

令和元年6月7日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2014～2018

課題番号：26220101

研究課題名(和文) 熱帯対流圏界層内大気科学過程に関する力学的・化学的描像の統合

研究課題名(英文) Synthesis of dynamical and chemical descriptions on the atmospheric processes in the Tropical Tropopause Layer

研究代表者

長谷部 文雄 (Hasebe, Fumio)

北海道大学・地球環境科学研究所・教授

研究者番号：00261735

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 141,400,000円

研究成果の概要(和文)：気候強制に対する成層圏の応答の解明を目的に、熱帯西部太平洋域においてSOWER・クライオサンプリング統合観測を実施し、成層圏大気の輸送過程を記述する独立3変数(水蒸気混合比、大気の年齢、重力分離)を含む諸量の高度分布を得た。その結果を後方流跡線や数値シミュレーションにより解析した結果、当初の目標を超え、観測データ相互の矛盾のない理解を導くような多くの知見を得た。熱帯対流圏界層・成層圏を対象にSOWER観測で蓄積してきたオゾン・水蒸気・雲粒子などのゾンデ観測で得られた知見は、夏季アジアモンスーン循環に伴う大気物質流出過程の研究へと継承・発展させられようとしている。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本課題は、航空機観測を主体とした欧米の観測計画が大きく進展しようとする中、成層圏大気力学・大気化学の分野で気球観測により長期にわたる観測実績を積み上げてきた我が国の2研究グループが組織的に連携することにより、独自の観点から国際的研究を牽引することを意図して実施された。観測領域である熱帯西部太平洋は日本に近いだけでなく、対流圏大気の成層圏流入域という科学的重要性を有する。現地組織の積極的関与が不可欠な現場観測の実施は、現地の科学振興という波及効果も期待できる。同時に行った留学生の受け入れも含め、大きな社会的意義があった。

研究成果の概要(英文)：Coordinated observations of SOWER-Cryogenic air sampling were conducted in the western tropical Pacific in an attempt to clarify the stratospheric response to climate forcing. Vertical profiles of various quantities, including three independent variables, i.e., water vapor mixing ratio, age of air, and gravitational separation, that describe the stratospheric transport processes, are successfully obtained. Analyses with the aid of backward air trajectories and numerical simulations reveal many interesting features, above expectations, leading us to a mutually consistent understanding among all observables. The knowledge accumulated from observational evidences taken from ozone, water vapor and cloud particle radiosondes under SOWER campaigns aimed at the tropical tropopause layer and the stratosphere will be a foundation useful for the study on the outflow of atmospheric pollutants associated with the summer Asian monsoon circulation.

研究分野：環境学

キーワード：物質循環 成層圏大気大循環 熱帯対流圏界層 脱水過程 クライオサンプリング 大気の年齢 重力分離 アイソトポキョール

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 温室効果ガスとして地球環境を規定する成層圏水蒸気は、大気が熱帯対流圏界面を通過して流入する際に受ける脱水過程に支配されている。脱水過程の理解は熱帯対流圏界層(TTL)概念の導入を機に劇的な変化を遂げ、成層圏水蒸気に関する理解は大きく進歩したが、1980年代以降の増加傾向や2001年を境とした階段関数的減少など、未解明な課題が多く残されている。

(2) 全球規模の成層圏大気大循環(Brewer-Dobson(BD)循環)は、成層圏変動を診断する重要な力学的指標である。成層圏流入後の経過時間として定義される大気の年齢(age of air; AoA)は、BD循環の速さを計量する最も代表的な物理量であるが、化学輸送モデルの診断する長期短縮傾向に対して観測データは延長傾向を示唆しており、両者の間に整合的な理解は得られていない。

2. 研究の目的

(1) TTLにおける力学・化学過程は、Global Hawkを用いた超高高度観測(ATTREX)を核とする欧米の航空機観測により大きく進展しようとしている。一方、我が国では、ゴム気球搭載型多目的ゾンデによるオゾン・水蒸気観測(SOWER)や大気球搭載のクライオサンプラーによる成層圏大気の回収・分析(クライオグループ)により、長期間にわたる詳細な観測を積み上げてきた。本課題は、両グループの組織的連携により、ATTREX後を志向した新たな研究の展開を目指す。

(2) 両グループがそれぞれ専門とする大気力学的観点と大気化学的観点の統合を図り、TTLおよび成層圏における物理・化学過程の理解の深化を目指す。具体的には以下の目標を掲げる：

