

金属薄板用の小型張出し試験機の開発

Development of a compact stretch-forming apparatus for sheet metal

学生氏名 青木 孝憲
指導教員 吉田 健吾

Abstract

International organization for standardization standardizes stretch-forming apparatus for the evaluation of sheet formability. Specimen dimensions are defined as 200 mm×200 mm which is too large for novel sheet metals under development. In this study, we designed and fabricated compact stretch-forming apparatus for small specimens of 50 mm×50 mm with 1.0 mm thickness. Using the developed apparatus and the one which follows ISO, equi-biaxial tension tests and plane-strain tension tests of 0.9 mm thick sheets of A6016-T4 were carried out. Using the digital image correlation method, strain distributions in a specimen are measured. Limit strains observed with compact apparatus are the same as those observed with ISO standard apparatus. This compact stretch-forming apparatus can be expected to come into practical use.

Key Words : Punch stretch-forming test, formability, digital image correlation method

1. 緒言

近年、新しい材料が次々と開発されており、開発段階での材料特性の評価が求められている。開発段階では大きな板材を製造することは非効率であり、一般に小型の板材が試作されている。このような小型の板材を用いて、金属の機械的性質や成形性を評価するために単軸引張試験が最も多く実施されている。しかし、一般に塑性加工において、板材は単軸引張のみならず平面ひずみ引張や等二軸引張など多様なひずみ状態を受ける。そのようなひずみ状態における成形性を評価するために、国際標準化機構 (ISO) では張出し試験が規格されている¹⁾。しかしながら、ISO 規格の張出し試験機で用いる試験片は、約 200 mm×200 mm と開発段階の板材にとっては大きく、試作された小型の板材で試験を行うには困難である。このような背景より、小型試験片に対応した小型張出し試験機の開発、および試験手法の確立が求められている。

本研究では、ISO 規格の試験片寸法を 4 分の 1 に縮小した小型試験片に対応した小型張出し試験機を設計・製作することを目指す。そして、アルミニウム合金板を用いて、小型張出し試験機で測定した成形性と、ISO 規格に準拠した大型張出し試験機で測定した成形性を比較し、開発した小型張出し試験機の妥当性を検証する。

2. 小型張出し試験機の開発

ISO で規格されている張出し試験の方法の一つに、平頭ポンチを用いた張出し試験がある。試験機の概略図を Fig. 1 に示す。試験片と中央の穴のあいた駆動板を上下ダイスで固定し、ポンチを上昇させることによって試験片を変形させる。駆動板の穴部分に対応する試験片の領域は変形中に摩擦の影響を受けることはない。その結果、この領域において破断が生じる。また、試験片の幅を変更することにより、単軸引張、平面ひずみ引張、等二軸引張における成形性を評価できる。そのため、薄板の成形性の評価に頻繁に用いられている。

当研究室では、すでに ISO 規格に準拠した大型張出し試験機を製作している²⁾。本試験機は試験片寸法が約 200 mm×200 mm、板厚 1 mm に対応するように製作された。本研究では、同様に板厚 1 mm に対応する小型張出し試験機を製作する。ただし、試験片寸法は 1 辺を 4 分の 1 に縮小した 50 mm×50 mm (面積は 16 分の 1) とする。引張強さ 1 GPa の金属材料に対応可能な試験機的设计をする。

試験中、ポンチによって張出される試験片は、ポンチ肩部では引張ひずみに加えて曲げひずみも受ける。その曲げひずみは、ポンチ肩半径と板厚の和に反比例する。板厚は 1 mm と固定しているため、ポンチ肩を 4 分の 1 に縮小すると過大な曲げひずみが発生する。一方、ポンチ肩半径を縮小しなければ、ポンチ平頭部の測定範囲が狭くなる。これらの相反する要求を満たすために、河合ら³⁾の研究を参考にして、ポンチ肩半径を 3.5 mm、ダイ肩半径を 4 mm と設定した。

ビードは試験片と駆動板を固定する役割がある。ビード高さは試験片と駆動板の合計の板厚よりも高い形状にすること

により完全に固定ができる⁴⁾。そこで、ビードは一辺 2.0 mm の正三角形とした。

3. 試験方法

供試材は板厚 0.9 mm の A6016-T4 の板材である。試験片形状を Fig. 2 に示す。50 mm×50 mm の試験片は等二軸引張試験に、50 mm×34 mm の試験片は平面ひずみ引張試験に用いる。駆動板は板厚 0.3 mm の SPCC であり、寸法を 50 mm×50 mm とし、中心部分に直径 8 mm の穴をあけた。穴部に対応した試験片の領域 (測定範囲) は、それぞれ等二軸引張、平面ひずみ引張を受ける。試験において、ポンチの上昇速度は約 0.4 mm/s とした。

