

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 2 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24340113

研究課題名(和文)成層圏突然昇温現象に伴う中間圏・下部熱圏の大循環変動過程の解明

研究課題名(英文) Dynamical processes in the mesosphere and the lower thermosphere during sudden stratospheric warmings

研究代表者

廣岡 俊彦 (HIROOKA, Toshihiko)

九州大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：90253393

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、成層圏突然昇温時の成層圏・中間圏・下部熱圏域の力学結合を明らかにするために、Aura MLSデータに基づき力学場の解析を行った。その結果、突然昇温直前の平均風変動の結果、中間圏内で大規模波動の活動度が高まり、それが中間圏及び下部熱圏の大循環変動に大きく寄与していることがわかった。一方、突然昇温に伴う、残差平均子午面循環強化の結果、赤道域成層圏の低温偏差と中間圏の高温偏差が引き起こされ、それらが赤道域の温度風平衡を通し、成層圏界面付近で東風加速、中間圏で西風加速をもたらし、成層圏界面付近と中間圏に独立した極大を持つ赤道域半年周期振動の振幅の変動を引き起こすことを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In this study, in order to clarify the stratosphere-mesosphere-lower thermosphere dynamical coupling processes during sudden stratospheric warming (SSW) events, we make dynamical analyses of the general circulation up to the mesopause level on the basis of Aura Microwave Limb Sounder data. It is found that large-scale waves are strengthened in the mesosphere due to changing background wind structure prior to the SSW occurrence and the waves could significantly contribute to general circulation changes in the mesosphere as well as in the lower thermosphere. In addition, during SSW events, residual mean poleward flows are enhanced to lead to equatorial temperature perturbations consisting of a cooling in the stratosphere and a warming in the mesosphere. These temperature perturbations are found to modulate the equatorial semiannual oscillation with two separate out-of-phase maxima centered near the stratopause and the upper mesosphere through the thermal wind balance at the equator.

研究分野：気象力学・中層大気科学

キーワード：成層圏突然昇温 中間圏 下部熱圏 半年周期振動 大気波動

## 1. 研究開始当初の背景

成層圏冬季では、太陽が当たらない寒冷な極夜域を中心に低気圧性の極渦が形成され、周囲に強い偏西風の極夜ジェットが作られる。対流圏で励起されるプラネタリー波は、西風極夜ジェット中を上方に伝播する。プラネタリー波の振幅がある限度を超えて大きくなると、1週間程度の間極渦が崩壊する。極域は一時的に高気圧性渦に支配され、西風極夜ジェットは大幅に弱くなり、しばしば東風に置き換わり、極域成層圏の気温は40度以上も上昇する。この現象を成層圏突然昇温といい、小規模なものは一冬に数回、大規模なものは1、2年に1回ほどの頻度で生じ、地表付近にまで影響が及ぶこともある。現在認められている理論では、50km付近の成層圏界面あたりでプラネタリー波が減衰、または砕波することで発生し、それに伴い、赤道域で上下から収束して極に向かい、極域で上下へと発散する大規模な子午面循環を駆動するとされている(図1)。

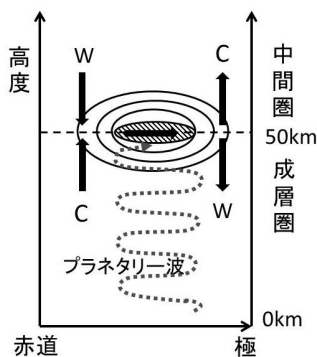


図1. 成層突然昇温の模式図 (Andrews 他, 1987の図を改変)。鉛直伝播したプラネタリー波が陰影域で減衰、矢印のような子午面循環を形成し、下降域で昇温(W)、上昇域で降温(C)する。極域の下降域の昇温(W)が突然昇温。

