

科学研究費助成事業（基盤研究（S））公表用資料
〔平成29年度研究進捗評価用〕

平成26年度採択分
平成29年3月10日現在

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

Synthesis of dynamical and chemical descriptions on the atmospheric processes in the Tropical Tropopause Layer

課題番号：26220101

長谷部 文雄 (HASEBE FUMIO)

北海道大学・大学院地球環境科学研究所・教授



研究の概要

温室効果ガスの蓄積とオゾン破壊物質の漸減が同時進行する成層圏において、その環境変動を理解するには化学的観点と力学的観点を統合した研究が必要である。本課題では、成層圏観測で日本を代表する2つの研究グループの連携により、熱帯において成層圏大気サンプリングと水蒸気・オゾン・エアロゾルゾンデなどによる統合観測を実施し、成層圏変動の理解を深める。

研究分野：環境学

キーワード：物質循環、成層圏大気サンプリング、水蒸気ゾンデ、オゾンゾンデ

1. 研究開始当初の背景

全球平均地表気温にも少なからぬ影響を及ぼす成層圏変動の解明には、化学的要因（例えば温室効果ガスやオゾン破壊物質の変動）と力学的要因（大気大循環の変調など）との間の相互作用に関する理解が不可欠である。このように複雑な相互作用の存在や観測の不足に加え、化学気候モデルで成層圏水蒸気の季節変動すら満足に再現できないなどの困難も相まって、成層圏環境問題には未解明の課題が多く残されている。

2. 研究の目的

化学的に不活性で人間活動により増加しつつあるCO₂などの大気微量成分は、成層圏流入時の混合比を保存しながら循環するため、その混合比を測定すれば大気成層圏流入後の経過時間（大気の年齢）を推定できることからclock tracerと呼ばれる。1980年代から蓄積されてきた中高緯度における観測データは年齢の長期増加傾向を示唆するが、化学気候モデルによる診断は逆に減少傾向を示す。大気大循環（Brewer-Dobson (BD) 循環）の速さの指標である大気の年齢に関するこの矛盾は、成層圏変動の理解の障害となってきた。本研究の目的は、亜熱帯混合障壁により中緯度大気の混合が制限され、成層圏流入後の経過時間として水蒸気テープレコーダ（熱帯成層圏水蒸気分布に特有の縞模様構造）を併用できる熱帯成層圏に焦点を合わせ、3に示す統合観測によって成層圏流入大気に作用する脱水過程と成層圏大気の年齢決定過程とに関する理解を深めることである。

3. 研究の方法

インドネシアのLAPAN Biak観測所で大気球を用いた成層圏大気サンプリングを実施し、採取された大気の分析によりclock tracerの混合比や各種温室効果ガスの混合比・同位体比などの高度分布を求め、大気化学的観点から大気履歴情報などを取得する。同時期に、水蒸気・オゾン・CO₂ゾンデ・雲粒子センサー・光学粒子カウンター・エアロゾルサンプラーなどをゴム気球により飛ばし、大気力学的観点から熱帯対流圏界層(TTL)内の水蒸気過飽和に関する知見を深めるとともに、大気が成層圏へ流入する最終段階における水蒸気量決定過程を解明する。

4. これまでの成果

2015年2月に大気球4機による大気サンプリングと各種ゾンデによる水蒸気・オゾン・微粒子準同時観測を実施した。観測期間中連続運用したライダーも順調に稼働し、観測は成功した。統合観測の核をなすこの成果は、欧米で準備が進められているStratole-2の先駆けをなすものでもあり、和文の報告書(3)を公表するとともに、その概要をBulletin of the American Meteorological Societyに投稿した(査読中)。具体的成果は以下の通り。大気サンプリングによる採取大気の分析により、高度17.2 kmから28.7 kmまでの7高度で代表的clock tracerであるCO₂とSF₆の高度分布が得られた。鉛直移流の卓越する赤道成層圏では、古い大気が存在する高高度に向けてclock tracerの混合比は減少する。今回の観測により、24 kmから25 km付近

を境に高度に伴う混合比減少率の大きな変動が認められた。この構造は、BD循環の深い分枝と浅い分枝との間の相違や中緯度大気の混合過程の高度依存性を反映していると考えられ、現在、詳しい解析を行っている。

今回の大気サンプリングによるもう一つの重要な成果は、大気重力分離に関する証拠が熱帯成層圏で確認されたことである。重力分離は、質量依存性のある分子拡散が質量依存性のない移流や渦拡散に対して無視できない超高層大気中で顕在化するが、今回の発見は、中高緯度成層圏で見出されていたその存在を決定付けるだけでなく、clock tracerと水蒸気テープレコーダに続く第3の独立な物理量として、重力分離が成層圏における大気の滞在時間の指標として使えることを示した。また、N₂Oアイソトポキョールの分析から、水平混合の時間スケールと比較したときのN₂O光解離時定数が、中部成層圏では短く下部成層圏では長いことが見出された。

