

その場年代計測装置による月惑星年代学探査
提案書

2014 年 3 月 31 日

目次

- 0 はじめに
- 1 目指す科学
 - 1.1 背景
 - 1.2 本計画の目標
 - 1.3 本計画の意義
 - 1.4 サクセスクライテリア
- 2 着陸地点と分析試料の条件
 - 2.1 着陸地点
 - 2.2 分析試料の条件と問題点
 - 2.3 試料選別の戦略
- 3 観測シナリオ
- 4 理学観測機器と開発状況
 - 4.1 マルチバンド分光カメラシステム (LMUCS)
 - 4.2 マクロ分光カメラ (LUMI)
 - 4.3 K-Ar 年代計測装置
- 5 ミッション要求
 - 5.1 着陸精度
 - 5.2 重量
 - 5.3 通信レート
 - 5.4 電力
 - 5.5 ロボ性能
- 6 軌道計画
 - 6.1 打上げから月周回軌道まで
 - 6.2 月面着陸
- 7 探査機システム構成
- 8 研究開発の推進
 - 8.1 実施体制
 - 8.2 開発スケジュール
- 9 参考文献

0. はじめに

日本における月惑星探査を力強く推進するためには、一連の探査計画において共通の柱となる理学目標の設定が必須であることは言うまでもない。太陽系科学が目指す究極のゴールは、太陽系で起こったとされる様々なイベントの有無と相互の因果関係を実証的に解明し、太陽系形成から現在に至る歴史を滑らかにつなぐことである。その目標を実現するためには、各事象を絶対的時間軸の上に配置していくことが不可欠である。高解像度の軌道上探査が一段落した内惑星探査にあつては、全球サーベイによって注意深く選定された地点に着陸して物質科学計測を行い、個々の天体の進化モデルを取捨選択することで、より洗練された太陽系・惑星進化の描像を得ることが今後の探査の主流となる。このような観点から我々は月惑星年代学を柱として、太陽系進化史の解明を目指したその場年代測定機器の開発とそれを用いた探査計画を提案する。

1 目指す科学

1.1 背景

太陽系科学が目指す究極のゴールは、我々の太陽系で起こったとされる様々な事象の相互の因果関係を実証的に解明し、太陽系形成から現在に至る歴史を滑らかにつなぐことである。太陽系形成の標準モデル [e.g., Hayashi et al. 1985] では、太陽系の惑星や小天体は、原始惑星系円盤の中で、ダストから成長したキロメートルサイズの微惑星がさらに衝突合体を繰り返すことで形成されたと考えられている。標準モデルの根幹である円盤仮説は近年の系外惑星系の観測によって実証されている。しかし、一般に太陽系形成論では惑星系形成の最初の 1 億年程の力学的過程が扱われる一方で、現在の太陽系で観測可能な地質学的記録、軌道進化の記録は過去 40 億年程度であり、理論と実証論の間には大きな時間的ギャップがある (図 1-1)。そのために原始惑星系円盤から現在の我々の太陽系に至るまでの力学進化過程の理解には未だ多くの未解決問題が残されている。

近年、特に注目を集めている問題の一つは惑星移動である。古典的なモデルではそれぞれの惑星は現在の軌道上で形成されたと考えられてきた。しかし近年、惑星はガス円盤との相互作用によって動径方向に移動する(タイプ I, II 移動) ことが理論的に予測されている [e.g., Tanaka et al. 2002]。また、太陽系巨大惑星がガス円盤や残存微惑星との角運動量の交換によって移動したとするシナリオが提案されており [e.g., Gomes et al. 2005; Walsh et al. 2011]、巨大惑星の大移動を考えることで現在の太陽系の構造 (海王星の形成時間の問題、メインベルト天体、トロヤ群、カイパーベルト天体の軌道分布、地球型惑星の質量分布、後期重爆撃期など) がうまく説明できる可能性がある。惑星大移動は魅力的なシナリオではあることは間違いないが、初期状態や考慮する物理過程次第で結果は操作可能であり、その自由度の高さゆえに“何でもあり”な理論である印象は否めない。結果として、太陽系の形成・進化のシナリオはいっそう複雑化しており、実証的解明をますます困難にさせている。

理論モデルを取捨選択し、より実証的に太陽系の形成・進化を解明するためには、現在の太陽系の観測から、過去の太陽系の情報を抽出し、初期状態をいかに復元できるかが鍵である。そのために、惑星からの重力相互作用を受けやすい太陽系小天体の軌道進化の歴史を解明することが圧倒的に重要である。現在の小惑星帯の質量は、現在の太陽系質量を説明するための最小質量モデルである林モデル [Hayashi et al. 1985] と比較しても 1/10000 しかない。なぜ太陽系小天体は惑星にまで成長できなかったのであろうか？なぜ、どのように質量枯渇したのであろうか？これらの問題の解明こそが巨大惑星や地球型惑星の形成と軌道進化の歴史を解く鍵である。特に現在の小惑星帯は、小惑星同士が衝突し、カタストロフィックな破壊やクレータリングなどにより破片が生成され、破片同士が衝突してさらに小さくなる衝突カスケード [Kobayashi, H. et al. 2010] の状態にあると考えられる。よって、小天体の質量枯渇の過程を解明するには、小天体の衝突破壊の歴史、軌道進化の歴史の復元が重要である。

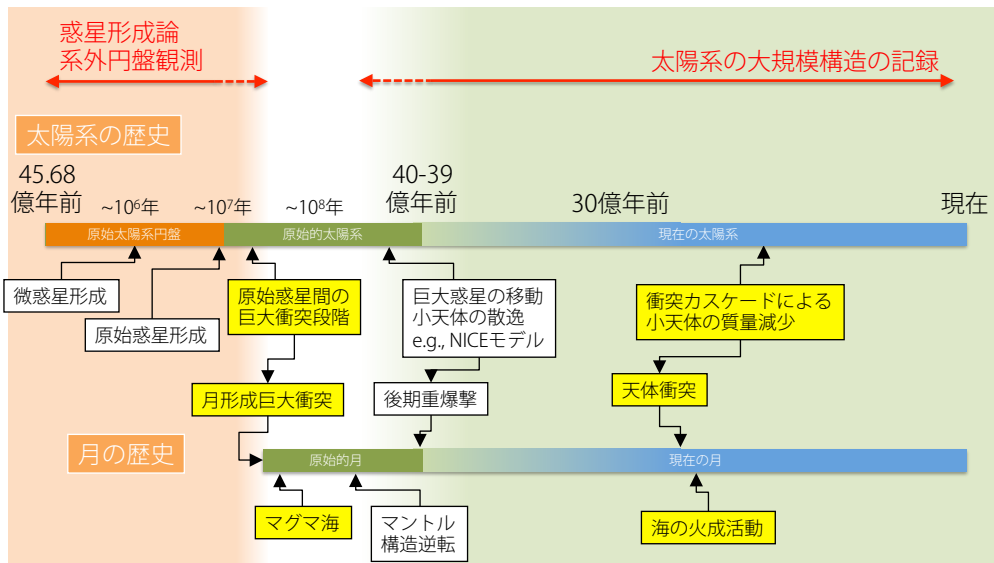


図 1-1 太陽系力学進化の概要。太陽系形成論では惑星系形成の最初の 1 億年程の力学的過程が扱われる。一方で、現在の太陽系で観測可能な地質学的記録、軌道進化の記録は~40 億年程度であり、形成理論と実証論の間にはギャップがある。太陽系の理論モデルを取捨選択し、より実証的に太陽系の形成・進化を解明するためには、現在の太陽系の観測からより初期の状態をいかに復元できるかが重要である。

