

特集「アポロ月着陸30周年」

アポロ月試料の化学分析

脇田 宏¹

1. はじめに

アポロ11号宇宙飛行士が月の岩石を持ち帰ってから30年が経過する。あの興奮は昨日のことものように、また、ずいぶん昔のことものようにも感じられる。月面着陸という人類初の快挙をテレビで息をつめて見守っていたこと、地球に持ちえかった岩石の分析を昼夜の別なく行い、ずいぶん神経をすりへらしたなどのことははっきりと覚えている。私が携わっていた放射化分析は、岩石試料を原子炉の中で中性子照射した後、化学分離を行って精製し、放射能を測って微量元素の定量を行う方法で、かなりの労力を必要とするが、当時では最も感度が高く、信頼性のある測定法であった。

1968年の夏、私は学位を取得するのを待って、日本での勤め先を辞め、月試料分析の共同研究者となるため、アメリカ合衆国に渡り、オレゴン州立大学で3年間を月試料の研究に打ち込んだ。翌年7月、地球にもち帰えられたアポロ11号の試料をはじめ、アポロ12号、14号、15号、16号、17号とすべてのミッション、それにソ連が実施したルナ16号の試料の主成分、微量元素の化学分析に携わり、20数編の論文を発表することができた。いん石など宇宙物質の微量元素を決定する方法が飛躍的に向上した今日、当時の分析の苦労話などは参考にならないかもしれない。しかし、2008年には、NASAのロボット探査機「マーズ・ローランダー」が火星の岩石を持ち帰る可能性が高い。アポロ計画30周年を記念して、多少とも役立てばとの願い

とともに、私の人生の最も充実した研究の日々をふりかえてみたい。

2. アポロ計画

1960年代のうちに人類を月に送り、無事に帰還させるというケネディ大統領の公約に基づく一連のアポロ計画はすさまじい計画であった。東西冷戦の最中であって、ロケット、人工衛星など宇宙を戦略的に制覇する分野で、ソ連に大きく水をあけられたアメリカが国の威信をかけて取り組んだプロジェクトであった。莫大な費用が必要なことは当然として、地球・宇宙科学関連の分野ばかりでなく、ロケット工学や宇宙医学の開発や農学、心理学などあらゆる分野の科学技術を向上させ、連携させることが急務であった。それには、なにより国民の理解を得ることが一番であった。この計画が成功すれば、ベトナム戦争で疲弊したアメリカ国民をふるいたたせることも、宇宙開発での遅れを一気に取り戻すこともできるのである。全世界が最も注目した計画であった。ものすごいことの内容を一言で説明することは難しい。しかし、「アポロ13号」という映画を見た人には容易に理解できるであろう。月への着陸は11号、12号と成功したが、13号は発射直後に宇宙船の事故により酸素の流失、船内異常低温、フィルター不全による二酸化炭素濃度の上昇など致命的なトラブルが発生し、地球への帰還をふくめて、飛行も危ぶまれる事態となった。このような事故をも予想し

¹ 学習院女子大学 国際文化交流学部

ていたNASAでは、緊急時に対処するための万全なサポート体制が組まれていて、これが冷静に実行されたのである。30年たった今日、日本の科学技術が月に人間を送り込めるまでに到達しているとは、とても私には思われぬ。1972年の17号まで続けられたアポロ計画の費用は概算で総額250億ドル以上といわれ、人類は総重量400キログラムの月試料を手に入れることができた。

3. 月試料分析の制約

月の岩石は莫大な費用をかけて採取された米国の国有財産である。月試料の研究はアメリカ国内を中心として、各分野から約140人の代表的科学者が主研究者 (Principle Investigator, PI) として選ばれ、準備体制がとられていた。月の石の研究に当たっては、通常の研究にはないさまざまな制約がつけられていた。今ではお笑い草と感ずるかもしれないが、当時は真面目に対処されたのである。そのいくつかを紹介しよう。

どれだけの量の試料を持ち帰れるかわからないので、ごく少量しか配分されない場合にも分析できるように備える。しかも、その化学組成は不明である(宇宙飛行士が地球に帰還した直後の検疫期間中に非破壊分析が行われ、その結果は知らされることになっていた)。月岩石がペリドタイトなどのような組成である可能性も考えて、そのときになって分析できなかったなどといった言い訳は通用しない。

試料を受け取った後、限られた期日内にプロポーザルで約束した分析を完了し、研究者全員が一堂に集まり成果を発表する。実際には、試料の配布が始まったのが9月末で、1月始めにヒューストンで開かれる「ルナー・コンファレンス」までわずかな日数しか残されていなかった。

