

微細藻類ユーグレナの宇宙における食利用の可能性

鈴木健吾 (株式会社ユーグレナ 執行役員 CTO)

豊川知華 (株式会社ユーグレナ R&D センター 先端科学研究所)

Potential of Microalgae Euglena for Food Use in Space

Kengo Suzuki

Executive Officer CTO, Euglena Co., Ltd.

Chibana Toyokawa

Advanced Science Research Institute, Euglena Co., Ltd.

【要旨】 地球や宇宙の物質循環におけるバイオマスとして、光合成を行う微細藻類ユーグレナの利用が検討されている。微細藻類は、光合成によって閉鎖的な生息環境に放出された二酸化炭素を固定し、酸素を発生させる。また、微細藻類は人間の生活排水に含まれる窒素とリンを利用して増殖し、タンパク質などの多くの栄養素を生産する。将来、人類が月や火星などに長期滞在する際に、資源循環型の持続可能な食料生産システムに微細藻類の培養システムを組み込むことが検討されており、各国で開発が進められている。本書では、株式会社ユーグレナが取り組んできた微細藻類ユーグレナのバイオマス利用に関する研究について包括的に紹介し、さらに宇宙利用の観点からユーグレナおよび微細藻類に期待される役割を考察する。

【キーワード】 微細藻類 ユーグレナ 宇宙 ゲノム編集 発酵

【Abstract】 The biomass of the photosynthetic microalgae *Euglena* is being considered for use in the material cycle on Earth and in space. Microalgae fix carbon dioxide released into a closed habitat through photosynthesis to generate oxygen. In addition, microalgae utilize nitrogen and phosphorus contained in human domestic wastewater to propagate and produce many nutrients such as protein. In the future, when humans stay on the moon or Mars for long periods of time, it is being considered to incorporate microalgae culture systems into sustainable food production systems based on resource recycling. This paper introduces the overall research on biomass utilization of microalgae *Euglena* that Euglena Co., Ltd. has been working on and discusses the expected role of *Euglena* and microalgae from the viewpoint of utilization in space.

【Keywords】 Microalgae Euglena Space Genome Editing Fermentation

1. はじめに

現在の人口増加に伴う食料の需要増加に加えて、食料生産における環境負荷軽減の必要性が強く認識され始めている。また、人の生活圏の拡大もかねて、地球外での宇宙における居住の可能性検討と技術開発も進められている。人の生活をベースにした閉鎖

空間における物質循環に関する技術開発は、地球上の顕在化している課題も、新しく作り出す宇宙における生活空間における課題も両方解決できる可能性がある。

そういった課題が認識される状況下で、単位体積、単位面積当たりの生産性が高い微細藻類を利用した新しいフードテックが注目を浴びている。中でもユーグレナという微細藻類は、高濃度の二酸化炭素

に対する耐性を持ち増殖することから、低炭素社会実現に向けたエネルギー・環境問題の解決を担う可能性がある生物として期待されている。ユーグレナは植物と動物の両方の特徴を持ち、59種類もの豊富な栄養素を含んでいる。さらに、ユーグレナ特有の成分であるパラミロンは、腸内環境の維持と免疫調整機能を果たすことから、ヘルスケア分野においても期待が高まっている。

地上においては、株式会社ユーグレナによって物質循環の実現を目指した佐賀サステナブルテック・ファームが開設され、液体肥料、培養土に続き、肥料の研究を推進し、微細藻類ユーグレナを介した資

源循環型農業の実現の検討が進んでいる。具体的には、微細藻類ユーグレナを下水処理場の未利用資源を活用して育て、微細藻類由来の肥料を生産してそれを農作物生育に活用することで、資源循環型農業の実現を目指すことを目的としている。

2021年からは、地球と宇宙の共通課題である「食」の課題解決を目指す共創プログラムであるSPACE FOODSPHEREの中の「バイオ食料リアクター」を研究開発するチーム内の枠組みで、微細藻類を用いた高効率な食資源の原料に関する研究開発が進められている（図2）。本著では、将来的に2040年の月面で人々が居住することなどを中心に宇宙利用に関

