

X線分光器、ガンマ線分光器、 分光カメラを用いた地質科学

SELENE-B ローバ サイエンス検討グループ

主メンバ 佐々木晶 (東大理)、久保田孝、岡田達明(宇宙研)、
佐伯和人 (秋田大工資)、武田弘(千葉工大)、
黒田洋司 (明治大理工)、國井康晴 (中央大理工)、
大竹真紀子、杉原孝充、平田成、比嘉道也、春山純一、金森洋史、
市川誠、佐々木建(宇宙開発事業団)、秋山演亮 (東大・理)、
柴村英道 (埼玉県大)、長谷部信行(早稲田大)、

SELENE計画(I, B, II, III...)の科学ターゲット

月の起源と進化のBig Pictureを作る

月の起源・進化に関わる重要なデータを与える未踏査地域の直接探査。 SELENEデータ⇒探査地点の最終候補設定・具体的な探査シナリオ策定

月面の地殻形成・火成活動の初期と最終段階が未解明

月の地下の初期地殻・マントル物質の探査

クレーター中央丘の物質を直接観測することで、地下物質の組成を同定し、マグマオーシャンからの成層構造形成モデルを制約できる。

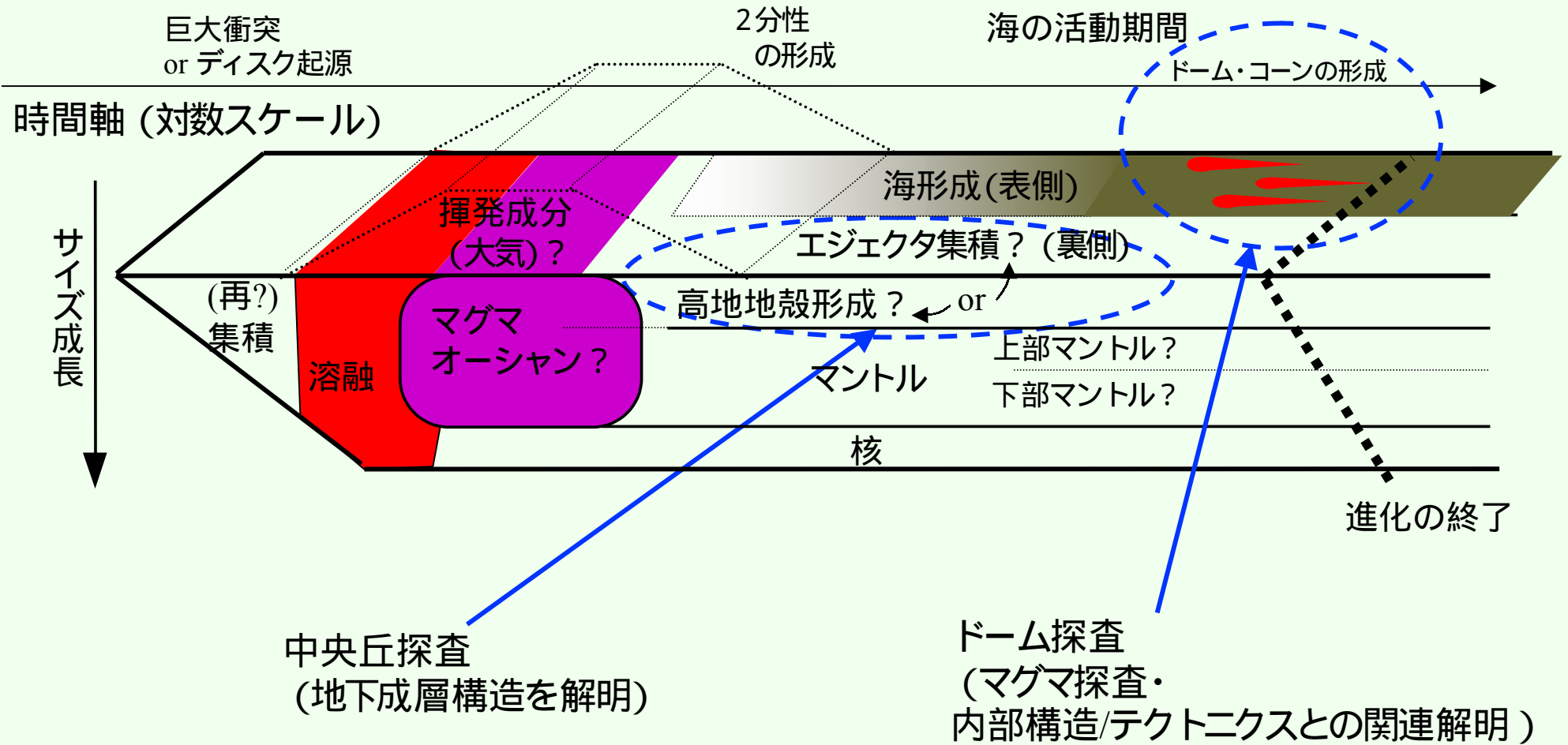
海地域の年代の新しい火山活動のスタイルの探査

海の玄武岩火成活動の後期には、ドーム・コーン等の火山体形成が進行した。これを調べれば、マグマ進化の最終段階の情報が得られる。

月の起源・進化のBig Picture

- 巨大衝突 ディスクからの月の形成 Hot Origin
- コア分離 マグマオーシャン
- 二分性の形成
 - 原始地殻がマグマオーシャンから分化して高地を形成？
 - 初期の衝突が主原因 (高地はエジェクタ集積)
クレータ中央丘の探査
=> 地下成層構造を解明して二分性の起源に迫る
- 海の形成、火山活動
 - 密度の高い海玄武岩の噴出機構は解明されていない
 - 海玄武岩の組成変化の原因、火山地形の成因は解明されていない
活動最終段階のドーム、コーンの観察
=> マグマ進化を解明

月の地質探査の位置付け



将来計画の中でのランダ・ローバ探査の位置づけ

着陸船ランダ探査

アーム等をつかい、周囲数m範囲のサンプル観察・分析は可能。
重量、サイズ、電力消費の大きな測定機器も搭載可能。
大量のデータ通信が可能。

ローバによる探査

広範囲の目標に対し、物質科学的特徴を知るための1次分析、サンプルの採取、観測機器の運搬・設置が可能。(着陸船では1地点のみ)
着陸船探査や有人探査が困難な地域(影、急傾斜地)の探査が可能。

月・惑星探査の将来ビジョンではサンプルリターンは重要な目標となる。その基礎技術としてもローバは不可欠である。特に月面では、着陸船で周囲の岩石・ソイルを採取しただけでは科学的に意味のあるサンプルを取得することは難しい。

