

A. 個別観測機器提案

(A1) 提案タイトル

火星生命探査機器群提案

(A2) 代表者（氏名・年齢・所属（連絡先））

山岸明彦・薬科大学（東京都八王子市堀の内1432-1、電話：042-676-7139、FAX：042-676-7145、
E-mail:yamagish@toyaku.ac.jp）

惑星探査経験無、国際宇宙ステーション暴露部「たんぽぽ計画」PI、2013年打ち上げ予定

(A3) 共同提案者（氏名・年齢・所属（連絡先））

吉村義隆・玉川大学（東京都町田市玉川学園6-1-1、電話：042-739-8271、FAX：042-739-8854、
E-mail:ystk@agr.tamagawa.ac.jp）

長沼毅・広島大学大学院生物圏科学研究科・（広島県東広島市鏡山1-4-4）

宮川厚夫・静岡大学（静岡県浜松市中区城北三丁目5-1）

出村裕英・会津大学コンピュータ理工学部（福島県会津若松市一箕町鶴賀）

豊田岐聡・大阪大学大学院理学研究科附属基礎理学プロジェクト研究センター
（大阪府豊中市待兼山町1-）

本多 元・長岡技術科学大学（新潟県長岡市 長岡技術科学大学・生物系）

小林憲正・横浜国立大学大学院工学研究院（横浜市保土ヶ谷区常盤台7-9-5）

大野宗祐・千葉工業大学惑星探査研究センター（ohno@perc.it-chiba.ac.jp）

石丸 亮・千葉工業大学惑星探査研究センター（ishimaru.ryo@it-chiba.ac.jp）

石上玄也・宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所（050-3362-6583）

佐々木晶・国立天文台（sho@miz.nao.ac.jp）探査経験有り

宮本英昭・東京大学総合研究博物館（hm@um.u-tokyo.ac.jp）探査経験有り

(A4) 提案する機器の概要

【背景・目的】近年の探査により、火星表層には、かつて大量の液体の水が存在していたこと、温暖湿潤な気候がある程度長期間保たれていたこと、そして火星は強い磁場を保持していたことが明らかにされた。これらを端的にまとめると、生命が生まれた頃の地球と極めて類似した環境を火星が持ち合わせていたという事に他ならない。こうした理由から、我々地球生命がどこから来て、どのような位置づけを持つかという究極的な問いに答えるために、火星は最も重要な研究対象であるといえる。

火星におけるメタンの発見と、地球におけるメタン酸化鉄還元細菌の発見 (Beal ら 2009) から、我々は火星表面において現在もまだメタン酸化鉄還元細菌 (化学合成微生物の一種) が生存しているのではないかと推定するに至った。この菌はメタンを生成するメタン菌とは全く別の菌であり、表層付近で生育する可能性がある。火星の様々な環境は生命が十分に生存可能な環境である。また、紫外線は様々な物質によって吸収されるので、薄い火星土壌に覆われるだけで、火星表面も十分に生育可能な環境となる。従って、メタンと酸化鉄のような酸化型物質の両者がある場所であれば、数センチメートル程度の深さでも微生物は生存している可能性がある。こうした状況から、我々は火星地下深部を掘削する必要が無いという点を世界で初めて指摘するとともに、火星において生命を直接探査することを、現在の技術レベルでも十分に実現可能な手法を用いて、世界に先駆けて提案することとした。なお計画の特性から、火星表面における有機物や地質探査も同時に行うことができると考えている。

【他の生命探査計画との比較と本計画の特徴】

火星ではこれまで、*Viking* 計画 (1976) で、Gas Chromatography / Mass Spectrometer (GCMS) 分析を行い、生物は地下 10cm までには存在しないと結論された。しかし、その分析感度は低く 10^7 細胞/gram という多数の細胞がなければ検出できない感度であった (Glavin et al., 2001)。今後 *Mars Science Laboratory mission* (MSL) では GCMS (a gas chromatograph and a quadrupole mass spectrometer) で、また *ExoMars* では Life Marker Chip という抗体を利用した装置で、生物関連分子の検出が計画されている。

我々の提案は、1) メタン発生地帯等の現存する生命を第一の探査対象とし、2) 以下に述べる様に複数の蛍光色素と蛍光顕微鏡を用いて生命を直接探査し、3) 最終的にはアミノ酸分析を行うことにより発見した生命の由来等を明らかにすることを特徴とする。

