

加工プロセスによる

ポーラス金属表面へのスキン層形成と機械的特性



研究ノート

松本 良*

Fabrication of Skin Layer on Porous Metal Surface by
Forming Processes and Mechanical Property

Key Words : Porous metal, Forming, Laser, Skin layer, Strength

1. はじめに

ポーラス（多孔質）金属は無数の気孔を有する金属材料である。軽量であることや衝撃吸収特性、制振特性等に優れた特性を有するため、機械部品や構造部材等への適用が期待されている。しかしながら、実用化に向けては機械的特性をはじめとする各種特性の向上が求められており、機械的特性については材質制御や構造制御による向上が取り組まれている。構造制御の一つに、ポーラス金属表面にスキン層（緻密層）を設けることで強度—重量バランスの向上が図られている。スキン層の形成について、例えば、ポーラス金属表面への中実薄板の接合（サンドイッチパネル構造化）¹⁾、ワイヤブラッシング加工²⁾、ショットピーニング加工³⁾等の加工プロセスによる形成手法が提案されている。

本稿では、ポーラス金属表面へのスキン層の形成について、塑性加工技術の一つである摩擦攪拌インクリメンタルフォーミング法と付加製造（Additive Manufacturing）技術の一つである選択的レーザ溶融法による研究事例を紹介する。

2. 摩擦攪拌インクリメンタルフォーミング法によるスキン層の形成⁴⁾

摩擦攪拌インクリメンタルフォーミング（FSIF）法は、インクリメンタル加工と摩擦攪拌接合を組合

わせた金属薄板成形用に提案された塑性加工プロセスであり、高速回転させた棒状工具を金属薄板に押込んで移動させることで金属薄板を成形する⁵⁾。ここでは3軸NC工作機械を用いて、クローズドセル型発泡アルミニウム（神鋼鋼線工業（株）：ALPORAS、気孔率：約90%、平均気孔径：約4mm、Fig. 5(a))に対して、Table 1に示すようにFSIFを適用し、表面近傍のセル壁のみに塑性変形と摩擦攪拌を施すことでスキン層の形成を試みた。

Fig. 1はFSIF、摩擦攪拌を行わない通常のインクリメンタルハンマリング（IH）、通常の単軸圧縮（UC）加工を施した後の加工表面および断面写真である。FSIF、IHで加工された試料は試料内部のセル構造を破壊することなく、表面近傍のみが塑性変形を受けスキン層が形成された。FSIFで形成されたスキン層表面近傍はセル壁の境界面が観察されなかったが、IHで形成されたスキン層はセル壁の境界面が観察された。これは表面近傍のセル壁が塑性変形により折畳まれた後、FSIFではセル壁同士が接合されたためであり、IHではセル壁が折重なったのみである。一方、UCでは試料内部のセル壁が局所的に塑性変形し、試料表面にスキン層は形成できなかった。

Fig. 2は形成されたスキン層の平面率（スキン層表面において金属マトリックスが占める面積率）と厚さである。FSIFの方がIHと比較して、薄く緻密なスキン層が形成できた。

3. 選択的レーザ溶融法によるスキン層の形成^{6),7)}

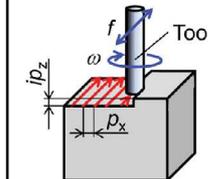
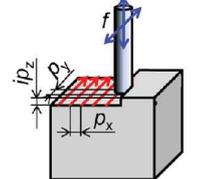
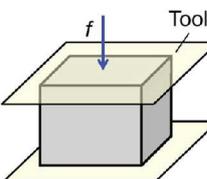
選択的レーザ溶融（Selective Laser Melting）法は、レーザを材料粉末に照射することで照射部を溶融・凝固させ、2次元断面形状を作り、凝固層を順次積層することにより、3次元部品を作製する手法である⁸⁾。ここでは発泡アルミニウム（ALPORAS）



* Ryo MATSUMOTO

1975年7月生
大阪大学 大学院基礎工学研究科 システム人間系専攻 機械科学分野 (2003年)
現在、大阪大学 大学院工学研究科 マテリアル生産科学専攻 材料機能化プロセス工学講座 准教授 博士(工学)
材料加工学, 塑性加工学
TEL : 06-6879-7500
FAX : 06-6879-7522 (学科共通)
E-mail : ryo@mat.eng.osaka-u.ac.jp

