

国際オゾンシンポジウム2016報告

柴崎和夫*¹・中島英彰*²・杉田考史*³・大山博史*⁴
 荻野慎也*⁵・金谷有剛*⁶・須藤健悟*⁷・秋吉英治*⁸
 出牛真*⁹・中野辰美*¹⁰・水野亮*¹¹・長濱智生*¹²
 山下陽介*¹³・塩谷雅人*¹⁴・辻健太郎*¹⁵・廣岡俊彦*¹⁶

1. はじめに

オリンピック開催年に合わせて、4年に一度の国際オゾンシンポジウム(QOS)が、2016年9月4日～9日の日程で、英国はスコットランドのエディンバラで開かれた。温暖化問題に比して、「オゾン層破壊」の問題は表舞台からは遠ざかってしまった感がある。この分野への研究資金の流入も細くなったことで、この分野の研究者の数は減少傾向にあることは確かであろう。2012年のトロントでも顕著であったが、シンポジウム参加者は300名程度、発表論文は(ポスター発表含め)350本程度と最盛期に比べると減っている。参加した日本からの研究者もかつて30名を超えることもあった事を想うと、少し寂しい気持ちにもなる。だが、4年に一度集まった研究者達の熱気はこれまでと

変わらない。

エディンバラの国際会議場を会場とした今回のシンポジウムは、一つの会場での口頭発表、昼食も提供されて、昼食会場での昼と夕刻のポスター・セッションと、非常に合理的な形での運営が成されていた。Webの時代でもあり、分厚いAbstract講演集もなく、簡単なプログラムを配布してのシンポジウムであった。主催は、スコットランドの自然環境研究機構(NERC, 英国)の生態および水文センター(CEH, 英国)とエディンバラ大学であった。

シンポジウムも派手な開会式もなく、今回のシンポジウム、プログラム委員会委員長のD. Fowler博士(NERC)の開会の宣言、スコットランド自治政府の地域および自然環境担当主任科学アドバイザーである

*¹ Kazuo SHIBASAKI, 國學院大學人間開発学部。

*² (連絡責任著者) Hideaki NAKAJIMA, 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

*³ Takafumi SUGITA, 国立環境研究所地球環境研究センター。

*⁴ Hirofumi OHYAMA, 名古屋大学宇宙地球環境研究所気象大気研究部。

*⁵ Shin-Ya OGINO, 海洋研究開発機構大気海洋相互作用研究分野。

*⁶ Yugo KANAYA, 海洋研究開発機構地球表層物質循環研究分野。

*⁷ Kengo SUDO, 名古屋大学大学院環境学研究所

*⁸ Hideharu AKIYOSHI, 国立環境研究所地球環境研究センター。

*⁹ Makoto DEUSHI, 気象庁地球環境・海洋部。

*¹⁰ Tatsumi NAKANO, 気象庁高層気象台観測第三課

*¹¹ Akira MIZUNO, 名古屋大学宇宙地球環境研究所気象大気研究部。

*¹² Tomoo NAGAHAMA, 名古屋大学宇宙地球環境研究所気象大気研究部。

*¹³ Yousuke YAMASHITA, 海洋研究開発機構ビッグデータ活用予測プロジェクトチーム。

*¹⁴ Masato SHIOTANI, 京都大学生存圏研究所。

*¹⁵ Kentaro TSUJI, 気象庁地球環境・海洋部。

*¹⁶ Toshihiko HIROOKA, 九州大学大学院理学研究院。

© 2017 日本気象学会

L. Heathwaite 博士の歓迎の辞と続き、最後に国際オゾン委員会の新会長である Sophie Godin-Beekmann (IPSL, フランス) の挨拶で終了であった。なお、新副会長はアメリカの Paul Newman (NASA/GSFC, 米国) である。その後、今回の会議の事務局長である S. Reis 博士 (CEH) から事務的な連絡があり、シンポジウムのセッションが始まった。

個人的には、1988年のドイツ、ゲッチンゲン以来8度目となるオゾンシンポジウムへの参加であった。今回はオゾン回復がどのように進展しているかの議論が白熱していたが、オゾン層が世界的に注目される前の、地道な研究発表が成されているオゾン研究のプロの国際シンポジウムである感が強かった。

エディンバラの街は見所も満載であったが、毎日雨、曇り、日照とめまぐるしく変わる、まさにイギリスらしい気候を満喫した。

以下に、5つに分けられた各セッションの内容に関して、印象に残った発表を中心に紹介する。

(柴崎和夫)

2. セッション1：成層圏オゾン (Stratospheric Ozone)

5日間のシンポジウムの初日は、この「オゾンシンポジウム」の中心的課題ともいえるべき「成層圏オゾン」のセッションから始まった。分科会的に会場を分けず、1会場に全員が集まってすべての口頭発表を聞くことが出来るのが本シンポジウムの特徴の一つであり、その分口頭発表の件数は限られている。それぞれのセッションでは30分のキーノートスピーチがあり、その後15分の一般の講演が続く形となっている。成層圏オゾンの口頭セッションは、初日の全部と2日目の午前の前半が充てられた。

最初に P. A. Newman (NASA/GSFC) らが、成層圏オゾン破壊の歴史と現状、21世紀の展望について講演を行った。その話は、4年おきに発行している前回の WMO/UNEP 2014年版オゾン破壊科学報告書 (WMO 2014) の内容のおさらいから始まり、最近の研究成果まで語られた。その内容のポイントは、以下のようなものである。

- ・モントリオール議定書は有効に働いており、オゾン層を破壊する塩素化合物 (ODS) の総量は、2012年には1996年と比べ3522から3210 ppt と、312 ppt (9%) 減っている。
- ・将来の ODS の放出への寄与としては、現在空調機

や断熱材の中に含まれる、いわゆるフロンの「バンク」が一番大きな部分を占める。

- ・バンクからの将来の放出は、温室効果への寄与も大きい。
- ・それでも、今世紀半ばには、オゾンホールは1980年以前レベルまで回復するであろう。

一方、以前はあまり注目されていなかった、代替フロンである HFC の事についての紹介があった。特にその大きな地球温暖化係数 (GWP) のため、将来の HFC の放出により、CO₂ の25%もの放射強制力を占めることになるかもしれない危険性が指摘された。このことは、丁度 QOS 終了後の10月にルワンダで行われたモントリオール議定書締結国会議で、オゾンをまったく破壊しない HFC の生産を規制する議定書の改定案の採択につながっている。今後は日本も、今の代替冷媒である HFC を、低 GWP の HFC や HFO、CO₂ などの自然冷媒へ転換することが要求されることになりそうである。さらに、オゾンと気候変動との関係が紹介され、その一部として2015-2016年の QBO の様子がこれまでにない変な様相を示していることが示された (Newman *et al.* 2016)。最後に、2018年オゾン破壊科学報告書の執筆スケジュールと目次案が示された。

