

宇宙環境を利用するライフサイエンス実験

宇宙へヒトが活躍する場の拡大に向けて



出席者 大西武雄¹⁾
馬嶋秀行²⁾
高橋秀幸³⁾
東谷篤志⁴⁾
(司会) 石岡憲昭⁵⁾

これまで宇宙でどのような実験が行われたのでしょうか？そしてどのような結果が明らかになったのでしょうか？新春にあたり、4人の先生をクルーに迎えた宇宙船 Ishi-Oka 号に同乗し、夢のあるお話を伺いましょう。 Isotope News 編集委員会

... ..

宇宙環境を利用する生物実験に 1990 年代から日本も参入し、20 年になるうとしています。さらに次の時代として、人が宇宙へ行き活躍の場を広げていくという趣旨の生物医学研究に向かって動きだしています。

では「なぜ、宇宙で実験をするのか」、最初は生命が宇宙環境に適應する基本的なメカニズムや、生命の応答性というものを理解しようと

いう基本的かつ生物学的な要求からでした。

それから、宇宙での生命の起源と進化など、我々の知的好奇心がさらなる宇宙実験へとかりたて、今日では、人が宇宙へ行くために、安全な宇宙飛行を目指す技術開発、宇宙放射線や微小重力の影響への対応という課題を解決するための研究が展開されています。

また最近では、宇宙から地球を見たとき、地球の環境問題というものが非常にクローズアップされ、オゾン層の問題から今度はさらに環境破壊の観点からも「なぜ宇宙か」ということが重要になってきています。

宇宙では生物にどのような変化が起きるか

石岡 まず、本日お越しいただきました先生方をご紹介します。

これまで多くの生物宇宙実験を経験されている大西先生。宇宙放射線に関する生体リスクからの観点で宇宙実験間近の馬嶋先生。植物は重力応答が顕著に現れるのでその研究は進んでいますが、今後、人が行くことで食糧の問題なども含め、日本の植物宇宙実験の最先端を行って

- 1) 奈良県立医科大学生物学教室 (教授)
- 2) 鹿児島大学大学院医歯学総合研究科 腫瘍学講座、宇宙環境医学講座 (教授)
- 3) 東北大学大学院生命科学研究科 宇宙環境適應生態分野 (教授)
- 4) 東北大学大学院生命科学研究科 ゲノム継承システム分野 (教授)
- 5) 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部 宇宙環境利用科学研究系 (教授)

いるお1人として高橋先生。最後に、日本の生物宇宙実験としては最も新しい、モデル生物の1つである線虫Cエレガンスを用いた実験に参加され成果を上げられた東谷先生。

まず始めに、多くの宇宙実験を手掛けてこられた大西先生に、話の口火を切っていただきたいと思います。

大西 最初に、私がこの宇宙に興味を持ったのは約25年前のことです。宇宙生物学会が立ち上がる以前、宇宙とどう取り組むかという準備段階の時代、高校の教科書に「放電や紫外線で、ミラーが無機物から有機物をつくった」それは、「生命再現のドラマを地球上で最初にやった」という記載があった。学者であれば誰も「本当かな?」と、「ぜひ証明してみたい」そんな気持ちで宇宙に取り組んだ。太陽の光というエネルギーが地球上で無機物から有機物合成のプロセスを歩ませたとすると...

私は紫外線を研究テーマとしていましたので、まさに自分のテーマそのもののように思いました。遺伝子の損傷により突然変異が起こる。そして、地球の現在の多様な生命進化へと遂げてきたドラマが宇宙研究で、生命科学で再現できるのではないかという期待で取り組みました。さらに、地球上に生物が海の中で生まれて、陸上へ上がるためにはオゾン層が必要であった。オゾン層破壊、地球上の生物はどのくらいの強さの紫外線まで耐えぬくかというテーマに取り組んできました。その実験は宇宙で起こる遺伝子損傷が地球上で人工に作った遺伝子損傷と同じかどうか、また、影響度が宇宙線と微小重力という2つの環境の中で、相互作用は起こるのか起こらないのか、最初のテーマだったと思います。このテーマは、これからの宇宙進出にもまだまだ大事な問題であります。

また、最初はバクテリアや細胞性粘菌など下等な、そして、小さな実験装置で済む実験を行いました。よりスケールの大きい、ヒト細胞とか個体とか、地球上と同じ1Gが作れる遠心機とかというようなものを組み合わせて、人類が

