

惑星地質ニュース

発行人：惑星地質研究会 白尾元理・出村裕英
事務局：〒111-0035 台東区西浅草 1-3-11 白尾方

PLANETARY GEOLOGY NEWS

Vol.20 No.4 Dec. 2008

TEL :03-3844-5945 FAX:03-3844-5930
E-mail: motomaro@ga2.so-net.ne.jp

ふたたび木星へ ―国際共同ミッションの実現に向けて―

木村 淳 KIMURA Jun

パイオニア、ボイジャー、そしてガリレオと続いた木星系の探査によって、我々は木星やその衛星などに関して驚くほど刺激的で示唆に富む知見を手に入れた。しかし同時に、現状の理解では説明の難しい事実も数多く明らかとなった。それを受けて現在、次なる木星系の探査計画の気運が国内のみならず全世界的に高まっている。本稿では、これまでの木星系の調査で得られた知見、特に衛星に対する理解の現状を簡単に解説するとともに、次期木星系探査に関する探査検討の現状を紹介したい。

惑星科学における木星系の重要性

太陽系の全容や起源を明らかにする上で、木星系がその大きな鍵を握っていることは言うまでもない。木星は、太陽を除く太陽系天体の中で他を圧倒する大きな質量と角運動量を持つ点で太陽系を代表する存在であるだけでなく、近年進歩のめざましい系外惑星の観測では、木星のような巨大ガス惑星が宇宙において普遍的な形態であることが分かってきた。すなわち木星系の起源の解明とは、より普遍的な惑星形成過程の解明という惑星科学の究極的な目標へと繋がる重要な研究課題と言える。また木星は、惑星サイズとも言える大きな衛星（ガリレオ衛星と呼ばれる4つの衛星）を従えており、それら各々が表層および内部に個性的な特徴を持っている。激しい火山

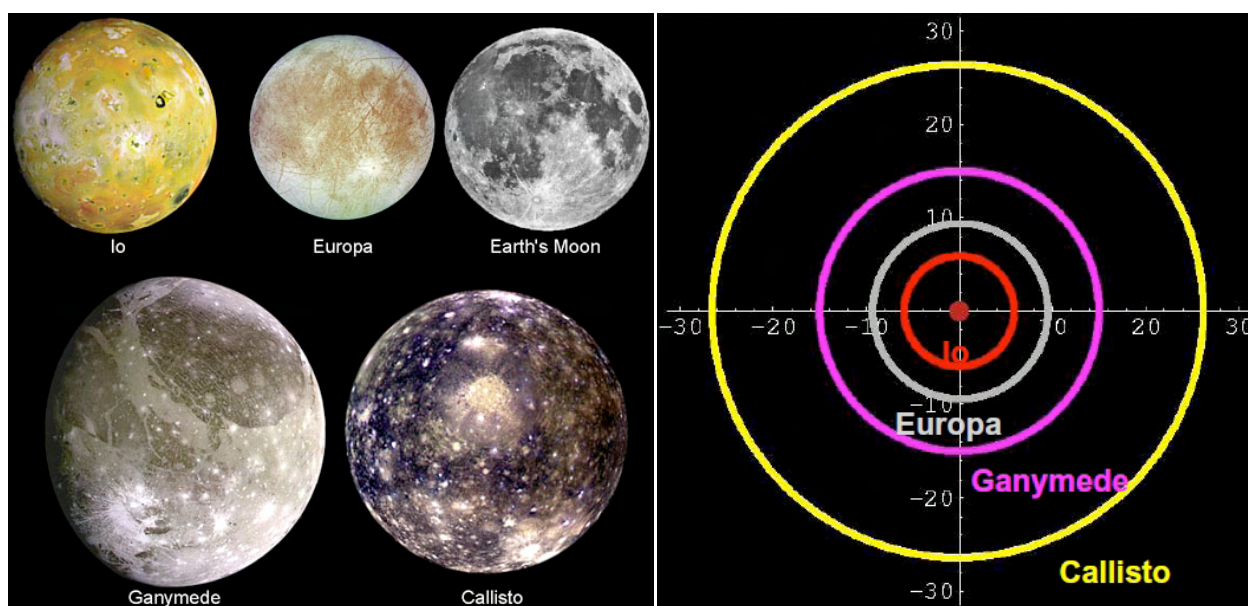


図1（左） ガリレオ衛星と地球の月。実際のサイズ比に合わせてある。

図2（右） ガリレオ衛星の軌道。軸上の数字は木星半径を表し、例えばエウロパの軌道は木星中心から約10木星半径、およそ67万kmにある。ちなみに木星中心からイオまでの距離は、地球中心から月までの距離にほぼ等しい。

