

## 月軟着陸／次期月探査の研究

## Study on Lunar Soft Landing and Next Lunar Mission

宇宙先進技術研究グループ

二宮哲次郎, 若林幸子, 濱田吉郎, 片山保宏,  
四宮康雄, 佐々修一, 松本甲太郎

Advanced Space Technology Research Group

Tetsujiro Ninomiya, Sachiko Wakabayashi,  
Yoshiro Hamada, Yasuhiro Katayama,  
Yasuo Shinomiya, Shuichi Sasa, Kotaro Matsumoto

## Abstract

SELENE-B, being proposed as the SELENE follow-on project, is the first Japanese moon lander for the exploration in the vicinity of a central peak of a crater. For SELENE-B, the sure obstacle avoidance and safe landing is the most severe technological requirement to be developed. There are so many problems for this mission. The spacecraft has to detect obstacles, such as crater or rocks, and move to the safe area. Some science investigations are planned after the landing, however scientific interests lie on the rocky places. The lunar rover is necessary to carry out these investigations. This paper reports the studies on these topics, and some topics for the future lunar probes.

## 1 はじめに

1980年代末に始まった我が国の月探査への取り組みは、1996年の宇宙開発政策大綱で「地球外天体に人間が宇宙活動を広げていく場合の第1歩」と示され、月内部構造の解明を目指すLUNAR-A計画、月周回観測と軟着陸実験を目指すSELENE計画として開始された。しかし、SELENEによる軟着陸実験は月面降下時の障害物検出機能とそれによる転倒防止への信頼性向上を求められ、2000年夏にSELENEから分離された。このため、より確実な軟着陸技術開発に向けた研究開発が旧航技研を交えた旧宇宙3機関共同で開始され、月面軟着陸技術確立を図ることとなった。

月軟着陸実験機(SELENE-B)研究では、軟着陸技術開発のみならず、月科学探査として、クレータ内部など様々な厳しい地形に軟着陸し地質探査などの表面探査を効率よく行うことも目指している。SELENE-B実現にはこれまでの宇宙技術に加えて様々な新技術が新たに必要となる。総合技術研究本部ではその技術開発課題として、降下経路を認識して着陸目標地点に正確にいたるための高精度航法技術、障害物を避けながら安全・確実に軟着陸するための障害物検知技術及び軟着陸技術、および着陸後の厳しい周辺地形での走破や地球

上から遠隔操作するための探査技術などの研究を進めている。また、SELENE-B では必ずしも必要ではないが次期月探査を見据えた月面滞在技術の研究なども進めている。本稿では、平成 15 年度に実施した各研究項目の成果を報告する。さらに、SELENE-B 検討チームによる成果についても簡単に紹介する。

## 2 研究の概要

平成 15 年度は以下の項目について研究を行った。

- 障害物検知・回避技術
  - 画像処理障害物検知
  - 障害物回避誘導制御
- 月面ローバ
  - 月斜面走行機構
- 夜間保温技術
  - 極低温耐久試験
  - レゴリス断熱特性解析
- その他の検討内容

## 3 成果概要

### 3.1 画像処理障害物検知

障害物検知アルゴリズムの検討

軟着陸障害物として、岩石(高さ 50cm 以上)、クレータ(直径 2m 以上)、坂(傾斜角 30° 以上)及び影地帯が想定された(図 1)。目標とするクレータ中央丘近傍では中央丘の生成過程から岩石分布割合が高いことが予想される。小型クレータ分布は月の海の 1/10 程度である。このため障害物検知では岩石の検知が重要となるが、着陸機の大きさから、高さ 50cm 以上の小型岩石も障害物と定められた。このような小型岩石はその存在確率も高いが、小型のため高々度での認識は極めて困難であるという課題が指摘されている。

光学画像処理はこれらの障害物認識の最も有力な手法であり、高速で降下する着陸実験機の障害物検知センサーとして優れている。光学画像処理手法は月以外の他惑星軟着陸への応用も期待できるため、これまでに 2 次モーメント法やステレオ法など種々の障害物(地形)認識手法が提案