初めて経験する宇宙空間での生物影響の仕組み、特に分子機構の研究をゼロから解きほぐすということを取り組んできたつもりです。

石岡 放射線と微小重力との相互作用という点に関して、先生はさまざまな実験をされていますが、それで得られた知見、それから今後はどうしていくべきかというようなことがありますしたら、お聞かせください。

大西 我々が医療で用いてきた γ 線、X線など比較的エネルギーの低い放射線ではなく、もっとエネルギーの高い、重粒子線 ある距離の間にたくさんのエネルギーを置く、重い粒子線が宇宙空間に多いということが分かり始めてきて、 γ 線よりもより怖いので、まさにそれを防護しないとイケない。

また、微小重力との関係は実験系、特に昆虫や植物の生物影響を見ると相互作用の可能性があるという結果がヨーロッパ、アメリカ、日本でデータができつつあります。

石岡 現在、先生が計画中の細胞を用いた実験計画は、今までの成果とはどうつながっているのでしょうか。

大西 細胞性粘菌は、動物でもあり植物でもありますけれども、宇宙では上ということがないのに、同一方向に子実体が立ち上がった。これは、非常に不思議なことです。私は、あっち向き、こっち向きするのではないかと思っていたのですが、それが同一方向に立ち上がったというのが成果でありました。

また、放射線感受性株も使いましたが、宇宙では胞子を作ることができなかったことで、やはり放射線と重力影響の相互作用もあるかと思っています。

アメリカのグループがラットなどの動物を既に打ち上げております。そのサンプルを分析したところ、がん抑制遺伝子産物p53が筋肉や皮膚でも増えていることを発見したのです。宇宙はがんになりやすい環境なのか、なりにくい環境なのかを、ぜひとも突き止めたくて、いま計画中の研究はそこに焦点を絞っています。



大西武雄氏

ミトコンドリアが教えてくれた宇宙とは

石岡 安全に宇宙へ行くためには、対処法を考えながら行くべきだと思います。その「宇宙へ安全に行くためには」ということに関して、馬嶋先生、お話しいただければと思うのですが。

馬嶋 私の研究の始まりは、がん治療の基礎医学で、がんを治すところからです。放射線医学総合研究所で、いま重粒子線による治療が行われて、非常に大きな成果を上げています。宇宙では γ 線、それから陽子線が一番多いですけども、ほかに混合放射線場であるところから重粒子のウエイトが結構大きい、つまり、宇宙はかなり線量が高く、地球上で受けている宇宙線量のおよそ100倍と最新では算出されています。この線量は胸部放射線写真撮影のおよそ1回分が宇宙1日分の被ばく線量となります。しかし、依然として低線量ですので、この線量の生物に対する効果を調べるのは難しく、より高い線量からずっと外挿してものを推測しようとしていました。

それから、私はちょっと方向転換をしまして、今の専門がミトコンドリアです。ミトコンドリアは、約10億年前に α プロテオバクテリアが細胞の中に共生したところから始まりました。それは、生命体の1番の転換期でし

た。そこからATPがたくさん作られるようになって、同時に電子伝達系というものを酸素を使ってエネルギーを出すために活性酸素が同時に副産物として出てきてしまうということが始まりました。この活性酸素発生が問題で、しかも、いろいろなものに影響されて、もっと活性酸素の量が増えてくるという、その引き金になるのが宇宙線であり、微小重力かもしれないと考えました。

要するにリスクなのですが、核のDNAの直接の損傷ももちろん大事です。けれど、ミトコンドリアを介しているいろいろなものが起きているに違いないと思っています。宇宙のような非常に低い線量でも同様なことが起こると考えています。実際に、ミトコンドリアから活性酸素が出て、それがアポトーシスと関係しているというのを、私は1998年に世界で最初に発表しました。

石岡 先生が今なさろうとしている宇宙実験の1つは宇宙放射線のリスクがどのぐらいあるのかを見るための実験であり、もう1つは生命現象の基本的なメカニズムとの関係であるかと思うのです。そのリスクに関しては...

