

## 22. 金属薄板の張出し成形試験におけるデジタル画像相関法を用いたひずみ測定の検討 An investigation on the accuracy of strain measurement using digital image correlation method for stretch forming test of sheet metal

学生氏名 山内 雄司  
指導教員 吉田 健吾

### Abstract

Deformations of sheet metals in stretch forming test are measured using two approaches: conventionally used method based on the length change of scratched lines and the other is based on digital image correlation (DIC) method. The accuracy of strain measurement of DIC is validated and is found to be as accurate as that of the conventional scratched-line method. Using the DIC method, the strain distribution is continuously measured from the initial undeformed state to fractured state. The visualization of continuous strain distribution change reveals that strains start to concentrate gradually even at early stage of deformation and increase rapidly before fracture.

**Key Words** : Punch stretch forming test, Digital image correlation method, Strain measurement, Strain distribution

### 1. 緒言

プレス加工は、生産性が高く、製造コストを抑えられるため、多くの工業分野で用いられている。プレス加工における成形不良として割れの発生が常に問題となっており、材料の成形性を事前に把握することが必要不可欠である。このような状況のもと、国際標準化機構 (ISO) では、張出し成形試験による成形限界の評価方法が規格化されている<sup>1)</sup>。張出し成形試験では、標線の寸法変化を基にしたひずみ測定法が従来より一般的に用いられている。材料に描かれた標線の変形前後の長さを測定してひずみを算出し、成形性を評価する。この方法では、変形後のひずみを把握できるが、変形中のひずみ分布は測定することができない。一方、近年、試験片にランダムパターンを塗布し、デジタルカメラでその変化を撮影して、それを基にひずみを同定するデジタル画像相関 (DIC) 法が普及してきている。DIC 法を適用することで、変形中の材料のひずみ分布の連続測定が可能となる。これまでに DIC 法によるひずみの測定精度の研究は、種々の条件において行なわれており、測定条件の検討がなされている<sup>2,3)</sup>。

本研究では、張出し成形試験に DIC 法を適用し、試験片のひずみ分布の連続測定を試みる。また、従来の標線に基づいたひずみ測定も実施して、DIC 法によって測定されたひずみと比較して、測定精度の検証を行う。これらを通じて、DIC 法を張出し成形試験に適用する際の適切な条件を導くとともに、適用限界を明らかにする。

### 2. 試験方法

#### 2.1 試験装置

CCD カメラを用いた張出し成形試験機の概略を Fig. 1 に示す。上ダイスと下ダイスで試験片および中央に穴の空いた駆動板を固定し、それらを円筒形の平頭パンチで押し上げることで張出し成形を行なう。駆動板があるため、試験片の中央部には摩擦が発生せずに 2 軸引張を受ける領域 (測定部) を作ることができる。パンチの中心の真上に CCD カメラを取り付けて試験片の変形を撮影する。滑らかに上下移動ができるマウンタに CCD カメラを取り付け、マウンタにはシャフトを設置してパンチの移動に合わせて上下に動くように設計した。これにより試験中の CCD カメラと試験片の距離は一定に保持され、撮影範囲は常に一定に保たれる。CCD カメラの解像度は、1024×768 Pixel であり、撮影範囲は 61×46 mm である。したがって、撮影した画像は 0.060 mm/Pixel である。

#### 2.2 試験条件

試験片は、220×220 mm の正方形で厚さ 0.9 mm のアルミニウム合金板 A6061-T4 である。駆動板は、220×220 mm の正方形で厚さ 1.0 mm の SPCC で、中心部分に直径 32 mm の穴をあけた。試験片の端部は全てビードにより固定されており、