ランダ・ローバの協調探査シナリオ

ターゲットに接近した着陸が可能な場合

- ローバは、ランダから数10m-数100m以内、長くても1km以内のターゲットまで往復し、サンプルを採取・帰還。
- ランダでサンプルの詳細分析。

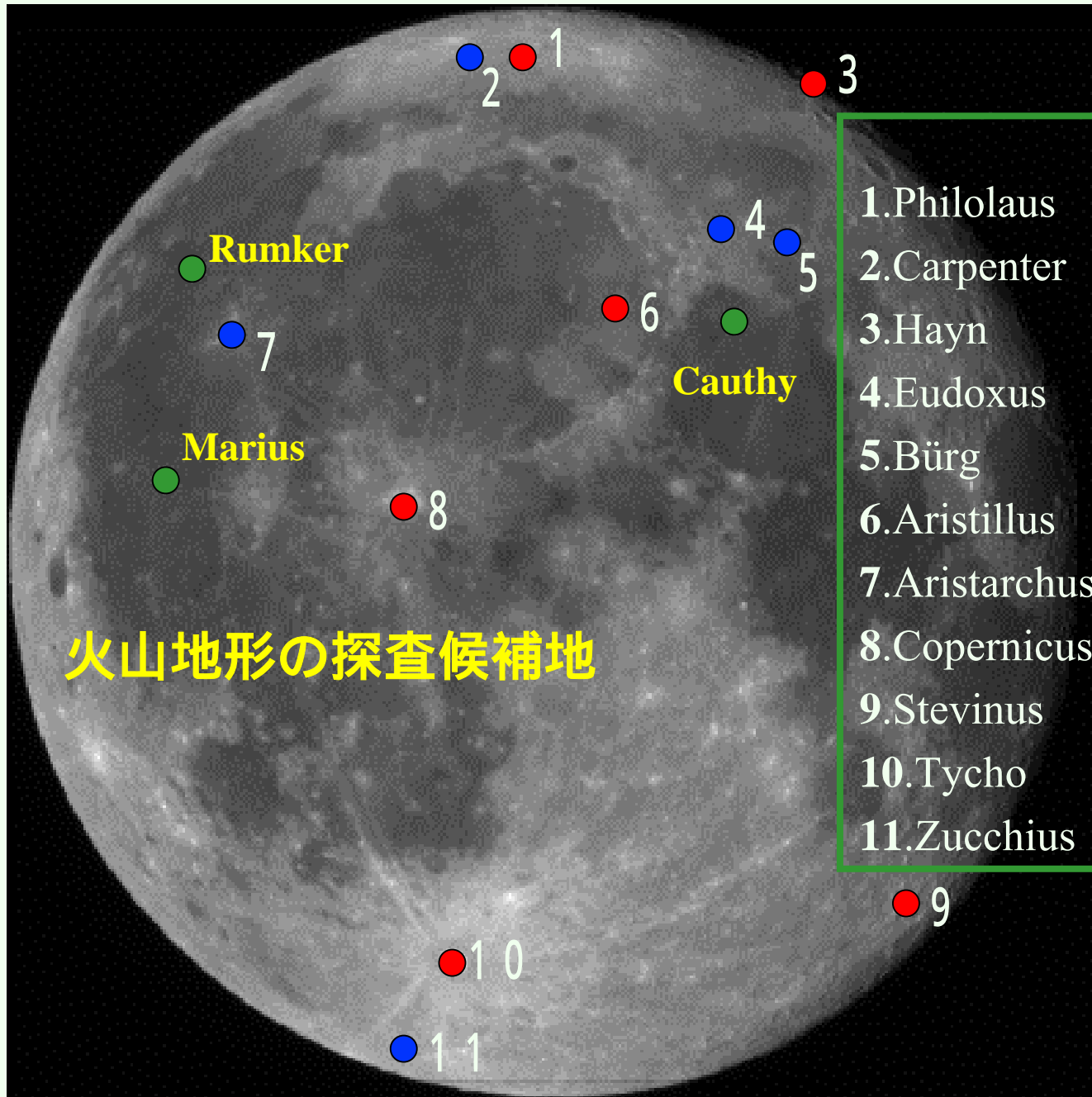
- 利点 ローバの軽量・省電力化が可能

- ローバ 分光カメラ、AXS(X線分光)、ガンマ線分光
 サンプル採取・運搬

- ランダ 岩石切断・研磨装置、カメラ付アーム、
 ミクロカメラ、AXS、[X線回折・質量分析]

探査候補地点

月の表側の中央丘 探査候補地



火山地形の探査候補地

- 1. Philolaus
- 2. Carpenter
- 3. Hayn
- 4. Eudoxus
- 5. Bürg
- 6. Aristillus
- 7. Aristarchus
- 8. Copernicus
- 9. Stevinus
- 10. Tycho
- 11. Zucchius

直径(km)	緯度	経度
71	72.5°N	327.5°
60	70.0°N	309.5°
87	64.5°N	84°
67	57.5°N	16.5°
