

小粒でもぴりりと辛い、衛星/小惑星の探り方

西松建設（株）技術研究所

秋山 演亮

<初めに>

“小粒でもぴりりと辛い”惑星探査計画

惑星科学を研究するには様々な方法があります。天体観測しかり、地球の調査もしかり。また、既に地球上には様々な宇宙からの試料があります。小さな塵として毎日毎日空から降ってきて、あなたの髪の毛にさえ降り積もっています。もうちょっと大きなサイズでは、各種の隕石が地球上のいろいろな場所で発見されています。

しかし惑星科学というと、惑星探査機がとってきた鮮やかな写真が頭に浮かんでしまいがちです。確かに惑星探査機を飛ばしてそれぞれの惑星/衛星/小天体の写真を撮ってくるとかなりのインパクトがあります。私の一昔前の人たちはアポロのテレビ中継にあこがれた人が多いですが、私の世代の場合はバイキング/パイオニア/ボイジャー画像に魅せられた人達だと思います。今の世代の人達は、マーズパスファインダーでソジャーナが動き回る画像に魅せられるのでしょうか？

惑星探査機の画像は華やかですが、見かけだけにだまされてはいけません。これは惑星科学が持つ手法のほんの一つにすぎないのです。惑星科学がいつから始まったのか、というのは非常に難しい問題ですが、たとえば月に関しては1610年にガリレオが望遠鏡を向けて以来、かなり早くから多くの観測・研究が行われています。1610年を惑星科学の元年とすると、惑星探査機が活躍し出すのは400年近くの歴史の中で、最後のほんの50年弱にしかすぎません。

たとえば小天体を例にとってみると、小天体に関するデータは探査機が取得したものよりも、地上観測や小天体から来たと考えられている隕石がもたらしたデータの方が圧倒的に多い、という現実があります。探査機を一度飛ばせば、素性のわかった非常に密度の高いデータが得られますが（もちろんそれは事前に十分な検討と準備をするからです）もっとも効率がよいのは、これらの地上のデータを補完するような探査計画を立てることです。そういう探査計画が、“小粒でもぴりりと辛い”探査計画、と呼べると思います。

こんかいの私の講演では、このような“ぴりりと辛い”探査計画を立案する為に、月や小天体に関してお話をさせていただきたいと考えております。

<月 / 小天体のサイエンス的位置付け>

各天体に残る誕生と進化の“指紋”

惑星科学の目的は、“太陽系がいかにして形成され、進化し、現在に至ったか”を明らかにすることだとよく言われます。もちろんこの前段階として“太陽（恒星）がいかにして形成され、進化し、現在に至ったか”という問題もありますが、これは天文学と惑星科学の境界領域です。そしてさらにその前段階として、“銀河がいかにして形成され、進化し、現在に至ったか”、“宇宙がいかにして形成され、進化し、現在に至ったか”などが有りますが、この辺になるともう完全に天文学の領域、そして物理学の領域といえるでしょう。

現在、太陽系の進化は図1(坂本 et al 1998)のように考えられています。これらは電波望遠鏡やハッブル宇宙望遠鏡、そして隕石の中に含まれていた様々な物質の固化条件や放射線年代などからわかってきた出来事です。この進化マップの中で固体惑星から何がわかるのか、と言うことがこの講演の主眼です。

固体惑星と言っても実に様々なものがありますが、太陽系の進化の中でそれぞれがどのようにできたかを考えると、それぞれの固体惑星の重要性がわかるかと思えます。図1の下から3番目の絵か

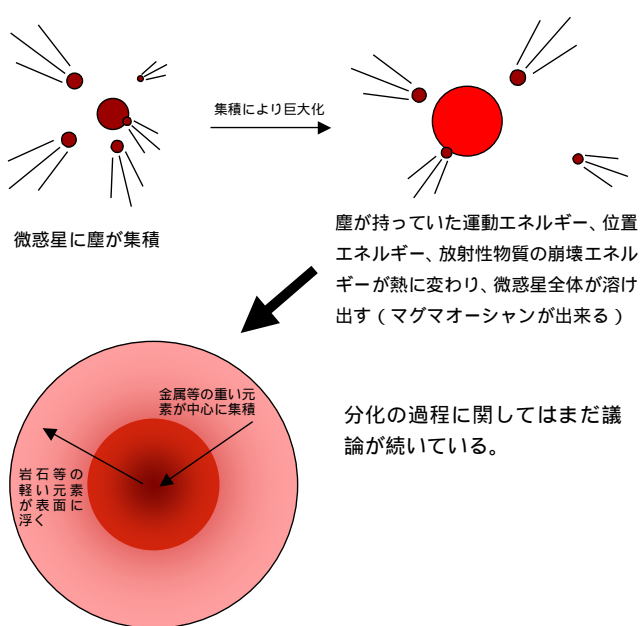


図 2 天体分化の模式図(MEF レポート 1-3 節(奥平))

だんだんと大きくなり、微惑星と呼ばれる天体にまで成長します。そして微惑星が大きくなればなるほどその重力も大きくなるので、周りからどんどん固まりを引き寄せようになります。このようにしてだんだんと惑星が形成されていきます。

これに伴い衝突によって発生する熱量もどんどん増え、ついにはその固まり全体が溶けてしまうような状態に陥ります。この状態を“マグマオーシャン”と呼びます。マグマオーシャンが起こると、その固まり内部で物質の流動が加速しますから（固体が液体になるため）金属など重たい物質が中心部へ沈み込み、珪素など軽い物質が表面に浮き上がってくる、“分化”が起こります（図 2）。このようなマグマオーシャンを体験した天体のことを、“分化天体”

と呼び、体験していない天体は“未分化天体”と呼ばれます。また、未分化の天体は、“始源的”な天体とも良く言われます。どのぐらいの大きさからマグマオーシャンが形成され分化が起こるのか、このあたりはまだよくわかっていませんが、1000km クラスになると分化を経験していると考えられています。

固体惑星を研究する我々が対象とする天体は、小天体のような小さなものであれば分化天体、未分化天体が有ります。しかし、衛星や惑星クラスになると、ほとんどは分化天体になります。ではこれらの天体から、それぞれ何を求めて研究を行うのか、次章以降で述べます。

小天体に関して

小天体の特徴の一つは、その数の多さです。1801 年に小天体第一号ケレスが発見されてから 2 世紀の間に、2 万個近い小天体が確定番号を獲得し、10 万個近くがほぼ精密な軌道確定されています（2001 年末現在。この数値は現在でもどんどん増えています）。これらの小天体は原始太陽系星雲やダスト成長の時代から始まり、微惑星や原始惑星から大型の分化天体への衝突成長と熱的分化に至るまでの、様々なイベントに関する直接情報を持っていると考えられています。

一般的に太陽系探査では以下のような事柄の究明が期待されます。

1. 原始太陽系円盤を構成した物質の空間的分布（ガスから塵への進化）
2. ガスと塵が微惑星や原始惑星を経て、現在の惑星・衛星・小天体に成長した過程で起きた出来事（塵から天体への進化）
3. 太陽系内での惑星や小天体の軌道・空間分布の変遷（惑星軌道・分布の進化）
4. 天体内部/表面における、衝突破壊/集積や熱的分化などの物質進化の過程
5. 生命の前駆物質と考えられる各種アミノ酸等有機物の存在・進化

小天体探査においては、このうち 2,4,5 に関して情報が期待できます。これは、小天体が様々な歴史を持っている事に起因します。小天体の現状を分類すると、以下のように分ける事ができます。

- a. 分化した小天体
- b. 未分化の小天体
- c. 分化した天体の破片としての小天体

d.未分化の天体の破片としての小天体（ただしこれはbと見分けがつかない）

この分類は、これまでの太陽系の進化について考えられている理論から導かれたものですが、じつはまだ小天体から試料は持ち帰られたことがないためこの分類も確実ではありません。もっとも地上には様々な隕石が落下してきているので、これらを調べることで上記のような小天体が存在するかどうか調査できる可能性はあります。隕石のそのほとんどは、軌道要素等から小天体起源と考えられていますが、確実に小天体起源かどうかの断定には至りません。

また別の方法として、小天体は様々な分光タイプを持つことから、地上での分光観測の結果を使って、分化・未分化に関して推測を行うことも不可能ではありません。しかし、これもまた間接的な証拠なので状況証拠にすぎないと考えられています。

実際に探査機がどんどん小天体に飛んでいって試料を持ち帰ってきていけばよいのですが、宇宙機を使った小天体探査の歴史は非常に浅いのが現状です。エロスに“touch down”をした NEAR シュメイカー探査機以前では、半ダースに満たない小天体を近接撮像したに過ぎません。しかもこれまでは、MUSES-C も含めて、探査対象を科学的意義から選ぶというより、宇宙機の工学的能力で行きやすい天体を選ぶというのがもっぱらでした。今後も小天体探査の機会が飛躍的に増大するとは考えられません。（たとえば日本ではせいぜい数年～10年に1度のチャンスしかないでしょう。）このことから、“ぴりりと辛い”ポスト MUSES-C 時代の小天体探査の目的は、豊富な地上での観測・分析のデータ（これまでに世界中で収集・記録された宇宙塵・隕石コレクションは数万個にも及びます！）と探査機のデータを橋渡しするために、主要なスペクトル型小天体の各々について定点データを取得し、「小天体の博物学」をなるべく短期間に決着させることになると考えられます。