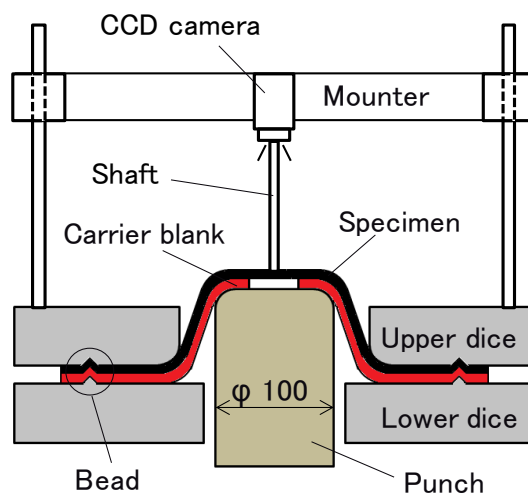


Fig. 1 Outline of stretch forming test

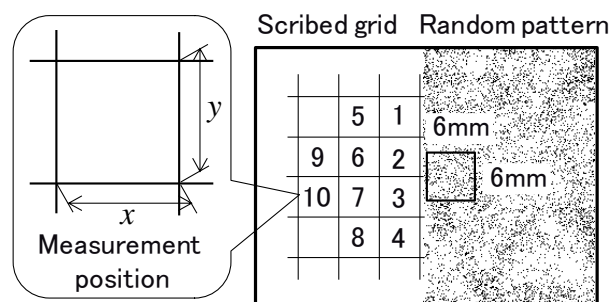


Fig. 2 Schematic illustration of specimen surface

円筒形の平頭パンチで張り出されるので、試験片中央の測定部は等 2 軸引張を受ける。実験において、パンチの上昇速度は約 1 mm/s とし、CCD カメラによる画像の取得は 5 回/s とした。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 精度検証

Fig. 2 に示すように試験片表面の測定部の半分に間隔が 5 mm の標線を、圧延方向 (x 方向) および圧延方向直角方向 (y 方向) に格子状に描き、残り半分に白色と黒色スプレーでランダムパターンを描いた。変形前に Fig. 2 に示す 10 箇所の正方形の標線間隔を測定した。

それぞれの箇所における標線間隔の測定は、Fig. 2 に示すように正方形の下辺と右辺で行なった。標線間隔の測定には、分解能が約 0.01 mm の測定顕微鏡を用いたため、ひずみの測

定分解能は 0.002 である。張出し成形試験を対数ひずみが約 0.2 に達するまで行ない、変形後の標線間隔を測定して、10 箇所での  $x$  方向、 $y$  方向の対数ひずみを求めた。ひずみ測定値は、平均値 0.205 で最大値 0.208、最小値 0.202 であった。したがって、ひずみ測定値は平均から  $\pm 0.003$  程度のばらつきを持つことが分かる。

次に、CCD カメラで撮影した画像より、成形前の画像と  $x$  方向の対数ひずみが約  $\varepsilon_x = 0.03$  となる画像を用いて DIC 法による画像相関を行なった。その次は、 $\varepsilon_x = 0.03$  の画像と  $\varepsilon_x = 0.06$  の画像で相関を行なった。その後は、同様にして対数ひずみ増分が約  $\Delta\varepsilon_x = 0.03$  となるような画像を取り出し、成形終了後の画像まで画像相関を行なった。それぞれの画像相関を基にして得られた対数ひずみ増分を足し合わせて対数ひずみとした。相関間隔が対数ひずみ増分  $\Delta\varepsilon_x = 0.06$  の場合も同様に測定を行ない、相関間隔  $\Delta\varepsilon_x$  の影響を確認した。DIC およびひずみの計算は Fig. 2 に枠で示す  $6 \times 6$  mm の範囲を対象とした。

相関間隔  $\Delta\varepsilon_x = 0.03, 0.06$  の場合のひずみ分布の測定結果を Fig. 3 に示す。 $\Delta\varepsilon_x = 0.03, 0.06$  のどちらにおいても、測定位置によってひずみにばらつきがあるという傾向が確認できる。この度合いは  $\Delta\varepsilon_x = 0.03$  の方が強い。Fig. 4 に DIC 法によって測定されたひずみのヒストグラムを示す。図中には標線によるひずみ測定値の平均値を示し、エラーバーは最大値と最小値の範囲を示している。 $\Delta\varepsilon_x = 0.03$  の場合、DIC 法で測定したひずみの平均値は 0.2054、標準偏差は 0.0061 であり、 $\Delta\varepsilon_x = 0.06$  の場合は、平均値は 0.2048、標準偏差は 0.0045 であった。

これらの結果より、相関間隔  $\Delta\varepsilon_x = 0.03, 0.06$  とした DIC 法でのひずみ測定値の平均値の差はたかだか 0.0006 であり、平均値は画像相関間隔による影響がほとんど無いことがわかる。さらに、それらと標線によるひずみ測定値はひずみの測定精度の範囲内で一致している。一方、DIC 法による測定値のばらつきは相関間隔の広い方が少なくなっている。これは相関間隔の広い方が、画素数に起因する変位測定誤差の影響が少ないためであると考えられる。

### 3.2 成形限界ひずみの測定

試験片表面全体にランダムパターンを描き、試験片が破断するまで張出し成形を行なった。画像相関間隔は約  $\Delta\varepsilon_y = 0.03$ 、測定範囲は  $40 \times 40$  mm で DIC 法による変位測定を行ない、ひずみ分布を測定した。Fig. 5(a)に  $y$  方向の対数ひずみ  $\varepsilon_y = 0.1$  のときのひずみ分布、(b)に  $\varepsilon_y = 0.2$  のひずみ分布、(c)に破断直前のひずみ分布をそれぞれ示し(d)に破断後の試験片の写真を示す。Fig. 5(a)より、対数ひずみが約  $\varepsilon_y = 0.1$  のときはひずみ分布がほぼ同様であることが分かる。一方、(b)の  $\varepsilon_y = 0.2$  では図の枠で示す箇所それぞれ不均一なひずみ分布が生じている。そして、それらの箇所へのひずみの集中は(c)の破断直前でさらに進んでいる。この位置は試験片の破断箇所と一致することが(d)の写真よりわかる。このように変形に伴うひずみの局所化が十分に測定・可視化できることが分かった。

