

6061 T6アルミニウム合金の高ひずみ速度域  
1 × 10<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>から4 × 10<sup>4</sup>s<sup>-1</sup>における変形応力  
のひずみ速度依存性

崎野, 清憲 / SAKINO, Kiyotaka

---

(出版者 / Publisher)

社団法人日本材料学会

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

材料 / 材料

(号 / Number)

11

(開始ページ / Start Page)

1021

(終了ページ / End Page)

1026

(発行年 / Year)

2006-11

# 6061-T6 アルミニウム合金の高ひずみ速度域 $1 \times 10^3 \text{s}^{-1}$ から $4 \times 10^4 \text{s}^{-1}$ における変形応力のひずみ速度依存性†

崎野 清 憲\*

## Strain Rate Dependence of Dynamic Flow Stress of 6061-T6 Aluminum Alloy at Strain Rates Ranging from $1 \times 10^3$ to $4 \times 10^4 \text{s}^{-1}$

by

Kiyotaka SAKINO\*

In order to evaluate the strain rate dependence of the dynamic flow stress of 6061-T6 aluminum alloy, strain rate reduction tests are conducted in the strain rate range from about  $2 \times 10^4$  to  $4 \times 10^4 \text{s}^{-1}$ , which is the strain rate range before reduction, and the reduction in strain rate is 58.6%. To eliminate an effect of elastic wave dispersion produced in a bar on the measured flow stress, a output bar being 2mm in diameter is employed. A steep increase in the flow stress was observed at the strain rate of about  $2 \times 10^4 \text{s}^{-1}$ . A simplified model for dislocation kinetics under dynamic plastic deformation is used which can represent a transition in the rate controlling mechanism of dislocation motion from a thermally activated process to a viscous drag. It is confirmed that the steep increase in the flow stress of 6061-T6 observed at the strain rate of about  $2 \times 10^4 \text{s}^{-1}$  is attributed to the rate dependence of the viscous drag on the dislocation motion and furthermore, the increase in the mobile dislocation density lowers a velocity of moving dislocations and shifts the transition region, or the strain rates in which the steep increase in the flow stress becomes to appear, to the higher strain rate side.

**Key words :** 6061-T6 Aluminum alloy, High strain rate test, Strain rate reduction test, Thermally activated process, Viscous drag, Phonon, Transition in rate controlling mechanism, Moving dislocation density

### 1 緒 言

金属材料の変形応力（塑性流動応力）にはひずみ速度依存性があることは良く知られている<sup>1), 2)</sup>とくに面心立方金属の場合、高ひずみ速度域で変形応力は急激に上昇することが指摘されている<sup>3), 4)</sup>その機構については、運動転位の律速機構がひずみ速度  $10^3 \text{s}^{-1}$  程度を境に、熱活性化過程による林転位との切り合いからフォノンや伝導電子を散乱する際の粘性的な抵抗に遷移するためとされている<sup>5), 6)</sup>本研究で扱う 6061-T6 アルミニウム合金については数多くの研究<sup>7)</sup>が行われているが、ひずみ速度  $10^3 \text{s}^{-1}$  以上を対象とした研究は少ない。それゆえ、前述した変形応力の急上昇が現れるか否かについても明らかでない。Yadav ら<sup>8)</sup>はホプキンソン棒法ならびにフライングプレート法を使用し、6061-T6 のひずみ速度  $10^5 \text{s}^{-1}$  程度の変形応力を測定し、変形応力はひずみ速度およそ  $10^2 \text{s}^{-1}$  付近から急上昇することを示した。上記の結果は、6061-T6 の変形応力のひずみ速度依存性はひずみ速度  $10^3 \text{s}^{-1}$  程度迄はほとんど見られないとする Holt ら<sup>7)</sup>の結果とは異なる。また、小川<sup>9)</sup>は 6061-T6 の変形応力を広いひずみ速度域 ( $10^{-4} \sim 1.5 \times 10^3 \text{s}^{-1}$ ) ならびに温度域 (77 ~ 473K) で測定し、その律速機構は単一の熱活性化過程に支配されており、変形応力の急な上昇はひずみ速

