ポーラス金属の塑性加工シミュレーション

吉村 英徳*

1. 緒 言

ポーラス金属，特に現時点で70%以上の気孔率を持つ発泡アルミニウムや中空金属球 (Metallic Hollow Sphere: MHS) 成形体などは，超軽量かつ高比剛性，高衝突エネルギー吸収性能を有し，構造物の強度を落とすことなく軽量化が図れるため，自動車等の衝突安全部材への適用可能性が注目されている材料である．自動車部材としてこの材料を実用化する場合，大きな課題は低コスト化と性能信頼性である．前者については，アルミニウム切削くずを用いた発泡アルミニウム⁽¹⁾や板状の超塑性材料に発泡剤を挟んで重ね合せ圧延を繰返す方法⁽²⁾，薄板材の微細プレスや薄肉管材のバルジ加工などの塑性加工による MHS 作製法⁽³⁾などの製造方法の研究が続けられている．一方，性能信頼性についても，均質化を図って増粘剤や加熱発泡条件の最適化など，上記の発泡法を含めて製造方法から検討がなされている．しかしながら，温度分布の制御や重力などの影響のため，気孔分布を完全に均一にすることは困難であり，ある程度の不均質を認めた上で信頼性のある部材設計を行う必要がある．

一般に超軽量ポーラス金属は，圧縮下では，図1のように長いひずみ区間で応力が比較的小きな値で一定となって人体への負荷を軽減するような良好なエネルギー吸収を示すプラトー応力が存在する．しかしながら，図2のように引張り下では，数%の引張りひずみで破断する脆弱さがあり，曲げ部材などに適用する場合はパイプ外套材やサンドイッチパネル材などの複合材としての利用が必須と考えられる．したがって，自動車部材への適用において効果的な衝突エネルギー吸収性能を付与するには，ポーラス金属の機械特性および複合材の形態での変形特性を考慮しなければならない．

図1 発泡アルミニウムの単軸圧縮試験から得られた応力-ひずみ関係 ($W=D=15$ mm, $h_0=30$ mm, ρ_0 は初期みかけ密度)．

図2 発泡アルミニウムの単軸引張り試験から得られた応力-ひずみ関係．

* 香川大学准教授；工学部知能機械システム工学科(〒761-0396 高松市林町2217-20)
Simulation for Plastic Deformation of Ultra-light Porous Metals; Hidenori Yoshimura (Faculty of Engineering, Kagawa University, Takamatsu)
Keywords: ultra-light porous metal, compression, tensile, finite element method, deformation behavior
2008年1月21日受理

また、ボンネットやピラーなどの緩やかな曲率を持った部材を作製するには部材製造の製造コストの抑制や各種加工履歴を踏んだ外套材の熱処理による強度低下防止の面から、ポーラス金属をバルク材から切り出して板材を作り、それに薄板材やパイプを外套することが要求される。曲げ外側での引張り変形のため、超軽量ポーラス金属の曲げ加工は困難であるが、筆者らは発泡アルミニウムの熱間曲げによる加工を提案しており⁽⁴⁾⁽⁵⁾、この加工の最適化においても機械特性を考慮した設計が必要となる。

近年、部材の設計においては有限要素法(Finite Element Method: FEM)などのCAE技術の活用が盛んであり、超軽量ポーラス金属の特性を生かすための部材の最適設計においてもCAEの適用は有効であると考えられる。しかしながら、ポーラス金属の変形挙動を解析する方法は確立されていない。FEM解析を行うには、応力-ひずみ関係を表す材料構成式が必要であるが、バルク材とは異なるポーラス用の材料構成式を新しく導入しなければならないのが理由である。本報では、島・大矢根の多孔質金属のための材料構成式⁽⁶⁾を発泡アルミニウムの塑性変形挙動へ適用することを試みたので、その結果と更なる課題について述べる。

2. 発泡アルミニウムの変形挙動解析

IFAM (Fraunhofer - institute for Applied Material Research)によって粉末冶金法で製作された相対密度 $\rho = 0.09 \sim 0.2$ の発泡アルミニウムを対象に検討を行う。ただし、材料構成式内のパラメータ同定に関しては、同様な手順で他のポーラス金属にも適用できると考えている。