馬嶋 今は、宇宙線程度の線量を当てたときに、遺伝子がどのように動くか、あるいはプロテオミクスなどもタンパクの動きなどを調べています。実際、これは地上の実験ですけども、0.1 mGyを照射して、アポトーシス、あるいはネクローシス、オートファジーなどの遺伝子が動いているというのを突き止めています。要するに、宇宙は細胞内で活性酸素を生み出す非常に過酷な条件にあると思います。

長期間人類が宇宙に滞在するには、ミトコンドリアから出てくる活性酸素が多いことが遺伝子の発現変化をきたし、この遺伝子発現変化が細胞の生命維持に非常に大事だと思います。

この遺伝子発現変化をどのように克服するかというと、抗酸化をコントロールするということが1つの必須条件になると考えています。すなわち、将来の宇宙長期滞在の可能性、それが

ら月、火星の滞在まで含めて、食事から、抗酸化剤を加えていったら非常にいいのではないかと考えています。

宇宙での植物実験から生物の多様性を知る

石岡 今までは安全な宇宙旅行を考えた上での実験をしてきたということですが、視点を変えて、生命が宇宙環境にどう適応するのか、どう反応するのかという観点からも、基礎生物学的な知見を得る期待があるわけです。植物を用いてこれまで実験をされてきた高橋先生、その辺のことを伺えればと思います。

高橋 私が宇宙生物学にかかわるようになったのは、1982年にアメリカNASAの重力宇宙生物学プログラムというプロジェクトにサポートされて、アメリカの大学で博士研究員をやっていたことがきっかけでした。

それ以来、いろいろ学び、考えてきたことは、「なぜ、植物と宇宙か」ということです。私たちが忘れてならないのは、植物というのは人間を含めたすべての生命のエネルギーの生産者であることです。植物は1次生産者というかたちで、地球の生命維持システムの1部として、私たちが生きる上でなくてはならないものです。宇宙に生命圏、人類の宇宙活動を拡大していく、あるいは地球以外の惑星なり宇宙空間に生命維持システムを作るということになりますと、そこは物質循環等を備えたシステムでなければいけない。植物が果たす役割というのは当然重要になってきます。

重力のない強放射線下の特殊な環境、宇宙で植物は生活できるのか。私たちが宇宙で植物をいろいろな目的、例えば食糧生産や環境維持のために栽培・生産できるのかというようなことです。

また、地球環境問題を克服するために宇宙環境を利用することも重要です。例えば、私たちが生きるためには酸素を必要としますが、地球上は21%という酸素を長い間維持してきました。それはとりもなおさず、植物を含めた生態



馬 嶋 秀 行 氏

系における物質循環により私たちの必要とする酸素が維持されているということです。ただ、そういうメカニズムがまだ正確に分からないのです。宇宙に1つの閉鎖空間を作って物質循環系を、植物を生産者として入れて、検証して地球を理解するというようなことも必要かと思うのです。

さらに、宇宙にしかないユニークな環境、重力がない、それから宇宙放射線、そういったものをツールにして生物学をやる。重力等が生物の地球上における進化に大きな影響を与えてきたことを理解するために、宇宙環境を使えるということです。私は植物を材料として、「なぜ、生命が地球環境に適応してきたか」というようなことを研究しています。植物というのは動物と違い、何かストレスなり住みにくい状況に置かれても、逃げたり回避するということができない。でも、植物は植物なりにいろいろな環境に適応して生活しています。

例えば、水の中で誕生した生命が、オゾン層ができた結果として何十億年もの長い間生活してきた水中から、陸地が上がったのは、今から4億5千万年ほど前と言われていています。続いて動物が上がって、今の私たちが住むような生態系ができました。

そのときに、1番問題だったのは何か。完全に水依存型 水がないと、生きられないという

生物になっていたわけです。それが、水の得にくい陸地が上がっていくという、植物のフロンティア的な活動を可能にしたのが、やはり重力や光などの陸地環境への適応でした。

陸地が上がって、必要な水を取り入れるために、根や維管束系ができてきました。しかし、根ができて、水は土の中、下にありますので自分の根の成長方向をコントロールする能力がないといけなかった。それで、根は重力を感じることができるようになって、下と上を認識するようになりました。根は水、あるいは養分のある土の中、すなわち下の方に伸びていく。地上部は光合成をしなければいけませんので、そのために茎は大気及び光のある上の方に伸びるようになりました。

重力を1つの信号として使えるように進化したわけですがけれども、なぜ植物は重力に反応できるのかというそのメカニズム、それが非常に面白いわけです。それを理解するのに、「重力のないところでは植物はどのような行動をするのか」というところからアプローチする手法です。宇宙環境の重力のないところを生物学に使うという観点で宇宙実験をやってきたのです。

