

# 火星のテラフォーミング

— 2012年度 卒業論文 —

09S1-002 秋葉 龍佑  
明星大学工学部物理学科  
天文学研究室

# 目次

要旨	p.3
はじめに	p.3
第1章 火星	
1.1 火星の環境	p.4
1.2 火星の探査	p.6
1.3 火星の地形	p.6
第2章 水の存在	
2.1 地形的証拠	p.8
2.2 地質的証拠	p.10
2.3 極冠と雲	p.11
第3章 テラフォーミング	
3.1 テラフォーミングする上での課題	p.12
3.2 温室効果ガスを用いて大気圧を上げる	p.13
3.3 鏡を用いて大気圧を上げる	p.14
3.4 その他の変化	p.16
第4章 まとめ	p.17
謝辞	p.18
参考文献	p.18

## 要旨

本研究では、火星がテラフォーミングの対象として考えられるようになった所以と、現在の火星の環境、現段階で考えられているテラフォーミングの方法を学び、実際にテラフォーミングを行った際に、どのようなことが問題になるのか、どのくらいの時間がかかるのか検証し、その可能性について考察した。

その結果、火星にはかつて温暖な気候があり、液体の水が存在していたことがわかった。また、火星をテラフォーミングするには膨大な費用と時間がかかるため、今すぐに実現するのは困難であることがわかった。しかし、これまで人類が生み出してきた技術をもってすれば、将来的に実現できる可能性があることは確かである。

## はじめに

火星は、地球型惑星に分類される赤い惑星で、第二の地球として注目を浴び、これまでに数多くの探査機が火星に向けて打ち上げられた。

惑星の環境を人為的に変化させ、人類の住める星に改造する、いわゆる“テラフォーミング”の考え方は1961年に天文学者カール・セーガンが金星の環境改造に関する論文「惑星金星」を発表したのが始まりとされている。以来世界中の研究者が研究を開始した。1976年にテラフォーミングをテーマにしたNASAによるシンポジウムが開催され、1991年にはネイチャー誌にNASAのクリストファー・P・マッケイらによる火星のテラフォーミングに関する論文が掲載された。テラフォーミングの研究はすなわち地球環境の研究でもあり、地球の環境破壊の修復にテラフォーミングの技術を応用することも考えられている。

火星は、地球に似た環境であり、地球のように改造できればいずれ人類が移住できるかもしれないということで一時話題になった。しかし私は、このことに関して無知であり、テラフォーミングの具体的な手段や費やす時間などを明らかにしたいと思ったのが、本研究を始めるに至った動機である。

本研究ではまず、火星がテラフォーミングの候補惑星として考えられるようになった所以を調べ、現在の火星の環境を把握し、これまでの探査の歴史、テラフォーミングするにあたっての問題点を学んだ。そして、C・マッケイらの論文に紹介されていたいくつかのテラフォーミングの方法について、実際にかかる時間などを検証し、その可能性について考察した。

## 第1章 火星

### § 1.1 火星の環境

太陽系第四惑星である火星は、大きさは地球の半分、質量は地球の10分の1の惑星である。表面積は地球の陸地の面積とほぼ等しく、1日の長さは24時間程、太陽に対して自転軸を傾けたまま公転していて四季が存在するなど、地球と似通った点も多い。

しかし、火星の大気は希薄で地表面で6hPaである。(地球は1013hPa)これは、大気が太陽風の影響を受けて宇宙空間に散逸しているためと考えられる。また、主成分は二酸化炭素が占めているが、大気が希薄なため温室効果は働いていない。そのため、火星の平均気温は低い。

火星の基本データ

太陽からの距離	1.52AU(天文単位)
火星の赤道半径	3400km (地球の約半分)
火星の質量	$6 \times 10^{23}$ kg (地球の10分の1)
火星の重力	$3.71\text{m/s}^2$ (地球の重力の約38%)
火星の1年	687日
火星の1日	24時間39分35秒
自転軸の傾き	25.2度 (地球は23.5度)
火星の表面積	$1.44 \times 10^8 \text{km}^2$ (地球の陸地の面積とほぼ等しい)
火星の大気組成	二酸化炭素 95%、窒素 2.7%、アルゴン 1.6%
火星の大気圧	6hPa (地球は1013hPa)
平均気温	-50°C
最高気温	約20°C (赤道付近)
最低気温	-130°C

