

第1部 高層気象台の沿革

第1章 概説

1. 高層気象台の設立と創業期の業務

(1) 高層気象観測をめぐる当時の情勢

高層気象台の設置は大正9(1920)年であるが、欧米ではそれより以前の19世紀末から20世紀初めにかけて高層気象観測所が次々と開設されている。その背景には、オーストリアのハン(J. Hann)による気象学の重要な発見があった。ハンは標高3105mのゾンプリック山での気象観測データを用いて、(地上とは異なり)上空では低気圧は寒冷で高気圧は温暖であることを示し、その結果から高・低気圧は熱的ではなく力学的な成因から生ずるとする論文を明治24(1891)年に発表した。岡田・荒川(1956)によれば、気象学において大気の鉛直構造を知ることの重要性を示したこの発見は、自由大気における高層気象観測実施の流れを加速した。

各国の高層気象観測所の開設者には著名な気象学者が顔を揃えている。明治29(1896)年にフランス・トラップ観測所を創設したのは、その後明治35(1902)年に成層圏を発見したテスラン・ド・ボール(L. P. Teisserenc de Bort)で、明治38(1905)年開設のドイツ・リンデンベルグ高層気象台の初代台長は、テスラン・ド・ボールと同時期に成層圏を発見し、また、アスマン通風乾湿計を考案したアスマン(R. Assmann)であった。彼らは、自由気球に自記測器とパラシュートを付けて飛揚し、落下・回収した後に記録を読む探測気球の観測に基づき成層圏を発見した(Baldwin et al. : 2019)。イギリスのパートン・ヒル観測所を作ったのは、ダインス風速計の開発者で後に「ダインスの補償の原理」を発見したダインス(W. H. Dines)であった。19世紀末以降における欧米諸国での高層気象観測事業の開始は、大気の三次元的な構造を把握可能とする点で、気象学に新たな展開をもたらした。

我が国においては山階宮菊麿によって、明治35(1902)年に日本最初の山岳観測所として筑波山観測所が開設されている。このころ、硬式飛行船ツェッペリンの完成(明治33(1900)年)、ライト兄弟の動力初飛行(明治36(1903)年)をはじめ、航空技術の発達と実用・軍用化が進んだ。我が国においても明治42(1909)年の臨時軍用気球研究会の設置(中央気象台技師の委員任命)、明治43(1910)年、日野・徳川両大尉による動力飛行機の初飛行が行われ、これらに供する高層気象観測の研究の必要性が高まってきた。

(2) 高層気象台の設置

明治43(1910)年3月12日、発達した低気圧の房総沖

通過により多数の漁船が転覆し、1000名近い死者行方不明者を出す災害となったため、第26帝国議会において同年3月22日に茨城県出身の衆議院議員根本正が緊急質問としてこの問題を取り上げ、気象の研究や天気予警報に資する高層気象観測の必要性を説いた。同日「高層気象観測所設置建議案」が渡辺千冬ら多数の議員により提出され、翌日に可決された。根本、渡辺は設置に関する予算計上が見送られる中、翌年以降の議会においても建議案を提出し、「近年の研究によると高低気圧は大気の高層にその動源を有し、その進行及び盛衰は高層の温度、湿度等で定まる。故に高層の気象を観測すれば暴風雨の発生もその兆候において発見が出来、予警報が確実になる。政府は速やかに高層気象観測所を設置されたい」と望んだ(山岡：1953)。

明治43(1910)年の建議案可決を受け、翌明治44(1911)年、中央気象台観測課長大石和三郎(口絵1)は、リンデンベルグ、トラップ、パートン・ヒル、ブルーヒル、マウントウェザー等、欧米の高層気象観測所や山頂観測所に派遣され、観測技術を習得し、約2年後に帰国した。帰国後も設置の予算は通っていないが、大石は茨城県内数か所において候補地の探索を行った。高層気象観測には凧揚作業のために広大な敷地が必要で、また、凧の鋼索が送電線に接すると危険であるため観測所は人里離れた所に位置しなければならない。大正3(1914)年には東京大林区署を訪れ、農商務省所管の国有林野の不要地の中から、高層気象観測に適した用地を茨城県筑波郡小野川村館野に見出した。その5年後の大正8(1919)年度予算において、観測所の新設がようやく認められ、大正8(1919)年4月24日にその国有林(52ha余り)の文部省への所管換えを東京大林区署長より得た。大石は同年末から翌大正9(1920)年3月にかけて、第一次世界大戦の影響により、所期の目的にあったドイツではなく米国へ渡り、凧揚げ器械、測風気球用経緯儀等の調達にあたった(大石：1950)。そして、大正9(1920)年8月25日、勅令第294号により高層気象台を置くことが定められ、大石は初代台長に任命された。12月4日に筑波郡長等を招き開台式を執り行い、翌日の一般縦覧には約2万人が参観したという。

(3) 観測の開始

高層気象台(観測地点としては、館野、館野、長峰、つくば、と表記されることがある)の現業観測は大正9(1920)年11月1日の地上気象観測により開始された。続いて、大正10(1921)年4月から小気球とそれを目視で追跡するための経緯儀(口絵11)を用いた測風気球観測

(口絵 10)が始まり、12月からは双経緯儀(2点)による観測とした。世界の高層観測所や我が国の測候所等が行っていた一点観測では気球の上昇速度を仮定するが、それを必要としない2点観測は上層風のより正確な観測を可能とした。観測は一日3回実施し、大正13(1924)年には、第3点(赤塚)及び第4点(大角豆)として民有地を買収して観測塔を設置(第3点：昭和5(1930)、第4点：昭和8(1933)年)するなど、正確な観測を期した。

大気下層(3000mまで)の気温・気圧・湿度・蒸気圧・風向・風速の観測は、大正11(1922)年に、風の強い時は凧(箱型)、風の弱い時は係留気球に気象自記器を搭載して開始した(口絵15と口絵12)。凧による観測においては、観測中の凧が高圧線に触れ、大正12(1923)年に増田技手の殉職、大正13(1924)年に牛5頭の感電死という事故が発生している。なお、北岡(1950)によれば、高層気象台における凧による観測で到達高度の最も高い記録は2700m(1930年12月)で、その時の鋼索の長さは5687mであった。また、探測気球による観測(口絵14)が大正12(1923)年から時々行われた。

(4) 観測成果の発表とジェット気流の発見

これら観測の成果は、速報値の旬報については高層気象台気象概報として大正13(1924)年から、そして一年間の観測の詳細と調査結果については高層気象台報告として大正15(1926)年からまとめられ、発行された。さらに調査研究や報告事項について集録した高層気象台彙報を大正12(1923)年に刊行している。高層気象台報告は当初よりエスペラント語で書かれ、高層気象台概報も昭和に入ってからエスペラント語で印刷、国内外の研究機関に送付された。

高層気象台創設6年後の大正15(1926)年には、測風気球による二年間の冬季の観測結果から、海拔10kmにおける70m/sを超える気候的な強い西風一すなわちジェット気流一の存在を世界で初めて示した(Ooishi:1926)。この発見は、米国気象学会100周年を記念して出版された「大気観測システムの100年の進展」(Stithほか:2019)でも紹介されており、大気観測の歴史において世界的に重要な業績であったことがわかる。また、Lewis(2003)は、この測風気球による大正13~15(1924~26)年にかけての観測をラジオゾンデによる昭和46~平成12(1971~2000)年の観測の30年平均と比較し、その正確さを強調している。

(5) 本庄出張所の設立

各国協力して気象・地磁気その他の地球物理上の観測

を行う目的で昭和7~8(1932~33)年に実施された第2回国際極年においては、海への気球落下を避け自記器の回収率を上げるため、飛揚地点を茨城県古河市西方渡良瀬川堤防、及び冬には埼玉県本庄町付近の利根川堤防(群馬県佐波郡名和村八斗島の坂東大橋北端)として、探測気球の臨時観測を行った。その結果、探測気球の飛揚に適していることが立証された本庄町に、同町の協力による敷地寄付等を受けて本庄出張所が昭和12(1937)年に創設され、翌昭和13年3月30日の竣工・開所となった。同年初めには一日3回の地上観測、2月に測風気球観測(一日3回)、3月には探測気球による現業観測が順次開始された。また、昭和15(1940)年には基線的一端として本庄出張所八斗島観測所が設置されている。

