

火星生命探査

吉村 義隆

はじめに

地球以外に生命は存在するのか？この問いに対する答えを出せる可能性がもっとも高い星が火星である。現在の火星は、赤い酸化鉄に覆われた乾燥した惑星であるが、約40億年前は、海、陸地、磁場、大気などがある、地球とよく似た環境であった。地球と同様に、火星にも生命は誕生したのだろうか？生命の痕跡を求めて、NASA（アメリカ航空宇宙局）とESA（欧州宇宙機関）は有機物探査を進めている。マーズサイエンスラボラトリー（MSL）計画のキュリオシティローバーによって、有機物、メタン、鉄や硫黄などの微生物のエネルギー源となる物質が発見され、過去のみならず現在も生命が生存している可能性が議論されるようになってきた。本稿では、火星の生命探査に関する研究動向とともに、日本のグループが開発を進めている、微生物細胞を検出する生命探査顕微鏡について紹介する。

過去の火星

地球のひとつ外側を公転する火星は、およそ2年2か月おきに地球に接近している。この接近するタイミングに合わせて、NASAやESAは、約2年おきに火星探査機を打ち上げ、これまでに多くのデータを蓄積してきた。その結果、過去の火星の姿が明らかになってきた。表面には、水が流れたと思われる河川状の地形がみられ¹⁾、かつては表面に海や湖のような液体の水が存在していた²⁾。大気を保護する磁場もあり³⁾、数気圧の二酸化炭素分圧を有する大気に覆われた温暖湿潤な気候であったと考えられている⁴⁾。表面に水が存在した期間についてはさまざまな議論がなされているが、数億年は続いた可能性がある⁵⁾。キュリオシティローバーの観測によっても、過去の火星には、中性で塩濃度の低い水環境、生命に必須な元素（炭素、水素、酸素、リン、硫黄）、微生物のエネルギー源となるさまざまな酸化還元状態の鉄や硫黄の化合物があり、生命の生存に適した環境が存在していたことが明らかになってきた⁶⁾。地球では海ができてから数億年のうちに生命が誕生していることから、火星でも生命が誕生した可能性が考えられている。

現在の火星

表面に水をたたえていた火星は、直径が地球の半分ほどで太陽からも遠いため、内部が冷えることにより磁場がなくなり、徐々に大気と水を失っていった。現在の火星表面は、薄い大気（地球の約100分の1）に、紫外線や放射線が降り注ぐ、生命にとっては過酷な低温環境である。しかし、地球では、生物、特に微生物は、環境に適応しながら生息環境を広げ、極地、熱水、地下、砂漠など、地球上の隅々まで存在するようになった。火星においても、生命が誕生したならば、大気や水が消滅する過程で環境に適応し生き残っているかもしれない。実際、地球の微生物の生存限界は非常に広い。シベリアの永久凍土には、 -20°C でも代謝できる微生物⁷⁾や、火星と同程度の気圧（7 hPa）でも増殖する微生物⁸⁾が存在し、放射線耐性菌として知られる *Deinococcus radiodurans* は5 kGyまで生存率の低下が見られず⁹⁾、火星表面の電離放射線（ 76 mGy yr^{-1} ¹⁰⁾）に十分耐えられる。火星の土には、加熱すると強力な酸化作用を示す過塩素酸塩が0.4–0.6%含まれている¹¹⁾が、低温では比較的安定で、過塩素酸耐性菌¹²⁾や、過塩素酸をエネルギー生産時の電子受容体として利用する微生物¹³⁾もいる。火星の物理化学的な環境因子の中では、紫外線が生命にとってはもっとも有害であり、表面で直接暴露された場合には生

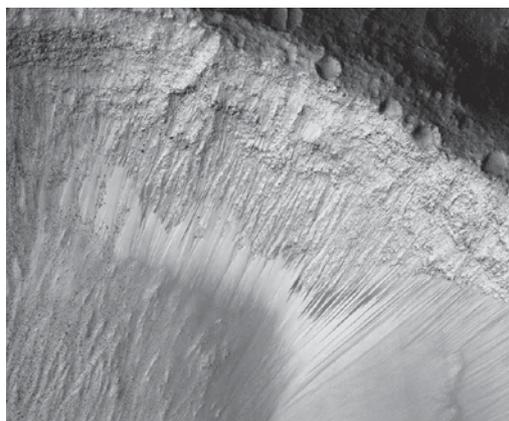


図1. クレーターの斜面に見られるリカリング・スロープ・リニア (RSL)。黒い筋状構造に液体の水が存在する可能性がある。出典：NASA/JPL-Caltech/Univ. of Arizona.

