

閉鎖生態系構築のための最適な導入生物

Selected organisms for systems of life-support in closed bio-ecosystems

*富田一横谷 香織¹*Kaori Tomita-Yokotani¹

1.筑波大学大学院生命環境科学研究科

1.Graduate School of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba

地球上に生育する多種多様な全ての生物は、長い年月の地球進化の過程の中で、相互に影響を受けあい進化し、生存に重要な機能を獲得し、維持・完成させ、また新たに進化・変化してきたと考えられる。宇宙や深海・あるいは砂漠などの過酷環境を想定して、人為的閉鎖生態系の設計を試みるとき、限られた種数の生物自身のシステムや環境応答現象および相互作用の変化や代謝と更に大気を含む物質循環の詳細な情報蓄積は、今後の発展に重要となる。必要な要素について各生物システムを考慮して考察する機会は重要である。今回、具体的導入生物種について、具体的提案と閉鎖生態系構築のための最適な種選抜について考察する。

キーワード：閉鎖生態系

Keywords: closed bio-ecosystems

宇宙閉鎖生態系における藍藻の利用

Use of cyanobacteria in a closed ecosystem in space

*大森 正之¹*Masayuki Ohmori¹

1. 中央大学理工学部生命科学科

1. Department of Biological Sciences, Chuo University

藍藻（シアノバクテリア）は、地球上で最初に太陽光エネルギーを利用して水を分解し、得られた還元力でCO₂を有機物に変えることに成功した生物である。その化学反応の過程で発生したO₂は、細胞の外部に放出され、それまで還元的であった地球の大気環境を一変させ、現在の酸化的大気環境を形成する要因となった。藍藻は、その後の地球の環境変動を乗り越え、現在でも陸圏、水圏を問わず地球上のすべての環境下で生息し、地球環境の維持に多大な貢献をしている。また、古くから人々の食用にも利用されている。藍藻の一種スピルリナは、現在補助食品として市販されており、栄養価の高さが宣伝されている。藍藻は、人類が宇宙にその生息域を拡大しようとする時、利用可能な重要な生物である。

宇宙における閉鎖生態系としては、今地上400kmを飛行している国際宇宙ステーションがある。宇宙ステーションと聞くと、人間と機械だけの閉鎖空間をイメージする人が多いかも知れないが、実際は無数の微生物を包含する立派な閉鎖生態系である。人間一人の腸内には90兆にもおよぶバクテリアが生息していると言われており、宇宙船内には宇宙飛行士によって持ち込まれた多くの微生物が生息しており、船内の環境変化に対応して消長を繰り返している。しかし、藍藻がその中に含まれているという報告はない。光合成緑色微生物の宇宙での培養は環境の維持の面からも十分に意義がある。

スピルリナ(*Arthrospira platensis*)は、らせん状の糸状体を作る藍藻で、アルカリ耐性、塩耐性を示し、培養中に他のバクテリアの混入を受けにくい。この藍藻を用いて、宇宙での光合成活性を測定する実験が、宇宙航空研究開発機構（JAXA）の日本—インド回収衛星搭載微生物培養実験として計画された。宇宙での培養は、JAXAが作製した宇宙実験用完全自動培養装置を用いることにした。本装置は、光照明装置、送液装置、温度および圧力測定装置等を備え、全装置の大きさはD-20cm、W-20cm、H-10cmで、アルミニウムをくり抜いた箱に納められた。スピルリナは、5 atom%¹⁸O、4 atom%NaH¹³CO₃を含む培地に懸濁し、10mLずつを6個の透明プラスチックバッグに分注した。6個のバッグはそれぞれ白色LEDパネルの間に設置され、20μmoles m⁻²sec⁻¹の照度で照明された。培養温度は28°Cに保たれた。照明開始後一定時間おきに、自動的に10mLずつのメタノールをそれぞれのバッグにポンプ挿入して、光合成反応を停止させた。ただし、バッグの一つは反応を停止せずに、実験終了後、細胞の増殖の測定に用いた。細胞の増殖は吸光度、クロロフィル量、タンパク質量の増加より評価した。また、光合成活性については、O₂発生量と酸素の同位体比を諏訪らが開発したGC/MS法により測定した。スピルリナ細胞は、6日間の培養により、吸光度にして約5倍、クロロフィル量にして約9倍、タンパク質量にして約9倍に増加した。O₂の発生量は、プラスチックバッグからの定量的なサンプリングが難しく、測定値は大きくばらついた。しかしながら、³²O₂、³⁴O₂の測定結果から、¹⁸Oを含む酸素ガスは時間とともに増加していることが高い精度で確認された。すなわち実験にH₂¹⁸Oを利用することの意義が確認された。CO₂の固定については、バッグ全体の有機炭素の増加量はサンプリングの難しさから、測定値はばらついたが、細胞中の¹³Cは高い精度で直線的な増加が確認され、活性の測定には同位体の利用が有効であることが証明された。

