

惑星科学のすすめ

米国ブラウン大学惑星地質 上級研究員

廣井孝弘

<予告>

ここ10年くらいにかけて、日本では惑星科学関係の学科が増えたり、宇宙飛行士達が宇宙での活動をしたり、月・火星・小惑星などに人工衛星を送るなどという、日本史上始まって以来の惑星科学ブームにありました。この期間に日本の惑星科学は飛躍的發展を遂げ、惑星科学で世界のトップを行くアメリカの水準に近づいて来たと思われま

す。筆者は東京大学基礎科学科で相対性理論・量子力学・太陽系生成論・結晶学などを学び、大学院では隕石の鉱物学と分光光学に手掛けて、小惑星の鉱物組成と起源について研究して来ました。8年以上前にアメリカに渡ってからは、ブラウン大学やNASAジョンソン宇宙センターで、小惑星と隕石との深い関連性の研究や、その手段となる惑星表砂の反射分光理論などを極め、現在はブラウン大学で研究する傍ら、日本の月ミッションにおける分光カメラの計画やNASAの研究者との共同研究にも貢献しています。

この連載では、学生の皆さんに惑星科学の一端を紹介してそのおもしろさをわかってもらおう一方で、アメリカの惑星科学と比較して日本の惑星科学界に存在する問題点にも触れることによって、研究者の皆さんには日本の惑星科学の将来に対して良く考え直す機会としてみたいと思います。大体的内容としては以下のように予定しています。

1. 惑星科学とは何か？

惑星科学は色々な惑星について研究することを主としますが、結局もっとも面白く重要な惑星は、我々の地球です。その事をも考慮しながら、惑星科学の目的について考える題材として、現在の惑星科学の諸研究分野をざっと振り返ってみて、天文学や地球科学との関係に触れます。惑星科学の未来についても考えてみたいと思います。

2. 太陽系生成論の歴史

太陽系の惑星群の起源を物理的・力学的に取り組んできた太陽系生成論の歴史について簡単に述べ、その現状と問題点から、より実際の惑星の観察や物質の研究に基づいた、より化学的・鉱物学的な太陽系生成論への転換の必要性を説きます。

3. 1969年：惑星科学の夜明け

惑星科学で非常に重要な出来事が多く起こった1969年について解説します。3つの出来事を簡単に列挙すると、アポロ11号による月試料の回収・南極隕石の発見・アエンデ隕石の落下です。特に南極隕石の発見は日本によってなされました。

4. 隕石と小惑星の謎

大部分の隕石は小惑星から来たと考えられ、太陽系の起源の秘密を説く鍵と信じられています。各々の隕石がどこの小惑星から来たのかとか、隕石が本当に小惑星帯の物質を平均的にサンプリングしているのかとか、望遠鏡による小惑星の組成研究がどれだけ信用できるのかなどの問題がまだ多くあります。特に、隕石の90%以上を占める普通コンドライトが小惑星帯に少ないように見えることと、小惑星帯に多いS型小惑星物質が隕石中に少ないことが、歴史的に大きな問題となっており、ここではその答えを模索します。このテーマは筆者の専門分野であるので、やや長く数回に渡るかもしれません。

5. 地球・月・火星と人類の起源と未来

地球は非常に特殊な惑星であり、その月の大きさや力学的・鉱物学的特性も特殊です。そして火星は、月や小惑星と同じく、火星隕石として物質研究が出来る対象で、小惑星帯に隣接する重要な惑星でもあります。近年、火星隕石中にバクテリアの化石を見つけたというNASAの研究者の報告などにより、生命の起源と惑星科学が注目を浴びました。惑星科学から見た地球人類の起源について、筆者なりのユニークな解説を試みたいと思います。NASAや日本の惑星探査ミッションも含めて月と火星に進出する人類の未来についても思いをはせたいと思います。

6. 日本の惑星科学の将来

筆者個人の経験と考えに基づく日本の惑星科学界の現状と将来の方向性についての随筆です。

お楽しみに。

<第1章 惑星科学とは何か?>

1.1 惑星科学の変遷

「惑星科学」という言葉は、最近では日本でも大学の学科名にも現れたりして馴染みのあるものになってきたと思われるが、私が東大にいた頃はそんな状況にはなく、目新しい境界分野と思われていたと思う。「惑星」という言葉から察するように、天文学や地球物理学の一部として、様々な惑星・月・小惑星といった天体を主に観測して力学的に研究しようというのが起源ではないかと思う。

ところが、1970年代から盛んに月試料や南極隕石の研究が世界的に行われ、月・火星・小惑星からの物質を直接調べることによって惑星科学ができる時代になってきた。そうすると、天文・地球物理関係のみでなく、隕石学者・岩石鉱物学者の出番となり、地学全般に関わるようになってきた。

1980年代以降は、望遠鏡による分光観測や様々な人工衛星による探査によって、惑星の組成や状態を調べられるようになってきた。とくに、分光観測は望遠鏡でできる安価な手法であり、惑星・衛星・小惑星の表面の反射率を波長に対してグラフ（反射スペクトル）にし、月試料・隕石・純粋鉱物などにも同様な測定をして比べることができる。それにより、隕石がどこから来たかとか、遠い天体表面の鉱物組成を推定する事ができるようになった。そこは分光学者の出番である。

更に近年、NASAのデーヴィッド・マッケイ博士らが火星から来た隕石であるALH84001にマイクロなバクテリアの化石らしい物が見つかったというので世間を騒がし、我々は火星で生まれた生物が進化した火星人もかもしれないとまでいわれた。そのような古生物に関する学問は地球の岩石に対しては存在したわけだが、隕石によって他の惑星の古生物を研究するというのは新しい。さらには、以前には要求されなかったマイクロの分析技術や火星隕石に本来あった有機物と地球環境から入り込んだ有機物との区別とかの非常に高度な測定技術と考察が必要になって、地球の古い岩石中の生物の痕跡を研究するのにも貢献したと思われる。この分野は「惑星生物学」とか「宇宙生物学」とも呼ばれ、古生物学・生物学・有機化学・鉱物学者などを巻き込んでいる。

その火星の生命の可能性に刺激されて、他に水が存在する天体に興味が行き、木星の衛星であるユーロパの地下にあると思われる水の海を探ろうと、ガリレオ人工衛星が特別ミッションを行ったり、ユーロパミッションというのが計画された。海ということなら、今後海洋学者も惑星科

学に手をつけられるようになる。なお、木星の衛星は非常にバラエティーに富んでいて、氷に覆われた衛星があると思えば、イオのように活発な火山がある衛星もあり、木星系がミニ太陽系ともいわれている所以である。一方、月の海も溶岩流によって出来たと考えられていて、火山学者もイオおよび月の海の研究に手がけられる事になる。

