

暴走温室効果：金星の水の歴史

0 Abstract

赤外線不透明度が液相もしくは固相と平衡状態にある気相が原因である惑星大気の放射対流平衡モデルによって議論する．灰色ガス，つまり全赤外線波長で吸収する気体の場合に，太陽定数が臨界値より大きい時の平衡は不可能である．従って平衡状態になるには凝縮相が大気中に蒸発する必要がある．

凝縮気相が主要大気成分である湿潤断熱そして擬似断熱の大気が考慮する．この状態は太陽定数が，水のように豊富な物質に対して超臨界である場合に当てはまる．そのような大気で全高度において凝結気体が主要物質となることが示される．原始金星大気の水の光解離についてこの状況に沿って議論されている．

1 Introduction

惑星大気熱収支を理解するのに，対流圏で放射平衡にある平行平板大気の使用モデルを使用する (Goody,1964)．この類の高度なモデルは地球の平均地表面温度と同様に，観測された大気圏大気の熱構造をうまく予測したものである (Manabe and Wetherald,1967)．一般に，大気の構成を与えられたものとして，そこから一定な太陽フラックス作用の元で平衡温度プロファイルを計算する．地球では，最も重要な気体は水蒸気，二酸化炭素，オゾンであり，これらはスペクトルの可視光，赤外線 (IR) 部分での強い吸収域を持つ．しかし，水蒸気の場合，大気中の水蒸気は蒸発と降水のサイクルによってコントロールされているため，吸収物質の量は温度に依存している．

この研究論文の目的 - モデル大気中の吸収気体の量が飽和水蒸気圧によって決まる時，特異点が生じる．それは単にモデルの失敗を意味するわけではなく，モデルが意味する物理系での興味深い変化も示唆することを示す．

特異性は太陽定数の値が一定の臨界値よりも大きくなるために現れる．水蒸気は赤外線放射の強い吸収物質であるが，大気中の水蒸気量は地表面での液相・固相との平衡によってコントロールされていて，温度に依存している．この平衡は臨界点の下で起こり得て，臨界点より上では起こりえない．

- ・ 太陽定数が臨界値より小さい時
⇒ 物質は惑星地表面に主に固体もしくは液体で存在している．
- ・ 太陽定数が臨界値より大きい時
⇒ 物質は大気中に主に気体として存在している．

水蒸気と二酸化炭素に対する臨界太陽定数を知ることによって，各惑星が超臨界か，亜臨界であるかを決定できる．

火星 - 水と二酸化炭素が共に地表面の永久凍結堆積物と平衡している。⇒ 両物質が火星で亜臨界である (Leighton and Murray, 1966)。

地球 - 水は臨界未満であるが、地球の二酸化炭素はその大部分が海洋に溶解し、堆積岩に埋まっているためやや特別である。おそらく海洋がなければ、二酸化炭素は地球大気の主成分であった (Rubey, 1964)。

金星 - 明らかに二酸化炭素の全てが現在大気中の存在しているため、二酸化炭素は明確に超臨界である。

では、金星は水に対して臨界超過であるのか？、そしてそのような環境は現在の金星の水の欠乏を説明できるのかどうか？

2 The grey model

仮定, 定義 -

上向きの一定正味フラックスを持つ平行平板大気を考える。

放射領域の長波 (IR) だけを考慮する。

太陽光は地表面全体で完全に吸収される (アルベドが 0)。

光学的深さ τ は

$$\tau = \int_z^\infty K \rho_v dz . \quad (1)$$

ここで K は吸収ガスの質量吸収係数, z は鉛直座標, ρ_v は吸収ガスの密度。

これらの定義と仮定の上で、放射平衡の解は (Goody, *loc. cit.*)

$$B(\tau) = \frac{F}{2\pi} \left(1 + \frac{3}{2}\tau\right) = \frac{\sigma}{\pi} T^4(\tau) , \quad (2a)$$

$$B(0) = \frac{F}{2\pi} , \quad (2b)$$

$$B^*(\tau^*) = \frac{F}{2\pi} \left(2 + \frac{3}{2}\tau^*\right) . \quad (2c)$$

ここで $B = (\sigma/\pi)T^4$ はプランク関数, σ は Stefan-Boltzmann 定数, T は温度, F は上向き放射フラックスの値, τ^* は地面での光学的深さである。

地表面大気の温度は $B(\tau^*)$, 地面の温度は $B^*(\tau^*)$ で決定され, $B^*(\tau^*) > B(\tau^*)$ なので, 地上での温度には不連続点がある。

アルベドが $A = 0.4$, 太陽定数 $S = 2.0 \text{ cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$ であることより, 惑星の単位面積あたりの太陽光吸収の全球平均は

$$\frac{(1-A)S}{4} = 0.3 \text{ cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$$

である。もし惑星が熱平衡であればこれは F と等しくなくてはならない。(2b) から, 成層圏に相当する温度は 206K, そして光学的深さ τ^* が $O(1)$ であれば, 地表面に相当する温度は地球に妥当である 280-300K である。

仮定 -

放射平衡解 (2) は通常 $\tau = 0$ から対流圏界面までの成層圏で有効である .

