

特集「月惑星探査の来たる10年：第二段階のまとめ」

その場年代計測装置による月惑星年代学探査

長 勇一郎¹, 諸田 智克², 三浦 弥生³, 亀田 真吾⁴, 吉岡 和夫⁵,
 岡崎 隆司⁶, 並木 則行⁷, 荒井 朋子⁷, 小林 正規⁷, 石橋 高⁷,
 大野 宗祐⁷, 千秋 博紀⁷, 和田 浩二⁷, 橋 省吾⁸, 渡邊 誠一郎²,
 古本 宗充², 本田 親寿⁹, 杉原 孝充¹⁰, 石原 吉明¹¹, 大竹 真紀子⁵,
 小林 直樹⁵, 唐牛 譲⁵, 武田 弘¹², 寺田 健太郎¹³, 鎌田 俊一¹,
 佐伯 和人¹³, 小林 進悟¹⁴, 國井 康晴¹⁵, 大槻 真嗣⁵, 杉田 精司^{1,16}

2012年7月4日受領, 2012年7月27日受理.

(要旨) 月面クレータ記録とアポロ試料の年代測定結果との対応付けによって, クレータ年代学という絶対年代計測の手段が獲得され, 我々は太陽系内側部における天体衝突史や月惑星表面上で生じたさまざまな現象を時間軸の目盛り入りで理解するに至っている. しかし太陽系の年代学には未だ大きな不確定性があり, 後期重爆撃期や巨大惑星大移動の有無, 火星絶対年代スケールの獲得などが重要問題として残されている. 将来の月惑星着陸探査によってこれらを解決し, 太陽系進化の描像をより具体的に得ることは今後の重要な科学目標である. 我々は, 今後10年の惑星探査に不可欠な手段と考えられる「その場年代計測装置」の開発と, それを月探査に応用したミッション提案を行ってきた. 本稿では着陸探査による年代計測の科学的重要性, 装置開発の進捗状況と現状の問題点, 及びミッション提案の概要について説明する.

1. 月惑星年代学探査の提案

日本における今後の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. 惑星科学が目指す一つのゴールは, 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. 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.

ここで述べられる提案内容は, 来る10年活動においてそれぞれ「K-Ar法を用いた月・火星着陸探査用その場年代計測装置」提案と「月面年代学シリーズ探査」提案として別々に提案されたものである. しかし, 両提案の科学的意義は月惑星年代学の推進という点で共通しており, また, 後者の実現性は前者の開発状況に強く依存していることから, 本稿では両者を一本化し提案することとした.

1. 東京大学理学系研究科
2. 名古屋大学
3. 東京大学地震研究所
4. 立教大学理学部
5. 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所
6. 九州大学理学府
7. 千葉工業大学 PERC
8. 北海道大学
9. 会津大学先端情報科学研究センター
10. 海洋研究開発機構地球深部探査センター
11. 国立環境研究所
12. 千葉工業大学フォーラム研究
13. 大阪大学大学院理学研究科
14. 放射線医学総合研究所
15. 中央大学理工学部
16. 東京大学新領域創成科学研究科
cho@astrobio.k.u-tokyo.ac.jp

2. 月惑星年代学における現状の問題点と科学的意義

月惑星年代学の歴史はクレータ年代学の歴史と言い換えても過言ではない. 月や火星は太陽系内側部における天体衝突の良い記録媒体であり, 特に月面では太陽系初期から現在までの衝突履歴がほぼ完全に保存さ

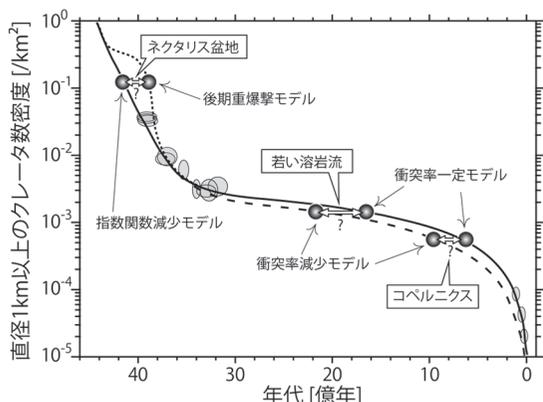


図1：月面のクレータ年代学関数。灰色の楕円はアポロ・ルナ試料の放射年代とクレータ数密度の関係を示す。

れている。月ではアポロ・ルナ計画で持ち帰られた岩石試料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いる（この関係をクレータ年代学関数と呼ぶ）[1]。それにより、太陽系内側における天体衝突史の復元と、クレータ数密度計測にもとづく年代測定手法（クレータ年代学）の構築が行われ、太陽系小天体の衝突破壊・軌道進化史や月惑星表面の地質進化史に関しての多くの知見が得られている。

