



同期回転水惑星の大気大循環に関する数値的研究 ー 自転角速度依存性と太陽定数依存性ー

納多, 哲史

(Degree)

博士 (理学)

(Date of Degree)

2013-09-06

(Date of Publication)

2015-09-06

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

乙第3228号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D2003228>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



(別紙様式3)

論文内容の要旨

氏 名 納多 哲史

論文題目 (外国語の場合は、その和訳を併記すること。)

同期回転惑星の大気大循環に関する数値的研究
・ 自転角速度依存性と太陽定数依存性 ・

要旨

研究の背景と目的

系外惑星の中には主星近傍に存在するものが多数発見されている。これらの惑星は主星の強い潮汐力によって自転周期と公転周期が同期し、昼半球と夜半球が地面に固定された惑星 (同期回転惑星) になっていると考えられる。比較的暗い主星の場合は潮汐固定半径の内側に、入射フラックスの値が地球の値程度である領域が存在する。そのため、この領域には同期回転する、海洋を保持する惑星が存在できる可能性がある。しかし同期回転惑星は昼半球に入射放射が集中しているため、暴走温室状態になりやすい可能性がある。

同期回転惑星において暴走温室状態に至る条件はまだ分かっていない。大気大循環モデル (General Circulation Model; GCM) を用いて同期回転惑星の気候を調べた研究 (Joshi et al., 1997; Joshi, 2003; Merlis and Schneider, 2010; Edson et al., 2011) において、現在地球の入射放射量においては暴走温室状態にならなかった結果があるにすぎない。ちなみに地球の日平均年平均日射分布を与えた場合については、GCM を用いて暴走温室状態に至る条件について調査した研究が存在する (Ishiwatari et al., 2002)。入射量を増大させると、暴走温室状態に至らない最大の入射量において惑星放射の値が水平方向に一様化した。このとき地表温度と惑星放射量 (Outgoing Longwave Radiation; OLR) の関係および温度の鉛直構造は相対湿度一定の1次元放射対流平衡モデルのものと類似していた。以上のことから、暴走温室状態に至る条件は相対湿度一定の1次元放射対流平衡モデルの射出限界として記述できると結論づけられている。

暴走温室状態に至る条件には、循環構造が間接的に寄与しているであろう。循環構造が変化すれば水蒸気輸送の変化により水蒸気分布が変化し、暴走温室状態に至る条件が変化しうると考えられるからである。過去に、いくつかの自転角速度を用い

た実験によって、定性的に異なる循環が存在することが示されている (Merlis and Schneider, 2010; Edson et al., 2011). 例えば自転角速度が十分小さい場合では昼夜間対流が卓越するが、自転角速度が地球の値の場合では中高緯度のジェットが見られる、といった具合である。しかし、これらの研究では中間の自転角速度における循環の詳細は記述されていない。また熱輸送、水蒸気輸送についての記述もあまり行われていない。

そこで本研究では GCM を用いて様々な値の入射放射量および自転角速度を用いた実験を行った。着眼点は以下の二点である。一点目は、同期回転惑星における暴走温室状態に至る条件の記述である。予想として、同期回転惑星においても暴走温室状態に至る条件が 1 次元モデルの射出限界で記述できるものとして考察を行う。二点目は、過去の研究では不十分であった循環の自転角速度依存性の調査および各状態における循環構造の記述である。循環の違いが熱輸送や水蒸気輸送を介して、暴走温室状態に至る条件にどのように関係しているかを考察する。

数値モデルの概要と実験設定

実験に用いた GCM は地球電脳倶楽部で開発が行われている dcpam5 (高橋ほか, 2011; <http://www.gfd-dennou.org/library/dcpam/>) である。1 次元放射対流平衡解が既に求められているモデルとの比較考察を容易にするため、雲などの物理過程は省略し、水惑星条件と呼ばれる、地球を理想化した条件を用いた。地表は沼惑星 (swamp) 条件と呼ばれる、湿潤な熱容量ゼロの地面を用いた。大気は凝結成分と非凝結成分のみから成る。入射放射はいずれの成分に対しても透明であり、凝結成分のみが惑星放射を吸収する。入射放射分布は同期回転日射分布であり、赤道を特定の点を中心とした一方の半球に定常的な入射フラックスを与え、もう一方の半球は入射ゼロとした。パラメータとして平均入射量 (地球の値である 345 W/m^2 から 425 W/m^2 まで) と自転角速度 (ゼロから地球の値まで) に様々な値を用いた。複数の自転角速度を用いたのは、循環パターンの違いがあっても暴走温室状態に至る条件について同様の記述が可能か調べるためである。その他のパラメータは地球の値と同じである。

