

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

阿 部 豊 雄*

1. はじめに

気象庁の気球を用いた高層気象観測は、1921年4月、茨城県小野川村館野（現つくば市）に設立された高層気象台（地点名：館野）における高層風観測で始まり、同年10月に福岡で、ついで11月に札幌でも開始された。無線技術を利用した高層気象の定常観測は、1938年6月、千葉県布佐に設置された中央気象台布佐出張所におけるラジオゾンデ観測により開始された（気象庁 1975）。以後、気象庁におけるラジオゾンデ観測は、2013年で75年が経過した。

観測成果である高層気象観測資料は、高層気象観測原簿や高層風観測原簿などとしてマイクロフィルム等に複製され気象庁において永久保存されていて閲覧が可能である。また、1947年7月からは国内全高層気象観測地点における毎月の高層気象観測資料を収録した Aerological Data of Japan（以下「高層月報」）が刊行され、1995年からは CD-ROM で発行されている。観測地点によって掲載開始年月は異なるが、気象庁のホームページでも公開されている。

高層気象観測資料は天気予報の基礎値や航空機の運航のために即時的に用いられ、蓄積された資料は大気現象を把握、解明する等の調査研究に使用されてきた。近年、気候問題への関心の高まりから、天気予報や航空機の運航のための利用においてさほど問題にならなかった、ラジオゾンデの変更に伴う観測値の特性の違いが世界的にも重要視されるようになった（藤原 2011）。

最近、日本気象学会から「高層気象観測の発展と現状（水野ほか 2014）」が刊行されたが、これまでの高層気象観測に使用されたラジオゾンデとそのデータ処理について系統的に解説したものはない。このため本稿において第1部で気象庁が1951年以降定常観測に使用したラジオゾンデとそのデータ処理、高層風観測の変遷について解説し、第2部で累積データの時系列特性と、ラジオゾンデの移行時に実施した特性比較観測の結果等について紹介する。

なお、南極昭和基地と気象観測船での高層気象観測、現在の岩手県大船渡市三陸町綾里において1970年から2001年まで実施した気象ロケット観測およびリモートセンシングによる高層気象観測は本稿で対象にしない。

2. 本稿で用いる主な用語の説明

本解説で使用する主な用語の意味は次のとおりである。

①ラジオゾンデ：

気圧・気温・相対湿度（以下「湿度」）を測定するセンサと無線送信器等で構成され、各センサの測定値を無線で地表に送信する高層気象観測器である。本稿では、ラジオゾンデ、レーウィンゾンデ、GPS ゾンデを特に区別する必要がない場合に、これらを総称して「ラジオゾンデ」、または単に「ゾンデ」と記述する。

②レーウィンゾンデ：

ラジオゾンデのうち、ゾンデからの電波を地上設置の無線方向探知機で追跡することにより、気圧・気温・湿度と高層風を同時に観測する高層気象観測器である。

③GPS ゾンデ：

ラジオゾンデのうち、全球測位システム（GPS：

* Toyoo ABE（無所属）、

東京都立川市若葉町1-13-2 20-305.

—2013年12月17日受領—

—2014年11月25日受理—

Global Positioning System) を利用して、高度(気圧)・気温・湿度と高層風を同時に観測する高層気象観測器である。GPS ラジオゾンデとも呼ばれるが、本稿では「GPS ゾンデ」と記述する。

④ゾンデ測定信号：

ラジオゾンデから送信される各要素の生データのことをいう(物理量変換前の場合もある)。ゾンデ測定信号の任意の点を示す場合は「測定点」という。このゾンデ測定信号は、観測処理終了後一定の保存期間が経過すると廃棄される。

⑤気温湿度観測点：

気温と湿度の鉛直プロファイルを再現するため、高層気象観測指針が定める基準でゾンデ測定信号から抽出された測定点をいう。気温湿度観測点を単に「観測点」と記述する場合がある。この気温湿度観測点のデータを用いて高度計算を行い、データは保存・公開される。

⑥風観測点：

高層気象観測指針が定める基準で一定時間間隔に風向・風速を算出した測定点をいう。データは保存・公開される。

⑦気温湿度特異点：

観測データを国際交換するために世界気象機関(WMO: World Meteorological Organization) が定めた通報基準で選ばれる観測点で、指定された観測点と気温・湿度の鉛直構造を最小限のデータで再現するための特徴的な観測点からなる。指定された観測点には地上、湿度の最終点、圏界面、観測終了点がある。特徴的な観測点は、等温層の上下端、逆転層の上下端および隣りあった特異点間を直線で結んで得られた気温と観測点の気温の差が地上から300 hPa 面まで1°C、300 hPa 面以高が2°C、同様に湿度の差が15% (RH) を超えないという条件を満足するために必要な観測点である。

特異点選択と観測データの国際交換形式(TEMP 報)については阿保(2001)が詳しいので参照されたい。

⑧風特異点：

WMO が定めた通報基準で選ばれる観測点で、指定された風観測点と風向・風速の鉛直構造を最小限のデータで再現するための特徴的な風観測点からなる。指定された風観測点には、地上および観測終了点と風速が最大の風観測点がある。特徴的な風観測点は、隣りあった特異点間を直線で結んで得られ

た風向・風速が、観測値から風向で10°、風速で5 m/sec を超えないという条件を満足するために必要な風観測点である。

⑨指定気圧面：

次に示す1000, 925, 900, 850, 800, 700, 600, 500, 400, 350, 300, 250, 200, 175, 150, 125, 100, (80), 70, (60), 50, 40, 30, 20, 15, 10, 5 hPa の気圧面である。ただし、80と60 hPa の使用は1960年12月までである。70 hPa は1961年1月に、925 hPa は1991年11月に加えられた。各指定気圧面データは保存され、平年値等の統計結果も含め公開される。

⑩測風経緯儀：

高層風観測に用いられる観測器で、望遠鏡が水平軸と垂直軸の2軸によって回転する構造となっており、観測者が視準して目標物(高層風観測では気球)を捕えたときの方位角と高度角を測定する。一般にトランシットやセオドライトとも呼ばれる。(第15図参照)

⑪集合型 GPS 高層気象観測システム (ABL: Automatic Balloon Launcher)：

あらかじめ観測者が複数観測分の GPS ゾンデや気球等の飛揚器材を所定の位置にセットしておき、設定したスケジュールに従い、GPS ゾンデの飛揚前点検、気球への水素ガス充てんと飛揚、地上気象要素データの取込み、GPS 測位信号および GPS ゾンデからの信号の受信、観測データの処理、高層気象観測電報の送信等を自動的に行うシステムである(気象庁 2004; 観測部観測課 2007)。気象庁が運用する ABL には、ヴァイサラ社製の AUTOSONDE と明星電気社製の ARS (Automated Radiosonde System) の2種類がある。本稿では ABL (V 社製) と ABL (M 社製) として区別する。

3. 高層気象観測地点の変遷と観測資料

ラジオゾンデによる定常的な高層気象観測は中央気象台布佐出張所において開始された。その後、同出張所での観測は大島測候所に引き継がれ1941年7月に中止された。ラジオゾンデによる高層気象観測地点は1940年から1946年にかけて2から3地点ずつ新設されたが短期間で観測を終了した地点もあって(気象庁1968)、気象庁の高層気象観測地点がほぼ確立したのは、根室、八丈島、名瀬で観測が開始された1957年である。高層気象観測地点の間隔は、WMO の GOS マ

第1表 地点別高層気象観測資料。

地点名 (地点番号)	高層風観測*1)	ラジオゾンデ観測 レーウィン ゾンデ観測	GPS ゾンデ観測	備 考*2)
稚 内 (47401)	1941.11.12 ～04.2.29	1945.12.15 ～09.11.30	2009.12.1～	
札 幌 (47412)	1921.11.28 ～04.2.29	1940.2.10 ～09.11.30	2009.12.1～	
根 室 (47420)	1941.8.1 ～04.2.29	1957.7.1 ～10.3.14		2010.3.14 21h で高層気象観測終了
釧 路 (47418)			2010.3.15～	ABL (V社製) による GPS ゾンデ観測開始
秋 田 (47582)	1936.1.1 ～04.2.29	1946.2.1 ～09.11.30	2009.12.1～	
仙 台 (47590)	1937.7.7 ～04.2.29	1942.1.1 ～08.3.31		2008.3.31 21h で高層気象観測終了
輪 島 (47600)	1941.6.6 ～04.2.29	1941.7.17 ～10.2.28	2010.3.1～	ABL (V社製) による GPS ゾンデ観測開始
館 野 (47646)	1921.4.1 ～04.2.29	1944.10.4 ～09.11.30	2009.12.1～	1999.7.1 21h 高高度レーウィンゾンデ観測開始
八 丈 島 (47678)	1957.7.29 ～03.5.31	1957.7.29 ～03.5.31	2003.6.1～	ABL (V社製) による GPS ゾンデ観測開始 2010.3.23 ABL (M社製) による GPS ゾンデへ移行
米 子 (47744)	1947.4.30 ～04.2.29	1947.4.30 ～09.9.30	2009.10.1 ～10.2.28	2010.2.28 21h で高層気象観測終了
松 江 (47741)			2010.3.1～	ABL (V社製) による GPS ゾンデ観測開始
潮 岬 (47778)	1941.9. ～04.2.29	1941.1.18 ～10.2.28	2010.3.1～	1955.12.1 高層分室へ移転 ABL (V社製) による GPS ゾンデ観測開始
福 岡 (47807)	1921.10. ～48.8.31 1957.7.1 ～04.2.29	1939.1.1 ～48.8.31 1957.7.1 ～09.11.30	2009.12.1～	1948.9.1～57.6.30高層気象観測中断
鹿 児 島 (47827)	1939.1.1 ～04.2.29	1946.1.19 ～09.11.30	2009.12.1～	1957.11.23鹿児島／吉野へ移転 1994.2.25合同庁舎入居のため移転
名 瀬 (47909)	1941.10.24 ～04.2.29	1957.4.15 ～07.2.28	2007.3.1～	1957.9.1名瀬／本茶峠へ移転 1955.3.1～高層月報に高層風観測資料掲載 2007.3 ABL (M社製) による GPS ゾンデ観測開始
石 垣 島 (47918)	1940.6.20 ～60.8.29 1964.9.1 ～04.2.29	1964.8.8 ～06.2.28	2006.3.1～	1951.9～54.7の期間は高層月報に高層風観測資料の掲載なし ABL (M社製) による GPS ゾンデ観測開始
那 覇 (47936)	1927*3) 1973.1.1 ～04.2.29	1940.2.5 ～44.10.10 1973.1.1 ～08.3.31		1944.10.10～72.12.31高層気象観測中断 2008.3.31 21h で高層気象観測終了し、オゾンゾンデ観測のみ継続
南大東島 (47945)	1947.1.1 ～60.10.31 1962.4.25 ～04.2.29	1961.4.2 ～05.2.28	2005.3.1～	1951.7～54.7の期間は高層月報に高層風観測資料の掲載なし ABL (V社製) による GPS ゾンデ観測開始
父 島 (47971)	1968.6.26 ～03.2.28	1968.6.26 ～03.2.28	2003.3.1～	1969.5.1～高層月報に高層気象観測資料掲載 シビカン社製 GPS ゾンデ
南 鳥 島 (47991)	1951.3.1 ～63.6.30 1968.7.1 ～02.2.28	1951.2.15 ～63.6.30 1968.7.1 ～02.2.28	2002.4.1～	1963.6.30～68.6.30の期間は米国気象局が高層気象観測実施 1969.5.1～高層月報に再開後の高層気象観測資料掲載 明星電気社製 GPS ゾンデ

