

全球海惑星気候の太陽定数依存性の研究: 海洋大循環の影響の考察

河合 佑太 [1]; 高橋 芳幸 [1]; 石渡 正樹 [2]; 西澤 誠也 [3]; 竹広 真一 [4]; 中島 健介 [5]; 富田 浩文 [6]; 林 祥介 [7]
[1] 神戸大・理・惑星; [2] 北大・理・宇宙; [3] 理研 AICS; [4] 京大・数理研; [5] 九大・理・地惑; [6] 理研 AICS; [7] 神戸大・理・地惑

A study on dependence of aquaplanet climates on the solar constant: consideration of the influence of ocean general circulation

Yuta Kawai[1]; Yoshiyuki O. Takahashi[1]; Masaki Ishiwatari[2]; Seiya Nishizawa[3]; Shin-ichi Takehiro[4]; Kensuke Nakajima[5]; Hirofumi Tomita[6]; Yoshi-Yuki Hayashi[7]

[1] Department of Planetology, Kobe Univ.; [2] CosmoSciences, Hokkaido University; [3] RIKEN AICS; [4] Research Inst. Math. Sci., Kyoto Univ.; [5] Earth and Planetary Sciences, Kyushu University; [6] RIKEN AICS; [7] Earth and Planetary Sciences, Kobe University

1. Introduction

In order to understand the diversity of exoplanet climates, we have investigated aquaplanet climates with atmospheric general circulation models (AGCMs). For example, Ishiwatari et al. (2007) (hereafter, referred to as INTH07) explored the solar constant dependency of aquaplanet climates in which the limit of longwave radiation of planet and atmospheric general circulation are considered, as an extension of previous studies (e.g., Budyko, 1969) with one-dimensional energy balance models (EBMs). They found a globally ice-covered state, a partially ice-covered state and a runaway greenhouse state, and showed the multiplicity of solutions, even in an AGCM with many degrees of freedom. But they excluded the ocean general circulation. However, the development of computational science enables the studies of exoplanet climates, considered the ocean general circulation (e.g., Marshall et al., 2007). In particular, Rose (2015) (hereafter, referred to as R15) investigated the solar constant dependence of aquaplanet climates with a coupled atmosphere-ocean-sea ice model, and indicated the ocean heat transport produced a new stable equilibrium state (waterbelt state). However, he used a simplified AGCM, and did not focus on cases of large solar constant where the runaway greenhouse state may exist. In this study, as an extension of INTH07, we explore solar constant dependence of a coupled atmosphere-ocean-sea ice system on an aquaplanet. We also investigate the change of climatic regimes with the ocean general circulation, and consider the role of ocean on aquaplanet climates.

2. Model and Experimental setup

We use our developing coupled atmosphere-ocean-sea ice model. The atmospheric model is an AGCM, DCPAM, in which three-dimensional primitive equations are solved. Based on INTH07, a gray atmosphere radiation scheme (Nakajima et al., 1992), moist convective adjustment scheme and large condensation scheme (Manabe et al., 1965), and Mellor and Yamada level 2 scheme are applied. The ocean model is a zonally averaged two-dimensional ocean general circulation model in which hydrostatic Boussinesq equations are solved. The mixing due to meso-scale eddies and convection is parametrized (Gent and McWilliams, 1990; Marotzke, 1991). The sea ice model is a thermodynamics model based on Winton (2000). The surface albedo is set to 0.5 where surface temperature is below 263 K, otherwise set to 0. In order to evaluate the influence of ocean general circulation clearly, three configurations are considered: swamp, slab, and dynamic ocean. The value of solar constant, S , is specified every 50 W/m^2 in the range between $900\text{-}1600 \text{ W/m}^2$. The number of atmosphere model grid is $64 \times 32 \times 32$ for $S > 1450 \text{ W/m}^2$, otherwise $64 \times 32 \times 16$. The number of grid points on ocean and sea ice models is 64×60 and 64 , respectively. For most of cases, the initial condition is a rest atmosphere and ocean with 280 K, while some other conditions are also used to examine the multiplicity. The time integration for swamp/slab ocean experiments is basically performed over about 300 years, and, for dynamic ocean experiment, over about 30,000 years with periodically synchronous coupling.

3. Results

The statistically equilibrium state of coupled system in a control case ($S=1380 \text{ W/m}^2$) reproduces the atmospheric and oceanic fields qualitatively, obtained from INTH07 and R15. In the dynamic ocean experiment, three climatic regimes appear with multiplicity, as in INTH07. The regime diagrams for dynamic ocean experiment is qualitatively similar to ones for swamp/slab ocean experiments, and the ocean general circulation seems to have a dramatic impact on the climates. The significant difference from R15 is that the runaway greenhouse state is contained, and the disconnection of branch of partially ice-covered state is not found. In order to examine the detailed branch structure, we perform further numerical experiments gradually varying the solar constant.

