

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： 陸惑星のハビタビリティに関する考察

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・河合佑太
北海道大学大学院理学院 荻原弘堯

実施年度：令和元年度～令和元年度

1. 研究目的

最近の系外惑星探査により、地球と同程度の質量を持つ惑星が 20 個以上発見されている。惑星に入射する恒星放射を与えた鉛直 1 次元放射対流平衡計算から、これらの惑星の中には液体 H₂O が存在可能な表面温度を持つものがある（ハビタブルである）と議論されている(Wit et al., 2018 など)。このような観測的研究の発展と並行して、系外惑星が多様な軌道要素・日射分布・表面水量を有していることに注目し、大気大循環モデル (GCM) を用いた地球型系外惑星の気候の多様性に関する数値的研究も行われている(Abe et al., 2011; Noda et al., 2018 など)。これらの研究は、地球外生命の存在可能性に関する議論まで迫ることを目指したものであるが、地球とは異なる条件下における気候に関する考察を通して、地球の温暖温和な気候が実現される条件に関する知見を獲得し、気候の安定性に関する理解を深めるものでもであると期待される。

本申請課題は、このような視点からの気候の安定性に関する考察の一環として陸惑星気候に関する数値実験を行うものである。陸惑星とは地球に比較して表層に存在する水が非常に少ない惑星である (Abe et al., 2005, Abe et al., 2011)。陸惑星に関する考察により、惑星の表面水量の多様性に注目した気候多様性の探索を行うことになる。Abe et al. (2011) は、陸惑星 GCM 実験により、陸惑星では、太陽定数がおおよそ 2400W/m² となるまで高緯度表面に液体の水が維持され、それよりも太陽定数が増加すると惑星全体で完全蒸発が起こることを示した。我々もここ数年のスーパーコンピュータ利用研究において陸惑星気候に関する数値実験に取り組んできた。当初は、完全状態発生条件の自転角速度・自転傾斜角依存性を調べることを目的としていた。自転角速度や自転傾斜角が異なる場合には、ハドレー循環・傾圧擾乱の存在／非存在あるいはそれらの循環構造が変化するため、結果が変わってくる可能性があるからである。しかし、我々のこれまでの実験によって、Abe et al. (2011) の結果とは異なり、完全蒸発が起こらない可能性があることが示された。本申請課題で

は、陸惑星において本当に完全蒸発が起こるのかという問いに対する答えを得ることをめざす。

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、全球表面にバケツモデル (Manabe, 1969) を適用した陸惑星実験を実施する。物理過程として、地球大気用放射スキーム (Chou et al., 1996; Chou et al., 2001)、Relaxed Arakawa and Schubert 積雲対流スキーム (Moorthi and Suarez, 1992)、鉛直乱流拡散スキーム (Mellor and Yamada, 1974)、地表面フラックススキーム (Louis et al., 1992) などを用いる。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。自転傾斜角は 0 とし、太陽定数の値は 1366, 2400, 2600 W/m² とする。自転角速度は地球の値を用いる。初期に与える土壌水分量は、水の深さにして 40 cm とした。解像度と初期場に関しては以下の 2 組のものを用いる: (a) 解像度: T42L26, 初期場は等温 (280K) 静止乾燥大気。これは H29 年度課題より継続して行っている実験である。(b) 解像度: T21L26, 初期状態は水惑星実験で得られる統計的平衡状態。鉛直解像度が Abe et al. (2011) よりも高いことを除けば、完全蒸発状態を得た Abe et al. (2011) と同様の設定となっており、Abe et al. (2011) の追実験となるものである。

3. 進捗状況

解像度と初期場として、「2. 研究計画」で記載した(a)を用いた場合の結果を図 1 に示す。この図は全球平均日射吸収量と全球平均土壌水分量の関係を示したものである。いずれの場合も平衡状態には達しておらず、8 年以上の時間積分をおこなって最後の 1 年間の時間平均値を示したものである。Abe et al. (2011) では全球平均日射吸収量がおおよそ 420W/m² 以上になると完全蒸発状態が得られていたのに対して、本研究における

