

課題研究成果報告書

発泡中のソフトプレス加工による発泡アルミニウムの形状付与

Shaping of aluminum foam by soft press forming during foaming process

群馬大学 半谷禎彦

転位強化と析出強化を両立したアルミニウム合金の高強度化プロセスと
マイクロメカニクス解析

Simultaneous precipitation and dislocation strengthening of age-hardenable
aluminum alloys and its micromechanical analysis

東京工業大学 村石信二

耐用温度300°Cを実現する鋳造アルミニウム基超合金の設計と組織形態制御

Designing and Microstructural Control of Cast-Type Aluminum-Based
Superalloys Applicable at 300°C in Service

名古屋大学 高田尚記

レーザ積層造形法による金属間化合物分散型耐熱アルミニウム合金の創製

Fabrication of heat-resistant aluminum alloys dispersed with intermetallic
compounds using selective laser melting

大阪産業技術研究所 木村貴広

July 2022



公益財団法人 軽金属奨学会



公益財団法人 軽金属奨学会
The Light Metal Educational Foundation Inc.

発泡中のソフトプレス加工による
発泡アルミニウムの形状付与

群馬大学 大学院理工学府

教授 半谷禎彦

目次

I. 研究の概要	1
II. 研究の成果	11
III. 総括と今後の展望	13
IV. 謝辞	14

I. 研究の概要

発泡中のソフトプレス加工による発泡アルミニウムの形状付与

1. はじめに

発泡アルミニウムは、アルミニウム内部に多数の気孔を導入した軽量性・衝撃吸収性・吸音性に優れる素材である。発泡アルミニウムを工業製品として利用するためには、製品形状に加工することが求められる。しかし、薄いセル壁からなるため、すぐに気孔がこわれてしまい発泡アルミニウムの加工は難しい。今までに、レーザー加工⁽¹⁾や曲げ加工⁽²⁾などが試みられているが、研究自体が少ないのが現状である。一般的に発泡アルミニウムの形状付与法として、発泡時の金型利用が挙げられる。この場合、金型にそった形状になる。金型に接しても気孔が潰されることはなく、その形状に作製できることが知られている。

本研究では、発泡アルミニウムの作製にプリカーサ法⁽³⁻⁵⁾を適用し、作製した発泡アルミニウムの形状付与を試みた。プリカーサ法は、図1⁽⁶⁾のように固体のアルミニウムにあらかじめ発泡剤を混合したプリカーサを作製し、そのプリカーサを加熱することで、発泡剤から発生したガスにより熔融したアルミニウムを発泡させるものである。

著者らは、光加熱によりプリカーサの発泡を試みている^(6,7)。光加熱は開空間での加熱であるため、加熱発泡中にプレス加工などを簡単に行うことができる。またプリカーサが熔融状態であるため、低荷重でプレス加工できることもわかっている。そこで本研究では、①プレス加工の応用、②ロール成形、③ベルトコンベアによる連続発泡、④切断加工を試みたので報告する。

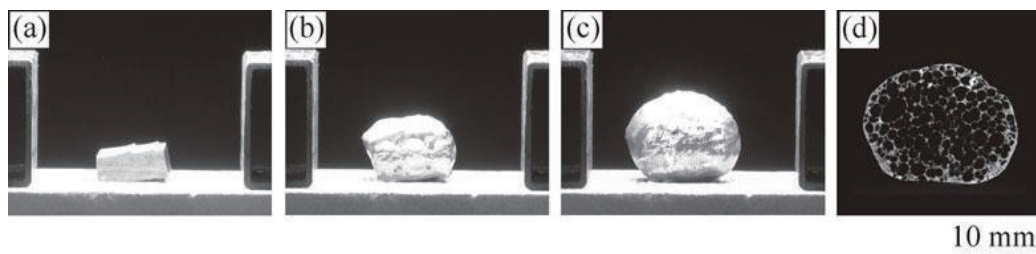


図1 プリカーサ法. (a) 固体のアルミニウム中に発泡剤を混合したプリカーサ. (b)-(c) プリカーサを加熱すると発泡する. (d) 発泡したアルミニウムの X 線 CT 画像. 内部に多数の気孔が生成している.

2. 研究の発端

著者らは、図2⁽⁶⁾のように、ガラスやサファイアを透過した光によりプリカーサが発泡でき、かつガラスやサファイアにより上方への発泡を拘束し、上面を平面に形状を付与できることを見出した。拘束する素材としては

