

フロンティアとしての宇宙



出席者 小島 秀 康¹⁾
小林 憲 正²⁾
吉川 真³⁾
(司会) 海老原 充⁴⁾

【2016年9月2日(金)開催】

海老原(司会) 新春座談会ということで、本日は宇宙をテーマに、フロンティアという面をお話させていただこうと思っています。

私は司会を務めます首都大学の海老原です。宇宙化学という分野で、宇宙物質の化学的なアプローチとして、元素の組成に着目して、主に隕石の分析をしています。太陽系の起源と進化を研究のテーマにしています。

小林 横浜国立大学の小林憲正です。研究テーマは生命の起源及び地球外生命の探査です。最近、この分野はアストロバイオロジー*¹という言葉で語られることが多くなっています。宇宙環境を模擬した実験をいろいろやってきたのですが、2015年から「たんばぼ計画」という国際宇宙ステーションを使った宇宙実験を始めています。

吉川 JAXAの吉川です。天文学、特に天体力学が専門です。宇宙研ではその専門と関係する探査機の軌道決定グループに入り、最初は火星探査機の「のぞみ」から始まり、その後「はやぶさ」、「はやぶさ2」に関わっています。同時に、小惑星の軌道

について興味を持っていて、特に小惑星が地球にぶつかってくると大きな災害になってしまう、それをどうやって避けようかというようなスペースガードの活動にも絡んでいます。

小島 国立極地研究所の小島です。なぜ極地研究所が絡むかというと、南極で隕石採取をやっていたからです。僕は南極に行ったのが5回、そのうち越冬が3回です。岩石、鉱物がバックグラウンドです。岩石といっても1億年くらい前のを大学で扱っていて、それが46億年前の隕石に移ったと説明するのが一番簡単ではないかと思っています。

海老原 どうもありがとうございました。138億年の歴史を持つ宇宙のここでの話題は、45~46億年の太陽系の年代に相当する期間での話になると思います。フロンティアということからすると、宇宙や太陽系の「へり」はどうなっているか、太陽系が生まれたときはどうなっていたか。未知の領域は数限りなくある。そういうことを調べるためには、小島さんが南極で回収してきた隕石に加えて、いま探査衛星で積極的に物を採ってこようとしている。フロンティアに近づこう、近づこうとしているわけです。本日は太陽系の成り立ち、歴史ということでお話をさせていただこうと思っています。

1) 国立極地研究所
2) 横浜国立大学
3) 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 (JAXA)
4) 首都大学東京

*¹ アストロバイオロジー：宇宙生物学，宇宙生命科学。

フロンティアを探るためのツールとして、一つは隕石、もう一つは日本の「はやぶさ」で成果を上げましたが、その前はアメリカのアポロ、ソ連のルナが月に行き直接採ってくるという、大きく分けて二つの手段があって、それらを通して太陽系の成り立ち、歴史、変遷を調べようとしている。

隕石は天から降ってくるという意味で昔からあったわけですが、昔は試料がなくて非常に困っていた。しかし日本の観測隊が組織的に南極隕石を見つけたことによって、俄然、試料としての制約がなくなったわけです。あの最初の頃の隕石の探査、あれもある意味で南極大陸もフロンティアの一つなわけですが、そのへんを小島さん、お話しいただけますか。

—隕石採集—

小島 南極で見つけた隕石はいま公称1万7,400個あるのですが、それがどのくらい多いかを比較するのに一番わかりやすいのが、日本国内で発見された現存する隕石は50個です。1万7,400個がいかに膨大かわかりいただけるでしょう。1個当たり平均して100gくらいで、僕は1,700kgくらいの隕石を持っています。量的にはすごく多くなっただけ、南極隕石で博士号を取った人がかなりいらっしゃるの、貢献は大きかったのではないかと。ちなみに、南極隕石が発見されるまで日本の隕石研究者は1桁しかなくて、それもほとんど海外に行っている。物がなかったというのは確かだと思います。

海老原 いまおっしゃったように、日本の隕石学の礎をつくる貢献をしたという意味では、南極隕石にはものすごく大きな意義がありましたね。

小島 そう言っていただければありがたいのですが。

海老原 私の先生、本田雅健は日本の隕石の草分けのような方でしたが、その東大物性研の本田研究室に助手でおられたのが島正子さんで、物性研の前はアメリカのハロルド・ユリーのところまで隕石の研究をやった。

島さんは物性研の後、ドイツのマックスプランクに行きました。日本の観測隊が1969年に9つの隕石を採ってきて、そのお土産に持ってきたものがどういう意味を持っているかというのがドイツに島さ



小島秀康氏

んがいたために明らかになる。それが74年から組織的な探査を始める大きなきっかけになった。

その頃、JAXAは宇宙に対しての物質という意味でのかわりはあまり持っておられなかったのですか。

吉川 それはかなり前ですね。

海老原 宇宙研のときですよ。いまにつながっているかどうかという話からすると、まだ距離があったわけですね。

吉川 そうです。

海老原 当時は隕石というと、極地研というよりもむしろ科学博物館でしたね。

小島 そうかもしれません。

海老原 島さんはドイツから科学博物館の化学部に移られて、日本の隕石を管轄しながら隕石の研究をされていた。

南極でクレバスに落ちて、死ぬか生きるかの状況で隕石探査をされた。そういう話も我々は生々しく聞いていますが、今は薄れてきていますね。

小島 それもありますが、実際に行った人間が割と深刻に考えない部分があるのではないかと思います。僕もクレバスはもちろん見ていて、広いものだと幅が数m、深さが30mくらいある。

