

アルミニウム合金の熱間成形*

劉 午陽**

Hot Forming of Aluminum Alloys*

Wuyang Liu**

1. はじめに

アルミニウム (Al) 合金は自動車産業や航空宇宙産業において軽量化を目的に適用が拡大している。軽量素材としてアルミニウム合金は加工性、耐食性、導電性、熱伝導性などにも優れる。しかし、アルミニウム合金は室温で延性が低いことと、スプリングバックが大きいことなどから冷間プレス成形が難しいという課題がある。複雑な形状を有するパネル部品を成形するため、材料の成形性を改善して、高延性を得ることが必要となる。熱間成形は大きい延性を得る方法の一つとしてアルミニウム合金にも幅広く応用されている。本稿では、主に自動車材と航空機材を対象とするアルミニウム合金板の熱間成形について解説する。

2. 熱間成形用アルミニウム合金の基礎特性

純アルミニウム (1000系) は成分の99%以上がAlで構成されるものである。純アルミニウムに様々な元素を添加したものはアルミニウム合金と呼ばれている。アルミニウム合金は、添加元素によって、2000系 (Al-Cu-Mg)、3000系 (Al-Mn)、4000系 (Al-Si)、5000系 (Al-Mg)、6000系 (Al-Mg-Si)、7000系 (Al-Zn-Mg, Al-Zn-Mg-Cu) に分類されている。また、アルミニウム合金は非熱処理型合金と熱処理型合金に分類される (非熱処理型合金: 3000, 4000, 5000系; 熱処理型合金: 2000, 6000, 7000系)。

熱間成形の場合には、主に非熱処理型合金の5000系および熱処理型合金の2000, 6000と7000系が使われている。各合金の特性と用途を Table 1 に示す。

アルミニウム合金の熱を利用した成形加工技術は、大きく熱間加工と温間加工に分類される。材種および成形方法によって適切な成形温度や成形速度を選んで成形される。通常、Fig. 1に示すように、温度が高くなるほど変形抵抗が低下し、全伸びが飛躍的に大きくなる¹⁾。

アルミニウム合金の高温特性を評価する指標の一つにひずみ速度—応力線図の勾配を表すひずみ速度感受性指数 (m 値)²⁾がある。ある一定温度の m 値は式 (1) で表され、応力 (σ) とひずみ速度 ($d\varepsilon/dt$) の関係式を微分して導くことができる。 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。高温の場合には、材料のひずみ硬化挙動が弱く、微小なくび

Table 1 Characteristics and applications of aluminum alloys for hot forming.

Types of alloys	Alloying elements	Properties	Primary applications
2000 series alloys	Cu, Mg	<ul style="list-style-type: none"> High strength Good machinability 	Aircraft components, Machine-cut components etc.
5000 series alloys	Mg	<ul style="list-style-type: none"> Excellent corrosion resistance, weldability, and formability. Relatively high strength 	Construction, Marine, Automotive body panels etc.
6000 series alloys	Mg, Si	<ul style="list-style-type: none"> Excellent corrosion resistance, strength, and extrudability 	Automotive structural components etc.
7000 series alloys	Zn, Mg, Cu	<ul style="list-style-type: none"> High strength Poor corrosion resistance and weldability 	Aircraft components, Automotive structural components etc.

* 本稿の主要部分は、ぶらすとす (日本塑性加工学会会報誌) 5-51 (2022), 126-130 に掲載。

The main part of this paper has been published in the Journal of the Japan Society of Technology of Plasticity 5-51 (2022), 126-130.

** (株) UACJ マーケティング・技術本部 R&Dセンター 第二開発部, 博士 (工学)

Develop Department II, Research & Development Center, Marketing & Technology Division, UACJ Corporation, Ph. D.(Eng)

れがより早く発生する。この局所変形部においてはひずみ速度は増加し、応力も急増する。すなわち、Fig. 2に示すように、 m 値が高くなるほど、くびれの発生が抑制され、大きな伸びが得られる³⁾。

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

高温で成形する場合には、変形抵抗が低下するだけでなく、Fig. 3に示すように成形限界が高くなり、温度が高くなるほど、延性は向上する⁴⁾。

3. アルミニウム合金の熱間加工技術

熱を利用した加工技術は、自動車と航空機の部材に幅広く適用されている。そのうち、パネル部品はもっとも代表的なものの一つである。本章では、パネル部品に適用されている熱間成形技術として超塑性成形およびホットスタンプについて述べる。

