

これまでに簡易熱数学モデルにより放熱板の必要面積・形状を検討し、熱的に実現性のあ  
るモデル設定、及び観測可能な太陽光条件等を検討した。今後はこの成果をもとに、耐機械環境  
性等も考慮した PM モデル（又は TTM/MTM）を設計し、詳細な熱解析、熱真空試験による検  
証を行う。

#### (2) 駆動機構の小型軽量化、耐環境性（特に高温環境）

ジンバル、フィルタホイールの軽量化のため超音波モータを使用することを、第 1 候補に  
想定している。市販品の超音波モータをベースに、耐真空・温度環境・機械環境性のための改良  
を施したものを搭載する計画である。これまでに市販品の超音波モータを用いて以下の試験を実  
施し、ベアリング設計、接着剤の選定や摩擦部（ステータ、ロータ接触箇所）の改良を検討し、  
試作品を製作済みであり、常温および低圧下 ( $10^{-4}$  Torr) での動作が確認できている。

## 4.2 マクロ分光カメラ (LUMI)

### 4.2.1 概要

マクロ分光カメラは SELENE-2 搭載候補機器の一つであり、本提案においては、ラング周  
囲の岩石の詳細な組織観察にもとづく試料選別の役割を担う。また、岩石の鉱物化学観測によっ  
て、岩石の形成過程や条件を決定することで、Aristillus クレータ形成とその後の地質史の実証  
的な解明に迫る。

### 4.2.2 科学的意義

一般的に岩石中の結晶の化学組成、結晶粒子のサイズや各鉱物の分布状態は、その岩石が  
マグマから固化した当時のマグマの化学組成・冷却速度・圧力条件などの決定的情報であり、地  
球科学の分野で広く用いられている。本探査では特に、Aristillus クレータ形成よりも後の天体  
衝突による加熱・溶融の影響を把握した上で試料を選別する必要がある、それは数十  $\mu\text{m}$  スケ  
ールでの岩石組織の観察が不可欠である。

### 4.2.3 測定原理

太陽からの入射による月面からの拡散反射光について、可視域から近赤外域までをターレ  
ット方式によって分光する。検出器は米 Goodrich 社の SU640HSX-1.7RT (InGaAs) を想定し  
ている。

### 4.2.4 機能・性能

光学仕様を表 4-2 に示す。太陽光を光源とすると、観測波長域において十分な SN 比 ( $>100$ )  
が得られることが分かっている。観測波長域は  $0.75\sim 1.55\ \mu\text{m}$  であり、珪酸塩鉱物中の  $\text{Fe}^{2+}$   
の吸収形状を測定して鉱物種の判別（月表面に存在する主要鉱物である輝石・かんらん石・斜長  
石・イルメナイトの判別）、鉱物の化学組成の推定、岩石組織の観察を行う。

表 4-2 マクロ分光カメラの光学仕様 [マクロ分光カメラ検討グループ 2011].

マクロ分光カメラ (LUMI)	観測波長 (nm)	750 (Conti.) 905 (Low-CaPx:Mg#90) 915 (Low-CaPx:Mg#70) 925 (Low-CaPx:Mg#50 相当) 980 (High-CaPx) 1050 (OI) 1250 (PI) 1550 (Conti.)
	分光方式	ターレット方式によるマルチ (8) バンド分光
	検出器	SU640HSX-1. 7RT Vis-InGaAs
	空間分解能	20 $\mu$ m/pixel
	観測視野	10mm $\phi$

#### 4.2.5 観測シナリオ

以下の手順により機器の健全性確認を行う。

(1) 観測機器一次電源 ON. (2) カメラ検出器 ON. (3) HK の確認. (4) カメラ信号処理部 ON. (5) 分光フィルタターレット ON. (6) 信号レベル確認.

典型的な運用シーケンスは以下である。

(1) アームで観測対象岩石を採取. (2) 観測対象の岩石表面の研磨. (3) 観測対象のマクロ分光カメラによる観測. 測定時間は 1 観測対象あたり 15 分程度. (4) 観測データの保存および伝送. 観測データはその後の運用方針検討に必要なためリアル伝送することとする.

#### 4.2.6 システム要求

##### (1) 軌道, 通信

データ伝送には, 本観測機器のデータを地上に下ろすだけの十分なレートを持つこと.

##### (2) 機器配置

センサ部はランダのマニピュレータ先端に搭載されること. エレキ部はランダ内部に搭載されること. また熱 I/F はセンサ部が独立熱制御, エレキ部は従属熱制御とする. 打上げから着地の間マニピュレータ先端のセンサ部はロンチロックされること. 温度は保存温度を保持されること. LUMI の観測窓および放熱面へのレゴリス等のコンタミが防止されること.

##### (3) 運用

センサ部格納時 (ロンチロック時を含む), LUMI の観測窓のコンタミ防止とダークカレント校正を兼ねたキャップ (遮光暗室箱) を提供すること. 低温環境時 (月の朝夕), 必要に応じてヒータを提供すること. 放熱面への月面および他機器からの熱入力を最小とすること.

