

3. 大気オゾン観測

3. 1 オゾン全量観測・反転観測

(1) 調査・研究の開始

高層気象台では、昭和 22(1947)年 9 月に高層課内に超高層掛を設置し、昭和 24(1949)年 3 月には写真乾板を用いた水晶分光による試験的なオゾン観測を開始している。

昭和 24(1949)年 11 月には、成層圏上部から大気最上部に至る大気の研究を行う、超高層係と工務係から成る第二観測課が設置され(庶務課・第一観測課との 3 課体制、中央気象台達第 30 号 昭和 24.12.27)、同年 3 月に新築された 33m²の観測(実験)室で、水晶分光器、夜間放射、オゾンゾンデによるオゾン観測手法の開発にあたった(高層気象台：1978)。

昭和 29(1954)年には、水晶を用いた一重分光器(図 3.3.1)を改良し、感部に光電子増倍管を用いた観測へと移行したが、可視光線などの迷光が大きく、それを除く手法が確立出来ず成功には至らなかった。

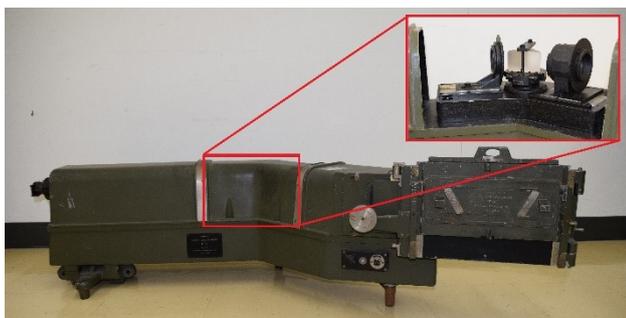


図 3.3.1 一重分光器 QF-60

(2) IGY とドブソン分光光度計による定常観測の開始

一重分光器では迷光により十分な精度が得られないことから、二重分光のベック社製ドブソン分光光度計 52 号機(口絵 23)を昭和 30(1955)年 3 月に輸入し、同年 7 月から国際オゾン委員会(IOC、後に IO3C と表記を変更)の定めた方法で定常的な観測(IGY に向けた予備観測)に入った。

昭和 32(1957)年 7 月の IGY の開始日には、全量観測の時刻は太陽光線の大気路程 3.0、2.0、南中の 1 日 5 回と定め実施した(昭和 43(1968)年 1 月からは大気路程 2.5、1.5、南中の 5 回に変更)。またオゾン鉛直分布を得る反転観測も開始している。

最初の二重分光光度計は輸入によったが、島津製作所にも製造を依頼し、合計 6 台を同社から購入した。高層気象台に於いてベック社製のものと同時観測して定数決定し、昭和 33(1958)年にかけて鳥島、南鳥島、札幌、鹿児島へと送り出し、国内各地での観測も開始した。

高層気象台の器械格納室で開始した観測は、昭和 31(1956)年に新築したオゾン及び放射観測室に移動し、さらに増加した分光光度計の格納・試験のため、翌年に本庄出張所から 12m²の建物を移築した。昭和 36(1961)年には、南極昭和基地でも観測を開始したが、南鳥島は昭和 38(1963)年、鳥島は昭和 40(1965)年にいずれも全観測引き揚げに伴い観測を中止した。那覇は沖縄返還後の昭和 49(1974)年に観測を開始した。

昭和 34(1959)年の第 3 回世界気象会議で、オゾン全量観測所の設立とオゾンゾンデ観測計画の確立が要請された。これを受け WMO は第 13 回執行理事会において、昭和 36(1961)年にオゾンに関するデータの収集及び品質管理体制の整備と、世界オゾンデータセンター(WODC、後に紫外線も追加され WOUDC となった)の設立を加盟国に要請した。カナダ大気環境庁がこれに合意し、昭和 37(1962)年にデータセンター業務を開始した。WODC はデータの収集だけでなく、計算機資源を要する反転観測の解析についても集中実施し、各国に刊行物として還元することとなった。