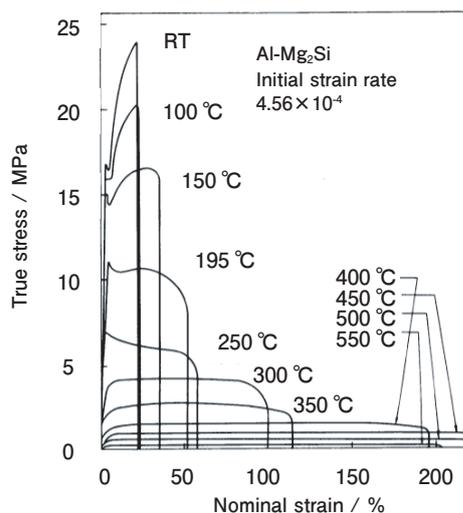


Fig. 1 Influence of forming temperature on the stress-strain curve of Al-Mg-Si alloy¹⁾.

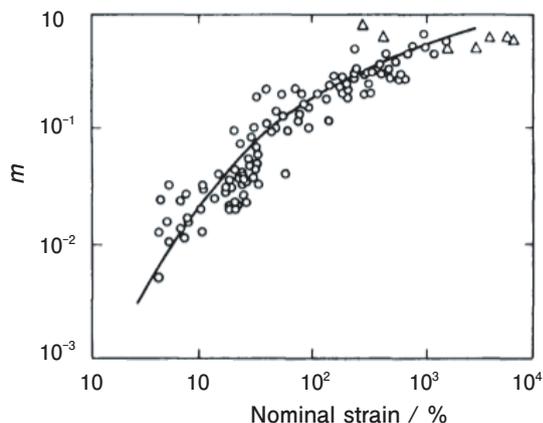


Fig. 2 Relationship between m -value and nominal strain³⁾.

3.1 超塑性成形

結晶粒径を $10 \mu\text{m}$ 以下までに微細化したアルミニウム合金を高温の $400 \sim 550 \text{ }^\circ\text{C}$ に加熱して、 $10^{-3}/\text{s}$ オーダーのひずみ速度域で加工することで超塑性変形が起こり、数百%以上にもおよぶ大きな伸びを得ることができる(Fig. 4参照)⁵⁾。超塑性は結晶粒界でのすべりが主な変形機構として働くため、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。Fig. 5に高温での一軸引張試験による伸びに及ぼす結晶粒径の影響を示す⁶⁾。この結果によると、結晶粒が小さいほど延性が大きいことが分かる。

超塑性を利用したパネル成形法として、ブランクを適切な温度まで加熱し、ガス圧を利用して素材を金型に馴染ませるブロー成形が行われる。この成形法は超塑性成形(SPF)、熱間ブロー成形もしくはホットガスフォーミングと呼ばれる。Fig. 6に熱間ブロー成形装置の概略図を示す⁷⁾。Fig. 7に熱間ブロー成形を用いた

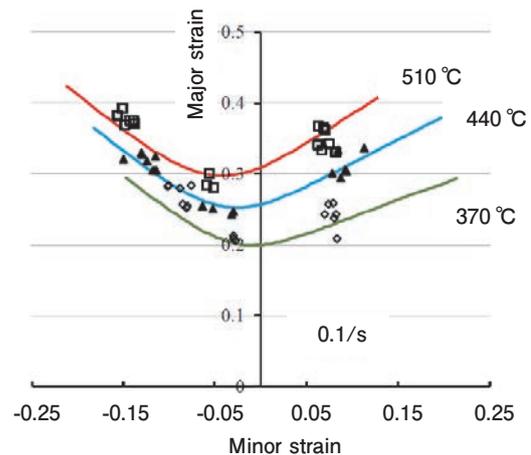


Fig. 3 Forming limit diagram of 6082 at high temperatures¹⁾.