発泡アルミニウムは気孔率のばらつきが非常に大きいため局所変形が生じるが、発泡アルミニウムの実用化にあたり、個々のスラブの気孔分布を考慮した変形解析をするのは困難である。本研究では、マクロ的には均一に変形すると仮定し、多孔質材料の変形解析に多く用いられている島・大矢根の材料構成モデルが発泡アルミニウムに適用できるかについて検討する。まず、得られた実験結果より、多孔質体の構成式の材料パラメータをフィッティングする。単軸圧縮結果を用いるため、異方性の影響が無視できなくなることが考えられるが、第一段階として、本報では等方性材料として取扱う。

(1) 多孔質金属材料の構成式

島・大矢根による多孔質金属の降伏条件式⁽⁶⁾は、

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{\rho^k} \sqrt{\frac{1}{2} \left\{ (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right\} + \left(\frac{\sigma_m}{f} \right)^2} \quad f = \frac{1}{a(1-\rho)^m} \quad (1)$$

である。ここで $\bar{\sigma}$ は相当応力、 ρ は相対密度、 k, a, m は材料パラメータ、 σ_m は静水圧応力、 f は相対密度 ρ の関数である。式(1)内の $(\sigma_m/f)^2$ は静水圧応力依存の項で、バルク材の降伏条件として一般に用いられるミーゼスの降伏条件式に、多孔質体の体積ひずみに関係するこの項を付け加えたも

のが降伏条件式となる。また、左辺はポーラス材の実質部の変形抵抗として提案されており、右辺の根号前の $1/\rho^k$ はポーラス材料をマクロ的に見たときの真応力を実質部のものに対応させるためのものである。 k は材料内部の空隙の形状効果として補正するために与えられた各材料によって異なる指数であるが、相対密度 $\rho > 0.6$ のとき、 $a = 2.5, m = 0.5, k = 2.5$ が実験結果とよく合うことが確認されている。しかし、発泡アルミニウムのような低密度のものに適用した事例はない。本報では、材料パラメータ k, a, m を上記の発泡アルミニウムの単純圧縮や引張り試験により、決定することを試みる。

(2) ポアソン比

式(1)を塑性ポテンシャルとし、各主ひずみ増分成分($d\epsilon_1, d\epsilon_2, d\epsilon_3$: 1は圧縮方向)で偏微分して得られた応力-ひずみ増分関係式において、単純圧縮の応力状態 $\sigma_2 = 0, \sigma_3 = 0$ を代入することにより、ポアソン比 ν と相対密度 ρ の関係として、

$$\nu = \frac{1 - 2/9f^2}{2(1 + 1/9f^2)} \quad (2)$$

が得られる。式(2)は f によって表される式で、はじめにポアソン比から a, m の材料パラメータを決定することになる。従来用いられてきた値($a = 2.5, m = 0.5$)では、相対密度が $0.1 \sim 0.3$ 程度である発泡アルミニウムにおいてはポアソン比が負の値になり適さないため、 $35 \text{ mm} \times 35 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$ の発泡アルミニウムブロックを用いて圧縮試験を行ってポアソン比を測定した。局所変形や多少の材料異方性によってばらつきはあり、かなり緻密化した場合には塑性におけるポアソン比 0.5 に近づくと考えられるが、相対密度 $\rho = 0.7$ ぐらまではおおそポアソン比は $\nu = 0.1$ である。これより、 $a = \sqrt{36/11}$ とし、相対密度 $\rho = 0.7$ 近くまでポアソン比を一定に保つ必要から $m = 0.01$ とする。

(3) 材料パラメータの同定および変形解析

多孔質体実質部の変形抵抗に対するひずみの影響を n 乗硬化則により表現すると

$$\bar{\sigma} = F \bar{\epsilon}^n \quad (n: \text{加工硬化指数}) \quad (3)$$

となる。さらに、一軸方向に変形されたとすると、式(1)は以下のように書き換えられ、この式を用いて単軸変形試験結果より材料パラメータを決定する⁽⁷⁾。

$$F \bar{\epsilon}^n = \frac{1}{\rho^k} \sqrt{1 + \frac{1}{9f^2} |\sigma_1|} \quad (4)$$

