ネック形状変化の解析にもとづく超塑性変形における 塑性安定性の検討

佐藤 英一* 栗林 一彦* 堀内 良*

J. Japan Inst. Metals, Vol. 52, No. 11 (1988), pp. 1051-1056

Study on Plastic Instability in Superplastic Deformation through Analysis of the Neck Shape Change

Eiichi Sato*, Kazuhiko Kuribayashi* and Ryo Horiuchi*

Plastic instability has been reanalyzed for superplastic materials with the strain rate sensitivity m and the flow hardening parameter γ . The condition under which a neck does not grow has been obtained as $I \equiv (\gamma - 1)/m \geq 0$. Even though $I < 0$, the neck broadens gradually provided $I \geq -1$. In the case of $-1 > I > -2$, the neck becomes initially sharper but it finally becomes broader. If $I \leq -2$, the neck becomes sharp. Although the usual superplastic deformation is thought to proceed in an unstable state because $I < 0$, a large elongation can take place provided that $I > -2$ and the neck becomes broader.

(Received January 19, 1988)

Keywords: superplasticity, plastic instability, necking, deformation induced grain growth, flow hardening, strain rate sensitivity, modelling, constitutive rate equation

I. 緒 言

微細粒超塑性変形では、鋭いネックが発生せず大きな伸びが得られる。このことは、従来変形応力のひずみ速度感受性指数(m)が大きいことで説明されており⁽¹⁾⁽²⁾、実験的にも破断伸びと m との間にはある程度の対応関係が報告されている⁽²⁾⁽³⁾。著者らは前報において、超塑性変形中には変形なしに加熱した場合に比べはるかに速い粒成長が生じ、この変形誘起粒成長は、現象的には加工硬化と同等の変形硬化をもたらすことを示した⁽⁴⁾。また、超塑性変形における変形の安定性には、 m とともにこの変形硬化の効果も併せて考える必要のあることを指摘した。

一定温度における一軸応力状態の引張変形を考えると、変形応力 σ はひずみ ε とひずみ速度 $\dot{\varepsilon}$ に主に依存すると考えられる。 σ のそれぞれに対する依存性を、

$$\gamma \equiv \left(\frac{\partial \ln \sigma}{\partial \varepsilon} \right)_{\dot{\varepsilon}} \quad (1)$$

$$m \equiv \left(\frac{\partial \ln \sigma}{\partial \ln \dot{\varepsilon}} \right)_{\varepsilon} \quad (2)$$

と表わすと、 γ を加工硬化係数、 m をひずみ速度感受性指数と呼ぶ。このときの変形の安定条件として、Hart⁽⁵⁾は、

$$m + \gamma \geq 1 \quad (3)$$

を導いたのに対し、Duncombe⁽⁶⁾⁽⁷⁾は、

$$\gamma \geq 1 \quad (4)$$

を導いた。Jonas⁽⁸⁾、Fortes⁽⁹⁾、Hutchinson and Neale⁽¹⁰⁾、Nichols⁽¹¹⁾は、式(3)と(4)の違いは、ネック部と均一変形部の断面積の差が大きくなること、あるいは、比が小さくなることのどちらを不安定性の判定条件としたかによることを指摘した。断面積の差が一定な場合には、変形が進行するにつれ断面積の比は小さくなっていくので、このときネックは成長すると考えるのが自然である。したがって、“ネックが成長しない”という安定条件としては、式(4)を用いるべきであろう。

しかし、式(4)が成立せずネックが成長する状態であっても、“緩やかに広がった形状のネック(broad neck)”になる場合には、結果的に大きな伸びが得られ、このときの変形の安定性は相対的に高いと考えられる。反対に、“鋭く切れ込んだ形状のネック(sharp neck)”になる場合には、変形の安定性は相対的に低いと考えられる。すなわち、変形の安定性を評価するには、式(4)以外にネックの形状変化を表わす別のパラメータを導入する必要がある。本報では、超塑性変形を対象に、このパラメータを用いて変形の安定性を検討した結果を報告する。

II. 構成方程式

変形前にすでに等軸微細な結晶粒組織が得られている材

* 宇宙科学研究所(The Institute of Space and Astronautical Science, Sagami-hara)

