

宇宙農業構想の展開

山下 雅道、秋山豊寛、新井真由美、石井 忠司、石川 洋二、稲富 裕光、大島 泰郎、大西 充、大森 克徳、大森 正之、鏡味 裕、片山 直美、金澤 晋二郎、刈屋 達也、河崎 行繁、木口 憲爾、岸本 直子、北宅 善昭、後藤 英司、齋藤 高弘、嶋宮 民安、清水 強、白石 篤志、高沖 宗夫、高橋 秀幸、竹内 俊郎、武田 弘、田中 茂雄、谷 晃、田村 憲司、都木 恭一郎、富田(横谷)香織、中島 厚、長友 信人、中野 完、中村 輝子、中村 祐二、中山 伸、新田 慶治、能登谷 正浩、橋本 博文、馬場 啓一、平藤 雅之、広崎 朋史、藤井 義晴、藤田 修、水谷 広、三橋 淳、三原 恵二郎、宮川 照男、向井 千秋、森 滋夫、矢沢 勇樹、山崎 直子、横田 博樹、渡邊 博之、和田 秀徳、そのほか宇宙農業サロン

Development of the Space Agriculture Concept

Masamichi Yamashita and Space Agriculture Saloon

E-Mail: yamashita@surc.isas.jaxa.jp

Abstract: Scope of biological science in space is widely discussed with the long ranged planning of space science. Three sub-discipline defined are; astrobiology to explore the origin of life in solar system, planetary biology to understand evolution and adaptation of living organisms against planetary environment of Earth, and biological/ ecological engineering to extend human presence in space. Space agriculture relates to all three supporting astrobiology exploration on Mars, based on basic knowledge of planetary biology. The concept of space agriculture has been developed with model space menu based on nutritional requirements and productivity at limited resource of farming area and other aspects. Combination of rice, sweet potato, soybean, green-yellow vegetable, silkworm pupa, loach fish, and sodium salt was selected. Co-culture of rice, azolla and loach is a candidate of space farming. Generation of agricultural soil was considered of Martian regolith mixed with compost of inedible biomass and human metabolic waste. Several concepts were compared for the recycle loop of sodium and potassium. Marine macro-algae, ulva, and halophyte species, iceplant are studied for this purpose. Fundamental characteristics of these two species are examined.

Key words; Space Agriculture

宇宙における生物科学と宇宙農業

JAXA の次期中長期計画において宇宙科学をどのように進めるかが議論されている。宇宙科学の基本的な目的は、宇宙や太陽系の起源と進化を解明し、いかに地球が生命の宿る惑星になったかを明らかにし、宇宙という極限環境で自然界の基本法則をさぐり、人類の根源の課題である宇宙の起源、物質、空間、生命の起源をさぐることにしている。

宇宙における生物科学は、地球圏外での研究を通して、地球環境を相対化する視点を持ち、普遍的な生命の発生と進化の原理を解明する。具体的には、太陽系環境と生命の起源をさぐる **アストロバイオロジー**、地球惑星環境と地球生命の進化・適応を生命の諸階層にわたり明らかにする **惑星生物学**、宇宙空間に進出することを可能にする **生物・生態系工学** の3つの分野で構成される。

宇宙科学のトップサイエンスセンターであることが要請されているのだが、アストロバイオロジーとふかく関連する極限生物学などの分野で日本はぬきんでた研究実績があり、生命の起源にいたる宇

宙での化学進化や系外生命探査について特徴あるとりくみを進めることができる。惑星生物学では分子的機構や遺伝子にもとづく宇宙実験など、特に植物学などで世界でトップレベルの科学を擁しており、生活環を通しての重力影響と重力環境への生物の適応・進化や、重力を感受し細胞・生理機能を調節したり生物の形態を制御する仕組み、また抗重力反応の解明などが期待される。生物・生態系工学では、閉鎖生態系による生命維持の実証的な研究のすぐれた基盤が日本にあるうえに、日本の歴史的・文化的背景にねざした宇宙農業の提案により、この分野を主導することができる。

