

国際共同観測による北極成層圏突然昇温に伴う南北両半球結合の研究

An International Observation Campaign for a Study of Interhemispheric Coupling Initiated by Sudden Stratospheric Warmings in the Arctic

*佐藤 薫¹、富川 喜弘^{2,3}、堤 雅基^{2,3}、高麗 正史¹、西村 耕司^{2,3}*Kaoru Sato¹, Yoshihiro Tomikawa^{2,3}, Masaki Tsutsumi^{2,3}, Masashi Kohma¹, Koji Nishimura^{2,3}

1.東京大学 大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻、2.国立極地研究所、3.総合研究大学院大学

1.Department of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science, The University of Tokyo,

2.National Institute of Polar Research, 3.The Graduate University for Advanced Studies

Recent observational and modelling studies suggest that the Northern and Southern Hemispheres of the earth atmosphere are potentially coupled by the Lagrangian mean flow in the mesosphere modulated by waves interacting with the mean flow. However, observations of modulated wave and flow fields which are needed for quantitative understanding of the interhemispheric coupling are not sufficient. Simultaneous observations of gravity waves at various locations are most important because they are a main driver of the Lagrangian mean flow in the mesosphere.

With the start of full system observation by the PANSY radar in the Antarctic in March 2015, a global mesosphere-stratosphere-troposphere (MST) radar network extending from the Arctic to the Antarctic has been realized. The MST radars are able to observe wind vectors with fine temporal and vertical resolutions including vertical wind components in the troposphere, stratosphere and mesosphere, although an observational gap of the middle and upper stratosphere remains. Thus, the characteristics of small-scale or short-period wave motions including gravity waves and the momentum fluxes associated with these waves can be estimated with a good accuracy.

In addition, recent high-resolution general circulation models enable an explicit simulation of gravity waves under ideal and/or climatological boundary conditions and allow us to examine the momentum budget in the MST region including gravity waves, although their resolution is currently not sufficient to resolve the entire gravity wave spectrum. Real atmosphere simulations utilizing such high-resolution models are still a challenge for the MST region. However, if such real atmosphere simulations are successful, they will help quantitative interpretation of the dynamical fields observed by the MST radar network, and the observations will provide invaluable validation data for the model improvement.

Therefore we will examine the interhemispheric coupling of the earth atmosphere through a combination of simultaneous observations by networking the MST radars over the world and high-resolution model simulations of the observed atmosphere. This is an official project, ICSOM, for SCOSTEP, but it is closely related to SPARC. The first international observation campaign was successfully performed during a time period from 22 January-17 February, 2016 when two minor warming occurred in the Arctic stratosphere. Seven MST radars and many other radars and optical instruments providing complementary observational data were operated. More than 30 scientists in eight countries are participated in this project. A preliminary result from this observation campaign will be presented.

キーワード：南北半球結合、中層大気、成層圏突然昇温、重力波、MSTレーダー、大気大循環

Keywords: interhemispheric coupling, middle atmosphere, sudden stratospheric warming, gravity waves, mesosphere-stratosphere-troposphere radars, general circulation

南極大型大気レーダーPANSYで観測された下部対流圏鉛直風擾乱の解析

Characteristic of Vertical Winds Fluctuations in the Lower Troposphere at Syowa Station in the Antarctic Revealed by the PANSY Radar

*南原 優一¹、佐藤 薫¹、堤 雅基²、高麗 正史¹

*Yuichi Minamihara¹, Kaoru Sato¹, Masaki Tsutsumi², Masashi Kohma¹

1.東京大学 理学系研究科 地球惑星科学専攻、2.国立極地研究所

1.Department of Earth and Planetary Science Graduate School of Science The University of Tokyo,

2.National Institute of Polar Research and The Graduate University for Advanced Studies

昭和基地 (39.59°E, 69.0°S) に設置されたPANSYレーダーは、2011年3月に初観測に成功した後、現在に至るまで連続観測を続けている。PANSYレーダーは鉛直風を含む3次元風速の鉛直プロファイルを高精度高分解能に観測することが可能である。本研究ではPANSYレーダーによる2012年7月から2015年6月までの3年間の長期連続観測データを用いて、南極域の下部対流圏の鉛直風と運動量鉛直フラックスの特徴について統計的な解析を行った。まず、周期約30日から8分までの広い帯域に亘る周波数スペクトルを求めた (図)。スペクトルは周波数のべき乗に比例する関係をしており、3つの周波数領域でその関係は異なることが分かった。また、周波数のべき指数が切り替わる周波数は、水平風と鉛直風で異なることも分かった。次に、運動量鉛直フラックス、鉛直風のバリエーションを周期1日から2時間の長周期成分と、周期2時間から8分の短周期成分とに分けて解析をしたところ、運動量鉛直フラックスは長周期成分が、鉛直風のバリエーションは短周期成分がより大きいという結果が得られた。

さらに、下部対流圏の鉛直風擾乱を詳しく解析したところ、南北にリッジを持つ地形に強制された地形性の重力波である可能性が極めて高いことが分かった。その根拠は主に以下の3つの観測事実である。1つ目は、地表付近の東西風が強いときに、強い鉛直風擾乱が下部対流圏で観測されることである。2つ目は、鉛直風擾乱の上限が、地形性重力波のクリティカルレベルと対応する東西風が 0 ms^{-1} となる高度と一致していることである。3つ目は、鉛直風擾乱が活発な時の周波数スペクトルはクリティカルレベルより上で、広い周波数帯に亘り不連続的に小さくなっていることである。この特徴は背景風の変化に伴う山岳波の位相変調で説明ができる。

