### 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。

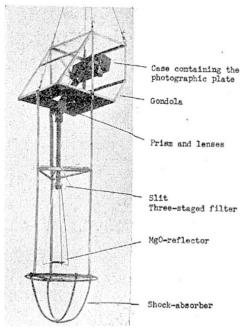


図 3.3.2 自記分光写真器によるオゾン観測 (山崎ほか: 1957).

# (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 を決める必要があっ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、それぞれ欠点があげ 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.

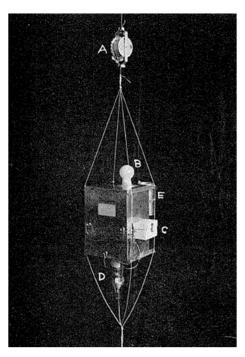


図 3.3.3 RSII-OP64 型オゾンゾンデ

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

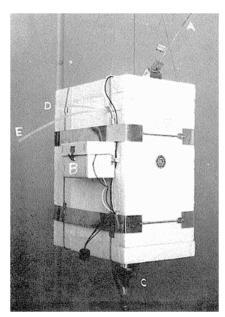


図 3.3.4 RSII-KC65 型オゾンゾンデ

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ブ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・

サスカツ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  | 連結飛揚     | なし     |
| 昭和53年 1978    | 西ドイツ                 | RSII-KC68  | 連結<br>飛揚 | なし     |
| 平成3年 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  | 室内実験     | フォトメータ |
| 平成12年 2000    | ドイツ<br>(JOSIE 2000)  | RS2-KC96   | 室内実験     | 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 ゾンデ化

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

おいて使用可能な GPS ゾンデと 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 ゾンデに RS-06 GM 型 GPS ゾンデが使われた(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ゾンデ(口絵17)を用いたECC型オゾンソ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 ゾ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 ゾンデを用いた 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 ゾンデが変更となったため、2021年1月に Vaisala RS41型 GPS ゾンデを用いた 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圧下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、吊り紐も長いため、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較正センター(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.

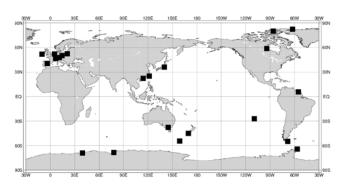


図 3.3.7 オゾンゾンデ観測地点の分布(2019年)

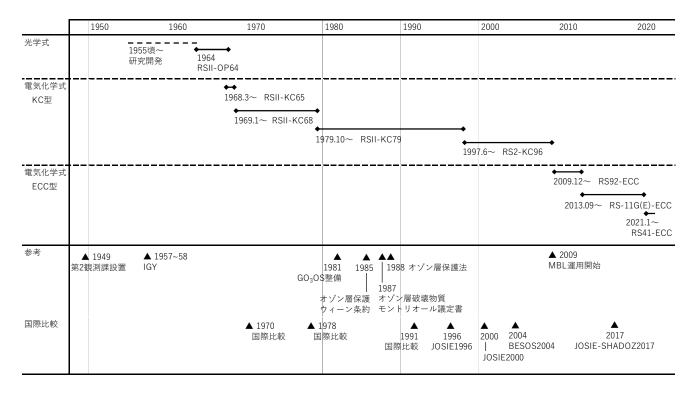


図3.3.8 オゾンゾンデ観測における使用オゾンゾンデの履歴

#### 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): オゾンゾンデの飛翔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の改善. 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.