40	45.5°N	28.5°
55	34.0°N	1.5°
40	23.5°N	312.5°
98	10.0°N	340°
75	33.0°S	54.5°
85	43.0°S	349°
64	61.0°S	310°

北から順番

赤: 直径70km以上

青: 直径70km未満

月のクレータ中央丘探査

意義・成果

クレータ生成時のリバウンドで中央丘は形成。
直径40～180kmのクレータの中央丘には、地下5～30kmの物質が掘り出されている。

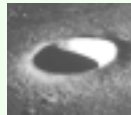
中央丘探査の主な目的

- (1) 中央丘物質の岩石組織、化学組成の測定から、月地殻の深部構造を知る。
- (2) クレータ内部の岩石分布から、中央丘形成メカニズムを解明し、中央丘岩石の深度推定の精度を上げる。

この探査により、月の初期地殻進化モデルに大きな制約条件を与える事ができる。これまで中央丘の直接探査は無い。

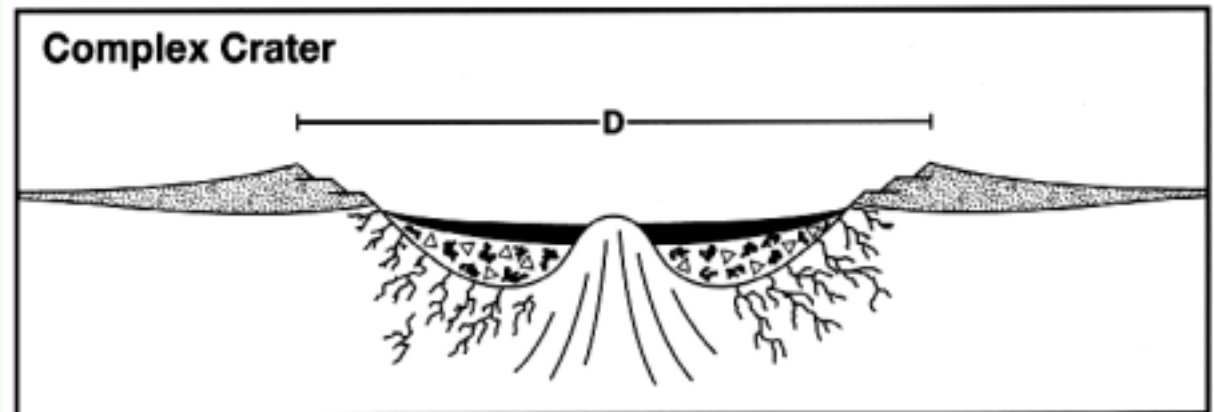
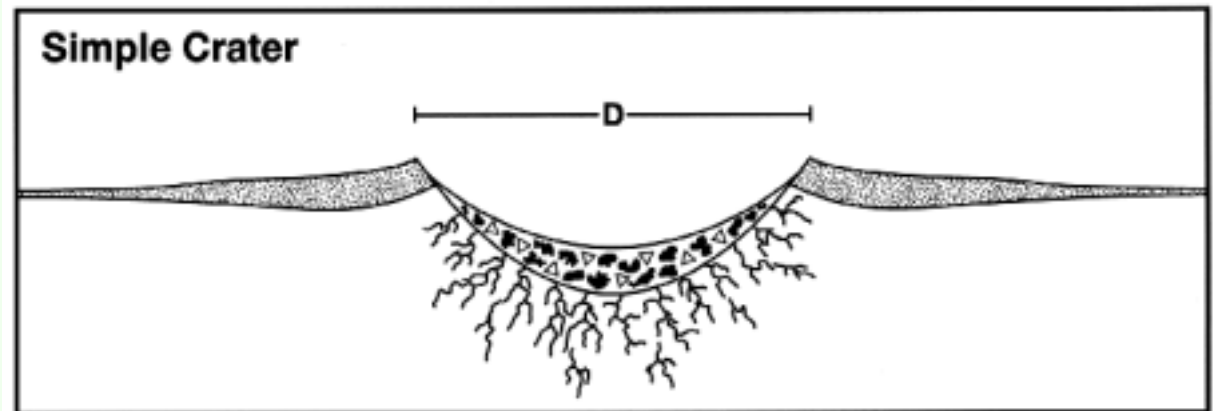
クレータ形成と中央丘