対流圏大気の流入する熱帯域で成層圏大気サンプリングを実施し、クロック・トレーサーであるCO₂やSF₆の混合比を高精度で測定し、大気化学的観点から成層圏大気の履歴情報を得る。

オゾン・水蒸気に加えて雲粒子やエアロゾルのゾンデ観測を実施し、水蒸気「テープレコーダ」により成層圏大気の上昇速度を評価するとともに、氷結・脱水過程の詳細を明らかにする。

全球客観解析場に基づく輸送過程のLagrange的記述を改良し、大気化学・大気力学的観点から成層圏輸送過程を記述する独立な指標について相互に矛盾のない理解を目指す。

SOWERでカバーすることのできていない、TTL脱水大気の中緯度への流出過程と夏季におけるチベット高気圧を周回する大気TTL流入過程の記述を試み、新たな知見を得る。

3. 研究の方法

(1) 中緯度・極域で実績を積み重ねてきた大気球によるクライオサンプリングは、小型化により熱帯域への応用が可能になった。本課題では、大気の成層圏流入域である熱帯西部太平洋に注目し、SOWER多目的ゾンデとクライオサンプリングとの同時観測を実施し、水蒸気分布から評価される大気の上昇速度とクロック・トレーサーから得られるAoAという、成層圏大気の履歴に関する独立な情報を得る。

(2) 地上設置の偏光ライダーによる観測と加熱/非加熱 dual 光学粒子カウンター(OPC)ゾンデの飛揚によりエアロゾルの数密度・粒径分布などの情報を得るとともに、雲粒子ゾンデにより氷晶数密度を評価し、TTL内脱水過程を詳細に観測する。さらに、エアロゾルサンプラーを飛揚し、回収されたTTL/成層圏エアロゾルの化学組成を詳細に解析する。

(3) 上記の観測で得られたデータを流跡線解析や化学輸送モデルにより解析し、大気力学的観点と大気化学的観点から矛盾のない理解を得る。また、雲微物理モデルの適用によりTTL内脱水過程の進行に関する理解を深める。

4. 研究成果

(1) 2015年2月にインドネシアBiak島でSOWER・クライオサンプリング同時観測(CUBE/Biak)を試み、大気球4機他、多数の多目的ゾンデの飛揚に成功した。その結果は概要論文にまとめられ、放球の様子が掲載誌の表紙を飾った(図1)。図2(左)は、クライオサンプリングで得られたCO₂とSF₆の高度分布を同年の北海道大樹町における同様の観測と比較した結果である()。熱帯で得られたCO₂(),SF₆()のモル比の高度分布は、高度23 km付近まで高度とともに徐々に低下した後25 kmにかけて急激に減少し、その上ではほぼ一定値を取るといった共通した特徴を示す。一方、北海道上空()では20 km程度まで急激に減少するが、その上では概ね一定値を取る。大気塊に含まれるクロック・トレーサーのモル比は成層圏流入時の対流圏での値を保持していると考えられるため、これらの値を過去の対流圏における値と比較することにより、その大気塊が成層圏へ流入した時期を推定することができる。



図1: 大気球の放球()

こうして得られる AoA (図 2 (右))は、本来 CO₂ ()と SF₆()とで一致すべきであるが、25 km より上で両者の値は異なる。その原因について仮説を提示したが、その真偽は確定していない。

(2) 熱帯下部成層圏は、亜熱帯混合障壁に守られており(パイプ構造)、中緯度からの混合が効きにくいとされているが、混合の影響が無視できる訳ではなく、一般にクロック・トレーサーから

評価された AoA と水蒸気「テーブルコーダ」から求められる成層圏大気の上昇速度とは直接対応しない。そのため、両者の単純な比較では不十分で、相互に矛盾のない理解の確立が求められる。その一つは、単一の全球客観解析場から両者が共に再現される条件を探ることである。後方流跡線を用いた予備的な計算の結果()では不十分な一致しか得られなかったが、化学輸送モデルに同化した気象場を用いることで解決できる目処がたってきた(論文準備中)。

