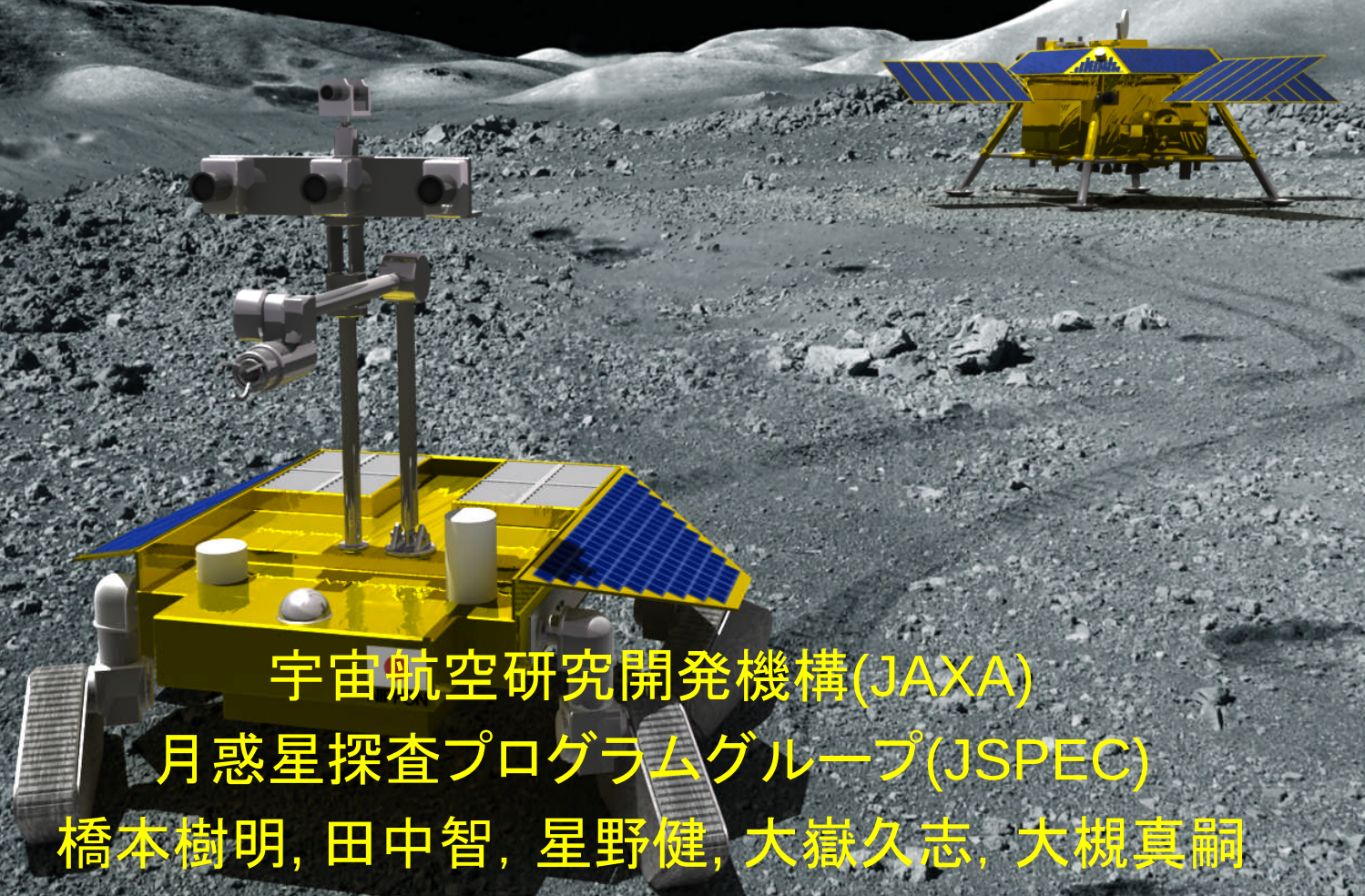


月着陸・探査ミッション(SELENE-2) の現状について



宇宙航空研究開発機構(JAXA)

月惑星探査プログラムグループ(JSPEC)

橋本樹明, 田中智, 星野健, 大嶽久志, 大槻真嗣

SELENE-2サイエンスチーム

SELENE-2関連ポスター発表

- P3-050 月面地盤調査装置(LSM) 小林泰三(九州大)他
- P3-051 SELENE2における広帯域地震計の開発 小林直樹(JAXA)他
- P3-052 SELENE-2/月電磁探査装置 (LEMS) の検討状況 松島政貴 (東工大)他
- P3-054 SELENE-2搭載機器候補LLR/iVLBIの検討状況報告 菊池冬彦 (国立天文台)他
- P3-055 LLFAST: 月低周波電波望遠鏡による月からの木星電波観測 岩田隆浩 (JAXA)他
- P3-056 SELENE-2搭載を目指したALIS/LMUCS/LUMIの科学目標と開発検討状況
大竹真紀子 (JAXA)他
- P3-057 SELENE-2 ローバ搭載用ガンマ線・中性子分光計の検討状況 長谷部信行 (早稲田大)他
- P3-058 RRMD-V(被ばく線量計測用 実時間型放射線計測装置)を用いた月面放射線環境の実測
永松 愛子(JAXA) 他
- P3-059 SELENE-2の着陸地点検討報告 佐伯和人 (大阪大学)他
- P3-05A SELENE2搭載用宇宙塵検出器LDMの開発 大橋 英雄(東京海洋大)他

<SELENE-3への搭載検討中>

- P3-053 次期月探査計画における月面天測望遠鏡(ILOM)の開発状況 田澤誠一 (国立天文台)他

SELENE-2のミッション

- ①将来の月面活動に必要な着陸技術(ランダ)と表面移動技術(ローバ)、長期滞在技術の技術開発・実証
- ②その場観測による月表面物質の科学探査と月の利用可能性調査
- ③上記を通じての国際貢献と国際的地位の確保

2007年6月のMDR(相当)、プロジェクト準備審査(相当)を経て、JAXAのプリプロジェクトとして概念設計を開始。

この考え方は、2007年秋の宇宙開発委員会月探査WGにおいても支持され、**2010年代中頃までに**実施すべきミッションとして整理された。

宇宙基本計画においては、2020年ごろの高度なロボット探査にむけて、月探査の進め方について1年程度をかけて検討することとなっているが、付表では**2015年頃に「月面着陸・探査ミッション」**を実施する案となっている。

この1年の進捗

1. 宇宙開発戦略本部における「月探査に関する懇談会」
 - － 2009年8月～2010年7月まで開催
 - － 2010年7月に「我が国の月探査戦略」としてまとめられる
2. 平成23年度概算要求
3. 理学委員会評価
4. Δ MDR(デルタミッション定義審査)
 - － 2007年6月のMDR以降の周辺状況変化に対応
5. 概念設計状況
 - － (CGデモビデオの更新)
 - － システムトレードオフ検討
 - － 着陸地点検討チーム
 - － 各観測機器インターフェイス調整
 - － 着陸技術、移動技術、越夜技術の進捗

宇宙基本計画より抜粋

(b) 有人を視野に入れたロボットによる月探査

月は地球に近い成り立ちを持ち、太陽系の起源と進化の科学的解明に重要であるとともに、資源等の利用可能性についても未解明であり、**月を当面の太陽系探査の重要な目標に設定する。**

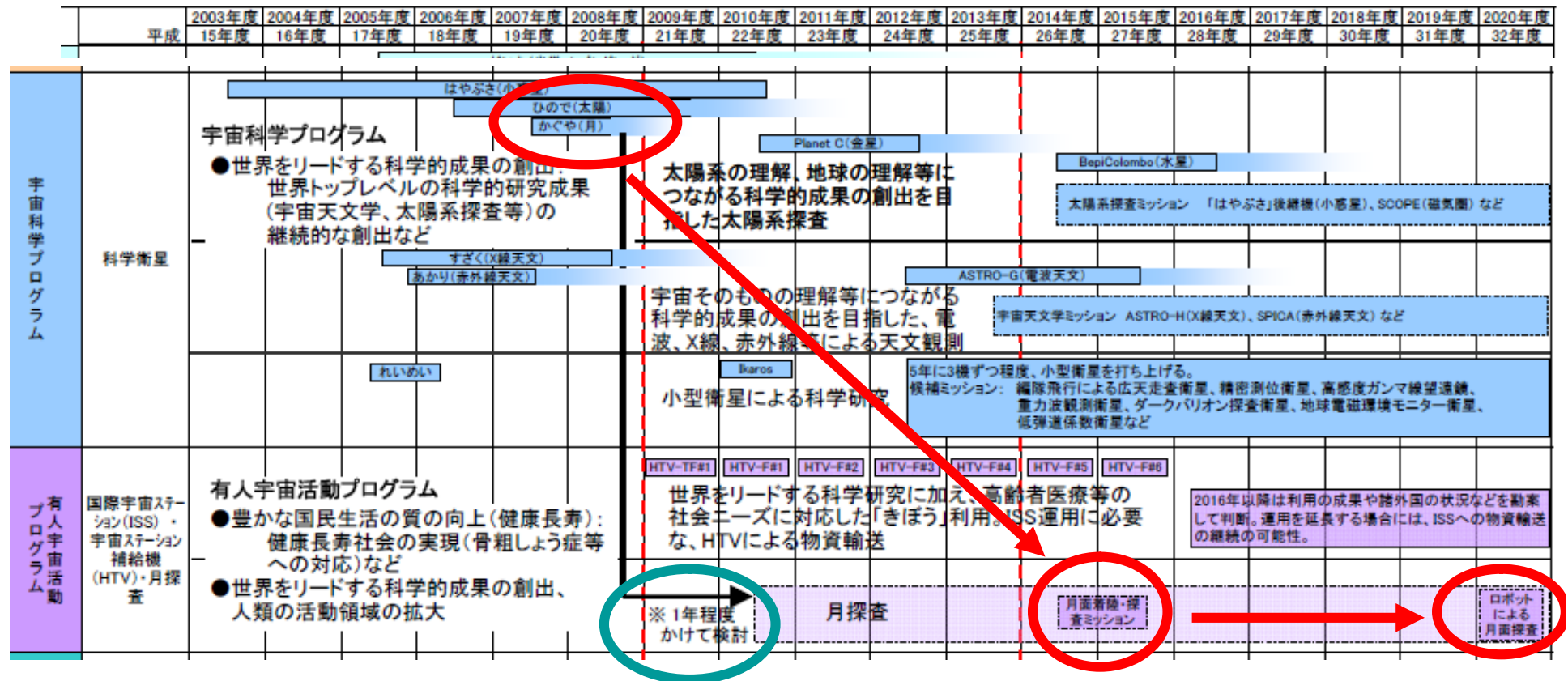
我が国が世界をリードして月の起源と進化を解明するとともに、科学的利用や資源利用の可能性を探るため、将来的にはその場での高度な判断などを可能とする月面有人活動も視野に入れた、日本らしい本格的かつ長期的な月探査の検討を進める。

具体的には、長期的に**ロボットと有人の連携**を視野に入れた以下の案を念頭において、我が国の総力を挙げ、**1年程度をかけて意義、目標、目指す成果、研究開発項目、技術的ステップ、中長期的スケジュール、資金見積りなどを検討する。**なお、我が国独自の目標を保持しつつ、各国の動向も注視し、国際協力の可能性も検討するとともに、実行に当たっては、適切な評価体制の下で推進する。

- ・ **第1段階(平成32年(2020年)頃)として科学探査拠点構築に向けた準備として、我が国の得意とするロボット技術をいかして、二足歩行ロボット等、高度なロボットによる無人探査の実現を目指す。**
- ・ その次の段階としては、有人対応の科学探査拠点を活用し、人とロボットの連携による本格的な探査への発展を目指す。

宇宙基本計画 別紙2

9つの主なニーズに対応した5年間の人工衛星等の開発利用計画(10年程度を視野)



月探査に関する懇談会

月探査に関する懇談会の開催について

平成21年7月17日

内閣官房長官決裁

1. 趣 旨

宇宙基本計画(平成21年6月2日宇宙開発戦略本部決定)を踏まえ、有人を視野に入れた月探査に関し、2020年頃に実現を目指す高度なロボットによる無人探査の目標、解決すべき技術的課題、研究開発ロードマップ、他産業への波及効果等について具体的な検討を行うとともに、その後の長期的視点に立った有人宇宙活動を想定した人とロボットの連携による月探査の目標、我が国として取り組むべき課題、国際協力の在り方等について検討を行うため、月探査に関する懇談会(以下「懇談会」という。)を開催する。

2. 構 成

- (1) 懇談会は、別紙に掲げる有識者により構成し、宇宙開発担当大臣の下に開催する。
- (2) 宇宙開発担当大臣は、別紙に掲げる有識者の中から、懇談会の座長を依頼する。
- (3) 懇談会は、必要に応じ、関係者の出席を求めることができる。

