

## 10 火星への生命の移住

CO<sub>2</sub> や CO<sub>2</sub> などの揮発性成分の性質、生命起源の可能性、火星固有の生命の形成などを含めた火星の地質学的歴史について第 8 章で議論した。生命について広く考えると、火星には Chapter 8 を超えるような様々な生命の様子がある。特に、火星に生命を移転できるかについては数多くの議論がなされてきた。これには火星環境への地球上の生物の計画的導入 (生物を意図的に繁殖と生存させる) が含まれている。ここでは火星をテラフォームすることを考える。テラフォームにより火星環境を地球のような環境、地球上の植物さらには人間までもが生存できるように、変化させる。付け加えると、意図しないで、地球上の生物を火星に送り込むことは可能である。これは、探査機を送るときに地球上の生物と一緒に乗り込むことで起こりうる；ひょつとするとこの様なヒッチハイカーたちは、火星上にある彼らが繁殖と生存できる場所で見つけられるかもしれない。最後に、これは一般的に UFO と同じような考え方に分類されるが、何人かはいわゆる 'Face On Mars' について、高度な文明が存在し、人が住んでいたもしくは訪れることはできた証拠であると考えている。

このような問題のほとんどは、明らかに今日の惑星科学もしくは宇宙生物学の主流ではない。われわれの議論では火星は地球外の生命を持っているので、そのような環境を理解することは重要である。このため、この章では、これら 3 つの面から地球外の火星生命について調べる。

### Terraforming Mars

惑星にテラフォームできるという考え方は我々の文化と深いかわりをもつ。少なくとも、最近の 20 ~ 30 年間では SF 文学、今日では 'Star Wars' や 'Star Trek' などがある。火星はテラフォーミングを考える上で非常に興味深い星である。なぜならば火星は太陽系のなかでもっとも地球に似た惑星であり、その気候はすでに若干地球に似ており、未来の宇宙飛行士が開拓するのは可能性として十分ありうる。この様なことは実現できるのだろうか？火星にテラフォームを行うときどのような技術的・科学的問題が生じるのだろうか？そして最終的に、他の惑星の環境を劇的に変化させたとき、どのような道徳的・倫理的な問題が生じるのだろうか？このような問題は最近多くの研究者によって議論されている。ここでは様々な議論の中から Christopher McKay (NASA's Ames Research Center in California) と彼の同僚による一連の論文をとりあげる。

火星の環境を生命が維持できるように変えるに際し、どのような条件が必要か考えなければならない。その度合いは火星大気が安定でなくてはならない。どのように変化させると現在の気候からそのようにテラフォームされた機構になるのか。そのように気候を変化させるために、火星環境に利用できる十分な量のガスがあるかどうか。

地球上の生命が生息できるように火星環境を変化させることを考えると、生物が存在できるような大気の組成、温度、圧力などを考慮に入れる必要がある。また、テラフォーミングの必要条件は、植物が生息可能か、人が植物を利用可能かで異なる。

地表面の温度は水が凍らないように制限される。これは一般的に温度が 0 °C 以上であると解釈される。し

しかしこれより低い温度でも生存できるものおり、実際永久凍土の中などにも生命はいるが、非常にまれな存在であるので、テラフォームの特徴を決める際には考慮に入れない。このような条件を満たすための二つの重要なポイントがある。一つ目は、chapter 8 で見たように、今日の火星の赤道の気温は、ほとんどの日とまでは言わないが一年以上氷点より高くなる。にもかかわらず、表面の平均温度は氷点より 50-60 K 低く、そのため動植物が生息することをイメージしにくい。そのため、温度の条件としてほとんどの日の一日の平均気温が氷点を超えている必要がある。その条件が満たされていれば、夜の気温が氷点を下回っていても、植物は十分な熱量と熱慣性より朝まで凍結を免れる。同様に、年平均にも同じことが言えて、夏に熱をためるため冬の厳しい寒さでも生き残れる。

