

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 24 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2008～2011

課題番号：20244076

研究課題名（和文） 気候変化における成層圏の影響の評価および力学的役割の解明

研究課題名（英文） Studies on the Effects of the Stratosphere on Climate Change and its Dynamical Role

研究代表者

余田 成男 (YODEN SHIGEO)

京都大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：30167027

研究成果の概要（和文）： 全球気象解析データおよび力学コアモデルから気象庁1ヶ月アンサンブル予報モデルまでを駆使して、成層圏変化が大気大循環の主要力学過程に及ぼす影響と力学的役割を明らかにした。特に、成層圏突然昇温現象に関連して、周極渦周縁の大規模前線構造を発見するとともに、極域循環の予測可能性変動の新知見を得た。また、化学-気候モデル実験結果も加えて、成層圏寒冷化、太陽活動変動などの外部要因変動が季節内変動・年々変動の及ぼす力学的役割を明らかにした。

研究成果の概要（英文）： Effects of the stratospheric change on the main dynamical processes of the general circulation of the atmosphere and their dynamical role were clarified with data analyses of global observations and numerical studies with a hierarchy of numerical models from a dynamical core to the JMA operational model of one-month ensemble numerical weather prediction. Some specific findings associated with a stratospheric sudden warming event are large-scale frontal structure at the edge of circumpolar vortex and systematic predictability variation of the annular mode before and after the event. A chemistry-climate model was also used in addition to the above data and models, and the dynamical influences of external forcings, such as the stratospheric cooling and variations of the solar activity, on the intra-seasonal and inter-annual variations of the atmosphere were elucidated.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	10,200,000	3,060,000	13,260,000
2009年度	7,800,000	2,340,000	10,140,000
2010年度	9,900,000	2,970,000	12,870,000
2011年度	9,100,000	2,730,000	11,830,000
年度			
総計	37,000,000	11,100,000	48,100,000

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：気候変動，成層圏，対流圏，子午面循環，大気波動

## 1. 研究開始当初の背景

温室効果気体の増加に伴う気候変化は、最

近では広く社会的な興味までを喚起しているが、その理解と将来予測は 21 世紀の地球

科学の重要な研究課題の一つである。

温室効果気体は対流圏を温暖化するが、成層圏では逆に寒冷化をもたらす。また、成層圏では熱的慣性が小さいために、その効果は対流圏よりもより顕著に現れる。現在、全球平均では約 0.5K/10 年(下部成層圏)～1K/10 年(上部成層圏)の割合で寒冷化しており、対流圏よりも短い期間の時系列データで気候変化の検出が可能である。

近年、赤道域帯状流の準二年周期振動(QBO)や冬季極域での成層圏突然昇温現象(SSW)などの成層圏内部変動のシグナルが、対流圏と成層圏をつなぐ大気波動を介して、あるいは大気波動の碎波や減衰によって誘起される子午面循環の「ダウンワード・コントロール」によって、対流圏まで伝わっていることが明らかになってきた。従来、成層圏は密度が低い為その気候変化の対流圏への影響は小さいと思われてきたが、このような力学過程のなかで増幅されて対流圏や地上の気候状態にまで影響を及ぼしている可能性が指摘され始めた。

例えば、対流圏から中間圏までを陽に扱う最近の化学-気候結合モデルで、成層圏以下は基本的に同一のままモデル上端を成層圏界面付近に下げただけで、対流圏の気候が大きく異なり、海氷が融解したことが報告されている。しかし、これが基本的に数値モデルの欠陥のためなのか、あるいは中層大気の状態の違いが力学的に増幅され下方影響することによる現実大気の問題なのかということについては明らかになっていない。

## 2. 研究の目的

中層大気は、特に冬季の中・高緯度において、冬季極域 SSW や極域環状変動などの顕著な自然内部変動成分を有する。また、熱帯域大気-海洋相互作用によるエルニーニョ・南方振動(ENSO)や赤道域 QBO の遠隔影響、あるいは、自然起源の外部強制変動(太陽活動、火山噴火)に対する応答の成分があり、人為起源の温室効果気体の増加やオゾン減少に対する応答成分をこれらと識別して議論する必要がある。しかし、現実には、これらの変動が独立でなく相互に影響しあって複雑に変動しており、その総合的な理解と信頼できる予測には、巧く設定された一連の数値モデル実験とその結果を活かしたデータ解析とが必要である。

