

特集「太陽系におけるアストロバイオロジー」 火星での生命探査計画

山岸 明彦¹

2011年4月7日受領, 2011年5月6日受理.

(要旨) 火星の環境は過酷であるが、地球の微生物の中には火星環境で生存可能な物も存在する。火星での大気中メタンの発見は、火星においてメタンを酸化する菌の存在可能性を検討課題として提起してきた。著者ら(MELOS生命探査サブグループ)はメタン発生地帯やその近傍では、火星表面下数cmで微生物が現在も存在しているのではないかとこの可能性を提起している。我々は蛍光顕微鏡とアミノ酸分析による火星生命探査を提案している。蛍光顕微鏡を用いることによって、DNAやRNAを持たない生物の細胞を極めて高感度で検出できる。アミノ酸の種類と鏡像異性(DL)を解析することによって、その生物の由来に関する情報を得ることができる。

1. はじめに

我々、微生物学者、地球化学者、惑星科学者、宇宙工学者は連携して火星における生命探査計画を計画中である。我々の計画は、火星におけるメタンの発見と地球の海洋でメタンと酸化鉄を利用して生育できる菌の発見に触発された探査計画である。これらの発見から、火星の表面下数cmに現在も微生物が生育している可能性が出てきている。火星の生命探査にあたっては、蛍光顕微鏡を用いることによって極めて高感度に、地球とはかなり異なったタイプの生命であっても検出可能である。また、その後アミノ酸分析を行うことによって、その生命の由来についての情報も得ることができる。我々のグループは火星探査ワーキンググループ(MELOS)の生命探査サブグループとして活動している。我々はこうした計画の概要を論文として発表した[1]。本稿は、その解説を中心として、その後の変更点も含めた解説を行う。従って、本稿は著者の責任に置いて解説しているが、そのほとんどすべての内容に関しては、MELOSワーキンググループの生命探査サブグループの議論に基づく原著論文[1]の共著者との共同の成果である。

2. 火星での生命の生存可能性

火星は低温で乾燥しており、気圧も地球に比べてかなり低い。こんな環境に生命は生存できるのであろうか？まだ、検討しなければならない点も残されているが、たとえ地球型の生命に限って考えたとしても、答えは「Yes」である。

表1には、地球上の生命の生存限界と火星の環境をまとめてある[1]。

重力は、大型の動物や大型植物の生育には大きな影響を持つが、微生物に対する影響はほとんどない[2]。温度は、地球に比べてかなり低いが、温度の高い場所や時間には微生物の増殖も可能な温度となる。火星の表面における大気圧は地球のその1%以下である。微生物の増殖に対する圧力の影響はまだ良く調べられていないが、微生物の生存だけを考えるならば真空中でもまったく問題ない。実際、多くの微生物の保存方法として、凍結真空乾燥した菌体を用いられている。火星表面の放射線も地球上に比べれば強いが、微生物の生存に全く問題ない。紫外線強度はかなり強く、火星表面で微生物が直接紫外線にあたると数分で死滅する。しかし、紫外線は数十 μm の火星土壌で遮蔽されるので、土壌中の微生物は紫外線からも防護される事になる。実際、火星の環境(温度、湿度、紫外線、大

1. 東京薬科大学 生命科学部
yamagish@toyaku.ac.jp

表1：地球上の生命の生存限界と火星での測定値あるいは推定値(文献1の表1より改変)

Factor	Limit for terrestrial life	Measurement/estimate on Mars
Gravity	~ 0 to unknown higher g	0.376 g
Temperature	Active from -20° C to 122° C	-87° C to 20° C
Pressure	Survivable lowest: unknown	Atmosphere 0.4 to 0.87 kPa
	Survivable highest : 1.6 GPa	(ca. 6/1000 of the Earth's)
Vacuum	Survivable	0.4 kPa
Salinity (NaCl%)	0 to >30% (saturation)	Evaporites
Water activity (Desiccation)	~ 0.6 (bio-activity)	~ 0
	~ 0 (survival)	
UV radiation	~ 5000 J m ⁻²	~ 20 W m ⁻²
Ionizing radiation	1440 Gy	0.4 mGy day ⁻¹
pH	-0.06 to 12.5	7.7 ± 0.5
Redox potential	Limits undefined	Highly oxidizing

表2：海底熱水噴出口付近で検出された化学合成細菌(文献4より改変)

++は単離されたもの, +は単離はされていないが存在が確認されたもの.

