

IIII 特集：生態工学 IIIII
(解説)

火星地下居住構想とラン藻の活用

新井 真由美

Underground Habitation Concept using Cyanobacterial Function on Mars

Mayumi ARAI

Abstract

Caves and lava tubes have been discovered at several areas based on remote sensing data and orbital imagery. Caves and other underground spaces moderate extreme temperatures - cooler in daytime and warmer at night. Early man used such spaces for habitation in areas with extreme climates for millennia. The assumption about these same structures on Mars would be the same; for moderating extreme temperatures, as well as possibly offering protection from space radiation and even Martian dust. Based on underground residences on Earth, I do consider that possibilities exist for underground habitation or even balanced-environmental habitation on Mars. In this study, I focus attention on the terrestrial cyanobacterium "*Nostoc* sp. HK-01". I discuss what we need to know and how the function of *Nostoc* sp. can be used in Mars habitation.

Keyword(s): mars habitation, space agriculture, cyanobacteria, underground, cave

1. 背景と目的

火星に生命および生命の痕跡を探る研究は、宇宙における生命の起源を理解する上で非常に重要である。近年においては、有機化合物の検出器や化学分析や鉱物組成分析器により、生命の痕跡を調べる探査が無人機により行われているが、近い将来は有人による探査が計画され、その最大の目的の1つが生命探査となると予想される。

火星探査機 Mars Odyssey が火星のアルシア山付近の暗い7つの縦孔状地形を THEMIS で観測した¹⁾。また、火星探査機 Mars Reconnaissance Orbiter も縦孔状地形を撮影している。一方で、地球においても、天然の洞窟や風穴、氷穴、溶岩チューブ等が世界各地に分布している。火星の表面は、平均しても 6 hPa と薄い大気圧であり、その主成分は二酸化炭素、さらに人間の呼吸器官に有害なダスト粒子が大気中に浮遊しており、宇宙放射線や UV も降り注ぎ地球型生命にとっては過酷な環境である。一方で火星の縦孔内部の空間は、宇宙放射線が侵入しにくい場所であり、生命が息している可能性が考えられる。縦孔や溶岩チューブは生命探査のターゲットであり、また、将来の有人火星基地の候補場所としても考えられている²⁾。

有人火星探査に際し、地球-火星間の輸送システム、宇

宙放射線のリスク回避、火星上における移動手段やライフラインの確保、火星独自の発電システムの開発、自給自足を視野に入れた宇宙農業、火星環境に適応した居住システム、医療や衛生、廃棄物処理等、取り組むべき課題が抽出される。地下住居を仮定した場合、居住空間には人工大気を確保する必要があるであろう。そのためには、外気への漏れがないように、気密性の高い多重構造の出入り口を持つ住居が必要と考えられるであろう。また、地下への降下方法や通信手段も課題になるであろう。

宇宙農業研究においては、火星有人探査に際し有用な生物材料が提案されている。その候補は、宇宙食の食材にも検討されている植物や昆虫、分解者としてのハエや高温堆肥菌等の他³⁾、火星レゴリスの有機土壌化等に有効で真空耐性や乾燥耐性、放射線耐性の強いラン藻 (*Nostoc* sp. HK-01) 等の宇宙農業システム構築に必要な生物でもある⁴⁾。宇宙農業研究の目標は、火星に 100 人が 20 年、自給自足によって生活ができるシステムを開発することである³⁾。

本稿では、この宇宙農業研究の目標を達成するため、ラン藻の機能を活用した火星居住構想について後半で考察する。そこで本研究の目的は、1)火星の環境を活かした環境共生型住居を想定した場合、どのような住居が考えられるか、2)ラン藻の機能を火星居住にどのように役立て

られるか、また 3)そのために何を見積もる必要があるか、を地球における事例をもとに考察することとした。

2. 方法

本研究を進めるにあたり、第 1 に有人火星探査の明確な意義を整理する。第 2 に現在の火星環境を把握する。本稿では特に火星の縦孔の特徴を整理し地球における同様な洞窟と比較する。第 3 に、地球における地下（地中）式住居の特徴を整理する。これらをもとに、火星における地下住居および環境共生型居住の可能性について考察する。第 4 に火星居住を視野に入れたラン藻の各種極限環境耐性等の実験例について述べ、最後に今後の展望を提案する。

