

2. ラジオゾンデ観測

(1) ラジオゾンデ観測の開始

1920年代になり、気球に吊るした測器による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、昭和4(1929)年に Bureau(フランス)が最初のラジオゾンデを飛揚し、翌昭和5(1930)年には Moltchanov(ロシア)や Duckert(ドイツ)がそれに続いた(DuBois *et al.* : 2002)。我が国においては、欧米にやや遅れて陸軍、中央気象台や海軍が個別に開発を開始した。

中央気象台においては昭和7(1932)年に研究に着手して、各種の要素技術の研究試作、数度の実地飛揚試験の後、昭和10(1935)年に中央気象台羽田出張所において初めて完全なる記録を得た。昭和13(1938)年6月中央気象台布佐出張所において、中央気象台1号型ラジオゾンデ(口絵16)による一日1回の現業観測が始まった。このゾンデは、気圧・気温・湿度センサーの機械的偏位を送信機発信回路のコンデンサ容量に替え、その容量の変化による送信周波数の変化を測定する搬送周波数変化式のもので、気象要素ごとに異なる周波数で伝送するため、1要素につき1送信機を有し、地上の受信機も各々専用のものを用いた。

高層気象台においては、昭和12(1937)年にラジオゾンデの研究を開始したが、そのときは完成を見なかった。ラジオゾンデを飛揚した記録は、昭和14(1939)年の日誌などに見られるが、最初の飛揚をいつ実施したかは定かでない。

昭和19(1944)年10月、高層気象台において、ラジオゾンデの現業観測を開始した。観測に使用したラジオゾンデは中央気象台1号型のほか、陸軍供与の三式温湿発振器(三式ゾンデ)が多く用いられた。特に終戦後は軍放出の三式ゾンデ、昭和22(1947)年からは、三式ゾンデを改良したS43K型ラジオゾンデを使用した。

(2) レーウィン観測の開始

昭和6(1931)年に Blair・Lewis(アメリカ)が、気球に発信器を吊り下げて飛揚して無線で追跡する方法(ラジオトラッキング)について発表した。以降、天候に左右されずに風を測定できる無線測風方法(レーウィン)についての研究開発が、世界各国で盛んにおこなわれた(DuBois *et al.* : 2002)。中央気象台においては、昭和14(1939)年に中央気象台嘱託となった東京帝国大学航空研究所の抜山が、ラジオトラッキングの研究開発を指導して、当時としては画期的であった抜山式測風方向探知機を開発するとともに、布佐出張所においてラジオトラッキング用送信機(中央気象台2号型ラジオゾンデ)の試作をすすめ、昭和

15(1940)年に完了した。

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研究を開始しており、9月以降は曇天で経緯儀による観測が不能の場合、レーウィンによる測風観測が行われることがあったが、現業観測の開始は1948年11月になってからである。なお、この抜山式測風方向探知機(最小感度方式)は、15MHzの発振器が入手困難であったため、現業観測の開始は1948年11月となった。

(3) 終戦後の臨時観測等業務

昭和24(1949)年の行政整理に伴い中央気象台が東京での観測を中止したため、それまで東京で行われていた試験観測の多くを高層気象台が引き継ぐこととなり研究への協力が増加した。終戦後にはラジオゾンデやレーウィンを使用し、各種の臨時観測を実施している。

昭和23(1948)年4・11月、昭和24(1949)年6・12月及び昭和25(1950)年5月に10日間実施された国際高層観測に協力し、一日4回ラジオゾンデ及び測風気球またはレーウィンによる観測を行った。

昭和23(1948)年5月の金環日食では、高層気象台は、中心食帯に近い礼文島・稚内において、総勢40名以上の体制で臨時観測を実施した。稚内付近における日食は9日10時25分頃に始まり、11時51分頃に食が最大となり、13時18分頃に終わるものであった。日食期間中にできるだけ多く観測を行い、また平常時の状態も観測するために、稚内における観測期間は7日から11日までの5日間で、7日は12・18・22時、11日は06時のみ実施した。8日から10日は、10時から13時20分までの間を20分間隔で実施し、その時間帯の前後では06・08・09時・09時30分と13時50分・14時20分・15時・16時・18時・22時に実施した。礼文島では8日から10日までの3日間で、稚内と同じタイミングで実施する計画であったが、悪天候等により25回の実施にとどまった。

稚内における観測は、稚内測候所(当時)を放球場として、地表から高度13km以上までの各レベルの微細な変動を調べるため、500g気球(平均上昇速度約415m/min)にラジオゾンデを吊り下げて放球し、それを双経緯儀法で観測した。この観測には、気温と湿度の受信機を3組使用した。また、稚内では石英分光器を用いたオゾン層観測も実施した。礼文島における観測は、下層大気の気流変化を極力細かく正確に測定するため、ほぼ同じ重さ・浮力の白色と赤色の2つの40g気球を同時に放球して、それを双経緯儀法で観測した。

この臨時観測により、日食の効果として気温が地表で

4.4℃, 成層圏で 10℃以上顕著に低下したこと, 成層圏における温度変化の振幅が高度 15km 以上で急激に増加して 18-19km で最大となりその後減少する様子がオゾンの鉛直分布と類似していることなどが報告されている(中央気象台: 1949).

昭和 25(1950)年 9 月のカムチャッカ・アリューシヤンの皆既日食の際にも, 中央気象台, 札幌・東京各管区気象台の協力のもと稚内・輪島・館野において同様の観測を一日実施した(北岡: 1960a). 北岡(1960b)は, この臨時観測結果等から, 圏界面付近で時に異常に大きな短周期の振動が起こることを明らかにした.

(4) 高層気象台におけるラジオゾンデ, レーウィン観測の確立

中央気象台 1 号型に代表される搬送周波数変化式ラジオゾンデには, 観測要素ごとに受信機を要し各々に観測者を配置する必要があることや, 周波数が短波帯の広い範囲で変化するため混信を受けやすいことなどの欠点があり, これを解決するために符号式ゾンデ S48 型ラジオゾンデが開発され, 観測に使用されるようになった.

符号式ゾンデは, センサー部(空盒(くうごう)気圧計・バイメタル温度計・毛髪湿度計), 符号発生部(符号発生機構・モータ)と発振器部などで構成され, 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る記録が行われた. 高度は P-T 線図から求めた各指定気圧面間の層厚の積算により計算された.

高層気象台においても, 昭和 24(1949)年に S48 型ラジオゾンデ(符号式, 搬送波 27MHz, 図 3.2.1)へ変更した.



図 3.2.1 中央気象台 S48A 型ラジオゾンデ

その後, 国際電気通信条約によりラジオゾンデの割当周波数帯が 400~420MHz となったことを受け, 昭和 25(1950)年に搬送波を 402MHz とした S49 型ラジオゾン

デに移行した. また, 同年 S50 型, 昭和 27(1952)年には符号板が改良された S52 型との併用, その後レーウィン観測とラジオゾンデ観測の双方に利用できるレーウィンゾンデ RS52 型, RS53 型, RS56 型へと運用が変わって行った.

レーウィン観測においては, 昭和 23(1948)年に, W44 型発振器(発信周波数 300MHz)と D44 型方向探知機(最大感度方式: 八木アンテナと受信機を三脚に載せ, ハンドルの手動操作で受信音が最大になる方位角・高度角を測定. 図 3.2.2)を用いた観測が始まったが, 感度が悪く観測可能高度も低かったことから, 測風経緯儀による観測を併用した.

