実用アルミニウム合金の高速変形特性†

東 健 司* 向 井 敏 司** 海 津 浩 一*
土 田 信*** 谷 村 真 治*

High Strain-Rate Deformation Characteristics in Commercial Aluminium Alloys

by

Kenji HIGASHI*, Toshiji MUKAI**, Kouichi KAIZU*
Shin TSUCHIDA*** and Shinji TANIMURA*

High strain-rate deformation characteristics in some commercial aluminium alloys, or 1050, 3003, 3004, 5182 and 7N01 alloys, have been investigated at high strain rate over 10^3 s^{-1} .

The main conclusions are summarized as follows ;

- (1) The strain-rate sensitivity of flow stress in all commercial aluminium alloys has been observed in the high strain rate range.
- (2) Three types in typical change of ductility with strain rate have been observed in the high strain rate range ; the first is that little change in ductility over strain rate as both 1050 and 7N01 alloys, the second is that ductility increases with strain rate as both 3003 and 3004 alloys, and the last is that ductility decreases with strain rate as 5182 alloy.
- (3) The alloys, that show larger ductility in the high strain rate range than that in the low strain rate range, are both 3003 and 3004 alloys, but both alloys of 5182 and 7N01 show lower ductility in the high strain rate range than in the low strain rate range, and 1050 alloy shows no change in ductility.
- (4) In commercial aluminium alloys, it is clear that one of the requirements to obtain larger ductility in the high strain rate range is an increasing value of strain rate sensitivity exponent m with strain.

Key words : High strain-rate deformation characteristics, Commercial aluminium alloys, Strain-rate sensitivity, Ductility

1 緒 言

金属あるいは合金の常温における変形応力は、 10^{-3} s^{-1} 程度の低ひずみ速度域では大きく変動しないが、 10^3 s^{-1} 以上の高ひずみ速度域では顕著に増加することが知られるようになってきた。^{1),2)} しかしながら、こうした高ひずみ速度域での延性に関する検討は、その実験の困難さ故ほとんど実施されていないのが実状である。高ひずみ速度における純アルミニウム³⁾および純銅⁴⁾の破断伸び値の増加が報告されている程度で、高ひずみ速度域での延性に関する統計的な研究はほとんど報告されていない。

本研究では、宇宙航空機用構造材料から一般構造材料まで幅広く利用されているアルミニウム合金を高速変形させ、そのときの合金の強度と延性に関する基礎的知験を得ることを目的とした。

2 実 験 方 法

2・1 試料の準備

供試材は、Table I に示す化学組成を有する5種類の実用アルミニウム合金（1050, 3003, 3004, 5182, 7N01）である。1050 は工業用純アルミニウム合金である。3000 系の両合金は Mn を少量添加することで加工性および耐食性を低下せずに強度を増加した合金で、主に建材や缶材として用いられる。5182 は優れた耐食性と溶接性を有し、自動車ボディシート材や缶蓋材に用いられる中強度合金である。7N01 合金は比較的強度が高く、溶接性も良いので、現在車両用構造材として用いられている。本実験では、各合金とも焼なまし材として用いた。焼なまし条件は、空気炉中で、650K, 2 hrs 焼なましし、その後空冷した。また、焼なまし温度までの昇温時間は 8 hrs である。

試験片は Fig. 1 に示すような平行部形状を持つ段付き丸棒引張試験片を用いた。この複雑な試験片形状は

† 原稿受理 平成 2 年 3 月 15 日 Received Mar. 15, 1990

* 正 会 員 大阪府立大学工学部 堺市百舌鳥梅町, Faculty of Engineering, University of Osaka Prefecture, Mozu-Umemachi, Sakai

** 学生会員 大阪府立大学大学院 堺市百舌鳥梅町, Graduate Student, University of Osaka Prefecture, Mozu-Umemachi, Sakai

*** 正 会 員 住友軽金属(株)技術研究所 名古屋港区千年, Technical Research Laboratories, Sumitomo Light Metals, Chitose, Minato-ku, Nagoya

Table I. Chemical composition of alloys.

