

テラフォーミングIV

金光研究室 嶋田 忠相

1 序論

「テラフォーミング（惑星地球化計画）」という言葉は1940年代、SF作家ジャック・ウィリアムソンによって作り出された造語である。彼は、地球以外の惑星を生命が生存できる環境まで工学的に改造するプロセスをこの言葉で表現しようとした。近年よく耳にする、地球温暖化により生まれた温室効果ガスを利用することにより、テラフォーミングは決して夢物語ではなく、現実味を帯びてきた。下の表は太陽系のうち地球に近い、金星と火星、それにタイタンを加えた4つの天体のデータである。

	表面温度	大気主成分	表面気圧	平均密度	平均半径	重力
金星	737(K)	二酸化炭素	93219(hPa)	5.24(g/cm ³)	6052(km)	8.87(m/s ²)
地球	282	窒素	1014	5.515	6378	9.78
火星	210	二酸化炭素	0.75	3.94	3396	3.71
タイタン	94	窒素	1440	1.88	2575	1.35

上の表からわかるように、金星や火星は地球から近いことに加え、温度が近かったり、大きさや重力が近いことからテラフォーミングに適していると考えられてきた。しかし、タイタンの大気は、地球と同じ窒素が主成分である。また、生命発祥の化学プロセス初期段階に必要なと考えられている、シアン化水素が存在しており、その後のプロセスに欠かすことのできない水も氷の形でだが、存在している。さらには、石油や天然ガスに代わるエネルギーとされるメタンハイドレートの存在の可能性もある。

NASA と ESA の共同ミッションである探査機カッシーニや小型プローブホイヘンスにより、タイタンの地表面や大気などさまざまな情報を我々は知ることができ、今後も引き続き行われる探査により、詳しくわかっていき、タイタンの持つ将来性が判明するだろう。また、人類が生き残る唯一の道は、地球を離れて別の惑星に移住することだという科学者もいる。つまり、タイタンはテラフォーミングする可能性はあると言える。

よって、本研究ではタイタンのテラフォーミングをするにはどうすればよいのか、具体的方法について検討を行った。

2 タイタン

タイタンは、最も地球と似た大気を持っている衛星である。それだけでなく重要なのは、多くの有機化合物が存在し、大量の水が氷ではあるが、存在している惑星だということである。よって、太陽系の中で、タイタンは人類が移り住むのに適した星だと言える。

3 テラフォーミング論の概要

タイタンのテラフォーミングの第一歩は、平均-179℃という気温を上げることである。テラフォーミングが実現可能かもしれないと具体性を帯びてきたのは1990年代に入ってからである。惑星を暖めるために、温室効果ガスを使うというアイデアが出されたのである。

タイタンでまず放出しようと考えているのは、フロンガスである。フロンガスといってもいろいろ種類があるが、オゾン層を破壊する恐れがあるフロン類ではなく、「代替フロン」と呼ばれるものの一種である PFC を使う計画である。フロンガスの温室効果は二酸化炭素の数千倍前後もあり、数 ppm のフロンガスと少量のメタンを大気中に放出することで、タイタンの気温はおよそ 20 °C 上昇する。これによって、タイタンに存在している液体のメタンに大きな変化が起こるものとする。

これまでの観測から、タイタンにはメタンなどの有機化合物が多くあることがわかっている。気温が上がると、このメタンが気化し始める。タイタンの大気中に充満したメタンは、フロンガスと比べると小さいが温室効果ガスとして働きはじめ、火星の温度はさらに上昇していくだろう。温室効果ガスの力で、太陽エネルギーを逃がさないようにすることができれば、タイタンはわずか数十年で暖くなるはずである。

4 Simulation 方法と結果

一般に気体の圧力・温度・密度は相互に無関係なものではなく、状態方程式という関係式で結ばれている。容積 V をもつ気体について、その質量を m 、圧力を P 、温度を T とし、 R はいま考えている気体に特有な定数で、気体定数とすると成り立つのが、理想気体の状態方程式である。

$$PV = mRT \quad \text{または} \quad P = R\rho T$$

ここで単位質量をもつ気体の状態方程式は、気体の密度は $\rho = m/V$ で定義されるから、右式となる。

大量の気体が失われてしまうような惑星は、長時間大気を保持することはできない。したがって、大気が失われる条件について調べることは逆に惑星が大気を持つ条件を調べることになる。まず、惑星の重力が十分に大きくて、大気が惑星にしっかりと束縛されている状態を考える。この時には、大気中の力の釣り合いから、大気中の圧力分布を求めることができる。このとき圧力 P は次の式で与えられる。