大気大循環や気候システムに対する我々の理解が十分に進んでいれば、成層圏寒冷化に伴って成層圏と対流圏の結びつきや対流圏の状態がどう変化するかを予言できるはずであるが、現状は不十分な理解のままに留まっている。本研究の目的は、成層圏

寒冷化が大気大循環の主要力学過程に及ぼす影響を明らかにすることである。

## 3. 研究の方法

中層大気の気候変動力学分野における我が国の第一線研究者からなる研究体制を作り、すべての研究方法を有効に組み合わせることにより、中層大気を陽に含む大気大循環の主要力学過程を網羅した総合的研究を強力に推進する。成層圏-対流圏結合系の多重時空間変動像に関する新たな研究のアイデアを共有し、定期的集会以での情報交換に基づいて全参加者が協調した研究を展開することにより、成層圏-対流圏結合系の気候形成過程とその気候変化における主要力学過程の役割を統一した視点で明らかにする。

具体的には、成層圏の長期変化が大気大循環の主要力学過程(平均子午面循環、プラネタリー波、傾圧擾乱、重力波、および、積雲対流群)に及ぼす影響をパラメータスウィープ実験とアンサンブル実験により定量的に評価する。そして、対流圏や地上の気候形成と気候変化においてこれらの各過程が果たす力学的な役割を明らかにする。

また、冬季極域 SSW など季節内変動が大きい状況で、気候的な季節進行とそれからの偏差としての年々変動に自然変動成分を区分けし、さらに強制応答としての経年的な気候変化を抽出することで、成層圏-対流圏結合系の多重時空間スケールでの変動・変化像を構築する。そして、データ解析、数値実験、理論を有機的に且つ有効に組み合わせることにより、そのような多重時空間変動・変化のなかで上記の主要力学過程が果たす役割を明らかにする。

## 4. 研究成果

研究計画に沿って、2 つの研究グループに分かれて研究を遂行した。それぞれの研究グループが本研究期間中に得たおもな成果は以下のようにまとめられる。

(1) 成層圏変化が各過程に及ぼす影響評価と力学的役割研究グループ:

- ・2009 年 1 月に生じた極渦分裂型の成層圏大規模突然昇温の観測的特徴を解析するとともに、予測可能期間が 5 日程度であることと、アラスカ近辺に生じたブロッキング現象が大規模突然昇温の生起予測に重要であることを明らかにした。

- ・北半球成層圏循環変動の主要な 2 つの成分から張られる 2 次元位相空間を用いて気象庁 1 ヶ月予報での成層圏高度場予測スプレッドの分布を吟味し、その分布が 2 次元位相空間における軌道特性で説明できる可能性を示

した。

・成層圏突然昇温に伴い極渦の縁に大規模な前線構造が形成されることを、GPS 掩蔽観測データを使って示した。突然昇温に際して観測されてきた大気重力波の振幅の増大が、この前線に伴う偽のシグナルで大部分説明できることを明らかにした。

・成層圏突然昇温(SSW)が北半球環状モード(NAM)の予測可能性に与える影響を調べるため、2009年と2010年冬季について予報実験結果等を用いて解析した。SSW後の予報では、SSW前に比べて対流圏NAM indexの予測スプレッドが有意に小さいことを示した。

・水惑星モデルを用いたパラメータスイープ実験により、ハドレー循環において波動が果たす役割が重要である可能性を示した。

・気象庁1ヶ月アンサンブル予報データを用いて、成層圏突然昇温の予測可能性を調査し、予測可能性に明確な年々の変動があることを明らかにした。

・数値モデルの高速化のために、IA-32 CPUおよびGPGPU上で高速に動作する球面調和関数変換ライブラリを作成し、フリーソフトウェアとして公開した。

(2) 季節内変動・年々変動・気候変化における外部要因変動の力学的役割研究グループ:

・成層圏力学過程、特に成層圏子午面循環の変化を通じた太陽活動の熱帯対流圏への影響に関する解析を行い、大気大循環モデル実験結果から、成層圏突然昇温と熱帯の積雲対流活動の変化の関連を明らかにした。特に、成層圏で子午面循環が強くなると、熱帯において絹雲が形成される高度が上がるとともに、大陸上の深い対流が強化されることを示した。

・ERA40データを用いて、赤道準2年周期振動(QBO)の全球への影響を調べ、QBOの位相変化の季節性がプラネタリー波の伝播に関連していることを示した。

・成層圏大規模突然昇温の前後において、より上層の大気への突然昇温の影響について解析を行い、中間圏、下部熱圏領域、さらに超高層大気領域に特徴的な変動が見られることを示した。

・化学-気候モデルを使った過去再現実験を行い、突然昇温や極渦強化のような東西風の大きな変化の前後において、それに付随する子午面循環の変化を力学量やオゾン量で調べた。その結果、東西風変化の影響が熱帯や南半球の圏界面付近でも見られることを明らかにした。また、過去再現・将来予測実験において成層圏下層の空気塊年代の解析を行い、将来と過去の地理的分布による差が季節に応じて変動することを示した。

## 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78件)

- ① Y. Yamazaki, K. Yumoto, D. McNamara, T. Hirooka, T. Uozumi, K. Kitamura, S. Abe and A. Ikeda, The nature of Arctic polar vortices in chemistry-climate models., Q. J. R. Meteor. Soc., 査読有, 2012, DOI: 10.1002/qj.1909
- ② Horinouchi, T., Moist Hadley circulation: possible role of wave-convection coupling in aqua-planet experiment, J. Atmos. Sci., 査読有, 69(3), 2012, pp891-907, DOI: 10.1175/JAS-D-11-0149.1
- ③ Y. Kuroda and H. Mukougawa, Role of medium-scale waves on the Southern Annular Mode, J. Geophys. Res., 査読有, 116, 2011, DOI: 10.1029/2011JD016293
- ④ K. Kodera, H. Mukougawa and Y. Kuroda, A general circulation model study of the impact of a stratospheric sudden warming event on tropical convection, SOLA, 査読有, Vol. 7, 2011, pp. 197-200, DOI: 10.2151/sola.2011-050
- ⑤ M. Harada and K. Ishioka, Inertia-gravity wave radiation from an unstable Bickley jet in rotating two-layer shallow water, SOLA, 査読有, Vol. 7, 2011, pp.113-116, DOI: 10.2151/sola.2011-029
- ⑥ N. Saito and K. Ishioka, Interaction between thermal convection and mean flow in a rotating system with a tilted axis, Fluid Dynamics Research, 査読有, 43, 2011, DOI: 10.1088/0169-5983/43/6/065503
- ⑦ Kobayashi, C. and K. Shibata, Evaluation of dynamical contribution to lower stratospheric ozone trends in northern mid-latitudes over the last three decades (1980-2006) using a chemical transport model, J. Meteor. Soc. Japan, 査読有, 89, 2011, p p 363-376 DOI: 10.2151/jmsj.2011-405
- ⑧ Deushi, M. and K. Shibata, Impacts of increases in greenhouse gases and ozone recovery on lower stratospheric circulation and the age of air: Chemistry-climate model simulations up to 2100, J. Geophys. Res., 査読有, 116, 2011, DOI: 10.1029/2010JD015361
- ⑨ Hitchcock P, Shepard TG, and Yoden S.,