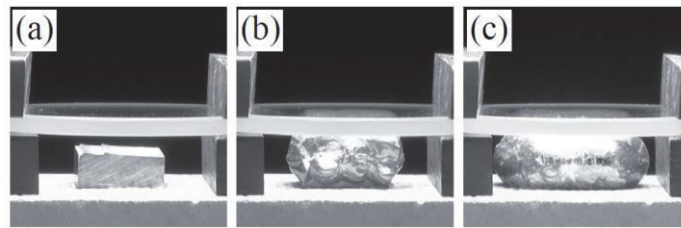


図2 ガラスを透過した光によりプリカーサを発泡させ上方への発泡を拘束。

光を透過すれば良いため、金網（スチールメッシュ）でも可能であった^(7,8)。

ところで、発泡時の金型を利用した方法では、発泡アルミニウムは金型にそった形状になり、金型に接しても気孔が潰されることはない。ここで、発泡時にガラスやサファイアを下方に動かしても上方への発泡を拘束できると考えられる。実際に発泡直後にプレス加工したものが図3⁽⁹⁾である。発泡中、あるいは発泡直後にプレス加工しても気孔が潰されることなく材料流動し、形状を付与できることがわかる。

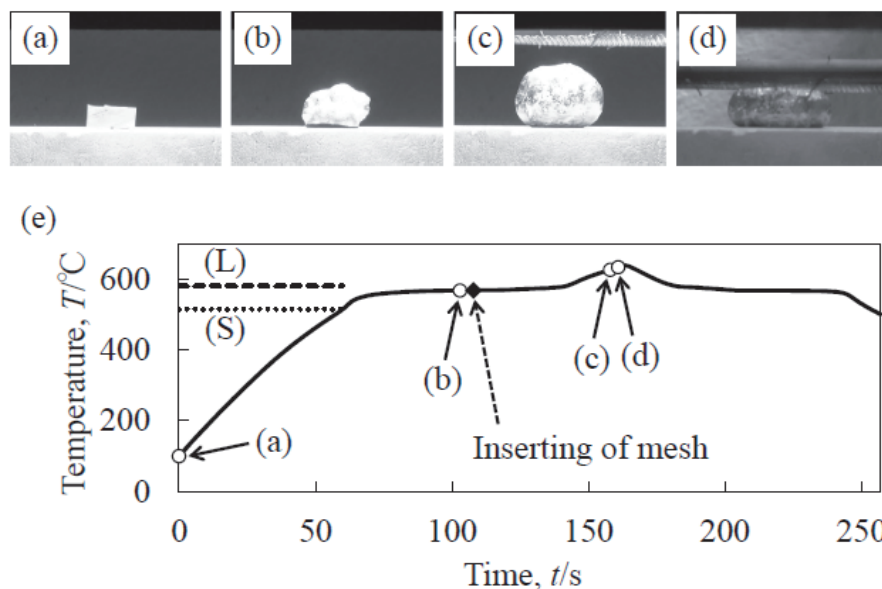


図3 発泡したプリカーサのプレス加工の様子，およびその時の温度履歴。母材の液相線温度を越えると大きく発泡する。加熱終了直後に金網によりプレス加工することで形状付与でき、気孔が圧潰する様子も見られない。

3. 本研究の成果

3. 1 プレス加工

図4⁽¹⁰⁾は、プリカーサ発泡直後にプレス加工を行ったものである。多数のピンからなる点群金型により試みたものである。図4aは星形のモデルであり、この形状を点群金型に転写させ金型とした。図4bはその金型により、プレス加工した発泡アルミニウムである。周囲にバリが発生しているが、星形に成形できている。図4c, dはX線CT画像であり、気孔がプレス加工により圧潰することなく維持されていることがわかる。これより、プリカーサの発泡中にプレス加工を行うことで金型形状の発泡アルミニウムを作製することができ、気孔形態が維持できることがわかった。

次に、2つのプリカーサを同時に発泡させ、プリカーサ発泡過程におけるプレス加工を利用して形状付与と同時にそれらの接合を試みた⁽¹¹⁾。プリカーサ法でも大きなプリカーサを加熱発泡することで大型の発泡アルミニウムの作製は可能である。しかし、プリカーサの寸法・形状によって用途が限られてしまい、使用用途ごとに異なる形状のプリカーサが必要となる。そこでプリカーサの加熱発泡中に、複数の小さなプリカーサを発泡力により接合することで発泡アルミニウムを大型化することが可能だと考えられる。2つのプリカーサを同時に発泡させプレス加工を行うことで、それらが接合され1つの発泡アルミニウムを作製することができた。また、接合した発泡アルミニウムの4点曲げ試験時の曲げ強度は、発泡アルミニウム自体の母材曲げ強度とほぼ同等であった。破断面を観察すると、ポーラス構造が確認できたため、母材破断していることがわかった。このことから発泡アルミニウムの母材強度と同等の強度を有する接合ができることがわかった。

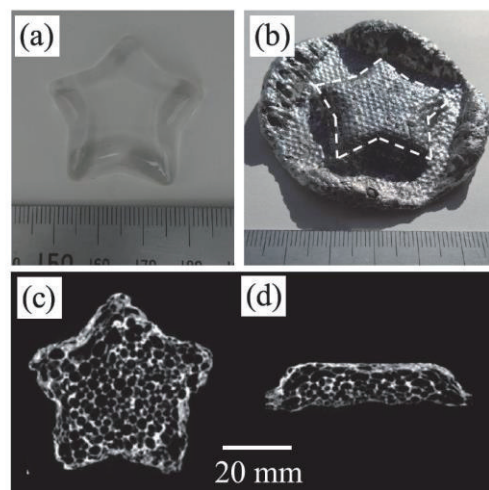


図4 プレス加工による形状付与の一例。(a) 星形のモデル。(b) プレス加工により得られた星形状の発泡アルミニウム。(c) 上方から観察したX線CT画像。(d) 横方向から観察したX線CT画像。気孔が維持されている。

