超塑性7475アルミニウム合金の特性評価における R型試験片法の有用性

高山 善匡* 杜澤 達美* 加藤 一*
松本 勝生*† 古城 紀雄**

*宇都宮大学工学部機械システム工学科

**大阪大学工学部材料物性工学科

J. Japan Inst. Metals, Vol. 59, No. 4 (1995), pp. 389-394

Usefulness of the R-type Specimen Method for Evaluation of Superplastic Characteristics in a 7475 Aluminum Alloy

Yoshimasa Takayama*, Tatsumi Tozawa*, Hajime Kato*,
Katsuo Matsumoto* and Norio Furushiro**

*Department of Mechanical Systems Engineering, Faculty of Engineering, Utsunomiya University, Utsunomiya

**Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering, Osaka University, Suita

Superplastic characteristics of a 7475 aluminum alloy have been evaluated by the R-type specimen method. The R-type specimen has no ordinary gauge part with a uniform cross section. The method has been proposed recently to solve the problems on the conventional tensile test using an ordinary specimen. As a result, it is found that the R-type specimen method enables to evaluate the extremely high superplastic elongation of the commercial 7475 alloy using a furnace with a common length. The elongation of the R-type specimen decreases with an increase in the radius of the R-part below a certain value, while it increases over that value. Better reproducibility of the elongation for the R-type specimen is obtained in Region II than that for the ordinary specimen. Moreover, the elongation of the ordinary specimen can be estimated quantitatively from the peak value of the strain distribution of the R-type specimen after fracture, using the suitable shape of the specimen and the adequate distance between gauge marks.

(Received September 5, 1994)

Keywords: superplasticity, evaluation, R-type specimen, tensile test, reproducibility, 7475 aluminum alloy

I. 緒 言

超塑性の特徴は、巨大な変形能と低い変形抵抗である。この特徴を利用することにより、超塑性の塑性加工技術への応用が活発になされてきた⁽¹⁾⁽²⁾。例えば、多数の部品を組合せて造られてきた複雑形状の航空機部材が、超塑性の応用により一体成形可能になっている。また、従来「非塑性加工材」とみなされてきたセラミックス、金属間化合物を含め、多くの難加工材の成形法に超塑性が利用され始めている⁽³⁾⁽⁴⁾。

このような超塑性の実用に際して、適切に評価された信頼性のある材料特性がその基礎になることはいうまでもない。しかしながら、超塑性材料の異常に高い延性のために、通常の引張試験法では特性評価が困難である場合が多い。したがって、試験装置あるいは試験方法の面におけるさまざまな工夫の下に特性評価がなされているのが現状である。その結果として、特性

評価の方法はおのずと個別化・細分化され、標準的な評価方法は統一されていない。いい換えれば、通常の一般的な形状の試験片を用いた引張試験を超塑性材料の特性評価に採用することはさまざまな問題をはらんでいるといわざるを得ない。

著者らは、前報⁽⁵⁾において、まず平行部を有する通常の試験片を用いた引張試験による超塑性材料の特性評価における問題点を整理し、次に問題点を解決し得る試験片として「R型試験片」を提案した。さらに、典型的な超塑性材料である Zn-Al 共析合金について、R型試験片を用いた引張試験による特性評価を試み、この特性評価法、すなわち、「R型試験片法」が極めて有用かつ簡便な評価手法となり得ることを示すことができた。

本研究では、航空機用材料として実用されている超塑性 7475Al 合金を用い、R部半径 R の変形挙動への影響および結果の再現性に着目して、R型試験片法による超塑性特性評価の有用性を検討した。

† 宇都宮大学大学院生、現在：(株)神戸製鋼所

II. 実験方法

試料には、7475Al 合金の圧延板材(板厚 $t=1.6$ mm)を用いた。この板材より、Fig. 1 に示すような R 型試験片を切り出した。ここで、最小 R 部幅 $W=6$ mm、つかみ部幅 $C=16$ mm 一定とし、R 部半径 R を 10, 15, 25, 37.5 mm と変化させた 4 種類の形状を用いた。R の変化に伴い、R 部長さ(標点間距離) L は 17.3, 23.4, 30.0, 37.4 mm と変化する。

