

「かぐや」に続く月探査計画

田中 智 Satoshi TANAKA

1. はじめに

月周回衛星「かぐや」が今年6月で運用を終えた。前号の『惑星地質ニュース』(Vol.21. No.2)で水谷先生が紹介されたように、ミッションとして立ち上がったのが1998年であった。構想段階からだとさらに歳月は遡り、月内部構造探査ミッションとして1990年からスタートしたLUNAR-A計画と並行して検討されたと記憶している。そこまで考えると20年を超える大変息の長いミッションであったが、一応の幕を閉じた。今後のデータ解析には多いに期待されるが、次なる月探査はどうなっているのか、そもそも月探査は今後も実施するのか、という声もささやかれ始めた。答えは当然ながらYesである。近年では次の月探査について関連学会や論文等で発表させていただく機会も多くなり、10年を超える構想段階、そして基礎開発を経ていよいよ本格的に始まろうとしている。ミッションとしてはまだ産声をあげたばかりで、今後大きく変更される可能性はあるが、JAXA（宇宙航空研究開発機構）が検討を進めてきた将来の月探査について紹介する。

2. 将来の月科学探査へむけて

今回の記事を執筆するにあたり、『惑星地質ニュース』のバックナンバーを一通り目を通した。それらの中で目にとまったのが、Jolliff 他「月の謎はどこまで解けたか」(Vol.12, No.4, 2000)である。以前にも読んだ記憶があるが再度読み直してみた。「かぐや」などの取得したデータとこれまでに得られた成果、今後期待される成果でいくつかの問題が解決もしくは大きく進歩することは間違いないとしても、

・「月の初期状態はどうだったのか」

・「月のマグマオーシャンの分化の深さはどれくらいだったか」

などという月の起源と進化に関わる根源的な問題についてはクリアな回答を得るにはまだ遠いことを感じる。表面組成のリモートセンシングではどれだけ詳細に調べ尽くしても限界がある。だからといって永遠に解けない課題ではない。私たちは着実にその回答を得るのに近づいている事は確かではあるが、彼らも文末に述べているように、「その謎を解明するのに鍵となる重要なサンプルを手にする」ことや「内部構造」を調べるが必要不可欠である。

「かぐや」では月を1年半にわたって周回し、質的にも量的にもこれ以上のものはないだろうと思われるリモートセンシング探査を行った。同種の探査は近年、ESA、中国、インド、米国でも実施され、概ね成功した（している）。これでリモートセンシング探査はやりつくしたとは言えないにしても、かなり徹底的に探査したと言ってよいだろう。これら一連の探査で月表面の地形や元素

