

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年6月19日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2011

課題番号：20540223

研究課題名（和文） 同期回転する地球型惑星上の気候に関する数値的研究

研究課題名（英文） A numerical study on climates of synchronously  
rotating terrestrial planets

研究代表者

石渡 正樹 (ISHIWATARI MASAKI)

北海道大学・大学院理学研究院・准教授

研究者番号：90271692

研究成果の概要（和文）：本研究では、水蒸気を含む同期回転惑星大気の循環構造に関するパラメータ実験、及び現実的なシミュレーションをめざしたモデル開発を行った。自転角速度変更実験により、振動する南北非対称状態が出現する場合や多重平衡解が得られる場合があることがわかった。太陽定数変更実験により、暴走温室状態が発生する太陽定数の値は、自転角速度の値に応じて  $100 \text{ W/m}^2$  程度の差が生じることがわかった。これらに加え、水素大気用放射スキームや数値モデル用データ入出力ライブラリの整備も行った。

研究成果の概要（英文）：In this study, parameter experiments on structures of moist atmospheres on synchronously rotating planets are performed, and model infrastructure needed for realistic simulations are developed. Parameter experiment with various planetary rotation rate show existence of oscillating north-south asymmetric states and occurrence of multiple equilibrium. Parameter experiment with various solar constant show that the value of solar constant at which the runaway greenhouse states occur changes about  $100 \text{ W/m}^2$  according to the value of planetary rotation rate. Moreover, radiation scheme for hydrogen atmospheres and a data input/output library are developed.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	700,000	210,000	910,000
2009年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
年度			
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学・天文学

キーワード：惑星大気，系外惑星，同期回転惑星，気候多様性，暴走温室状態，大気大循環モデル，自転角速度

## 1. 研究開始当初の背景

近年の系外惑星探査では中心星近傍に存在する惑星が多数発見されている。これらの惑星は強い潮汐力により同期回転をしていると考えられる (Ida and Lin, 2005)。同期回転惑星では、半球だけが常に中心星からの入射放射を受け、反対半球には放射が入射しない。このため、同期回転惑星では、地球とは異なり、固定された日射強制が与え続けられることになる。

同期回転惑星において生命が発生・維持できる環境が実現されるかどうか、特に惑星表層において液体の水が存在できる環境が実現されるかどうかという興味から、大気大循環モデル (GCM) を使って気候状態を推定する試みがいくつかなされた (Joshi et al, 1997; Joshi 2003)。しかし、湿潤大気を持つ同期回転惑星の気候状態を広いパラメータ範囲にわたって求める試みは行われていなかった。

## 2. 研究の目的

本研究課題では、理想的な設定下において GCM 実験による湿潤大気を持つ同期回転惑星の気候状態の多様性の探索、及び将来的に必要なより現実的な数値シミュレーションを見据えたモデル開発を行う。具体的な研究目的は以下の通りである。

(1) 同期回転惑星における自転角速度依存性実験：同期回転惑星の場合、永続的な昼半球と夜半球が存在するため、東西方向の熱輸送が気候状態の決定に大きく影響すると考えられる。大気における熱輸送は大気循環によって規定されるため、大気循環のパターンが大きく変われば、熱輸送量も変化すると予想される。ここでは、太陽定数、重力加速

度、惑星半径などパラメータは地球の値を使用し、自転角速度を変更した実験を行い、循環パターン、熱輸送、水蒸気輸送などが自転角速度の値に応じてどのように変化するかを調査する。

(2) 同期回転惑星における太陽定数変更実験：Ishiwatari et al. (2002, 2007) によれば、地球的な状況においては、入射放射量に応じて、全球凍結状態・部分凍結状態・氷無し状態・平衡状態に達することのできない暴走温室状態など、多様な気候状態が現れることが示されている。同期回転惑星の場合、常に入射放射を受ける昼半球では暴走温室的な状態、入射の無い夜半球では凍結状態にある、ということも起こり得る。ここでは、GCM を用いた太陽定数変更実験を行い、同期回転惑星における大気構造の変化、暴走温室状態の発生条件に関する考察を行う。研究開始当初においては、更に ice-albedo feedback 過程を導入して全球凍結状態まで含んだ気候のレジームダイアグラムを作成する予定であった。しかし、大量な数値実験を行う前に、データ入出力に関するモデル整備を行う必要が生じたため、以下の (3) で述べるモデル整備を優先して行った。

