

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月3日現在

機関番号：14501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K17809

研究課題名(和文) 惑星大気大循環に関する階層的数値モデル群の構築による金星大気超回転の解明

研究課題名(英文) Exploration of superrotation by development of hierarchical numerical models of planetary atmospheric circulation

研究代表者

櫻村 博基 (Kashimura, Hiroki)

神戸大学・理学研究科・特命助教

研究者番号：80635186

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,200,000円

研究成果の概要(和文)：金星大気の高速東西風「スーパーローテーション」のメカニズム解明のために、大気力学・地球流体力学の階層的モデル群の開発を行った。既存の大気大循環モデルを用いた予備実験の結果から、数値モデルで計算される大規模場が、数値的手法に依存して大きく変化しうることを見いだした。数値解の数値解法や方程式系に対する依存性を掌握するため、また階層的モデル群構築のため、汎用スクリプト言語Rubyによる、数値計算の実験環境を構築し、これをライブラリの形で整理・公開した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来広く認識されていなかった、大気モデルにおける大規模場の数値解法依存性を発見し示すことが出来た。これは気象学における数値シミュレーションの根幹に関わる重要な問題であり、この問題を提起できたことの学術的意義は非常に大きい。そして、この問題に対峙するための道具としての数値計算の実験環境を構築・公開することで、当該分野の研究コミュニティに貢献することが出来た。

研究成果の概要(英文)：Towards the understanding of Venusian fastly rotating atmosphere, superrotation, hierarchical numerical models for atmospheric dynamics and geophysical fluid dynamics have been developed. I found a strong dependence of large-scale numerical results on numerical methods from preliminary experiments using existing atmospheric general circulation models. To understand such numerical dependence and to develop the hierarchical models, I developed an environment for experimental numerical calculations by using a scripting programming language Ruby and published as a library.

研究分野：惑星大気力学

キーワード：地球流体力学 数値解法 数値モデル Ruby 準二年周期振動

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

惑星規模の大気の流れ「大気大循環」は惑星気候システムにおいて、非常に重要である。なぜなら、太陽入射による南北加熱差によって大気大循環は駆動され、赤道から極向きにエネルギーが輸送されることで、各緯度帯のエネルギー収支が保たれているからである。太陽系内の惑星・衛星に限っても、大気大循環の様相はそれぞれ異なっている。とくに金星では、自転周期が243地球日と長いにも関わらず、大気は約4日で自転方向に回転しており、このような大気大循環は「スーパーローテーション」と呼ばれている。地表面摩擦に抗して、高速東西風が維持される、スーパーローテーションのメカニズムは惑星気象学最大の謎のひとつである。

大気の運動は、基本的に回転球面上（あるいは球殻）の、圧縮粘性流体の運動方程式（ナビエ-ストークス方程式）、熱力学方程式、連続の式で記述される。これは、非線形な偏微分方程式系であり、一般に解析解は求められない。また、分子粘性が効くスケール、惑星大気の鉛直・水平スケールなどの著しい違いにより、直接この方程式系の数値解を求めることも容易ではない。

気象学分野では、上記の基礎方程式系をもとに、目的に応じて様々な近似を施して、種々の近似方程式系を導入してきた。例えば、全球規模の数値天気予報に用いられるプリミティブ方程式系、中高緯度の高低気圧の運動の理解に有用な準地衡方程式系などがある。近似の少ない系は、現実大気の再現を目指す数値シミュレーションや、観測値を方程式系に馴染むよう補正・補間するデータ同化に利用され、現象の詳細な「記述」を可能にする。一方、近似の度合いが大きい方程式系は、理想化した数値実験や現象のメカニズムを説明する理論モデルの構築に使われ、現象の「理解」に貢献する。近年は、計算機性能の向上や観測データ同化技術の発達により記述的な研究が充実してきた。これは、他の惑星においても同様である。しかし、極めて非線形性の強い大気現象は、記述だけではそのメカニズムを理解できないということが問題であった。

理解のためには、注目する現象の本質を捉えた、理想化された・近似の多い方程式系で構成される、単純モデルが有用となる。歴史の長い地球気象学の分野では、どのような現象に、どのような方程式系が有用か、知識・経験が蓄積されてきた。一方、歴史の浅い惑星気象の場合、そのような蓄積がなく、最適な単純モデルを選択することが難しく、大きな問題であった。

2. 研究の目的

本研究では、上述の現象の詳細な記述を可能にする近似の少ないモデルと解釈に有用な単純モデルとのギャップを埋めるために、近似の度合いが階層的な数値モデル群を構築し、それを用いた大規模な数値実験によって、金星大気スーパーローテーションの本質を見だし、メカニズムを解明することを目指した。

