延性金属の一樣ひずみに及ぼす降温プロセスの影響

上村 岳之*・大澤 泰明*

Journal of The Japan Institute of Light Metals, Vol. 63, No. 12 (2013), 439–445

© 2013 The Japan Institute of Light Metals

Effect of temperature descent process on uniform strain of ductile metals

Takayuki UEMURA* and Hiroaki OHSAWA*

An analysis on plastic instability theory together with some constitutive equations involving strain, strain rate and temperature leads to simple conclusion, which suggests an increase of uniform strain range by falling off temperature intentionally during the process. To evaluate the above prediction, the concept of temperature descent is provided and the usefulness of cooling down with the process temperature is shown by the comparison with constant temperature. Experiments were carried out in uniaxial tensile test, methods of cooling with using natural cooling and air blow cooling. It was observed that temperature descent during forming process causes a significant rise of the uniform strain. In the case of air blow cooling, significant increase of uniform strain was seen because temperature descent rate was larger than natural cooling. The result may be applied to any other metal, being independent of metal class, thus generalized concept seems to be reached to extension in uniform strain range of metals with poor formability.

(Received February 27, 2013 Accepted July 28, 2013)

Keywords: plastic instability, constitutive equation, uniform strain, temperature descent, high temperature deformation

1. 緒 言

アルミニウム、マグネシウム、チタン合金などの非鉄軽量金属に対する期待が医療福祉¹⁾、輸送機器関連分野²⁾を中心に高まっており、需要の増加や用途の拡大が顕著に認められる^{3),4)}。板材のプレス加工分野においてこれら金属板材は一般的に難加工性材料に分類され、鉄鋼材に比して成形性は確実に劣るものと認識されていて、マグネシウム合金薄板の箱型製品の例では薄板からのプレス加工によらず、生産効率を度外視して半凝固鑄造法が活用されている³⁾。

劣悪な成形性の要因は、それぞれの材料や合金に応じて様々であるが、結晶構造のすべり系、およびその数の大小に負うところが大きく、これらによって難加工性が端的に説明されている⁵⁾。高温では室温において休止していたすべり系が活性化してくるので、加工性を向上させる一般的な方策として加工温度を高く設定することが挙げられる⁵⁾。板材の深絞りや張出に属する加工では、一樣かつ定常な温度場が通常は前提とされる。周辺加熱深絞りでは、ブランクの周辺部は高温、中心部は低温を保つ非一樣な温度場が利用される。しかしながら、これら高温加工において加工温度場の一樣/非一樣あるいは定常/非定常に言及した詳細な実験研究は、質、量とも極めて限定されている。

本研究では、Zn–Al共析組成合金 (SPZ) およびAZ31マグネシウム合金を対象にして、変形中に試験体の周辺温度を意

識的に降下させること (降温プロセス) により安定な変形能が増大することを予測する解析結果⁶⁾を提示し、その上で引張試験における一樣ひずみが実際にこの手法により向上する⁷⁾ことを示す。本研究は、難加工性金属板材の安定な変形能を向上させる普遍的な方法として、降温プロセスの重要性と可能性を実験解析により明示することが目的である。

2. 一樣ひずみの解析予測

扱う材料は均質、等方で、高温に曝されている間に生じる再結晶などの金属組織変化は考慮せず弾性変形も無視する。ひずみ、ひずみ速度、温度を独立変数とし、流動応力をそれらの関数として (1)式タイプの構成方程式を考える。

$$\sigma = \sigma(\epsilon, \dot{\epsilon}, T) \quad (1)$$

おそらく、(2)式の構成式は (1)式のタイプの中で最もよく引用されるものであろう⁸⁾。

$$\sigma = K \dot{\epsilon}^m \epsilon^n \exp\left(\frac{A}{T}\right) \quad (2)$$

ここで、材料特性値 K は $\epsilon = \dot{\epsilon} = 1$ かつ $T = \infty$ のときの応力値であり、 m, n, A はおのおの塑性変形の流動応力に関するひずみ速度、ひずみ、温度依存性の定量化数値であり、次のように定義される。

