

8 火星に生命は存在できるのだろうか?

現在, 我々は火星の生命に関する知識を持っていない. これにも関わらず, 過去のいつの時代かに生命が生まれた可能性はある. それらは既に絶滅したかもしれないし, 未だ惑星のどこかに存在しているかもしれない. この章では, まず現在及び過去の火星環境を紹介し, 更に生きている有機体はどのように生じ得るのか, またその有機体は現在まで生存し続けられるのかを議論する.

8.1 現在の表層環境

- 火星は多くの地質過程が機能している (ex. 火山活動, テクトニクス, 氷/水が関連するもの, 風に関連する物質移動, 巨大隕石衝突)
- 地表写真 (図 8.1): 砂漠によく似ており, 小さな吹きだまりや砂丘がある.
- 今日の火星表層環境 (表 1) は, 一般的に生命と結びつかない.
 - 平均地表面温度は H_2O 融点と比較して十分低い. 赤道付近の温度は $\sim 273\text{K}$ まで上昇するが 大気圧が水の三重点 ($=6.1\text{mbar}$) 付近と非常に薄いため, 通常液体の水は存在できない.

物理量	火星	地球
地表面温度	220 K ($-53\text{ }^\circ\text{C}$)	287 K ($15\text{ }^\circ\text{C}$)
大気圧	6 mbar	1.013 mbar
大気組成	CO_2 (96%)	N_2 (78%), O_2 (18%)
1 日	24.6 地球時間	24 地球時間
1 年	686 地球日 (669 火星日)	365 地球日
自転軸傾斜角	25 °	23.5 °
軌道離心率	0.0934	0.0167

表 1: 火星の大気/天文パラメータ

- 地球と比較して特徴的な火星環境
 - 火星の大気圧は季節/場所により 1 割程度の変動する.
 - 火星は起動離心率が大きく, 一年を通して太陽放射入射量は 40% 変化する. また, 火星の近日点は南半球の夏付近にあるため, 南半球の季節変化は, 北半球のそれに比べて大きい.
 - 高緯度では冬期, 二酸化炭素の霜が極冠を形成する.
 - * 北半球の夏極冠では, CO_2 の霜は消失するが, H_2O 氷と赤い砂との混合物で形成される永久極冠は消失しない (図 8.3¹).

¹NASA PhotoJournal PIA01247. 右の写真の暗いところは砂丘@Mars, P771(粒径 200-400 μm @Mars, P734)

- * 南半球の夏極冠では、CO₂ の霜は完全に消えないようである。H₂O 氷がもし存在していたとしても大気中に放出されないだろう。
 - * この二つの極冠の差は部分的にしか理解されていないが、高度差によるもの、大気ダストが霜の熱バランスへ与える影響、地面下のエネルギー伝導の影響の結果と考えられる。
- 火星表層環境での水の振る舞い
 - 火星には極冠を除いても豊富な H₂O が存在する。大気中に水蒸気や氷晶として存在し、さらに、高緯度の地面の中に H₂O 氷としてほぼ確実に存在する。
 - 火星表面では液体の H₂ は安定に存在できない。岩やレゴリスの中の孤立したくぼみに捕獲された氷晶は解けて、蒸発を免れているかもしれないが、非常にまれなケースであろう。
 - 火星における生命の可能性
 - 火星表面での水の欠如に加え、オゾンの希薄さ²も生命の存在をより非現実的なものに行している。
 - 火星表面の観測によると、火星は生命の為の場所として不適切なように見える。もし生命が存在していたとしても、十分な量の水を得るには非常に難しい時代であっただろうし、紫外線によって容易に滅ぼされてしまうだろう。

8.2 原始火星の温暖湿潤な気候

- 初期火星が温暖である事を示唆する地形的証拠
 - インパクトクレーター (図 8.5)
 - * 古い地形³では直径 15km 以下のクレーターが消失している。また、15km 以上のクレーターは、若い地形にあるものと比較して、かなりの風化を経験している。これは、火星史の初期において風化率がおよそ 1000 倍大きかったことを示唆する⁴。
 - * 現存する巨大クレーターのいくつかに見られる風化形式 (例えばクレータの壁のガリーなど) は表面での流水を示唆している。
 - バレーネットワーク (図 8.6)
 - * 地球上での水によって削られたものと同様の樹木状パターン。
 - * 形成要因は議論が続けられているおり、その候補としては降水、地下水の漏出、水を多く含んだ破片の風化、複合的なもの、が挙げられている。いずれにせよその形成には地表面 (もしくはそのそば) の液体の水の存在が関連したに違いない。
- 初期気候の温暖化メカニズム