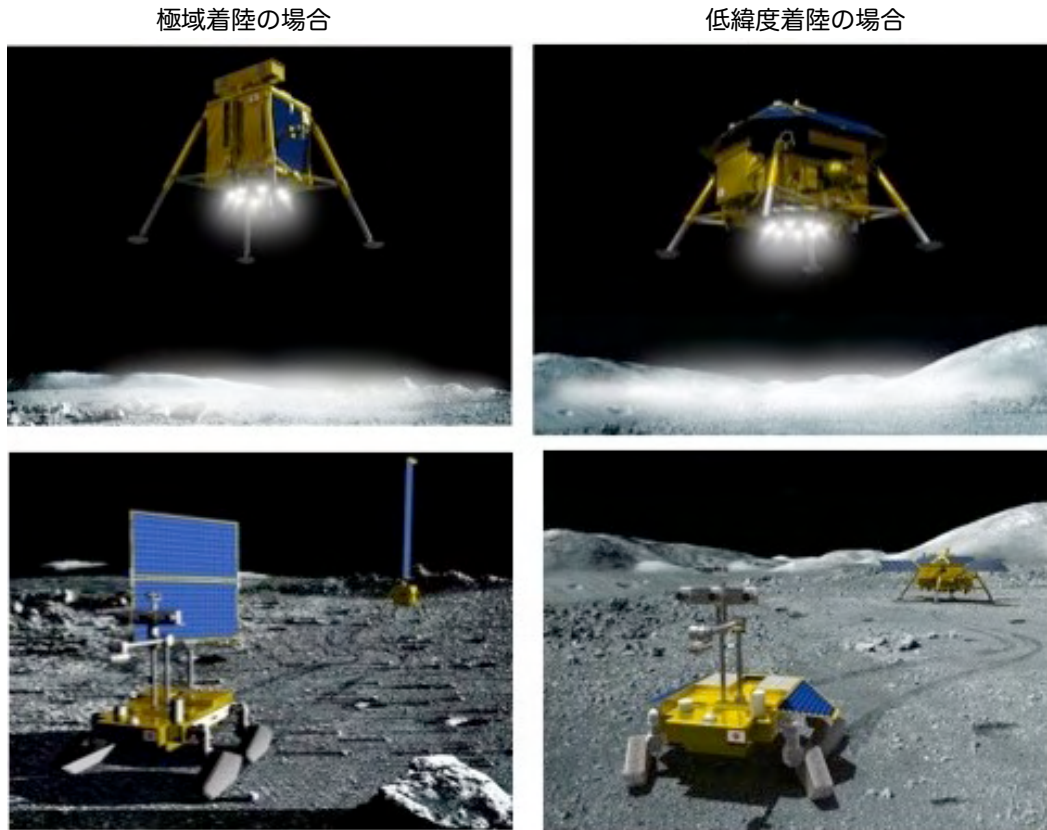


図1 SELENE-2 の構想図

分布、鉱物分布の様子は格段に詳細が分かり、浅部構造の情報を得た。ここまで段取りが揃った今、「ここには絶対行ってサンプルを直接調べたい！」候補が絞りこまれてつつある。

内部構造に関するデータはアポロミッションのデータに限定されるものの、現在でもデータを徹底的に調べつくす努力が行われているし、論文も発表されている。どういう精度のデータが欲しいのか、どういう観測装置が必要なのか、そしてどの程度の観測期間が必要か、などミッションにとって重要な「要求仕様」はすべてそろっており、それを実現する観測装置、システムの開発が日本の研究者だけでなく海外においても進められてきた。「あとは実施されるのは待つのみ」というのは少し言いすぎではあるが、意気込みは十分である。

3. SELENE-2 ミッションの概要

SELENE-2 計画は当初、2010 年代の中頃までに打ち上げることを目標として検討を進めていた「月探査着陸ミッション」である。前の「かぐや」が「SELENE (SELenological and ENGINEERING Explore: セレーネ)」計画であったので、その後続ミッションとして「SELENE-2」計画と呼んでいる。

本計画はもともと、SELENE 計画段階から着陸機を搭載する構想があったが、開発リスク分散のために着陸機を「後回し」にすることが 2000 年に決定された。途中の経緯は割愛するが、2007 年 7 月よりプリプロジェクトとして検討を開始し、現在、具体的な設計を行っている。あくまでも現時点での構想ということで簡単に紹介すると、探査機の規模としては H2A ロケットで打ち上げ可能なサイズ、すなわち、月面に到達する重量が 1000kg 程度の着陸機を考えている。着陸するま