発泡アルミニウムの場合、圧縮と引張りは全く別の変形モードとなるため、両応力状態を別々に表現する必要がある。曲げ変形の解析では中立軸を挟んで圧縮・引張り応力が生じるため、単軸圧縮および引張り試験結果の応力-ひずみ関係より、それぞれの F, n, k を決定する。材料パラメータ F, n, k は、適用するひずみ領域を考慮してフィッティングし、表1のような値で与える。引張り変形では、極めて低ひずみで破断するため、材料に引張り力がかかるような曲げ解析を行

表1 発泡アルミニウムに対して決定した島・大矢根らの材料構成式のパラメータ.

	n	F	k	ひずみの適用範囲
圧縮	-3.6×10^{-4}	46.05	1.45	0.035~0.5
圧縮	0.190	148.3	1.45	0.001~0.035
引張り	0.385	258.5	1.45	

純アルミニウムの変形抵抗 $\sigma = 136\bar{\epsilon}^{-0.28}$

う場合には数%程度のひずみ領域で解析を行えばよい. また, 圧縮において低ひずみでは良い一致を示さなかったため, $\bar{\epsilon} = 0.0035$ 以下の低ひずみでフィッティングしている. このひずみの境界値は, 単に FEM の計算において収束性が低下することを回避するために応力が連続的になるよう決定したもので, 変形モードの変化で切り替えることは今後の課題であると思われる. アルミニウムのバルク材の変形抵抗は, 純アルミのものを試験して $\sigma = 136\bar{\epsilon}^{-0.28}$ と仮定する.

(4) 解析結果

表1の値を用いて得られた単純圧縮および引張り状態での FEM と試験結果との比較を, 図3, 4に示す. 引張り状態では FEM 結果の発泡アルミニウムの応力値は実験値の約2倍になっているが, 圧縮に関してはおよそ一致しており, 通常のアルミニウムに比べ, 低応力のプラトー領域が現れているのが分かる. また, 引張りにおいては, 実験結果から求めた破断時のひずみの平均値 $\bar{\epsilon} = 0.0138$ に達したときに割れが発生したものとして, 該当する要素の変形抵抗を極めて小さい $\sigma = 0.001$ に変えて計算したものである.

発泡アルミニウムは材料的に不均一であり, 局所変形を伴うため, 図5のように平面ひずみ・上下左右対称の1/4モデルで要素内密度の分布を考慮して圧縮の解析を行う. ①物体全体が均一としたもの, ②上下に5層に相対密度分布を与えたもの($\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$), ③各層の平均相対密度は②に等しいが, 要素ごとに初期相対密度をランダムで与えたもので計算する.

図6に, 公称応力-公称ひずみ曲線を示す. 全体が均一な①に比べ, 傾斜材料の②では初期段階でわずかに応力が低く, 局所変形の影響が出ている. 圧下が進むにしたがい, ①に近づく. ランダムな初期密度の③は, ②と同じ傾向を示すが, ②に比べて応力が変動しており, 実験と同様にセルのばらつきによって応力の振動が発生する様子が表現できている.

図7は初期相対密度を各要素でランダムに与えた時の要素形状(相対密度0.17, 圧下率50%)である. 初期密度が低いx軸付近で大きく圧縮し, 局所変形が発生している. 初期密度が低い要素で変形が大きくなっている. また相対密度が高いところでは多少のブリッジング効果もあり, これが応力の振幅に影響していると考えられる. ただし, 各要素でのセルサイズやセル数などの影響は無視しており, 計算の高精度化においてはこれらの影響の調査は今後の課題であると考えられる.

図3 実験および FEM 解析による発泡アルミニウムの単軸圧縮時の応力-ひずみ関係の比較(初期密度 $\rho_0 = 0.2$).