存できないが、紫外線は、火星表面を覆う砂や岩石で遮蔽されるので、表面から数cm下であれば問題なく生存できる¹⁴⁾。

生命に必須の液体の水も、表面付近にある可能性がある。低温低圧の火星表面環境では、水は液体状態ではほとんど存在できず、多くは、高緯度地帯に氷として存在している^{15,16)}。しかし、塩濃度が高ければ、融点や水の蒸発速度が下がるため液体で存在できる。液体の水が存在している可能性がある場所としては、リカリング・スロープ・リニア (recurring slope lineae: RSL) が注目されている (図1)。赤道付近のクレター斜面に、春から夏にかけて現れる筋状構造で、水が流れた跡のように見え、過塩素酸の水和塩が検出されていることから、液体の水が存在する可能性が指摘されている¹⁷⁾。水ではなく砂などの粒子が流れた跡との説もあり¹⁸⁾、その形成プロセスは議論中であるが、地球では、水分活性が約0.4の高塩濃度環境にも微生物が生息している¹⁹⁾ので、好塩菌のような微生物が存在しているかもしれない。

微生物のエネルギー源になりうる物質も現在の火星に存在する。生物は、エネルギー源である還元物質 (電子供与体) と酸化物質 (電子受容体) との酸化還元反応によって得られるギブズ自由エネルギーを使ってエネルギーを獲得している。人間のような真核生物は、有機物を電子供与体、酸素を電子受容体に行っているが、原核生物は多様な物質を利用している。表1に、地球の微生物で知られている電子供与体と電子受容体の組合せのうち、火星に存在していることが分かっている、あるいは、存在が推定されている物質を使った組合せ²⁰⁻²²⁾の一部を示した。エネルギー源 (電子供与体) としては水素、一酸化炭素、メタン、還元型硫黄 (S^0, S^{2-})、還元型鉄 (Fe^{2+}) などあげられ、これらは独立栄養生物が利用する。火星由来の有機物が発見されたことから、従属栄養生物の存在もありえなくはない。火星表面は、紫外線によって

水蒸気から解離した酸素が表面土を酸化するので、電子受容体となる酸化物質は豊富にあり、二酸化炭素、酸化型の鉄や硫黄、硝酸、二酸化炭素、酸化型マンガンなどがあげられる。表1のエネルギー源の中では、メタンが近年注目されている物質である。火星の大気には微量のメタンが含まれており、季節変動や急激に増加する現象が見られることから、局所的なメタンの放出源があると推定されている²³⁾。このような場所は、メタンをエネルギー源とする微生物 (メタン酸化菌) の生息には適した場所であろう。メタンはまた、地球では、その多くがメタン生成菌由来と言われており、火星でもメタン生成菌が存在しているか、あるいは過去に存在したメタン生成菌によって作り出されたメタンがメタンハイドレート (クラスレート) として地下に蓄えられており、そこからメタンが放出されている可能性も考えられている^{24,25)}。