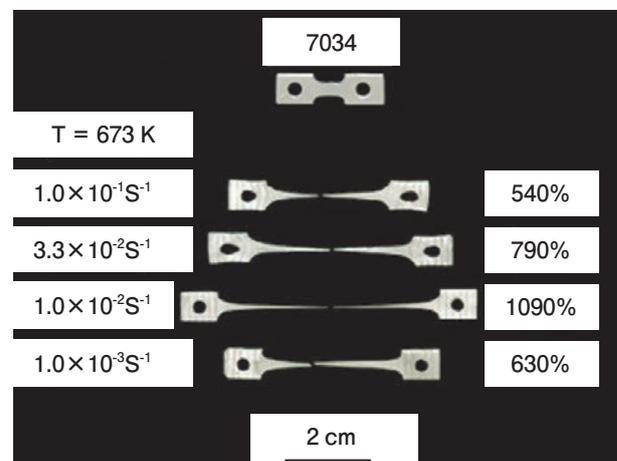


Fig. 4 Photograph of the appearance of specimen after high-temperature tensile test of 7034⁵⁾.

パネルの成形加工例を示す。

熱間ブロー成形の利点は下記の通りである。

- 著しく大きな伸びを示すため、複雑な形状を有するパネルを一体で成形可能である。
- 金型が雄型もしくは雌型のどちらか一方のみで成形できるため、金型費を節約できる。
- スプリングバックがほとんど発生せず、形状凍結性に優れる。
- 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。
- 低ひずみ速度で変形させるため生産性は低いが、多品種少量生産に適している。

熱間ブロー成形は特定の超塑性を有するアルミニウム合金を用いた成形方法である。通常、熱間ブロー成形に適している材料の m 値は 0.3 ~ 1.0 である。現在では、いくつかの種類アルミニウム合金が超塑性を有することが確認されている。熱間ブロー成形用アルミニウム合金を Table 2 にまとめる。

Table 2 Aluminum alloys for SPF²⁾.

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.

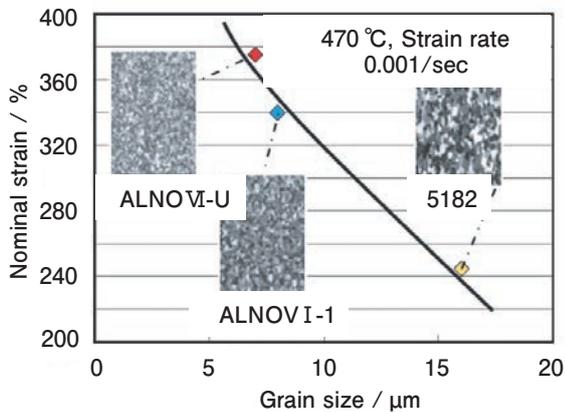


Fig. 5 The relationship between grain size and ductility⁶⁾.

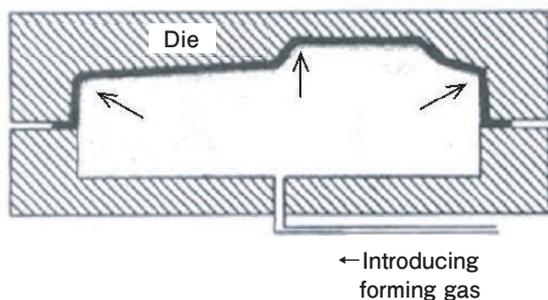


Fig. 6 Schematic diagram of SPF equipment⁷⁾.

熱間ブロー成形を実用化させるためには、生産性の向上が必要である。これに関して、日本国内では本田技研工業、海外ではGeneral Motorsなどが高速熱間ブロー成形を行っている。本田技研工業では、熱間ブロー成形のサイクルタイムを短縮させるために、成形前に材料の急速予備加熱を行う。その後、材料を金型に投入して従来の熱間ブロー成形の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た⁸⁾。

Fig. 8に高速熱間ブロー成形により成形した部品を示す⁹⁾。General Motorsで実施している高速熱間ブロー成形はQuick Plastic Forming (QPF)と呼ばれている。Fig. 9にQPF用治具の概略図を示す¹⁰⁾。またFig. 10にはQPFにより成形したパネルの例を示す。

QPFとSPFを比較すると、QPFはより高いひずみ速度で成形させることが可能である。SPFでは延性が最大となるようなひずみ速度で成形が行われるが、QPFでは成形時間を短縮するために、より大きいひずみ速度でアルミニウム合金を変形させることが目的となる。

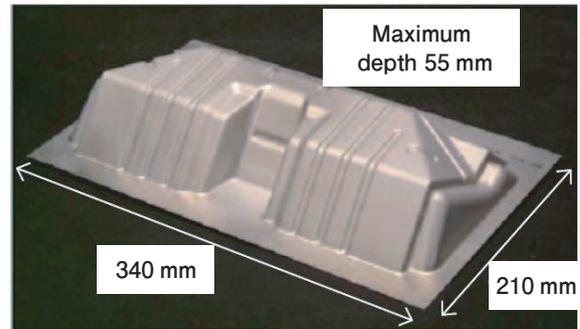


Fig. 7 Panel formed by SPF⁶⁾.