図1 「サステナブルテック・ファーム」のコンセプトイメージ

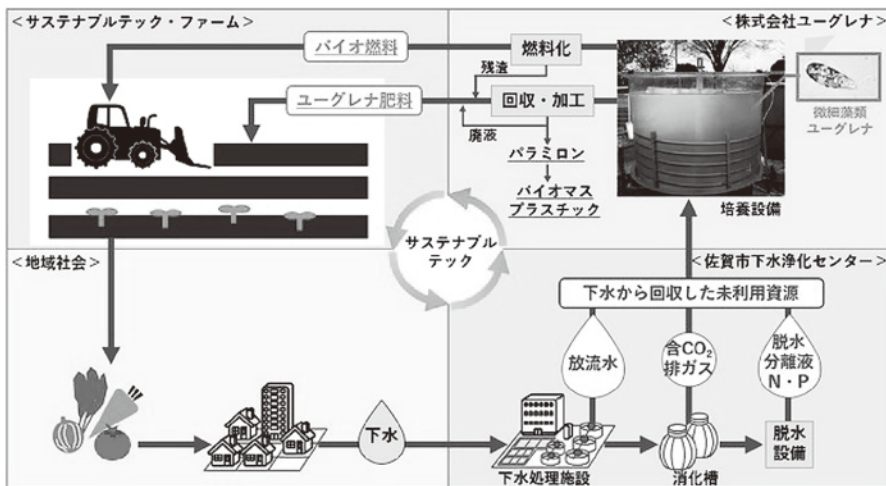


図2 バイオ食料リアクターのイメージ図（出典：SPACE FOODSPHERE）



する可能性を見据えた考え方や実施されている内容について紹介する。

2. 宇宙における資源循環型食料としての微細藻類の利用可能性

2.1. 閉鎖系における微細藻類の役割

月面基地などの閉鎖空間において、人が長期滞在するための生活環境システムの構築を検討する際に、滞在時に発生する廃棄物中の資源を有効活用することが大きな課題である。ISS（International Space Station）では、水の電気分解とサバティエ反応の二つを活用し、居住空間に溜まった二酸化炭素を酸素に変換する技術が、ECLSS（Environmental Control and Life Support System）の仕組みとして実際に取り入れられている。



サバティエ反応では、酸素生成時の副産物として得られる水素が使われるが、呼吸によって発生した等量の二酸化炭素を除去するためには水素が不足するため、余剰な二酸化炭素は吸着して廃棄物として処理する必要がある（Mansell, Abney and Miller, 2011）。この問題に対する解決策として、高等植物、微細藻類などの光合成生物を利用することで、二酸化炭素と生活排水から酸素と食料を作り出し、生活に活用することができる水を再生する方法が検討さ

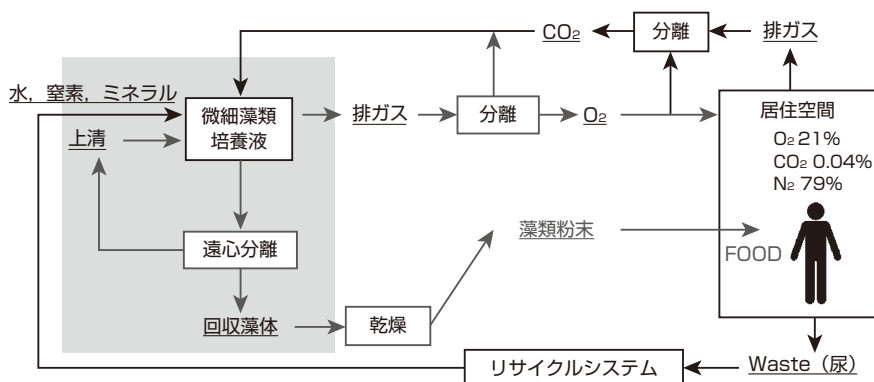
れている。特に微細藻類は、高等植物に比べて成長が速く、さらにバイオマス全体が可食部であり廃棄物が少ない点において、資源循環型食料生産への利用が期待されている（図3）。

