

21. 引張変形を受ける A5052 板に発生する変形帯の非接触測定 Noncontact measurement of deformation band produced on A5052 sheet subjected to tensile deformation

学生氏名 海藤 稜馬
指導教員 吉田 健吾

Abstract

Deformation bands appearing in Al-Mg alloy sheet subjected to uniaxial tension was investigated using digital image correlation (DIC) analysis. The deformation bands emerge an array of the direction inclined between 56° to 59° from the tensile direction. The bands were propagated in succession. The width of the deformation bands and the strain rate in the band area increase with increasing the strain in the specimen. Then, the frequency of occurrence of deformation bands decrease and its movement becomes slow down. When the width of the specimens are made wide, width of the deformation bands and the strain rate in the band increase, and the frequency of occurrence of deformation bands decrease. In addition, the frequency of occurrence of deformation bands decreases. However, the moving velocity of the deformation bands is unchanged.

Key words: Aluminum alloy, tensile test, digital image correlation method, strain measurement

1. 緒言

Al-Mg 合金は耐食性、成形加工性、溶接性等に優れており自動車用ボディパネルや建築材など様々な製品に使用されている。この合金の引張特性として、応力-ひずみ曲線に鋸歯状の応力変動を示すセレーションがある。これは動的ひずみ時効によって帯状の局所変形が連続的に発生し、Fig. 1 に示すような変形帯が隣接する位置に伝播することが原因である。これにより金属表面にひずみ模様を生じて製品外観を損なうため、解決すべき課題となっている。中山ら^{1,2)}はひずみゲージやカメラ撮影、また触針式表面形状測定装置による方法を用いて変形帯の幾何学形状と形成位置や形成順序について研究を行った。このように従来の研究では、主にひずみゲージの計測値を基にして変形帯の形成を調査した。しかし、この方法ではゲージを貼り付けた部分のひずみしか計測できないため、変形帯の発生全体の調査は困難であった。

これに対して、近年普及してきたデジタル画像相関 (DIC) 法を用いることで、変形帯の発生に伴い不均一化するひずみ分布の測定および可視化が可能となる。この 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、変形の前後の画像を比較することで変位を測定し、ひずみ等を算出する手法である。DIC 法を用いた変形帯に関する過去の研究報告^{3,4)}がいくつかある。Herdawandi ら³⁾は DIC 法を用いてひずみ分布を観察することで、変形帯の発生における試験温度や予ひずみの影響を報告している。

本研究では A5052 板材を供試材として、単軸引張試験で生じる変形帯の発生特性を詳細に調査する。DIC 法を用いた解析を行うことで、試験片表面の対数ひずみ分布および対数ひずみ速度分布の時間変化を測定する。そして、引張試験においてひずみの増大が変形帯形成に及ぼす影響を調査する。さらに、試験片平行部の幾何学形状が変形帯形成に及ぼす影響を調査する。

2. 実験方法

試験片は板厚 1.0 mm の A5052-O 材である。JIS13B 号試験片を約 60% に縮小し、平行部長さ 36 mm、平行部の幅 7.5 mm の試験片を作製した。また、平行部の幅を変化させた際の影響を確認する比較材として、平行部長さは同じく 36 mm で、幅を 30 mm と変更した試験片も作製した。試験片表面には DIC 法による変位測定を行うために必要となるランダムパターンを塗布する。これは水性塗料で、下地として試験片表面に白色の塗料を吹き付けた後、その上から黒色の塗料を斑点模様となるように吹き付ける。

実験装置にはインストロン型試験機を用いる。このときクロスヘッド変位速度を 1.0 mm/min と定めると、対数ひずみ速度の平均値は $3.4 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ となった。CCD カメラは試験機に取り付けた試験片の表面に対して垂直となるように設置する。そして撮影範囲の長辺方向が引張軸に対して平行で、全体が映るように調節する。ここで引張軸方向を x_1 方向、引張軸に垂直である方向を x_2 方向と定める (Fig. 1 参照)。CCD カメラの解像度は $2448 \times 2048 \text{ pixel}$ で、撮影範囲は $76.5 \text{ mm} \times 64.0 \text{ mm}$ とした。したがって撮影画像の画素は 0.031 mm/pixel である。また画像撮影間隔を 0.2 s とした。そして試験開始から破断直前までの全ての画像の変位解析を行った。

