

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2005～2008

課題番号：17340140

研究課題名（和文） 太陽活動が及ぼす地球大気への影響のモデリングと定量化

研究課題名（英文） Modeling and quantification of the solar influence on the terrestrial atmosphere

研究代表者

廣岡 俊彦（HIROOKA TOSHIHIKO）

九州大学・大学院理学研究院・教授

研究者番号：90253393

研究成果の概要：11年以下の多様な周期で変化する太陽活動が地球大気に与える影響について、観測データの解析と、太陽放射過程と化学反応を組み込んだ大気大循環モデルの開発、それによる数値実験を通して調べた。地表付近から高度約500kmに及ぶ大気が、下層の対流圏、中層の成層圏、中間圏、高層の熱圏、電離圏といったそれぞれの領域ごとに、特有の特徴を持つ応答を示すことが明らかとなった。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2005年度	4,900,000	0	4,900,000
2006年度	3,300,000	0	3,300,000
2007年度	3,700,000	1,110,000	4,810,000
2008年度	3,300,000	990,000	4,290,000
年度			
総計	15,200,000	2,100,000	17,300,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学、気象・海洋物理・陸水学

キーワード：太陽活動、大気大循環、光化学反応、シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

太陽活動には有名な約11年周期の変動や、22年周期、さらに長い変動周期も存在する。それに対し、下層大気での気候変動を、太陽活動周期と関連づける研究も以前から行なわれてきた。しかし、両者の間の上部成層圏から中間圏にかけての領域では、長期にわたる正確な観測データが不足しているため、太陽活動と下層大気の変動の関係は未だ明らかとはなっていない。また、太陽の27日の自転周期に伴う放射の変動や、太陽活動が激しい期間に観測される太陽からの高速粒子

の高緯度域への侵入が地球大気に与える影響にも近年大きな関心が持たれている。太陽活動の変動に対する大気全体の応答を調べるためには、既存の観測データが十分でないため、数値モデル(大気大循環モデル)による数値実験が有力な手段となる。

最近各国で行われている気候変動の将来予測に関する数値実験でも、太陽活動の影響は未知のものとしてしか扱われていない。本研究の成果はこの予測にも応用可能であり、社会的な意義も大変大きい研究課題であるといえる。

2. 研究の目的

本研究では、11年周期よりも短い時間スケールの太陽活動変動に伴う地球大気の応答を、大気大循環モデルを用いて定量化することを目指す。このために、中間圏以下の光化学過程と、熱圏・電離圏の物理過程を、既存の大気大循環モデルに導入し、地表面からおよそ500kmまでの高度域を統一的に扱うことのできる大気大循環モデルを開発して数値実験を行う。同時に、近年新たに再構成された、地表付近から下部中間圏にまで至る観測データ(同化データ)を解析することで、数値実験結果を検証し、地球大気への影響を定量的に見積もることを目指す。

3. 研究の方法

本研究では、最新の長期間の同化データ解析、中間圏・熱圏域の物理過程、化学過程を含む大気大循環モデルの開発、それを用いた大規模数値シミュレーション、及びその結果の解析が中心となる。

同化データとしては、米国国立環境予測センター(NCEP)/国立大気研究センター(NCAR)再解析データを主に用いる。大気大循環モデルとしては、中間圏域までの詳細な化学反応を組み込んだ東京大学気候システム研究センター(CCSR)/国立環境研究所(NIES)開発の化学気候モデルを用いるとともに、高度約150kmまでの物理過程を含む九州大学開発の大気大循環モデルに、熱圏・電離圏の物理過程を結合させた高度500km域までの全大気領域を含むモデルを開発する。これらの大気大循環モデルを用いた数値シミュレーションにより、太陽活動変動の地球大気への影響を定量的に見積もる。

4. 研究成果

得られた主要な結果は、以下の4つの項目にまとめられる。それぞれ世界的に見ても、他に類のない研究成果である。

(1) 成層圏・下部中間圏域の大気潮汐波

大気潮汐波は、主として大気中の水蒸気やオゾンによる太陽紫外線の吸収がもたらす加熱の1日変化により生じることが知られている。本課題では、比較的多くの研究が実施されている上部中間圏より上の領域に比べ、実態が未だよくわかっていない、下部中間圏より下層における大気潮汐波の振る舞いと、太陽活動11年周期変動の影響の有無を調べるために、CCSR/NIES化学気候モデルを用いて数値シミュレーションを行った。さらに、気象庁気象研究所の化学気候モデルの数値シミュレーション結果との比較を行った。

