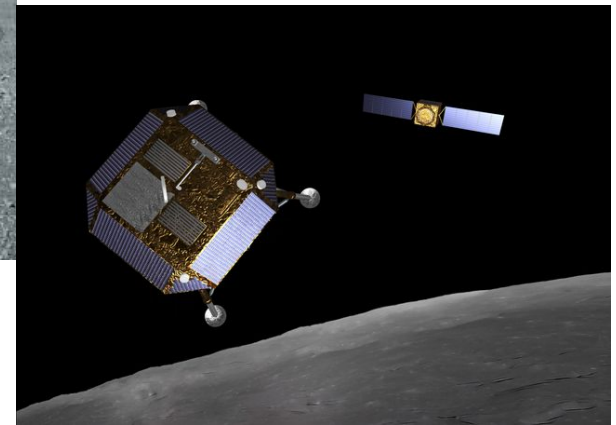


月着陸探査計画 SELENE-2 における科学観測の検討状況



ISAS/JSPEC/JAXA

田中智、三谷烈史、
大嶽久志、小川和律、
小林直樹、飯島祐一
木村淳

北大理

2011年7月6日 CPSセミナー

目次

1. 月探査の科学的意義
2. SELENE-2における科学観測検討の進め方
3. SELENE-2の科学目標（現状版）

太陽系・地球と月の歴史

46億年前

原始太陽系星雲の形成

原始惑星の衝突合体・原始惑星の形成
 微惑星の形成

地球

巨大衝突？

月系の誕生

45-44億 40-38億 39-28億

原始地殻の形成

マグマオーシャン

大激変？
巨大衝突・衝突盆地形成

海の形成 最盛期

単純なテクトニクス

豊富な情報を保持している

ほとんどの情報が失われた空白域
 ∴) プレート運動などによる表層の更新

43億 39億 35億

マグマオーシャン

最古の岩石？ ↓ 地殻物質？

プレートテクトニクスの開始？

生命の誕生
最古の堆積岩 ↓ 海存在

最古の古地磁気観測
↓ 内核の形成？

~10億

間欠的な火成活動

27億 21億 10億

光合成
酸素の発生

酸素呼吸獲得

生物の発生

現在

人類の誕生

月の歴史

地球の歴史

- ・ 太陽系形成の最終段階で「地球-月系」は形成された
- ・ 地球型惑星の形成直後の進化過程を月は記録している

月探査の科学的意義

「地球-月系」は太陽系形成の最後の段階で形作られたものであり、その形成の理解は太陽系惑星の成り立ちの最終段階を把握する鍵である。 現在の惑星は、原始太陽系円盤にあるダストからキロメートルサイズの「微惑星」が形成され、それらが衝突合体することにより「原始惑星」に成長し、最後の「原始惑星」どうしの衝突合体（「巨大衝突」）によって生まれたと考えられているからだ。そして「巨大衝突」の帰結として地球周囲の高温衝突破片から生まれた月の初期状態は熔融状態にあり、そこからの冷却が月の最初の進化過程となる。「地球-月系」の成り立ちの理解を通して「巨大衝突」過程の実像が見えてくる。

月は地球型惑星の初期進化に関する情報を現在まで留めた、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。

月探査の科学的意義(整理)

月探査により、

- (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)

