

熱間ブロー成形によるアルミ・アルミ合金の加工*

新里 喜文**, 浅野 峰生***

Aluminum Processing by Hot Blow Forming*

Yoshifumi Shinzato** and Mineo Asano***

1. はじめに

熱間加工温度域に加熱したアルミニウム合金板は低応力で大きな伸びを有し、冷間におけるプレス成形性よりも大きな成形能を有する。この特徴を生かし、自動車分野等に熱間ブロー成形が適用されている。本稿では熱間ブロー成形の特徴、UACJの熱間ブロー成形用アルミニウム合金に対する取り組みなどについて紹介する。

2. 超塑性および熱間ブロー成形の特徴

超塑性は、材料を高温で変形させるとあたかも水飴のように数100%以上伸びる現象とも説明される。結晶粒径を10 μm以下までに微細化した材料を高温の400～550℃に加熱し、 10^{-3} /sオーダーのひずみ速度域で加工すると、結晶粒界でのすべりが主な変形機構として働く。よって、微細な結晶粒組織を有する材料の方が変形に寄与する粒界面積が多くなるため、巨大な伸びが得られる。この現象を利用し、アルミニウム合金板を高温に加熱することで、低応力で大きな伸びが得られ、ガス圧による熱間ブロー成形(超塑性成形)が可能となる。Fig. 1に熱間ブロー成形の装置概略図を示す¹⁾。熱間ブロー成形の利点は下記の通りである。

- ・製品の一体成形が可能であるため、部品点数、接合点数の低減による軽量化、低コスト化などが可能である。
- ・金型への転写性も優れるため設計自由度が高い。
- ・金型は雄型若しくは雌型のどちらか一方のみで成形が可能であるため、金型費を節約できる。

・冷間プレスで問題になるストレッチャーストレインマークが発生しない。

通常の冷間プレスと熱間ブロー成形の特徴をTable 1に示す。熱間ブロー成形は冷間プレスに比べ成形時間が長い大量生産には不適で、加工コストが高くなるため利用分野としては、航空機部品などの高付加価値製品および少量～中量生産部品(50～10000個/年間)に好適とされている。また、熱間ブロー成形は完全張出成形であるため、板厚減少が大きく、板厚分布制御が課題である。

従来、この不均一な板厚分布を改善するため、高温かつ低ひずみ速度域での熱間ブロー成形が行われてき

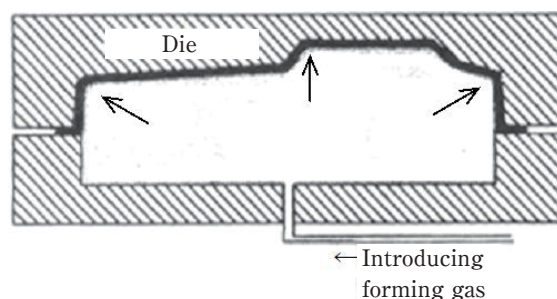
Fig. 1 Schematic illustration of blow forming device. ¹⁾

Table 1 Comparison between cold press forming and hot blow forming.

	Cold press forming	Hot blow forming
Forming temperature	Room temperature	500℃
Strain rate	1~10/s	10^{-2} /s
Sheet thickness distribution after forming	Small	Larger thickness reduction, compared to cold press forming

* 本稿の主要部分は、プレス技術, 54-12 (2016), 52-55に掲載。

The main part of this review has been published in the journal of Press Working, 54-12 (2016), 52-55.

** (株)UACJ R&Dセンター 第二開発部

Development Department II, Research & Development Division, UACJ Corporation

*** (株)UACJ 板事業本部 名古屋製造所

Flat Rolled Products Division, Nagoya Works, UACJ Corporation

Table 2 Typical aluminum alloys for superplasticity.

Alloy	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Others	Al
2004	0.20	0.20	5.5-6.5	0.10	0.50	-	0.10	0.05	0.03-0.50Zr	Bal.
5083	0.40	0.40	0.40	0.4-1.0	4.0-4.9	0.05-0.25	0.25	0.15	-	Bal.
7475	0.10	0.12	2.4-3.0	0.05	0.25	0.05	0.10	0.15	-	Bal.
8090	0.20	0.30	1.0-1.6	0.10	0.6-1.3	0.10	0.25	0.10	2.2-2.7Li 0.04-0.16Zr	Bal.