火星の大気にはマイクロサイズの塵が浮遊している。数年に一度、地表から巻き上げられた微粒子によって砂嵐（ダストストーム）が発生する。火星大気には水分が少ないため、一度発生した砂嵐は拡大し、時には全球を覆うことがある（図 1.1.1）。

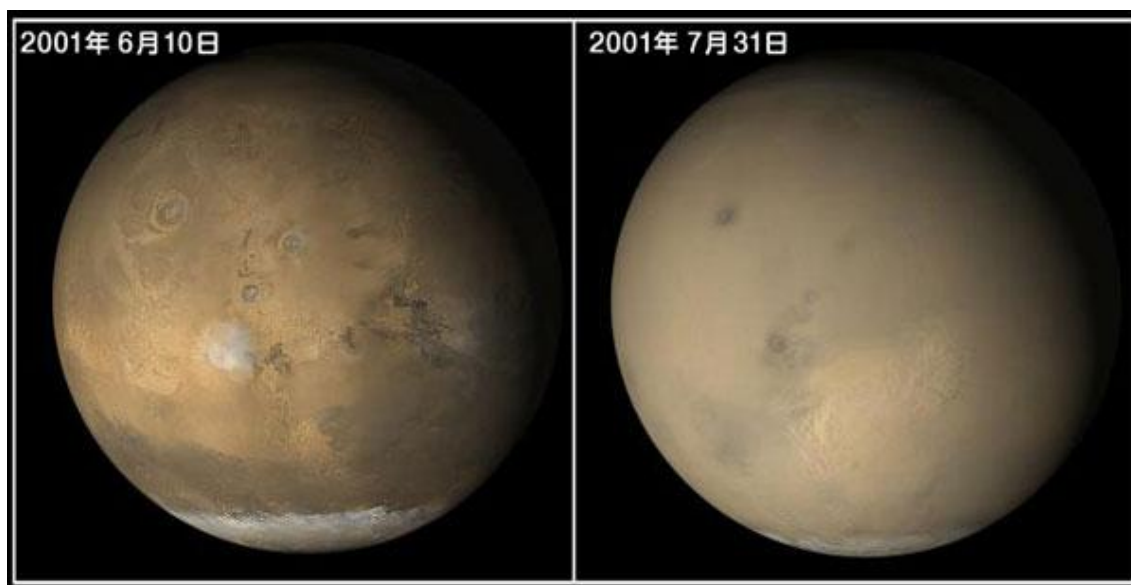


図 1.1.1 火星の砂嵐（ダストストーム）の様子 /NASA 提供

余談になるが、火星はフォボス（図 1.1.2）とダイモス（図 1.1.3）という 2 つの衛星を抱えている。フォボスは太陽系の惑星の衛星の中で最も主星に近く、火星の表面からおよそ 6000km 以内の軌道を回っている。また、火星の自転より速く公転しているため、フォボスは火星の潮汐力によって徐々に火星に引きつけられ、いずれ火星の表面に衝突するか、破壊され火星の環になると考えられている。この 2 つの衛星は、火星の重力によって捕捉された小惑星だと考えられている。



図 1.1.2 衛星フォボス /NASA 提供



図 1.1.3 衛星ダイモス /NASA 提供

## § 1.2 火星の探査

これまでに火星の地表や気候、地形を研究するために、ソ連やアメリカ、ヨーロッパ、日本によって数多くの探査機が火星に送り込まれた。しかし、およそ 2/3 がミッション前に、またはミッション直後に何らかの失敗を起こしている。この失敗の一部は技術上の問題によるものと考えられるが、原因不明の失敗や交信が途絶えたものも多く、研究者の中には地球と火星の間に「バミューダトライアングル」があるのではないかという者もいた。

1965年7月アメリカの探査機マリナー4号が世界で初めて火星接近に成功し、21枚の写真を撮影して火星表面の様子を地上に送ってきた。また、世界で初めて火星の周回軌道に入ったのは1971年米マリナー9号で、流氷によって作られたと思われる地形など、多くの河の痕跡の撮影に成功した。日本は1998年に探査機のぞみを打ち上げたが、機器トラブルが発生し、周回軌道への投入を途中で断念した。

