

衝撃圧縮ならびに衝撃引張り試験機を用いた アルミニウム合金の広いひずみ速度域におけ る変形応力のひずみ速度依存性

KANO, Ryosuke / 狩野, 凌佑

(出版者 / Publisher)

法政大学大学院理工学・工学研究科

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学大学院紀要. 理工学・工学研究科編

(巻 / Volume)

58

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

7

(発行年 / Year)

2017-03-31

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00014109>

衝撃圧縮ならびに衝撃引張り試験機を用いた アルミニウム合金の広いひずみ速度域における 変形応力のひずみ速度依存性

Strain Rate Dependence of the Flow Stress of Aluminum Alloys in Wide Strain Rate range
using impact compression and tension testing machines

狩野凌佑

Ryosuke Kano

指導教員 崎野清憲

法政大学大学院理工学研究科機械工学専攻修士課程

It is important to study the strain rate dependence of the flow stress in the wide strain rate range since a processing rate which a recent progress in technology brings about has been very high. The strain rate dependence in FCC metals is known to become large as the strain rate rises. FCC metals increase dramatically when the strain rate exceeds about 5×10^3 /sec. In order to clarify this mechanism, high strain rate tests are performed with Aluminum alloys A1050 and A1070 which are FCC metals. This study used 2 types of the high strain rate machines. First, a split Hopkinson pressure bar system is used for A1070 in the strain rate range $\dot{\epsilon} = 6 \times 10^3 \sim 2 \times 10^4$ /sec. Second, the split Hopkinson tension bar system is used for A1050 at the strain rate $\dot{\epsilon} = 1 \times 10^3$ /sec. Both of tests were experimented at $T=203, 293, 373, 473$ K. This study showed that strain rate dependence of the flow stress was attributed to a transition in a rate controlling mechanism of a dislocation motion from a thermal activation process to a phonon drag.

Key words: strain rate dependence, FCC metals, thermal activation process, phonon drag

1. 緒論

面心立方金属の変形応力はひずみ速度の増加に伴い、大きくなることが知られている。変形応力は低ひずみ速度側から高ひずみ速度側にかけて緩やかな上昇を示すが、高ひずみ速度域 5×10^3 /s 付近において急上昇することが報告されている。しかし、その変形機構は未だ十分に解明されていない。

現在、モノの切削や塑性加工は非常に高速化され

ているため、高ひずみ速度域における材料の変形挙動を知ることが必要である。

したがって、本研究では面心立方金属であるアルミニウム合金(A1050, A1070)を対象に低ひずみ速度域から高ひずみ速度域にかけての圧縮試験、引張試験を行った。引張試験は大きなひずみ速度が出ないため低速側から高速側にかけての変形応力のひずみ速度依存性は圧縮試験、引張試験の結果より評価

した。また、高速側で見られる変形応力の急上昇は非常に大きなひずみ速度を出すことのできる圧縮試験の結果より評価した。二つの試験より、高ひずみ速度域で見られる変形応力のひずみ速度依存性について、簡単な転位の運動モデルを用いて考察した。

2. 実験

2.1 試験片

圧縮試験には面心立方構造である工業用純アルミニウム(A1070BD-H14)を用いた。Fig.1 に示すように、直径および長さがそれぞれ 1.5mm, 2.0mm の円柱形である。引張試験には、圧縮試験同様に面心立方構造である純アルミニウム(A1050P H24)を用いた。Fig.2 に示すように、試験片長さ 40mm, 幅, 16mm, 厚さ 1mm, 標点間距離 6mm の薄板である。

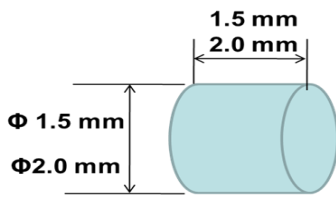


Fig.1 Specimen Shape of A1070

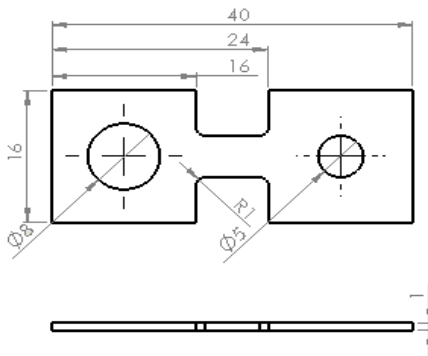


Fig.2 Specimen Shape of A1050

Table1 に A1070 の化学成分, Table2 に A1050 の化学成分を示す。

Table 1 Chemical composition of A1070(mass%)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
0.20	0.25	0.04	0.03	0.03	—	0.04	0.03	99.7