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、1億年よりも若いクレータに限られているため、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大きな不確実性が残されている（図1）。例えば20億年付近に年代を持つ領域の場合、用いる年代学関数によって得られる年代に6億年以上の差異が生じる。また、月以外では火星起源と考えられる隕石が発見されているが、これらの隕石の結晶化年代が火星のどの地質ユニットの年代を反映しているのかは明らかでなく、試料の絶対年代と地質イベントとの対応は取れていない。このように月惑星の年代学における時間軸は確立されたとは言いがたいのが現状であり、今後の探査によって月面における未取得年代範囲の試料と各惑星（特に火星）の試料を獲得し、表層進化史に時間軸を入れることは最重要課題である。以下では、3つの主要な問題に着目し、絶対年代を獲得することの意義を概説する。

2.1 40億年以前の衝突史

月における40億年以前の試料採取の意義は後期重爆撃仮説の検証にある。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になった時期があったと考えている。これは後期重爆撃仮説と呼ばれる[2]。一方、アポロ試料は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にすぎない、という反対意見もある。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、その原因はこれまで太陽系規模の軌道進化の枠組みの中で議論されてきた。例えばGomes et al. [3]は太陽系初期の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。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、月科学における最優先課題の一つである。これを検証するためには、ネクタリス盆地などの古い衝突盆地の年代を決定することで、40億年前以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（4.2節参照）。

2.2 過去30億年の衝突フラックス

太陽系内側の衝突フラックスに関するもう一つの問題は、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、約30億年前から現在にかけて天体衝突頻度が1/3程度減少した可能性を示唆する[4]。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、月面におけるクレータ生成率はおおよそ一定であったと解釈されている[1]。35億年前以前の大規模なクレータ形成期が終了した後の衝突フラックスの変動は、地球近傍天体（NEOs）供給過程とNEOsソースの規模の時間変化を制約するために重要な情報となる。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ることが重要である。そのような地点としては、コペルニクスクレータや月面で最も若い溶岩流が挙げられる（4.2節参照）。

2.3 火星の絶対年代

火星表面の年代推定に用いる年代学関数は、上述し

た月の年代学関数をベースとし、重力効果や衝突天体の軌道要素・衝突確率の違いに対する解析的研究[e.g., 5]に立脚して推定されている。そのため、火星のクレータ年代学にはモデルに応じて10億年もの不定性があることが指摘されており、火成活動や気候の進化を考える上で大きな不確定要素となっている[6]。今後の探査によってクレータ数密度が明らかな地点に着陸機を降ろし、その地質ユニットを代表すると判断できる岩石の年代を相対誤差数10%以内で計測することができれば、定量的な火星史の議論を開始することが可能となる。また、火星試料に絶対的時間軸を付与することは、火星と月の天体衝突率の直接比較を可能とし、太陽系内側における衝突天体のソースの制約に重要な役割を果たす。

3. 惑星探査による岩石固化年代の その場計測

3.1 年代その場計測の意義

以上のような重要問題を解決するためには、対象天体に着陸して地質ユニットの年代を反映する岩石の絶対年代を計測することが必要不可欠である。これらの問題を最終決着するには、地球へのサンプルリターンによる正確・精密な年代計測が必要だろう。しかし、サンプルリターン探査は技術的・コスト的に大きな困難を伴う上に、いざその場で地質ユニットの年代を反映する最適試料を一発必中で選別するのは至難の業である。一方、年代のその場計測が実現すれば、試料を複数個採取した上での繰り返し計測ができ、年代データの吟味が可能となる。サンプルリターンミッションの際に地球で詳細計測をする価値がある試料の選定を行うことも期待できる。

3.2 K-Ar法によるその場年代測定

そこで我々は、K-Ar法と呼ばれる年代測定法を用いて、惑星着陸探査によって岩石の固化年代をその場計測する装置の開発を進めている。K-Ar法とは、カリウムの放射性同位体である ^{40}K が ^{40}Ar に放射壊変する現象(^{40}K の半減期 = 12.5億年)を利用して岩石の固化年代を推定する方法である。K-Ar法には後述するArのロスなどの問題点があるが、他の年代測定法に比べて岩石中の親核種の存在度が高いことや希ガスで

あるArの測定が比較的簡便であることなどから、技術的には大きな優位性がある。一方、Rb-Sr法やSm-Nd法は、測定対象となる元素の存在度が非常に少ない上に化学処理が必要であるため、測定手順が複雑で装置も大型化してしまい、探査機に搭載するには技術的困難が大きい。また、Ar-Ar法は試料への中性子照射によって ^{39}K を ^{39}Ar に変換して同時に質量分析器で計測する。そのため精度を高めやすく、Arロスの評価も行うことができるという利点があるが、現在のところ探査対象天体上で中性子照射を行うことは技術的に難しい。