一方、近年の衛星観測に基づき、突然昇温前後で生じる西風極夜ジェットの東風への急変は、対流圏から中間圏にまで広がっていること、50km付近の昇温の発生に先行して90km付近の中間圏界面付近に東風が出現し、それが下降していしていること、突然昇温後の西風極夜ジェットの回復も90km付近から始まっていることなどが報告されている。これらの特徴は最新の衛星データで初めて得られたもので、既存の理論では説明できないものである。また、観測事例自体がほとんど無いため、同じ特徴が他の事例で見えるのかもどうか不明である。さらに、突然昇温によると見られる影響が、遠く超高層の磁気圏にまで及んでいるという報告がある。しかしながら現在の理論では、図1のように、下部中

間圏以下で予想される子午面循環の概略が示されているだけであり、それ以上で何が生じているのかは未解明の状況である。

### <引用文献>

Andrews, D. G., J. R. Holton, and C. B. Leovy: Middle Atmosphere Dynamics, Elsevier, 489 pp, 1987.

## 2. 研究の目的

上記を受け、本研究では、成層圏突然昇温生起時における突然昇温と中間圏・下部熱圏大気の力学結合の過程を、過去の事例解析と様々な数値実験に基づき説明することを目的とする。成層圏突然昇温と中間圏・下部熱圏域の大気力学結合過程が明らかとなることで、突然昇温生起機構そのものに対する新しい大気科学的視点を提起できることに加え、それより上の電離圏、磁気圏における現象説明にも貢献できる点で、本研究は大きな意義を持つ。

## 3. 研究の方法

成層圏突然昇温そのものは、図1の通りプラネタリー波と成層圏の平均流の相互作用で生起すると考えられるが、それに伴う大循環の変動は、プラネタリー波自身はもちろん、重力波、大気潮汐波など様々な大気波動の活動度の変動をもたらすと考えられる。こうして生じた大気波動の変動は、成層圏に加え、中間圏や下部熱圏の大循環の変動にフィードバックするであろう。従って、まず突然昇温の特徴を観測データから調べ、それに伴う各種波動の活動度の解析を行う必要がある。その結果を、解像度、対象領域が異なる2種類の大気大循環モデルによる数値シミュレーションにより検証する。

データ解析においては、ヨーロッパ中期予報センターのERA Interim、気象庁のJRA-55などの長期再解析データに加え、90kmまでをカバーするAura衛星搭載のMLSや、120kmまでをカバーするTIMED衛星搭載のSABERによる観測データを用いて力学的解析を行う。大気大循環モデルについては、熱圏上端まで含む統合的な大気大循環モデルGAIAと、高度約150kmまでの下部熱圏以下を扱う高解像度の大気大循環モデルJAGURを用いる。

## 4. 研究成果

ここでは、得られた成果のうち、(1)成層圏突然昇温時の中間圏力学場変動に関する成果と、(2)赤道域半年周期振動と成層圏突然昇温に関する成果について記す。

(1) 成層圏突然昇温時の中間圏力学場変動

図2は、2009年1月と2010年1月の成層圏突然昇温を含む4カ月間について、北緯70-82度における帯状平均気温と北緯55-70度における帯状平均東西風の時間・高度断面である。2009年の事例は極渦分裂型、2010年の事例は極渦変位型の突然昇温であった。前者で見られる突然昇温生起時の中間圏の冷却は、後者でもやや弱いが確認できる。東西風に関しては、前者では中間圏で、突然昇温に先行する東風への反転が見られるのに対し、後者では成層圏・中間圏同時の強い東風加速が生じており、さらに、その東風極大の高度は前者より高高度となっている。

2009年の事例について、上部中間圏で東風が先行して現れた原因を明らかにするため、力学場を詳細に解析したところ、突然昇温直前の上部成層圏から下部中間圏にかけての平均風変動の結果、下部中間圏の大循環場が順圧もしくは傾圧不安定な状態となり、それにより励起された大規模な不安定波が上部中間圏に伝播し、東風出現に寄与していることがわかった。

