

オゾン観測ネットワークの現状

～札幌と那覇サイトの停止を受けて～

林 田 佐智子^{*1}・中 島 英 彰^{*2}・藤 原 正 智^{*3}・山 内 恭^{*4}
金 谷 有 剛^{*5}・笠 井 康 子^{*6}・今 村 隆 史^{*7}

1. はじめに

オゾン研究連絡会は、天気2019年6月号に「オゾンに関する観測的研究の将来展望」と題し、2018年度秋季大会中に開催されたオゾン研究会での議論内容の報告を行った(林田ほか 2019)。この議論は、2018年2月に気象庁のオゾン・紫外線観測の再編によって札幌と那覇のオゾンゾンデ観測等が終了したことを受けて、将来のオゾン観測に対する影響と観測の重要性を議論するために開催されたものである。上記の報告にある通り、これまでに蓄積されてきた日本のオゾンゾンデ観測や全量観測・紫外線観測について、その有用性を改めて確認したところである。日本の気象庁が長年にわたりオゾンゾンデ観測を継続してきたことは国際的に高い評価を受けており、2018年2月の再編に際しては、2018年6月にIO₃C(国際オゾン委員会)から、同8月にNDACC(大気組成変化モニタリングネットワーク)から、気象庁長官宛てにオゾンゾンデ観測の継続を求める書簡が送付されている。観測の種類と期間については第1図を参照されたい。さらに、2022年1月をもって、気象庁は全量観測も含め札幌と那覇のオゾン観測を中止し、我が国のオゾン観測は半分の規模に縮小され、つくばと昭和基地の2ヶ所のみ

となった。

オゾン層には、太陽からの有害な紫外線を吸収することで地上に到達することを防ぎ、地上生物の活動を守る重要な働きがある。そのため、オゾンカラム全量の継続的な監視は、先進国の重要な責務である。特に、日本による南極昭和基地でのオゾン減少の報告は世界で最も早く報告されたものであり、重要な国際貢献と認識されてきた。

本稿では、まず、学術的観点からオゾン観測の歴史を振り返り(第2章)、日本のオゾン観測の歴史的意義について詳述する(第3章)。特に南極オゾンホール発見の過程において、南極昭和基地におけるオゾン観測の果たした役割には特筆すべきものがあり第4章に記述する。成層圏オゾンの保護にあたっては、1987年に「オゾン層を破壊する物質に関するモントリオール議定書」が採択され、その締約国である日本では1988年「特定物質の規制等によるオゾン層の保護に関する法律(オゾン層保護法)」が制定された。この法律に基づき、環境省が委託する検討会が毎年定例で開催され、年次報告書が出版されている。このような国際的枠組みの中で気象庁のオゾン観測の果たしている役割と(第5章)、日本の行政におけるオゾン観測の意義を記述する(第6章)。

(林田佐智子)

2. 地上からのオゾン観測の歴史

オゾン量計測の歴史は、水の電気分解によってオゾンが発生することを発見したSchönbeinの研究室で1850年に訪れたフランスのAntoine C. Becquerelによって始まった。Becquerelは、1852年にオゾンがヨウ化カリウム(KI)水溶液によって消失することを発見し、その際オゾンは以下の反応によってヨウ素分子

