宇宙農業における微生物生態系の利用とその工学的課題

山下雅道 石川洋二 大島泰郎 ほか 宇宙農業サロン
ISAS/JAXA 大林組 環境微生物学研究所 ほか

1. 宇宙農業の概念と微生物生態系

長期間の宇宙ミッションでは人間の生命を維持する水や酸素や食料を使い捨てにすると、その補給総量はミッション期間の長さに比例して大きくなっていく。月や火星上で人間が長期に居住するシステムを構築しようとするに生命維持に必要な物質を代謝産物から再生して循環利用することが重要な課題となる。物質を再生利用する装置はそれ自体の重量やかさは大きいものの、長期で規模の大きなミッションでは物質を循環利用することで使い捨ての系としたときの補給総量より重量などが小さな値となる。生命維持システムを使い捨ての方式とするが再生利用するが、あるいは二つを組み合わせるにせよ、それを建設し運用するために地球などから輸送しなければならない質量が輸送系の能力の範囲内におさまるかどうかは有人ミッションの実現可否の岐路となる。

人間が生きていくのに必要な物質の量をみると、水が最も多くついで食料と酸素である。補給量がおおきければ再生循環方式に切り替えるメリットが大きいので、まず水、次に食料・酸素が再生循環される。スペースシャトルでは燃料電池をつかい水素と酸素の反応によって電力を発生し供給することからその副産物としてふんだんに得られる水が生活に利用される。二酸化炭素は水酸化リチウムにより吸収され、尿は薬剤により防腐処理したうえで貯蔵され地上に持ち帰られる。国際宇宙ステーションでの電力は太陽電池でまかなうため、水の再生循環がなされる。また二酸化炭素を吸収する薬剤は1回きりの使い捨てではなく、固体アミンによる二酸化炭素の捕集がなされ吸収剤は再生利用される。酸素は水の循環から一部が抜き出されて化学的に生成され、漏洩するチッ素をおぎないつつ船室内の気体成分の分圧が調整される。地球周回軌道では地上から宇宙ステーションへのアクセスは容易であって、食料や水は地上から供給されるオープンな系が採用されている。

月での生命維持をかんがえると、地球周回軌道に

くらべて遠距離にあるとはいえ、月はつねに地球の近傍にあって火星とはちがい宇宙機の打ち上げの時間的な窓に制限はない。生命維持システムにもとめられる障害の回避策のなかに地球からの救援やあるいは地球への避難を一つの選択としてふくむことができる。火星での有人活動では惑星間の飛行時間が長期であり、地球からあるいは火星からの打ち上げの時間的な窓には制限がある。物質の再生循環の閉鎖度の向上が求められるし、生命維持にかかわる要求事項は信頼性などより厳しいものがあり、また長期のミッションにあって豊かな生活環境を確保しなければならない。低重力状態でのシステムの挙動をたしかめるなど、月での実証試験を実施して段階的な開発を計画するのがもとめられる。

宇宙農業はFig. 1のように生物のはたらきを利用して物質を再生して循環利用する。宇宙農業では人間の代謝産物である二酸化炭素と水を原料にして植物の光合成により酸素と食料を生産する。植物は葉面から水を蒸散させて根から吸水するとともに無機イオンをとりこみ植物体内の生合成反応場所に輸送する。植物体内でのバイオマス生産量に対する蒸散水の量の比をみると、植物の葉面から蒸散した水蒸気を凝縮回収して、水を再生循環して必要量をまかなうことができる。このように宇宙農業は人間の生命維持のための水-食料-酸素に対する要求に応えることができる。

植物を栽培するには水と二酸化炭素のほかに植物体を構成する他の元素を肥料として与えることが要求される。地上の農業では降雨が地殻から溶脱させるなどしてこれらの元素が自然的に供給されるのにくわえて、肥料が農業生態系に投入される。肥料の質量は植物体を構成する3つの主要元素H, C, Oに比べれば桁違いに小さなものである。したがって排泄物から「肥料」を再生循環するというクローズド・ループ方式と肥料を外部から供給するオープンな方式を比較してどのような規模・期間のシステムで前者の再生循環が優位になるかをみると、水-食料-酸素の再生利用での規模・期間の再生利用への転換点に対して桁違いに大規模・長期間の構想段階ではじめて肥料再生循環が優位となる。

当面の宇宙農業での物質の再生循環は肥料への

Materials Circulation
in Space Agriculture

Fig. 1. Materials Circulation in Space Agriculture

Materials circulation among three members of Mars habitation, human, plant and composting microbial ecology, is shown in this diagram. Recycling of water, conversion between oxygen and carbon dioxide, and food and fertilizer loop are driven by the inflow of the solar energy. By utilizing planetary resources available on Mars, scale of Mars habitation can be enlarged by the support of space agriculture.

変換利用というよりは排泄物や「ごみ」の適切な処理にある。これは地球上での問題と似るところがあって、排泄物や食料材料の非可食部分を腐敗させて人間に有害なものとなしように処理する必要がある。地球上でも小地域内での物質の循環利用が指向されている例もあり、持続的な文明のひとつの要素としてとらえられている。宇宙ではかりに天体表面に生活空間を設営するにせよ、廃棄物が地球上のように自然的なプロセスによって処理されて無害化したりふたたび物質循環のループにのって再生利用されたりすることはない。また、宇宙での生活空間は与圧された小さな閉鎖空間であって、地上のように有害な成分が拡散によりまづは低濃度となることもないので、宇宙での「ごみ」問題の過酷さは地球にくらべて格別である。

さて、地球上生命圏での物質循環には土壌中の微生物が分解者としてまた物質のシンクやストックとしておおきな寄与をなしている。排泄物や「ごみ」の処理ばかりではなく、栽培植物の肥料に変換して再生利用し、宇宙農業の再生循環のループをより閉じたものとし、さらに月や火星上で得られる鉱物や大気などの資源をとりこんで宇宙農業が活用でき

るように変換する。これにより他天体上で自立した生存圏を構成しそのなかでの生命活動をささえるばかりでなく、さらに圏外資源のとりこみにより生存圏を地球から輸送される資源によらず拡大するのが可能なシステムを構築できるかを宇宙農業の検討課題としている。