R 型試験片との比較のため、平行部を有する通常の試験片を作製した。この試験片の各部の寸法は、平行部長さ 6 mm、平行部幅 4 mm、肩半径 6 mm、つかみ部幅 8 mm であり、標点間距離は 5 mm とした。この試験片は、JIS 規格⁽⁶⁾あるいは ASTM 規格⁽⁷⁾の試験片に比べかなり小さい。また、平行部幅に対する平行部長さの比は、両規格におけるほとんどの試験片で 4 以上であるのに対し、1.5 とかなり小さい。しかしながら、前報⁽⁵⁾で述べたように超塑性特性評価の特殊性として認められている形状であると考えられる。

引張試験は、温度 803 K、引張速度 $8.3 \times 10^{-7} \sim 1.7 \times 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ の条件で行った。試験片のつかみ部は、R 部の端までヤスリ式チャックにより固定し、R 部以外はほとんど変形しない状態で引張試験を行った。また、試験片 R 部には、最小断面積を有する中央を基点として 3 mm 間隔に標点を設け、破断後に板幅方向中央のひずみ分布を測定した。

III. 実験結果

1. 応力-変位曲線

まず、通常の試験片と R 型試験片の基礎的な引張変形挙動を比較する。Fig. 2 は、7475Al 合金の両試験片について公称応力-変位曲線を示したものである。ここで、R 型試験片の公称応力は荷重を R 部の最小原断面積で割った値とした。図のように、両試験片ともに、超塑性材料の特徴である明瞭なひずみ速度(引張速度)依存性を示している。また、R 型試験片の公称応力-変位曲線に特異な応力変動等は認められない。このことは、変形部のひずみ速度履歴が通常の試験片と同様に滑らかであることを意味していると理解される。

しかしながら、破断に至る過程で R 部中央にひずみが集中することから、試験中のある時点において中央部のひずみ速度は通常の試験片のそれよりも相対的に大きくなっていることは

Fig. 1 Shape and dimensions of the R-type specimen.

Fig. 2 Comparison of nominal stress-displacement curves between the ordinary and the R-type (with $R=25$ mm) specimens: The nominal stress for the R-type specimen refers to the applied load divided by the minimum cross-sectional area of the R-part.

明らかである。著者らは Zn-Al 共析合金について引張速度一定の引張試験を行い、変形中の R 部中央のひずみ速度変化が比較的小さいとの結果を得ている⁽⁸⁾。引張速度一定の条件においては、通常の試験片のひずみ速度は原理的に変形に伴い減少する。例えば、公称ひずみ 500% になればひずみ速度は初期状態の 1/6 になる。R 型試験片の中央へのひずみの集中は、このひずみ速度の減少を相殺する方向に働くため、ひずみ速度変化が小さくなる訳である。ひずみ速度依存性の高い超塑性特性の評価には、定ひずみ速度の試験が理想であるから、R 部中央の変形は、通常の試験片の変形に比べ、理想的な条件に近いといえる。

本来 Fig. 2 に示したような荷重-変位曲線の比較は、同一のひずみ速度でなされるのが適当であると考えられる。しかしながら、前述のように両試験片で試験中のひずみ速度変化が異なるため、延性評価を含めて考えると、初期状態のひずみ速度のみを同一にすることはあまり適切とはいえない。Zn-Al 共析合金の結果から概算すると、公称応力がピークを示す初期状態における $R=25$ mm の R 型試験片中央部のひずみ速度は、通常の試験片の 0.5~0.7 倍程度と見積もられる。その後変形とともに通常の試験片のひずみ速度は相対的に遅くなるため、破断ま

