

令和 6 年 5 月 31 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2023

課題番号：20K04061

研究課題名(和文) 高速な3次元スペクトル大気大循環モデルの構築と大気力学研究への新たなアプローチ

研究課題名(英文) Development of a fast 3D spectral atmospheric general circulation model and new approaches to atmospheric dynamics research

研究代表者

石岡 圭一 (Ishioka, Keiichi)

京都大学・理学研究科・教授

研究者番号：90292804

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：3次元スペクトルスペクトルメカニスティック大気大循環モデル(MCM)の構築に成功し、その成果を発表した論文は、論文賞も受賞するなど、学会でも高く評価されている。これを用いた大気力学研究に対する新たなアプローチの成果として、先行研究のベンチマーク実験設定でQBO(準2年振動)的振動が生じるかどうかを調べ、さらに差分法のモデルとの比較により、QBO的振動が発生するかしないかは、鉛直離散化手法および解像度に大きく依存することを明らかにした。また、派生的研究として、2022年のトンガの噴火で検出されたPekerisモードに関して、その等価深度を精密に与える手法を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で構築された3次元スペクトルスペクトルメカニスティック大気大循環モデルは、鉛直方向に差分法を用いる従来のモデルに比べて精度的に優れているため、将来的に天気予報モデルにこの手法が応用される可能性もあり、それが実現すれば社会的意義は大きい。また、この定式化は数学的に簡明であり、この定式化を用いた線形固有値解析などが比較的容易であるため、大気力学研究に新たなアプローチを可能にするという意味で、学術的意義も高い。

研究成果の概要(英文)：We have succeeded in constructing a three-dimensional spectral-mechanistic atmospheric general circulation model (MCM), and the paper in which we presented our results has been highly evaluated in the scientific community, including a paper award. As a result of a new approach to the study of atmospheric dynamics using the MCM, we investigated whether or not QBO (Quasi-Biennial Oscillation)-like oscillations occur in the benchmark experimental setup of a previous study and, by comparison with the finite-difference method model, showed that whether or not QBO-like oscillations occur depends largely on the vertical discretization method and resolution. The results showed that whether or not QBO-like oscillations occur depends strongly on the vertical discretization method and resolution. As a corollary study, we also proposed a method to accurately give the equivalent depth of the Pekeris mode detected in the 2022 Tonga eruption.

研究分野：地球流体力学

キーワード：3次元スペクトル大気大循環モデル 成層圏準2年周期振動 Pekerisモード

## 1. 研究開始当初の背景

大気力学に関する理論的研究においては、その草創期においては様々な近似が入った基礎方程式が数学的に解析されることが多かったが、計算機の登場により、いわゆる「トイモデル」と呼ばれるような簡略化されたモデル方程式を数値的に解くことが行われるようになり、計算機が発達した近年では、大気大循環モデル(GCM = General Circulation Model)のうちでも大気力学に関わるコア部分を抽出したメカニスティック大気大循環モデル(MCM = Mechanistic Circulation Model)と呼ばれるものを数値計算することが多く行われるようになってきている。このような場合、湿潤対流の効果や精密な赤外放射伝達の効果の計算を含むフル GCM においてそれらの計算をスイッチオフして用いることが多いが、巨大なプログラムの一部だけを使うことになり計算効率的に無駄な部分も多くなる。もちろん GCM の力学コア部分だけを抽出して提供されているようなものも存在するが、十分に最適化・並列化されているとは言い難く、またプログラム構造も複雑になっており、トイモデルのように理論的研究を指向する研究者が気軽に使えるようなものにはなっていない。また、理論的研究において MCM を用いた数値実験を行っている場合でも、そこで用いられているデータ解析手法は、観測的研究で発展してきた解析手法、例えば、主成分分析等が用いられることが多く、Lorenz がトイモデルで用いたような、モデルの自由度が少ないことを活用した数学的な解析手法が必ずしも適用できているわけではない。

