

B9 SLIM 小型探査機における着陸脚システムの開発

関野智之 (首都大・院), 白嶋美紀 (首都大), 北菌幸一 (首都大), 佐藤英一 (JAXA), 澤井秀次郎 (JAXA)
Tomoyuki Sekino(TMU), Miki Shirashima(TMU), Koichi Kitazono (TMU), Eiichi Sato(JAXA), Shujiro Sawai (JAXA)

1. はじめに

近年, 小型科学衛星の研究が活発に行われるようになり, 従来の探査機の「降りやすいところに降りる」着陸から「降りたいところに降りる」というピンポイント着陸技術への転換が求められている. これに伴い, 宇宙科学研究所/宇宙航空研究開発機構において SLIM(Smart Lander for Investigating Moon)プロジェクト¹⁾が進められている (図 1). SLIM プロジェクトは小型月探査機のピンポイント着陸に関するいくつかの技術実証を目的としており, 本研究ではその中の「小型探査機に適した軽量で効率的な着陸衝撃吸収技術」の実証を目指している.

SLIM は低リソースの小型探査機であり, 斜面など悪条件の地面に対しても機体を転倒させずに着陸させることを目標としている. このため, 衝撃吸収機構には小型かつ軽量であること, 力学的に等方性であること, エネルギーを蓄えず消費することが求められる. この要求に応えるため, 発泡アルミニウム²⁾³⁾の使用が考えられる. 発泡アルミニウムは図 2 のように内部に多数の気孔を有しており, 密度は緻密なアルミニウムの 1/10 と軽量である. さらに, 圧縮などの外力を加えると気孔が潰れることによりほぼ一定の変形荷重を保ったまま塑性変形するため, エネルギー吸収効率に優れている.

本研究では, 発泡アルミニウムによる小型探査機に適した衝撃吸収機構を提案する. 設計した衝撃吸収機構は, 圧縮試験と落下試験機によって評価する.

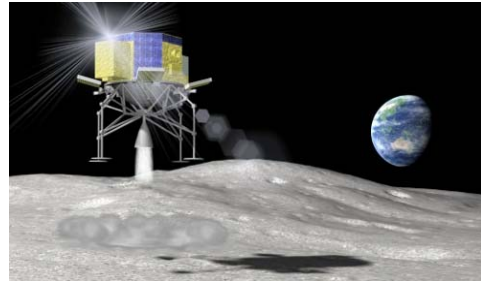


図 1 SLIM イメージ

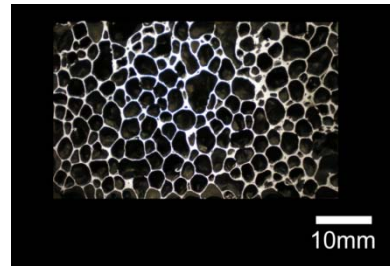


図 2 発泡アルミニウム断面写真

2. 着陸脚形状検討

SLIM 探査機はドライ質量 120 kg の重量を持つ. これを所定の位置まで制御運航した後自由落下させ, 月面に 3 m/s の速度で着陸することを想定している. このときの着陸時の衝撃から搭載された電子機器を保護するため, 衝撃による加速度を 15 G(147 m/s²)以下に抑える必要がある. 探査機の傾きや月面の傾斜により, SLIM 探査機の 4 本ある着陸脚のうち, 1 本または 2 本が先に着陸することを想定すると, SLIM 着陸時の要求仕様は表 1 のように表せる.

この要求仕様を満たすような衝撃吸収機構を作製するため, 発泡アルミニウムを使用する. 本研究に用いた発泡アルミニウムの圧縮時の応力-ひずみ曲線を図 3 に示す. 発泡アルミニウムは一定の応力で変形するプラトー領域を持つ. 圧縮変形時に消費される比エネルギーは, 応力をひずみで積分することで求められ, 発泡