電子供与体	電子受容体	化学合成細菌	存在
S ²⁻ , S ⁰ , S ₂ O ₃ ²⁻	O ₂	硫黄酸化細菌	++
S ²⁻ , S ⁰ , S ₂ O ₃ ²⁻	NO ₃ ⁻	脱窒硫黄酸化細菌	+
H ₂	O ₂	水素酸化細菌	++
H ₂	NO ₃ ⁻	脱窒水素細菌	—
H ₂	S ⁰ , SO ₄ ²⁻	硫黄硫酸還元菌	++
H ₂	CO ₂	メタン菌, 酢酸菌	++
NH ₄ ⁺ , NO ⁻	O ₂	硝化細菌	+
Mn ²⁺	O ₂	マンガン酸化細菌	++
CH ₄	O ₂	メタン酸化細菌	++
CO	O ₂	一酸化炭素酸化細菌	++

気組成, 土壌)を模擬していくつかの生物種の生存可能性の実験が行われた. その結果, 土壌中では乾燥耐性をもつ微生物やクマムシ(乾燥耐性を持つ小型節足動物)が長期間生存可能であることが実験的に示されている[3].

3. 生命の生育条件

さて, 火星の環境で生命が長期間「死滅しない」からといって「生育」に適しているとは限らない. 生命が地質学的時間スケール(数千万年, 数億年)においても生存するためには物理的生存環境に加えて, 自由エネルギー源が必要である. たとえば, 動物は食物(餌)と酸素が無ければやがて死滅してしまう. これは, 食物を酸素で酸化して得られる自由エネルギーを用いて

生命活動を維持しているからである. 生物のこうした活動を呼吸とよんでいる(息をする事ではなく, 呼吸基質の生化学的酸化反応を呼吸と呼んでいる). 自由エネルギー獲得手段として, 呼吸の他に光合成と化学合成が知られている. 光合成生物は太陽光と宇宙空間の低温を利用して自由エネルギーを獲得している. 化学合成生物は還元型物質と酸化型物質の酸化還元反応から自由エネルギーを獲得する. 呼吸は広義に化学合成の一種と考えることも可能である. しかし, 化学合成と言う場合には還元型物質として水素, 硫化水素, 硫黄, 亜硫酸, 一酸化炭素, メタン, アンモニア等の還元型無機化合物を用いる. また, 酸化型物質としては酸素の他, 硫酸イオン, 硝酸イオン, 二酸化炭素等が用いられる. こうした化学合成を行う生物は主に細菌の仲間である. 化学合成を行う細菌は化学合成細菌

と呼ばれる。化学合成細菌は地球上の地熱地帯(温泉、噴気孔、海底熱水噴出孔)に多くみられる[4]、表2には地球の海底熱水噴出孔周辺に発見されている化学合成細菌を例示した。このように考えると、たとえば地熱地帯などのように自由エネルギーを獲得できる場が存在するかどうか、火星環境における生命の生育の鍵であると考えられる。

4. 火星におけるメタン酸化菌

さて、火星では現在のところはっきりとした地熱活動の報告はないが、今後もし地熱活動が発見されれば、その周辺は化学合成細菌の生存を支えるのに適した環境といえる。ごく最近になって、火星におけるメタンの存在が報告された[5]。その特徴的なこととして、メタン濃度が火星表面で局所的に異なっていること、濃度の季節的変動が見られることがある。火星でのメタンの寿命が比較的短いこと(数百年)また、火星大気循環がかなり早いことを考えると、メタンの供給源が現在も存在している可能性が高い[6,7]。

地球上におけるメタンの発生源としては、埋没した生物遺体からのメタン生成、熱水岩石反応による非生物的メタン生成、メタン菌によるメタン生成等が知られている[6,7]。また、メタンハイドレイトなど、メタンが地底に蓄積していて、それが季節的溫度変化に対応して火星大気中に放出される可能性もある。

この中で、メタン菌によるメタン生成が多くの研究者の思いつくところである。メタン生成はおそらく地熱活動由来の水素を利用していると推定されるが、その場所は地中深い場所である可能性が高い。火星の地下深く例えば数kmでの生命探査は難しい。また、その他のメタン発生源によるメタン発生の場合にはメタン菌は関与していない。従って、メタン菌を探査の対象とすることには多くの問題点が残る。

さて、ごく最近になって、メタンを発生するメタン菌ではなく、メタンを酸化鉄で酸化して生育できるメタン酸化菌が地球の海水中から発見された[8]。これまでも、メタンを酸化して生育できるメタン酸化菌はいくつかの種が発見されていた。しかし、既知のメタン酸化菌は酸化鉄を酸化型の基質として利用することはできない。それに対して、今回発見された菌は酸化鉄を用いてメタンを酸化することによって自由エネル