始原天体としての側面

小天体はなぜ大きな天体になれなかったのか？特に、どうして小惑星帯が形成されたのか？に関しては、これまでも多く議論がなされてきました。太陽系で惑星が形成される過程に置いて、木星が暴走的に成長にするフェーズがあったと考えられています。この結果、小惑星帯付近では物質が木星に吸い取られてしまい、微惑星同士の衝突頻度が減少し、十分に成長しきれなかった微惑星が火星と木星軌道の間小惑星帯を形成したと考えられています。また、外惑星域では回転速度もゆっくりしているので十分な衝突回数が稼げず、冥王星軌道の外側にも集積しきれなかった様々な微惑星が存在していると考えられています。これらが EKBO と呼ばれる天体群です。

巨大惑星や月などの衛星は、その大きさから、すべてマグマオーシャンの段階を経験し、分化していると考えられています。このマグマオーシャンの段階で、惑星を形作った様々な物質はすべて溶けてリセットされてしまい、それ以前に関する多くの情報を失ってしまいます。

一方それに対して十分な大きさまでの成長をすることがなかった（すなわち溶けなかった）微惑星は、これら熱変成を受けていないか、あるいは少ない熱変成しか受けておらず、現在まで太陽系形成時の物質が持っていた情報を持っていると考えられています（図3）。これが小天体の持つ、“始原天体”としての側面です。この“始原天体”としての側面は、太陽系の形成論を考えるにあたって小天体探査に求められる重要な意義の一つです。

このような始原天体として探査対象となる小天体は、一つにはあまり巨大化しておらず、また太陽の輻射熱による熱変成も少ないものが望ましいと考えられます。EKBO はその条件を満たす重要な天体群ですが、残念ながらこれらまでの距離はあまりに遠すぎ探査は困難です。

一方彗星は、その起源を EKBO あるいはそれ以遠の太陽系周縁部に持つと考えられています。その為、始原天体としての側面を持つ可能性が十分にあります。また、彗星はほとんどが地球軌道の内部に近日点を持つので、距離的には探査機を送り込みやすい対象天体ともいえます。ただし実際には探査機と探査天体の V を考慮にいれなければならないので、探査機をランデブーさせる、もしくは周回軌道に乗せるのは非常に難しくなります。側方を通過するフライバイという手法は取り得ますが、フライバイ時に観測できる時間はせいぜい 20～30 分程度と言われており、満足な観測を行う

ことは非常に困難です。(もっともそれを何とかするのが探査計画立案者の腕の見せ所なのですが) 始原天体での探査にあたっては、このように太陽系形成時の情報を保持した物質を調査することが重要な目的となります。またここでは多くはふれませんが、別の観点として、生命の起源となりうるような物質がこれら天体に見つかるかもしれません。これは惑星科学にとどまらず、地球生命の起源と進化に関して重要な情報を与えます。末尾に添付しますが、氷衛星や火星、そして小天体で見つかる可能性のある生命に関する研究、すなわち地球外生命に関する研究は、アメリカでは3年ほど前よりかなり盛んになりつつあります。日本でも横浜国大の小林憲正先生の研究室などで研究が進められています。

分化天体としての側面

未分化天体が太陽系誕生時の情報を残していたのに対して、分化天体の場合は一度溶けてしまっているので、この情報はリセットされてしまっています。その為、分化天体に求められるのは“固体惑星が如何に進化したか”という情報になります。

図3を見てもらうと明らかですが、地球などの場合、天体自体がまだ熱的に冷え切っていませんか

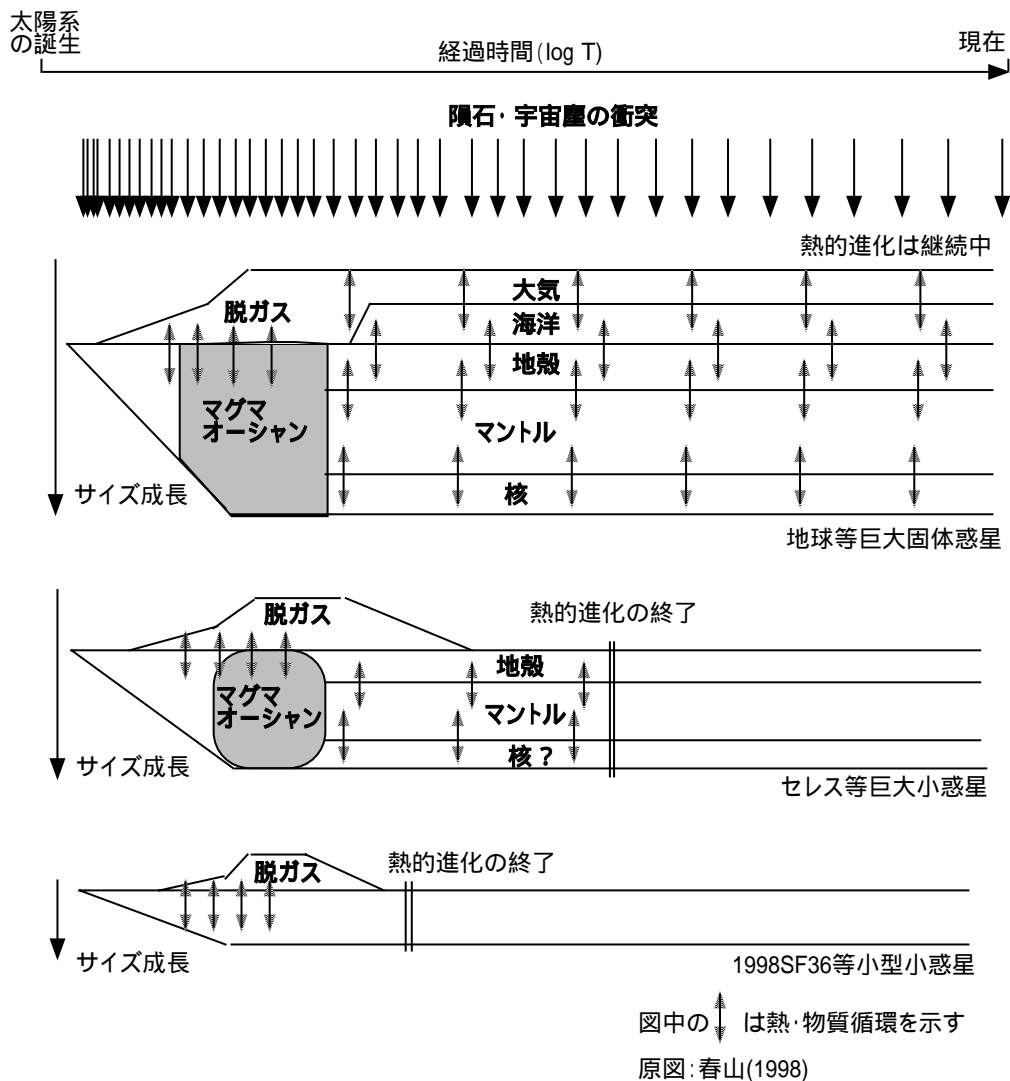


図3 小天体・月・地球の進化模式図

ら今でも物質循環が進んでいます。このため、分化天体形成初期の記録もリセットされています。月などは現在は熱的に死んでいると考えられていますが、それでも相当の長期にわたり、物質循環があったと考えられます。その為、やはり固体惑星形成初期の情報は失われてしまっています。しかし小天体の場合は分化していたとしても、大きさが小さいためすぐに冷めてしまい固体惑星形成初期の情報を保持している可能性があります。また小天体の中には、分化天体が割れてできたものが有るとも考えられています。この場合は地球でもあまりに深すぎて見えなかったコア物質が割れて露出している可能性があります。たとえばM型的小天体と言われるものは金属質だと考えられているのですが、この金属は分化天体のコアの部分だと考えられています。すなわち、これらを観測することにより、地球でも見る事ができなかった固体惑星の深部物質を直接観測できる事になります。

小天体には、“族（ファミリー）”と呼ばれるグループがあります。ファミリーはいくつか見つかったのですが、これらは同じような軌道要素（離心率、軌道傾斜角など）を持っていることから、元々一つの天体だったものが割れてこのファミリーが形成されたと考えられています（ちなみに小惑星に“族”があることは、1917年に平山さんによって発見されました）。そのファミリーの中には、金属質のMタイプや岩石質のSタイプ的小天体などを含むものがあります。これらは、元々の固体惑星の成層構造を示しているのかもしれませんが、すなわち惑星がバラバラに割られた状態、なのかもしれません。これらのサンプルを調べることにより、固体惑星の内部構造がよりわかる、と云うことです。

残念なことに、我々はまだ小天体からのサンプルを直接には入手していません。その代わりに、それら小天体から来たと考えられている多数の隕石試料を多数保有しています。（ちなみに日本は南極で多数隕石採取を行っているので、世界でも有数の隕石保有国です。が、人手不足もあってまだその分析が十分に進んでいないのが現状です。）この隕石が現在如何に研究されているかを知れば、我々が分化天体をどのように研究すれば良いかがわかってきます。

隕石は始原的隕石（＝未分化の隕石、コンドライト）と分化した隕石の2つに大別されますが、ここでは分化した隕石を見てみましょう。こういった分化した隕石からは、分化天体の内部構造や熱源について調べることができます。

分化した隕石は、主構成物質が珪酸塩であるエコンドライト、および、鉄隕石、石鉄隕石に分けられます。これらの種類は、隕石が分化天体のどの場所でできたかによって決まったのだと考えられます。また多数の隕石を調べてみると、同位体組成が一致しているなどの理由から、元々は一つの天体に属していたと考えられるものもあります。