*法政大学 理工学部 機械工学科 (〒184-8584 東京都小金井市梶野町3-7-2)。Department of Mechanical Engineering, Hosei University (3-7-2 Kajino-cho, Koganei-shi, Tokyo 184-8584). E-mail: takayuki.uemura.33@adm.hosei.ac.jp

$$m = \frac{\partial \ln \sigma}{\partial \ln \dot{\epsilon}}, \quad n = \frac{\partial \ln \sigma}{\partial \ln \epsilon}, \quad A = \frac{\partial \ln \sigma}{\partial (1/T)} \quad (3)$$

いずれも、偏微分に基づく定義式であり、常微分による定義とは物理的意味が異なることに注意する。一般的に材料特性値 K, m, n, A は、実験内で想定されるひずみ、ひずみ速度、温度のある範囲内で一定値として扱われる。

延性金属の引張試験における最高荷重点までの公称ひずみは一樣伸びと呼ばれ、その大きさは安定変形の尺度となる。本論文においては最高荷重点までのひずみを一樣ひずみと定義する。最高荷重点において次式が成立する。

$$\frac{d\sigma}{d\epsilon} = \sigma \quad (4)$$

(2)式と(4)式を組合せれば、一樣ひずみ ϵ_u は次式のように与えられる。

$$\epsilon_u = \frac{d \ln \sigma}{d \ln \epsilon} = n' + \bar{\gamma} m + A \delta \quad (5)$$

n' は応力-ひずみ線図上の見かけの加工硬化率であり、次式で定義される $\bar{\gamma}$ と δ はそれぞれ変形中のひずみ速度と温度のひずみに対する変化率を示す工程変数である。これらの工程変数は、意識的に実験中に変化させることのできるパラメータであって、材料定数とは異なる意味を有するものである。

$$\bar{\gamma} = \frac{d \ln \dot{\epsilon}}{d \ln \epsilon}, \quad \delta = \frac{d(1/T)}{d \ln \epsilon} \quad (6)$$

これからの議論では、これらの工程変数 $\bar{\gamma}$ と δ は(6)式に従って記述され、引張変形中に一定値として算定できるものとする。そうすると、(1)式は次式のように与えられることになる。

$$\sigma = \sigma(\epsilon, \dot{\epsilon}(\epsilon), T(\epsilon)) \quad (7)$$

(5)式は、(2)式に従う材料の一樣ひずみは、材料定数だけではなく、ひずみ速度と温度の変化率にも左右され、ひずみ速度を加速するほど、また変形中に温度を低下させるほど小さくなることを示唆している。通常、材料定数 A は正の値と考えられるからである。

(2)式を掛け算型と呼ぶなら、(8)式の構成方程式は足し算型であり、このタイプもごく一般的に用いられる形式である。

$$\sigma = K \left\{ \epsilon^n + m' \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right\} \exp \left(\frac{A}{T} \right) \quad (8)$$

(2)式中の4個の材料定数のうち n, A の定義は同一であるが、応力のひずみ速度依存性を表す m' は(9)式のように定義され、(3)式中の m とは異質である。さらに、 $\dot{\epsilon}_0$ は任意の初期ひずみ速度であり、 K は $\epsilon = \dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0 = 1$ かつ $T = \infty$ のときの応力値である。

$$m' = \frac{1}{K} \frac{\partial \sigma}{\partial \ln \dot{\epsilon}} \quad (9)$$

(2)式の不安定条件と(8)式の足し算型構成方程式の組合せでは、一樣ひずみは解析的には得られず、(10)式の代数方程

式の実数根として与えられる。

$$\epsilon^n - (n + A\delta)\epsilon^{n-1} + m'\gamma\epsilon - (1 + A\delta)m'\gamma = 0 \quad (10)$$

ここでも一樣ひずみの値は、材料定数 m', n, A に加えて、工程変数 γ および δ によって変動することになる。ただし、 γ と $\bar{\gamma}$ との間に次の関係がある。

$$\bar{\gamma} = \frac{d \ln \dot{\epsilon}}{d \ln \epsilon} = \frac{d\epsilon}{d \ln \epsilon} \frac{d \ln \dot{\epsilon}}{d\epsilon} = \epsilon \gamma \quad (11)$$

