

火星表面での微生物探査装置LDM: Life Detection Microscope 開発の現状

山岸明彦(東京薬科大学生命科学部)、佐藤毅彦(ISAS/JAXA)、宮川厚夫(東京薬科大学生命科学部)、佐々木聰(東京工科大学応用生物学部)、吉村義隆(玉川大学農学部)、今井栄一(長岡科学技術大学生物系)、長沼毅(広島大学生物圏科学研究科)、小林憲正、癸生川陽子(横浜国立大学工学研究院)、藪田ひかる(大阪大学理学部)、三田肇(福岡工業大学工学部)、出村裕英(会津大学コンピュータ理工学部)、波多英寛(熊本大学自然科学研究科)、小林正規(千葉工業大学惑星探査研究センター)

[要旨] 火星初期約4億年は表面の20%を海で覆われていた(Villanueva et al., Science 2015)。また当時の火星には火山活動や地磁気もあり、温暖湿潤な地球初期と同様な環境が保たれていたため、生命誕生の環境があったといえる。Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) はクレーター斜面の流出地形(Recurrent Slope Linear)に塩水和物を発見した(図1)。NASAの探査車MSL: Mars Science Labo (Curiosity)によって、メタンが現在も時折放出されていること(図2)、現在の火星表面で堆積岩(泥岩)と、その中の硫化物と有機物が発見された(図3)。MSLが泥岩中から検出した CH_3Cl (1.4-2.3nmol/100mgsoil)は(図3)火星有機物由来であることが明らかとなった。これは有機炭素 $1.7-2.8 \times 10^{-7}$ g/g soilに相当し、すべてが細胞とすると $2-3 \times 10^6$ 細胞/g soilに相当する。地球由来の微生物でも火星表面の環境に生存可能なものが存在する(表1)。また、火星表面で存在する物質をエネルギー源とする微生物も地球には存在する(表2)。装置に付着した地球由来細胞(コンタミ)とはいくつかの方法で識別可能である(表3)。現状のLDM装置は 10^4 細胞/g 土壌ほどの高い感度を持っている(表4)。今年打ち上げ予定のESAのTGO(Trace Gas Orbiter)はpptの感度を持ち、メタン放出地点の詳細な情報が期待される。

図1. 火星のクレーター斜面で見える流水の跡と思われる地形に塩($\text{Mg}(\text{ClO}_4)_2$, MgCl_2 , NaClO_4)水和物が発見された(Ojha et al. Nature Geosci, 2015)。飽和過塩素酸塩水は $-70 \sim +24^\circ\text{C}$ で液体状態を保持し得る。



図2. 火星表面でのメタンの検出。MSLは 0.69 ± 0.25 ppbvのバックグラウンドより明らかに高い 7.2 ± 2.1 ppbvのメタンを検出した。メタンはメタン酸化菌のエネルギー源となる。(Webster et al., Science, 2015)

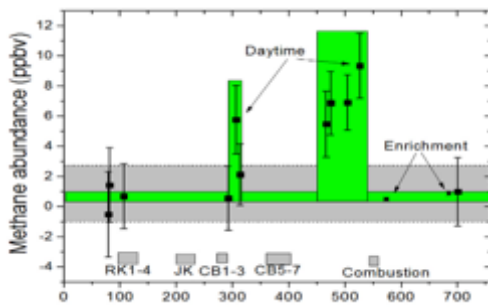


表1. 地球生物の火星表面生存可能性
地球微生物の中には火星表面環境で生存、増殖可能な菌が存在する。紫外線は薄い土壌層で遮蔽されるので数センチメートル下は生存可能となる。放射線は地球のどんな微生物の生育にとっても問題無い。地球には過塩素酸を利用できる菌がいる。総合すると、火星表面地下数センチで地球微生物も生存増殖可能。

環境因子	地球生物の生育限界	火星表面環境
温度	$-20 \sim 122^\circ\text{C}$ (生育) -196°C (生存)	$-130 \sim 20^\circ\text{C}$
気圧	700 Pa (生育)	600~800 Pa (地球の6/1000)
水	Water activity: $a_w=0.6$ Humidity: 70%	Ice/Brines/Vapor
pH	$-0.06 \sim 12.5$	7.7 ± 0.5
紫外線	$5,000 \text{ J m}^{-2}$	20 W m^{-2}
放射線	1,440 Gy	0.4 mGy day^{-1}

図3. 火星土壌中の塩化メタンの発見と還元型硫化物と硫化物の発見。MSLは、火星土壌を加熱して塩化メタンと硫化水素を検出した。硫化物と硫化物は微生物のエネルギー源となる。D. W. Ming et al. 2013 Science Express。塩化メタンは火星有機物由来であることが報告された (Freissient, C. et al. J. Geophys. Res. Planets, 2015)。