高層気象台では分光光度計の導入当初から、観測や点検、常数決定等に使用する装置を自ら開発・作成してきた。初期には島津製作所製ドブソン分光光度計において、測定の手となる光学くさびに関する課題が多く生じていた。この光学くさびの濃度勾配を点検し、補正により経時変化への対応を可能とするため、昭和 37(1962)年頃に 2 ランプ点検装置を試作している。さらに昭和 40(1965)年頃には、光源にヨウ素ランプを用いた水冷方式の点検装置に改良した。また 2 枚の光学くさび間の多重反射の防止に取り組むとともに、自ら金属気体を真空蒸着させて光学くさびを試作するなど、各種の問題解決にあたった。

昭和 40(1965)年頃から、反転観測時の労力軽減を目的として、感部の検出値を R ダイアル駆動装置にフィードバックすることで自動的に制御させ、その制御をアナログ記録する自動記録装置の開発に着手した。昭和 47(1972)年から高層気象台で運用を始め、昭和 48(1973)年にかけて各官署へ展開した。

また、この装置開発と同時期に、電気系の改造にも着手した。感部である光電子増倍管の微小な電流を効率よく増幅する交流増幅器の精度向上を図るとともに、電源装置の小型・軽量化を行った。同期整流器においては、コンピュータとブラッシュの接触面から生じるカーボン粉末の光学部への付着を避けるため、セクタ回転に同期させるチョップ駆動方式へ変更し、さらにサブミニチュアランプとフォトランジスタを用いた同期信号発生器

を採用するなど改良を行った。それらはまず昭和48(1973)年に購入したベック社製ドブソン分光光度計116号機に適用し、その後各官署の機器に展開していった。

(3) 国際的な校正体系の確立とデータ処理への電子計算機の導入

昭和51(1976)年に決議されたWMO 全球オゾン研究・監視計画において、NOAA 気候監視診断研究所(CMDL, のちのESRL/GMD)がもつドブソン分光光度計83号機が国際第一準器と定められた。このドブソン分光光度計は昭和47(1972)年以降、定期的にハワイ・マウナロア観測所で絶対検定を行っている。

昭和52(1977)年には米国・ボルダーで国際比較が開催され、気象研究所研究官が参加した。国際比較の目的は、世界各地のオゾン全量観測の均質化を図るため、NOAAの国際第一準器で値付けされた二次準器(地区準器)を複数定めることであった。気象庁が国内準器としていたドブソン分光光度計116号機は、電気系の改造が済んでいたことなどからNOAAによる改良を施すこともなく精度的な条件を満たし、アジア地区準器に指定された。

昭和63(1988)年の第40回WMO 執行理事会において、ドブソン分光光度計は3年に1度比較観測を行うよう勧告された。しかし比較観測は測器輸送が必須であり多大な経費と時間を要するため、国際巡回標準ランプによる点検で代行することになった。昭和56(1981)年11月から翌年1月まで第1回国際巡回標準ランプ点検が実施され、NOAAにおいて結果が解析された。本点検は昭和60(1985)年の第2回、平成3(1991)年の第3回まで実施されたが、その後のオゾンホール発見で要求されることとなったトレンド解析には、精度的に不十分であることから、比較観測へその役割が戻り現在に至っている。表3.3.1に日本が参加したドブソン分光光度計の国際比較を示す。

昭和56(1981)年頃、同期整流器について、対面型のフォトランジスタとサブミニチュアランプの反射型フォトセンサと回転反射板への変更、同期整流回路中の水銀リレーの半導体アナログスイッチ化により可動部分を除くなどの改造を、気象測器工場の協力で実施したことにより、位相合わせが容易となり自動観測装置の記録の振幅を格段に小さくできた。

昭和58(1983)年になると電子計算機が一般に普及し始め業務への導入が始まった。まずオゾン全量計算のための器械定数、大気外定数、天頂光観測図表等を、一年間のデータにより補正し、年間の観測値を再計算する

BASICによるソフトウェアを開発した。反転観測時の、指定天頂角の時刻計算、R値からN値への変換、反転曲線の計算・表示も開発した。

昭和63(1988)年の初めには、オゾン層観測業務用パソコンとして国内官署にも導入され、高層気象台で開発した観測・点検資料の解析・整理、報告物作成・印刷等のソフトウェアが導入された。

