

### 3.2 オゾンゾンデ観測

#### (1) オゾンゾンデ研究開発の開始

超高層大気の大気構造とその状態の把握のために、特にオゾン層の正確な観測研究とその常時化などを主要任務として昭和24(1949)年に設置された第2観測課において、オゾンゾンデによるオゾン層の観測手法の研究開発がすすめていた。小型水晶分光器を気球につけて飛ばして、撮影した太陽スペクトルの写真からオゾンの鉛直分布を測定するメテオログラフ方式(図3.3.2)により開発して、昭和31(1956)年から昭和36(1961)年の間に成功した9回の飛揚を報告している(山崎ほか:1957, 清水・山崎:1958, 清水・山崎:1959, 山崎・秋田:1960)。この方法は記録した写真乾板を回収する必要があるため、飛揚できる期間は上層風の弱い夏期に限られたこともあり、やがて気象研究所で開発されたフィルタ式のオゾンゾンデに移行していった。

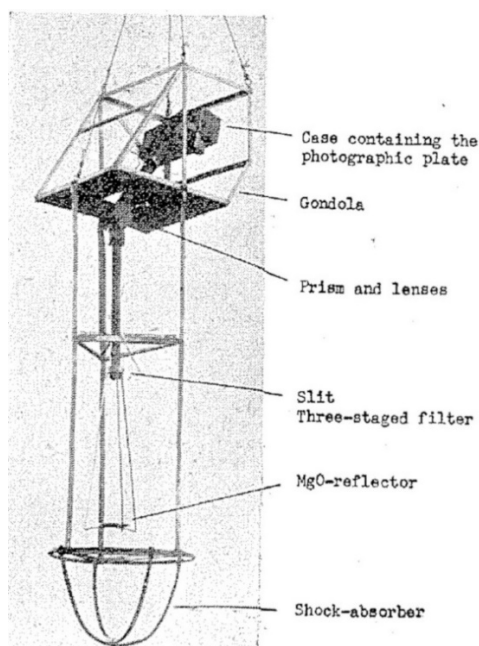


図3.3.2 自記分光写真器によるオゾン観測  
(山崎ほか:1957)。

#### (2) 光学式オゾンゾンデによる定常観測の開始, KC型への移行とその後の改良

わが国では、気象研究所において化学式と光学式のオゾンゾンデが開発されていた。化学式における点滴方式は、気泡の発生を完全に除去することができず飛揚高度が溶液の沸点までであること、また光学式においては、昼間のみとなるうえ、オゾンの積分から鉛直分布の詳細を決める必要があつて計算に時間がかかり、またゾンデの揺れと散乱光の影響があるなど、それぞれ欠点があ

られていた。高層気象台では、「ふいご」で吸い込んだオゾンによるルミノールの発光を利用した乾式化学ゾンデによる試験観測を昭和39(1964)年8月に行い、その後も電源・感光面の安定や軽量化等の改善を図っていた(村松:1965)。一方で、昭和39(1964)年9月には光学式のRSII-OP64型オゾンゾンデ(図3.3.3)の試験観測を行い、同年10月の札幌・鹿児島に続き、翌昭和40(1965)年末に光学式による定常観測を開始した。

