圧着部を有する6061アルミニウム合金押出型材の 引張特性に及ぼすミクロ組織の影響*

松岡 秀明**・Luc NEUMANN***
浜野 秀光**・坂口 雅司**

Journal of Japan Institute of Light Metals, Vol. 52, No. 4 (2002), pp. 155-160

Effect of microstructures on tensile properties of a 6061 extruded alloy containing weld parts*

Hideaki MATSUOKA**, Luc NEUMANN***
Hidemitsu HAMANO** and Masashi SAKAGUCHI**

The 6061 extruded sections such as the hollow shape have a few weld parts, and the microstructure is recrystallized around the weld part. The quality and microstructural control of the weld part is very important for the machine parts as the mechanical properties depend on the difference of deformation behavior between weld part and non-weld one. The purpose of our study is to investigate the deformation mechanism of 6061 extruded alloys having the weld part. In this paper, the tensile property of 6061 extruded alloys having the weld part was evaluated as compared with the non-weld one. As a result, the elongation of 6061 extruded alloys having the weld part was lower than that of the non-weld one. The result analyzed with the Electron Backscatter Diffraction Patterns (EBSPs) showed that the weld part was the recrystallized structure, and the non-weld part was the un-recrystallized one having subgrains. Then the texture structures were different between the weld part and the non-weld one. The tensile deformation of 6061 extruded alloys having the weld part depended on the difference of texture structure (at same the time the Taylor's factor, M , depends on texture structure) such as the formation of discontinuous structures. Therefore the elongation values obtained from tensile test does not show the real ductility behavior, and the considerations of deformation mechanism that depend on microstructures in parallel parts determine the real ductility of aluminum alloys having the weld part.

(Received July 2, 2001)

Keywords: 6061 extruded alloy, weld part, tensile property, microstructure, texture structure

1. 緒 言

アルミニウム合金の中空押出型材は、ポートホール・ダイスあるいはブリッジ・ダイスを用いて成形されるのが一般的であるが、その押出形状の複雑さに応じ断面中にいくつかの圧着部が形成されるようになる。なお、圧着部とはポートホール・ダイスあるいはブリッジ・ダイス内で分割されたアルミニウム合金が押出ダイス出口付近で再び圧接される際の接合面である。特に、低押出比中空型材の T1 時における組織形態は、圧着部近傍がダイスとの摩擦によって誘起された再結晶組織、非圧着部が非再結晶組織（繊維組織）となる不連続組織が形成される^{1),2)}。

ところで、アルミニウム合金の機械的特性に対する不連続組織の影響については、古くから指摘されている。たとえば、江田ら²⁾は圧着部を有する Al-Mn 系合金円筒押出材をバルジ法にて変形させた際、圧着部近傍が不連続変形するこ

とに注目し、組織形態との関連から詳細な調査を行っている。Electron Channeling Pattern (ECP) 法による集合組織解析の結果から圧着部と非圧着部で集合組織が変化していることが明らかとなり、それが Al-Mn 系合金円筒押出材の不連続変形を招くことを報告した。一方、圧着部に関する直接的調査ではないが、再結晶組織と繊維組織が混在するアルミニウム合金の報告としては、Day ら³⁾、岸ら⁴⁾の表面再結晶組織を有する Al-Zn-Mg(-Cu) 系合金に対して応力腐食割れ (stress corrosion cracking, 以下 SCC) 試験を実施した例がある。両報告では、応力負荷した 7075 合金を 3.5% NaCl 水溶液中に浸漬した場合、表層と内部で水素脆化程度が異なり、SCC き裂が表面粗大再結晶粒界では伝播するが、内部の繊維組織粒界で停滞することを報告した。傾向として、再結晶組織の粒界傾角が大きくなるために、SCC き裂伝播は粒界エネルギーの高い再結晶組織粒界で促進され、他方繊維組織粒界では遅延・停留することが示された。このような不連続

* 軽金属学会第101回秋期大会（平成13年11月）にて一部発表。

** 昭和電工㈱アルミニウム技術研究センター（〒323-8678 栃木県小山市犬塚 1-480）。Aluminum Technology Research Center, SHOWA DENKO K.K. (1-480 Inuzuka, Oyama-shi, Tochigi 323-8678)。