3. その他

懇談会の庶務は、文部科学省その他関係機関の協力を得て、内閣官房宇宙開発戦略本部事務局において処理する。

我が国の月探査戦略

～世界をリードするロボット月探査と有人宇宙活動への技術基盤構築～

平成22年7月29日
月探査に関する懇談会

3. 月探査の目標と取組

3. 1 月探査の目標

＜月探査の目標＞

2020 年に月の南極域に世界で初めてロボットにより探査基地を構築し、地震計等の観測機器を設置して 1 年以上の内部構造探査、ロボットによる数ヶ月間の周辺探査、これまで人類が手にしたことのない岩石の採取とサンプルリターンを行う。これにより、今後の太陽系探査に重要なステップとなる宇宙技術を確立すると共に、月の起源と進化の解明にせまる。

月探査の目標を定めるに当たっては、①2020 年に月の表側からのサンプルリターンを実現し 2025 年に月の裏側からのサンプルリターンを実施する案、②2020 年に月の南極域に基地を構築し 2025 年に月の裏側（南極エイトケン盆地）からのサンプルリターンを実現する案を中心に検討を行うとともに、別途実施された学生を中心とする月探査ナショナルミーティングや一般国民へのアンケート調査なども検討の参考とした。これらを踏まえ、更に月探査の目的を最大限効率良く、できる限り低コストで早期に達成することを目指した検討を行った。すなわち、今後の太陽系探査のための宇宙技術として重要な、重力天体への往還技術、長期ロボット探査技術などを効率良く早期に確立

(1) 2015年のロボット月探査

＜月の表側での探査活動：月面へのピンポイント軟着陸、短期間のロボット探査＞

2020年の本格的探査に向け、2015年に以下のような世界をリードできる成果の達成を目指すと共に、利用に向けた環境調査などを実施する。また、能力上の余裕に応じて、例えば超小型ロボットやメッセージプレートの搭載など、先端技術実証や国民の夢の実現などの幅広い活動を可能とする工夫を検討する。

① 技術

＜世界初＞

- ・ 世界初の100m級の最高精度での月面無人自動軟着陸
- ・ 世界で初めてロボットにより地震計等の観測機器を月面の適地を選んで設置
- ・ 世界初の再生可能エネルギーのみによる越夜（2週間続く極寒の夜を越える）
 - 従来、越夜には原子力電池が使われているが、世界で初めて太陽光発電と蓄電池（リチウムイオン電池）のみによる、観測機器の越夜を行う。

＜我が国初＞

- ・ 我が国初の重力天体でのロボット探査と最新鋭の地震計等による観測
 - 月探査ロボットは、目的を確実に達成し、かつ限られたリソースの中で最大限の機能を発揮できるように、軽量・低コストで、かつ高い信頼性を有する効率の良いものとする必要がある。
 - 地上での技術を過酷な条件の宇宙仕様とするために、5年程度の時間を要することを考えると、5年程度前には地上においてその技術の見通しが立っている必要がある。
 - したがって、ロボットについては、月探査を確実に実行するという観点でローバタイプのロボットで実施する。

② 科学

＜世界初＞

- ・ 最新鋭の地震計等による内部構造探査を数ヶ月間行い、世界で初めて地殻の厚さや内部の密度を高い精度で決定し、月全体の主要元素組成を明らかにするとともに、「マグマの海」の冷却に伴って直接形成された岩石を採集分析し、月の地殻が形成された過程の実態を明らかにする。

③ その他

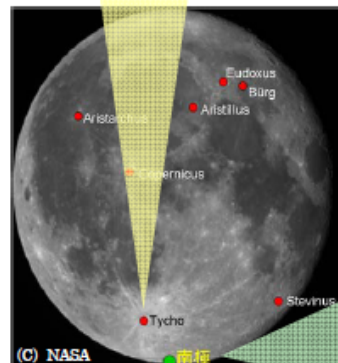
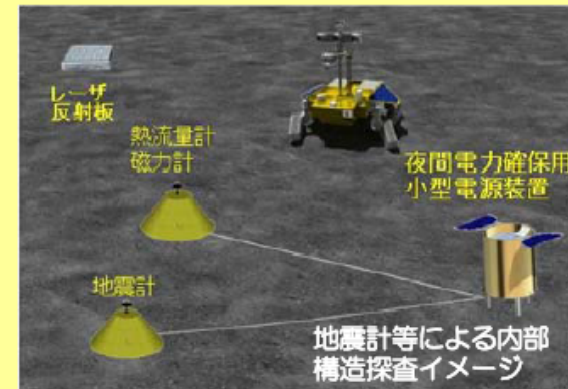
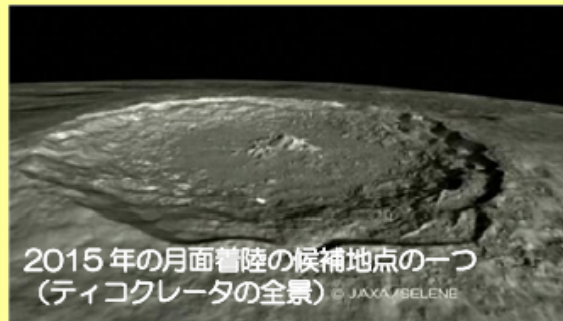
＜世界初＞

- ・ 「かぐや」による月周回軌道上からの世界初のハイビジョン映像配信に続き、月面からのハイビジョン映像を世界で初めて地上に配信する。

資金規模は、2015 年頃までに約 600～700 億円程度と試算。

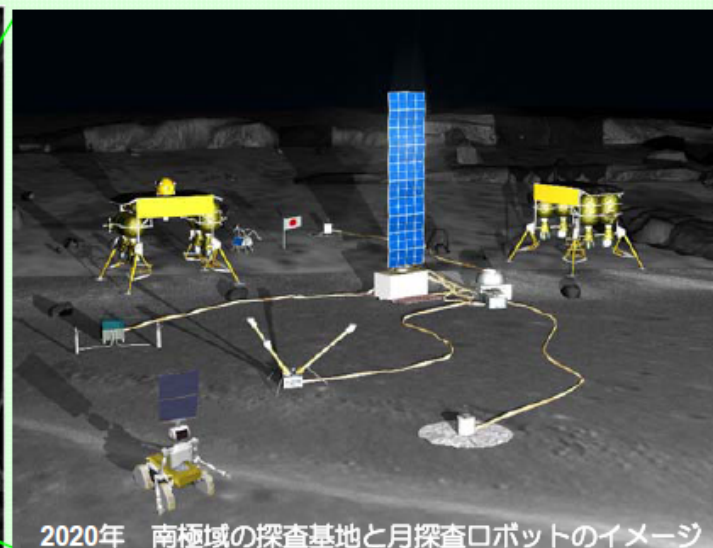
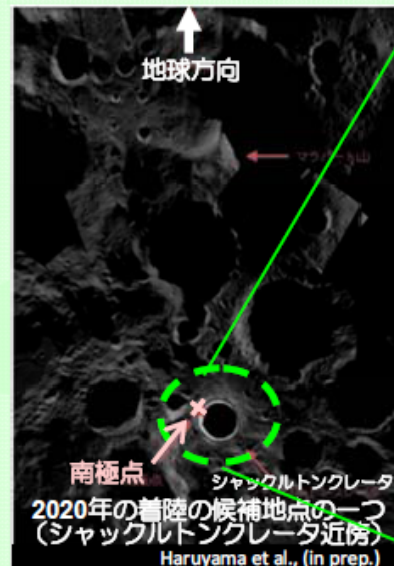
参考図1 ロボット月探査イメージ

2015年のロボット月探査イメージ



- 2015年の着陸地点候補
(大規模クレーター)
- 2020年の着陸地点候補
(南極域)

2020年のロボット月探査イメージ



(画像素材 JAXA提供)

懇談会では、ロボットによる月探査を中心として、我が国独自の目標や進め方を検討してきた。有人宇宙活動については、将来的にはロボットと有人の連携も考えつつ、当面は、探査目標に係わらず、将来に向けた着実な技術基盤の構築が重要であるとの結論を得た。

ロボットによる月探査については、「はやぶさ」の成果と相まって、今後の幅広い太陽系探査の重要なステップとなり、我が国の保有していない宇宙技術を自ら確立していくこと、そして、「かぐや」の成果を更に発展させ、月の起源と進化の解明にせまることなどが、我が国の宇宙開発戦略上重要であると考えている。一方で、太陽系探査は、月に限らず様々な天体について幅広く展開されることが重要であり、段階的にステップを積み重ねながら戦略的に実施していくべきものである。したがって、太陽系探査全体の総合的な推進に留意しつつ、月探査に取り組むべきと考える。

近年の我が国の目覚ましい太陽系探査の成果を発展させていくことの重要性を考えれば、この分野に更に多くの予算が確保される必要があると考えるが、国際協力による効率的な実施の検討や、予算等の状況に応じ、実施時期などについての柔軟な対応が望まれる。

「当面の宇宙政策の推進について」(2010/08/27)

月探査については、宇宙開発担当大臣の下での「月探査に関する懇談会」の検討結果をも踏まえ、国際協力による効率的な実施や実施時期などについて柔軟に対応しつつ、着実に推進する。

- ・・・実施意義は認められたものの、実施時期は「柔軟に対応する」ということで、平成23年度予算ではプロジェクト化に必要な予算処置はされていない。打上げは2016年度以降になる見込み。
- ・・・予算は限られているものの、「着実に推進する」必要がある。

理学委員会評価について

- SELENE-2は、科学のみならず技術開発、月利用、国際的地位の確保等を目的としたマルチミッションの計画であるが、その（固体惑星）科学の部分については理学委員会で評価をお願いするのが適切であるとの判断の下、「SELENE-2科学評価委員会」を立ち上げていただいた。
- 月科学（特に着陸探査）の意義を、分かりやすく整理。
- 「かぐや」の観測によってわかった知見を反映。
- 各観測機器で実現可能な科学と優先順位（の考え方）を整理。

月探査の科学的意義

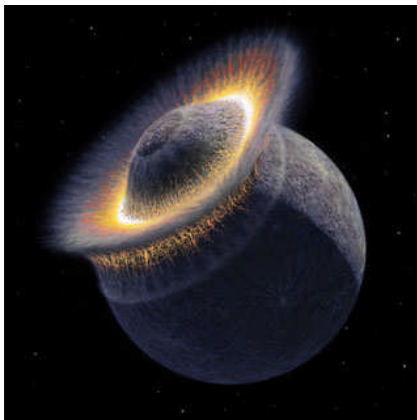
宇宙科学の目標は、宇宙の起源と進化の一連の過程を解明することにより、人類に共通する問題意識「われわれはどこから来てどこへ向かうのか」に対して、科学的な理解を得ることにある。その中で、太陽系および地球の誕生と進化は重要なテーマである。月の起源と進化の解明はこのテーマに対し本質的に重要な意義を持つ。

「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。



月の成因について現在最も支持されている「巨大衝突説」。これは火星程度の大きさの天体が衝突し、破片が再集積して月が誕生したとする仮説である。しかし現在得られている証拠を矛盾なく説明するまでには至っておらず、衝突の規模や状況を制約する実証データはほとんど存在しない。



月は形成後、全球規模で熔融したマグマで覆われた(マグマオーシャン)。これは月の進化の初期段階を特徴づける一大イベントである。月にマグマオーシャンが存在することから、他すべての地球型惑星にも存在した可能性が示唆されている。しかし月における熔融規模や構造については不明な点が多い。

