

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

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 29 年度～平成 29 年度

1. 研究目的

系外惑星探索により生命存在に適した気候を持つと予想される複数の惑星（例えば、プロキシマ b; Anglada-Escudé et al., 2016）が発見されるのに伴い、系外惑星における生命存在可能性を念頭に置き地球と異なる条件下にある気候の研究も盛んに行なわれている（Hu and Yang, 2014; Kaspi and Showman, 2015 など）。本研究の目的は、地球・火星・金星の太陽系内惑星に加え系外惑星も考察の対象として、軌道要素・自転角速度などの条件に応じてあらわれる気候の多様性の探索および多様性をもたらす物理の考察を行うことである。地球以外の惑星の気候に関する考察を通して、地球環境の安定性に関する理解を深めることも目指す。

本課題では、様々な水量を持つ惑星：陸惑星から海惑星まで、の気候を考察する。陸惑星とは地球に比べて表層に存在する水の量が非常に少ない惑星である。系外惑星の中にもそのような惑星が存在し、しかも生命存在に適した気候を持つ可能性がある（Abe et al., 2005）。Abe et al. (2005) は、大気大循環モデル（GCM）を用いて、陸惑星では寒冷な気候に加えて温暖温和な気候も存在し得ることを示した。温暖な気候では、南北水蒸気輸送により低緯度の乾燥領域と高緯度の湿潤領域が形成される。また、新田ほか（2014）は陸惑星における暴走温室状態（Nakajima et al., 1992）発生の太陽定数閾値が水惑星における値の約 1.7 倍となることを示し、閾値はハドレー循環の境界緯度における水蒸気量によって決定されると議論した。ハドレー循環境界緯度は自転角速度によって大きく変化する（Williams, 1988; Kaspi and Showman, 2015 など）ので陸惑星における暴走温室状態の発生条件は自転角速度に応じて変化する可能性がある。本課題では、まずこの可能性について検討し、陸惑星における暴走温室状態発生条件を明らかにする。この結果と、これまでの我々の水惑星実験による考察（H26 年度までのスーパーコンピュータ利用研究）によって、表層が陸で覆われた惑星と表層が水で覆われた惑星の 2 つの極端な状況における暴走温室状態の発生条件に関する理解が得られることになる。この議論をさらに拡張して、様々な海陸分布をもつ場合も考察し、暴走温室状態発生条

件の惑星表層水量への依存性を明らかにすることまで目指す。

2. 研究計画

Abe et al. (2005) と同様の陸惑星 GCM 実験（初期における水の深さ：全球一様の 20cm, 軌道要素：地球と同じ、自転傾斜角：地球の値 23.4° ）を実施する。用いるモデルは、我々の研究グループで開発を行なっている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する。放射計算には Chou et al. (1996) および Chou et al. (2001) の地球大気用スキームを使用する。積雲過程には、Relaxed Arakawa and Schubert スキーム（Moorthi and Suarez, 1992）を用いる。雲水量は、雲の消滅時間を仮定した簡単な時間発展スキームを用いて求める。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吸収量を計算する。鉛直乱流拡散の評価には Mellor and Yamada (1974) の level 2.5 の方法を、地表面フラックスの計算には Louis et al. (1992) の方法を用いる。水蒸気および雲水の移流には Kashimura et al. (2013) のセミラグランジュ移流スキームを用いる。解像度は T42L26 を基本とする。

昨年度は、地球の値で規格化した自転角速度 Ω^* を 1.0 とした場合について 50 年の積分を実施する実験を行っていた。そこでは、Abe et al. (2005) の結果と異なり、低緯度の乾燥化が十分に起こるまでには至らなかった。今年度はさらに積分時間を延長し Abe et al. (2005) と同様の結果が得られるか確認する。その確認後、太陽定数を増加させた実験を行なう。用いる太陽定数 S の値は 1800, 2000, 2200 W/m^2 の 3 通りとする。さらに、 $\Omega^*=0.1$ とした場合について同様の実験を行ない、ハドレー循環の緯度幅によって、陸惑星の暴走温室状態発生条件が変わるのかどうかを調べる。これらの実験を終了することができた後には、海陸分布が存在する場合について太陽定数を変更した実験を

