

大気大循環モデルを用いた地球気候の太陽定数依存性に関する数値実験

松田 幸樹 [1]; 石渡 正樹 [2]; 高橋 芳幸 [3]; 林 祥介 [4]
[1] 神戸大・理; [2] 北大・理・宇宙; [3] 神戸大・理・惑星; [4] 神戸大・理・地惑

Numerical experiments on dependence of the Earth's climate on the solar constant by the use of a GCM

Koki Matsuda[1]; Masaki Ishiwatari[2]; Yoshiyuki O. Takahashi[3]; Yoshi-Yuki Hayashi[4]
[1] Science, Kobe Univ; [2] CosmoSciences, Hokkaido University; [3] Department of Planetology, Kobe Univ.; [4] Earth and Planetary Sciences, Kobe University

A solar constant is one of important parameters causing diversity of the planetary climate. For example, in previous studies by the use of one-dimensional energy balance models (EBMs), the planet's climate was studied (e.g., Budyko, 1969). These studies showed globally ice-covered states, partially ice-covered states, and ice-free states appeared as changing the solar constant. In addition, the existence of multiple states with a solar constant was also shown. A planetary climate was also studied by the use of general circulation models (GCMs) (e.g., Ishiwatari et al., 2007). This study confirmed the three states, which had been shown by EBMs in previous studies, appear in GCMs. Moreover, the existence of the runaway greenhouse state, which had not been shown in EBMs, was confirmed. In the previous studies, however, effects of land-ocean distribution and atmospheric composition were not considered. In this study, we assume the atmospheric composition and the land-ocean distribution same as those of the present Earth, and show dependence of the Earth's climate and some physical variables on the solar constant.

In the experiments, we use a planetary atmosphere general circulation model, DCPAM5. Dynamics process is calculated by solving the primitive equations with a spectral method. For radiative process, the Earth radiative model by Chou et al. (2001) is used. Condensation process is represented by Relaxed Arakawa-Schubert scheme (Moorthi and Suarez, 1992). Vertical turbulent mixing process is represented by the Mellor and Yamada (1982) level 2.5 scheme. Cloud process is represented by forecasting mixing ratios of a cloud ice and a cloud water, with considering advection, turbulent mixing, production by condensation, and loss with fixed time constants. On the land surface, the surface and soil temperatures are calculated by a soil heat conduction model, and the soil moisture is calculated by a bucket model (Manabe, 1969). For the ocean, a slab ocean with depth of 60 m is assumed. The surface albedo of the ocean is set to 0.6 where the surface temperature is below 271.15 K, while it is set to 0.1 where the surface temperature is above 271.15 K. We use data of ETOPO1 (Amante and Eakins, 2009) and Matthews (1983, 1984, 1985) for topography and surface albedo distribution, respectively. As for ozone distribution, we use a zonal mean value of climatology of CMIP5 simulations. Resolution used in this study is a longitude-latitude grid size of about 5.6 degrees, and 26 vertical levels. By the use of the model, we performed 15 experiments with various solar constants and two initial conditions to explore dependence of the Earth's climate on the solar constant. The given solar constant ranges from 1100 Wm^{-2} to 1500 Wm^{-2} , and two initial conditions are isothermal atmospheres of 280 K or 200 K.

The results of the experiments confirmed existence of globally ice-covered states, partially ice-covered states, and ice-free states, that had been discovered by previous studies by the use of EBMs and GCMs. Moreover, we found the climate regime diagram is different between in the southern hemisphere and in the northern hemisphere, because of the difference in the land-ocean distribution. We examined the change of meridional circulation as changing the solar constant. As the solar constant increases, the upward flow region of meridional circulation moves southward, and the strength of meridional circulation does not increase monotonically. The strength of meridional circulation has the maximum when a planet is in a partially ice-covered state in both hemispheres. Moreover, examination of the strength of meridional circulation in a partially ice-covered state show, as the solar constant increases, the circulation becomes weak in the southern hemisphere, but become strong in the northern hemisphere.

As a next step, we will confirm the existence of a runaway green house state, and a large ice cap and small ice cap instabilities.

惑星気候の多様性を考える上で、太陽定数は重要なパラメータの一つである。南北 1 次元エネルギーバランスモデル (EBM) を用いた先行研究 (例えば, Budyko, 1969) において、惑星気候の太陽定数依存性が調べられた。それによると、太陽定数に応じて全球凍結状態、部分凍結状態、氷なし状態という 3 つの状態が現れること、および、ある太陽定数に対して複数の状態 (多重解) が解となることが示された。また、大気大循環や惑星放射の射出限界を陽に計算できる大気大循環モデル (GCM) を用いた先行研究においても、惑星気候の太陽定数依存性が調べられ、EBM で得られた 3 つの状態や多重解が現れることが確認された (例えば, Ishiwatari et al., 2007)。さらに、GCM を用いた研究では、EBM では見られなかった暴走温室状態が存在することが確認された。上記で挙げた 2 つの先行研究では、海陸分布や大気組成の影響を考慮していない。本研究では、地球の海陸分布と大気組成を考慮した大気大循環モデルを用いて、地球気候の太陽定数依存性を明らかにし、様々な物理量の太陽定数依存性について考察する。

実験には惑星大気大循環モデル DCPAM を用いる。力学過程は、プリミティブ方程式系をスペクトル法を用いて解くことで計算される。放射過程は、Chou et al. (2001) 等による地球放射モデルを用いる。凝結過程は、Relaxed Arakawa-Schubert (Moorthi and Suarez, 1992) で表現される。鉛直乱流混合過程は、Mellor and Yamada (1982) level 2.5 により表現される。雲は、移流、乱流混合、凝結による生成、定数時定数による消滅を考慮して雲水・雲氷混合比を予報することで、表現される。

陸面では、土壌熱伝導モデルにより土壌温度を計算し、バケツモデル (Manabe, 1969) により土壌水分を計算する。海は、60 m の深さを持つ板海として取り扱う。海表面アルベドは、海表面温度が 271.15 K よりも低い時には 0.6 とし、271.15 K より高い時には 0.1 とする。地形データは ETOPO1 (Amante and Eakins, 2009) を使用する。陸面アルベド分布は Matthews (1983, 1984, 1985) によるものを使用する。オゾン分布は CMIP5 設定の気候値の東西平均を使用する。本研究で行った実験で用いた解像度は、緯度経度格子間隔が約 5.6 度であり、鉛直方向の大気層数が 26 である。このモデルを用いて、地球の気候の太陽定数依存性を調べるために、様々な太陽定数と二つの初期条件を与えて 15 個の実験を実施した。与えた太陽定数の範囲は 1100 Wm^{-2} から 1500 Wm^{-2} であり、初期条件は 280 K および 200 K の等温大気である。

上記の設定で実験を行ったところ、全球凍結状態、部分凍結状態、氷なし状態が存在することが確認された。また、地球の海陸分布を考慮すると、気候レジーム図が南北半球で異なることがわかった。また、太陽定数の変化に伴う子午面循環の変化について調べた。太陽定数が増加すると、子午面循環の上昇域が南方向へ移動する。子午面循環の強度は単調増加せず。南北半球ともに部分凍結状態が最大となる。部分凍結状態の中で子午面循環の強度を比較すると、南半球では太陽定数大きくなるにつれて弱くなるが、北半球では太陽定数変化してもあまり変化しない。

今後は、暴走温室状態の有無や大氷冠不安定や小氷冠不安定の有無を確認する予定である。