Fig. 8 Automotive parts for QPF of aluminum alloys⁹⁾.

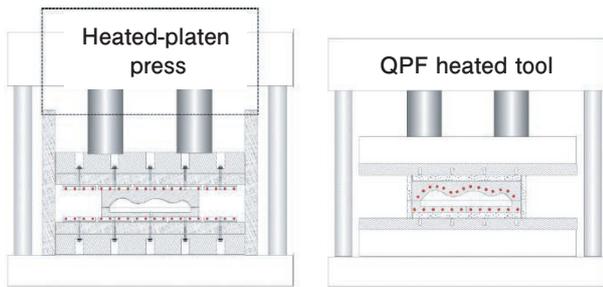


Fig. 9 Schematic of the fixture for QPF¹⁰⁾.



Fig. 10 Panel formed by QPF¹⁰⁾.

Table 3に熱間ブロー成形と高速熱間ブロー成形の特徴比較を示す。SPFと比べると、QPFで使用されるアルミニウム合金では、生産性を最大化するために、各特定のパネル形状を中心に成形条件に最適化されている。成形できる形状の複雑さはSPFより低いが、冷間プレスでの低延性を克服できる。

熱間ブロー成形の生産性を向上させるために、Hot Die Forming (HDF) と呼ばれる成形法も提案されている¹¹⁾。Fig. 11にHDFプロセスの概略図を示す。熱損失を防ぐため、成形中にblankだけではなく金型も加熱することを特徴としている。成形中に材料の温度低下を防ぐことができるため、材料の m 値が高い値のまま、高延性が得られる。HDFプロセスでは、材料を高温に保ちつつ成形するため、成形に必要なガス圧は低い。小R形状などを成形する場合にはより大きなガス圧を加える必要があるが、ガス圧が不足する場合には、最終的に小R部をパンチにより成形することも可能である。

またSPF成形はほとんどが張出し成形であるため、板厚減少が大きい。一方HDF成形は材料を保持する外周部分の密閉性を保ちながら材料を流入させることができるため、板厚減少を抑制できる特徴を有する。Fig. 12にSPFとHDFにより成形した試験片の板厚分布の比較を示す。HDFの方は板厚減少の抑制効果は大きかった。

3.2 ホットスタンプ

近年、自動車産業でのアルミニウム合金の適用を拡大するため、高強度熱処理型のアルミニウム合金のホ

Table 3 Comparison of characteristics between SPF and QPF (Typical values in the table)^{8),10)}.

	Superplastic Forming (SPF)	Quick Plastic Forming (QPF)
Structure	Grain size below 10 μm	Not specified
Method for determining forming conditions	Maximize ductility	Maximize productivity
Forming temperature	Approximately 500 $^{\circ}\text{C}$	Approximately 450 $^{\circ}\text{C}$
Strain rate	$10^{-4}/\text{s}$ order	$10^{-2}/\text{s}$ order
Application	Aerospace components, etc. (Small-batch production)	Automotive components, etc. (Mass production)

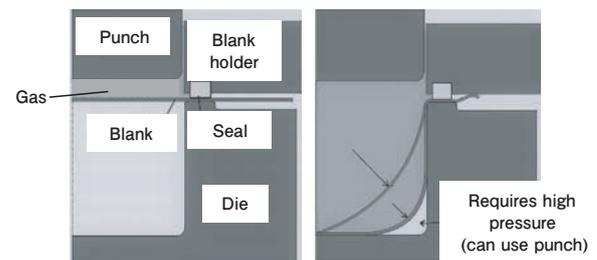


Fig. 11 Schematic of the HDF forming process¹¹⁾

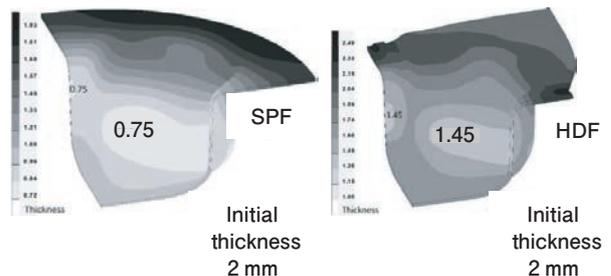


Fig. 12 Comparison of thickness distribution (left) SPF; (right) HDF¹¹⁾.

