NASA

月の南極の写真。左上の図は月の表面の高低地図で、「南極－エイトケン盆地」は紫色の部分。月探査機クレメンタインの測定データから作成。

The hole at the bottom of the Moon

月の底の穴

Nature Vol.453 (1160-1163) / 26 June 2008

かつて、形成されたばかりの内太陽系が猛烈な「爆撃」を受けていた時期があり、それによって月や地球やその他の惑星の姿が大きく変わったといわれている。爆撃は本当にあったのか？ いつ、どのような形で起きたのか？ 月の南極にある巨大なクレーターが、そのかぎを握っている。Eric Hand 記者が報告する。

ドファール 961 は、ほかの「月の石」とは似ていなかった。ワシントン大学(ミズーリ州セントルイス)の地球化学者 Randy Korotev は、最近分割されたドファール 961 の表面を見て、すぐにそれがとても黒っぽいことに気づいた。ほとんど紫色をしている。また、金属の大きな粒を含んでいることにも気づいた。これまでに見てきた「月の石」とは、あまりにも異なっている。「これはあの『大きいやつ』から来たのだろうか?」と彼は思った。

ドファール 961 が月の破片であることはわかっていた。それは何らかの衝突によって月から削り取られ、月の弱い重力の支配を脱し、地球の重力につかまった。その後、数万年前にオマーンの砂漠に落下し、数年前に一攫千金を狙う収集家の手に落ちた。Korotev は、これがオークションサイト「eBay」に出品されるのを待ち続け、ついに、ネット上で評判のよいディーラーがドファール 961 の 6 グラムの破片を 1 グラムあたり 1000 米ドル(約 11 万円)で販売しているのを見つけた。実に、金の 30 倍の値段である。Korotev はその破片の一部を買い、自らの疑問を確かめるための化学分析にその 3 分の 1 をあてた。

ドファール 961 のほかに、すでに知られている月由来の隕石は 59 個あり、その化学組成から、いずれも月の 3 つの領域から来たものであることがわかっている。これに対して、ドファール 961 はおそらく第 4 の領域から飛んできたものらしい。それは、月の底(南極)から裏側のエイトケンクレーターにかけて広がる「南極-エイトケン盆地」という深くて暗い穴である。ここは、現在知られているかぎり、月で最大の爆発が起きた場所である。ドファール 961 の内部には、この爆発の記録が残っている可能性がある。その記録は、形成されたばかりの内太陽系が猛烈な爆撃を受けていた時期があったのかどうか、あったとしたらいつ頃のことだったのかという問題を解決するための手がかりになると考えられている。

南極-エイトケン盆地を作ったような本当に巨大な衝突は、単なるクレーターではなく盆地を作る。こうした盆地は、深く、複雑であり、衝撃波が的の中心のような同心円状の地形を残している。盆地としても、南極-エイトケン盆地の規模は群を抜いている。太陽系の中を見渡しても、これよりも大きな盆地は火星のボレアリス盆地しかない。Nature 2008 年 6 月 26 日号 1212 ページに掲載された報告によれば、直径 1 万キロメートルのボレアリス盆地を作った衝突は、火星の北半球の表面を削り取るほどの規模であったようである。一方、南極-エイトケン盆地も、直径 2600 キロメートル以上、深さ 12 キロメートル以上という規模をもち、中国の半分を覆い、チベットの最も高い山が入ってしまう大きさである。

南極-エイトケン盆地は、月で最大の盆地であるだけでなく、月で最古の盆地でもある。このことは、クレーターが互いに重なり合うようすをマッピングするという相対的な年代決定法によって明らかにされた。しかし、絶対的な形成時期は不明である。

46 億年前に太陽系が形成されて間もない頃は、生まれたばかりの惑星に、残った微惑星がひっきりなしに衝突していた。月自体も、この時期の激しい衝突により地球の一部がたたき出されてきたと考えられている。しかし、38 億年前には、衝突の頻度は低下し、今日とそれほど変わらないレベルになっていた(右のグラフを参照)。問題は、それまでの時期はどうだったのかということだ。衝突の頻度は滑らかに低下していったのだろうか?あるいは、多くの科学者たちが考えているように、39 億年前に大きなピークがあったのだろうか?