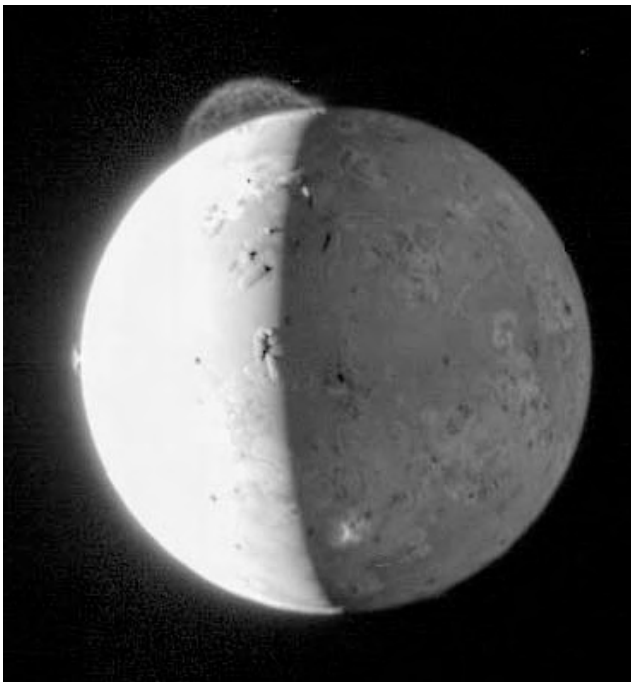


図3 冥王星探査機ニュー・ホライズンズが撮影したイオ。北極付近から高さ 290 km に達する噴煙を上げるトゥバシュター (Tvashtar) 火山が見える。

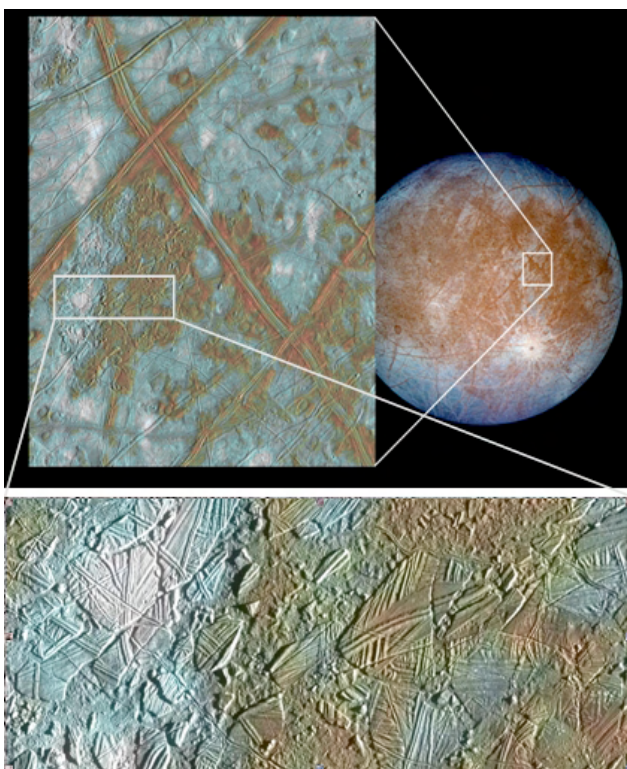


図4 探査機ガリレオが撮影した、エウロパのコナマラ (Conamara)・カオスと呼ばれる、表面の一部が崩れた領域。拡大画像は縦 30 km、横 70 km をカバーしており、色調を強めてある。この地形の成因については諸説あるが、地球の流氷のように見えることから、この領域の氷が一時的に融けたか、表面のすぐ下で柔らかい氷が対流したことで出来たと考えられている。

活動を持ち表面が常に塗り替えられているイオ、一見すると滑らかな氷の世界だが無数のひび割れや断層などに覆われているエウロパ、大規模な断層に覆われた比較的新しい地域と衝突クレーターが埋め尽くす古い地域とに二分されるガニメデ、そして全面を衝突クレーターに覆われ地質活動が不活発なカリスト。このようにガリレオ衛星は、地球以上に地質学的に活発なものからほとんど活動の痕跡を示さないものまで、実に幅の広い個性を持っている。こうした点で木星系は“ミニ太陽系”とも例えられ、木星とその衛星系の特徴を理解することは太陽系全体の天体が持つ多様性の原因や意味を理解していく上での重要なステップにもなるのである。

これまでの探査で見えてきた衛星の姿

惑星科学における木星系の重要性は当然かなり以前から認識されており、これまでに1970～80年代にパイオニアおよびボイジャーが木星を通過しながらの調査を行い、1990年代後半から2001年にかけてはガリレオ探査機が木星系に留まって詳細な観測を行った。現在の我々が木星の衛星、特にガリレオ衛星に対して持つ情報の大部分はガリレオ探査機によって得られたものである。

ガリレオ衛星の中で最も木星に近いイオは、太陽系で最も活動的な固体天体であり、活発な火山活動と溶岩流の噴出によって表面が常に塗り替えられている。探査機の赤外観測などから、イオの地殻熱流量は全球平均で 1.5 W/m^2 以上と推定されており、この値は現在の地球の平均地殻熱流量 0.06 W/m^2 をはるかに上回る。これほどの高い熱エネルギーを作り出すことには、イオと木星との間に働く潮汐力が強く寄与している。イオの軌道は完全な円ではないため、衛星が公転する間に木星か