月は他の地球型惑星と比較して小型の天体であるがゆえに、早くに地質活動が停止した。そのため月は太陽系初期から現在までの太陽系内側部における天体衝突の良い記録媒体であり、月面クレータ記録は過去 45 億年に及ぶ太陽系小天体の衝突破壊、軌道進化の歴史を観測的に制約できる数少ない情報源である (図 1-2)。月ではアポロ・ルナ計画によって持ち帰られた岩石試料が得られ、その放射年代と着陸地点のクレータ密度の関係づけがなされており、内太陽系における天体衝突の理解はこの関係にもとづいている (その関係をクレータ年代学関数と呼ぶことにする) (図 1-3) [e.g., Neukum 1983; Stöffler & Ryder 2001]。しかし、アポロ・ルナ岩石試料中で絶対年代と地質イベントとの対応がとれているものは、30~39 億年前の海の玄武岩や衝突溶融岩、そしてティコなどの 1 億年よりも若いクレータに限られており、1~30 億年前と 40 億年以前の年代範囲のクレータ年代学関数には不確実性が大きい。そのために、太陽系小天体、さらには巨大惑星の軌道進化に関わる天体衝突史の重要問題が未解決として残っている。

未解決問題の一つは、後期重爆撃の有無である。アポロ試料中の衝突溶融岩の放射年代は 38~40 億年に集中しており、このことから一部の月科学者は 39 億年前に天体衝突が活発な時期があったと考えており、これを後期重爆撃仮説と呼んでいる。一方、この説に反対する月研究者も少なくなく、アポロ試料は Imbrium や Serenitatis といった比較的若い (~39 億年) 特定の衝突盆地からの放出物に汚染されているために一様な年代を示しているだけ、という主張である。このように、後期重爆撃は仮説の域を出ていないにも関わらず、これまで太陽系規模の天体の軌道進化の枠組みの中でその原因は議論されてきた。例えば Gomes et al. [2005]は太陽系初期に

起こったかもしれない巨大惑星の急激な軌道移動と関連づけて後期重爆撃期の原因を説明している。このシナリオは Nice モデルと呼ばれ、現在観測されるエッジワース・カイパーベルトの軌道や天王星、海王星の軌道要素、形成の時間スケールの問題をうまく解決できるモデルとして認知されつつある。このように今や後期重爆撃仮説は太陽系形成の描像を左右する問題であり、月科学における解決すべき最優先課題の一つと言える。この問題を解決するにはネクタリス盆地などの古い衝突盆地の年代を決定し、40 億年前の衝突率がどのように減少したのかを明らかにする必要がある (図 1-3)。

もう一つの問題は、過去 30 億年の衝突頻度の長期的時間変化である。小惑星帯の衝突進化の数値計算研究は [Durda et al. 1998]、~30 億年前から現在にかけて天体衝突頻度が~1/3 程減少した可能性を示唆する。一方で、放射年代が得られている月の海のクレータ記録と若いクレータのクレータ数密度の比較から、過去 30 億年間クレータ生成率がおおよそ一定であったと解釈されている (図 1-3) [Neukum 1983]。また、月の衝突ガラス試料の年代測定からは、30-5 億年前は緩やかな減少、過去 5 億年は増加があったように見える [Culler et al. 2000]。重爆撃が終了した後のフラックスがどのように変動してきたかは NEOs 供給過程と NEOs ソースの規模を制約するための重要情報である。この問題を決着させるためには 25-5 億年前に対応するクレータ密度を持つ領域の放射年代を得て、そのクレータ数密度との関係を調べるのが重要である。

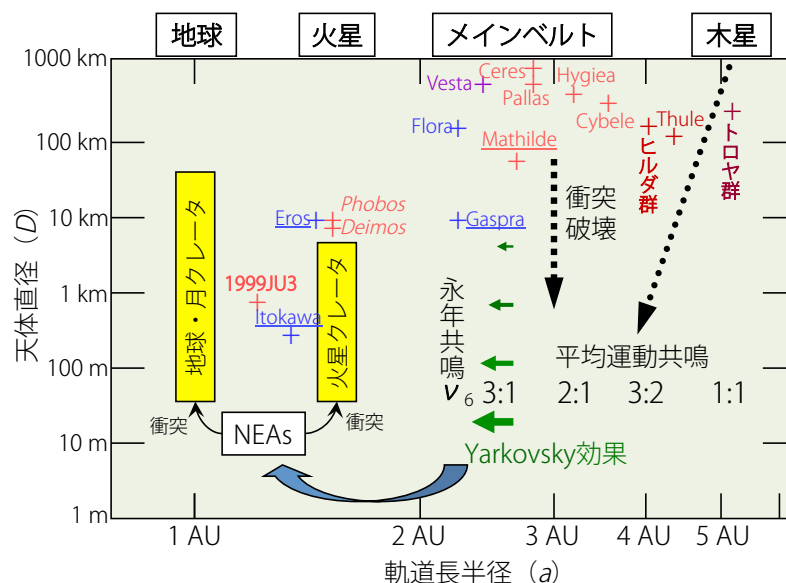


図 1-2 小惑星メインベルトから地球近傍への小天体供給過程 (渡邊 [2012]より改変)。小惑星間の衝突破壊は多くの小破片を生成する。それらの破片はヤルコフスキー効果などによって軌道長半径を変化させ、巨大惑星の平均運動共鳴や永年共鳴の位置にまで移動すると、軌道離心率が増大し内惑星の軌道と交差するようになり、地球近傍小天体となる。これらの一部は惑星や月に衝突し、その表面にクレータを形成する。巨大惑星の移動や小天体間の大規模な衝突の歴史は、月のクレータ記録に保存されているはずである。