ギーを獲得できる菌であった。

これらの発見を総合するならば、火星表面にはメタンを酸化鉄あるいはその他の酸化型基質(硫酸、酸素等)で酸化して生育できる菌が存在する可能性があるのではないかという可能性が出てきた[1]。

5. 火星にいる微生物：どこを探すか

これまでの生命探査は液体の水を探す探査計画であった。地球上の生物の場合、液体の水は様々な分子をとかず溶媒として必須である。多くの生物は水が無くなるとやがて死滅する。従って、液体の水のある場所はもちろん、火星での生命探査の第一の候補地となる。火星の大気圧は水の飽和水蒸気圧よりも低いため、地表の多くの場所では水は液体としては存在し得ない。しかし、塩が高濃度に溶けて、凝固点降下をしたような場所、あるいは地下深部で圧力の高い場所では現在でも液体の水として存在しているのではないかと推定されている。そういった場所では、かつて火星に生命が誕生していたならば現在も生命が生育し続けている可能性がある。

しかし、前述の様に水は生存の為だけならば必要無い、真空乾燥した微生物やいくつかの動物種は乾燥した状態で何年も生存する。生育の為にどれだけの水が必要であるかは必ずしも明らかではない。しかし、カビなど、少なくとも外側に液体の水が無くても増殖可能な種は知られている。そうした点から、探査地として、もう一つの重要な視点は継続的に自由エネルギーが獲得可能な場所という視点がある。前述の様に、メタンの噴出地帯が重要なターゲットとなる。Munmaは火星の低緯度域のTerra Sabae, Nili Fossae, Syrtis Majorをメタン濃度の高い場所として報告している[5]。大気中の一定の場所にメタン濃度の高い地域があるということは、その付近にメタン噴出地帯があることを想定させる。前述の酸化鉄依存性のメタン酸化細菌はメタンの噴出している地域付近に生息している可能性がある。この場合には、数kmの地下を探査する必要はない。メタンが地下から大気中へ放出される場所が火星表面にあるはずである。メタン噴出地帯の表面下数cmが、メタン酸化菌探査の候補となる。

さらに、もし現在も生育を続けている微生物が火星表層あるいは地下の液体の水の層に相当量存在してい

るのであれば、その菌体は火星表層で広く撒布される可能性がある。表層で紫外線の照射を受けると微生物は死滅する可能性もあるが、死滅した微生物がただちに分解されるわけではない。移動したあとで、火星表面下に埋もれれば紫外線からの直接の分解を受ける事無く、微生物細胞の形状は一定の時間保存される可能性もある。紫外線や砂嵐によってできるハイドロキシラジカルが間接的に有機物を分解する機構も報告されているので、撒布した微生物細胞が永遠に保持されるわけではない[9,10]。しかし、火星表面直下で保存されている菌体も、火星における微生物探査を考える場合には考慮しておくべき検出対象である。

6. 日米欧の生命探査計画

火星における生命探査実験を行ったVikingではいくつかの実験が行われた。まず、放射性同位元素で標識した培地に火星土壌を接種して呼吸の測定が行われた。また、光を照射して、光合成反応が測定された。こうした実験では生物反応は検出されなかったと結論された。しかし、その感度は大変低く1グラムの火星土壌あたり 10^7 細胞なければ検出できない感度であろうと推定されている[11]。地上で最も細胞密度の低い場所(南極の水、深海底、高地砂漠)では 10^4 細胞/g土壌であるので[12,13]、もしこういった場所でVikingの測定が行われたなら、やはりそこには生命はいないと結論されたことになる[14]。

NASA/ESAは共同で火星探査機MSL(Mars Science Laboratory:Curiosity)を2011年打上予定である。MSLに搭載された種々の分析機器の中で、SAM(Sample Analysis at Mars)では固体サンプルをオープンで加熱し、放出された気体および火星大気をガスクロマトグラフィーで分離後、質量分析装置(QMS)で分析する予定である[15]。この装置でかなり多種類の揮発成分が分析されると予想される。また、同位体の分析も計画されている。しかし、かりに地球と同様な生物細胞があったとして、この方法で検出されるかどうかは不明である。

2016/2018年にはExoMarsと呼ばれる計画が予定されている。2018ExoMarsでは、ローバーにLMC(Life Marker Chip)という過去および現在の生命に関連する分子の検出器を搭載する予定である[16]。この装置