料の超塑性変形においては、変形を加えない場合よりもかなり速い粒成長が生ずるが、それ以外の顕著な組織変化は生じない。また、その変形応力はひずみ速度と粒径に強く依存する。変形中に粒径が増加すると、それに応じて変形応力も増加するはずであり、実際に、Zn-22%Al 合金において、粒成長から期待される応力増加とひずみ速度一定の引張試験で観察された応力増加とはよく一致していた⁽⁴⁾。したがって、超塑性変形の変形応力はひずみには直接は依存しないと考えることができ、その構成方程式は、

$$\dot{\varepsilon} = K' \bar{D}^{-p} \sigma^{1/m} \quad (5)$$

と表わすことができる。ここで $\bar{D}$ は粒径、 p と m は材料や変形条件によって定まる定数、 K' は $\bar{D}$ と σ 以外のパラメータを含んだ係数である。

変形中の粒成長について、ひずみに依存する成分(変形誘起成分)と時間に依存する成分(静的成分)に分けて考える。初期粒径 $\bar{D}_0$ の試料がひずみ ε の変形後には $\bar{D}$ になり、変形なしに同一温度に加熱したときには $\bar{D}_s$ になるとするとき、粒成長のうちの変形誘起成分は、静的成分があまり大きくない場合には近似的に $(\bar{D}/\bar{D}_s)$ で表わすことができる⁽⁴⁾。また、Zn-22%Al 合金において、この粒成長の変形誘起成分は、超塑性変形条件ではひずみ速度や変形温度および変形経路にはほとんど依存せず、与えられたひずみに比例し、

$$\ln\left(\frac{\bar{D}}{\bar{D}_s}\right) = a\varepsilon \quad (6)$$

という式で表わすことができた⁽⁴⁾。

式(5)と(6)をまとめると、変形中の変形応力は、

$$\sigma = K'' \bar{D}_0^{mp} \left(\frac{\bar{D}_s}{\bar{D}_0}\right)^{mp} e^{ampe} \dot{\varepsilon}^m \quad (7)$$

となり、変形誘起粒成長($\exp(ampe)$)と静的粒成長($(\bar{D}_s/\bar{D}_0)^{mp}$)の両者がそれぞれ変形応力の増大に寄与している。しかし静的粒成長による応力増加は、局所的ひずみに依存せず試験片全体に均一に生じるため、変形の安定性には寄与しない。変形誘起粒成長による変形硬化係数 γ は、

$$\gamma = am p \quad (8)$$

となり、これは変形中には変化しないと考えられる。式(7)のうち関係のない項を K の中にまとめると、

$$\sigma = K e^{\gamma\varepsilon} \dot{\varepsilon}^m \quad (9)$$

という構成方程式が得られ、以後の解析はこの式をもとに進める。

超塑性変形中には、緩やかに広がったネックがゆっくりと成長する。変形が進んでポイドが多数発生している場合を除いて、一部分が急に鋭くくびれ破断に至るということはない。この場合、局所的ひずみ速度の時間的変化は小さく、変形応力はひずみ速度一定の変形状態のものに等しいといえる。したがって、以後の解析で用いる m と γ は、ひずみ速度一定の変形状態に対する値を用いるものとする。

なお、上述の緩やかなネックを対象とする場合には、ネック部における多軸応力状態の影響は小さいものと考えられ

るので、以後の解析では一軸応力状態を前提にする。

III. ネックの成長挙動の解析

1. 平滑試験片におけるネック成長の判定条件

緒言に述べたように、ネックが成長するか否かの判定条件は、Duncombe⁽⁶⁾⁽⁷⁾により一般的に考察されているが、本節では、以後の解析のため、超塑性変形を念頭においてその導出を行なう。

