

法政大学学術機関リポジトリ

HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

火星のテラフォーミング

著者	谷藤 敬
出版者	法政大学大学院理工学研究科
雑誌名	法政大学大学院紀要. 理工学・工学研究科編
巻	59
ページ	1-8
発行年	2018-03-31
URL	http://doi.org/10.15002/00021613

火星のテラフォーミング

TERRAFORMING MARS

谷藤敬

Kei Tanifuji

指導教員 春日隆

法政大学大学院理工学研究科システム理工学（創生科系）修士課程

In this study, I carried simulation of terraforming Mars. Terraforming refers to artificially changing the environment of celestial bodies so that human beings can live.

Key Words : *Dry ice*

1. 序論

本研究では、火星のテラフォーミングのシミュレーションを行った。テラフォーミングとは、人為的に天体（主に惑星と衛星）の環境を変化させ、人類が住めるようにすることをいう。

2. 方法

研究方法については、関連論文を解説し、そこに記述されているテラフォーミングの方法や根拠をもとに、独自のテラフォーミングプロセスを考察していく。

人類が火星に住めるようにするには

1. 表面温度の上昇（平均で -5°C 以上）
2. 大気圧の増加（ $0.24\sim 4$ 気圧）
3. 海の形成
4. 大気組成の最適化（地球と同じように）
5. 紫外線照射の削減

以上の大きく分けて5項目をクリアする必要がある。

ある。

この中でも本研究では1と2に注目してシミュレーションを行い、目標としては火星を二酸化炭素ほぼ100%で1気圧の惑星にし、そのための適切な鏡の大きさと所要年数を導き出す。

3. 火星の概要

（1）地球と火星の比較

太陽系第4惑星である火星は地球の約半分の大きさで、地球より太陽から遠く、大気圧も地球に比べ極端に低いため、気温も低い。しかし、軸の傾きがほとんど等しく、これにより四季が存在する。また、低温ながらも日中の赤道付近では20度を超えることもあり、太陽系の天体の中でも特に地球に似通っているといえる。表1[1]より火星に人類が移住する上で、大きな障害になるのは気圧の低さ、気温の低さ、大気組成の違いであることがわかる。

ドライアイスの面積	$1.44 \times 10^{12} \text{m}^2$
-----------	----------------------------------

表1 火星と地球の比較データ

	地球	火星
太陽からの平均距離	1AU	1.52AU
赤道半径	6380km	3400km
表面積	$5.1 \times 10^8 \text{km}^2$	$1.44 \times 10^8 \text{km}^2$
軸の傾き	23.5度	25度
1年の長さ	365.25日	687地球日
1日の長さ	23時間 56分	24時間 37分
表面重力	9.8m/s^2	3.71m/s^2
脱出速度	11.19km/s^2	5.03km/s^2
平均気温	15°C	-55°C
最高気温	58°C	30°C
最低気温	-88°C	-140°C
大気圧	1013.25hPa	6.08hPa
大気組成	CO ₂ :96%, Ar:1.9%, N ₂ :1.9%, etc	N ₂ :78.1%, O ₂ :21%, Ar:0.9%, etc
衛星数	1	2
アルベド	0.2	0.3

(2) 火星の極冠

火星には極冠と呼ばれる大量の氷とドライアイスが、南極と北極部分に存在する。(表2) 極冠は氷の上にドライアイスが被さっている構成になっている。NASA と ESA のマーズエクスプレスオービターという氷の厚さをマッピングできるレーダー機器で測定された。

表2 極冠のドライアイスのデータ

ドライアイスの体積	$1.7 \times 10^{21} \text{cm}^3$
ドライアイスの密度	1.562 g/cm ³
ドライアイスの質量	$2.7 \times 10^{15} \text{t}$

4. テラフォーミング

(1) テラフォーミングの方法の概要

序論でも示したが火星をテラフォーミングするには以下の5項目をクリアする必要がある。

1. 表面温度の上昇 (平均で-5°C以上)
2. 大気圧の上昇 (0.24~4 気圧)
3. 海の形成
4. 大気組成の最適化 (地球と同じように)
5. 紫外線照射の削減

方法の大まかな流れとしては、大気圧を上昇させるために、火星の傍に巨大なミラーを設置し太陽光を反射させ、極冠のドライアイスに照射し気化させ、二酸化炭素の大気を大量に生成し気圧を上げる。気圧が上昇することで気温も上昇する。すると極冠の氷が溶け、海が形成される。