現在は、惑星表面で起こっている衝突現象や宇宙風化作用を実験室で再現したり、太陽系の初期に原始的な隕石の類の物質ができた過程を再現しようというような「実験惑星科学」も盛んになってきていて、非平衡を扱った物理学との接点も見えてきている。更に言えば、人工衛星を設計・打ち上げして太陽系内の天体の探査に行くのも「探査惑星科学」と言える。そこでは最適の軌道を決めるのみでなく、新しいセンサーを開発したり、その天体での試料採集をするロボット技術の開発するとかの工学的要素が多大に入ってくる。それは宇宙工学とも言えそうだが、最先端の研究では惑星科学者が手がけている場合が多い。

1.2 惑星科学と天文学・地球科学との関係

それでは、以上のように発展してきた惑星科学が、天文学および地球科学とどういう関係にあるのかを考えてみようと思う。

天文学というのは、本来空に見える物をすべて研究してきたような学問であり、地球が惑星の一つであるという認識以前から存在し得たわけである。ところが、ガリレオが望遠鏡で木星の衛星群（ガリレオ衛星）をみつけたりした頃から、地球も太陽を回る衛星の一つに過ぎないという認識に客観的な実例ができたと思われる（もちろんコペルニクス・ケプラー・ニュートンの貢献はあったが）。そのあたりから惑星の科学は存在したわけで、現在でもアメリカ天文学会の一部として惑星科学会があり、惑星天文学という言葉が存在する。その当時は望遠鏡で可視光の観測をする事と軌道などの計算をする事が主であり、分光で物質同定をしたり、探査衛星を送ったり、試料を取って持ちかえるなどという事はなく、天文学の一部として何の抵抗もなかったと思われる。

一方、地球科学では地球の岩石・大気・海などを扱ってきて、地球の環境に特殊化した形で学問を行ってきたが、隕石や月の試料といったその範疇に入らない物が増えてきて、地球科学的手法に新たな挑戦が起こったと思われる。例えば、月も隕石のもとである小惑星も普通は重力は比較的小さく空気も水もないため、生成される鉱物の種類や組成が違う。それによって、地球科学の基本原理は使えても、適用の仕方が違い、また日常の経験からより遠い物なので

理論的なシミュレーションによる研究が不可欠になってきた。それゆえ、惑星科学は地球科学の応用とも考えられる。一方では、地球も惑星の一つであるので、惑星科学的な研究から惑星としての地球を研究する事ができる。とくに、地球がいかに太陽系星雲から生成したかを知る事は、地球科学で扱う研究における基本的な初期条件を与える上で参考になりうる。

以上から分かるように、惑星科学は天文学と地球科学との接点として境界領域であったが、今やそれ自体が大きな分野として発展したと考えられる。

1.3 惑星科学の目的

以上に説明したように、天文学の一分野に過ぎなかった惑星の科学が、地球科学と密接なつながりを持ちながらも、それらとは違う独自の発展を遂げて今日の惑星科学となった。地球科学と同様に固相・液相・気相のすべてを扱い、物理学・化学・生物学や工学にも関係する。いわば全ての科学が太陽系全体の舞台に広がったようなものである。更には、冥王星の外側ではるか遠い軌道を回る天体群を観測したり、太陽系が出来前前から存在した粒子の生き残りを隕石中から見つけ出してその起源となる超新星の核融合過程を推測したり、他の星の周りの太陽系を観測したりと、太陽系の外へと惑星科学の対象は広がりつつある。

それでは、惑星科学の究極目的とは何であろうか？そんな物はないんだと言われればそれまでだが、私としては、どの科学にも究極目的があり、それは科学全体の目的と合致すると思う。NASAの局長であるダニエル・ゴールデン氏は、NASAの惑星科学の長期的目標として、太陽系の外はるかかなたまででも行って探査できる人工衛星を作ることと、他の恒星の周りの惑星系に地球型の惑星と生命を見つけるといふ、一頃のSFに近い構想を出している。そこには、地球型惑星の生命の存在に対する古くからの歴史的問いかけがあると思われる。それは、「我々人類はこの宇宙で孤独な存在なのか？それともどこかに同類の生命はいないのだろうか？」という地球外知的生命体の有無に関するものである。

もし知的生命がいると分かたら人類始まって以来の大発見であり、惑星科学の最大の貢献であるとなるであろう。原始的生命はいたが知的生命はいなかったとしてもそれは非常に大きな発見である。地球型の惑星は見つかったが生命は見つからなかったとしたら、地球型惑星はこの宇宙に多く存在するであろうということになり、人類の第二の故郷となりうる惑星があることになる。

それでは、地球型惑星も生命も何も見つからなかった

らどうであろうか。見つからないから存在しないとはいえないが、それを目的に永遠に続けるのは妥当であろうかが疑問である。わたしは、それも十分に意味のある結果だと思う。なぜなら、この宇宙に地球型の惑星も生命も存在しなければ、我々人類が唯一の生命体であり、この地球が我々が存在できる唯一の場所である。それゆえ、我々が自滅すれば全宇宙から知的生命体がいなくなり、大宇宙の自然を鑑賞する者も研究する者ものもいなくなる。そしてそのような存在を宇宙に残すためには、50億年ぐらいたって太陽がその末期に近づいて地球が熱くなりすぎた時には、人類は火星を地球環境化（テラフォーミング）するかスペースコロニーを作るかする必要があり、最終的に太陽が死滅する前には、太陽系から逃げ出して他の太陽系に行ったり、人工太陽を作る必要がある。

このような、哲学的・価値論的な側面は難しく遠い目標だが、やはり惑星科学においても究極的には面白い内容であると思う。それがはっきりするまでは、とにかく地球はかけがえのない惑星であり、人類にはそれを守って生存する責任があると思ったほうが安全であろう。

<第2章 太陽系生成論の歴史>

2.1 太陽系の特徴とそれから推測される起源

太陽系の起源については、おそらくギリシャ時代から哲学的に論じられてきたに違いない。トレミーによって大成された天動説的な世界観においては、ただ単に神の創造は完全な円運動によって構成されるとして、多くの円運動を複雑に用いて説明していた。そういうモデルにおいては、惑星の運動は複雑で時には逆行もするため、その起源を論ずるのは簡単ではなかったろう。ところが、チコ・ブラーエとケプラーの観測・計算によって、惑星が太陽を中心とする単純な楕円軌道上を運動しているとして説明できる基盤ができ、ガリレオ・コペルニクス・ニュートンといった天才たちが、現在の美しい太陽系の姿を解明したと思われる。更にその後の天文観測、惑星探査、月探査、隕石などの試料の研究などによって、太陽系の起源を探るための鍵は一層豊富になった。

では、現在解明された太陽系の特徴を振り返ってみて、その起源を探るヒントとしてみよう。まず前述のように、全ての惑星が太陽を焦点の一つとする楕円軌道を回っているわけであるが、それらがほぼ同一平面状に存在する事である。更に、各惑星の自転方向やその周りの衛星の公転・自転方向も大体はこの平面状で惑星公転と同方向である事である。これらのことは、太陽系の惑星達がどこから太陽にランデブーして集まってきたのではなく、太陽の周りに平らな星雲のようなものがあってそれから固まってできたのではないかという示唆を与える。