*** Inst. Metal Forming, RWTH Aachen (Intzestraße 10, 52056 Aachen, Germany)。

組織形成に依存した粒界性格の問題は腐食環境下以外でも生じ、再結晶組織、非再結晶組織粒界における転位の拘束程度、粒界すべりの発生頻度等の違いによって変形挙動が異なる。著者らも、表面再結晶組織を有する6061合金押出材の引張変形挙動について調査し、押出表面が再結晶組織、内部が繊維組織となる不連続組織境界および冷却速度に応じた粗大析出物の偏析が不連続変形を生じさせ、結果として著しい延性能低下を招くことを報告した⁵⁾。本研究で対象としたような圧着部を有するAl-Mg-Si系合金の機械的特性および変形挙動に関する詳細な検討例は非常に少ないが、前述の報告例からも予測できるように、圧着部、非圧着部のような不連続組織の形成が機械的性質に対して多大な影響を及ぼすことは十分に示唆される。

本研究では、近年自動車構造用部材を中心に急速な需要拡大を遂げているAl-Mg-Si系合金の中で、特に圧着部を有する6061合金中空押出材の機械的性質に及ぼす圧着部組織形態の影響について調査することを目的とした。まず、ここではトラス構造に押出成形した場合の6061合金の圧着部近傍で形成される組織形態をミクロ組織観察、TEMおよびElectron Backscatter Diffraction Pattern（以下EBSPs）法によって解析し、その結果と引張特性の関係から圧着部を有する6061合金の変形挙動を調査したので報告する。

2. 実験方法

本研究では、供試材として6061合金を用いた。押出ビレット形状（直径380 mm）にDC 鋳造された6061合金を温度843 K、時間43.2 ksの条件で均質化処理した後、温度773 K、速度 2.5×10^{-2} m/sで押出した。なお、押出後の冷却はクーリングテーブル上で放冷とした。Fig. 1に、本実験で供試材として用いた押出形状（押出比27）を示した。

引張試験片は、中空形材より圧着部が試験片（JIS 13B号定形試験片、Fig. 2(a)）平行部中央近傍となるよう採取した。なお、試験片採取はその長手方向が押出方向と直交する方向とした。また、試験片加工の際に押出表面再結晶層（表層より約200 μ m 範囲）を除去する目的で試験片両表面を0.5 mm 面削し、試験片板厚（4 mm）に仕上げた。Table 1には、引張試験片に対して施した各試験片の呼称と熱処理条件の一覧を示した。なお、本研究では溶体化処理温度を803, 833 Kの2種類とし（時間10.8 ks一定）、時効処理を施さないT4材と時効処理温度443 Kで時間を18.0, 39.6 ksとしたT6材を準備した。また、比較のため同一押出形材から平行部に圧着部を有さない試験片も採取し（Fig. 2(b)）、圧着部の有無によって生じる変形挙動の違いについても検討を行った。なお、0.2%耐力に関しては試験片平行部中央に添付したひずみゲージにて測定した。

3. 実験結果

3.1 ミクロ組織および集合組織の解析結果

本供試材の代表例として、H_s3材の押出直後（T1, Fig. 3(a)）、圧着部近傍（T6, Fig. 3(b)）、非圧着部（T6, Fig. 3(c)）のミクロ組織観察結果を示した。なお、金属顕微鏡レベルで観察される他の試験片の組織形態は基本的にH_s3材と同様であったのでここでは省略した。T1状態で直線的に観察される圧着ライン（Fig. 3(a)矢印部）は、T6処理

Fig. 1 Shape and dimensions of 6061 extruded section.

(a) Weld part

(b) Non-weld part

Fig. 2 Shape and dimensions of tensile specimen.