は生体関連分子を抗原抗体反応の原理で検出しようという装置である。80種類ほどの生体関連分子を選択し、その分子に関する抗体を作製した。その抗体に結合した分子を、プラズモン共鳴という原理に基づき検出する。検出の特異性はかなり高く、また検出感度もppbとかなり高い。前処理の詳細が明らかで無いため、微生物検出感度の推定は難しいが、概ね 10^7 細胞/g程度であろうと推定される。

また、ESAのExoMarsと同時に打ち上げられるNASAのMAX-Cローバーでは、 μ m分解能の顕微鏡が計画されている。有機化合物があるかも知れないという間に関してはこれで情報が入る可能性がある。我々は、MELOS(Mars Exploration with Lander-Orbiter Synergy)火星複合探査計画の中の生命探査サブグループとして、生命探査装置の開発を行っている。我々の生命探査計画そのものはJAMP(Japan Astrobiology Mars Project)と呼んでいる[1]。以下では火星における生命探査計画をJAMPと略称する。JAMPでは、2段階での生命探査を計画している。第1段階では、蛍光顕微鏡を用いた“細胞”の探査を行う。第2段階ではアミノ酸の分析をおこなう。

7. 生命探査の対象

生命探査における困難な点がいくつも有るが、その第一に考えなければならない点は、火星に生命が現在も生存するとしてそれがどのような生命なのか自明ではないという点がある。しかし、これまでの生命科学とりわけ初期進化に関する研究から、生命の一般的な特徴がある程度わかるようになってきている(もちろん、地球生物の知識からの類推しかできないという限定付であるが)。

まず、前述のように地球生物細胞の内部は水を溶媒とする溶液であると考え事ができる。水は、溶媒として多くの高分子や低分子を溶解している。さらに、水は水酸イオンや水素イオンを介して、様々な生体内反応の基質を供給している。それ以外の溶媒を想定することは可能であるが、水のある環境では、水を溶媒として用いる可能性が高い。

次に、生命はおそらく膜に包まれた“細胞”様の構造を持っている可能性が高い。生命の起原研究者の多くは、“細胞”の存在が、その後の生命進化の原動力とし

て不可欠であると考えている。すなわち、自己と非自己を区別する何らかの境界がない場合には、均質な水溶液状体を考えざるを得ない。均質な水溶液中では、より効率のよい分子と効率の悪い分子を選別する為の基礎が無くなる。良い物と悪い物を比べる為には何らかの境界が必要となる。地球上の生物は、すべて疎水性の膜で囲まれた細胞でできている。火星でも水溶液中で境界を創るためには何らかの疎水性膜が用いられる可能性が高い。

第3に細胞の大きさが一定の範囲であることがある。地球上の生命の細胞は一定の大きさを持っている。原核生物と呼ばれる、細菌や古細菌は大きさ $1\ \mu\text{m}$ の細胞を持っている。その理由として、細胞内外の物質の拡散による移動速度があげられている。真核生物とよばれる生物(動物、植物など)はこれよりもかなり大型の $10\ \mu\text{m}$ から $100\ \mu\text{m}$ の大きさの細胞からできている。真核生物の細胞は内部に多くの輸送装置をもっている。それらの輸送装置がエネルギーを用いて物質を細胞内で運搬している。その結果、真核細胞は大型になることができたと理解されている。こうした、理由を考えるならば、火星における細胞も $1\ \mu\text{m}$ から $100\ \mu\text{m}$ の大きさをもっていると推定される。もちろん、こうした細胞が多数集合した多細胞生物である可能性もあるが、そのことは顕微鏡を用いた観察では障害にはならない。

生命を考える際4番目に重要な点として、細胞内に触媒活性をもつことがある。地球上の生命の細胞成分の70%は水であるが、水以外で最も多い成分はタンパク質である。タンパク質は生体内では触媒として機能している。生命の特徴として自由エネルギーを必要とするという点については先に述べた。生物細胞は、細胞内で自由エネルギーを利用して、物質の移動、高分子の合成、分子の転換等、生命維持の様々な反応を行っている。それらの過程で、自由エネルギーを利用して、様々な反応を触媒しているのがタンパク質である。つまり、触媒活性をもっていることが、生物の重要な特性として考えられる。

第5にタンパク質様物質の存在がある。タンパク質は前述の様に20種類のアミノ酸が一定の順でならんだ高分子である。アミノ酸は原始地球大気を想定した非生物的合成実験でも、宇宙空間での低温での合成を想定した模擬実験でも、最も容易に大量に合成される。初期地球に大量のアミノ酸が蓄積したのであれば、似

