

月着陸探査SELENE-2ミッションの紹介と現状

田中 智¹, 橋本 樹明¹, 星野 健¹, 飯島 祐一¹, 三谷 烈史¹,
大嶽 久志¹, 小林 直樹¹, 木村 淳²

(要旨) JAXAでは「かぐや」に続く月探査ミッションとして月惑星への着陸および移動探査技術の獲得を主目的としたSELENE-2計画を検討している。現在はフェーズA(プリプロジェクト)段階にあり、2010年代半ばの打ち上げを目指している。本稿ではSELENE-2ミッションの現状と今後の動向について紹介する。

1. はじめに

本格的な月周回探査衛星「かぐや」が2009年6月をもって成功裏に終わり、これまでとは比較にならないほど充実したリモートセンシングデータ(高分解能・高精度グローバルマッピングデータなど)が取得された。リモートセンシングによる月探査はかなり成熟した段階に入ったと言えるだろう。これに続く月探査計画として、JAXAでは月惑星への着陸および移動探査技術の獲得を主目的としたSELENE-2計画を検討している。本計画は次の3つを大きなコンセプトとして掲げている。

- ① 着陸・移動・長期滞在技術の開発と実証
- ② その場観測による月表面物質および内部構造に関する科学探査と月の利用可能性調査
- ③ 国際貢献と国際的地位の確保

本稿ではSELENE-2の概要を紹介するとともに科学目標や科学搭載機器についての現在の検討状況と今後の予定について述べる。

2. SELENE-2ミッションの概要

「かぐや」では月軌道に探査機を投入し、周回軌道から観測運用を行う技術を獲得、成熟させたと言える。

月惑星探査への着陸技術実証を次のメインターゲットとすることは、月からのサンプルリターン技術や月の本格的利用へむけたさらなるステップアップとして重要なマイルストーンである。月を含む重力が比較的大きい天体への着陸は世界的に見れば初めてではないものの、我々が今後独自に月惑星探査を遂行するための重要なステップであると考えている。

SELENE-2は現在、打ち上げロケットとしてH2A-204を想定しており、着陸機の他に移動探査機(ローバ)および周回衛星の3種類の構成で検討が進められている(図1)。着陸機のドライ重量は1000kg前後で、観測機器等を約100kg程度搭載可能である。ローバは重量が100kg程度であり10kg程度の観測機器を搭載可能と考えており、着陸地点から1km程度移動できることを目標としている。周回衛星は月面に設置した観測機器のリレー通信としての役割が主目的であるが、月面に設置される機器との協調観測をする事により科学的成果をさらに増大させる可能性を有しているために数10kg程度の観測機器の搭載は必要と考えている。

最初にも述べた通りSELENE-2は基本的には着陸技術を実証することが主たる目的であるが、この他にもいくつかの技術的な挑戦をしており大別すると以下の3点に分類される。

- ① 着陸目標地点に対し精度1km以内を目指す。高精度着陸技術。-「降りられるところの探査」から「降りたいところの探査」-
- ② 遠隔操縦と自律機能を融合させた表面移動技術。