*1) パイボール観測, レーボール観測又はレーウィン観測 (2004年2月29日15時の観測で終了) による高層風観測資料

*2) 備考欄中の ABL (V社製) はヴァイサラ社製の集合型 GPS 高層気象観測システムの, ABL (M社製) は明星電気社製自動放球システムの略称

*3) 高層風観測 (パイボール観測) の開始年の他は詳細不明

第2表 1951年以降の定常観測に使用されたラジオゾンデ (安倍・阿部 (1995) の表に追加し作成)。

年	型名 ^(*) 及び 使用期間	気圧センサ	気温センサ	湿度センサ	備考
1951	S50 L型, M型あり	空ごう気圧計 ・L型: 直径43 mm のリ ン青銅製空ごう2個連結 ・M型: 直径42 mm の波 なし型洋白製空ごう2個 連結	バイメタル温度計 ・両面ニッケルメッキ ・L型: 長さ50 mm, 幅42 mm, 厚さ0.23-0.28 mm ・M型: 長さ37 mm, 幅27 mm, 厚さ0.25 mm ・切断式温度計で校正	毛髪湿度計 ・L型: 長さ60 mm の毛髪16本 ・M型: 長さ55 mm の毛髪24本	・データ伝送方式は符号式 ・S52型と RS52型は S50型の符号板を改良したもの ・52型への移行は, 観測地点で異なり, 1952年7月から11月にかけて実施された ・吊紐の長さは7 m
1952	S52, RS52 L型, M型あり				
1954	S53, RS53 K型, M型, Ka型, Ma型あり	空ごう気圧計 ・K型: 直径42 mm の波なし型洋白製空ごう2個連結 ・M型: 直径44 mm の波つきリン青銅製空ごう2個連結 ・Ka型と Ma型: 波なしリン青銅製空ごう2個連結で, Ka の直径は42 mm, Ma の直径は44 mm	バイメタル温度計 ・ニッケルメッキのバイメタルで, 長さ50 mm, 幅42 mm, 厚さ0.25 mm ・切断式温度計で校正	毛髪湿度計 ・圧延処理した長さ60 mm の毛髪20本	・データ伝送方式は符号式 ・気圧センサは各型により材質や形状が異なるが, 気温センサと湿度センサの仕様は統一された ・バイメタルへの取付け部からの熱伝導の影響を除くため熱遮断型に改良した ・53型への移行は, 観測地点により異なり, 1954年4月から6月に実施された ・吊紐の長さは7 m
1956	S56, RS56, RS II56 根室, 秋田, 館野, 八丈島, 鹿児島では同じ気圧・気温・湿度測定部を用いたエコーゾンデ (ES58, ES61, ESr8) が使用された時期あり	空ごう気圧計 ・直径44 mm の波なし型リン青銅製空ごう2個連結	バイメタル温度計 ・S53型, RS53型と同じ ・切断式温度計で校正	毛髪湿度計 ・圧延処理した長さ60 mm の毛髪10本 ・RS56型は導入時毛髪20本を使用した ・1957年1月から10本に変更	・データ伝送方式は符号式 ・56型への移行は, 観測地点により異なり, 1956年6月から7月に実施された ・RS II56型は, 変調器と発信器の一部及び完全トランジスタ化が図られ, RS II56T型 (1969年), RS II56A型 (1976年) と型名が変更された ・吊紐の長さは1968年6月に7 m から15 m に変更
1981	RS2-80 (レーウィンゾンデ)	空ごう気圧計 ・直径60 mm の鉄・ニッケル合金製アネロイド気圧計 ・78接点の接点式気圧計 ・各接点間で約6 kΩの抵抗差があり, 接点抵抗から接点番号と気圧値を求める	サーミスタ温度計 ・小型ダイオードタイプの白色塗装したサーミスタ	カーボン湿度計 ・長方形のアクリル基板に微粒子カーボン等を塗布した湿度計	・伝送方式は変調周波数変換式 ・要素切替え周期は, アナログ記録用が1要素3秒で, 自動処理用が1要素1秒 ・80型への移行は観測地点により異なるが1981年3月1日から3月3日の短期間に行われた ・吊紐の長さは15 m
1992	RS2-91 (レーウィンゾンデ)	空ごう気圧計 ・直径46 mm の鉄・ニッケル合金製アネロイド気圧計 ・静電容量変換式で気圧を連続的に測定	サーミスタ温度計 ・日射と赤外放射の影響を少なくするためサーミスタにアルミニウム蒸着し, 水滴付着軽減にシリコン膜を塗布	高分子静電容量式湿度計 ・日射及び赤外放射による影響と水滴付着を軽減するためのアルミ製保護カバー付き	・伝送方式は変調周波数変換式 ・要素切替え周期は1要素1秒 ・JMA-91型高層気象観測装置の整備に合わせて, 80型から順次移行 ^(*) ・吊紐の長さは15 m
2002	RS-01G (GPS ゾンデ) 明星電気社製	搭載なし ・GPS 測位による高度と気温, 湿度から計算	サーミスタ温度計 ・RS2-91型 レーウィンゾンデと同じ	高分子静電容量式湿度計 ・RS2-91型 レーウィンゾンデと同じ ・アルミ製保護カバー付き	・デジタル伝送方式 ・観測値は1秒毎 ・2002年4月南島で移行 ・吊紐の長さは15 m

2003	MARK II A (GPSゾンデ) シッピカン社製	搭載なし ・GPS 測位による高度と 気温、湿度から計算	チップサーミスタ温度計 ・赤外線反射用と撥水用 の2種類をコーティング 処理	炭素被膜式湿度計 HYGRISTOR	・デジタル伝送方式 ・観測値は1秒毎 ・2003年3月父島で移行 ・吊紐の長さは15 m
	RS80-15GA (GPSゾンデ) ヴァイサラ社製	静電容量式アネロイド気圧 計	静電容量式ヒーズ温度計	静電容量式薄膜湿度計 ・アルミ製保護カバー付 き	・デジタル伝送方式 ・観測値は2秒毎 ・2003年6月八丈島で移行 ・吊紐の長さは60 m
2004	RS92-AGP (GPSゾンデ) ヴァイサラ社製	シリコンセンサ気圧計 ・シリコンセンサを用いた 気圧計	静電容量式ワイヤ温度計 ・高反射アルミ薄膜によ り日射の影響を軽減	薄膜静電容量式加熱2セ ンサ湿度計 ・加熱抵抗を持つ2セン サで水分等を加熱して 蒸発 ・2センサは加熱と計測 を交互に行う	・デジタル伝送方式 ・観測値は2秒毎 ・2004年1月八丈島で移行 ・2005年3月南大東島で移行 ・吊り紐の長さは60 m
2006	RS-01GM (GPSゾンデ) 明星電気社製	搭載なし ・GPS 測位による高度と 気温、湿度から計算	サーミスタ温度計 ・RS2-91型 レーウィン ゾンデと同じ	高分子静電容量式湿度計 ・RS2-91型 レーウィン ゾンデと同じ ・アルミ製保護カバー付 き	・デジタル伝送方式 ・観測値は1秒毎 ・2006年3月石垣島で移行 ・2007年3月名瀬、8月南鳥島で移行 ・吊紐の長さは15 m
2007	RS92-SGP (GPSゾンデ) ヴァイサラ社製 (2009年12月 から RS92-SGPJ**)に 変更)	シリコンセンサ気圧計 ・RS92-AGP 型と同じ	静電容量式ワイヤ温度計 ・RS92-AGP 型と同じ	薄膜静電容量式加熱2セ ンサ湿度計 ・RS92-AGP 型と同じ	・デジタル伝送方式 ・観測値は2秒毎 ・RS92-AGP 型の送信出力(20 mW)を70 mW に変更 ・2007年6月八丈島、7月南大東島で移行 ・吊紐の長さは30 m
2008	LMS6 (GPSゾンデ) ロッキード マーチン シッピカン社製	搭載なし ・GPS 測位による高度と 気温、湿度から計算	チップサーミスタ温度計 ・MARK IIA 型と同じ	高分子静電容量式湿度計 ・温度補償用サーミスタ をセット ・保護カバーを取り付け雨 滴等から湿度センサと 温度補償用サーミスタ を保護	・デジタル伝送方式 ・観測値は1秒毎 ・2008年3月父島で移行 ・吊紐の長さは15 m
2009	RS-06G (GPSゾン デ) 明星電気社製	搭載なし ・GPS 測位による高度と 気温、湿度から計算	サーミスタ温度計 ・センサのサイズを小さ くし RS-01GM に比 して応答性が良く、日 射補正量が少ない	高分子静電容量式湿度計 ・RS-01GM に比して保 護カバーの直径が1.5 倍で、材質をアルミか ら樹脂に変更	・デジタル伝送方式 ・観測値は1秒毎 ・2010年2月石垣島、3月八丈島、7月名 瀬で移行 ・吊紐の長さは15 m
2010	RS-11G (GPSゾン デ) 明星電気社製	搭載なし ・GPS 測位による高度と 気温、湿度から計算	サーミスタ温度計 ・日射と赤外放射の影響 を避けるため表面にア ルミ蒸着 ・水滴の付着を軽減する ためセンササイズを約 1 mm と小さくしてセ ンサ取付け部を改良	高分子静電容量式湿度計 ・日射と赤外放射を避 け、水滴付着を防止す る保護カバーはアルミ 蒸着した合成樹脂を使 用	・デジタル伝送方式 ・観測値は1秒毎 ・電池を含む重量は85 g (定常観測のラジ オゾンデでは最も軽量) ・2013年7月姫野、同9月稚内、札幌、秋 田、福岡、鹿児島で移行 ・吊紐の長さは10 m
2013					

* 1) 型名のSはラジオゾンデを、RSはラジオゾンデとレーウィン (高層風観測) を併せたレーウィンゾンデを表す。

* 2) RS2-80型からRS2-91型への移行年月

1992年10月：館野 92年11月：秋田、仙台、輪島、八丈島、米子、名瀬 93年2月：根室、那覇 93年12月：稚内、南鳥島
1994年1月：父島 94年2月：札幌、鹿児島 95年2月：福岡 96年2月：南大東島 97年2月：石垣島* 3) RS92-SGPJへの移行年月
2009年12月：稚内、札幌、秋田、館野、福岡、鹿児島 10年2月南大東島、10年3月：釧路、輪島、松江、潮岬
SGPJは、吊紐の長さが15 m、設定周波数が404.5 MHz、電源がスイッチ付き乾電池の日本仕様である。

ニユアル (WMO 2003) が要請するところの、一般的に陸域で250 km, 海洋域で1000 km を超えない水平解像度をほぼ満たす配置である。

第1表に、日本上高層資料30年報 (気象庁 1983) に観測資料が収録されている地点の高層気象観測資料の開始と終止の期日を示す。同表には、2009年12月に気象庁のレーウィンゾンデ観測が全面的に GPS ゾンデ観測へ移行することに合わせ2010年3月に集合型 GPS 高層気象観測システム (ABL) の整備で再配置された地点 (根室を釧路に、米子を松江に移転) も加えた。この表は、高層気象観測の変遷と観測実施官署の履歴 (気象庁観測部高層課 1995), 気象庁イントラホームページ掲載の気象官署履歴, 気象庁マイクロフィルム目録 (気象庁 1968) および高層月報を参考に作成したものである。

次に第1表の補足を記述する。

那覇の観測は、1940年2月に開始されたが1944年10月10日の空襲で観測を中断した。第2次世界大戦終了後はアメリカ軍によって行われ、その後、沖縄の復帰 (1972年5月15日) に伴い1973年1月1日に再開された (気象庁 1975)。しかし、同地点の観測は、仙台と同じ2008年3月31日に終了した。

福岡の1948年9月1日から1957年6月30日までの観測中断は、日米行政協定により米軍が板付で観測を実施したことに伴うものであった (福岡管区気象台イントラホームページ掲載の福岡高層沿革より)。

南鳥島の観測は、1951年2月から米軍の委託により開始されたが、1963年6月米国のマーカス島ロラン局の完成とともに米国気象局に移管された。その後、1968年6月に小笠原諸島が日本に返還された同年7月1日に気象庁による観測が再開された (気象庁海洋気象部 1979)。

4. ラジオゾンデ観測の変遷

高層気象観測で用いるラジオゾンデは、観測精度の向上に加えて、小型軽量化・低廉化のため、その時々最新の電子部品や電子工学、通信・情報処理技術を取り入れて改良と改善が図られて来た。このため、定常観測開始当初のラジオゾンデは、1年で更新された場合や、観測のつど異なる型式のものが使用されたこともあった。高層月報には、観測に使用したラジオゾンデの型名や測定に用いたセンサ等の詳細仕様が掲載されている。

第2表は日本上高層資料30年報 (気象庁 1983) 作

成の起年である1951年以降の定常観測で使用したラジオゾンデの型名、各センサの仕様等をまとめたものである。この表は安倍・阿部 (1995) の表に加除して作成したもので、ラジオゾンデの使用期間が分かるように変更のあった年および移行年を灰色で示してある。

1981年導入の RS2-80型レーウィンゾンデまでは新型式のラジオゾンデへの移行が1年以内に全地点で行われているが、RS2-91型レーウィンゾンデの場合は最初の館野 (1992年10月) から最後の石垣島 (1997年2月) まで約5年の移行期間がある。2002年に南鳥島で GPS ゾンデ観測へ移行後は、レーウィンゾンデ観測の GPS ゾンデ観測化が進められるとともに外国製品も採用されたことにより、観測地点毎に使用されるゾンデが異なり、定常観測に用いられる GPS ゾンデの種類は多様化した。

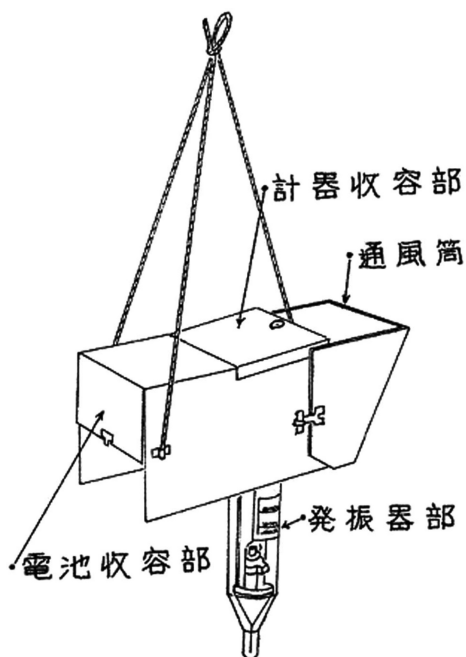
1950年以前に使用されたラジオゾンデについては、気象百年史 (気象庁 1975) の「II 部門別史、第5章 高層気象観測」、小熊 (1969)、安倍・阿部 (1995) が詳しいので参照されたい。

4.1 定常観測開始当初のラジオゾンデ

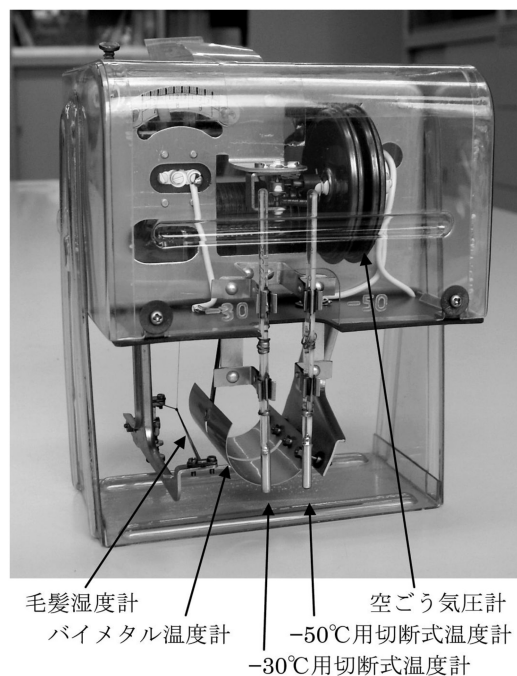
最初の定常観測に用いられたラジオゾンデは3元式の中央気象台1号型ラジオゾンデであった。このラジオゾンデは、気象要素の変化とともに送信周波数が連続的に変化する搬送周波数変化式であり、ひとつの気象要素についてひとつの送信機を内蔵しているため、気圧・気温・湿度測定専用の3台の短波受信機を必要とした。気圧・気温・湿度の3要素を観測するため、周波数の使用帯域が6.2~12 MHz と広く、無線電や電話等との混信があり観測に困難をきたすことがしばしばであった (気象庁 1975)。このため、搬送周波数を27.7 MHz に固定し、各気象要素の測定値をモース符号として送信する符号式ラジオゾンデが開発され、1949年2月頃から使用されるようになった。1950年4月からは国際電気通信条約の割当周波数帯である402 MHz に切り換えた (藤原 1950)。