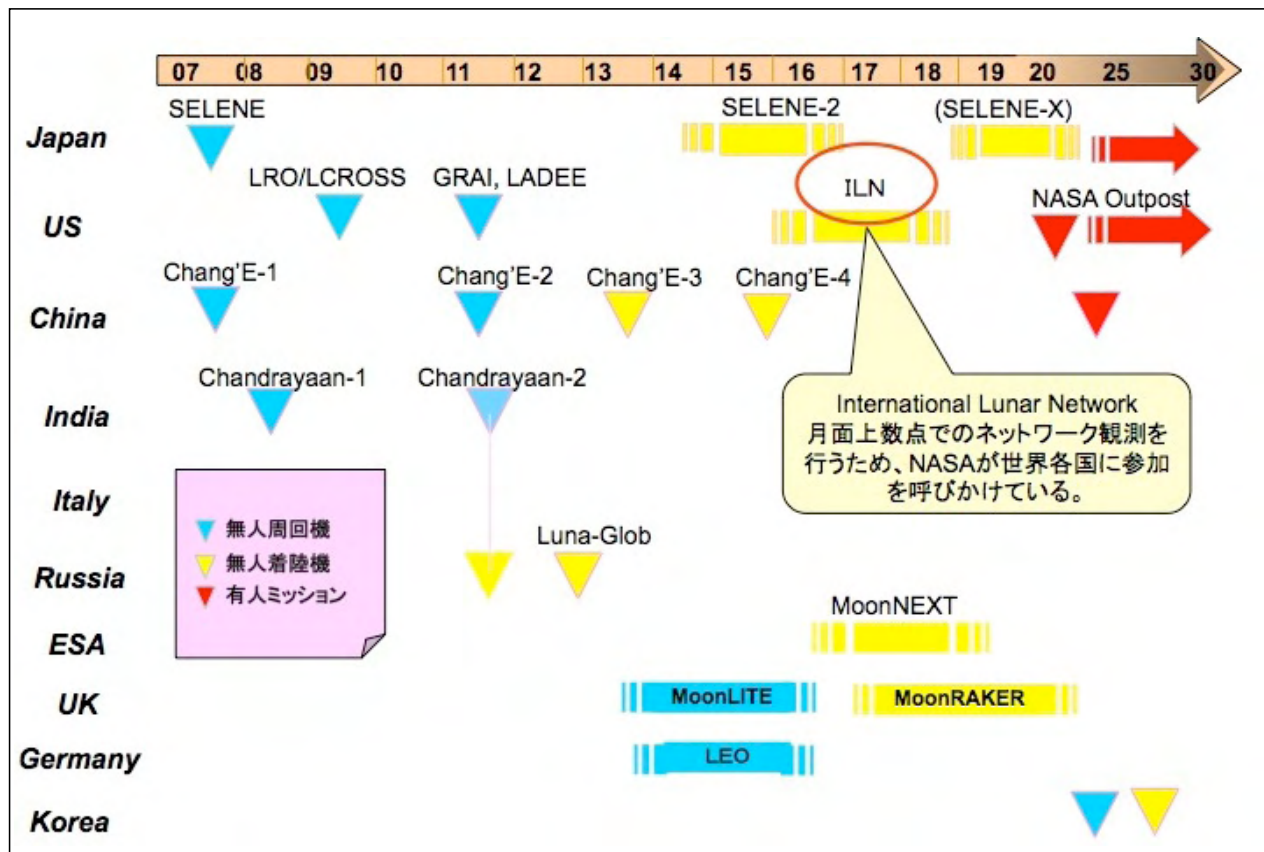


図2 世界の月探査計画状況

でに必要な、いわゆるバス機器の重量を考えると、ミッションペイロードは200～400kg程度になる設計検討結果になっている。着陸機にはローバーを搭載し、また、リレー通信と科学観測用の周回衛星から構成される。着陸地点には低中緯度だけでなく高緯度～極地域も対象にする。図1にミッションの構想図を示す。

SELENEは周回軌道からの「月の起源と進化に迫るサイエンス」が主テーマであったが、SELENE-2は必ずしもサイエンス主導とは言えない。前向きな意味で捉えれば、月には単に「月の起源や進化」を探るサイエンスの目標としてだけでなく、他もそれに劣らない魅力的なものがある。月という場所には、様々な利用価値が考えられる。安定した地面や地球からの妨害電波を遮蔽した環境を実現できる月面天文台としての利用、月資源の利用、現在のISS（国際宇宙ステーション）に続く人類進出の場、他の惑星を探査するためのステップとしての場の利用などである。

4. 内部構造の解明のために：国際協力によるグローバルミッションの実現にむけて

月を研究してきた科学者達が今最も欲しいデータはグローバルな月の全体像である。表面、表層付近のグローバル像は得ることができた。次なるステップ、「月内部のグローバルな構造」を明らかにするためには複数機で構成されたネットワーク観測が必要不可欠である。日本はこの目的のために世界に先駆けて努力してきた。「はじめに」で述べた、内部構造探査のネットワーク観測を1回のミッションで実現しようとしたのが、LUNAR-A計画であった。ミッションではペネトレータとよばれるハードランダー（高速で月表面に貫入させる）プローブを複数機（LUNAR-Aの