それぞれのタイプの隕石が形成される熱・圧力条件を考えると、表層に位置していたのがユークライト、その内側にダイオジェナイトが分離されていて、両者の機械的混合物としてホルワライトがあり、さらに、金属コアと珪酸塩の境界付近のサンプルがパラサイト（石鉄隕石）だと考えられます。金属コアの部分はいわゆる鉄隕石（隕鉄）になります。これらの隕石の微量元素分析を行うことによって、母天体の集積、溶融、内部構造の進化過程の推定が可能です。また、岩石組織を調べることにより、それらの固化条件（温度・圧力）がわかります。

これと同じような分析を小天体に対して行えば、同様の調査が可能です。しかしせっかく既に膨大な隕石試料が地上にあるのに、すべての小天体にわざわざ行ってサンプルを持ち帰ってくるという

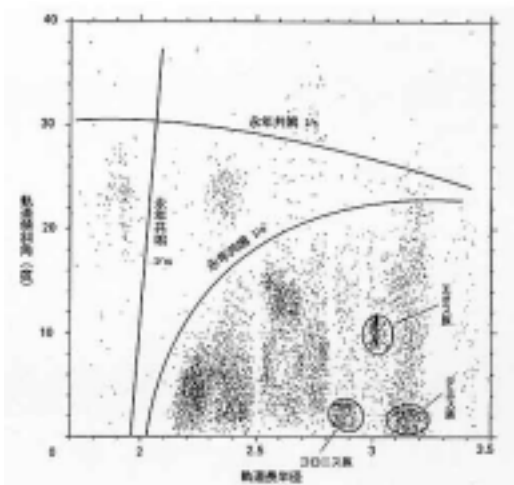


図 4 小惑星の族(ISAS NEWS 207 吉川)

のはかなりコスト的に無駄です。そこで、まずは隕石タイプと小天体のタイプとの関連を調べることが一番重要で、“ぴりりと辛い” 探査計画であると我々は考えています。

月に関して

言うまでもないことですが、月は我々地球に一番身近な天体です。もちろん、時々近地球小天体が月と地球の仲を裂こうと間に割って入ってきますが、しかしずっと恒常的に見れば、やはり月が一番身近な天体であるといえるでしょう。また、惑星科学が月から初めて学んだことは非常に多くあります。たとえばクレータというものに関して最初に教えてくれたのも月でした（今ではクレータのほとんどは衝突起源だと考えられていますが、昔は噴火によるものだとも考えられていました）し、レゴリスの存在、宇宙風化作用に関して月が最初に教えてくれました。また月までの距離は他の天体よりも短い

ため、様々な工学的な実験の場としても好都合です。アポロを始め多くの探査機が月に行ったことはご存じの通りです。では、月は既に探査され尽くされて、おもしろみのない天体か？という

と、そうではありません。日本は今後、Lunar-A、SELENE、そして SLENE-B と月探査を考えており、まだまだ月には解くべき謎が有ると考えています。月は分化天体の一つですが、小天体のように割れて内部が露出しているということはありません。しかし大きなクレータは衝突後に深部物質が盛り上がりできたと考えられる中央丘を持っているため、ここを調べると 10km ~ 20km ぐらいの深部物質を見ることができます。ただし、この部分の深さは地殻から上部マントルに達する程度の深さなので、残念なことにコアを見るには至りません。それではやはり月を探査する意義はないのか？と思ってしまうかもしれませんが、月は太陽系を持っているもう一つの大きな謎、“ジャイアントインパクト”の証拠を秘めている可能性が大きな天体なのです。

月には多くの特異性があります。第一に、月の大きさです。月の地球に対する大きさの比は、数ある衛星の中でも非常に大きく、地球との 2 重惑星と呼んでもいいぐらいの大きさです（冥王星の衛星カロンは月よりもさらに大きな比を持っていますが、太陽系進化を考えると外惑星域の場合と内惑星域の場合は別の意味があると思われます）。他の固体惑星を見ると、水星・金星はそもそも衛星を持っていません。火星は衛星を持っていますが非常に小さく、おまけに歪な形状をしています。このため、どちらも小天体だったものが火星重力に捕まったものだと考えられています。それに対して月の地殻物質が地球の地殻物質と同じような同位体傾向を示すことから、月と地球は少なくとも両者がまだ溶けていた時代から、ともに進化してきたと考えられています。では月 地球の 2 重系がどのように誕生したのか？これに関してはまだ明確な答えが出ていません。有力なものとして、

- ・兄弟説：原始太陽系円盤から共成長した
- ・捕獲説：火星の衛星と同様にたまたま通りかかった月を地球重力がとらえた
- ・ジャイアントインパクト説：何か大きなものが地球にぶつかり地球を再融解させ、地球周りにディスクを形成してそれが集まった
- ・分離説：何かの要因で地球の表面がぶちっとちぎれた

などが有ります（図 5 参照）。現在ではジャイアントインパクト説がもっとも有力です。これにはいろいろ理由がありますが、前述のように地球と月の地殻の同位対比が似通っていること、月のコ

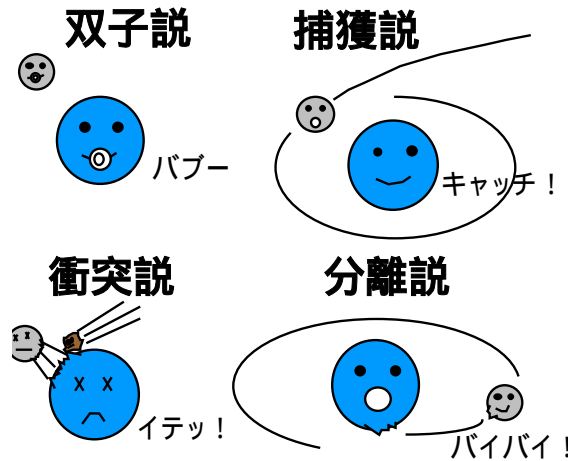


図 5 月の成因

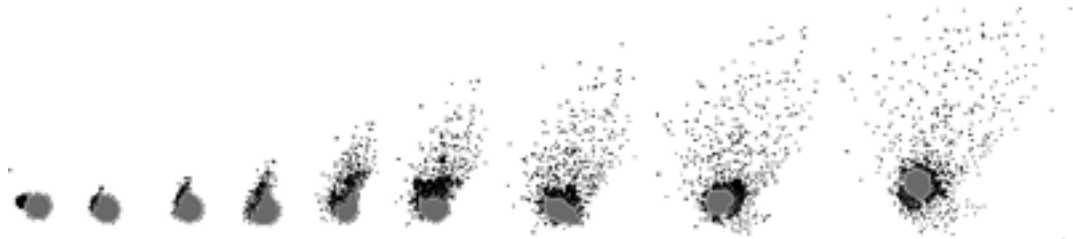


図 6 ジャイアントインパクトのシミュレーション例 東大・牧野

http://grape.c.u-tokyo.ac.jp/~makino/animations/giant_impact/

アのサイズが小さいこと、地球の上部マントルにニッケル、コバルト、イリジウムなどの親鉄元素がかなりの高濃度で含まれていること等々、多くの問題点を解決してくれることがこの仮説を支持しています。また、近年では東工大の井田さん達が様々な条件でジャイアントインパクトをシミュレーションによって計算され、月がどのようにできたか、物質が月と地球でどのように配分されたかなどが計算されていて、非常に説得力があります。(図6)

このようなジャイアントインパクトはとても特異な現象で、普遍的に太陽系の謎を解くには役に立たないのではないかとと思われるかもしれませんが、しかし実は太陽系を見渡すと、このジャイアントインパクトが原因かもしれない、と考えられる現象がいくつもあります。

たとえば金星。惑星は形成時に、公転方向の角運動量によって公転方向と同じ方向に自転している場合がほとんどです。しかしながら金星は、公転方向とは反対方向に自転をしています。これは南北を逆にさせるような、あるいは自転の向きを逆にさせるような方向・部分に衝突が起こったのではないかと仮説もあります。また、天王星の自転軸はほぼ公転面と同じ方向に傾いています。これもジャイアントインパクトのような衝突が原因ではないかと考えられています。そもそも惑星は原始太陽系円場の中にあつた微惑星同士が衝突・集積してできたものですから、このようなジャイアントインパクトは珍しい現象ではなく、太陽系内で普遍的に起こっていた可能性があります。どのぐらいの頻度で衝突が起こりえたかなどは、惑星形成論の分野で研究が進められています。

このように、月には小天体とはまた違ったサイエンスのおもしろい課題が有ります。では、小天体の時のようにもっとも効率よく、“ぴりりと辛い”探査計画を立案するには、どのあたりに焦点を当てるべきなのでしょう？これに関しては、小天体の場合と同様、“素性の明らかなサンプルを着陸探査により入手し、それとの比較により、全球のリモートセンシングのデータに校正を与えること”と、“地球-月系固有な現象に関して最小の労力で解を得ること”の二つがあげられます。

分化天体としての側面

月は形成後もしばらく暖かく、その後、火成活動が盛んであったことがわかっています。すなわち、月は固体惑星形成時の“指紋”は失っているかもしれないけれども、固体惑星形成初期の“指紋”を残していると言えます。これが月を探査する意義の一つです。図7は図3をさらに拡張して、月だけに関して詳細を描き込んだ月の進化図です。物質が集積してやがて全球が溶けてマグマオーシャンを形成し、それが徐々に固まって地殻、そしておそらくマントルと核が形成された、と考えられています。

月表面はアノーサイトなどの比較的軽い物質が覆っていますが、たとえばクレータが形成されたときにリバウンドで深部物質が盛り上がり露出する、あるいは太古の火山活動によってマグマが噴出するなどにより、表面にも様々な深部物質の有ると考えられます。

月の表側に関しては、これまで地上観測によって膨大な観測データもあります。また、赤道域に関しては、アポロによる軌道上からの観測データがありますし、最近ではクレメンタインなどが様々な分光写真を撮っています。しかし、月はアフリカ大陸ほどの面積を持つ天体であり、かなりの大きさが有ります。その為、これまでの探査・地上観測では、まだ全球に関して均質なデータは入手