(2)式と(8)式から派生する議論では、応力、ひずみ、ひずみ速度、温度の4パラメータを前提にすることになるが、Zener-Hollomonのパラメータ Z ((12)式)を導入すれば、応力、ひずみ、 Z の3変数間の議論に簡略化できる。(12)式中の定数 B は(2)式の A と $A = Bm$ の関係があることに注意する。この場合、(13)式を(4)式と組合せれば、(14)式によって一樣ひずみが与えられることになる。

$$Z = \dot{\epsilon} \exp \left(\frac{B}{T} \right) \quad (A = Bm) \quad (12)$$

$$\sigma = K Z^m \epsilon^n \quad (13)$$

$$\epsilon_u = n + \bar{\zeta} m = \frac{n}{1 - \zeta m} \quad (14)$$

ただし、工程変数 $\bar{\zeta}$ と ζ の定義と関係は

$$\bar{\zeta} = \frac{d \ln Z}{d \ln \epsilon} = \frac{d\epsilon}{d \ln \epsilon} \frac{d \ln Z}{d\epsilon} = \epsilon \zeta \quad (15)$$

これまでの展開を要約すれば、流動応力のひずみ依存性に加えて、ひずみ速度と温度依存性をも考慮した構成方程式(2)、(8)、(13)式を不安定条件(4)式と組合せれば、いずれにせよ、材料定数だけでなく、ひずみ速度と温度の変化率が一樣ひずみに影響することが認識できる。変形中にひずみ速度を加速するほど、加工温度を低下させるほど一樣ひずみの大きさが増加することが予想される。一定温度下でのひずみ速度変化率と局部ひずみとの対応については、すでに研究成果^{9),10)}があるので、ここでは、温度の下降に伴う一樣ひずみの増減に関わる場合について検討を進める。

3. 自然冷却の場合

恒温槽内での引張試験は、通常、試験開始から破断時まで一定の温度を維持して実施される。試験開始時に温度維持の加熱制御を中止し、恒温槽の扉を開け放し、自然に試験片温度が低下する状態で引張試験を行えば、降温プロセスの一樣ひずみに及ぼす影響を検討することができると考えた。

3.1 供試板材

板厚 1 mm の SPZ を用いた。これは、超塑性合金の中でも 523 K 付近で超塑性が最も顕著に発現することが知られる材料で、超塑性加工の変形解析や組織解析のモデル材として用いられてきた。(3)式の m 値は、超塑性温度としては最も低い 523 K において、0.5 にも達することがある。この温度では、 n 値はほとんど計量できないほど小さく、公称応力-ひずみ線図はこれらの m, n 値を反映して、一樣ひずみの量が極端に小さく、最高荷重点以降の擬一樣変形が、緩やかな荷重低下を伴いながらだんだんと破断まで続く。さらに、流動応力の温度依存性の定量評価指数である A の値 ((3)式) も室温

Fig. 1 Geometries of sheet specimen (SPZ).

Fig. 2 Temperature descent at each part in natural cooling test.

と超塑性温度の間でそれなりに大きな値を示すものと考えられる。降温プロセスの実験では最適なモデル材として使用できる。試験片の幾何形状を Fig. 1 に示す。試験片中央部には直径 5 mm のひずみ測定用円格子をスタンプした。自然冷却における試験片中央部、上部チャックおよび炉内の温度変化をサーモグラフィにて計測した結果を Fig. 2 に示す。試験片中央部の温度変化は、試験片平行部にて最も温度が低下した点のデータを用いた。試験片中央部と上部チャックでは温度差が存在するが、試験片の破断がすべて中央部で観測されたことから、試験片中央部の測定値を温度データとして用いることとした。

3.2 自然冷却の実験結果

Fig. 3(a) には、423 K における公称応力-ひずみ線図、(b) には 423 K からの自然冷却における線図を示す。Fig. 3(a) では、クロスヘッドスピード (C.H.S.) の大きさに独立に大きな伸びが得られ、一様ひずみもほぼ変化していないことがわかる。一方、Fig. 3(b) の自然冷却では、総体的な全伸びの低下が認められ、加えて、一様ひずみは C.H.S. が小さくなるにつれて明瞭な右方向への移動が示されている。