表 3.3.1 ドブソン分光光度計の国際比較

No.	実施年	実施場所	参加機関
1	1977年	米国・ボルダー	気象研究所
2	1984年	オーストラリア・メルボルン	高層気象台
3	1989年	米国・マウナロア	高層気象台
4	1992年	米国・ボルダー	本庁
5	1995年	スイス・アローザ	高層気象台
6	1998年	米国・ボルダー	高層気象台
7	2001年	米国・マウナロア	高層気象台
8	2004年	米国・ボルダー	高層気象台
9	2007年	米国・ボルダー	高層気象台
10	2010年	米国・マウナロア	高層気象台
11	2013年	米国・ボルダー	高層気象台
12	2017年	オーストラリア・メルボルン	高層気象台

(4) オゾンホールの発見を契機とする測定精度向上への取り組み

昭和59(1984)年、ギリシャ・ハルキディキで行われたオゾンシンポジウムにおいて、その後のオゾンホール発見とオゾン層保護につながった、南極昭和基地における1982年10月のオゾン全量の大幅な低下に関する報告が行われた。これは取得データの高い信頼性が評価された結果であるが、高層気象台でのドブソン分光光度計の調整・改造や、点検装置の開発、観測隊員への研修が地道に続けられてきたことが大きく貢献した。

昭和60(1985)年には、オゾン層の保護を目的とする国際的な枠組みである、オゾン層の保護のためのウィーン条約が採択され我が国も加入した。条約の前文には「締約国は、…国際機関及び国内機関において進められている作業及び研究、特に国際連合環境計画のオゾン層に関する世界行動計画に留意し、…オゾン層及びその変化により生ずる悪影響についての科学的知識を増進させるため、一層の研究及び組織的観測が必要であることを認識し、…」とあり、附属書Iには主要な科学的問題として「大気の温度構造を変化させ得るオゾンの鉛直分布の変化、並びにその結果として気象及び気候に生じ得る影響を認識する」とある。また締約国が組織的観測を実施す

る分野として「人工衛星による観測網、及び地上の観測網を統合した全球オゾン観測組織を最大限に活動させることによるオゾン層の状態の観測」と記載されている。WMO もオゾン層保護などに対処するため、平成元(1989)年に「全球大気監視(GAW)」計画を開始した。

国内でも昭和 63(1988)年 5 月、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)が施行され、気象庁でも観測部高層課にオゾン層解析室(のちの環境気象課オゾン層情報センター)が設置されるなど観測体制の強化が図られた。同年度末には、補正予算によりベック社製ドブソン分光光度計 5 台の輸入も実現し、それらを高層気象台で各種調整を行った上で、高層気象台・沖縄・札幌・鹿児島に配備した。

平成 4(1992)年、ブラジルで開催された環境サミットを契機として、開発途上国へのオゾン層観測の支援がもめられるようになった。我が国は運輸省(当時)・気象庁がアジア・太平洋地域の気候変動観測を支援するため、平成 5(1993)年より人材育成、研究・調査協力を行ってきた。この活動の一環として、平成 8(1996)年 2 月に第 1 回(インド、韓国、フィリピン、タイ、NOAA の WMO 専門家)、8 月に第 2 回(中国、パキスタン、マレーシア)のアジア・太平洋地域オゾンワークショップが企画され、高層気象台においてアジア地区準器(ドブソン分光光度計 116 号機)で参加国の測器の校正を行った。この取り組みは、その後のドブソン分光光度計の地区比較(表 3.3.2, 口絵 25)につながっている。

表 3.3.2 ドブソン分光光度計の地区比較

No.	実施年	参加国
1	1996 年	I: インド, 韓国, フィリピン, タイ II: 中国, パキスタン, マレーシア(※1)
2	2003 年	中国
3	2004 年	韓国(※2)
4	2006 年	インド, イラン, パキスタン, フィリピン, タイ
5	2011 年	中国
6	2016 年	中国, タイ, パキスタン