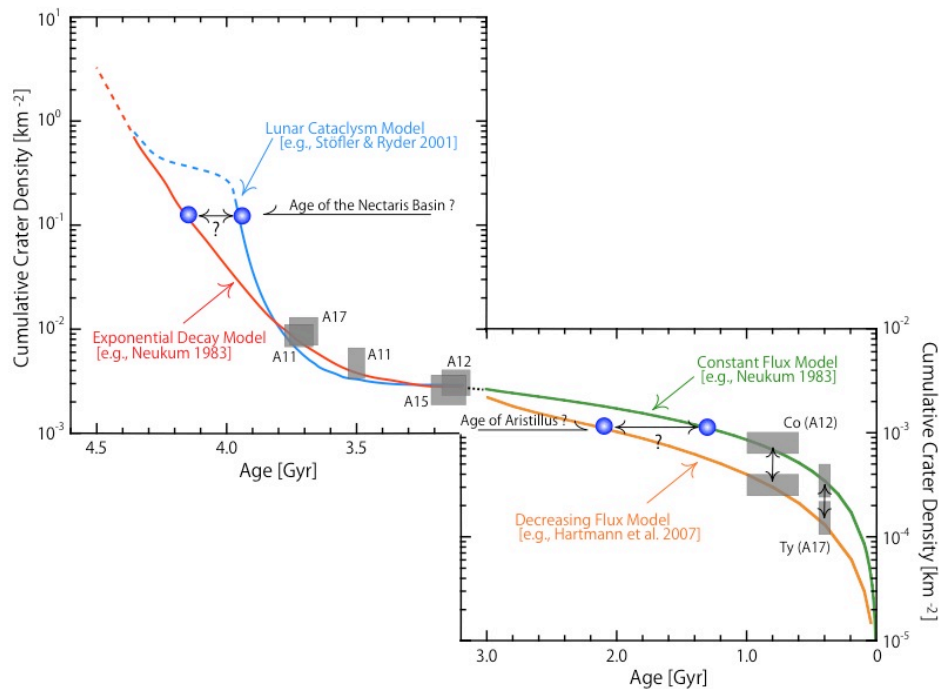


図 1-3 アポロ・ルナ岩石試料の放射年代と着陸地点のクレータ密度の関係。太陽系内側の天体衝突の歴史の現状理解はこの関係にもとづいている。試料の年代は 39~30 億年前に集中しているため、39 億年前以前と 30 億年前から現在にかけての天体衝突の歴史には不確実性が残されている。

1.2 本計画の目標

上記の問題の解決に向けて、本提案は月面着陸によるその場年代測定にもとづいて月面クレータ記録に絶対的時間軸を入れることにより、太陽系内側の天体衝突史を復元するものである。前述のように、現状では岩石試料の欠落のために 39 億年前以前と過去 30 億年間の天体衝突史が不確定であるが、本提案では下記の太陽系力学進化に関わる問題の解明の重要性と国外ミッションとの競合性・相補性を考慮し、特に過去 30 億年の天体衝突史の復元を対象とする。それにより下記の科学目的の達成を目指す。

(A) 小天体のサイズ分布進化の復元

微惑星から現在の太陽系小天体への力学進化は、巨大惑星の形成と大移動の歴史を知る上での鍵であり、太陽系形成から現在の太陽系構造へとつなぐ第一級の重要問題である。小天体の力学進化過程を探る上で重要な情報は小天体のサイズ分布である。メインベルト天体の観測から 100~1000km サイズの天体数が卓越している事が知られているが、これがもともとの微惑星形成時の特徴的なサイズを反映しているものか、現在の太陽系小天体が経験している衝突カスケードによる副産物であるのかはよく分かっていない。本提案では月表面に見られる太陽系天体衝突

の時間変化から小天体質量の減少速度を初めて観測的に定量化し、衝突破壊強度などの基礎量をおさえることで、衝突カスケードが100km サイズ天体の分布まで影響しているかを評価し、小天体のサイズ分布の問題に決着をつける。

(B) 月の熱的進化史の復元

月は地球型惑星形成の最終段階に生じたとされる「巨大衝突」の実体に迫りうる唯一無二の天体である。巨大衝突仮説の予測によると月は全溶融から始まったとされる。その場合、高温の初期状態はその後の熱進化を大きく左右し、月は20億年以上もの長期間、マントル溶融域を保持できたと考えられる。一方で、クレタ年代学で決定された月のマグマ噴出年代から見積もられるマントル溶融域の保持期間は、クレタ年代学のモデルに大きく依存し、衝突率一定モデルでは約25億年もの間保持されていたことになり [Morota et al. 2011]、月が高温でつくられたことを強く示唆するが、衝突率減少モデルに従うと15億年程度であり、初期の高温状態を必要としない。本提案では、衝突史の復元によってクレタ年代学の高精度化を達成し、マントル溶融域が長期間保持されたかを検証することで、月の初期温度状態を決定する。

月の熱史解明は月の初期状態を復元するために重要であるだけでなく、分化天体の熱進化を体系的に理解するためにも大きな意義がある。分化天体の熱的進化史と天体サイズの間には相関関係がある。小河らのマントル進化シミュレーションによると [Ogawa 2000; Ogawa & Yanagisawa 2011; 2012]、月を含めた地球型惑星のマントル進化は主に4つの物理素過程 ((1) 火成活動による放射性元素の地殻への濃集, (2) 火成活動によるサーモスタット効果, (3) マントルバースト, (4) プレートテクトニクス) の貢献度の違いで説明できる。月と火星を比較すると、月ではマントルのレイリー数が低いためサーモスタット効果が弱く、長く火成活動が続くと期待される。このように、月の火成活動の期間を決定することは、地球型惑星の冷却過程の素過程の理解とその検証に不可欠である。

(C) クレタ年代学関数の構築による惑星年代学の精密化

クレタ年代学関数の構築は天体衝突史の解明だけでなく、固体惑星表面の年代推定手法の精度向上にも重要である。特に30~1億年前の年代範囲に対応する領域は、クレタ年代学関数の不確定性のため、クレタ数密度にもとづく年代決定において5~10億年程度の誤差が残されていた。もしその年代範囲の放射年代とクレタ密度の対応がとられ、クレタ年代学関数形状が決定されれば、クレタ数密度による年代決定精度は数密度計測の誤差のみに減らす事ができ、2~3億年の精度で月面年代の決定が可能となる。それにより月の地質進化の理解は飛躍的に進むことは言うまでもない。また、月のクレタ年代学関数はすべての固体天体で行われているクレタ年代学の基礎となっていることから、火星や金星、水星、氷惑星といった個々の地質進化過程の解明においても大きな意義を持つ。