同出張所においては、昭和20(1945)年8月15日早朝の空襲により庁舎一棟が全焼したが、疎開中の中央気象台人事課等の職員による搬出により、観測資料の焼失は免れた。

(6) 長峰回顧録

大正9(1920)年の開設から昭和18(1943)年まで23年間にわたり台長を務めた大石は、長峰回顧録(大石:1950)に、敷地の選定などの台設立の準備や構内官舎での生活の苦勞を含め、創業期の出来事を詳しく追想しており、高層気象台創業期の貴重な記録となっている。その中で大石は、「兎も角も世界広しといえども気象台としてかような大面積を有する処は他にはないと余は信じている。永遠を目的とする気象観測のためこの広大なる好適地を永遠に保存したいものである。」と述べている。なお、昭和23(1948)年には、大石台長の業績を記念し、中央気象台関係者の寄付により大石記念館が竣工した。

2. ラジオゾンデによる観測の確立

(1) ラジオゾンデ観測の開始

昭和初期には気球に吊り下げた測器の測定値を無線で地上に送信するラジオゾンデの研究・開発が欧米で行われており、昭和4(1929)年にフランスのビュロー(R. Bureau)が初めて使用に成功し、それにドイツのドウッケルト(P. Duckert)、ロシアのモルチャノフ(P. A. Moltchanov)が続いた(DuBoisほか:2002)。ラジオゾンデ開発の背景には、航空機の発達とともに急速に高まった高層気象観測への要望がある。我が国においては陸軍と中央気象台がやや遅れて開発を開始したが、昭和10(1935)年中央気象台羽田出張所での初の飛揚試験を経て、昭和13(1938)年6月中央気象台布佐出張所において一日1回の現業観測に入った。

昭和 13(1938)年から翌年にかけて行われた気象事業国営移管において、中央気象台のもとに配置された高層気象台では、昭和 19(1944)年 10 月にラジオゾンデの現業観測を開始した。ラジオゾンデは中央気象台 1 号型(口絵 16)のほか、陸軍供与の三式温湿発振器が多く用いられ、特に終戦後は軍放出の三式ゾンデあるいはそれを改良した S43K 型ラジオゾンデ(昭和 22(1947)年から)によって観測が維持された。

第二次大戦の末期、器材特に水素ガスの不足から係留気球の観測が困難となり、昭和 19(1944)年に同観測は中断された。同時に凧による現業観測は終了となり、ラジオゾンデと凧の組み合わせにより一日 1 回程度の観測を続けたが、時折欠測をせざるを得なかった。その後、凧による観測は昭和 21(1946)年に終了した。また、探測気球による現業観測は、昭和 19(1944)年ラジオゾンデの現業観測開始により終了となったが、本庄出張所においては昭和 21(1946)年を除き、昭和 24(1949)年まで飛揚が続けられた。

(2) レーウィン観測の開発

無線による測風観測(レーウィン観測)には、電波を受信するための方向探知機の開発が必要であった。中央気象台において、当時としては画期的であったいわゆる抜山式測風方向探知機が開発されており、昭和 15(1940)年に布佐出張所においてラジオトラッキング用送信機の試作が完了している。

高層気象台では昭和 19(1944)年 4 月にレーウィン受信室を布佐出張所から移設してレーウィンによる高層風観測技術の確立をはかり、9 月以降は経緯儀による観測が不能(曇天時)の場合はレーウィンによる調査観測が行われた。

昭和 24(1949)年に、300MHz の W44 型発振器と三脚上の八木アンテナと受信機で、手動により受信音が最大になる方位・高度角を探す D44 型最大感度式方向探知機を用いたレーウィンが使用されると、単経緯儀による併用観測が増え、同年 6 月には双経緯儀法が完全に終了した。

なお、昭和 21(1946)年には上層気流観測のため軍の財産を譲り受けて銚田臨時出張所を設置し、微気圧変化の研究を行ったが、昭和 24(1949)年に廃止された。

(3) ラジオゾンデとレーウィン観測の確立

終戦後、日本の高層観測は観測技術と観測網が整備確立され、これに伴いラジオゾンデは毎年改良につぐ改良が加えられた。

高層気象台が使用するラジオゾンデは S43K までの搬

送周波数変化式ゾンデから昭和 24(1949)年に符号式の S48 ゾンデ(搬送波 27MHz)への変更がなされた。符号式ゾンデはセンサー部(空ごう気圧計・パイメタル温度計・毛髪湿度計)及び計器部(符号発生機構・モータ)と発振器部等で構成され、気圧・気温・湿度の観測値をモールス符号として送信し、聴受による手書き、またはラジオゾンデ符号自動記録装置によって記録が行われた。高度は気圧-温度(P-T)線図からもとめた各指定気圧面間の層厚の積算により計算された。当時は、到達高度の目標を最低 17km(約 100hPa)としていた。

翌昭和 25(1950)年には国際電気通信条約によるラジオゾンデへの割り当て周波数帯にあたる搬送波 402MHz の S49 型ゾンデ、同年 S50 型、昭和 27(1952)年には符号板が改良された S52 型が使用された。その後レーウィン観測とラジオゾンデ観測を同時に行うためのレーウィンゾンデである RS52 型、RS53 型、RS56 型の運用と変わっていった。

レーウィンにおいても W44 型発振器と D44 型方向探知機(感度がよくなく観測可能高度も低かった)による運用から、昭和 25(1950)年に 408MHz の W49 型発振器への変更があり、同年には特性の等しい 4 個の八木アンテナを配置し、各アンテナからの受信レベルが等しくなる方向を電波の到来方向として方位角と高度角を測定する等感度方式(D49E 型)方向探知機が導入され感度の向上が得られた。D49E 型方向探知機は、ゾンデが S52 型を経て RS52 型から RS56 型へと変更される間も運用された。この間は、ゾンデが雲に入るまで経緯儀、その後の追尾は探知機に切り替える観測方式を実施した。

(4) 高高度までの高層風観測をめざした中継観測

西風の強い冬季には水平距離が大きく、電波の入射角度が小さく地面反射の影響を受けやすくなるため、測風観測における精度が落ちることから、昭和 25(1950)年に本庄で飛揚したレーウィンを館野で中継受信する中継観測を試み、観測高度 20km で水平距離を半分にすることができた。その後、昭和 27(1952)年から昭和 28(1953)年にかけても本庄-館野の中継観測を行った。さらに、昭和 29(1954)年から昭和 31(1956)年にかけては、茨城県の鹿嶋の中継地点として観測を実施している。

中継観測は高高度の上層風の観測が可能となる一方、人手を多く要する。このため、現業的な観測としては実施されなかった。

(5) 昭和 24(1949)年当時の台運営方針

第 2 次世界大戦中から戦後にかけて、戦争のために高

層気象観測の必要が増したことに加えラジオゾンデが導入されたことで、高層気象台は拡張期を迎えた。ラジオゾンデの導入で、現業観測の大気上限が 3km から成層圏下部に達し、当時「高層気象台の高層化」(高層気象台：1950)とも呼ばれた。また、放射と移流が重要な成層圏以上を超高層大気とし、オゾン層やそれに関わる大気放射の観測・研究を開始している。その間、高層気象台の人員は、昭和 15(1940)年に 50 名弱であったものが終戦前には 75 名程度に増え、戦後の軍要員の受け入れで一時は 119 名となった。

しかし、昭和 24(1949)年の人員整理で人員は約 40 名まで減った。その際に台の構成を見直し、それまでの 4 課体制から、総務課、地上と高層気象を担当する第一観測課、超高層気象を担当する第二観測課の 3 課体制とした。