たような環境にあった初期火星でも大量のアミノ酸が蓄積した可能性は高い。火星生命が地球型とおなじ20種のアミノ酸を用いる保証はないが、アミノ酸を用いた高分子化合物を細胞内成分として採用している可能性は十分考えられる。さらに、タンパク質分子はタンパク質内部に疎水性コアを創ることによって構造をとり、この構造に依存して触媒活性を発現している。地球以外の生命のタンパク質様構造も同様な原理で触媒活性を持つ可能性は高い。

地球のほとんどすべての生物は遺伝情報をDNAに蓄積している(ウイルスの一部にRNAを遺伝物質としているものがあるが、ウイルスを生物とするかどうかは両論ある)。DNAにおける遺伝情報はAGCTの4つの塩基と呼ばれる複素環化合物の配列(並び順)として記録されている。遺伝情報が世代間で保存される仕組みは、AとT、CとGの塩基が互いに特異的な相互作用によって特異的に対合することにある。この対合はDNAに特異的ではなく、RNAの中でも、同様の塩基の対合(CとG、AとU)が見られる。塩基の種類もA、T、C、G、Uだけでなく、特殊な場合には多くの別の塩基が用いられている。したがって、火星生物がAGCT以外の塩基やDNA以外の遺伝物質を用いている可能性は十分考えられる。

8. 生命探査原理

JAMPでは前節で検討したような生命の特徴を特異的に染色できる蛍光色素を組み合わせて用いることによって、生命らしい構造体、“細胞”を検出する[1]。すなわち、1)疎水性膜透過性の蛍光色素と不透過性の蛍光色素を用いて疎水性膜を検出する。2)触媒反応の基質となり、反応の結果、蛍光を発するようになる色素を用いることにより触媒活性を検出する。3)タンパク質の特性であるタンパク質内部の疎水性やアミノ基を染色することによりタンパク質様の分子を検出する。4)DNAやRNAなどの遺伝物質の特性である複素環塩基の構造を検出する蛍光色素を用いて遺伝物質様分子を検出する。

こうした蛍光色素の組み合わせによって、地球上の生物であれば膜に囲まれてタンパク質や触媒活性をもち、DNA等の遺伝物質をもつ構造体として検出される。またもし例えば膜に囲まれてタンパク質様の物質を持

っているが、DNAもRNAも持たない構造体があればそれを検出することもできる。地球生命の場合、細胞が死滅すると膜の透過性が高くなることが知られている。あるいは、死滅した細胞はタンパク質やDNAとRNAを持つが、膜の存在は判別できない構造体として検出される。この色素の組み合わせは実際、死滅した地球生物細胞の検出に用いられている。全く同じ原理で、地球外生物に対しても、膜の透過性が高いか低いかを判定することによってDNAやRNAを持たない場合でも、構造体の“死細胞”の検出も可能である。

9. “細胞”以外の有機物構造体の検出

仮に火星には現在、生命が存在していない場合には、生命の起原以前に蓄積した有機物が残存している可能性がある。ただし、実際に有機物が蓄積しているかどうかは、有機物の増加速度(宇宙塵の降り注ぐ量)と放射線等により有機物が分解する速度との兼ね合いとなる。数千万年という時間スケールでは地表1.5 m程度より浅い部分の有機物は分解されてしまうという推定もある[16,17]。

しかし、ごく最近落下してまだ分解されていない有機物がある場合には、上述の蛍光色素の組み合わせによってそれがどのような物質であるかの情報を得ることもできる。

火星表面で存在している可能性のある物質としては次のようなものを想定できる。1) 複雑有機物：大気中での有機物合成や宇宙空間での有機物合成で合成される分子は分子量1000以上の高分子である。これらを加水分解するとアミノ酸などの有機化合物が得られるが、合成された分子は分子量2000程度の高分子である。2) プロテノイドミクロスフェア：複雑有機物が加水分解してできたアミノ酸を脱水縮合するとペプチド結合で重合した高分子が合成される。化学結合はタンパク質に似ているが、立体構造はタンパク質の特徴をもっていないのでタンパク質類似物とう意味をもつ名称、プロテノイドと呼ばれている。プロテノイドは水溶液中で大きさ数 μ m程度の球状構造をつくる。この球状構造はプロテノイドミクロスフェアと呼ばれている。3) PAH (Polycyclic Aromatic Hydrocarbon)：多環式芳香族炭化水素は有機物の不完全燃焼でできるが、隕石中や生物の化石化の過程でも

