法政大学学術機関リポジトリ
HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

PDF issue: 2025-07-31

6061アルミニウム合金の高ひずみ速度域における粘性抵抗を考慮した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)
12
(開始ページ / Start Page)
1301
(終了ページ / End Page)
1306
(発行年 / Year)
2005-12

The Society of Materials Science, Japan

「材料」(J. Soc. Mat. Sci., Japan), Vol. 54, No. 12, pp. 1301-1306, Dec. 2005
論　文

6061アルミニウム合金の高ひずみ速度域における粘性抵抗を考慮した変形応力のひずみ速度依存性†

崎　野　清　憲*

Strain Rate Dependence of Dynamic Flow Stress Considering Viscous Drag for 6061 Aluminum Alloy at Very High Strain Rates

by

Kiyotaka SAKINO *

In the previous paper, in order to evaluate the strain rate dependence of the dynamic flow stress of aluminum alloys, 6061-O and -T6, high strain rate tests were performed at strain rates ranging from $1\times10^3 s^{-1}$ to $3\times10^4 s^{-1}$, and strain rate reduction tests were also conducted in the strain rate range from about $1\times10^4 s^{-1}$ to $2\times10^4 s^{-1}$, which is the strain rate range before reduction. A steep increase in the flow stress was observed for 6061-O at the strain rate of about $5\times10^3 s^{-1}$. The above phenomenon, however, was not observed for 6061-T6 in the strain rate range where the strain rate reduction tests were conducted and also the strain rate dependence of the flow stress was negligibly small. In this paper, to clarify the difference between the above-mentioned phenomenon for 6061-O and -T6, 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. The equation derived from the kinetic model reveals that the steep increase in the flow stress of 6061-O observed at the strain rate of about $5\times10^3 s^{-1}$ 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. It is expected that the flow stress of 6061-T6 increases abruptly in the strain rate region above about $2\times10^4 s^{-1}$.

Key words : 6061 Aluminum alloy, High strain rate test, Strain rate dependence of flow stress, Thermally activated process, Viscous drag, Phonon, Transition in rate controlling mechanism, Mobile dislocation density

1　緒　　言

金属材料の変形応力（塑性流動応力）は速度依存性を示すことは良く知られている.[1), 2)]なかでも，面心立方金属の変形応力はひずみ速度 $10^{-3}s^{-1}$ 程度の準静的領域からひずみ速度およそ $1\times10^3 s^{-1}$ 付近の高ひずみ速度域までは，ひずみ速度の対数に対しほぼ直線的に緩やかに上昇し，その後急激に上昇することが報告されている.[3), 4)]この現象について，変形応力は瞬間のひずみ速度に依存するという考え方[5)]と，変形により形成される内部組織のひずみ速度履歴依存性によるとする説[6)]がある．これまで，著者は上記の問題を調べるため，高い時間分解能をもつ新しい速度急変試験装置を開発し，面心立方金属のアルミニウムに対しひずみ速度 $1\times10^4 s^{-1}$ 以上の領域で速度降下型のひずみ速度急変実験を行い，この領域における変形応力は瞬間のひずみ速度に大きく依存している事を報告してきた.[7)]さらに，転位の動力学モデルから導かれる瞬間ひずみ速度依存型の構成式，およびこれ迄に得られている転位の運動についての定量的な知見をもとに，高ひずみ速度域に見られる面心立方金属の変形応力の急な上昇は転位の運動に対する律速機構が低速側の熱活性化過程による林転位との切り合いから高速側のフォノンや伝導電子の散乱による粘性抵抗領域への移行によって生じることを示した.[8)]しかし，上記の結論は高純度アルミニウム (5nAl) に対して得られたものであり，強化組織を形成するための多量の添加元素を含んだ合金をも対象とした広い解釈ではない.

本研究で扱う6061アルミニウム合金については多くの研究[9)]が行われているが，ひずみ速度 $10^4 s^{-1}$ 以上の領域を対象とした研究は少ない．Yadav ら[10)]は6061-T6の広範囲ひずみ速度 ($10^{-4}\sim10^5 s^{-1}$) 試験において，ひずみ速度およそ $8\times10^2 s^{-1}$ 付近から粘性的な抵抗が支配的となり，変形応力がひずみ速度の増加と共に急激に上昇する事を示している．小川[11)]は6061-T6に対し広い温度域 (77 ～ 473K) ならびにひずみ速度域 ($10^{-4}\sim1.5\times10^3 s^{-1}$) で引張試験を行い，ひずみ速度 $10^4 s^{-1}$ 程度までの変形応力のひずみ速度依存性を転位の交切機構を主体とした熱活性化過程論でうまく説明している.

