

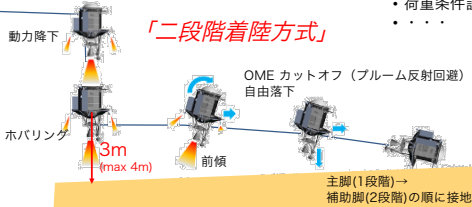
丸 祐介, 河野太郎, 北園幸一(首都大), 佐藤英一, 戸部裕史, 奥泉信克, 江口 光(総研大・院)  
 森川峻平(静大・院), 斉藤堯哉(静大・学), 岡崎 峻, 大槻真嗣, 能見公博(静大), 澤井秀次郎  
 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 SLIMプロジェクトチーム

**背景: SLIMの着陸脚系** 展開脚等の機構部を極力排する受動的な衝撃吸収機構と、二段階着陸方式を組み合わせ、高い信頼性の着陸システムを構成

### 着陸ダイナミクス検討

二段階着陸方式のメリット

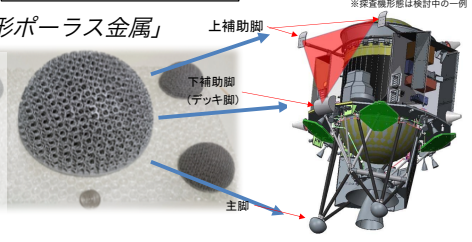
- 大荷重を受ける主脚を限定し、構造質量を軽減できる
- 垂直に着陸するよりも最終的な重心が低くなるため、速度誤差に強い
- フェアリング包絡域にフィットした細長い探査機形状
- スラスター方向の脚が減り、センサー視野との干渉が少ない



### 衝撃吸収機構開発

「3D積層造形ポーラス金属」

- アルミニウムのクラッシュコアと比較したメリット
- 広い荷重方向に対応可能な等方性
- 初期状態でのイニシャルピークの低さ
- 気孔率やセル形態に任意に調整できる制御性
- 3D積層造形による品質の安定性



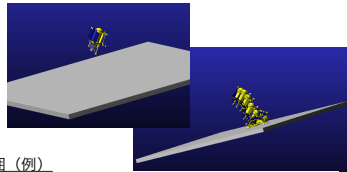
### 着陸ダイナミクスシミュレーション

脚配置の最適化検討

汎用のマルチボディダイナミクスソルバー MSC ADAMS を使用し、自由落下フェーズ後の着陸シミュレーションを介して脚配置の最適化を行っている

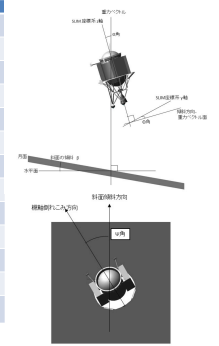
着陸シミュレーション概要

- 構体は基本的に質量特性をもつ剛体で表現
- 衝撃吸収材のみ能見モデルによって表現 (事項)
- 自由落下フェーズ (高度3m) から静定までの期間の運動をシミュレート
- 姿勢、接地パラメータ、質量特性など不定性を持つパラメータを乱数としてモンテカルロ解析

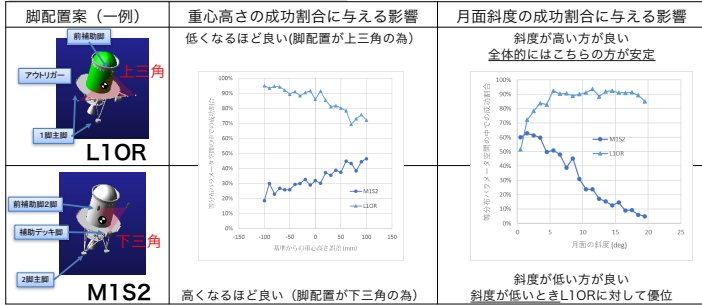


モンテカルロ解析の対象パラメータと範囲 (例)

	最低値	最大値	単位	備考
斜面角度	0	20	deg	
倒れ方位角	-30	30	deg	
ピッチ倒れ角	-28	-35	deg (倒れ側が良、0deg直立)	
ロール角	-5	+5	deg	
前進速度	-300	1300	mm/sec	
横速度	-600	600	mm/sec	
重心位置誤差 x	-20	20	mm	
重心位置誤差 y	-20	20	mm	
重心位置誤差 z	-100	+100	mm SLIM座標系 (-側が脚側)	
質量誤差	-15	15	Kg	
慣性モーメント誤差割合	1.5	0.75	ixx, iyy, izz に対する比率 (一律)	
摩擦係数	0.4	0.8		
高度誤差	0	-2000		約3700mmを基準 (足先から地面までの距離は姿勢等によっても変化)