場合は 2 機) 投入する計画であった。技術的な困難さのためなどの理由から残念ながら 2007 年にミッションは中止されたが月惑星内部構造探査の強力なインフラになることを狙ってペネトレータの開発は現在も続けている。

内部構造探査を複数機で遂行するために、複数のランダーを着陸させるという案もある。これは、米国が検討中のミッション、International Lunar Network である。

現在、米国をはじめ諸外国（インド、中国、ロシア、ヨーロッパ諸国）も月探査の検討を本格的に開始しており、打ち上げ予定時期もかなり近接している。世界各国の月ミッションの検討状況を図 2 に示す。これらのミッションの連携した観測が実現すれば、理想的なネットワーク観測は夢ではない。各国の独自性を維持しつつ大きな成果が期待できる国際協働としての絶好の機会と言える。SELENE-2 ミッションにおいても「国際貢献と国際的地位の確保」を大きな柱として掲げている。我が国がイニシアティブをとって世界的に貢献できる大きなチャンスである。

5. 今後の動向：月探査懇談会による月探査のゆくえ

JAXA では今後の月探査について、ステップバイステップの開発をプログラムの進める構想を検討した（図 3）。着陸探査 → 帰還技術（サンプルリターン） → 有人探査というステップはとりたてて斬新なアイデアとは言えないが、現在の技術的な状況と将来の見込みなどを整理、分析し、相当数の可能性を多面的に検討し、紆余曲折を経て時間をかけて作成した「大枠」であることに価値がある。図に示された「大枠」のなかで、「さまざまなアイデアや地道に開発した技術、トップサイエンス」をどうやって入れ込んでいくかが勝負どころである。

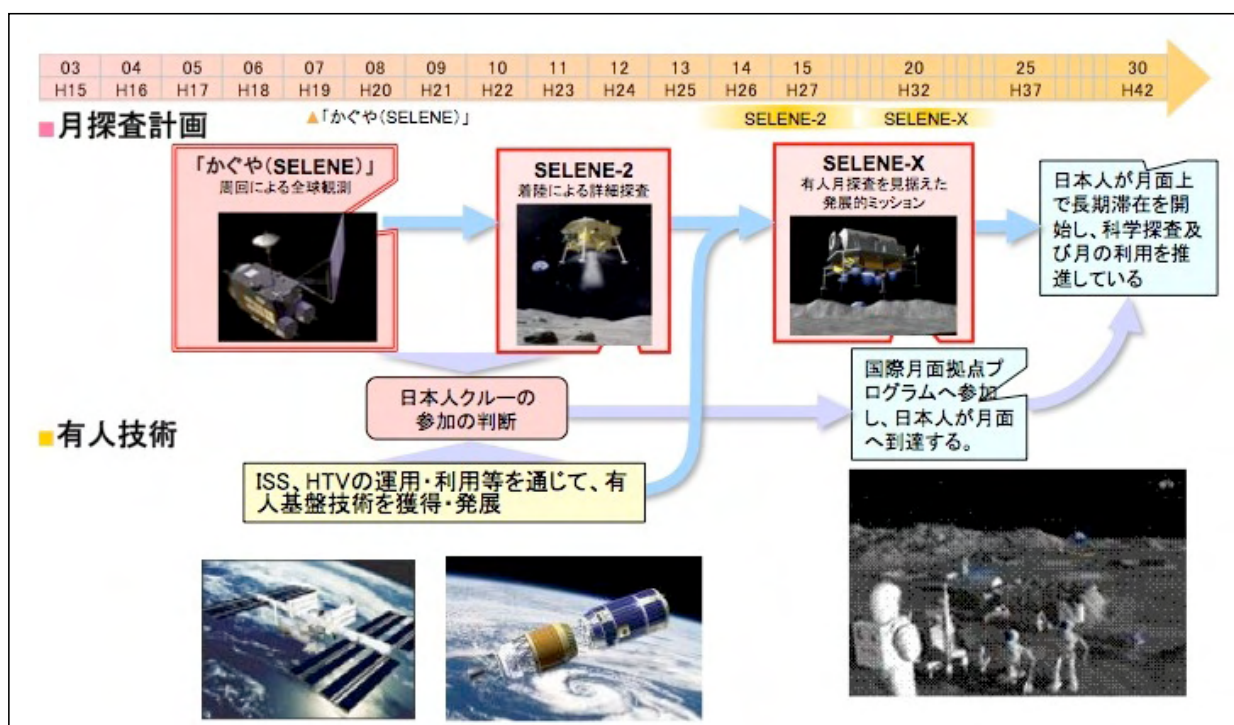
これとは別に、2009 年 6 月に制定された宇宙基本計画 (http://www.kantei.go.jp/jp/singi/utyuu/keikaku/keikaku_honbun.pdf) において月探査は大きなトピックになった。多数の項目のなかで、「月探査」に関してのみは宇宙科学プログラムから分岐して有人宇宙活動とあわせての検討課題となり、「今後約 1 年をかけて検討する事項」とされた。これにもとづき、2009 年 7 月、20 名の委員によって今後の月探査の動向を検討するための「月探査懇談会」が発足した。この議論でまとめられた方向性によって今後の月探査の行方が大きく左右されようとしている。

