



K. Shinagawa

傾斜発泡によるアルミフォームの形状・構造制御

品川 一成*

1. 緒言

金属フォームは低密度に由来する特性により超軽量部材、衝撃吸収剤、吸音材などへの応用が期待されている。多孔体を構造材料として用いる場合は、植物や骨の構造に見られるように気孔構造に分布をつけることで、比剛性を効率よく上げることが可能である。このような部材を開発するには傾斜構造の最適化と同様、作製法の研究が重要である。オープンポアの傾斜構造を作製する方法はいくつか提案されているが、強度の点ではクローズドポアが有利と考えられる。インテグラルスキンフォーム成形によって傾斜クローズドセル構造が作製されているが¹⁾、金型による冷却を利用しているため、温度勾配に依存した簡単な形状に限られる。筆者らは発泡剤配合量に分布をつけ、計算機援用の最適化を通して、3次元構造を所望の密度分布で一体化成形することを提案している²⁾。これまでモデル材料としてガラス粉末を用い、インテグラルスキンフォームを作製可能であることを示した³⁾。

本研究では金属フォームへの傾斜発泡の適用を検討した。Al-Si 混合粉末に発泡剤を添加し、円柱状試料に成形後、炉内で円管状の型内に設置し、加熱した。膨張率の異なる層を積層させた場合の試料の形状変化と気孔生成を調査した。また、傾斜発泡過程を解析するために、発泡、膨張挙動のモデル化とシミュレーションも行った。さらに層構造の安定化のためにSiC/TiH₂配合率の膨張挙動への影響を調査した結果を報告する。

2. 実験

2.1 実験方法

Al 粉末(<150 μ m)に7wt%のSi 粉末(2-3 μ m)および安定化のために3wt%のSiC 粉末(150 μ m)を加え、発泡剤としてTiH₂ 粉末(<45 μ m)を混合した。図1はAlおよびAlSi5-3vol.%SiCの成形体(ϕ 30x20mm)の予備焼成実験で得られた気孔率とTiH₂量との関係である。成形体の膨張はTiH₂量とともに非線形に増加するが、含有量を変えることで様々な気孔率が得られる。本研究では積層させるフォームのTiH₂量として、気孔率48%および76%が得られる0.05wt%および0.5wt%を選択する。図2はそれぞれのフォームの外観を示す。気孔サイズもTiH₂量によって変化することがわかる。

