

On the Moon as it was on Earth

地球で起こったことを月で見る

Bernard Marty



月の表面は地球初期の歴史の記録を保有しているのだろうか。最近発表された月の表層砂の分析に基づくと、どうやらそうらしいのだが、卓抜な発想によりこの考えを検証することができそうだ。

Nature Vol. 436(631-632)/4 August 2005

核のゆっくりとした冷却と核の内側部分の結晶化の結果出現した地球ダイナモによって、地球磁場が発達し、地球表面は地球外物質や宇宙線から守られるようになった。地球ダイナモのメカニズムや出現時期はまだわかっていないが、小嶋稔たち¹は新しい観点からこの問題に取り組むことができると述べている。

小嶋たちは、アポロ計画によって回収された月の表層砂から得られた地球化学的データの新たな解釈をもとに考察している。地球ダイナモが動き出す前は、地球大気上層部からイオンが逃げだし、太陽が放出するいわゆる太陽風中のイオンとともに、月の表層砂にインプラントされた。しかし、この過程は地球磁場の出現とともに終わり、その後は太陽風がもたらすイオンが、月の表層砂にインプラントされるイオンの大部分を占めるようになったというのだ。このモデルにしたがえば、月の表層砂中に閉じこめられている揮発成分の組成は、太古の地球大気と太陽風が混じったものになる。両者の相対的な割合は地質年代によって変わるので、これら2つの生成源の組成だけでなく、地球ダイナモがはじまった時期の解明に展望が開ける。

月は形成時には高温であったため、地球の大気や海洋にあるような「揮発成分（たとえば、水素、炭素、窒素、希ガス）」が全体として枯渇している。しかし、月の表層砂には揮発成分が豊富にあり、月の外にその供給源があることを示している。供給源のうち2つは明らかである。

第一の供給源は、月には地殻運動がないことから生じるものだ。つまり、惑星形成の初期段階が終わっ

た後、月の表面は「惑星物質」の連続的な衝突を受けて進化した。この惑星物質は太陽からのものとは異なる揮発成分組成をもち、太陽ではなく、さまざまな大きさの小惑星や彗星に由来する。惑星物質に閉じこめられた揮発成分の一部は蒸発し、砂粒の表面に再び閉じこめられた。第二の供給源は太陽風中のイオンで、月表面の砂粒へ数十ナノメートルという特徴的な深さに直接インプラントされた。この成分は、月の表層砂とアポロ宇宙船の宇宙飛行士が太陽に曝露したアルミ箱の両方に見つかっている（図1）。両方の試料に含まれるヘリウム、ネオン、アルゴン（これらの元素だけが実験中に分析できた）の同位体組成はまったく同じで、月の表層砂に含まれる希ガス成分は、太陽風に由来するものが大部分を占めていることを示している。

しかし、他のいくつかの成分、とくに窒素はこの描像に当てはまらない²。窒素には2つの同位体¹⁴Nと¹⁵Nがある。その存在比は、地球ではほとんどの場合2%以下のばらつきしかないのに対して、月の表層砂では30%以上もばらつきがある。太陽または太陽コロナ内の核過程で、月の表層砂中の窒素同位体存在比のばらつきを説明できるようなものは知られていない。しかも、月の表層砂中の窒素は太陽風中の希ガスよりも豊富に存在する。この窒素同位体と窒素原子の多さを太陽風だけでは説明できないといわれている^{3,4}。

5年前、技術の進歩によって可能になった月の砂粒の分析によって、太陽風中の窒素成分は地球の窒素

と比べて、 ^{15}N が24%以上も少ないことが明らかになった⁵。これは月の表層砂中の豊富な ^{15}N は「惑星」に起源があることを示すものだった。この点で、惑星間の塵粒子はとくに有望な候補である。このような粒子のフラックスは地球への地球外物質のフラックスの大部分を占め、太陽風に比べて ^{15}N に富んでいるからである。

今回、小嶋たち¹は別の解釈を提案した。 ^{15}N の豊富な月の表層砂は、月が現在よりも近く、そして地球磁場が形成されていなかったため、地球からイオンが逃げることができたときに、地球大気からもたらされたというのだ。この仮説は、2つの供給源の混合から生じる同位体の相関関係に基づいている。供給源の1つは、重水素が存在せず（星の重水素燃焼ステージで消費されてしまうため、太陽に重水素はほとんどない）、 ^{40}Ar （太陽ガスは ^{36}Ar が占めている）と ^{15}N の少ない太陽の成分である。もう1つの供給源は、重水素（海洋からもたらされる）と、 ^{40}Ar （ ^{40}K の崩壊によって地球で作られる）を含み、 ^{15}N の豊富な大気成分である。小嶋たちはこのモデルが必要とする大気中の核種のフラックスを計算し、地球化学的な観測結果と矛盾しないことを見いだした。