Alloy	Element (wt%)								
	Zn	Mg	Cu	Mn	Cr	Zr	Ti	Fe	Si
1050								0.27	0.10
3003			0.15	1.20				0.61	0.27
3004		1.21	0.15	1.05				0.33	0.17
5182		4.52		0.35			0.03	0.25	0.10
7N01	4.50	1.71	0.15	0.35	0.16	0.15	0.05	0.21	0.12

Fig. 1. Shape and dimension of test specimen (mm).

後述する特殊アタッチメントを使用するために決定された。

2・2 高速引張試験機

高ひずみ速度域での引張試験は、ホプキンソン棒法を応用した試験機により行った。計測装置を含む試験機の概略を Fig. 2(a) に、また、特殊アタッチメントの外観および試験片をアタッチメントに装着した状態の模式図を Fig. 2(b) に示す。この方法により、圧縮力を引張力に変換することができ、 $1 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ 以上の高ひずみ速度域における高速引張試験が可能となる。また、 $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ での引張試験をインストロン万能試験機を用いて行い、低ひずみ速度域での機械的性質の参考データとした。本実験での試験温度はすべて 300K 一定とした。

3 試験結果

5 種類の実用アルミニウム合金の高ひずみ速度での公称応力-公称ひずみ線図を Fig. 3 に示す。ここでは代表例として、 $2 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ のひずみ速度で変形したときの応力-ひずみ曲線を示している。また、低ひずみ速度 ($1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$) での試験結果も同時に示している。両ひずみ速度における変形応力は合金により大きく異なっており、変形応力に及ぼす合金系の違いが明らかに観察される。また、各合金とも高ひずみ速度で変形させた場合の変形応力は、低ひずみ速度で変形させた場合より全ひずみ量に渡って大きくなっており、高ひずみ速度での変形応力の増大が認められる。各合金の両ひずみ速度における破断伸び値に差異が認められるが、応力-ひずみ曲線において最大応力が得られるひずみ量も異なっており、各合金とも均一伸び値に

及ぼすひずみ速度の影響が認められる。

Fig. 4 および Fig. 5 は、各合金の高ひずみ速度域での最大流動応力と均一伸び値の変化をひずみ速度に対して示した結果である。本実験での最大流動応力は、Fig. 3 より算出した真応力-真ひずみ曲線における最大応力を意味し、また、均一伸び値は最大公称応力が得られる真ひずみ量で評価した。

Fig. 4 の最大流動応力とひずみ速度の関係より、高ひずみ速度域での最大流動応力は低ひずみ速度より各

Fig. 2. A split Hopkinson pressure bar system with measuring system for high strain-rate deformation characteristics data (a) and a devised-specific attachment with setting up specimen (b).

Fig. 3. Typical nominal stress/nominal strain curves of tensile tests at both strain rates of $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ and $2 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ in some commercial aluminium alloys.

Fig. 4. Typical stress/strain rate curves in some commercial aluminium alloys.

合金とも大きな値を示す。また、高ひずみ速度域においても最大流動応力はひずみ速度が大きいほど増加している。通常、 $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 程度以下の低ひずみ速度域での流動応力はほとんど変動せず、応力のひずみ速度感受性はかなり低いことが一般的である。しかしながら、 $1 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ 以上の高ひずみ速度域では、ひずみ速度の増加にともない流動応力の急激な増加が観察されており、応力のひずみ速度感受性はかなり大きくなっている。ひずみ速度の増大とともに最大流動応力が増加するという基本的な傾向は各合金系とも同じである。しかし、高ひずみ速度域における各合金の最大流動応力の増大傾向の違いより、応力のひずみ速度感受性は各合金間においてやや異なるものと推測される。

高ひずみ速度域での均一伸び値は、顕著に低い伸び値を示す 7N01 を除いて各合金とも 0.2 ~ 0.3 範囲内

Fig. 5. Typical uniform strain/strain rate curves in some commercial aluminium alloys.