地球史を知るという観点では

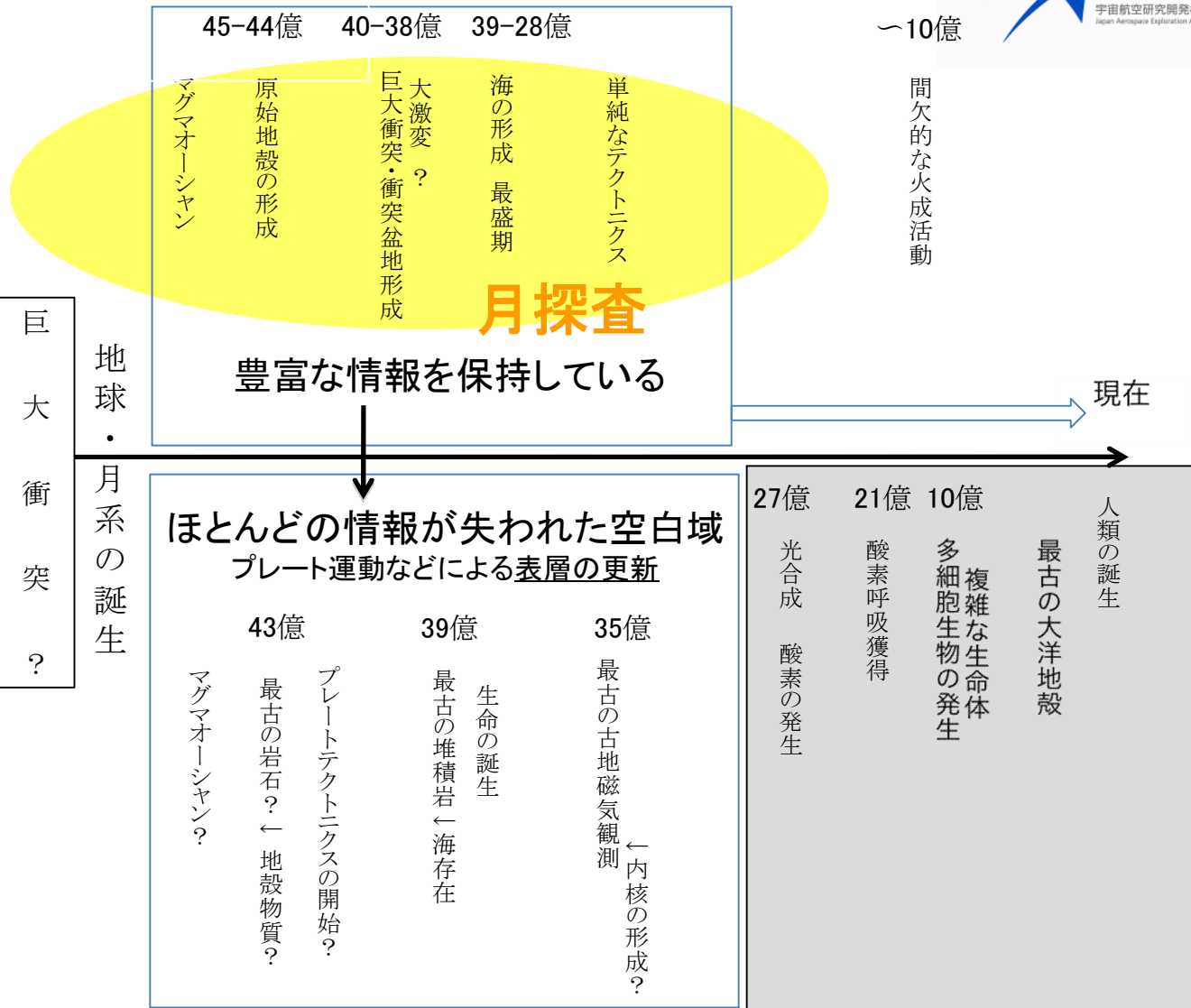
月の歴史

46億年前

原始太陽系星雲の形成
微惑星の形成
微惑星の衝突合体・原始惑星の形成
原始地球の形成

始原天体探査

地球の歴史



- 太陽系形成の最終段階で「地球～月系」はできた。
- 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。

SELENE-2で目指す科学(1)



「地球-月系」の起源と共進化

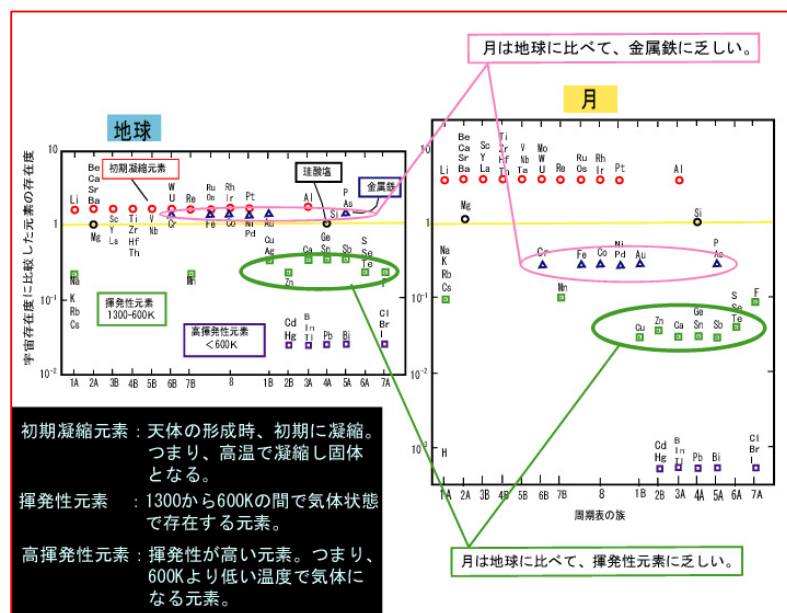


太陽系における惑星形成過程の「巨大衝突段階」は「地球-月系」の起源として広く受け入れられている。地球-月系において巨大衝突の存在を実証することは、惑星形成過程において巨大衝突過程が普遍的に存在したことを示唆し、惑星形成の最終段階を理解する上でも重要である。

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こと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。



地球、月の始原物質に対する元素存在度。元素には高温で揮発性が高いものと低いものに大別されその相対的な量比が惑星の起源を大きく制約する。月に関してはアポロサンプルに基づいて検討がなされ、月は地球に比べて揮発性元素および金属鉄に乏しく、巨大衝突説を支持する大きな証拠の一つとされているが、未だ不確実性が高く大きく変わる可能性がある。

SELENE-2で目指す科学(2)



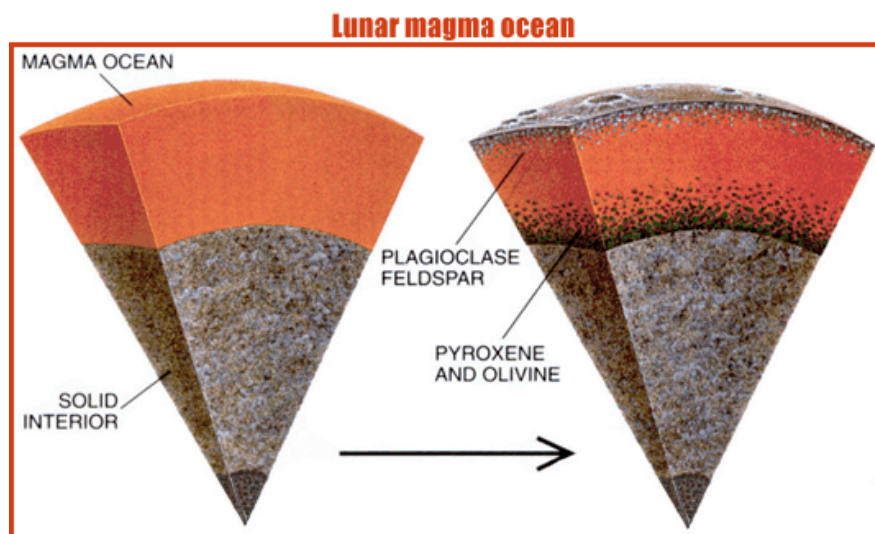
月から探る地球型惑星の分化と内部進化



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熔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ーによる数百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、熔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.)

アポロミッションで持ち帰られた岩石より月形成直後には大規模なマグマオーシャンがあったことが提唱された。マグマオーシャンで生成した生成岩石(斜長岩)が大規模に分布することが「かぐや」探査で明らかになったがどのように冷却したのが、マグマの組成は何であったのかなど重要な課題が解決されていない。

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

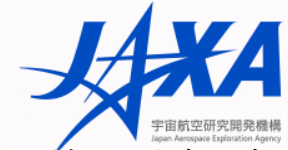
着陸地点付近の地殻を構成する岩体の同定。および、それと同種のもので、着陸地点周辺で採取可能な岩石の同定をする。

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)

SELENE-2 Mission Concept



【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。

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。

【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。

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、レーザー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。

【方法1b₂】中心核の状態(液体 or 固体?)を明らかにする。

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)

SELENE-2 Mission Concept



【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)

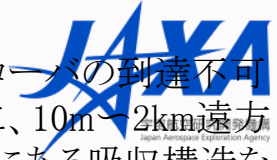
SELENE-2 Mission Concept

【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

評価結果(1)

第5章の「SELENE-2 で目指す科学」は、評価委員からの要請にもとづいてSELENE2 推進チームにより半年で作成されたもので、**関係するコミュニティの意見をよくまとめた上で整理されたものと理解し、現時点において、十分に検討されていると判断した。**一方、科学目標の設定などの整理は、本レポートに引用したような形では提案書には掲載されていなかった。その事実をここに明記するとともに、近い将来、例えばSRR 等に臨む際に**提案書のアップデートを要望する。**

つきつめた所、SELENE-2 において実現可能な大きなテーマとして

1. **アポロ14 号の着陸地点に着陸して行う地震波の高S/N 観測**(地震計が一機しかないため、アポロで確立した震源からの地震波を使う。震源は波形によって識別可能)。**それを中心としたコアサイズの決定。**
2. 「かぐや」により新たに識別され、**マグマオーシャンからの一次生成鉱物がそのまま保存されていると考えられる着陸地点における岩石の直接観測。**アポロ計画における着陸地点とは異なる。

があることが識別された。これらは二つとも、月の起源とその進化を解明する上で指導的な仮説の是非を検証するために極めて重要であるが、着陸地点という意味において排他的であり、同時には実現できない。評価委員会はその事実を認識し、**着陸地点の決定後、すみやかに搭載機器の見直しをおこない、科学目標実現のために最適化をはかる事を前提とした上で、SELENE-2 に十分な科学的意義があると判断する。**今後、着陸地点の検討を進めて、最適なサイエンス機器のコンフィギュレーションが決まるはずである。その段階では、**サイエンスの達成に必要な最低限(冗長機能をいれた上で)である事が求められる。**その過程で、しっかりと議論し、根拠の十分な説明を行う事を要望する。

評価結果(2)

着陸地点については、コミュニティを巻き込む形で、「着陸地点検討チーム」で議論が進められている。今後も、惑星科学会や地球化学会、鉱物科学会などに代表されるコミュニティの総意を集め、検討を進めていただきたい。現時点で着陸地点が確定していないこともあろうが、本報告書を作成する段階でチームの中の地質関係の専門家が極めて限られている印象を受けた。それが、科学目標の具体的な設定やそれをどのように進めるかの記述において、地質関係の部分が特にあいまいである事の原因の一つと推測される。今後の課題として、地質探査に関して、モデル識別に対する指標や想定される物理プロセスに対する制限などにおいて、より具体的な提案に昇華させる必要がある。そのために、チームに地質の専門の研究者の参加が不可欠である。これに関して、今後チームからの具体的なチーム増強案の提出を要望する。

地質研究の分野を審議する上で本評価委員会においても十分な陣容とはいえなかった。これは理学委員会としての課題である。今後、計画を具体的に進め、限られた資産の中で最大限のサイエンスの成果をあげるためには、審査において地質の専門の研究者が入る事が不可欠であることを本評価委員会としての提言としたい。

また、以下の三つのコメントに留意されたい。

評価結果(3)

- 地震計や熱量計など、国際協力によって開発する機器に対して、その取り組みの記述が書かれていない。科学は進歩にともなって規模が大きくなり、単独でより大きな成果を得るのが難しくなっている。そのため国際協力は必須であり、世界の科学者の知見を集めてミッションを実現することが望まれる。また、より優れたミッションであるほど、国際的な注目度は高く多くの科学者が協力してミッションを定義するはずである。こうした**国際協力の体制についての記述が不十分**である。
- SELENE-2 は多くの観測機器で構成されている。**個々の観測機器の開発体制について判断を行うにあたっては、それぞれのチームの過去の実績や個々のメンバーがどのように参加するかなどを知る必要がある**。提案書を見る限りその判断を下しにくいため別途評価が必要である。
- 前述したように評価委員会発足時に用意されていたSELENE-2 科学搭載機器検討チームによる**SELENE-2 科学提案書(2009 年9 月発行)には、月科学の意義や背景、さらに「かぐや」での成果を受けてSELENE-2 で行うべき科学目標などが系統だって記述されていない**。そのため、めざすべき科学目標の優先度やその着陸地点との関係を識別するのが困難であった。また、めざすべき科学目標から必要となる観測機器へのブレークダウンについても明確に記述されていない。そのため、どの機器が本当に必要であり選択すべきであるかが評価しにくい。本評価委員会での評価に際して新たにまとめられた資料において、大きな改善が見られたが、今後、より上位の審査に向けて、本評価委員会に提出された資料を発展させ、よりわかりやすい資料をコミュニティの力を集めて作成していただきたい。その際、宇宙物理、天文、惑星磁気圏などの他の宇宙科学分野の国際コミュニティに提示する事を意識し、米国における"The Scientific Context for Exploration of the Moon: Final Report"などを念頭におき、高いレベルの資料として作成されん事を切に希望する。

評価結果(4)

