

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 27 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2009～2012

課題番号：21244072

 研究課題名（和文） 大気微量成分観測と 4 次元同化場解析による熱帯対流圏界層内
脱水過程の解明

 研究課題名（英文） Study on the dehydration in the Tropical Tropopause Layer by
observations of minor constituents and analyses of 4-D assimilation field

研究代表者

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

研究者番号：00261735

研究成果の概要（和文）：ゾンデを用いた現場観測により熱帯成層圏水蒸気量の長期トレンドを明らかにするとともに、熱帯対流圏界層（TTL）内を水平移流しながら巻雲を形成し凝結脱水中の大気の対氷過飽和度が 80% に達する事例を見出した。また、観測された大気の水蒸気混合比とその大気の流跡線に沿って上流へ遡ることにより評価される最小飽和水蒸気混合比との比較解析により、TTL 内を水平移流しながらゆっくり上昇する大気に働く脱水過程の観測的記述に初めて成功した。

研究成果の概要（英文）：The long-term trend of the water concentration in the tropical stratosphere has been estimated from in situ observations by radiosondes. Supersaturations close to 80% in relative humidity with respect to ice have been observed in cirrus clouds advected horizontally in the Tropical Tropopause Layer (TTL). General features of dehydration associated with horizontal advection for the air parcels slowly ascending in the TTL have been observationally described for the first time by investigating the water mixing ratio of the observed air parcels and their minimum saturation mixing ratio estimated along the trajectories upstream.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	9,700,000	2,910,000	12,610,000
2010 年度	9,800,000	2,940,000	12,740,000
2011 年度	9,800,000	2,940,000	12,740,000
2012 年度	5,600,000	1,680,000	7,280,000
年度			
総計	34,900,000	10,470,000	45,370,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学、気象・海洋物理・陸水学

キーワード：地球環境システム・成層圏組成変動・熱帯対流圏界層・脱水過程・ゾンデ観測・過飽和度・同化場解析

1. 研究開始当初の背景

温室効果に限らず様々な物理化学過程を介して地球環境を規定する水は常温で飽和・凝結するため高度と共に急激に減少し、低温の熱帯対流圏界面を通過する際の氷結・脱水により極度に乾燥した大気が成層圏

へ流入する。成層圏水蒸気は 1980 年代から 1990 年代にかけて著しい増加傾向を示したが、2001 年を境に階段関数的に減少した。こうした変動は大気循環の駆動過程・圏界面領域の温度変動と対応するはずであるが、そのメカニズム、さらには、そうした温度・水蒸

気変動がオゾン層回復シナリオに及ぼす影響などについては分かっていない。

成層圏水蒸気を規定する脱水過程の理解は、熱帯対流圏層(Tropical Tropopause Layer; TTL)概念の導入と TTL 内水平移流に注目した脱水仮説の提示により革新的な変化を遂げた。すなわち、それまでの鉛直1次元の上昇流に伴った断熱冷却ではなく、大気塊が TTL 内を準水平的に移流する過程で曝される低温こそ、成層圏流入大気の保持し得る水蒸気量を支配する要因であると認識されるに至った。このような脱水過程が大気大循環モデル内で機能する事が確認され、客観解析場に基づく大気循環の Lagrange 的記述により成層圏水蒸気変動が比較的良好に再現される事は上記の仮説を支持するが、これらの研究における脱水過程の記述は極度に簡略化されており、現場観測データによる検証が課題として残されていた。

2. 研究の目的

我々の研究グループは、熱帯太平洋域におけるオゾン・水蒸気の時空間分布とその変動過程を明らかにするために、鏡面冷却式水蒸気ゾンデ・ECC オゾンゾンデによる精密な観測(SOWER プロジェクト)を実施してきた。熱帯西部太平洋域におけるこのような活動は世界的にも類がなく、国際的に一定の評価を得てきた。本研究の目的は、成層圏大気環境に対する水蒸気とオゾンの重要性に鑑み、熱帯下部成層圏水蒸気の長期変動を現場観測により記述するとともに、対流圏と成層圏との物質交換、とりわけ成層圏へ流入する大気に作用する脱水メカニズムに関する理解を深めることである。

