

宇宙農業研究の展開

山下雅道、橋本博文、富田-横谷香織、片山直美、野瀬昭博、武田弘、三橋惇、
佐々木正己、和田秀徳、宇宙農業サロン

Scope of Space Agriculture Research

Masamichi Yamashita, Hirofumi Hashimoto, Kaori Tomita-Yokotani, Naomi Katayama,
Akihiro Nose, Hiroshi Takeda, Jun Mitsuhashi, Masami Sasaki, Hidenori Wada,
Space Agriculture Saloon

Space agriculture will enable to support life in outer space by biological and ecological system. Japan and east Asia contribute to develop this advanced life support capability with their cultural and historical background. Hyperthermophilic aerobic composting bacterial system provides safe and quick processing of waste and inedible biomass. Its feature as plant fertilizer to complete materials recycle should be carefully examined. Use of domesticated insects is one of unique proposal in our concept. Feasibility of polinator insect for space agriculture is studied with an emphasis on their flight maneuver under hypo-gravity and sub atmospheric pressure designed for our Martian greenhouse farming. Sodium is another issue in materials recycle between human (animal) and plant. Marine algae is proposed to harvest potassium and other nutrient minerals in extract of human waste compost, and concentrate sodium behind. Use of halophyte or genetic introduction of their capability to grow under salinized condition could be substitute in solving this problem. Salt tolerance and sodium uptake of several halophyte species were examined. We aim to establish scope of space agriculture study for future human exploration in the solar system.

火星有人生命探査を実現する宇宙農業

月より遠い天体への有人飛行は、われわれの宇宙活動の大きな挑戦である。火星に降り立つ理由のおおきなものは、生命探査である。太陽系の惑星のなかで生命がはじまる可能性は、地球のほかに火星に限られる。火星の大気中に内部から湧き出ているメタンが低濃度ではあるが存在する。メタンを代謝基質としたりメタンを生成する生物が今も火星の地下に生きていたとの期待もふくらんでいる。生命の理解はVikingを計画した時代のから大きく進歩しており、地球地下深部に生きる生物群の発見などによる新しい生命観をもとに地球圏外での生命探査を計画する。

有人宇宙活動を進めるには、輸送系の安全・存命性などに無人の宇宙システムとは質を異にする要求がエンジニアリングに対してある。生命維持システムは有人ならではの要求である。月までは、国際宇宙ステーションでいま使われているいろいろな生命維持技術を適用できる。食料もふくむ物質の再生循環システムを月では採用すべきではない。ところが、火星をめざすには生命維持システムの構成は異なる。

火星に水、酸素、食料を地球からはこび使い捨てるのか、あるいは再生循環利用して排泄物から食料を再生するかという選択がせまられる。再生循環するのはその装置などの初期投資が必要なので、短い日数の少人数のミッションだと、使い捨てが有利である。水についてみると、水洗トイレや風呂、洗

濯など含めると1人一日あたりおよそ200kgを使っており、切り詰めても30kgは必要である。ヒトは1日におよそ8,000リッターの空気を吸う。酸素だけでも、毎日500g～1kg消費する。大人数で長期間のミッションになると、食料など消費する積算量は大きく、物質の再生循環利用を実現することが有利になる。水の積算消費量の重量のペナルティは大きく、国際宇宙ステーションでも、尿から水を再生している。ただし、食料は地上から運び上げ、排泄物は船外に廃棄している。

月まではこれでよいのだが、火星では生命探査が主たる目的であるから、探査対象を汚染する排泄物は廃棄できない。宇宙農業は、植物を栽培し、人間の排出する二酸化炭素を酸素に変換する。植物の光合成には、水を葉から蒸散させないといけない。植物が食料を作れば酸素は化学当量分作れるし、水も蒸散した水蒸気を凝縮すれば必要量を得ることができる。宇宙農業は、100人規模で20年の期間運用する探査ステーションを火星の上で建設する段階の生命維持・生活環境創成のための提案である。およそ100年後にそのような大規模で長期の火星探査を実行することができるだろう。

