

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 9 月 25 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2014

課題番号：24540469

研究課題名(和文) 気候モデルを用いた中間圏夜光雲の数値シミュレーションと気候変動に関する研究

研究課題名(英文) Simulation and climate variation of polar mesospheric clouds using a climate model

研究代表者

高橋 正明 (TAKAHASHI, Masaaki)

東京大学・大気海洋研究所・教授

研究者番号：70188051

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：下部熱圏を含んだ気候モデルを用いて、夏季中間圏極域夜光雲の変動を研究した。5日波や潮汐波動、中層大気を透過した東向き重力波によって夜光雲が大きく変動している。H₂Oを観測値に戻すnudging-スキームでは夜光雲存在高度の広がりが10km以上あったものが、開発されたメタン酸化・化学モデルでは4km程度と観測と整合性のあるシミュレーション結果を得た。

太陽11年変動でどの程度の変化が見られるかの数値実験を行い、温度や水蒸気に関しては他のモデル結果と比較して概ね整合性があったが、夜光雲に関しては大きな変化はなかった。

研究成果の概要(英文)：The time variation of polar mesospheric cloud (noctilucent cloud) in the summer season is investigated using a climate model including the lower thermosphere. The variation of cloud occurring is controlled by 5-day oscillation, tides and eastward propagating gravity waves. The vertical extent of the cloud in the model is 10km scale that is not realistic. In order to have the realistic extent of cloud, a chemical climate model is developed for the occurrence of the cloud whose vertical extent is about 4km.

The atmospheric response to 11-year solar cycle has been simulated. The response difference of temperature and water vapor between solar maximum and solar minimum is almost consistent to previous model results, however the response difference of cloud is small.

研究分野：大気物理学

キーワード：夜光雲 夏季中間圏 太陽11年変動 気候モデル 化学モデル 重力波 大気潮汐 5日波

1. 研究開始当初の背景

地球大気の夏季高緯度中間圏では、太陽が照っているにも関わらず冬季に比べ低温であることが知られている。この低温は、内部重力波の砕波によって平均東西風の減速が起こり、減速とバランスするための南北流を補償する夏季高緯度上昇流による断熱冷却の為と言われている。中間圏上部、夏季高緯度低温域の薄い層(厚さ3km程度)に出現する夜光雲の水平スケールは数kmから1000 km程度の様々なものが観測されており、衛星観測による夜光雲の全球的存在の様子が分かるようになってきた。

夜光雲の時間変動に関して、水平スケールの小さい重力波、全球規模スケールを持つ大気潮汐波動や5日波の重要性が指摘されている。

モデル研究としては、全球の気象データ同化モデルによる再現実験の研究が始まり、気候モデルによる気候変動の研究に発展しつつある状況である。

2. 研究の目的

衛星観測によって、夜光雲が夏季中間圏高緯度のどのような場所に存在するかの全球分布が知られるようになってきた。しかし、大気場と結びついての生成や変動に関しては未解明の問題として残っている。夜光雲は温度や水蒸気分布、さらに雲凝結プロセスや沈降プロセスに依存する。夜光雲の気候変動に関わる研究を行う為、大気場をモデル内部で首尾一貫して求めることが出来る気候モデルを用いる。

本研究は、中間圏および下部熱圏までの気候場を表現する鉛直高解像度3次元気候モデルを用いての夜光雲再現実験や、その出力データの解析と観測結果等との比較を行い、夜光雲と大気変動や気候変動との関係を調べる。

3. 研究の方法

(1) 中間圏夜光雲の変動メカニズムに関して、気候の研究で使われている大気大循環モデルを用いて研究を行う。用いるモデルは、上部中間圏、下部熱圏(top約150km)にまで拡張した気候モデルである。中間圏高度では重力波が重要な役割を果たしている。大きなスケールの重力波については直接解き、そのbreakingは乾燥対流調節スキームと渦拡散で表現する。モデルで直接表現できない重力波についてはHinesパラメータが導入されており、現実的な気象場を得る為にパラメータ変更実験を行う。東西平均気象場および中間圏高度での惑星波動、大気潮汐波動、重力波のような様々な擾乱が存在しており、それらの観測結果と比較し、中間圏・下部熱圏大気が気象場として現実的であることを確認する。