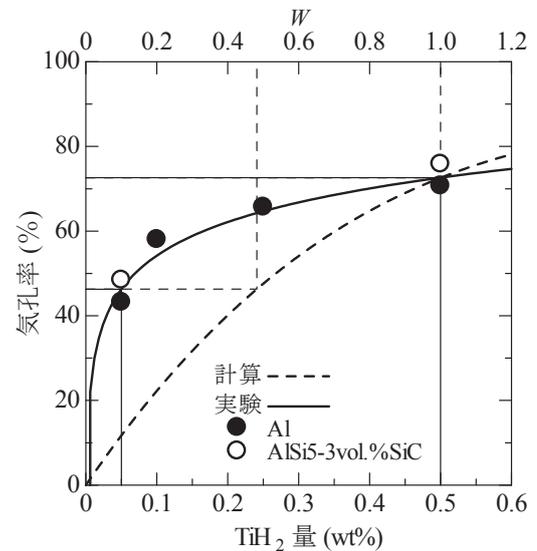


図1 気孔率とTiH₂量との関係: W はシミュレーションで用いる式(5)におけるパラメータ

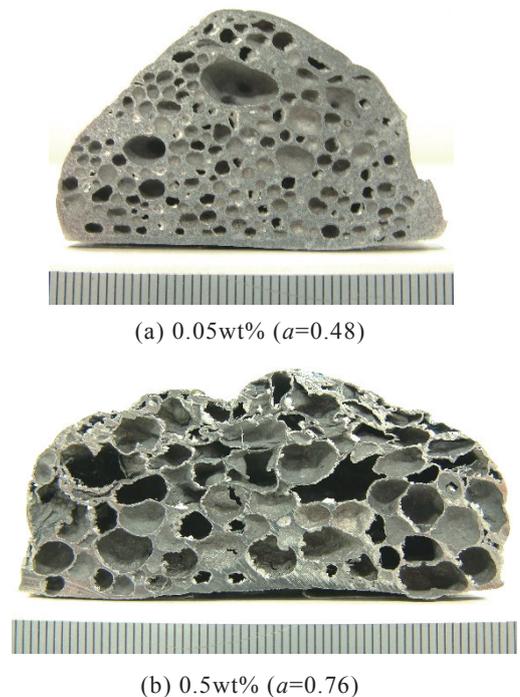


図2 TiH₂量の異なるAlSi5-3vol.%SiCフォームの断面 (a : 平均気孔率)

*香川大学工学部材料創造工学科 教授

表 1 試料

試料	厚さ (mm)	TiH ₂ (wt%)	型寸法 (mm)
L2-M5	10/10	0.5 / 0.05	φ 50
L2-M4	10/10	0.5 / 0.05	φ 42
L2-M3	10/10	0.5 / 0.05	φ 32
L3s	5/5/5	0.05 / 0.5 / 0.05	φ 42
L3t	5/10/5	0.05 / 0.5 / 0.05	φ 42

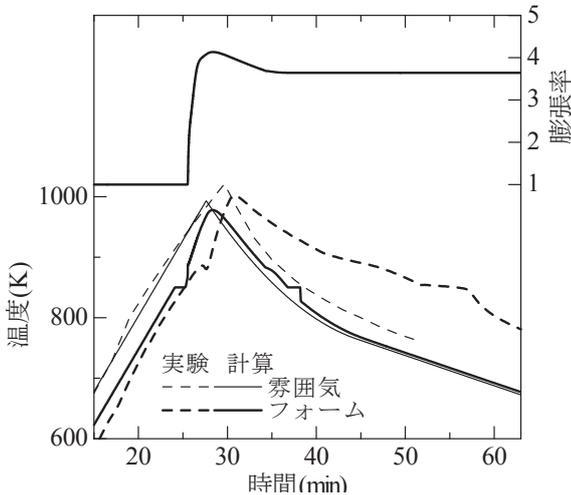
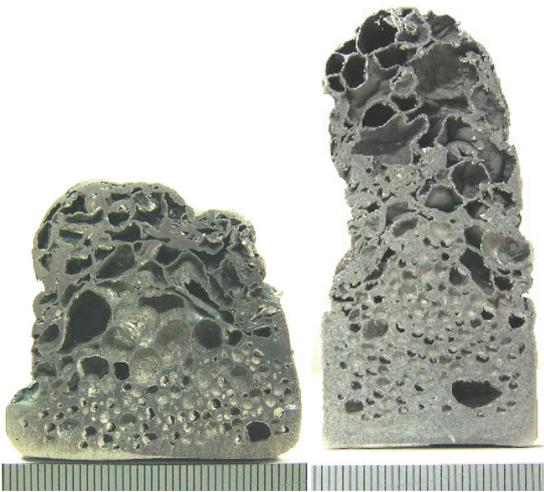


図 3 図 2(b)のフォーム焼成時の温度履歴 (実験および計算) および膨張率 (計算)



(a) L2-M5 ($a=0.60$)



(b) L2-M4 ($a=0.59$)

(b) L2-M3 ($a=0.59$)

図 4 異なる径の型内で焼成した 2 層材試料の気孔構造 (a : 平均気孔率)

積層材試料として、各混合粉末を表 1 に示すように組み合わせ、723K、160MPa で圧粉し、直径約 30mm、高さ約 15~30mm の円柱状前駆体を作製した。2 層材試料 L2 については異なる径の型 (ステンレス製パイプ) を用いて焼成した。また、層厚を変えた 3 層材試料 L3 も作製した。各前駆体試料は電気炉に入れ、試料直下に配置した熱電対の温度が 996K に達した時点で加熱を終了し、その後炉冷した。図 3 は試料底の温度変化の例である。