宇宙農業構想の基本概念とその発展

宇宙農業は、火星におけるアストロバイオロジー探査を目的として長期間多人数のミッションを実現するエンジニアリングである。宇宙農業はアストロバイオロジー探査をささえるばかりでなく、地球圏外での農業をすすめるには惑星生物学の基礎的な知識の蓄積を要する。このように、宇宙農業は宇

宙での生物科学の全分野にふかくかかわる。本文では、宇宙農業サロンで検討している宇宙農業の基本概念についていくつかの項目を説明し、研究の発展構想を紹介する。

宇宙農業における食品構成と作物植物の候補

食品の構成を設計するさいに考慮すべきは、栄養学的な諸要求を（過不足なく）満たすのが第一の要素である。宇宙農業にもとめられる要求は、限られた資源の範囲でその食品が生産できること、またその生産・供給において確実であることをあげることができる。限られた資源とは、栽培面積・容積や太陽光強度、食品加工も含めた作業時間などである。作物品種を選定するには、単位面積当たりの（多毛作をおこなうとし、一回の耕作期間も考慮した）収量をもとに、可食部に含有されるエネルギーやタンパクなどを得るのに必要な面積を作物品種で比較する。作物品種の生殖様式が風媒か虫媒か、あるいは栄養生殖かといったことも、栽培の難易という点で評価の際に考慮する。

エネルギー含量を指標とした所要栽培面積をくらべると、サツマイモがもっともすぐれている。穀類についてイネ、コムギ、ソバ、キヌアをくらべると、近代農業の発展において収量がいちじるしく増大したイネがぬきんでている。タンパク含量を指標にして比較するとダイズがえらばれる。ただし虫媒であることに注意を要する。以上の観点からイネ、ダイズ、サツマイモをえらび、鉄やビタミンの要求などから緑黄色野菜（コマツナで代表）を加える。葉や茎も食用できるサツマイモの品種が開発されており、緑黄色野菜としての栄養価がいかにあるかを評価することにしていく。

これら4つの植物性食品の組合せでは、ビタミンD、B₁₂、コレステロール、塩分が不足する。このため、まず昆虫を食材に加えることとした。クワを育て、その葉をカイコにあたえてサナギを食用する。樹木を宇宙農業にくわえることにより、余剰の酸素と木材をえる。

カイコのサナギは動物性食品ではあるものの、脂質の構成やアミノ酸の構成という点から、十分なものではない。そこでドジョウをくわえることとした。ドジョウは養殖魚として確立されており、また飼育環境が劣悪となっても消化管呼吸したりして耐性が高い。ドジョウを加えて構成した献立は栄養価も十分である。

イネを育てる水田の表面に、チッ素固定能を有する藍藻を共生させる水棲のシダであるアカウキクサを生育させる。水中ではカイコの幼虫の糞やアカ

ウキクサなどを餌にしてドジョウを養殖する。イネ、アカウキクサ、魚（ティラピア、コイ、ソウギョ）あるいは水禽（アイガモなど）の3つを組み合わせる農法は、国際イネ研究所などにより提唱されてきた。

アカウキクサは直接に人間の食用にもできるが、ドジョウはカイコの糞や水中の微細藻類などを餌として成長し、より高品位の食材へと変換する。微細藻類や光合成する原生動物は増殖速度が格段にはやいため、二酸化炭素の酸素への変換機能に大きな期待がよせられる。ただし、直接これらを食用するには細胞壁の処理が必要であったり、あるいは調理方法がかぎられる。ドジョウや微細藻類を食する貝などは食品としてすぐれ、また太陽光エネルギーから食用バイオマスへの変換効率も高い。

アカウキクサ、ドジョウに自然の池の底泥の微生物生態系をくわえると、太陽光を照射のもと蒸発する水を補水するのみで、長期間水換えなしに安定した生態系を維持できることを実証している。

宇宙における土壌の創生とその評価

宇宙農業構想では、火星でえられる資源を有効に利用しようとしている。火星のレゴリスにふくまれる生元素や大気中の微量の窒素などを生物学的な要素によって作物植物に利用可能な資源として活用する。土壌中の生物の果たす役割や、作物植物との相互作用など、土壌のなかの生態系はよく理解されてきている。促進的効果ばかりではなく、土壌に起因する作物植物への病害などについても制御する手法が確立している。