(2) 気候モデルで使われている飽和度に依存する瞬間的な雲生成過程が入っており、雲の沈降速度は中間圏に相当するよう調整し、夜光雲変動の結果を得る。夜光雲にとって最も重要な物理量である水蒸気分布を得るため、観測値の水蒸気分布に戻す方法に加えて、中間圏でのメタン酸化による水蒸気生成の化学プロセスを導入する。

(3) 現実的な大気場を再現するモデルを作成、気候値的な温度、風、水蒸気や夜光雲を表現し、その高度に存在する擾乱である惑星波動や大気潮汐を含む夏季極域中間圏の大気場が再現される。現実的大気環境場の条件のもと、気候モデルによる夜光雲生成の再現実験を行う。これまでの解析やモデル結果との比較を通し、モデル中の大気変動を解析することにより大気変動と関係したプロセスを研究する。最後に、入射する太陽放射の強度を変化させ、太陽11年変動の影響を評価する。

4. 研究成果

(1) 夏季中間圏の夜光雲と大気の有り様

中間圏における夜光雲重力落下速度は10cm/sと設定した。放射過程は、化学スキーム導入に都合のいいように32-バンド放射スキームを用いた。Hinesの重力波パラメタリゼーションのパラメータ値は鉛直臨界波数を $3.3 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$ とし、中層大気下端の重力波運動量フラックス値を標準実験として使われている値の0.4倍とした。注目している夏季北半球極域 69Nにおける中間圏温度は140K以下であり、観測結果と整合的な夜光雲生成に都合のよい温度構造となっている。

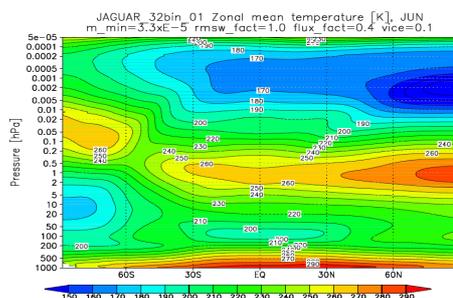


図1 気候モデルで再現された6月の東西平均温度の緯度高度断面図

このような大気中での夜光雲の変動について調べた。図2は、68N, 0.006hPa level (約83km)における夜光雲の変動を示している。期間は6月15日から6月29日までの2週間である。この期間に、数日程度の西に伝播するシグナルが見られ、その中に東方向に早く動くシグナルが多く存在することが確認できる。

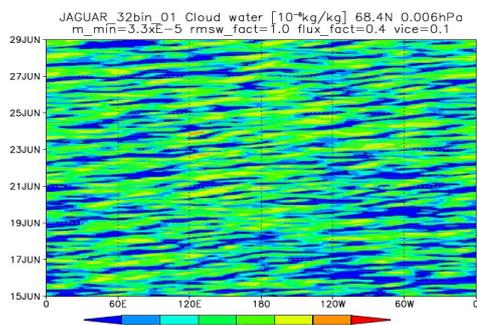


図2 68N, 0.006hPa level (約83km)における夜光雲の経度時間断面図

若干高い高度(0.002hPa, 約90km)での温度擾乱変動のスペクトル解析を行った。西向き成分の特徴として1日潮汐成分が見える。また約5日周期のシグナルも見ることができ

る。東向き成分では、周期1日から8時間にわたりほぼ様なシグナルが存在し、スケールの大きな重力波に対応していると考えられる(図省略)