1. 宇宙航空研究開発機構

2. 惑星科学研究センター/北海道大学
tanaka@planeta.sci.isas.jaxa.jp

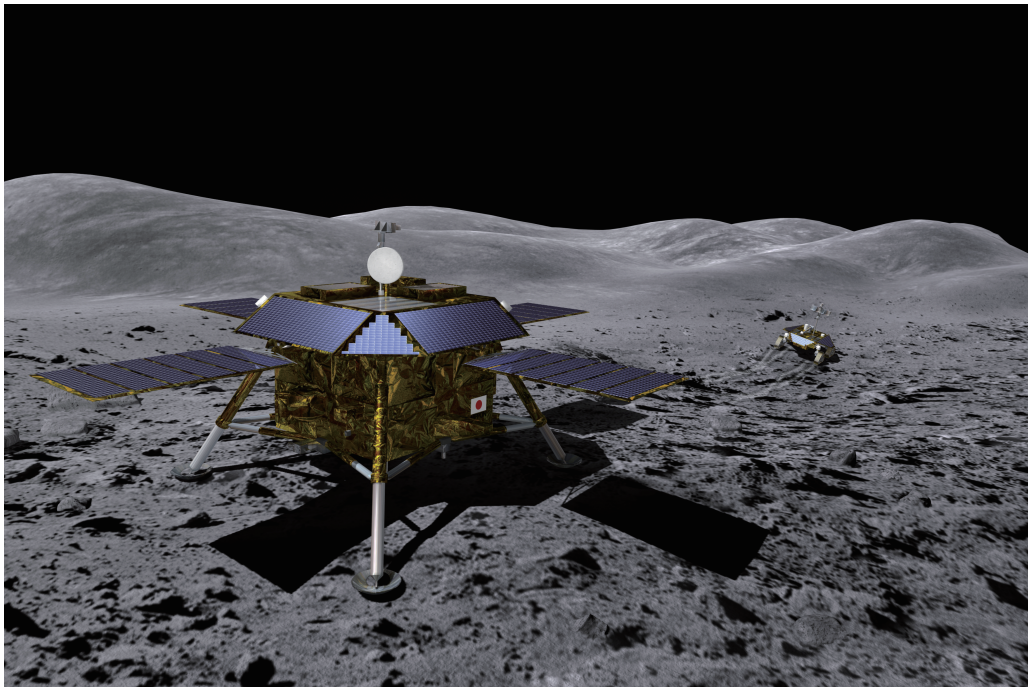


図1：SELENE-2着陸機とローバの想像図。着陸機重量は1000kg，ローバは100kg程度を想定している。この他にも通信リレー用として周回衛星を有する

太陽系・地球と月の歴史

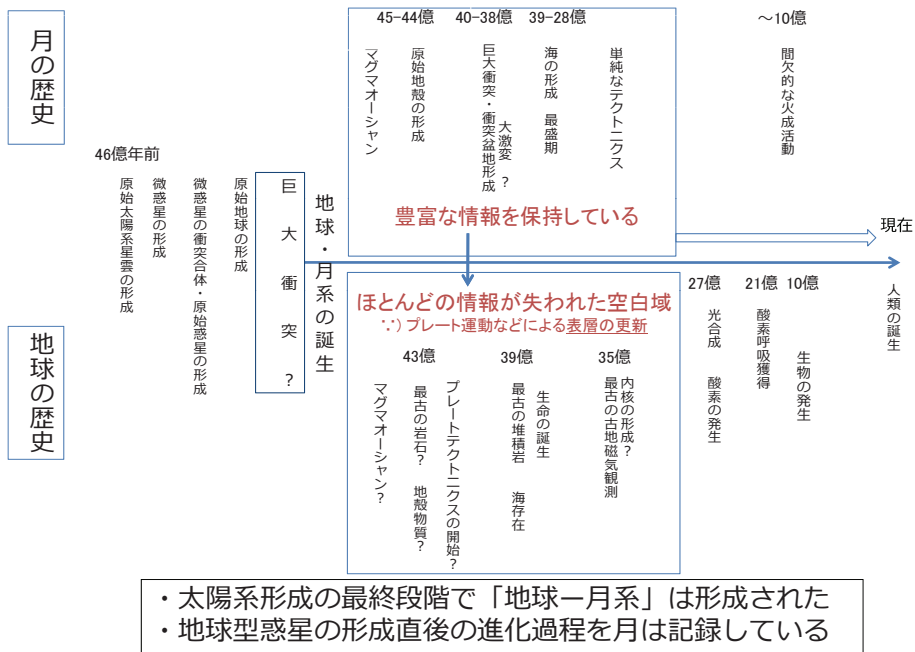


図2：月と地球の概略史。地球-月系誕生まもない時期は地球では知りえない情報であり，科学的に価値の高い探査対象の一つと言える。

表1：科学観測搭載候補機器と概要

名称	略称	概 要
(着陸機搭載)		
iVLBI用電波源	iVLBI	月面に設置する電波源(S, X帯)を用いて逆VLBI観測を行い, 月の重力場を精密測定する(サバイバルモジュール搭載).
月レーザ測距	LLR	レーザ反射装置を月面に設置し, 視線方向の変動を測定する(10mm以下の精度). Apolloで設置した別の地点もあわせて計測することにより月の秤動を調べる.
眺望分光カメラ	ALIS	可視・近赤外(380-2400nm)分光カメラにより, 主要な苦鉄質鉱物およびチタン鉄鉱の組成比を高精度で推定する.
表面地殻熱流量観測	HFP	月表層にプローブを埋設させ, 温度勾配と熱伝導率を測定することにより地殻熱流量を観測する(温度計測精度0.02度以内).
月広帯域地震計	LBBS	広帯域地震計を設置, 着陸地点の地殻厚さやコア, マントルなどの内部構造を直接探査する(サバイバルモジュール搭載).
月電磁探査装置	LEMS	外部磁場変化による月の電磁感応から月内部の電気伝導度構造探査を行う. またMT法(Magneto-telluric法)による表層付近の電気伝導度探査を実施する(サバイバルモジュール搭載).
(ローバ搭載機器)		
