

2D15 アナログ実験施設を利用した 有人火星探査実証実験の有効性について

○宮嶋宏行（東京女学館大）

Efficacy of Manned Mars Exploration Field Study using Analog Experimental Facility
Hiroyuki miyajima (Tokyo Jogakkan College)

Key Words: Analog Study, Extra Vehicular Activities (EVA), Field Research, Logistics

Abstract

Analog testing on ground facility is a primary method to demonstrate the technology and operation for a manned space exploration. There are ground experimental facilities and fields for analog testing such as Haughton-Mars Project (HMP), Flashline Mars Arctic Research Station (FMARS), Mars Desert Research Station (MDRS), MARS500, and Hawaii Space Exploration Analog and Simulation (HI-SEAS). MDRS is a time-proven facility that has been used by US and European researchers. Team Nippon organized by the Japan Mars Society was the first all Japanese team to participate in the Mars Desert Research Station (MDRS) crew rotations in 2013-2014. The team's six crewmembers conducted a two-week habitation experiment regarding space food, hygiene control, and logistics and life support for habitation and planetary Extra Vehicular Activities (EVA). This paper reports the analog test research trends and efficacy conducted by all 2013-2014 rotation crews as well as the summary of the experiments conducted by the Team Nippon.

1. 目的および背景

有人宇宙開発では地上アナログ実験施設を用いた実証実験が大きな役割を果たしてきた。1960年代のNASA アポロ計画ではアリゾナ州フラグスタッフの月面を模擬した砂漠で月面車や装置等の実証実験が行われた。同砂漠では2000年以降もNASAの次世代与圧月面ローバの実証実験が行われている。

さらに長期の宇宙居住を目指した代表的なアナログ実験施設としてはカナダデボン島のホートンマーズ計画 Haughton-Mars Project (HMP), 同じくデボン島のフラッシュライン火星北極圏研究基地 Flashline Mars Arctic Research Station (FMARS), 米国ユタ州ハンクスビルの火星砂漠研究基地 Mars Desert Research Station (MDRS), ロシアの MARS500, 米国ハワイ島のハワイ宇宙探査アナログシミュレーション Hawaii Space Exploration Analog and Simulation (HI-SEAS)がある。このうち MDRS は10年以上の運用実績を持つアナログ実験施設の1つである。現在まで居住実験や惑星表面探査の模擬施設として欧米各国のクルーによって利用されてきた。

2014年3月に、このMDRSの2013-2014年ローテーションに日本火星協会により結成された Team Nippon が参加した。日本人6人からなる Team Nippon

(Crew137)は、13年間のMDRS運用の歴史の中で、初めての日本人だけによるクルーである。2013-2014ローテーションでは2013年12月から2014年5月までの実験期間に2週間交代で11のクルーが参加した。

本論文では、MDRSで2013-2014年に各クルーが実施した研究課題を、報告書をもとに概観する。次に Team Nippon の研究成果を踏まえて、アナログ実験施設を利用した有人火星探査実証実験の可能性と有効性について考察する。

2. 研究施設と研究課題

MDRSの施設構成を図1に示す。MDRSは左からMusk天文台、温室(GreenHab)と居住モジュール(Hab)、発電機などのエネルギー供給施設からなる。居住モジュールは火星協会会長 R. Zubrin によるマーズダイレクト計画の実物大の居住施設である。内部は図2に示すように2階層から構成され、下層階に生物学・地質学実験室、作業室、EVA準備室、トイレ、洗面室、シャワー、2つのエアロックがあり、上層階には、キッチンとダイニングルーム、6つの個室、個室と天井の間には1つのロフトがある。電気はディーゼル発電設備(120V, 8kW)により供給される。これらの仕様は2014年3月時点のものであり、改修または変更が日常的になされている。