和名ではイシクラゲとよばれている*Nostoc commune*は、陸棲であるため乾燥や低温に強く、窒素固定能を持つため窒素肥料の供給も必要ない。地球上では砂漠緑化における利用が考えられており、火星での農業を考えると、作物を育てる土壌の創生には最適と思われる。そこで、陸棲藍藻の光合成活性の測定を試みた。まず、乾燥させた*Nostoc commune*に1日給水した後、ガラスバイアルまたはプラスチックバッグに入れ、気相を窒素ガスに置換した。また、光合成の基質としてCO₂を100~500μL加えた。細胞を一定時間白色光または波長660nmのLED光を用いて照射し、GC/MSによって明暗におけるCO₂量の増減とO₂量の増減を測定した。その結果、光照射下では、気相のCO₂は継時的に減少し、O₂は継時的に増加した。暗所ではCO₂の増加とO₂の減少が観察された。しかし測定値にばらつきが大きく、サンプリング時における大気の混入が大きな問題となった。安定同位体の¹⁸O-H₂Oおよび¹³Cを用いることで、より正確な測定が可能になるとと思われる。

キーワード：藍藻、宇宙実験、光合成

Keywords: Cyanobacteria, Space experiment, Photosynthesis

シート化による陸棲ラン藻の有効利用

Utilization of the terrestrial cyanobacterial sheet

*加藤 浩¹、木村 駿太²、古川 純²、富田一横谷 香織²、山口 裕司³、竹中 裕行³、河野 伸之⁴

*Hiroshi Katoh¹, Shunta Kimura², Jun Furukawa², Kaori Tomita-Yokotani², Yuji Yamaguchi³, Hiroyuki Takenaka³, Nobuyuki Kohno⁴

1.三重大学、2.筑波大学、3.マイクロアルジェコーポレーション株式会社、4.多機能フィルター株式会社

1.Mie University, 2.University of Tsukuba, 3.MicroAlgae Corporation, 4.Takino Filter Incorporated

生物が極限環境状態で生存する仕組みの一つに乾燥耐性能がある。空気中の窒素を固定する光合成生物のうち乾燥耐性能を有する陸棲ラン藻は土壌に必要な炭素や窒素を供給でき、かつ極限環境状態でも生存できることから環境改善の資材として利用可能な生物であると考えられる。特にイシクラゲ (*Nostoc commune*) は南極から砂漠までの幅広い環境に適応する陸生ラン藻として知られており、自然界で目視できるサイズの塊を形成し、単離過程で他の生物を増殖させることから、生命を維持する「ゆりかご」の役割を果たせるのではないかと考えた。*Nostoc commune*を土壌改良に利用するため、ラン藻塊を挟んだシート資材を作製した。ラン藻を植物栽培に必要な窒素源にするためにラン藻シートによる植物栽培を進めるとともに、近年の放射性物質の回収方法として、土壌表面を移動する土壌微粒子に吸着された放射性物質を回収することを検討した。これらの結果を踏まえて、閉鎖空間におけるラン藻の役割について議論する予定である。

キーワード：乾燥、ラン藻、バイオレメディエーション、農業、宇宙、陸棲

Keywords: desiccation, cyanobacteria, bioremediation, agriculture, space, terrestrial

生物種の選抜と閉鎖生態系モデルの作成

Species selection and making a model of a closed bio-ecosystem

*木村 駿太¹、富田一横谷 香織¹、生態工学会若手の会（次世代活性化委員会）

*Shunta Kimura¹, Kaori Tomita-Yokotani¹, Young Researchers Committee for Eco-Engineering (In the Committee on Activation of Science Society for the Next Generation)

