高ひずみ速度領域におけるアルミニウムに対する速度急変実験*

崎野 清 憲^{*1}, 塩入 淳 平^{*1}Effect of Steep Reduction in Strain Rate on the Dynamic Flow Stress
of Aluminium at Very High Strain Rates

Kiyotaka SAKINO and Jumpei SHIOIRI

In order to evaluate the effects of the instantaneous strain rate and the structural state reflecting the strain rate history upon the dynamic flow stress, strain rate reduction tests are conducted for high-purity polycrystalline aluminium in a strain rate range from about 8000 to 20000/sec. For the strain rate change tests in such a very high strain rate range, a very steep change in the strain rate is required for the loading system. A new apparatus is devised by which a sharp reduction in the strain rate can be obtained. It is confirmed that the instantaneous strain rate plays a more important role than the structural state in the flow stress at very high strain rates where a steep increase in the strain rate sensitivity of the flow stress is observed.

Key Words: Shock, Elastic Wave, Strain Rate Sensitivity, Differential Method, Instantaneous Strain Rate, Strain Rate History, Threshold Stress, Fading Memory Effect

1. 緒 言

金属材料の変形抵抗のひずみ速度依存性 ($d\sigma/d \log \dot{\epsilon}$) がひずみ速度 5 000/sec 付近から顕著な上昇を示すことは解説論文⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾にも見られるように多くの研究者によって報告されている。そして次第に、研究者の関心は“ $d\sigma/d \log \dot{\epsilon}$ ”の上昇の微視的機構に移ってきている。この現象に関して Ferguson ら⁽⁵⁾は転位論的考察を背景に、運動転位の律速機構が低速側の熱活性化過程(変形抵抗がひずみ速度の対数に比例する領域)から高速側の粘性抵抗支配(変形抵抗がひずみ速度そのものに比例する領域)へ移行するためと考えた。この考えは変形抵抗のひずみ速度依存性は転位の運動速度、つまり瞬間のひずみ速度に依存するという考え方である。しかし最近、この現象について上記とは異なった解釈も広く行われている。Follansbee ら⁽⁶⁾⁽⁷⁾はひずみ速度履歴差によって生じる内部組織の違いに着目し、“ $d\sigma/d \log \dot{\epsilon}$ ”の変化がみられる高ひずみ速度領域で動的予変形を加えた試験片の絶対零度に外挿した再負荷降伏応力(Threshold stress)を測定した。そして、“Threshold stress”を内部組織状態を示す量的パ

ラメータとし、動的予変形時の変形応力と“Threshold stress”の関係を調べ、この領域における変形応力のひずみ速度依存性の変化は大部分ひずみ速度履歴の差によって生じる内部組織の違いによるものであり、瞬間ひずみ速度の影響はほとんどないと報告している。一般に、変形抵抗が瞬間のひずみ速度とひずみ速度履歴の両方に依存していることは当然と考えられるが、どちらにどれだけ依存しているかは非常に興味のあるところである。この問題を調べるため試験片のひずみ速度を変形途中で急に増加あるいは減少させる、一種の差動実験が行われてきた。一般に、内部組織の変化は瞬間的には起こり得ないと考えられ、ひずみ速度を急に変えたときに生じる変形抵抗の瞬間的变化は、変形抵抗に対する瞬間のひずみ速度の寄与を示すとみなすことができる。このような差動実験の報告も解説論文⁽¹⁾⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾の中に数多くみることができる。しかし、ホプキンソン棒法などによる動的な差動実験はいずれもひずみ速度範囲は 2 000/sec 付近が上限のようであり、“ $d\sigma/d \log \dot{\epsilon}$ ”の上昇がみられる高ひずみ速度範囲での実験は行われていないようである。これは高ひずみ速度領域における差動実験が技術的にむずかしく、信頼できる実験方法が見いだせないためと思われる。