Table 1 Specimen codes and heat treatment conditions

Code	Category	Solid solution treatment		Aging treatment		Temper
		Temperature (K)	Time (ks)	Temperature (K)	Time (ks)	
L _s 1	Weld	803	10.8	—	—	T4
L _s 2				443	18.0	T6
L _s 3					39.6	
H _s 1		833	10.8	—	—	T4
H _s 2				443	18.0	T6
H _s 3					39.6	
N-H _s 1	Non-weld	833	10.8	—	—	T4
N-H _s 2				443	18.0	T6
N-H _s 3					39.6	

(Fig. 3(b)) 後に一部は再結晶粒界、一部は圧着ラインが消滅し粒内に取込まれている様子が確認された。圧着部近傍および非圧着部ともに再結晶（あるいは回復）が進行していたが、X線回折結果から判断するとFig. 3(c)で示した非圧着部ではランダム方位が観察されていたことから、一部sub-grainが残存する非再結晶組織（繊維組織）であると判断できた。また、その組織形態は圧着部近傍とは明らかに異なっていた。全試験片において、圧着部近傍で粗大晶出物が確認

Fig. 3 Optical micrographs of macrostructure in H_s3 specimen near the surface. Where 'WL' in photograph is the weld line.

されることはなかった。**Fig. 4**(a), (b)はH_s3材の圧着部近傍および非圧着部のTEM観察結果であるが、Fig. 4から明らかなようにH_s3材の圧着部近傍および非圧着部の粒界において析出物が特に密に分散するような傾向は認められなかった。

つぎに、EBSPs法を用いて圧着部、非圧着部の集合組織に関する解析を行った。なお、EBSPs法による解析の際、圧着部および非圧着部ともに引張軸がED方向となるよう試料を採取し、その表面を電解研磨にて仕上げた。**Fig. 5**には、H_s3材の圧着部近傍、非圧着部の方位分布関数（Orientation

Fig. 4 TEM photographs of H_s3 specimen.

Distribution Function, ODF) 解析結果の一例を示した。解析の結果、圧着部近傍では{110}が発達した集合組織が確認され⁶⁾、他方非圧着部では一部再結晶集合組織が混在する加工集合組織が形成されていることが明らかとなった。なお、この傾向は全試験片で同一であった。

3.2 引張試験結果

Fig. 6は、各試験片の溶体化処理温度、時効処理時間と0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$ 、引張強さ σ_B 、破断伸び（標点間伸び） ϵ_l の関係を示した結果である。Fig. 6から明らかなように、全試験片の $\sigma_{0.2}$ 、 σ_B は時効処理時間が長くなるにつれて大きくなり、他方 ϵ_l では小さくなる傾向が認められた。また、溶体化処理温度の影響についてみると、溶体化処理温度が高いほど $\sigma_{0.2}$ 、 σ_B および ϵ_l の絶対値が大きくなることがわかった。

ところで、試験片平行部に圧着部を含むL_sN材、H_sN材(n :試験片番号)とそれを含まないN-H_sN材を比較すると、 $\sigma_{0.2}$ 、 σ_B では10%程度の差が確認された。他方、両者の ϵ_l においても差異が確認され、特にL_s1材の ϵ_l はN-H_s1材よりも40%程度減少し、また他の試験片の比較では圧着部を有する方が20%程度の差が確認された。本実験範囲において、

Fig. 5 Orientation distribution function plotted in Euler space of H_s3 material measured using the Electron Backscatter Diffraction Pattern (EBSPs) method.

(a) 0.2% proof stress and tensile strength

(b) Elongation

Fig. 6 Relationship between tensile property and aging time at each specimen.

L_{Sn} 材, H_{Sn} 材の引張特性は $N-H_{Sn}$ 材よりも低くなる傾向にあったことから, 試験片平行部における圧着部の有無が引張特性と密接な関係にあることがわかった。Fig. 7 には H_{S3} 材の試験後の試験片表面観察例であるが, 圧着部近傍と非圧着部において変形挙動 (オレンジピールの発生度合) が異なる様子が確認された。そこで, 引張試験片標点間 (50 mm) を10分割し, 個々の領域の伸びを調査したところ, Fig. 8 に示すようになった。なお, 各領域の表記は引張試験機に取付けた上部を領域1, 下部を領域10としている。Fig. 8 から明らかなように, $N-H_{S3}$ 材においてネッキング部周辺以外の各領域の伸び ϵ_x (x : 領域番号) は均一であったことから, その変形過程は標点間全域で均一変形が発生した後, 標点間中央部 (領域6) でネッキングが生じ破断に至ったものと推察される。他方, H_{S3} 材の最終破断部は領域4であったが, 圧着部が存在する領域5および6の ϵ_5 , ϵ_6 は他の領域に比べ明らかに低くなっていることがわかる。また, 圧着部を境にした上部 (領域1から領域4) と下部 (領域7から領域10) に対して個々の ϵ_x を比べると, 下部よりも上部の方が小さくなっていることがわかった。なお, 上部中でネッキング部以外の各領域の ϵ_x をみると, いずれも $N-H_{S3}$ 材の各 ϵ_x レベ

Fig. 7 Optical micrograph of surface shape in H_{S3} specimen after tensile test. Fig. 8 Elongations, ϵ_x , of each area in H_{S3} specimen and $N-H_{S3}$ specimen shared 10 areas.

