
 報 告

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

高層気象台*

要 旨

高層気象台ではラジオゾンデによる高層気象観測を定常的に実施しており、2009年12月にラジオゾンデをRS2-91型レーウィンゾンデからRS92-SGP型GPSゾンデへ移行した。この新旧ゾンデのデータ特性を把握するため、1年間に渡り季節毎の比較観測を実施した。データを比較した結果、測風方式が異なる両ゾンデ間で風の観測値に差異はみられなかったが、湿度では高湿度環境でゾンデ間の差が5%となり、気圧では成層圏で約0.5hPaの差が見られるなど、気温、湿度や気圧の観測値に特徴的な差が見られた。これは、総観気象に求められる精度の範囲内であるものの、気候監視等の長期間のデータを解析する場合、データの連続性という観点から、観測データの扱いには測器の特性変化を考慮する必要がある。

1. はじめに

ラジオゾンデによる高層気象観測は、世界各地で行われており、天気予報のための数値予報モデルへの同化や気候変動・地球環境の監視に利用されている。気象庁では国内16か所と南極の昭和基地でラジオゾンデによる定常観測が実施されており、高層気象台(館野)もその一つである。

気象庁におけるラジオゾンデによる高層気象観測網の図を第1.1図に示す。明星電気株式会社製のRS2-91型レーウィンゾンデは1992年～2009年の期間、気象庁の観測地点で使用されてきた。高層気象台では2009年12月に、定常観測用ラジオゾンデを、RS2-91型レーウィンゾンデからヴァイサラ株式会社製のRS92-SGP型GPSゾンデ

へ移行し、国内11か所でも同様にRS92-SGP型GPSゾンデへ移行した(その他4か所と昭和基地では明星電気株式会社製RS-06G型GPSゾンデを使用、他1か所はSippican社製LMS6型GPSゾンデを使用)。

気象庁ではこれまで、ラジオゾンデの測器更新時には、新旧ラジオゾンデの比較観測を実施してきた。その目的は、更新前後の観測データの連続性を確認するためと、観測データを長期的に利用する場合に不可欠な情報である観測測器の違いによる特性を把握しておくためである。気候変動の研究において、ラジオゾンデの変遷とそれらの特性の把握は重要な課題となっている(Steinbrecht *et al.*, 2008)。そこで、高層気象台では、

* 古林 絵里子・能登 美之・小城 良友・大野 恭治・片野 信行・脇野 定則・吉井 博之・中野 辰美・阿部 豊雄・松元 誠・岩渕 真海・山田 昭裕・金子 祐也・斉藤 信也・島村 哲也、渡部 信行(現 熊谷地方気象台)、中村 雅道・馬場 祐介(現 地球環境・海洋部 環境気象管理官)、上野 圭介(現 地球環境・海洋部 オゾン層情報センター)・小松崎 均(現 観測部観測課 気象測器検定試験センター)、大吉 智也・高野 松美(現 観測部計画課 南極観測事務室)



第 1.1 図 気象庁におけるラジオゾンデによる高層気象観測網

RS2-91 型レーウィンゾンデ (以下「Meisei_91 ゾンデ」という。) と RS92-SGP 型 GPS ゾンデ (以下「Vaisala_SGP ゾンデ」という。) の連結飛揚による比較観測を行い、観測データの特性の把握と共に長期間時系列データの連続性を検証した。

また、高層気象台は 2009 年 9 月に、世界気象機関 (WMO) など 4 組織が設立した GRUAN (GCOS Reference Upper Air Network, Seidel *et al.*, 2009) の基準観測所の一つとして登録された。GRUAN の目的は、長期的な気候変動の把握のための高精度で連続性のある高層大気観測である。しかし、GRUAN では機器更新に伴う観測データの連続性の評価方法は確立しておらず、高層気象台での測器更新が GRUAN の発足後世界的に初めての事例となるため、比較観測の手法及びデータの解析方法とその評価に高い関心が寄せられている。

2. 比較観測の方法

2.1 飛揚形態と観測期間

Meisei_91 ゾンデと Vaisala_SGP ゾンデの性能は、第 2.1.1 表 (気象庁, 2004 ; Vaisala, 2006) のとおりで、大きな違いは、気温、湿度、気圧のセンサーの違いと、後で述べる測風原理の違い、伝

送方法のデジタル化、データ処理アルゴリズムの違い等である。

飛揚形態は、二つのゾンデの無線信号の混信を防ぐため第 2.1.1 図のように 2m の竹竿に両者を離して固定し、一つの気球で飛揚する方法である。気球は 1200g 気球 (冬季のみ 2000g 気球) を使用し、気球とラジオゾンデの間は、ひも又は巻下器で接続し、そのひもの全長は 30m (2000g 気球の場合は 60m) である。巻下器は筒状の芯につりひもを巻き付けた糸巻き状のもので、気球と観測測器の距離を短くすることで飛揚を容易にするために使用される。気球飛揚後、巻下器のひもは次第に解け十分な長さとなる。上昇速度は約 6m/s に保つように気球の浮力を調節した。これは、気温センサーに対して適正な通風を与えると同時に日射補正等の条件をそろえ、気球の到達高度を確保するためである。また、気球破裂後に器材を安全に降下させるため、紙製のパラシュートを取り付け、更に観測終了後の器材の陸上落下が予想される日避けて観測を行った。

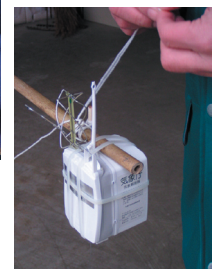
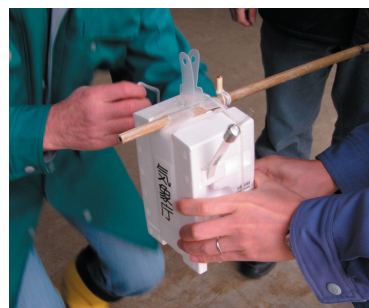
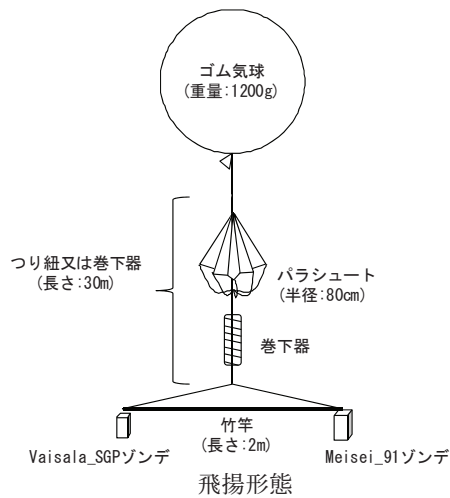
比較観測を実施した期間は 2009 年 12 月～2010 年 10 月で、季節ごとに統計可能な約 30 回 (00UTC の観測約 15 回, 12UTC の観測約 15 回) の観測データ取得を計画し下記の通り実施した。

- (1) 冬季: 2009 年 12 月 3 日～2010 年 1 月 15 日
(00UTC : 14 回, 12UTC : 15 回)
- (2) 春季: 2010 年 3 月 1 日～3 月 19 日
(00UTC : 15 回, 12UTC : 15 回)
- (3) 夏季: 2010 年 5 月 24 日～7 月 8 日
(00UTC : 12 回, 12UTC : 14 回)
- (4) 秋季: 2010 年 9 月 27 日～10 月 26 日
(00UTC : 15 回, 12UTC : 15 回)

比較観測時の太陽高度角を第 2.1.2 図に示す。00UTC の気温の観測では日射の影響を補正するため、太陽高度角の違う季節に比較観測を実施した。第 2.1.3 図と第 2.1.2 表はそれぞれ Meisei_91 ゾンデと Vaisala_SGP ゾンデの気温の日射補正量を示したものである。Meisei_91 ゾンデの日射補正については、気象庁 (2004) に示されているように、センサー各部での日射による加熱、周囲の空気との熱交換及び各部の間での熱伝導を考慮した熱バランスの微分方程式を解くことによって得

第 2.1.1 表 ラジオゾンデの性能 (気温が -40℃より低い湿度データは使用しない。)

型式	Meisei_91 ゾンデ (RS2-91 型レーウィンゾンデ) (日本)		Vaisala_SGP ゾンデ (RS92-SGP 型 GPS ゾンデ) (フィンランド)	
	センサー	精度	センサー	精度
気圧センサー	空ごう式	±1hPa	シリコン (BAROCAP®)	1080 -100hPa:1hPa 100 -3hPa :0.6hPa
気温センサー	サーミスタ	±0.5℃	静電容量式ワイヤ (F-THERMOCAP®)	0.5℃
湿度センサー*	静電容量変化式	±7%(10～ 95%)	薄膜静電容量式加 熱 2 連センサー方 式 (H-HUMICAP®)	5%
高度	測高公式によって 求めた層高の積算		測高公式によって 求めた層高の積算	
風向・風速	自動追跡型方向探 知機		コード関連式 GPS 受信器	0.15m/s,2degrees
周波数	1680MHz		400MHz	
電池	注水電池		乾電池	



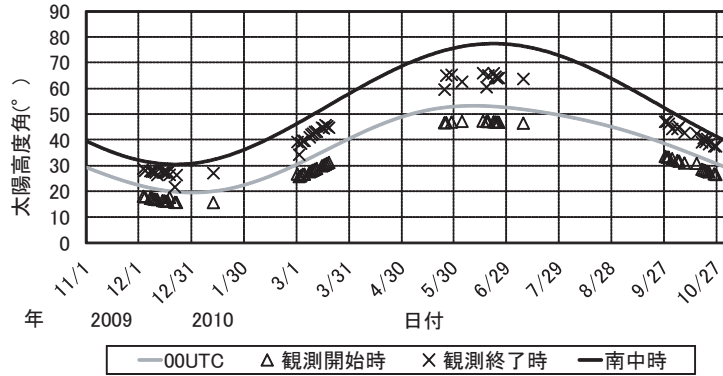
放球準備

飛揚準備 (Meisei_91 の固定)

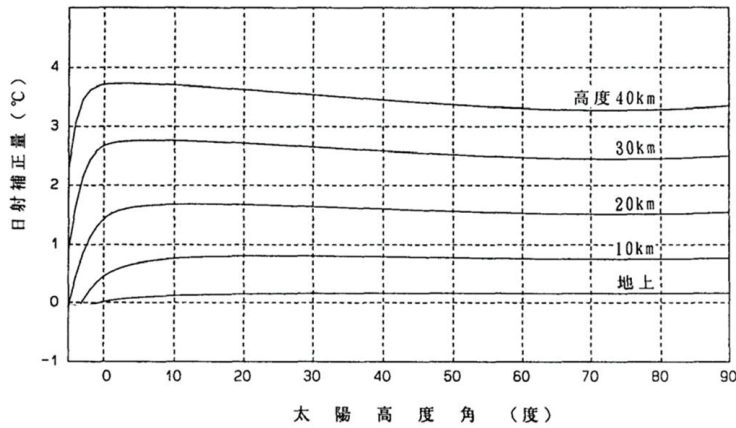
飛揚準備 (Vaisala_SGP の固定))

第 2.1.1 図 比較観測の飛揚

館野における1年間の太陽高度角の変化



第 2.1.2 図 館野における 1 年間(2009 年 11 月～2010 年 10 月)の比較観測時の太陽高度角の変化(灰色線：00UTC, 黒色線：南中時, △：観測開始時, ×：観測終了時)



第 2.1.3 図 Meisei_91 ゾンデの日射補正量(気象庁,2004)

第 2.1.2 表 Vaisala_SGP ゾンデの日射補正量(Vaisala,2005)

Elevation angle [degrees]	Night	-5	-3	0	3	10	30	45	60	90
Sea Level	0°C	0°C	0°C	0°C	0°C	0.01°C	0.04°C	0.06°C	0.07°C	0.1°C
500hPa	0°C	0°C	0°C	0.04°C	0.07°C	0.11°C	0.14°C	0.14°C	0.14°C	0.14°C
200hPa	0°C	0°C	0.01°C	0.11°C	0.15°C	0.19°C	0.21°C	0.2°C	0.2°C	0.21°C
100hPa	0°C	0°C	0.05°C	0.18°C	0.23°C	0.27°C	0.28°C	0.27°C	0.27°C	0.27°C
50hPa	0°C	0°C	0.15°C	0.28°C	0.34°C	0.38°C	0.39°C	0.37°C	0.37°C	0.37°C
30hPa	-0.01°C	0°C	0.21°C	0.36°C	0.42°C	0.45°C	0.45°C	0.43°C	0.43°C	0.44°C
20hPa	-0.01°C	0.11°C	0.27°C	0.44°C	0.49°C	0.53°C	0.52°C	0.5°C	0.49°C	0.5°C
10hPa	-0.01°C	0.25°C	0.35°C	0.53°C	0.58°C	0.61°C	0.6°C	0.57°C	0.57°C	0.57°C
5hPa	-0.02°C	0.35°C	0.38°C	0.58°C	0.63°C	0.65°C	0.65°C	0.62°C	0.62°C	0.63°C

られる。Vaisala_SGPゾンデの場合、赤外放射に対する補正も含まれている。

比較観測で使用した Meisei_91 ゾンデの気球到達気圧を第 2.1.4 図に示す。2000g 気球を使用した冬季は測定限界としている 5hPa(高度約 35km)より上空まで到達しているが、1200g 気球を使用した季節の到達気圧は 6hPa(高度約 34km)付近が多い。