火災や盗難など試料の紛失がないように対策する。マニアが狙うことも予想されるので、絶対に盗まれることのないようにマニュアルを作成し、それに従う。こ

のため、研究棟の鍵の交換にはじまり、サンプルを保管する金庫の置かれた部屋には、月試料を分析する研究者以外は立ち入りが禁止され、その部屋をキャンパスポリスが2時間おきに巡回する、などの規則が作られた。これによって、試料を研究室に置き去りにしないとか、長時間測定の間も保管に気を配るなどの注意が必要だった。ヒューストンで配られる試料の受取やよそでの実験のために試料を運搬する際には、手錠つきのカバンなども使われた。

こんなことをと思うかもしれないが、最近の新聞におもしろい記事がのっていた。ホンジュラスに贈られたアポロ17号の岩石が米国に密輸され、関税当局により押収されたという。ちなみに、この1.1グラムの岩石には、約6億円の値がつけられていた。

月試料に対するアメリカ国民の関心は高く、公開は義務であった。たとえ、分析中の試料であっても、週末は原則として市民に公開・展示しなければならず、これは分析する上に大きな妨げとなった。

地球にもち帰った試料は3ヵ月間の検疫期間が設けられて人体への安全性が一応検討されていた。しかし、これだけでは不十分とされ、決して試料に素手でふれたり、吸い込まないようにという注意があった。検疫期間中にヒューストンの「Lunar Sample Receiving Laboratory」で顕微鏡観察や非破壊分析を行っていた科学者たちは、日に何度も実験室から出る度に頭からシャワーを浴びなくてはならず、体中の脂が抜けてしまったとほぼしていたほどである。

試料は貴重であるので、微量といえども後世に残すこととされていた。このため、重量を測定するために使った葉包紙や化学分離を行った後の廃液に至るまで、試料番号と処置・経過などを記載した紙を貼り付けて保存する。さすがに、この通達はずぐに撤廃されたが、当初は、余計な神経を払わなければならなかった。

これは、幸いだったと考えなければならないのだが、採取された試料の種類が多く、また、何人ものPI

との共同研究が組まれていたので、独自の分析スケジュールを立てることは難しかった。

4. 研究プロポーザル

私のボスのR.A. Schmitt教授はいん石の希土類元素分析の大家で、NASAのアポロ計画に採用された研究計画は、化学分離による中性子放射化によって14個の全希土類元素 (La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, ならびにLu)とY, InおよびCdの定量を行う他、非破壊分析を併合して、合計36種の元素(前述した以外の元素を挙げると、主成分元素では、Si, Ti, Al, Fe, Mg, Ca, Na, K, CrとMn, 微量成分では、Sc, Ba, V, Co, Hf, Zr, Th, RbとCs)を定量するというものだった。周期率表にある元素の3分の1, 30数種もの元素を定量するのは容易ではない。一部は非破壊分析でまとめて定量できるとしても、標準試料を作成するのも大変な作業となる。

このプロジェクトに対して、PIのSchmitt教授は2人のCoI (Co-Investigator)をやとって実施することになっていた。私は先任のCoIに従っていれば良い立場にあった。ところが、困ったことには、分析操作も決まらないうちに先任のCoIが他の機関に移ってしまい、実験上の責任が私にかかってきて、大変な重荷となった。良かった点は豊富な研究費とボスの性格だった。ボスは一寸した結果に対しても労いと感謝のことばをかけてくれる人で、一緒に働くのはとても楽しかったし、彼の信頼に酬いたいと思っていた。なによりも、日本での就職先をやめて、アメリカに渡った私にとっては、帰国後の職を得るため、できるだけ多くの成果を挙げる必要があった。

留学先は田舎の大学町で、PIが何人もいるシカゴや東部の大学などとは異なり、話し相手も少なく、とくに岩石学などのコメントを求めることは困難であった。60kmくらいはなれた隣町のオレゴン大学には、G.G. GolesとD.F. Wyleの2人のPIがいたが、出かけて話し

ている暇はなかった。

私たちの行っていた放射化分析という方法には実施上のこわさがつきまとっていた。放射化した試料を溶融してしまったら最後、やり直しはきかないのである。放射能が壊変してしまう前に目的の元素を分離精製しないと万事休すなのである。とりわけ、岩石試料を溶融する操作には真剣に取り組まねばならない。事前にルツボの中に化学分離を行うすべての元素のキャリアーを加えて乾燥し、この中に中性子照射した試料を移してアルカリで溶融するのである。照射直後は放射能も高く、近づいてのぞき込むことは避けなくてはならない。溶融をしすぎるとろつぽに穴があいてしまうおそれがあるし、足りなくて溶け残ったりしたら一大事である。