形成される。こうした物質は場合により固まりとして存在している。こうした3つの有機物構造体もそれぞれ特有の特徴をもっており、その特徴に着目するとある程度特異的な染色が可能なのではないかと推定している。そこで、これらの物質の蛍光色素による識別を目標に、蛍光色素の選定を進めている。

10. 生命探査第二段階・アミノ酸分析

前述の様に地球上の生命の15%はタンパク質である。細胞を質量分析すれば生命の分析ができそうな気がする。しかし、細胞の質量分析はそれほど単純ではない。細胞の中には最も単純な原核生物で数千種類、複雑な真核生物では数万種類のタンパク質分子が一つの細胞内に存在している。それらのタンパク質分子の分子量は千から数百万にまでおよぶ。従って、いま細胞をまるごと質量分析したとすると分子量千から数百万までの千種類以上のタンパク質分子のピークがだらだらと八ヶ岳の尾根の様に続くことになる。良く分かっている生物に関してですら、それらのピークのどれが何のタンパク質に相当するかは容易にはわからない。このような分析結果が得られたとき、これを生物と同定することができるとは思えない。

しかし、いま細胞を加水分解すると19種類のL型アミノ酸とグリシンの合計20種類のアミノ酸、4種類のDNA単量体、4種類のRNA単量体、数種類の糖類、数種類の脂肪酸とその他の低分子化合物の混合物が得られる。高感度アミノ酸分析はそれほど容易ではないが、アミノ酸を化学的に誘導化すればそれも可能となる。現在、加水分解誘導化後、質量分析によってアミノ酸分析をおこなう装置の開発を行っている。

火星生命を加水分解して、アミノ酸を分析すると、その結果に基づいて、生命体がどのような由来であるかの情報を得ることができる。検出されたアミノ酸を地球生命のアミノ酸と比較して、場合分けすると以下のようなになる。場合A：アミノ酸の種類が地球上の生命と同じ場合。この場合、火星生命が地球の生命と同じ起原をもつ生物である可能性が高い。つまり、1) 地球の生命が数10億年前から現在までのどこかの時点で火星に到達した可能性、2) なかでも現在までに火星に到達した探査機に付着して地球生命が火星に到達した可能性、3) 逆に火星生命が今から40億年前に地球

に到達して地球生命の起原となった可能性、4)何らかの必然性によって地球生命と火星生命が独立して同じアミノ酸を選択した可能性。以上の4つの可能性がある。場合B: 火星で検出されたアミノ酸の種類が地球生物と多少なりとも異なっている場合。その構造体は地球以外由来である可能性が高い。おそらく、火星で独自に進化した生命体であろうと推定できる。場合C: アミノ酸の種類がこれまで隕石等で報告されているアミノ酸の種類に類似している場合。その構造体は化学進化の段階にある非生物的有機物である可能性が高い。クロマトグラフィーによる分解能の高い分析手段を用いると、アミノ酸の鏡像異性体DLを分析することも可能である。DLの分析が可能となった場合にも、アミノ酸の種類と同様に火星で検出されたDLによって、以下の様な3つに分類分けされる。場合A: アミノ酸がすべてL型であれば、火星生物が地球生命との何らかの関連を持つ可能性が高い。すなわち、前段落で解説した場合Aの1)から4)の可能性がある。場合B: アミノ酸がすべてD型であれば構造体は地球以外由来である可能性が高い。おそらく火星で独自に進化した生命体であろうと推定できる。場合C: アミノ酸がDLの混合である場合にはアミノ酸の種類によっていくつかの可能性がある。1)種類が隕石等で報告されているアミノ酸の種類に類似していれば、検出されたのは化学進化の段階にあるアミノ酸である可能性が高い。2)種類が地球型生命に類似していれば、前段落で説明した場合1)と同等の可能性、つまり地球生命と関連した生物由来である可能性がある。そしてその生物個体が死滅してからアミノ酸のラセミ化によってDL混合物になった可能性が高い。3)種類が地球型とかなり異なっている場合には、前段落の場合Bと同等の可能性がある。つまり、地球外の生物由来である可能性がある。そして、その生物個体が死滅してからアミノ酸のラセミ化によってDL混合物になった可能性が高い。