キーワード：大型大気レーダー、極域大気

Keywords: MST Radar, Polar Atmosphere

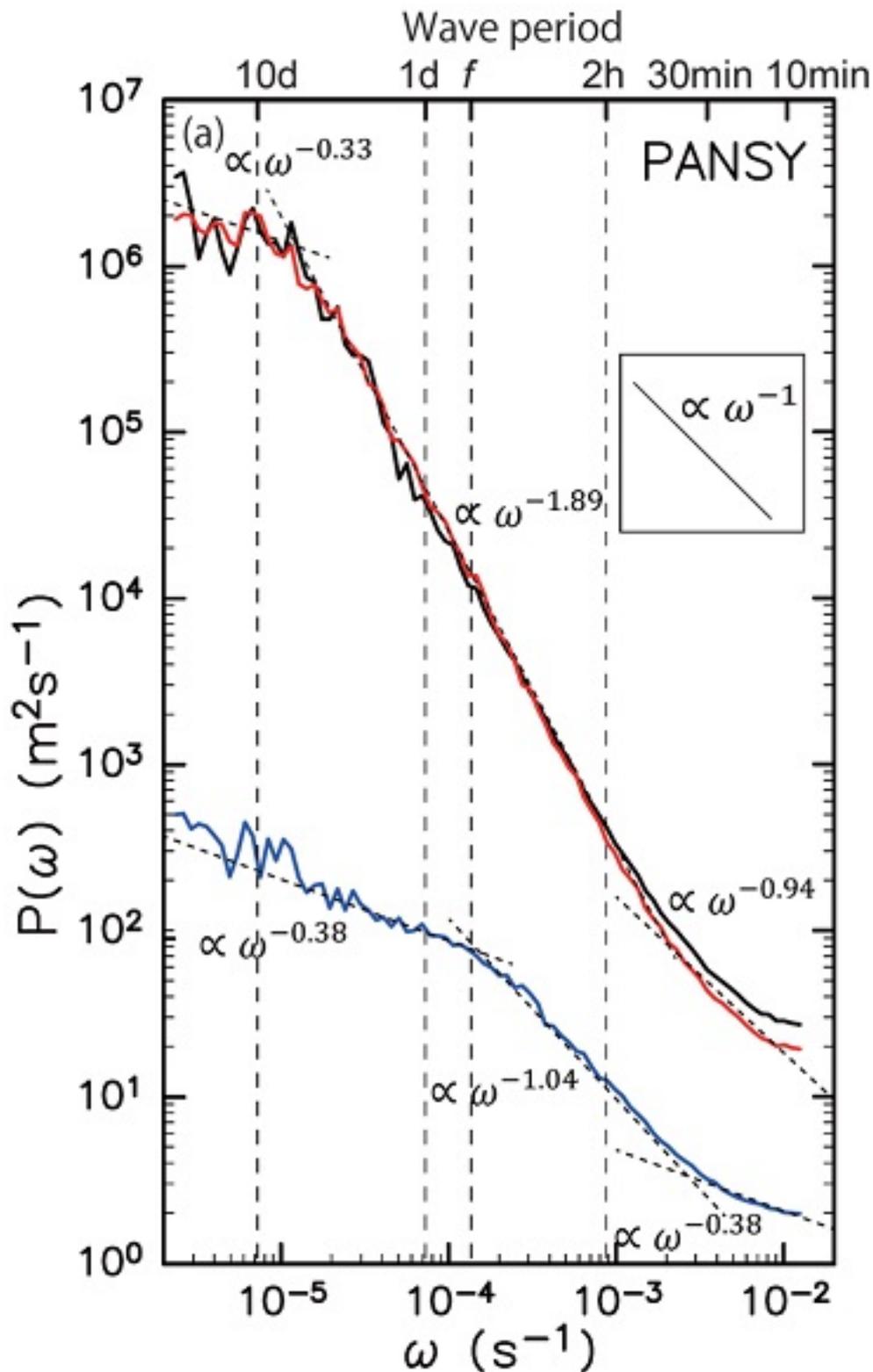


Figure : The frequency power spectra of zonal wind (black), meridional wind (red), and vertical wind (blue) fluctuations by PANSY radar. Both axis are log-scale.

南極昭和基地大型大気レーダーによって観測された中間圏重力波

Inertia-gravity waves in the mesosphere observed by the PANSY radar

*澁谷 亮輔¹、佐藤 薫¹、堤 雅基^{2,3}、富川 喜弘^{2,3}、佐藤 亨⁴、西村 耕司²、中村 卓司²、高麗 正史¹

*Ryosuke Shibuya¹, Kaoru Sato¹, Masaki Tsutsumi^{2,3}, Yoshihiro Tomikawa^{2,3}, Toru Sato⁴, Koji Nishimura², Takuji Nakamura², Masashi Kohma¹

1.東京大学 大学院理学系研究科、2.国立極地研究所、3.総合研究大学院大学、4.京都大学 情報学研究科
1.Graduate School of Science, The University of Tokyo, 2.National Institute of Polar Research,
3.University for Advanced Studies (SOKENDAI), 4.Department of Communications and Computer
Engineering, Kyoto University

The PANSY (Program of the Antarctic Syowa MST/IS radar) radar installed at Syowa Station (39°E, 69°S), the first MST/IS radar in the Antarctic, provides vertical profiles of three-dimensional wind vectors with fine height and time resolutions in the troposphere, stratosphere and mesosphere. We performed the first successful observation with a complete system of the PANSY radar in 16–24 March 2015. During this observation period, strong wave-like wind disturbances propagating phases downward were observed in the mesosphere. Their zonal wind amplitudes, vertical wavelengths and vertical phase velocities were estimated at about 30 m/s, 13 km and -0.3 m/s, respectively. This means that wave periods are about 11 h. We newly developed a grid configuration which were fine and equally-spaced only for high latitudes of the Southern Hemisphere, and performed a simulation using NICAM (a Nonhydrostatic ICosahedral Atmospheric Model) with the newly-developed grids. We successfully simulated strong wind disturbances similar to the PANSY radar observations with wave periods from 10–13 h in the mesosphere. First we examined amplitudes of the diurnal and semi-diurnal migrating tidal components and those of gravity wave components with horizontal wavelengths smaller than 1000 km as frequently examined by previous studies in the model-simulated wind field. Their amplitudes were much smaller than the observation, suggesting that dominant wave-structures in the mesosphere were not due to migrating tides nor small-scale gravity waves. The remaining components have quite similar structure and amplitudes to the observations. We estimated wave parameters of five dominant wave packets simulated near Syowa Station. Wave parameters of each wave packet were estimated as was consistent with the linear theory of hydrostatic inertia-gravity waves. Horizontal wavelengths are about 2000 km, which is also consistent with those estimated for the wavelike disturbances observed by the PANSY radar assuming that they are due to inertia-gravity waves. We examined propagation and sources of these wave packets using backward ray tracing method. It was suggested that a wave packet simulated at 00 UTC 19 March at 40° E in the mesosphere was generated by spontaneous radiation from the imbalance of polar night jet at the height of 50 km, while a wave packet simulated at 09 UTC 21 March at 120° W in the mesosphere was generated by spontaneous radiation from the imbalance of polar front jet at the tropopause.

キーワード：大気重力波、中間圏

Keywords: Atmospheric gravity waves, mesosphere

北半球突然昇温に着目したアンサンブルカルマンフィルターによるデータ同化と予報実験

A study on data assimilation using the ensemble Kalman filter and simulation of a sudden stratospheric warming

*小新 大¹、佐藤 薫²、宮崎 和幸³

*Dai Koshin¹, Kaoru Sato², Kazuyuki Miyazaki³

1.東京大学 理学部 地球惑星物理学科、2.東京大学 大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻、3.海洋研究開発機構

1.Department of Earth and Planetary Science, School of Science, The University of Tokyo,

2.Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo, 3.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

中層大気には、成層圏突然昇温や赤道準二年周期振動など重要な現象が多く存在する。これらの現象は、成層圏や中間圏の赤道から極へ、夏極から冬極へ向かう大循環を通して全球に影響を与えることが示唆されている。また、技術の進歩により観測の解像度や数値モデルの分解能も、共に向上している。各気象機関で作成されている気候データには、成層圏までの観測データが同化されているが、中間圏についてのデータ同化はまだ一般的ではない。本研究では、地上から中間圏にわたる観測データを同化し、中層大気の現実的な場を再現、予測するための基礎的な検討を行った。

まず、モデルトップが成層圏上部（～40km）である全球モデルMIROCを用いて、成層圏の衛星観測データの同化の有効性を調べた。従来型観測によるデータとしてはNCEPの提供するPREPBUFR（地上・海上・航空機・ラジオゾンデ・ウィンドプロファイラ観測等が含まれる）を、衛星観測による成層圏データとしてNASAが提供するMLSによる気温リトリーバルを使用した。モデルの解像度はT42（水平約270km）、鉛直32層である。データ同化手法として、アンサンブルカルマンフィルター(EnKF)を用い、2014年2月始めの北半球成層圏突然昇温が発生した時期の解析値を作成した。北半球突然昇温は非線形性が高く一般に予測が困難な現象として知られる。

解析値は主に2種類、従来型データ（PREPBUFR）のみを同化したものと、地上に加えて中層大気衛星観測データ（MLS）も同化したものを作成した。どちらの場合でも、突然昇温の発生を気候データと同じタイミングで再現する解析値が得られた。解析値の精度に関しては、中層大気において、従来型データのみよりも、衛星観測による中層大気データも同化したほうがより高いことを確認した。また、アンサンブルメンバーの標準偏差を調べたところ、衛星観測データの同化の効果は、成層圏でより大きい（標準偏差が小さい）ことがわかった。

また、突然昇温発生より数日前の2月1日時点でのデータ同化により得られた解析値を初期値として、アンサンブル予報実験を行った。これも、衛星データも同化した解析値を初期値とするほうが、従来型データのみよりも突然昇温を高精度で予測できた。その理由を解析したところ、両者は対流圏での波活動については特に差はないが、成層圏の波の活動に大きな違いが見られることがわかった。これは、成層圏の入り口である対流圏界面付近の背景場の構造が、密で全球をカバーする衛星観測データの同化によって、より現実的に与えられ、対流圏からのプラネタリー波の伝播が精度よく再現できたためと考えられる。今後は、データ同化計算における各種パラメータを最適化するとともに、トップを高くしたモデルを用いる影響を調査し、高精度な中層大気データ同化解析の実現を目指す。

キーワード：データ同化、突然昇温、アンサンブルカルマンフィルター

Keywords: data assimilation, sudden stratospheric warming, ensemble Kalman filter

JRA-55ファミリーデータにおける中高緯度成層圏の大規模力学変動の比較

Comparison of large-scale dynamical variations in the extratropical stratosphere among the JRA-55 family datasets

*田口 正和¹

*Masakazu Taguchi¹

1. 愛知教育大学

1. Aichi University of Education

This study seeks to compare the “JRA-55 family” datasets in terms of the extratropical stratospheric and tropospheric circulation in both hemispheres. In particular, we explore large-scale dynamical variations such as stratospheric sudden warmings (SSWs) during NH winter and SH spring when the extratropical stratosphere is dynamically active.

