

## 「熱帯対流圏界層に関する日米二国間ワークショップ： 研究の現状と観測の未来」に参加して\*

稲 飯 洋 一<sup>\*1</sup>・小 石 和 成<sup>\*2</sup>・坂 崎 貴 俊<sup>\*3</sup>・西 本 絵 梨 子<sup>\*4</sup>  
杉 立 卓 治<sup>\*5</sup>・櫻 井 万 祐 子<sup>\*6</sup>・山 木 望 愛<sup>\*7</sup>・江 口 菜 穂<sup>\*8</sup>

### 1. はじめに

熱帯対流圏界層 (Tropical Tropopause Layer, 以下 TTL) は熱帯域上空高度約14-18 km (気圧200-80 hPa, あるいは温位350-400K) に存在する対流圏-成層圏遷移層である。TTL は子午面循環場の観点から成層圏最上流部に位置しており, この層における物質輸送過程が成層圏へ流入する大気組成を決定づけている。TTL は地表からも宇宙空間からも遠く, これまで十分な観測が実施されてこなかったが, 今大きな転換期を迎えようとしている。2013年から壮大な TTL 観測キャンペーンが開始されるのである (5章参照)。

こうした流れの中, 我々の TTL に関する知見と問題点を再確認し, 観測の連携強化と相互補完による成果の最大化を図るために本ワークショップ (WS) は開催された。約30年前に中層大気力学に関する日米セミナー (廣田ほか 1983) が開催されたハワイ大学

East-West Center に49名 (内日本人19名) の TTL 研究者が日米に加え欧州からも集まった (第1図)。会議は2012年10月15日から19日にかけて以下のテーマに沿って進められた。

- 第1日: TTL の構造: これまでの観測と理解
- 第2日: TTL についての重要かつ未解決の問題
- 第3日: 2013-2015観測計画, 学生・若手プログラム
- 第4日: 問題解決に向けた観測とモデリング
- 第5日: 連携及び研究計画

TTL 研究の現状や会議の様子, 所感などを以下にまとめる。なお議事録は音声付きのパワーポイントで [http://scholar.valpo.edu/ttlworkshop/2012\\_proceedings/](http://scholar.valpo.edu/ttlworkshop/2012_proceedings/) (2013.9.3閲覧) に残されている。会議の中で特にユニークであったのは3-4日目に向け開催された学生および若手研究者による研究計画提案プログラムである (3章)。このプログラムを通じて我々が見た事や感じた事, 奮闘の様子をご覧頂き, 当該分野に吹く熱気とともに TTL 研究の面白さを感じ取っていただければ幸いである。 (稲飯洋一)

### 2. TTL 概説: これまでに得た知見と今後の課題

TTL という概念が提唱されたのは1990年代末である。対流圏は熱対流による鉛直混合が盛んな領域であり, 成層圏は強い絶対安定領域で大気波動が卓越する領域であるが, Highwood and Hoskins (1998) は複数の力学的側面から定義される対流圏界面高度 (例えば Cold Point Tropopause (CPT) や Lapse Rate Tropopause など) を比較し, 高度14 km から18 km の高度域に複数の境界を定義出来る事を指摘した (この領域が後に Tropical Tropopause Layer と呼ばれる)。同時期に Folkins et al. (1999) は CPT より低

\* A report on the U.S.-Japan bilateral workshop on the Tropical Tropopause Layer: State of current science and future observational needs.

<sup>\*1</sup> (連絡責任著者) Yoichi INAI, 東北大学大気海洋変動観測研究センター (現: 京都大学生存圏研究所).  
yoichi\_inai@rish.kyoto-u.ac.jp

<sup>\*2</sup> Kazunari KOISHI, 京都大学防災研究所.

<sup>\*3</sup> Takatoshi SAKAZAKI, 北海道大学環境科学院 (現: 京都大学生存圏研究所/日本学術振興会特別研究員 PD).

<sup>\*4</sup> Eriko NISHIMOTO, 京都大学生存圏研究所 (現: 京都大学理学研究科).