もちろん宇宙農業にもとめられるのは、確実に生命維持機能を実現することであり、たとえば100%の物質閉鎖循環を目的とはしない。肥料を外部からもちこみ、土壌によらない水耕栽培といった方式の方が確実であり、また投下する資源の量がすくないのであれば、それを選択する。とりわけ、少人数ではじめられる火星居住の初期には、水耕方式の農業を適用する。非可食のバイオマスや排泄物から高温好気堆肥菌システムにより堆肥をつくり、火星レゴリスに有機質を混合して農業土壌を創生していく宇宙農業の展開シナリオを想定している。

火星の表面をおおうレゴリスがそもそもどのような鉱物学的な性質をもつのかについて、これまでの探査結果をまとめて整理する。さらに今後どのような情報を得なくてはいけないのかを明らかにして、火星探査計画に宇宙農業からの要求を組み入れていく。

宇宙農業の研究用に作成してきた火星レゴリス

模擬物質は、元素組成を火星表面の代表的な組成にちかくなるようにしている。しかし、粒度や鉱物的な特質については、今後検討する。細断した非可食バイオマスや堆肥化したバイオマスを模擬レゴリスにくわえて、植物を栽培する試験をしている。根粒細菌や菌根菌などの活性や宿主植物との相互作用、堆肥中の成長促進作用の検定とそれに適合する手法などについて明らかにしていく予定である。

高温好気堆肥菌生態系についても、宇宙農業のシステム設計に必要な特性の把握や安全性の確認などを、米国やロシアの研究グループと協力をふくめてすすめている。

宇宙農業における Na-K の循環

食品構成の設計の項でのべたように、人間はナトリウムを要求し、摂食したナトリウムは排泄される。排泄物を堆肥として農業土壌に施肥すると、一般の作物植物の栽培を阻害する塩集積がおこる。高濃度のナトリウムは植物にとって毒性をもつ。これにひきかえて、ナトリウムとおなじアルカリ金属であるカリウムは細胞内に選択的にとりこまれるし、肥料の三大要素とされるように、土壌中のカリウム濃度は往々にして植物の生育を制限する。

地球上のナトリウムとカリウムの循環と、それぞれのコンパートメントにおける濃度比は、土壌中や海底の粘土鉱物による選択的な吸着や溶脱、細胞の選択的なイオンの取り込みや排出などにより維持されている。宇宙では、人間を経由する物質の循環が生態系のなかの物質流を支配することが、このナトリウム、カリウムの循環においても地球上の自然の循環にくらべて苛烈な条件をあたえる。

宇宙農業におけるナトリウム、カリウムの循環に対するアプローチはいくつかある。ひとつは物理化学的な原理によりナトリウムとカリウムを分離するものである。代表的なものに溶解度の温度依存性の違いを利用して、溶解・析出において温度を上下させて分離する方式がある。このような手法の問題の一つは、ナトリウム・カリウムの分離過程のなかで難溶性の化合物として循環ループから脱落してしまう成分があることである。この問題は、次に述べる生物学的な手法では回避できると期待される。

生物学的な手法には、カリウムを選択的に収穫する生物をもちいそれを堆肥化すると、ナトリウムが高濃度であっても生育する栽培植物をもちいるふたつがあげられる。

前者の手法の妥当性を検討するために、アオサの特性を調べている。アオサは近年富栄養化した沿岸において繁茂する傾向にある。干潟や河口部の浅い

水域で生育し、広い総塩濃度への耐性がある。海藻類の藻体内と海水に含まれる元素の濃度比をみると、おおくの元素は藻体内に濃縮されているのがわかる。少ない例外のひとつはナトリウムである。アオサの培養液のイオン組成について、ナトリウムとカリウムの比を海水での比から大きくかえて、相対的にカリウムの濃度を高めた実験をさまざまな総塩濃度についておこなった。その結果、総塩濃度、ナトリウム・カリウムの濃度比を大きくかえてもアオサ藻体内の濃度や濃度比はおよそ一定にたもたれること、カリウム濃度について生育を制限する閾値が存在することがわかった。アオサ藻体にふくまれるカリウムはナトリウムに比しておおく、人間の排泄物中の比よりもカリウムはおおい。したがって、堆肥浸出成分をいれた擬似海水中でアオサを栽培すると、擬似海水中のナトリウム濃度はたかまるので、それから食塩を作成すればよい、アオサはそのまま食用するか、あるいは堆肥として作物植物を栽培する。

