

暴走温室効果

地球大気の温室効果は主に水蒸気と二酸化炭素の赤外吸収によっている。正味太陽放射が増大して海面温度が上昇すると、温度が高いほど水の飽和蒸気圧は高いから、大気中の水蒸気量は増えるであろう。水蒸気量の増加は温室効果を強め、更に海面温度を上昇させる。こうして温室効果による気温の上昇がとまらなくなる、つまり、温室効果が暴走する、ということが考えられる。これが「暴走温室効果」の最も素朴なイメージである。

このように、「暴走温室」は時間とともに気温が「制限なく」上昇していく現象であるはずだが、「暴走温室効果」に関する研究で、気温の時間変化をあからさまに取り扱った例は過去にない。過去の研究は大気の平衡状態の考察に基づいて「暴走温室状態」の出現を問題にしてきた。更に面倒なことに「暴走温室状態」の定義も研究者毎に微妙に異なっているのが現状である。

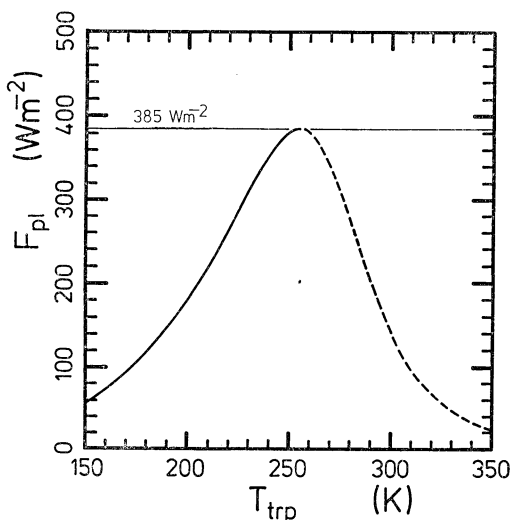
筆者は「暴走温室状態」を「地面で気液平衡が成立するとき、大気が定常状態で宇宙空間に射出できる惑星放射に上限が存在して、その上限よりも大きな太陽放射が入射している状態」と考える。そしてその惑星放射の上限を「射出限界」と呼びたい。暴走温室効果では「射出

限界」の存在が本質的に重要である。射出限界が存在すると、射出限界よりも大きな太陽放射が入射した場合には、入射太陽放射と射出限界の差は地表温度を上げ、海水を蒸発させるために用いられるはずである。地表温度が上昇しても海洋が存在するかぎり地面で気液平衡は成立するから、射出限界以上の射出はできない。従って、暴走温室状態では、海がなくなって地面での気液平衡が破れない限り、地表温度の上昇は止まらないはずである。

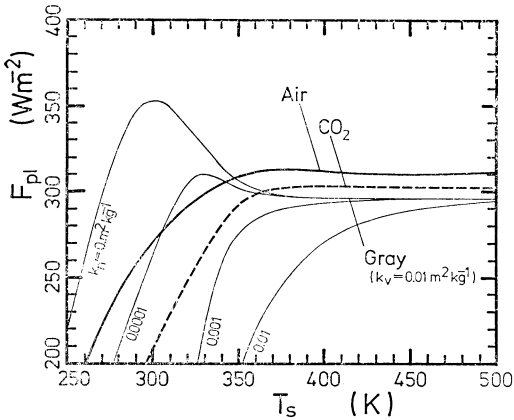
暴走状態で海洋が存在できないことから、逆に、暴走温室を「海洋の消滅」と殆ど同義に用いる研究者もある。しかし、「海洋の消滅」は温室効果とは無関係にも起こり得るので (Abe, 1988), 「海洋の消滅」だけで暴走温室効果の特徴づけるのは正しくないと考えられる。

射出限界を初めて見いだした暴走温室効果を議論したのは日本では駒林 (1968) であるが、世界的には Ingersoll (1969) とされる。Ingersoll は、地面で気液平衡が成り立てば対流圏界面でも大気は水蒸気で飽和する (飽和に近い) と考えた。そして、放射平衡にあり、対流圏界面で飽和している成層圏が射出できる惑星放射には上限があることを示した (第1図)。これ以上の太陽放射が入射すると圏界面で未飽和になる、つまり海洋がすべて蒸発して気液平衡が破れるまで気温が上昇する、すなわち、「暴走」が起こると論じた。

