

B02 アルミニウム繊維焼結体を用いた SLIM 探査機の衝撃吸収

関野智之（首都大・院），北薊幸一（首都大），佐藤英一（JAXA），澤井秀次郎（JAXA）
Tomoyuki Sekino (TMU), Koichi Kitazono (TMU), Eiichi Sato (JAXA), Shujiro Sawai (JAXA)

1. 緒言

2007年に打ち上げられた月周回衛星かぐや（SELENE）による月面写真から，春山らによってマリウス丘に縦穴が発見されている¹⁾。この縦穴は溶岩チューブに通じるものと考えられており，重要な研究対象であるとともに，将来的に基地設置地点としても有望視されている。このように近年の月探査の進展に伴い，研究者の興味は月という漠然とした対象から月の特定の地点へと移り変わりつつある。そのため，今後の月探査機には降りたいところに正確に降りるピンポイント着陸や，打ち上げ回数増加のための低リソース化が求められており，宇宙科学研究所ではSLIM（Smart Lander for Investigating Moon）プロジェクト²⁾が進行している。SLIMはピンポイント着陸技術に関するいくつかの新技术の実証を目指す小型月探査機であり，我々は次世代小型探査機に適した効率的な着陸衝撃吸収材料の提案を目指している。

これまでの月探査機には着陸時の衝撃吸収機構としてクラッシュハニカムが採用されている³⁾。この衝撃吸収機構で様々な方向からの衝撃を吸収するためには複雑な構造を構築しなくてはならない。結果としてサイズと重量を増加させてしまうため，小型化・低リソース化を図るSLIMには適していない。そこでSLIMプロジェクトではハニカムに代わる衝撃吸収材料としてポーラスアルミニウムを検討している。ポーラスアルミニウムとは内部に空孔を有する機能性材料の総称であり，その多くは等方的な機械的特性を示し，軽量でありながらエネルギー吸収能に優れるという特徴がある。本研究ではポーラスアルミニウムのひとつであるアルミニウム繊維焼結体に注目した。

アルミニウム繊維焼結体は，アルミニウムの繊維をブロック状に圧縮，拡散接合したものである。その内部形態はオープンセル構造であり，吸水性や放熱機能が注目されている。一方，ポーラスアルミニウム特有の高いエネルギー吸収能を有すると考えられるものの，それについてはあまり報告されていない。そこで，本研究ではアルミニウム繊維焼結体の機械的特性について，異方性，サイズ効果，ひずみ速度依存性に焦点をあて調査した。

2. 実験方法

2.1. アルミニウム繊維焼結体

本研究で用いたアルミニウム繊維焼結体は太盛工業株式会社より提供いただいた。その微細構造をFig.1に示す。繊維径0.1mmのA1070アルミニウムが焼結されており，平均密度は0.5g/cm³，気孔率は80%である。

2.2. 実験装置

準静的圧縮試験は島津製作所製 AUTOGRAPH(AG-IS)を用いて，高いひずみ速度での動的圧縮試験はFig.2に示す自作の落錘式衝撃試験機を使用して行った。この衝撃試験機は，落錘を永電磁ホルダによって所定の高さに保持したのち，磁力による接続を断つことでレールに沿って自由落下させ，試験片に任意の衝撃負荷を与える。落錘上部に共和電業製加速度計(AS-50TB)を取り付け落錘の加速度を，試験片の下部に同社製ロードセル(LMR-S-5KNSA2-P)を3台設置し，それらの入力を合計することで試験片に加わる荷重を記録する。データ収録は同社製データロガー(EDS-400A)を用い，サンプリング周波数は10kHzとした。得られた荷重および加速度の記録から圧縮応力 σ および圧縮ひずみ ε を次式により算出した。

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{\iint a \, dt}{l} \quad (2)$$

ここで、 F はロードセルより得られた荷重、 A は試験片の初期断面積、 a は加速度計より得られた加速度、 t は時間、 l は試験片の初期長さである。なお、ロードセルに荷重の入力が記録された時点をも $t=0$ とした。

2.3. 実験条件

アルミニウム繊維焼結体の機械的特性の異方性を調査するため、直行した 3 軸方向に対する圧縮試験を行った。提供された 1 辺 100 mm の立方体のアルミニウム繊維焼結体から 1 辺 50 mm の立方体試験片を 3 個バンドソーを用いて切り出した。これを x , y , z の 3 軸方向に対しクロスヘッド速度 1000 mm/min で圧縮した。

