

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 14 日現在

機関番号：82706

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26800252

研究課題名(和文)成層圏大気大循環の長期変動における大気重力波と熱帯対流の役割

研究課題名(英文)Role of atmospheric gravity wave and tropical convection in long-term variation of stratospheric general circulation

研究代表者

小玉 知央(KODAMA, Chihiro)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・ビッグデータ活用予測プロジェクトチーム・ユニットリーダー

研究者番号：90598939

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：中層大気における大気重力波を適切に再現するため、非静力学全球大気モデルNICAMの鉛直層を増強し、モデルトップを80kmまで拡張した中層大気版NICAMの実行環境を構築した。水平14-56km(試験的には7km)、鉛直300m-2kmの解像度で多数の数値実験を行い、水平・鉛直解像度をともに高めた場合に基本場および大気重力波の再現性が向上することを明らかにした。結果を学会等で発表することで、国際的な枠組みであるCMIP6 DynVARへのNICAMグループとしての参加につながり、中層大気版NICAMを用いた気候研究に向けて一定の道筋をつけた。

研究成果の概要(英文)：In this study, middle-atmosphere version of non-hydrostatic global atmospheric model, NICAM, was constructed by enriching vertical levels of original NICAM and extending model top height to 80 km to appropriately simulate atmospheric gravity wave in the middle atmosphere. A series of numerical experiments were performed with horizontal resolutions of 14 - 56 km (7 km on a trial basis) and vertical resolutions of 300 m - 2 km. It was found that simulation with both higher horizontal and vertical resolutions shows better performance in reproducing basic state and atmospheric gravity wave. Results of this study was presented in scientific conferences, which leads to a participation of NICAM group in an international activity, CMIP6 DynVAR, and will lead to climate study using middle-atmosphere NICAM.

研究分野：気候の数値シミュレーション

キーワード：全球非静力学中層大気モデル 大気大循環 大気重力波

1. 研究開始当初の背景

成層圏の平均子午面循環である B-D (Brewer-Dobson) 循環は、様々な規模の大気波動によって駆動され、成層圏の基本場・大気組成分布だけでなく対流圏の長周期変動の決定に大きな役割を果たす。しかし、B-D 循環の長期トレンドに対する観測的な評価はまだ定まっていない。気候モデルを用いた将来予測実験では B-D 循環の強化が指摘されているが、その大きさは気候モデルによって大きく異なる。循環が変化するメカニズムも明らかではなく、特に全球観測と数値モデリングが困難な大気重力波と熱帯対流が B-D 循環の長期変動に果たす役割は未解明である。この問題を解明するためには、大気重力波と熱帯対流を陽に解く、非静力学全球大気モデルの構築が必要であった。

2. 研究の目的

B-D 循環の長期変動に対する様々な空間スケールの大気波動、特に大気重力波の役割を明らかにすることを長期的な目的とした。そのために本研究では、対流圏・中層大気の大気重力波と熱帯対流を陽に扱うことができる非静力学全球大気モデルの実験設定を構築し、これまでにない高水平・鉛直解像度の数値実験を行った。これにより、様々な規模の大気波動の生成・伝搬について水平・鉛直解像度に対する依存性を調査した。

3. 研究の方法

はじめに非静力学全球大気モデル NICAM (Sato et al. 2014) のモデルトップを標準的に用いられている 40 km から 80 km へ拡張した。中層大気の大部分における鉛直解像度 ( $z$ ) は 2 km、1 km、500 m、300 m とした。図 1 は用意したモデルの鉛直標準レベルである。水平解像度 ( $x$ ) は 56 km、14 km、7 km の設定を用意した。これらの解像度に合わせて、中層大気を含む適切なオゾンや初期ショックを除去した大気初期値など用意した。

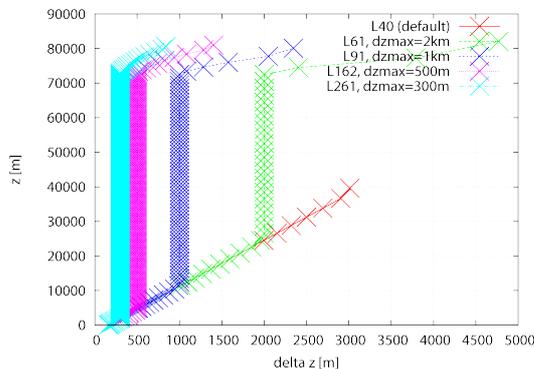


図 1. モデルの鉛直標準レベル。赤：標準版、緑： $z = 2$  km、青： $z = 1$  km、桃： $z = 500$  m、水色： $z = 300$  m。