での変形過程における平均的なひずみ速度は、ほぼ同等であると考えられる。このことは両試験片の変形応力の大小関係からも裏付けられる。

以上のことから、本報では、通常の試験片と R 型試験片 ($R=25\text{ mm}$) の比較は、同一の引張速度における結果について行うことにした。

2. R 型試験片の破断伸びに及ぼす R 部半径の影響

Fig. 3 は、各引張速度における破断伸びと R 部半径 R の関係である。破断伸びは R 部長さ L の変化より求めた。Region III⁽⁹⁾に対応する速い引張速度においては R 依存性がほとんどみられない。これに対し、Region II に対応する遅い引張速度では、 R を 10, 15, 25 mm と大きくすると破断伸びは小さくなっていき、 R を 25 mm から 37.5 mm とさらに大きくすると、破断伸びは逆に大きくなっている。このような結果は、各試験片のひずみ分布の違いから次のように理解される。

Fig. 4 に R 型試験片の破断後のひずみ分布を示す。R 部に 3 mm 間隔にもうけた標点について、各標点間の平均公称ひずみを図示した。図中の右方向が実際の引張試験における上方向である。Fig. 4(a) は、Region II の引張速度における $R=10, 15, 25\text{ mm}$ の試験片の結果である。R 部長さによる分布の変化をみていくと、 $R=10\text{ mm}$ で R 部端部のひずみ分布裾野部がみられないことを除けば、 $R=25\text{ mm}$ 以下の分布は同じタイプの典型的な R 型試験片の分布曲線を呈しているといえる。また、分布のピーク値は R が大きくなると増加の傾向にあるが、その増加は R 部長さ L の変化に比べて小さい。したがって、Fig. 3 における $R=25\text{ mm}$ までの破断伸びの減少は、「R 部半径の増加に伴い R 部長さは大きくなるが、R 部の伸びの絶対量の増加は小さい」ことによると解釈することができる。R 部の伸びの絶対量は、基本的には R 部長さが長い方が大きくなるはずである。しかし、 R が小さい試験片では R 部長さ L の最小 R 部幅 W に対する比 L/W が小さいために伸びの絶対量が大きくなり、 R が違っても絶対量に差がないものと考えられる。

$R=25\text{ mm}$ から 37.5 mm への破断伸びの増加は、 $R=37.5$

Fig. 3 Effect of the radius of the R-part, R , on elongation for the R-type specimen.

Fig. 4 Strain distributions in the gauge part of the R-type specimen after fracture under various conditions: the section numbers on the horizontal axis refer to the gauge marks dividing the original gauge part into the segments 3 mm long, which are numbered from 1 about the mid-point of the specimen.

mm の試験片の破断後のひずみ分布から次のように理解される。

Fig. 4(b) のように、 $R=37.5\text{ mm}$ の試験片の分布においては、引張速度 $3.3 \times 10^{-6}\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ でひずみがかなり広い範囲に分布した曲線を示しており、 $1.7 \times 10^{-6}\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ではひずみ分布曲線のピークが中央から外れている。このようなひずみ分布の特徴は通常の試験片にしばしば見られるものであり、この試験片が R 型試験片の典型的なひずみ分布を呈していないことがわかる。よって、 R の増加により、R 型試験片のひずみ分布は比較的広い範囲にひずみが分散する通常の試験片のそれに近づくことがわかる。したがって、この R の増加による破断伸びの増加は、R 部中央の疑似平行部が伸びの絶対量を稼ぐためであると理解される。

3. 破断伸びの再現性

超塑性の破断伸びは、特に巨大な値になるほど試験装置に係わる微妙な条件に影響されやすい傾向にあり⁽¹⁰⁾、再現性に乏しいものと考えられる。前報⁽⁵⁾で述べたように、R 型試験片

は R 部中央にひずみが集中し破断に至るため、通常の試験片に比べて破断に対する不確実性が小さいと推測され、破断伸びの再現性の改善が期待される。このことを確かめるため、 $R=25\text{ mm}$ の 20 本の試験片の引張試験を行い、通常の試験片による結果と比較して、破断伸びの再現性を調べた。