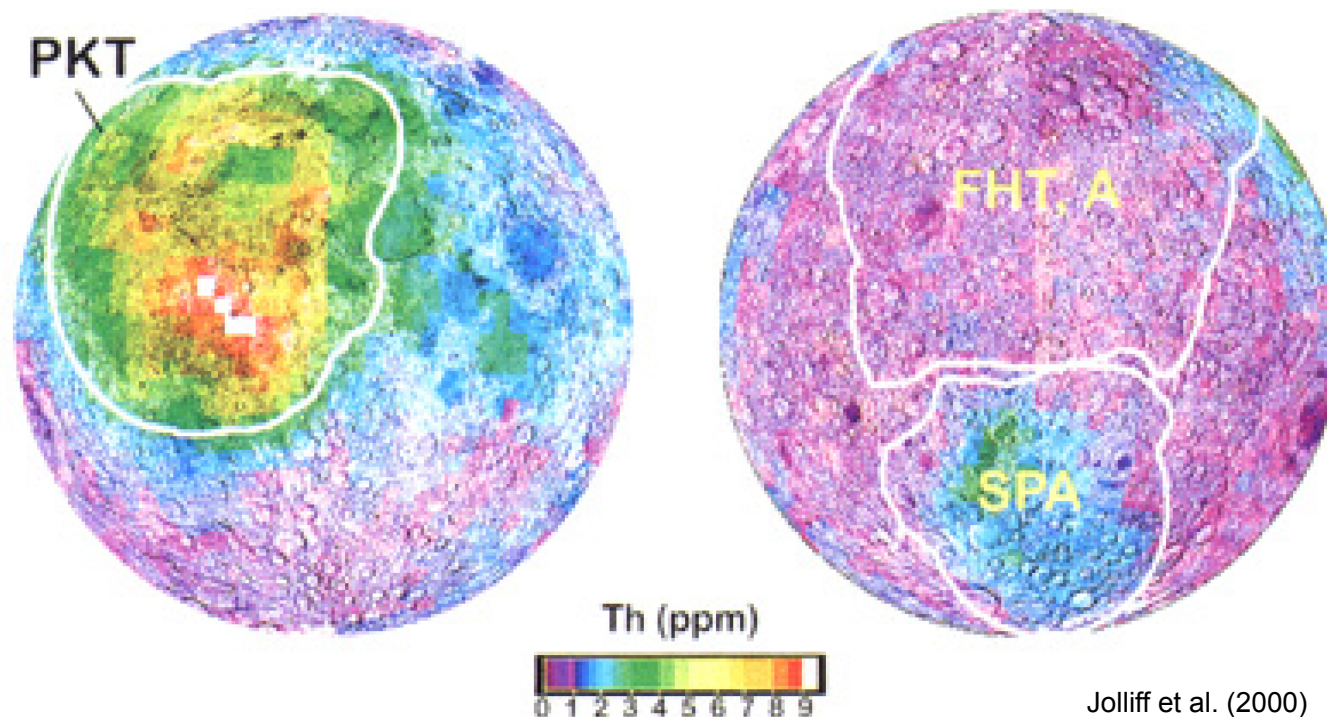
を解明し、太陽系および地球の誕生と進化を探ることが可能である。

月科学の進展（1）

月が熔融状態から始まったという考え方は、1960年代のアポロ着陸探査で初めて提唱された。アポロにより地球へ持ち帰られた岩石試料の分析により、冷却過程で生じる元素分配結果が確認された。月震と月重力場からは、全球を覆う厚い「地殻」が存在することが明らかになった。そして、その地殻が月形成直後に短期間で形成されたことが岩石の年代測定から示された。これらの観測事実により、大規模熔融からの冷却という月初期進化の描像が確立された。

月科学の進展(2)

しかしながら、表側の低緯度域にあるアポロ着陸地点は月全球の特異な地域にしか属していないことが、後の探査で判明した。溶融状態からの冷却過程で特徴的な振る舞いを示す Th の全球分布図が、**1990年代のリモートセンシング探査**(クレメンタイン衛星、ルナプロスペクタ衛星)で描かれ、全球が一様に冷却しただけでは説明できない三つの大地質区分に分けられることが判明した。アポロ着陸地点から採集されたサンプルに加え、その後発見された月の各地域をランダムサンプルしていると考えられる「月隕石※1」の分析結果も冷却過程は単純ではないことを支持した。



Jolliff et al. (2000)

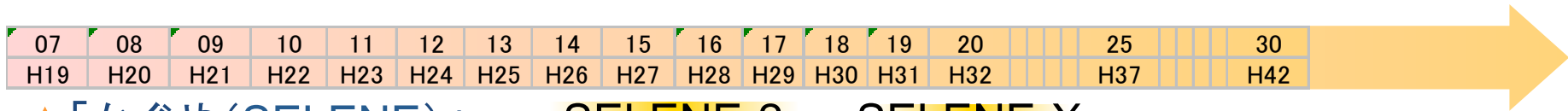
月科学の進展(3)

このように、大規模溶融からの冷却という単純な描像では観測事実を説明できないことが明らかになった中、2000年代後半に、かぐや、LROなどの最新鋭の観測装置を搭載した衛星が、再度、リモートセンシング探査を実施した。これにより、**我々は数10m分解能で鉱物分布図を手に入れた**。1990年代より1桁の空間分解能の向上により、クレータ中央丘^{※2}などの場所を詳細に分析することが可能となり、**進化過程の解明の鍵となる地域が初めて明らかになった**。

全球リモートセンシング探査が終わり、再度、世界は着陸探査に向かおうとしている。どこに着陸すれば最も重要なデータが取れそうかという知見が得られたからだ。さらに、アポロデータに基づいた月の内部構造の理解も40年のデータ解析により、信頼性がゆらぎ、限界が見えてきている。最新鋭の計測器を表面に設置することにより、新たな内部構造を描くべき時にきている。それに基づき月全体の化学組成を推定し、元素宇宙存在度や地球組成と比較することにより、月起源説を確固たる根拠を持って論じることができる。

科学として面白いことがあるのであれば、
機会は利用する

JAXAの考える月探査プログラム案



▲「かぐや(SELENE)」 SELENE-2 SELENE-X

「かぐや (SELENE)」
周回による全球観測

SELENE-2
着陸による詳細探査

SELENE-X
有人月探査を見据えた
高度なロボット探査

重力天体への着陸技術を獲得したい

この流れの中で科学として最大限の利をうるように。
=当然制約はある

SELENE-2での制約条件

- 1機1箇所の着陸探査であること。サンプルリターンはしない。着陸精度は狙った着陸点に対して1km以内。
- 着陸地点は表側（経度 ± 80 度）、中低緯度（ ± 60 度）に限定する。
- 観測機器搭載可能重量は最大で200kg程度。
- データ伝送量は50GBit/day程度(無尽蔵にデータが取得できるわけではない) でこれを観測機器や機器メンテナンスデータでシェアする。
- ミッション期間は「基本的に」2カ月半であること。越夜が成功すれば1年オーダーの可能性はある。ただし、10日程度の（越夜をしない）の可能性もある。

科学観測機器搭載の（制約）条件

- （当然ながら）観測によって得られるデータが科学的な価値を十分有していること。月の科学に限定すれば、月、ひいては固体惑星の起源、進化に関する普遍的な現象の最大級の課題に大きく貢献する回答を得ること：科学価値
- 現時点で性能、重量、電力、通信量、観測期間、熱的な制約などの条件下で「ある程度」の搭載可能性を示すことができていること。特に温度条件の制約は厳しく。：技術可能性
- 1 観測機器あたり数億円程度：資金制約
- 信頼できる搭載機器開発チームの体制であること：マンパワーリソース