マルチバンド分光双眼カメラ	LMUCS	ステレオ撮像により地形計測を行い, マルチバンド撮像を行うことにより局所的な地質区分を行う.
ガンマ線・中性子分光計	GNS	U, Th, K及びSi, Fe, Al, Ca, Tiの元素組成計測を行う. ガンマ線分光計(LbBr3結晶, CdTe半導体)と中性子分光計(Si素子)による熱・熱外中性子強度を測定しFe, Tiの濃度を計測する.
月面マクロ分光カメラ	LUMI	岩石・レゴリス表面を高倍率で連続分光撮像し, 主要鉱物の組成, 分布, 組織などを観察する. アブレーションツールを用いて岩石を研削(研磨)する.
(周回衛星搭載機器)		
iVLBI用電波源	iVLBI	月面に設置する電波源(S, X帯)を用いて逆VLBI観測を行い, 月の重力場を精密測定する.
月電磁探査装置	LEMS	月電磁探査装置による電磁感応計測のリファレンスとして, 外部磁場の計測を行う.

ー将来の有人探査用も含むローバにむけたStep-by-Stepの開発ー

③ 原子力に頼らずに14日間の夜を乗り切る越夜技術.

ー長期観測・長期滞在への道を拓くー

これらはいずれをとっても科学成果と密接に関連している. 現時点では10m以下の分解能を有する画像が全球的に取得されており, 着陸したい場所を高精度で特定できる. 地質学的に重要な露頭や地域が限定された特徴的構造などへ確実に着陸することで科学的成果を高いクオリティーでかつ迅速に得るためには高精度着陸は重要な技術であろう. 移動技術については着陸地点周囲を地質学的に調査することが可能になるメリ

ットだけでなく, ローバで移動しながら地震探査などを行うことにより着陸地点付近の地下構造を解明すること, さらに長期観測を要求する観測機器にとっても着陸機から離れたより最適な場所を選ぶことが可能になる. 越夜技術に関しては地震観測や測地観測など地球物理学的観測にとって重要である. SELENE-2では2回の夜を乗り越えること, つまり3ヵ月程度の運用をノミナルの成功基準として技術開発を進めている.