度  $10^5 \text{s}^{-1}$  程度迄は現れないとしている。著者は 6061-O<sup>10)</sup> と T6<sup>11)</sup> に対し、ひずみ速度およそ  $1 \times 10^4 \text{s}^{-1}$  以上の領域で速度急変実験を行い、6061-O についてはひずみ速度  $5 \times 10^3 \text{s}^{-1}$  付近で変形応力の急な上昇が見られるが、6061-T6 についてはひずみ速度  $2 \times 10^4 \text{s}^{-1}$  程度迄はそのような現象は現れないことを報告した。さらに、フォノンならびに伝導電子散乱による粘性抵抗を考慮に入れた構成式を用い、運動転位密度の増加が変形応力の急上昇域を高ひずみ速度側へ移行させる事を示し、6061-T6 の変形応力はひずみ速度  $2 \times 10^4 \text{s}^{-1}$  以上の領域で急上昇する可能性があることを示唆した<sup>12)</sup>そこでは、直径 4mm の出力棒を用いて、直径および長さが 1.5mm の試験片に対しひずみ速度急変実験を行った。しかし、出力棒中に現れる弾性波の分散の影響により、行われたひずみ速度は  $2 \times 10^4 \text{s}^{-1}$  程度が限界であった。上記の解釈ならびに予測の妥当性を確かめるには、さらなる高ひずみ速度域における実験が必要である。

そこで、本報では棒中の弾性波の分散の影響を軽減するため、直径 2mm の出力棒を用いた速度急変装置を試作し、6061-T6 に対しひずみ速度およそ  $2 \times 10^4 \text{s}^{-1}$  から  $4 \times 10^4 \text{s}^{-1}$  の領域で定ひずみ速度ならびにひずみ速度急変実験を行い、興味ある結果を得たので報告する。

† 原稿受理 平成 18 年 3 月 14 日 Received Mar. 14, 2006

\* 正 会 員 法政大学工学部機械工学科 〒184-8584 小金井市梶野町, Dept. of Mech. Eng., Hosei Univ., Kajino-cho, Koganei, 184-8584

## 2 実 験

### 2.1 供試材および試験片

実験に使用した 6061-T6 (大同軽金属工業) は 535°C (1.5h) で溶体化処理した後、水焼入れを行い、170°C (8h) で焼戻し処理されている。試験片は直径 6mm の丸棒を直径および長さがそれぞれ 1.0mm の円柱形に機械加工して用いた。試料の化学成分を Table 1 に示す。

### 2.2 実験方法

装置の詳細はほぼ既報<sup>10)</sup>の通りなので、ここでは簡単に述べる。高ひずみ速度域およそ  $2 \times 10^4 \sim 4 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$  の圧縮試験にはホプキンソン棒法を用いた。ここでのホプキンソン棒法は、出力棒端面に取り付けられた試験片を打撃棒が直接圧縮変形するシステムである。

高ひずみ速度域では弾性棒中を伝わる弾性波の分散の影響が顕著になるため、本実験におけるひずみ速度域では直径 2mm のタングステン製丸棒を用いた。通常、径の小さな出力棒にひずみゲージを接着するのは困難であるが、ここでは出力棒の表面に絶縁被膜を作成し、ゲージ長さが 1mm で幅 0.25mm の無ベースの半導体ひずみゲージ (SKS-30112: 共和電業) を軸対称に 2 枚貼り付けた。速度急変実験は、試験片を圧縮変形している打撃棒を変形途中で減速用の中空丸棒に衝突させることによって行った。本実験で用いた直径 10mm の打撃棒 (Ti 合金) と外径 10mm で内径が 4.6mm の減速棒 (Ni 合金) との組合せによる速度降下率は 58.6% である。試験片の出力棒端面への取り付けはグリースの粘着力を利用している。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  $\dot{\epsilon}$  は棒中を伝わる縦波の初等解を用い、試験片に接触する直前の打撃棒の衝突初速度  $v_1$  と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

$$\dot{\epsilon} = \frac{1}{\ell_0} \left( v_1 - \frac{a_0 \sigma_n}{A_1 c_1 \rho_1} - \frac{a_0 \sigma_n}{A_3 c_3 \rho_3} \right) \quad (1)$$

b) 衝突後すなわち減速後

$$\dot{\epsilon} = \frac{1}{\ell_0} \left( \frac{v_1 - (a_0 \sigma_n / A_1 c_1 \rho_1)}{1 + (A_2 c_2 \rho_2 / A_1 c_1 \rho_1)} - \frac{a_0 \sigma_n}{A_3 c_3 \rho_3} \right) \quad (2)$$