2.2. 宇宙での微細藻類利用の歴史

宇宙に関連した微細藻類の実験の歴史は古く、これまで数多くの試験が行われてきている（Niederwiesera, Kociolek and Klaus, 2018）。軌道上における藻類の最古の記録では、1960年にKorabl-Sputnik 2で緑藻の一種であるクロレラの液体培養に成功し、軌道上で基本的な生理機能や光合成機能を維持できることが示されている（Semenenko and Vladimirova, 1961）。その他に、各国の地球上における閉鎖隔離環境施設で微細藻類の培養試験が実施された報告事例もあり、ISSにおける低軌道ではスピルリナ培養の実施例も存在している（Fahrion, Mastroleo, Dussap and Leys, 2021）。主にこれらの研究の中でも、微細藻類培養は基本的には液体中で実施するため、低軌道における微小重力環境下と、火星または月面を想定した低重力環境下での適切な培養方法は異なると想定されて考察がなされている。月面などの低重力環境を想定した微細藻類培養方法は検討され始めたばかりである（Detrell, 2021）。

物質循環を想定した際には、人の生活排水を効率よく利用できるかが重要となる。微細藻類の中でも人の尿の主要成分である尿素を資化できるクロレラや、尿中に含まれるアンモニア態窒素を資化できるユーグレナ、尿素とアンモニア態窒素を資化できる

図3 閉鎖系の微細藻類を利用した物質循環モデル



クラミドモナスなどの利用が検討されている。また、国内では、植物の非可食部残渣の硝化反応によって得た硝酸態窒素を資化できるスピルリナを用いた担持体培養が検討されている。既に国際宇宙ステーションでの培養経験がある種も存在するが、微細藻類の種それぞれに長所・短所が存在する。

欧州宇宙機関 (ESA) における MELiSSA プロジェクトにてスピルリナが採用された例があるが、スピルリナは塩基性培地での培養が必要であることから、藻体濃度が高くなるにつれてアンモニアが発生し、閉鎖空間では増殖が阻害される問題が生じる。また、同様にクロレラなどの真核緑藻の利用も検討されるが、細胞壁の存在により生食での栄養供給源としては難があり、中性 pH での培養が必要であることから雑菌の増殖など、スピルリナの場合とは異なる問題が報告されている。これらのことから、微細藻類の宇宙での培養利用には、培養システムの構築と改良に加え、宇宙空間での培養に適した種の選定、品種改良など、複数の観点からの考察が必要とされる。

2.3. 資源循環系のユーグレナ培養方法の検討

ユーグレナは、培養液中にある糖、アルコール、アミノ酸など様々な炭素源を利用して増殖が可能であり (Tani and H. Tsumura, 1989; Richtera, Liu, An, Li, Nasir, Strauch, Becker, Krüger, Schuster Ntefidou, Daiker, Haag, Aiach and Lebert, 2015), 尿中に含まれるアンモニア態窒素を資化することも可能である。また、ユーグレナは乾燥重量の 30~50% がタンパク質であり (中野・宮武・乾・穂波・村上・金井・辰巳・相賀・近藤, 1998), 微量栄養素であるビタミンやミネラルを幅広く含有している点が優れている。また、ビタミン B₁, B₁₂ を除く全てのビタミンを合成できるため、植物だけでは確保が難しいビタミン D の供給を担うことができる。ユーグレナは DNA 損傷の要因となる電離放射線や UV に非常に高い耐性能を有しており、宇宙での利用に適していることが期待されている。