次に、S. Solomon (MIT, 米国) らが当年の Science 誌に掲載されたオゾン破壊回復に関する論文 (Solomon *et al.* 2016) の内容を紹介した。現在の成層圏オゾン研究者の関心事の大きなものに、「いつ統計的に有意なレベルで成層圏オゾン層が回復してきていると言えるか?」という命題がある。今回の QOS2016の成層圏オゾンセッションでも、オゾントレンドや回復に関する複数の発表があった。その中でも Solomon の論文と今回の発表は、その命題に一つの解を与えたものと位置づけられよう。まず最初に Solomon は地球温暖化の原因が人為起源であるかどうかという問題に対する過去3回の IPCC report (1995, 2001, 2007) の記述の強まりを示し、ある事実を統計的に有意に示すためには「自然変動からのずれの大きさ」と「証拠 (指紋)」を示すことが重要だと述べた。その際、火山噴火による成層圏エアロゾルの増加が数年にわたって成層圏オゾン量の減少に大きな寄与を与えることに注目し、史上4番目に大きかった2015年の南極オゾンホールは、その年に噴火したチリの Calbuco 火山噴火の影響が大きいことを示した。その上で、南極点基地 (米国) と昭和基地 (日本) の

オゾンゾンデ観測や、各種衛星観測データを解析し、MERRA 気象データにナッジングした WACCM 化学気候モデル計算の結果との比較により、以下の結論を導き出すことに成功した。

- ・南極オゾンホールが最大に広がる10月に関しては、統計的に有意な回復傾向はまだ見られない。
- ・一方、オゾンホール発達期の9月に関しては、2000年頃から最近にかけて、オゾン全量に明らかな回復傾向が見える。
- ・南極点基地と昭和基地の9月のオゾンゾンデ観測データには、2000年から2015年にかけて、高度15 km 付近に有意な増加傾向が見える。モデルによると、そのうち半分は化学的な原因によるものである。
- ・総反応性塩素 (Cly) の減少の影響は、オゾンホールの初期により顕著に現れる。
- ・一方、10月のオゾンホールは気象場や力学の影響を大きく受け、その回復を確認できるまでにはまだしばらくかかるであろう。

このように、下部成層圏での南極オゾンホールの回復を世界に先駆けて（しかも、2015年の大きなオゾン破壊の原因が火山であることも示したうえで）示したことは、さすがオゾン研究の大家 Solomon さん、してやったりと感じ入った。

オゾントレンドに関する発表の中から M. I. Hegglin (レディング大学, 英国) の発表について紹介する。この発表では背景として Randel and Wu (2007) を引用していた。そこでは、まず熱帯域のオゾン全量は ODS の増加にかかわらず、中緯度や高緯度の減少トレンドとは違い、ほとんど変化がないことが SBUV/TOMS による観測から1979年~2005年の期間について示されている。しかし、高度分布が導出可能な衛星観測 (SAGE/SAGE II) からは対流圏界面より上の積分値としてみると 5 DU から10 DU 程度の減少トレンドが見出されている。これら異なるセンサから導出されるトレンドの原因が何なのかは、はっきりしていなかった。これについて最近のモデル研究の結果、その原因は Randel and Wu (2007) でも暗示されていた熱帯対流圏オゾンの増加が成層圏の減少を補っていたことが示された (Shepherd *et al.* 2014; WMO 2014)。関連して、同じく熱帯域での UT/LS 領域におけるオゾンの最近の状況について L. Froidevaux (NASA/JPL) の発表を紹介する。SHADOZ ネットワークのオゾンゾンデと MLS によ

ると、2005年から2015年におけるトレンドは 2~10%/10年の上昇となったが、これはあくまでもこの10年の傾向であり、2%/10年以下を検出するとすると、まだまだ観測が短すぎると結論していた。

次に、極域成層圏のオゾンとそれに係る化学種の最近の話題から J. -U. GrooB (FZJ, ドイツ) の発表について紹介する。背景として Solomon *et al.* (2015) に示されるように、南極の冬の初めにおいて、観測された HCl と化学輸送モデルとの間に不一致があることが知られている (高度は30 hPa レベル)。HCl は ClONO_2 と同じく、PSC との不均一反応によって冬の初めに減少してゆくが、先に ClONO_2 が枯渇してしまうと、反応の相手方が不在になるため HCl の減少は抑制される。しかしより極渦のエッジ付近 (70° S) においては輸送によって、より低緯度側から供給される ClONO_2 との反応でモデルにおいても HCl の減少が再現されている。一方で、より極側の80° S 付近では、観測からは HCl の減少が見られるものの、モデルでは低緯度側からの輸送の影響を受け難いためか、HCl の減少が再現できていない。この点は他のモデルではどうなのか? などまだ良く分かっていない極域オゾン化学である。これについて GrooB はラグランジュモデルの CLaMS を用いて、MLS により観測された HCl の再現を試みた。その結果、南極のみならず北極においても極夜域のより深部 (等価緯度で75度以上) で HCl を過大評価することが分かった。特に温位レベルが500 K においては南極の7月から9月終わりまで最大で1.5 ppbv 以上モデルが過大評価している。彼らはこれが極夜であることから宇宙線起源の GCR によって、本来存在し難い NO_x や HO_x が付与された結果ではないかと仮定した (GCR による成層圏大気への影響については古くから議論されている)。そこで観測モデル間の差が大きくなり始める6月後半の500 K 面に着目して、過去の文献値から GCR によってある NO と HO_x の生成を仮定し計算を実施した。その結果、 ClONO_2 と HOCl の生成が生じることで、HCl との不均一反応が促進され、HCl が減少することを示した。しかしその規模は不十分であることも分かった (差の1/3程度を埋める)。また、最終的な春先のオゾン全量再現への影響はとても小さいことも示された (つまりこの高度での HCl の差異が解消されなくても春期のオゾン全量自体は再現される)。しかしこの HCl の観測モデル間の差異についてはモデルでの再現が難しいケースとして残さ

れる。

その他の発表としては、M. C. Pitts (NASA/LaRC) らによる、人工衛星 CALIPSO 観測による10年間のPSCの観測のまとめた発表があった。その中では、Global Modelの中でPSCを扱うために必要なキーパラメータの情報提供や、2015年11月に始まったSPARCの中でのPSCの国際的研究活動の紹介 (<http://www.sparc-climate.org/activities/polar-stratospheric-clouds/>, 2017.02.03閲覧)があった。また、H. Oelhaf (KIT, ドイツ)らによるPOLSTRACCという、北極の航空機キャンペーンの結果など、最近の北極オゾン破壊に関する発表もいくつかあった。

ポスターを含めたこのセッションの所感として、まず北半球中緯度の上部成層圏(例えば2hPaレベル、高度40km)では2000年以降、3%/10年程度のオゾン増加傾向が見られていることに関しては様々な観測やモデル計算の結果からもコンセンサスが得られているように思う。またオゾン以外の微量成分も10年以上に渡る衛星観測結果が蓄積されてきたので、それらを活用してより正確に上部成層圏HClのトレンドを導出するなどのアイデアが目にとまった。現状、このような多成分同時測定可能な衛星センサはMLSとACE-FTSが主なものであり、なるべく長期の観測が継続されることを願うばかりである。

(中島英彰, 杉田考史)

3. セッション2:対流圏オゾン (Tropospheric Ozone)