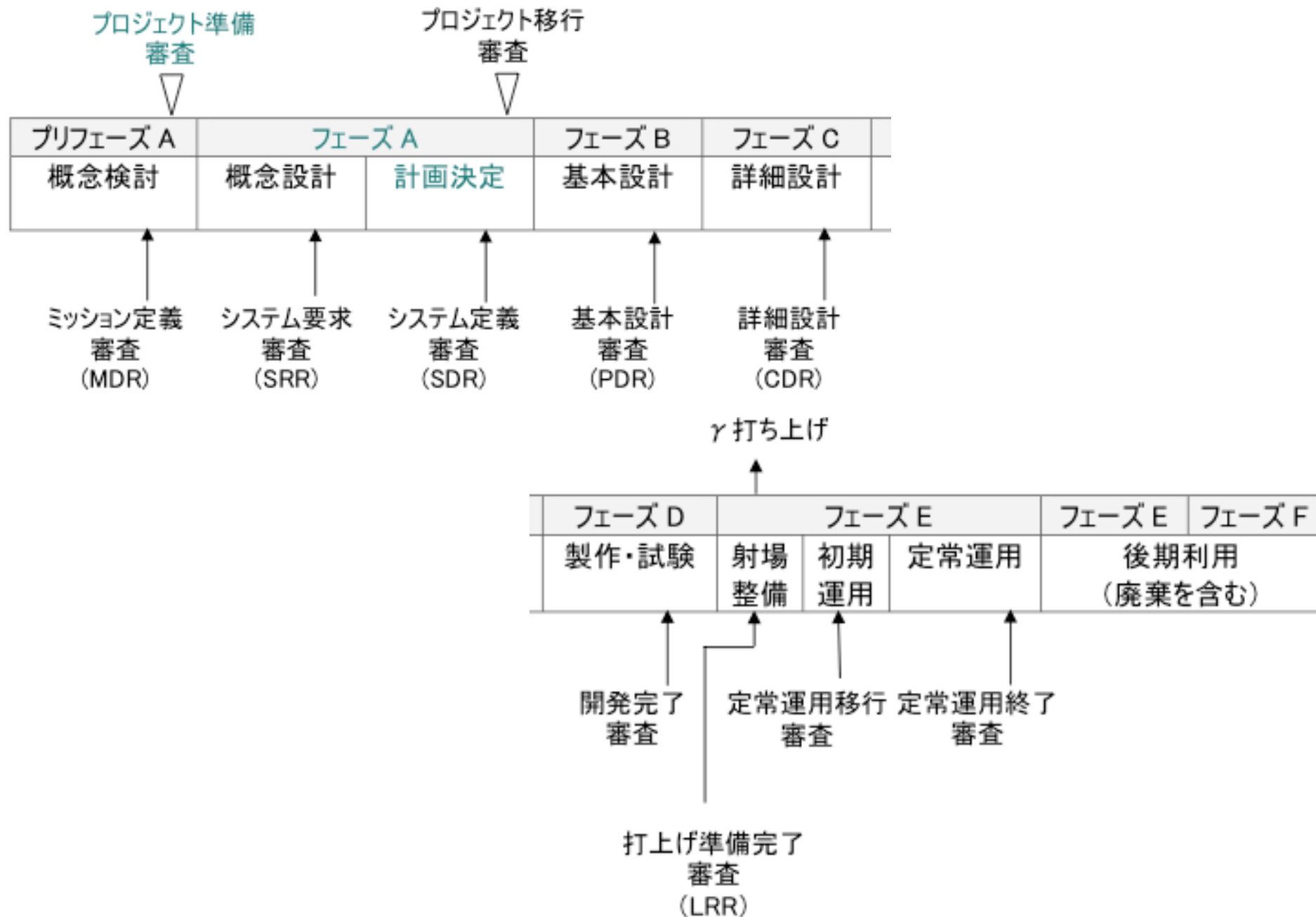
科学観測機搭載の方針

- サイエンスとしての位置づけは最大限度確保するが、基本的には着陸技術の開発を第一優先にする。
 - ⇒着陸地点、ミッション期間、着陸機体数、などにおいてサイエンス最優先とはしない。
- 利用調査、将来有人探査実現にむけた観測を「かぐや」よりもさらに進めた意味で捕らえること
 - ⇒サイエンス機器において、利用調査を具体的に意識する。搭載機器提案書中にも積極的に盛り込む。
- 「トップサイエンス」を実現するという点からは、それを実現できるトップレベルの機器を搭載するのが基本ではあるが、国内主体チーム（海外メンバを持つことはよいと思う）で極力達成する努力をする。
 - ⇒SDR前までは、公募をせずに、これまでの検討チームからの提案で搭載機器を構築する

SELENE-2の科学観測の観点から実現、達成したい ポイント

- 着陸機（1 or 2） + 月周回衛星
- SELENE-3へ確実につながる探査。地質探査や環境調査⇒サンプルリターン。
- 科学的に最大の価値を有する着陸地点の選定。
- 着陸機が発生するノイズなどの影響を最小限度に抑えるシステム構成。
- 国際協働を考慮したネットワーク観測の実現。
- 原子力のパワーを使わずに長期間、できれば数ヶ月オーダーの観測を実現。SELENE-3以降では1年以上観測期間を実現させる目処を得る。

プロジェクトのフェーズ



科学搭載機器検討のこれまで

2007年6月 プリプロジェクト認可 (Phase-A開始)

2008年7月 搭載機器ミッション系チーム立上げ

8月 観測機器提案候補者 全体会議

10月 各機器から科学提案書提出

～ 開発調整会議

(科学目標と機器の仕様、
システムへの要求に関する情報
の集約と整理、搭載へのフィージビリティ、
開発課題、開発体制などについて協議)