宇宙農業は、火星の上で人間の排泄物から肥料をつくり、それにより食料作物を栽培して、酸素や水も二酸化炭素や廃水から再生循環利用する。このような宇宙農業構想の検討は、何を食材とするかということから始まる。宇宙では栽培面積や容積が限られる。多毛作を前提とすると単位耕地面積あたりのバイオマス・エネルギー収量の優れた穀物作物はコ

メである。コムギよりはコメが優れているのだが、現在有人宇宙活動を牽引しているアメリカやロシアではコメを主要な食材とはしていないために、コムギを宇宙で栽培する穀物作物種とするように彼らは構想している。このような背景を踏まえるなら、宇宙農業の提案は宇宙での食文化をふくむ総合的なものとしておこなう必要がある。栄養学的な要求としてタンパクはエネルギーについて大きな項目としてあり、耕地面積が少なくすむダイズを提案している。日本やアジアにはダイズを多様に利用するすぐれた食文化がある。必要なエネルギーを少ない耕地面積で供給するには、サツマイモが優れている。ジャガイモと比較すると、必要栽培面積も少なくすむうえに、サツマイモには甘味もあり食物繊維が豊富で腸内環境を良好に維持することができる。ビタミンの摂取のためには緑黄色野菜が必要である。

しかし、これら植物性の食品材料だけでは栄養学的に不足する。ビタミンではDやB₁₂やタンパクのアミノ酸組成が問題だが、決定的に欠乏するのは、動物性の脂質分子、特にコレステロールである。大きな家畜動物を火星に導入するのは難しい。また人間も食用できるバイオマス有家畜動物にあたえ、そのミルクや肉を利用すると、バイオマスの利用効率はおおよそ1/10に減ってしまう。効率からいえば、食物連鎖のなかでより下位のメンバーのバイオマスを利用するのが望ましい。



これらを考慮して、火星で栽培しようとしているのが、写真に示す農作物である。樹木(クワ)を栽培し、その葉で昆虫(カイコ)を飼育する。幼虫が成育しマユのなかで変態したサナギを食用する。カイコだけでは動物性の栄養要素が不足するので、水田でドジョウを養殖する。魚を食用することで補給できる動物性の食品成分の重要なものは内臓に含まれるので、丸ごと食用されるドジョウが適している。ドジョウの養殖方法は確立されている。また冬期に水を抜いた水田でも地下深くに潜って春をまっ

たり、水中の溶存酸素濃度が低下した時には口吻から空気を吸い込んで肛門から排出するあいだに消化管で気体交換する能力ももつなど、宇宙農業にとってすぐれた性質をドジョウは有している。

これら食材からどのような食品を作るかの一例として、ダイズから加工したオカラ、サツマイモの粉に豆乳を加えて、これをコウジカビによるデンプンの糖化とイーストによるアルコール発酵でふくらませてクッキーとする方法を試している。

宇宙農業への日本・東アジアの貢献

日本あるいは東アジアから提案するその豊かな食文化にとどまらず、さまざまな技術・要素により火星での宇宙農業に対して貢献することができる。いくつかを示してみよう。

堆肥菌による排泄物の肥料への変換：従来の堆肥化プロセスでは、その処理温度は50から60℃である。この温度では、寄生虫の卵は生き残るし、嫌気的な条件の下では病原性細菌の密度も高くなる。高温好気堆肥菌は、80~100℃の堆肥化温度を示す。好気条件で温度が高いことから、処理速度は速い。高温条件に曝露されることで高温好気堆肥菌以外は滅菌され、安心・安全の堆肥づくりができる。台所用の生ごみ処理機でも高温好気堆肥菌は使われており、安全で練れた技術として確立されている。しかし、高温好気堆肥菌により生成した堆肥の肥効を植物の芽生えにより調べると、堆肥の追熟処理が必要であることが判明したり、チッ素成分が硝酸態には変換されない可能性など検討すべき点がわかってきた。宇宙放射線への曝露が高温好気堆肥菌生態系に及ぼす影響も重要な研究課題のひとつである。