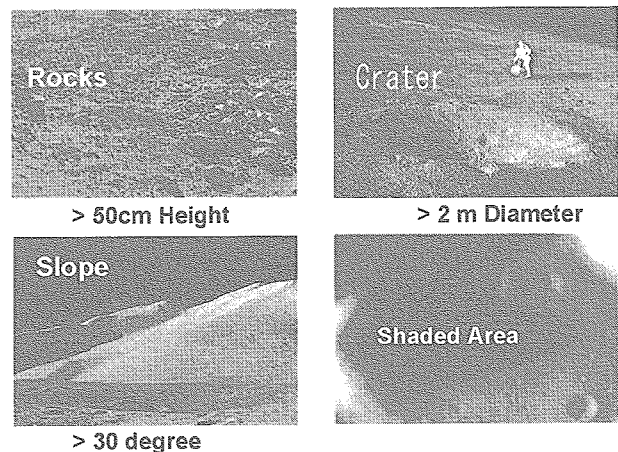


図 1 想定された軟着陸障害物

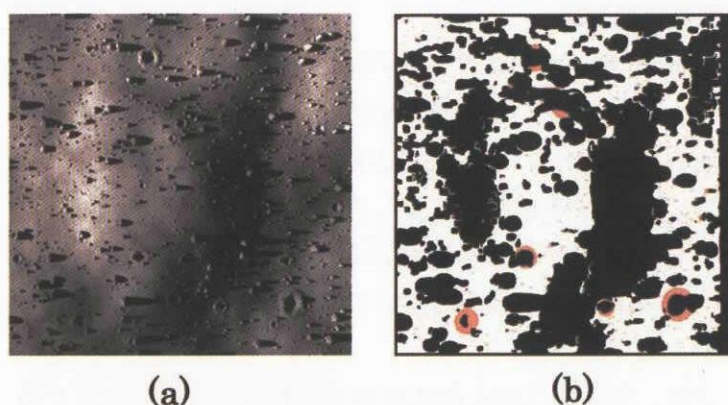


図2 複合画像処理による障害物認識  
(a)原画像, (b)認識結果 (白:安全着陸領域)

されている。しかし、それぞれの手法の障害物認識機能には制約、限界があり、単一の手法では垂直降下時のバスセンサーとして所要の信頼度を確保するのは困難である。このため、それぞれの処理結果を統合判断することで障害物認識の信頼度を向上させる複合画像処理手法（図2）の研究を進めている。

#### 障害物検知センサのハードウェア化

障害物センサの開発に当たり、アルゴリズムの開発・評価とともに重要なのがハードウェアでの実現性の確認である。特にステレオ視を利用した障害物検知手法には計算コストが大きいという問題があり、月着陸に必要な実時間処理を達成するためには専用の装置を適用することが必要と考えられる。そこで、現在、地上民生品で開発が進んでいるリアルタイムステレオ計測器の宇宙仕様化に向けて、必要な装置構成についての検討、および回路規模の見積り、並びに処理速度の見積りを行った。

既存の画像センサとして、ETS-VII 搭載用ランデブ・レーダ（RVR）、MUSES-C 搭載用光学航法センサ（ONC）をベースに検討を行った。複数の処理方式で処理画像サイズを変えながら検討した結果、表1のように、約1 Hzでの計測が可能となる見通しを得た。

表1 宇宙仕様リアルタイムステレオ計測装置  
リソース見積り（画像サイズ 1000×1000[pixel]）

質量	3.8 [kg]
消費電力	36 [W]
外形寸法	280(W)×240(D)×80(H) [mm]
処理時間	1～2 [Hz]