最後に、SELENE-2 において工学的研究を主たる目的としながらも、最大限のトップサイエンスの成果をあげるために理学コミュニティの議論を深め、それを探査機の設計にフィードバックする努力を常に怠らないSELENE-2 チームの姿勢に敬意を表するとともに、今後ともこうした「共に議論する」活動が進むことを期待する。また、理学のコミュニティにあっては、広い視野をもち、意見をすいあげながらサイエンスの成果をあげるためのリソースの集中をはかり、本当に必要な機器だけに特化したミッションを計画することによって、小規模であっても大きな成果をあげてきた日本の宇宙科学の伝統を是非とも守って頂きたい。

△MDRの経緯

- 2007年6月：ミッション定義説明会（MDR相当）

この間、「月探査に関する懇談会」での議論、「かぐや」の観測成果、米国の宇宙政策変更、技術開発の進捗などあり。

- 2010年9月：△MDR説明会

この間、その分科会でありJAXA内外の有識者で構成される科学技術評価委員会に、技術実証・科学・利用に対するミッション構成例を示し、その妥当性とMDR相当の技術的実現性の評価を付託した。

- 2010年10月：△MDR本審査

△MDR審査結果

ミッションの定義・システムの実現可能性及び現時点におけるリスクの識別については、概ね妥当である。なお、△MDR本審査員及び科学技術評価委員会からの指摘・提言を踏まえ、定められた期限までにアクションアイテムを処置すると共に、プロジェクトの早期実現に向けた更なる検討を進める必要がある。

・主要アクションアイテム

- A. 国際情勢等を考慮し着陸技術実証をより早期に実現することを優先し、開発の規模や範囲を適正化するとともに、その主旨をミッション要求書の序文に追記する。
- B. 着陸場所が決まった時点で、再度ミッション機器の選定を行う。その際には、今回の評価委員会の提言及び科学に関する理学委員会の評価を尊重するとともに、今回除外されていたミッション候補機器も含めて最適の機器構成を検討する。
- C. ミッション機器全体のリソース低減に向けたシステム検討を行う。
- D. 試料中の主要元素存在比計測に必須である元素分布観測装置について、連携する他機器と同レベルの仕様と実現性検討を行う。

SELENE-2着陸地点検討会議

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

2010年5月21日活動開始

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

2010年3月19日結成

詳しくは、

P3-059 SELENE-2の着陸地点検討報告 佐伯和人（大阪大学）

<基本方針>

着陸地点の議論の過程を段階的に公開する
(最終的には一般公開)

議論の過程をオープンにすることで……

「コアメンバー以外の研究者が意見を出しやすい環境をつくる」

「着陸地点提案者のアイデアのオリジナリティーを尊重する」

「スポンサー(＝納税者)に、計画と成果との対応が打ち上げ前に周知されることで、打ち上げ後の成果公表の注目度を高める効果を図る」

(佐伯氏資料より)

サイエンステーマ・着陸地点提案書応募
(2010年6月2日～6月14日)

21グループから
35件の科学テーマと
約70箇所の着陸地点の提案

声かけ:

日本惑星科学会、日本鉱物科学会、日本地球化学会、
日本地震学会、日本測地学会、
「かぐや」サイエンスメンバー

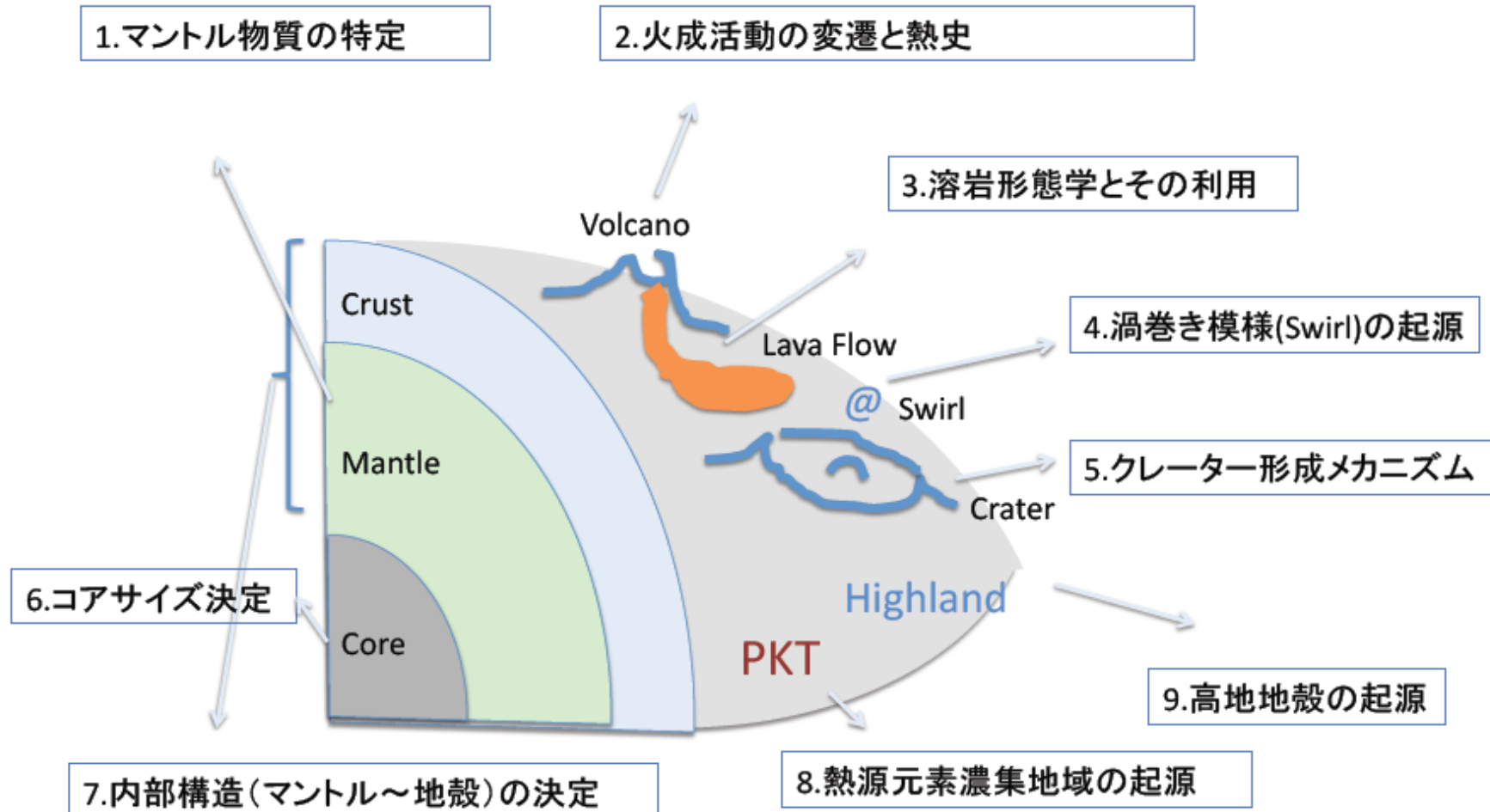
月科学の大テーマは二つ

「太陽系形成の最終段階で、地球-月系はどのように形成されたか」

「地球型惑星の形成直後の進化過程はどのようなものか」

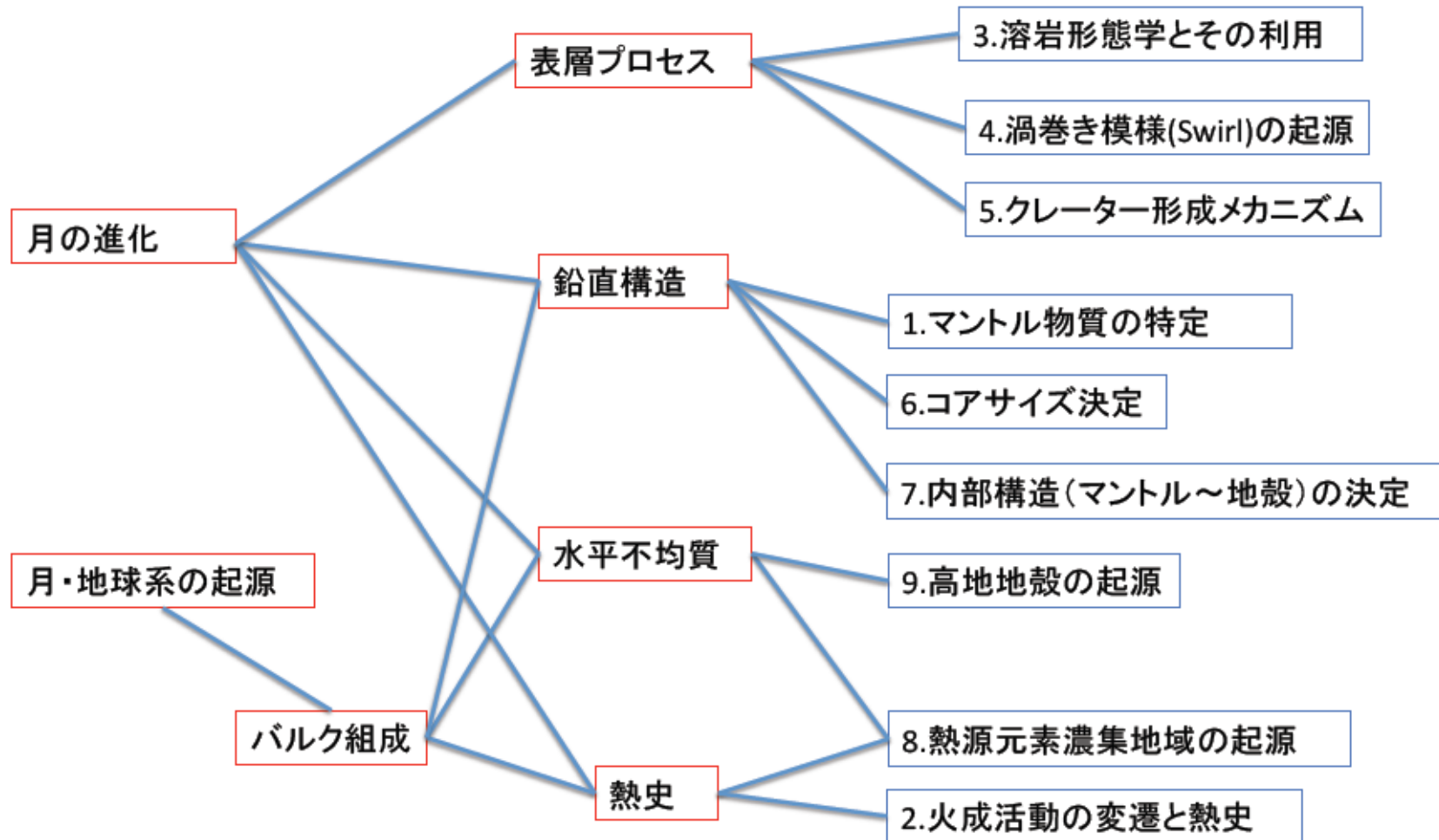
(佐伯氏資料より)

サイエンステーマ・グループ化 (暫定版)

