



Y. Hangai

発泡アルミニウムの高速成形を実現する 発泡直後のプレス加工

半谷 禎彦*

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、通常の緻密金属の加工と異なり、薄いセル壁からなる気孔は加工中に壊れやすいため、発泡アルミニウムの加工は難しい¹⁾。今までに、室温でのレーザー加工²⁻⁵⁾、圧縮成形⁶⁻¹⁰⁾、インクリメンタルフォーミング^{11,12)}、バルジ成形^{13,14)}、押しや圧延加工¹⁵⁻¹⁷⁾などが試みられているが、研究自体が少なく十分になされていないのが現状である。

代表的な発泡アルミニウムの作製法の一つにプリカーサ法^{18,19)}がある。プリカーサ法は図1のように固体のアルミニウム中に発泡剤を混合したプリカーサをあらかじめ作製し、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溶融したアルミニウムを発泡させるものである。プリカーサ法における発泡アルミニウムの形状付与は、一般にプリカーサを金型に入れそれを加熱発泡させ金型内に充填する型内発泡によりなされている²⁰⁻²²⁾。この場合、金型にそった形状になり、金型に接した箇所でも気孔が壊れることなく形状付与できる。

図2はプリカーサを加熱発泡させ発泡アルミニウムを得る発泡工程の温度履歴である。プリカーサを加熱し、温度がほぼ一定となる固液共存状態に達すると発泡が徐々に始まる。その後、液相線温度を超えると温度が上昇し急激に発泡する。型内発泡の場合、液相線温度を超え大きく発泡する温度帯を利用している。型内発泡では気孔を維持したまま形状付与できることから、液相線温度近傍あるいはそれ以上で加工すれば、加熱発泡終了後であっても気孔を壊すことなく形状付与できる可能性が示唆される。本研究では、この温度帯でのプレス加工の試みについて報告する。

2. 光加熱

本研究では、ハロゲンランプを用いた光加熱^{25,26)}により直接プリカーサを加熱している。電気炉などのように周囲が囲まれておらず、開空間での加熱であるため、発泡の様子を容易に観察できる。また加熱発泡中や発泡直後に、プレス加工など何らかの加工を任意のタイミングで行うこ

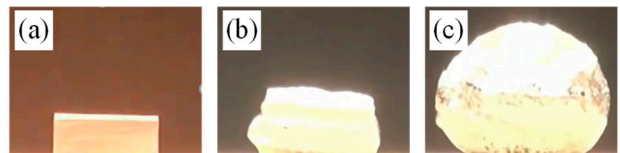


図1 プリカーサ法。(a)固体のアルミニウム中に発泡剤を混合したプリカーサを作製する。(b)-(c)プリカーサを加熱し発泡させる。

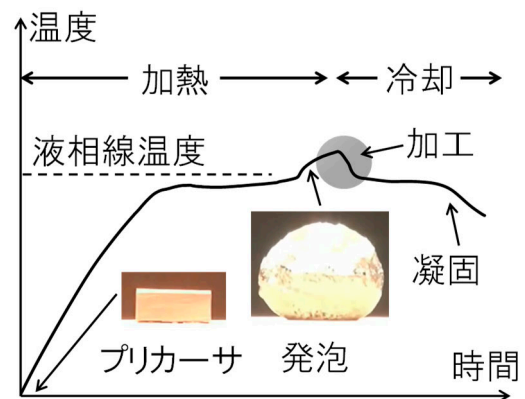


図2 プリカーサ法における発泡工程の温度履歴。灰色の部分为本稿で加工を試みた温度帯である。

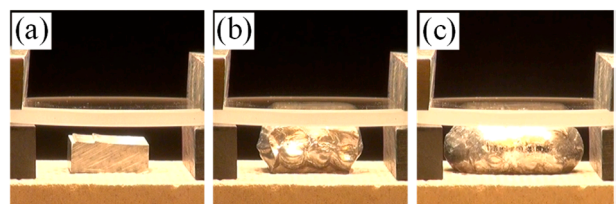


図3 光加熱によるプリカーサの発泡の様子。ガラス板を透過した光によりプリカーサを発泡。気孔を維持したままガラス板により上面への発泡を拘束している²⁵⁾。

とができる。光は直接プリカーサに照射されプリカーサ近傍以外の箇所は高温にならないため、加工装置の耐熱対策が必要な箇所は限定されており比較的容易に加工装置を導入できる。