1.3 本計画の意義

日本では重力がある天体の着陸探査の経験は今のところ無い。しかし、サンプルリターンを視野に入れた着陸ミッションは世界の惑星探査の一つの主流となりつつある。例えば、月探査に限っても、2013年に中国の嫦娥3号が雨の海への着陸に成功し、今後も嫦娥4号以降に着陸、サンプルリターン探査を計画している。更に米国が2017-8年に極域着陸探査 (RESOLVE) を、2020年頃には南極エイテン盆地への着陸探査を計画しており、ロシアやESA、インドも2010年代後半から2020年頃にかけて月面着陸を目指している。このような状況下で、特に着陸技術は将来の有人探査計画の推進において世界に遅れをとらないためにも、早急に獲得すべき技術である。次期月探査候補であるSELENE-2とSLIMでは月面着陸を予定しており、着陸技術実証とローバ走行技術実証が行われる。本提案はそこで獲得された技術を活用するものであり、重力天体表面における活動技術獲得に向けたプログラムに沿ったものである。

また、本提案の重要な意義は着陸探査によるその場年代測定の手法と観測機器を開発し、技術実証する点にある。一般に、現状の技術レベルでは相対誤差2-3%の高精度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えると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その場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。月の表面年代も、実は未だにファクター2以上の不確定性が残されている時期が非常に多く、月進化史解明の大きな足枷になっている。月面の絶対年代推定は、内側太陽系の他の惑星のクレタ年代の標準モデルともなっているため、月面年代の不確定性は他の地球型惑星のクレタ年代学の不確定性にも直結する。そのため、惑星表面上での年代計測の技術獲得は宇宙惑星科学分野の長年の悲願と言っても過言ではない。本探査で獲得されるその場年代決定技術や試料選別のスキーム、月面移動地質調査技術の経験は、将来の月面サンプルリターン計画や火星探査計画に継承されるものである。実際に、本計画の主役となるK-Ar年代計測装置のサイエンステargetには火星の気候変動時期の解明も含まれており、火星探査も想定した開発を進めている [長ほか 2013]。

その場年代計測はその科学的意義の高さから、海外においても精力的に検討が始められており、現在の着陸惑星探査機用の搭載装置として最も盛んに開発されている機器の一つである。過去においても、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。いわゆるモデル年代計測のみが可能で、コンタミや部分脱ガスの影響を評価できない欠点がある。ここで提案する年代計測装置は従来手法のこ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。本提案チームはこの手法の原理実証に成功しており [長ほか 2013]、現状、海外チームに対して、一日の長がある。これに気付いたNASA Marshall Flight Centerの研究者からは、NASAのMars 2020ローバ搭載用のK-Ar計測装置の共同開発を提案されている。本

開発で得られる様々な知見は、自前の装置開発に使えるだけでなく、Mars 2020 という Curiosity と同サイズの大型ローバに搭載される機器への開発にも活用できる可能性がある。

固体惑星探査の長期的なロードマップにおいて、内部構造探査と着陸による表面物質探査を相補的に位置づけ、実現性を持って計画することが圧倒的に重要である。内部構造探査によって現在の惑星の構造を把握し、着陸による物質探査で時間進化の情報を得ることで、惑星の内部構造の進化の復元が完成される。現在、小型探査計画に提案されているペネトレータ実証探査は、月の形成・進化過程の解明を目指すという点で、まさに本提案と相補的に位置づけられるものである。

1.4 サクセスクライテリア

本提案においては、着陸地点周囲の地質の形成年代の決定が最優先科学目標となるが、そのためには、着陸点周囲に点在する岩石の年代計測を複数回行い、その統計情報にもとづいた解釈が必要となる。一方、そもそも信頼に足るその場年代計測自体が世界で類を見ないことを考慮し、まずは周辺に点在する岩石試料の年代を決定してみせることをミニмумサクセスとする。

月面では天体衝突によって様々な領域を起源とする岩石の混合が起こる。着陸点はそのような混合の少ない領域を選択するが、ごく一部の岩石からは周辺地質からの飛来物が発見される可能性がある。それらの岩石の年代と鉱物・元素組成の把握、既存のリモートセンシングデータとの相互参照によって、着陸地点の地質だけでなく、周辺地質の進化史も復元できる可能性がある。そこで、周辺地質も含めた進化解明をフルサクセスに位置づける。

ミニмумサクセス：着陸点周囲の岩石の K, Ar 量を計測し、年代を 10%の精度で決定する。

ノミナルサクセス：着陸点周囲の岩石を選別し、着陸点の地質年代を 10%の精度で決定する。

フルサクセス：着陸点の地質を含む、周辺地質の進化史を復元する。

2 着陸地点と分析試料の条件

2.1 着陸点

科学目標の達成に適した着陸地域の条件は以下である。

- (1) 10-20 億年前の年代に対応したクレータ数密度を持つ領域
- (2) 十分に広い地質ユニットをもつ領域
- (3) 高カリウム量 (>1wt%) 領域

条件 (1) にある 10-20 億年は、クレータ年代学関数の校正点となる岩石試料が欠落した年代範囲のおおよそ中間であり、代表的な年代学関数のモデルであるクレータ生成率一定モデル [e.g., Neukum 1983] とクレータ生成率減少モデル [e.g., Hartmann et al. 2007] の差が最も大きくなる年代範囲である。条件 (2) は、絶対年代が得られる地質ユニットのクレータ数密度の計測精度を保証するために必要となる。条件 (3) は本ミッションで行う年代計測法 (K-Ar 法) の精度を保証するための条件である。

月面の元素組成には大きな不均質がある。ルナプロスペクターや「かぐや」のガンマ線分光計による観測から、カリウムを含んだ放射性元素は嵐の大洋や雨の海周辺の Procellarum KREEP Terrane (PKT) と呼ばれる地域に濃集していることが知られている (図 2-1) [Lawrence et al. 2007; Kobayashi, S. et al. 2010]。つまり、条件 (3) を満たす領域は PKT の内部ということになる。さらに PKT の中でも放射性元素の分布には不均質があり、特に放射性元素が濃集している領域の多くは衝突クレータの位置と対応している。その中で条件 (2) を満たす領域として、比較的大きなクレータを選び出した結果を表 2-1 に示す。それぞれのクレータの上に形成された小クレータのカウンティングを行った結果をみると、Aristillus クレータのモデル年代が条件 (1) を満たしていることがわかる。以上の結果から、月の表側北半球にある直径 55 km のクレータ、Aristillus (33.9N, 1.2E) クレータのフロアーを本提案の着陸地域とする (図 2-2)。

表 2-1 かぐや GRS の K 量マップにもとづき抽出した高カリウム量地域とクレータ年代。

| Name | Dia. [km] | Lat. | Long. | Th [ppm]* ¹ | K [ppm]* ² | Neukum Model N(1) [km ⁻²] | Age [Gyr] |
|-------------|--------------|------|-------|------------------------|-----------------------|--|-----------|
| Aristarchus | 40 | 24 | -47 | ~14 | 5136 | 0.0000980 | 0.12 |
| Aristillus | 55 | 34 | 1 | ~14 | 5136 | 0.001110 | 1.33 |
| Kepler | 30 | 8 | -38 | ~14 | 5136 | 0.000277 | 0.33 |
| Lalande | 24 | -4 | -8.5 | | | | |
| Marian | 40 | 42 | -43 | ~14 | 5136 | 0.0045 | 3.48 |
| Timocharis | 34 | 27 | -13 | ~14 | 5136 | 0.00256 | 2.99 |
| Copernicus | 96 | 10 | -20 | ~3 | 1330 | 0.000484 | 0.58 |

*1 Lawrence et al. [2007] Fig.3 より. *2 Kobayashi, S. et al. [2010]の K 量と Th 量の関係式から算出.