これまでの生命探査

1970年代のバイキング計画による生命探査では、生命の存在に否定的な結論が出された。バイキング着陸機は、表面土を試料として、有機物分析と代謝活性測定を行った。有機物分析は、熱分解ガスクロマトグラフィー質量分析法 (thermal volatilization gas chromatography mass spectrometry: TV-GC-MS) によって行われた。生命が存在するならば、有機物が検出されるはずであるが、試料を200°C、350°C、500°Cに熱した際に放出される有機物を分析した結果、火星由来の有機物と考えられる物質は検出されなかった²⁶⁾。代謝活性は、三つの実験で測定された。熱分解放出 (pyrolytic release: PR) 実験では、放射性炭素¹⁴Cで標識した二酸化炭素や一酸化炭素を水とともに試料に加えて光を照射した。光合成で生成した有機物を熱分解して放出される¹⁴Cを検出する実験である。少量の¹⁴Cが取り込まれたが、90°Cで2時間試料を加熱した後にも同レベルの取り込みが見られたので、この取り込みは非生物学的反応と考えられた。ガス交換 (gas exchange: GEX) 実験は、アミノ酸やビタミンなどの栄養液と、二酸化炭素などの混合気体を試料室に加え、気体組成の変化をガスクロマトグラフィーで調べる実験で、生物が存在すれば、二酸化炭素などの放出によって気体組成が変化する。二酸化炭素の発生が観察されたが、 Fe_2O_3 のような火星の土に存在する酸化剤による反応と考えられた²⁷⁾。ラベル放出 (label release: LR) 実験は、¹⁴Cで標識した栄養液 (ギ酸、グリコール酸、グリシン、D-アラニン、L-アラニン、D-乳酸、およびL-乳酸) を添加して、呼吸によって放出される二酸化炭素などに含まれる¹⁴Cを検出する実験である。¹⁴Cの放出が検出され、

表1. 火星の微生物で想定されるエネルギー源 (電子供与体) と電子受容体の組合せ

エネルギー源	電子受容体	地球の微生物代謝
H ₂ , CO	CO ₂	メタン生成
H ₂	Fe ³⁺ , SO ₄ ²⁻ , S ⁰ , ClO ₄ ⁻	水素酸化
CH ₄	NO ₃ ⁻ , Fe ³⁺ , MnO ₂ , SO ₄ ²⁻	メタン酸化
S ⁰ , S ²⁻	NO ₃ ⁻ , Fe ³⁺ , MnO ₂	硫黄酸化
Fe ²⁺	NO ₃ ⁻ , MnO ₂	鉄酸化
CO	NO ₃ ⁻ , H ₂ O, SO ₄ ²⁻ , ClO ₄ ⁻	一酸化炭素酸化
有機物	NO ₃ ⁻ , Fe ³⁺ , SO ₄ ²⁻ , ClO ₄ ⁻	従属栄養

さらに試料を160°Cに加熱すると放出されなくなったことから、生物の存在が期待された²⁸⁾。しかし、TV-GC-MSで有機物が検出されなかったことと、土の中の酸化剤の存在によっても説明できることから、非生物的反応と考えられた²⁹⁾。これらの結果から、実験の検出限界内には生物は存在しなかったという結論に至った³⁰⁾。しかしその後、バイキングで使われた、TV-GC-MS装置の問題点が報告されてきた。検出感度が低く、チリのアタカマ砂漠のような、微生物密度が低い試料では微生物を検出できず³¹⁾、また、不揮発性物質も検出が困難であった³²⁾。したがって、バイキングの装置では、火星に生物が存在することは正確には分からなかったといえる。

有機物は生命の痕跡 (biosignature) を探すときの重要なターゲットであり、バイキング計画以降も装置の開発が進み、火星での有機物探査が行われている。近年、MSL計画のキュリオシティローバーは、ゲールクレーターの表面を掘削して得た約35億年前の泥岩から、クロロベンゼンなどの有機塩素化合物³³⁾、チオフェン類や芳香族化合物などの有機物³⁴⁾を発見した。キュリオシティの分析装置もまたTV-GC-MSによるものであり、有機塩素化合物は、火星に存在する有機物と、表面にある過塩素酸塩などの酸塩化物とが、分析時の加熱によって反応してできたものと考えられている³⁵⁾。熱分解を伴う分析方法では、分解前の有機物が、火星の生物由来の有機物なのか、火星に飛来した隕石や惑星間塵 (interplanetary dust particles) などに含まれていた非生物由来の有機物なのかは分からないが、生命存在の条件の一つである有機物が見つかったことは、今後の探査を期待させる結果である。