2009年3月 有識者による意見交換会

6月 科学提案書 初版発行

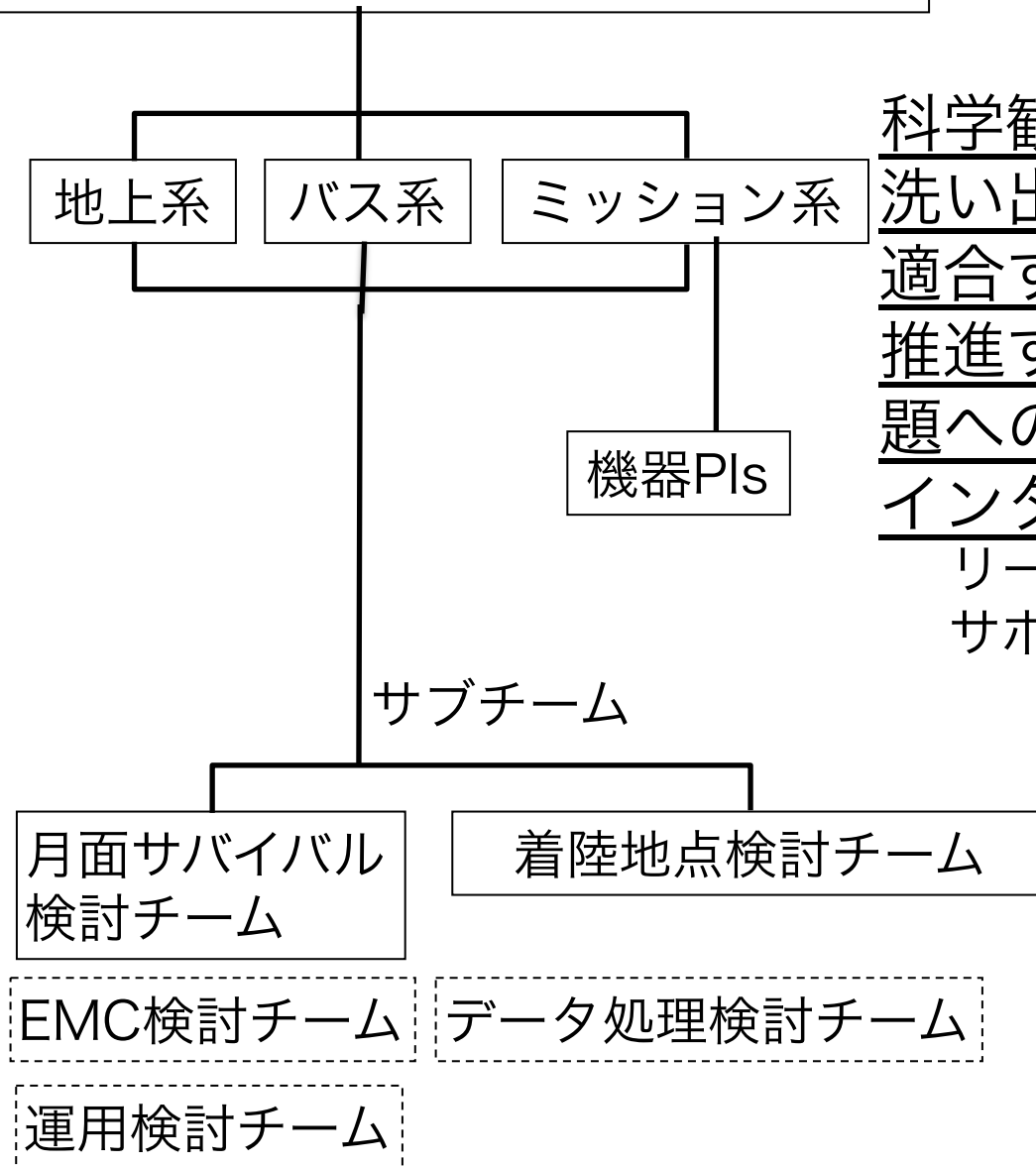
7月 観測機器提案候補者 全体会議

9月 宇宙理学委員会による評価 (翌9月まで)

SELENE-2 科学側の組織 (案)

JAXA SELENE-2プリプロジェクトチーム

「かぐや」を踏襲



科学観測に対する大きな課題を洗い出し、プロジェクト進行に適合するように各機器の開発を推進するとともに、共通的な課題への対策、衛星システムへのインターフェースを行う

リーダー：田中智

サポート：飯島祐一、三谷烈史、木村淳、大嶽久志、小川和律、小林直樹（参加順）

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

科学搭載機器検討のこれまで

2008年7月 搭載機器ミッション系チーム立上げ

8月 観測機器提案候補者 全体会議

10月 各機器から科学提案書提出

～ 開発調整会議

(科学目標と機器の仕様、
システムへの要求に関する情報
の集約と整理、搭載へのフィージビリティ、
開発課題、開発体制などについて協議)

2009年3月 有識者による意見交換会

6月 科学提案書 初版発行

7月 観測機器提案候補者 全体会議

9月 宇宙理学委員会による評価 (翌9月まで)

科学提案書 公開版発行

12月 観測機器提案候補者 全体会議

宇宙理学委員会

- 全国の広い範囲の宇宙科学研究者から構成される組織であり、研究者の自主的な「声」を集約するためのもの。
- （研究班員は、宇宙科学の研究者であり博士号取得者であれば、どなたでも応募可。理学委員は、研究班員による選挙などで選ばれる。）
- 全ての科学衛星はこの委員会で科学的な意義、技術的に、体制として実現可能かの評価を受けて来た。
- SELENE-2 の科学観測機器については、この委員会での評価を受けることとし、委員会からの選抜メンバにより、科学的意義、各観測機器の科学目標及びフェージビリティについて審議・評価を受けることとした。

科学搭載機器検討のこれまで

- 2007年6月 プリプロジェクト認可 (Phase-A開始)
- 2008年7月 搭載機器ミッション系チーム立上げ
- 8月 観測機器提案候補者 全体会議
- 10月 各機器から科学提案書提出
- ～ 開発調整会議
(科学目標と機器の仕様、
システムへの要求に関する情報
の集約と整理、搭載へのフェジビリティ、
開発課題、開発体制などについて協議)
- 2009年3月 有識者による意見交換会
- 6月 科学提案書 初版発行
- 7月 観測機器提案候補者 全体会議
- 9月 宇宙理学委員会による評価 (翌9月まで)
- 科学提案書 公開版発行
- 12月 観測機器提案候補者 全体会議
- 2010年1月 観測機器提案候補者 全体会議
- 搭載機器設計ガイドラインの発行