3. SELENE-2ミッションで目指す科学目標と搭載機器候補

月は地球型惑星の初期進化に関する情報を現在まで

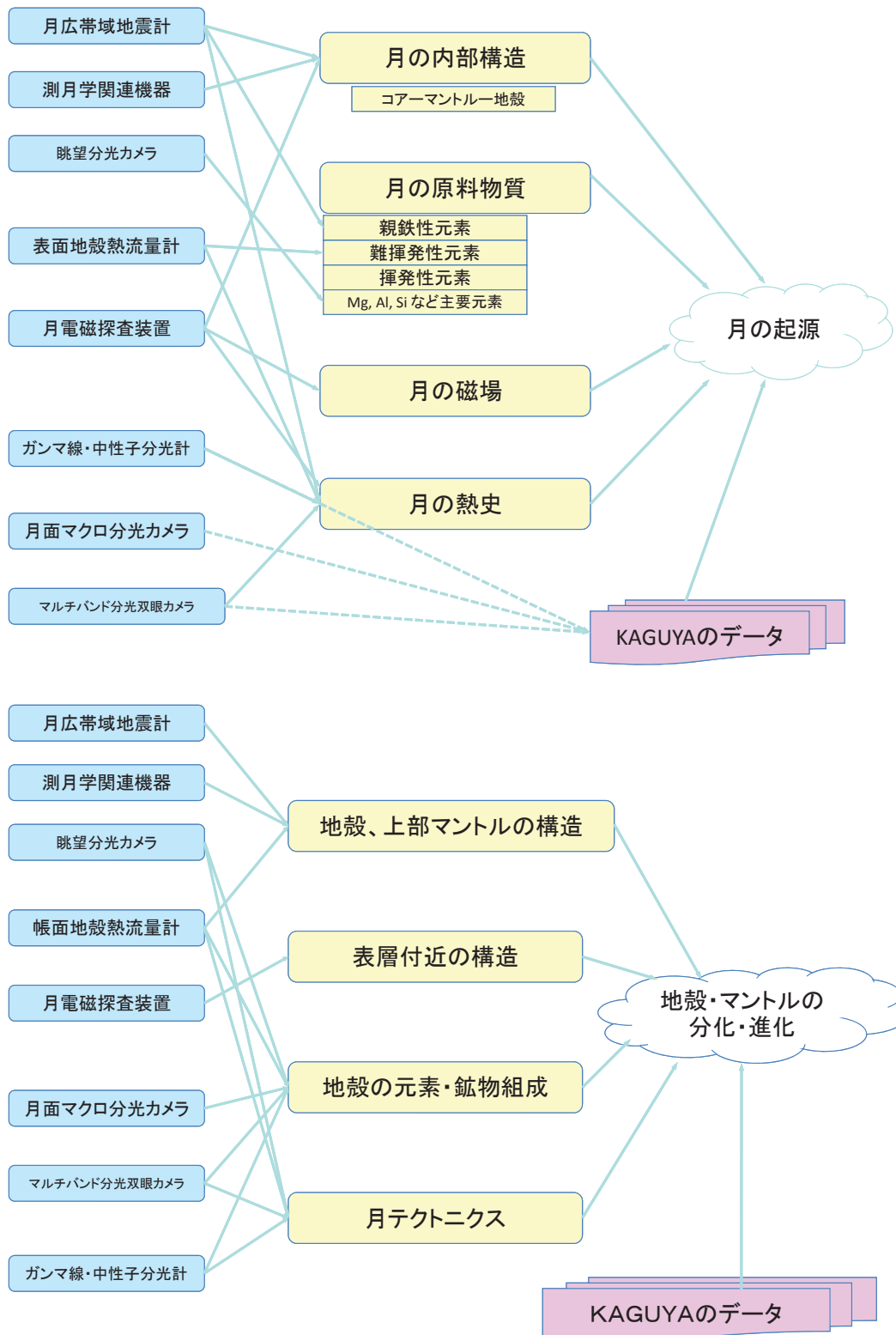


図3：科学観測搭載候補機器の期待される科学成果の概要。

留めた、いわばロゼッタストーンと言える。地球では浸食や火成活動、プレートテクトニクスによる表層の更新により、地球史初期の地質学的情報がほとんど失われている。それに対し、月は地球と同様に層構造への分化を経たのちサイズが小さいゆえに比較的早く冷え固まった。そのため月には形成直後からの進化の地質学的記録が連続的に残されている(図2)。