次に、太陽に近い惑星から順にその特性を見ていくと、水星は小さくて衛星を持たず、金星は地球と同じくらい大きさで衛星を持たず、地球は衛星(月)を1つ持ち、火星は突然小さくなるが2つの衛星を持ち、その外側には小惑星帯があり、その後はガスを大量に持つ巨大惑星である木星・土星へと続き、一般に衛星の数が多い。この傾向は、太陽系の原始星雲が固体とガスの混合でできていて、太陽からの距離によってそれらの混合率や大きさ、更には衛星の数が決まったという示唆を与える。そのことは、ボーデの法則として知られている、各惑星の太陽からの平均距離がある数列に従っている事とも関係があるに違いない。

また、月をはじめとする多くの天体の表面にはクレーターと呼ばれる隕石衝突の跡がある。時にはその天体の直径に近いような大きなクレーターも見つかる。クレーターの大きさは実際にそのクレーターを作った隕石の大きさでなくて衝突エネルギーに相関があるので、必ずしも大きな物体が衝突したとは限らないが、現在小惑星帯に残ってい

るような岩石片が多く存在して天体に衝突したと考える事は妥当である。これは、太陽系の固体物質が小さい微粒子から出発したとしても、その過程でそれぞれが大きく成長して、末期には大きい物体同士の巨大衝突が起こる時代を迎えた事を示唆する。そう考えると、自転軸が異常に傾いていたり自転が公転の逆だったりする惑星もあることは、末期に巨大天体が衝突して偶然そう言ったと言える。

2.2 太陽系生成論の標準モデル

太陽系がいかにかできたかを漠然と考えるのみならば、カントの星雲説とかも含まれるであろうが、定量的にしっかりと太陽系生成論を展開したのは1969年のサフロノフの著書が最初であろう。1970年代になって、日本においては恒星の形成理論で有名な京都大学の林グループが惑星系の生成論を展開した。その後はウェザリルなどが取り組んできたようにコンピューターシミュレーションで多体問題を直接扱うことが主流になってきた。しかし依然として解析的な太陽系生成論は現象の本質を探る面で重要である。

1980年代に確立された標準モデルと呼ばれる最も一般的な太陽系生成論は、前節で述べたような自然な推測に沿っている。太陽系は、太陽系星雲とよばれる塵(固体微粒子)とガスの混合体が回転をしながら固まって太陽と惑星系が同時に生成したと考える。これは、現在の太陽系が持つ回転角運動量の保存則から導かれる。しかし、初期の太陽系星雲の総質量はわからないので、適当に推定することになる。一般には、現在知られている太陽系の固体質量を足しあわせて塵の質量を求め、ガスの質量は、塵の質量に見合うように太陽系元素存在度から求める。太陽系の元素存在度は、太陽大気と原始的な炭素質コンドライトの組成から求められる。その結果は、太陽系星雲は現在の太陽質量の1.3%増程度の質量になる。そのようなガスと塵の混合体が回転していると、塵の粒子は回転による遠心力と太陽からの重力の合力を受けて、公転面上へと沈んで行く。そうしてできた塵の沈殿層は重力不安定を起こして分裂を始め、微惑星と呼ばれる天体が多くできる。そして微惑星が太陽の周りを公転しながら合体成長して惑星や衛星ができるわけである。その過程で星雲内のガスは散逸していくが、木星型惑星はそのガスを重力で取り込んで現在のような巨大なガス惑星となり、地球型惑星はガスを取り込まず、それらを構成する固体物質内に取り込まれていた揮発性元素が脱ガスして大気ができた。

それでは、火星と木星の間の小惑星帯はなぜできたのであろうか？微惑星がお互いに合体成長するためには、それらの衝突力が重力による合体力を上回らないようにしな

ければならない。もし衝突の速度が大きすぎたり角度が浅すぎたりすれば、合体せずに飛散する。太陽の重力のみを受けてすべての微惑星が円軌道を回っていれば、お互いの相対速度は小さいが、異なる楕円軌道の微惑星同士では相対速度は大きくなりうる。木星は非常に巨大な惑星となったので、その周りの惑星は太陽からの重力のみでなく木星からの重力の影響を強く受けて軌道が変化しやすくなり、お互いの相対速度を増すことになって、衝突の際に合体しにくくなった。その結果、小惑星帯には大きく成長し得なかった微惑星のなごりや、成長した後壊れてしまったものがいびつな形の岩石として存在していると考えられ、火星が小さいのも同様に木星の重力の影響の結果だと考えることができる。

2.3 太陽系生成論の問題点と物質科学からの視点

ではそのような簡単なモデルが前節で述べたような現在の太陽系の姿をいかに説明できるかを調べてみよう。微惑星の合体成長の速さは、各惑星軌道での公転運動の速さに比例するので、水星・金星・地球・火星といった地球型惑星系では比較的早く、木星・土星などの外惑星では遅くなる。ところが、木星のようなガス型の惑星は太陽系星雲に存在したガスを取り込んでおり、成長に時間がかかりすぎるとガスが散逸してしまっただけでは不可能になる。ということは、地球型惑星軌道ではガスの散逸後に惑星が（ガスを捕まえるに足る重力を持つまで）成長を遂げ、木星型惑星軌道ではガスの散逸前にすでに惑星は大きく成長していなければならない。ガスの散逸が太陽に近い地球型惑星軌道で早く起こったと仮定するのはもっともだが、それでも木星型惑星の成長は遅すぎて話にならない。上記のように微惑星が等しい大きさで足並みを揃えて成長するのでなく、いくつかは突出して大きくなって他をことごとく吸収していくという暴走成長モデルに基づけば成長に要する時間は短縮されるが、それでも木星型惑星の成長が地球型惑星よりも遅いことには変わらない。

一つの回答としては、木星軌道には意外と多くの材料物質が存在していて、ガスを捕獲できるだけの大きさに成長するのが意外と早かったという可能性がある。例えば、木星軌道ぐらいまで遠くなれば、たとえ太陽活動が活発であったとしても、水が氷として存在できる距離であると思われる。また、その他の低温物質（アンモニアの氷や含水鉱物）もより豊富に存在しうるはずである。一般にそのような物質は強度が小さいので、衝突の際にお互いに合体しやすく、それゆえに惑星成長が早く進んだという可能性がある。

標準的な太陽系生成論のもう一つの問題は、隕石からの証拠との兼ね合いにある。隕石の90%以上を占めるコンドライトは、その中にミリメートルのオーダーの大きさのコンドリュールという球状の物質を多く含んでいる。コンドリュールは高温で瞬間的に融けてできたものであり、その周りを埋めるマトリックスとは熱的歴史が違って、両者は機械的に混合合体されたように見える。特に炭素質コンドライトの一部には高温では壊れてしまう物質が多く含まれている。太陽系星雲が静かに固まっていったのではそのようなコンドライトを大量に作る事は不可能で、例えば、他の太陽系で観測されたような双極分子流のように、物質が太陽近くにまで落ちて熱せられた後に、低温の遠くまでまた飛ばされるような仕組みを考えねばならない。