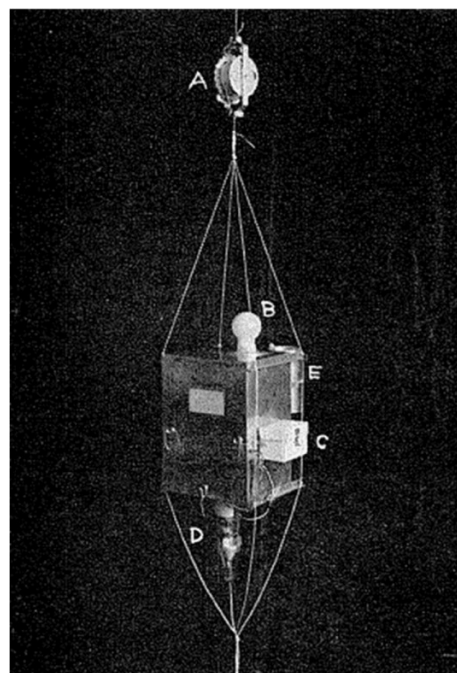


図3.3.3 RSII-OP64型オゾンゾンデ

さらに、気象研究所で開発されて、南極昭和基地で第7次隊(1966年)以降使用された、他に比べて取り扱いが比較的簡単で汚染等の影響も少ない、ヨウ化カリウム(KI)溶液と空気中のオゾンとの化学反応により生じる電流を利用するKI solution and Carbon electrode型(KC型)のオゾンゾンデであるRSII-KC65型(図3.3.4)を、定常観測用に取り扱いが簡単になるよう改良したKC68型を開発して、これを昭和43(1968)年から定常的に運用することとなった。高層気象台では、KC65型を現業用に改良する基礎資料を得るため、地上試験と数十回の飛揚試験を昭和43(1968)年に行った(鈴木・大野:1969)。

昭和54(1979)年に、気象研究所でオゾン測定部に単管式反応管を利用して小型・軽量化し、IC回路を用いて電気系統に改良を加えたKC79型と従来型のKC68との比較観測を実施して、同年10月にRSII-KC79型オゾンゾンデの本格運用を開始した(廣田・村松:1986)。昭和63(1988)年に、それまで月一回程度であったオゾンゾン

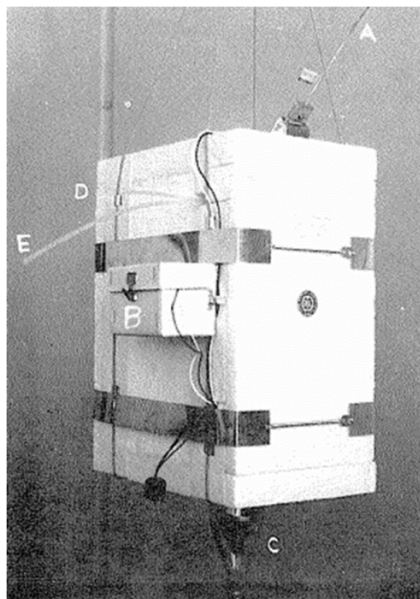


図 3.3.4 RSII-KC65 型オゾンゾンデ

デの飛揚が毎週一回とされた。

KC79 型オゾンゾンデの高高度観測中に、オゾン反応電流の急激な減少や反応停止が発生するため、平成 7(1995)年に反応管内の気泡の発生状況を把握する試験を行い、ポンプによる吸気量の減少と炭素電極部から発生する気泡による連結穴の閉塞が原因と特定した(須田ほか：1996)。

平成 6(1994)年に、気圧・気温測定部を RS2-91 型レーウィンゾンデと同等のものに変更して高度分解能の向上と取り扱いの特殊性を可能な限り排除することを目的とした RS2-KC96 型の飛揚試験を行い、平成 9(1997)年に、RS2-KC96 型オゾンゾンデ(口絵 17)の運用を開始した。

### (3) オゾンゾンデの国際比較観測

気象庁は改良を重ねながら継続して KC 型を使用してきたが、世界では Electrochemical Concentration Cell 型(ECC 型)や Brewer-Mast 型(BM 型)の電気化学式オゾンゾンデが定常観測に用いられてきた。ECC 型オゾンセンサは KC 型と同じく電気化学式オゾンセンサであるが、KC 型の反応管は単管であるのに対し、ECC 型は複管で濃度の異なる反応液を規定量注入する必要がある。データの均質性確保や各測器の特性を把握するため、国際オゾン委員会と WMO は、1964 年以降数度にわたり国際オゾンゾンデ相互比較観測を行ってきた。気象庁は、昭和 45(1970)年、昭和 53(1978)年に西ドイツ・ホーエンバーゼンベルクで開催されたオゾンゾンデ国際比較観測に RSII-KC68 型で参加した。以降も、平成 3(1991)年カナダ・