次に、加熱発泡直後のプレス加工中に気孔がどのように変形しているか X 線透過により“その場観察”を行い、内部気孔の逐次追跡を試みた^(12, 13)。図 5⁽¹³⁾は、プレス加工中の気孔の透過画像である。気孔はプレス加工により圧潰することなく、気孔を維持しながら材料流動することで発泡アルミニウムの形状を変化させることができることがわかった。また、プレス加工により気孔率もほぼ変化しないことも示唆された。

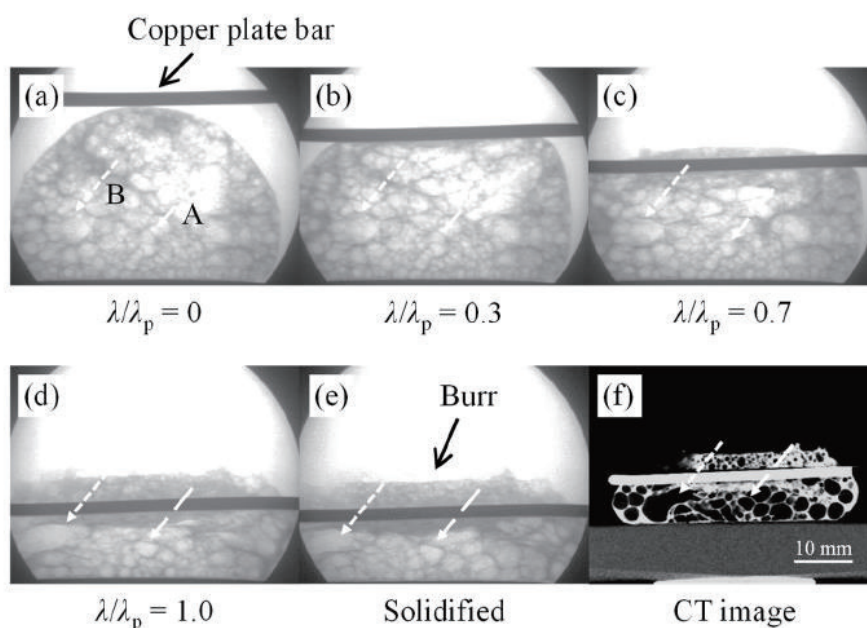


図 5 プリカーサ発泡直後のプレス加工を X 線透過により観察. (a)-(d) プレス加工中の様子. 白矢印で示した A, B の気孔は、場所は変わっているが、形状はほぼ維持されている. (e) 凝固後の発泡アルミニウムの X 線透過画像と、(f) 凝固後の発泡アルミニウムの X 線 CT 画像を比べると、X 線透過画像でも気孔を明瞭に観察できていることがわかる.

3. 2 ロール成形

図6は、プリカーサが発泡した直後にローラーで平面形状の付与を試みたものである⁽¹⁴⁾。図6 aに示すようにプリカーサを設置し、図6 bに示すようなローラーを用いた。図6 c, dに示すように、プリカーサを加熱し発泡したら、消灯と同時にランプ下から外に引き出し、図6 e, fに示すように、凝固する前にロール成形を行った。図6 gに、ロール成形により得られた発泡アルミニウムを示す。見えている上面がロール成形をした面である。若干バリが出ている様子が見られる。これは、ロール成形時に、ローラーと鉄の棒の隙間に入ってしまったアルミニウムである。しかしながら、図6 dに見られるような山形状に発泡した発泡アルミニウムを、ロール成形により平面状に加工できることがわかる。図6 hにX線CT画像を示す。ロール面の上から観察したような画像となっている。これより、気孔を壊すことなく発泡アルミニウムの成形ができることがわかる。通常、常温下で発泡アルミニウムをロール成形すると、圧縮試験のように気孔が潰れてしまう。しかしながら、本研究のように、発泡直後にロール成形することで気孔形態を維持したまま、形状付与を行うことができると考えられる。