「高層気象台創立 30 年の回顧と現況」(高層気象台：1950)によれば、当時の台運営方針は、

- (i) 超高層大気の正確な状態の把握、熱機構の究明、ひいては之が気象現象(天気変化)に及ぼす役割の研究、に重点を置き之に総力を結集する、
- (ii) 最少限必要な高層常時観測の正確な遂行、及び精度の向上、
- (iii) 諸外国との知識の交換、観測及び研究成果の速報、提供、

であった。この方針に沿って業務を進めたことが、3 節で述べる後年の国際地球観測年への円滑な対応を可能とした、と考えられる。また、中央気象台が昭和 24(1949)年に東京での高層気象観測を中止した。このため、従来そこで行われていた開発等のための試験観測の多くを高層気象台が受け持つこととなり、また、研究観測への協力が増加した(高層気象台：1978)。

(6) 本庄出張所の廃止

本庄出張所では、昭和 24(1949)年頃より観測の対象は接地境界層に移り、低層用探測気球による観測が開始された。また、昭和 26(1951)年、米国よりカイツーン(約 2m³)を購入し係留気球による低層気象観測の開発が開始された。翌昭和 27(1952)年には、気球製作所から購入した 10 m³の流線型気球の係留索として、ビニール被覆の鋼線を縫り合わせたものを導線とし、従来の自記記録器を気球に吊り下げる方式から、気象データが直接地上で得られる方式に変更した。

しかしながら、ラジオゾンデの実用化と後述する D55A 型自動追跡記録型方向探知機の導入にみられる電波測角技術の確立により、探測気球や中継観測の意義が薄れたことから、本庄出張所は昭和 32(1957)年 8 月 31 日

に廃止され、下層気象の業務は高層気象台に引き継がれた。これにより、高層気象台は、総務課、地上と下層気象の観測第一課、高層気象の観測第二課、超高層気象の観測第三課の 4 課制となった。

3. 国際地球観測年(IGY)を契機とする業務の変革

(1) 国際地球観測年(IGY)への参加

高層気象台の業務発展には、国際共同観測などの国際的な取り組みが深く関係している。その中でも昭和 32(1957)年 7 月から昭和 33(1958)年 12 月にかけて実施された国際地球観測年(IGY)は、その後、現在に至るまでの高層気象台のあり方に大きな影響を与えた。

IGY は国際学術連合(ICSU、現在の国際学術会議)による計画案の承認(昭和 27(1952)年)の後、数年間の準備を経て実施された。日本学術会議が昭和 29(1954)年に政府(内閣総理大臣の吉田茂宛て)に提出した IGY の実施に関する要望書には、「全世界の協力によって電離層・高層気象・経緯度の変化およびそれらに係る天文・物理・地球物理諸現象を地球全面で同時に共同観測し、それにより自然界に関する人類知識の飛躍的発展が期待され、通信・航空・天気予報・災害防止その他への利用面における利益ははからざるべきものがある」とあり、学界の意気込みが伝わってくる。

北岡(1955)によれば、気象分野における IGY の狙いは、太陽活動の変化から大気循環の変化に至るすべての現象を世界的規模で観測して、これらの因果関係を究明することにあった。この目的を達成するためにわが国では、(i)太陽放射、地球放射観測の実施、(ii)大気中のオゾン観測(ドブソン分光光度計による)の実施、(iii)高層観測の強化、を計画した。なお、当時、中央気象台高層課長として気象分野の IGY を推進したのは、昭和 23~26(1948~1951)年にかけて第 4 代の高層気象台長を務め、2.(5)項で述べた台の運営方針を決めた北岡龍海である。

高層気象台では上記三項目すべてに対応し、IGY を契機として新たな現業観測を始め、観測の質を向上させることとなった。

(2) 高層気象観測の強化

(ア) 自動追跡記録型探知機の導入と観測時刻の標準化

IGY に先立つ昭和 30(1955)年には国産の D55A 型自動追跡記録型方向探知機が開発され、高層気象台では、これを用いた現業観測を昭和 32(1957)年 4 月に開始した。これとともに指向性の強い送信周波数 1680MHz の RSII56 型レーウィンゾンデが使用された。この改良によって観測精度が大きく向上し、その後、RSII56 型は昭和

57(1982)年までの間、長期間にわたり現業観測に利用された。またゾンデ観測においては、自動符号記録装置により手書き受信の必要がなくなった。IGY では観測時刻が世界的に標準化され(Grant et al. : 2009)、高層気象台の観測時刻もそれに合わせてレーウィンゾンデ観測は 09 時と 21 時とした(レーウィン観測は 03 時と 15 時)。一方、現業的な測風気球観測は同年 9 月に終了した。

なお、D55A 型自動追跡記録型方向探知機の導入により、高層気象台の施設にも変化が生じた。昭和 31(1956)年秋、庁舎増築、気球充填室・水素ガス貯蔵庫移設、円柱状の測風塔の庁舎北方約 60m への新築を行い、翌昭和 32(1957)年に旧測風塔へ同方向探知機のアンテナ設置等を行った。

(イ) 強化観測の実施とエコゾンデ観測

IGY 期間中には、現業観測の到達高度の目標を 50hPa として 2000g の大型気球を用い、この期間中 6 回の世界気象特別観測期間(世界日と呼ばれた)にはそれを 10hPa として一日 4 回の観測を行った。

上層で西風が強い冬季における測風観測の精度をさらに上げるため、地上装置から送信パルスを送った時間とゾンデからの返信パルスを受信した時間差からゾンデまでの直線距離を測定し、それに基づいて風速を図るエコゾンデを用いた観測も実施した。昭和 37(1962)年 2 月以降、高層気象台では 9 時の現業観測を原則としてエコゾンデ(ES58・ES61 型)により行うこととなった。

その後、方向探知機はトランジスタ化した正副切替方式の D55B2(エコゾンデ観測装置は RD56B)への更新が図られ、高層気象台では昭和 47(1972)年にその運用を開始した。昭和 56(1981)年までエコゾンデによる 9 時の定時観測を行った。

(3) 特殊ゾンデ観測

IGY を契機として、特殊ゾンデの定常的な観測化が図られた。IGY において高層気象台では上層大気の電位傾度と電気伝導度を同時に測定する電気ゾンデ、大気中の水蒸気量を測定する露点ゾンデを飛揚した。また、太陽活動極小期国際観測年(IQSY)において、昭和 40(1965)年に長波長放射量の鉛直分布を測定する輻射ゾンデの現業観測を開始した。これらの特殊ゾンデ観測は、あらかじめ計画された観測カレンダーによってゾンデごとに週一回の観測値を得ることを目標に、この年に定常化された。なお、特殊ゾンデ観測のうち、オゾンゾンデと放射能ゾンデについては別途記述する。

高層気象台では、高層課指導のもと、特殊ゾンデの国

際比較を昭和 38(1963)年から昭和 46(1971)年にかけて、複数回実施した。そのうち、気温基準ゾンデの国際比較は、昭和 41(1966)年の WMO 第 18 回執行理事会で採択され、昭和 43(1968)年 12 月に高層気象台で実施されたものである。

(4) ドブソン分光光度計によるオゾン観測

大気中のオゾン観測については、昭和 22(1947)年以降、気象研究所とともに観測手法の開発・研究を進めてきたが、IGY の計画を機にすでに世界標準の測器となっていたドブソン型二重分光光度計(以後、ドブソン分光光度計と呼ぶ)を用いた観測を実施することとし、IGY に 2 年先立つ昭和 30(1955)年 7 月に国際測地学・地球物理学連合(IUGG)の国際オゾン委員会(IO₃C)の定めた方法での現業観測を開始した。

最初のドブソン分光光度計はイギリスのベック社製のものであったが、その後、合計 6 台を島津製作所に発注し、ベック社のものと同時観測して機器の定数決定後、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、各地で観測を開始した。昭和 36(1961)年には南極昭和基地においても観測を開始した。

IGY の大きな成果の一つは、ドブソン分光光度計を用いたオゾン観測網が世界に展開されたことで、IGY の開始時には世界 32 地点、昭和 39~40(1964~65)年の IQSY を経て 1960 年代末には 100 地点ほどでオゾンが観測されるようになった(Bojkov : 2012)。その中で日本の観測網は南極を含め質・量ともに充実したものであり、それが 1980 年代の南極オゾンホール発見にもつながった。

