

暴走温室状態

石 渡 正 樹*

下端で H_2O の気液平衡が成り立つ大気と考えた場合、大気上端における外向き長波放射フラックス (OLR) には上限値が存在する。この上限値を上回る入射量が大气に与えられた状態は暴走温室状態と呼ばれ、気温上昇と大気水蒸気量の増加が止まらなくなり (「温室効果が暴走する」とも表現される) 海洋の大幅な減少または消失が起こると考えられる。近年では太陽以外の恒星の周囲に系外惑星が数多く発見され、それらの環境を推定する試みの1つとして暴走温室状態に関する研究もいくつか行われている。本誌では既に「暴走温室効果」の用語解説 (阿部 1990) が掲載されているので、ここでは阿部 (1990) 以降に進展した事項を中心に解説する。

OLR に上限値が存在することを理解する上で基礎となるものは射出限界 (Nakajima *et al.* 1992) である。これは極限的な状況で得られる OLR 上限値であり、鉛直 1 次元平衡モデルの結果を用いて定義される。第 1 図に、灰色大気鉛直 1 次元平衡計算によって得られる 2 種の射出限界を示す：

1. 成層圏モデルの OLR 上限値 (385 W m^{-2} , 第 1 図の太破線)：このモデルでは下端で飽和し水蒸気混合比一定かつ灰色放射平衡にある成層圏を考える。このモデルで得られる OLR 上限値は、Komabayashi (1967) と Ingersoll (1969) によって導かれたものであり Komabayashi-Ingersoll 限界と呼ばれる。詳しくは、阿部 (1990) による解説を参照されたい。
2. 水蒸気大気の 1 次元放射対流平衡解の OLR 上限

値 (約 300 W m^{-2} , 第 1 図の太実線の高温側の漸近値)：このモデルでは湿潤断熱構造を持つ対流圏と放射平衡構造を持つ成層圏を考える。その結果では、高温状態において OLR の値が地表面温度にほとんどよらない。これは、大気水蒸気量が増加すると、光学的深さが 1 となるレベルが対流圏上層に位置するようになること、及びそのレベルの気温が気圧のみで決定される (気温と気圧の関係が H_2O の飽和蒸気圧曲線により一意に決定される) ようになることによっている。

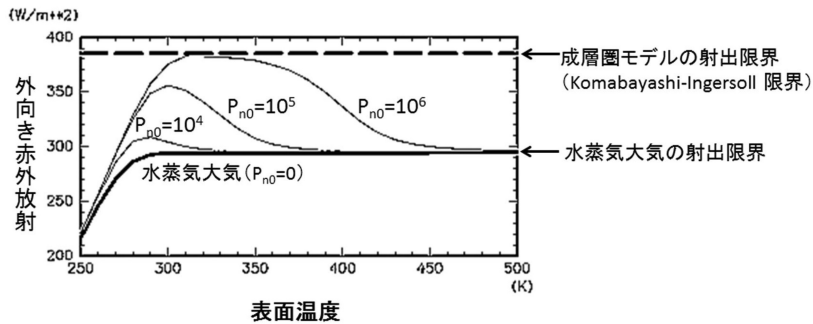
灰色放射を用いた場合でモデル設定を変更すると OLR 上限値は変化するが、いずれも水蒸気大気の射出限界と Komabayashi-Ingersoll 限界との間の値になる。乾燥空気を含む大気の場合には、地表面温度の関数としての OLR のグラフに極大が生じる (第 1 図の細線)。この極大値が OLR 上限値を与えることになる。相対湿度を考慮して大気水蒸気量を決定するスキームを組み込んだ場合には、OLR のグラフの形がより複雑になることもある (Sugiyama *et al.* 2005 など)。

非灰色放射スキームを用いた場合でも、地表面温度が 300 K を越えると OLR の値がほとんど変化しなくなる。その値は、上記の水蒸気大気の射出限界に対応するものである。更に地表面温度が増加し 1500 K を超えると、近赤外域からの射出によって再び OLR の値が増加する (Kopparapu *et al.* 2013; Goldblatt *et al.* 2013 など)。この結果をもとに、水蒸気大気の射出限界を上回る入射量が大气に与えられた状況を考えてみると、惑星表面上に存在する液体 H_2O (海洋) の質量に応じて最終状態は変わることになる。 H_2O 質量が地球海洋程度であれば、 H_2O は全て蒸発し、対流圏下層に乾燥対流層、対流圏上層に湿潤対流層を持つ平衡状態 (Abe and Matsui (1988) で示された大気構造) が実現されるだろう。惑星表面に多量の H_2O

