

国際オゾンシンポジウム2012報告*

柴崎和夫^{*1}・忠鉢 繁^{*2}・中島英彰^{*3}・豊田賢二郎^{*4}
 鈴木 睦^{*5}・磯野靖子^{*6}・中根英昭^{*7}・関谷高志^{*8}
 塩谷雅人^{*9}・入江仁士^{*10}・中野辰美^{*11}・笠井康子^{*12}
 長濱智生^{*13}・坂崎貴俊^{*14}・宮川幸治^{*15}

はじめに

22回目の国際オゾンシンポジウムが、2012年8月の最終週(27日～31日)にカナダのオンタリオ州トロント市で開催された。オゾン層に関連する研究分野の研究者が一同に会する、4年に一度の機会である。カナダ環境省(Environment Canada)と国際気象大気科学協会(IAMAS)、トロント大学、ヨーク大学、カナダ気象海洋学会が後援し、国際オゾン委員会(IO₃C)が主催した今回のシンポジウムは、ヨーク大学のTom McElroy博士がホスト役を務めた。2012年は世界のオゾン研究にとって、そしてカナダのオゾン研究にとっても、幾つかの記念すべき年である。WMOの国際オゾンデータセンターがカナダに設置されたのが1962年で、当年は50周年である。また、現在のオゾン全量観測の重要機器であるBrewerオゾン分光計の製造がカナダで開始されたのが、30年前の1982年でもある。そして、オゾン層破壊に関与するフロンガスの規制を決めたモントリオール議定書の採択からは25周年である。

オゾンシンポジウムが日本人研究者にも注目されるようになったのはオゾンホール発見以降である。南極越冬中(第23次隊)にオゾンの集中観測を実施した気象研究所(当時)の忠鉢氏により、1982年の南極春季に昭和基地上空でオゾン全量が急減し、オゾン層の最大オゾン濃度値も低下している、という観測結果が世界に発表されたのが1984年ギリシャで開催された第15回のオゾンシンポジウムであった。これこそがオゾンホール狂騒曲の幕開けであった。その後、世界中の研究者が大挙して参加し、研究費も増え、オゾンシンポジウムも盛況を呈したのである。

日本における研究者も増え、オゾンシンポジウムに参加する日本人研究者も増えていった。それから四半世紀経ち、地球環境問題という形では、世間的にオゾン層破壊の問題は決着がついたかのように考えられている。現実には、今回のオゾンシンポジウムの後に、南極ではオゾン層回復の兆しがあるとWMOが発表した。オゾンシンポジウムにおける熱気も、いささか冷めた感がある。前回4年前のトロムソでも感じたこと

* Report on the Quadrennial Ozone Symposium 2012.

^{*1} SHIBASAKI Kazuo, 國學院大學人間開発学部.

^{*2} CHUBACHI Shigeru, 千葉科学大学危機管理学部.

^{*3} (連絡責任著者) NAKAJIMA Hideaki, 国立環境研究所地球環境研究センター, 〒305-8506 つくば市小野川16-2, nakajima@nies.go.jp

^{*4} TOYOTA Kenjiro, ヨーク大学.

^{*5} SUZUKI Makoto, JAXA 宇宙科学研究所.

^{*6} ISONO Yasuko, 名古屋大学太陽地球環境研究所.

^{*7} NAKANE Hideaki, 高知工科大学環境理工学群.

^{*8} SEKIYA Takashi, 名古屋大学大学院環境学研究所.

^{*9} SHIOTANI Masato, 京都大学生存圏研究所.

^{*10} IRIE Hitoshi, 千葉大学環境リモートセンシング研究センター.

^{*11} NAKANO Tatsumi, 気象庁地球環境・海洋部.

^{*12} KASAI Yasuko, 情報通信研究機構.

^{*13} NAGAHAMA Tomoo, 名古屋大学太陽地球環境研究所.

^{*14} SAKAZAKI Takatoshi, 北海道大学大学院環境科学院.

^{*15} MIYAGAWA Koji, 気象庁高層気象台.

© 2013 日本気象学会

であるが、若い研究者の参加による熱気が少々薄れているようだ。今回も、トロントというアメリカやヨーロッパからの地の利のある都市での開催だったが、参加者数（300名超）は想像したよりも少なかった。ただ、筆者（柴崎）がこの分野の研究に足を踏み入れた頃から活躍している、いわゆる有名人は（例えば R. Bojkov, R. Watson, S. Oltmans, J. Gille など）、年齢を重ねても元気に研究に励んでいるのが印象深い。

一方で、筆者が初参加した1988年（第16回）の時に感じた、特にヨーロッパの研究者が持つ職人気質のようなもの、地道に観測を継続し、データの質をとことん追求していく姿勢、をまた色濃く感じるようになった。学問としてみれば、研究の種はつきない。今回のシンポジウムの中心的トピックの一つは、2010年冬季から2011年春季に発生した、いわゆる北極オゾンホールとも称すべきオゾン減少事象であった。北極域でオゾンホールは発生しない（規模の小さいいわゆるミニホールは別にして）と言われ続けてきたが、果たしてそれは間違いであったのか、あるいは地球全体の気象場の変化が起こりつつあること、すなわち地球温暖化に伴う気候変動の一部としての結果なのか、大いに議論は盛り上がった。もう一つの特徴と感じたのは、先ほど述べた、これまでに得られたデータを執念をもって精密化、均質化していこうという姿勢である。今後大型の地球観測衛星を打ち上げる計画は実現が難しいという状況で、これまで取得してきたデータを他の（例えば地上観測）データと統合する、複数の測器によるデータの質の標準・均質化に努力する傾向が目についた。

T. McElroy による心温まる、そしてウィットに富む歓迎のオープニング挨拶で始まったシンポジウムであったが、木曜の晩餐会では、前回のトロムソからこの4年の間に逝去した研究者達（若い人もいる）に対し哀悼の意を表する厳粛な場面もあった。また、恒例でもある IO₃C 委員改選（半数）も行われ、中根英昭委員が退任したが、金谷有剛氏（JAMSTEC）が新たに選出されて、日本からは塩谷委員との2人体制が維持されることになった。役員に変更はなく、委員長はギリシャの C. Zerefos, 副委員長にアメリカの R. Stolarski, 幹事（秘書役）がフランスの S. Godin-Beekman, 広報担当がアメリカの D. Wuebbles である。さらに次の開催地も早々と発表され、2016年のオゾンシンポジウムは韓国での開催が決定した。

なお、シンポジウムの各セッションの内容、トピックについては、各担当者からの詳細な報告を読んでいただきたい。（柴崎和夫）

セッション1：極域オゾン

極域オゾンのセッションは、8月27日の開会式に引き続き3つのサブセッション（I:5編, II:7編, III:7編）に分けて行われた。これまではオゾンホールは南極上空にだけ出現するとされていたが、2011年3月には北極上空にもオゾンホールが出現した。これまでの南極オゾンホールの定義によると厳密にはオゾンホールとは言えないのだが、人工衛星により観測された通常の値からのオゾンの減少量や継続日数を考えると、南極オゾンホールに匹敵する現象と思われる。閾値を別に定義して、「北極のオゾンホール」と呼んでもいいのではないかと思われる。このことを受けて、北極オゾンホール関係の論文が9編、南極関係が4編であった。残り6編は、南極北極共通の問題と言うことになる。以下、このセッションで発表された論文の内容を紹介する。