11. 生命探査計画

実際の生命探査の前に生命探査地域の選定が行われる必要がある。探査装置を積んだ着陸機が火星に降下を始める前までに、着陸地の選定が行われる必要がある。優先順位は今後の検討が必要であるが、1)液体の水の存在可能性、2)着陸の容易さの他に、本稿で検討

した自由エネルギー供給機構すなわち 3)メタン発生地帯、4)地熱地帯等が候補地を決定する上での重要な要素となる。メタン発生地帯はこれまでの報告で必ずしも一致した結果が得られているわけではない。しかし、今後の地球からの観測、あるいは2016年に打上予定のESAのExoMars Trace Gas Orbiter(TGO)により、より正確なメタン濃度の探査結果が出る可能性がある。また、メタンガス噴出地帯では地下からの熱を運び出すことによって、高温になっている可能性がある。高温の場所を赤外線画像の解析から探査することによって候補地の情報が得られる可能性がある。あるいは、メタンガスにより地表は還元型となる可能性もあり、周囲に比べて還元型鉱物(とりわけ2価鉄)を高濃度に含む可能性がある。こうした地域の遠隔あるいは周回機からの結果に基づく解析がメタン発生地域の絞り込みに役立つかもしれない。さらに、地球上のメタン発生地域に特有の地形として泥火山が知られている。こうした地形的特徴が火星表面でも報告されている[6,19,20]。このような地形的特徴も参考にされるべきであろう。また、何らかの方法で火星表面あるいは火星大気中のメタン測定が行われるならばさらに直接的情報となる。ローバー、火星気球や火星航空機等の他、分散着陸装置によるメタン濃度測定等の可能性もある。

さて着陸候補地が選定されると、着陸機はその場所への着陸を目指す。着陸したローバーは地表で移動しながらメタンの発生地域に向かうことになる。メタン発生地として詳細な位置が特定されていれば、そこへ向かう。もし、はっきりとした場所の特定がおこなえなければ、ローバーでメタン濃度を測定し、風向きの情報と組み合わせてメタン発生地を探る方法もありうる。また、地球では火山ガスの噴出地域には特有の地形的特徴があるので、地形的特徴を目印にメタンガス発生地域を探すことも可能かもしれない。しかし、もし生命がその近接領域で生育している場合には、火星生命生育の現場でなくても、そこから細胞が風によって周囲に運ばれる可能性もある。従って、メタンガス発生現場が特定できない場合でも土壌の解析を行う意義がある。

生命探査の第一段階は蛍光顕微鏡による観察である。ローバーは適当な場所でロボットアームに付けたシャベルで土壌を採集する。地球では、微生物は岩石中では無く、土壌、あるいは砂の間に高濃度で生育してい

る。従って、岩石を砕く必要はない。土壌をすくい取って分析装置に運び入れる。一定の圧力と温度を保った分析装置内では、使い捨てのシャーレの上に土壌を移し蛍光色素液を混合することによって微生物の染色を行う。染色した微生物を自動的に蛍光顕微鏡観察して撮像する。蛍光色素の発光が検出された部分を自動的に特定して、その部分の画像を地球に送信する。蛍光色素には発光する蛍光波長の異なるものがある。蛍光波長が異なる色素を組み合わせることによって、前述のいくつかの特徴を識別する色素を同時に用いる事もできる。現在その組み合わせを選定している。

生命探査の第二段階では、まず微生物を鉱物粒子から分別する。一つの方法は、顕微鏡で蛍光を発する粒子を μ TAS(Micro Total Analysis System)によって選別する方法である。 μ TASとは半導体微細加工技術を用いて微小サイズで流体を取り扱う装置の事である[18]。すでに、流体を混合したり、粉体を輸送することには成功しており、この技術を用いて蛍光を発する微粒子を選別する装置を開発している。また、もう一つの方法としては土壌を水中に拡散し、鉱物粒子と有機物との比重の違いを利用して選別する方法がある。今後こうした方法の中からより適切な方法を選択する。

次いで、選別された微粒子の加水分解を行う。タンパク質の加水分解は通常6M HCl, 110℃で24時間処理する。マイクロ波を用いると処理時間が短縮されるのでマイクロ波を用いた装置の開発を検討している。アミノ酸は誘導体化の後にGC-MSで分析を行う。GC-MSはすでに歴史を持つ分析装置であり、MSLにも搭載予定である。