ルと同等であることから, 上部では一様な変形が生じていることがわかった。

4. 考 察

本研究では, 6061合金の引張特性に及ぼす圧着部近傍のミクロ組織の影響について調査を行ったが, 前述したように圧着部近傍と非圧着部の変形様式に違いが確認され, 結果として特に ϵ_1 において見掛け上差異が生じることが明らかとなった。また, EBSPs 法による解析結果において, 圧着部および非圧着部の集合組織形態が異なっていたことから, ここでは両結果を基に圧着部を有する本合金の変形メカニズムを整理した。

多結晶金属材料において, 集合組織の形成が機械的特性に影響を及ぼすことは古くから知られている^{7)~11)}。一般に, 多結晶材料の降伏応力 σ_y (0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$) は次式で表されることが知られている^{11)~13)}。

$$\sigma_y = M\tau_y \quad (1)$$

ここで, M は集合組織形成に依存する Taylor 因子であり, Fig. 9 で示したように fcc 金属では方位に対応した定数となる。また, τ_y はせん断降伏強さである。そこで, 本合金の圧着部, 非圧着部の M について調査を実施した。Fig. 10 は, H_{S3} 材および $N-H_{S3}$ 材の試験片標点間中における M の変化を示した一例である。なお, 両材料の測定箇所は領域5 (H_{S3} 材における圧着部) と, 領域2および領域8 (H_{S3} 材にお

Fig. 9 The Taylor factor, M , for tension in fcc crystals, as a function of the orientation of tensile axis¹²⁾.

Fig. 10 Taylor factors, M , calculated from the EBSPs data of int. 2, int. 5 and int. 8 in parallel part.

ける非圧着部)の計3か所とした。まず、試験片標点間中の組織形態が一樣なN-Hs3材について調査を行ったところ、 M は各領域で同等であった。他方、Hs3材では圧着部近傍で M は大きく、一方非圧着部ではN-Hs3材のそれと同等となる結果が得られた。なお、熱処理条件が異なる他の試験片についても調査を実施したが、それらの M の絶対値こそ一部異なったが、圧着部近傍で M が大きく、両非圧着部で同等となる傾向は同様であった。

以上のことから、本研究で確認された圧着部を有する6061合金押出材の延性能低下メカニズムを考察する。一般に用いられる引張試験片形状は、チャック部から平行部にかけてR部が設けられている。理論上、この形状は初期の引張負荷段階でR部に応力集中を生じさせ (Fig. 11(a)), その後の負荷増加によって試験片平行部へ一様変形を伝ばさせる (Fig. 11(b)) ことを目的としている。実際の多結晶材料では、R部形状に応じた応力集中量と、その近傍の格子欠陥、第二相粒子の存在割合等の相互作用によって、臨界応力を越えた一つのR部から初期変形が開始する。その後、引張負荷の増加とともに試験片長手方向への変形が伝ばし、標

Fig. 11 True stress, σ , - true strain, ε , curve and deformation behavior of tensile specimen having a weld-part by FEM method in case of the small and large load applied (1/4 3D solid model in thickness = 4 mm).

点間が一樣伸びを呈することになる。N-Hs3材のように、試験片平行部に連続組織を有するものは、上記の過程を経てネッキングを生じ最終的に破断に至ることから、初期の標点間距離 l_0 の変位量 Δl ($=l-l_0$, ここで l は変形後の標点間距離)によって ε_l ($=\Delta l/l_0$)を決定することができる。