K-Ar法によるその場年代計測の計画は欧米のミッションでも提案されてきたが、未だに実現はされていない。2003年に打ち上げられたESAのMars Expressにランダーとして搭載されていたBeagle 2においては、X線蛍光法によるKのバルク計測と、700℃～1100℃の高温炉によって試料から抽出するArの磁場型質量分析計による計測とを組み合わせた年代計測が計画されていたものの[7]、火星投入時に通信が途絶した。また、2012年8月に火星に着陸したNASAの巨大ローバMars Science Laboratory (MSL)においては、後述するLIBSによりKをバルク測定し、高温炉によってArを抽出することで年代計測を行うオペレーションが予定されている。しかしながら、この方法には、鉱物中のArの拡散係数を考えると高温炉ではArを全て抽出できない可能性があること、全岩分析では後述する過剰Arの寄与を評価できないこと、といった問題点がある[8]。

一方我々の提案する年代計測装置は、高エネルギー密度のレーザーパルスを試料に照射することで直下点をプラズマ化してKとArを同時に抽出し、Kをレーザー誘起プラズマ分光法(Laser-induced breakdown spectroscopy; LIBS)によって、Arを四重極質量分析計(Quadrupole Mass Spectrometer)によって定量する(LIBS-QMS法)。本手法ではレーザーによる高空間分解能のスポット分析(レーザーのスポット径～数百 μm)が可能で、岩石の同一部分についてKとArを測定することになるため、岩石内のK・Ar分布の不均一性に左右されずに計測できる。また、試料はレーザーによって瞬間的には10000 K以上に加熱されるため、照射点直下に含まれるArは全て放出されることが期待される。さらに、1つの岩石試料に対して複数

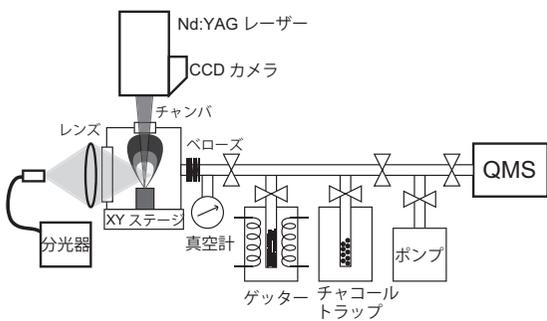


図2：LIBS-QMSシステムの概念図。

の鉱物の計測を行うことが可能となるため、アイソクロン法による計測が期待できる。これは従来の提案法(全岩分析)では不可能であり、年代計測の精度と確度を格段に向上できるメリットを持つ。

3.3 年代計測装置の開発状況

我々は上述のK-Ar年代計測の実現性を検証するため、原理実証用の装置を製作した。これは、試料を導入する真空チャンバー、LIBS測定のためのレーザー・分光器、放出されたArを測定するQMS、放出されたガスを精製するTi-Zr getter、Arより重い希ガスを回収するチャコールトラップ、および装置全体を高真空に保つための真空ポンプから構成される(図2)。なお、月探査の場合には真空ポンプが不要となるためリソースの大幅な節約が可能となる。以下では、本装置を使い得られたK検量線と年代既知試料の分析結果について述べる。

(1) LIBSによるK計測モデルの構築

LIBSによるKの定量は、K濃度が既知の試料にレーザーを照射してスペクトルを取得し、そのシステムに固有のK濃度-K輝線強度関係を予め較正しておくことによって行う。較正試料には、岩石標準試料粉末を高圧プレスによって押し固めたペレットを用いた。レーザーはNd:YAGレーザー(波長1064 nm, パルス幅6 ns, パルスエネルギー100 mJ, スポット径500 μm)を用いた。レーザープラズマからの発光はレンズによって集められ、光ファイバを通じて分光器(Ocean Photonics HR2000+)へ導入された。プラズマの発光開始前から分光器のシャッターを開き、1