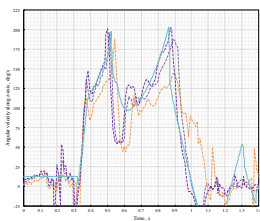


脚配置の着陸成功割合に対する評価・考察の一例



### 模型落下実験

- 数値シミュレーションの検証のため、模型落下実験を実施している
- 実寸の1/3の模型を落下させ、着陸成否の評価とモーションキャプチャシステムによるダイナミクスの定量評価を行っている



倒れ込み方向の角速度のシミュレーションと実験の比較例

- 点線: 実験、実線: シミュレーション
- なお、この計算では、砂への貫入及び砂の持ち上げ効果を考慮している



### まとめ

- SLIMの「着陸脚系」の検討状況を報告した
  - 着陸ダイナミクス検討
  - 衝撃吸収機構の開発
- SLIMでは二段階着陸方式をとる、高信頼性のため、展開脚等の機構品は極力避ける
- 衝撃吸収材は金属3D積層造形によるポーラスアルミニウムを使用し、セル形態、気孔率によって発生荷重を制御
- 脚の配置はマルチボディダイナミクスシミュレーションのモンテカルロ解析により最適化を行っている。解析は、模型実験で検証する。

### 衝撃吸収機構の機能

- 衝撃吸収機構は、探査機脚 (主脚、デッキ脚、前脚) 先端に取り付けられ、各脚が接地する際に、探査機に加わる荷重を規定値以下に抑えつつ、接地時の規定値以上のエネルギーを吸収する機能をもつ。
- 衝撃吸収材の要求機能・性能は、以下の項目に整理される。

- 最大荷重:** 衝撃を吸収する際に発生する最大の荷重。システム構造とのI/F値。
- 吸収可能エネルギー:** 最大荷重以下で吸収できる最大のエネルギー量。GNCとのI/F値と着陸ダイナミクス計算結果から決まる。
- 形状および外形寸法:** 最大荷重および吸収エネルギーが決まると、衝撃吸収材の断面積 (の積分値) と必要な潰れしるの関係が決まる。また、レーダー、アンテナの視野との関係も考慮する必要がある。
- 荷重の着地点および方向:** 構造とのI/Fとして、最大荷重だけでなくモーメント (トルク) についても規定する必要がある。

### 衝撃吸収機構の構成

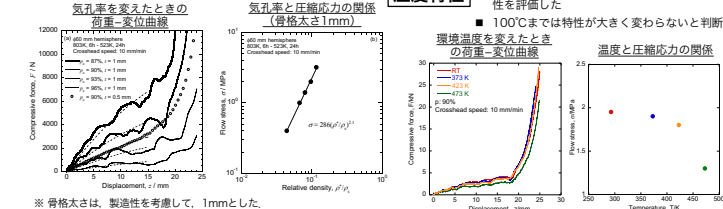
- ポーラス金属部:** 衝撃吸収材の主構成要素であり、接地時に自らが潰れ、発生荷重を規定値以下に抑えつつ、規定値のエネルギーを吸収する。3D積層造形で成形される。
- 熱制御材:** 着陸時のエンジンブルームからの熱入力に対し、衝撃吸収材を規定の温度以下に保つ
- 取付I/F構造部:** 脚側ブラケットへ衝撃吸収材を取り付けるためのI/F部品。この部材に直接3D積層造形、脚部ブラケットとはネジ留め。



### 衝撃吸収材の主な特性

- 形状**
- 接地時の姿勢や斜面は変化しうる。
    - 断面の小さいところから圧縮される。 → 半球形状
    - ストローク (潰れしろ) は、潰れ方向の高さに依存する。
    - 傾いた状態で圧縮されるとき、最大断面積をとれるストロークが制限される。 → 半球+円柱形状
- 半球形状試料 (φ60mm) の単軸圧縮結果**
- 直径60 mmの半球を圧縮。
  - z = 15mm (半径の50%) までは解析結果と一致。
  - z > 15mm ではセル構造の緻密化のため圧縮力が上昇。

### 気孔率と圧縮応力の関係



### 衝撃吸収機構の単体検証試験

- 3D積層ポーラスアルミニウムの衝撃吸収能力を確認するため、落下による動的圧縮試験を実施
- 探査機ドライ質量と合わせた錘を吸収材の上につけ、接地時に月面着陸時と同じ運動エネルギーとなるように落下高さを設定
- 加速度と吸収材インターフェースでの発生荷重を計測
- 垂直に落下させた場合の実験結果を示す

