

平成 22 年 5 月 1 日現在

研究種目： 基盤研究(B)

研究期間： 2007 ～ 2009

課題番号： 19340135

研究課題名 (和文) 成層圏過程を通じた太陽活動の地域気候への影響

研究課題名 (英文) Solar influence on regional climate through stratospheric process

研究代表者

小寺 邦彦 (KODERA KUNIHICO)

名古屋大学・太陽地球環境研究所・客員教授

研究者番号： 70343887

研究成果の概要 (和文)：

観測とモデル実験を組み合わせた手法を用いて、成層圏力学を通じた太陽活動の対流圏への影響の過程を解析し、明らかにした。また冬期成層圏循環の変化が海洋との相互作用を通して持続することや、地域性に違いが出ることを示した。さらに太陽活動は温室効果ガス増加の影響を変調して太陽活動が盛んな時には成層圏寒冷化の影響が対流圏及び下のを促進し、北大西洋の海面気圧場に北太平洋振動のような空間パターンを生み出す事を明らかにした。

研究成果の概要 (英文)：

Solar influence through the stratospheric dynamical processes is clarified by combination of the observational and chemical-climate model studies. It is shown that the stratospheric circulation change can persist longer in the troposphere through interaction with the oceans, creating regional differences. During the period of high solar activity, stratospheric cooling effect due to the increased greenhouse gases propagates more easily to the troposphere and creates North Atlantic Oscillation-like pattern in the sea-level pressure.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	5,700,000	1,710,000	7,410,000
2008 年度	4,000,000	1,200,000	5,200,000
2009 年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
年度			
年度			
総計	13,200,000	3,960,000	17,160,000

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、気候変動、成層圏対流圏結合

1. 研究開始当初の背景

太陽活動の気候への影響については、古くは太陽放射エネルギーの変動が直接気温の変化を生み出すと考えられていた。しかし、近年の人工衛星による太陽放射エネルギーの直接観測から、太陽黒点周期変化に伴う全太

陽放射エネルギー変化は直接的な地表面気温変化を作り出すには小さすぎることに、しかし紫外線域での放射エネルギーの変化は上層大気を変化させる程度に十分大きいことが分かってきた。そしてこれまでの研究から太陽活動に伴う上層大気の変動は成層圏過

程および対流圏－成層圏結合過程によって増幅し下方伝播する可能性が示された。

また気候変動に太陽活動の変化が果たす役割を明確にする為に世界気候研究計画(WCRP)の主要プログラムの一つである「成層圏プロセスとその気候への役割 (SPARC)」において“成層圏プロセスを通じた太陽活動の気候への影響の研究グループ (SOLARIS)”が発足し中層大気化学・気候モデル実験を主とした太陽活動の影響の研究が実施されている。この国際共同研究を推進を計る事を目的とし本研究課題は提案された。

2. 研究の目的

従来の太陽活動の影響の研究は年平均・全球平均気温の変化の議論が主であった。しかし寒波や大雪、干ばつ、洪水等社会生活に大きな影響を与える現象は主として循環場の変化から引き起こされている。そこで本研究では太陽活動がどのように成層圏循環を変化させ対流圏の各地域にどのようなプロセスを経て影響を及ぼすかを明らかにする事を目的とする。

3. 研究の方法

本研究では気象再解析や衛星観測のデータを用いて太陽活動の影響の解析を行うと共に、成層圏過程を通じた太陽活動の気候への影響の国際共同研究である SOLARIS の枠組みを生かし、特に気象研究所、米国大気科学センター、ベルリン自由大学、マックスプランク気象研究所等で行った中層大気化学・気候モデル実験結果と観測とを比較する事によって太陽活動が気候に影響及ぼす過程を明らかにする。また太陽活動に対する大気の応答は成層圏力学に内在する性質の為に極めて非線形的である。その為に太陽活動の影響は成層圏赤道準二年振動や温室効果ガスの増加といった別の要因による変化との相互作用を引き起こす。それ故に太陽活動の影響を明らかにする為には大気の内変動についても同時に明らかにしていく事が重要である。

