R 型試験片を用いた引張試験による 超塑性特性の評価

古城 紀雄* 高山 善匡** 杜澤 達美**
加藤 一** 小野 和人†

*大阪大学工学部材料物性工学科

**宇都宮大学工学部機械システム工学科

J. Japan Inst. Metals, Vol. 57, No. 1 (1993), pp. 29-35

Evaluation of Superplastic Characteristics by means of Tensile Test of R-type Specimen

Norio Furushiro*, Yoshimasa Takayama**, Tatsumi Tozawa**,
Hajime Kato** and Kazuto Ono**

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

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

In order to evaluate the basic characteristics of superplastic materials, an R-type specimen has been proposed, which has no ordinary gauge part of a uniform cross section.

First, the fundamental problems of a conventional evaluation method have been pointed out. Then, the superplastic characteristics of a Zn-Al eutectoid superplastic alloy have been examined to investigate the possibility of the new evaluation method using the R-type specimen.

As a result, it is found that the R-type specimen has the excellent possibility. In particular, the extremely high elongation can be estimated from a peak value of strain distribution after fracture. Moreover, true stress versus true strain rate relation and m -value in a wide range of strain rate can be derived from the results for a pair of R-type specimens.

(Received July 6, 1992)

Keywords: superplasticity, evaluation, R-type specimen, tensile test, zinc-aluminum eutectoid alloy

I. 緒 言

超塑性材料の基本的な特徴は、巨大な破断伸びを示すことおよび変形応力のひずみ速度感受性指数 m 値が通常の高温変形の場合よりも高いことである。加えて、変形応力が低くそのほとんどが加工硬化しないことも超塑性による成形加工に有用な特徴である。したがって基本的な超塑性特性としては、破断伸び、変形応力のひずみ速度依存性 (m 値) および変形応力-ひずみ関係が挙げられる。

これらの超塑性特性の評価は通常引張試験によりなされてきた。しかしながら、異常に高い延性に起因して超塑性材料の特性評価は一般の引張試験法では困難である場合が多い。したがって、超塑性特性は、 m 値測定法、試験片形状、定ひずみ速度試験⁽¹⁾などにみられるように、試験装置あるいは試験方法の面における研究者のさまざまな工夫の下に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。このことは、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がさまざまな問題をはらんでいることを意味するものともいえる。

そこで、本研究では、まず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する。次にこれを踏まえ、問題点を解決し得る試験片として「R 型試験片」を提案するとともに、この R 型試験片を用いた引張試験による特性評価の可能性について検討する。

II. 通常の試験片を用いた引張試験による超塑性特性評価の問題点

1. 試験装置上の問題点

超塑性材料の引張試験は高温において引張速度一定の条件でなされるのが一般的である。超塑性特性は温度とひずみ速度に強く依存することが知られており、試験においてこれらを高精度に制御することが重要となる。よって、特に破断伸びの大きな超塑性材料を破断するまで引っ張るためには、均一に制御さ

† 宇都宮大学大学院生

れた長い帯域を持つ加熱炉が必要となる。例えば、平行部長さ 20 mm の試験片が 1500% 伸びるとすると、少なくとも 320 mm の均熱帯を有するかなり長い加熱炉が必要となる。このような炉には複数の制御器による温度制御が不可欠となる。

また、前に述べた定ひずみ速度試験は、ひずみ速度に強く依存する超塑性特性の評価および変形機構の解明のために考案されたものであり、理想的な試験方法であると考えられる。しかしながら、定ひずみ速度を実現するためには、時々刻々と変化する試験片の標点間距離に応じてクロスヘッド速度を速くする特殊な引張速度制御が必要である。

加えて、ほとんどの場合このクロスヘッド速度制御はゲージ部の均一変形を前提としているが、この前提と実際の実験結果が異なる例も報告されている⁽²⁾。よって、仮にクロスヘッド速度をこのように制御できたとしても真の「定ひずみ速度」試験がなされていない場合も有り得る。