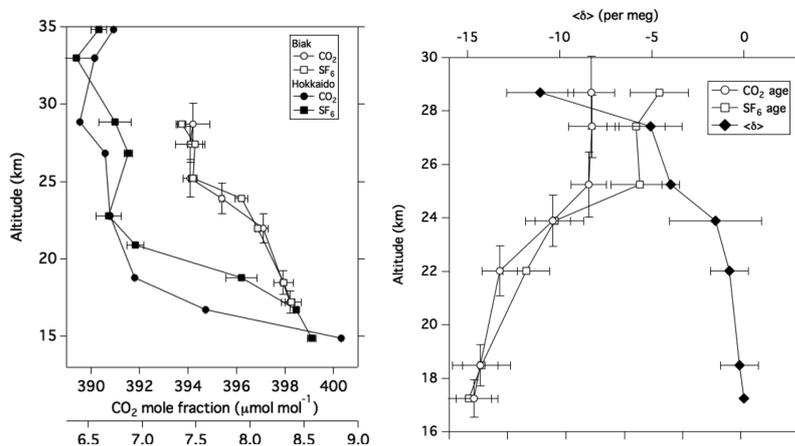


図 2: クライオサンプリングで得られた(左)CO₂, SF₆ のモル比と(右)大気の種類と重力分離を定量化する $\langle \delta \rangle$ の高度分布 ()。

(3) 成層圏大気履歴を記録する第 3 の独立な物理量として重力分離が存在する。重力分離とは、重力場において質量の大きな分子が下方に、小さな分子が上方に濃縮する現象で、平均自由行程の長い熱圏ではよく知られている。混合の活発な成層圏でこのような効果は顧みられてこなかったが、クライオサンプリング試料の精密な分析により、高度の増加とともに顕在化する重力分離が中高緯度成層圏で発見されている()。CUBE/Biak による採取試料の分析から、熱帯成層圏で初となる重力分離が確認された(図 2(右))。数値シミュレーションにより、この結果と AoA とを同時に再現することができれば、再現に最適なモデルパラメータを手掛かりに輸送場の記述精度を高めることができるが、2次元モデルによるシミュレーションではよい一致が得られていない()。この状況を打破するため、成層圏重力分離の 3次元シミュレーション(図 3)に挑戦した。世界初の試みであるため、不十分点がいくつか残されたままで観測事実の再現も不完全であるが、論文発表()を本課題終了に間に合わせる事ができた。

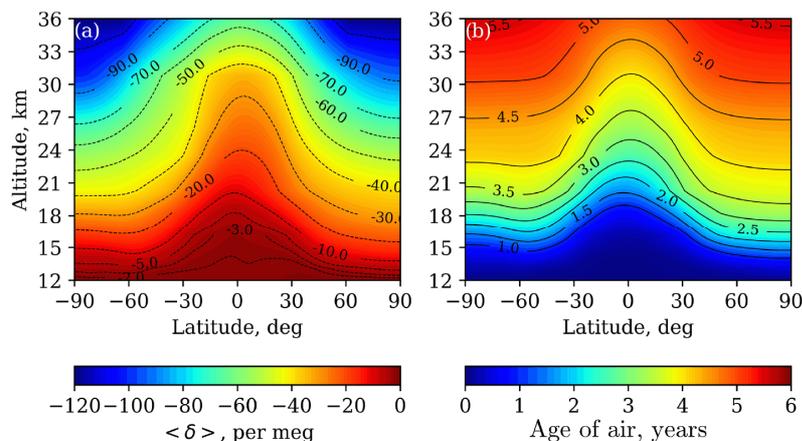


図 3: 成層圏大気(左)重力分離と(右)年齢(AoA)に関する 3次元シミュレーション。年平均値の緯度・高度断面で示す。熱帯域で上昇し高緯度で下降する Brewer-Dobson 循環により大気が輸送される間に年齢が増加し重力分離が進行する()。

(4) ゾンデ搭載型の雲粒子センサー CPS を開発し、液滴と氷晶とを区別しながら雲粒子の鉛直分布測定が可能になった()。CPS による TTL 巻雲の観測に成功したが、運悪く下層雲に阻まれ、偏光ライダーとの同時観測は実現しなかった。一方、TTL 内移流時間が十分長く TTL 内で形成されたと判断できる 2 例の巻雲を加熱/非加熱 dual OPC ゾンデにより観測し、不揮発性エアロゾルが同時観測された雲粒子よりかなりの低密度であることと、エアロゾルと雲粒子の粒径分布が分離していることを見出した。これらの特徴は均質核生成による巻雲形成を示唆する。

(5) 成層圏変動に関する流跡線解析により次の結果を得た。まず、2001 年を境とした成層圏水蒸気の階段関数的減少は、2000 年 9 月に発生した成層圏への水蒸気流入量の減少に起因すると特定され、その原因はチベット高気圧の弱化に伴う大気塊移流経路の東偏と熱帯西部太平洋暖水域の東方拡大による TTL 脱水域の移動にあると解釈された()。一方、1980 年代中緯度成層圏 AoA の延長傾向について検討した結果、大気塊の成層圏通過時間の長期変化傾向で説明できない分の 20-80%が、中緯度下部成層圏大気 TTL 内混入過程で説明されることを見出した()。