O. Cooper (コロラド大学/NOAA ESRL) がTOAR (Tropospheric Ozone Assessment Report) プロジェクトの概要に関するキーノートスピーチを行った。TOARは、地表から対流圏界面までの対流圏オゾンの全球分布とそのトレンドに関する最新の科学アセスメントを研究コミュニティに提供することを目的としている。また、世界で千点以上の観測地点におけるオゾン濃度の時系列データを収録し、気候や健康、農作物への影響の研究のために自由にアクセスできるデータベースを構築している (<https://join.fz-juelich.de/accessdb/>, 2017.02.03閲覧)。OMI/MLSによる対流圏オゾンカラム量は、2005-2015年の10年間に、南アジアなど世界の広い範囲で正のトレンドを示し、その傾向は、商用航空機での観測IAGOSによる長期データでも確認されることが示された。

D. Tarasick (カナダ環境・気候変動局) や E. von Schneidmesser (SIWA, ドイツ) から TOAR 関連の報告があった。健康影響のインデックスとなる、地上オゾン濃度日最大8時間値の年間第4位の値は、1995-2014年にかけて、欧米の都市部では低下しているが、それとは対照的に、日本の都市部では横ばい～増加傾向にある点が示された。日本の都市部ではNO排出量が低下したことにより、NOとオゾンとの反応によってオゾン濃度が減少するタイトレーション効果が甘くなり、オゾン濃度が上昇する効果があることが指摘されているが、欧米の都市部では様相が異なるようであり、興味深かった。

J. L. Neu (NASA/JPL) らは、成層圏の循環の年々変動が北半球中緯度の対流圏オゾンの変動やトレンドにどのような影響を及ぼしているか調べた。まず、2005-2010年のMLSの熱帯域成層圏の水蒸気データから推定された上昇流の強さがQBOやENSOの指標と相関があることを示した。また、その上昇流の強さは、MLSで観測された北半球中緯度の下部成層圏オゾンのアノマリと相関があり、さらにTESの対流圏オゾンのアノマリとも対応していることを明らかにした。次に、WACCMを使って、成層圏の循環と対流圏オゾンの年々変動/トレンドとの関係について調査し、QBOとENSOはどちらも成層圏の循環の変化を引き起こすが、互いの位相が循環の変化に大きく影響することを明らかにした。また、成層圏の循環の変化による対流圏オゾンのトレンドへの影響は、前駆物質のエミッションの変化による寄与と同程度の効果があり、トレンドの解釈には注意が必要であることが指摘された。

D. Flittner (NASA/LaRC) らは、静止軌道衛星から北アメリカ上空の大気汚染物質(対流圏オゾン、NO₂、HCHO等)を高時空間分解能で観測することを目的として2018年以降に打ち上げが予定されているTEMPOについて紹介した。TEMPOにはイメージング回折格子分光計が搭載され、紫外(290-490nm)と可視(540-740nm)領域の後方散乱太陽光スペクトルが観測される。2つの波長領域を使用することで、対流圏下層に感度を持つ対流圏オゾンを導出できるようである。1日1回の観測に限られる低軌道衛星と比べて、TEMPOでは1時間毎に高い空間分解能(35°Nで南北2.1km×東西4.4km)で観測できるため、エミッションや化学反応の日内変化を捉えることが期待される。同じく今後打ち上げが予定されてい

るヨーロッパ Sentinel-4、韓国の GEMS とともに、静止軌道から準グローバルな大気汚染物質のリアルタイムでのモニタリングが可能になることも紹介された。

Y. Kanaya (JAMSTEC) らは、前駆物質の観測に基づいた光化学ボックスモデルを用いて、これまで中国の複数地点や福江島での集中観測でオゾン生成速度やレジームを推定してきた結果を示した。福江島での観測結果を用いた解析から、中国から日本へ越境流入する時点でのオゾン生成速度とレジームを明らかにし、国内での追加的なオゾン生成を抑制するには、NO_xに加えて VOC を軽減することが有効であることを示した。また、最近、実験室で確かめられた、HO₂ラジカルのエアロゾル表面での消失や HO₂+NO 反応への水の効果を考慮した場合に、オゾン生成速度の見積値は有意に減少することを示し、ラジカル化学の不確実性を軽減することが重要であることを述べた。ただし、それらの新たな反応経路は、オゾン生成レジーム（および削減戦略）には大きく影響しないことも合わせて示した。

K.-P. Heue (DLR, ドイツ) らは、GOME-2のオゾン全量と雲特性データから、convective-cloud-differential (CCD) 法により月毎の熱帯 (20°N-20°S) の対流圏オゾンカラム量 (高度10 km まで) を算出した結果について報告した。この方法では、GOME-2の O₂ A-band から導出された雲特性データに基づいて、clear-sky でのオゾン全量と視野内に対流性の厚い雲がある場合のオゾン全量 (つまり成層圏カラム量) を分類し、その差を取ることで対流圏カラム量を求めている。これまでは、MLS 等で観測された成層圏のオゾン量をオゾン全量から差し引く方法が広く使われており、その方法と CCD 法から求めた対流圏カラム量の比較も紹介された。対流圏高度の決定方法の違いから、カラム量で比較すると CCD 法に9.4 DU の負のバイアスがあるが、対流圏内の平均的な濃度で比較すると良く一致することが示された。

Y. Cohen (ツールーズ大学/CNRS, フランス) らは、商用航空機による観測データである MOZAIC と IAGOS を比較・統合することにより、1994年から2013年のおよそ20年にわたる長期トレンドの算出を可能とした。十分なサンプリングの得られている4領域 (北米東部、ヨーロッパ、中東、東アジア) における上部対流圏オゾンのトレンドはいずれの領域でも 0.3~0.5%/yr の正の値を示していた。ただし、特定

の季節のオゾン増大が正の長期トレンドをドライブしている訳ではなく、各月の極小値が季節に関わらず年々増大していることが長期トレンドの要因である、との結果であった。この極小値の増大が何に起因するかは明らかにされなかった。

C. Wespes (ブリュッセル自由大学, ベルギー) らは、6年間の IASI のオゾンプロファイルデータから、対流圏と成層圏におけるオゾン変動の要因を多変量回帰分析により調査した結果を発表した。IASI のデータは緯度20°毎、4つの高度レベル (地表-300, 300-150, 150-25, 25-3 hPa) 毎に日平均して使用された。重回帰モデルの変数には、直線のトレンドと季節変化に加えて、力学的変動要因として太陽活動、QBO, ENSO, NAO/AAO に関するパラメータが使用された。赤道領域では、季節変化以外には QBO と太陽活動が支配的なオゾンの変動要因であることが示された。また、6年と期間は短い、オゾンゾンデやその他の衛星のデータを使った先行研究と合致した統計的に有意な2つのトレンド (30°-50°S の上部成層圏の正のトレンド, 30°-50°N の対流圏の負のトレンド) が得られたことも報告された。

T. Trickl (KIT, ドイツ) らは、ヨーロッパの4地点 (Payerne, Bilthoven, Lindenberg, Zugspitze) でのライダーによる水蒸気、オゾン、およびエアロゾルの連続観測と、その4地点を含むヨーロッパ上空の航空機搭載水蒸気ライダーによる観測から、2008年10月の成層圏大気の対流圏への大規模な侵入イベントの詳細について報告した。ライダーのデータから、成層圏から下部対流圏まで輸送される間の対流圏の空気との混合は、輸送の速度と比べてゆっくり起こっていることを示した。また、観測データとトラジェクトリー解析を組み合わせることで、侵入層の3次元的な構造を明らかにした。