$$\frac{dP}{dr} = -\frac{GM_{(r)}}{r^2} \rho_{(r)}$$

ここで r は惑星の中心からの距離、 M は惑星の中心から半径 r の球内にある物質の質量、 ρ は大気の密度、 G は万有引力定数 ($= 6.67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2 \text{ kg}^{-2}$) である。この式は静水圧平衡の式と呼ばれる。

地表面での escape parameter を導入する。

$$\lambda_0 = \frac{GM_0 m}{r_0 k T_0}$$

λ_0 の定義に現れる物理量のうち T_0 以外は、すべて固体惑星の大きさや大気組成がわかれば決まる量である。つまり λ_0 は地表面温度 T_0 を表す無次元のパラメーターであると考えてよく、惑星が大きく、地表面温度が低いほど大きな値をとる。 λ_0 がある臨界値以上であれば

大気圧が0になるrが存在するが、臨界値以下ではrを無限大まで大きくしても、圧力が0にならなくなる条件は

$$\lambda_0 < \frac{\gamma}{\gamma-1}$$

である。これが静水圧平衡が破れる条件である。

z = 0での温度をT₀として定数を定めると、断熱大気の温度分布として

$$T = T_0 \left(1 - \frac{z}{H}\right)$$

が得られる。ただし、ここでHは断熱大気のスケールハイトで

$$H = \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{R_g T_0}{\mu g}$$

である。

また、断熱大気の密度分布と圧力分布は、断熱気体の状態方程式

$$P = K\rho^\gamma$$

と、理想気体の状態方程式を用いて

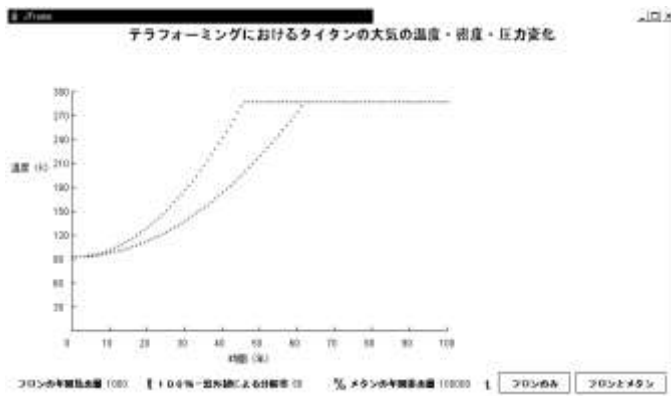
$$\rho = \rho_0 \left(1 - \frac{z}{H}\right)^{1/(\gamma-1)} \quad P = P_0 \left(1 - \frac{z}{H}\right)^{\gamma/(\gamma-1)}$$

となる。

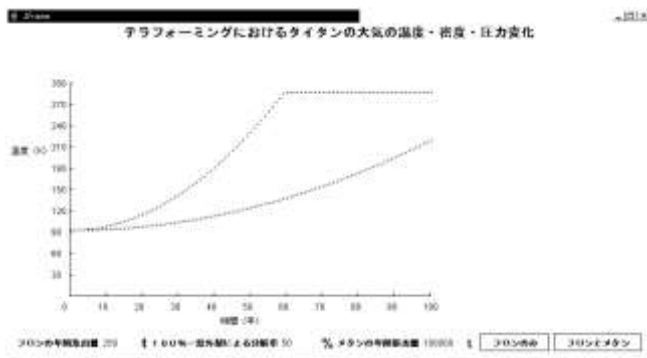
タイタンのテラフォーミングでまず放出しようと考えられているフロンガスの地球温暖化係数 (GWP) は二酸化炭素の約2500倍に相当し、10億分の1 (1 ppb) の混合比で地表面温度を0.1K上げることができる。フロンガスの放出によるタイタンの温度上昇で、タイタンに存在するメタンの三重点からずれ、気体となって放出されると考えられる。そこで、フロンを放出しながら、メタンが放出され、その一部分は光により分解されるが、温室効果が促進されると仮定して Simulation を行った。