このように、理想的な超塑性特性試験には極めて特殊な装置を必要とし、比較的簡便に行えることを要求される標準的評価法には必ずしも適当とはいえない。

2. 試験法上の問題点

試験法上の問題点としては、ひずみ速度の表現方法が挙げられる。前述のように、ひずみ速度は超塑性特性を左右する重要な因子の一つであるが、その試験条件の表現は必ずしも完全とは言えない。すなわち、通常引張速度一定試験においてはひずみ速度が徐々に減少すると理解されており、ひずみ速度は試験開始時の初期ひずみ速度で表現されている。しかし、この初期ひずみ速度は引張速度と試験前の試験片寸法から便宜的に求められるものであり、その定義も必ずしも明確とはいえない。さらに、初期ひずみ速度と試験片の実際のひずみ速度との関係は後述のように試験片形状に依存しており、この点も大きな問題である。

また、超塑性特性を評価する上で極めて重要なパラメータとしてひずみ速度感受性指数 m が挙げられる。 m 値の測定法としては、速度変化試験法、定速度試験法、応力緩和試験法など数種類の方法が提示されている⁽³⁾。これらの測定法については m 値のバラツキと破断伸びとの相関性の両面からその信頼性が検討され、測定法の統一に関する提言がなされている⁽³⁾⁽⁴⁾が、いまだ統一されるには至っていない。さらに、定速度試験法による m 値の算出の際に用いられる応力としては、定常状態の変形応力という意味でしばしば最大応力が採られるが、一方である与えられたひずみにおける変形応力を用いるべきであるとの考え方もあり、問題を残すものとなっている。

加えて、試験法上の最も重要な問題として試験片形状の影響が挙げられる。これについては、次節に詳述することにする。

3. 試験片形状に関する問題点

これまでの超塑性に関する研究ではさまざまな形状の試験片が用いられている。その理由は以下のように理解される。引張試験片は本来 1 軸応力状態を実現するため、長い平行部を設けることが基本である。また、平行部の一様な変形を保証するために十分に大きい肩半径をとることが必要である。しかし、超塑性特性の評価のためには、①試験片を破断させるために、

加熱炉の均熱帯の長さとの関係から平行部をかなり短くしたり、あるいは②正確なひずみ速度制御の観点から R 部の変形を避けるために、極端に肩半径を小さくすることもしばしばなされる。これらにより、当然ながら変形中 1 軸応力状態が保持されないことも有り得ると考えられるが、超塑性特性評価の特殊性として認められてきている。したがって、研究者が「通常の引張試験片形状」と「超塑性特性評価の特殊性」という相反する条件のいずれを重要視するかにより、さまざまな試験片形状が選ばれるものと理解される。

以下に、試験片形状に関する問題点として、破断伸び、変形応力および m 値に及ぼす試験片形状の影響について述べる。

超塑性材料の破断伸びが試験片形状に左右されることはよく知られている。超塑性 7475 アルミニウム合金の実験結果⁽⁵⁾によれば、板厚と平行部幅の増加により破断伸びは大きく増加し、ゲージ部長さの増加に伴い幾分減少するとされている。このような傾向はすべての超塑性材料にみられるものであろう。

著者の一部は、Zn-Al 共析超塑性合金を用いて実験とコンピュータ・シミュレーションにより変形応力に及ぼす試験片形状の影響を検討し、次のような結果を得ている⁽⁶⁾。すなわち、超塑性材料の変形応力は試験片形状の変化により 20% 以上ものおおきな変化を示した。このような変形応力の変化は、試験片形状の変化が試験片内の真ひずみ速度分布の変化をもたらした結果であると理解される。

m 値に及ぼす試験片形状の影響は他の力学的特性への影響と対応するものであると考えられるが、その系統的な研究は少ない。断片的な研究結果⁽⁷⁾では、一部の場合を除き、その影響は小さいとされている。しかしながら、明確な結論を得るためにはより詳細かつ系統的な検討が必要であると考えられる。

以上のように、試験片形状は超塑性特性に大きな影響を及ぼすと考えられ、その決定は超塑性特性評価にとって極めて重要な問題である。

III. R 型試験片を用いた引張試験による超塑性特性評価の可能性

1. R 型試験片とその意義

今回提案する「R 型試験片」は、Fig. 1 のように、通常の板状引張試験片の平行部を取り除いた形状である。このような試験片形状は疲労試験にしばしば用いられており、JIS 規格⁽⁸⁾および ASTM 規格⁽⁹⁾において疲労試験片として規定されている。また、変形様式を変化させる目的等の特殊な用途ではあるが、R 型試験片が引張試験片として使用された例もいくつか