成層圏では, 吸収物質が他の気体と一様に混ざっている .

もし吸収物質が地球大気の水蒸気のように振る舞えば, そのとき惑星地表面付近と対流圏では, 密度 ρ_v が飽和値 $\rho_s(T)$ に近いとする .

温度と吸収物質濃度の両方が対流圏界面で連続的であり, 対流圏界面は熱平衡にあるため, 温度が連続している . 地表面の固相・液相物質の存在は, 地表近くの大気が飽和に近いことを裏付け, 湿潤対流のダイナミクスによって対流圏の全高度において飽和に近いことを裏付ける . 従って, 成層圏下部が飽和に近い状況は最終的には惑星地表面での固相・液相の存在による .

今, 以上の仮定の結論を追求する . P を圧力, ρ を密度, m を混合大気の実平均分子量とし, 吸収気体の質量分率 ρ_v/ρ を成層圏で一定とする . そのとき静水圧の式 $dP/dz = -\rho g$, そして (1) から,

$$\tau = KP_v m_v / mg \quad (3)$$

を得る . ここで P_v は吸収気体の分圧, m_v は吸収気体の分子量, g は重力加速度である . 対流圏界面では $P_v = \mu P_s(T)$ とする . ここで μ は対流圏界面での相対湿度, P_s は飽和水蒸気圧である . そのとき (2a) と (3) から対流圏界面での温度 T に対する F についての暗黙の関係を得る :

$$\frac{F}{2\sigma} = T^4 \left[1 + \frac{P_s(T)}{P_0} \right]^{-1}, \quad P_0 = \frac{2mg}{3\mu K m_v} \quad (4)$$

P_0 の量を解釈するため, 光学的深さが 1 であるとき, (3),(4) から吸収気体の分圧が $P_v = mg/Km_v = 3\mu P_0/2$ となることに注目する . $K = 0.1 \text{cm}^2 \text{gm}^{-1}$, $\mu = 100 \%$, $m = 29$, $m_v = 18$, $g = 10^3 \text{cm sec}^{-2}$ で, $P_0 = 8 \text{mmHg}$ を得る . 8mm は地球地表面付近で水蒸気分圧の値を示す . 灰色大気モデル内で必要に応じオーダーが一致した全光学的深さ τ^* と一致している (Goody, p.332) . しかし, 任意の P_0 が地球に灰色大気を適用していることに相当できることに気がつくべきである .

(4) との関係で, 解がある臨界値 (Fig.1) 未満の F の値としてのみ存在する .

小さな T に対して, 右側の関数は T^4 に比例している .

大きな T に対しては, 関数は $T^4/P_s(T)$ に比例している .

前者は T の増加関数であり, 後者は減少関数である, だから (4) の右側の式は最大値を持つはずである . この最大値は水や二酸化炭素といった物質に計算され, 定数 P_0 の適切な選択で与えられる . Fig.1 で, 水に対する F の臨界値は, P_0 の範囲で与えられる . ちなみに, 地球と金星の地表面上の平均入射光量はそれぞれ 0.50 と $0.95 \text{cal cm}^{-2} \text{min}^{-1}$ であり, 反射を考慮に入れると, 吸収量はいずれも約 $0.30 \text{cal cm}^{-2} \text{min}^{-1}$ である .

(4) 式によってモデルに対するフラックス F を絶対的な上限値として与える . (2) と (3) を満たしている大気は, 各層において放射平衡にあるために必要な上向きフラックスを選

ぶことができる。ある高度より下を対流圏に置き換えると、その層での上向きフラックスを減少させる傾向がある。

第一に、対流は地上での温度不連続を解消する、その結果地表面からの放射が減少する。

第二に、対流は温度が深さと共にゆっくり増加するように減率を減少させる。

第三に、対流は対流圏内での水蒸気をより混ぜる、その結果不透明度が増す。(4) で認められる最大値に近い時にのみ有効)

最終結果は、対流的な対流圏は、正味フラックス F が (4) 式で仮定した最大値に満たないある限られた量でなければ、必要な上向きフラックスを運べない。ある具体例 (無限に下向きに広がっている飽和した対流圏、断熱減率、圧力に独立な灰色吸収作用) に関して、Eddington 近似で計算された最大上向きフラックスは Table.1 で与えられたそれらの約 85 % である。

3 暴走温室効果の議論

議論しているモデルは、IR 不透明度は濃度が蒸発と降水によってコントロールされている気体に起因すると与えると、太陽定数が特定の臨界値より大きい時平衡が不可能である。Manabe and Wetherald(1967) は地球大気のと温度と水蒸気量の時間進化を研究しており、彼らの解答は安定平衡にほぼ等しい傾向にある。不安定平衡解は、いくつかの太陽定数の値に存在するかもしれないが、平衡は特定の点より上ではどんな平衡も不可能である。