12. 生命探査装置の予想される性能

さて、現在開発中の生命探査装置はこれまでの生命探査に比較して遙かに高い“細胞”検出感度をもつであろうと推定している。顕微鏡では1細胞あれば検出可能であるが、実際には同じ様な蛍光特性、同じ様な形状と大きさを持つ構造体が10個程度あれば、おそらく細胞であろうと推定できる。土壌を自動的に顕微鏡観察する場合には、シャーレの底面を観察する事になる。従って、土壌の内ではシャーレに近接した部分に10個程度の細胞があれば検出できるのではないかと推定している。

アミノ酸分析に関しては、まだこれから開発しなければならない自動化の課題も多く、検出感度がどの程度になるかは未定である。しかし、1グラム土壤中10000細胞を検出する性能を目標としている。その検出感度をもてば、地球上の最も細胞密度の低い場所でも微生物を検出可能となるからである。

13. まとめ

JAMP計画では、火星のメタン発生地域で現在生育しているメタン酸化細菌の探査を第一の目標としている。メタン酸化細菌はメタンが発生している場所近傍の土壌表面付近(数cm)で検出できる可能性がある。しかし、必ずしもメタン酸化細菌だけが検出できるわけではなく、どのような細菌、微生物であっても、蛍光染色の原理に適合する生物であれば検出可能である。実際、地球と異なる生化学的特徴をもつ生物、例えばDNAやRNAを持たない細胞であっても検出可能である。また、生きている細胞に限らず、他の場所で生育して風等の作用で移動してきた細胞等も検出可能である。

さらに、重要な特徴として、非常に高い検出能力をもつと予想されることである。原理的には10細胞であっても検出できるのではないかと予想している。ただし、地球から探査機に付着して運ばれる微生物である可能性を除外するためには、100細胞程度の検出が望まれる。かりに、探査機に地球由来の微生物が付着していたとしても、それが多数同じ場所の土壌に混入する可能性は低いと予想されるからである。従って、100細胞検出されたなら、それは火星にいた生物といつてよいのではないかと考えている。

顕微鏡本体に関しては、基礎技術はすでに成熟しており、火星で利用可能な軽量、低電力、自動化装置としての開発を進めている。アミノ酸分析装置に関しては、今後の開発要素も多いが、タンパク質分解、誘導化、アミノ酸分析という技術そのものは生化学分野における既に成熟した技術として存在している。

また、こうした生命探査の原理は、火星に限定されるわけではない。火星以外に生命の存在可能性の推定されている天体、ユーロパ、エンセラダス等、あるいは水性の溶媒とは異なる為、検出蛍光試薬は選定し直す必要が有るが、タイタンのメタンの海での生命探査

へも応用することができる。もちろん、極地や砂漠等、地球での生命探査も重要な応用範囲と言える。

謝 辞

丁寧な査読を頂いた、東京大学総合研究博物館の宮本英昭博士に感謝いたします。

文 献

- [1] Yamagishi, A. et al., 2010, *Biol. Sci. Space* 24, 67.
- [2] 山岸明彦, 他, 2010, 新しい生物学 第10巻 極限環境生物学, 179(岩波書店).
- [3] Johnson, A. P. et al., 2011, *Icarus* 211, 1162.
- [4] Jannasch, H. W., 1985, *Proc. R. Soc. London B*225, 277.
- [5] Mumma, M. J. et al., 2009, *Science* 323, 1041.
- [6] Komatsu, G. et al., 2011, *Planet. Space Sci.* 59, 169.
- [7] Etiopé, G. et al., 2011, *Planet. Space Sci.* 59, 182.
- [8] Beal, E. J. et al., 2009, *Science* 325, 184.
- [9] Atreya, S. K. et al., 2007, *Planet. Space Sci.* 55, 358.
- [10] Shkrob, I. A. et al. 2010, *Astrobiology* 10, 425.
- [11] Glavin, D. P. et al., 2001, *Earth Planet. Sci. Lett.* 185, 1.
- [12] Karner, M. B. et al., 2001, *Nature* 409, 507.
- [13] Navarro-González, R. et al., 2003, *Science* 302, 1018.
- [14] Navarro-González, R. et al., 2006, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 103, 16089.
- [15] Mahaffy, P., 2008, *Space Sci. Rev.* 135, 255.
- [16] Parnell, J. et al., 2007, *Astrobiology* 7, 578.
- [17] Kminek, G. et al., 2006, *Earth Planet. Sci. Lett.* 245, 1.
- [18] Arora, A. et al., 2010, *Anal. Chem.* 82, 4830.
- [19] Miyamoto et al., 2004, *J. Geophys. Res.* 109, E06008.
- [20] Allen, C. C. and Oehler, D. Z. 2010, *Astrobiology Science Conference*, 5172.