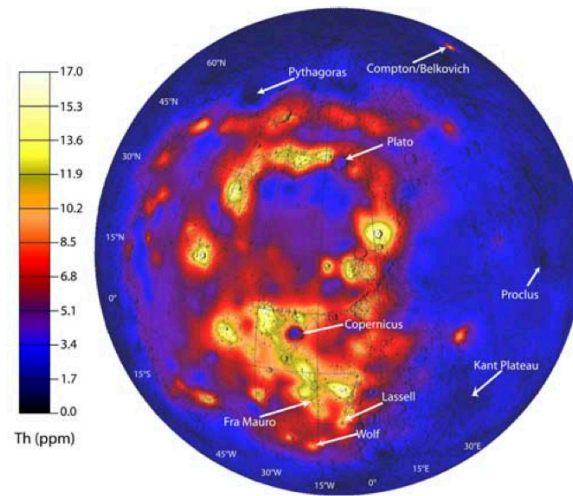


図 2-1 ルナープロスペクター搭載ガンマ線分光計によるトリウム分布 [Lawrence et al. 2007].

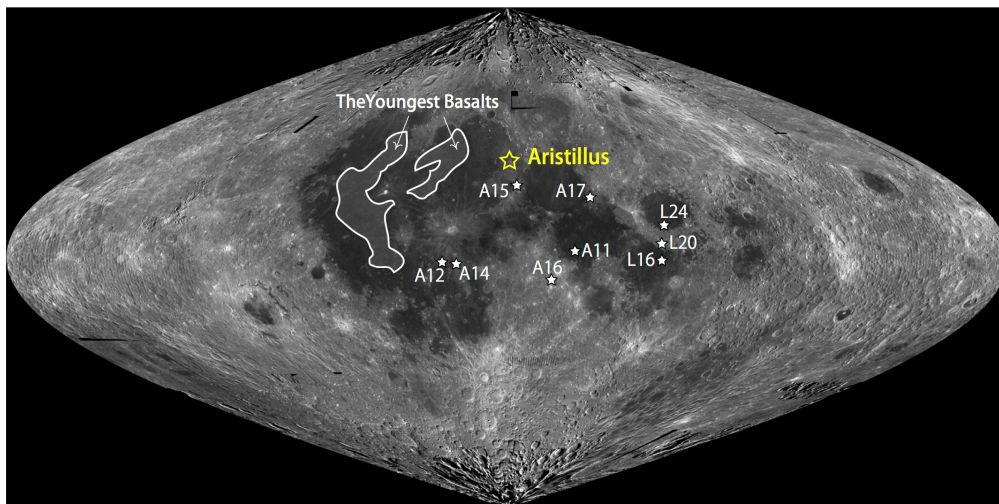


図 2-2 着陸候補地点, Aristillus クレータの位置.

Aristillus クレータの形成年代を決定するためには, Aristillus クレータのフロアーに着陸し, Aristillus クレータ形成時につくられた衝突溶融岩の年代を決定する必要がある. 一方, Aristillus クレータ形成以後の天体衝突の影響により, Aristillus クレータフロアはレゴリスに覆われ, 岩石の一部は角礫岩化されていると考えられる. そのような岩石は度重なる衝突による再加熱のために K-Ar 年代がリセットされている懸念もある. そこで, Aristillus クレータフロアにおいてごく最近 (<~1000 万年) のクレータリングで掘削され, 露出した新鮮な岩石が転がっている領域を探索領域とする (図 2-3). それにより, Aristillus クレータ形成以後の微小天体の衝突で Ar リセットされた可能性を劇的に減少させることができると期待される. これについての詳細は試料選別の戦略とともに後述する.

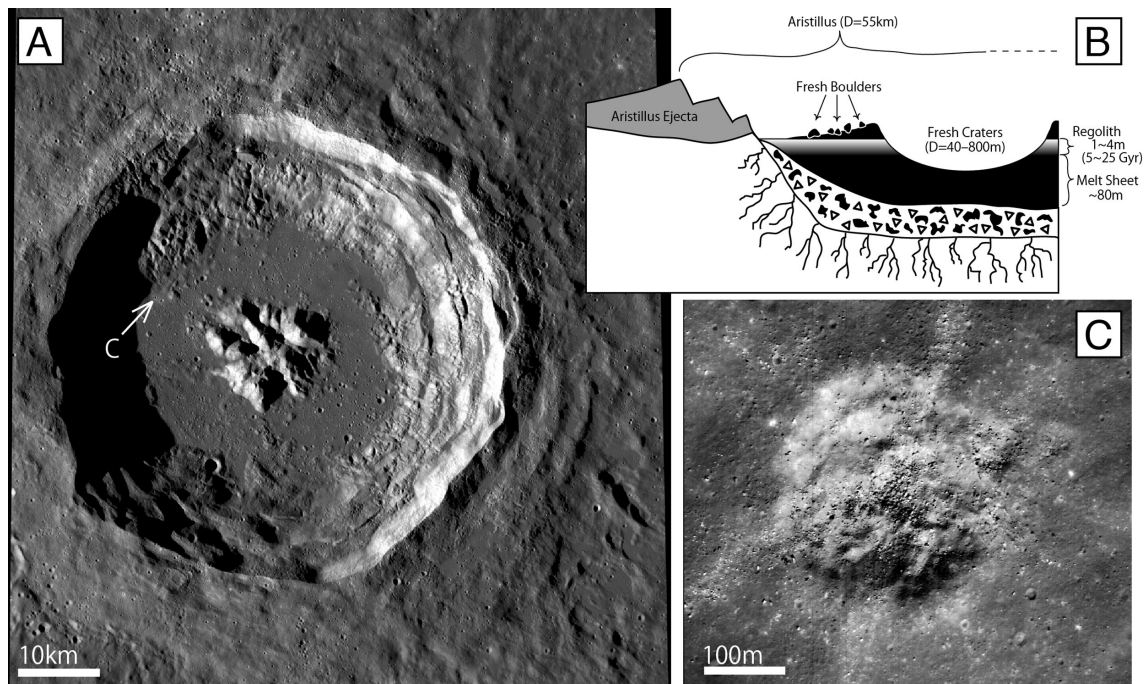


図2-3 Aristillus クレータ内の着陸候補点。Aristillus インパクトメルト岩の年代決定のために、表面のレゴリス層を掘抜いている小クレータの周囲の新鮮な岩石を分析する。(A) かぐや地形カメラ画像。(B) Aristillus クレータの断面模式図。(C) Aristillus クレータ内部にある小クレータ。小クレータ形成時に掘削された岩石がクレータ周囲に存在しているのがわかる。

