

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・海惑星気候の自転傾斜角依存性

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2年度～令和2年度

1. 研究目的

これまで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多数発見されている。そのうちの20個程度は、表面温度が液体H₂Oの存在可能な範囲にあり、生命の存在が可能となる気候を持つ（ハビタブルである）と予想されている（Wit et al., 2018 など）。これらの惑星は、軌道要素・日射分布・表面水量などの緒量が地球とは大きく異なる状況にあり、それらの気候は多様な様相を呈していると想像されている。系外惑星にあらわれると考えられる気候の多様性を調べるために大気大循環モデル（GCM）を用いた数値的な研究がおこなわれてきている（例えば、Abe et al., 2011; Noda et al., 2018）。

本研究は、昨年度課題から継続しておこなっている、系外惑星の1つの姿として考えられる陸惑星の気候に関するGCM実験を実施するものである。陸惑星とは、地球の海洋に比較して非常に少量の水（H₂O）しか表層に持たない惑星である（Abe et al., 2005, Abe et al., 2011）。陸惑星GCM実験を行ったAbe et al. (2011)では、太陽定数がおおよそ2333 W/m²となるまで土壌水分が残存し、それよりも太陽定数が増加すると土壌水分が完全に蒸発する状態が発生するという結果が示されていた。これに対して、昨年度に我々が実施した陸惑星実験では太陽定数が2400 W/m²とした場合でも完全蒸発状態が発生しない可能性が示された。昨年度はAbe et al. (2011)と同様に自転傾斜角を0とした実験をおこなっていたが、自転傾斜角が0でない場合は極にも太陽放射が入射するので、これにより高緯度領域の土壌水分の蒸発が促進される可能性が考えられる。今年度は完全蒸発状態の発生/非発生に関して検討を進めることを目的として、自転傾斜角として0でない値を与えた場合について検討を行うことを目的とした。現状ではまだモデルのビルド作業に手間取っており数値実験を開始するには至っていないが、発表会では地球の自転傾斜角の値を与えた場合についての結果を示す予定である。

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)、地表面ブラックススキーム (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。初期に与える土壌水分量は、水の深さにして40 cmとした。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。この値は、過去の研究で完全蒸発状態が得られた太陽定数を上回るものとなっている。自転傾斜角については、昨年度は0とした実験を実施しており、今年度は23.5度、60度と変更した実験を行う予定である。昨年度は、解像度をT21L26として初期状態は水惑星実験で得られる統計的平衡状態を用いた実験を中心とする議論をおこなった。今年度は、この設定を用いた自転傾斜角変更実験を実施するところから行い、順次解像度を増加させた実験を行う予定である。

3. 進捗状況

図1に、昨年度に実施した自転傾斜角を0とした実験で得られた全球平均土壌水分量と全球平均大気水蒸気量の時間変化を示す。図1の細黒実線は大気水蒸気量と土壌水分量の和を示している。これは計算開始から徐々に減少しており、表層の雪層に含まれる水量が増加していることを示している。40,000日目（おおよそ110年目）には、大気水蒸気量も土壌水分量もほぼ一定値に達したように見える。惑星表層に存在する水の大部分は土壌水分となっており、完全蒸発は得られなかった。

図2に、水量がほぼ一定値に達したと思われる最終状態における水に関する量の緯度分布を示す。図2(a)

から、熱帯域では土壌水分も大気水蒸気量も大きく減少しているのに対して、極域では表層にほぼ全ての水が存在していることがわかる。極域に存在する水のほぼ9割が土壌水分として保持され残りの1割は表層の雪層として存在している。図2(b)から、赤道域と極域で降水および蒸発が起こっていることがわかる。赤道域ではわずかに残った水により降水と蒸発が発生している。全ての緯度において降水量と蒸発量は局所的にはほぼバランスしており、地表から蒸発した水がその場で降水となって土壌水分に戻っていると考えられる。これらの結果は、陸惑星上に液体の水が存在する太陽定数範囲は過去の研究で議論されてきたものよりずっと広い可能性があることを示唆するものである。しかし、自転傾斜角などのパラメータを変更した実験を実施し、検討を重ねる必要があると考えられる。そのため、今年度は、自転傾斜角を変更した実験をおこなう予定である。現在はまだ新システムの SX-Aurora 上で DCPAM のビルド作業が終了しておらず、コンパイルができ次第実験に取り掛かる。

4. 今後の計画

自転傾斜角の値として 60 度など地球よりも大きな値を与えた場合についての実験を実施する。また、昨年度は T21L26 の低解像度実験に留まっていたが、水平解像度を増加させた実験にも進む予定である。これらにより陸惑星における完全蒸発状態の発生/非発生に関する検討を重ねる予定である。

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：
陸惑星のハビタビリティに関する考察

6. 計算機資源の利用状況 (2020年4月1日～11月30日)

実行ユーザ数: 3

VE 時間積 v_debug: 0.11 hours, v_normal: 0.00 hours,
計: 0.11 hours, (全体の VE 時間積に対する占有率: 0.0%)

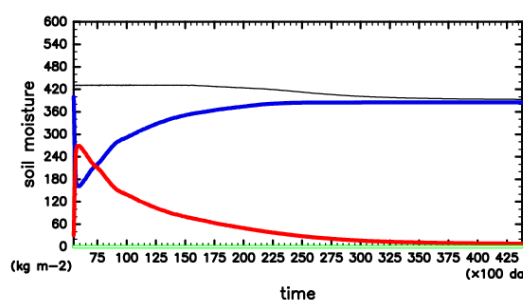


図 1. 水(H₂O)に関する量の全球平均値の時間変化。赤線は大気水蒸気量[kg/m²]、青線は土壌水分量[kg/m²]。細い黒線は両者の和である。横軸は時間[day]。

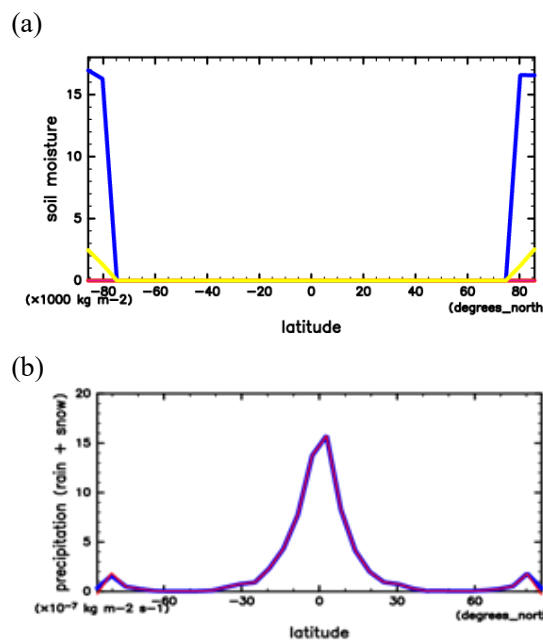


図 2. 陸惑星実験で得られた水量と降水・蒸発フラックスの緯度分布。(a) 青線は土壌水分[kg/m²]、赤線は大気水蒸気量[kg/m²]、黄色線は表面上の雪層中の水量[kg/m²]をあらわす。(b) 降水[kg/m²/sec] (青線)と蒸発[kg/m²/sec] (赤線)の緯度分布。いずれも154年目における200日平均の結果を示す。横軸は緯度。