昭和 25(1950)年に W49 型発振器(発信周波数 408MHz,) への変更があり, 同年には D49E 型方向探知機(等感度方式: 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

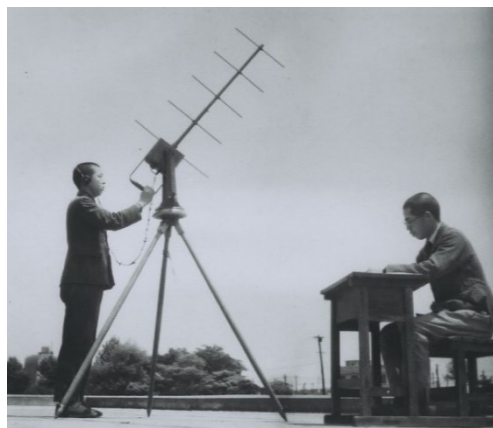


図 3.2.2 D44 型方向探知機(最大感度方式)

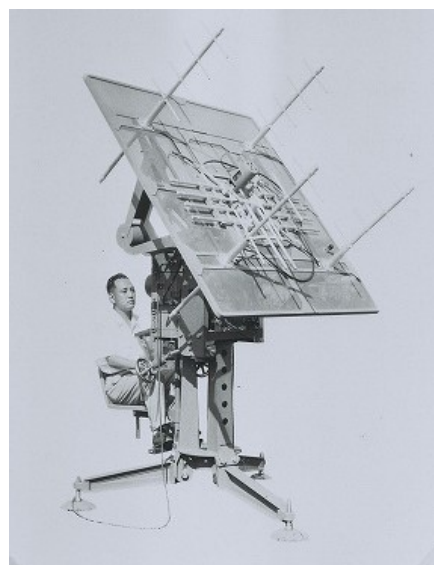


図 3.2.3 D49E 型方向探知機(等感度方式)

向として方位角と高度角を測定、図 3.2.3)が導入された。D49E 型方向探知機は、S52 型、RS52 型、RS56 型へと変更される間も運用された。この頃は、ゾンデが雲に入るまでは測風経緯儀、その後は無線で追跡する観測方式(レーウィン観測)を実施した。

(5) 中継観測の試み

西風の強い冬季には気球の水平移動距離が伸び、電波の入射角度が小さくなることで地面反射の影響が大きくなり測風観測の精度が落ちる。これを解消するため、昭和 25(1950)年に、本庄で飛揚したレーウインを館野で中継受信する中継観測(リレー観測)を試みて、観測高度 2 万 m で水平距離を半分にすることができた。さらに、昭和 27(1952)年 1 月から 3 月にかけて測風経緯儀とレーウィン(悪天時に本庄では最大感度式方向探知機、館野は等感度式方向探知機)を利用して本庄～館野の中継観測を行った(高層気象台：1954)。また同年 12 月から昭和 28(1953)年 3 月の観測では本庄の方向探知機を等感度式に変更し、精度を向上させた(角：1955)。昭和 29(1954)年 1 月から 3 月、同年 12 月から昭和 30(1955)年 3 月及び昭和 31(1956)年 1 月から 3 月には、茨城県の鹿嶋を中継地点として観測を実施している(高層気象台：1957)。中継観測は高高度の上層風の観測が可能となるが、人手を多く要するため、定常的な観測としては実施されなかった。

(6) 自動追跡記録型方向探知機の導入と観測時刻等の全国統一

米軍の使用していた AN/GMD-1A 型自動追跡記録型方向探知機は、1600MHz 帯と波長が短くパラボラアンテナを使用し、測角誤差が小さく非常に高性能であった。昭和 28(1953)年に在日米空軍から GMD-1A 型の日本への貸与の申し出があり、中央気象台では、測風精度向上と昭和 32(1957)年から始まる IGY の観測要請に応えるため、昭和 30(1955)年の秋田・輪島から GMD-1A 型自動追跡記録型方向探知機の設置が始まった。また、GMD-1A 型をモデルにして開発した国産の D55A 型自動追跡記録型方向探知機(図 3.2.4)が、昭和 31(1956)年頃から使われるようになった。

高層気象台は、D55A 型の現業観測導入に先立ち、昭和 32(1957)年 2 月に、館野、銚田、佐原の 3 地点に方向探知機及び測風経緯儀を設置して、レーウィンゾンデ及びエコーゾンデにより D55A 型の測角精度の試験を行い、同年 4 月に D55A 型による現業観測へと移行した。この移行では飛揚する測器も周波数 1680MHz の RSII-56 型レーウィンゾンデ(口絵 16)、W57 型レーウィンへと変更さ

れ、測風経緯儀による高層風観測を同年 10 月に廃止した。

レーウィン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。なお、D55A 型を導入するため、昭和 31(1956)年秋に、庁舎北方約 60m の位置に円柱状の測風塔の新築等をして、翌昭和 32(1957)年に旧測風塔へ D55A 型のアンテナ設置等を行った。

その後、レーウィンゾンデは、昭和 51(1976)年に搬送波発振器部をトランジスタ化した RSII-56A 型レーウィンゾンデへと変更された。レーウィンは昭和 34(1959)年に W58 型へ、昭和 36(1961)年に W60 型へ、昭和 51(1976)年に W75 型へと変更された。

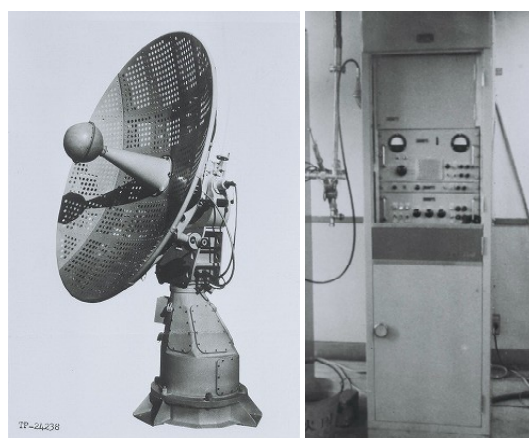


図 3.2.4 D55A 型自動追跡記録型方向探知機

観測回数は、昭和 27(1952)年 12 月に 00 時・12 時の一日 2 回観測であったが、昭和 32(1957)年 4 月に全国的に変更された高層気象観測時刻に合わせ、レーウィンゾンデ観測は 09 時及び 21 時、高層風観測は 7 月に 03・15 時のレーウィン観測を加えて一日 4 回観測となった。観測時間の変更にとまなう統計上のずれを調整するため、全国いくつかの官署で実施された特別観測においては、昭和 35(1960)年、昭和 36(1961)年に 6 時間毎、昭和 39(1964)年、昭和 40(1965)年に 3 時間毎のレーウィンゾンデ観測を実施した。また、昭和 32(1957)年 7 月から昭和 33(1958)年 12 月に行われた IGY の期間中、高層気象台では、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 回の世界気象特別期間には目標到達高度を 10hPa としてゾンデ・レーウィン一日 4 回の観測を行った。

(7) 高層風観測へのエコー方式の導入と改善

D55A 型方向探知機を導入してからも、偏西風が強い

冬季は、気球(レーウィンまたはレーウィンゾンデ)が遠くへ流され、気球の高度よりも流された距離の方が長くなり、高度角が極めて低くなってしまうため風速誤差が大きかった。この風速誤差を改善するため、高度角が低い場合の無線測風方式としては、地上送信機から発射したパルス電波をレーウィンの送受信機(トランスポンダー)が地上へ送り返すパルス電波の往復時間を測定して気球までの直距離から水平距離を求めて高層風を計算するエコー方式が導入された。エコー方式は、レーウィンの高度と方向探知機の方位角で求めるレーウィン方式よりも優れていることから、パルス電波発射装置の製作に入り、昭和 32(1957)年、昭和 33(1958)年に高層気象台において感度性能・測距精度確認のための試験観測が実施された。昭和 33(1958)年末からは、高層気象台を含む 4 官署で 15 時の観測においてエコー方式を用い、昭和 34(1959)年 1 月には EW58 型エコーレーウィン及び D55A 型に測距装置等を付加した RD56 型エコーゾンデ観測装置による現業観測を開始した(鈴木：1963)。口絵 16 にエコーゾンデの例を示す。