2.2 実験結果

図 4 は異なる径の型内で焼成した 2 層材試料の断面図である。上層と下層で大小の気孔の生成が確認できる。試料の平均気孔率は図 2 で示した 2 つの独立したフォームの気孔率の平均と等しかった。図 5 に示すように 2 層材試料における気孔サイズ分布もまた、独立したフォームのそれと同様であった。

図 6 は 3 層材試料の断面図である。3 層に相当する 3 つの領域が観察できた。しかし、各領域の形状はそれほどバランスの取れたものではなかった。これは表面張力および重力の影響と考えられる。

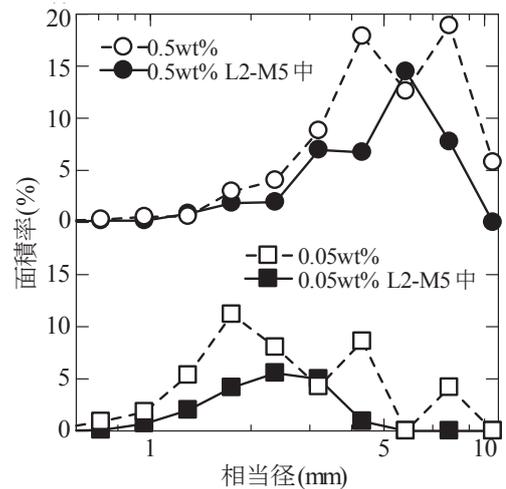


図 5 図 2 の独立したフォームと図 4(a)の積層フォームにおける気孔分布の比較



(a) L3s ($a=0.63$)

(b) L3t ($a=0.62$)

図 6 3 層材試料における気孔構造 (a : 平均気孔率)

3. 解析方法

3.1 構成式

前駆体試料の膨張挙動は以下に示す粘性多孔質体の構成式と発泡剤の化学反応式とを連成させて計算する^{2,4)}.

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{2\eta} \frac{1}{\rho^{2n-1}} \left\{ \sigma'_{ij} + \delta_{ij} \frac{2}{9f^2} (\sigma_m + \sigma_s - p_g) \right\} \quad (1)$$

$$f = 1 / (1.5\sqrt{1-\rho}), \quad n=1 \quad (2)$$

$$\sigma_s = \frac{2\gamma}{r_0} \sqrt[3]{\frac{\rho}{\rho_0} \frac{1-\rho_0}{1-\rho}} \quad (3)$$

$$p_g = \frac{3(A+B)RT}{4\pi r_0^3} \left(\frac{\rho}{\rho_0} \frac{1-\rho_0}{1-\rho} \right) \quad (4)$$

$$\frac{dA}{dt} = d_a \cdot \exp\left(-\frac{Q_a}{RT}\right) \cdot (Wc_a - A)^\alpha \quad (5a)$$

$$\frac{dB}{dt} = d_b \cdot \exp\left(-\frac{Q_b}{RT}\right) \cdot (Wc_b - B)^\beta \quad (5b)$$

ここで、 $\dot{\varepsilon}_{ij}$ ($i, j=x, y, z$) はひずみ速度、 σ'_{ij} は偏差応力、 σ_m は静水圧応力、 ρ は相対密度、 R はガス定数 (8.31J/mol·K)、 T は温度である。一気孔当たりのガス発生量 $A+B$ (mol) に関する定数は、図7に示すように文献5)より決定した。ただし、 W は TiH_2 量を表すパラメータであり、図1の実験値に合わせて調整した。粘性係数 η は、半溶融状態における変形抵抗⁶⁾を参考に、以下のような固相率 X の関数で表されると仮定する。