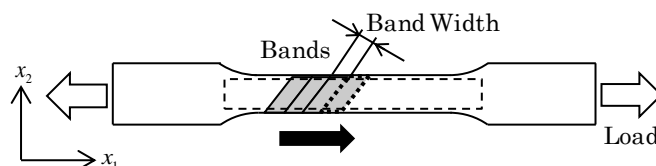


Fig. 1 Propagation of deformation bands

解析範囲は Fig. 1 に破線で示した試験片肩部を含む長方形内部とする。この解析域内において 5 pixel 間隔で各地点の面内変位を測定する。そして変位の測定結果から対数ひずみ分布や対数ひずみ速度分布を求める。

3. 実験結果

3.1 ひずみが 0.02 ~ 0.03 における変形帯の発生特性

試験片平行部の幅が 7.5 mm の試験片を用いて引張試験を行った。試験開始後 66.0 s ~ 67.0 s の間の 0.2 s 毎の x_1 方向の対数ひずみ分布、および x_1 方向の対数ひずみ速度分布を Fig. 2 の (a) と (b) にそれぞれ示す。この間試験片平行部における対数ひずみ分布の平均値は約 0.020 であった。Fig. 2(a) より、対数ひずみ速度が大きい帯状の領域 (黒い部分) が確認できる。その他の領域は ± 0.004 の値を示し、その平均値はほぼ 0 となった。つまり、この帯状領域にのみ変形が発生している。本研究ではひずみ速度が 0.005 s^{-1} 以上となる帯状の領域を変形帯とみなす。この変形帯は時間経過に伴い、 x_1 方向に向かって隣接した位置に伝播した。また Fig. 2(b) では、変形帯の発生と移動に伴ってひずみが x_1 方向に増加する様子を確認した。

ひずみが 0.02 ~ 0.03 の範囲 (試験開始後 65.8 s ~ 98.2 s) における変形帯の発生特性を調査した結果、このひずみ域において変形帯は x_1 方向に対して $56^\circ \sim 59^\circ$ の角度であった。 x_1 方向に連続して伝播する変形帯の公称移動速度は 3.5 mm/s であった。変形帯の幅は $0.8 \sim 1.8 \text{ mm}$ の範囲であった。また、変形帯内部の対数ひずみ速度の最大値は $0.011 \sim 0.019 \text{ s}^{-1}$ の値を示した。

3.2 ひずみが 0.15 ~ 0.16 における変形帯の発生特性

試験片平行部の幅が 7.5 mm の試験片の引張試験開始後 467.6 s ~ 468.6 s の間の 0.2 s 毎の x_1 方向の対数ひずみ速度分布を Fig. 3 に示す。この間、試験片平行部における対数ひずみ分布の平均値は約 0.151 であった。468.0 s で変形帯が発生した後、しばらく変形帯は観測されずに平行部における対数ひずみ速度の平均値はほぼ 0 を示した。そして再び 468.6 s で隣接する位置に新しい変形帯が発生した。このように変形帯が発生する時と、変形帯が発生せずひずみが生じない時があった。このとき変形帯が発生しない時間間隔は 0.4 s であった。

ひずみが 0.15 ~ 0.16 の範囲 (457.2 s ~ 489.2 s) における変形帯の発生特性を調査した結果、変形帯の発生と消滅が繰り返し起こることがわかった。その間、変形帯の発生角度は $56^\circ \sim 59^\circ$ の範囲であった。変形帯が x_1 方向へ断続的に移動するとき、その移動距離

