

成層圏過程とその気候における役割 (SPARC)

第4回総会報告*

田口正和^{*1}・井上 誠^{*2}・山下陽介^{*3}・出牛 真^{*4}
江口 菜穂^{*5}・一丸知子^{*6}・河谷芳雄^{*7}・久保川 陽呂鎮^{*8}
宮崎和幸^{*9}・西井和晃^{*10}・富川喜弘^{*11}

1. はじめに

第4回 SPARC 総会が、2008年8月31日から9月5日にイタリアのボローニャで開催された。ボローニャはフィレンツェとヴェネチアの中間に位置し、建物の軒の柱廊、赤やオレンジの屋根瓦が特徴の都市である。会場となった CNR Conference Center は自然に囲まれた小高い丘の上に建っており、ボローニャ駅中心部からバスで15分ほどの場所に位置する。そこに世界各国より約400名の参加者が集まり、成層圏過程に関する研究発表が行われた。SPARC は1992年に開始された WCRP の主要プログラムのひとつであり、成層圏プロセスが地球の気候変動に及ぼす影響の研究を推進する国際研究プロジェクトである。4年に1度総会を開き、成層圏の役割についての研究発表を行っている。1996年に第1回総会がメルボルン（オーストラリア）で開かれ、第2回のマルデルプラタ（アルゼ

ンチン）、第3回のビクトリア（カナダ）での会議（余田ほか 2005を参照）に続いて今回はその第4回となる。

1日目は、IPCC の第1作業部会の共同議長であり、南極のオゾンホール生成機構に関する研究で著名な Solomon 博士（米・NOAA）の特別講演で幕を開けた。初日は「分野横断的問題」というセッションであり、他に4名の招待講演が行われた。2日目以降には、以下のセッションに分かれて、口頭・ポスター発表が催された。

- （1日目）分野横断的問題 Cross-cutting Issues
- （2日目）成層圏対流圏力学結合 Stratosphere-Troposphere Dynamical Coupling
- （3日目）中高緯度の上部対流圏-下部成層圏 Extratropical UTLS
- （4日目）成層圏変化の検出と要因分析 Detection and Attribution of Stratospheric Change
- （5日目）対流圏界面遷移層 Tropical Transition Layer
- （6日目）大気化学と気候 Atmospheric Chemistry and Climate

また4日目の午後には、様々なワーキンググループによる研究集会が開催され、より専門的な内容の発表やディスカッションが行われた。

発表数は、口頭発表が約60件、ポスター発表が約330件を数えた。講演中には聴講者も発表に聞き入っており、常時活発な質問や議論が展開された。一方で、本総会はポスター発表にも重点を置いていることに特徴があった。ポスターセッションの会場は広く、1発表につき2度のコアタイムが設けられ、議論するのに十分な時間が確保されていた。

* Report on SPARC 4th General Assembly.

^{*1} TAGUCHI Masakazu, 愛知教育大学地学領域.

^{*2} INOUE Makoto, 東京大学大気海洋研究所.

^{*3} YAMASHITA Yousuke, 国立環境研究所.

^{*4} DEUSHI Makoto, 気象研究所.

^{*5} EGUCHI Nawo, 国立環境研究所.

^{*6} ICHIMARU Tomoko, 九州大学大学院理学院.

^{*7} KAWATANI Yoshio, (独)海洋研究開発機構・地球環境変動領域.

^{*8} KUBOKAWA Hiroyasu, 北海道大学大学院環境科学院.

^{*9} MIYAZAKI Kazuyuki, (独)海洋研究開発機構・地球環境変動領域.

^{*10} NISHII Kazuaki, 東京大学大学院理学系研究科.

^{*11} TOMIKAWA Yoshihiro, 国立極地研究所.

© 2010 日本気象学会

次節以降では、日本から参加した若手研究者及び大学院生による各セッションの内容説明と会議の感想について報告する。

(井上 誠, 山下陽介)

2. 分野横断的問題

初日は大気化学、モデル、衛星観測など様々な分野の研究者による招待講演で始まった。まず、IPCCの第1作業部会の共同議長であるSolomon博士(米・NOAA)の特別講演があった。その後、各方面の専門家4名の講演が行われた。