搭載機器設計ガイドライン

- 搭載機器の設計を進めるために不可欠な情報である、主要設計項目（電気、機械、熱など）や、各搭載機器に求める耐性、インターフェースなどを規定したガイドラインの作成を進めている。基本的にはSELENE（かぐや）で実績のあるガイドラインに基づき、着陸にともなう条件変化（特に熱設計に対する基準が大きく異なる）を考慮して作成を進めている。

月着陸探査機(SELENE2)

搭載機器設計ガイドライン I (着陸機編) (Instrument Design Guideline: IDG)

本文書は、SELENE2 着陸機搭載予定の各機器担当者が平成21年度より行う概念検討、概念設計、及びインターフェース条件書の作成に必要な、着陸機システムインターフェース条件等の概要をガイドラインとしてまとめたものである。

科学搭載機器検討のこれまで

2007年6月 プリプロジェクト認可 (Phase-A開始)

2008年7月 搭載機器ミッション系チーム立上げ

8月 観測機器提案候補者 全体会議

10月 各機器から科学提案書提出

～ 開発調整会議

(科学目標と機器の仕様、
システムへの要求に関する情報
の集約と整理、搭載へのフィージビリティ、
開発課題、開発体制などについて協議)

2009年3月 有識者による意見交換会

6月 科学提案書 初版発行

7月 観測機器提案候補者 全体会議

9月 宇宙理学委員会による評価 (翌9月まで)

科学提案書 公開版発行

12月 観測機器提案候補者 全体会議

2010年1月 観測機器提案候補者 全体会議

搭載機器設計ガイドラインの発行

～3月 各機器の概念検討、

衛星システム検討その4

3月 着陸地点検討チームの立ち上げ

～5月 SRRへの要求整理

着陸地点検討チーム立ち上げの趣意

- 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）。今回、**SELENE-2ミッションの意義について根幹に関わるテーマとして「着陸地点検討チーム」**をサブチームとして設立する。サブチームは通常プリプロジェクトの傘下として活動を実施するが着陸地点検討は探査によって得られる科学成果などに直結する問題であり、各搭載機器提案者以外からも広く意見を集めるべきと考えている。そこで、本検討チームは他のサブチームとは異なり、**プリプロジェクト傘下にあるのみでなく、**別途独立して設立する「SELENE-2サイエンスチーム」の下にも位置づける（プリプロジェクトチームは、原則として機器提案者およびバス系、地上系担当に限られるため）。**このサイエンスチームはもっと広く門戸を広げて、SELENE-2の科学目標の一層の充実、初期成果後（一般公開後）の日本の月科学の推進体制の構築を目指すことに貢献していただける方を募る。**なお、サイエンスチームへ提供する情報は必ずしも公開できるものではないために任命される方を登録制（SELENE-2プリプロジェクト研究員となっただけでなく、守秘義務を課す）とする。

SELENE-2着陸地点検討会議 — 組織 — (SELENE-2Landing SiteResearchBoard)

コアメンバー (主査:佐伯)

荒井朋子(千葉工大)、荒木博志(国立天文台)、石原吉明(国立天文台)、
大竹真紀子(JAXA)、唐牛譲(早稲田大)、小林直樹(JAXA)、
佐伯和人(大阪大)、杉原孝充(JAMSTEC)、春山純一(JAXA)、本田親寿
(会津大)

↓ 報告

↑ コメント

メンバー (メーリングリスト sel2site-all@planeta.sci.isas.jaxa.jp)

提案者

- + SELENE-2着陸地点検討会議(3月19日@宇宙研)出席者
- + 提案募集のメールに対して、経過を知らせて欲しいと要求のあった研究者

- 着陸地点検討の成果は月惑星シンポジウム（8月1-3日）をご期待ください。

科学搭載機器検討のこれまで

2009年3月 有識者による意見交換会

6月 科学提案書 初版発行

7月 観測機器提案候補者 全体会議

9月 宇宙理学委員会による評価（翌9月まで）

科学提案書 公開版発行

12月 観測機器提案候補者 全体会議

2010年1月 観測機器提案候補者 全体会議

搭載機器設計ガイドラインの発行

～3月 各機器の概念検討、
衛星システム検討その4

3月 着陸地点検討チームの立ち上げ

～5月 システム要求審査（SRR）への要求整理

8-10月 Δ ミッション要求審査（ Δ MDR）

2011年6月 着陸地点 投票

以降の資料

- ミッション系一搭載機器提案グループ間の議論に基づいて作成した資料である。これをもって宇宙理学委員会、 Δ MDR等の評価を受けてきた。
- 着陸地点検討チームの活動やフェージビリティ検討の進捗に伴って、最適化していく

月科学におけるSELENE-2の役割

現在我々は高精度なピンポイント着陸技術を身につけつつあり、また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、月の表側の1地点（中低緯度）への着陸という制約はあるものの、観測したいポイント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、冒頭で挙げた(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、前頁(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。