2.2 ラジオゾンデの飛揚前点検

高層気象観測指針(気象庁, 2004)及び簡易型 GPS 高層気象観測システム(MBL)観測マニュアル(気象庁観測課, 2011)のとおり、観測の前には各ラジオゾンデの観測精度の確認のために点検を行い、許容範囲で合格したものを使用する。各ラジオゾンデの観測精度の許容範囲は、第 2.2.1 表のとおりである(気象庁, 2004;気象庁観測課, 2011)。

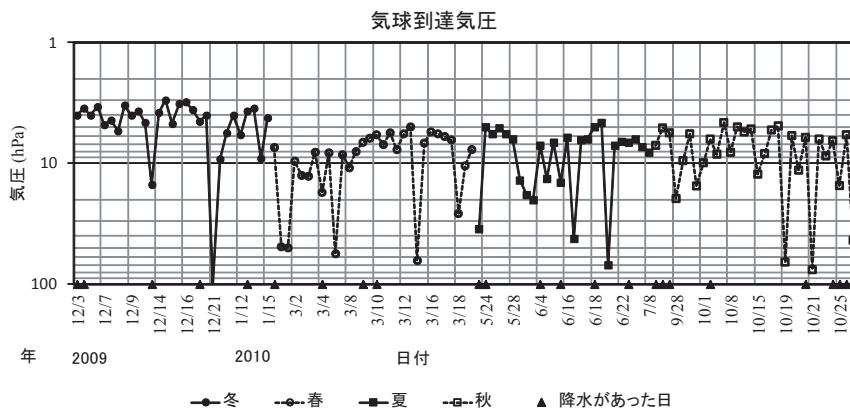
Vaisala_SGP ゾンデの気温・湿度の点検には、

Vaisala Ground Check Set GC25(気象庁観測課, 2011)を使用し、換気モーターで空気を循環させた状態で行う。気温は温度基準ユニットの基準値と比較し、相対湿度は内蔵された乾燥剤(モレキュラーシーブ)により 0%を湿度センサー点検時の基準としている。

Meisei_91 ゾンデの気温・湿度の点検には、ゾンデ性能点検装置(気象庁, 2004)を使用した。気温・湿度の点検基準となる二重管温度計(乾球用, 湿球用)とラジオゾンデの気温・湿度センサーに通風(約 6m/sの風速)した状態で点検する。

気圧の基準値には、両ラジオゾンデ共に、JMA95型地上気象観測装置の気圧計の値を使用する。

Meisei_91 ゾンデの気温と湿度を除き、両ゾンデの点検によって明らかとなった気温・湿度・気圧の基準値との差が、許容範囲内であれば、補正值として観測値の補正に利用する。



第 2.1.4 図 Meisei_91 ゾンデから得られた観測終了時の気圧値(▲は放球時に降水があった観測)

第 2.2.1 表 飛揚前点検における合格基準

	Meisei_91	Vaisala_SGP
気温	±0.5℃	±1.0℃
湿度	±7%	±4%
気圧	±5.0hPa	±3.0hPa

2.3 観測処理

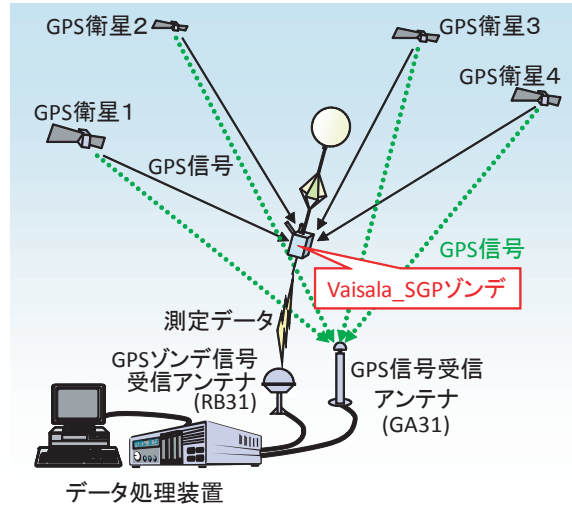
第 2.3.1 図は Vaisala_SGP ゾンデの観測原理を 図示したものである。Vaisala_SGP ゾンデの観測処理は次の通り行われる。GPS ゾンデから送信される観測データは Vaisala Telemetry Antenna(RB31) を通じて Vaisala Sounding Processing Subsystem(SPS311)に入力され、各気象要素データに分離・変換して、Vaisala DigiCORA Sounding System (Ver.3.63) で物理量(観測値)に変換される。なお、高層風観測については、ラジオゾンデが受信する GPS 衛星からの信号の周波数が、それらの相対速度に応じて変化すること、すなわちドップラー効果を利用して測定している。具体的には、GPS 衛星からの信号のドップラーシフト量からラジオゾンデと GPS 衛星との相対速度を測定し、更に基地局の GPSAntenna (GA31) を使用して GPS 衛星との相対速度を測定することによって、その相対速度の差を上層風の水平成分として算出している。

第 2.3.2 図は Meisei_91 ゾンデの観測原理を 図示したものである。Meisei_91 ゾンデの観測処理装置は、JMA-91 型高層気象観測装置である。Meisei_91 ゾンデでは自動追跡型方向探知機でラジオゾンデから発信されるアナログ信号を受信し、ゾンデ信号変換器で受信信号周波数を数値化、気象要素に分離して周波数値を求め、観測値を算出する。また、自動追跡型方向探知機によって得られた測角値と気象要素(気圧、気温、湿度値)から求めた高度を用いて風向・風速を算出する(気象庁, 2004)。

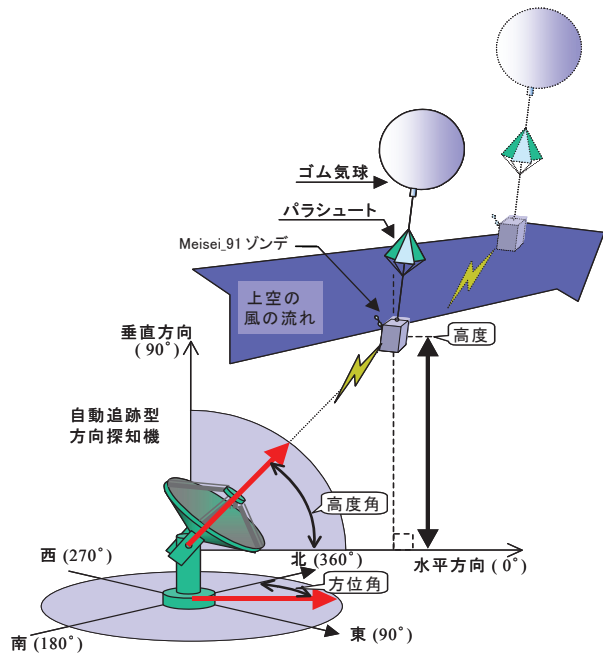
なお、観測開始時の地上気象観測データ(気圧、気温、湿度、風向、風速)は JMA95 型地上気象観測装置の値を使用する。比較観測期間中の地上気象観測データを付録 1 に示す。

2.4 比較解析方法

観測データの比較検証の方法として、同時刻及び指定気圧面におけるデータ比較解析を行った。前者は観測時刻を基準とした同時刻における観測データの比較であり、両ラジオゾンデのセンサー



第 2.3.1 図 Vaisala_SGP ゾンデの観測原理



第 2.3.2 図 Meisei_91 ゾンデの観測原理

が同じ空気塊を測定することによって、センサー自身や補正方法の違いを調べ、観測データの特性を把握することができる。後者の指定気圧面データは、高層気象観測データとして各方面で利用されることから、観測データの長期的な連続性を検証するため比較解析を行う。

3. 同時刻における比較データ解析

3.1 観測データ

比較するデータは、各ラジオゾンデの観測処理プログラムで作成される。Vaisala_SGPゾンデでは、2秒ごとの各気象要素のデータが得られる。Meisei_91ゾンデでは約4秒ごとの気温・湿度・気圧のデータ、1分ごとの風向・風速データが得られる。湿度観測値は、どちらも気温-40℃以上で観測されたデータを使用し、気温が初めて-40℃を下回った時間以降の湿度データは使用しない。Meisei_91ゾンデの相対湿度は0℃以下の温度依存性を補正した(気象庁, 2004)。

気温・湿度・気圧についてはMeisei_91ゾンデの観測から得られるデータに合わせて4秒ごとのデータを使用した。また、ジオポテンシャル高度は、それぞれのゾンデの気圧センサーで計測された気圧値と気温・湿度値より計算された値を使用した。

一方、風向・風速は、Meisei_91ゾンデの観測から得られる風のデータに合わせて、1分ごとのデータを使用した。

3.2 両ゾンデデータの時刻同期

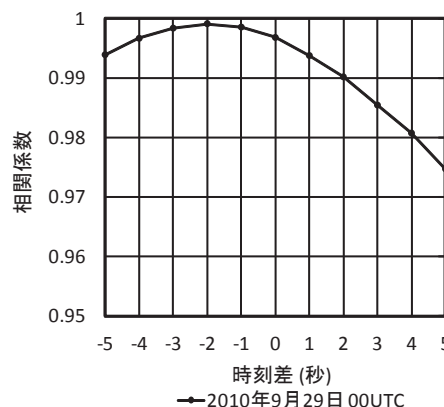
ラジオゾンデの観測処理はそれぞれのシステムで行われるため、両観測データに共通のタイムスタンプが無い。このため同時刻のデータを同定して、時刻同期する必要がある。そこで、客観的な時刻同期のため、Meisei_91ゾンデの4秒ごとのデータから時間内挿により1秒ごとのデータを作成し、気温について2秒ごとのVaisala_SGPゾンデのデータと比較して、飛揚後5~10分の時間対気温のプロファイルが最も近くなる時、すなわち、時間に対する気温データの相関係数が最も高い時の時刻差を求め、それを時刻補正值とした。これは、他の観測要素と比べて気温の観測値の差が小さいため、過去に行われたWMOの国際ラジオゾンデ比較においても利用されている(da Silveira *et al.*, 2006; Nash *et al.*, 2006)。時刻同期のデータには放球後5~10分又は10~25分の気温差が1℃を超えない5分間を選んだ。使用するデータを5分目以降としたのは、飛揚時に使用した巻下器が伸びきる時間を確保するためであ

る。相互相関係数を求める式は以下のとおりである。

$$\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_{i+t} - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_{i+t} - \bar{y})^2}}$$

- x_i : Vaisala_SGPにおける各時刻の気温観測値
- y_i : Meisei_91における各時刻の気温観測値
- \bar{x} : Vaisala_SGPにおける気温観測値の平均値
- \bar{y} : Meisei_91における気温観測値の平均値
- n : 相関係数を求める区間(時間)のサンプル数
- t : 時刻差

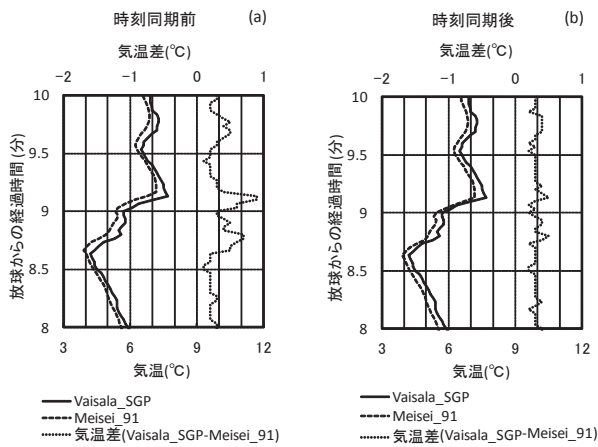
第3.2.1図は、相関係数の計算結果の一例(2010年9月29日00UTC観測)である。縦軸は相関係数、横軸は時刻差を示し、それぞれの観測開始を共に0秒としてデータの時間をずらした場合の、Vaisala_SGPゾンデの時間からMeisei_91ゾンデの時間を引いた値(秒)である。この例では、相関係数が最も大きいのは-2秒の時で、これを時刻補正值とした。第3.2.2図は、時刻同期を行う前後の気温の時系列グラフである。時刻同期前は、Vaisala_SGPゾンデの方が9分付近の気温の凹凸が早く現れているのに対し、時刻同期後はほぼ同じ時間に凹凸が見られることが分かる。第3.2.3



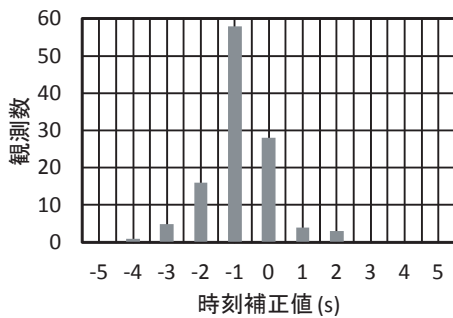
第3.2.1図 二つのラジオゾンデによる気温観測値時系列の相関係数(横軸: Vaisala_SGPゾンデの時間からMeisei_91ゾンデの時間を引いた値(秒), 縦軸: 相関係数)

図は判定された時刻補正值 (Vaisala_SGP ゾンデの時間から Meisei_91 ゾンデの時間を引いた値) の全観測の度数分布図で、時刻補正值は-1, 0秒の事例が多い。

以上述べた方法で時刻同期したデータを使用し、気温・湿度・気圧・高度の比較解析を行った。また、1分ごとのデータを使用する風速・風向に関しては、時刻同期は考慮せずに比較を行うこととした。



第 3.2.2 図 2010/9/29 00UTC 観測における、時刻補正前後の気温と気温差の時系列 (a: 補正前, b: 補正後)



第 3.2.3 図 補正時間の度数分布図

3.3 比較の解析方法

比較にあたっては、観測時の気圧 (Meisei_91 ゾンデを基準) によって分類した 13 層の気圧層ごとに、時刻補正を行った観測値の差 (Vaisala_SGP ゾンデ - Meisei_91 ゾンデ) の平均値を算出した (気象庁観測部高層課, 1983; 迫田ほか, 1999)。