月探査により、次の3つの点について解明し、太陽系および地球の誕生と進化を探ることが重要な課題である；

- (1) どのように地球-月系が誕生し進化したのか(起源と共進化)
- (2) 固体天体がどのように層構造に分化し進化するのか(分化と内部進化)
- (3) 太陽系の初期において地球-月系にどれだけの微惑星の衝突があり、それによりどのような変動が両天体にもたらされたのか(衝突とその影響)

前項で述べたように、現在我々は高精度なピンポイント着陸技術、および表面移動技術を獲得しようとしている。このような工学的進歩の中で、いくつかの制約条件はあるものの観測したい地点で科学観測を実現できる時代が到来したのである。

SELENE-2では、(1)「起源と共進化」、(2)「分化と内部進化」という2つの問題を解決するために月という固体そのものに触れることにより得られるデータを取得する。つまり月の起源や分化の問題に迫るために、内部の硬さ、電気・熱の伝わり易さと言った表面を観察しただけでは得られないデータや分化過程を記

録した岩石が見られる重要な地点でサンプルの鉱物組成、化学組成データを取得する。

なお、かぐやでは月表面を高分解能で撮像することで小さな衝突痕(クレータ)までを観測することが可能となり、(3)「衝突とその影響」の問題に大きく寄与してきた。(3)をさらに推し進めるためには衝突頻度と年代の相関に絶対基準を与えることが必要であり、サンプルリターンによる年代決定が必要である。サンプルリターンはSELENE-2の目標技術には含まれずSELENE-3以降を目指す。

現段階においてSELENE-2における科学目標の大テーマについては規定しているが、具体的な着陸地点や観測機器の詳細仕様を絞り込むことは現段階では適切ではない。着陸機、周回機、そしてローバというインフラに対してどういう機器を搭載することが可能であり、それらで達成できるサイエンスはどこまでかを突き詰めておくことがミッションの最初段階として重要であると判断した。この趣意のもとで2008年7月にミッション系チームを立ち上げ、SELENE-2ミッションの母体となる宇宙科学研究所理学委員会下に設置されたワーキンググループ(次期月探査検討ワーキンググループ)に参加していた研究者を中心に科学観測候補機器の提案をお願いし、計16に及ぶ提案を頂いた。各搭載機器提案チームに対する技術調整会議により搭載可能性や科学成果についての議論、そして2009年3月には有識者による意見交換会を開催して12搭載機器のモデルペイロードを選定。そして2009年5月に「SELENE-2科学提案書」の初版発行に至った。科学

表2：月からの科学、月の利用調査、アウトリーチ搭載候補機器

名称	略称搭載機	概要
低周波電波望遠鏡 (月からの科学)	LLFAST(周回衛星)	20-25 MHz帯で惑星・太陽電波の測定を行う。地上局と同時観測を行うことにより低周波VLBIを構成し、高空間分解能での観測を行う。
宇宙塵検出器 (月からの科学)	LDM(周回衛星)	惑星間塵(太陽系内起源)、星間塵(系外起源)のサイズ、個数、速度を観測する。地球領域でのダスト環境、月面のダスト環境とレゴリス進化の情報を得る。
放射線量計 (利用調査)	RRMD-Ⅲ (周回衛星)	数MeV/n～数十GeV/nの広範囲の宇宙放射線環境の線量当量(LET)をSi位置検出器により測定し、宇宙飛行士滞在期間の可能性や放射線遮蔽技術開発の基礎データを取得する。
月面地盤調査装置 (利用調査)	LSM(着陸機)	着陸地点を1m程度掘削し、せん断試験やボアホール内の画像データなどにより月レゴリスの地盤基礎データを取得する。将来月面に設置する機器や構造物の設計、ローバ走破性向上に役立てる。
ハイビジョンカメラ (アウトリーチ)	HDTV (周回衛星, 着陸機)	月面で着陸に際するリアルで新鮮な情報を伝え、宇宙開発の理解促進、および教育普及に役立てる。

