

微小重力衛星探査機の動力学モデルの構築と着陸シミュレーション解析

勝又晴日 山口大輝 日高真太郎 石上玄也 (慶應大)

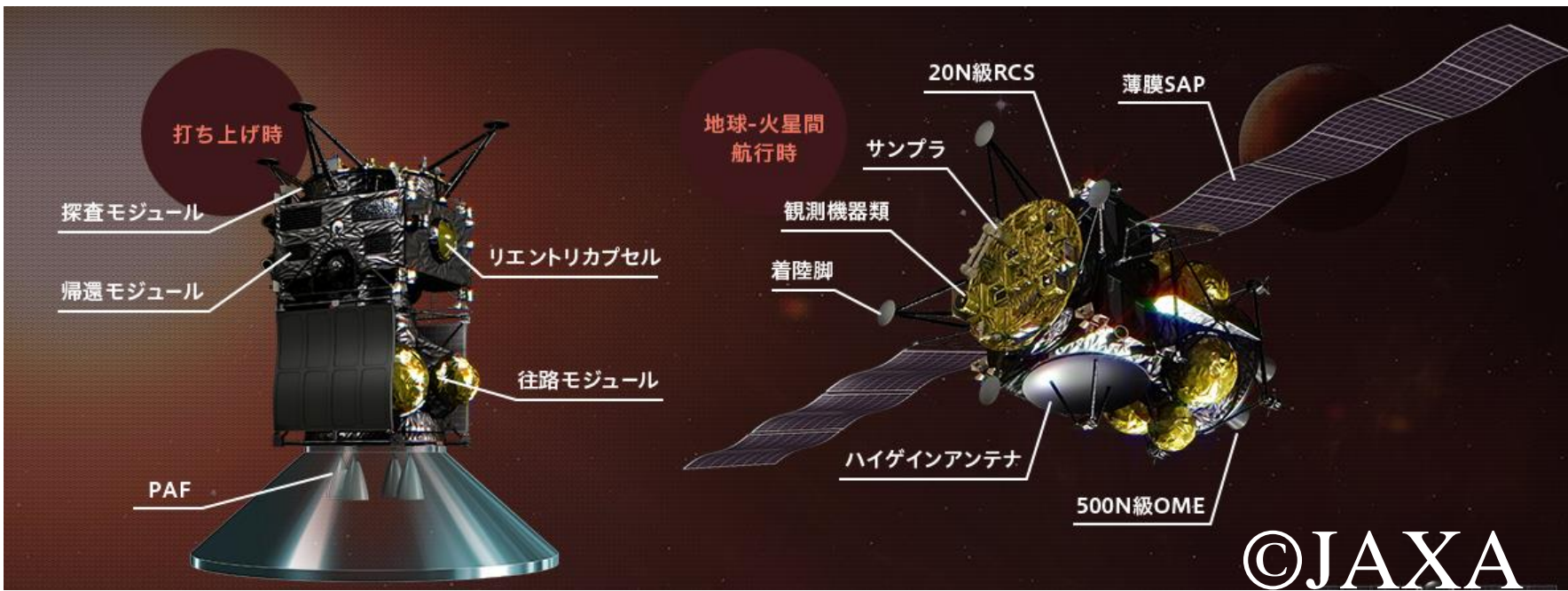


研究背景

微小重力環境では, 探査機の太陽電池パネル, タンク燃料といった構成要素の動的な影響が顕著である

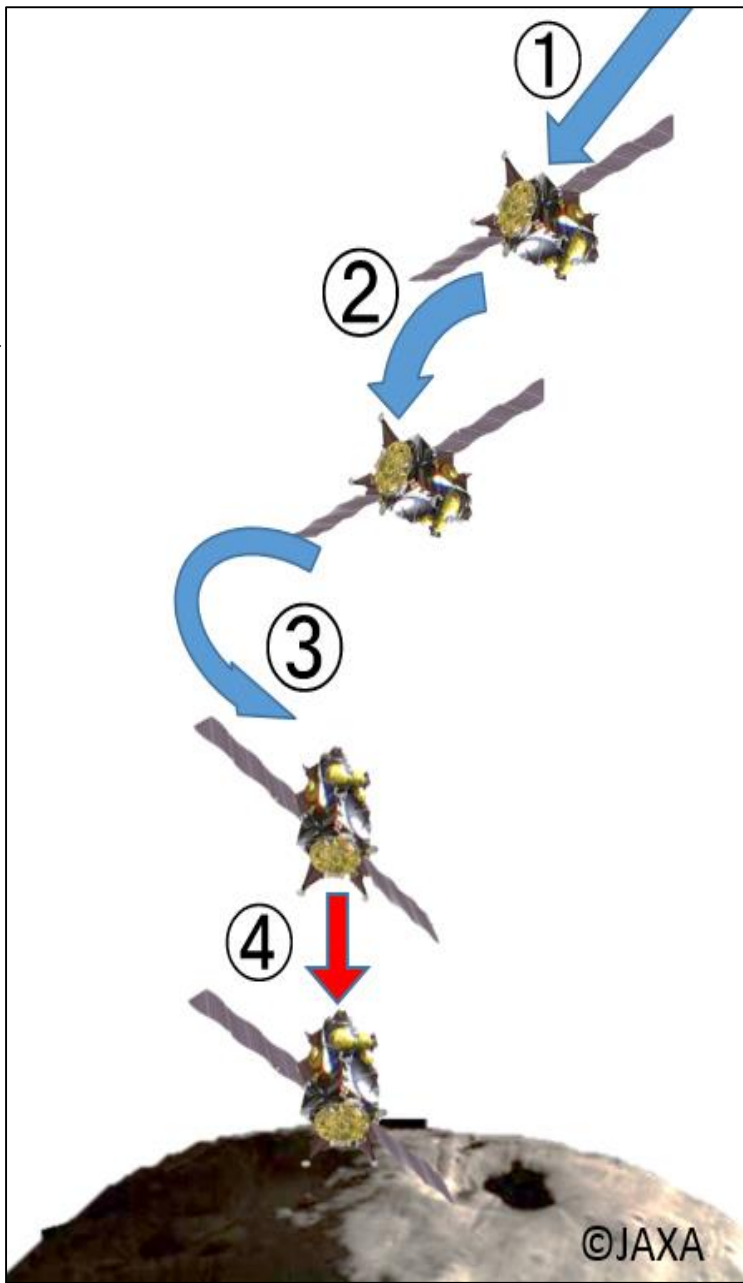
微小重力環境に特化した探査機の挙動解析が必要

挙動解析の対象例
火星衛星探査計画Martian Moons eXploration(MMX) の着陸機

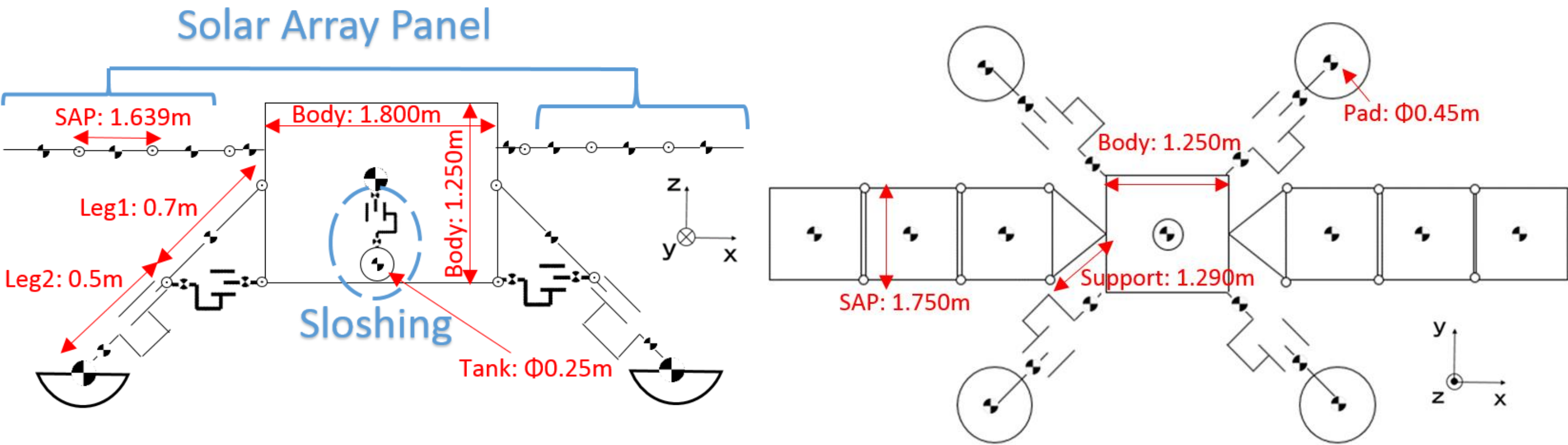