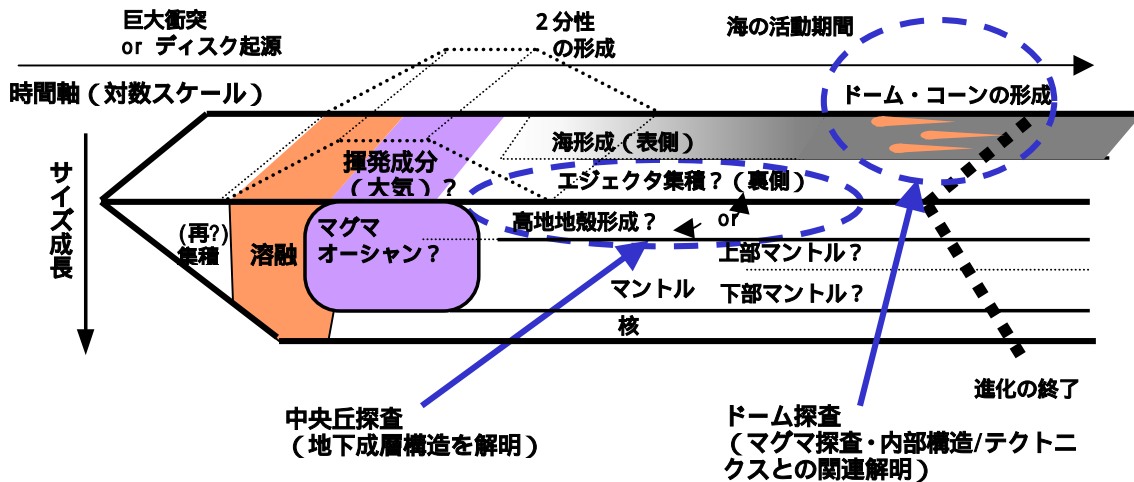


図 7 月の進化模式図 原図：春山(1998)

月の表面は地球側・反地球側で異なる地形を持つ。中央丘探査は地下成層構造の解明を可能にし、高地の形成に知見を与えることが期待される。ドーム・コーン探査はマグマ探査、内部構造/テクトニクスとの関連を解明し、海の後期における活動を明らかにする事が期待される。

できていません。(一部では高解像度であっても他の部分では低解像度だったりする為、定量的な議論がなかなかできません)そこで第一の目的として、月全球にわたって均質なデータを拾得することが望まれます。

次にこのようにして得られた均質なデータを見てみますと、様々な分光タイプを示す地点が見つかります。これらをタイプごとに色分けして地図を作ることは可能ですが、どのタイプがどんな種類の岩を示しているかは、実際に現地サンプルを入手して、比較しないとわかりません(このような作業をグラントゥールスを取る、と言います)。もちろん地上でいるんな岩石を分光観測して、それとの比較から類推するということもできますが、表面の粒度の違いや宇宙風化作用などによって必ずしも正確な比較をすることはできません。また分光観測の場合、組成はわかっていても遠方からでは岩石組織までは見ることはできませんから、岩石が固化した温度・圧力条件なども見積もることができません。たとえば岩石が地下深部でゆっくり冷えた時と地表近くで早く冷えた時では、岩石を構成する結晶の大きさが異なってきます。軌道上から月表面に苦鉄質の組成の岩石が見つかった場合でも、着陸してその岩石の組織をみなければ、深成岩か、貫入岩か、それとも特殊な化学組成の溶岩なのかは区別が付きません。

そこで2番目の目的としては、リモートセンシングによって得られた全球分のデータに、極わずかな着陸地点で得られたサンプルから解を与え、どのような物質がどこに分布しているかという知見を得ること、すなわち“グラントゥールスを得ること”があげられます。これまでアポロで6回、ソビエトの無人サンプルリターン機、ルノフォートで2回の計8回しかサンプルの直接分析は行われていません。しかも当時は着陸しやすい海の部分に行ったため、採取されたサンプルにも偏りがあります。そこで軌道上/地上からの観測で、これまで採取されたのとは異なった性質を示している地点に行き、そのサンプルを直接調査することが、現在求められています。着陸探査は軌道上からの探査と異なりきわめてローカルな探査しかできないと思われがちですが、得られたデータをこのように活用すれば、これまで得られた月全体のデータをさらに活かすことが可能となります。

地球・月系固有の側面

図7は月ができた以降に関する模式図ですが、ジャイアントインパクトで月ができたとすれば、他の惑星とは異なったスタート点を取ることになります。すなわち、惑星は原始太陽系円盤からできましたが、月の場合はこの原始太陽系円盤からいったん火星ぐらいのサイズの惑星にまで成長し

た天体が原始地球に衝突し、(このあたりはモデルによっても変わりますが)いったんバラバラになって地球周りに降着円盤を形成し、そこから再集積して月ができた、と考えられます(図6参照)

その後、月は図7に示すような進化をたどったと考えられているわけですが、ここでもまた月特有の現象が見られます。月は他の天体と違い、表側と裏側が非常に異なった性質を持っていることが知られています。これは月の写真を見ただけでも明らか(図8)なので

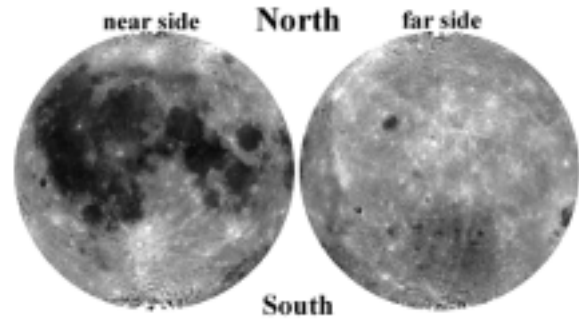


図8 月の表側・裏側

すが、表側には海が存在するのに対し裏側にはそういったものはなく、表側よりもさらに多くのクレータ痕が観測されます。これが月の2分性と言われるものです。図7はこの表面での進化の違いがわかるような図になっています。また、月の地殻の厚さは裏側の方が表側に比べて圧倒的に厚いことがわかっています。

月の表面形成に大きな影響を与えた

マグマオーシャンの固結時期(約45億年前)

マグマオーシャン語の火成活動時期(約45億年前~40億年前)

海の火成活動時期(約42億年前~30億年前)

の3つの火成活動時期が知られています。マグマオーシャン後に固化した状態では、軽い物質(アノサイトなど)が地殻に、重い物質(オリビンなど)がマントルに、さらに重い金属物質がコアに集積すると考えられています。その為、まず月の周りをアノサイトの地殻が全球的に覆った状態がだと考えられてきました。ただし、このとき重い成分が地球方向に引き寄せられたのが月の地殻の厚さが異なる(裏側の方が厚い)原因ではないかともいわれていますが、このあたりはまだ検討が必要でしょう。

その後、
・ の火成活動によって、月のマントル付近に存在していた物質が吹き出してきたと考えられていましたが、実際に計算をしてみると(Head and Wilson, 1992 など)、マグマが月表面まで吹き上がってくることは困難であることがわかってきました。ここで、図9を見てください。これはこれまで得られた月の分光画像から、トリウム(Th)の分布を調べたものです。これによると、表側の海の部分にトリウムが多く分布することがわかります。このトリウムという物質は、“固まりにくい”性質を持っています。すなわち、マグマオーシャンが冷え固まる時、表面から固まっていきますから、だんだんと液層の方、すなわちマントルの方へ移動していつてしまう物質です。すなわちある部分にトリウムが多いと言うことは、そこはよりマントルに近いところにあった物質(高密度下部地殻)と考えられます。

一方、月の裏側にはトリウムはほとんど分布していません。しかし、月の裏側の南には、サウスポールエイトケンと呼ばれる、直径が2500kmにも達する巨大なクレータが存在します。クレータの直径と深さの比は月の場合10:1程度ですから、サウスポールエイトケンでは20km以上の深さの物質が掘り出されていると考えられます。これは、上部マントル付近にまで達していても良いような深さです。しかし、そのような深さに達しているにもかかわらずトリウムが見えないことは、何らかの原因で軌道上からの探査ではトリウムが見えなくなっているのか、あるいは何らかの原因でトリウムが実際に存在していない事が考えられます。そこで、第一の目的としては、トリウムの分布が実際にどうなっているのかを調査することが上げられます。

次に海の火成作用は、クレータ年代学を用いて、かなり新しい時期に起こったことがわかっています。月形成からしばらくたった時期に、海の化成作用を引き起こさせた熱源は何であったのか?これを調べるのが、第二の目的としてあげられます。

月探査においては軌道周回機/着陸探査機による探査、中でも着陸探査を実施することにより、これまで得られたデータを十分に活かすことができる“びりりと辛い”探査計画の立案が可能であると考えます、