極域オゾンのサブセッションIでは、最初にトロント大学の K. Strong ら（招待講演）が北緯80度のカナダの北極圏 Eureka に設置された観測基地である「PEARL」の紹介を行い、「PEARL」における観測結果から、2011年春には北極上空でも南極上空と同様の不均一相反応及び脱窒が起こっていたことを報告した。2番目にドイツの M. Rex らが、2010/2011の冬季の下部成層圏の極渦が異常に安定していたため、成層圏気温が低下し、北極上空でも PSC の発生が可能となったことを報告した。3番目にフランスの J.-P. Pommereau らは、2011年の北極オゾンホールに伴うオゾン破壊量が南極に匹敵する値であったこと、その原因は1月中旬に北極上空で観測された気温が成層圏での水の氷点よりも低く、北極上空でも脱水・脱窒過程が進行したためであることを示した。北極上空の成層圏が低温になれば、北極上空でもオゾンホールは発生する。つまり、2011年3月になぜ北極上空にオゾンホールが発生したかは、北極成層圏がなぜ低温であったかという疑問に置き換わる。このことについてブレーメン大学の M. Weber らが、前年の夏に赤道太平洋域で La Niña が起こり、さらに QBO が西風フェーズの時に安定した極渦が起こる傾向があることを報告した。また、一般的に、極域成層圏の大きな変動は La Niña に続いて起こることが多く、El Nino

の時には北極成層圏では気温もオゾン濃度も高い傾向があることを報告した。さらに、太陽活動が最大で、El Nino や La Niña などの自然変動が無い時には、激しいオゾン濃度の変動は見られないことを報告した。これらの指摘は、北極におけるオゾンホール発生の予測に役立つ可能性があり、今後のさらなる研究の進展が期待される。さらに、ドイツの B.-M. Sinnhuber らは、もし10年間に0.7 K の割合で北極成層圏の低温化が進行すると、フロンガスの規制の効果が相殺されてしまう可能性を報告した。

極域オゾンのサブセッションIIでは7件の口頭発表が行われた。F. Khosrawi らは、成層圏水蒸気トレンドと最近の北極域でときどき発生している大規模な脱窒現象との関係に関して、人工衛星データをもとに考察した。その中で、2010/2011年北極域における大規模なオゾン破壊に脱窒が及ぼしていた影響に関して評価し、そのことと最近の成層圏での水蒸気の増加トレンドに関して、モデルを用いた評価を行った。H. Nakajima らは、人工衛星 CALIPSO/CALIOP による PSC の観測データから判別された PSC のタイプ別に、トラジェクトリー上で MLS 観測のマッチ解析を行うことによって、違う種類の PSC ごとにオゾン破壊率に差があるかどうかを解析した結果について報告した。解析の結果、PSC のタイプによってオゾン破壊率に違いがみられ、STS PSC で大きな破壊がみられることを示した。Wetzel らは、2010年1月と2011年3月の大気球搭載赤外放射分光器 MIPAS-B 観測結果をもとに、塩素酸化物の日変化に関して解析した結果について報告した。解析の結果をモデルによる ClO と ClONO₂ の変化と比較したところ、PSC が太陽からの直達光を遮って光解離率を減少させていた可能性が示された。この結果は、すでに科学雑誌 *Atmospheric Chemistry and Physics* に論文として掲載されているということである (Wetzel *et al.* 2012)。M. Volk らは、2010年冬季に行われた RECONCILE キャンペーン (オゾンを中心とした大気観測キャンペーン) において、高高度航空機 M55 Geophysica に搭載されたトレーサーガス測定器 HAGAR データをもとに、N₂O と CFC-11 のトレーサー・トレーサー相関解析から、空気塊の起源を調べるという解析結果に関して発表した。その結果、観測された空気塊を、極渦起源、境界起源、極渦外起源のものに分類し、極渦外起源の空気塊の極渦内へのフィラメント状の侵入現象に関して報告した。M. von Hobe らは、2009年から

2013年にかけて、欧州を中心に8カ国、16の研究機関が参加した RECONCILE の概要と、これまでに明らかとなった主な成果に関して報告した。RECONCILE はもともと、ClO ダイマーの光解離定数でこれまでの定説と異なった実験結果が出てきたことがきっかけとなって組織されたプロジェクトであるが、欧米の多くのグループが参加し、さまざまな結果が上がってきている様子が紹介された。F. Strohm らは、極渦内の ClO ダイマーの光解離定数に関して、ClO やそのダイマーを直接観測する測器である HALOX の RECONCILE での観測結果をもとに議論した。その結果、光解離係数は従来言われていた値と整合することを示した。M. Brakebusch らは、3次元 CTM である WACCM を使ったシミュレーションによる、2004/2005年冬季北極におけるオゾン変換の様子を、MLS による観測結果と比較して議論した。その結果、WACCM モデルが下部成層圏のオゾン変化の様子をよく再現していることが示された。

極域オゾンのサブセッションIIIでは7件の口頭発表が行われた。S. Viscardi らは、CALIPSO/CALIOP による PSC の観測結果と、PSC の微物理過程を取り込んだ3次元 CTM によるモデル計算結果を、2007年南極冬季について比較解析した。その結果、温度の僅かな違いが、PSC の分布に大きく影響することが示された。H. Oelhaf らによる発表は、本人が丁度気球キャンペーンに参加している最中のため、共著者の G. Wetzel によって発表された。彼らは赤外 (MIPAS-B)・ミリ波 (TELIS)・UV (DOAS) の3つの大気周縁気球観測器の2008、2009、2010、2011年の4回の気球観測結果について報告した。これらの測器を組み合わせると、Cl₂, Br₂, NO_y, HO_x 等多くの化学種の同時観測が可能となり、大変強力な組み合わせであると感じられた。J. De Laat らは、2010年南極オゾンホールに関して、マイナーな成層圏突然昇温が及ぼす影響に関して議論した。南極では、オゾンホールが1980年代に発見された後、2002年や2004年には突然昇温によりオゾン破壊が小さかったが、2010年に関するもそれに次いでオゾン破壊が小さく、その原因に関して力学的な観点から議論した。また、2012年に関するもオゾン破壊が小さくなる可能性に関して、最新速報として報告していた。T. Blumenstock らは、1993/94年の冬から北極域スウェーデン・キルナで観測を継続している地上設置 FTIR による微量気体成分の長期観測結果を報告した。観測の結果、オゾ