## § 1.3 火星の地形

火星の赤道付近に、タルシス台地と呼ばれる巨大な溶岩台地があり、その西側には標高の高い火山が存在する。タルシス台地は今から35億年以上前に形成されたと考えられている。タルシス台地の中央にはマリネリス峡谷と呼ばれる巨大な割れ目があり、その東端から洪水地形が北極平原に続いている。洪水地形はマリネリス峡谷の北側の凹地からも北へ続いている。マリネリス峡谷の中央部は、東端よりも低いために、流水のみが峡谷を作ったとは考えにくい。構造的な峡谷を開く活動や、火山活動が存在した可能性が高い。

火山帯はおもに火星の北半球に集中している。オリンパス山、タルシス火山列、エリシウム山といった火山がある。オリンパス山やタルシスの3火山の標高は25kmを超えていて、山頂付近には明瞭なカルデラがある。数千万年程度の年代の溶岩流地形があることから、火星の火山の一部は現在も活動を続けていると考えられる。しかし、地球や金星と比較すると、天体全体に及ぶような火山活動ははるかに弱い。これは天体が小さいために内部の冷却が進んだためだと考えられる。

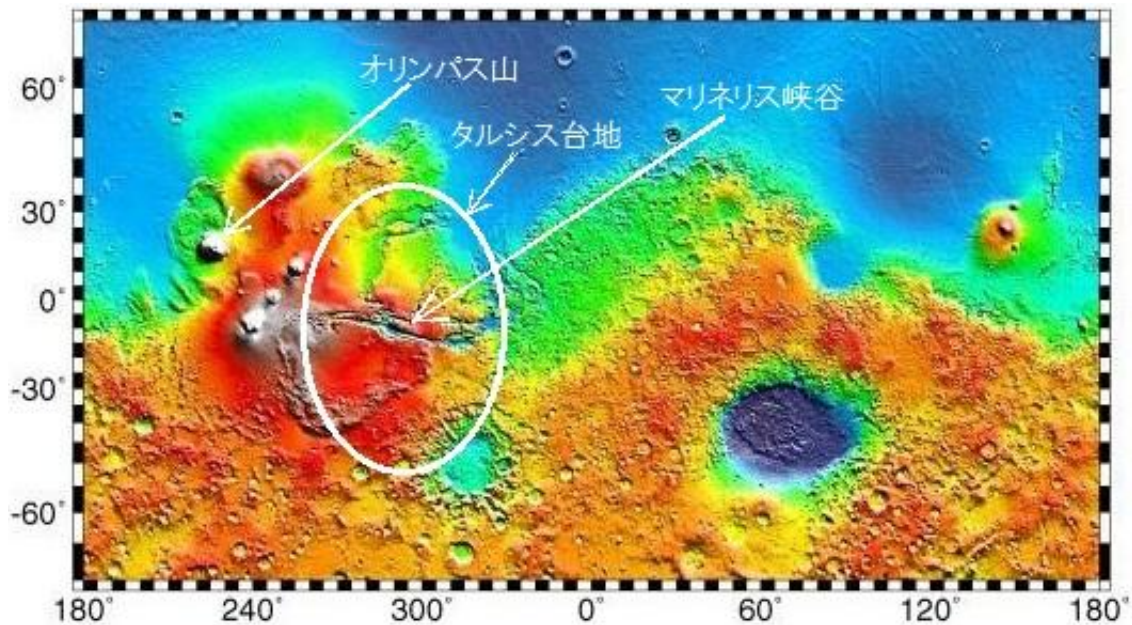


図 1.3 火星の地形図 /NASA 提供

南北で、高度・クレーターの数に大きな違いがある

火星の地形は南北で大きく異なる（図 1.3）。南半球は、標高が高く衝突クレーターに覆われている。北半球は相対的に標高が低く、クレーター密度が低い。太陽系の他の固体天体と同様に、表面のクレーター密度が高いほど、その地域は相対的に古い。

