系外惑星大気の研究

石渡正樹 (北大・理)

共同研究者: 中島健介 (九大・理)、林祥介 (神戸大・理)、 竹広真一 (京大・数理研)、河合佑太 (理研 R-CCS)、高橋芳幸 (神戸大・理)、 樫村博基 (神戸大・理)、富田浩文 (理研 R-CCS)、 水野陽太 (北大・理)、吉田哲治 (北大・理)



2024年03月17日 GFDセミナー特別編2024



何をしゃべるか

- 何をしゃべると良いのか(何をしゃべるべき なのか)本気でわからない
 - -「1時間林さんの思い出話をしゃべったら良いんじゃない?」とも言われたが。。。
- 良いかどうかわからないけど、ここでは、
 これまでの系外惑星を念頭においた大気研究の話をして現状を確認する努力をおこなうことをしたい

本来であれば「次に向けて課題を明確にする」とまで言うべきだろうけど、宿題がいっぱいありすぎて気が重くなるだけだからそこまでは言わない

(系外)惑星気候研究のmotivation

- ここ数年は、系外惑星の多様性・生命存在
 可能性・太陽系内探査
 に向けての準備、
 等とか言われている?
- 昔は、GFD的な動機
 あるいは観光旅行
 (©木村竜治さん)
 だったのだと思う
- 林さんの個人的な 事情としては、上記だけ でなくだいぶ政治 的な理由があった?



<u>http://exoplanet.eu/</u>にて作成





地学図表

https://nao.ac.jp/news/ topics/2017/ 20170223-exoplanets.html

水惑星あるいは海惑星: 全球表面が海洋で覆われた惑星 陸惑星:表層に少量の水 (平均水深で数m)を保持する惑星







いろんなパラメータ値・設定:太陽定数、自転角速度、自転傾斜角、 日射分布(同期回転惑星日射分布など)





- ・惑星表面全体が「海洋」に覆われた惑星
- ・発案者は Hayashi and Sumi (1986)
 - クラウドクラスター、 スーパークラウド クラスターという 降水構造の存在を予想
 - これで水惑星パラダイム が作られた
 - 後々にはAPEプロジェクトへ (Nakajima et al., 2013等)



Hayashi and Sumi (1986), JMSJ,64, 451. Fig.3b

Aqua-Planet Experiment (APE) Projectの結果の一例



赤道降水ホフメラー図



水惑星設定の理想実験の話題

- ・年平均日射分布を与えた場合の太陽定数依存性
 - 射出限界とは
 - 大気だけを考えた場合
 - 海洋と大気を考えた場合
- ・同期回転惑星

射出限界とは

- ・ 水蒸気を含む大気が射出できる赤外放射量上限値
 - 複数種類が存在
- ・ モデル:鉛直1次元放射対流平衡モデル
 - 大気成分:水と乾燥空気
 - 飽和した対流圏と放射平衡した成層圏
 - 灰色放射:日射には透明。赤外放射には灰色(κ=0.01 Kg/m^2)





暴走温室状態に至る大気構造





JAS, 49, 2256-2266, Fig5a

灰色放射水惑星 太陽定数依存性

モデル

- ・惑星大気大循環モデル:DCPAM5
 - http://www.gfd-dennou.org/library/dcpam/
 - 開発方針:同一の枠組みで多様な惑星の計算を可能に



- 基礎方程式:3次元球殻中のプリミティブ方程式
- 大気成分:水蒸気+乾燥空気 or 地球を想定した大気組成
- 凝結過程: 対流調節 (Manabe et al., 1965) or Arakawa-Schbertスキーム (Moorthi and Suarez, 1992))
- 差分化:水平方向スペクトル法、鉛直方向差分

3次元系における暴走温室状態発生条件

- ・ モデル: AGCM5.3
- 計算設定
 - 放射:灰色大気(Nakajima et al., 1992)
 - 日射分布:地球の軌道パラ
 メータで得られる年平均日射
 分布
 - 太陽定数:1000~1700W/m²
 - 表面:沼惑星(swamp ocean)
 設定。地表面は常に熱バラン
 スしていると仮定。
 - 表面アルベド:表面温度によって値を変える
 - 地形無し、雲無し
- 全球平均日射量が射出限界を 超えると暴走温室状態が発生 する