Table 2 Chemical composition of A1050(mass%)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
0.25	0.40	0.05	0.05	0.05	—	0.05	0.03	99.5

2.2 実験装置および実験方法

本研究では低ひずみ速度域の測定はインストロン型試験機($\dot{\epsilon}=10^{-3}\sim 10^{-1}/s$)を使用した。次に、高ひずみ速度域の測定は、圧縮型ホプキンソン棒装置($\dot{\epsilon}=6\times 10^3\sim 2\times 10^4/s$)と引張型ホプキンソン棒装置($\dot{\epsilon}=1\times 10^4/s$)²⁾を使用した。また引張型ホプキンソン棒装置は圧縮型と両者の結果を比較するために今回試作した。試験温度は 203K, 293K, 373K, 473K である。高温域では耐火レンガでできた小型の電気炉, 低温域ではドライアイスとエタノールを用いた。

2.2.1 圧縮型ホプキンソン棒装置

Fig.3 に圧縮型ホプキンソン棒装置の概略図を示す。打撃棒, 入力棒, 出力棒は降伏点の高い直径 10mm のマルエージングスチールを用いた。入・出力棒の長さは 2000mm である。打撃棒が入力棒に衝突することによって入力棒中に生じる入射波 ϵ_I ならびに入力棒の試験片端面で生じる反射波 ϵ_R , 試験片の変形応力によって出力棒に生じる出力波 ϵ_T は 2本の棒に貼られたそれぞれのひずみゲージで測定される。出力波 ϵ_T は非常に小さな波のため, 出力棒には感度の高い半導体ひずみゲージを使用した。測定された波形を Fig.4 に示す

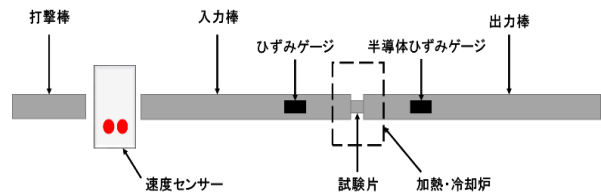


Fig.3 Sprit Hopkinson pressure bar system for compression

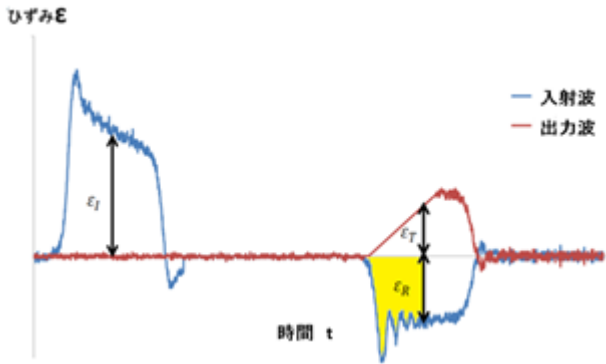


Fig.4 Typical shape of inertial, transmitted and reflected pulses measured at each strain gage.

2.2.2 引張型ホプキンソン棒装置

Fig.5 に引張型ホプキンソン棒装置の概略図を示す。打撃棒，入力棒，出力棒は SUS304 を用いた。入力棒の直径は 16mm，長さは 1700mm であり，出力棒の直径は 12mm，長さは 2000mm である。打撃棒は外径が 25.4mm，内径は 19.6mm，長さ 600mm の中空管を使用した。打撃棒が，入力棒の端面に取り付けられたヨークに衝突することで試験片を引張り，試験片の変形応力は出力棒において出力波 ϵ_T として半導体ひずみゲージで測定される。測定された波形を Fig.6 に示す。