石岡 実際に先生がされた宇宙実験で、こういう面白いことがあったということがあると思うのですが、その辺はいかがですか。

高橋 植物が重力を利用して、自分の伸長方向をコントロールするというのは重力屈性と言われているのですけれども、それは比較的よく

研究されている領域です。

私はかつてからキュウリを研究材料に使ってきました。ヘチマでもメロンでもスイカでも同じなのですが、ウリ科植物の種というのは比較的平べったい形をしていますので、土の中では横になります。発芽してくる時に根と茎の境界領域の下側に“ペグ”と言われる突起ができるのです。平べったい種を上と下がひっくり返るようにして発芽させても、そのペグは必ず下側に1個できるのです。宇宙に持っていったら、そのペグがどのようなになるか。

実際に1998年、向井千秋さんのフライト2回目のときに、宇宙実験をやりました。宇宙にキュウリの種を上げて、宇宙で水をやって一定時間育てて観察したところ、ペグが両側に2個できたのです(写真1)。ということは、ペグの形成に重力を必要不可欠とはしないということなのです。もともとは2つの突起を作る能力を持っているけれど、地上では必要な1個だけを作るように、重力に植物が応答することによって上側にペグができないように、その形態形成を抑えていることが分かったのです。

ですから、抑えているという意味で、私たちは重力が形態形成をネガティブにコントロールしているというところらえ方をしています。これは実は宇宙実験をやらないと、本当に分からなかったことだと思っています。

石岡 生物自体が持っている適応とか応答とか、まさに多様性というものの1つの傍証でもあると。

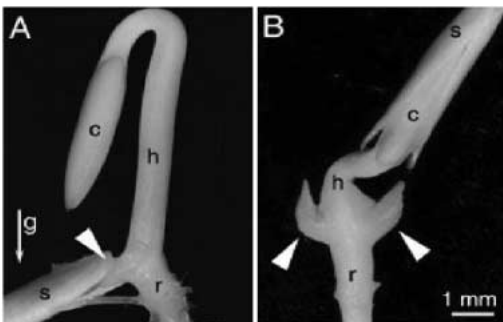


写真1 微小重力下におけるキュウリのペグ形成 (STS-95, 1995) ウリ科植物の芽生えは、本来両側に突起(ペグ)を形成する能力を有するが、地上では重力環境を検出して一方を抑制することが明らかになった。

- A : 地上で生育させたキュウリの芽生えの形態
- B : 微小重力下で生育させたキュウリの芽生えの形態
- 矢印 : peg ペグ
- c : cotyledon 子葉
- h : hypocotyl 胚軸
- r : root 根
- s : seed coat 種皮

(東北大学 高橋先生ご提供)

大西 大変面白い結果だと思えますね。植物は、将来自分が無重力の世界に連れて行かれると思わなくても、どのような環境にも自分を合わせられるようにセットアップされていたのではと、高橋先生はお考えになられますか。どの環境にも適応する生物の多様性からも、生命はいかにしたたかに進化してきたのか、のように見えるけれど、それは合目的過ぎますかね。(笑)

高橋 進化という意味で面白いことだと思うのですが、やはりそれだけの遺伝的なバリエーションを備えているということが1つの基本ではないかと思えます。ある環境に置かれて、その中で生きなければいけないといったときに、生きられるような...

大西 生命のしたたかさ。

線虫Cエレガンスからヒトへのメッセージ

石岡 生命のしたたかさという話が出たのですけれども、植物以外で個体を用いた最近の宇宙実験としましては、線虫Cエレガンスという虫を用いた日本の実験があります。

その実験で面白い結果が出ていますので、東谷先生からお話を伺いたいと思うのですが。

東谷 私たちが材料にしているのは、線虫Cエレガンス(写真2)という土壌に住む長さ1mm ぐらいのモデル生物です。この線虫の特徴は、卵から成虫になるのに約4日間と、世代交代が大変早いことが大きな特徴です。もう1つ



高橋 秀幸氏

の特徴は、ゲノムの約2万からなる全遺伝子の配列情報が既に明らかになっており、さらに、3分の1はヒトにも共通する遺伝子であり、細胞分裂や、生殖、遺伝子の修復、細胞の自発的な死(アポトーシス)などの基本的なメカニズムは保存されています。