3. 有人火星探査の意義

有人火星探査の意義や方向性を考えるにあたり、ポール・ゴージャンの絵画のタイトルでもあり、人類にとって根本的な問いでもある“Where do we come from? Where are we? Where are we going?”に着目したい。「我々はどこから来たのか」の普遍的な疑問に答えるためには、「宇宙および地球における生命の起源」を探る必要がある、宇宙生命探査が必要になるであろう。「我々はどこへゆくのか」について考えたとき、科学技術の進歩で宇宙探査や宇宙利用、宇宙へ進出する我々の生活圏や暮らしの多様化がより進むであろう。地球の限られた資源や生態系との共存を視野にいれて、地球の未来をどう作るかを考え、その理想像に近づくために、我々は今何をすべきかをバックキャストする必要があるであろう。

2011 年 8 月に日米欧を中心とした国際宇宙探査協働グループ (ISECG) の会合で、今後 25 年間程度の探査シナリオ、目標・目的、構築すべき宇宙システム、獲得すべき宇宙技術等について活発な議論が交わされた。そして将来の有人火星探査に向けての道筋として、Asteroid Next と Moon Next の二つのアプローチが盛り込まれた国際探査ロードマップ (The Global Exploration Roadmap) を公表することが合意された⁵⁾。

一方で、オランダの民間プロジェクトは、2023 年に火星に人類を送る Mars One 計画を発表した。この計画は、4 人の宇宙飛行士を火星へ着陸させ、10 年後にはおよそ 20 人がコロニーを作り、科学実験や生命探査を行うというもので「我々人類が火星で学び成長し繁栄し永住する基盤を確立する」という目標を掲げている⁶⁾。

1969 年、アポロ 11 号で人類が史上初めて月面に降り立った瞬間、国家や民族の壁を越えて世界があたかも 1 つになって、同じ人類の飛躍を祝福したではなからうか。人類の火星着陸は、月面着陸の際の技術以上に人類の叡智を結集させ、かつ各国の平和利用のためのターゲットに

使われるべきである。火星有人探査とその先の居住を検証する際、強い目的意識と分野横断型の研究開発、火星環境を汚染しないコンセプトワークや国際協力等が必要であり、これらは結果的に現在の地球に潜む地球規模の様々な課題解決に必ず繋がるものと考えられる。

4. 火星の洞窟とその特徴

Mars Odyssey は、火星に黒い縦孔（洞窟）を撮影し、その洞窟の開口部とみられる黒くて丸い地形を 7 カ所発見している⁷⁾。2009 年、Mars Odyssey の熱放射撮像カメラ THEMIS が火星赤道付近のアスクレウス山付近に 2 つの縦孔状地形を撮影した。その翌年、Mars Reconnaissance Orbiter 搭載の高解像度カメラ HiRISE でもその孔をとらえた。その 2 つの孔の直径は、それぞれ 310m と 180m であり、アスクレウス山周辺を取り巻く溶岩地層にできた陥没クレーターと見られている。これは、地下空洞の天井部分が崩落して形成されたクレーターと考えられ、ハワイの火山にも同様な地形がみられる。Fig. 1 は Mars Odyssey が捉えた縦孔の写真であり、写真左は可視光で撮影したものであり、他の 2 つは赤外線カメラで撮影したものである。中央の写真は午後の中頃の相対温度を示し、右の写真は、火星時間で明け方 4 時のものである。この画像から、孔の内部は、昼は周囲の温度より涼しく、夜は暖かいことがわかる。これらのことから 洞窟の開口部だと推測されている⁷⁾。

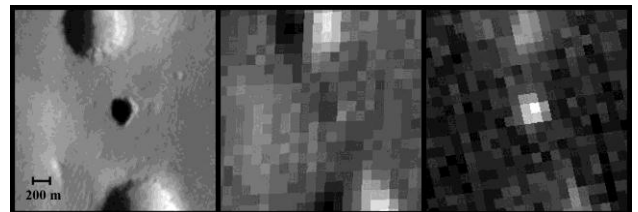


Fig. 1 Temperature Behavior of Possible Cave Skylight on Mars (Image credit: NASA/JPL-Caltech/ASU/USGS)