海老原 小島さんはクレバスに落ちたことはない？

小島 ない。

海老原 落ちそうになったこともない？

小島 ない。

海老原 そうですか、それはそれは(笑)。小林先



小林 憲正 氏

生がアメリカに行っておられた当時、南極隕石はアメリカではまだそんなに騒がれていなかったのですか。

小林 私には1982年からアメリカに行ったのですが、ポナムベルマというアストロバイオロジーの先駆けの研究者の下で研究を行いました。彼は隕石分析、特に有機物の分析に興味を持っていて、マーチソン隕石^{*2}（炭素質コンドライト）中のアミノ酸の最初の論文にも名前が載っている人です。私が日本からメリーランドに行くことになったとき、まず向こうから指令が来たのは、渡米前に極地研に行って挨拶してこい（笑）。そこで小島さんに初めてお目にかかりました。今後、南極隕石が重要になるであろうと、ポナムベルマさんも十分に認識していました。

海老原 「はやぶさ2」がいま飛んでいて、有機物を探ってくる、生命の起源を探るといった話に行き着くと思うのですが、こと有機物に関しては、地球上の汚染がすごく気になります。マーチソン隕石は1969年でしたね。あれを回収してすぐ袋に入れて。汚染も少なく、なおかつ有機物をたくさん含んでいたから、研究にはものすごく役に立った。

小林 あれがなかったらアストロバイオロジーはいまほど進んでいなかったと思われます。さらにいくつかのほかの隕石と南極隕石からずいぶんいろいろな変わったものが出てきたおかげで現状があると

^{*2} マーチソン隕石：1969年9月28日にオーストラリア・ビクトリア州のマーチソン村付近に飛来した隕石。

思います。

小島 南極隕石の中にはいろいろな炭素質隕石がありますので、まだ「はやぶさ2」のターゲットになる天体がどういうものかわかりませんが、お役に立てるのではないかと思います。

海老原 「はやぶさ2」の研究を進める基になる研究として、南極隕石を使っていろいろ探っているというのは変ですが、炭素質コンドライトをアナログサンプルとして研究されていますね。

吉川 はい。

海老原 話を戻すと、南極隕石が話題になるのは1969年からとういことですね。

小島 そうです。

海老原 1969というのは因縁の年で、マーチソンもアエンデ^{*3}も落っこちてきた。

海老原 有機物に関して言えば、南極隕石は南極大陸といえども地球上に長く放置されていたということで、有機物の研究にはそんなに役に立たないと素人考えで思っていたのですが、そんなことはないのですか。

小林 液体の水がかぶるといことがない。それが非常に重要です。要するに、冷凍庫に入っていたという感じです。表面はひよっとすると水がかぶることがあるかもしれませんが、少し割って中を採ればほとんど問題ない。例えばアミノ酸に関して言えば、DとL^{*4}（右手型と左手型）の比を取ると、それが地球で付いたかどうかかわかりますが、南極隕石やマーチソンで中から採ったアミノ酸を調べれば、基本的に左手型がたくさんあるということはない。

海老原 南極隕石で有機物に関して何か画期的な遺留物が見つかったとか、研究成果として上がったということはないのですか。

小林 アミノ酸に関しては、マーチソンで隕石の中にアミノ酸があるということがはっきりしたわけですが、最近では網羅的に調べるという動きがあって、マーチソンを凌ぐくらいいろいろなものが入っているというのは出てきているようです。

^{*3} アエンデ：アエンデ隕石。1969年2月8日メキシコのチワワ州アエンデ村の近くに落下した隕石雨（多数の隕石が一時に落下する現象）。

^{*4} DとL：グリシンを除くアミノ酸には、右手と左手の関係のように、互いに対となる構造のものが存在し、それぞれをD体、L体とよび区別されている。

海老原 無機分析ですと、南極隕石があったから、いろいろな知識が新しく加わり、いままでの認識を改めた、広がったというものはいっぱいあります。だから隕石の研究者にとって、あるいは宇宙全体の理解、太陽系の成り立ちや進化を研究するという点では、南極隕石の存在価値はすごく大きいものだと思います。

最初は日本が、偶然かもしれないけれども、69年にお土産に持ってきたものがすばらしい試料だとわかり、74年から組織的に採って、でもまだ採りきれない。

小島 まだまだ広がるのは間違いないと思います。ただ、自然環境としてはすごく厳しいので大変は大変です。

— 探査衛星での調査 —

海老原 隕石という、ある意味で受動的に採る試料の数はどんどん増えてきたのですが、人間が別の天体に行って、隕石とは別の宇宙物質を手に入れて、フロンティア、知識を広げようという動きが出てきた。そうなる探査衛星ということになって、宇宙研、JAXA に期待する流れがでてきたと思います。

例えば「はやぶさ」、当初 MUSES-C といわれていた探査衛星は工学的なミッションとしてつくられた。最終的に試料を採ってくるというのも使命の一つであってプロジェクトの立ち上げ、予算化は、それまでの隕石あるいは月の石も含めた宇宙物質の知識を基にして、ある程度こういうことが期待できるということをプロポーズをして実現にこぎ着けるわけです。そのへんのご苦労というか、隕石の成果と結び付けた視点で、実現に至った経緯について、吉川さん、何かお話いただけますか。