また、そのような機構は、塵が静電力によってミリメートルオーダーまで成長する段階と、隕石のようなメートルサイズのものが微惑星となる過程との中間的過程を説明しうる。センチメートル程度の物体は、静電力も重力も弱く、コンドライトのように柔らかいマトリックスがクッションのようになって合体するのが理想的に思われる。コンドリュールが小惑星帯のみでなく、より遠くまで飛ばされたとすると、前述の木星軌道付近での惑星成長速度を早くするのに貢献しうる。

以上のような問題点は数え切れないほどあるだろうが、重要な点は、最近の物質科学的な研究によって太陽系生成論に対する制約が一層厳しくなってきた事である。コンピューターの進歩によってより複雑なシミュレーションが年々できるようになってくるので、いずれは微惑星のパラメーターとして力学特性のみならず化学・鉱物特性も入れてシミュレーションをできる時が来るであろう。そうなれば当然、衝突によって物質が揮発したりするわけであるから、塵とガスの化学的相互作用も考慮する事になる。ずっと以前に竹内均先生などがおっしゃっていた化学的太陽系生成論である。

<第3章 1969年：惑星科学の夜明け>

1969年には今日の惑星科学を一大学間に成らしめたとも言える重大事件が起こった。そこでは我が国日本とアメリカが大きな貢献をしている。

3.1 炭素質コンドライトの大量落下

前回は紹介したように、炭素質コンドライトというのは太陽系において非常に原始的であると考えられているが、研究用に入手できる量は非常に少なかった。最も原始的といわれていたCIコンドライトは現在でも非常に希少だが、CMおよびCVといわれる炭素質コンドライトは、1969年に落ちた2つの隕石のおかげもあって、現在多くの研究者に供している。ちなみに、Cは炭素質(Carbonaceous)の略で、MとかVはおのおののグループ内の代表的な隕石名の頭文字を取っただけである。更に岩石の変成度を記載するために1から6までの番号がつけられ、3が最も変成度が少なく、3から2,1と減るにつれて水質変成度が増し、4,5,6と増えるにつれて熱変成度が増していく。

1つはメキシコのアエンデという村に2月8日に落ちたCV3コンドライトで、地名を取ってアエンデ隕石と呼ばれている。この隕石は巨大なもので、回収された重量だけでも2トン以上ある。このアエンデ隕石にはコントリュールとマトリックス以外に、白い含有物があり、CaとAlに富んだ高温鉱物が多く含まれているのでCAI(Ca-Al-rich Inclusion)と呼ばれている。以下に述べるように、このCAIは太陽系物質の起源を考える上で非常に大きな貢献をした。

前回述べたように、太陽系は塵とガスの混合体が回転しながら凝縮してできたと考えられている。宇宙が始まった頃の古くから存在する水素ガス以外のガスや固体は高压下、すなわち恒星の内部でないと出来ないのも、自然とその塵も他の恒星内部で出来て、その恒星が爆発したから飛び散ったと考えられる。アエンデ隕石中のCAIに含まれる酸素同位体の質量数17と18のものが最も豊富な16に対してどれだけ存在するかを測ってみると、地球のものとは全く違う事が分かった。地球の物質の酸素同位対比を、平均的な海水の値とのずれで測り、酸素17のずれを縦軸に、酸素18のずれを横軸にとると、地球の物質の酸素同位体値は傾きが約0.5の直線に乗る。それは、酸素が異なる相の間で動く時に質量の違いが動きやすさに影響するからである。ところが、アエンデの中のいろいろなCAIの酸素同位体を測ると、傾き0.5の直線上に乗らないばかりか、傾きが約1.0の直線に乗るのである。このことは、そ

れらのCAIが同一天体で共に生成されたのではなく、太陽系星雲の別々の場所で固まったもので、塵が元々作られた恒星が異なるために酸素同位対比が違ふと考えられる。傾きが1の直線に乗るのは、2つの恒星から来た2種類の酸素同位対比が存在して、それらがある比で混ざった時にそのような直線に乗る同位対比を持つ物質がいろいろ出来るという説明がもっともらしい。

同じ1969年の9月28日に、オーストラリアのマーチソンという所に100kgという比較的大きな隕石が落ちた。このマーチソン隕石はCM2コンドライトと呼ばれ、その2という数字から分かるように水質変成を受けて出来た鉱物、特に層状珪酸塩が多く含有されている。そのような加水鉱物は、加熱するとだんだん水分を失って別の鉱物に変わっていくが、大部分の元素は揮発性なので残る。マーチソンの酸素同位体は地球のものとはもちろん違ふが他のCM2隕石と共に0.5の傾きの直線に乗る。それはCM2コンドライトが同一の母天体または母天体集団から来た事を示唆する。ところが、マーチソンを加熱するとその値がずれて、その直線から外れてしまう。このことは、マーチソンの母天体でマーチソンを水質変成させた氷か水は、他の鉱物とは異なる酸素同位対比を持っていた事を示唆する。

このように太陽系の太古の詳細な情報を秘めた炭素質隕石が大量に落ちて来た事で、より物質に根付いた惑星科学への移行の契機になり、隕石学者や鉱物学者が惑星科学に貢献できる大きな機会が出来た。

3.2 南極隕石の発見：やまと隕石

上記のように、新鮮な隕石を集めるには、ある時にある所に落ちてくるのを待たねばならないが、既に過去に落ちているものを拾う事も出来る。ところが、隕石の外のこげた黒い部分がはがれると、鉄隕石以外の多くの隕石は一見したところ普通の石と変わらない。ところが、それでも隕石を比較的簡単に見つけられる場所があった。

日本の国立極地研究所からの南極越冬隊が南極のやまと山脈のふもとを探検していると、いくつかの黒い石が散らばっているのを見つけた。それらは隕石である事が分かり、Yamato-69隕石として知られている。南極の氷はこの山のふもとで気化してしまうので、力学的平衡を保つためにその山のふもとへよそから氷が移動してくる。それと同時に、南極各地に落下して氷に埋まった隕石も集まって来たというわけである。その後、主に日本とアメリカのチームが隕石探査を何度も行い、現在ではおそらく2万個以上の隕石が南極から回収されている。

この大量の隕石試料は、それまで入手しにくかった珍

しい種類の隕石をも多く含み、隕石に基づく惑星科学者にとっての宝庫となった。火星生命の可能性で有名になった ALH84001 も 1984 年にアメリカ隊が南極のアラン・ヒルズという丘で見つけたものだし、月からの隕石や、C型小惑星から来たと思われる熱変成を受けたCMコンドライトなどに関しては、日本の極地研究所の探検隊が多大な貢献をしている。