<sup>\*5</sup> Takuji SUGIDACHI, 北海道大学環境科学院.

<sup>\*6</sup> Mayuko SAKURAI, 名古屋大学環境学研究所.

<sup>\*7</sup> Moe YAMAKI, 北海道大学環境科学院.

<sup>\*8</sup> Nawo EGUCHI, 九州大学応用力学研究所.



第1図 参加者全員の集合写真。主催者は最前列で首飾りを付けている (Dr. Andrew Gettelman 提供)。

い高度14 km からオゾン濃度が増加する事に着目し、やはり対流圏と成層圏の境界は一意的には定義出来ず、両圏間には遷移層 (Tropical Transition Layer) が存在すると結論づけた。

略すと同じTTLであるTropical Tropopause LayerとTropical Transition Layerは、共にこの領域 (本WSでは気温減率が最大となる高度から温位400K程度までとされる事が多かった) の呼称として現在使用される。しかしその経緯を踏まえ、力学過程に着目した場合は前者、化学過程や大気組成に注目した場合は後者が用いられる事が多い。いずれにせよTTLという概念の登場で、この領域が対流活動で特徴づけられる対流圏から独立し水平輸送と大気波動が卓越する準成層領域として認識されたことにより、それまで鉛直一次的に考えられていた対流圏-成層圏間の物質輸送過程は根本から見直された。

特に成層圏の水蒸気分布に支配的な役割を持つ脱水過程についてはその理解が飛躍的に進歩し、TTLにおける局所的低温域への水平移流 (Holton and Gettelman 2001) と大気波動 (Fujiwara *et al.* 2001) に伴う脱水仮説が提唱されるに至った。中・上部TTLの大気は中高緯度大気波動による力学的吸い上げ (ブリューワ・ドブソン循環) と放射加熱 (水蒸気量が少ないため潜熱加熱は有効ではない) がバランスしながらゆっくりと上昇している。またモンスーンに伴う等温位面に沿う中高緯度下部成層圏大気との混合 (in-mixing) や、熱帯大規模擾乱もTTLの力学的構造や大気質に大きな影響を持っている。TTLの概説については、併せて長谷部 (2012) も参照されたい。

以下にTTLに関する現在進行形的主要な争点や疑問を挙げる。

水平移流に伴う脱水は主要な脱水過程なのか (水蒸気同位体比観測と矛盾)? 観測される氷晶存在下における過飽和は如何に維持されているのか? TTL内の氷晶、微量気体成分を直接観測できる有効な観測装置 (もしくは手法) は? TTLに準普遍的に存在する巻雲やエアロゾルの化学過程や放射過程での役割は? 対流活動やin-mixingの影響は定量的にどうか? それにより成層圏に供給される短・長寿命化学種の役割は? など。 (稲飯洋一・西本絵梨子)

### 3. 学生・若手プログラム

2章末に挙げたような問題に対しどのような観測を実施すれば解決が図れるのか? ここ数年間に予定されている観測計画 (5章参照) を踏まえて、セミナーに参加する学生・若手研究者が、3つの異なるテーマに分かれて自由討論し意見をまとめ発表する、という課題が出された。テーマは、アジアモンスーンとin-mixingの影響を強く受ける北半球夏の「JJA」、ブリューワ・ドブソン循環強化によりTTLが最も低温化する北半球冬の「DJF」、そしてモニタリングや長期変動に注目する「Climatology」である。各チームの課題に対する取り組みを以下に記す。 (稲飯洋一)

#### 3.1 チームJJA (北半球夏季)

(メンバー: Bryce Harrop, Jianjun Jin, Rei Ueyama, 久保川陽呂鎮, 小石和成, 西本絵梨子)

JJAグループ (第2図) では、上部対流圏から下部成層圏にかけて夏季アジアモンスーンとそれに伴う上部対流圏から下部成層圏にかけての顕著な循環場に主に着目した。経済発展の著しいこのアジア域の上空で、どのように微量気体やエアロゾルが輸送されていくのか、そのとき対流活動やオーバーシュートイングが何の役割を持っているのか、依然不確定なままであることが話題に挙がった。

