

B. ミッション提案

(B1) 提案タイトル

月面年代学シリーズ探査

(B2) 代表者（氏名・年齢・所属（連絡先））・惑星探査に係った経験があれば記載下さい。

諸田 智克（名古屋大学大学院環境学研究科 (morota@eps.nagoya-u.ac.jp) ・ SELENE/LISM, SELENE-2/ALIS)

(B3) 共同提案者（氏名・年齢・所属（連絡先））・惑星探査に係った経験があれば記載下さい。

渡邊 誠一郎（名古屋大学大学院環境学研究科 (seicoro@eps.nagoya-u.ac.jp)）

古本 宗充（名古屋大学大学院環境学研究科 (furumoto@eps.nagoya-u.ac.jp)）

本田 親寿（会津大学先端情報科学研究センター (chonda@u-aizu.ac.jp) ・ LUNAR-A, Hayabusa/AMICA, SELENE/LISM, Hayabusa2/NIRS3, SELENE-2/LUMI (PI)）

杉原 孝充（海洋研究開発機構地球深部探査センター (sugihararat@jamstec.go.jp) ・ SELENE/LISM/GRS, SELENE-2/LMUCS (PI)）

石原 吉明（国立天文台 RISE 月探査プロジェクト (ishihara@miz.nao.ac.jp) ・ SELENE/RSAT/VRAD/LALT）

大竹 真紀子（宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所 (ohtake.makiko@jaxa.jp) ・ SELENE/LISM (PI), SELENE-2/LUMI (PI)）

小林 直樹（宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所 (kobayashi.naoki@jaxa.jp) ・ LUNAR-A, SELENE-2/LBBS (PI)/Mission, InSight, Hayabusa2/Mission）

唐牛 譲（宇宙航空研究開発機構月・惑星探査プログラムグループ (karouji@planeta.sci.isas.jaxa.jp) ・ SELENE/GRS, SELENE-2/GNS, Hayabusa/curation）

荒井 朋子（千葉工業大学 PERC (tomoko.arai@it-chiba.ac.jp) ・ SELENE/LISM/GRS, SELENE-2/LIBS）

武田 弘（千葉工業大学 (takeda.hiroshi@it-chiba.ac.jp) ・ SELENE/LISM/GRS）

寺田 健太郎（広島大学大学院理学研究科 (terada@hiroshima-u.ac.jp)）

杉田 精司（東京大学新領域創成科学研究科 (sugita@k.u-tokyo.ac.jp) ・ SELENE/RSAT/VRAD, Hayabusa2/AMICA）

鎌田 俊一（東京大学理学系研究科 (kamata@astrobio.k.u-tokyo.ac.jp) ・ SELENE/RSAT/VRAD）

長 勇一郎（東京大学大学院理学系研究科 (cho@astrobio.k.u-tokyo.ac.jp) ・ SELENE/RSAT/VRAD）

三浦 弥生（東京大学地震研究所 (yayoi@eri.u-tokyo.ac.jp) ・ Hayabusa, Hayabusa2）

佐伯 和人（大阪大学大学院理学研究科 (ksaiki@ess.sci.osaka-u.ac.jp) ・ SELENE/LISM, SELENE-2/ALIS (PI)）

(B4) 提案するミッションの概要(A4 一枚以内)

■探査概要

ローバ搭載の LIBS-QMS システムを用いたその場 K-Ar 年代測定にもとづいて、月面の重要地域の年代を決定し、既存のリモートセンシングデータから計測されるクレータ統計情報と組み合わせることにより、太陽系内側におけるクレータ形成史の復元を目指すものである。搭載機器とその機能を絞り込むことで軽量化し、月面の複数箇所（3～4カ所）を調べるシリーズ探査とする。

■探査（着陸点）候補

後述の科学目標の達成の為に、以下の条件に合致した領域を着陸点とする。

- ・過去に探査経験のない1~30億年前、40億年以前の年代範囲に対応したクレータ数密度を持つ領域（2地点）
- ・月の地質学的進化史において年代情報が重要な意義を持つ領域（1~2地点）

