

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： 陸惑星設定を用いた自転傾斜角依存性実験

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

本研究は系外惑星の1つの姿であると考えられている陸惑星における気候の多様性を調査する数値計算を実施し、惑星表層における液体の水の存在可能条件に関する知見を得ることをめざすものである。陸惑星とは惑星大気表層系の水の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実験を行い、惑星の自転傾斜角を0とした場合に、太陽放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・エアロゾルなしの飽和水蒸気大気ではおよそ320 W/m²となる）を超えても惑星表面に液体の水が保持され、415 W/m²を超えると土壤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。

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)と同様に自転傾斜角を0とした実験では、Abe et al. (2011)とは異なり、太陽放射吸収量が450 W/m²（与えた太陽定数は2400 W/m²）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た（平成31年度～令和2年度スーパーコンピュータ利用研究課題）。このため陸惑星における液体の水の存在条件に関する検討を継続して行っている。

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。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。初期条件として、全球が海洋で覆われた水惑星実験で得られた大気の統計的平衡状態を用いる。表面には全球一様400 kg/m²の土壤水分を与える。自転角速度は地球の値を用いる。太陽定数の値として、2400 W/m²を用いる。自転傾斜角については、0度、23.4度を用いる。解像度はT21L26を用いる。初期状態として、水惑星実験の平衡状態、全球一様な比湿10⁻³をもつ静止状態の2種の状態を用いる。

3. 進捗状況

令和2年度までに我々がおこなってきた実験では自転傾斜角として0を与えており極域が低温になり蒸発が進まないという結果が得られていた。令和3年度には我々のモデルでも完全蒸発状態が発生することを確認するために極域を「強制的に」加熱する場合について考察することにした。自転傾斜角として0でない値を与えれば、極にも太陽放射が入射するので高緯度領域の土壤水分の蒸発が促進される可能性がある。この予想のもとに、現在地球の自転傾斜角を与えた場合についてGCM陸惑星実験を行い、完全蒸発状態が発生するかどうかを調べた。

太陽定数2400 W/m²、自転傾斜角を23.4度とし、水惑星実験の平衡状態を初期状態として与えた場合について30年の時間の積分を実施したところ、極域の年平均表面温度は320Kまで上昇し、対流圏内の大気温度も300K以上になった(図は示さない)。このため極域での蒸発が起こるようになり土壤水分の減少が起こった。しかし、この場合でも土壤水分が完全に蒸発するには至らなかった。そこで今回は完全蒸発状態の発生を阻害している原因を探るため水の挙動を調べた。

図は2年分の水に関する量の東西平均値の時間変化を示したものである。大気水蒸気の大部分は低緯度に存在しており(図a)、土壤水分は極域に残っている(図b)。極域における土壤水分の変化は以下に述べ

るようになっている。冬至を過ぎる時期から夏至に至るまでの期間（北半球の場合、図に示された範囲では13860日から14040日）では土壤水分が減少する。これは、降水が減少する一方で高緯度における日射量が増加するにしたがい、蒸発がより高緯度で起こるようになるためである。土壤水分量は夏至の直後（北半球の場合、14060日）に最小となり、その後再び増加する。これは、極夜の降水が起こり始める一方で日射量が減少し温度が低下するため蒸発がほとんど起こらないためである。土壤水分量は冬至（14270日）において最大となる。この季節変化を繰り返すため極域における土壤水分が完全に消失することは起こらない。土壤水分が一樣で大気に一樣な比湿を与えた初期状態からの時間積分は現在実行中であり、その結果は講演で示す予定である。

4. 今後の計画

以前より我々がおこなってきた実験を含め、Abe et al. (2011) が示した完全蒸発状態を得ることができていない。想像される状況としては、極域に水分が溜まっている解と大気中に水蒸気が保持される解との二種類の統計的安定状態が存在している可能性がある。今後は、我々の求めた解の物理的構造を詳細に解析しその正当性の確認を進めるとともに、我々の解が物理的に良好な解である場合には、解の多重性の可能性の検討を進め、より広い太陽定数範囲、暴走温室状態など多様な初期状態を用いた実験を実施することにより多重性の検討を行う予定である。