アルミニウムは一定の応力下において多くのエネルギーを吸収できることが分かる。

この圧縮特性から、着陸脚衝撃吸収機構の形状に求められる条件を算出する。着陸脚のとりうる最大断面積 S_{\max} は以下の式から求める。

$$S = \frac{F_{\max}}{\sigma_{pl}}$$

ここで、 F_{\max} は SLIM の許容荷重、 σ_{pl} は発泡アルミニウムの 20~30%ひずみにおけるプラトー応力である。高さ h は 0~50%ひずみにおける応力が一定であると近似して以下の式から求める。

$$h = \frac{W}{\sigma_{pl} \times S} \times 2$$

ここで、 W は必要エネルギー吸収量、 S は S_{\max} 以下の任意の断面積である。ひずみが 50%を超えると緻密化により変形応力が上昇するため、必要エネルギー吸収量に達する高さが 50%ひずみとなるよう、高さを 2 倍している。これらの式から、SLIM の要求仕様から試験片の形状は、たとえば $35 \times 35 \times 150 \text{ mm}^3$ が挙げられる。しかし、この形状では細長く、圧縮時に巨視的な座屈を起こし破断してしまうという問題があった。

この問題に対処するため、発泡アルミニウムの側面から穿孔を施した。SLIM の要求仕様を満たすように設計した $100 \times 100 \times 130 \text{ mm}^3$ の試験片の穿孔位置を図 4 に示す。穿孔を施すことによって試験片の断面積を部分的に小さくし、全体の断面積の割にプラトー荷重を低下させている。これによりアスペクト比を小さく抑え、座屈が起こりにくい試験片を作製することができるようになった。

これまでの研究⁴⁾では穿孔を施した発泡アルミニウムのみでの圧縮試験、落下試験を行い、性能を評価していた。しかし、着陸脚が月面のレゴリスを模擬した豊浦票準砂に埋まりこみ、エネルギー吸収能を十分に評価できないとい

う問題があった。そこで、アポロ月着陸船の衝撃吸収機構⁵⁾に倣い、直径 20 mm の着陸パッドを取り付けた。図 5 に示す発泡アルミニウム製の着陸脚について圧縮試験および落下試験で評価する。

表 1 SLIM 着陸条件

	Unit	2 gears	1 gear
Total dry mass	kg	120	120
Mass at the landing per gears	kg	60	120
Landing speed	m/s	3	3
Impact energy	J	540	540
Absorbed energy per one gear	J	270	540
Maximum acceleration	m/s ²	147	147
Maximum load per one gear	N	8820	17640

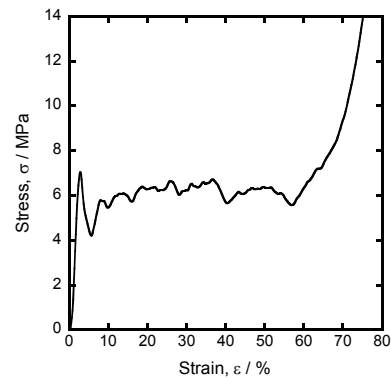


図 3 発泡アルミニウム応力-ひずみ曲線

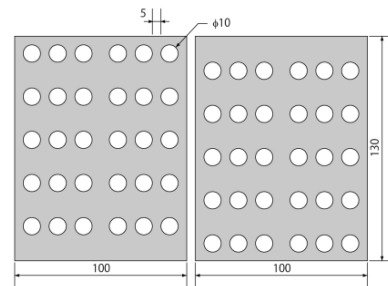


図 4 試験片穿孔位置

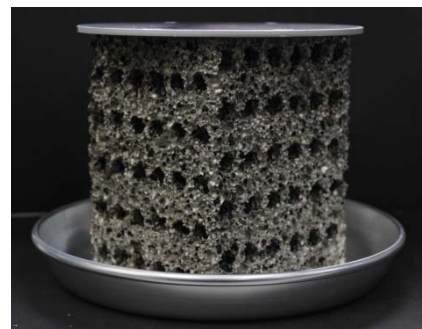


図 5 着陸パッドを備えた発泡アルミニウム

3. 圧縮試験

穿孔を施した発泡アルミニウムについて、島津製作所製 AUTOGRAPH(AG-IS)を用いて、クロスヘッド速度 1000 mm/min で圧縮試験を行った。試験によって得られた応力-ひずみ曲線が無穿孔のものとともに図 6 に示す。穿孔を施すことによってプラトー応力は 6 MPa から 0.5 MPa に減少している。図 7 には圧縮力を変位で積分することで得たエネルギー吸収量を縦軸に圧縮力を横軸にとったエネルギー-荷重線図を示す。2本脚着陸の必要吸収エネルギー量(270 J)における圧縮力は 5370 N、1本脚着陸の必要吸収エネルギー量(540 J)における圧縮力は 13800 N であった。これは、SLIM 探査機の許容最大荷重以下であり、SLIM の要求仕様を満たしている。また、必要エネルギー吸収量に達したときの変形量は、2本脚着陸の場合 66 mm、1本脚着陸の場合 100 mm であった。