その結果、両シミュレーションともに、夏季の上部成層圏、下部中間圏域では一日潮が卓越し、その構造から、鉛直方向に伝播できない外部波型の一日潮基底モードと同定できた(図1a)。

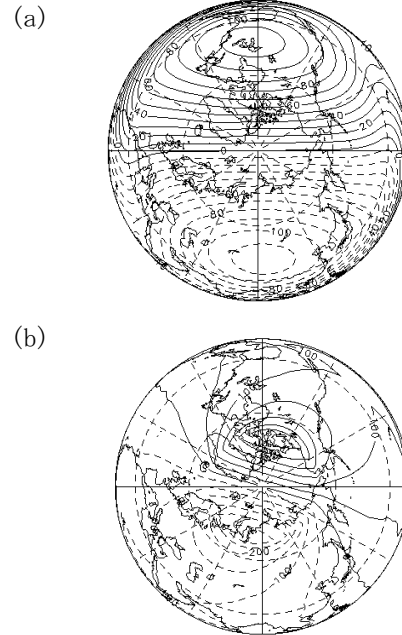


図1. 化学気候モデルに現れる上部成層圏における北半球夏季の大気潮汐波の構造。いずれも0世界標準時のもの。(a)1hPa面(高度約48km)高度場に見られる一日潮汐波の構造。等値線は10m。(b)5hPa面(高度約37km)におけるオゾン混合比の対応成分構造。等値線は50ppbv。破線は負の偏差。

さらにオゾン場における一日潮対応成分の振る舞いを調べたところ、上部成層圏オゾン場において、夏半球の緯度70度付近の1hPa(ヘクトパスカル)と5hPa付近に極大が見られ、前者ではオゾン量最大域が太陽よりも約13時間、後者では太陽よりも約5時間それぞれ遅れて、1日周期で西進していた(図1b)。このような構造は本研究課題で初めて示されたものであり、独立に開発された二つのCCMで同様の結果が得られたことから、これらが単にモデル固有の原因で形成された構造とは考えにくい。高度領域や、極大が現れるのが夏極付近であることを考えあわせると、基本的にこの構造は光化学反応により形成されているものと推測される。

また、潮汐の振幅は、太陽極大期の方が極小期よりも大きくなる結果が得られた。同様の特徴は、気象庁の同化データなどの観測データでも部分的に確認されたが、特にオゾン場の変動については、シミュレーション結果を確認する観測データがほとんど存在しな

いため、今後の観測手段の開発を含めたさらなる研究が必要である。

以上のように、今までほとんど実態が知られていなかった成層圏・下部中間圏域の大気潮汐波の特徴が本研究で明らかとなり、今後引き続く研究への指針を与えることができたと思われる。

(2) 太陽活動 11 年変動と冬季成層圏循環

本課題では、NCEP/NCAR 再解析データを用いて、太陽活動 11 年変動に伴う冬季成層圏の大気変動について解析を行った。先行研究である Kodera and Kuroda(2005)は、11 年変動における太陽活動極大期(High Solar; HS)の初冬には、高緯度と中低緯度の間の環状変動パターンである北極振動(Arctic Oscillation; AO)が対流圏から成層圏に伸びた構造を示すのに対し、同極小期(Low Solar; LS)では成層圏のみに構造が限られるという解析事実を述べている。本研究では、そのような構造にどのような力学メカニズムが働いているかを調べた。特に、地球規模の大気波動であるプラネタリー波の役割を調べ、また化学気候モデルを用いて問題を考察した。

HS、LS のそれぞれに対応させて経験的直交関数(EOF)解析を行う。EOF 解析は東西及び月平均の等圧面高度場に適用した。解析期間は 1979-2005 年である。北緯 40-90°、成層圏(10-200 hPa)での時系列に対し、第一主成分(EOF-1)を取り出す。それを成層圏北半球環状モード(S-NAM)とよび、様々な物理量を回帰させて、詳細な特徴を調べた。