た。古くから知られている2004合金(Supral 150)や7475合金といった超塑性用アルミニウム合金は熱処理型合金に分類され、成形後に焼き入れや析出硬化のための熱処理が必要であることおよび耐食性などの問題から使用用途は航空機などの少量かつ多品種の生産に適用されてきた^{2)~4)}。この点を解決するためにAl-Mg合金での超塑性材料が研究された。Al-Mg合金は非熱処理型合金であり、成形後の熱処理も必要なく、耐食性や溶接性にも優れ、さらに素材も比較的安価であることから実用化が進んでいる。特に中強度構造用合金である5083合金に超塑性現象が報告されて以来⁵⁾、自動車用にも使用されている。超塑性成形用アルミニウム合金の化学成分をTable 2に示す。

3. 高速ブロー成形

先述したように熱間ブロー成形では粒界すべりが主な変形機構として働く。粒界すべりは $10^{-3}/s$ オーダーの非常に小さいひずみ速度域でのみ働くため、成形速度を高めると伸びが低下する。そのため、熱間ブロー成形は生産性が低いという欠点がある。一方、5000系合金では、結晶粒を微細化しない場合においても超塑性現象が発現するという報告例がある。結晶粒径を約 $50\ \mu m$ としたAl-5.5%Mg-0.3%Cu合金を種々のひずみ速度で高温引張試験を行った結果をFig. 2に示す^{6),7)}。Fig. 2中のAl-5.5%Mg-0.3%Cu合金は通常の5083合金(ひずみ速度： $2 \times 10^{-4}/s$)と比較して、比較的低温かつ高ひずみ速度($10^{-2} \sim 10^{-1}/s$)で高い伸びが得られ、Fig. 3に示すようにキャビティの発生が極端に少ないため、高い熱間ブロー成形性を示す^{6),7)}。このような比較的低温で高速の超塑性挙動を示すことに対して、溶質雰囲気引きずり運動(Solute drag creep)によるものと考えられている^{8),9)}。

この比較的低温で高速の成形条件にて、高い延性を示す現象を利用した熱間ブロー成形を従来の熱間ブロー成形と区別して、高速ブロー成形とここでは定義する。従来の熱間ブロー成形と高速ブロー成形の特徴比較をTable 3に示す。粒界すべりを変形機構とする熱間ブロー成形では、高速ブロー成形よりも大きな伸び

が得られ、成形後の板厚分布が均一であるという特徴がある反面、粒界すべりにより粒界三重点でひずみが蓄積して、キャビティと呼ばれる微小空洞欠陥が発生しやすい傾向がある。

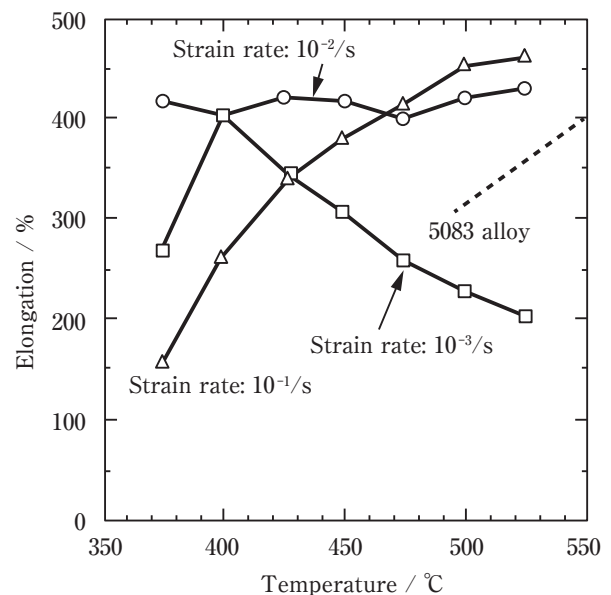


Fig. 2 Relationship between temperature and elongation of Al-5.5Mg-0.3Cu.