ここで、 $\rho$ ,  $c$ ,  $A$  は棒の密度、弾性波の伝播速度および出力棒の断面積を表しており、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。 $a_0$ ,  $\ell_0$ ,  $\sigma_n$  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。試験片のひずみ  $\epsilon_n$  (公称) と真応力  $\sigma_t$  は式 (1) と (2) の  $\dot{\epsilon}$  から次式のように求められる。

$$\epsilon_n = \int_0^t \dot{\epsilon} dt \quad (3)$$

$$\sigma_t = \sigma_n (1 - \epsilon_n) \quad (4)$$

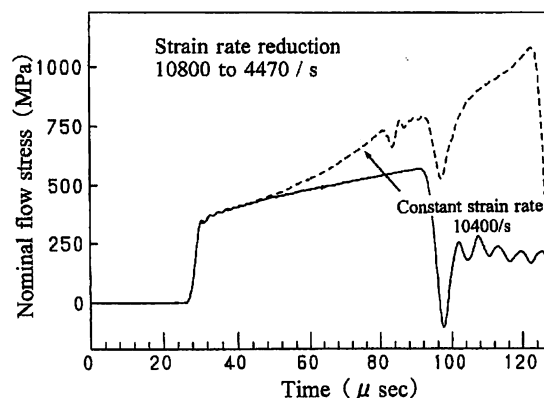
Table 1 Chemical composition of 6061 aluminum alloy. (wt %)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
0.60	0.34	0.29	0.05	0.99	0.20	0.04	0.03

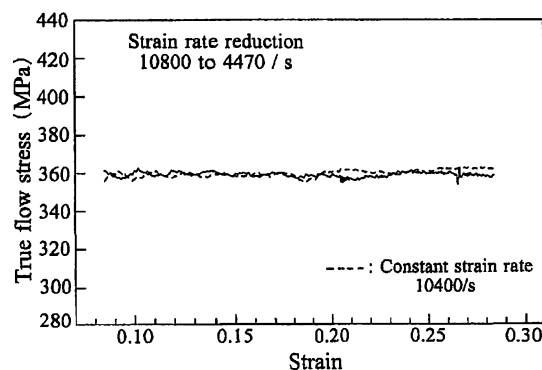
なお、式 (1) と (2) 中の  $\sigma_n$  の項は比較的小さいので (例えば、ひずみ速度  $2 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$  でひずみ 0.2 の場合、 $v_1$  に対しおよそ 3% 程度)、この項を無視して求めたひずみ速度を公称ひずみ速度とする。のちに本文中に示される真応力-ひずみ速度線図は、公称ひずみ速度一定における真応力-公称ひずみ線図から求めている。

### 3 結果および考察

まず、直径 4mm の出力棒を用いて行われたひずみ速度およそ  $1 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$  から  $2 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$  の領域における速度急変実験の結果を Fig. 1 および Fig. 2 に示す。Fig. 1 はひずみ 18% 付近でひずみ速度を  $1.08 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$  から  $4.47 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$  に、Fig. 2 はひずみ 17% 付近で  $1.79 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$  から  $7.41 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$  に急速に降下させた場合である。各図中の (a) は公称応力-時間線図であり、(b) は速度急変箇所を拡大表示した真応力-公称ひずみ線図である。また、図中には速度急変による変形応力の降下量を求めるため、速度急変前のひずみ速度に対応した一定ひずみ速度線図も描いてある。Fig. 1 におけるひずみ速度急変後の両者を比較すると、変形応力の降下はほとんど現れていない。Fig. 2 においては変形応力の降下量は幾分 (3 ~ 5MPa 程度) 見られるものの、この程度では変形応力が急上昇

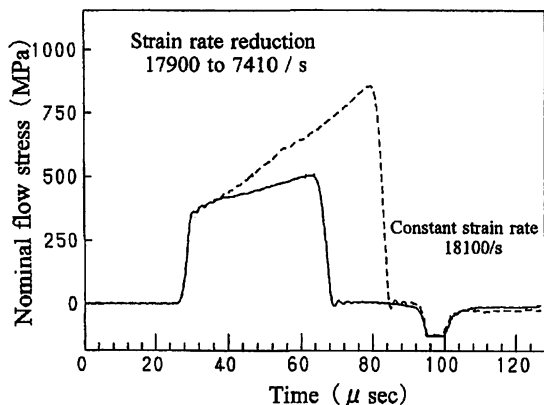


(a) Nominal flow stress vs time curves.

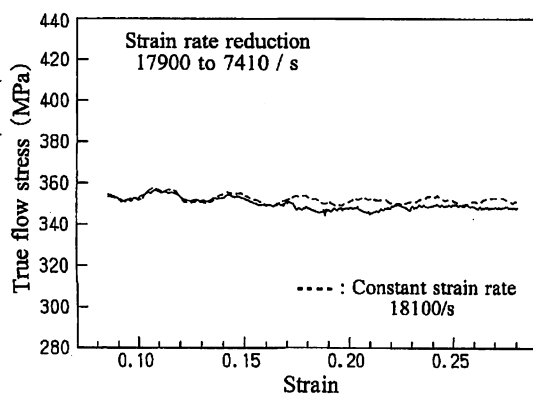


(b) True flow stress vs strain curves.