2.2 分析試料の条件と問題点

K-Ar 年代計測の分析対象となる試料の条件は以下である。

- (a) 地質ユニットとの対応付けが可能である試料であること
- (b) K-Ar 年代がリセットされていないこと
- (c) 太陽風による Ar 打ち込みの影響がないこと (深さ数百 nm までのごく表面の影響)

一方で、月面は長年にわたる天体衝突の影響により、レゴリスに覆われ、岩石の大部分は角礫岩化されている。そのような岩石は地質ユニットとの対応付けが困難である。また、度重なる衝突による再加熱のために K-Ar 年代がリセットされている懸念もある。実際に、アポロ 16 号着陸点のインパクトメルトブレッチャ試料のほとんどで Ar の部分的ロスが起こっている [Norman et al. 2006]。

2.3 試料選別の戦略

上記の問題を避けて、Aristillus インパクトメルトの固化年代を正確に決定するために、下記のような多段階での対策をとることで、K-Ar 年代分析に適した試料選別の確度を向上させる。

- (a) ごく最近のクレータリングで掘削・露出した新鮮な岩石が存在する領域を探索領域とする。

- (b) 岩石の表面数 mm を研磨，またはコア抜きをし，太陽風起源の Ar の混入を防ぐ。
- (c) 岩石研磨面を顕微分光して，衝撃変成の痕跡が無い試料であることを確認する。
- (d) 年代計測の際に鉱物ごとの K, Ar 量を測定し，アイソクロンから Ar の部分リセットを評価する。
- (e) 複数の試料の年代を測定し，年代のヒストグラムから試料の年代の同一性を評価する。

(a) については，前述のように，Aristillus クレータフロアにおいてごく最近 (<1000 万年) のクレータリングで掘削され，露出した新鮮な岩石が転がっている領域を探索領域とすることで (図 2-3)，Aristillus クレータ形成以後の微小天体の衝突で Ar リセットされた可能性を劇的に減少させることができる。Aristillus クレータの場合，インパクトメルトシートの厚さは~80m であり [Cintala & Grieve, 1998]，その形成年代が 25 億年以下であるならば，表面で発達したレゴリス層は平均的に 4 m 以下であると見積もられる。ごく最近になってつくられた直径 50m 以上のクレータはレゴリス層よりも下位のメルトシート岩を掘削し，露出させたはずである。このような岩石の K-Ar 時計は，(1) Aristillus クレータのメルトシートの固化後に開始し，(2) ごく最近のクレータ形成，掘削により一部リセット，(3) その後～現在までの微小天体衝突により岩石表面のごく一部でリセット，といったシンプルな衝突履歴をたどったと考えられる。このようなメルトシート起源の岩石は実際に新鮮なクレータの周囲に存在する (図 2-3c)。また，A15 KREEP 玄武岩試料は 21 億年前に，A12 レゴリス試料は 8 億年前に (おそらく大クレータ形成イベントによって) Ar が完全にリセットされ，その後リセットされていないと解釈できる Ar-Ar 測定結果を示す試料も存在する [Ryder et al. 1991; Barra et al. 2006]。10-20 億年間，月面に露出し，天体衝突を受けながらも Ar リセットされていない岩石が存在することは，ごく最近の露出地域では衝突加熱の影響を受けていない試料が存在する事を強く示唆する。

本提案では 1 試料の分析で最低限の科学目標を達成 (クレータ年代学関数の代表的な 2 つのモデル，クレータ生成率一定モデルとクレータ生成率減少モデルを識別できること，クレータ年代学による年代決定におけるモデル依存性に起因する誤差を 2-3 億年に抑えること) するために，年代計測精度として 15% を目指している。この目標は 1 試料の分析精度と同程度となる見込みである。一方で，複数試料を分析する必要性は，(a) 岩石試料を露出させた小クレータの形成時に一部の岩石の Ar がリセットされている可能性があり，Aristillus クレータの形成年代を持つ試料を確実に分析するため，(b) 個々の試料の年代のばらつきを評価するため，である。(a) に関して，もし分析対象の岩石が，岩石を露出させた小クレータの形成時に年代がリセットされていれば，小クレータの年代は Aristillus クレータよりも十分に若く (Aristillus クレータの 1/100 程度)，アルゴン計測の下限を下回るため，計測結果そのものから Aristillus クレータではなく，小クレータの年代を反映していることが判断可能である。問題は年代計測してみないと確実な判断ができないことである。そのため，事前に小クレータ形成で Ar リセットされた岩石の存在割合を見積もっておく必要がある。もし衝突イベントのような一時的な温度上昇での Ar リセット

は岩石の溶融温度を超えるか、それに近い温度まで上昇した領域でのみ起こるという仮定に基づくと、インパクトメルトの生成量に関する一般的なスケーリング則 [Cintala & Grieve 1998] から、小クレータ形成の影響をある程度見積もることが可能である。今回対象とする小クレータの直径は 100–200 m であり、そのようなサイズのクレータ形成によってつくられるインパクトメルト領域の体積は、クレータ体積の 0.05 % 以下と見積もられる。その場合、小クレータのエジクタブランケットにおいて、小クレータ起源のインパクトメルトが占める割合は 10 % 以下となる。つまり、少なくとも 5 個以上の岩石試料の分析を行えば、小クレータ形成でリセットされていない岩石を 99.999 % の確率で探し出すことができる。

もう一つの問題は Aristillus クレータ形成時に完全に K-Ar 年代がリセットされていない可能性である。しかし、本提案では Aristillus クレータフロアのインパクトメルトシート岩石を直接分析するため、この可能性は十分に低いと考えられる。これを確証するため、アポロ試料の年代値のばらつきを参考にして、個々の試料の年代値のばらつき具合を評価する。