図 1 MDRS の施設構成

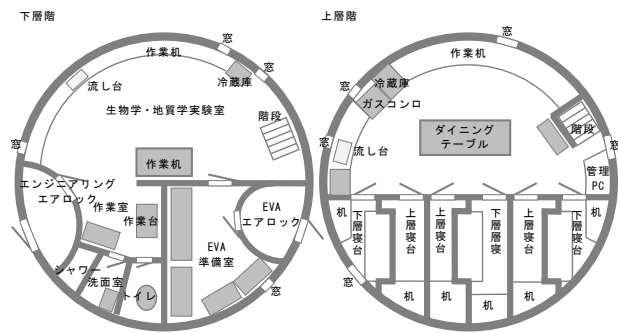


図 2 MDRS の平面図

MDRS 居住実験クルーの募集はローテーション開始の半年程前に行われ、応募書類と職務経歴書によりメンバーが選考される。メンバー選抜後、実験主任者 (PI) は事前研究計画書を提出し、サイエンスチームの承認を受けなければならない。事前研究計画書の承認後に研究計画書を提出し、ミッションの 1 ヶ月前までに最終的な承認を受けなければならない。

3. MDRS を利用した研究課題

各クルーの研究報告書¹⁾から分野別の研究課題の分析を行う。表 1 に 2013-2014 年のクルーごとの分野別研究課題を集計した。事前研究計画書に示された研究分野は、人に関する研究、動物を利用した研究、その他のライフサイエンス、地質・環境科学、技術開発・評価、天文学の 6 分野である。この分類に従うと、人に関する研究、その他のライフサイエンス、技術開発・評価での課題設定が多い。さらに技術開発・評価は設備・運用、船外活動 (EVA: Extra Vehicular Activities)、ローバ等の 3 つに分けて整理できる。MDRS は火星表面を模擬した砂漠の中に設置されているため EVA とサイエンス活動を組み合わせたミッションの機器開発が多い。

表 1 2013-2014 年分野別研究課題

2013-2014 年ローテーション	研究分野							
	人に関する研究	動物を利用した研究	その他のライフサイエンス	地質・環境科学	技術開発・評価			天文学
					設備・運用	船外活動	ローバ等	
Crew131			植物栽培 (LED)			グローブ開発		
Crew132			宇宙生物学, 植物栽培	地質調査	資源管理	ナビゲーション		
Crew133				地質調査	メディカルトレーニング	通信, ヘルメット温度管理		天体観測 (電波望遠鏡)
Crew134	被ばく低減, ヒューマンファクター (心理学・神経学)		火星居住・テラフォーミングのための有機体試験, 汚染		遠隔医療	グローブ開発, 通信, 機器開発	ヒューマンロボットインタラクション, ステレオ・カメラ	
Crew135	体重管理・満腹感調査		植物栽培 (LED)		居住システム設計 (信頼性, 冗長性, 構造, 音響, 拡張性)	ヘッドマウントディスプレイ		
Crew136			宇宙生物学	地質調査		ヘリウム気球を利用した地形分析		天体観測 (分光分析)
Crew137	食事 (災害食), 官能検査, 健康管理, 衛生管理				資源管理, 居住システム	ナビゲーション		
Crew138	運動の実現性, 機器開発 (生物医学, 生物)				MDRS 運用手順マニュアル化	バッテリー, 観測技術, クルーの自律性, 地図作成		
Crew139	チームビルディング (事前訓練と協調性)							
Crew140			植物栽培 (UV カット)		資源管理		バックパック (自転車・ストレッチャー), クモ型ロボット	
Crew141	ヒューマンファクター, ノンバーバルコミュニケーション		植物栽培			救助プロトコル	ヒューマン/ローバインタラクション	天体観測

さらに、事前研究計画書の技術開発・評価項目には、EVA 中の無線通信、自律および操縦型ローバ、無人航空機および気球、室内ロボット、宇宙服要素技術、水再生・水浄化・洗濯、空気再生、計測・遠隔・データ収集技術、資源（水・電力・燃料）利用計測、太陽光発電・風力発電、太陽熱発電、基地-地球間通信の分野が設定されている。これらの分野は過去のミッションで実施された一般的な研究分野と考えられる。

4. Team Nippon の実験概要

Team Nippon は、火星居住のための宇宙食の一部としての日本食の研究（PI：片山）、惑星表面探査におけるロジスティクスと生命維持の研究（PI：宮嶋）の2つのテーマで2014年3月1日から2014年3月15日までの2週間居住実験を行った。我々は、ミッション目標を以下のように設定した。