## 2. 研究の目的

本研究の第 1 の目的は、十分に最適化・並列化された高速動作する MCM を構築し、本研究自体で活用するだけでなく、その定式化を一般に公開することによって大気力学研究コミュニティに寄与することである。本研究で構築する MCM は、既存のものとは異なり、水平方向だけでなく鉛直方向にもスペクトル法を用いた離散化を行うという点で独自性がある。既存の MCM (または GCM) でも水平方向の離散化を球面調和関数展開に基づくスペクトル法を用いているものは多いが、鉛直方向の離散化には殆んど差分法が用いられている。本研究で構築する MCM においては、鉛直方向の離散化にルジャンドル多項式展開に基づくスペクトル法を用いることにより、差分法に比べてより少ない離散化自由度でより高精度の数値解を得られるようにすることを目指す。このことが以下に述べる本研究のもう一つの目的である大気力学研究に対する新たなアプローチを可能にする。新たなアプローチの 1 つ目は、中緯度傾圧擾乱の活動度の準周期的変動に関して、不安定周期軌道を用いた解析を試みることであり、観測的研究により、南半球対流圏の中緯度傾圧擾乱の活動度について 25 日程度の準周期的変動が見られることが明らかになっている。このような変動について理解を深めることは、その他の大気の季節内振動との関連性からも重要である。本研究では、この変動の解析に不安定周期軌道の手法を適用することを試みる。不安定周期軌道の手法は、近年、主に乱流研究の分野で発展してきた解析手法であり、準周期的な変動を示す高次元の力学系において、準周期的な変動の骨格とも言うべき不安定周期軌道を探索して求めることによって、準周期的な変動を統計的に扱う代わりに、求めた 1 つの不安定周期軌道についての解析を行うものである。この手法により、現象の典型的な時間変化を明確に追跡することが可能になり、現象を引き起こす力学的なメカニズムの定量的解析が容易になると考えられる。新たなアプローチの 2 つ目は、鉛直離散化の方法の違いが、大気波動の励起過程等にどう影響を与えうるかを調べることであり、Yao and Jablonowski(2015)では、様々な MCM において、成層圏の QBO(準 2 年周期振動)に類似した東西風変動がどのように現われるか比較実験をしており、そこで、鉛直方向に単純な差分法を使わずにラグランジュ的に移流効果を計算する手法を用いた MCM では他の MCM と異なり、大気波動の励起が弱く、QBO 的振動が現れないことが示されている。このことは、鉛直解像度だけでなく、鉛直離散化の手法が慣性重力波の励起過程に影響を与えている可能性を示すものであり、本研究で開発する 3 次元スペクトル MCM を用いることにより、この問題を追究することが可能になる。

## 3. 研究の方法

十分に最適化・並列化された高速動作する 3 次元スペクトル MCM を構築する。具体的には、鉛直方向にルジャンドル多項式展開に基づくスペクトル法を用いた 3 次元スペクトル MCM の定式化を行い、それをプログラム言語で実装し、OpenMP で並列化するとともに、最新の CPU に適合した最適化を行うことによって高速動作するようにする。開発した MCM は、先行研究で提案されているテスト実験を行って精度チェックを十分に行う。次に、本研究で開発される高速な MCM を用いて、Held and Suarez(1994)で提案されている実験設定で中緯度の傾圧擾乱の時間発展の数

値実験を長時間にわたって行い、その中から典型的な準周期的変動が期間を抽出する。その準周期的変動に関して、反復手法を適用して、対応する不安定周期軌道を探査する。その際、系の自由度のオーダーの反復計算が必要になるので、MCMの水平方向または鉛直方向の解像度を適宜下げるなどの試行錯誤をしながら探索を行う。求められた不安定周期軌道に関して、風速場と温度場の時間変化および渦運動エネルギーと南北熱輸送量の時間変化を詳細に調べることにより、不安定周期軌道が、中緯度傾圧擾乱に関して観測研究で発見されたBAM(=Baroclinic Annular Mode)の変動の骨格とみなせる解になっているかを明らかにする。さらに、本研究で開発される3次元スペクトルMCMを用いて、Yao and Jablonowski(2015)で提案されている実験設定で長期間の大気循環場の時間発展を行い、成層圏のQBO的な東西風変動が現れるかどうか、その解像度依存性も含めて調べる。さらに、別途、鉛直差分法のMCMを構築し、それを用いた計算結果と比較することにより、鉛直離散化手法の違いがどのように大気波動の励起に影響を及ぼすのかを調べる。