Table 1 摩擦攪拌インクリメンタルフォーミング (FSIF), インクリメンタルハンマリング (IH), 単軸圧縮 (UC) 加工の加工様式および加工条件

Forming method	Friction stir incremental forming (FSIF)	Incremental hammering (IH)	Uniaxial compression (UC)
			
Tool rotation rate ω /rpm	8000	0	0
Tool feed rate f /mm·min ⁻¹	60	60	60
Tooling pitch at i -th pass /mm	$p_x = p_z = 0.5$	$p_x = p_y = p_z = 0.5$	$p_z = 5$
Total pass number of forming in z direction n	10	10	1

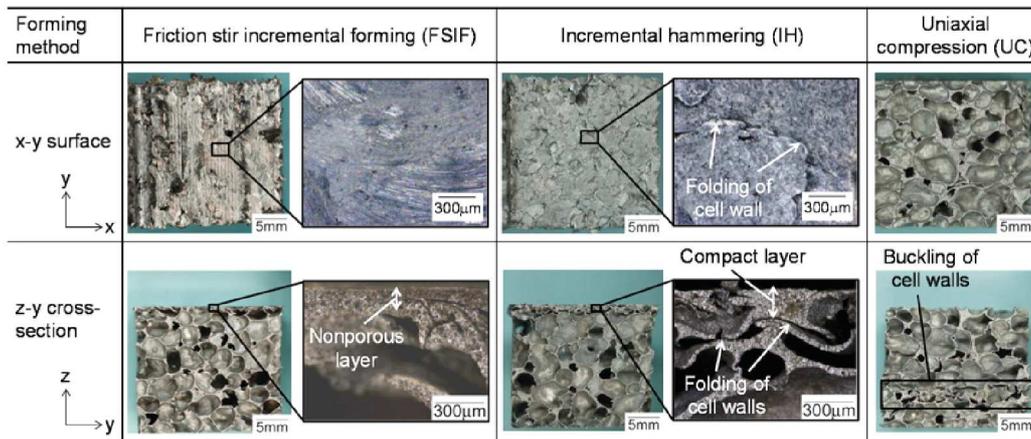


Fig. 1 FSIF, IH, UC 加工後の発泡アルミニウム加工部の表面および断面写真

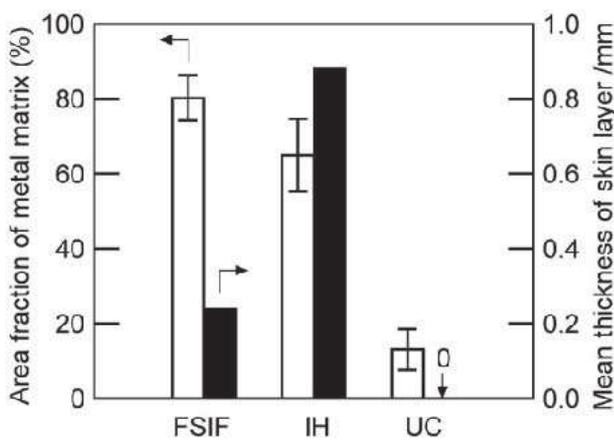


Fig. 2 FSIF, IH, UC 加工で形成されたスキン層の平面率および厚さ (加工深さ $np_z = 5$ mm)