重なり合うクレーターの最も下にある南極-エイトケン盆地の大きさを考えると、その形成時期は、「後期重爆撃期」あるいは「月の大変動期」を絞り込むための決定的な手がかりとなるはずである。南極-エイトケン盆地の形成時期が早ければ、衝突の頻度は低く、長

期間であり、ピークの幅は広がったことになる。もしかすると、衝突頻度はこの期間を通じて一定だったのかもしれない。一方、形成時期が遅ければ、大変動があったことになる。

米国アカデミーが、昨年、南極-エイトケン盆地の形成時期を決定することを月科学の最重要課題に定めたのは、そのためである。この盆地の形成時期を決定することは、大変動仮説と、それに伴うさまざまな関連事項を検証することを意味している。検証の結果、誕生したばかりの月に何が起きていたのかが明らかになり、ひいては太陽系のほかの場所で何が起きていたのかを推測できるようになる。内太陽系の惑星が大気を失うほど激しい爆撃を受けたのは突然のことだったのかどうかもわかる。それは、生命の起源とも関係がある。激しい爆撃は、すでに生まれていたあらゆる生命を絶滅させてしまったのだろうか?あるいは、最も初期の生命体の多くが耐えてきた地獄のような環境は、この爆撃によって作り出されたのだろうか?また、ある惑星への爆撃により、ドファール 961 のような岩石に細菌が付着したものを別の惑星へと吹き飛ばして、生命を移動させたこともあったのだろうか?

ハワイ大学の地質学者 Jeffrey Taylor は、「これは未解決の大問題だ」という。

R. KOROTEV

隕石「ドファール 961」は、月で大変動が起きていた時期を教えてくれるかもしれない。

「月は、この問題の手がかりが得られる唯一の場所なのです」。

月という記録板

月の表面が傷だらけであることは一目瞭然である。しかし、科学者たちは長い間、月の表面をクレーターだらけにしたのは、外からの力ではなく内からの力であると考えていた。衝突クレーターの、火山爆発の名残のカルデラと誤解していたのである。引退した地質学者の Don Wilhelms は、「今の人は、この誤解がどれほど広く受け入れられていたかを想像することもできないでしょう。なにしろ、月面で起こることのすべてが火山活動に起因していると考えられていたのです」と話す。Wilhelms は、カリフォルニア州メンローパークの米地質調査所に勤務していた 1970 年代の初めに南極－エイトケン盆地の地図を初めて作成したことや、現在コーネル大学（ニューヨーク州イサカ）に所属する惑星科学者の Steve Squyres とともに火星のボレアリス盆地の存在を初めて提案したことで知られている¹。

宇宙開発競争が始まったとき、月の詳細な地図が新たに作られ、先駆的な天体地質学者たちは火山仮説を葬り去った（*Nature* 2008 年 6 月 26 日号 1164 ページ参照）。彼らは、大きな盆

地はすべて天体衝突によって形成されたと推定した。一方、アポロ計画の宇宙飛行士たちが 1970 年代初めまでに持ち帰っていた「月の石」からも、意外な事実が明らかになった。クレーターを作った天体衝突のすべてが、ほぼ同時期に起きていたことがわかったのである。広大な「雨の海」ができたのは 38 億 5000 万年前のことだったが、相対年代決定により、その近くの「神酒の海」ができてから「雨の海」ができるまでに数百個のはっきりしたクレーターが形成されているにもかかわらず、わずか 5000 万年しか経過していないことが明らかになった。また、40 億年前よりも古いクレーターはなかった。

1973 年には、カリフォルニア工科大学（同州パサデナ）の Fouad Tera らが、この極端な衝突頻度を説明するのに「大変動」という言葉を初めて用いた。彼らはこの年の惑星科学会の論文要旨に、「当時の地球からは、すばらしいショーが見えたとはいえない。ただし、頑丈なシェルターがあればの話だが」と書いている。

実際、「高みの見物」というわけにはいかないはずだった。それは、地球上で繰り広げられた最大のショーでもあり、生き延びられたらめっけものといえるようなショーだったからである。月

と地球の距離は小さいため、月に起きたことはすべて地球にも同様、あるいはそれ以上に起きてしまうのである。しかし、地球への天体衝突の記録は失われてしまった。地球にできたクレーターの大半は、風化や浸食やプレートの移動による間断ない攪拌のために消えてしまったからである。月惑星研究所（テキサス州ヒューストン）の地質学者 David Kring は、「ですから月は、地球上の出来事の記録板のようなものなのです」と話す。

