

## 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計算： 陸惑星気候の太陽定数依存性

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

実施年度：令和4年度～令和4年度

### 1. 研究目的

本研究は、系外惑星も考察対象に含めて惑星の気候の多様性および安定性に関する理解を深めることを目指すものである。この数年間のスーパーコンピュータ利用研究課題では系外惑星の1つの姿であると考えられている陸惑星の気候多様性に関する調査を行ってきた。陸惑星とは惑星大気表層系の水量が平均水深にして10mのオーダーの惑星である。Abe et al. (2011)は陸惑星設定を用いたGCM(大気大循環モデル)実験を行い、全球平均日射吸収量が水惑星における暴走温室状態発生の閾値(我々の予備的な1次元放射平衡モデル計算によれば、地球大気と同様な放射特性をもつ雲・エアロゾル無しの飽和水蒸気大気ではおよそ320 W/m<sup>2</sup>)を超えて415 W/m<sup>2</sup>になっても惑星表面に液体の水が保持され、419 W/m<sup>2</sup>になると土壌水分が全て蒸発する完全蒸発状態が発生するという結果を得た。この結果は、水を豊富に持つ水惑星よりも陸惑星の方が広い太陽定数範囲で惑星表面に液体の水を保持するというを示しており、陸惑星は系外惑星の生命存在可能性を考える上で重要な調査対象であると言える。

我々の研究グループにおいても陸惑星の気候状態の多様性の理解を得ること、完全蒸発状態の発生条件に関する考察を行うことを目的として陸惑星設定を用いたGCM実験を実施してきた。しかし、Abe et al. (2011)と同様の設定を用いた追実験では、Abe et al. (2011)の結果とは異なり、全球平均日射吸収量が450 W/m<sup>2</sup>(与えた太陽定数はS=2400 W/m<sup>2</sup>)を超えても完全蒸発状態の発生を認めることができないという結果が得られていた。完全蒸発状態の発生に関する検討を行っていた令和4年度の利用研究課題において、完全蒸発状態に至るにはまだ入射量が不足している可能性が示唆された。令和5年度においては、更に太陽定数を増加させた実験を実施し、完全蒸発状態の発生の有無の検討を重ねた。

### 2. 研究計画

惑星大気大循環モデル DCPAM5 (<http://www.gfd-dennou.org/library/dcpam>)を用いて陸惑星設定におけ

る太陽定数変更実験を実施する。DCPAM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。放射計算には、Chou et al. (1996)、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。積雲スキームおよび大規模凝結スキームで計算される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。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。雲水量は、生成(積雲対流スキームから計算)、移流、乱流拡散、消滅(雲水量に比例し、消散時間をパラメータとして与える)を考慮した時間発展方程式を解くことにより求める。雨水は大気中で蒸発せずに落下させる。地表面モデルとしてバケツモデル(Manabe, 1969)を惑星表面全体に適用する。与えた太陽定数の範囲は現在地球のS=1366 W/m<sup>2</sup>から完全蒸発に至るのに十分大きいと想像されるS=3200 W/m<sup>2</sup>までとした。太陽定数を増加させるに従い時間積分のタイムステップを短くとる必要があり、S=3200 W/m<sup>2</sup>の場合ではタイムステップとして30秒を用いた。地表面アルベドとしては一定値の0.2を与える。Abe et al. (2011)と同様に、自転傾斜角の値としては0度を用いた。初期に与える土壌水分量は全球一律の0.4 kg/m<sup>2</sup>(水の深さにして40 cm)とする。解像度はT21L26を用いる。

### 3. 進捗状況

図1にS=2400 W/m<sup>2</sup>の場合およびS=3200 W/m<sup>2</sup>の場合で得られた大気水蒸気量と土壌水分の全球平均値の時間変化を示す。S=2400 W/m<sup>2</sup>の場合(図1a)は令和4年度までに得られた結果を示したものである。この場合では、積分開始後32850日(およそ90年)には、水の大部分が極域に固着した土壌水分として存在するようになる。全球平均日射吸収量は450 W/m<sup>2</sup>となり、Abe et al. (2011)が得た完全蒸発状態発生の閾値を超えるものになっている。これに対してS=3000 W/m<sup>2</sup>の場合(図1b)、では、ほとんど全ての水が大気中に存在する状態が得られた。この場合の全球平均

日射吸収量は  $620 \text{ W/m}^2$  であった。我々の実験においては土壌水分がほとんど消失する状態を得るためには、日射吸収量が Abe et al. (2011) が得た土壌水分消失の閾値よりもずっと大きくならなければならないということがわかった。しかし、次で述べるように  $S=3200 \text{ W/m}^2$  の場合でも、土壌水分はわずかに残っており、Abe et al. (2011) が議論した完全蒸発状態に対応するものであるかについては更に検討が必要である。