※1 マレーシアのオゾン観測測器はブリューワー分光光度計。

※2 相手国に日本の移動準器を持ち込み実施。

WMO では、第五次長期計画に基づき、平成 13(2001)年から平成 19(2007)年までの GAW 計画の実施戦略を策定した。同戦略においては、世界の観測データのトレーサビリティを確保する(データを共通のスケールで比較

可能にする)ための校正体系の強化を重要戦略の一つととらえていた。気象庁は WMO からの要請を受け、平成 14(2002)年 3 月、正式にアジア地区のドブソン分光光度計の地区校正センター(RDCC-A)の責務を担うこととなった。

気象庁では、アジア・南西太平洋地区のオゾン全量観測に関する「WMO 品質保証科学センター(QA/SAC)」も平成 7(1995)年から担っている。QA/SAC は観測所のデータ品質を評価すると共に、観測機器の状況を把握するなどし、地区内での観測精度の維持・向上を目的としている(表 3.3.3)。

フィリピン気象局はマニラでオゾン全量観測を行っているが、平成 16(2004)年当時、衛星データとの比較検証や測器の点検データなどから、観測精度に問題が生じている可能性があった。そこで QA/SAC の一環として高層気象台職員を派遣し、同観測所の測器の維持・管理状況を確認し、必要な技術指導をおこなった。平成 22(2010)年には現地での校正も行っている。

韓国ではソウル市の延世大学において、昭和 59(1984)年からオゾン全量観測と反転観測を行っているが、測器の経年変化が見られるようになったため、平成 16(2004)年、高層気象台が維持管理する移動準器を相手国に持ち込み、現地での校正を実施した。平成 18(2006)年には、後述の制御自動化の導入支援も行っている。

表 3.3.3 ドブソン分光光度計に関する QA/SAC 活動

実施年	対象(実施場所)	実施内容
2002 年	中国科学院(日本)	研修
2004 年	マニラ観測所(フィリピン)	現地調査・技術指導
2004 年	延世大学(韓国)	測器校正・技術指導
2006 年	延世大学(韓国)	制御自動化導入支援
2010 年	マニラ観測所(フィリピン)	測器校正・技術指導

WOUDC への観測データの報告は、月毎の郵送であったが、速報性も求められるようになってきたことから、平成 5(1993)年 9 月、WMO/CBS データ管理部会/データ表示・コード副部会第 1 回会議において、GTS 回線での CREX(文字形式汎用気象通報式)による交換が提案された。翌年の WMO/CBS 臨時会議の勧告を受け、高層気象台では平成 7(1995)年、試験通報を開始した。その後平成 12(2000)年 5 月に正式運用となり、平成 13(2001)年から札幌・鹿児島・那覇で、平成 19(2007)年からは南極昭和基地でも開始された。

(5) ドブソン分光光度計の制御自動化の取り組み

ドブソン分光光度計の制御を自動で行う試みは、平成2(1990)年の南極昭和基地への導入が始まりである。初期の制御には、データ処理に導入されていた汎用の電子計算機(NEC製 PC-9801 シリーズ)に収納した3枚の拡張ボードで、駆動部に取付けたモーターの制御、測器からの信号処理、入出力処理を実現した。プログラム開発はMS-DOS ベースの BASIC を用いて高層気象台で自主開発した。光学くさびを制御する R ダイアルや、測定波長を決める Q レバー、直射光を取り込むためのサンディレクタプリズムの高度角・方位角のモーター制御、器温の測定、光電子増倍管出力の収集、回転セクタ用モーター、アッテネーターの制御がパソコンによる自動制御となり、誤操作や個人差が排除され信頼性が格段に向上した。

昭和基地での運用の経過を踏まえ、平成4(1992)年から翌年には、新たな自動化の基本方針を立て、気象測器工場とメーカーの協力を得て、改良型(NEC製 98note とドッキングステーションを介して拡張ユニットを接続して構成)が開発・制作され、高層気象台のドブソン分光光度計125号機に導入された。改良型は高層気象台での試験運用を経て、平成6(1994)年に正式運用となり、以降国内及び昭和基地へ展開した。