上記条件に適した領域として、月面の現状理解に基づき、以下を着陸候補点にあげる（図1）。

(A) コペルニクスクレータ内部のインパクトメルトシート

(B) 月面で最も若い溶岩流（嵐の大洋・雨の海領域中心部の溶岩流）

(C) ネクタリス盆地のリム付近、または同等のクレータ数密度を持ち、フロアーが溶岩流に覆われていない衝突盆地の内部

■シリーズ化のイメージ

若い領域ほど、岩石固化後の衝突再加熱による Ar ロスの可能性や衝突によるミキシングの影響が低く、得られるデータの解釈がしやすいと考えられることから、第一弾の探査は上記候補地点の中で層序学的・クレータ年代学的に最も若い領域である (A) コペルニクスを探査地点とし、その場 K-Ar 分析装置の実証実験を兼ねた、地質探査・年代測定探査を行う。それらが実証された後、(B) 月面で最も若い溶岩流、(C) 衝突盆地の順で探査する。

■観測イメージの概要

ローバ搭載の分光カメラによる地質判読（岩石サイズ分布・組成などのマッピング）にもとづき、ローバ走行計画の立案・分析対象岩石の選定を行い、ロボットアームで試料を採取、研磨、サンプルチャンバーにセットし、LIBS-QMS システムで K-Ar 分析を行う。

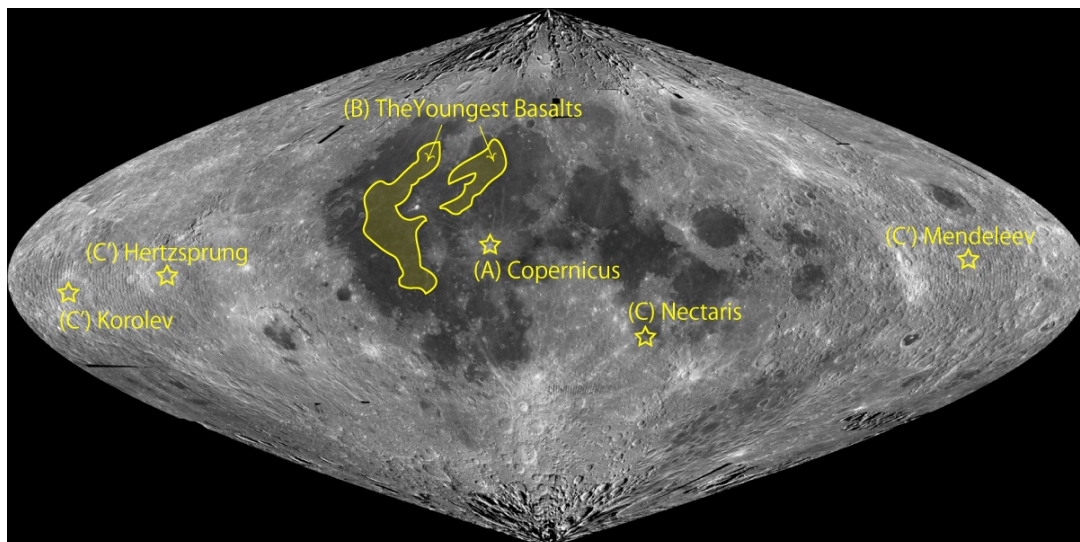


図1. 探査候補地点. (A) コペルニクスクレータ. (B) 月面で最も若い溶岩流. (C) ネクタリス盆地. (C') ネクタリス盆地に近いクレータ数密度をもつ衝突盆地.