を移動に要した時間で除することで変形帯の公称移動速度を求めた。その結果、変形帯の公称移動速度は0.98 mm/sとなった。変形帯の幅は1.4 ~ 2.4 mmの範囲であった。また、変形帯内部の対数ひずみ速度の最大値は0.025 ~ 0.030s⁻¹の値を示した。以上の結果と3.1節のひずみが0.02であるときの結果を比較すると以下のことがわかった。変形帯の発生角度は同じであった。ひずみが増加することで、変形帯が発生する時間間隔、変形帯の幅、変形帯内部の対数ひずみ速度の最大値は共に増加し、移動速度は減少した。

3.3 試験片幅が変形帯の発生特性へ及ぼす影響

試験片平行部の幅が30 mmの試験片で単軸引張試験を行った。試験開始後608.2 s ~ 609.2 sの間の0.2 s毎のx₁方向の対数ひずみ速度分布をFig. 4に示す。この間試験片平行部における対数ひずみ速度の平均値は約0.150であった。変形帯の発生後0.6 sの間は変形帯が観測されず、平行部における対数ひずみ速度の平均値はほぼ0であった。また、3.2節と同様に変形帯が漸続的に発生した。

ひずみが0.15 ~ 0.16の範囲(607.8 s ~ 632.0 s)における変形帯の発生特性を調査したところ、変形帯の発生角度は56° ~ 59°の範囲であり、変形帯が発生しない間隔は0.6 sとなった。変形帯の公称移動速度は0.78 mm/sとなった。変形帯の幅は1.4 mm ~ 2.3 mmの範囲で平均値は2.0 mmであった。また、変形帯内部の対数ひずみ速度の最大値は0.035 ~ 0.045s⁻¹の値を示した。この結果と、3.2節の幅7.5 mmの試験片に0.15 ~ 0.16のひずみを与えた際の結果と比較すると、変形帯の発生角度と幅は同じであった。また、移動速度も同程度の値となった。変形帯の発生しない間隔、変形帯内部の対数ひずみ速度の最大値は増加した。

4. 考 察

変形帯の発生角度はひずみ量や試験片平行部の幅に関わらず、x₁方向に対して56° ~ 59°の角度で発現した。これに関してHerdawandiら³⁾はA5754で引張試験を行い、変形帯はひずみ速度やひずみ量に関わらず55° ~ 60°で発生することを実験的に確認した。これは本実験と同様の値を示しており、変形帯の発生角度は試験片形状やひずみ量による影響を受けないと考えられる。変形帯の発生時に変形帯以外の領域ではひずみは生じていなかった。したがって、変形帯の長さ方向のひずみはゼロでなければならず、これを満たす方向に変形帯は発生する。単軸引張を受ける等方性材料について、この条件を満たす方向を計算すると、55.4°となる。実験値はこの値よりも大きいのが、その原因は供試材の異方性が影響したものと考えられる。

幅7.5 mmの試験片では、ひずみの増加に伴って変形帯は連続して発生する挙動から、断続的に発生する挙動へと変化し、変形帯が発生しない時間間隔は増加した。それに伴って一度に発生する変形帯内部の対数ひずみ速度の最大値、変形帯の幅および移動速度は共に大きくなった。Herdawandiら³⁾は応力-ひずみ曲線に現れる応力変動を調査した。そして、ひずみの増加に伴い、動的ひずみ時効による応力降下は徐々に増大することを確認した。すなわち、次の変形が生じるために必要な応力は増加し、その応力に達するまでの時間間隔も増加する。応力降下は変形帯の発生に伴うものであり、その後、応力が再び上昇する際には変形帯は発生しない。つまり、変形帯の発生しない間隔が長くなるという実験結果と符合する。

変形帯が発生しない間隔が大きくなるにつれて、一度に生じる変形帯のひずみは大きくなる。これは、変形帯の幅と変形帯内部のひずみ速度の増加として実験結果に表れた。

試験片の幅を7.5 mmから30 mmへ大きくすることで、変形帯内部のひずみ速度の最大値および変形帯の発生しない間隔は共に増加した。一方、変形帯の幅と移動速度は変化がなかった。ひずみ速度の最大値の増加は、上述のように変形帯の発生しない間隔が増加したことが原因である。しかし、変形帯の発生しない間隔が増加した原因は不明のため、今後類似した条件での調査が必要となる。