北半球と南半球の性質が極端に異なるという火星の「二分性」について、これまで、何らかの理由で火星の内部が溶け、地殻運動による「マントル流動説」と、過去に何らかの天体が火星に衝突した「巨大天体衝突説」の 2 つの仮説が立てられていたが、「マントル流動説」の方が有力とされていた。

そんな折、2008 年米・マサチューセッツ工科大学の研究チームは、探査機による重力場と高度の観測結果を分析し、火星の北半球から直径 8500 km、火星の 40% をカバーできる、太陽系最大の楕円形のクレーターを特定。つまり、北半球は丸ごと一つ、巨大天体の衝突によって形成されたクレーターだということだ。さらに、その天体衝突によって北半球が滑らかになったのではないかと考えている。巨大天体の衝突は、南北で地殻の厚さや磁場に差異があることについても説明ができるようだ。

## 第2章 水の存在

### § 2.1 地形的証拠

現在の火星表面は、寒冷・低圧で液体の水が安定に存在することができない。しかし、軌道船の観測から火星表面にさまざまな河川状の地形が広がっていることが明らかになった。大きく分類すると、巨大な洪水地形であるアウトフローチャンネル(図 2.1.1)と樹枝状の谷地形であるバレーネットワーク(図 2.1.2)に分けられる。

アウトフローチャンネルは大きなものになると、幅数 10~100 km、長さは数 1000 km に及ぶ。とくに火星赤道域のマリネリス峡谷周辺から北極平原へ向けて何本かのアウトフローチャンネルが流れている。アウトフローチャンネルの源領域は火星の火山の地域に近いために、火山活動が地下の氷を融解させて、洪水を引き起こしたというモデルがある。また、北極平原に流れた大量の水は、一時的に海を存在させて、火星全域を温暖にしたという主張もある。

一方、火星の南半球のクレーターに覆われた古い地域には、幅が狭い樹枝状の谷(バレーネットワーク)が広く分布している。これはアウトフローチャンネルよりも古い約 40 億年前の谷であると考えられている。火星の広い地域に分布しているため、火星全体が温暖な環境であったために生成されたと考えられている。個々のバレーネットワークの源は、地下水の流出を表す形状を示している。谷の中には、河床移動や段丘地形もあり、長期間にわたって、流水活動が続いたことを示している。



図 2.1.1 アウトフローチャンネル  
/ESA 提供

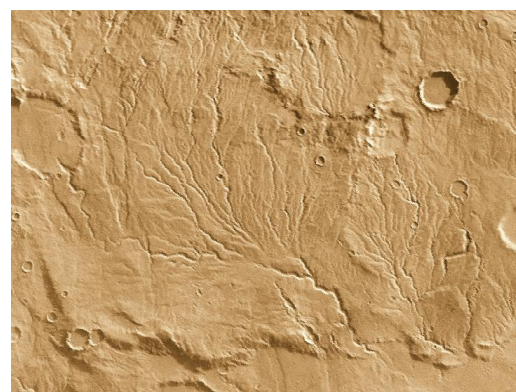


図 2.1.2 バレーネットワーク  
/NASA 提供





図 2.2.4 探査機マーズ・グローバル・サーベイヤーが撮影した  
ガリーの地形 /NASA 提供

2004年に「ガリー」と呼ばれる新しい溝地形の存在が明らかになった。ガリーは、バレーネットワークの峡谷の壁面や、クレーター内部の急斜面に存在する長さ数kmの溝地形である(図 2.2.4)。しばしば同じ場所に平行して多数のガリーが存在する。塵の沈積が少なく、以前観測を行った時には確認されなかったが、再度同じ場所で観測を行った際に発見されたため、比較的新しい地形であると考えられる。ガリーの成因については当初は、地下の帯水層から流出された水により形成されたと考えられていたが、高緯度帯の低温状態では地下に液体の水が存在することは困難である。しかし、仮にガリーの成因が水の流出ならば、現在の火星で流水活動が継続していることになる。

## § 2.2 地質的証拠

これまで、火星の水の存在を調べるため数多くの探査機が送り込まれたが、十分な成果は得られなかった。そんな中、2004年1月に火星探査機「スピリット」、「オポチュニティ」が火星に着陸し、表面探査における新たな歴史を切り開いた。スピリットの着陸地点は、太古の湖と考えられる直径100 kmほどのグセフクレーター（図2.2.1）である。ここには、マアディム谷という古いバレーネットワークに分類される200 km余りの長さの河川跡が流れ込んでいる。オポチュニティはイーグルクレーター（図2.2.2）という直径数10mの小クレーター内に着陸した。