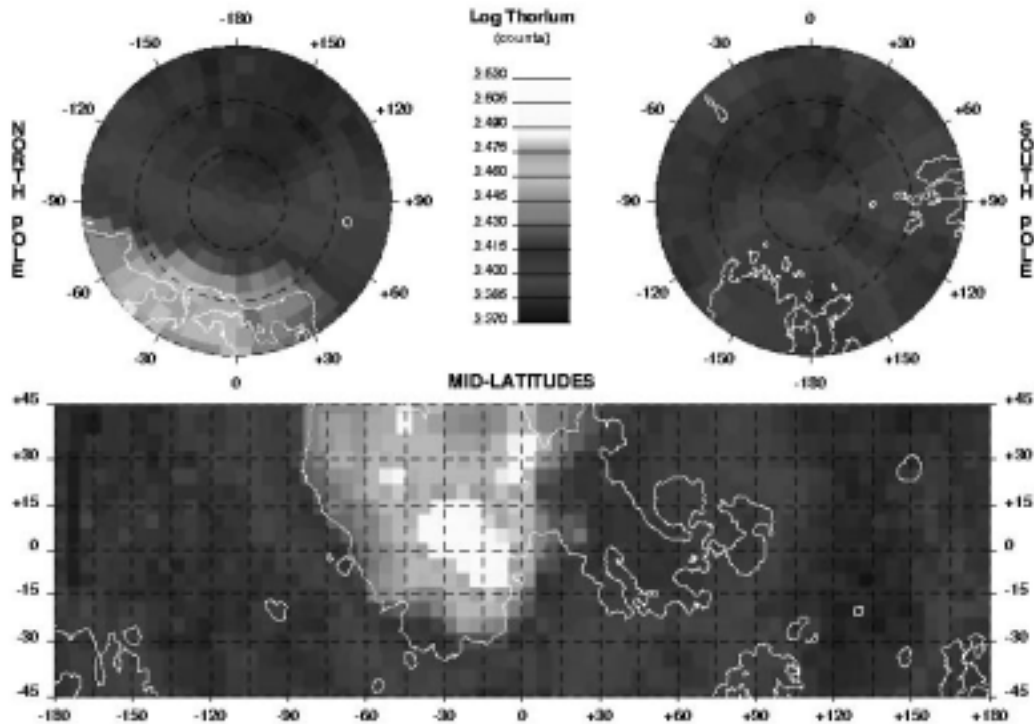


図 9 月のトリウムの分布

< Post MUSES-C 計画に関して >

(参考) MUSES-C 計画

MUSES-C は、今年 11 月に打ち上げられる予定の日本の小惑星探査計画です。もっとも MUSES という名前は“ミューロケットを使った工学試験衛星”を意味しますので、ホントは小惑星探査が目的ではなく、電気推進と自律航法などが実現可能かどうかを実証するための工学試験衛星です。これは宇宙研の特徴なのですが、宇宙研では“サイエンスを実現するための工学”という点に重きが置かれており、MUSES-C でも上記工学的課題を実証するにとどまらず、理学的にも重要な課題を解決する探査計画が立案されています。



図 10 MUSES-C サンプルング想像図 (池下)

<http://www.bekkoame.ne.jp/~beyond/index.html>

MUSES-C でもっとも印象的なのは、独特なサンプル回収機構です。サンプラーホーンと呼ばれる筒の中から弾丸を発射し、それによって飛散した岩石片をサンプラーホーンの奥でキャッチして持ち帰るという構造になっています。

このようなサンプリングを、将来すべてのタイプの小天体に実施することにより、小天体の項で述べたような“ぴりりと辛い”探査計画が実現できるようになると期待されます。

Post MUSES-C 計画

この計画を語るには、小天体探査フォーラム (MEF) に関して語る事も必要なのですが、今回は簡単に説明するにとどめます。MEF とは 2000 年 5 月末より、MUSES-C に続く、今から 10 年後に日本が行うべき小天体探査について、

(1) アイデアを全国からボトムアップ式に募り

(2) 各案の科学的意義や工学的な実現可能性を検討し、

(3) 宇宙研が実施できる規模の有力なミッション候補を 2000 年度内に幾つか創り出す

ことを主目的として、インターネット上で立ち上げられた「日本語限定」会員制グループ、小天体探査フォーラム (MEF: Minor Body Exploration Forum 会員ページ、<http://www.egroups.co.jp/group/minorbody>; 一般公開ページ、<http://www.minorbody.com>) のことです。

(現在でも会員を募集していますので、是非ご参加ください。)

ここでの議論により、表 1 にしめす 7 つの探査案がまず提案されました。これらはよく見ると、

1) 小天体博物学の早期決着:

(地上分光観測と隕石・宇宙塵データベースの統計的相関の橋渡し)

2) 分化・未分化小天体の表面・内部構造探査:

(母天体の衝突履歴・熱的進化の履歴解明に向けて)

の二つに大きくは分類されることがわかります。1) では MUSES-C で培った技術を最大限利用しながら、短期間のサンプルリターンで、複数の小天体訪問を実現できる軌道計画や国際協力が重要となります。2) では、母天体の内部構造を理解するための同一族中でも特にスペクトル型や大きさ、自転周期、自転軸、軌道要素などが多様な複数小天体からのサンプルリターンやベスタの巨大クレータを踏破して露岩に分化した地層を探すローバーなど、または現天体の内部構造を調べるための弾性波、レーダーサウンダーなどの小天体への応用など、比較的新しい技術が求められます。

このような観点から、MEF では

1) 「スペクトル既知 NEO マルチランデブー & サンプルリターン (できれば M 型と CAT 天体候補含む) + 着陸機 (又はローバー) + HERA ミッションとの国際連携」

2) 「複数スペクトル型小天体族マルチフライバイ & サンプルリターン + 編隊飛行技術」

をレファレンスミッション案として提案しています。

MEF はきわめて私的な集まりですので、今後これを日本としての探査計画にあげるためには、様々な手順を踏み承認を得なければ行けません。これまでは日本の探査計画は様々な方法で立案、承認されてきましたが、最近はその選考過程がようやく一元化されつつあります。毎年年末に宇宙研で開催される“宇宙科学シンポジウム”で発表を行い、それに基づき理学委員会/工学委員会で議論が行われます。この理学委員会/工学委員会とは、宇宙研及びその他機関の有識者 (人数比はだいたい半々ぐらいだそうです) からなる委員会で、ここではかなりつつこんだ専門的な議論がなされます。ここで承認を受けた後、文科省に計画として提案されます。それを受けて予算真性が行われ、これが認められると晴れて日本としての探査計画として認められるようになります。これまでに、金星探査計画、水星探査計画などが宇宙科学シンポジウム 理学委員会/工学委員会という流れで決定されてきました。Post MUSES-C 計画も、今年、あるいは来年の宇宙科学シンポジウムで、こういった手順を経て承認されることが望まれています。

宇宙科学シンポでは理学委員会/工学委員会にかけられる、まだ遙か前の段階の提案なども多数なされますので、これに参加すると様々な探査案に関して知ることができます。もしお時間があれば、是非一度ご参加されてみてはいかがでしょうか？

表1：MEFで提案されたポストMUSES-C小天体探査7案。

評価順位：1 = 専門家委託 2 = 提案者相互（自己抜き） 3 = MEFメンバー投票

NASA-D=米ディスカバリーミッション

MEF提案（探査天体例）	主な探査目的	海外の競合探査案	評価 1	評価 2	評価 3
ファミリーミッション （コロニス族小天体[イダ、 バイコヌール、ミモーサ、 モールトナ]）	メインベルト小天体族マルチフライバイ&サンプルリターン。母天体である原始惑星の衝突履歴・内部構造の解明・小天体起源微粒子の組成計測。	None	1	1	2
スペクトル既知NEOマルチランデブー&サンプルリターン （ネレウス、オルフェウス、 1982XBなど）	二つ以上の異なるスペクトル型の近地球型小天体へのランデブー&サンプルリターン。MUSES-C、HERA等と協力して小天体博物学の決着を目指す。	HERA (NASA-D)	2	1	3
CAT（彗星・小惑星遷移）天体ミッション （ウィルソン・ハリントン 彗星）	CAT天体へのランデブー&着陸探査。彗星から小惑星への変遷過程の解明。	DS-1 (JPL/NASA) CNSR (JPL/NASA) Stardust (NASA-D) CONTOUR(NASA-D) Deep Impact (NASA-D) Rosetta (ESA)	3	5	1
フォボス・ダイモス着陸探査ミッション （フォボス&ダイモス）	火星衛星の内部構造探査。巨大クレータを持つ小天体内の空隙の起源解明。	Phobos 1 & 2 (Russia)	3	4	3
ベスタランデブー （ベスタ）	V型小天体ランデブー。巨大クレータを通した、分化天体の「内部構造」観察。HED隕石の起源解明。	Dawn(NASA-D) New World Explorer (NASA-D) MASTER (ESA)	5	3	6
近地球型小天体マルチフライバイ&火星衛星サンプルリターン （NEO[TBD]&フォボス）	複数機の編隊飛行による小天体のフライバイ全球撮像。火星衛星表面サンプルリターン。	Aladdin (NASA-D) Phobos SR (CNES)	6	7	5
Mタイプ小天体ミッション （1986DA）	M型小天体ランデブー&着陸。隕鉄の起源解明。分化天体の中心核探査。	None	7	6	6

< SELENE-B 計画に関して >

(参考) Lunar-A 計画

Lunar-A の目玉はペネトレータと呼ばれる、槍状の地震計です。これを軌道上から文字通り月面に投げて突き刺し、がっちりと月表面に固定して、月の地震(月震)を計測します。これによって月の核の大きさを測ることを目的としています。この核の大きさは、月の成因と考えられている、ジャイアントインパクト説を補完する為の情報となると考えられています。またこのペネトレータの技術は、月以外の天体への応用も考えられるので、工学的な意味からも注目されています。残念ながら私が Lunar-A に関して知っている情報はごくわずかですので、今回の原稿では割愛させていただきます。しかし、今回の夏の学校にもご参加されている(はずの)東工大の姫野さんが、7/1 に Lunar-A の責任者である宇宙研の水谷先生にインタビューを行っています。9/25 発行予定の惑星学会の機関誌、遊星人に掲載される予定ですので、是非読んでみてください。学生の視点から見た様々な疑問点が説明されていることと思います。なお、遊星人を読めない方は、12/25 前後までお待ちください。MEF の公開ページ(<http://www.minorbody.com>)で原稿が読めます。こちらではこれまでのインタビュー記事(“ひてん”、“のぞみ”、“SELENE”、“MUSES-C”)も読むことができます。