D55A 型では、測風と同時にゾンデ観測ができるエコーゾンデに対する感度がやや不足していたが、地上観測装置にパラメトリック増幅器が設置されてからは、ゾンデ符号も十分受信できるようになり、昭和 37(1962)年 4 月以降、高層気象台では 09 時の観測を原則としてエコーゾンデ(ES58 型、ES61 型)により行なった。なお、高層風の計算は、観測者が航跡図を作成して移動方向と移動量を読み取って風向・風速を求める方法により行われていたが、昭和 52(1977)年にプログラミングが可能な電子卓上型計算機による計算方法に変更された。

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 型自動追跡記録型方向探知機(図 3.2.5)へ、エコーゾンデ観測装置は RD56B 型へ更新されて、高層気象台では昭和 47(1972)年にその運用を開始した。また、エコーゾンデは、昭和 54(1979)年に受信器部を変更した ES78 型エコーゾンデに変更された。



図 3.2.5 D55B2 型自動追跡記録型方向探知機

高層気象台では昭和 56(1981)年までエコーゾンデにより 09 時の観測を行っていたが、ゾンデが高価であること、地上装置の保守整備がやや複雑であるなどの理由から、高層気象台以外への国内展開では根室・秋田・八丈島・鹿児島へ導入されたが観測回数は少なかった。なお、エコーゾンデによる観測は、昭和 56(1981)年 3 月の変調周波数変化式レーウィンゾンデ(RS2-80 型)の運用開始に伴い廃止された。

(8) 高層気象観測の近代化

昭和 45(1970)年頃から高層気象観測の近代化計画が検討され、観測の効率化、データの均質化、観測通報の迅速化のため、信号を計算機処理できる新型ゾンデの開発が進められた。新型ゾンデは、気象要素の変化をセンサーの抵抗変化でとらえ、それにより搬送波を変調して伝送する、変調周波数変化式ゾンデとして計画された。この開発に関する気象研究所の特別研究(昭和 50～52(1975～77)年度)の飛揚試験を高層気象台で行った。

抵抗変換方式への変更に沿ったセンサー開発も行われ、新型ゾンデでは、気圧計は温度補正不要のスミスパン空盒の抵抗接点式空盒気圧計、気温センサーはサーミスタ温度計、湿度計はカーボン湿度計が使われた。また、高度計算は P-T 線図で手計算する方法から、測高公式で計算機を用いて算出する方法に変更された。

高層気象台では、昭和 56(1981)年 3 月に変調周波数変化式 RS2-80 型レーウィンゾンデ(口絵 16)による観測へ移行した。全国的にもほぼ同時期に RS2-80 型へ移行した。移行に伴い高層気象台では、符号式レーウィンゾンデ(RSII-56 型)と変調周波数変化式レーウィンゾンデ(RS2-80 型)との連結飛揚による比較観測を昭和 56(1981)年 3・6・9・12 月に昼夜各 5 回ずつ実施した(観測部高層課：1983)。また、全国展開に向けての研修を高層気象台で実施した。

昭和 56(1981)年から翌昭和 57(1982)年には、新湿度計及び温度計の降雨時等における影響について調査した(榎本：1983)。また昭和 57(1982)年には、RS2-80 型における日射による気温誤差の補正(日射補正)について検証するため、TR-67 型の発信部をトランジスタ化した気温基準ゾンデ(TR-82 型)との比較観測を 11 回実施した(観測部高層課：1984)。

(9) 高層気象観測の自動化

昭和 56(1981)年に RS2-80 型レーウィンゾンデへと移行した後も、ゾンデ信号観測装置(アナログ記録器)の記録を読み取って卓上計算機で気温・湿度・高度を算出す

る方式がとられていたが、昭和 61(1986)年になって高層気象観測資料自動処理装置(図 3.2.6)の整備が開始された。

高層気象観測資料自動処理装置は信号変換装置とミニコンピュータを主体としたデータ処理装置等からなり、ゾンデ測定信号及び方向探知機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ものであった(観測部高層課：1987)。高層気象台では、昭和 60(1985)年に自動化対応のため無指向性アンテナを設置するなどの準備を行い、昭和 61(1986)年 3 月に運用を開始した。運用開始後の昭和 61(1986)年末から翌年 3 月まで、低高度角における測角値の修正処理の検証のために、D55B2 と測風経緯儀による測角比較観測を 33 回実施している(金子ほか：1988)。また、平成元(1989)年から平成 2(1990)年にかけては、アンテナ周辺で生じるエッジ反射を防止する実験に取り組み、反射波防止装置を開発し、測角の乱れ防止に成功した(新井ほか：1990)。このほか、方向探知機の追跡精度確認方法の改良にも取り組み、天候に左右される経緯儀との比較観測の補完的手段として極軌道衛星を利用する方法を考案し、平成 5、7(1993、1995)年に試験観測を行った(坂尻・須田：1996)。



図 3.2.6 高層気象観測資料自動処理装置
(阿部(2015)から引用)。

(10) JMA-91 型高層気象観測装置の導入

財政的な事情もあり、ミニコンピュータ主体の高層気象観測資料自動処理装置の展開が進まなかったことから、パーソナルコンピュータによるデータ処理装置とモノパルス方式の自動追跡型方向探知機等で構成される JMA-91 型高層気象観測装置(図 3.2.7)が開発されて、平成 4(1992)年に整備された。

JMA-91 型高層気象観測装置は、ゾンデの自動追跡とゾンデ信号の受信、観測処理、気象報の作成・通報までを一貫して行う総合観測システムである。方向探知機も、D55B2 型の円錐走査方式からモノパルス方式への変更に



図 3.2.7 JMA-91 型高層気象観測装置

上段：左自動追跡型方向探知機(左)、レドーム(右)

下段：ゾンデ信号変換器、操作部、データ処理装置

より、飛揚直後のゾンデの捕捉が従来よりも容易になると共に、高い測角精度が得られるようになった(観測部高層課：1996)。

また、観測装置と並行して、RS2-80 型のセンサー等を改良した RS2-91 型レーウィンゾンデ(口絵 16)が開発され、JMA-91 型が整備された官署から順に使用を開始した。RS2-91 型の気圧センサーは静電容量変化式空盒気圧計で、温度補正用の温度測定用サーミスタが内蔵されている。気温センサーについては、RS2-80 型より小型化したほか、日射放射等の影響を小さくするために全体をアルミニウム蒸着・ガラスコーティング、水滴付着軽減のためのシリコン膜塗布、水滴が落ちやすい構造とするなどの改善がなされた。湿度センサーは静電容量変化式で、日射と水滴の侵入を防ぐためにアルミキャップを被せた。受信装置の性能が向上したことにより、平成 5(1993)年にレーウィンのを、W75 型から発信機出力を抑えた W92 型に変更した。

高層気象台では、JMA-91 型高層気象観測装置に更新した際に、D55B2 型方向探知機を試験室に移設した。これら二つの方式の方向探知機で同一の発信器を追跡して、風向・風速の比較を行った(佐藤ほか：1993)。また、JMA-91 型の使用開始前後と平成 5、6(1993、1994)年にそれぞれ 2 回ずつ、RS2-80 型と RS2-91 型の連結飛揚による比較観測を実施した。

平成 11(1999)年に RS2-91 型レーウィンゾンデの湿度センサーを、保管時の高湿による影響が少なく、加湿・除湿方向の特性の差が小さな新センサーへと変更した際には、観測部高層課の依頼により、新旧センサーの比較観測を行った(瀧江ほか：2000).