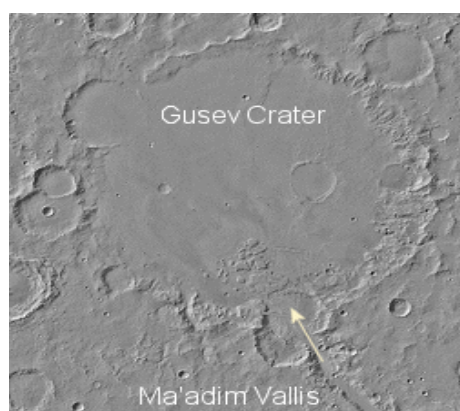


図 2.2.1 グセフクレーター  
/NASA 提供

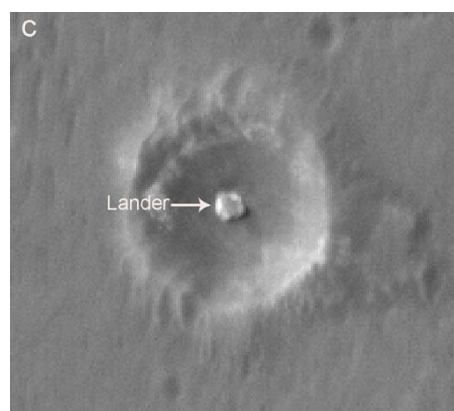


図 2.2.2 イーグルクレーター  
/NASA 提供

イーグルクレーター内部には、層状の堆積岩構造の岩石の露頭が存在した。これまでに火星表面で観察された暗色の火山性岩石と異なり、周囲の土壌よりも明るい色を示す。層状岩石の分析からは、堆積岩中に酸化鉄からなる球粒物質が含まれること、また、過去に水が干上がった証拠と考えられる含水硫酸塩鉱物も検知された。オポチュニティはその後、エンデュランス（図2.2.3）、ビクトリアといったクレーターでも堆積岩地層を発見している。スピリットもグセフクレーター内で水成堆積物の証拠を確認した。

「スピリット」と「オポチュニティ」は、火星表面のほぼ反対の位置に着陸している。その双方で堆積岩が発見されたことから、火星初期の温暖環境は天体の広範囲で維持されていたと考えられる。

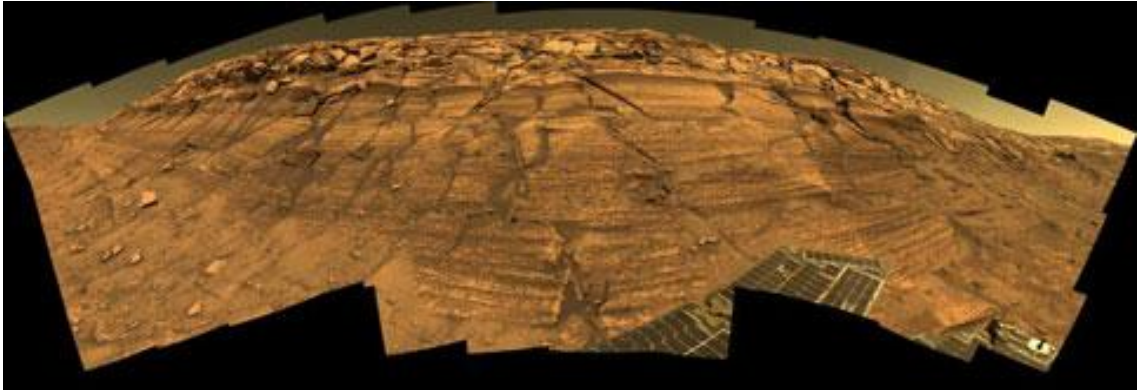


図 2.2.3 オポチュニティが撮像したエンデュランスクレーター内部のバーンズ・クリフと呼ばれる堆積岩地層 /NASA 提供

## § 2.3 極冠と雲

火星には南北に極冠というのがある。この極冠は水の氷でできていて、二酸化炭素の氷（ドライアイス）に覆われた形で存在する。極冠の詳細画像からは、細かい成層構造が存在することが明らかになっている。氷が沈殿するときには大気中の塵も集めて落下する。また、蒸発するときには塵は残される。氷の凝縮・蒸発が何度も起きると、結果として塵は蓄積する。そのため、極冠の成層構造は過去の火星の気候変動を記録していると考えられる。