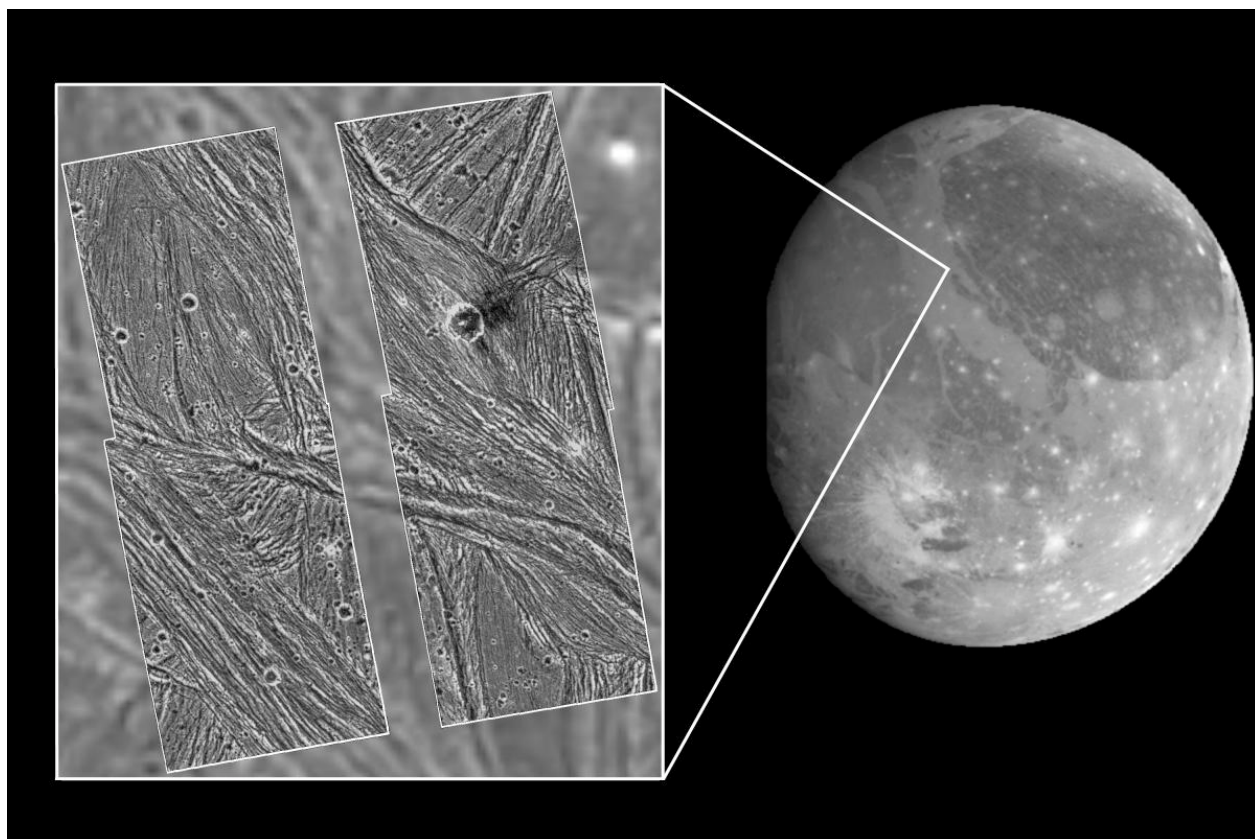


図5 ガニメデの断層地形。撮像範囲は縦 120 km、横 110 km で、ボイジャー探査機が撮影した低解像度画像の上に、ガリレオ探査機による高解像度の画像を重ねてある。表面が伸展力を受けて連続した正断層を形成してできたと考えられている。

ら受ける潮汐力が時々刻々変化する。すると衛星は周期的に揉まれ（潮汐変形を受け）、摩擦によって加熱される。この一連の発熱過程を潮汐加熱と呼ぶ。これによってイオは、岩石が融点以上に熱せられ、溶岩となって噴出しているのである。

またイオのひとつ外側を回るエウロパに対しても、潮汐加熱は大きな影響を及ぼすと考えられている。エウロパの表面は岩石質のイオと異なり、 H_2O 主体の水で覆われている（木星系以遠の固体天体はほぼあまねく水を多量に有していることから、氷衛星とも呼ばれる）。このエウロパでは、ガリレオ探査機の電磁気探査によって表面下に全球的な液体の水の層、いわゆる地下海が存在が強く示唆されている。また同様の電磁氣的傾向はガニメデやカリストにおいても（エウロパよりは弱いながらも）確認され、冷たい氷の世界とされていた氷衛星の従来の見方は大きな転換を迫られることになった。そしてこの海を数十億年にわたって凍結から免れさせてきた熱源もまた、潮汐加熱だと考えられている。