ンに関しては20 km 以上で+0.5~1.0%/年の有意な増加トレンドを報告した。また、ClONO₂やHClなど塩素化合物の減少トレンドや、寒冷な冬の脱窒や化学的オゾン破壊の様子などについても報告した。L. Avallone らは、南極の観測基地からの長時間飛行気球によるオゾンの準ラグランジュ観測 (Concordiasi) プロジェクトの結果に関して報告した。このプロジェクトでは、2010年9月から10月の間に6発の気球が放球され、それぞれ数か月にわたる高度17 km 付近でのオゾンの連続飛行観測を実施した。その結果、オゾンが徐々に破壊されていく様子を、実時間で測定することに成功した。M. Janouch らは、南極半島のアルゼンチン・マランビオ基地に Brewer 分光器をチェコ共和国が設置し、オゾンとUVの観測を開始したことについて報告した。データは衛星経由で送付され、WOUDCにも登録されているとのことである。このセッション最後の報告者である Grooss らは、トラジェクトリーボックスモデルあるCLaMSシミュレーションによって、南極オゾンホールに関してオゾンが最大に破壊される最低オゾン量の値が何によって規定されているのかに関して調べた。その結果、CH₄の酸化、COの酸化、O₂の光解離による光化学的オゾン再生がこの最低オゾン量を規定している可能性を示唆した。(忠鉢 繁, 中島英彰)

セッション2：対流圏オゾン

J. Logan らは、1990年以降の欧州・北米・日本・ハワイにおける自由対流圏オゾン濃度トレンド解析(レビューを含む)と、それにより明らかにされた各地の濃度季節変化の年々変動を全球化学輸送モデル(GMI Combo モデル)がよく再現するか否かという問題について報告した。大気境界層の上に通常位置しているドイツ・スイス・オーストリアの山岳地域での地表オゾン濃度モニタリング地点では、精度と安定性がオゾンゾンデよりも高い測器を長期に運用している。さらに、1994年からは同様の測器を旅客機に搭載したMOZAICプロジェクトが欧州のいくつかの空港で離発着時の鉛直プロファイルの場合によっては月に50回以上取得し続けており、オゾンゾンデのルーチン観測よりも時間的に密なデータを蓄積している。これらの月別平均値を比べると、5~10年単位のトレンドと年々変動の双方にそれぞれ欧州広域で共通のパターン(1990年代は1 ppb yr⁻¹程度の微増傾向、2000年代は横ばいか若干の減少傾向)が見られる。日本の下

部対流圏では、欧州と北米で濃度が上げ止まった2000年代に入っても明らかな濃度上昇傾向が続いている。欧州と北米の夏季下部対流圏オゾン年々変動は熱波に伴う気温と循環場の摂動が大きな影響を及ぼしているが、この点は全球化学輸送モデルの解像度でも十分に再現できているようだ。その一方で、春季の長期的オゾン増加傾向を各地域でよく再現できていない点が強調された。1990年代に入ると北米と欧州からの人為起源NO_x排出量が減少に転じ、中国からの排出量は増加していたものの前者よりも規模は明らかに小さかった。この時期に成層圏からのオゾン流入量が増加した可能性も指摘されているが、GMIモデルに組み込まれた対流圏・成層圏化学過程と使用された客観解析データの大気循環場では、対流圏オゾン濃度の春季月別値が年々変動するのを再現できないらしい。

H. Clark らは、MOZAICからIAGOSへと引き継がれつつある旅客機を用いた大気化学観測について報告した。この種のデータを長期に取得することの有用性についてはLoganらの研究でも明らかだが、IAGOSでは衛星経由で準リアルタイムにデータを伝達し、大気汚染と天気の予報業務に資する方向性も目指している。

B. Rappenglueck らは、米国ワイオミング州で着々と開発が進む天然ガス掘削に伴って発生するオゾン前駆物質排出とその影響について報告した。人為起源物質の排出がガス田以外からは殆どない地域である。地上連続測定では、メタンとNO_xの濃度時間変化が見事な相関を示していた。早春期(3月頃)には、積雪表面での不均一反応によりNO₂がHONOに変換され、HONOの光解離がOH(とNO)を生成してオゾン高濃度イベント発生を駆動する。バルーン観測によりオゾンと気象要素のプロファイルも取得し、現象の鉛直スケールをうまく捉えていた。早春の積雪時に日中140 ppbを超えるオゾン混合比が地表から100 m程度の非常に薄い大気混合層内で観測され、同じ日の地上HONO混合比は最高2 ppb程度にも達していた。積雪の存在により日中の大気混合層の発達を抑えられ、前駆体が地表付近に濃縮される効果も重要らしい。

I. Kononov (講演はM. Beekmann) らは、2010年夏にロシア西部を襲った熱波が大規模な森林火災を誘発し、大量のエアロゾル放出と高濃度オゾンの発生をもたらした状況を、CHIMEREモデルを用いて再現した。MODIS衛星で得られたFRPデータを使っ

て火災の位置・時間・規模を同定し、モスクワ近郊の地上ネットワークで測定されたCOとPM10の濃度時系列を用いて排出量を逆算していた。森林火災起源エアロゾルに含まれるHULISは、表面反応によりオゾン破壊する効果を持ち、汚染気塊中の正味オゾン生成が最大で30%程度抑制されるらしい。室内実験結果を参考にしてオゾンの取り込み係数を紫外光と可視光の強度・相対湿度・オゾン濃度自身の関数でパラメタライズし、高濃度エアロゾルが太陽光の到達を抑制する効果までモデルでは考慮されていた。なお、CHIMEREというモデルの名称は、フランス語のchimie「化学」とaérer「換気する」をchimère「怪物(キメラ)」にかけた言葉遊びが命名の由来らしいが、今時のモデルは皆どれも怪物的だ(M. Beekmann氏との私信)。

S. WuらはGEOS-Chemモデルを用いて、2000年から2050年にかけての対流圏オゾン変動に関するいくつかのシナリオ計算を行い、気候変動に伴う針葉樹林から広葉樹林への植生変化がオゾンの乾性沈着速度を増加させ、特に中高緯度夏季の森林地帯で地表オゾン濃度の顕著な減少(最大5~10 ppb程度)をもたらすと予想していた。M. Hollowayらは、HadGEM2-ESモデルを用いたオゾンと植生の相互作用の研究について講演した。オゾンによる気孔損傷の影響でオゾンと窒素酸化物の乾性沈着やイソプレンの大気放出が抑制される効果をパラメタライズし、森林大気中の光化学過程へのフィードバックの大きさを検討していた。これらの効果の導入により、モデル計算される地表オゾン濃度は熱帯雨林地帯で顕著に(最大で5 ppb程度)増加するが、オゾン乾性沈着速度低下の効果が最も大きいとのことである。

