

|||| 解説 ||||

## 火星模擬実験の概観と有人火星探査の検討

角地 雅信<sup>1</sup>・宮嶋 宏行<sup>2</sup>・安濃 由紀<sup>1</sup>・村川 恭介<sup>1</sup>

### Overview of Mars Simulation Experiments and Consideration of Manned Mars Exploration

Masanobu SUMIJI<sup>1</sup>, Hiroyuki MIYAJIMA<sup>2</sup>, Yoshiki ANNOU<sup>1</sup> and Kyosuke MURAKAWA<sup>1</sup>

#### Abstract

Many experiments to simulate Mars environment have been implemented around the world. In this article, we report MARS500, HI-SEAS, MDRS, Biosphere 2 and Yuegong-1 as simulations of manned Mars exploration. More than 1000 people have participated in MDRS including Japanese researchers, engineers and students. The Biosphere 2 experiment proved that it is difficult to mimic Earth's ecosystem. Effects of microgravity and radiation during manned Mars exploration have been also examined in many experiments. The radiation detector piggybacked to the Mars rover, Curiosity, showed high level of radiation during the trip from Earth to Mars. Therefore, some measure should be taken to avoid high level of radiation exposure to astronauts.

**Keyword(s):** Manned mars exploration, MDRS, Biosphere, MARS500, Yuegong-1, HI-SEAS, Radiation

Received 21 January 2016, accepted 10 May 2016, published 31 July 2016

#### 1. はじめに

人類は古くから地球外の惑星で暮らすことに憧れてきた。日本のおとぎ話のかぐや姫や、Ray Bradbury の火星年代記など人類が地球外で暮らす話は多数存在する。また、近年でも Star wars のように、人類が地球外の惑星などで生活する映画が多数公開されている。人類が地球外に暮らせる惑星などの候補として、月、金星、及び火星が考えられている。月は地球に近く、かつてのアポロ計画で人類が到達した場所であるが、生命の存在に必要な水の存在が確実に見つかっていない。また、金星は重力が地球に近いが、表面温度は 400 °C 以上、地表面の気圧は地球の 92 倍であり、生命が生息するには過酷な環境である。一方、火星については、古くから水の存在が指摘されており、かつては生命が存在したと考えられてきた。そして、2015 年 9 月 28 日の NASA の発表によれば、火星表面に水が流れている証拠が見つかっており、現在でも微生物のような生命が存在すると推測されている<sup>1)</sup>。

このような背景から、特に近年は各国で無人での火星探

査が進められている。アメリカは 1964 年に Mariners4 号を火星周回軌道に投入し、火星表面の写真を送信することに成功した。火星表面に着陸した探査機は 1971 年のソ連によるマルス 3 号が初めてとなる。一方のアメリカは 1976 年に Viking1 号、2 号を火星表面に着陸させ写真の送信に成功した。それから 20 年以上経過して、アメリカは 1997 年に火星表面を走る無人探査機 Mars Pathfinder の着陸に成功した。火星表面の無人探査機は、その後 2003 年の Spirit と Opportunity、2011 年の Curiosity と続いている。また火星周回軌道に投入された探査機も、2001 年の Mars Odyssey (アメリカ)、2003 年の Mars Express (欧州)、2005 年の Mars Reconnaissance (アメリカ)、2013 年の MAVEN (アメリカ) 及び 2013 年の MOM (インド) と続いている。

今後は無人探査だけでなく、有人探査も検討されている。NASA は 2030 年代に有人火星探査を行うことを表明している。また、アメリカの民間企業 SpaceX やオランダの非営利団体 Mars One はそれよりも早く 2020 年代に人類を火星に送ることを計画している。

1 日本火星協会〒103-0011 東京都中央区日本橋大伝馬町 11-8 HAT ビル 6F  
Mars Society Japan, HAT Bldg. 6F, 11-8 Nihonbashioodenmacho, Chuo-ku, Tokyo 103-0011, Japan.