(B5) ミッションの科学目標、および「惑星探査の長期的展望」に於ける本提案の位置づけ（第一段階パネル報告との関連が明らかになるように記述してください）

・・・第一段階パネル報告とつながらないものも排除しませんが、その場合は、独自の説明を加えてください。

・・・できれば「Minimum success、Nominal success、Maximum success」を分けて書けるなら書くことを推奨します。

■ミッションの科学目標

本ミッションでは、これまでに得られていない年代範囲の領域において、岩石試料の放射年代を決定し、画像データから計測されるクレータ数密度との対応付けにより、クレータ年代学関数の完成を目指す。それにより、

1. 天体衝突史の復元と太陽系小天体のサイズ分布進化・軌道進化を実証的に制約
 - a. 初期フラックス（後期重爆撃仮説の検証、巨大惑星の軌道進化への制約）
 - b. 過去 30 億年のフラックスの長期的変動 (NEOs 供給過程、供給ソースの規模の制約)

2. 月惑星表面年代決定手法（クレータ年代学）の確立と固体惑星進化履歴復元の高精度化を目指す。

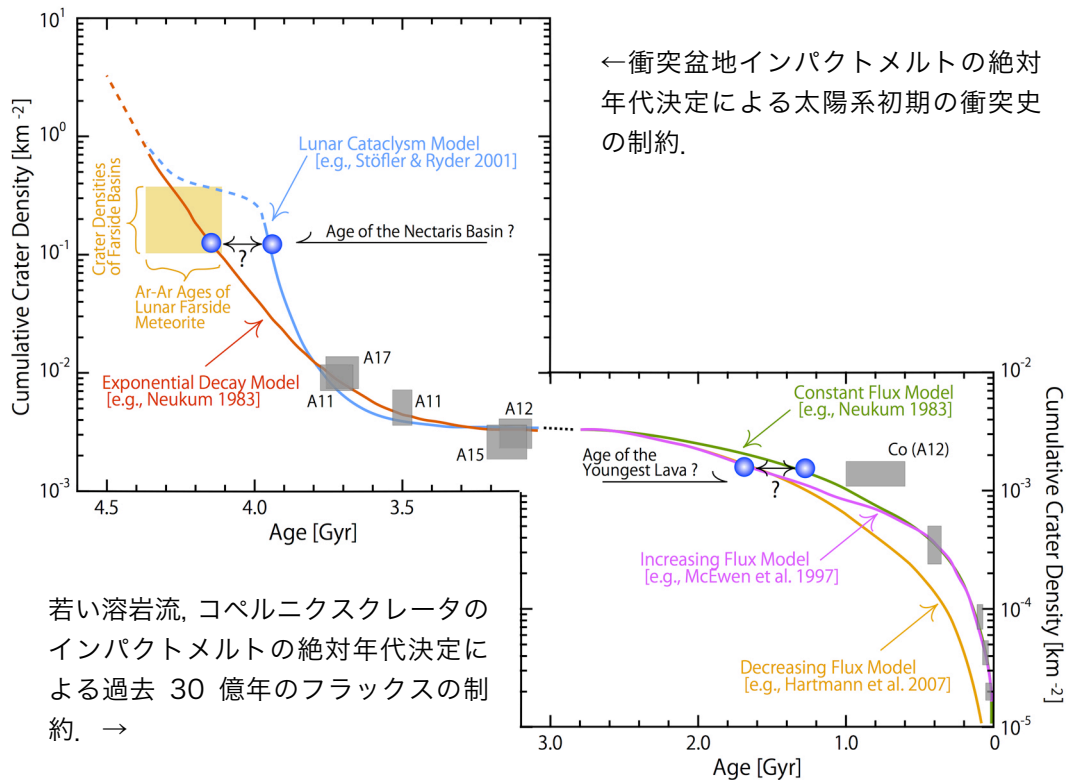


図2. クレータ年代学関数の現状の理解. アポロ・ルナ試料において, 放射年代と地質イベントの対応付けがなされているのは 30~39 億年前, 1 億年前~現在に限られている (灰色四角). 39 億年以前, 30~5 億年前の年代試料が得られれば (青丸), 天体衝突史の長期変動の理解は完成する.

■ 科学目標と意義の詳細

月面年代研究とクレータ記録研究の背景

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太陽系小天体の衝突破壊・合体, 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. 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2) [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いる. そのため, 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定性が大きい. 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.