1 気圧は約 1013hPa であるから 1 m²当たりにかかる力は約 101300N である。[2]
地球上の 1 m²の上にある大気の質量は

$$N = 1 \text{ m}^2 \text{ 当たりにかかる力} = 101300 \text{ [N]} \quad (1)$$

$$g = \text{地球の重力加速度} = 9.8 \text{ [m/s}^2] \quad (2)$$

として

$$N/g \approx 10000 \text{ [kg]} \quad (3)$$

となる。

火星の大気圧を 1 気圧にするために必要な大気量は

$$A_m = \text{火星の表面積} \approx 1.44 \times 10^{14} \text{ [m}^2] \quad (4)$$

$$N/g = \text{地球上の } 1 \text{ m}^2 \text{ 上にある大気の質量} \approx 10000[\text{kg}] \quad (5)$$

として

$$A_m \times (N/g)^2 \approx 1.5 \times 10^{18}[\text{kg}] \\ = 1.5 \times 10^{15}[\text{t}] \quad (6)$$

となる。

そして表 2 よりドライアイスの質量は $2.7 \times 10^{15} \text{t}$ なので、このうちの約 6 割気化させると 1 気圧になる。ちなみにすべて気化してしまった場合には約 1.8 気圧になってしまうが、これは水深約 8 メートルほどであるが、圧縮空気を使ったスキューバダイビングで、30 メートルまでなら安全に潜水できるため、4 気圧までなら人間は耐えられる。

(2) 「鏡による太陽光の照射」

火星に届く太陽放射のエネルギーは、火星と太陽の距離は 1.52 AU なので

$$E_e = \text{地球に届く太陽放射のエネルギー} \\ = 1.38 \times 10^3 [\text{W/m}^2] \quad (7)$$

として、太陽放射のエネルギーは距離の二乗に反比例して薄くなっていくので

$$E_e \times \left(\frac{1}{1.52[\text{AU}]}\right)^2 \approx 6 \times 10^2 [\text{W/m}^2] \quad (8)$$

となり

$$E_m = 6 \times 10^2 [\text{W/m}^2] \quad (9)$$

とおいておく。

つまり火星の公転軌道を半径とした球面には、

太陽から 600W/m^2 のエネルギーが到達している。そしてそのごく一部を火星は受け取っている。

「鏡による太陽光の照射」の方法とは、火星に当たっていない太陽放射のエネルギーを、鏡を使用し反射させ、火星に照射するということである。

(図 1)

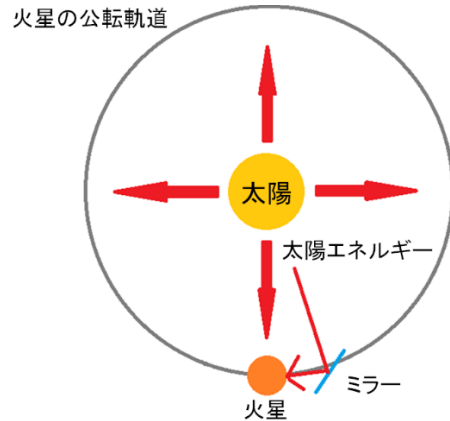


図 1 「鏡による太陽光の照射」の方法の模式図

5. 検証

(1) ドライアイスの気化にかかる年数

ドライアイスの気化にかかる年数を求めるにあたって、秋葉 龍佑の卒業論文である「火星のテラフォーミング」に記載してある計算方法を参考にした。反射率 100% で、面積が極冠の面積に等しいミラーを用い、火星の両極冠全体に、垂直に太陽放射のエネルギーを照射できたと仮定する。極冠にあたる全太陽放射エネルギー F は

