

||||| 特集：宇宙に生きる—基礎から応用まで— |||||
(解説)

火星をめざす宇宙農業構想—日本・アジアからの発信—

山下 雅道¹・片山 直美²・橋本 博文³・富田-横谷香織³・宇宙農業サロン⁴

Space Agriculture for Habitation on Mars—Perspective from Japan and Asia

Masamichi YAMASHITA¹, Naomi KATAYAMA², Hirofumi HASHIMOTO³,
Kaori TOMITA-YOKOTANI³ and Space Agriculture Task Force⁴

Abstract

Manned Mars exploration at a large and long scale inevitably requires recycle of materials to support human life on a distant isolated outpost. A conceptual design is developed for Martian agricultural system based on biologically regenerative functions. Environment in a green house dome will be maintained at sub-atmospheric pressure with proper partial pressure of oxygen and other gas species. Photosynthetic conversion of carbon dioxide and water to oxygen and biomass is the major driving mechanism for habitation on Mars. Water recycle, at a quantity required for human life, can be made by respiration of plant leaves. It should fully utilize a solar energy received on the Martian surface for the photosynthetic reaction. Sub-surface water and atmospheric carbon dioxide mined on Mars should be also associated with the plant cultivation system. We selected rice, soybean, sweet potato, and green-yellow vegetable for the core food materials in space agriculture. From nutritional viewpoint, animal origin material should be supplemented to the diet with lipids, including cholesterol, vitamin D, and B₁₂. Insect eating is proposed for the best use of the limited resource available for space agriculture. Silkworm and hawkmoth pupa are candidate for this purpose. Co-culture of rice, *Azolla* (aquatic fern), and loach fish is promising as well. One of the core technological functions in the concept is hyper-thermophilic aerobic composting bacterial ecology. It plays a role of processing human metabolic waste and inedible biomass and of converting them to fertilizer for plants cultivation. One of the characteristics of the technology is the processing temperature high at 80–100°C. The quality of the compost has been shown essential to create a healthy regenerative system. In the materials recycle loop, handling of sodium, which is required for human physiology but negatively affects on ordinary plant growth, is another challenge in space agriculture. Cultivating salt accumulating plant species, such as ice plant, or harvesting potassium made by marine algae is promising candidate for this. Space agriculture, with our perspective from Japan and Asia, might be beneficial for solving the global problems of food shortage and loss of agricultural land at increasing human population.

1. 火星探査をささえる宇宙農業

わたしたちが火星をめざすとき¹⁾, 地球を周回する軌道や月面での活動を計画するのはおおきく異なる条件がある。それは、生命維持のエコノミクスである。地球周回軌道や月面では、生命維持のための現地資源は太陽光エネルギーを除いて得ることはできない。月の極地域の永久に太陽光の差し込まないクレータ部位に水の氷が存在していることは知られているが、生命維持に十分な量ではない。地球周回軌道の太陽光についても、特別な軌道でないかぎ

り、およそ1.5時間ごとに昼夜がくりかえされるし、月面では14日間の夜が続くので、地球の環境に適応している植物を、このような太陽光の明暗周期により大規模に栽培するのはむずかしい。一方、地球周回軌道や月面は、そこへむかう宇宙輸送機の打ち上げの時間的な制約はほとんどない。生命維持に支障がおこったとしても、数日で救援物資を差し向けることができる。

これに対して、火星にむかう宇宙機の打ち上げの機会は2年に1度にかぎられる。地球から離れば、最短2.5年を帰還に要する。少人数の火星ミッションでは、宇宙農業

1 JAXA 宇宙科学研究本部 〒229-8510 神奈川県相模原市由野台 3-1-1
Inst. Space Astron. Sci., JAXA, Yoshinodai, Sagami-hara 229-8510, Japan
2 名古屋女子大学 〒467-8610 名古屋市瑞穂区汐路町 3-40
Nagoya Women's University, Shioji, Mizuho-ku, Nagoya 467-8610, Japan
3 筑波大学 〒305-8572 つくば市天王台 1-1-1
University of Tsukuba, Tsukuba 305-8572, Japan
4 Space_Agri@surc.isas.jaxa.jp

といった食料をふくみ再生循環式の生命維持システムが要求されることはない。多人数で長期の火星活動を構想するのであれば、地球生命圏という後背地のない条件のもとでの、食料をふくむ物質の流れや循環の管理、そして生命活動を支えるための環境の制御が、エンジニアリングの対象となる。長期の有人宇宙活動では、水の再生利用や炭酸ガスの酸素への変換にとどまらず、排泄物や食料素材の非可食部分を処理してふたたび植物を栽培する資源へと変換し、食料素材を再生産することがエコノミクスの点から有利になる。安全かつ確実にヒトの生命を維持するエンジニアリングに加えて、快適な生活をおくれるような環境や景観をつくりだすことも重要な要求である。宇宙農業は、生物そして生態系的な要素を構成し、それを制御して、生命維持の要求に応える。