- On the Approximation of Local and Linear Radiative Damping in the Middle Atmosphere, *J. Atmos. Sci.*, 査読有, 67 (6), 2010, pp.2070-2085, DOI:10.1175/2009JAS3286.1,
- ⑩ Yoden, S., Ishioka, K., et al, Jet formation in decaying two-dimensional turbulence on a rotating sphere, IUTAM Symposium on Turbulence in the Atmosphere and Oceans, 査読有, IUTAM Bookserie 28, 2010, DOI: 10.1007/978-94-0, 07-0360-5\_210
- ⑪ Y. Chikamoto, Y. Tanimoto, H. Mukougawa, and M. Kimoto, Jet formation in decaying two-dimensional turbulence on a rotating sphere, *J. Meteor. Soc. Japan*, 査読有, 88-2, 2010, pp.183-202, DOI:10.2151/jmsj.2010-205,
- ⑫ K. Takemura and H. Mukougawa, Predictability during the onset period of a Euro-Atlantic blocking event during 12-21 December 2007, *SOLA*, 査読有, Vol. 6, 2010, pp.109-112, DOI:10.2151/sola.2010-028,
- ⑬ Kodera K., Chang in the ENSO teleconnection characteristics in the boreal winter, *SOLA*, 査読有, Vol. 6, 2010, pp.021-024, DOI:10.2151/sola.6A-006
- ⑭ Inaba, M and K. Kodera, Forecast study of the cold December of 2005 in Japan: Role of Ross by waves and tropical convection, *J. Meteor. Soc. Japan*, 査読有, Vol. 88, 2010, pp.719-735, DOI:10.2151/jmsj.2010-405,
- ⑮ Eguchi, N., and K. Kodera, Impacts of stratospheric sudden warming event on tropical clouds and moisture fields in the TTL: A Case Study, *SOLA*, 査読有, Vol. 6, 2010, pp.137-140, DOI:10.2151/sola.2010-035,
- ⑯ Ray, E. A., K. Shibata, et al., Evidence for Changes in Stratospheric Transport and Mixing Over the Past Three Decades Based on Multiple Datasets and Tropical Leaky Pipe Analysis, *J. Geophys. Res.*, 査読有, 115, D21304, 2010, DOI:10.1029/2010JD014206
- ⑰ Butchart, N., I. Cionni, V. Eyring, K. Shibata, et al., Chemistry-climate model simulations of 21st century stratospheric climate and circulation changes, *J. Clim.*, 査読有, 23, 2010, pp.5349-5374,
- ⑱ Taguchi, M., Observed connection of the stratospheric quasi-biennial oscillation with EL Nino ~Southern Oscillation in radiosonde data ~, *J. Geophys. Res.*, 査読有, 2010, 115, D18120, DOI:10.1029/2010JD014325
- ⑲ M. Kohoma, S. Nishizawa and S. Yoden, Classification of Polar-night Jet Oscillations and Their Relationship to Fast and Slow Variations in a Global Mechanistic Circulation Model of the Stratosphere and Troposphere, *J. Clim.*, 査読有, Vol. 23, 2010, DOI:10.1175/2010JCL13458.1
- ⑳ Ito. K., Y. Naito., and S. Yoden, Combined effects of QBO and 11-year solar cycle on the winter hemisphere in systems, *Geophys. Res. Lett.*, 査読有, 2009, Vol. 36, DOI:10.1029/2008GL037117
- ㉑ Randel, W. J, Shine K.P, Austin J, and S. Yoden, et al, An update of observed stratospheric temperature trends, *J. Geophys. Res.* 査読有, Vol. 114, 2009, DOI:10.1029/2008JD010421,
- ㉒ Mukougawa H., Hirooka T., and Kuroda Y., Influence of stratospheric circulation on the predictability of the tropospheric Northern Annular Mode, *J. Res. Lett.*, 査読有, Vol. 36, 2009, DOI: 10.1029/2008GL037127
- ㉓ Horinouchi, T. and T. Tsuda, Spatical structures and statistics of using a heuristic vertical cross-section extraction from COSMIC GPS atmospheric gravity waves derived radio occultation date., *J. Geophys. Res.*, 2009, 査読有, Vol. 114, doi:10.1029/2008JD011068
- ㉔ Cagnazzo, C., Manzini, E., Calvo, N. and Shibata, K. et al, Northern winter stratospheric temperature and ozone responses to ENSO inferred from an ensemble of Chemistry Climate Models, *Atmos. Chem. Phys.*, 査読有, 2009, Vol. 9, pp. 8935-8948,
- ㉕ William J. Randel, Keith P. Shine, and Yoden, S. et al, An update of observed stratospheric emperature trends, *J. Geophys. Res.* 査読有, 2009, Vol. 114, D02107, DOI:10.1029/2008JD010421
- ㉖ S. Keita and Mukougawa H., Characteristics of the meso-scale environments of storms associated

with typhoon-spawned tornadoes in Miyazaki, Japan, SOLA, 5, 5-8, 査読有, 2009, DOI:10.2151/sola.2009-002,