このグループではメンバーの気質にもよるのか、比

較的淡々とした雰囲気では発表準備や議論が進められた。しかし、スライドを作る際に役割分担をしすぎてしまい、各自自分の分担に専念しすぎてしまった感があった。個々人の意見・成果をつないでグループ全体としてのメッセージを作成する難しさ、コミュニケーションを取る大切さをあらためて実感した。発表もまた分担して行ったが、やはり英語圏のプレゼンターは流暢で羨ましかった。また、UeyamaやJinは、ネット環境やメーリングリストを通じて、最新のデータについて意見交換できたら良いという提案しており、ちょっとした機会に海外の研究者とディスカッションをする環境や、そのような議論のできる友人・研究者ができること、研究に対する見方も変わってくるのかなと感じた。(西本絵梨子・小石和成)

### 3.2 チームDJF (北半球冬季)

(メンバー：Tra Dinh, Stephanie Evan, 稲飯洋一, 櫻井万祐子, Tao Wang, 山木望愛)

3日目の昼食後、グループでの作業をホテルのロビーにて行った(第3図)。まず各観測キャンペーンの測定項目、場所、高度、分解能をピックアップした。メンバーの発言をTraがまとめ、Stephanieがスライド作成を担当して作業を進めた。初めは皆ソファに座って作業していたが、議論をするうちに床にも座るようになった。その様子を見た本WS主幹事の一人NCARのAndrew Gettelmanに「ここは君たちの部屋かい?」と言われてしまった。それ程、周りを気にせず集中して取り組んでいたのだと思う。米国の研究者は活発に発言し、主張の仕方も強いと感じ

た。私は英語ができないため話についていけなかったが、英語が上達しても海外の研究者に気後れしそうだと思った。夕食後も作業を続け、23時半頃には各自部屋に帰り、翌朝、再びロビーにて仕上げの作業をした。

本WSに参加し、SOWER (Sounding of Ozone and Water in the Equatorial Region) キャンペーンの面白さを改めて感じた。研究の最前線に触れることができ嬉しかった。ただ、TTLという共通点がある人と議論できる貴重な機会であったのに、言葉の壁が高く不完全燃焼な感じが悔しく、英語を勉強しようと強く思った。(櫻井万祐子)

モデル屋、観測屋、解析屋、それぞれで興味を中心や着眼点が異なっており、相補的に情報を提供し合いながら議論を進める事が出来た。しかし発散気味の情報をまとめ、チームとして発表資料を作成する作業に入ると、各人の興味や考え方の差異がボトルネックとなった。日本でいう喧嘩腰の議論というよりむしろ本物の喧嘩のような雰囲気と言葉の応酬に加え、自分の主張を穏便には曲げない米国の研究者の気の強さに圧倒された。米国で働く研究者にとっては当たり前の事なのかもしれないが、私はといえば自分の意見をスライドに反映してもらうのにも説得を繰り返し(最終的には懇願し)1時間以上を要して漸くひとつ意見を通す事ができるような有様だった。ともあれ、一見すると頑強な壁も体当たりを繰り返してみれば意外と何とかなったのだ。次は開始直後から全力で体当たりを試みたい。(稲飯洋一)



第2図 学生・若手プログラムの作業風景。チームJJAのグループディスカッションの様子(Dr. Gary Morris提供)。



第3図 第2図と同様、チームDJF(Dr. Gary Morris提供)。

海外の研究者の議論の激しさに驚いた。英語ができないことに加えあまりの議論の激しさに圧倒され、ほとんど議論に参加できなかったのがとても残念に感じる。しかし議論の終盤に、Tra や Stephanie に「何か興味のあることはどんどん言ってね！ 英語ができなかったら稲飯さんに通訳してもらって！」というようなことを言われ、少し議論に参加することができた。修士学生の自分がこのような WS に参加させてもらうことができ、本当に幸せなことだと感じている。(山木望愛)