「地球-月系」の起源と共進化

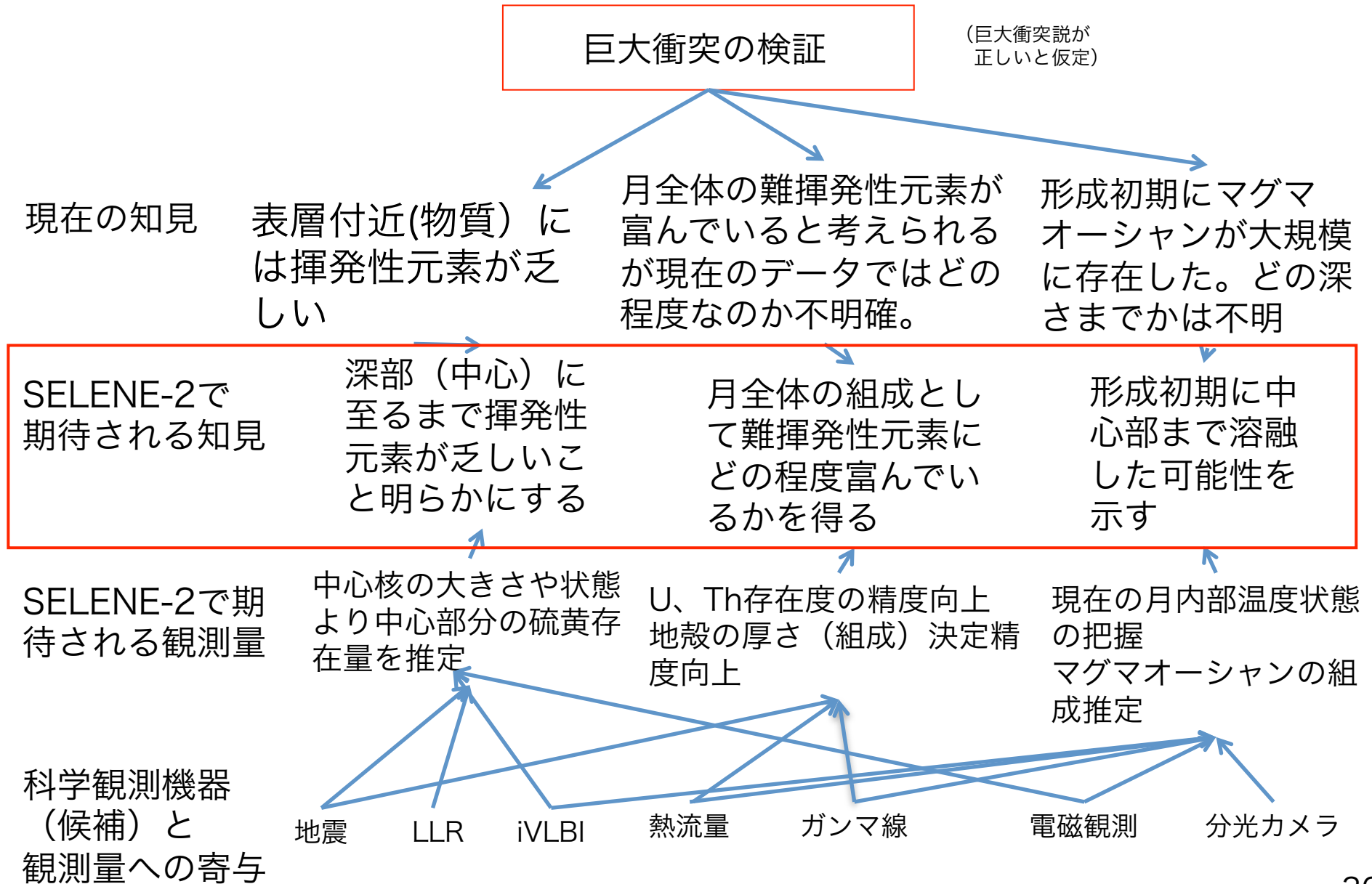
太陽系における惑星形成過程の「巨大衝突段階」は「地球-月系」の起源として広く受け入れられている。地球-月系において巨大衝突の存在を実証することは、惑星形成過程において巨大衝突過程が普遍的に存在したことを示唆し、惑星形成の最終段階を理解する上でも重要である。

月形成モデルとしての「巨大衝突仮説」では、原始地球に火星サイズの「原始惑星」が衝突し、放出された破片が集積し月を形成したと考えられている。衝突によって10000Kを超える高温状態を経験することが推定される事から再集積した破片は揮発性物質を失い、相対的に難揮発性物質に富む。

アポロ探査で持ち帰った岩石が地球の岩石と比較して揮発性元素が著しく少ないことが明らかになるとともに、アポロ着陸探査により月全体として難揮発性元素に富んでいることが示唆され、巨大衝突説の強い証拠と考えられていた。しかし近年、観測データの再解析の結果、月が難揮発性元素に富むかは定かではないことが明らかになり、また、揮発性元素の枯渇が月深部～中心部にまで及んでいるかどうかは元より不明である。

SELENE-2では月起源仮説を確信をもって提唱できるような質の高いデータを得ることを主目的の一つとする。そのために、主に地殻に分配される難揮発性元素Al, Ca, Th, U、中心核に分配される揮発性元素S（硫黄）、また核の主成分となるFeの月全体量を制約するために地殻の厚さ、組成、中心核の大きさを計測する。

期待される科学成果



SELENE-2で目指す科学(2)

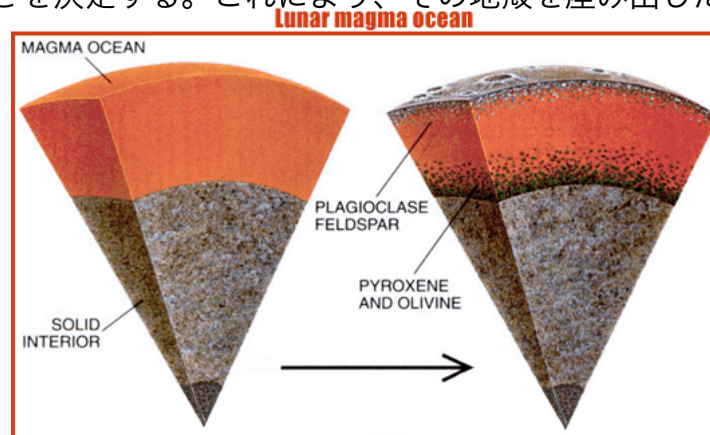
月から探る地球型惑星の分化と内部進化

月は初期に大規模融解し、後に冷却による結晶（鉱物）の生成、密度の違いによる物質の浮沈が生じることによって、地殻・マントル・金属核からなる多層構造に分化したと考えられている。この「マグマオーシャン仮説」はアポロ月探査の結果提唱され、すべての地球型惑星の初期進化の考え方にパラダイムシフトを引き起こした。

分化過程の解明には、どんな物質が、どのくらいの規模で溶融したかを知る必要がある。マグマオーシャンから浮上し形成された一次生成鉱物を調べ理解することはその基となるマグマオーシャンの解明に寄与する。