図2に全ての実験で得られた全球平均日射吸収量と土壌水分量の関係を示す。Abe et al. (2011) の結果 (図の青点) では入射吸収量が  $419 \text{ W/m}^2$  を超えると土壌水分が急激に消失する。これに対して、本研究でおこなった実験 (図の赤点) では、全球平均日射吸収量が増加するに従い土壌水分量が連続的に減少しているようにも見え、また我々の実験で得られたほぼ土壌水分が消失する場合 (全球平均日射量が  $630 \text{ W/m}^2$ 、太陽定数が  $3200 \text{ W/m}^2$  の場合) でも全球平均土壌水分量はおおよそ  $0.05 \text{ kg/m}^2$  となっており土壌水分は蒸発しきれていない。これらの結果が、閾値を挟んで土壌水分量が急激に減少するという Abe et al. (2011) の主張と異なるものかどうかについては更に検討を要する。我々の実験では雨水の蒸発を考慮しておらず、このために完全蒸発状態への遷移が妨げられている可能性がある。また平衡状態に至っていない場合もあるため、長時間積分の継続、他の太陽定数を用いた実験を追加し土壌水分が減少する様子を詳細に確認することとする。

#### 4. 今後の計画

今後は、更に積分を継続し土壌水分が完全には消失しないという結果について検討をおこなう予定である。長時間積分を継続するとともにモデル比較実験も実施する。これらにより、完全蒸発状態への遷移が本当に不連続なものかどうかを確認し陸惑星の気候レジームに関する考察をおこなう予定である。

#### 5. 計算機資源の利用状況 (2023年4月1日～2023年10月31日)

VE 時間積 v\_debug: 0.0 hours, v\_normal: 200,549.6 hours, 計: 200,549.6 hours, (全体の VE 時間積に対する占有率: 2.7%)

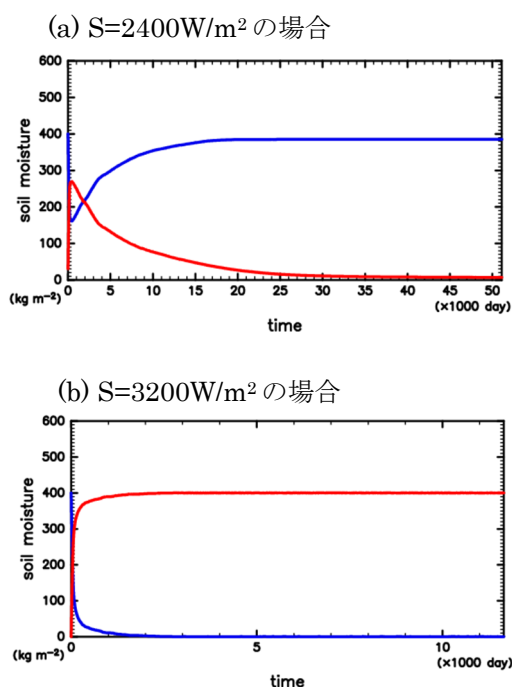


図1.大気水蒸気量と土壌水分量の全球平均値の時間変化。赤線は全球平均大気水蒸気量 [ $\text{kg/m}^2$ ]、青線は全球平均土壌水分量 [ $\text{kg/m}^2$ ]。(a)  $S=2400 \text{ W/m}^2$  の場合。日射吸収量は  $450 \text{ W/m}^2$  となっている。0日目から56570日までの結果を示している。(b)  $S=3200 \text{ W/m}^2$  の場合。日射吸収量は  $630 \text{ W/m}^2$  となっている。0日目から15020日までの結果を示している。

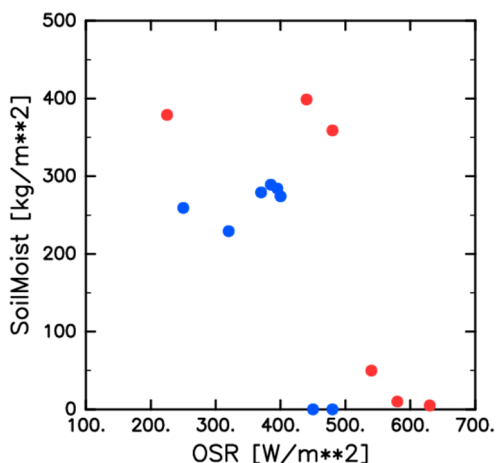


図2.全球平均日射吸収量 [ $\text{W/m}^2$ ] と全球平均土壌水分量 [ $\text{kg/m}^2$ ] の関係。赤点は本研究の結果。ただし  $S=2600 \text{ W/m}^2$  の場合 (日射吸収量は現時点で  $480 \text{ W/m}^2$ ) はまだ平衡状態に至っていない。青点は Abe et al. (2011) の Fig.6 を読み取った値を示す。