

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

北海道大学大学院理学院 荻原弘堯

実施年度：平成 28 年度～平成 28 年度

1. 研究目的

ケプラー宇宙望遠鏡などの観測によって、地球の数倍程度の質量を持つ系外惑星が次々と発見されている。最近では、ハビタブルな気候を有すると予想される惑星が太陽系の近傍にも発見され (Anglada-Escudé et al., 2016)、系外惑星の気候に対する関心が高まっている。系外惑星気候に関する考察は、地球外における生命存在可能性の検討に貢献するだけでなく、地球のような温和な環境が実現されるための条件・地球環境の安定性に関する理解を深めるものでもある。

本研究の目的は系外惑星も考察の対象に加え惑星気候の多様性を理解することであり、本課題においては陸惑星を中心的に考察する。陸惑星とは地球に比べて表層に存在する水の量が非常に少ない乾燥惑星である (Abe et al., 2005)。惑星表層水量の不定性は非常に大きいので (Tian and Ida, 2015)、陸惑星が実在する可能性は十分にある。Abe et al. (2005) は、大気大循環モデル (GCM) 実験によって、陸惑星では寒冷的な気候に加えて温暖な気候も存在し得ることを示した。温暖な気候では、南北水蒸気輸送により低緯度の乾燥領域と高緯度の湿潤領域が形成される。また、新田ほか (2014) は陸惑星における暴走温室状態 (Nakajima et al., 1992) 発生の太陽定数しきい値が水惑星における値の約 1.7 倍となること、しきい値はハドレー循環の境界緯度における水蒸気量によって決定されることを示している。

以上のように、陸惑星の気候状態の決定には水蒸気分布が重要な役割を果たす。水蒸気分布はハドレー循環などの循環構造により決定されるので、循環構造が変われば陸惑星の気候状態も大きく変化すると考えられる。しかしながら、これまでの陸惑星 GCM 実験では、ハドレー循環の幅を決定づける自転角速度も含めて、外部パラメータが変化した場合については調べられていない。

そこで本課題では、様々な自転傾斜角・自転角速度・太陽定数に対して陸惑星の大気循環場、熱・物質輸送構造を求め、これまでに我々がおこなってきた太陽定数依存性実験、自転角速度依存性実験の結果 (これまでのスーパーコンピュータ利用研究) との比較を通じて、陸惑星大気構造の理解を深め、系外惑星気候に関

する知見を蓄積することを目指している。しかし、以下に記述するように、昨年度において GCM 計算によって統計的平衡状態を得るまでには至っておらず、今年度もその問題に継続して取り組んでいる。また「4. 今後の計画」で記述するように、当初の目的よりも、更にポイントを絞りこんだ計画に変更するよう検討を行っているところである。

2. 研究計画

陸惑星設定 GCM を用いて数値実験をおこなう。用いる大気大循環モデルは、我々がこれまでに開発・使用してきた惑星大気大循環モデル DCPAM5 (<http://www.gfd-dennou.org/library/dcpam>) である。その力学過程は 3 次元球面ブリミティブ方程式系から成る。水平離散化にはスペクトル法を用いる。鉛直座標には σ を採用し、Arakawa and Suarez (1983) の方法を用いて離散化を行なう。放射計算には、Chou et al. (1996) および Chou et al. (2001) の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。この積雲スキームで診断された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。雲の消滅時間を仮定した簡単な雲スキームを用いて雲水量の時間発展を求める。乱流過程の評価には Mellor and Yamada (1974) の level 2.5 の方法に従って決めた鉛直拡散係数を用いる。地表面フラックスの計算には Beljaars and Holtslag (1991) の方法を用いる。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。上記の物理過程スキームと組み合わせて雲の消失時間を 1500 秒とすると地球条件において全球熱収支がおよそ 5 w/m^2 の誤差の範囲内で合うことが確認されている。地表面モデルとして、バケツモデル (Manabe, 1969) を惑星表面全体に用いる。

現在までに行っている計算では、太陽定数・自転傾斜角・自転角速度・表面気圧などのパラメータの値を地球と同じ値に設定している。解像度は T42L26 であり、水平方向にも鉛直方向にも Abe et al. (2005) の計算のおよそ倍である。この設定で、50 年以上の積分が実現している。統計的平衡状態が得られた後には、水

平解像度を T21, T84 に変えた場合、初期水量を変えた場合についても同様の平衡状態が得られるかどうかを確認することにする。この確認を行なってから、自転角速度を変化させた実験を行うこととする。用いる自転角速度の値としては、0.0, 地球の 0.1 倍, 地球の 2.0 倍の 3 通りを予定している。