Ishiwatari et al. (2002), JAS,59, 3223-3238,Fig.4a, Fig7 13

アイスアルベドフィードバックを考えると

- 計算設定
 - 放射:灰色大気
 - 日射分布:地球の軌道パラ
 メータで得られる年平均日
 射分布
 - 太陽定数:1000~1700W/m²
 - 表面:沼惑星(swamp ocean)
 設定。地表面は常に熱バランスしていると仮定。
 - 表面アルベド:表面温度に よって値を変える
 - 地形無し、雲無し
 - 結果:複数の気候レジーム
 - 部分凍結状態
 - 全球凍結状態
 - 暴走温室状態
 - (氷無し平衡状態)



気候レジーム図

e2019JD031761,Fig.3a



- 大気大循環モデル: DCPAM (https://www.gfd-dennou.org/library/dcpam/)
 - 大気成分: 乾燥空気, 水蒸気
 - 力学過程:浅い大気,静力学近似したナビエ・ストークス方程式
 - 灰放射過程: 色放射スキーム (Nakajima et al., 1992)
 - 乱流混合過程: Mellor and Yamada (1982), Louis et al. (1982)
 - 凝結過程: Manabe et al. (1965), 雲なし
 - 空間解像度:水平格子間隔約6度,鉛直16層
- ・海洋大循環モデル
 - 力学過程: 自転軸対称(東西平均)・静力学近似ブシ ネスク方程式系
 - 乱流混合過程: Redi (1982), Gent and McWilliams (1990), Marotzke (1991)
 - 空間解像度:南北格子間隔約3度,鉛直60層
- ・海氷モデル
 - 熱力学過程: 3-layer model (Winton, 2000)
 - 水平輸送:水平拡散によりパラメータ化
 - 空間解像度: 南北格子間隔約3度



周期的同期結合 (Sausen and Voss, 1998)を 用いて, 結合系を3万 年間積分

海洋循環を考えると:吸収係数が大きい場合の気候レ ジーム図

水蒸気: $\kappa_v = 0.1 \text{m}^2/\text{kg}$ 乾燥空気: $\kappa_n = 10^{-5} \text{m}^2/\text{kg}$



吸収係数が比較的小さい場合の気候レジーム図



- ・ 海洋の扱い方によらず複数種類の解が存在
 - 暴走温室解
 - 部分凍結解 (ただしRose(2015)が得た赤道域開氷解は現れない)
 - 全球凍結解
- 海洋の扱い方に依らずブランチの構造はほぼ変わらない

水惑星太陽定数依存性まとめ

- ・灰色大気の大気大循環モデルを用いた水惑星
 気候の太陽定数依存性
 - 複数の気候レジームが存在
 - ・全球凍結状態、部分凍結状態、赤道域開氷解(water belt)、氷無し平衡状態、暴走温室状態
 - ・高温側の臨界点は射出限界によって記述される

- 気候レジーム図としてまとめられると嬉しい

- ・Budyko (1969), Sellers (1969) などのエネルギー バランスモデルを用いた考察に接続できる
- ・多重解・解の安定性が見やすい

灰色放射同期回転惑星 自転角速度依存性

同期回転惑星とは

- ・ 自転周期と公転周期が等しい惑星
- ・ GCM実験で2種のレジームがあると議論されている
 - Joshi (2003): Ω*=1 (Ω*: 地球の値で規格化した自転角速度)
 - Merlis and Schneider (2010): Ω*=1/365~1
 - Edson et al. (2011): $\Omega^*=1/100 \sim 1$



同期回転惑星 設定

- 放射過程:灰色
- 積雲対流:対流調節 (Manabe et al., 1965)
- 表面フラックス: Beljaars and Holtslag (1991)
- ・ 鉛直乱流拡散: Mellor and Yamada (1974) level2.5
- 地表面:swamp
- 雪無し
- ・ 自転角速度Ω*:0-1 (Earth) 18 通り
- 日射分布:固定された昼半球と夜半球
- ・ 太陽定数、惑星半径、重力加速度:地球の値
- 全球平均表面気圧: 10⁵ Pa
- ・ 地表面アルベド:0
- 解像度:T21L16
- 積分時間: 2000 日
- ・ 初期状態:等温 (280K) 静止状態、初期温度場にランダムノイズ(10通り)