自然冷却の場合、試験片中央部で計測した温度変化を (6) 式の δ で定量化した結果を Fig. 4 に示す。算出された δ の値は最も大きなものでも約 1.45×10^{-4} 、低いものでは 10^{-7} のオーダーの値を取り、非常に小さな値である。C.H.S. に対する傾向としては、各初期温度に対して、高速ほど δ の値が減少し、低速ほど値が大きいことがわかる。Fig. 5 は、 $\bar{\gamma}$ の値を一定温度の場合について計測した結果である。 $\bar{\gamma}$ 算出に用いるひずみ速度の値は、ひずみのデータを分割し、前後のひずみの増加量とそれに要した時間を基に算出した。ここで求まる値は、算出に使用した 2 つのひずみの中間のひずみに対す

Fig. 3 Nominal stress vs. nominal strain curves at (a) constant testing temperature 423 K and (b) gradually decreasing temperature from 423 K.

Fig. 4 Change of the δ values at natural furnace cooling test.

るひずみ速度となる。超塑性温度では、 $\bar{\gamma}=0$ となり、一定の C.H.S. に対して一定ひずみ速度試験になっていることがわかる。降温での値もほぼ同様な傾向を示した。

一定な各実験温度に対して、(16) 式を適用し、重回帰計算^{9),10)}によって材料定数 m, n を算出する。重回帰計算とは、 $\ln \sigma, \ln \dot{\epsilon}, \ln \bar{\gamma}$ を軸とする直交座標の空間で、データを平面として近似することをいう。同じ実験データを使用し (2) 式を想定して重回帰計算によって材料定数 m, n, A を算出する。温度データが加わることで独立変数が 3 つとなり可視化はできないが、重回帰計算することで重回帰平面が求まる。求まった平面の傾きから材料定数を求める。それぞれの計算により求めた材料定数を Fig. 6(a), (b) に示す。

Fig. 5 Change of the γ values.

Fig. 6 Regression values of the material constants in (a) Eq. 16 and (b) Eq. 2.

$$\sigma = K \dot{\epsilon}^m \epsilon^n \quad (16)$$

Fig. 6(b) の値は、ほぼ一様と見なせるひずみ範囲、Fig. 3(a), (b) に示したひずみ速度範囲、および373 Kから523 Kまでの温度範囲にわたる平均的な値と考えることができる。

Fig. 7(a) は、Fig. 6(b) の材料定数およびFig. 4, Fig. 5の δ と $\bar{\gamma}$ を使って (5) 式の ϵ_u を、恒温と自然冷却について比較したものである。Fig. 7(b) には実験により得られた一様ひずみを示したが、恒温と自然冷却についての変化が比較できる。一定温度においては、C.H.S.の増加に従って一様ひずみは増加する傾向を示し、降温過程においては、低速域における一様ひずみが大きく増加することが解析的にも実験的にも緻密に説明されていることがわかる。

4. 強制空気冷却の場合

引張試験中の温度低下を定量的に示す工程変数 δ は、引張

Fig. 7 Comparison of the uniform strain in isothermal test and natural furnace cooling test ((a) Calculated values. (b) Experimental results).

Fig. 8 Geometries of tube specimen (AZ31).

開始からの経過時間ではなく、ひずみに対して定義されているので、自然冷却において、炉内の試験片温度低下は時間に対して一定と思われるが、ひずみに対してはC.H.S.の大きさによって異なる値をとる。したがって、自然冷却では高速において δ が大きな値をとることができず、一様ひずみもそのことを反映して、高速において降温の効果が顕著に認められない。高速においても、降温の効果を明確に示すためには、強制的な降温過程を導入して検討することが必要となる。そこで、試験片に強制的に空気を当て、高い δ の値を得られる状況で試験を実施する。冷却方法に関しては、急激な温度低下を与えると同時に試験片内の温度のばらつきを最小限に抑えることが要求される。上記の問題を解決すべく、試験片にパイプを用い、内部へ空気を流入させることで冷却を行い降温プロセスの影響を調査した。

4.1 供試材

供試材には、AZ31合金を用いた。試験片形状をFig. 8に示す。試験片表面には、2.5 mm間隔でひずみ測定用にけがき線を入れた。Fig. 9に試験片内部の空気の流れを示す。コンプレッサからの空気がマンドレルの中心から流入し、試験片を冷却し、マンドレルの周囲に設けられた溝から外部へ流出する構造となっている。空気の流量は試験開始から破断に

Fig. 9 Air flow in the tube.