月面等の閉鎖空間の微細藻類の培養は、培養環境を高度に制御する必要があることから人工光を用いての生産が一般的に検討されている。我々は、月面

等の低重力環境での藻類培養方法を検討するにあたり、アクリル板を用いた平板型フォトバイオリアクター (縦 1,000 mm, 横 500 mm, 厚さ 100 mm) を作成し、安定的に連続培養する技術開発を進めている (図 4)。

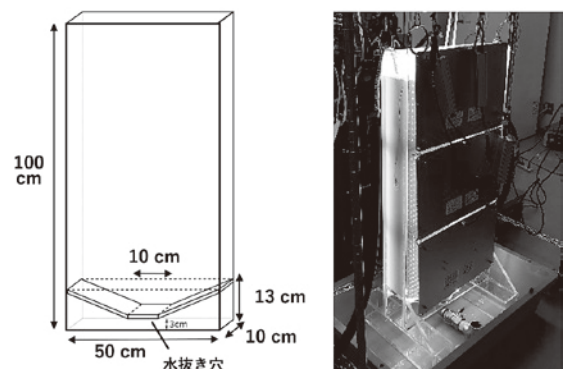
この平板型フォトバイオリアクターの設計時には底に斜面を作ることで、回転式の水流を起こし、細胞の攪拌を可能とした。また、光源として LED パネルを 3 枚連結して吊り下げ、培養槽の両側面に均一に光照射できるようにした。実際に生産性を維持した状態で、2 週間の連続培養が可能であることを確認しており、平板型フォトバイオリアクターの有効性が示された。

また生活排水の利用を想定した研究として、ヒトの尿を水で 20% (v/v) に希釈したものにビタミン B₁, B₁₂ および微量金属を添加して培養液として調整したものを用意して、ユーグレナの試験管通気培養試験を実施した。その培養試験の結果として、ユーグレナの細胞肥大化と乾燥重量増加が認められ、尿中の成分を利用して増殖が可能であることを示すことができた。ユーグレナは尿素を資化できないため、尿素分解触媒を用いるか、酸分解によって、尿素からアンモニアへと変換する技術を組み合わせると、より効率的に窒素源を再生できると考えられる。

2.4. ゲノム編集によるユーグレナ品種改良の検討

2015 年の国連サミットで採択された持続可能な開発目標 (SDGs) は、国際社会共通の目標として世界中に広まっている。この SDGs を達成するため

図 4 平板型フォトバイオリアクターの設計図 (左) と培養の様子 (右)



には、再生可能な生物資源を活用することが必要である。近年、SDGsを達成するためのコンセプトとして、バイオエコノミーが注目されている。株式会社ユーグレナは、これまでバイオマスの5Fの基本戦略に基づき、微細藻類ユーグレナを活用して、食品をはじめとするヘルスケア事業（Food）、ユーグレナ由来の繊維・プラスチック（Fiber）、飼料（Feed）、肥料（Fertilizer）、バイオ燃料（Fuel）の5つの用途での研究開発を進めてきた。特に、重量単価の高いものから低いものに順次事業展開していくことで、バイオマスの生産コスト低減とバイオマスの利用可能性の拡大を推進してきた。これらの目的に応じたユーグレナの育種を施すことが求められている中、近年、ユーグレナのゲノム編集技術を世界で初めて成功させた（Nomura, Yoshikawa, Suzuki and Mochida, 2020）。ユーグレナはゲノム編集効率の良さから、産業上有用な株の分子育種に向けたプレイクスルーとなる可能性がある（Harada, Nomura, Yamada, Mochida and Suzuki, 2020）。

月面等における資源循環の観点での微細藻類培養では、適切な品種改良を施すことが必要である。閉鎖系での食料として考えた場合、ユーグレナが蓄積するパラミロンと呼ばれる貯蔵多糖はヒトが消化できずエネルギー源としては期待できない。このため、ユーグレナのパラミロン生合成に関わる遺伝子の一つである *EgGSL2* 遺伝子をゲノム編集で機能しない状態にして、パラミロン欠損株を作出した（図5）。このパラミロン欠損株は野生株に比べてタンパク質含有量が1.7倍に増加しており、宇宙でのタンパク