データ処理の方法を図示したものが第 3.3.1 図で、具体的な計算は以下のとおりである。Vaisala_SGP ゾンデ, Meisei_91 ゾンデの観測開始からの観測値番号 i (i は気温・湿度・気圧・高度の場合 4 秒ごと, 風向・風速の場合 1 分ごと) の観測値をそれぞれ T_i^V, T_i^M とする。Meisei_91 ゾンデの気圧値を基準に、同じ時刻の観測データを以下の 13 層に分類する。

- (1) $1000\text{hPa} \geq P_i^M > 700\text{hPa}$, (2) $700\text{hPa} \geq P_i^M > 500\text{hPa}$,
- (3) $500\text{hPa} \geq P_i^M > 300\text{hPa}$, (4) $300\text{hPa} \geq P_i^M > 200\text{hPa}$,
- (5) $200\text{hPa} \geq P_i^M > 150\text{hPa}$, (6) $150\text{hPa} \geq P_i^M > 100\text{hPa}$,
- (7) $100\text{hPa} \geq P_i^M > 70\text{hPa}$, (8) $70\text{hPa} \geq P_i^M > 50\text{hPa}$,
- (9) $50\text{hPa} \geq P_i^M > 30\text{hPa}$, (10) $30\text{hPa} \geq P_i^M > 20\text{hPa}$,
- (11) $20\text{hPa} \geq P_i^M > 15\text{hPa}$, (12) $15\text{hPa} \geq P_i^M > 10\text{hPa}$,
- (13) $10\text{hPa} \geq P_i^M > 5\text{hPa}$

P_i^M は Meisei_91 ゾンデの観測値番号 i の気圧データ。

同一の気圧層に分類された観測データについて、平均値 (\bar{T}^V, \bar{T}^M), 差の平均値 ($\bar{\Delta T}$) を次の式によって求める。ここで、観測値の差は Vaisala_SGP ゾンデの値から Meisei_91 ゾンデの値を引いたもの ($\Delta T_i = T_i^V - T_i^M$) とする。

層別の平均値は、

$$\bar{T}^V = \frac{\sum_{i=is}^{ie} T_i^V}{ie - is + 1}, \quad \bar{T}^M = \frac{\sum_{i=is}^{ie} T_i^M}{ie - is + 1}$$

層別の差の平均値は、

$$\bar{\Delta T} = \frac{\sum_{i=is}^{ie} \Delta T_i}{ie - is + 1}$$

である。is, ie はそれぞれ P_i^M がその層に入った最初の観測値番号と最後の観測値番号である。

各層の比較データを、昼夜別, 季節別等に区分して集計する。各集計区分の合計した観測回数を N , その順番を $K=1, 2, \dots, N$ として、以下の式によって各種統計量を求める。

K番目の観測データの解析処理

振り分け基準の 気圧(hPa)	1000~700	...	P(L)~P(L+1)	...	10~5
i (観測値番号)	1, 2,	is(L), is+1(L), is+2(L), ..., ie(L), N-1, N
T_i^V 時刻補正済みの 観測データ		
T_i^M		
ΔT_i = $T_i^V - T_i^M$		

●は解析に使用しない。

P(1)=1000hPa, P(2)=700, ..., P(L), P(L+1), ..., P(13)=10hPa, P(14)=5hPa

層別の平均値をすべての観測について平均することにより、集計した層別の平均値を求める。

第 3.3.1 図 同時刻における比較の解析処理方法

集計した層別の平均値は、

$$\overline{T^V} = \frac{\sum_{k=1}^N \overline{T_k^V}}{N}, \quad \overline{T^M} = \frac{\sum_{k=1}^N \overline{T_k^M}}{N}$$

集計した層別の差の平均値は、

$$\overline{\Delta T} = \frac{\sum_{k=1}^N \overline{\Delta T_k}}{N}$$

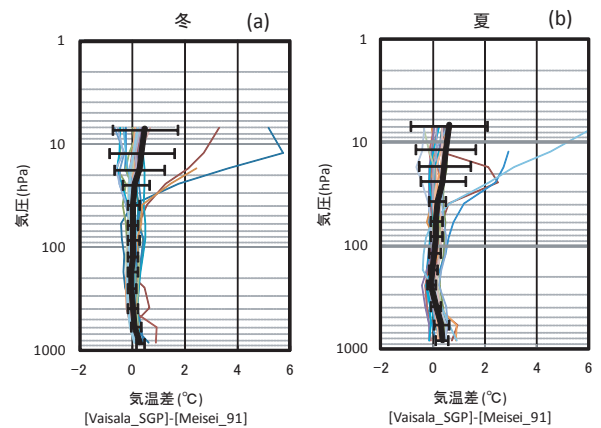
集計した層別の差の標準偏差は、

$$\sigma(\overline{\Delta T}) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N (\overline{\Delta T_k} - \overline{\Delta T})^2}{N}}$$

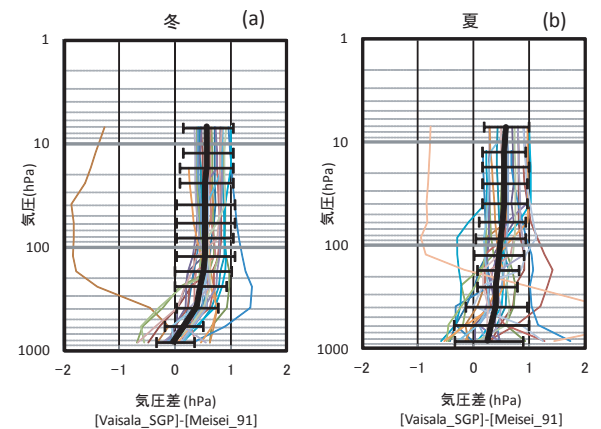
である。

3.4 データの選別 (気温・気圧)

気温や気圧の観測データの中には、第 3.4.1 図、第 3.4.2 図のように、全体の傾向から大きく外れる事例 (外れ値) がいくつか見られた。両ラジオゾンデの気温差・気圧差が各層の標準偏差の 3 倍 (3σ) 以上となった場合は、何らかの原因により正しい測定値が得られていないものと考えて、その観測データはすべて平均値を求める解析には含めないこととした。このように除外したこれらの観測データについては個別に解析し、考察で議論する。また、湿度は、個々の観測値の変動が気圧



第 3.4.1 図 冬 (a) と夏 (b) の各観測における気温差と気温差の標準偏差



第 3.4.2 図 冬 (a) と夏 (b) の各観測における気圧差と気圧差の標準偏差

や気温に比べて大きいことから、データの選別は行わないこととした。

3.5 気温・湿度・気圧・高度の比較結果

第 3.5.1 図に高度別の観測数を示す。合わせて 103 回分 (00UTC 観測が 52 回分、12UTC 観測が 51 回分) の観測データが得られた。また、春と冬の 300 ~ 200hPa の気圧層の湿度は、測定範囲 (-40℃以上) を超える事例が多いため、ほとんどが夏と秋の観測データである。

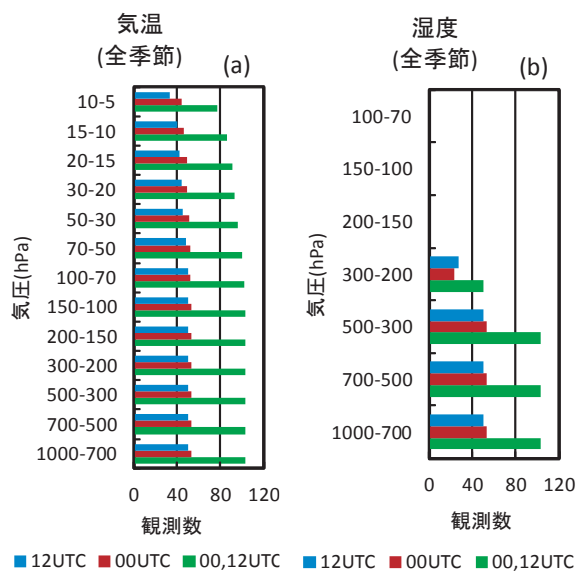
始めに、気温の比較結果を示す。Meisei_91 ゾンデの気温センサーはサーミスタを用いた温度計であり、気温の変化に対応した電気抵抗の変動を利用して測定するものである。一方、Vaisala_SGP ゾンデの気温センサーはガラス・セラミック絶縁体を挟んだ二つの薄いプラスチックワイヤで構成された静電容量式ワイヤの温度計であり、温度により変化するガラス・セラミック絶縁体の誘電率の変化をワイヤ間の静電容量の変化として検出することにより測定するものである。

第 3.5.2 図は全観測データによる二つのゾンデの気圧層別平均気温と、00UTC 観測、12UTC 観測それぞれにおける気圧層別平均気温差 (Vaisala_SGP - Meisei_91) のグラフである。全

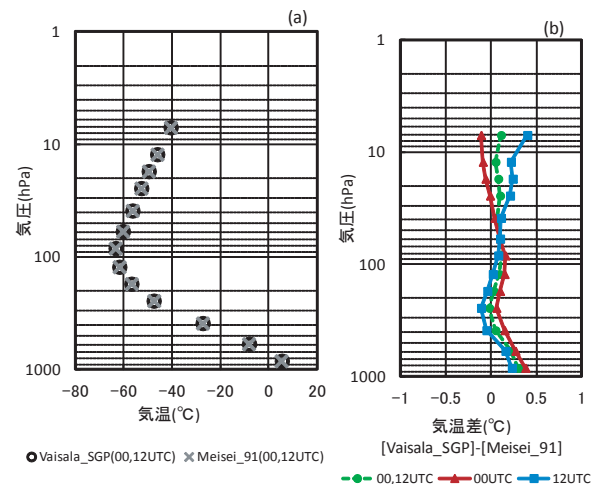
観測、00UTC 観測、12UTC 観測ともに、1000 ~ 500hPa、100 ~ 50hPa の層で Vaisala_SGP ゾンデの方が高い気温観測値を示している。また、12UTC 観測では 100hPa より上層で Vaisala_SGP ゾンデの気温観測値が高い状態が続くが、00UTC 観測では 30hPa より上層で Meisei_91 ゾンデの気温観測値が高い結果となっている。

第 3.5.3 図は気圧層別の気温差 (Vaisala_SGP - Meisei_91) を季節ごとに示したものである。00UTC 観測については、冬の 15hPa より上層、春・秋の 30hPa より上層で Meisei_91 ゾンデの観測値が高く、それ以外の気圧層については Vaisala_SGP ゾンデの観測値が高い傾向がある。特に夏についてはどの気圧層においても Vaisala_SGP ゾンデの観測値の方が高い。また、12UTC 観測における冬の気温差の標準偏差が他の季節と比べて小さい。

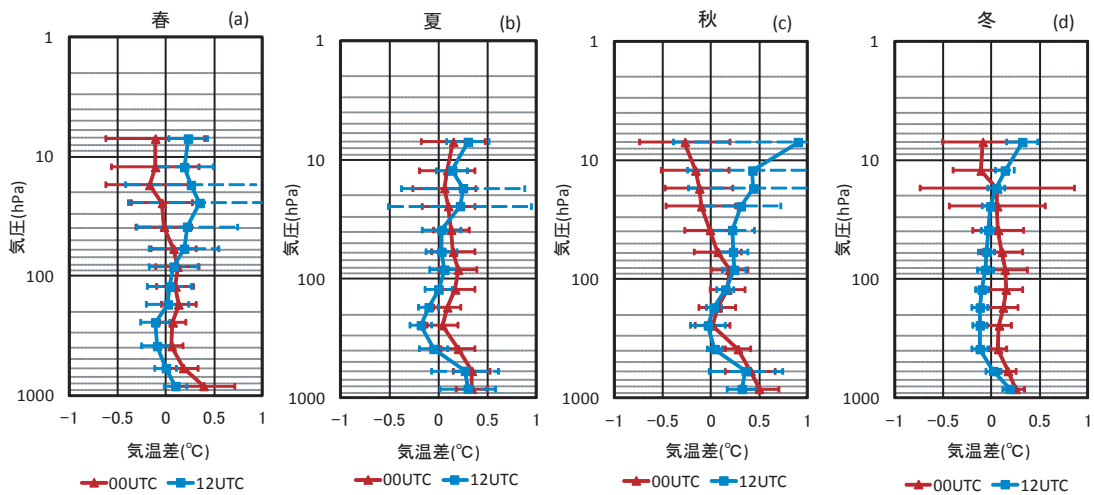
次に、湿度の比較結果を示す。湿度センサーはどちらのゾンデも湿度の変化に従って変動する高分子膜の誘電率を利用しており、この誘電率の変化を高分子膜を挟む極板間の静電容量の変化として検出することにより測定する。違いは、Meisei_91 ゾンデの場合、日射、赤外放射の影響及び水滴の付着を軽減するためにアルミキャップ



第 3.5.1 図 気温 (a) と湿度 (b) の解析に使用した各気圧層別観測数



第 3.5.2 図 気圧層別平均気温 (a) と気温差 (b)



第 3.5.3 図 各季節における気圧層別平均気温差 (Vaisala_SGP - Meisei_91) と気温差の標準偏差 (a: 春, b: 夏, c: 秋, d: 冬)