【探査内容】微生物探査の方法としては、蛍光色素をもちいた蛍光顕微鏡観察を自動的に行う。細胞の特徴を検出するいくつかの色素を組み合わせる用いることから、「細胞」を検出する。

さらに、そのアミノ酸分析を行う。地球の生物は 20 種類の L 型アミノ酸からなるタンパク質を持っている。火星の「細胞」らしき粒子が地球と同じアミノ酸かどうかを調べる事により、「細胞」の由来を知ることができる。また、メタン濃度を実測する。シャベル等の土壌採集装置はローバー、ランダーに設置されるものとする。

【MELOS 計画との関係】蛍光顕微鏡撮像装置は MELOS1 計画への搭載提案をおこなっている。蛍光顕微鏡撮像装置が MELOS1 計画の一部として採択され、MELOS1 計画がプロジェクト化された場合には蛍光撮像装置は 2020 年代前半には装置は完成し、探査実績をもっている可能性があるが、次の火星探査でも搭載を目指す。現在実験室でのアミノ酸分析はタンパク質の加水分解後 HPLC (High Performance Liquid Chromatography) 分析によって行われている。今後、アミノ酸の分析装置の自動化と小型化開発を行う。さらに小型メタン測定装置を開発搭載する。

(A5) 機器の科学目標、および「惑星探査の長期的展望」に於ける本提案の位置づけ

本ミッションの科学目標は第一段階アストロバイオロジーパネル報告火星生命探査に沿っている。

A5-1 提案観測機器が単独で達成できる科学目標、および期待される成果

Minimum success

装置が動作し、以下の観測に成功する

- A. 蛍光顕微鏡が動作し、ダストあるいは土壌を撮像し、地球転送に成功する
- B. 有機物分析装置が動作し、アミノ酸存在量の上限を判定する。
- C. メタン分析装置が動作し、メタン濃度の上限を判定する。

Nominal success

それぞれの装置で以下の観測に成功する。

- A. 顕微鏡が動作し、微生物および有機物の存在量の上限を判定する。
- B. 有機物分析装置が動作し、アミノ酸存在量の上限を判定する。
- C. メタン分析装置が動作し、メタン濃度の上限を判定する。

Maximum success

Nominal successに加え、以下の項目を達成する。

- A. 1. 顕微鏡の観察で、有機物を検出する。
2. 顕微鏡の観察で、微生物を検出する。
- B. 有機物分析装置により、アミノ酸を検出する。
- C. メタン分析装置により、メタンを検出する。

(A5-2) 他の観測データ（地上観測を含む）と組み合わせて期待される相乗効果

メタン濃度は地上からの観測および火星周回機によって観測されている。その地上濃度を直接測定することができるようになる。メタン濃度測定装置はMSLに搭載されているが、多くの領域での測定が重要である。