構築した設定を用いて、2004 年 6 月 1 日を初期値とする積分を表 1 の通り実施した。

表 1. 解像度と積分期間

実験名	x	z	積分期間
dx56dz2km	56 km	2 km	1 年
dx56dz1km	56 km	1 km	1 年
dx56dz500m	56 km	500 m	1 年
dx56dz300m	56 km	300 m	1 年
dx14dz2km	14 km	2 km	1 年
dx14dz1km	14 km	1 km	7 日
dx14dz500m	14 km	500 m	1 月
dx14dz300m	14 km	300 m	4 日
dx7dz500m	7 km	500 m	1 日
dx7dz300m	7 km	300 m	3 日

4. 研究成果

はじめに 1 月以上の積分結果を用いて基本場の再現性を検証した。図 2 は  $x = 14$  km の各実験における 2004 年 6 月の東西平均東西風である。夏半球（ここでは北半球）の中層大気に着目すると、 $z$  が細かくなるとともに東風ジェットとの再現性が向上している。熱帯下部成層圏の東西風については、 $z = 2$  km では初期条件が持っていた準二年振動 (QBO) 的な構造が崩れてしまっているが、 $z = 500$  m では保たれている。冬半球（ここでは南半球）の中層大気では、 $z$  が細かい方が極夜ジェットが過大に再現されているが、極夜ジェット軸の傾きについては改善傾向が見られる。図では示さないが、 $x = 56$  km の各実験においても、 $z = 2$  km から 300

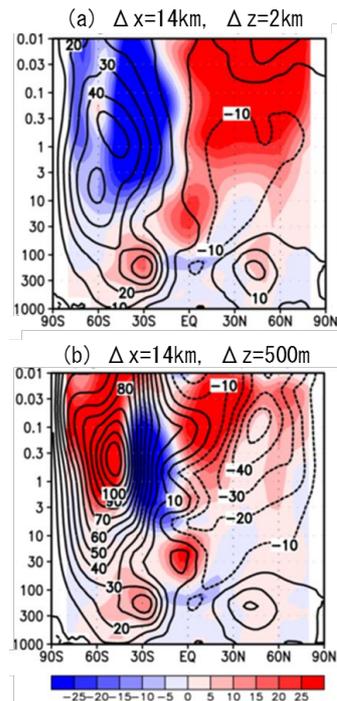


図 2. 2004 年 6 月の東西平均東西風 (等値線) と CIRA86 気候値からの偏差 (シェード)。 (a) dx14dz2km 実験、(b) dx14dz500m 実験。単位は [m/s]

m の範囲において同様の傾向を確認した。また、異なる  $x$  の実験を比較した結果、 $x$  が細かい方が極夜ジェット、東風ジェットともに弱化し、東西風の再現性が全体的に改善するが分かった。

これらの基本場の再現性は、以下に示す大気重力波の解像度依存性と整合的である。中層大気において大気重力波の指標となる水平発散を示したのが図3である。水平・鉛直解像度がともに高い  $dx14dz500m$  実験では、アンデス下流や南大洋、モンスーン域などで大気重力波の構造が確認できる。インド洋や北米大陸では大規模な対流活動に伴い、波が同心円状に広がっている様子も確認できる。一方、 $z$  を粗くした  $dx14dz2km$  実験では大気重力波に地理的分布はほとんどなく、大きな振幅のノイズが全球に広がっている。水平解像度の粗い  $dx56dz2km$  および  $dx56dz500m$  実験では、 $dx14dz500m$  実験で見られたような大気重力波の地理的分布は確認できたが、細かい水平構造については再現できなかった (図省略)

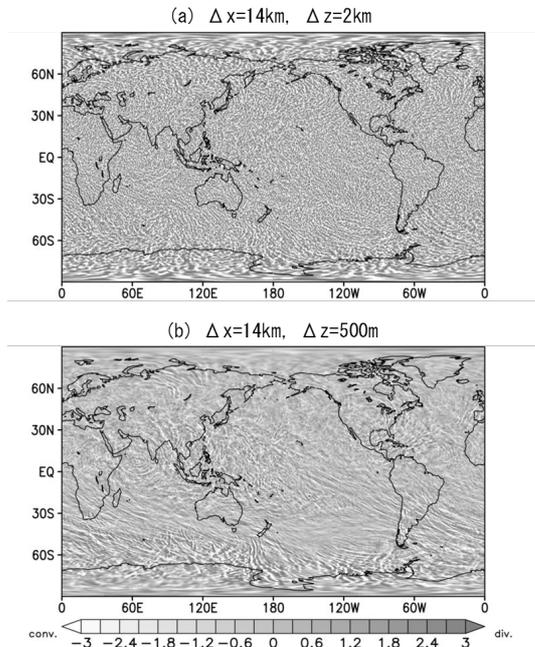


図3 . 高度 50 km における水平発散のスナップショット (積分開始後 5 日目)。(a)  $dx14dz2km$  実験、(b)  $dx14dz500m$  実験。単位は  $[10^{-4}/s]$ 。