実験ではいずれの場合も完全蒸発は起こっていない。いずれの場合も平衡状態を得るには至っていないが、土壌水分量は時間とともに増加している。例として日射吸収量がおよそ 540W/m^2 となっている場合 (与えた太陽定数の値は 2600W/m^2) の結果を図 2 に示す。この図は全球平均土壌水分量と全球平均大気水蒸気量の初期から 8 年目までの時間変化である。積分開始の 50 日以降は土壌水分量は増加を続け、大気水蒸気量は減少を続けている。図 3 に東西平均した降水量と蒸発量の差 (P-E) の時間変化を示す。時間積分の後半の期間には極域では正となっており、これが土壌水分量の増加をもたらしている。他の実験いずれにおいても完全蒸発は得られておらず、極域における土壌水分量が増加を続ける結果が得られた。

上記の (a) を用いた実験では Abe et al. (2011) とは解像度と初期場が異なっていたので完全蒸発状態が得られなかった、すなわち陸惑星設定においては同一の太陽定数に対して完全蒸発状態と土壌に水分が残存する状態の多重平衡が存在するというものも考えられる。この可能性について検討するため、Abe et al. (2011) と同様の解像度と初期場とする (b) を用いた実験を実施した。太陽定数として 2400W/m^2 を用いて 130 年以上の数値積分を行い、ほぼ統計的平衡状態を得るに至った。その結果、(a) の場合と同様に極域において土壌水分が残る状態が得られることが確認された (図は示さない)。これより、我々が行った実験ではいずれも完全蒸発状態は得られなかった。Abe et al. (2011) が得た完全蒸発発生の閾値を越えてもなお陸惑星の表面には液体の水が存在する可能性がある。

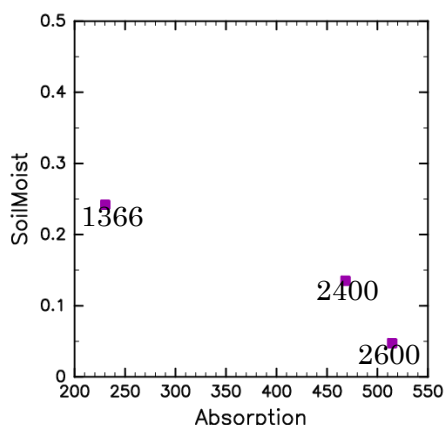


図 1 日射吸収量に対する全球平均土壌水分量の関係。横軸は全球平均日射吸収量 [W/m^2]、縦軸は全球平均土壌水分深さ [m]。図中の数値は実験で与えた太陽定数 [W/m^2] の値である。

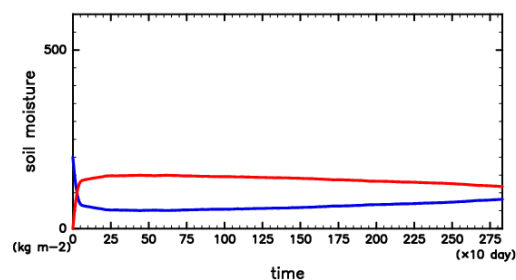


図 2 全球平均大気水蒸気量 (赤線) と全球平均土壌水分量 (青線) の時間変化。縦軸は水量 [kg/m^2]。

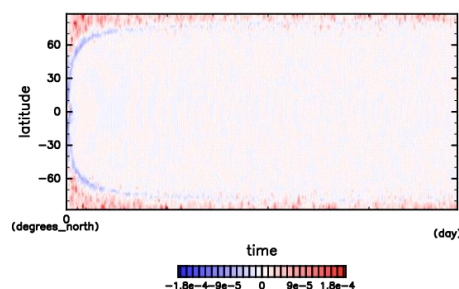


図 3 東西平均降水量から東西平均蒸発量を引いたもの [kg/m^2] の時間変化。縦軸は緯度。いずれも横軸は時間 [day]。

4. 今後の計画

今後取り組むべき問題は、完全蒸発状態が発生することがあり得るか否かを明確にすることである。そのために太陽定数を更に増大させた実験を実施する。これにより、本研究と Abe et al. (2011) の結果の相違は、完全蒸発状態の発生閾値が異なる定量的な問題なのか、完全蒸発状態の有無の相違による定性的な問題であるかを切り分けることにする。

5. 昨年度終了研究課題名

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

6. 計算機資源の利用状況 (2018 年 10 月 1 日 ~ 2019 年 11 月 30 日)

実行ユーザ数: 4

CPU 時間 v_deb: 0.00 hours, v_32cpu: 58,302.71 hours, v_96cpu: 6,945.95 hours, v_160cpu: 0.00 hours, 計: 65,248.66 hours