前報[12)]では，アルミニウム合金 (6061-O，6061-T6) の

†　原稿受理　平成17年4月4日　Received Apr. 4, 2005
*　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

NII-Electronic Library Service

The Society of Materials Science, Japan

高ひずみ速度域における変形応力のひずみ速度依存性を調べるために，ひずみ速度およそ $1\times10^4\mathrm{s}^{-1}$ から $2\times10^4\mathrm{s}^{-1}$ の領域で速度急変実験（速度降下率：58.6%）を行った．6061-O についてはひずみ速度 $5\times10^3\mathrm{s}^{-1}$ 付近で変形応力の急な上昇が現れ，6061-T6 においてはひずみ速度 $2\times10^4\mathrm{s}^{-1}$ 程度においてもそのような現象は見られないという結果を得た．このような相違の生じる原因を明らかにすることは，アルミニウム合金の高ひずみ速度域における律速機構を解明する上で重要と考える．

そこで本研究は，前報で得られた 6061-O ならびに 6061-T6 の高ひずみ速度域における変形応力のひずみ速度依存性について，転位の運動ならびにそれに対する障害を考慮に入れた微視的変形機構の見地から解析をすすめた．さらに，準静的領域の圧縮試験と 6061-T6 の高ひずみ速度域における高温試験も併せて行った．

2 微視的変形機構の力学モデル

6061-O で得られた速度急変実験の結果に基づき，瞬間ひずみ速度依存型の変形機構を考える．

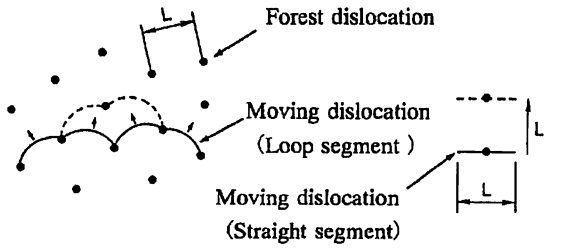
一般に，面心立方金属においてはパイエルス力は無視できるくらい小さく，転位の運動に対する固有抵抗はフォノンや伝導電子の散乱による粘性的な抵抗である．一方，外因抵抗としては，添加元素やそれらによる析出物が考えられるが，転位の運動に対する時間依存型の抵抗としては主としてすべり面に交差する転位すなわち林転位が考えられる．ゆえに，すべり面上の転位は林転位を切るときの熱活性化過程と，林転位間を通過するときの粘性抵抗に律速されて進む．このような転位の運動の動力学的解析は多くの研究者によって行われてきているが，ここでは Shioiri and Satoh[13]の近似方法を用いる．林転位を切って進む転位の運動の様子を Fig. 1 (a) に示す．簡単のため，(a) に示した運動転位ループの運動の一ステップを，同図 (b) に示したような長さ 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う．L は林転位の平均間隔である．転位の平均速度 $\bar{v}_d$ は，林転位との切り合いの待ち時間を t_t，林転位間を通過するのに要する時間を t_v とすると

$$\bar{v}_d = L/(t_t + t_v) \tag{1}$$

と書ける．せん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ はオロワンの式より

$$\dot{\gamma} = \rho_d \boldsymbol{b} \bar{v}_d \tag{2}$$

と表される．



(a) Loop segment model.　　(b) Straight segment model.

Fig. 1. Kinetic model of dislocation segment motion.

ここに，

ρ_d ： 運動転位密度（単位体積中の運動転位の総長さ）

$\boldsymbol{b}$ ： バーガースベクトル

よって，式 (2)は次式のようになる．

$$\dot{\gamma} = \rho_d \boldsymbol{b} L/(t_t + t_v) \tag{3}$$

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_t は次式のように与えられる．

$$t_t = \upsilon^{-1} \exp\left[E(\tau)/kT\right] \tag{4}$$

ここに，

υ ：デバイの振動数

$E(\tau)$ ： 切り合いの見掛けの活性化エネルギー

τ ： 転位に働く有効せん断応力

k ： ボルツマン定数

T ： 絶対温度

である．林転位による抵抗のおよぶ範囲を λ とすると，切り合いの際に応力 τ は $\tau\boldsymbol{b}L\lambda$ の仕事をする．ここで，$\lambda \fallingdotseq \boldsymbol{b}$ と考えられており上記の見掛けの活性化エネルギー $E(\tau)$ は次式の形に表される．