(5) 日射・放射観測の開始

長波放射に関しては、IGY の直前の昭和 32(1957)年に下向き長波長放射量の現業観測を開始、昭和 36(1961)年には測器を通風型放射計に変え、少し遅れて同年内に地面からの上向き長波放射量の観測も同放射計により開始した。短波放射に関しては、IGY の開始と同時に熱電堆式全天日射計による現業観測を開始し、昭和 36(1961)年には地面反射日射量の観測を開始、また直達日射を遮断する太陽直射光遮蔽環装置を開発して昭和 37(1962)年には散乱日射量の観測を始めた。これにより、直達・散乱日射の別も含め、地表面における放射収支の変化を観測することが可能となった。その後、現在まで短波・長波放射観測を続けているが、このように長く放射観測を実施している観測所は世界的にも数地点しかなく、気候変動、地球環境の監視に貴重な観測拠点となっている(例えば、Ohmura : 2009)。

(6) 放射能ゾンデによる大気中の放射能観測

ビキニ環礁における水爆実験による昭和 29(1954)年 3 月 1 日の第五福竜丸事件の後、大気圏内核実験による人工放射能による環境汚染の研究の必要性が高まり、同年 5 月 1 日に日本学術会議は放射線の影響を総合的に研究するため「放射線影響調査特別委員会」を設置した。同委員会の決定を受け、気象庁は昭和 30(1955)年 4 月から全国 15 か所の気象台、測候所、南方定点観測船及び海洋観測船で、雨及び雪の放射能、塵あい(ちり、ほこり)の放射能、海水の放射能の連続的な観測を開始した。一方、原子力基本法の成立を受け昭和 31(1956)年に原子力委員会が発足し放射能調査計画要綱を立案、気象庁の放射能観測も昭和 32(1957)年度からその要綱に基づく放射能調査実施計画の中に位置づけられ、観測項目に上空の放射能等が加わった。

このような状況の中、高層気象台では、気象研究所で開発された放射能ゾンデを用いた観測を昭和 34(1959)年 9 月から開始した。観測開始当初はγ線検出器にガイガー・ミュラー計数管を使用したものであった。大気圏内核実験が減少し上層大気中の放射能が次第に低下したことに対応し、昭和 48(1973)年からはタリウム活性化ヨウ化ナトリウム結晶の放射線による発光を利用したシンチレーション検出器とする、より効率のよい放射能ゾンデに移行した。その後、軽量化などの改良を重ね、国の効率的な観測体制の再検討により気象庁が放射能観測業務を終えた平成 18(2006)年(石井ほか:2006)まで観測を続けた。高層気象台での約 48 年間に渡る放射能ゾンデ観測から、核爆発実験によると考えられる放射能の影響は 1985 年頃まで残っていたこと、昭和 61(1986)年 4 月 26 日のチェルノブイリ原発事故では放射能が成層圏まで拡散したことなどが確認された(塩水流ほか:2007)。

(7) IGY による高層気象台業務の変化

ここまで述べてきたように、IGY を契機に、高層気象台では、世界標準のドブソン分光光度計を用いたオゾン観測と、地上での放射収支監視を可能とする短波・長波放射観測を開始し、従来から行ってきた高層気象観測も大きく改善した。また、それぞれが世界の観測網の中の一観測地点としての性質を持つようになり、その後、基準的な観測地点として、観測手法の改善、標準化、人材育成に貢献することに、高層気象台の役割が変わっていった。日本国内の代表的な高層気象官署から、大気科学観測の世界的な拠点に変わっていくきっかけが IGY であった、と言える。この変化は、1970 年代以降に顕在化するオゾン層破壊や地球温暖化などの気候変動への対応

に生かされることになるが、IGY の目的にあるようにその時点では明示的には意識されていなかったようである。

(8) 筑波研究学園都市の建設と高層気象台

筑波研究学園都市は、国の試験研究機関と大学を集団的に移転して首都の過密防止に寄与するとともに、世界的水準の研究拠点を形成して科学技術、学術研究及び高等教育に対する時代の要請に応えることを目的として建設された。昭和 41(1966)年に都市計画法により関係 6 町村全域が研究学園都市計画区域として決定され、高層気象台が保有する敷地は赤塚・大角豆観測場を除いて同区域に含まれた。昭和 47(1972)年には建設する研究・教育機関等は 43 機関とされ、気象庁においては高層気象台の他、気象測器工場(現気象測器検定試験センター)と気象研究所がそれにあてられた。

高層気象台の敷地については、東側にあった地上観測露場の中央から、北側に設置されていた係留気球格納庫の南西端に引いた、北北西一南南東の線から北東側の敷地を、遊歩道及び工業技術院(現国立研究開発法人産業技術総合研究所)の用地として提供し、面積をほぼ保ったまま細長い形から四角形へと変わることになった(口絵 9)。露場は昭和 48(1973)年庁舎の北西約 30m の地点に 100m 四方で整備され、高層気象台新庁舎は昭和 50 年(1975)年 3 月に完成し、同年 4 月には気象測器工場とともに移転した。5 年後の昭和 55(1980)年 3 月には気象研究所を含め、すべての機関の移転あるいは新設が終了した。筑波研究学園都市の建設により、高層気象台のへき地問題が解消され、また、気象研究所との共同研究・調査を実施しやすくなった。

4. オゾン層破壊問題への対応

(1) オゾン層破壊問題の始まり

第 3 節で述べたように、IGY は高層気象台の業務を大きく変えたが、この変化は 1970 年代以降に顕在化するオゾン層破壊問題への対応に生かされることとなった。

1970 年代に入り成層圏を飛行する超音速航空機(SST)の排気ガスによるオゾン層への影響が懸念されたが、この問題への関心が高い中、昭和 49(1974)年には人為起源のフロンガスから放出された塩素原子によるオゾン層破壊の可能性が提起(Molina and Rowland :1974)され、より大きな社会問題となった。この問題に対応するため、WMO はオゾン観測網の整備・充実などを骨子とする「全球オゾン研究監視計画」を昭和 51(1976)年に立ち上げた。オゾン観測は、IGY を機に IO₃C と WMO の連携のもとでドブソン分光光度計(Dobson and Harrison : 1926)を用い

た観測が世界中に展開され(3節で述べた通り高層気象台は昭和 30(1955)年に現業観測開始), 1960 年代末には世界 100 地点ほどで観測されるようになっていた(Bojkov : 2012)が, 問題の一つはその標準化であった。そこで, WMO では全球オゾン研究監視計画により, 米国海洋大気庁(NOAA)の測器(#83)を国際第一準器(世界準器)とした上で, 全世界を分割した地域に二次準器(地区準器)を置き, それで地区内の測器を校正する世界標準化の体系を作り, そして昭和 56(1981)年にはこれまでの観測網をもとに全球オゾン観測システム (GO₃OS: Global Ozone Observing System)を整備した。

(2) アジア地区準器としてのドブソン分光光度計とその自動化

我が国は, 昭和 52(1977)年に米国・ボルダーで行われた世界準器との国際比較に高層気象台の国内準器(#116)で参加し, それは NOAA による改良も要せずに国際二次準器(アジア地区準器)に指定された。以後, 複数回の国際比較を経て現在に至るまで#116 はアジア地区準器としてあり続け, 地区内の国際相互比較などによるオゾン観測の標準化に不可欠な測器となっている。

高層気象台ではドブソン分光光度計の開発・改良にも長年にわたって取り組み(Miyagawa : 1997 など), 例えば平成 7(1995)年スイス・アローサでの国際比較観測時には「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, さらに測器の校正はとてよく維持管理されている」と高く評価された。オゾンホールが発見につながる南極昭和基地における昭和 57(1982)年 10 月のオゾン全量の大幅な低下(Chubachi : 1984)は, 高層気象台で調整し#116 で校正された測器(#122)で観測された。オゾンホールが発見は, オゾン層の破壊が現実のものであるとの認識を広め, その後のオゾン層保護の取り組みを加速したが, それは高層気象台で地道に続けられてきた観測測器の整備・調整, 開発や観測員の研修によって得ることができた, 高い信頼性をもつデータの蓄積によって成し得たものである。