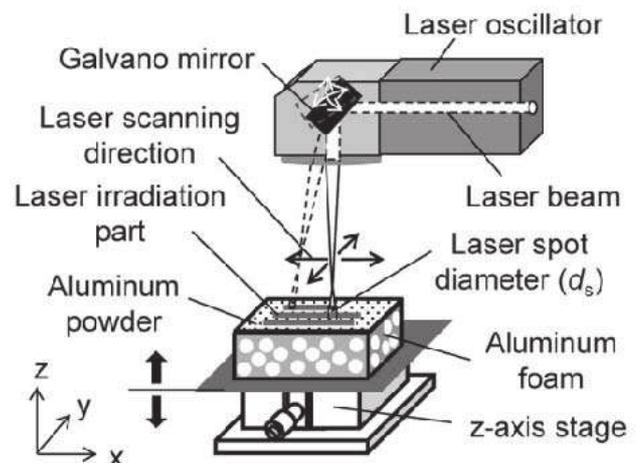


Fig. 3 選択的レーザー溶融 (SLM) による発泡アルミニウム表面へのスキン層形成

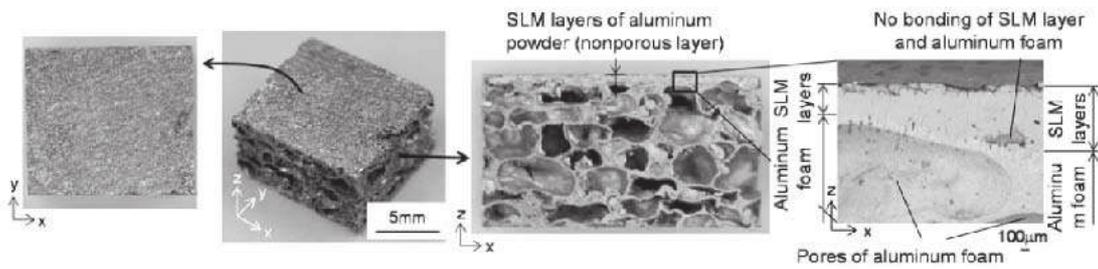
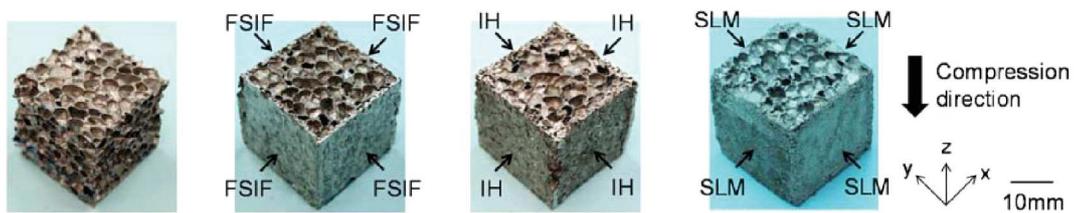


Fig. 4 選択的レーザー溶融 (SLM) により発泡アルミニウム表面に形成されたスキン層 (レーザー照射エネルギー密度: $2.1\text{J}/\text{mm}^2$, アルミニウム粉末積層ピッチ: 0.2mm)



(a) 発泡アルミニウム (b) FSIFスキン層を有する発泡アルミニウム試料 (スキン層なし) (c) IHスキン層を有する発泡アルミニウム試料 (d) SLMスキン層を有する発泡アルミニウム試料

Fig. 5 それぞれの加工法で形成されたスキン層 (側面4面) を有する発泡アルミニウム試料

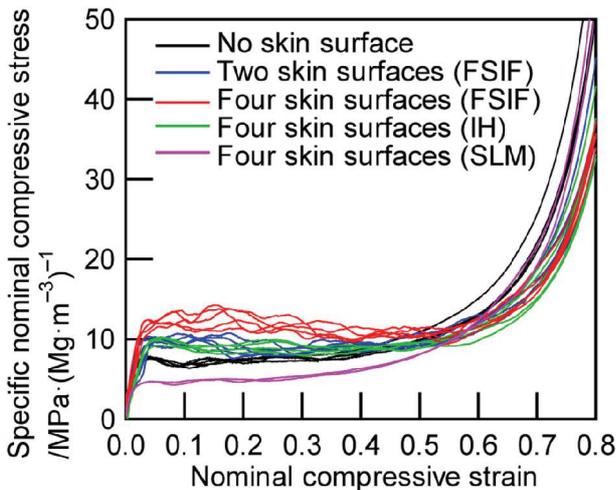


Fig. 6 スキン層を有する発泡アルミニウム試料の比公称圧縮応力-公称ひずみ曲線

表面の気孔内にアルミニウム粉末を供給し、パルス発振 Nd:YAG レーザマーカ (最大平均出力 50W) を用いて、Fig. 3 に示すように SLM を施すことでスキン層の形成を試みた。