$$E(\tau) = E_c - \tau v^* \tag{5}$$

ここに，

E_c ： 切り合いの真の活性化エネルギー

v^* ： 活性化体積 $= \boldsymbol{b}L\lambda \fallingdotseq L\boldsymbol{b}^2$

である．

つぎに，粘性抵抗に律速されて転位が運動するとき，応力 τ と転位の速度 v_d との間には次のような線形関係がある．

$$\tau \boldsymbol{b} = B v_d \tag{6}$$

ここに，$B\ (= B_p + B_e)$ は摩擦係数（減衰係数）と呼ばれており，フォノンの散乱による摩擦係数 B_p と伝導電子の散乱による摩擦係数 B_e の和である．[14]

運動転位の林転位間の通過時間 t_v は式 (6)より

$$t_v = BL/\tau\boldsymbol{b} \tag{7}$$

となり，式 (3)は式 (4)，(5)，(7)より

$$\dot{\gamma} = \rho_d \boldsymbol{b} L \Big/ \left\{\upsilon^{-1} \exp\left[\left(Ec - \tau L \boldsymbol{b}^2\right)/kT\right] + BL/\tau\boldsymbol{b}\right\} \tag{8}$$

と表すことができる．この式は応力 τ とひずみ速度 $\dot{\gamma}$ との関係式である．応力が低いとき，言い換えれば低速の時は，$t_t \gg t_v$ で，式 (8)は近似的に

$$\dot{\gamma} \fallingdotseq \rho_d \boldsymbol{b} L \upsilon \exp\left[-\left(Ec - \tau L \boldsymbol{b}^2\right)/kT\right] \tag{9}$$

と書ける．これは運動転位が林転位と切り合う際の熱活性化待ち時間により律速される熱活性化流動の式で，変形応力はひずみ速度の対数に線形依存する．また，応力が高いとき，言い換えれば高速の時は，$t_t \ll t_v$ で，式 (8)は近似的に

$$\dot{\gamma} \fallingdotseq \rho_d \boldsymbol{b}^2 \tau / B \tag{10}$$

となる．これは，粘性抵抗により律速された粘性流動の式で，変形応力はひずみ速度に線形依存する．したがって，Fig. 2 に示すようにひずみ速度を対数座標で表すと，変形応力は式 (9)の熱活性化流動域では直線的に緩やかに上昇し，式 (10)の粘性流動域に入ると急激に上昇する．

NII-Electronic Library Service

The Society of Materials Science, Japan

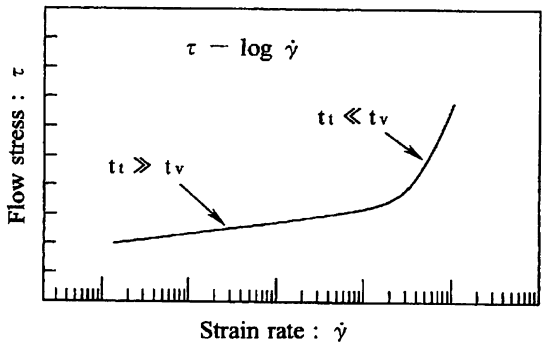


Fig. 2. Theoretical prediction given in Eqs. (8).

上述のモデルは活性化体積を一定としているが，活性化体積の有効応力（応力の熱的成分）依存性を考慮したモデルでは，粘性抵抗が支配的となるのはひずみ速度 $10^5 s^{-1}$ 以上と推定されている.[11]

3 実　　験

3・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℃ (1.5h) で溶体化処理した後，水焼入れをおこない，170℃ (8h) で焼戻し処理されている．なお，6061-O は温度 380℃ (3h) で空冷処理されている．試験片は直径 6 mm の丸棒を直径および長さがそれぞれ 1.5mm，2.0mm および 5.0mm の円柱形に機械加工して用いた．試料の化学成分を Table Ⅰに示す．