$$\eta = \eta_s e_1 \exp(e_2 X) \quad 0 \leq X < 0.4 \quad (6a)$$

$$\eta = \eta_s \exp(e_3 X^3 + e_4 X^2 + e_5 X + e_6) \quad 0.4 \leq X < 0.6 \quad (6b)$$

$$\eta = \eta_s \exp\{e_7(1-X)\} \quad 0.6 \leq X \leq 1 \quad (6c)$$

ここで、 η_s は $X=1$ における粘性係数で、 e_1-e_7 は定数である。 X は次のように天秤の法則によって計算する。

$$X = \frac{S(T_e - T_m) + S_e(T_m - T)}{(S_e - S_s)(T_m - T)} \quad 0.462 \leq X \leq 1 \quad (7)$$

共晶温度における X の0から0.462までの変化は、

$$\Delta X = \frac{C_p \Delta T}{L} \quad (8)$$

により計算する。ここで、 C_p は比熱、 L は融解熱である。温度 T と固相率 X 、固相率 X と粘性係数 η との関係を図8に示しておく。

3.2 有限要素解析

熱伝導、化学反応、膨張変形の連成解析は、既報⁴⁾と同様、表面張力、自重を考慮し、軸対象問題として行った。ただし、型との摩擦はなしとした。計算に用いた材料定数を表2に示す。炉内雰囲気への加熱冷却曲線を図1

に示すように設定し、試料の加熱冷却は雰囲気との熱伝達のみにより行われると仮定した。図1には0.5wt% TiH_2 のフォームの温度変化と膨張挙動の計算例を示してある。

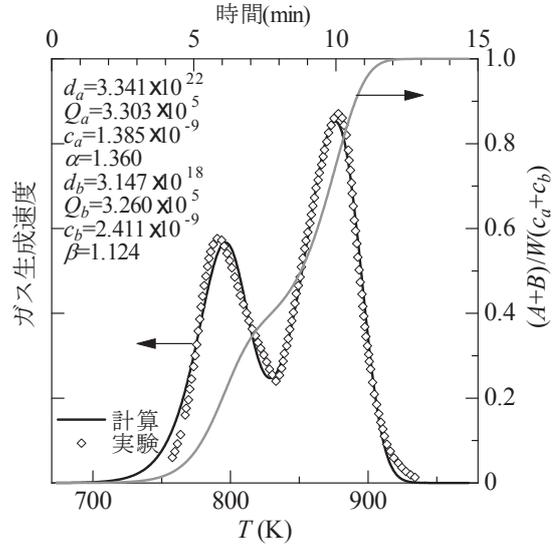


図7 反応速度式によるガス発生計算：材料定数は加熱速度 20.1 K/min に対する実験データ⁵⁾からの推定値

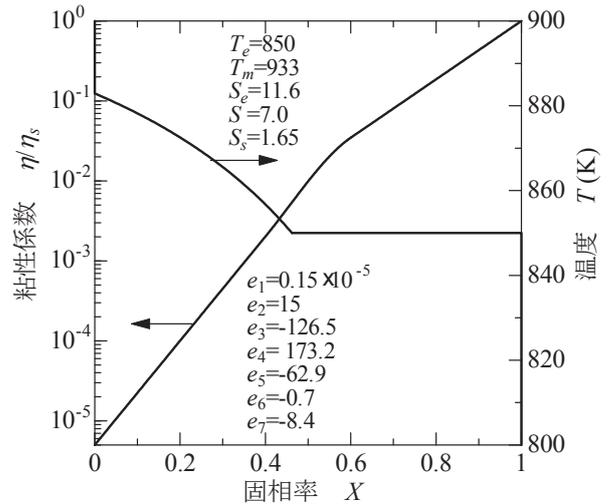


図8 固相率による粘性係数の変化の計算⁵⁾

表2 計算に用いた材料定数

粘性係数 η_s	1×10^9 Pa·s
密度	2700 kg/m ³
表面張力	0.865 N/m
熱伝導率	237 W/(m·K)
比熱 C_p	900 J/(kg·K)
潜熱 L	10.3 kJ/mol
熱伝達係数	80 W/(m ² ·K)
初期相対密度	0.999
初期気孔半径	0.135 mm