4. 研究成果

主として成層圏における太陽活動の力学的応答、対流圏への伝播のメカニズムとその影響の持続性、そして気候変動における太陽活動の役割について以下に示す。

(1) 力学的応答

太陽活動が盛んになり紫外線が増えると上部成層圏・成層圏界面でオゾンが増加し気温も上昇する。力学的なフィードバックが無い場合には、太陽紫外線による加熱は気温の上昇に伴う赤外放射の増加による冷却と釣り

合う(図1 a)。力学的な応答が存在する場合にはプラネタリー波と成層圏の西風ジェットとの相互作用を考慮しなければならない。しかしどの様にフィードバックが起こるかは基本場に依存して放射効果が支配的か、あるいは力学的効果が支配的かの二つの場合に分かれる。

初冬のように成層圏界面付近の西風が強くとプラネタリー波の活動がまだ小さい場合には放射効果がより支配的になる。この場合は太陽紫外線加熱の増加により冬半球で気温の南北勾配強くなり西風が強くなる (ΔU)。強い西風は対流圏からの波 (EPF) の伝播を跳ね返す。この結果、プラネタリー波により誘起される成層圏子午面循環が弱くなり、赤道域の上昇流による力学的冷却効果が弱まるので赤道域の気温はより上昇する。逆に極域成層圏では下降流が弱まり力学的加熱が減少するので気温は低下する (図1 b)。しかしながら冬至を過ぎて晩冬になると低緯度と高緯度との太陽放射加熱の差が小さくなる。一方、対流圏のプラネタリー波はより強くなり成層圏へ伝播してくる。この場合には力学的効果が支配的になるので太陽放射が増加しても波による熱輸送が増加して熱が赤道から極域に運ばれてしまい赤道域の昇温は小さくなる。その結果、気温の南北傾度はより小さくなり成層圏界面付近の西風はより弱くなる。その為に波はより容易に上部成層圏に伝わって来る。この場合には太陽活動が増加しても赤道域の気温は上昇せず極域の気温が上がり極渦が弱くなるという初冬とは逆の応答が出現する (図1 c)。

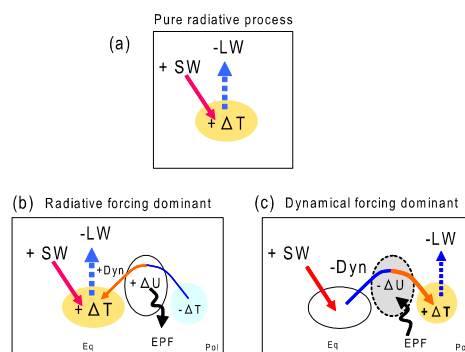


図1 太陽紫外線加熱に対する大気の応答の概念図。(a)力学的応答の無い場合、(b)、(c)力学的応答が存在するが、より(b)放射効果、あるいは(c)力学的効果が支配的である場合。図のSWは短波、LWは赤外放射加熱を、Dynは力学的加熱の変化を、また ΔT 、 ΔU は気温、東西風の変化、EPFはプラネタリー波の伝播の変化を現している。

(2) オゾンの鉛直分布

現在太陽活動の影響を論じる上で大きな問

題の一つは太陽活動が盛んになり紫外線が増加しても中部成層圏のオゾンには変化が見られない事である。衛星観測によると年平均オゾン濃度の太陽周期と同期した変動は赤道上部成層圏と下部成層圏の2カ所で大きく約数パーセントある(図2左)。中部成層圏の応答が小さい事が観測の技術的問題によるのか現実にそうなのか、またどういう理由からそのような空間分布が生じるのかを明らかにする必要がある。図2右に気象研究所、NCAR、GFDLの中層大気化学気候モデルで再現された11年の太陽活動に伴う赤道域のオゾンの変化を示す。このモデル比較の結果から現実的な設定でモデル実験を行えば観測された様なオゾン応答の極小域が再現される事がわかった。

また、その形成のメカニズムについては上に述べた力学的効果が働く場合、輸送の効果の大きくなる中部成層圏では初冬と晩冬で太陽活動に伴う循環がほぼ反転するので年平均オゾンの変化が小さくなるということの説明が出来る。