樹木の栽培：植物の光合成により産生したバイオマス消費すると、いったん作られた酸素は二酸化炭素にもどってしまう。木材をそのままにして利用すれば、その分の酸素は残り、余剰の酸素を生産することができる。宇宙での居住空間を快適にするために、内装を木材とする。宇宙農業構想では、樹木としてクワを選んでいる。その葉でカイコをそだて、サナギを食用するほか、マユから衣料を作る。クワの木を木材としてつかうほかに、ビタミンDが豊富に含まれるシイタケやキクラゲといったキノコを栽培すると木質バイオマスを食用に転換もできる。

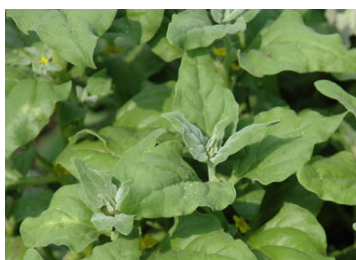
農業昆虫の利用：作物植物のなかには、虫媒による授粉がその生産にとって重要な種もある。花と昆虫は互いに共進化してきた。地上農業では、家畜化したハチをつかい授粉している例がある。低圧低温の火星では、与圧ドームのなかで作物を栽培する。火星表面の重力は地球のそれのおよそ1/3であり、与圧ドーム内の圧力は1/5気圧を想定している。そこ

で、送粉昆虫がこのような環境下で飛行運動できるかを確かめようとしている。高山での飛行や密度を低くしたHe-O₂混合気体のなかでの飛行が調べられている。これらに加えて、飛行による移動運動や花にアプローチした際のホバリングが、異なる重力や気体の密度のもとで可能かどうかを確かめ、揚力発生のおしきみとその調整機構についてあきらかにしたい。このために、航空機による弾道飛行実験により低重力環境での昆虫の飛行行動を記録する計画を進めている。



クロマルハナバチ

海藻や耐塩作物植物の利用：動物は体液の中にNaが多く含まれ、Naを摂取する必要がある。一方で、普通の植物はNaが多いと育たない。物質再生循環システムでは堆肥を肥料としてもちいる過程で、塩を分離して食塩とする必要がある。ひとつの解決策は海藻の利用である。海藻はNaを多く含む海水中でそだち、藻体内にはNaはとりこまず、Kを選択的に吸収する。堆肥の抽出液により海藻を栽培する。収穫した海藻は食用するか、もう一度堆肥化して植物の肥料とする。耐塩性の作物植物や品種改良による食物植物への耐塩性の付加はNa問題解決の第二の方法である。アイスプラントやツルナなどの耐塩性植物の特性を検討している。植物体内に取り込まれるNaとKの量や比を調べ、宇宙農業の物質循環に組み入れることの有効性を考察している。



ツルナ

酒を含む宇宙農業の嗜好品：遠隔に隔離された宇宙船の環境と似ていると注目されている南極越冬隊の基地での飲酒についての考え方は、各国で異なるようである。カビやバクテリアの働きをうまく使って酒を醸造し、ハレの祭りに楽しむのは、文化のひとつの要素である。飲酒・嗜好食を適切にたのしむことで、リスクの増大はまねかずにミッションの成果が増大するなら、宇宙農業におおいに組み入れるべきである。

世界の多様な文化・歴史と宇宙農業

世界各地のそれぞれの多様な文化や歴史は、宇宙農業を進めるのに貴重な貢献をする。コメやカイコは日本の文化に密接に関係し、宇宙農業への日本の誇れる提案である。そして物質の再生循環利用についても、日本にはすぐれた歴史がある。江戸時代には、都市とその近郊の農村の間で物質循環するシステムが確立されていた。都市住民の尿尿を金肥として近郊農民がもとめ、これを施肥し収穫した野菜や穀物を都市住民に販売・供給していた。周年にわたる金肥による農業経営がなされていたという。このような日本や東アジアの歴史は、宇宙農業の開発へのすぐれた貢献を可能にする。