Fig. 1 Response of flow stress to sudden reduction in strain rate ranging from  $1.08 \times 10^4$  to  $4.47 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$  and flow stress at constant strain rate of  $1.04 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$ .



(a) Nominal flow stress vs time curves.



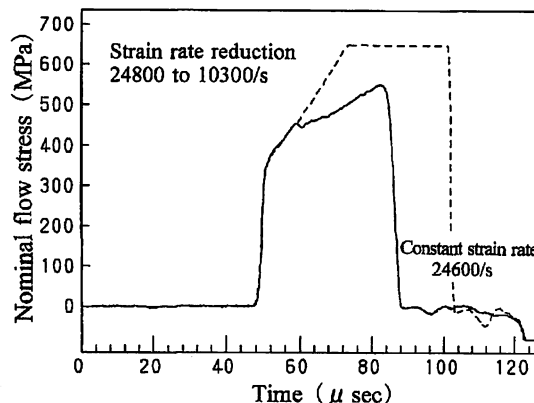
(b) True flow stress vs strain curves.

Fig. 2 Response of flow stress to sudden reduction in strain rate ranging from  $1.79 \times 10^4$  to  $7.41 \times 10^3 \text{s}^{-1}$  and flow stress at constant strain rate of  $1.81 \times 10^4 \text{s}^{-1}$ .

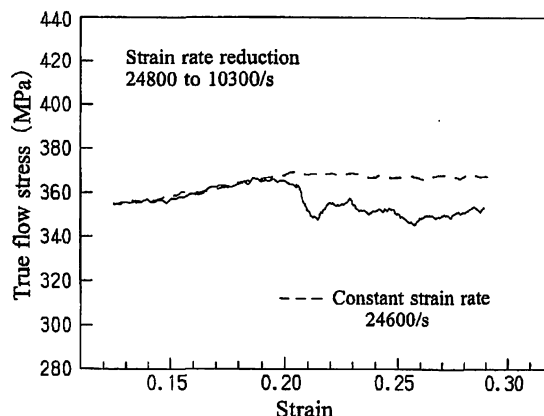
しているとは思えない。また、Fig. 2 では出力波形に周期的な振動が現れており、正確な応力の降下量を求めにくくなっている。これは出力棒中に生じる弾性波の分散による影響であり、高ひずみ速度試験になる程その影響は顕著となる。

次に、ひずみ速度  $2 \times 10^4 \text{s}^{-1}$  以上の領域で行われた速度急変実験の結果について示す。前述したように、高ひずみ速度域では棒中の弾性波の分散の影響が強く現れるため直径が 2mm の出力棒を用いた。さらに試験片の慣性力の影響を極力押さえるために、直径および長さが 1mm の試験片を用いた。Fig. 3 はひずみ速度を  $2.48 \times 10^4 \text{s}^{-1}$  から  $1.03 \times 10^4 \text{s}^{-1}$  に、そして Fig. 4 はひずみ速度を  $4.10 \times 10^4 \text{s}^{-1}$  から  $1.66 \times 10^4 \text{s}^{-1}$  にひずみ速度を急速に降下させた場合である。Fig. 1 ならびに Fig. 2 の場合と同様、各図中の (a) は公称応力-時間線図であり、(b) は速度急変箇所を拡大表示した真応力-公称ひずみ線図である。直径 2mm の出力棒を用いたことにより、弾性波の分散の影響はかなり軽減されており、速度急変による変形応力の降下も明確である。ちなみに、変形応力の降下量は Fig. 3 の場合およそ 15MPa であり、Fig. 4 の場合は 22MPa である。

Fig. 5 に、ひずみ速度  $1 \times 10^4 \text{s}^{-1}$  から  $4 \times 10^4 \text{s}^{-1}$  の領域



(a) Nominal flow stress vs time curves.



(b) True flow stress vs strain curves.

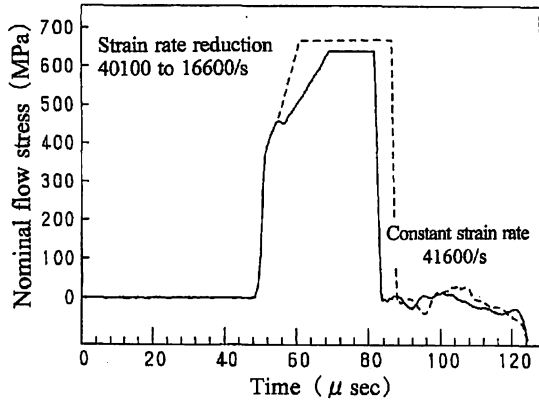
Fig. 3 Response of flow stress to sudden reduction in strain rate ranging from  $2.48 \times 10^4$  to  $1.03 \times 10^4 \text{s}^{-1}$  and flow stress at constant strain rate of  $2.46 \times 10^4 \text{s}^{-1}$ .