### 3.3 チーム Climatology (気候・長期トレンド)

(メンバー: Marta Abalos, 江口菜穂, Anne Glanville, 坂崎貴俊, Wiwiek Setyawati, 杉立卓治)

我々のチーム(第4図)は、気候・長期トレンドがテーマであった。それらに係る科学的問題を整理し、その解決にあたって現在/今後の観測をどう生かすかを話し合うというものである。議論はチームのメンバーでランチを食べた後、ホテルのロビーの一角で始まった。テーマが漠然としてなかなか議論の方向性が決まらず作業は深夜にまで及んだが、最終的には気候変動・トレンドの議論に耐えうる精度の高い観測ネットワークの維持・構築が重要であると同時に、衛星データの検証および再解析・モデルの性能(とくに雲物理)向上にはキャンペーン観測が不可欠だという結論にまとまった。

私にとってこのような本格的な「会議」に参加するのは初めての経験だった(「会議」と名のつくものはたくさんあるが、大抵の場合、人の発表をフンフンと聞いて終わる)。他のチームの報告でも書かれているとおり、やはり欧米の2人は自己主張が強く、自分の意見をどしどし言うことの重要性を改めて感じた。作業が長引いて疲れたが、途中 Anne と Marta が宅配ピザを注文してくれたり、発表当日もランチを取りながらディスカッションしたりと、最終的には楽しく終わることができた。今後につながる研究者人脈を築けたのが最大の成果だと思う。(坂崎貴俊)

私にとって初の国際会議であり、気後れせずに議論に参加しようと臨んだものの、不甲斐ない結果に終わった。我々チームの議論のテーマは、精度の高い測定継続が必須となる“Climatology”であり、測器開発を専門とする私にとって主張したいことも多かつ



第4図 第2図と同様、チーム climatology (Dr. Gary Morris 提供)。

たが、英語力の不足と調和を重んじる日本人気質(?)のせいで、自分の考えを伝えることができなかった。英語力の不足を痛感した苦い経験となったが、海外の若手研究者の遠慮のない議論や活気に溢れた雰囲気を経験できたことは、今後研究を進めるうえで非常に有益だったと思う。(杉立卓治)

## 4. 発表の紹介(文中の所属は当時のもの)

ワークショップ中に発表されたポスターと口頭発表の内容をここでいくつか抜粋する。対流圏と成層圏を区別する際には、まず雲の到達高度を考える必要がある。このような雲の役割について Harrop (ワシントン大学) は、水蒸気の放射射出量と気温との関係から anvil の到達高度がおおよそ13 km 付近で決まることを WRF (Weather Research and Forecasting Model) の計算結果から示し、さらに熱帯の深い対流系に伴って TTL の放射収支が大きく影響されることを述べた。Evan (米国海洋大気庁) は数値計算で再現される最低温度が平均的に1.2 K の cold bias を持ち、これが雲に伴う放射の影響であることを指摘していた。さらに NICAM (Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model) の解析から、久保川陽呂鎮(東京大学) は雲システムに応答する温度変動について詳細に調べた結果を発表していた。西本絵梨子(京都大学) は、衛星観測で得られた OLR (Outgoing Longwave Radiation 外向き長波放射量) と再解析の気象場との間にみられる季節内から年々変動までの時間スケールの気温応答を示した。また、江口菜穂(九州大学) は、熱帯成層圏の突然昇温と対流圏の大規模な雲の分布とが対応して変化する様子を示した。成層圏と対流