5. 地球の洞窟の特徴

地球には天然の洞窟や風穴、氷穴等、世界各地に様々な穴状地形が分布している。洞窟は、形成要因により Table 1 のように大まかに分類できる。その他の穴としては、人工的に掘られた金鉱山、炭鉱、マンガン坑道等がある。

日本にある洞窟の大半は溶食洞窟である。月や火星は、地上から観測できる穴としては、火山性の溶岩洞が発見されている。地球の溶岩洞は、世界中の火山地帯に分布している。溶岩チューブは、溶岩が流れ出したあとに残る空洞で地球同様に火星でも類似の地形が発見されている¹⁾。富士山麓には、マグマ表面が固まった後、地中に含まれるガスが地上に出てくることで形成された「ガス孔」と呼ばれる穴が存在する (Fig. 2)。

Table 1 Classification of Caves with formative factor

分類	形成要因
溶食洞窟 (石灰洞, 鍾乳洞, 氷河洞)	雨水や地下水が岩石を少しずつ解かしていく溶食作用により形成
火山洞窟 (溶岩洞)	火山噴火により流出した溶岩の中に形成
浸食洞窟 (海食洞, 河食洞, 風食洞)	雨水, 地下水, 河川, 波等によって岩石が削られる浸食作用で形成
構造洞窟 (割れ目洞, 断層洞, 節理洞, 地震洞)	地すべり, 断層, 褶曲等の地殻変動によってできる割れ目や断層の崩落や剥離によって形成



Fig. 2 A blowhole located in Mt. Fuji

地球の洞窟には、生物が生息しており代表的なものとしてコウモリがあり、その糞や死骸を栄養源とする生物群集からなる独特の生態系が形成されている。火星の洞窟の調査を進めれば、地底湖や地下水等のかたちで液体の水が発見されるか、もしくは過去に液体の水が存在した証拠が見つかるかもしれない。それに伴い、火星独自に進化した生命やその痕跡が発見される可能性が高くなるであろう。

コウモリや微生物による洞窟利用のみならず、我々人間も、地下や洞窟の持つ独特の環境を古くから利用してきている。フランスの西南部に位置するラスコー洞窟からは、15,000年前の旧石器時代後期のクロマニヨン人によって描かれていたとされる壁画が発見されている⁸⁾。洞窟壁画は世界中で発見されており、旧石器時代における人類の文化や暮らし、当時の気候や自然環境が読みとれる。これらのことから、洞窟が人類の古くからの居住空間であったことが伺える。洞窟は、その他、鉱物資源の採取や、天然の冷蔵庫や蔵、そして、住居や文化的・宗教的な場所、近年では宇宙飛行士の訓練の場としても利用されている⁹⁾。

6. 地球における地下住居の事例と特徴

現代に入ってからでも、洞窟に限らず地下という空間は世界各地で居住空間として利用されてきた。地下（地中）式住居の事例としては、中国の黄土高原の「窯洞」、スペインのアンダルシア地方の「グアデス」、チュニジア南部の「シエニーニ」、トルコのカップドギア地方の「ユルギュップ」、アメリカ中西部ニューメキシコ州の「タオスプエプロ」等がある。これらの地域は、いずれも北緯 35～37 度近に位置し、年間降水量は約 500mm 以下と少ない¹⁰⁾。極度に乾燥し厳しい温度環境の土地で、どのような地下（地中）住居を作り住んでいるのか。火星居住を検討するにあたり、中国とトルコにおける地下住居から学ぶものがあると考え、この 2 つの事例を本稿で紹介する。

6-1. 黄土高原の窯洞（中国）

中華人民共和国の黄河流域の黄土高原一帯に、「窯洞式住居」(Yao-dong) と呼ばれる地下（地中）式住居で生活している人々がいる。黄土高原は、黄河の上流および中流域に広がり、北緯 35～37 度、温帯夏雨気候・ステップ気候区に位置する。年間降水量が約 300mm～500mm と少なく、内陸に位置するため夏は 35 度を超す酷暑、冬は零下 20 度を越す酷寒という厳しい自然条件で、気温の年較差は約 30～34℃¹⁰⁾である。