(6) 観測データによる情報不足を補い、全球大気組成変動に関する基礎データを提供するために、大気組成のデータ同化研究に取り組んだ。衛星観測データと数値モデルを統合したデータ同化プロダクトは、大気微量成分の時空間分布と、それらが温暖化物質や大気汚染物質として気候や健康に与える影響について解析するために利用できる。複数の大気化学種の衛星観測をJAMSTECで開発したデータ同化システムに取り込み、長期再解析データプロダクト(TCR-2)を構築してweb上で公開した([その他]のデータ公開参照)。このデータは既に様々な研究で利用され、作成者自らも学術研究に利用している。例えば、NASAが東アジアで実施した航空機観測キャンペーンKORUS-AQに参加し、個別排出源や成層圏から対流圏への下降輸送、越境輸送の影響を加味し、東アジア域における大気組成変動に関する包括的理解を得るために役立てた()。

<引用文献>

- Hasebe et al., Coordinated Upper-troposphere-to-stratosphere Balloon Experiment in Biak (CUBE/Biak), *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 99, 1213-1230, 2018, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-16-0289.1>.
- Sugawara et al., Age and gravitational separation of the stratospheric air over Indonesia, *Atmos. Chem. Phys.*, 18, 1819-1833, 2018, <https://doi.org/10.5194/acp-18-1819-2018>.
- Ishidoya et al., Gravitational separation of major atmospheric components of nitrogen and oxygen in the stratosphere, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L03811, 2008, <https://doi.org/10.1029/2007GL030456>.
- Belikov et al., Three-dimensional simulation of stratospheric gravitational separation using the NIES global atmospheric tracer transport model, *Atmos. Chem. Phys.*, 19, 5349-5361, 2019, <https://doi.org/10.5194/acp-19-5349-2019>.
- Fujiwara et al., Development of a cloud particle sensor for radiosonde sounding, *Atmos. Meas. Tech.*, 9, 5911-5931, 2016, <https://doi.org/10.5194/amt-9-5911-2016>.
- Hasebe and Noguchi, A Lagrangian description on the troposphere-to-stratosphere transport changes associated with the stratospheric water drop around the year 2000, *Atmos. Chem. Phys.*, 16, 4235-4249, 2016, <https://doi.org/10.5194/acp-16-4235-2016>.
- Inai, Long-term variation in the mixing fraction of tropospheric and stratospheric air masses in the upper tropical tropopause layer, *J. Geophys. Res.: Atmos.*, 123, 4890-4909, 2018, <https://doi.org/10.1029/2018JD028330>.
- Miyazaki et al., Balance of emission and dynamical controls on ozone during the Korea United States Air Quality campaign from multiconstituent satellite data assimilation. *J. Geophys. Res.: Atmos.*, 124, 387-413, 2019, <https://doi.org/10.1029/2018JD028912>.

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計23件)

- Belikov, D., S. Sugawara, S. Ishidoya, F. Hasebe, S. Maksyutov, S. Aoki, S. Morimoto, and T. Nakazawa, Three-dimensional simulation of stratospheric gravitational separation using the NIES global atmospheric tracer transport model, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 査読有, 19, 5349-5361, 2019, <https://doi.org/10.5194/acp-19-5349-2019>.
- Miyazaki, K., T. Sekiya, D. Fu, K. W. Bowman, 他12名, Balance of emission and dynamical controls on ozone during the Korea United States Air Quality campaign from multiconstituent satellite data assimilation, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 査読有, 124, 387-413, 2019, <https://doi.org/10.1029/2018JD028912>.
- Hasebe, F., S. Aoki, S. Morimoto, Y. Inai, T. Nakazawa, S. Sugawara, C. Ikeda, H. Honda, H. Yamazaki, Halimurrahman, T. Shibata, M. Hayashi, N. Nishi, M. Fujiwara, S.-Y. Ogino, M. Shiotani, 他8名, Coordinated Upper-troposphere-to-stratosphere Balloon Experiment in Biak (CUBE/Biak), *Bulletin of the American Meteorological Society*, 査読有, 99, 1213-1230, 2018, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-16-0289.1>.
- Sugawara, S., S. Ishidoya, S. Aoki, S. Morimoto, T. Nakazawa, S. Toyoda, Y. Inai, F. Hasebe, C. Ikeda, H. Honda, D. Goto, and F. A. Putri, Age and gravitational separation of the stratospheric air over Indonesia, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 査読有, 18, 1819-1833, 2018, <https://doi.org/10.5194/acp-18-1819-2018>.
- Fujiwara, M., T. Sugidachi, T. Arai, K. Shimizu, M. Hayashi, Y. Noma, H. Kawagita, K. Sagara, S. Okumura, Y. Inai, T. Shibata, S. Iwasaki, and A. Shimizu, Development of a cloud particle sensor for radiosonde sounding, *Atmospheric Measurement Techniques*, 査読有, 9, 5911-5931, 2016, <https://doi.org/10.5194/amt-9-5911-2016>.