吉川 「はやぶさ」の初号機は、とにかく往復探査をしたい、月よりも遠い天体まで行って着陸して戻ってくる、その技術を確立したいというのが最初の工学的なモチベーションで、おまけでサンプルを採ってくるというかたちになっていたわけです。工学の人が集まって一致団結してやったというのが「はやぶさ」です。

実際やってみたらいろいろなトラブルがあって、話題になった。技術的なトラブルは、あきらめず



吉川 真氏

に、また苦労はしたものの解決できました。そして、ほんのちょっとだけイトカワの物質を持ち帰った。いまその分析がかなり進んできていて、結構面白い結果が出ています。最初のモチベーションは工学的な技術の開発だったのですが、結果的には隕石の話にもつながり惑星科学にずいぶん貢献して、それが「はやぶさ2」として理学、サイエンスをメインに出したミッションにつながったのではないかと思います。

海老原 私もいろいろところで回収された試料から得られた成果の話をする機会があるのですが、あれは「グリコのおまけ」だと(笑)。子どものとき、おまけが欲しくてグリコを買ってもらったようなもので、おまけがものすごくうれしかった。我々にとっては今回もそのとおりで、もちろん当初の目的は工学ミッションで、いろいろな段階をクリアされて、結果として大成功で終わった。しかし、あれを持ってきて、隕石の出どころがどこか、いままで直接証拠がなかったけれども、たしかに小惑星から来ているということを実証したわけです。

吉川 隕石は宇宙物質として非常に重要ですが、地球に落ちてコンタミ(汚染)を含んだ物質とコンタミのない物質とを比較してみたいというのが大きなテーマでした。

海老原 サンプルを採ってくるのは夢かもしれない。しかし採ってきたときにはちゃんと対応できるようなことを考える。その考えるプロセスが日本のやり方としては非常にユニークで、完全にオープンで、コンペティションを2段階でやって、プロ



海老原 充 氏

ポーザルをまず書いて、レビューして、オーケーになったら試料をプロポーザルに沿って分析する。そのとき南極隕石を……。

小島 最初、マスキングして試験したはずですよ。

海老原 あれは NASA で試料調製したのですか。

小島 宇宙研に直接行って、宇宙研でサンプル、試料を用意したはずですよ。

海老原 結局、南極隕石がそういうセレクションにもかかわっていて、2段階でパスした人が初期分析にかかわった。非常に面白いというか、フェアでしたね。日本でもこういう取り組み方をするのか、宇宙研のポリシーが出ていって、参加していて気持ちよかったです。最終的には、いろいろありましたが、うまく試料が戻ってきて、あれも大変な作業でしたね。

小島 すごいなと思います。隕石を例えると、河原の石。要するに、現地に行って採ってきていないので、上流にあるのはわかるけれども、上流のどこにどういったちであるかということまでわからない。そういう意味で、探査と隕石を研究するのは別物という感じがします。それは両方とも知っている僕だから言えるかもしれない。一般の人には、なぜそんなことにお金を使うのという言い方をされるかもしれません。

海老原 探査に関して？

小島 そう。

海老原 でも南極に行って隕石探査するのもお金は結構かかりますね。

小島 桁が違います。だっていまでも隕石だけで

なく、オーロラなど南極にかかわるサイエンスのすべてを含めて13億円くらいしか使っていない。

海老原 「はやぶさ」の初号機とおっしゃいましたね。

吉川 いろいろな言い方があって、初号機と言ったり、「はやぶさ1」と言ったり。正式名称は「はやぶさ」と「はやぶさ2」です。

海老原 MUSES-Cが、あるとき「はやぶさ」という名前になった。「はやぶさ2」ももともとは違う名前と呼ばれていたのですか。

吉川 最初から「はやぶさ2」です。コードネームがない。

海老原 どの段階で「はやぶさ」になったのですか。

吉川 打ち上げが成功して、直後に「はやぶさ」になりました。

海老原 今度は打ち上げが成功しているから、「はやぶさ2」でいいわけですね。

吉川 開発段階で「はやぶさ2」でした。打ち上げが成功したら名前を変えようかという話もあったのですが、「はやぶさ2」で有名になってしまったので変えるのをやめただけです。

海老原 MUSES-Dでも何でもよかったのですね。

吉川 MUSESはコードネームです。「はやぶさ2」も違う名前にしたらどうかという話は内部的にはちらっとあったのですが、同じ名前で行こうということになりました。

海老原 初号機に戻ると、あれはなぜ MUSES-C だったのですか。

吉川 MUSESというのは、M-Vロケットを使った工学実証ミッションというシリーズの名前で、MUSES-A、B、C、三つ目が「はやぶさ」でした。直前の MUSES-Bは「はるか」という電波天文衛星です。

小林 全然違う系列ですね。

吉川 はい、宇宙研には PLANET シリーズというものがあって PLANET-Aが「すいせい」、PLANET-Cが「あかつき」ですが、これとは別で、純粋に工学実証シリーズのものです。

—「あきらめない」というメッセージ—

海老原 「はやぶさ」が飛んで、紆余曲折があつて、2010年6月に戻ってきた。あれはストーリーとしても感動ものです(笑)。開けて中に物がちゃんとありそうだとわかったのが11月頃ですかね。