1. はじめに

系外惑星で実現される気候の多様性の理解を深めるために、我々は大気大循環モデルを用いて水惑星の気候を調べてきた。例えば、Ishiwatari et al. (2007) (以後 INTH07) では、伝統的な南北 1 次元エネルギー・バランスモデル (EBM) を用いた研究 (Budyko 1969 等) の発展として、惑星放射の射出限界や大気大循環が陽に考慮される系で、水惑星気候の太陽定数依

存性を調べた。EBM に比べて自由度が遥かに多い系でも、現在地球の太陽定数付近で全球凍結解、部分凍結解、暴走温室解の多重性が存在することを INTH07 は示したが、海洋大循環の影響は考慮されなかった。しかし、近年の計算科学の発展に伴い、地球以外の惑星気候計算にも海洋大循環が考慮できるようになってきている (Marshall et al., 2007 等)。特に、Rose (2015) (以後 R15) は、水惑星の大気海洋海水結合系の太陽定数依存性を調べ、海洋熱輸送により新たな安定平衡解 (赤道非凍結解) が生じることを示唆している。しかし、彼らは計算時間の短縮のために簡略化した大気モデルを用いている。また、太陽定数が大きい場合は着目されなかったため、暴走温室解までは調べられていない。本研究では、INTH07 の発展として、INTH07 大気設定のもとで、水惑星大気海洋海水結合系の太陽定数依存性を調べる。また、海洋大循環の有無による気候レジームの変化にも注目し、水惑星気候に対する海洋の役割について考察する。

2. モデルと実験設定の記述

実験には、系外惑星の気候探索を念頭に現在我々が開発中の大気海洋海水結合モデルを用いる。大気モデルは、惑星大気大循環モデル DCPAM である。力学過程では、3次元プリミティブ方程式系が擬スペクトル法によって解かれる。放射過程は Nakajima et al. (1992) の灰色大気放射スキーム、凝結過程は Manabe et al. (1965) の湿潤対流調節スキームと大規模凝結スキーム、鉛直乱流混合過程は Mellor and Yamada level 2 スキームによって表現される。海洋海水モデルは軸対称モデルである。力学過程では、静力学ブジネスク方程式系が擬スペクトル法によって解かれる。海洋の中規模渦や対流による混合は、Gent and McWilliams (1990) や Marotzke (1991) のパラメタリゼーションにより表現される。海水モデルは Winton (2000) の鉛直3層熱力学モデルであり、海水輸送は海水厚さの水平拡散で表現する。表面アルベドは表面温度が 263 K 以下では 0.5、それより高い場合は 0 に設定する。本実験では、海洋大循環の影響を明確に調べるために、海洋の取り扱いとして swamp ocean, slab ocean, dynamic ocean の3種類を考える。太陽定数 (S) は約 900~1600 W/m² の範囲で約 50 W/m² ごとに指定する。大気モデルの格子点数は、太陽定数が 1450 W/m² より大きい場合は 64x32x32 (T21L32)、それ以下の場合は 64x32x16 (T21L16) に設定する。海洋モデルの格子点数は 64x60、海水モデルの南北格子点数は 64 である。多くの実験における初期値は 280 K 等温の静止した大気海洋とするが、解の多重性を調べるために別の実験で得られた全球凍結解や暴走温室解を初期値とした実験も行った。時間積分は、基本的に、swamp/slab ocean 実験では約 300 年間、dynamic ocean 実験では周期的同期結合を用いて約 3 万年間行う。

3. 計算結果

標準ケース (S=1380 W/m²) から得られる結合系の統計的平衡状態は、INTH07 や R15 が得た大気海洋場を定性的に再現することを確認した。dynamic ocean 実験から得られる気候レジームは、全球凍結解、部分凍結解、暴走温室解の3種類であり、これらの解は多重解であることが示された。また、swamp ocean, slab ocean 実験の気候レジーム図と比較するとき、その多重性の様相は定性的には変化せず、我々の設定では海洋大循環の影響が小さいことが分かった。R15 が得た気候レジーム図と大きく異なる点は、暴走温室解が含まれることと、彼らが示唆した、海洋熱輸送した場合に生じる部分凍結解のブランチの分断が見られない点である。現在、部分凍結解のブランチの構造により迫るため、部分凍結解を初期値にして太陽定数を増減させる実験を進めている。

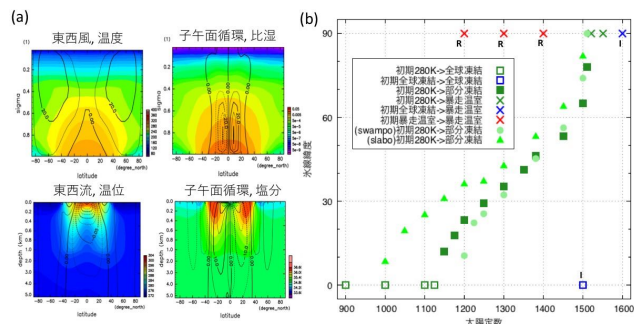


図: dynamic ocean 実験における (a) 太陽定数 1380 W/m² の場合の大気海洋場の子午面分布, (b) 水線緯度の太陽定数依存性 (初期値が全球凍結解・暴走温室解の場合は、それぞれ I, R のラベルで示している。また、swamp/slab ocean 実験における部分凍結解の点もプロットしている。)