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

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　荻原弘尭

実施年度：平成 27 年度～平成 27 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惑星が多数発見されている（Torres et al., 2015）。本課題は、地球のような温和な環境の実現条件に関する考察対象として系外惑星をとらえ、GCM 実験により気候多様性に関する知見の蓄積を目指すものである。

今年度は、表層に存在する水量が地球に比較して極端に少なく惑星全体が陸地である陸惑星（Abe et al., 2005）の気候に着目する。昨年度の水惑星条件を用いた考察と組みあわせることにより、将来的には、惑星上の水量に応じて平衡状態の実現条件がどのように決まるのかという理解が得られると期待される。

陸惑星における平衡状態の実現条件に関しては、新田他（2014）が GCM 実験によって、暴走限界（暴走温室状態が発生する全球平均入射量）の値は地球の値の約 1.7 倍であること、その値はハドレー循環境界緯度における大気水蒸気量により決定されることを示した。しかし、自転角速度によってハドレー循環境界緯度は大きく変化するので境界緯度における水蒸気量も変化するはずである。これより、陸惑星設定で自転角速度を変化させた場合には, 暴走限界も変わると予想される。本課題ではパラメータ実験によって陸惑星おける暴走温室状態発生条件に関する考察を行う。

2. 研究計画

まず Abe et al.（2005）の再実験を行い陸惑星における循環構造を掌握する。次いで陸惑星設定において、暴走限界の自転角速度依存性について考察する。

用いるモデルは、われわれがこれまでに開発・使用してきた惑星大気大循環モデル DCPAM（http://www.gfd-dennou.org/library/dcpam）である。その力学過程は 3 次元球面プリミティブ方程式系から成る。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 τ_{LT} 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。惑星表面全体にバケツモデル（Manabe, 1969）を用いる。

3. 進捗状況

昨年度に行った水惑星設定実験の解析作業を継続しており、計画は大幅に遅れている。現在までに、初期の水の深さを全球一様の 1cm とした場合（Abe et al., 2005 の 1/20）とした予備実験を行ってみたが、赤道域で乾燥化が起こるという Abe el al.（2005）と同様の結果が得られていない。積分時間が不足しているようである（予備実験の積分時間 3 年に対し、Abe et al., 2005 は 10 年積分）。早急に Abe et al.（2005）の結果を再現できるかどうかを確認し、次のパラメータ実験に進みたい。

4. 今後の計画

陸惑星における暴走限界のパラメータ依存性を調査する。特に、自転角速度依存性に注目する。太陽定数として 1200 W/m^2 から 2500 W/m^2 までの数種類の値を、自転角速度として地球の値の 0.2 倍, 0.5 倍, 1 倍, 2 倍, 4 倍の値の 5 種類を用いたパラメータ実験を実施する。

5. 今年度計算機資源の利用状況（2015 年 6 月 1 日～9 月 30 日、SX-ACE）

実行ユーザ数: 4

CPU 時間 v_deb: 0.00 hours, v_32cpu: 0.003261111 hours, v_96cpu: 0.00 hours, v_160cpu: 0.00 hours, 計 : 0.003261111 hours

6. 昨年度研究課題のまとめ

6.1. 昨年度研究課題名

系外惑星大気の数値計算: 雲の存在を考慮した暴走温室状態に関する考察

6.2. 昨年度研究課題の目的

表面に水が豊富に存在する惑星における暴走限界に関する考察をおこなった。GCM を用いた暴走温室状態に関する最近の研究では、雲のアルベド効果 (Yang et al., 2013) や亜熱帯域乾燥化の効果（Leconte et al., 2013）が暴走限界の値に影響すると議論されている。しかし、我々は、灰色放射 GCM 実（Ishiwatari et al., 2002）の結果に基づき、暴走温室状態の発生条件は、大気が射出可能な OLR と全球平均日射吸収量の大小関係によって整理できると予想している。本研究では、

GCM 実験を行い、暴走温室状態の発生条件が雲の存在によってどの程度影響を受けるのかを調べた。

6.3. 昨年度研究課題の成果概要

用いたモデルは、2 節にて記述した DCPAM である。ここでは、地表面全てに沼条件を適用する。日射分布として、昼半球と夜半球が固定された同期回転惑星を模した分布（同期回転日射分布）と日変化・季節変化が起こる地球的な分布（非同期回転日射分布）の 2 種類を用いた。自転角速度は地球の値を用いる。τ_{LT} として 1500[sec]（雲ありの場合）、0[sec]（雲なしの場合）の 2 種の値を用いた。2 節に記述した物理過程スキームと組み合わせるとτ_{LT}=1500[sec]では地球条件において全球熱収支が約 5w/m^2 の誤差の範囲内で合うことを確認している。地表面アルベドとして一様値 0.15 を仮定した。モデルの解像度は T42L26 とした。