2 国際医療福祉大学成田キャンパス〒286-8686 千葉県成田市公津の杜 4-3  
International University of Health and Welfare, 4-3 Kozunomori, Narita, Chiba 286-8686, Japan.  
(E-mail: sumijim@gmail.com)

有人火星探査において問題になるのは、地球と火星の距離である。地球と火星の距離は、2003年に最も近づいた時で5576万kmであり、これは月と地球の距離の143倍にもなる。そのため、地球と火星との間の片道旅行では化学推進を用いた場合最低でも180日かかる。さらに、火星の滞在期間と地球への帰還に要する日数を合計すると、地球を出発し、火星に滞在してから地球に戻るまでの期間は最短でも1年半ほどかかる<sup>2)</sup>。この間、有人火星探査を行う宇宙飛行士は、大量の放射線被曝、長期間の無重力、長期間の閉鎖環境という過酷な環境で生活することになり、精神的、健康的な影響が懸念される。そのため、有人火星探査を行う前に、これらの環境が人体にどのような影響を与えるかを調べておく必要がある。このような実験は、すでに世界各地で行われている。本解説では、これらの研究内容と成果について紹介する。

## 2. 長期滞在模擬実験

### 2.1 MARS500

火星への往復飛行は前述したように約1年半かかる。このような長期間、限られたメンバーで宇宙船や火星で過ごす場合、宇宙飛行士にどのような心理的影響を及ぼすかを調べる実験が欧州宇宙機関（ESA）とロシア科学アカデミー・一生医学研究所（IBMP）の共同研究として行われた<sup>3)</sup>。この実験は、設備の動作確認を行うための14日間の閉鎖実験、予備実験としての105日間の閉鎖実験、そして520日間の本実験の3つの過程からなり、2010年から2011年にかけて520日間の実験がモスクワにあるIBMPの研究所で行われた。その実験施設の概要をFig.1に示す。図中の番号1は居住モジュール、2は医学、心理学実験を行う医学モジュール、3は火星着陸船、4は火星模擬施設、5は貯蔵庫やグリーンハウスがあるユーティリティモジュールとなっている。本実験は最初の250日を地球から火星への飛行、次の30日を火星滞在、最後の240日を火星から地球への帰還というスケジュールを仮定して行われた。参加した乗組員はロシア人3人、フランス人、イタリア人、中国人が各1人である。この実験期間中は乗組員と外部とのコンタクトは無線通信で行われ、地球との距離に応じて通信にかかる時間が徐々に長くなるようにした。この実験においては、主に長期滞在が精神面に及ぼす影響について調査が行われた。ただし、放射能と無重力の影響については考慮されていない。

合計520日という長丁場の実験における模擬宇宙飛行士の典型的なタイムスケジュールはTable 1のようになる。実験としては、無重力環境での食料の生産、微小重力環境での筋力低下の予防法の検討、呼吸パターンの解明による

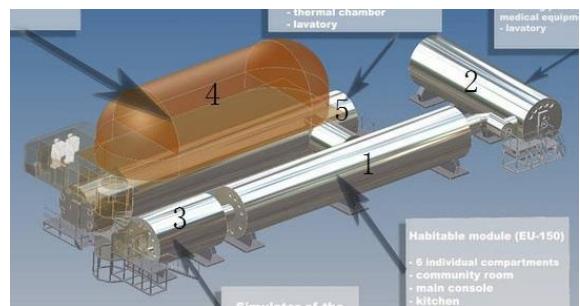


Fig. 1 MARS 500 isolation facility<sup>4)</sup>

Table 1 Typical schedule of the simulated astronaut

行動	時間(hour)
睡眠	8.5
起床から朝食まで	1.5
会議	0.5
仕事の準備、装置の点検	1.5
システムの作動	2
昼食	1
実験	4
トレーニング	1
夕食+自由時間	4

睡眠の研究などが行われた。実際の宇宙船内では、重量制限を考慮するとこれらの研究の全てが行われることは考えにくいが、宇宙船内で何もしないと逆にストレスがたまるので、適度に仕事を設けるように配慮されたと考えられる。