ットスタンプ成形が方法の一つとして考えられている。

Linら¹²⁾が提案したHFQ[®](*1) (Hot Form Quench) は代表的なアルミニウム合金のホットスタンププロセスの一つである。Fig. 13にHFQプロセスにおいて材料に与えられる温度履歴を示す¹²⁾。最初に、適切な微細構造を取得するために、blankを溶体化処理温度(500 $^{\circ}\text{C}$ 程度)に加熱し、一定時間を保つ(A, B)。次に、blankを速やかにプレス成形(C, D)して短時間保持する。高温における材料の延性を活かし、破断させずに成形することができる。その後金型とblankの温度差により、blankが急冷される。また、金型による冷却速度が十分であるため、焼き入れが可能となる。成形後に自動車部品としての強度要件を満たすた

脚注*1

HFQはImpression Technologies社の商標
<https://hfqtechnology.com/>

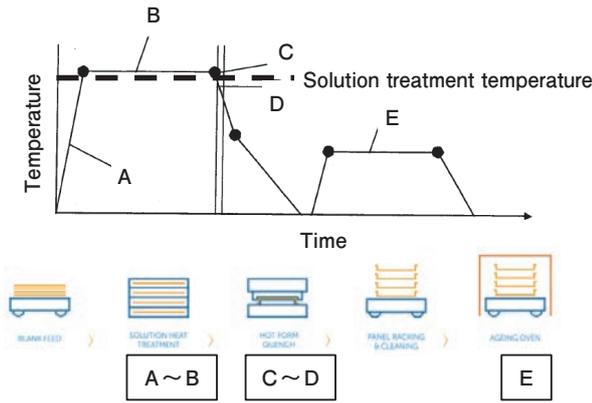


Fig. 13 Schematic of HFQ (Hot Form and Quench) process^{12), *1)}.



Fig. 14 Application example of HFQ (Inner door panel)^{*1)}.

めに、人工時効熱処理を実施し、所定の強度を得る(E)。Fig. 14 (*1) に示す製品例のようにHFQを用いることで複雑形状を一体で成形可能となる。

従来のホットスタンプでは最初の溶体化処理温度までの加熱時間(約10 min¹³⁾)が長い。またプレス後に人工時効を行うことで所定の強度が得られるが、これらは生産性の面およびコストの面で課題となる。

これに関して、前野らはプレス成形後の人工時効を必要としないホットスタンプ成形方法を提案している。Fig. 15に示すように、人工時効硬化処理された素材(7075-T6)の強度が低下しない程度に、接触加熱方式により短時間のうちに材料を加熱し、プレス成形を行う。これによりホットスタンプ後の人工時効処理を省略できるためプロセスの時間短縮が可能となる^{14), 15)}。

ホットスタンプ用アルミニウム合金の特性や成形性は試験温度・冷却速度に依存しているため、正確に目標温度まで加熱・冷却できる試験方法や試験装置が必要となる。一軸引張試験では、Fig. 16に示すように、試験治具による熱損失を減らすために、チャック部と試験片を断熱すると同時に、空気冷却を組み合わせる

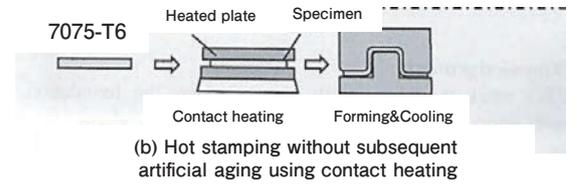
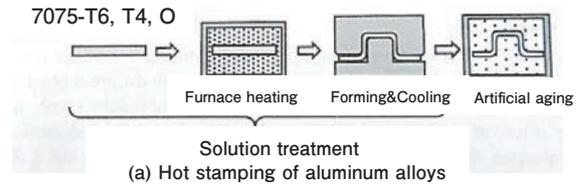


Fig. 15 Hot stamping of aluminum alloys with solution treatment and hot stamping without subsequent artificial aging using contact heating¹⁴⁾.

