

**Dependency of equilibrium states of gray atmosphere on solar constant:
from the runaway greenhouse to the snowball states**

○石渡正樹 (北大地球環境), 中島健介, 竹広真一 (九大理), 林祥介 (北大理)

Masaki ISHIWATARI*, Kensuke NAKAJIMA, Shin-ichi TAKEHIRO**, Yoshi-Yuki HAYASHI***

*Graduate School of Environmental Earth Science, Hokkaido University, Sapporo 060-0810, Japan

**Department of Earth and Planetary Sciences, Kyushu University, Fukuoka 812-8581, Japan

***Division of Earth and Planetary Sciences, Hokkaido University, Sapporo 060-0810, Japan

Multiple equilibrium solutions of gray atmosphere are investigated for various values of solar constant. Models used are a three-dimensional primitive model (GCM) and a one-dimensional energy balance model (EBM). Solutions obtained by models are only ice-covered states for small values of solar constant, and only runaway greenhouse states for large values of solar constant. For intermediate values, multiple solutions are obtained, for instance, a combination of ice-covered state, partially ice-covered state and the runaway greenhouse state. The large ice cap instability discussed in previous EBMs also occurs in GCM, since a partially ice-covered state with ice line latitude lower than 20 degree is not obtained. Contrary to results of EBMs, an equilibrium solution in which ice line latitude is 22 degree is obtained in GCM. The solution is maintained by condensation heating near ice line latitude.

1. はじめに

太陽定数は地球型惑星の気候を決定する上で重要な外部パラメータである。太陽定数の値が大きく変化した場合、以下で述べるように、現在の地球で実現されているような温かな気候は実現しないと言われている。

太陽定数を減少させた場合には全球凍結状態が発生する。Budyko⁽¹⁾ や Sellers⁽²⁾ などの南北 1 次元エネルギーバランスモデル (EBM) では、太陽定数がわずかに減少しただけで平衡解は全球凍結解のみとなる。現在の地球を想定した条件下では全球凍結解と 2 つの部分凍結解が存在する。部分凍結解のうち高緯度に氷境界が存在する解は現在の地球の気候に対応する。部分凍結解のうち低緯度に氷境界が存在する解は不安定であり、⁽³⁾ この不安定性は large ice-cap instability と呼ばれる。全球凍結状態に関しては、Snow ball Earth 仮説⁽⁴⁾ に触発され、大気・海洋結合モデルを用いた計算もなされている⁽⁵⁾。

一方、太陽定数が増大した場合には、暴走温室状態が発生し大気は平衡に達することができない。Nakajima ら⁽⁶⁾ などの鉛直 1 次元モデルを用いた計算によれば、海洋を持つ惑星上の大気の上端から射出される外向き長波放射 (OLR) には上限値が存在することが示されている。この惑星放射上限値を越えた入射フラックスが与えられると大気の平衡状態は消失する。実際に大気大循環モデルで惑星放射上限値を越えた太陽入射フラックスを与えた計算を行うと、温度は上昇を続け水蒸気量は増加を続ける暴走温室状態が得られる。⁽⁷⁾

これまで、全球凍結状態から暴走温室状態までを表現できるモデルを使用して気候の太陽定数依存性を調査するということも行われてはこなかった。従来の EBM では、長波放射を温度の線形関数で与えているために放射量の上限值は存在せず暴走温室状態は発生しない。暴走温室状態の発生も許容される系において得られる平衡解の安定性は従来の EBM で得られていた平衡解の安定性とは異なる可能性がある。そのため、従来の EBM で議論されてきた large ice-cap instability が発生するかどうかは自明ではない。そこで本研究では、暴走温室状態の発生が許容される灰色大気において ice-albedo feedback を考慮して EBM の計算をやり直すことにする。更に、灰色大気の GCM を用いて太陽定数を変化させたパラメータスタディも行。GCM の計算においては、平衡解だけを求める EBM の計算では出現しない振動状態が発生したり EBM の平衡解とは異なる別種の解のブランチが存在する可能性もある。EBM では求めることができないこのような解の探索も行い、広い太陽定数の範囲において様々な気候状態の存在領域をプロットした一覧図を描き、