ここで宇宙農業での微生物生態系としている理由は、単独の微生物種による処理プロセスではなく、共生的な関係にある多くの微生物種群のはたらきや、さまざまな機能をもつ微生物種の協奏的な作用に着目して、微生物生態系を物質の再生循環システムを構成する一つのサブシステムとしてとりこみ活用しようとしていることにある。このような微生物生態系のありさまは、このところ発展のめざましい分子生物学的手段を活用する研究により、よく理解されるようになっていく。

また、無菌化した人間を宇宙農業の中に想定することはいずれのところできない。したがって、人間由来の細菌が農業にどんな影響をあたえるかを考えておく必要がある。そして宇宙農業の中に積極的に微生物をくみこみ、維持制御するかという問題が存在する。人間の健康の維持という宇宙農業を拡大

した視点からみることにも要求される。免疫機能の賦活には微生物の存在が重要であることが指摘されており、子供の泥遊びなどは適切な微生物環境に曝露することにより健康な発達をはかるという観点からその意義が再認識されている（藤田、2005）。

自然から隔離されて人工的な環境の中に人間が生きるのは文明の一つの様相としてとらえることもできるのだが、これと対をなして自然にふれることの大切さや、それによる心身の健康の増進が認められている。閉鎖ビル症候群に代表されるように、人工的な環境が健康に有害なカビや微生物の増殖をもたらしているのも確かである。自然であればそれでよいとか自然が至高であるといったことはない。しかし、すくなくとも生命圏で多様に相互作用しながら進化してきた生物はそれぞれに進化でいうところの適応度を増大してきており、その過程で生態系を構成する他の生物種との相互作用のネットワークも安定した生態系の維持を結果するように形成されている。そのようにしてみれば、「自然的環境」は生命にとりひとつの適解である。

豊かな土壌微生物生態系にかこまれそれにさわることの快適さやさらに進めてその医学的な効用には、はっきりとした理由やしくみがしめされていない。しかし、人間をとりまく微生物生態系を健康で快適な生活を可能にするように構成し維持することを宇宙農業への要求のひとつに定義しておくことは適当だろう。すなわち抗生物質を多投与することにより人間をとりまく微生物環境を制御するのか、あるいは微生物生態系に内在する個体・種間の相互作用などによる「自然」の制御におよそ依存するのかは、宇宙での生命維持を設計する上で大きな選択であり、その選択はたんに生命維持システムの装置重量を許容範囲内におさめることができるかといった指標ではかられるのではなく、人間の嗜好であるとか価値判断にゆだねられる要素と強く関連する。

2. 微生物生態系による物質循環利用の歴史的・文化的背景

日本では人の排泄物である尿尿を肥料として農業生産に利用することはふるくからなされている。17-19世紀の江戸では百万の人口が安定して維持され、江戸周辺の農業生産により消費都市の要求がまかなわれていた。江戸での尿尿は金肥としてあがなわれて農業資源として利用され、江戸と周辺農村との間に物質循環のループが形成されていた（高橋、

1987）。このような尿尿の肥料としての農業における利用は第二次世界大戦後までひろくみられた。しかし日本人の生活様式が西欧化し生の野菜をサラダなどとして食するようになって、寄生虫や病原細菌の伝搬が問題となり人の尿尿を肥料として利用するのが廃れている。一方、西欧ではそもそも尿尿の利用がなされることはなく、疫病を蔓延させるみなもととして忌避されてきた歴史がある。人の尿尿から作成された肥料を通常の農地へ投入するのに厳しい規制をもうけている地域すらある（V. der Ryn, 1980）。

ところで、現在の日本でのゴミ処理問題に、ゴミの収集とその処理がある。日本では下水道の整備が遅れているために、米国のように台所の流しの下にあるディスポーザーで生ゴミを細砕して下水処理場へ流下させて処理することが抑制されている。下水処理場で処理されたあとに排出される水がリンなどの成分を多く含み、排水のながれこむ河川や海洋沿岸部を富栄養化させるといった環境問題をもたらすこともある。一方、生ゴミを焼却処理するには、生ゴミが水分を多く含むことによりそれにふくまれる化学的なエネルギーで燃焼させるのが困難であり、燃焼を促進するためにつかわれる化石燃料の消費が問題となっている。また最終処分地にゴミを埋蔵するにしてもそこでの環境問題を引き起こしている。そこで多くの地方自治体が生ゴミの発生源である食堂や家庭に生ゴミ処理機を設けることで生ゴミ収集処理量を低減しようとして機械の設置に財政補助をおこなったりしている。

市販されている家庭用の生ゴミ処理機にはいくつかの方式があるが、そのうちのひとつ（日立、BGD-X180, <http://kadenfan.hitachi.co.jp/namagomi/kitchenmagic/bio.html>）は好気高温堆肥菌生態系により短時間で生ゴミを処理して有機物を二酸化炭素と不揮発性の無機物質へと変換する。この生ゴミ処理機は家屋内において稼働できる。生ゴミを好気高温堆肥菌を含む基材に混合し、反応槽内を80℃に昇温しながら攪拌しつつ外気を通気することにより、一家族の標準的な1日あたりに発生する生ゴミ1.5 kgを4.5時間程度で処理することができる。生成物は肥料として用いることができる。80℃という温度は処理に使われている好気高温堆肥菌の至適な処理・増殖活性が得られる条件であり、大規模な処理設備では好気条件にすると発生する反応熱により反応槽の温度が上昇していき、堆肥菌の活性の温度依存性により反応速度が低下する温度まで昇温していく。しかし家庭用の小

型の機器では、反応部の体積がその表面積に比べて小さく周囲への放熱が盛んなためにゴミ処理の反応熱のみによっては80℃まで昇温できないために、反応槽下部の壁面にヒーターが設けられて温度を制御しながら加温している。