Solomon博士の講演は、これまでのIPCCの評価報告書にまとめられた最近の成層圏研究に関する内容が中心であった。特に、近年の南半球春季のオゾン減少が夏季の高緯度対流圏の気候場(具体的には、SAMインデックス)のトレンドに有意に影響を及ぼすという話は興味深かった(Thompson and Solomon 2002)。これは、熱帯下部成層圏の寒冷化(Thompson and Solomon 2005)や、温室効果ガスの増加に伴う子午面循環、また波動伝播特性の変化(Garcia and Randel 2008)が関係していることを示唆しており、これからの進展が注目される。Polavarapu(カナダ環境省)は、成層圏におけるデータ同化の最新の成果と問題点、今後の展望を発表した。Lohmann(スイス連邦工科大学)は、UT/LSにおける巻雲や対氷過飽和域のモデルシミュレーション結果を紹介し、衛星データや航空機データと比較した。

このように、1日目は化学やデータ同化など多岐に渡る手法や内容の発表が行われ、成層圏に関する最新の研究成果に触れることができた。成層圏過程の研究が社会的にも注目され、今後の進展が期待されている分野であることを改めて実感した。

(井上 誠)

3. 成層圏対流圏力学結合

本セッションでは主に成層圏の力学や将来変化、気候変化予測における成層圏の重要性についての講演があった。ここでは講演の一部を紹介する。成層圏極渦変動によって対流圏環状モードは影響を受ける。この過程の中で平均風及び温度場の変化が、波による運動量フラックスに及ぼす影響についてはまだ理解が足りないことをThompson(米・コロラド州立大学)が指摘した。また、Kushner(加・トロント大学)はGCMを用いた二酸化炭素増加実験で、重力波パラメ

タリゼーションの設定によって、対流圏環状モードの応答が変化することを示した。多くの二酸化炭素増加実験でBDCが強化する結果が得られている。Garcia(米・NCAR)はこの強化は亜熱帯下部成層圏におけるEliassen-Palmフラックス収束の増加に伴うことを示し、対流活動の活発化の影響を示唆した。McLandress(加・トロント大学)はEliassen-Palmフラックスの増加には地形性重力波と惑星規模波動の増加が主に寄与していることを示した。Giorgetta(独・MPI)は、1991年のピナツボ山の噴火がQBO西風位相の持続に寄与したメカニズムについてGCMで検証した。佐藤(東京大学)は高解像度AGCMを用いた中層大気力学の研究(KANTOプロジェクト)の概要を紹介し、AGCMで得られた対流圏-中間圏界面における波動と大循環の相互作用の結果を報告した。

力学結合・重力波・データ同化に関するポスター発表は100件以上あったが、その一部を紹介する。Baldwin(米・NWRA)は成層圏過程が対流圏に及ぼす影響を、気候モデルで表現するために必要な解像度と物理過程に関する議論を行った。Ern(独・FZK)はSABER衛星観測とECMWF客観解析に現れた重力波との比較を行い、山岳波と極夜ジェット起源の重力波がよく表現されていることを示した。Geller(米・Stony Brook大学)は高解像度ラジオゾンデデータを用いた重力波の解析を行い、鉛直流に現れる重力波シグナルは対流と深く関連し、自発的に励起される慣性重力波は運動エネルギーに現れやすいことを示唆した。一丸(九州大学)は気象研究所気候モデルの予測結果を用いて、北半球冬季の突然昇温の予測可能性はプラネタリー波のスケールに強く依存することを示した。井上(CCSR)は対流圏循環とQBOの関連をNCEP/NCARの再解析データを用いて調べ、QBO東風・西風位相に伴う中高緯度の循環場の変動の違いを示した。津田(京都大学)は最新衛星COSMICを、河谷(JAMSTEC)はAGCMを用いて、亜熱帯ジェットから生成される重力波、及び赤道域の3次元重力波・赤道波の全球分布、励起源と伝播特性に関して、観測とモデルを合わせた考察を行った。西井(東京大学)は突然昇温予報に影響を与えた初期値誤差場を調べた。田口(愛知教育大学)はNCEP/NCARの再解析データを用いて、対流圏のプロッキングと成層圏突然昇温との関連を調べ、両者に統計的には大きな相関が無いことを示した。渡辺(JAMSTEC)は

T213L256 AGCM の波動を含む全般的なモデル特性について報告した。

(河谷芳雄, 西井和晃)