C. Wespesらは、IASI衛星データで見えるオゾンとCOの相関をMOZART-4モデルによるタグ付きシミュレーションと合わせて解析し、オゾン光化学生成と $\Delta O_3/\Delta CO$ 比との関係の地域性・季節性などを議論した。IASIのデータリトリバルで使用されるカーネルの鉛直プロファイルがオゾンとCOで異なる点を指摘し、注意を喚起していた。W. Verstraetenらは、TES衛星データから見える2005~2010年のオゾン濃度トレンドをTM5モデル計算との比較を交えて議論した。TESデータは、500 hPa付近の高度でオゾンゾンデデータに対して3.5~7 ppb程度の正のバイアスを示すが、バイアス値には明確なトレンドが見られない。OMI衛星データのNO₂カラム量を使って

中国でのNO_x排出量トレンドを調整すると、TM5モデルがTESデータで見える中国上空のオゾン濃度トレンドをよく再現するらしい。

M. Rexらは、海面水温の高い西部熱帯太平洋にOHラジカル濃度が相対的に低い領域が存在することを、オゾンゾンデ観測と化学輸送モデル計算を組み合わせ示した。成層圏化学に影響を及ぼす短寿命微量成分(SO₂やCH₂Br₂など)の光化学破壊が他の熱帯域より遅くなることで、同海域の活発な対流活動と併せて相乗効果的に上方へ輸送され易くなるという考え方を提示した。A. Thompsonらは、2012年夏に東南アジア域での航空機集中観測を予定していたSEAC4RSプロジェクトと、それに同期する形で計画されたオゾンゾンデ集中観測SEACIONS(SHADOZで確立された3地点に加え新たに5地点で1日1回ゾンデ放球)について紹介し、特に、ゾンデデータから垣間見える熱帯大気化学の多様な変動特性に言及していた。

(豊田賢二郎)

セッション3：オゾンに関連した微量気体成分の観測と収支

R. Salawitch(メリーランド大学)らは、成層圏最下部のO₃濃度に大きく影響する極短寿命物質(very short-lived substances: VSLS)起源のBrOがCH₃Br及びハロン濃度に基づくこれまでの推定よりも高い成層圏濃度で観測されていることをOMI及びSCIAMACHY観測結果に基づいて示した。またBrOの成層圏カラム量を見視したモデル等での扱いは誤りであるとした。2011年春のFairbanksでの検証実験とOMI観測から、成層圏のVSLS起因のBrOは5 pptであり、その内2 pptがPGI(Product Gas Injection)であり、3 pptがSGI(Source Gas Injection)であると結論した。この結果から、オゾン層将来予測などで現在用いられている値より高めのBrO値が実際の値であるとした。またSCIAMACHY-limb, SMILESなど多くのLimb観測は、高めのBrO値を報告してきたが、version改訂の度に値が低くなっていることに対してBrO値に対する先入観があるのではないかとコメントを行った。S. Tegtmeier(ヘルムホルツ海洋研)らは、赤道域での海水中及び大気中のVSLS(CH₃Br, CH₂Br₂, CH₃I)の測定から、鉛直混合及び成層圏への輸送量についてモデル計算と良い一致を得たことを報告した。T. von Clarmann(カールスルーエ工科大学)ら

は、2002年7月から Envisat 衛星搭載の赤外 Limb 放射分光計 MIPAS で得られた O_3 , H_2O , CH_4 , N_2O , NO , NO_2 , HNO_3 , HNO_4 , N_2O_5 , $ClONO_2$, ClO , CO , CFC-11, CFC-12, $HOCl$, SF_6 , H_2CO など30種におよぶ分子種の気候値について報告した。 SF_6 など他衛星では十分な空間分布が測定できない分子が age of air の特定に有効であること、逆に CFC-11, CFC-12の成層圏での観測結果は対流圏でのトレンドから単純に説明できないことを報告した。J. Gille (NCAR) らは、Aura 衛星搭載の赤外 Limb センサー HIRDLS の O_3 , CFC-11, CFC-12 の観測結果とモデル計算の比較から、2006年夏に60-120°E, 30°N の辺りで観測された O_3 減少について報告した。この減少は CFC-11, CFC-12の観測によって対流圏での強い鉛直混合とそれによる下部成層圏への速い輸送が行われた結果であり、モデル計算でも十分に再現できたことを示した。M. Suzuki (宇宙研) らは、SMILES の高精度な ClO , HO_2 , $HOCl$ の測定結果から定常状態近似を用いて $ClO + HO_2$ の反応速度を Arrhenius プロットから推定する試みを示し、これまでのモデル計算で用いられた JPL2006の値よりも大きな値の JPL2010がより妥当であることを報告した。J. Anderson (ハンプトン大学) らは、UARS/ HALOE, UARS / MLS, Aura / MLS, ACE-FTS の観測結果に基づいて1991年から現在までの成層圏 H_2O トレンドを求め、これを地上観測及びゾンデ観測と比較した結果について報告した。

これらの研究成果によって、Aura/MLS, SMILES などの高い鉛直分解能を持つ衛星観測が成層圏微量気体の測定手段として有用であり、モデル計算で既に再現できる現象を越えた新しい科学研究に必須であることが示された。また将来にわたって長期継続観測を行うことがこの分野の研究の進展に欠かせないことも一層明らかになったと感じられた。

(鈴木 睦, 磯野靖子)

セッション4：モデル計算：力学—化学結合・オゾン—気候相互作用

本セッションは二日目と三日目に分かれて行われた。T. Shepherd (トロント大学) らは、これまでの観測データに基づくトレンド解析についての以下の5つの疑問点を挙げ、化学気候モデルを使ったオゾン破壊物質 (ODS) の「あり」「なし」についての比較実験によって説明を試みた。①オゾンの減少トレンドは

1980年以前は無かったのか？②熱帯ではオゾン減少は無かったのか？③南半球の1980年代のオゾン全量の不連続の理由は？④ピナツボ火山の影響で北半球ではオゾンが大幅に減少したのに南半球で減っていないのはなぜか？⑤オゾンは回復しているのか？これらに答える鍵は対流圏オゾンの増大によるマスク効果 (①及び全般) と力学的変動 (②～⑤) であるという説明がなされた。「ODS あり」から「ODS なし」を差し引いたオゾン時間変化のプロットによって、1960年以降のオゾン破壊の40%が1980年以前に起こっていたことが示され、オゾントrend解析に一石を投じた感があった。一方、化学気候モデルが冬から春の北極オゾン減少を (従って北半球中高緯度のオゾン減少を) 十分表現しきれていないという課題が示された。R. Stolarski らは、化学気候モデルの比較に関して様々なモデル計算結果の平均・ばらつきを示すことからどう先に進めるか、という課題について論じた。下部成層圏の輸送を適切に表現しているモデルを塩素貯留物質 (HCl , $ClONO_2$) の長期観測データと比較することで診断できること等を示した。K. L. Smith らは、オゾン層の回復によって南極域の海水がどんな変化を受けるかについて化学気候モデルによるシミュレーションを行い、オゾン層破壊物質の削減が温室効果ガスの増大による海水の減少を33%緩和するとの結果を示した。P. Braesicke らは、地球温暖化を緩和する手段としての「ジオエンジニアリング」の一つである「external solar radiation management (SRM)」(例えば成層圏にミラーを置く) がもたらす様々な効果について化学気候モデルによるシミュレーションを行い、オゾンを含む気候システムに様々な変化をもたらすことを示した。Y. L. Yung らは、太陽活動に対するオゾンの応答を気候モデルが十分に再現できていない問題について、新しい UV の観測データや OH の扱いによって改善がみられたが、それでも十分に再現できたとは言えないことを示した。S. Meul らは化学気候モデルを用いて、温室効果ガスの増加が南極域の成層圏オゾン、特に冬～春季のオゾンホールに及ぼす影響についてのシミュレーション結果を示した。結果は次の通りであった。晩冬から春の南極下部成層圏気温は低下せず、メタンや一酸化二窒素の増加は HO_x の増加と NO_x の減少をもたらす、ブリューワー・ドブソン循環の強化によって極域のオゾンは増える。結果を総合して、オゾン層破壊物質濃度が変わらない場合、温室効果ガスの増加はオゾンホール面積の45%の