ひずみの測定は CCD カメラを用いたデジタル画像相関法 (DIC 法) で行う。DIC 法は測定対象物を変形時に CCD カメラで連続的に撮影して、変形前後の画像を比較することで変位を測定し解析域内のひずみ等を算出する手法である。CCD カメラによる画像の取得は 5 回/s とする。

また、小型張出し試験機の妥当性を検証するために、ISO 規格に基づいた既存の大型張出し試験機を用いて等二軸引張試験を行う。試験片は同一材料で、寸法は 220 mm×220 mm とする。

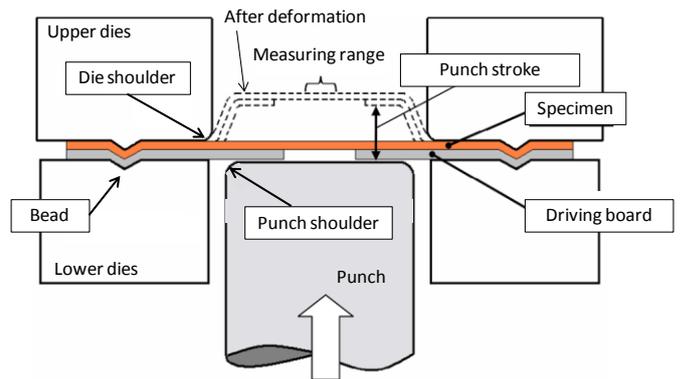


Fig. 1 Stretch-forming apparatus

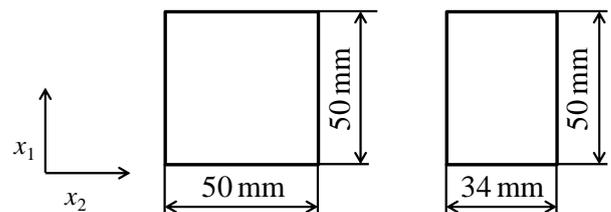


Fig. 2 Specimen geometries

4. 試験結果

はじめに、破断後の試験片を示す。Fig. 3に等二軸引張試験後の大型試験片（左）および小型試験片（右）を示す。どちらも試験片中央の測定範囲内で割れが発生した。DIC法での解析範囲はFig. 3に示す枠内である。この枠は駆動板の穴径よりも小さい。また、図示していないが、平面ひずみ引張試験においても、同様に試験片中央から割れが発生したことを確認した。

小型張出し試験機で行った等二軸引張試験におけるひずみ測定値のヒストグラムをFig. 4(a)に示す。破断直前の x_1 方向のひずみ ϵ_1 の割合を表している。 ϵ_1 の値が0.245の付近でグラフが多少突出しているものの、全体的には正規分布となった。 ϵ_1 の平均値は0.234となり、標準偏差は0.007となった。また、 x_2 方向に発生するひずみ ϵ_2 の割合も正規分布となり、 ϵ_2 の平均値は-0.009であった。すなわち、 x_2 方向にひずみはほとんど発生せず、平面ひずみ引張状態で試験が行えた。

小型張出し試験機で行った平面ひずみ引張試験におけるひずみ測定値のヒストグラムをFig. 4(b)に示す。破断直前の x_1 方向のひずみ ϵ_1 の割合を表している。 ϵ_1 が0.195と0.215を頂点とした二つの山が確認できた。これは、等二軸引張試験の結果と明らかに異なった結果を示している。 ϵ_1 の平均値は0.204となり、標準偏差は0.014となった。一方、図示していないが、 x_2 方向に発生するひずみ ϵ_2 の割合は正規分布となり、 ϵ_2 の平均値は-0.009であった。すなわち、 x_2 方向にひずみはほとんど発生せず、平面ひずみ引張状態で試験が行えた。

次に、小型張出し試験機での試験結果と比較するために、大型張出し試験機で等二軸引張試験を行った。ひずみ測定値のヒストグラムをFig. 4(c)に示す。破断直前の x_1 方向のひずみ ϵ_1 の割合を表している。正規分布の形状となり、 ϵ_1 の平均値は0.229、標準偏差は0.004となった。また、結果は示していないが、 x_2 方向に発生するひずみ ϵ_2 の割合も正規分布となり、 ϵ_2 の平均値は0.227となった。