分析方法を確立するのも一苦労だった。溶融した岩石を水に抽出し、インジウム、カドミウム、それに希土類元素とイットリウムをそれぞれ相互分離する。希土類元素はグループとして精製を重ね、最後の水酸化物を溶かしてイオン交換樹脂のカラムにのせ、溶離液(*a* ヒドロキシイソ酪酸)のpHを連続的に変えながら、フラクションコレクターに分け取る最適条件を決めるのである。細かい樹脂をつめた長いカラムに窒素ボンベで圧力をかけて分離を早めるのであるが、最後のランタンが分離するまでには1晩もかかる大変な作業であった。

希土類元素の相互分離が一段落したところで問題となったのは、インジウムの分離であった。通常、インジウムの分離は水酸化物を沈殿させた後、臭化水素酸で飽和したジイソプロピルエーテルに抽出し、精製するのである。この溶媒抽出操作中によくおこるのだが、シリカが折出してくると水相と有機相とが分離しなくなり、半減期が54分のIn-116は測れないまま時間切れとなってしまふ。新しく着任したCoIはアルゼンチン生まれの55才独身の化学者で、いつもこの抽出操作に失敗していたが、うまい方法を考えついでくれた。エーテル抽出する前の溶液に粉末の金属亜鉛を加えてイ

ンジウムを金属に還元してしまうのである。この方法によって、ほとんど一回の操作でインジウムをきれいに単離することができた。化学収率も高く、今でも使える優れた分析法だと思っている。

カドミウムの分離については、ほとんど問題はなかった。希土類元素の相互分離は、pHの異なる2種類の α プロピルイソラク酸溶液をつくり、pHの高い溶液をもう一方の溶液に滴下して、徐々にpHを上げながら、長いカラムのイオン交換樹脂に吸着させた希土類元素を順次溶離していくのである。

こうした準備のうちに、アポロ11号は地球をはなれ、1969年7月20日、月着陸に成功し、最初の試料が採取された。このミッションでは40個近くの岩石と月の土を合わせて、100kgもの試料を採取し7月24日に地球に帰還した。試料が配られるまでの3ヶ月間は、これで仕事ができるという喜びと分析に失敗したらという不安感が交錯して落ち着かない時期であった。

5. 月試料の化学分析

9月の終り、これまでLESPETによって行われていた化学分析の結果がScience誌に発表[1]された。分光分析によるおおまかな月物質の化学組成は地球の玄武岩と似ていた。このことは残念なことでもあった。もし、微量元素の濃度の低いダナイトのような組成であったとしたら、機器分析にたよる研究者にはデータを出すことができず、分析は化学分離をする私たちの独壇場となったはずである。ここで、この予備的な分析では希土類元素をはじめとする微量元素の値は報告されていなかった。

そのすぐ後、月岩石試料と土、それに深さ別に5層のコア試料が配布された。岩石試料は結晶度、発泡度などさまざまであったが、地球の岩石とそれほど変わっているようではなかった。均質であると想定され、研究者相互の分析値を比較する目的で配られた月の土には、岩石のかげらや色とりどりのガラス玉、鉄やコ

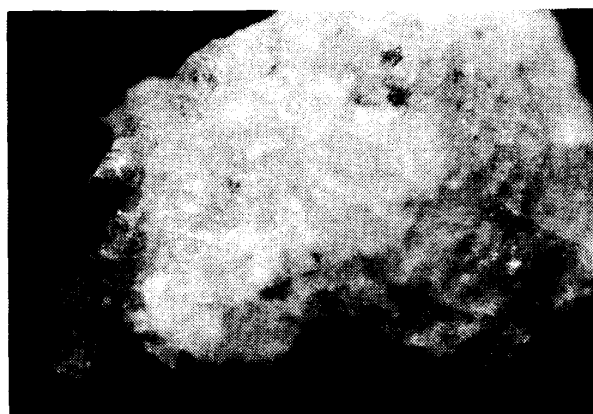


写真1 アポロ11号の土に含まれている斜長岩の小塊

ンドルール様の球粒なども含まれていた。これらを分けて分析すべきであるのは分かっていたが、結局、断念した。今でも惜しまれるのは、白色の岩塊(写真1)を分析しなかったことである。分析していたとすれば、大ヒットとなったのである。私たちに配られた試料は合せて13種類で他のPIとの共同研究の試料を加えると分析しなければならない試料の数は40個以上にもなった。実際に分析に着手することができたのも10月半ばのことである。それから分析をはじめて、すべての分析を1月始めの月会議までに間に合わせなければならないのである。当時の余裕のなさが災いして、重大な発見の機会をとり逃がしてしまった。