そこで、ヒトのモデル生物の1つとして、2004年4月、ロシアの宇宙船ソユーズを利用した国際線虫宇宙実験(International *C. elegans* Space Experiment 1: ICE first)が国際的な協力体制で実施され、日本のJAXAも実験に参画することになりました。サンプルは、ソユーズから国際宇宙ステーション内に運ばれ、約1週間の宇宙飛行後、再びソユーズで帰還されました。宇宙環境では、宇宙飛行士の筋や骨量が低下するという事はよく言われています。そこで、

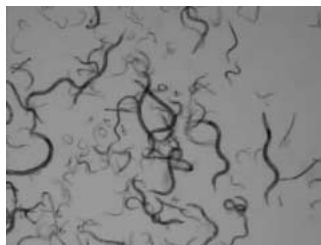
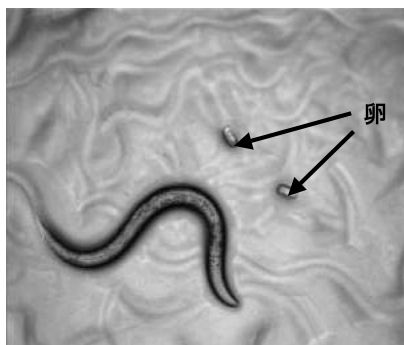


写真2 線虫国際宇宙実験(ICE-first)
宇宙実験用培養バッグ内の線虫(*C.elegans*)
(JAXA 石岡先生ご提供)



東谷 篤志 氏

今回の日本からの研究課題の1つには、宇宙で生まれ育った線虫の（骨はありませんが）筋肉はどうなるのかという、分子レベルの解析でした。その結果については、主に担当された石岡先生から後でお話いただくことにします。

次に、加齢の問題で、宇宙環境では老化がどう進むのか。浦島太郎のように、宇宙に行けば年を取らずに帰ってくるのか。はたまた地上で生活する以上に老けて帰ってくるのかという問題です。今回の線虫の実験結果では、宇宙では線虫の加齢が抑えられるような結果が得られ、その詳細な解析が続けられています。

また、私たちは、生殖に関わる問題についての宇宙実験を行いました。4日間で世代交代が完了しますから、成虫の体内で減数分裂を経て配偶子が形成され、受精後、次世代の子どもが発生分化し、そして再び成虫になり、その次の世代につなぐまでのフライト期間が確保されました。今回、宇宙フライトサンプルを観察したところ、染色体の減数分裂をはじめとする配偶子形成から、次世代への発生分化まで問題なく行われることが確認されました。また、減数分裂の過程ならびに配偶子の成熟過程で、高頻度に生じる生殖細胞のアポトーシスも、宇宙の微小重力下で正常に行われることが分かりました。なかでも、減数分裂過程のアポトーシスはDNA損傷をモニターして誘導されるので、宇

宙放射線によりDNAが深く傷ついた際にもアポトーシスが正常に働き、宇宙で、遺伝的変異を積極的に取除くシステムが問題なく機能する可能性が示唆されました。

では、筋肉の結果について、石岡先生お願いします。

石岡 宇宙飛行士が地球に帰ってきたときに問題になるのは、骨の問題、骨量減少の問題があるのですが、もう1つ、筋肉の問題、筋萎縮を起こして立ち上がれないという事態があります。

線虫は筋肉として体側筋を持っています。それからものを食べる時の咽頭筋を持っています。筋肉の種類はその2種類です。我々は線虫の遺伝子のレベルとタンパク質のレベルで、どういふ変化があるかということで調べたのですが、その結果、筋肉にかかわるタンパク質と遺伝子が減少していることを明らかにしました。これが人の筋萎縮につながるかどうかは別として、遺伝子のレベルでも筋肉にかかわるものの発現が抑えられ、タンパク質のレベルでも確かに少なくなっている。両方同時に進んでいるということを見出したのは初めてのことだと思います。

今後、人が宇宙へ行ったときに起こる現象の研究の切り口になるのではないかと考えています。今後も線虫の実験というのはまだまだ非常に期待が持て、続けていく予定にしています。