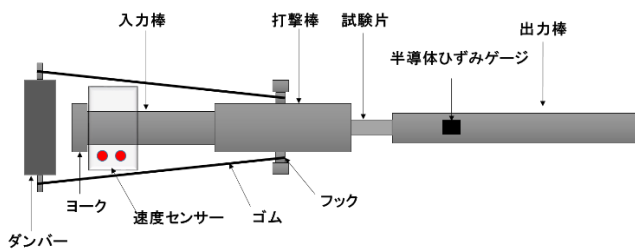


Fig.5 Sprit Hopkinson pressure bar system for tension

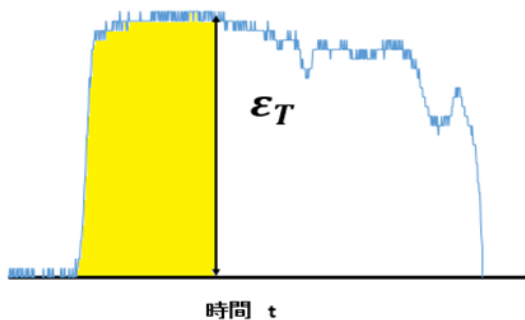


Fig.6 Transmitted pulse with time

3. データ解析

圧縮・引張試験で得られたそれぞれの波形から，試験片のひずみ ϵ_S ，ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_S$ ，公称応力 σ_S ，真応力 σ_T は次式を用いて求めることができる。³⁾

$$\epsilon_S = \frac{C_0}{L} \int_0^t (\epsilon_I - \epsilon_R - \epsilon_T) dt \quad (1)$$

$$\dot{\epsilon}_S = \frac{C_0}{L} (\epsilon_I - \epsilon_R - \epsilon_T) \quad (2)$$

$$\sigma_S = \frac{EA}{2A_S} (\epsilon_I - \epsilon_R - \epsilon_T) \quad (3)$$

$$\sigma_T = \sigma_S (1 \pm \epsilon_S) \quad (4)$$

ここで， C_0 ， A ， E は棒の弾性伝播速度，断面積および縦弾性係数を示し A_S ， L はそれぞれ試験片の断面積，ならびに長さである。

4. 結果および考察

4.1 圧縮試験結果

$T=293K$ におけるひずみ速度 $\dot{\epsilon} = 6 \times 10^3/s \sim 2 \times 10^4/s$ の領域で圧縮試験を行った際に得られた真応力-ひずみ線図を Fig.7 に示す。ひずみ速度が大きくなるにつれて，変形応力が上昇するため変形応力のひずみ速度依存性が顕著に表れていることが分かる。次に，Fig.8 にひずみ速度 $\dot{\epsilon} = 1 \times 10^4/s$ における各温度別の真応力-ひずみ線図を示す。低温域では変形応力が大きくなり，高温域では温度の上昇に伴い変形応力が小さくなっている。

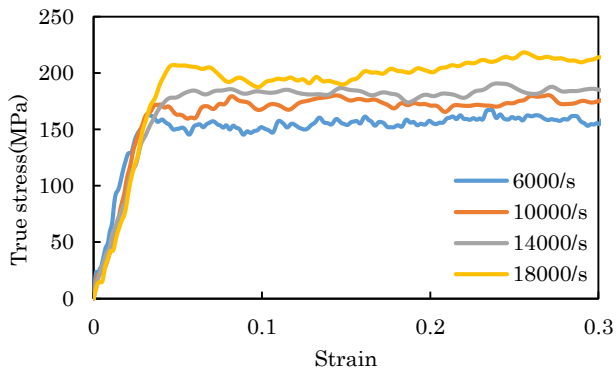


Fig. 7 Stress-strain curves at high strain rates (T=293K, compression)