### 3.2 障害物回避誘導制御

SELENE-B は、月の周回軌道からスラスタの推力で軌道速度を打ち消す動力降下フェーズ、障害物を回避しながら目標地点付近の安全な領域へと移動する垂直降下フェーズを経て月面に軟着陸する。現在想定されている SELENE-B のコンフィギュレーションでは、探査機には横移動専用のスラスタは搭載されておらず、機体の姿勢を傾けてメインスラスタの横方向成分を発生させることでのみ横移動推力を得ることができる。そのため、SELENE-B には横移動に必要な姿勢目標値を適切に定める誘導則と、それに対して高精度かつ速応性のある姿勢制御則が必須である。

垂直降下フェーズは、動力降下時の航法誤差を吸収するフェーズなどの 4 つのサブフェーズから構成される(図 3)。誘導制御則の概要は以下の通りである。

- ◆ 基準軌道設定: 各サブフェーズ開始時に、必要な横移動を達成し、かつ消費燃料を最小とするような軌道を計算する。
- ◆ 基準軌道への誘導: 機体運動が基準軌道に沿うように、メインスラスタ推力及び姿勢角目標値を調整する。
- ◆ 姿勢制御: 姿勢角目標値に追従するように、姿勢制御用スラスタで制御する。

基準軌道は、縦の運動と横の運動をカップリングさせたまま、消費燃料が最小となるような軌道を求めている。基準軌道への誘導は、フィードフォワード要素(軌道設定時に計算した推力及び姿勢角)及びフィードバック要素(基準軌道(位置及び速度)と現在軌道との差分)を用いて行う。ノミナルケースのシミュレーションに加え、誤差のあるケースについても研究を進めている。今後は航法誤差、重力誤差などを含めたより詳細な検討を進める予定である。

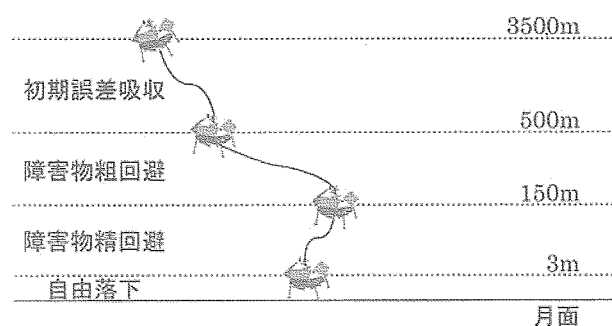


図3 垂直降下フェーズ着陸シーケンス

### 3.3 月斜面走行機構

SELENE-B は軟着陸後にクレータ中央丘近傍に接近し地質探査を行うための小型ローバを搭載する構想である。月面ローバ開発にはこれまでの宇宙技術の小型化に加えて多様な新規技術が必要であるが、特に登坂性能と遠隔操縦に重点をおいて研究を進めている。

SELENE-B の探査目標クレータ中央丘近傍は部分的にせよ激しい起伏が避けられない地



形であろう。従って、ローバ登坂能力は SELENE-B 科学探査にとって最も重要な機能である。このため最大傾斜角度  $30^{\circ}$  の模擬レゴリス斜面を模擬できる月面走行試験装置を整備し、車輪やクローラ等の基本走行機構の登坂性能評価を進めている(図4,図5)。また、4輪独立操舵の小型ローバを試作し柔軟で高精度な位置決め機能を目指し、登坂走行などの遠隔操縦手法の研究を進めている。



図4 月面走行試験装置と試作ローバ

### 3.4 極低温耐久試験

月は大気を持たない天体であるため、月面では日中と夜間の気温の差が激しく異なる。このような過酷な温度環境において長期間にわたるミッションを遂行するためには、地球時間で約15日間続く月面上の夜間をいかにして乗り越えるかが、今後の月着陸ミッションにとって重要な課題である。

そこで、現在の宇宙用の機器の設計基準、製造基準に基づいて製作された宇宙用機器が、太陽発電を利用できない夜間に外部エネルギーに依存することなく、月面上で遭遇する低温環境(約 $-180^{\circ}\text{C}$ )にどの程度耐えうるのかを検討した。フライト機器であり実軌道上運用を経験している SFU 関連のフライト機器を試験に供した。