- MMX着陸シーケンス
- ① 擬似周回軌道から投入
 - ② 速度を相殺しつつ降下
 - ③ ホバリング
 - ④ 天体表面へ自由落下

特に困難と考えられる④の着陸に注目する



メカニカルモデルの構築



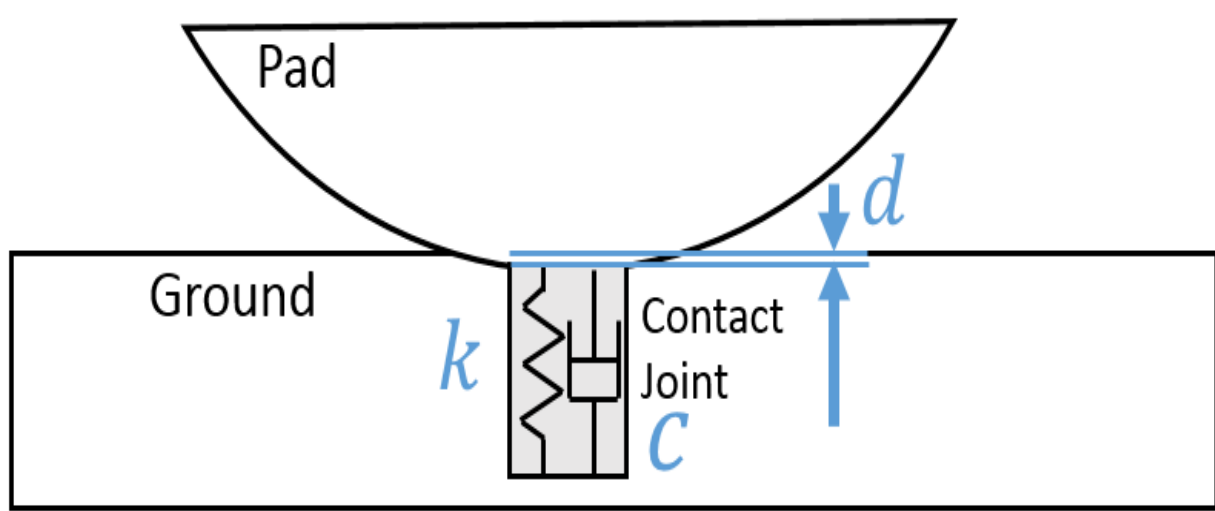
| 検討例 | 本体 | SAP | 支柱 | 上脚 | 下脚 | パッド |
|------------|-----|-----|----|----|----|-----|
| ドライ重量 [kg] | 700 | 80 | 10 | 30 | 30 | 10 |