このときの温度変化T、密度変化ρ、圧力変化Pはそれぞれ次式で表すことができる。

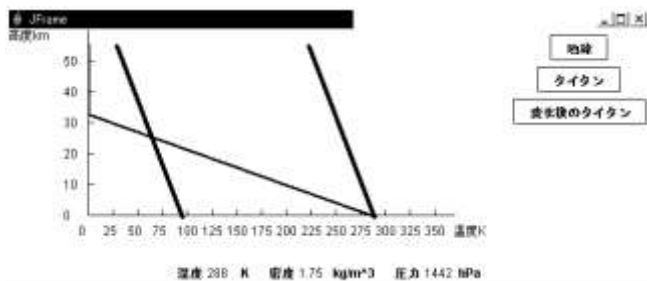
$$T = \left(\frac{M_f}{S} W_f + \frac{Ma}{S} W_{CO_2}\right) H_w t + T_0 \quad , \quad \rho = \frac{P\mu}{R_g T} \quad , \quad P = \frac{S_0 + M_f + Ma}{Sm} g$$



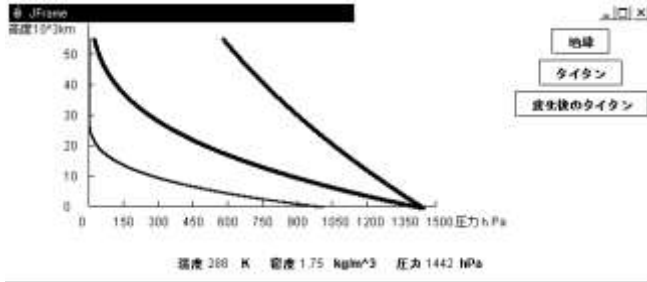
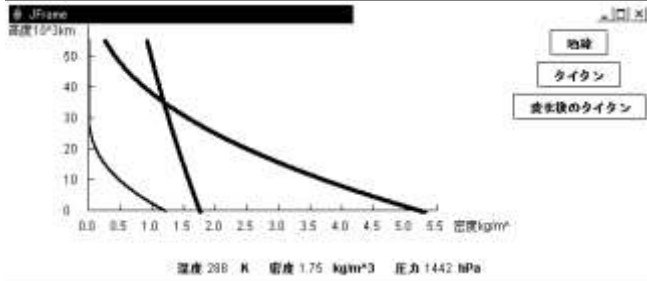
下がフロンのみ、上がメタン併用を表すグラフである。タイタンの温度が上昇すると、タイタンに存在する液体のメタンが、気体で放出される。メタンの温室効果により、タイタンの温度はさらに上昇していく。これを暴走温室効果と呼ぶ。



これはフロンの量を減らした場合である。下の曲線がフロンのみで、上の曲線がメタンの併用の場合である。メタンの温室効果係数はフロンの約 1/100 ほどだが、十分効果が見込めるといえるだろう。



これは細線で地球、太線でタイタン・テラフォーミング後のタイタンの高度変化による温度、圧力、密度変化を表したものである。上から、温度、圧力、密度の順である。太線のうち高度が上がるにつれ、左側にある方が、変化前を表している。グラフから見て取れるように、温度、密度、圧力とも変化させることができたが、地球と比べて密度は未だ大きく、圧力も高い。しかし、これは地球とタイタンでの重力の違いとフロンとメタンの増加によるものが原因だと考えられる。これについては、現在のところどうしようもない。



5 考察と課題

温室効果ガスを用いたタイタンのテラフォーミングは、大気温度・密度・圧力のそれぞれにおいて、かなり効率的であるといえる。テラフォーミングの結果、タイタンの地表には氷だった水が溶け、液体として存在するだろう。また、放出されたフロンガスが紫外線により分解されることで、オゾン層の代わりにある程度の量の紫外線を防いでくれることも期待できる。さらには、もともと存在する多くの有機化合物により、生命誕生の可能性もある。しかし、問題も多くある。第一に酸素が必要である。また、地球とは違う重力という課題も残っている。最大の課題は、地球から遠く離れた地に、フロンを供給できる用意をすることである。

その課題を克服するためにも、地球とよく似た、しかしまた地球とは異なった辺境の惑星が、第二の地球となる可能性を求めて行われる今後の探査に注目したいと思う。