*群馬大学 教授

光加熱では、図3のようにガラスやサファイアを透過した光により直接プリカーサを発泡でき、かつガラスやサファイアにより上方への発泡を拘束し、型内発泡と同様に気孔を維持したまま上面を平面に形状付与できる²⁵⁾。ガラスは安価で入手しやすいもののアルミニウムと反応しやすく、プリカーサが発泡しガラスに触れると接合し冷却時に熱膨張率の差から割れてしまう。サファイアはガラスのように接合することはほとんどないが、高価であるとともに加工が難しく型としては適切でない。一方、拘束する素材としては光を透過すれば良いため、金網(スチールメッシュ)でも可能であり^{26, 28)}、安価で入手しやすく、加工もしやすい。金網を要求される形状に加工すれば、金網の形状に発泡アルミニウムを形状付与できる²⁹⁾。ただし、光透過性があるものの、高温下では金網もたわみやすいため、高精度に発泡アルミニウムの加工を行うためには発泡直後に金網を熱源と発泡アルミニウムの間に挿入するなど

の工夫が必要である。発泡後に消灯してから加工する場合には、光を透過する必要がないため一般的な加工で用いられる金網を用いることもできる。

3. プレス加工

3.1 プレス加工の試み

図3において発泡時にガラスやサファイアを下方に動かしても、気孔を維持したまま上方への発泡を拘束できる可能性がある。また、開口している金網でも圧縮し発泡アルミニウムが開口部からはみ出さなければ加工できる可能性がある。そこで、図4に示すようなステンレス製金網をプレス金網としてロボットアームに装着し、発泡直後にプレス加工を試みた¹⁾。図5にプリカーサの発泡と、発泡したプリカーサへのプレス加工の様子、およびその時の温度履歴を示す。温度はプリカーサの中心に直接熱電対を挿入して計測を行っている。加熱中はハロゲンランプの電力