それはなんとすさまじい出来事だった。Kring は、地球への天体衝突をモデル化してみた²。その際、地球は月よりもはるかに大きな標的であるため、月に起きたことのスケールを 13 倍に見積もりを進めていった。彼らは、「神酒の海」の形成から「雨の海」の形成までの 5000 万年間に、天体衝突によって大きな盆地が 15 個形成されたという Wilhelms の見積もりに基づいて、地球には数千年に 1 回の頻度で直径 20 キロメートルのクレーターを作るサイズの天体が衝突していたはずだと結論した。さらに、100 万年に 1 回の頻度で、直径 1000 キロメートルの盆地を作るサイズの天体が衝突していたという。そうした衝突は地球の海を蒸発させ、その蒸気は地表の生物を絶滅させただろう。Kring は、岩が気化したガスは、衝突後数千年にわたって残留していた可能性があると考えている。

これで驚いてはならない。Kring の見積もりは、実はとても控え目なものだ。地球の強い重力は、月の 500 倍の頻度で天体を引きつける可能性がある。さらに Kring は、30 個もの大きな盆地を計算から除外している。Wilhelms はこれらの盆地を、南極－エイトケン盆地よりも後、「神酒の海」よりも前に形成されたとしているからである。もしも南極－エイトケン盆地が「神酒の海」よりもあまり古くないことがわかれれば、天体が地球に衝突していた頻度はさらに高かったことになる。

さらに、Wilhelms が見つけた盆地

タイムカプセル：この写真の薄片のように、衝突で溶融した「月の石」は、すべてほぼ同じ時期にできている。

の数は多くの研究の基準となってきたが、今では古く、かなり控え目なものになっている。米航空宇宙局（NASA）ゴダード宇宙飛行センター（メリーランド州グリーンベルト）のHerbert Freyは、最近、月探査機クレメンタインが測定した地形データにもとづく新たな盆地探しを終えた。Freyらの研究チームは2008年の月惑星科学会で、直径300キロメートル以上の盆地を92個報告した。これはWilhelmsが見つけた盆地の数の2倍である。「私たちは、月に衝突した天体の数を実際よりひどく少なく見積もっていたのです」とFreyは話す。「これはおそらく、40億年前の地球がすむにたえない場所であったことを意味しています」。

しかし、一部の宇宙生物学者は、大変動は、生物を絶滅させるどころか、生命を誕生させるきっかけになった可能性があるかとみている。地球に衝突したすい星や小惑星からは、外来の有機物がもたらされただろう。爆撃は地殻を貫いてマントル内部の深い対流をかきたて、大陸地殻を作り出したかもしれない。また、表面の海ははぎ取られてしまったかもしれないが、地表下の水と熱により、熱を好む生物がはぐくまれた可能性がある。系統樹の中で、3つの主要な枝（細菌、古細菌、真核生物）の祖先に熱を好む傾向があるのは、おそらく偶然の一致ではないだろう³。

大変動の原因

「月の石」が明らかにしたこと1つは、爆撃は38億5000万年前にかなり急速に沈静化したということである。しかし、そもそも何がこの爆撃を引き起こしたのだろうか？ 一部の研究者は、太陽系が形成されたときに残った微惑星が衝突するのは当然であると主張してきた。しかし、長期にわたる爆撃を可能にするだけの数の微惑星が残ったことの明確な説明はない。大変動を引き起こしたのは微惑星とは別のタイプの小天体であったと主張する研究者もいるが、そうだとしたら、新しい小天体の

動きを引き起こした原因は何だったのだろうか？ 「自分ではそのメカニズムを思いつかないという理由から、この仮説を気に入らなかった人もいました」とWilhelmsは話す。

数年前、ブラジル、米国、フランスのニースの研究者らが、1つの説明を提案した。このチームは、天王星と海王星が普通に考えられるよりも太陽から遠く、離心率の大きな軌道を回っている理由を説明するために、太陽系の力学モデルを構築した⁴。彼らのモデル（「ニースモデル」ともよばれる）は、海王星の軌道が天王星の軌道の内側にある原始太陽系から出発し、そこから時間を進めていった。約7億年後に、木星と土星がある軌道パターンに入ると、その重力の作用を受けて、天王星と海王星が太陽からもっと遠くにはじき飛ばされた。さらにその結果、冥王星の彼方に広がるカイパーベルト（氷でできたすい星群が作る巨大な円盤）がかき乱されて、すい星を内太陽系へと向かわせたのである。

しかし、この説明には問題が1つあった。月のクレーター内部の物質は、化学組成においても大きさの分布においても、小惑星とはよく一致するが、すい星とは一致しないのである。これは、最も多く、あるいは、最も新しい時期に月を爆撃していた天体が小惑星であったことを示唆している。ニースモデルの提案者たちは、この問題に対しては、「木星と土星の軌道変化は、火星と木星の間にある小惑星帯も乱したのだらう」と答えている。地球や月などに小惑星を衝突させるには、それで十分である。