4. 中高緯度の上部対流圏-下部成層圏

中高緯度 UTLS セッションでは, UTLS における大気構造, 微量成分分布, 大気輸送過程, 大気放射過程に関する興味深い発表が数多くあった。

セッションの前半では, 近年の人工衛星観測データに基づく UTLS の微細構造に関する報告があり, 最新の衛星観測の高い能力を印象付けるものであった。Alexander ら (米・NWRA/CoRA) は AIRS 及び HIRDLS による観測データから, 堀之内ら (京都大学) は GPS 掩蔽観測データから, 様々な地点における重力波の事例解析結果を示した。また, Gille (米・NCAR) らは, HIRDLS による温度と微量成分 (オゾン, 水蒸気, 一酸化窒素) データを用いて, 対流圏-成層圏双方向輸送の事例を記述した (観測の概要は Gille *et al.* 2008 を参照)。セッションの後半では, 航空機および衛星観測に基づく UTLS での微量成分分布と対流圏界面逆転層に関する発表があった。大気波動により駆動される大規模な下降流が逆転層に寄与し得る可能性があることや (Birner, 米・コロラド州立大学), 近年の衛星観測から推定される対流圏界面付近での局所的な混合領域の存在 (Hegglin, 加・トロント大学, Hegglin *et al.* 2008 を参照), アジアモンスーン域 UTLS におけるオゾンや CO 濃度の増大 (Park, 米・NCAR) (Park *et al.* 2008) など, 大気構造を理解する上で重要な新しい研究発表があった。

ポスター発表では, 各種観測やモデルを駆使した, UTLS 微細構造や大気構造 (循環, 対流圏界面高度, 微量成分濃度) の長期変動を調査する研究発表があり, 大変良い勉強になった。著者 (宮崎) の高分解能 GCM を用いた中高緯度 UTLS の輸送過程に関する発表に対しては, Legras (仏・LMD), Haynes (英・ケンブリッジ大学), Gille (米・NCAR) などから数多くのコメントを貰うことができ, 今後の研究の発展へのヒントを得ることができたことも大きな収穫となった。全体に, 議論の充実した楽しい (?) 会議であった。

(宮崎和幸, 田口正和)

5. 成層圏変化の検出と要因分析

午前中だけのセッションであった会議4日目は, 成

層圏気候変化の探知・要因・予測に関する研究成果が報告された。まず Bodeker (ニュージーランド・NIWA) によりセッションの概要説明が行われ, 近年のオゾン回復に関する見解を示した結果 (Kane 2008) などが紹介された。続いて, 大気微量成分の衛星観測や計算機の進歩に基づいた最新の研究成果について8件の講演が行われた。Newman (米・NASA) は CCM と EESC の予測に基づき, 極域オゾンが2024年ごろから回復に向かい, 2060年代には1980年のレベルまで回復することを示した。また, 気候変動が回復を加速させる可能性も示唆した。

オゾンホールと気候変動, あるいは太陽活動や微量成分の経年変動との関係を議論する講演が多い中で, 多数の水蒸気測定器を実験室で直接比較する AquaVIT プロジェクトに関する Möhler (独・FZK) の講演は目を惹いた。最後に, SPARC 以降の新たな成層圏プロジェクトについて, Shepherd (加・トロント大学) のレビューを基に活発な議論がなされた。成層圏と気候変動の関わりを知ることは, 単なる科学的興味を超えて社会的要請となりつつある。成層圏の研究が今後どこに向かうのか, 今回の SPARC はその方向性を考える良い機会となったように思う。

(一丸知子, 富川喜弘)

6. 対流圏界面遷移層

本セッションでは, TTL 内での物質輸送過程を議題の中心とした, モデルと観測の研究結果が発表された (講演11件, ポスター111件)。

まず, 最初に Anne Thompson (米・ペンシルバニア大学) からセッションの概要説明がなされた。主に TTL 内の力学 (輸送過程) を理解するための, 水蒸気量の観測, 雲微物理, 水蒸気トレンド, 物質輸送過程を理解するためのトレーサー実験などといった研究分野間の相互関係や現在話題となっている研究成果が述べられた。続いて, モデル実験や観測から得られた結果の口頭発表がなされた。そのいくつかを取り上げる。

Donner (米・NOAA) は, TTL 内の水蒸気量をコントロールしている対流雲を GCM 内で表現する際には, 深い対流がもたらすデトレインメント効果だけでなく, 雲微物理過程を現実に合わせて正確に表現する必要があることを指摘した (Donner *et al.* 2007)。

Fueglistaler (英・ケンブリッジ大学) は, ERA-40 では雲と放射の相互作用から生じた加熱 (上昇流)