#### 4.2.7 開発課題と検証シナリオ

光学カメラの開発状況は, InGaAs 検出器で我々の必要とする光学性能が十分に評価できていないため, TRL レベルは TRL2 程度に相当し, 研磨部は実験的なコンセプトの実証は済んで

いるため、TRL3 に相当する。現状の重要な課題は、小型・軽量化、InGaAs 検出器の性能評価、真空下での研磨性能の確保である。InGaAs 検出器の性能評価については解析評価済みであり、性能試験も実施している [本田ほか 2013]。

#### (1) 真空下での研磨機構

これまで唯一研磨機構が搭載された米国火星ミッションでの技術と比べても、真空度の高い月面上での研磨はより技術的ハードルは高い。そこで、下記の二方向での検討を進めている。(a) 米国 Honeybee 社にて、火星用研磨システムと同様な機構を用いて月面環境（真空下）での研磨性能について評価中である。Honeybee 社による真空下での研磨評価の結果では、研磨性能自体は（表面荒さ、研磨に要する時間、必要押しつけ力などともに）クリアする事が確認できている。ただし、現状設計では研磨刃の摩耗が大きく、10 サンプル以上の研磨が厳しい状況にある。刃の摩耗度は刃の形状（刃の体積を増やすなど）などにより十分改善の余地があり、今後、刃の設計を最適化すれば解決できる見込みが立っている。(b) 上記とは別に、国内での研磨機構開発についても検討するため、国内メーカーに研磨機構検討を打診し、検討を進めている。

#### (2) VIS-InGaAs 検出器の性能評価

購入済みである VIS-InGaAs 検出器 (OEM 品) について、これまでに実施した評価試験では、温度安定性やノイズ評価など一部項目しか終わっていないが、電気性能は問題ない事を確認している。ただし、検出器自体が米国での防衛上、取扱注意対象となっているため、購入品は内部構造や電気特性などの情報が現状ではなかなか得られない事が問題である。これに関しては、プレフライトモデル用、フライトモデル用検出器の購入予定がある程度立てばメーカーと技術的に詰めた議論をすることにより、情報の提示や我々の希望に応じた検出器回路の修正（例えば検出器温度モニタ情報の出力など）にも対応が可能であることまで確認済みである。今後は、SELENE-2、または本提案のプロジェクト化後にプレフライトモデル用、フライトモデル用検出器を購入することとし、それまでに OEM 品で分光特性や迷光、飽和特性など光学的な評価を進める。

#### (3) カメラ部 EM 製作検討

EM 作成に向けた検討を 2012 年度から開始しているものの予算の関係から制作までは行っていないが、光学系概念設計の一部を行い、性能到達の見込みは確認済みである。今後は、外部予算も含めた予算の獲得に注力するとともに、本提案の WG 化後により詳細な光学系概念設計と EM 制作を行う予定である。

### 4.3 K-Ar 年代計測装置

#### 4.3.1 概要

K-Ar 年代計測装置はマルチバンド分光カメラ、マクロ分光カメラで選別された岩石試料の K 量と Ar 量を計測し、固化年代を決定するための機器であり、本提案の主役と言ったべき機器である。

#### 4.3.2 科学的意義

月惑星の進化過程の解明のために、最も重要な観測の一つは表面の形成年代である。一般に、現状の技術レベルでは正確な年代計測には岩石のサンプルリターンが必要であるが、技術的にもコスト面を考慮してもサンプルリターンには未だ大きなハードルがある。特に将来、火星や水星、外惑星の衛星などの着陸探査を見据えたとき、その問題はより重要となってくる。それに対し、もし惑星表面上で岩石の年代計測が可能となれば、探査計画のコストやリスクの大幅な軽減が可能となり、またサンプルリターン計画を行う上でも惑星表面上で予備分析による試料選別の信頼性が格段に向上するという計り知れない利点がある。諸外国の探査では K-Ar 法の提案と搭載実績があるものの、従来の方法では原理的に地質史を復元するにたえうる信頼性の高い年代値を出すことができなかった。ここで提案する年代計測装置は従来手法の欠点を補ったアイソクロン法による K-Ar 年代のその場計測を採用する。

#### 4.3.3 測定原理

高エネルギー密度のレーザーパルスを試料に照射することで直下点をプラズマ化して K と Ar を同時に抽出し、K をレーザー誘起プラズマ分光法 (Laser-induced breakdown spectroscopy; LIBS) によって、Ar を四重極質量分析計 (Quadrupole Mass Spectrometer) によって定量する。Ar 計測に関しては、「かぐや」や Bepi-Colombo で搭載／開発実績のある飛行時間型質量分析装置 (TOF-MS) の採用も検討中である。

#### 4.3.4 機能・性能

レーザー：波長 1064 nm, パルス幅 6 ns, エネルギー 100mJ, スポット径 500 $\mu$ m

分光計：波長範囲 730-800 nm, 波長分解能 0.4 nm, SNR 250:1

質量分析：Ar 検出限界  $\sim 10^{-16}$  mol, M/ $\Delta$ M  $\sim 80$

#### 4.3.5 観測シナリオ

以下の手順で、マルチバンド分光カメラ、マクロ分光カメラで選別された岩石試料の K-Ar 年代計測を行う。ここではコア抜き機を採用したケースを記す。

(1) サンプルのコア抜き、(2) 真空容器への収納 (シール可能なコア抜き機 Honeybee robotics)、(3) コア試料側面鉱物のマッピング撮影、(4) 照射点へのサンプル移動 (直進×回転の二次元)、カメラによる試料撮影、(5) レーザー予備照射による試料表面のクリーニング、(6) QMS ブランク計測、(7) レーザー照射 (500-1000 パルス, 2 Hz)・プラズマ発光スペクトル取得、(8) ゲッタによるガスの精製、(9) 質量分析計でのマススペクトル取得、(10) バルブを開けガスの放出、(11) 照射後のサンプルを撮影、z 方向の焦点移動によるレーザー掘削孔体積計測、(12) (4) に戻る (アイソクロンデータが取れるまで 5 回以上の繰り返し)、(13) 試料交換 (ドリルビットの再利用 or 複数個のドリルビットを搭載するかは要検討)。