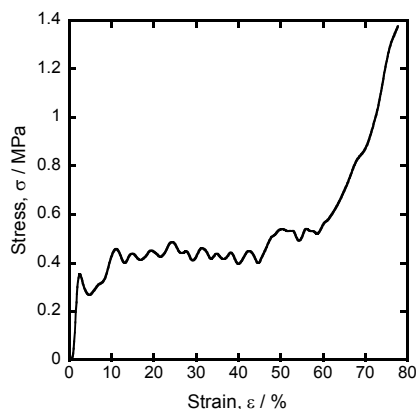


図 6 応力-ひずみ曲線

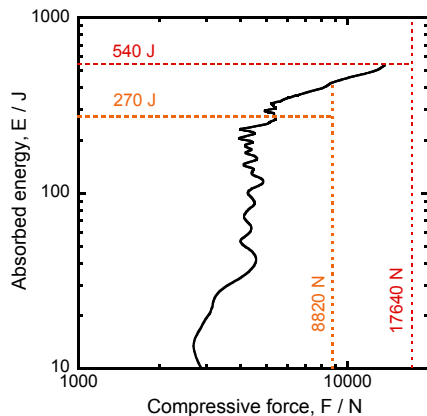


図 7 エネルギー-荷重線図

4. 落下試験

4.1. 試験条件

穿孔を施した発泡アルミニウムの動的なエネルギー吸収性能を評価するため、自作の落錘式衝撃試験機を使用した。試験機の写真と模式図を図 8 に示す。落錘および試験片は永電磁ホルダによって外枠に接続されており、電流を流すと永電磁ホルダの磁力が低下し、レールに沿って自由落下する。試験片上部に搭載する増おもり型分銅の数により、着陸時の衝撃エネルギーを決定する。計測センサには共和電業製の単軸加速度計(AS-50HB)を設置し、同社製のデータロガー(EDS-400A)を使用してサンプリング周波数は 10 kHz でデータ収集した。着地点には月面の状態を考慮し、月の砂レゴリスを模した豊浦標準砂の傾斜 15° の斜面を用意した。

落下試験は 2本脚および 1本脚着陸条件でそれぞれ 1回ずつ行った。2本脚着陸条件では、増おもり型分銅を 60 kg 分搭載し、衝突速度が 3 m/s となるよう、460 mm の高さから落下させた。1本脚着陸条件では、同じく 60 kg 分の分銅を搭載し、衝突時のエネルギーが 2倍になるよう、2倍の高さ 920 mm から落下させた。これは本来であれば、120 kg 分の分銅を搭載して試験を行うべきだが、自作した試験機の強度を考慮するとそれが困難であったためである。

4.2. 試験結果

着陸パッドを使用することによって砂地への埋まりこみを 10~20 mm に抑えることができた。これによって十分な荷重が加わり変形した試験後の試験片の様子を図 9 に示す。斜面上方に位置する右側が大きく変形しており、平均の変形量は 2本脚および 1本脚条件でそれぞれ 70 mm および 90 mm であった。これは、準静的圧縮試験から予測された値と加速度計によって得た加速度を 2階積分することで求めた変形量(表 2) とほぼ一致している。

図 10 には加速度計により得た加速度-時間

履歴を示す。両条件ともに着地時のピークが観測されず、 50 m/s^2 程度の加速度で減速を開始した。2本脚条件ではプラトー領域中でエネルギーを吸収しきり SLIM の許容加速度以内で静止することができた。一方、1本脚条件では緻密化領域に入り許容加速度以上の加速度が検出された。これは 120 kg 分の増おもり型分銅を搭載させるべきところを半分の 60 kg しか搭載しておらず、運動方程式 $F = ma$ から加速度が想定値の2倍の値で検出されているためである。このため、1本の着陸脚が最初に着陸した場合も1本の着陸脚のみで加速度を許容値以下に抑えつつエネルギーを吸収できると考えられる。

図11は加速度から算出した荷重-変位曲線である。両条件ともに準静的圧縮試験の結果と概ね一致している。このことから、SLIMの想定する速度域においては穿孔を施した発泡アルミニウムに速度依存性はなく、準静的圧縮試験と同等のエネルギー吸収ができることがわかった。