4.2 符号式ラジオゾンデ (S50型~RS II56型)

1951年に使用されたゾンデはS50型であった。その後種々の改善が図られ、第2表に示す通りS52型、S53型、S56型と型名が改められた。ゾンデの種類は、手動追跡型無線方向探知機用の送信周波数408 MHz のRS52型、RS53型、RS56型と、自動追跡記録型方向探知機用の指向性の強い送信周波数1680 MHz のRS II56型があり、1982年2月まで使用された。最も長期間使用されたRS II56型の外観図を第1図に、計



第1図 RS II56型レーウィンゾンデの外観図。
大きさ (W×D×H) は330×120×373
mmで、重量は約1150gである。気象
庁 (1973a) 掲載の第23.1図を転載。



第2図 RS II56型レーウィンゾンデの計器部。
大きさ (W×D×H) は105×88×127
mmである。高層気象台 (茨城県つく
ば市) の談話室に展示されているものを
2014年7月22日に撮影したものである。

器部の写真を第2図に示す。

4.2.1 ゾンデの概要

ゾンデは、センサ部 (空こう気圧計・バイメタル温度計・毛髪湿度計) および計器部 (符号発生機構・モータ) と発振器部等で構成される。各気象要素の測定値は、それぞれのセンサの器械的变化をペン機構で拡大し、モールス符号として送信された (観測部高層課 1972; 清水 1982)。

開発当初は、気象要素の変化に応じた観測値をモールス符号として断続的に送信したが、RS52型からは搬送波を可聴周波数で変調して送信する方式に変更された。各気象要素は約5秒毎に測定されるように計器部のモータの回転速度が設定された。

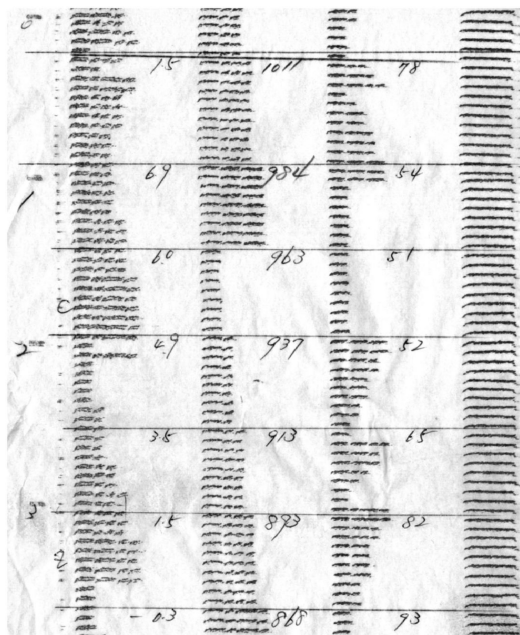
気圧・気温・湿度値とモールス符号との関係は、1台毎の目盛付け (検定) を気象庁が行った。符号回路には、長さ80 mm、太さ3 mmの水銀温度計を2本入れバイメタル温度計の作動状況の確認を行った。水銀温度計は、切断式温度計で、それぞれ約-30℃と約-50℃に達すると回路が切れるように接点を設けてある。温度が約-30℃で湿度符号を打ち切り、約-50℃

で区切り符号を変化させるようになっている。従って、湿度の観測は約-30℃で打ち切れ、約-30℃と約-50℃においてバイメタル温度計の測定値と切断式温度計の値を比較することにより、センサが凍結等による誤観測を生じていないか確認し信頼性の判断を行った (気象庁 1963)。

4.2.2 ゾンデ測定信号の処理

ラジオゾンデから送信される符号 (ゾンデ測定信号) の記録は、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行われた。第3図はゾンデ測定信号の記録例である。

気圧・気温・湿度の算出は、受信記録のすべての符号の変わり目について行うのではなく、地上および気圧符号の変わり目 (気圧観測点: 気圧1符号幅は地上付近で約25 hPa, 100 hPa 付近で約7 hPa, 30 hPa 付近で約4 hPa), 温度と湿度の記録における特徴的な測定点, 湿度測定 of 最終点 (約-30℃) および観測終了点として選定された気温湿度観測点について行われた。

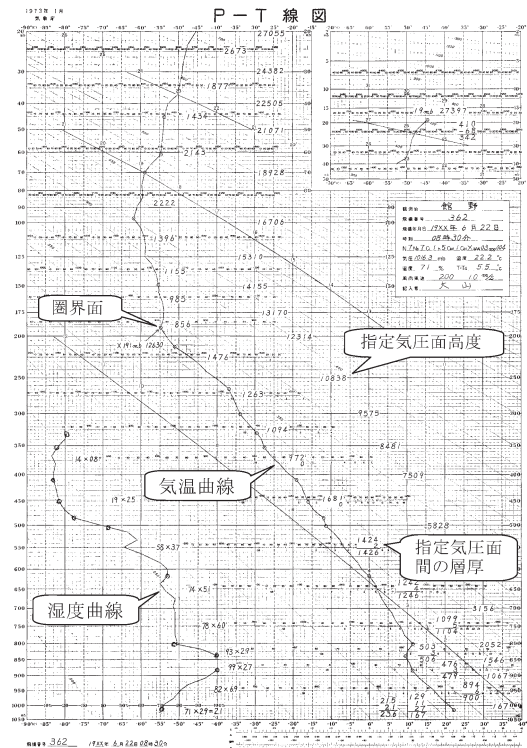


温度符号 気圧符号 湿度符号 区別符号

第3図 RS II56型レーウィンゾンデの受信記録例。ラジオゾンデ符号自動記録装置によるゾンデ測定信号の記録例である。ラジオゾンデの型式によって使用されたモルルス符号は異なるが、RS II56型ではT, N, D, B, O, C, Z, M, Gおよび区別符号用のロングTと数字の5の11種類が使用された。左端の数字は飛揚からの時間(分)で上から下に経過。高層気象台に保存されている資料で観測日時是不明である。

温度記録の特徴的な測定点とは、温度符号が低温側への符号変化から昇温側への符号に変わる点と昇温側への符号変化から低温側への符号に変わる点(逆転層の下端と上端)、温度の隣り合う符号が交互に記録される層の始まりと終わりの点(等温層の下端と上端)である。また、湿度記録の特徴的な測定点とは、湿度符号が高湿側から低湿側へ、または低湿側から高湿側へ3符号以上変化して湿度が極大または極小となる点である。

気圧観測点の気圧は気圧点検記録(気象庁の検定値に各観測所で減圧しながら開管水銀気圧計と比較して気圧計の現地点検をした際の偏差等を加えた記録)の同符号に対応した値を用い、温度・湿度の特徴的な測定点(気温湿度観測点)の気圧は気圧観測点間の符号数から内挿により求めた。気温および湿度は、気象庁



第4図 P-T線図の記入例。縦が気圧軸(P0.286)で、横軸に気温と湿度の値が目盛っている。右側の下から上まで伸びている曲線が気温の鉛直プロファイル(気温曲線)で、左側の途中で途切れている曲線が湿度の鉛直プロファイル(湿度曲線)である。P-T線図では、各指定気圧面間の層厚を読み取って順次積算し指定気圧面の高度を得るとともに圈界面の判定と気温湿度特異点(気温と湿度曲線上の○で囲んだ点)の選択を行った。気象庁(1973a)掲載の第26.1図を引用。

が行った検定記録(符号対温度または湿度)から、該当する符号内の相対位置の値を読み取った。各指定気圧面の気温と湿度は、指定気圧面を挟む上下の気温湿度観測点の値から計算尺を用いて気圧内挿により求めた。

高度計算は、各気温湿度観測点の気圧・気温・湿度を、縦軸に気圧をP0.286で目盛り、横軸に気温と湿度を等間隔に目盛ったP-T線図にプロットして行った。具体的には、観測所の海拔高度に高層気象常用表(気象庁1973b)から求めた地上と1000 hPa間の層厚を加え、これにP-T線図から読み取って求めた各指定気圧面間の層厚を逐次積算することにより各指定気圧

面について計算した。最終到達気圧の高度は、高層気象常用表から最後の指定気圧面と最終気圧観測点間の層厚を求め、この層厚を最後の指定気圧面の高度に加えることにより得た（気象庁 1973a）。P-T線図では圈界面の判定と気温湿度特異点の選択も行った。P-T線図の記入例を第4図に示す。

4.2.3 使用期間内における主な変更

符号式ラジオゾンデの観測方法等の主な変更を第3表に示す。期間中の最大の変更は1957年4月1日に実施された観測時刻の変更である。以下に第3表の内容について補足する。

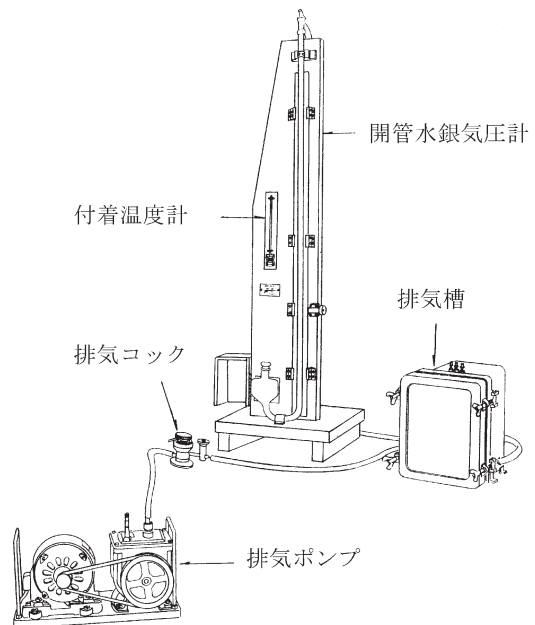
(1) 気圧測定関係

空ごう気圧計は、飛揚する10日前から3日前の期間内に、輸送中の衝撃等による気圧指示値への狂いの有無の点検と気圧補正値を得るために現地点検が行われた。現地点検は、第5図に示す気圧点検装置の排気槽に空ごう気圧計を入れて、排気ポンプで観測時と同じ速度で地上気圧から約5 hPaまで減圧して行う。ゾンデに添付されている気圧検定記録と開管水銀気圧計の値を比較し、気圧検定記録との差が高層気象観測指針で定める規定値を超えるものは観測に使用せず、規定範囲内のセンサはこの偏差を観測時の気圧補正（気圧第一補正）値とした。

空ごう気圧計は、温度による測定誤差があり低温低圧試験の実験結果（鈴木ほか 1954）を考慮して、1955年1月から現地点検時の室温と飛揚時の地上気温との差による空ごうの温度補正（気圧第二補正）を開始した。翌1956年4月から飛揚時の地上気温と飛翔中の空ごう気圧計付近の温度との差による温度補正（気圧第三補正）を開始した。気圧第二補正値は、温度差が10℃のとき、1000 hPa付近で4 hPaであり、気圧とともに減少し200 hPa付近からの低压部では0 hPaである。気圧第三補正の具体的方法は観測点の気圧（気圧第二補正済み値）とその点における飛揚後の

第3表 符号式ラジオゾンデの使用期間内における主な変更事項。

対象要素	起日（年.月.日）	変更事項
気圧観測	1955. 1. 1 ～	・気圧計現地点検時の室温と飛揚時の地上気温との差による空ごうの温度補正（気圧第二補正）を開始。
	1956. 4. 1 ～	・飛揚時の地上気温と飛翔中の空ごう気圧計付近の温度との差による空ごうの温度補正（気圧第三補正）を開始。
	1956. 4. ～	・空ごう気圧計は直径44 mmの波なし型リン青銅製に統一。
	1959. 1. 1 ～	・気圧計現地点検時における開管水銀気圧計の示度には温度補正のみ実施していたが、重力補正も開始。
気温観測	1953. 7. ～	・熱伝導遮断型バイメタル温度計に変更
	1956. 4. 1 ～	・気温観測値に対する日射補正を開始
	1957. 4. 1 ～	・気温観測値に対する日射補正方法の一部改正
	1968. 6. ～	・気球の熱航跡の影響を小さくするためゾンデの吊紐の長さを7 mから15 mへ変更
湿度観測	1954. 6. ～	・毛髪湿度計の遅れやヒステリシスを少なくするため毛髪にエーテル処理と圧延処理を行い使用
	1957. 1. ～	・圧延処理した長さ60 mmの毛髪20本使用を10本使用に変更
高度計算	1973. 1. 1 ～	・高度計算に用いる重力加速度を9.8 m/s ² から9.80665 m/s ² に変更。これに伴い、P-T線図の各指定気圧面間の層厚および仮温度補正目盛を変更。（変更以前の高度は、0.99932を乗じた値）
観測時刻	1957. 4. 1 ～	・観測時刻の00時（15UTC）及び12時（03UTC）を09時（00UTC）及び21時（12UTC）に変更。



第5図 気圧点検装置。空ごう気圧計を排気槽に入れ、排気コックを操作することにより排気ポンプで約5 hPaまで減圧し、ゾンデ添付の気圧検定記録と開管水銀気圧計の示度を比較して気圧補正量を得る装置である。気象庁（1973a）掲載の第22.4図を転載。

経過時間によって求めた。その補正量は、地上付近で 0 hPa, 500 hPa 付近で約 3 hPa, 100 hPa 付近で約 0 hPa, 30 hPa 付近で約 -2 hPa である (気象庁 1973b)。