減少をもたらすことが示された。C. Staehelin らは、ピナツボ火山噴火の後で南半球のオゾンがそれほど減少しなかったことについて、様々な力学的要素について検討し、QBO と様々な力学的効果 (EP-flux の増大, ブロッキング, SAM と ENSO) がオゾンの増大をもたらす、不均一反応によるオゾン減少を打ち消したと結論した。

セッションは翌日の朝から再開した。D. Wuebbles (イリノイ大学) らは、航空機 NO_x エミッションが気候に与える影響について発表を行った。化学気候モデル (CAM4・5) と AEDT により推定された航空機 NO_x エミッションを用いてシミュレーションを行い、2006年の航空機 NO_x の気候影響 (オゾン, メタン, 成層圏水蒸気を含む) を 17.1 mWm^{-2} と推定した。また、技術・航空機運用の改善を考慮した将来の気候影響は 24.8 mWm^{-2} であるとの推定を示した。S. Fueglistaler (プリンストン大学) らは、下部成層圏気温の季節変動における力学、オゾン、放射の相互作用について発表した。発表では、プリューワー・ドブソン循環の季節変化によるオゾン変化と静的安定度の緯度分布が、特に熱帯域の気温の季節変化を強化していることを述べた。また、季節変化と数年スケールの年々変動では、熱帯域と中高緯度の気温の間に負の相関があることを示した。D. MacKenzie (トロント大学) らは、中高緯度 UTLS 遷移層分布の季節性と成層圏-対流圏間の物質交換についての発表を行った。GEOS-Chem モデルの UTLS 遷移層は、ACE-FTS による衛星観測と整合的であることを示した上で、UTLS 遷移層の分布・季節性が STE の強さと一致していることを示した。さらに、南インド洋・大西洋において成層圏起源のオゾンが対流圏に、南アフリカ・南米起源の一酸化炭素が成層圏に輸送されていることを示した。N. MacDonald (カールトン大学) らは、CMAQ アジョイントモデルを用いて、北米大陸の CPF (Climate Penalty Factor; 気温に対する大気汚染の感度) を評価した結果を示した。モデルの結果から、用いる大気汚染の指標により CPF が異なること、都市域では NO_x の排出規制が CPF に悪影響を与えることなどが示された。B. M. Sinnhuber (ベルリン自由大学) らは、EMAC モデルを用いて臭素を含む VSLS (極短寿命物質) が成層圏オゾン減少に与える影響を調査した結果を発表した。彼らの結果からは、現在の成層圏臭素のうち20%が VSLS 起源であることが示されていた。また、VSLS は、中緯度で総

カラムオゾンを 5-10 DU 減少させ、高緯度のオゾン消失も促進すると述べた。

このあとセッションの内容は CFC や HCFC の削減の話へと移った。G. Velders らは、モントリオール議定書による CFC と HCFC の規制が京都議定書の目標の 5-6 倍の温室効果の減少をもたらしたとのオゾンアセスメントパネル報告書2010の記述を引用しつつ、その効果が将来、HFC の増加によって失われる可能性があることを指摘した。そして、GWP が 150以下の HFC 代替物質が有効であることに言及すると共に、政治的には HFC をモントリオール議定書に含めることが有効であるとの意見を示した。D. Wuebbles は 6 種の不飽和結合を持った短寿命の HFC 代替物質については化学気候モデルを用いた寿命と GWP の評価が必要であること、及びそれらの HFC 代替物質の寿命は 1 か月以内で GWP は 5 以下であることを示した。そして、現在使用している HFC をこれらの物質によって代替するならばモントリオール議定書によって得られた温室効果削減効果 (Climate Benefit) が引き続き確保されると結論した。この講演に対して中根は、「その二つの結論については異論はないが、CFC, HCFC, HFC の回収を行うことによる温室効果の削減効果が大きい」ことを指摘し、関連する質疑が行われた。(中根英昭, 関谷高志)

セッション5：観測技法と相互比較

特にこのセッションで印象深かったこととして、米国の UARS その後の Aura, また欧州での SCIAMACHY など衛星観測データが長期間に渡って蓄積されるようになって、それらのデータを横断的に比較する中で相互の問題点を明確化していこうという動きが見て取れたことが上げられる。これは衛星データに限ったものではなく、地上からのオゾンをはじめとする微量成分観測の継続性、あるいは観測点配置の最適性などの話題としてもあらわれていたように思う。とにかく測りましたというだけではなく、これからそのデータの持ち味 (時間的な継続性であるとか高精度で参照データとなり得るとか) を十分に意識した観測計画が必要とされる時代に入っていることを認識させられた。

このセッション冒頭の招待講演では、J. Orphal らから、オゾンの吸収断面積の相互比較に関する国際的な専門家会議でおこなわれている活動内容について詳細な紹介があった。またその次の C. Janssen らから

もオゾン同位体を含む吸収断面積に関する同様の講演があり、今後の地上や衛星からのオゾン観測の基礎となるものと期待される。地上観測システムの相互比較・校正も重要であり、A. Redondas Marrero からは欧州において地域ごとにおこなわれているブリューワ分光器の相互比較キャンペーンの結果について報告があった。こういった地上観測は一般的に長期間継続的に運用され、観測寿命の限られる衛星観測のギャップを埋めるとともに、衛星データを一本化するときの参照データとして非常に重要である。特にここでは、迷光の影響やフィルターの非線形の問題などが指摘された。S. Dikty らは、WFDOAS といわれる手法に基づいて GOME と SCIAMACHY から得られた紫外から可視にかけての分光観測データからオゾン全量を得て、長期の地上観測と比較した。その結果バイアスはほとんどの地上観測点において2%以下で、さらに長期トレンドを引き起こしうる雲や対流圏オゾンの変動などについて吟味が必要であることを述べた。衛星観測と地上観測との比較という観点で、M. Shiotani らが国際宇宙ステーションに搭載された大気観測装置 SMILES とオゾンゾンデとを比較した結果を示した。SMILES にかぎらず他の衛星観測でも指摘されている熱帯下部成層圏における衛星側の正のバイアスの一部が、オゾンゾンデの応答時間の問題で説明できる可能性を示した。