提案書は公開資料であり，著者ならびにミッションチームメンバーにご連絡いただければ配布する．なお，科学観測候補機器の技術開発検討をさらに進めた結果，現時点においては9機器まで絞り込んでいるが，今後新たな観測機器が加えられたり，現状の候補機器も対象から外されることは十分ありうることに留意いただきたい．ここではこれまでに絞り込んだ各候補機器の概要をまとめ（表1）それらが月の科学成果にどのように貢献しているかを定性的に紹介する程度にとどめる（図3）．

SELENEは周回衛星での「月の起源と進化に迫るサイエンス」がメインテーマであったが，SELENE-2は必ずしもサイエンス主導とは位置づけていない．前向きな意味で捉えるのであれば，月は単に「月の起源や進化」を探るサイエンスだけでなく，他の価値もそれに劣らないくらい魅力的なものがある．例えば月という場所の利用価値は，安定した地面や地球からの妨害電波を遮蔽した環境を実現できる月面天文台としての利用，月資源の利用，現在のISS（国際宇宙ステーション）に続く人類進出の場，他の惑星を探査するためのステップとしての場の利用など様々である．さらに「かぐや」でのハイビジョン画像は広報面や教育面で大きくアピールすることに成功した．SELENE-2においても何らかの形で，しかも新しいコンセプトも取り入れて搭載することは重要な位置づけであろう．現在，「月からの科学」，「月の利用調査」，そして「アウトリーチ」を目的としたモデルペイロードは5つの搭載機器がある（表2）．

4. 月探査の国際動向－国際協力を通してのグローバルミッションの実現にむけて

「かぐや」をはじめ近年の月探査で，表面や表層付近のグローバル像を得ることができた．次なるステップとして「月内部も含めた月全体のグローバルな構造」を明らかにするためには複数機で構成されたネットワーク観測が必要不可欠である．2年ほど前に月探査の現状と将来ビジョンについて紹介をし[1]，当時国際的に月探査が目白押しである現状を報告した．この間に米国の月探査計画が大きく方針転換したが，計画や打ち上げ時期の変更はあるにしても今なお数多くの月

探査計画が進められている状況に変わりはない．

内部構造探査を複数機で遂行するために複数のランダーを着陸させるという案もある．最も検討が進んでいる一つは，米国が検討をしている国際月ネットワークミッション（International Lunar Network，通称ILN）である．科学搭載機器や期待される成果，通信技術，着陸地点，電力技術などの検討を世界中の宇宙機関や研究者に参加を呼びかけて行っている．我が国も積極的に参加しており，多くのワーキンググループ（WG）のリーダーシップをとっている．現在いくつかのWG検討結果がまとめられており，ダウンロード可能である（http://iln.arc.nasa.gov/working_groups）．

その他の諸外国（インド，中国，ロシア，ヨーロッパ諸国）も月探査の検討を本格的に開始しており，打ち上げ想定時期もSELENE-2の予定とかなり近接している．これらのミッションと連携して協働観測を実現できれば，月内部のグローバルな構造を明らかにするための理想的なネットワーク観測の実現も夢ではない．これは各国の独自性を維持しつつ大きな成果が期待できる国際協働としての絶好の機会と言える．冒頭でも述べたようにSELENE-2ミッションにおいても「国際貢献と国際的地位の確保」をミッションの大きな柱として掲げている．我が国がイニシアティブをとって世界的に貢献できる大きなチャンスである．