二つ目は、ほとんどの人が知っているように、大気が氷点を下回っても、地上の水は必ずしも凍るわけではない。これは地面が太陽光を直接吸収して大気の底よりも暖くなるためである。冬でも、大気が氷点より十分低くなるまで川は凍らない。南極大陸では気温は一樣に氷点より 20 K 低いが、湖は完全には凍らない；常に太陽光が入っていて、さらに毎年数日間融点より高い水が流入してくるため、水は氷の下では液体を保っていらる。観測結果から氷に覆われた湖は表面温度の年平均が 245 K、つまりは氷の温度が氷点よりも 30 K 低い状態までは、凍らないことが言える。

我々の考えでは、空気の底の年間平均気温は氷の融点よりも高いことが必要である。このような温度の増加は大気中の温室効果ガスによってもたらされる。このようなガスには  $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$  (気体)、オゾン、などがあり大気が熱を宇宙空間に放出するのを妨げ、大気を暖かくする。今日の火星に 6 mbar の  $\text{CO}_2$  を加えると、温室効果で 6 K 暖くなる。地球では温室効果は主に  $\text{CO}_2$  と  $\text{H}_2\text{O}$  によって引き起こされ、それが他の気体だった場合に比べ表面が 30 K 増加している。火星の気温を 50-60 K 上げる場合  $\text{CO}_2$  ガスは 1-2 bar 必要となる (Figure 10.1)。

figure 10.1 火星大気の温室効果モデル。曲線は与えられた  $\text{CO}_2$  あつりよくから求まる表面温度  
このモデルでは太陽の出力は現在の値を用いている。(After Kasting, 1991.)

生命を維持するために必要なガスの量と組成は、種によって異なる代謝によって決まる。植物の場合、光合成のため  $\text{CO}_2$  を必要とする。ほとんどの地球上の植物は 0.15 mbar 以上の  $\text{CO}_2$  がないと生きていけない；植物がどのぐらいの  $\text{CO}_2$  まで生き残れるのか、はっきりした上限はない。窒素も重要であり、最小で 1-10 mbar 必要である。光合成する植物といえど、酸素も同様に重要である；一般的に 20 mbar の  $\text{O}_2$  が必要である。

人間はより多くのものを必要とする。 $\text{CO}_2$  は中毒量である 10 mbar 以下が要求される。 $\text{O}_2$  は 130 mbar 以上必要である (現在の地球では 210 mbar である)。窒素はそれ自体は必要ないが、全圧を 500 mbar 以上にするための 'buffer' として必要である；これは地球でもっと高い山の上の圧力と同じくらいである。

われわれの求める圧力、大気組成、温度は実際の火星とは明らかに異なっているように思える。温度を上げるために大量の  $\text{CO}_2$  が必要である；このような高い  $\text{CO}_2$  は植物の生存を可能にするが、人間には致命的である。地球はより太陽に近いので、より少ない温室効果で気温が氷点よりも高くなる。

えられる。クロロフルオカーボン化合物 (CFCs)、エアコンや冷蔵庫に使われている気体だが、これなら利用可能かもしれない。しかしこれを使うにも問題があり、太陽光によって分解されるので、数百年しか存在しない。つまりは、連続的な生産が必要となる。大気の数に対して十分な量の CFCs の生産率を大雑把に見積ると、 $10^{12}$  tons/yr 以上が必要となる。対して、現在の地球の生産率は  $10^6$  tons/yr であるので、このアプローチはそう簡単ではないと言える。