ポスター発表でも興味深い発表がなされた。J. Cuesta (CNRS, フランス) らは、2つの衛星センサ IASI (赤外) と GOME-2 (紫外) によるマルチスペクトル解析を東アジア大気汚染に適用し、対流圏最下層のオゾン導出を試みた結果、地表オゾン濃度との相関を初めて見出した。2009年5月に見られた、中国から西日本方面へ進む越境大気汚染事例を重点的に解析した。その際、300 hPa での渦位を成層圏トレーサーとして用いることで、高濃度オゾン気塊のうち成層圏の影響の強い部分を分離して大気汚染ブルームを抽出し、その動きを追った。ブルーム内の $\Delta O_3/\Delta CO$

の時間発展について、衛星からの値が化学輸送モデルと整合的であることを示し、対流圏下層の光化学オゾンを衛星から捉えたものと結論した。

G. Morris (聖エドワード大学, 米国) らは、オゾンゾンデ計測に SO_2 が負の干渉を与えることを逆手にとって、 SO_2 フィルター付きのゾンデ装置と通常の装置とを同時に飛揚させる「Dual Sonde 観測」によって、オゾンと SO_2 の高度分布を同時に計測できることを示した。通常の一基のオゾンゾンデ計測の場合でも、オゾン高度分布の急変から SO_2 量を推定可能であることを示し、ハワイの Hilo など、 SO_2 の発生源となる火山近くでのオゾンゾンデ計測にも適用して解析した。

S.-Y. Ogino (JAMSTEC) らは、ベトナム・ハノイにおけるオゾンゾンデ観測の概要と得られた結果を発表した。観測はベトナム水文気象局、SOWER プロジェクトおよび SHADOZ プロジェクトの共同で、およそ10年にわたって継続しており、この領域の物質循環の実態を明らかにしている。ハノイの位置するインドシナ半島では、平均的な季節変化の振幅は上部対流圏・下部成層圏領域と下部対流圏で大きい。上部対流圏・下部成層圏においては夏にオゾンが増大する。これはアジアモンスーン循環に伴う中緯度成層圏大気の低緯度対流圏への輸送による。また、下部対流圏においては、春季にオゾンが増大する現象が見られ、これはインドシナ半島北西部で活発なバイオマスバーニングに起因すると考えられる。

このように、本セッションではさまざまな時空間スケールでの対流圏オゾン変動が議論された。近年、対流圏オゾンや前駆物質の衛星観測が目覚ましく進歩しているが、それでも未だに知識は断片的であり、今後、TOAR の活動などを契機として、観測や数値モデルから統合的な理解を進展させることがますます重要であると実感した。

(大山博史, 萩野慎也, 金谷有剛)

4. セッション3：オゾン化学-気候相互作用 (Ozone Chemistry-Climate Interactions)

本セッションでは、気候影響や気候変動を主題として、対流圏・成層圏のオゾン変動についての9件の講演があった。セッション冒頭の招待講演 (Keynote) では、名古屋大学の須藤 (K. Sudo) から、最近数十年間の対流圏オゾンの全球変動とその要因について化学気候モデル (CHASER) を用いた研究結果の紹介

があった。このなかで、まず地表のオゾンや一酸化炭素 (CO) の長期傾向は、主に人為・産業起源のエミッション変化に支配される一方で、数年規模の年々変動については、全球的にはバイオマス燃焼の年変動の寄与が大きい (ただし、東アジアや北米等では気象場変動の寄与も大きい) ことを示した。対流圏オゾン総量としても、2000年までは人為起源の NO_x エミッション増加を反映して増加傾向にあるが、全球 NO_x エミッション量があまり変化しない2000年以降も増加傾向が継続し、この傾向はマウナ・ロアでの観測 (WDCGG) に見られるオゾントレンド ($\sim 1.33 \text{ ppbv d}^{-1}$) とも整合的とのことである。さらに、このような長期傾向について、同モデルで感度実験・解析を行った結果、成層圏からのオゾン輸送 (いわゆるオゾン STE) 量が増加していることが2000年以降の対流圏オゾン増加傾向につながっている可能性を指摘した。この結果について、最新の化学気候モデルの相互比較実験である CCM1 プロジェクトの枠組で行った将来予測実験 (2005~2100年) で、今後の地球温暖化によるブリュワー・ドブソン循環の強化が顕著な STE 増加を及ぼすことを示しながら、すでにその傾向が出現している可能性に言及した。さらに、このような気候変動に伴うオゾン変化は大気酸化能の増加にも寄与し、メタンの全球収支や長期トレンドの支配的要因になり得ることを示した。

つづいて、L.E. Revell (チューリヒ工科大学, スイス) は、 N_2O の ODP についての発表を行った。 N_2O は、将来増加する可能性がある温室効果ガスであり、また、 $\text{O} (1\text{D})$ との反応や太陽紫外線による光解離によって NO_x を生じオゾンを破壊する。 N_2O の ODP は、単位質量の N_2O のエミッションによるグローバル平均のオゾン全量の減少を、大気中の寿命を加味して CFC-11 に相対的に表したもののだが、これには大気中の塩素濃度や CO_2 、 CH_4 の濃度依存性があり、これらの物質の濃度が将来変化することによって、 N_2O の ODP も変化するという話である。まず、今後大気中の塩素濃度が減少することが予想され、その場合 NO_x が不活性な ClONO_2 になる機会が減るため、 N_2O によるオゾン破壊能が上がる。さらに CO_2 が増加すると成層圏が冷えるため、 NO_x のオゾン破壊触媒サイクルの温度依存性によりその効率が落ち、 N_2O によるオゾン破壊能は下がる。 CH_4 の増加による N_2O のオゾン破壊能の変化には CO_2 と同様のメカニズムが期待されるが、より複雑であり、例えば、

CH₄の増加によるHO_xの増加によってNO_xが硝酸に変換される機会が増加しNO_xによるオゾン破壊効率を下げる働きや、CH₄が活性塩素をHClに変換して塩素によるオゾン破壊能率を落とし、NO_xによるオゾン破壊の効率を相対的に上げる働きなどがある。化学気候モデルによる計算では、CH₄の増加はN₂Oによるオゾン破壊能を若干上げる。以上により、将来、大気中の塩素濃度が下がり、CO₂の増加が比較的小さく、CH₄の増加が比較的大きい場合は、N₂OのODPが現在大気値に比べて2倍くらい大きくなるという結果を示した。用いたモデルはSOCOL v.3化学気候モデルであり、計算されたODP値そのものはモデルの特性(循環の強さなど)にも依存する(Revell *et al.* 2015)。

D. M. Gifford (MIT) はオゾンの放射過程による熱帯対流圏界面(TTL)における気温の季節変動への寄与に着目した研究を発表した。この高度域の気温に対する成層圏オゾン濃度の影響が大きいことを示し、熱帯低気圧への影響について、TCPIという指標の季節変動の議論を行った。