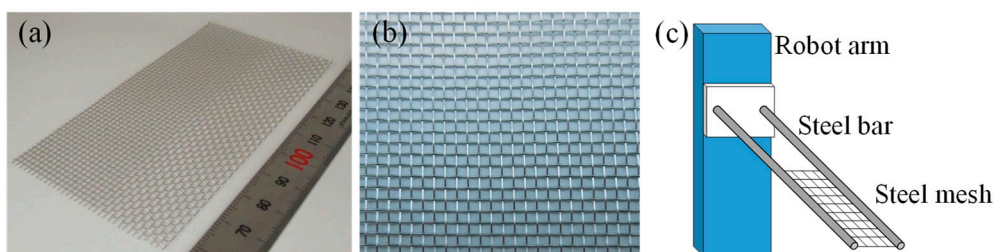


図4 (a)プレス金型に用いた金網。(b)金網の拡大写真。(c)金網をロボットアームに装着した概略図¹⁾。

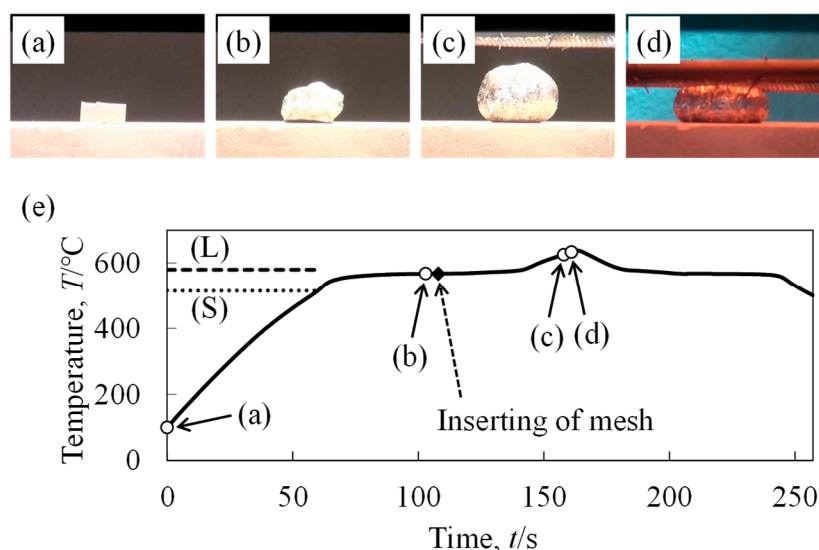


図5 プリカーサの発泡と発泡したプリカーサへのプレス加工の様子、およびその時の温度履歴。(a)-(c)母材の液相線温度を超えると大きく発泡する。(c)の上部に見えるものがプレス加工に用いたプレス金網で、加熱発泡中に導入している。(d)加熱終了直後に金網によりプレス加工することで形状付与でき、気孔が圧潰する様子も見られない。(e)液相線温度を超え大きく発泡し、発泡による膨張が止まったら、加熱をやめ((c)点)プレス加工を行う((d)点)¹⁾。


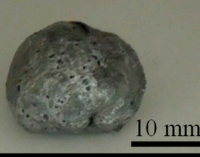
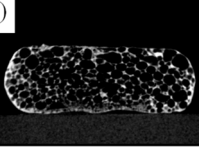
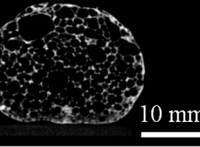
	プレス加工	自由発泡
外観写真	(a) 	(b)  10 mm
X線CT画像	(c) 	(d)  10 mm
気孔率	81.1 %	82.4 %

図 6 (a)プレス加工した発泡アルミニウムの斜め上方から見た外観写真。(b)自由発泡させプレス加工していない(型との接触のない)発泡アルミニウムの斜め上方から見た外観写真。(c)プレス加工した発泡アルミニウムの X 線 CT 画像。(d)自由発泡させプレス加工していない発泡アルミニウムの X 線 CT 画像¹⁾。

を一定とし調温していない。Al-Si-Cu 系の ADC12 アルミニウム合金を用いており、固相線温度 (S) は 515°C、液相線温度 (L) は 580°C である³⁰⁾。プリカーサは固相線温度を超えると発泡し始め、液相線温度を超えると急激に発泡する。予備実験により 630°C 程度で膨張が止まり表面から気孔壁が割れたことによりガス抜けが起こり始めたため、630°C でランプを消灯してプレス加工を行っている。プレス金網は加熱中にプリカーサの温度が固液共存状態にあるうちに導入し、その後は金網を通して光を照射し加熱を続けている。手動でロボットアームに装着した金網をプリカーサ上部まで導入しており、導入するのに多少時間がかかったため金網を加熱中に導入しているが、後述の 3.2 節や 6 章のように任意のタイミングで円滑に導入できる場合は消灯後でも構わない。図 5(d) のプレス加工時の様子を見ると、発泡アルミニウムは延性的に変形している。図 6 に得られた発泡アルミニウムとその X 線 CT 断面画像を示す。プレス加工せず同様の発泡条件で自由発泡させた場合も示す。X 線 CT 画像中、白い部分がアルミニウム、黒い部分が気孔を示している。プレス加工した発泡アルミニウムは自由発泡したものと同様の気孔形態を示しており、プレス加工により内部の気孔を壊すことなく気孔率を 80% 程度に維持しながら形状のみを変えることができることがわかる。また、発泡直後のアルミニウムは柔らかいため、低荷重でプレス加工でき金網でも変形させることができる。なお、消灯前の加熱発泡中に金網でプレス加工することも可能であるが、冷却前に金型を離型すると膨張が継続しているため加工した形状を維持できない。また、消灯後に冷却され液相線温度以下でプレス加工した場合