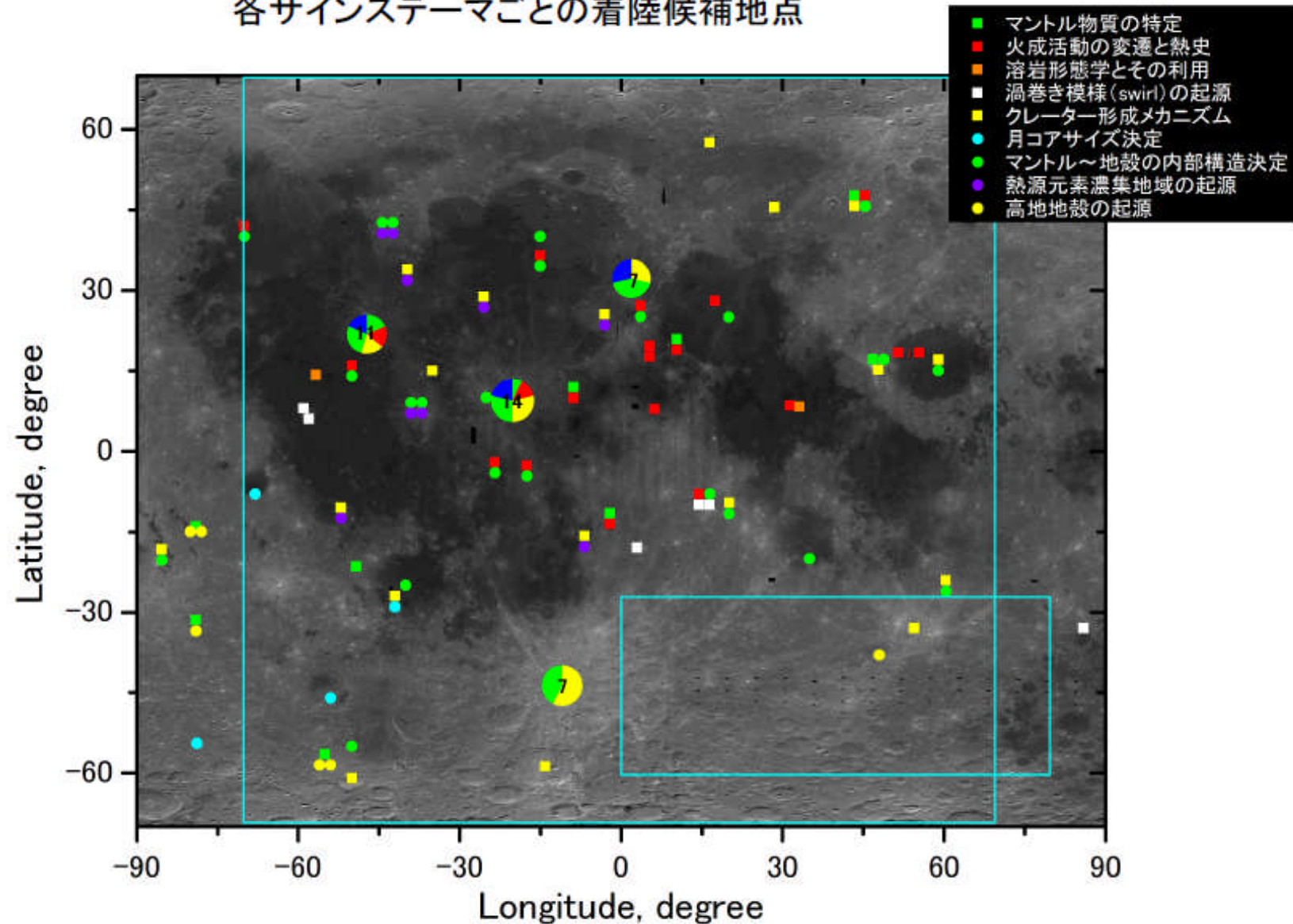


(佐伯氏資料より)

各サイエンステーマの関係(暫定版)



各サインステーマごとの着陸候補地点



2010.12現在の搭載機器候補案

- ランダ搭載／月面設置候補
 - 全方位眺望分光カメラ
 - HDTV、月地盤調査装置
 - SM1(広帯域地震計)
 - SM2(熱流量計、月電磁探査装置、逆VLBI用電波源)
 - 月レーザ測距用反射板
- ローバ搭載候補
 - マルチバンド分光双眼カメラ、月面マクロ分光カメラ、 γ 線・中性子分光計
- 周回衛星搭載候補
 - 月電磁探査装置
 - 逆VLBI電波源
 - HDTV、放射線線量計
 - 低周波電波観測、ダスト計測

機器：長期観測機器

月面着陸に必要な技術

JAXA Space Exploration Center

宇宙航空研究開発機構
Japan Aerospace Exploration Agency

※数値は検討の一例

誘導制御アルゴリズム

着陸準備軌道 100×15km

①レーザ高度計

②推力可変エンジン

③地形照合航法

①着陸レーダ

④障害物検知・回避

⑤着陸脚

•動力降下

周回速度(約1.7km/s)をゼロまで減速しながら着陸点上空約3.5kmまで降下

•垂直降下(3.5km～)

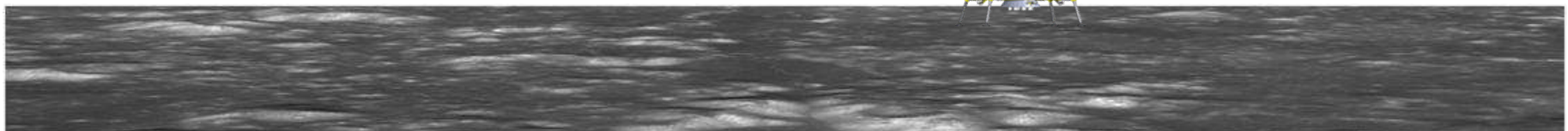
月の重力加速度を減じながら垂直に降下

•障害物回避(500-100m)

障害物検知結果に基づき着陸選定地点上空まで移動

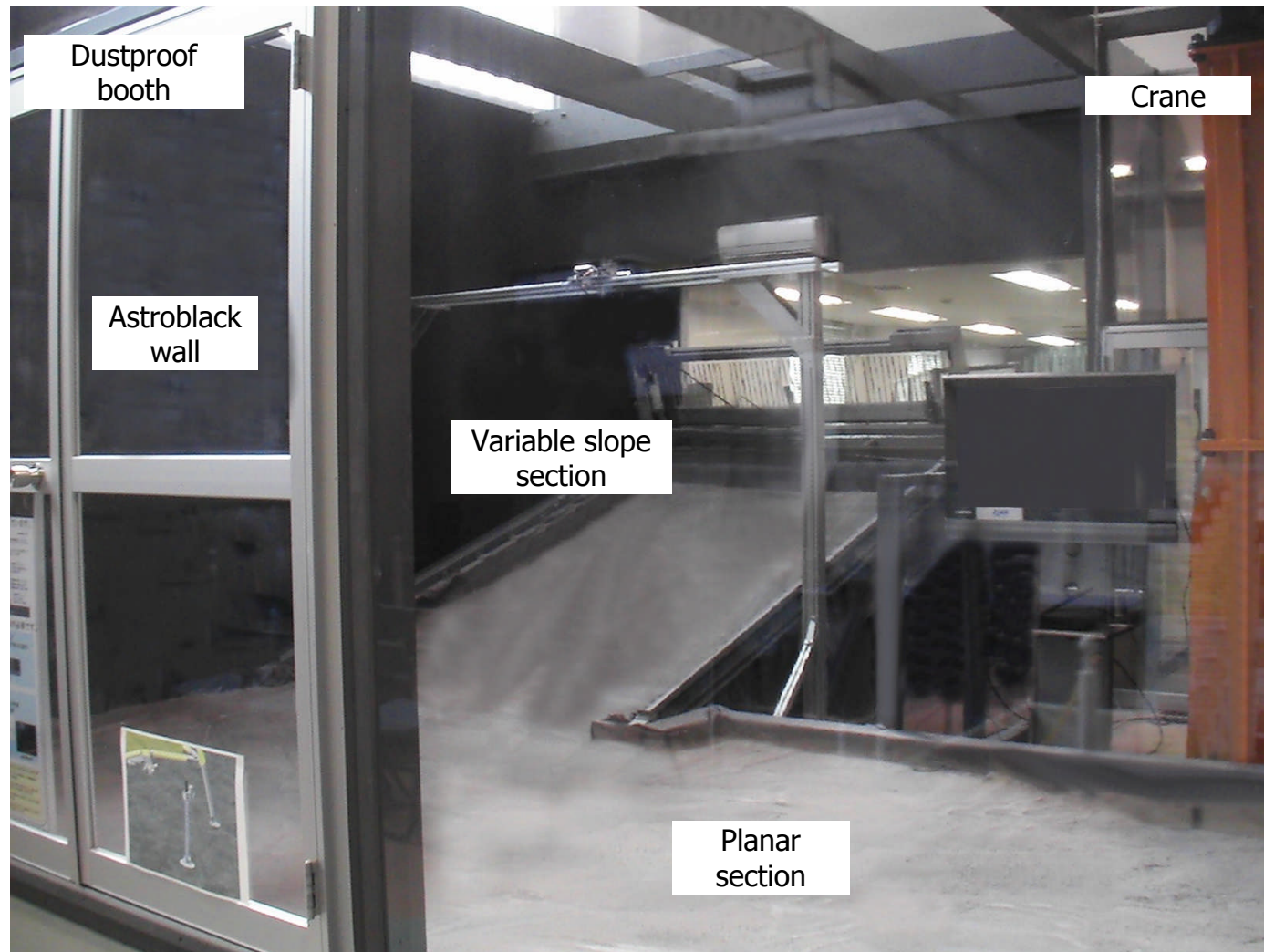
•最終降下(3m～)

エンジンを停止し自由落下により着地



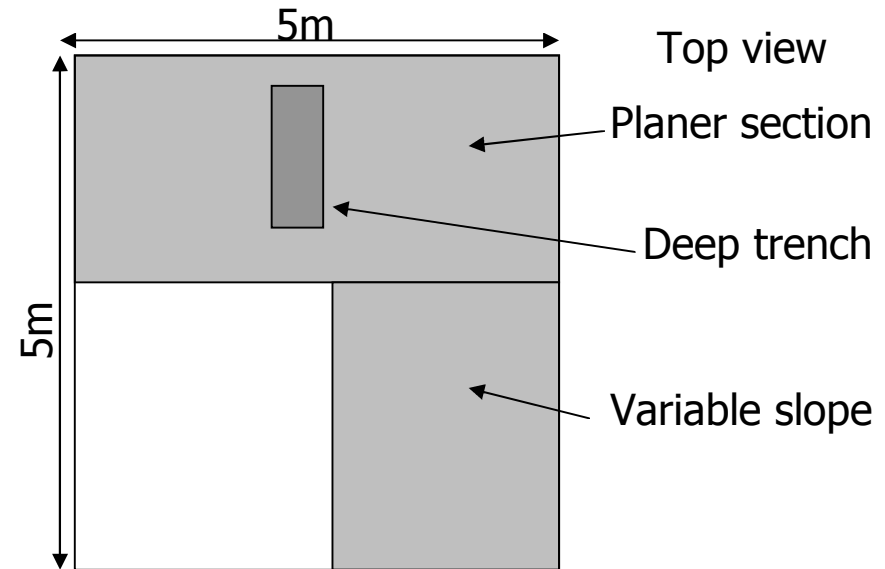
※各要素技術①～⑤の個別説明は次頁以降。

Test field for lunar landing exploration



The new test field for lunar landing exploration

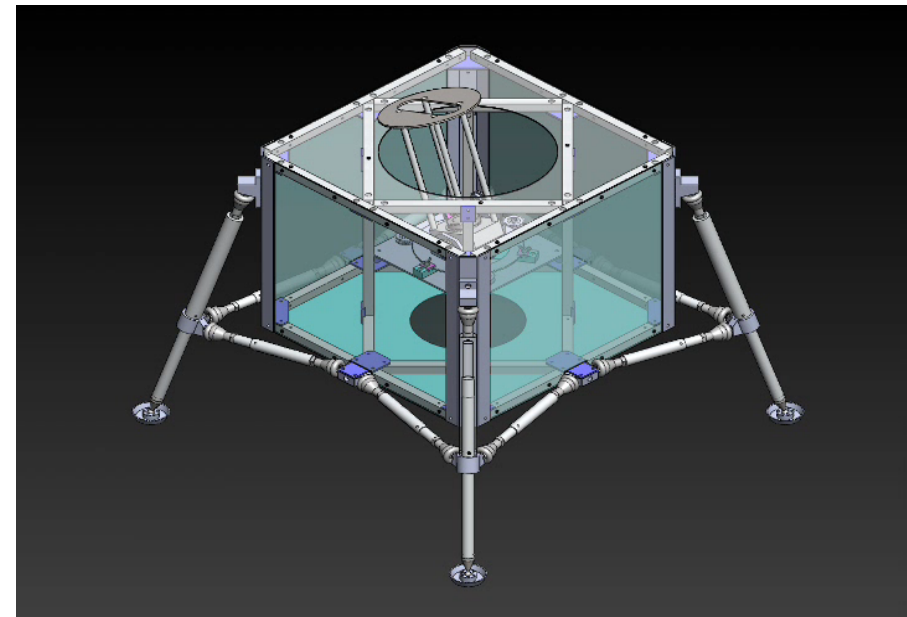
- Covered with lunar regolith simulant with a depth of about 250 mm.
- Divided into a section of about 2 x 3 m with variable slope and a planar section of about 3 x 5 m.
- The variable slope has a hydraulic mechanism that can achieve an inclination of up to about 30 degrees and is equipped with a leveling machine to maintain the condition of the lunar regolith simulant.
- The entire field is covered with a dustproof booth



Items		Value
Total area		21m ²
Simulant depth		250mm
Plane	Configuration	Plane with a deep trench
	Leveler	Under development
Slope	Configuration	Variable slope
	Inclination	0 to 30 deg.
	Leveler	Automatic
Environment		Temperature 25deg. C Relative humidity <35%

Landing leg tests

- Test piece:
 - 1/6 scale model of SELENE-2.
- Conditions:
 - The test piece is installed to the sliding rod with the electromagnet holder and dropped from various attitude and velocity
 - The bulk density of lunar regolith simulant and the inclination of the slop are changed as testing parameters