3 観測シナリオ

下記に観測シナリオを示す。

- (1) Aristillus クレータフロアにある新鮮な小クレータの周囲に~100m の精度でのピンポイント着陸を行う。
- (2) 分光カメラで着陸点付近の地質、岩相マッピングを行い、観測計画を作成する。
- (3) ランダ周辺の岩石を採取し、岩石表面を研磨、またはコア抜きし、分光カメラで表面の岩石組織を観察する。
- (4) 岩石が角礫岩ではなく、固化時の組織が保存されていることを確認する。
- (5) ランダ内の年代計測装置に試料をセットし、年代を計測する。
- (6) (3)~(5) を繰り返す、蓄積した岩石年代データから、Aristillus クレータの形成年代を決定する。

着陸点周辺の岩石の数密度の計測結果から、ランダから手の届く範囲 (1-2 m) の分析で Aristillus クレータの年代決定は十分に可能であると期待できる。一方、万が一、着陸機が岩石の少ない領域に着地し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と考えている。

岩石コアの採取、表面の岩石組織の確認、試料のセットで約 1.5 時間、1 試料中の 1 点のカリウム・アルゴン量の測定に 35 分 (以上の時間見積もりは別資料を参照)、アイソクロンを引くために 1 試料につき 5 点の計測を要するとすると、1 試料の年代計測に約 4.5 時間を要することになる。よって、1 日に 4-5 試料の年代計測が可能であり、10 試料 (TBD) を分析するには 3 日間の観測が必要である。初期チェックアウトに 3 日 (TBD)、着陸地点周辺の地形、地質情報の取得に 1 日、観測運用計画の立案に 1 日を要するとする、最低限の運用期間は 8 日である。上記では 24 時間のリアルタイム運用を想定した。その場合、他国の観測局の使用が必要となる。

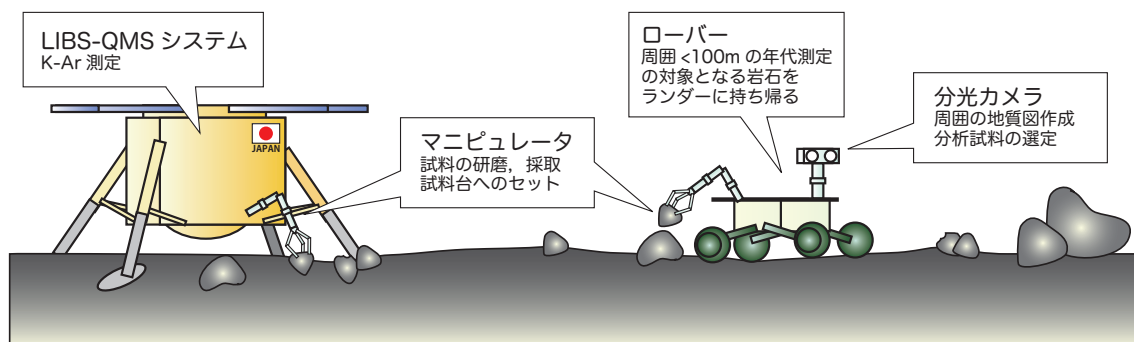


図 3-1 探査のイメージ。ランダ周辺の岩石を採取，研磨し，年代計測を行う。また，着陸機が岩石の少ない領域に着地した場合のバックアップとして，ローバでの周囲数十 m 範囲の岩石調査，採取も行う。

表 3-1 探査スケジュール案。

| 日程 | 太陽高度 | 作業内容 |
|-------|-------|---|
| | | 打上 |
| 1 日目 | 12.8° | 月周回 |
| 2 日目 | 25.7° | |
| 3 日目 | 38.4° | 着陸 |
| 4 日目 | 51.4° | ランダ搭載サイエンス機器ヘルスチェック |
| 5 日目 | 64.0° | LMUCS カメラ ON |
| 6 日目 | 78.0° | 動作チェック LMUCS による周辺観測 周辺マップ作成，探査計画作成 |
| 7 日目 | 90.0° | 近傍探査 |
| 8 日目 | 71.2° | 着陸機搭載アームでサンプル採取・観察・分析 |
| 9 日目 | 64.4° | |
| 10 日目 | 51.6° | |
| 11 日目 | 39.2° | (オプション) |
| 12 日目 | 26.4° | |
| 13 日目 | 13.6° | |
| 14 日目 | 0.0° | 終了 |

4 理学観測機器と開発状況

本提案の科学目標達成のために要求される観測機器の仕様を図4-1に示す。

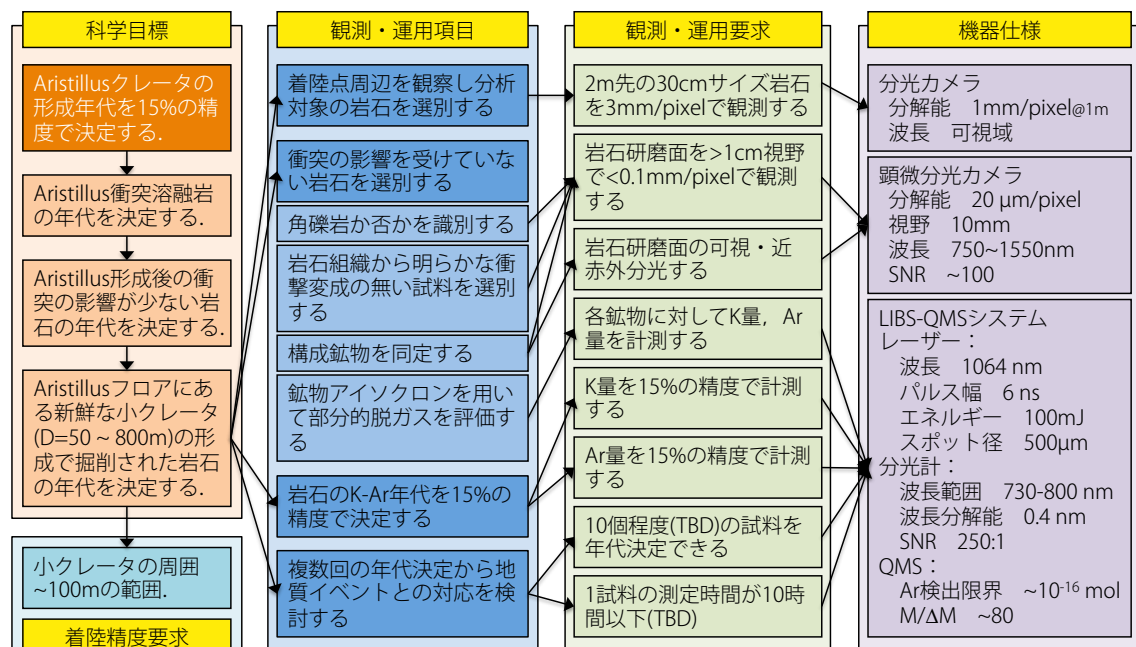


図4-1 科学目標と要求される着陸点精度，機器仕様。

4.1 マルチバンド分光カメラ (LMUCS)