^{*1} (連絡責任著者) Sachiko HAYASHIDA, 総合地球環境学研究所/奈良女子大学。

sachikoh@chikyu.ac.jp

^{*2} Hideaki NAKAJIMA, 国立環境研究所。

^{*3} Masatomo FUJIWARA, 北海道大学。

^{*4} Takashi YAMANOUCHI, 国立極地研究所。

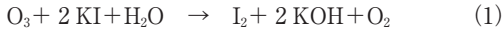
^{*5} Yugo KANAYA, 海洋研究開発機構。

^{*6} Yasuko KASAI, 情報通信研究機構。

^{*7} Takashi IMAMURA, 国立環境研究所。

© 2023 日本気象学会

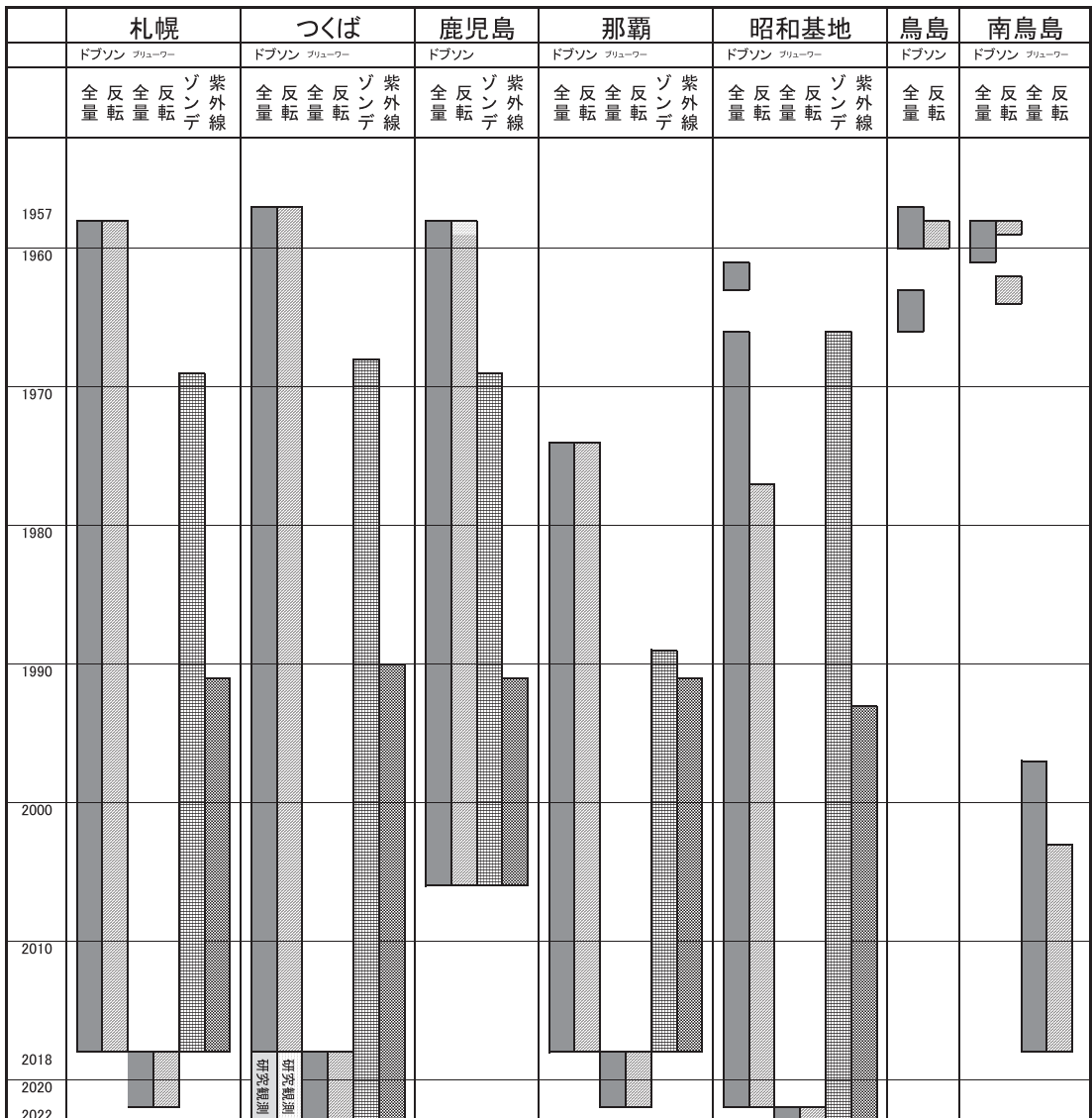
(I₂) を生じさせることを見出した。



この際生じたヨウ素分子は、でん粉と反応することによって紫色の反応物を生じる。この手法を応用することで、大気中のオゾン濃度を測定することが可能となった。ちなみに、(1) の反応は、現在でもオゾンゾンデによるオゾン量の計測手法として使われている。

1858年フランスの Jean-Auguste Houzeau によってオゾンが大気中に継続的に存在していることが明らかになると、オゾンに関するさまざまな研究が行われるようになり、1860年から1900年の間には、ヨーロッパと米国で多くの地上観測点が設置されていった。そして、オゾン量の日変化や季節変化の様子が明らかにされていった。

