

値(約300 Wm⁻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 H₂Oの

飽和蒸気圧曲線により一意に決定される)ようにな

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

暴走温室状態

石渡正樹*

下端でH₂Oの気液平衡が成り立つ大気を考えた場 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 入射量が大気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:

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

 * 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

 B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

ることによっている。

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気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

123





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みの場合、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。Pno=10⁴; 10⁵;10⁶は、地表面における乾燥空気分圧がそれぞれ10⁴ Pa, 10⁵ Pa, 10⁶ 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 を超えた状態、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 impactgenerated H_2O-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 onedimensional 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.