暴走温室状態に至る条件

全ての自転角速度において、大きな平均入射量で非平衡状態が見られた。この場合、2000 日以上積分を行っても全球平均 OLR の値が平均入射量の値とバランスせず、全球平均地表温度が単調増加を続けた。暴走温室状態に至ったと考えられる。平衡状態、暴走温室状態の定義を行い全実験結果について分類を行ったところ、いずれの自転角速度も平均入射量 400 W/m^2 前後で暴走温室状態に至った。暴走温室状態に至る平均入射量の値には 20 W/m^2 程度の自転角速度依存性が存在した。

全ての自転角速度において、平均入射量の増大に伴い OLR 分布が全球で平坦化した。また、GCM において平衡状態が保持される平均入射量の最大値と GCM の相対湿度を与えた 1 次元モデルの射出限界の値は、 20 W/m^2 程度の精度で一致した。温度の鉛直プロファイルにおいても GCM の温度勾配は 1 次元モデルの温度勾配に似通っていた。以上のことから、同期回転惑星においても、暴走温室状態に至る平均入射量の値は 1 次元放射対流平衡モデルにおける射出限界で記述できると結論づけられる。

循環構造が定性的に異なる場合でも、暴走温室状態に至る平均入射量の値が異なるとは限らなかった。代表的な循環構造における水蒸気輸送を調べた結果、水蒸気の主な供給源である昼半球の対流圏下層において、上昇風と水平風のどちらが卓越するかが重要であることが分かった。上昇風が卓越する場合は、水蒸気の大部分は持ち上げられて凝結することにより取り除かれる。その結果、夜半球へは乾燥した大気が移流されるため相対湿度が比較的小さくなり、暴走温室状態に至る平均入射量は大きくなる。東西風が卓越する場合は、恒星直下点付近から供給された水蒸気はほとんど凝結しない。その結果、夜半球へは比較的湿潤な大気が移流されるため相対湿度が比較的大きくなり、暴走温室状態に至る平均入射量は小さくなる。

循環の自転角速度依存性

相対湿度分布の違いは循環構造の違いによるものである。そこで、循環構造の自転角速度依存性に着目し、循環構造の詳細と熱輸送の記述を行った。平均入射量を地球の値に固定して自転角速度をゼロから地球の値まで系統的に変化させた実験を行った。その結果、循環構造は自転角速度が小さい場合から順に (1) 昼夜間対流と

iv

要旨

超回転; (2) 昼夜間対流は消失し, 超回転と振動が出現; (3) 超回転や振動は消失し, 中高緯度ジェットが出現; の3種類に分類された。(1), (3)は過去に報告された循環構造と整合的であったが, (2)の振動状態は本研究において初めて発見された。上層の東西風の値を見ると, (1), (2)は連続的に遷移し, (2), (3)は不連続に遷移しており, かつ多重平衡解が存在した。

昼半球から夜半球への顕熱輸送と潜熱輸送はそれぞれ自転角速度に大きく依存したが, 両者の合計の値は自転角速度によらなかった。合計の値が自転角速度によらなかったのは, 昼半球が射出限界に達していたために, 昼半球で射出しきれないエネルギーが夜半球に輸送された結果と考えられる。

結論

様々な平均入射量の値を用いた実験の結果から, 暴走温室状態に至る平均入射量の値は日射分布や循環構造に依存することが示された。本研究で用いた GCM は理想化されたモデルであるため, 得られた値をそのまま現実の系外惑星に適用することはできない。しかし本研究の結果は, 鉛直 1 次元モデルのみで海洋存在条件の見積もりを行うことの限界を示唆するものである。海洋存在条件をより精度良く見積もるためには GCM を用いて循環構造を陽に計算しなければならないであろう。

本研究で発見された振動解の存在は, 系外惑星において全球規模の周期的あるいは非周期的振動が起こる可能性を示唆する。このことは例えば, 定常状態を仮定したモデルを用いた結果が振動解の時間平均された結果と対応するかどうかを検討する必要をもたらすだろう。現実の系外惑星に振動解が存在するかどうかは今後の課題である。

同期回転する湿潤大気の場合でも多重平衡解が存在することが確認された。この結果は, 主星の輝度や軌道長半径などの外部パラメータが同じ惑星があったとしても, 過去の履歴によって違う状態にある可能性を示唆している。また, 有限振幅の擾乱が与えられた場合には, 二つの状態間で遷移が起こる可能性もある。