3・2 実験方法

本実験では，6061-T6 の高ひずみ速度試験を温度 373K および 473K で行ったが，装置の詳細はほぼ既報[8]の通りなので，ここでは簡単に述べる．準静的領域における圧縮試験にはインストロン型の試験機を用い，高ひずみ速度域およそ $1\times10^3 \sim 2\times10^4 s^{-1}$ で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．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おり，試験温度が 473K でも試験片を保持できるシリコン系の高温用グリースを使用した．試験片の変形応力は，出力棒の試験片端から 150mm の位置に貼られた半導体ひずみゲージにより検出され，サンプリングタイムが 0.1μs のディジタルメモリに記録される．試験片の加熱には小型の電気炉を用いた．また，ひずみゲージ近傍の出力棒の温度上昇を防ぐため，炉外側の出力棒に対しボルテックスチューブからの冷却空気を吹き付けた．本実験の各ひずみ速度域で用いた試験片の大きさならびに打撃棒と出力棒の詳細を Table Ⅱに示す．

Table Ⅰ. 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

Table Ⅱ. Hopkinson bars and specimens employed in each strain rate range.

Strain rate (s^{-1})	Specimen, Output and impact bars (mm)
$1\times10^3 \sim 3\times10^3$	Specimen : ϕ 5.0 × ℓ 5.0 Output bar : Maraging steel ϕ 20 Impact bar : Ti-6Al-4V ϕ 50
$4\times10^3 \sim 2\times10^4$	Specimen : ϕ 2.0 × ℓ 2.0, ϕ 1.5 × ℓ 1.5 Output bar : Tungsten ϕ 4 Impact bar : Ti-6Al-4V ϕ 13

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，試験片に接触する直前の打撃棒の初速度 V_0 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．

$$\dot{\varepsilon} = \frac{1}{\ell_0}\left(v_0 - \frac{a_0\,\sigma_n}{A_1 c_1 \rho_1} - \frac{a_0\,\sigma_n}{A_2 c_2 \rho_2}\right) \tag{11}$$

ここで，ρ，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 は打撃棒および出力棒を表している．a_0，ℓ_0，σ_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 ε_n（公称）と真応力 σ_t は式 (11)の $\dot{\varepsilon}$ から次式のように求められる．

$$\varepsilon_n = \int_0^t \dot{\varepsilon}\,dt \tag{12}$$

$$\sigma_t = \sigma_n(1-\varepsilon_n) \tag{13}$$

なお，式 (11)中の σ_n の項は比較的小さいので（例えば，6061-T6 のひずみ速度 $2\times10^4 s^{-1}$ でひずみ 0.2 の場合，V_0 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ーひずみ速度曲線は，公称ひずみ速度一定における真応力ー公称ひずみ曲線から求めている．

4 結果および考察

4・1 6061-O

式 (8)は，転位の支配的な固有抵抗および外因抵抗を考慮して導いた変形応力のひずみ速度依存性を表す式であるが，変形応力の実測値との定量的な比較に当たっては，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．外部から加わる変形応力を τ_0，応力の非熱的成分を τ_a と書くと，転位を動かそうとする有効応力 τ は $\tau_0-\tau_a$ となるので，式 (8)は次の形に書ける．

$$\dot{\gamma} = \frac{\rho_d \boldsymbol{b} L}{\upsilon^{-1}\exp\left\{\left[Ec-(\tau_0-\tau_a)L\boldsymbol{b}^2\right]/kT\right\} + BL/(\tau_0-\tau_a)\boldsymbol{b}} \tag{8'}$$

同様にして，熱活性化流動の式 (9)および粘性流動の式 (10)も

$$\dot{\gamma} \fallingdotseq \rho_d \boldsymbol{b} L \upsilon \exp\left\{-\left[Ec-(\tau_0-\tau_a)L\boldsymbol{b}^2\right]/kT\right\} \tag{9'}$$

$$\dot{\gamma} \fallingdotseq \rho_d \boldsymbol{b}^2(\tau_0-\tau_a)/B \tag{10'}$$