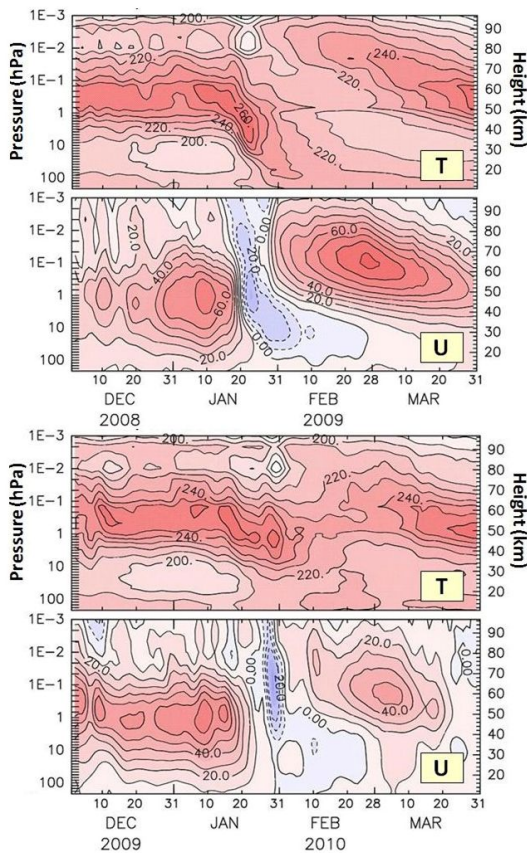


図2. 2009年1月(上)と2010年1月(下)の突然昇温前後の期間における、70-82°Nでの帯状平均気温と55-70°Nでの帯状平均東西風の時間・高度断面図。温度場については色が濃い領域ほど高温を表し、帯状平均東西風については、暖色系が西風、寒色系が東風を表す。気温と東西風の等値線間隔はそれぞれ10K、10m/sである。

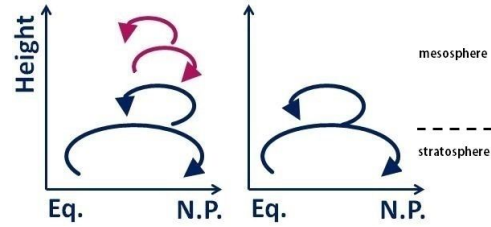


図3.(左)2009年の成層圏突然昇温に伴う子午面循環像と、(右)従来考えられていた子午面循環像の模式図。2009年の事例では、上部中間圏で不安定波が引き起こす東風に伴い形成される子午面循環(紫色)と、その下の、従来から考えられてきたプラネタリー波による子午面循環(黒色)の2重構造になっている。

また、不安定波による上部中間圏での東風加速の結果、図3に示すような、従来考えられていたプラネタリー波が引き起こす子午面循環とは別の子午面循環が上方に形成されることも初めて示された。

それに対して2010年の事例では、対流圏起源のプラネタリー波が、ほぼ成層圏と同時に出現する中間圏の東風形成に、直接的に寄与していることがわかった。

また、大気大循環モデルを用いた数値シミュレーションでは、中間圏における東風先行の特徴を再現することができなかった。

以上のように、成層圏突然昇温生起前の中間圏域変動の特徴が年ごとに大きく異なることと、上部中間圏での東風の先行出現に対しては中間圏内で生じる不安定波の寄与が大きいという、新しい成果を得ることができた。

(2) 赤道域半年周期振動と成層圏突然昇温

赤道域中層大気には、平均東西風が半年周期で振動する半年周期振動(以下SAO)という現象が存在する。この現象は、成層圏界面付近(SSAO)と中部中間圏(MSAO)に独立した振幅の極大を持ち、両者はほぼ逆位相の関係にあることが知られている(図4)。プラネタリー波の増幅を契機として発現する成層圏突然昇温時には、大規模な力学場の変動が引き起こされ、成層圏・中間圏を含めた赤道域の循環にも大きな影響を及ぼす可能性がある。そこで本研究では、SAOと成層圏突然昇温の関係について調べた。