探査機本体部分はひとつの剛体として定義し, 同本体に機械的に接続されている部品を多節リンク系によりモデル化する

①地盤接触モデル

天体表面との接触力学をモデル化
[接触計算式]
・着陸脚と天体表面の衝突が検出された場合に, 以下の接触モデルに基づき, 接触力を計算する
$$F_{contact} = kd + C\dot{d}$$

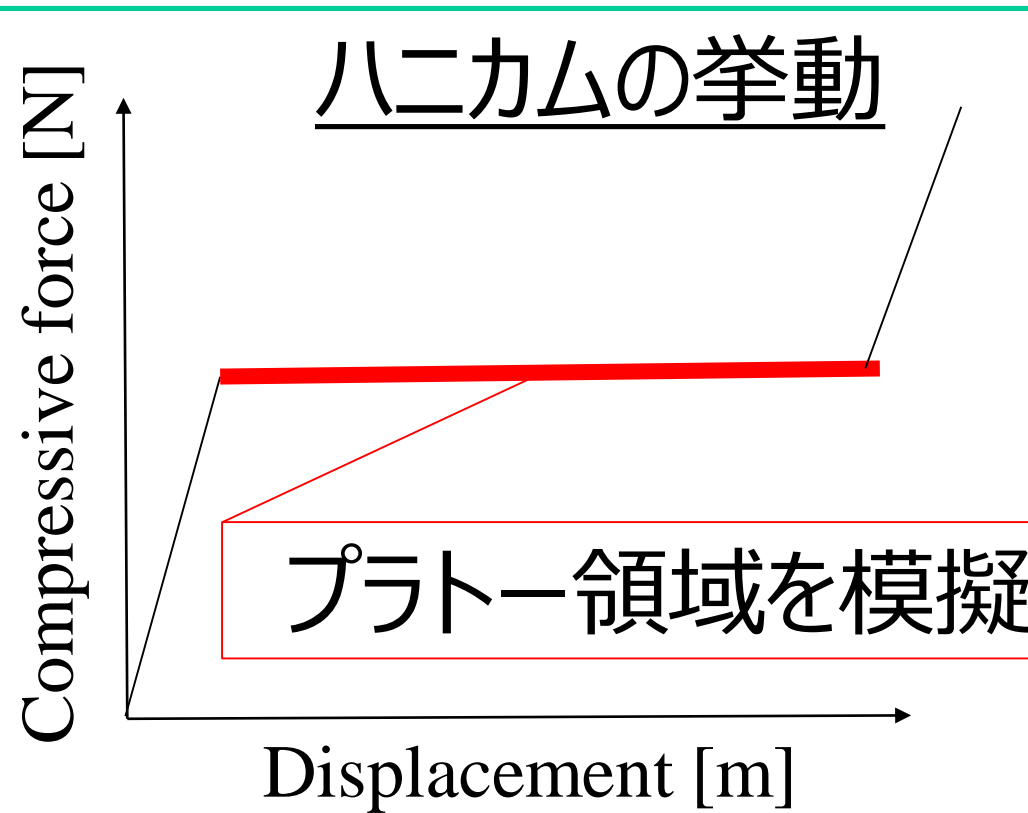
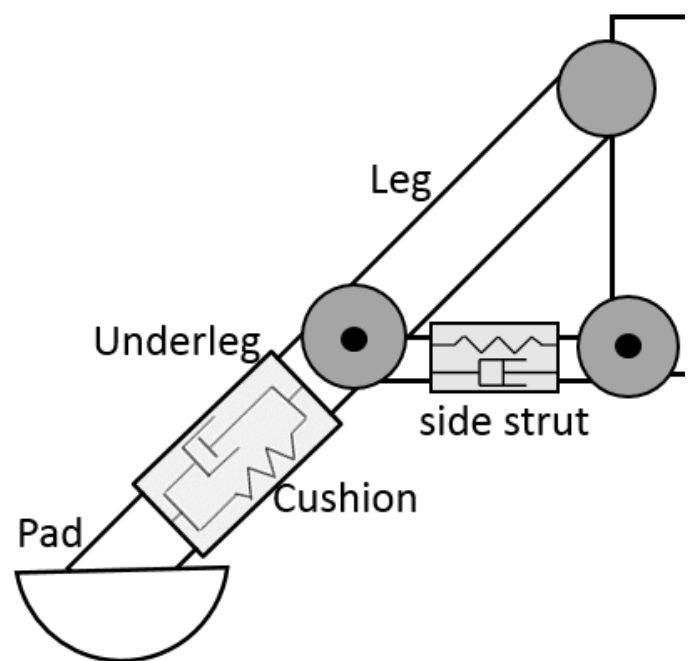
 k [N/m] : 弾性係数
 C [N/m/s] : 減衰係数
 d [m] : 天体表面への貫入量
・接地面は砂地を想定した粘弾性をもった平面であり, フォボス表面の粘弾性係数値が未知であるため
 k, C の値は, 月レゴリスの粘弾性の値
 $k = 4537$ N/m, $C = 4450$ N/(m/s) を参照値とした[1].