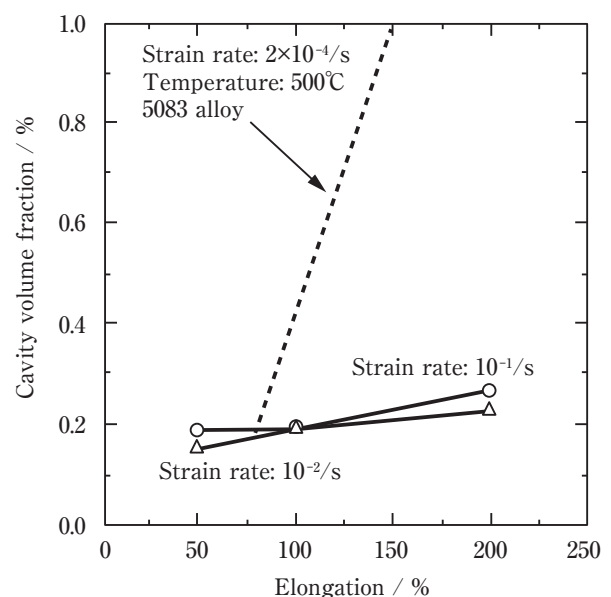


Fig. 3 Relationship between elongation and cavity of Al-5.5Mg-0.3Cu.

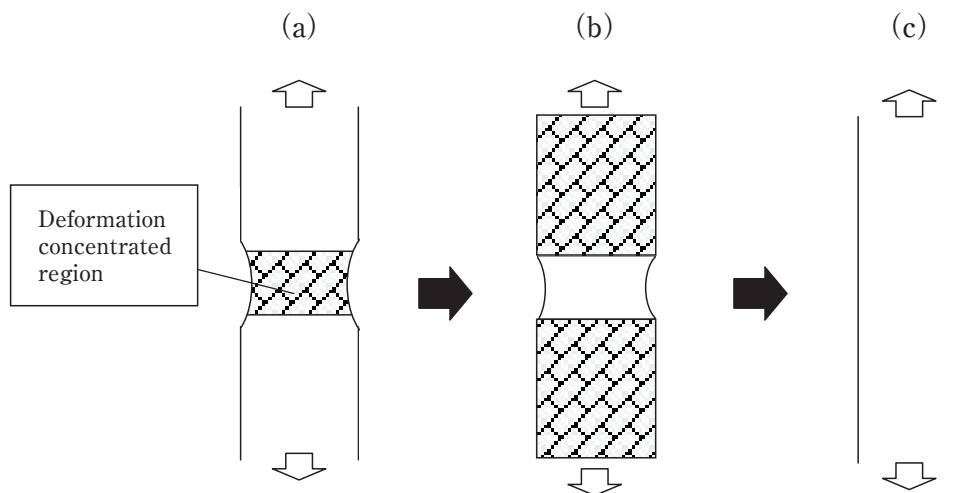
Table 3 Characteristic comparisons between conventional blow forming and high speed blow forming.

	Conventional blow forming	High speed blow forming
Desirable grain size	Less than 10 μm	Fine grain structure is not required
Forming temperature	500°C	400-500°C
Strain rate	10 ⁻³ /s	10 ⁻² /s
Forming mechanism	Grain boundary slip	Solute drag
Sheet thickness distribution after forming	Larger thickness reduction compared to cold press forming, smaller thickness reduction compared to high speed blow forming	Larger thickness reduction compared to conventional hot blow forming
Cavitation	Easy to form	Hard to form

超塑性はJIS規格内では、「多結晶材料の引張変形において、変形応力が高い歪速度依存性を示し、局部収縮（ネッキング）が生じることなく数100%以上の巨大な伸びを示す現象」と定義される¹⁰⁾。ひずみ速度感受性は変形応力の歪速度依存度を示す値である。ひずみ速度感受性指数（ m 値）が正の値を持つ材料は高温変形時に大きな伸びが得られる。その理由を説明する。変形は材料全体が変形する均一変形と、その後くびれ発生に伴い開始する局部変形に分けられる。アルミニウム合金の全変形量に占める局部変形量の割合は通常小さいため、材料の伸びは均一変形の大小によって決まる。そのため、均一変形の継続を妨げるくびれが発生しにくい材料ほど、大きな伸びを示す。くびれの発生しにくさを表す指標として、応力と歪み速度の関係式を微分して導くことができる m 値があり、ある一定温度において、 m 値は (1) 式で表される。