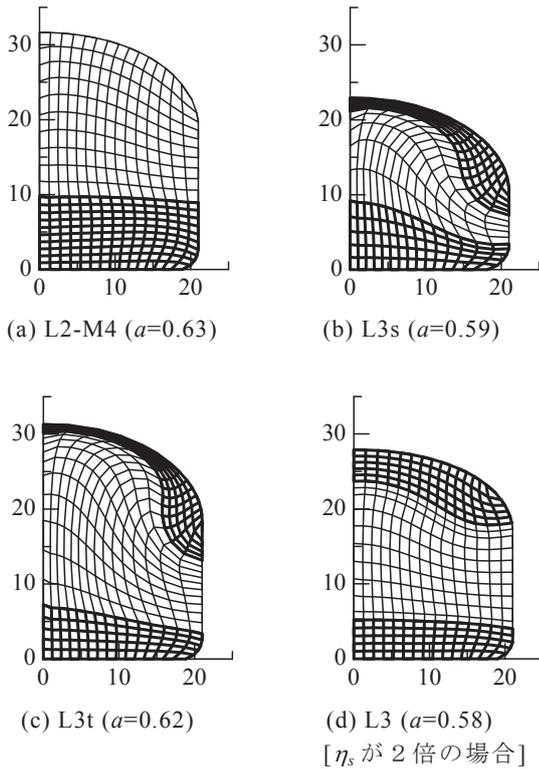
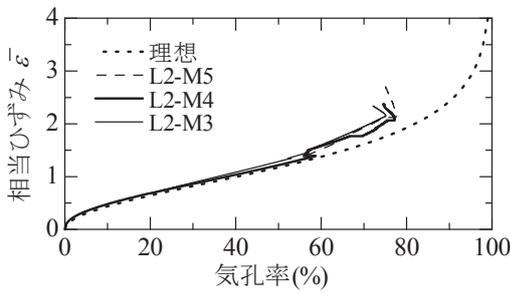
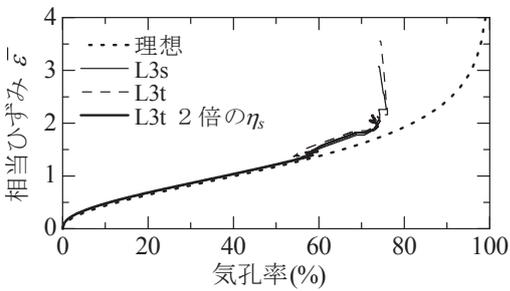


図9 試料の最終の断面形状：太線は異なる層を示す
(a: 平均気孔率)



(a) 2層材試料



(b) 3層材試料

図10 式(10)により計算される理想的な膨張による相当ひずみの推移と、有限要素解析において最も変形した要素における相当ひずみの推移との比較

4. 解析結果および考察

4.1 2層材試料

図9(a)は2層材試料 L2-M4 について断面形状，層構造を計算した結果である．上層は表面張力のために丸くなっているが，下層の膨張は安定した変形となった．気孔率分布は自重に影響されるが，2領域がはっきりし，計算上でも2層構造の生成が可能であることが裏付けられた．

4.2 3層材試料

3層材試料 L3s および L3t について計算した結果をそれぞれ図9(b), (c)に示す．両者とも上層の重みで中間層が大きくゆがみ，気孔分布は上下対称ではなくなっている．軸対称計算であるため，大きくゆがんだ形状のものには意味がないが，図6で示した実際の層構造の不安定と対応していると考えられる．