窯洞には、主に 2 つの形式がある。「下沈式窯洞住居」は、平坦な台地に一辺 10m 前後、深さ約 6m の堅穴を掘ることによってできる四壁面に横穴を掘る形式 (Fig. 3)。山懸式窯洞住居は、靠山式とも呼ばれ、台地の崖面や山の斜面に横穴を掘った形式。両形式とも、数穴で一住居を構成し 1 つの窯洞の規模は、幅が約 2.5m～3.5m、高さ約 2.5m～3m、奥行約 6m～9m である¹⁰⁾。宮野らの調査結果によれば、窯洞内においては外気温の日変動の影響が少ないことがわかる¹¹⁾。冬季は、窯洞の断熱性の良さが観測されている。日変動の非常に少ない窯洞内の壁温度と夜間の窯洞内気温を比較してみると、両者はほぼ同

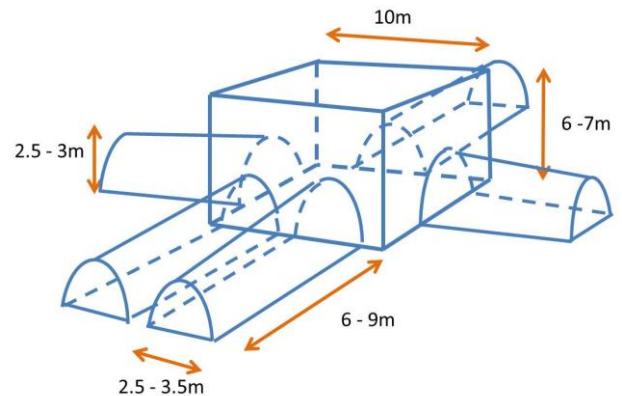


Fig. 3 Structure of Yao-dong in Ocher Plateau

じか、壁温度がやや高く、窯洞周囲の黄土層が冬季、貴重な放熱源となっていると考えられる。窯洞は、夏涼しく、冬暖かい利点があるが、一方では、換気が悪い、湿っぽい、暗いといった欠点がある。自然エネルギーの利用の1つとして温度差換気があるが、窯洞では、地中温度と室内の気温との温度差を利用し、床下ダクトや天井裏空間をダクトとして、部屋の奥の空気を抜く工夫もみられる。換気による結露対策や、内壁を石灰等で白くすることで、反射板や反射塀等を設けて太陽光の反射で照度を上げる工夫も提案されている¹²⁾。

6-2. カップドギア地方の地下都市（トルコ）

トルコのアナトリア高原の中央部に、約 100km²にわたって広がるカップドギア（Cappadocia）と呼ばれる大奇岩地帯がある。ギョレメ国立公園およびカップドギアの岩石遺跡群は、1985年にユネスコの世界遺産に登録されている¹³⁾。ここは、厚く堆積した凝灰岩とその上位に位置する溶岩が、浸食作用によってその抵抗性が異なるために奇岩状を呈するに至った特異な地形を持ち、はじめに洞窟を掘って住み着いたのは、新石器時代の人々である。現在、公開されている地下都市のなかで最大級のものがデリンクユで、数万人が暮らしていたとされる。その広大な地下都市は地下8階に相当し、無数の部屋が発見されている。ここは、一年を通じて室温が15℃前後に保たれているため、食料を保存しやすく快適に過ごすことができる。地下内部に外気を取り入れるため、地下都市の中心を地上から最下層まで、まっすぐ通気孔が掘られている。最下層では地下水とつながり、井戸としても利用されていた¹⁴⁾。この地下都市内には、学校や協会もあり、火星における地下都市を構想する際に比較する良き事例ではなかろうか。

6-3. 地下空間の利用

近代は、地下空間の利用が多様化した。具体的には、トンネル、地下鉄、駐車場、娯楽施設、音響施設、放水路、地下発電所、原油貯蔵場所等である。とくに北欧の

Table 2 Advantages and disadvantages about underground space

短所	<ul style="list-style-type: none"> ・日照性（暗い・要工夫） ・換気性（乏しい） ・排水性（要工夫） ・時間と方角の判断力
長所	<ul style="list-style-type: none"> ・外気の影響少ない（雨、風、温度、日射UV、花粉、ダスト） ・温度一定（外気温からの遮断） ・地上の景観を大きく乱さない ・耐震効果が高い（シェルターとしての利用） ・セキュリティ（軍事利用等）