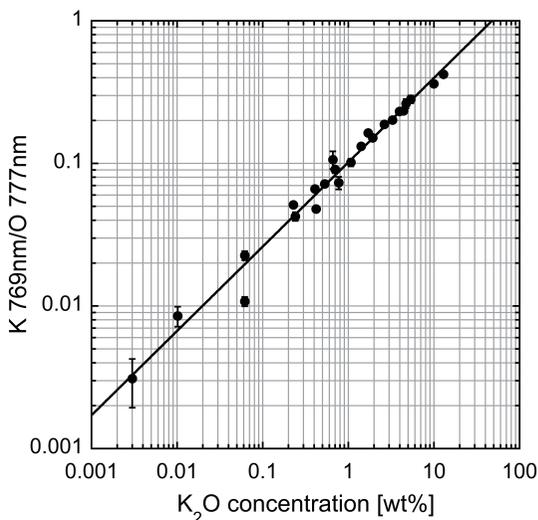


図3：試料のK₂O濃度と輝線強度との関係。K輝線の強度は酸素輝線の強度で規格化した。

msecに渡って時間積分した発光を取得した。図3に、K濃度とK輝線の強度との関係を示す。発光輝線の絶対強度は、レーザーエネルギーの変動や表面状態の変化、光学系の透過率等の諸要因によって変動しうるため、これを検量モデルに用いるのは定量の不確かさを増加させる。そこで、岩石試料に普遍的に存在する酸素原子の呈する輝線(777 nm)の強度でK輝線(769 nm)の強度を規格化してこれらの影響を取り除く。Kの最も強い輝線は766.4 nmに存在するが、今回用いた分光器の分解能では分離不可能な波長にMgの輝線が重なってしまっているため用いていない。縦軸のエラーバーは、一つの試料につき計測した4点の標準偏差である。各データ点を冪関数でフィッティングして検量線とした。

(2) 年代標準試料の計測

K量、Ar量の感度較正が済んだ段階で、年代既知の試料の計測を試みた。試料は鉱物分離されたHornblende(K₂O=0.93 wt%, age=1.74 Ga)を高圧プレスによってペレット状に成型したものを用いた。試料表面に吸着した大気を取り除くため、真空中で180℃・24時間のベーキングを行った。レーザーを試料へ500回(20 Hz×25秒)照射して試料のLIBSスペクトルを取得した(図4)。真空ライン内でgetterを用い、レーザー照射によって放出された気体から活性ガスを

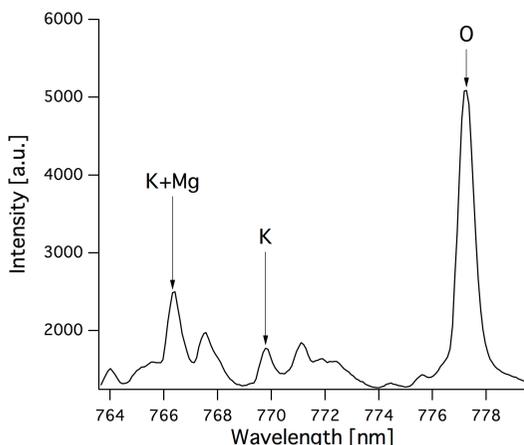


図4：年代標準試料(Hornblende)のLIBSスペクトル。

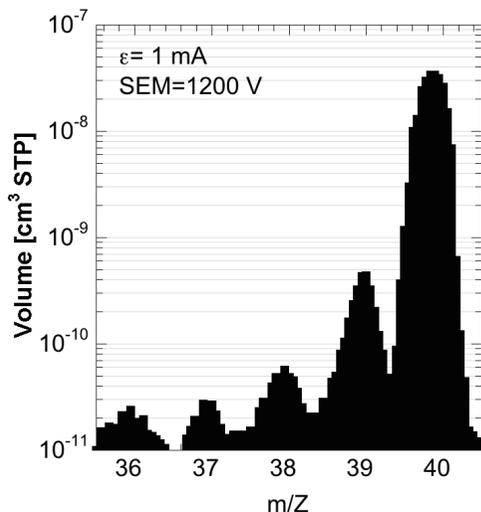


図5：年代標準試料から放出されたガスのマススペクトル(質量数36から40まで)。Arの安定同位体は質量数36, 38, 40に存在する。

除去した後に、液体窒素で冷却したチャコルトラップによってArより重い希ガスを回収した。一旦ラインを排気した後再度ラインを閉鎖系にし、トラップを加熱して放出させたAr等をQMSへと導入して質量分析を行った。図5にAr周辺のマススペクトルを示す。Arの安定同位体は質量数36, 38, 40をもつ。質量数37と39のピークは炭化水素である。大気Arの³⁸Ar/³⁶Ar比は0.188であるが、分析試料の38/36比はそれより高く、38の大部分は炭化水素であると考えられる。質量数36についても、残留ガスのマススペクトルからArと炭化水素の混合であると推測される。

まず、LIBS計測で得られた発光スペクトルを検量モデルに当てはめ、K₂O=1.0±0.2 wt%を得た。これは0.93 wt%と誤差の範囲で一致する。さらに、レーザーによって放出されたKの絶対量(mol)を見積もるために、試料が掘削された体積を顕微鏡観察によって計測した。レーザークレータの体積が(4.4±0.5)×10⁵ cm³であったことと、Hornblendeの密度として3.2±0.3 g/cm³を仮定することで、レーザーによって掘削された試料の質量を(1.4±0.2)×10⁴ g、その中のK原子の数を(3.0±0.6)×10⁸ molと推定した。

