

## 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3年度～令和3年度

### 1. 研究目的

系外惑星探査により、地球と同程度の質量を持つ系外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H<sub>2</sub>Oの存在可能な範囲にあり、生命存在を可能とする気候を有している（ハビタブルである）と予想されている（Wit et al., 2018など）。これらの惑星では、軌道要素・日射分布・表面水量などの総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ると想像される。本研究は系外惑星気候の多様性に関する調査の一環として、陸惑星（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）における完全蒸発状態の発生条件に関する数値計算を実施し、系外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GCM実験を行った Abe et al. (2011)では、太陽定数がおよそ 233W/m<sup>2</sup>となるまで土壤水分が残存し、それよりも太陽定数が増加すると土壤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、一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/m<sup>2</sup>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。一昨年度は Abe et al. (2011)と同様に自転傾斜角を 0（季節変化がない）とした実験をおこなっていた。このため、極域の年平均入射放射量が少なく極冠が形成されやすかったということが考えられる。自転傾斜角が 0 でない場合には、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。この予想のもとに昨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。しかし、昨年度導入された SX-Auroraにおいてモデルのビルト作業に成功することができず、数値実験を実施できずにつながった。今年度は昨年度の計画をそのまま引き継ぎ自転傾斜角を変更した陸惑星実験を実施する。

### 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 橫雲対流スキーム (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（横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。表面には全球一様に深さ 40 cm 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/m<sup>2</sup>を用いる。この太陽定数の値は、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であり、一昨年度の自転傾斜角を 0 とした我々の実験では完全蒸発状態が得られなかつたものである。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 23.4 度、10 度、5 度と変更した実験を行う予定である。解像度は T21L26 を用いる。

### 3. 進捗状況

昨年度計画において自転傾斜角を変更した陸惑星実験を行おうとしたところ、更新されたスーパーコンピュータシステム SX-Aurora で、使用していた大気大循環モデルの長時間積分ができない、という問題が発生した。このため保守員室を通じて、NEC社のプログラムサポートにおいて調査をして頂くことになった。実行時間に比例してメモリ使用量が増加する・配列外参照が起こっているという問題点が発見された。保守員室とプログラムサポートのご尽力により、今年度になつてから、コンパイルオプション -mno-stack-arrays

を使用することによりメモリ使用量が増えていく問題が解決され、配列外参照エラーが起こっている箇所が特定され、長時間積分を実施することが可能となった。

図 1 には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結果 (a) と今年度に開始した自転傾斜角を 23.4 度とした実験の途中経過 (b) を示す。図には全球平均土壤水分量 (青線) と全球平均大気水蒸気量 (赤線) の時間変化を示している。自転傾斜角が 0 の場合は 40,000 日目 (およそ 110 年目) には、大気水蒸気量も土壤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壤水分となっており、完全蒸発は得られていない。これに対して、自転傾斜角が 23.4 度の場合は、2785 日 (8 年弱) までの積分でしかないが、土壤水分量 (青線) は減少を続け、大気水蒸気量 (赤線) は増加を続けている。このまま積分を延長すれば完全蒸発状態が得られるこも考えられる。8 年目の段階では土壤水分の大部分は極域に存在しており、各半球の夏の初めに蒸発が起り、冬季には土壤水分量は一定に保たれるという変化を通じて徐々に減少している (図は示さない)。極域で蒸発した水は低緯度に輸送されており、大気中の水蒸気は低緯度領域で増加している。統計的平衡状態において大気中の水蒸気分布がどのようなものになるのか、降水の増加により完全蒸発状態の発生が妨げされることはないのかを確認するために、さらなる長時間積分が必要である。

#### 4. 今後の計画

現在実行している陸惑星実験で大気の統計的平衡衡状態を得るために数値積分を継続する。現在は全球平均土壤水分量が減少しており完全蒸発状態に向かっているようにも見受けられるが、水が大気中に留まり続けるのかどうかを確認する必要がある。この実験が終了した後に、自転傾斜角を 10 度、5 度とした実験を実施し、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・水惑星気候の自転傾斜角依存性 (課題代表者: 石渡正樹)

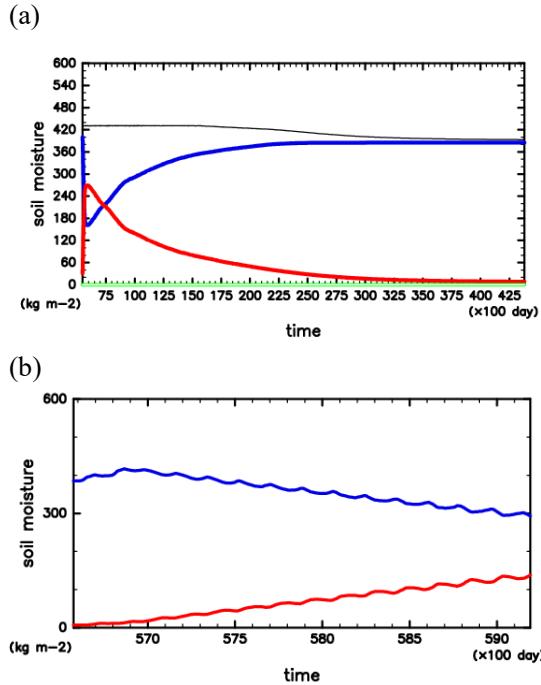


図 1. 陸惑星実験で得られた水量の時間変化。

(a) 自転傾斜角を 0 とした場合(昨年度の結果)。(b) 自転傾斜角を 23.4 度とした場合(今年度の結果)。青線は全球平均土壤水分 [kg/m<sup>2</sup>]、赤線は全球平均大気水蒸気量 [kg/m<sup>2</sup>]をあらわす。(a) には表面上の雪層中の水量 [kg/m<sup>2</sup>] (灰色線) も示している。

#### 6. 計算機資源の利用状況 (2020 年 11 月 1 日～2021 年 10 月 31 日)

実行ユーザ数: 3

VE 時間積 v\_debug: 1.58 hours, v\_normal: 1,352.22 hours, 計: 1,353.80 hours, (全体の VE 時間積に対する占有率: 0.1%)