がTTL内で過大評価されていることを示すとともに、オーバーシュートしている(対流圏界面を突き抜ける)積乱雲がもたらす冷却効果を正確に評価する必要性を指摘した。

Grosvenor (英・マンチェスター大学) は、深い対流活動が対流圏の水蒸気を成層圏に輸送することで、成層圏を湿潤化させる効果を議論し、近年の成層圏の湿潤化トレンドの一因を成している可能性を指摘した。

Volk (独・フランクフルト大学) は、熱帯の3つの航空機観測データ(ブラジル、西部アフリカ、ダーウィン)を使用して、TTL内、TTLから成層圏への物質輸送過程(熱帯域での対流活動に伴う鉛直輸送、中緯度での成層圏との対流圏界面をまたぐ等温位面上の水平輸送、TTL内のゆっくりとした上昇)に着目した。その結果、中緯度の対流圏界面を通過しての等温位面上の水平輸送は、ブラジルで頻繁に観測された。ダーウィンや西部アフリカではあまり観測されなかった。ブラジルとダーウィンの観測は、一酸化炭素(トレーサーとして使用)が深い対流活動によって対流圏下層からTTL内に運ばれ、その後、ジェット付近において成層圏に輸送されていることを示した(Konopka *et al.* 2007)。

その他多くの興味深い話題が本セッションで取り上げられた。主に深い対流活動がTTL内へ与える影響の理解、が議論の中心にあがっていた。

ポスター会場は大きく2つに分けられ、展示時間も充分にあったため、参加者はほとんどのポスターを見ることができた。筆者もポスターでの参加だったが、多くの研究者と充分な議論を交わすことができた。自分の英語力に対する反省も感じたが、著名な研究者との議論は何にも代えられない貴重な体験であった。

(久保川陽呂鎮、江口菜穂)

7. 大気化学と気候

最終日に行われた本セッションでは、対流圏から成層圏における化学-放射-力学相互作用によって生じる気候変動に関する研究成果を中心として、10件の口頭発表があった。CCMを用いて行われた研究内容が多数を占め、Tourpali (ギリシャ・アリストテレス大学) による21世紀中の地表紫外線予測など社会的要請を意識したテーマの発表が多かったのも特徴的であった。

セッション始めに行われたEyring (独・DLR) に

よる概要説明のなかで“CCMVal”マルチモデル実験の成果が紹介され、下部成層圏オゾントレンドが対流圏の気温プロファイルに及ぼす影響について言及した。またプロジェクトの今後のあり方について、大気諸過程(力学場・輸送・化学など)に着目したメトリックを用いてプロジェクトに参加するCCMの選別を行う必要があるとした。Lawrence (独・MPI) らは深い積雲対流が大気微量成分の濃度分布に与える影響についてCCMを用いて解析し、Arakawa-Schubert マスフラックススキームのように格子内でプルームアンサンブルを仮定して対流輸送計算を行う場合の方が、仮想的に1つの積雲があるとしてバルクの計算する場合よりも上部対流圏まで微量成分を多く鉛直輸送し、観測事実と整合的であると述べた。また、通常の積雲パラメタリゼーションでは格子内でマスバランスした補償下降流を仮定しているが、この仮定は微量成分の輸送に有意な誤差をもたらすと主張し、全球モデルの対流輸送の再現精度を向上していくためには、雲解像モデルを用いた評価を同時に行いながら観測との比較・解析を行っていく必要があるとした。須藤(名古屋大学)は、CCMによる過去・現在・将来予測実験を行うことで成層圏・対流圏におけるオゾン変動とそれに伴う気候応答を見積もった。産業革命以降のオゾン前駆物質の増加は全球平均対流圏オゾンに10DU程度増加させる効果があったのに対し、成層圏オゾン破壊に伴う成層圏から対流圏へのオゾンフラックスの減少は1DU程度減少させる効果があったとした。また、対流圏オゾン増加による現在気候の平衡応答は0.29°Cであるのに対し、成層圏オゾン減少によるものは-0.06°Cであるとした。21世紀中は成層圏オゾンが回復しBDCも強まると予測されるとし、これらの効果が対流圏化学に及ぼす影響についても言及した。Mathison (英・UKMO) らは、オゾンの再現性が数値天気予報精度に与える影響について報告し、UKMOの予報モデルに3次元変分法を用いてEOS MLSやSBUV/2といった衛星データを同化した場合やSPARC気候値を用いた場合は予報が改善されることを示した。また、UKMOにおいても4次元変分法によるオゾンのデータ同化を行う計画があることを述べた。Gray (英・レディング大学) らは、これまでのIPCC実験では人為的排出によって決まるオゾントレンドが強制されているが、太陽活動などによるオゾンの自然変動も対流圏・成層圏の気候に影響を与えることを大気-海洋結合モデルを用いた実験により示

