



Title	超塑性変化における粒界すべりの役割
Author(s)	古城, 紀雄
Citation	大阪大学低温センターだより. 1987, 58, p. 4-6
Version Type	VoR
URL	<a href="https://hdl.handle.net/11094/6635">https://hdl.handle.net/11094/6635</a>
rights	
Note	

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

# 超塑性変形における粒界すべりの役割

工学部 古城 紀 雄 (吹田 4430)

## 1. はじめに

材料の物性を系統的に解析した上で、それに強靱性ならびに高機能性を付与する原則を提言してゆくことは材料設計学のひとつの方向である。一方、ある材料が有用な材料としての市民権を得るためには使用環境に適した形状に加工もしくは成形され得ることが必要条件となり、このことから、材料の塑性変形の本質およびその特性向上に関する研究も工学的意義をもって遂行されてきている。ことに金属材料の塑性変形特性については金属の基本的特長に直接関連していることでもあり、報告も多い。

材料のこのような変形特性のひとつに「延性」がある。この延性を、ここでは単純に一方方向に引張試験した際の破断までの塑性変形量  $\Delta L$  に着目し、これの初期長さ  $L_0$  に対する百分率（以下、これを「伸び」と呼ぶ）で評価することとする。純金属を十分高い温度である時間保持して転位などの格子欠陥の少ない状態とし、これを室温付近で試験したときに得られる伸びの値はおよそ数10%から100%までの範囲である。これが2相組織の合金となると、第2相の種類、量、形状および分布状態などにも影響されるが、一般に純金属の場合より高強度となるが延性は低下する。たとえば純銅および純銀はそれぞれ比較的大きい延性を示すが、それらの共晶合金については、組織を層状から微細な等軸晶に調整したとして、室温での変形では大きな局部変形をともなう伸びは20%にも達しなくなる。実用されている多くの2相合金では、それ自体延性の低い金属間化合物とか2次固溶体の第2相を含んでいるので、このような2相混合組織の合金の延性は一般に極めて低い。

ところが、一方でZn-Cu-Al3元共晶合金が高温で異常に大きい伸びを示すことが古くは1920年に報告されており、また、Bi-Pb合金では同じく高温で2000%にもおよぶ伸びが記録されている。近年では亜鉛合金や銅合金で5000%を越す値も見られる。これらは先に述べた純金属や合金の場合の伸びとは桁違いの値であり、その後精力的にこの現象と取り組んだソ連の研究者によって「超塑性」と名付けられることとなった。以来、今日まで超塑性を示し得る変形条件ならびに組織学的要件の系統的検討そして材料成形への応用についての基礎研究が続けられ、最近では航空機用構造材料としてのチタン合金の成形など多方面において実用化されている。また研究対象も金属からセラミックスも含めた材料全般に拡大しつつあり、機能性材料の一翼と期待を担っているといえよう。なお超塑性は通常各材料の融点の1/2以上の高温でのみみられる現象であることを読者各位にお断りしておく。

本稿では超塑性に関する変形機構についての筆者らの考え方を以下に簡単に紹介したい。

## 2. 超塑性変形と粒界のすべり

超塑性変形についての検討がかなり進んだ結果、超塑性は高温での応力負荷のもとにおいても安定な微細等軸晶組織の材料を、適当な温度およびひずみ速度条件下で変形した時に現れること、そしてその

現象論的特徴は(1)「伸びが異常に大きいこと」と(2)「変形応力が低く、かつ、そのひずみ速度依存性が非常に大きいこと」の2点にまとめられることがわかってきた。この特徴の(1)の「巨大な伸び」が主に粒界すべりによってもたらされることはすでにしられていたが、このことと(2)との関連性については不明であった。そこでまず粒界すべりの全変形への貢献度 ( $\epsilon_{\text{gbs}} / \epsilon_t$ ) とその時の応力のひずみ速度依存性について調べることにした。

ここで変形応力を $\sigma$ 、ひずみ速度を $\dot{\epsilon}$ とすると次式のように表される。

$$\sigma = K \dot{\epsilon}^m \quad \dots\dots\dots(1)$$

定数 $K$ および変形応力のひずみ速度感受性指数 $m$ は変形温度、結晶粒径など試料と試験条件の因子に依存する。いま試料の断面積を $A$ 、荷重を $P$ とすると、

$$-dA/dt = (P/K)^{1/m} / A^{(1-m)/m} \quad \dots\dots\dots(2)$$

となる。(2)は式が $m$ が大きくなると断面の減少に伴う断面減少速度の増加率が小さくなる。すなわち、局部収縮の進行速度が小さくなって、結果として大きな伸びをもつ可能性のあることを示している。このように $m$ と伸びがある相関をもつことがわかり、多くの実験事実もおよそその相関を示しているの、ここではひとまず $m$ を超塑性の指標とする。