一方、放出されたガスのQMSスペクトルから、放出された⁴⁰Arのうち、放射壊変起源の⁴⁰Arは(2.9±0.6)×10⁸ [cm³ STP]=(1.3±0.3)×10¹² [mol]であると見積もった(STP: 標準温度圧力)。このとき大気混入の寄与は、地球大気中の同位体比⁴⁰Ar/³⁶Ar=296を用いて、

$$[{}^{40}\text{Ar}]_{\text{rad}} = [{}^{40}\text{Ar}]_{\text{total}} - [{}^{40}\text{Ar}]_{\text{atm}} = [{}^{40}\text{Ar}]_{\text{total}} - 296 [{}^{36}\text{Ar}]$$

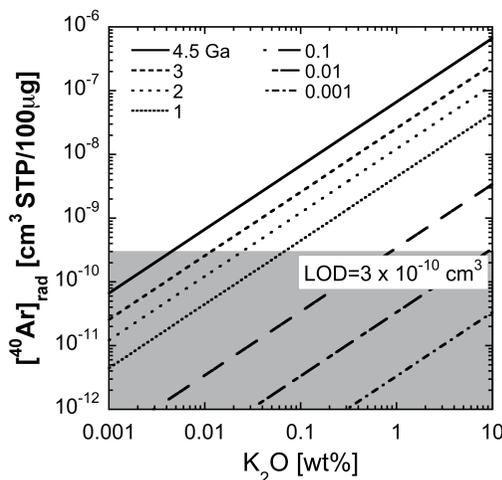


図6：ある年代とK濃度を持つ試料を100µg(500-1000パルスに相当)溶融させた際に放出される⁴⁰Ar量。検出限界(3×10⁻¹⁰ cm³)よりも上の白い背景の領域が現状で検出可能な領域を表す。

により差し引いた。質量数36には炭化水素も含まれているため⁴⁰Ar_{atm}量を過剰に見積もることになるが、今回の試料では⁴⁰Ar_{rad}量が相対的に多いためその影響は分析誤差の範囲に収まる。なお、QMSのArに対する感度は既知量のArをシステムに導入することによって事前に校正している。

Arの検出限界は装置の残留ガス量(バックグラウン

ド)に制約されている。現在のシステムでは ^{36}Ar 、 ^{40}Ar に対してそれぞれ $1 \times 10^{11} \text{ cm}^3 \text{ STP}$ 、 $3 \times 10^{10} \text{ cm}^3 \text{ STP}$ であった。この値を用いることで、数百回~1000回程程度のレーザー照射を行って $100 \mu\text{g}$ の試料を蒸発させたときに放出されるArから、計測可能な岩石のK濃度とその年代との関係を見積もることが出来る。現状の ^{40}Ar 検出限界では、例えば10億年以上の年代をもつ岩石が検出限界を超える量の放射起源 ^{40}Ar を持つために必要な K_2O 濃度は数百ppmである(図6)。

今回はK量が均質な試料を用いておりアイソクロンを引くことはできないため、以下のモデル年代式によって年代値を算出する。

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \left(\frac{\lambda}{\lambda_e} \frac{[^{40}\text{Ar}]_{\text{rad}}}{[^{40}\text{K}]} + 1 \right)$$

ここで $\lambda (=5.543 \times 10^{10} \text{ yr}^{-1})$ は ^{40}K の壊変定数、 $\lambda_e (=0.581 \times 10^{10} \text{ yr}^{-1})$ は ^{40}K の ^{40}Ar への壊変定数を表す(^{40}K は10.5%が ^{40}Ar に、89.5%が ^{40}Ca に壊変する[9])。 $[^{40}\text{Ar}]_{\text{rad}}$ は放射起源 ^{40}Ar 量、 $[^{40}\text{K}]$ は現在の ^{40}K 量を表す。

今回の測定値を年代算出式に代入すると、 $t=2.7 \pm 0.5 \text{ Ga}$ という値が得られた。LIBSとQMSを組み合わせた本手法のような計測法によってK・Arが同時計測された例は未だかつて無く、具体的な年代値の算出は、我々が知る限りこれが初めての試みである。試料の年代値(推奨値)は1.74 Gaであるので、現状では約60%の相対誤差がある。これは、Kに対して ^{40}Ar が期待される量の1.8倍放出されたことを示唆している。今回の分析における ^{40}Ar 過大評価の要因は、レーザーによって掘削されたクレータの壁面が加熱されることによるArの拡散放出、Ar検出感度較正のずれ、およびK絶対量を求めるために用いた掘削体積の見積もりの誤差などが考えられる。これらの誤差を小さくするために、レーザー照射周波数を現状の20Hzから下げることによる試料への熱の蓄積の抑制、感度較正実験の見直しを現在行っている。第三の要因についても確認実験を進めるが、実際の探査では年代既知試料を較正試料とすることで掘削体積の値を年代計算に使用しない計測手法を開発予定である。すなわち、既知のAr/K比(年代)を持つ試料を複数測定して、 $[^{40}\text{Ar}]_{\text{電流値}}(\text{QMS})/[^{40}\text{K}]_{\text{輝線強度}}(\text{LIBS})$ の値の較正線を描くという方法である。本結果はLIBS-QMS法を用いた最初の年代計測結果であるため、現状での年代測定値の精度・確度は必ずしも満足出来るものではない。しか