- 単純クレータ
おわん型



平底型

- 中央丘クレータ
リバウンドで下層物質が上昇・露出



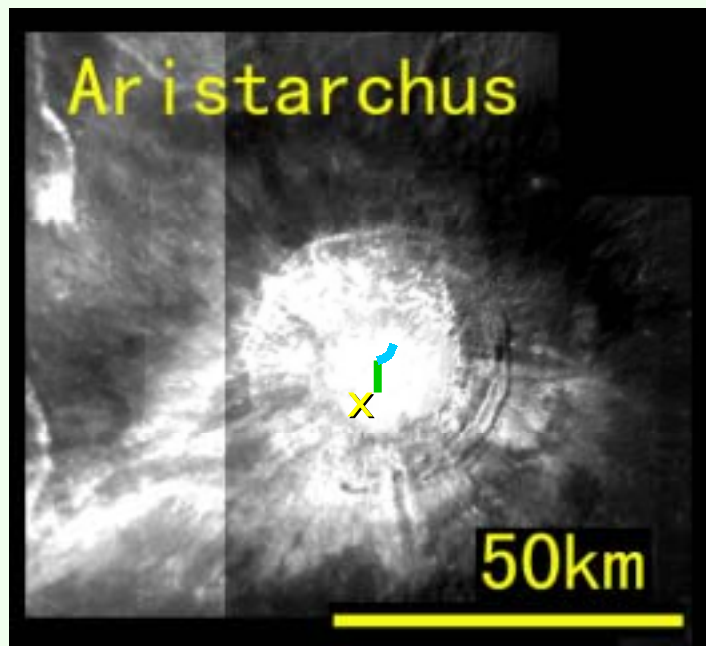
月のクレータ中央丘探査：中央丘より落下した岩石を調べる！

探査候補 7: Aristarchus(23.5°N,47.5°W、直径40km)

研究が進んでいる嵐の大洋の溶岩を掘り起こしているため、表層物質の混入割合が判定しやすく、クレータ形成メカニズムの解明に有利。

探査候補 8: Copernicus(10.0°N,340°W、直径98km)

赤道近くの年代の新しい大きなクレータ。クレメンタインのデータからマントル物質を代表するカンラン石が中央丘に露出していると考えられる。



X: Landing site

1. 中央丘に近い(500m以内)クレータ底に着陸。
2. 中央丘・側壁を遠方より分光撮像を行う。
3. 中央丘の麓へ進み、分光撮像と線観測を行い、高空間分解能で化学組成の分布を調べる。
4. 岩石、レゴリスを採取。ランダに帰還し、画像分光、X線分光計で岩石組織、化学組成を分析。
5. **オプション1**: 中央丘に接近後に、中央丘斜面を登り中央丘の構成岩石を詳しく調査する。
6. **オプション2**: 中央丘に接近後に、中央丘を迂回し組成の異なる岩石の観察・採取を行う。

月の火山性地形(ドーム、コーン)探査

意義・成果

海の火成活動の後期に形成された、ドーム・コーン等の火山地形について直接探査を行い実体を明らかにする。

ドームの分布は、月地殻・マントルの大局構造に関係している可能性が高い。円形・楕円形で、直径3～17km 高さは数100m以下。斜度は数度のものが多い。周囲の海の溶岩流と比較したときの組成：同じか異なる(分化した)か？ 一回の噴出なのか、複数回の噴出もしくは火山体を形成しているか？ 地下にマグマリザーバーが存在することができたかどうか