The JRA-55 family consists of three datasets: a main product of the JRA-55 reanalysis data (referred to as STDD below), and two sub-products of JRA-55C and JRA-55AMIP (referred to as CONV and AMIP, respectively). CONV assimilates only conventional observations, whereas AMIP runs the same numerical weather prediction (NWP) model without assimilation of observational data. Kobayashi et al. (2014) reported preliminary results from these data, such as cold bias in the SH winter upper stratosphere (i.e., strong polar night jet bias) for CONV and AMIP compared to STDD.

Our comparison of AMIP to STDD reveals characteristic features of AMIP in frequency and vortex morphology of major SSWs during NH winter: AMIP shows a much smaller frequency, and has only vortex displacement events. These differences are contributed by two factors. First, the fixed threshold, or zonal wind reversal, for the major SSWs is disadvantageous to AMIP where the polar night jet is strong more often. Furthermore, the zonal wind response to planetary wave activity bursts in the lower stratosphere of a similar strength is weaker in AMIP than in STDD. This is particularly the case when wave 2 plays an important role. As for SH spring, large variability occurs later in AMIP than in STDD; e.g., AMIP exhibits no zonal wind reversal before late October

It is also found that CONV reproduces most of the DJF major SSWs identified in STDD, although some cases are identified a few days later or missed. In SH spring, CONV misses the major SSW in September 2002, as it, albeit slightly, underestimates the zonal wind deceleration. These differences of CONV would be understood by the bias of the NWP model (as seen in AMIP) and the paucity of data assimilation as hypothesized by Kobayashi et al. (2014).

キーワード：JRA-55ファミリーデータ、成層圏突然昇温

Keywords: JRA-55 family datasets, Stratospheric sudden warmings

非定常な波強制に対する中層大気2次元及び3次元循環の形成

Formation of two dimensional and three dimensional circulation responding to unsteady wave forcing in the middle atmosphere

*林 佑樹¹、佐藤 薫¹、安田 勇輝¹

*Yuuki Hayashi¹, Kaoru Sato¹, Yuki Yasuda¹

1.東京大学理学系研究科

1.School of science, The University of Tokyo

中層大気ラグランジュ的の子午面循環は、オゾン等の物質を輸送するだけでなく、大気温度構造に力学的に影響する。この子午面循環は、主に大気波動による遠隔的な運動量の再分配によって駆動されている。従来の研究では、Haynes et al. (1991) のダウンワードコントロールの原理を用いた解析のように「定常の仮定」が多く用いられてきた。しかし、一般に波強制は非定常であり、「定常の仮定」を用いた議論には限界がある。たとえば成層圏突然昇温では、波強制の時間スケールが短く、子午面循環は定常を仮定した場合と異なる応答を示すことが予想される。このような、過渡的現象を解析するためには、「遅い」変数（線形化渦位 q ）の記述する運動だけでなく、「速い」変数（水平発散 δ と非地衡渦度 γ ）の記述する運動の時間変化も含む方程式系を用いなければいけない。本研究の目的は、非定常な波強制に対する循環の形成過程を、「速い」変数の時間変化も含めて理論的に明らかにすることである。そこで、本研究では、まず Boussinesq 方程式系を用いて、非定常で東西一様な波強制に対する2次元の形成過程を調べ、次に理論的に導出したバランス方程式を用いて、非定常で東西非一様な波強制に対する3次元の循環形成を理論的に調べることにした。

大気の大規模運動は Rossby 数が十分小さいため、強制に対する応答として線形応答が支配的であると考えられる。線形応答を調べるのに適した手法の1つに Green 関数の方法がある。ここで、Green 関数とはデルタ関数型の強制に対する応答を記述する関数である。本研究では Green 関数を解析的な手法によって求め、循環を記述する変数である水平発散 δ と非地衡渦度 γ 、地衡流を表す変数である線形化渦位 q の時間発展を求めることにした。主に東西方向の運動方程式における波強制に対する応答を詳しく解析したが、南北方向の強制や熱力学の方程式における非断熱加熱に対する応答についても簡単に議論を行っている。

まず、東西一様な強制に対する応答を解析した。時間的に一定な強制に対する定常解は、鉛直2細胞型の循環となることがわかった。強制の強さを時間方向にステップ関数的に変化させると、過渡的な応答として、広い帯域に亘る振動数を持つ大規模な重力波が放射されるが、最終的には慣性振動と準定常な子午面循環が残ることがわかった。この子午面循環は定常解とほぼ一致していた。また、循環形成の時間スケールに着目した解析を行った。その結果、その依存性は次元解析による理論的予想と調和的であり、過渡的に生じる重力波の群速度と強制の空間構造がその時間スケールをほぼ決定していることがわかった。また、強制の強さがゆっくりと変化する場合についても解析を行った。強制の時間スケールが慣性周期より長い場合は、重力波は発生せず、循環は波強制の変化に隷属して緩やかに変化することがわかった。これは子午面循環が各時刻で「定常の仮定」により得られた循環場に一致することを示している。また、与えられた波強制に対して、東西風加速とコリオリトルクにどのように分配されるかも調べた。その結果、分配は強制の形状に依存すること、その特徴は次元解析により理論的に説明可能であることがわかった。

次に、強制が東西非一様な3次元構造を持つ場合を考えた。この場合、過渡的な応答としてロスビー波の放射が予想される。重力波とロスビー波の時間スケールは大きく異なるため、ロスビー波に焦点をあてて解析することにした。すなわち、強制の時間スケールが慣性周期より大きく、「速い」変数で記述される運動が完全に隷属している場合を考えた。Leith (1980) でも用いられたバランス方程式の手法を用いて、「速い」変数の時間変化を除いた支配方程式系を導いた。この方程式系では、「遅い」変数である線形化渦位 q で記述される地衡流は時間発展を陽に解くのに対し、「速い」変数である水平発散 δ と非地衡渦度 γ で記述される循環は、強制項や β 項によって診断的に求められる。これらの式を用いて理論解析を行った。 β 項がない場合、地衡流の定常解は強制付近に局在した東西対称な場となるが、 β 項が存在する場合、地衡流は東西非対称で強制の西側に局在する構造となった。また、このような応答の β 効果依存性は、「遅い」変数である線形化渦位 q だけではなく、診断的に求められる「速い」変数である水平発散 δ と非地衡渦度 γ にも見られた。時間依存性がス

テップ関数型の強制に対しては、ロスビー波の過渡的応答が強く見られ、時間経つにつれて東西波数の小さな構造が先に消えていくことがわかった。また、最終的に定常に至るまでの時間スケールには、線形緩和の強さ κ に依存することがわかった。

キーワード：中層大気、循環、波強制

Keywords: middle atmosphere, circulation, wave forcing

成層圏の物質輸送の3次元描像及びオゾン分布に関する研究

A study of three dimensional structure of stratospheric material transport and ozone

*木下 武也¹、佐藤 薫²*Takenari Kinoshita¹, Kaoru Sato²

1.情報通信研究機構、2.東京大学 大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻

1.National Institute of Information and Communications Technology, 2.Department of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science, The University of Tokyo

緯度高度断面における波と平均場の相互作用を記述する変形オイラー平均 (TEM) 系は、これまで多くの研究に用いられてきた。その結果、成層圏のブリューワ・ドブソン循環はプラネタリー波・傾圧波・大気重力波、中間圏の夏極から冬極に流れる子午面循環は主に大気重力波によって駆動されていることがわかっている。しかしながら上記の循環を含む 空気塊の経度方向の流れや、子午面循環の経度依存性 については解明されていないことが多く、TEM系を3次元に拡張する研究が行われてきた。一方でTEM系は、地表面付近の物質輸送や不安定波に伴う残差流を正確に記述できない問題が指摘されている。温位面上の質量重みつき平均 (MIM) 系は、上記課題を克服した方程式系であり、最近MIM系を3次元に拡張した研究が行われている。そこで本研究では、ERA Interim再解析データを使用し、3次元TEM系及びMIM系を用い、成層圏のブリューワ・ドブソン循環の3次元構造を調べる。続いて、南半球成層圏のオゾン分布における擾乱に伴う物質輸送について議論する。