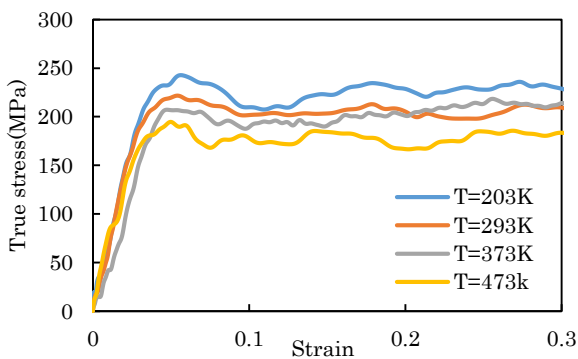


Fig. 8 Stress-strain curves at each temperature ($\epsilon = 1 \times 10^4/s$, compression)

Fig. 9 に準静的試験から得られた低ひずみ速度域 ($\epsilon = 10^{-3} \sim 10^{-2}/s$) の結果を含めたひずみ量 0.1 における変形応力と広範囲ひずみ速度の関係を示す。各温度において低速側から高速側にかけては変形応力が直線的に大きくなっていることが分かる。高速域ではおよそひずみ速度 $\epsilon = 5 \times 10^3/s$ 付近で変形応力の急激な上昇が見られる。

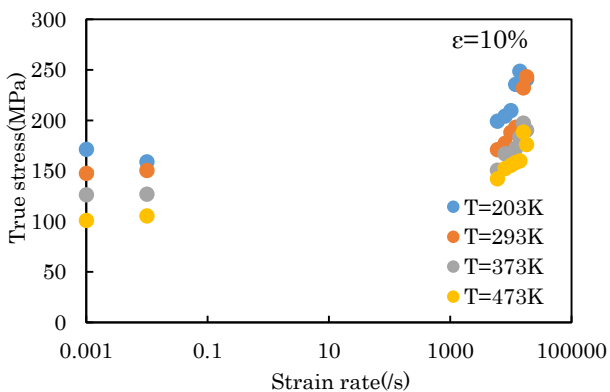


Fig. 9 Relation between stress and strain rate at strain of 0.1 in the wide strain rate ranges (compression)

4.2 引張試験結果

Fig. 10 に T=293K においてひずみ速度 $\epsilon = 10^{-3} \sim 1 \times 10^3/s$ の領域で引張試験を行った際に得られた真応力-ひずみ線図を示す。ひずみ速度が大きくなるにつれ引張り強さが上昇している。また変形応力のひずみ速度依存性も顕著である。Fig. 11 にひずみ速度 $\epsilon = 1 \times 10^3/s$ での温度別の真応力-ひずみ線図を示す。温度によって変形応力に差が生じることが明らかである。Fig. 12 には降伏点での変形応力とひずみ速度の関係を示した。ひずみ速度が大きくなるにつれて変形応力の直線的な上昇がうかがえる。また、高温域では傾きが大きいことから変形応力のひずみ速度依存性が大きくなっている。

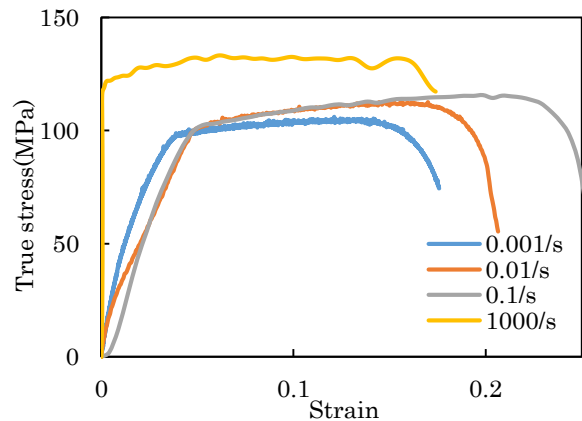


Fig. 10 Stress-strain curves at each strain rates (tension)