一方、気圧点検装置の開管水銀気圧計の示度は、温度と重力の影響を受けるため、読取値に器差補正 (気象庁の測器検定による補正) を行った後、温度補正を行い、次いで重力補正を行う必要がある。温度補正は水銀の高さを 0°C のときの高さに換算するもので、重力補正は観測所の位置により異なる重力を標準重力 (980.665 cm/sec²) における値に換算するものである。開管水銀気圧計の示度補正は、1958 年まで温度補正のみを実施していたが、1959 年から重力補正が追加された。重力補正値は、稚内が全層 0.0 hPa であり、最も大きい石垣島と南鳥島の 20 hPa で 1.7 hPa である (気象庁 1973b)。

(2) 気温測定関係

バイメタル温度計は、日射の影響を受け真の気温より高めに測定することから、昼間の気温測定値に対して日射誤差の補正を行う必要がある。林ほか (1956) は、上昇するゾンデと近似的条件での室内実験と飛揚実験および外国ゾンデとの比較実験を行って日射誤差を明らかにするとともにその補正方法を検討した。この検討結果を得て、1956 年 4 月 1 日から定常観測で日射補正を開始した。下層での日射誤差は小さいことから、日射補正は 400 hPa 面 (高度約 7200 m) 以上の温度測定値を対象に行った。日射補正値は、日射誤差をゾンデの上昇速度と太陽高度角をパラメータとして、気圧の関数としてプロットした日射補正図板を用い、ゾンデが大体 50 hPa 面に達する時間 (飛揚時の地方標準時に 1 時間を加えた時間) の太陽高度角と上昇速度から、観測点の気圧における補正値を読取り求めた。気圧が 400 hPa から 200 hPa までの上昇速度は 300 m/min で一定とし、次の気圧間隔、200~150 hPa, 150~100 hPa, 100~50 hPa, 50~30 hPa の上昇速度は個々の観測において求めた (林ほか 1956)。日射補正を開始した翌年の 1957 年 4 月に日射補正方法の一部改正があり、日射補正のための上昇速度は次に示す気圧間隔、400~200 hPa, 200~100 hPa, 100~50 hPa, 50~30 hPa, 30~20 hPa, 20~10 hPa に分けて求めることにした。日射補正図板は 400~200 hPa 用と 200~4 hPa 用の 2 種類を使用することに変更された。

気温測定の精度改善には、1968 年に気球とラジオゾ

ンデ間の吊紐の長さを 7 m から 15 m にする変更があった。これは、気球による熱航跡の気温測定値への影響 (Tiefenau and Gebbeken 1989; 鎌田ほか 2002; Shimizu and Hasebe 2010) を軽減するためである。鈴木・旭 (1978) は、吊紐を長くしたことの効果を調べるため吊紐の長さが 7 m の時 (1964~1967 年) の 09 時と 21 時の気温差 (日射の有無による指定気圧面気温の差) と吊紐の長さが 15 m の時 (1969~1972 年) の 09 時と 21 時の気温差を比較し、後者のデータが格段に良質になっていると報告している。

(3) 湿度測定関係

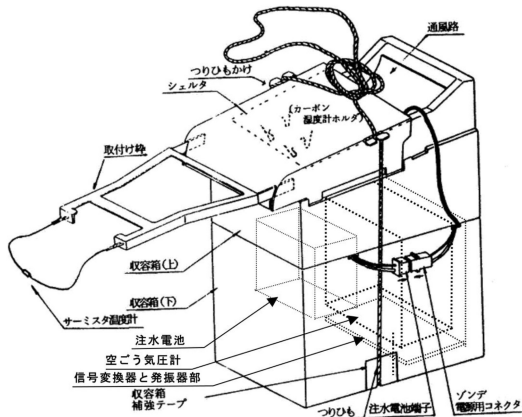
毛髪湿度計は、複数本の毛髪の両端を固定し中央部分を細い錫メッキ銅線等で吊ったものであり (第 2 図)、その先端が指針につながっている。毛髪の湿度変化に対する応答の遅れとヒステリシスは、Kobayashi (1960)、小林 (2007) が圧延処理と化学処理を施すことにより改善されることを明らかにし、これらの処理を行った毛髪湿度計は 1954 年 6 月から使用された (石川 1981)。使用する毛髪の本数と長さはゾンデの型式によって異なり (第 2 表)、1957 年 1 月以降は長さ 60 mm、使用本数 10 本に統一された。

4.3 RS2-80 型レーウィンゾンデ

ゾンデからの信号を計算機処理することにより観測の効率化、データの均質化、観測通報の迅速化を図るため RS2-80 型レーウィンゾンデ (以下「RS2-80 型」) が開発されて 1981 年 3 月から導入された。RS2-80 型の外観図を第 6 図に示す。

4.3.1 ゾンデの概要

RS2-80 型は、1680 MHz の搬送波を気象要素の変化に応じ変調して伝送する変調周波数変化式のゾンデである。気象要素は全て抵抗変化として測定され、各センサ抵抗 (R) は R-F 変換回路で周波数 (F) に変換される。気圧センサは、空ごう気圧計と抵抗付接点板等で構成され、気圧変化に伴う空ごうの歪みをペンが拡大して接点板上を移動することにより抵抗値が階段状に変わる抵抗接点式空ごう気圧計である。気圧接点間隔は、地上付近で約 20 hPa, 100 hPa 付近で約 8 hPa, 10 hPa 付近で約 2 hPa である。空ごうは鉄とニッケルの合金製で温度依存が小さいことから温度補正が不要である。気温センサは温度の変化で抵抗値が変わるダイオードタイプのサーミスタ温度計であり、サーミスタ部とリード線部分は日射による影響を軽減するため白色塗料が塗布されている。湿度センサは、アクリル基板上に微粒子カーボンや HEC (Hydroxy

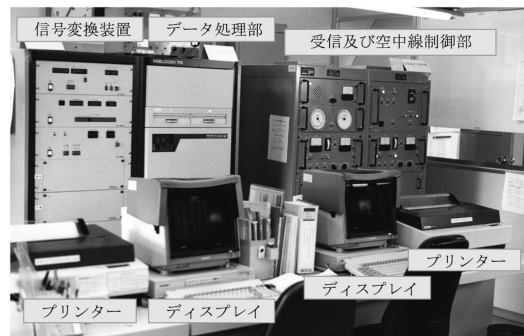


第6図 RS2-80型レーウィンゾンの外観(透視)図。大きさ(W×D×H)は180×105×260 mmで、重量は約580 gである。気象庁観測部(1980)掲載の第23.1(a)図を一部加工して転載。

Ethyle Cellulose), ソルビトール, 湿潤剤等を塗布したカーボン湿度計であり、湿度の変化を抵抗変化として測定する。各センサの目盛付け(検定)は気象庁が行った(観測部高層課 1981)。

4.3.2 ゾンデ測定信号の処理

RS2-80型の測定要素は、基準信号で各測定要素を挟んだ次の「基準信号→気圧→気温→気圧→湿度→気圧→気温→気圧→基準信号〜以後繰り返す」の順に切換えて送信される。この切換え周期には、アナログ記録方式用の約3秒切換えと計算機による自動処理用の約1秒切換えがある。RS2-80型導入当初の観測は、ゾンデ信号をアナログ記録器に記録して観測者が読取って処理した。その後、ゾンデ測定信号およ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(国際気象通報式 TEMP 報, 以下「気象報」)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が1986年2月に館野に整備され、同3月1日からこの装置による観測が開始された。同装置は、那覇(1987年4月)、札幌(1988年3月)、福岡(1989年3月)、南大東島(1990年3月)、石垣島(1991年4月)に順次整備された。札幌に整備された装置の写真を第7図に示す。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で構成(気象庁観測部 1987)され、観測処理プログラムのほとんどは気象庁職員が作成した。



第7図 高層気象観測資料自動処理装置と D55B 自動追跡型方向探知機の受信及び空中線制御部(提供: 札幌管区気象台高層気象観測室)。高層気象観測資料自動処理装置は信号変換装置とデータ処理装置(データ処理部(ミニコン)、グラフィックディスプレイ2台、プリンター2台)等で構成される。

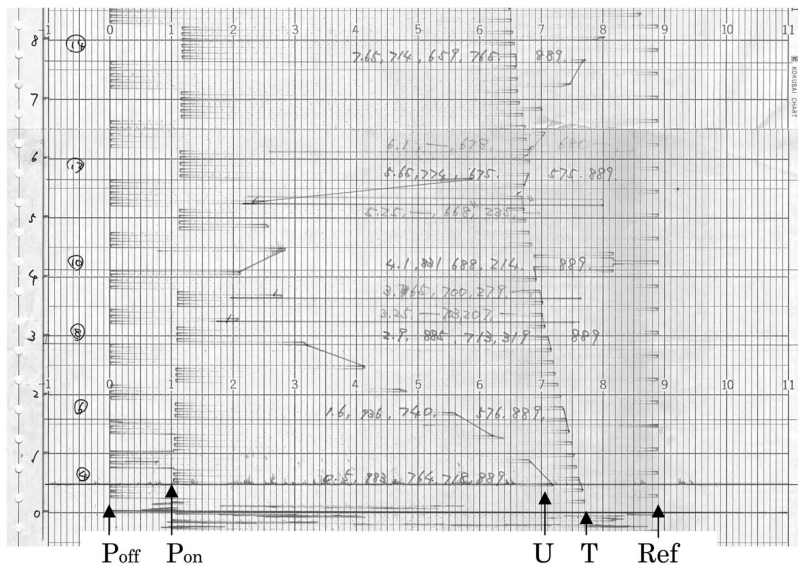
(1) アナログ記録方式

ゾンデ測定信号(気圧・気温・湿度・基準信号)をF-V(周波数-直流電圧)変換付自動平衡型アナログ記録器で記録し、目盛等の読取値は桌上型計算機に手入力して気圧・気温・湿度の物理量に変換して各気温湿度観測点の高度や指定気圧面值等の計算を行った。アナログ記録の例を第8図に示す。

観測点の選定は、気圧の偶数接点を先に設定した後、その気圧観測点間における気温・湿度の原曲線を高層気象観測指針が定める基準で再現するのに必要な測定点を追加する気圧分割方式で行われた。具体的には、地上および最初に気圧のオン接点信号(第8図の P_{on})になる点、気圧計のOFF接点(第8図の P_{off})が偶数接点のON接点に変わる点(第8図の気圧接点番号④, ⑥, ⑧, ⑩…の P_{on} になった点)と、この偶数接点間(地上付近における偶数接点間の気圧幅は約40 hPa, 100 hPa 付近が約16 hPa, 10 hPa 付近が約4 hPa)において、気温測定信号および湿度測定信号を直線内挿して原曲線(気温または湿度の測定信号の記録)との偏差が定められた基準(アナログ記録紙の目盛幅で規定)を超える場合は気温湿度観測点として追加し、原曲線を再現できるように選定した。湿度の観測は気温-40°Cまでである(気象庁観測部 1980)。

(2) 計算機による自動処理

観測点の選定は、気圧分割方式を改めて約4秒毎に得られる気温測定値と約8秒毎に得られる湿度測定値



第8図 RS2-80型レーウィンゾンデの受信記録例。アナログ記録器によるゾンデ測定信号の記録例である。アナログ記録左端の数字は飛揚からの経過時間（分）、○印内の数値は気圧接点番号、Poffは気圧のオフ接点信号、Ponは気圧のオン接点信号、Uは湿度測定信号（変化が大きいため部分的に直線で結んである）、Tは気温測定信号、Refは基準信号である。館野における1989年12月12日09時の記録である。

について、次の基準でそれぞれの原曲線を再現できるように特徴的な測定点（気温湿度観測点）を選定する方式を採用した。

〈気温の基準値〉地上から300 hPaまで 0.3°C
 300 hPa から100 hPaまで 0.5°C
 100 hPa から50 hPaまで 0.7°C
 50 hPa 面以高 1.0°C

〈湿度の基準値〉地上から気温-40°Cまで 4%RH
 この基準は、WMOの精度要求（WMO 1983）に準じて、期待される精度および観測点数を考慮して決定された。具体的には、縦軸を $\ln P$ 、横軸を気温として、すでに決定している観測点（最初は地上の点）から上層に向かって順次、気温測定点（約4秒毎の気温測定値の点）へ直線を引き、その直線と途中の気温測定点との値の差の絶対値が上記の基準以上となる点があれば偏差の最大の点を観測点とする。該当する観測点がなければ気温測定点をひとつ上に伸ばして同様の比較を繰り返す。前観測点から5分を超えても基準値を超える気温測定点がない場合は5分を超える最初の気温測定点を観測点とする。これらの気温観測点における湿度は湿度測定点から時刻内挿により求める。湿度の原曲線を再現するのに必要な測定点は、気温曲線の

再現のために選択した観測点間において湿度測定値が上記の基準を超える湿度測定点がある場合は偏差の絶対値が最大となる点を観測点として追加する。さらに、すでに決定した観測点と新たに追加された湿度の観測点間において湿度の基準を超える点がないかを探し、もし該当する観測点があれば追加をする。このようにして全ての湿度測定点が湿度観測点の選定基準を満たすまで繰り返す。湿度で選ばれた観測点における気圧と気温はそれぞれの測定点から時間内挿によって求める（観測部高層課1987）。

高層気象観測資料自動処理装置は、前述の処理で決

定した各気温湿度観測点の高度や指定気圧面值等の計算、高層風の計算を行い、100 hPaまでの観測データが得られた時点および気球の破裂等により観測が終了した時点において気温湿度特異点と風特異点を選び、気象報を作成し送信する。