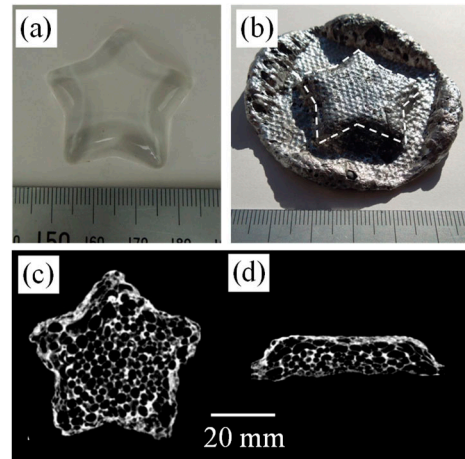


図 7 プレス加工による形状付与の一例。
(a)星形の型のモデル。(b)プレス加工により得られた星形状の発泡アルミニウム。(c)上方から観察した X 線 CT 画像。(d)横方向から観察した X 線 CT 画像。気孔が維持されている²³⁾。

には、内部は固液共存状態であっても外気に触れている表面から凝固するため、発泡アルミニウム表面で割れが生じることがあり、液相線温度以上で行うプレス加工よりも大きな荷重が必要となる。

図 7 は多数のピンによってそのヘッド部で金型表面を形成した点群金型により星形状へプレス加工を試みたものである²³⁾。図 7(a) は星形の型のモデルであり、この形状を点群金型に転写させプレス金型としている。図 7(b) 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 7(c)、(d) は星形に成形した発泡アルミニウムの 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。

図 8 は加熱発泡直後のプレス加工中に気孔がどのような挙動をしているか、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ものである^{27, 31)}。図 8(a)-(d) はプレス加工中の気孔の透過画像である。 λ/λ_p は圧縮率であり、 $\lambda/\lambda_p=0$ がプレスする銅板が発泡アルミニウムに接触した時点、 $\lambda/\lambda_p=1$ がプレスが終了した時点としている。矢印で示した A、B の気孔はプレス加工に伴い位置が変わり、隣接する気孔との合体などにより若干形状が変わっているが、気孔は壊れることなく維持されている。実験のセットアップの都合上、加熱し続けながらプレス加工したため、気孔の合体は発泡過多によるものと考えられる。図 8(e) の凝固後の発泡アルミニウムの X 線透過画像と、図 8(f) の凝固後の発泡アルミニウムの X 線 CT 画像を比べると、矢印で示した気孔が観察されるなど X 線透過画像でも気孔を明瞭に観察できている。すなわち、発

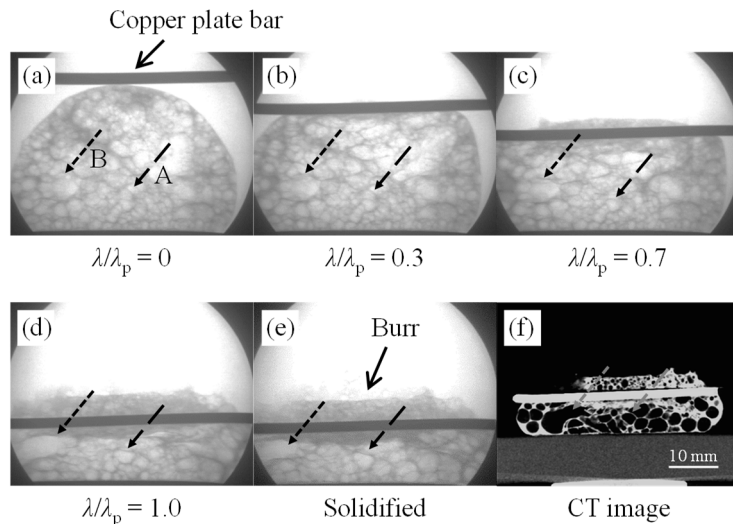


図 8 プリカーサ発泡直後のプレス加工を X 線透過により観察。(a)-(d)プレス加工中の様子。矢印で示した A, B の気孔は、位置は変わっているが、形状はほぼ維持されている。(e)凝固後の発泡アルミニウムの X 線透過画像と、(f)凝固後の発泡アルミニウムの X 線 CT 画像を比べると、X 線透過画像でも気孔を明瞭に観察できている。すなわち、発泡直後のプレス加工では気孔を維持しながら材料流動により発泡アルミニウムを形状付与できる²⁷⁾。