なお, ドブソン分光光度計は平成 30(2018)年までの 60 年間以上にわたり高層気象台における現業観測に活用された。現在は, 高層気象台ではアジア地区準器の#116 と研究用として#125 他を利用し, また, 南極昭和基地では#119 と#122 を現業観測に利用している。

(3) オゾンゾンデによる観測

ドブソン分光光度計はオゾン全量観測に用いられ, また, それを用いた反転観測という手法でオゾンの鉛直分

布も観測されているが, それらは地上からのリモートセンシングでありオゾン層の微細構造を測るには不十分であった。そこで, オゾンセンサーをラジオゾンデに結合させるオゾンゾンデが開発された。

我が国においては, 昭和 30(1955)年頃から気象研究所と高層気象台でオゾンゾンデが開発され, 高層気象台では昭和 40(1965)年末に光学式オゾンゾンデによる現業観測を開始した。さらに, 気象研究所で実用化されたヨウ化カリウム(KI)とオゾンの化学反応を利用する KI solution and Carbon electrode 型(KC 型)の電気化学式オゾンゾンデ(Kobayashi and Toyama : 1966)の現業運用を昭和 43(1968)年に開始し, 改良を重ね平成 21(2009)年まで続けた。その後, 実質的に世界標準となっていた Electrochemical Concentration Cell 型(ECC 型)に切り替え, 現在に至っている。ECC 型は KC 型と同じ電気化学式オゾンセンサーであるが, KC 型に比べオゾン変化に対する応答が速いなどの特徴がある。

オゾンゾンデに関してもデータの均質性確保や各測器の特性を把握するため, IO₃C と WMO のもとで国際比較が実施されており, 我が国も, 昭和 45(1970)年に西ドイツで開かれたオゾンゾンデ国際比較観測以後参加し, 高層気象台も KC 型と ECC 型の特性比較などでその役割の一端を担っている。

(4) ブリュウワー分光光度計による紫外線観測の開始

ブリュウワー分光光度計(Brewer : 1973)は, ドブソン分光光度計の後継としてブリュウワー(A. W. Brewer)により考案されたもので, カナダ大気環境庁とトロント大学で開発された測器である。ドブソン分光光度計とブリュウワー分光光度計との主な相違点は, 分光用に前者が石英プリズムを, 後者が回折格子を使用していることと, 光強度の測定に前者が光学くさびを利用して二波長の光の強度比を求めているのに対し, 後者が光子計数方式で直接光強度を測定している点にある。ブリュウワー分光光度計はオゾン観測のために考案されたものであるが, その原理から光学的に大きな改造を施さないまま紫外線スペクトル観測に使用できる。

オゾン層破壊により地上に到達する有害紫外線の増加が懸念される中, 高層気象台ではブリュウワー分光光度計による紫外線スペクトル観測の技術開発を進め(伊藤ほか : 1991), 平成 2(1990)年に B 領域波長別紫外線(UV-B)の毎時観測を開始した(札幌, 鹿児島, 那覇では平成 3(1991)年, 南極昭和基地では平成 6(1994)年に開始)。

これらの国内のブリュウワー分光光度計は高層気象台の国内準器(#113)を用いて校正することで標準化してお

り、#113は基準ランプ点検と、世界校正センター(カナダ環境・気候変動省)の国際準器と数年ごとに比較観測を行うことで精度を確保している。なお、オゾン全量の現業観測は、業務の効率化などを理由として平成30(2018)年にドブソン分光光度計からブリューワー分光光度計による観測に移行した。

(5) オゾン層破壊の科学評価への貢献

オゾン層を保護するためのウィーン条約が昭和60(1985)年に、条約に基づきオゾン層破壊物質の規制を定めたモントリオール議定書が昭和62(1987)年に採択され、オゾン層や紫外線の組織的な観測や研究、オゾン層破壊物質の規制等の国際的な枠組みが構築された。モントリオール議定書の取り決めに従い、WMOと国連環境計画(UNEP)は科学者の協力を得つつ、数年に1回のペースで「オゾン層破壊の科学評価」を作成、公表している。また、国内では昭和63(1988)年に成立したオゾン層保護法で、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ことが定められた。これを受けて気象庁では翌平成元(1989)年にオゾン層解析室(平成8(1996)年にオゾン層情報センターに改組)を設置し、気象庁が実施しているオゾン・紫外線観測の結果を中心に、同室で入手した衛星などの観測データを用いて毎年オゾン層の状況を調査解析し、その成果を年次報告として公表している。これらは、オゾン層保護の取り組みへの科学的根拠を与えるものであり、高層気象台はGO3OSの重要な拠点としてこれらの科学評価に貢献している。

平成30(2018)年に発表された「オゾン層破壊の科学評価：2018」によれば、モントリオール議定書の下に実施された施策により、大気中のオゾン層破壊物質の量が減少し、成層圏オゾンの回復が始まっている。また、オゾン全量が1980年(オゾン破壊が顕著になる前の指標となる年)の量に回復するのは、北半球中緯度では2030年代、南半球中緯度では今世紀半ば頃と予測されている。一方、トリクロロフルオロメタン(CFC-11)の予期せぬ増加も解析されており、これらのことはオゾン層の監視と解析が引き続き必要なことを端的に示している。

(6) 地上オゾン観測

高層気象台における地上オゾン観測は、係留気球による下層気象の調査を出発点として昭和51(1976)年から実施、種々の調査研究に用いられ下層オゾンの鉛直分布や日変化、季節変化等を明らかにしてきた(例えば、林：2008)。その一方で大気汚染・地球環境の長期的な変動の

監視に役立てるべく観測を継続してきた一面もあった。昭和63(1988)年に現業観測を開始した高層気象台における地上オゾン濃度観測は、生活圏すなわち汚染された地域における観測という点が、気象庁が国内3か所(綾里、南鳥島、与那国島)で行っている大気バックグラウンド汚染(BG)観測と大きく異なっている。

地上オゾン濃度は、成層圏オゾンや風上からの流入と地表面への沈着に加え、汚染物質である窒素酸化物との光化学反応による生成の結果として観測される。その消長には大気汚染物質と紫外線量が密接に係わっており、大気汚染の原因の一つである光化学オキシダントの大部分がオゾンであることから、環境省の大気汚染物質広域監視システムの測定要素のひとつとして地上オゾン濃度が測定・公表されており、その測定局は全国で1500か所以上ある。

このような背景のもと、近年、地上オゾン観測のあり方について見直しが行われた。その結果、高層気象台が地上オゾン観測継続の主目的としている“大気中でのオゾンの流れの確認や地球環境の長期的な監視”については、前述のBG観測が担っており、“大気汚染の監視”については環境省の密な観測網を構築している状況を踏まえて、高層気象台における地上オゾン観測は平成28(2016)年に終了となった(阿保ほか：2018)。

5. 気候変動問題と日射・放射観測

(1) 気候変動問題の顕在化

IGYにより開始・改善した日射・放射観測は、その後顕在化した地球温暖化などの気候変動問題への対応に生かされることとなった。

IGYで開始されたハワイ・マウナロアにおける二酸化炭素観測から、その濃度の上昇傾向が確認(Pales and Keeling：1965)されたこと、また、放射対流平衡モデルを使った二酸化炭素増に対する地上気温上昇の理論的研究(Manabe and Wetherald：1967)や大循環モデルによる初めての二酸化炭素倍増実験(Manabe and Wetherald：1975)などにより、気候や人為起源の気候変化に対する関心が高まった(Bolin：2007)。

そのような状況の中、気候変動や異常気象の社会・経済活動への影響の世界的な増大や、人為的要因による気候変動へ懸念の高まりに対応するため、昭和54(1979)年に第一回世界気候会議が開かれ、その結果、世界気候計画(WCP)が発足、そのサブプログラムとしてICSUとWMOのもとで世界気候研究計画(WCRP)が発足した。このWCRPがもたらした気候研究の目覚ましい進展は、温室効果気体の増加に伴う地球温暖化の科学的評価を行う

