

<講演録>
月でもお米が作れるの!?
~グリーンコロニー・プロジェクト~
Is it possible to grow rice on the moon!?
-Green Colony Project-

東谷篤志*

Atsushi Higashitani

I. はじめに

私は関西で育ち 62 年の寅年生まれである。ガンダムがテレビに登場した時は、17 歳、受験前、その後、大学生活では 4畳半一間のテレビがない下宿だったので、残念ながら当時のテレビ放送を直に見ることはなく育った。このガンダムオープンインベーションに参画して、メンバーの伊藤篤史先生、金子俊郎先生ほかガンダムの先輩方から徹底的に教育を受け今に至っている。東北大学に赴任後、早 29 年となり趣味は自転車とカニを切って料理を振舞うことである。

これまでに様々な生物を材料に用いた分子生物学的な研究、教育を行っているが、そのなかでガンダムの世界観にも通じる研究としては、モデル生物のひとつ線虫を国際宇宙ステーションに運び宇宙で育てる実験を実施してきた。きっかけは 2004 年の国際共同線虫実験で、そこから足掛け 20 年、計 7 回ほど宇宙実験を行い、2009 年にはスペースシャトルのアトランティス号に線虫の赤ちゃんを乗せて、宇宙の無重力下でどのように成長するかという実験を PI として行った。宇宙での線虫の培養は、JAXA および本グリーンコロニー・プロジェクトの三菱重工が開発した「きぼう」日本実験棟に設置された「小さなコロニー」細胞培養装置を用いて、線虫の赤ちゃんが 4 日後大人になった映像を、ジェフリー宇宙飛行士が筑波宇宙センターに送信してくれた。この「小さなコロニー」装置には、遠心機により地球と同じ 1G 環境を人工的につくることもできる。その結果、宇宙での人工 1G 環境で育った線虫は、地上 1G 育ちと同じく元気に泳ぐ大人に成長していたが、無重力環境で育った大人は活発に泳ぐことができず、首振り角度も小さく、ビートも弱々しく、その後、「きぼう」実験棟内で凍結し、スペースシャトルで地上に回収後、線虫の各種成分を分析したところ、筋肉やミトコンドリアの働きが弱まっていることもわかった¹⁾。この現象は、長期宇宙で活動する宇宙飛行士の症状にも通じる結果で、大人で 1 mm 程度の小さな生き物の線虫がわずか 4 日間の宇宙での育ちで、このような劇的な変化を生じるというのは非常に興味深いものであった。また、友人でもある筑波大学を中心とした研究チームでは、同じく「小さなコロニー」装置を使って、宇宙でマウスを育てている。自動的に食事や水を供給するだけでなく、排泄物も吸い出すなどの機能が開発され、宇宙の無重力環境でもマウスが清潔かつ健康に過ごし、ストレスを与えない工夫がなされている。このマウスのおよそ 1 カ月

* 東北大学大学院生命科学研究科

におよぶ宇宙実験においても、人工的な 1G 環境と比較して無重力環境で過ごしたマウスの骨や筋肉は、痩せ細ることが報告されている²⁾。これら線虫やマウスなどのモデル生物を用いた宇宙実験は、宇宙飛行士が無重力環境で健康を維持し活動するためにも重要であるとともに、現在の高齢社会における課題の一つである不動や低運動に起因する骨や筋肉の萎縮、廃用性症候群にも関連するもので、これらの要因の追求や対策などへの貢献を目指している。

II. 月でお米がつくれるの？

本プロジェクトがはじまって以来、ガンダムをビデオなどで視聴し猛勉強しているが、最初に放送がはじまった 1979 年から、宇宙、コロニーや火星などでの農業シーンが映像として出てくる。一方で、月面での農業シーンというのは登場していない。何故か？そこで、月でお米を作るための課題は何か、ということをガンダムオープンイノベーションの我々の研究チーム「グリーンコロニー・プロジェクト」と「ビーム・サーベル～プラズマ農業プロジェクト」で共同して取組むこととした。

月面で農業を行うには空気や水の供給、光や温度管理は当然不可欠であるが、人類が生活できる月面基地があることを前提にそれらは整備された上で、その他の大きな 2 つの課題、「月面の土」と「低重力の影響」について、我々は取組んでいる。月面は、レゴリスと呼ばれる細かい砂や碎けた岩石に覆われている。月を構成する主要な成分は、地球の海の砂とほぼ一緒で、石英とも呼ばれる二酸化ケイ素、酸化アルミニウム、酸化鉄、酸化マグネシウム、酸化カルシウム、酸化ナトリウム、酸化カリウム、無水リン酸塩鉱物などで構成されている。植物を育てるためには窒素・リン・カリウムという三大栄養素が必須だが、ここでいう窒素は気体としての窒素ガスではなく、アンモニア態や硝酸態という窒素肥料となる成分で、月のレゴリスにはそれらが全く存在しない。ではどうするの？ということで、我々のグループでは、プラズマ技術を使って空気中に含まれる窒素と酸素の気体から、最終的に硝酸イオンを作れば良いと考え、空気と電気だけで独自に開発したプラズマ装置で五酸化二窒素 (N_2O_5) ガスを効率良くかつ選択的に合成し³⁾、このガスは水に 100% 溶けて硝酸 (HNO_3) になるので植物の窒素肥料になることを証明してきた⁴⁾。