国々では、地下利用が盛んである。それは、安定した花崗岩等の良好な岩盤に恵まれているため、安全な掘削ができることと、極寒という厳しい自然環境から身を守るという両側面が理由にあげられる。地球における地下住居の例から地下住居の長所と短所を **Table 2** に示す。地下空間は、その短所を克服すれば、快適な居住空間および生活空間になる可能性を秘めている。

7. 火星における環境共生型住居に必要な要素

火星探査機による縦孔の発見により、探査のターゲットとして、あるいは居住空間および宇宙農業の展開域として地下の利用可能性が広がった。地下空間は、火星表面に届く宇宙放射線や空中を漂うダスト（砂塵）、そして過酷な温度環境から逃れられる天然のシェルターになる可能性を秘めている。

火星において、**Table 2** に示した特徴を持つ地下空間で生活するとなれば、その空気や水の循環システムは、国際宇宙ステーションに類似したものになるであろう。火星およびその地下という特殊な環境を最大限に活用した環境共生型住居を想定した場合、居住地として選出する地点が、**Fig. 1** のような縦孔なのか、**Fig. 2** のようなガス孔なのか、その形状や穴のスケールで居住空間の設計が大きく異なるものとなるであろう。また、火山洞窟を活かした天然の穴を利用するのか、中国窯洞のような砂が堆積してできた黄土層様の土を掘ることで地下空間を人工的に作るのか、カップドギア地方のように凝灰岩様の岩石を掘り抜くのか等、様々な選択肢がある。初期の居住空間は、アポロの月着陸機のような居住モジュール、もしくはプレハブ工法を用いた現場で即座に組み立てが可能なもの、もしくは南極雪上車やキャンピングカー様の機能と移動手段を兼ね備えた探査ローバーを活用するであろう。一方で、宇宙放射線からの長期的な被曝を避けるために、天然の地下空間を利用した火星独自のヴェアナキュラー地下空間ができないだろうか。有人火星探査において、火星滞在期間が短期から長期に移行するに際し、何を検証しておく必要があるだろうか。

これまでの火星探査においては、衛星による火星全球の地質図や地形図を作成してきた。また、現場観測では、岩石や地質調査、大気調査、生命探査が行われている¹⁵⁾。これらのデータは、生命探査のみならず有人探査に向けた候補地の選定に役立つであろう。長期の有人火星探査においては、居住地の選定や設計をより厳密化していく必要がある。そのために、世界の様々な環境共生型地下住居の工法や課題、火星基地を模擬した実験、南極基地や国際宇宙ステーション・地上実験等での経験と宇宙農業研究に基づく持続可能なシステム構築等のノウハウとそこで得られた成果や課題を統合化していく必要がある。

一般的に住宅は、1日の大部分を過ごす場であり、家族

という社会の最少単位の生活を行う空間である。火星での 100 人の年齢構成と家族構成を視野に入れた個々の住宅のデザイン、そしてコミュニティ全体での住宅やニュータウンのデザイン（集合住宅なのか、共同生活なのか）も合わせて計画していく必要がある。また、100 人規模といえども 20 年ともなれば、1,000 人規模、1 万人規模も視野に入れ、医療所や避難所の他に、教育や娯楽施設等の機能も考慮しておく必要がある。国際宇宙ステーションにおいては、実験空間が生活空間でもあるため、その機能や役割、利用者の年齢構成も限られており、特殊な目的のもとに設計された施設であった。宇宙飛行士が生活や実験操作をしやすい工夫や誤操作防止対策が施されている。日本実験棟「きぼう」においては、白と青を基調とした内装で、視覚や聴覚を考慮した設計となっており、日本唯一の総合的なデザイン評価・推奨制度であるグッドデザイン賞を 2010 年に受賞し¹⁶⁾、デザイン面においても高い評価を得ている。同様に、火星居住に特化した建築デザインも十分検討しておく必要がある。エアシャワーで花粉除去を行うように、火星のダストを室内に持ち込まないための除去装置や空調システム等も完備する必要がある。