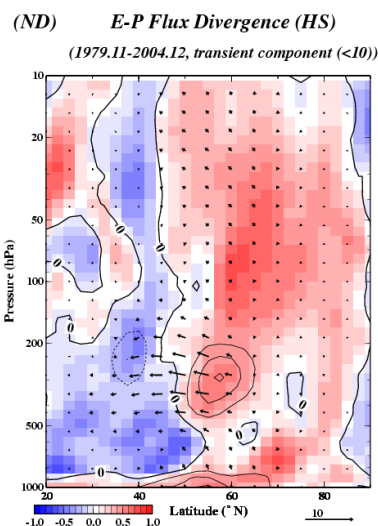


図 2. 周期 10 日より早い波動(transient eddy)による EP フラックス(波の活動度; ベクトル)と、それによる東西風成分の加速度(等値線と陰影)。赤は西風加速、青は同減速の領域。

その結果、HS における、S-NAM に回帰した初冬の東西風に、成層圏から対流圏に広がる有意なシグナルが存在することがわかった。それに対し、LS における初冬の結果は、HS とは異なりシグナルは成層圏に限られ、下層の対流圏までは伸びていない。さらに、HS における初冬での、S-NAM に回帰した波の活動度(EP フラックス)とその発散を調べたところ、成層圏から対流圏に伸びた AO に対応して、対流圏中では波動による西風加速があった。波動の役割を、周期 10 日より早い波動(transient eddy)とゆっくりした(定常な)波動に分けて調べると、対流圏では、周期の短い transient eddy が、成層圏では定常波動が、それぞれ AO 変動に重要な役割を果たしていた(図 2)。

さらに、CCSR/NIES 化学気候モデルを用いて、少しずつ初期値を変えた三つのアンサンブル実験結果を用いて、同様の解析をおこなった。HS における初冬の応答として、成層圏でも AO シグナルはあるものの、対流圏とは弱くつながっている。一方、LS 初冬での応答は、場所はすこし北にずれるが、LS の方が対流圏とのつながりは強いようである。このように、モデルは観測解析結果を十分に再現できていないことがわかった。この原因として、化学気候モデルでは、傾圧波や惑星波動の振る舞いを十分に再現できていないことが挙げられるが、さらに精度を上げた結果を得るためには、より多くの実験が必要であると思われる。

(3) 太陽活動と中間圏・熱圏領域の大気波動

本課題では、高度約 500km までの大気領域を含む大気大循環モデルを用いて、中間圏および熱圏領域における大気波動に関して、太陽活動の依存性を調べた。特に、下層大気起源の大気波動のうち、一日潮汐波と重力波の活動度に注目して解析を行った。その結果、以下のような結果が得られた。

下層大気起源の大気重力波に関し、熱圏領域における卓越周期は、太陽活動度にかかわらず高度とともに短くなった。一方、大気重力波に伴う中性大気の流れ・温度変動の振幅は、太陽活動度が増加するに従って弱くなる結果が得られた。ところが、中間圏での重力波の振幅や振る舞いについては、太陽活動度の変化に伴う顕著な違いは見られなかった。このことから、熱圏領域の振幅の変化は、熱圏の大気密度が太陽活動度に伴い増加することや、熱圏下部における静的安定度が太陽活動に伴い変化することが原因であることがわかった。また、これらの熱圏における重力波の特徴は、CHAMP 衛星により得られた特徴(Bruinsma and Forbes, 2008)とも定性的に一致することがわかった。

一日潮汐波に関しては、高度 150km 以上で

は、太陽活動度変動に伴い振幅が大きく影響を受けるとい、今までに考えられていたのと同様の結果が確認できた。しかし、高度150km以下の下部熱圏領域や中間圏では、太陽活動度に伴う太陽加熱率の変動よりも、(太陽活動度変動とは直接関係のない)下層大気変動に由来する変動が顕著であることがわかった。例えば、太陽活動度の27日周期や11年周期変動に伴った一日潮汐波の振幅変動を、数値モデルで得られた潮汐波の振幅変動成分の中から抽出することは困難であった。

上記の研究を遂行するには、対流圏から熱圏までのすべての大気領域を含んだ、水平分解能の良い全球モデルが必要である。現在のところ、我々の研究グループ以外で、このような数値モデルの開発を完了しているグループは地球上には存在しないため、上記の成果は本研究課題において特筆すべきものである。