### 2.2 HI-SEAS

火星を模擬した実験としてこの他に、NASAの出資によって行われているHI-SEASが挙げられる。HI-SEASはHawai'i Space Exploration Analogue and Simulationの略で、ハワイ島のMauna Loaという高度約2400メートルの高地で行われている<sup>5)</sup>。最初のミッションは4か月、2回目も4か月、3回目は8か月、そして現在の4回目のミッションでは1年を目標に長期滞在の実験が進められている。周囲にはほとんど生命は存在しておらず、空気も薄いという環境で、参加メンバーは船外に出るとときには宇宙服を着用することになっており、火星表面にいることを仮想体験できるようになっている。

HI-SEASはMARS500と似ているが相違点もある。第一に、MARS500は火星への往復を模擬して、地球と火星の間の旅行期間を設けているが、HI-SEASでは火星表面の滞在期間しか設けていない点である。この期間は、化学

推進剤を利用した輸送系を想定して片道約8か月に設定された。第二に、MARS500は参加メンバーが全員男性だったのに対し、HI-SEASの4つのミッションは全て男性3人女性3人という組み合わせになっている。メンバーに女性が参加すれば、メンバー間の関係も良好になるのではないかと思われる。

### 2.3 MDRS

MDRSはMars Desert Research Stationの略で、アメリカの非営利団体の火星協会がアメリカのユタ州に所有する火星模擬実験施設である<sup>6)</sup>。MDRSの歴史はMARS500やHI-SEASより古く、2002年から始まっている。模擬実験は暑さを避けるために秋から春にかけて行われており、1チーム約6名が約2~3週間滞在し、それぞれの実験を行っている。日本からは、日本火星協会が2014年3月にTeam Nipponとして6名<sup>7)</sup>、2014年11月に1名、2015年2月に1名を派遣した。日本火星協会は今後もMDRSに日本人を派遣する計画を立てている。

**Figure 2**にMDRSの施設の写真を示す。MDRSの施設は、写真に示されている居住モジュール、温室及びMusk天文台と、写真には示されていない発電機などのエネルギー供給施設からなる。温室は研究用の植物を栽培するための施設として使われている。居住モジュール、温室及びMusk天文台はトンネルにより連結され、参加者が自由に往来することができる。エネルギー供給施設は居住モジュールから30メートルほど離れたところにある。MDRSのエネルギー源は軽油やプロパンガスなどの化石燃料であるが、火星には酸素がないため、実際の探査でHI-SEASのように太陽光発電を使うかもしくは小型原子力発電が使われると考えられる。火星は地球よりも太陽から遠いことと、夜間でも発電する必要性を考慮すると、小型原子力発電を使うことが有力視されている。

写真からわかるように、MDRSの施設はユタ州の砂漠にあり、火星の地形を模擬したものとなっている。HI-SEASと同様、船外活動があり、このときは、メンバーは宇宙服を着て活動する。船外活動には周囲の地形を探査することが含まれる。移動は徒歩あるいは、四輪バギーが用いられる。

MDRSは、火星への航行期間を考慮していない点や、火星に似た環境の砂漠で実験が行われているなど、HI-SEASと共通点が多い。そのため、HI-SEASのミッション1のメンバーはHI-SEASのミッション直前にMDRSに参加しており、MDRSをHI-SEASの予備実験として利用した。MDRSはこのように他の火星模擬実験の予備実験としての役割だけでなく、学生が宇宙探査や火星探査に関わる仕事に就くためのステップとしても利用されている。2014年3月のTeam Nipponにおいて日本からも名古屋女子大



**Fig. 2** MDRS facility<sup>6)</sup>

学の学生2人が参加している。

MDRSには、これまでに延べ約1000人がミッションに加わっている。MARS500やHI-SEASに比べ短期間の実験を繰り返すため、多くの人に参加のチャンスがある。MDRSにたくさんの人が火星探査の模擬実験に加わり、その体験を多くの人に分かち合うことで、世界中の多くの人に火星探査に興味を持ってもらうことが意図されている。

また、米火星協会はカナダのDevon島という北極圏にある島にもFMARS(Flashline Mars Arctic Research Station)という火星模擬実験施設を所有している。米火星協会は、今後FMARSにおいてMars Arctic 365という1年に及ぶ火星模擬実験を行うことを計画している。