試験片にネックが発生してもそれが成長しなければ、変形は安定であると考ええる。今後、均一変形部は添字 u 、ネック部は添字 n をつけて表わすことにする。それぞれの断面積 A_u と A_n の比

$$\phi = \frac{A_n}{A_u} \quad (10)$$

を断面積不均一係数と呼び、これがネックの大きさを表わす。

さて、平滑試験片の引張変形中に、局所的にわずかな変形が急速に進行し、微小なネックが発生したと仮定する。その後、均一変形部のひずみが ε_u 、ひずみ速度が $\dot{\varepsilon}_u$ 、変形応力が σ_u 、断面積不均一係数が ϕ になったとき、ネック部のひずみ ε_n と変形応力 σ_n は、体積一定条件と荷重の釣り合い条件より、

$$\varepsilon_n = \varepsilon_u - \ln \phi \quad (11)$$

$$\sigma_n = \phi \sigma_u \quad (12)$$

と表わされる。これらを構成方程式(式(9))に代入すると、ネック部のひずみ速度 $\dot{\varepsilon}_n$ は、

$$\dot{\varepsilon}_n = \dot{\varepsilon}_u \phi^{(\gamma-1)/m} \quad (13)$$

と表わされる。

ネックの大きさは ϕ で決められるので、 ϕ が変形の進行と共に減少しなければ、すなわち $\dot{\phi} \geq 0$ であれば、ネックは成長しない。 $\dot{\phi}$ は、式(10)を微分することにより、

$$\dot{\phi} = \dot{\varepsilon}_u \phi (1 - \phi^{(\gamma-1)/m}) \quad (14)$$

と表わすことができる。 $\phi < 1$ であるので、変形の安定条件は、

$$I \equiv (\gamma-1)/m \geq 0 \quad (15)$$

となり、式(4)が導かれる。この I は、後に示すが、不安定性(Instability)の程度を表わすパラメータである。なお、当然であるが、

$$\dot{\phi} \geq 0, \dot{\varepsilon}_u \geq \dot{\varepsilon}_n, \frac{|\dot{A}_u|}{A_u} \geq \frac{|\dot{A}_n|}{A_n} \quad (16)$$

という3つの判定条件は、皆同じことを意味している。

一方、ネック部と均一変形部の断面積の差が大きくならないという判定条件は、

$$\frac{|\dot{A}_n|}{|\dot{A}_u|} = \phi^{(m+\gamma-1)/m} \leq 1 \quad (17)$$

と表わされ、これは、

$$(m+\gamma-1)/m \geq 0 \quad (18)$$

であるので、いわゆる Hart の塑性安定条件(式(3))が導

かれる。なおこの条件は $I \geq -1$ と等価である。

2. あらかじめネックが存在する場合

ネックの原因は、機械加工で試験片平行部を作製したときに導入された断面積の差であるという考え方がある⁽⁸⁾⁻⁽¹¹⁾。これを“機械加工によるネック (geometric defect, machining defect)”と呼び、前節で扱った局所的に変形が進行して生じたネックを“局所的変形によるネック (deformation defect, mechanical defect)”と呼ぶ。

機械加工による ϕ_0 の大きさの初期ネックは、変形が進むと、

$$\varepsilon_n = \varepsilon_u - \ln \frac{\phi}{\phi_0} \quad (19)$$

という大きさのひずみを持ち、このときの $\dot{\phi}$ は、

$$\begin{aligned} \dot{\phi} &= \dot{\varepsilon}_u \phi (1 - \phi^{(\tau-1)/m} \phi_0^{-\tau/m}) \\ &= \dot{\varepsilon}_u \phi (1 - \phi^{(\tau(1 - (\ln \phi_0 / \ln \phi) - 1)/m)}) \end{aligned} \quad (20)$$

と表わされる。

式(20)によれば、 $\phi = \phi_0$ である変形初期には $\dot{\phi}$ は負であるので、機械加工によるネックは変形開始直後は必ず成長する。ところが、変形初期のネックが微小である場合には、変形が進行すると、 $(\ln \phi_0 / \ln \phi)$ が 1 に比べ無視できるようになり、式(20)と式(14)は一致する。

超塑性変形における伸びの推定を行うとき、変形前の試験片平行部に機械加工の精度として 0.99~0.999 程度の微小ネックの存在を仮定することがある⁽¹⁰⁾⁻⁽¹²⁾。 $(\ln \phi_0 / \ln \phi) < 0.1$ 程度であれば式(20)と式(14)が一致するとみなしてよいとすると、0.99~0.999 の微小ネックは、0.9~0.99 まで成長した後は式(14)を用いてもよいであろう。一方、あらかじめ機械加工により巨視的なネックを作った試験片を用いてネックの成長を調べるような場合⁽¹³⁾には、 ϕ_0 が無視できないので、式(20)を用いる必要がある。