別の、可能性のあるアプローチとして、火星気候システムに基づく固有の不安定性が上げられる。現在の低い大気圧では、大気を通す極域への熱輸送がほとんどない。そのため極域の冬はとても寒くなり、 $\text{CO}_2$  の雪が降り積もる；この凝結が全大気圧を相対的に低くしている。地球では対照的に、冬のほうの半球でも十分な熱が大気を通して極域へ向かうため、極域の海は凍らない。火星では、少し大気圧があがると、結果として、極域へ輸送される熱量も増加する。圧力が数十ミリバール上がると、極域へ向かう熱輸送が不安定性を起こすには十分なほど大きくなるかもしれない；極域へ行った過剰な熱が極冠と高緯度のレゴリスを暖め、貯蔵されている  $\text{CO}_2$  が大気へ開放される。結果として圧力の増加は、極域へ向かう熱輸送を増加させ、 $\text{CO}_2$  を開放する。極域に十分な量の  $\text{CO}_2$  があるとすると、この正のフィードバックは平衡状態には達せず、100 mbars から 1 bar の  $\text{CO}_2$  が開放されるまで繰り返される (Figure 10.2)。

figure 10.2 火星大気圧の不安定性。点線は温度を大気中の  $\text{CO}_2$  圧力の関数として表している。

実線は  $\text{CO}_2$  飽和温度を示している。モデルの予測によると、ある温度で圧力が飽和圧力を超えたら、気候システムは不安定になるこの場合圧力は 5-10 mbar で安定となる。

(After Harberle *et al.*, 1994)

気候の不安定性が火星大気圧に劇的な変化をもたらすことは可能である。火星の極と高緯度の領域に十分な量の利用可能な  $\text{CO}_2$  があるかどうかは最も大きな問題である。極冠は 1 bar ほどの  $\text{CO}_2$  を氷として含んでいると思われる。地面にも別に 1 bar 程度の  $\text{CO}_2$  が含まれていると思われる。しかし、現在の火星表面には凍土が存在すると考えられており (Chapter 8 参照)、それによって  $\text{CO}_2$  がレゴリスから大気へ拡散するのが妨げられる。さらに、 $\text{CO}_2$  は吸着ガスの状態で地中に存在し、比較的弱い物理的結合により同じ位置に拘束される。これは、レゴリスを暖めることでもっとも簡単に解放できる；全てもしくはほとんどのガスを解放しようとするレゴリスを 1 km ほど暖めなくてはならない。このためには、地表面を暖め、その熱を地中に伝播させるのが唯一の方法である；レゴリスを 1 km 暖めるためには  $10^5$  年かかる。つまりは、長い時間をかけて地面を暖めないと、この不安定性が起こるかどうかは明確でない。

そしてもちろん、 $\text{CO}_2$  が大気へ放出されて気温が上昇しても、暖かい気温により地表と地表面に液体の水ができ、 $\text{CO}_2$  が溶けてしまうかもしれない。溶けた  $\text{CO}_2$  は炭酸塩鉱物を形成し、再び大気から  $\text{CO}_2$  を取り除くことになるかもしれない。このプロセスで大気から  $\text{CO}_2$  を取り除くのに  $10^7$  年しかかからない。言い換えると、 $\text{CO}_2$  による温室気候は形成可能だが、安定ではない； $\text{CO}_2$  は優先的に地表面下に移動する。

$\text{CO}_2$  の代わりに温室効果ガスとして、様々な気体が気温を上昇させるために利用可能であり、まだ存在していない技術に期待する人もいるかもしれない。例えば窒素をアンモニア、 $\text{NH}_3$  に変えるなど。アンモニアはとても有効な温室効果ガスである。現在の地球にある少量の窒素でさえ、全体の気温を水の融点まで上げるために十分なアンモニアを生産できる；しかし、窒素をアンモニアに変換させるのは難しい。

火星を地球化することは可能だろうか？現在分かっていることだけではどちらとも言いがたい。それは、どのくらいの  $\text{CO}_2$  が火星の極域とレゴリスに含まれているかと、火星気候システム固有の不安定性の物理的詳細に依存する。おもしろことに、水が液体で存在できるようにするなど、火星の気候を変化させるのはとても難しいのにもかかわらず、35 億年前はそのような状態だったようだ。当時の太陽光度は現在のものに比べ 30% 少なかったのにもかかわらず、初期の火星では液体の水が比較的広範囲に現れていた (Chapter 8)。おそらく、これは地質学的過程の進行により発生した温室効果ガスが大気的主要成分を占めたためである。気候が寒く変化したのは、温室効果ガスが地殻や宇宙空間に散逸したためであると考えられる。