天体衝突史における残された問題 1: 後期重爆撃仮説

未解決問題の一つは, 後期重爆撃 (Lunar Cataclysm) 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2）。

天体衝突史における残された問題2：過去30億年の衝突頻度の長期変化

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2） [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ことが重要である。

クレータ年代学への貢献

クレー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、クレータ年代学関数の不確定性のため、クレー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ータ密度の対応がとられ、クレータ年代学関数形状が決定されれば、クレー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、月のクレータ年代学関数はすべての固体天体で行われているクレー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。

着陸候補地点の放射年代の月科学への貢献

ここで提案しているコペルニクスクレータと若い溶岩流の年代測定そのものが月科学にとって重要な意義を持つことを付け加えておきたい。嵐の大洋中心部の溶岩流は月面で最も最近まで海の火山活動が続いていた領域であり [Morota et al., 2011; 諸田, 2011], その絶対年代の獲得は月の熱史を制約する上で重要なデータとなる。コペルニクスクレータ形成は月の地質区分を定義する重要イベントの一つであり、光条をもつ最も古いクレータである [e.g., Wilhelms, 1987]。月面で光条がどのように消失するか、つまりはどのように宇宙風化作用が進行するかに対して絶対的な時間軸をいれることができるという点で重要である。

Minimum success, Maximum success

(Minimum) 最初の探査地点において分光カメラを用いて角礫岩化していない岩石試料を発見し、LIBS-QMSにより K, Ar を定量する。(Maximum) 3地点の絶対年代の決定によりクレータ年代学関数を完成する。

■惑星探査の長期的展望に於ける本提案の位置づけ

科学的意義

本提案の重要性は、年代測定とクレータ記録を結びつけて、小天体・巨大惑星の軌道進化に制約を与え、現在の太陽系形成の描像を実証・検証することにより、惑星科学コミュニティ全体への波及効果は大きいと考える。同様な観点から、第一段階地球型惑星固体探査パネル報告でも固体天体の年代学とそれに基づく太陽系小天体の軌道進化史の解明は第一級科学の一つとしてあげられている。また、コペルニクスの年代測定の重要性は荒井ほか [2010] によって「第一段階地球型惑星固体探査パネルへの意見書」でも述べられている。

太陽系で起きた様々な現象の年代の理解、その時間関係から現象の相互関係・因果関係を整理していくことは太陽系形成の実証学そのものであり、将来の月惑星探査の柱となるべきテーマである。

本提案の月面年代学はその第一歩と位置づけられる。

小型・中型探査の意義

本提案の特徴は小型～中型（ここでは現在検討中の月面探査計画 SELENE-2 の半分程度の重量規模・予算規模を想定）のシリーズ探査を目指す点にある。現在、検討が進められている月探査 SELENE2 は大型多角的観測探査であるのに対して、惑星科学コミュニティにはそのような長周期・間欠的に成果がえられるものをサポートし続ける体力は十分でないように思われる。科学的成果の相乗効果や惑星探査の人材育成を効率的に進めるためにも、惑星探査の長期計画の中で大型探査、小型・中型探査を相補的に位置づける必要がある。

着陸探査とその場観測技術開発の意義

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。しかし着陸・サンプルリターン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り、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と言える。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、ここに述べた科学的意義を達成するためには、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する必要がある。この場合、試料の酸分解などを必要としない、40K の放射壊変による 40K-40Ar 系の年代測定法が候補として考えられるだろう。年代測定にはかなり精密な同位体比測定技術が必要となり、大きな課題である。しかし、その技術開発自体に、将来の惑星探査検討に対して大きな意義があることも考えられるべきであろう。上述したような十分絞られたサイエンスタージェットに的を絞り、かつ複数回のその場同位体比測定による年代推定ミッションの後に、同規模でのサンプルリターンミッションも視野に入れることによって、系統的な年代学的な理解が得られるだろう。