試験結果から、一部の機器については予想以上の低温耐性を持っていたが、送信回路機器などは極低温に耐えられず故障した。今後、故障原因の確認を進めると共に、試験設備の整備を含めて長期的に実証、実験を進めていく必要がある。

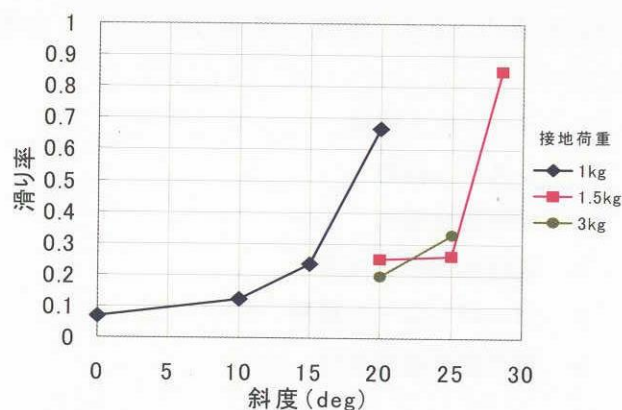


図5 クローラ走行時の滑り率と斜度の関連

### 3.5 レゴリス断熱特性解析

月面での日中と夜間の温度変化は非常に過酷だが、図6に示すように、地下については比較的穏やかな温度変化になっている。そこで、夜間保温にレゴリスを利用した場合の保温性の評価検討を進めている。

具体的には、レゴリスで覆われているアルミニウムでできた円筒状のモジュールの昼夜の温度変化を調べている。

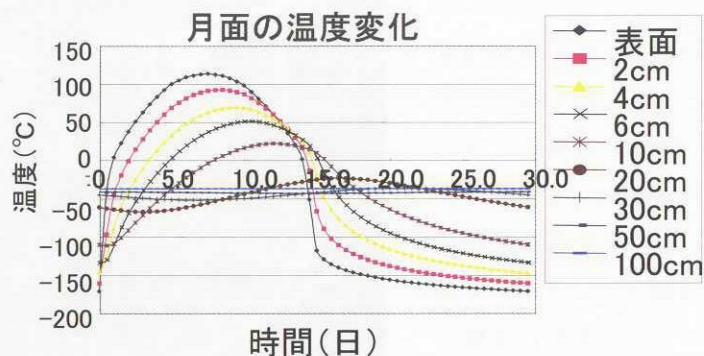


図 6 月面の温度変化

### 3.6 その他の検討内容

SELENE-B については、旧宇宙 3 機関を中心とする SELENE-B 検討会のメンバーで協力して検討を進めてきた。個別の課題については、各種研究会を作り、以下の項目について検討を行った。

- ミッション検討
- システム検討
- 地形照合航法
- 着陸衝撃吸収技術
- ローバシステム検討
- 理学観測機器検討

## 4 まとめ

今年 1 月に発表されたアメリカの新しい政策を始めとして、昨今の国際情勢の変化などから月面探査の重要性は増している。このような状況の中で、日本にとって新規開発技術となる個々の課題と共に、長期的な戦略をたてることが重要となる。

平成 15 年度は SELENE-B の実現に向けて、様々な技術的な課題に対して取り組むとともに、ミッションとしての提案を行った。今後は、各研究項目について着実に研究を進めるだけでなく、開発を見据えた検討を進めていく必要がある。

## 5 参考文献

- 1 SELENE-B 検討チーム(ISAS/NAL/NASDA 他): 月軟着陸実験計画(SELENE-B)提案書, 2002.
- 2 片山他, 「画像を用いた障害物検知手法の検討」, 第 47 回宇宙科学技術連合講演会, 2003.10
- 3 濱田他, 「月面高精度着陸のための SELENE-B 誘導制御系検討」, 第 47 回宇宙科学技術連合講演会, 2003.10