図5にSAOが極大となる1月に突然昇温が生じた近年の4つの事例を重ね合わせた解析の結果を示す。上図は赤道上における季節進行からの気温偏差、下図は同じく東西風偏差のそれぞれ高度時間断面図で、Day0は突然昇温最盛日に当たる。

図5上より、突然昇温時に上部成層圏で気温が負偏差、下部中間圏では正偏差となり、

これらは、突然昇温時に形成される子午面循環の赤道域上昇流と下降流による温度変化（図1）に対応していることがわかる。図5下の東西風偏差を見ると、この時期に成層圏界面付近で負偏差（東風加速）、中部中間圏では正偏差（西風加速）となり、これら温度偏差と東西風偏差は、赤道域の温度風の関係を満たしている。2つの領域の東西風加速傾向は、SSAOとMSAOそれぞれの季節進行の位相（図4）と一致することから、突然昇温は、半年周期振動の振幅極大期にはSSAOとMSAO両者の振幅を増大させる方向にはたらくことがわかる。

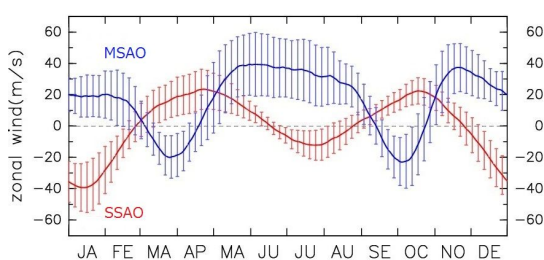


図4. 赤道域の解析期間で平均したSSAO高度(1hPa; 赤線)とMSAO高度(0.01hPa; 青線)における帯状平均東西風の気候値的季節進行(エラーバーは標準偏差で5日おきに示している)。

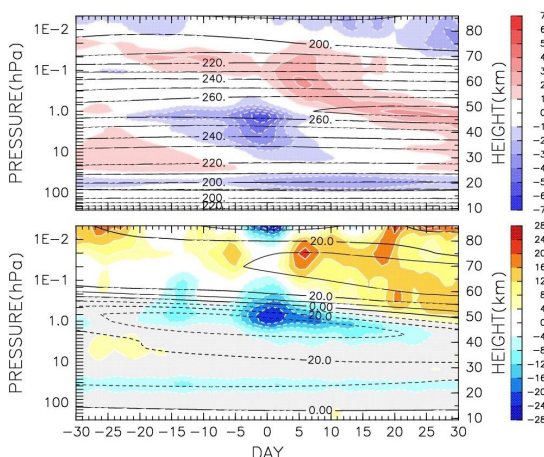


図5. SAO極大期に生じた4つの突然昇温事例の重ね合わせ解析における、赤道域の帯状平均気温偏差(上図)と東西風偏差(下図)の高度時間断面図。暖色系が正の偏差、寒色系が負の偏差を表す。等値線は重ね合わせに対応する気候値的季節進行を示す。Day0は突然昇温最盛日である。

一方、2月から3月の時期は、図4に示したようにSAOの遷移期にあたり、この時期に突然昇温が生じると、上記と同様の東西風加速が、SAOの遷移を遅らせる方向にはたらくことが示唆される。

以上、成層圏突然昇温生起により引き起こ

される赤道域半年周期振動の振幅変調の観測的事実を示したのは世界で初めてのことであり、本研究で得られた大きな成果の一つと言える。

また、図5より、下部中間圏の昇温とMSAO領域の西風加速は、上部成層圏の降温とSSAO領域の東風加速に対し6日程度遅れて生じていることがわかる。このことより、下部中間圏の昇温には、上述した成層圏突然昇温に伴う子午面循環強化以外の要因、例えばSSAO域の東風強化に伴う重力波の活動度の変化を受けた遅延効果なども関与している可能性が考えられ、この点については今後さらに解析を進める必要がある。

また、大気大循環モデルを用いた数値シミュレーションでは、SSAOの特徴は再現することができたが、MSAOは非常に弱くしか再現することができなかった(図は省略)。特に中間圏より上の低緯度域に関して、より現実的な大気大循環モデルの開発が今後の課題である。

## 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14件)

Y. Kawatani and K. Hamilton: Weakened stratospheric Quasibiennial Oscillation driven by increased tropical mean upwelling, *Nature*, 査読有, 497, 2013, 478-481, doi:10.1038/nature12140.