3. 研究の方法

物理化学過程による大気質変動の記述には Lagrange 的手法が有効である。本研究では、熱帯西部太平洋域に展開した観測網により多様な履歴をもつ大気塊を観測し、循環場の特性と対応させて脱水過程の気候学的特性を記述する。さらに、オゾンホール研究で実績のある match 法を TTL 内脱水過程に適用し、脱水効率を定量的に評価する。すなわち、TTL 内を移流する同一大気塊を複数回観測し、観測される水蒸気量の相違により移流中に生じた脱水量を評価する。流跡線計算には、既存の全球解析場に加え、データ同化の適用により高度化された独自の気象場も利用する。これにより、時空間分解能の改善のみならず、アンサンブル計算による誤差の評価などが可能になると期待される。また、理論的に解明できていない極度の過飽和に関する観測事例の集積により微物理過程の理解を深め、気候変動予測モデルの精緻化に貢献する。

4. 研究成果

(1) 熱帯下部成層圏水蒸気は、1990年代には中緯度と同様の漸増傾向を示したが、2001年前後の急激な減少の結果、2000年代初頭は低い値が継続した。その値は2004年以降に回復し再び増加に転じたように見える(図1)。これら10年規模の水蒸気変動は、客観解析場に見られる100 hPa面の温度変動とよく対応している。

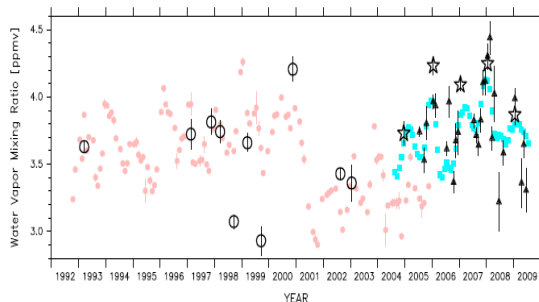


図1: ゾンデ観測及び衛星観測により求められた熱帯下部成層圏における水蒸気変動 (Fujiwara et al., 2010)

(2) 西部太平洋 TTL を移流しながら非断熱加熱によりゆっくり上昇する大気塊において進行する脱水は、ゾンデ観測された水蒸気混合比(OMR)とその大気に移流中に経験した最小飽和水蒸気混合比(SMR_{min})との散布図により明瞭に表現される。すなわち、360-365 K 温位面上で観測される均一核生成の臨界値を超える過飽和($OMR > 1.6 \times SMR_{min}$)は大気塊に脱水が進行中であることを、380 K 温位面上における $OMR \sim SMR_{min}$ の関係は有効な脱水が働かない事を示唆している(図2)。このような過程による脱水効率を定量化するために、TTL 内を水平移流する大気中で match 対と見なせる大気塊を特定し、1回目と2回目の観測で得られた水蒸気量を比較した(図3)。370-380 K 温位領域における脱水事例は見出されなかったが、下部TTLで特定されたmatch事例について経路中の温度履歴と対応させた解析の結果、氷結開始必要条件として対氷相対湿度 $207 \pm 81\%$ 、氷結開始後の到達可能相対湿度として $83 \pm 30\%$ 、氷結に必要な時間スケールとして 2-3 時間という値を得た。こうした脱水過程を経た TTL 大気は亜熱帯へ流出し、Hanoi におけるオゾンの冬季極小を形成する。

(3) 圏界面付近の低温条件下(~ 180 K)で存在する巻雲中において、対氷相対湿度で 80% を超える過飽和が観測された。また、2011年1月のライダーおよび光学的粒子計数器(OPC)による観測では、圏界面付近の厚さ 1~2 km の硫酸塩エアロゾル層中に薄い(数密度 $10^5/m^3$ 以下)巻雲が見出された(図4)。後方流跡線計算の結果から、脱水進行中の大気塊