オゾンに関する光学的特性に関しては、1879年にフランスの Marie A. Cornu が、地上には293nm より波



第1図 気象庁によるオゾン・紫外線観測の歴史。少しでも観測があればその年を着色。2022年1月をもって、札幌と那覇でのオゾン全量観測とオゾン反転観測も終了。

長の短い太陽からの紫外線は到達していないことを発見した。その2年後の1881年には、英国の Sir Walter N. Hartley による室内実験によって、オゾン分子は233-293nmの紫外線（ハートレー帯）を強力に吸収することが判明した。また Hartley はこの太陽紫外線を吸収するオゾンは、地上付近よりは上空により多く存在すると推定した。

1920年代になると英国の Gordon M. B. Dobson によって、新たなオゾン計測機器が開発された。今日でも世界中で使われている「ドブソン分光光度計」の原型となるこの装置は、1924年にその最初の装置が制作された。この装置は紫外域のオゾンによる吸収が有る波長と無い波長の比を取ることで、上空のオゾン鉛直カラム量を測定する。1925年には Dobson により、このドブソン分光光度計による通年の観測が行われた。その結果、高・低気圧の通過に伴うオゾン量の変動や、オゾン量の季節変化が明らかとなり、オゾン鉛直カラム量は春（4月）に最大となり、秋（10月）に最少となる変化が得られた。Dobson は同様の分光光度計による観測網をその後ヨーロッパ各地や世界中にも展開していった。その結果、オゾン鉛直カラム量の季節変化の振幅が緯度によって異なることや南北で半年ずれる事、カラム量の極大は高緯度域にあることなどが明らかとなった。その後1956年には日本も含め、世界中のドブソン分光光度計の数は44となり、1957-58年の国際地球観測年（International Geophysical Year: IGY）の期間には、英国の南極ハレー基地にドブソン分光光度計が設置され、1961年には昭和基地にも設置され、その後の1980年代の「南極オゾンホール」の発見につながっていった。

世界で最も歴史の古いオゾン鉛直カラム量の継続観測は、スイスのアローザにおいて Daniel Chalonge によって1926年に始まり、Paul Götz によって引き継がれた。そして現在に至る世界最長のオゾン観測時系列となっている。日本においては、1957年の IGY を契機につくばにおいてドブソン分光光度計によるオゾン全量観測が始まり、国産機による観測が翌1958年から札幌、鹿児島、鳥島、南鳥島でも始まった（第1図）。

Dobson のもとで飛行機雲の生成の研究を始めたカナダ生まれの Alan W. Brewer は、英国のオックスフォード大学で成層圏水蒸気量も測れる露点水蒸気計の開発を行った。彼の研究は、後の「ブリューワー・ドブソン循環」の発見につながった。後に彼は1973年にカナダ気象庁と共同で「ブリューワー分光光度計」

の考案と開発を行った。1980年代にさらに改良されたブリューワー分光光度計は全天候型で屋外設置が可能であり、自動観測が可能なことから、今日では世界各地の100地点以上で、上空のオゾン量や紫外線強度の観測に用いられている。日本の気象庁では1990年からつくばで、1991年に札幌、鹿児島、那覇で、1993年に南極昭和基地でブリューワー分光光度計による観測を開始した。また2018年2月から札幌、つくば、那覇でのオゾン観測測器が、これまでのドブソン分光光度計からブリューワー分光光度計に変更された（第1図）。

（中島英彰）

3. 日本のオゾン観測の歴史的意義

気象庁・高層気象台による大気オゾン観測（全量観測、オゾンゾンデ観測、地上オゾン観測）および紫外線観測について、観測開始の経緯やその後の発展については、高層気象台（2021）によくまとめられている（藤原 2022）。ここではオゾン全量観測についてごく簡単にまとめる。高層気象台では1949年から試験的なオゾン観測が高層課・超高層掛のもとで開始されていたが、1957年の IGY を契機としてドブソン分光光度計を英国より輸入し本格的な観測を開始した。IGY の際には国産のドブソン分光光度計も導入して国内5地点で全量観測を行ったが（第1図）、南鳥島と鳥島は1960年代前半に終了した。一方、南極昭和基地では1961年の第5次観測隊において試験観測をした後に1966年の第7次観測隊より定常観測を開始し、また那覇では沖縄返還後の1974年に観測を開始した。南鳥島では世界気象機関（WMO）全球大気監視（GAW）計画の全球観測所に指定されたことを受け、ブリューワー分光光度計によって1997年に観測を再開している。