新たに浮上した謎

このように、ガリレオ探査機による調査は科学者の想像を超える刺激的な知見を数多くもたらしたが、それと同時に説明のつかない謎や解決に至らない問題も浮き彫りとなった。

そもそも衛星の内部に海があることは可能性の域を出ておらず、海が存在する深さや厚さ、組成については特定できていない。言い換えれば、海を覆う固体氷殻の厚さが見出せておらず、潮汐加熱の大きさを具体的に見積もることを困難にさせている。また潮汐加熱は、単に火山を駆動したり

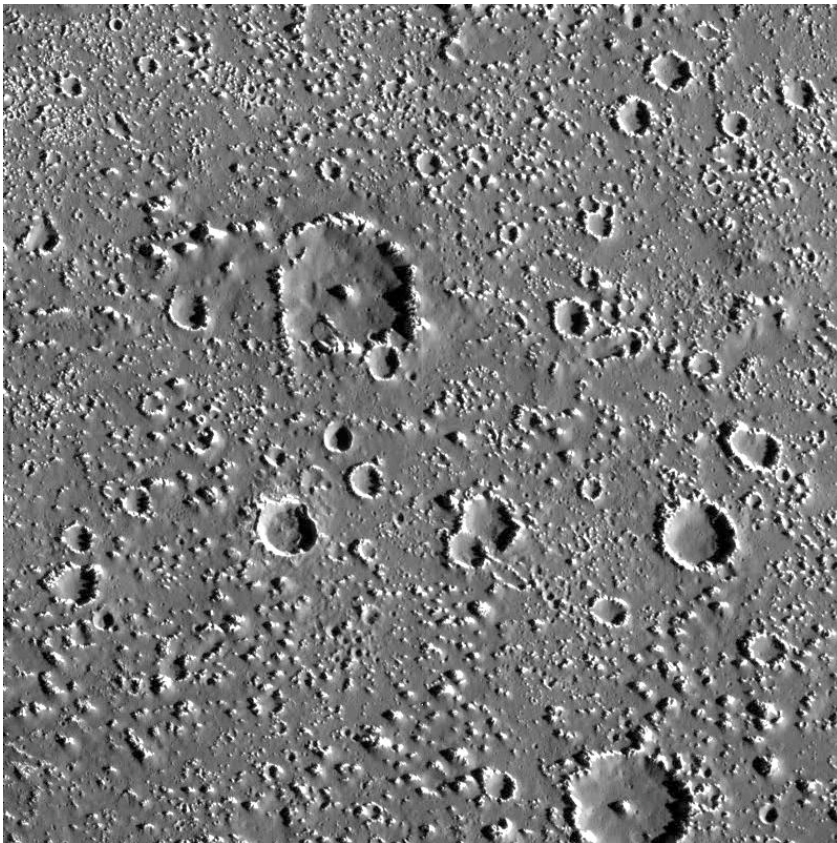


図 6 ガリレオ探査機が撮影したカリスト表面のクローズアップ画像で、75 km 四方の領域が撮影されている。大小さまざまなクレーターが表面を埋め尽くしている。暗灰色の物質が薄く覆っているようにも見え、クレーターのリムや壁面などの高まった部分に白く純度の高い氷が露出している。

海を作るためだけの機構ではない。重力ポテンシャルの変化を熱に変換するこの過程は、衛星全体を加熱し氷と岩石の大規模な分離を引き起こすような内部構造の進化に大きく寄与したり、木星との間に重力的なトルクを生じさせて軌道運動を変化させうるなど、惑星－衛星系システムの進化を根本で支配する重要なメカニズムである。また、潮汐エネルギーが支配する天体は木星の衛星だけではないため、これを詳細に調べることは太陽系天体全体の進化を論じる上でも極めて重要である。最近では土星の衛星エンセラダスの氷噴出活動も潮汐力が主原因と考えられているほか、太古の月も地球に近かった時代には激しい潮汐作用を経験した可能性がある。

このような現状を受けて、地下海の直接検出を主目標に据えた次世代の木星探査計画が検討されている。具体的には、氷殻を透過するレーダーサウンダーで氷と水の境界面を検出したり、衛星周回軌道上で継続的な電磁気観測を行うことで地下海の規模や組成に関する強い制約を得ること、などである。また高度計などによって衛星の潮汐変形の大きさを検知できれば氷殻の厚さを制約できたり（すなわち地下海の有無に判断がつく）、表面下の重力や熱の異常を検出することで、氷殻の力学的・熱的構造を推測するなど、様々なアイデアが議論されている。

国際協力下での次期木星圏探査へ

過去の探査によって木星の衛星系に対する知見は飛躍的に広がったが、上で述べたようにサイエンス面で様々な未解決問題が残されているほか、ガリレオ探査機はアンテナ展開に失敗してデータ通信量に大きな制約を受け、取得した科学データ量が限定されるという重大な障害もあった。これによって例えば衛星表面の撮像領域が非常に限定的になるなどし、月に対して周回衛星「かぐや」が行っているような大局的な議論に踏み込めない現状がある。