この改良型装置は平成7(1995)年、スイス・アローサの国際比較に持ち込んだ際、「今回参加した18台のドブソン分光光度計の中で最も近代化された測器であり、しかも測器はとても良く維持管理されている」と絶賛された。

平成10(1998)年頃、装置を制御する電子計算機の更新が検討され始めた。Windows OS で動作する電子計算機が主流になっていたことから、制御プログラムも C 言語で改めて制作し(現用のソフトウェア: Windobson)、Windows Me で動作するノート型電子計算機に、PCカード経由で拡張ユニットを外部接続する形態とした。

このころ周辺機器についても、さまざまな改良・自動化が適用されている。サンディレクタ装置の改造や2ランプ点検装置の更新、昼夜を問わず実施可能な小型のペン型の低圧水銀ランプを用いた水銀ランプ点検装置を開発した。

Windows Me システム導入後数年が経過した平成17(2005)年には、老朽化と各 I/O モジュールへのデバイスドライバのサポート体制の打ち切り等に備え、改めて長期的なサポート体制と汎用性を重視した自動化システムの構築が検討された。産業用コンピュータの標準規格の一種であるコンパクト PCI を採用し、Windows XP ベースで動作する構成とした(口絵24)。様々な基本制御の開発・改良、個々のパーツの特性試験・評価、試験運用

なども併せて実施した。平成18(2006)年には高層気象台に導入され、その後他の官署にも適用した。

ここまでの数段階の改良・開発により、測器の向きを調整する操作を除くほぼ全ての手順が自動的に行えるようになった。観測者は空の状態や、装置の動作を監視するだけで良くなり、取得データの品質は格段に良くなった。各種点検も、開始時のセッティング以外はほぼ自動で動作するようになり、安定した点検値の取得が可能になった。

この自動化システムは、これまでに世界10地点程度に技術移転されている。平成18(2006)年の韓国延世大学を皮切りに、平成21(2009)年にはNOAA地球システム調査研究所(ESRL)地球監視部(GMD)(ボルダー)、オーストラリア・メルボルン及びアルゼンチン・ブエノスアイレス、さらに平成24(2012)年に、ニュージーランド・ローダーで、Windobson とともに導入されている。

ソフトウェア単独でも取得データの解析ツールとして利用できることから、WMO 事務局長から気象庁長官に、Windobson をドブソン分光光度計用の標準的なデータ処理プログラムとして各国へ提供するよう依頼がなされている。これまでフィリピン、タイ、ドイツ、南アフリカに提供した。

(6) 観測値再評価の取り組みとブリューワー分光光度計によるオゾン観測への移行

高層気象台では、適宜観測値の再計算や再評価にも取り組んでいる。

昭和59(1984)年には、NOAA の国際準器と国内準器との比較により与えられた標準ランプの基準値をもとに、高層気象台及び各官署の測器の器械定数を過去に遡って決定し、従来の自己検定法によるオゾン全量に対する補正量を昭和52(1987)年まで再計算した。

平成4(1992)年に、気象庁は「日本大気オゾン観測資料30年報(1961-1990)」を刊行したが、その際の過去資料の再評価においては、校正方法を自己検定法から準器との比較校正法へ変更し、反転観測についても最新ソフトウェアで再計算した。

ドブソン分光光度計の反転観測の再評価を目的として、欧州委員会及びWMOによりREVUEプロジェクトが実施され、長期間定期的に行われている世界16地点(高層気象台、札幌、鹿児島、那覇ほか12地点)のデータが使用された。高層気象台では国内4地点の反転観測データに含まれるオゾン全量依存性を再評価し、平成16(2004)年に行われたオゾンシンポジウム論文誌への投稿を行っている。さらに国内4地点について、測器入れ換えや校

正に伴う N 値のシフト誤差と反転比較の結果に基づいた太陽天頂角への依存性を評価するとともに、平成 17(2005)年までのデータセットに補正を行って、オゾン鉛直分布を再計算しオゾンゾンデ観測との比較も行った。