(B6) 搭載観測機器の候補、およびミッション科学目標との関係

■ LIBS-QMS システム

別途提案される「K-Ar 法を用いた月・火星探査車用その場年代計測装置（代表者：杉田 精司）」を年代測定装置として検討中。機器詳細は提案書を参照されたい。

■ 分光カメラ

SELENE2（プリプロジェクト）搭載予定のマルチバンド分光双眼カメラ（LMUCS）（または LMUCS から機能をしばったもの）を使用。

1. 観測計画立案のための広範囲の撮像と更に接近して高分解能で岩石の構造、組織を観測可能にする。
撮像範囲：1m~∞（2m の距離に最適化）
空間分解能：0.3mrad 程度（~0.3mm/pixel 程度@近点=~1m 程度）（TBD）
視差：~0.3m
Toe-in：~1°
マスト：地上高~90cm
2 軸ジンバル：Azm：±~180°，Elv：±90°
2. 複数のバンドパスフィルタによる可視-近赤外域の分光多色撮像（Si-CCD）を行い、構成鉱物同定する。
撮像バンド波長：415, 450, 500, 550, 600, 650, 700, 750, 800, 850, 900, 950, 1000nm（TBD）
波長分解能（バンドパスフィルタ半値幅）：20-40 nm 程度
3. 年代測定の対象となるインパクトメルト、玄武岩の選定を行う。
角礫岩になっていない、岩石組織が保存されている試料を選定する。

(B7) 科学目標の達成に必要な観測精度とカバレッジ（試料回収については取得すべき試料の条件）

■年代測定試料の条件

K-Ar 分析に適した試料は、

- (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

があげられる。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プ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]。また月面では太陽風による Ar の打ち込みがあるため、岩石内部を分析する必要がある。

■試料の選定方法・評価方法

上記の問題を可能な限り軽減するために、以下の工夫・対策をとる。

- (1) 衝突クレータ内部で形成されたインパクトメルトシート岩体や溶岩流から、ごく最近のクレータリングで掘削され、周囲に飛散した新鮮な岩石を分析する。
- (2) 分光カメラを用いて岩石試料中の鉱物を同定し、各コンポーネントの分析によりアイソクロンを引き、データの正当性を評価する。

(1)に関して、コペルニクスクレータのケースを図3に示す。コペルニクスクレータの場合、インパクトメルトシートの厚さは~200m 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 5m 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、(ア) コペルニクスのメルトシートの固化後に開始し、(イ) ごく最近のクレータ形成、掘削により一部リセット、(ウ) 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4)。

若い溶岩流や衝突盆地の年代決定を行う際にもこれと同様に、比較的最近になりクレータリングで露出した、溶岩流起源、インパクトメルトシート起源の岩塊を対象とすることで、地質ユニットとの対応付けができ、岩石固化後の衝突の影響が極力少ない (K-Ar リセットの可能性が極力少ない) 試料を選択的に分析することができる (ただし衝突盆地の場合はメルトシート、レゴリス層 (より若い盆地からのエジェクタ層) の厚さがそれぞれ 1 桁、2 桁異なる)。

(2) に関しては、試料を選別した画像と得られた同位体比やアイソクロンでの年代値を相互比較して、複数の (年代の) 物質の混合でないことを確認し、アイソクロンから推定される同位体比初性値を評価して、Ar の散逸の程度や初性 Ar 同位体比の起源を評価する。