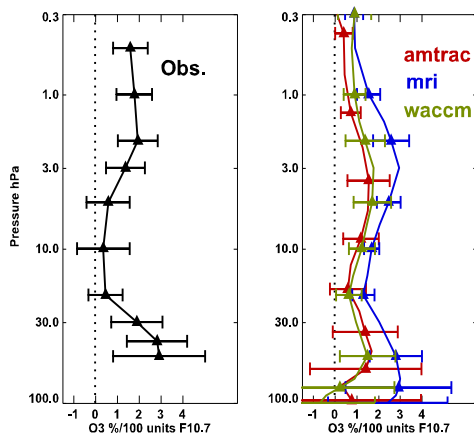


図2 太陽周期に対する赤道成層圏の年平均オゾン変動率。(左)観測、(右)モデル実験(青:気象研、茶:NCAR、緑:GFDL)。

(3) 太陽活動の遅延効果

これまでの研究から太陽活動の影響は冬の成層圏から極夜ジェット振動と同様にプラネタリー波と帯状平均流の相互作用を通して対流圏に降りて来ることが分かった。しかしこの効果は成層圏が西風になる冬期しか働かないが太陽活動の影響は夏にも現れる。また太陽には11年周期より長い周期があり太陽活動の影響を考える場合には海洋との相互作用も考慮する必要がある。そこで、冬期の成層圏循環の変化がどの様に海洋に伝わり、再び大気に影響を与えるかのフィードバックについて気象研究所の海洋・大気結合モデルを用いて実験を行って調べた。

実験ではまず海洋・大気結合モデルの冬の成層圏に運動量を加え西風ジェットの強さを変えた実験を行った。成層圏の循環場の変化に対応して大気の循環が変わるので海水温も変化する。次に気候値の海面水温にこの実験から得られた海面水温偏差を加えて下部境界条件として大気大循環モデルを走らせ、気候値の海面水温を用いた標準実験との差から海洋の変化が再び大気に与える影響を調べた。

図3はこうして得られた海洋からのフィードバックの効果を海面気圧(SLP)について示してある。海洋の応答の寄与が大きい地域は北大西洋と北太平洋の二カ所に見られる。北大西洋では北大西洋振動に特有の南北に正負の気圧場のシーソーパターンを示している。また北太平洋ではアリューシャン低気圧の変動パターンを示している。これらは両地域における冬の循環に主要な変動パターンである。ところで両地域での影響の現れやすい季節は異なっており北大西洋の場合は初冬であるのに対して太平洋は晩冬から春にかけてである。この違いは両地域での西風ジェットと主にストームトラックの緯度、季節変化の違いに由来するものと考えられる。

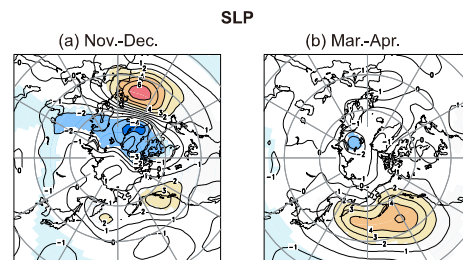


図3 海からのフィードバック。(a)11-12月、(b)3-4月。95%以上有意である領域に彩色。

上に述べた海洋フィードバックによる効果の他に遅延した太陽活動の効果としてはオゾンの輸送を通じた効果がある。太陽活動の影響で冬期に低緯度から極域へ輸送されるオゾン量が異なると夏期になって極域下部成層圏のオゾン加熱に違いが生じる。その結果、夏期の下部成層圏の温度構造に違いが出るので対流圏の波の活動が変わり、対流圏の中高緯度の循環に影響が現れる。観測のみでは対流圏の変化と成層圏オゾンの因果関係を突き止めるのは難しいので気象研究所の化学・気候モデルを用いて太陽紫外線強度を変化させる実験を行った。その結果は観測結果を支持し太陽活動の影響は冬のオゾンの輸送の効果を通じ夏の対流圏に北大西洋振動の変調という形で現れる事が分かった。