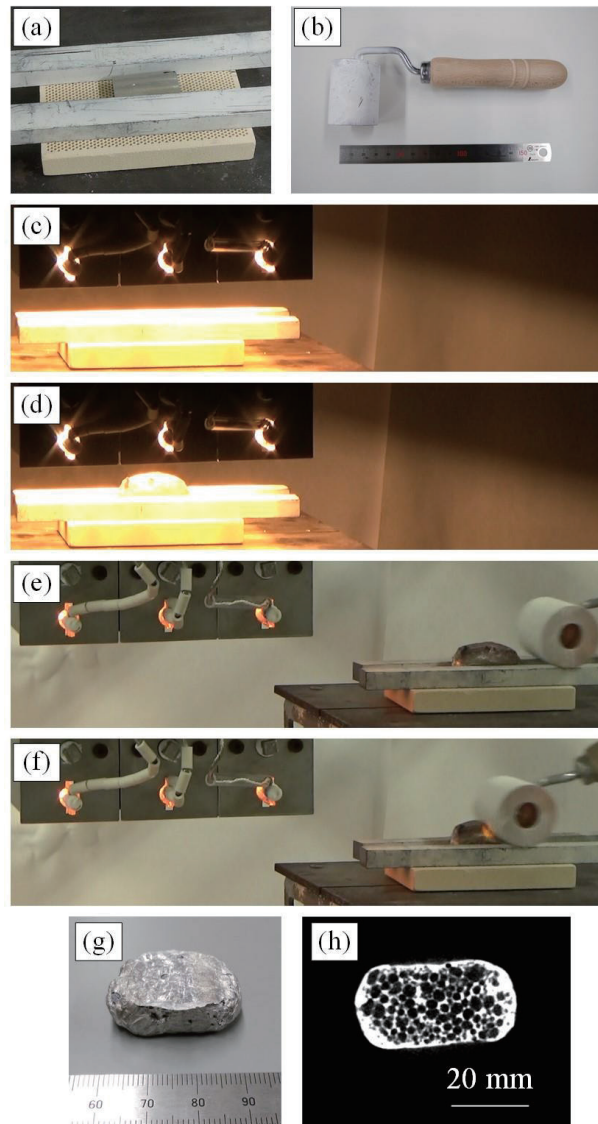


図6 (a)プリカーサ設置方法. (b) 用いたローラー. (c)-(d) プリカーサの発泡. (e)-(f) 発泡アルミニウムのロール成形の様子. (g) 得られた平面形状の発泡アルミニウム. (h) 得られた発泡アルミニウムのX線CT画像. 気孔がロール成形後も維持されている.

3. 3 ベルトコンベアによる連続発泡

図7⁽¹⁵⁾は、ベルトコンベアにより、多数のプリカーサを連続的に発泡させることを試みたものである。ランプに印可する電流・電圧や、ベルトコンベアの手速を調整することで、それぞれのプリカーサは同じような温度履歴を示し、連続的に発泡させられることが示唆された。

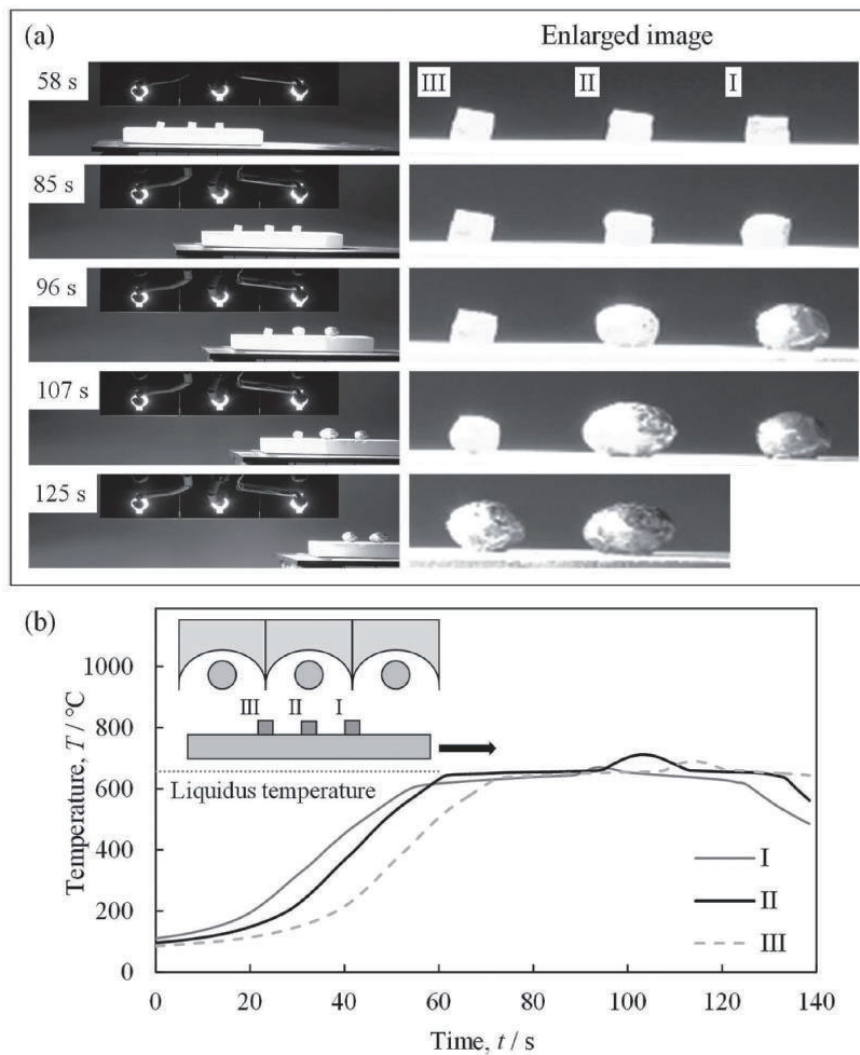


図7 (a)3つのプリカーサは、左から右にベルトコンベアでランプの下を通り、順に加熱される。右図はプリカーサ部の拡大図であるが、右のプリカーサから順に発泡している様子が見られる。(b)温度履歴から、3つのプリカーサともに、ほぼ同様の温度履歴となっていることがわかる。