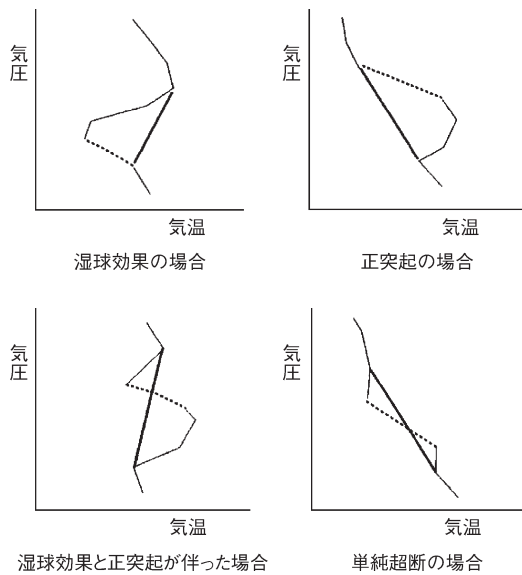
4.3.3 気温測定値に対する補正

(1) 日射補正

中村ほか（1983）は、日射、赤外放射、取り付け金具、自己加熱（ジュール熱）、ゾンデの空中線から発射される電波の影響、応答の遅れによる気温測定誤差の評価を行った。この評価で導出した日射補正の実用式による補正が妥当であることを、気温基準ゾンデ（RS II-TR67型）との比較観測において実証した。RS2-80型の気温測定値の日射補正は、地球表面付近における太陽光線の通過に対する障害を考慮に入れて幾何学的に日射がゾンデに当たるかどうか判定を行い、この実用式にもとづき行った（観測部高層課1987）。

(2) 気温の超断熱減率発生時の補正

気温測定値が乾燥断熱減率よりも大きい気温減率（超断熱減率）を示すことがある。この現象は雲の中や雲を抜けたときに生じることから、RS2-80型の

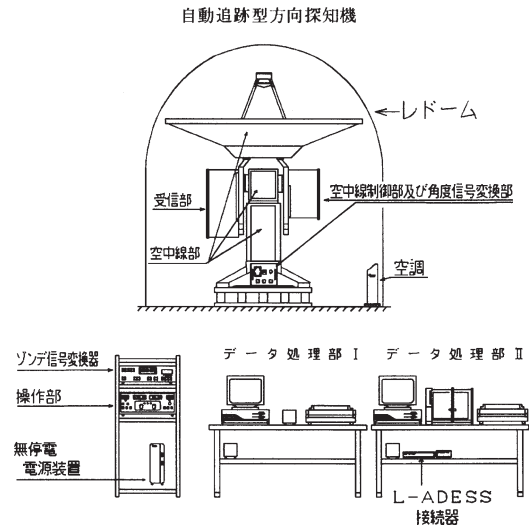


第9図 RS2-80型レーウィンゾンデの気温測定値における超断熱修正方法。RS2-80型レーウィンゾンデのサーミスタ温度計に付着した水滴が蒸発し潜熱を奪う湿球効果の場合（上段左），付着した水滴が凍結して潜熱を放出する正突起の場合（上段右），湿球効果と正突起が伴った場合（下段左），これらのいずれとも判断できない場合（単純超断，下段右）の修正方法を図示したものである。各図の細線が気温測定値の原曲線で，点線が超断熱減率の生じている区間とすると，太実線のように修正する。観測部高層課（1987）掲載の第3.5図を転載。

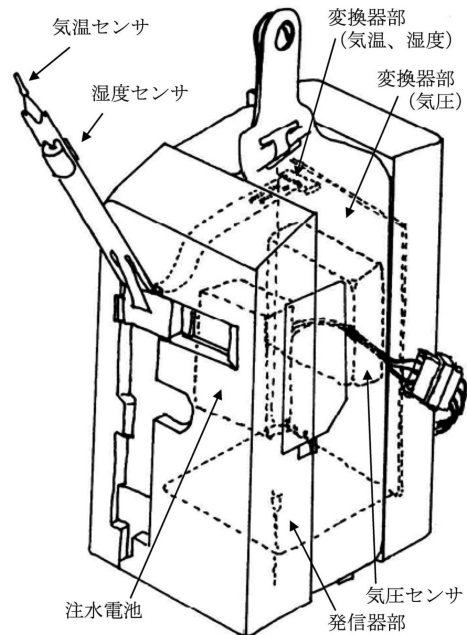
サーミスタが（第6図：直径約2mm，長さ約4mmの円筒形），雲粒や雨滴の付着しやすい形状であると判断された。超断熱減率発生時には，次に示す①サーミスタに付着した水滴が蒸発して潜熱を奪う場合（湿球効果），②サーミスタに付着した水滴が凍結して潜熱を放出する場合（正突起），③上記の①と②が伴った場合等において，第9図に示す超断熱修正を行った（観測部高層課 1987）。

4.4 RS2-91型レーウィンゾンデ

高層気象観測資料自動処理装置は，当時のミニコンピュータを主体に構成したため高価であり，財政的事情から6地点にしか整備できなかった。このため性能が飛躍的に向上したパーソナルコンピュータ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（第10図参照）を開発して，1992年2月に館野，仙台，米子の3地点に整備し



第10図 JMA-91型高層気象観測装置の構成。気象庁（1995）掲載の第3.1図を転載。



第11図 RS2-91型レーウィンゾンデの外観（透視）図。大きさ（W×D×H）は110×90×180mmで，重量は約270gである。気象庁（1995）掲載の第3.20図を転載。

た。この観測装置と並行してRS2-80型のセンサ等を改良して開発されたのがRS2-91型レーウィンゾンデ（以下「RS2-91型」，第11図参照）である（迫田ほか

1999).

4.4.1 ゾンデの概要

RS2-91型の気圧センサは、静電容量変化式空ごう気圧計である。空ごうの対面の電極板により、気圧の変化に伴う空ごうの伸縮を静電容量変化として検出する非接触方式で気圧を連続的に測定する。気圧センサには、温度補正用の内部温度測定用サーミスタが取り付けられている。気温センサは、サーミスタ温度計で、RS2-80型のサーミスタより小さく、水滴が落ちやすい取付け構造にし、日射や赤外放射等の影響を小さくするため全体にアルミニウム蒸着やガラスコーティングを施し、水滴付着軽減にシリコン膜を塗布するなどの改善が図られた。湿度センサは、ガラス板上にある金属層の下部電極と、水蒸気が通過できる薄膜上部電極との間に高分子感湿膜を形成し、上下電極間の静電容量の変化で湿度を検出する静電容量変化式の湿度計である。日射や赤外放射等の影響と水滴等の侵入を防ぐためアルミキャップを被せてある(気象庁 1995; 迫田ほか 1999)。

センサの目盛付けは、RS2-80型までは全て気象庁が行ったが、RS2-91型は各センサについて製造業者が行った。測定精度を担保するため、媒介センサを用いて気象庁と製造業者の基準器の差を確認するとともに、個々のゾンデについては気象庁において1点実測(常圧、常温、常湿)による器差検査を実施した。

4.4.2 ゾンデ測定信号の処理

RS2-91型の測定要素は、基準信号で各測定要素を挟んだ次の「基準信号→気圧→気温→湿度→基準信号～以後繰り返し」の順に送信される。この切り換え周期は約1秒である。JMA-91型高層気象観測装置のデータ処理部(以下「91装置」)は、気圧・気温・湿度の気象要素が気温測定の時刻に測定されたとみなして処理する(本節では気温測定時刻で代表する点を「測定点」という)。91装置の処理プログラムは、ほとんど気象庁職員が開発したものである。気温湿度観測点は高層気象観測資料自動処理装置と同じ基準で気温と湿度の原曲線を再現するのに必要な測定点を選定する方式であるが、データの処理速度を上げるため選定方法が改められた。気温湿度観測点は、縦軸を時間、横軸を気温・湿度とし、気温湿度観測点としてすでに決定している気温湿度観測点(最初は地上の点)を起点、これより2つ上の測定点を終点として、これらを直線で結んで内挿して求めたこの間の測定点の時刻に対応する気温と湿度の内挿値と、測定点の気温と湿度値との

差の絶対値を求める。このとき、気温と湿度のいずれの差の絶対値も基準値(4.3.2(2)参照)を超えないときには、終点を1つ上の測定点に移動して同様の計算を繰り返す。いずれかの偏差で基準を超える測定点があったときには、終点の直前の測定点を採用し、起点から5分を超えても気温と湿度の基準値を超える偏差の測定点がない場合は、5分以上離れない最後の測定点を新たな気温湿度観測点として採用し、この点に起点を移して同様の処理を繰り返すことにより選定する(気象庁 1995)。

気温湿度観測点選定後から気象報作成通報までの処理は高層気象観測資料自動処理装置とほぼ同様である。

4.4.3 使用期間内における主な変更

(1) 気圧計現地点検の変更

RS2-91型の気圧センサは、4.2.3(1)のように、導入当初全数について気圧点検装置(第5図参照。ただし、開管水銀気圧計を広域型振動式気圧計に替え、点検値の収集等はパソコンで処理)により現地点検を実施した。しかし、10年以上の使用実績をもとに2004年3月からは、現地点検を取りやめ飛揚前点検の偏差と偏差推定式により気圧測定値の補正を行う(気象庁 2004)方法に変更した。

(2) 気温測定値に対する日射補正

RS2-91型に対する日射補正式は、RS2-80型に対する日射補正式と同様な考え方にもとづいて求めた(気象庁 1995)。1992年10月の導入時に暫定的な日射補正式を用いたが1993年3月に新しい日射補正式を導入し、同11月にはさらに改修が行われた。気象庁内部資料(気象庁観測部 1994)では「暫定的日射補正式を用いた観測値は日射補正がやや不十分であったと思われる」と記述されている。

(3) 湿度測定値の温度補正

RS2-91型の高分子静電容量式湿度計は、低湿から高湿への加湿方向と高湿から低湿への除湿方向において同じ湿度でも静電容量が異なり測定値に誤差の生じることがわかり、1997年7月から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い新センサに変更した(気象庁観測部 1998)。両湿度センサの性能特性を調べるため1999年に高層気象台において連結飛揚による比較観測を実施した。この結果、新センサは高湿域での改善と、低温域では旧センサよりも湿度が高く測定されることが認められた(澁江ほか 2000)。新センサについて恒温恒湿試験装置を用いた

温度特性試験を行い、 0°C 以下の低温域（温度の負領域）において、基準値よりも高湿を示す特性があることがわかった。このことから、総観気象に求められる高層気象観測の望ましい精度（相対湿度 $\pm 5\% \text{RH}$ ）を満たすため温度補正を行い（気象庁 2004）2003年2月1日から適用した。なお、Sugidachi and Fujiwara (2013a, b) により、この湿度センサの特性の再調査と補正式の改善提案がなされている。

4.5 GPS ゾンデ

(1) GPS ゾンデへの移行背景

方向探知機方式は、直径2mのパラボラアンテナ等地上設備が大がかりである。また、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）を求める高層風観測には時間・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。

方向探知機によらない方式のラジオゾンデには、GPS ゾンデ以外に、船舶や航空機の位置測定に用いられるロランやオメガといった航法電波を利用して高層風を観測するロランゾンデ、オメガゾンデがある。気象庁は気象観測船においてオメガゾンデによる観測を行ったが、1997年9月末にオメガ局が運用を停止したためGPS ゾンデに移行した。第1表の観測地点では、ロランゾンデ、オメガゾンデとも使用しなかった。

(2) GPS ゾンデ観測の形態

GPS ゾンデによる高層気象観測には、観測者が行うものとABLによるものがある（第1表参照）。また、観測に用いられているGPS ゾンデは、各観測地点のゾンデの移行年度によって製造会社や型が異なり、明星電気社製、ロッキードマーチンシッピカン



第12図 明星電気社製 GPS ゾンデ（提供：気象庁観測部観測課）。型名と大きさ（W×D×H、重量）は、左から順にRS-01G型（69×66×150 mm、約210 g）、RS-01GM型（89×85×215 mm、約160 g）、RS-06G型（98×88×155 mm、約150 g）、RS-11G型（86×67×154 mm、約85 g）である。

（Lockheed Martin Sippican）社製、ヴァイサラ（Vaisala）社製と三社の製品で、種々の型名のものがある（第2表参照）。

4.5.1 明星電気社製 GPS ゾンデの変遷

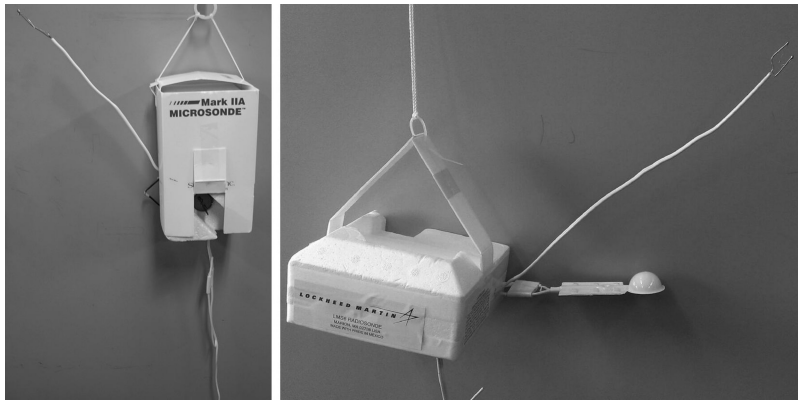
明星電気社製のGPS ゾンデは気圧計を搭載せず、気圧はGPS 測位による高度とゾンデ自身で測定した気温・湿度から静力学平衡式により算出する。

2002年4月に南鳥島へ導入されたRS-01G型の気温センサと湿度センサはRS2-91型と同じ仕様のものである。

2006年3月にRS-01G型の電源（注水電池）をリチウム電池に変更したRS-01GM型が使用されるようになり、南鳥島も2007年8月からこのタイプに移行した。

2010年2月に石垣島へ導入されたRS-06G型のサーミスタ温度計は、RS-01G型より応答性の良いサーミスタで、センサのサイズを小さくして水滴付着の低減を図った。また、湿度センサの保護カバーをアルミ蒸着を施した合成樹脂製に変更するとともにカバーの直径をRS-01GM型の1.5倍にして、日射・赤外放射と水滴付着の影響を極力少なくするように改善を行った。

2013年7月に館野に導入され、同年9月から稚内等5観測地点（第2表参照）でも使用が開始されたRS-11G型は、サーミスタのサイズを約1mmと小さくするとともに、取付け部の形状を水滴の付着しにくい構造に改良して、電池を含む重量が約85gと軽量化された。RS-11G型はこれまで定常観測に使用された中で最も軽量のラジオゾンデで、観測終了後（気球破