### 3. 人工閉鎖生態系実験

これまでに紹介した火星探査模擬実験は、食糧が外部から補給されるものだった。また、火星には酸素がほとんどないため、酸素も補給しなければならない。将来人類が火星に長期間滞在することを考えると、食糧や酸素を補給するためには、地球からロケットで火星まで輸送しなければならない。しかし、大量の食糧や酸素を遠く離れた惑星に輸送するのはかなりのコストがかかる。火星に長期間滞在することを考えれば、食糧、水、酸素、エネルギーは全て火星で自給自足できるようにするのが望ましい。これは火星に地球と同じような閉鎖的な生態系を作ることになる。

将来人類が地球外の惑星で生活することを目指して、人工的な閉鎖生態系(CELSS=Controlled Ecological Life Support System)の実験も行われてきた。その最も大きな実験として、アメリカのアリゾナ州で行われたBiosphere 2が挙げられる。Biosphere 2はアメリカのベ

ンチャー企業である Space Biosphere Ventures 社により建設されたもので、地球を巨大な閉鎖生態系とみなす Biosphere1 として、ミニ地球としての意味で人工的な閉鎖生態系の施設という意味で Biosphere 2 と名付けられた。Biosphere 2 は、人類が地球外で生活することを目的とするだけでなく、地球の生態系の循環システムについての理解を深めるという目的もある。

**Figure 3** に Biosphere 2 の模式図を示す。図に示すように、Biosphere 2 は 3.15 エーカー (12748 平方メートル) のガラス張りの建物の中に、熱帯雨林、砂漠、湿地、サバンナ、海、農場及び人間の居住区が設けられている。Biosphere 2 は外部と完全に隔離されており、酸素、水、食料は全て内部で循環する仕組みとなっている。Biosphere 2 はある程度の気密性を有しており、空気の漏れは年間 10% 以下である。

Biosphere 2 で人間を使って人工的な閉鎖生態系を実現する実験は、1991 年 9 月から 1993 年 9 月までの 2 年間にかけて行われた<sup>9)</sup>。参加者はアメリカ人 5 人、イギリス人 2 人、ベルギー人 1 人、男女 4 名ずつという構成となっていた。この他に約 3800 種の生物種が Biosphere 2 内に閉じ込められた。この間参加メンバーは外部から隔離されていたが、外部と通信することはできたし、ガラス越しに外部の人と接触することもできた。Biosphere 2 は地球と比べると非常に小さい閉鎖生態系で、物質の循環が非常に速いという特徴を有する。そのため、生態系が分解できない石鹼、シャンプー、香水などは使用が禁じられ、紙の使用も極力抑えられた。Biosphere 2 内のトイレではトイレットペーパーは使用できず、代わりにハンドシャワーが使われた。

この実験において、酸素濃度のコントロールが問題になった。酸素の供給は施設内の植物の光合成によってのみ行われていたので、昼夜の酸素濃度の変化が起きた。また、地中の微生物の活動やコンクリートによる二酸化炭素の吸収を予測できず、酸素濃度は 14 % まで低下し、メンバーに高山症のような症状が見られるようになった。そのため、1993 年 1 月に外部から約 14 トンの酸素を供給することになった。また、生態系のバランスを取ることも困難を極め、植物が異常に成長したり、特定の生物種が異常繁殖するという事態も発生し、参加メンバーはこれらの事態の対応に追われた。

この 2 年間の実験の後、別の 7 人のメンバーでミッション 2 が約半年行われた。しかし、Biosphere 2 での閉鎖生態系実験はこれが最後となった。現在、Biosphere 2 の運営はアリゾナ大学に移管され、有料の見学ツアーに参加すれば内部を見学することができる。



**Fig. 3 Biosphere 2<sup>8)</sup>**

Biosphere 2 ほどの規模ではないが、人工的に閉鎖生態系を作り居住する実験はロシアの BIOS-3 でも行われていた。また、日本でも有人火星探査という目的ではないが、青森県六ヶ所村の環境科学技術研究所で 2008 年まで閉鎖生態系の居住実験が行われた。