H. Irie らは、対流圏 NO₂ カラム濃度を観測する衛星センサー (SCIAMACHY, OMI, GOME-2) のバイアス評価を多軸差分吸収分光法 (MAX-DOAS) による観測を用いて実施した。3つのセンサーのデータのバイアスは10%より小さいという結論を導き、それらの衛星観測の地方時の違いを利用して数値モデル等を日変化の観点で評価できることを提案した。A. Piters らは軽量で低消費電力の使い捨て型の NO₂ 測定器の開発を紹介した。これはオゾンゾンデのように気象ゾンデに搭載して簡便に打ち上げ可能で、微細な高度分布情報を測定できるとのことである。この測器は1 ppbv の変動を捉えられることを示し、こういった観測を利用することが衛星観測のリトリバルやモデルの高精度化に資する可能性を述べた。A. Jonsson らは、特に太陽掩蔽法による衛星観測の検証比較において、検証観測との時空間の一致基準の選定が重要であることを述べた。その問題を克服するために、数値モデルを用いて全ての検証観測の誤差を評価した上で使うことができるようにする CMAM20 プロジェクト

を紹介した。予備解析として ACE-FTS や OSIRIS のオゾン観測のバイアスとランダム誤差を評価した結果を示した。

G. Labow らは SBUV にオゾン吸収断面積の見直しを含む最新のアルゴリズム Ver8.6 を適用し、1970 年の BUV まで遡ったオゾン全量について、ドブソン、ブリューワ等の地上観測と比較し、バイアスが±1%程度に収まることを示した。J. Zawodny らから SAGE の Ver.7 による解析の報告があり、搭載センサーの重複期間データをもとに SAGE III から過去へと再評価し、SAM II, SAGE といった初期の衛星データ精度が大きく改善したことを示した。このような信頼性の高い長期データセットは、トレンドの把握のみならず、地上観測のシステム更新等に伴うデータ不連続の評価にも有効であろう。D. Hubert は14の衛星ミッションによるオゾン鉛直分布の系統的な品質について、オゾンゾンデとの比較結果を示した。一見して SAGE III など一部のセンサーの品質が高いようでもあったが、高い高度での正バイアスや、衛星の観測期間によって評価がバラつく原因は、比較対象のオゾンゾンデ側にあるとの指摘であった。オゾンゾンデデータの均質性の確保については、SPARC/IO₃C/IGACO-O3/NDACC がオゾン鉛直分布の過去変化の理解を深めるための評価活動 (SI²N) として進めており、関連するポスター発表が多数報告されていた。データの見直しの報告が多いなか、D. Flittner らからは、SAGE III の月光を利用した掩蔽観測によるオゾン、NO₂、NO₃ の鉛直分布が示された。極夜等で太陽光の利用が限られる地域では特に貴重であろう。

(塩谷雅人, 入江仁士, 中野辰美)

セッション6：宇宙からのオゾン観測

本セッションでは衛星オゾン観測に関する議論が行われた。前回のオゾンシンポジウムまでにはない新しいセッションであり、発表件数は口頭13件、ポスター32件であった。2012年はオゾンの成層圏グローバル分布が初めて Nimbus-7 衛星搭載の LIMS で観測された1978年から34年になる。2005年からこれまでの7年間の間だけを見ても、成層圏や対流圏のオゾンを観測した衛星センサーは世界で12機器以上であり、軌道上にあるオゾン観測衛星センサー数は減少傾向にあるものの、衛星オゾン観測研究分野の隆盛は未だ衰えていない。

4日目の8月30日に実施された口頭発表では、午前

中にこれまでの衛星観測のオゾン長期トレンドが議論された。D. Degenstein らによる Odin/OSIRIS の 7 年間のオゾン観測にはじまり、E. Kyrola らによる Envisat/GOMOS の 10 年間のオゾン連続観測について紹介があった。その後、欧州や米国におけるオゾン長期トレンド観測プロジェクトの紹介が続いた。欧州衛星観測データによる 16 年間にわたるグローバルオゾン全量トレンド報告 (M. Coldwey-Egbers ら)、いくつかの衛星データをマージしオゾンの長期トレンド高度プロファイルを得る NASA の MEASUREs GOZCARDS プロジェクト (H.-J. Wang), ESA の Climate Change Initiative Programme 中のオゾンデータレコード活動についての紹介 (M. Van Roozendaal), など各国における長期的オゾン観測の概要に関する発表があった。

午後は各衛星オゾン観測のハイライト講演が続いた。TOMS の Version9 オゾン全量解析アルゴリズムのハイライト (P. Bhartia) に始まり、D. Rault からの OMPS センサー紹介、熱赤外サウダ MetOp-A/IASI (M. George) による対流圏オゾン観測、SCIAMACHY のハイライト (J. Burrows), MIPAS の各 L2 データセット比較 (A. Laeng), SciSat-1/MAESTRO の可視紫外と近赤外測定を用いたエアロゾル消散係数 (C. T. McElroy) の講演があった。口頭講演の最後は、カナダの新たな衛星観測提案 CASS の紹介 (K. Walker) で締めくくられた。

ポスター 32 件はこれまでの長期観測によるオゾントレンド、検証、解析アルゴリズム開発を中心に議論が活発に行われた。中でも S. Tegtmeier らによる SPARC Data Initiative 活動は、1978 年の LIMS の観測からこれまでの世界のオゾン Limb 観測を集めて比較することで各測器の特徴や観測の中心値を明らかにする面白い試みであった。

現在では世界の衛星オゾン観測の中心は Limb geometry による成層圏オゾン観測から静止衛星や気象衛星などの Nadir geometry による対流圏オゾン観測に興味が移行している。Envisat 衛星が観測を停止した後 Limb geometry の衛星観測は行われておらず、今後も予定がない。今回のオゾンシンポジウムでは、成層圏長期トレンド観測の発表に加え、対流圏オゾン観測の発表が増えていることであろう。

(笠井康子, 長濱智生)

セッション 7 : オゾン及び紫外線量の観測・解析

シンポジウム 5 日目には、一日間にわたって「オゾン及び紫外線量の観測・解析」と題したセッションが組まれ、20 件の口頭発表が行われた。題目から想像できる通り、言わば「なんでもあり」のセッションであり内容は多岐にわたっていたが、大局的視点からみれば「オゾン長期トレンド」を意識したものがほとんどであった (UV の発表も 1 件あったがここでは割愛する)。以下この視点に立って、発表を整理してみたい。