表面温度の Ω*依存性

$\Omega^* = 0$ $\Omega^* = 0.15$ $\Omega^* = 0.75$ $\Omega^* = 1.0$

表面温度



Noda et al. (2017), Icarus, 282, 1-18, Fig. 5, 6, 9, 11



・ 10 メンバーの「アンサンブル実験」 – 初期温度場に異なるランダムノイズ



Ω*(地球の値で規格化した自転角速度)

熱輸送 Ω*依存性



昼夜間熱輸送量はΩ*に依らない
熱輸送量は射出限界により規定される
(熱輸送) = (入射量) – (射出限界)

地球放射 太陽定数・自転角速度依存性 同期回転惑星vs非同期回転惑星

考察する問題:暴走温室状態の発生条件

- 暴走温室状態の発生条件はどのように決まるのか?
- ・ 暴走温室状態に関する人々の研究
 - 同期回転惑星設定 (Yang et al., 2013など)
 - 大気海洋結合モデル
 - ・ 平衡状態は S=2200 W/m²まで
 - ・厚い雲の形成が重要と指摘
 - 地球設定 (Leconte et al., 2013など)
 - ・大気大循環モデル
 - ・ 平衡状態は S~1500 W/m²まで
 - ・ 亜熱帯域の乾燥化が重要と指摘

・我々の想像:暴走条件はもっと簡単に決まるのでは?









- 積雲対流: Relaxed Arakawa-Schubert (Moorthi and Suarez, 1992)
- 地表面フラックス: Beljaars and Holtslag (1991)
- 鉛直乱流拡散:Mellor and Yamada (1974) level2.5
- 流拡散、消滅を考慮
- 乾燥空気量:表面気圧で10⁵Pa, 地表アルベド:0.15
- 解像度: T42L26, 積分時間: 3年



地球大気用放射スキームと簡単雲モデルを用いた場合 地球的日射を用いた場合との比較



統計的平衡状態
●:同期回転(雲あり)
●:非同期回転(雲あり)
●:同期回転(雲無し)
●:非同期回転(雲無し)

暴走温室状態 ×:同期回転(雲あり) ×:地球放射(雲あり) ×:同期回転(雲無し) ×:地球放射(雲無し)

暴走温室状態発生閾値 およそ 300 W/m²

OLR水平分布

 同期回転惑星日射:赤道上経度分布(緯度平均)-1.0



• 非同期回転惑星日射: Meridional (zonal mean)



同期回転惑星実験まとめ

- ・ GCM実験により、同期回転する水惑星の大気状態の自転 角速度・太陽定数依存性を調査
- 自転角速度依存性(S*=1.0)
 - Ωの値による循環パターンの違い
 - slowly rotating regimeとrapidly rotating regimeの存在
 - 多重平衡解の存在
 - ・時間変動する状態も存在
 - でも、昼夜間熱輸送量はΩには依存しない
 - (熱輸送量) = (入射量) (射出限界)
- 太陽定数依存性(Ω*=1.0)
 - 雲の有無、自転角速度によらずOLR 最大値(射出限界?)は存在 するらしい
 - ・ 雲無しではおよそ 350W/m², 雲ありでは およそ300W/m²
 - 暴走状態の発生条件は「全球平均日射吸収量がOLR最大値を 超えること」となっているように見える
 - ・が、要検討。雲がある場合のOLR上限値はどのように決まるのか?

陸惑星気候の 太陽定数依存性





DCPAMで計算した場合

- 実験設定
 - 放射:地球放射モデ ル(Chou and Lee, 1996; Chou et al., 2001)
 - 表面:バケツモデル (Manabe, 1969)
 - 結果:完全蒸発状態 が発生する閾値がず れる?
 - 現在のところ完全
 蒸発状態への移行
 は連続的に起こる
 か不連続的に
 起きるかはまだど
 ちらともいえない。





- ・GCM実験で「示された」ことは
 - いくつかの種類の気候状態・いくつかの臨界点の
 存在
 - 多重解の存在
 - 射出限界は気候多様性を考える上での重要キー ワード(基礎概念)の1つ
- ここまでで思うところは
 - いろいろやらかしたなあ(及び、やらかしてない なあ)というのが正直なところ
 - モデル依存性の問題は避けて通れない?