(参考) SELENE 計画

私は SELENE のカメラチームメンバーの末席に名を連ねていますが、ばたばたして不本意ながら幽霊メンバーになってしまっています;ので、実は私が書く内容よりも他で読む方が詳しい情報はわかると思います。SELENE に搭載されるカメラ(LISM)に関しては、こちらで情報が得られます。
<http://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2000/pdf/1317.pdf>

SELENE がもたらすもっとも大きな科学的貢献は、私は“月面上のすべての部分から、同じクオリティのデータを拾得する”事であると思っています。月の写真はルナオービターやアポロ、最近ではクレメンタインが多数撮影していますが、しかし全球分、同じクオリティで写真を撮っているわけではありません。その為、月に関するこれまでの研究はある意味観測によるバイアスを受けていると言えます。今回、SELENE が全球のデータを同じクオリティで観測することにより、このようなバイアスが無くなります。

また、月の重力場に関しては、これまで表側ではデータが取られていますが、裏側に関して、全部のデータを取るのとは今回が世界初です。重力計のデータは、月の内部構造を知る上でも重要な手がかりになるため、月の進化史を紐解くに当たり、重要な鍵となる情報を与えてくれることが期待されます。

さらに、SELENE はすぐ後に SELENE-B という着陸探査を計画しています。着陸探査に当たっては、着陸する場所にどのぐらいの大きさの岩石が、どのぐらいの密度転がっているのか?とすることを事前に知っておくと、ランダの設計が非常に楽になります。SELENE でもっとも高解像度の画像は 10m ピクセルですので、着陸用の高解像度画像とするにはちょっと粗すぎます。しかし、SELENE の本運用を終了した時点で軌道高度を下げて観測ができれば、解像度はその分あげることができます。また最後の最後に SELENE を月に落とすときに、月に落ちる直前まで撮影を行えば、cm ピクセルの高解像度写真も可能かもしれません。日本ではシリーズで探査計画が進められることは少ないのですが、今回の SELENE シリーズでは、是非後続機の運用が楽になるような情報を拾得して欲しいと思っています。

SELENE は 2005 年に打ち上げの予定です。

SELENE-B 計画

SELENE-B は元々 SELENE に含まれていた着陸試験の部分が切り離されて独立した計画です。SELENE は一年間の月探査の後、月への軟着陸試験を行う予定でしたが、一年間も軟着陸機を月周

りで周回させ続けることは機器の信頼性低下にもつながるため、独立した計画で実施することになり、どうせ独立した計画で行うのであれば、有意なサイエンスも行おう、という主旨で始まった計画です。

SELENE-B でどのような探査を行うかに関しては、様々な提案がありましたが、現在のところローバを搭載してラング周りの岩石を観測し、月の地質観測を実施する計画が有力です。この計画の細部はまだ検討中ですが、現在2つの大きなサイエンス的課題が検討されています。

一つは月観測の意義でも述べたように、軌道上からの探査で見えているデータのグランドトゥルースを取ること。着陸探査、サンプルリターン探査は既にアポロやルノフォートで実施されていますが、その当時採取できていない種類のサンプル、特に月の深部から出たと考えられるサンプルを採取しその場で分析を行い、グランドトゥルースを取ることが計画されています。

もう一つは、月表面にマグマオーシャンの一部がホントに一部露出しているのかどうかを調べる事が目的として考えられます。岩石は軌道上からの分光観測だけでは岩石組織がみる事ができないため、その固化条件がわかりません。しかし着陸探査を行うことにより、岩石組織、とりわけ結晶のサイズや成長の痕跡を観測することにより、これらを明らかにすることができます。

SELENE-B 計画は現在立案過程であり、今後も様々な提案・検討をふまえて系学が策定される予定です。現時点では、表側の中央丘付近（あるいは中央丘の上）に着陸機をおろし、そこからローバを走行させて様々なサンプルを拾い集め、表面を加工（磨く等の作業を行う）して、それをラングで詳細調査する案が検討されています。

SELENE-B 計画は今年末に宇宙研で開かれる予定の宇宙科学シンポジウムで発表を行い、ミッションの実現を図る予定です。御興味がある方は、是非ご参加ください。

< (参考) 氷衛星に関して >

氷衛星とは？

氷衛星とは、主に外惑星の周りを回る、氷で覆われた衛星のことです。実は水は木星軌道以遠では、氷として多数存在しています。おそらく原始太陽系円盤が形成されたときに、木星より内側では揮発してしまっただけでも、木星以遠では揮発せずに多く残ったのだと考えられます。

氷衛星の誕生や進化に関しても、固体惑星やガス惑星と同様におもしろい話が多数有るのですが、残念ながら私からみなさまにお伝えできるほどの知識を有しておりません。そこで、その代わりに言っただけですが、私たちが数年前に検討を行った、氷衛星の一つであるエウロパへの生命探査計画に関する原稿を転載します。これは、日本スペースガード協会の機関誌でもある“あすてろいど”24号のために書いたものです。

氷衛星の多くは確かに表面に“水”を多数もっていますが、しかしこれは固体の“氷”として多く存在します。近年の調査により、エウロパはその氷の下に広大な海を持っているのではないかと考えられるようになりました。

この海を舞台に地球外生命が活躍をしているのではないかとすれば、我々はその生命にどうやったら会うことができるのか？これが我々の研究のスタートでした。

なお現状ですが、この研究はここまでで頓挫しています。探査機を実際に飛ばすのは、ものすごく大変なのです；しかしNASAでは計画が着々と進んでおり、Europa オービター、そしてそれに続く潜水探査が検討されています。

エウロパの生命探査～Europa 魚は氷羊の夢をみるか？～

1. 火星隕石中の生命痕跡発見の衝撃

1996年、アトランタオリンピックが終わるのを待って（だと思っただけは私の勘ぐりすぎ？）、アメリカは世界に重大発表を行いました。南極氷床から発見された火星隕石のなかに、生命の痕跡らしい

ものを発見した、というのです。このニュースは瞬く間に世間を席卷しました。(でも日本においては、たまたま"ふうてんの寅さん"こと渥美清さんが他界された為、国民の関心はそちらに行ってしまったが。)世はまさしく世紀末。東西冷戦が終結し、ベルリンの壁が崩れ、ソビエト連邦も崩壊しました。我々の持っていた価値観はがらりと崩れ、そこに飛び込んできたのがこのニュースでした。新世紀がすぐそこまで迫ってきているのを実感させるニュースでした。

なぜその隕石が火星隕石と断定されるのか？なぜその中に存在するみみずのはいつくばったような形状のものが生命痕跡とされたのか？これについては本稿では説明を省きますが、その後の討論の中で、この隕石中の生命痕跡がほんとうに生命の痕跡なのかどうかに関してかなり疑問視されるようになってきました。しかし、それにも関わらずこのニュースは非常に重要な転機であったと私は思います。それまで地球外生命に関する話はSF上の話に過ぎませんでした。それがこの事件を期に、地球外生命に関して真面目で活発な議論が科学者の間でなされるようになったからです。機は熟せり、科学による地球外生命探査が大きく動き始めたのです。生命は宇宙に普遍的に存在するのだろうか？それとも地球というかなり限られた場所において、特殊な事情の基に発生したのだろうか？我々はその答えを未だ知りません。しかし可能性として言えば、生命とはごくありふれた自然現象であるとも考えられることも出来そうだが、というのがなんとなく、ぼんやりと我々科学者が感じ始めていた事でした。火星隕石の事件はそんなぼんやりとした認識に、明確な科学者としての判断を要求してきた事件だったのです。

2. 生命？

正確に言うと地球外生命の探査は以前から始まっていました。アメリカで行われた、電波を使ったSETI計画。また、火星探査機パイキングには生命探査装置が搭載されています。過日亡くなったカールセーガン博士による木星大気中の気球型生命に関する理論的考察など、様々な可能性に関する研究もなされています。

残念なことに我々は未だ生命がいかにして発生するのかを知りません。そもそも生命をいかに定義すればよいのかというのも難しい問題です。地球外生命をSFではなく科学的に考えるにあたってはまずこの定義をクリアにする必要があります。しかしその定義に関して書き始めるとそれこそ本の10冊でも書いてしまうような内容なので、やはり本稿にはそぐいません。そこで本稿では、不十分とはわかってはいますが以下のように生命を定義し考えていきたいと思えます。

1.生命は、外界に存在する自由エネルギーを体内に取り込んで炭素の酸化還元を行い、自己維持をするシステムである。

2.生命はC,O,H,N等を基調とした有機物で構成されている。

また、付加条項として以下を考察条件とします

3.地球外生命を考えるに当たっては、該当天体環境で生存できる地球型生命を考える。

付加条項3は、我々は地球型の生命以外は知らないことに鑑み、"科学的に生命を考えるために付け足したものです。またこの定義では増殖に関する項目が入っていませんが、無視することにします。非常に乱暴な前提条件ではありますが、これに従ってとりあえず話を進めることにしましょう。

3. 太陽系内での地球外生命

アポロが月に設置した実験装置を後日地球に持ち帰り検査したところ、月面の温度差、宇宙線の照射にも関わらずある種の細菌が生き残っていたとの報告があります。また地上においても、原子炉の中でも生きている細菌類がたという話も聞いたことがあります。これらは既に発生した生命が、後になってそのような劣悪な環境に対応できる複雑な防御機構を持ち、このような過酷な環境の中でも生き残ったと考えられます。しかし少なくとも生命誕生に際しては、宇宙線の照射、激しい温度変化などにさらされた場合、生命は発生しえないと思われまます。このような過酷な環境から生命を守る鎧として、液体の水の存在が生命誕生に不可欠です。その為、地球外生命を考えるにあたっ