Fig. 10 Temperature descent at each part in air blow cooling test.

至るまで一定とし、その流量は約240 L/minである。複数回の測定により、温度低下速度の再現性は良好であることを確認した。強制空気冷却による試験片の温度変化を Fig. 10 に示す。温度測定は図中に示した3点を測定点とし、熱電対にて測定した。自然冷却に比べ急速な温度低下を得られた。さらに試験片内の温度のばらつきも抑えられている。 δ の算出には、試験片中央部で測定した温度データを用いた。冷却方法および試験材料が自然冷却の場合と異なるが、本研究では同一材料かつ同一の冷却方法における降温プロセスと一定温度の実験結果の比較に焦点を絞り、一様ひずみに与える影響について検証を行う。それぞれの冷却方法による実験結果を独立して評価することで材料特性値の差異による影響を議論することは不要となる。さらに異種材料での実験を通じて、降温プロセスが一様伸び増加の普遍的な手法であることを示す。

4.2 強制空気冷却の実験結果

Fig. 11(a) には、673 Kにおける公称応力-ひずみ線図、Fig. 11(b) には、673 Kからの強制空気冷却における線図を示す。Fig. 11(a) では、C.H.S.が大きくなるにつれ、一様ひずみが増加していることがわかる。これは、C.H.S.の増加に従い、ひずみ速度変化率が増加しているためである。一方、Fig. 11(b) の強制空気冷却では、自然冷却の場合と同様に全伸びの低下が認められるが、一様ひずみは、すべてのC.H.S.において定常試験の結果よりも増加していることがわかる。

δ のC.H.S.に対する変化を Fig. 12 に示す。自然冷却の場合と同様、高速では値が小さくなっている。ひずみ速度変化率については、一定温度での試験と同様にC.H.S.の増加に従い増加する傾向を示したが、一様ひずみに対して δ が与える影

Fig. 11 Nominal stress vs. nominal strain curves at (a) constant testing temperature 673 K and (b) gradually decreasing temperature from 673 K.

Fig. 12 Change of the δ values at air blow cooling test.

響の方が大きいため、低速での変形においてより大きなひずみ量が得られたと考えられる。

5. 材料定数の算定および理論値の算出

強制空気冷却試験により得られたデータを基に算出した各構成方程式における材料定数を Table 1 に示す。これらの値および工程変数を (5), (10) 式に代入することで掛け算型、足し算型の構成方程式による一様ひずみが理論値として求まる。どちらの構成方程式においても、 A は大きな値をとる。(5), (10) 式において、 A は δ と掛合せた形で記述されており、変形中の温度変化が一様ひずみに及ぼす影響の大きさがわかる。強制空気冷却の実験結果より得られた δ は、最も高いもので 1.92×10^{-4} (C.H.S.: 2 mm/min)、最も低いもの

Table 1 Material constants in each constitutive equation.

	n	m	A	K
Multiplication type	0.032	0.101	1233	16.86
	n	m'	A	K
Addition type	0.037	0.093	1047	8.96

Measurement range: ε : 0.05~0.09, $\dot{\varepsilon}$: 0.0524~0.1265 [s^{-1}],
 T : 373~673 [K], $\dot{\varepsilon}_0$: 0.00001 [s^{-1}].

Fig. 13 Comparison of the uniform strain in isothermal test and air blow cooling test ((a) Calculated values, (b) Experimental results).

では 1.81×10^{-5} (C.H.S.: 200 mm/min) と非常に小さい値であるが、 A と掛合せることで工程中の温度変化の影響は劇的に変わる。例えば、掛け算型構成方程式において、C.H.S. が 2 mm/min のとき、理論値の一樣ひずみに占める $A\delta$ 項の割合は、90% 近くになる。

Fig. 13(a) は、Table 1 に示した材料定数の値を用いて (5) 式および (10) 式から算出される一樣ひずみを恒温と強制空気冷却について比較したものである。(5) 式と (10) 式では、一樣ひずみの定義のされ方は異なっているが、同様の解析結果が得られていることがわかる。Fig. 13(b) は、実験により得られた一樣ひずみである。実験値と理論値ともにすべての C.H.S. において、降温過程の方が一樣ひずみが増加するという傾向は同様であるが、その値には乖離がみられ、理論値の方が大きく算出される結果となった。この原因として理論値の計算において δ を変数としてではなく、定数として扱っていることが考えられる。実際の試験においては、Fig. 10 からわかるように温度低下の割合は時間の経過とともに変化している。 δ は経過時間ではなく、ひずみに対して定義される

Fig. 14 Axial strain distribution (C.H.S.: 20 mm/min).