- ⑳ H. Mukougawa, T. Hirooka and Y. Kuroda, Influence of stratospheric circulation on the predictability of the tropospheric Northern annular mode, J. Geophys. Res, 査読有, 2009, DOI:10.1029/2008JD011068
- ㉑ T. Horinouchi, A numerical study of upward-propagating gravity waves in two different MJO phases, Geophys. Res. Lett., 35, L17802, 査読有, 2008, DOI:10.1029/2008JD011068
- ㉒ Kodera K., H. Mukougawa and S. Itoh, Tropospheric impact of reflected planetary waves from the stratosphere, J. Res. Lett., 査読有, 2008, DOI:10.129/2008GL034575,

[学会発表] (計 140 件)

- ① S. YODEN, (基調講演) Stratospheric Sudden Warming and its Role in Weather and Climate Variations, Workshop on Stratospheric Sudden Warming and its Role in Weather and Climate Variations, 2012, 2月22日, 芝蘭会館 (京都市)
- ② K. Ishioka, Development of a spherical harmonics transform library for several architectures 2nd AICS International Sympo., 2012, 3月1日, 理化学研究所計算科学研究所 (神戸市)
- ③ Kodera K., H. Mukougawa, Y. Kuroda., and Eguchi. N., Impact of stratospheric sudden warming event on tropical circulation and convection, Workshop on Stratospheric Sudden Warming and its Role in Weather and Climate Variations, 2012, 2月23日, 芝蘭会館 (京都市)
- ④ Shibata, K. and M. Deushi, Impacts of Global Warming and Ozone Recovery on Stratospheric Sudden Warming in Transient Simulations of a Chemistry-Climate Model, Workshop on Stratospheric Sudden Warming and its Role in Weather and Climate Variations, 2012, 2月24日, 芝蘭会館 (京都市)
- ⑤ K. Kodera, K. Matthes, (招待講演) Solar influence on the Earth's surface through stratospheric dynamical processes, The 2nd Nagoya Workshop on the Relationship between Solar Activity and Climate Changes, 2012, 1月17日, 名古屋大学 (名古屋市)
- ⑥ Taguchi, M., H. Mukougawa, T. Hirooka, S. Noguchi and Yoden S., Predictability

of Northern winter stratospheric conditions using JMA one-month ensemble predictions for 2001/02-2009/10, WCRP OSC: Climate Research in Service to Society, 2011, 10月24日, Denver (USA)

- ⑦ Yoden, S., Mesoscale-model study on an extratropical tropopause inversion layer, WCRP OSC: Climate Research in Service to Society, 2011, 10月24日
- ⑧ Shibata, K. and M. Deushi, Effects of greenhouse gas increase and ozone recovery on lower stratospheric circulation and the age of air as revealed by chemistry-climate model simulations up to 2100, 11th EMS (European Meteorological Society) Annual Meeting, 2011, 9月12日, Berlin (Germany)
- ⑨ Mukougawa, H., S. Nagata, T. Hirooka, Y. Kuroda., Influence of Stratospheric Sudden Warmings on the Predictability of the Northern Hemisphere Annular Mode, 2011 International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) General Assembly, 2011, 7月5日, Melbourne (Australia)
- ⑩ K. Kodera, (招待講演) Non-Linear interaction of the solar forcing in the boreal winter, IUGG, 2011, 6月29日, Melbourne (Australia)
- ⑪ T. Horinouchi, (招待講演) Analysis of spatial structure of gravity waves using GPS occultation data, AGU Chapman Conference on Atmospheric Gravity Waves and Their Effects on General Circulation and Climate, 2011, 3月3日, Honolulu (Hawaii)
- ⑫ Taguchi, M., (招待講演) Connection of the stratospheric quasi-biennial oscillation with EL Nino-Southern Oscillation, AGU Chapman Conference on Atmospheric, 2011, 3月11日, Honolulu (USA)
- ⑬ Y. Naito and N. Nishi et al, Global distribution of minor constituents observed by SMILES and its dynamical background, 91<sup>st</sup> Annual Meeting, 2011 1月25日, Seattle (USA),
- ⑭ Otsuka, S., Yoden, S., and Takeshita, M., Numerical experiments on formation processes of thin moist layers in the tropical mid-troposphere over eastern Pacific, AMS 91st Annual Meeting, 2011, 1月26日, Seattle (USA)
- ⑮ K. Shibata and S. Yukimoto, Current