## 1 火星地球化における倫理と道徳のジレンマ

- 火星の地球化は倫理と道徳の問題にもかかわる。火星には惑星としての価値がないのだろうか？火星の資源は使うべきか？
- 火星の地球化に対し、Robert Haynes と McKay が考えた賛成意見と反対意見
  - － 賛成意見
    1. 呼吸できない  $\text{CO}_2$  大気の中で、未来の宇宙飛行士やコロニーの住人が生活するのを簡単にする。；呼吸器を着用すればその星の探検ができる。
    2. 生産されるバイオマス\*1 は宇宙飛行士やコロニーの住人の重要な資源となる。
    3. 人類が有益で魅力があ長期のプロジェクトに集中できる。
    4. 火星への入植を考えると、必須条件であるように思われる。
    5. 戦争や大災害が起こったときの隠れ家として用いることができる。
    6. 火星の地球化を研究するだけでも、科学と技術を発展させ、新しい教育の発展と経済活動を刺激し、国際協力を促進させる。
    7. 多くの研究は、地球の環境問題の解決と生物圏の理解に関係がある。
    8. 火星の地球化と生物圏の移植が可能だとすると、いつか誰かが始める。
    9. 生物がいる惑星のほうがいない惑星より価値がある。
    10. この様なプロジェクトへの努力から、新しいフロンティアと人類の挑戦が生まれる。
    11. 太陽系の探査と開発は、国際的な競争や技術開発のはけ口となる。
  - － 反対意見
    1. とても長い時間がかかる。おそらく政府機関の存続期間よりだいぶ長い。さらにその間世界経済は安定である必要がある。
    2. かかる費用や努力とつりあうような、経済的利益があるかどうか明確でない。
    3. 希少な人間の才能と経済資源を他の重要なプロジェクト (社会問題や環境問題) から流用することになる。
    4. 現在火星に生命がいるかどうかは分かっていない。；火星固有の生命を絶滅させないためにも、行うべきではない。
    5. 科学的探究や将来の別の用途のため、現在の状態を保つほうが望ましい。

\*1 生物資源 (bio) の量 (mass) を表す概念で、一般的には「再生可能な、生物由来の有機性資源で化石資源を除いたもの」。  
<http://www.biomass-hq.jp/> - バイオマス情報ヘッドクォーター

6. プロジェクトの過程で何か問題が起こったら取り返しがつかない。
  7. 人間は地球環境を悪くしてきた。他の惑星を運営できると考えるのはおこがましい。
  8. 地球化が成功したとすると、火星は軍事や経済にとって魅力的なターゲットになるかもしれない。 ; これは現在よりも多くの社会政治学的な問題を生み出す。
  9. 解決できない、政治や法律の問題があるかもしれない。
  10. 火星の生物圏でどのような進化が起こるか予測不能である。 ; 人間や地球に害を及ぼすかもしれない。
  11. この様なプロジェクトは邪悪で、天罰を受けるかもしれない。
- ここであげたような論点に着目し、自分なりの見解を持ってほしい。現在火星の地球化は不可能だが、詳細について議論する時間は十分にある。

## 意図せずに生物を火星に送り込む

### 火星に送り込まれる生物

- 意図しないで火星に生物を送り込むことがある。探査機や調査に行った人間を通して輸送される。
- 現在火星に生物がいるか調査中であるので、これは重要な問題である。
- 1967年、アメリカと(当時の)ソビエト連邦により生物汚染に関する条約が結ばれた。
  - 火星に生命がいるか調査している間は、火星を地球上の生物で汚染しない。
  - 探査機を火星に送る場合は、付着している微生物の数を 1000 以下にしなくてはならない。