した。彼らが行った過去再現実験では、自然変動も含んだオゾンを強制した場合にのみエルチヨン・ピナツボ火山噴火後に観測された“step-like”な下部成層圏の気温変化を捉えることが出来たとした。Timmerck (独・MPI) からはピナツボ火山のエアロゾルが水循環に与えた影響についてのシミュレーション結果が紹介された。

セッションの途中で Waugh (米・ジョンズ・ホプキンス大学) による特別講義「成層圏変動の予測とその気候に果たす役割」が行われた。21世紀における成層圏変動の予測結果を紹介し、ハロゲン化した ODS 量の減少とともにオゾンの回復が見られる一方、オゾンの回復状況は緯度帯によって異なること、GHG の増加による成層圏寒冷化の影響や輸送の変化の影響を受けることなどを指摘した。Reichler (米・ユタ大学) は CCM 現在気候、将来予測実験を用いた熱帯の対流圏界面付近のトレンドについて報告した。Scinocca (加・CCCma) は北極域の海水の消失がオゾンの回復に与える影響について CCM 将来予測実験を基に示した。

ポスターセッションでは、柴田 (気象研究所) が MRI CCM を用いて、秋吉 (NIES) が CCSR/NIES CCM を用いて現在気候、将来予測実験を行った結果を報告した。筆者の出牛は MRI CCM を用いてピナツボ噴火が QBO に及ぼす影響について、また山下は CCSR/NIES CCM を用いて太陽活動の違いが AO に及ぼす影響を議論した。

(出牛 真, 山下陽介)

8. おわりに

このように、SPARC 総会期間中の6日間で成層圏に関する多くの研究に触れることができ、各国の研究者と白熱した議論を行うことができた。9月3日の夕方にはボローニャ市街で懇親会が催され、続いて行われたダンスパーティーにも多くの参加者があった。懇親会の会場付近にはヨーロッパ最古の総合大学として知られるボローニャ大学やゴシック様式のサン・ペトロニオ聖堂、食料品が安く手に入る市場、上から市街が一望できるボローニャの斜塔、休憩ができるマッジョーレ広場などがあり懇親会前に訪れた参加者も見られた。こうした交流の機会に加え食事やコーヒープレイクなど、研究発表以外の時間にも若手研究者や学生が各国からの参加者と交流できる機会が多く、各自の研究の進展だけでなく人的交流の観点からも大変意

義のある会議であったと言える。

略語一覧

AGCM (GCM) : Atmospheric General Circulation Model 大気大循環モデル
 AIRS : Atmospheric Infrared Sounder 大気赤外サウンダ
 AO : Arctic Oscillation 北極振動
 AquaVIT : Aqua Validation and Instrument Tests Aqua 検証・測器試験
 BDC : Brewer-Dobson Circulation ブリュウワー・ドブソン循環
 CCCma : Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis カナダ気候モデリング・解析センター
 CCM : Chemistry-Climate Model 化学-気候モデル
 CCMVal : Chemistry-Climate Model Validation Activity for SPARC 化学-気候モデル検証活動
 CCSR : Center for Climate System Research, University of Tokyo 東京大学気候システム研究センター (2010年4月より東京大学海洋研究所と統合し東京大学大気海洋研究所に改称)
 CNR : Consiglio Nazionale delle Ricerche イタリア国立研究所
 DLR : Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt ドイツ航空宇宙センター
 ECMWF : European Centre for Medium-Range Weather Forecasts ヨーロッパ中期予報センター
 EESC : Equivalent Effective Stratospheric Chlorine 等価実効成層圏塩素
 EOS MLS : Earth Observing System Microwave Limb Sounder 地球観測システムマイクロ波リムサウンダ
 ERA-40 : ECMWF 40 year reanalysis data ECMWF40 年再解析データ
 FZK : Forschungszentrum Karlsruhe カールスルーエ研究所
 GHG : Greenhouse Gas(es) 温室効果気体
 GPS : Global Positioning System 全地球測位システム
 HIRDLS : High Resolution Dynamics Limb Sounder 高分解能力学リムサウンダ
 IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change 気候変動に関する政府間パネル
 JAMSTEC : JAPAN Agency for Marine-Earth Science and Technology 海洋研究開発機構
 LMD : Laboratoire de Météorologie Dynamique 気象力学研究所
 MPI : Max Planck Institute マックス・プランク研究所
 MRI : Meteorological Research Institute 気象庁気象研究所