## 4. 結言

本研究では、張出し成形試験におけるひずみ測定に標線間隔を測定する従来の方法と DIC 法に基づく方法を適用した。その結果、張出し成形試験における DIC 法によるひずみ測定精度は、標線を用いた従来の測定方法と測定精度の範囲内で一致した。また、画像相関間隔はひずみ測定値の平均値には影響を及ぼさないが、測定値のばらつきに影響があることが確認できた。DIC 法を適用することで破断に至るまでの大ひずみの連続的なひずみ分布の測定と可視化が実現できることがわかった。

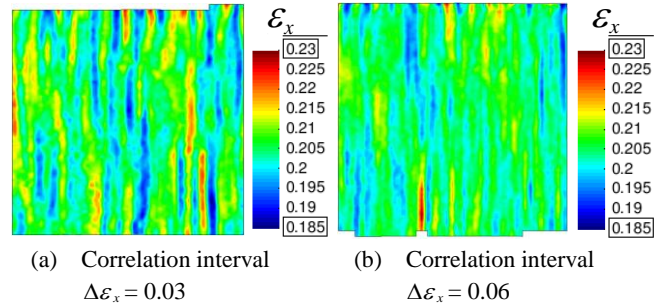
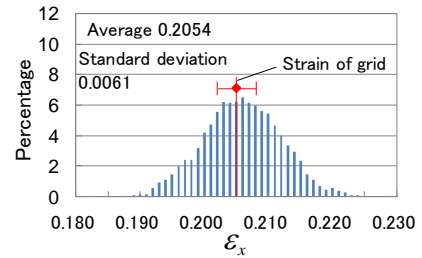
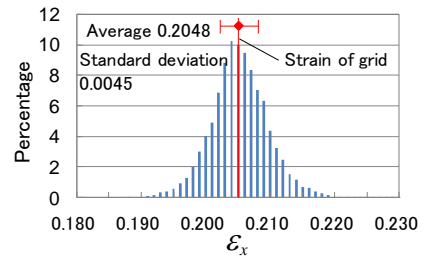


Fig. 3 Distribution of logarithmic strain  $\varepsilon_x$



(a) Correlation interval  $\Delta\varepsilon_x = 0.03$



(b) Correlation interval  $\Delta\varepsilon_x = 0.06$

Fig. 4 Histogram of logarithmic strain  $\varepsilon_x$

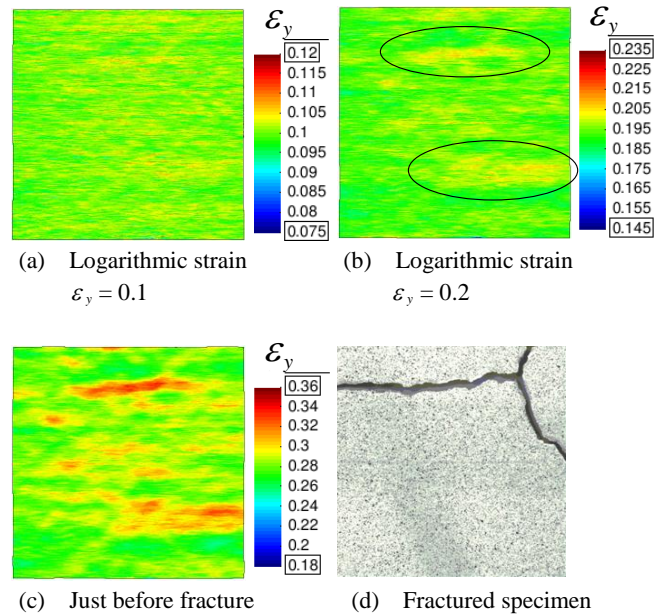


Fig. 5 Distribution of logarithmic strain  $\varepsilon_y$  and fractured specimen

### 参考文献

- 1) ISO12004-2, Metallic materials-Sheet and strip-Determination of forming-limit curves, (2008).
- 2) 出水享ら, 長崎大学紀要, 工学, **41**-77(2011), 45-52.
- 3) 畷田道雄ら, 日本機械学会論文集, **76**-763(2010), 587-594.