(http://www.kantei.go.jp/jp/singi/utyuu/tukitansa/dail/siryoul_1.pdf)

数百億円を超える予算規模の探査となると単純にサイエンスとかテクノロジーと言った枠だけでは捉えることはもはや無理があり、政治や国際関係などが絡んで事態が複雑である。しかし私たちは、月という探査対象には惑星科学を発展させる大きなブレークスルーがまだたくさん潜んでおり、重要な天体であると確信している。このためにもさまざまな境遇を乗り越えてでも月探査は「是が非でもやりぬく」必要があるし価値がある。

6. 乗り越えなければならない技術課題

月の着陸探査は過去において米国や旧ソ連がすでに実現した技術である。しかし、日本にとっては全く経験のないものであり、米国や旧ソ連がロケットや人工衛星などの技術開発に大きな努力と年月を費やしたことを考えると、どれもかなり難しそうな技術である。仮に着陸が成功できたとしても、月面の昼間の温度は 120°C、そして夜間は -200°C にも下がり、それが 14 日間も続く



ことを考えると、これまでの技術レベルの延長程度では搭載機器は耐えられそうにない。このように月着陸には大きな技術的なチャレンジを多く含んでいる。

科学的な検討をした結果、システムに要求するレベルは「かぐや」に劣らず高いものである。着陸したい位置精度は1km程度の精度、いわゆる“ピンポイント着陸”が要求されている。原子力電池を使わないで極端な温度条件に耐えることができ、長期間、できれば1年間を超える観測が望ましい。着陸機から分離されるローバーは、着陸機に搭載した観測機器との連携プレーで詳細かつ高精度の地質調査（岩石の分析）をすることを考えている。少なくとも着陸機の視界程度、つまり5km程度まで到達する能力が望まれている。トップサイエンスを実現するための壁は厚い。

ただし、悲観的な面ばかりとは言えない。日本の技術力や粘りはかなりのもので、例えば「かぐや」では電磁気探査からの要求のために電磁ノイズ的に世界一クリーンな衛星を実現できたという。VLBI 技術（超長基線干渉計）を巧みに利用して月の運動を精密に観測しようとする観測機器候補はオリジナリティの高いものであり、「かぐや」で培った技術がしっかり継承されている。内部構造探査で重要な地震観測や熱流量観測は国際的に共同したトップレベルのチームを構成して開発が進められているなど、前向きな要素も多い。

これらの重要な基盤技術が確立しないと月探査はいくら計画が盛り上がっても意味がない。私たちは、これらを慎重に判断して確実なミッションを成立させることがなによりも重要である。そのための本格的な動きがまさに始まろうとしている。(宇宙航空研究開発機構)