#### 4. 研究成果

本研究の主目的である、3次元スペクトルMCMの開発は成功し、その定式化の詳細とベンチマークテスト計算での精度検証の結果は、Ishioka, et al. (2022)として論文発表した。鉛直方向にルジャンドル多項式展開を用いたことおよび大気上端での特異性を生じさせない工夫を施すことにより、対称性が良く、かつ数値計算する際も効率の良い定式化になり、鉛直方向の自由度を増やしていった場合に急速に精度が上がることを示された。この論文は、JMSJ論文賞を受賞するなど、学会でも高く評価されている。この3次元スペクトルMCMを用いた新たな研究手法のアプローチとして、中緯度の傾圧擾乱の時間発展における不安定周期軌道の抽出にも成功しており、得られた不安定周期軌道の変動パターンが、BAMの変動の骨格とみなせるようなふるまいを示すことも明らかにした。この結果は、今井・石岡(2022)として学会発表している。さらに、MCMにおけるQBO的振動の発生の有無に関する研究については、先行研究のベンチマーク実験設定でQBO的振動が生じるかどうか、鉛直離散化手法および解像度に大きく依存し、鉛直方向にスペクトル法を用いたMCMおよび、差分法でも鉛直解像度が高い場合にはQBO的振動が生じなくなることを明らかにした。さらに、この差異の原因についても詳細に解析し、鉛直離散化の精度の違いによって、赤道域の対流圏界面付近に相当する高度に強い西風ジェットが形成されるかどうか異なり、そのジェットでの大気波動のフィルター効果によって、QBO的振動が生じるかどうかの違いが生じることを明らかにした。この成果は、Fujita and Ishioka(2024)として論文発表している。また、3次元スペクトルMCMを構築したことによって、それを間接的に用いた派生的な研究も数多く進捗した。台風を意識した回転球面上の孤立した傾圧渦の移動メカニズムを明らかにした研究(鈴木・石岡, 2021(学会発表)), 2次元乱流の統計力学に関して、統計的平衡状態の新たな計算法を提案した研究(Ryono and Ishioka, 2022), トンガ噴火時に検出されたPekerisモードの等価深度を理論的に求め、観測結果との差異について議論した論文(Ishioka, 2023; Ishizaki, et al., 2023), である。これらの派生的研究は、本研究で開発した3次元スペクトルMCMが、大気力学研究に非常に有用であることを示している。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 FUJITA Shun, ISHIOKA Keiichi	4. 巻 102
2. 論文標題 Do dry GCMs generate QBO-like oscillation?	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2151/jmsj.2024-026	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 ISHIOKA Keiichi	4. 巻 101
2. 論文標題 What is the Equivalent Depth of the Pekeris Mode?	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II	6. 最初と最後の頁 139 ~ 148
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2151/jmsj.2023-008	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 ISHIZAKI Hideaki, SAKAZAKI Takatoshi, ISHIOKA Keiichi	4. 巻 101
2. 論文標題 Estimation of the Equivalent Depth of the Pekeris Mode Using Reanalysis Data	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II	6. 最初と最後の頁 461 ~ 469
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2151/jmsj.2023-027	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 ISHIOKA Keiichi, YAMAMOTO Naoto, FUJITA Masato	4. 巻 100
2. 論文標題 A Formulation of a Three-Dimensional Spectral Model for the Primitive Equations	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II	6. 最初と最後の頁 445 ~ 469
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2151/jmsj.2022-022	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Ryono K, Ishioka K	4. 巻 54
2. 論文標題 New numerical methods for calculating statistical equilibria of two-dimensional turbulent flows, strictly based on the Miller-Robert-Sommeria theory	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Fluid Dynamics Research	6. 最初と最後の頁 055505 ~ 055505
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1873-7005/ac9713	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 ISHIOKA Keiichi, YAMAMOTO Naoto, FUJITA Masato	4. 巻 100
2. 論文標題 A Formulation of a Three-Dimensional Spectral Model for the Primitive Equations	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2151/jmsj.2022-022	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計11件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 藤田駿・石岡圭一
2. 発表標題 乾燥大気大循環モデルはQBO的振動を生み出すか?
3. 学会等名 日本流体力学会年会2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 石崎秀晃・坂崎貴俊・石岡圭一
2. 発表標題 再解析データを用いたPekerisモードの等価深度の推定
3. 学会等名 日本流体力学会年会2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 藤田駿・石岡圭一
2. 発表標題 乾燥大気大循環モデルは準二年周期振動を生み出すか?
3. 学会等名 日本気象学会2023年度秋季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 石崎秀晃・坂崎貴俊・石岡圭一
2. 発表標題 再解析データを用いたPekerisモードの等価深度の推定
3. 学会等名 日本気象学会2023年度秋季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 今井稀温・石岡圭一
2. 発表標題 メカニスティック大気大循環モデルにおける不安定周期軌道の探索
3. 学会等名 日本気象学会秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Keiichi Ishioka
2. 発表標題 What is the equivalent depth of the Pekeris mode?
3. 学会等名 NTU-KU Joint Workshop on Severe Weather and Climate Impacts in East Asia (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Koki Ryono and Keiichi Ishioka
2. 発表標題 Numerical methods for calculating statistical equilibria of two-dimensional turbulence considering all Casimir invariants
3. 学会等名 6th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 漁野光紀・石岡圭一
2. 発表標題 回転球面上の2次元乱流に対する統計力学的平衡状態の数値計算
3. 学会等名 日本流体力学会年会2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 漁野光紀・石岡圭一
2. 発表標題 2次元乱流の統計的平衡状態を数値計算するための新しい手法
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 石岡圭一
2. 発表標題 球面調和関数変換ライブラリの高速化について
3. 学会等名 CPSセミナー
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木裕太・石岡圭一
2. 発表標題 回転球面上における傾圧渦の移動について
3. 学会等名 日本気象学会2020年度秋季大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	藤田 駿  (Fujita Shun)		
研究協力者	石崎 秀晃  (Ishizaki Hideaki)		
研究協力者	坂崎 貴俊  (Sakazaki Takatoshi)		
研究協力者	今井 稀温  (Imai Kion)		
研究協力者	漁野 光紀  (Ryono Koki)		



6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	鈴木 裕太  (Suzuki Yuta)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関