3. 研究の方法

本研究ではまず、大気の運動を表す近似方程式系を総ざらいし、整理するところから始めた。次に、数値モデルに使用するプログラミング言語を選定した。気象学分野では伝統的に Fortran が利用されてきたが、本研究では、コードの可読性や表現力、拡張の容易さを考慮し、よりモダンな言語の利用も検討した。

また、既存の2種類の大気大循環モデル SCALE-GM (<http://r-ccs-climate.riken.jp/scale/ja/index.html>) と DCPAM (高橋 他, 2018) を用いた予備実験を実施した。SCALE-GM は静力学近似を用いない完全圧縮方程式系を、正二十面体準一様格子に基づき差分法で解く、非常に高解像度での計算を狙った先進的なモデルである。一方、DCPAM は静力学近似を用いたプリミティブ方程式系を、球面調和関数を用いたスペクトル法で解く、伝統的な大気大循環モデルである。両モデルを用いて、大気大循環モデルの力学標準実験である Held and Suarez (1994) を高高度 (50 km) に拡張した実験を行った。Held and Suarez (1994) は地球の対流圏を理想化した設定での力学計算の標準実験であるが、その設定はそのまま高高度に拡張することが出来る。ただし、現実の成層圏を模した放射強制を与えるわけではなく、高度約 15 km よりも上空は 200 K 等温の状態に近づけるような強制を与えるというものである。

上記の予備実験の結果から、計算される大規模場の振る舞いが数値解法や時間刻み幅にも顕著に依存しうることが見いだされた。これをうけて、方程式系の近似の度合いだけでなく、数値解法に対する解の依存性を掌握することも重要な課題であることが明らかになった。これに対峙するために、数値解法を簡単に切り替えられる数値計算の実験環境の整備を行った。

4. 研究成果

まず、数値モデルを作成するにあたり使用するプログラム言語を検討・選定した。本研究では、Fortran、Julia、Ruby の中から検討した。Fortran は気象学の分野で古くからが使用されているため、多くのライブラリが利用可能であり、また実行速度も速いが、記述の柔軟性は近年のスクリプト言語に比べて悪く、本研究で目的とする階層的な数値モデル群を構築・運用するには効率的でない。Julia は科学計算処理を念頭に設計された言語であり、スクリプト言語でありながら実行速度が速い。しかしながら、気象学分野での実績が乏しく、利用可能なライブラリが少なく、モデル開発には時間を要すると見込まれた。一方、Ruby は非常に柔軟な記述ができる汎用スクリプト言語であり、気象学分野ではデータ解析・可視化用のプログラム言

語として使われている実績がある。Ruby 自体の実行速度は高速ではないものの、計算負荷の高い部分を C 言語で記述することが可能である。そこで本研究では、Ruby を利用して数値モデル群を開発することにした。

次に、SCALE-GM と DCPAM を用いた、大気大循環モデルの力学標準実験 Held and Suarez (1994) の高高度拡張実験を実施した。水平解像度が 220 km 以上の低解像度設定で DCPAM と SCALE-GM とで、時間発展計算を実施したところ、高度 15 km 以下の対流圏の振る舞いは、両モデルで顕著な差は見られなかった。ところが、高高度領域の風の振る舞いは大きく異なっていた。SCALE-GM で計算された赤道上空の平均東西風の振る舞いは驚くべきもので、地球成層圏の準二年周期振動 (QBO) に類似する自励的な振動の存在が見出された (図 1a; 現実の QBO は赤道域の積雲対流から生じる重力波に起因するが、本計算には積雲対流は含まれていないため、これは予想外の結果であった)。対応する DCPAM 計算ではこの振動がみられなかった (図 1b)。このように赤道上空の平均東西風の振る舞いが数値モデルの計算方法によって大きく異なることは、Yao and Jablonowski (2013, 2015) でも報告されていたが、その具体的な原因は明らかになっていない。

本研究ではさらに、SCALE-GM においてモデルパラメタを様々に変えた計算を実行した。その結果、赤道上空の平均東西風の振動の発生は、解像度と散逸係数に依存することが分かった。逆に低解像度の DCPAM においても散逸係数を小さくすることにより振動解が得られることが分かった。また SCALE-GM において、時間積分の刻み幅 dt を変更した計算を実施したところ、赤道上空の平均東西風の振る舞いは、 dt にも依存することが明らかになった。すなわち、水平解像度が約 220 km の場合、 dt が 20 分のときには、数年周期の東西風振動が得られていた (図 2a) が、 dt を 5 分にすると、振動が得られなくなった (図 2c)。ところが、 dt をさらに小さく 1.25 分にすると、10 年程度の長周期の東西風振動が得られた (図 2e)。大気モデルで計算される大規模場が、これほど dt に依存するというのは驚くべき結果である。