[1] M. Nohmi and A. Miyahara, "Modeling for Lunar Lander by Mechanical Dynamics Software," AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference and Exhibit, 2005, San Francisco, California.

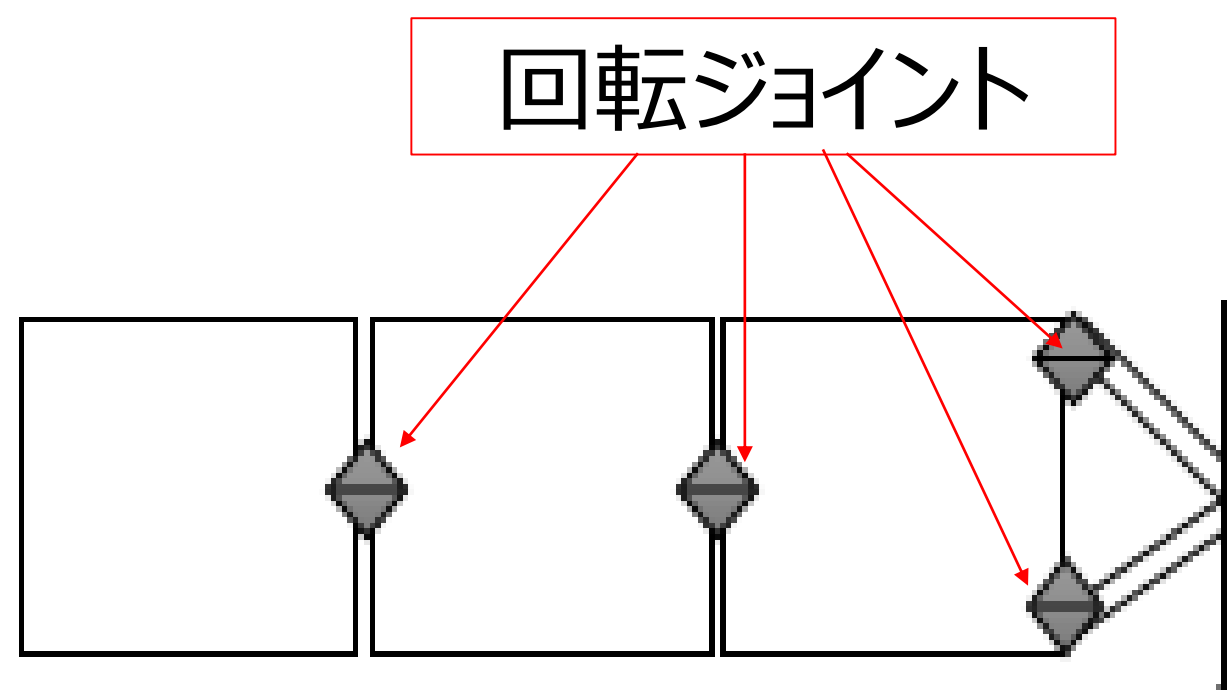
②着陸脚モデル

着陸の衝撃の吸収材をモデル化
[脚軸方向]
・2剛体から構成(Leg, Underleg)
・ハニカムコアによる衝撃吸収材を, バネダンパ系で再現
[横方向]
・直動ジョイントを含んだ副脚



