、縦軸下方向を正として x 方向ひずみ ϵ_x を、横軸左方向を正として y 方向ひずみ ϵ_y をそれぞれ示す。

この表記では主として、応力経路 σ_x - σ_y 曲線は第一象限に、ひずみ経路 ϵ_x - ϵ_y 曲線は第三象限に、 x 方向の応力-ひずみ曲線 ϵ_x - σ_x は第四象限に、 y 方向の応力-ひずみ曲線 ϵ_y - σ_y は第二象限にそれぞれ表示される。

最大主応力方向 (Fig. 11 の場合 x 方向) の ϵ_x - σ_x 曲線より定まる初期降伏点 (第四象限の□印) を起点として、各軸に平行な直線と Fig. 11 に示す他の3つの曲線との交点を順次結ぶ

Fig. 11 Schematic illustration of the loading path diagram.

と、図に示すように各曲線の初期降伏点を結んだ長方形を描くことができる。本研究ではこれを破線で記し、初期降伏線と呼ぶ。この表示方法によって、各曲線における初期降伏点を容易に特定することが可能となる。

5. A3104-H材の二軸引張試験

5.1 A3104-H材の負荷経路全図

3章と同じ試験条件において、A3104-H材 (アルミ缶ボディ用素板, 板厚0.3mm) の試験を行い、2.4節に示した弾性ひずみの修正により求めた負荷経路全図をFig. 12に示す。なお、開発した二軸引張試験装置は多くのリンク節点をもつため、 $U_x:U_y=1:1$ の設定においても水平方向チャックの変位が垂直方向チャックの変位よりもわずかに大きい。このため、 $U_x:U_y=1:1$ の試験は圧延方向を装置の水平方向とした場合と、装置鉛直方向とした試験を行い、それぞれ $U_x:U_y=1:1(1)$, $U_x:U_y=1:1(2)$ と表記する。

Fig. 12(a)には圧延方向、Fig. 12(h)には圧延直角方向の単軸引張試験結果を示す。これらの試験では、十字形試験片ではなく、通常の単軸引張試験片を用いた。最大主応力方向の ϵ - σ 曲線よりいずれの曲線もおおよそ300MPaで降伏している。

Fig. 12(c)に示した $U_x:U_y=2:1$ の場合、第一象限に示される σ_x - σ_y 曲線では σ_x がおよそ300MPaで折れ曲がり、その後降伏点を迎える。一見すると σ_x - σ_y 曲線の折れ曲がり点 (以下、変曲点) を降伏曲面に達した点と誤解しかねないが、 ϵ_x - σ_x 曲線との対応を考えると、この変曲点は降伏点とはいえない。この変曲点での最大主応力 σ_x は、圧延方向での単軸引張試験で得た降伏点 (300MPa 近傍) とほぼ一致している。つまり、 σ_x - σ_y 曲線や ϵ_x - ϵ_y 曲線に最初に現れる変曲点 (第一変曲点) は最大主応力方向の腕部が単軸応力場で降伏したことにより現れる変曲点であり、応力測定域における真の降伏点を示しているわけではない。真の降伏点は最大主応力方向である ϵ_x - σ_x 曲線上で特定し、この点を起点として他の曲線との交点を結んだ長方形により、各曲線上における降伏点を正確に明示することができる。

Fig. 12 Loading path diagrams for $U_x:U_y=1:0, 2:1, 1:1, 1:2, 0:1$, and $\sigma_x:\sigma_y=1:0, 0:1$ for A3104-H.

Fig. 12(d)の第三象限に示される ε_x - ε_y 曲線では ε_x が0.003を超えると大きく折れ曲がる。この折れ曲がり箇所では、最大主応力方向(x方向)の腕部が単軸応力場で降伏して伸びるため、同方向の応力測定領域への変形の伝達は停滞する。一方、最大主応力に直交する方向(y方向)の腕部は弾性変形状態であるため、チャック部変位 U_y の増加により応力測定領域への変形の伝達が継続する。このため、ひずみ経路に大きな折れ曲がりが生じる。

変位比一定の二軸引張試験においては、腕部の塑性変形によって応力およびひずみの履歴は複雑な経路を描くが、提案した負荷経路全図を用いることで試験法特有の応力およびひずみ状態の全体像を表現することができる。また、負荷経路全図を用いることで、上述のように最大主応力方向の応力-ひずみ曲線から応力空間における降伏点を特定することができる。