し具体的な年代値の算出によって、上述したような今後の改善の方向性が明らかになったと言える。

また装置の重量については、現在のところ比較的高エネルギーのレーザー、商用クラスのQMSおよび分光器を用いているため総重量は100 kg以上ある。但し重量の大部分は汎用的なレーザー68 kg(ヘッド24 kg、電源・冷却ユニット44 kg)と一般的な真空ポンプ37 kg(ターボ分子ポンプ11 kg、ロータリーポンプ26 kg)が占めている。残りはQMS 3.8 kg(分析管+コントローラ)、分光器(0.57 kg)、真空配管・ヒータ(数kg)、光学系(約1 kg)である。現状ではこのように市販の機器を組み合わせた装置を用いてLIBS-QMS法という新手法の実現に向けた実証実験を進めている段階である。今後、装置をK-Ar年代計測に特化させ小型化できる余地は充分にあるが、試料採取ロボットなども含めた具体的な設計は今後の課題である。SELENE2以降のローバに搭載することを想定し、惑星探査機への搭載実績のある小型レーザー(2 kg)、分光器(約500 g)、QMS(1 kg)、小型化した真空システムなどによりトータルで10 kg程度まで軽量化することを目標としている。大気を排気する必要がない月探査では真空ポンプを搭載する必要がなく、より軽量の測器となる見込みである。

3.4 試料選定

K-Ar法はその性質上、(1)試料の二次的変成や衝突脱ガスによるArのロス(年代値の若返り)、(2)大気起源・マントル起源・太陽風の打ち込みなどに由来する非放射壊変 ^{40}Ar の寄与(年代値の過大評価)といったことが問題となり得る。意味ある年代値を求めるためには、試料の採取地点の特徴や岩石組織、鉱物観察などを多角的に用いて予め問題のある試料を避けることと、試料の妥当性を測定によって評価できることが必要である。以下では探査において考慮すべき項目を列挙する。月面での試料選定については4.3節において述べる。

火星探査において問題になると考えられるのは、大気やマントル由来の過剰 ^{40}Ar である。火星隕石の一種であるShergottiteには、マントルに含まれていた ^{40}Ar が溶岩噴出時に脱ガスせずそのまま閉じ込められたと考えられる過剰 ^{40}Ar が広く見られる[e.g., 10]。ただしその量は $1.2 \times 10^6 \text{ cm}^3 \text{ STP/g}$ 程度であるため、K

量が多く年代値が古い試料の場合には寄与は小さいと期待できる。いずれにせよ、複数試料の分析とアイソクロン法に基づいてこれらの影響を評価することが重要である。なお、火星探査において高精度のアイソクロンを引くためには、長石系のKに富む鉱物を計測する必要がある。そのため顕微分光カメラなどを用いた鉱物の判別が必須である。火星試料について10%の精度で年代を決定できるアイソクロンを引くためには、KおよびArの定量誤差を10%としたときに、4倍程度のK濃度範囲をもつ鉱物を約10点計測することが必要だと見積もられている[8]。

また火星には大気が存在するので、試料への大気成分の混入も考慮する必要がある。現在の火星大気には $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}=1700\text{-}1800$ 程度の同位体比を持つArが存在しているが[11]、火星表層の大気圧は地球の100分の1程度と比較的低く、火星隕石の中では衝撃を受けてガラス化した部分に存在するのみである。そのため、火星上では衝撃による岩石組織のガラス化と大気の溶け込みが生じていない試料を注意深く採取すれば、大気混入は大きな問題にならないかもしれない。

また、水質変成が起きている可能性が高い堆積岩地帯ではK-Ar年代計測の適用が難しいだろう。そのため、Noachianの古いユニットを計測する場合には、流水による変成や衝突脱ガスを受けていないと判断できる着陸地点を慎重に探す必要がある。一方で、乾燥寒冷気候が卓越し天体衝突の影響も少ないAmazonianのユニットの計測であれば、二次的変成の影響は比較的小さいと期待できる。いずれの場合においても、岩石の表面数mmを覆う風化層を計測前に除去することは必須である。