キーワード：残差流、オゾン、子午面循環

Keywords: residual mean flow, ozone, meridional circulation

平均子午面循環の3次元構造とその強制力

Three dimensional structure of mean meridional circulations and their forcing

*菅野 湧貴¹、岩崎 俊樹¹*Yuki Kanno¹, Toshiki Iwasaki¹

1.東北大学

1.Tohoku University

成層圏における東西平均子午面循環はBrewer-Dobson循環と呼ばれ、熱帯地域で上昇、中緯度で極向き、中高緯度で下降する。等温位面に沿って東西平均をすると、冬半球の対流圏中高緯度にも直接循環を描くことができる。これらの平均子午面循環について、その経度方向の違いは十分に理解されていない。そこで本研究は、温位面での質量重み付き時間平均法を用いて、成層圏・対流圏における平均子午面循環の3次元構造を明らかにする。

温位面での質量重み付き時間平均法は、温位面での質量重み付き帯状平均法 (Iwasaki, 1989) の東西平均を時間平均にしたものである。温位座標上で質量重みを掛けて時間平均した南北風、温位の時間変化を描くことで平均子午面循環の3次元構造を明らかにする。東西方向の運動方程式を温位座標での質量重み付き時間平均法で書くと、コリオリ強制項、移流項、Eliassen-Palm flux (EP flux)発散項、その他強制項が表れる。また、EP flux発散項は、定常波動の形状抵抗、非定常波動の形状抵抗、レイノルズ応力項の3つに分けられる。運動方程式の収支解析を行うことで、平均子午面循環にどの項が寄与するかを明らかにする。

冬季北半球の北緯45度における質量重み付き時間平均南北風は、対流圏で波数3、成層圏で波数2の構造を持つ。気圧座標での単純時間平均南北風と比べると、特に対流圏下層で差が大きい。対流圏下層では、質量重み付き時間平均南北風は北風成分が強く、これは高緯度からの気候学的な寒気の流出を表す。成層圏での南北風の分布は単純時間平均とよく似ている。運動方程式の収支から質量重み付き時間平均南北風に寄与する項を調べると、EP flux発散項の中の定常波動による形状抵抗の項がおおよそコリオリ強制項と釣り合っている。

キーワード：子午面循環、温位座標

Keywords: Meridional circulation, Isentropic coordinate

アジアモンスーン高気圧に伴うメソスケールの擾乱の力学的特徴と成層圏・対流圏間の物質混合への影響

Dynamical characteristics of mesoscale disturbances around Asian monsoon anticyclone and its influence on Stratosphere-Troposphere exchange

*雨宮 新¹、佐藤 薫¹

*Arata Amemiya¹, Kaoru Sato¹

1. 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻

1. Graduate School of Earth and Planetary Science, Tokyo University

成層圏・対流圏間の物質輸送と混合に関する近年の研究では、北半球夏季の上部対流圏・下部成層圏(UTLS)領域に卓越するアジアモンスーン高気圧(以下単に「モンスーン高気圧」)の果たす役割に注目が集まっている(Randel et al., 2010)。物質混合に関わるモンスーン高気圧の力学的特徴は、等温位面上のErtel渦位(PV)を用いて理解されている。約360~380Kの温位面上の大部分において、モンスーン高気圧内側は対流圏にあたり、外側を占める成層圏の空気に比べて、PVが顕著に低い特徴がある。それに対応して、水蒸気やオゾンの混合比も高気圧内外で顕著な差がある(Fueglistaler et al., 2009)。等温位面上でのモンスーン高気圧内外の混合は、これを縁どる強い高気圧性循環によって抑えられており、極渦の場合と同様の手法により、PVの勾配によって混合のバリアの位置を把握できる(Ploeger et al., 2015)。一方で、モンスーン高気圧はそれ自体が大きな季節内変動を示し、メソスケール擾乱や渦の分裂を伴うが(Popovic and Plumb, 2001)、それらが不可逆的な混合をもたらすと考えられている。本研究では、モンスーン高気圧内外の混合に関わるメソスケールの擾乱の力学的特徴についてPVを用いて調べ、特に高気圧の北側・南側を対比して、混合に関わると考えられる擾乱に伴う下降流の成因を論じた。

使用したデータは2011~2015年6~9月のERA-Interim再解析データである。ただし、UTLS領域では異なる再解析データ間の不一致が比較的大きいことがわかったので、JRA55、MERRAを用いた結果との比較も行った。

まず、370Kの等温位面上では、モンスーン高気圧の南側にあたる5°N~20°Nに数日程度の継続時間をもった高PVを持つ擾乱が間欠的に出現する。これは亜熱帯ジェットの内側の中緯度成層圏の空気が高気圧北東でのロスビー波の砕波に伴って南側に流入したものの('in-mixing')による。等温位面上で0°N~20°N[KS1]で平均した時間-経度断面で見ると、間欠的に生じるPVの大きな領域が西向きに移流されているが、徐々にPVの値が小さくなり、約80°Eを境にして西側では大部分が不明瞭となる。これはPVまたは温位が移流に伴って保存されないことを示し、in-mixingが基本的に不可逆であるとする先行研究の見方を裏付けるものである。そこで、個々の擾乱に注目して、不可逆な混合に関わる周囲の循環の特徴を調べた。

150hPaの等圧面上の時間-緯度断面において、モンスーン高気圧の南側の高PVを持つ擾乱に注目したところ、その多くが下降流と対応していることが分かった。一方で、北側でも同様に300hPaの等圧面上で下降流と高PVの対応がみられた。これはジェット付近での圏界面の下降として知られているものである(Shapiro, 1980)。以上の結果を他の再解析データを用いたものと比較したところ、鉛直流の大きさや細かな分布はデータ間の不一致が大きいものの、メソスケールの循環の定性的特徴については整合していることがわかった。

このような擾乱に伴う鉛直流の成因について、バランス流の力学に基づいた理解を試みた。UTLSにおいて、低緯度側では相対渦度と惑星渦度の比は必ずしも小さくないが、東風ジェットが卓越するため、地衡風バランスは十分に満たされている。すなわち、Semi-Geostrophic系を導くBalanced-Jet近似(Hoskins, 1975)に基づいて、地衡風に直交する面(y-z面とする)上の二次循環の質量流線関数 ψ が次のSawyer-Eliassen方程式を用いてバランス流から診断できる。

$$\text{式(1)}: N^2 \partial^2 \psi / \partial y^2 + 2S^2 \partial^2 \psi / \partial y \partial z + F_s^2 (\partial^2 \psi / \partial z^2 - \psi / 4H^2) = Q$$

ただし $S^2 = -g/\theta \partial \theta / \partial y$ 、 $F_s^2 = f(f - \partial u / \partial y)$ である。右辺のQはバランス流から診断される量である。これらを緯度・経度方向に3点の移動平均を施した再解析データを用いて、各点の地衡風の向きに応じて計算した。

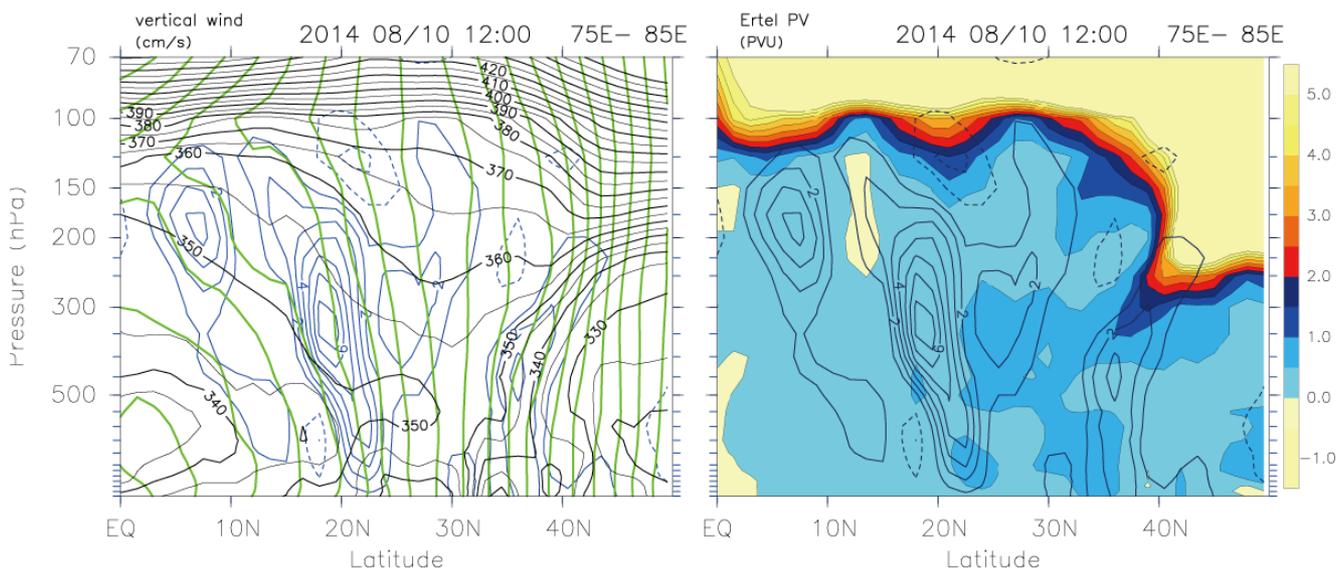
先行研究では寒帯前線ジェット付近での圏界面下降について、式(1)を用いて診断される二次循環が実際の非地衡風と鉛直風を定性的に再現することが示されている(Shapiro, 1981; Uccellini, 1985)。モンスーン高気圧北側の亜熱帯ジェットの場合も、先行研究と同様に、ジェットの出口である収束域の上下にダイポール型の大き