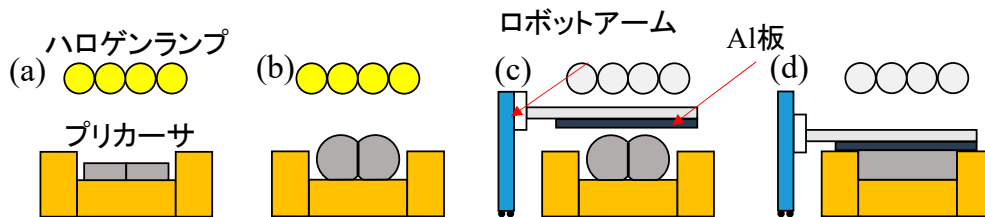


図 9 発泡直後のプレス加工による複数プリカーサの接合の概略図。(a), (b)2つのプリカーサをセラミックスの型に入れ加熱し発泡させる。(c), (d)加熱終了後、プレス金型であるアルミニウム板でプレス加工を行い接合する²⁴⁾。

泡アルミニウムはプレス加工により気孔を保ちながら材料流動することで形状付与できることがわかる。また、X 線透過画像から算出した気孔率も、プレス加工によりほぼ変化しないことも示唆されている。

3.2 発泡直後のプレス加工による発泡アルミニウム同士の接合

前節のように、発泡直後のプレス加工により材料流動が生じることで発泡アルミニウムの形状付与ができることが示せた。そこで2つのプリカーサを同時に発泡させ、プレス加工を利用して形状付与と同時にそれらを接合することを試みた²⁴⁾。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、求められる形状ごとに異なる大きさのプリカーサが必要となる。複数の小さなプリカーサをプレス加工中に接合することができれば、作製が容易な小さなプリカーサを必要量だけ用いて、形状付与しながら一体化し大きな発泡アルミニウムが作製できる。従来の型内発泡でも複数のプリカーサを金型に入れ発泡力で一体化できる

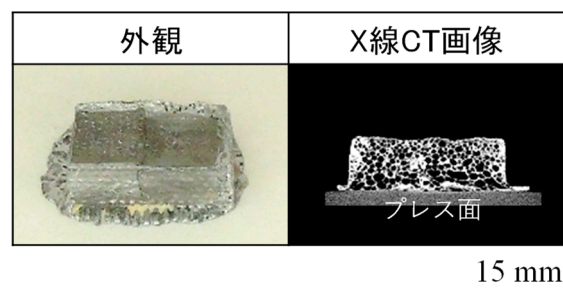


図 10 複数プリカーサの発泡直後のプレス加工により接合した発泡アルミニウムの外観写真と X 線 CT 画像。外観写真の表面には若干の接合線が見られるが、X 線 CT 画像から内部には接合線が見られず気孔も壊れることなく維持されている²⁴⁾。

が^{32,33)}、プレス加工ではさらに大きな材料流動が生じるため接合が容易になることが期待される。

図 9 に接合工程の概略図を示す。図 9(a)のように、2つ

のプリカーサを並べてセラミックス型に入れ、図 9(b)のように光加熱により 2 つのプリカーサを同時に発泡させる。発泡して消灯後、図 9(c)のようにロボットアームに装着した金型を導入し、図 9(d)のようにプレス加工する。なお、ここでは消灯後に金型を導入しプレス加工を行っているため、プレス金型にはアルミニウム緻密板を用いている。図 10 に 2 つの発泡アルミニウムを接合したものの外観写真、およびその X 線 CT 断面画像を示す。表面に若干の接合線が見られるが、内部には接合線が見られず気孔も壊れることなく維持されている。また、切断した試料断面の走査型電子顕微鏡 (SEM) 画像からも表面で接合界面が見られるものの内部では接合線は見られないことを確認している。接合した試料の 4 点曲げ試験も行ったところ、曲げ強度は単体の発泡アルミニウム自体の曲げ強度とほぼ同等で、破断面ではポーラス構造を確認している。接合が不十分な場合、プリカーサ表面の酸化被膜が残存し破断面に現れるが、プレス加工では、材料流動により酸化被膜が破壊されて強固な接合がなされたものと推察される。