これとは別に、下水処理場で生成する汚泥やその他の農産廃棄物を好気高温堆肥菌生態系により処理し肥料にする大規模なシステムも長年にわたり運用されてきていて、成熟した技術として確立されている（金澤、2003）。好気高温堆肥菌生態系による処理のプロセスで発生する揮発性の化学種も同定されている。家庭用の装置では処理過程の特に初期に発生する臭気性の気体は触媒層を通過させることによりその濃度が低減され、家屋内で駆動させることのできるほどの濃度にそれらを低減できる。使用されている好気高温堆肥菌や生ゴミを処理した産物の安全性の検証は家庭での使用を前提とする装置の製造者責任のもとによくなされているとしてよい。

ここで述べたような日本の文化的な背景や成熟し確立している技術をもとにして、宇宙農業構想（宇宙農業サロン、2005）では好気高温堆肥菌生態系の利用を検討している。宇宙農業におけるもう一つの微生物利用の概念として、排泄物や廃棄バイオマスの嫌気発酵によりメタンを生成して宇宙居住でのエネルギー源の一つにしたり、あるいはメタンなどを原材料とする有機化学合成により宇宙農業施設を拡大建造するためのポリマー素材を製造して利用するといった構想もあるが、ここでは好気高温堆肥菌生態系による物質の再生循環利用に限定して論ずることとする。

宇宙農業は、生物そして生態系といった要素をとりいれてそれらの個体数やはたらきを制御することによって安全かつ確実にヒトの生命維持機能を実現し、さらに快適な生活を送れるように環境や景観をつくりだす。宇宙農業にはさまざまな発展段階や規模があるが、当面の検討対象として、月や火星での100人の規模20年の運用期間を想定してその概念を検討している。月から火星に有人活動を拡大していくには日本がそれにより何を達成するかを明解に定義し、その実現にむけた総合的なシナリオとマイルストーンを日本独自に規定するのが必須のことである。同時に月・火星探査やそこでの有人活動の事業はその規模からして国際的な協力や分担がもとめられる。協力や分担のさまざまな領域のなかで宇宙農業、とりわけ微生物生態系の利用にかかわる部分での日本の寄与には期待すべき点が多

くある。

3. 宇宙農業での微生物生態系の適用にむけた開発・検証課題

農業において微生物やその生態系を利用することは、それを土壌の改良資材のひとつとして投入するというように意識的におこなうにせよ、あるいは所与の自然力のひとつとして意識せずに利用しているにせよ、微生物生態系を農業に適用することの効用についてはおよそ自明のことがらである。しかし宇宙農業ではその構成や運用に要求されることががら地上での農業とは異なる点が多くあり、つぎのような課題を検討して微生物生態系の適用の可否を判断しながら開発をすすめる必要がある。

3.1. 微生物生態系による物質の再生循環利用のエコノミー - そして循環物質は栽培植物に可給的な化学的形態であたえられるか

はじめにも述べたように、栽培植物体に含まれるH, C, Oの主要元素以外の化合物で肥料として農業系に投入される物質量は主要元素にくらべるとおよそ少ない。水や酸素のおよその所要量がそれぞれ100 kg/day person、1 kg/day personであるのに対し、肥料として処理する量はヒトの摂取量をめやすとすれば20 g/day personである。われわれが検討の対象としている100人20年の運用では肥料の総量は15トンとなる。ところで、Mars Habitation 2057（石川ら、1990）での火星居住（150人）のための輸送量の見積もりでは宇宙農業の施設の構成材料の質量は500トンとされていて、肥料の積算総質量はこれにくらべれば一桁以上少ない。したがって、この規模での宇宙農業における肥料の再生循環利用への要求、別なことばでいえば肥料成分を使い捨てすることへの輸送質量ではかるペナルティには強いものはない。肥料の再生循環利用を取り入れるにせよ、それはより大規模な系を構築するための試験的な段階としてとらえることができる。このような観点からすると、排泄物や廃棄物の適切な処理という側面の要求にこたえるのがこの段階での肥料再生循環利用のシステムではより重要であるのかもしれない。

物質循環再生のエコノミー（資源の配置）はシステム概念の検討において考慮すべき項目である。肥料の再生循環利用をとっても、微量元素を含めて完全な閉鎖循環を実現するのにいかにほどのシステム構成、重量や容積、さらに運用に要するエネルギーを要するのを見積もり、また実証することは重要

である。その結果をもとにして、一部の循環については外部との入出力を部分的に許容するオープンな系とするシステム構成との間でトレードオフをおこなうのがよい。すべての物質の完全閉鎖再生循環を実現しようとする、その装置の質量やその運用に要するエネルギーは地球生命圏のそれらを世界の人口で除した値よりはちいさな値にはなろうが、いずれ大きなものである。工学的なシステムをくみあげて閉鎖再生循環を実現することにより、われわれがいまは無償で享受している地球生命圏の物質循環とその調節を眼にみえる形で提示し、その価値の認識を公衆のあいだで広く共有して地球の環境・エネルギー問題の認識をあらたにするという意義がある。

さて宇宙農業における物質循環再生のエコノミーの解析では、物質循環の閉鎖率を 100% から順次下げてゆき、そのペナルティとしてオープンな循環となる部分をおぎなう消耗物資の積算質量を非 100% 再生循環システムの質量に加えた総質量を推定する。この値と閉鎖率の関係をみて総質量が極小となる閉鎖率を適正な設計として選択するのが物質循環再生のエコノミー、すなわち投下する資源の最適配置である。ただし、生命維持システムの構成を評価し最適化するには、質量ばかりでなくシステムが障害に対して強健であること、とくにカストロフィックで致命的な障害をもたらさずそれを予防した障害への対抗策が組み込まれて準備されていることが求められる。

栗原 (1975) は宇宙基地での生命維持についてほかの自然的な生態系と比較して「緊張のシステム」と特徴付けている。生態学のセントラルドグマは多様性と低生産性により安定な生態系の特性がもたらされるというものである。宇宙での閉鎖生態系の特徴は、そのシステムへの有機物、無機物ともに入力および出力がないことにくわえて、分解された無機物と合成された有機物の貯蔵 (シンクとストック) 量あるいは物質の循環流量に対する貯蔵コンパートメントへの出入りの流量が、たとえば地球規模でみた閉鎖生態系の物質循環流での貯蔵量や流量と比して極端にすくないことである。このようにしてうまれる強度な緊張は、閉鎖生態系の設計を次のようなものとする。すなわち、自然の生態系でみられる生物学的な調節作用に生命維持機能を依存させるのではなく、生態系を構成する生物個体の数やその生理学的な活動度を把握し、環境要素の摂動による生物個体の生理的な応答や生物間の相互作用の知識をもとに全システムの挙動を予測して