* 原稿受付 平成 4 年 2 月 7 日。

*¹ 正員、法政大学工学部(〒184 小金井市梶野町 3-7-2)。

最近、塩入、崎野⁽¹⁰⁾は高ひずみ速度領域における変形抵抗のひずみ速度依存性を調べるために、打撃棒の断面積をステップ状に変えたスプリットホプキンソン棒装置を使用し、ひずみ速度 10 000/sec 以上での差動実験を試みた。しかし、ひずみ速度急変の際、入射圧力棒中における弾性波の分散の影響が強く現れ、ひずみ速度変化を十分鋭くできず、十分な結果は得られなかった。

そこで本研究では、高ひずみ速度領域で急速なひずみ速度変化を得るために、打撃棒で直接試験片を圧縮し、その途中で変形速度を急激に減少させる新しい差動実験装置を考案した。そして、アルミニウム試験片に対して行った実験結果から、高ひずみ速度領域に見られる変形抵抗のひずみ速度依存性の上昇がひずみ速度履歴と瞬間のひずみ速度のどちらに大きく依存しているかを調べた。

2. 実験方法

2.1 実験装置 高ひずみ速度領域でひずみ速度急変実験を行うには、測定装置系に高い時間分解能が要求される。したがって、従来用いられてきたスプリット型のホプキンソン棒システムでは入射圧力棒中における弾性波の分散により、ひずみ速度の急速な変化が得られないという欠点がある。出力棒側にも弾性波の分散の問題はあるが、こちらのほうは分散を考慮に入れた出力棒の伝達特性を用いて、変形応力の急速な変化は読み取ることが可能である。

そこで、著者らは、図 1 に示すような差動実験装置を考案した。これはスプリットホプキンソン棒装置から入射圧力棒を取り除き、出力棒外側に減速用の中空丸棒を互いに接触することなく同心円状に設置したものである。まず、圧縮空気を利用して発射された打撃棒は直接出力棒左端に接着された試験片を圧縮し、試

験片のひずみ量が所定の値に達したところで減速用の中空丸棒に衝突し、端面の速度は急速に減少する。このとき、変形中の試験片は打撃棒の端面の速度変化に対応したひずみ速度変化を受けることとなる。減速時の試験片ひずみ量は、中空丸棒端面からの試験片突き出し量によって決まる。その設定にはマイクロメータを利用した微小変位計を用いた。試験片の変形応力は出力棒に接着されているひずみゲージによって検出され、直流ブリッジ型動ひずみ計を経てデジタルメモリに記憶される。デジタルメモリのサンプリングタイムは $0.1 \mu\text{sec}$ である。さらにデータは計算機に転送され処理された後、ひずみ-真応力曲線の形で直接デジタル X-Y プロットで出力される。

打撃棒は直径 10 mm で Ti-6 Al-4 V 合金製である。密度は 4.42 g/cm^3 、棒中の弾性波伝ば速度は $5.06 \times 10^3 \text{ m/sec}$ で、長さは試験片に所定のひずみ量を与えるように数種類用意した。出力棒には 480°C 、3 時間で時効処理したマルエージング鋼を用いた。密度は 8.02 g/cm^3 、棒中の弾性波伝ば速度は $4.77 \times 10^3 \text{ m/sec}$ で、長さは 300 mm である。直径は弾性波の分散を考慮に入れるとできるだけ小さいほうが望ましいが、ゲージ接着等の理由から 4 mm とした。出力棒の運動量は同質同形の慣性棒を用いて後方に逃がしてある。減速用の中空丸棒は打撃棒と外径が等しく同質のものをを用い、長さは減速後に得られる試験片のひずみ量を考え 100 mm とした。この場合、たとえば減速後のひずみ速度が 5 000/sec の場合、減速後に得られる試験片のひずみ量は 20% となる。内径は出力棒との接触を避けるには大きいほうがよいが速度の減少率を考えるとそれほど大きくはできず 5.5 mm とした。試験片のひずみ速度を求めるために必要な打撃棒の初速度は試験片の直前に標点間距離約 30 mm で設置した二組のフォトダイオード・フォトトランジスタシステム