宇宙農業研究には世界各国・地域からメンバーが加わっている。各国・各地域には、それぞれに宇宙農業にとって優れた要素がある。それらの要素を持ち寄り、共通の目的のためにお互いに補い、助け合う関係をつくるのがよい。世界のひとびとが、それぞれの夢を宇宙に託し、宇宙農業を媒介として強固な協力関係を確立することができるならば、宇宙活動は人類文明の発展に寄与する。加えて、地上の食料・農業・環境問題の解決や持続的な発展のために宇宙農業をテストベッドとしてつかうこともできる。

発表論文 (2009年度)

Masamichi Yamashita, Kaori Tomita-Yokotani, Hirofumi Hashimoto, Nanase Sawaki, Masahiro Notoya; Sodium and Potassium Uptake of *Ulva* - Application of Marine Macro-algae for Space Agriculture, *Advances in Space Research*, 43, 1220-1223 (2009)

Mayumi Arai, Kaori Tomita-Yokotani, Seigo Sato, Hirofumi Hashimoto, Masayuki Ohmori and Masamichi Yamashita; Growth of terrestrial cyanobacterium, *Nostoc* sp., on Martian Regolith Simulant and its vacuum tolerance, *Biol Sci Space*, 22, 8-17 (2008)

富田-横谷香織, 新井真由美, 太田誠一, 田村憲司, 青木俊夫, 橋本博文, 山下雅道, 和田秀徳, 宇宙農業サロン; モデル植物ミヤコグサの栽培による宇宙農業の可能性 - 火星模擬レゴリスとミズゴケ・ピートモス, 草炭研究, 8, 38-47 (2009)

Masamichi Yamashita, Hirofumi Hashimoto, Hidenori Wada; On-Site Resources Availability for Space Agriculture on Mars, in "Mars: Prospective Energy and Material Resources", Springer, (2010)

Hidenori Wada, Masamichi Yamashita, Naomi Katayama, Jun Mitsuhashi, Hiroshi Takeda and Hirofumi Hashimoto; Agriculture on Earth and on Mars, in "Space Exploration Research", NOVA Science Publishers (2009)

国際会議など

- N. Katayama, T. Yoshimura, K. Baba, M. Yamashita, Space Agriculture Task Force; Insects for Space Agriculture and Sustainable Foods Web on Earth, RAST2009, (Istanbul, June, 2009)
- N. Katayama, K. Tomita-Yokotani, H. Hashimoto, M. Yamashita, P.C. Njemanze; Cassava for Space Diet - African Contribution to Space Exploration, RAST2009, (Istanbul, June, 2009)
- Kaori Tomita-Yokotani, Serkan Anilir, Naomi Katayama, Hirofumi Hashimoto, Masamichi Yamashita; Space Agriculture for Habitation on Mars and Sustainable Civilization on Earth, RAST2009, (Istanbul, June, 2009)
- Kaori Tomita-Yokotani, Ke'ichi Baba, Yoichi Hasegawa, Hirofumi Hashimoto, Masamichi Yamashita; Cosmo Flower 2008 Mission for Legend and Education - Connection with Plant Science under Space Environment, RAST2009, (Istanbul, June, 2009)
- Hidemi Ueno, Naomi Katayama, Masamichi Yamashita, Akemi Kuwayama, Michiko Umino, Katue Beniya, Keiko Furuhashi, Saeko Tokunaga, Yuuki Kubo, Space Agriculture Task Force Let's eat delicious space foods -Space foods are health foods-, RAST2009, (Istanbul, June, 2009)