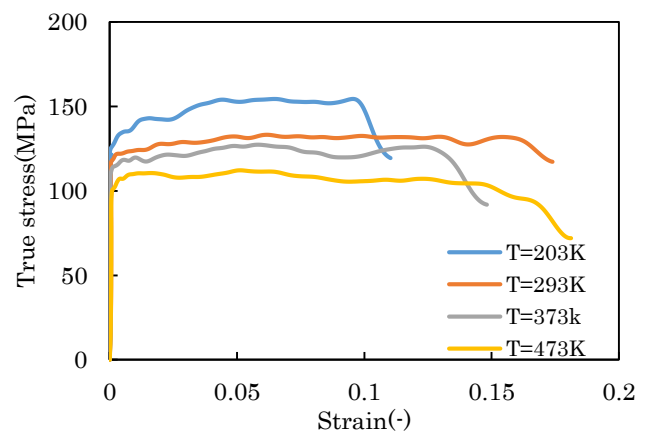


Fig. 11 Stress-strain curves at each temperature ($\epsilon = 1 \times 10^3/s$, tension)

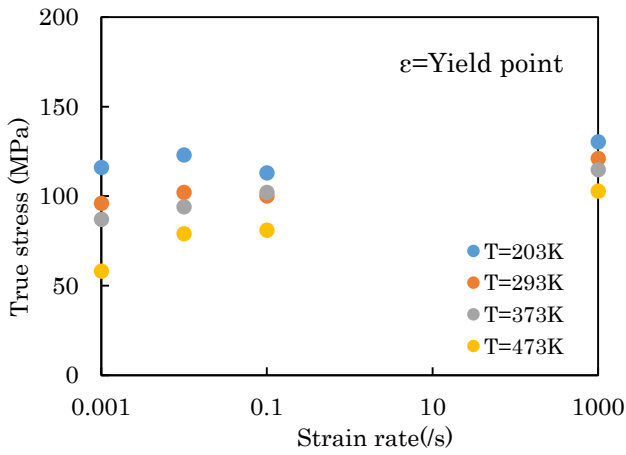


Fig.12 Relation between stress and strain rate at yield point in the wide strain rate range(tension)

4.3 転位モデルを用いた考察

Fig9, Fig.12 より高ひずみ速度域における変形機構は低速側と異なるものであると考えられる。したがって、以下の考察を行った。⁴⁾

一般に、面心立方金属においては、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。⁵⁾一方で、外因抵抗としては、すべり面に交差する転位すなわち林転位が考えられる。したがって、すべり面上の転位は林転位を切る時の熱活性化過程と、林転位間を通過するときの粘性抵抗に律速されて進む。その機構を Fig.13 に簡単な転位の動力学モデルとして示す。

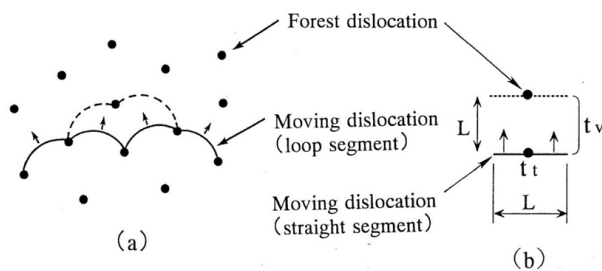


Fig.13 Kinetic model of dislocation segment motion. (a) Loop segment motion (b) Straight segment motion

林転位を切って進む運動転位ループの運動を長さ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う。Lは林転位間の平均距離である。転位の平

均速度 V_d は林転位との切り合いの待ち時間 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

$$V_d = L / (t_t + t_v) \quad (5)$$

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

$$\dot{\gamma} = \rho_d b V_d \quad (6)$$

と表される。この時 ρ_d : 運動転位密度, b : バーガー スペクトルである。したがって式(5)は次式のようになる。

$$\dot{\gamma} = \rho_d b L / (t_t + t_v) \quad (7)$$

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 は次式の通り。

$$t_t = v^{-1} \exp[E(\tau)/kT] \quad (8)$$

この時、 v : デバイの振動数, $E(\tau)$: 切り合いの見かけの活性化エネルギー, τ : 転位に働く有効せん断応力, k : ボルツマン乗数, T : 絶対温度である。ここで見かけの活性化エネルギー $E(\tau)$ は次式の形で表される。

$$E_c(\tau) = E_c - \tau V^* \quad (9)$$

ここで、 E_c : 切り合いの真の活性化エネルギー, V^* : 活性化体積 $\cong Lb^2$ である。次に、粘性抵抗に律速されて転位が運動するとき、応力 τ と転位速度 V_d との間には次のような線形関係がある。

$$\tau b = B V_d \quad (10)$$

B は摩擦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。⁵⁾

運動転位の林転位間の通過時間 t_v は式(10)より

$$t_v = BL / \tau b \quad (11)$$

となり式(6)は式(8), (9), (11)から

$$\dot{\gamma} = \rho_d b L / \left\{ v^{-1} \exp[E_c - \tau V^* / kT] + \frac{BL}{\tau b} \right\} \quad (12)$$