#### 4.3.6 システム要求

#### (1) 軌道，通信

年代測定の際には試料中の計測点選択などでリアルタイムでの運用が必要である．そのためデータ伝送には，本観測機器のデータを地上に下ろすだけの十分なレートを持つことが必要となる．

#### (2) 機器配置

試料ランダのマニピュレータでアクセス可能な位置に配置すること．温度は保存温度を保持されること．放熱面へのレゴリス等のコンタミが防止されること．

#### (3) 運用

低温環境時（月の朝夕），必要に応じてヒータを提供すること．放熱面への月面および他機器からの熱入力を最小とすること．

### 4.3.7 開発課題と検証シナリオ

LIBS と質量分析を組み合わせた年代計測は新たな技術であり，現状は実験的にコンセプト証明がなされた段階にまできている．しかし，各要素技術は海外も含めれば搭載実績がある技術であるが，日本で衛星搭載に必要な耐環境性能と科学観測に必要な計測性能を兼ね備えた年代装置を確実に制作する技術・体制は確立していない．そこで，まずはフライト品と同等の構造や計測性能を持ったエンジニアリングモデル(EM) の制作と地上調査現場による実運用試験を，2014 年度から 2016 年度にかけて行う予定であり，科学研究費補助金の申請を行っている．

開発計画：

2014 年度：各要素（質量分析部，集光光学系を含むパルスレーザ部，分光計部，レーザー照射チャンバー）の所定の性能評価と試作機制作を行う．質量分析部については，TOF-MS を採用する場合，TOF-MS そのものは「かぐや」搭載 PACE や Bepi-Colombo 搭載予定の CPA などの従来装置をベースとして設計できるが，その一方で，計測ガスを電離させるためにイオン化チェンバーの開発が必要となる．そこで，TOF 部の製作は 2014 年度から行う一方で，イオン化チェンバーはまずは荷電粒子の軌道追跡計算による詳細な設計を行いつつ実験室での試作と検証実験し，EM 製作は 2015 年度から開始する予定である．レーザー部については，小型フェムト秒レーザーを導入して検証実験と衛星搭載改良を行う．さらに，これを着陸機に搭載して実際に運用するため，非常に小さい（直径  $5\mu\text{m}$ ）スポット径を実現できるレーザー集光系を設計・製作する．分光計測部については，通常 CCD の高速転送機能を用いて必要な時間分解能を得る方法を採用．具体的には，本計画で導入するフェムト秒レーザーを東京大学に既存の実験装置に組み込んで分光計測実験を行い，最適な露光時間帯の割り出しを行う．このデータを基に，CCD の選定および改修内容を検討する．照射チェンバーとガスライン製作については，直線導入機と回転導入機を備えたサンプル保持機構を持つ照射チェンバーを製作する．

2015 年度：基本的には初年度に開始した各コンポーネントの開発を継続する。具体的には初年度に詳細設計や選定した装置を実際に製作したり購入したりする要素が多い。具体的な項目は、質量分析部についてはイオン化チェンバーを実際に製作すること、分光部については、マス킹を施した宇宙用 CCD を購入して光検出システムを製作すること、レーザー部については、新規購入する小型フェムト秒レーザーを分解してペルチエ冷却実験を実施することである。これにより、各項目の EM は完成する。

2016 年度：全体組立と総合性能評価を中心にして研究を進め、全体構造を組み上げる。加えて、実際の露頭での地質調査実証実験の実施を大きな目標とする。

## 5 ミッション要求

### 5.1 着陸精度

新鮮な岩石を確実に採取するためには、表面が小クレータの放出物で完全に覆われているエジェクタブランケットへの着陸が必要となる (図 2-3 c). 対象となる小クレータのサイズは 40-800 m であるため、~100m の精度でのピンポイント着陸が必要となる。

### 5.2 重量

#### (1) LMUCS

SELENE-2 搭載用に検討した結果 (概算値) を以下に示す。

カメラ部：0.75 kg

着陸機内部のエレキ部：1.25 kg

校正板：0.2 kg 程度

#### (2) LUMI

SELENE-2 搭載用の検討結果を表 5-1 に示す。

センサ部：1.15 kg

着陸機内部のエレキ部：0.85 kg

表 5-1 マクロ分光カメラの質量の見積もり [マクロ分光カメラ検討グループ 2011]. 表には SELENE-2 搭載を想定した研磨装置部が含まれているが、本提案ではコア抜きドリルとどちらを採用するか検討中である。