(4) 近年の温暖化トレンド

近年の地球温暖化の原因が人為的な温室効果ガスの増加か、太陽活動の変化によるのかといった議論が絶えない。しかし、これまでに見たように大気の応答は非常に非線形的であるために二者択一の関係ではなく両者の応答に相互作用が生じる可能性がある。また、温室効果ガスの増加の影響として普通は温暖化が語られるが温室効果ガスの増加は成層圏には寒冷化をもたらす。先に述べた様に冬の成層圏での循環の変化は対流圏へと降りて来るので成層圏での温室効果ガス増加の影響が太陽活動で変調されて対流圏に伝わるという複雑なプロセスが働く可能性がある。

大雑把に言えば成層圏の寒冷化は極夜ジェットの強化をもたらし、対流圏の温暖化は亜熱帯ジェットの強化をもたらす。ところで極夜ジェットの強化はプラネタリー波の南北伝播を変化させ亜熱帯ジェットを弱化する傾向がある。一方亜熱帯ジェットの強化は極夜ジェットを弱めると言った相反する効果がある。この為に温室効果ガスが増加しても成層圏寒冷化の効果が対流圏の効果を凌駕し極夜ジェットが強まる場合と、その逆に対流圏の温暖化の効果により極夜ジェットが弱化する場合が生じる。

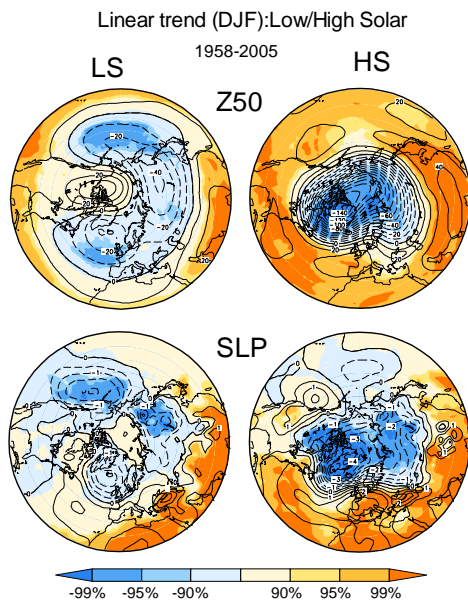


図4 太陽活動活発期(HS)と不活発期(LS)で分けた1958-2005年の線形トレンド。(上)50hPa高度場、(下)海面更正気圧場のトレンド。彩色は統計有意性を示している。

ところで太陽活動が変化するとそれにより成層圏循環の基本場が変わる。そこで太陽周期の位相により対流圏のトレンドが変調を

受ける可能性を調べた。図4は1958年から2007年の期間を太陽活動の高い期間(HS)と低い期間(LS)に分け別々に線形トレンドを計算した結果である。上は50hPaの冬平均気圧高度、下は海面気圧の線形トレンドの図である。

海面気圧の変化は太陽活動の高い時期には極域での気圧の低下とその周辺、特に北大西洋域での増加として現れ、北大西洋振動、あるいは北極振動に似たパターンを示している。一方太陽活動の低い時期にはアリューシャン低気圧の気圧低下のトレンドが顕著である。太陽活動の低い時期の北太平洋の気圧低下は熱帯太平洋の海面水温が上昇するエルニーニョ時に現れる変化と類似している。

下部成層圏50hPa高度では太陽活動の高い場合は極とその周辺部との高度場のシーソーパターンが明瞭であり、成層圏から対流圏へとつながる環状模式的なパターンを形成している。太陽活動の低い時期では成層圏では極渦は弱く波数1と2の波のパターンが見られる。一般に太陽活動が高い時期は成層圏変動が対流圏に、太陽活動が低いときには対流圏変動が成層圏に入り易い。温暖化ガス増加の成層圏循環への影響も太陽活動が高い時期には対流圏に降りてくるという今回の結果もこれと整合的である。

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12件)

①Inaba, M and K. Kodera (2010), Forecast Study of the Cold December of 2005 in Japan: Role of Rossby waves and tropical convection, J. Meteorol. Soc. Japan, accepted. 査読有

②Austin, J. R., K. Shibata (17番), 他20名, Coupled chemistry climate model simulations of stratospheric temperatures and their trends for the recent past, Geophys. Res. Lett., 36, L13809, 2009. 査読有

③Kodera, K., H. Mukougawa, and S. Itoh, Tropospheric impact of reflected planetary waves from the stratosphere, Geophys. Res. Lett., 35, L16806, 2008. 査読有