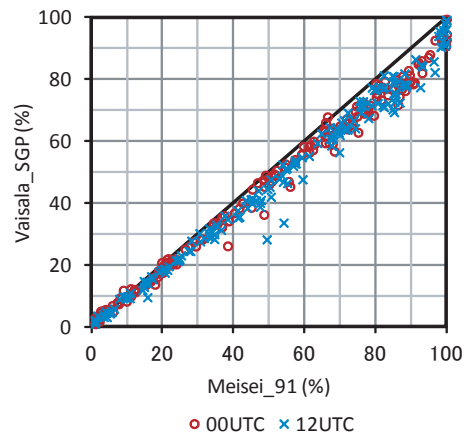
をかぶせているのに対し、Vaisala_SGP ゾンデは、加熱抵抗を持つ2つのセンサーからなり、センサーに付着する水分等を交互に加熱することにより蒸発させる機能を持たせている。

第 3.5.4 図は気圧層別平均湿度値を二つのゾンデで比較した図である。湿度が高い領域では、Vaisala_SGP ゾンデより Meisei_91 ゾンデの湿度値が大きい。

第 3.5.5 図は4秒値データでの湿度差 (Vaisala_SGP - Meisei_91) と湿度の関係を示している。データは00UTC、12UTC観測の両方を使用した。どの気圧層でも、湿度が高くなるのに比例して両者の差が大きくなっており、Meisei_91 ゾンデの湿度観測値が大きい傾向が見られる。ただし、湿度値に対する湿度差の比で考えると、湿度値が20%RHより大きい範囲ではその割合は10%前後でほぼ一定している。気圧層で比較すると、地表に近い1000～700hPaの気圧層よりも気温の低い500～300hPaの気圧層で湿度差が大きくなっている。

季節別の気圧層別平均湿度差を示したものが第 3.5.6 図である。湿度差は全体的に-5%RH付近に偏っている。また、秋の湿度差が他の季節に比べてやや大きくなっているのは、秋の観測データには、飛揚時の現在天気雨が雨の場合や全雲量N(8分率)が7～8の事例が多く含まれており、高湿

相対湿度の散布図



第 3.5.4 図 気圧層別平均湿度の散布図

度の環境の事例が多かったため、湿度差が大きくなったと考えられる。

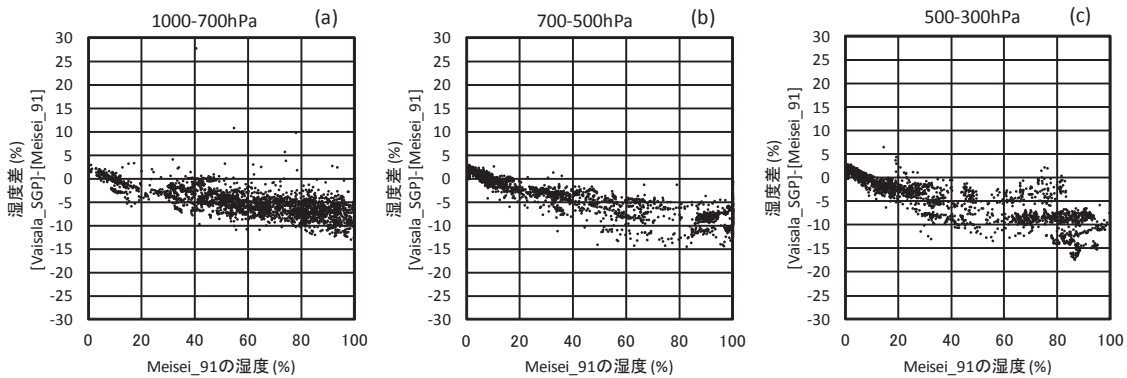
次に、気圧と高度の比較結果を示す。Meisei_91 ゾンデの気圧センサーは鉄・ニッケル合金を使用した空ごう式気圧計であり、空ごうの対面に電極板を設け、気圧の変化に伴う空ごうの伸縮を空ごうと電極板間の静電容量の変化として検出する。一方、Vaisala_SGP ゾンデはシリコンセンサーを用いた気圧計である。リファレンスチャンバーとして機能する真空チャンバーと大気圧の影響を検出する外部気圧チャンバーから構成さ

れ、2つのチャンバー間にはシリコン隔膜がある。大気圧の変化に伴うシリコン隔膜の位置の変化により上下電極間の静電容量の変化を検出して気圧を測定する(気象庁, 2004)。ジオポテンシャル高度はどちらのラジオゾンデも、各センサーによって測定した気圧、気温、湿度の観測値から測高公式によって求めた層高の積算によって算出する。

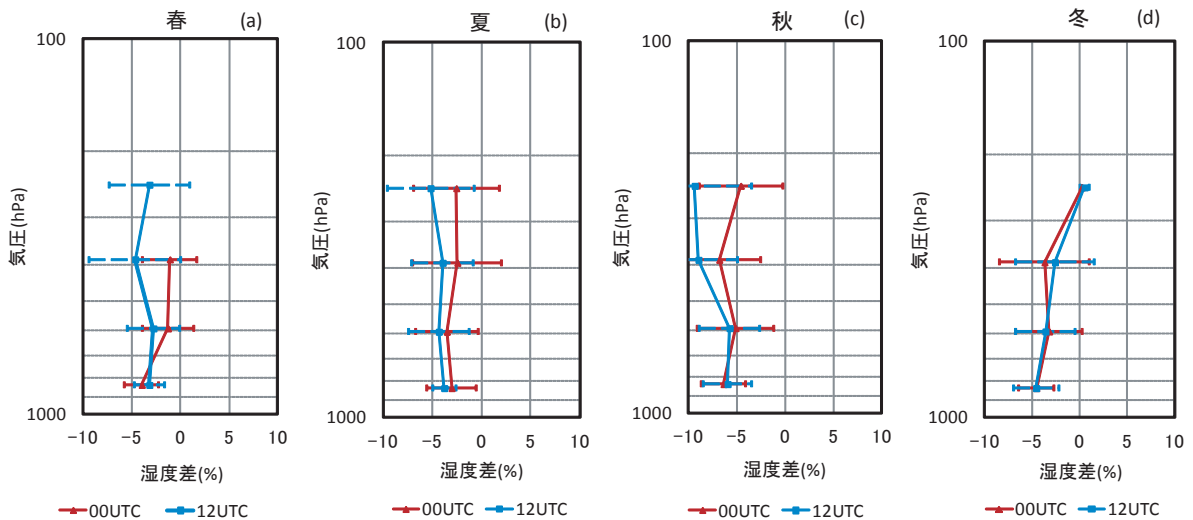
第3.5.7図は00UTC観測, 12UTC観測それぞれにおける各気圧層別に平均を取った気圧差と高

度差 (Vaisala_SGP - Meisei_91) を示す。気圧差は全体的に正の側に偏っており、Vaisala_SGP ゾンデの気圧観測値の方が大きい。特に100hPaより上の気圧層では0.5~0.6hPaのほぼ一定した気圧差が見られ、観測終了気圧も同程度の差がみられた。この気圧差によって、ジオポテンシャル高度は上空に行くに従ってその差が大きくなっていく。

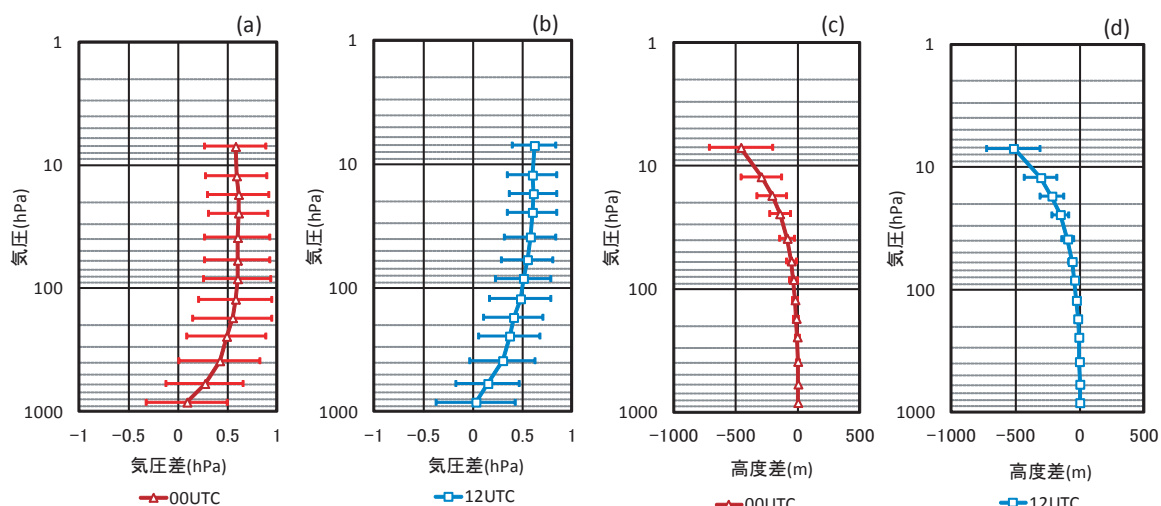
なお、各気圧層における観測時刻別や季節別の気温差、湿度差、気圧差を付録2に示す。



第3.5.5図 4秒値データにおける湿度差の湿度依存性 (a : 1000 ~ 700hPa, b : 700 ~ 500hPa, c : 500 ~ 300hPa)



第3.5.6図 各季節における気圧層別平均湿度差 (Vaisala_SGP - Meisei_91) と湿度差の標準偏差 (a: 春, b: 夏, c: 秋, d: 冬)



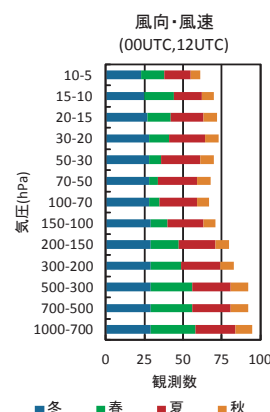
第 3.5.7 図 全ての季節で平均した 00UTC, 12UTC 観測の気圧層別平均気圧差, ジオポテンシャル高度差 (Vaisala_SGP - Meisei_91) とそれらの標準偏差 (a: 00UTC の気圧差, b: 12UTC の気圧差, c: 00UTC のジオポテンシャル高度差, d: 12UTC のジオポテンシャル高度差)

3.6 風向・風速の比較結果

風向・風速のデータについて, 比較結果を以下に示す. 第 2.3 節で示したように, Meisei_91 ゾンデでは, 自動追跡型方向探知機によって追跡したレーウィンゾンの位置の移動方向と移動距離から風向・風速を算出し, Vaisala_SGP ゾンデでは, GPS 衛星からの信号周波数のドップラー効果を利用して風成分を測定し, 風向・風速を算出する.

第 3.6.1 図は, 比較に使用した季節別の観測数で, 全部で 96 回分の観測データが使用された. そのうち 00UTC 観測が 47 回, 12UTC 観測が 49 回である. 春が地上付近に比べ上空で観測数が少ないのは, 方向探知機を使った Meisei_91 ゾンデの観測システムでは, ラジオゾンデが上空にある場合, 地面や建造物が方向探知機の測角値に誤差を与える低高度角になりやすく, その時の観測値が得られないためである. また, 風向・風速の算出方法は, Vaisala_SGP ゾンデは常に準瞬間風の観測値であるのに対し, Meisei_91 ゾンデは, 放球からの経過時間によって 3 種類の時間の組 (1 分法, 重複 2 分法, 重複 4 分法) に分け, 各々の組において両端の時刻における測器の位置の違いからその層の高層風を求める (気象庁, 2004).

第 3.6.2 図は季節別に見た Vaisala_SGP ゾンデにおける風向・風速の気圧層別平均値と両ラジオ



第 3.6.1 図 風向・風速の解析に使用した気圧層別観測数

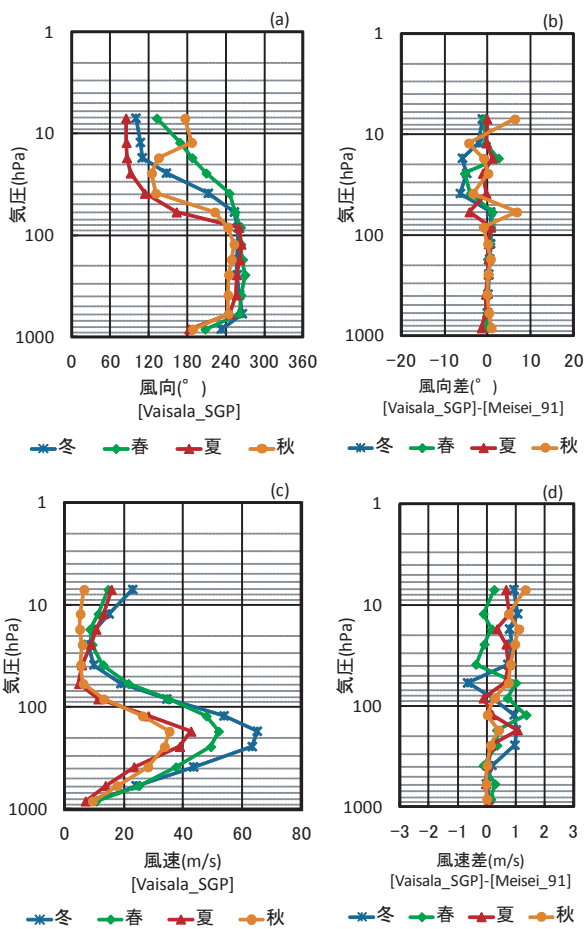
ゾンデの差を示している. 風向については, 1000 ~ 70hPa の西風となっている気圧層ではどの季節も平均風向差はほぼゼロであるが, それより上空では差が大きくなり, 最大で約 6° の風向差が見られる. 風速については, 地上に近い 1000 ~ 300hPa の気圧層では風速差は小さいが, 風速が大きくなる 200hPa 付近から上空の気圧層では Vaisala_SGP ゾンデの風速が大きい傾向があり, 大きいところで約 1m/s の差がある.