次に、我々は、模擬月レゴリスを用いたイネ栽培の実験を行った。模擬月レゴリスの上で純水のみで発芽させたイネと、プラズマ生成 N_2O_5 を供給した水で発芽させたイネのその後の成長を観察した。前者は、発芽するものの第 3 葉が展開して、その後、完全に成長が止まってしまう。これは、種が蓄えている最初の栄養素だけで成長しており、それ以上大きくなるためには、みずから光合成をしながら、窒素肥料を基にアミノ酸や核酸塩基を合成し、タンパク質や DNA を作りながら、細胞を増やし大きく成長しなければならないからである。後者の N_2O_5 を供給した水では、レゴリスの上でも成長し続け少ないながらも穂が出ることも確認できた（図 1）。

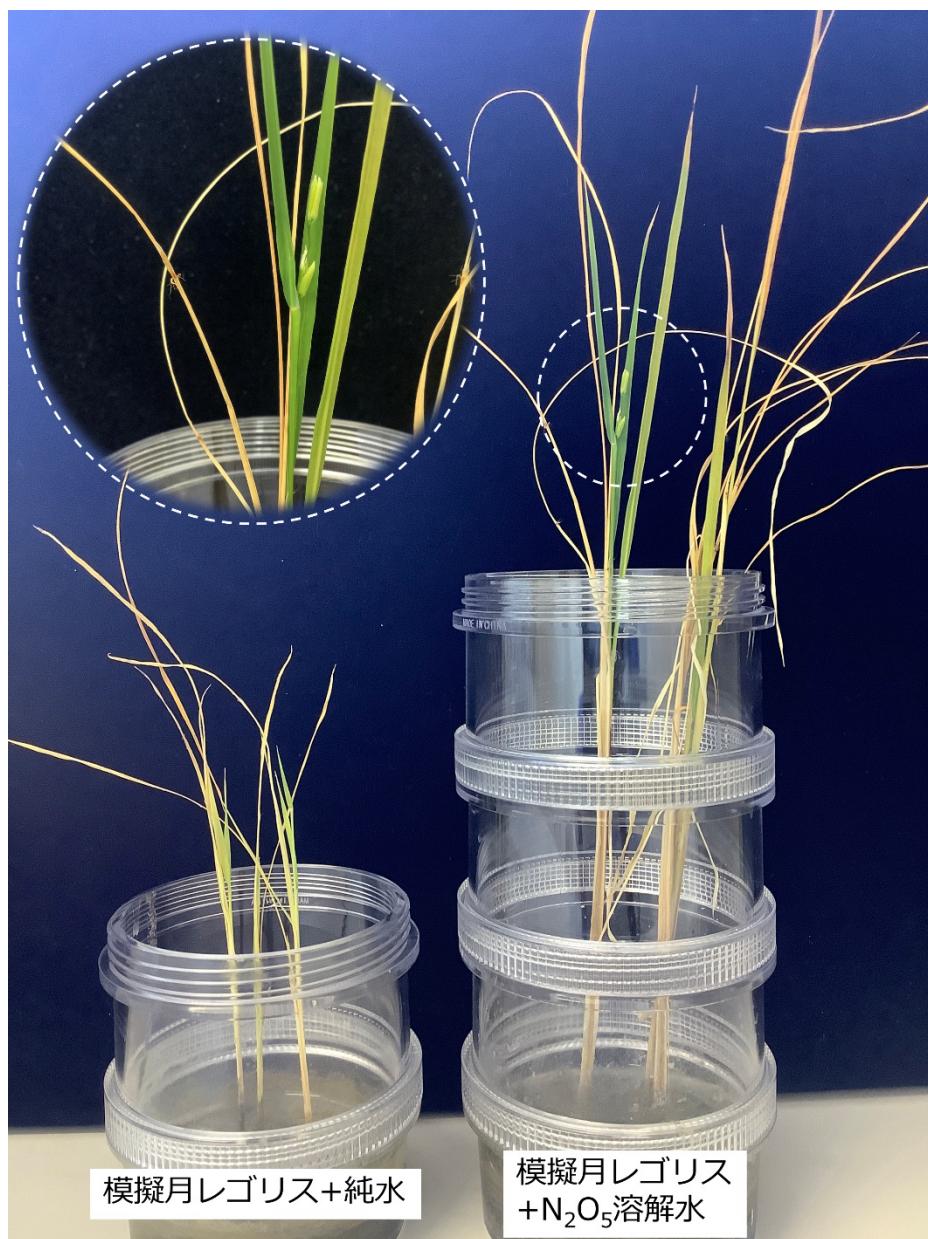


図1：イネを模擬月レゴリスとプラズマ生成 N_2O_5 溶解水で育てた実験結果（文献5改編）⁵⁾

次に、重力の問題。国際宇宙ステーションの中では、金井宇宙飛行士らが2017年から2018年、アメリカの装置を使って小麦の栽培に成功している。また、2020年にはチャンセラー宇宙飛行士がレタスを育て、それを油井宇宙飛行士らがその場で食べたりもしている。ではガンダムにも登場したトマトはというと少し地上での栽培とは異なる様子が観察される。地上でミニトマトを栽培したら、ヘタは上で赤い実は下に奇麗な房をつくるって育つ。一方、若田宇宙飛行士らが、2023年に国際宇宙ステーションの中で育てたミニトマトの写真をみると赤く実ったミニトマトは、上を向いたり、横を向いたりバラバラで、また、土の代わりにスポンジを用いて栽培しているが、根っこが気中にも多数飛び出していた。こうしたことを踏まえると、無重力のもとで植物

は育つことはできても、種類によっては収量が低下したり、果実が出来ても甘みが少なかつたりするかもしれない。

皆さんが良く知っているように、植物は地球の重力を感じて地上部の茎は上に、根は重力に従い下に成長する。したがって、無重力のもとでは茎や根の伸びる方向がばらつき、葉の向きランダムに、さらに茎が細長く伸びる「徒長」のような現象や細胞壁が薄く軟弱になりやすいなど様々な報告があり、これらが間接的に光合成能力を低下させることも知られている。では、月面の低重力 $1/6G$ の世界では植物はどのように育つのかというのが、次なる大きな課題である。と同じ 6 分の 1 の重力の世界ではどうなるかということを実験した。本プロジェクトの三菱重工は、「様々な宇宙重力環境を再現する小さなコロニー」3 次元 (3D) クリノスタット装置を開発し、均一な 3D 回転では無重力を模した環境、さらに 3D 回転を制御することで月面を想定した $1/6G$ や火星を想定した $1/3G$ の模擬低重力環境の世界をつくることに成功している。そこで、シロイヌナズナを育ててみると、通常の $1G$ では茎や葉は上に伸びて、根っこはまっすぐ下に伸びているものが、無重力環境になると、茎や葉が下に向かったり、根っこが上に向かったりとランダムに育った。そして 6 分の $1G$ だと、根っこは正しく下に伸びているが、 $1G$ ほどはまっすぐ下ではなく、茎や葉も横に曲がったりしていた。

将来的な「月でもお米がつくれるの?」の素朴な問い合わせに応えるべく、はじめの一歩となるここで紹介した実験は、東北大学の異なる部局、工学研究科の金子先生、佐々木先生、鈴木大生君、金属材料研究所の笠田先生、さらに、自然科学研究機構核融合科学研究所の伊藤先生、三菱重工の本馬さん、宮地さん、高村さんら、はじめ多くの方々と、このガンダムオープンイノベーションを通して素晴らしいコラボレーションができた成果である。