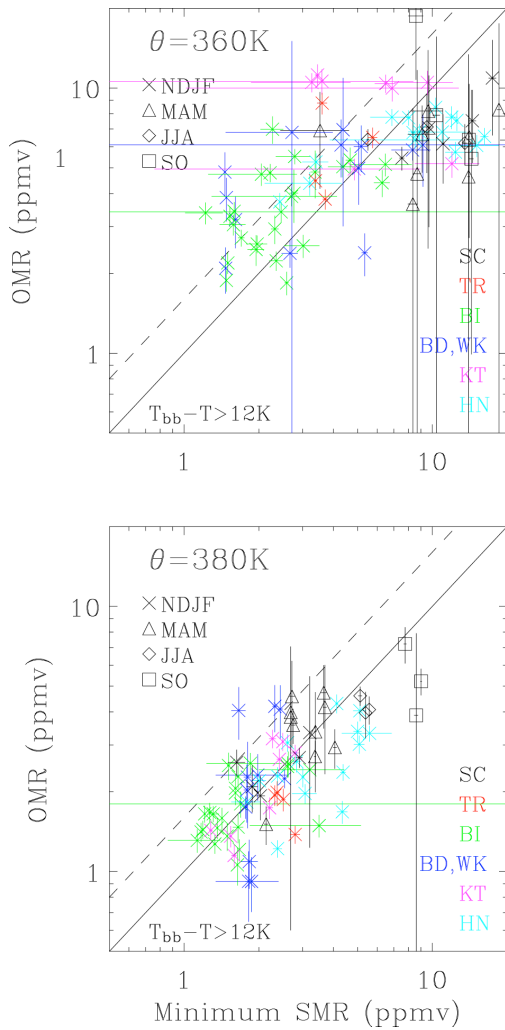


図 2: ゾンデ観測された水蒸気混合比 (OMR) とその大気に移流中に経験した最小飽和水蒸気混合比 (SMR_{min}) との散布図。上が 360 K、下が 380 K 温位面上における結果 (Hasebe et al., 2013 より抜粋)

を観測したものと判断された。

(4) 熱帯中部太平洋における過去の観測や SOWER 観測で見出された水蒸気分布の地点間の相違は、地理的要因よりも MJO のような大規模擾乱に伴う TTL 領域の波動の位相構造に強く規定されている事が明らかとなった。

(5) 衛星観測により得られた NO_2 , O_3 , CO, HNO_3 データを同時に同化する事により、対流圏における大気微量成分の分布や放出量を評価する手法には大きな進展があった (図 5)。一方、温度に鋭敏な脱水過程を必要な精度で再現するためのデータ同化には、解決すべき困難が依然として残されている。予備的な解析によれば、時間分解能の高度化が重要である事、安易な nudging による同化は擬似的非断熱加熱などの副作用をもたらす事などが明らかとなった。今後は同化手法の高度化を

図るとともに、力学的流跡線計算に対する確率論的取り扱いとアンサンブル計算の導入により、モデル解像度以下の対流活動による寄与を取り込む試みも進める予定である。

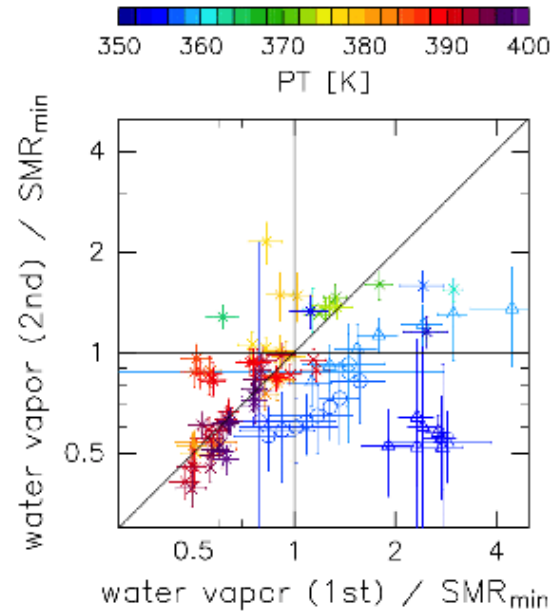


図 3: Match と判定された大気塊について、観測された水蒸気混合比と最小飽和水蒸気混合比の比を求め、1 回目の値を横軸、2 回目の値を縦軸にとって描いた散布図 (Inai et al., 2013)