名称	数量	単位質量 [kg]	合計質量 [kg]	備考
R-SIP	1	2.622	2.622	
センサ部	1	1.500	1.500	
LUMI	1	0.465	0.465	
ターレット	1	0.085	0.085	
レンズ部	1	0.100	0.100	
モータ	1	0.090	0.090	
センサ SU640HSX-1.7RT	1	0.090	0.090	
センサ処理回路基板	1	0.050	0.050	
その他	1	0.050	0.050	
アブレーションツール	1	0.355	0.355	
ツール	1	0.030	0.030	
モータ	1	0.185	0.185	
ベアリング、カブラ等	1	0.040	0.040	
ブラケット等	1	0.060	0.060	
その他	1	0.040	0.040	
共通	1	0.680	0.680	
ケース	1	0.500	0.500	
ネジ等	1	0.030	0.030	
把持機構 (じゃばら・ブラシ)	1	0.050	0.050	
MLI	1	0.100	0.100	
エレキ部	1	0.850	0.850	
FPGA基板	1	0.120	0.120	
電源基板	1	0.120	0.120	
モータドライバ基板	1	0.120	0.120	
DC/DCコンバータ	1	0.100	0.100	
ケース	1	0.350	0.350	
その他	1	0.040	0.040	
ケーブル	1	0.272	0.272	
センサ系	1	0.140	0.140	MDM37, AWG#26, 1mを想定
フィルタホイール駆動系	1	0.066	0.066	MDM15, AWG#26, 1mを想定
アブレーションツール駆動系	1	0.066	0.066	MDM15, AWG#26, 1mを想定

センサ部  
(マニピュレータ上に搭載される)

エレキ部  
(ローバー内部に搭載される)

(3) K-Ar 年代装置

計測装置：12 kg

アーム：3 kg

K-Ar 装置の重量見積もりは、各要素の海外実績値の積算値に基づくものであり、現状では目標値である。

(4) 観測機器まとめ

ランダ搭載機器の総計は、

K-Ar 年代装置 12 kg (TBD)+ LMUCS 2 kg + LUMI 2 kg + アーム 3 kg (TBD) = 19 kg  
であり、ローバを 30 kg 程度とする。

### 5.3 データ量と通信レート

(1) LMUCS

素子数 1,024 x 1,024

bit 深度 2 byte

バンド数 13 bands (415–1000nm) (TBD) + 1 band (dark 用)

1 バンド、1 測定あたりのデータ量 =  $1,024 \times 1,024 \times 2 = 2.1$  Mbyte (非圧縮)

1.7 Mbyte (可逆圧縮 (圧縮率 80%)), 0.6 Mbyte (非可逆圧縮 (圧縮率 30%))

FOV = 20°

着陸点周辺地形・地質把握のためのデータ

遠方視  $1.7 \text{ Mbyte} \times 13 \text{ (方位)} \times 1 \text{ (バンド)} = 21.8 \text{ Mbyte}$

近傍視 (10 m)  $1.7 \text{ Mbyte} \times 13 \text{ (方位)} \times 5 \text{ (バンド)} = 109.0 \text{ Mbyte}$

近傍視 (2 m)  $1.7 \text{ Mbyte} \times 13 \text{ (方位)} \times 5 \text{ (バンド)} = 109.0 \text{ Mbyte}$

総データ量 =  $21.8 \text{ Mbyte} + 109.0 \text{ Mbyte} + 109.0 \text{ Mbyte} = 239.8 \text{ Mbyte}$

ダウンリンク時間を 12 時間として、通信レートは  $239.8 \text{ Mbyte} / 12 \text{ h} = 44.4 \text{ kbps}$

(2) LUMI

素子数 512 x 512

bit 深度 2 byte

バンド数 8 bands (750–1550 nm) (TBD)

1 測定あたりのデータ量 =  $512 \times 512 \times 2 \times 8 = 4.2 \text{ Mbyte}$  (非圧縮)

3.4 Mbyte (可逆圧縮 (圧縮率 80%)), 1.3 Mbyte (非可逆圧縮 (圧縮率 30%))

総データ量 =  $3.4 \text{ Mbyte} \times 20 \text{ (試料の数)} = 67.2 \text{ Mbyte}$

1 試料のダウンリンク時間を 10 分間として、通信レートは  $3.4 \text{ Mbyte} / 10 \text{ min} = 45.3 \text{ kbps}$

(3) K-Ar 年代装置

LIBS

波長サンプリング数 176 (730–800 nm を 0.4 nm 間隔)

bit 深度 2 byte (TBD)



1 測定あたりのデータ量 =  $176 \times 2 = 352$  byte (TBD)

総データ量 =  $352 \times 10$  (試料の数)  $\times 5$  (1 試料あたりの測定数) = 17.6 kbyte (TBD)

QMS (TBD)

CCD カメラ

素子数 1024 x 1024

bit 深度 1 byte (TBD)

1 測定あたりのデータ量 =  $1,024 \times 1,024 \times 1 = 1$  Mbyte (TBD)

総データ量 =  $1,000,000 \times 10$  (試料の数) = 10 Mbyte (TBD)

1 試料のダウンリンク時間を 30 分間として、通信レートは  $1 \text{ Mbyte}/30 \text{ min} = 82.2 \text{ kbps}$

#### (4) 観測機器まとめ

上記の見積もりから科学観測データの総量は以下である。

$239.8 \text{ Mbyte} + 67.2 \text{ Mbyte} + 10 \text{ Mbyte} = 317 \text{ Mbyte}$

年代計測ではデータを確認しながら分析を進める必要があり、このフェーズで通信レートが最大となる。よって、82.2 kbps の通信レートが確保されればよく、高利得アンテナは必ずしも必要としない。