破断伸びと引張速度の関係をもとに、それぞれ Region II および III に対応する条件として引張速度 3.3×10^{-6} および $1.7 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ を設定し、各 20 本の試験片について実験を行った。データのばらつきを度合いを表す値として、破断伸びの変動係数 $C_v^{(11)}$ を求めてみると、Region II の引張速度では、通常の試験片の変動係数が $C_v=0.156$ であるのに対し、R 型試験片では $C_v=0.103$ と約 2/3 となっており、ばらつきが小さいことが確かめられた。Region III では両試験片の結果の違いはさらに大きく、R 型試験片の変動係数は $C_v=0.072$ と通常の試験片の $C_v=0.200$ の約 1/3 に過ぎない。このように、R 型試験片の破断伸びが良好な再現性を示すことは、統計学的に明確に裏付けられた。

IV. 考 察

1. R 型試験片と通常の試験片による延性評価の比較

ここでは、超塑性材料の延性評価の観点から、R 型試験片と通常の試験片を比較してみたい。前報⁽⁵⁾と同様に、破断伸びおよび最大平均公称ひずみのひずみ速度依存性を検討する。

Fig. 5 は、各 R 型試験片の破断伸びおよび最大平均ひずみを公称ひずみ速度に対して図示したものである。通常の試験片の公称ひずみ速度は、引張速度を平行部長さで割った値である。R 型試験片に関しては、III 章 1 節で述べた「 $R=25\text{ mm}$ ($L=30.0\text{ mm}$) の R 型試験片の中央部のひずみ速度が通常の試験片のそれとほぼ同等である」ことを基にして定めた。すなわち、R 型試験片の公称ひずみ速度は、「仮に」引張速度 v を R 部長さ L で割った値の 5 倍、 $5v/L$ で表すことにした。

それぞれの図に、通常の試験片の破断伸びを併せて示した。各プロットは一部を除いて 3 本の試験片の値の平均を表し、プロットに添えられた範囲表示は最大値と最小値を示す。ただし、前述の再現性実験に用いた通常の試験片および $R=25$

Fig. 5 Relationship between the quantities representing the ductility and the nominal strain rate for the R-type specimens with various radii of the R-part, R and the ordinary specimen.

mm の R 型試験片の 2 つの引張速度条件でのプロットと範囲表示は、20本の試験片のものである。

まず、両試験片の破断伸びを比較すると、R 型試験片の破断伸びは通常の試験片のそれの1/2~1/4程度となっている。この結果から、「標準的な寸法の加熱炉により巨大な超塑性伸びの評価が可能である」という R 型試験片の有用な特徴の一つが、確かめられた。また、7475Al 合金についても R 型試験片の破断伸びが延性の指標となり得ることも確認された。

ひずみ速度依存性の点からみれば、いずれの R 部半径においても、R 型試験片の破断伸びは通常の試験片の破断伸びと全体的には似通ったものになっている。より詳細にみると、破断伸びのひずみ速度依存性は R 部半径により変化している。R=10 mm では、通常の試験片に比べ幾分破断伸びの変化幅が大きく、ひずみ速度依存性が強められた様相を呈している。R=15 mm, 25 mm, 37.5 mm と大きくなると、R 型試験片のひずみ速度依存性は小さくなっており、遅いひずみ速度において両試験片の破断伸びの差が大きくなっている。このような依存性が弱められる傾向は、Zn-Al 共析合金⁽⁶⁾においてもみられたものである。

次に、R 型試験片のひずみ分布のピーク値である最大平均ひずみと通常の試験片の破断伸びを比較してみると、一部を除いて、絶対値が比較的近い値を示している。最大平均ひずみはケガキ線間隔に依存するものであり考慮を要するが、適切なケガキ線間隔の設定により、この値から通常の試験片の破断伸びを定量的に評価し得ることがわかる。しかしながら、R 部半径の小さい R=10 mm あるいは 15 mm の試験片では、最大平均ひずみのひずみ速度に対する変化が通常の試験片の破断伸びのそれとは異なっている。一方、R=25 mm および 37.5 mm の試験片では、両者の変化傾向が極めて類似している。このことは、R 部半径の大きい試験片の R 部中央の引張変形中の応力状態が通常の試験片の平行部の単軸応力状態に近いことによるものと考えられる。R 部半径の小さい試験片では、特に引張変形初期の応力状態が単軸と大きく異なるため、速い引張速度における最大平均ひずみが過小に現れ、結果として通常の試験片の破断伸びと異なる依存性を呈するものと理解される。したがって、R 部半径の小さい試験片による超塑性特性評価は、適切でないと考えられる。