吉川 秋ですね。

海老原 分析する側とすれば、どうなるかわからないというままに、ものすごく興奮しました。そして2010年の年末頃から分析を開始した。そして、その成果をアメリカのヒューストンの、それこそ人類を初めて月に運んだアポロ11号のときからずっと続いている、昔は月科学会議といいましたが、月惑星科学会議で発表しようと思った。それが2011年3月の初旬にスケジュールされていて、そこで特別セッションをやるということになった。しかし、やろうと言っていたときにはまだ成果がどなたも出ていない(笑)。結局、その数か月で成果を出しました。私もそれにかかわりましたが、あのときはいろいろな意味でスリリングでした。

ただ、発表が現地時間の3月10日で、次の日が東日本大震災でした。皆さん短期間で成果を出せたというので非常にエキサイトした発表でした。私も意気揚々と帰路についた空港で、日本の震災のことを知った。震災もさることながら、原子力のあの災害につながっていくというその現実との落差がものすごく大きかった。しかし成果はまとめなければいけない。最終的には8月にプレスリリースさせていただいて、*Science*での発表につながっていったわけです。

「はやぶさ」が戻ってきて、日本中が興奮した。成果に対してどのくらいの日本人が興奮されたかどうかはわからないけれども、少なくとも全体としてはプラスの成果が得られたことは間違いないと思う。日本中が打ちひしがれたなかで、それを緩和するという事はないにしても、ある意味で力づけたということにはなった気がします。

小島 そうでないともっと沈んでいたかもしれない。

海老原 その中で「はやぶさ2」につながっていく。「はやぶさ2」もウィンドウ(発射時限)があったわけでしょ。

吉川 行く天体によって、打ち上げることができ

る期間のインターバルが違ってきます。「はやぶさ2」の目標天体であるリュウグウという小惑星の場合はだいたい4年に1回打ち上げる機会が回ってくる、一旦延ばしてしまうと4年待たないといけないというのがあって、そこに間に合わせようというのが時間的にはかなり厳しかったですね。

海老原 震災前から計画されていたわけですね。

吉川 「はやぶさ」初号機がイトカワに到着したのは2005年9月ですが、その後、いろいろなトラブルがありました。着陸しようとしたら不時着してしまったり、2回目の着陸はできたのですが、弾丸でサンプルを採取することができなかつたり、その直後には通信が途絶えたり、2005年の年末、「はやぶさ」は大変な状況だったわけです。地球に戻れるかどうかもわからない。ただ、何が悪かったかというのは見当が付いていました。

それで、2006年の初め頃に「はやぶさ2」という次の計画をすぐに提案しようということになって、2006年度の夏から秋にかけて最初の提案書をJAXA内で作くり、提案を出しました。だから「はやぶさ2」の提案はかなり早かったのです。そのときは2010~11年に打ち上げようということで、「はやぶさ」のリベンジとして提案したのですが、予算がなかなか通らない。延び延びになって、2010~11年のウィンドウに打ち上げられない。しょうがないので次のウィンドウの2014年前後の打ち上げに延ばして、プロポーザル提案を続けていったのですが、結果的に「はやぶさ」が戻ってきて日本中が沸いて注目されて、ようやく予算が付いた。まさに震災後、正式にプロジェクトになっていったものです。

小林 これも工学が先行ですか、それとも理学がいきなり頭に出てくるのでしょうか。

吉川 最初は「はやぶさ」がうまくいかなかったということがあるので、そのリベンジとして、悪かったところを直して成功させようと。だから工学のモチベーションが大きかったのですが、同じイトカワに行ってもしょうがないので、そこで理学が入ってきました。イトカワはS型^{*5}の小惑星だったので、次はぜひともC型^{*6}に行きたいというサイエ

^{*5} S型小惑星：ケイ酸鉄やケイ酸マグネシウムなどの石質の物質を主成分とする小惑星。

^{*6} C型小惑星：炭素系の物質を主成分とする小惑星。

ンスからの要望です。ですから、「はやぶさ2」は最初からC型小惑星がターゲットでした。

たまたま、1999年に発見された小惑星1999 JU3（後にリュウグウと命名）がC型で、かつ「はやぶさ」クラスの小さな探査機でも往復できる軌道にあったので、最初から「はやぶさ2」のターゲットはリュウグウでした。

海老原 すんなり戻ってこなくて、紆余曲折して戻ってくるように巧んだ、そんなことはもちろんないと思います(笑)。しかし、あれがあったからイメージとして、例えば映画になったり、話として面白くというのは語弊がありますが、ああいうシナリオが結果として書けたというのはすごいですね。

吉川 幸運が何回も続いたという感じのミッションですね。

海老原 もちろん幸運はあったと思いますが、JAXA内で必死になって取り組まれて、限りあるものを使って誘導して戻ってきた。その努力は相当なものだったのではないかと思います。

吉川 当事者としてはあまりそう思わなくて、その時その時の状況を見ていま何をやるべきかを議論してやる、次の結果が出てきたら、また次のことを考えてやるという感じで、やるべきことをやっているうちに、いつの間にか戻ってきた。ただ、あきらめなかったというのはそのとおりで、とにかく何でもいから可能性があれば、それを突き詰めてやってみようという感じでやっていたわけです。

海老原 回収試料を分析したとき、私に割り当てられたのは比較的大きいとは言っても0.1 mmサイズの粒子1個でした。ところがサンプル分析用の試料容器に入れるときに見失い、顕微鏡下で探して、結局、4時間ぐらいして見つかったのですが、もう一回それが起こった。あきらめないというのはすごく重要なことですね。