第 3.6.3 図は季節別に見た Vaisala_SGP ゾンデにおける風の東西・南北成分の気圧層別平均値

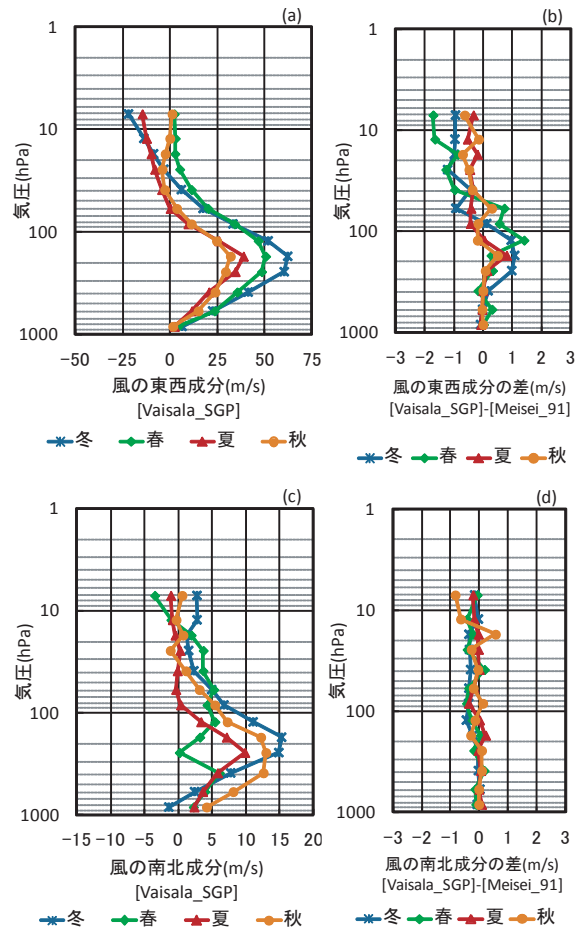
と両ラジオゾンデの差を示している。東西成分では、どの季節も高度に対する差の分布パターンは類似しており、地表近くの 1000 ~ 500hPa や、風速が弱くなる 100hPa 付近の気圧層では差が小さい。また、西風成分の強い気圧層では差が正の側に偏り、大きいところで約 +1.0m/s に達する。一方、東風成分となる気圧層では逆に差が負の側に偏り、大きいところで約 -0.5 ~ -1.5m/s となっている。風速としては全体的に Vaisala_SGP ゾン

デの値が大きい傾向が見られる。季節別の特徴では、西風が強い冬と春に差が大きい。南北成分では東西成分に比べて差は全体的に小さく、どの季節もゾンデによる平均差は 1m/s より小さい。ただし、各成分風速に対するそれらの差の割合で見ると、東西成分と南北成分は同程度である。

なお、各気圧層における観測時刻別や季節別の風向差、風速差を付録 2 に示す。



第 3.6.2 図 各季節における Vaisala_SGP ゾンデの気圧層別平均風向 (a)・風速 (c) と二つのラジオゾンデによるそれらの差 (b, d)



第 3.6.3 図 各季節における Vaisala_SGP ゾンデの気圧層別平均の風の東西 (a)・南北 (c) 成分と、二つのラジオゾンデによるそれらの差 (b, d)

4. 指定気圧面における観測データの比較

4.1 統計処理の方法

それぞれのラジオゾンデの観測システムで計算された指定気圧面 (1000, 925, 900, 850, 800, 700, 600, 500, 400, 350, 300, 250, 200, 175, 150, 125, 100, 70, 50, 40, 30, 20, 15, 10, 5hPa) の観測データについての比較を行った。このデータは WMO により高層気象観測における提供データとして位置づけられ、各方面に利用されるデータである。観測値の差は第 3 章と同様に Vaisala_SGP ゾンデの値から Meisei_91 ゾンデの値を引いたもの ($\Delta T_L = T_L^V - T_L^M$, T_L^V と T_L^M はそれぞれ L 番目の観測における Vaisala_SGP ゾンデと Meisei_91 ゾンデのある指定気圧面における観測値) とする。各指定気圧面の比較データを、観測時刻別 (00UTC, 12UTC), 季節別等に区分して集計する。各指定気圧面の合計した観測回数を N, その順番を $L=1, 2, \dots, N$ とし、以下の式によって各種統計量を求める。

各指定気圧面の平均値は、

$$\overline{T^V} = \frac{\sum_{L=1}^N T_L^V}{N}, \quad \overline{T^M} = \frac{\sum_{L=1}^N T_L^M}{N}$$

各指定気圧面の差の平均値は、

$$\overline{\Delta T} = \frac{\sum_{L=1}^N \Delta T_L}{N}$$

各指定気圧面の差の標準偏差は、

$$\sigma(\Delta T) = \sqrt{\frac{\sum_{L=1}^N (\Delta T_L - \overline{\Delta T})^2}{N}}$$

である。

4.2 指定気圧面における気温・湿度の比較結果

第 4.2.1 図に各指定気圧面における季節別平均気温差と気温差の標準偏差のグラフを示す。全体的に、1000 ~ 500hPa 面では、Vaisala_SGP ゾンデの気温観測値が高く 0.1 ~ 0.6°C の差が見られる。300hPa 面付近では Meisei_91 ゾンデの気温観測値が高い傾向にあり、その差は -0.1 ~ -0.3°C である。また、冬を除く季節の 12UTC 観測では 30hPa 面より上で Vaisala_SGP ゾンデの気温観測値が高い。夏の 00UTC 観測では 100hPa 面より上で正の偏差が続く。

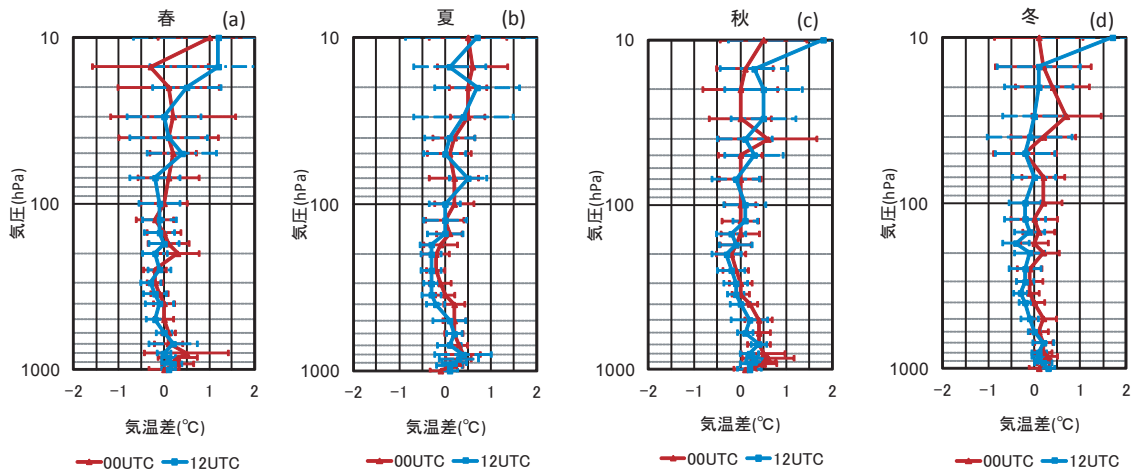
第 4.2.2 図は各指定気圧面における季節別平均湿度差と湿度差の標準偏差のグラフである。同時刻における比較と同様に、全体的に 5%RH 程度 Meisei_91 ゾンデの湿度観測値が高い傾向にある。00UTC 観測では春の観測は 600hPa 面より上で他の季節よりも湿度差が小さい。秋の観測は全体的に湿度差の大きさが 5%RH よりも大きく、他の季節に比べて湿度差が大きい。

なお、各指定気圧面における観測時刻別や季節別の気温差、湿度差、高度差を付録 3 に示す。

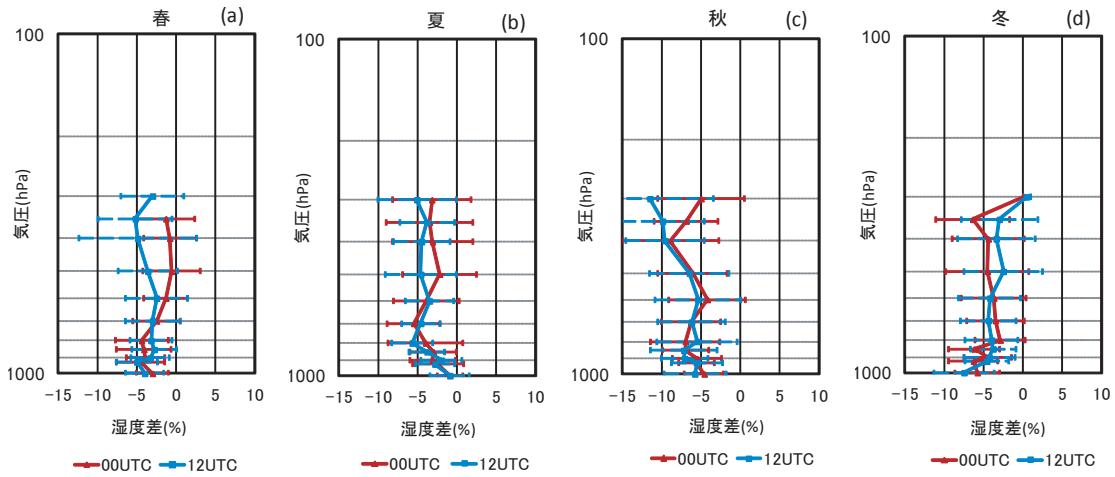
4.3 指定気圧面における風向・風速の比較結果

第 4.3.1 図は各指定気圧面における季節別平均風向差と平均風速差の解析結果である。風向差については、地表付近の 1000 ~ 800hPa 面では風向差がやや大きく、10° 近い差のある気圧面も見られるが、700 ~ 100hPa 面では風向差が小さくなり、70hPa 面より上では再び風向差が大きくなる。風速差については 1000 ~ 300hPa 面では風速差は小さく、その大きさは 1m/s より小さいが、それより上空では全体的に風速差が正の値に偏り、Vaisala_SGP ゾンデの風速が 1 ~ 2m/s 程度大きい傾向がある。これらの結果は同時刻における比較結果と同じ特徴である。

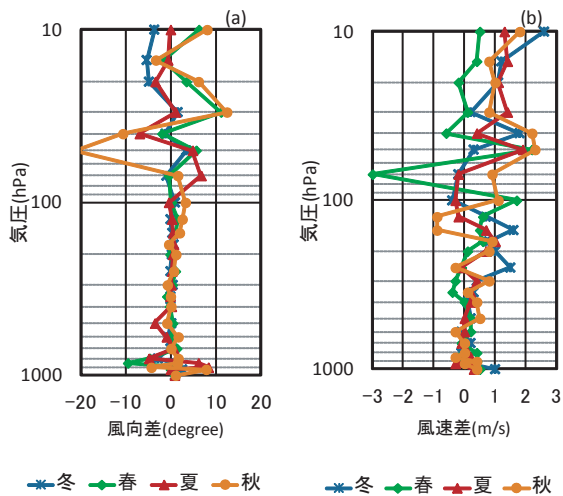
なお、各指定気圧面における観測時刻別や季節別の風向差、風速差を付録 3 に示す。



第 4.2.1 図 各季節における指定気圧面の平均気温差 (Vaisala_SGP - Meisei_91) と気温差の標準偏差 (a: 春, b: 夏, c: 秋, d: 冬)



第 4.2.2 図 各季節における指定気圧面の平均湿度差 (Vaisala_SGP - Meisei_91) と湿度差の標準偏差 (a: 春, b: 夏, c: 秋, d: 冬)



第 4.3.1 図 各季節における指定気圧面の平均風向差 (a) と平均風速差 (b) (Vaisala_SGP - Meisei_91)

5. 比較結果のまとめ

観測データの比較結果をまとめると、以下のよう
な特性が分かった。

- (1) 気温については 1000 ~ 500hPa では Vaisala_SGP ゾンデの観測値が高い傾向がある。また、同時刻で比較を行った場合、日射のある 00UTC と日射のない 12UTC では 30hPa より上空で特徴が異なり、00UTC では Meisei_91 ゾンデが高く、12UTC では Vaisala_SGP ゾンデが高い結果となった。ただし、その気温差は、高層気象観測で必要とする精度の 0.5℃より小さい。
- (2) 湿度については Meisei_91 ゾンデの観測値が平均で 5% 程度高く、特に高湿度の環境下においてその傾向が強い。
- (3) 気圧については、同時刻で観測値を比較すると、100hPa より上空では 0.5hPa 程度 Vaisala_SGP ゾンデの観測値の方が高く、この気圧差に対応して、高度の観測値にも大きな差が見られる。
- (4) 風については、Vaisala_SGP ゾンデの風速が大きい傾向が見られ、最大で約 1m/s の差があり、特に東西成分の風速差が大きい。

これらの差はセンサーや観測データ処理のアルゴリズムの違いによるものが含まれる。気温については、第 2.1.2 表や第 2.1.3 図より、高度が高いほど日射補正量が大きいことから、観測時刻による比較結果の違いには、日射補正の違いが表れていると思われる。また、風向・風速の差は測風方式が異なることに起因するものが大きい。湿度の差については第 6.2 節で更に議論する。