3. ネックの成長挙動

均一変形部にあるひずみを加えたときネックがどれだけ成長するかという、 $\dot{\varepsilon}_u$ で規格化したネックの成長速度は $(\dot{\phi} / \dot{\varepsilon}_u)$ で表わされる。局所的変形によるネックの場合、 $(\dot{\phi} / \dot{\varepsilon}_u)$ は、一定の大きさ ϕ のネックにおいて I に対し Fig. 1 のように変化する。 $I < 0$ でネックが成長する場合、 I が大きければ大きいほど $|\dot{\phi} / \dot{\varepsilon}_u|$ は小さくなる。つまり、 I の大きさは各瞬間のネックの成長速度を定める。なお、機械加工によるネックも、 $(\ln \phi_0 / \ln \phi)$ が 1 に比べ無視できる場合には同じ挙動を示す。

I は、各瞬間のネックの成長速度だけでなく、ある ϕ_0 という大きさの初期ネックの成長挙動全体をも支配する。まず、変形の進行に伴う ϕ の変化は、式(14)を積分すると、

$$\phi = \phi_0 e^{\varepsilon_u} \{1 - \phi_0^I (1 - e^{I \varepsilon_u})\}^{-1/I} \quad (21)$$

と表わされる。また、ネック部の断面積が 0 になるときに

Fig.1 The dependence of the normalized neck growth rate $(\dot{\phi} / \dot{\varepsilon}_u)$ on I for several values of ϕ calculated from eq.(14).

得られる、均一変形部の最大ひずみは、式(21)で $\phi \rightarrow 0$ の極限をとると、

$$\varepsilon_u^{\max} = \frac{1}{I} \ln (1 - \phi_0^I) \quad (22)$$

で与えられる†。

4. ネックの形状変化

前節の解析により、 I がネックの成長挙動を支配していることが明らかになった。ところで、ネックが緩やかに広がった形状になる場合には、大きな伸びが期待できるが、ネックが鋭く切れ込んだ形状になる場合には、当然伸びは小さくなる。そこで、ネックがどのような形状に成長するかを解析することにより、材料の延性の程度をさらに明確にできるものと考えられる。

ある瞬間、試験片のある点に、大きさ ϕ のネックが存在していたと仮定し、その近傍での ϕ の傾きを、

$$\left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_{t=0} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \left[\frac{(\phi' - \phi)}{\Delta x} \right] \quad (23)$$

と定義する。ここで、試験片の引張方向の位置を x で表わし、試験片の引張方向に Δx 離れた点の断面積不均一係数を ϕ' とした。ネックの勾配の大きさは、 $|\partial \phi / \partial x|_t$ で表わされ、変形の進行に伴う勾配の大きさの変化率は、

$$\frac{\partial}{\partial t} \left| \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_t \right| = \left[\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right) \right] / \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_t \cdot \left| \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_t \right| \quad (24)$$

で表わされる。

式(24)の中で、 ϕ の傾きの変化率は、

† 0.999 程度の ϕ_0 を仮定したときの $\varepsilon_u^{\max}$ は、伸びの推定値として用いられることがある⁽¹⁰⁾⁻⁽¹²⁾。しかし、その物理的な根拠はなく、これはあくまで目安程度に考えるべきである。

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left[\left\{ \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_{t=\Delta t} - \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_{t=0} \right\} / \Delta t \right] \quad (25)$$

である。ここで $\left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_{t=\Delta t}$ は Δt 後の ϕ の傾きであり、

$$\left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_{t=\Delta t} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \left[\frac{\phi(\Delta t) - \phi(0)}{\Delta x(1 + \dot{\epsilon}_n \Delta t)} \right] \quad (26)$$

$$\phi(\Delta t) = \phi \{ 1 + \dot{\epsilon}_n \Delta t (1 - \phi^{(\gamma-1)/m}) \} \quad (27)$$

$$\phi'(\Delta t) = \phi' \{ 1 + \dot{\epsilon}_n \Delta t (1 - \phi^{(\gamma-1)/m}) \} \quad (28)$$

$$\dot{\epsilon}_n \Delta t = \dot{\epsilon}_n \Delta t \phi^{(\gamma-1)/m} \quad (29)$$