アメリカの探査機ジェネシスは、最終的にユタ砂漠に激突してしまった。アメリカの場合には日本と仕組みが違って、PI (Principal Investigator: 主任研究員) がすべて責任を持ってやる。ジェネシスの場合はカルテク (Caltech: カリフォルニア工科大学) の教授ドン・バーネットですが、この人があきらめない。ジェネシスが帰ってきたのは2004年だったか。いまでも毎年ヒューストンの会議の前日に1日セッションで現状報告を兼ねて、成果報告会を

やっています。ああいう砂漠の砂の中に落ちてしまって、本来だったら落ちる前にヘリコプターで引っかけ地球のものと隔絶して分析するのを、地球のもので汚染されたままに研究を継続して、成果をずいぶん上げた。あきらめないというのはものすごく大事だとつくづく思いました。

今回我々も分析するとき、当初は計画どおりいけば簡単にいろいろなことができると思っていたのですが、だめかもしれない。しかし、ひょっとすると小さいものが入っているかもしれない。だからその段階、その段階で分析法を変えて、限られた試料を使い回して皆でやろう。帰還のときの試行錯誤と同じようなことを、分析する側でも結果としてやった。そういうのが大事でしょうね。震災で被災された方にも、あきらめないというのがメッセージとして伝わった面はあると思います。

それも多少プラスになった面があるかどうかわかりませんが、「はやぶさ2」にもつながっている。「はやぶさ2」が帰ってくるのは2020年。

吉川 2020年の年末です。

海老原 2019年だと、隕石学での記念すべき年の1969年からいろいろ意味で50周年ですね。

小島 50年目の2019年に隕石学会が札幌であります。

海老原 いま「はやぶさ2」はどのような状況にあるのですか。

吉川 2015年の12月に戻ってきて、地球の引力を利用してスウィングバイ^{*7}を行いました。いまは地球からどんどん離れるフェーズになっていて、1億kmぐらいの距離のところにあります。小惑星到着は2018年の6~7月で、これから太陽の周りを2周ぐらいして小惑星に着くという予定になっています。今後イオンエンジンを2回噴くのですが、それさえちゃんとできれば、到着までは割と問題なくいくと思います。到着してからが大変ですが。

海老原 今度は結構深いところの試料も採ろうとしていますね。

吉川 今回は盛りだくさんの探査機になっていて、リモセン (リモートセンシング) 観測としてカメラや赤外線分光器などでデータを取るのですが、さら

^{*7} スウィングバイ: 天体の万有引力を利用して宇宙機の運動方向や速度を変更する技術。

に小さな着陸観測機（ランダー）を合計4つ下ろします。日本製の小さな1 kg ぐらいのMINERVA-II^{*8}が3つあって、もう一つはドイツとフランスがつくった10 kg ぐらいのMASCOT^{*9}です。

着陸は最大3回できます。その3回目の着陸の前に、インパクト（衝突装置）を使って、2 kg ぐらいの銅の塊をドカーンと小惑星表面にぶつけてクレーターをつくる。クレーターの大きさも深さもわからないのですが、想定では直径が2~3 m、深さが50 cm ぐらいの穴を開けることができるので、そこに着陸すれば、ちょっとだけ地下の物質が採れる。表面の物質と地下の物質を両方採って比較するというのが目的ですが、人工的に小さなクレーターをつくって物を採るとするのはリスクが非常に高いミッションなので、本当にできるかどうかは行ってみないとわかりません。

海老原 工学的なミッションを負いながらも、サイエンスを展開する。そのサイエンスの主目的が、生命の起源につながる物質をとということですね。

吉川 はい、そうです。

海老原 その点は小林先生の領域になってくると思うのですが、いわゆる宇宙風化でもって、表面は宇宙線で常に叩かれていますね。そうすると有機物も分解してしまう。表面物質でなく、ある程度潜っている物質のほうが研究には役に立つということはあるのですか。

小林 生命の起源という立場から有機物を分析するときは何でも欲しいですね(笑)。もちろん太陽系ができて最初の時期にどんな有機物があったかを調べるのであれば、なるべく風化していない奥のものがほしいですが、逆に、ある程度風化したものがバラバラになって地球に降ってきて、それが生命のもとになった可能性もあります。そういう意味では、いろいろなタイプのサンプルが欲しいというところですね。

「たんぼぼ」という新しい実験もやっています。これは宇宙ステーションを使った宇宙実験というカテゴリーに入ります。隕石のように大きなものが地球に降ってきて、それが生命のもとになったという

のが昔から言われてきたシナリオですが、むしろ大きな隕石や彗星のようにばかにかいものではなく、細かな塵のかたちで降ってきたものが一番たくさん貢献したのではないかという説があります。つまり「たんぼぼ計画」では、国際宇宙ステーションの曝露部で、降ってくる塵を集めています。彗星や隕石に加えて、それらがもっと細かくなった塵を、地球に降ってくる手前で捕まえるというものです。地球に降って来た後ですと地球上のものが混じってしまうので。