でおこなわれた速度急変実験の結果をまとめて示した。縦軸は速度急変による変形応力の降下量であり、横軸はひずみ速度を対数座標で表している。図に見られるように、ひずみ速度およそ  $2 \times 10^4 \text{s}^{-1}$  付近から変形応力が急上昇しているのが分かる。速度急変実験から求められる変形応力差は、ひずみ速度に対する瞬間応答成分であり、応力-ひずみ速度線図の傾きは変形応力の瞬間ひずみ速度依存性の大きさを表している。

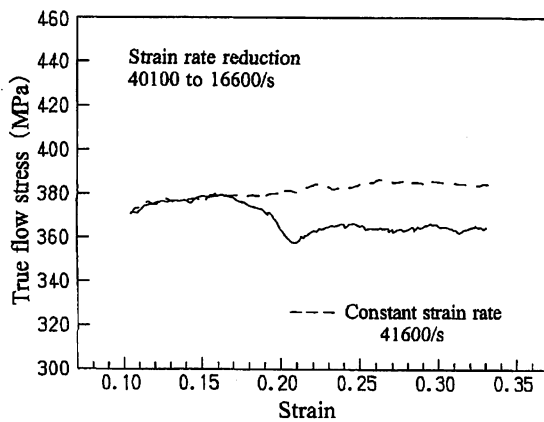
そこで、上述の変形応力が急上昇するという現象を、運動転位の律速機構が低速側の林転位との切り合いから高速側の粘性抵抗支配へ遷移することによって生じると考え、解析には変形応力の瞬間ひずみ速度依存型の転位モデル<sup>13), 14)</sup>を用いた。このモデルは、運動転位ループの運動の一ステップを、長さ  $L$  の直線転位セグメントの距離  $L$  の運動で置き換えて扱っている。 $L$  は林転位の平均間隔である。よって、転位の平均速度  $v_d$  は、林転位との切り合いの待ち時間を  $t_i$ 、林転位間を通過するのに要する時間を  $t_v$  とすると  $v_d = L/(t_i + t_v)$  となり、ひずみ速度  $\dot{\gamma}$  はオロワンの式から

$$\dot{\gamma} = \rho_d b L / (t_i + t_v) \quad (5)$$

と表される。



(a) Nominal flow stress vs time curves.



(b) True flow stress vs strain curves.

Fig. 4 Response of flow stress to sudden reduction in strain rate ranging from  $4.10 \times 10^4$  to  $1.66 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$  and flow stress at constant strain rate of  $4.16 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$ .

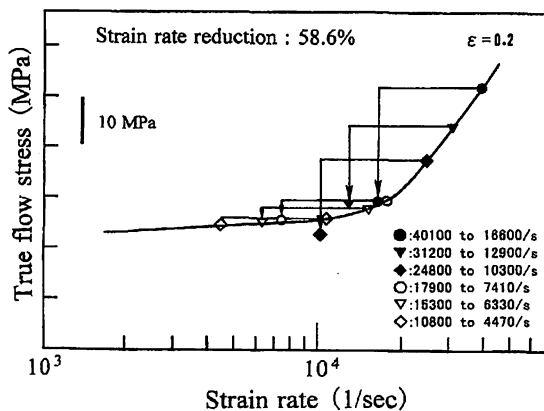


Fig. 5 Flow stress drop obtained from every rate reduction test at strain rate ranging from  $1 \times 10^4$  to  $4 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$ .

ここに、

- $\rho_d$  : 運動転位密度 (単位体積中の運動転位の総長さ)
- $b$  : バーガースベクトル

である。林転位との切り合いは熱活性化の助けを借りて行われるため、待ち時間  $t_w$  は次式のように与えられる。

$$t_w = v^{-1} \exp[(E_c - \tau V)/kT] \quad (6)$$

ここに、

- $v$  : デバイの振動数
- $E_c$  : 切り合いの真の活性化エネルギー
- $\tau$  : せん断応力 (せん断応力の熱的成分)
- $V$  : 活性化体積 ( $\approx Lb^2$ )
- $k$  : ボルツマン定数
- $T$  : 絶対温度