また、指定気圧面の比較による各要素の差は、同時刻における比較で示した気圧差による影響、すなわちデータが取得される実際の気圧の違いによる差も含まれることになる。

6. 考察

6.1 気温差が特に大きい事例について

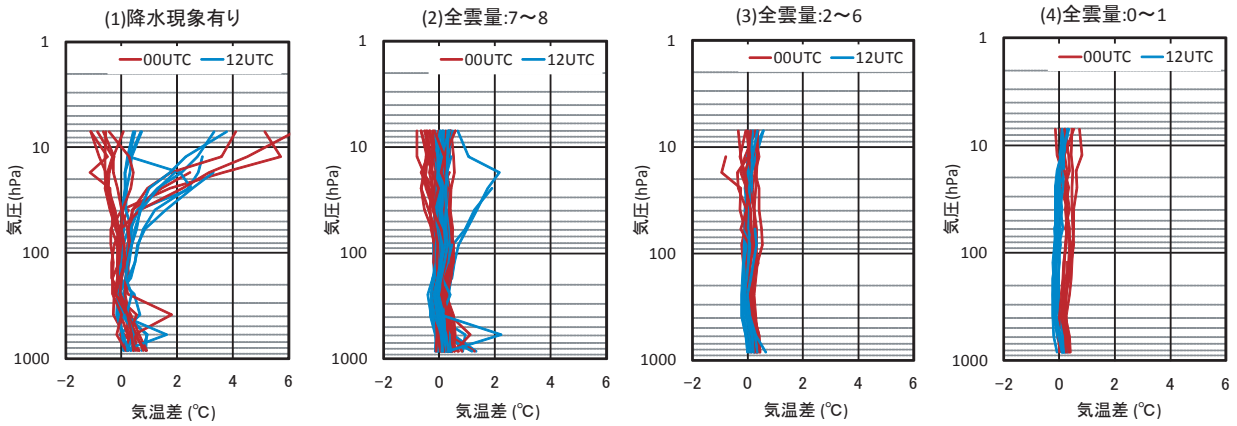
第 3.4 節においてデータの選別で解析に含めなかった気温差が大きい事例(10 例)について原因を探るため、飛揚時の現在天気と全雲量の条件で振り分けを行った。条件は、(1) 全雲量に関係な

く飛揚時又は飛揚 1 時間以内に降水現象があった場合、(2) 全雲量 N が 7 又は 8 の場合、(3) 全雲量 N が 2 以上 6 以下の場合、(4) 全雲量 N が 0 又は 1 の場合、の 4 つである。(2) ~ (4) は降水現象を含まない。条件ごとに振り分けられた観測データを、第 3.3 節の方法と同様に 13 の気圧層別に平均を取った気温差 (Vaisala_SGP - Meisei_91) を図示したものが第 6.1.1 図である。それぞれの条件ごとの観測数は全 115 観測のうち、(1)21, (2)54, (3)21, (4)19 である。条件 (1) や (2) は気温差が大きい、(3) や (4) は気温差が小さくバラつきも小さい。この結果、気温差が大きいために解析から除外した事例は、季節や観測時刻に関わらず全て (1) 又は (2) の条件に含まれる。

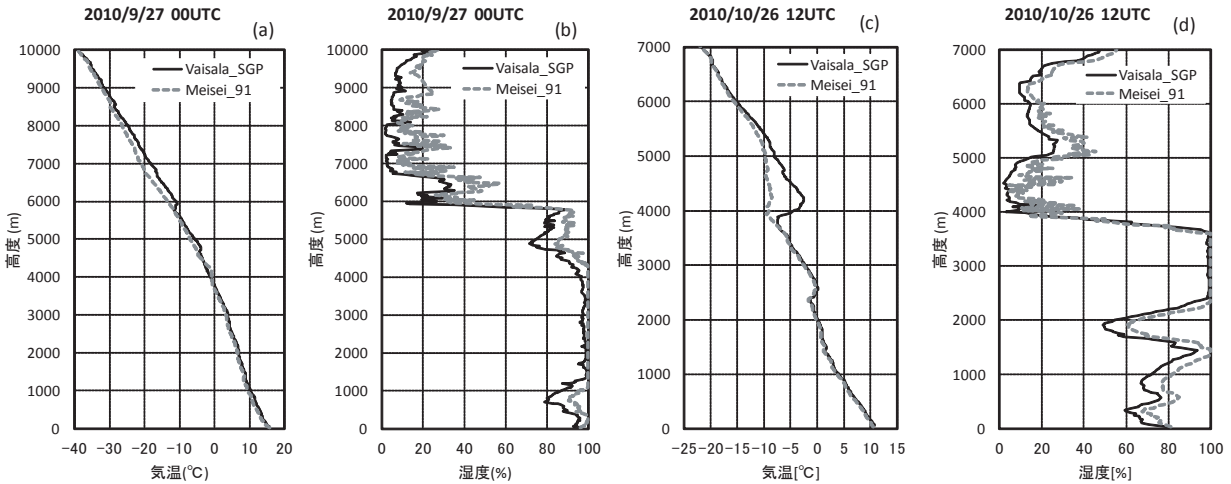
次に、(1) 又は (2) の条件に振り分けされた観測データのうち、対流圏において大きな気温差が見られた事例の気温と湿度のグラフを第 6.1.2 図に示す。2010 年 9 月 27 日 00UTC の事例は (1) の条件、2010 年 10 月 26 日 12UTC の事例は (2) の条件に含まれる。気温差と湿度の変化に注目すると、どちらの事例においても、湿度の鉛直分布が高い値から急激に低い値へと変化する雲頂付近と考えられる高度を通過したところで急激に気温差が開き、そこから上空へいくに従って再び気温差が小さくなるという現象が見られる。このような雲頂付近の気温測定値については、岡林 (1986) においても RS II -56 型 (バイメタル温度計) と RS2-80 型 (サーミスタ温度計) の比較観測資料の中で、バイメタル温度計のラジオゾンデでは雲頂付近に気温の逆転層が現れたが、サーミスタ温度計のラジオゾンデでは雲頂付近に低温層が観測されている。雲頂付近の湿度急減層では安定な空気が沈降し、乾燥断熱的に昇温するために気温の逆転層が生じることがある。岡林 (1986) は、この雲頂付近の逆転層と低温層 (湿度急減層) が一般的には対応していると考えられていることから、ラジオゾンデによる気温観測値の差の原因としては、サーミスタの気温センサーに水滴が付着したまま雲を通り抜けるとき、湿度急減層で水滴が蒸発し、その潜熱による見かけ上の気温低下の影響が現れていることも考えられると説明している。今回の比較結果においても、対流圏で湿度が高い

状態の大気をラジオゾンデが通過する(1)や(2)の条件で気温差が大きい事例が見られることから、これらの気温差の原因として、対流圏でラジオゾンデの気温センサーに水滴又は氷が付着した

事や、その水滴又は氷が蒸発する際の潜熱の影響を受けたことが考えられる。また、成層圏においても気温差が大きくなる事例については更に調査が必要である。



第 6.1.1 図 放球時の雲量・降水の有無で振り分けた場合の各型の気圧層別平均気温差 (Vaisala_SGP - Meisei_91). (1): 降水現象有り, (2): 全雲量 N=7 ~ 8, (3): 全雲量 N=2 ~ 6, (4): 全雲量 N=0 ~ 1



第 6.1.2 図 2010/9/27 00UTC 観測と 2010/10/26 12UTC 観測における各ラジオゾンデによる気温 (a, c) と湿度 (b, d) の観測値 (どちらも対流圏で二つのラジオゾンデに大きな気温差が見られた事例)

6.2 湿度の差について

湿度観測における系統的な差に関して絶対的な評価をするため、異なる測定原理によって求める可降水量 (Precipitable Water Vapor) を利用して比較を行った。比較に使用するデータは、GPS 気柱水蒸気量観測装置 (GPS 受信機) で算出される大気遅延量 (萬納寺, 1998) から求められた可降水量とラジオゾンデによる観測値から算出される可降水量である。可降水量とは、単位面積の大気のコラムに含まれる水蒸気の総量のことであり、大気のコラムに含まれる水蒸気が全部凝結して水になった時の深さを示す指標である。GPS 受信機は、比較観測を実施した高層気象台 (館野) に設置されている (第 6.2.1 図)。

ラジオゾンデの観測値から可降水量を算出する方法は以下の式のとおりであり、観測値が得られる各面における混合比を気圧で積分することにより得られる (西村ほか, 2003)。

$$\text{可降水量} : \text{PWV} = \frac{1}{g} \int_{\text{surface}}^0 r dp$$

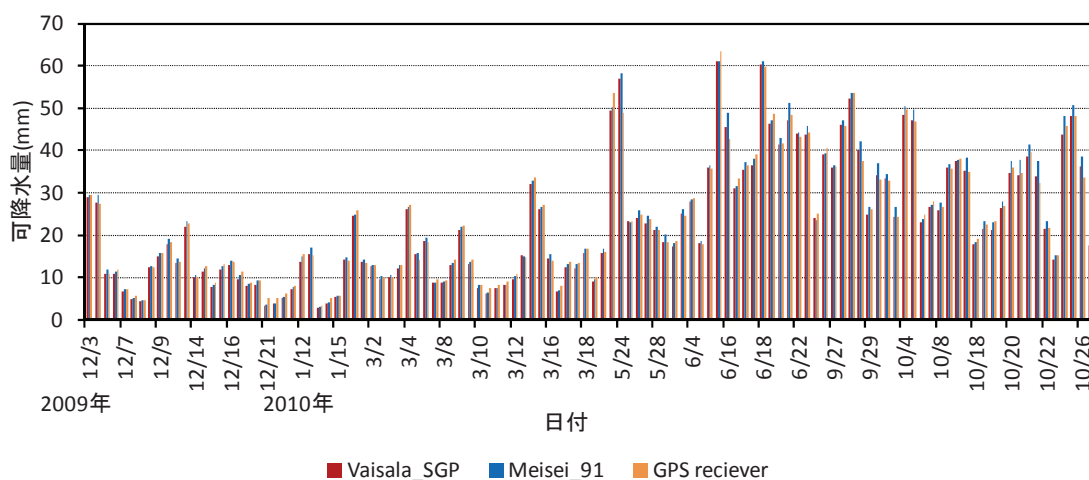
ここで、 r は混合比、 g は重力加速度、 p は気圧であり、混合比はゾンデの観測から得られる気温・相対湿度・気圧から求められる。

比較観測の実施日において、それぞれの観測機器から得られる可降水量とそれらの差を示したものが第 6.2.2 図と第 6.2.3 図である。第 3.5 節で示したように湿度観測値では Meisei_91 ゾンデが大

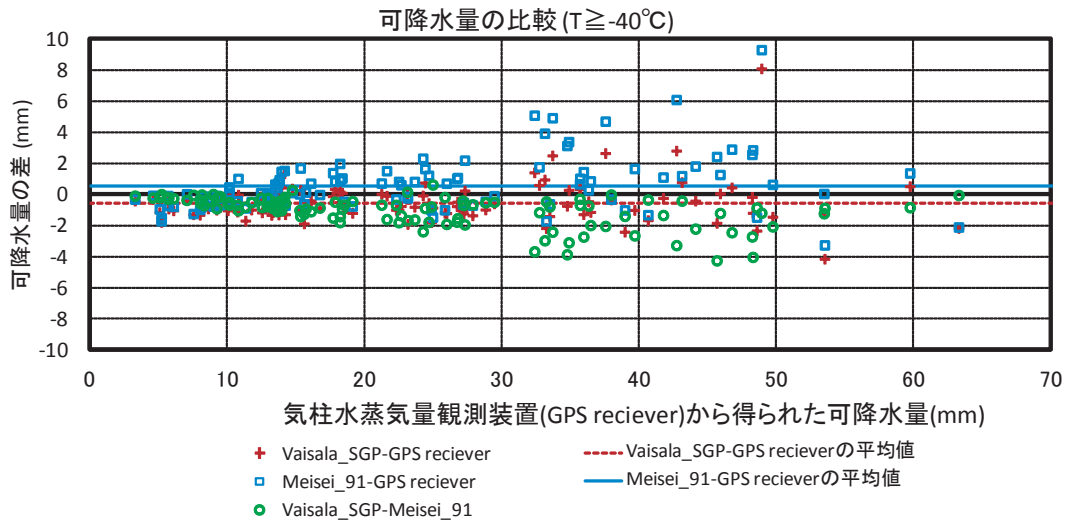
きい値を示す傾向があったため、可降水量も全体的に Meisei_91 ゾンデが Vaisala_SGP ゾンデに比べて大きい値となった。両ラジオゾンデの可降水量の差は RMS(Root Mean Square) で約 1.4mm であった。また、第 3.5 節に示したように湿度が高くなるとラジオゾンデによる湿度差が大きくなっているという結果を反映し、湿度が高い夏や秋には可降水量の値の差やバラつきも大きくなっている。GPS 受信機とラジオゾンデの可降水量の差は、RMS で Vaisala_SGP ゾンデが約 1.4mm、Meisei_91 ゾンデが約 1.8mm、ラジオゾンデから GPS 受信機の値を引いた差の平均値では Vaisala_SGP ゾンデが約 -0.5mm、Meisei_91 ゾンデが約 +0.5mm であり、GPS 受信機の値が両ゾンデの中間の値を示す結果となった。したがって、



第 6.2.1 図 館野に設置されている GPS 受信機



第 6.2.2 図 各ラジオゾンデと館野の GPS 受信機の観測データから得られた可降水量



第 6.2.3 図 各ラジオゾンデと館野の GPS 受信機の観測データから得られた可降水量の差

GPS 受信機の値を基準に考えると、Vaisala_SGP ゾンデは湿度を過小評価、Meisei_91 ゾンデは過大評価の可能性があり、更に両者の誤差が加わるにより大きな湿度差となったと考えられる。このように GPS 受信機の可降水量と比較して、相互比較だけでは分からない特性の違いを知ることができる。しかし、どちらのラジオゾンデの値がより絶対値に近いかを判断するにはなお検討の余地がある。