な Q_y が生じ、南北流の非地衡風成分、鉛直流の分布が良く対応していた。一方で、高気圧南側では Q_y と子午面循環の分布は必ずしも整合的ではなかった。そこで、高気圧南側のメソスケールの鉛直流の形成に関して、湿潤過程の役割を調べた。下降流は南側の上昇流と対になって生じることが多く、空間分布は緯度高度断面で見ると上ほど南に傾いた構造を持つことがわかった。このような特徴は、循環が湿潤対称不安定によると考えることによって説明できる。ある時刻のPV、鉛直流、相当温位および絶対角運動量の緯度高度断面を図に示す。15-20°N、125-250hPa付近において相当温位と絶対角運動量の等値線はいずれも南向きに傾き、両者の傾きが近くなっている。これは安定度が中立に近いことを意味する。循環が高緯度側と逆向きに傾いていることは、式(1)の係数の符号から理解することができる。

以上をまとめると、モンスーン高気圧の低緯度側では間欠的なin-mixingにより、高PVの空気を伴う擾乱が発生する。それに伴いみられる顕著な斜めの下降流は、高緯度側のジェット付近の圏界面下降の場合のようなバランス流自体による強制ではなく、湿潤対称不安定により形成されている可能性が高いことが示された。

キーワード：大気力学、成層圏・対流圏結合、物質循環

Keywords: Atmospheric dynamics, Stratosphere-Troposphere coupling, Tracer transport and mixing



ユーラシア大陸上空の上部対流圏・下部成層圏における大気中CH₄濃度とその炭素・水素同位体比の時空間変動

Spatial and temporal variations of atmospheric methane concentration and its carbon and hydrogen isotopic ratios in the upper troposphere/lower stratosphere over the Eurasian continent observed by commercial airliner

*藤田 遼¹、森本 真司¹、青木 周司¹、町田 敏暢²、澤 庸介³、松枝 秀和³、丹羽 洋介³、坪井 一寛³、勝又 啓一²、中澤 高清¹

*Ryo Fujita¹, Shinji Morimoto¹, Shuji Aoki¹, Toshinobu Machida², Yousuke Sawa³, Hidekazu Matsueda³, Yosuke Niwa³, Kazuhiro Tsuboi³, Keiich Katsumata², Takakiyo Nakazawa¹

1.東北大学大学院理学研究科大気海洋変動観測研究センター、2.国立環境研究所、3.気象庁気象研究所

1.Center for Atmospheric and Oceanic Studies, Graduate School of Science, Tohoku University,

2.National Institute for Environmental Studies, 3.Meteorological Research Institute

北半球高緯度において、温室効果気体の時空間変動やその放出源を明らかにするために、航空機を用いたキャンペーン観測がこれまで複数回行われてきた (Sugawara et al., 1996; Tohjima et al., 1997; Nakazawa et al., 1997; Paris et al., 2008)。しかし、航空機による系統的な時系列観測は非常に少なく (Matsueda et al., 2002; Haszpra et al., 2012; Umezawa et al., 2012)、これまでに得られた知見は限られていた。特に、CO₂に次いで重要な温室効果気体であるCH₄について、その放出・消滅過程の情報を含む炭素・水素同位体比 ($\delta^{13}\text{C}$, δD) とCH₄濃度の同時高精度観測を上部対流圏から下部成層圏にかけて実施した例は非常に限られており (Sugawara et al., 1997; Rice et al., 2002; Röckman et al., 2011)、北半球高緯度域における系統的な観測例はこれまでに報告されていない。本研究ではCONTRAILプロジェクトの一環で2012年4月より、パリ (モスクワ) -羽田 (成田) 間において、民間定期旅客機上で月に一度採取された大気試料を用いてCH₄濃度、 $\delta^{13}\text{C}$, δD の同時高精度観測を行い、ユーラシア大陸上空の上部対流圏・下部成層圏におけるそれらの時空間変動を明らかにした。

上部対流圏では明瞭な季節変動がみられなかった。一方で、下部成層圏ではCH₄濃度と $\delta^{13}\text{C}$, δD は明瞭な逆位相の変動を示し、CH₄濃度 ($\delta^{13}\text{C}$, δD) は11~1月に極大 (極小) を、春に極小 (極大) を示した。北半球高緯度域における下部成層圏での季節変動の原因としては、夏から秋にかけて低緯度側から対流圏の空気塊が流入すること、冬から春にかけてブリュワー・ドブソン循環に伴って中・上部成層圏から空気塊が沈降することが考えられた (Sawa et al., 2015)。さらに、CH₄濃度と $\delta^{13}\text{C}$, δD の相関を調べることにより、上部対流圏ではCH₄と水酸化ラジカル (OH) との反応による消滅が支配的である一方で、下部成層圏ではOHに加えて、塩素ラジカル (Cl)、励起酸素原子 (O(¹D)) との消滅反応が生じている可能性が示唆された。

キーワード：メタン、炭素・水素同位体比、上部対流圏・下部成層圏、ユーラシア大陸

Keywords: Methane, carbon and hydrogen isotopic ratios, upper troposphere/lower stratosphere, Eurasian continent

インドネシア上空成層圏におけるCO₂とSF₆の濃度CO₂ and SF₆ concentrations in the stratosphere over Indonesia

*菅原 敏¹、青木 周司²、森本 真司²、石戸谷 重之³、中澤 高清²、豊田 栄⁴、池田 忠作⁵、本田 秀之⁵、稲飯 洋一⁶、長谷部 文雄⁶、Putri Fanny⁷、後藤 大輔⁸

*Satoshi Sugawara¹, Shuji Aoki², Shinji Morimoto², Shigeyuki Ishidoya³, Takakiyo Nakazawa², Sakae Toyoda⁴, Chusaku Ikeda⁵, Hideyuki Honda⁵, Yoichi Inai⁶, Fumio Hasebe⁶, Fanny Aditya Putri⁷, Daisuke Goto⁸

1.宮城教育大学教育学部、2.東北大学、3.産業技術総合研究所、4.東京工業大学、5.宇宙科学研究所、6.北海道大学、7.インドネシア国立航空宇宙研究所、8.国立極地研究所

1.Miyagi University of Education, 2.Tohoku University, 3.AIST, 4.TITECH, 5.JAXA/ISAS, 6.Hokkaido University, 7.LAPAN, 8.NIPR

Stratospheric air collections were carried out at Biak, Indonesia in February 2015, by using the compact cryogenic air sampler (J-T sampler). Eight sets of air sampler were launched from the experiment field in LAPAN observatory (001°10'32" S, 136° 06'02" E) using 4 large plastic balloons. The data obtained at 8 different altitudes will be used for elucidating the vertical structures of GHGs and their chemical processes in the TTL and the tropical stratosphere, with an average vertical resolution better than 2km. Air samples were analyzed for concentrations of CO₂, CH₄, N₂O, and SF₆ at Tohoku University and Miyagi University of Education. The concentrations of CO₂ and SF₆ at 29 km altitude were 392.9 ppmv and 7.5 pptv, respectively. Stratospheric CO₂ and SF₆ are known as the 'clock tracer'. In this study, we estimated the mean age of air in the tropical stratosphere over Biak, and compared them with the results obtained from the previous experiments at Japan, Kiruna, and Syowa station. The CO₂ concentration data was corrected for the airborne production by methane oxidation. CO₂- and SF₆-age were estimated by comparing the observed concentrations with the CONTRAIL data records in the tropical upper troposphere. As a result, the mean age of air was estimated to be about 3 years at 29km altitude. This value was significantly lower than those obtained from the satellite SF₆ measurements.