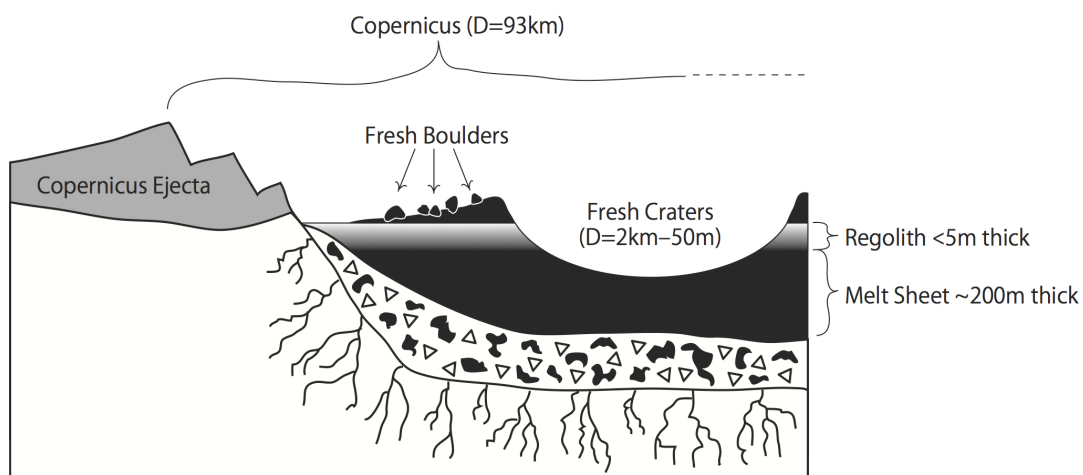


図3. 探査対象地域の例：コペルニクスクレータ内部の断面模式図。ごく最近のクレータ形成において掘り起こされたインパクトメルトシート起源の岩石はシンプルな衝突履歴をもつと考えられ、K-Ar 分析から得られる年代の解釈が容易であると期待できる。