Korotевは現在、ニースモデルのおかげもあって、月の大変動仮説を支持しているという。彼が大変動仮説に関して抱いていたもう1つの長年の疑問も、別の研究により解決されつつある。Korotевは、ほとんどの「月の石」が約39億年前のものであったのは、単に、宇宙飛行士の石の選択が偏っていたせいではないかと疑っていたのである。彼は、ほかの数人の研究者とともに、宇

宙飛行士たちは「雨の海」を作った衝突の際にできた石ばかりを拾ってきて、科学者たちはそれらを別々の衝突の際にできたものと誤解したのではないかと主張していた。

キャンベラにあるオーストラリア国立大学の宇宙化学者 Marc Norman は、アポロ計画で収集された試料から新しいデータを引き出す努力を続けており、Korotевの主張に対する反証となりうる結果を得ている。Normanが調べているのは衝突溶融物である。衝突溶融物は再結晶した残留物であり、衝突によって融けた石の同位体記録を含んでいる。Normanは、アポロ計画で収集された石の1つに含まれる21の衝突溶融物の形成時期を決定し、それらが2億年の範囲に収まることを明らかにした⁵。さらに彼は、衝突溶融物の形成時期がいくつかのグループに分かれていることに気づき、これらが4回の別々の衝突を表していると解釈した。この解釈が正しいならば、短期間の爆撃の間に多数の大きな盆地が形成されたという仮説のさらなる裏づけとなるだろう。

短期間の爆撃があったことを裏づける証拠は隕石からも得られている。アポロ計画で収集された石には地理的な分布に制約があったが、隕石は、月のあらゆるところからやって来ていると考えられる。現在マーシャル宇宙飛行センター（アラバマ州ハンツビル）に所属している Barbara Cohen は、Kringとともに研究を行い、7回から9回の衝突があったことを示唆する衝突溶融物を含む4個の隕石を分析した。彼女は、どの溶融物も39億2000万年前より古くはないことを見いだした⁶。10年前に、生命の証拠を含んでいるとされて有名になった火星の隕石「アランヒルズ84001」も、月の大変動仮説を支持している。45億年前にできたこの石の一部は、39億年前に起きた何らかの重大事件により変化していたのである。

再び月へ

それでも、一部の月科学者たちは、宇

John Young らの宇宙飛行士は、分析に最も適した石を選ぶ地質学的訓練を受けていた。写真は、1972 年のアポロ 16 号での同飛行士。

宇宙飛行士が拾ってきた「月の石」にも、空から降ってきた「月の石」にも満足していない。「南極－エイトケン盆地の形成時期を知る最良の方法は、そこへ行き、石を拾ってきて、その形成時期を調べることだ」と彼らはいふ。

単純なロボット着陸機を月に送り込む方法は比較的安くすむだろうが、ロボットの年代決定能力は十分ではない。放射性同位体年代決定には質量分析計が必要であり、着陸機に搭載できる程度の大きさの装置だと、測定誤差は 10 パーセントもある。40 億年前にできた石なら 4 億年の誤差があることになり、これは、南極－エイトケン盆地の年代決定計画の趣旨には合わない大きさである。「40 億年前と 42 億年前は違うということをお願いののですから、現時点では実現していないレベルの測定精度が必要なのです」と Taylor は説明する。

このため、月科学者のあるグループは、南極－エイトケン盆地サンプルリターン計画を強く推している。この計画が実現すれば、1976 年にソ連が最後に月に送り込んだルナ探査機が 170 グ

ラムの土を持ち帰ってきて以来、初の月サンプルが地球にもたらされることになる。ワシントン大学（ミズーリ州セントルイス）の Brad Jolliff が率いるこのグループは、NASA の公募制太陽系探査プロジェクト「ニューフロンティア・プログラム」の 6 億 5000 万ドル（約 700 億円）を上限とする探査計画の部門に応募するつもりである。今回の提案の受付は今年の 12 月に始まり、選定は 2010 年に行われ、打ち上げ日は 2015 年以降になる。

2005 年に行われた前回のニューフロンティア・プログラムの公募では、「ムーンライズ計画」と名づけられた南極－エイトケン盆地サンプルリターン計画が最終選考まで残ったものの、惜しくも「ジュノー計画」に敗れた。ジュノー計画は、木星に探査機を送り込んで周回軌道に乗せ、さまざまな観測を行うというものであり、2011 年の打ち上げをめざしている。ムーンライズ計画の副研究責任者だった Jolliff は、その敗因を、「多くの段階と構成要素を必要とするサンプルリターン計画は、単純なジュノー