自然の生態系や、さらに地球の惑星としての環境や物質循環の機能が、地球上での人間の活動をささえている。太陽光をはじめ水や空気など地球上ではおよそ無償で得られるものを、再生し制御するためのしくみを宇宙農業では明示的に組み立て、植物などを栽培して食料に加工するシステムを構築し、運用しなくてはならない。さらに、農業は食料の生産供給ばかりではなく、生活の快適さと、人類文明の発展にむけた余剰の時間と資源を確保している。人類の歴史をかえりみれば、食料の採集・狩猟に依存していた時代から、農業作物や家畜の農耕・牧畜がはじまり、言語をはじめとする文化がつけられ古代文明が発展し、穀倉地帯たる植民地の拡大もあり科学や近代産業が確立し、さらに近代農業が農業生産を拡大し、そのなかから宇宙活動を可能にする基盤が形成されてきた。そのときどきに農業生産総力は人口の上限を規定してきたし、また農業労働生産性の向上は科学をはじめとする農業以外の活動に従事する人の割合をふやしてきた。宇宙農業のエンジニアリングは、人類文明のたどった歴史を、火星のうえで、急ぎ足でたどるものでもある。

宇宙活動のひとつの成果は、地球を宇宙から俯瞰する眼をわれわれにあたえたことにある。宇宙船地球号という概念は、地球生命圏がひとつの運命共同体であることをしめしている。いまや生命圏の中での物質循環流のおよそ10%以上をヒトが占有し、人間の活動が地球のあたえる容量を、いくつかの指標において、すでに超えてしまっている。火星で人工的生態系を構築しヒトが生存できる環境を維持するエンジニアリングをすすめることは、とりもなおさず地球上での人類の持続的な文明維持・発展のための地球規模、および小地域規模でのエンジニアリングを構想し、エネルギー・物質・環境問題を解決するための格好なテストベッドとなる。地球の限られた資源とその再生循環利用を前提とするライフスタイルを提示し、地球上のさまざまな問題解決に有効な手だてを実証する。

そして、宇宙での活動の計画は、我々がなにを目指して進むのかという疑問にも答える。人類の宇宙への進出は、

健全な文明の持続がなければ不可能である。宇宙での活動は、文明の維持と発展に寄与する。そして、厳しく限られた資源のもとで物質を再生循環して生命活動を駆動し、快適な生活環境を創出する宇宙農業は、地球での環境負荷の低減や循環型社会を実現するのによいモデルとなる。

2. 生物学的要素による生命維持

宇宙農業は、生命活動に密接に関係する生命維持のはたらきを生物学・生態学的な要素により実現しようとしている^{2,3)}。これは、つぎのような期待にもとづいている。

第一に、人間がよく適応してきた地球の生命圏の環境や人間をふくむ生態系の一部を切り出して、宇宙の圏外環境に再現する。地球生命圏の進化と変遷のなかで淘汰され、いくたびかのきびしい摂動にさらされても持続してきたことから、地球生命圏をおりなす生物・生態系要素のすぐれていることは実証されている。このような優れた機能を、宇宙農業システムにとりいれて活用する。

第二に、生物や生態系の特質のひとつとして、周囲の環境変化にあっても生物個体の生理や生態系の運動を安定に維持する恒常性機能がある。この機能を宇宙農業システムの要素の中に繰り込み、さらにそれを補強することによって、安定性を確保したシステムが構築できる。

第三に、生物がその進化の歴史のなかで選び取り発展させてきた複雑で精緻な化合物の生合成や、その産物がみせるたくみな調節機能などは、人工的なシステムで実現できる機能や合成できる化学種の特質に対して、すべてではないにせよ依然としてまさるところがおおい。生物のはたらきとしくみのすべてを我々が理解し模倣できるほどの地点に、現代科学はまだ到達してはいない。

しかし生物にはすぐれた特質のある一方で、いったん生物をとりまく環境が許容範囲外に遷移すると、生物・生態系のもろさが露呈したり、あるいは修復不能状態になってしまう。さらに、地球生態系・生命圏の一部のみを切り出すなら、そこで失われる機能にも注意しておかなくてはならない。

地球上の生命圏での物質の循環は、地球という巨大な後背地（シンクとソース）に支えられている。生命活動に適した大気や水の環境、太陽光といった要素は、人間の活動にたいして自然力・所与の資源として与えられている。宇宙農業は、これらの環境条件をつくりだし維持することからはじめなければならない。宇宙農業生態系のなかでは、人間が支配する物質やエネルギーの流れはほぼ100%をしめる。そして、宇宙農業には後背地といった地球生態系のなかでの物質循環での大きなシンクやソースはない。宇宙農業を計画することは、地球上で再生可能な物質循環を進める上でこれまで無償で手に入れてきた自然的な資源の価値をみつめなおす契機となる。そして微生物生態系の生命圏における物質循環での重要なやくわりとその自然的な制御のしくみについて眼をむけることとなろう。