A. H. Butler (NOAA) (発表はR. W. Portmann) からは、詳細なオゾン化学過程がインタラクティブに結合している地球システムモデル(WACCM)を用いて幾つかのシナリオに基づいた将来予測実験およびそれに付随した感度実験を行い、二酸化炭素(CO₂)・一酸化二窒素(N₂O)・メタン(CH₄)などの温室効果気体が21世紀中のオゾン層の動態にどのような影響を及ぼすかを調査した。モントリオール議定書に基づいたオゾン破壊物質排出規制の成功により、21世紀後半においては温室効果気体がオゾン層の長期変動に果たす役割が相対的に大きくなると考えられている。そのため温室効果気体各々の将来パスがどのような経路を辿るかによって、気候変化のみならずオゾン層(および地上に到達する紫外線)の長期変化にも大きな影響を及ぼし得る。Butlerらはこれらの影響を見積もるため、RCP2.6とRCP8.5将来シナリオ実験のほかこれら実験をベースにN₂OやCH₄のみを別シナリオにした感度実験を行った。それぞれの物質が辿る将来パスが異なるとオゾン全量の長期変化傾向も大きく異なる結果となり、特にCOP21の目的達成と同時にN₂O排出の緩和が重要になってくるとのことであった。

W. J. M. Seviour (Johns Hopkins大学, 米国) からは、南半球極域で生じるオゾン層破壊に対する南極海の応答を調べるために、2000年代のオゾン強制を与え

たアンサンブル気候実験を実施した。Ferreira *et al.* (2015) は、オゾンホールに対する南極海の応答は時間的に変化し、先ず早い応答として南極海の海面水温は下がるが、その後、遅い時間スケールの応答として海面水温は上昇するとの説を大気海洋結合モデルによる実験に基づいて提唱した。Seviourらは、この説を別の大気海洋結合モデルを用いて検証するとともに、この応答が初期値やオゾン強制の与え方(月平均値と日平均値)によってどの程度変わるか調査した。Seviourらによる実験で得た応答の大きさは、Ferreiraらの結果と定量的にも同程度であった。またオゾン強制として日平均値を与えた場合、海面上の風応力は月平均値を与えた場合より50%程度増加し海洋内のオイラー平均流は増加したものの、海面水温や残差循環への影響に大きな差はなかったとのことであった。

H. E. Rieder (Graz大学, オーストリア) からは、窒素酸化物(NO_x)の将来的な排出規制に加えて将来予測される気候変化が米国の地上オゾン濃度に及ぼす影響を化学気候モデルを用いて評価した。彼らは、RCP4.5とRCP8.5将来シナリオ実験をベースに、NO_xの排出規制を現在と同程度にしたケースとさらに規制を強めたケースについて感度実験を行うとともに、CH₄濃度を2005年のレベルに固定した感度実験もあわせて行った。日中の地上オゾン濃度の環境基準を上回る日数について調査すると、NO_x排出規制が現在と同レベルであっても地球温暖化により大気質は悪化する結果となった。またNO_x排出規制を現在よりも強めるがCH₄は増加するという将来シナリオでは、高オゾン濃度の季節が夏季から春季へとシフトするという結果となるとのことであった。

W. J. Collins (レディング大学) からは大気中のオゾン増加が全球降水量にどのように影響するかについて、MacIntosh *et al.* (2016) の内容を中心にモデル実験結果を紹介した。彼らの実験では、対流圏の上層・下層、および成層圏に一定量のオゾン増加が与えられ、それに対する速い応答として生じる大気の直接加熱(下層オゾン増加に対しては冷却)と、地表気温変化による遅い応答(feedback)のそれぞれに付随する降水量変化が定量的に評価されている。この結果として、遅い応答としては、オゾンはどの高度の増加についても降水の増加を起し、速い応答としては、対流圏下層のオゾン増加は降水量の増加(大気の直接冷却による)を引き起こす一方、上部対流圏や成層圏

でのオゾン増加は降水量の減少（大気加熱による）につながる事が示された。CO₂の増加についても同様の降水応答がみられるが、CO₂の場合は速い応答による降水減少がより顕著であり、これが遅い応答による降水量増加を大きく相殺するため、単位放射強制力あたりの降水増加は、CO₂よりもオゾンの方が大きいという結果を得ている。このため、過去100年間の降水量増加に対し、CO₂とオゾンで、ほぼ同程度の寄与があるとされている。全球降水量変動については、エアロゾルも含めた同様のモデル相互比較実験が実施されている (<http://www.cicero.uio.no/en/PDRMIP>, 2016.11.20閲覧)。

T. Butler (IASS, ドイツ) らは夏季ヨーロッパの高濃度オゾン発生要因を調べるため、ヨーロッパ各地のオゾン観測値について、各気象要素（気温、湿度、気圧、風速、日射量など）に関する重回帰分析等を行った結果 (Otero *et al.* 2016) を報告した。その結果、夏季ヨーロッパでの高濃度オゾン発生には、気温（日最高気温）が最も大きく影響していると結論づけ、高温日には、オゾン生成の化学反応サイクルが速くなることに加えて、イソプレン等の植物起源 VOCs のエミッションが増加することも高濃度オゾン発生に同等の寄与を及ぼしていることをボックスモデル計算によって示した。

最後に、E. M. Bednarz (ケンブリッジ大学, 英国) は UM-UKCA 化学気候モデルを用いて、太陽11年周期変動によって生じるオゾン濃度変動の気温変動への影響について報告し、モデルはこれらの相互作用を入れるのが望ましいことを示した。

(須藤健悟, 秋吉英治, 出牛 真)

5. セッション4：全球オゾン観測と測定技術 (Global Ozone Observations and Measurement Techniques)

本セッションでは、4日目の朝から5日目の午前にかけて26件の口頭発表と、102件のポスター発表が行われた。まず、地上観測関連からまとめて紹介する。

セッション冒頭の V. Thouret (CNRS, フランス) による講演では、MOZAIC から IAGOS へと引き継がれた航空機観測について紹介があり、20年以上取得されたデータセットは、他の地上観測との比較及び同時観測によって検証され、一貫した品質であると示された。また、取得された観測データは自動品質管理され、準リアルタイムで大気汚染予測 (CAMS) にも

利用されていることが紹介された。大気汚染関連では、Z. L. Fleming (Leicester 大学, 英国) らは、対流圏オゾン・大気汚染物質の観測について、近年多く市販されている廉価な小型センサーが既存のモニタリング測器に替わり得るかについて精度検証を通じて検討し、現時点ではセンサー自身やアルゴリズムの改善、較正方法の確立が不可欠であると報告した。

J. Herman (NASA/GSFC) らは、Pandora 分光計と Dobson, OMI, OMPS 及び SBUV を 2 年半比較し、Pandora は +1% / 年程度のドリフトが認められたものの、各測器との平均オフセットは +0.3 ~ +1.6% に収まったと報告した。L. Egli (PMOD/WRC, スイス) らは、地上から全量観測を行う分光計 (Dobson, Brewer, Pandora など) について、UV 標準光源などを利用した特性評価を通じて、全量観測の信頼性を向上させるための取組 (ATMOZ) を紹介した。この取組では、Pandora を含むアレイ型の分光計へのシフトを念頭に置いているようであった。