高層気象台では、輸入したドブソン分光光度計の電気系の改造や、国産のドブソン分光光度計の製造依頼と導入や、点検や常数決定等に使用する装置の自作や、データ処理ソフトウェアの開発なども行ってきた。また気象庁では国際的なドブソン分光光度計の校正体系の確立にも大きな貢献をしてきている（Komhyr 2008；高層気象台 2021）。国際比較観測には、1977年の米国・ボルダー以降毎回参加しており、アジア地区の二次準器を所有している。これを用いて1990年代からはアジア・南西太平洋地区のドブソン分光光度計の校正を行っており、2002年からは正式にアジア地区校正センターの責務も担っている。

本稿冒頭に述べた通り2018年2月の観測体制見直し

がされ、札幌、那覇とつくばでのオゾン全量観測及び反転観測は、ドブソン分光光度計からそれまで紫外線観測に用いていたブリューワー分光光度計へと変更された。そして、2022年1月をもって札幌と那覇におけるオゾン全量・反転観測自体が中止された。併せて昭和基地でのオゾン全量・反転観測が、ドブソン分光光度計からブリューワー分光光度計へと変更された（第1図）。

日本列島では長年にわたり、札幌から那覇あるいは南鳥島まで幅広い緯度帯においてオゾン全量観測が実施されてきた。オゾン全量の全球分布図を見てみると（気象庁 2022；環境省 2021）、日本付近は北半球では最もオゾン全量の南北傾度が大きい地域である。北海道では北極域の影響を受けた空気塊が、南の沖縄や南鳥島では亜熱帯地域の影響を受けた空気塊が輸送されてくることもある（Chubachi *et al.* 2002, 2003；Hasebe and Yoshikura 2006）。このような地域で、緯度方向に稠密に観測を行い、信頼度の高いデータを長年出してきたことは、オゾン層の長期変化の評価や、人工衛星観測の検証において、国際的に極めて大きな貢献であった。今回、日本のオゾン観測が大幅に縮小され、つくばと昭和基地のみとなってしまったことは、地球環境の監視、人工衛星観測の検証やバックアップという観点から見て大きな損失と言えよう。

（藤原正智）

4. 南極昭和基地におけるオゾン観測の果たした役割

昭和基地でのオゾン全量及びオゾンゾンデ観測から、春先の南極成層圏オゾンの減少—オゾンホール—が世界で初めて報告された（Chubachi 1984, 1985）。昭和基地では、南極観測が一旦中断した後、1966年の第7次隊として越冬観測を再開して以降、オゾンの全量観測は気象庁による定常観測の一要素として連綿として続けられてきた。実はその前の、第5次隊、1961年にも全量観測は行われていた。ちょうど第7、8次隊では、「南極高層大気の熱的構造—オゾン鉛直分布の観測と放射特性」が気象研究観測のテーマとして挙げられ、ここにオゾンゾンデ観測も始められ、2年間の観測が継続された。その後、オゾンゾンデ観測も定常観測にも位置づけられ、研究観測と補完しつつ進められた。

第23次隊（1982年越冬）からは、「中層大気国際協同観測」Middle Atmosphere Program (MAP) の一環

として「南極中層大気の総合観測」が4年間にわたって実施され、その初年度に「オゾンの総合観測」が位置づけられた。気象研究所から参加した忠鉢 繁隊員が気象研究観測として気象定常観測をサポートしながらドブソン分光光度計によるオゾンの月光観測とオゾンゾンデ観測の拡充を担った。当初の目的は、極夜期のオゾン量変動を把握しようということであり、世界に先駆けて極夜期のオゾン全量が緩やかに増加し真冬に極大をとり、その後減少するという変化が報告された。一方、春先のオゾン全量測定値が著しく低下し、ドブソン分光光度計の故障ではないかと心配された。しかし、オゾンゾンデによる鉛直分布の観測からも、これまでにないオゾン層高度のオゾンの著しい減少が見られ、「成層圏オゾンの減少」として報告された。最初の発表は、1983年12月の国立極地研究所の「第6回極域気水圏シンポジウム」であり、そのプロシーディングス論文が1984に発表され（Chubachi 1984）、本節冒頭に述べた通り、初の南極成層圏オゾン層破壊の報告となった。その観測結果が国際的に信用されたことは、第3章で述べられたこれまでの地道な取り組みによると言えよう（高層気象台 2021；小林 2007）。