$$m = d(\ln \sigma) / d(\ln(d\varepsilon/dt)) \quad (1)$$

ここで、 σ は変形応力、 $d\varepsilon/dt$ はひずみ速度を示す。 m 値が正の値の場合にひずみ速度の増大に伴い、変形応力が増大することを意味する。 m 値が正の値を有する場合の変形中に発生した微小くびれの挙動を Fig. 4 に模式的に示す。この微小なくびれにおいて変形が集中することにより、他の部分に比較して局部的にひずみ速度が増大する。このとき、 m 値が正の値であるため、くびれ部の局所的な変形応力が高まり、微小くびれ部の局部変形の進行が妨げられる。その後、変形は硬化した微小くびれ部以外で進行し、やがて微小くびれが消滅し、再び均一変形が継続される。 m 値が大きいほど、ひずみ速度の変化に伴う変形応力の増分が大きいためくびれ発生が抑制され、大きな伸びが得られる。 m 値は粒界すべり（従来の熱間ブロー成形）の場合に約0.5、溶質雰囲気ひきずり運動（高速ブロー成形）の場合は約0.3の値となり、高速ブロー成形で得られる伸びは m 値が小さくなるため従来の熱間ブロー成形で得られる伸びと比較して小さくなる。

**Fig. 4** Necking suppression of material with positive m value.¹¹⁾

- (a) Flow stress increases with increasing strain rate in a deformation concentrated region.
- (b) No more deformation proceeds in the region because of increased flow stress, and then deformation progress in the other region.
- (c) Uniform deformation proceeds again after small necking disappears.

4. 熱間ブロー成形の自動車への実用化例およびUACJの熱間ブロー成形の取り組み

熱間ブロー成形の自動車への実用化に関して、日本国内では本田技研工業、海外ではGeneral Motorsなどで適用されている。本田技研工業では、S2000のハードトップルーフ¹²⁾、レジェンドのフェンダやトランク¹³⁾に5083合金および5182合金が適用され、生産性を高めるために、高速ブロー成形を行っている。また、サイクルタイムの短縮のため、急速予備加熱を外段取りで行い、金型に投入後、従来の超塑性成形の3倍の成形圧力で成形することにより、従来の12倍の生産性を達成している。General Motorsでは熱間ブロー成形の手法として、quick plastic forming (QPF) を実用化しており、従来のsuperplastic formingと区別している¹⁴⁾。

UACJでは、先述した耐食性や溶接性に優れた5083合金を中心に材料開発および実用化を進めてきた。アルノービ1は5083合金をベースとし、化学成分および製造プロセスの最適化により開発された合金である¹⁵⁾。アルノービ1は遷移元素のMn, Crの微細析出物が結晶粒界をピンニングするため、熱間ブロー成形時に粒界の移動が起こりにくく、その結果結晶粒の成長が比較的少ないという特徴がある。また、熱間ブロー成形材に求められる性能として、成形中の微小空洞欠陥の発生現象であるキャビテーションが少ないことが重要である。アルノービ1はキャビテーションの起点となる粗大な金属間化合物を抑えるため、Fe, Si量を低減し、航空機や自動車などの難加工品に使用されている。

アルノービ1は優れた特性を有しているが、成形温度の低温化、成形時間の短縮などの生産性の向上が求められている。そこで、アルノービ1よりも低温におけ

る加工および高速加工が可能であり、ブロー成形性を向上させたアルノービUを開発した。アルノービUはアルノービ1よりも微細な結晶粒を有する。アルノービUの非常に微細な結晶粒は遷移元素の添加および製造条件の最適化により達成したものである¹⁶⁾。アルノービUの性能に関して簡単に紹介する。Fig. 5にアルノービUとアルノービ1の成形温度とひずみ速度に対する高温伸びの関係を示す¹⁷⁾。アルノービUはアルノービ1と比較して高い延性を示す。アルノービ1は470℃で最大の伸びを示すが、アルノービUは成形温度40～50℃低くしてもアルノービ1と同等の伸びが得られるため、成形温度の低温化が図れる。また、ひずみ速度を2～3倍速くしても同等の伸びが得られるため、成形時間を1/2～1/3に短縮できる。Fig. 6に室温における各種5000系合金の引張性質を示す。アルノービUは5000系としては高い引張性質を有しており、強度が求められる自動車用外板にも適用可能である。