平成 20(2008)年には、RSII-56, RS2-80, RS2-91 型ゾンデの比較観測による新旧ゾンデ間の特性比較の偏差を利用し、観測値を同一に扱うための補正を行い、昭和 31(1956)年 7 月から平成 19(2007)年 12 月にかけての 21 時の各指定気圧面気温の月平均値のトレンド調査を実施した(上里ほか：2008).

(11) オメガゾンデの試験観測への協力

昭和 43(1968)年から平成 9(1997)年まで運用されたオメガ航法システムは、船舶・航空機向けの電波航法システムの一つで、8 つの送信局で全世界をカバーした。日本は、昭和 50(1975)年から平成 9(1997)年 9 月までの間、海上保安庁が対馬オメガ局を運用していた(竹内ほか：2014)。このオメガ航法システムをラジオゾンデの位置決定に利用して高層風観測を行うゾンデをオメガゾンデと呼んだ。オメガゾンデには、パラボラアンテナでラジオゾンデを自動追尾する必要がなく、地上のアンテナ施設を小型軽量化できるという特徴があり、昭和 40(1965)年に提案されて以来、各国で研究開発がすすみ、日本でも気象研究所がオメガ高層風観測システムを開発した(青柳：1974)。昭和 52(1977)年には、オメガ高層風観測システムの改良のために、高層気象台においてエコーゾンデとオメガゾンデの比較観測を行った(浅井ほか：1979)。

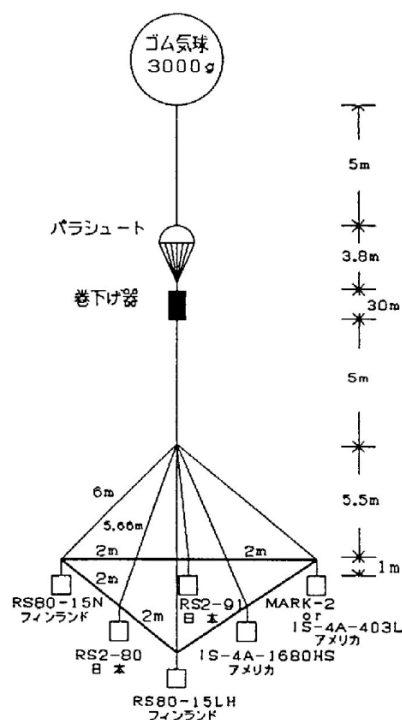
昭和 63(1988)年から翌年にかけて、気象研究所の「気象観測の総合化の基礎的研究」に協力し、計 4 回 19 日間の総合観測に参加し、RS2-80 型レーウィンゾンデの 6 時間ごとの観測と Vaisala RS80-15N 型オメガゾンデの同時飛揚や連結飛揚、係留気球による観測などを実施した(気象研究所：1994)．その後、平成 5(1993)年には気象研究所の「台風と総観場の相互作用に関する研究」に協力してオメガゾンデを飛揚し、同年から翌年にかけても、気象研究所の「竜巻等瞬発性気象現象に関する研究」に協力してオメガゾンデを飛揚した．さらに、平成 7(1995)年の「つくば域降雨観測実験」のためのオメガゾンデ飛揚に協力した(瀬古ほか：1998)．

(12) WMO ラジオゾンデ比較観測(フェーズ IV)の開催

平成 5(1993)年 2 月から 3 月にかけて、高層気象台を会場として WMO ラジオゾンデ比較観測(フェーズ IV)が実施された(口絵 31, 32). WMO のラジオゾンデ比較観

測は、昭和 59(1984)年にイギリス(フェーズ I)、昭和 60(1985)年にアメリカ(フェーズ II)、平成元(1989)年に旧ソ連(フェーズ III)で開催されてきたが、日本で開催されたフェーズ IV をもって一連の国際比較が終了した。フェーズ IV では、我が国のほかフィンランド、米の 3 か国が参加し、7 種類のラジオゾンデ(日本: RS2-80 型, RS2-91 型, フィンランド: Vaisala RS80-15N 型, RS80-15LH 型, アメリカ: AIR-IS-4A-1680HS, AIR-IS-4A-403L, VIZ Microsonde2)を一日 3 回、20 日間飛揚した。比較観測は、各ラジオゾンデ間の気圧・気温・湿度及び高度の観測値の系統的な差の定量化、異なる風観測システムによる風の観測値の差の評価、指定気圧面データの差の定量化、気温観測の放射による誤差の評価等を目的に行われ、その結果は平成 8(1996)年に WMO から最終報告書(WMO/TD-No.742)として公表された。

高層気象台においては特別の体制でこれに取り組み、アンテナ設置台や飛揚準備台等の施設・設備の準備、1 回に 6 台のゾンデを連結飛揚するためのゾンデ連結リグ(図 3.2.8)の制作と航空法上の手続き、外国からの人員・器材の受入や生活支援、飛揚作業に係る人員配置や地上気象観測値の提供等を行い、大きなトラブルもなく全 60 回の飛揚を完遂した(林・阿部：1994)。



第3図 比較観測ゾンデ飛揚形状図

図 3.2.8 WMO ラジオゾンデ比較観測フェーズ IV におけるゾンデ連結飛揚形状.
(林・阿部(1994)から引用).

(13) ウィンドプロファイラ観測に係る業務実験

ウィンドプロファイラ(WPR)は、地上から上空に向けて電波を発射し、大気の乱れ(大気の屈折率の不連続)により散乱されて戻ってきた電波の周波数のドップラー偏移をもとに、その地点の上空の風を連続的に観測する装置である。国外では、平成4(1992)年から米国海洋大気庁によるWPR観測網の実用化試験が行われて、毎時の観測結果がGTS回線を通じて気象庁に配信されていた。国内では、気象研究所において昭和63(1988)年から研究観測が行われていた。

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」を実施した。業務実験の目的は、(i)WPR資料報を作成・伝送する処理プログラム等の開発、(ii)WPRデータの取得率や品質等の評価、(iii)予報業務におけるWPRデータの有効性の評価、(iv)現業運用の問題点の検討の4項目について調査・技術開発を行い、その結果に基づき現業観測への導入に必要な事項を明らかにすることであった。業務実験は、気象研究所のWPRを使用して、1年目のうちにWPRデータをL-ADESSにオンライン出力する体制を整えて、2年目から3年目にかけてデータを蓄積した。また3年目には高層気象台内に「作業部会」を設けて、データ解析と報告書作成を行った。高層気象台は、上記の(iii)を除くすべての項目に取り組んだ。

この業務実験により、(i)WPRの観測結果を資料報として自動的に伝送するシステムについて問題点の多くが対処可能であること、(ii)WPRのデータは適切な品質管理を行うことでレーウィンゾンデと同等の高品質な観測結果となし得ること、また機器改良や信号処理の改善により取得率の改善が期待できること、(iii)WPRデータの利用により大気状態の詳細な把握ができ、予報精度の向上が期待できること、(iv)最新の装置では観測性能・操作性等が向上しており、必要な設備・体制を整えれば現業観測での運用で大きな問題とならないことが明らかになった。平成9(1997)年3月に、業務実験の結果を取りまとめた「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報告書」を発表した(高層気象台ほか：1998)。

その後気象庁は、豪雨をもたらす湿潤大気の流れの動向を常時監視することができるWPR観測網の整備を計画し、平成13(2001)年4月に局地的気象監視システム(WINDAS)による高層風の現業観測を開始した(加藤ほか：2003)。