(3) 将来的な同期回転惑星気候シミュレーションに向けたモデル整備：系外惑星においては、現在の地球大気に比べて水素濃度が高い可能性、あるいは中心星の放射スペクトル太陽のものとは異なる可能性が指摘されている。ここでは、より現実的なシミュレーションのための系外惑星用放射スキームの開発を見据えた第一歩として、水素を含む場合の放射スキームの作成に着手する。放射スキームの開発に加え、本研究課題で

は GCM で使用するデータ入出力ライブラリの整備を行うことにした。これは当初計画されていなかったが、(2) の最後で記述した気候のレジームダイアグラムの作成においては、GCM とエネルギーバランスモデルを併用した数値計算が必要となる。これらを効率的に実施可能とするため、複数のモデルにおけるデータ出力を統一した形で行うようデータ入出力ライブラリの整備を行った。

### 3. 研究の方法

(1) 同期回転惑星における自転角速度依存性実験：用いる大気大循環モデルは `dc pam5` であり、水平方向には球面調和関数を用いたスペクトル変換法、鉛直方向には差分法を用いた離散化を行なう。大気は、水蒸気を想定した仮想的な凝結性成分と乾燥空気を想定した非凝結性成分から成る。水蒸気だけが長波放射を吸収、射出し、その吸収係数は波長によらない定数であるとする。積雲パラメタリゼーションとして湿潤対流調節スキーム (Manabe et al., 1965) を用いる。凝結した水蒸気は速やかに系から取り除かれ雲は存在しない。太陽定数、重力加速度、惑星半径などは地球の値を用いる。入射放射は経度 0 度から 180 度の領域 (昼半球) のみに与え、経度 180 度から 360 度の領域 (夜半球) では 0 とする。地表面は常に熱バランスしているものと仮定し、熱バランスを満たすように表面温度を決定する。分解能は、水平方向に三角形切断で全波数 21、鉛直層数は 32 とする。各実験につき 1000 日から 10000 日の時間積分を行う。自転角速度の値として、 $\Omega=0$  から  $\Omega=1$  まで 20 通りの値を用いた。ここで、 $\Omega$  は地球の値で規格化した自転角速度である。

(2) 同期回転惑星における太陽定数増大実

験：上記 (1) の自転角速度変更実験で用いたモデルを用いて、太陽定数を増大させた場合に長時間時間を可能とするためのモデル設定の検討、太陽定数を変更したパラメータ実験を行う。まず同期回転設定において太陽定数が増大させたテスト計算を行い、長時間積分を可能とするためのモデル設定を探る。これを終了した後に、太陽定数の値として、 $1200 \text{ W/m}^2$  から  $1600 \text{ W/m}^2$  まで変更したパラメータ実験を実施する。これにより、同期回転惑星設定における暴走温室状態の発生条件に関する考察を行う。

(3) 将来的な同期回転惑星気候シミュレーションに向けたモデル整備：水素大気用の放射スキームの開発を行う。木星型惑星の放射対流平衡構造を求めた Appleby and Hogan (1984) の計算方法を用いた放射計算を行う。吸収係数の計算には Borysow and Frommhold (1987) の方法を用いる。これらの方法を用いて放射計算を行うスキームを開発し、木星の設定を与えたテスト計算をおこなう。また、本課題で用いる GCM で使用されているデータ入出力ライブラリ `gtool5` における入出力用ルーチンのインターフェースの整備を行う。GCM のような大規模モデルにおいてもエネルギーバランスなどの小規模モデルでも同様の形式でデータ入出力をおこなえるインターフェースを開発する。