## 5.4 電力

### (1) LMUCS

SELENE-2 搭載用に検討した結果 (概算値) を以下に示す。

カメラ部：5 W

着陸機内部のエレキ部：11 W

### (2) LUMI 相当

SELENE-2 搭載用に検討した結果を図 5-1 に示す。

センサ部：6 W

着陸機内部のエレキ部：15.85 W

### (3) K-Ar 年代装置

レーザー：2 W

分光器：2.5 W

QMS 系：~11.8 W (ピーク)

モニタカメラ：20 W

アーム：~15 W (SELENE-B を参考にした)

#### (4) 観測機器まとめ

上記の機器が同時に運用したとして、最大電力量は、

$\text{K-Ar 年代装置 } 63 \text{ W (TBD)} + \text{LMUCS } 16 \text{ W} + \text{LUMI } 22 \text{ W} + \text{アーム } 15 \text{ W (TBD)} = 116 \text{ W}$

である。しかし、実際にはそれらは同時に運用する必要はなく、試料の顕微観察時が最大で、 $\text{LUMI } 22 \text{ W} + \text{アーム } 15 \text{ W (TBD)} = 37 \text{ W}$  である。

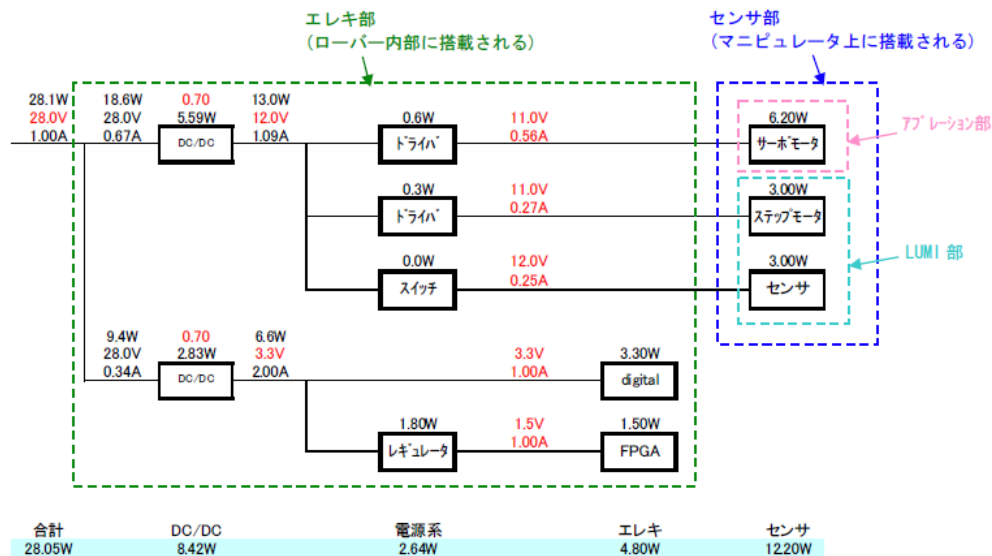


図 5-1 マクロ分光カメラの電力量の見積もり [マクロ分光カメラ検討グループ 2011]. 図には SELENE-2 搭載を想定した研磨装置部が含まれているが、本提案ではコア抜きドリルとどちらを採用するか検討中である。

## 5.5 ローバ性能

着陸機周辺のマニピュレータで採取可能な範囲 (~2 m) に存在する岩石を分析対象とする。しかし、岩石の少ない領域に着地してしまった場合のバックアップとして、また、より遠方 (~数十 m) に興味深い岩石 (例えば、他地質ユニットから飛来したと思われるような岩石やラング周辺の岩石よりもより新鮮面を見せている岩石等) が存在する場合、ローバにより試料を採取し、着陸機に持ち帰り、年代計測を行う。これにより、リスクの軽減と科学達成度の向上を図る。実際に、過去の火星探査で移動技術を持つか否かでその科学成果が大きく異なっており、ノミナルサクセスの達成のみならず、フルサクセスを目指した場合には、遠方岩石にアクセスできる何らかの技術が必要となる。

ローバの移動範囲は着陸機から数十 m の範囲とする。着陸点周辺の岩石の分析を優先するため、ローバの往復期間は 5 日程度を許容する。5 日のうち、2 日を試料採取に要するとして、3 日で 100 m 程度の移動を行うとすると、移動速度は 1 m/h となる。

Aristillus フォロアにある小クレータ周辺の平均的な傾斜は 0-7 度程度であるため、最大 15 度の斜面の移動が可能とする。

## 6. 軌道計画

本提案チームでは軌道計画の工学的検討は未実施であるものの、日本の月面着陸ミッションは SELENE-B, SELENE-2, SLIM で十分な検討実績があり、それらの情報を用いて本提案ミッションの軌道計画の予備的な検討が可能である。そこで、ここでは SELENE-B の軌道計画 [SELENE-B 検討チーム 2002] を参考情報として記載する。

### 6.1 打上げから月周回軌道まで

SELENE-B で検討された軌道計画を下記に記す。まず H-IIA ロケットで打ち上げ、静止トランスファー軌道に投入した後、探査機自体の推進系により、月遷移軌道・月周回軌道を経て、月面への降下を実施する。一旦、月周回軌道に投入するのは、月面降下開始前に通信リンクが確保されていることなどをチェックアウトすることを想定しているためである。また、ピンポイントの着陸を目指していることもあり、周回軌道に投入することで、それ以前の軌道誤差を月周回軌道中で、ある程度補正することができるなど、軌道設計上利点がある。