(14) GPSゾンデの導入

平成8(1996)年にVaisalaが高層風観測におけるGPSの利用を開始(VAISALA：2014)するなど、方向探知機方式に代わり、操作が容易で、方向探知機のように複雑な受信設備を必要とせず、観測所からの距離に関わらず同じ精度で測風が可能な、GPS方式を利用して高層風観測を行うゾンデ(GPSゾンデ)の開発が世界各国ですすめられた。平成13(2001)年にブラジルで開催されたWMOのGPSラジオゾンデ国際比較に参加した5種類のゾンデの多くは完成されたものではなかった(Silveira *et al.*：2003)が、平成17(2005)年にモーリシャスで開催されたWMOのGPSラジオゾンデ国際比較に参加した日本を含む7種類のGPSゾンデは実用化されたもので、これらのGPSゾンデの性能は高く評価された(Nash *et al.*：2006)。気象庁においても、平成7(1995)年に「次世代高層気象観測システム検討委員会」を設け、次期高層気象観測網の構築についての検討を進め、平成9(1997)年に報告書をまとめ、引き続き技術面、経費面を注視しつつ検討を進めることとした(観測部観測課：2007)。

高層気象台においては、平成8(1996)年にVaisala GPSゾンデの試験観測、平成9(1997)年のVaisalaのオメガゾンデとGPSゾンデの連結飛揚や、平成9(1997)年の「つくば域降雨観測実験」を始めとした様々な研究観測においてGPSゾンデの飛揚を実施した。

国内の気象官署におけるGPSゾンデの導入は離島官署が先行した。平成14(2002)年4月に、南鳥島気象観測所に明星電気RS-01G型GPSゾンデ(気圧計非搭載、図3.2.9)が、翌平成15(2003)年3月に父島気象観測所にLockheed Martin Sippican(LMS) MARK II A型GPSゾンデが導入された。離島官署への導入に先立ち、高層気象台において平成13(2001)年にRS-01G型とRS2-91型レーウィンゾンデの、平成14(2002)年にMARK II A型とRS2-91の連結飛揚を行った。また、平成15年(2003)に、GPSゾンデを使用して、観測前の点検、気球への水素ガスの充填、観測の実施、観測結果の通報までの一連の観測作業のすべてを自動的に行う集合型GPS高層気象観測システム(ABL)が、国内で初めて八丈島測候所に導入され、同年6月に観測が開始された(観測部観測課：2007)。八丈島での観測開始に先立ち、高層気象台において、同年2月にABLで使用するVaisala RS80-15GA型GPSゾンデとRS2-91型の連結飛揚を行った。石垣島地方気象台ほかでは、明星電気のABLが導入され、明星電気RS-01GM型GPSゾンデを使用していたが、平成22(2010)年からは温度センサーの小型化等の改善がされた明星電気RS-06G型GPSゾンデが使われた。高層気象台において、平

成 21(2009)年に RS-06G 型と RS2-91 型の比較観測を昼夜各 10 回行った。

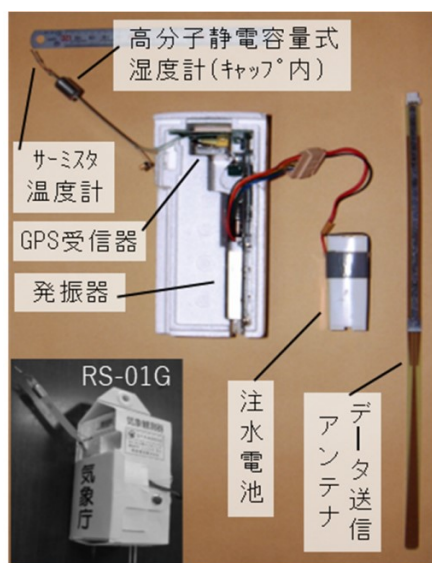


図 3.2.9 明星電気 RS-01G 型 GPS ゾンデ

高層気象台では、平成 21(2009)年 12 月に簡易型 GPS 高層気象観測システム(MBL)が導入され、現業観測で RS92-SGP 型の日本仕様である Vaisala RS92-SGPJ 型 GPS ゾンデ(口絵 16)の使用を開始した。運用開始から RS2-91 型との連結飛揚を行い、翌平成 22(2010)年 10 月までに 115 回の比較観測を実施した(高層気象台：2011)。また、平成 23(2011)年には、雨天時に集中的に実施した比較観測データを利用して、雨天時における気温観測データの特性について調査を行い、RS2-91 型が成層圏において気温を低めに観測することを示した(古林ほか：2012)。なお、方向探知機による高層風観測は平成 23(2011)年 11 月が最後となり、その後完全に GPS 方式に移行した。

平成 25(2013)年には、MBL で使用するゾンデの地上処理装置からの出力形式の仕様を規定することで、MBL で使用するゾンデを複数のメーカー・ゾンデが入札対象となるように変更した。その結果、同年 7 月から MBL で明星電気 RS-11G 型 GPS ゾンデ(気圧計非搭載、口絵 18)を使用することとなった。また、平成 26(2014)年 2 月 28 日をもって、03 時と 15 時に行っていたレーウィン観測を終了した。

平成 29(2017)年 9 月に、MBL で使用するゾンデが RS-11G 型から iMS-100 型 GPS ゾンデ(口絵 16)に変更となった。これに先立ち、非常に小型で軽量の iMS-100 型の飛揚形態を決定するため、変更前の平成 28(2016)年 4 月から 10 月までの間に 36 回の試験飛揚を実施した。また、iMS-100 型と RS-11G 型の連結飛揚を、翌平成 29(2017)

年 6 月までに 4 季節昼夜各 10 回、計 80 回を実施して、平成 30(2018)年に気温、湿度、気圧、ジオポテンシャル高度、風向・風速の差等についてとりまとめた(古林・星野：2018)。令和 2(2020)年度には、MBL で Vaisala RS41-SG 型 GPS ゾンデ(口絵 16)を使用することとなり、同年 6 月に使用を開始し、RS41-SG 型と iMS-100 型との連結飛揚を行っている。

GPS ゾンデの観測データ処理は、それぞれの GPS ゾンデメーカーが提供するソフトウェアにより行っていたが、気象庁は平成 30(2018)年 3 月に高層気象観測データ統合処理システムを整備して、気象庁が規定したアルゴリズムに基づき作成した観測データ処理プログラムにより各観測所のデータ監視や観測報・資料報の発信を観測部現業で一元処理することとなった。これにより現業観測において、高層気象台現業では飛揚準備から放球までを実施して、観測部現業(現大気海洋部予報課気象監視・警報センター観測チーム)は飛揚後のデータ監視や観測報・資料報の点検・送信を実施することになった。

(15) 水素ガスの安全対策

水素ガスによる気球爆発事故の原因は、水素ガスと気球内部面の摩擦による静電気帯電と、そのスパークによる引火と考えられていたため、ボンベ等の接地に対応していた(中央気象台：1951)が、昭和 32(1957)年 7 月、确实に対応を取っていたにもかかわらず水素ガスボンベが自然発火し、水素貯蔵庫が焼失した。当時の川瀬台長の指導のもと、発火原因についての詳細な調査と実験を行い、ガス噴出に伴う帯電の火花放電が原因であることをつきとめた(中島ほか：1958)(高層気象台：1960)(中島ほか：1961)(穂田ほか：1961)。さらに穂田ほかは、防止策としてボンベの口金や気球への水素ガス充填に用いる浮力錘の出口に放電針を取付けることを考案した(図 3.2.10)。

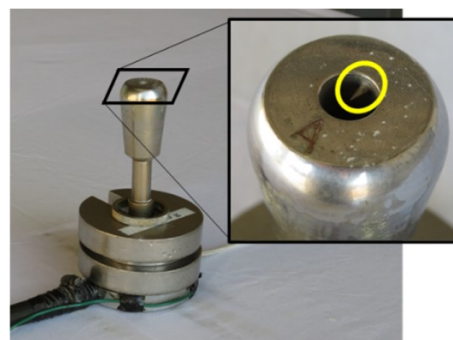


図 3.2.10 浮力錘と放電針(円内)