の値を示す。各合金の高ひずみ速度域での均一伸び値はひずみ速度に対して著しく異なる挙動、すなわちあまり変化しない (1050, 7N01)、低下する (5182)、増加する (3003, 3004) という三種類の変化を示す。最大流動応力のひずみ速度依存性が基本的に合金系の違いにあまり大きく依存しなかったのに対し、各合金の均一伸び値に及ぼすひずみ速度の影響は合金系によって著しく異なることが分かる。

低ひずみ速度で得られた均一伸び値と比較すると、1050 の高ひずみ速度域での均一伸び値はほとんど変化せず、延性のひずみ速度依存性を示さない。しかし、3003 および 3004 は高ひずみ速度ほど大きな均一伸び値を示す。5182 と 7N01 は、逆に高ひずみ速度域において均一伸び値の顕著な減少を示す。こうした高ひずみ速度域における各合金系の均一伸び値の変化は、合金のミクロ組織と変形条件との相互作用で決定されると推測されるが、変形間中のミクロ組織変化の観察結果はここでは触れない。しかしながら、均一伸び値のひずみ速度依存性より、本実験で用いた実用アルミニウム合金は高ひずみ速度での均一伸び値が低ひずみ速度より大きくなるグループ (3003, 3004)、あまり変化しないグループ (1050)、小さくなるグループ (5182, 7N01) の 3 種類に大別できるという新しい知見を得ることができた。

こうした合金系の違いの起因した低ひずみ速度と高ひずみ速度における均一伸び値の増減の理由は非常に興味ある問題である。しかし、この問題を明らかにするために多くのミクロ組織学的検討が必要であるから、本研究では高ひずみ速度域における各合金の均一伸び値のみについて検討する。

4 考 察

本実験で用いた各合金とも、高ひずみ速度域では大きな応力のひずみ速度感受性を示したが、その感受性は合金系の違いによってやや異なる傾向が認められた。

そこで、この応力のひずみ速度感受性に注目して、各合金の高ひずみ速度域での延性を変形の安定性条件より検討した。

変形の安定性条件には、多くのモデルが提案されている^{5)~8)}。本研究では、各合金における応力のひずみ速度感受性の差異に注目しているわけであるから、このひずみ速度感受性を考慮している安定性条件のひとつである Hart の条件⁷⁾を用いる。

Hart は変形の安定性条件を次のように定義している。すなわち、試験片の断面積の減少速度が、断面積の減少とともに減少するとき、試験片の長さ方向に沿って存在するわずかな断面積の不均一は消失する方向に変化し、その結果、変形は均一で安定なものになる。この安定性条件は次式で表される。

$$\frac{\delta \log \dot{A}}{\delta \log A} \geq 0 \quad (1)$$

ここで、 A は断面積、 $\dot{A}$ はその減少速度である。任意の変形径路において、任意の時間における増分 $d\sigma$, $d\varepsilon$, $d\dot{\varepsilon}$ の相互関係を、

$$d \log \sigma = \gamma d\varepsilon + m d \log \dot{\varepsilon} \quad (2)$$

とする。ここで、 m はひずみ速度感受性指数、 γ はひずみ硬化係数であり、以下に示すようなパラメータである。

$$m = \left(\frac{\partial \log \sigma}{\partial \log \dot{\varepsilon}} \right)_{\varepsilon}, \quad \gamma = \left(\frac{1}{\sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} \right)_{\dot{\varepsilon}} \quad (3)$$

荷重 $F = \sigma A$ は、試験片断面の任意の位置で常に一定であるから、

$$\delta F = A \delta \sigma + \sigma \delta A = 0 \quad (4)$$

の関係が成立する。これらより、最終的に次式が得られる。

$$0 = \frac{\delta A}{A} (1 - \gamma - m) + m \frac{\delta \dot{A}}{\dot{A}} \quad (5)$$

Fig. 6. A schematic explanation for the method to measure both values of γ and m .

$m > 0$ のとき、式(1)は、

$$\frac{\delta \log \dot{A}}{\delta \log A} = \frac{1 - \gamma - m}{m} \quad (6)$$