コーンの形態はスコリア丘に似ている。スコリアは多孔質玄武岩の「黒い軽石」で噴水のように火山弾を噴き上げるストロンボリ式噴火で形成。

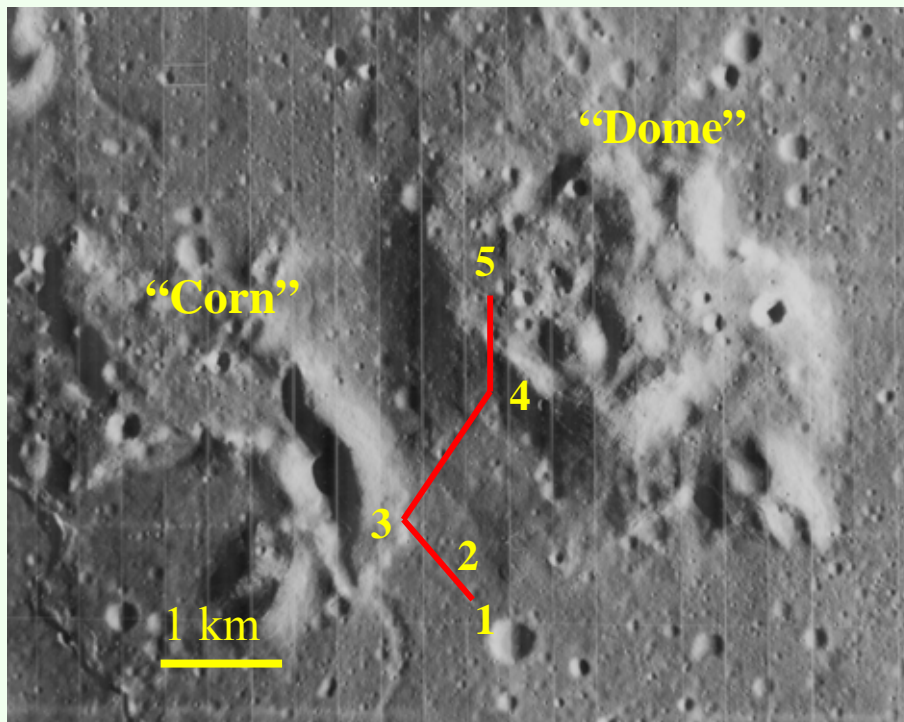
月の重力は地球の1/6、大気が無い。スコリア丘はより平坦になる。

月に本当にスコリアが存在するのか？ マグマ中のC(グラファイト)がCOに酸化され、ある圧力を境に急激に発泡が開始する。また真空中のため、気泡は膨張し破碎が進む。スコリアではなく、ガラス球の「丘」が存在？

月の火山性地形(ドーム、コーン) 探査

候補地: マリウス丘群 (Marius hills) - 比較的小規模な(数km ~ 十数km)ドーム、コーンの集合体。他地域の大型ドームよりも接近や山体の全体像把握がしやすい。

探査シナリオ



1. コーンとドームが隣接する、着陸しやすい地域にランダを着陸させる。
2. コーンについて遠景から分光撮像
3. ローバでコーンに接近。その過程で随時分光撮像する。山体構成物質および基盤岩との関係を分光観察する。岩石の画像分光・X線分析も行う
4. ドームに接近・観測する。複数の溶岩流より構成されている場合は、斜面を登り上位のユニットを観察。ドームもしくはコーンのみの観測の場合は、ランダに帰還して物質分析。

月のクレータ中央丘探査 および 火山性地形探査

ランダへの要求項目

中央丘もしくは火山の麓から500m以内の平坦地に着陸

周囲を多波長で撮像するカメラ

X線分光(回折)装置(岩石研磨装置・顕微分光装置)の搭載、ローバからの試料受け渡し

ローバへの要求項目

数バンドの分光カメラ, 線分光, X線分光計の搭載

数100m 最長数kmの走破性能

サンプル採取・運搬機構

岩石表面のレゴリスの除去

表面の直接探査、地質調査の必要性

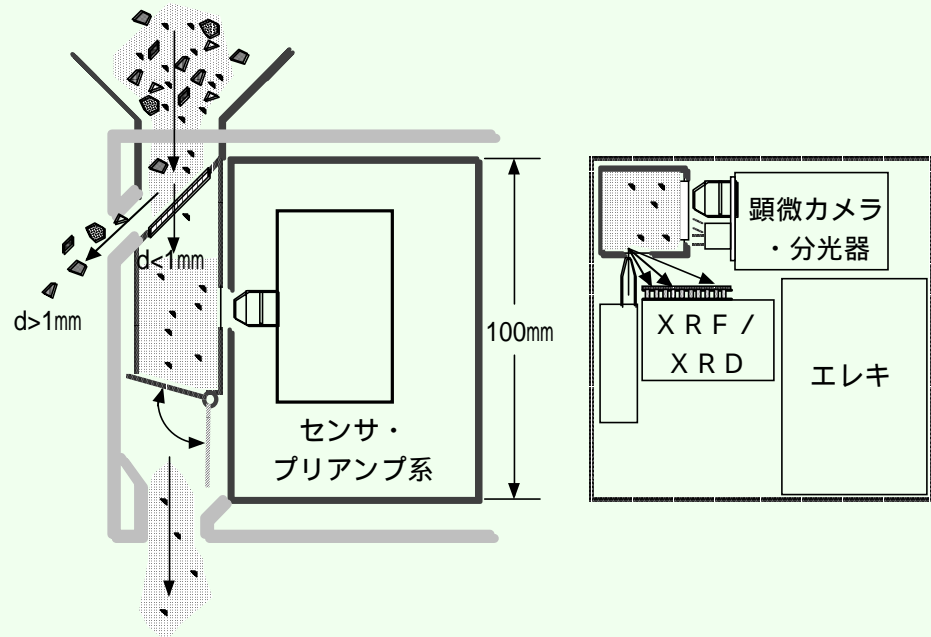
- 個々の岩石単位、鉱物単位の撮像・分光観察が重要
 - リモセンでは不可能な分解能
 - 宇宙風化作用を受けた表層を除去した観察
- リモセンの - X線分光の解像度では火山や中央丘分析は困難。
 - 分化したマグマ K, U, Thが濃集、Si多
- 一カ所の観察だと不十分
 - 中央丘やドームそのものに着陸するのは困難
 - ローバ移動観測で異なる種類の岩石を観察可能
- ドーム、コーンの観察ではリモセンより細かな分解能(1m以下)が地形観察でも必要。特に溶岩の形態の観察