と表すことができる。低ひずみ速度域の時は $t_t \gg t_v$ であり、式(12)は近似的に

$$\dot{\gamma} \approx \rho_d b L v \exp[-(E_c - \tau V^*) / kT] \quad (13)$$

高ひずみ速度域の時は $t_t \ll t_v$ であり、式(12)は近似的に

$$\dot{\gamma} \approx \rho_d b L \tau / B \quad (14)$$

となる。なお、実測値と比較の際はせん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ を垂直ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ に変換、さらに応力の非熱的成分 σ_a を考慮した。

ここで、計算に用いた値は $\rho_d = 5.51 \times 10^8 \text{m}^{-2}$, $L = 3.0 \times 10^{-8} \text{m}$, $b = 2.86 \times 10^{-10} \text{m}$, $E_c = Gb^3 / 5^6$ とした。摩擦係数 B は Vreeland ら ⁷⁾ の測定値より $B = 2.5 \times 10^{-5} \text{Pa} \cdot \text{s}$ を用いた。また応力の非熱的成分 σ_a は実測値と合うように A1070 の圧縮試験では $\sigma_a = 130 \text{MPa}$, A1050 の引張試験では $\sigma_a = 90 \text{MPa}$ とした。Fig.14, Fig.15 に圧縮試験, 引張試験での低ひずみ速度域から高ひずみ速度域にかけての実験から得られた実測値と熱活性化支配を考慮した計算値との関係を示す。圧縮・引張試験から得られた実測値は計算値とほぼ良好な一致を示している。したがって、低速側から高速側にかけての変形応力のひずみ速度依存性は転位が熱運動の助けを借りて、転位同士を切り合う熱活性化支配を受けているためであると考えられる。Fig.16 には $T=293\text{K}$, ひずみ量 ($\epsilon = 10\%$) における圧縮・引張試験の実測値と計算値との比較を示す。両者ともに実測値, 計算値の良好な一致が見られる。グラフの傾きがほぼ同じであるため、試験を行った二つの試験片の活性化体積には大きな差がないと考えられる。したがって、両者の応力差は非熱的成分 (σ_a), つまり試験片の内部組織の

違いであると考えられる。

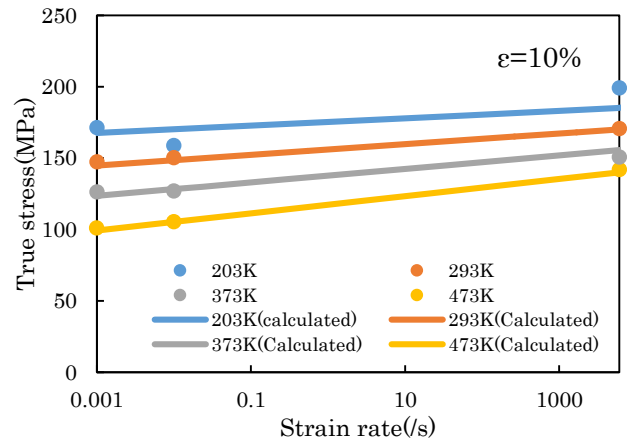


Fig.14 Comparison of measured results with calculated results for strain at 10%(compression)