1.筑波大学大学院生命環境科学研究科

1.Graduate School of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba

人工に閉鎖生態系の作出を試みるとき、限られた種数の生物を介して行われることが求められる。このとき、生物の代謝活動や環境応答および生物間相互作用は、種により差異や個体差が生じるため、導入する生物種を選抜し、研究を蓄積することが非常に重要である。本発表は、二酸化炭素の吸収や酸素の供給に加え、食資源ともなり得る陸棲藍藻や、さらに生薬や建材としての利用も可能な樹木を例に、種選抜の重要性を論じる。また、これら生物種を組み合わせる閉鎖生態系モデルを構築するために、生態工学会に所属する学生が中心となって行っている取り組みについて紹介する。

キーワード：閉鎖生態系、生命維持システム、生物種選抜、陸棲藍藻、樹木

Keywords: Closed bio-ecosystem, Life support system, Species selection, Terrestrial cyanobacteria, Tree

閉鎖型生命維持システムの最適設計を目指したECLSSおよび微小生態系に関する研究

Study on ECLSS and Micro Ecosystem Aimed at The Optimal Design of Closed Ecological Life Support Systems

*寺尾 卓真、広崎 朋史¹、桜井 誠人²*Takuma Terao, Tomofumi Hirosaki¹, Masato Sakurai²

1.宇宙システム開発株式会社、2.宇宙航空研究開発機構

1.Space Systems Development Corporation, 2.Japan Aerospace Exploration Agency

人は宇宙で生きるために、人間の生存しうる環境を作り出さなくてはならない。その環境を作り出すシステムがECLSS ((Environmental Control and Life Support System)である。ECLSSはCO₂濃度、O₂濃度、湿度などをコントロールし、また人体や機器類から発生する有害物質を除去する。現在地上400kmのISS (International Space Station)では、各国のECLSSが稼働し、6名程度が活動できる環境を生み出している。現在のISSでは、地球からの物資の補給を前提とし、一部の物質を再利用している。完全な再利用可能となるシステムは、開発されていない。月、火星での有人宇宙活動が期待される近年、いよいよ物質再生率の高いECLSSの開発が望まれる。完全な物質循環の研究を目指した、人間の作り出した閉鎖生態系にバイオスフィア2やCEEFF (Closed Ecology Experiment Facilities)がある。どちらも数名の人間を生かすために広大な土地や処理装置を必要とした。部分再生のISSのECLSSは比較的コンパクトであるが、物質を完全に再利用するとすると途端にシステムは複雑化し、困難を極める。

マクロに見れば、地球は太陽のエネルギーを源に動作する最大の閉鎖系である。地球内で物質は循環し、そこには多くの生命が存在している。それらはありとあらゆる乱れに耐えながら、絶滅していく種も存在するが、一人の人間の一生よりはるかに長い期間で共存している。しかも、何かがコントロールしているかのように、自然と個体数は収束していったり、振動したりする。自然生態系は多くの側面で非常に安定的である。この自立安定性は様々な要因によってもたらされることが研究されている。しかし、この性質を具体的にシステムに組み込む方法は、明らかではない。このシステムの自立安定の機能をECLSSに搭載することは、ECLSS開発者の一つの普遍的な夢である。

我々は、完全に物質循環可能なECLSSすなわちCELSS (Closed Ecological Life Support Systems)とはどのようなシステムが実現可能であるかを提案するために、現実的なECLSS解析と生態系の機能の解析という2方向のアプローチを行う。ECLSS解析では、現在の技術を想定しECLSSを構築した場合、どの技術がボトルネックとなっているのか、システムへの感度が高いのかなどを複数の評価項目を用いて調査する。また同時にECLSSでの実際のトラブルと実生態系の乱れとの類似点などを学ぶ。生態系解析では、最小限の生態系microcosmをモデル化し、系の乱れに対する復元力はどのように起きるかを解析し、そのメカニズムの解明を図る。そして、自然生態系の自立安定機能はどのように具体的な人工のシステムに適用できるのかを検討する。最終目標は、生態系解析から得られたシステムの自立安定機能をCELSSに適用し、高い安定性を有したシステムの提案、そのための技術的課題の提案を行いたい。現在の我々の研究の進捗は、各アプローチの解析に留まっている。本発表では、それらの紹介を行う。

キーワード：生命維持システム、閉鎖系、生態系、マイクロコズム

Keywords: Life support system, Closed system, Ecosystems, Microcosm

クエ飼育排水を用いたクビレズタの培養と物質吸収の推定

The culturing of sea grape *Caulerpa lentillifera* by using waste water of kelp grouper and estimating the ability of absorbing elements contained in waste water.