アイスプラントは耐塩性の植物であり、海水ほどの高塩濃度でも生育する。葉や茎の表面に球状の透明な液胞をつけるブラダ細胞のなかで選択的にナトリウムを液胞内に排出する。アイスプラントの植物体に含まれるナトリウム塩は乾量の 30% にもおよぶ。一つの植物体の大きさもおおきい。これまでにあげられてきた候補植物種のなかではもっともすぐれている。栽培液のイオン濃度比とアイスプラント植物体内の比の関係など、基本的な特性について調べている。

ここに述べた以外にも、宇宙農業に関連する事項の検討を、アメリカ、ロシア、中国、韓国の研究者とも連絡をとりながらすすめている。宇宙農業構想を火星において実現するのを今世紀中と想定し、着実な研究と開発の計画をたてようとしている。

宇宙農業サロン：

http://surc.isas.jaxa.jp/space_agriculture

メンバー：青木晶世、秋山豊寛、新井真由美、安藤達彦、石井忠司、石川洋二、泉龍太郎、伊藤雅則、稲富裕光、大塩寛寛、大島泰郎、大島博、太田誠一、大西充、大森克徳、大森正之、岡本美貴、尾上典之、鏡味裕、片山新太、片山直美、加藤拓、金澤晋二郎、刈屋達也、河崎行繁、木口憲爾、岸田芳朗、岸本直子、北松円香、北宅善昭、小池惇平、上妻馨梨、小島洋志、後藤英司、齋藤宏弘、齋藤孝夫、嶋宮民安、清水和哉、清水強、

下田敏史、白石篤志、鈴木洋平、鈴木智典、高沖宗夫、高橋秀幸、竹内恵、竹内俊郎、武田弘、田中茂雄、谷 晃、田村憲司、土肥哲哉、都木恭一郎、富田（横谷）香織、中沢武、中島厚、長友信人、中野完、中村輝子、中村祐二、中山伸、新田慶治、野瀬昭博、能登谷正浩、橋本博文、馬場啓一、平藤雅之、広崎朋史、藤井義晴、藤田修、船本林太郎、古野隆雄、丸茂克美、水谷広、御手洗玄洋、三橋淳、三原恵二郎、宮川照男、向井千秋、森滋夫、矢沢勇樹、矢野幸子、山崎直子、山下雅道、山本聡子、横田博樹、和田秀徳、渡辺巖、渡邊博之、Woong-Young Soh、Oscar Arenales、Mark Nelson、Bill Dempster、Abigail Alling、Liu Chung-Chu、Robert Kok、KyoungShik Han、Pilson Choi、DuckYee Cho、GinChang Soh、Hyuncheul Soh、Charles Van Hove、楊玉楠、劉紅、権春善、David M Porterfield、Vladimir Sychev

2006 年度の主な発表

山下雅道；火星での暮らし -地球圏外の極限に生きる、*科学* (岩波) 8月号、800-805 (2006)

Masamichi Yamashita,, Yoji Ishikawa, Yoshiaki Kitaya, Eiji Goto, Mayumi Arai, Hirofumi Hashimoto, Kaori Tomita-Yokotani, Masayuki Hirafuji, Katsunori Omori, Atsushi Shiraishi, Akira Tani, Kyoichiro Toki, Hiroki Yokota, Osamu Fujita; An Overview of Challenges in Modeling Heat and Mass Transfe for Living on Mars, *Ann. N.Y. Acad. Science*, **1077**, 232-243 (2006)

Masamichi Yamashita, Naomi Katayama, Shigeo Mori; Living in Greenhouse Built on Mars, *Gravitational Physiology*, **13**(1), P-155-156 (2006)

Hashimoto, H., Koike, J., Yamashita, M., Oshima, T., Space Agriculture Saloon; Proposal for Extension of Planetary Protection Policy to Avoid Biological Contamination of Mars with Manned Exploration Supported by Space Agriculture, *Viva Origino*, **34**, 86-89 (2006)