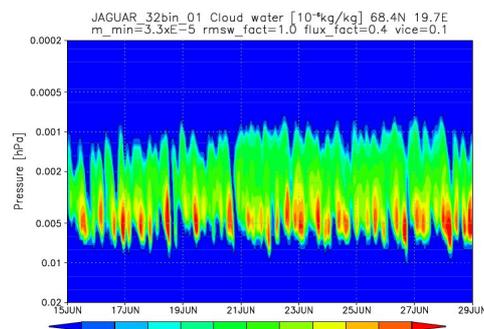


図3 20E, 68Nに於ける夜光雲の時間高度断面図

このような大気変動に対応した夜光雲の20E, 68Nにおける時間高度断面図は図3のようになっている。中間圏高度ではメタン酸化による水蒸気生成が重要な役割を果たしているが、その生成を以下のような式で表現している；

$$Q = k_1(q(z) - H_2O) - k_2(H_2O)$$

ここで、 $q(z)$ は標準的な水蒸気分布、 H_2O はその場の水蒸気量を、 k_1 はメタン酸化による反応係数、 k_2 は水蒸気光解離の反応係数である。図3から分かるように、夜光雲の発生する高度範囲が観測と比較して鉛直方向に広がりすぎる。平均的な水蒸気に戻すようにしているので雲生成が余分に起こる為と思われる。メタン酸化による水蒸気生成スキームを、化学過程を考慮したものに変更した。

(2) 化学モデルによる結果

CCSR/NIES化学気候モデルに入っている成層圏化学スキームから、メタン酸化反応とHOx, Oxの化学に関する系を取り出し、メタン酸化による水蒸気生成の化学スキームを構築した。

温度、東西風の分布は、(1)の結果と類似している。水蒸気分布は、中層大気で少し少なく、冬半球熱圏においては水蒸気が大きい

結果となっている。また、夜光雲発生高度のすぐ下層で水蒸気が多く存在している。

夜光雲の時間的振る舞いを調べてみると、(1)での時間的振る舞いと同様であった。0.002hPa-levelでの温度擾乱のスペクトルを調べてみると、定性的には同じだが(1)に比べ5日波や東向き半日潮などのシグナルが強くなっていた。

この場合の夜光雲の時間変動は図4のようである。興味深い結果として、夜光雲の現れる高度が数kmの範囲に制限されている。雲の落下速度は(1)と同じであり、衛星観測やレーダー観測の結果と整合性があるので、化学過程の重要性を示唆していると思われる。

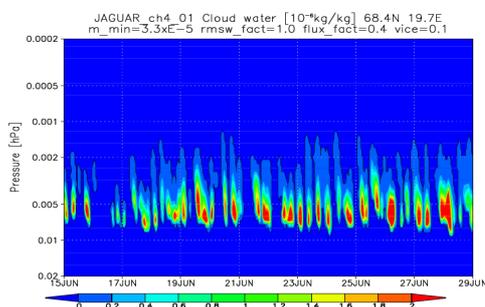


図4 化学モデルに於ける20E, 68Nでの夜光雲の時間高度断面図

(3) 太陽放射11年変動の影響

太陽放射11年変動の夜光雲への影響をみるために、太陽放射maxとmin各々の数値積分を行い、結果の差をとることで太陽放射11年変動の影響を調べた。熱圏の短波放射スキームの連続吸収帯(125nm-175nm)での放射フラックスの値を、太陽maxと太陽minの観測値に設定した。また、オゾン量についてはmaxとminでの化学気候モデルの結果を用いた。

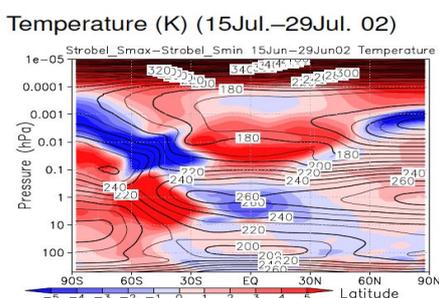


図5 化学モデルでの(Solar Max - Solar Min) 温度偏差 (color, 実線はSolar Minの値)の緯度高度断面図

熱圏では大きな高温偏差があり、観測と整合性がある。中層大気は全体的には高温偏差であるが、領域的に大きな違いがある。赤道域中間圏では高温偏差であり、これはオゾンによる短波放射の影響と考えられる。偏差の大きさは3Kほどであり、先行研究に比較して構造は幾分異なるが同様な値である。冬半球の中間圏(成層圏)は低温偏差(高温偏差)となっており、この構造は先行研究と同様である。興味深い結果として、夏季中間圏の夜光雲が生成される高度では低温偏差となっている。