編集部注：詳しい科学目標と観測機器提案については、「SELENE-2 科学提案書」（2009 年 6 月，SELENE-2 科学搭載機器検討チーム）をご参照ください。

新刊紹介

星の地図館 太陽系大地図

渡部潤一・布施哲治・石橋之宏・片山真人・矢野創 著, 2009 年 7 月発行, A4 判, 240 ページ, 小学館, 5800 円+税, ISBN978-4-09-526079-2

小学館からは、『星の地図館』の初版が 1995 年に、新版が 2005 年に出版されていたが、本書はこれの中で対象を太陽系天体だけに絞って、豊富な地図や写真で解説したものである。

太陽系の地図帳といえば、『The NASA Atlas of the Solar System』(R.Greely, R.Batson 編, 1997) が定評があるが、この本は A3 判よりもさらに大きく、広げて見るには大きすぎた。その反省からか 2001 年にはコンパクト判（といっても A4 判）が発行されている。

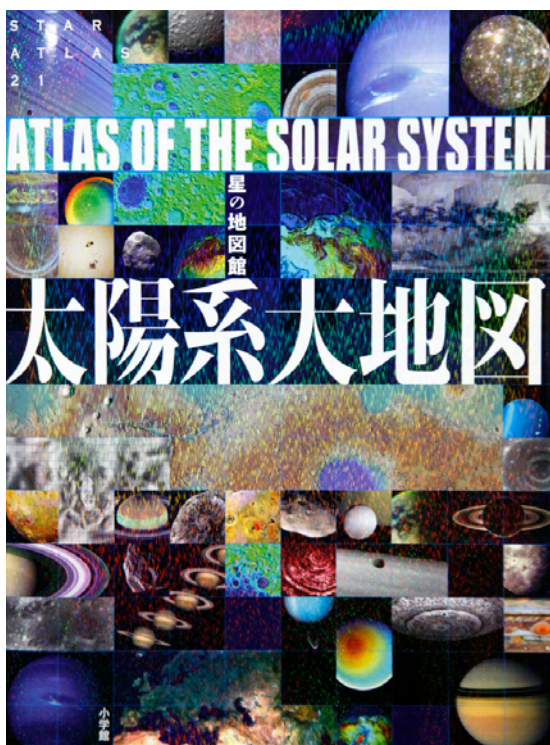
小学館から『太陽系大地図』が発行されたときとは、『The NASA Atlas of the Solar System』があれば十分と思っていたが、実際に『太陽系大地図』を手にして眺めてみると、その考えは誤りであることがわかった。その 1 つの理由は、本書に加えられた最近 10 年間の探査機の活躍である。最近の月探査機「かぐや」、小惑星探査機「はやぶさ」、水星探査機「メッセンジャー」の成果は記憶に新しいが、それ以外にも火星、木星や土星の衛星、小惑星、彗星などからの探査の成果は目を見張るものがある。

もう 1 つの理由は、工夫された図や解説である。たとえば私たちは、冥王星が海王星のすぐ外側を回っていて、その近くには太陽系外縁天体と呼ばれる天体があることは知っているが、冥王星よりも大きな準惑星が、どうして 2003 年まで発見されなかったかという問いにはすぐに答えられない。その答えは、本書の 20 ページを見ると一目瞭然である。オールトの雲に比べると太陽系外縁天体のはるかに太陽の近くをまわっていることも 22 ページの図から発見できる。また 179 ページ

には多数の彗星の近日点距離と遠日点距離が図示されている。池谷・関彗星はやはり太陽にきわめて接近した彗星だったとか、ウエスト彗星の遠日点距離が 1 万 AU を越える彼方であることが実感できて楽しい。

本書を眺めていくと、いままでぼんやりしていた太陽系の全体像が理解できたような気がしてくる。こう思わせるのは 5 人の著者の綿密な打ち合わせと太陽系を理解させたいという情熱、それを受けて多数の手間のかかる図作りや編集作業をした小学館のスタッフのたまものだろう。これだけの本を作れるのは、やはり多数の図鑑づくりを手がけている小学館ならではのである。