Masamichi Yamashita1, Yoji Ishikawa, Makoto Nagatomo, Tairo Oshima, Hidenori Wada, and Space Agriculture Task Force; Space Agriculture for Manned Space Exploration on Mars, *J Space Tech Sci*, **21-2**, 1-10 (2005)

Naomi Katayama, Masamichi Yamashita, Hidenori Wada, Jun Mitsuhashi, Space Agriculture Task Force; Entomophagy as Part of a Space Diet for Habitation on Mars, *J Space Tech Sci*, **21-2**, 27-38 (2005)

片山直美、山下雅道、和田秀徳、三橋淳、宇宙農業サロン；火星居住のための昆虫を考慮した宇宙食の構想、*Biol Sci Space*, **20**, 48-56 (2006)

山下雅道；地下にもぐる太陽系内の生命、*科学* (岩波) 2月号、143-146 (2007)

山下雅道、片山直美；Habitation2006 どうかかわれた米国新宇宙政策下の生命維持工学の展望および Laboratory Biosphere での研究展開、

Eco-Engineering. **18**, 89-92 (2006)

Shin-ichiro Kanazawa, Yoji Ishikawa, Kaori Tomita-Yokotani, Hirofumi Hashimoto, Yoshiaki Kitaya, Masamichi Yamashita, Makoto Nagatomo, Tairo Oshima, Hidenori Wada and Space Agriculture Task Force; Space agriculture for habitation on Mars using thermophilic aerobic composting bacteria, insects, woods and other biological members, *COSPAR Beijing*, July, 2006

Tairo Oshima, Shin-ichiro Kanazawa, T. Moriya, Yoji Ishikawa, Hirofumi Hashimoto, Masamichi Yamashita, and Space Agriculture Task Force; Hyper-thermophilic aerobic bacterial ecology for space agriculture, *COSPAR Beijing*, July, 2006

Naomi Katayama, Yoji Ishikawa, Muneo Takaoki, Masamichi Yamashita, Shin Nakayama, Kenji Kiguchi, Robert Kok, Hidenori Wada, Jun Mitsuhashi and Space Agriculture Task Force; Entomophagy and Space Agriculture, *COSPAR Beijing*, July, 2006

山下雅道；火星での人類生存に向けた宇宙農場構想、地球惑星科学連合大会 (2006)

山下雅道、富田香織、石川洋二、北宅善昭、宇宙農業サロン；宇宙農業構想と生態工学、生態工学会大会 (2006)

山下雅道；食料生産と宇宙農業 - 宇宙長期構想・生命維持工学における食料系の選択と計画、生態工学会大会 (2006)

片山直美、山下雅道；給食から提案する昆虫食 -地球や宇宙などの閉鎖型環境における循環永続型社会構築のために、植物工場学会大会 (2006)

山下雅道・宇宙農業サロン；ポスト国際宇宙ステーションを牽引する有人宇宙探査とそれを支える宇宙農業構想、宇宙科学技術連合講演会 (2006)

山下雅道、野瀬昭博、北宅善昭、富田-横谷香織、橋本博文、能登谷正浩、和田秀徳、宇宙農業サロン；宇宙農業におけるナトリウム・カリウム問題、日本宇宙生物科学会第 20 回大会 (2006)

太田誠一、平石香苗、青木俊夫、田村憲司、橋本博文、山下雅道、富田-横谷香織、宇宙農業サロン；火星模擬レゴリスを用いたミヤコグサの栽培による宇宙農業の可能性、日本宇宙生物科学会第 20 回大会 (2006)

橋本博文、中山伸、山下雅道、宇宙農業サロン；低圧環境におけるカイコの飼育実験、日本宇宙生物科学会第 20 回大会 (2006)

片山直美、山下雅道、宇宙農業サロン；給食から提案する宇宙食、日本宇宙生物科学会第 20 回大会 (2006)

Masamichi Yamashita; Eating Insect for Habitation on Mars - A Testbed for Solving Our Global Problems, *International Space Medicine Symposium in Sapporo 2007*, Sapporo (2007)