アポロ計画では多くの地殻岩石サンプルが持ち帰られたが、その中にはマグマオーシャンからの直接的な（一次）生成鉱物と明言できるものは同定されなかった。しかし「かぐや」での全球にわたる精密な鉱物分布調査により、マグマオーシャンから直接生成した鉱物である純度の高い斜長石が月の広い範囲に分布していることが示唆された。

SELENE-2では、一次生成鉱物がそのまま保存されていると考えられる場所（補足資料に具体的な候補を示す）に着陸しローバを用い、サンプルの採取、鉱物の組成・サイズの詳細測定などロボット技術を駆使した地質調査を実現する。数百m精度に位置決めされた着陸探査とローバによる数百mの移動地質調査が実現できれば、目標とするサンプルを確実に収集でき、その詳細な分析（鉱物組成やサイズ、形状など）をする事で溶岩の化学組成、温度、圧力状態を推定できる。同時に、溶融規模を知るために、地震波探査によって着陸地点の地殻厚さを決定する。これにより、その地殻を産み出したマグマオーシャンの深さが推定できる。



(Adapted from G. J. Taylor (1994) The scientific legacy of Apollo, *Scientific American*, v. 271, p. 40-47.)

1. 目標設定

SELENE-2科学目標の設定

SELENE-2の目標

月科学への貢献

「地球-月系」の起源

月の原材料を決定し、その物質がどこからやってきてどのようにできたかを知る

1a 難揮発性元素の中で、分化過程で地殻に濃集しやすい元素の代表であるAl, Ca, U, Thの総量を元素の宇宙存在度や地球と有意に比較しうる10%程度の精度で決定する。

1b 揮発性が高く親鉄性の高い硫黄（S）が中心核に多く含まれているか、それとも枯渇しているかを知る。

揮発性に応じた元素の量が分ることにより、巨大衝突説で予想されるような高温下で月が形成されたのかを検証できる。

地球型惑星の分化と内部進化

地球では失われている初期進化、月が形成してから数億年で起きた大規模な分化過程を知る

2a マグマオーシャンの冷却過程で生成された地殻の厚さを、着陸地点の下にある弾性波速度の不連続面として10%程度で決定する。
かぐやの重力・地形探査で得られた全球的な地殻厚さの相対分布に対し絶対値校正点を与える。

2b 地表付近のマグマオーシャンの熱進化を推定するために深さ300km程度までの温度構造を±200度程度で決定する。

2c 月地殻の形成・冷却過程およびマグマオーシャンの組成を推定するために、マグマオーシャンから直接生成された物質が露出した地域の岩石および表土の産出状態を調べ、それらの組成と組織を決定する。

マグマオーシャンがどのような組成、規模であったか、そこから地殻が如何に形成したかの理解につながる。

1. 目標設定

科学目標のブレイクダウン1

目標1a

難揮発性元素の中で特に地殻に濃集しやすい元素の代表であるAl, Ca, U, Th の総量を元素の宇宙存在度や地球と有意に比較しうる10%程度の精度で決定する。

方法1a₁

着陸地点の地殻の厚さを10%程度の精度で決定する（目標2aと同じ）。Al, Ca の地殻中の濃度は過去の観測から推定する。

方法1a₂

着陸地点での表面熱流量を測定する。それによって、熱量の主因となる放射性元素（U, Th）の総量を着陸地点下部に対して推定する。

目標1b

親鉄性が高く揮発性の高い硫黄（S）が中心核に多く含まれているか、それとも枯渇しているかを知る。

方法1b₁

中心核の大きさを10%程度の精度で明らかにする。それによって、月の材料物質を特徴づける月全体の鉄存在量を見出すとともに、中心核に硫黄が有意に含まれているかどうかを知る。

方法1b₂

中心核の状態（液体か固体か？）を明らかにする。

1. 目標設定

科学目標のブレイクダウン2

目標2c

月地殻の形成・冷却過程およびマグマオーシャンの組成について理解するために、マグマオーシャンから直接生成された地殻物質が露出した地域の岩石および表土の産出状態を調べ、それらの組成と組織を決定する。

方法2c₀

初期地殻鉱物が保存されている場所に着陸し、ローバーでの表面移動、岩石採取用アーム等のロボット技術を駆使し、岩石を観測装置へ供する。

方法2c₁

着陸地点付近の地殻を構成する岩体の同定。および、それと同種のもので、着陸地点周辺で採取可能な岩石の同定をする。

方法2c₂

試料の鉱物量比を3%精度 (@80-100%) で決定し、各鉱物の組成を計測するとともに、各鉱物の結晶サイズと配置を計測する

SELENE-2目標を達成 するのに必要な機器(1)

【方法1a₁, 2a】 着陸地点の地殻の厚さを地震波を用いて10%程度の精度で明らかにする。

【方法1b₁】 中心核の大きさと密度を10%程度の精度で明らかにする。

【方法1b₂】 中心核の状態（液体or 固体？）を明らかにする。

広帯域地震計

マグニチュード2の月震は1ヶ月に1度ほど月深部の既知の地点で起きる（頻度－震度分布は補足資料。）

マグニチュード2の月震を仮定した場合、

地殻：表層付近で散乱された波形から、地殻下面でのS→P変換波を抽出するためには、周期10秒以上の帯域で $1 \times 10^{-11} \text{m/s}$ 程度（アポロ月震計の3倍）の計測精度が必要である。

コア：表層付近で散乱された波形からコアでの反射S波を抽出するためには、周期10秒以上の帯域で $3 \times 10^{-11} \text{m/s}$ 程度（アポロ月震計の3倍）の計測精度が必要である。