WMO/GAW が推奨するオゾン観測測器としては、全天候かつ全自動のブリューワー分光光度計もある。気象庁でも紫外線観測への導入以来、時折移行を検討していたが、ドブソン分光光度計との観測値に、測器の構造や校正方法、パラメータの取り扱いの差異に起因する差の存在が課題となっていた。WMO/GAW はこの系統的な差の要因として、オゾン吸収係数の扱いの違いを平成 27(2015)年に指摘しており、同係数の見直しの勧告を検討している。関連して、主観測測器を変更するには 3 年以上の並行観測と、測器の特性及び観測値の連続性を評価すべきとしている。

高層気象台では札幌、つくば及び那覇の 3 地点で観測したデータにより、オゾン吸収係数の波長依存性及び温度依存性に着目してオゾン全量を統計的に補正した。これらの補正により、両測器間の系統的な差の絶対値及びその季節変動の幅が小さくなる効果を確認できた。

観測値の連続性が保たれることが確認されたことから、平成 30(2018)年 2 月、気象庁は札幌、つくば、那覇のオゾン観測測器をドブソン分光光度計からブリューワー分光光度計に移行した。また南鳥島のブリューワー分光光度計によるオゾン観測を同年 1 月に終了した。現在ドブソン分光光度計を使用したオゾンの定常観測は南極昭和基地のみとなっているが、高層気象台ではオゾン吸収係数変更への対応及び南極昭和基地の観測データの評価のため、引き続きドブソン分光光度計による研究観測を実施している。

今後、WMO/GAW から勧告されるオゾン吸収係数の見直し手法に従って、過去のオゾン全量観測値の再計算を実施する。高層気象台では、オゾン全量観測データの均質性と連続性の向上をはかるため、ドブソン分光光度計について観測開始からの校正及び点検資料に基づく観測データの再評価に着手し、再計算に備えている。

WMO/GAW ではブリューワー分光光度計の地区校正センターの計画を進め、ヨーロッパ地区(RA-IV)では平成 15(2003)年スペイン気象局が、カナリア諸島のテネリフェ島に RBCC-E を構築し、オゾン・紫外線観測のための国際測器相互比較観測による測器定数の校正を開始した。アジア地区においても、同様の校正センターへの要望が高かったため、日本国内の高地においてオゾン・紫外域日射観測のブリューワー分光光度計用測器定数の校正や、比較観測の実施可能性についての調査を行うことになっ

た。高層気象台では東京大学宇宙線研究所附属乗鞍観測所において、東大宇宙線研究所との共同研究「乗鞍岳におけるブリューワー分光光度計を使用したオゾン・紫外線の観測」として平成 21(2009)年に開始し、平成 28(2016)年まで毎年夏季に実施した。

(7) 観測成果と将来展望

IGY を見据え、昭和 30(1955)年にドブソン分光光度計でのオゾン全量観測を開始してから、令和 2(2020)年で 65 年となった。この間高層気象台は、南極昭和基地及び国内地点の測器の維持、観測データの品質管理や見直しなどの業務を一手に引き受けてきた。これらを地道に緻密に実施してきたことが、結果として南極オゾンホールが発見に大きく貢献してきた。

高層気象台で開発、改修を重ねてきたドブソン分光光度計の自動化技術はソフト・ハードとも、国内に止まらず、多くの国々に技術移転されている。また RDCC-A や QA/SAC の活動を通し、多大な国際貢献を果たしてきた。

衛星によるオゾン観測が可能となった現在、地上からの観測に求められるのは、緻密な観測網ではなく、長期変化の把握と衛星観測のグランドトゥルースになり得る高品質データである。それには高層気象台で引き続き観測を実施し、精度向上に取り組むことが重要となる。

前述の通り、未だブリューワー分光光度計とドブソン分光光度計の観測値の差異は完全には解消できていない。研究の進展により、この先再びオゾン吸収係数の見直しがあるかもしれない。今後新たなオゾン観測測器の導入もあるだろう。これまでオゾン観測に使用してきた測器を高層気象台で維持管理し、測器の特性を把握し、観測データの検証が行える体制を維持していくことも重要と考える。