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

みられる^{(10)–(13)}。しかしながら、超塑性特性評価の目的で用いられた例はみあたらないようである。

II 章で述べたように、通常の試験片による超塑性材料の特性評価にはいくつかの問題点がある。特に、3 節で述べた試験片形状の影響のうち、試験片内のひずみ速度分布は重要である。実際の試験におけるひずみ速度を正確に求めるためには、引張速度と試験前の試験片寸法から形式的に求めるのではなく、なんらかの方法で実測した寸法変化から求めることが必要であろう。この観点から、比較的簡便な方法として、所定の時間で試験を中断し、試験前後の試験片の寸法変化を測定することにより、ひずみ速度を求めることが考えられる。この方法により、平均的なひずみ速度は確実に測定できる。一方、通常の試験片において肩半径 R が大きい場合には R 部がかなり変形し、平行部のひずみ速度がその分だけ小さくなることが明らかにされている⁽⁶⁾。よって、 R 部にはその断面積に対応したひずみ速度が分布していることになる。このひずみ速度分布を中断試験法により測定し積極的に利用しようとするのが、R 型試験片の発想の原点である。

また、このような見方もできる。超塑性変形においては、変形応力のひずみ速度依存性が非常に大きく、ネッキングの発達が抑制される⁽¹⁴⁾という考え方はよく知られている。R 型試験片による引張試験はまさにこのネッキングに対する抑制抵抗を調べる実験でもある。したがって、R 型試験片を用いた引張試験法は原理的に不可欠・最適な超塑性特性の評価法であるともいえる。

2. R 型試験片による超塑性特性評価の特長

前述のように、R 型試験片による本特性評価の最大のメリットは、試験片内のひずみ速度分布を利用して複数の変形条件における特性を評価できることにある。検討すべき点は残されているが、1 本の試験片により、広範囲のひずみ速度条件のデータが一度に得られる点は、試験の簡便さもさることながら最も強調されるべき特長であろう。

次に、R 型試験片であるため、中央部にひずみが集中し、試験片全体としては破断伸びが小さくなる。したがって、非常に大きい破断伸びを示す超塑性材料についても標準的な寸法の加熱炉を用いた試験が可能となる。

また、一般に、ばらつきが大きいと考えられる破断伸びの再現性の向上も期待される。さらに、試験片の破断形状は主として変形応力のひずみ速度依存性を反映するものと考えられることから、この破断形状の詳細な解析による超塑性特性把握の可能性も考えられる。加えて、試験片の加工工程が単純であり、高精度の加工が期待できる。

3. R 型試験片の応力状態

R 型試験片は平行部を取り除いた試験片形状であるため中央部断面で面積が最小となり、中央部に応力集中を生じる⁽¹⁵⁾。しかし、 R 部半径 R が相対的に大きい場合には応力集中はそれほど大きいものではない。例えば、 $R=25$ mm, $W=6$ mm, $C=16$ mm の試験片の場合には中央部の応力集中度 α (=最大応力/平均応力) は 1.09 にすぎない。同様の寸法で平行部がある通常の試験片では R 部に最大応力集中点が存在し、その点の

α は 1.12 で、むしろ R 型試験片の場合よりわずかながら大きい。よって、 R が十分に大きければ、R 型試験片における応力集中は、通常の試験片のそれに比べ、特に問題になるものではないといえる。

前述のように通常の試験片においては、平行部幅に対し十分に長い平行部が設けられていれば、1 軸応力状態が保たれる。この前提のもとに、材料の基本的な力学的特性を評価することが可能となる。しかし、R 型試験片においては、変形部分すなわち R 部分は 1 軸応力状態とはならず、2 軸応力状態となる。この場合、引張軸に垂直な方向の応力の大きさが問題である。 R が十分に大きければ部分的には平行部のある通常の試験片に近い状態となるから、この応力は引張軸方向の応力に比べて小さいものと考えられるが、この点についてはさらに検討する予定である。