レーザー照射条件により、アルミニウム粉末の連続的な線状凝固、非連続的な球状凝固、未凝固 (粉末の飛散) の 3 形態が得られた。Fig. 4 は SLM によりアルミニウムのスキン層を形成した発泡アルミニ

ウムの写真であり、適切なレーザー照射エネルギー密度を設定することで、アルミニウム粉末を溶融・凝固させ、発泡アルミニウムのセル壁とも接合された。またアルミニウム粉末のみならず、樹脂粉末や他金属粉末のスキン層形成も取り組んでおり、マルチマテリアル構造化も可能である。

4. スキン層を有するポーラス金属の圧縮特性

Fig. 5 はスキン層を有する発泡アルミニウムの単軸圧縮試験用試料の外観写真である。スキン層は圧縮方向と平行面にそれぞれの加工法で形成された。

Fig. 6 は得られた比公称圧縮応力 (単位重量あたりの公称圧縮応力) - 公称ひずみ曲線である。いずれの試料も変形初期の弾性領域、応力がほぼ一定のまま変形が進むプラトー領域および多くの気孔が潰れる緻密化領域から構成されるポーラス金属特有のふるまいを示したが、スキン層を有する試料はいずれもプラトー領域のひずみ域は狭くなった。FSIF によるスキン層 (4 面) を有する試料の比プラトー応力は、スキン層がない場合と比較して約 1.6 ~ 2.0 倍に向上したが、IH によるスキン層を有する試料では大きな向上は見られなかった。これは前述し

た通り、FSIFによるスキン層はセル壁同士が接合されることに対して、IHによるスキン層はセル壁が折重なるのみであることに起因する。さらにFSIFによるスキン層は塑性変形と摩擦攪拌により高強度化された可能性もある。一方、SLMによるスキン層を有する試料は比公称圧縮応力の向上が見られなかった。これはスキン層を形成することで相対密度が高くなったにもかかわらず、圧縮初期段階でスキン層が剥離し、強度向上に寄与しなかったためである。SLMによるアルミニウムスキン層の形成においては、スキン層と発泡アルミニウムの接合強度の改善が今後の課題である。

5. おわりに

本稿では、ポーラス金属表面へのスキン層の形成加工とその機械的特性について、筆者が取り組んでいる研究事例を紹介した。摩擦攪拌インクリメンタルフォーミング法および選択的レーザ溶融法いずれの加工によっても適切な加工条件を設定すれば、スキン層を形成可能であった。しかしながら、得られたスキン層を有するポーラス金属の機械的特性の向上については継続課題であり、現在、比強度向上を主眼としたスキン層の形状(厚さ、配置)・材質の最適化、スキン層形成における加工条件の最適化や

新たな加工プロセスによるスキン層の形成に取り組んでいる。

参考文献

- 1) H.-W. Seeliger: Adv. Eng. Mater., 4-10(2002), 753-758.
- 2) J. Lobos, S. Suzuki, H. Nakajima, Y.S. Ji, H. Fujii, D. Terada, N. Tsuji: J. Phys. Conf. Ser., 165-1(2009), 012070.
- 3) 松田一晃, 郡山茂樹, S.-T. Paiboon, 鈴木進輔, 浅川基男, 井手拓哉, 中嶋英雄: 銅と銅合金, 52-1(2013), 92-96.
- 4) R. Matsumoto, H. Tsuruoka, M. Otsu, H. Utsunomiya: J. Mater. Process. Technol., 218(2015), 23-31.
- 5) M. Otsu, T. Ichikawa, M. Matsuda, K. Takashima: Proc. Process. Fabrication of Adv. Mater. XVIII, (2009), 1963-1972.
- 6) S. Kanatani, R. Matsumoto, H. Utsunomiya: Key Eng. Mater., 622-623(2014), 861-867.
- 7) 金谷重宏, 松本 良, 宇都宮 裕: 第65回塑性加工連合講演会講演論文集, (2014), 9-10.
- 8) J.P. Kruth: CIRP Ann. - Manuf. Technol., 40/2(1991), 603-614.