第13図 ロッキードマーチンシッピカン社製 GPS ゾンデ（提供：気象庁観測部観測課）。型名と大きさ（W×D×H，重量）は，左から順に MARK II A 型（105×95×140 mm，約360 g），LMS6型（127×152×76 mm，約210 g）である。

裂後）の落下による着水（地）時の安全性も配慮されている。明星電気社製 GPS ゾンデの写真を第12図に示す。

4.5.2 ロッキードマーチンシッピカン社製 GPS ゾンデの変遷

2003年3月から父島において使用が開始されたシッピカン社製 GPS ゾンデは，気圧計を搭載しないタイプの MARK II A 型である。気温センサは，小型ディスク型のチップサーミスタ温度計で，赤外線反射用と撥水用の2種類のコーティング処理が施されている。湿度センサには特殊炭素被膜のカーボン湿度計（HYGRISTOR）が用いられた。父島の GPS ゾンデは，2008年3月，気温センサに MARK II A 型と同じサーミスタを用い，湿度センサを特殊高分子ポリマー使用の高分子静電容量式湿度計（LMS6型）に更新された。LMS6型は，湿度センサの近傍に温度補償用のサーミスタが取り付けられていて，湿度センサと温度補償用サーミスタへの雨滴等の影響を防ぐため保護カバーが取り付けられている。

2013年現在，気象庁でロッキードマーチンシッピカン社製 GPS ゾンデによる観測を実施している観測地点は父島のみである。ロッキードマーチンシッピカン社製 GPS ゾンデの写真を第13図に示す。

4.5.3 ヴァイサラ社製 GPS ゾンデの変遷

2003年6月に八丈島で使用を開始した GPS ゾンデは，静電容量式気圧計，静電容量式ビーズ温度計およびアルミ製保護カバー付きの静電容量式薄膜湿度計をセンサとする RS80-15GA 型である。このゾンデの湿

度センサは，Nakamura *et al.* (2004) によってドライバイアスのあることが指摘されている。八丈島では RS80-15GA 型による観測を開始した直後から圏界面付近での高層風の欠測が多発した。気象庁のホームページに公開されている八丈島の高層気象観測資料によると，2003年6月の21時に実施した29回の観測において指定気圧面の風観測データに欠測のあった観測は13回あり，6月の09時は30観測中7観測に，7月の

09時は31観測中11観測に，21時は31観測中6観測に指定気圧面風の欠測があり，その発生高度は150～70 hPa 面が多い。この現象について，欠測が発生した観測データのログファイルを詳細に分析した結果，飛揚から2000～3000秒後にラジオゾンデで捕捉した GPS 衛星数の減少していることがわかった。しかし，業者から GPS 衛星捕捉数低下の原因はコードレス方式そのものにある問題との認識が示されたものの，欠測原因の特定に至らなかった。

コードレス方式とは，同じ GPS 衛星から送信される電波をゾンデと地上局で受信し，ゾンデと地上局におけるそれぞれのドップラーシフトを計算して両者のドップラーシフトの差からゾンデの移動速度を決定するものである。一方，コード方式とは，GPS 衛星から送信される電波を復調して，そこに含まれる情報から電波の到達時間差を決定し，その時間差分から高層風を求めるものである。

八丈島では，RS80-15GA 型の高層風の欠測多発を改善するため，2004年1月16日からコード方式の新型 GPS ゾンデである RS92-AGP 型に移行した。RS92-AGP 型の気圧センサは，大気圧の変化でシリコン隔膜の位置が変わることによる電極間の静電容量の変化を検出して気圧を測定する。気温センサは，ガラス・セラミック絶縁体の誘電率が温度により変化することを利用し，この絶縁体を挟んだ2つの薄いプラチナワイヤ間の静電容量の変化を検出することにより温度を測定する。湿度センサは，水分の吸着によって誘電率が変化する薄膜ポリマーを用いた薄膜静電容量式加熱



第14図 ヴァイサラ社製GPSゾンデ（提供：気象庁観測部観測課）。型名と大きさ（W×D×H、重量）は、左から順にRS80-15GA型（155×55×125 mm、約330 g）、RS92-AGP型（75×80×220 mm、約290 g）、RS92-SGP型（75×80×220 mm、約290 g）である。

2 センサ湿度計である。湿度の計測は、2つのセンサのうち一方のセンサで行い、もう一方のセンサは水分等を蒸発させるために加熱して周囲環境に対し安定した後計測に切り替える。2つのセンサは交互に加熱と計測を繰り返す（気象庁 2004）。

八丈島と南大東島のRS92-AGP型は、2007年6月8日と7月1日にそれぞれRS92-SGP型へ移行した。RS92-SGP型の各センサはRS92-AGP型と同じものが用いられていて、送信出力が20 mW から70 mW に変更されたタイプである。RS92-SGPJ型は、観測者が飛揚を行う観測地点でも使用可能にするためRSU921型巻下器の吊紐の長さを30 m から15 m に短くし、電源をスイッチ付乾電池に、周波数を404.5 MHz に設定したRS92-SGP型の日本仕様で、2009年12月から6地点において使用が開始された。2010年2月からはヴァイサラ社製ABLでもRS92-SGPJ型に移行した。ヴァイサラ社製GPSゾンデの写真を第14図に示す。

4.5.4 GPSゾンデのデータ処理

GPSゾンデの各センサの目盛付けは全て製造業者が行う。気象庁は気象業務法の定めによる気象測器検定規則にもとづき、ゾンデの型式認定と認定測定者の認定を行い、認定測定者（現時点では本稿に登場する全てのゾンデ製造業者が認定測定者の認定を受けている）によるゾンデ1台毎の器差の測定結果を登録検定

機関が書類審査することによりゾンデの測定値の信頼性を担保している。また、各観測地点では、ラジオゾンデ・レーウィンゾンデ観測と同様、GPSゾンデの飛揚直前に飛揚前点検（ベースライン点検）を行い、ゾンデの測定値と基準器の値を比較し、その偏差が定められた基準内であることを確認した後観測に用いる。

GPSゾンデの測定周期は製造会社によって異なり、明星電気社製とロッキードマーチンシッピカン社製は1秒毎に、ヴァイサラ社製は2秒毎に測定値

（気圧・高度・気温・湿度・風向・風速の全気象要素）が得られる。この測定値（1秒値または2秒値）から観測成果である気温湿度観測点データおよび風観測点データならびに国際交換の気象報（TEMP報）で通報する気温湿度特異点と風特異点の選定過程には2通りの方法がある。ひとつは、気温・湿度・高層風の鉛直プロファイルを一定の基準で再現するため測定値から観測点を選定した後に特異点を選択するもの。もうひとつは、先に測定値から通報のための特異点を選択した後に、より詳細な気温・湿度・高層風のプロファイルを再現するための観測点を追加するものである。しかし、観測処理プログラムの全てをゾンデ製造業者が作成し内容を公開していないため、アルゴリズムの詳細については不明である。

5. 高層風観測の変遷

高層風観測開始当初は、水素ガスを充てんした小型のゴム気球（自由気球）を測風経緯儀で追跡して上空の風向・風速を観測するパイボール観測が行われた。ラジオゾンデ観測が開始されると、ラジオゾンデを取付けた気球を測風経緯儀で追跡して行うレーボール観測や、気圧計と無線送信器等で構成される観測器（レーウィン）を自由気球に取付けて飛揚しその信号を無線方向探知機で追跡するレーウィン観測が行われた。レーウィンゾンデが開発導入され自動追跡型方向

第4表 高層風観測の主な変遷。

起日 (年.月.日)	変 更 事 項
1951.1.1 以前～	・パイボール観測, レーボール観測, 手動追跡型方向探知機でのレーウィン観測による高層風観測 ・高層風の計算処理は, 測風整理図板と水平距離尺で航跡図を作成し, 風速尺と風向板で読取り実施
1955.6.～	・自動追跡記録型方向探知機 (GMD-1A 型) 導入開始 (第5表参照)
1956.1.1	・水平距離の計算に地球曲率補正 (弧距離) を導入
1957.4.1～	・観測時刻00時 (15UTC) 及び12時 (03UTC) を09時 (00UTC) 及び21時 (12UTC) に変更
1957.7.1	・パイボール観測を止めて, すべてレーウィン観測にする
1959.1.1～	・高高度における測風精度向上のため重複4分法を導入
1961.10.～81.3.	・一部観測地点では, 09時, 21時のレーウィンゾンデ観測に替えてエコーゾンデ観測を実施
1962.1.1～	・低高度角帯, 準低高度角帯を設け, この間に入るデータは欠測または修正を施すこととする。
1977.5.～	・電子卓上型計算機を使用して高層風計算を開始
1986.3.～	・高層気象観測資料自動処理装置の導入開始
1988.1.1～	・パソコンによる高層気象観測の計算処理開始
1987.2.16～	・モノパルス方式の方向探知機 (MOR-22型) 導入開始 (第5表参照)
1992.2.～	・モノパルス方式の方向探知機とパソコン等で構成する JMA-91型高層気象観測装置への移行を年次計画で開始 (第5表参照)
1996.11.1～	・JMA-91型高層気象観測装置の高度角 (EL) の平滑処理に平滑区間の最適化と自動調整を導入
2002.4.1～	・高層風観測は, GPS ゾンデ観測への移行開始に伴い, 方向探知機方式から GPS 測位方式に変更 (第5表参照)
2009.12.1～	・稚内, 札幌, 秋田, 館野, 福岡, 鹿児島 の6地点で GPS ゾンデ (RS92-SGPJ 型) へ移行
2010.3.15～	・方向探知機による高層風観測は全て GPS 測位方式に移行

第5表 高層気象観測用地上装置 [方向探知機] の変遷 (使用開始期日; 気象庁観測部高層課 (1995) の表に加除し作成)。

地点名	D44型最大 感度方式	D49E 型 等 感度方式	自動追跡型方向探知機					GPS 測位方式
			GMD-1A 型	D55A 型	D55B 型	MOR-22型	JMA-91型	
稚 内		1950.10.11	1957.9.11		1965.10.16		1993.12.13	2009.12.1
札 幌	1949.2.	1950.7.20	1957.8.29		1967.10.28		1994.2.7	2009.12.1
根 室				1957.6.19	1972.11.12		1993.2.18	
秋 田		1950.9.15	1955.6.2		1973.10.22	1990.2.6		2009.12.1
仙 台	期日不明	期日不明		1957.12.1	1973.11.1		1992.2.29	
輪 島	1945.12.	1950.9.8	1955.6.1	1962.11.20	1969.11.27		1995.1.23	2010.3.1
館 野	1948.11.2	1950.9.	1955.9.	1957.4.14	1972.12.8		1992.2.12	2009.12.1
八 丈 島				1957.7.29	1971.1.22			2003.6.1
米 子	1948.4.1	1950.9.		1957.9.17	1973.11.7		1992.2.21	
潮 岬		1950.6.	1955.11.25		1964.1.25		1993.1.21	2010.3.1
福 岡				1957.7.1	1972.11.28		1995.2.10	2009.12.1
鹿 児 島	1949.2.1	1950.7.1		1957.11.23	1973.11.20		1994.2.25	2009.12.1
名 瀬		1955.3.1	1957.9.1		1966.11.25		1995.2.27	2007.3.1
石 垣 島				1964.8.8	1976.12.8		1997.2.27	2006.3.1
那 覇					1972.12.23	1987.2.16		(2008.11.1)
南大東島				1961.4.2	1976.12.17		1996.2.26	2005.3.1
父 島			1968.6.26		1969.2.22			2003.3.1
南 鳥 島			1968.7.1		1969.6.12			2002.4.1

注1: D44型およびD49E型は手動追跡型の方向探知機である。

注2: D55B型には, D55B-2型, D55B-3型, D55B-3R型がある。

注3: 「期日不明」は観測した事実はあるが使用開始年月日が不明な場合で, 日付が不明な場合は日付を空白にした。

注4: 那覇のGPS測位方式はオゾンゾンデ観測で行っているものである。

探知機が整備された後、09時と21時の高層風観測は全てレーウィンゾンデ観測に移行した。03時と15時の高層風観測（レーウィン観測）は、衛星気象観測の発達や局地的気象監視システム（WINDAS、観測部観測課高層気象観測室 2003）の展開などにより、2004年2月29日の観測で終了した。高層風観測の主な変遷を時系列に表したのが第4表である。ラジオゾンデの追跡に使用した地上設備（方向探知機）の変遷と整備年を第5表に示す。第5表は、「高層気象観測の変遷と観測実施官署の履歴」（気象庁観測部高層課 1995）掲載の表に1996年以後の変更を加えるなどの修正を行い作成したものである。各種方向探知機の特徴と形状については安倍・阿部（1995）が詳しいので参照されたい。

GPS ゾンデ観測に移行する以前の高層風観測は、上記のように、気球またはラジオゾンデが飛翔する方向を測風経緯儀または方向探知機で追跡してその航跡（軌跡）を求める方法で行われた。このため、高層風観測の変遷は、航跡図を作成するための測角、水平距離の算出に用いる高度、風向風速の計算方法に関する精度改善の歴史である。

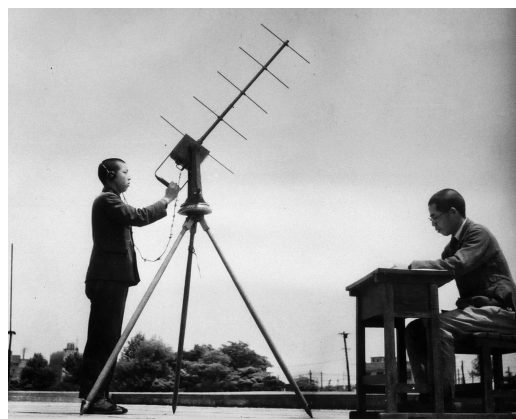
5.1 高層風（航跡図）計算に用いる測角値の精度改善の歴史

パイボール観測とレーボール観測では、測風経緯儀（第15図参照）を用いて、方位角と高度角の測定が行われた。測風経緯儀による測定は人間による目視観測であることから、気球が雲で遮られる場合や雨天時、太陽の方向に飛翔する場合には高層風の観測がでしな