サイズ効果について調査するため、異なるサイズの試験片に対し圧縮試験を行った。1 辺 20, 30, 40, 50 mm の立方体形状の試験片を用意した。これを、ひずみ速度が同等 (0.00167 s^{-1}) になるよう、クロスヘッド速度それぞれ 2, 3, 4 および 5 mm/min で圧縮した。

ひずみ速度依存性について調査するため、異なる速度での圧縮試験を行った。試験片は 1 辺 40 mm に統一した。AUTOGRAPH にてクロスヘッド速度 4 mm/min (0.00167 s^{-1}) および 1000 mm/min (0.417 s^{-1}) で、落錘式衝撃試験にて衝突速度 2 m/s (50 s^{-1}) および 3 m/s (75 s^{-1}) で圧縮した。衝突時の速度が想定のものとなるよう、落錘はそれぞれ 200 mm および 460 mm の高さから落下させた。試験片に十分な変形を与えるため、搭載する重錘はそれぞれ 38 kg および 8 kg とした。

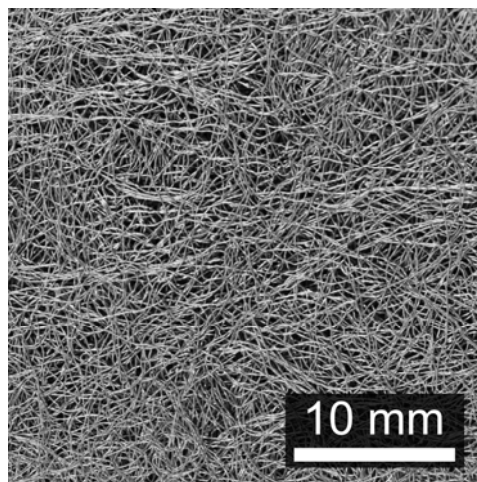


Fig.1 Microstructure of sintered aluminum fiber

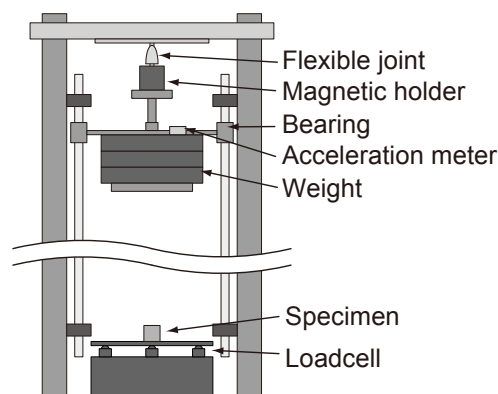


Fig.2 Schematic illustration of drop weight impact testing machine

3. 結果と考察

3.1. 異方性

3 方向に対する圧縮によって得られた応力-ひずみ曲線を Fig.3(a)に、方向毎のプラトー応力を Fig.3(b)に示す。その偏りの少ない内部構造から予想された通り、圧縮方向による変形挙動に差異はなく、圧縮応力の偏差は 10%程度に抑えられている。

3.2. 圧縮挙動

Fig.3(a)が示すように、アルミニウム繊維焼結体は応力一定での変形を示さず、ひずみの増加に伴い応力は緩やかに上昇し、ひずみが 40%を超えると緻密化による応力の急上昇を示した。他のポーラスアルミニウムでは、セルの座屈による変形応力の低下に起因する変形の局所化、いわゆる変形バンドを形成した圧縮挙動を示すが、アルミニウム繊維焼結体は変形バンドが形成されず、全体的に均質に圧縮が進行した。これはアルミニウム繊維焼結体が構造体として弱く、座屈による変形応力の低下がほとんどないため、変形の局所化が起きなかったことが原因と考えられる。

3.3. サイズ効果

試験片サイズ毎の応力-ひずみ曲線を Fig.4(a)に、サイズ毎のプラトー応力を Fig.4(b)に示す。一辺が 20 mm のものは他と比べプラトー応力がおよそ 6 割程度に低下していた。アルミニウム繊維焼結体の平均気孔径は試験片サイズよりも十分小さいため、このサイズ効果は気孔によるものではない。アルミニウム繊維焼結材には製法の都合上、部分的に繊維同士の接合が弱い箇所が存在する。試験片サイズが小さくなると、全体積に対する接合の弱い繊維の割合が増加するため、それに伴い塑性崩壊応力が低下していると考えられる。