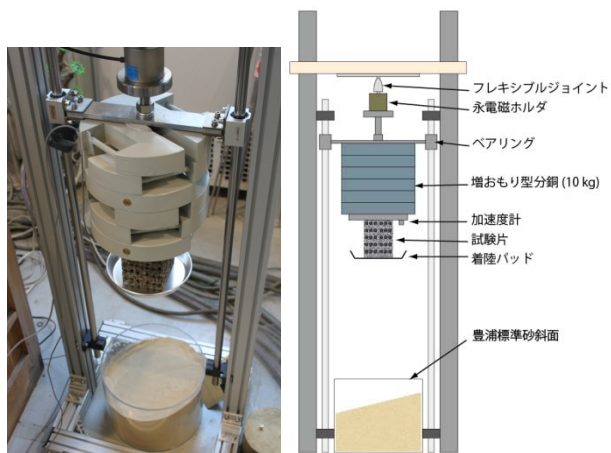


図8 落下試験機

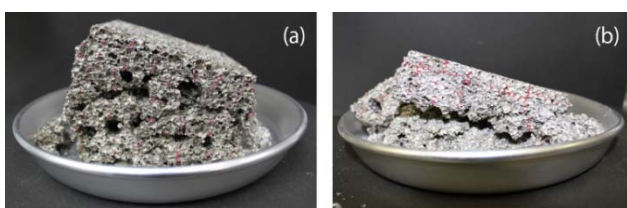


図9 試験片写真(a)2本脚条件, (b)1本脚条件

表2 試験片変形量

	Measured value	Prediction from compression test [mm]	Calculated from acceleration meter [mm]
2 gears	70	66	75
1 gear	90	100	100

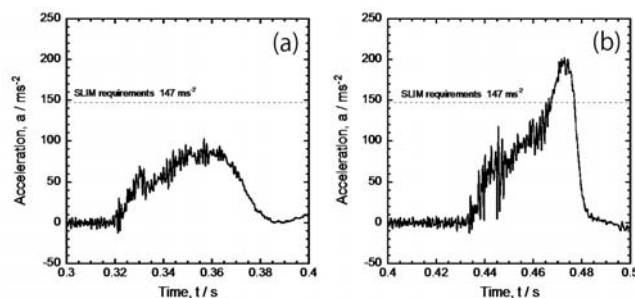


図10 加速度-時間履歴(a)2本脚条件, (b)1本脚条件

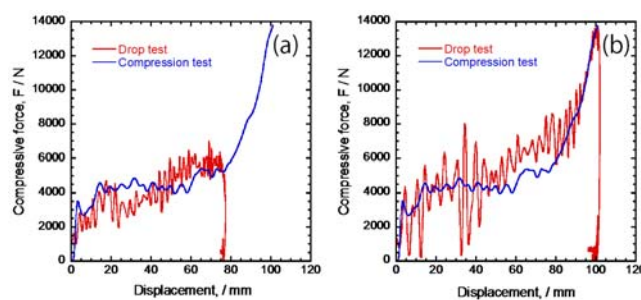


図11 荷重-変位曲線(a)2本脚条件, (b)1本脚条件

5. まとめ

SLIM 探査機の着陸脚衝撃吸収システムとして、着陸パッドを備えた発泡アルミニウムの有効性を実験的に検証した。発泡アルミニウムの側面から穿孔を施すことにより、圧縮応力を SLIM の条件に最適化させた。着陸パッドの使用によって、砂斜面に埋まりこむという問題は解消され、動的落下試験で得られた結果は準静的圧縮試験の結果と概ね一致した。発泡アルミニウムを使用した着陸脚システムは、SLIM の目指すピンポイント着陸を実証するための性能を十分に有していることがわかった。

参考文献

- 1) 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, 第 57 回宇宙科学技術連合講演会, 3F06, 2013.
- 2) 西誠治, 槇井浩一, 有賀康博, 濱田猛, 内藤純也, 三好鉄二: 発泡アルミニウムの製造技術とその諸特性, R&D 神戸製鋼技報, Vol.54, No.1, pp.89-94, 2004.
- 3) L.J. Gibson, M.F. Ashby 著, 大塚正久訳: セル構造体, 内田老鶴圃, 1993.
- 4) 関野智之, 白嶋美紀, 北菌幸一, 佐藤英一, 澤井秀次郎: SLIM 探査機の斜め着地における発泡アルミニウム製衝撃吸収機構の検討, 第 57 回宇宙科学技術連合講演会, 3F12, 2013.
- 5) William F. Rogers: APOLLO experience report - Lunar module landing gear subsystem, NASA TN D-6850, 1972.