$$A_d = \text{極冠の面積} \approx 1.44 \times 10^{12} [\text{m}^2] \quad (10)$$

$$E_m = \text{火星に届く太陽放射のエネルギー} \\ = 6 \times 10^2 [\text{W/m}^2] \quad (11)$$

として

$$F = E_m \times A_d = 8.6 \times 10^{14} \text{ [J/s]} \quad (12)$$

である。

また、極冠のドライアイスの質量、比熱はそれぞれ

$$m = 2.7 \times 10^{21} \text{ [g]} \quad (13)$$

$$c = 573 \text{ [J/(g \cdot K)]} \quad (14)$$

であるから、熱容量 X は

$$X = mc = 1.5 \times 10^{24} \text{ [J/K]} \quad (15)$$

となる。

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

$$\Delta T = 50 \text{ [K]} \quad (16)$$

として、熱量は

$$Q = X \times \Delta T = 7.5 \times 10^{25} \text{ [J]} \quad (17)$$

となる。

これより、極冠にある全てのドライアイスを気化するのにかかる時間は、

$$t = \frac{Q}{F} = 8.7 \times 10^{12} \text{ [s]} = 27 \text{ 万年} \quad (18)$$

となり 1 気圧分気化させるには 15 万年ほどになる。

(2) ミラーについて

式(18)より反射率 100% で、面積が極冠の面積に等しいミラーを用い、火星の極冠全体に、垂直に太陽放射のエネルギーを照射できたと仮定した

場合、ドライアイスを 1 気圧分気化するのに、15 万年かかることがわかった。

ここで所要年数を縮めることを考える。

所要年数 t は

$$Q = \text{熱量} = 7.5 \times 10^{25} \text{ [J]} \quad (19)$$

$$F = \text{全太陽放射エネルギー} \\ = 8.6 \times 10^{14} \text{ [J/s]} \quad (20)$$

として

$$t = \frac{Q}{F} \quad (21)$$

で導き出すことができる。そのため、全太陽放射エネルギーが増えれば所要年数は減る。全太陽放射エネルギーを増やすためにはミラーの個数を増やす必要がある。ミラーの個数と所要年数の関係は、南北に照射する分 2 個 1 セットとして表 3 のようになった。表を見るとミラーの個数を 10 倍にすると所要年数が 10 分の 1 になっている。これよりミラーの個数が数百個で所要年数が数百年辺りが妥当なラインだと結論づけた。

そして、4t/km³ の密度のミラーを高度 214000km に設置すると太陽光の圧力によって火星を周回せずに静止するため、その高度に設置する。

所要年数 (年)	ミラーの個数 (セット)
150000	1
15000	10
1500	100
150	1000
15	10000
1	150000

表 3 ミラーの個数と所要年数の関係

$$T = 195\text{K} \quad (27)$$

(3) 火星の大気宇宙への飛散速度

かつて火星には濃い大気が存在したという説が有力だ。それが現在ではかなり薄くなってしまっている。この理由がわからないことには、いくら大気を増やしてもまたすぐなくなってしまうかもしれない。

以前は火星の重力が小さいがゆえに宇宙空間へ飛散したと考えるのが一般的であったが、去年 NASA は太陽風が原因だと発表した。[3]

太陽風とは、太陽から吹き付ける高速の陽子や電子のことである。現在は毎秒約 100g ずつ剥ぎ取られている。30 万年で $9.5 \times 10^8 \text{t}$ だ。過去に火星の大気が大量に剥ぎ取られたのは、数十億年という長い年月をかけたのと、太陽が若く活発でありより多くの大気が剥ぎ取られたためである。地球は地磁気の磁場に覆われており、太陽風の直撃を受けずに済んだ。

また、火星の大気は薄く重力も小さいため、最初に気化した二酸化炭素分子は他の分子にぶつからずに進んで宇宙に飛散してしまう可能性がある。そこで二酸化炭素分子一個当たりの平均並進運動速度 v を計算し考察した。

$$E = \frac{3}{2} \cdot k_B \cdot T \quad (22)$$

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{3}{2} \cdot k_B \cdot T \quad (23)$$

から v を求める。 k_B はボルツマン定数として

$$k_B = R/N \quad (24)$$

$$k_B = 1.381 \times 10^{-23} \text{JK}^{-1} \quad (25)$$

$$m = 44 / (6 \times 10^{23}) \text{g} \quad (26)$$

195K は二酸化炭素の昇華温度である。よって

$$v = 10.5 \text{ (m/s)} \quad (28)$$

この速度は火星の脱出速度である 5.02km/s より十分小さいため、火星の重力の小ささによる飛散は考慮しなくてよいと思われる。

(4) 有効放射温度

さて、晴れて 1 気圧で二酸化炭素はほぼ 100% の大気を火星が獲得できたとする。その後について検証した。まず、有効放射温度とは惑星に届く太陽放射のエネルギーとアルベド (大気による太陽光の反射率) によって求めることができる。[] この温度は、惑星の地表の環境や大気による温室効果などは考慮されていない。地表面に吸収される日射のエネルギーと、地表面が出す放射の強さは釣り合うので、単位面積当たりの惑星に届く太陽放射のエネルギーを S 、惑星の半径を R 、惑星のアルベドを A 、 σ = ステファン・ボルツマン定数として [4][5]