(4) 太陽活動と電離圏変動

近年、下層大気に起源を持つ変動(大気重力波、プラネタリー波、大気潮汐など)によって生じていると考えられる電離圏変動が新たに発見され、大気上下結合の重要性が再認識されている。本課題では、当グループによって開発された地表から大気上端までを含む大気大循環モデルを用いて、上層、下層からの影響による超高層大気変動について調べた。

大気大循環モデルによる数値シミュレーションの結果から、極域熱圏への地磁気活動変化に伴うエネルギー流入の増大に起因して、全球伝播する大気擾乱の特徴が示されたほか、地磁気静穏時にもオーロラオーバル、昼夜境界、真夜中温度極大付近で励起される大規模波動の存在が予測された(Fujiwara and Miyoshi, 2006)。また、これらの大気擾乱と下層大気との影響により、局所的な擾乱(温度構造)が形成されることが示された(Fujiwara and Miyoshi, 2009)。さらに、昼夜境界付近での大気波動については、Forbes et al. (2008)などによる詳細な研究へと発展している(図3)。

本研究課題では、世界に先駆けて大気全域を含む大気大循環モデルを開発し、それを用いた数値シミュレーションから、下層大気の影響による局所擾乱など、これまで示されて来なかった新たな熱圏変動の描像を明らかにすることができた。近年、国内外の学界では、下層大気が上層大気(熱圏・電離圏)に与える影響に関して、急速に関心が高まっている。本研究課題はこのような世界的な研究の流れをリードするものであり、大きなインパクトを有するものと考えられる。

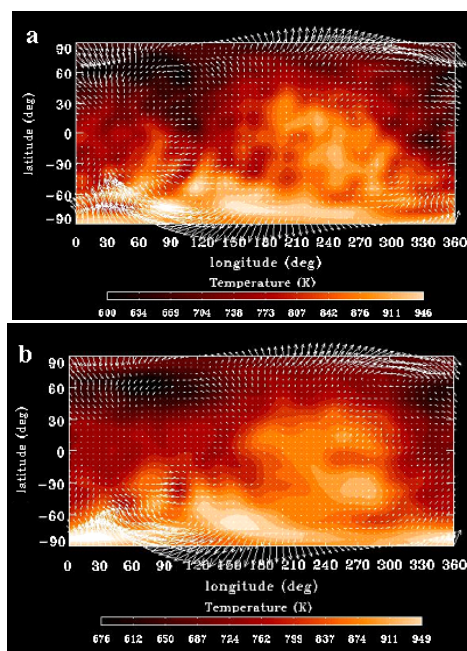


図3. 大気大循環モデルによって計算された高度約300kmにおける熱圏風、温度の全球分布。太陽活動極小、11月、地磁気静穏時の計算。(a) 下層大気の影響を含む計算で局所擾乱がいたるところで見られる。(b) 下層大気の影響を除いた計算(高度約80km以下で全球様な温度分布を時間変化させずに与え、また風速をゼロとして1日経過した計算)。(b)では(a)に比べて滑らかな温度分布となっている。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計44件)

- ① Austin, J., K. Taurpali, E. Rozanov, H. Akiyoshi, 他19名: Coupled chemistry climate model simulations of the solar cycle in ozone and temperature. *J. Geophys. Res.*, 査読有, 113, 2009年, doi:10.1029/2007JD009391.
- ② Miyoshi, Y., and H. Fujiwara: Gravity wave in the thermosphere simulated by a general circulation model. *J. Geophys. Res.*, 査読有, 113, 2008年, doi:10.1029/2007JD008874.
- ③ Iwao, K., and M. Takahashi: A precipitation seesaw mode between northeast Asia and Siberia in summer caused by Rossby waves over the Eurasian continent. *J. Climate.*, 査読有, 21, 2008年, 2401-2419.
- ④ Hei, H., T. Tsuda and T. Hirooka: Characteristics of atmospheric gravity wave activity in the polar regions revealed by GPS radio occultation data with CHAMP. *J. Geophys. Res.*, 査読有, 113, 2008年, 2401-2419.

ophys Res., 査読有, 113, 2008年, doi:10.1029/2007JD008938, 2008.