5.2 等塑性仕事面

H材の二軸引張応力下における加工硬化特性を定量的に評価するため、3章と同様の手順で等塑性仕事面を測定した。等塑性仕事面を構成する応力点がすべての応力経路で測定できたのは $\varepsilon_0^p=0.0012$ までであった。一方、圧延方向の単軸引張試験では $\varepsilon_0^p=0.036$ まで、変位比1:0では $\varepsilon_0^p=0.005$ まで、変位比2:1では $\varepsilon_0^p=0.0012$ まで、変位比1:1では $\varepsilon_0^p=0.004$ まで、変位比1:2では $\varepsilon_0^p=0.0012$ まで、変位比0:1では $\varepsilon_0^p=0.006$ まで、圧延直角方向の単軸引張試験では $\varepsilon_0^p=0.036$ まで応力点が測定可能であった。十字形試験片を用いた試験条件において最大の対数塑性ひずみ ε_0^p であった0.006までのすべての測定値をFig. 13に示す。これは圧延方向の各等塑性仕事量に応じた降伏応力 σ_0 で正規化されたグラフである。前述したように、H材は加工硬化指数(n 値)が小さいため、応力測定部を塑性変形させることが困難である。しかし、本研究で提案した試験方法によって対数塑性ひずみ $\varepsilon_0^p=0.0012$ まで等塑性仕事面を測定することができた。同図には対数塑性ひずみ $\varepsilon_0^p=0.0012$ の等塑性仕事面を用いて次式で示すYld2000-2d降伏関数 $\phi^{12)}$ によってモデル化した降伏曲面を示す。ここで $\bar{\sigma}$ は相当応力、 M は降伏関数の次数である。

$$\phi = 2\bar{\sigma}^M$$

等塑性仕事面と降伏関数モデルとの誤差の自乗和が最小になるように次数 M を決定した結果、最適な次数 M の値は7.78であった。

以上より、本研究で作製した十字形試験片および二軸引張試験装置を用いれば、O材のみならず、加工硬化指数の小ささゆえに初期降伏曲面の測定が困難とされるH材に対しても適用可能であることが示された。

6. 結 言

加工硬化の小さい薄肉材の代表例として硬質アルミニウム3104-H材を対象として、二軸引張応力場における局所的な塑性変形特性の測定を目的として、薄肉超小型試験片に適した二軸引張試験方法を開発した。本研究で得られた知見は以下の通りである。

(1) チャック変位比一定条件下での二軸引張試験の結果から、応力空間とひずみ空間における曲線を読み解くための手法として、負荷経路全図を考案した。

(2) 汎用の単軸引張試験機を駆動源とし、チャックの変位比を変更可能なリンク機構を開発した。これを用いてA3104-O材の等塑性仕事面を測定した結果、本研究よりも大きな試験片を対象とする応力比一定試験により測定されたそれとほぼ一致した。これより、本二軸引張試験装置の妥当性を示した。

(3) A3104-H材の二軸引張試験結果に対して負荷経路全図の手法を適用し、最大で0.0012の相当塑性ひずみに対応する等塑性仕事面の測定に成功した。さらに、測定された等塑性仕事面は、次数 $M=7.78$ のYld2000-2d降伏関数により近似可能であることを明らかにした。

以上により、アルミ缶ボディ用素板の二軸引張変形挙動を測定し、その変形挙動を定量的に評価するための実験手法を確立することができた。

参 考 文 献

- 1) 小出政俊, 鶴田淳人: 神戸製鋼技報, **55** (2005), 75-80.
- 2) 桑原利彦, 井上裕之, 花房泰浩, 伊藤隆一, 瀧澤英男: 軽金属, **58** (2008), 449-455.
- 3) T. Kuwabara, S. Ikeda and T. Kuroda: J. Mater. Process. Technol., **80/81** (1998), 517-523.
- 4) 永安達哉, 高橋 進, 津藤哲也: 第60回塑性加工連合講演会講演論文集, (2009), 19-20.
- 5) 渡邊哲也, 黒田充紀: 第61回塑性加工連合講演会講演論文集, (2010), 357-358.
- 6) Y. Hanabusa, H. Takizawa and T. Kuwabara: J. Mater. Process. Technol., **213** (2013), 961-970.
- 7) (財)機械システム振興協会: 産業用次世代レーザー応用・開発に関する調査研究報告書, (2009), 40.
- 8) Y. Hanabusa, H. Takizawa and T. Kuwabara: Steel Res. Int., **81** (2010), 1376-1379.
- 9) 花房泰浩, 瀧澤英男, 桑原利彦: 第63回塑性加工連合講演会講演論文集, (2012), 99-100.
- 10) アルミニウムハンドブック第七版, 日本アルミニウム協会, (2007), 32.
- 11) R. Hill, S. S. Hecker and M. G. Stout: Int. J. Solids Struct., **31** (1994), 2999-3021.
- 12) F. Barlat, J. C. Brem, J. W. Yoon, K. Chung, R. E. Dick, D. J. Lege, F. Pourboghra, S. H. Choi and E. Chu: Int. J. Plast., **19** (2003), 1297-1319.

Fig. 13 Normalized measured stress points forming contours of plastic work, compared with the theoretical yield locus based on the Yld2000-2d yield function for $\varepsilon_0^p=0.0012$.