4. 月面年代学探査

4.1 探査の概要

ここでは月面のクレータ年代学関数の完成に向けたミッション提案を行う。本ミッションでは、ローバ搭載のLIBS-QMSシステムによるその場K-Ar年代測定装置を用いて月面の重要地域の年代決定を行うことを念頭に置く。搭載機器を絞り込むことで軽量化し、月面の重要な地域を複数回に分けて調べるシリーズ探査とする。さらにサンプルリターン探査も視野に入れる

ことで系統的な年代学的理解を得ることを目指す。

4.2 探査候補地点とシリーズ化の戦略

2節で述べた科学目標の達成のために以下の条件に合致した領域を着陸点とする(図7)。

- (1) 過去に探査経験がなく、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) 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。

これらの条件に適した領域として、月面の年代学的・地質学的な現状理解に基づいて以下を着陸候補点に挙げる。

- (A) コペルニクスクレータ内部
- (B) 月面で最も若い溶岩流(嵐の大洋・雨の海領域中心部)
- (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。

(A)、(B)の領域は1~30億年、(C)の領域は40億年かそれ以前の年代に対応したクレータ数密度を持つ領域であり、着陸点の条件(1)を満たす。また、(A)、(C)領域の形成は月の地質区分を定義する重要イベントであるため、条件(2)を満たしている。(B)は最も長い期間、海の火山活動が続いていた領域であり、その絶対年代の獲得は月の熱史を制約する上で重要であるため探査地点として提案する。

一般に、月面上の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混合の影響が小さく、得られるデータの解釈がしやすいと考えられる。そのため第一弾の探査は上記候補地点の中で層序学的に最も若い領域であるコペルニクス(A)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。その際に、その場K-Ar分析からArロスの無いと思われる試料、すなわちより古い年代を示す試料を選別してサンプルリターンを行う。持ち帰った試料について、Ar-Ar法など他の手法を用いてより正確な年代測定を行うとともに、その場K-Ar分析の有効性を検証する。その場年代計測の有効性が実証された後、月面で最も若い溶岩流(B)、衝突盆地(C)の順で探査を行う。

2節で重要問題として挙げた後期重爆撃の検証・過

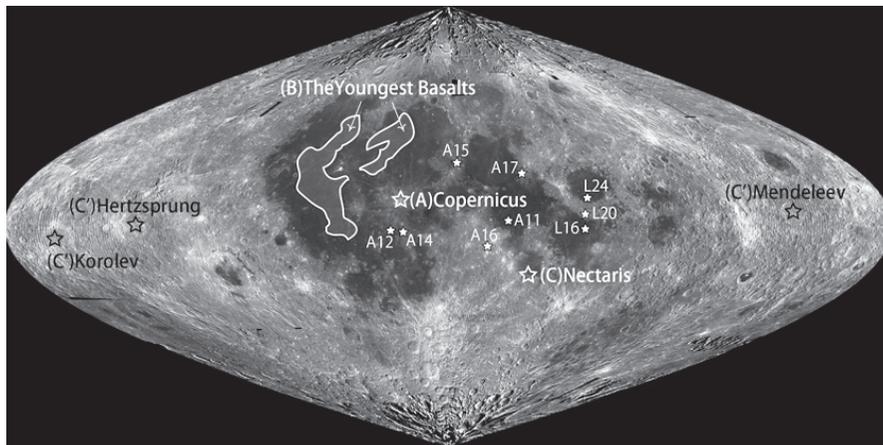


図7：探査候補地点。(A)コペルニクスクレータ。(B)月面で最も若い溶岩流。(C)ネクタリス盆地。(C)はネクタリス盆地に近いクレータ数密度をもつ衝突盆地を示す。A, Lはアポロ・ルナ試料の採取地点を表す。

去30億年のフラックスの時間変動の検出には、ともに1億年程度の誤差(2.5~5%の精度)での年代推定が必要である。一方でその場K-Ar年代計測法の現在の目標誤差は10%であり、科学目標に対する要求精度を満たしていないが、多数の岩石を分析することで年代の頻度分布を求め、得られた年代データがどのモデルに整合的かを統計的に議論することを目指す。ただし、鉱物アイソクロン法による測定精度は試料中のK含有量の不均質性(変動幅)にも依存し、また、分析した岩石がArロスを経験していないとは限らない。そのため、分析に必要となる岩石数を見積もることは容易ではなく、今後の検討課題である。

4.3 年代測定試料の条件・選定方法

K-Ar分析に適した試料の条件として、(a)地質ユニットとの対応付けが可能であること、(b)K-Ar年代がリセットされていないこと、(c)太陽風の影響がないことがあげられる。月面の岩石は天体衝突によるかき混ぜなどによって角礫岩化された、極めて複雑な履歴を辿ったものであることが多い。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。そのような岩石を選んでしまえば、地質ユニットとの対応付けが困難であり、信頼出来る年代値も得られない。そのため試料の選定には慎重さが要求される。そこで、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