前述のように、最大平均ひずみは、比較的 R 部半径が大きい試験片については、通常の試験片の破断伸びを定量的に評価するのに極めて有効であるといえる。そこで、破断伸びと同様に最大平均ひずみの再現性を調べてみた。その結果、Region II の引張速度では、変動係数 $C_v=0.139$ 、Region III では、 $C_v=0.105$ であった。これらの値は、2 つの引張速度においていずれも、R 型試験片の破断伸びの変動係数よりは大きいものの、通常の試験片の破断伸びのそれよりは小さいことがわかる。このように、再現性の観点からも、最大平均ひずみが延性の指標として有用であることが確認された。

2. 適切な R 型試験片の形状

前節で述べたように、R 型試験片による超塑性特性評価の結果は、試験片形状に大きく依存する。適切な試験片形状は、通常の試験片による結果との関係を踏まえた評価の合理性と評

価手法としての簡便性を考慮したものでなければならない。

本研究で着目した R 部半径 R に関しては、延性評価の観点から十分に大きい R とすることが望まれる。すなわち、前述のように、 R が小さい場合には、主要な変形部分である R 部中央が多軸応力状態となるため、適切な延性評価が困難となると考えられる。また、 R が大きすぎる場合には、R 部中央に疑似平行部が生じるため、伸びの絶対量が比較的小さいという R 型試験片の特長が損なわれる。したがって、この 2 つの観点から、R 部半径 R は、25 mm 程度が適切であるといえる。

前報⁽⁵⁾においては、Zn-Al 共析合金を用いて、つかみ部幅 C の影響を調べている。 $R=25$ mm、最小 R 部幅 $W=6$ mm 一定とし、 C を 10 mm から 20 mm まで増加させると、それに伴い R 部長さ L は 19.6 mm から 34.7 mm に増加する。したがって、 C の影響は、 L の影響とみなし得る。 L が小さい場合は、つかみ部による変形の拘束により多軸応力状態となるため、延性評価には不適切である。一方、 L が大きい場合には、比較的単軸応力状態に近く、合理的な評価は可能であるが、必要以上に L が大きいことはより長大な試験装置を必要とする等の問題があり、好ましくない。また、 L が大きい試験片の R 部端部のひずみは極めて小さく測定誤差の影響が大きいいため、前報で述べた R 部のひずみ分布の利用の観点からも有効とはいえない。よって、 $L=30$ mm 程度の形状が、推奨される。

以上のように、前報および本報で用いた試験片形状の範囲では、R 部半径 $R=25$ mm、R 部長さ $L=30$ mm、最小 R 部幅 $W=6$ mm、つかみ部幅 $C=16$ mm の形状が、超塑性特性評価に最も適切であるといえる。板厚 t の影響は明らかではないが、 t の増加に伴い破断伸びが増加すると推測されることから、2 mm 程度以下とすることが望ましいと考えられる。

3. 材料による試験結果の差違

前報の Zn-Al 共析合金の R 型試験片による結果と本報の 7475Al 合金の結果を比較することは非常に興味深い。材料による結果の差違は、主として、変形応力のひずみ速度依存性の違いにより現れる。R 型試験片においては、R 部に広範囲のひずみ速度分布が生じるため、試験結果への影響が比較的大きい。 $R=25$ mm、 $L=30$ mm のほぼ同じ形状の試験片について破断後のひずみ分布を比較すると、Zn-Al 合金(前報 Fig. 6(c))の方が 7475 合金(Fig. 4(a))に比べて、中央へのひずみの集中度が高いことがわかる。最大ひずみも Zn-Al 合金の方が大きく、ひずみ集中度の違いは明らかである。この結果は、変形応力のひずみ速度依存性、すなわち m 値が Zn-Al 合金の方が小さいことによると理解される。ただし、ひずみによる硬化の影響も無視し得ない。