である。

つぎに、転位の林転位間の運動はフォノンや伝導電子を散乱する際の粘性抵抗に律速されるので、その通過時間  $t_b$  は次式のように与えられる。

$$t_b = BL/\tau b \quad (7)$$

ここに、

- $B$  : 摩擦係数 (減衰係数とも呼ばれる)

である。よって、式 (5) は式 (6), (7) より

$$\dot{\gamma} = \rho_d b L / \{v^{-1} \exp[(E_c - \tau V)/kT] + BL/\tau b\} \quad (8)$$

と表すことができる。この式は低ひずみ速度域から高ひずみ速度域にかけての運動転位の律速機構の遷移を評価できる応力とひずみ速度の関係式である。低速の時は  $t_w \gg t_b$  なので、式 (8) は近似的に

$$\dot{\gamma} \approx \rho_d b L / \{v^{-1} \exp[(E_c - \tau V)/kT]\} \quad (9)$$

と書ける。また、高速の時は  $t_w \ll t_b$  なので、式 (8) は近似的に

$$\dot{\gamma} \approx \rho_d b^2 \tau / B \quad (10)$$

となる。なお、変形応力の実測値との定量的な比較にあたっては、変形に伴って増加する応力の非熱的成分の影響を考慮に入れる必要がある。外部から加わる応力を  $\tau_0$ 、応力の非熱的成分を  $\tau_a$  と書くと、転位を動かそうとする応力  $\tau$  は  $\tau_0 - \tau_a$  となる。

そこで、Fig. 5 のひずみ速度  $2 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$  付近で現れる変形応力の急な上昇を式 (8) を用いて評価する。実験結果は多結晶体の試験片の圧縮応力  $\sigma$  と圧縮ひずみ速度  $\dot{\epsilon}$  の関係であるが、式 (8) は単結晶の分解せん断応力  $\tau$  とせん断ひずみ速度  $\dot{\gamma}$  の関係で導かれている。両者の間の換算はテーラー因子を 3.06 として行う。式 (8) 中の諸量の内、未知のものは、林転位間隔  $L$ 、運動転位密度  $\rho_d$  および応力の非熱的成分  $\tau_a$  である。活性化体積  $V$  は実測値の  $\sigma_t$  と  $\log \dot{\epsilon}$  の関係の直線部分の勾配から式 (9) を用いて求め、さらに平均林転位間隔  $L$  は  $V$  との間に  $V = Lb^2$  の関係があると仮定し、求めている。  $\rho_d$  はこのように求めた  $L$  の値を用い、式 (8) が示す変形応力の急上昇開始点を実測値のそれに対応するように決定する。  $\tau_a$  は応力の非熱的成分の影響を含まない計算値とその影響を含む実測値との比較によって求める。上記のように求めた 6061-T6 のそれぞれの値は  $V = 5.49 \times 10^{-27} \text{ m}^3$ 、 $L = 6.71 \times 10^{-8} \text{ m}$ 、 $\rho_d = 2.1 \times 10^{12} \text{ m}^{-2}$ 、 $\tau_a = 104 \text{ MPa}$  である。活性化エネルギー  $E_c$  は Ashby ら<sup>15)</sup> による  $Gb^3/5$  を用いた。摩擦係数  $B$  は Hikata ら<sup>16)</sup> の測定値  $4.88 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$  を採用した。このように求めた応力-ひずみ速度線図を Fig. 6

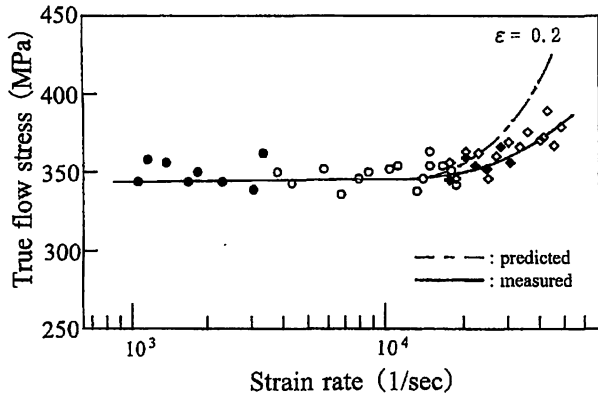


Fig. 6 Comparison of measured flow stress curve with the predicted one in the strain rate range from about  $1 \times 10^3$  to  $4 \times 10^4 \text{s}^{-1}$ .