サスカトゥーンでのオゾンゾンデ国際相互比較に RSII-KC79 型で参加、平成 8(1996)年、平成 12(2000)年ドイツでの光学的測器(フォトメータ)を基準器とした室内比較実験 JOSIE1996 に RSII-KC79 型で、JOSIE2000 に RS2-KC96 型で参加、平成 16(2004)年米国で開催された、各国で運用中の各種ゾンデと前述の基準器を一つのゴンドラに乗せて飛揚する国際比較観測(BESOS2004、図 3.3.5)に RS2-KC96 で参加した。表 3.3.4 に気象庁が参加したオゾンゾンデ国際比較を示す。平成 8(1996)年以降の国際比較より、KC 型オゾンゾンデによるオゾン観測値に下層側で過小評価、オゾン量が最大を示す高度より上層で過大評価する傾向のあることが明確となった。

表 3.3.4 気象庁が参加したオゾンゾンデ国際比較

| 実施年           | 場所                   | オゾン<br>ゾンデ | 実験方法     | 基準器    |
|---------------|----------------------|------------|----------|--------|
| 昭和45年<br>1970 | 西ドイツ                 | RSII-KC68  | 連結<br>飛揚 | なし     |
| 昭和53年<br>1978 | 西ドイツ                 | RSII-KC68  | 連結<br>飛揚 | なし     |
| 平成3年<br>1991  | カナダ                  | RSII-KC79  | 連結<br>飛揚 | なし     |
| 平成8年<br>1996  | ドイツ<br>(JOSIE 1996)  | RSII-KC79  | 室内<br>実験 | フォトメータ |
| 平成12年<br>2000 | ドイツ<br>(JOSIE 2000)  | RS2-KC96   | 室内<br>実験 | フォトメータ |
| 平成16年<br>2004 | アメリカ<br>(BESOS 2004) | RS2-KC96   | 連結<br>飛揚 | フォトメータ |

近年では、平成 28(2016)年に英国・エディンバラで開催されたオゾンゾンデ専門家会合及び国際オゾンシンポジウム、平成 29(2017)年のオゾンゾンデ国際比較(ドイツ・ユーリヒ)、平成 30(2018)年のオゾンゾンデ標準操作手順の評価パネル会合(スイス・ジュネーブ)に、高層気象台から参加している。

### (4) 研究観測への協力等

昭和 54(1979)年、気象研究所への研究協力として、成層圏フレオン(フッ化炭化水素の商品名)のゾンデ観測を 9 月まで実施した。平成 4(1992)年の初めには、国立環境研究所との研究協力によりオゾンゾンデ特別観測を実施、以後平成 14(2002)年まで毎年冬季から春季にかけて 10 回程度、環境研究総合推進費によるオゾンゾンデ観測を実施した。また、高層気象台では、オゾンゾンデ国際比較の準備として RS2-KC96 型オゾンゾンデと RS-KC02G



図 3.3.5 BESOS field campaign, USA, at April 2004

18 台のオゾンゾンデと基準となるフォトメータ等を搭載したゴンドラを吊り下げたポリエチレン気球の飛揚風景 (WMO(2008)より引用)。

型オゾンゾンデの連結飛揚を平成 15(2003)年に実施している。また南極観測事務室からの依頼により、RS2-KC96 型と RS-KC02G 型の連結飛揚実験を平成 16(2004)年に行っている。

#### (5) KC 型から ECC 型への移行と GPS ソンデ化

高層気象台は平成 12(2000)年末から翌年初めに、気象研究所の KC96 型と ECC 型オゾンゾンデの連結飛揚調査に協力した。また、オゾンゾンデ国際比較において指摘された KC96 型オゾンゾンデによる対流圏下部のオゾン測定値の過小評価状態について、その実態と要因を調査するために、KC96 型のオゾン慣らしの効果の持続性・再現性やポンプの吸気性能の確認、オゾンを壊しにくいとされる材質を使用する ECC 型のポンプ部との比較、飛揚前点検において、基準オゾン濃度空気の注入に対して反応電流の少ないものとそうでないものの連結飛揚実験を、平成 16(2004)年から平成 18(2006)にかけて行って、オゾン慣らし時間の延長により過小評価状態の改善が見込まれることを明らかにした(鎌田ほか：2007)。