この話が始まったのは2006年です。

海老原 「たんぼぼ」はアメリカの計画として？

小林 純粋に日本の計画です。

海老原 主体はJAXAですか。

小林 大学/JAXA 連合というかたちで、いろいろな人が入っています。

海老原 文科省のサポートを得ながら？

小林 ほとんどサポートなしで、手弁当で始めました。探査はお金がすごくかかるし、宇宙実験もお金を食っているという批判はあるのですが、「たんぼぼ」はお金のかかっていないミッションです。

海老原 国際宇宙ステーションを使う。

小林 そのこのステーションを上げるお金を入れてしまえばすごいお金になりますが、「はやぶさ2」と「たんぼぼ」は並行して計画されてきたということになります。それが2015年にやっと打ち上がり、1年間、地球にまさに降ってくるような塵を宇宙ステーション軌道で捕まえたものが、2016年8月、地球に帰ってきました。秋に日本に来て、初期分析が始まったという段階です。

そういうものが生命の誕生に必要なとしたら、かなり風化している可能性はあるのですが、それのものは小惑星や彗星の中身にずっと保存されていたはずですから、そういうものも欲しい。一つやればいいのではなく、いろいろなミッションを横に並べて初めていろいろなことがわかるのではないかと思っています。

海老原 昔、小林先生が実験室の中で、荷電粒子が何かを当てて反応させて、生命体の前駆物質をつくらうとしていた。そのようなものが「たんぼぼ計画」で見つかるかもしれないという理解でいいのですか。

小林 むしろそういうものが回り回って時間が経

^{*8} MINERVA-II：小型ローバ。

^{*9} MASCOT：Mobile Asteroid Surface Scout は「はやぶさ2」に搭載される約10 kgの小型着陸機。

った後で、実際に降ってくる時にどうなっているかということになります。宇宙空間あるいは惑星環境でどんなものができるかを見るには実験室のそういう実験が一番いいと思っているのですが、それがそのままではなく、紆余曲折の末、地球に降ってくるとすると、いろいろな段階のサンプルが欲しくなります。

海老原 その場合には、生命をつくる素材を見つけることになるわけですね。

小林 小惑星や彗星、それから今回「たんぽぽ」で捕まえる塵などはそういう素材です。

海老原 その素材を組み立てて生命にするのは地球ですね。

小林 38億年ぐらい前に地球で組み立てられたと想像しているのですが、その環境が地球に全く残っていません。地球の生命の起源は本当のことは永遠にわからないと言ってしまえばわからない。

宇宙はある意味のタイムマシンであり、タイムカプセルです。距離で138億光年離れているということは、138億年前の情報までは見つかる。太陽系の場合は46億年前のサンプルも見つかる可能性があるということで、いろいろな時期のものが探せる。また小天体の話とは別になりますが、火星、あるいは木星や土星の氷衛星を調べると、その中に地球で言えば何十億年前のものに近いものが眠っている可能性がある。そういった情報をつなぎ合わせていくと、地球でもこういう経路で生命になったということが少しずつわかってくるのではないかと考えています。

海老原 「はやぶさ2」でサンプルリターンして、それを調べた結果として、生命の前駆体になる複雑な有機物が見つかることが期待される。それを使って生命になる過程というのは別のところで議論されるべきだし、観測されるべきだと。

小林 太陽系だけでも、火星なりエウロパという木星の衛星なりいろいろなところで情報が得られるということは十分に期待されます。

海老原 将来的にはそういうところをターゲットとした探査を行うということが次のプロセス、次へのブリッジになるわけですね。

吉川 そうですね。日本の場合、太陽系の中でも、例えば木星や土星という遠い惑星まで探査機を送るのはいまの技術だと難しいのですが、世界を見

ればアメリカやヨーロッパが木星や土星に探査機を送っているわけです。氷衛星は生命という観点からも非常に面白い注目すべき天体なので、そういった方面で探査が進むと、新たなことがわかってくると思います。

海老原 そのへんまで日本独自で探査衛星を飛ばすことも期待できるのですか。

吉川 技術的なブレイクスルーが必要で、一番大きな問題は電力です。太陽電池で電気を起こすわけですが、遠くに行くと太陽の光は弱い。一つの可能性としては、ソーラーセイルという宇宙ヨットです。もともとのアイデアは太陽の光を広い面積の薄いシートで受けて光の圧力で軌道を変えていくというまさに宇宙ヨットなのですが、その広い面積に薄い太陽電池を張って電力をつくるわけです。木星ぐらいの距離までだったら、一辺が50mぐらいの正方形のシートを張れば電力を起こして行けるという検討はいまJAXAでやっているのですが、それでも木星が限界です。もっと遠くまで行きたいときには、アメリカのように原子力電池のようなものを使わなくては行けなくて、原子力というと放射能などができてしまうので難しい状況です。

海老原 遠くへ行ったアメリカの大型衛星は原子力のエネルギーを使っているのですか。

吉川 木星に到着したばかりのジュノーという探査機は太陽電池でやっていますが、それ以前は木星を含めて木星より遠いものは原子力電池だったと思います。

海老原 日本独自でというのも今後の探査では当然ありうると思いますが、ヨーロッパ連合体でやっているようなコミュニティをつくってという動きは日本の場合にはないのですか。

吉川 例えばアジア地域でいろいろな国が集まってヨーロッパのようにやるというのはあってもいいと思うのですが、いまのところ探査の世界ではまだないですね。

海老原 私がかかわったアメリカのジェネシスと日本の「はやぶさ」の予算を比較すると、片やオールジャパン、片やキャルテクのPIが1人で取り仕切っているスモールミッションですが、大差ないと聞いています。そういう差が現実としてあるから、アメリカの大きなミッションに伍していくのは大変だと思います。