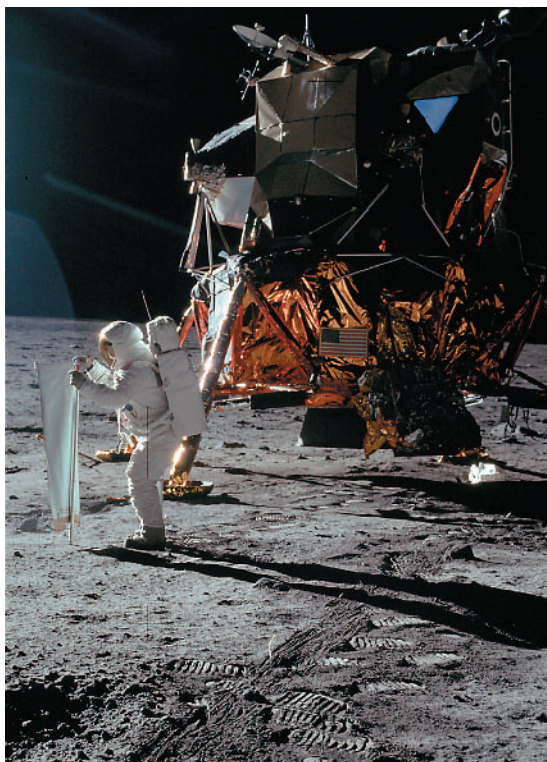


図1 月のフィールドワーク。バズ・オールドリンが「太陽風収集装置」のアルミ箔を設置している。

この解釈は、希ガス成分と安定同位体成分のばらつきをある程度説明でき、月の表層砂の組成を説明するのに必要な供給源の強度と矛盾しない。しかし、惑星間の塵粒子も太陽風と比べて重水素と ^{15}N が豊富であり、地上観測の結果を外挿して推定した塵粒子のフラックスは、月の表層砂に必要な量の重水素と窒素を供給できる（ ^{40}Ar の存在は代案として、月内部からの脱ガスで説明される）⁶。もう1つの問題は、小嶋たちの提案では ^{15}N の豊富な窒素と ^{40}Ar の豊富なアルゴンには密接な関係があることが求められているに対して、 ^{15}N の少ない表層砂は ^{15}N の多い表層砂よりも、（ ^{36}Ar と比べて） ^{40}Ar の量が多い傾向にあるということである。実際には、月の表層砂は3つの供給源の寄与を反映している可能性があり、そのために同位体比の変化傾向があいまいになる。地球大気由来の成分は、時がたつとフラックスが急激に変化し、惑星間の塵粒子のフラックスも、時間とともに変化する可能性があるが、太陽風由来のフラックスはほぼ一定である。

それにもかかわらず、小嶋たちの仮説は示唆に富むものであり、検証可能であるという長所がある。まず、太陽風に含まれる軽元素の同位体組成はまだよくわかっていない。しかし、Genesis計画で27か月間曝露されたターゲットの分析によって、同位体組成の明確化が進展するだろう。次に、小嶋たち¹が指摘するように、月の裏側はその歴史のほとんどのあいだ地球の方を向いていなかったため、月の裏側の表層砂は、地球大気由来する揮発成分をほとんど含んでいないと思われる。月の裏側の探査は、将来行われる月探査計画の優先事項となると期待される。また、隕石の一部は月の裏側が起源である可能性があり、有望な分析対象である。

私たちは今後の成り行きを見守るべきだ。しかし、この仮説が正しいとわかった場合、地球磁場の歴史、生命の進化や初期地球の環境条件と関連している可能性の研究に新しい道が開かれる。 ■

CRPG (仏)、Bernard Marty

1. Ozima, M. et al. *Nature* **436**, 655–659 (2005).
2. Kerridge, J. F. *Rev. Geophys.* **31**, 423–437 (1993).
3. Geiss, J. & Boschler, P. *Geochim. Cosmochim. Acta* **46**, 529–548 (1982).
4. Wieler, R., Humbert, F. & Marty, B. *Earth Planet. Sci. Lett.* **167**, 47–60 (1999).
5. Hashizume, K., Chaussidon, M., Marty, B. & Robert, F. *Science* **290**, 1142–1145 (2000).
6. Marty, B., Hashizume, K., Chaussidon, M. & Wieler, R. *Space Sci. Rev.* **106**, 175–196 (2003).