このように再現された大気重力波の特徴は、図4のようにエネルギースペクトルを描くことで定量的に確認できる。上部対流圏に着目すると、 $dx14dz500m$  実験における長波( $k$  が数十以下)は  $k^{-3}$  則に従っていることが分かる。それより短い波長では  $k^{-5/3}$  則に従うことが知られているが、ほとんど再現できていない。これは Terasaki et al. (2009) で示されているように、水平解像度がまだ足りないためである。大気重力波に相当する波数( $k$  が数十以上)の高度依存性に注目すると、中

層大気では高度が増すとともに大気重力波のエネルギーが増大している。大気重力波は鉛直伝搬とともに放射や拡散によって減衰するが、もし減衰が小さければ密度が小さくなることで波の振幅は大きくなる。このような過程をモデルは表現していると考えられる。

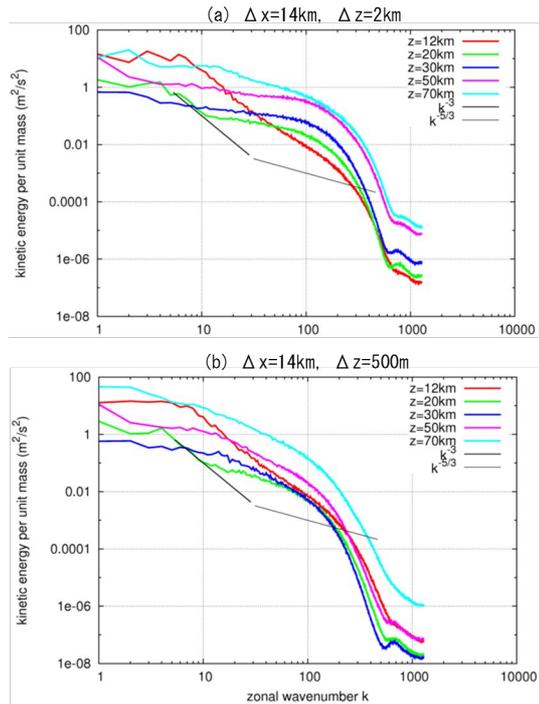


図4 .  $45^\circ N$  における高度別の運動エネルギースペクトル。(a)  $dx14dz2km$  実験、(b)  $dx14dz500m$  実験。2004 年 6 月 6 日 ~ 30 日で平均。

次にエネルギースペクトルの解像度依存性に注目する。 $dx14dz500m$  実験に比べて  $dx14dz2km$  実験では、中層大気において大きな大気重力波のエネルギーが再現された。鉛直解像度が高い方がエネルギーが低い、という不思議な結果であるが、図2、図3の描像や波が輸送する東西運動量の鉛直フラックス (図省略) とも整合的である。Watanabe et al. (2015) においても類似の結果が示されており、最近の研究とも整合的である。なお、 $x = 56 km$  の各実験では、 $x = 14 km$  に比べて大気重力波のエネルギーは過小となるという予想通りの結果が得られている (図省略)

- 以上の  $14 km \times 56 km, 300 m \times 2 km$  の結果をまとめると、
- ・水平解像度と鉛直解像度をともに細かくすることで、基本場および大気重力波の再現性は向上する。
- ・鉛直解像度が粗い場合、中層大気における大気重力波のエネルギーは過大に表現されて振る舞いが悪化する (特に水平解像度  $14 km$  で顕著) となる。

上の 2 点目について考察する。図4 から上

部対流圏におけるエネルギースペクトルは  $z$  にあまり依存せず、中層大気における違いは鉛直伝搬の違いであることが分かる。一つの理由として、鉛直解像度が粗い場合は大気重力波の鉛直波長が本来よりも長く再現され、鉛直伝搬の際に減衰を受けにくくなることが考えられる。また、Lindzen and Fox-Rabinovitz (1989) は理論的考察から、大気重力波をクリティカルレベル付近も含めて正しく表現するためには鉛直解像度を無限小に取る必要があると主張した。これは実用的な指針ではないが、大気重力波を解像するための最適な水平解像度と鉛直解像度の組み合わせについては今後の重要な課題である。

この課題と関連して、本研究を行う過程では研究開始当初の想定を超える数値不安定に悩まされた。初期値や実験設定の変更である程度は低減できたが、特に  $z = 1$  km 実験において数値不安定が最も起きやすく、積分期間を延ばすことができなかつた(表1)。また、 $x = 7$  km についても長期間の実験はまだ困難であり、引き続き原因究明が必要である。