5. 注目される着陸地点の選定

月着陸探査である以上，何と言っても重要なのが「どこに降りるのか？」であろう．着陸地点によって科学目標は大きく左右される．「かぐや」の成果が少しずつ出て来ており，ミッション機器やシステム検討が進んで来た現在，着陸地点の検討を本格的に始める時期だと言えよう．

しかし，月面のどこにでも着陸可能であるとする，システム検討が発散してしまい，技術的にも困難であるために以下の制約条件を設定した．

技術的な制約条件としては；

- －月の表側，少なくとも着陸後2週間程度は地球局から可視であること．
- －直径10m以内に50cm以上の障害物がなく，斜度30deg以内であること．
- －着陸時には日照である場所（日照側に遮蔽物が無

いこと)。

また、システム検討の前提条件として;

- 着陸地点は1箇所であること。
- 表側の中低緯度地域(緯度<60度, 経度<80度の領域)(通信および熱・電力設計からの制約)であること。
- 着陸地点から数百mの範囲の探査で十分な場所(ローバ移動距離からの制約)。
- 目標とした地点から数百mずれた地点への着陸が許容できる場所(着陸機の誘導精度からの制約)。

SELENE-2プリプロジェクトでは、重要で共通性の高い基盤技術や実現にむけた難易度が高いと考えられるテーマについてサブチームを作って検討を行っている(EMC検討チーム, 月面サバイバル検討チームなど)。これと同じ位置づけで「着陸地点検討チーム」を2010年3月に設立した。通常、サブチームはプリプロジェクトの傘下として活動を実施するために、プリプロジェクト側で人選およびとりまとめをするが、着陸地点に関しては科学成果などに直結する問題であり、各観測候補機器提案者以外からも広く意見を集めるべきであると考え、惑星科学会をはじめ関連学会に参加を呼びかけた。その結果50名程度の参加者が集まり、その中から10名のコアメンバーを中心に検討が進められている。この検討状況や結果については別途報告される予定であるが検討チームへの参加は随時行っているのに関心のある方は著者らにご連絡いただきたい。

6. ミッションの現状と今後の動向

2010年8月現在、SELENE-2ミッションはフェーズA(プリプロジェクト)段階にある。正式なミッション(フェーズB)として認定されるには乗り越えるべき審査行程があり、近日中にその一つ(システム要求審査)を受ける予定である。この審査を通過すればミッションシステムや観測候補機器製造を担当するメーカーの選定が可能となり、ミッション実現にむけて現実味がいっそう増す。しかし良い話ばかりでもない。現在のSELENE-2の搭載可能な観測機器重量では候補機器を全て搭載することはできない。従って科学的成果や搭載フィージビリティ、開発体制などを総合的に判断し、搭載機器のさらなる絞りこみや選定評価という厳しい状況も待っている。またこのような大型探査に必

要な予算がいったい確保できるのかどうかという大きな問題も残されている。現在の経済状態を踏まえると大変厳しい状況にはあるが、ミッション化実現に向けてプリプロジェクトチームと搭載機器チームが一丸となって課題を丹念に克服することがミッション実現につながる重要でかつ最も早いプロセスである。

ミッションを実現する為には;

- ① トップサイエンスの実現とそのアピール
- ② 世界に誇る観測機器の保有
- ③ 強靱なサポート体制

の3点を以前強調した[1]。この2年間で我々ミッションチームは②について重点的に取り組んできており温度環境などが厳しく難易度の非常に高い月面における機器の搭載フィージビリティを格段に上げることができたと考えている。そして3月に設置した着陸地点検討チームは①と③について大きな飛躍があるものと確信している。最新の状況については、学会の発表や説明会などを逐次開催させていただき所存である。その折には是非とも忌憚りの無いご意見、ご提案をいただければ幸いである。

参考文献

- [1] 田中智, 2008, 遊星人 17, 47