今後の生命探査

NASAやESAは、今後の探査でさらに詳しく有機物を調査する計画を立てている。2020年打ち上げ予定のMars 2020計画 (NASA) では、ラマン分光法と紫外蛍光を利用し、有機物や鉱物の種類を調べる装置 (Scanning Habitable Environments with Raman & Luminescence for Organics & Chemicals: SHERLOC) を搭載する予定である³⁵⁾。熱をかけず非破壊で分析でき、30 $\mu\text{m}/\text{pixel}$ の分解能を持つカメラが付いているので、試料中の有機物の分布や、芳香族化合物や脂肪酸など、有機物の構造に関する情報が得られる可能性がある。Mars 2020計画ではまた、生命が含まれている可能性が高い試料を容器に入れて火星上に保存し、将来の計画で地球に持ち帰る計画 (Mars Sample Return: MSR) を検討している。探査機での現場分析は、重量や電力に制限があ

るので分析手法が限られるが、地球に試料を持ち帰ることができれば、電子顕微鏡など、ラボにある大型分析機器を使うことができるので、生命存在の有無を明らかにできる可能性は高まる。

ESAもまた、2020年打ち上げのExoMars 2020計画で有機物分析を予定している。ラマン分光装置 (Raman Laser Spectrometer: RLS) による有機物や鉱物の同定の他、誘導体化プロセスを組み込んだ熱分解ガスクロマトグラフィー質量分析法と、過塩素酸塩の影響を受けにくいとされるレーザー脱離質量分析法 (laser desorption mass spectrometry: LD-MS) による分析装置 (Mars Organic Molecule Analyzer: MOMA) の搭載が計画されている³⁶⁾。誘導体化によって、アミノ酸や有機酸などを分析でき、光学異性体 (enantiomer) も分析できるので、地球の生命のように、アミノ酸のD体とL体に偏りが見られれば、生命の存在を示唆する結果が得られるかもしれない。

日本の火星探査計画

日本の火星探査は、火星の衛星であるフォボスとダイモスの観測とサンプルを採取する計画 (火星衛星探査計画 (Martian Moons eXploration: MMX) が、2020年代前半の打ち上げを目指して開発が進められている。火星本体の着陸探査は現在のところ計画されていないが、将来の探査に備え、生命探査装置の開発がJAXA (宇宙航空研究開発機構) のワーキンググループで進められている。これは生命探査顕微鏡 (Life Detection Microscope: LDM) という名前で、蛍光顕微鏡をベースにしたものである³⁷⁾。火星に現在も微生物が生存している可能性があることに着目し、微生物細胞の検出に重点を置いている点が大きな特徴である。蛍光顕微鏡を使う主な利点は、ミクロな形態情報を得られること、微生物密度が低い試料でも、観察範囲を広げることで、検出感度を上げることができることである。以下に、現在の開発状況を紹介する。

色素液開発 蛍光顕微鏡は、環境中の微生物検出だけでなく、生物学の分野で広く用いられており、さまざまな細胞成分を検出する蛍光色素が使われている。火星の生命がどのようなものか分からないので、地球のすべての細胞に共通する、以下の性質を検出できる蛍光色素を使う予定である。(1) 有機物でできている、(2) 細胞のような外界と隔てる構造がある、(3) 代謝している。有機物検出にはタンパク質染色色素として知られるSYPRO Redを用いる。アミノ酸は隕石にも含まれており、宇宙では生成されやすい物質であることから、火星