そこで次なる木星系探査計画の検討が全世界的に本格化しており、我が国も国際共同木星探査計画として検討を開始している。この探査計画は、2006 年より日欧のグループが水星探査計画 Bepi Colombo をモデルにして、共同で木星およびその衛星（特にエウロパ）の総合的探査を行うために開始した計画である。2007 年のはじめには JAXA 宇宙科学研究本部にワーキンググループの設立が認められ、欧州のグループと国内外で会合を持つなど密接に連携しながらミッション実現を目指している。本計画は LAPLACE（ラプラス）という名称で欧州宇宙機関（ESA）の宇宙科学計画“COSMIC VISION”に提案され、厳しい 1 次選考を通過した。さらにその後、米国航空宇宙局（NASA）で計画している Europa Explorer 計画とも連携し、現在は 3 機体制の総合探査を行う計画（EJSM: Europa Jupiter System Mission）へと展開している。

EJSM においては、NASA が、JEO (Jupiter Europa Orbiter: エウロパ周回機)、ESA が、JGO (Jupiter Ganymede Orbiter: ガリレオ衛星フライバイ／ガニメデ周回機)、そして JAXA が、JMO (Jupiter Magnetosphere Orbiter: 磁気圏観測機) を担当することになっている。さらには、ロシアが独自にエウロパ着陸機を到達させることを検討中である。前述のようにエウロパやガニメデでは地下海が存在が強く示唆されており、生命の存在まで議論されていることなどから、EJSM ではレーダーなどで地下海の姿を明らかにすることがトップサイエンスとなっている。

探査機の打上げは 2020 年以降を予定しており、その後 6～7 年かけて木星に到着する計画である。当初案では、日本の JMO は ESA の JGO に相乗りする形で打ち上げられる計画であったが、現在は日本独自の打ち上げ案の検討も行っている。

(宇宙航空研究開発機構 月惑星探査プログラムグループ)

マグマと氷が会える時 ―アザス高地への遠征調査―

小松吾郎 KOMATSU Goro

「惑星地質学にとって地球の地質学からのフィードバックは大変有益である」とは前に惑星地質ニュースに書いたことであるが（2002 年 14 巻 4 号）、言っているだけではダメなので私も自分で野外調査に出かけている。今回は 2005 年夏にロシア科学アカデミー・シベリア支部と共同で遠征調



査を行ったアザス高地の火山群（研究地域の中心位置は北緯 52°25′、東経 98°25′、左図の中央黒丸）について紹介する。

アザス高地はシベリア南部、ロシア連邦内のトゥバ共和国東部に位置する海拔 2000 m 以上にも達する火山台地であるが、その詳細はほとんど知られていない。この台地を含むサヤン山系は第四紀に広く氷に覆われていた時期が何度もあったとされている。また玄武岩質の火山活動が断続的におきた。



図 1 アザス高地への道中で休憩する。

このような状況は古代の火星でも十分にありうる。火星は、玄武岩などの火山岩が広く地表に存在し、過去には低緯度地帯まで氷が覆っていた可能性をもつ惑星である。よってマグマと氷の相互作用が研究対象の一つとなっている。私がアザス高地を調査するのはこのためであるが、氷と火山活動相互作用はアイスランド、カナダ、アラスカ、南極でも知られており、研究も進んでいる。

私は天の邪鬼なので、他人があまり仕事をしていない地域に踏み込むのが好きである。現地に到達するのに馬でキャラバンを組んで行く必要があるとすればなおさらである。ダートの道さえもなく、アザス高地に到達するにはヘリコプターで行くか、四輪駆動車で到達できる現地に一番近いブリヤート人の家から馬で5日間かけて行くしかない。お金のない我々は後者であるが、その方がはるかに面白い（図1）。

道中、急峻な山岳地帯、広大な湿原、激流渦巻く河川など行く手に障害が次々に現れ、嵐や蚊の大群にも襲われることしばしばであったが、その甲斐あって目の前に出現した火山群はそのテーブルのような形態でもって驚かせてくれた（図2）。火山と言えば一般的に円錐形あるいはカルデラという感覚を持っている私にとって、とても奇妙である。氷床（氷河の中でも面的に大きいものをここでは便宜的にそう呼ぶ）のような厚い氷の下でマグマが噴出すると、その周囲の氷が溶け、溶岩が急激に冷やされるためハイアロクラスタイト（hyaloclastite）と呼ばれる破碎されたガラス質の火山岩が生成される。枕状溶岩の破片が入っていることもある。ハイアロクラスタイトは氷床内の融水湖の中で堆積するが、マグマの噴出が続くと成長した山体が氷床の頂上に達する。続く山体成長では、溶岩が玄武岩質の場合には粘性が低いので、傾斜のゆるいほとんど平坦な山体をつくる。

