

研究課題名：系外惑星も含めた地球型惑星の気候多様性に関する数値実験： 大きな赤道傾斜角を持つ惑星の気候

課題代表者：北海道大学大学院理学研究院 石渡正樹
共同研究者：九州大学大学院理学研究院 中島健介
神戸大学大学院理学研究科 林 祥介
北海道大学大学院理学院 荻原弘堯
神戸大学大学院理学研究科 河合佑太

実施年度：平成 30 年度～平成 30 年度

1. 研究目的

これまでの系外惑星（太陽系の外に存在する惑星）探査から、中心星近傍に存在する巨大ガス惑星など太陽系内惑星とは大きく異なる特徴を持つ多様な惑星が発見されてきた。今後の系外惑星観測のターゲットは従来の観測精度では発見が難しかった地球型惑星になってきており、既に地球程度の質量を持つ惑星が 20 以上も発見されている。これらの惑星の中には地球と同様に温暖温和な気候を有するものもあると考えられている (Gillon et al., 2016)。多様な系外惑星を想定した気候推定は惑星気候学における新たな課題であると言える。多様な条件下における気候推定は、地球のような生命の存在に適した環境が存在・維持される条件および気候の安定性の考察につながるものが期待される。

これまでの系外惑星の気候推定は、海外の研究グループによるもの (Hu and Yang, 2014; Kaspi and Showman, 2015 など) に加え、我々の研究グループにおいても継続しておこなわれてきた。それらは、全球凍結から暴走温室に至るまでの水惑星気候の多様性の調査などである (Ishiwatari et al., 2002, 2007; H14 年度以降の国立環境研究所スーパーコンピュータ利用研究など)。本課題は、一昨年度課題より開始した陸惑星気候の考察をおこなうものである。陸惑星とは、表層に存在する水が地球に比較して極端に少ないため、惑星全体が陸地となる惑星である。惑星形成理論からは惑星表層に存在する水の量には大きな幅がありえると言われており (Tian and Ida, 2015)、陸惑星も存在する可能性がある (Abe et al., 2005)。過去の陸惑星 GCM 実験では、地球の太陽定数を与えた場合には低緯度の乾燥領域と高緯度の湿潤領域が形成されること (Abe et al., 2005)、太陽定数を地球の値の 1.7 倍 (太陽定数の値は 2322W/m^2) まで増加させても平衡状態が得られることが示されている (新田他, 2014, Abe et al., 2011)。これらによれば、陸惑星では水惑星に比べると広い太陽定数の範囲でハビタブルな環境が実現されることになる。

Abe et al. (2011) では太陽定数が現在地球の 1.7 倍の値を超えると土壌水分は全て蒸発し暴走温室状態に至るとい

結果が得られていた。しかし、ハドレー循環などの循環構造が変化し、水蒸気輸送の様態が変化した場合に同様の結果が得られるのかについては調べられていない。本課題では、自転傾斜角、自転角速度など循環構造に強く影響するパラメータを変化させた陸惑星実験を実施し、陸惑星における暴走温室状態の発生条件に関する考察を目指す。

2. 研究計画

用いる大気大循環モデルは、我々がこれまでに開発・使用してきた惑星大気大循環モデル DCPAM5 (<http://www.gfd-dennou.org/library/dcpam>) である。その力学過程は 3 次元球面プリミティブ方程式系から成る。水平離散化にはスペクトル法を用いる。鉛直座標には σ を採用し、Arakawa and Suarez (1983) の方法を用いて離散化を行なう。放射計算には Chou et al. (1996) および Chou et al. (2001) のスキームを使用し、水蒸気、CO₂、雲による長波放射および短波放射の吸収を考慮する。大気分子による短波放射の散乱についてはレイリー散乱を仮定して評価する。積雲過程には Relaxed Arakawa and Schubert スキーム (Moorthi and Suarez, 1992) を用いる。この積雲スキームで診断された雲密度と上記の放射スキームを用いて雲による放射の吸収・反射・散乱を計算する。雲の消滅時間を仮定した簡単な雲スキームを用いて雲水量の時間発展を求める。乱流過程の評価には Mellor and Yamada (1974) の level 2.5 の方法に従って決めた鉛直拡散係数を用いる。地表面フラックスの計算には Beljaars and Holtslag (1991) の方法を用いる。水蒸気および雲水の移流は Kashimura et al. (2013) のセミラグランジュ法物質移流スキームを用いて計算する。上記の物理過程スキームと組み合わせて雲の消失時間を 1500 秒とすると地球条件において全球熱収支がおおよそ 5w/m^2 の誤差の範囲内で合うことが確認されている。地表面モデルとして、バケツモデル (Manabe, 1969) を惑星表面全体に用いる。ここではバケツの深さは十分深くっており、バケツから水があふれることはないようにしている。