以上の結果から、数値モデルで計算される大規模場が、数値解法や解像度・時間刻み幅に大きく依存していることが見いだされた。地球大気のように観測が充実している場合は、それとの整合性から、数値計算の妥当性を確認できる。しかし、観測の乏しい惑星大気の場合は、そのような確認が難しい。数値解の数値解法依存性について掌握することがより一層求められる。

そこで、当初計画していた階層的数値モデル群の構築の前に、その基盤として、様々な数値解法を切り替えて数値解を比較・考察が手軽にできるように、数値計算の実験環境を整えた。プログラミング言語は上で検討した Ruby を用い、既存の気象学データの解析・可視化ライブラリである GPhys (<http://ruby.gfd-dennou.org/products/gphys/>) を拡張する形で開発した。まずは、計算の核となる空間微分計算を含む球面調和関数変換のコードを作成しモジュール化した。この部分をモジュール化したことで、球面や β 平面などのジオメトリの違いを、モジュールを切り替えることで対応できるように設計した。また、Ruby の柔軟な表現力を活かし、出

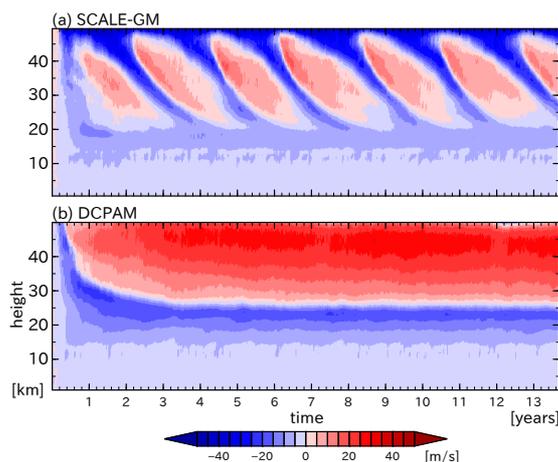


図 1 赤道上空東西平均東西風の時間発展。(a) SCALE-GM と (b) DCPAM の結果。

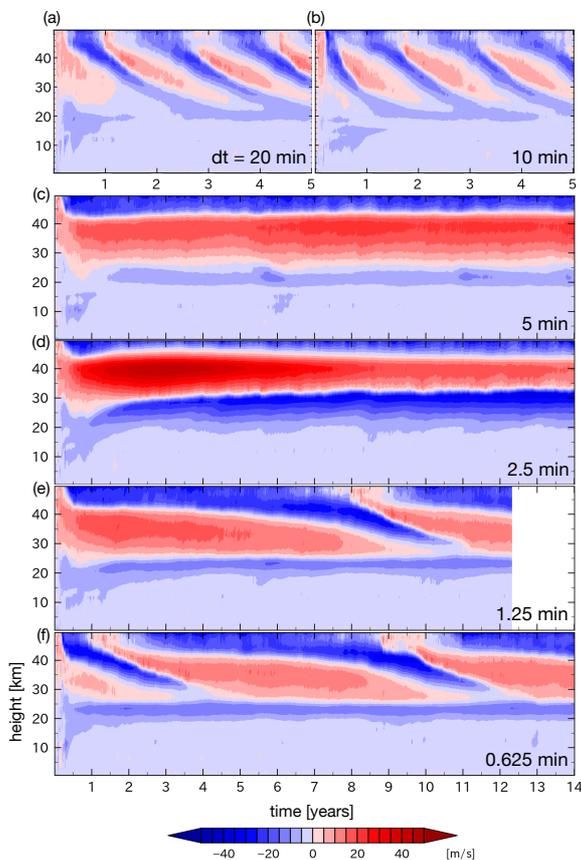


図 2 SCALE-GM で計算された赤道上空の東西平均東西風の時間刻み幅依存性。時間刻み幅の大きさは、(a) 20 分、(b) 10 分、(c) 5 分、(d) 2.5 分、(e) 1.25 分、(f) 0.625 分である。空間格子間隔は、水平約 220 km、鉛直 1 km である。