制御するといった様式を生命維持系の設計に採用させることになる。

しかし、宇宙農業が生物的なシステム要素のすぐれたはたらきを取りこもうとするのであれば、物質について完全な閉鎖循環を実現するというドグマを月や火星上の宇宙農業の指導原理にするのではなく、物質循環再生利用のエコノミーというシステム構成のための判定尺度をつかい、月や火星といった圏外でえられる資源の活用や一部の物質の系外からの補給やあるいは循環ループからの除去をも選択肢の中に入れてシステムの構成を設計するのがよい。また物質循環における貯蔵コンパートメントの関与割合を高めるのも生態系の運命を安定にする一つの方策である。

さて宇宙農業において物質循環の閉鎖度をたかめようとするならば、ヒトが摂取し排泄する成分や食料材料の非可食部分の主要元素 (H, C, O) 以外の成分が栽培植物に可給的な化学的形態で微生物生態系から与えられるかを検証しておかなくてはならない。循環の過程で植物に非可給的な形態となって循環から脱落していくのであれば、その部分を補充していくというペナルティを考慮しなくてはならない。主要な肥料成分のひとつであるリン酸イオンは二価のアルカリ土類イオンや遷移金属イオンと結合して不溶性の塩として沈積することにより植物に可給的な形態ではなく供給される懸念はあるものの、土壌中の微生物のはたらきによってリン酸イオンが可溶化されたりあるいは有機態のリン酸化合物が分解されて植物にあたえられるのも一方で知られている。問題は再生循環の装置内で沈積して循環のループからリンが脱落することかもしれない。

施肥設計にもとづいて栽培植物の種やあるいはその生育段階に応じて過不足無く肥料成分が与えられるかも問題となる。そのなかでの一つの課題は、ヒトをふくむ動物がナトリウムの摂取を植物食料材料以外にもとめ、したがって排泄物を処理した成分からナトリウムを除去したうえで植物にあたえる肥料とする必要のあることである。宇宙農業におけるナトリウムの選択的な除去についていくつかの方式が論じられている (山下ら、1985)。

3.2. 栽培植物の根系周辺に微生物生態系を形成することの利点はあるか

地球生命圏での土壌微生物のバイオマスをヒトのそれと比較すると、細菌にせよ菌類にせよヒトの 100 倍以上のバイオマスを有している。これらの微生物の挙動は生命活動を駆動する物質循環の

ありさまを大きく支配している。分子生物学的手段やさまざまな分析技術の発達もあって、土壤中に形成される細菌などの微生物や微小な動物、菌類の同定、それらが構成する生態系の挙動、それと相互作用する植物のはたらきについて多くの知見が蓄積されてきている。植物とこれら根系周辺の生物は共利的な関係にあったり、共生がみられたり (Ueda, 2001)、あるいは逆に植物の生長に障害を与えたりする。アレロパシーは植物が生理活性な化合物を産生して周囲の生物に抑制的あるいは賦活的な影響をあたえる現象である。根粒細菌は植物の根に進入して窒素固定することにより植物の生産性を高める。菌類は菌根を形成するなどして根系周辺の根が直接には摂取できない肥料成分をひろく集めて植物にひきわたす。これらとひきかえに植物からは光合成産物が根粒細菌や菌根菌にあたえられる。根系周辺の「健全」な微生物生態系が栽培植物の生産性をどのように増進し、またその健全性を維持するのになにか整えられるべきかなどについて、経験的な知識は蓄積されているものの、その定量的な評価や作用機構についての科学的な解明は十分になされているとはいえない。土壌微生物が産生する腐食質の物理・化学的な特質や植物の生育にあたえる影響をかわきりに、土壌微生物の間での資源をめぐる競合や、病原菌に対する植物の耐性や共生菌による防護など、農業と土壌微生物のかかわりにはいくつかをあげることができる。微生物生態系やそれが作り出す土壌中の物理的形態や化学的構造が、肥料成分を保持するストックとなったりまた pH やイオン濃度を適正な範囲に保持するような緩衝効果をもたらすかについても評価し、またそのようなことを実現するための処理プロセスを明らかにすることがもとめられる。宇宙農業構想において利用を想定している好気高温堆肥菌生態系により作出される「土壌」が、栽培植物の根系の発達やそのはたらき、さらに植物と共生する微生物やその生態系に有利な環境をあたえるかどうかを評価する指標や分析方法を規定して栽培試験を実施する必要がある。

根系にとっての土壌の作用や微生物生態系が形成されることの利点が明確にされ、またそれを良好な状態に維持するためのモニターや制御の実施や障害の予防的監視・回避方法を策定し実証することができれば、根系環境を容易に制御できる水耕栽培ではなく土耕栽培が選択される。土壌は微生物にとって多様な棲息環境を与え、多様な種からなる生態系をそこに実現するものと推定される。しかし仮に水耕栽培が宇宙農業で採用されるにせよ、ひと

たび障害が発生すると連結している一つの養液循環系のなかで障害が急速に伝搬することもある。水耕養液中や根系表面での微生物相の作用やその制御は水耕栽培法で検討しておくべき技術的な課題のひとつである。

3.3. 月や火星や小惑星の資源の宇宙農業への活用 に微生物生態系は寄与するか

宇宙農業の指向するところは、地球から資源を持ち出すことなく、宇宙農業を設営する月や火星、また火星に設営するなら火星表面に加えて小惑星や月から得られる資源を活用することにより輸送系への負荷を低減し、また宇宙で自立的な活動や生活空間の構築を可能にするところにある。レゴリスや表面の岩石の鉱物学的な特性をしらべ、これらを宇宙農業施設の構造材として活用できないかとか、あるいはレゴリスや岩石の鉱物から肥料成分を引き出せるかどうかを検討している。