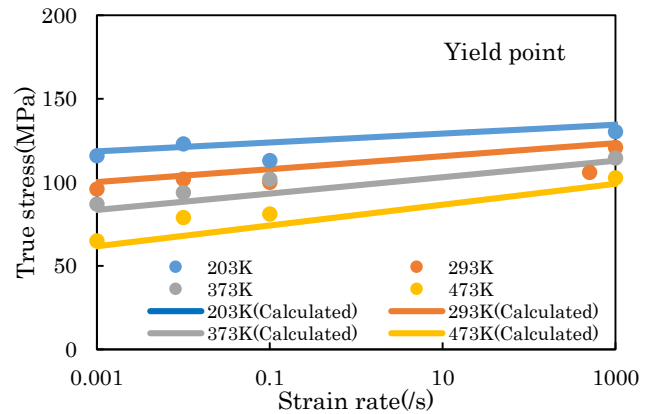


Fig.15 Comparison of measured results with calculated results for Yield point(tension)

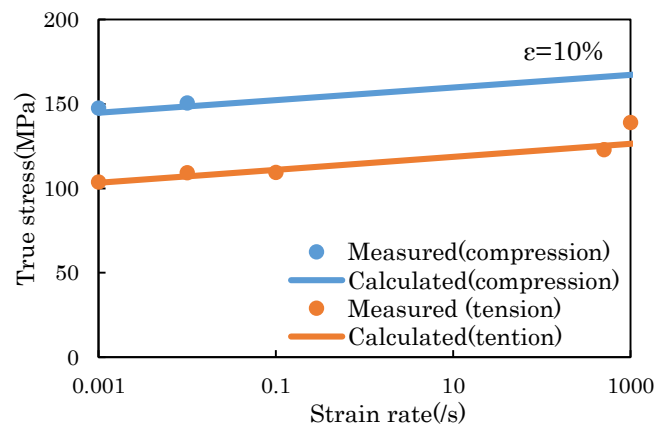


Fig.16 Comparison of measured results with calculated results for strain at 10%, T=293K

Fig.17 では、圧縮試験での広範囲ひずみ速度域における変形応力のひずみ速度依存性を評価するために実測値と熱活性化支配、粘性抵抗支配の二つを考慮した計算値との関係を示す。実測値と計算値の一致から高速側での変形応力の急上昇は運動転位に対する粘性抵抗を考慮することでうまく表すことができた。したがって、低速側から高速側にかけての変形応力のひずみ速度依存性は運動転位の律速機構が熱活性化過程支配によるものであり、高速側で見られる変形応力の急激な上昇は、運動転位の律速機構が粘性抵抗支配へと遷移するためであると考えられる。

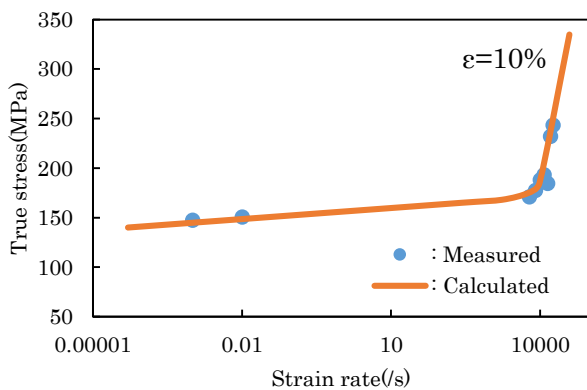


Fig.17 Comparison of measured results with calculated curves for A1070 in the wide strain rate range

謝辞

本研究において、ご多忙の中実験における助言また論文の指導を頂いた崎野清憲教授に心から謝意を示すものであります。また、共同で研究を行った崎野研究室学部4年の横田楓君にも心より感謝しております。これからの崎野研究室の更なる発展を心より願っております。

参考文献

- 1) Dowling A.R 2名, J.INST.METALS, Vol.97(1970)
- 2) 中島康博, 鋼材の引張特性に及ぼすひずみ速度および温度の影響(2011)
- 3) U.S. Lindholm, Dynamic Deformation of Metals, ASME, (1965), 42.
- 4) 狩野・崎野, アルミニウムも高ひずみ速度域にお

ける変形応力のひずみ速度依存性, 山梨講演会, (2016)

- 5) 鈴木平, 転位のダイナミクスと塑性, (1985), 28
- 6) M.F.Ashby and H.J.Frost (A.S.Argon Ed), MIT Press, (1975), 117.
- 7) Vreeland., 他 2名, J.Appl.Phys.40-2(1969), 833.