各種ゾンデ観測からも概ね所期の結果が得られつつある。水蒸気・オゾンゾンデで観測された水蒸気テープレコーダは、大気成層圏流入後の滞在時間に関する独立な情報として解析に利用されている。エアロゾルサンプラーでは高度10 kmから25 kmの領域で25試料が採取された。その分析から硫酸塩粒子やケイ酸塩粒子に加えて海塩粒子などの多様な粒子が見出され、TTLが対流圏と成層圏を起源とする粒子の混在領域であることが明らかとなった。この結果は光学粒子カウンターによる観測結果とも整合的である。一方、雲粒子センサーの開発は関連課題による観測の機会も利用して順調に進み、液滴と氷晶の識別法を確立するなど、実用化のめどが立った(1)。また、長期間にわたり蓄積されてきたゾンデデータの解析には、測器の更新に伴うバイアスの評価が重要であるため、その精密な評価を行った(4)。

循環場・波動解析の分野では、2000年を境とした成層圏水蒸気の階段関数的減少のメカニズムに関する仮説を論文発表した(2)。TTL内脱水過程に関わる巻雲生成については、航空機観測を参照した理想化条件下での巻雲生成について雲微物理モデルを用いて議論した(5)。一方、大気サンプリングによりclock tracerから評価された大気の年齢に関する解析では、鍵となる年齢スペクトルについて考察中である。客観解析場を用いて後方流跡線により求めたスペクトルに基づき、CO₂とSF₆の高度分布と水蒸気テープレコーダの統一的再現を試みているが、まだ満足のゆく結果に至っていない。

5. 今後の計画

残された課題の達成に向けた観測点の有効配置を検討した結果、TTL脱水過程については、北半球冬季に上流域に位置する中部熱帯太平洋のTarawaと夏季に中緯度からTTLへの流入・混合過程を捉えるためのベトナム

Hanoiに拠点を集約する。Tarawaでは季節内振動、赤道波、大規模移流の寄与の定量化を目指し、雲粒子センサーとの同時観測を行う。Hanoiは冬季の流出下流域としても機能させ、成層圏流入の最終段階での水蒸気量決定過程を解明する。観測点集約に伴い、Biakに設置していたライダーをLAPAN Bandungに移設し、日本から研究者を派遣することなく現地研究者により適切な時期に観測を行う。

成層圏水蒸気の2000年問題に関して提起した仮説を検証するため、大気大循環モデルによる解析を進める。大気の年齢スペクトルの推定に関しては、後方流跡線に基づくLagrange的推定法を精密化するとともに、Euler的手法も併用して相互に矛盾のない結果を得る。その後、年齢スペクトルを構成する大気塊の分類を行い、移流経路や水平混合の影響を評価する。

6. これまでの発表論文等(受賞等も含む)

1. Fujiwara, M., T. Sugidachi, T. Arai, K. Shimizu, M. Hayashi, Y. Noma, H. Kawagita, K. Sagara, T. Nakagawa, S. Okumura, Y. Inai, T. Shibata, S. Iwasaki, and A. Shimizu (2016), Development of a cloud particle sensor for radiosonde sounding, *Atmos. Meas. Tech.*, 9, 5911-5931, doi:10.5194/amt-9-5911-2016.
2. Hasebe, F., and T. Noguchi (2016), A Lagrangian description on the troposphere-to-stratosphere transport changes associated with the stratospheric water drop around the year 2000, *Atmos. Chem. Phys.*, 4235-4249, doi:10.5194/acp-16-4235-2016.
3. 池田忠作, 青木周司, 森本真司, 菅原敏, 本田秀之, 豊田栄, 石戸谷重之, 中澤高貴, 長谷部文雄, 稲飯洋一, 林政彦, 柴田隆, 他13名 (2017印刷中), インドネシア・ビアク島におけるクライオジェニックサンプラー回収気球実験, 宇宙航空研究開発機構研究開発報告, JAXA-RR-16-008, 33-48, doi:10.20637/JAXA-RR-16-008/0002.
4. Inai, Y., M. Shiotani, M. Fujiwara, F. Hasebe, and H. Vömel (2015), Altitude misestimation caused by the Vaisala RS80 pressure bias and its impact on meteorological profiles, *Atmos. Meas. Tech.*, 8, 4043-4054, doi:10.5194/amt-8-4043-2015.
5. Mimura, S., F. Hasebe, and T. Shibata (2016), Constraints on the formation of high-ice-concentration thin cirrus in the Tropical Tropopause Layer, *SOLA*, 12A, 18-21, doi:10.2151/sola.12A-004.

ホームページ等

<http://sower.ees.hokudai.ac.jp/kakenhi2014/>