*岡田 涼汰¹、遠藤 雅人¹、栗原 紋子¹

*RYOTA OKADA¹, MASATO ENDO¹, AYAKO KURIHARA¹

1.東京海洋大学

1.Tokyo University of Marine Science and Technology

閉鎖循環式陸上養殖システムは、排水処理の部分に問題を持ち、近年ではその排水処理に経済的価値の高い海藻類の培養を組み合わせ、環境への負荷を軽減させる技術の確立が目指されている。本研究では海産魚のクエ *Epinephelus bruneus* とクビレズタ *Caulerpa lentillifera* を供試生物として用いて、クエの飼育排水および緑藻の強化培地であるPES原液を肥料として、総水量50 Lの水槽で28日間のクビレズタの培養実験を行った。培養期間中は水温およびpHをそれぞれ28℃および8.0以上に保ち、光周期は12 L:12 Dとした。また、クビレズタの塩分耐性を調べるために、塩分は32 psuと36 psuの2種類に設定した。これらの培養の結果、クエ排水区(32 psu)で成長がもっともよく、比成長率(SGR)は7.16となり、この値は他のPES区(32 psu)と同程度であることが示された。一方で、すべての試験区を通してPES区(36 psu)でもっとも成長が悪く、SGRは5.27となった。培養実験に加えて本実験ではクエ飼育排水、飼育廃棄物およびクビレズタに含有される元素量を誘導結合プラズマ発光分析装置(SPS7800, エスアイアイ・ナノテクノロジー(株))および全有機炭素計(TOC-V_{CSH}, (株)島津製作所)に取り付けた全窒素ユニット(TNM-1, (株)島津製作所)を用いて測定した。この結果より、クエ飼育排水を用いてクビレズタを培養することが可能であることが示され、また、クエ飼育排水と飼育廃棄物を組み合わせることによって、クビレズタ培養に必要な元素の大半を満たすことができるということが明らかとなった。このことから、クエ飼育排水と飼育廃棄物の混合液にマンガン、銅、ホウ素の3元素を混合液1 Lあたりにそれぞれ189.9 μg、99.4 μgおよび157.5 μg加えることによって、混合液を不足量の無いものとすることができるということが示された。

キーワード：クエ、クビレズタ、閉鎖循環式養殖システム、排水利用、飼育廃棄物、水質

Keywords: Kelp grouper, Sea grape, Recirculating fish culture system, Utilization of waste water, Culturing waste, Water quality

火星環境を想定した陸棲藍藻 *Nostoc* sp. HK-01の生育

Growth of a terrestrial cyanobacterium, *Nostoc* sp. HK-01, in the poor nutrient mediums similar to the environment on Mars

*井上 琴美¹、木村 駿太¹、猪坂 純平⁴、新井 真由美²、加藤 浩³、佐藤 誠吾¹、富田—横谷 香織¹

*Kotomi Inoue¹, Shunta Kimura¹, Jyunpei Isaka⁴, Mayumi ARAI², Hiroshi Katoh³, Seigo Sato¹, Kaori Tomita-Yokotani¹

1.筑波大学大学院生命環境科学研究科、2.日本科学未来館、3.三重大学、4.筑波大学生命環境学群

1.Graduate School of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba, 2.National Museum of Emerging Science and Innovation, 3.Mie University, 4.School of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba

陸棲藍藻 *Nostoc* sp. HK-01の乾燥藻体は、極めて高い宇宙環境耐性を有し、加水することで光合成及び窒素固定を行い、食資源としての有用性も備えていることから、今後火星などの過酷な閉鎖生態系における物質循環に利用可能な生物種として高く期待できる。実際にHK-01を火星環境に持ち込むことを想定すると、貧栄養条件下におけるHK-01の生育を明らかにする必要がある。本発表は、①HK-01の休眠細胞が自身の死細胞等の構成成分を用いて生育を行う可能性、②火星の現地資源を想定した火星模擬レゴリスを用いて生育を行う可能性を検証し、これらの結果から、HK-01が火星を想定した貧栄養条件で生育できる可能性を考察する。

キーワード：閉鎖生態系、火星模擬レゴリス、陸棲藍藻

Keywords: closed bio-ecosystems, Martian regolith simulant, terrestrial cyanobacterium

陸棲シアノバクテリアの乾燥耐性に関する遺伝子産物の探索

Searching for water stress proteins in terrestrial cyanobacteria, *Nostoc* sp. HK-01*安部 智子¹、飯室 瑠里香¹、木村 駿太²、加藤 浩³、木村 靖子⁴、富田—横谷 香織²*Tomoko Abe¹, Rurika Iimuro¹, Shunta Kimura², Hiroshi Katoh³, Yasuko Kimura⁴, Kaori Tomita-Yokotani²