④Kuroda, Y., K. Yamazaki, and K. Shibata, Role of ozone on the solar cycle modulation of the North Atlantic Oscillation, J. Geophys. Res., 113, D14122, 2008. 査読有

- ⑤ Kuroda, Y., Effect of stratospheric sudden warming and vortex intensification on the tropospheric climate, *J. Geophys. Res.*, 113, D15110, 2008. 査読有
- ⑥ Austin, J., K. Kodera (14 番), K. Shibata (19 番), 他 20 名, Coupled chemistry climate model simulations of the solar cycle in ozone and temperature, *J. Geophys. Res.*, 113, D11306, 2008. 査読有
- ⑦ Shibata, K. and M. Deushi, Long-term variations and trends in the simulation of the middle atmosphere 1980-2004 by the chemistry-climate model of the Meteorological Research Institute, *Ann. Geophys.*, 26, 1299-1326, 2008. 査読有
- ⑧ Kodera K., M.E. Hori, S. Yukimoto, and M. Sigmond, Solar modulation of the Northern Hemisphere winter trends and its implications with increasing CO₂, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L03704, 2008. 査読有
- ⑨ Miyazaki, C. and T. Yasunari (2008), Dominant interannual and decadal variability of winter surface air temperature over Asia and the surrounding oceans, *J. Climate*, 21, 1371-1386. 査読有
- ⑩ Yukimoto, S., and K. Kodera, Annular Modes forced from the stratosphere and interactions with the oceans, *J. Meteorol. Soc. Japan*, 85, 943-952, 2007. 査読有
- ⑪ Kuroda, Y., Effect of QBO and ENSO on the solar cycle modulation of winter North Atlantic Oscillation, *J. Meteorol. Soc. Japan*, 85, 889-898, 2007. 査読有
- ⑫ Kuroda, Y., M. Deushi, and K. Shibata, Role of solar activity in the troposphere-stratosphere coupling in the southern hemisphere winter, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L21704, 2007. 査読有

[学会発表] (計 27 件)

- ① Kodera, K., Seasonal variation of the solar influence, Second SOLARIS Workshop., 2010 年 3 月 10-12 日, Potsdam.
- ② Shibata, K. 他 1, Comparison of solar signals in the past simulation 1960 to 2006 with the MRI chemistry-climate model between observed and modeled SST forcings, Second SOLARIS Workshop., 2010 年 3 月 10-12 日, Potsdam.
- ③ Kuroda, Y. 他 1, Influence of solar cycle and QBO modulation on the Southern Annular Mode, Second SOLARIS Workshop., 2010 年 3 月 10-12 日, Potsdam.

④ 小寺 邦彦, 他 2, 2009 年 1 月の成層圏突然昇温の熱帯への影響, 第 7 回異常気象と長期変動研究集会, 2009 年 10 月 29-30 日, 宇治.

⑤ Kodera, K. 他 1, Conceptual model for the solar influence from the stratosphere, MOCA-09, 2009 年 7 月 19-29 日, Montreal.

⑥ Kodera, K., 他 1, Inter-hemispheric stratosphere-troposphere coupling in the polar and equatorial regions, MOCA-09, 2009 年 7 月 19-29 日, Montreal.

⑦ Kodera, K., 他 1, Cirrus cloud variation in the tropics during the southern stratospheric sudden Warmings in 2006 and 2007, AGU 2008 Fall Meeting, 2008 年 12 月 15-19 日, San Francisco.

⑧ 柴田清孝, 他 1 名, 化学-気候モデルにおける NAM の下部成層圏での持続時間について, 第 6 回異常気象と長期変動研究集会, 2008 年 10 月 30-31 日, 宇治.

⑨ Kodera, K., 他 1 名, Intercontinental tropospheric teleconnection by planetary wave reflection in the stratosphere, SPARC 4th General Assembly, 2008 年 8 月 31 日-9 月 5 日, Bologna.

⑩ Kuroda, K., Role of solar activity in the troposphere-stratosphere coupling in the northern and southern hemisphere winters, SPARC 4th General Assembly, 2008 年 8 月 31 日-9 月 5 日, Bologna.