5. おわりに

アルミニウム合金は熱間ブロー成形により成形性を向上させることができ、様々な形状や材料特性を付与することができる。この特徴を利用して、自動車分野をはじめとする世界中の広い分野への適用が期待される。

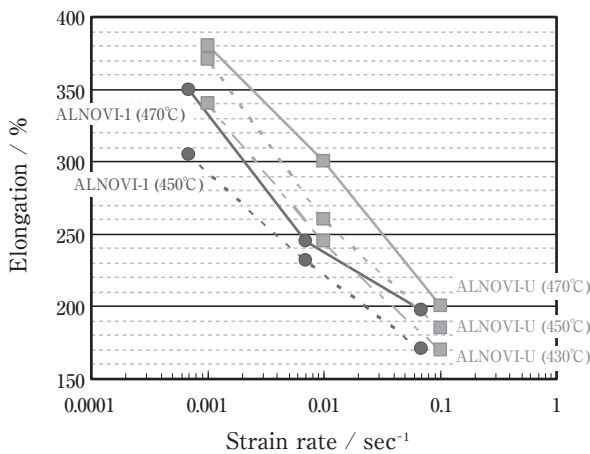


Fig. 5 Relationship between strain rate and elongation in tensile properties at high temperature of ALNOVI-1 and ALNOVI-U.

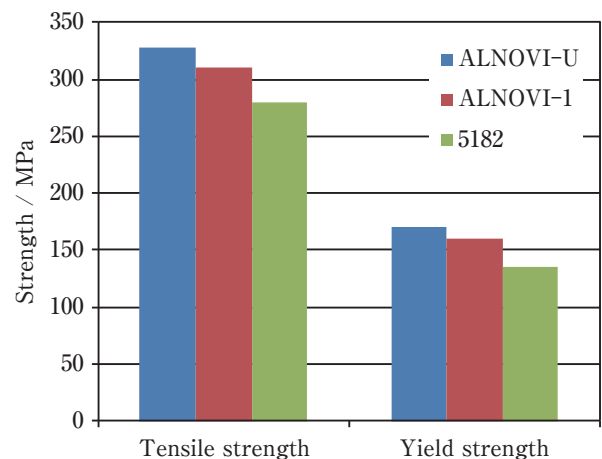


Fig. 6 Strength at room temperature of ALNOVI-1, ALNOVI-U and 5182 alloy.

参考文献

- 1) 阿部佑二：アルミニウムの加工方法と使い方の基礎知識，(2004)，152-158，軽金属製品協会
- 2) 超塑性研究会編：超塑性と金属加工技術，(1980)
- 3) 吉田英雄，熊谷正樹，松田真一：住友軽金属技報，**31** (1990)，203-209.
- 4) 吉田英雄：住友軽金属技報，**37** (1996)，90-98.
- 5) D. J. Lloyd: Metall. Trans., **11A** (1980), 1287-1294.
- 6) H. Uchida, M. Asano and H. Yoshida: Material Science Forum, 304-306 (1999) 309-314.
- 7) H. Uchida, M. Asano and H. Yoshida: Sumitomo Light Metal Technical Report, **40** (1999) 12-15.
- 8) 伊藤勉，駒正幸，柴崎聡，大塚正久：日本金属学会誌，**66** (2002)，476-484.
- 9) E. M. Taleff, D. R. Lesure and J. Wadsworth: Met. Mater. Trans., **27A** (1996), 343-352.
- 10) JIS H7007, 金属系超塑性材料用語，(1995)
- 11) Furukawa-Sky Review, No.4 (2008), 66-69.
- 12) 中尾敬一郎，横山鎮，渡辺二郎：アルミニウム No.53, **10** (2003)，103-105.
- 13) 柴田勝弘：アルトピア，(2005)，4月号，9-14.
- 14) J. G. Schroth: Advances in Superplasticity and Superplastic Forming Ed. By E. M. Taleff, TMS (2004), 9-20.
- 15) 田形勉：金属，**73** (2003)，324-329.
- 16) K. Ichitani and T. Tagata: Materials Science Forum, 539-543 (2007) 357-361.
- 17) 工藤智行：UACJ Technical Reports, **1** (2014)，131-133.



新里 喜文 (Yoshifumi Shinzato)
(株)UACJ R&Dセンター 第二開発部



浅野 峰生 (Mineo Asano)
(株)UACJ 板事業本部 名古屋製造所