3. 火星100人・20年の宇宙農業システム概念と その基本構成

宇宙農業の目標として、火星への往復飛行と火星上の前哨基地での生命維持機能を実現し、そこでの生活環境を安全で快適なものにすることをあげる。宇宙農業のシステムの概念をかためるために、火星上で100人規模の前哨基地を20年運用することを目標として設定する。当然、このような規模の火星有人探査が送りだされるまえに、無人探査や5-6人といった少人数の有人ミッションからはじまるいくつかの段階がある。宇宙農業はそれら前段的な活動の蓄積の上に構想するものであり、さらにそれを発展させるものとして、火星で得られる資源を最大限活用して活動の規模を拡大していく。また、われわれのめざす火星探査の主たる目的が地球圏外に生命を探査するアストロバイオロジーであることから、探査対象への地球生命体やその有機物による汚染をさけることはいうまでもない。

火星の大気は二酸化炭素を主成分とする。全圧は約1 kPaである。温度は季節や緯度にもよるが、低い。全球的に砂嵐が吹き火星表面での太陽光入射強度が低下することもある。2007年7月には数週間にわたり砂嵐がつづき、火星面上で探査活動をしているローバーの太陽電池による発生電力は大きく減少した。表面に入射する太陽光の密度は地球の半分である。そのスペクトルは200 nmにまでおよぶ紫外部を含む。火星の半径は地球の半分で、重力は0.38 G、自転周期はほぼ地球と同じである。公転周期はおよそ地球の二倍であり、かつ公転軌道は地球ほどには真円でない。自転軸の傾きは地球とおおよそおなじであり、太陽との距離が変化することもある。季節の変化は地球よりも顕著である。磁場はなく、大気も薄いことから、高エネルギーの宇宙線は遮蔽されことなく火星表面に到達する。表面近くの化学的環境は短波長の太陽光による光化学反応もあって酸化している。地域・地形によっては、表層直下に存在する凍った水を抽出して利用できる。火星は地球とは異なりマントルと地殻が分化した歴史をもたないために、表面のレゴリスや岩石は玄武岩質のところが多い。しかし部位によって存在する鉱物やその詳しい成分、レゴリス・岩石の粒度や大きさの分布はことなるので、今後の火星探査において宇宙農業の観点からする探査を実施する必要がある。

宇宙農業がまず実現しなくてはならないのは、人間や動植物・微生物の生命活動を可能にする物理・化学的な環境を生成して維持することである。与圧した温室ドームをつくり、その内部にさらに高い圧で与圧した人間の居住部を入れ子の形でつくる。温室ドームで植物を栽培したりする光は、火星の自転周期がほぼ地球と同じであることもあって、太陽光を利用する。宇宙農業における植物の栽培条件は、植物の生理的な要求をみだし、かつ、建設する宇宙農業システムのコストを過剰にしない範囲で選ぶ。地球

上で進化してきた生物種は、おおよそ地球の環境によく適応している。そのような生物が、設定する栽培環境にどのような生理的な反応を示すかを推定し、実証しておかなければならない。温室ドームの内部は、全圧をおよそ20 kPaとして、酸素分圧を植物の栽培に必要な10 kPa、水蒸気はその常温での蒸気圧からおよそ2 kPa、二酸化炭素は植物の光合成を阻害しない500 Pa以下、残りを火災安全性の観点から窒素とした気体でみす。温室ドームの内圧の設定は、温室ドームと与圧構造の機械的な強度要求をひくめ、その質量を低減するために、低い圧としている。しかし、植物の生理や成長におよぼす圧力のくわしい影響や、事故により温室ドーム内圧に人間が曝露されたときの安全性、さらに着用する与圧服内外の差圧が作業性などにどれほど支障となるかを勘案する。

居住区の圧力設定は、人間が長期に低圧に曝露された場合の生理的な影響を評価してきめるが、温室ドーム内で着用する与圧服の圧力設定ともからんでいる。居住区には植物の光合成反応によって生成した酸素を選択的に濃縮・加圧してとりこみ、また居住区からは逆に二酸化炭素を選択的に濃縮して温室ドームへと排出する。居住区的全圧はヒトの生理学的な要求から100から50 kPa、酸素分圧を20 kPaにたもち、二酸化炭素分圧は500 Pa以下に制御する。

4. 宇宙農業システムのなかの物質循環と エネルギー流

宇宙農業は地球圏外で生命活動を支えるために、Fig. 1に示すように、水、空気を再生循環利用し、食料の生産やさらに衣料や住空間など快適な生活環境を作り出す。物質資源として火星の表層下にある水や大気中の二酸化炭素および微量の窒素、表面のレゴリスや岩石に含まれるカリウムやリンをはじめとする生元素も宇宙農業の物質循環ループのなかに取り入れる。すなわち、地球など外部から物質資源を運び入れるばかりでなく、現地での資源を活用することによって、宇宙農業の規模を拡大していく。