となる．

NII-Electronic Library Service

The Society of Materials Science, Japan

ここで，前報で得られた6061-Oのひずみ速度$1\times10^3s^{-1}$から$3\times10^4s^{-1}$における変形応力をFig. 3に示す．ひずみ速度域は広範囲に及ぶため，各ひずみ速度域に応じて試験片の大きさと出力棒の径をそれぞれ変えてある．図中に示される●印はマルエージング鋼製の出力棒（ϕ20mm）を用い，直径および長さが5.0mmの試験片を圧縮変形させた時の結果である．また，○印はタングステン製の出力棒（ϕ4mm）で，直径および長さがそれぞれ2.0mmおよび1.5mmの試験片を用いて得られた結果である．さらに，◆印は直径3.0mmのタングステン製出力棒と直径および長さが1.0mmの試験片に対する結果である．図中に実線で示される応力ーひずみ速度曲線はFig. 4に示す前報の速度急変実験の結果を基に描かれたものである．一般に，変形応力には速度に対する瞬間応答成分と履歴成分が含まれるが，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，実線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．また，図中の応力ーひずみ速度曲線は，ひずみ速度$5\times10^3s^{-1}$以下では緩い勾配の直線で，それ以上では急な上昇を示す．まず，このような変化を式(9)'の熱活性化流動から式(10)'の粘性流動への遷移と仮定してみる．実験結果は多結晶体の試験片の圧縮応力σと圧縮ひずみ速度度$\dot{\varepsilon}$の関係であるが，式(8)'は単結晶の分解せん断応力τ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)'の中の諸量の内，未知のものは，林転位間隔L，運動転位密度ρ_dおよび応力の非熱的成分τ_aである．他の諸量については信頼できる数値あるいは関係式が得られている．活性化体積v^*と林転位間隔Lはσ_tと$\log\dot{\varepsilon}$の関係の直線部分の勾配から式(9)'を用いて求め，運動転位密度ρ_dはσ_tの急上昇開始点を粘性流動域への移行点として求める．τ_aは応力の非熱的成分の影響を含まない計算曲線と実測値を比較して求めるが，ここでの6061-Oならびに6061-T6の場合は，既に得られている純アルミニウム[8]の応力ーひずみ線図との比較によって求めた．上記のように求めた6061-Oのそれぞれの値は，$v^*=5.49\times10^{-27}m^3$，$L=6.71\times10^{-8}m$，$\rho_d=5.51\times10^{11}m^{-2}$，$\tau_a=47.7MPa$である．活性化エネルギー$E_c$はAshbyら[15]による$Gb^3/5$を用いた．摩擦係数$B$はHikataら[16]の測定値$4.88\times10^{-6}Pa\cdot s$を採用した．このように求めた応力ーひずみ速度曲線をFig. 5に鎖線で示す．Fig. 5に鎖線で示される計算値と実測値を比較すると，実測値の高ひずみ速度域での立ち上がりは計算値に比べて緩い．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，運動転位密度は応力の上昇とともに増加していくことが考えられる．そこで，式(8)'の運動転位密度を応力の関数として取り扱うことも可能と考える．本実験では，運動転位密度を分解せん断応力1MPa当たり$3.81\times10^{10}m^{-2}$増加させることによって，式(8)'から得られる変形応力の急な立ち上がりを実線で

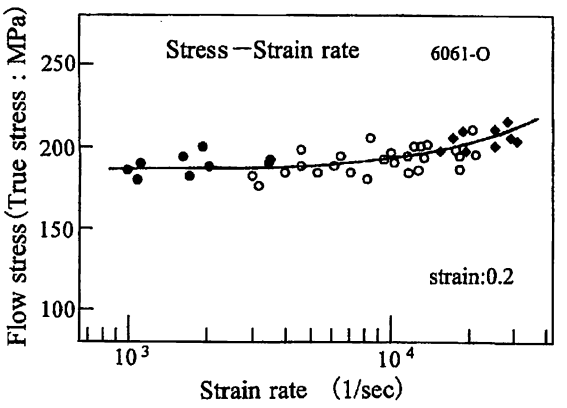


Fig. 3. Strain rate dependence of flow stress of 6061-O determined from strain rate reduction tests at strain of 0.2 in the strain rate range from $1\times10^3s^{-1}$ to $3\times10^4s^{-1}$.

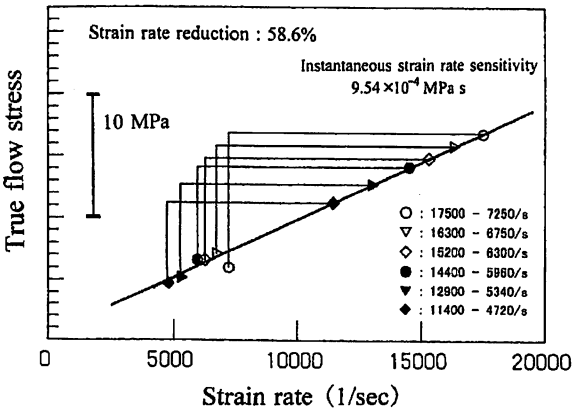


Fig. 4. Flow stress drop and instantaneous strain rate sensitivity obtained from various strain rate reduction tests at strain rate ranging from about $1\times10^4s^{-1}$ to $2\times10^4s^{-1}$.