生物は宇宙で繁殖できるか

大西 では、石岡先生と東谷先生のお2人にお尋ねいたします。

今、我々は宇宙実験でいろいろな動物を使って研究しています。ところが、今度その延長上に誰しも「ヒトは、どうだろうか」という想定がやってきますね。「宇宙で、ヒトの子はできるのか」また「その子は大人になれるのか」その子のふるさとは宇宙ですから、「その子は地球に来られるのか」。これに対する答えを、先生方の想像でよいですからお願いします。

石岡 東谷先生、生殖のための環境というのがあると思うのですけれども、いかがですか。

東谷 線虫レベルでは、宇宙でも大丈夫だということは確かだろうと思います。それでヒトの場合を想像するに、「逆子はどうなるのか」という問題が1番大きいと思います。地上では、知らず知らずのうちに子どもは頭が下を向いているのが普通です。宇宙だと、胎児の状態でどちらに頭が向くのか。

石岡 それは、重力で例えばクルッと回るのが、実際に感知しているのかということにもかかわると思うのです。

東谷 そうですね。実際、宇宙で妊娠してみると、下の方にちゃんと胎児の頭が向くようになっていられるかもしれませんね。

ただ、言えることは、筋肉等はかなり負荷がかからなくなります。そうすると、宇宙飛行士が1週間滞在するだけでも、地上に降り立ったときは瞬間的には立てないというような状況になりますから、宇宙でもし何年も育った子どもができた場合、おそらく体形はかなり変わって、地上では立てないのではないかというのは容易に想像できます。

大西 昔の火星人の想像図のようになるわけですか。

石岡 そこは分かりませんけれども。(笑)メダカ(水棲生物)では宇宙で卵を産んで、受精がうまくいって稚魚が誕生したという井尻憲一先生の実験もありますし、この線虫自体も宇宙で卵を産んで、ちゃんとかえって世代交代しています。そういう観点から言うと、生命のシステムとしては可能であろうと...

大西 しかし、その2つとも足はないですね。

石岡 ヒトとなると、先日、日本宇宙生物科学学会でも議論したことがあるのですが、やはり宇宙でも生殖自体は可能であろうと。例えば受精に関しても、重力がそれにかかっているかどうか、精子と卵子との反応というのは、重力がなくてもいくのではないかと、僕個人的には思っているのです。



石岡 憲昭氏

一方、鶏の実験で卵を宇宙に持っていったときに、産卵当日の有精卵は孵らず死亡していた。これは重力が関係していることが分かっている、酸素を取るためには必ず胚の一部が卵殻の内表面に行き血管網が形成されないといけないのですが、生まれてすぐに微小重力状態に持っていくと、胚は卵の真ん中に漂っているだけで殻の内表面に行かず血管網が形成されず酸素が取れなくて死亡したのです。

それ以外の動物は、うまくいくのではないかと想像しています。

大西 ネズミの動物実験などもあり得ると。

石岡 昔 NASA がやった動物の実験では、生まれたときに親が授乳しないといけないのですけれども、まさにその授乳が問題でした。

ヒトだと何か工夫するから、克服できると思うのですけれども、ネズミの場合、一生懸命に母親が授乳しようとして抱え込むのですが、後ろ足のほうから子どもが逃げていってしまう。その結果、子どもが浮かんでクルクル回っているだけです。そういう現象を NASA の実験のビデオで見ました。

大西 ネズミは、ネズミ算式に増えないと。

石岡 そういう意味では、増えません。

高橋 やはり植物でも、この生殖の問題はここ十数年来、宇宙生物学としては非常に大きな問題になっています。種から種まで完全に生

活環を宇宙空間で回せるかということで、最初に NASA を中心にしてやった実験では種ができなかったのです。

結局、宇宙空間というのは、対流がないということでガス交換がうまくいきません。それをきちんとコントロールしないと、植物が光合成に必要な二酸化炭素を取り込むことも阻害されるというようなことです。

それから、閉鎖系ですから、いろいろな有害ガスをきちんと除去する必要があります。こうした問題を、装置の改良などによって解決したら、宇宙でも植物は受精して種を作ったということです。

大西 それは、ハエとかチョウとか昆虫を入れなかったからではないのですか。

高橋 そういう側面もまた1つあります。例えば、自家受精が簡単にできない、つまり花粉がどこからか飛んで来なければいけないような植物にとっては、それも重要です。

大西 おしべとめしべの位置関係とか、上下関係。花粉が落ちるという現象を地上で利用している生物と、していない生物との違いとか。昆虫を媒介にして受精をするケースもあるし。