4.1.1 概要

マルチバンド分光カメラは SELENE-2 搭載候補機器の一つであり，本提案においても，ラング周囲の地質，岩石の鉱物組成のマッピングとその後の試料選別，分析運用計画の策定に欠かせない。またこれまで蓄積してきたリモートセンシングデータと着陸点における詳細地質とのスケール接続の役割も担う。オプションとして予定しているローバにも搭載し，着陸点周囲数十 m 範囲の岩石の組織観測も行う。

4.1.2 科学的意義

月に限らず，固体天体表面のリモートセンシングにおいてマルチバンド分光は天体表面の数百 m スケールでの岩相把握に力を発揮し，惑星表層の地質進化の理解に多大なる貢献がなされてきた。さらに着陸探査における高解像度でのマルチバンドイメージングにより，数十 cm～数 m スケールでの岩石ブロックの岩相把握が可能となり，着陸点における詳細な月面地質進化史が解明されるであろう。そしてより重要なことは，試料分析とリモートセンシングとのスケールを接続する情報が得られることで，リモートセンシングデータの解釈に物質科学的知見を取り込むことができ，全球的な地質進化の解釈の飛躍的進展が期待できることである。

4.1.3 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複数のバンドパスフィルタによって分光し、CCDの素子上に焦点を結び結像させることによって定量的に輝度値を測定することがマルチバンド分光カメラシステムの基礎測定原理である。このとき、CCD面上にきた光量を絶対値として測定することを、第一の目標とする。しかし、大きさ、形状、鉱物組成が多様に変化する岩石が撮像対象になるため、撮像範囲の起伏の波長は、衛星軌道からのリモートセンシング観測の場合と比較して多様である。このため、絶対輝度値を測定して反射率を求めるよりも、校正標準を搭載し、標準からの相対反射率を求めた方が運用上効率的に撮像できると考えられる。また、定期的な標準の撮像により、長期運用における分光カメラのハードウェアについて経年劣化を把握することも重要である。

4.1.4 機能・性能

開発を検討している機器仕様を表4-1に示す。ランダ搭載のマルチバンド分光カメラシステムの性能において重要なのは、衛星軌道からの観測とは異なり、観測領域までの距離が大きく変化するため（ $\infty \sim 1\text{m}$ 程度）、レンズ系設計においては、被写界深度を大きくとることがポイントになる。焦点調節機構は可動部が必要となり、光学設計をより複雑にすることになるので、採用しない。至近距離からの高空間分解能での撮像を考えた場合、現在検討している 1024×1024 素子のCCDを用いると、最近接距離 1m 、画角 20° のとき $< 1\text{mm}$ の空間分解能が可能となる。この程度の空間分解能が達成されれば、岩石中に含まれる鉱物粒子の一つ一つの形状を十分に認識し、観察することができる。

撮像波長領域を可視域～比較的短波長の近赤外域に設定している。そのため撮像素子は民生品CCDを採用し、 $400\text{nm} \sim 1000\text{nm}$ 程度の波長域での撮像が可能とする。また、可視域CCDは、既製品で高画素数（＝高空間分解能）を達成しやすいことも、観測波長を可視域に設定する理由としてあげられる。このとき、マルチバンド分光カメラは、複数のバンドパスフィルタをフィルタホイールに装備し、フィルタホイールを回転させることによって観測波長を変化させながら撮像し、観察対象の分光スペクトルデータを得る。

4.1.5 観測シナリオ

まずランダシステムのチェックアウトが行われた後、マストの伸展および動作確認、マルチバンド分光カメラ含む観測機器システムの動作確認が行われる。手順としては、マスト展開の前にカメラも含めた観測機器の健全性確認を行う。正常な信号処理が確認された後に、マストを展開し、マストおよびジンバルの動作確認を行う。その後、マストのジンバルを稼働させつつ、マルチバンド分光カメラでの撮像を行い機能の確認を行う。確認後は、マルチバンド分光カメラの撮像可能領域内のランダ上に設置された校正ピースを撮像し、マルチバンド分光カメラの校正を施した後に、サイエンスデータとしての画像取得が行われる。

表 4-1 マルチバンド分光カメラ装置検討仕様 [マルチバンド分光カメラチーム 2011].

| 項目 | 仕様 | 備考 |
|--------|---|------------------------|
| 撮像範囲 | 1m~∞ | 焦点調節機構なし |
| 使用波長 | 415nm, 450nm, 500nm, 550nm, 600nm, 650nm, 700nm, 750nm, 800nm, 850nm, 900nm, 950nm, 1000nm, Wide-band filter, dark 用 non-filter スペース | Wide-band filter は双眼視用 |
| 波長反値幅 | 20nm 程度 | |
| F ナンバー | 15-20 程度 | |
| 撮像素子 | CCD (非冷却をノミナルとし, 熱設計の結果によってペルチェ冷却を検討する) | |
| 素子数 | 1024×1024 | |
| 素子サイズ | 13um | |
| FOV | 20°程度 | |
| 動作温度 | 0°C~50°C | |
| 空間分解能 | 1mm 以下 @_1m from target object | |
| 設置ジンバル | Elevation: +90°/-60°, Azimuth: ±170° | |

4.1.6 システム要求

(1) 軌道, 着陸地点, 運用期間など, 運用方法に関する項目

運用期間は昼間とする. 太陽高度の状況をもて, 最適な活動時間帯を設定する.

(2) 電氣的, 機械的, 熱的な条件に関わる項目

マルチバンドカメラを搭載するマストおよび水平, 垂直方向を可動にするジンバルの設置が必要である. ジンバルの可動範囲は, アジマス方向に±170°程度, エレベーション方向に+90°/-60°程度とする.

(3) EMC, コンタミ, 視野, 搭載方法, 設置条件, 擾乱の項目

搭載方法は, ランダにマストを設置して搭載する. マルチバンド分光カメラのレンズ系の位置が, 地面より 90 cm 程度の高さを確保できるようにする. 直径φ150mm 程度の校正板 (RGB に対応する反射率スペクトルが既知の校正板と 5 段階程度のグレースケール (反射率:90, 70, 50, 30, 10%程度, 詳細は TBD) の校正板で構成される) をランダ上面, マルチバンド分光カメラシステムの視野内に設置する.

4.1.7 開発課題と検証シナリオ

「かぐや」等の開発実績によりセンサ開発には大きなリスクは無い.

(1) 検出器性能を満たすための熱設計 (特に高温側)

月面からの赤外輻射, および太陽光入射を考慮して, CCD を動作温度 (最高 40°C) 以下で動作させるために, 放熱板の面積確保以外に, 形状等の工夫も必要となる可能性がある.