このようなひずみ分布の集中度の違いは、R 型試験片の破断伸びの引張速度依存性にも影響を及ぼす。R 型試験片の変形においては、その中央部のひずみが顕著な引張速度依存性を示す。しかしながら、集中度の高い Zn-Al 合金では、R 部中央のひずみを稼ぐ部分の割合が小さいため、R 部全体の破断伸びの引張速度依存性は幾分弱められる傾向となる⁽⁵⁾。これに対し、7475 合金では、この傾向は比較的小さい。

V. 結 言

本研究では、超塑性 7475Al 合金を用い、R 部半径 R の変形挙動への影響および結果の再現性に着目して、R 型試験片法による超塑性特性評価の有用性を検討した。得られた結果は以下のようにまとめられる。

(1) R 型試験片の Region II における破断伸びは、通常の試験片の破断伸びの $1/2 \sim 1/4$ 程度となっており、巨大な超塑性伸びの評価に対し有用であることがわかった。また、破断伸びは、R 部半径 R が 10 mm から 25 mm と大きくなると減少し、さらに 37.5 mm となると増加した。この増加は、 R が大きい試験片においては R 部中央の疑似平行部が伸びの絶対量を稼ぐためであると理解された。

(2) R 型試験片の破断伸びのばらつきを表す変動係数は、通常の試験片のそれより小さく、R 型試験片の破断伸びの良好な再現性が統計学的に確認された。

(3) R 型試験片のひずみ分布のピーク値である最大平均ひずみは、通常の試験片の破断伸びと類似した変化傾向を示し、比較的その絶対値も近いので、適切な試験片形状の選択と適切なケガキ線間隔の設定により、この値から通常の試験片の破断伸びを定量的に評価し得ることがわかった。

(4) 適切な R 型試験片形状の検討の結果、前報および本報で用いた試験片形状の範囲では、R 部半径 $R=25$ mm, R 部長さ $L=30$ mm, 最小 R 部幅 $W=6$ mm, つかみ部幅 $C=16$ mm の形状が、超塑性特性評価に最も適切であると考えられた。

以上のように、R 型試験片法による超塑性特性評価は、標準寸法の加熱炉による巨大な超塑性伸びの評価、破断伸びの良

好な再現性などの評価法として有益な特徴を備えており、超塑性特性評価のための極めて有用かつ簡便な手法であることが明らかとなった。

終わりに、有益な討論をしていただきました大阪大学工学部の馬越佑吉教授、新日本製鉄の水沼 晋氏、茨城大学工学部の本橋嘉信助教授に深く感謝致します。試料をご提供いただきましたスカイアルミニウムの小松原俊雄氏に心より感謝致します。また、実験に協力された宇都宮大学大学院生の磯江和彦君、福田充博君に感謝の意を表します。

本研究の結果の一部は、(財)大阪科学技術センター附属ニューマテリアルセンターの工業技術院委託研究によって得られたものである。

文 献

- (1) 宮川松男, 小林 勝: 日本金属学会会報, **25**(1986), 8.
- (2) 大澤泰明, 西村 尚: 軽金属, **39**(1989), 765.
- (3) T. G. Nieh, J. Wadsworth and F. Wakai: Intern. Metals Rev., **36**(1991), 146.
- (4) T. Wajata, K. Isonishi, K. Ameyama and M. Tokizane: ISIJ Intern., **33**(1993), 29.
- (5) 古城紀雄, 高山善匡, 杜澤達美, 加藤 一, 小野和人: 日本金属学会誌, **57**(1993), 29.
- (6) JIS Z 2201(1980).
- (7) ASTM E8M-93(1993).
- (8) 高山善匡, 杜澤達美, 加藤 一, 渡部英男, 古城紀雄: 未発表(日本金属学会第115回大会講演概要, (1994)).
- (9) S. W. Zehr and W. A. Backofen: Trans. ASM, **61**(1968), 300.
- (10) 東 健司: 材料, **42**(1993), 1357.
- (11) 鈴木義一郎: 統計解析法の原理, 現代人の統計 1, 林知己夫編, 朝倉書店, (1977), 10.