図 1 速度急変装置の概略

の間を打撃棒が通過する時間から求めている。変形応力の測定にはゲージ長さ 2 mm の半導体ひずみゲージが出力棒の中心位置に軸対称に 2 枚接着してある。

打撃棒が減速用中空丸棒に衝突する前および後の試験片のひずみ速度は棒中を伝わる縦波の初等解を用い、試験片の変形応力による打撃棒、出力棒の変形を考慮に入れて次式で与えられる。

a) 衝突前すなわち減速前

$$\dot{\epsilon} = \frac{1}{l_0} \left(v_1 - \frac{a_0 \sigma}{A_1 c_1 \rho_1} - \frac{a_0 \sigma}{A_3 c_3 \rho_3} \right) \dots\dots\dots (1)$$

b) 衝突後すなわち減速後

$$\dot{\epsilon} = \frac{1}{l_0} \left\{ \frac{v_1 - (a_0 \sigma / A_1 c_1 \rho_1)}{1 + (A_2 c_2 \rho_2 / A_1 c_1 \rho_1)} - \frac{a_0 \sigma}{A_3 c_3 \rho_3} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 v_1 は試験片に接触する直前の打撃棒の初速度である。 ρ, c, A は棒の密度、弾性波の伝ば速度および断面積であり、添字 1, 2, 3 は打撃棒、減速用中空丸棒および出力棒を表している。 a_0, l_0, σ は試験片の変形前の断面積と長さおよび変形中の公称応力である。上式では試験片の質量を無視することによって、変形中の試験片両端の応力は等しいと考えてある。打撃棒の初速度 v_1 とデジタルメモリに記憶された刻々の変形応力 σ からひずみ速度、ひずみ、さらに真応力を計算する際は式(1)、(2)を用いた。なお、式(1)、(2)の中の σ の項は小さいので、この項を無視して求めたひずみ速度を本論文では公称ひずみ速度とする。のちに図中に表示されるひずみ速度は公称ひずみ速度である。

2.2 装置の作動試験 高時間分解能をもつ本実験の速度急変装置には二つの問題がある。一つは出力棒中における弾性波の分散の問題であり、もう一つは減速用中空丸棒との衝突による打撃棒の端面減速の作動状態の問題である。まず、出力棒中の弾性波の分散特性を実験的に調べるために、出力棒の試験片端に同質同径の弾性棒を衝突させて得られるステップ入力に対する応答を求めた。ただし、この応答特性は出力棒の分散特性のみでなくストレインゲージシステムの特性まで含んだ伝達関数である。さらに、この実験で得られた応答特性を検証するため Airy 積分の項で与えられる分散応答の近似解⁽¹⁾と比較した。この近似解は出力棒の一端に速度または力の単位段階入力を与えたときの荷重原点から十分離れた Z 点の時刻 t における応答特性として次式のように与えられる。

$$F(Z, t) = \frac{1}{3} + \int_0^p \text{Ai}(\xi) d\xi \dots\dots\dots (3)$$

ここで

$$D = \left(\frac{4}{3\nu^2 C_3 r^2 t} \right)^{1/3} (Z - C_3 t)$$

ただし、 $\text{Ai}(\)$ は Airy 積分、 ν はポアソン比、 r は棒の半径である。

図 2 に実験から得られた応答特性と式(3)の近似解を示した。振動部の振幅および波長にはやや違いはあるものの、波形の立ち上がり部分では両者はよく一致している。

次に、本装置の速度急変時の作動状態を調べるために、打撃棒の衝突端面速度の変化を出力棒を用いて連続的に測定した。測定は本実験と同一装置を用いて行った。図 3 (a) に示すように、出力棒端面を減速用中空丸棒端面より少し突き出し状態におき、打撃棒が速度 V_0 で直接出力棒端面に衝突したときを考えると、打撃棒の衝突後の端面速度 V_{10} は次式で与えられる。

$$V_{10} = \frac{A_1 c_1 \rho_1}{A_1 c_1 \rho_1 + A_3 c_3 \rho_3} V_0 \dots\dots\dots (4)$$