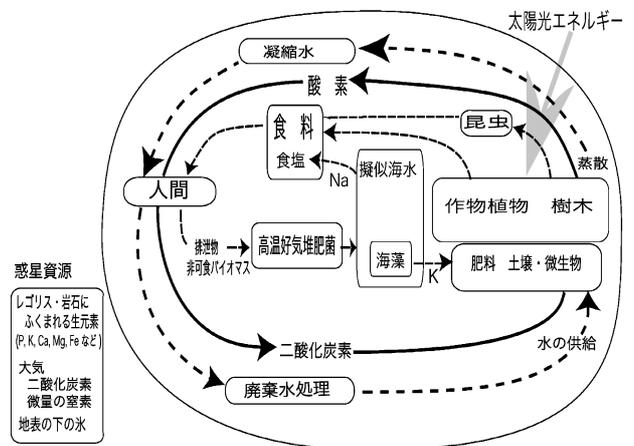


Fig. 1 宇宙農業の物質循環ループ

生命活動にともなう物質循環の主たるものは、一人当たり、水（生活用水を含めると30から100 kg/day）、二酸化炭素-酸素（それぞれ1から0.5 kg/day以上）、食料（湿質量2 kg/day）、肥料および無機塩（20 g/day）である。宇宙農業では、植物の光合成をこの物質循環のための中核的なプロセスとする。植物により食料を生産すれば、人間が排出する二酸化炭素の酸素への変換が食料の生産と当量分なされる。地球周回軌道や月面では、使い捨てのシステムとしたときにおおきなペナルティとなる水の一部を再生循環して利用することがなされ、あるいは構想されている。

ヒトは食物を摂取して、その中にふくまれるバイオマスを肺から取りこんだ酸素により酸化することにより、生命活動をいとなむエネルギーをえる。1日当たりの摂取エネルギーはおよそ2000 kcalであり、これはヒト1個体が平均して100 Wのエネルギー率で消散していることとなる。これに対して、ヒトの食料を植物が光合成により生産するのに必要な太陽光のエネルギーは50 kWであり、ヒトの消費するエネルギーのおよそ500倍を要する。すなわち、物質の再生循環をおこない植物により食料を生産するには一人当たり50 kWの光エネルギーを供給しなければならない。このような資源要求は、食料をふくむ再生循環システムの初期投資を（使い捨てとした場合の累積消耗品量にくらべて）大きなものとし、地球周回軌道や月面で宇宙農業が（火星以遠での利用にむけての実証試験はさておき）選択されない理由になっている。

植物の光合成反応は水と二酸化炭素を主原料として光エネルギーによりバイオマスと酸素を生産する。火星表面での太陽光照射強度と植物の光合成効率から推定すると、火星での宇宙農業の植物栽培面積（あるいは太陽光の集光面積）は一人あたり200 m²となる。食料と酸素の生産量の要求はすでにのべたとおりであるが、植物の葉面からの水の蒸散量とバイオマス生産量の比から、蒸散した水を凝縮して回収すれば必要な水の量100 kgをまかなうことができる。このように太陽光は、植物の光合成のための可視光成分のおこす光化学反応ばかりでなく、水を蒸散させる熱入力としてもはたらく。温室ドーム内には、蒸散した水を回収して再利用するために、ドーム内の気体の対流を誘起したり、水の凝縮をおこなうためにドーム内気候を生成する。

植物の光合成反応を支配する要因には、光の入力のほかに、気孔および葉の周囲での二酸化炭素、酸素、水蒸気や熱の輸送過程がある。葉からの水の蒸散は、根からの吸水と無機イオンの吸収と植物体内の輸送を駆動するとともに、蒸発の潜熱によって葉温を下げる。重力は葉周辺での自然対流を誘起して、物質や熱の輸送を促進することにより植物のバイオマス生産に副次的な影響をあたえる。気体の圧力も葉の周辺での輸送過程を支配する。

栽培空間の規模での気体の流動とそれにとまなう伝熱現象の推定は、植物体周囲の微気象にくわえ、温室ドーム内での物質・熱輸送過程を把握するために必要である⁴⁾。植

物から蒸散した水を凝縮し回収し再利用するしくみなどは、栽培空間を与圧する構造をどのようにしてつくるか、および火星の大気と栽培空間の間の熱的なインターフェースなどによっても決まる。温室ドームへの熱入力は太陽光であり、同じ量のエネルギーが温室ドームから出力する。火星大気および火星表層への熱出力において、それぞれの部分で熱抵抗がどれほどかで、温室ドーム内の温度がきまる。火星の大気の密度は地球大気のおよそ1/100である。地球の温室での内外温度差と火星の温室ドームでのそれを比較するならば、後者は前者の100倍であることを期待することができる。すなわち、凍った火星表層と温室ドームの断熱に注意をはらいさえすれば、内部の温度を生物にとって適温にたもつことはむずかしくない。