平成 17(2005)年には南極昭和基地に GPS 高層気象観測システムを設置、試験運用を開始しており、昭和基地に

において使用可能な GPS ソンデと ECC 型オゾンセンサを組み合わせたオゾンゾンデを導入する必要が生じていたことから、高層気象台では ECC 型オゾンゾンデの性能検査及び KC 型オゾンゾンデとの比較のため連結飛揚を、平成 19(2007)年から翌年にかけて月一回計 3 回実施している。この試験では、GPS ソンデに RS-06 GM 型 GPS ソンデが使われた(中村ほか：2008)。KC 型の運用終了後の平成 27(2015)年には、過去の KC 型オゾンゾンデ観測データの反応電流補正アルゴリズム改善に資するため、KC 型オゾンセンサの反応電流・暗電流について、反応液温度依存性を調査する実験の結果をとりまとめている(岩渕ほか：2015)。

世界的なオゾン層観測網において、ECC 型オゾンゾンデが実質的な世界標準となるなか、国際比較観測結果によるオゾンセンサの特性を把握して、KC 型と ECC 型との観測値の正確な比較が可能となったことや、データ品質、データ処理作業への影響などを総合的に考慮した結果、気象庁はオゾンセンサを KC 型から ECC 型に切り替えることとして、地上設備の更新に合わせて、平成 20(2008)年から平成 22(2010)年にかけて、南極昭和基地を含む気象庁の全観測官署において ECC 型へ移行した。高層気象台では、平成 21(2009)年から RS92-SGP 型 GPS ソンデ(口絵 17)を用いた ECC 型オゾンゾンデ観測を開始した。なお、ECC 型オゾンセンサは EN-SCI 社と Science Pump 社の 2 社が製作しており、気象庁では前者を使用している。

平成 21(2009)年に ECC 型の使用を開始してから 10hPa 付近でオゾン分圧値が不自然に急上昇する現象が時折見られるようになり、反応液の沸騰、高湿度によるインターフェースボードの結露及び反応液飛散による同ボードの短絡について調査・再現実験を行い、反応液減圧時に反応液に溶け込んでいた空気から気泡が発生し、さらに反応液そのものが沸騰することによる気泡がイオンブリッジを覆い、イオンブリッジの流れを遮断してしまう可能性を示した(矢代ほか：2014)。インターフェースボードについては、金属カバーで保護されるようになった。

平成 25(2013)年 7 月に簡易型 GPS 高層気象観測装置と RS-11G 型 GPS ソンデによる観測が開始されたことを受けて、オゾンゾンデ観測においても、同年 9 月から RS-11G(E)型 GPS ソンデを用いた ECC 型オゾンゾンデによる観測を開始した。その後、令和 2(2020)年に調達する GPS ソンデが変更となったため、2021 年 1 月に Vaisala RS41 型 GPS ソンデを用いた ECC 型オゾンゾンデによる観測へと切り替わった。

## (6) ポンプ効率測定装置の開発と現業化

電気化学式のオゾンゾンデは、大気を吸入し反応管へと導く小型のポンプを内蔵している。このポンプは周囲の気圧低下に従い流量(体積流量)が低下する特性があるため、地上での流量に対する比率をポンプ効率として上空大気の吸引速度補正に用いる。従来、ポンプ効率は、理論式、開発時の実験値や製造元の推奨値といった平均値のテーブルが利用されていた。高層気象台では、平成 19(2007)年に、個々のオゾンゾンデに内蔵されるポンプの低下圧におけるポンプ効率を測定する装置を開発した。現在は、流量測定法としてエアバッグ方式を採用した流量計を製作(図 3.3.6)し、ECC 型のポンプを用いたポンプ効率の測定試験を行っている。