国内講演会

- 橋本博文, 富田一横谷香織, 片山直美, 新井真由美, 山下雅道, 宇宙農業サロン; 火星有人探査を目指した宇宙農業の構想、2009生態工学会年次大会 (筑波、6. 2009)
- 片山直美, 山下雅道, 橋本博文, 宇宙農業サロン; 宇宙食利用のための昆虫の組み合わせに関する研究、2009生態工学会年次大会 (筑波、6. 2009)
- 片山直美, 上野秀美, 久保有季, 古橋啓子, 徳永佐枝子, 山下雅道; 韓国宇宙食の日本人による官能試験結果、2009生態工学会年次大会 (筑波、6. 2009)
- 新井真由美, 富田一横谷香織, 佐藤誠吾, 橋本博文, 大森正之, 山下雅道; 火星を想定した宇宙農業におけるラン藻の活用、2009生態工学会年次大会 (筑波、6. 2009)
- 本橋恭兵, 富田一横谷香織, 馬場啓一, 古川純, 佐藤誠吾, 橋本博文, 山下雅道; 宇宙環境における樹木形態形成に関する基礎研究、2009生態工学会年次大会 (筑波、6. 2009)
- 種子を用いた科学研究の可能性、2009生態工学会年次大会 (筑波、6. 2009)
- 山下雅道; 火星に生きる、第3回宇宙旅行シンポジウム (東京、8. 2009)
- Kaori Tomita-Yokotani, Toshio Aoki, Seigo Sato, Maki Asano, Hirofumi Hashimoto, Masamichi Yamashita; Comprehensive analysis of molecules related to flavonoid compound in Lotus japonicus seedlings under the pseudo space condition, 宇宙生物科学学会大会 2009
- Jong-il Choi, Minchul Yoon, Jae-Hun Kim, Beom-Seok Song, Yohan Yoon, Geun Joong Kim, Masamichi Yamashita, Myung-Woo Byun, Ju-Woon Lee; Effect of gamma irradiation on hyperthermal composting bacteria, 宇宙生物科学学会大会 2009
- Masamichi Yamashita and Space Agriculture Task

Force; Space Agriculture on Mars under the Partial Gravity Environment, 宇宙生物科学学会大会 2009

- Naomi Katayama, Masamichi Yamashita, Ju-Woon Lee, Myung-Woo Byun, Jae-Hun Kim, Beom-Suk Song, Jong-il Choi; A taste test of the four Korea space foods -Japanese panelist version-, 宇宙生物科学学会大会 2009
- Naomi Katayama, Masamichi Yamashita, Hirofumi Hashimoto, Space Agriculture Task Force; Importance of the food resources storage for the long-term space stay - the food storage as the clothes and furniture-, 宇宙生物科学学会大会 2009

紹介

- ISASメールマガジン 235号 山下雅道 宇宙に漕ぎ出す葛飾・下肥舟 (24 March, 2009)
- ISASメールマガジン 247号 山下雅道 宇宙農業の心髄 (16 June, 2009)
- ISASメールマガジン 264号 山下雅道 火星で食べるヘルシー・シルキー酒まんじゅうクッキー (13 October, 2009)
- 葛飾郷土と天文博物館 山下雅道 火星にこぎだす葛飾・下肥舟 (4. 2009)
- ISTS JAXA特別企画「進化する宇宙食」山下雅道 宇宙で農業をする時代がやってくる (筑波、7. 2009)
- 2009ナツガク 山下雅道 宇宙で生きる・火星でくらす～火星でごはんが作れるの?～ (相模原、8. 2009)
- ディスカバリーパーク焼津 山下雅道 宇宙でのくらし～国際宇宙ステーション、そして火星をめざして～ (焼津、9. 2009)
- 科学知総合研究所 (SKIL) 第18回合同研究会 山下雅道 火星で農業 - そして人類の持続発展 (東京、10. 2009)
- 環境フォーラム in 佐久 佐久の空 火星をあおぎ 宇宙農業 (臼田、11. 2009)
- 四日市市立博物館プラネタリウム 山下雅道 宇宙農学のすすめ (四日市、2. 2010)
- NHK 21時ニュース, 宇宙トマト, 2009/4/17
- NHK International (Daily News /Features), Dream Food? 2009/4/30
- JAXAクラブ <http://www.jaxaclub.jp/> 動画ニュース (2009.12.11): 宇宙で農業をする時代がやってくる!
- Denmark Public TV, Turen går til Mars (2009)
- 全国農業新聞 2010.1.1 えっ 火星に畑!? 「火星で100人が20年生活」。循環型農業システム検討
- CNES Mag, Agriculture Spatiale, 44, 58-60 (2010)