4. おわりに

本稿では、プリカーサ法において発泡させた直後の軟化した状態でのプレス加工による形状付与の試み、およびプレス加工による接合の試みについて紹介した。発泡アルミニウムは加工が難しい素材であるが、発泡直後の温度帯を利用することで、気孔形態を維持しながら、それらの加工を実現できる可能性がある。それらの加工を生産性よくできれば発泡アルミニウムの低コスト化にもつながると考えられる。

謝 辞

本研究は、公益財団法人天田財団からの一般研究助成により実施した研究に基づいていることを付記するとともに、同財団に感謝いたします。本報告書の一部は、著者の文献の一部より軽金属学会の許可のもと転載させて頂きました。また、本研究を遂行するにあたり、群馬大学の松原雅昭名誉教授、天谷賢児教授、鈴木良祐准教授にご協力を頂きました。

参考文献

- 1) Hangai, Y., Ohashi, M., Nagahiro, R., Amagai, K., Utsunomiya, T. and Yoshikawa, N.: Press forming of aluminum foam during foaming of precursor, *Mater. Trans.*, **60**-11 (2019), 2464-2469.
- 2) Kathuria, Y. P.: A preliminary study on laser assisted aluminum foaming, *J. Mater. Sci.*, **38**-13 (2003), 2875-2881.
- 3) Quadrini, F., Guglielmotti, A., Squeo, E. A. and Tagliaferri, V.: Laser forming of open-cell aluminium foams, *J. Mater. Process. Technol.*, **210**-11 (2010), 1517-1522.
- 4) Yilbas, B. S., Akhtar, S. S. and Keles, O.: Laser hole cutting in aluminum foam: Influence of hole diameter on thermal stress, *Opt. Lasers Eng.*, **51**-1 (2013), 23-29.
- 5) Changdar, A. and Chakraborty, S. S.: Laser processing of metal foam - A review, *J. Manuf. Process.*, **61** (2021), 208-225.
- 6) Contorno, D., Filice, L., Fratini, L. and Micari, F.: Forming of aluminum foam sandwich panels: Numerical simulations and experimental tests, *J. Mater. Process. Technol.*, **177**-1-3 (2006), 364-367.
- 7) Banhart, J. and Seeliger, H. W.: Aluminium Foam Sandwich Panels: Manufacture, Metallurgy and Applications, *Adv. Eng. Mater.*, **10**-9 (2008), 793-802.
- 8) Gagliardi, F., Filice, L., Umbrello, D. and Shivpuri, R.: Forging of metallic foams to reproduce biomechanical components, *Mater. Sci. Eng. A*, **480**-1-2 (2008), 510-516.
- 9) 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).
- 10) Cai, Z.-Y., Zhang, X. and Liang, X.-B.: Multi-point forming of sandwich panels with egg-box-like cores and failure behaviors in forming process: Analytical models, numerical and experimental investigations, *Mater. Des.*, **160** (2018), 1029-1041.
- 11) Jackson, K. P., Allwood, J. M. and Landert, M.: Incremental forming of sandwich panels, *J. Mater. Process. Technol.*, **204**-1 (2008), 290-303.
- 12) Matsumoto, R., Tsuruoka, H., Otsu, M. and Utsunomiya, H.: Fabrication of skin layer on aluminum foam surface by friction stir incremental forming and its mechanical properties, *J. Mater. Process. Technol.*, **218** (2015), 23-31.
- 13) Nassar, H., Albakri, M., Pan, H. and Khraisheh, M.: On the gas pressure forming of aluminium foam sandwich panels: Experiments and numerical simulations, *CIRP Annals*, **61**-1 (2012), 243-246.
- 14) Mata, H., Santos, A. D., Parente, M. P. L., Valente, R. A. F., Fernandes, A. A. and Jorge, R. N.: Study on the forming of sandwich shells with closed-cell foam cores, *Int. J. Mater. Form.*, **7**-4 (2014), 413-424.
- 15) 宇都宮裕: ポーラス金属の塑性加工による成形と材質制御, *金属*, **80**-10 (2010), 44-50.
- 16) 宇都宮裕, 鶴岡裕之: ポーラス金属の塑性加工, 素形材, **53**-2 (2012), 14-19.
- 17) Weiss, M., Abeyrathna, B. and Pereira, M.: Roll formability of aluminium foam sandwich panels, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, **97**-1 (2018), 953-965.