搭載科学機器

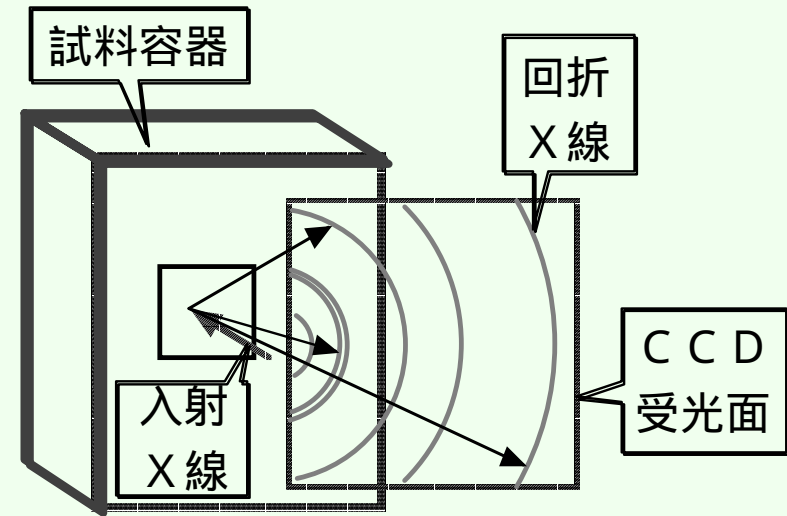
- 分光カメラ(マクロ) 探査地域の地形・鉱物組成
- 分光カメラ(ミクロ) 岩石の組織・鉱物組合せ
 - 個々の岩石は様々な岩片の衝突混合物である可能性が高い
- X線分光 主要元素組成
- X線回折 鉱物組成
- ガンマ線分光 K, U, Th量、主要元素

- 質量分析 主要元素、微量元素、同位体、年代
 - 月では現在の技術では揮発性物質を除き容易ではない
- 磁力計、電波サウンダ、熱流量計、地震計
 - 地質探査・組成解明という目的とは外れる

X線分光(回折)



- ランダ搭載地質鉱物探査システムのセンサ部。サイズは100mmの立方体程度。25mm径の試料ホルダーに試料を挿入し、顕微分光カメラで光学的観察・計測、XRF/XRDで元素組成と鉱物組成を調べる。



X線蛍光・回折分析器(XRF/XRD)の概念図。X線用CCDを蛍光X線のエネルギー波高分析、および背面反射法による回折X線の回折パターンの画像取得に用いて、採取試料の主要元素組成、鉱物組成を調べる。