<p>Team Nippon は、火星協会の 3S(Safety, Simulation, and Science) のポリシーを参考に3つのミッション目標を設定する。</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Team Nippon は怪我や事故なく、安全にこのミッションを達成する。 2. 火星の生活と探査を模擬する。 <ul style="list-style-type: none"> • 衛生・健康・廃棄物最小を維持しながら、水をあまり使わない災害食を、火星の食事に応用する。 • 過去の居住体積やヒューマンファクター研究を参考にしながら、火星居住施設の研究と設計を行う。 • MDRS の EVA 機器を利用して、惑星表面移動探査のパラメータについて調査する。 3. サイエンスとしては、調理器具・キッチン設備の ATP 検査を行い、伝統的な日本式の衛生管理法の効果を測定する。

2週間のミッション中は米国山岳時間19時から21時までの2時間 CapCom 通信が義務付けられ、指定のフォーマットに従ってメンバーの健康状態、エンジニアリングデータ、植物の生育状態、EVA 事前計画と事後報告、トラブルシューティングなどについて各担当者がメールで報告する必要がある。

5. Team Nippon の実験結果

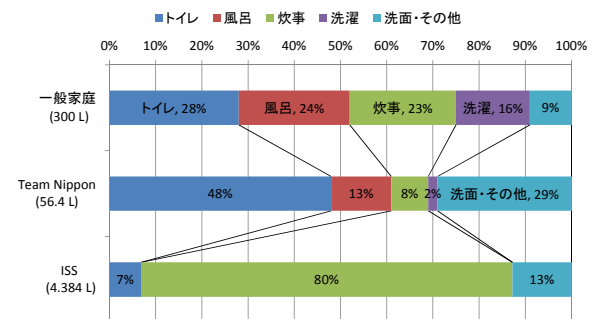
2週間の居住実験及び惑星表面探査シミュレーションの成果の一部を示す²⁾。6人で2週間の居住実験の水の使用量を表2に示す。我々は調理に関わる水の使用量を大きく抑え、その分の水をシャワーなどの衛生維持に利用した。水の使用量を抑える方法には、名古屋女子大学片山教授の研究グループによる災害時の食事や調理法を導入した。この方法で調理の水を節約したため、水洗トイレの洗浄水量が水消費量の約半分になった。

次に、一般家庭³⁾、Team Nippon、ISS（国際宇宙ス

テーション）⁴⁾の1日一人当たりの平均水使用量を図3に示す。Team Nippon は、水消費量を一般家庭の6分の1程度に抑えることができた。特にシャワー、炊事での節約が大きい。今回は、実験用衣類のみを洗濯したため、洗濯水の利用は少ない。国際宇宙ステーションでは、シャワーや洗濯での水利用がなく、トイレでの水利用もかなり少ないため、全体の水使用量は4,384 Lと少ない。そのため調理用水と飲用水が全体の8割を占めるのが特徴である。

表2 Team Nippon の水使用量

水用途	使用量 L/mission	水使用量 割合	使用量 L/人-day
トイレ洗浄水	2137	48%	27.4
シャワー用水	422	10%	5.4
洗髪用水	136	3%	1.7
洗顔・歯磨き用水	266	6%	3.4
手洗い用水	297	7%	3.8
洗濯用水	76	2%	1.0
調理用水	197	4%	2.5
飲用水	148	3%	1.9
食器洗浄水	30	1%	0.4
植物栽培用水	49	1%	0.6
その他	673	15%	8.6
合計	4431	100%	56.4



ISS: 国際宇宙ステーション

図3 水利用区分の比較

次にMDRSに装備されたEVA装備を利用した惑星表面探査シミュレーションの様子を図4に示す。我々は表3に示すように7回のEVAを実施した。そのうちAll-Terrain Vehicle (ATV)を利用した遠征探査を4回行った。My tracks (Google)を利用してEVAのGPSデータ(kml形式で緯度、経度、高度等)を記録した。EVA#4の記録をGoogle Earthで作図した結果を図5に示す。峡谷をATVで走行し最後の1.5kmを徒歩によりMuddy Creekに到達する往復26kmの遠征探査である。



図 4 惑星表面探査シミュレーション

表 3 EVA の概要

#	日	人数	ATV	目的地	時間
1	3/3	4		East hill of MDRS	14:32 - 16:06
2	3/4	4		North hill of MDRS	10:15 - 12:02
3	3/6	2	x	White Rock Reservoir	10:02 - 11:45
4	3/7	3	x	Muddy Creek	11:05 - 15:35
5	3/10	3	x	North Pinto Hills	10:55 - 13:45
6	3/11	4		East hill of MDRS	9:53 - 11:58
7	3/12	3	x	East valley of MDRS	10:05 - 12:25