生命の発生とその進化にとって、生物体を構成する素材としての元素がその棲息域でどのように確保できるかは、環境への生命の適応性の重要な要素の一つである。長野 (1980) は、宇宙での物質進化の帰結としてある太陽系や地球の元素構成を生命という観点から、つぎのようにまとめている。太陽系の元素組成は、ビッグバン以来の宇宙での核反応によって生成してきた元素の組成であり、何回かの星の形成と爆発を繰り返してきたことによりその組成がぎまっている。太陽系星雲からいくつかの惑星がつくられ、それぞれの惑星の元素組成は星雲のなかでのその惑星の位置にしたがって、星雲の中で形成されていた元素分布を反映して原始惑星の元素組成がぎまった。そしてそれぞれの惑星のたどった異なる歴史が、最初の太陽系での元素組成から現在のその惑星の表面にみられる元素組成へと変遷させた。地球の固体部分は形成し冷却する過程でコアとマントルに分化し、さらにマントルから地殻が分化した。さらに活発な地殻の活動や大陸の形成、火山活動などによって多様な鉱物が生成している。鉱脈の形成の一つの要因は生物の選択的なイオン取り込みと集積であったりもする。

一方、月や火星では基本的にはマントルの分化にとどまり、その結果表面のレゴリスや岩石の元素組成は地球の表面や地殻のそれとはかなり異なる。しかし火星ではかつて表面に海があり、また火山活動のあったことも表面地形などから知られている。火星隕石の分析やいくつかの火星探査によっておよそその鉱物学的な情報が得られ、あるいは推定されている。近年に実施された火星の探査により、こま

かな地形や特に火星表面の岩石の微視的な情報が多く得られており、火星表面の鉱物学的な描像をあらためて整理している。

太陽系での元素組成と惑星の元素組成で異なる点は、揮発性の元素が惑星から失われているということである。地球についていえば、ケイ素の存在量により相対化した値で、希ガスについておよそ10桁ほど太陽系の値より低く、惑星形成の過程やその後の歴史で消失している。酸素は他の元素と結合して蒸気圧の低い酸化物を作ったことにより、およそ1桁しか低下していない。水素、炭素、窒素についてみると、それぞれ6、4、5桁ほど太陽系より低い。

非揮発性の元素の分布について Emiliani (1992) は、太陽系、全地球、地殻、玄武岩（海洋底）、花崗岩（大陸）などを比較している。太陽系と全地球の非揮発性元素の分布に大きな差はない。原始地球の表面が冷えながら内部に金属のコアが分化したり、表面が固化するなどいくつかの層に分化してきた。その過程で、それぞれの層の圧力や温度にしたがって、特に密度がことなるよう化学的なしくみにより元素の分布が分化していった。大陸の地殻を代表する花崗岩は、その密度が小さいことにより、厚い地殻をつくって海の上に大陸をもちあげている。

全地球と花崗岩の元素組成を比べると、花崗岩で増大するのは Na, Al, Si, K, Ca などであり、大きく減少するのは Mg, Fe である。

生物体側から元素の組成をみると、Fig. 2 のようになる。ここでは、植物の乾量のなかにしめる元素のわりあいを多い順に左から右へと並べている。原子数の相対対数値を縦軸として、植物体 (Taiz & Zeiger, 1998)、河川水 (利根川、理科年表)、地球の地殻、太陽系 (化学便覧)、火星の表層の値 (Kieffer et al, 1992) を比較している。植物体をのぞき、4つの値はケイ素の原子数を同一にすることで比較している。植物体を構成する元素については、炭素の原子数を太陽系の値とあわせて比較している。水素、炭素、酸素の主要3元素とチッ素は揮発性の元素であり、別に論じなければならない。非揮発性のカリウム以下の元素についてみると、当然のこととして、植物体の構成元素は河川水での元素の分布とさほど異なることはない。植物は必要な元素を選択的に体内に取り込むしくみや、あるいは逆に取り込まないしくみを発達させているものの、利用可能な元素が確保できて生命を持続し拡大させてきているということは否めない。河川水の成分は、陸地への降雨により大陸の地殻を構成する鉱物の

Fig. 2. Elemental composition and space agriculture
Relative number of atoms of major elements that consist plant body is plotted with the logarithmic scale. Elemental comparison is made between plant body, river (Tone) water, Earth crust, solar system and Mars surface. The values for other than plant body are normalized to Si. For plant body, C is normalized to that of solar system.

なかから水に溶けだした成分と、生命圏が構築された後は生命活動の産物やその作用により溶解した成分である。上に述べたように、地球の地殻、とりわけ大陸をつくった地殻には太陽系や地球全体に比べてカリウムが30倍以上濃縮されている。

ここで火星の表層の元素組成をみると、多くの元素で太陽系の組成と近く、カリウムの密度は低い。これは火星の形成から現在に至る過程での火星内部での非揮発性元素の所在の分化が地球ほどには進行しなかったことを示している。植物体の組成と比べるとカリウムの濃度が低い。希少な元素ではホウ素の火星での存在比が不明である。なお、火星の地質学的、鉱物学的な知見は、火星表面の探査をローバーによっておこない、いくつかの手法で鉱物種や化学的組成が1990年後半以降詳しく調べられており (McSween, et al, 2004)、その中にはナトリウム、カリウムを多く含む岩石の存在も知られている。

次に揮発性元素についてみると、炭素、酸素は火星の大気に資源を求めることができる。火星表面での大気中の二酸化炭素分子の数密度は、地球大気中の数密度に比べて20倍である。火星の大気中の水の分圧は低く、また表面には北極の極冠をのぞけば水が大量に存在することはない。しかし、Boynton, et al, (2002) は熱的中性子の観測から、火星の表層ちかくに水素（水の氷）の存在することを報告している。近年に鉄砲水の噴出があったことを示す高精細な火星表面地形が観測されたり、また赤道近くの表層に氷結した北極海ほどの大きさの海があるとの推定もあり (Murray, 2005)、火星のそれほど深くない部分から水を農業の資源として採取できる可能性を示している。