に鎖線で示す。なお、上述の計算では  $L$  および  $\rho_d$  に速度依存性はないと仮定されている。図中に示される記号  $\circ$ ,  $\bullet$ ,  $\blacklozenge$  は既報<sup>11)</sup>の測定値であり、 $\blacktriangle$  は今回直径 2mm の出力棒を用いて直径および長さがそれぞれ 1mm の試験片に対して測定した値である。実線は Fig. 5 で求めた応力-ひずみ速度線図である。計算値と実測値を比較すると、計算値の高ひずみ速度域での立ち上がりは実測値に比べてかなり急である。これは、式 (8) では林転位の間隔は一定と仮定し、運動転位ループ長さの分布を考慮していないためと思われる。運動転位のループ長さを一定と仮定した場合、すべてのループはいっせいに粘性抵抗律速状態へ移行することになるが、長さに分布がある場合は、応力が高くなるにつれて長いループから順次粘性抵抗律速状態へと移行していくことになる。よって、実測値は計算値に比べ緩やかな立ち上がりになると考えられる。

Fig. 7 に、6061-T6、6061-O ならびに 5nAl の高ひずみ速度域における変形応力-ひずみ速度線図を示す。図中の実線は実測値であり、破線は式 (8) を用いて求めた計算値である。6061-O<sup>10)</sup> ならびに 5nAl<sup>17)</sup> の実測値は、既に行われた速度急変実験の結果から得られたものである。本来、それぞれの応力レベルは添加元素や析出物などの

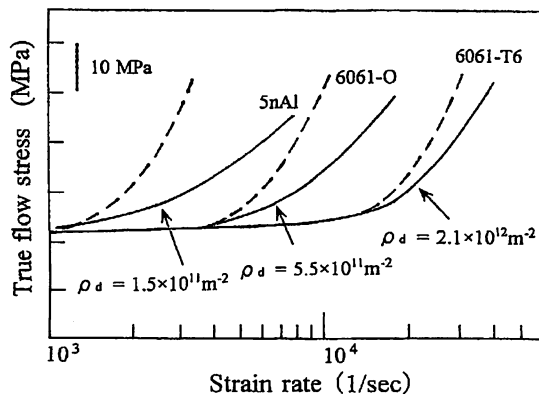


Fig. 7 Relation of moving dislocation density to step increase in flow stress at high strain rates for 6061-O, 6061-T6 and 5nAl, respectively.

影響により異なるが、変形応力が急上昇するひずみ速度域を比較するため、変形応力急上昇前のそれぞれの応力レベルを合わせてある。変形応力が急上昇するひずみ速度域は 5nAl、6061-O そして 6061-T6 の順に高ひずみ速度側に移行している。式 (8) による計算では、活性化体積  $V$  ならびに摩擦係数  $B$  は同じ値を用い、運動転位密度  $\rho_d$  の値を変えた。5nAl は  $\rho_d = 1.5 \times 10^{11} \text{m}^{-2}$ 、6061-O は  $\rho_d = 5.5 \times 10^{11} \text{m}^{-2}$  そして 6061-T6 は  $\rho_d = 2.1 \times 10^{12} \text{m}^{-2}$  とする事により、それぞれに現れる変形応力の急上昇を評価することが出来る。

本実験の結果は Yadav らの結果とは大きく異なった。Fig. 8 に Yadav らならびに本実験の結果を示す。本実験で用いたモデルに基づいて Yadav らの結果を考察すると、運動転位密度はおよそ  $2 \times 10^{10} \text{m}^{-2}$  程度となり、この値は焼鈍された 5nAl よりも一桁程低い値となる。また、摩擦係数  $B$  の値を大きく採る事によってもその立ち上がりのひずみ速度を予測できるが、その場合の  $B$  の値はおよそ  $5 \times 10^{-4} \text{Pa} \cdot \text{s}$  となり、Hikata らが測定した値とは著しく異なる。本実験の結果ならびに考察からでは、Yadav らの実験結果を評価できない。

#### 4 ま と め

既報で予測した 6061-T6 の変形応力の急な上昇を確かめるため、直径が 2mm の出力棒を用い、ひずみ速度  $2 \times 10^4 \sim 4 \times 10^4 \text{s}^{-1}$  の領域で定ひずみ速度ならびにひずみ速度急変実験を行った。その結果、以下の事が明らかとなった。

- (1) 6061-T6 の高ひずみ速度域における変形応力の急上昇はひずみ速度およそ  $2 \times 10^4 \text{s}^{-1}$  付近で現れた。
- (2) 6061-T6 の変形応力の急上昇域が 5nAl や 6061-O に比べ高ひずみ速度側へ移行するのは、式 (8) 中の運動転位密度を増加させることにより評価できる。

#### 参 考 文 献

- 1) J. D. Campbell, "Dynamic plasticity : macroscopic and microscopic aspects", Materials Science and Engineering, Vol.12, pp.3-21 (1973).