ここで，試料がゆがまずに理想的な膨張変形をする場合の気孔率と相当ひずみとの関係を考える．多孔質体の構成式から導かれる次式

$$\dot{\varepsilon} = -\frac{2}{3} \frac{1}{\sqrt{1-\rho}} \frac{\dot{\rho}}{\rho} \quad (9)$$

を積分することで，等方的な膨張による相当ひずみ $\bar{\varepsilon}$ が，気孔率 a の関数として次のように得られる．

$$\bar{\varepsilon} = \frac{4}{3} \operatorname{arctanh} \sqrt{a} \quad (10)$$

ここで $\rho = 1 - a$ を用いた．図10に，式(10)による理想的な膨張をした場合の相当ひずみと気孔率の関係と，解析で得られた相当ひずみの最大値とその要素の気孔率との関係を示す．これより，膨張過程の最後に，粘性が下がった時点で自重によるゆがみが大きくなることがわかる．図9(d)および図10(b)には粘性係数 η_s の値を2倍にした場合の L3t の計算結果を示した．粘性の増加により変形が安定化しており，気孔分布を制御するには粘性の調整も重要であることがわかる．

5. 傾斜構造安定化の検討

5.1 SiC/TiH₂ 配合率の調整

アルミフォームの気孔率は，SiC 粒子を添加することで上昇することが知られている．Esmaeelzadeh ら⁷⁾ は，TiH₂0.5wt%において，SiC 量を変えた場合の気孔率について調査しており，SiC を 3vol.%配合したフォームの気孔率が最も高いと報告している．しかし，SiC と TiH₂ 量を共に変えた場合については調べられていない．ここでは SiC/TiH₂ 配合率をそれぞれ 0~10vol.%，0.5~1.5wt% の範囲で調整して前駆体を作製し（高さ 20mm），フォームの気孔率，アスペクト比（高さ／横幅）の変化を調査した．また，高い気孔率，アスペクト比が得られる配合率を利用して3層での積層発泡も試みた．3層での積層発泡では，各層 10mm の前駆体とし，円筒型(φ42mm)内で発泡させた．

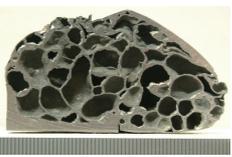
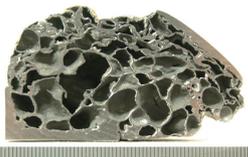
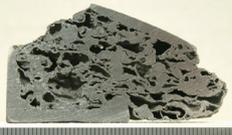
		SiC (vol.%)		
		3	5	6
TiH ₂ (wt%)	0.5	 ($\alpha=0.84$)	 ($\alpha=0.71$)	 ($\alpha=0.31$)
	1.0	 ($\alpha=0.81$)	 ($\alpha=0.78$)	 ($\alpha=0.53$)
	1.5	 ($\alpha=0.71$)	 ($\alpha=0.78$)	 ($\alpha=0.69$)

図 11 フォームの断面 (α : 平均気孔率)