チッ素は火星大気中で二酸化炭素につぐ濃度で存在している。ただし、その数密度は地球大気に比べて3桁以上低い。Mancinelli & Banin (2003) が説明しているように、チッ素の同位体比が軽い同位体の欠損をしめすことから、火星大気から宇宙空間へとチッ素が逃散したことが推定される。火星には磁場がないために太陽風が大気を構成する分子・原子の軽い成分を火星から引きはがした。チッ素と水素からなるアンモニウムイオンは、1価の正イオンであること、また大きさがちょうどカリウムイオンとおなじことから、カリウムをふくむ鉱物においてアンモニウムがカリウムと入れ替わって火星の地殻の中にチッ素が貯蔵されている可能性がいわれている。地球の地殻をみるとチッ素の含量は低い。火星の地殻中のチッ素を資源として利用す

ることができるかの判定は、火星での地質鉱物の調査を待たなければならないが、いかに期待できるかについては不明なところが多い。河川水中のチッ素が高濃度であるのは、生物起源のチッ素である。

火星における農業資源としての元素についてまとめると、H, C, O の植物体主要三元素は火星大気および表層下の氷から得ることができる。N は火星大気中のチッ素分子を濃縮した上でチッ素固定して植物が摂取できる形態に変換する必要がある。K は火星の岩石やレゴリスから得られるがその存在密度は低い。他の元素についてはおおむね火星の表面に存在する。月や火星表面のレゴリスなどが、その物理・化学的な特性において宇宙農業で想定する微生物生態系を構築して期待する機能を発揮させることができるかは評価の一つの項目である。大まかな特徴として地球でいえばマントル起源の鉱物組成であって、鉄などの含量が高い。また風化の機構のちがいによって、粒系分布や微視的な構造の相違もある。栽培植物の生長に対して抑制的な成分が土壌基材として取り込まれるレゴリスにあるなら、その除去や低減に有効な方法を用意しておく必要がある。

火星の大気を資源として余剰の酸素を蓄積していく一つの方法は、地球がこれまでに二酸化炭素と水から光合成により酸素とバイオマスを生産し、バイオマスあるいは炭素を地球内部に埋め込んできたのとおなじような過程を実現すればよい。火星大気を原料として樹木の光合成により産生するバイオマスをたとえば木材として利用することにより酸素を二酸化炭素に再変換しないで蓄積していくのは一つの方法である。

3.4. 好気高温堆肥菌生態系は宇宙農業を確実・安全に機能させるか

生物や生態系をシステム要素としてふくむときには、複雑で非線形性がつよくさらに応答時間や記憶効果のある生命システムの特徴を考慮する必要がある。統合したシステムの安定性を確保するには、生物に特有なこれらの特性や挙動について十分な理解のもとにシステムの構成を設計し、安定な運用のために制御手法を用意しておくのが要求される。

地球生命圏では厚い大気層や強い磁場によって宇宙線や太陽からの短波長光から生命活動を遮蔽保護している。このような遮蔽が不十分な条件では、堆肥菌の遺伝的な変異やそれによりもたらされる生態系の遷移の危険性について評価し、安定で確実な運用を確保するための方策を確立しておかな

くてはならない。

微生物利用の安全性の評価は重要な項目である。ここで好気高温堆肥菌生態系にかぎって論ずるならば、安全性についておよそ肯定的な推定をすることができる。病原性であったり有害な細菌の多くは嫌気的な条件で盛んに活動するものが多い。好気高温状態に維持することによって、このような条件下で活発に増殖する細菌種や高温に耐性な細菌により微生物生態系は構成される。プロセスが均一な液相とかではなく不均一な基材の上で進行するために、環境の一部は高温嫌気的な条件となりうる。さて、原材料中に含まれる他の微生物さらに動物・植物・菌類は高温好気条件に曝露されてほとんどが死滅する。そして、生成物が常温条件に戻されると、高温状態で活性が高かった細菌種の活動は低下してしまう。ヒトの体温ではこれらの細菌の活性や増殖は抑制されている。しかし、好気高温堆肥菌生態系は高温嫌気状態で活性な細菌や常温から活発な活性をしめして昇温させていくエネルギーを供給する細菌など多様な種から構成されているのは確かであって、こと安全性ということでもあり、慎重に評価・検証する必要がある。

宇宙では短波長の太陽光や宇宙線など遺伝情報をなう分子を分解したりあるいは変異させる要素がある。好気高温堆肥菌やその生態系において宇宙に特異的な遺伝的な変異があるのかどうか、また一般的な変異にせよ生態系に大きな影響をあたえたり人間や農業生産に阻害的な要素になるかを検証し分析しておくことが求められる。また病原性細菌を検知する方法を規定し、病原性細菌が増殖したりあるいは農業生産を阻害するような他の要因が発生した場合の措置方法をあらかじめ用意しておく。宇宙農業で採用する微生物生態系が、たとえば抗生物質の混入によって崩壊したりその処理機能が阻害されることを防止するための方策もシステムの設計や運用の指針に組み込んでおくのも重要なことである。

宇宙農業の拡張した目的の一つは、人間をとりまく微生物生態系を健康で快適な生活を可能にするように構成し維持することにある。好気高温堆肥菌生態系がつくりだす土壌が有害な微小生物の増殖を抑制するか、またその土壌に接する人間にどのような肯定的あるいは否定的な影響をあたえるかをみておくことが必要である。人間に由来する細菌が宇宙農業で計画される微生物生態系にどんな影響をおよぼすのか、また宇宙農業の微生物生態系とその産物が人間の体表面や消化管などで有用な働き

をしている細菌相を変化させるのかどうかを評価する。

また、高温好気堆肥菌生態系が重金属をことさらに濃縮・集積するかは、地球の地殻の成分とは異なるレゴリスを土壌を生成する素材として利用することもあって、レゴリスの利用とあわせて評価すべきである。あるいは有害な重金属を不溶態として保持するような土壌を形成するかについてもしらべておく。人間にとって有害な元素を濃縮集積する能力があるのならバイオ・リメディエーションとして活用することもできる(石川ら、2001)。

高温好気堆肥菌プロセスは、バイオマスを分解し好気的な環境で酸化して二酸化炭素と水を主たる生成物とする発熱反応プロセスである。プロセス中の温度は高温好気堆肥菌の代謝反応の上限温度を超えて昇温することはまれである。しかし、防災という観点からは、高温好気堆肥菌プロセスにおいて反応層の一部が嫌気状態となり、還元的な雰囲気の中で有害な気体を生成したりあるいはメタンや水素などが微生物によって産生する可能性のあることに留意して、これらの気体の集積により発火することを防止するようにシステムを設計する必要がある。