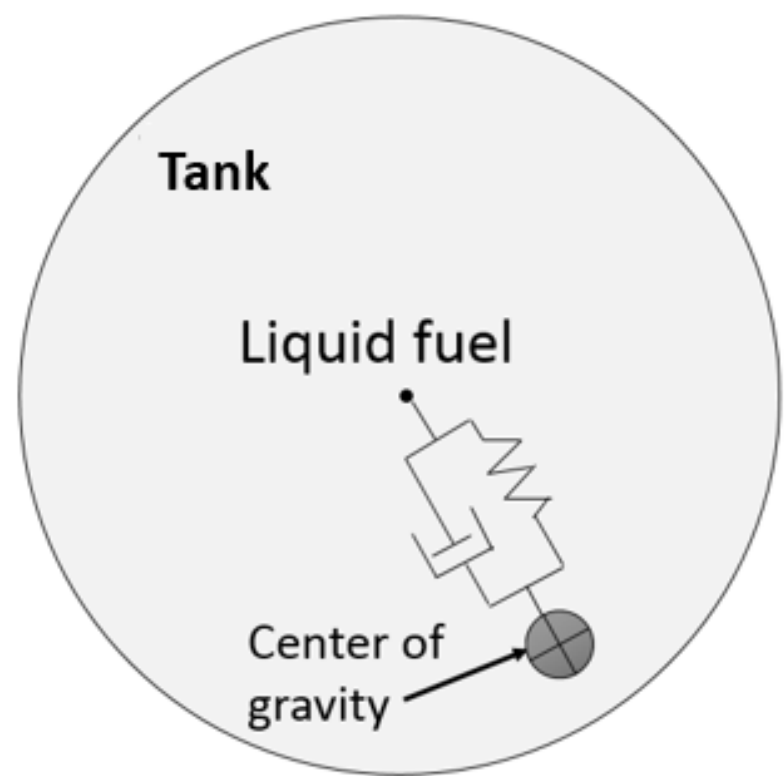
③太陽電池パネル(SAP)モデル

太陽電池パネルの振動をモデル化
・3剛体から構成
・回転ジョイントはバネダンパ系



④スロッシングモデル

探査機本体内に搭載されている燃料のスロッシング挙動をモデル化
・バネマスダンパ系振子モデル



シミュレーション解析

MMXの探査対象である火星衛星のフォボスへの着陸解析

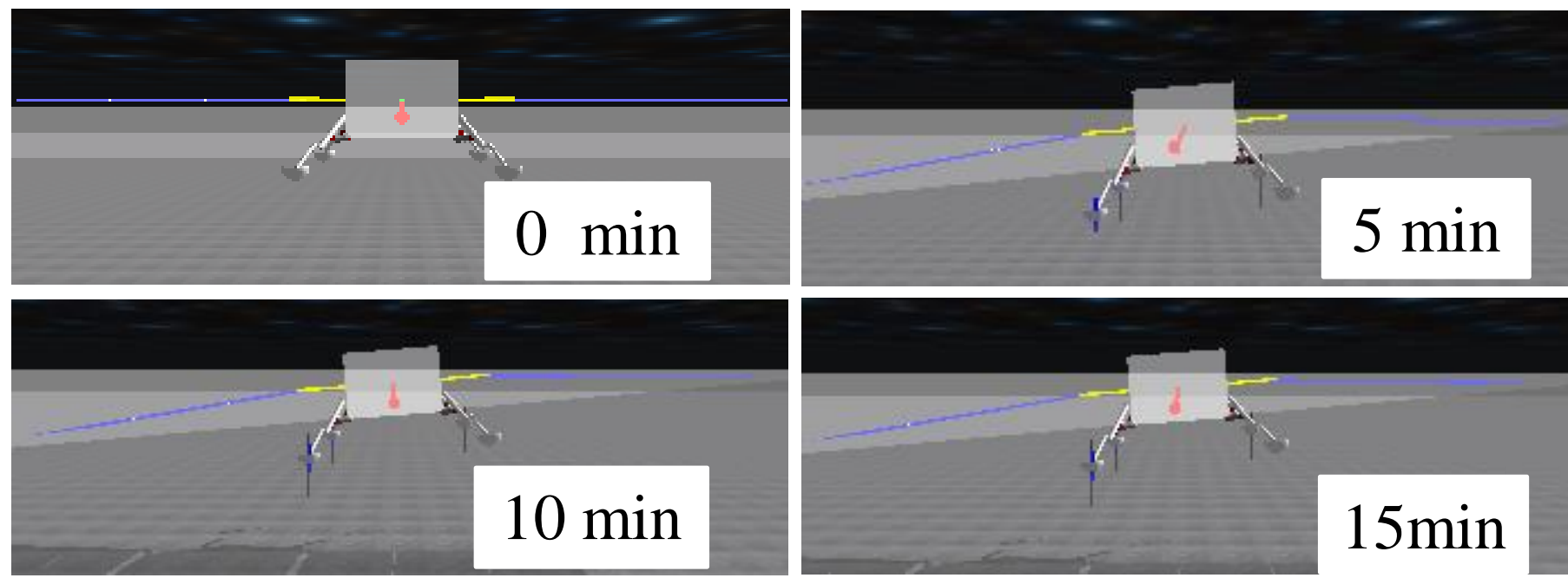
運動方程式

$$H\ddot{q} + C(\dot{q}) + G(q) = \tau + J^T F$$

(H : 質量行列, C : 速度依存項, G : 重力項, F : 外力項, τ : トルク項, q : 一般化座標)

シミュレーション入力条件

| | 燃料残量 m [kg] | 地面の傾斜角 s [°] |
|----|------------------|-------------------|
| 範囲 | 300-1200 | 0-12 |
| 刻み | 50/100 | 1 |