5. 宇宙での食材の選択

宇宙農業の出発点のひとつは食事のメニュー作りである。空気、水、食料の再生のために栽培・飼育する植物・動物種は、ヒトの栄養学・生理学的な要求にこたえるばかりでなく、食事における文化などより広い種々の要求条件を規定した上で、選定・構成する。すなわち、食材やその献立は人間の嗜好要求にも応え、生活に潤いを与える。

栄養学的な観点からすれば、エネルギーの摂取、体組織のつくりかえのためのタンパク、およびビタミンやミネラルなどの微量成分の摂取要求などが、食材や献立の選定において考慮すべき事項である。限られた資源を有効に利用する農業生産という観点からすれば、栄養学的な要求をみたすために必要な耕作面積を最小化する組み合わせを食材の構成において求めることとなる。

農業において穀類の発見は、食物材料を貯蔵して安定な供給を可能とし、人類の歴史を大きくすすめたものであり、われわれの食文化もそれに深く規定されている。宇宙農業の穀類の選択のために、コメ、コムギ、ソバ、キヌアについて、エネルギー摂取量に対応する耕作所要面積を多毛作を前提にして比較すると、育種などの努力の成果もあってイネが優れているのがわかる。エネルギーの摂取ということではイモもよい食材である。継代栽培の様式が栄養生殖であることもイモの優れた点である。サツマイモとジャガイモを比較すると、耕作所要面積はおよそおなじだが、甘味の得られることや食物繊維の含有量のおおさから、サツマイモが総合的に優れている。タンパクの供給ということから、マメ科の植物であるダイズを加える。マメ科の植物は根粒菌と共生してチッ素固定をするというメリットもある。ビタミンなどの摂取には、緑黄色野菜も必要である。緑黄色野菜の代表としてコマツナをあげているが、香味野菜など多様な作物種であってよい。

このようにして、コメ、ダイズ、サツマイモ、緑黄色野菜の4つを宇宙農業の基本食材としてえらんだ。奇しくも、日本での伝統的な基本植物性食材と一致する。しかし、この4つの植物由来の食材では、細かくみると、



Fig. 2 宇宙農業の基本食材 (1人一日分). コメ300 g, ダイズ100 g, サツマイモ200 g, 緑黄色野菜300 g, 食塩3 g, カイコサナギ50 g, ドジョウ120 g. この食材の組み合わせを調理して摂食すれば, 科学技術庁資源調査会編五訂日本食品標準成分表およびここに記載のない食品については別に実施した成分分析の結果により各含有成分を推定すると, 厚生労働省の策定した「日本人の食事摂取基準 (2005年版)」で規定されているそれぞれの項目を満たすのがわかる⁶⁾.

Na, コレステロールに代表される脂肪, ビタミンDやB₁₂などが不足する. これらを補うには, 食塩と動物性食材をくわえる必要がある. 後述する理由から樹木を宇宙農業にくわえることから, 動物性食材にひとつとしてクワの葉を餌とするカイコのサナギを候補とした. さらに, 脂肪の割合の増強, コレステロールの摂取, ビタミンDなどを考えると, ドジョウをくわえるのが一つの策である. 水田でイネを栽培し, その水面に水棲のシダであるアカウキクサを浮かべる. アカウキクサに共生するラン藻によりチッ素固定する. イネ, アカウキクサ, 水棲動物の3つを組み合わせると, アカウキクサにより水面下での太陽光の利用を制限して水田の雑草を抑制し, 水棲動物がアカウキクサを食し, また水田の底の泥を攪拌して土中のリンなどをよく懸濁させ, イネやアカウキクサによるそれらの利用を促進する. 国際イネ研究所などが推奨してきたイネ, アカウキクサ, 水棲動物の共作では, 水棲動物にアヒルやアイガモといった水禽類, ティラピアやコイなどの魚が取り上げられてきた.

宇宙農業では, **Fig. 2** にしめすように, ドジョウを選択する. ドジョウはコレステロールの含量など栄養学的ないくつかの点ですぐれており, なによりも水田とその周囲の水系で自生している生物種である. 水田から水が消失してもしばらくは泥の中に深くもぐり延命する. 水中の溶存酸素濃度が低下しても, 口から吸い込んだ空気を消化管の中に導いて肛門から排出するあいだに気体交換する腸管呼吸

の能力もあり, 劣悪な環境でも強靱な生命力をしめす種である. 栄養成分をみても, ティラピアに遜色はないし, なによりも日本や東アジアの食文化の中に定着しており, その養殖技術も確立している. ドジョウの養殖面積は, 一年で卵から成魚とした場合に最大で10 kg/m²の収量をえられることから, 栄養学的な観点から設計された, 一人あたり44 kg/year (120 g/day)のドジョウを生産するには最低4.4 m²を要する.