観測機器の機器最終チェックアウトは、軌道決定運用の空き時間などを利用して実施する。

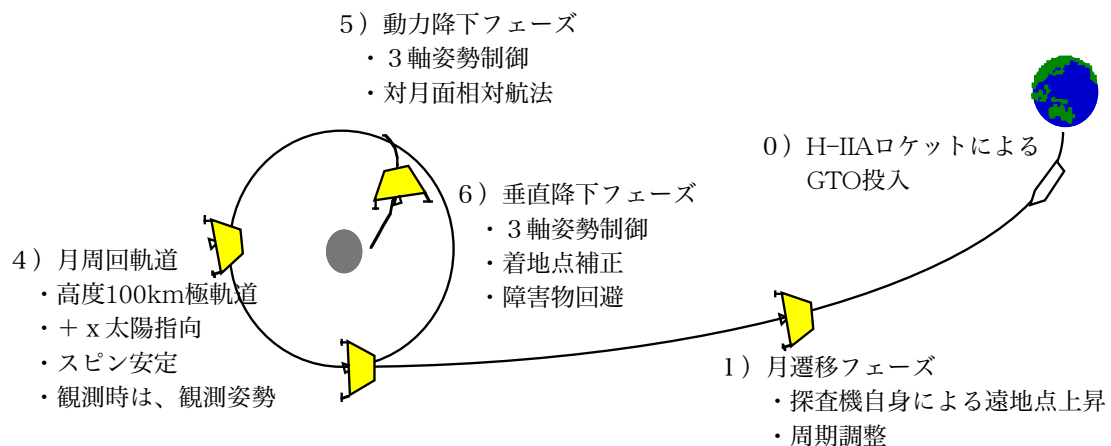


図6-1 打上から月周回までの軌道計画 [SELENE-B 検討チーム 2002, 図 2.2-1 より].

### 6.2 月面着陸

SELENE-B で検討された着陸方法を下記に記す。周回する探査機が着陸目標点近傍に差しかけたところで、軌道を離脱し、降下軌道に移行する。軟着陸直前に障害物の回避や着陸位置誤差修正のための補正フェーズを経て軟着陸する。降下軌道は全期間、臼田局からの可視運用を前提とする。降下開始後、オンボードでの航法・誘導を地上局側でスーパーバイズして、場合によっては修正コマンドを送信することを想定している。ただし、通信遅れがあるため探査機には自律性が求められ、技術的には非可視での着陸降下実施も可能である。しかし、SELENE-B 計

画では、この着陸降下そのものが重要な実験項目であることを鑑み、実験データを確実に取得することを優先し、降下フェーズは可視という条件を付した。

降下シーケンスは重力降下フェーズと垂直降下フェーズの2つのフェーズに分けられる。重力降下フェーズでは探査機の対月面位置・速度を調整し、目標点のほぼ上空でホバリングに近い状態になるまで探査機を誘導する。慣性基準装置、レーザ高度計、光学カメラを航法センサとして、メインスラスタを連続的に噴射し続ける。光学カメラは、探査機直下の月面を撮像し、これを月面地形図と照合することで現在位置を推定する。着陸目標点は月面地形図上で定義され、また、地形図座標系と慣性座標系の間には誤差があることから、月面地形を照合する航法は重要である。垂直降下フェーズでは着陸に障害となる岩などを識別して回避運動を行う。このフェーズでは、慣性基準装置の他、電波高度速度計と光学カメラを使用する。電波高度速度計は高度情報とともに3軸の対月面相對速度情報を出力するため、軟着陸を確実に実施するのに重要なセンサである。光学カメラは月面地形の照合による位置推定の他、月面上にある障害物を検知するために使用される。

SELENE-2での検討によると、着陸精度は主に航法の精度に依存しており、これは目標点に対する相対的な精度であるため、参照する月面地図の空間解像度に依存する。SELENE-2での想定では「かぐや」の地形カメラ (~10 m/pixel) を参照地図としているため着陸精度を数百 m と見積もっていたが、現在は Aristillus クレータ周辺は LRO による高解像度画像データ (<1 m/pixel) が取得されているため、数十 m の精度で航法が可能であると期待できる。別の誤差要因として制御精度があるが、これは数 m と見積もられている。