氏名	納多 哲史		
論文 題目	同期回転水惑星の大気大循環に関する数値的研究 ―自転角速度依存性と太陽定数依存性―		
審査委員	区 分	職 名	氏 名
	主 査	教授	林 祥介
	副 査	教授	荒川 政彦
	副 査	教授	山中 大学
	副 査	岡山大学 大学院自然科学研究科 准教授	はしもと じょーじ
	副 査	准教授	岩山 隆寛
要 旨			
本論文は, 比較的単純な設定と単純な大気大循環モデルを用いて, 同期回転惑星(公転周期と自転周期が一致しており, 昼半球と夜半球の経度が固定されている惑星)における大気大循環の描像を議論したものである。同期回転惑星は, 観測の進歩によって近年発見と研究が急速に進んでいる太陽系外惑星に存在する惑星タイプの一つである。考察のために用いられた単純な設定は, 惑星表面が「沼」(循環せず, 熱容量も無視できる水面)で覆われた水惑星条件であり, これに対し, 申請者も開発に参加している大気大循環モデルを用いて, 灰色放射特性を持つ仮想的な水蒸気の循環を考慮し, 入射放射量と自転角速度の二つのパラメータに対する数値実験を多数行い, 実現する気候状態を整理議論している。 第1章では研究の背景が述べられている。比較的暗い主星の周りでは, 平均入射フラックスの値が我々の地球の値程度である惑星軌道領域は潮汐固定半径の内側に存在し, そこにある惑星は同期回転状態にあると想像される。しかし, 平均入射フラックスが我々の地球の値程度であるとしても, 同期回転惑星では昼半球に入射放射が集中するため, 大気中の水蒸気量が多くなり, 最終的には海洋は全て蒸発する暴走温室状態になりやすい可能性が考えられる。しかし, 同期回転惑星の気候については, すでに大気大循環モデルを用いて調べた研究が存在しており, 地球の平均入射量では暴走温室状態に至らない, とする計算結果が報告されている。しかし, 従来の研究ではパラメータ研究が不十分であり, 暴走温室状態に至る入射フラックス条件は調べられていなかった。本論文は, パラメータの範囲を広げて数値実験を徹底して行うことにより, 暴走温室状態の発生条件を調査することを目的としている。また, 同期回転惑星に想定される惑星の自転角速度は我々の地球に比べてかなり小さいので, 自転角速度の違いがもたらす循環構造の差異が, 暴走温室状態に至る条件を左右する可能性も存在する。過去の同期回転惑星の循環の研究より, 同期回転惑星では, 昼夜間対流型や中高緯度ジェットが強く現れるハドレー循環型など, 我々の地球とは定性的に異なる循環構造が自転角速度に依存して現れることが知られている。循環の違いによる水蒸気輸送の違いが, 大気中の湿度を変える可能性があり, 結果として, 暴走温室状態に至る条件が変わりうる。本論文では, これらの背景を踏まえ, 大気大循環モデルを用いて様々な平均入射量と自転角速度を覆うパラメータ実験を行い, 同期回転惑星の気候状態の記述と, 暴走温室状態の発生条件の探求に着手している。 第2章は本論文で用いられた大気大循環モデルが説明されている。理論的な階層性を重視し, 暴走温室状態という概念の定義に用いられている鉛直 1 次元灰色放射対流平衡モデルとの比較考察を行うため, 最小限の水循環過程を表現した系を採用している。全球は「沼」におおわれた水惑星条件を用いており, 「沼」での水循環や熱輸送はなく, 氷結もしない(凍ることによる潜熱放出がない)。大気成分は乾燥大気と水蒸気の 2 成分であり, 水蒸気の凝結は潜熱解放のみ考慮し, 雲や降水は存在しない。また, 水蒸気は赤外放射活性な灰色吸収物質として扱われている。 第3章は様々な平均入射量と自転角速度を用いた実験の結果を整理し, 暴走温室状態に至る条件について考察している。実験で用いた全ての自転角速度(0 ~地球自転角速度)において, 同期回転惑星においても 400 W/m²程度以上の平均日射に対しては平衡状態が得られない, という結果が得られた。この非平衡状態は, 惑星が射出する外向き赤外放射の全球平均値と入射平均日射量とが釣り合っており, 全球平均地表面温度が単調増加を続けており, 暴走温室状態にある, と判断された。暴走温室状態の発生には 20 W/m²程度の自転角速度依存性が見られた。			