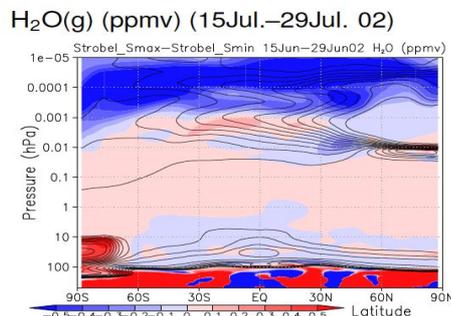


図6 水蒸気偏差の緯度高度断面図

図6は水蒸気偏差を示している。熱圏の温度上昇に対応して、水蒸気量は減少している。中層大気ではメタン酸化の増加により水蒸気量は増加傾向である。一方、夏季中間圏では、おおよそ減少偏差で夜光雲生成の下層の方では正偏差となっている。

夜光雲量の偏差に関しては、夜光雲領域においては、solar maxで低温化傾向の為わずかな増加傾向になっている。HALOE観測によると、solar max(min)で、温度上昇(下降)、水蒸気減少(増加)、雲の明るさは暗い(明るい)となっている。一方69Nに於けるモデル結果では、年々変動が大きく明確ではないが、夜光雲高度(約83km)においてsolar max(min)には低温(高温)バイアス、水蒸気は減少(増大)、また雲の明るさは暗い(明るい)傾向にある。モデル結果は、過去のモデル結果と

温度・水蒸気は整合的ではあるが、雲についてはそれほど変化していない結果でありさらなる研究が必要である。

5 . 主な発表論文等
〔雑誌論文〕(計 9 件)

Watanabe, S., K. Sato, Y. Kawatani, and M. Takahashi, Vertical resolution dependence of gravity wave momentum flux simulated by an atmospheric general circulation model, *Geoscientific Model Development*, accepted, 査読有

Yamamoto, M., and M. Takahashi, Dynamics of polar vortices at cloud top and base on Venus inferred from a general circulation model: Case of a strong diurnal thermal tide, *Planetary and Space Science*, in press, doi:10.1016/j.pss.2015.01.017, 2015, 査読有

Kumar, V., S.K. Dhaka, K.K. Reddy, A. Gupta, S.B. Surendra Prasad, V. Panwar, Narendra Singh, Shu-Peng Ho, and M. Takahashi, Impact of quasi-biennial oscillation on the inter-annual variability of the tropopause height and temperature in the tropics: A study using COSMIC/FORMOSAT-3 observations, *Atmospheric Research*, 139, 62-70, doi:10.1016/j.atmosres.2013.12.014, 2014, 査読有

Dhaka, S.K., V. Malik, Y. Shibagaki, H. Hashiguchi, S. Fukao, T. Shimomai, H-Y. Chun, and M. Takahashi, Comparison of vertical wavelengths of gravity waves emitted by convection in the UTLS region at Koto Tabang (0.20S, 100.32E) and Gadanki (13.5N, 79.2E) using radars, *Indian J. Radio and Space Phys.*, 43, 24-40, <http://nopr.niscair.res.in/handle/123456789/27165>, 2014, 査読有

Inoue, M., and M. Takahashi,

Connections between the stratospheric quasi-biennial oscillation and tropospheric circulation over Asia in northern autumn, *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 118, 10740-10753, doi:10.1002/jgrd.50827, 2013, 査読有

Bhatnagar, R., V. Panwar, Y. Shibagaki, H. Hashiguchi, S. Fukao, T. Kozu, M. Takahashi, and S. K. Dhaka, Hourly radiosonde observation of humidity and temperature and high resolution vertical wind using the Equatorial Atmosphere Radar during convection over Koto Tabang, Indonesia in CPEA-II campaign, *Indian J. Radio and Space Phys.*, 42, 277-291, <http://nopr.niscair.res.in/handle/123456789/23000>, 2013, 査読有