研究開始当初は長期積分を行う予定であった。しかし、前述したように high-top 化による数値不安定に悩まされたこと、世界的に高解像度中層大気モデリングの研究競争が激化したこと、長期積分を実施可能な中途半端な水平・鉛直解像度(例えば  $x = 14$  km,  $z = 2$  km)では大気重力波の再現性が良くなかつたこと、などを考慮して、解像度を十分高めた短期積分による大気重力波研究にシフトした。その結果、当初の計画になかつた  $x = 7$  km の積分に挑戦して数日積分が実現した。数日積分であればエネルギースペクトルの解析には十分であることも確認しており、今後、詳しい解析を行う予定である。

本研究を通じて、中層大気を解像する非静力学全球大気モデルの実験環境を構築し、全球高解像度実験を実施できる環境が整ったことは大きな前進である。研究開始当初の目的であった将来変化については今後の課題であるが、本研究を通じて国際的な枠組みである CMIP6 DynVAR への参加を決定するなど、今後の中層大気版 NICAM を用いた長期気候実験に向けて一定の道筋をつけることができたと考えている。

#### <参考文献>

- M. Satoh and Coauthors, The Non-hydrostatic Icosahedral Atmospheric Model: description and development, Prog. Earth Planet. Sci., 1, 2014, 18  
DOI:10.1186/s40645-014-0018-1  
K. Terasaki, H. L. Tanaka, M. Satoh, Characteristics of the Kinetic Energy Spectrum of NICAM Model Atmosphere, SOLA, 5, 2009, 180-183

DOI:10.2151/sola.2009-046  
S. Watanabe, K. Sato, Y. Kawatani, M. Takahashi, Vertical resolution dependence of gravity wave momentum flux simulated by an atmospheric general circulation model, Geosci. Model Dev., 8, 2015, 1637-1644  
DOI:10.5194/gmd-8-1637-2015  
R. S. Lindzen, M. Fox-Rabinovitz, Consistent Vertical and Horizontal Resolution, Mon. Weather Rev., 117, 1989, 2575-2583  
DOI:10.1175/1520-0493(1989)117<2575:CVAHR>2.0.CO;2

#### 5. 主な発表論文等

##### [雑誌論文](計1件)

R. J. Haarsma 他 25 名うち 12 番目, High Resolution Model Intercomparison Project (HighResMIP v1.0) for CMIP6, Geosci. Model Dev., 査読有, 9, 2016, 4185-4208  
DOI:10.5194/gmd-9-4185-2016

##### [学会発表](計7件)

小玉知央, CMIP6 HighResMIP 関連(モデルの準備状況、改善チューニング等) GCM 検討会, 2017年3月22日、岡山国際ホテル(岡山県岡山市)

小玉知央, 全球非静力学モデル NICAM における (1)気候バイアス低減に向けた取り組み、(2)今後の気候実験計画、波と平均流の相互作用に関する研究会 第3回打ち合わせ, 2017年2月23日、名古屋大学東山キャンパス(愛知県名古屋市)

小玉知央, 高解像度気候シミュレーションの「現場」から、気象夏の学校 2016(招待講演) 2016年8月7日、八王子セミナーハウス(東京都八王子市)

C. Kodama, S. Watanabe, T. Nasuno, M. Satoh, and H. Kubokawa, Basic state and gravity wave simulated by high-top global non-hydrostatic atmospheric model NICAM, SPARC DynVAR Workshop, 2016年6月7日、Finnish Meteorological Institute (Helsinki, Finland)

C. Kodama, S. Watanabe, T. Nasuno, M. Satoh, and H. Kubokawa, Basic state and gravity wave simulated by high-top global non-hydrostatic atmospheric model NICAM, Asian Conference on Meteorology, 2015年10月27日、京都大学(京都府京都市)

C. Kodama, S. Watanabe, T. Nasuno, M. Satoh, and H. Kubokawa, Basic state and gravity wave simulated by high-top global non-hydrostatic atmospheric model NICAM, 26th International Union of Geodesy and Geophysics General

Assembly 2015、2015年6月26日、Prague, Czech

小玉知央, 渡辺真吾, 那須野智江, 佐藤正樹, 久保川陽呂鎮、中層大気版 NICAM における基本場・大気重力波の解像度依存性、日本気象学会 2015 年度春季大会、2015 年 5 月 21 日、つくば国際会議場(茨城県つくば市)

〔その他〕

研究活動：

<http://kodama.fubuki.info/wiki/wiki.cgi/research>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

小玉 知央 (KODAMA, Chihiro)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・ビッグデータ活用予測プロジェクトチーム・ユニットリーダー

研究者番号：90598939