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計算: 陸惑星・水惑星気候の自転傾斜角依存性 (課題代表者: 石渡正樹)

6. 計算機資源の利用状況 (2021年11月1日～2022年10月31日)

実行ユーザ数: 3

VE 時間積 v_debug: 0.33 hours, v_normal: 7,284.52 hours, 計: 7,284.85 hours (全体の VE 時間積に対する占有率: 0.6%)

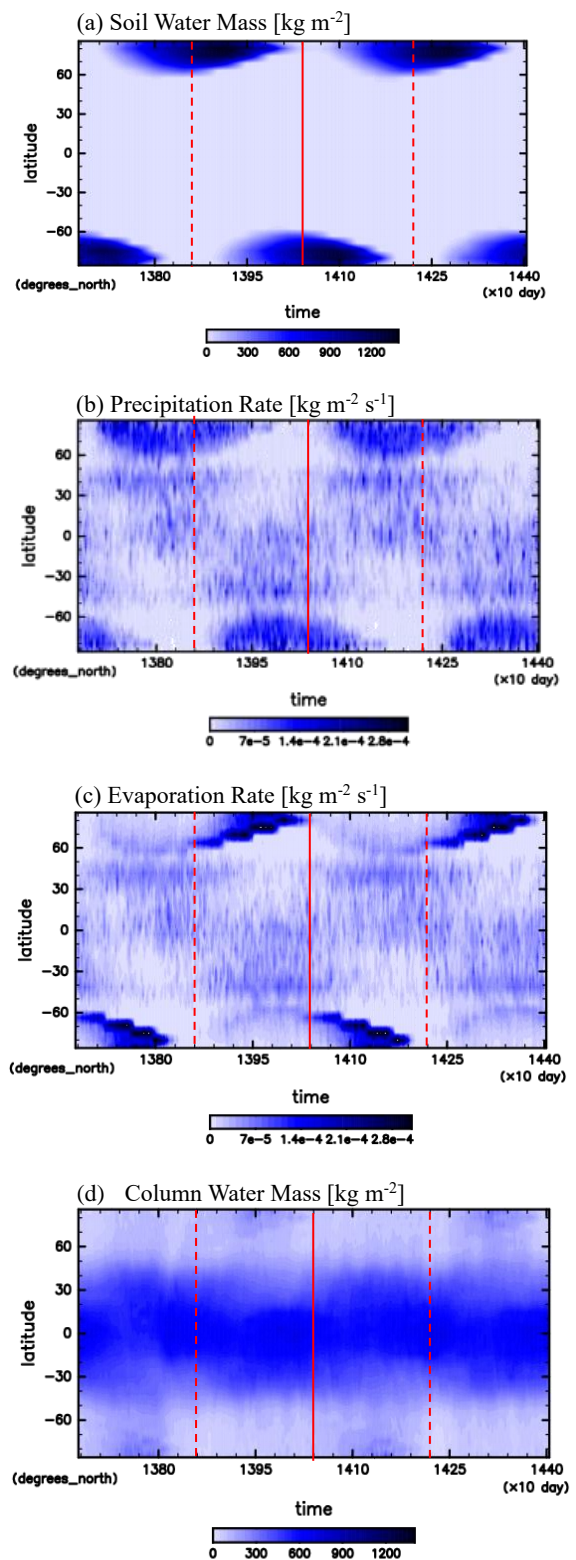


図. 水に関する量の東西平均南北分布の年周変化。(a)土壤水分、(b):降水、(c):蒸発、(d):鉛直積分水蒸気量。計算を開始してから22年目の北半球の夏至から24年目の北半球の夏至までの期間を示す。赤実線が北半球の夏至、赤破線が北半球の冬至である。