* Masaki ISHIWATARI, 北海道大学大学院理学研究院。

momoko@gfd-dennou.org

© 2014 日本気象学会



第1図 灰色放射の場合における地表面温度とOLRの関係。実線は鉛直1次元放射対流平衡解を示す。太実線は大気成分が水蒸気の場合、細い実線は大気成分が水蒸気と乾燥空気である場合の結果である。 $P_{n0}=10^4$; 10^5 ; 10^6 は、地表面における乾燥空気分圧がそれぞれ 10^4 Pa, 10^5 Pa, 10^6 Paの場合である。太破線は成層圏モデルで得られるKomabayashi-Ingersoll限界の値を示す。

が存在すれば、1500 K以上の地表面温度を持つ平衡状態が実現される（この場合、大気下層は水の臨界点を越えた状態、すなわち超臨界状態となる）。

なお、地球温暖化で問題視されている大気中 CO_2 濃度の増加では暴走温室状態は発生しない。このことは阿部（1990）で指摘されているものであり、最近のGoldblatt *et al.* (2013)でも論じられている。

大気循環を考慮した3次元系における暴走温室状態の発生条件に関するGCM実験も行われている。Ishiwatari *et al.* (2002)は、雲無し灰色大気の場合について太陽定数増加実験を行った。その結果、全球平均入射量が相対湿度を考慮した1次元放射対流平衡解のOLR上限値を超えた場合に暴走温室状態が発生することを示した。雲によって暴走温室状態の発生条件がどう変わるかは未解決の問題である。Leconte *et al.* (2013)は雲スキームを組み込んだGCM計算を行い、上層雲の温室効果のために、雲無しの場合に比べて小さい入射量で暴走温室状態が発生するという結果を得ている。今後はその一般性を検討する更なる研究が必要である。

参考文献

阿部 豊, 1990: 暴走温室効果. 天気, 37, 351-352.
Abe, Y. and T. Matsui, 1988: Evolution of an impact-

generated $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ atmosphere and formation of a hot proto-ocean on earth. *J. Atmos. Sci.*, 45, 3081-3101.

Goldblatt, C., T.D. Robinson, K. Zahnle and D. Crisp, 2013: Low simulated radiation limit for runaway greenhouse climates. *Nature Geosci.*, 6, 661-667.

Ingersoll, A.P., 1969: The runaway greenhouse: A history of water on Venus. *J. Atmos. Sci.*, 26, 1191-1198.

Ishiwatari, M., S. Takehiro, K. Nakajima and Y.-Y. Hayashi, 2002: A numerical study on appearance of the runaway greenhouse state of a three-dimensional gray atmosphere. *J. Atmos. Sci.*, 59, 3223-3238.

Komabayashi, M., 1967: Discrete equilibrium temperatures of a hypothetical planet with the atmosphere and the hydrosphere of one component-two phase system under constant solar radiation. *J. Meteor. Soc. Japan*, 45, 137-139.

Kopparapu, R.K., R. Ramirez, J.F. Kasting, V. Eymet, T.D. Robinson, S. Mahadevan, R.C. Terrien, S. Domagal-Goldman, V. Meadows and R. Deshpande, 2013: Habitable zones around main-sequence stars: New estimates. *Astrophys. J.*, 765, doi:10.1088/0004-637X/765/2/131.

Leconte, J., F. Forget, B. Charnay, R. Wordsworth and A. Pottier, 2013: Increased insolation threshold for runaway greenhouse processes on Earth-like planets. *Nature*, 504, 268-271.

Nakajima, S., Y.-Y. Hayashi and Y. Abe, 1992: A study on the "runaway greenhouse effect" with a one-dimensional radiative-convective equilibrium model. *J. Atmos. Sci.*, 49, 2256-2266.

Sugiyama, M., P.H. Stone and K.A. Emanuel, 2005: The role of relative humidity in radiative-convective equilibrium. *J. Atmos. Sci.*, 62, 2001-2011.