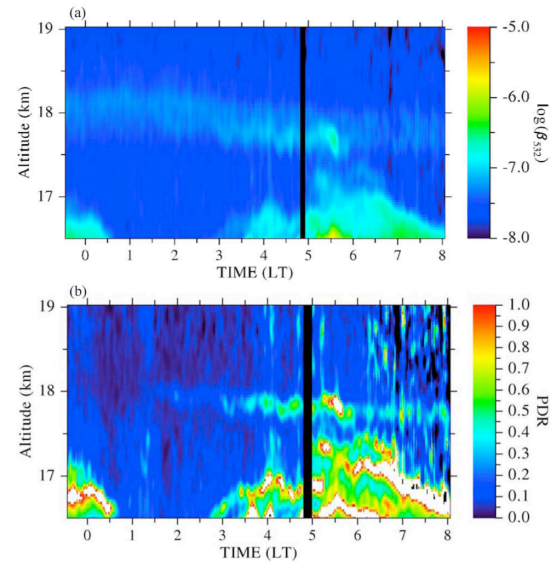


図 4: 2011 年 1 月 12 日の Biak (1.2 S, 136.1 E) におけるライダー観測で得られた波長 532 nm における (上) 後方散乱係数と (下) 偏光解消度の時間-高度断面 (Shibata et al., 2012 より抜粋)

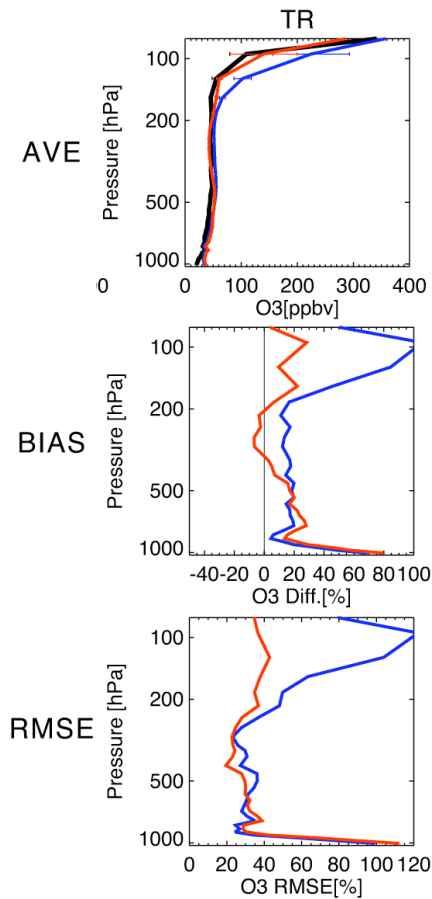


図 5: 2007 年 1 月 7 日から 30 日までの期間で平均された熱帯域における鉛直オゾン分布。上段は(黒)オゾンゾンデによる観測値、(青)モデルによる計算値、(赤)衛星データを同化して得られた結果。中段と下段は、それぞれゾンデ観測値に対するバイアスと平均自乗誤差の高度分布 (Miyazaki et al., 2012 より抜粋)

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 40 件)

- ① Sugidachi, T., and M. Fujiwara, 2013: Correction of the stepwise change observed at 0°C in Meisei RS2-91, RS-01G, and RS-06G radiosonde relative humidity profiles, *J. Meteor. Soc. Japan*, 91, in press. 査読有
- ② Ogino, S.-Y., M. Fujiwara, M. Shiotani, F. Hasebe, J. Matsumoto, Thuy Ha T. Hoang, and Tan Thanh T. Nguyen, 2013: Ozone variations over the northern subtropical region revealed by ozonesonde observations in Hanoi, *J. Geophys. Res.*, 118, 3245-3257, doi:10.1002/jgrd.50348. 査読有