高橋 そうですね。例えばマメ科植物なんかは閉花受精をしますし、植物によってはめしべが伸びてくるときに、自動的に花粉がつくような構造になっている場合もあります。先生が言われたように飛んでこないといけないもの、それが宇宙では問題になるということですね。

ヒトは閉鎖系でいかに生きるか

石岡 つい最近、フランスの宇宙機関が「微小重力で手術ができるか」ということを実際にはパラボリックフライトですけれども、外科手術をやって成功したという話があります。

今後宇宙に人が行くというなかで、宇宙医学としては非常に大事なことです。既に国際宇宙ステーションは飛んでいます。日本の実験棟「きぼう」も打ち上がり、いろいろなことができるようになります。

NASA が“月”“火星”というなかで、今後の宇宙実験というのはどのようになっていくか、あるいは、先生方の夢でもいいのですが、一言ずつ語っていただければと思います。では、馬嶋先生からお願いします。

馬嶋 人類が地球を出てほかの天体を探して住むという話もないわけではなくて、密接に関係しているのは、地球がどれくらいもつか、最悪の場合には100年くらいしかもたないのではないかという説さえあります。

それは、地球の温暖化。それから今は地球の人口は64億人ですけれども、それが100億人になって食糧不安の問題。そして自然破壊があります。自然というのが実は移り動くものかもしれないかもしれませんが、地球には住めなくなり、実際に宇宙に出て人類が生きられるかどうかもまた問題になります。それには、植物の問題もありますし、子孫を残すとかという問題を含んででしょう。これらの解決が人類の夢です。一方、宇宙研究のメリットですが、宇宙で使えるものを開発することによって、やはりサイエンスが広がりを見せるというところがかかなり大きいかと、近未来的には思います。

石岡 いま現実に地球にも還元できるということですね。高橋先生、今後の展望としてはどうでしょうか。

高橋 植物の生産を考えるうえで重要なのは、植物がどういう形をしていてどういう成長制御の仕組みを持っているかということです。それが、地球上では例えば重力に支配されているという側面があります。それを、やはり基本的に宇宙を使って理解していく。それによって、その知見を宇宙における植物生産に応用していくというスタンスで、最終的には食糧生産あるいは環境調節等を含めて、植物を宇宙で大々的に栽培する、宇宙農業にもつながってきます。人類が宇宙に滞在する、生命圏を広げると言ったときの重要な基本的パーツとしてとらえていかなければいけないのではないかと思います。

例えば、根は重力だけではなく、水とか光にも応答して伸長方向を制御する。地球上ではそういった応答は、重力応答によって隠されていると言いますが、干渉されるような状況にあります。それが宇宙に行くと、その干渉がなくなり、純粋にその系が見えるようになります。

宇宙で水に対する応答が顕著になるのであれば、地球上の重力の代わりに水に対する応答を使って根の伸びる方向を制御する、地上部だったら、光に対する応答を使って、有利な方向に植物を伸ばしてあげるといったようなことができるようになると思います。

石岡 ライフサイエンスとしては、大きなテーマだと思います。宇宙飛行士が植物の宇宙実験があったときに、宇宙で水をあげて植物が育っていくことがすごく楽しみであった。つまり、宇宙という何もない閉鎖系で、みんな楽しんで癒やされた。植物というのは、やはりまた違った側面もあるなと考えています。

高橋 確かに宇宙で人間が暮らすとしたら、それも必要なことだと思います。

大西 宇宙の盆栽ですか。(笑)

石岡 人が行くときにはやはり精神とか心理とか、そういう問題があるだろうと思います。

馬嶋 宇宙環境で我々が生きていくときに、本当に農場を作らなくてはいけなくて、大事なのが炭水化物、米、麦とか大豆、トウモロコシ、そういうものが将来的に可能性があるのですか。また、どのぐらいで実現しますか。

高橋 私は、技術的に解決すべき点があるにしても、コスト面がサポートされれば、かなり実現の可能性は高いのではないかと考えています。閉鎖生態系と言いますが、完全に植物工場ですね、その宇宙バージョンを考えればいいと思っています。それが生命維持システムのための物質循環系の部品として機能するということで、大規模施設としては六ヶ所村の環境科学技術研究所にあります。大々的に稲、大豆を完全閉鎖系で栽培し、かつ物質循環させて、そこで人が1人が2人暮らして、自分たちが作った米