圏との相互作用について、観測とモデルの違いがどの程度あるのか、まだこれから明らかにする必要がある課題として議論されていた。

また、成層圏と対流圏との間に遷移領域として存在する TTL では、その極度に寒冷な環境から微物理的にも興味深い現象が多々報告されている。ここ10年ほどの観測結果でも、過飽和が起こる状況が頻繁にみられ、この高度域での雲の表現が非常に繊細であることが明らかになってきている（例えば Krämer *et al.* 2009）。Dinh（プリンストン大学）は TTL での雲の詳細な微物理を組み込んだ2次元モデルを用いて、雲に伴うメソスケールの循環が及ぼす水蒸気輸送の効果について議論した。また、櫻井万祐子（名古屋大学）は地上からのライダー観測で得られた雲の微物理特性を、微物理モデルの結果から解釈する結果を示した。さらにこの TTL 領域での雲の統計について、Wang（テキサス A&M 大学）は CALIPSO（Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations）衛星のデータを用いて、この高度域で形成される雲が、より下層から侵入してくる対流雲に伴ったものであるかを判別する研究を紹介した。稲飯洋一（東北大学）は、これまで日本のグループが行ってきた SOWER の気球による観測から得られた水蒸気データを、MATCH（同一空気塊を複数回観測する）手法により解析し、TTL 大気脱水の定量化と過飽和の見積もりを報告した。

TTL を含む高度域での力学分野からの研究では、山木望愛（北海道大学）は SOWER の観測結果について温度や東西風の構造に着目して議論した。坂崎貴俊（北海道大学）は、大気潮汐に伴ってどの程度の温度振幅が生じているかを詳細に解析した研究を発表した。小石和成（京都大学）は、オゾンがこの高度域ではトレーサーとして扱えることを利用して混合の指標とし、赤道波に伴って乱流輸送が生じていることを観測データから示した。さらに、オゾンが低濃度になるプロファイルに着目した Birner（コロラド大学）は、オゾンの低濃度偏差が気温場の応答によって生じていることを述べていた。力学の知見をもとに、いかに水蒸気やオゾンなどの物質の変動を理解できるかが議論されていた。

一方で、最近の観測的な研究の立場からは、中国を中心に集中観測を行っている Bian（中国科学院）、ベトナムで長期に渡ってオゾン観測を継続してきた荻野慎也（JAMSTEC）の発表があった。最新の測器の

開発としては、杉立卓治（北海道大学）の通常の定常観測では困難な TTL での水蒸気量を測定可能な気球搭載用のペルチェ式鏡面冷却式水蒸気計の報告があった。また、自動回収が可能な無人航空機搭載エアロゾル採集器および OPC（Optical Particle Counter, 光散乱式粒子計数器）について林 政彦（福岡大学）からの発表があり、雲の微物理特性を取得可能な HYVIS（Hydrometeor Video Sonde, 雲粒子ゾンデ）については清水健作（明星電気株式会社）からの発表があった。アメリカに対して、日本の方が技術的なユニークさが目立っており、各研究者から具体的な質問がでていた。（小石和成）

## 5. 計画されている観測と今後の展開

2013-2015年にかけて欧米諸国が大規模に研究資源を投入し、西太平洋領域を中心に TTL の全貌を一気に解き明かそうという壮大なキャンペーン観測が複数(!)実施される。各キャンペーンの詳細は Gettelman *et al.* (2013) の Table 1 に譲るが、我々日本人が痛感したのは、観測規模が日本と欧米で文字通り桁違いであるということである。米国の ATTREX/BATTREX, SEAC4RS/SEACIONS, CONTRAST, 英国の CAST などは、東南アジアや西太平洋上空で網の目のような航空機観測を行い、さらにそれと同期するようにラジオゾンデを数十から数百発規模で打ち上げるという、お祭り騒ぎの“絨毯爆撃的”観測計画である（各研究計画の正式名称や詳細な計画については Gettelman *et al.* (2013) を参照願いたい）。航空機観測では飛行航路・高度を自由に設定でき、TTL 領域においてリモート観測では得がたい情報（エアロゾル、雲微物理量（過飽和度、粒形分布）、各種大気微量成分など）を密に得られる点が最大の強みであろう。これらを通じて物質輸送や雲物理過程の理解が飛躍的に進むことが期待される。