なお、平成 29(2017)年にドイツ・ユーリヒで開催されたオゾンゾンデ国際比較(JOSIE-SHADOZ 2017)では、ポンプ効率測定の専門家として高層気象台の中野研究官が招請されて、技術指導を行った。



図 3.3.6 ポンプ効率測定装置

## (7) オゾンゾンデの安全対策

オゾンゾンデは重量が重く、気球やパラシュートが大型となり、吊り紐も長いので、落下位置が主要空港周辺や大都市市街地等に予測される場合は、落下時の安全を考慮して翌日以降に飛揚を延期していた。その飛揚の可否判断に用いている落下位置推定プログラム(木津・川上：1994)において、気球原材料の変更等によりパラメータで設定した気圧に到達しない事例が多くみられるようになり、またパイプセパレータ付パラシュートとオゾンゾンデ用パラシュートを使用することから、ゾンデの到達気圧とパラシュート別降下速度について調査し、平成 20(2008)年にパラメータの再設定を行った(伊藤・奥山：2008)。その後も、平成 23(2011)年にオゾンゾンデ用パラシュート(190 型)への適合と、各種パラメータの調整による精度改善を図っている。また平成 25(2013)年末には、

吊り紐の調査のため同時飛揚を 10 回実施している。

## (8) 観測成果と将来展望

高層気象台におけるオゾン層観測は、当初は超高層大気の熱機構とその状態の把握のために、特にオゾン層の正確な観測研究を行ってきたが、その後のオゾン層破壊、地球温暖化といった地球環境問題にかかわる重要な観測として社会の要請に強く裏付けられた観測を行っている。

オゾン層の観測には、衛星やライダーによる観測等のリモートセンシング技術をベースにした観測手法が開発されているが、ブリューワーによる反転観測よりも細かな解像度で対流圏まで含めてオゾンの鉛直プロファイルを直接観測できるオゾンゾンデ観測は、それらのデータの補正や検証の基準データとして利用される(高尾：1990)ほかに、化学気候モデルのパフォーマンスの確認に用いられてきた(環境省：2019)。また、気象庁は、過去の国際比較における KC 型や ECC 型とオゾンゾンデ世界校正センター(WCCOS)の基準器との比較実験結果に基づくオゾンゾンデ観測データの均質性向上に取り組んでいる。

今後、大気組成変化も扱う地球システムモデルが発展し、短期予報や季節予報がそれで行われるようになると、オゾン観測データの利用価値が広がることが考えられる。近年の研究成果によると、全球のオゾン層は 21 世紀中頃には 1980 年代のレベルに回復することが予測されているものの、地球温暖化など将来の気候変動によって影響を受ける可能性が指摘されている。このため、今後も継続的に観測データを取得し、オゾン層の変化を監視する必要がある。2019 年に世界でオゾンゾンデ観測を実施している地点の分布を図 3.3.7 に示す。

今後も国内唯一のオゾンゾンデ観測地点として、継続的かつ高精度な観測データの取得、及び的確な業務遂行を進めていきたい。高層気象台において観測に使用したオゾンゾンデの履歴を図 3.3.8 に示す。

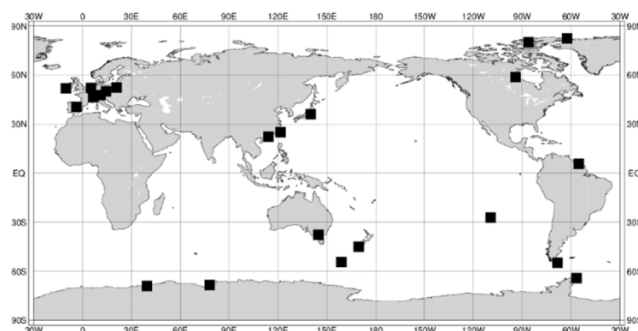


図 3.3.7 オゾンゾンデ観測地点の分布(2019 年)