キーワード：CO₂、SF₆、大気年代

Keywords: CO₂, SF₆, Age of air

インドネシア上空成層圏において観測された大気主成分の拡散分離

Diffusive separation of major atmospheric components in the stratosphere over Indonesia

*石戸谷 重之¹、菅原 敏²、青木 周司³、森本 真司³、中澤 高清³、豊田 栄⁴、池田 忠作⁵、本田 秀之⁵、稲飯 洋一⁶、長谷部 文雄⁶、Putri Fanny⁷、後藤 大輔⁸、村山 昌平¹

*Shigeyuki Ishidoya¹, Satoshi Sugawara², Shuji Aoki³, Shinji Morimoto³, Takakiyo Nakazawa³, Sakae Toyoda⁴, Chusaku Ikeda⁵, Hideyuki Honda⁵, Yoichi Inai⁶, Fumio Hasebe⁶, Fanny A. Putri⁷, Daisuke Goto⁸, Shohei Murayama¹

1.産業技術総合研究所、2.宮城教育大学、3.東北大学、4.東京工業大学、5.宇宙航空研究開発機構、6.北海道大学、7.インドネシア国立航空宇宙研究所、8.国立極地研究所

1.National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), 2.Miyagi University of Education, 3.Tohoku University, 4.Tokyo Institute of Technology, 5.Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), 6.Hokkaido University, 7.Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN), 8.National Institute of Polar Research

In the atmosphere over the turbopause (about 100 km), the mole fraction of heavier molecules decreases with increasing altitude due to diffusive separation in Earth's gravitational field. Recently, Ishidoya et al. (2013) reported such gravitational separation of the atmosphere is also found in the middle to lower stratosphere (about 15-35 km) over Japan from high precision measurements of the composition of the atmospheric major components. To investigate whether gravitational separation is also detectable over the equatorial region or not, we carried out collection of the stratospheric air using a balloon-borne cryogenic air sampler over Biak, Indonesia during February 22-28, 2015. For the observation, we used a Joule-Thomson minicooler, developed by Morimoto et al. (2009), as the cryogenic air sampler, and succeeded to collect 8 air samples at heights of 17-29 km. The collected air samples were analyzed for $\delta(\text{Ar}/\text{N}_2)$, $\delta(\text{O}_2/\text{N}_2)$, $\delta^{15}\text{N}$ of N_2 , $\delta^{18}\text{O}$ of O_2 and $\delta^{40}\text{Ar}$ by using a mass spectrometer (Ishidoya and Murayama, 2014), and the measured values showed small but significant decrease with altitude probably due to gravitational separation. The amount of gravitational separation, evaluated as delta values for the mass number difference of 1 (e.g. delta for $^{15}\text{N}^{14}\text{N}/^{14}\text{N}^{14}\text{N}$), is found to be 11 per meg at the height of 29 km. Based on the observed gravitational separation and a 1-dimensional steady state eddy diffusion/molecular diffusion model, we estimated 1-dimensional vertical eddy diffusion coefficients (K_z) over the equatorial region. By using the average K_z from the surface to the middle stratosphere, we calculated a timescale of the vertical diffusion for a length scale from the surface to the middle stratosphere assuming simple Fickian diffusion. We found that the calculated timescale agrees with the elapsed time since the stratospheric air passed an upper boundary of the tropical tropopause layer (TTL), estimated from tape recorder signals of stratospheric water vapor (Mote et al., 1996), which is significantly smaller than the mean age of air estimated from CO_2 concentration (CO_2 age). This discrepancy may be due to insensitivity of gravitational separation to mixing processes in Brewer-Dobson circulation, of which variations change the mean age of air significantly.

References

Ishidoya, S. et al. (2013) Gravitational separation in the stratosphere –a new indicator of atmospheric circulation. *Atmos. Chem. Phys.*, 13, 8787-8796, www.atmos-chem-phys.net/13/8787/2013/, doi:10.5194/acp-13-8787-2013.

Ishidoya, S. & Murayama, S. (2014) Development of high precision continuous measuring system of the atmospheric O_2/N_2 and Ar/N_2 ratios and its application to the observation in Tsukuba, Japan. *Tellus B*, 66, 22574, <http://dx.doi.org/10.3402/tellusb.v66.22574>.

Morimoto et al. (2009) A new compact air sampler and its application in stratospheric greenhouse gas observation at Syowa station, Antarctica. *J. Atmos. Oceanic and Technol.*, 26
10.1175/2009JTECHA1283.1.

Mote, P. W. et al. (1996) An atmospheric tape recorder: The imprint of tropical tropopause temperatures on stratospheric water vapor. *J. Geophys. Res.*, 101, 3989-4006.

キーワード：大気成分重力分離、クライオジェニックサンプラー、インドネシア上空成層圏

Keywords: gravitational separation of atmospheric components, cryogenic air sampler, stratosphere over Indonesia

短寿命成層圏オゾン破壊物質であるブロモホルムとジブロモメタンの観測研究

Observational study of the short-lived ozone depleting substances, bromoform and dibromomethane

*横内 陽子¹、斉藤 拓也¹、曾 継業¹、向井 人史¹、Stephen Montzka²

*Yoko Yokouchi¹, Takuya Saito¹, Jiye Zeng¹, Hitoshi Mukai¹, Stephen Montzka²

1.国立研究開発法人国立環境研究所、2.National Oceanic and Atmospheric Administration

1.National Institute for Environmental Studies, 2.National Oceanic and Atmospheric Administration

Bromoform (CHBr_3) and dibromomethane (CH_2Br_2), which undergo photolytic degradation and react with OH to produce inorganic bromine, are the large contributors of organic bromine from the ocean to the atmosphere, where it can affect stratospheric and tropospheric ozone chemistry (Carpenter and Liss 2000; Montzka and Reimann 2011). These naturally produced ozone-depleting substances (ODS) are attracting more interest as concentrations of anthropogenic ODS decrease under the provisions of the Montreal Protocol. The major sources of these bromocarbons are believed to be seaweed or macroalgae, followed by phytoplankton and other biological sources, but many uncertainties remain with regard to their production amount and mechanism. In this study, we conducted high-frequency long-term measurements of CH_2Br_2 and CHBr_3 at Hateruma Island, and found that the relationship between $[\text{CH}_2\text{Br}_2]/[\text{CHBr}_3]$ and $[\text{CHBr}_3]$ could be explained by their chemical decay in the atmosphere with a fairly consistent $\text{CH}_2\text{Br}_2/\text{CHBr}_3$ initial emission ratio, and some additional coastal effects. By combining these data with NOAA global observation data (14-yr monthly data from 14 ground stations), we obtained new insight into the global sources of these bromocarbons and their chemical degradation.

キーワード：ブロモカーボン、発生源、長期観測

Keywords: bromocarbons, sources, long-term observation

太陽高エネルギー粒子の大気への影響に関するボックスモデルシミュレーション：中層大気での微量化学種の変動

Box-model simulation for atmospheric effect of solar energetic particles: variation of trace chemical species in the middle atmosphere

*中井 陽一¹、望月 優子¹、丸山 真美¹、秋吉 英治²、今村 隆史²

*Yoichi Nakai¹, Yuko MOTIZUKI¹, Manami MARUYAMA¹, Hideharu Akiyoshi², Takashi Imamura²

1.理研仁科加速器研究センター、2.国立環境研究所

1.RIKEN Nishina Center, 2.National Institute for Environmental Studies

Recently, the atmospheric effect of solar energetic particles (SEPs) has attracted interests. High-energy protons in SEPs are able to come down to the stratosphere in the polar region and they are considered to induce increase of reactive odd nitrogen species (NO_y) due to dissociation of nitrogen molecules. Furthermore, they cause depletion of ozone through the catalytic reaction cycle involving NO_y over a period longer than SEP events. The concentration variations of several chemical species have been observed and their simulations have been attempted [1].