対する SOWER を中心とした日本チームの観測は、（航空機観測はなく）ゾンデやライダーを中心としたもので、単にその規模だけ比較すれば残念ながら欧米の計画とは雲泥の差がある。しかし、立つ瀬がないということでは決してない。まず、SOWER は1998年から継続的にこの地で観測を続けていることを強調したい。また、4章でも一部紹介したように、気温の超高精度観測を実現する MTR ゾンデ（Meisei Temperature Reference Sonde, 明星気温基準ゾンデ）、エアロゾル/雲粒子を計測する OPC、粒子を撮像するこ

とで形状まで観測できる HYVIS, 水蒸気濃度の高精度観測を可能にし得る鏡面冷却式水蒸気計 (杉立卓治 (北海道大学) が開発中), さらに観測装置の回収を容易にするグライダーなど, 航空機観測にはない“高精度でユニークな”観測手法を多数持ち合わせていることが日本の最大の強みである。加えて, Inai *et al.* (2013) に見られるように, 解き明かす問題点を予め絞り (例えば, Inai *et al.* (2013) では西太平洋の水平移流による脱水過程), 綿密で最適な観測計画を練ることで費用対効果を上げていることも強調したい。今後はこれまで十数年にわたって行ってきた高精度観測を継続することで微量成分の長期変化の検出を目指すと同時に, 上に挙げた made in Japan を武器に, 唯一無二のデータと独自の解析手法を持って世界と渡り合っていくことが必要そうである。

上記述べたように, 欧米と日本では観測計画の性質が大きく異なっている。しかし逆に言えばお互いの計画の良さを生かした共同研究に繋がる絶好の機会でもある。欧米の航空機観測の精度を日本チームによる高精度の現場観測によって補うことも可能であろうし, 解析の面で言えば, Inai *et al.* (2013) で用いられているような MATCH 手法を航空機観測・地上観測データに適用することで, 1度だけでなく2度・3度と同じ空気塊を観測する「複数回 MATCH」の実現が可能かもしれない。また, このような共同研究を行うため, 多くの研究者がなるべく簡単に膨大な情報やデータを共有できるプラットフォームを作るべきという意見が会議の中で複数出された。クラウドストレージサービスの Dropbox の利用など, この会議ではファイル共有を手軽に行う試みもなされており, 今後, 研究データも含めて手軽に交流できる環境の構築が望まれる。

最後に, これら観測的事実の集積を進める一方で, モデル等を使ったプロセス研究との連携が不可欠であることも感じた。TTL を規定するパラメータは観測が非常に難しく, 測器 (間) バイアスの問題が常につきまとうため, 観測データだけから真値を決めるのはかなり難しい。力学・光化学・放射学によって観測事実を裏打ちできる解釈を付与できるかどうかという視点が, 観測事実の robust さを確かめる上で, および我々の理解の向上を図る上で, 今後ますます重要性を増しそうである。例えば2013年6月の AMS ミーティングでは, 西太平洋で行われた ATTREX の予備観測の結果が早速 Ueyama らによって紹介され, 観測

とモデルを併用することで, TTL の水蒸気プロファイルは雲微物理過程および重力波に伴う気温変動を考慮に入れることによって整合的に説明できることが示されていた。 (坂崎貴俊・小石和成・杉立卓治)

## 6. おわりに：会議を終えての所感と我々の世代がなすべきこと

私はどうしても「日本チーム」「欧米チーム」という構図でこの会議を見てしまっていた。予算・人の規模の差のみならず, 英語力・発言力でも大きな差がある。どうしても米国人の発言が多くなるし, ときおり (私には理解できない) アメリカンジョークを交えながら米国主導で会議が進んでいくことを歯痒く見守るばかりであった。あのフレンドリーな雰囲気はとても居心地が良かったが, その一方で, 今こそ航空機まで投入するほど垂涎の的となっている TTL 領域に早い段階で注目し, 定常的に観測を行って価値あるデータを蓄積してきた SOWER チームの先人の明に強い尊敬の念を抱いた。「温故知新」。偉大な先人の努力と業績に敬慕を示しつつ, 新たな展開を切り開けるように精進したい。 (坂崎貴俊)