である。式(26)~(29)を式(25)に代入すると、

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right) = -\dot{\epsilon}_n \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_{t=0} \left\{ \left(2 + \frac{\gamma-1}{m} \right) \phi^{(\gamma-1)/m} - 1 \right\} \quad (30)$$

が得られる。したがって、ネックの勾配の大きさの変化率は、

$$\frac{\partial}{\partial t} \left| \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right) \right|_t = -\dot{\epsilon}_n \{ (2+I)\phi^I - 1 \} \cdot \left| \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right) \right|_t \quad (31)$$

と表わされ、

$$\{ (2+I)\phi^I - 1 \} \geq 0 \quad (32)$$

であれば式(31)は負である。すなわち、ネックの勾配は大きくならない。

種々の I に対する $\{ (2+I)\phi^I - 1 \}$ の値を、 ϕ の関数として Fig.2 に示す。 $0 > I \geq -1$ では、常にこれは正であり、変形の進行と共にネックは緩やかな形状になりながら成長する。 $-1 > I > -2$ では、 ϕ が I の値に対応した臨界値以上

Fig.2 The dependence of $(2+I)\phi^I - 1$ on ϕ for several values of I . If the value of $(2+I)\phi^I - 1$ is positive, the gradient of ϕ decreases and the neck grows broader.

では負であるが、それ以下では正になる。すなわち、ネックがあまり大きくないときは鋭くなりかけるが、ネックがある程度成長すると緩やかになってくる。 $I \leq -2$ では常に負であり、ネックはどんどん鋭くなっていく。

Fig.3 に、上述の説明を図示した。ここでは、まず初めに、最小の ϕ_0 が 0.9 である三角形のネック (破線) が、局所の変形の進行によって発生したと仮定した。そして、最小の ϕ が 0.1 になるまで変形させたときの ϕ の分布を、種々の値の I について、式(21)を用いて計算した。 $I = -0.5, -1.5$ の場合には、試験片の最も細くなった部分が一番緩やかになっており、緩やかに広がったネックが形成されているのに対し、 $I = -2.5$ の場合には最も細い部分が一番鋭くなっており、鋭く切れ込んだネックになっている。

Fig.3 Examples of the evolution of a neck with strain. The initial distribution of ϕ is indicated by the broken line, and the distributions of ϕ when the minimum becomes 0.1 are indicated by the solid lines for several values of I .

IV. 変形の安定性パラメータ I

以上をまとめると、Table 1 に示すように、 $I \equiv (\gamma-1)/m$ の値に対応して、変形の安定性について次のように場合分けすることができる。

まず $I \geq 0$ の場合には、ネックが存在してもそれは成長しない。これは、 $\gamma \geq 1$ という Duncombe の条件に対応している。

$I < 0$ であれば、ネックは必ず成長する (断面積の比は変形の進行と共に小さくなる)。しかし、 $I \geq -1$ であれば、ネックは常により緩やかに広がった形状になるように成長する。その結果得られる伸びは非常に大きい。この $I \geq -1$ という条件は、Hart の条件 $m + \gamma \geq 1$ と等価である。

Table 1 Summary of plastic instability.

I	m and r	Behaviour of a neck
$I \geq 0$	$r \geq 1$	A neck does not grow.
$0 > I \geq -1$	$r < 1$ $m + r \geq 1$	A neck grows but always broadens.
$-1 > I > -2$	$m + r < 1$ $2m + r > 1$	A neck becomes sharp initially but broad finally.
$-2 \geq I$	$2m + r \geq 1$	A neck becomes sharp.