### Viking の汚染対策

- 生物を取り除くために、表面と内部パーツをアルコールで洗浄。
- 生物汚染を最小限に抑えるため、特別に用意された無菌室で手術服を着た技術者がパーツを組み立てる。
- 内部にいるバクテリアを減らすために加熱。これだけでは不十分だが、“汚染生物数”の数を 1/10000 にできる。
- 組み合わせることにより“汚染生物数”を十分に減らすことができる。

### 現在は

- 火星では地球上の生物は繁殖できない(少なくとも Viking が訪れた場所では)。表面への紫外線によりほとんどのバクテリアが死ぬ。土壌中の酸化剤により有機物は破壊される。
- 探査機が火星へ着陸する場合、そのほとんどは、無菌室でアルコール消毒すれば十分。温泉地などで生物の探索を行う場合はこれでは不十分。火星の生命が存在するかもしれない。

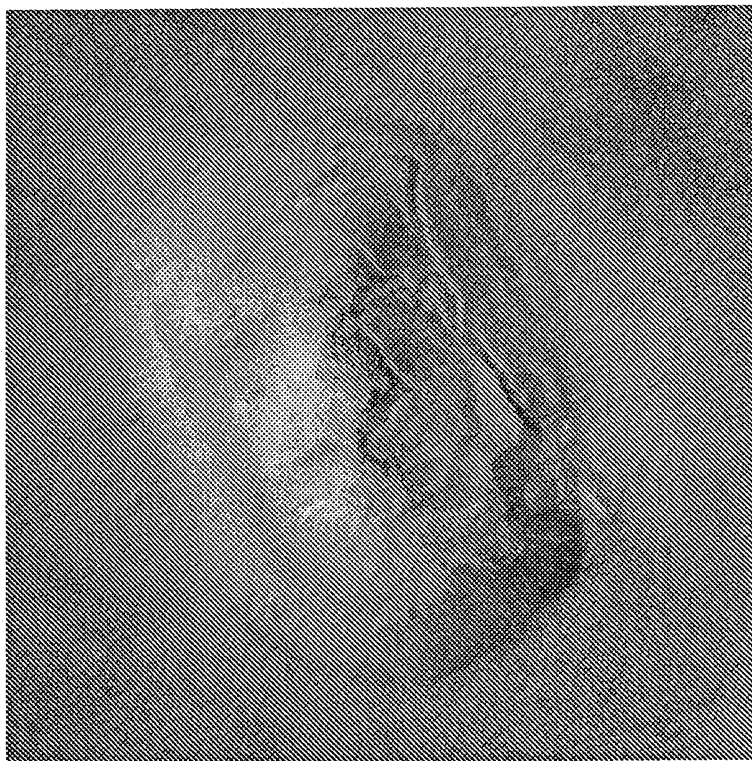
## 火星の人面岩

### 人面岩について

- 火星に文明があった証拠として“人面岩”の存在が考えられる。
- 大量にクレーターのある南半球の高地と、若い火山性の北半球の低地との中間に存在。(Figure 10.3)
- 直径 1 km 位。ヘルメットをかぶっているように見える (または“勇敢な王子様”の髪型)。宇宙をじっと見つめている。(Figure 10.4)
- 知的な生物が作ったと考えるより、地質学的過程でできたと考えるほうが妥当。
  - 付近に同じ様なサイズと形を持つものが多数存在。外観の詳細のみ異なる。

figure 10.3 火星の人面岩。写真の右上に存在。要塞とピラミッドのように見えるもののすぐそばにある。顔の左側にある“ドーナツ”は人工的に作り出した楽器である。(NASA photo)

figure 10.4 火星の人面岩の拡大図。(NASA photo)



マーズ・グローバル・サーベイヤーによる人面岩の写真