アカウキクサについても, 食用することができ, いくつかの猥立が開発されている. またキムチそのほかの漬け物にふくまれる植物性乳酸菌の宇宙における有用性についても明らかになっている⁵⁾.

6. 昆虫食と樹木の利用

我々の宇宙農業構想を特徴づけるのは, 昆虫と樹木の利用である^{6,7)}. 宇宙農業では, 物質の再生循環利用率をなになんでも100%とはしない. 火星現地でえられる物質資源により, 物質循環ループから脱落していく物質を補充する. 太陽光ばかりでなく他の現地資源を積極的に利用して宇宙農業システムを拡大していく. 火星大気の主成分である二酸化炭素と火星表面下はかなり広い範囲で存在している水を取りこめば, 植物の光合成の原料物質をえることができる. 火星大気に微量あるチッ素を取りこみ, マメ科植物に共生する根粒菌やあるいはラン藻などによりチッ素固定の原材料を供給することもできる. また火星レゴリス中にふくまれるカリウムやリンその他の生元素を植物に取り込むのに, 植物と共生する菌根菌などを活用する. ただしこれらは, 輸送質量のペナルティが大きくない限り地球から持ち込む「肥料」のバックアップとしてとり入れるべきものである.

昆虫の利用は, 人間の栄養要求から着想されている. 生理的に必要なエネルギーおよび栄養成分を過不足なく摂取するような食材料の構成を考えると, 先に示したように植物性の食材料のみでは困難である. 肉食主義者の摂取する食材料の構成にせよ, 牛乳といった動物起源の材料が含まれている. われわれが食用とする動物種の進化系統樹状の位置をみると, 特に日本食では多様なグループの動物を食しているのがわかる. ヒトから進化系統上遠い位置にある食用の動物種はエビであるが, さらにその先をたどると昆虫がある. 昆虫は日本の食品成分表にもイナゴとハチの子が記載され, またアジア, アフリカ, 南アメリカの各地で, さまざまな昆虫が食文化の一部にくみこまれている. 昆虫の中では, カイコとミツバチのふたつは古くから家畜化されてきた. カイコの幼虫はクワの葉を摂食して成長し, マユをつかってそのなかでサナギとなる. カイコの成虫は羽を持つものの飛ぶことはできず, また盲目である. カイコのサナギの食味や食感は, 進化系統的に近縁のエビに, 当然のことながら, 類似している. 栄養学的な観点から設計された⁶⁾一人あたりカイコのサナギを50 g/day 食用

するには、その餌であるクワの栽培面積は64 m²を要する。

カイコは動物ではあるものの、クワの葉に豊富に含まれるアミノ酸の構成比を食用動物特有の構成比までには変換していないし、また脂質についても同様である。栄養学的な要求を満たすには、コメ、ダイズ、イモ、緑黄色野菜（コマツナなど）をもとに、カイコのサナギにくわえて魚をとり入れる。ところで、サツマイモは収穫できるエネルギーあたりの栽培面積はもっとも優れているばかりでなく、葉、茎も食用でき、可食部の割合が90%以上である。ただし、サツマイモの葉を直接に食用せず、エビガラスズメの餌としてあたえ、エビガラスズメのサナギを食用することも可能である。ただしカイコの蛾は飛翔能力が失われていて、基質の上で移動して配偶相手をさがして交尾して産卵する。しかし、エビガラスズメは飛翔しながら交尾するので、火星の温室ドームでの低重力、低圧の環境で飛翔や交尾行動に支障がないかを検討しておく必要がある。大気中のチッ素をヘリウムに置き換えて、飛翔する媒質の密度が変わったときの昆虫の飛翔行動が調べられており、参考になる。

樹木の栽培は植物バイオマスを生産する材料などとして、二酸化炭素を光合成の物質再生循環ループにはもどさないことにより、余剰の酸素を生産し蓄えることができる。ビタミンD要求にこたえ、また食をゆたかにするには、樹木にはえるキノコも食材の候補である。キノコは樹木を食用可能な食料へと変換するとともに、ビタミンDの前駆体をふくむものもある。この前駆体は太陽光に曝露するとビタミンDに変換される。

7. 高温堆肥菌生態系による物質循環

排泄物や非可食のバイオマスから肥料および食塩を再生循環できれば、宇宙農業の物質循環のループをより閉じることができる。高温堆肥菌生態系はこの目的に適した系であり、排泄物や非可食のバイオマスを処理し、作物栽培の肥料・資材として再生利用することができる。堆肥菌生態系は、共生的な関係にある多数の菌種により構成される。それぞれの菌種を単独で培養したり、同定することはむずかしい。これらの菌群が生産する高機能の酵素を抽出して利用するという概念も提案されている。