3.4. ひずみ速度依存性

ひずみ速度毎の応力-ひずみ曲線を Fig.5(a)に、ひずみ速度毎のプラトー応力を Fig.5(b)に示す。いずれのひずみ速度条件とも同様な圧縮特性を示し、プラトー応力はひずみ速度の増加に伴い増加する傾向はみられなかった。アルミニウム繊維焼結体はオープンセル構造であり、セル内のガス圧の影響がないため、ALPORAS などのクローズドセル型ポーラスアルミニウムと異なり、ひずみ速度依存性がなかったと考えられる。このため、SLIM 着陸衝撃吸収機構などの動的圧縮用途への応用時も準静的圧縮試験の結果から、十分に性能評価ができる。

また、動的圧縮試験で通常発生するピーク応力が発生しなかった。これはアルミニウム繊維の径が 0.1 mm と極めて細く弾性変形が支配する領域がほとんどないことが原因であり、衝撃吸収材料として優れている。

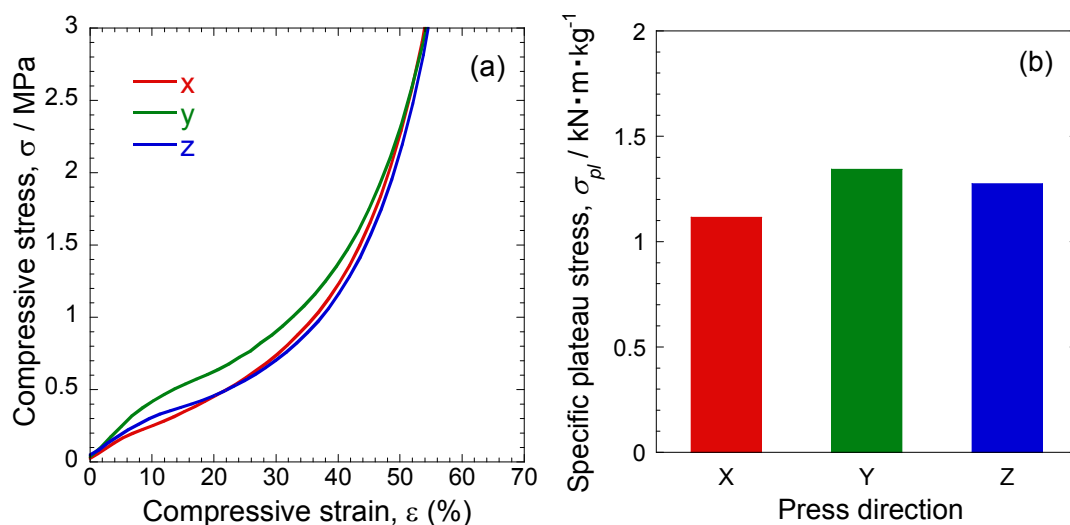


Fig.3 Anisotropy of sintered aluminum fiber (a)Stress-strain curve (b)Specific plateau stress for each direction