現在の基準で超臨界にある惑星に何が起こるであろうかを考える。

惑星のアルベドは増加することで、より多くの太陽光の反射を許す。その結果熱平衡に必要な F 値を下げる。現在完全雲量であると思われる金星のアルベドはたったの約 0.7 であり、完全雲量が可能である状況はあまり知られていない。たとえ水が地球上と同じように金星で豊富であるとしても、完全雲量は不可能であるだろう。

そこで、最大雲量によって決定される、1 より小さい最大アルベドがあると仮定する。実際の地球の成層圏下部の相対湿度 μ は中緯度地方で 100 % よりかなり小さい。これは対流圏界面が中緯度地方においてよりも熱帯地方で冷たいからであり、成層圏の空気は熱帯地方を通過するにつれて明らかに乾燥される。成層圏の含水量が熱帯の対流圏界面での飽和水蒸気圧によってコントロールされているため、原理上地球はモデルの例外ではない。

成層圏下部の高い相対湿度は、対流的な対流圏中の高い相対湿度に関連し、海が存在に起因する。従って、もし海が完全に蒸発してしまえば、水蒸気は主大気成分となる。しかし、相対湿度は減少するであろう。海が蒸発するのに必要なエネルギーは、惑星が放出するよりも多くの太陽光を吸収していれば得られるだろう。

これが暴走温室効果である。圧力に因らない吸収係数を持つ灰色吸収気体にとって、熱平衡が可能である中間段階はない。海があり、対流圏が上向きに水蒸気を混ぜるのに十分に活発であれば、熱平衡は太陽定数が臨界値よりの大きければ不可能である。そのような

惑星は水に対して超臨界であり、惑星の全ての水は大気中に存在する。

長波フラックスの上限を定めようとする、スペクトルの透明部分は最も重要である。8 – 20 μ の窓に特有な水蒸気の K 値を選択すると、灰色モデルは、二酸化炭素に同様には適用できず、水蒸気のように帯域中で測定可能な吸収を示さず、全 IR 波長で測定可能な吸収を示す。

放射線図を使うことで対流圏からの最大上向きフラックスを計算することも可能である (Ingersoll, 1968)。ところがこの場合、最大地表面温度 (温室効果が“暴走する”温度) を特定することが必要である。これは基本的に乾燥大気沸点である。重要な変化は水蒸気が下層大気の主成分となるときに発生する。地球大気モデルにおいて、対流圏からの最大フラックスは $0.57 \text{ cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$ である。(地球大気モデル: 沸点 373K, 減率 6.5 K km^{-1} , 全高度で相対湿度 50%, 単位質量あたりの二酸化炭素 0.05%, 等)。

臨界太陽定数は、雲量とアルベド、大気の組成と構造、直接太陽放射加熱量、等を含んだ多くの因子次第である。しかし、暴走温室効果は、もし水が金星に豊富にあれば金星で発生する可能性がある。

4 金星への可能性がある応用

仮定 -

かつての金星に水が豊富にあり、水に対して超臨界であった。

一層高い水蒸気混合比はより大きな光解離率をもたらす、水素は宇宙空間に逃げている、酸化可能な物質は地表面で過剰な酸素を消費することに利用できる。

そのような解釈は、矛盾した地球大気構成の理論なしで現在の金星の水と酸素の少ない状態を説明する (Berkner and Marshall, 1965; Brinkmann, 1969)。

Sagan (1960) と Gold (1964) も金星の暴走温室効果の可能性を議論し、金星の暴走温室効果は地球の光解離に比べ急速な光解離をもたらさない。暴走温室効果はもっと高い地表面温度と下層大気にもっと大量の水蒸気をもたらすだろうが、成層圏の温度が最小になっている場所の放射収支をそれほど変えない。それ故に、成層圏の光解離に利用できる水蒸気量は地球のように小さく、大量の水は失われることがないと判断した。

成層圏の全大気圧が暴走温室効果で十分に減らされるかもしれない。その結果、地球においては光解離から水蒸気を保護している放射線の遮蔽を弱めるのを見ていく。

混合比は、相対湿度が常に低い層においては一定である、と仮定する。組成は地球対流圏のような湿潤対流が発生する層だけで変化する。湿潤断熱過程内において凝結した水は雲のような塊の中に残り、擬似湿潤断熱過程において凝結した水は雨として空から降る。

もし水蒸気が初期金星大気全高度において主成分であったならば、それは紫外線 (UV) 光の重要な吸収物質の 1 つであっただろう。だから水蒸気は地球上よりもより大きな率で

光解離するであろう。言い換えれば、コールド・トラップは金星でまだ作用しているが、成層圏の温度が最低になるところより上で他の気体の放射線遮蔽はない。

この論文で示されること

金星軌道で海を持つ惑星では暴走温室状態が起こりうる。

水蒸気が金星のような大気でほとんど均一に混合しており、大量の水が比較的短い時間で解離する。

酸素は金星の第2価の鉄と結合して酸化鉄を形成し、もし大気中の炭化水素があれば、結合して二酸化炭素を形成している。暴走温室効果の高い地表面温度はこの結合を加速させる。

地球と金星の際立った違いが太陽系内の相対位置の必然的な結論として説明される。