We have studied concentration variation of trace chemical species induced by SEP protons through the Box-model simulation. It involves multitudinous reactions of various ionic and neutral chemical species but no transport processes. We simulated the concentration variations for the middle atmosphere in polar region during the SEP event in October-November 2003. In this simulation, we adopt 77 chemical species and 522 gas-phase ionic and neutral reactions. We assume that the prompt products are charged and neutral species generated from nitrogen and oxygen molecules and that the yields of the prompt products are determined only with the energy deposit in the air. These prompt products generated by the SEP protons induce subsequent ionic and neutral chemical reactions (SEP-induced reactions). The production rates of the prompt products were estimated using the G-value [2,3]. The daily energy deposits were estimated from the calculated daily ion-pair creation rate due to the SEP protons [4]. The concentration variation of each species due to SEP protons was estimated as the difference between the result by considering both SEP-induced and photochemical reactions and that only for photochemical reactions under the same initial condition.

In this talk, we will mainly report the results of our simulation for the variations of ozone and reactive odd nitrogen species for the SEP event in October-November 2003.

References

- [1] For example, B. Funke *et al.*, *Atmos. Chem. Phys.* 11, 9089 (2011).
- [2] C. Willis and A. W. Boyd, *Int. J. Radiat. Phys. Chem.* 8, 71 (1976).
- [3] H. Mätzing, *Adv. Chem. Phys.* LXXX, 315 (1991).
- [4] C.H. Jackman *et al.*, *Atmos. Chem. Phys.* 8, 765 (2008).

化学気候モデルの力学場と化学場の特徴について

Characteristics of dynamical and chemical fields in Chemistry Climate Models

佐々木 拓也¹、*塩谷 雅人¹、秋吉 英治²、出牛 真³、Kinnison Douglas⁴Takuya Sasaki¹, *Masato Shiotani¹, Hideharu Akiyoshi², Makoto Deushi³, Douglas Kinnison⁴

1.京都大学生存圏研究所、2.国立環境研究所、3.気象研究所、4.米国大気研究センター

1. Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University, 2. National Institute for Environmental Studies, 3. Meteorological Research Institute, 4. National Center for Atmospheric Research

We analyzed results from three coupled chemistry-climate models (CCM) to investigate characteristics of climatological differences between free-running (FR) and specified dynamics (SD) modes, by paying attention to interactions between dynamical and chemical fields. The three models used in this study are the NCAR Whole Atmosphere Community Climate Model, version 4 (WACCM4) (Marsh et al., 2013), the Model for Interdisciplinary Research on Climate 3.2-Chemistry-Climate Model (MIROC3.2-CCM) (Imai et al., 2013; Sakazaki et al., 2013), and the Meteorological Research Institute-Earth System Model Version 1 Revision 1 (MRI-ESM1r1) (Deushi and Shibata, 2011; Adachi et al., 2013). Outputs from the three models are based on simulations proposed by IGAC/SPARC Chemistry-Climate Model Initiative (CCMI) to improve our understanding in modelling of the chemistry and dynamics of the troposphere and stratosphere. REF-C1 and REF-C2 simulations for FR mode CCM (FR-CCM) and REF-C1SD simulation for SD mode CCM (SD-CCM) are used for the period of 1980-2010 as monthly means.

We carefully analyzed differences found at mid-high latitudes in the stratosphere of the winter hemisphere, the extratropical upper troposphere and lower stratosphere (Ex-UTLS) and the tropical tropopause layer (TTL). Comparisons of stratospheric temperatures at mid-high latitudes show that for all FR-CCM results the seasonal change is delayed in both hemispheres during the winter and spring; especially in the southern hemisphere all FR-CCM results show cold biases in early spring. Results for ozone are similar to those for temperature, and the biases in the southern hemisphere are clearer than in the northern hemisphere. We also investigated the Eliassen-Palm fluxes (EP flux) and resulting residual mean meridional circulations, because the seasonal changes in temperature and ozone during these seasons and in those regions are affected by the meridional circulation. EP flux convergences and downward velocities in winter are smaller for all FR-CCM results than SD-CCM ones, indicating that the time of maximum wave activities seen in EP fluxes are delayed about 1-2 months for all FR-CCM results. These suggest that the temperature and ozone biases are due to some problems with model reproducibility of planetary waves propagating into the stratosphere from the troposphere.

In the Ex-UTLS, all FR-CCM results show cold biases especially in summer, and all SD-CCM results overestimate radiative cooling effects. Comparisons of water vapor with satellite observations (Aura-MLS) and models show that all model results overestimate water vapor in the upper troposphere at mid- and high latitudes. Because water vapor has an important role in the radiation budget during the summer in this region, the FR-CCM cold biases and the SD-CCM overestimations of radiative effects are from water vapor overestimations. The dynamical fields are specified in SD-CCM, therefore these overestimations are due to the model reproducibility of chemical, transport and microphysics processes associated with water.

In the TTL, we compared ozone distributions in SD-CCM and FR-CCM results. We found that FR-CCM of MIROC3.2-CCM and WACCM4 cannot reproduce the increase of ozone in boreal summer. This is due to the annual cycle of upwelling and the horizontal transport from mid latitude; this mechanism is called

in-mixing and is understood as the nearly isentropic transport owing to the Asian and North American monsoon anticyclones. WACCM4 FR-CCM can reproduce this increase in isentropic coordinate, and the Asian monsoon anticyclone is weak in the FR-CCM of MIROC3.2-CCM. These indicate that temperature and monsoon anticyclone reproducibility is strongly related to the improvement of ozone results in the TTL.

キーワード：化学気候モデル、成層圏の力学と化学、中高緯度上部対流圏および下部成層圏、熱帯対流圏界層
Keywords: Chemistry Climate Model, stratospheric dynamics and chemistry, extratropical upper troposphere and lower stratosphere, tropical tropopause layer

温室効果気体(GHG)増加とオゾン回復に伴うCCMI将来実験から得られたオゾンQBOの将来変化
Future changes in quasi-biennial oscillation of ozone with increasing GHS and ozone
recovery in CCMI simulation

*直江 寛明¹、出牛 真¹、吉田 康平¹、柴田 清孝²

*Hiroaki Naoe¹, Makoto Deushi¹, Kohei Yoshida¹, Kiyotaka Shibata²

1.気象研究所、2.高知工科大

1.Meteorological Research Institute, 2.Kochi University of Technology

The future quasi-biennial oscillation (QBO) in ozone in the equatorial stratosphere is examined by analyzing future transient reference simulation (REF-C2) for the period from 1960 to 2100 in a climate change due to increasing GHGs and decreasing ODSs under the Chemistry-Climate Model Initiative (CCMI) activities. The REF-C2 simulation is conducted using the Meteorological Research Institute Earth System Model (MRI-ESM), which constitutes a core component of the atmosphere-ocean coupled global climate model and components of sea-ice, aerosol, and ozone models. We have conducted the wavelet analysis to provide inter-annual variability of amplitude and phase of the ozone QBO in the vertical structure of tropical stratosphere.

In the simulation the power spectra of the equatorial zonal-mean ozone mixing ratio shows a double peak structure with maximum amplitude at two pressure levels of around 30 hPa and 10 hPa and a node at 15 hPa. The vertical residual-velocity anomalies are in phase with the ozone anomalies in the upper stratosphere with the abrupt phase change at around 15 hPa. Below this level, the phase is almost reversed from what it is above. Quantitatively, the amplitude of the ozone QBO in the model-free simulation (REF-C2) is reduced to 0.25 ppmv at 10 hPa, which is about half of that in the simulation forced by the meteorological reanalysis data (REF-C1sd).

Compared with the past climatology of 1960-1980 at the time before the severe ozone destruction, the amplitude of the future equatorial ozone QBO during the period of 2040-2070 at the time of the ozone recovery is characterized by the decrease by 20-30% at 30 hPa and the increase by around 20% at 5-10 hPa. This can be explained by the fact that the dominant role of future ozone decrease in the lower stratosphere is due to the changes in tropical upwelling. In addition, it is found that chemical ozone production and destruction do contribute to the ozone changes in the tropical upper stratosphere.