こうして最終的に頂上が平たく側面が急斜面のテーブルのような形の火山が形成されるが、これらは火山学ではトゥヤ（tuya）と呼ばれる（トゥヤも含めた氷の下でマグマが噴出してできる火山一般の総称は氷底火山である）。もちろんこれは単純化した形成過程であるが、現実には山体成長が氷床の頂上に到達しない場合や側面崩壊、氷床より高くなった段階での火砕丘形成、融水の放出による洪水侵食、マグマ噴出以後の氷河の浸食作用などにより個々の山体は多様な形態を示す。



図 2 アザス高地にある氷底火山の一つ、ブリオゼルニィ山。現在氷床は消失しており、また歴史時代に火成活動は記録されていない。

いずれにせよ氷床（厳密に言えば水にかこまれた融水湖面—氷床の頂上よりやや低い）より高い位置に存在する火山岩はハイアロクラスタイトではなく、空気中で溶岩が固結したものであることが多い。そこでハイアロクラスタイトの存在する最高標高（現実には溶岩の層の厚さが山体と比べてかなり薄いので平たい山頂部の平均標高で近似する）と周りの地形の高度の差でもって当時の氷床の厚さを大体推定することができる。アザス高地ではその厚さは約 300～600 m と推定された。

面白いことにアザス高地にはハイアロクラスタイトと関連がないスコリア丘も存在している。これは氷の分布が小さくなったか、あるいは完全に消滅した時期にも火成活動があったことを示す。したがって火山の形成年代がわかれば、アザス高地が氷に覆われていた時期の推定ができるのだ。年代測定の精度にやや問題があるのだが、最後にアザス高地が広範囲に連続した氷で覆われていたのは 5 万年以前ではないかと考えられている。

このようにしてシベリアにはマグマと氷が相互作用してできる火山地形が存在し、その研究は火星の似たような地形の理解に大きな寄与をすると考えられている。私にとっては 3 週間で 10kg も痩せてしまった過酷な遠征調査であったが、得るものが大きい経験だった。

（国際惑星科学研究大学院、ペスカーラ、イタリア）

いま世界の月探査機は

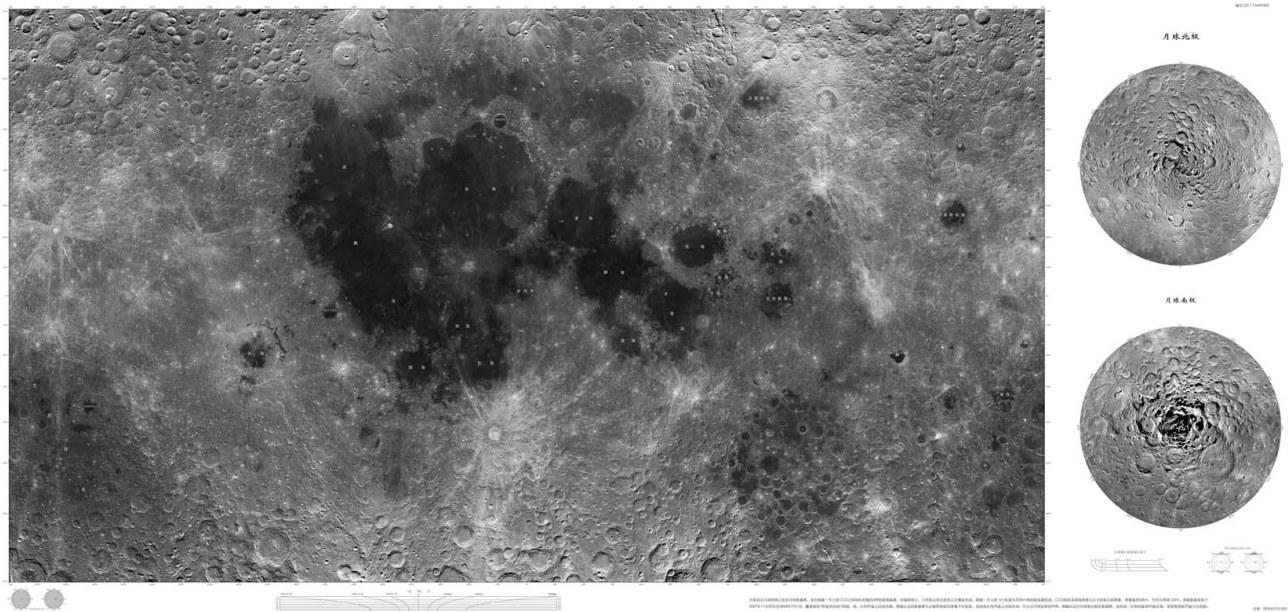
白尾元理 SHIRAO Motomaro

現在、日本の「かぐや」、中国の「嫦娥 1 号」、インドの「チャンドラヤーン 1 号」が月軌道を周回し、来年春には米国の LRO が加わる。ここではそれぞれの現状を紹介する。