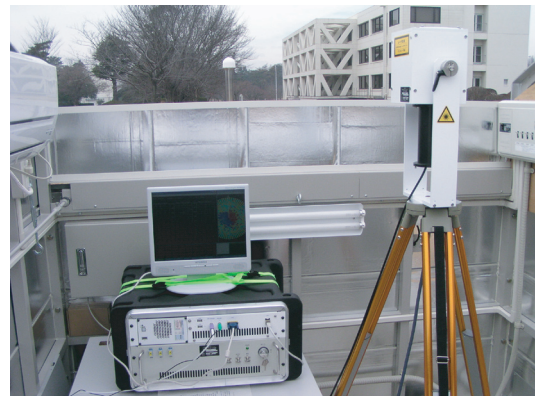
6.3 ドップラーライダーとラジオゾンデによる風観測値の比較

下層風データについて、ラジオゾンデと異なる測定原理を持つドップラーライダーの観測値との比較を行った。ドップラーライダーの測定原理は、レーザー光を空間に発射し、大気中のエアロゾルからの散乱光を受信して、その移動速度、すなわち風速を測定する方法である。最大測定範囲、距離分解能、測定周期はそれぞれ 1,500m、75m、7.2 秒である。風観測値は仰角 80°、72 秒間のコニカル走査によって測定される。ドップラーライダーの仕様を第 6.3.1 表に、ドップラーライダーの外観を第 6.3.1 図に示す。

第 6.3.2 図は 2009 年 12 月～2010 年 11 月においてドップラーライダーと Vaisala_SGP ゾンデの風向・風速を統計的に比較した結果である。風速

第 6.3.1 表 ドップラーライダーの仕様

レーザー光波長	1.5～1.6 μm
観測モード	コニカル走査 (仰角: 80°)
パルス幅	200 ns, 500 ns*, 1,000 ns (*: operational mode)
距離分解能	30 m, 75 m*, 150 m (*: operational mode)
観測範囲	30～600 m, 75～1,500 m*, 150～3,000 m (*: operational mode)
レンジ数	20
最大観測速度	-30～30 m/s
観測データ	水平風向・風速, 鉛直風速

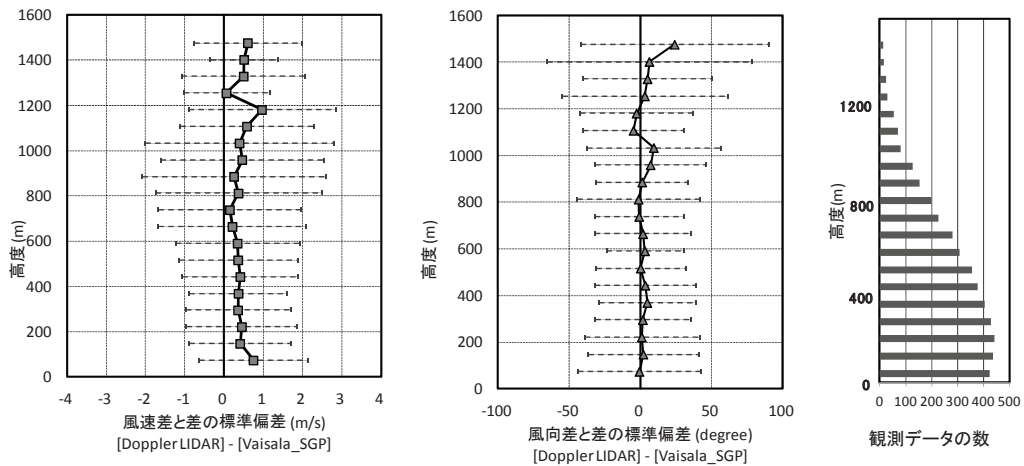


第 6.3.1 図 館野に設置されているドップラーライダー (右: 光アンテナ, 左: データ処理部)

ではドップラーライダーの方が Vaisala_SGP ゾンデよりも約0.4m/s 大きい結果となっている。一方、風向については良く一致していると言える。

第 6.3.2 表は 2009 年 12 月～2010 年 11 月におけるドップラーライダーと Vaisala_SGP ゾンデの水平風データを比較した統計結果であり、風速・

風向・風の東西成分・風の南北成分の比較結果を示している。全体的な水平風速・風向の差はそれぞれ 0.4m/s, 1.9° であり、標準偏差はそれぞれ 1.1m/s, 29.1° であった。これらの結果から、ドップラーライダーとラジオゾンデの観測値が比較的良く一致することがわかる。



第 6.3.2 図 2009 年 12 月～2010 年 11 月におけるドップラーライダーと Vaisala_SGP の風観測値の比較結果

第 6.3.2 表 2009 年 12 月～2010 年 11 月における館野でのドップラーライダーと Vaisala_SGP の水平風観測値の比較結果(差はドップラーライダーから Vaisala_SGP を引いたものを示す)。

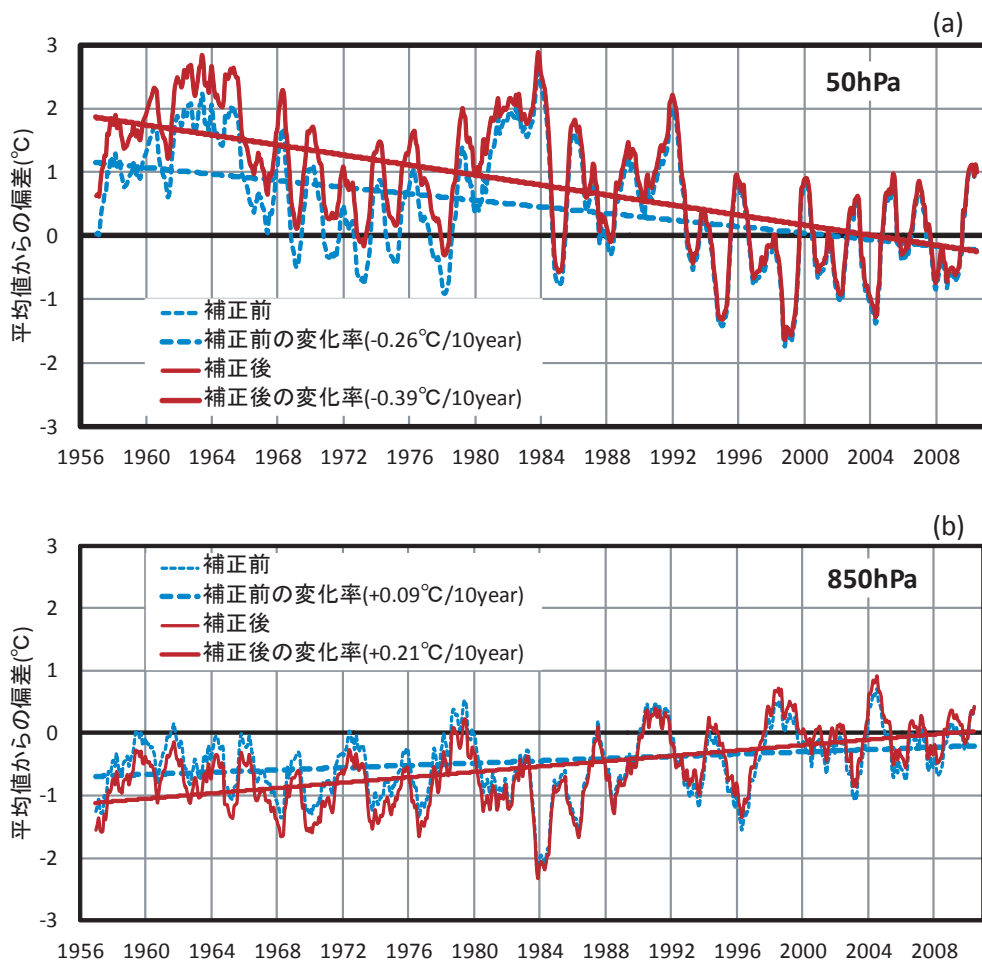
高度 (m AGL)	観測データの数	水平風速 (m/s)		水平風向 (°)		風の東西成分 (m/s)		風の南北成分 (m/s)	
		差	標準偏差	差	標準偏差	差	標準偏差	差	標準偏差
合計	4448	0.4	1.1	1.9	29.1	0.1	1.0	0.0	1.1
74	424	0.8	1.1	-0.6	35.5	0.0	1.1	0.1	1.1
148	437	0.4	1.0	2.2	33.2	0.0	1.0	0.0	1.1
221	442	0.5	0.9	1.1	34.6	0.1	1.1	0.1	1.1
295	429	0.4	1.0	1.8	29.4	0.1	1.0	0.1	1.0
369	404	0.4	1.0	4.9	27.3	0.1	1.0	0.0	1.0
443	377	0.4	1.0	3.5	25.1	0.1	1.0	0.1	1.0
517	355	0.4	1.1	0.3	23.0	0.1	1.0	0.1	1.1
591	307	0.3	1.0	3.3	17.7	0.2	0.9	0.1	1.1
664	280	0.2	1.1	1.9	23.9	0.2	1.1	0.0	1.1
738	226	0.2	1.1	-0.8	22.6	0.1	1.0	-0.1	1.5
812	199	0.4	1.3	-1.2	26.5	0.1	1.2	0.0	1.1
886	154	0.3	1.3	1.3	29.9	0.0	1.1	0.0	1.1
960	126	0.5	1.2	7.3	28.7	0.0	1.1	0.1	1.1
1034	82	0.4	1.0	9.5	34.9	0.2	0.9	0.0	1.1
1107	69	0.6	1.3	-4.8	39.0	0.3	1.2	0.2	1.0
1181	53	1.0	2.6	-2.6	33.8	0.1	1.3	-0.2	1.5
1255	31	0.1	0.8	3.2	30.7	0.1	1.3	-0.3	0.8
1329	23	0.5	0.9	5.1	39.4	0.3	1.2	0.0	0.9
1403	17	0.5	1.3	6.4	19.7	-0.2	1.3	0.2	1.4
1476	13	0.6	1.5	24.1	49.0	0.0	0.6	0.3	1.1

6.4 測器の変更に伴う気温長期変化への影響

高層気象観測資料は通常各指定気圧面の値が利用され、長期的な気候監視においてもこの観測値は重要資料となっている。しかし、今回の結果で指定気圧面資料にも影響が表れることがわかったことから、長期的なデータ利用にどのような影響があるかを検討した。上里ほか(2008)は、指定気圧面の統計値を利用して、過去のラジオゾンデの変更時の特性変化を考慮し、館野における過去50年間の気温トレンドを解析した。例えば、850hPaでは経年変化量が $0.07^{\circ}\text{C}/10$ 年であったものがラジオゾンデの変遷を考慮した補正を行うことによって $+0.20^{\circ}\text{C}/10$ 年となり、補正の影響は無視できないことを示している。今回の比較観測

においても付録第3.1表の850hPaに示したゾンデの違いによる差は $0.2 \sim 0.4^{\circ}\text{C}$ であり、10年の経年変化量とほぼ同程度の大きさであった。

第6.4.1図は今回の結果とこれまでのラジオゾンデ変更時の特性変化を考慮して気温のトレンドを再評価した例である。この期間ラジオゾンデは本報告を除き、1981年3月、1992年10月の2回の更新が行われ、それぞれのデータ特性の変化が評価されている(気象庁観測部高層課, 1983; 迫田ほか, 1999)。補正方法は上里ほか(2008)と同様に、ラジオゾンデ更新時の比較観測から得られた各指定気圧面における器差(気温偏差)を観測値に加えることによって行った。器差補正值と観測値は共に、日射の影響がない12UTCのデータ



第 6.4.1 図 12UTC 観測における指定気圧面の器差補正前後の月平均値(12 カ月移動平均)のトレンド(a: 50hPa, b: 850hPa, 値は 10 年平均(2001 年~ 2010 年)からの偏差)。

青曲線: 補正前, 青直線: 一次回帰直線(補正前), 赤曲線: 補正後, 赤直線: 一次回帰直線(補正後)

を使用した。この結果、対流圏内(850hPa面)では変化率が $+0.09^{\circ}\text{C}/10\text{year}$ から $+0.21^{\circ}\text{C}/10\text{year}$ へと上昇傾向が顕著となった。また、成層圏内(50hPa面)では変化率が $-0.26^{\circ}\text{C}/10\text{year}$ から $-0.39^{\circ}\text{C}/10\text{year}$ と下降傾向がより顕著となった。このようにラジオゾンデの特性の変化を考慮することで、10年の変化率は約 0.1°C の違いが生じた。したがって、長期的なトレンドを対象としてデータを利用する場合は、観測機器の違いによる観測値の特性を十分把握しておくことが重要である。

7. まとめ

高層気象台で定常観測に使用しているラジオゾンデの機種に更新に伴い、Meisei_91ゾンデとVaisala_SGPゾンデの同時飛揚による比較観測を実施した。その結果、測器に期待される精度の範囲内ではあるものの、湿度には約5%RHの差が見られ、気圧にも約0.5hPaの差が見られるなどの特性が分かり、二つのラジオゾンデの測定値には特徴的な差があることが確認された。今回の結果では特に湿度の値に大きく差があり、無視できない大きさとなっていたことから、原理の違う測定方法としてGPS気柱水蒸気量観測装置での観測値で比較を行ったが、その観測値が両ゾンデの中間を示す結果となり、その絶対値に対する評価は難しい。現在高層気象台で使用しているアプリケーションVaisala DigiCORA Sounding SystemはVer.3.63であるが、湿度計算におけるアルゴリズムが改良されたVer.3.64では、従来のバージョンに比べて数パーセントのドライバイアスが改善されることが報告されている(www.vaisala.com)。2010年に中国で行われたラジオゾンデの国際比較「WMO Intercomparison of High Quality Radiosonde System」の報告書によると、このVer.3.64を使用した場合、湿度観測に関する結果は良好であると示されている(Nash *et al.*, 2011)。