レーザー測距

外力に対する秤動*1の位相の遅れから、コア－マントル境界での摩擦（それぞれの物性に依存）の情報を抽出するために、1ミリ秒角以下の精度で消散項*2の振幅を求める。これには月面に、レーザ反射板をアポロ着陸地点から離れた地点（たとえば2000km南）に設置し、視線（地球→月）方向の運動をmmレベルの精度で計測する必要がある。

VLBI観測

密度構造を反映する重力場を精密測定し、慣性モーメント、地球潮汐に対する応答を調べる。

視線（地球→月）方向と、視線垂直方向に感度を持つ観測量を組み合わせ、周回衛星の運動を計測する。（感度：視線方向10-20cm以下、視線垂直方向20cm以下）。

*1秤動：自転軸の運動

*2消散項：外力トルクの変動の位相とずれて生じる振動成分

SELENE-2目標を達成 するのに必要な機器(2)

【目標2b】 内部温度分布を±200度程度で明らかにする。

電磁探査装置

惑星間磁場の変動に対し、月の固体物質が伝導体として（200Kで1桁電気伝導度が異なる）どのように応答するかを計測し、月内部の電気伝導度構造を調べる。また、物質を仮定することにより温度構造を制約する。振幅1nT、周期0.1秒以上の外部磁場変動に応答する磁場変動を0.1nT精度でとらえる必要がある。

【方法1a₂】 着陸地点での表面熱流量を測定する。それによって、熱量の主因となる放射性元素（U, Th）の総量を着陸地点下部に対して推定する。

熱流量計

熱流量(W/m²)を20%程度の精度で計測するために、月面にプローブを埋設して鉛直方向の温度勾配を10%精度（0.1度/1m精度）、熱伝導率を20%精度で測定する。

ガンマ線分光計

熱流量観測地点の周辺表層にある放射性元素Thからのガンマ線を計測し、表層物質中のTh濃度を知る。着陸地点や地形にもよるが、数μg/g程度の濃度差は熱流量において10%程度の違いを生み出す。

【方法2c₀】 初期地殻鉱物が保存されている場所に着陸し、ローバーでの表面移動、岩石採取用アーム等のロボット技術を駆使し、岩石を観測装置へ供する。

【システムへの要求】

数100m精度のピンポイント着陸ができること。
着陸地点からローバで100m以上移動して観測できること。

SELENE-2目標を達成 するのに必要な機器(3)

【方法2c₁】地殻を構成する岩体の同定と、それを構成している岩石と同種のもので、着陸地点周辺で採取可能な岩石の同定をする。

【方法2c₂】試料の鉱物量比を3%精度 (@80-100%) で決定し、各鉱物の組成を計測するとともに、各鉱物の結晶サイズと配置を計測する。

眺望分光カメラ

ローバで探査する前の着陸地点周辺やローバの到達不可能な範囲の地質学的な記載をするために、10m~2km 遠方の岩石の各鉱物に特有な可視~近赤外にある吸収構造を、分光カメラによりとらえ鉱物組成を調べる。380~2450 nmの領域の反射スペクトルをSNR100以上で観測する。2km先の垂直面に現れた地質ブロックを100 m単位で、10 m 先の岩石を5 cm の単位で識別する

マルチバンド分光双眼カメラ

地殻を構成する岩体と同じ組成をもつ岩石を近接観測するためにローバに搭載し、mm以下の分解能で鉱物を識別する（可視~近赤外において十数バンド撮像）。

ガンマ線・中性子分光計

地殻構成鉱物には取込まれにくい元素Thからのガンマ線を計測し、Th量が0.1ppmなのか0.5ppmかを識別する。このために、エネルギー帯域 0.1 - 8 MeV程度において0.5 photons/cm²/min 以上のライン強度をもつガンマ線を数時間の測定で定量する。玄武岩質か斜長岩質かを短時間に判別するために、熱中性子/熱外中性子のカウント比を得る。

マクロ分光カメラ+岩石加工装置

岩石・レゴリス表面を高倍率で連続分光撮像し、鉱物組成、分布、組織を観察する

SELENE-2に関する科学評価レポート（案）

（平成22年9月8日 理学委員会提出）

（平成22年10月16日 改訂）

理学委員会：SELENE-2 科学評価小委員会

<http://www.isas.jaxa.jp/home/rigaku/project/project.php>

「宇宙理学委員会 SELENE-2」で検索

理学評価の総括

- 評価委員の方には月探査（科学）の重要性、価値を理解していただいた。
- これまでにない定量的な要求値を提示し、その意味でレベルの高い資料が作成できたと考えている。資料の作成方法についても、今後のフェーズアップや他のミッション創生に活用できるノウハウを蓄積できた。
- 評価開始当初、期待していた搭載機器のフィージビリティを上げるための技術的な議論は少なく、科学的意義についての言及が主体となった。しかし、評価資料作成に伴い機器開発チームとの議論、機器仕様への反映がかみ合い、その面においては技術的な検討も併せて進めることができた。→一例：次ページの設計要求フロー
- 着陸地点を決めない状況での評価であったこともあり、サイエンスの絞り込みが十分でないとの指摘を受けた（絞り込まなくても大項目は普遍的でシナリオはできると踏んでいた）。「かぐや」の成果が出始めるタイミング、SELENE-2の進行具合など難しい判断ポイントがあったので、やむを得ない点があったものの着陸地点を絞り込んだ後に迅速に理学評価を実施（今回は1年程度もかかってしまった）という段取りもあったかもしれない。

まとめ

- 探査という枠組みの中で最大限の月科学を実施できるよう、科学目標の明確化、技術的な開発課題の洗い出しと実証を継続している。
- 関連コミュニティへの呼びかけ、説明の機会をなるべく設け、より良い科学成果を得られるように進めている。（まだ不十分かもしれないが…）
- 他の宇宙理学コミュニティにもその価値を認めて頂けるように宇宙理学委員会での評価を受けた。
- 着陸地点検討結果は乞うご期待!
- S-2プリプロジェクトは進行は難航。SRRは実行できず、代わりに Δ MDRの実施にとどまった。