### 4. 研究成果

(1) 同期回転惑星における自転角速度依存性実験： $\Omega=0\sim 1$  までの 20 通りの自転角速度の値を与えた数値実験を行った結果、典型的な大気状態として、 $\Omega$  が小さい順に、次の 3 種類があらわれることがわかった：

- ① 昼夜間対流が起こる状態 (図 1)
- ② 南北非対称な場が振動する状態 (図 2)
- ③ 夜半球中緯度に擾乱が生じる状態 (図 3)

$\Omega$  がゼロから増加するに従い、状態 ①、② は連続的に変化していく。 $\Omega = 0.75 \sim 0.85$  の場合には、状態②と状態③の両方が解となる多重平衡解が得られた。湿潤大気をもつ同期回転惑星において、多重平衡解が存在することが確認された。 $\Omega$  の変化に応じて循環パターンや昼半球から夜半球への顕熱輸送量と潜熱輸送量は変化するものの、顕熱輸送量と潜熱輸送量の和はほとんど変化せず、昼半球と夜半球の地表面温度の差の自転角速度依存性も小さいものとなった。

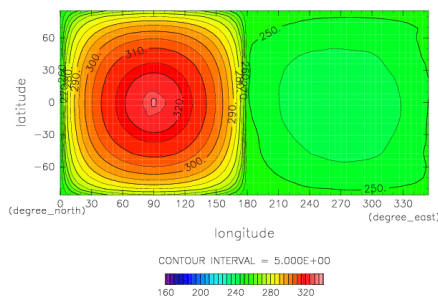


図1  $\Omega = 0$  の場合の表面温度分布。  
1000 日の時間平均。

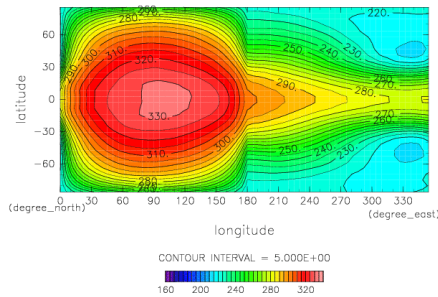


図2  $\Omega = 0.5$  の場合の表面温度分布。  
1000 日の時間平均。

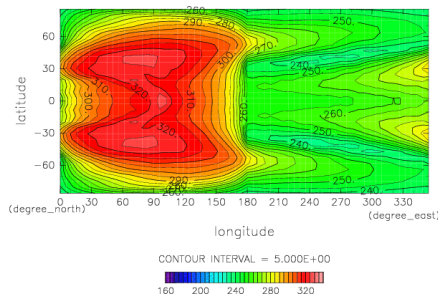


図3  $\Omega = 1$  の場合の表面温度分布。  
1000 日の時間平均。

(2) 同期回転惑星における太陽定数増大実験：まず、太陽定数を増大させたテスト計算を実施し長時間積分が可能となるモデル設定を模索した。その結果、鉛直層数を 48、タイムステップを 30 秒とすると、安定して数値計算を実行できることがわかった。次に、これらの鉛直解像度、時間解像度を用いて、太陽定数変化実験をおこなった。これにより、太陽定数が地球の値のおおむね 1.1 倍程度になると暴走温室状態が発生するという結果を得た。また、暴走温室状態が発生する太陽定数の値は、自転角速度の値によって  $100 \text{ W/m}^2$  程度変化することもわかった。長波放射量上限値と暴走温室状態が発生する太陽定数の間には明確な対応関係が見られず、相対湿度の値の自転角速度依存性なども考慮する必要があることが示唆された。

(3) 将来的な同期回転惑星気候シミュレーションに向けたモデル整備：第一に、水素大気用の放射スキームの開発を行った。放射計算の定式化と水素の吸収係数データの収集を行ない、水素大気に関する放射スキームの実装をおこなった。この放射スキームと対流調節を用いて、現在の木星大気設定における放射対流平衡構造を用いるテスト計算を行った。その結果、0.1-2 気圧の範囲で木星温度構造をほぼ再現できることを確認した。第二に、入出力用ライブラリ GT00L5 の整備を行った。同様の形式をもつ 2 種のインターフェース：大規模モデル用インターフェースと小規模モデル用インターフェースを作成した。これによりモデル規模、出力データ量によらず、統一された形式でデータ入出力を行えるようになった。