高温好気堆肥菌システムは、下水汚泥や農業畜産廃棄物の処理などで日本において発達している技術である⁸⁾。通常の堆肥菌による処理では反応温度が50–60°Cであるのに対して、高温好気堆肥菌では80–100°Cという高温が至適活動温度である。代謝反応の生成熱で反応部が昇温し、反応温度が至適温度範囲に自動的に調節される。好気条件下で増殖する細菌群あることから、病原性の細菌群ではないと推定されている。他の病原性細菌や寄生虫の卵などは、堆肥化での高温処理により、自然のオートクレーブにより死滅する⁹⁾。

堆肥化の反応速度は高温であるがゆえに速い。生成する

堆肥としての特性にも、重金属イオンを非可溶性な化学形態とするなど、いくつかすぐれたものがある。農業土壌での微生物生態系が高温好気堆肥菌の生成物を加えることにより良好な状態にたもたれたり、あるいは作物植物種の成長を促進するような生理活性物質をあたえる。高温好気堆肥菌生態系は家庭用の生ゴミ処理機にもくみこまれており、その安全性の検証もふくめて、成熟した技術となっている。

欧米では、排泄物に対して人口の集中した都市に疫病をもたらした負の側面をみることが多い。日本をはじめとするアジアでは、都市近郊の農民が金肥として尿尿をあがなってまで農業生産力を増進してきたという見方が優越する背景がある。

8. Naの分離と再生利用

宇宙農業において直面する問題のひとつは、Naの循環である。地球の生命圏での物質の循環にしめる人間を経由する循環の割合は、およそ10%と見積もられているが、宇宙農業ではほとんど100%が人間を経由する。ヒトが栄養学的に要求するNaの量は大きく、植物起源の食材にはふくまれていないことから、食塩として摂取する。一方で、植物は一般的に高いNa塩濃度では生長が阻害される。ヒトの排泄物を処理して農業作物への肥料として使用するときには、このNaを肥料から除去し、食塩へと再生しないといけない。このNa循環の問題解決にはいくつかの原理と方式を候補としてあげることができる。物理化学的な方式には、塩の溶解度の温度依存性の違いを利用する方式があり、実証試験もすでにされている。

耐塩性の植物やその性質を遺伝子工学的に組み込んだ作物種を作出するのも、宇宙農業におけるNa処理の一つの方策である。アイスプラントは葉や茎の表面に球状に突出するプラダー細胞の内部にNaを集積する性質がある。海水にちかい培養液で栽培すると、アイスプラントの乾量の30%がNaClとなり、食すると塩辛い野菜である。塩分の多い干拓地においてアイスプラントを栽培して塩分を植物体にとりこみ土壌中のNa分を低減し、そのあとに通常の作物種を栽培するといった利用もされている。

海藻は海水中で生育するが、藻体中のNa/K比は海水の値47に対し、0.1といった低い値を示す種もある。細胞内にイオン種選択的にKイオンをくみ上げ、反対にNaを細胞外にくみ出すことによって、このような藻体中のNa/K比がつくられ維持されている。海藻の中には、汽水域や河口で生育し、広い塩濃度で成長するアオサなどの種がある。人間活動による富栄養化現象が海岸や河口域に発生すると、アオサなどは爆発的に繁茂し、汚染の指標生物とされている。アオサを広いNa/K比と総塩濃度の培養液中で栽培したところ、その生育にはK濃度の閾値があること、および藻体内のNa/K比は培養液での比にかかわらず一定の値となることがわかった。そのようなアオサ

の特性を利用し、ヒトの排泄物由来の堆肥から浸出した無機塩溶液を擬似海水としてその中でアオサを栽培する。Kほかの成分を藻体に収穫し、直接食用するかあるいは栽培植物の肥料にする。相対的にNaが濃縮される擬似海水からは食塩を製する。

藻類の栽培と食用をふくむ利用技術は日本に優れたものがある。日本食では旨味としてコンブなどを用いたり、多くの海産淡水産藻類が食用されている。日本食は、健康的であるとの定評にくわえ、後述する問題のある動物の肉を多くは含まない。これらがよく理解されるならば、藻類の食用は広く受容されるだろう。

9. 宇宙農業のシナリオと地球の問題への貢献

国際宇宙ステーションが運用段階にはいり、ポスト・宇宙ステーションとして有人火星など長期の有人ミッションが構想されている。そのような中で、有人宇宙技術の中心課題として生物的要素による物質の再生循環利用が国際的に注目されている。自然観や生命観、そして資源の再生循環において、日本やアジアにはすぐれた文化的歴史的な背景がある。このような背景に加えて、我が国に蓄積された生物学的、農学的、および工学的技術を相乗させることによって、日本は宇宙農業の開発に貴重な貢献をなし得る¹⁰⁾。

宇宙農業はその研究開発のあらゆる段階で、地球の食料・環境・エネルギー問題の解決への手がかりをひきだし、いくことができる。宇宙農業の当面する目的はそこにあるといっても過言ではない。地球上では、人口の増大がつづく一方で、砂漠化や土壌の喪失、塩集積などにより農業耕作地が減少している。近代農業技術の発達により農業生産効率があがってきたのだが、その効果も適用する対象農耕地の質の低下や効果の逡減があり、これから先におおきな収率の増大を見込むことは困難である。