「気候変動に関する政府間パネル(IPCC)」の設置(昭和 63(1988)年)を学術的に可能とした。

(2) 基準地上放射観測網(BSRN)地点としての日射・放射観測

地球温暖化予測の不確実性の原因の一つに、エアロゾルや温室効果ガスの増減が気温を変化させる原動力である日射放射に及ぼす効果について、十分に解明されていないことがあげられる。これらの理解を進めるため、平成 2 (1990)年に WCRP の全球エネルギー・水循環研究計画(GEWEX)の下に基準地上放射観測網(BSRN)が発足した。その目的は、衛星による地球監視、大気大循環モデルの開発改良、地表面放射収支の長期トレンド監視など気候変動に関する分野で活用される、高精度な日射・放射観測データの提供である。

高層気象台では、IGY を契機に日射・放射観測の項目を順次増やし、昭和 37(1962)年には直達と散乱日射の別も含め地表面における放射収支の解析に必要な全成分の観測を開始し、その後、より高精度な観測機器への変更等を行いつつ精度よく現業的に観測してきた。こういった実績のもと、BSRN 地点として平成 8(1996)年からデータ報告を開始し、その高品質なデータは国際的に高い評価を得ている。南極昭和基地が平成 6(1994)年から、また、札幌、福岡、石垣島、南鳥島では新たに高精度な日射・放射観測を開始した平成 22(2010)年(間宮ほか：2012)から BSRN 地点としてデータを報告しているが、これらには高層気象台の調査・研究による知見と技術支援が活かされている。

現在、BSRN 地点は世界で約 60 地点あり、そのデータを用いた多くの研究は気候変動の理解を深め、IPCC による評価にも重要な役割を果たしている(例えば、Wild et al. : 2013)。なお、BSRN 地点の中でも直達と散乱日射量の高精度な観測を IGY 以後長く続けている地点は高層気象台を含め世界で数地点しかない。高層気象台におけるその貴重な観測データは、地表に届く日射量の十年規模の変化とそれをもたらしたエアロゾルの直接・間接影響の評価研究にも活用された(Ohmura : 2009)。

6. 高層気象観測の高度化と気候変動問題への対応

(1) 高層気象観測の自動化と高度化

人工衛星の気象利用開始を背景に、WMO による世界気象監視(WWW)計画が昭和 43(1968)年に開始され、全球観測システム(GOS)、全球通信組織(GTS)、が構築され(高橋ほか：1987)、リアルタイムな全球の気象監視・予測のための高層気象観測の重要性が増していた。このころ、

気象庁では高層気象観測の近代化計画が開始(昭和 46(1971)年)され、観測の効率化、データの均質化、観測通報の迅速化を図るために、信号を計算機処理できるゾンデの開発が進められた(観測部高層課：1974)。

その結果、昭和 56(1981)年 3 月の変調周波数変化式レーウインゾンデ(RS2-80 型)への切替えを経て、昭和 61(1986)年にはゾンデ測定信号及び方向探知機の方位角と高度角の角度信号の収集から各種計算処理、高層気象観測電報の作成送信までをリアルタイムに自動で行う、高層気象観測資料自動処理装置の運用を高層気象台で開始した。さらに、平成 4(1992)年にはパソコンを用いる JMA-91 型高層気象観測装置を導入し、RS2-91 型レーウインゾンデも同年から運用された。これらのゾンデと観測装置の開発・導入において、高層気象台では試験飛揚の実施、新旧ゾンデの連結飛揚による比較観測、日射補正式の検証を行った。

平成 5(1993)年、WMO 第四回ラジオゾンデ国際比較観測を高層気象台で一か月にわたって開催した。我が国の他フィンランド、米国が参加し、一日 3 回、20 日間の飛揚が行われている。参加国のゾンデ間の気圧・気温・湿度及び高度の観測値の系統的な差と、異なるシステムによる風向・風速、風ベクトルの差の評価、指定気圧面のデータの差の定量化等が行われた。

高層気象台は、高層気象観測の自動化に伴うレーウインゾンデの小型軽量化と高度化に合わせて、パラシュートの改良、巻下器の改良、ゾンデの飛翔予測シミュレーションプログラムの開発、そして全国の高層気象観測に携わる職員に研修を実施するなど、日本の高層気象観測の技術センターとしての役割を果たした。また、平成 6(1994)年 4 月から平成 9(1997)年 3 月までの 3 年間、高層気象台は気象庁観測部・予報部・気象研究所と共同して「ウィンドプロファイラによる風観測の定常化に関する業務実験」を実施し、その成果は平成 13(2001)年に開始された全国におけるウィンドプロファイラ観測網による高層風観測の現業化に活かされた。

(2) GPS 高層気象観測の開始

方向探知機方式は、パラボラアンテナ等地上設備が大がかりであり、ゾンデ信号の高度角が低くなると、電波が地面反射の影響を受けて測角精度が低下することや、観測地点近くのビルの高層化によって電波が遮られ、観測ができなくなる部分が生じるなどの弱点がある。さらに方向探知機でゾンデを自動追跡して得られる航跡から、ゾンデの単位時間当たり(通常 1 分毎)の移動方向(風向)と移動距離(風速)をもとめる高層風観測においては、時

間・高度分解能に限界がある。このようなレーウィンゾンデ観測の弱点を解消した方式のラジオゾンデが GPS ゾンデである。

高層気象台においては、平成 8(1996)年に Vaisala 社製 GPS ゾンデの試験観測、平成 9(1997)年の Vaisala 社製オメガゾンデと GPS ゾンデの連結飛揚試験、平成 9(1997)年から平成 10(1998)年にかけての「つくば域降雨実験」のための GPS ゾンデ観測の支援など、数々の GPS ゾンデの飛揚を実施した。その後、様々な試験や比較観測を行い、平成 21(2009)年 12 月に GPS ゾンデによる常時観測を開始した。方向探知機を用いた高層気象観測は、その後も比較観測のために使用したが、平成 22(2010)年 10 月の観測を最後に終了した。

GPS ゾンデの導入により、詳細な位置情報を含む 1～2 秒間隔の時間分解能の高い観測が可能となり、それにより数値予報のメソ解析での利用データ数が従来の 1.5 倍以上に増加し、大気の流れや気温、水蒸気の鉛直分布の情報により高密度に得られるようになった。これにより数値予報による降水予測の精度が向上した(気象庁予報部：2016)。

(3) GCOS 基準高層観測網(GRUAN)と高層気象台

平成 2(1990)年に開催された第二回世界気候会議では全球気候観測システム(GCOS)の構築が提唱され、WMO、UNEP、ICSU、政府間海洋員会(IOC)のもとに平成 4(1992)年に活動を開始した。GCOS は GOS などの既存の観測システムも活用した、大気、海洋、陸面及び生物圏の気候系全体を対象とした総合的な観測システムである(気象庁：1999)。気候変動に関する国際連合枠組み条約(UNFCCC)は、温室効果ガスの削減だけでなく気候変動に関する研究と組織的観測についても定めており、その組織的観測を担うのが GCOS である。

GCOS は既存の GOS を活用した気候監視に耐える高層観測システム(GUAN)の観測点として、平成 7(1995)年に世界で約 150 か所の高層気象観測所を選定し、日本では札幌、館野、鹿児島、石垣島、父島、南鳥島、及び南極昭和基地が指定された。高層気象台(館野)は、GUAN の観測点として平成 11(1999)年 7 月から高高度レーウィンゾンデ観測を実施した。加えて、UNFCCC からの要請を受けて平成 16(2004)年に策定された GCOS 実施計画において、長期にわたる気候変動監視の基準となる高精度の高層気象観測データの取得などを目的とした観測網の確立が課題とされ、それを受け GCOS 基準高層観測網(GRUAN)の構築が進められた。気象庁は平成 21(2009)年に長期間の高品質な高層気象観測データを有する高層気

