

熱帯対流圏界層における力学・化学過程の解明 -2014 年 Biak 観測-

長谷部文雄¹、稲飯洋一²、柴田隆³、林政彦⁴、塩谷雅人²、西憲敬⁴、藤原正智¹、
宮崎和幸⁵、荻野慎也⁵、鈴木順子⁵、清水健作⁶、杉立卓治⁷、三村慧⁷、高島久洋⁴、澤田岳彦⁶

¹ 北大院地球環境、² 京大生存圏、³ 名大院環境、
⁴ 福岡大理、⁵ JAMSTEC、⁶ 明星電気、⁷ 北大院環境

1、はじめに

成層圏水蒸気量の定量的考察に基づき、Brewer (1949)は対流圏大気の成層圏流入経路が低温の熱帯域に限定されると指摘し、大気大循環像を成層圏にまで拡張した。その後の観測の蓄積に伴って脱水過程に関する理解は深まった(「成層圏の泉」仮説; Newell and Gould-Stewart, 1981)が、低温形成の物理過程が大気塊の鉛直上昇に伴う膨張/冷却であるとの認識は一貫して維持された。半世紀余りを経てこれを覆したのが Holton and Gettelman (2001) である。彼らは大気塊が力学的に維持される低温域を準水平的に移流することこそが脱水過程の本質であると指摘し、脱水の主役を成層圏へ貫入する積乱雲から対流圏界面付近に形成される巻雲へと置き換えた。水平移流仮説の基礎となったのは、成層圏大気大循環駆動メカニズムに関する理解の大変革 (Haynes et al., 1991; Holton et al., 1995)と熱帯対流圏界層 (Tropical Tropopause Layer; TTL) 概念の導入 (Highwood and Hoskins, 1998; Folkins et al., 1999) であった。また、対流圏界面温度の季節変動が成層圏流入大気の水蒸気混合比として記録され成層圏を上昇している様子が「大気のテープレコーダー」(Mote et al., 1996) として捉えられ、赤道と中緯度との間の混合障壁の存在が認識されるようになった (Plumb, 1996)。こうした力学理論の発展に基づく成層圏水蒸気の理解に関する変遷は、成層圏化学や地球温暖化の理解にも及ぶ。

このような学術的背景の中、我々は熱帯域におけるオゾン・水蒸気ゾンデ観測 Soundings of Ozone and Water in the Equatorial Region (SOWER) プロジェクトの下、1998 年から TTL を狙ったゾンデ観測を継続的に実施してきた。特に 2003 年 12 月以降は TTL の中でも時空間的に最も低温となる北半球冬季の西部太平洋上空に焦点を絞り、これまでに 1) TTL における過飽和大気の水物理的特徴 (Shibata et al., 2007, 2012) や、2) 熱帯大気波動の TTL 脱水過程への影響 (Fujiwara et al., 2001; Suzuki et al., 2010; Inai et al., 2012)、3) TTL 内の水平移流に伴う脱水の定量化 (Hasebe et al., 2007, 2013; Inai et al., 2013)、などを明らかにしてきた。そして、2014 年 2-3 月に欧米の研究グループによる西部太平洋熱帯域における 3 つの航空機観測 Airborne Tropical Tropopause Experiment (ATTREX), CONvective TRansport of Active Species in the Tropics (CONTRAST), Co-ordinated Airborne Studies in the Tropics (CAST) が実施され、これらと同期した観測を SOWER でも計画・実施した。なお、今回の観測はインドネシア航空宇宙庁 (LAPAN) との共同観測である。