吉川 まさに来週が打ち上げですが、オサイリス・レックス^{*10}というアメリカ版の「はやぶさ2」のようなミッションがあります。これは目的の天体がB型^{*11}の小惑星で、「はやぶさ2」が行くリュウグウはC型ですが、C型とB型はほとんど同じです。微妙に違うだけなので、アメリカのオサイリス・レックスというミッションもサンプルリターンですが、やはり有機物の分析を狙っています。

実は、小惑星に到着するのも「はやぶさ2」とほとんど同じ時期です。「はやぶさ2」が2018年の6~7月、オサイリス・レックスが2018年の8月ぐらいに到着する予定なので、2018年は「はやぶさ2」とオサイリス・レックスがそれぞれ小惑星に到着して探査を始めるというエキサイティングな年になるはずですが、ただ、オサイリス・レックスは「はやぶさ2」に比べるとはるかに大きな予算を使っていますから、ミッションの規模は違いますね。

海老原 帰ってくるのはいつですか。

吉川 オサイリス・レックスは2023年で、帰りは「はやぶさ2」のほうが早い。

海老原 「はやぶさ2」の帰還が2020年の12月だと、オリンピックの後。

吉川 ちょうどオリンピックの後ですね。

海老原 探査衛星の話がいくつか出ましたが、物質、しかもサイエンスに足を入れているという意味で、JAXAで計画されている今後のミッションはあるのですか。

吉川 「はやぶさ2」の次のサンプルリターンのミッションとして、火星の衛星から物質を持ち帰ろうというのは検討が進んでいるところです。まだミッションとしてゴーはかかっていませんが。

海老原 火星の衛星？

吉川 フォボス^{*12}か、ダイモス^{*13}か。

海老原 本体ではなく、衛星というのは何か意味があるのですか。

吉川 火星の表面からのサンプルリターン、これ

は本当に面白い興味のあるものですが、探査機としては着陸すると離陸しなくてはいけないので大型化してしまう。まだ衛星のほうが引力が弱いので、着陸して離陸するのが技術的には楽だということです。ただ、火星の衛星も火星の周りを回っているので、結果的には火星の重力圏に探査機が1回入って出てくることになるので、「はやぶさ」や「はやぶさ2」のように小惑星に着陸するのはレベルが違って、探査機的能力がかなり必要になる。だから技術的には飛躍が必要です。

海老原 火星といえば、火星からきた隕石というものがある、あれも南極隕石が非常に貢献している面があると思います。もちろん月の隕石があって、これは月の試料があるから直接比べられて、月隕石だとわかる。ただ、火星隕石は比べられるものがない。

小島 衛星が1976年に着陸して、火星の大気を分析して、我々もデータだけは持っている。

海老原 バイキング計画^{*14}のデータですね。そういう意味では、間接的かもしれないけれども、証拠はある。しかし本当にそうかと言われて、100%というには、直接のデータがない。だから火星の直接の試料も欲しい。

探査と隕石はある意味でコンプリメンタリー（相補的）ではある。ただし、探査はお金がすごくかかる。しかも「はやぶさ2」の場合にはサンプリングサイトが3か所とおっしゃいましたが、かなり似たようなところですね。火星のように大きなところだと1か所。隕石はランダムに来るから、天体の全体像を調べるときには都合がよい。

—フロンティアへの挑戦—

海老原 しかし探査というのは素性がわかるし、例えば「はやぶさ」のときに成果が一番あったと思うのは、*in situ*でその場で採ってきたものを測っているので、宇宙風化の詳細が非常によくわかった。「はやぶさ2」の場合にも直接行って、表面ばかりでなく、中のものも採ってこられるとすると、隕石

^{*10} オサイリス・レックス：NASAの小惑星探査機。日本時間2016年9月9日、米フロリダ州から打ち上げ成功。地球接近小惑星ベンヌからサンプルリターンを行う予定。

^{*11} B型小惑星：炭素質の小惑星。C型小惑星に似た特徴を持つ。

^{*12} フォボス：火星の第1衛星。

^{*13} ダイモス：火星の第2衛星。

^{*14} バイキング計画：NASAが1970年代に行った火星探査計画。バイキング1号とバイキング2号の、2機の火星探査機が火星への着陸に成功した。

とは違うものを情報として持ってくるわけです。だから隕石は隕石の情報、探査は探査の情報で、どちらも重要だと思います。

吉川 本当はたくさん天体に探査機を飛ばしたいけれども、お金もないから、数が限られてしまう。サンプルリターンミッションでは、一つの小惑星から物質を持って帰ってきますが、それと地球に落ちているたくさんの隕石の分析と比較することによって、隕石の分析の精度、つまりコンタミの影響を排除するようなことに貢献できればいいですね。隕石のほうはいろいろな天体から来ているので、それを調べることで太陽系全体のことを理解するのにつながるようになるので。

小島 隕石を研究するのと実際に行き行ってサンプルリターンするのと意味が全然違って、サンプルリターンはすごく重要だと思っています。

海老原 小島さんは実際にサンプルを採ってこられるし、自分で研究される。吉川さんはサンプルリターンの技術的なことまで含めてマネージングされている。我々は、どちらも使わせていただいている。使う側とすれば、どちらも大事だという気がする。当事者の2人の方もどちらも大事だという認識を持たれているということは、ものすごく意義深いことだと思います。