計画よりもリスクが高いと見なされたのです」と説明する。

当時のムーンライズ計画は、2 機の着陸機を別々の場所に送り込むことを提案していた。1 機は南極－エイトケン盆地の縁の近くに着陸させ、もう 1 機は衝突溶融物が集まりやすい盆地の中心部に着陸させる。Jolliff は今、盆地の中心部に 1 機だけ着陸機を送り込むという選択肢も考えている。人類を再び月に送り込むという NASA の計画が実現するなら、2020 年までに宇宙飛行士たちが南極－エイトケン盆地の中にあるシャクルトンクレーターで月面基地の建設に取りかかっているはずであり、そうならば、盆地の縁の近くに行くことになるからだ。ムーンライズ着陸船は、盆地の中心部の石と土を 1 キログラム程度集めて地球に戻ってくるだけでよいと Jolliff は説明する。

新しいムーンライズ計画によってもたらされるサンプルを使えば、月科学者たちは多くの衝突溶融物結晶の年代を決めることができるだろう。最も古く、最も頻繁に見られた年代が、南極－エ

イトケン盆地を作った天体衝突が起きた時期ということになる。しかし、ほかの年代を示唆する衝突溶融物のせいで、この推論に曖昧さが残ることは間違いない。南極－イトケン盆地の中には、大きな盆地がほかに 5 個以上あるからだ。そして論争は続くだろう。「広大な土地の一点に着陸してひとすくいの土を拾うだけでは、求めている答えは得られません」と Norman は話す。

Norman は、宇宙探査計画をバランスのよいものにするためには、ロボット探査と有人探査の両方が必要であるとして、両方の計画を支持している。「サンプルリターン計画に関する私の見解は、ヒト対ロボットというような単純な図式ではなく、もう少し複雑です。地質学的な問題に挑戦するなら、どちらの方法でもそれなりの仕事はできるでしょう。挑戦しないなら、どちらの方法でも仕事にはなりません」と彼は話す。しかし、ほかの研究者たちは、月の裏側に

ある大きな盆地の謎は、人間がそこへ行き、天体衝突が作った窪みの中から石を拾って帰るまでは解決しないだろうと主張している。

米政府説明責任局（GAO）によると、人類を再び月に送り込むためのプロジェクトには 20 年間で少なくとも 2300 億ドル（約 25 兆円）の予算が必要になると見積もられている。これに対して、ニューフロンティア・プロジェクトは 6 億 5000 万ドルを上限としている。一方、Korotev は、542 ドル（約 6 万円）プラス送料と保険料の 12 ドル（約 1300 円）で購入した半グラムの月の破片についてその年代を調べるだけで、謎の一部を解くことができると考えている。彼は今年中に、南極－イトケン盆地の貴重な破片の一部を Cohen に提供する予定である。Cohen はハンツビルで、先端がダイヤモンドでできたドリルをドファール 961 に打ち込み、人間の髪の毛ほどの細さのコアを数本抜

き出そうと計画している。

Cohen は、その試料をレーザーで蒸発させ、石の結晶格子の中に数十億年間閉じ込められていたアルゴンガスを測定するつもりである。このアルゴン原子の数を数えれば、月が激しい爆撃にさらされていた大変動期の年代を特定できるかもしれない。この試みが成功すれば、月科学者たちが幾星霜も探し求めてきた答えが明らかになる。それは、月からの小さな使者がもってきた、大きなメッセージである。 ■

Eric Hand は *Nature* のワシントン DC 支社で物理学を担当している。

1. Wilhelms, D. E. & Squyres, S. W. *Nature* **309**, 138-140 (1989).
2. Kring, D. & Cohen, B. *J. Geophys. Res.* **107**, 41-46 (2002).
3. Zahnle, K. & Sleep, N. H. in *Comets and the Origin of Life* (eds Thomas, P., Chyba, C. & McKay, C., eds) 175-208 (Springer, 1997).
4. Gomes, R. et al. *Nature* **435**, 466-469 (2005).
5. Norman, M. D., Duncan, R. A. & Huard J. J. *Geochim. Cosmochim. Acta* **70**, 6032-6049 (2006).
6. Cohen, B. A., Swindle, T. D. & Kring, D. A. et al. *Science* **290**, 1754-1756 (2000).