- status of MRI models for the CMIP5 simulation, SPARC DynVar Workshop, 2010, 11月4日, Boulder (USA)
- ⑩ T. Hirooka, T. Ichimaru, Y. Harada, H Naoe and H. Mukougawa, Stratosphere-troposphere dynamical coupling through blocking phenomena during recent major stratospheric sudden warmings, DynVar Workshop 2, 2010, 11月3日 Boulder (USA)
- ⑪ A. Kubin, K. Matthes, K. Shibata, K. Kodera, and U. Langematz,, Comparison of the 11-year solar signal in coordinated SPARC/SOLARIS experiments using filtered forcings, SCOSTEP (Scientific Committee on Solar Terrestrial Physics, 2010, 6月22日, Berlin (Germany)
- ⑫ S. YODEN, Numerical studies on international and external variations of the winter polar vortex with a mechanistic circulation model, WCRP Workshop on Seasonal to Multi-Decadal Predictability of Polar Climate, 2010, 10月26日, Bergen (Norway)
- ⑬ S. YODEN, (招待講演) Classification of Polar-Night Jet Oscillations and Their Relationship to Fast and Slow Variations in a Global Mechanistic, 7th Annual Meeting AOGS, 2010, 7月5日, Hyderabad International Convention Centre (India)
- ⑭ Shibata. K. and M. Deushi, Effect of sea surface temperature on the solar signal in the stratosphere and troposphere as revealed by chemistry-climate model simulations from 1960 to 2006, SCOSTEP Symposium, 2010, 7月22日, Berlin (Germany)
- ⑮ Hirooka. T., Vortex splitting of the major stratospheric sudden warming in January 2009 and its predictability, AGU 2009 Fall Meeting, 2009, 12月18日, San Francisco (USA)
- ⑯ Yoden. S., M. Kohma. and S. Nishizawa, Relationship among SSW, VI, PJO and A0 in an Idealized Stratosphere-Troposphere Coupled model, EGU 2009 General Assembly and Congress European Geosciences Union, 2009年4月20日 Vienna (Austria)

[図書] (計2件)

- ① 余田成男, 太陽活動変動の地球気候への影響 京都大学学術出版会「総説 宇宙天気」第13章, 2011, 659,
- ② Forster, P. M., S. Yoden., et al,

Stratospheric changes and climate. Chapter 4 in "Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2010", Global Ozone Research and Monitoring Project-report No. 52, World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 2011, 516,

[産業財産権]

- 出願状況 (計0件)  
○取得状況 (計0件)

[その他]

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

余田 成男 (Yoden Shigeo)  
京都大学・大学院理学研究科・教授  
研究者番号: 30167027

### (2) 研究分担者

石岡 圭一 (Ishioka Keiichi)  
京都大学・大学院理学研究科・准教授  
研究者番号: 90292804

内藤 陽子 (Naito Yoko)  
京都大学・大学院理学研究科・助教  
研究者番号: 50324603

向川 均 (Mukougawa Hitoshi)  
京都大学・防災研究所・教授  
研究者番号: 20261349

堀之内 武 (Horinouchi Takeshi)  
北海道大学・地球環境科学研究院・准教授

研究者番号: 70343887

小寺 邦彦 (Kodera Kunihiko)  
名古屋大学・太陽地球環境研究所・客員教授

研究者番号: 70343887

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

田口 正和 (Taguchi Masakazu)  
愛知教育大学・教育学部・准教授  
研究者番号: 50397527

柴田 清孝 (Shibata Kiyotaka)  
気象庁気象研究所・環境応用気象研究部・室長

研究者番号: 50354494

### (3) 連携研究者 なし