実施した実験において平衡状態が得られたかどうかをまとめた結果を表 1 に示す。表で×をつけた場合では、OLR が大気日射吸収量を下回っており，表面温度が時間とともに増加する状態となっている。これらは暴走温室状態に対応するものであると考えられる。同期回転日射分布の場合に得られた平衡状態の 1 例を図 1 に示す。昼夜間熱輸送によって夜半球が加熱されて惑星全体として平衡に達している。

暴走限界の値は、設定によって変わり、450W/m^2 から 550W/m^2 の範囲に及ぶ。雲なしの場合では、非同期回転日射の場合でも同期回転日射の場合でも 450W/m^2 程度となる。これに対して、雲ありの場合では、同期回転日射分布を用いた場合の暴走限界は非同期回転日射分布を用いた場合の値に比べて大きくなる。しかし、太陽定数増加時における OLR は 4 つの実験設定（2 種の日射分布および雲の有無）すべてにおいて 280～320 W/m^2 の範囲におさまっている（図は示さない）。これにより、全球平均日射吸収量がおよそ 300 W/m^2 を越えると暴走温室状態が発生すると考えられる。これより、雲を導入した設定においても、雲を考慮しない設定と同様、大気の赤外放射量の上限値が存在し、全球平均日射吸収量がこれを越えると暴走温室状態が発生すると言えそうである。

実験設定による暴走限界の違いは、OLR の違いは小さいことから、アルベド（表 1）の違いによっていると言える。同期回転日射の場合の方が、アルベドが大きくなるのは恒星直下点付近において雲水量が大きくなることによっている。実験設定に応じて，雲水量がどのように変化しているのか現在精査中である。

6.4. 昨年度計算機資源の利用状況（2014 年 4 月 1 日～2015 年 3 月 31 日、SX-9/A(ECO)）

実行ユーザ数: 4

CPU 時間 v_deb: 16.27 hours, v_cpu: 3,266.54 hours, v_8cpu: 0.00 hours, v_16cpu: 0.00 hours, 計: 3,282.81 hours

	雲なし		雲あり	
	同期回転	非同期回転	同期回転	非同期回転
341.5W/m^2	○ 0.18	○ 0.15	○ 0.42	○ 0.36
400W/m^2	○ 0.18	○ 0.20	○ 0.44	○ 0.40
450W/m^2	× 0.16	× 0.13	○ 0.42	× 0.33
500W/m^2			○ 0.44	
550W/m^2			× 0.44	

表 1. 全実験の結果の概要。 上段は統計的平衡状態が得られたかどうかを示す。〇は統計的平衡状態が、×は統計的平衡状態が得られず、全球平均地表面温度が上昇を続ける状態が発生したことを示す。下段の数値は全球平均アルベドを示す。

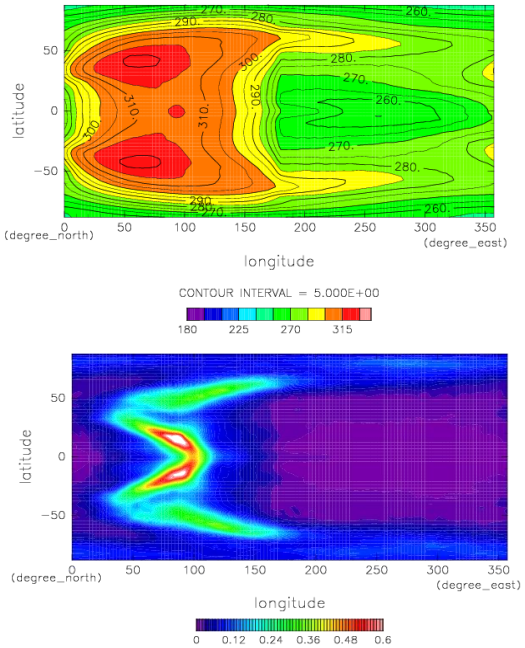

図 1. 同期回転日射分布を用いた場合に得られた統計的平衡状態の表面温度[K]（上図）と鉛直積分雲水量[kg/m^2]（下図）。雲あり、S=2000 W/m^2 の場合。3 年目の 365 日平均を示す。経度 0 度-180 度が昼半球、経度 180 度- 360 度が夜半球である。