## 5. 主な発表論文等 〔雑誌論文〕(計 3 件)

- ① Ishiwatari M., Toyoda E., Morikawa Y.,

Takehiro S., Sasaki Y., Nishizawa S.,  
Odaka M., Otohe N., Takahashi Y. O.,  
Nakajima K., Horinouchi T., Shiotani  
M., Hayashi Y.-Y., Gtool development  
group (2012) "Gtool5": a Fortran90  
library of input/output interfaces for  
self-descriptive multi-dimensional  
numerical data. Geosci. Model Dev., 5,  
449-455, doi:10.5194/gmd-5-449-2012.  
査読有り

- ② 納多哲史, 石渡正樹, 中島健介, 高橋芳幸, 森川靖大, 西澤誠也, 林祥介 (2011) 同期回転惑星における大気大循環に関する数値実験: 太陽定数依存性. ながれ 30 別冊, P.129. 査読無し
- ③ 石渡正樹, 地球流体電脳倶楽部 dcmode1 プロジェクト, 地球流体電脳倶楽部 davis プロジェクト (2009) 地球流体電脳倶楽部 dcmode1/davis チュートリアル報告. 遊星人, 18, 125-127. 査読無し

[学会発表] (計 17 件)

- ① Noda S., Ishiwatari M., Nakajima K., Takahashi Y. O., Morikawa Y., Nishizawa S., Hayashi Y.-Y. (2011) The atmospheric general circulation of synchronously rotating planets: dependence on planetary rotation rate. EPSC-DPS Joint Meeting 2011, Abstract No. P234. ナントイベントセンター (フランス)
- ② 納多哲史, 石渡正樹, 中島健介, 高橋芳幸, 森川靖大, 西澤誠也, 林祥介 (2011) 同期回転惑星における熱収支の自転角速度依存性. 日本惑星科学会 2011 年秋季講演会, 講演番号 S32-05. 相模女子大 (相模原市)
- ③ 納多哲史, 石渡正樹, 中島健介, 高橋芳幸, 森川靖大, 西澤誠也, 林祥介 (2011) 同期回転惑星における太陽定数増大実験. 日本地球惑星科学連合 2011 年大会. 幕張メッセ (千葉市)
- ④ 納多哲史, 石渡正樹, 中島健介, 高橋芳幸, 森川靖大, 西澤誠也, 林祥介 (2011) 同期回転惑星における暴走限界の自転角速度・日射分布依存性. 日本気象学会 2011 年度春季大会. 国立オリンピック記念青少年総合センター (東京都)
- ⑤ 納多哲史, 石渡正樹, 中島健介, 高橋芳幸, 森川靖大, 西澤誠也, 林祥介 (2011) 同期回転惑星における熱収支の自転角速度依存性. 日本気象学会 2011 年度秋季大会. 名古屋大学 (名古屋市)
- ⑥ 高橋芳幸, 杉山耕一郎, 小高正嗣, 石渡正樹, 佐々木洋平, 西澤誠也, 中島健介, 竹広真一, 林祥介 (2011) 惑星大気計算のための大循環モデルならびに雲解像モデルの構築. 日本気象学会 2011 年度秋季大会. 名古屋大学 (名古屋市)
- ⑦ 高橋芳幸, 杉山耕一郎, 小高正嗣, 石渡正樹, 佐々木洋平, 西澤誠也, 中島健介, 竹広真一, 林祥介 (2011) 共通のプログラムスタイルを持つ大気大循環モデルと雲解像モデルの開発. 日本惑星科学会 2011 年秋季講演会. 相模女子大 (相模原市)
- ⑧ 納多哲史, 石渡正樹, 中島健介, 高橋芳幸, 森川靖大, 西澤誠也, 林祥介 (2010) 同期回転惑星の大気大循環とその自転角速度依存性. 日本気象学会 2010 年度春季大会. 国立オリンピック記念青少年総合センター (東京都)
- ⑨ 森川靖大, 石渡正樹, 高橋芳幸, 小高正嗣, 林祥介 (2010) 惑星大気大循環モ