と書き換えることができる。Hart は、引張り変形の安定性条件として、式(6)より $(\gamma + m) \geq 1$ を導出した⁷⁾。しかしながら、この Hart の変形の安定性条件を材料の延性評価に適用する際、次の点に留意しなければならない。合金のミクロ組織は変形中何らかの形で変化すると考えられるから、 γ および m は変形初期の値から変形量とともに変化すると考えた方が自然である。すなわち、材料の延性、特に均一伸び値は変形の安定性条件が変形に伴い満足されなくなる変形量と考えることができる。そこで、 γ および m を変形量(ε)に依存する変数として、以下に示すような塑性不安定性パラメータ $I(\varepsilon)$ を定義する。

$$I(\varepsilon) = \frac{1 - \gamma - m}{m} \quad (7)$$

ここで、Hart の変形の安定性条件式(1)と式(7)より、 $I(\varepsilon) \leq 0$ を満足する m および γ を与えるひずみ速度域とひずみ量域で変形の安定性が少なくとも保証される。すなわち、 $I(\varepsilon)$ の変化を実験的に検討することでひずみ速度の影響による延性の増減を明確にすることができる。

ここで、実験結果から γ および m を導出する過程の概略を Fig. 6 に示す。図に示すように、真応力-真ひずみ曲線の任意のひずみ量における曲線勾配をそのときの真応力値で割ることにより γ を求めた。また、真応力-真ひずみ速度曲線の任意のひずみ速度における曲線勾配より m を求めた。まず、ひずみ量の増加にともなう各合金の m の変化を調べるため、任意のひずみ量における変形応力とひずみ速度の関係を検討した。その代表例として 1050 の場合の変化を Fig. 7 に示す。任意のひずみ量における変形応力のひずみ速度依存性はほぼ共通しているが、ひずみ量が増加するほど高ひずみ速度域での各線の傾き、すなわち m は

Fig. 7. The relationship between flow stress and strain rate at given true strain levels in 1050 aluminium alloy.

Fig. 8. The change of m value with strain in some commercial aluminium alloys at high strain rate of $3 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$.

Fig. 9. The change of γ value with strain in some commercial aluminium alloys at high strain rate of $3 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$.

減少する傾向が認められる。このような高ひずみ速度域でのひずみ量にともなう m の変動はすべての合金において観察された。高ひずみ速度で引張試験したときのひずみ量の増加にともなう各合金の m の変化を Fig. 8 に示す。実験精度を鑑み、ここでは高ひずみ速度域にわたっての平均値としての m を算出し、 $3 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ のひずみ速度を高ひずみ速度域の代表値とした。各合金の m はそれぞれ異なった挙動を示し、 m の最大値は異なるひずみ量においておのおの得られた。また、ひずみ量にともなう γ の変化を Fig. 9 に示す。各合金とも γ がひずみ量とともに低下することは共通であるが、7N01 のみは他の合金と異なり、 γ の急速な低下が特徴的である。

つぎに、これらの m および γ の値より算出した各合金の高ひずみ速度における $I(\epsilon)$ の値を Fig. 10 に示す。図中で $I(\epsilon) \leq 0$ を満たすひずみ領域では変形は安定であり、 $I(\epsilon) = 0$ となるひずみにおいて局部的不安定すなわちネッキングの顕著な成長が始まると考えられる。均一変形を局部的不安定が起こるまでの変形であると定義するならば、本研究における $I(\epsilon) = 0$ となるひずみ量を均一伸び値と考えることができる。そこで、 $I(\epsilon) = 0$ となるひずみ量 ϵ_0 と最大公称応力が得ら

Fig. 10. The change of $I(\epsilon)$ with strain in some commercial aluminium alloys at high strain rate of $3 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$.

Table II. The comparison between ϵ_0 and ϵ_U at high strain rate of $3 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ in some commercial aluminium alloys.

	1050	3003	3004	5182	7N01
ϵ_U	0.238	0.264	0.240	0.248	0.147
ϵ_0	0.247	0.282	0.256	0.261	0.153

れる真ひずみ量で評価した均一伸び値 ϵ_U (Fig. 5 参照) を各合金について整理した結果が Table II である。両者の値は比較的良好に一致しており、応力のひずみ速度感受性を有する材料の延性評価に塑性不安定性パラメータ $I(\epsilon)$ を用いることの妥当性を示唆している。