モントリオール議定書の採択により ODS は減少し、オゾン量の減少は 2000 年代前半に底を打ったとされているが、そこからの回復トレンドが見られるかが近年の関心事となっている。また、CO₂ 増加に伴う成層圏寒冷化 (オゾンの消失反応を減速) によってオゾン量はさらに早い回復 (“super recovery”) を示すことも予測されており (WMO 2011), 近年のオゾン量の変化傾向について観測データを用いた定量的な記述が求められている。

さて、オゾン観測は、全量観測とプロファイル観測の二つに大別される。オゾン全量については、地上観測ではドブソン分光計により 1920 年代以降、衛星観測では 1970 年代以降、長期データが蓄積されている。また、オゾンプロファイルでは、ドブソン分光計の Umkehr 観測 (1950 年代以降), 継いでオゾンゾンデ (1960 年代以降), オゾンライダー (成層圏と対流圏) (1980 年代以降), マイクロ波や FTIR (1990 年代以降) 等の地上観測や、BUV・SBUV・SBUV/2 (1970 年代以降), SAGE (I/II/III), HALOE, UARS/MLS, GOME, SCIAMACHY, ACE-FTS, Aura/MLS 等 (1979 年以降) の衛星観測によって長期のデータが蓄積されている。継続的に使用される測器の品質ができるだけ高いこと、およびその品質が知られていることも必要である。現在、各々の測器についてワーキンググループがつくられ、均質で長期的なデータセットを構築する作業が進められていることが報告された (J. Staehelin)。また、別のアプローチとして、全量観測データを CTM に同化して得られる再解析データ (Multi-Sensor Reanalysis ; MSR) を作成する試みもある (R. van der A)。オゾンの同化に関しては課題が多いが、均質なデータを作る上で今後有力な手段の一つとなっていくだろう。

衛星観測がおかれた状況については特に発表が多かったため、少し詳しく説明したい。オゾンプロファイルを長期監視する上で極めて重要な貢献をした

SAGE II が2005年に20年余にわたる長寿を全うし観測を終了した。現在、プロファイルの長期トレンド解析という観点で残る頼みの綱はSBUVとSBUV/2という状況にある。ただしSAGE IIの場合と異なり、異なる衛星に搭載された測器間のbiasをいかに補正して均質なMerged Ozone Data (MOD)を作成するかが大きな課題となっていた。R. McPetersらは、8つのSBUV(/2)、すなわちNimbus-4衛星搭載のBUV (1970-72年)・Nimbus-7衛星搭載のSBUV (1979-1990年)・NOAA-9, 11, 14, 16, 17, 18衛星搭載のSBUV/2 (1985年～)によって得られた40年間の長期オゾン時系列データを再処理した。再処理にあたって、以前の処理では衛星のオーバーラップ期間からオゾン観測量を調整していたのに対し、この処理調整では各衛星に放射輝度校正を定めて系統的に補正を施している。その他、Brion-Daumont-Maligetによるより正確なオゾン吸収係数の適用、OMI測器からの雲頂高度気候値補正、Aura/MLSとゾンデによるオゾンプロファイル気候値の更新、軌道変更に伴うドリフトの測定限界の適用などがなされた。SBUV観測と世界準器観測(Dobson #83)のオゾン全量差は $+0.85\% \pm 0.88\%$ で以前の処理に比べてよく一致した。オゾンプロファイルの誤差は概ね5%であった。これにより、衛星間のバイアスを考慮せずともある程度均質なデータセットを構築することが可能になった(S. Frith)。

これらのMODを用いたトレンドの解析結果が数多く紹介されていた。多くの解析では重回帰解析を用いて力学的変動ファクター(QBO, プリューワ・ドブソン循環, 太陽活動周期変動, ENSO, AOなど)に伴う経年変動を取り除き、残差成分としての長期変化について議論していた(S. Godin-Beekman, W. Steinbrecht, M. Weber)。ただ、これら力学的変動については統計的な議論に終始しており、メカニズムにまで踏み込んだ議論は十分になされていない印象を受けた。

オゾン全量のトレンドについては、J. Staehelinが、北半球の近年のオゾン増加傾向がEESCの減少傾向と一致していることを示し、モンテリオール議定書の効果が表れている明確な観測的証拠であると結論づけていた。これはM. Weberによる衛星データ解析の結果とも整合的である。一方R. van der Aは南極の全量トレンドについてMSRを用いて議論していたが、有意な回復傾向は見られないようである。北半

球と南半球でトレンドが異なることはM. TullyやM. Pastelも指摘していた。

一方オゾンプロファイルについては、W. Steinbrechtが、EESC減少と成層圏寒冷化の影響が相まってオゾンのsuper recoveryが見られていることを、複数の地上・衛星観測データの結果をCCMの結果と比較しながら示していたのが興味深かった。先にも述べたように、単一測器データのみでは質的にも量的にも確実な結果を導くのが難しい中、複数のデータセットの結果を合わせれば説得力が増すものだと感じた。とはいえ、彼が講演の最後に述べていた「オゾントrendは一朝一夕の(10年程度の)観測で検出することは難しく、長期的で均質な観測体制が必要である。一方で、成層圏寒冷化等の検出に必要な温度の長期観測も、(気温観測が一番の基本であるはずなのに)実は十分でない」というメッセージは印象的であった。他にトレンドについては、中部成層圏でNO_xの増加による負のトレンド(C. Gebhardt)やプリューワ・ドブソン循環強化による負のトレンドが見られる(J. Ziemke)との発表もあったが、その有意性についてはさらに検証が必要そうである。

最後に、我田引水になるがオゾン日変動の話の詳細を紹介させていただきたい。オゾン日変動は近年次の2点について特に注目されている。まずは、SAGE IIのsunset-sunrise biasの問題である。その名の通り、特に上部成層圏領域において、日の出と日の入の観測値が最大5-10%程度異なることが報告されており、これがオゾン日変化によるものではないかと疑われている(E. Kyrola)。2点目は、MOD作成に付きまとう「日変動バイアス補正」の問題である。多くの衛星は太陽同期であるものの、軌道面の長期変化(orbital precession)により観測の地方時が徐々に遅れていく(例えばSBUVでは10年で10 hours程度)。事実、今回更新されたSBUV Ver.8.6データについてもプロファイル値については測器間で数%のbiasが残っている(R. McPeters)。現時点でオゾン日変動の描像は明らかになっていないために当問題に対する補正はなされておらず、日変動成分の定量的な評価がSBUVのMODデータ改善におけるkey factorであると複数の講演で指摘されていた(R. McPeters, S. Frith)。このような背景のもと、セッション最後に日変動に関する発表が2件行われた。T. Sakazakiは、SMILESデータおよび2種類のCTM(CCMを再解析気象データにナッジング)を用いて、オゾン日変動