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4} \quad (29)$$

$$S(1 - A) \cdot \pi R^2 = \sigma T^4 \cdot 4\pi R^2 \quad (30)$$

によって求めることができる。

ちなみになぜ右辺に 4 がかけられているかというと、惑星に届く太陽放射のエネルギーのうち、惑星が受けているのは、惑星をちょうど半分にした断面積で受けているのに等しい。(図 2) そして、惑星全体の単位面積当たりで受けているエネルギーの平均は、惑星に届く太陽放射のエネルギーの約 1/4 になる。つまり S が 1/4 になっているためである。



図2 火星が断面で太陽放射のエネルギーを受けているイメージ図

では、地球の有効放射温度を求めてみる。式(30)において、 S は地球に届く太陽放射のエネルギーとして

$$S = 1.38 \times 10^3 \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (31)$$

$$A = \text{地球のアルベド} = 0.3 \quad (32)$$

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4} \quad (29)$$

として①に代入し T を求めると

$$T = 255 \text{ K} \quad (33)$$

となる。これは -18°C であり、地球の平均気温は 15°C である。つまり、地球の地表環境と大気には、約 $+33^\circ\text{C}$ の温室効果があることになる。

次に火星の有効放射温度を求める。式(30)において、 S は火星に届く太陽放射のエネルギーとして

$$S = 6 \times 10^2 \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (34)$$

$$A = \text{火星のアルベド} = 0.2 \quad (35)$$

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4} \quad (29)$$

として式(30)に代入し T を求めると

$$T = 214 \text{ K} \quad (36)$$

となる。これは -59°C であり、火星の平均気温は -55°C である。つまり、現在の火星の地表環境と大気には、約 $+4^\circ\text{C}$ の温室効果があることになる。

地球と火星の温室効果に差が出る主な理由として、海と緑地と比較的厚い大気が存在が原因としてあげられる。

仮にもし火星で地球と同じ環境（厳密に言えば同程度の温室効果、アルベド）を実現することができれば、火星の平均気温は -33°C まで上昇するだろう。

ちなみに火星の赤道の断面積と同じ大きさのミラーを1 or 2枚設置し、火星に照射した場合の有効放射温度は、火星に届く太陽放射のエネルギー S を2倍、3倍にすればよいので、①より T を求めると1枚の時は $T = 254 \text{ K}$ 、2枚の時は $T = 281 \text{ K}$ になり、2枚設置すると理論上では、現在の火星の状態でも適度な温度にはなる。

(5) 更なる時間短縮の可能性

ここで更なる時間とエネルギーの節約の可能性を探る。クリストファー・P・マッケイらの「Technological Requirements for Terraforming Mars」[6]から

$$T_{mean} = S^{0.25} \times T_{BB} + 20(1+S)P^{0.5} \quad (37)$$

$$T_{pole} = T_{mean} - \frac{\Delta T}{(1+5P)} \quad (38)$$

$$T_{max} = 1.1T_{mean} \quad (39)$$

$$T(\theta) = T_{max} - (T_{max} - T_{pole})\sin^{1.5}\theta \quad (40)$$

これらを用いる。尚、各項は表4を参照されたい。

T_{mean}	惑星の平均気温 [K]
S	太陽定数 [1]
T_{BB}	現在の火星の黒体温度 (213.5 K)
P	パール (1b=1 気圧)
T_{pole}	極の気温 [K]
ΔT	大気がないときの平均気温と極の気温差 (S=1 の時 $\Delta T=75$)
T_{max}	惑星の赤道の気温 [K]
$T(\theta)$	任意の緯度での気温 [K]

表4 式(37) (38)の各項

T_{pole} が二酸化炭素の昇華温度である 195 K になればいいので、式(38)に $T_{pole}=195$ を代入し必要な圧力を求めると

$$P \approx 0.2b \quad (39)$$

となり、0.2 気圧になるまで太陽光を照射すればよいということになる。この結果を表3に反映し改良すると

所要年数 (年)	ミラーの個数 (セット)
15000	2
1500	20
150	200
15	2000
1	30000

表5 ミラーの個数と所要年数の関係 (改)

表5より数百個ほどのミラーで数十年照射すればよくなり、更に敷居が低くなったことがわかる。そして無事1気圧を達成した場合式(37)より平均気温は -16.5°C になる。赤

道の気温は式(39)より 5.85°C になる。

6. 結論

テラフォーミングをするにあたって、人類が火星に住めるようにするには

1. 表面温度の上昇 (平均で -5°C 以上)
2. 大気圧の増加 (0.24~4 気圧)
3. 海の形成
4. 大気組成の最適化 (地球と同じように)
5. 紫外線照射の削減