ローバ搭載 線分光器

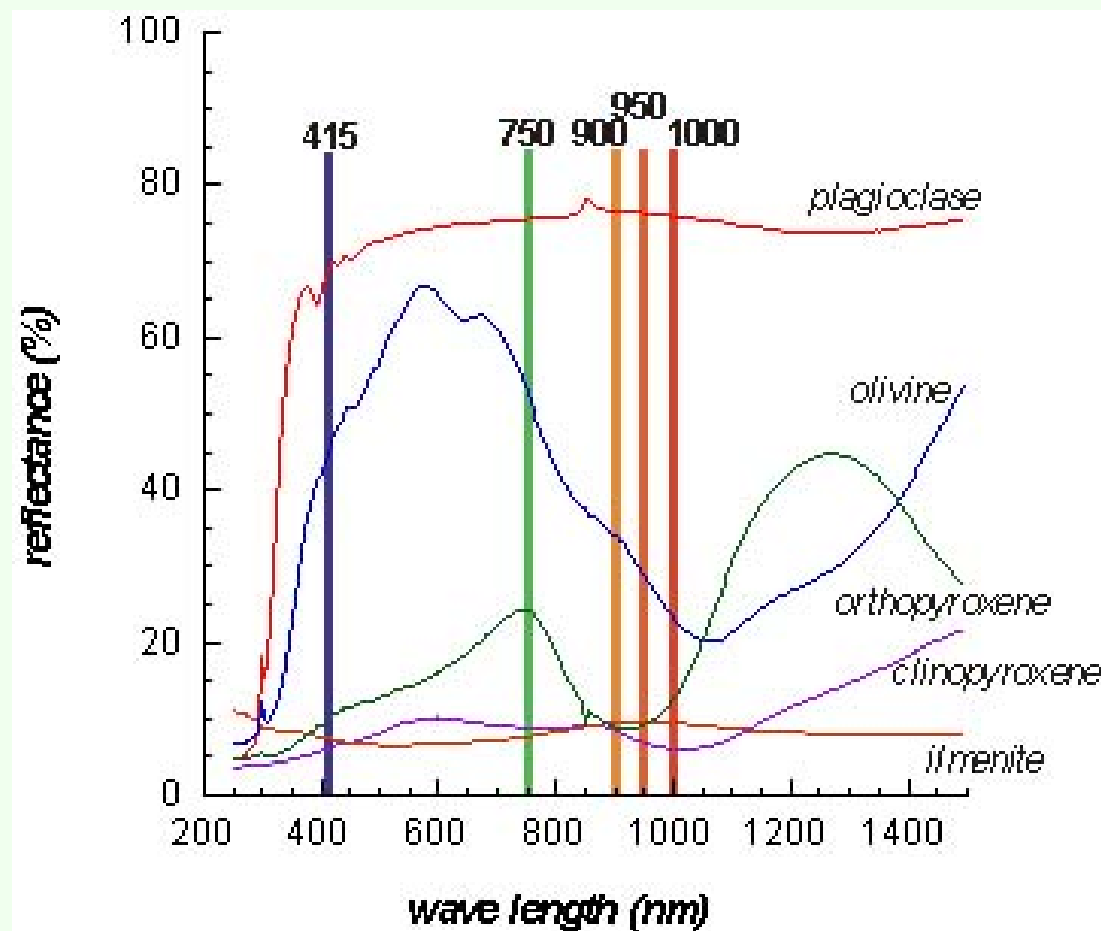
- 目的 K, U, Thの同定
- NaI(Tl) CsI(Tl)シンチレータ+ フォトマル
CdTe、CdZnTe半導体検出器 冷却不要
- 3MeVまで 検出器のサイズ 15 ~ 20mm
表層のレゴリスにセンサーを押し込むことで宇宙線ノイズを除去
- 機器重量 < 2kg
センサ部: 500 g(プリアンプ込み +500g?)
高圧電源: 250 g(回路・取付部含む。1.5kV級)
エレキ: (500g)共通可能な部分は他機器と共有
- 8MeVまで測定すれば 主要元素も測定可能
- 課題 機器の冷却

分光カメラ

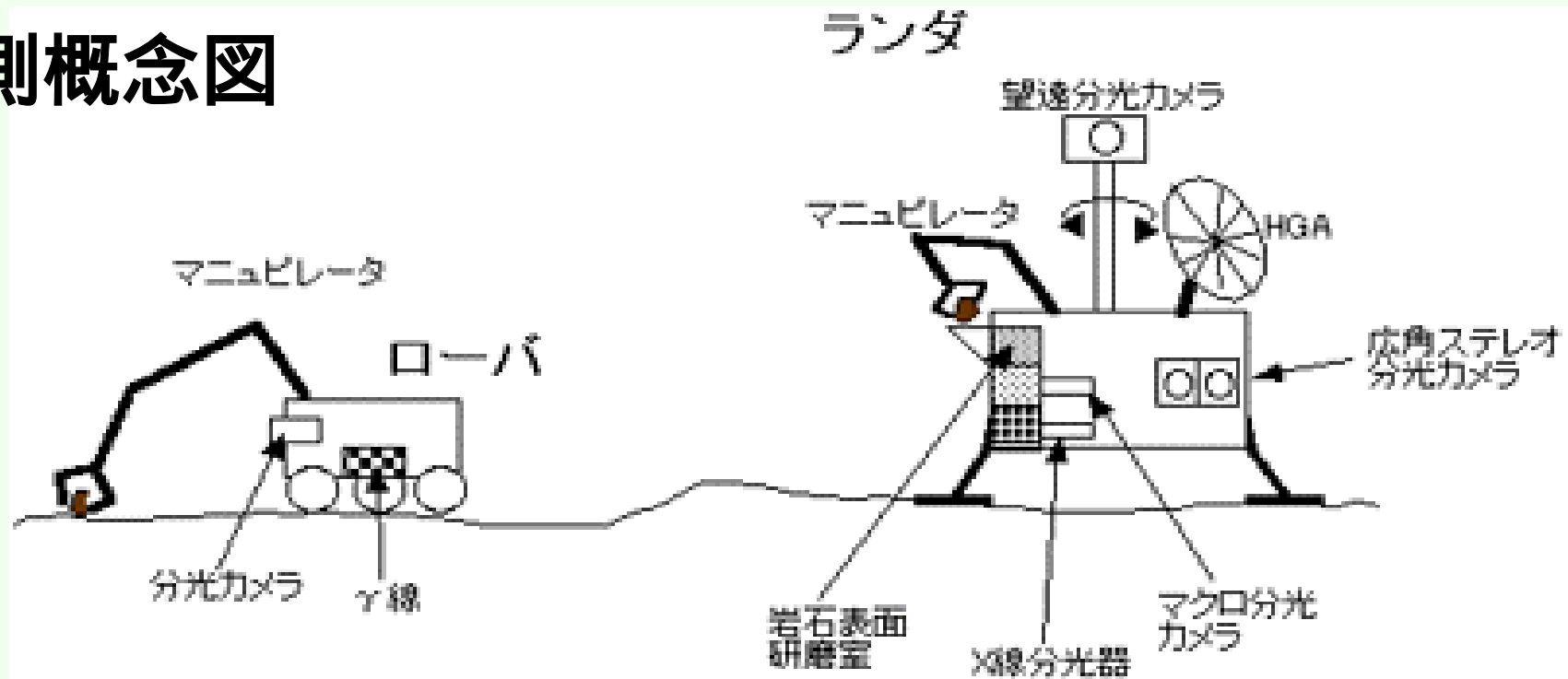
- 分光装置の使用が考えられているのは以下の3機器
 - ランダ搭載望遠/広角カメラ ローバの探査経路決定、露頭分光調査
必要バンド数:全体で数バンド マルチバンド分光が必要
 - ローバ搭載広角カメラ サンプルの選別
必要バンド数:全体で数バンド マルチバンド分光が必要
 - ランダ搭載マクロカメラ 岩石の詳細調査
必要バンド数: 1サンプルにつき数バンド 連続分光装置が必要
(サンプル毎にこのバンドは変わるため、全体では数十バンド必要)
- MUSES-C等で利用されている、バンドパスフィルター&フィルターホイールの組み合わせによる分光装置 (例MUSES-C:AMICA)
 - に關してはこのタイプが使用可能 軽量化1-2kg可能
- AOTF等の連続分光装置をマルチバンド的に利用
 - a) 受光部側に連続分光装置を取り付ける
 - b) 光源側に連続分光装置を取り付ける軽量化・感度が課題