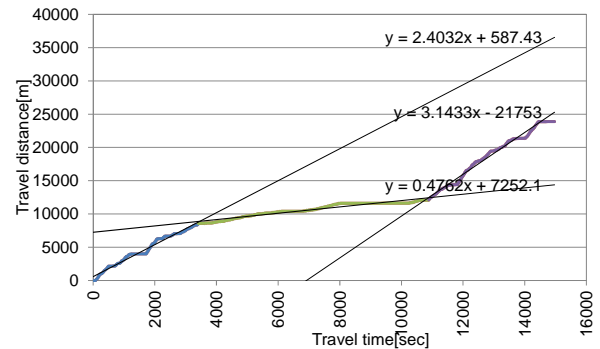


最高高度：1417 m，最低高度：1335 m，移動距離 26 km

図 5 ATV を用いた遠征探査シミュレーション

次に、先ほどの GPS データからヒュベニの公式を用いて移動距離を計算した。ただし、ヒュベニの公式は高度を考慮しない距離計算のため、Google Earth で作図した結果に比べ約 8% の誤差が発生した。移動時間とこの移動距離を線形近似して平均移動速度を求めた。EVA#4 の計算結果のみ図 6 に示す。EVA#3, 5, 7 についても同様に計算し、その結果を表 4 に示す。ATV (往路)、ATV (復路)、徒歩 (丘陵)、徒歩 (平地)、徒歩 (峡谷) の平均移動速度については、それぞれ 6.7~9.4 km/h, 6.5~20.5 km/h, 0.59~0.84 km/h, 1.7 km/h, 2.8 km/h の暫定値を得た。ATV の平均移動速度は地形や、往路か復路かによりばらつきが発生する。徒歩については、EVA スーツを装着しているため丘陵地帯では一般的な歩行速度 4km/h の約 4 分の 1、平地では約 2 分の 1 である。EVA スーツを着用しての移動はかなり体力を消耗するため長時間の移動は困難である。また実際の遠征では、一旦 ATV 利用が困難な地形に遭遇し迂回路がない場合、

それ以降の移動は徒歩に限られるため事前の十分な地形分析が必要である。例えば、Crew 136 は気球による地形観測を実施した。



区間 1 (1~3412 秒) : ATV で移動, 区間 2 (3413~10886 秒) : 徒歩で移動, 区間 3 (10887~14965 秒) : ATV で移動

図 6 #4 の移動時間と移動距離の関係

表 4 地形と平均移動速度 (m/s を km/h に変換)

#	ATV (往路) km/h	ATV (復路) km/h	徒歩 (丘陵) km/h	徒歩 (平地) km/h	徒歩 (峡谷) km/h
1	-	-	-	-	-
2	-	-	-	1.7	-
3	8.6	10.0	0.84	-	-
4	8.7	11.3	-	1.7	-
5	6.7	6.5	0.59	-	-
6	-	-	-	-	-
7	9.4	20.5	-	-	2.8

6. おわりに

2013-2014 年に MDRS で実施された研究課題を分析し、その傾向を調査した。Team Nippon の 2 週間の火星生活模擬実験 (食事、衛生、ロジスティクス、および惑星表面探査) の経験を踏まえ、次の 2 つの留意点を得た。居住実験については、クルーの生活様式や外部気候が大きく影響するため、行動や環境が管理されている実際の宇宙ミッションとの単純な比較は適当ではない。また、惑星表面探査については、機器の開発等で有効な実験機会を得られる可能性が高く、多くのクルーにより実施されている。

参考文献

- 1) Mars Society, MDRS Final Mission Reports Field Season 2013-2014, <http://mdrs.marssociety.org/home>, 2014.
- 2) H. Miyajima, et al., MDRS Crew137 Final Mission Reports, <http://mdrs.marssociety.org/home/crew-137/final-mission-report>, 2014.
- 3) 国土交通省, 平成 25 年版「日本の水資源」, 2013.
- 4) Barry Tobias, John D. Garr II, and Meghan Erne, International Space Station Water Balance Operations, AIAA 2011-5150, 2011.