その後、英国BAS（南極調査所）Farman *et al.* (1985) のNature誌の論文で、オゾン全量の急激な減少がフロン増加によるとの仮説が示され、さらに人工衛星Nimbus7搭載のTOMS（オゾン全量分布分光計）データからのStolarski *et al.* (1986) 論文等により「オゾンホール」として確実なものとなった。「オゾンホールの発見」がどれになるかは議論のあるところだが、南極成層圏オゾンの急減が初めて発表されたのは昭和基地での観測からであったことは明らかである。1960年代から一貫してオゾン全量及びゾンデ観測を続けてきたのは昭和基地だけであり、その長年の観測データの蓄積が重要であった。オゾンホールの成因をいち早く研究した米国海洋大気庁（NOAA）のS. Solomon (1986) も昭和基地でのオゾンゾンデ観測の結果から下部成層圏でオゾン破壊が最も進んでいることを示し（例、第2図）、オゾンホールの成因解明につなげた。これを受けて、「昭和基地での長年の観測の蓄積は知識の川（river of knowledge）となっている」（Solomon, 2004年、ブループラネット賞受賞記念講演）と称賛している。

このように、長年の地道な観測があつて初めて現象の解明が可能となるのであり、昭和基地におけるオゾン観測（全量及び鉛直分布、紫外線量、地上オゾン）

の重要性が再認識されているところである。

(山内 恭)

5. オゾン観測の国際的枠組みの中で日本の果たしている役割について

気象庁によるオゾン全量やオゾンゾンデ観測は、WMOのGAW計画に基づいて実施されている。また、気象庁は同アジア・南西太平洋地区品質保証科学センターとして、オゾン全量観測の助言・支援を実施し、全球大気監視校正センターとしてドブソン分光光度計によるオゾン全量の観測基準も維持するなど、国際的に大きな役割を果たしてきた。これらの観測データはWMOの下部組織であるWOUDC（世界オゾン・紫外線資料センター）から世界に公開されている。

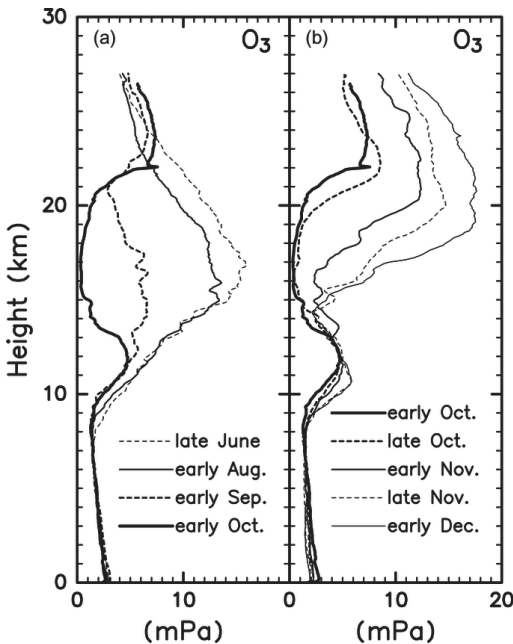
こうしたデータは成層圏・対流圏科学の両面で、特色あるアジア域の南北断面データとして世界の研究者に活用されてきた。人工衛星によるオゾン計測の全球的かつ系統的な検証では日欧米宇宙機関等のミッションを支え、大気の循環や化学に関するメカニズムの評価等を可能としてきた。また、IGAC（国際全球大気化学）/SPARC（成層圏―対流圏過程と気候への役割）