質生産に適した株として期待される。将来的には、ゲノム編集を応用することで、宇宙におけるニーズの高い任意の有機資源の生産を目指す余地もある。

このように、尿を用いてタンパク質を高効率に生産する手法は、月面生活に限った話ではなく、地上におけるタンパク質生産技術としても還元可能である。尿を含む家畜排せつ物や下水などの未利用資源を用いて微細藻類を培養することで、飼料や肥料として利用できれば、循環を生み出すことが可能である。

3. 微細藻類ユーグレナの発酵助剤としての活用の可能性

宇宙空間における物質の利用において、微生物による物質変換を行う発酵についても利用可能性があると考えられる。有機物を多く含んでいる生活廃棄物などは微生物発酵による堆肥生産が可能であり、植物工場を通じた食料生産に活用するなど物質循環を助ける可能性がある。さらに、食品に関しては野菜などの非可食部や、保存性が高くないものを発酵食品に変換することもできる。宇宙では食事のバリエーションが限られる中、限定的な加工プロセスだけで、栄養素や食味にバリエーションを持たせることが可能であり、今後検討の余地があると考えられる。一般的な発酵食品として知られているもののほかに、調味料としてのグルタミン酸ナトリウムや嗜好品のアルコール（＝お酒）なども生産することが可能となる。

図5 ゲノム編集で作出した *EgGSL2* 遺伝子破壊株（パラミロン欠損株）の解析

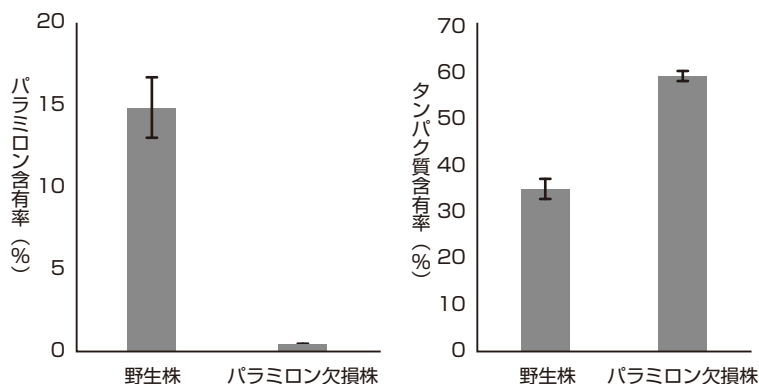
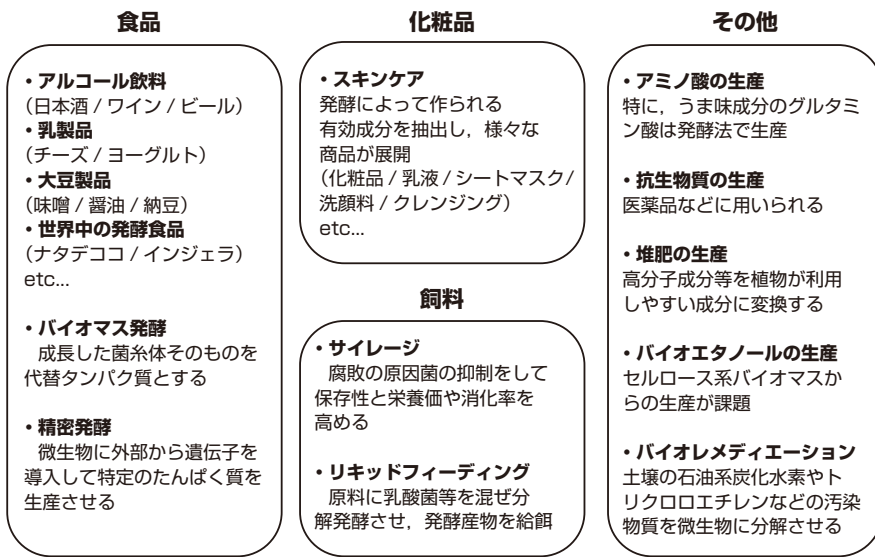