では、このような液体の水が存在しているか、あるいは存在していたかが大きなキーポイントとなります。

太陽系において液体の水が存在した/していることがほぼ確実な天体に以下のものがあげられます。

- a) 地球
- b) 火星
- c) 氷衛星

彗星は氷を多く含んでおり、強烈な放射線から有機物を保護しますが、それらはほとんどすべて固体です。固体内では液体と比べて物質同士が反応しにくく生命誕生には適していると言えないため、ここでは除外します。

地球においては無事生命が発生し繁栄しているのでこれは良いでしょう。次に火星に関してですが、ここでは表面の地形の観測等により、過去に大量の液体の水（海）が存在したことはほぼ確実であると考えられます。過去の一時期に、生命が存在したかもしれません。しかし、全球を覆うような海は 20 億年以上前に干上がってしまっています。一部の地域には数億年前の洪水の後も見られるので、局地的には生命が現存している可能性はあると思います。最後に氷衛星ですが、実は私はこの中のひとつ、Europa には現在も生命が全球にわたって存在していると考えています。

4 . 氷衛星(Europa)の海

Europa は、太陽系外惑星域に多くみられる氷衛星の一つです。太陽系の中の温度は、太陽から遠ざかるにつれて低くなっていきます。火星軌道よりも内側においては、氷は温められてガス化してしまします。しかし木星軌道以遠においては氷は多数存在しています。たとえば、土星の輪などは大部分が氷から出来ています。外惑星の衛星は集積時から多数の水を保持しており、外側を氷で覆われた氷衛星として存在していることが多いのです。

現在の太陽系生成論によりますと、太陽系の惑星は原始太陽の周りをまわっていたガスや塵がいくつかの塊となって集まって出来たと考えられています。氷衛星もこのような過程により出来たのです。この集積時の熱で表面は溶かされ、形成初期に全球が海で覆われました。東大の山岸さんの計算によりますと、大型の氷衛星では表面からは低圧氷が、底からは高圧氷が発達してあつという間（といっても惑星形成のスケールですから数万年とか数百万年の単位ですが）に固化してしまうそうです。反対に小型氷衛星では、表面からの低圧氷が 26 億年で海をすべて凍らせてしまうそうです。Europa は大きさ的には中間的な大きさであるため、現在も氷の下に液体の海を保持している可能性があります。

理論計算以外にも、実際の探査を通じて Europa に海があるのではと言われてきました。まずその根拠としてあげられたのが、表面地形のデータです。惑星表面の年代を測定するには、"クレータ年代学"といわれるものがよく使われます。これは、宇宙からの隕石の落下によって生成されるクレータの大きさとその密度分布から、統計的に表面地形の年代を推定するという手法です。このクレータ年代学による調査では、Europa 表面年代は大変若いことがわかっています。一方、表面の地形にも特徴的なものが多数みられます。まず、Packed ice 構造といわれる地形があります。これは北極海が凍るときにみられるよう



図 11 Europa の表面地形

右上に見えるのが Packed Ice。黒っぽく見えるところがダークスポット。盛り上がったドーム地形もいくつか見れる

な、内部の液体の対流によって表面の氷が動かされ、パキパキに割れた構造のことで。その他にも表面には、Flow と呼ばれる水の流れたような痕や、Plume と呼ばれる下からなにか暖かいものが盛り上がってきたような地形がみられます。これらはすべて、そう遠くない時期（10 億年前？）に表面近くで液体の水（海）の活動があったことをうかがわせます。

現在、そんな傍証よりもっと強力な証拠が見つかりつつあります。今年の 12 月から、NASA のガリレオ探査機は "Europa mission" と銘打って様々な Europa 観測を行っています。この観測によって、Europa は木星磁場に感应した固有の磁場を持っているのではないかと考えられるデータが見つかりました。

木星は巨大な磁場を持っており、その中を Europa は楕円軌道をとって廻っています。つまり、Europa にいると木星磁場が時々刻々と変化していることとなります。もしも Europa の水が完全に固化していれば木星磁場の影響で固有磁場を発生させたりはしません。しかし、もしも Europa が全球にわたって液体の水（海）を持っていたら？ 海は導体であるため磁場変化に感应して誘導電流を発生させ、それに伴って磁場を発生させることとなります。Europa の観測データとして、このような理論に合致する磁場データをガリレオが送ってきたのです。この観測はまだ第 1 回のものでしか公表されていないため、あと数度予定されている観測でより詳しいことがわかるまでは確かなことはいえません。しかし、今年中にはこの問題にも決着が付くことでしょう。その他に、ガリレオの計測した Europa の慣性能率というデータによって、Europa 表層の氷・海の層の厚さは約 150km ということがわかっています。このうちのどのくらいの割合が表面の氷で、どのくらいが海なのかはわかっていません。現在の主流的意見では、表面氷の厚さは数 km ~ 数十 km とされています。これらに関しても磁気データの解析から、今年度中には決着が付くことが期待されています。日本では北大の倉本さんをはじめとする方々がこの問題に関して精力的に取り組まれています。

5 . Europa に期待される生命形態

では、Europa の海はどんな環境なのでしょう？ Europa 表面は 140K 程度の温度しか無く、太陽光強度も地球の 1/25 にすぎません。Europa の海は液体として存在していることから、摂氏 0 度以上はありそうですが太陽光は表面氷に阻まれてまったく届かないと考えられます。このような環境下においても生命は存在しえるのでしょうか？

地球における深海調査がヒントを与えてくれました。太陽光の届かない深海底において、多数の生命コロニーが発見されたのです。太陽の光のないところで、これらはどうやって生きているのでしょうか？ 先に述べた生命の定義に従い、彼らが炭素の酸化還元を行うために外界から何を取り込んでいるのかを調べてみましょう。

図 12 に地球上生命の物質循環サイクルの模式図を示します。この図の左半分では、生命は酸化剤として分子状酸素を使っています。しかし分子状酸素というものは、実は植物による光合成反応でしかこのように多量には生み出されません。その為、左半分の生物は太陽の光がないと生きていけない事になります。それに対して右半分の生き物は、酸化剤に SO_4^{2-} や NO_3^- 等を用いています。これらは火山や熱水鉱床といったものを通じて地球内部から多量に供給されています。すなわち、右半分の生命に関しては太陽の光が必要でない事になり、光の届かない Europa 深海底でも存在できる！ と言いたいのですが実はそう

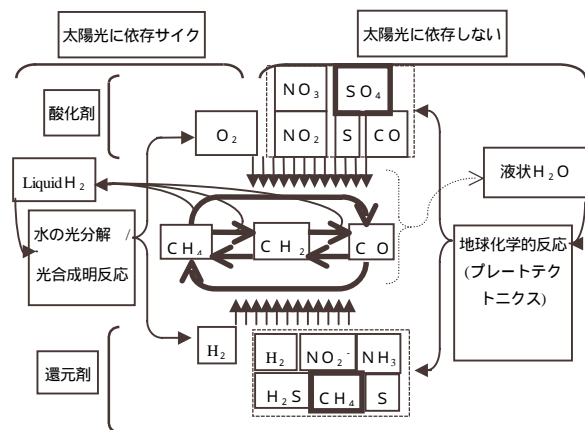


図 12 地球上の生命の物質循環

でもありません。

表2は右半分に属する生命体の、体内における化学反応を記述したものです。化学反応を詳細に調べていくと、反応の過程の中でほとんどの細菌が分子状酸素を使用していることがわかります。地球上では、たとえ深海中であっても表層で作られた分子状酸素が供給されておりそれらを使うこともできるのですが、Europaにおいてはそれは期待できません。まったく分子状の酸素を使わないもの、それはメタン生成細菌(Methanogenic bacteria)と、メタン酸化細菌(Methane-oxidizing Bacteria)と呼ばれる細菌です。もちろんこの他に、地球に生命が誕生した当初、まだ光合成を行う生命が存在していない(つまり分子状酸素がまだない)頃に存在していたけれども、既に死滅していると考えられる他の種類の細菌(つまりメタン以外の物質を使うもの)も存在している可能性はあります。これらの細菌はEuropaで、過去ではなく現在も生存している可能性があるのです。

これらの細菌はすべて核のない生物、"原核生物"に属しており、単体として大きなものは期待できません。図13に地球上で単離されたメタン生成細菌の写真を載せます。(九州農業試験場撮影)大きさは1~5μm程度です。Europaでもし生命が発見されるとしても極めて小さいものでしょう。ただしバイオフィームなど生命の集合体として、観測・検出しやすい大きなものは存在しているかもしれません。

もしもこれらの生命がEuropaに存在したとした場合、どの程度の数密度で存在しているのかというのも重要な問題ですが、これに関して推定を行うのはかなり困難です。もちろん地球上においてこれらの生命がどの程度の数密度で存在しているかはわかりますが、他の生命との生存競争の影響もあつきます。Europaとは異なる地球固有の環境条件があまりにも多いので、これはそのままEuropaには当てはまりません。むしろ、地球の深海底熱水鉱床付近における細菌全部の数密度が対応した数値になっているのかもしれない。ガラパゴスリフトの熱水鉱床では、だいたい104-105個/cm³の細菌が見つっています。Europaにおいて局地的にはもこの程度の数密度の生命が存在しているのかもしれない。

表2 主な化学合成細菌とそのエネルギー獲得反応 (長沼 1996)