1.東京電機大学、2.筑波大学、3.三重大学、4.十文字学園女子大学

1.Tokyo Denki University, 2.University of Tsukuba, 3.Mie University, 4.Jumonji University

ネンジュモとも呼ばれる *Nostoc* 属は陸棲シアノバクテリアの一種であり、特に *Nostoc commune* は乾燥ストレスに対し強い耐性を示す、すなわち、菌体が乾燥した状態でも長期間生存可能であることが以前から知られている。本研究に用いた菌株 *Nostoc* sp. HK-01 は、乾燥耐性を指標に、陸棲シアノバクテリアの中でも特に乾燥に強い株として新たに陸上から単離された株である。乾燥後にデシケーター内に8ヶ月放置した後でも、液体培地で培養すると乾燥前と同様に増殖を始めることが確認されている。さらに、本菌株は乾燥状態で高い耐熱性（100°C, 10時間）を示すことも報告されており、過酷環境耐性研究の分野で特に注目されている。

本研究では、*Nostoc* sp. HK-01 株がどのようにしてこのような高い過酷環境耐性を獲得するのかを明らかにすることを目的とした。そのため、まず本菌体が湿潤状態（液体培養中）から乾燥状態に移行する際に特異的に発現する遺伝子を同定することにした。*Nostoc* sp. HK-01 株を液体培地中で十分に増殖させた後に集菌し、デシケーター中で乾燥させた。菌体が十分に乾燥するまでの間、乾燥過程にある菌体を経時的にサンプリングした。サンプリングした菌体を超音波で破碎し、細胞タンパク質をSDS-ポリアクリルアミドゲル電気泳動に供して解析した。その結果、液体培養中の菌体中には見られず、さらに乾燥過程で経時的に発現量が増加するタンパク質がいくつか確認された。このタンパク質は、菌体が乾燥するにつれて発現量が増加していることより本菌株の乾燥耐性に関与している可能性がある。今後は MALDI-TOF-MS を用いた質量分析法によりこれらのタンパク質を同定する予定である。

キーワード：シアノバクテリア、乾燥耐性、ストレスタンパク質

Keywords: cyanobacteria, desiccation tolerance, stress protein

閉鎖生態系における陸棲ラン藻*Nostoc* sp. HK-01の食品としての機能評価Evaluation of food functions of a terrestrial cyanobacterium, *Nostoc* sp. HK-01 in closed bio-ecosystems

*木村 靖子^{1,2}、木村 駿太²、加藤 浩³、新井 真由美⁴、佐藤 誠吾²、富田一横谷 香織²

*Yasuko Kimura^{1,2}, Shunta Kimura², Hiroshi Katoh³, Mayumi ARAI⁴, Seigo SATO², Kaori Tomita-Yokotani²

1. 十文字学園女子大学、2. 筑波大学、3. 三重大学、4. 日本科学未来館

1. Jumonji University, 2. University of Tsukuba, 3. Mie University, 4. National Museum of Emerging Science and Innovation

人類が長期間宇宙環境に滞在するために食料の確保は重要な課題である。光合成微生物の陸棲ラン藻*Nostoc* sp. HK-01は、乾燥や真空、熱や紫外線、重粒子線(He)など各種宇宙環境に対して高い耐性があることが検証され、火星などの閉鎖生態系への導入生物として期待されている。陸棲ラン藻*Nostoc* sp. HK-01を人が直接摂取して有用であることが検証できれば、宇宙環境における食資源として大きく貢献できる。本発表では、陸棲ラン藻*Nostoc* sp. HK-01の食品としての一次機能である栄養的価値、二次機能としてのおいしさや嗜好性、三次機能としての抗酸化機能が備わっていることを確認し、宇宙環境における陸棲ラン藻*Nostoc* sp. HK-01の食資源としての有用性を初めて明らかにした。過酷な環境条件で栽培可能なラン藻類が効率よく食料化できれば、今後予想される地球規模の食糧問題に対して、有効な対策ともなり得る。

キーワード：閉鎖生態系、ラン藻、食資源、*Nostoc* sp. HK-01、食品の機能性

Keywords: closed bio-ecosystems, cyanobacteria, food resource, *Nostoc* sp. HK-01, food functions