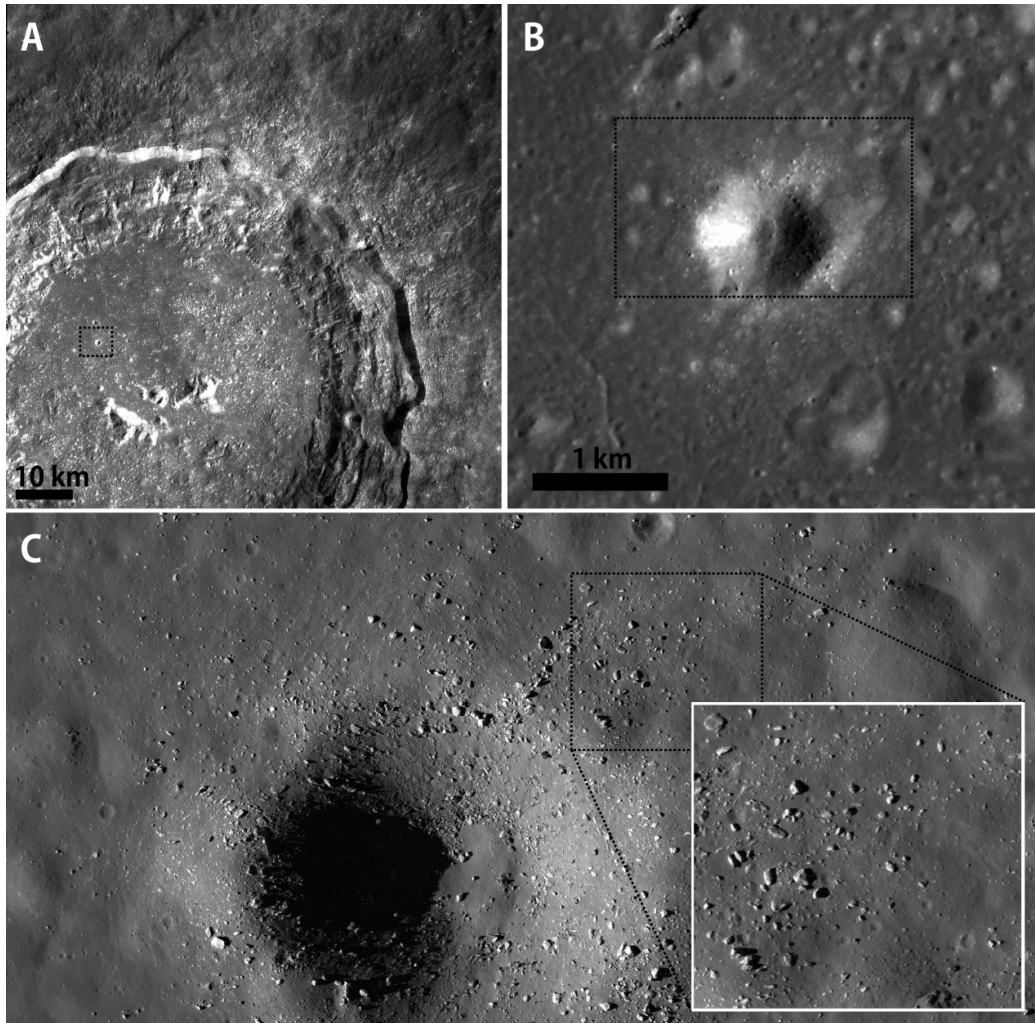


図4. 探査対象地域の例：コベルニクスクレータ内部の新鮮クレータ（D=950m）の例。(A) コベルニクスクレータのかぐや地形カメラモザイク画像。(B) コベルニクス内部の新鮮クレータ（(A)の破線領域）。(C) 同じ新鮮クレータのLRO画像（(B)の破線領域）。新鮮なクレータの周囲にはコベルニクス形成時につくられたインパクトメルトシート岩体を起源とする岩塊が露出している。

(B8) 想定する開発体制・・・メンバーリスト（役割と経験・能力(含む技能)）可能なメーカー

■LIBS-QMS システム

別提案「K-Ar 法を用いた月・火星探査車用その場年代計測装置（代表者：杉田 精司）」を参照

■分光カメラ（以下、SELENE2 搭載予定 LMUCS の開発体制）

PI：杉原 孝充

Sub-PI：大嶽 久志（JAXA）

検出器・光学系開発：小川 和律（JAXA），諸田 智克，横田 康弘（NIES）

搭載ソフトウェア開発，データ圧縮技術開発，解析ソフトウェア開発：成瀬 継太郎（会津大），寺園 順也（会津大），横田 康弘，小川 佳子（会津大）

駆動機構部，制御機能，電気系：國井 康晴（中央大），大槻（JAXA）

機器システム試験：荒井 朋子，出村 裕英（会津大），北里 宏平（会津大）

データ解析およびサイエンス：大竹 真紀子，佐伯 和人（大阪大），Colutis

衛星システムとのインタフェース，運用検討：大嶽 久志

(B9) 実現に向けて必要となる技術課題

可能であれば、以下も付して下さい。

- ・ これらを解決するまでに予想されるおおまかなスケジュール
- ・ これらを解決するまでに必要なおおまかな予算

■LIBS-QMS システム

別提案「K-Ar 法を用いた月・火星探査車用その場年代計測装置（代表者：杉田 精司）」を参照

■分光カメラ

- ・ 月面温度変化の中での光学系の変動
- ・ CCD ドライバ、画像処理電気系の排熱とローバシステム内での放熱

スケジュール

仕様決定：FY201

上記技術課題の検討：FY2013

PM 設計・試験：FY2014 (TBD)

ローバ搭載地上試験：FY2015

FM 設計：FY2016 (TBD)

FM 試験・システム総合試験：FY2016-2017 (TBD)

(B10) 参考文献提案書内容の根拠となる文献資料（論文・報告書など）で、パネラーが参照できるようなものがありましたら記載してください。

荒井朋子, 他, 2010, 月コペルニクスクレータのリターンサンプルの年代分析による太陽系相対年代学（クレータ年代学）の検証と確立, 「月惑星探査の来たる 10 年」 第一段階パネルへの意見書.

Cintala, M.J. and Grieve, R.A.F. 1998, Meteorit. Planet. Sci. 33, 889.

Culler, T.S., et al. 2000, Science 287, 1785.

Durda, D.D., et al., 1998, Icarus 135, 431.

Gomes, R., et al., 2005, Nature 435, 466.

Hartmann, W.K., 2007, Icarus, 186, 11.

McEwen, A.S. et al., 1997, J. Geophys. Res. 102, 9231.

Morota, T., et al., 2011, Earth Planet. Sci. Lett., 302, 255.

諸田智克, 2011, 遊星人, 20, 324 (印刷中).

Neukum, G., 1983, Meteoritenbombardement und Datierung planetarer Oberflächen (Munich: Ludwig-Maximilians-Univ.).

Norman, N.D., et al., 2006, Geochim. Cosmochim. Acta 70, 6032.

Stöffler, D. and Ryder, G., 2001, Space Sci. Rev. 96, 9.

Wilhelms, D.E. 1987, The geologic history of the Moon, U.S. Geol. Surv. Prof. Pap.

(以上)