Ingersoll は金星大気に水がないことを「暴走」と関係づけて議論したので、それ以来、暴走温室効果は惑星大気の進化の視点から研究されてきた。惑星形成期の大気を研究する目的で Abe & Matsui (1988) と Kasting (1988) はそれぞれ独立に、対流圏を含み現実的な放射特性・状態方程式を考慮した一次元の放射対流平衡モデルを構築した。彼らは、地表に液体の水が存在する条件下では地表温度が約 350 K 以上になると惑星放射が約 300 W/m² で頭打ちになることを示した (第2図)。(373 K 以上でも水の蒸気によって大気圧が上がるために臨界温度 647 K 以下では液体の水が存在できる)。正味太陽放射がこれより大きいと平衡状態での地表温度は 1500 K 程度以上になり、地面での気液平衡は破れ、海洋は消滅する。つまり約 300 W/m² という射出限界が存在するのである。この射出限界は、射出限界を越えても対流圏界面が水蒸気で飽和したままである点で駒林や Ingersoll



第1図 水蒸気で対流圏界面が飽和している場合の圏界面温度と惑星放射の関係 (Nakajima *et al.* 1990 による)。惑星放射に上限 (射出限界) があることがわかる。破線は物理的に不合理な解である。



第2図 放射対流平衡大気モデルでの地表温度と惑星放射の関係。Kasting (1988) の空気の場合 (Air), Abe (1988) の二酸化炭素大気の場合 (CO₂), Nakajima *et al* (1990) の仮想的灰色大気の場合 (Gray) (k_v, k_n はそれぞれ水蒸気, 「空気」の吸収係数)。地表温度が 350K 以上になると惑星放射が一定になることがわかる。

のものとは異なる。

種々の射出限界間の関係は Nakajima *et al* (1990) によって整理された。駒林や Ingersoll の射出限界は、いわば「湿った」成層圏が放射できる惑星放射の上限であり、Kasting や Abe & Matsui が見いだした射出限界は湿った対流圏が放射できる放射束の上限である。原理的には上記以外の射出限界も存在する (Nakajima *et al.*, 1990)。紙数の都合により、ここではこれらの射出限界の成因について述べる余裕がない。詳しくは Nakajima *et al.* (1990) を参照されたい。

いずれにせよ、射出限界は地表温度が上がると大気中の水蒸気量が増えるために生じる。もし、地表温度が上がっても相対湿度が下って大気中の水蒸気量が増えない

ならば、射出限界は生じない。しかし、現状では、地表温度が変化したときに相対湿度がどう変化するかはよくわかっていない。この点については今後の研究が必要である。

さて、現実的なモデルによると射出限界は約 300 W/m² である。現在の地球の正味放射は約 240 W/m² なので射出限界以下だが、大気上端での太陽放射は約 340 W/m² であり、また赤道域での正味太陽放射も 300 W/m² を越えている。従って大気中の相対湿度分布やアルベドの値によっては、現在の地球でも暴走温室は起こりうる。ところで、二酸化炭素の増大による地球温暖化が問題になっているが、二酸化炭素が増大しても暴走温室は起こらない。大気構造を質的に変化させるという点で、二酸化炭素よりも、相対湿度や雲のアルベド効果の方がより重要である。

文 献

- Abe, Y., 1988: Conditions required for water-ocean formation on an earth-sized planet, *Lunar Plan et Sci. XIX*, 1-2, Lunar Planet. Inst., Houston.
- , and T. Matsui, 1988: Evolution of an impact-generated H₂O-CO₂ atmosphere and formation of hot proto-ocean on earth, *J. Atmos. Sci.*, 45, 3081-3101.
- Ingersoll, A.P., 1969: The runaway greenhouse: a history of water on venus, *J. Atmos. Sci.*, 26, 1191-1198.
- Kasting, J.F., 1988: Runaway and moist greenhouse atmospheres and the evolution of earth and venus, *Icarus*, 74, 472-494.
- 駒林 誠, 1968: 大気圏と気圏が共存できる条件—比較惑星論から考える—, *自然*, 23, No. 2, 24-31.
- Nakajima, S., Y.-Y. Hayashi and Y. Abe, 1990: to be submitted to *J. Atmos. Sci.*

(名古屋大学水圏科学研究所・阿部 豊)