A. Thompson (NASA/GSFC) による講演では、地上観測網 (NDACC, WMO/GAW) の現状についての紹介があった。長期にわたる衛星機器の導入により、地上観測への観測精度の要求が高まっており、全球オゾンとその複雑な回復を捉えるためには、地上測器の各コミュニティが品質評価基準を高め、データを再処理するためのさらなる取組が必要と主張された。

これに対応して、H. Smit (FZJ, ドイツ) らは、(センサタイプまたは操作手順の変更によって不均質となっていた) オゾンゾンデの過去データを再処理して均質化する取組 (O3S-DQA) の進捗状況を報告し、J. Rimmer (マンチェスター大学, 英国) は、欧州の Brewer 分光計ネットワーク (EUBREW-NET) における観測データの品質管理体制を紹介した。R. Schofield (メルボルン大学) らは、オーストラリアの Umkehr データを新たな (A, C, D 各波長組を用いた) 解析手法によって再処理した結果を示し、T. Leblanc (カリフォルニア工科大学/JPL) らは、差分吸収ライダーの解析アルゴリズムにおける測定の不確かさについて、10以上の要素別及び高度別に分析して報告した。このようなプロファイル観測における測定値の不確かさは、異なる観測手法との比較や、モデルへの同化の際に有用な品質情報である。

以降は、衛星観測関連を紹介する。まず、今後の運用が予定されている衛星搭載センサーとして、ベル

ギーの D. Fussen (ベルギー宇宙大気研究所) から、成層圏オゾンプロファイラ ALTIUS センサーの開発状況が報告され、韓国の J. H. Kim (プサン国立大学) から、対流圏オゾンの監視を目的とした GEMS センサーのシミュレーション結果が報告された。複数衛星のマージデータとしては、M. Coldewey-Egbers (DLR, ドイツ) (講演は P. Braesicke) から、GOME 型センサーから作成した月平均オゾン全量 (GTO-ECV), V. F. Sofieva (フィンランド気象研究所) から、ESA のリムおよび掩蔽観測に基づくオゾンプロファイルの均質化データセット (HARMOZ) が紹介された。また、モデルによる長期再解析データとして、G. J. Labow (SSAI/NASA) から、NASA の MERRA-2, R. J. van der A (KNMI, オランダ) から、KNMI の MSR2 について、それぞれ地上観測との検証結果が示され、従来のデータセットから解析精度が改善したと報告された。

M. Weber (ブレーメン大学, ドイツ) らは、オゾントレンド解析に必要とされる衛星観測データの安定性 (Stability) について議論した。近年指摘されている2000年以降の正のオゾントレンドが有意である領域は上部成層圏のみであり、オゾン自身の年々変動だけでなく、測器のドリフト成分もトレンド解析に深刻な影響を与える。モンテカルロシミュレーションによると、特に単一の測器の場合はドリフト成分の十分な精度での評価には困難がある一方で、多くの衛星センサーのように平均して5~7年程度で入れ替わる場合は、データのマージによってドリフト成分の影響を小さくすることができるかと報告された。

最後に、N. J. Livesey (カリフォルニア工科大学/JPL) らの報告が印象深かったので紹介する。MLS のようなリムスキャン型センサーは高い鉛直分解能を有することから、これまで大気微量成分の観測を通じて、大気中のオゾン化学や気候変動のプロセスの理解に大きく貢献してきたが、今後10年のこのタイプのセンサーの打ち上げはわずか2機しか計画されていないと指摘した。NASA では次の10年間に Quantified Earth Science Objective (QESO) という形での定量的な科学目標の設定が要求されているという。成層圏オゾンに回復の兆しが見られ、全球モデル計算が十分に発達したと考えられている現在、オゾン関連の研究者は、次の時代にオゾンに関してどのような科学目標を定め、ミッションを提案し、その必要性をいかに説

くかということが重要になると報告された。

(中野辰美, 水野 亮, 長濱智生)

6. セッション5: 将来のオゾンの変化と影響 (Ozone Effects/Future Ozone Changes)

Effects of ozone on climate, human health, ecosystems and food production セッションは9/9 (金) の午前後半に行われた。まず L. Emberson (ヨーク大, 英国) らが、オゾンと気候の極端化が生態系に及ぼす複合的な脅威を評価するためのモデル手法の開発について講演を行った。大気汚染物質である対流圏オゾンは、農作物の生産性を低下させる悪影響を及ぼし、気候変化の影響も受ける。これらを評価するために地上に降下するオゾン量を算出するための全球化学輸送モデル (CTM) や領域モデル WRF-Chem と生態系モデルとを合せて利用しているとのことである。著者にとって馴染みの少ない生態系モデルに関しては、植物のダメージはオゾン量に必ずしも依存せず気孔を通過するフラックスに依存することや、気温が上がると気孔が閉じやすいのでオゾンフラックスが減少すること、瞬間的なオゾンフラックスは光合成に影響するが蓄積的なオゾンフラックスは成長期の植物のサイズに影響することなど、目新しい内容が多く含まれていた。

F. Selden (KNMI, オランダ) らは、「大気中にオゾンが存在しない世界」をアンサンブル気候シミュレーションにより計算し、オゾンが現在の気候に果たしている役割をあらためて評価した。手法としては、中層大気の気温分布だけではなく、地球の放射収支、西風ジェット、降水パターンなどへの応答を定量的に見積もり、「オゾンが存在する世界」の気候シミュレーションの結果と比較した。オゾンがなければ、西風ジェットについては対流圏から成層圏まで強化されて1つになり、気温についてはカナダが温暖化しシベリアが寒冷化するなど、極端な状況だからこそオゾンの気候に与える影響が見えやすい点は、オゾン-気候相互作用の重要性を認識できるよい材料となると感じた。

C. Heaviside (Public Health England, 英国) らは、地上オゾンによる短期的な曝露による健康への影響を評価した Health effect of Climate Change 2012 report について紹介した。

E. W. Wolfram (CEILAP, アルゼンチン) らは、2005年10月に起こったオゾンホールに起因して、オゾ

量の少ない気塊が南アメリカ中緯度域へ輸送された際の晴天時 UV インデックス（計算値）の変化について示した。高緯度に位置するリオガジェゴスでは影響が大きく、UV インデックスが通常の倍程度になる日があったという評価には驚いた。もちろん、UV フラックスの算出には雲による遮蔽効果を考慮する事が重要とのことであったが、太陽直達光に加えて周囲の雲からの散乱光が加わるため、逆に UV フラックスが増加することがあるという観測結果は印象的であった。

M. van Weele (KNMI, オランダ) らは、“オゾン層破壊物質に関するモントリオール議定書”の策定が紫外線対策にどの程度有効であったかを、全球化学輸送モデルによる“同議定書が策定されなかった場合の世界 (world avoided)”のシミュレーション結果と比較することにより見積もった。その推定結果に基づく、“world avoided”では北半球夏季において紫外線が極端に強くなる日が増加し、例えば夏季オランダにおいては UV インデックスが 7 以上となる日数は、2012年までに現在の10倍以上に増えていたと見積もられた。また、2011年の北半球高緯度における大規模なオゾン破壊は、オゾン全量が極端に低くなったのが（日射のほとんどない）高緯度に限られていたためその影響はきわめて限定的だったなどの話題があった。