6. 第1回月会議

ヒューストンに向かう飛行機の中では、いくつもの大学の研究者たちが一緒になり、さかんにデータの探り合いを行っていて、自分たちの出したデータを確認めたがっていた。分析技術の信頼性が問われ、さながら「化学分析のオリンピック」に参加しているような気がした。

1970年1月5日から8日の日程で、第1回月科学会議(Apollo 11 Lunar Science Conference)がヒューストンで開かれることは決まっていた。これに出席する140人の主研究者は受付けにScience誌に発表する論文の原稿を持参することになっていた。アメリカの学会ではめ

ずらしくダークスーツを着た人が多かった。

私どもの論文[2]を含めて、総計584人(これがアポロ11号試料の最初の研究に携わった研究者)による144編の論文はScienceの特集号(The Moon Issue)[3]として直ちに出版された。その出版スケジュールを振り返るのも面白い。受け付けと同時に原稿はレフリーの査読に回され、著者の変更を経て、実に1月中旬に発送されたのである。この会議の内容がいかに世界中の注目を浴びていたかがわかる。

会議は年代測定、主成分・微量成分元素・安定同位体・希ガスなどの地球化学、鉱物学・岩石学、衝突効果、物性、有機化学などの分野に大別され、4日間で150近くの論文が発表された。どの発表も新しい知見を含んでいたが、なかでも月岩石の年齢と化学組成に話題が占められていた。朝9時から夕方まで、ひとり当たりの発表時間は20分間に限られ、マスコミの取材もはげしかった。

地球の石と大きく違うのはチタンの存在量が多いことだった。月の表面は真空で水がなく、還元的な環境で金属チタンなども存在し、希土類元素の分布パターンも地球のものとは大きく異なっていた。静かの海の土や岩石は濃度に著しい違いがあるものの、軽希土から重希土にかけて上に凸形で、大きな負のEu異常を持つパターンを示していた。この中にあって、J.A. Wood[4]のグループは、ソイルの中に4%ほど存在する白色の斜長岩を研究し、これらが静かの海の岩石とは組成も色も比重も全く異なる高地から由来した可能性を指摘した。また、J. A. Philpotts and C.C. Schnetzler[5]は月岩石から分離した斜長石の希土類元素パターンを示し、これが海の岩石のパターンと相補的であることを報告した。さらにカリウム(K)や希土類元素(REE)、リン(P)などのイオン半径の大きい元素が異常に濃縮したガラスが「KREEP」と名づけられた。

11号試料の報告の中に、早くも前年11月に回収されたアポロ12号試料の速報も発表された。休む間もなく、つぎの分析をはじめなければならない時期が迫

っていたのである。

つぐないの気持もあって、会議後ただちに、前述のWoodやC. Frondel, D.H. Andersonらの協力を得て140 mgの斜長岩を集め、大急ぎで元素分析を行った。その結果は、コンドライト組成を持っていた月が分化の過程で、深部に超塩基性岩石を沈降させ、同時に表面には上層に軽い白色のanorthositeとその下に黒色の玄武岩からなる層に分離し(図1)、月が形成されたこと、さらに、巨大いん石の落下により上層の白い地殻が吹き飛ばされた箇所に、黒い海の部分があるという論文[6]をまとめた。これはScience誌に受理されて、大きな反響を受けた。

その後、17号までの月試料の分析結果をまとめる形で、希土類元素の存在度と分布パターン(図2)から月の形成と進化について解釈をまとめて、Geochem. Jour.に論文[7]を発表した。この詳細な説明は省き、希土類元素パターン図のみを示すにとどめる。