2、観測概要

ATTREX-CONTRAST-CAST に同期して 2014 年 2 月に LAPAN-SOWER 共同観測が実施されたのはインドネシア・ビアク島（南緯 1.17 度、東経 136.06 度）である。2 月 17 日に第一陣がビアク島に到着、2 日間の観測準備の後 19 日よりゾンデ観測を実施し、2 月 26 日までに計 10 回のゴム気球飛揚を行った。気球飛揚時刻は、太陽光による水蒸気ゾンデ観測への悪影響を回避するためと現地の Air Traffic Control の制約から、現地時間の 15 時、もしくは 18 時に限定された。図 1 は 2 月 22 日現地時間 17 時 55 分頃の気球飛揚直前の様子である。また 19 日と 20 日の飛揚において、低温化した TTL において気球が破裂してしまうトラブルが続発した。これに対し、ゴム気球を飛揚前に灯油に漬ける「油漬け」と、ペイロードの軽量化を講じて水素ガス充填量を抑えることでゴム気球への負担を軽減した。これらの結果、以降の観測においては気球は安定して 30 km 程度まで飛揚した。ゾンデで測定された気象要素は気温、気圧、水蒸気濃度、オゾン濃度、水平風ベクトル、エアロゾル・雲粒子、などである。

3、観測結果

図 2 は SOWER により 2014 年 2 月にインドネシア・ビアク島で観測された地表から 30 km までの気象要素の鉛直プロファイルである。水蒸気は対流圏で高度に伴い急激に減少し、高度 16-18 km にわたり極小値（約 3 ppmv 程度）を示し、その上空ではわずかに増加し高度 20 km 付近の小さな極大とともに 4-5 ppmv 程度の値が示されている。他の物理量に注目すると、飽和水蒸気混合比、オゾン混合比、東西風速、温位について高度 16 km に急激な鉛直勾配の変化が存在しており、地表からこの高度までが対流に支配された対流圏であると考えられる。また高度 18 km 付近にもこれらのプロファイルに急激ではないがやはり鉛直勾配の変化が示されている。飽和水蒸気混合比は気温に依存する物理量であり基本的にその鉛直構造はそのまま気温の構造と見なす事ができるが、高度 16-18 km 付近が低温であり、その中でも 17 km 付近は局所的な気温極大となっている。

以上のような各観測プロファイルの鉛直構造について理解するために、全球気象データを用いた解析を行った。その結果、観測時期にビアク島の東方で活発化した Madden-Julian 振動に伴う大規模擾乱によってビアク上空の TTL に経度-高度方向に傾いた温度偏差場が形成されていた（ケルビン波応答）ことが示された。ゾンデにより観測された各物理量に見られた 16-18 km 付近の鉛直構造は、このように対流圏の大規模擾乱の力学応答として形成されたものであると理解された。さらに東西風速データに見られる高度 16 km 付近の非常に強いシア構造も同様に大規模擾乱に起因しており、その上下で大気質の流入元が異なるため、これが物質的境界になっていると解釈された。このことは全球気象データを用いた流跡線解析やエアロゾル・雲粒子観測結果とも整合的であった。

今後は、以上の結果を含め ATTREX-CONTRAST-CAST の研究チームと観測データを共有し、相互比較や 3 次元的な気象場の構造把握について、密に連携し解析を進めていく。



図 1 : 2014 年 2 月 22 日午後 17 時 55 分頃 (現地時間)、今キャンペーン観測において 4 回目のオゾン・水蒸気ゾンデ飛揚直前の様子。手前にゾンデ本体を、奥に水素を充填したゴム気球を保持している。