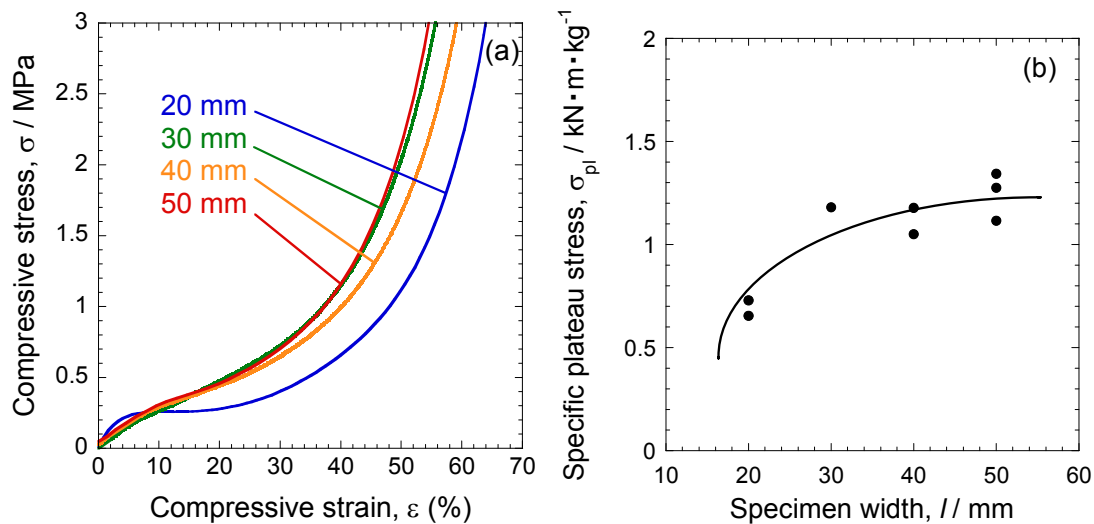


Fig.4 Size effect of sintered aluminum fiber (a)Stress-strain curve (b)Specific plateau stress is plotted as a function of specimen width

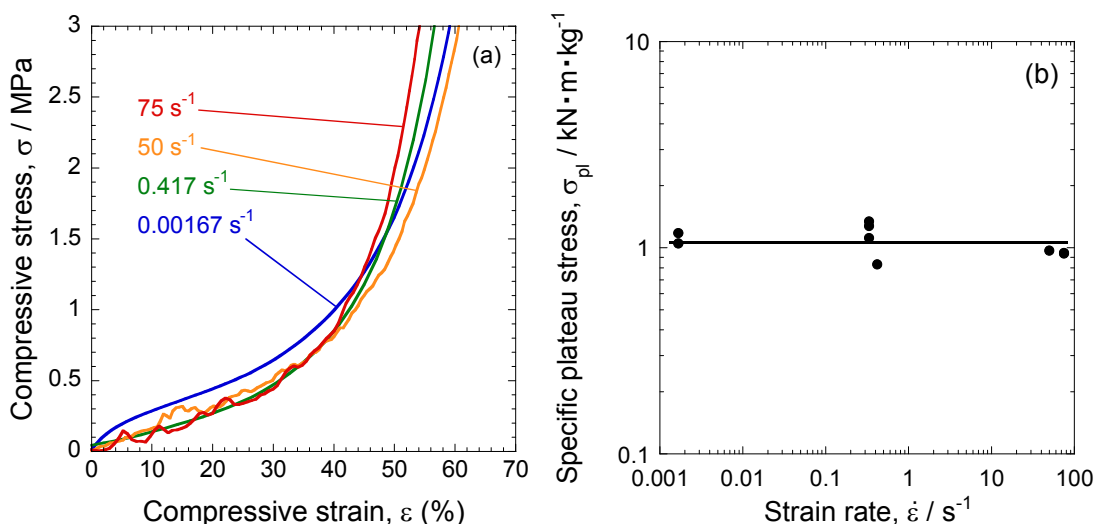


Fig.5 Strain rate sensitivity of sintered aluminum fiber (a)Stress-strain curve (b)Specific plateau stress is plotted as a function of initial strain rate

4. 結言

SLIM 着陸脚衝撃吸収材料としてアルミニウム繊維焼結体に注目し、その機械的特性を調査した。その偏りの少ない内部構造から力学的等方性を示した。小さい試験片においては変形応力が低下するサイズ効果を示した。セル気圧の影響のないオープンセル構造ゆえに、ひずみ速度依存性はないとよく、準静的圧縮試験の結果から動的圧縮特性を十分評価できる。また、衝突直後のピーク応力が観測されず、アルミニウム繊維焼結体は高速での衝撃吸収に適していることがわかった。

参考文献

1) Junichi Haruyama, Kazuyuki Hioki, Motomaro Shirao, Tomokatsu Morota, Harald Hiesinger, Carolyn H. van der Bogert, Hideaki Miyamoto, Akira Iwasaki, Yasuhiro Yokota, Makiko Ohtake, Tsuneo Matsunaga, Seiichi Hara, Shunsuke Nakanotani, and Carle M. Pieters: Possible lunar lava tube skylight observed by SELENE cameras,

Geophysical research letters, Vol.36, L21206(2009), doi: 10.1029/2009GL040635.

2) 坂井真一郎, 澤井秀次郎, 福田盛介, 中谷幸司, 佐藤英一, 功刀信, 安光亮一郎, “ピンポイント月着陸を目指す小型実験機”, 宇宙科学技術連合講演会論文集, Vol.57(2013), 3F06.

3) William F. Rogers : APOLLO experience report - Lunar module landing gear subsystem, NASA TN D-6850 (1972)