現在でも行われている閉鎖生態系の実験は中国の月宮 1 号 (yuegong-1) がある。月宮 1 号は 2014 年 1 月に完成し、同年 2 月から、3 人の人間を入れた 105 日間の閉鎖実験が行われた。この実験の特徴はタンパク質源として、ミールワームという昆虫が用いられたことである。昆虫食は特に西洋の宇宙飛行士から敬遠されて、これまで紹介した火星模擬実験ではいずれも採用されなかった。しかし、Biosphere 2 のように、生態系の一部としての豚、ニワトリ、ヤギなどを火星まで運ぶことは技術的に困難なので、昆虫を食用として宇宙で飼育することも選択肢として考えなければならない。

#### 4. 微小重力及び放射線が人体に与える影響

##### 4.1 微小重力の影響

これまでの実験では重力と放射線の影響は考慮されていなかった。なぜなら、放射線環境や微小重力環境を人工的に作り出すことが困難だからである。微小重力を短期的に実現する方法は落下塔や放物線飛行などがあるが、これらはいずれも数秒～数分程度しか持続しない。長期間の微小重力を実現するのは現在のところ国際宇宙ステーションなどの宇宙しかない。この他に擬似的に微小重力を実現する方法としてクリノスタットを用いる方法もある。

まず、長期間の微小重力環境が人体に与える影響については、国際宇宙ステーション、スペースシャトル、ミールなどの有人宇宙探査における宇宙飛行士の健康状態を調べることで明らかになっている。人間が長期間の微小重力を経験すると、宇宙酔い、心循環器の機能低下、骨と筋肉

**Table 2** Radiation Exposures

	放射線量 (mSv)
火星往復旅行	662
国際宇宙ステーション長期滞在	90~180
法定年間上限線量（日本、男性）	50
法定年間上限線量(福島第一原発、2011年)	250
一般人の年間被曝線量	3.6

の機能低下といった問題が現れる。そのため、宇宙飛行士は地球から微小重力環境に来たときには気分が悪くなったり、顔がむくんだり、頭痛を起こしたりという症状を経験する。また、宇宙飛行士が長期間微小重力環境で生活して地球に戻ると、立ちくらみを起こしたり、筋肉の低下により歩けなくなったりする。現在国際宇宙ステーションでは、宇宙飛行士が約半年間滞在するミッションを行っている。また、記録では、ロシアの宇宙飛行士 Valery Polyakov 氏が 438 日間連続で宇宙に滞在したことがある。また、火星の重力は地球の重力の約 38 %で、微小重力から火星表面に降り立つときの影響は、微小重力から地球に降り立つときの影響よりは小さいと推測される。ただし、火星から地球に帰還するときは、合計で 500 日以上の微小重力及び低重力を経験することになり、Polyakov 氏の記録を上回ることになるので、人体への影響が懸念される。

また、微小重力あるいは低重力環境で生物の生殖活動にどのような影響が現れるのかということも問題になる。いくつかの実験により、哺乳類以外の生物については、微小重力環境でも地球上と同じように生殖活動を行うことが知られている。一方、哺乳類については、いくつかの実験で、生殖活動は地球上よりも低下することが報告されている。1979 年の *cosmos1129* の実験では、成熟したネズミの雄と雌を混ぜて微小重力環境で飼育したが、雌はいずれも出産しなかったことがわかった<sup>10)</sup>。また、日本の研究グループもクリノスタッフを使った実験で、微小重力下ではマウスの受精は地上と同じように行われるが、胚の形成は微小重力環境では劣化することを報告している<sup>11)</sup>。

火星の重力は地球の重力の約 38 %で、これは微小重力というには大きすぎるが、地球の重力よりは明らかに小さい。このような低重力環境での実験例はないが、火星の重力環境では微小重力環境と地球上の中間の影響が現れると考えられる。