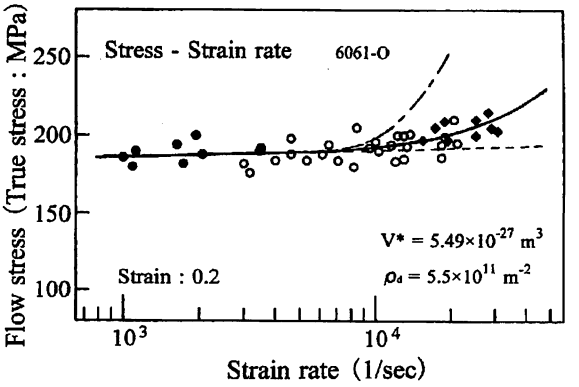


Fig. 5. Comparison of measured flow stress with the prediction determined from Eq.(8)', taking account of increase in ρ_d with increasing flow stress.

NII-Electronic Library Service

The Society of Materials Science, Japan

示すように実測値の緩やかな立ち上がりに近づけることができる．

4・2 6061-T6

6061-T6 の場合はひずみ速度およそ $1\times10^4\mathrm{s}^{-1}$ から $2\times10^4\mathrm{s}^{-1}$ の領域で行われた速度急変実験[12]においても顕著な変形応力のひずみ速度依存性はみられなかった．そこで，6061-T6 の変形機構を熱活性化過程で取り扱えるか否かを調べるために，ひずみ速度 $1\times10^3\mathrm{s}^{-1}$ から $2\times10^4\mathrm{s}^{-1}$ の領域で温度 $T=373\mathrm{K}$ および $T=473\mathrm{K}$ における高ひずみ速度実験を行った．得られた結果を式 (9)'を用いて求めた応力ーひずみ速度線図とともに Fig. 6 に示す．変形応力のひずみ速度依存性の大きさを表す活性化体積は 6061-O と同じ値を用いた．また，有効応力と応力の非熱的成分に対し，小川[11]の論文中に引用されたアルミニウムの温度による弾性定数の変化を考慮し，補正を加えた．このようにして得られた各温度における変形応力ーひずみ速度線図は高温域では実測値に比べ幾分低くはなっているが両者はほぼ対応している．以上の結果より，6061-T6 のひずみ速度 $1\times10^3\mathrm{s}^{-1}$ から $2\times10^4\mathrm{s}^{-1}$ における変形機構は運動転位と林転位との斬り合いで律速される熱活性化過程であると考えることができる．つまり，上記のひずみ速度域では転位の運動は粘性抵抗領域へ遷移するための速度には達していないものと考えられる．6061-T6 の転位の速度が同一ひずみ速度における 6061-O のそれに比べ低いのは，オロワンの式 (2)から明らかなように運動転位密度が高くなっているためと考える．なお，添加元素や析出物（GP ゾーン）が転位の移動を阻止し，その結果運動転位密度が減少するというのは考えにくい．なぜならば，運動転位密度が低下すれば転位の移動速度は高くなり，より低ひずみ速度域で律速機構の遷移つまり変形応力の急上昇が現れるからである．しかし，実験結果にはそのような傾向は見られない．そこで，Fig. 7 に式 (8)'を用いて求めた高ひずみ速度域における純アルミニウムの応力ーひずみ速度曲線を示す．これは，応力の非熱的成分 σ_a を 39MPa，摩擦係数 B を $4.88\times10^{-6}\mathrm{Pa\cdot s}$ そして活性化体積 v^* を $5.49\times10^{-27}\mathrm{m}^3$ とし，運動転位密度 ρ_d を $1.5\times10^{11}\mathrm{m}^{-2}$ から $1.5\times10^{13}\mathrm{m}^{-2}$ に変化させた場合である．運動転位密度の増加は変形応力の急上昇域いわゆる律速機構の遷移領域を高ひずみ速度側に移行させ，熱活性化流動域の応力を低下させる．運動転位密度の増加が応力の低下を招くというのは，転位の平均移動速度 v_d と転位に作用する有効応力 τ との関係を示す以下の式から明らかである．