- ③ Hasebe, F., Y. Inai, M. Shiotani, M. Fujiwara, H. Vömel, N. Nishi, S.-Y. Ogino, T. Shibata, S. Iwasaki, N. Komala, T. Peter, and S. J. Oltmans, 2013: Cold Trap Dehydration in the Tropical Tropopause Layer Characterised by SOWER Chilled-Mirror Hygrometer Network Data in the Tropical Pacific, *Atmos. Chem. Phys.*, 13, 4393-4411, doi:10.5194/acp-13-4393-2013. 査読有

- ④ Inai, Y., F. Hasebe, M. Fujiwara, M. Shiotani, N. Nishi, S.-Y. Ogino, H. Vömel, S. Iwasaki, and T. Shibata, 2013: Dehydration in the tropical tropopause layer estimated from the water vapor match. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 13, 633-688, doi:10.5194/acpd-13-633-2013. 査読無

- ⑤ Inai, Y., T. Shibata, M. Fujiwara, F. Hasebe, and H. Vömel, 2012: High supersaturation inside cirrus in well-developed tropical tropopause layer over Indonesia, *Geophys. Res. Lett.*, 39, L20811, doi:10.1029/2012GL053638. 査読有

- ⑥ Kubokawa, H., M. Fujiwara, T. Nasuno, M. Miura, M. K. Yamamoto, and M. Satoh, 2012: Analysis of the tropical tropopause layer using the Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model (NICAM): 2. An experiment under the atmospheric conditions of December 2006 to January 2007, *J. Geophys. Res.*, 117, D17114, doi:10.1029/2012JD017737. 査読有

- ⑦ Iwasaki, S., T. Shibata, H. Okamoto, H. Ishimoto, and H. Kubota, 2012: Mixtures of stratospheric and overshooting air measured using A-Train sensors, *J. Geophys. Res.*, 117, D12207, doi:10.1029/2011JD017402. 査読有

- ⑧ Shibata, T., M. Hayashi, A. Naganuma, N. Hara, K. Hara, F. Hasebe, K. Shimizu, N. Komala, Y. Inai, H. Vömel, S. Hamdi, S. Iwasaki, M. Fujiwara, M. Shiotani, S.-Y. Ogino, and N. Nishi, 2012: Cirrus cloud appearance in a volcanic aerosol layer around the tropical cold point tropopause over Biak, Indonesia, in January 2011, *J. Geophys. Res.*, 117, D11209, doi:10.1029/2011JD017029. 査読有

- ⑨ Nishimoto, E., and M. Shiotani, 2012: Seasonal and interannual variability in the temperature structure around the tropical tropopause and its relationship with convective activities, *J. Geophys. Res.*, 117, D02104, doi:10.1029/2011JD016936. 査読有

- ⑩ Koishi, K., and M. Shiotani, 2012: Water Vapor and Ozone Variations in the Tropical

Tropopause Layer during the Central Equatorial Pacific Experiment Campaign, *J. Meteor. Soc. Japan*, 90, 403-416, doi:10.2151/jmsj.2012-304. 査読有

⑪ Miyazaki, K., H. J. Eskes, K. Sudo, M. Takigawa, M. van Weele, and K. F. Boersma, 2012: Simultaneous assimilation of satellite NO₂, O₃, CO, and HNO₃ data for the analysis of tropospheric chemical composition and emissions, *Atmos. Chem. Phys.*, 12, 9545-9579, doi:10.5194/acp-12-9545-2012. 査読有

⑫ Miyazaki, K., T. Maki, P. K. Patra, and T. Nakazawa, 2011: Assessing the impact of satellite, aircraft, and surface observations on CO₂ flux estimation using an ensemble-based 4D data assimilation system, *J. Geophys. Res.*, 116, D16306, doi:10.1029/2010JD015366. 査読有

⑬ Fujiwara, M., H. Vömel, F. Hasebe, M. Shiotani, S.-Y. Ogino, S. Iwasaki, N. Nishi, T. Shibata, K. Shimizu, E. Nishimoto, J. M. Valverde-Canossa, H. B. Selkirk, and S. J. Oltmans, 2010: Seasonal to decadal variations of water vapor in the tropical lower stratosphere observed with balloon-borne cryogenic frostpoint hygrometers, *J. Geophys. Res.*, 115, D18304, doi:10.1029/2010JD014179. 査読有