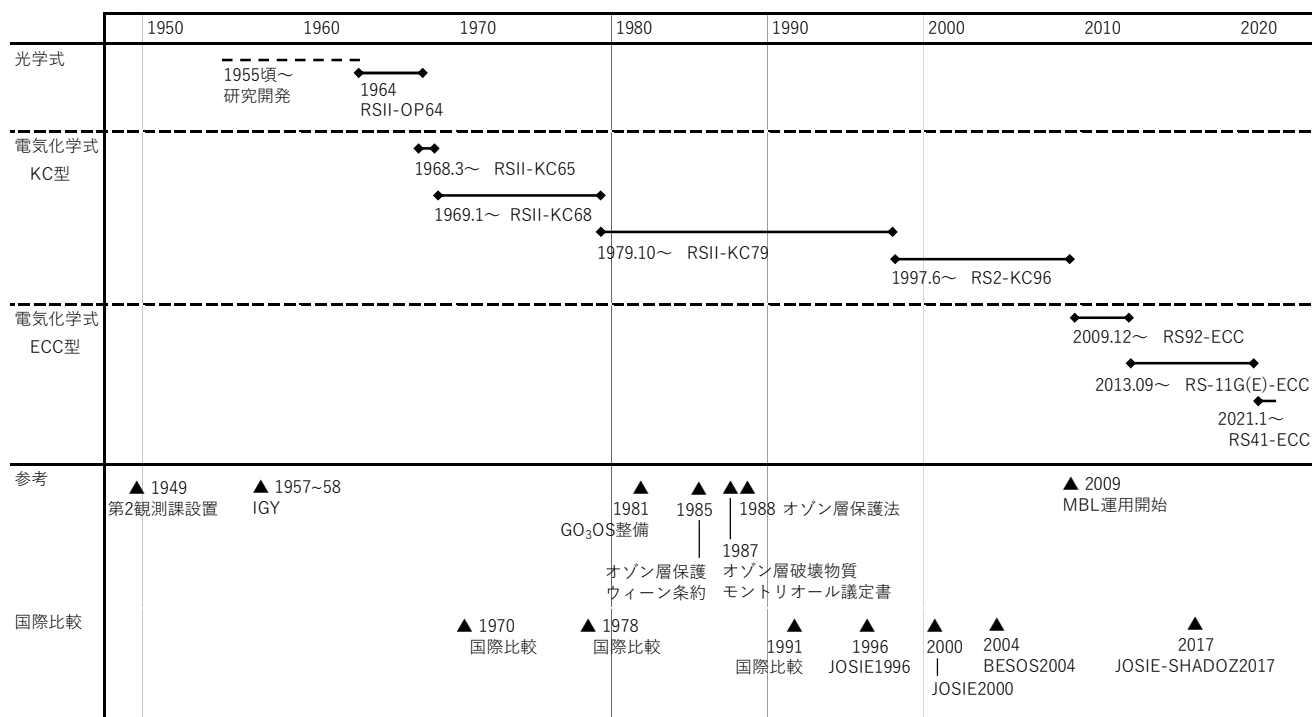


図 3.3.8 オゾンゾンデ観測における使用オゾンゾンデの履歴

## 参考文献

- 林田佐智子・竹内綾子・金谷有剛・高島久洋・藤原正智・宮崎和幸・笠井康子 (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.
- 廣田道夫・村松久史 (1986): KC79 型オゾンゾンデ用オゾンセンサーの性能試験. 研究時報, **38**, 115-118.
- 伊藤智志・奥山順健 (2008): オゾンゾンデの飛行予測シミュレーションプログラムのパラメータの再設定. 高層気象台彙報, **68**, 23-36.
- 岩渕 真海・金子 祐也・中野 辰美・伊藤 智志 (2015): KC 型オゾンゾンデの反応電流及び暗電流の温度依存性. 高層気象台彙報, **73**, 25-34.
- 鎌田浩嗣・茂林良道・岩野園城・佐々木利・伊藤智志・岩渕真海・野村幸弘・岩坪昇平 (2007): RS2-KC96 型オゾンゾンデの対流圏下部におけるオゾン測定 of 改善. 高層気象台彙報, **67**, 75-84.
- 環境省 (2019): 平成 30 年度オゾン層等の監視に関する年次報告書. 環境省地球環境局, 239pp.
- 気象庁 (2008): オゾンゾンデ観測指針 KC 型編. 気象庁地球環境・海洋部, 57pp.
- 気象庁 (2010): オゾンゾンデ観測指針 ECC 型編. 気象庁地球環境・海洋部, 46pp.
- 気象庁 (2018): オゾン観測指針 オゾンゾンデ観測編. 気象庁地球環境・海洋部, 46pp.
- 気象庁 (2019): オゾン層・紫外線の年のまとめ(2018 年). 気象庁地球環境・海洋部, 51pp.
- 木津暢彦・川上勝弘 (1994): オゾンゾンデ及び現用のレーウィンゾンデの落下予想. 測候時報, **61**, 117-122.
- 村松久史 (1965): 化学発光物質を用いたオゾンゾンデの試作(第 1 報). 研究時報, **16**, 645-650.
- 中村雅道・岩野園城・松元誠・辰己弘・伊藤智志 (2008): KC 型オゾンゾンデと ECC 型オゾンゾンデの相互比較観測について. 高層気象台彙報, **68**, 7-14.
- 中野辰美・岩野園城 (2008): エアバッグ方式流量計を用いたオゾンゾンデ用ポンプ効率測定装置の開発. 高層気象台彙報, **68**, 43-50.