この考案は昭和 38(1963)年に「可燃性ガス容器の自然発火防止装置」として特許(特許出願公告: 昭 38-10792, 特許 0413702)を取得し, この功績により発明協会全国表彰及び運輸大臣表彰を受賞した(高層気象台: 1978)。

(16) 巻下器の開発

巻下器は, 強風時のゾンデ飛揚におけるゾンデ破損や気球破裂を避けるために使用するもので, 所定の長さの吊り紐を巻付けて気球とゾンデの間を短くすることでゾンデの飛揚を容易にし, 気球が上昇する間に吊り紐が次第にほどけて通常の長さになるものである。古くは昭和 26(1951)年刊行の「高層観測指針」に巻下器という記述がある。

昭和 41(1966)年頃からアルミ製の堅牢な「66 型運動式巻下器」(図 3.2.11 左)を使用してきたが, 昭和 47~48(1972~1973)年に観測部高層課の依頼により軽量で低コストの巻下器の開発に取り組んだものの当時は完成に至らなかった。その後, 昭和 56(1981)年にゾンデが軽量小型化したため, 昭和 61(1986)年から再び巻下器の開発に取り組む, 柳橋・中村(1987)が考案して実用新案登録した「緩降下装置」(実登 1986203)を原型として, 新井・大胡田(1988)がビニールホースとゴムバンドを組み合わせた「気象観測用巻下器」(実用新案出願広告, 平 5-8240)(図 3.2.11 中)を開発した。平成 29(2017)年 9 月に使用を開始した iMS-100 型の重量は 40g 未満と非常に軽量なので, 「気象観測用巻下器」をさらに小型化した「気象観測用小型巻下器」(図 3.2.11 右)を使用している。

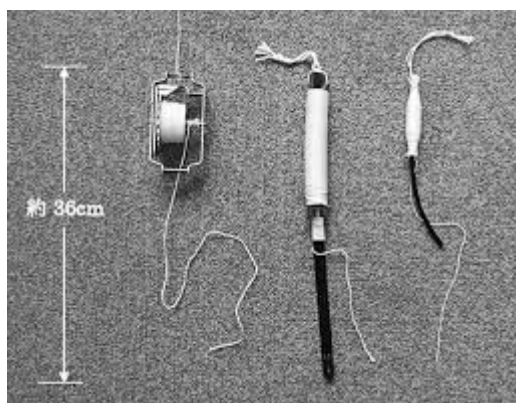


図 3.2.11 各種の気象観測用巻下器

左から 66 型運動式巻下器, 気象観測用巻下器, 気象観測用小型巻下器(阿部(2018)から引用)。

(17) パラシュート開傘率向上へのとりくみ

気球破裂後, ゾンデ等の飛揚器材は地上や海上に落下する。地上に落下する飛揚器材等(以下, 「落下ゾンデ」

という)による衝撃軽減のため, 地上付近での落下速度が 3~4m/s となるようにパラシュートを取り付けている。

パラシュート開傘率を向上させ地物衝突による事故を減少させるために, 昭和 45(1970)年頃に気球破裂後にパラシュートと気球残骸を切り離し別々に落下させる「気球切離し方式」(毛利: 1970, 渡辺: 1972), 平成 4, 9(1992, 1997)年にパラシュート下部と頂部を結ぶ転送紐に転送リングを通しそのリングに気球を結び飛揚する「転送リング方式」, 平成 6(1994)年にパラシュートを逆さにゾンデ下部に取り付けて飛揚する「逆さ吊り方式」, 平成 9(1997)年に気球内にパラシュートを収納して飛揚する「気球内収納方式」等, いくつかの方式について検討・試験が行われてきたが, 業務導入まで至らなかった。

成田ほか(1999)は, 平成 10(1998)年に改めて様々な接続方法について検討・試験飛揚を行い, 総合的に評価が高かったパイプセパレータ方式の利用を提案した。パイプセパレータ方式とは「切り離し装置方式」の一種で, 竹棒をパラシュート頂部に, パイプをゾンデあるいは吊り紐の中間に取り付けて, 竹棒をパイプにさした状態で飛揚する方式である。図 3.2.12 に中間取付タイプのパイプセパレータ方式を示す。平成 11(1999)年には「ラジオゾンデ用パイプセパレータ方式パラシュート」として実用新案登録(第 3065371 号)を取得した。高層気象台では, 平成 12(2000)年からパイプセパレータ方式で運用している。また, 平成 12(2000)年の高層気象台創立 80 周年記念式典において, 開発者の成田・梶原に対して「パイプセパレータ方式パラシュートを開発した功績」についての高層気象台長表彰が行われた。その後, ゾンデ軽量化に

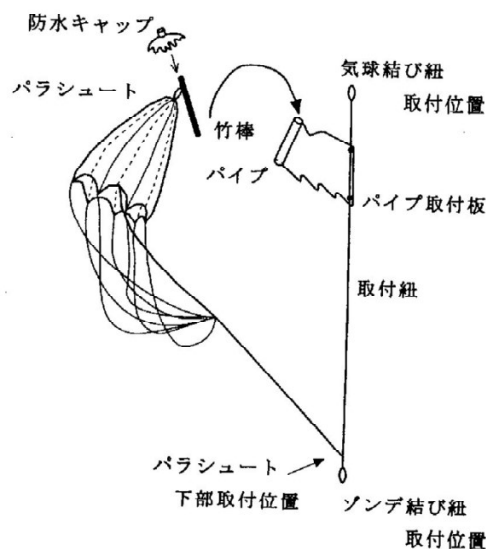


図 3.2.12 パイプセパレータ方式(中間取付タイプ)
(成田ほか(1999)から引用)。

対応した「つり紐直結型パイプセパレータ方式」を開発して、平成 27(2015)年 9 月から全国で運用されている。

また、強風時の開傘率向上等を図るため、峯野ほか(2000)が「ラジオゾンデ用収納方式パラシュート」を開発して、平成 12(2000)年に実用新案登録(第 3074645 号)を取得した。金子ほか(2007)は、パラシュートと巻下器を一体化したものを開発した。

平成 28(2016)年には、観測部観測課の依頼により iMS-100 型等の軽量ゾンデに対応した新型パラシュートの性能試験、不織布パラシュートの雨天時性能試験や生分解性素材パラシュートの性能試験を行った。

(18) ゾンデの落下位置予測

高層気象台では、昭和 41(1966)年頃から飛揚前 12 時間以内の観測資料を使い落下地点を推定する方法を開発(三浦：1966)して、オゾンゾンデ飛揚の可否の参考資料にする等、危険防止の観点でゾンデ落下地点の推定・把握に取り組んできた(竹内ほか：1979, 中村ほか：1990)。

平成 6(1994)年には、オゾンゾンデ飛揚の 6 時間前の観測データを用いて落下位置を予測するソフトウェアを開発した(木津・川上：1994)。その後、平成 11(1999)年には、ゾンデ落下中のデータをリアルタイムで利用し気球の残骸重量、開傘状況等の条件を考慮した着地位置等の予想・航跡等の表示を行う「ゾンデ落下位置監視プログラム」を開発した(中野ほか：1999)。

平成 13(2001)年頃から、任意の地点からのゾンデの飛揚から着地に至るゾンデの振る舞いを、ゾンデ飛揚前に数値予報データ等を利用してシミュレーションする「ゾンデの飛翔予測シミュレーション(AOS)プログラム」を開発(中野・藤田：2002)した。AOS によるゾンデ落下位置予測の例を図 3.2.13 に示す。平成 15(2003)年には、利