表面移動技術

主要技術課題

②操作・制御

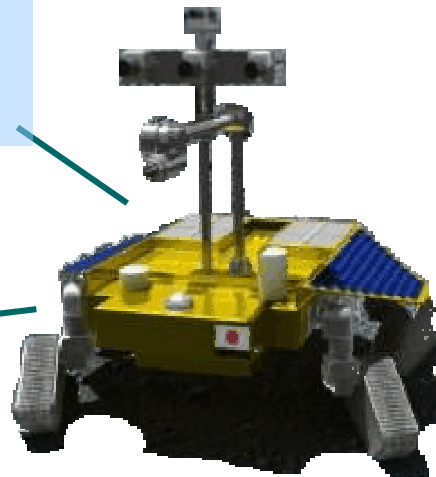
- ・遠隔操縦
- ・地形計測
- ・経路生成

①走行

- ・砂(レゴリス)地走行
- ・登坂

③作業

- ・把持
- ・観測



④耐環境性

- ・低温／高温
- ・レゴリス

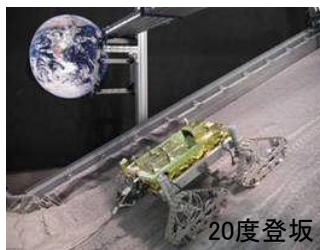
走行

車体試験

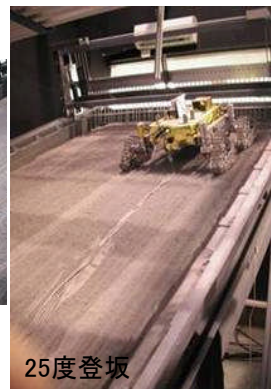
- ・複数のコンセプトモデルの試作により、走行系の全体設計を進めた。
- ・走行機構の一方式(クローラ型)を中心に車体試験を実施した。
- ・サスペンション方式は、パッシブで起伏への適応性が高いロッカー機構が候補である。
- ・起伏走行や岩石乗り越え時の各輪の空転や滑りを把握し補償する手法の検討を進めている。
- ・標準地形の設定に沿った確認試験を継続して行い、搭載走行系の設計及び評価に反映していく。

登坂性能評価

模擬砂上で斜度25度までの登坂試験を実施し、単輪と整合する性能を確認するとともに、滑り率等の評価指標の明確化を行った。



20度登坂



25度登坂

乗り越え性能評価

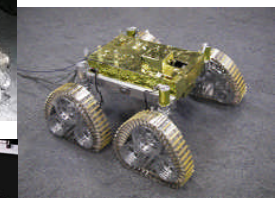
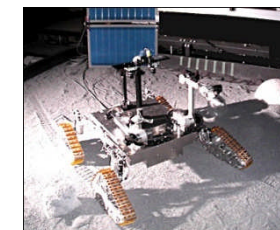
段差・岩石の乗り越え、クレータリムの乗り越えなどを実施し、サスペンション等の評価を行った。



屋外フィールド試験

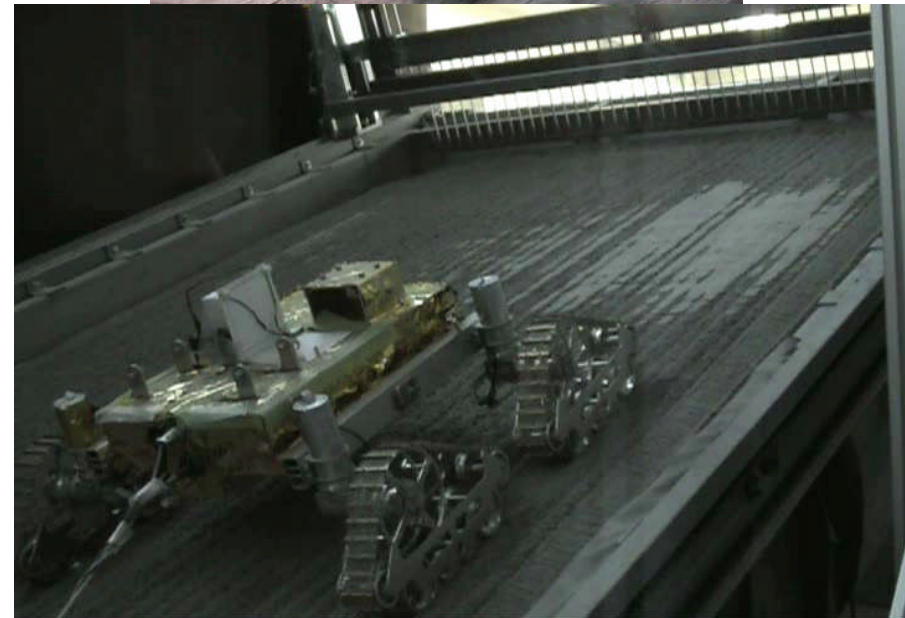
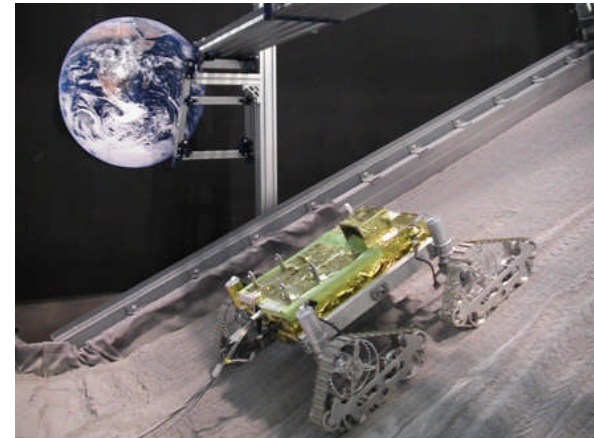
操舵性能等評価

基本的な4輪操舵や定点回転機能の確認を実施した。各種走行モードの選定等に反映していく。



Slope mobility tests

- Test model:
 - This experiment confirms the hill-climbing performance of the moving mechanisms using one of experimental models equipped with a crawler.
- Conditions:
 - Slope angles
 - It is assumed that the rover has the capability to climb a slope of up to 25 degrees.



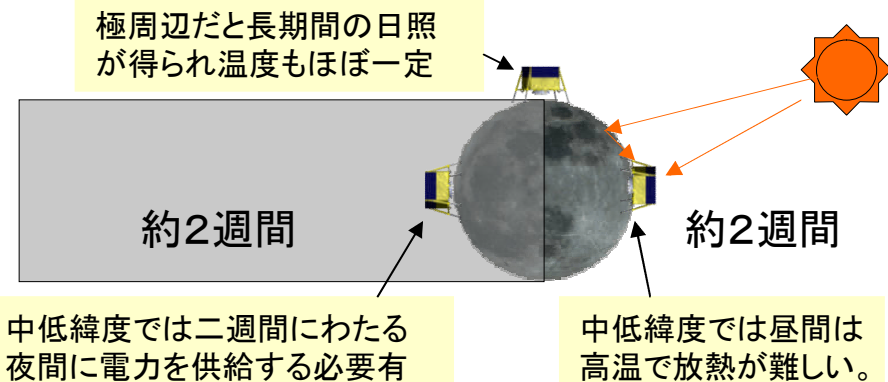
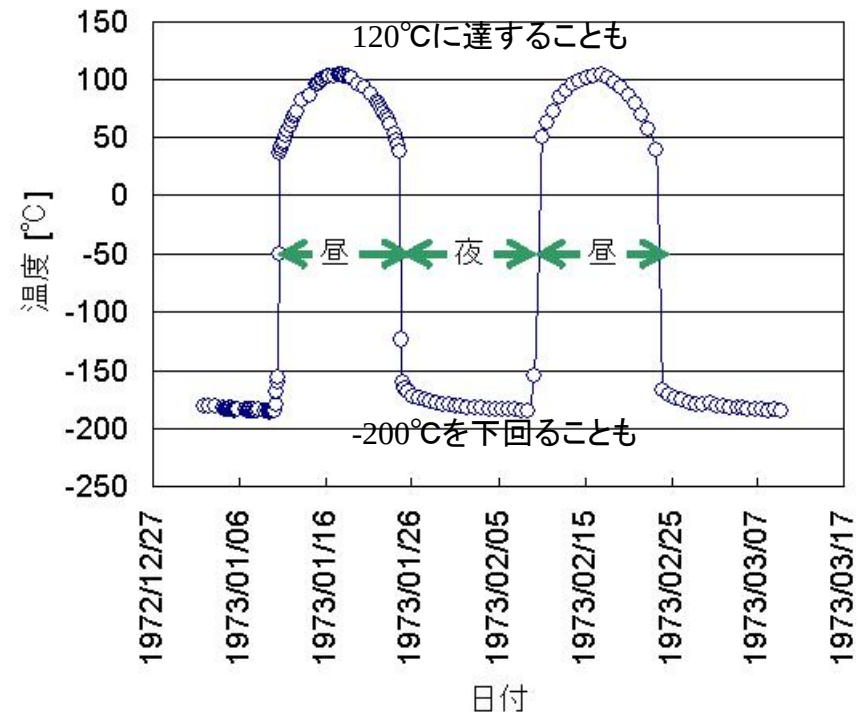
越夜技術の必要性

- 厳しい月面環境
 - 中低緯度地域の場合
 - 昼間(約2週間)
 - 最低表面温度: $+120^{\circ}\text{C}$
 - 放熱が困難
 - 夜間(約2週間)
 - 最低表面温度: -200°C
 - 太陽電池使えず, 100W供給しようとする、現状では300kg近い電池が必要

極域の場合

- $-50 \pm 10^{\circ}\text{C}$ 程度でほぼ一定

- 熱管理・電源技術が重要
 - 夜を越えないとミッション期間は昼間の二週間に限定される.