象台を GRUAN 観測所に登録して、その構築に参加した。

高層気象台は、平成 24(2012)年に GRUAN が運用を始めた登録サイトが確実かつ継続的に活動を行うための「サイト認証制度」と、高層気象観測が気候監視を目的とした基準となるための「ゾンデ認証制度」に基づく認証の取得を目指した。このうちサイト認証については、様々な観測手法による比較観測の実施など、認証に求められる厳しい要件を満たすことで、平成 30(2018)年 4 月に取得した。現在、GRUAN のサイト認証されている観測地点は世界で 12 地点であり、そのうちの一つである高層気象台は、まさに世界の基準となる高層気象観測所であると言える。一方、ゾンデ認証については、認証を受けるための論文と技術文書の作成等を行い、平成 31(2019)年 4 月に RS-11 型 GPS ゾンデの認証を取得した。

高層気象台では、GCOS による GUAN や GRUAN の構築以前から、現業観測のゾンデ更新の際には連結飛揚による特性比較観測を実施してきた(阿部：2016)。この結果を用いて観測値を補正することにより、IGY 以降の 60 年間以上に渡る均質な観測データを得ることができ、また、それは札幌など国内の他の観測地点にも適用でき、それらは気候変動の長期監視や研究にとって貴重なデータとなる(古林：2016)。

(4) 高層気象台での係留気球観測

昭和 32(1957)年の本庄出張所の廃止に伴い高層気象台に係留気球を用いた観測を引き継いだ。その観測頻度は 1970 年代には通常年間 30～60 回程度で、1980 年代前半には 100 回を超える年もあった。気象研究所や大学等との共同研究も行なわれ、昭和 49(1974)年と翌昭和 50(1975)年には ICSU と WMO との共催の全球大気開発計画の副計画「気団変質に関する総合観測(AMTEX)」の冬季観測に参加し、宮古島での観測を実施した。観測結果は大気境界層の研究や環境アセスメントの調査などに活用され、主な成果としては、境界層構造の把握や高度断面の時系列変化の詳細、物理的現象の解明などがあげられる。大気汚染に関連して係留気球に気象用計器とオゾン濃度測定器を搭載した観測では、気温の接地逆転層に伴う下層オゾン濃度の汚染移流の特徴的な変化を報告した。

しかしながら、係留気球観測には、維持管理の体制、運用コスト、マンパワーの確保、安全面の対策、観測機器の老朽化、等の種々の問題があった。また、観測は研究・調査用に限られ、その頻度は 1990 年代に入り年数回と減少していた。さらに、下層大気より詳細な観測手段として、高分解能で観測頻度の高いウィンドプロファ

イラ、ドップラーライダー、GPS 気柱水蒸気量(可降水量)等のリモートセンシング観測が活用できるようになってきた。このようなことから、高層気象台では平成 25(2013)年 3 月をもって係留気球観測を終了した。

7. 研究・調査成果の公表、研修、普及啓発の取り組み

高層気象台彙報は、高層気象台が発行する印刷物で、原則として年 1 回作成、高層気象台職員及びその共同研究者などによる高層気象の業務に関する論文・報文・解説・観測データ等を掲載している。原稿は原則として高層気象台外の専門家の査読を受けたものである。第 1 号の発行は大正 12(1923)年であり、令和 2(2020)年 3 月には第 76 号を発行した。

高層気象台における研修は、現在、部内研修として、高層気象観測業務研修、オゾン・紫外線日射観測研修、日本南極地域観測隊気象庁派遣隊員技術取得訓練の他、気象大学校大学部学生の見学、JICA 実習生の見学などが行われている。また、特にオゾン観測機器等の各官署における障害時には適時に対応を行うなど技術支援を行っている。

平成 14(2002)年、高層気象台ホームページを開設した。ホームページには業務の紹介・解説に加え、観測データ、高層気象台彙報などを掲載している。高層気象台は、気象研究所、気象測器検定試験センターとともに、平成 4 年(1992)年からお天気フェアつくばを開催し、つくば市民にオゾンゾンデ放球の見学などの一般公開を行っている。

大石記念館は築 60 年を経過し、老朽化により危険な状態となったことから、平成 19(2007)年 2 月に解体した。その際、庁舎内の談話室に大石初代台長を記念したコーナーを設置し、台長の写真やその功績を記したパネル、「陵霄漢」「友雲交風」の額は、ここに飾られている。

高層気象台時報は、以前に速報として発刊していた高層気象台概報を一新したもので、気象資料の代表的なものと同内各種記事やニュースを併せた内容で昭和 60(1985)年に第 1 号を発刊(年 6 回)した。平成 4(1992)年の第 42 号より季刊となり、平成 14(2002)年以降は気象データの掲載を中止し、高層気象台の動向に関する記事を掲載していたが、平成 17(2005)年 1 月の第 91 号をもって休刊となった。その後、平成 21(2009)年からは部内誌として、高層気象台ニュース(季刊誌)を発刊している。

8. 高層気象台の現在と今後

「高層気象台創立 30 年の回顧と現況」(高層気象台: 1950)では、初代大石台長の思う高層気象台のあり方とし

て、「広大な敷地と相当長期にわたって変わることのない環境を利用して半永久的で精度の高い日本における標準の総合的な大気観測所とし、これを基にした研究をする所にしたいというにあった」と述べている。以降、高層気象台は一貫して、我が国の高層気象観測を代表する観測点、そして高層気象観測における先駆的な役割を果たす調査・研究機関として、IGY を契機に観測対象を大気環境分野へと広げつつ、長期間にわたって精密な高層気象観測を継続している。

その間、社会の変化・必要に応じ、観測基準の維持・精度向上等に関する調査研究や技術開発、世界基準との国際比較観測による国内基準の維持や、南極を含む国内測器の維持管理・技術支援、国内外の職員・関係者の研修といった役割を都度与えられ、その責務を担ってきた。

地球規模の気候変動・大気環境監視の重要性が増した昨今、その基盤となる観測を長年実施してきた高層気象台には、WMO による様々な観測計画への参加を含め、その基準的な観測点としての国際的な貢献がますますもとめられている。GRUAN では、世界で 12 地点しかない認証サイトのひとつとして、気候の長期変動の監視に活用できる、測器の比較観測を含めた高精度の高層気象観測を実施している。GAW においては、ドブソン分光光度計のアジア地区基準器を管理し、各国測器との比較観測により、同地区におけるオゾン観測の精度維持に貢献している。また日射・放射観測では、長期間観測を継続する有数の観測地点として BSRN に貢献している。

これらの観測に関しては、測器やデータ処理手法の開発・改良により観測の高精度化を目指すとともに、観測手法の切り替え時には、新旧測器の比較観測を実施、それに基づき気候変動や地球環境の長期的な監視に使えるようにデータを均質化することで、その価値を大きく高めることが出来る。それは高層気象観測データのみならず、昭和 30(1955)年から実施したドブソン分光光度計による現業観測を平成 30(2018)年にブリューワー分光光度計へ切り替えたオゾン全量・反転観測データ、平成 21(2009)年に KC 型から ECC 型に切り替えたオゾンゾンデ観測データについても言える。これまで比較観測は実施してきており、それに基づく観測データの均質化のための調査・研究をより一層進めたい。また、測器更新に伴う比較観測と均質化は、今後も継続して行う必要がある。

気象庁は、「2030 年に向けた数値予報技術開発重点計画」を平成 30(2018)年に策定し、数値予報の高度化・精度向上について野心的とも言える高い目標を掲げた。高層気象観測データは、数値予報実施のための基本的なデ