図4 実験および FEM 解析による発泡アルミニウムブロックの単軸引張り試験から得られた応力-ひずみ関係の比較(初期密度 $\rho_0 = 0.2$).

図5 発泡アルミニウムの密度分布を考慮した FEM 解析モデル.

曲げ変形によって衝突エネルギーを吸収する部材である A・B の各ピラー, ポンネット等への適用のため, 曲げ変形の解析も行う. 15 mm 正方形段面, 標点距離 100 mm の発

図6 密度分布を考慮した発泡アルミニウムの単軸圧縮解析による応力-ひずみ関係の結果。

図7 密度分布のある発泡アルミニウムブロックの各圧下率での変形状および相対密度の変化。

泡アルミニウムのみの曲げ変形では、曲げストロークが2 mmに達した辺りから荷重が低下し始める。これは材料の曲げ外側に亀裂が発生したためであり、この亀裂が発生する曲げ工具押込み量(以降割れ発生限界とする)は、材料の相対密度によって多少前後するがおよそ2~3 mm程度である。このように発泡アルミニウムは曲げ加工に耐え得る材料とは言いがたい。

そこで、図8のようなサンドイッチ構造材の曲げ試験をFEMシミュレーションする。左右対称にモデル化し、平面ひずみ変形として計算を行う。縦20要素、横20要素に分割している。上面側では圧縮力が、下面側では引張力が生じ、それぞれで材料パラメータを変更する必要があるが、静水圧応力の正負によって収束計算中に各要素の圧縮・引張りの判定を行っている。上下表面のバルク材の厚みは1 mmで、3層に分割している。また、発泡アルミニウムとバルク材は、自動車用部材への適用において、部材内での発泡成形もしくは接着剤によって堅固に接合されて用いられると考えられるため、一体と仮定して計算した。

図9に、上部ジグのストローク2.5 mmのときのFEMの計算結果の静水圧応力と相当ひずみの分布を示す。試験片中央部で折れ曲がり、また上部のジグの直下で大きく変形してくぼみが発生している。前報では、ストロークが約1 mm付

図8 発泡アルミニウムのサンドイッチ構造材の曲げ変形解析モデル。

(a) 静水圧応力

(b) 相当ひずみ

図9 発泡アルミニウムのサンドイッチ構造材の曲げ変形による静水圧応力および相当ひずみの分布(押込み工具ストローク2.5 mm)。

図10 発泡アルミニウムの曲げ変形における荷重-ストローク曲線。

近で破断していたのに対し、2.5 mmにおいても、試験片中央の下部の発泡アルミニウムにはほとんど引張力が生じていない。

3. 結 言

文献

- (1) 小橋 眞, 津田智司, 金武直幸: 第57回塑性加工連合講演会講演論文集, (2006), 331-332.
- (2) K. Kitazono, E. Sato and K. Kuribayashi: Scripta materialia 50 (2004), 495-498.
- (3) 宅島祐太, 三原 豊, 吉村英徳: M & P 2007, (2007), 289-290.
- (4) 松屋邦明, 吉村英徳, 品川一成, 三原 豊, 鮎川佳弘, 第56回塑性加工連合講演会講演論文集, (2005), 403-404.
- (5) 松屋邦明, 吉村英徳, 品川一成, 三原 豊, 鮎川佳弘, 平成18年度塑性加工春季講演会講演論文集, (2006), 71-72.
- (6) S. Shima and M. Oyanc: Int. J. Mech. Sci., 18(1976), 285-291.
- (7) 吉村英徳, 品川一成, 村上勝彦, 鮎川佳弘: 塑性と加工, 45(2004), 244-248.

吉村英徳

★★

1999年 大阪大学大学院基礎工学研究課博士後期課程
修了

1999年 4月 大阪大学言語文化部助手

2000年 4月 香川大学工学部助手

2006年 4月 香川大学工学部准教授—現職

専門分野：塑性加工，数値解析

超軽量ボラス金属の製造法および機械的特性的調査

鋼管の1次加工の変形挙動シミュレータおよび2次
加工性評価試験法の開発，マイクロ塑性加工によるマ
イクロ針やマイクロ金型の製造法について従事。

★★