細菌	エネルギー獲得反応	得られるエネルギー (G°)	
		kcal/mol	kJ/mol
硫黄酸化細菌	$S^{2-} + 2O_2 \rightarrow SO_4^{2-}$	190	795
	$S + 3/2 O_2 + H_2O \rightarrow SO_4^{2-} + 2H^+$	140	585
	$S_2O_3^{2-} + 2O_2 + H_2O \rightarrow 2SO_4^{2-} + 2H^+$	211	883
	$**S_2O_3^{2-} + 5/8 NO_3^- + 1/5 H_2O \rightarrow 4/5 N_2 + 2SO_4^{2-} + 2/5 H^+$	178	747
硝化細菌	$NH_3 + 3/2 O_2 \rightarrow NO_2^- + H_2O$	65	272
	$NO_2^- + 1/2 O_2 \rightarrow NO_3^-$	19	77
鉄酸化細菌	$Fe^{2+} + 1/4 O_2 + H^+ \rightarrow Fe^{3+} + 1/2 H_2O$	11	44
マンガン酸化細菌	$Mn^{2+} + 1/2 O_2 + H_2O \rightarrow MnO_2 + 2H^+$	16	67
水素酸化細菌	$H_2 + 1/2 O_2 \rightarrow H_2O$	57	237
メタン生成細菌 ***	$**H_2 + 1/4 CO_2 \rightarrow 1/4 CH_4 + 1/2 H_2O$	8	33
メタン酸化細菌 ***	$CH_4 + 1/2 O_2 \rightarrow CH_3OH$	196	818
	$****CH_4 + SO_4^{2-} \rightarrow HCO_3^- + HS^- + H^+ + H_2O$	4	16

* 反応式左端の電子供与体(酸化されるもの)1モルあたりの値

** 嫌気(無酸素的)条件下での反応

*** 必ずしも化学合成細菌ではない

**** この反応を行う微生物はまだ確認されていないが、間接的証拠により存在が予想されている。

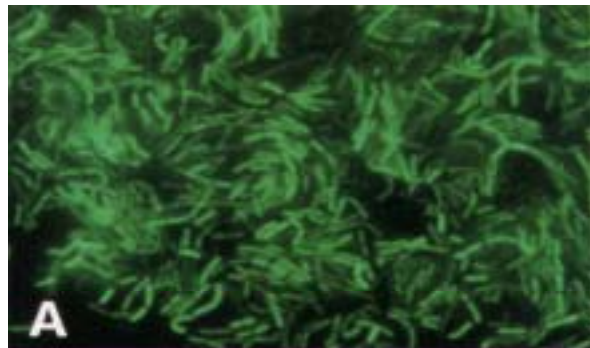


図13 地上でのメタン生成細菌の形状

この他にも球状の物なども見つっている

6 . Europa への生命探査計画

以上のような形態を持つと考えられる Europa に存在するかもしれない生命を発見するにはどのような方法が考えられるでしょうか？ アメリカでは既に2つのミッションが検討されています。一つ目 Europa Orbital といいます。このミッションでは生命探査こそ予定されていませんが、エウロパの周回軌道に探査機を送り込み、その海の状態を詳細に調べることが目的としています。詳細に関してはここ (http://www.jpl.nasa.gov/ice_fire//europao.htm) で調べることが出来ます。二つ目は、生命探査を主目的にした Ice Pick というミッションです。(詳細はここ <http://occult.mit.edu/europa/>) Ice Pick は氷の下に潜水探査機を送り込み、熱水鉱床近辺まで探査機を近づけて直接生命を発見することを狙っています。Europa の氷の厚さは数 km ~ 数十 km と見積もられており、この氷を溶かして探査機を海底まで送り込むのはかなり多量のエネルギーを要するでしょう。もちろん将来的にはこのようなミッションは是非行わないといけません、とりあえず、より簡単な方法で生命が存在していることを発見してからでも遅くないかもしれません。それではより簡単な方法とは、一体どのような方法が考えられるのでしょうか？ 実は、エウロパ表面の地形写真に、その答えが隠されています。エウロパ表面の広範囲にわたって、茶色の帯状の地形が見られます。近年の観測から、ここでは"塩"、すなわち海からの噴出物と思われるものが見つかっています。これらは地下の海水からの物質が表面まで運ばれていることの直接の証拠といえます。またその他にも、中緯度地域にドームやダークスポットと呼ばれる地形が、ほぼ同じ大きさ(直径 20km 程度)、ほぼ同じ密度分布で存在しています。Pappalardo 達は、これらはエウロパの氷の層が対流しているために出来たに違いない、と結論付けました。地下の海によって氷の表層が暖められて、いくつもの対流が存在しているため、その対流同士の間でドームやダークスポットが出来ると考えたのです。とすると、このような噴出で、あるいは対流に乗って地下の海表面の物質が氷の表層まで運ばれてきている可能性が有ります。もしもそうであるならば、我々は何も海底までおこななくても表層の氷を調べることによって Europa の生命を発見することが出来るかもしれません。この仮定に基づいて、我々はミッション検討を行っています。(すでに7月に名古屋で開かれた COSPAR で発表をされており、投稿論文はこちらで見ることが出来ます。(<http://microft.geoph.s.u-tokyo.ac.jp/~europa/doc/cospar2.pdf>) 図 14 に概略図を載せます。

我々の考えている探査機は、氷の下の海までは潜りません。表面に降り立った探査機は周りの氷を溶かしてフィルターで濾過します。この時宇宙空間からの飛翔物の混入を防ぐために、少なくとも数センチ以上掘った所の氷が必要と考えられます。このようにして濾過された残滓物をまず顕微鏡カメラで観測します。この段階で生命と考えられる形状を持った物質が発見できるかもしれません。しかしそれだけでは生命と断定するには早すぎます。次に、この残滓物の偏光を調べる作業を行います。じつはアミノ酸を利用している生命体は、"光学活性"、すなわち、"旋光性"という特性を示すことがわかっています。"旋光性"を示す物としては生命体、あるいはソーラーネブラと呼ばれる宇宙空間からの物質が知られていますが、今回は宇宙空間からの物質の混入の影響は除去されているので、もしも残滓物が旋光性を示し、かつ旋光性が自然に失われるのに要する時間に比べて十分に早く氷の対流が怒っているならば、せばそれは生命由来である可能性が非常に高いと考えられます。

このアイデアの実現にはまだまだ多くのハードルが存在しています。たとえば、Europa

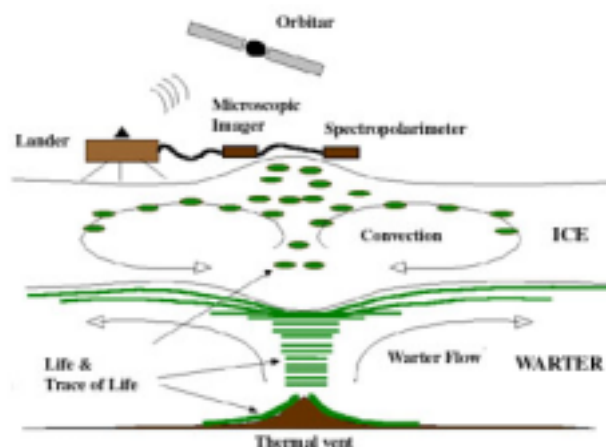


図 14 ミッション概略図

に探査機を送り込むのは至難の業です。何故なら、Europa は地球から非常に遠いところにあるからです。大きなロケットで打ち上げ、スイングバイと呼ばれる加速技術を使い、木星の大気を利用した減速（エアロブレーキ）技術を使うことになるでしょう。しかし木星の周りには強い放射線体があるため、探査機を放射線による影響から守るためにはあまり木星に近づくわけにはいきません。この辺が軌道計算屋さんの腕の見せ所になります。次に Europa 表面への探査機の着陸法が問題です。衛星表面に探査機器が壊れないように降ろさなければならぬのでかなり困難な作業です。減速用のエンジンなどを考えると重量もばかにはなりません。これには、Luna-A で使われることになっているペネトレータと呼ばれる日本独自のシステムが有効かもしれません。無事に着陸してからも電源をどうするかという問題もあります。Europa 表面での太陽光強度は地球の 1/25 で、太陽発電パネルによる発電はあまり期待できません。原子力電池を用いる方法もありますが、Europa の環境を汚染してしまう可能性もありますし、日本では色々な意味で困難な状況にあります。温度差を利用した熱伝対発電、あるいは強力な木星磁場を利用した誘導電流による発電など、色々なアイデアを出して十分に検討することが必要です。探査段階においては、地表何センチまで掘ればソーラーネブラなどの混入のないピュアな氷が取れるのかも検討が必要です。このように、まだまだ多くの未解決の問題をこの計画は抱えています。

7. まとめ

以上、特に生命探査に絞って Europa の探査計画を御紹介しました。問題は山積みですが、しかしこの他にも Europa の探査には面白いテーマがたくさんあります。太陽系はどのようにして出来たのか？ 氷衛星の形成のシナリオは？ 氷衛星はどのようにして進化したのか？ 等々、これらに関して知見が得られるなら、十二分に"お釣りの来る"計画と言えるでしょう。先にも御紹介したように、アメリカにおいては Europa の生命探査計画が大きく動き出そうとしています。我々は海外の研究者とも意見を闘わせながら、世界的プロジェクトとして Europa 生命探査計画を推進していければいいなあと考えています。だって、地球外生命探査ですよ。もしもその存在が明らかになれば、これは我々の価値観を根底から揺るがす発見となることでしょう。Europa 魚は氷羊の夢をみるか？ 我々の興味は尽きません。

(おわり)