また、火星では時折雲が発生することがある。火星の雲は地球の雲と同じように氷の粒でできている。したがって、雲が存在するということは、火星に水の循環システムがあるという重要な証拠になる。

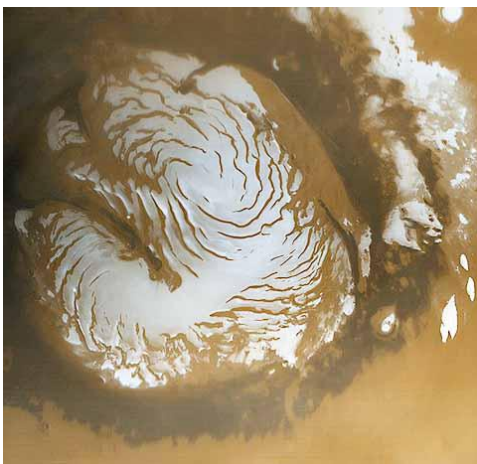


図 2.3.1 北極冠 /NASA 提供



図 2.3.2 南極冠 /NASA 提供

## 第3章 テラフォーミング

### § 3.1 テラフォーミングする上での課題

前章で述べたような火星の環境でテラフォーミングを行う上で、課題となるのは以下に示すようなものである。

- ・ 温室効果が働かないほど希薄な大気
- ・  $-50^{\circ}\text{C}$ という低気温
- ・ 現在の環境では安定に存在しない液体の水
- ・ 人類が呼吸するのに必要な酸素が不十分

まず先に考えなければならないのは、大気圧、そして気温である。これらの値を上げないことには、液体の水を維持することができないし、酸素を作り出すことも難しい。

本研究では、大気圧を上げる手段として「温室効果ガス」、「鏡による太陽光の照射」の2つを検証してみる。この2つの方法はNASAのクリストファー・P・マッケイらが1997年に出版した

「**Technological Requirements for Terraforming Mars**」

という論文に掲載されていたものであり、これについて詳しく検証してみた次第である。

### § 3.2 温室効果ガスを用いて大気圧を上げる

大気圧を上げる方法の一つは、温室効果ガスを直接火星大気中に散布するというものである。これにより、気圧と同時に気温も上昇する。この方法に用いる温室効果ガスはメタン (CH<sub>4</sub>)、パーフルオロカーボン (PFC)、六フッ化硫黄 (CF<sub>6</sub>) である。これらは二酸化炭素に比べ温室効果が強く、寿命が長い。

物質名	GWP※	寿命
メタン (CH <sub>4</sub> )	21	10 年
パーフルオロカーボン (PFC)	6500	5 万～10 万年
六フッ化硫黄 (CF <sub>6</sub> )	23900	3000 年

※GWP・・・地球温暖化係数

二酸化炭素による温室効果を 1 としたときの温室効果の強さ

まずメタンに関して、2003 年に地上からの望遠鏡による観測で大気にメタンが含まれている可能性が浮上し、2004 年の探査機の調査による大気の解析でメタンの存在が確認された。これは、火星にメタンのガス源が存在するという興味深い事実を示唆している。ガスの生成源としては火山活動や彗星の衝突、あるいはメタン菌のような微生物の形で生命が存在するなどの可能性が考えられているが、いずれも未確認であり、今現在調査中である。

また、パーフルオロカーボン、六フッ化硫黄について、これらを形成するのに必要な化学物質はすでに火星に存在していることが確認されている。そのため、火星に大気を作り出す工場のようなものを建造するという方法が、現在検討されている。

ここで、温室効果に必要な大気圧が 1 気圧だと仮定してみる。

そのとき、1 気圧の圧力を与える大気量は、

$R = \text{火星の半径} = 3400 \text{ [km]}$  ,  $\sigma = \text{面密度} = 1 \text{ [kg/cm}^2\text{]}$   
として、