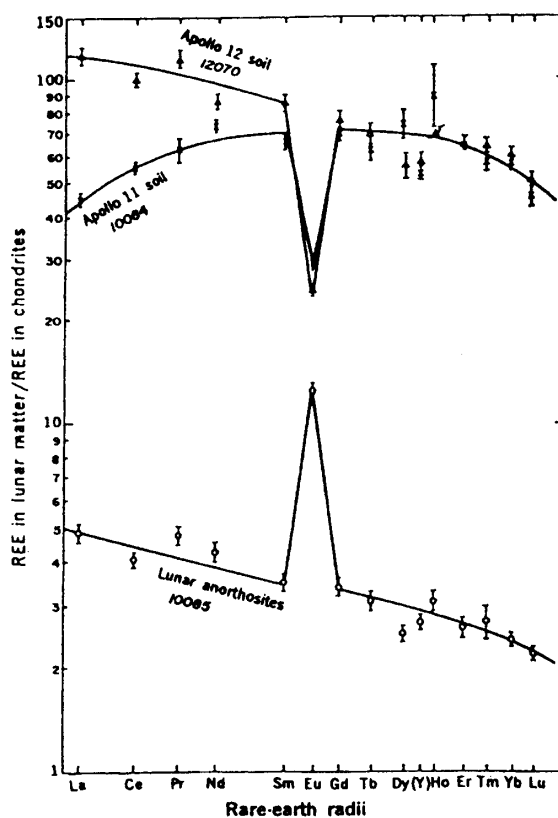


図1 アポロ11、12号の土と斜長岩の希土類元素分布パターン(コンドライトで規格化したもの)(Wakita and Schmitt, 1970より)。

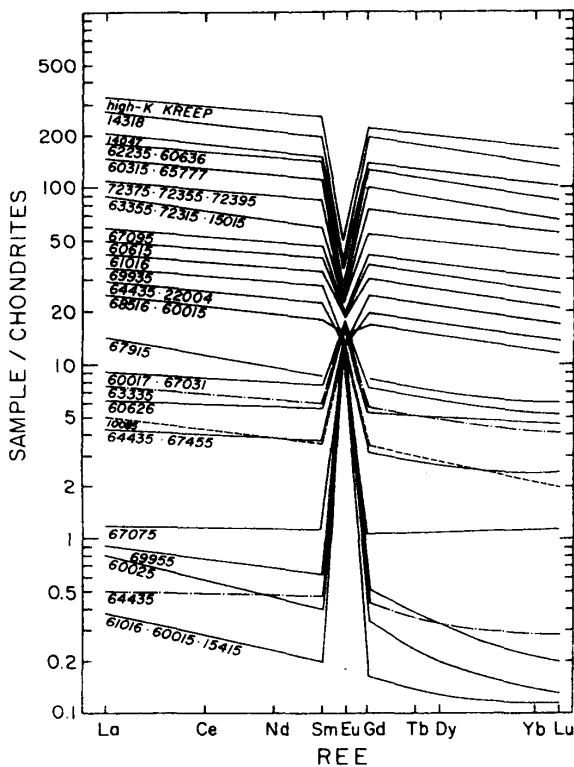


図2 ANT(anorthosite-norite-troctolite)からKREEPに至る月試料の希土類元素分布パターン(Wakita et al., 1975より)。

7. おわりに

筆者は1971年に帰国して以来、月などの研究からはまったくはなれてしまった。今回、思い出を書く機会をいただいたことに深く感謝する。それにしても、月には水が存在しないという当時の見解はどうなったのだろうか。月探査機「ルナプロスペクター」によると両極地方の無数のクレーター中には総量が60億トンもの水が氷の形で存在していると推定されている。また、当時、宇宙化学の第一線で活躍していた研究者たちは、今どのようにしておられるのだろうか。

参考文献

- [1] LESPET (Lunar Sample Preliminary Examination Team), 1969: Preliminary examination of lunar samples from Apollo 11, *Science*, 165, 1211-1227.
- [2] Schmitt R.A., Wakita H. and Rey P., 1970: Abundances of 30 elements in lunar rocks, soil and core samples, *Science* 167, 512-515.
- [3] The Moon Issue, 1970: *Science*, 167, 449-784.
- [4] Wood J.A., Dickey, Jr. J.S., Marvin, U.B. and Powell, B.N., 1970: Lunar anorthosites, *Science*, 167, 602-604.
- [5] Philpotts J.A. and Schnetzler C.C., 1970: Potassium, rubidium, strontium, barium, and rare-earth concentrations in lunar rocks and separated phases, *Science*, 167, 493-495.
- [6] Wakita H. and Schmitt R.A., 1970: Lunar anorthosites: Rare-earth and other elemental abundances, *Science*, 170, 969-974.
- [7] Wakita H., Jaul, J.C. and Schmitt, R.A., 1975: Some thoughts on the origin of lunar ANT-KREEP and mare basalts, *Geochem. J.*, 9, 25-41.