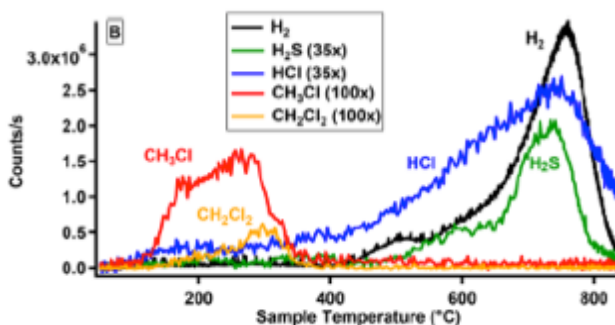


表2. 化学合成細菌が利用可能な化合物の組み合わせ。

還元型物質	酸化型物質	化学合成細菌
CH_4	NO_3^- , MnO_2 , $\text{Fe}(\text{OH})_3$, SO_4^{2-} , etc.	メタン酸化菌
Fe (II)-sulfides	NO_3^- , MnO_2 , etc.	鉄酸化菌
S^{2-}	ClO_4^- , NO_3^- , MnO_2 , etc.	硫黄酸化菌

図4. 蛍光色素(SYTO24, Propidium Iodide, SYPRO Red)による微生物と有機物の検出。生細胞と死細胞(あるいは有機物)の識別が可能である。SYPRO Redは、様々な生物、非生物由来有機物を赤く(あるいは黄色に)染色する。SYTO 24も様々な有機物を染色する。Propidium iodideは、死細胞だけを赤く染色する特徴がある。従って、SYTO 24とPropidium iodideを組み合わせると、死細胞は赤に生細胞は緑に染色される。これは、Propidium iodideが膜を透過できない事、すべての生物細胞は膜に包まれていること、生物細胞の膜は、細胞が死ぬと透過性を増してPropidium iodideで染色される様になることによる。Miniature *E. coli* cellは大腸菌の変異株で、分裂してできる小さい細胞にはDNAが含まれない。上記のシステムでDNAが無い生物細胞も検出できる事を示している。Proteinoid は、生命の起源前に想定されている有機物、PAH(Polycyclic Aromatic Hydrocarbon)は隕石等にも含まれる。SYPRO Redによって、有機物を公汎に検出し、SYTO24とPropidium iodideの組み合わせで、生細胞と死細胞を検出する。これらの色素の温度耐性と放射線耐性は検証済み。色素液は非加熱滅菌可能。

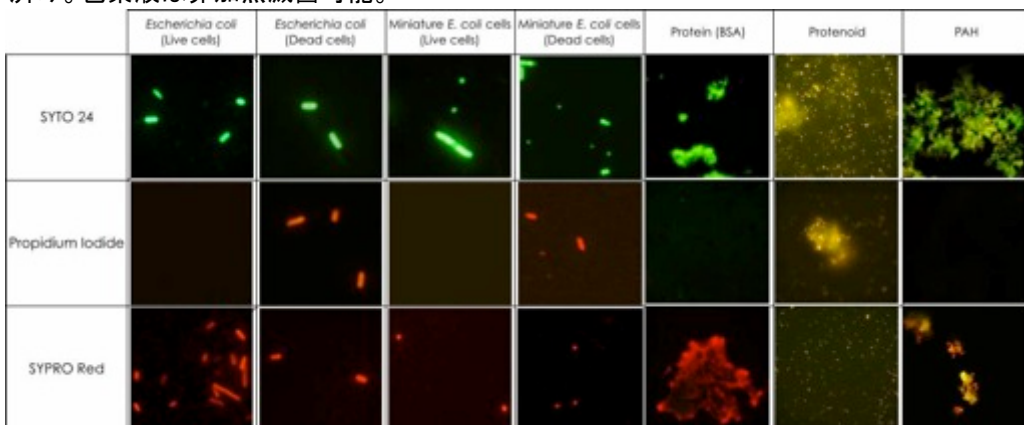


表3. 火星由来微生物と地球由来(装置からのコンタミ)との識別方法。第一段階の三つによって火星由来かどうかはほぼ判定されるが、第二段階から第四段階で検出された微生物の由来が詳細に明らかになる。

	識別方法
第一段階	火星表面で十分に移動して表面に付着した微生物がコンタミ除去 紫外線で死滅した後に分析する。
対照標品	表面土壌の解析で、コンタミがないことを確認する。
複数観察	複数の細胞、複数の標品を観察して確認する。
第二段階	アミノ酸分析をする。20種のL型でなければ地球外生物の可能性が高い。20種L型の場合、第三段階
第三段階	遺伝子分析をする。DNAを持たないあるいは遺伝子がなければ、地球外生物の可能性が高い。
第四段階	遺伝子の系統解析をする。いつ頃(現在か、数億年以上前か)地球から移動したかが判定できる。

表4. 設計中の装置の諸元。感度は現状 10^4 細胞/g土壌で、今後千倍程度感度が上がる改良を検討中。色素液にグリセロールを添加することで凍結と気化を防ぐことができる。光源(LD)の放射線耐性は検討済み。

質量	6 kg (TBC)
外形	120 x 120 x 250 (h) mm
最大電力	20 W (TBC)
動作温度	-40°C (TBC) $\sim 24^\circ\text{C}$ (色素温度であり、IFでの温度要求は緩和される見込み)
保存温度	-40°C (TBC) $\sim 50^\circ\text{C}$ (1時間程度なら 70°C も可)