現在、国際宇宙ステーションでの宇宙食はレトルトが中心だが、ガンダムの宇宙世紀に描かれたように宇宙（そら）で農業が行われ、豊かな食が自給自足に提供できるようになるまで、まだまだ多くの課題を解決しなければならない。そのためにも、月での米作りを実現させるためのチャレンジを我々はこれからも続けていきたい。本読者の皆様にも興味関心をもっていただき引き続き応援していただくとともに、次世代の研究者としてこれらの研究を繋げられれば幸いである。最後に、株式会社バンダイナムコ研究所はじめ関係者の皆々様にもこの場を借りて深くお礼申し上げる。

文献

1. Higashibata A, Hashizume T, Nemoto K, Higashitani N, Etheridge T, Mori C, Harada S, Sugimoto T, Szewczyk NJ, Baba SA, Mogami Y, Fukui K, Higashitani A. Microgravity elicits reproducible alterations in cytoskeletal and metabolic gene and protein expression in space-flown *Caenorhabditis elegans*. *NPJ Microgravity*. 2016 Jan 21;2:15022.
2. Shiba D, Mizuno H, Yumoto A, Shimomura M, Kobayashi H, Morita H, Shimbo M, Hamada M, Kudo T, Shinohara M, Asahara H, Shirakawa M, Takahashi S. Development of new experimental platform 'MARS'-Multiple Artificial-gravity Research System-to elucidate the impacts of micro/partial gravity

- on mice. *Sci Rep.* 2017 Sep 7;7(1):10837.
3. Sasaki S, Takashima K, Kaneko T. Portable plasma device for electric N₂O₅ production from air. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2021;60:798–801.
 4. Takeshi S, Takashima K, Sasaki S, Higashitani A, Kaneko T. Plasma nitrogen fixation for plant cultivation with air-derived dinitrogen pentoxide. *Plasma Processes Polymers.* 2024 21: e2400096 <https://doi.org/10.1002/ppap.202400096>
 5. Kaneko T, Sasaki S, Suzuki D, Ohkuma H, Higashitani A. Plasma nitrogen fixation for future lunar agriculture. 2026 in press.