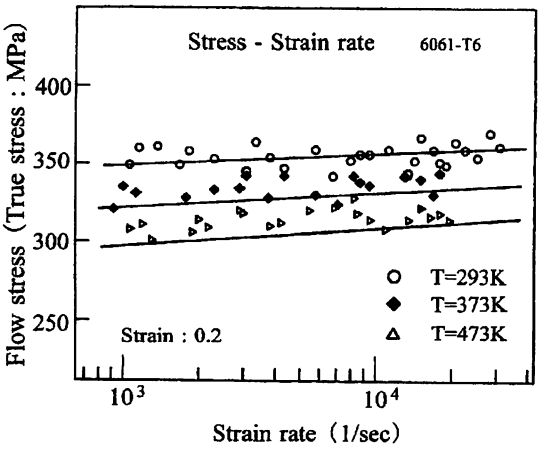


Fig. 6. Measured flow stress and strain rate dependence of flow stress of 6061-T6 at temperatures of 293, 373 and 473K in the strain rate range from about $1\times10^3\mathrm{s}^{-1}$ to $2\times10^4\mathrm{s}^{-1}$.

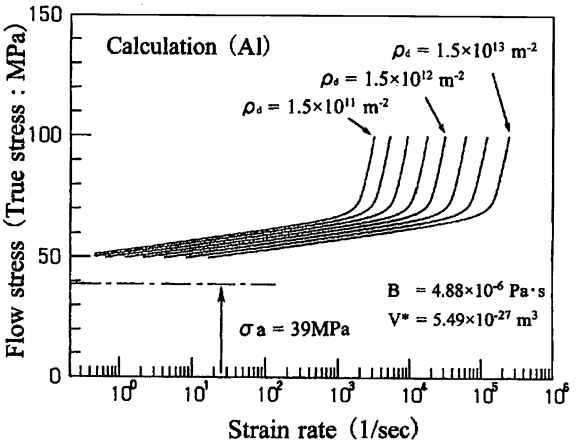


Fig. 7. Relation between strain rate at which steep increase in flow stress appears and mobile dislocation density.

$$\bar{v}_d=\left(\frac{\tau}{\tau_0}\right)^m \tag{14}$$

ここで，τ_0 は転位速度 $1\mathrm{cms}^{-1}$ を与えるせん断応力，m は転位速度の応力依存性を表すパラメーターである．また，図に示されるように律速機構が遷移する応力は一定であることから，転位が粘性抵抗領域へ遷移する速度は運動転位密度の大きさにかかわらず一定であることもわかる．

4・3 広範囲ひずみ速度域における変形応力

Fig. 8 に，純アルミニウム，6061-O そして 6061-T6 の準静的ひずみ速度 $10^{-3}\mathrm{s}^{-1}$ から高ひずみ速度およそ $3\times10^4\mathrm{s}^{-1}$ にかけての変形応力とひずみ速度の関係を示す．実線で示される応力ーひずみ速度曲線は式 (8)'を用いて求めた計算値である．応力の非熱的成分 σ_a は純アルミニウムが 39MPa，6061-O が 148MPa そして 6061-T6 が 317MPa である．活性化体積は三者とも一定値 $v^*=5.49\times10^{-27}\mathrm{m}^3\,(235\boldsymbol{b}^3)$ を用い，運動転位密度は純アルミニウムが $1.53\times10^{11}\mathrm{m}^{-2}$ であり，6061-O が $5.51\times10^{11}\mathrm{m}^{-2}$ である．6061-T6 の律速機構の遷移領域は明らかでないが，ここでは，ひずみ速度 $2\times10^4\mathrm{s}^{-1}\sim3\times10^4\mathrm{s}^{-1}$ 程度で変形応力の急上昇が生じると仮定し，運動転位密度を $4.51\times10^{12}\mathrm{m}^{-2}$ とした．図中の破線はこのようにして求めた変形応力ーひずみ速度曲線である．6061-O ならびに 6061-T6 の準静的領域では実測値の方が計算値より応力レベルは高く，また変形応力のひずみ速度依存性はほとんどみられないが，それ以上の高ひずみ速度域にかけては計算値と良い一致を示している．また，三者の活性化体積が同