3.3 アポロ 11 号の月着陸・月試料回収

1969 年で何といっても有名なのは、7 月 20 日にアポロ 11 号が月に着陸して試料を持ち帰った事である。それ以前は月の高地と海がどのような物質で出来ていてどのくらい古いのかなども確かではなかった。アポロ 11 号以降は、物質および年代が分かっただけでなく、年代とクレーターの数から隕石衝突率の変化や、酸素同位体組成が地球と同じである事などが分かった。それらの結果は、月の起源に関して現在最も有力な説である、「火星ぐらいの大きさの天体が地球に衝突して月が出来た」という考えをサポートする事となった。アポロ 11~17 号が持ち帰った試料は未だに科学者の手によって研究され、新しい成果をあげている。

3.4 その他

1969 年は、その他にも Safronov 博士の太陽系生成論の著書の英語版が出たり、小惑星の観測と隕石との関連がついてきたり、大陸移動説（大洋底拡大説）などが確認される前夜でもあった。日本としては、1969 年は隕石惑星科学にとっても夜明けであったが、日本の惑星科学全体としては現在が夜明けに近い。上記の 3 項目から分かるように、月・小惑星・火星などが最も身近な惑星科学の対象であるが、日本は今、SELENE、Planet-A、MUSES-C、Planet-B などのミッションによって独自の惑星科学技術とデータを獲得しようとしている。過去の 30 年間は惑星科学の飛躍的発展の時代であったが、今後の 30 年間はそれ以上の変化を見るであろう。

<第4章 隕石と小惑星の謎>

4.1 隕石はどこから来たか？

隕石については前回も少々触れたが、ここではそれらがどこから来たのかということに的を絞ることにする。隕石が良く知られていない時代には、それが空から落ちて来たのを見たという人の証言は UFO を見たという人のように簡単には信じられないものであった。ところが時代が下って人口が多くなり、高度の観測機器も出てきて、隕石が確かに空から落ちてきているのだということと、更に運が良ければそれが地球に落ちる前はどんな軌道を描いて太陽系に存在したのかということ計算できるようになった。そんな隕石の一つがロストシティ隕石で、その軌道は地球軌道に交わるような部分から小惑星帯に交わるところまで伸びた楕円であった。このことは、隕石が小惑星帯から来た可能性があることを示唆する。

一方、以前に紹介した太陽系生成論に依れば、太陽系は塵とガスからだんだん大きくなって固まったのだから、小さなかけらが取り残されていて隕石として降ってきてもおかしくないと考えられる。実際、地球がまだ現在の大きさに成長していない頃は、隕石が多く降り注いでいて、それゆえにここまで大きくなったのである。しかしながら、そんな 46 億年も前の材料物質が未だにどの惑星や衛星にも取り込まれずに浮遊しているだろうか？多数の学者の意見は「否」である。隕石の中には、ただ単に塵が固まったまま 1 メートルくらいの大きさ以上に成長せずに隕石として落ちて来たというものは見当たらない。先に述べたコンドライトにしても、最も原始的な隕石とは言え、その組織を見ると水か氷が常温近くで鉱物を水質変成させたり、加熱して低温鉱物を熱変成させたりというような隕石よりもずっと大きな天体でないと起こりにくいような現象が起こったことが分かる。したがって、隕石は塵がいったんある程度大きな天体に成長した後でそれが壊れて出来たかけらであると考えられる。また、隕石を常に生産するためには、今現在も衝突が頻繁に起きている場所から隕石が来なくてはならない。

それと、隕石の熔融固化年代は非常に古い。大部分が 45~46 億年前である。普通大きな天体（惑星・衛星）にある岩石は、その天体の熱・水か氷・隕石衝突・風化作用などによって変化してしまう。太陽系生成時からほとんど変化していないのは、比較的小さい天体で、大気や水もなく内部の放射性元素の発熱も小さいようなものしかない。

以上のことから自然に結論されるのは、大部分の隕石は小惑星から来たということである。望遠鏡で観測して分

かるように、大きくて観測にかかる小惑星だけでも何千と存在する。小さなもので数えたらまた桁違いに多いはずである。また、太陽系生成論で触れたように、小惑星帯は木星に近く、木星の摂動によって軌道をずらされて円軌道からのずれが大きな楕円軌道となっており、お互いに衝突しやすくなる。もちろん、彗星から来た隕石もあるだろうが、氷を含む場合はその氷が大気圏突入時に溶けて空洞を作り、隕石が破壊されてしまう。それゆえ、彗星からは塵（ダスト）としてのみ物質が降ってくると考えられる。また、例外的な隕石としては、月または火星から来たと考えられている隕石である。それらは月や火星の初期の大規模な地殻活動の記録を残している。

大部分の隕石が小惑星帯から来ているというのは非常に都合がいい。なぜなら、小惑星帯は地球から遠いので今のところ簡単には石を取って来るわけにはいかない。また、小惑星はあまり大きくなれなかったために、太陽系の材料物質が固まった後で変成する途中で止まってしまった様に成っている物が多く、太陽系物質の材料物質から現在の物質に至る進化の歴史を語りうる物である。

4.2 隕石がどの小惑星から来たかを調べる方法

上述したように、隕石は小惑星が衝突して出来たかけらであるから、その小惑星は運が悪ければもはや存在していないことになる。しかしながら、望遠鏡で見えるような比較的大きな小惑星は、衝突が起こっても生き延びる可能性が大きいと考えられ、そのかけらが地球のどこかに過去に落ちたかもしれないと思うのは自然である。

特定の隕石がどの小惑星から来たかを調べる第一歩は、岩石及び鉱物組成が同一かどうかを調べることである。そのために、小惑星に行って試料を取ってくる以外に最善の方法は、望遠鏡で見える小惑星からの太陽光の反射を分光して、隕石にも同様の測定をし、それらの反射スペクトルのパターンを同定することである。これは簡単そうに聞こえるが、実は奥が深いことである。実を言えば、筆者はこの小惑星と隕石の鉱物学的分光学に取り組んで 10 年以上になるが、未だに未解決のことは多く、新しい観測・実験・解析が新しい結果を生み出し続けている。

この方法の結果については次節以降で詳しく解説するが、最初にこの反射スペクトルを用いてユークライトという隕石と小惑星ベスタとの類似性を指摘したのがマッコードという人で、1970 年にその論文が出ており、惑星科学の夜明けである 1969 年にはもう取り組んでいたに違いない。