一方で、現在経済が急激に発展している地域では、食肉消費の増大のためにヒトにとり可食の穀物を家畜の飼料としたり、あるいは飼料用作物を耕作するために可食栽培作物の作付けとの競合がおこり、農産物の輸出地域であったものが輸入地域へと転落している。食物連鎖を1段上がるごとに利用可能なバイオマスは1/10に目減りする。欧米の肉食中心の食事を地球上のすべての人がとるならば、地球の容量をはるかにこえて地球が6個必要になる。牧畜や肉食文化は、直接に食用できる作物植物の栽培が困難であった地域で、非可食の植物を家畜の餌としてあたえ食用の肉や乳に変換したという歴史のうえにあるのだが、地球全体をみれば資源の制約から成り立たない。

日本の食文化はコメを中心とする豊かな農業生産のもとに牧畜や肉食を選択せず、それが宗教的な食への規範をうけいれる素地ともなった。農業の近代化にもより、栄養学的にも豊かな食文化を形成して、平均寿命も世界的に最も長命の地域となっている。少しばかり昔の典型的な日本食では、動物性食品は魚が多く少量の肉がくわわる。宇宙農

業や宇宙食ともからみ、このような日本食文化が優れたものとして地球上の多くの人々に受容されるのであれば、それは食物連鎖の下位に位置する食材であったり、可食のバイオマス生産と競合しないこともあり、地球1.2個分の資源でまかなうことができる。1.2と地球の容量は超過しているものの、欧米の肉食文化をとる場合に比べて1/5である。

地球上で問題となっている砂漠化や塩集積による農耕地の減少に対して、有機質のすきこみによる土壌の再生や、塩除去のための生物的浄化の方策は有効な方策のひとつであろう。有機質を全く含まない火星レゴリスを原材料として農業土壌を創生し、さらにヒト由来のNaについても処理し再生循環する宇宙農業は、地上の農業が直面する課題にも深く関連する。宇宙農業では、空間の利用効率をたかめるために、人間のための食料生産とは競合しない昆虫を利用したり、水田を養殖水産と共用するといった構想をたてている。日本・アジアにとどまらず、世界の各地域のすぐれた農業や食文化を検討しつつ、宇宙という厳しい条件を課して宇宙農業の計画は練り上げられる。そのような宇宙農業の研究が地上での問題解決に寄与できるものと期待している。

参考文献

- 1) 山下雅道：科学（岩波）2月号，（2007）143.
- 2) Masamichi Yamashita, Yoji Ishikawa, Makoto Nagatomo, Tairo Oshima, Hidenori Wada and Space Agriculture Task Force: *J Space Tech Sci*, 21-2 (2005) 1.
- 3) 山下雅道：科学（岩波）8月号，（2006）800.
- 4) Masamichi Yamashita, Yoji Ishikawa, Yoshiaki Kitaya, Eiji Goto, Mayumi Arai, Hirofumi Hashimoto, Kaori Tomita-Yokotani, Masayuki Hirafuji, Katsunori Omori, Atsushi Shiraiishi, Akira Tani, Kyoichiro Toki, Hiroki Yokota and Osamu Fujita: *Ann. N.Y. Acad. Science*, 1077 (2006) 232.
- 5) Naomi Katayama, Masamichi Yamashita, Yoshiro Kishida, Chung-Chu Liu, Charles Van Hove, Iwao Watanabe, Hidenori Wada and Space Agriculture Task Force: *Humans in Space Symposium*, Beijing, 2007.
- 6) Naomi Katayama, Masamichi Yamashita, Hidenori Wada, Jun Mitsuhashi and Space Agriculture Task Force: *J Space Tech Sci*, 21-2 (2005) 27.
- 7) Naomi Katayama, Yoji Ishikawa, Muneo Takaoki, Masamichi Yamashita, Shin Nakayama, Kenji Kiguchi, Robert Kok, Hidenori Wada, Jun Mitsuhashi and Space Agriculture Task Force: *Adv Space Res, on line*, (2007) doi:10.1016/j.asr.2007.01.027.
- 8) Kanazawa, S., Y. Ishikawa, K. Tomita-Yokotani, H. Hashimoto, Y. Kitaya, M. Yamashita, M. Nagatomo, T. Oshima, H. Wada and Space Agriculture Task Force: *Adv Space Res*, (2007) doi:10.1016/j.asr.2007.09.040.
- 9) Hashimoto, H., Koike, J., Yamashita, M., Oshima, T. and Space Agriculture Saloon: *Viva Origino*, 34 (2006) 86.
- 10) 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: *Space Utiliz Res*, **23** (2007) 396.

(2007年 8 月20日受理)