NII-Electronic Library Service

The Society of Materials Science, Japan

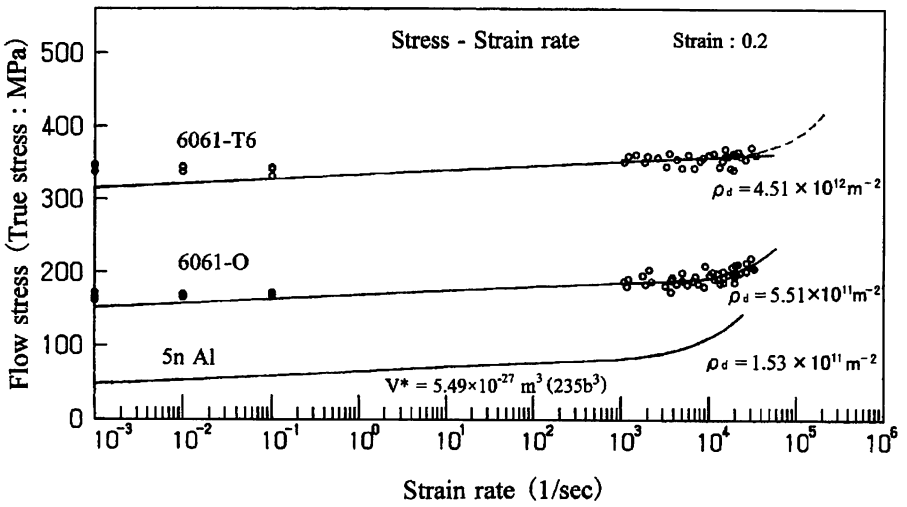


Fig. 8. Relation of mobile dislocation density to steep increase in flow atress at high strain rates for 6061-O, 6061-T6 and 5n Al, respectively.

じ事から，合金元素は変形応力のひずみ速度依存性には本質的な影響を与えないと思われる．

以上より，運動転位密度の増加は律速機構の遷移領域（変形応力の急上昇域）を高ひずみ速度域側に移行させることは明らかであり，6061-T6の運動転位密度は少なくとも $\rho_d = 4.51 \times 10^{12} m^{-2}$ 程度以上に増加している可能性がある．

5 結　　言

6061-Oならびに6061-T6の高ひずみ速度域における変形応力のひずみ速度依存性について，既に得られている純アルミニウムに関する知見ならびに転位の動力学モデルを用いて考察し，以下の結論を得た．

(1) 6061-Oの高ひずみ速度域における変形応力の急上昇は転位の運動に対する粘性抵抗の速度依存性によって表すことができる．

(2) 運動転位密度の増加は転位の平均移動速度を低下させ，変形応力が急上昇するひずみ速度域すなわち運動転位の律速機構の遷移領域を高ひずみ速度側に移行させる．

(3) 6061-T6の変形応力はひずみ速度 $2 \times 10^4 s^{-1}$ 以上の領域で急上昇する可能性がある．

参 考 文 献

1) J. D. Campbell, Mat. Sci. Eng., **12**, 3 (1973).
2) U. S. Lindholm, Inst. Phys. Conf. Ser., No.21, 3 (1974).
3) W. Tong and R. J. Clifton, J. Mech. Phys. Solids, **40**, 1251 (1992).
4) A. R. Dowling, J. Harding and J. D. Campbell, J. Inst. Metals, **98**, 215 (1970).
5) W. G. Ferguson, A. Kumar and J. E.Dorn, J. Appl. Phys., **38**, 1863 (1967).
6) P. S. Follansbee and U. F. Kocks, Acta Metallurgica, **36-1**, 81 (1988).
7) K. Sakino and J. Shioiri, J. de Phys., **IV**, C3-35 (1991).
8) K. Sakino, J. de Phys., **1**, Pr 9-57 (2000).
9) 例えば，D. L. Holt, S. G. Babcock, S. J. Green and C. J. Maiden, Trans. ASM, **60**, 152 (1967).
10) S. Yadav, D. R. Chichili and K. T. ramesh, Acta Metall. Mat., **43**, 4453 (1995).
11) 小川欽也，軽金属，**51**，175 (2001).
12) 崎野清憲，遠藤　肇，材料，投稿中．
13) J. Shioiri and K. Satoh, Inst. Phys. Conf. Ser., No.70, 89 (1984).
14) 鈴木　平，"転位のダイナミックスと塑性"，p.28 (1985) 裳華房．
15) M. F. Ashby and H. J. Frost, Constitutive Equations in Plasticity, (A. S. Argon Ed.), MIT Press, 117 (1975).
16) A. Hikata, R. A. Johnson and C. Elbaum, Phys. Rev. B2, 4856 (1970).

NII-Electronic Library Service