なお、出力棒端面の突き出し量は打撃棒と出力棒との衝突によって生じた弾性波が打撃棒の他端まで伝ばするのに要する時間を目安としてきめた。その後、打撃棒の衝突端面は速度 V_{10} で移動し減速用中空丸棒に衝突する。衝突後の打撃棒の端面速度 V_{20} は次式から求められる。

$$V_{20} = \frac{A_1 c_1 \rho_1}{A_1 c_1 \rho_1 + A_2 c_2 \rho_2 + A_3 c_3 \rho_3} V_0 \dots\dots\dots (5)$$

その後、始めに出力棒との衝突の際打撃棒内に生じた弾性波が他端で反射して衝突端に戻ってくるまで、打撃棒の衝突端面は速度 V_{20} で移動し続ける。上記の作動状態は出力棒ゲージからの出力波形として図 3 (b) に示してある。この測定で得られる V_{10}/V_0 および V_{20}/V_0 の値 0.78 および 0.51 は式(4)および(5)から得られる計算値 $V_{10}=0.785 V_0$ 、 $V_{20}=0.507 V_0$ と非常

図 2 出力棒の実験応答特性と近似解の比較

図3 速度急変装置の作動試験

により一致を示す。また、出力棒と減速用中空丸棒の衝突による減速もかなり理想的に行われていることがわかる。

ただし、速度降下は一見それほど急には行われていないように見える。しかし、これは出力棒中における弾性波の分散によると考えられる。そこで、ステップ状の速度降下を仮定し、図2の出力棒系の実験応答特性をこれに適用して計算した結果を図3(b)に記入した(一点鎖線)。測定結果との一致はかなりよく、速度降下がゆるやかに見えるのは出力棒系の主として分散特性で決まる応答特性によるところが大きく、実際の速度降下はかなり急しゅんなものと考えられる。

3. 結果および考察

実験に使用した試験片は高純度(99.999%)多結晶アルミニウムで、直径3mmの冷間引き抜き材を直径2mm、長さ2mmの円柱形試験片に切削加工した後、500°Cで3時間真空焼鈍した。焼鈍後の試験片の平均結晶粒径は約0.2mmである。

図4 一定ひずみ速度における変形応力とひずみ速度の関係

まず始めに、ひずみ速度急変実験から得られる変形応力変化と比較するため、一定ひずみ速度実験を同じ装置と試験片を使いひずみ速度約4000/secから25000/secの範囲で行った。その結果を図4に示す。この図には一定ひずみ量($\epsilon=0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30$)における真応力とひずみ速度の関係を示してある。図に示すごとく本実験で行われたひずみ速度範囲においては変形応力とひずみ速度の関係を直線で近似することができる。これは、このひずみ速度領域が変形応力のひずみ速度依存性($d\sigma/d \log \dot{\epsilon}$)の上昇領域であることを示すものである。速度急変実験における結果を解析するには、変化前、変化後の一定ひずみ速度に対応した応力-ひずみ曲線が必要となる。これをその度に測定するのは非常に煩雑となるので、図4の結果から応力、ひずみ、ひずみ速度の間の実験式を導き出した。これは次式のように与えられる。

$$\sigma_t(\epsilon, \dot{\epsilon}) = \sigma_0(\epsilon) + \alpha \dot{\epsilon} \quad \dots \dots \dots (6)$$

ここで、

$$\sigma_0(\epsilon) = 5.35 + 217\sqrt{\epsilon} - 100\epsilon$$

$$\alpha = 1.47 \times 10^{-3} \text{ MPas}$$

図4のそれぞれのひずみに対応する直線は、上記の実験式を用いて描いたものである。この実験式により、本実験で行われたすべてのひずみ速度に対応する一定ひずみ速度下の応力-ひずみ曲線を得ることができる。

ひずみ速度急変実験はひずみ速度約8000/secから20000/secの範囲で行った。図5に一例として試験片のひずみ16%付近でひずみ速度を 2.13×10^4 /secから 1.26×10^4 /secに急速に降下させたときの変形応力の応答出力を示す。比較のため、ひずみ速度 2.10×10^4 /secで行われた一定ひずみ速度実験の変形応力を