$-1 > I > -2$ では、ネックは初めは鋭くなりかけるが、最終的には緩やかに広がった形状になる。 $I > -2$ という条件は、 $2m + \gamma > 1$ という条件と等価である。

$I \leq -2$ の場合には、ネックは鋭く切れ込んだ形状になりながら、急速に成長する。この条件では、初めに仮定した一軸応力状態はもはや成立せず、本解析の定量性も低下する。

さて、実際の超塑性変形では、 I は如何ほどであろうか。著者らの測定によれば⁽⁴⁾、Zn-22% Al 合金において、典型的な値として、 $m = 0.4$ 、 $mp = 1.2$ 、 $\alpha = 0.3$ という値を測定した。このときの I は -1.6 であり、緩やかなネック形成の判定条件を満たしていることになる。

V. 考 察

1. 従来の解析との比較

緒言に述べたように、ネックが成長するか否かという変形の安定条件は、式(4)の Dunconbe の条件を採用すべきである。式(3)の Hart の条件は、断面積の差が大きくなりすぎないという条件に過ぎない。これが満たされても、式(4)が成立しなければ、変形の進行と共にネック部の断面積の比は小さくなっていくので、ネックは成長すると考えるのが自然である。

ただし、式(3)は、変形中常にネックの勾配が小さくなるという条件でもあり、これは変形の安定性の程度を表わす一つの判定条件になっている。Jonas ら⁽⁸⁾は、式(3)を“変形が局在化しない条件”であると述べているが、その意味は、本報で示したようにネックの勾配の変化を解析することにより、初めて明確になる。

超塑性変形においては、変形誘起粒成長による変形硬化はひずみに依存せず一定値であるとみなすことができた。一方、通常の室温での変形では、加工硬化は転位の集積により生じ、その大きさはひずみに強く依存する。そのときの構成方程式は、簡単のため、

$$\sigma = K \varepsilon^n \dot{\varepsilon}^m \quad (33)$$

という形で表わされることが多いが、その場合の加工硬化係数は、

$$\gamma = \frac{n}{\varepsilon} \quad (34)$$

という ε の関数になる。すると、通常の室温での変形は、ひずみが n より小さい場合 ($\varepsilon \leq n$) には安定であるが、ひずみがそれを越えると不安定になると考えられる。

Ghosh⁽¹⁴⁾は、荷重の最大点付近でネックが形成され始めるという観察結果から、引張速度一定試験では $\gamma - m > 1$ 、ひずみ速度一定試験では $\gamma > 1$ という安定条件を導いた。しかし、荷重の最大点を不安定性の開始点と考えるよりも、 ϕ あるいは $(\partial\phi/\partial x)_t$ の変化を解析する方が合理的であろう。

Kocks ら⁽¹⁵⁾は、 m と γ の変形経路依存性を強調し、彼

らのいう“状態パラメータ”を用いた解析を展開した。その中で、 $(\partial/\partial x)_t$ と $(\partial/\partial t)_x$ を区別し、試験片のある点におけるひずみ速度勾配の発展を記述する微分方程式を導くまでは、美しい解析である。しかし、それを実際の材料に適用するにあたっては、非常に特殊な近似を導入する必要があるが生じている。超塑性変形においては、加工硬化は変形誘起粒成長によりもたらされ、これには変形経路依存性はほとんどないため、“状態パラメータ”を用いた解析は必要ないものと思われる。

2. 均一変形部のひずみ速度の変化の影響

これまでの解析では、均一変形部のひずみ速度の変化についての考慮を払ってこなかった。引張変形においては、通常、試験片平行部が均一なひずみ速度で変形する場合に伸び速度あるいはひずみ速度が一定となるように変形させる。ネックが発生しその部分のひずみ速度 $\dot{\varepsilon}_n$ が変化すれば ($I < 0$ の場合大きくなる)、当然均一変形部のひずみ速度 $\dot{\varepsilon}_u$ も変化するはずである。最後に、この $\dot{\varepsilon}_u$ について解析しよう。

試験片均一変形部とネック部の長さをそれぞれ l_u 、 l_n とすると、外から加えた変形速度は、均一変形部とネック部の各要素の変形速度の和

$$\dot{\varepsilon} \{l_u + l_n\} = \dot{\varepsilon}_u l_u + \dot{\varepsilon}_n l_n \quad (35)$$

で与えられるはずである。

あらかじめ機械加工によりネックを作った試験片については、式(19)と式(35)を組み合わせると、

$$\dot{\varepsilon}_u [l_{u0} + l_{n0} \phi_0^{(m-\gamma)/m} \phi^{(\gamma-m-1)/m}] = \dot{\varepsilon} [l_{u0} + l_{n0} \phi_0 \phi^{-1}] \quad (36)$$

Fig.4 The dependence of $\dot{\varepsilon}_{u0}/\dot{\varepsilon}$ and $\dot{\varepsilon}_{n0}/\dot{\varepsilon}$ on $l_{n0}/(l_{n0}+l_{u0})$ expected from eqs.(37)(38) (solid line) compared with the experimental data of Okabe et al.⁽¹³⁾ (Δ and $\circ$).