Budyko の 3 次元バージョンを実践することを目指す。

2. モデル

使用したモデルは灰色大気の 3 次元プリミティブモデル (GCM) と南北 1 次元のエネルギーバランスモデル (EBM) である。GCM は、Ishiwatari ら⁽⁷⁾ と同一のモデルである。大気は、水を想定した仮想的な凝結性成分と非凝結性成分から成る。放射過程に関しては、Nakajima ら⁽⁶⁾ と同様、短波に対しては透明、長波に対しては水蒸気のみが灰色の放射特性をもつものとする。表面温度が氷点 273 K 以下となる領域ではアルベドの値を 0.5、それ以外の領域では 0 とする。使用する EBM は、放射スキームを除けば North⁽³⁾ と同一のものである。外向き長波放射は、GCM と同一の放射スキームを用いて計算する。南北熱輸送フラックスについては拡散型のスキームを使用する。熱輸送係数は、氷アルベドを 0、 $S = 1380 \text{ W/m}^2$ (地球における値) とした場合の 3 次元計算で得られる南北温度差を最も良く再現するよう決める。GCM においても EBM においても年平均日平均日射分布を与え太陽定数 S を変化させた計算を行う。

3. 結果

Fig.1 は EBM の結果である。この図は氷の境界緯度の太陽定数依存性を示している。海水の境界緯度が 0 度というのは全球凍結平衡解に対応し海水の境界緯度が 90 度というのは氷無し平衡解に対応する。図中の×は、暴走温室状態が発生することを示す。この EBM では、部分凍結解が存在するのは、 $1300 \leq S \leq 1870 \text{ W/m}^2$ の範囲である。この範囲においては、太陽定数の増大に伴い氷面積が減る解と太陽定数の増大に伴い氷面積が増える解の 2 種類の解が存在する。太陽定数の増大とともに氷面積が増えるブランチ上の解の氷境界緯度は 30 度から 70 度の範囲に存在する。放射スキームは異なるけれども、North⁽³⁾ の結果からこのブランチ上の解は安定であると考えられる。太陽定数の増大とともに氷面積が減るブランチは氷境界緯度が 30 度よりも低緯度にある場合と氷境界緯度が 70 度よりも高緯度にある場合の 2 本がある。これらの平衡解は不安定であり、それぞれ large ice-cap instability と small ice-cap instability⁽⁸⁾ に対応すると想像される。

部分凍結解平衡解以外にも、平衡解として全球凍結平衡解と氷なし平衡解がある。全球凍結平衡解は $S \leq 1900 \text{ W/m}^2$ の範囲に存在する。氷なし平衡解は $1300 \leq S \leq 1440 \text{ W/m}^2$ の範囲に存在する。従来の EBM に比べて氷なし平衡解が存在す

る範囲はずっと狭い。 $S \geq 1440 \text{ W/m}^2$ において氷が存在しなければ、暴走温室状態が発生してしまうからである。 $S > 1900 \text{ W/m}^2$ では、平衡解は存在できずに暴走温室状態が発生する。