- 18) Baumgartner, F., Duarte, I. and Banhart, J.: Industrialization of powder compact foaming process, *Adv. Eng. Mater.*, **2-4** (2000), 168-174.
- 19) 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*, **53-10** (2003), 427-432.
- 20) 小橋眞, 金武直幸: プリカーサ法による超軽量ポーラス金属および高融点化合物のプロセス技術 (特集 ポーラス材料の成形技術), *素形材*, **53-2** (2012), 8-13.
- 21) García-Moreno, F.: Commercial applications of metal foams: Their properties and production, *Materials*, **9-2** (2016), 85.
- 22) Duarte, I., Vesenjak, M. and Vide, M. J.: Automated Continuous Production Line of Parts Made of Metallic Foams, *Metals*, **9-5** (2019), 531.
- 23) 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*, **70-5** (2020), 194-196.
- 24) 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*, **70-11** (2020), 517-522.
- 25) Hangai, Y., Amagai, K., Tsurumi, N., Omachi, K., Shimizu, K., Akimoto, K., Utsunomiya, T. and Yoshikawa, N.: Forming of aluminum foam using light-transmitting material as die during foaming by optical heating, *Mater. Trans.*, **59-11** (2018), 1854-1859.
- 26) Hangai, Y., Amagai, K., Omachi, K., Tsurumi, N., Utsunomiya, T. and Yoshikawa, N.: Forming of aluminum foam using steel mesh as die during foaming of precursor by optical heating, *Opt. Laser Technol.*, **108** (2018), 496-501.
- 27) Hangai, Y., Kawato, D., Ohashi, M., Ando, M., Ogura, T., Morisada, Y., Fujii, H., Kamakoshi, Y., Mitsugi, H. and Amagai, K.: X-ray radiography inspection of pores of thin aluminum foam during press forming immediately after foaming, *Metals*, **11-8** (2021).
- 28) Hangai, Y., Nagahiro, R., Ohashi, M., Amagai, K., Utsunomiya, T. and Yoshikawa, N.: Shaping of aluminum foam during foaming of precursor using steel mesh with various opening ratios, *Metals*, **9-2** (2019).
- 29) 半谷禎彦, 鶴見望, 天谷賢児, 宇都宮登雄, 吉川暢宏: 金網金型による発泡アルミニウム発泡時の形状付与, *日本金属学会誌*, **82-12** (2018), 484-486.
- 30) 軽金属学会: アルミニウムの組織と性質, (1991), 軽金属学会.
- 31) Hangai, Y., Kawato, D., Ando, M., Ohashi, M., Morisada, Y., Ogura, T., Fujii, H., Nagahiro, R., Amagai, K., Utsunomiya, T. and Yoshikawa, N.: Nondestructive observation of pores during press forming of aluminum foam by X-ray radiography, *Mater. Charact.*, **170** (2020), 110631.
- 32) 金武直幸, 小橋眞: 超軽量クロードセル型ポーラス金属の創製プロセス, *金属*, **80-10** (2010), 4-10.
- 33) Duarte, I., Oliveira, M., Garcia-Moreno, F., Mukherjee, M. and Banhart, J.: Foaming of AA 6061 using multiple pieces of foamable precursor, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **438** (2013), 47-55.