4. R 型試験片を用いた引張試験結果

ここでは、特性評価の可能性を検討するため、5 種類の R 型試験片を用いた実際の試験結果を示す。

(1) 実験方法

試料には、典型的な超塑性材料の 1 つである Zn-Al 共析合金の圧延板材 (板厚 $t=1$ 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、 R 部半径 $R=25$ mm 一定とし、 R 部幅 $W=6$ mm, つかみ部幅 C を 10, 12, 16, 20 mm と変化させ、さらに $W=4$ mm, $C=20$ mm を加えた計 5 種類の形状を用いた。 $W=6$ mm の形状では C の変化に伴い、 R 部長さ (標点間距離) L はそれぞれ 19.6, 23.7, 30.0, 34.7 mm となる。簡単のため後述の実験結果は $W=4$ mm, $C=20$ mm の形状についても L の値、36.7 mm により整理した。機械加工した試験片は、試験中の静的な粒成長を抑制するため、533 K-14.4 ks 保持後空冷の熱処理を施し、試験に供した。

引張試験は、温度 473 K, 引張速度 5.0×10^{-6} , 1.7×10^{-5} , 1.7×10^{-4} および 1.7×10^{-3} m·s⁻¹ の条件で行った。一部の試験片については、所定の変位 (時間) で試験を中断する試験を行った。なお、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。

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、所定の変位 (時間) で試験を中断した後あるいは破断後に、板幅方向中央のひずみ分布を測定した。

(2) 解析方法

本研究では R 型試験片という特殊な形状の試験片について、ひずみ分布、ひずみ速度分布、さらには応力-ひずみ速度関係を求めるため、次のようにデータの解析を行った。

まず、ひずみ分布は、以下のように求められる。R 型試験片について、各ケガキ線間の平均的なひずみを求めることは可能であるが、断面積が様でないため、そのひずみに対応する位置を決定することは容易ではない。したがって、そのひずみに対応する応力を求めることも困難である。そこで、区分的多項式補間の 1 つである 3 次のスプライン補間⁽¹⁶⁾を用いて、各標点上のひずみを導出した。すなわち、Fig. 2 のように横軸を引張試験前の標点間隔にとり、最初の標点を原点 ($a_0=0$) と

Fig. 2 Cubic spline interpolation of the cumulative extension.

する。縦軸には原点 a_0 から $a_i (i=1, 2, \dots, n)$ までの累積した伸びをとる。このとき、スプライン補間により描かれた曲線の接線の傾きが、各標点における公称ひずみを表すことになる。

次に、ひずみ速度分布は、以下のように計算した。求められた公称ひずみを真ひずみに変換し、各標点において3次のスプライン補間により真ひずみ-時間曲線を求める。そして、得られた曲線の接線の傾きとして真ひずみ速度を計算した。

応力の計算は各標点の断面において、荷重を断面積で除した平均応力とした求めた。この解析方法により、応力とひずみ速度が明確に対応づけられる。

(3) 実験結果

Fig. 3 に、最も基本的な引張試験結果である公称応力-変位曲線の一例として、R 部長さ L が 30 mm の試験片の結果を示す。なお、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、引張速度の変化に伴う変形応力の変化は極めて大きく、超塑性材料の特徴をよく表している。また、概して言えば、通常の試験片による公称応力-変位曲線と比較して特徴的な形状の差は認められない。このことは、R 型試験片における変形部のひずみ速度履歴が通常の試験片と同様に

Fig. 3 Nominal stress-displacement curves of the R-type specimen with $L=30$ mm.

滑らかでしかも同傾向であることを意味している。ただし、破断までの変位が小さいことから、中央部のひずみ速度が通常の試験片よりも大きくなっていることは明らかである。

Fig. 4 は、5 種類の R 型試験片の最大公称応力を示している。 $W=6$ mm の 4 種類の試験片についてみると、最大公称応力は R 部長さ L にほとんど依存しないことがわかる。このことは、試験片中央の主要な変形部分のひずみ速度が L によらずほぼ等しいことを示すものであると考えられる。 W の影響は幾分みられ、 $W=4$ mm, $L=36.7$ mm の試料の応力は $W=6$ mm の試験片と比べて大きい傾向にある。

Fig. 5 は、同様に、R 型試験片の破断伸びを示したものである。ここで、R 型試験片の破断伸びは、R 部長さ L の変化より求めた。各引張速度において、 L の増加に伴い、破断伸びは大きく減少する傾向を示した。 L の増加は、R 部の平均的なひずみ速度を減少させ、それにより破断伸びが変化すると推測される。しかし、いわゆる Region III⁽¹⁷⁾ の条件と考えられる引張速度 $1.7 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ においても、 L の増加とともに破断伸びが減少していることから、平均的なひずみ速度の変化の影響は小さいといえる。このような結果は、 L の増加によって、局所的な伸びの絶対量は大きく変化せず、ほとんど変形しない領域が増加するためと理解される。また、最大荷重と同様に、 W の影響がみられ、 W の異なる $L=34.7$ mm から $L=36.7$

Fig. 4 Effect of the gauge length, L , on maximum nominal stress for the R-type specimen.