図 6 発酵プロセスの利用用途の例



ユーグレナは栄養素が豊富なだけでなく、プレバイオティクスとして働き、人の腸内において乳酸菌等有益な細菌の増殖を促進し、腸内細菌叢のバランスを調整する効果が認められている (Nakashima, Sasaki, Sasaki, Yasuda, Suzuki and Kondo, 2021)。ユーグレナが他の微生物の増殖促進に寄与するだけでなく、発酵助剤としての役割が確認されている。2016年には麴づくりの際に、米と麴菌にユーグレナ粉末を加えて製麴することで、麴の働きをより引き出す効果があることを確認している。作られたミドリ麴は一般的な麴と比べて、麴が生成する酵素の量が向上することや、強い抗酸化作用を持つ硫黄化合物(エルゴチオネイン、グルタチオンなど)の含有量が向上することが確認されており、食品や化粧品などのヘルスケア分野などでの活用が期待されている。

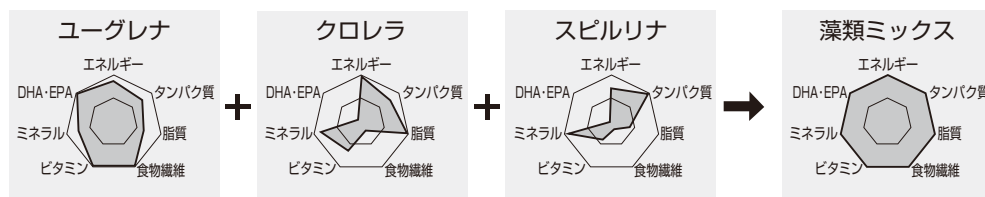
現在は、発展途上国の課題解決においても活用できる可能性を検討している。インドネシアの伝統的な大豆発酵食品であるテンペは、大豆をテンペ菌で発酵させることにより作られるが、このテンペの発酵過程におけるユーグレナ添加による影響を評価した。通常のテンペの作成に加えて、大豆重量の1%のユーグレナ発酵過程で添加したテンペの作成を行った。官能評価は大豆臭さ、香りの好ましさ、味の好ましさ、総合評価について7段階で評価した。その結果、すべての評価項目において通常のテンペ

と比較してユーグレナ添加テンペではスコアが良好だった。今回はテンペの発酵過程においてユーグレナを添加することによりテンペの風味を改善することが示された。今後はユーグレナ添加テンペについて抗酸化物質含有量、酵素活性などについて定量的な評価を進めていく予定である。

4. プランクトン食の課題と可能性

プランクトンは水に懸濁したまま摂取しようとすると、水産生物に見られるような濾過摂食と呼ばれるような触手や鰓などを用いて濾し取る手段などに限定される。エンジニアリング的には、遠心分離機を用いて遠心力によって濃縮するか、中空糸膜などを用いて濃縮する手段を用いて濃度を高める必要がある。また、食味の観点においては、プランクトンを単に固めただけでは食感が物足りずに、菌ごたえや肉汁のように代表されるような、食における各主成分のモザイク状の分布などが満足度において重要と考えられる。これらの課題を解決する方法として、植物プランクトンとも言われる微細藻類の抽出液を、一度動物細胞の培養に利用することで、培養肉を生産し、より一般的な食肉に近い風味と食感を出すように成形できることが期待されている (山中・清水, 2022)。