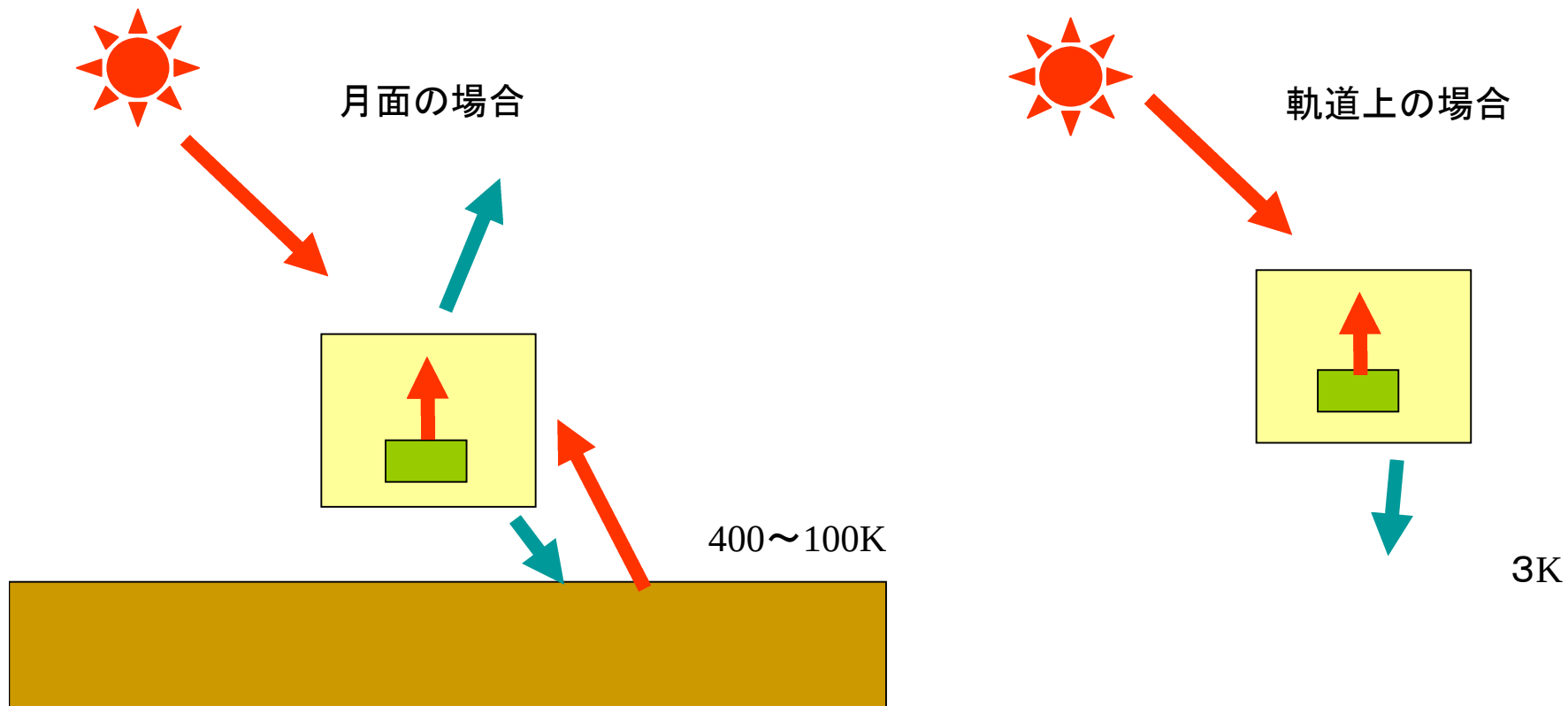


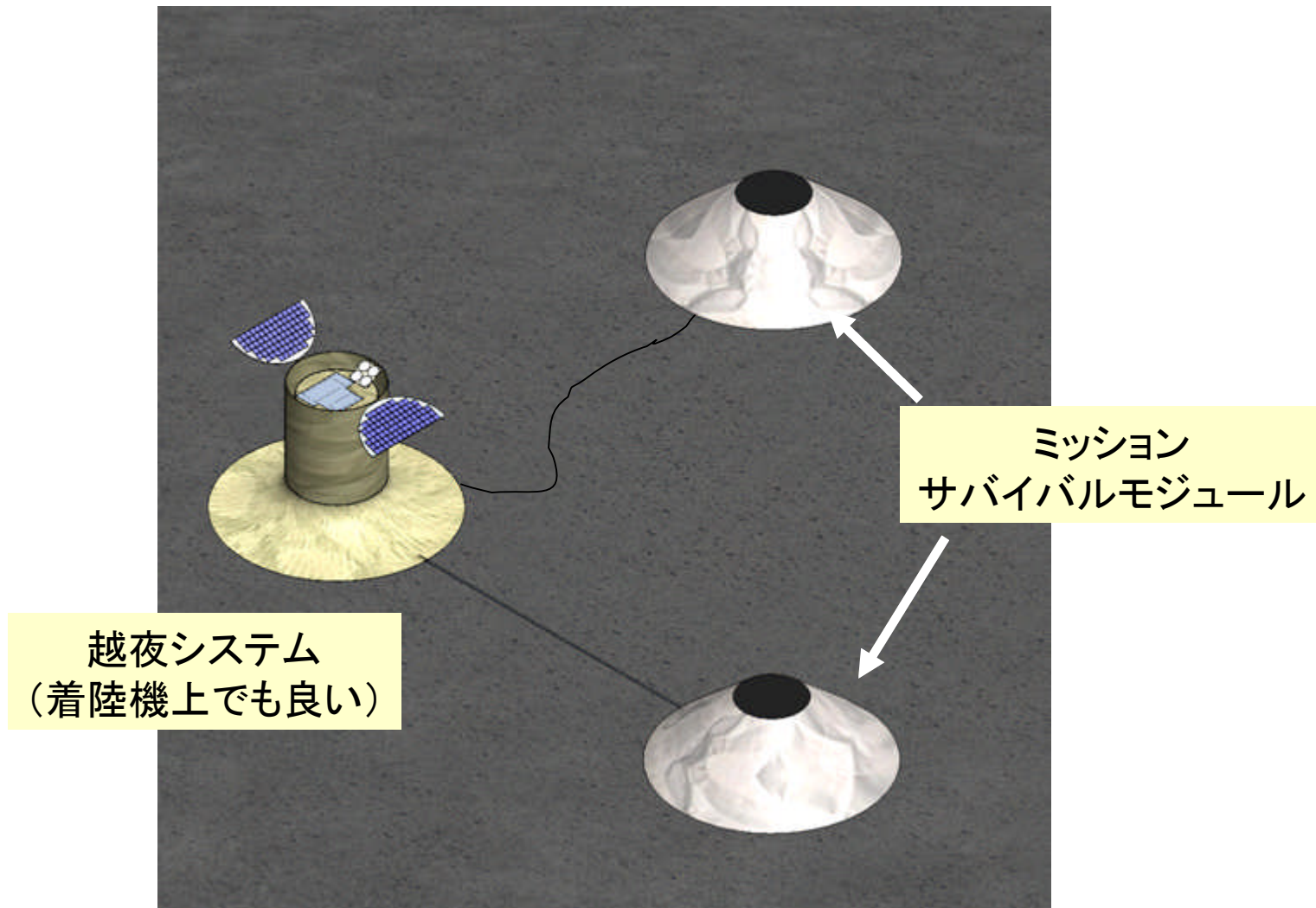
越夜が必要な機器

- SELENE-2ミッションにおいて越夜が必要な機器は以下が考えられる
 - － 着陸機バス系のうち着陸後の活動に必要な機器
 - 最初の夜以降に、ミッション機器に通信、データ処理、電源等のサービスを提供するためのバス系システム
 - これらの越夜のためのシステムを「越夜システム」と呼ぶ
 - － 長期観測が必要な観測機器
 - 月震計、電磁場観測など月面に設置され、長期間の観測を要求される観測機器
 - これらの越夜のためのシステムを「ミッションサバイバルモジュール (MSM)」と呼ぶ
 - － ローバ
 - ローバは、独立した宇宙機で、かつ移動距離が大きいため、他のシステムに依存せず、独立した越夜を考える。

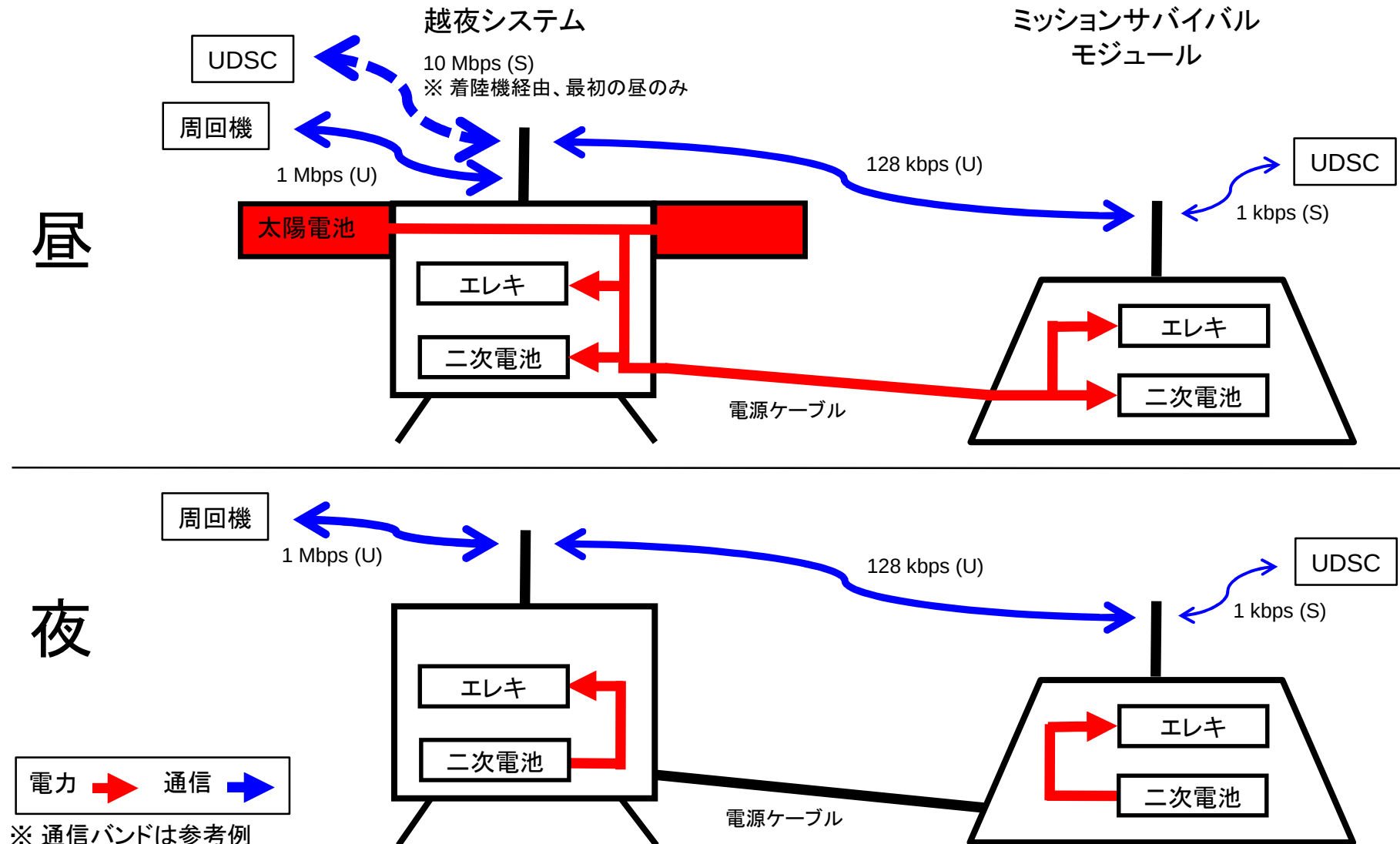
月面上での熱設計

- 非常に長時間におよぶ夜間(15日間)の保温が課題
- 昼の動作時の排熱と夜間の断熱をどう両立させるか
- 可変熱制御デバイスが必須(サーマルルーバ、ヒートパイプ、熱スイッチ、可変放射率素子など)
- 月面レゴリスの影響を考慮





越夜システムとMSMの機能分担(2)

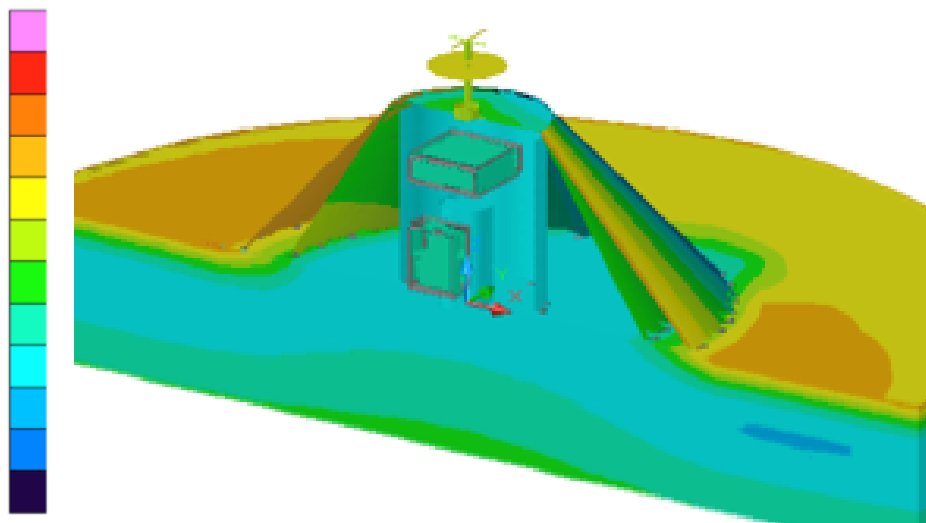


MSMの熱数学モデルによる検証

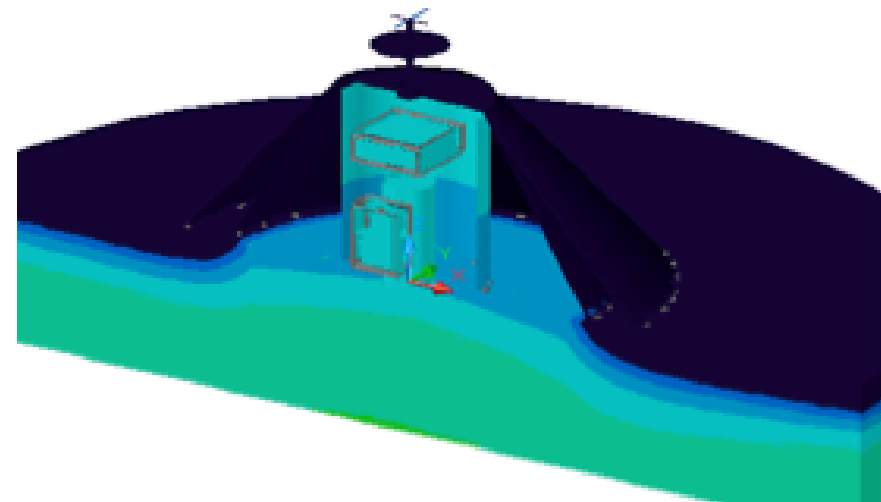
サバイバルモジュールは、月面の広い面積を MLI で覆い、月レゴリスを蓄熱材として利用することで内部の温度を安定化する。(あたかもレゴリスの小山がある状態を作る)

このコンセプトについて、熱数学モデルにより越夜サバイバルの熱的成立性の検証を行った。熱モデルには深さ 10 m までのレゴリス層を含み、これの熱伝導率は温度依存性、深さ依存性を考慮した。またモジュールの周囲 10 km までの月面との輻射結合を考慮した。

月レゴリス下層と、サバイバルモジュール内部の温度が、昼と夜で安定している様子



温度 日の出の7日後 (太陽高度最大)