Fig. 5 Effect of the gauge length, L , on elongation for the R-type specimen.

mm の間で試料の伸びは大きく減少している。

試験片 R 部の破断後のひずみ分布を Fig. 6 に示す。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。ここで、図中の右方向が実際の引張試験における上方向である。各試験片とも、当然ながら中央付近にひずみが集中しており、(d)の R 部長さ $L=34.7$ mm の試験片の引張速度 $1.7 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ では 1600% ものひずみが得られている。この値は、本合金について報告されている破断伸びの最大値 2900%⁽¹⁸⁾と比較して考えれば、平行部を有する通常の試験片により求められる破断伸びとはほぼ対応していると思われる。

また、各試験片において、引張速度すなわちひずみ速度の違いによりひずみ分布が大きく異なることは明らかである。この中で、(a)の $L=19.6$ mm の試験片ではひずみ分布のピーク位置が中央から大きくはずれた例がみられ、全体に分布に広がり大きい。このような特徴は平行部を有する試験片によくみら

れるものであり、(a)試験片の形状の変形挙動が平行部を有する試験片のそれに近いためであると理解される。一方、(e)試験片はピーク位置が引張速度によらず整っており、R 型試験片の特徴をよく表している。しかしながら、平均ひずみの最大値は他の試験片に比べて小さい傾向となっている。これは、3 mm の標点間距離に対し、 $W=4$ mm である (e)試験片の最小幅周辺へのひずみ集中の度合いが大きいためであると考えられる。この点に関しては、ひずみの集中と適切な標点間距離の関係を十分に検討する必要があると考えられる。

(4) 考 察

超塑性材料の破断伸びは、一般に顕著なひずみ速度依存性を示す。そこで、Fig. 5 と 6 の実験結果に関してひずみ速度依存性を調べ、延性の指標としての有用性を検討する。Fig. 7 は、R 型試験片の破断伸びを引張速度に対してプロットし直したものである。また、Fig. 8 には、ひずみ分布のピークの値すな

Fig. 6 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.

Fig. 7 Relationship between the elongation and the pulling speed for the R-type specimen.

Fig. 8 Relationship between the maximum mean nominal strain and the pulling speed for the R-type specimen.

わち最大平均公称ひずみを引張速度に対して図示した。

Fig. 7 のように R 型試験片の破断伸びは明確なひずみ速度依存性を示しており、破断伸びの簡便な評価には有効であると考えられる。しかし、R 部長さ L が小さい試験片では値に大きなばらつきがみられる点で、問題を残している。さらに、「通常の試験片の破断伸び」あるいは後述の最大平均公称ひずみの変化と比較すると、破断伸びの引張速度に対する変化の割合はかなり小さい傾向がみられる。したがって、この値から、「通常の試験片の破断伸び」を推定し定量的に評価することは難しいと思われる。

これとは対照的に、Fig. 8 の最大平均公称ひずみは、ひずみ速度依存性がより明確であり、通常の試験片により求められる破断伸びのひずみ速度依存性とほぼ同様の様相を呈している。よって、適切な試験片形状と標点間距離を選択すれば、最大公称ひずみにより「通常の試験片の破断伸び」を定量的に評価することが可能であると考えられる。

最後に、R 部長さ $L=30$ mm の試験片の中断引張試験の結果から求められた真応力と真ひずみ速度との関係を Fig. 9 に示す。これは、 L の変化より求められる R 部の平均公称ひずみ $e=0.1$ および $e=0.3$ に対応する変位でそれぞれ引張試験を中断した 2 本の試験片を 1 組として、前述の解析方法により、 $e=0.1$ における値を求めた結果である。

Fig. 9 Relationship between the true stress and the strain rate derived from the results for the interrupt tests of four pairs of the R-type specimens.