5. 結 言

A5052-Oの単軸引張試験を行い、変形帯の発生特性を調査して

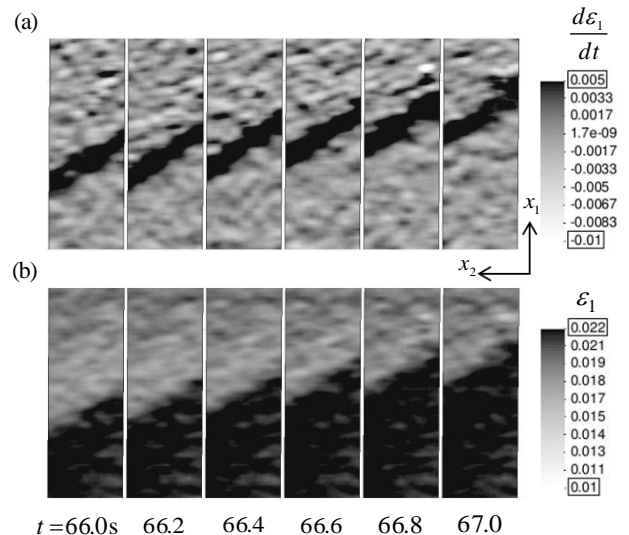


Fig. 2 (a) Strain rate maps of the specimen on 30 mm in width show the deformation bands when averaged logarithmic strain reaches 0.02. (b) Strain maps at the same time as (a) show the increasing strain with the propagation of the bands.

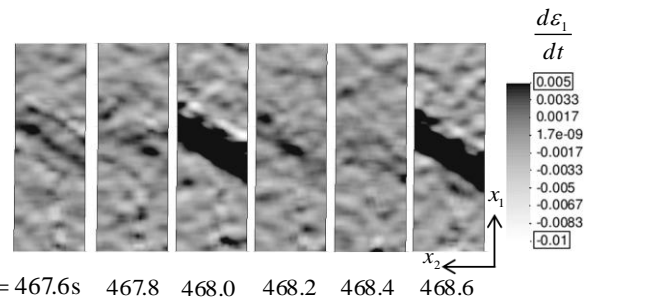


Fig. 3 Strain rate maps show the deformation bands when averaged logarithmic strain reaches 0.151.

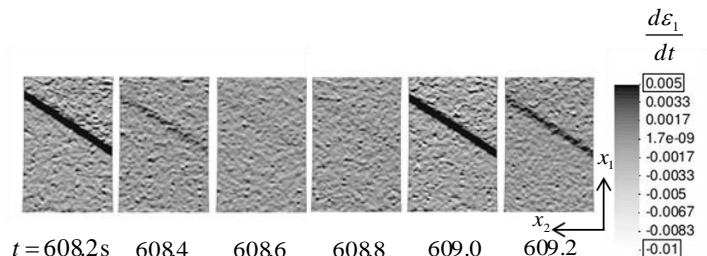


Fig. 4 Strain rate maps of the specimen on 30 mm in width show the deformation bands when averaged logarithmic strain reaches 0.150.

次の結果が得られた。変形帯の発生角度はひずみ量や試験片形状の影響を受けない。ひずみの増加に伴って変形帯の幅と、変形帯内部のひずみ速度、変形帯の発生しない時間間隔は増加する。一方、変形帯の移動速度は低下する。また、試験片の平行部の幅を大きくすることで、変形帯内部のひずみ速度および変形帯内部のひずみ速度の増加、また変形帯の発生頻度の低下を示す。変形帯の幅と移動速度は変化しない。

参 考 文 献

- 1) 中山・前田：軽金属, **61**, (2011), 240-245.
- 2) 中山・野村・吉田：軽金属, **57**, (2007), 398-404.
- 3) Herdawandi H, et al. : Acta Materialia **55**, (2007), 4151-4160.
- 4) Zavattieri P.D., et al. : International Journal of Plasticity **25**, (2009), 2298-2330.