な岩石を選んで分析する。このような岩石は、岩石固化後のK-Ar年代リセットの可能性が低く、かつ角礫岩化していなければ地質ユニットとの対応付けが容易である。掘削を起こしたクレータリングで年代がリセットされたか否かは次のようにして判断する。まず分光カメラを用いて鉱物同定と岩石組織の観察を行い、変成の程度を確認する。次にLIBS-QMS分析によりアイソクロンを引く。このとき、直線のアイソクロンを示さない試料は脱ガス等の二次的影響があると判断して年代測定の対象からは外す。一方で、掘削時のクレータリングで完全にArが散逸して年代が完全にリセットされてしまった場合は、岩石の年代は着陸点領域の年代よりも極めて若い年代となり、場合によっては放出される放射起源 ^{40}Ar 量は現状での本測器の検出限界以下であると推測される。そのため、掘削時のクレータリングによるリセットを受けた試料かどうかは分析結果から判断可能である。

月試料におけるもうひとつの問題は太陽風に含まれるArの打ち込みである。月には大気が存在しないため太陽風は直接月表層に到達する。試料が溶岩であれば表面の数百nm程度の深さまでしか侵入していないが、レゴリス角礫岩である場合には、岩石組織の至る部分に太陽風起源Arが混入している。しかもその $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比は一定ではないため、放射起源 ^{40}Ar 量を見積もることが困難である。岩石表面を研磨して内部を露出させ、岩石組織を観察して角礫化していないことを確かめることが必須である。さらに、太陽風には

HeやNeなどが多く含まれるので、これらをQMSによって同時に分析することで太陽風の寄与の有無を判定する。また、高エネルギー宇宙線による核反応で岩石中にAr同位体が生成される場合もあるが、その寄与は $^{38}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比からある程度見積もることが出来る。太陽風由来や宇宙線照射起源の希ガス同位体を検出することもQMSでの重要な分析項目の一つである。

月の斜長岩中のK濃度は低く(数百ppm以下)高地岩石の測定は困難であるが、一方で表側のProcellarum KREEP Terraneと呼ばれる海領域には比較的K濃度の高い(~3000 ppm)岩石が存在していると考えられている[12]。この値は本システムの検出限界を上回っており、年代計測が可能であると考えられる。よってここに位置するコペルニクスクレータ(探査候補地点A)や海の玄武岩(探査候補地点B)は適切な探査対象と考えられる。

なおここでは分光カメラの候補として、SELENE-2プリプロジェクトに搭載を検討中であるマルチバンド分光双眼カメラ(LMUCS)を想定している[13]。月面走行ローバは、SELENE-2の開発により本探査を行う時点では確立されていると期待される。現状では、ローバ重量100 kg、ペイロード重量10 kg程度を想定している[14]。

謝 辞

本研究を遂行するに当たって、東京大学の長尾敬介教授には年代標準試料を提供して頂きました。また東京大学物性研究所の八木健彦教授には高圧プレスを使った試料の作製をさせて頂きました。感謝いたします。匿名の査読者のお二人には、本稿を改善する上で大変建設的で有意義なコメントを頂きました。この場をお借りして御礼申し上げます。

参考文献

- [1] Neukum, G., 1983, habilitation thesis, Ludwig-Maximilians-Univ., Munich, Germany.
- [2] Tera, F. et al., 1974, Earth Planet. Sci. Lett. 22, 1.
- [3] Gomes, R. et al., 2005, Nature 435, 466.
- [4] Durda, D. D. et al., 1998, Icarus 135, 431.
- [5] Ivanov, B. A., 2001, Space Sci. Rev. 96, 87.
- [6] Doran, P. T. et al., 2004, Earth Sci. Rev. 67, 313.
- [7] Talboys, D. L. et al., 2009, Planet. Space Sci. 57, 1237.
- [8] Bogard, D. D., 2009, Meteorit. Planet. Sci. 44, 3.
- [9] Steiger, R. H. and Jager, E., 1977, Earth Planet. Sci. Lett. 36, 359.
- [10] Bogard, D. D., 2009, Meteorit. Planet. Sci. 44, 905.
- [11] Bogard, D. D. et al., 2001, Space Sci. Rev. 96, 425.
- [12] Kobayashi, S. et al., 2010, Space Sci. Rev. 154, 193.
- [13] 杉原孝充ほか, 2011, 日本地球惑星科学連合2011年大会, PPS024-34.
- [14] 田中智ほか, 2010, 遊星人 19, 3.