(A5-3) 科学目標の達成に必要な観測精度とカバレッジ

（試料回収については取得すべき試料の条件）

A. 蛍光顕微鏡観測装置

分解能、1マイクロメートル/ピクセル

3種類以上での波長での画像撮像

100細胞/グラム土壌の微生物検出感度

B. 有機物分析装置

10⁴細胞の有機物を検出する感度

すなわち、細胞質量：10⁴ cells x 1 pg/cell = 10⁻⁸ g、

アミノ酸総量：10⁻⁸ g x 0.2 = 2 x 10⁻⁹ g

1種類あたりのアミノ酸検出感度： $2 \times 10^{-9} \text{ g} \times 0.05 = 10^{-10} \text{ g}$

10種類以上のアミノ酸を識別できること。

C. メタン観測装置

火星大気中平均メタン濃度10ppbを検出できること。

(A6) 想定する開発体制

A. 顕微鏡開発

宮川厚夫（静岡大学）・MELOS 1 で実施中・もと蛍光顕微鏡メーカー所属技術者

佐藤毅彦（ISAS/JAXA）・MELOS 1 でCCD開発担当・宇宙開発実績あり

出村裕英（会津大）・MELOS1で画像解析担当

サンプル処理機構開発

内海裕一（兵庫県立大）・微量分析装置開発専門家

蛍光色素開発担当

吉村義隆（玉川大学）・MELOS 1 で実施中・微生物蛍光観察専門家

本多 元（長岡技術科学大学）・MELOS 1 で実施中・有機物蛍光観察専門家

B. 有機物分析装置開発

浜瀬健司（九州大学）・超微量アミノ酸HPLC分析装置開発専門家

豊田岐聡（阪大）・質量分析装置開発専門家・宇宙搭載機器開発実績あり。

小林憲正（横浜国立大学）・有機物バルク分析装置開発・アミノ酸分析専門家

三田肇（福岡工大）・有機物バルク分析装置開発・アミノ酸分析専門家

C. メタン検出装置開発

戸野倉賢一（東京大学）・小型メタン測定装置開発・メタン測定装置専門家

大野宗祐、石丸 亮（千葉工大）・小型メタン測定装置開発・火星メタン専門家

D. ローバ搭載型の土壌採集機構検討

石上玄也（ISAS/JAXA）・MELOS1で実施中・ローバー専門家

微生物実験

伊藤 隆（理化学研究所）・火星微生物探査可能性詳細検討・メタン酸化微生物専門家

長沼 毅（広島大学）・火星微生物探査可能性詳細検討・極限環境微生物専門家

装置開発アドバイザー

山下雅道、矢野 創、橋本博文、田端 誠、（ISAS/JAXA）・装置開発全般

久保田孝（ISAS/JAXA）・ローバ搭載可能性検討

佐々木晶（国立天文台）・装置開発全般および着陸地選定

宮本英昭（東大博物館）・装置開発全般、着陸機との関係検討および着陸地選定

可能なメーカー：（株）トヤマ 他

(A7) 実現に向けて必要となる技術課題

A. 蛍光顕微鏡自動撮像装置の開発

蛍光顕微鏡自動撮像装置の開発はMELOS 1への搭載を目指して、平成23年度「宇宙機搭載機器開発費」を得て進行している。以下の様な、開発状況であり、いくつかの今後の課題はあるが、いずれもMELOS 1の計画の設定時間範囲内で実現可能と予想している。具体的な開発項目は以下の通り。

A-1. 蛍光色素の選定（担当者：吉村、本多、山岸）

これまで、生物学分野では数千種の蛍光色素が開発され実験で用いられている。顕微鏡を用いた生物細胞検出のための色素選定の報告もある。しかし、未知組成をもつ細胞をどのように検出するかという包括的な検討は行われていない。我々は、細菌細胞、DNAを持たない細胞、メタン酸化菌を検出対象とするだけでなく、存在可能性の高い有機物（非生物的合成有機化合物、プロテノイド、タンパク質、PAH）を検出できる色素の選定、さらに生細胞と死細胞をDNAやRNAの存在にかかわらず識別できる色素の選定を行っている。同時に鉱物との識別も可能である必要がある。これらの開発は今年度中にほぼ完了予定である。こうした色素は、低温凍結状態あるいは固体で安定である。予想されるエントリーカプセル内に収納された状態では宇宙線の影響も少ないと予想されるが、放射線耐性は今後検討する。30℃以上での高温で溶液状態では色素の種類によっては不安定であり、より安定な固体状態での搭載を検討する。有機物ではあるが、微生物の栄養素とはならず、PPP上の問題もない。現時点で解決困難な要素は識別されていない。

A-2. 蛍光顕微鏡開発（担当者：宮川、佐藤、出村）

現在、XYZ三軸モーター駆動、フィルター交換ローター、CCD、レーザーダイオード、LED光源、0.65マイクロメートル/ピクセルをBBMモデルとして作成している。平成24年度中には3色CCDを持つシステムとしてBBM完成予定。

今後の課題は

A-2.1 宇宙搭載機としての振動試験、放射線耐性試験、温度試験、信頼性のテストと改良

A-2.2 光学系の宇宙および火星環境への対応

A-2.3 画像処理ソフトの開発と装置への実装

A-2.4 フィルター枚数検討、波長可変フィルターの搭載可能性検討、CCD（1色か3色か）検討、光源の種類選定（これは、色素および鉱物解析対象に依存する）

A-2.5 装置制御部開発

A-2.6 サンプル処理部開発

B. アミノ酸自動分析装置

アミノ酸自動分析は実験室内では、有機物抽出、加水分解、誘導化、LC分析あるいはGC分析として実施されている。高感度検出は蛍光色素を用いて行われている。しかし、火星での高感度分析を考えた場合には質量分析装置による検出との比較検討が必要である。平成23年度「宇宙機搭載機器開発費」による開発の一部として以下の検討を進めている。