現在では、太陽系の最新情報はウェブから簡単に得ることができるが、パソコンの前に座ってどんどん検索できて知識が広がっていくように見えても、パソコンの画面を小さく、断片的な知識しか得られず、すぐ



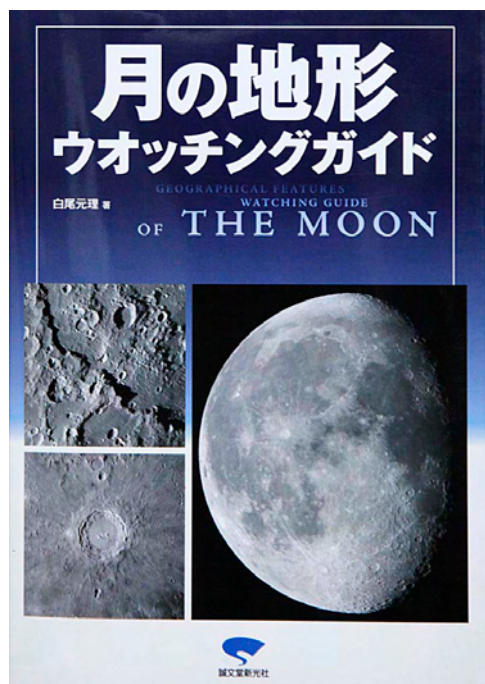
忘れてしまうことが多い。本書を眺めていると、やはり太陽系の全体像を眺めるには、本に限ると思ってしまう。小学生も、先生も、研究者も、休日に丸一日をかけて本書を眺めていけば、いままでも知らなかった太陽系の姿が得られ、満足感に浸れるに違いない。このような本が日本で出版されたことを、素直に喜ぶたい。

(白尾元理)

月の地形 ウォッチングガイド

白尾元理著, 2009 年 8 月発行, A5 判, 160 ページ, 誠文堂新光社, 2200 円+税, ISBN978-4-416-20921-9.

都会の小口径望遠鏡でも十分楽しめる月面観察、それに打ってつけの新刊であり、これを片手に十五夜が楽しめそうである。本書は 4 ページ単位の 37 節から構成され、最初の 12 節を使って月齢別の総合的な解説を行い、続く 25 節で拡大写真を使って地域別のガイドを載せている。口径 35cm の反射望遠鏡とデジタルカメラの組み合わせで撮影された鮮明な月面写真は、それを眺めるだけでも十分楽しめるもので、地質写真家としての著者の面目躍如であろう。



地域別のガイド記事は単なる写真解説にはとどまらず、個々の地形がどのようにしてできたのか、月の歴史を読み解く最新科学成果に基づいてまとめられ、この 1 冊でも相当な情報量がある。しかし、初心者にも分かりやすいような配慮が見られ、予備知識の解説を含むコラムもほぼ毎節にあたる 32 項目もあるため、写真と突き合わせつつ飽きずに読むことができるだろう。

月探査機の高解像データがウェブで自由に見られる時代になったが、それらとはひと味違った箱庭のような月を地上から天体望遠鏡で楽しむ観察の手引書として、お勧めの書籍である。また、和書でこれほどの月面解説をしている類書を見かけないため、月地形の初学者あるいは月面観測データの解釈をする地形学以外の研究者向けにも有用である。

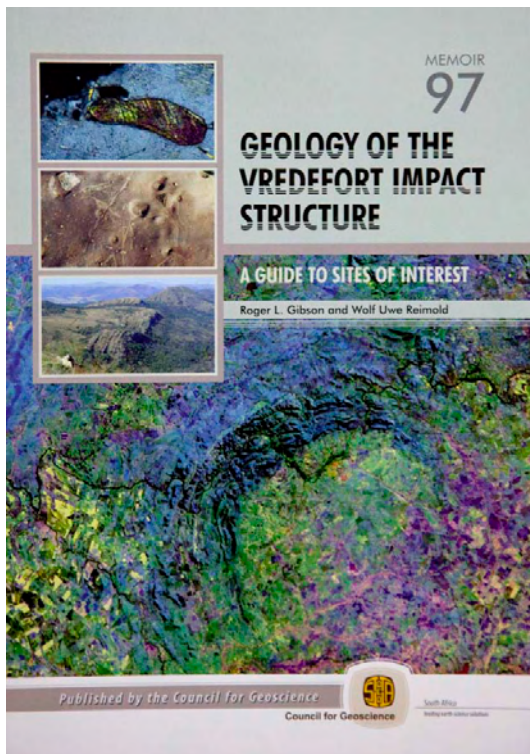
(出村裕英)