キーワード：オゾンQBO、準二年周期振動、オゾン破壊と回復

Keywords: ozone QBO, quasi-biennial oscillation, ozone depletion and recovery

成層圏SO₂注入による気候工学の強制とフィードバック：GeoMIP G4実験の解析Forcing and feedbacks of geoengineering by SO₂ injection into the stratosphere: Analysis of GeoMIP G4 experiment*榎村 博基¹、関谷 高志²、阿部 学¹、渡邊 真吾¹*Hiroki Kashimura¹, Takashi Sekiya², Manabu Abe¹, Shingo Watanabe¹

1.国立研究開発法人 海洋研究開発機構、2.名古屋大学 環境学研究所

1.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2.Graduate School of Environment Studies, Nagoya University

気候工学 (geoengineering) とは「人為的な気候変動の対策として行う意図的な惑星環境の大規模改変」である。地球温暖化に対抗するための気候工学の手法は、太陽放射の一部を人為的に宇宙空間に反射させて地表に降り注ぐ放射量を減らす方法 (Solar Radiation Management; SRM) と大気中の二酸化炭素を取り除く方法 (Carbon Dioxide Removal; CDR) に大別される。SRMの中で最も有力な方法の1つが、成層圏エアロゾル注入である。これは、例えば1991年のピナツボ山のような大規模な火山噴火を模して、成層圏に硫酸塩エアロゾルを注入・散布することで、大気の太陽放射反射率を増加させて、地表が受け取る短波放射量 (正味地表短波放射) を減らし、地表気温を下げようとするものである。気候工学に関するモデル相互比較計画 (GeoMIP) では、地球システムモデルを用いた気候工学数値シミュレーションの相互比較実験が実施されている。

本研究では、成層圏エアロゾル注入に関するやや現実的な実験設定のGeoMIP-G4実験について解析する。G4実験は、地球温暖化シナリオの1つRCP4.5実験を基準 (比較対象) として、その上で2020年から2070年までの間、毎年 5 Tg (1991年ピナツボ山噴火の約1/4に相当する) の二酸化硫黄 (SO₂) を赤道下部成層圏に注入するという想定の実験である。ただし、成層圏エアロゾル注入の再現方法は統一されておらず、SO₂から硫酸塩への化学反応過程や核形成・凝集成長などの微物理過程をモデル化して陽に解くモデルもあれば、単に1991年のピナツボ山噴火後の成層圏のエアロゾルの光学的深さ (Aerosol Optical Depth; AOD) をもとに作られた規定のAODを境界値データとして与えるだけのモデルもあり、実験結果の比較には工夫を要する。また、成層圏エアロゾル注入によって地表 (対流圏) の気温が低下することで、少なくとも雲量・水蒸気量・地表面アルベドが変化すると考えられる。これらは短波の反射や吸収に影響するため、SRMの効果に対してフィードバックを与える。

そこで本研究では、G4実験における各モデルのSRM強制とフィードバック効果を分離して求めるために、1層大気を仮定した短波放射伝達モデルを応用する。すなわち、GeoMIPで提供されている物理量である大気上端 (TOA) と地表面における短波の下向き・上向き放射量 (全天および晴天) から、晴天大気の短波反射率・吸収率、雲の効果、地表面アルベドを求める。そして、それぞれの変化量 (G4 -RCP4.5) の、正味地表短波放射の変化量に対する寄与を求めることで、SRM強制と各フィードバック効果を見積もる。この際、晴天大気の反射率の変化は成層圏エアロゾルによるもの、吸収率の変化は水蒸気量の変化によるものと仮定している。解析の結果、SRM強制の大きさは全球・時間平均値でおよそ-3.6から-1.6 W/m² と、モデルごとのバラツキが大きいことが示された。また、SO₂から硫酸塩への化学・微物理・輸送過程を陽に計算したモデルの方がSRM強制が大きく、規定のAODでは毎年 5 TgのSO₂注入によるSRM強制としては過小評価であることが示唆された。雲量と水蒸気量の変化に伴うフィードバックはともに、+0.5から+1.5 W/m²程度の加熱効果であった。ただし、水蒸気量の変化の効果は、地表気温の変化量とほぼ比例 (気温低下が大きいほど加熱効果も大きい) しているのに対して、雲量変化の効果は気温低下量と相関が低く、その振る舞いはモデル間で一貫していない。一方、地表面アルベドの変化は冷却効果のフィードバックをもたらすものの、その大きさは (全球平均値で見ると) 小さい。

以上の結果から、成層圏エアロゾル注入による気候工学のシミュレーション (G4実験) において、SRM強制そのもののバラツキが大きいこと、そしてSRM強制は雲量・水蒸気量・地表面アルベドの変化をもたらすフィードバックによって、地表では半分程度に減じることが示された。

キーワード：気候工学、成層圏エアロゾル、短波放射、GeoMIP

Keywords: Geoengineering, Stratospheric aerosols, Shortwave radiation, GeoMIP

成層圏SO₂注入によるジオエンジニアリングの成層圏エアロゾル・大気循環への影響Effects of geoengineering by stratospheric SO₂ injection on stratospheric sulfate aerosols and circulation*関谷 高志¹、樫村 博基²、渡邊 真吾²、須藤 健悟^{1,2}*Takashi Sekiya¹, Hiroki Kashimura², Shingo Watanabe², Kengo Sudo^{1,2}

1.名古屋大学大学院環境学研究科、2.海洋研究開発機構

1.Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 2.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

ジオエンジニアリングは、地球温暖化対策として、意図的に気候システムを改変する手法である。その中でも、成層圏へのSO₂注入は大規模火山噴火による成層圏へのSO₂放出とその後の全球平均の地上気温低下に基づいている。しかしながら、ジオエンジニアリングモデル相互比較プロジェクト (GeoMIP) に参加している気候モデルは、大きくばらついた結果が示している。その不確実性の一因は、エアロゾルの微物理特性や成層圏大気循環であると考えられる。そこで本研究は、地球システムモデルMIROC-ESM-CHEMに成層圏硫酸塩エアロゾル微物理モジュールを導入し、成層圏硫酸塩エアロゾルの分布・微物理特性を陽に計算できるモデルを構築した (以降、MIROC-ESM-CHEM-AMPとする)。MIROC-ESM-CHEM-AMPを用いて、GeoMIPのG4実験に準拠したジオエンジニアリング実験を行った。G4実験は、RCP4.5シナリオ下での5 Tg/yearのSO₂を下部成層圏の赤道直上への注入を想定している。また、MIROC-ESM-CHEMによるG4実験の結果と比較を行った。ただし、MIROC-ESM-CHEMでは、ピナツボ火山噴火時に観測された成層圏エアロゾル光学的深さ (stratospheric aerosol optical depth; SAOD) に基づくSAODを与えることで成層圏SO₂注入の影響を表現している。比較の結果、MIROC-ESM-CHEM-AMPは、MIROC-ESM-CHEMより約2倍大きなSAODを示した。また、MIROC-ESM-CHEM-AMPでは、成層圏SO₂注入によって、硫酸塩エアロゾルの有効粒径が0.51 μmまで成長した。2040~2069年における成層圏硫酸塩エアロゾルの平均滞留時間は1.13年、成層圏総量は2.85 TgSであり、1年間のSO₂注入量 (2.5 TgS) よりも大きかった。

また、成層圏SO₂注入の成層圏大気の影響を調査した。両方のモデルにおける成層圏大気平均年代は、50 hPaより下方では増加 (最大0.15年)、50 hPaより上空では減少した (最大0.25年)。MIROC-ESM-CHEM-AMPにおける大気平均年代の変化は、MIROC-ESM-CHEMと比較して3倍以上大きな変化を示した。さらに、MIROC-ESM-CHEM-AMPを用いて、RCP4.5 (ジオエンジニアリングを実施しない) 実験の海面温度を与えたG4実験を行い、成層圏大気平均年代における成層圏SO₂注入の影響について詳しく調査した。その結果、50 hPaより上空における大気平均年代の減少は、速い応答 (例えば、硫酸塩エアロゾルによる赤外放射の吸収の影響) によって引き起こされていることが示された。一方、50 hPaより下方における平均年代の増加は、遅い応答 (例えば、対流圏の寒冷化) に起因していた。遅い応答に伴う成層圏循環の弱体化は、わずかにSAODを増加させた (約5%)。

キーワード：ジオエンジニアリング、成層圏エアロゾル、成層圏大気循環、エアロゾル微物理

Keywords: Geoengineering, Stratospheric aerosols, Stratospheric circulation, Aerosol microphysics