Tomikawa, Y., K. Sato, S. Watanabe, Y. Kawatani, K. Miyazaki, and M. Takahashi, Growth of planetary waves and the formation of an elevated stratopause after a major stratospheric sudden warming in a T213L256 GCM, *J. Geophys. Res.*, 117, D16101. 1-16, doi:10.1029/2011JD017243, 2012, 査読有

Hirota, N., and M. Takahashi, A tripolar pattern as an internal mode of the East Asian summer monsoon, *Clim. Dyn.*, 39, 2219-2238, doi:10.1007/s00382-012-1416-y, 2012, 査読有

Yamamoto, M., and M. Takahashi, Venusian middle-atmospheric dynamics in the presence of a strong planetary-scale 5.5-day wave, *Icarus*, 217, 702-713, doi:10.1016/j.icarus.2011.06.017, 2012, 査読有

〔学会発表〕(計 9 件)

Yamashita, Y., H. Akiyoshi, T. G. Shepherd, and M. Takahashi, Combined influences of the QBO and 11-year solar cycle on the stratosphere-troposphere circulation in the Northern Hemisphere winter, 11th Annual Meeting Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 2014, 2014.7.28, ロイトン札幌 (北海道・札幌市)

伊藤 一成、黒田 剛史、笠羽 康正、高橋 正明、Venus GCM への金星硫酸雲生成・消失と大気化学過程の導入 (1)、日本惑星科学会 2014 年秋季講演会、2014 年 9 月 24 日、東北大学片平キャンパスさくらホール (宮城県・仙台市)

山本 勝、高橋 正明、厚い雲に覆われた地球型惑星大気循環の感度実験、日本気象学会 2014 年度秋季大会、2014 年 10 月 21 日、福岡国際会議場 (福岡県・福岡市)

伊藤 一成、黒田 剛史、笠羽 康正、高橋 正明、GCM を用いた金星硫酸雲生成・消失と大気化学過程の研究、日本気象学会 2014 年度秋季大会、2014 年 10 月 23 日、福岡国際会議場 (福岡県・福岡市)

伊藤 一成、黒田 剛史、笠羽 康正、寺田 直樹、池田 恒平、高橋 正明、金星大気大循環モデルへの硫酸雲生成・消失過程と大気化学過程の導入、第 136 回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会、2014 年 11 月 2 日、松本文化会館 (長野県・松本市)

Yamashita, Y., H. Akiyoshi, and M. Takahashi, CCSR/NIES CCM simulations for 11-year solar cycle and QBO effects on the Northern Hemisphere extratropical winter circulation, Davos Atmosphere and Cryosphere Assembly DACA-13, 2013.7.12, Davos (Switzerland)

Takahashi, M., Development of stratospheric QBO research, Tenth

International Seminar on Climate System and Climate Change (招待講演), 2013.7.16, Beijing (China)

山下 陽介、直江 寛明、高橋 正明、成層圏 QBO の南半球大気へのテレコネクションに見出された長期変動、日本気象学会 2013 年度秋季大会、2013 年 11 月 21 日、仙台国際センター (宮城県・仙台市)

渡辺 真吾、佐藤 薫、河谷 芳雄、高橋 正明、大気大循環モデルでシミュレートされる重力波運動量フラックスの鉛直解像度依存性、日本気象学会 2013 年度秋季大会、2013 年 11 月 21 日、仙台国際センター (宮城県・仙台市)

〔その他〕
ホームページ:「夜光雲研究」
<http://157.82.240.165/nlc/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高橋 正明(TAKAHASHI, Masaaki)
東京大学・大気海洋研究所・教授
研究者番号: 7 0 1 8 8 0 5 1

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

秋吉 英治 (AKIYOSHI, Hideharu)
独立行政法人国立環境研究所・地球環境研究センター・室長
研究者番号: 8 0 2 1 1 6 9 7

滝川 雅之 (TAKIGAWA, Masayuki)
独立行政法人海洋研究開発機構・地球環境変動領域・主任研究員
研究者番号: 3 0 3 6 0 7 5 4

渡辺 真吾 (WATANABE, Shingo)
独立行政法人海洋研究開発機構・シームレス環境予測研究分野・分野長
研究者番号: 5 0 3 7 1 7 4 5