同時に示した。減速前の両者の変形応力の一致から、実験結果の再現性も非常に良好と思われる。また、ひずみ速度急変後に二つの変形応力-時間曲線の間にあらわれた差は、たんにひずみ速度が異なるために時間的な関係であらわれた差だけではなく、ひずみ速度の降下に伴う変形応力の降下の存在をも示している。そこで、ひずみ速度急変による変形応力変化を詳しく調べるために、ひずみ速度急変箇所を拡大した真応力-ひずみ曲線を図6に示す。図中(a)はひずみ速度を $2.13 \times 10^4/\text{sec}$ から $1.26 \times 10^4/\text{sec}$ に、(b)は $1.62 \times 10^4/\text{sec}$ から $9.58 \times 10^3/\text{sec}$ に、そして(c)は $8.08 \times 10^3/\text{sec}$ から $4.77 \times 10^3/\text{sec}$ に降下させた場合である。また、図中には式(6)を用いて得られた減速前、減速後に対応する一定ひずみ速度の応力-ひずみ曲線も描いてある。式(6)から得られた一定ひずみ速度における応力-ひずみ曲線は多数の実験から求められた平均値であり、同じひずみ速度における個々の実測値との間には多少の差が生じ得る。そこで、本報では減速前の応力レベルが式(6)から得られる応力レベルと合うように実測値のほうに補正係数を掛けてある。使用された係数はごく1に近い値であり、具体的には0.97から1.03の間の値である。本実験は差動実験であり、応力の絶対値ではなく降下量を問題としているので、この操作は容認できると考えられる。図6から、ひずみ速度急変後の変形応力は式(6)から予想される一定ひずみ速度の応力-ひずみ曲線に非常に近いところまで降下している。また、ひずみ速度急変時における変形応力変化がこの装置で得られるひずみ速度の急変に比べ、やや緩やかに降下しているように見える。本実験の場合は、これはいわゆる“ひずみ速度履歴の記憶消失効果”⁽¹²⁾によるものではなく出力棒中における弾性波の分散によるものと考えられる。そこで、一点鎖

図5 速度急変実験における変形応力と時間の関係

(a) ひずみ速度 $2.14 \times 10^4/\text{sec}$ から $1.26 \times 10^4/\text{sec}$ (b) ひずみ速度 $1.62 \times 10^4/\text{sec}$ から $9.58 \times 10^3/\text{sec}$ (c) ひずみ速度 $8.08 \times 10^3/\text{sec}$ から $4.77 \times 10^3/\text{sec}$

図6 速度急変実験

図7 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \Delta\sigma_f, \Delta\sigma_d$ の定義

線で示した変形応力のステップ状の降下を仮定し、出力棒中の弾性波の分散を考慮にいれて計算した変形応力変化を図中に破線で示した。実測値と良好な一致がみられる。つまり、ゆるやかに見える変形応力降下は“ひずみ速度履歴の記憶消失効果”ではなく、出力棒中における弾性波の分散によるものであり、変形応力はひずみ速度変化とともに急速に降下していると判断できる。上記の計算に使われた弾性波の分散特性は図2に示される出力棒系の実験応答特性である。

図6に示したように、速度急変箇所の応力変化は図7のような形をもっている。以下、実験で得られた速度急変時の応力の応答を定量的に考察するため $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \Delta\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3, \Delta\sigma_f = \sigma_1 - \sigma_2$ を図7に示したように定義する。 $\Delta\sigma_d$ は一定ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_1, \dot{\epsilon}_2$ による変形応力差であり、 $\Delta\sigma_f$ は速度急変によって得られる変形応力の降下量である。