分光測定による鉱物分析の原理

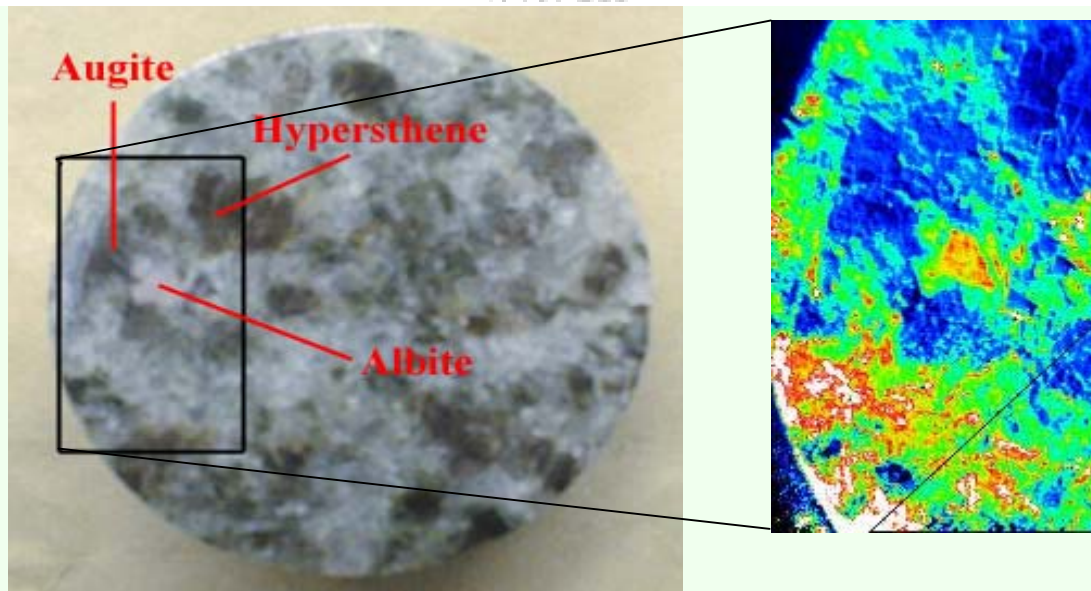
- 基本的な鉱物種の判別、宇宙風化度には5-6バンドは必要
- さらにFe、Ca含有量、鉱物混合比の見積には必要バンドは変化・増加



観測概念図



AOTF分光カメラ (マクロ/広角用)



岩石表面の分光観測例(750nm/590nm)

開発項目・課題

- ローバ

踏破性能の高い5輪ローバ(MICRO-5)開発。カメラ付アーム搭載。
月面仕様の設計が課題(真空、熱、重力、電力、通信、搭載機器)

- 観測機器

現段階でフィジビリティが高いのは、フィルター付きカメラ
連続分光、線分光は小型化、省電力化が課題

着陸船でのX線分光は、開発可能(SELENEでリモセン機器)
X線回折は開発要素あり

AOTFを用いた岩石切断面の連続分光試験 進行中

– 搭載機器として開発要素はあるが、鉱物同定には有効であることを確認

岩石切断・研磨機構、サンプリング機構 現在検討中