ータであることに加え、日射・放射観測データも含め、その開発・検証に欠かせない現地観測によるグランドトゥルスデータである。6. 節で述べた通り、GPS ゾンデになって高精度・鉛直高解像度の観測データが得られるようになり、例えば、非地形性の重力波発生メカニズムや乱流強度推定の研究(例えば、星野ほか：2016)に活用できるようになった。これらの研究の成果は、数値予報の重力波パラメタリゼーションの改良等に生かせるはずである。また、重点計画では、大気・海洋に加え、エアロゾル・オゾンなど大気組成の変動とそれらの相互作用を扱う地球システムモデルによる数値予報の実現を目指しているが、その開発にあたり高層気象台で続けているオゾン観測データが必要とされるであろう。令和2(2020)年の気象庁の組織改正に伴い、気象庁本庁の数値予報開発センターが高層気象台の庁舎内に移転してきた。地の利を生かして、重点目標の達成を目指す数値予報の開発への高層気象台の観測データの活用をより一層進めたい。

地球規模の気候変動・大気環境の監視、数値予報の実施・開発のために、世界の基準観測点として高層気象観測を高精度に継続して行いつつ、先進的な高層気象観測の手法を調査研究・開発し、実地的な試験検証、技術的な指導を担う機関としての役割が、今後も高層気象台に求められていくであろう。昭和26～31(1951～1956)年に高層気象台長を務めた山岡保は、高層気象台の性質として「ステーションとラボラトリーが互いに相補って有効なオブザーバトリーを形成する」と主張した(清水：1982)。その性質は創設100年の現在も変わらないし、高層気象台の役割を果たすために今後も変えてはいけないと考える。

この先、オブザーバトリーとしての高度な業務を担う専門性の高い人材を維持・育成し、観測分野のみならず、数値予報開発・地球環境監視・気象メカニズム研究などの観測データ利用分野の機関・専門家との国内・国際的な連携を強めつつ、観測・調査・研究を行い続け、世界有数のステーションとしての観測データの価値をより一層高めていきたい。

参考文献

阿部豊雄 (2016) : 気象庁における高層気象観測の変遷と観測値の特性, 第2部観測値の特性. 天気, **63**, 267-95.

阿保敏弘・駒崎由紀夫・高野松美・茂林良道 (2018) : 高層気象台における地上オゾン濃度観測(1988～2016年). 高層気象台彙報, **75**, 39-50.

Baldwin, M. P., and co-authors (2019) : 100 years of progress

in understanding the stratosphere and mesosphere. *A Century of Progress in Atmospheric and Related Sciences: Celebrating the American Meteorological Society Centennial, Meteor. Monogr.*, **No.59**, Chap.27.

Bolin, B. (2007) : A history of the science and politics of climate change. *Cambridge University Press*, 277pp.

Bojkov R. D. (2012) : International Ozone Commission: History and activities. *IAMAS Publication Series*, **No.2**, 100pp.

Brewer, A. W. (1973) : A replacement for Dobson spectrophotometer? *PAGEOPH*, **106**, 919-927.

Chubachi, S. (1984) : Preliminary results of ozone observations at Syowa Station from February 1982 to January 1983, *Memoir National Institute of Polar Research*, Special Issue, **34**, 13-19.

Dobson, G.M.B. and D. N. Harrison (1926) : Observations of the amount of ozone in the earth's atmosphere and its relation to other geophysical conditions. *Proc. R. Soc. London*, **A110**, 660-693. DuBois, L. J., R. P. Multhauf and C. A. ZIEGLER (2002) : The invention and development of the radiosonde, with a catalog of upper-atmospheric telemetering probes in the National Museum of American History, Smithsonian Institution. Smithsonian Institution Press, SSHT No.53, 74pp.

Grant A. N., S. Bronnimann, and T. Ewen (2009): A new look at radiosonde data prior to 1958. *J. Climate*, **22**, 3232-3247.

林則雄 (2008): オゾンの歴史は気象庁の歴史. 国土交通 2008.9, 52-53.

星野俊介・小林広征・小池哲司・橋口浩之・足立アホロ・黒須政信・山本真之・梶原佑介・別所康太郎・岩渕真海 (2016) : ウィンドプロファイラとゾンデから求めた乱流エネルギー消散率の比較. *Pap. Metero. Geophys.*, **66**, 39-55.

石井一雄・今滝利博・井上長俊・本田耕平 (2006) : 放射能観測50年史. 測候時報, **73**, 117-154.

伊藤朋之・上野文夫・梶原良一・下道正則・上窪哲郎・伊藤真人・小林正人 (1991) : 地上到達紫外線量の監視技術の開発. 研究時報, 気象庁, **43**, 213-273.

観測部高層課 (1974) : 高層気象観測の近代化計画について. 測候時報, **41**, 39-88.

気象庁 (1999) : 近年における世界の異常気象と気候変動～その実態と見通し～(VI), 341pp.

気象庁予報部 (2016) : 観測データ利用の改良及びメソ数値予報システムの背景誤差の改良. 平成28年度数

- 値予報テキスト, 第 2 章, 41-67.
- 北岡龍海 (1950) : 長峰落穂集, 長峰回顧録集, 高層気象台彙報特別号付録, 高層気象台, 90-100.
- 北岡龍海 (1955) : 国際地球観測年の狙い, 天気, **2**, 80-81.
- 高層気象台 (1978) : 高層気象台 50 年誌. 47pp.
- Kobayashi J. and Y. Toyama (1966) : On various methods of measuring the vertical distribution of atmospheric ozone (III). *Pap. Met. Geophys.* **17**, 113-126.
- 古林絵里子 (2016) : ラジオゾンデの歴史的変遷を考慮した気温トレンド(第 2 報). 高層気象台彙報, **74**, 17-25.
- Lewis, J. M. (2003) : Ooishi's observation-viewed in the context of jet stream discovery. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **84**, 357-369.
- 間宮嘉久・居島修・石井憲介・大河原望・辰巳弘 (2012) : 新しい日射放射観測の開始について. 測候時報, **79**, 15-37.
- Manabe, S. and R. T. Wetherald (1967) : Thermal equilibrium of the atmosphere via given distribution of relative humidity. *J. Atmos. Sci.*, **24**, 241-259.
- Manabe, S. and R. T. Wetherald, (1975) : The effect of doubling the CO₂ concentration on the climate of a general circulation model. *J. Atmos. Sci.*, **32**, 3-15.
- Miyagawa, K. (1997): Development of an automated system for the Dobson ozone spectrophotometer, *The Geophys. Maga. Series 2*, **2-1**, 77-107.
- Molina, M.J. and F. S. Rowland (1974) : Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: chlorine atom-catalysed destruction of ozone. *Nature*, **249**, 810-812.
- Ohmura, A. (2009) : Observed decadal variations in surface solar radiation and their causes. *J. Geophys. Res.* **114**, D00D05.
- 岡田武松・荒川秀俊 (1956) : 世界気象学年表, 地人書館, 229pp.
- Ooishi, W. (1926) : Reporto de la Aerologia Observatorio de Tateno (in Esperanto). *Aerological Observatory Rep.* **1**, Japan Central Meteorological Observatory, 213pp.
- 大石和三郎 (1950) : 長峰回顧録, 長峰回顧録集, 高層気象台報特別号付録, 高層気象台, 1-72.
- Pales, J. C. and C. D. Keeling (1965) : The concentration of atmospheric carbon dioxide in Hawaii, *J. Geophys. Res.*, **70**, 6053-6076.
- 清水正義 (1982): 高層気象台便り. JMA ニュース, **No.869**, **No870**, 気象庁.
- 塩水流洋樹・阿部豊雄・奥山順健 (2007) : 高層気象台における放射能ゾンデ観測 48 年の記録. 高層気象台彙報, **67**, 121-136.
- Stith, J. L., and co-authors (2019) : 100 years of progress in atmospheric observing systems. *A Century of Progress in Atmospheric and Related Sciences: Celebrating the American Meteorological Society Centennial, Meteor. Monogr.*, **No.59**, Chap.2.
- 高橋浩一郎・内田英治・新田尚 (1987) : 気象学百年誌. 第二期気象学のプロムナード, 東京堂出版, 230pp.
- 山岡保 (1953) : 高層気象台創立の頃, 測候時報, **20**, 332-338.
- Wild M., D. Folini, C. Scar, N. Loeb, E. G. Dutton, and G. K-Langlo (2012) : The global energy balance from a surface perspective. *Clim. Dyn.*, **40**, 3107-3134.