計算設定は Abe et al. (2005) にある warm-upright case の自転傾斜角 23.5 度の場合にあわせる。自転角速度・表面気圧は地球と同じ値に設定している。離心率は 0 とする。太陽定数 S の値としては 1366, 2200, 2400, 3000, 3200 W/m^2 の 5 種を用いる。解像度は T42L26 とした。Abe et al. (2005) で用いられた解像度は T21L11 なので鉛直解像度は Abe et al. (2005) の倍以上となっている。初期条件として、等温 (280K) 静止乾燥大気・土壌水質量を一様とした状態を与え、4 年以上の積分を実行した。初期の土壌水分量として、全球一様の 20, 40, 60cm の深さの水を与える 3 通りの場合を考える。

3. 進捗状況

上記の設定を用いて太陽定数を増加させた実験をおこなった。その結果、 $S=3200 \text{ W/m}^2$ まで増加させても暴走温室状態は発生せず統計的な平衡状態が得られた。ここでは、例として 初期の水深さが 20cm, $S=2400 \text{ W/m}^2$ の場合の結果を示す。全球平均 OLR (Outgoing Longwave Radiation; 図 1a の青線) と全球平均入射放射量 (図 1a の赤線) はほぼつりあっており、統計的な平衡状態が実現されている。全球平均 OLR は 約 450 W/m^2 になっており、射出限界を大きく上まわる値となっている。射出限界によって射出量が抑えられる傾向は見られず、暴走温室状態の発生が起っていない。Abe et al. (2011) では、太陽定数が現在地球の 1.7 倍の値になると土壌水分が全て蒸発するという結果が得られていたが、本研究の実験では結果が異なる。図 1(b) に全球平均大気水蒸気量 (図の青線) および全球平均土壌水分量 (図の赤線) の時間変化を示す。土壌水分量は 0 にならず、全球平均にしておよそ 5cm の深さの水量が土壌に含まれ、残りは大気中に水蒸気として存在する。

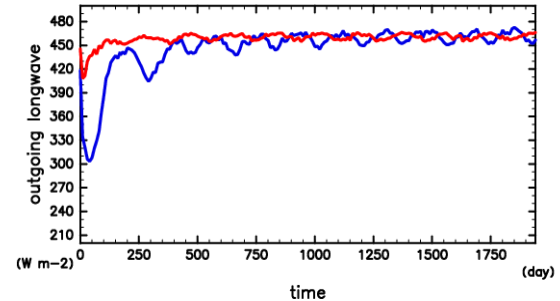
全土壌水分の蒸発が起らないという結果は、太陽定数を 3200 W/m^2 (現在の地球の太陽定数のおよそ 2.3 倍) まで増加させても得られた。これは Abe et al. (2011) とは異なる結果である。この違いが Abe et al. (2011) に比べて本研究の計算では暴走温室状態の発生が抑制されているという違いをもたらしている可能性がある。

4. 今後の計画

陸惑星における完全蒸発の発生に関して、本課題における実験と過去の Abe et al. (2011) とで結果が異なった理由として、初期状態の違いが考えられる。Abe et al. (2011) では太陽定数を順次増加させる実験をおこなっており、これにより完全蒸発が進行した可能性がある。今後は初期状態の違いによる結果の相違の確認を行うとともに、自転傾斜

角・自転角速度を変更したパラメータ実験も実施し循環構造の相違による結果の違いについて調査する。

(a)



(b)

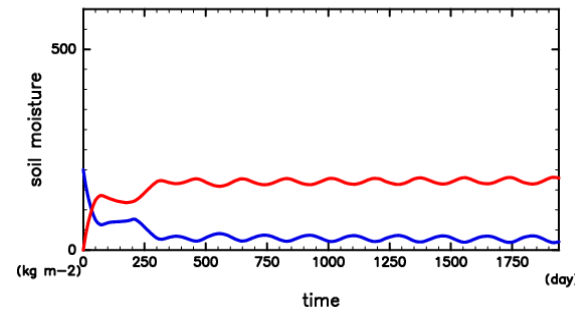


図 1. 陸惑星実験で得られた全球平均量の時間変化。

(a) 入射放射フラックス(赤線)と OLR(青線) [W/m^2].
(b) 鉛直積算水蒸気量(赤線)と土壌水分量(青線) [kg/m^2]. いずれも横軸は時間[day]. 初期水の深さが 20cm, $\Omega^*=1.0$, $S=2400 \text{ W/m}^2$ の場合。

5. 昨年度の研究課題名

系外惑星も含めた地球型惑星の気候多様性に関する数値実験: 海陸分布が気候に及ぼす影響

6. 計算機資源の利用状況 (2017 年 10 月 1 日 ~ 2018 年 11 月 30 日)

実行ユーザ数: 5

CPU 時間 v_deb: 0.00 hours, v_32cpu: 131,088.89 hours, v_96cpu: 0.00 hours, v_160cpu: 0.00 hours, 計: 131,088.89 hours