実施する。地球の海陸分布を与えた場合、半球にわたるような超大陸が存在する場合、多数の小大陸が存在する場合などについて考察する予定である。

3. 進捗状況

昨年度は 50 年までの時間積分で低緯度の乾燥化が十分に起こるところまで到達できずにいた。今年度はさらに継続し 70 年までの時間積分をおこなった。その結果、低緯度の乾燥領域を得ることができた。図 1 に 70 年積分で得られた東西平均土壌水分量の時間変化を示す。低緯度領域では乾燥化が起こり、極域に水に集まる構造が形成されている。図は示さないが、緯度 75 度よりも低緯度領域では土壌水分量の減少が続いている。それより高緯度域では土壌水分量の増加が続いている。低緯度において乾燥化が起こるという結果は Abe et al. (2005) と共通するものとなった。ただし、図 1 で示された状態は Abe et al. (2005) の結果に比べて低緯度の乾燥域が広いものとなっている。図 1 では土壌水分がほとんど 0 となる乾燥域はおおよそ緯度 65 度まで広がっている。これに対して、Abe et al. (2005) の結果では乾燥域は 58 度までとなっている。

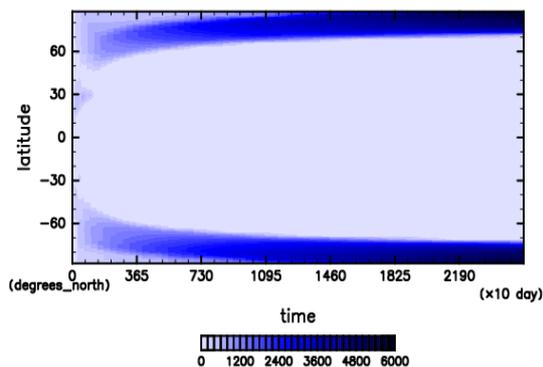


図 1. 土壌水分の時間変化。東西平均土壌水分量 [kg/m²] 緯度分布の時間変化。横軸は時間。70 年分の結果を示す。縦軸は緯度。 $\Omega^*=1.0$, $S=1366\text{W/m}^2$ の場合。

陸惑星実験において低緯度乾燥領域が形成されることが確認されたので、太陽定数増加実験を開始した。 $S=1800\text{W/m}^2$ として 2300 日の積分を実行した結果を図 2 に示す。この場合、年平均全球平均 OLR (外向き赤外放射) はほぼ太陽放射量と等しくなっており暴走温室状態は発生せず、統計的平衡状態に達するものと考えられる。以前に我々が行なった swamp 設定の水惑星実験では $S=1800\text{W/m}^2$ の場合には暴走温室状態が発生していた。すなわち、陸惑星では水惑星に比べて暴走温室状態が発生する太陽定数閾値が大きく

なっており、新田ほか (2014) の議論と調和的なものになっている。

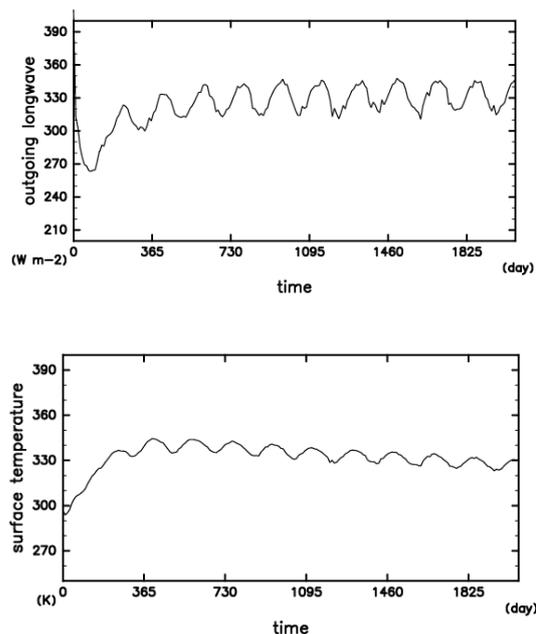


図 2. 太陽定数増加実験の結果。(上図)全球平均 OLR [W/m²]. (下図)全球平均地表面温度 [K]. 横軸は時間 [日]. $\Omega^*=1.0$, $S=1800\text{W/m}^2$ の場合。

4. 今後の計画

$\Omega^*=1.0$ の場合について、さらに太陽定数を増加させた実験 ($S=2000, 2200\text{W/m}^2$ など) を実施し暴走温室状態が発生する太陽定数閾値を決定し、新田ほか (2014) の再検討を終了させる。次に、 Ω^* 、ひいては大気の循環構造が暴走温室状態の発生条件に与える影響に関する考察を行なうために、 $\Omega^*=0.1$ の場合についても太陽定数増加実験を実施する。その後、半球が海・別半球が陸となっている惑星など仮想的な海陸分布を持つ場合についての調査に進む予定である。

5. 昨年度終了研究課題名

系外惑星も含めた惑星気候多様性に関する数値実験

6. 計算機資源の利用状況 (2016 年 10 月 1 日 ~ 2017 年 11 月 30 日)

実行ユーザ数: 4

CPU 時間 v_deb: 0.00 hours, v_32cpu: 59,128.51 hours, v_96cpu: 0.00 hours, v_160cpu: 0.00 hours, 計: 59,128.51 hours