高ひずみ速度域においてひずみ速度の増加とともに均一伸び値の増大が観察された合金は 3003, 3004 であった。したがって、これらの合金のひずみ量にともなう γ と m の変化より、本実験で用いた実用アルミニウム合金において大きな均一伸び値が高ひずみ速度域で得られる条件のひとつは、より広範囲のひずみ領域にわたって加工硬化 (ひずみ量にともなう γ の緩やかな減少) し、かつひずみ増加にともない m が増大することであると考えられる。こうした γ と m のひずみ量にともなう変化によって、その両者の和が 1 より大きくなることが、より大きな均一伸び値を得るための条件であると思われる。

今後、高ひずみ速度域において、より高い延性を得るためには、こうした γ と m の組合せが得られるような、合金のミクロ組織制御や変形条件 (温度やひずみ速度) を決定すればよいと思われる。

5 結 論

5 種類の実用アルミニウム合金 (1050, 3003, 3004, 5182, 7N01) を高速引張試験し、次のような結論を得た。

- (1) 各合金の最大流動応力は 10^3 s^{-1} 以上の高ひずみ速度域で顕著なひずみ速度依存性を示した。
- (2) 高ひずみ速度域での均一伸び値は、ひずみ速度

に対してあまり変化しない (1050, 7N01), 低下する (5182), 増加する (3003, 3004) という三種類の変化を示した。

(3) 各合金は, 高ひずみ速度での均一伸び値が低ひずみ速度より大きくなるグループ (3003, 3004), あまり変化しないグループ (1050), 小さくなるグループ (5182, 7N01) の3種類に大別された。

(4) 本実験で用いた実用アルミニウム合金において, 高ひずみ速度域でひずみ量にともない均一伸び値が増大する条件のひとつは, ひずみ量にともなうひずみ速度感受性指数 m の増大であることが明らかになった。

(平成元年5月23日 日本材料学会第38期学術講演会にて講演)

参 考 文 献

1) T. Nicholas, "Impact Dynamics", ed. by J. A. Zukas, *et*

al., p. 277 (1982) JWS, New York

2) L. E. Malvern, "Mechanical Properties at high rates of strain 1984", ed. by J. Harding, p. 1 (1984) The Institute of Physics, London

3) K. Kawata *et al.*, "High Velocity Deformation of Solids", ed. by K. Kawata & J. Shioiri, p. 1 (1978) Springer Verlag, New York

4) G. Regazzoni and F. Montheillet, "Mechanical Properties at high rates of strain 1984", ed. by J. Harding, p. 63 (1984) The Institute of Physics, London

5) A. Considere, *Annales des Ponts et Chaussees*, **9**, 579 (1985).

6) C. Rossard, *Rev. Met.*, **63**, 225 (1966).

7) E. W. Hart, *Acta Met.*, **18**, 351 (1967).

8) J. D. Campbell, *J. Mech. Phys. Solids*, **15**, 359 (1967).

書 評

磁 性 流 体 入 門

神 山 新 一 (著)

(1989年, 産業図書(株)発行, A 5 判, 135ページ, 2300円)

磁性流体は1965年に NASA の宇宙開発技術の副産物として開発され, 外部環境(磁場)によってその材料特性を自由に制御できる新しい機能材料の一つとして, 流体力学, 電磁気学, 超微粉体工学, 物性工学, 制御工学などに関連する学際的分野で将来に向っての発展が期待されている。本書はこのような急激に脚光をあびている磁性流体を, これから勉強してみようと考えている人のための入門書であり, 次の6章で構成されている。

☆磁性流体の製法と分散安定性

☆磁性超微粒子の特性

☆磁性流体の種類と特性

☆磁性流体の磁場中での振舞い

☆磁性流体の熱力学

☆磁性流体の応用

磁性流体の性質については, その製造法から始まり, 種類, 特性などが紹介されるとともに, 磁場中での挙動, 熱力学的な特性が説明されているが, 材料物性の面から見ると, その磁性の原理についてもう少し深く述べられていると理解しやすいように思われる。磁性流体の応用に関する部分では, 磁性流体シール, 軸受, 研磨, ダンパーを始め, 各種センサー, 光エレクトロニクスなどへの活用が述べられており, これからメカトロニクス関連のデバイス開発を担当する技術者には大いに参考になりそうである。いずれにしても, この分野では数少ない入門書であり, 比較的わかりやすく書かれている。

(三重大学工学部 妹尾 允史)