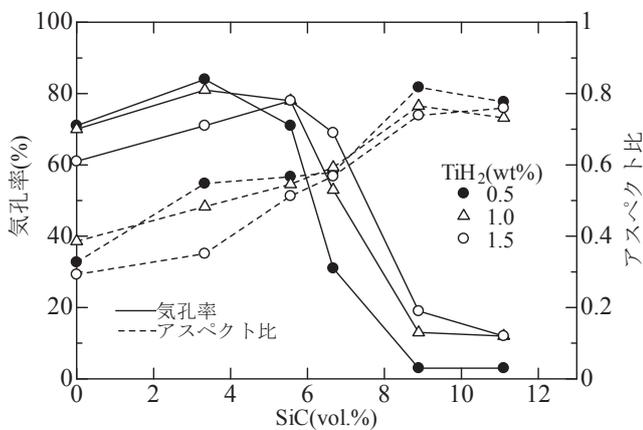


図 12 気孔率, アスペクト比への SiC/TiH₂ 配合量の影響

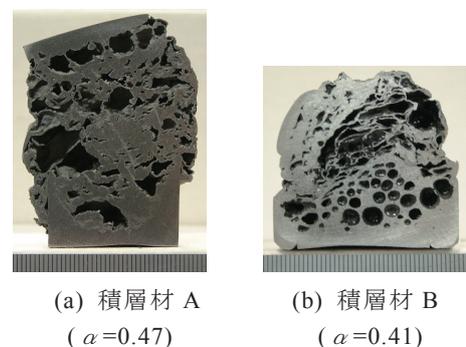


図 13 3層材の断面; A: TiH₂ 1.0/1.5/1.0wt%, SiC6vol.%, B: TiH₂ 0.05/0.5/0.05wt%, SiC3vol.%

5.2 結果および考察

(1) 気孔率とアスペクト比

試料の断面を図 11 に、気孔率、アスペクト比を図 12 に示す。フォームの横幅は、最大値と最小値の平均とした。SiC を 0~6vol.% の範囲で配合した場合は TiH₂ 量に拘わらず高い気孔率が得られているが、6vol.% より多く増量した場合、気孔率が下がり、8vol.% 以上ではほとんど発泡しなかった。しかし、TiH₂ 添加量が多いほど気孔率の低下を抑えられることがわかった。また、発泡した SiC 0~7vol.% の範囲でアスペクト比について見ると、TiH₂ 量が多い場合に低下する傾向があるが、SiC も増量することで、高いアスペクト比を保てることがわかった。

(2) 層構造の安定性

積層材として、TiH₂ 配合率を上から 1.0/1.5/1.0wt% となるように組み合わせ、SiC をすべての層に 6vol.% 配合した試料を作製した。これを積層材 A とし、比較材として TiH₂ 0.05/0.5/0.05wt%, SiC 3vol.% の試料を積層材 B とする。

図 13 は発泡後の試料断面写真である。B の層構造は上側が偏って崩れてしまっているが、A は傾きが少なかった。配合率の調整により、層構造の安定性が向上することが確認できた。積層材 A, B の気孔率はそれぞれ 0.47, 0.41 であり、配合率の調整により気孔率も上がることがわかった。ここで、互いの層の拘束がない場合を想定し、

その時の気孔率を前節の単層材の自由発泡の値の体積平均として推定すると、Aが0.60、Bが0.70である。上記の値とこれらとの比を考えると、それぞれ $0.47/0.60=0.78$ 、 $0.41/0.70=0.59$ であり、これからも拘束状態での発泡の安定化に対し配合量の調整が有効であるといえる。

6. 結言

異なる発泡剤量を添加した粉末を積層させることにより、Al-Siフォームにおいて傾斜気孔構造が生成することを実験および数値解析により確認した。また、傾斜構造安定化の手段の一つとして、SiC/TiH₂配合率の調整が重要であることを示した。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり研究開発助成をいただきました財団法人天田金属加工機械技術振興財団に対し、深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) C. Körner, M. Hirschmann and H. Wiehler. Porous Metals and Metal Foaming Technology (Proc. MetFoam2005), (2006), 279-284, JIM
- 2) K. Shinagawa and Y. Oyashiki, Key Eng. Mat., **274-276** (2004), 1107-1112.
- 3) 品川一成, 大屋敷由香, 平 16 年春塑加講論, (2004), 175-176.
- 4) K. Shinagawa, T. Kaneko, M. Nakashima and Y. Hirashima., Key Eng. Mat. **177-180**(2000), 23-28.
- 5) D. Lehmhus and M. Wichmann., Porous Metals and Metal Foaming Technology (Proc. MetFoam2005), (2005), 133-138, JIM
- 6) 杉山澄雄, 塑性加工便覧, (2006), 977-980, コロナ社
- 7) S. Esmaelzadeh, A. Simchi and D. Lehmhus, Porous Metals and Metal Foaming Technology (Proc. MetForm2005), (2006), 101-106, JIM