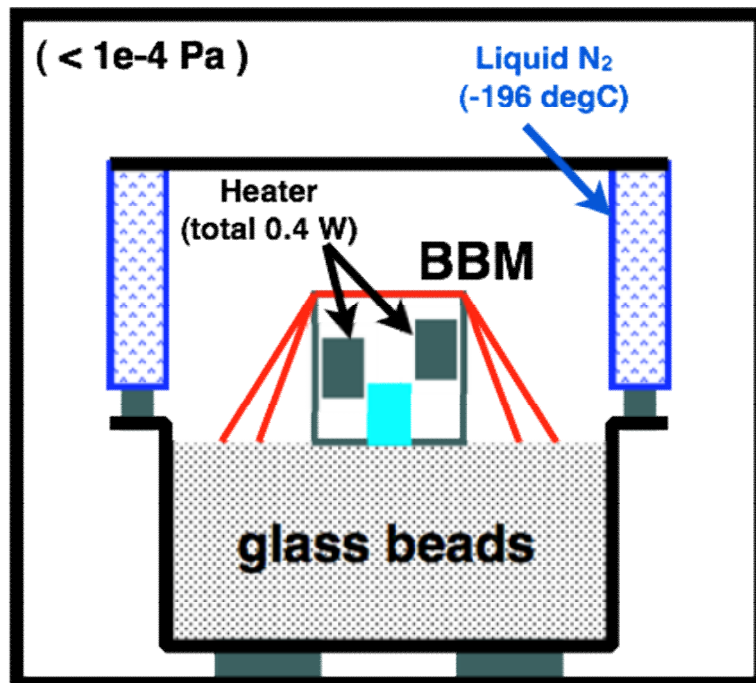


日没の7日後 (深夜)

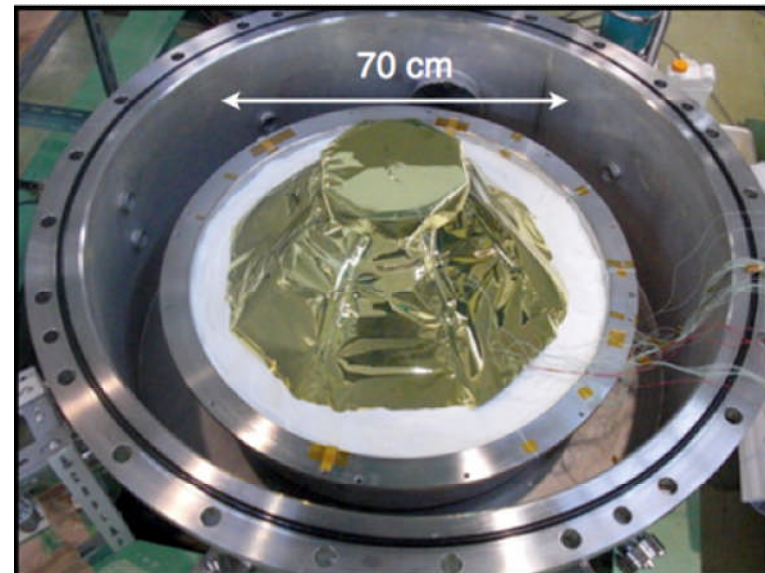
MSMの 熱真空試験による検証

熱数学モデルで仮定した各部の熱パラメータ (主に、レゴリス-MLI間、および構体・エレキなど各部の熱伝達係数、MLI の実効放射率など) の検証を目的として、熱特性評価用BBM を製作し、熱真空試験を実施した。月レゴリス表層を模擬するためには、熱特性が似ており真空引きが容易なガラスビーズを用いた。周囲を液体窒素タンクで囲い、2週間の温度変化をモニタした。

熱真空試験のコンフィグレーション



熱真空試験の様子

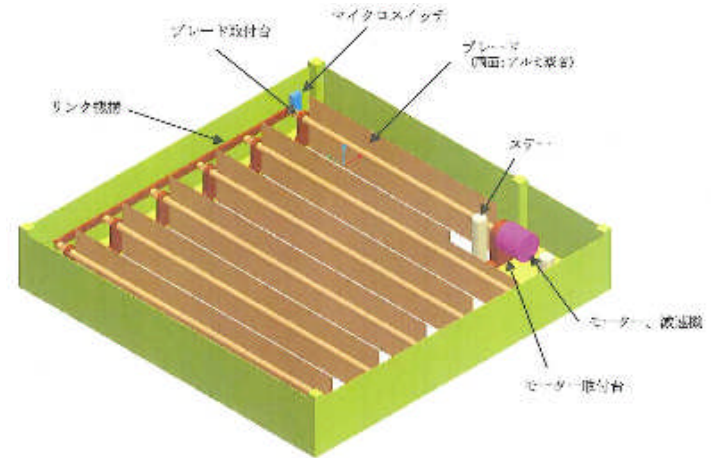


能動型の放熱制御装置

観測機器の温度変動をさらに抑えるため

- ・ 超音波モータ制御により
任意のタイミングで輻射率を変化できる
- ・ 実効輻射率変化 ~ 0.5 (熱モデル推定)

概念検討と試作機設計を完了した。



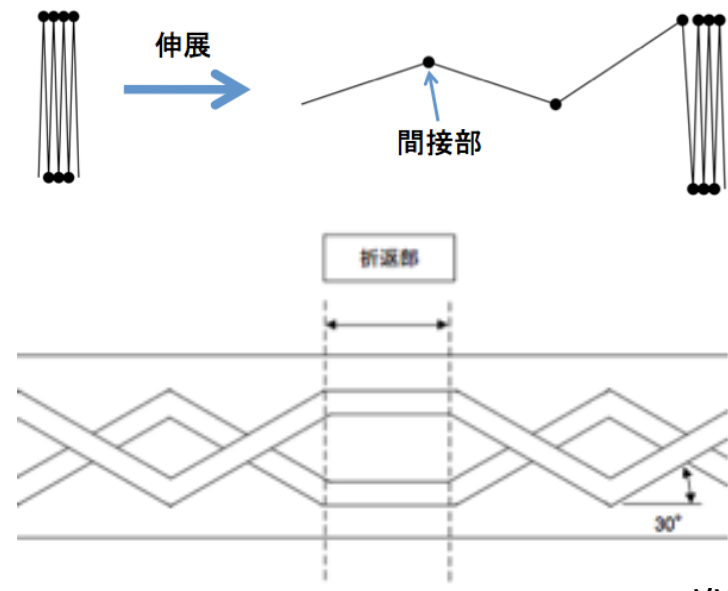
観測拠点を結ぶ電源ケーブル

- ・ 月面設置時に伸展できるもの
- ・ $-200 \sim 110^{\circ}\text{C}$ で使用可能

リール式だと重量大、故障リスク大。

折り畳み式フレキシブルフラットケーブル

磁場発生を抑えるため、導線をクロス→

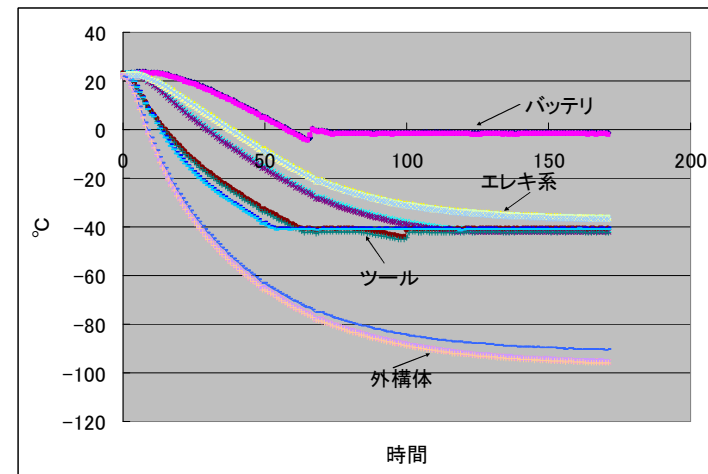
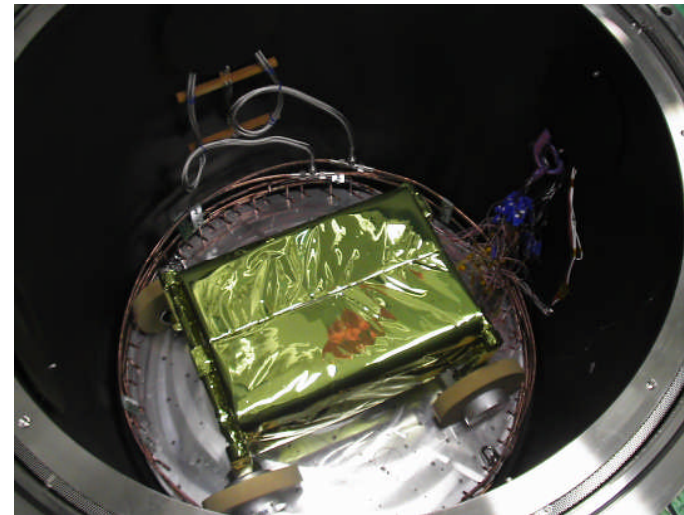


ローバ越夜 検討状況の概要

- ローバの越夜について
 - SELENE-2ミッションのローバは、移動技術実証としてのミッション機器であるとともに観測機器のプラットフォームとしてバス機器の側面もあわせ持つ。
 - いずれの観点からも越夜が強く望まれている。
- ローバ特有の問題点
 - ローバは移動するため、着陸機などからのエネルギー供給が難しい。
 - 越夜時に着陸機まで戻る場合、移動距離が大きく制限される上に、コネクタの結合などが必要である。
 - リソースが限られており、大型の保温用電池を搭載することは困難である。
→これまで、月および火星の無人ローバでラジオアイソトープを保温に用いていないものは無い。
- これまでの検討
 - 熱数学モデルによる解析やBBMによる熱真空試験を実施している。

ローバ試験モデルによる検証例

- 検証試験
 - 熱数学モデルで仮定した各部の熱パラメータ (MLI実効放射率、構体や搭載機器など各部のコンダクタンスなど) の検証を目的として、熱特性評価用 BBM を製作し、熱真空試験を実施している
- 試験環境
 - 真空槽: 月面を模擬するために液体窒素で冷却されたプレートを持つφ1.5mの真空槽に設置し、シュラウドを液体窒素で冷却。
 - 真空度: $<10^{-4}\text{Pa}$
 - 試験期間: 10日間
- 試験結果
 - 解析とほぼ一致する結果が得られており、数Wの電力で内部の温度を維持可能である。
 - 越夜が可能な目処がつきつつある。



数Wで内部温度を維持可能

まとめ

- 予算状況が厳しい折、プロジェクト移行は遅れているが、低予算でできる範囲の要素技術開発は前倒しで行っている。
 - 着陸地点と観測機器構成の最適化検討などを行っている。
 - 国際協力についても、積極的に展開している。
-
- 今後とも、ご支援よろしく申し上げます。

参考文献

- 「宇宙基本計画」、宇宙開発戦略本部、(2009.6.2)
http://www.kantei.go.jp/jp/singi/utyuu/keikaku/keikaku_honbun.pdf
- 「我が国の月探査戦略」、月探査に関する懇談会、(2010.7.29)
<http://www.kantei.go.jp/jp/singi/utyuu/tukitansa/100730houkokusho.pdf>
- 「当面の宇宙政策の推進について」、宇宙開発戦略本部、(2010.8.27)
<http://www.kantei.go.jp/jp/singi/utyuu/kettei/100827/suisin.pdf>
- 「SELENE-2 に関する科学評価レポート」、宇宙理学委員会、(2010.10.16)
http://www.isas.jaxa.jp/home/rigaku/project/rigaku_SELENE2_Science9.pdf
- 佐伯和人、荒井朋子、荒木博志、石原吉明、大竹真紀子、唐牛譲、小林直樹、杉原孝充、春山純一、本田親寿：次期月探査計画SELENE-2 の着陸地点検討報告、日本惑星科学会2010年秋季講演会214、名古屋大、(2010.10)
- Tatsuaki Hashimoto, Takeshi Hoshino, Satoshi Tanaka, Masatsugu Otsuki, Hisashi Otake, Hitoshi Morimoto: Japanese Moon Lander SELENE-2 - Present status in 2010 -, IAC-10.A3.2B.1, 61th International Astronautical Congress, Prague, Czech, (2010.9)
- Takeshi Hoshino, Sachiko Wakabayashi, Tatsuaki Hashimoto, Yoshihara Shoichi: Technology development under simulated lunar environment for lunar surface exploration, IAC-10,A3,2B,2, 61th International Astronautical Congress, Prague, Czech, (2010.9)
- 橋本樹明, 星野 健, 田中 智, 大嶽久志, 大槻真嗣: 月着陸探査ミッションSELENE-2、2A17 (JSASS-2010-4226)、第54回宇宙科学技術連合講演会、静岡、(2010.11)