「かぐや」（日本）

2007 年 9 月 14 日に種子島宇宙センターから打ち上げられた「かぐや」は、2007 年 10 月 18 日には高度 100km の月周回極軌道に入った。2007 年 12 月 21 日からは定常運用をはじめ、2008 年の 10 月 31 日に、当初から予定されていた定常運用を完了した。

中国首次月球探测工程全月球影像图



「嫦娥 1 号」の画像によって作られた月面全図 ((C)Xinhua Photo)

14 の観測機器のうち、蛍光 X 線分光計 (XRF)、粒子線計測器 (CPS)、ガンマ線分光計 (GRS)、月レーダーサウンダー (LALT) には不具合が発生して観測できない期間があったが、その他の観測機器は順調で、成果は HP (http://www.jaxa.jp/press/2008/12/20081203_sac_kaguya.pdf) 等に紹介されている。注目すべき成果としては、「かぐや」とリレー衛星「おうな」を用いた裏側重力の精密測定、地形カメラによる南極域のシャクルトンクレーターの詳細観測、裏側の海の年代決定、スペクトルプロファイラーによるクレーター中央丘の詳細観測、レーザー高度計による南北極地域の日照条件観測などがあげられる。またハイビジョンカメラでは当初の目的であった地球の出入のみではなく、100 本 (8 分撮影の映像を 1 分再生) 以上の月面ビデオ撮影にも成功している。

2008 年 11 月 1 日から「かぐや」はすでに後期運用に入っており、2009 年 3 月中旬までは現在の高度 100km で観測を続け、3 月中旬から 4 月下旬までは高度 50km の低高度運用、5 月からは 20km (南極) × 100km (北極) のだ円軌道での運用、そして 8 月以前に月へ衝突する予定である。

(「かぐや」の HP http://www.selene.jaxa.jp/index_j.htm)

「^{じょうが}嫦娥 1 号」(中国)

2007 年 10 月 24 日に四川省西昌衛星発射センターから打ち上げられ、2007 年 11 月 5 日からは高度 200km の月周回軌道で観測していた「嫦娥 1 号」は、2008 年 12 月 9 日に軌道高度を 100km に下げることに成功し、この高度からさらに高い精度で観測を続けている。

また 2008 年 11 月 13 日には、「嫦娥 1 号」によって撮影された月面全図を公開した。この月面全図の解像力は約 120m で、クレメンタインの月面全図の解像力 200m よりは高解像力である。なお、クレメンタインの月面全図のように赤道域では太陽高度が高いために陰影に乏しくのっぺりとしている。なお国家天文台によると 2011 年末までに「嫦娥 2 号」を打上げを予定しており、解像力約 10m のカメラが搭載される予定である。

(「嫦娥 1 号」の HP <http://210.82.31.82/index.asp?modelname=eng\en-news>)

「チャンドラヤーン 1 号」(インド)

2008 年 10 月 22 日にインド西部のサテッシュ・ダワン宇宙センターから打ち上げられ、11 月 9 日には高度 100km の月周回極軌道に入って観測を始めた。11 月 14 日には月衝突プローブ (MIP: the Moon Impact Probe) を放出し、南極付近に衝突させた。「チャンドラヤーン 1 号」は、インド以外の国々の高性能な観測機器も搭載していることが特徴で、成果の一部はすでに公開されている。この探査機は全重量 675kg と小型であるが、「かぐや」(全重量約 3 トン) に類似する観測機器が多く搭載しており、今後は「かぐや」の強敵となるかもしれない。

(「チャンドラヤーン 1 号」の HP <http://www.isro.gov.in/Chandrayaan/htmls/home.htm>)

「ルナー・リコネッサンス・オービター」(LRO: 米国)

当初の計画よりも半年遅れの 2009 年 4 月 24 日、ケネディー宇宙センターからアトラス V ロケットを使って打ち上げられる予定である。現在は、熱真空試験が終了した段階である。

前述の 3 つの周回探査機が類似の観測機器を搭載しているのに対して、LRO は高度 50km から将来の月面基地建設を目指した着陸地点の選定、人体に影響を与える放射線量の測定、H₂O の存在量などを調べることに重点が置かれている。また LRO と一緒に打ち上げられる LCROSS は、月軌道に入ってまもなくアトラス V ロケットのセントール上段部を極付近の永久影地域に衝突させ、そこから巻き上げられるプルームを観測して水の氷の有無を調べる。またこのプルームは地上の大望遠鏡によっても観測される予定である。

(「LRO」の HP <http://lunar.gsfc.nasa.gov/index.html>)