NASA : National Aeronautics and Space Administration 米国航空宇宙局
 NCAR : National Center for Atmospheric Research 米国大気研究センター
 NCEP : National Centers for Environmental Prediction 米国環境予測センター
 NIES : National Institute for Environmental Studies 国立環境研究所
 NIWA : National Institute of Water and Atmospheric Research ニュージーランド国立水圏・大気研究所
 NOAA : National Oceanic and Atmospheric Administration 米国海洋大気庁
 NWRA/CoRA : Northwest Research Associates/ Colorado Research Associates Division ノースウェスト研究所/コロラド研究所分室
 ODS : Ozone-Depleting Substances オゾン層破壊物質
 QBO : Quasi-Biennial Oscillation 準2年周期振動
 SABER : Sounding of the Atmosphere using Broadband Emission Radiometry ブロードバンド放射測定を用いた大気サウンディング
 SAM : Southern Annular Mode 南半球環状モード
 SBUV/2 : Solar Backscatter UltraViolet/2 太陽光後方散乱紫外線計
 SPARC : Stratospheric Processes and their Role in Climate 成層圏過程とその気候における役割
 TTL : Tropical Tropopause Layer, Tropical Transition Layer 対流圏界面層, 対流圏界面遷移層
 UKMO : United Kingdom Meteorological Office 英国気象局
 UT/LS : Upper Troposphere/Lower Stratosphere 上部対流圏/下部成層圏
 WCRP : World Climate Research Programme 世界気候研究計画

参 考 文 献

Donner, L. J., L. W. Horowitz, A. M. Fiore, C. J. Seman, D. R. Blake and N. J. Blake, 2007 : Transport of radon-222 and methyl iodide by deep convection in the GFDL Global Atmospheric Model AM2. *J. Geo-*

phys. Res., **112**(D17303), doi : 10.1029/2006JD007548.
 Garcia, R. R. and W. J. Randel, 2008 : Acceleration of the Brewer-Dobson circulation due to increases in greenhouse gases. *J. Atmos. Sci.*, **65**, 2731-2739.
 Gille, J. *et al.*, 2008 : High Resolution Dynamics Limb Sounder : Experiment overview, recovery, and validation of initial temperature data. *J. Geophys. Res.*, **113**, D16S43, doi : 10.1029/2007JD008824.
 Hegglin, M. I., C. D. Boone, G. L. Manney, T. G. Shepherd, K. A. Walker, P. F. Bernath, W. H. Daffer, P. Hoor and C. Schiller, 2008 : Validation of ACE-FTS satellite data in the upper troposphere / lower stratosphere (UTLS) using non-coincident measurements. *Atmos. Chem. Phys.*, **8**, 1483-1499.
 Kane, R. P., 2008 : Is ozone depletion really recovering? *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.*, **70**, 1455-1459.
 Konopka, P., G. Günther, R. Müller, F. H. S. dos Santos, C. Schiller, F. Ravagnani, A. Ulanovsky, H. Schlager, C. M. Volk, S. Viciani, L. L. Pan, D.-S. McKenna and M. Riese, 2007 : Contribution of mixing to upward transport across the tropical tropopause layer (TTL). *Atmos. Chem. Phys.*, **7**, 3285-3308.
 Park, M., W. J. Randel, L. K. Emmons, P. F. Bernath, K. A. Walker and C. D. Boone, 2008 : Chemical isolation in the Asian monsoon anticyclone observed in Atmospheric Chemistry Experiment (ACE-FTS) data. *Atmos. Chem. Phys.*, **8**, 757-764.
 Thompson, D. W. J. and S. Solomon, 2002 : Interpretation of recent Southern Hemisphere climate change. *Science*, **296**, 895-899.
 Thompson, D. W. J. and S. Solomon, 2005 : Recent stratospheric climate trends as evidenced in radiosonde data : Global structure and tropospheric linkages. *J. Climate*, **18**, 4785-4795.
 余田成男, 江口菜穂, 河谷芳雄, 久保博司, 永島達也, 西澤誠也, 西井和晃, 庭野将徳, 日尾泰子, 宮崎和幸, 渡辺真吾, 2005 : 成層圏過程とその気候における役割 (SPARC) 第3回総会報告. *天気*, **52**, 249-254.