図7 微細藻類ユーグレナ、クロレラ、スピルリナの栄養分析イメージと、藻類ミックスの栄養バランスイメージ



また栄養面では、ユーグレナを始めとする藻類はそれぞれ1種類だけ摂取することを継続すると栄養素が偏る可能性が懸念されており、株式会社ユーグレナでは複数の微細藻類を組み合わせることにより完全栄養食の実現を目指すアルゴリズム「Algae Nutrition Formula™」の研究を進め、このアルゴリズムとバイタルデータを用いて宇宙環境で持続的に不足栄養素を補う生産モジュールの実現を目指している。これらが実現すれば、省スペースでの物質循環を実現しながら栄養素を充足する形で供給でき、食する人の満足度の高い新しい食システムを提供できると考える。

5. 宇宙における食品に期待される役割

ここまで、ユーグレナが栄養豊富な食品として有用であり、発酵助剤としての役割や、培養肉生産への利用について述べてきた。さらに、ユーグレナは人の健康を支えるいくつかの機能性を持つことが示されている。ユーグレナの特有成分であるパラミロンは、人が栄養として吸収はできないが、食物繊維としての機能があり、ラットにおけるコレステロールの吸収や、アトピー性皮膚炎の緩和効果、さらに免疫応答を調節する機能を有することが示唆されている。

宇宙飛行は、無重力環境や高線量な宇宙放射線の影響で、健康上様々な不具合をもたらすことが知られている。筋萎縮などの他に、肝機能についてはいくつかの障害が起きることが分かっており、マウスでは、肝臓の線維化や非アルコール性脂肪肝が引き起こされることが知られている。パラミロンをラットに経口投与したとき、肝損傷を誘発した際に、活性酸素を除去する酵素SOD (Super Oxide Dismutase) の回復が認められた (Sugiyama, Suzuki,

Mitra, Arashida, Yoshida, Nakano and Takeuchi, 2009)。この結果から、宇宙環境における酸化ストレスにより体内に活性酸素障害が引き起こされる問題に対して、ユーグレナの摂取が有効である可能性を考えた。

筑波大学と株式会社ユーグレナで開発された解析手法「サルファーインデックス解析」を用いて、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) の協力を受けて宇宙飛行したマウスの肝臓の提供を受けて研究を行った。調査は、生体内の酸化還元反応の中心を担う硫黄化合物の状態を網羅的に調べられ、宇宙に行ったマウスの肝臓内では、システイン、エルゴチオネイン、グルタチオンなど還元的な硫黄化合物の量が減少していることが明らかとなった。これらの還元的な硫黄化合物は生体内の抗酸化に貢献していることが知られている。宇宙飛行中に発生した活性酸素による体に与える酸化的なダメージを緩和するために消費され、その存在量が減ったと推察される。このことは、宇宙での健康維持に硫黄系抗酸化物質の摂取が有効である可能性を示している。本研究で特に重要なのが、宇宙飛行によってエルゴチオネインの量が地上での生活時の約半分に減ることが明らかとなったことである。エルゴチオネインは哺乳類の体内では合成できず、一部のキノコなどから微量に摂取するしかない物質である。通常の宇宙生活において、減少したエルゴチオネインを既存の食のみで摂取することは難しい可能性があり、本研究成果が新たな宇宙食の開発指針となることが期待される。

6. まとめと展望

宇宙開発において、月面基地構想や火星移住構想などの検討が進められている。今後、月面や火星などにおける長期滞在を見据え、低重力閉鎖環境での安定的かつ持続的な食料供給システムの開発が必要

である。野菜などの高等植物の生産を想定した場合、ヒトが利用する際には非可食部、残渣が発生するが、微細藻類の利用により高効率な食料生産と植物だけでは不足しがちな栄養素の確保と同時に、空気と水の再生に効率的に寄与することが期待される。

閉鎖循環系での微細藻類を用いた高効率な食料生産手法の開発に向けて、様々な種類の微細藻類を利用し、人工光、尿、有機廃棄物再生液肥を用いた培養手法の改良を進めている。これらの開発を通して、宇宙と地球の課題解決ができる高効率な食料資源生産並びに資源再生を実現する手法の確立に貢献することを目指している。