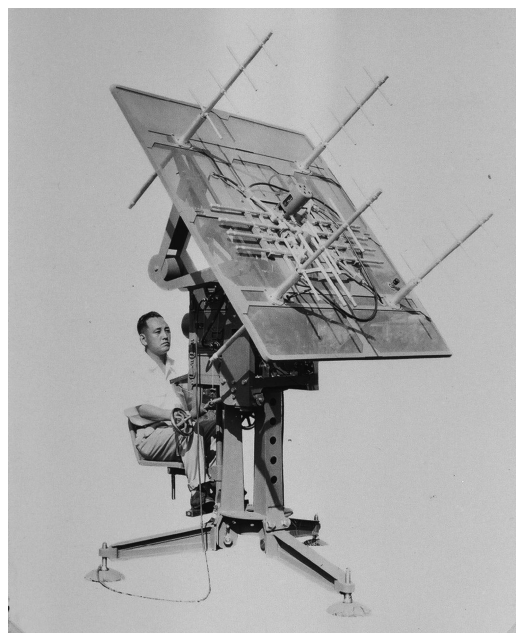


第15図 パイボール観測開始当時に使用された測風経緯儀。阿部（1997）掲載の写真6を転載。

かった。このため、気象の影響を受けずに高層風を観測するため、気圧計と小型の無線送信器等からなるレーウィンと、これを追跡するためのD44型最大感度方式の方向探知機（第16図参照）が製作されて導入された。D44型最大感度方式方向探知機は、5素子の八木アンテナを手動操作により上下左右に振って電波の最も強い到来方向を探しその方位角と高度角を測定した。測角誤差は、方位角が約4°、高度角が約3°であ



第16図 D44型最大感度方式レーウィン受信機と観測風景。高層気象台所蔵写真を転載。



第17図 D49型等感度方式レーウィン受信機。高層気象台所蔵の写真を転載。

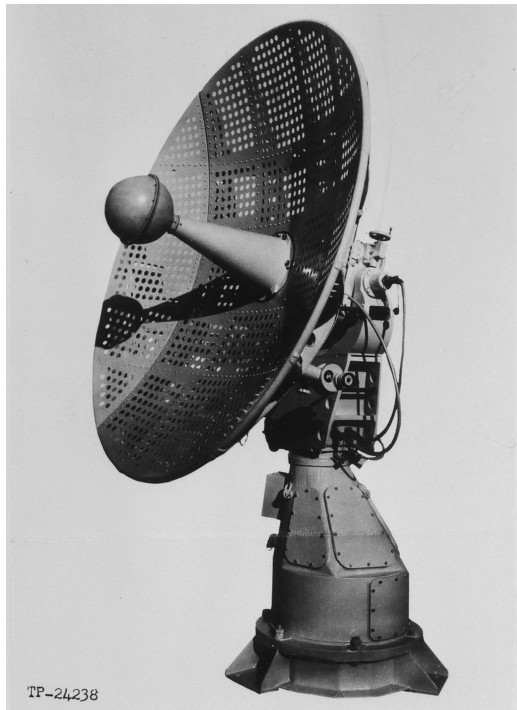
る（中央気象台 1951）。また、観測環境の違いにより方位角で 10° 、高度角で 3° との記述もある（気象庁 1975）。この方式は受信感度の最大点の検出精度が良くないため、次いで開発整備されたのが第17図のD49型等感度方式の方向探知機であった。D49型等感度方

式方向探知機は、特性の等しい4個の八木アンテナ等で構成され、レーウィンまたはレーウィンゾンデからの電波が4個のアンテナに等しいレベルで受信できるように手で追跡して測角を行うものである。測風経緯儀との比較観測による測角誤差は方位角が 2.2° 、高度角が 1.4° であった（気象庁 1975）。

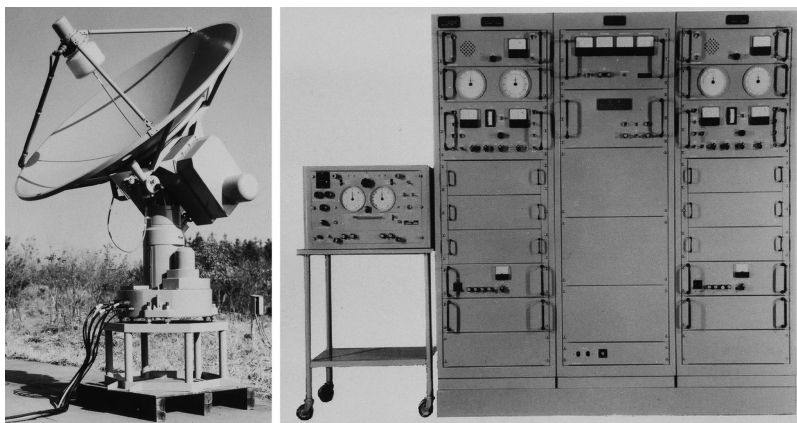
1957年7月より開始された地球観測年（IGY）の観測要請に応じるため、1954年に在日アメリカ空軍から移管されたGMD-1A型自動追跡記録型方向探知機の整備が1955年から開始された。1957年4月からはGMD-1A型をモデルに日本で改良製作されたD55A型自動追跡記録型方向探知機（空中線部を第18図に示す）が導入設置された。GMD-1A型およびD55A型方向探知機は、直径2mのパラボラアンテナで、指向性の強い1680 MHz帯の電波を探知するためにアンテナビームを回転させる形式の等感度方式を発展させた円錐走査方式で、レーウィンゾンデまたはレーウィンを自動追跡するものである。この自動追跡記録型方向探知機は受信感度が良くなり地面反射の影響を受けない場合の測角精度が 0.1° で、高層風の観測精度が飛躍的に向上した。D55A型の電子回路を真空管からトランジスタ化する等の改良を行ったのがD55B型である。その後、受信部と空中線制御部を2式備え電子回路を全て半導体化して信頼性を向上したD55B2型（第19図参照）となり、空中線部を遠隔制御できるように改良したD55B-3R型がある（父島と南鳥島に設置）。D55B型、D55B2型、D55B-3R型とも追跡方法と測角精度は同じである。

自動追跡の方法にモノパルス方式を採用したのが

MOR-22型である。モノパルス方式は、D55B型と同じ大きさの直径2mのパラボラアンテナの中央部に4個のアンテナ素子を配置し、ゾンデからの信号が上下左右のアンテナ素子の組み合わせに等しく受信できるように、パラボラアンテナの方向をフィードバック制御し自動追跡を行う方式である。モノパルス方式の利点は、円錐走査方式のようにアンテナビームを回転させる必要がないことから



第18図 D55A型自動追跡記録型方向探知機の空中線部。高層気象台所蔵の写真を転載。



第19図 D55B2型自動追跡記録型方向探知機の空中線装置（左）と受信および空中線制御装置（右）。気象庁（1973a）掲載の第21.8図を転載。

機械的可動部分が少なく保守性に優れることである。また、1個のパルスが受信できれば追跡するゾンデの方向がわかることから追跡精度が良いことである。MOR-22型の整備は秋田と那覇の2地点のみであった。その後、モノパルス方式の自動追跡型方向探知機とゾンデ信号変換器、データ処理用パソコン等で構成されるJMA-91型高層気象観測装置(第10図)が開発されて、1992年2月から各観測地点への整備が開始された。

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・通報を一貫して行う総合観測システムである(観測部高層課 1996)。

無線電波を利用する方向探知機は、高度角(仰角)が低くなると地面や建物等の地物による電波の反射や屈折現象の影響を受け高度角の測角精度が低下する。このため、1962年1月1日から高度角の測角値に低高度角帯と準低高度角帯を設け、低高度角帯については風向・風速を求めないで欠測とし、準低高度角帯の風向・風速は括弧を付ける等の区別を行った。高層気象観測指針(気象庁 1963)は、低高度角帯について「電波の直達を遮る100 m以内のすべての地物の外縁から6°以内に含まれる部分および100 m以遠の地物の外縁から3°以内に含まれる部分」と定義し、準低高度角帯を「電波の直達を遮る100 m以遠の地物の外縁から3°~6°の部分」と定義してある。高層気象観測指針(気象庁 1995)では、準低高度角帯を廃し、低高度角帯の定義を「100 m以内の地物の外縁から6°以内、100~200 mのときは4°、200~500 mのときは3°、500~2000 mのときは2°、2000 m以遠のときは1°」に改めた(JMA-91型高層気象観測装置の処理プログラムには1995年5月1日から適用)。

方向探知機の測角値は、高度角が低くなり観測所周辺の地物による電波反射を受けた場合の測角値の誤差を除去するため角度の平滑処理を行う。JMA-91型高層気象観測装置の角度平滑処理には、1996年11月から、アンテナの設置高度と高度角の変化率から予想される電波干渉の周期を計算して行う最適な角度平滑区間の設定と高度角の自動調整機能(気象庁 2004)が追加された。JMA-91型高層気象観測装置における角度値の処理と角度値に含まれる誤差、角度値の誤差除去のための平滑化等については荻原・迫田(1999)が詳しいので参照されたい。

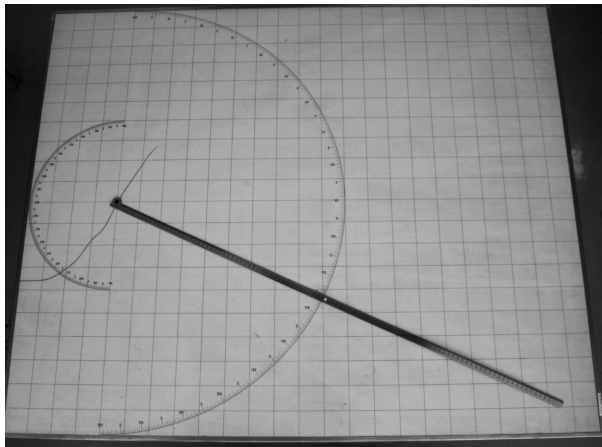
測風経緯儀と方向探知機による正確な測角値を得る

ためには、方位角を真方位に設定するとともに回転軸を垂直に保持する必要がある。測風経緯儀は、業者による点検整備と気象庁での検定により測角値の精度を確保した。一方、方向探知機は移動ができないため、業者による点検整備と調整を行うとともに、定期的に測風経緯儀との比較観測を行った。この比較では、レーウィンゾンデまたはレーウィン観測と同時に測風経緯儀を用いて方位角と高度角の測定を行い方向探知機の測角値と比較して、方向探知機の機能が正常であることの確認が行われた。しかし、根室、八丈島、米子、潮岬において高度角値の誤差が判明し過去の高層風資料を訂正した事例がある(気象庁観測部高層課 1996)。

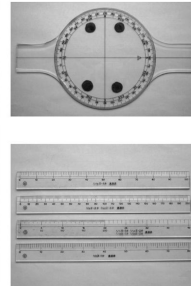
5.2 高層風(航跡図)計算に用いる高度の精度改善の歴史

自由気球の上昇速度はその気球につめたガス量の浮力によりほぼ決定する。この上昇速度を計画上昇速度といい、パイボール観測における高度は飛揚時からの経過時間と計画上昇速度の積として求める。しかし、気球の上昇速度は、実際の大気では上昇気流や下降流があつて一定でないことから高層風計算の誤差となる。高度を正確に求め測風精度を上げるために、同じ気球を2台の測風経緯儀で追跡して測定値を求め、測定値から三角測量の手法で高度を求める双経緯儀法により実施したパイボール観測もある。レーボール観測では、ラジオゾンデ観測で算出した高度を用いる。レーウィン観測の場合は、気圧の測定値しかないため、その気圧値に対する高度を直前に実施したラジオゾンデ観測の気圧対高度の関係を使用して求める。レーウィンゾンデ観測では、同時に測定した気圧・気温・湿度から算出した高度を用いる。

レーウィンゾンデの到達高度は、使用するゴム気球の大きさにもよるが約30 kmである。観測地点から飛揚されたレーウィンゾンデの水平距離は、偏西風が強い冬季には到達高度の5倍以上の200 kmを超えて高度角が低くなることから前節で述べたように測定精度が低下する。このため水平距離の算出にレーウィンゾンデの高度ではなく、アンテナからレーウィンゾンデまでの直線距離(直距離)を求めて利用するエコーゾンデ観測が1961年10月から定常観測に導入された(第4表)。エコーゾンデ観測の地上装置はD55B型自動追跡記録型方向探知機にパルス発生装置(送信機)と測距機を含む測距装置等を付加したエコーゾンデ観測装置である。エコーゾンデはRS II56型レーウィンゾ



第20図 高層風計算のための測風整理図板と水平距離尺（左），風向板（右上），風速尺（右下）。測風整理図板は，合成樹脂板上に円形の方位目盛と経緯線を刻んだもので，円の中心部に水平距離尺（写真の左側中央部から右下に置かれている金尺）を取付けの穴があいている。風速尺は複数の種類があり，航跡図を描いた縮尺に適合したものを使用する。2013年2月27日に高層気象台で撮影したものである。



ンデに受信器部を付加する等の改造を行った符号式ラジオゾンデの一種である。地上装置はゾンデ信号を受信するとともに測距パルスを送信し，エコゾンデはこの送信パルスに応答して返信パルス（エコ）を発信する。エコ方式は，地上装置で測距パルスを送信してから返信パルスを受信するまでの往復時間からゾンデまでの直距離を求め，この直距離と高度角から算出した水平距離を航跡図の作成に利用する。エコゾンデ観測は，根室，秋田，館野，八丈島，鹿児島島の5地点で行われた。館野を除き実施回数が少なく，ゾンデがRS II 56型からRS2-80型に移行した1981年3月に廃止された。