4. どのように微生物生態系を利用する宇宙農業を(日本において)すすめるか

新しくNASA長官に就任したM.D. Griffinは、2004年3月の米国議会科学委員会での証言において、Bush大統領の提唱した宇宙探査計画の実現にむけ努力するのであれば月を経由する火星有人探査の開発のための時間および財政的資源に拮抗する国際宇宙ステーションへの追加的な支出は困難であるとしている。NASAはすでに月から火星にむけた宇宙飛行を実現するための組織再編成をすすめており、これにかかわる課題解決・実証のためのテストベッドとして国際宇宙ステーションを位置づけなおしている。そして国際協力の方式は国際宇宙ステーションでの経験を反省して、戦闘機の共同開発方式を適用するとの構想がNASAにおいて浮上している。

微生物生態系を利用する宇宙農業を日本からの計画への寄与の一つとすることは、本文で説明した日本で関連技術が成熟していることなどから適当であると判断できる。また生命維持技術の体系を多様なものとして確立することによって、ロバストなシステムの構築をはかることができる。宇宙農業概念をつくりあげ、その開発計画のなかに国際宇

宙ステーションや月で検証すべき項目を定義して、火星での宇宙農業への段階的な技術開発のマイルストーンをさだめ、火星上でどのように建設拡大していくかのシナリオを策定していくこととしたい。各段階でのシステムへの機能要求とそれにしたがうシステム構成を設計して、その構築のための資源の配置や輸送系や運用エネルギーへの要求などを明らかにしていきたい。

はじめにあきらかにしたように、宇宙農業における微生物生態系の利用は、当面想定する規模の有人活動における栽培植物の肥料再生循環ということではそれをすすめる意義を主張することはできないだろう。しかし、「ゴミ」や排泄物を閉鎖した生活空間のなかで適切に処理する方法として微生物生態系の利用は有力な候補である。特に、火星の有人探査では、その主たる目的が火星での圏外生命探査である。先行する無人探査ほどの惑星検疫は適用できないが、有人探査に移行したあとでも地球由来の生物やその産物により探査対象である火星を汚染するリスクは最小限に抑制しなければならない。管理された微生物生態系の維持が宇宙農業と圏外生物学探査の双方によって要求される。

われわれの構想は、宇宙で物質資源の再生循環利用をおこなう自立的な宇宙農業をおこない、さらに進出した月や火星の表面で得られる資源をもとにして拡大再生産していくことを実証する初期の段階のエンジニアリング（工学）としている。また人間をとりまく微生物生態系を、健康で快適な生活を増進できるように維持していくことが宇宙農業の拡大した目的のひとつである。

このような宇宙農業の構想を検討し開発研究をすすめる駆動力のみなものひとつは、地球のエネルギー・環境問題の解決にこの宇宙農業の構想が有効であると期待していることにある。火星の探査への取り組みは人類文明の持続発展と人類の健康な好奇心の所在をしめすものである。宇宙農業にかせられる要求にこたえることは、地球生命圏の有限の資源をいかに利用して健康で知的な生活を確保するかに答えるのにひとしい。持続的に発展する文明を指向するのに、地球の資源の有限であることを前提にしてどのような物質の循環再生をはかるかを、そしてそもそもどんな生活様式を求めるかについて、宇宙農業をよいテストベッドとして活用することができる。新石器時代初期に開始された農業（Monje ら、2003）がその生産性のたかさをもってメタ・生命システムとしての文明を可能にし、また農業生産に付随する社会が成立し発展したこと

により超自然的な生命システムの階層ともいえる文明を発達させた。そのなかで科学というすぐれて人間的な活動をうみだし、その成果は近代農業の発展の基礎となっている。人類社会での分業の発達や高度に細分化した科学は、ともすれば自然にたいするわれわれの総合的な想像力をかえって減退させている。宇宙農業への取り組みは、すぐれて知識の総合化を要求しその成果が全地球的な問題の解決に寄与する点で普遍的な意義を有している。

参考文献

- Space Agriculture Saloon Web address: http://surc.isas.jaxa.jp/Space_Agriculture/
- Member: 新井 真由美, 石井 忠司, 石川 洋二, 泉 龍太郎, 稲富 裕光, 大島 泰郎, 大島 博, 大森 克徳, 大森 正之, 鏡味 裕, 片山 直美, 片山 新太, 金澤 晋二郎, 刈屋 達也, 河崎 行繁, 北宅 善昭, 小池 惇平, 小島 洋志, 後藤 英司, 齋藤 高弘, 齋藤 孝夫, 嶋宮 民安, 清水 強, 白石 篤志, 高沖 宗夫, 高橋 秀幸, 武田 弘, 谷 晃, 田村 憲司, 都木 恭一郎, 富田 (横谷) 香織, 中島 厚, 長友 信人, 中村 輝子, 新田 慶治, 橋本 博文, 馬場 啓一, 平藤 雅之, 藤井 義晴, 藤田 修, 水谷 広, 三原 恵二郎, 宮川 照男, 向井 千秋, 森 滋夫, 矢野 幸子, 山崎 直子, 山下 雅道, 横田 博樹
- Boynton, W.V. *et al.*, (2002) Distribution of Hydrogen in the Near Surface of Mars: Evidence for Subsurface Ice Deposits, *Science*, **297**, 81-85.
- Emiliani, C. (1992) Planet earth, Cosmology, Geology, and the Evolution of life and Environment, Table 9.2, Cambridge Univ. Press.
- 藤田紘一郎 (2005) 「きれい好き」が免疫力を落とす、講談社。
- Ishikawa, Yoji, Takaya Ohkita, Yoji Amemiya (1990) Mars habitation 2057: Concept design of a Mars settlement in the year 2057, *J. British Interplanetary Society*, **43**, 505-512.
- 石川洋二, 千野裕之, 辻博和 (2001) 油汚染土のバイオレメディエーション技術の高度化 (その 1) - 堆肥の添加による多環芳香族炭化水素の分解 - 大林組技術研究所報, **63**, 81-84.
- 金澤晋二郎, 山村友王, 柳田裕紹, 蔵本寛基 (2003) 超高温・好気発酵法によるバイオハザードフリーコンポストの製造新技術, 土と微生物, **58**, 105-114.
- Kieffer, H.H., B.M. Jakosky, C.W. Snyder, M.S. Matthews (1992) Mars, Univ Arizona Press.
- 栗原康 (1975) 有限の生態学 - 安定と共存のシステム -, 岩波新書 G92, 岩波書店。
- Mancinelli, R.L. and A. Banin (2003) Where is the nitrogen on Mars? *Int. J. Astrobiology*, **2**, 217-225.
- McSween, H.Y., *et al* (2004) Basaltic rocks analyzed by the Spirit rover in Gusev crater, *Science*, **305**, 842-845.
- Monje, O., G.W. Stutte, G.D. Goins, D.M. Porterfield, G.E. Bingham (2003) Farming in space: Environmental and biophysical concerns, *Adv. Space Res.*, **31**, 151-167.
- Murray, J.B. *et al.* (2005) Evidence from the Mars Express