フロンティアに立ち返ると、どこまで行ってもフロンティアは宇宙に関してはなくなる。だから面白いし、チャレンジを今後も続ける。「はやぶさ2」が予定どおりちゃんと戻ってきて、次につながれるといいですね。

生命の起源とかアストロバイオロジーという言葉がはやりになって、小林先生は元からずっとやってこられた立場として違和感のようなものは持たれませんか。

小林 この分野はなるべくいろいろなアプローチで攻めていかないと先が見えてこない。新しいアストロバイオロジーという名前の下に、いままで単に生命の起源というだけの旗のときには全然来てくれなかった人がいっぱい入ってきてくれますと、アプローチの仕方が増えるので、この先、学問の進展が非常に期待できます。

海老原 それは世界的な傾向ですか。

小林 そうですね。遡っていくと、火星隕石の話が発端です。

海老原 84001*¹⁵。

小林 あれで火星の生命の可能性が出てきたということで、NASAが俄然元気になって、この分野で旗を振ろうと。

結果的には、あれだけで火星に元は生物がいたという直接の証拠にはならないというほうに一応収束しているのではないかと思います。

海老原 火星隕石の中で生命の痕跡が見つかるという論理、それはそれで筋が通っていると思ってい

いのですか。
小林 あの頃、火星のサンプルを持ってくることはまだできなかったわけで、勝手に飛んでくるものの中で、勇み足的なところもあるかもしれませんが、こういうことまで議論できる可能性があるということを示したことで有益だったのではないかと思います。

海老原 あの化学物質なんて地球上の汚染物質と同じものですよ。

小林 PAH（多環芳香族炭化水素）のパターンで、あれは生物由来だという議論をしているわけですが、PAHというのは有機物の死骸のようなもので、そこからどこまで言えるかというのは非常に難しいところがあるかもしれません。

海老原 今度の「はやぶさ2」に期待する試料は南極隕石ではない、要するに地球上のいろいろなものが排除できるという意味でも、次元が違う。その意味で「はやぶさ2」の試料では、ALH84001の隕石の中で見つかったような痕跡物質とは異質のものを想定されますね。

小林 当然、太陽系の始原物質ということで、火星環境のものとはかなり違う。火星のほうは化学進化のプロセスのかなり進んだもので、そこに生物がいれば生物由来のものがさらに混じっている。そこはまだよくわからないのですが。

海老原 火星に行き行ってああいうものを採ってきたとしても、同じような議論になってしまう。

小林 火星の場合は水やメタンがどこから出ているという議論がだいぶ進んでいるので、そういうものが出てくる近くで探すという、20年前では議論できなかったことがいまならできるということが期

*¹⁵ 84001 : Allan Hills 84001. 1984年12月27日に南極大陸のアラン・ヒルズで採取された火星起源の隕石。

待できます。

海老原 そういう探査も将来的には、小林先生とすれば、ぜひとも期待したいと。

小林 そうですね。バイキングの頃はそういう情報なしでいきなり行ってしまったので、要するにサハラ砂漠のど真ん中に降りたら何が見つかるかという感じだったわけですが、今度は火星の中でもなるべく可能性の高いところということで進んでいくと思います。

海老原 NASAはそのへんの計画を持っているのですか。

吉川 NASAは火星探査もどんどんやっていて、新しいのを打ち上げる予定です。

海老原 生命の起源のようなものを。

吉川 そうですね。次は火星の地下を掘ってみようとも言っています。

小林 2020年にヨーロッパが打ち上げるのは2mぐらい掘るといふ計画があります。NASAはサンプルリターンを見据えた探査を進めていくという話になりつつあります。

海老原 月と地球に近い軌道の小惑星と火星、ほかに直接行って試料を採ってくる、例えば水星に行くというのはなかなか難しいのですか。

吉川 今まさにJAXAとESA（欧州宇宙機関）共同でBepiColomboというミッションをやっていて、打ち上げはESAの都合で延びているのですが、1~2年後です。日本側の探査機はできていて、ヨーロッパに送ってあって、ESA側の探査機と合体さ

せて打ち上げるのです。水星まで行くと二つの探査機に分かれて水星を周回し、水星の磁場などを調べる。リモセン観測で、残念ながら着陸はしないので、物質までは取れないのですが。

海老原 水星から来た隕石があるという研究者もいる。

小島 あっても不思議ではない。火星から来ているのだから、水星か金星のやつが見つかってもいいのではないかと。ただ、物は全然わからない。

吉川 軌道的な意味から言うと、水星から地球まで来てもおかしくないのでは、ありうると思います。

海老原 隕石でもまだわからないことがいっぱいありますね。太陽からの距離によって、物質、同位体の組成がどう変わったとか。いまの惑星の位置は、できたときからずっとそこにいた、大きいのは場所があまり変わらないのかもしれませんが、摂動を受けてずいぶん変わっている可能性もありますね。

吉川 最近の説だと、惑星の軌道は大きさが変わったと言われています。いまいる場所よりも大きくずれていたというわけですね。

海老原 そういう議論をするときの材料として、いろいろな天体から物を持ってくる。それは現時点では夢の部分も多いかもしれませんが、次世代にぜひとも引き継いでいただきたい。本日は夢のある話、どうもありがとうございました。

（終）