図のように、4 組の R 型試験片により、4 オーダー程度の広範囲のひずみ速度における真応力-真ひずみ速度関係を求めることができた。各引張速度における関係は両対数軸上ではほぼ直線で表される。傾きより m 値を求めてみると、引張速度 5.0×10^{-6} , 1.7×10^{-5} , 1.7×10^{-4} および $1.7 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ に対し、対応する m 値はそれぞれ 0.45, 0.53, 0.55, 0.45 とほぼ妥当な値が得られた。これは、Region I, II および III⁽¹⁷⁾ の存在を示すものといえる。しかしながら、引張速度 1.7×10^{-5} , 1.7×10^{-4} の結果がなめらかにつながらず、真ひずみ速度 10^{-3} s^{-1} 付近で食い違っている。これは、III 章の 3 節で述べたように、主として R 部が 2 軸応力状態にあるためと考えられ、今後詳細な検討が必要である。

IV. 結 言

本研究では、通常の試験片を用いた引張試験による超塑性特性評価の問題点を整理し、これを踏まえて R 型試験片による特性評価について検討した。その結果、R 型試験片による超塑性特性評価の可能性を示す有用な結果を得ることができた。特に (i) 巨大な延性を示す超塑性材料の破断伸びの評価および (ii) 試験片内に生じたひずみ速度分布を利用した広範囲のひずみ速度条件における真応力-真ひずみ速度関係および m 値の簡便評価は有用であると考えられる。

今後、R 部の 2 軸応力状態の解析、通常の試験片による結果との対応関係、結果の再現性等を検討することにより、R 型試験片を用いた引張試験が超塑性特性評価のための極めて有用かつ簡便な手法となり得るものと期待される。

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、石川島播磨重工業の吉利 醇氏ならびに新日本製鉄の水沼 晋氏に深く感謝致します。また、実験に協力された宇都宮大学大学院生の松本勝生君に感謝の意を表します。

本研究結果の一部は(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) N. Furushiro, H. Yamazaki and S. Hori: Trans. ISIJ, **27**(1987), 415.
- (2) 大澤泰明, 西村 尚: 塑性と加工, **27**(1986), 375.
- (3) 次世代金属・複合材料研究開発協会, 日本塑性加工学会, 超塑性材料の特性評価法調査委員会: 超塑性材料の特性評価法に関する調査報告書, (1987), 第4章.
- (4) 次世代金属・複合材料研究開発協会, 日本塑性加工学会, 超塑性材料の特性評価法調査委員会: 超塑性材料の特性標準化に関する調査報告書, (1988), 第2章.
- (5) 江藤武比古, 広瀬弥五郎, 日野光雄, 宮木美光: 軽金属学会第67回秋期大会講演概要, (1984), 47.
- (6) Y. Takayama, N. Furushiro, T. Tozawa and H. Kato: *Superplasticity in Advanced Materials*, Ed. by S. Hori, M. Tokizane and N. Furushiro, The Japan Society for Research on Superplasticity, (1991), 69.
- (7) 次世代金属・複合材料研究開発協会, 日本塑性加工学会, 超塑性材料の特性評価法調査委員会: 超塑性材料の特性評価法に関する調査報告書, (1987), 9, 31.
- (8) JIS Z 2275.
- (9) ASTM E466-76.
- (10) 水沼 晋, 吉田清太: 理化学研究所報告, **45**(1969), 79.
- (11) 水沼 晋, 吉田清太: 塑性と加工, **10**(1969), 908.
- (12) 水沼 晋, 山口重裕, 阿部光延, 速水哲博: 鉄と鋼, **66**(1980), 221.
- (13) Y. Uetani, S. Abou, S. Tada and S. Ikeno: *Science and Engineering of Light Metals*, Ed. by K. Hirano, H. Oikawa and K. Ikeda, The Japan Institute of Light Metals, (1991), 953.
- (14) A. W. Backofen, I. R. Turner and D. H. Avery: Trans. ASM, **57**(1964), 980.
- (15) 西田正孝: 応力集中, 森北出版, (1967), 552, 632.
- (16) A. Ralston and P. Robinwitz: 戸田英男, 小野令美共訳: 数値解析の理論と応用, ブレイン図書出版, (1986), 67.
- (17) S. W. Zehr and W. A. Backofen: Trans. ASM, **61**(1968), 300.
- (18) H. Ishikawa, F. A. Mohamed and T. G. Langdon: Phil. Mag., **32**(1975), 1269.