²火星オゾンの量は地球の $\sim 10^{-5}$ 程度。火星のオゾン混合比は 0.04 - 0.2 ppm。地球のそれは 10-100 ppm。火星の大気圧が地球の 1/100 であることを考慮するとこのぐらいになる (混合比の値は 比較惑星学, P279, 表 4.5 より)。

³図 8.4; 火星地形の年代を 3 つの時代に分けて示したもの。地形の年代はクレーター年代学によって決められている。

⁴1000 倍とされている根拠は不明

- 初期地球のように厚い CO_2 大気による温室効果が大気を暖めたかもしれない。しかし、火星は地球よりも太陽から遠く、液体の水を許容するのに必要とされる量の CO_2 (~数気圧) が存在したとしても大気中で凝結してしまい、十分な CO_2 の温室効果は得られなかっただろう。微量のダストや他の気体はこの問題を緩和したかもしれない⁵。
 - 現在の寒冷な気候への遷移は大気の宇宙空間への散逸の結果だろう。火星の同位体比は、揮発性物質が宇宙空間へ散逸しただろうことを示唆する。
- 水に関連した様々な地形
 - 火星は気候の変化を経験してきたにも関わらず、火星史を通して水は地形学的に活発に振る舞ってきた。
 - * 図 8.7⁶: 表面の水の流れによって形成された flood channel. この地形は地球の高水敷時に見られるものとよく似た形態学的特徴を持つ。
 - * 図 8.8: 大洪水の発生場所. channel はカオス的崩壊堆積物の領域から発生している。これは地表面下に貯蓄されていた水の放出を示唆する。
 - * 図 8.9: 海岸線の可能性のある地形. 波が周辺の海岸線を形成し得るほど長い時間、 H_2O が液体として存在した可能性を示唆する。
- 火山活動
 - 水は火山活動によっても地質的期間、放出されてきた。火星上には火山活動の豊富な証拠が存在する。北半球平野は火山性のもので、火星表面のおよそ 1/3 を覆っている。加えて、多くの巨大な (周囲の平地から 25km にも及ぶ) 火山が存在する (図 8.10)。これらは、火山活動が火星史のほとんどの期間で活動的であった事を示唆する。
- 火星隕石
 - 火星隕石は、地球や月の特徴的な酸素同位体比と異なること (図 8.11)、火星大気組成と同一組成の気体を捕獲していること (図 8.12) から火星起源であると考えられている。
 - 火星隕石は 13-1.8 億年前に結晶化した火山岩のかけらであり、ごく最近、火星上で火山活動がある証拠である。
 - 火星隕石は現在水が存在する証拠を示している。ある程度の水を含んでいるだけでなく、そのいくつかは結晶化後、熱水が岩石中を流れた事による変成を受けている。
- 明らかに、火星史を通して水は火星の表面及び表面付近において重要な分子種であった。初期の気候は表面での水の存在を許容しており、水はその後もずっと地表面下の中に存在していた。正確な水の量に関して多くの議論があるけれどももし、すべての水が同時に表面に存在したとすると深さ 1 km 程度の海が形成されるのに十分な程度かもしれない。

8.3 火星で生命は形成可能か?

- 生命形成に必要なとされるもの (See. Chap. 05).