というように、均一変形部のひずみ速度が ϕ の関数として表わされる。特に変形開始直後については、ネック部と均一変形部のひずみ速度が、それぞれ、

$$\dot{\epsilon}_{u0} = \dot{\epsilon} \left[1 - \frac{l_{n0}}{l_{n0} + l_{u0}} (1 - \phi_0^{-1/m}) \right]^{-1} \quad (37)$$

$$\dot{\epsilon}_{n0} = \dot{\epsilon} \left[1 - \frac{l_{n0}}{l_{n0} + l_{u0}} (1 - \phi_0^{-1/m}) \right]^{-1} \phi_0^{-1/m} \quad (38)$$

で与えられる。

Fig.4 には、この $\dot{\epsilon}_{u0}$ と $\dot{\epsilon}_{n0}$ の $\{l_{n0}/(l_{n0} + l_{u0})\}$ に対する依存性を、岡部ら⁽¹³⁾ による Al-33%Cu 合金についての実測値 (Δ , $\circ$) と共に示す。ネック部の初期長さが全体の 0.8 以上の場合の $\dot{\epsilon}_{u0}$ と 0.2 以下の場合の $\dot{\epsilon}_{n0}$ を除くと、式 (37) (38) は実測値の傾向をほぼ正しく予測している。

VI. 結 言

ひずみ速度感受性指数 m と変形誘起粒成長による変形硬化係数 γ をもつ超塑性変形における変形の安定性を、特にネックの形状変化に注目して解析した。その結果、 $I \equiv (\gamma - 1)/m$ の値に対応して、次のように場合分けできることを示した。

- (1) $I \geq 0$ では、ネックが存在してもそれが成長しない。
- (2) $0 > I \geq -1$ では、ネックは成長するものの、その形状は緩やかに広がったものとなる。
- (3) $-1 > I > -2$ では、ネックは初めは鋭くなりかけるが、最終的には緩やかに広がった形状になる。
- (4) $I \leq -2$ では、ネックは鋭く切れ込んだ形状になる。

超塑性変形中は一般に $I < 0$ であるので、その変形は不安定な状態でのまま進行していると考えられるが、 $I > -2$ であればネックは成長するもののその形状は緩やかになるので、破断までに大きな伸びが得られるものと考えられる。

本研究の経費の一部は昭和 60, 61 年度文部省科学研究費補助金によることを付記し謝意を表する。

文 献

- (1) W.A.Backofen, I.R.Turner and D.H.Avery: Trans. ASM, 57(1964), 980.
- (2) D.H.Avery and W.A.Backofen: Trans. ASM, 58(1965), 551.
- (3) D.A.Woodford: Trans. ASM, 62(1969), 291.
- (4) 佐藤英一, 栗林一彦, 堀内 良: 日本金属学会誌, 52(1988), 1043.
- (5) E.W.Hart: Acta Metall., 15(1967), 351.
- (6) E.Duncombe: Int. J. Mech. Sci., 14(1972), 325.
- (7) E.Duncombe: Int. J. Solids Struct., 10(1974), 1445.
- (8) J.J.Jonas, R.A.Holt and C.E.Coleman: Acta Metall., 24(1976), 911.
- (9) M.A.Fortes: Int. J. Mech. Sci., 19(1977), 483.
- (10) J.W.Hutchinson and K.W.Neale: Acta Metall., 25(1977), 839.
- (11) F.A.Nichols: Acta Metall., 28(1980), 663.
- (12) A.K.Ghosh and R.A.Ayres: Metall. Trans., 7A(1976), 1589.
- (13) 岡部卓治, 畑山東明, 武井英雄, 池田正人: 日本金属学会誌, 47(1983), 1108.
- (14) A.K.Ghosh: Acta Metall., 25(1977), 1413.
- (15) U.F.Kocks, J.J.Jonas and H.Mecking: Acta Metall., 27(1979), 419.