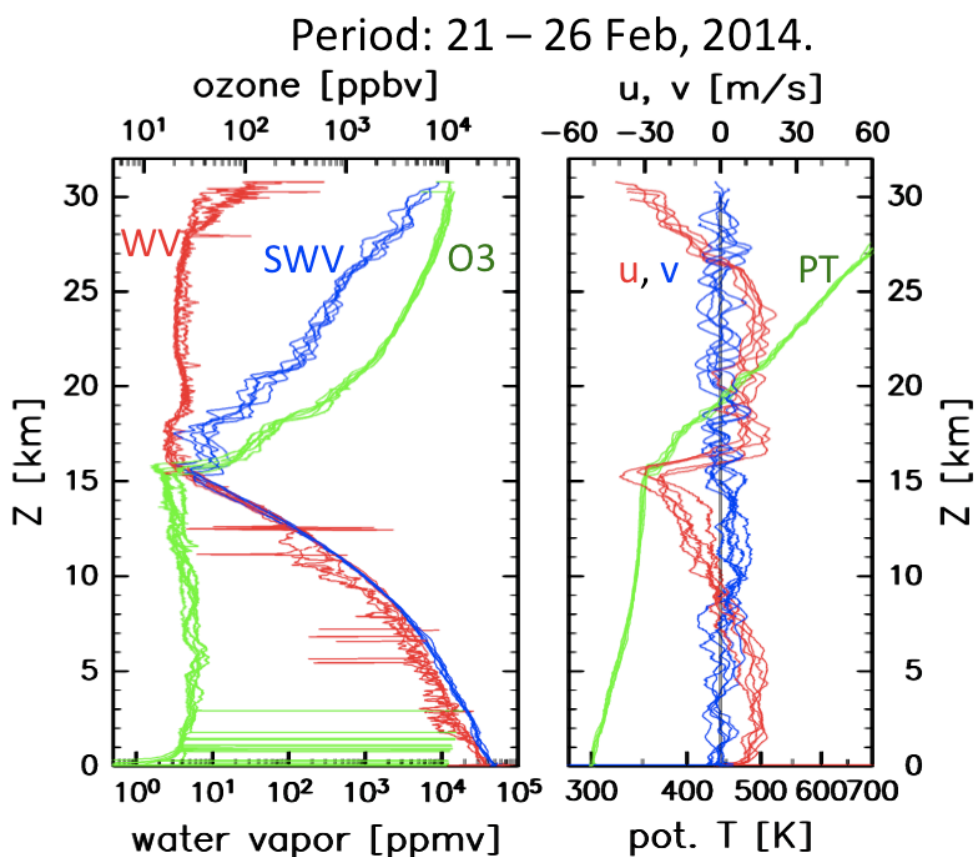


図 2 : 高度 30 km 付近までデータを取得できた 5 つの観測についての (左パネル) 水蒸気混合比 (赤)、飽和水蒸気混合比 (青)、オゾン混合比 (緑)、(右パネル) 東西風 (赤)、南北風 (青)、温位 (緑) の鉛直プロファイル。

参考文献

- Brewer (1949), *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, 75, 351–363.
- Folkens et al. (1999), *J. Geophys. Res.*, 104, 22,095–22,102.
- Fujiwara et al. (2001), *Geophys. Res. Lett.*, 28, No. 16, 3143–3146.
- Hasebe et al. (2007), *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 803–813.
- Hasebe et al. (2013), *Atmos. Chem. Phys.*, 13, 4393–4411, doi:10.5194/acp-13-4393-2013.
- Haynes et al. (1991), *J. Atmos. Sci.*, 48, 651–678.
- Highwood and Hoskins (1998), *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, 124, 1579–1604.
- Holton and Gettelman (2001), *Geophys. Res. Lett.*, 28, 2799–2802.
- Holton et al. (1995), *Rev. Geophys.*, 33, 403–439.
- Inai et al. (2012), *Geophys. Res. Lett.*, 39, L20811, doi:10.1029/2012GL053638.
- Inai et al. (2013), *Atmos. Chem. Phys.*, 13, 8623–8642, doi:10.5194/acp-13-8623-2013.
- Mote et al. (1996), *J. Geophys. Res.*, 101, 3989–4006.
- Newell and Gould-Stewart (1981), *J. Atmos. Sci.*, 38, 2789–2796.
- Plumb (1996), *J. Geophys. Res.*, 101 (D2), 3957–3972.
- Shibata et al. (2007), *J. Geophys. Res.*, 112, D03210, doi:10.1029/2006JD007361.
- Shibata et al. (2012), *J. Geophys. Res.*, 117, D11209, doi:10.1029/2011JD017029.
- Suzuki et al. (2010), *SOLA*, 6, 97–100, doi:10.2151/sola.2010-025.