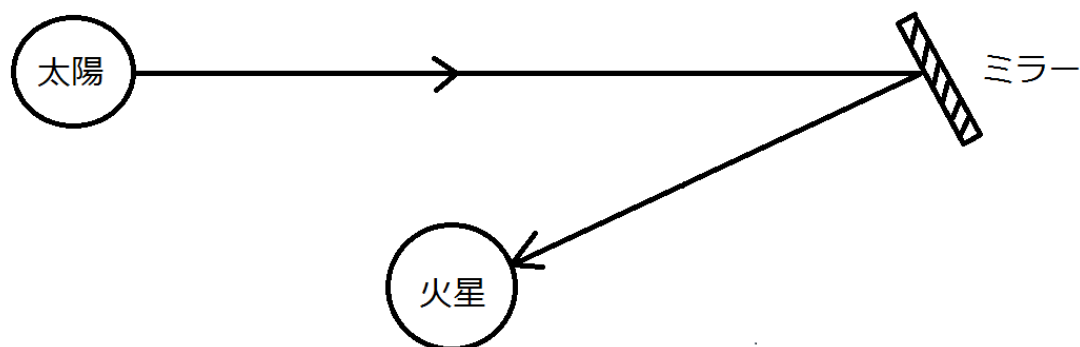
$$M = 4\pi R^2 \times \sigma = 1.5 \times 10^{15} \text{ [t]}$$

となる。

これは地球大気のおよそ 30% の量である。

### § 3.3 鏡を用いて大気圧を上げる

大気圧をあげるもう一つの方法は、巨大な鏡を宇宙空間に設置し、極冠に太陽光を照射するというものだ。これにより、極冠のドライアイスが昇華し、二酸化炭素と水蒸気が生み出される。



巨大な鏡と言っても、宇宙空間に浮かせておくには限界がある。そこで、この方法で用いる鏡は、いくつもの人工衛星のようなものを用いて宇宙空間に浮かべ、それにより太陽光が極冠全体に当たるようにする。

ここで、極冠にある全てのドライアイスを気化できたと仮定してみる。

極冠のドライアイスの体積、密度がそれぞれ、

$$V = 1.7 \times 10^{21} \text{ [cm}^3\text{]} , \quad q = 1.562 \text{ [g/cm}^3\text{]}$$

であるから、極冠にあるドライアイスの量は、

$$m = V \times q = 2.7 \times 10^{15} \text{ [t]}$$

となる。

前節の計算から、1気圧の大気圧を与える大気量が、

$$M = 1.5 \times 10^{15} \text{ [t]}$$

であるから、極冠にあるドライアイスのうち6割ほどを気化できれば、十分1気圧の大気を作り出せると考えられる。

では、極冠にある全てのドライアイス気化した場合、どれだけの時間がかかるのだろうか。

火星は太陽から 1.52AU(天文単位)離れていることから、火星に届く太陽放射エネルギーは、

$$1.38 \times 10^3 [\text{w/m}^2] \times \frac{1}{(1.52[\text{AU}])^2} \doteq 6 \times 10^2 [\text{w/m}^2]$$

極冠の面積が 144 万  $\text{km}^2$  であるから、極冠にあたる全太陽放射エネルギーは

$$F = 6 \times 10^2 [\text{w/m}^2] \times 144 \times 10^{10} [\text{m}^2] = 8.6 \times 10^{14} [\text{J/s}]$$

である。また、極冠のドライアイスの質量、比熱はそれぞれ

$$m = 2.7 \times 10^{21} [\text{g}], \quad c = 573 [\text{J}/(\text{g} \cdot \text{K})]$$

であるから、熱容量は

$$X = mc = 2.7 \times 10^{21} [\text{g}] \times 573 [\text{J}/(\text{g} \cdot \text{K})] = 1.5 \times 10^{24} [\text{J/K}]$$

現在の極冠の気温が 147 K(−126°C)、ドライアイスの昇華温度が 194 K(−79°C) であるから

$$\Delta T = 50 [\text{K}]$$

として、熱量は

$$Q = X \Delta T = 1.5 \times 10^{24} [\text{J/K}] \times 50 [\text{K}] = 7.5 \times 10^{25} [\text{J}]$$