- デルの設計と開発. 日本地球惑星科学連  
合 2010 年大会. 幕張メッセ (千葉市)
- ⑩ 納多哲史, 石渡正樹, 中島健介, 高橋芳  
幸, 森川靖大, 西澤誠也, 林 祥介  
(2010) 同期回転惑星の大気大循環とそ  
の自転角速度依存性. 日本地球惑星科学  
連合 2010 年大会. 幕張メッセ (千葉市)
- ⑪ 納多哲史, 石渡正樹, 中島健介, 高橋芳  
幸, 森川靖大, 西澤誠也, 林 祥介  
(2010) 同期回転惑星における太陽定数  
増大実験. 日本惑星科学会 2010 年秋季  
講演会. 名古屋大学 (名古屋市)
- ⑫ 納多哲史, 石渡正樹, 中島健介, 高橋芳  
幸, 森川靖大, 西澤誠也, 林 祥介  
(2010) 同期回転惑星における太陽定数  
増大実験. 日本気象学会 2010 年度秋季  
大会. 京都テルサ (京都市)
- ⑬ Noda, S., Ishiwatari, M., Nakajima, K.,  
Takahashi, Y. O., Morikawa, Y.,  
Nishizawa, S., Hayashi, Y.-Y. (2010)  
The atmospheric general circulation  
of a synchronously rotating planet and  
its dependence on rotation rate. West.  
Pac. Geophys. Meet. 台北国際コンベンシ  
ョンセンター (台湾)
- ⑭ 森川靖大, 高橋芳幸, 小高正嗣, 石渡正  
樹, 林祥介 (2009) 階層的地球流体モデ  
ルのためのデータ入出力 Fortran 90/95  
ライブラリ Gtool5. 日本地球惑星科学連  
合 2009 年大会. 幕張メッセ (千葉市)
- ⑮ 森川靖大, 高橋芳幸, 小高正嗣, 石渡正  
樹, 林祥介 (2009) 階層的数値モデルの  
ためのデータ入出力ライブラリ Gtool5  
の設計と開発. 日本気象学会 2009 年度  
春季大会. つくば国際会議場 (つくば市)
- ⑯ 石渡正樹, 高橋芳幸, 杉山耕一郎, 小高  
正嗣, 中島健介, 林祥介, 地球流体電脳  
倶楽部 dcmoel プロジェクト (2009) 系

外惑星の気候探索をめざした数値モデル  
の開発. 日本気象学会 2009 年度秋季大  
会. アクロス福岡 (福岡市)

- ⑰ 石渡正樹, 高橋芳幸, 杉山耕一郎, 森川  
靖大, 納多哲史, 山下達也, 西澤誠也,  
小高正嗣, 中島健介, 林祥介, 地球流体  
電脳倶楽部 dcmoel プロジェクト  
(2009) 系外惑星の気候探索をめざした  
数値モデルの開発. 第 6 回太陽系外惑星  
大研究会. 国立天文台 (三鷹市)

[その他]

開発モデル群のソースコードはネットワー  
ク上に公開している.

モデル群全体のエントリページ:  
<http://www.gfd-dennou.org/library/dcmoel/>

全球静水圧モデル dcpam:  
<http://www.gfd-dennou.org/library/dcpam/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

石渡 正樹 (ISHIWATARI MASAKI)  
北海道大学・大学院理学研究院・准教授  
研究者番号: 90271692

### (2) 研究分担者

倉本 圭 (KURAMOTO KIYOSHI)  
北海道大学・大学院理学研究院・准教授  
研究者番号: 50311519

小高 正嗣 (ODAKA MASATSUGU)  
北海道大学・大学院理学研究院・助教  
研究者番号: 60344462

中島 健介 (NAKAJIMA KENSUKE)  
九州大学・大学院理学研究院 助教  
研究者番号: 10192668

(3) 連携研究者  
無し