また、図8⁽¹⁶⁾のように、それぞれのプリカーサの合金種が異なり、発泡温度が異なるプリカーサを同一ライン上で発泡させる試みも行った。同一ライン上で発泡させるためには、それらの発泡に要する時間を等しくする必要がある。本研究では、光源との距離を適切に調節することで異種合金のプリカーサを、十分に発泡させ連続作製が可能であった。

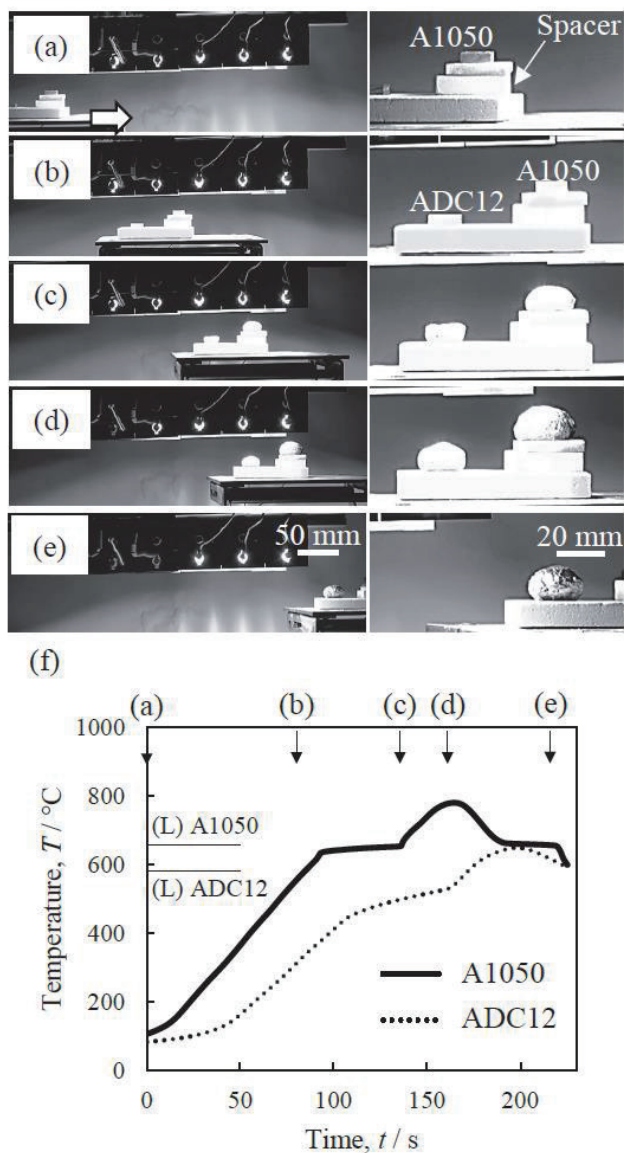


図8 (a)-(e)ADC12（低発泡温度）とA1050（高発泡温度）が順に加熱され発泡している様子が見られる。(f)温度履歴をから、それぞれの母材の液相線温度(L)を越え、発泡温度に達していることがわかる。

3. 4 切断加工

発泡アルミニウムは常温下で切断加工をすると、圧力で気孔が潰れる問題がある。そこで図9⁽¹⁷⁾のように、発泡直後の軟化した状態で発泡アルミニウムの切断加工を試みた。放射温度計で計測した表面温度が液相線温度直下になった時に切断することで、気孔形状を維持したまま切断加工できた。常温下での切断加工よりも低荷重で切断できることが期待される。なお、それよりも温度が低下すると凝固して硬化するため、刃を通過できず切断を行うことが困難であった。

また、これを応用して、加熱発泡直後の発泡アルミニウムの切断加工を行い、切断後、冷却しきる前にポリカーボネートを切断面に圧着して接合を試み、母材破断が実現する良好な接合が達成できた⁽¹⁸⁾。また、ポリカーボネートが発泡アルミニウムの気孔部に侵入することでアンカー効果が生じ、強固な接合を行うことができた。さらに、切断、接合による発泡アルミニウムの内部の気孔形状への影響は見られなかった。すなわち、発泡アルミニウムの特性を損なわずにポリカーボネートとの接合が可能であることが示唆された。この方法を利用することで、発泡アルミニウムの作製から接合までのプロセスを同一工程で行うことができることが期待される。