⑭ Suzuki, J., M. Shiotani, and N. Nishi, 2010: Lifetime and longitudinal variability of equatorial Kelvin waves around the tropical tropopause region, *J. Geophys. Res.*, 115, D03103, doi:10.1029/2009JD012261. 査読有

⑮ Hamada, A., and N. Nishi, 2010: Development of a Cloud-Top Height Estimation Method by Geostationary Satellite Split-Window Measurements Trained with CloudSat Data, *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 49, 2035-2049, DOI:10.1175/2010JAMC2287.1. 査読有

⑯ Suzuki, J., M. Fujiwara, A. Hamada, Y. Inai, J. Yamaguchi, R. Shirooka, F. Hasebe, and T. Takano, 2010: Cloud-top height variability associated with equatorial Kelvin waves in the tropical tropopause layer during the Mirai Indian Ocean cruise for the study of the MJO-convection onset (MISMO) campaign, *SOLA*, 6, 97-100, doi:10.2151/sola.2010-025. 査読有

⑰ Nagai, T., B. Liley, T. Sakai, T. Shibata, and O. Uchino, 2010: Post-Pinatubo Evolution and Subsequent Trend of the Stratospheric Aerosol Layer Observed by Mid-Latitude Lidars in Both Hemispheres,

SOLA, 6, 69-72, doi:10.2151/sola.2010-018. 査読有

⑱ Miyazaki, K., 2009: Performance of a local ensemble transform Kalman filter for the analysis of atmospheric circulation and distribution of long-lived tracers under idealized conditions, *J. Geophys. Res.*, 114, D19304, doi:10.1029/2009JD011892. 査読有

⑲ Fujiwara, M., S. Iwasaki, A. Shimizu, Y. Inai, M. Shiotani, F. Hasebe, I. Matsui, N. Sugimoto, H. Okamoto, N. Nishi, A. Hamada, T. Sakazaki, and K. Yoneyama, 2009: Cirrus observations in the tropical tropopause layer over the western Pacific, *J. Geophys. Res.*, 114, D09304, doi:10.1029/2008JD011040. 査読有

⑳ Inai, Y., F. Hasebe, K. Shimizu, and M. Fujiwara, 2009: Correction of radiosonde pressure and temperature measurements using simultaneous GPS height data, *SOLA*, 5, 109-112, doi:10.2151/sola.2009-028. 査読有

[学会発表] (計 83 件)

① Hasebe, F., and T. Shibata, Critical Outstanding TTL Questions: Ground Based Observations, A U.S.-Japan Workshop on the Tropical Tropopause Layer: State of Current Science and Future Observational Needs, 2012年10月15-19日, University of Hawaii (USA)

② 稲飯洋一, 青木周司, 本田秀之, 菅原敏, 森本真司, 長谷部文雄, 植松光夫, 白鳳丸熱帯東部太平洋気球観測によるTTL上端大気のage推定, 日本気象学会2012年秋季大会, 2012年10月3-5日, 北海道大学(札幌市)

③ 荻野慎也, 藤原正智, 塩谷雅人, 長谷部文雄, 松本淳, H. T. T. Ha, N. T. Tan Thanh, ハノイのオゾンゾンデ観測に基づく北半球亜熱帯域におけるオゾン変動, 地球惑星科学連合大会, 2012年5月20-25日, 幕張メッセ国際会議場(千葉県)

④ Nishi N., A. Hamada, M. Ohigawa, and S. Shige, Analysis of tropical cloud systems using a new cloud-top height data by geostationary satellite splitwindow measurements trained with CloudSat data, AGU Fall Meeting, 6 December 2011, Moscone Convention Center (San Francisco, USA)

⑤ Shiotani, M., and E. Nishimoto, SOWER (Soundings of Ozone and Water in the Equatorial Region): Variability of temperature structure around the tropical tropopause, WCRP Open Science Conference, 25 October 2011, Sheraton Denver Downtown Hotel (Denver, USA)