9/9 (金)の午後は、まず highlighting future ozone という内容で Frank Dentener (Joint Research Center, イタリア) が対流圏オゾン研究に関して、John Pyle (ケンブリッジ大, 英国) が成層圏オゾン研究に関して、プロジェクトの紹介や化学気候モデルによる将来予測結果の紹介により説明した。Frank Dentener は越境汚染に関係する HTAP (Hemispheric Transport of Air Pollution) プロジェクトの紹介を行った。HTAP2では、No Further Control (NFC), Current Legislation (CLE), Maximum Feasible Reduction (MFR) という3種類のシナリオがあり、それぞれのシナリオによる将来予測結果を示していた。John Pyle は成層圏オゾンの将来変化に関してオゾン変動と気候変動の2通りの相互作用があることを紹介した。具体的には(1)オゾン回復は温室効果ガス (GHG) の将来予測に強く影響される(気候変動の影響を受ける)、(2)気候はオゾン減少に影響を受け、またオゾン回復の将来予測に影響を受ける、という内容であった。また(2)に関

係して近年示されつつあるオゾンと力学との相互作用についても紹介していた。例えば、熱帯域のオゾンが GHG 増加による熱帯域の上昇流変化、及び対流活動の増加に伴う雷活動による NOx 増加による対流圏オゾン変化に敏感であることや、南極のオゾン減少が南半球対流圏の気候に影響することなどである。

次に将来のオゾン変化に関して、BBC の Question Time を模した形式のパネルディスカッションが行われた。司会者は BBC の環境アナリストである Roger Harrabin が務め、パネリストには Sophie Godin-Beekman (IPSL, フランス), Irina Petropavlovskikh (コロラド大学, 米国), Frank Dentener (Joint Research Center, イタリア), John Pyle (ケンブリッジ大学, 英国), Paul Newman (NASA/GSFC), Christos Zerefos (アテネ大学, ギリシャ) が加わった。オゾン層が変化する時期には、気候変動が重要な役割を果たすことや、太陽放射, QBO, ENSO などの年々変動を考慮する必要など、気候の観点からの議論に加えて、ビタミン D の生成や健康影響など疫学的観点からも活発な議論が行われた。議論の途中で Question Time 同様、聴衆からパネリストへの質問時間も設けられ、議論の活性化を助けていた。例えば、GHG に対してオゾン破壊物質 (ODS) の重要性を policy maker に伝えるにはどうしたら良いのか、など科学コミュニケーションに踏み込んだ質問も行われた。それに関連して Roger Harrabin からは、300語くらいでメディアに伝える必要があるので非常に難しいといった指摘もあり、単に科学的な観点のみならず科学コミュニケーションの観点からもどのように発信するべきか常に考えておく必要があることを実感した。パネルディスカッションの最後には、パネリスト1人当たり1分で実際に相手をトランプ大統領候補と仮定した場合、どのように伝えればよいかというイベントが行われた。パネリスト達が説明に苦慮する場面も見られ会場は大いに盛り上がった。

次に Department of Environment, Food and Rural Affairs (DFFRA) の Chief Scientific Advisor を務める Iain Boyd が、オゾン観測と将来変化を policy maker に対して伝えるにはどのようにしたら良いのか、について講演を行った。研究者と政策決定者・メディアなど、異なるコミュニティ間で情報伝達することの難しさについて示唆に富んだ講演であった。最後に Stefan Reis (CEH) が締めくくられ、QOS2016は終了した。



第1図 Auchencorth Moss 大気観測所訪問の
一コマ。

(山下陽介, 塩谷雅人, 辻 健太郎)

7. おわりに

本文 QOS2016の期間中のエディンバラの天候はあまりよくなかった。一瞬晴れになったと思っても、すぐに曇って雨になる感じで、初秋のスコットランドの天候の気まぐれさを感じさせる1週間であった。この節では、サイエンスセッション以外の行事や、大会全体を通しての印象を報告したい。

上述のような不安定な天候の1週間の中で、会議の中日である9月7日は、期間中ほぼ唯一の好天に恵まれた。この日のセッションは午前中のみを設定されており、午後は大会唯一のExcursionの企画である、エディンバラ郊外にあるAuchencorth Moss大気観測所訪問が行われた(第1図)。Auchencorth Mossは、CEH (Centre for Environment and Hydrology) に属する観測ネットワークの一つで、様々な大気微量成分やエアロゾルの長期モニタリングを行っている施設である。牧場のそばの荒涼とした草原の中に、たくさんの測器が置かれ、観測が行われていた。

夕方には、それに引き続いて、Conference Dinnerが、National Museum of Scotland (スコットランド国立博物館) にて行われた(第2図)。閉館後の博物館前に集合、300名以上の参加者全員で集合写真を撮影後、入り口付近のロビーでシャンパンを飲みながら30分ほど雑談。その後おもむろに2階のホールに向かい、グループに分かれて丸テーブルに着席後、コース料理が饗された。ワインとともに料理を楽しんだあと、今回 IO3C (国際オゾン委員会) の President, Vice-President, Secretary が、それぞれ、Christos



第2図 Conference Dinner 前の、スコットランド国立博物館前での集合写真 (主催者提供)。

Zerefos (アテネ大学, ギリシャ), Richard Stlarski (Johns Hopkins大学, 米国), Sophie Godin-Beeckmann (IPSL, フランス) から, Sophie Godin-Beeckmann (IPSL, フランス) (Secretary からの昇格), Paul Newman (NASA/GSFC), Irina Petropavlovskikh (コロラド大学, 米国) に交代したことに伴うセレモニーが行われた。

QOSは、4年に一度のオゾンファンが集う研究集会であり、毎年たくさんの国際研究集会が開かれている昨今でも、この会議のみで出会うことができる研究者も多い。ここ何回かのQOSでは、オゾン層の回復が始まっているかどうかについて慎重な議論が行われていたが、今回のQOSにおいては、上部成層圏のオゾンは2000年以降回復している (Paul Newman) ことと、南極オゾンホールは、9月はゆっくりとした回復が見られるものの10月にはまだ明瞭な回復が見られない (Susan Solomon) という報告が印象的だった。4年後の2020年には東アジアで開催される可能性が大きいとのことであるが (中島2016, 私信), アジアの地で多くのオゾンファンが再会し、オゾンのサイエンスに関する熱い議論が交わされることを期待したい。

(廣岡俊彦)

略語一覧

ACE-FTS : Atmospheric Chemistry Experiment-Fourier Transform Spectrometer

ALTIUS : Atmospheric Limb Tracker for the Investigation of the Upcoming Stratosphere