Geology of the Vredefort Impact Structure

R.L.Gibson, W.U. Reimold, 2008 年 11 月発行, A4 判, 181 ページ, Council for Geoscience, South Africa.

現在、地球上には約 180 個の衝突クレーターが発見されているが、最大のものは南アフリカのフレデフォートクレーター (直径 300km) である。本誌 21 巻 3 号に出村裕英氏がこのクレーターの巡検参加記を寄稿されているが、その中で出版予告されていたのが本書である。

世界の三大クレーターはサドベリー (カナダ、直径 250km)、チュクシュループ (メキシコ、直径 170km)、フレデフォート (南アフリカ) で、それぞれの衝突年代は 20 億年前、0.65 億年前、20.2



億年前である。サドベリーは形成後の構造運動を受けているし、チェクシュループは地下 / 海底下にある。これに対してフレデフォートクレーターは、形成後の変形も少なく、乾燥地に位置し、アクセスも良いので、大型の衝突クレーターの構造を学ぶには最適の場所である。

本書は 3 章から構成される。第 1 章「概観とフレデフォートクレーター」(51 ページ)、第 2 章「フレデフォート衝突以前の始生代基盤の地質」(22 ページ)、第 3 章「巡検ガイド」(105 ページ) である。

一口に衝突クレーターといっても、直径 1.3km のメテオールクレーターと直径 300km のフレデフォートクレーターでは、衝突によってできた地形・地質構造、インパクトメルトの量、放出物の産状や分布など大いに異なる。フレデフォートクレーターを例に大型クレーターの特徴を解説したのが第 1 章である。

衝突構造を調べる上では、衝突前の地質構造をよく理解していることも重要である。衝突前の状態がわからなければ、衝突時の変形を理解することができない。特に沈み込み帯に位置し、最古の地層年代は 4 億年前に過ぎない日本に住んでいる私たちには、フレデフォートクレーターの基盤をなす盾状地（年代は 20 億～34 億年前）には馴染みがない。そんな私たちに親切なのは、基盤地質を解説した第 2 章である。

本書の核になるのは第 3 章「巡検ガイド」である。私は今年の夏、九州大学の清川昌一氏と共に写真撮影のためにサドベリー（カナダ）を訪れた。以前に行われた巡検の案内書をたよりに回ったが、ポイントがわからずに行ったり来たりで、ようやくたどり着いた露頭が案内書の白黒写真の露頭と同じなのか判断しかねることあり、せっかく現地に来たのに目的の露頭にたどり着けないのではという不安にしばしば襲われた。この章は、そのようなことのないように、詳細な地図入りで 26 か所のポイントを示し、それぞれのポイントには詳細な説明と共にカラーの露頭写真、顕微鏡写真、図、表がついていて非常にわかりやすい。お薦めのコースも 4 例が示されており、しっかりフレデフォートクレーターを見学するには 3 日程度はかかりそうである。

本書は巨大衝突クレーターを理解するための良い教科書になっており、現地を訪れる必要のない人は第 1 章だけを、現地を訪れる人は第 2・3 章も読めばよい。本書は、南アフリカの Council for Geoscience (<http://www.geoscience.org.za/>) から US \$ 58 で購入できる。 (白尾元理)

編集後記: 本号では JAXA の田中智氏から月着陸を目指す SELENE-2 計画についての巻頭記事を寄稿していただきました。私は 9 月 28～30 日、東京大学工学部で開催された惑星科学会の秋季大会に参加しましたが、「かぐや」の成功によって研究者たちが自信をもって SELENE-2 計画に取り組んでいる感じが感じられました。これからの日本の月探査が楽しみです。 (S)