【謝辞】 本研究の成果の一部は、農林水産省「新・食料産業の創造に向けた宇宙食の開発・実用化促進委託事業」、及び、農林水産省委託事業「月面等における長期滞在を支える高度資源循環型食料供給システムの開発」戦略プロジェクト（Grant number: JPJ01857）、SATREPS（Grant number: JPMJSA2204）の支援を受けて行った。

参考文献

Detrell, G. (2021) "Chlorella Vulgaris Photobioreactor for Oxygen and Food Production on a Moon Base—Potential and Challenges." *Front. Astron. Sp. Sci.*, Vol. 8, p. 700579.
 Fahrion, J., Mastroleo, F., Dussap, C. G. and Leys, N. (2021) "Use of photobioreactors in regenerative life support systems for human space exploration." *Front. Microbiol.* Vol. 12, p. 699525.
 Harada, R., Nomura, T., Yamada, K., Mochida, K. and Suzuki, K. (2020) "Genetic Engineering Strategies for *Euglena gracilis* and Its Industrial Contribution to Sustainable Development

Goals" *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, Vol. 8, pp. 1–10.
 Mansell, J. M., Abney, M. B. and Miller, L. A. (2011) "Influence of oxygenated compounds on reaction products in a microwave plasma methane pyrolysis assembly for post-processing of sabatier methane." 41st ICES, 2011–1–13.
 Nakashima, A., Sasaki, K., Sasaki, D., Yasuda, K., Suzuki, K. and Kondo, A. (2021) "The alga *Euglena gracilis* stimulates Faecalibacterium in the gut and contributes to increased defecation." *Scientific Reports*, Vol. 11, No. 1, pp. 1–8.
 Niederwiesera, T., Kociolek, P. and Klaus, D. (2018) "A review of algal research in space." *Acta Astronautica*, pp. 359–367.
 Nomura, T., Yoshikawa, M., Suzuki, K. and Mochida, K. (2020) "Highly Efficient CRISPR-Associated Protein 9 Ribonucleoprotein-Based Genome Editing in *Euglena gracilis*." *STAR Protocols*: 100023.
 Richtera, P.R., Liu, Y., An, Y., Li, X., Nasir, A., Strauch, S. M., Becker, I., Krüger, J., Schuster, M., Ntefidou, M., Daiker, V., Haag, F. W. M., Aiaich, A. and Lebert, M. (2015) "Amino acids as possible alternative nitrogen source for growth of *Euglena gracilis* Z in life support systems." *Life Sciences in Space Research*, No. 4, pp. 1–5.
 Semenenko, V. and Vladimirova, M. (1961) "Effect of cosmic flight conditions in the Sputnik ship on the viability of *Chlorella*." *Physiol. Plants*, No. 8, pp. 743–749.
 Sugiyama, A., Suzuki, K., Mitra, S., Arashida, R., Yoshida, E., Nakano, R. and Takeuchi, T. (2009) "Hepatoprotective effects of paramylon, a β -1, 3-D-Glucan isolated from *Euglena gracilis* Z, on acute liver injury induced by carbon tetrachloride in rats." *Journal of Veterinary Medical Science*, Vol. 71, No. 7, pp. 885–890.
 Tani, Y. and Tsumura, H. (1989) "Screening for tocopherol-producing microorganisms and α -tocopherol production by *Euglena gracilis* Z." *Agric. Biol. Chem.* Vol. 53, pp. 305–312.
 中野長久・宮武和孝・乾博・穂波信雄・村上克介・金井謙二・辰巳雅彦・相賀一郎・近藤次郎 (1998) 「地球環境を閉鎖・循環型生態系として配慮した食糧生産システム—藻類（ユーグレナ）の食糧資源化に関する研究—」『CELLS 学会誌』 Vol. 10, No. 2, pp. 13–24.
 山中久美子・清水達也 (2022) 「サステナブルな培養液の開発」『生物工学会誌』第100巻第4号, pp. 165–168.