4.3 小惑星の鉱物組成と隕石との対応

前節で触れたように、小惑星からの太陽の反射光を波長分解して反射率に変換してプロットする（反射スペクトル）と、その形から、小惑星の表面にある鉱物の種類や化学組成などがわかる。例えば、前述の小惑星ベスタ・デンボウスカ・E型小惑星は、波長1ミクロン付近と2ミクロン付近に美しいガウス関数形をした吸収帯が1つつあるが、それらは輝石という鉱物中の2価の鉄イオンによるものであることがわかり、その詳しい波長位置から輝石中の鉄・マグネシウム・カルシウムの含有量比の範囲を推定できる。これらに対応する隕石としては、ベスタから来たと思われるハワルダイト・ユークライト・ダイオジェナイトという隕石があり、私の指導教官であられた武田弘先生がそれらの頭文字を取ってHED隕石と名づけられ、現在ではその名が標準的に使われている。ベスタは小惑星の中では最も月に近い熱史を持ったもので、鉱物が高度に分化したためにそのように輝石と斜長石が表層にできて、その下にはカンラン石と金属鉄があると考えられている。

一方、エレオノラやエテルニタスなどのいくつかの小惑星は1ミクロン付近に3つの吸収帯が重なったような反射スペクトルを示し、これはカンラン石という鉱物の特徴である。これらは、上述のように小惑星が熱的に分化してカンラン石が豊富な部分が内部にできたものと考えられている。これに対応する隕石はパラサイトという鉄含有量の少ないカンラン石と金属鉄でできた石鉄隕石や、ブラチナイトという鉄含有量の多いカンラン石でできた隕石が知られている。

そして、これら輝石とカンラン石がいろいろな割合で混ざったような反射スペクトルを示すのがS型と呼ばれている小惑星の群れで、小惑星帯（アステロイドベルト）の地球に近い部分では最も豊富な小惑星である。S型という名は、輝石やカンラン石に代表される珪酸塩（Silicates）か石質（Stony）から来たものである。これに対応する隕石は、後述するように、未だはっきりとわかっていないが、その副分類であるS(IV)型の輝石・カンラン石比は普通コンドライトに近いものがあるということがギャフィーという人の研究によってわかっている。

小惑星帯の地球から遠い側には、C型と呼ばれる小惑星が豊富であり、それが暗くて平らな反射スペクトルを示すので、炭素質コンドライトのような炭素を含むものと考えてきた。実際は、私が1993年に示したように、C型およびその副分類のB, G, F型は炭素質コンドライトが加熱変成された物により近く、3.2節で述べたように日本の南極探検隊が持ち帰った隕石にそのようなものが多く発見さ

れた。

4.4 普通コンドライトとS型小惑星の謎

普通コンドライトは隕石中の90%以上を占めるもので、鉄元素の含有量が高い順にH, L, LLの3つに分類されている。そして各々が熱変性度に応じて3~6の指数を持ち、H5とかL3のように組み合わせて分類する。それらは様々な量比で輝石・カンラン石を含み、上述のようにS(IV)型の小惑星がそれに近い輝石・カンラン石比を示す。ところが、それだけでは普通コンドライトがS(IV)型小惑星から来たとは言えない事情がある。

S型小惑星の反射スペクトルをそれに近い鉱物組成を持つと思われる隕石の反射スペクトルとよく比べてみると、両者には大きな違いがあることがわかる。まず、S型小惑星の吸収帯は対応する隕石の吸収帯よりも浅いことである。これは隕石を細かい粉にすることで吸収帯を浅くしてもまだ足りないものである。もう一つの違いは、S型小惑星の1ミクロン吸収帯の傾きが対応する隕石よりも大きいことである。一般に、1ミクロンの吸収帯の両端で接線を引くと右上がり（波長が長くなると大きくなる）になるが、その傾きがS型小惑星の方が対応する隕石よりもずっと大きいのである。そのようにS型小惑星の反射スペクトルが右上がりになることを赤化していると呼ぶが、S型小惑星の2ミクロン吸収帯ではそのような赤化は起こっていない。

それゆえ、S(IV)型小惑星が普通コンドライトに似た輝石・カンラン石の比を示していても、上述した吸収帯の浅化とスペクトルの赤化傾向があるために、S(IV)型小惑星が普通コンドライトでできているとは結論できないのである。普通コンドライトには輝石・カンラン石のほかに斜長石や金属鉄も含まれている。金属鉄の量を人為的にふやしてやると確かに1ミクロン吸収帯が浅くなり赤化するが、同時に2ミクロンバンドも赤化してしまい、また可視光領域の反射スペクトルの形が合わなくなり、S(IV)型とは似つかないものになってしまう。

以上の問題を解決するには大まかに言って2つの方法がある。第一は、普通コンドライトはS(IV)型小惑星から来ていないと考えることである。そうすると、小惑星帯に豊富に存在するS型小惑星が隕石中の90%をも占める普通コンドライトとは関係ないということになり、隕石は小惑星帯を均一にサンプルしているわけではなく、ちょうど良い軌道にある限られた小惑星から来ているに過ぎないか、普通コンドライトは地球からは観測にかからないような1km以下の小さな小惑星から来ているということになる。確かに、1m程度の大きさの隕石と10~1000kmの観測にか

かる小惑星が異なる鉱物組成を持っていてもおかしくはない。しかしながら、4.1 節で述べたように、隕石を常に地球に供給するためにはそれらを大きな小惑星から衝突によって補給する必要がある、またタイプ 6 とかの熱変性度の高い普通コンドライトはそのような高温に熱せられるためには大きな小惑星の内部にあったと考えるのが最も自然である。

第 2 の解決案としては、小惑星の表面が宇宙風化作用によって、その内部や隕石から変化してしまっていて、それゆえに反射スペクトルが赤化し、浅い吸収帯を示していると考えられることである。その宇宙風化作用というのは月の表土（レゴリス）に関しては知られていて、微小隕石の衝突・気化によってレゴリス内部が加熱されて還元され、鉱物粒子内に微小な金属鉄が生成されることか、粒子の表面が気化したガスのコーティングや放射線の影響で変化したことによって起こると考えられている。ところが、月表土の宇宙風化作用は S 型小惑星のものとは少々異なる。ただそれは、月表土の反射スペクトルは 2 ミクロン吸収帯も赤化しているが、S 型小惑星ではそれが起こっていないことである。そのことは、月表面と S 型小惑星表面との鉱物組成の違いや微小隕石の衝突エネルギーと頻度の違いで説明できるかもしれない。実際、ビンゼルという天文学者が地球軌道に近い小惑星の反射スペクトルを多く測り、普通コンドライトに似たものから S 型小惑星に似たものまで様々に存在することを示した。

問題は、宇宙風化作用を実験的に再現する試みがうまく言っていなかったことである。しばらく前に、ロシアのモロズという人がレーザーを隕石に照射することによって宇宙風化作用をシミュレートする試みをしたが、普通コンドライトを S 型小惑星に似たものにするには成功していない。最近、東大地質学教室の大学院生だった山田さんと佐々木助教教授らのグループがその方法を改良し、カンラン石に富む S 型小惑星の反射スペクトルに近いものを実験的に作ることに初めて成功した。それと同時に、輝石はカンラン石ほど変化しないことが示され、それによって、私が調べた S 型小惑星の赤化傾向と輝石・カンラン石比との相関関係を説明できることがわかった。このような実験的研究によって宇宙風化作用が小惑星の表面鉱物組成や微小隕石の衝突エネルギーなどに依存して異なった効果を示すことがわかってくると期待される。それが月と S 型小惑星の反射スペクトルの宇宙風化作用を異なるものに行っているに違いない。