⑪ Shibata, K., 他 1 名, Spatial structure of the quasi-biennial oscillation in zonal wind and ozone simulated with the MRI-CCM, SPARC 4th General Assembly, 2008 年 8 月 31 日-9 月 5 日, Bologna.

⑫ Kodera, K., Solar modulation of the northern hemisphere winter trends: implications with increasing CO₂, Workshop on Variability of the Global Atmospheric Circulation During the Past 100 Years, 2008 年 6 月 15-20 日, Monte Verità

⑬黒田 友二、太陽活動の対流圏成層圏結合に及ぼす役割：南北両半球の比較、日本地球惑星科学連合 2008 年大会, 2008 年 5 月 16-21 日, 千葉

⑭小寺邦彦, 北半球冬期における近年のトレンドの太陽活動による変調：二酸化炭素ガス増加との関わり合い、日本地球惑星科学連合 2008 年大会、2008 年 5 月 16-21 日, 千葉

⑮黒田友二, 太陽活動の北大西洋振動変調に及ぼすオゾンの役割, 日本気象学会 2008 年春期大会, 2008 年 5 月 18~21 日, 横浜.

⑯Kodera, K., 他 2, Solar modulation of the northern hemisphere winter trends: implications with increasing CO₂, 2008 EGU general assembly, 2008 年 4 月 13-18 日, Vienna.

⑰Shibata, K., 他 1, Temperature and ozone response to the 11-year solar cycle in the tropical stratosphere as revealed by ensemble simulation of chemistry-climate model, 2008 SORCE Scientific meeting, 2008 年 2 月 9-11 日, Santafe.

⑱Kodera, K., Stratospheric impact on the equatorial convective activity, International Seminar on Climate Variability, Change and Extreme Weather Events, 2008 年 2 月 26-27 日, Kuala Lumpur.

⑲Kuroda, Y., Effect of QBO and ENSO on the solar cycle modulation of winter North Atlantic Oscillation, AGU 2007 fall meeting, 2007 年 12 月 10-14 日, San Francisco.

⑳Kodera, K. 他 3, Solar modulation of the recent trends in the NH winter circulation, International CAWSES Symposium, 2007 年 10 月 23-27 日, Kyoto.

㉑Shibata, K., 他 1, Simulations of the effect of 11-year solar cycle with MRI chemistry-climate model, International CAWSES Symposium, 2007 年 10 月 23-27 日, Kyoto.

㉒黒田友二, 南半球冬季における太陽活動の上下結合に及ぼす影響, 2007 年日本気象学会秋季大会, 2007 年 10 月 14 日-16 日, 札幌

㉓小寺邦彦, 成層圏—対流圏結合：極域から赤道域へ第 31 回極域宙空圏シンポジウム, 2007 年 7 月 23-24 日, 東京.

㉔Kodera, K., 他 2, The Role of the Stratosphere in the Climate System, IUGG 2007, 2007 年 7 月 2-13 日, Perugia.

㉕Kodera, K., 他 1, Solar influence on the Indian Ocean through stratospheric dynamical processes, IUGG 2007, 2007 年 7 月 2-13 日, Perugia.

㉖Shibata, K., 他 1, Ozone radiative feedback on the quasi-biennial oscillation, chemistry-climate model validation, SPARC CCMVal workshop, 2007 年 6 月 26-28 日, Leeds.

㉗Kodera, K., Solar influence study group for SPARC, 日本地球惑星科学連合 2007 年大会, 2007 年 5 月 25-30 日, 千葉.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小寺 邦彦 (KODERA KUNIHICO)
名古屋大学・太陽地球環境研究所・
客員教授
研究者番号：70343887

(2) 研究分担者

安成 哲三 (YASUNARI TETSUZOU)
名古屋大学・地球水循環研究センター
教授
研究者番号：80115956

柴田 清孝 (SHIBATA KIYOTAKA)
気象庁・気象研究所・環境応用研究部
室長
研究者番号：50354494

黒田 友二 (KURODA YUUJI)
気象庁・気象研究所・気候研究部
主任研究官
研究者番号：80343888

堀 正岳 (HORI MASATAKE)
名古屋大学・地球水循環研究センター
研究員
研究者番号：60432225
(H19-H20)