上述のように会議はそのほとんどが欧米の研究者主導であった。日米セミナーは日と米が対等なはずではないのか? 私はいささかショックを受けた。日本は日本人気質だったと言ってしまえばそれまでだが, なんだか欧米の子分のようなではないか (おそらくこれはこの業界に限った話ではないだろう)。もっと声を上げないと, そのためにまずはしっかりと世界の潮流, 我々の業界で言うと ATTREX を筆頭とした大規模観測, に連携して得意技を駆使して存在感を示す事が重要だろう。しかしそれだけでは他人の土俵を間借りしているに過ぎない。私は日本が得意とする気球観測を発展させるべきだと考える。プラスチック気球を用いた成層圏大気採集, 気球と無人航空機を組み合わせた観測によるエアロゾル採集, 等浮力気球を用いたラグランジュ観測, 高高度用二酸化炭素ゾンデなどユニークで強力な手法を活用・開発し, 航空機による大観測の先を拓くこと。我々次世代の TTL 研究者にそれが求められている。 (稲飯洋一)

小規模でありながらも大御所・中堅・若手の研究者が一堂に会する国際ワークショップに参加して, 顔の知っている研究仲間が増えたことは私のような駆け出

しの研究者にとってとても貴重な財産となった。こうやって地道に自分や自分の研究についてアピールしていき、発言する場数を踏んでいくことが研究者として成長するために大切なことのひとつであると思う。今回は日米のセミナーであったが、日本人の少ない環境で研究活動を行うことも視野を広げ度胸をつけるために必要なことであると改めて感じた。（西本絵梨子）

### 謝 辞

欧米側の主幹事と共に有意義なWSを開催していただきました北海道大学長谷部文雄先生始めSOWERチームの皆様へ深く感謝申し上げます。特に若手研究者が積極的に会議に参加できる場を設けてくださったことで、我々一同、他の会議では得難い貴重な経験を積むことができました。本WS参加にあたり北海道大学環境科学院グローバルCOE（坂崎・杉立）、東北大学グローバルCOE（稲飯）、京都大学防災研究所大航海プログラム（小石）による支援を頂きました。本WSはNational Science Foundation (NSF) の協力により開催されました。本原稿執筆にあたっては長谷部先生から貴重なコメントをいただきました。

### 参 考 文 献

- Folkens, I., M. Loewenstein, J. Podolske, S. J. Oltmans and M. Proffitt, 1999: A barrier to vertical mixing at 14 km in the tropics: Evidence from ozonesondes and aircraft measurements. *J. Geophys. Res.*, **104**, 22095-22102.
- Fujiwara, M., F. Hasebe, M. Shiotani, N. Nishi, H. Vömel and S. J. Oltmans, 2001: Water vapor control at the tropopause by equatorial Kelvin waves observed over the Galápagos. *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 3143-3146.
- Gottelman, A., K. P. Hamilton, G. A. Morris, F. Hasebe and H. B. Selkirk, 2013: U.S.-Japan bilateral workshop on the Tropical Tropopause Layer: State of the current science and future observational needs, 15-19 October 2012, Honolulu, HI, USA. *SPARC Newsl.*, (40), 37-47.
- 長谷部文雄, 2012: 熱帯対流圏界面を通じた物質交換. *天気*, **59**, 788-796.
- Highwood, E. J. and B. J. Hoskins, 1998: The tropical tropopause. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **124**, 1579-1604.
- 廣田 勇, 林 祥介, 山中大学, 1983: 日米セミナー「中層大気力学」の報告. *天気*, **30**, 133-135.
- Holton, J. R. and A. Gottelman, 2001: Horizontal transport and the dehydration of the stratosphere. *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 2799-2802.
- 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.*, **13**, 8623-8642.
- Krämer, M., C. Schiller, A. Afchine, R. Bauer, I. Gensch, A. Mangold, S. Schlicht, N. Spelten, N. Sitnikov, S. Borrmann, M. de Reus and P. Spichtinger, 2009: Ice supersaturations and cirrus cloud crystal numbers. *Atmos. Chem. Phys.*, **9**, 3505-3522.