粒界すべりの全変形に対する寄与率および粒界すべりのひずみ速度は、あらかじめ試験片表面に付与した条痕を連続的に顕微鏡観察し、粒界での食い違いの時間的変化を写真法で調べて求めた。用いた試料は、Al-Cu および Sn-Pb の2元共晶合金であり、Al-Cu 合金については $5\mu\text{m}$ 、Sn-Pb 合金については6および $10\mu\text{m}$ の二種類の平均結晶粒径をもつ試料を用いた。また、 $m$ については引張変形中にひずみ速度を変化させ、それに伴う変形応力の変化を求め、(1)式より導かれる次式によって算出した。

$$m = d \ln \sigma / d \ln \dot{\epsilon} \quad \dots\dots\dots(3)$$

図1はそれぞれの $m$ を示す条件下で変形開始から各30%伸びまでの変形について求めた結果を $m$ と $\epsilon_{\text{gbs}} / \epsilon_t$ との関係で示している。これより $m$ の値がより大きく変形が超塑性的であるほど変形に占める粒界すべりの寄与率の高いことが明らかに示された。なお2つの合金系で大きな変化はないようである。また、 $m$ と $\epsilon_{\text{gbs}} / \epsilon_t$ の関係は数100%におよぶ変形においてもおよそ図1と同様であった。それ故、大きな伸びをもたらす機構において粒界すべりが重要な役割を担っていることについては全く疑う余地がないといえる。

表1は、ある値の $m$ を与える条件下で粒界すべり自体がどの程度の速度で進行するかを調べ、その時の負荷応力値と合わせて、粒界すべりについての $m$ 、すなわち $m_{\text{gbs}}$ を求めた結果であ

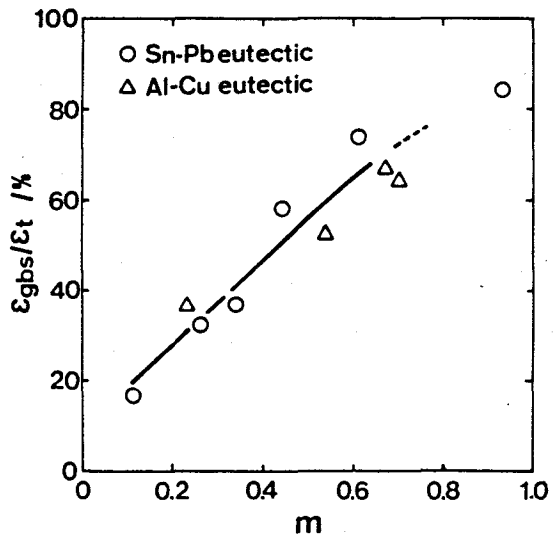


図1 種々の $m$ 値をとる条件下で約30%まで変形した Sn-Pb および Al-Cu 共晶合金の変形量に対する粒界すべりの寄与

る。 $m$ が超塑性の厳密な指標となるかどうかは現在引続き論争中であるが、表1のAおよびBについては $m > 0.5$ であり、明らかに超塑性条件といえる。表1での重要な結果は変形が超塑性的であるなしにかかわらずすべての条件で $m_{\text{gbs}}$ の値が $m$ より大きくいずれも1.0に近い値をとることを示していることである。このことは粒界すべり自体が非常に高い $m$ をあたえることを明確に示している。従って、超塑性において大きな伸びのみならず大きな $m$ をあたえる機構も粒界すべりと直接関連していると考えざるを得ない。

本研究での結果は、たとえば粒界へ到達した転位がクライムグライド (Climb-glide)機構で粒界すべりを生じ、その際の律速過程が粒界上のレッヂ (ledge) での拡散過程であるとの考えで説明されたと考えている。この場合には、粒界すべり自体が、大きな伸びと大きな $m$ の両方に直接寄与しているとの立場がとられている。一方、粒界すべり自体ではなく、それが進行する粒界近傍で粒界すべりを連続して可能にするための調整機構に高い $m$ を与える機構を考える立場があり、その場合には、粒界移動、クリープ変形、動的再結晶などの過程のいずれかが超塑性変形を律速するとの立場がとられる。しかし、前者の立場よりみると、粒界移動などの過程においても全て拡散過程を素過程として含んでおり、それが律速過程となることは十分に可能なことであろうとおもわれる。いずれにしても超塑性が粒界すべりにより変形し、かつ、それが高い $m$ を与えることで局部変形が抑制されるために巨大な伸びを結果としてもたらすとの基本的考え方でもって、はじめて超塑性現象を合理的に理解することが可能となったと考えている。

### 3. おわりに

以上、超塑性変化における粒界すべりの役割について述べたが、超塑性に関する問題は難加工材料の成形への応用、変形中のキャビテーションの抑制および変形条件の高ひずみ速度化など未解決の事柄が多く、稿を終えるにあたり研究活動へ新たな意欲をかりたてられているところである。

表1 Sn-Pb 共晶合金を三種の $m$ をとる条件下で変形したときの粒界すべりに関する応力のひずみ速度感受性指数  $m_{\text{gbs}}$

Conditions	$m$	$m_{\text{gbs}}$
A	0.616	0.726
B	0.538	0.757
C	0.425	0.830