3. 進捗状況

昨年度において Abe et al. (2005) と同様の陸惑星実験（ただし、初期の地表面水量として全球一様の 10kg/m^2 を与えたもの。Abe et al., 2005 ではこの 20 倍の水量を与えた計算を行なっている）を実施したところ、10 年積分で統計的平衡状態には到達せず、赤道域における土壌水分量（およそ 5kg/m^2 ）が高緯度域における値（およそ 12kg/m^2 ）の半分程度までしか減少しない結果が得られた。昨年度の実験では熱帯域において完全な乾燥化が起こるまでに至らなかったのに対して、Abe et al. (2005) では赤道域で土壌水分量がほとんど 0 となる結果が得られている。DCPAM5 と Abe et al. (2005) が用いたモデルでは乾燥化が起こる早さに大きな違いがあるようである。さらに、昨年度はモデル設定によって乾燥化の起こる早さに違いがあらわれるかどうかを調べるため、Abe et al. (2005) と同じ初期水量を与えた場合・自転傾斜角を変えた場合・水蒸気移流の取り扱いを変えた場合の計算も実施した。いずれにおいても 10 年積分で熱帯域の完全な乾燥化は起こらなかった。

今年度は、統計的平衡状態を得ることを目的として継続して長時間積分を実行している。現在までに 50 年の積分が実行できており、その結果を図に示す。図 1 は東西平均した土壌水分の時間変化である。低緯度の乾燥領域と高緯度の湿潤領域が形成されている。図 2 は東西平均した降水量の時間変化である。図には示さないが蒸発も同様の分布になっており、降水も蒸発もともに土壌水分が多い領域のみで起きており、地表から蒸発した水蒸気は同じ緯度帯で凝結し降水となっている。これらは Abe et al. (2005) で得られた結果と同様の特徴である。しかし、図からわかるように低緯度側の乾燥領域は徐々に拡大しており（図の白い領域と青い領域の境界が 10 年でおおよそ 2 度移動している）、まだ統計的平衡状態まで到達していない。

4. 今後の計画

まずは統計的平衡状態に達するまで時間積分を続行する。低緯度の乾燥領域が更に拡大していくと予想されるが、まだ数 10 年の積分が必要であると考えられる。この実験で統計的平衡状態が得られた後に、初期水量や解像度を変更して同様の結果が得られるかどうかの

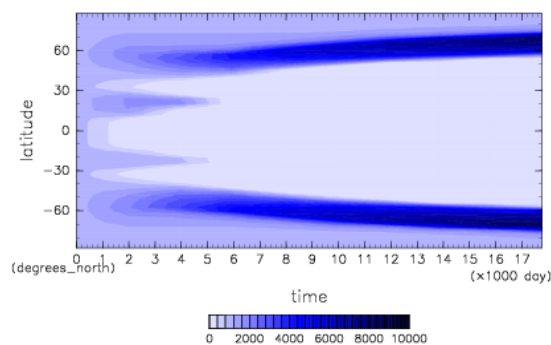


図 1. 東西平均土壌水分の時間変化。横軸は時間で 50 年分を示している。自転傾斜角が 23.44 度の場合。単位 $[\text{kg/m}^2]$ 。

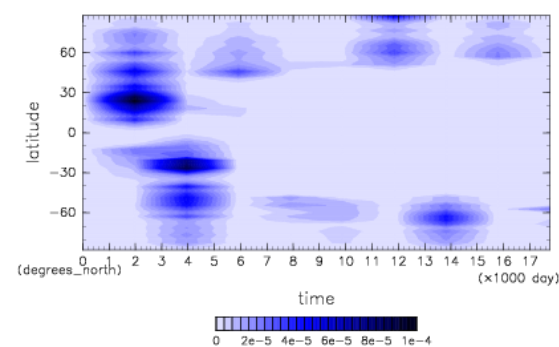


図 2. 東西平均降水量の時間変化。横軸は時間で 50 年分を示している。自転傾斜角が 23.44 度の場合。単位 $[\text{kg/m}^2/\text{sec}]$ 。

確認実験を行なうこととする。パラメータ実験の実施には当初予定していたものよりずっと長い時間が必要であることがわかったので、当初の計画を縮小し、自転角速度の値を 3 種程度 (0.0, 地球の 0.1 倍, 2.0 倍など) に絞って陸惑星の気候状態を調べることにする。

5. 昨年度終了研究課題名

系外惑星大気の数値計算: 陸惑星の気候多様性に関する考察

6. 計算機資源の利用状況 (2015 年 10 月 1 日 ~ 2016 年 10 月 31 日)

実行ユーザ数: 4

CPU 時間 v_deb: 2.67 hours, v_32cpu: 25,874.03 hours, v_96cpu: 0.00 hours, v_160cpu: 0.00 hours, 計: 25,876.70 hours