ATMOZ : Traceability for ATMospheric total column Ozone

BBC : British Broadcasting Corporation

- CALIPSO : Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations
- CAMS : Copernicus Atmosphere Monitoring Service
- CCD : Convective Cloud Differential
- CCMI : Chemistry Climate Model Initiative
- CEH : Centre for Environment and Hydrology
- CEILAP : Centro de Investigaciones en Láseres y Aplicaciones アルゼンチン・レーザー応用研究センター
- CFC-11 : Chloro-Fluoro Carbon-11
- CHASER : Chemical AGCM for Studies of atmospheric Environment and Radiative forcing
- CLaMS : Chemical Lagrangian Model of the Stratosphere
- CNRS : Centre National de la Recherche Scientifique フランス・国立科学研究センター
- COP : Conference Of the Parties
- CTM : Chemical Transport Model
- DFFRA : Department of Environment, Food and Rural Affairs
- DLR : Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt ドイツ・宇宙航空センター
- DU : Dobson Unit
- ENSO : El Niño-Southern Oscillation エルニーニョ・南方振動
- ESA : European Space Agency
- ESRL : Earth System Research Laboratory
- EUBREWNET : European Brewer Network
- FZJ : Forschungszentrum Jülich ドイツ・ユーリッヒ研究センター
- GAW : Global Atmosphere Watch
- GCR : Galactic Cosmic Rays 銀河系宇宙線
- GEMS : Geostationary Environmental Monitoring Spectrometer
- GHG : GreenHouse Gases
- GOME : Global Ozone Monitoring Experiment
- GOME-2 : Global Ozone Monitoring Experiment-2
- GSFC : Goddard Space Flight Center
- GTO-ECV : GOME type Total Ozone - Essential Climate Variable
- GWP : Global Warming Potential
- HARMOZ : HARMonized dataset of Ozone profiles
- HFC : Hydro-Fluoro Carbon ハイドロフルオロカーボン
- HFO : Hydro-Fluoro Olefin ハイドロフルオロオレフィン
- HTAP : Hemispheric Transport of Air Pollution
- IAGOS : In-service Aircraft for a Global Observing System
- IASI : Infrared Atmospheric Sounding Interferometer
- IASS : Institute for Advanced Sustainability Studies
- IO3C : International Ozone Commission
- IPCC : International Panel on Climate Change
- IPSL : Institut Pierre Simon Laplace フランス・ピエール・シモン・ラプラス研究所
- JAMSTEC : Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology
- JPL : Jet Propulsion Laboratory
- KIT : Karlsruhe Institute of Technology
- KNMI : Royal Netherlands Meteorological Institute
- LaRC : Langley Research Center
- MERRA : Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications
- MIT : Massachusetts Institute of Technology
- MLS : Microwave Limb Sounder
- MOZAIC : Measurement of Ozone and Water Vapour on Airbus in-service Aircraft
- MSR2 : Multi-Sensor Reanalysis version 2
- NAO/AAO : North Atlantic Oscillation/Antarctic Oscillation
- NASA : National Aeronautics and Space Administration
- NDACC : Network for the Detection of Atmospheric Composition Change
- NERC : Natural Environment Research Council
- NOAA : National Oceanic and Atmospheric Administration
- O3S-DQA : Ozone Data Quality Assessment
- ODP : Ozone Depletion Potential オゾン破壊ポテンシャル
- ODS : Ozone Depleting Substances オゾン破壊物質
- OMI : Ozone Monitoring Instrument
- OMPS : Ozone Mapping Profiler Suite
- PMOD/WRC : Physikalisch-Meteorologisches Observatorium Davos/World Radiation Center スイス・ダボス気象物理観測所・世界放射センター
- POLSTRACC : The POLar STRAtosphere in a Changing Climate
- PSC : Polar Stratospheric Clouds
- QBO : Quasi-Biennial Oscillation 準二年振動
- QESO : Quantified Earth Science Objective
- QOS : Quadrennial Ozone Symposium
- RCP : Representative Concentration Pathways
- SAGE/SAGE II : Stratospheric Aerosol and Gas Experiment
- SBUV : Solar Backscatter Ultraviolet Instrument
- SHADOZ : Southern Hemisphere ADditional Ozone-sondes

- SIWA : Institute of Advanced Sustainability Studies
 SOCOL : Solar Climate Ozone Links
 SOWER : Soundings of Ozone and Water in the Equatorial Region
 SPARC : Stratosphere-troposphere Processes And their Role for Climate
 SSAI : Science Systems and Applications, Inc.
 STE : Stratosphere-Troposphere Exchange
 TCPI : Tropical Cyclone Potential Intensities
 TEMPO : Tropospheric Emissions: Monitoring of Pollution
 TES : Tropospheric Emission Spectrometer
 TOAR : Tropospheric Ozone Assessment Report
 TOMS : Total Ozone Monitoring Spectrometer
 TTL : Tropical Tropopause Layer
 UKCA : United Kingdom Chemistry and Aerosols
 UM : Unified Model
 UNEP : United Nations Environment Programme
 UT/LS : Upper Troposphere/Lower Stratosphere
 VOC : Volatile Organic Compounds 揮発性有機物質
 WACCM : Whole Atmosphere Community Earth System Model
 WDCGG : World Data Centre for Greenhouse Gases
 WMO : World Meteorological Organization
 WRF-Chem : Weather Research and Forecasting model coupled to Chemistry
- 参 考 文 献
- Ferreira, D., J. Marshall, C. M. Bitz, S. Solomon and R. A. Plumb, 2015: Antarctic ocean and sea ice response to ozone depletion: A two-time-scale problem. *J. Climate*, **28**, 1206-1226.
- MacIntosh, C. R., R. P. Allan, L. H. Baker, N. Bellouin, W. Collins, Z. Mousavi and K. P. Shine, 2016: Contrasting fast precipitation responses to tropospheric and stratospheric ozone forcing. *Geophys. Res. Lett.*, **43**, doi:10.1002/2015GL067231.
- Newman, P. A., L. Coy, S. Pawson and L. R. Lait, 2016: The anomalous change in the QBO in 2015-2016. *Geophys. Res. Lett.*, **43**, doi:10.1002/2016GL070373.
- Otero, N., J. Sillmann, J. L. Schnell, H. W. Rust and T. Butler, 2016: Synoptic and meteorological drivers of extreme ozone concentrations over Europe. *Environ. Res. Lett.*, **11**, 024005, doi:10.1088/1748-9326/11/2/024005.
- Randel, W. J. and F. Wu, 2007: A stratospheric ozone profile data set for 1979-2005: Variability, trends, and comparisons with column ozone data. *J. Geophys. Res.*, **112**, D06313, doi:10.1029/2006JD007339.
- Revell, L. E., F. Tummon, R. J. Salawitch, A. Stenke and T. Peter, 2015: The changing ozone depletion potential of N₂O in a future climate. *Geophys. Res. Lett.*, **42**, doi:10.1002/2015GL065702.
- Shepherd, T. G., D. A. Plummer, J. F. Scinocca, M. I. Hegglin, V. E. Fioletov, M. C. Reader, E. Remsberg, T. von Clarmann and H. J. Wang, 2014: Reconciliation of halogen-induced ozone loss with the total-column ozone record. *Nature Geosci.*, **7**, doi: 10.1038/ngeo2155.
- Solomon, S., D. Kinnison, J. Bandoro and R. Garcia, 2015: Simulation of polar ozone depletion: An update. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **120**, doi:10.1002/2015JD023365.
- Solomon, S., D. J. Ivy, D. Kinnison, M. J. Mills, R. R. Neely III and A. Schmidt, 2016: Emergence of healing in the Antarctic ozone layer. *Science*, **353**, doi: 10.1126/science.aae0061.
- World Meteorological Organization (WMO), 2014: Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2014. World Meteorological Organization, Global Ozone Research and Monitoring Project—Report No. 55, WMO, 416 pp.