来るだけ数式に近い形でコードを記述できるようにした。次に、種々の時間積分法を実装した。時間積分のコードを予報方程式と分離させ、インターフェースを統一することで、簡単に時間積分の方法を切り替えられるようにした。さらに、スクリプト言語であることの利点を活かし、計算の途中の任意のタイミングで処理を中断させ、そこから対話的処理に移行できるようにした。これにより、数値解法ごとの計算1ステップの違いを探索することが非常に容易になった。開発したライブラリを用いた2次元渦度方程式の数値モデルのコード例を図3に示す。また、テスト計算として、Williamson *et al.* (1992) の球面浅水方程式系の標準実験を実施し、ライブラリが問題なく動作すること確認した。

```

1 # 2次元渦度方程式
2 require "numru/gphys"
3 require "numru/ganalysis"
4 require "../lib/timeintegration.rb"
5 require "../lib/gphysmath.rb"
6
7 require "pry"
8 include NumRu
9 include NMath
10 include GPMath
11
12 # 定数設定
13 dt = UNumeric[ARGV[0].to_f,"s"] # 時刻幅
14 HD = UNumeric[5E4.to_f,"m2.s-1"] # 拡散係数
15 T = UNumeric[86400*5,"s"] # 積分時間
16 Beta = UNumeric[0.0E-11,"m-1.s-1"]
17 R = GAnalysis::Planet.radius
18 Omega = GAnalysis::Planet.omega
19
20 # 領域設定
21 # 周期境界の2次元平面
22 grid = GPhys.domain2D(
23   {"range"=>0..1E7, "grid_points"=>64, "cyclic"=> true,
24    "units"=>"m"},
25   {"range"=>0..1E7, "grid_points"=>64, "cyclic"=> true,
26    "units"=>"m"} )
27 # 2次元球面
28 # grid = GPhys.domain2Dsphere(64,R) # 引数は経度方向の格子
29 # 点数
30 # 変数設定 (渦度)
31 vor = GPhys.make_var(grid,
32   {"name"=>"vor", "long_name"=>"vorticity",
33    "units"=>"s-1"} )
34
35 # 球面調関数変換の準備
36 # GPhys.prepare_spht(vor)
37 # GPhys.use_spht
38
39 #####
40 # 初期分布設定 #
41 #####
42 # グリッドデータで与える場合
43 xc0 = 4000E3; yc0 = 5000E3; xc1 = 6000E3; yc1 =
44 5000E3; rlen = 1000E3
45 # xc0 = 150; yc0 = 0; xc1 = 210; yc1 = 0; rlen = 20
46 xval = vor.coord(0).val; yval = vor.coord(1).val
47 val = vor.val
48 grid.shape[1].times{|j|
49   grid.shape[0].times{|i|
50     r0 = sqrt( (xval[i]-xc0)**2 + (yval[j]-yc0)**2 )
51     r1 = sqrt( (xval[i]-xc1)**2 + (yval[j]-yc1)**2 )
52     val[i,j,0] = (exp((rlen-r0)/rlen*2) + exp((rlen-
53     r1)/rlen*2))*1.0E-5
54   }
55 }
56
57 vor.replace_val(val)
58
59 GPhys.prepare_fft_wavenumber(vor)
60
61
62
63
64 # Vorticity equation on double cyclic 2D-plane
65 voreq2Dplane = lambda {|gphys,t|
66   GPhys.use_fft
67   zeta = gphys[0]
68   psi = invlap(zeta)
69   zeta_tendency = -jacobian(psi,zeta) - Beta*psi.dx +
70   HD*lap(zeta)
71   return NArray.to_na([zeta_tendency])
72 }
73
74 # Vorticity equation on 2D-sphere
75 voreq2Dsphere = lambda {|gphys,t|
76   zeta = gphys[0]
77   psi = invlap(zeta)
78   zeta_tendency = -jacobian(psi,zeta) - 2*Omega/
79   R*psi.dx + HD*(lap(zeta) + 2/(R*R)*zeta)
80   return NArray.to_na([zeta_tendency])
81 }
82
83 ofnl = "vor.nc"
84 gphys = NArray.to_na([vor])
85
86
87 i = 0
88 # 時間発展ループ
89 while (dt*i < T) do
90   auto_write(ofnl, gphys[0], i, false)
91   gphys = TimeIntegration.rk3(gphys,dt,1,&voreq2Dplane)
92 end
93
94 # gphys = TimeIntegration.rk3(gphys,dt,
95 10,&voreq2Dsphere)
96 p i*dt if (i%20 == 0)
97 i += 1
98 if gphys[0].max.to_f.nan? then
99   raise "!!! Numerical Instability occurs !!!"
100 end
101 end