## 4.2 放射線の影響

火星までの往復旅行では放射線の影響が大きな問題となる。NASA は火星探査機の Curiosity に放射線測定器を同乗させ、火星までの往復旅行において人体が受ける被曝量を見積もった結果、地球と火星の往復飛行にかかる日数が 360 日と仮定した場合、火星往復飛行で宇宙飛行士が受ける被曝量は 662 ミリシーベルトということがわかった<sup>12)</sup>。この仮定では、火星における滞在期間は含まれていない。この被曝量は、福島第一原発事故後に一時的に設けられた放射線量の限度である年間 250 ミリシーベルトも超えることになる。国際宇宙ステーションの被曝量は 1 日あたり 0.5~1 ミリシーベルトなので、6か月滞在の宇宙飛行士でも被曝量は最大で 180 ミリシーベルトである。前述した宇宙飛行士 Valery Polyakov 氏の被曝線量も推計では年間最大 365 ミリシーベルトなので、この値を超えている。このように、有人火星探査は放射線被曝という点では非常にリスクが高いことがわかった。そのため、宇宙飛行士の安全を考慮すれば、放射線を遮断するよう宇宙船を設計するか、短期間で火星に到達できる宇宙船を開発するなどの対策が必要となる。現在の宇宙船の遮蔽技術では、放射線の被曝量を抑えることは困難なため、いわゆる火星への片道切符（地球へ帰還しない旅行）であれば、宇宙飛行士が浴びる放射線量も低く抑えられる。将来的に人類を火星に定住させる計画であれば、先に火星に物資を送っておき、火星の地下に基地を建設するなどして放射線被曝を低くする対策を取っておき、地球から来た宇宙飛行士が火星に永住する方が安全面、コスト面でも合理的と考えられる。また、短期間で火星に到達する方法としては、原子力推進ロケットを用いる方法が検討されている。原子力推進ロケットを使えば、地球から火星までの航行期間は 1 月から 1 月半程度になると推定されており、従来のロケットに比べ航行期間を大幅に短縮することができ、放射線の被曝量を抑えることが可能となる。

## 5. まとめ

有人火星探査を模擬した実験として、MARS500, HI-SEAS, MDRS, Biosphere 2 及び月宮 1 号などを紹介した。アメリカの非営利団体火星協会が運営する MDRS は日本も含め世界中の多くの人が参加しており、火星模擬実験の結果だけでなく、多くの人が火星探査に興味を持つことも期待されている。Biosphere 2 の実験では、酸素濃度が低下したり、食料が欠乏したりするなどの問題が生じた。このことから、人工的な閉鎖生態系を模擬することの困難さが示された。中国の閉鎖生態系実験の月宮 1 号では

昆虫食が試された。昆虫食は特に西洋の宇宙飛行士から敬遠されているものの火星で自給自足する手段として期待される。最後に火星への有人飛行で宇宙飛行士が受ける被曝量を検討した。日常生活の基準を上回るかなりの放射線量が予想され、火星旅行は危険を伴うことがわかった。そのため、宇宙飛行士を地球に帰還させない計画や原子力推進ロケットを使うなどの手段を検討する必要がある。

### 参考文献

- 1) Lujendra Ojha, Mary Beth Wilhelm, Scott L. Murchie, Alfred S. McEwen, James J. Wray, Jennifer Hanley, Marion Massé and Matt Chojnacki,: Nature Geoscience, **8** (2015) 829.
- 2) 竹内薫: 「人類が火星に移住する日」 p. 58, 技術評論社 (2015).
- 3) <http://mars500.imbp.ru/>
- 4) [http://www.esa.int/Our\\_Activities/Human\\_Spaceflight/Mars500/The\\_isolation\\_facility](http://www.esa.int/Our_Activities/Human_Spaceflight/Mars500/The_isolation_facility)
- 5) HI-SEAS ホームページ, <http://hi-seas.org/>
- 6) MDRS ホームページ, <http://mdrs.marssociety.org/>
- 7) 第15回宇宙科学シンポジウム, 宇宙科学研究所(2015).
- 8) Life in Biosphere 2, TED talk, Jane Poynter (2009).
- 9) アビゲイル・アーリング, マーク・ネルソン: 「バイオスフィア実験生活」, 講談社 (1996)
- 10) Serova LV and Denisova LA: Physiologist, **25** (1982) S9.
- 11) Sayaka Wakayama, Yumi Kawahara, Chong Li, Kazuo Yamagata, Louis Yuge and Teruhiko Wakayama: PLoS One, **4** (2009) e6753.
- 12) Richard A. KERR: Science, **340** (2013) 1031.