5. 考察

等二軸引張試験における破断直前のひずみ ϵ_1 の平均値は小型試験片で0.234、大型試験片で0.229となり、小型試験片の方が約2%大きな値となった。黒崎ら^{5),6)}はポンチに対して板厚が大きくなると破断時のひずみは大きくなることを実験的に確認している。本研究では、同じ板厚の試験片を用いているため、小型試験機での破断時のひずみが大きくなったことは、この結果と整合する。板厚と試験片の相対的な関係により破断時のひずみが増えるもの、それは高々2%であった。

平面ひずみ引張試験を行ったFig. 4(b)の結果において、ひずみの頻度分布は2山形状であった。この発生原因を検討するために、ひずみ分布図を確認した。その結果をFig. 5に示す。試験片に発生しているひずみが大きいほど黒く示される。試験片が破断する直前にひずみがバンド状の領域に集中することがわかる。破断後の試験片を確認したところ、この箇所において試験片は破断していた。そのため、試験片が破断する直前にくびれが発生したため、破断付近の範囲とそれ以外の範囲でひずみに差が生じたと考えられる。

6. 結言

本研究では、試験片寸法が50 mm×50 mmで板厚1.0 mmに対応した小型張出し試験機を開発した。試験結果より、等二軸引張状態、平面ひずみ引張状態の成形性評価を行うことができた。既存の大型張出し試験機で同一材料を用いて試験を行った結果、両試験片とも発生した破断直前のひずみの平均値は同等であり、小型張出し試験機の妥当性が確認できた。

ISO規格の大型張出し試験機で使用していた試験片の板厚を変えず、試験機と試験片の小型化を図ったことにより、開発段階の金属材料を用いて、様々なひずみ比で材料の成形性の評価が行えると考えられる。

参考文献

- 1) ISO12004-2, Metallic materials-sheet and strip-determination

of forming-limit curves, (2008).

- 2) 田村一樹：山形大学卒業論文, (2011).
- 3) 河合望ほか：機論C, **45**-395, (1979), 584-592.
- 4) 小林政教：名古屋大学博士学位論文, (1989).
- 5) 黒崎靖ほか：機論C, **55**-516, (1989), 2221-2227.
- 6) 黒崎靖ほか：機論C, **48**-426, (1982), 278-287.

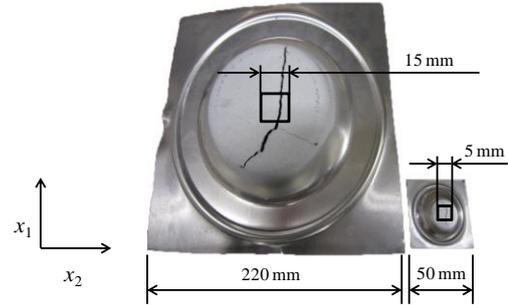
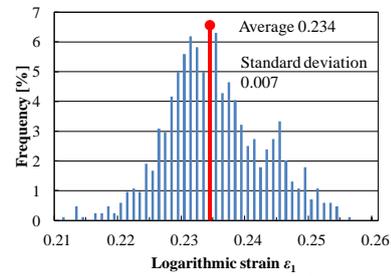
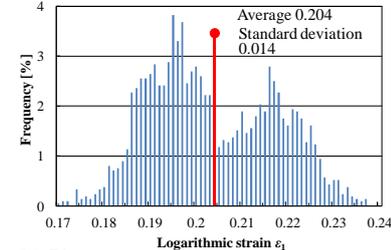


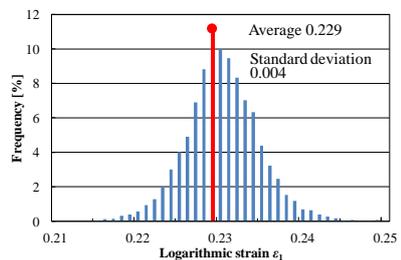
Fig. 3 Sheet metal after experiment (A6016T-4)



(a) Equi-biaxial tension test using compact stretch-forming apparatus



(b) Plane-strain tension test using compact stretch-forming apparatus



(c) Equi-biaxial tension test using conventional stretch-forming apparatus

Fig. 4 Histogram of logarithmic strain

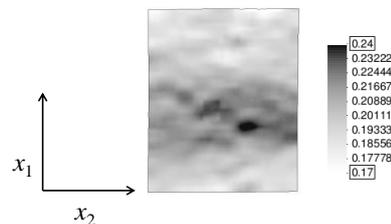


Fig. 5 Distribution of logarithmic strain ϵ_1