参考文献

- 池田弘(1965)：ドブソン型オゾン分光光度計用光学くさびの真空蒸着（第 1 報）。高層気象台彙報，**33**，7-13。
- 池田弘・菊池直次郎(1965)：オゾン分光光度計の検定光源としてのよう素ランプの特性。研究時報，**17**，567-572。
- 池田弘・小畑実(1972)：オゾン分光光度計の自動化について。研究時報，**24**，151-160。
- 池田弘・菊池直次郎・小畑実・福田寿彦・松本勝雄(1972)：オゾン分光光度計用 2 ランプ点検装置について。高層気象台彙報，**37**，49-51。
- 池田弘(1977)：オゾン分光光度計電気系統の改良。研究

- 時報, **29**, 147 - 152.
- 池田弘・小畑実・片山進(1977): オゾン分光光度計用自動記録装置. 高層気象台彙報, **38**, 35 - 41.
- 池田弘・大越延夫・酒井重典・忠鉢繁(1978): オゾン分光光度計波長点検用恒温槽について. 高層気象台彙報, **39**, 52 - 55.
- Ito M., Uesato I., Noto Y., Ijima O., Shimizu S., Takita M., Shimodaira H., Ishitsuka H.(2014): Absolute Calibration for Brewer Spectrophotometers and Total Ozone/UV Radiation at Norikura on the Northern Japanese Alps. *Jour. of Aerological Observatory*, **72**, 45 - 55.
- 梶原良一・小林正人・小城良友・成田修・廣田道夫(1989): オゾン過去資料の見直しについて. 高層気象台彙報, **49**, 32 - 37.
- 川村清(1951): 光電管による大気オゾン測定に関する予備的研究. 高層気象台彙報, **20**, 76 - 82.
- 気象庁(1970): オゾン観測指針. 気象庁, 121pp.
- 気象庁(1980): オゾン観測指針. 気象庁, 123pp.
- 気象庁(1991): オゾン観測指針 オゾン全量・反転観測編. 気象庁, 91pp.
- 気象庁(2018): オゾン観測指針 オゾン全量・反転観測編. 気象庁, 83pp.
- 小城良友・小林正人・上窪哲郎・梶原良一(1990): ドブソンオゾン分光光度計の完全自動化試作改造について. 高層気象台彙報, **50**, 29 - 34.
- 高層気象台観測第二課 (1957): 館野におけるオゾン全量観測について. 高層気象台彙報, **25**, 17 - 35.
- 高層気象台 (1978): 高層気象台 50 年誌. 高層気象台, 47pp.
- 高層気象台観測第三課・気象測器工場 (1982): オゾン分光光度計の同期整流器の改造について. 高層気象台彙報, **42**, 47 - 51.
- 高層気象台観測第三課 (1984): 「カナダからの手紙」ーオゾン分光光度計の内部散乱光についてー. 高層気象台彙報, **44**, 26 - 36.
- 高層気象台観測第三課 (1990): オゾン観測業務プログラムの解説. 高層気象台彙報, **50**, 35 - 40.
- 高層気象台観測第三課 (1996): ドブソンオゾン分光光度計の自動化システムの開発. 測候時報, 気象庁, **63**, 303 - 330.
- 桑名十郎(1962): オゾン分光光度計のための“2 ランプ装置”について. 研究時報, **14**, 779 - 789.
- 桑名十郎・小畑実(1964): ドブソン型オゾン分光光度計の蒸着ウェッジの多重反射について. 高層気象台彙報, **32**, 27 - 31.
- 松原廣司(1984): オゾンデータ整理のためのパーソナルコンピュータの導入. 高層気象台彙報, **44**, 16 - 25.
- 松原廣司・梶原良一(1985): オゾン反転観測におけるパーソナルコンピュータの利用. 高層気象台彙報, **45**, 40 - 48.
- Miyagawa K.(1996): Development of automated measuring system for Dobson ozone spectrophotometer. *Ozone symposium in Italy in 1996*, **2**, 951 - 954.
- Miyagawa K.(1997): Development of an automated system for the Dobson ozone spectrophotometer. *The Geophy. Maga. Series 2*, 2-1, 77 - 107.
- 宮川幸治, (1996): スイス・アローザで行われた WMO ドブソンオゾン分光光度計の国際相互比較. 高層気象台彙報, **56**, 7 - 14.
- 宮川幸治, 高尾敏則(1996): オゾン全量データの CREX 通報について. 高層気象台彙報, **56**, 27 - 30.
- 宮川幸治, 能登美之(1997): 昭和基地で使用する自動制御サンディレクタ. 高層気象台彙報, **57**, 37 - 40.
- 宮川幸治, 能登美之(1999): 自動化に対応した新 2 ランプ点検装置. 高層気象台彙報, **59**, 37 - 40.
- 宮川幸治・能登美之・伊藤真人(2001): ドブソン分光光度計の新水銀ランプ点検装置. 高層気象台彙報, **61**, 29 - 31.
- 宮川幸治 (2002): ドブソン分光光度計の新自動制御方式. 高層気象台彙報, **62**, 27 - 44.
- 宮川幸治・Hannagrace F.Cristi (2005): WMO/GAW のフィリピン・マニラにおけるオゾン観測の現状. 高層気象台彙報, **65**, 89 - 92.
- 宮川幸治・Jhoon Kim・Hi Ku Cho (2005): 韓国・延世大学でのドブソンオゾン分光光度計の較正. 高層気象台彙報, **65**, 93 - 98.
- 宮川幸治(2006): 反転観測におけるN値の再評価. 高層気象台彙報, **66**, 21 - 32.
- 宮川幸治・赤木万哲(2007): アジア地区ドブソン分光光度計の国際相互比較2006. 高層気象台彙報, **67**, 1 - 8.
- 宮川幸治(2007): ドブソン分光光度計の自動化ウィンドウズシステムの高度化. 高層気象台彙報, **67**, 85 - 98.
- 小畑実(1965): オゾン分光光度計の同期整流の改造試験について. 研究時報, **16**, 658 - 661.
- 小畑実・池田弘(1965): オゾン分光光度計の同期整流の改造試験について (第2報). 研究時報, **17**, 564 - 566.
- 大竹潤・上野圭介・上野幹雄・木下篤哉・伊藤智志・清水悟(2019): アジア地区ドブソン分光光度計の相互比較2016 開催報告. 測候時報, 気象庁, **86**, 63 - 71.
- Rumen D. Bojkov(2012): International Ozone Commission:

History and activities. *IAMAS Publication Series No. 2*, 100pp.

清水悟・上野圭介(2019):メルボルンにおける WMO ドブソンオゾン分光光度計の国際相互比較. 高層気象台彙報, **76**, 17 - 20.

志村英洋・上野丈夫・廣瀬保雄・田森俊彦・宮川幸治・伊藤真人・能登美之・高尾俊則・寺坂義幸(1997):アジア・太平洋地域オゾン国際比較実施に関する報告. 高層気象台彙報, **57**, 7 - 16.

高野松美・中野辰美・上野圭介・藤原宏章(2019):オゾン全量観測測器の特性調査. 高層気象台彙報, **76**, 11 - 16.

高尾敏則(1996):高層気象台におけるオゾン観測の40年. 高層気象台彙報, **56**, 1 - 6.

V. E. Fioletov, G. Labow, R. Evans, E. W. Hare, U. Köhler, C. T. McElroy, K. Miyagawa, A. Redondas, V. Savastiouk, A. M. Shalamyansky, J. Staehelin, K. Vanicek, M. Weber (2008): Performance of the ground - based total ozone network assessed using satellite data. *J. Geophys. Res.* **113**, D14313, doi:10.1029/2008JD009809.

WMO(1992): Handbook for Dobson Data Re-evaluation. WMO/GAW/Global Ozone Research and Monitoring Project Report, No.29, 122pp.

WMO(2009): Operations Handbook – Ozone Observation with Dobson Spectrophotometer. WMO/GAW No.183, 74pp.

山崎正博(1954):オゾン観測の予備的実験. 高層気象台彙報, **22**, 1 - 17.