ものの、試験中に刻々と変化し、一定値ではない。C.H.S. が低いほど乖離が大きいことはこれが原因であると考えられる。また、材料定数の算出に用いるひずみ、ひずみ速度、温度のデータ範囲を変化させることで材料定数が変化することも要因として挙げられる。(2), (8) 式を用いた材料定数の算定法についての研究¹¹⁾ においても、データ範囲と材料定数の変化について言及されている。温度変化を伴う変形に対する材料定数の算定についての議論も実験と合せて検討していく必要がある。

Fig. 14 は C.H.S. が 20 mm/min のときのひずみ分布であり、定常試験と降温試験を比較したものである。図中には、一樣ひずみの実験値および (5), (10) 式による理論値を併せて記載した。定常試験では、理論値が実験値と近似している。一方、降温試験においては、理論値が実験値に対してかなり大きく算出されており、その値は試験片が局所変形に至っている領域であることは明らかである。

6. 結 言

これまで、ひずみ、ひずみ速度、温度を含む構成方程式を利用した鉄鋼材料の熱間での変形抵抗に関する研究⁸⁾ が行われてきた。しかし、これらは一樣ひずみについては議論されていない。本研究では、一樣ひずみの増加に関する温度依存性について考察を行い、変形中の温度低下が一樣ひずみの増加に寄与することを示した。温度低下が材料の成形性に与える影響については、全伸びの低下や全伸びに占める一樣ひずみの割合の増加についての議論などを残すが、今回は、一樣ひずみに主眼を置いた。

自然冷却と強制空気冷却の実験では、おのおのの試験に対して、降温プロセスと一定温度での試験結果を比較することで、変形中の温度低下が一樣ひずみに与える影響を評価した。自然冷却では、低速での変形で一樣ひずみの増加が観察された。これは変形に時間を要したことで、変形中の温度低下が大きくなり、降温の影響をより大きく受けたためである。強制空気冷却のように急速な温度低下を与えることで、高速での変形に対しても一樣ひずみの増加が観察された。効率のよい冷却方法および温度低下の割合を適切に制御することで、更なる一樣ひずみの増加が期待できる。

本研究で得られた結果は、延性金属全般に対して適用可能

である。また、単軸引張試験を用いて実験・考察を行ったが、一般プレス加工においても温度低下を伴う変形が安定な変形能の向上に寄与するという予測は成立するものであり、今後使用量の増加が見込まれる非鉄軽量金属のプレス成形性の改善策の1つであると考ええる。

謝 辞

本研究の実験とデータ整理に協力された本大学院工学研究科元院生 茂木 寛君（現 富士重工業株式会社）、野口幸起君（現 富士フィルム株式会社）にお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 松下富春：塑性と加工，**51** (2010)，165–166.
- 2) 深川 仁：日本機械学会誌，**115** (2012)，762–766.
- 3) 八代利之：軽金属，**62** (2012)，231.
- 4) B. B. Clow: Magnesium Technology 2002 (2002), 3–5.
- 5) 西野創一郎：軽金属，**61** (2011)，269–273.
- 6) 上村岳之，吉水源宏，大澤泰明：日本機械学会第18回機械材料・材料加工技術講演会 (M&P2010) CD-ROM 論文集，(2010)，304.
- 7) T. Uemura, M. Yoshimizu and H. Ohsawa: Proc. ICAA12, (2010), 522–527.
- 8) 日本塑性加工学会編：塑性加工便覧，コロナ社，(2006)，1105–1107.
- 9) 吉澤宗晴，大澤泰明：日本機械学会論文集 (A編)，**60** (1994)，1597–1603.
- 10) 吉澤宗晴，大澤泰明：日本機械学会論文集 (A編)，**62** (1996)，562–568.
- 11) 宮武 康，大澤泰明：軽金属学会第122回春期大会講演概要，(2012)，155–156.