となる。

これより、極冠にある全てのドライアイス気化するのにかかる時間は、

$$t = \frac{Q}{F} = \frac{7.5 \times 10^{25} [\text{J}]}{8.6 \times 10^{14} [\text{J/s}]} = 8.7 \times 10^{12} [\text{s}] = 27 \text{ 万年}$$

となる。

### § 3.4 その他の変化

気体の状態方程式より、気圧と気温は比例関係にある。そのため大気圧が上昇するにつれて気温も上昇し始める。現在、火星の赤道付近では 20°C 程度まで気温が上昇している。そのため、テラフォーミングが完了すれば、火星全体の気温も 20°C 程度まで上昇するだろうと予想している。

仮に、テラフォーミングが進み、ある程度火星の大気が暖かくなり、極冠や地中の氷が溶け、液体の水が維持できる環境になったとすると、火星に植物を送り込むことが可能になる。これは、火星の環境でも繁殖できるように品種改良された植物を送り込み、植物の作用によって人間の呼吸に必要な酸素を生み出すというものである。

中でも注目しているのは藻類と呼ばれる植物である。藻類の生息環境は様々である。特に淡水や海水といった水圏では植物プランクトンとして水中の生態系における一次生産者として重要な位置を占める。低温に耐えるものは、極圏の氷上や氷中に冰雪藻（スノーアルジー）として、流氷下面などに海氷藻類（アイスアルジー）として存在する。反対に摂氏 40°C 以上の温泉環境に生息する温泉藻というのものもある。これらを用いて、長い年月をかければ人類が呼吸できる程の酸素が生み出されるだろう。



## 第4章 まとめ

現在の火星は、大気が希薄なため温室効果が働いていない。そのため平均気温 $-50^{\circ}\text{C}$ という低気温である。しかし、地形的・地質的証拠などから、かつての火星が液体の水を維持できるような温暖な気候であったことは明らかである。また、水は極冠に固体の状態が存在し、地中には液体の水が存在する可能性があることがわかった。

さらに、火星をテラフォーミングする上で問題となるのは、温室効果が働かないほど希薄な大気、平均 $-50^{\circ}\text{C}$ という低気温、現在の環境では安定に存在しない液体の水、人類が呼吸するのに必要な酸素が十分でないということであることがわかった。

また、C・マッケイらが提案した火星のテラフォーミングの手段について検証した結果、現在火星で存在が確認されている物質、例えばドライアイスやメタンなどを用いてテラフォーミングすることは可能であるが、それには膨大な費用と時間がかかり、今すぐ実現するのは難しいと考えられる。しかし、理論的には筋の通ったテラフォーミングの手段であり、これまで人類が生み出してきた技術をもってすれば、将来的には実現できる可能性があることは確かである。

火星では現在、探査機キュリオシティをはじめとして、各国がさまざまな調査を行っている。今後、テラフォーミングに繋がる新たな発見や、生命の存在に関わる興味深い証拠が見つかるかもしれない。引き続き、世界の宇宙開発に関する動向に着目していきたい。

## 謝辞

研究を進めるにあたり、文献の紹介や研究に対するアドバイスなど、様々なご教授と励ましの言葉をくださった祖父江義明教授、小野寺幸子助教、日比野由美さん、1年間ゼミや研究発表会において我々4年生を陰でサポートし、見守ってくださった同研究室院生の先輩方に、この場を借りて深く感謝申し上げます。また、共に研究活動に勤しんだ同研究室4年生の皆さん、1年間お疲れ様でした。

皆さんのおかげで、大学生活を有意義に過ごすことができました。ありがとうございました。

## 参考文献

- 竹内薫：火星地球化計画 実業之日本社 (2004)
- 渡部潤一：シリーズ現代の天文学第9巻 太陽系と惑星 日本評論社 (2008)
- 国立天文台：理科年表平成25年 丸善出版
- Christopher P.Mckay、Robert M.zubrin：  
Technological Requirements for Terraforming Mars (1997)

Web サイト

- <http://www.sorae.jp>
- <http://www.astroarts.co.jp>
- <http://www.hirahaku.jp>
- <http://www.nasa.gov>
- <http://www.esa.int>