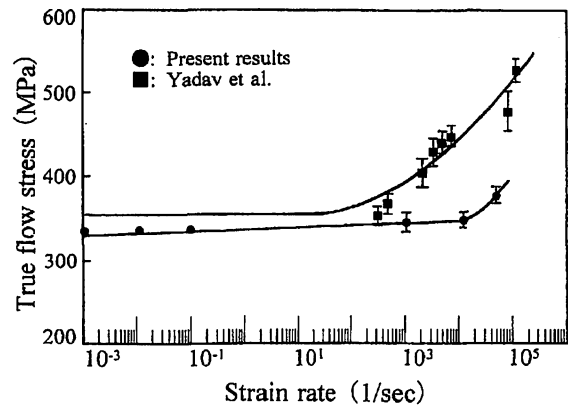


Fig. 8 Comparison of strain rates in which step increase in flow stress determined from this experiment with that obtained by Yadav et al.

- 2) U. S. Lindholm, "Review of dynamic testing techniques and material behavior", *Proceedings of Mechanical Properties at High Rates of Strain* (J. Harding, ed.), Institute of Physics Conf. Ser., No.21, pp.3-21 (1974).
- 3) W. Tong and R. J. Clifton, "Pressure shear impact investigation of strain rate history effects in oxygen-free high-conductivity copper", *Journal Mechanical Physics of Solids*, Vol.40, No.6, pp.1251-1294 (1992).
- 4) A. R. Dowling, J. Harding and J. D. Campbell, "The Dynamic Punching of Metals", *Journal of Institute of Metals*, Vol.98, pp.215-224 (1970).
- 5) W. G. Ferguson, A. Kumar and J. E. Dorn, "Dislocation damping in aluminum at high strain rates", *Journal of Applied Physics*, Vol.38, pp.1863-1869 (1967).
- 6) J. Shioiri, K. Sakino and S. Santoh, "Strain rate sensitivity of flow stress at very high rates of strain", *Proceedings of IUTUM Symposium : Constitutive Relation in High/Very High Strain Rates*, K. Kawata, J. Shioiri (eds.), pp.49-58 (1996) Springer-Verlag Tokyo.
- 7) D. L. Holt, S. G. Babcock, S. J. Green and C. J. Maiden, "The strain rate dependence of the flow stress in some aluminum alloys", *Transactions of ASM*, Vol.60, pp.152-159 (1967).
- 8) S. Yadav, D. R. Chichili and K. T. Ramesh, "The mechanical response of A6061-T6 Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> metal matrix composite at high rates of deformation", *Acta Metall. Mater.*, Vol.43, No.12, pp.4453-4464 (1995).
- 9) K. Ogawa, "Impact tensile characteristics of 6061-T6 aluminum alloy", *Journal of Japan Institute of Light Metals*, Japan, Vol.51, No.3, pp.175-181 (2001).
- 10) K. Sakino and H. Endoh, "Strain rate dependence of flow stress of A6061-O at very high strain rates", *Mechanical Engineering Congress, 2004 Japan*, Vol.1, No.04-1, pp.199-200 (2004).
- 11) K. Sakino and H. Endoh, "Strain rate dependence of flow stress of A6061-T6 at very high strain rates", *The 49th Zaikenren*, Japan, pp.319-320 (2004).
- 12) K. Sakino, "Strain rate dependence of dynamic flow stress considering viscous drag for 6061 aluminum alloy at very high strain rates", *Journal of the society of materials science, Japan*, Vol.54, No.12, pp.1301-1306 (2005).
- 13) A. Kumar and R. G. Kumble, "Viscous drag on dislocation at high strain rates in copper", *Journal Applied of Physics*, Vol.40, pp.3475-3480 (1969).
- 14) J. Shioiri and K. Satoh, "An ultrasonic study of the behavior of dislocations at very high rates of strain", *Proceedings of Mechanical Properties at High Rates of Strain*, J. Harding (ed.), Institute of Physics Conf. Ser., No.70, pp.89-96 (1984).
- 15) M. F. Ashby and H. J. Frost, "Constitutive Equations in Plasticity", A. S. Argon (ed.), p.117 (1975) MIT Press.
- 16) A. Hikata, R. A. Johnson and C. Elbaum, "Interaction of Dislocations with Electrons and with Phonons", *Physical Review B*, Vol.2, No.12, pp.4856-4863 (1970).
- 17) K. Sakino and J. Shioiri, "Dynamic flow stress response of aluminum to sudden reduction in strain rate at very high strain rates", *Proceedings of DYMAT 1991 : 3rd International Conference on Mechanical and Physical Behaviour of Materials under Dynamic Loading*, Vol.1, pp.35-42 (1991) EDP Science.