- 日本気象学会 (1992): オゾン研究の展望. 気象研究ノート, **No.175**, 86pp.
- 日本気象学会 (2014): 高層気象観測の発展と現状. 気象研究ノート, **No.229**, 182pp.
- 清水正義・山崎正博 (1958): 自記分光写真器によるオゾンの垂直分布の観測(2). 高層気象台彙報, **26**, 1-3.
- 清水正義・山崎正博 (1959): 自記分光写真器によるオゾンの垂直分布の観測(3). 高層気象台彙報, **27**, 1-4.
- 須田智・阿部豊雄・坂尻政市 (1966): 成層圏における KC79 型オゾンゾンデの測定不良とその原因について. 高層気象台彙報, **56**, 37-44.

- 鈴木剛彦・大野勇太 (1969): カーボン電極型オゾンゾン  
デの現業化のための試作と試験. 天気, **16**, 549-556.
- 高尾俊則 (1990): オゾン観測資料の利用について. 天気,  
**37**, 31-40.
- 高層気象台 (1950a): 高層気象台創立 30 年の回顧と現況.  
高層気象台彙報特別号, 72pp.
- 高層気象台 (1950b): 長峰回顧録集. 高層気象台彙報特別  
号付録, 102pp.
- 高層気象台 (1978): 高層気象台 50 年誌. 47pp.
- WMO (2008): Global atmospheric ozone monitoring. Bulletin,  
**57**, <https://public.wmo.int/en/bulletin/global-atmospheric-ozone-monitoring> (2020.11.26 閲覧)
- WMO (2014): Quality Assurance and Quality Control for  
Ozonesonde Measurements in GAW. GAW Report 201,  
87pp.
- 矢代和也・萩谷聡・宮林直人・岩渕真海 (2014): オゾン  
ゾンデ観測において 10hPa 付近で発生するオゾン  
分圧値の急上昇について. 高層気象台彙報, **72**, 1-34.
- 山崎正博・清水正義・福田寿彦・秋田貞一 (1957): 自記  
分光写真器によるオゾンの垂直分布の観測. 高層気  
象台彙報, **25**, 45-54.
- 山崎正博・秋田貞一 (1960): 自記分光写真器によるオゾ  
ンの垂直分布の観測(4). 高層気象台彙報, **28**, 69-71.