の生命もアミノ酸を利用している可能性が高い。SYPRO Redで、アミノ酸が重合したタンパク質を検出する。この色素は、細胞由来だけでなく、アミノ酸の熱重合物（プロテノイド）や多環芳香族炭化水素（polycyclic aromatic hydrocarbon: PAH）などの非生物由来の有機物も染色されることを確認しており、まずは、生物・非生物に関わらず幅広く有機物を検出する。細胞膜の有無は、膜透過性の異なる2種類の蛍光色素（SYTO24 & propidium iodide (PI)）の混合色素を用いる。親水性のPIは、膜透過性が低いため生細胞は染色されず、死細胞のみ染色される。疎水性で膜透過性が高いSYTO24は細胞の生死に関わらず細胞内に入り、核酸などの有機物を染色する。そのため、生細胞はSYTO24の緑色、死細胞はPIの赤色の蛍光を発する。代謝活性は、CFDA-AM (carboxyfluorescein diacetate, acetoxymethyl ester) のようなエステラーゼ基質蛍光色素で検出する。色素自体は無蛍光だが、細胞内でエステラーゼ酵素によってエステル結合が切られると緑色の蛍光を発する。エステラーゼは、地球では幅広く生物細胞に存在する酵素で、エステラーゼ基質蛍光色素は、生細胞検出色素としてさまざまな実験に用いられている。これらの色素の染色性とミクロな形態情報などを使って細胞の判別を行う。また蛍光色素を溶かす溶媒には67%グリセロール溶液を用いる。グリセロールを添加することで、染色液の融点と蒸気圧が下がり、火星の低温低圧環境下でも液体状態を保つことができる。

装置開発 図2は、LDMの概念図である。上部は、試料皿ローターで、試料皿と染色液タンクが20セット配置してある。試料皿に土を入れ、タンクの染色液を試

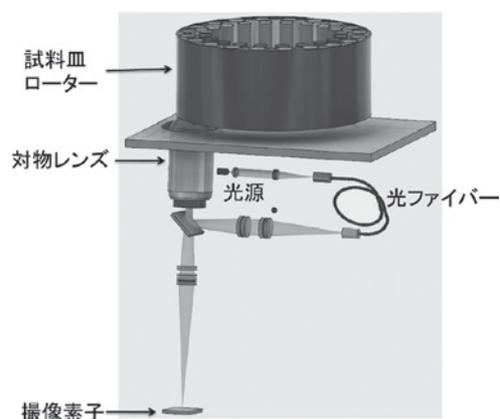


図2. LDMの概念図。試料皿ローターには20個の試料皿と染色液タンクが並んでおり、それぞれ異なる蛍光色素で染色できる。文献37 (© 2018 by the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences and ISTS) より改変。

料皿に添加する。試料皿下部は、石英ガラスになっており、対物レンズで下から観察する。光源は、蛍光色素の励起用として青色レーザーダイオード、明視野観察用として白色LEDを用いる。光ファイバーを通して試料に照射して撮像素子で画像を記録する。ローターを動かしながら撮影し、約1 mm³の試料体積を操作する。土の中に10⁴ cells/g程度の微生物が存在していれば、1 mm³中に数～10細胞程度検出される。10⁴ cells/gは、チリのアタカマ砂漠など、地球上のもっとも微生物が少ない環境の微生物密度にほぼ等しく、仮に火星で生命が検出されなかった場合でも、火星の微生物密度は10⁴ cells/g以下であるという微生物密度の上限を示すことができる。空間分解能は1 μm/pixelで、直径1 μmやそれ以下の微生物細胞の他、レゴリスやダストなどの鉱物粒子の形態情報が得られる。概寸160 W × 120 L × 240 H (mm)、目標重量6 kg、電力消費約30 W、動作温度-30～30°Cであり、現在、実験室レベルでの試験機 (bread board model: BBM) の製作を目指して、顕微鏡部の設計と製造、染色液添加機構の検討、ローターの設計などを行っている。

おわりに

近年の火星探査によって、過去の火星には、生命が存在できる環境があることが分かってきた。環境を整えば生命は誕生するのだろうか？現在の地球の生命は、同じ遺伝機構やタンパク質合成機構を持っており、共通の祖先から進化してきたと考えられている。しかし、生命が誕生した初期には、さまざまなタイプの生命が存在した可能性もあり、火星では、地球とは異なるタイプの生命が誕生し生き残っているかもしれない。地球型生命の誕生は、偶然なのか必然なのか？地球外生命を調べることによって、そのような問いに答えが出せるかもしれない。生命探査はその第一歩である。微生物細胞を検出できるLDMは、火星だけでなく、エンケラドスやエウロパ、金星など、生命の存在が議論されている他の天体にも応用可能であり、近い将来、地球外生命の姿を捉えることを目指して開発を進めている。