の化学気候モデル相互比較イニシアチブやIPCC報告書のための結合モデル相互比較といった数値モデル評価に対しても検証データを提供してきた。4年ごとにWMO/UNEP（国連環境計画）から出版されるオゾン層評価報告書や最新のIPCC AR6でも、これらの観測・モデルのデータが総括され、社会や政策決定者へ向けた強いメッセージが発せられ続けている。特にオゾン層評価報告書では1987年に国際的に合意されたモントリオール議定書に対し、世界中の研究者が集結する形で成層圏オゾン層と破壊物質のプロセス研究から実態把握を行い、オゾン層が回復していることを定量的に示した。これは国際的に連携した政策決定により地球環境（オゾン層破壊）が回復したという貴重な例となった。

全量・ゾンデ観測には、衛星観測では代替できない新たな役割がある。第一に、大気組成に関するデータ同化プロダクトの評価が挙げられる。近年、衛星データの数値モデルへの同化によって、オゾンなどの3次元濃度分布を含む「再解析プロダクト」が構築され、日欧米の研究グループから発信され、気候影響の解析などにも活用されるようになった。しかしながら、プロダクト間のばらつきなども大きく、入力される衛星データとは独立な観測情報を用いて評価する必要がある。

第2に、オゾンゾンデデータは、IGACの対流圏オゾンアセスメントレポートTOARやその第2期TOAR-II（2020-2024年）において、高度毎の対流圏オゾン存在量の変化を評価するため、また、IPCC報告書などでの気候影響を把握するための主力データとなっている。このように、オゾン観測の用途は成層圏以外にも拡張し、広く活用されている。

第3に、新たな衛星観測の評価や、新たな衛星プロダクト開発のためのアルゴリズム評価における必要性が挙げられる。2020年に打ち上げられた韓国のGEMSから、静止衛星によるオゾン等の大気組成の日変化計測が始まっており、太陽天頂角の大きい時間帯を含めた全量値の検証が必須である。また、赤外と紫外・可視など、複数の波長帯でのオゾン計測を複合させることなどにより、対流圏オゾン量を成層圏と区別して導出する方法や、さらには、対流圏の上・中・下部の存在量を区別して導出するアルゴリズムの開発が進められている。これらのためにも、独立な検証データ（全量・ゾンデ）が必要である。次期「ひまわり」において赤外サウンダが搭載されれば気温・水蒸気に加えて



第2図 オゾン分圧鉛直分布の季節進行，昭和基地2003年，(a) オゾンホール形成期と (b) オゾンホールの消滅期 (Sato *et al.* 2009 ©Copyright American Meteorological Society)。

オゾンの高精度導出が可能となり、他の衛星による紫外・可視観測との複合に基づいて、大気質・健康影響の面で重要な「対流圏下部のオゾン量」が導出されることも想定されており、その検証が直ちに必要となる。地球観測衛星委員会 CEOS では、大気組成に関する将来ミッションの最適配置や協力の在り方を毎年の会議で検討しており、2019年にまとめられた White Paper ではオゾン全量・高度分布を含む検証データのニーズが高く、2030年代以降も不可欠な観測項目であるとされている。今回の札幌や那覇のオゾン観測途絶はこのような国際的に期待される役割を、これまでのようには十分果たせなくなることを意味している。

(金谷有剛・笠井康子)

6. 日本の行政におけるオゾン観測の意義

第1章で述べられた通り、オゾン層保護法の中で、気象庁は「オゾン層の状況並びに大気中における特定物質の濃度の状況を観測し、その成果を公表する」、環境省は「気象庁による観測結果等を活用しつつ、オゾン層の破壊の状況や特定物質の濃度変化の状況を監視し、その状況を公表する」とされている。

環境省は毎年「成層圏オゾン層保護に関する検討会」を開催し、気象庁から「オゾン層・紫外線の年のまとめ」等で公表される観測結果や解析結果、ならびに上述のオゾン層評価報告書などをもとに検討し、「オゾン層等の監視結果に関する年次報告書」を公表している。年次報告書では、日本におけるオゾン層や紫外線の状況は気象庁における観測結果に大きく依存している。第3章でも述べられている通り、北極域でのオゾン層破壊の影響を受けやすい札幌や亜熱帯域のオゾン層変動の影響を受けやすい那覇のオゾン量や紫外線の変化には、つくばでの状況とは異なる特徴が見えていく。日本のオゾン層や紫外線量の変化の状況を監視していく上で、気象庁による札幌と那覇での観測の継続が困難となることは、人工衛星観測があるとは言え、残念なことである。