の5項目をクリアする必要がある。そこで本研究では「鏡による太陽光の照射」という方法についてシミュレートすることであった。それに際して、上記の項目のうち1と2に焦点を置き、目標としては火星を二酸化炭素ほぼ100%で1気圧の惑星にし、そのための適切な鏡の大きさと所要年数を導き出すことであった。

まず、1気圧にするために必要な大気の総量を、地球の上空にある 1 m^2 当たりの大気の質量と火星の表面積から求め、火星に届く太陽放射のエネルギーを、地球に届く太陽放射のエネルギーと、火星と太陽の距離から求めた。

1気圧にするための所要年数に関しては、反射率100%で、面積が極冠の面積に等しいミラーを用い、火星の両極冠全体に、垂直に太陽放射のエネルギーを照射できたと仮定した。その場合、極冠の面積と単位面積当たりの火星に届く太陽放射のエネルギーから、極冠にあたる全太陽放射エネルギーを求め、極冠のドライアイスの質量、比熱から熱容量を求め、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、ドライアイスの温度を 5°C 上昇させるための熱量を求め、そこから結果として所要年数は15万年かかるとわかった。そして、ミラーの個数を倍にすると所要年数が半分になることから、ミラーの個数が数百個で所要年数が数百年辺

りが妥当だと結論付けた。そして、 $4\text{t}/\text{km}^3$ の密度のミラーを火星の高度 214000km に設置すると太陽光の圧力によって火星を周回せずに静止するため、その高度に設置するとした。

一方で火星の大気の宇宙への飛散も考慮した。かつての火星には濃い大気が存在したといわれているが、それがなくなった理由として、NASAによると太陽風が原因だとわかった。しかし現在の飛散速度は、毎秒約 100g ずつであり、30万年でも $9.5 \times 10^8\text{t}$ であることから、本研究では考慮しなくてよいと結論付けた。そして、火星の重力の小ささによる大気の飛散についても検証し、気体の運動エネルギーの式から、二酸化炭素分子一個当たりの平均並進運動速度を求めたが、火星の脱出速度を大幅に下回ったため、こちらも考慮しなくてよいと結論付けた。

そして、火星が地球並みの温室効果を持つようになった場合の温度を推定した。地表面に吸収される日射のエネルギーと、地表面が出す放射の強さは釣り合うことから、太陽放射のエネルギーとアルベド (大気の反射率) から地球と火星の有効放射温度を求め、地球の温室効果による上昇分が 33°C であることを求めた。そして、その上昇分を火星の有効放射温度に加算すると、火星の平均温度は -33°C になるだろうことがわかった。

最後に、更なる時間とエネルギーの節約の可能性を探るべく、クリストファー・P・マッケイらの「Technological Requirements for Terraforming Mars」から式を引用しシミュレーションを行った結果、数百個ほどのミラーで数十年照射すればよくなり、更に敷居が低くなったことがわかった。そして無事1気圧を達成した場合、平均気温は -16.5°C になり、赤道の気温は 5.85°C になると推定された。これだけ気温が上がれば夏や昼間に氷が溶けだし大気中に漂うため、更なる温室効果が期待でき、十分な気温を

確保できたといえるだろう。

7. 謝辞

本研究を進めるにあたって、ご指導・ご支援していただいた多くの方々に心からお礼を申し上げます。

始めに法政大学・春日 隆教授には特段お世話になり、丁寧にご指導をいただきました。

同じゼミの加納くんは研究内容こそ違えど、お互い励ましあったり、情報交換したりなど、様々な面でお世話になりました。

最後に、私の両親には、私の望む道へ進める環境を作り、暖かく見守っていただき心から感謝いたします。

参考文献

- [1] NASA ホームページ Mars Facts
- [2] 秋葉 龍佑：「火星のテラフォーミング」(2012)
- [3] NASA ホームページ NASA Mission Reveals Speed of Solar Wind Stripping Martian Atmosphere (2015. 11. 6)
- [4] 山賀 進：われわれはどこから来て、どこへ行こうとしているのか、そして、われわれは何者か 第2章 大気と太陽エネルギー (2005. 12. 28)
- [5] 地球、金星、火星の有効放射温度 (2012. 7. 12)
- [6] Christopher P. McKay, Robert M. Zubrin：「Technological Requirements for Terraforming Mars」(1997)