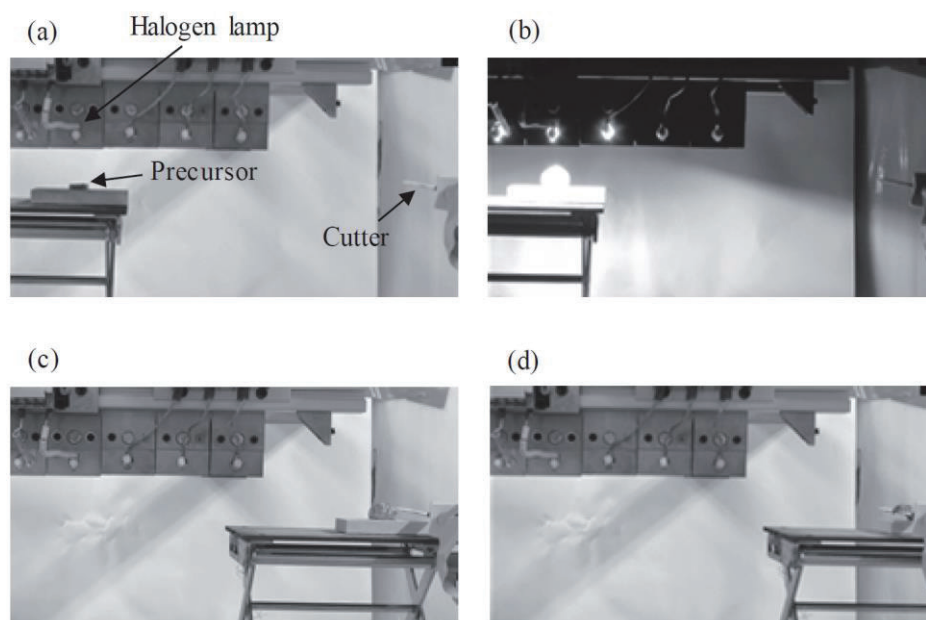


図9 発泡アルミニウムの発泡と発泡直後の軟化した状態での切断加工。
(a) 加熱前. (b) 加熱発泡中. (c)発泡直後, 発泡アルミニウムをカッターの近くに移動. (d) カッターにより切断.

4. おわりに

本研究では、プリカーサ法において発泡させた直後の軟化した状態における加工を行い形状付与を試みた。①プレス加工，②ロール成形，③ベルトコンベアによる連続発泡，④切断加工などを試み，気孔形態を維持しながらの加工ができることが示唆された。今後は，大型化や加工精度について研究を進めていくことが不可欠であると考えられる。

文献

- (1) Changdar A., Chakraborty S. S., Laser processing of metal foam - A review, *J Manuf Process*, Vol.61, (2021), pp.208-225.
- (2) 竹腰功, 久米裕二, 小橋眞, 金武直幸, アルミニウムフォームサンドイッチの部分圧縮成形における変形挙動, 第64回塑性加工連合講演会, (2013).
- (3) Baumgartner F., Duarte I., Banhart J., Industrialization of powder compact foaming process, *Adv Eng Mater*, Vol.2, (2000), pp.168-174.
- (4) 小橋眞, 棚橋伸也, 金武直幸, Al-TiH₂ 混合粉末プリカーサの加熱によるポーラスアルミニウムの発泡過程, *軽金属*, Vol.53, (2003), pp.427-432.
- (5) Hangai Y., Utsunomiya T., Hasegawa M., Effect of tool rotating rate on foaming properties of porous aluminum fabricated by using friction stir processing, *J Mater Process Technol*, Vol.210, (2010), pp.288-292.
- (6) Hangai Y., Amagai K., Tsurumi N., Omachi K., Shimizu K., Akimoto K., Utsunomiya T., Yoshikawa N., Forming of aluminum foam using light-transmitting material as die during foaming by optical heating, *Mater Trans*, Vol.59, (2018), pp.1854-1859.
- (7) Hangai Y., Amagai K., Omachi K., Tsurumi N., Utsunomiya T., Yoshikawa N., Forming of aluminum foam using steel mesh as die during foaming of precursor by optical heating, *Opt Laser Technol*, Vol.108, (2018), pp.496-501.
- (8) Hangai Y., Nagahiro R., Ohashi M., Amagai K., Utsunomiya T., Yoshikawa N., Shaping of aluminum foam during foaming of precursor using steel mesh with various opening ratios, *Metals*, Vol.9, (2019), No. 223.
- (9) Hangai Y., Ohashi M., Nagahiro R., Amagai K., Utsunomiya T., Yoshikawa N., Press forming of aluminum foam during foaming of precursor, *Mater Trans*, Vol.60, (2019), pp.2464-2469.
- (10) 半谷禎彦, 都丸拓海, 大橋政孝, 天谷賢児, 宇都宮登雄, 吉川暢宏, 点群金型

による発泡中のポーラスアルミニウムのプレス加工, *軽金属*, Vol.70, (2020), pp.194-196.