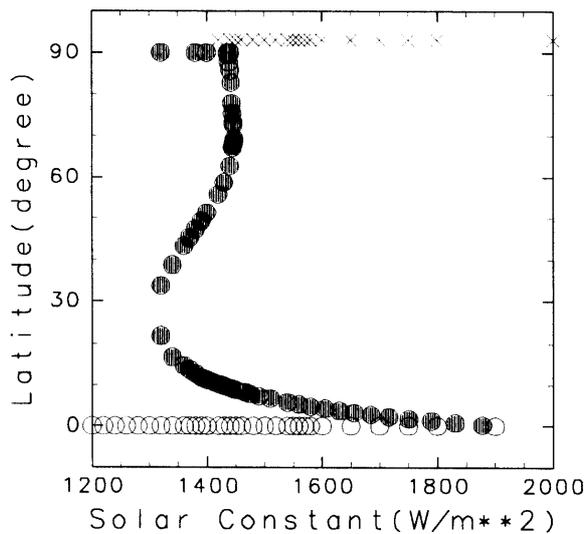


Fig. 1 The relationship between solar constant and ice line latitude obtained by EBM. Marks \circ , \bullet and \times represent ice-covered state, partially ice-covered state and runaway greenhouse state, respectively.

これに対して、GCM の結果を示したのが Fig.2 である。この図には、複数の初期値から始めた計算が全て表示されている。部分凍結平衡状態は、 $1250 \leq S \leq 1570 \text{ W/m}^2$ の範囲において得られた。このうち、 $1300 \leq S \leq 1570 \text{ W/m}^2$ の平衡状態は初期値として 280K の一様温度状態を用いた場合の計算で得られたものであり、 $1250 \leq S < 1300$ の平衡状態は $S = 1300 \text{ W/m}^2$ の計算で得られた部分凍結状態から徐々に S を減少させていき得られたものである。 $S = 1250 \text{ W/m}^2$ の場合では、60000 日の長時間積分でも氷境界緯度は 22 度そのまま安定に保たれた。この結果は、EBM とは異なる。EBM では氷境界緯度が 30 度よりも低緯度となる解は不安定になる。低緯度まで氷が広がった部分凍結状態では、降水のピークは氷境界緯度付近に存在しており赤道付近でほとんど降水は無い。氷境界緯度付近の凝結加熱は熱帯全体を加熱することによって氷の拡大を妨げているのだと思われる。この降水構造は、対流圏下層の赤道付近で下降流を、氷境界付近で上昇流を生じる 2 階建てのハドレー循環パターンによってもたらされる (図は示さない)。

一方、氷境界緯度が高緯度に存在する統計的平衡状態については、氷の境界緯度にして 87 度となる場合 ($S = 1560 \text{ W/m}^2$) まで得られた。EBM では small ice cap instability が起きるので、このような平衡解は得られないはずである。GCM ではこれらの状態では氷境界がしっかり存在するわけではなく、実は氷境界が南北に振動する。太陽定数の値が増大するとともに、氷境界の振動の振幅は大きくなっていく (図は示さない)。

全球凍結平衡状態は、初期値を 280K の一様温度状態から始めた場合では、 $S \leq 1295$ において得られる。全球凍結状態を初期値とした場合には、もっと広い範囲にわたって全球凍結状態が維持される。Fig.2 において F の文字がつけられたのは、 $S = 1000 \text{ W/m}^2$ の全球凍結状態を初期値とした場合の結果である。 $S = 1710 \text{ W/m}^2$ まで太陽定数を増加させても全球凍結状態は保たれたが、 $S = 1720 \text{ W/m}^2$ では氷が消失し暴走温室状態が得られた。

暴走温室状態は、初期状態を 280K の一様温度状態とした場合には $S \geq 1600 \text{ W/m}^2$ で発生する。暴走温室状態を初期値とした場合には、もっと広い範囲にわたって暴走温室状態が維持される。Fig.2 において R の文字がつけられたのは、 $S = 1600 \text{ W/m}^2$ の暴走温室状態を初期値とした場合の結果である。 $S = 1300 \text{ W/m}^2$ まで太陽定数を減少させても表面温度の全球平均値は増加をつづけ暴走温室状態が保たれる結果が得られた。 $S = 1280$