用者が WEB ブラウザ上で操作してシミュレーションを実行できる WEB アプリとした「ゾンデの飛翔予測情報システム」として完成(藤田：2003)させた。平成 17(2005)年には、予測精度の検証と地図描画の導入等の実運用化のための改善を行った(岩坪：2005)。また、平成 18(2006)年には、Windows 版「落下位置監視プログラム」が完成し、観測課を通じて地方官署へ配布されている。その後もゾンデ小型化等で飛揚器材に変更があると、落下位置予測に係るパラメータを見直して運用している(伊藤・奥山：2008)。

(19) 高層気象観測データの活用と今後の高層気象観測

ラジオゾンデによる高層気象観測は、観測回数が 1 日に 2 回と少なく、観測地点数も国内で 16 地点と限られているが、運営経費が高額となるため絶えず観測の効率化が求められている。しかしながら、上空の大気の状態を直接観測で立体的に把握するものはほかになく、非常に重要なものとなっている。この高層気象観測データはリモートセンシング観測の検証・グランドトゥルースデータとしての利用や、数値予報モデルの初期値やモデル開発の検証データとしての利用に欠かすことができないものである。さらに、高層気象観測データは国際的に交換されて、天気図作成や数値予報モデルによる気象予測に現業的に利用される気象業務の基盤データとなるほか、気象庁において編集・統計処理されて、気候変動の監視や気象災害等の調査を始め各種産業界等にも広く利用されている。

高層気象台は、ラジオゾンデによる観測の草創期から、試験飛揚の実施等でラジオゾンデの開発・改良に積極的に関わってきたが、GPS ゾンデではメーカーが開発・製品化を担うようになり、高層気象台が直接それに関わることはなくなった。しかし、商品化された GPS ゾンデによる観測とその結果が妥当なものかを正しく評価し、さらにメーカーに依存せずとも、より高精度な観測データを引き出す技術力が必要とされる。また高層気象台は、パラシュートの開傘率向上や落下ゾンデ位置予測等の安全に、かつ効率的に観測を行うための技術開発にも積極的に取り組んでおり、引き続きこれに貢献することが期待される。

高層気象台が行ってきた、長期間にわたる精密な高層気象観測の成果は、気候変動・大気環境監視にとって基礎となるもので、引き続き、新旧ラジオゾンデの切替時に両者の比較観測による系統的な差の把握とその補正による長期間均質な高層気象観測データを提供する等、気候変動等に資する観測データの提供に係る取り組みを着

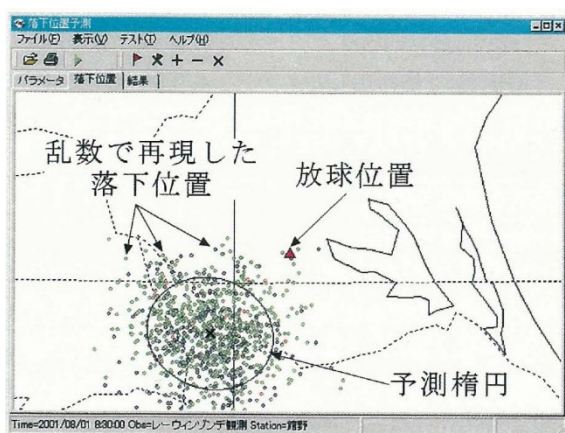


図 3.2.13 AOS によるゾンデ落下位置予測
(中野・藤田(2002)から引用)。

実に行うとともに、GRUAN(第6節で述べる)等のWMOによる様々な観測への参加を含め国際的な貢献してゆくことが期待される。

参考文献

- 安部貞八・阿部豊雄 (1995): 高層気象台におけるゾンデ観測 50 年. 高層気象台彙報, **55**, 1-10.
- 阿部豊雄 (2015): 気象庁における高層気象観測の変遷と観測値の特性 第1部 高層気象観測の変遷. 天気, **62**, 3-27.
- 阿部豊雄 (2018): 奨励賞を受賞して ―高層気象観測現場での創意工夫―. 天気, **65**, 51-55.
- 穂田巖・中島正一・伊達一俊 (1961): 水素ボンベと気球の帯電および自然発火について(第4報). 高層気象台彙報, **7**, 1, 20-28.
- 青柳二郎 (1974): オメガ高層風観測システムについて. 船と海上気象, **18**, 1, 1-7.
- 新井芳水・大胡田輝信 (1988): 高層観測用巻下器について. 高層気象台彙報, **48**, 11-16.
- 新井芳水・大胡田輝信・小城良友・大野恭治・荻原裕之・木津暢彦 (1990): 高層気象観測における測風測角を乱す反射波の調査について. 高層気象台彙報, **50**, 15-18.
- 浅井富雄・石川浩治・三沢信彦・名越利幸・青柳二郎・吉留英二・飯田睦治郎 (1979): オメガ高層風観測システムの予備実験. 天気, **26**, 361-370.
- 中央気象台 (1949): Report of Solar Eclipse Observation May 9, 1948. *Geophys. mag.*(中央気象台欧文彙報), **19**, 57-203.
- 中央気象台 (1951): 高層観測指針. 中央気象台, 269pp.
- DuBois, L. J., R. P. Multhau and C. A. ZIEGLER (2002): The Invention and Development of the Radiosonde, with a Catalog of Upper-Atmospheric Telemetry Probes in the National Museum of American History, Smithsonian Institution. Smithsonian Institution Press, SSHT No.53, 74pp.
- 榎本盛泰 (1983): RS2-80 型レーウィンゾンデの2,3の試験報告. 高層気象台彙報, **43**, 15-21.
- 淵秀隆 (1950): レーウィンについて. 測候時報, **17**, 93-97.
- 藤田建 (2003): ゾンデ飛行予測情報システムの開発. 高層気象台彙報, **63**, 13-24.
- 林則雄・阿部豊雄 (1994): つくばにおける WMO ラジオゾンデ比較観測(フェーズ IV). 高層気象台彙報, **54**, 13-30.
- 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.
- 岩坪昇平 (2005): ゾンデの飛行予測情報システムの利用について. 高層気象台彙報, **65**, 17-22.
- 金子哲治・中島浩一・日野原正巳 (2007): 生分解性素材を用いたパラシュート一体型巻下器の開発. 高層気象台彙報, **67**, 107-120.
- 金子敏正・宮本仁美・山内孝夫 (1988): 高層風観測における高度角の測角乱れについての一考察. 高層気象台彙報, **48**, 23-28.
- 観測部観測課 (2007): 集合型 GPS 高層気象観測システム(ABL)について. 測候時報, **74**, 127-166.
- 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.
- 観測部高層課 (1983): RS2-80 型と RSII-56 型レーウィンゾンデの比較観測について. 測候時報, **50**, 373-384.
- 観測部高層課 (1984): RS2-80 型レーウィンゾンデの気温基準ゾンデとの比較観測について. 測候時報, **51**, 367-377.
- 観測部高層課 (1987): 高層気象観測の自動化. 測候時報, **54**, 225-262.
- 観測部高層課 (1995): 高層気象観測の変遷と観測実施官署の履歴 ―観測資料の有効利用のために―. 気象庁観測部高層課, 97pp.
- 観測部高層課 (1996): JMA-91 型高層気象観測装置について. 測候時報, **63**, 49-82.
- 加藤美雄・阿保敏広・小林健二・泉川安志・石原正仁 (2003): 気象庁におけるウィンドプロファイラ観測業務. 天気, **50**, 891-907.
- 気象庁 (1975a): II 部門別史 第5章 高層気象観測. 気象百年誌, 339-351.
- 気象庁 (1975b): III 官署来歴 第3章 高層気象台. 気象百年誌, 気象庁, 573-581.
- 気象庁観測部・高層気象台・気象庁予報部・気象研究所 (1997): 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報告書.
- 気象研究所 (1994): 各種気象観測機器による比較観測. 気象研究所技術報告, **33**, 394pp.
- 北岡竜海 (1955a): 高層観測の有効運営について(1). 測候時報, **22**, 275-278.
- 北岡竜海 (1955b): 高層観測の有効運営について(2). 測候時報, **22**, 317-322.
- 北岡竜海 (1955c): 高層観測の有効運営について(3). 測候時報, **22**, 345-348.
- 北岡竜海 (1960a): 1950 年 9 月 12 日日食時の特別高層観