```

GPhys.use_fft:
微分計算にFFTを使用するフラグ
コメントアウトすれば中央差分

$$\zeta_t = -J(\psi, \zeta) - \beta\psi_x + \nu\Delta\zeta$$

zeta_tendency = -jacobian(psi,zeta) - Beta*psi.dx + HD*lap(zeta)

auto_write:
NetCDFへの逐次書き出し

TimeIntegration.rk3: ルンゲクッタ3段で時間積分
rk3 → euler/rk2/rk4 などで時間積分法が切替可能

図3 開発したライブラリを用いた2次元渦度方程式のサンプルプログラム。

本研究で構築した Ruby ライブラリにより、様々な系 (モデル) を様々な数値解法で計算し比較することが容易になった。これにより、数値解法の影響を確認しつつ、系の近似の度合いによる数値解の違いを検証することができるようになり、数値的研究による金星大気スーパーローテーションのメカニズム解明に向けて前進することが出来た。本研究で構築したライブラリはサンプルプログラムも含めて、<https://github.com/hiroki-mac/ruby-gfd-ex> にて公開している。

<引用文献>

①高橋 芳幸, 樫村 博基, 竹広 真一, 石渡 正樹, 納多 哲史, 小高 正嗣, 堀之内 武, 林 祥介, DCPAM 開発グループ (2018), 惑星大気モデル DCPAM, <http://www.gfd-dennou.org/library/dcpam/>, 地球流体電脳倶楽部。
 ②Held, I. M. and M. J. Suarez (1994), A proposal for the intercomparison of the dynamical cores of atmospheric general-circulation models. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **75**(10), 1825–1830.
 ③Yao, W. and C. Jablonowski (2013), Spontaneous QBO-like oscillations in an atmospheric model dynamical core. *Geophysical Research Letters*, **40**(14), 3772–3776.

- ④ Yao, W. and C. Jablonowski (2015), Idealized quasi-biennial oscillations in an ensemble of dry GCM dynamical cores. *Journal of Atmospheric Sciences*, **72(6)**, 2201–2226.
- ⑤ Williamson, D. L., J. B. Drake, J. J. Hack, R. Jakob, and P. N. Swarztrauber (1992), A standard test set for numerical approximations to the shallow water equations in spherical geometry. *Journal of Computational Physics*, **102(1)**, 211–224.

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 4 件)

- ① 榎村 博基「Ruby による数値計算実験場構築の試み」日本気象学会 2019 年度春季大会、2019 年
- ② 榎村 博基、八代 尚、西澤 誠也、富田 浩文、中島 健介、石渡 正樹、高橋 芳幸、林 祥介「乾燥大気理想化実験における QBO 的周期振動のモデル依存性」日本気象学会 2017 年度秋季大会、2017 年
- ③ Kashimura, H., H. Yashiro, S. Nishizawa, H. Tomita, K. Nakajima, M. Ishiwatari, Y. O. Takahashi, and Y.-Y. Hayashi, “Model dependence of a QBO-like oscillation in a dry dynamical core experiment”, Joint SPARC Dynamics & Observations Workshop—QBOi, FISAPS & SATIO-TCS, 2017 年
- ④ 榎村 博基、八代 尚、西澤 誠也、富田 浩文、中島 健介、石渡 正樹、高橋 芳幸、林 祥介「惑星大気シミュレーションの高解像度化に向けて：理想化実験における QBO 的周期振動のモデル依存性」JpGU-AGU joint meeting 2017、2017 年

[その他]

開発ライブラリ公開 URL: <https://github.com/hiroki-mac/ruby-gfd-ex>

6. 研究組織

(1) 研究協力者

研究協力者氏名：八代 尚

ローマ字氏名：(YASHIRO, Hisashi)

研究協力者氏名：西澤 誠也

ローマ字氏名：(NISHIZAWA, Seiya)

研究協力者氏名：富田 浩文

ローマ字氏名：(TOMITA, Hirofumi)

研究協力者氏名：中島 健介

ローマ字氏名：(NAKAJIMA, Kensuke)

研究協力者氏名：石渡 正樹

ローマ字氏名：(ISHIWATARI, Masaki)

研究協力者氏名：高橋 芳幸

ローマ字氏名：(TAKAHASHI, Yoshiyuki O.)

研究協力者氏名：林 祥介

ローマ字氏名：(HAYASHI, Yoshi-Yuki)

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。