謝 辞

LDMの開発は、JAXAの生命探査顕微鏡ワーキンググループで、平成29年度および平成30年度宇宙理学委員会戦略的基礎開発予算 (JAXA)、平成30年度自然科学研究機構アストロバイオロジーセンタープロジェクト (課題番号: AB301019) の助成を受けて行っている。

文 献

- 1) Malin, M. C. and Carr, M. H.: *Nature*, **397**, 589 (1999).
- 2) Carr, M. H. and Head, J. W.: *J. Geophys. Res.: Planets*, **108**, 5042 (2003).
- 3) Acuna, M. *et al.*: *Science*, **284**, 790 (1999).
- 4) Pollack, J. B. *et al.*: *Icarus*, **71**, 203 (1987).
- 5) Villanueva, G. *et al.*: *Science*, **348**, 218 (2015).
- 6) Grotzinger, J. P. *et al.*: *Science*, **343**, 1242777 (2014).
- 7) Rivkina, E. *et al.*: *Appl. Environ. Microbiol.*, **66**, 3230 (2000).
- 8) Nicholson, W. L. *et al.*: *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **110**, 666 (2013).
- 9) Cox, M. M. and Battista, J. R.: *Nat. Rev. Microbiol.*, **3**, 882 (2005).
- 10) Hassler, D. M. *et al.*: *Science*, 1244797 (2013).
- 11) Hecht, M. H. *et al.*: *Science*, **325**, 64 (2009).
- 12) Shcherbakova, V. *et al.*: *Microorganisms*, **3**, 518 (2015).
- 13) Oren, A. *et al.*: *Extremophiles*, **18**, 75 (2014).
- 14) Yamagishi, A. *et al.*: *Biol. Sci. Space*, **24**, 67 (2010).
- 15) Feldman, W. C. *et al.*: *Science*, **297**, 75 (2002).
- 16) Smith, P. H. *et al.*: *Science*, **325**, 58 (2009).
- 17) Ojha, L. *et al.*: *Nat. Geosci.*, **8**, 829 (2015).
- 18) Dundas, C. M. *et al.*: *Nat. Geosci.*, **10**, 903 (2017).
- 19) Yakimov, M. M. *et al.*: *Environ. Microbiol.*, **17**, 364 (2015).
- 20) Rummel, J. D. *et al.*: *Astrobiology*, **14**, 887 (2014).
- 21) Cockell, C. S.: *Astrobiology*, **14**, 182 (2014).
- 22) Westall, F. *et al.*: *Astrobiology*, **15**, 998 (2015).
- 23) Webster, C. R. *et al.*: *Science*, **360**, 1093 (2018).
- 24) Max, M. D. and Clifford, S. M.: *J. Geophys. Res.: Planets*, **105**, 4165 (2000).
- 25) Atreya, S. K. *et al.*: *Planet. Space Sci.*, **55**, 358 (2007).
- 26) Biemann, K. *et al.*: *J. Geophys. Res.*, **82**, 4641 (1977).
- 27) Oyama, V. I. and Berdahl, B. J.: *J. Geophys. Res.*, **82**, 4669 (1977).
- 28) Levin, G. V. and Straat, P. A.: *J. Geophys. Res.*, **82**, 4663 (1977).
- 29) Margulis, L. *et al.*: *J. Mol. Evol.*, **14**, 223 (1979).
- 30) Klein, H. P.: *Orig. Life Evol. Biospheres*, **29**, 625 (1999).
- 31) Navarro-Gonzalez, R. *et al.*: *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **103**, 16089 (2006).
- 32) Benner, S. A. *et al.*: *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **97**, 2425 (2000).
- 33) Freissinet, C. *et al.*: *J. Geophys. Res.: Planets*, **120**, 495 (2015).
- 34) Eigenbrode, J. L. *et al.*: *Science*, **360**, 1096 (2018).
- 35) Beegle, L. *et al.*: *IEEE Aerospace Conference*, 1 (2015).
- 36) Vago, J. L. *et al.*: *Astrobiology*, **17**, 471 (2017).
- 37) Yamagishi, A. *et al.*: *Trans. JSASS, Aerospace Tech. Japan*, **16**, 299 (2018).