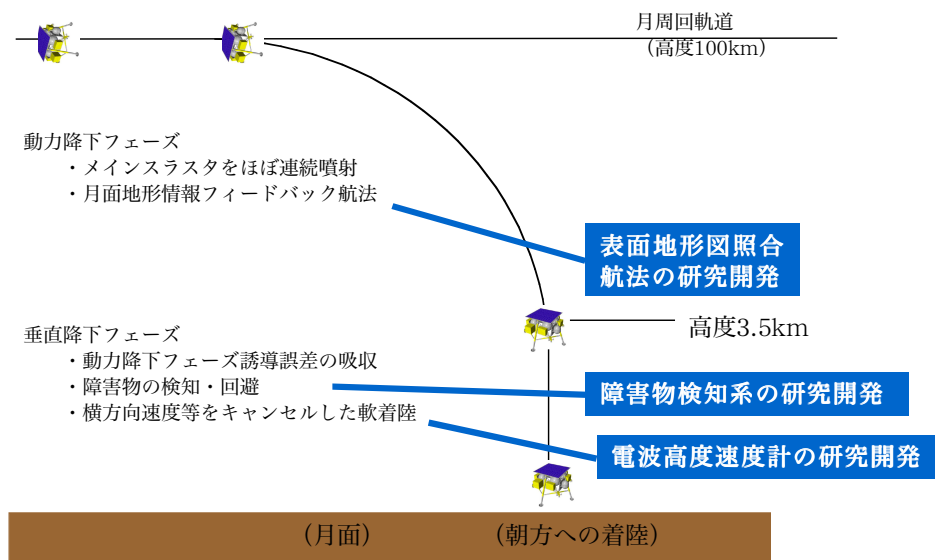


図 6-2 月面着陸の概要 [SELENE-B 検討チーム 2002, 図 2.2.3-1 より].

## 7. 探査機システム構成

本提案チームでは探査機システムの工学的検討は未実施であるものの、日本の月面着陸ミッションは SELENE-B, SELENE-2, SLIM で十分な検討実績があり、それらの情報を用いて本提案ミッションの探査機システム構成の予備的な検討が可能である。実際に、本提案のランダ搭載観測機器の重量、最大電力量の見積り値は 19 kg, 37 W であり、これは SELENE-B のランダ搭載観測機器のリソースと非常に近く (表 7-1, 表 7-2), 観測運用シナリオにおいても多くの類似性がある。そこで、ここでは SELENE-B の探査機システム構成を参考情報として記載する。

表 7-1 SELENE-B 質量解析表 [SELENE-B 検討チーム 2002, 表 3.2.4-1 より改変].

		質量 [kg]
実験機 (打上時)		2000.0
実験機 (ドライ)		520.0
バス, 着陸実証ミッション		470.0
サイエンスミッション		50.0
	ランダ搭載機器	20.5
	ローバ・システム	29.5
	サイエンス機器	5.7
	テレサンプリング	3.2
推進薬		1479.9
	月遷移軌道～月周回軌道投入	831.0
	月周回軌道離脱～着陸	620.6
	残推進薬など	28.3

表 7-2 SELENE-B 電力解析表 [SELENE-B 検討チーム 2002, 表 3.2.4-2 より改変].

		電力 [W]				
		打上	月遷移	周回(影)	着陸	月面
着陸機		328.6	381.4	271.4	618.6	179.7
バス, 着陸実証ミッション		328.6	381.4	271.4	618.6	124.1
サイエンスミッション						55.6
	ランダ搭載機器					55.6
	ローバ・システム					0.0
ローバ・システム(月面分離後)						50.6
	サイエンス機器					22.0
	テレサンプリング					15.0

SELENE-B では探査機は着陸機とは別に周回機を配置せず、ロケットから切り離された後から月面着陸まで一体である。これは、着陸目標点は月の表側に設定しているため、地上局との通信確保のためのデータ中継衛星を月周回軌道に配置する必要がないこと、周回軌道で着陸後に不要となる要素を切り離すことによる重量的メリットよりも切り離し機構を付与することの複雑化、リスク発生デメリットのほうが大きいと判断されるためである。

姿勢制御方式は、月面着陸降下において3軸の姿勢制御が必要であることを鑑み、基本的に3軸安定化方式としている。衛星上面にOSR (Optical Solar Reflector) を貼り付け、放熱面としており、OSRの周囲にひさし状に太陽電池を配置し、必要な電力を確保している。通信系は、オムニアンテナと中利得アンテナにより地上局との通信を行う。中利得アンテナで256kbps程度のテレメトリ回線が確保できることが分かっており、これは本提案の必要データレートを十分に確保できる。質量解析、電力量解析の結果を表7-1、7-2に示す。

本提案ではローバは科学目標の達成のために必ずしも必須ではない。一方、もし着陸機が岩石の少ない領域に着地してしまった場合のバックアップとして、また、ランダから遠距離(数十m程度)に遠方地質からの飛来物などの岩石学的に興味深い岩石が発見されることを想定し、小型ローバにより周辺の岩石の分析、採取も行うことで、リスクの軽減と科学目標の達成度の向上を図る。実際に、過去の火星探査で移動技術を持つか否かでその科学成果が大きく異なっており、ノミナルサクセスの達成のみならず、フルサクセスを目指した場合には、遠方岩石にアクセスできる何らかの技術が必要となる。

ローバはランダから数十m離れた試料を採取、分光計により分析し、着陸機に持ち帰るなどの役目を持つ。

## 8 研究開発の推進

### 8.1 実施体制

これまで本提案の検討は理学的視点を中心に進めてきており、システムの成立性などについては SELENE-B と SELENE-2 で検討実績があることから、それらのチームと連携し、情報提供を受けるかたちで進めてきた。今後は工学部分の検討体制の強化が課題であり、メンバーを増強中である。

K-Ar 年代測定装置の実現が本提案の鍵となる。質量分析部について、「かぐや」搭載 PACE や Bepi-Colombo 搭載予定 CPA の開発実績を持つプラズマ分野の研究者を、レーザ部に関して、SELENE-2 の LIBS 開発担当者を配置し、体制強化を図っている。