気象庁と環境省は3年ごとに開催されるオゾン層保護に関わるウィーン条約締結国による「オゾン調査管理者会合」に参加し国別報告書の提出や会合での取り組みの紹介を行っている。2008年の第7回会合以降は、世界の各地域の調査・研究に関する活動の報告をその地域を代表する国から発表する形式となっており、アジア・南西太平洋地区を代表して日本が報告を行っている。これは、気象庁がアジア・南西太平

洋地区におけるドブソン観測の精度管理を担っていることと無縁ではないと思われる。気象庁がこの地区での精度管理に関わる役割を今後も引き続き果たしていくことを期待したい。

地道に信頼度の高い観測を継続することは予算的にも人員・人材の点からも容易なことではないが、長期にわたる信頼度の高い観測の継続と言う積み重ねの上に築かれた国際的存在感は、世界一特にアジア域一での地球環境監視における日本のリーダーシップの発揮や日本に対する信頼感にもつながってきたものと思われる。

(今村隆史)

7. 将来へむけて

本稿では、日本のオゾン観測の歴史とその世界的な位置づけについて振り返った。地球観測には地道な積み重ねが必要であることは、本稿の中で繰り返し述べられている通りである。日本は、2002年からは正式にアジア地区校正センターの責務も担っていることも強調しておきたい。世界に信用される日本のオゾン観測であり続けることを願ってやまない。

参考文献

- Chubachi, S., 1984: Preliminary results of ozone observations at Syowa Station from February 1982 to January 1983. Mem. Natl. Inst. Polar Res., Spec. Issue, **34**, 13-19.
- Chubachi, S., 1985: A special ozone observation at Syowa station, Antarctica from February 1982 to January 1983. Atmospheric Ozone (Zerefos, C.S. and Ghazi, A., eds.), Proc. Quadrenn. Ozone Symp.(Halkidiki Greece 3-7 Sep. 1984), 285-289.
- Chubachi, S. *et al.*, 2002: Preliminary results of vertical ozone soundings at Wakkanai, Japan. Polar Meteor. Glaciol., **16**, 149-162.
- Chubachi, S. *et al.*, 2003: Detection of air within the northern hemisphere polar vortex at Wakkanai and at Tsukuba, Japan. Polar Meteor. Glaciol., **17**, 48-60.
- Farman, J.G. *et al.*, 1985: Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClOx/NOx interaction. Nature, **315**, 207-210.
- 藤原正智, 2022: 「高層気象台100年誌 (高層気象台彙報特別号)」高層気象台 編. 天気, **69**, 176-177.
- Hasebe, F. and Y. Yoshikura, 2006: Long-term ozone trend depicted by ozonesonde observations over Japan. SOLA, **2**, 084-087.
- 林田佐智子ほか, 2019: オゾンに関する観測的研究の将来

- 展望：2018年秋季オゾン研究連絡会の報告. 天気, **66**, 457-461.
- 環境省, 2021：令和2年度（2020年度）オゾン層等の監視結果に関する年次報告書. 252pp.
- 気象庁, 2022：オゾン層・紫外線.
https://www.data.jma.go.jp/gmd/env/ozonehp/diag_o3uv.html (2022.6.3閲覧).
- 小林壽太郎, 2007：ゾンデ開発の余韻—湿度とオゾンの計測—. 次世代へ伝えたいこと—あのひとからの助言. 気象研究ノート, (213), 111-116.
- Komhyr, W.D., 2008: NOAA/ESRL Global Monitoring Division - Early History. NOAA Global Monitoring Laboratory, 20pp.
- 高層気象台, 2021：高層気象台100年誌. 高層気象台彙報, 特別号, 167pp.
- Sato, K. *et al.*, 2009: Longitudinally- dependent ozone increase in the Antarctic polar vortex revealed by balloon and satellite observations. J. Atmos. Sci., **66**, 1807-1820.
- Solomon, S. *et al.*, 1986: On the depletion of Antarctic ozone. Nature, **321**, 755-758.
- Stolarski, R. S. *et al.*, 1986: Nimbus 7 satellite measurements of the springtime Antarctic ozone decrease. Nature, **322**, 808-811.
-