B-1. 微生物のバルク選別方法（担当者：山岸）

B-2. 微生物の加水分解方法の検討（担当者：小林、三田、内海、山岸）

B-3. 有機物誘導体化方法の検討（担当者：小林、三田、内海、山岸）

B-4. アミノ酸検出装置 TOF-MS飛行時間型質量分析装置（担当者：豊田）

豊田がこれまで宇宙機を含め多くの実績を持つ装置である。極めて高い検出感度と質量分解能をもつ。質量範囲は制限無し、重量は20kg以下、消費電力は50W以下を目指す。GC-TOFMS, MALDI-TOFMSとしての地上用小型高分解能質量分析計は既に完成しており（Anal. Chem., 82 (2010), 8456-8463. 50cm×60cm×30cm. 35kg. 分解能3万以上）、この装置をベースにさらなる小型軽量化を図る。GC-TOFMSの場合、検出下限は10ppb程度である。一方、MALDIは一般的にはfmolやamolの分析が可能であるが、アミノ酸の場合イオン化効率が悪い。しかしGCに比べ前処理が不要で、GCを用いない分、軽量化や消費電力の面から有利である。本計画では、GC-TOFMSとMALDI-TOFMSの両方を感度、前処理の簡便性の面から検討する。

誘導化アミノ酸高感度分析での総合的自動化と分析感度の検証が課題である。

C. メタン濃度測定装置（担当者：大野・石丸）

レーザーの反射吸収を用いた低質量（600グラム）低電力消費のメタン濃度測定装置が開発されている。

今後既存の装置の原理に基づいた装置の改良可能性を検討する。

課題として、以下の2点がある。

C-1. 検出感度の検証と高感度化の検討

C-2. 宇宙および火星環境対応への装置の改良

D. ローバ搭載型の土壌採集機構検討（担当者：石上）

現在、MELOS-1ローバの全体的なフィージビリティ検討をしており、その一環としてローバ搭載型の土壌採集機構を検討する。

スケジュール表

	2011年～	2016年～	2021年～	2026年～
蛍光顕微鏡	宇宙機開発	開発完了	打上運用	
サンプル処理装置	宇宙機開発	開発完了	打上運用	
アミノ酸自動分析装置				
細胞分別装置	基本開発、BBM	宇宙機開発	開発完了	打上運用
誘導化装置	基本開発、BBM	宇宙機開発	開発完了	打上運用
検出装置	選定、BBM 開発	宇宙機開発	開発完了	打上運用
メタン測定装置	基本開発、BBM	宇宙機開発	開発完了	打上運用

予算見積もり。

	2011年	2016年	2021年	2026年
蛍光顕微鏡	2千万円	2千万円	打上運用	
アミノ酸自動分析装置				
細胞分別装置	1千万円	2千万円	2千万円	打上運用
誘導化装置	1千万円	2千万円	2千万円	打上運用
検出装置	5千万円	2億円	2億円	打上運用
メタン測定装置	1千万円	2千万円	2千万円	打上運用
合計	1.0億円	2.8億円	2.6億円	全期間合計 6.4億円

(A8) 参考文献提案書内容の根拠となる文献資料

火星生命探査計画全般に関して

[1] Yamagishi, A. et al., 2010, Biol. Sci. Space 24, 67-82.

[2] 山岸明彦 2010 惑星科学会誌「遊星人」20, 108-116

生命極限環境耐性全般

[3] 山岸明彦, 他, 2010, 現代生物科学入門 第10巻 極限環境生物学, 179-220 (岩波書店).

火星でのメタン観測結果

[4] Mumma, M. J. et al., 2009, Science 323, 1041-1045.

[5] Komatsu, G. et al., 2010, Planet. Space Sci. 59, 169-181

[6] Etiope, G. et al., 2010, Planet. Space Sci. 59, 182-195

[7] Atreya, S. K. et al., 2007, Planet. Space Sci. 55, 358-369.

地球でのメタン酸化鉄還元細菌の発見

[8] Beal, E. J. et al., 2009, Science 325, 184-187