や野菜を食べて、その残ったものを肥料に回したり、ヤギのエサにして、自給自足するというような試みです。

東谷 私は、1世代は問題なく越えられるかもしれませんが、やはり、次の世代では、さらに、その後、何世代も続いた場合、それぞれの生物がどのように適応し、進化していくかというところは大変面白い課題だと思います。

ヒトは1つ1つハードルを越えて宇宙へ

石岡 ありがとうございます。さて、最後に大西先生。

大西 先ほど、「鶏の卵は、生まれてすぐに宇宙に上げたらヒヨコはできなかつたけれども、実は卵の膜に胚が血管を張るところのプロセスで初めに浮力が要る。いわゆる、重力が要る。それを地球上の鳥は、卵を転がして子孫を作ってきた」と。本能だと思いますけれども、地球上の生命というのは、そもそも重力の中で生まれてきた。それを地球とは違う環境に置くことによって、「なぜ、生きてきたか」という、この「なぜ」を、宇宙は問い直したと思います。

それは、様々な研究者が「ここまではできる」「これはできる」「できないことは、何か...」という、植物の持っている能力や、動物の生命活動の「なぜ」を宇宙研究が提起をしていこう。それを小学生から高校生、人間みんなが考える「なぜ」「どうしてだろう」ということに、宇宙実験は今後とも答えていこうと思います。

また、健康という面からみると、宇宙では先ほど言ったように骨量が減少する。筋力が低下する。免疫機能が低下する。体液、いわゆる人類は頭が上にありますから、宇宙に上がると、どなたも顔が丸くなります。それを“ムーンフェース”と呼びます。循環器系の問題もあります。

もちろん、今日は話が出なかったですけども、上下認識、いわゆる宇宙酔いという問題が

あって、人間は必ず上と下というものを認識し生活しているので、宇宙酔いという現象が起こるわけです。そのような体の変化というのが地球上でいかに上手に人間の健康が保たれているかというの分かります。

また、宇宙飛行士が目をつぶっても光が見えるライトフラッシュという経験をしてきています。これは、まさに宇宙放射線が船内にまで入ってきていることを体験していることになります。現在、200人以上の宇宙飛行士がいるわけですけれども、特に長期滞在のクルーにはリンパ球の中に染色体異常を持って地上に降りてきた方もいます。

大体の計算ですと、1日の放射線は1 mSvで、地上で大体1年間で被ばくする量を、宇宙では1日で被ばくすることになってしまう。そのような放射線を、現在の計画では往復約1年から1年半かかるであろう火星を考えると、1.5 Svから2 Svになります。一気に0.5 Sv浴びたら白血球数は下がるのですけれども、それを1年半から2年かかって宇宙の重粒子線を浴びてくることは、果たしてどの程度防護の必要があるかという研究も、火星の旅に飛び立つ前にしておかなければならない研究だと思えます。まだまだ、たくさん研究テーマがあります。

最後に、夢として宇宙ステーションの曝露部、船外にぜひとも動物園と植物園を作りたい。

い。当然、そこにはゾウ、キリンは連れて行くわけにはいきませんので、もっと小さなスケールの動物園、植物園です。線虫も入ったり、高橋先生の植物も入ったり、いろいろな生物やその中に昆虫がいたり、そのような動物園、植物園を宇宙に作って、どの生物が生き延びて、いくかをぜひとも調べたいというのが私の夢です。

東谷 まるで、ノアの箱舟ですね。

大西 少なくとも、鳥類だけは連れては行けないことが分かった。

石岡 もうこれからは間違いなく普通の人が宇宙へ行く時代です。そういうなかであって、この「宇宙実験がどうあるべきか」。

テラフォーミング(惑星地球化計画)だとか、惑星に農場を作ろうという話も含めて、人が宇宙へ行くときに、食糧の問題もあるでしょうし、どんな場合にも宇宙放射線は浴びずにはすみませんので、それに対する安全性はどうか。人が宇宙へ行くときの問題を解決していく1つの手段はやはり宇宙実験でしょうし、宇宙実験だからこそできる問題もあると思うのです。その辺は、皆さん、賛同していただけたらと思うのですが。

短い時間でしたけれども、先生方、お忙しい中お付き合いいただきまして、本当に今日はありがとうございました。

... ..

(終)