- 測. 高層気象台彙報, **6**, 4, A111-A171.
- 北岡竜海 (1960b): 圏界面付近の短周期振動. 高層気象台彙報, **6**, 4, 33-44.
- 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.
- 古林絵里子・吉井博之・阿部豊雄・金子祐也 (2012): RS2-91 型レーウィンゾンデと RS92-SGP 型 GPS ゾンデの比較観測データを用いた雨天時における雲頂付近及び成層圏の気温観測値の特性調査. 高層気象台彙報, **70**, 13-22.
- 古林絵里子・星野俊介 (2018): iMS-100 型と RS-11G 型 GPS ゾンデの比較観測による特性評価. 高層気象台彙報, **75**, 17-25.
- 高層気象台 (1950): 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, 高層気象台, 72pp.
- 高層気象台 (1954): 昭和 26-27 年冬季における高層風のリレー観測. 高層気象台彙報, **5**, 3, 199-218.
- 高層気象台 (1957): 昭和 31 年 1 月 9 日～3 月 5 日における高層風のリレー観測の資料. 高層気象台彙報, **6**, 1, A1-A40.
- 高層気象台 (1960): 水素ボンベと気球の帯電および自然発火について(第 2 報). 高層気象台彙報, **6**, 4, 137-167.
- 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 (2011): 明星電気 RS2-91 型レーウィンゾンデとヴァイサラ RS92-SGP 型 GPS ゾンデの相互比較試験観測と検証結果. 測候時報, **78**, 221 - 257.
- 高層気象台・観測部・予報部 (1998): 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 ―調査結果と提言―. 測候時報, **65**, 137-228.
- 毛利文郎 (1970): 気球切離し装置. 測候時報, **37**, 84-85.
- 中島正一・穂田巖・山田一郎 (1958): 水素ボンベの発火について(序報). 高層気象台彙報, **6**, 2, 87-92.
- 中島正一・穂田巖・伊達一俊 (1961): 水素ボンベと気球の帯電および自然発火について(第 3 報). 高層気象台彙報, **7**, 1, 16-19.
- 中村忠・茂林良道・菊池勝敏 (1990): レーウィンゾンデの落下地点推定. 高層気象台彙報, **50**, 19-22.
- 中野辰美・坂尻政市・肆矢朗久・長井勝栄・阿部豊雄 (1999): ゾンデ落下位置監視プログラムの開発. 高層気象台彙報, **59**, 13-24.
- 中野辰美・藤田建 (2002): ゾンデの飛翔予測シミュレーションプログラムの開発 ―ゾンデの飛翔予測情報システムの実現にむけて―. 高層気象台彙報, **62**, 7-16.
- 成田修・大胡田輝信・瀬堀パトリック・鳥井克彦・峯野秀美 (1999): パイプセパレータ方式パラシュートの開発. 高層気象台彙報, **59**, 1-12.
- Nash, J., R. Smout, T. Oakley, B. Pathack and S. Kurnosenko (2005): WMO Intercomparison of High Quality Radiosonde Systems Vacoas, Mauritius, 2-25 February 2005. 118pp.
(http://www.wmo.int/pages/prog/www/IMOP/reports/2003-2007/RSO-IC-2005_Final_Report.pdf)
- Nash, J., T. Oakley, H. Vomel and W. LI (2011): WMO Intercomparison of High Quality Radiosonde Systems (Yangjiang, China, 12 July – 3 August 2010). WMO/TD 1580, 238pp.
- 松崎卓一 (1982): ラジオゾンデの開発時代. 水路, **11**, 3, 49-50.
- 峯野秀美・中村誠・澁江昇・鎌田浩嗣・川江訓 (2000): ラジオゾンデ用収納方式パラシュートの開発. 高層気象台彙報, **60**, 1-8.
- 三浦四郎 (1967): ゾンデ落下点の推定法. 研究時報, **18**, 522-526.
- 坂尻政市・須田智 (1996): 気象衛星の追跡による方向探知機の測角値の点検について. 高層気象台彙報, **56**, 45-48.
- 佐藤尚志・尾関一頼・伊藤肇 (1993): 2 台の方向探知機による高層風の比較観測からみたラジオセオドライト方式の精度. 高層気象台彙報, **53**, 17-22.
- 瀬古弘・吉崎正憲・楠研一・つくば域降雨観測実験グループ (1998): 1995 年 8 月 16 日に関東地方を通過したスコールライン. 天気, **45**, 93-103.
- 澁江昇・阿部豊雄・木津暢彦 (2000): RS2-91 型レーウィンゾンデの新旧湿度センサ比較(速報). 高層気象台彙報, **60**, 9-16.
- Silveira, R. B., G. F. Fisch, L. A. T. Machado, A. M. Dall'Antonia, L. F. Sapucci, D. Fernandes, R. Marques and J. Nash (2006): WMO Intercomparison of GPS Radiosondes Alcântara, Brazil 20 May - 10 June 2001. WMO/TD 1314, 61pp.
- 清水正義 (1982): 気象観測と測器 3. 高層気象観測. 天気, **29**, 13-21.
- 角俊治 (1955): 1952～1953 年冬季における館野-本庄の上層風. 高層気象台彙報, **6**, Suppl., 33-40.
- 鈴木茂 (1963): 新しい高層風観測装置(エコー方式)について, 天気, **10**, 25-32.
- 竹内旦・田村竹男・安倍貞八・福森正光・忠鉢繁 (1979):

- 現用レーウィンゾンデ及びレーウィンの落下について. 高層気象台彙報, **40**, 7-12.
- 竹内謹治・高木雄太・五十嵐耕 (2014): 電波標識温故知新(1) ～オメガ航法システム 第1部～. 電波航法, **56**, 3-8.
- 上里至・伊藤智志・熊本真理子・茂林良道・中村雅道 (2008): ラジオゾンデの歴史的変遷を考慮した気温トレンド(第1報). 高層気象台彙報, **68**, 15-22.
- VAISALA (2014): Sounding Generations. VAISALA NEWS, **192**, 6.
- 和達清夫 (1993): 【最新】気象の事典. 和達清夫監修, 東京堂出版, 607pp.
- 渡辺幸一 (1972): 気球切離し装置(改良型). 測候時報, **39**, 58-59.
- WMO (2018): Chapter 12. Measurement of Upper-air Pressure, Temperature and Humidity. Guide to Instruments and Methods of Observation Volume I –Measurement of Meteorological Variables, WMO 8, 370-442.
- Yagi, S., A. Mita and N. Inoue (1996): WMO International Radiosonde Comparison -Phase IV- Tsukuba, Japan, 15 February – 12 March 1993 Final Report. WMO/TD 742, 130pp.
- 柳橋度・中村匡善 (1987): レーウィン用軽量巻下器について. 高層気象台彙報, **47**, 22-25.
- 柳本俊亮 (1939): ラジオゾンデの解説. 測候時報, **10**, 5, 157-163.
- 予報部数値予報課 (2015): 観測データ利用の現状と課題. 数値予報課報告・別冊, **61**, 98pp.
- 湯浅光朝 (1977): 13. 台風(高層)研究部関係一天沼分室における研究. 気象研究所, 気象研究所三十年史, 106-107.