氏名 納多 哲史

暴走温室状態に至る解の構造については、同期回転惑星においても暴走温室状態に至る条件が1次元灰色放射対流平衡モデルで定義される射出限界とある程度対応付けることができるものとして、以下の三点について解析を行っている：(1) 平均入射量を増大させた際に惑星からの外向き赤外放射の緯度経度依存性が弱くなり、平坦化することを確認した。(2) 地表面温度と外向き赤外放射の関係を図示し、大気大循環モデルによる結果と、大気大循環モデルで得られた相対湿度の値を1次元灰色放射対流モデルに適用した結果を比較し、両者が20 W/m²程度の差で近い値を取ることを確認した。(3) 大気大循環モデルと1次元灰色放射対流平衡モデルで、対流圏の温度構造、特に鉛直温度勾配が類似していることを確認した。暴走温室状態に至る平均入射量である約400 W/m²は大気大循環モデルで得られた相対湿度の値に対応する1次元放射対流平衡モデルの射出限界に対応している。

暴走温室状態に至る平均入射量下限の自転角速度依存性と循環構造との関係については次のような解析を行っている。数値実験によると、循環構造が定性的に異なる場合でも、暴走温室状態に至る平均入射量の下限值に大きな違いは見いだせなかった。しかし、水蒸気の主な供給源である昼半球の対流圏下層において、上昇風と水平風のどちらが卓越するかによって、暴走条件に変化が生じることが見出された。上昇風が卓越する場合は、水蒸気の大部分は大気上層に持ち上げられる際に凝結除去され、夜半球へは乾燥した空気が移流されるため、相対湿度が小さくなり暴走温室状態に至る平均入射量は大きくなる。東西風が卓越する場合には、恒星直下点付近から供給された水蒸気はほとんど凝結しないまま水平に速やかに輸送され、夜半球へは比較的湿潤な空気が供給されるため、相対湿度が大きくなり、暴走温室状態に至る平均入射量は小さくなる。

第4章は平均入射量を固定して様々な自転角速度を用いた実験の結果をもとに、同期回転惑星における循環パターン、およびそれに伴う熱輸送・水蒸気輸送について考察している。循環パターンは自転角速度が小さい場合から順に(i) 昼夜間対流と超回転、(ii) 昼夜間対流の消失と振動解の出現、超回転状態の維持、(iii) 超回転状態と振動解の消失とハドレー循環・中高緯度ジェットの出現、の3種類に分類された。(i)、(iii)は過去に報告された循環と整合的であるが、(ii)の振動状態は本研究において初めて発見された解である。上層の東西風の値を見ると、(i)から(ii)へは連続的に遷移するのに対し、(ii)から(iii)へは不連続に遷移しており、多重平衡解の領域が存在した。昼半球から夜半球への顕熱輸送と潜熱輸送はそれぞれ自転角速度に大きく依存したが、両者の合計の値は自転角速度にあまりよらない、という新たな発見があった。その理由は、昼半球の惑星外向き赤外放射が射出限界に達していたため、昼半球での射出量は自転角速度にあまり依存せず、結果として、夜半球に輸送されたエネルギー量も自転角速度にあまり依存しない、という構造をとるためと考察された。暴走温室状態は、この余剰エネルギーが夜半球で宇宙空間に射出できなくなると発生する。

以上のように本論文は、世界に先駆けて、同期回転惑星の暴走温室状態に至る条件を考察したもので、その値は、大気大循環モデルによる平均的相対湿度を与えれば、1次元放射対流平衡モデルの射出限界で記述できること、ならびに、暴走温室状態に至る平均入射量が循環および日射によってどのように左右されるかを示したものであり、非常に先駆的な試みであると言える。一方、暴走温室状態に至る平均入射量の詳細な値は循環構造に依存するという計算結果は、従来行われてきた、鉛直1次元放射対流平衡モデルによる系外惑星の海洋存在条件を見積もる手法の限界を示唆するものである。さらに、同期回転惑星においては、自転角速度によって循環パターンが定性的に変化することは知られていたが、本研究では系統的なパラメータ実験を行い、循環構造、熱輸送、水蒸気輸送について詳細な記述を行っている。これらは過去の断片的な研究結果を総括するだけでなく、過去の研究では見落とされていた振動解、多重平衡解の発見に至っている。

以上のように本論文は、同期回転日射条件における大気大循環モデルの数値実験を行うことによって、太陽系外惑星の海洋存在条件を評価するにあたって重要な知見を得たものとして価値ある集積であると認める。よって学位申請者 納多哲史 は、博士(理学)の学位を得る資格があると求める。

・特記事項
・特許登録数 0件
・発表論文数 0編