観測機器の開発予算に関して、分光機器については、SELENE-2 搭載候補機器であることもあり、概念検討や各コンポーネントの試験実施のための購入予算がある程度、確保されてきた。今後は科研費などの外部資金の獲得を進める。K-Ar 年代測定に関しても、EM 作成に向けて外部資金の獲得をまさに進めている。データ解析に関しては、「かぐや」で構築した人材と体制が整っており、データ解析やモデリングに関わる予算についても、これまで途切れることなく科研費などの外部予算を獲得してきた実績がある。

開発・科学検討体制（現状メンバーでの体制、随時声かけ中。）

提案代表：諸田智克（名古屋大）

システム検討：小林直樹（JAXA）、渡邊誠一郎（名古屋大）、小川和律（JAXA）

アドバイザー：向井利典、橋本樹明、田中智（JAXA）

ローバー開発：國井康晴（中央大）、大槻真嗣（JAXA）

分光カメラ開発：杉原孝充（JAMSTEC）、大竹真紀子（JAXA）、佐伯和人（大阪大）、本田親寿（会津大）、諸田智克（名古屋大）

K-Ar 年代計測装置開発：長勇一郎（立教大）、杉田精司、三浦弥生（東京大）、亀田真吾（立教大）、齋藤義文、笠原慧、小川和律、吉岡和夫（JAXA）、岡崎隆司（九州大）、並木則行、荒井朋子、小林正規、石橋高、大野宗祐、千秋博紀、和田浩二（千葉工大）、橘省吾（北海道大）

研磨・コア抜きドリル開発：長勇一郎（立教大）、杉田精司、三浦弥生（東京大）、大竹真紀子（JAXA）、本田親寿（会津大）

運用検討：諸田智克（名古屋大）、本田親寿（会津大）

ソフトウェア開発：石原吉明（産総研）、鎌田俊一（北街道大）、小林進悟（放医研）

データ解析、科学検討：

鉱物学・岩石学：大竹真紀子、唐牛譲（JAXA）、杉原孝充（JAMSTEC）、佐伯和人（大阪大）、武田弘（東京大）、荒井朋子（千葉工大）、小林進悟（放医研）

年代：三浦弥生（東京大），長勇一郎（立教大），杉田精司（東京大），杉原孝充（JAMSTEC），  
寺田健太郎（大阪大）

リモートセンシングデータとの結合：本田親寿（会津大），諸田智克（名古屋大），石原吉明  
（JAXA）

理論：渡邊誠一郎，古本宗充（名古屋大），鎌田俊一（北街道大），小林直樹（JAXA）

## 8.2 開発スケジュール

下記に開発スケジュール案を示す。

WG 立上げ：FY2016

MDR       ：FY2018

打ち上げ   ：～FY2023

開発スケジュール

分光機器：

技術課題の検討：FY2014～

EM 制作：2017

PM 設計・試験：FY2018（TBD）

FM 設計：FY2019（TBD）

FM 試験：FY2019-2021（TBD）

K-Ar 年代計測装置：

既存の DM によるアイソクロン年代計測技術の確立：FY2014

小型質量分析計，サンプルハンドリング部の開発：FY2014-16

EM の製作とフィールド試験：FY2016

PM 設計・試験：FY2018-2019（TBD）

FM 設計・試験：FY2020-2022（TBD）



## 9 参考文献

- Barra et al., *Geochim. Cosmochim. Acta* 70, 6016.
- Cintala & Grieve, 1998, *Meteorit. Planet. Sci.* 33, 889.
- Culler et al. 2000, *Science* 287, 1785.
- Durda et al., 1998, *Icarus* 135, 431.
- Gomes et al., 2005, *Nature* 435, 466.
- Hayashi et al., 1985, in *Protostars and Planets II*, eds. Black & Matthews, Univ. Arisona Press, 1100–1153.
- Hartmann, 2007, *Icarus* 186, 11.
- Kobayashi, H. et al., 2010, *Icarus* 209, 836.
- Kobayashi, S. et al., 2010, *Space Sci. Rev.* 154, 193.
- Lawrence et al., 2007, *Geophys. Res. Lett.* 34, L03201. doi:10.1029/2006GL028530.
- Morota et al., 2011, *Earth Planet. Sci. Lett.* 302, 255.
- Neukum, 1983, *Meteoritenbombardement und Datierung planetarer Oberflächen*, Munich: Ludwig-Maximilians-Univ.
- Norman et al., 2006, *Geochim. Cosmochim. Acta* 70, 6032.
- Ogawa, 2000, *J. Geophys. Res.* 105, 6997.
- Ogawa & Yanagisawa, 2011, *J. Geophys. Res.* 116, E08008, doi:10.1029/2010JE003777.
- Ogawa & Yanagisawa, 2012, *J. Geophys. Res.* 117, E06004, doi:10.1029/2012JE004054.
- Ryder et al., 1991, *Geophys. Res. Lett.* 18, 2065.
- Stöffler & Ryder, 2001, *Space Sci. Rev.* 96, 9.
- Tanaka et al., 2002, *Astrophys. J.* 565, 1257.
- Walsh et al., 2011, *Nature* 475, 206.
- 長ほか, 2013, *遊星人* 22, 132.
- 本田ほか, 2013, 日本地球惑星科学連合 2013 年大会, 幕張, PPS23-02.
- SELENE-B 検討チーム, 2002, SELENE-B 提案書.
- マクロ分光カメラ検討グループ, 2011, SELENE-2 提案書.
- マルチバンド分光カメラチーム, 2011, SELENE-2 提案書.