他方、本研究で対象としたような標点間に圧着部、非圧着部が混在するような場合、上記メカニズムと同様に一つのR部から発生した変形は、 M の小さな非圧着部を試験片長手方向に伝ばするが、やがて M の大きな圧着部に変形が到達、拘束されることになる。当然、その後の引張負荷の増加によって圧着部近傍も一部変形を開始するが、その応力レベルではすでに変形している非圧着部において更に損傷が蓄積し、結果として圧着部と非圧着部で不連続変形が生じる。つまり、標点間全域に一樣変形が及ぶ前に、非圧着部での損傷蓄積による応力集中によってネッキングが生じ、最終的に破断に至ったものと考えることができる。前節で示した結果において、ネッキングが生じた上部(領域1から領域4の区間)とN-Hs3材の両 ε_x が同等であり、さらには圧着部近傍が非圧着部ほど変形していなかった事実が、上記の変形メカニズムを裏付けている。以上より、圧着部を有する6061合金で確認された ε_l の低下は、一樣変形していないにもかかわらず Δl を l_0 で除したために現れた見掛け上の結果であり、これは圧着部と非圧着部の塑性降伏程度の違いによる不連続変形に依存する現象であった。

このように、一樣伸びを呈する材料を対象とした一般的な破断伸びの決定法は、圧着部を有する本合金には適合しないことから、たとえば本研究で行ったように標点間の個々の領域に対して ε_x を評価する等の手法が圧着部を有するアルミニウム合金押出材の本来の延性能評価といえるであろう。また、圧着部、非圧着部の組織形態をいかに一樣化するかが今後の最大の課題であり、他の機械的特性との関連から早急な対応が必要である。

5. 結 言

本研究では、6061合金中空押出型材の機械的特性に関する評価の一環として、まず試験片平行部に圧着部を有する合金の引張特性に関する調査を行った。また、圧着部が形成される際の組織形態を詳細に調査し、それと引張変形メカニズムを総括しまとめた。得られた結論は以下のとおりである。

(1) 圧着部を有する6061合金の0.2%耐力、引張強さは、圧着部を有さないものと同等であったが、前者の破断伸びは後者に比べ20~40%程度低下していた。変形様式は、圧着部を有さない材料が一樣変形であるのに対し、圧着部を有するものは不連続変形となった。

(2) 6061合金の圧着部近傍の組織形態について調査を実施したところ、粒内および粒界での晶析出物の分散状態は同様であった。また、集合組織に関しては、圧着部近傍では再結晶集合組織、非圧着部では一部再結晶集合組織が混在する加工集合組織が形成されていた。

(3) Taylor 因子に関する調査から、本合金で引張試験時に確認された不連続変形には圧着部、非圧着部での集合組織形成に依存した変形様式の違いが密接に関与していることがわかった。つまり、圧着部を有する6061合金の破断伸び低下は、不連続変形によって生じた見掛け上の結果であった。

(4) 一般に、引張試験片平行部に連続組織が存在する多結晶金属材料において有効な破断伸びは、不連続組織（圧着部、非圧着部）を有する本合金には適合できないことから、他の手法にて延性能を評価する必要がある。

参 考 文 献

- 1) たとえば、目木利教，平野正和，松岡秀明，坂口雅司：第99回軽金属学会秋期大会講演概要，(2000)，213.
- 2) 江田浩之，坂口雅司，前原 久，鋤本巳信，淵澤定克：軽金属，**43** (1993)，438.
- 3) M. K. B. Day, A. J. Cornish and T. P. Dent: Met. Sci. J., **3** (1969), 175.
- 4) 岸 陽一，広瀬幸雄，佃 市三，永井滋一，東 健司：材料，**43** (1994)，1111.
- 5) 松岡秀明，坂口雅司：軽金属，**50** (2000)，222.
- 6) 長嶋晋一編著：集合組織，丸善，(1984)，117.
- 7) G. I. Taylor: J. Inst. Met., **62** (1938)，1938.
- 8) E. A. Calnan and C. J. B. Clews: Phil. Mag., **42** (1951)，616.
- 9) U. F. Kocks: Ph.D. thesis (1959), Harvard Univ., Cambridge, Mass.
- 10) 小岩昌宏：日本金属学会会報，**23** (1994)，479.
- 11) 松岡秀明，広瀬幸雄，東 健司：日本機械学会論文集，**63A** (1997)，2686.
- 12) U. F. Kocks: Met. Trans., **1** (1970)，1121.
- 13) G. Y. Chin, W. L. Mammel and M. T. Dolen: Trans. TMS-AIME, **239** (1967)，1854.