以上の 2 つの考えは、最終的には S 型小惑星から試料を取ってくることによって解決されるかもしれないが、残念ながら今のところそのような探査衛星によるミッション

は予定されていない。

<第5章 地球のおかれた環境から見た 人類の起源と未来>

第一回でも触れたが、ここでは太陽系における地球およびそれを取り巻く惑星群の環境から、人類の起源と未来について考察してみたい。

5.1 生命は地球外から来たのか？

近年、火星から来た隕石である ALH84001 の中に存在する炭酸塩が火星上で存在した細菌化石のものである可能性があるという説が出て、未だにその真偽ははっきりしていないものの、生命が地球の外でも発生し得ることと、地球の生命も地球外から来たのではないかという可能性にも多大な関心が注がれた。しかしながら、太陽系生成論の章で述べたように、火星も地球も太陽系星雲の塵とガスが固まってできたものであり、微生物が火星から来ようと彗星から来ようとそれは生物発生と進化の速さの違いに過ぎない。

それよりも重大な問題は、現在地球以外の惑星に生命が存在するかということである。火星隕石の細菌化石が証明されれば、火星はもとよりユーロパなどの氷・水惑星や彗星にも原始的な生命がいる可能性はある。しかし、知的生命体が我々と同様な組成をしているとすれば、現在の地球環境以外では知的生命体の発生と存続は難しいと思われる。そのことを以下の節でより詳しく述べてみよう。

5.2 地球環境の特殊性

生命の存在に液体の水が重要なことは良く知られている。太陽系内の惑星は主たる熱源を太陽から得ているので、太陽から受けるエネルギーとそれを宇宙空間に放出してしまう分との差し引きでその惑星の温度が決まる。それが 0～100℃の間ぐらいで安定して存在していないと生命の維持は難しい。金星は地球とほぼ同じ大きさだが太陽に近く濃い大気による温室効果で熱を逃がす効率が悪く、その表面は灼熱の世界である。一方、火星は地球よりずっと小さい上に太陽から遠く、低温の世界である。それでも金星よりは生命にとってやさしい環境である。月は太陽からの距離において地球と同じだが、その小ささのゆえに大気を持たず、液体の水は存在できない。ユーロパを含め、大気がなく低温の惑星で液体の水が存在し得るのはその地下においてのみである。しかしそのような地下の海洋では太陽光が届かず、太陽光によってエントロピーを放出する機構をもてないので、生命が高度に進化することは難しいはずである。

生命の存在に重要なことは、液体の水が存在することのみではない。太陽は生命に必要な太陽光を供給する反面、有害な太陽風という荷電粒子の集合も出している。地球の場合は非常に強力な磁場によって太陽風がうまく避けられているが、磁場を作る金属核を持たないような小天体ではそうは行かない。また、適度な濃さの大気は上記のように液体の水を保つ環境を作るのみでなく、宇宙空間から降り注ぐ隕石や塵を大気の摩擦熱で破壊したり溶かしたりすることで地上が直接攻撃されることを防いでいる。しかしながら、大きくかつ強度の強い隕石はやはり地上に落ちてくるわけだが、入射が斜めなものほど大気によって跳ね返されたり減速される。さらには、大気中のオゾンによって入射してくる紫外線が吸収されたりと、大気を持つ役割は大きい。言うまでもなく、大気は水とともに地球のあらゆる場所を循環して温度を含む環境の平均化をもたらしているが、地球の自転軸が公転面に対してやや傾いていることも、各地に四季をもたらして一年を通して太陽光の入射量を平均化するのに役立っている。

5.3 彗星・小惑星が地球に及ぼす影響

前章で述べたように、小惑星から多くの隕石が今も降り注いでいて、彗星からは主にダスト（塵）が降ってくる。したがって、それらよりも大きなものが降ってきて地球に危機を与えるかもしれないと考えるのは自然である。ただし、最後にそれが起こったのが恐竜たちが滅びた時代であるとすれば、それが起こる確率は非常に小さいと言えるだろう。

1998年に公開された映画のうちで、「ディープインパクト」と「アルマゲドン」は彗星や小惑星が地球に衝突してくるという状況を想定している。確かに、地球の軌道と交わったり接するような軌道を持つ小惑星や彗星は存在するので、タイミングが悪ければ地球に衝突することもありうる。しかし、アルマゲドンで想定されているような、何百 km もある小惑星が地球に衝突する数週間前までわからないというのはありそうもない。なぜなら、地球軌道に近い小惑星は最大でも数十 km だし、アステロイドベルトにある大きな小惑星が突然軌道を変えて地球に衝突する軌道に乗るといのはかなり大きな変化であって、1年ぐらい前からその危機が観測からわかると考えられる。

その点において、ディープインパクトは非常にありうる状況を想定している。そこでは 10km ぐらいの大きさの彗星が地球に衝突する 1年以上前に発見され、それを破壊する 2段階の計画が立てられ、一部の人類が 2年間生き延びるための地下都市が作られている。彗星は氷を主とする

揮発性物質を多く含んでいると考えられるので、内部に核爆弾などを仕掛ければ粉々になる可能性が高い上に、十分に小さくなった後に大気圏に突入すれば、その熱で内部の氷が溶けて空隙ができ、大気の圧力で粉々になってしまう。ただし、彗星に着陸するというのが映画で見られるように運良くうまく行くかどうかは大きな疑問である。

5.4 惑星科学と人類の生存との合目的性

一般に、惑星科学は人間の実生活に直接関係ない学問のように思われがちだが、前節に述べたように、惑星科学的立場から太陽系の小天体の起源と未来の挙動を知ることが地球に対するそれらの脅威を正しく評価し、対策を立てるのに役立つ。それをさらに推し進めて、小天体の脅威を人類の活動に役立てることも考えられる。

まず、地球上に何年間も核の冬をもたらして生命を絶滅させるような巨大衝突がいずれ来るとすれば、人類はどこかに一時的にでも退避する必要がある。地下都市も良いが、太陽のエネルギーを利用できる退避場所としては宇宙コロニーが考えられる。ひとりのアニメ「機動戦士ガンダム」で描かれていたように、地球と月の系のラグランジュ点に宇宙コロニーを建設し、また小惑星を捕獲して基地や資源の供給源とすることは非常に合理的なアイデアである。彗星や原始的小惑星ならば水を確保できるし、M型小惑星ならば鉄・ニッケル合金が手に入る可能性が高い。そのように小天体の鉱物・化学組成を推定するのは惑星科学の仕事である。