⑥ Inai, Y., F. Hasebe, M. Fujiwara, M. Shiotani, N. Nishi, S.-Y. Ogino, H. Vömel, T. Shibata, and S. Iwasaki, SOWER (Soundings of Ozone and Water in the Equatorial Region): Dehydration in the TTL estimated from the water vapor match, WCRP Open Science Conference, 25 October 2011, Sheraton Denver Downtown Hotel (Denver, USA)

⑦ Hasebe, F., Y. Domon, K. Miyazaki, and Y. Inai, SOWER (Soundings of Ozone and Water in the Equatorial Region): Application of Data Assimilation to the Study of TTL Dehydration, WCRP Open Science Conference, 25 October 2011, Sheraton Denver Downtown Hotel (Denver, USA)

⑧ Miyazaki, K., T. Sekiyama, T. Nakamura, M. Deushi, T. Maki, C. Kobayashi, H. Akiyoshi, K. Shibata, Y. Yokoo, M. Sawada, T. Nakazawa, S. Aoki, and T. Iwasaki, Recent developments in chemical data assimilation for atmospheric gases and aerosols in Japan, The 8th SPARC Data Assimilation workshop, 21 June 2011, Belgian Federal Science Policy Office (Brussels, Belgium)

⑨ 長谷部文雄, 熱帯対流圏界面を通じた物質交換, 日本気象学会2010年秋季大会(招待講演), 2010年10月28日, 京都テルサ

⑩ Hasebe, F., M. Shiotani, M. Fujiwara, H. Vömel, N. Nishi, S.-Y. Ogino, T. Shibata, S. Iwasaki, H. Takashima, Y. Inai, K. Shimizu, K. Miyazaki, K. Yamazaki, T. Iwasaki, and S. Oltmans, Recent results from SOWER activities in the tropical Pacific, IGAC-SPARC Joint Workshop, 25-26 October 2009, 京都大学芝蘭会館

⑪ Shibata, T., Simultaneous observations of humidity by CU-CFH and cirrus clouds by lidar in upper troposphere over Indonesia, IGAC-SPARC Joint Workshop, 25-26 October 2009, 京都大学芝蘭会館

⑫ Fujiwara, M., F. Hasebe, M. Shiotani, H. Vömel, S.-Y. Ogino, S. Iwasaki, N. Nishi, T. Shibata, K. Shimizu, E. Nishimoto, J. Valverde-Canossa, H. B. Selkirk, and S. J. Oltmans, Seasonal to decadal variations of water vapor in the tropical lower stratosphere observed with balloon-borne frost-point hygrometers, IGAC-SPARC Joint Workshop, 25-26 October 2009, 京都大学芝蘭会館

⑬ 土門優介, 宮崎和幸, 稲飯洋一, 長谷部文雄, データ同化を利用した流跡線計算高精度化の試み, 日本気象学会2009年春季大会, 2009年5月28-30日, つくば国際会議場(茨城県)

[その他]

ホームページ等

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

<http://www.oes.hokudai.ac.jp/~f-hasebe/SOWER/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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

研究者番号: 00261735

(2) 研究分担者

塩谷 雅人 (SHIOTANI MASATO)

京都大学・生存圏研究所・教授

研究者番号: 50192604

藤原 正智 (FUJIWARA MASATOMO)

北海道大学・大学院地球環境科学研究所・准教授

研究者番号: 00360941

西 憲敬 (NISHI NORIYUKI)

京都大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号: 00222183

荻野 慎也 (OGINO SHINYA)

独立行政法人海洋研究開発機構・地球環境変動領域・研究員

研究者番号: 80324937

宮崎 和幸 (MIYAZAKI KAZUYUKI)

独立行政法人海洋研究開発機構・地球環境変動領域・研究員

研究者番号: 30435838

柴田 隆 (SHIBATA TAKASHI)

名古屋大学・大学院環境学研究科・教授

研究者番号: 70167443

(3) 連携研究者

山崎 孝治 (YAMAZAKI KOJI)

北海道大学・大学院地球環境科学研究所・教授

研究者番号: 70270791

岩崎 俊樹 (IWASAKI TOSHIKI)

東北大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号: 80302074