- ⑤ Hirooka, T., T. Ichimaru, and H. Mukougawa, Predictability of stratospheric sudden warmings as inferred from ensemble forecast data: Intercomparison of 2001/02 and 2003/04 winters. J. Meteor. Soc. Japan, 査読有, 85, 2007年, 919-925.
- ⑥ Iwao, K., and T. Hirooka: Dynamical quantifications of ozone minihole formation in both hemispheres. J. Geophys. Res., 査読有, 111, 2006年, doi:10.1029/2005JD006333.
- ⑦ Miyoshi, Y., and H. Fujiwara: Excitation mechanism of intraseasonal oscillation in the equatorial mesosphere and lower thermosphere, J. Geophys. Res., 査読有, 111, 2006年, doi:10.1029/2005JD006993.
- ⑧ Miyahara, S.: A three dimensional wave activity flux applicable to inertio-gravity waves. SOLA, 査読有, 2, 2006年, doi:10.2151/sola.2006-028.
- ⑨ Yoshikawa, Y., and S. Miyahara: Excitations of nonmigrating diurnal tides in the mesosphere and lower thermosphere simulated by the Kyushu-GCM. Adv. Space Res., 査読有, 35, 2005年, 1918-1924.
- ⑩ Mukougawa, H., H. Sakai and T. Hirooka: High sensitivity to the initial condition for the prediction of stratospheric sudden warming. Geophys. Res. Lett., 査読有, 32, 2005年, doi:10.1029/2005GL022909.

[学会発表] (計 124 件)

- ① Yamashita, Y., H. Akiyoshi and M. Takahashi: The stratospheric and tropospheric variability around the North Pole associated with the solar cycle and the QBO, SPARC 4th General Assembly, 4 Sep. 2008, Bologna, Italy.
- ② Miyoshi, Y., and H. Fujiwara: Upward propagation of atmospheric waves from the troposphere to the thermosphere and its impact on the general circulation in the thermosphere, 37th COSPAR Scientific Assembly, 14 July 2008, Montreal, Canada.
- ③ Hirooka, T., M. Kitamura, K. Shibata and H. Akiyoshi: Planetary-scale ozone anomalies associated with atmospheric tides in the upper stratosphere and lower mesosphere. Quadrennial Ozone Symposium, 3 Jul. 2008, Tromsø, Norway.
- ④ Kitamura, M., T. Hirooka, K. Shibata and H. Akiyoshi: Tidal waves in the stratosphere and lower mesosphere as inferred from CCM simulations. International CAWSES Symposium, 24 Oct. 2007, Kyoto, Japan.
- ⑤ T. Hirooka, T. Ichimaru and H. Mukougawa:

Occurrence patterns of stratospheric sudden warming events in view of the stratosphere-troposphere coupled system and their predictability. WCRP Seasonal Predictability Workshop, 5 June 2007, Barcelona, Spain.

- ⑥ Miyoshi, Y., and H. Fujiwara: Day-to-day variations of the general circulation in the Thermosphere simulated by a general circulation model. IAGA 10th Scientific Assembly, 28 July 2006, Toulouse, France.

[図書] (計 3 件)

- ① Mukougawa, H., T. Hirooka, T. Ichimaru, and Y. Kuroda: Nonlinear Dynamics in Geosciences, Tsonis, A. A., and J. B. Elsner, edited, Springer-Verlag, 2007 年, p. 221-233.

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

廣岡 俊彦 (HIROOKA TOSHIHIKO)
九州大学・大学院理学研究院・教授
研究者番号: 90253393

(2) 研究分担者

宮原 三郎 (MIYAHARA SABURO)
九州大学・大学院理学研究院・教授
研究者番号: 70037282

(3) 研究分担者

三好 勉信 (MIYOSHI YASUNOBU)
九州大学・大学院理学研究院・准教授
研究者番号: 20243884

(4) 研究分担者

高橋 正明 (TAKAHASI MASAOKI)
東京大学・気候システム研究センター・教授
研究者番号: 70188051

(5) 研究分担者

藤原 均 (FUJIWARA HITOSHI)
東北大学・大学院理学研究科・助教
研究者番号: 50298741

(6) 研究分担者

秋吉 英治 (AKIYOSHI HIDEHARU)
(独) 国立環境研究所・大気圏環境研究領域・主任研究員
研究者番号: 10270589