火星における「人間圏」は、生活圏と開拓圏に分類できる。開拓圏は、有人で探査を行う範囲とロボットや航空機、人工衛星による観測範囲が含まれる。人間圏は、科学技術というツールを含めれば、すでに無人ではあるが火星全域をカバーし、太陽系の外へと拡大している。有人による活動域の拡大という意味において、火星における人間圏のシステムをデザインする際に忘れてはならないのは惑星そのものとの正しい共生の在り方について十分議論すべきであろう。これは、今の地球との共生の在り方にも通じるものがあると考えられる。人類が火星に住むことになれば、さらにその先の将来にわたり、人類の痕跡が火星に残ることであろう。まるで、ラスコー洞窟の壁画のように、その際に、どんな痕跡を我々は残すべきであろうか。地球から探査機が続々と火星に送り込まれ、地球起源の微生物が火星で独自の進化を遂げている可能性も否定できない。火星に生命および生命の痕跡があるか否かの探査は、宇宙における生命の起源を理解する上で重要である。まずこの証拠材料を集めることが先決であろう。そして、その探査の先に、有人による火星探査と火星居住が控えるべきであろう。

人間とともに、火星へ持ち込むのが好ましい生物の選定の研究も進んでいる。最初に持ち込むのに適した材料としては、火星レゴリスの有機土壌化に有効で真空耐性や乾燥耐性の強いラン藻⁴⁾、火星食に提案されている食材としての植物や、分解者としてのハエや高温堆肥菌等は、宇宙農業システム構築に必要なものである³⁾。火星居住にあたり、火星環境の一般的なリスクの他、想定外のリスクも十分に把握し、対策を講じておくことが必須である。火星環境は、温度圧力条件が地球と大きく異なる以外に

も、地表面を覆うレゴリスが宇宙服や機器類の不具合、肺や気管支等の疾病をもたらす危険性が考えられる。火星往復ミッションの間に浴びる放射線量及び火星着陸後の放射線被爆への対処方法および SPE の宇宙天気予報システムが必要になるであろう。さらに、居住区を支える外部システムとして火星独自の発電システム、循環を駆動させるエネルギーシステム、そしてリサイクルシステムとその装置や施設等も必要となるであろう。

8. 火星におけるラン藻の活用

ラン藻の環境調整機能の解明は火星における宇宙農業および居住環境創出において貢献できると期待される。宇宙農業におけるラン藻の機能の活用方法について、Table 3 にまとめた。

陸棲ラン藻 (*Nostoc* sp. HK-01) は、乾燥状態であれば 10^{-5} Pa の高真空環境に暴露されても、その後加水を行うことで蘇生し、液体培養を行うことでコントロールと同等かそれ以上増殖する能力を持つことが示され、液体培養 8 日後のクロロフィル-a 量はコントロールと同等を示した⁴⁾。乾燥した *Nostoc* sp. は 1 年間の高真空曝露後においても、加水することで蘇生が確認された。さらに、五十嵐と富田らの研究では、ラン藻のガンマ線、紫外線、重粒子線、高温 (100℃) 環境への曝露後の耐性が高いことを示している¹⁷⁾。新井と富田らの研究では、火星模擬レゴリス培地上でのラン藻の増殖を確認している⁴⁾。そして、富田と木村らの研究では、ラン藻の食品としての機能として高いアミノ酸量の存在を示している¹⁸⁾。

Table 3 Expected Function of Cyanobacterium for Mars Habitation

ラン藻の活用例	そのために見積もるべきこと
酸素生成	・ 低圧、低温、放射線等の極限環境下における光合成能力、酸素発生量、呼吸量
火星レゴリスの有機土壌化	・ レゴリス上での増殖能と条件 ・ レゴリスからの吸収物と量 ・ レゴリスへの分泌物
食材	・ 元素組成、成分割合 ・ 光合成生成物としての糖類の種類と割合、合成条件 ・ 培養法、調理法
物質循環促進剤	・ ラン藻を取りまく、無機物および有機物との間の物質の授受や相互作用、物質循環について (炭素循環/窒素循環/水循環への寄与等)
湿度調整生物	・ 極限環境下での吸水能力

火星を想定した宇宙農業の始動において、乾燥耐性能、高真空耐性能、紫外線耐性能、窒素固定能等を有する *Nostoc* sp. は、有用生物であると想定されるため、宇宙での機能と限界、物質循環への関与や生物間相互作用についてもより詳細に調べる必要がある。