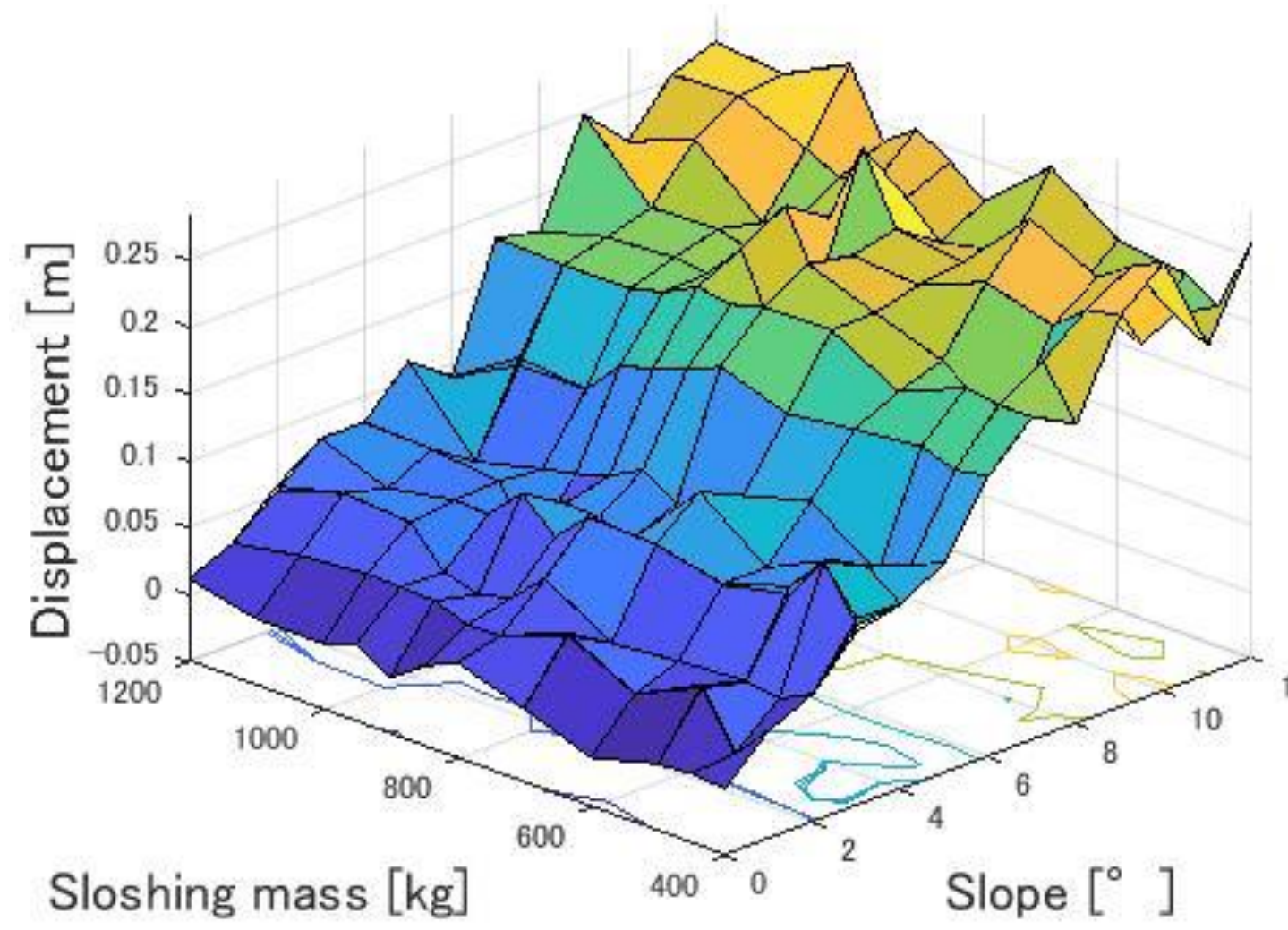
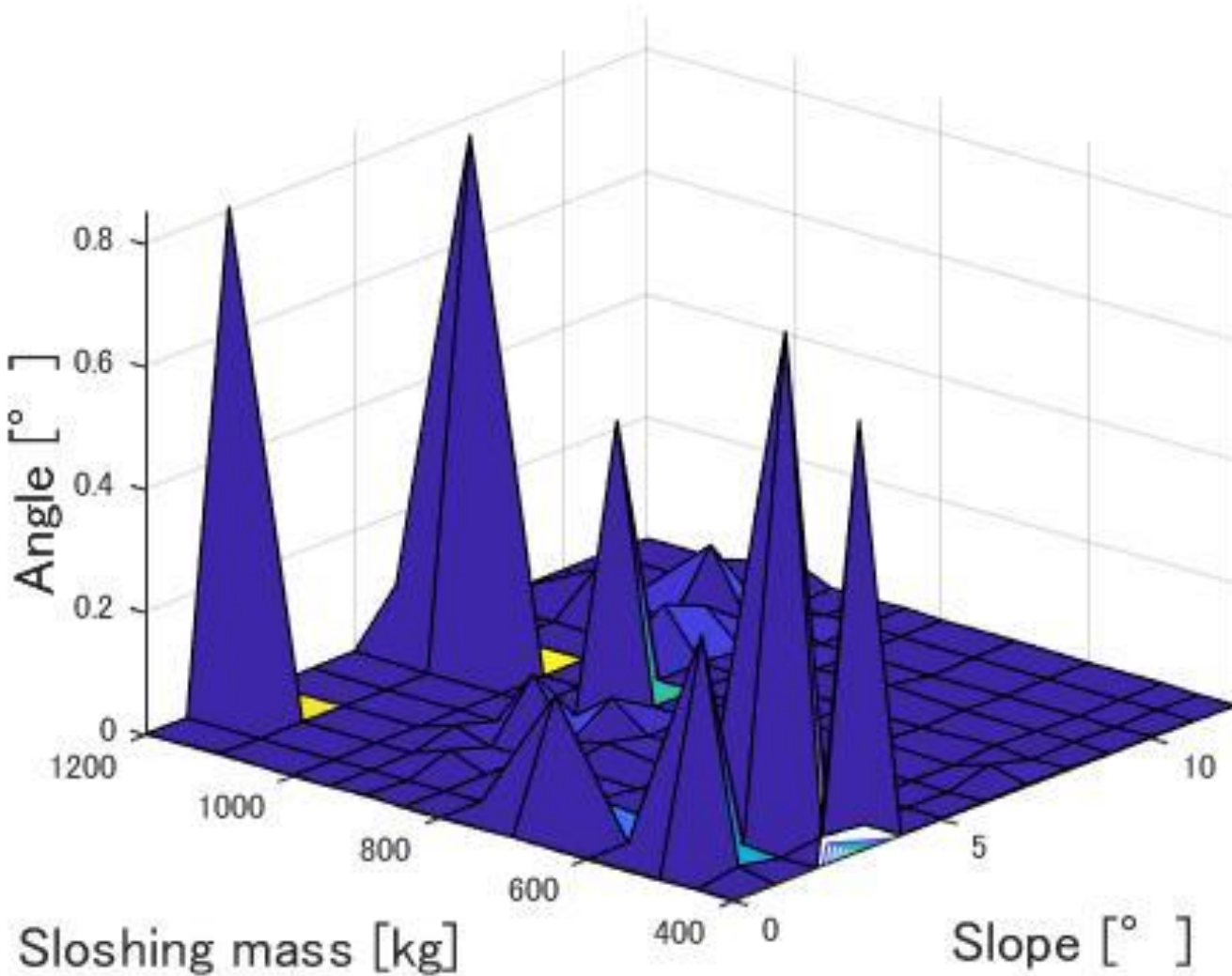
シミュレーション実行画面 ($m=500$ kg, $s=5^\circ$)