High Resolution Stereo Camera for a frozen sea close to Mars' equator, *Nature*, **434**, 352-356.

長野敬 (1980) 物質の進化, 化学総説, **30**, 197-219, 日本化学会編.

Taiz, L. and E. Zeiger (1998) *Plant Physiology*, 2nd ed. Sinauer Assoc.

高橋英一 (1987) ミネラルの循環, in 宇宙における生物学および農学の展開, ISAS.

Ueda, Kenji, Michiyo Ohno, Kaori Yamamoto, Hanae Nara, Yujiro Mori, Masafumi Shimada, Masahiko Hayashi, Hanako Oida, Yuko Takeshita, Mitsuyo Nagata, and Teruhiko Beppu (2001) Distribution and diversity of symbiotic thermophiles, *Symbiobacterium thermophilum*, and related bacteria, in natural environments, *Appl. Environ. Microbiol.*, **67**, 3779-3784.

V. der Ryn, S. (1980) トイレットからの発想, (訳: 西村肇、小川彰) ブルーバックス, B-317.

山下雅道, 大矢晴彦, 新田慶治, 谷田沢道彦 (1985) 閉鎖生態系 - 宇宙農業におけるナトリウムとカリウムの循環, 日本航空宇宙学会誌, **33**, 288-296.

山下雅道, 新井真由美, 石井忠司, 石川洋二, 泉龍太郎, 大島泰郎, 大島博, 大森克徳, 片山直美, 片山新太, 金澤晋二郎, 刈屋達也, 河崎行繁, 北宅善昭, 後藤英司, 齋藤高弘, 清水強, 白石篤志, 高沖宗夫, 高橋秀幸, 谷晃, 都木恭一郎, 富田(横谷)香織, 中島厚, 長友信人, 新田慶治, 橋本博文, 平藤雅之, 藤井義晴, 水谷広, 三原恵二郎, 宮川照男, 向井千秋, 森滋夫, 矢野幸子, 山崎直子, 横田博樹 (2005) 宇宙農業構想, *Space Utiliz. Res.*, **21**, 323-326.

Engineering issues of microbial ecology in space agriculture

Masamichi Yamashita, Yoji Ishikawa, Tairo Oshima, and Space Agriculture Saloon

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

Closure of the materials recycle loop for water-foods-oxygen is the primary purpose of space agriculture on Mars and Moon. A microbial ecological system takes a part of agriculture to process our metabolic excreta and inedible biomass and convert them to nutrients and soil substrate for cultivating plants. If we extend the purpose of space agriculture to the creation and control of a healthy and pleasant living environment, we should realize that our human body should not be sterilized but exposed to the appropriate microbial environment. We are proposing a use of hyper-thermophilic aerobic composting microbial ecology in space agriculture. Japan has a broad historical and cultural background on this subject. There had been agriculture that drove a closed loop of materials between consuming cities and farming villages in vicinity. Recent environmental problems regarding garbage collection and processing in towns have motivated home electronics companies to innovate "garbage composting" machines with bacterial technology. Based on those matured technology, together with new insights on microbiology and microbial ecology, we have been developing a conceptual design of space agriculture on Moon and Mars. There are several issues to be answered in order to prove effectiveness of the use of microbial systems in space.

- 1) Can the recycled nutrients, processed by the hyper-thermal aerobic composting microbial ecology, be formed in the physical and chemical state or configuration, with which plants can uptake those nutrients? A possibility of removing any major components of fertilizer from its recycle loop is another item to be evaluated.
- 2) What are the merits of forming soil microbial ecology around the root system of plants? This might be the most crucial question. Recent researches exhibit various mutually beneficial relationships among soil microbiota and plants, and symbiotic ecology in composting bacteria. It is essential to understand those features, and define how to conduct preventive maintenance for keeping cultivating soil healthy and productive.
- 3) Does microbial ecology contribute to building sustainable and expandable human habitation by utilizing the on site extraterrestrial resources? We are assessing technical feasibility of converting regolith to farming soil and structural materials for space agriculture. In the case of Mars habitation, carbon dioxide and a trace amount of nitrogen in atmosphere, and potassium and phosphorus in minerals are the sources we consider. Excess oxygen can be accumulated by woods cultivation and their use for lumber.
- 4) Is the operation of space agriculture robust and safe, if it adopts hyper-thermophilic aerobic microbial ecology? Any ecological system is complex and non-linear, and shows latency and memory effects in its response. It is highly important to understand those features to design and operate space agriculture without falling into the fatal failure. Assessment should be made on the microbial safety and preparation of the preventive measures to eliminate negative elements that would either retard agricultural production or harm the healthy environment.

It is worth to mention that such space agriculture would be an effective engineering testbed to solve the global problem on energy and environment. Mars and Moon exploration itself is a good advocate of healthy curiosity expressed by the sustainable civilization of our humankind. We propose to work together towards Mars and Moon with microbial ecology to assure pleasant habitation there.

Key words: Space agriculture, Thermophilic aerobic composting bacteria, Symbiotic bacteria