書籍紹介

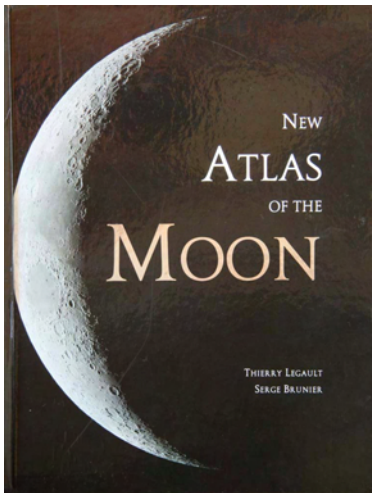
New Atlas of the Moon

Legault, T. and Brunier, S., 2006, New Atlas of the Moon. 128pp, Fireely Books Ltd, USA, ISBN-13: 978-1-55407-173-9, ISBN-10: 1-55407-173-9, 36×26cm (Amazon com. から 34.65USD + 15.98USD (送料) で購入)

天体望遠鏡を買って最初にのぞく天体といえば月である。今や 3 機の探査機が同時に月を周回する時代になったが、地上の望遠鏡から撮影した月面写真が月観測のよいガイドブックになるのは現在も変わらない。

さて最も定評ある月面写真アトラスは、1967 年に出版された『Consolidated Lunar Atlas』(G.P. Kuiper 他編) である。このアトラスは世界中の大望遠鏡で撮影された選りすぐりの月面写真を体系的に整理したもので、アポロ計画のために準備されたものである。プロが本気になって作った月面写真アトラスなので、これを越えるアトラスはなかなかできなかった。『Consolidated Lunar Atlas』は絶版になっていたが、最近 HP (http://www.lpi.usra.edu/resources/cla/maps/part_i/) で公開されているのでぜひご覧いただきたい。

ところで 2000 年以降になって口径 30cm 級の望遠鏡をもつアマチュアの月面写真のレベルが著しく向上した。その理由は、デジタルカメラの登場と画像処理技術の進歩である。彼らは Web カメラやビデオカメラを使い、その画像数百枚を RegStax のような画像処理ソフトで処理し、大気の揺れをキャンセルすることによって、高解像力の月面写真を得ることに成功し、ようやく 40 年前の



プロの仕事を超えることができたのである。『New Atlas of the Moon』はこのような写真によって作られたアトラスである。

本書は 2004 年に出版されたフランス語版を英訳したものである。2 人の著者はいずれもフランス人で、Lagault 氏が月の撮影を担当し、Brunier 氏が本書の解説を担当しているようだ。撮影地はフランスのパリ郊外で、緯度でいえば 10° も日本よりも北である。そのような場所でこれだけの解像力の写真を撮影するのだから大したものである。フランスには Dollfus、Viscary、Dragesco といった月面写真の名手がいたが、前書きによると本書もその伝統が引き継がれているようだ。

全体の構成は 12～63 ページが「月齢ごとの月」、64～107 ページが「月の拡大写真」、108～123 ページが「月の動き」等の 3 章からできている。「月齢ごとの月」の章は右ページ一杯に月全体の写真があり、その上には地名入りのビニールシートがかけられるようになっており、左ページには解説がある。方位は天体望遠鏡で見るのに合わせて月の南を上になっているが、探査機の撮影した月面写真と比較しながら見るのには不便である。

「月の拡大写真」の章では 1 ページまたは半ページに 1 つずつ合計 62 の地形を取り上げている。解説は、望遠鏡の観測ガイドに適した内容で、専門的過ぎずに簡潔に書かれている。拡大写真の解像力はすばらしいものであるが、1 枚の写真の撮影範囲が 500km 四方以下と狭いのが残念である。これはビデオカメラ + RegStax という撮影法の限界ともいえるべきものである。カバーする地域の広さでは『Consolidated Lunar Atlas』、解像力では『New Atlas of the Moon』に軍配があげられる。

本書の印刷はマレーシアで、円高の現在ならば約 5000 円で入手することができる。スパイラル綴じなので開きやすく、使い勝手もよい。望遠鏡による月面観測ファンにお勧めする。(白尾元理)

INFORMATION

●企画展「46 億年!地球のしごと!～地質写真家が見た世界の地形～」のお知らせ

本誌の編集人白尾元理の写真を中心とした企画展が現在開催中です。博物館の企画展ですので、写真 54 点に加えて、写真と関連のある化石、岩石なども展示してあります。場所は箱根登山鉄道「湯本」駅の 1 つ手前「入生田^{いりうだ}」のすぐ側です。入場は無料です。お近くにおいでの際はぜひお立ち寄り下さい。

場 所：神奈川県立生命の星・地球博物館（小田原市入生田 499 電話：0465-21-1515）
http://nh.kanagawa-museum.jp/event/tokuten/2008_c_shigoto/index.html

期 間：2008 年 12 月 6 日（土）～ 2009 年 2 月 22 日（日）9 時～ 16 時 30 分

休館日：毎週月曜（年末年始の休館は 12 月 29（月）～ 1 月 3 日（土））

編集後記：第 2 の月ラッシュで世界中が競争するなか、次の世代の小惑星や木星等の大型深宇宙ミッションは国際共同計画の枠組で進められています。探査が米露に独占されていた時代から、国際協調・競争に日本が加わる時代となったのは、感慨深いですね。 (D)