(11) 大橋政孝, 半谷禎彦, 天谷賢児, 松原雅昭, 鈴木良祐, 宇都宮登雄, 吉川暢宏, 複数プリカーサ発泡過程のプレス加工によるポーラスアルミニウムの接合, *軽金属*, Vol.70, (2020), pp.517-522.

(12) Hangai Y., Kawato D., Ando M., Ohashi M., Morisada Y., Ogura T., Fujii H., Nagahiro R., Amagai K., Utsunomiya T., Yoshikawa N., Nondestructive observation of pores during press forming of aluminum foam by X-ray radiography, *Mater Charact*, Vol.170, (2020), No.110631.

(13) Hangai Y., Kawato D., Ohashi M., Ando M., Ogura T., Morisada Y., Fujii H., Kamakoshi Y., Mitsugi H., Amagai K., X-ray radiography inspection of pores of thin aluminum foam during press forming immediately after foaming, *Metals*, Vol.11, (2021), No. 1226.

(14) Hangai Y., Suzuki K., Ohashi M., Mitsugi H., Amagai K., Roll forming of aluminum foam immediately after precursor foaming, *Results in Engineering*, Vol.10, (2021), No.100224.

(15) Hangai Y., Ohashi M., Nagahiro R., Amagai K., Utsunomiya T., Yoshikawa N., Continuous foaming of multiple aluminum foam precursors by combining conveyor and optical heating, *Mater Trans*, Vol.61, (2020), pp.1703-1706.

(16) 大橋政孝, 半谷禎彦, 三ツ木寛尚, 天谷賢児, 宇都宮登雄, コンベヤー光加熱による異種合金ポーラスアルミニウムの連続作製, *軽金属*, Vol.71, (2021), pp.177-179.

(17) 山本貴也, 半谷禎彦, 三ツ木寛尚, 発泡直後のポーラスアルミニウムの切断加工, *軽金属*, Vol.71, (2021), pp.246-250.

(18) 山本貴也, 藤岡巧, 半谷禎彦, 三ツ木寛尚, 加熱発泡直後のポーラスアルミニウムの切断・圧着によるポリカーボネートとの接合, *軽金属*, Vol.72, (2022), pp.27-29.

Ⅱ. 研究の成果

発泡中のソフトプレス加工による発泡アルミニウムの形状付与
研究成果リスト

1. 半谷禎彦, 都丸拓海, 大橋政孝, 天谷賢児, 宇都宮登雄, 吉川暢宏: 軽金属, **70** (2020), 194-196.
<https://doi.org/10.2464/jilm.70.194>
2. 大橋政孝, 半谷禎彦, 天谷賢児, 松原雅昭, 鈴木良祐, 宇都宮登雄, 吉川暢宏: 軽金属, **70** (2020), 517-522.
<https://doi.org/10.2464/jilm.70.517>
3. Yoshihiko Hangai, Daisuke Kawato, Mizuki Ando, Masataka Ohashi, Yoshiaki Morisada, Takuya Ogura, Hidetoshi Fujii, Ryohei Nagahiro, Kenji Amagai, Takao Utsunomiya, Nobuhiro Yoshikawa: Mater. Charact., **170** (2020), 110631.
<https://doi.org/10.1016/j.matchar.2020.110631>
4. Yoshihiko Hangai, Masataka Ohashi, Ryohei Nagahiro, Kenji Amagai, Takao Utsunomiya, Nobuhiro Yoshikawa: Mater. Trans., **61** (2020), 1703-1706.
<https://doi.org/10.2320/matertrans.MT-M2020137>
5. 大橋政孝, 半谷禎彦, 三ツ木寛尚, 天谷賢児, 宇都宮登雄: 軽金属, **71** (2021), 177-179.
<https://doi.org/10.2464/jilm.71.177>
6. 山本貴也, 半谷禎彦, 三ツ木寛尚: 軽金属, **71** (2021), 246-250.
<https://doi.org/10.2464/jilm.71.246>
7. Yoshihiko Hangai, Mizuki Ando, Masataka Ohashi, Kenji Amagai: Metals, **11** (2021), 140.
<https://doi.org/10.3390/met11010140>
8. Yoshihiko Hangai, Kodai Suzuki, Masataka Ohashi, Hironao Mitsugi, Kenji Amagai: Results in Engineering, **10** (2021), 100224.
<https://doi.org/10.1016/j.rineng.2021.100224>