＜着陸成功条件＞

- 着陸 (姿勢変動 1° を恒常的に維持できる状態) が, 探査機の天体表面への接地から10 分以内に実現できること.
- 探査機が天体表面に接地後, 着陸が行われるまでに動くことが許容される距離は5 m以内であること.
- 天体表面に触れてよい探査機の構成要素は着陸脚先端のパッドのみとする.
- 着陸後の静定姿勢は着陸地点のフォボス局所平均平面に対して, 探査機のロール・ピッチ角ともに 5° 以内であること.

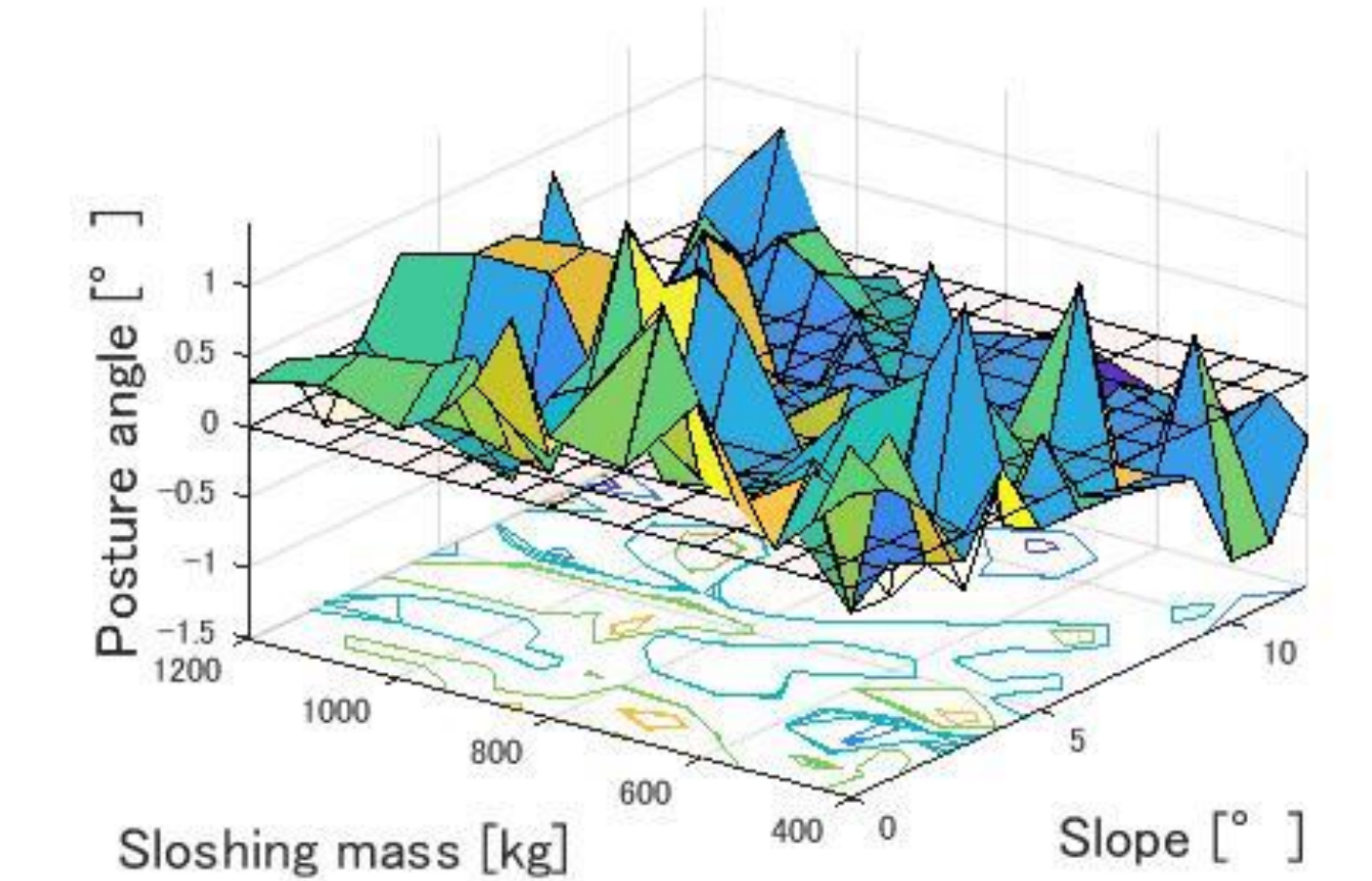
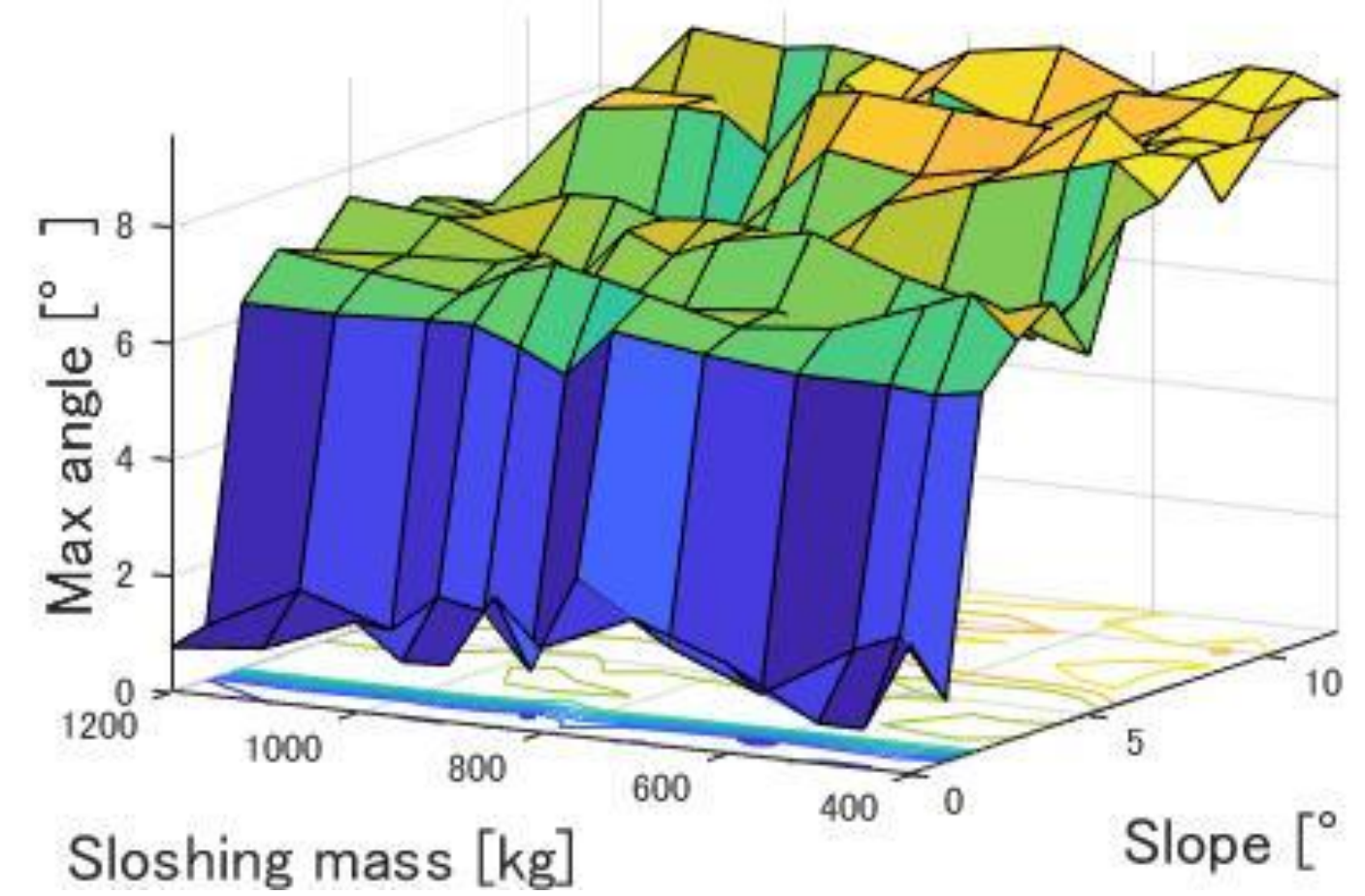
1 着陸判定
(10分から15分の間に $\pm 1^\circ$ 以上の変化がないか)

2 移動量
(9分30秒から10分30秒のx軸の値平均)



3 斜面に対する本体の最大姿勢角
(15分間でSAPが表面に触れるか)

4 静定姿勢
(10分から15分の間の姿勢の平均)



シミュレーション解析に基づく考察

1. スロッシングによる共振により静定時間が長期化

・着陸斜面傾斜角と液体燃料残量に依存して共振点が存在し, 静定までの時間を長くすると考えられる

2. 地面傾斜と移動量が比例関係

・おおまかな比例関係があると考えられる
・共振やSAPの接触による影響により, 一様な傾向は見られていないと考えられる

3. SAPが天体表面に触れる本体角度が, 幾何的計算による 11.2° よりもかなり小さい 4°

・着陸斜面傾斜角が 2° のとき, 斜面に対する本体角度が 6° になっており, 着陸斜面傾斜角が本体に与える影響が大きいと考えられる
・ 4° から最大角度が不規則に変動しており, SAPが天体表面に触れたと考えられ, SAPは自重や振動, 本体角度により 4° 付近で天体表面と接触すると考えられる

4. 明確な相関は無い

・液体燃料残量が少ない場合, 共振点を除き, 着陸斜面傾斜角の初期角度に影響を受けやすいと考えられる