⁵雲による温室効果も候補の一つとして上げられている

⁶Viking Orbiter frame 827A21

- 有機分子の源
- 非平衡過程を駆動可能なエネルギー源
- 生命に必要な要素 (C, H, O, N, S, P) へのアクセス
- 有機物源の候補
 - 外部からのもの (ex. 惑星間空間で形成され、地球に集積した隕石ダストやデブリに伴って供給される)
 - 内部からのもの (ex. 大気中もしくは海洋中の熱水口の化学反応で形成された)
- 生命を形成可能な場所 (非平衡エネルギーを取得可能かつ必要要素へアクセス可能な条件を満たす場所)
 - 比較的静穏な表面付近: 初期火星の気候は地球の生命が形成された時代の地球の気候といくらか似ていただろう。もし地球上の生命が比較的静穏な表面近くの環境で形成されたとすると、その結果同時期の火星表面で生命が形成された可能性は高く、もっともらしくさえある。
 - 温泉: これは初期火星上に広がっていたに違いない。火星の温泉や熱水系は地殻中に熱と水の十分な供給源を要求するだろう。熱は、微惑星集積の衝突によるものが表面下に保持されているだろうし、火星火山も熱を供給可能であろう。また地形的証拠は、火星地殻中に豊富な水が存在する事も提案している。
- 地球起源の火星生命
 - 他の火星生命起源は地球かもしれない。地球への隕石衝突によって宇宙空間へ放出された岩は、軌道進化を経て火星へ落下する事が可能である。インパクトによって宇宙空間へ放出される岩石やデブリのすべてが加熱されたり、衝撃を受ける訳ではないだろうから、それらに含まれていたかもしれない細菌やその胞子はその放出イベントを生き抜き、火星上で繁殖したかもしれない。
- 生命は現在まで生き抜く事が可能か
 - 火星の Viking 探査機が報告したように今日の火星上には生命が全球的に分布してないかもしれない。しかし、生物学的に適切な場所 (例えば火山活動に関連した温泉、液体の水が存在可能であった地表面下深くに埋められた場所) に偶然位置し、繁栄し続ける事はあり得るだろう。

8.4 Viking による生命探査

- Viking mission
 - Viking mission: 軌道船及び着陸船を載せた探査機 2 機で構成された NASA のミッション。1975 年打ち上げ。軌道船によって全球イメージングや放射観測、着陸船によって表層イメージング、鉛直温度構造、大気成分、表面温度、風、地表原石の化学分析、生物学実験 (生命探査実験) などが行われた。
 - この章では 3 つの生命探査実験と土壌の成分分析の結果を示す。

- 生命探査実験 1: 炭素同化実験 (熱分解放出実験)
 - 目的: この実験は光合成, 化学合成, もしくは CO/CO_2 に関連する他の代謝プロセスの試験としてデザインされた.
 - 手法: 火星の土壌サンプルを ^{14}C でラベリングされた CO_2 及び CO ガスに一定時間触れさせ, サンプルが有機素材として C を取り込むか否かを調べた.⁷
 - 結果: ^{14}C はたしかにサンプルに取り込まれたが, その活動レベルは地球鉱物の実験をもとに期待されていたものと比べて十分低かった. 生物学的有機物が生きれないほど高温でサンプルを熱した後に実験を行った場合も肯定反応が現れた.
 - 結論: 地球化学過程によって大気中から CO 及び CO_2 が取り込まれ, 岩石中で少量の炭素鉱物もしくは炭素高分子化合物が形成されることを示したが, 生物学的活動が生じていた事を確信させる暗示はなかった.

- 生命探査実験 2: ラベル放出実験
 - 目的: この実験は周辺の環境から有機素材を吸収し, その際放出された気体を大気中に戻すことのできる火星有機物が存在するか否かを試験した.
 - 手法: 放射性同位体によってラベルされた有機培養液⁸. をサンプルと接するように投入し, 放出された気体が label された元素を含むか否かを放射活性度を観測する事で調べた.
 - 結果: 放射活性度は時間とともに増加し, その後培養液が使い切られるとともに徐々に平らになった (図 8.14). さらに, サンプルを 50°C で加熱した際, その放射活性度はかなり減少し, また 160°C まで加熱したときには, 肯定反応を作る為のその能力は完全に破壊された.
 - 結論: この実験は生命の検出に対する肯定反応をもたらしたが, 信号は生命の存在を一意的に示唆したとはいえない. 過酸化水素のような土壌中の活動的な酸化剤は観測された信号を作るように栄養素と反応することもあり得る.

- 生命探査実験 3: 気体交換実験
 - 目的: 培養液にさらされた生物相が発生させるかもしれない特定のガスを検出する.
 - 手法: 土壌を培養液⁹にさらし, 周辺のガスをガスクロマトグラフを用いてモニタリングする¹⁰. この実験は, wet mode(培養液を直接固体中に加える) と humid mode(培養液を固体のうえの蒸発可能な空間へ加える) で行われた.
 - 結果: 実験開始後すぐに酸素が検出された. しかし, それは 最初に, 反応が期待されていた地球上の有機物がある場所と異なる暗い領域から酸素が発生していた. またサンプルを 145°C まで加熱した際も反応はとまらなかった. さらに同様のガスが, 土壌を水蒸気に触れさせただけでも発生した.