9. Y. Hangai, D. Kawato, M. Ohashi, M. Ando, T. Ogura, Y. Morisada, H. Fujii, Y. Kamakoshi, H. Mitsugi, K. Amagai: *Metals*, **11** (2021), 1226.
<https://doi.org/10.3390/met11081226>
10. 山本貴也, 藤岡巧, 半谷禎彦, 三ツ木寛尚: *軽金属*, **72** (2022), 27-29.
<https://doi.org/10.2464/jilm.72.27>
11. 藤岡巧, 半谷禎彦, 三ツ木寛尚, 天谷賢児: *日本金属学会誌*, **86** (2022), 17-21.
<https://doi.org/10.2320/jinstmet.J2021042>
12. 大塚駿, 半谷禎彦, 三ツ木寛尚, 天谷賢児: *日本金属学会誌*, **86** (2022), 30-33.
<https://doi.org/10.2320/jinstmet.J2021046>
13. 永井孝直, 半谷禎彦, 三ツ木寛尚, 松原雅昭, 鈴木良祐: *軽金属*, **72** (2022), 16-21.
<https://doi.org/10.2464/jilm.72.16>
14. Yoshihiko Hangai, Kenji Okada, Yuuki Tanaka, Tsutomu Matsuura, Kenji Amagai, Ryosuke Suzuki, Nobuaki Nakazawa: *Mater. Trans.*, **63** (2022), 257-260.
<https://doi.org/10.2320/matertrans.MT-M2021130>

Ⅲ. 総括と今後の展望

本研究課題において、プリカーサ法において発泡させた直後の軟化した状態における加工を行い形状付与を試みた。図1のように、プリカーサの発泡は母材の液相線温度を越えると顕著に起こるが、そこから冷却し凝固しきる前に加工を行うことで、低荷重かつ気孔を維持したまま加工をすることが可能であることが示唆された。得られた知見は以下の通りである。

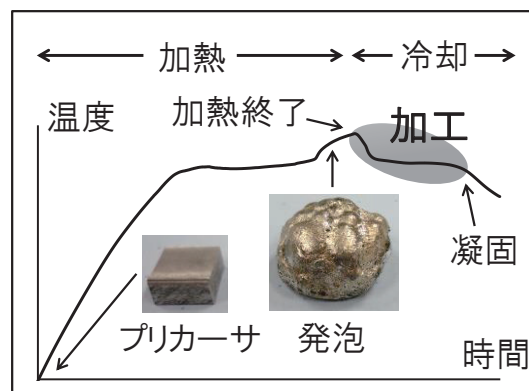


図1 本研究で活用した温度帯

- (1) 気孔形態を維持したままプレス加工できることが示された。
- (2) 気孔形態を維持したままロール成形できることが示された。
- (3) 気孔形態に影響することなく切断加工できることが示された。

研究を進めるうちに、応用的な研究も行うことができた。その観点から、

- (1) 複数プリカーサをプレス加工で接合することができることが示された。すなわち、小さなプリカーサから、大きな発泡アルミニウムを作製できることが示唆された。また、異種合金のプリカーサが混在する状況でも、接合できることが示唆された。
- (2) 複数プリカーサをベルトコンベアにより、順々に発泡させられることが示唆された。また、異種合金のプリカーサが混在する状況でも、発泡させられることが示唆された。
- (3) 発泡アルミニウムを切断した後に、余熱を用いて樹脂と熱圧着させられることが示唆された。すなわち、プリカーサの発泡から樹脂との接合まで一連の工程で実現できることが示唆された。

実用化を見据える際には、大型化や加工精度を実現する研究が次のステップと考えられる。また、得られた発泡アルミニウムが所望の特性を有しているか検査方法の確立も不可欠であり、機械学習などにより特性評価できるシステムも構築したいと考えている。

IV. 謝 辭

本研究課題は、2019年度に採択された公益財団法人軽金属奨学会の課題研究の助成により行われました。本助成によって、発泡アルミニウムの加工の基礎研究を行うことができ、応用面での研究も進めることができました。心より感謝申し上げます。

2019年の夏に採択され研究を進めて参りましたが、2020年になり、コロナ禍の影響で全面的に研究がストップしてしまう事態に陥りました。研究遂行も危ぶまれるなか、軽金属奨学会の事務局の方々には遂行のために、親身に相談にのっていただき、少しでも進められる道と一緒に考えて下さりました。改めて感謝申し上げます。

X線透過撮像では、大阪大学接合科学研究所の藤井英俊先生、森貞好昭先生、小倉卓哉様には、X線装置内で、発泡アルミニウムの加熱およびプレス加工を行い観察するという無茶な要望をかなえて下さり、多大なるご支援をいただきました。試料作製では群馬県立群馬産業技術センターの鎌腰雄一郎様に、X線CT撮像では群馬県立群馬産業技術センターの高橋勇一様、群馬大学の三ツ木寛尚様に、コロナ禍の中、様々ご相談にのって下さり、多大なるご支援をいただきました。光加熱や様々な実験では、群馬大学の松原雅昭先生、天谷賢児先生、鈴木良祐先生、岡田賢二様、後藤悠様にディスカッションやご支援をいただきながら進めることができました。深く感謝申し上げます。

実際の実験やデータの解析などは群馬大学の学生、大橋政孝さん、安藤瑞季さん、川戸大輔さん、大塚駿さん、山本貴也さん、永井孝直さん、都丸拓海さん、鈴木滉大さん、藤岡巧さん、小澤創さんが行ってくれました。皆さんの素晴らしいアイデアと真摯な取り組みにより研究を進めることができました。

最後に、公益財団法人軽金属奨学会の今後益々のご発展を祈念しております。

2022年4月
半谷 禎彦