5.3 高層風の計算方法改善の歴史

観測者が手計算で行った高層風の計算では，高度角と高度から水平距離を求め，測風整理図板（航跡図板）上に水平距離尺を用いて一定時間ごとの気球（ゾンデ）の投影点を方位角と水平距離で定まる位置にプロットして航跡図を作成する。この航跡図のプロットされた位置間を風向板と風速尺を用いて読取り風向と風速を求める。高層風計算に用いた測風整理図板と水平距離尺，風向板，風速尺を第20図に示す。水平距離については，1951年刊行の高層観測指針（中央気象台1951）で「高度に対応する高度角のcotangent（余接：著者補記）を乗じて水平距離を求める」と記述されており，水平面における距離が求められた。1956年

1月からは地球曲率の影響が考慮され，水平距離を気球（ゾンデ）の高さにおける地球曲面に沿った弧距離（気象庁1973b）に改められた。このようにして求められた飛揚から1分毎（パイボール観測の場合は30秒毎の場合もある）の水平距離と方位角を航跡図板にプロットして航跡図を作成し，1951年の時点では飛揚から1分毎（パイボール観測の場合は30秒毎の場合もある）の移動方向と移動量を読取り風向・風速を求めた。水平距離を弧距離と定義する前の風速は実際より少し大きく計算された。

1959年1月1日からは，高高度における測風精度向上のため，飛揚から14分（高度約5 km）まで1分毎（1分法，層厚約400 mの平均風），14分から40分（高度約16 km）まで2分毎（2分法，層厚約800 mの平均風），38分以降が4分毎（層厚約1600 m）で38分～42分，40分～44分，42分～46分と重複した4分間隔（重複4分法）で風向・風速を読取るように改められた。航跡図を作成して風向・風速を読取る高層風観測は1977年5月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に移行した。JMA-91型高層気象観測装置では，高層風の鉛直分解能を向上するため，飛揚から14分まで1分法，飛揚後13分から40分まで重複2分法（13分～15分，14分～16分，15分～17分），38分以降が重複4分法（38分～42分，39分～43分，40分～44分）と風向・風速の計算時間を変更された。

GPSゾンデ観測の高層風計算では，シッピカン社製のMARK II A型を除き，GPSゾンデとGPS衛星との相対速度の変化に伴う衛星信号のドップラーシフトから風向・風速を算出する。MARK II A型ではGPS測位方式によりGPSゾンデの位置を求めその位置変化（移動方向と移動量）から風向・風速を算出する。高層風の鉛直分解能（出力間隔）は，明星電気社製とロッキードマーチンシッピカン社製が1秒毎，ヴァイサラ社製が2秒毎である。GPS方式による高層風観測では，どの高度でも同じ精度の観測値が得ら

れる。

6. 定常観測用ゴム気球の変遷

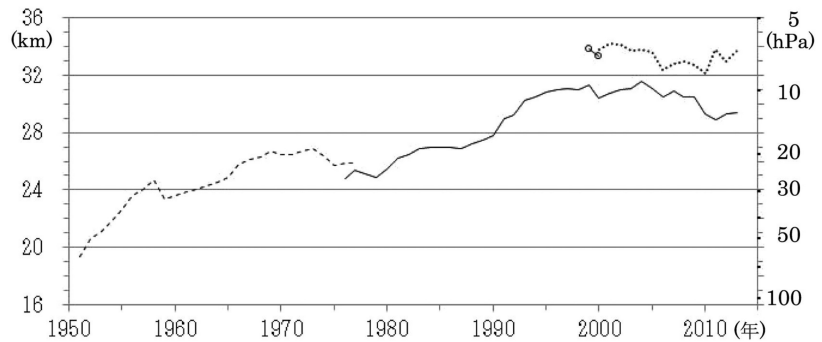
気象観測用ゴム気球の大きさは、60 g ゴム気球（パイボール観測用）、600 g ゴム気球（レーウィンゾンデ観測用）等その自重によって表す。気球の到達高度は、気球の大きさや、気球の上昇速度を決める純浮力とゾンデ等懸垂物の総重量で定まるガスの充てん量などによって異なる（澁江ほか 2001）。1951年から1975年の定常観測に使用された気球は800 g ゴム気球であった。1976年のゾンデ

の軽量化（1150 g が950 g へ）に合わせて気球が600 g ゴム気球に変更され、移行期の1976年と1977年は600 g ゴム気球と800 g ゴム気球が混在して使用され、1978年以降は600 g ゴム気球が使用されてきた。館野は、1995年に GUAN（GCOS Upper Air Network）観測地点に選定され、5 hPa まで到達することを目標とするレーウィンゾンデ観測（高高度レーウィンゾンデ観測）が行われることとなった。そのため1999年7月1日からの21時に1000 g ゴム気球による観測が開始され、2000年7月14日からは1200 g ゴム気球に移行した。1000 g ゴム気球と1200 g ゴム気球を使用する場合の吊紐の長さは30mである。気象庁における定常観測の年平均観測高度の変化を第21図に示す。図からは、ゾンデの軽量化とゴム気球の大きさの変更および性能改善による観測高度向上の経過が読み取れる。

7. まとめ

本稿では、気象庁が1951年以降において、高層気象観測の定常観測で使用したラジオゾンデの型式の変遷にあわせて次のことを解説した。

①気圧の測定は、空ごうの変化を機械的に検出する方式から、抵抗変化として検出する方式へ、ついで静電容量の変化として連続的に測定する方式へ移行された。2002年以降使用されるようになった GPS ゾ



第21図 年平均観測高度の変化。1951～1977年の破線は800 g ゴム気球、1976～2013年の実線は600 g ゴム気球、白丸付きの1999～2000年の実線は1000 g ゴム気球、2000～2013年の点線は1200 g ゴム気球である。1976年から1977年は800 g ゴム気球から600 g ゴム気球への移行のため年平均を求めた観測回数が異なる。1000 g ゴム気球と1200 g ゴム気球は館野の21時における高高度ゾンデ観測の年平均である。なお、1000 g ゴム気球は1999年7月1日から使用を開始したが、2000年7月14日からは1200 g ゴム気球に移行したため、1999年と2000年はそれぞれ約半年間ごとの平均である。1951～1994年は気象庁内部資料の高層気象技術打合せ会資料のデータを、1995～2013年は気象庁観測部観測課で集計のデータを利用し作成した。

ンデは、気圧計を搭載せず GPS 測位による高度から気圧を算出するものがある。

- ②気温の測定は、バイメタル温度計で温度変化を機械的に測定する方式から、電気的な変化として測定するサーミスタ温度計、静電容量式ワイヤ温度計へ移行された。
- ③湿度の測定は、毛髪湿度計で湿度変化を機械的に測定する方式から、電気的な変化として測定するカーボン湿度計、静電容量式湿度計へ移行された。RS2-91型の高分子静電容量式湿度計では、使用開始後の2003年2月に温度補正式が適用された。
- ④ゾンデ信号から物理量に変換し観測値を整理する処理方法は、観測者による図表を用いた手作業での処理から、計算機による自動処理に移行し、データ処理の迅速化と観測値の均一性が図られた。
- ⑤高層風観測の方法は、測風経緯儀によるパイボール観測から、方向探知機によるレーウィンゾンデ観測へ、そして GPS 測位を利用する GPS ゾンデ観測へと移行された。
- ⑥レーウィンゾンデを追跡する方向探知機は手動式から自動追跡へ移行された。自動追尾方式は円錐走査方式からモノパルス方式へと移行されて、測角精度と追跡性能の改善が図られた。
- ⑦航跡図による高層風計算では、風向風速の計算時間

に1分法, 2分法, 重複2分法, 重複4分法が適用され, 測風精度と鉛直分解能の向上が図られた。

謝 辞

本稿をまとめるに際し, 木津暢彦氏(気象庁観測部), 茂林良道氏(高層気象台)と高塚康史氏(銚子地方気象台)にGPSゾンデに関する情報等を提供していただいた。掲載した高層気象観測資料自動処理装置の写真は能登美之氏(札幌管区気象台)に, GPSゾンデの写真は木津暢彦氏にお世話になった。下道正則氏(前高層気象台長)と中村雅道氏(高層気象台)には原稿の作成に当たり多くの貴重な助言をいただいた。記して感謝の意を表します。

また, 不備な原稿を丁寧にご校閲いただき貴重なご意見とご指導をくださった査読者および担当編集委員の方々に深謝申し上げます。

参 考 文 献

- 安倍貞八, 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, 1997: 高層気象観測とその歴史。高層気象台彙報, (57), 41-58.
- 阿保敏広, 2001: 高層気象観測業務の解説。財団法人気象業務支援センター, 42pp.
- 中央気象台, 1951: 高層観測指針1951.
- 藤原寛人, 1950: 気象援助業務に対する国際的周波数の割当と日本のラジオゾンデ周波数。測候時報, 17, 40-43.
- 藤原正智, 2011: 気候監視のための新しい高層気象観測ネットワーク GRUAN。天気, 58, 679-695.
- 林 英之介, 関口理郎, 矢田 明, 1956: 日本のラジオゾンデの日射誤差とその補正について。研究時報, 8, 425-437.
- 石川 潔, 1981: ラジオゾンデ(明星電気のゾンデの歴史)。明星電気守谷技報。
- 鎌田吉博, 藤田 建, 日野原正己, 澁江 昇, 川江 訓, 2002: 気球後流が観測に及ぼす影響に関する調査(第一報)。高層気象台彙報, (62), 17-26.
- 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.
- 観測部観測課高層気象観測室, 2003: 局地的気象監視システム(WINDAS)による高層風観測業務の開始。測候時報, 70, 63-118.
- 観測部高層課, 1972: 現用のゾンデ。測候時報, 39, 323-353.
- 観測部高層課, 1981: RS2-80型レーウィンゾンデについて。測候時報, 48, 313-330.
- 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, 1996: JMA-91型高層気象観測装置について。測候時報, 63, 49-82.
- 気象庁, 1963: 高層気象観測指針1963.
- 気象庁, 1968: 気象庁マイクロフィルム目録。
- 気象庁, 1973a: 高層気象観測指針1973.
- 気象庁, 1973b: 高層気象常用表。
- 気象庁, 1975: 高層気象観測。気象百年史, 339-351.
- 気象庁, 1983: 日本上高層資料30年報(Aerological data of Japan 30-year period averages (1951-1980))。
- 気象庁, 1995: 高層気象観測指針1995.
- 気象庁, 2004: 高層気象観測指針2004.
- 気象庁海洋気象部, 1979: 小笠原気象観測業務10年誌。
- 気象庁観測部, 1980: 高層気象観測暫定実施要領。
- 気象庁観測部, 1987: 高層気象観測暫定実施要領(自動処理方式による)。
- 気象庁観測部, 1994: 平成6年度高層気象技術打合せ会資料。
- 気象庁観測部, 1998: 平成10年度高層気象技術打合せ会資料。
- 気象庁観測部高層課, 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, 1996: 高層風資料の訂正について。天気, 43, 431.
- Kobayashi, J., 1960: Investigations on hygrometry. Pap. Meteor. Geophys., 11, 213-338.
- 小林壽太郎, 2007: ゾンデ開発の余韻-湿度とオゾンの計測-。気象研究ノート, (213), 111-116.
- 水野 量, 上窪哲郎, 定村 努編集, 2014: 高層気象観測の発展と現状。気象研究ノート, (229), 182pp.
- Nakamura, H., H. Seko, Y. Shoji, Aerological Observatory and Meteorological Instruments Center, 2004: Dry biases of humidity measurements from the Vaisala RS80-A and Meisei RS2-91 radiosondes and from ground-based GPS. J. Meteor. Soc. Japan, 82, 277-299.
- 中村匡善, 林 則雄, 増田一彦, 1983: RS2-80型レーウィンゾンデの気温センサーに生ずる種々の誤差の見積もりについて-日射補正式について-。測候時報, 50, 117-138.
- 荻原裕之, 迫田優一, 1999: JMA-91型高層気象観測装置による高層風観測。気象研究ノート, (194), 25-35.
- 小熊一人, 1969: 高層気象観測装置。気象研究ノート, (99), 150pp.
- 迫田優一, 永沼啓治, 荻原裕之, 井上長俊, 三田昭吉, 1999: RS-91型レーウィンゾンデ。気象研究ノート, (194), 3-24.
- 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.
- 澁江 昇, 鎌田浩嗣, 阿部豊雄, 2001: 高層気象観測用気球に関する諸特性の調査—到達高度・上昇速度・ガス漏洩量—. 高層気象台彙報, (61), 59-68.
- Shimizu, K. and F. Hasebe, 2010: Fast-response high-resolution temperature sonde aimed at contamination-free profile observations. *Atmos. Meas. Tech.*, **3**, 1673-1681.
- 清水正義, 1982: 気象観測と測器, 3. 高層気象観測. 天気, **29**, 13-21.
- Sugidachi, T. and M. Fujiwara, 2013a: Correction of the stepwise change observed at 0°C in Meisei RS2-91, RS-01G, and RS-06G radiosonde relative humidity profiles. *J. Meteor. Soc. Japan*, **91**, 323-336.
- Sugidachi, T. and M. Fujiwara, 2013b: Impact of a new temperature-dependence correction on historical Meisei radiosonde humidity data. *SOLA*, **9**, 179-182.
- 鈴木 茂, 旭 満, 1978: ラジオゾンデのつりひもの長さの変化における日射の気温測定に及ぼす影響. 研究時報, **30**, 93-97.
- 鈴木 茂, 金子松栄, 牧野 宏, 中野宗男, 1954: CMO-S50型ラジオゾンデの低温低圧検定結果について. 高層気象台彙報, (5), 345-352.
- Tiefenau, H. K. E. and A. Gebbeken, 1989: Influence of meteorological balloons on temperature measurements with radiosondes: nighttime cooling and daytime heating. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, **6**, 36-42.
- WMO, 1983: Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation. Table 1.
- WMO, 2003: Manual on the Global Observing System (2003 edition). WMO-No.544.

The Historical Changes of Upper-air Observation and the Characteristics of
Aerological Data at Japan Meteorological Agency.
Part 1 The Historical Changes of Instruments and Methods
about Upper-air Observation

Toyoo ABE

20-305, Wakabacho 1-13-2, Tachikawa-shi, Tokyo 190-0001, Japan.

(Received 17 December 2013; Accepted 25 November 2014)