のグローバルな描像を初めて明らかにした。オゾンブ
ロファイル値で最大8%, オゾン全量で最大1% (い
ずれも peak-to-peak 値) の変動が生じることが分か
り, さらに CTM の解析によりこれらの変動には光化
学・力学の両者が寄与していることを明らかにした。
また, SAGE II の sunrise-sunset バイアスがオゾン
日変動によって生じていることも指摘した。続いて
A. Parrish は, Mauna Loa 観測所のミリ波放射計
データと CTM データを用いてオゾン日変動を調べ,
観測とモデルの整合性がよいことを示した。これら2
件の発表は, 観測が少ない日変動を調べる上で CTM
が今後強力な手段となり得ることを示した点でも意義
深い。ちなみに, MOD 作成における日変動補正問題
については, スイスの K. Hocke を中心としたワーキ
ンググループが発足し, 今後2年計画でオゾン日変動
およびそのトレンド解析への影響について定量的見積
もりが行われることを付記しておく。次回のオゾンシ
ンポジウムまでにはこの点を考慮した MOD が出現す
ることが期待される。(坂崎貴俊, 宮川幸治)

略語一覧

ACE-FTS : Atmospheric Chemistry Experiment Four-
rier-Transform Spectrometer
AEDT : Aviation Environmental Design Tool
AO : Antarctic Oscillation
BUV : Backscatter Ultra Violet Radiometer
CALIOP : Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polari-
zation
CALIPSO : Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Path-
finder Satellite Observations
CAM : Community Atmosphere Model
CASS : Chemical and Aerosol Sounding Satellite
CCM : Chemistry-Climate Model
CLaMS : Chemical Lagrangian Model of the Strato-
sphere
CMAM : Canadian Middle Atmosphere Model
CMAQ : Community Multi-scale Air Quality model
CPF : Climate Penalty Factor
CTM : Chemistry Transport Model
DOAS : Differential Optical Absorption Spectrometer
EESC : Equivalent Effective Stratospheric Chlorine
EMAC : ECHAM/MESSy Atmospheric Chemistry
model
ENSO : El Niño-Southern Oscillation
Envisat : Environmental Satellite
EP-flux : Eliassen-Palm flux

ERS-2 : European Remote Sensing satellite
FRP : Fire Radiative Power
FTIR : Fourier-Transform InfraRed Spectrometer
GEOS-Chem : Goddard Earth Observation System-
Chemistry model
GMI Combo model : Global Model Initiative Combo
model
GOME : Global Ozone Monitoring Experiment
GOME-2 : Global Ozone Monitoring Experiment-2
GOMOS : Global Ozone Monitoring by Occultation of
Stars
GOZCARDS : Global OZone Chemistry And Related
trace gas Data records for the Stratosphere
GWP : Global Warming Potential
HadGEM2-ES : Hadley Centre Global Environmental
Model version 2 Earth System configuration
HAGAR : High Altitude Gas Analyze
HALOE : Halogen Occultation Experiment
HALOX : HALogen Oxide Monitor
HIRDLS : High Resolution Dynamics Limb Sounder
HULIS : HUmic-Like Substances
IAGOS : In-service Aircraft for a Global Observing
System
IAMAS : The International Association for Meteorol-
ogy and Atmospheric Sciences
IASI : Infrared Atmospheric Sounding Interferometer
IGACO : Integrated Global Atmospheric Chemistry
Observations
IO₃C : International Ozone Commission
IOD : Indian Ocean Dipole
JAMSTEC : Japan Agency for Marine-Earth Science
and Technology
LIMS : Limb Infrared Monitor of the Stratosphere
MAESTRO : Measurements of Aerosol Extinction in
the Stratosphere and Troposphere Retrieved by Oc-
cultation
MAX-DOAS : Multi-Axis Differential Optical Absorp-
tion Spectroscopy
MetOp-A : Meteorological Platform on Polar Orbit-A
MIPAS : Michelson Interferometer for Passive Atmo-
spheric Sounding
MIPAS-B : Michelson Interferometer for Passive
Atmospheric Sounding-Balloon
MLS : Microwave Limb Sounder
MOD : Merged Ozone Data
MODIS : MODerate resolution Imaging Spectro-
radiometer
MOZAIC : The Measurement of OZone and water
vapor by Airbus In-service airCRAFT

MOZART-4 : The Model for OZone And Related chemical Tracers version 4
 MSR : Multi-Sensor Reanalysis
 NASA : National Aeronautics and Space Administration
 NDACC : Network for the Detection of Atmospheric Composition Change
 NOAA : National Oceanic and Atmospheric Administration
 ODS : Ozone Depleting Substances
 OMI : Ozone Monitoring Instrument
 OMPS : Ozone Mapper Profiler Suite
 OSIRIS : Optical Spectrograph and InfraRed Imaging System
 PSC : Polar Stratospheric Clouds
 QBO : Quasi-Biennial Oscillation
 QOS : Quadrennial Ozone Symposium
 RECONCILE : Reconciliation of essential process parameters for an enhanced predictability of Arctic stratospheric ozone loss and its climate interactions
 SAGE : Stratospheric Aerosol and Gas Experiment
 SAGE II : Stratospheric Aerosol and Gas Experiment II
 SAGE III : Stratospheric Aerosol and Gas Experiment III
 SAM : Southern Annular Mode
 SBUV : Solar Backscatter Ultra Violet Radiometer
 SBUV/2 : Solar Backscatter Ultra Violet Radiometer/2
 SCIAMACHY : SCanning Imaging Absorption spectroMeter for Atmospheric ChartographY
 SciSat-1 : Science Satellite-1
 SEAC4RS : Southeast Asia Composition, Cloud, Climate Coupling Regional Study
 SEACIONS : Southeast Asia Consortium for Intensive Ozonesonde Network Study
 SHADOZ : Southern Hemisphere ADDitional

OZonesondes
 SI²N : SPARC/IO₃C/IGACO-O3/NDACC
 SMILES : Superconducting Submillimeter-Wave Limb-Emission Sounder
 SPARC : Stratospheric Processes And their Role in Climate
 STE : Stratosphere-Troposphere Exchange
 STS : Super-cooled Ternary Solution
 TELIS : TERAhertz and Submillimeter Limb Sounder
 TES : Tropospheric Emission Spectrometer
 TFHTAP : Task Force on Hemispheric Transport of Air Pollutants
 TM5 : The global chemistry Transport Model version 5
 TOMS : Total Ozone Mapping Spectrometer
 UARS : Upper Atmosphere Research Satellite
 UTLS : Upper Troposphere and Lower Stratosphere
 UV : UltraViolet
 VSLS : Very Short-Lived Substance
 WACCM : Whole Atmosphere Community Climate Model
 WFDOAS : Weighting Function Differential Optical Absorption Spectroscopy
 WMO : World Meteorological Organization
 WOUDC : World Ozone and Ultraviolet Radiation Data Centre

参考文献

Wetzel, G. *et al.*, 2012: Diurnal variations of reactive chlorine and nitrogen oxides observed by MIPAS-B inside the January 2010 Arctic vortex. *Atmos. Chem. Phys.*, **12**, 6581-6592.
 WMO, 2011: Scientific Assessment of Ozone Depletion 2010. Global Ozone Research and Monitoring Project - Report No.52, Geneva, Switzerland, 516pp.