図8には、ひずみ速度約8000/secから20000/secの範囲で行われた、ひずみ速度急変実験の結果をまとめて示してある。それぞれ公称ひずみ速度降下率は約41%である。図中には速度急変時の試験片のひずみ量をパラメータとして、式(6)から導かれたそれぞれの応力-ひずみ速度曲線が示されている。図中の○、◇印はそれぞれ図7で定義された σ_1, σ_2 に対応する値である。 $\sigma_1 - \sigma_2$ であらわされる瞬間のひずみ速度変化による変形応力の降下量は、式(6)から予想されるひずみ速度急変後の変形応力に非常に近づいている。このことは、内部組織変化は瞬間的には起こり得ないということを考えると、この降下量は瞬間のひずみ速度の影響によると考えることができる。

図9には、ひずみ速度急変実験における速度急変前のひずみ速度とそのときの変形応力の降下率を示してある。変形応力の降下率は図7で定義された $\Delta\sigma_f$ と

図8 速度急変実験における変形応力の降下量

図9 速度急変実験における $\Delta\sigma_f$ と $\Delta\sigma_d$ の比

$\Delta\sigma_d$ の比である。図中に示される一点鎖線は、それぞれのひずみ速度における降下率の平均を示しており、その比はおよそ0.78である。すなわち、二つのひずみ速度による変形応力差 $\Delta\sigma_d$ の約80%は瞬間のひずみ速度に対する応答であり、残り約20%がひずみ速度履歴の差によって生じる内部組織の違いをあらわしているものと思われる。

以上の結果は、“ $d\sigma/d \log \dot{\epsilon}$ ”が上昇を示す高ひずみ速度領域において変形応力のひずみ速度依存性はひずみ速度履歴よりも瞬間のひずみ速度に大きく影響されていることを示すものである。

4. 結 言

ひずみ速度およそ10000/sec以上の高ひずみ速度領域における、金属材料の変形抵抗のひずみ速度依存性を明らかにするため、高ひずみ速度域で高い時間分解能を有するひずみ速度急変装置を考案し、高純度多結晶アルミニウムに対してひずみ速度を急速に降下さ

せる差動実験を試みた。その結果、 σ - $\log \dot{\epsilon}$ 曲線の急な上昇がみられる高ひずみ速度領域において、変形抵抗のひずみ速度依存性はひずみ速度履歴の差によって生じる内部組織の違いよりも瞬間のひずみ速度の差に強く支配されているのを確かめた。しかし、より一般的な結論を得るためにはほかの面心立方金属、特に銅や体心立方金属への実験が必要と考えられる。

文 献

- (1) Campbell, J. D., *Mat. Sci. Eng.*, **12** (1973), 3.
- (2) Lindholm, U. S., Mechanical Properties at High Rates of Strain (Harding, J. 編), *Inst. Phys. Conf. Ser.* No. 21 (1974), 3, Bristol.
- (3) Harding, J., Impact Loading and Dynamic Behaviour of Materials (Chiem, C. Y. ほか 2 名編) *DGM Informations gesellschaft mbH, Oberursel*, **1** (1988), 23.
- (4) Harding, J., Mechanical Properties at High Rates of Strain (Harding, J. 編) *Inst. Phys. Conf. Ser.* No. 102 (1989), 189.
- (5) Ferguson, W. G., ほか 2 名, *J. Appl. Phys.*, **38** (1967), 1863.
- (6) Follansbee, P. S., ほか 2 名, *J. de Physique*, **46** (1985), C 5-25.
- (7) Follansbee, P. S. and Kocks, U. F., *Acta Metall.*, **36** (1988), 81.
- (8) Duffy, J., Mechanical Properties at High Rates of Strain (Harding, J. 編) *Inst. Phys. Conf. Ser.* No. 47 (1979), 1, Bristol.
- (9) Duffy, J., Materials Behaviour under High Stress and Ultrahigh Loading Rates (Mescal, J., Weiss, V., 編) Plenum Publishing Corp., (1983), 21, New York.
- (10) 塩入・崎野, 第 9 回固体衝撃シンポジウム (1989), 22.
- (11) Skalak, R., *J. Appl. Mech.* (1957), March, 59.
- (12) Klepaczko, J. and Duffy, J., Mechanical Properties at High Rates of Strain, *Inst. Phys. Conf. Ser.* No. 21 (1974), 91.