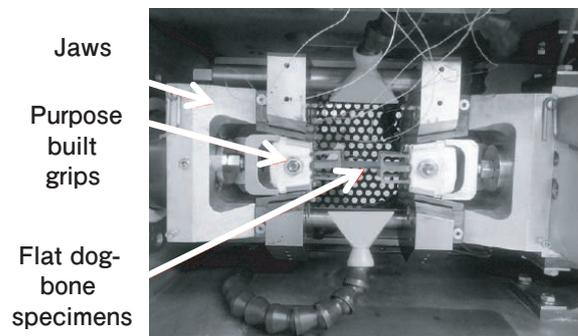


Fig. 16 High-temperature uniaxial tensile test fixture⁴⁾.

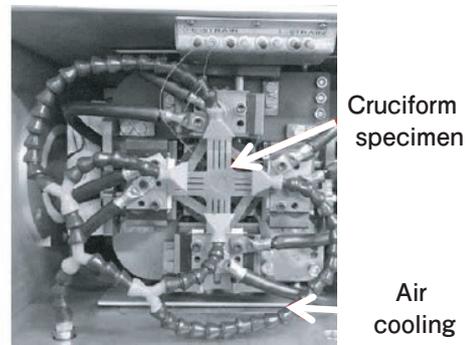


Fig. 17 Biaxial tensile test fixture for evaluating forming limits under high-temperature⁴⁾.

ことでホットスタンプにおける複雑な温度履歴を再現できる。成形性評価では、Fig. 17に示すような空冷システムを組み合わせた高温二軸引張試験治具を用いて、異なる変形領域における成形限界を評価することでFig. 3のような高温条件でのFLD (Forming Limit Diagram)を作成できる。

アルミニウム合金のホットスタンプ加工法の特徴を下記にまとめる。

- 複雑な形状を一体化することができるため、コストダウンを実現できる。また、部品点数を削減で

きるため、工程簡略化が可能となる。

- 延性の向上により、部品設計の自由度が向上する。
- スプリングバックはほとんどなく、形状凍結性に優れる。

4. おわりに

本稿では、アルミニウム合金板の熱間成形加工技術を紹介した。アルミニウム合金板の高温における変形特性を利用することで成形性を向上させることができる。それにより、複雑形状の一体化や、高強度材の成形が可能となる。この特性を活用し、アルミニウム合金板でも幅広い分野への適用が期待される。

参考文献

- 1) 大塚正久, 堀内 良: 軽金属, **27** (1977), 85-101.
- 2) 新里喜文, 浅野峰生: UACJ Technical Reports, **5** (2018), 64-68.
- 3) 東 健司: 粉体工学会誌, **25** (1988), 528-536.
- 4) Z. Shao, N. Li, M. Ganapathy and T. A. Dean: Procedia Manufacturing, **15** (2018), 6-13.
- 5) C. Xu, M. Furukawa, Z. Horita and T. G. Langdon: Advances in Superplasticity and Superplastic Forming (2004), 193-200.
- 6) Furukawa-Sky Review, **7** (2011), 30-31.
- 7) 阿部佑二: アルミニウムの加工方法と使い方の基礎知識, 軽金属製品協会 (2004), 152-158.
- 8) 福地文亮, 林 登, 小川 努, 横山 鎮, 堀 出: 軽金属, **55-3** (2005), 147-152.
- 9) Furukawa-Sky Review, **1** (2005), 40-41.
- 10) J. G. Schroth: Advances in Superplasticity and Superplastic Forming (2004), 9-20.
- 11) M. S. Niazi, P. Amborn, E. Lamers and J. Hirsch: IOP Conf. Series: Mater. Sci. Eng. **651** (2019), 012003
- 12) J. Lin, T. Dean, R. P. Garrett and A. D. Forter: Patent Application, WO2008059242 A2.
- 13) R. P. Garrett, J. Lin and T. A. Dean: Int. J. Plasticity, **21** (2005), 1640-1657.
- 14) 前野智美, 斎藤拓己, 飛田夏葵, 森 謙一郎, 谷口俊哉: 平成30年度塑性加工春季講演会講演論文集, (2018), 25-26.
- 15) 前野智美, 飛田夏葵, 斎藤拓己, 森 謙一郎, 谷口俊哉: 第69回塑性加工連合講演会講演論文集, (2018), 163-164.



劉 午陽 (Wuyang Liu)

(株)UACJ マーケティング・技術本部
R&D センター 第二開発部,
博士 (工学)