W/m^2 では大気が冷却し全球凍結状態になる。これは、全球平均入射太陽放射フラックスが暴走温室状態における OLR の上限値を下回るため大気の冷却が起こるためであると考えられる。OLR 上限値は対流圏の相対湿度の値により決定される⁽⁷⁾。暴走温室状態を初期状態とした $S = 1280 \text{ W/m}^2$ の場合対流圏の相対湿度の値は約 60% となっており、これから OLR 上限値は 330 W/m^2 と見積もられる。この値は、上記の結果とおおむね調和的である。

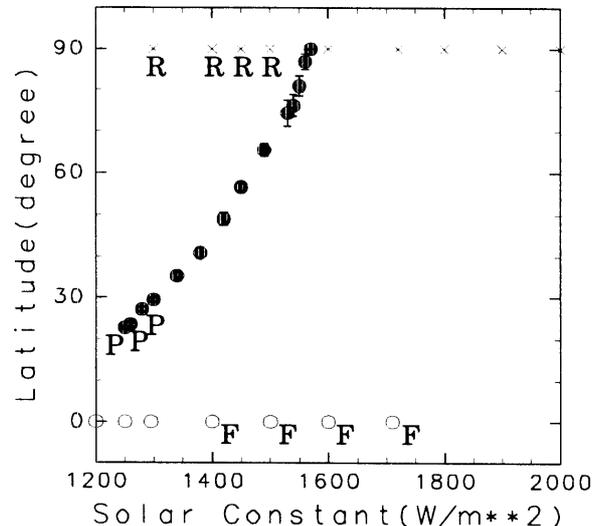


Fig.2 The relationship between solar constant and ice line latitude obtained by GCM. Character "F" and "R" represent cases whose initial states are ice-covered state calculated under $S = 1200 \text{ W/m}^2$, runaway greenhouse state obtained under $S = 1600 \text{ W/m}^2$, respectively. Character "P" and represents results which are obtained with decreasing S gradually starting from partially ice-covered state with $S = 1300 \text{ W/m}^2$. Marks without character represent cases with isothermal state as initial condition. As for marks \circ , \bullet and \times , refer to Fig. 1.

4. 議論

GCM の結果は、3次元系でも large ice-cap instability はやっぱり起こるようだ、ということを示唆している。GCM では 20 度よりも低緯度に氷境界が存在する安定な解が得られなかった。GCM は時間発展問題を解いているので不安定平衡解は求めることはできないけれども、この領域には不安定平衡解が存在し、EBM で議論されたのと同様の意味での large ice-cap instability が起きている、と著者は考える。一方、氷面積が減少した場合には、GCM では統計的平衡状態が得られた。このため、一見 GCM では small ice cap instability は起きないようにも見える。しかし、GCM の計算結果では、氷面積が減少していくと氷境界緯度の振動の振幅が増大した。この結果は、3次元系では安定振動解と時間発展問題では得られない不安定平衡解が存在し、EBM における small ice cap instability の発生の GCM における対応物は Hopf 分岐である、ということを示唆しているのかもしれない。

引用文献

- 1) M.I.Budyko: *Tellus* **21** (1969) 611-619.
- 2) W.D.Sellers: *J. Appl. Meteor.* **8** (1969) 392-400.
- 3) G.R.North: *J. Atmos. Sci.* **32** (1975) 1301-1307.
- 4) P.F.Hoffman, A.J.Kaufman, G.P.Halverson & D.P.Schrag: *Science* **281** (1998) 1342-1346.
- 5) S.K.Baum & T.J.Crowley: *Geophys. Res. Lett.* **28** (2000) 583-586.
- 6) S.Nakajima, Y.-Y.Hayashi, & Y.Abe: *J. Atmos. Sci.* **49** (1992) 2256-66.
- 7) M.Ishiwatari, S.Takehiro, K.Nakajima & Y.-Y.Hayashi: *J. Atmos. Sci.* **59** (2002) 3223-3238.
- 8) G.R.North: *J. Atmos. Sci.* **41** (1984) 3390-3395.