更には、地球も惑星のひとつであり惑星科学の対象のひとつであることと、小天体が地球に衝突するというような従来の地球科学では扱わなかった現象を考えるという点で、地球環境の保全を考えるのも惑星科学の仕事である。巨大衝突によって舞い上がった水蒸気と塵の雲を以下に取り除いて太陽光が一刻も早く地上に届くようにするかということや、地下や宇宙コロニーという閉じた環境下で如何に生命を維持するかというような問題である。さらに、第一章でも触れたように、火星をテラフォーミングして人類が移住可能にするというのも惑星科学の課題である。

以上のように、惑星科学の知識から地球人類の生存を助けることができるが、その過程において惑星科学自体が受ける恩恵もある。例えば、宇宙ステーションや宇宙コロニーの建設をして、宇宙から天体望遠鏡などで太陽系の小天体を観測することで、地球上からの場合と違って空気による吸収・太陽光の散乱・電波障害といったノイズのないデータをとることができる。また、小惑星などを捕獲することにより、地球外で資源を採掘して人工衛星やロケット

を建造することで、より大きな物体を遠くへ探査機として飛ばすことができる。近地球小惑星には幸いあらゆる型のもが含まれているので、研究対象としても資源としても非常に有用なものである。

<第6章 日本の惑星科学の将来>

6.1 日本の惑星科学の研究のあり方

第1章でも述べたように、惑星科学の歴史はまだ若く、特に過去の30年間に飛躍的發展を遂げながら惑星科学という定義自体を形成してきたといえる。ところが、その間の日本の惑星科学の研究の多くはアメリカのNASAが取ってきた試料やデータをもったり、その方針に追随するという側面が多にあったことを認めねばならない。もちろんNASAの良いところはどんどん取り入れるべきだが、日本独自の研究が望まれるところである。近年においては、宇宙科学研究所や宇宙開発事業団を中心として様々な惑星ミッションが進行しており現在火星に飛んでいる「のぞみ」の他、月に地震計（ペネトレーター）を埋め込んで内部構造を探るPLANET-A計画、月の表面および重力を詳細に調査するSELENE計画、近地球小惑星から試料を取ってくるMUSES-C計画、そして水星の電磁気圏および表面の観測といった日本独自の計画がどんどん進行している。それらはすばらしいものであるが、NASAが計画しているミッションの数と多様性に比べるとまだまだである。

日本のミッションがNASAのミッションと異なるところは、日本では研究所や政府が上から指示して計画を始めることががちなのに対し、NASAは研究費の申請のように一般の科学者から公募を募っているいろいろなミッションのアイデアを出させ、それらを競争させて相互審査によって採択するという、下から上がるという方式であることである。惑星ミッションというものは長期的展望が必要なのですべて平面的競争というわけには行かないだろうが、政府の基本方針の枠内でなら研究者間に競争があればある程よい。そのような自由競争を阻害するような要素、例えば研究者の世界の派閥、衛星を作る特定の企業と政府との癒着、専門分野間の偏見といったものは、ミッションの成功に非常に大きな障害となる。日本の研究者達は大いにその点を肝に銘じるべきである。

ミッション以外の基礎研究については、以前に述べたように南極から大量に回収される隕石、最近回収が始まった宇宙塵、そして将来の小惑星や月からの試料を通して物質科学的な方向からの研究は絶えず続けられるべきである。しかしながら、それのみではミッションとの関わりは弱く、両者を結びつけるリモートセンシングの基礎理論と実践に力を入れるべきである。それも、地球用の資源衛星の多くのように空間解像度は高いが波長バンドは数えるほどしかない物でなく、空間方向も波長方向も解像度と数において多いものが惑星リモセンには要求される。それらは、鉱物

学・岩石学・隕石学の裏付けられたリモセン理論によって解釈されるべきである。そのような分野の發展を日本の惑星科学界は非常に怠ってきたことを反省し、今からでも人材と設備において力を入れるべきである。

6.2 日本の惑星科学の教育の未来

現在惑星科学者として活躍している研究者の多くは、「惑星科学科」のような学科ができる前に地球物理・地質・鉱物・天文・物理・応用数学・生物といった従来の学科で勉強してから大学院か就職してから惑星科学に入った者が多い。現在は学部時代から惑星科学専門の学科に入ることができ、大学院もそのまま上に行くことができる。それは一見良いようだが、心配すべきことも多い。

まずは、惑星科学科で教えること以外の上記のような既成の基礎科学を学ぶ機会が減っていることである。特に秀でた専門のない学生が惑星科学科なるものに多く出てきてしまうのは危険である。また、惑星科学が境界領域で自分自身の学科を持たなかった時代に多くの人材が他分野から流入したことで現在のレベルの惑星科学界ができたわけで、そのような分野間の交流を途絶えさせてはならない。

そして何より重要なのは、大学での授業および大学院での研究指導の内容は、世界中の惑星ミッションや観測といった最新のデータと解釈に基づいて、常に進歩していかなければならない。日本の惑星科学の学生も教官も、一般に地道な研究をしっかりと行っているとしてもその研究結果が持つ意味、惑星探査との関連、そしてどの様にその結果を発表すべきかという点において、アメリカの学生や教官に劣ることが多い。もちろんそのような教育を高校などのレベルまで下げていったら理想的である。NASAはそのような努力を怠らずに続けている。

学生が惑星科学に関して日本で学べることは、正直言ってアメリカで学べることよりも劣っている事が多い。さらに、大学院で博士号を取ってアメリカでポスドクなどをすれば、世界の惑星科学の最先端を経験できる可能性が高い。また、アメリカの研究者達と同等な立場でアメリカで研究職についていく日本人が増えれば、日米の惑星科学界の交流のための橋渡しとして貴重な存在となりうる。しかし、日本の学問界も政府もそれを本当には助けていない。日本育英会は、奨学金返還を免除される就職口を日本の研究機関のみに限っているし、大学院を出てから5年以内にそのような職につかずにアメリカなどで研究をしていたら、その後日本で教授とかになって20年とか勤めても、一切返還は免除されずに全額を返さねばならない。かく言う私も過去6年間も奨学金を返還しつづけており、ブラウン大

学でもらえる 1 ヶ月の給料以上の額を毎年返さねばならない。日本で安住して大学に勤める同様な世代の研究者達は、私と比べて 2 倍ぐらいの年額の給料をもらっているのに奨学金は免除になっているのに、このような事態は日本育英会の恥とまで考えられかねない。そのような日本政府の矛盾した態度と日本の大学の閉鎖的人事を改善しなければ、惑星科学はおろか学問全体がいずれは困難を迎え、つけを払わされる時が来るであろう。

<最後に>

この連載を愛読して下さった方々に感謝いたします。様々な問題点もあからさまに書きましたが、現在の惑星科学者の皆さんも学生の皆さんも、日本の惑星科学の将来に希望を持って注目し、それに貢献していく人々が増えていくことを願っています。