C. Iida, T. Hirooka, and N. Eguchi: Circulation changes in the stratosphere and mesosphere during the stratospheric sudden warming event in January 2009. *J. Geophys. Res. Atmosphere*, 査読有, 119, 2014, doi:10.1002/2013JD021252.

S. Noguchi, H. Mukougawa, T. Hirooka, M. Taguchi, and S. Yoden: Month-to-month predictability variations of the winter-time stratospheric polar vortex in an operational 1-month ensemble prediction system. *J. Meteor. Soc. Japan*, 査読有, 92, 2014, 543-558, doi:10.2151/jmsj.2014-603.

Y. Miyoshi, H. Fujiwara, H. Jin, and H. Shinagawa: Impacts of sudden stratospheric warming on general circulation of the thermosphere. *J. Geophys. Res. Space Physics*, 査読有, 120, 2015, doi:10.1002/2015JA021894.

T. Ichimaru, S. Noguchi, T. Hirooka, and H. Mukougawa: Predictability

changes of stratospheric circulations in Northern Hemisphere winter. J. Meteor. Soc. Japan, 査読有, 94, 2016, 7-24, doi:10.2151/jmsj.2016-001.

[学会発表](計 80 件)

Y. Miyoshi, H. Jin, H. Fujiwara, and H. Shinagawa: Vertical coupling of the atmosphere-ionosphere system obtained by the GAIA model simulation. IAGA 12th Scientific Assembly, 2013 年 8 月 28 日, Merida (Mexico), 招待講演.

T. Hirooka: Atmospheric science research in Kyushu University. The 3rd International Congress on Natural Sciences, Niigata, Japan, 2013 年 10 月 13 日, 新潟大学 (新潟県・新潟市), 招待講演.

Y. Kawatani, J. N. Lee, and K. Hamilton, Interannual variations of stratospheric water vapor in MLS observations and climate model simulations. PANSY meeting, 2014 年 3 月 11 日, 国立極地研究所 (東京都・立川市), 招待講演.

Y. Miyoshi, H. Fujiwara, H. Jin, and H. Shinagawa, Impact of stratospheric sudden warming on the general circulation in the MLT region simulated by a whole atmosphere model. 26th IUGG General Assembly, 2015 年 6 月 27 日, Prague (Czech Republic), 招待講演.

T. Handa, G. Liu, T. Hirooka, and N. Eguchi: Interannual changes of stratospheric ozone as revealed by satellite observations and their relation with dynamical fields. AOGS2015, 2015 年 8 月 3 日, Singapore (Singapore), 招待講演.

廣岡俊彦, 向川均: 北半球冬季における成層圏突然昇温の生起と予測可能性について. 地球電磁気・地球惑星圏学会第 138 回総会及び講演会, 2015 年 11 月 1 日, 東京大学 (東京都・文京区), 招待講演.

[図書](計 1 件)

廣岡俊彦: 成層圏突然昇温. 「低温と環境の科学事典」, 河村公隆他編, 朝倉書店, 東京, 14-15, 2016 年, 印刷中.

[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

<http://fx.geo.kyushu-u.ac.jp/>

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

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

河谷 芳雄 (KAWATANI, Yoshio)  
海洋研究開発機構・統合的気候変動予測研究分野・主任研究員  
研究者番号: 00392960

岩尾 航希 (IWAO, Koki)  
熊本高等専門学校・共通教育科(八代キャンパス)・准教授  
研究者番号: 80396944

(3) 連携研究者

渡辺 真吾 (WATANABE, Shingo)  
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: 50371745