9. 今後の展望

今後の展望として、陸棲ラン藻 *Nostoc* sp. は、たんぼぼ計画の第二サブテーマ「地球微生物の宇宙生存」の生物材料としての国際宇宙ステーション日本実験棟「きぼう」上での微生物曝露実験への参加が予定されている。宇宙空間で紫外線や宇宙線を浴びた状態での生存可能時間を宇宙実験で推定する予定である。また、オランダの民間プロジェクトの Mars One 計画にも、宇宙農業研究は貢献できる可能性を有するため、連携協力を検討したい。

謝辞

筑波大学の富田・横谷香織先生と研究室の皆さん、JAXA の山下雅道先生と宇宙農業サロン、JAXA の春山純一先生、JAXA の大西充氏には多大なご助言とモチベーションを頂きました。心から感謝申し上げます。

参考文献

- 1) G. E. Cushing, T. N. Titus, J. J. Wynne, and P. R. Christensen: *Geophys. Res. Lett.*, **34** (2007) L17201.
- 2) G. E. Cushing: *Journal of Cave and Karst Studies*, **74**, 1 (2010) 33.
- 3) M. Yamashita, M. Arai, C. Ishii, Y. Ishikawa, R. Izumi, T. Oshima, H. Oshima, K. Omori, N. Katayama, A. Katayama, S. Kanazawa, T. Kariya, Y. Kawasaki, Y. Kitaya, E. Goto, T. Saito, T. Shimizu, A. Shiraishi, M. Takaoki, H. Takahashi, A. Tani, K. Toki, K. Tomita-Yokotani, A. Nakajima, M. Nagatomo, K. Nitta, H. Hashimoto, M. Hirafuji, Y. Fujii, H. Mizutani, K. Mihara, T. Miyagawa, C. Mukai, S. Mori, S. Yano, N. Yamazaki, H. Yokota: *Space Utilz. Res.*, **21** (2005) 323.
- 4) M. Arai, K. Tomita-Yokotani, S. Sato, H. Hashimoto, M. Ohmori and M. Yamashita: *Biol. Sci. in space*, **22**, 1 (2008) 8.
- 5) NASA's web site: <http://www.nasa.gov/exploration/about/isecg/>
- 6) Mars One's web site: <http://mars-one.com>
- 7) NASA's website: http://www.nasa.gov/mission_pages/odyssey/images/cave4.html
- 8) W. Wildgen: *Semiotic evolution and the dynamics of culture*, ed. B. Marcel, B. van Heusden and W. Wildgen, Chap.7, p.111, Peter Lang: Bern, Switzerland (2004).
- 9) ESA's web site: <http://esamultimedia.esa.int/HSO/caves/CAVES-Information-Kit-2012.pdf>
- 10) A. Miyano, K. Inaba and A. Mizutani: *Architectural Institute of Japan*, **23** (1985) 217 (in Japanese).
- 11) A. Miyano, K. Inaba and A. Mizutani: *Architectural Institute of Japan*, **100**, 1240 (1985) 36 (in Japanese).
- 12) 審洞考察団著：生きている地下住居 中国の黄土高原に暮らす4000万人，彰国社，1988.
- 13) Unesco's website: <http://whc.unesco.org/en/list/357>
- 14) Daiwa house industry co., LTD 's website: <http://www.daiwahouse.co.jp/eco/column/world/10.html> (in Japanese).
- 15) M. Arai: *Eco-engineering*, **22**, 4 (2010) 185 (in Japanese).
- 16) JAXA's web site: http://www.jaxa.jp/press/2010/09/20100929_kibo_e.html
- 17) Y. Igarashi, M. Arai, H. Fujishiro, K. Tomita-Yokotani, S. Sato, H. Kato and M. Ohmori: *Japan Geoscience Union Meeting, Makuhari, Chiba, Japan* (2012) HCG32-P01.
- 18) K. Tomita-Yokotani, Y. Kimura, S. Sato, H. Kato, M. Arai, H. Hashimoto and M. Yamashita: *COSPAR2012, Mysore, India* (2012).

(2013年3月5日受理, 2013年3月25日採録)