⁷ サンプルがどれだけ ^{14}C を取り込んだかを調べる際, 有機物が熱分解する程度の高温でサンプルを加熱し, C を放出させていることから熱放出実験と呼ばれる.

⁸ 培養液は, 水の中の放射性同位体 (^{14}C , ^{35}S) でラベルされたギ酸塩、泌乳、ブドウ糖、アミノ酸、および硫酸塩で構成されていた火星生物相の利き手は不明なので, これらには右手系, 左手系の分子を含めた.

⁹ 培養液は様々なアミノ酸, 塩, ビタミン, CHO 化合物, DNA の基礎となる プリン, ピリミジン からなり, さらに, 右手系, 左手系の分子を含む.

¹⁰ モニタリングされた気体種は H_2 , N_2 , O_2 , CH_4 , CO_2 , Ar , Kr であり, 最後の二つはキャリブレーション用である.

- 結論: この結果は酸化剤が固体中に存在していたという事によって最も良く説明できる.
- 土壌成分解析
 - 目的: 土壌中の有機分子の量の計測
 - 手法: 土壌サンプルを加熱し, その後のガスをガスクロマトグラフに通して成分 (正確には分子質量の) 分析をおこなった.
 - 結果: この実験で検出されたの唯一の有機分子は, 離陸前の機械の清掃の際に残された様々な溶剤であり, 機器精度¹¹的に検出が期待されていた隕石/小惑星起源の有機物すら検出されなかった.
 - 結果: この実験は, 生物活動の発生において非常に厳しい限界を示し, さらに土壌中に有機分子を崩壊する還元的分子の存在を提案した.
- 興味深い事に, 3 つの生命探査実験は, はじめ土壌サンプルが活動的な生物相を含む事を期待させる結果を示した. しかしながら, 放出実験で示された有機分子の完全な欠如はこの結果が生命によるものと信じる事を非常に困難にした.

8.5 火星生命探査

- 現存する生命の探査
 - Viking 実験によって得る事のできた最も強い結論は, 着陸地点には生きている生物相の存在を強く示唆するものが存在しなかったことである. しかしながら, Viking 実験は推測上の火星生命体がエネルギーを得るかもしれない可能性のあるメカニズムのうちの2,3 しか試験していない. 火星生物相は, Viking の実験のそれらとまった異なる条件下で繁殖しているのかもしれない.
 - もし生命が液体の水のある孤立したオアシスにのみ存在していたならば, Viking 実験自体正しかったけれど, 場所が悪かったことになる.
 - オアシスの候補としては, これらは火山活動, 熱水系/温泉活動もしくは大洪水活動があったところなどの, 近年液体の水が存在していた場所が挙げられる.
 - また, レゴリス中に氷か塩水の存在に関連した生命を発見できるかもしれない. 地球上の生命はそのような環境に存在する事が示されてきており, 起こりえる火星生命体も同様に存在出来るだろう.
- 絶滅した生命の探査
 - 絶滅した生命の証拠を探す場所の候補としては適切なものは, とりわけ初期に水が豊富にあった場所, すなわちバレーネットワークの下流, 古い盆地, 古火山のある場所などである.
 - 巨大な峡谷であるマリネリス峡谷の壁は魅力的な場所かもしれない. 深さ 10km の露出した壁の領域は, 以前表面下数 km に埋まっていた場所への簡単なアクセスを許容しており, 表面下深さ 10km の地殻を調査可能である.

¹¹この機器は重量比にして 1/10 億 といった極微量の分子を検出する事が可能であった.

- 火星生命は、もし存在していたとしても、それほどたくさん存在するはずがない。火星表層での利用可能なエネルギー（熱水系システムもしくは化学風化などの地球化学的エネルギー）を基に火星上に繁殖可能な生物の量を見積もると、その値は地球の $1/40$ でしかない。

8.6 まとめ

- 火星の生命の存在について説得力のある示唆を供給する有用な証拠は存在しない。Viking 着陸船は火星上の特定の 2 点において生命の証拠を発見していない。しかしながら、火星表面の隔離された、より好都合な環境で現在も生命が存在できた可能性はまだある。火星条件は生命の起源を招くだろう。それゆえに、絶滅した生命証拠が存在し、火星で広がっている可能性がある；そのような絶滅した生命の探査はまだ行われていない。
- 火星は太陽系内で最も地球外生命の証拠が見つけれそうな場所である。これらの可能性を調査する為に詳細な探査計画によるミッションが必要である。