〔学会発表〕(計 116 件)

Belikov, D., Modeling of gravitational separation using the NIES global atmospheric tracer transport model, 2017 AGU Fall Meeting, 2017.

Inai, Y., Variation in the mixing fraction of tropospheric and stratospheric air masses sharing the tropical lower stratosphere, JpGU-AGU Joint Meeting 2017, 2017.

Sugawara, S., Age of air and gravitational separation in the stratosphere over Indonesia, 2016 AGU Fall Meeting, 2016.

Fujiwara, M., Soundings of Ozone and Water in the Equatorial Region (SOWER): 1998-2016, UTLS Observation Workshop, 2016.

Hasebe, F., The mechanism of the stepwise decrease of stratospheric water around the year 2000, Asian Conference on Meteorology, 2015.

〔その他〕

ホームページ <http://sower.ees.hokudai.ac.jp/kakenhi2014/>

アウトリーチ

Hasebe, F., Dehydration in the Tropical Tropopause Layer with the implication for the water/ozone variations over Vietnam, The 9th Scientific Conference in the University of Science-Vietnam National University, 2014.

長谷部 文雄, 大気球で迫る地球の謎, 北海道スペーススクール 2015, 宇宙航空研究開発機構, JAXA 大樹航空宇宙実験場, 2015.

Ogino, S.-Y. et al., Ozone transport over the southeast Asian region revealed by the ozonesonde observations in Hanoi, Vietnam, Mini-Workshop on Upper-Air Sounding and Air Quality, Hanoi, Vietnam, 2018.

データ公開

大気微量成分長期再解析プロダクト TCR-2 の公開: <https://ebcrpa.jamstec.go.jp/tcr2/>

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：青木 周司

ローマ字氏名：(AOKI, Shuji)

所属研究機関名：東北大学

部局名：大学院理学研究科

職名：教授

研究者番号(8桁)：00183129

研究分担者氏名：藤原 正智

ローマ字氏名：(FUJIWARA, Masatomo)

所属研究機関名：北海道大学

部局名：大学院地球環境科学研究院

職名：准教授

研究者番号(8桁)：00360941

研究分担者氏名：塩谷 雅人

ローマ字氏名：(SHIOTANI, Masato)

所属研究機関名：京都大学

部局名：生存圏研究所

職名：教授

研究者番号(8桁)：50192604

研究分担者氏名：柴田 隆

ローマ字氏名：(SHIBATA, Takashi)

所属研究機関名：名古屋大学

部局名：大学院環境学研究科

職名：教授

研究者番号（8桁）：70167443

研究分担者氏名：林 正彦

ローマ字氏名：(HAYASHI, Masahiko)

所属研究機関名：福岡大学

部局名：理学部

職名：教授

研究者番号（8桁）：50228590

研究分担者氏名：西 憲敬

ローマ字氏名：(NISHI, Noriyuki)

所属研究機関名：福岡大学

部局名：理学部

職名：教授

研究者番号（8桁）：00222183

研究分担者氏名：荻野 慎也

ローマ字氏名：(OGINO, Shin-Ya)

所属研究機関名：国立研究開発法人海洋研究開発機構

部局名：大気海洋相互作用研究分野

職名：主任研究員

研究者番号（8桁）：80324937

研究分担者氏名：宮崎 和幸

ローマ字氏名：(MIYAZAKI, Kazuyuki)

所属研究機関名：国立研究開発法人海洋研究開発機構

部局名：地球環境観測研究開発センター

職名：招聘主任研究員

研究者番号（8桁）：30435838

(2)研究協力者

研究協力者氏名：菅原 敏

ローマ字氏名：(SUGAWARA, Satoshi)

研究協力者氏名：石戸谷 重之

ローマ字氏名：(ISHIDOYA, Shigeyuki)

研究協力者氏名：稲飯 洋一

ローマ字氏名：(INAI, Yoichi)

研究協力者氏名：BELIKOV, Dmitry

ローマ字氏名：(BELIKOV, Dmitry)

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。