更に、ラジオゾンデの特性変化による観測データの連続性への影響を検証するため、今回の結果を含めたこれまでの比較観測結果を利用し、ラジオゾンデの変遷を考慮した気温の長期トレンドの再解析を行った。この結果では、ラジオゾンデ間の観測値の差異がおよそ10年の経年変化量の値

と同程度であった。これは精密な長期データ解析のためには、測器の更新時における観測データの連続性の把握と検証が不可欠な情報であることを示している。

これまで気象庁では、ラジオゾンデ間の特性を把握するための比較観測とそのデータ解析が行われてきたが、データのメタ情報を必要とするGRUANでは、その解析方法は確立しておらず、今回のような解析の手順を一つの基準として示すことができた。比較観測の解析手法と解析結果は、GRUANの実施調整会議で報告し、今後GRUANのマニュアルの作成に寄与するものと期待される。

謝 辞

比較観測及び本稿のデータ解析にあたり、多くの助言、御教授をいただいた観測部観測課の方々に厚くお礼申し上げます。また、可降水量のデータ解析にあたり、データ提供をいただいた観測部観測課観測システム運用室の皆様に厚くお礼申し上げます。

参考文献

- da Silveira R., G. Fisch, L. Machado, A. Dall'Antonia, L. Sapucci, D. Fernandes, R. Marques, and J. Nash (2006) : WMO intercomparison of GPS radiosondes, Alcântara, Brazil, 20 May-10 June 2001., Instruments and Observing Methods Report No. 90, WMO/TD No. 1314, World Meteorological Organization.
http://www.wmo.int/pages/prog/www/IMOP/publications/IOM90_RSOBrazil/IOM90_RSO_EMA_Alcantara2001.pdf
- 気象庁 (2004) : 高層気象観測指針 .2004.
- 気象庁観測部高層課 (1983) : RS2-80 型と RS II -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.
- 気象庁観測課 (2011) : 簡易型 GPS 高層気象観測システム (MBL) 観測マニュアル.
- 萬納寺信崇 (1998) : GPS 大気遅延量を利用した数値予報. 数値予報課報告・別冊第 44 号, 14-24.
- Nash, J., R. Smout, T. Oakley, B. Pathnack, and S. Kumosenko (2006) : WMO Intercomparison of High Quality Radiosonde Systems, Vacoas, Mauritius, 2–25 February 2005. WMO/TD No.1303, Instrument and Observing Methods Report, No.83, World Meteorological Organization, Geneva, 118pp. [Available on line at http://www.wmo.int/pages/prog/www/IMOP/publications/IOM-83_RSO-Mauritius/IOM-83_Radiosondes_Vacoas2005.pdf]
- Nash, J., T. Oakley, H. Vömel and LI Wei (2011) : WMO Intercomparison of High Quality Radiosonde Systems, Yangjiang, China, 12 July-3 August 2010. WMO/TD No.1580, Instruments and Observing Methods Report, No.107, World Meteorological Organization, Geneva, 248pp. [Available on line at http://www.wmo.int/pages/prog/www/IMOP/publications/IOM-107_Yangjiang.pdf]
- 西村昌明・岩淵哲也・内藤勲夫・里村幹夫 (2003) : GPS 可降水量のラジオゾンデによる再検証. 天気, Vol.50, No.12, 909-917.
- 岡林俊雄 (1986) : RS II -56 型と RS2-80 型ゾンデとの気温, 高度の比較について. 高層気象台彙報, 第 46 号, 31-35.
- 迫田優一・永沼啓治・荻原裕一・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.
- Seidel, D. J., Berger, F. H., Diamond, H. J., Dykema, J., Goodrich, D., Immler, F., Murray, W., Peterson, T., Sisterson, D., Sommer, M., Thorne, P., Vömel, H. & Wang, J. (2009) : Reference Upper-Air Observations for Climate: Rationale, Progress, and Plans. Bulletin of the American Meteorological Society, 90, 361–369.
- Steinbrecht, W., Claude, H., Schönenborn, F., Leiterer, U., Dier, H. and Lanzinger, E. (2008) : Pressure and Temperature Differences between Vaisala RS80 and RS92 Radiosonde Systems. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 25, 909-927.
- 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, 第 68 号, 15-22.
- Vaisala Oyj : Vaisala Humidity Measurement Improved Algorithm.
 [Available on line at <http://www.vaisala.com/en/products/soundingsystemsandradiosondes/soundingdatacontinuity/Pages/humiditymeasurementimprovedalgorithm.aspx>]
- Vaisala Oyj (2005) : Revised Solar Radiation Correction Table RSN2005 for Temperature Sensor. VAISALA, [Available on line at <http://www.vaisala.com/en/meteorology/products/soundingsystemsandradiosondes/soundingdatacontinuity/Pages/solarradiationcorrectiontable.aspx>]
- Vaisala Oyj (2006) : Vaisala ラジオゾンデ RS92-SGP. [Available online at <http://www.sankotsusho.co.jp/products/kisho/kousoukansoku/pdf/rs92.pdf>]

付録1 比較観測期間中の地上気象観測データ

付録 第1.1表 冬季地上気象観測データ

N: 全雲量, Nh: 下層又は中層雲量, CL: 下層雲の状態, h: 雲底高度, CM: 中層雲の状態, CH: 上層雲の状態, WW: 現在天気, P: 気圧, T: 気温, H: 湿度, Dir: 風向, Vel: 風速

観測時刻	日付	放球時刻 (UTC)	雲・天気							地上値				
			N	Nh	CL	h	CM	CH	WW	P (hPa)	T (°C)	H (%)	Dir (°)	Vel (m/s)
00 UTC	12/2	23:31:07	8	8	2	X	X	X	80	1012.1	8.0	96	310	0.6
	12/3	23:30:33	1	1	1	X	0	0	1	1010.2	9.3	89	30	1.9
	12/6	23:30:19	3	1	5	X	0	2	3	1014.1	7.0	68	330	1.0
	12/7	23:30:16	0	0	0	9	0	0	2	1022.3	3.2	73	260	1.2
	12/8	23:30:15	8	6	5	X	7	X	2	1020.4	6.8	78	320	1.8
	12/9	23:30:23	1	1	1	X	0	1	2	1020.9	9.9	71	50	3.2
	12/10	23:30:19	8	6	2	X	7	X	80	1020.9	7.4	92	340	2.0
	12/13	23:30:14	7	7	5	X	X	X	2	1013.7	7.2	64	360	1.2
	12/14	23:30:14	3	3	5	X	0	0	1	1016.2	3.9	67	190	1.1
	12/15	23:30:19	8	1	7	X	2	X	2	1011.5	2.1	84	330	1.8
	12/16	23:30:21	7	7	2	7	X	X	27	1009.6	3.9	62	40	2.4
	12/20	23:30:17	0	0	0	9	0	0	2	1007.1	4.7	45	290	3.7
	12/21	23:30:18	2	1	1	X	3	0	2	1017.0	1.3	51	320	2.1
1/11	23:30:21	8	8	5	X	X	X	2	1007.6	1.3	82	300	1.3	
12 UTC	12/3	11:30:35	7	7	7	X	X	X	21	1001.6	10.1	96	70	1.0
	12/4	11:30:27	6	6	5	X	0	2	2	1017.6	8.7	77	50	2.3
	12/7	11:30:15	1	0	0	9	0	1	2	1018.3	7.3	41	300	3.7
	12/8	11:30:22	8	8	5	X	X	X	3	1021.4	7.6	66	30	1.9
	12/9	11:30:25	8	8	5	X	X	X	2	1018.0	9.1	71	340	1.9
	12/14	11:30:32	7	7	5	X	0	0	2	1011.8	7.0	74	320	2.1
	12/15	11:30:20	7	4	0	X	3	2	2	1011.5	4.8	69	300	1.0
	12/16	11:30:16	1	1	5	X	0	0	2	1008.0	4.4	83	40	2.2
	12/17	11:30:17	1	1	5	X	0	0	2	1005.4	1.8	93	310	1.4
	12/21	11:30:15	0	0	0	9	0	0	2	1013.9	3.2	37	280	3.5
	12/22	11:30:16	0	0	0	9	0	0	2	1016.0	0.5	85	-	0.2
	1/12	11:30:23	8	7	7	X	2	X	60	999.1	2.2	96	310	1.6
	1/13	11:41:15	0	0	0	9	0	0	2	1005.0	1.9	35	290	3.1
1/14	11:31:14	0	0	0	9	0	0	2	1016.2	2.1	41	340	5.1	
1/15	11:30:17	0	0	0	9	0	0	2	1015.7	-1.3	66	250	1.7	

付録 第1.2表 春季地上気象観測データ

観測時刻	日付	放球時刻 (UTC)	雲・天気							地上値				
			N	Nh	CL	h	CM	CH	WW	P (hPa)	T (°C)	H (%)	Dir (°)	Vel (m/s)
00 UTC	2/28	23:38:03	8	8	7	X	X	X	21	1015.7	6.5	91	10	1.8
	3/1	23:30:19	8	6	5	X	7	X	2	1012.1	4.5	82	50	3.1
	3/2	23:30:17	5	1	5	X	3	2	1	1011.5	5.7	76	150	1.1
	3/3	23:31:51	8	3	5	X	7	X	2	1026.7	5.8	70	40	2.3
	3/4	23:30:15	1	0	0	9	0	2	2	1008.2	9.8	84	290	1.5
	3/7	23:30:14	7	1	5	X	3	2	2	1024.4	4.6	69	30	3.1
	3/8	23:30:14	8	7	5	X	7	X	2	1025.0	3.5	69	30	4.3
	3/9	23:30:17	7	7	5	X	X	X	2	996.5	3.5	88	310	2.8
	3/10	23:30:17	1	1	1	X	0	0	2	1011.6	7.4	46	300	4.8
	3/11	23:30:16	0	0	0	9	0	0	2	1025.2	6.3	70	310	1.8
	3/14	23:30:18	8	8	5	X	X	X	2	1022.6	7.5	79	340	1.5
	3/15	23:30:13	7	6	5	X	0	2	2	997.6	12.2	86	300	1.9
	3/16	23:30:17	7	7	5	X	X	X	2	1015.4	7.9	34	310	2.3
	3/17	23:30:17	7	1	5	X	1	X	2	1015.1	7.3	69	10	1.4
	3/18	23:30:22	7	4	2	X	3	X	2	1010.9	5.2	83	-	0.2
12 UTC	3/1	11:30:17	8	2	2	X	7	X	2	1008.8	6.0	87	60	5.5
	3/2	11:30:13	8	8	5	X	X	X	2	1012.1	3.3	79	40	3.0
	3/3	11:30:15	2	2	2	X	3	0	2	1020.0	7.7	70	120	1.8
	3/4	11:30:15	8	8	7	X	X	X	61	1018.4	5.4	95	330	2.1
	3/5	11:30:27	7	7	6	X	X	X	2	1012.8	10.9	91	50	2.7
	3/8	11:30:20	6	1	5	X	0	1	2	1026.3	3.5	78	90	1.8
	3/9	11:30:19	8	8	0	X	2	X	73	1011.8	0.7	94	20	4.8
	3/10	11:30:23	1	1	6	X	0	0	41	998.4	1.8	96	270	1.4
	3/11	11:30:18	0	0	0	9	0	0	2	1021.0	6.0	56	310	1.9
	3/12	11:30:16	7	1	0	9	3	2	2	1018.9	10.8	66	180	3.3
	3/15	11:30:14	8	5	2	X	7	X	2	1010.6	16.1	73	190	4.5
	3/16	11:31:37	5	5	5	X	0	0	1	1003.1	9.9	83	50	1.5
	3/17	11:30:17	4	4	5	X	0	0	2	1016.2	7.2	58	110	1.4
3/18	11:30:17	7	7	5	X	X	X	2	1009.4	6.9	76	50	3.6	
3/19	11:30:18	3	3	1	X	3	0	2	1012.0	7.1	77	140	2.3	

付録 第1.3表 夏季地上気象観測データ

観測時刻	日付	放球時刻 (UTC)	雲・天気							地上値				
			N	Nh	CL	h	CM	CH	WW	P (hPa)	T (°C)	H (%)	Dir (°)	Vel (m/s)
00 UTC	5/23	23:30:16	8	7	7	X	2	X	61	1004.1	17.2	94	70	3.3
	5/24	23:30:14	7	7	2	X	0	0	2	997.6	20.3	87	100	1.6
	5/27	23:30:19	7	7	2	X	X	X	2	1007.2	14.7	78	60	1.9
	6/2	23:30:20	0	0	0	9	0	0	2	1016.6	19.6	65	300	0.9
	6/14	23:30:49	6	6	2	X	0	2	1	1006.2	20.4	85	280	2.9
	6/16	23:30:18	7	2	5	X	3	2	2	1005.4	25.0	69	20	1.2
	6/17	23:30:18	7	1	2	X	3	9	2	1005.2	24.7	77	280	0.9
	6/20	23:30:18	8	4	2	X	1	X	2	1000.5	25.0	78	240	2.5
	6/21	23:30:18	8	6	2	X	1	X	2	1004.9	24.7	79	300	0.5
	6/22	23:30:18	8	8	2	2	X	X	80	1001.9	23.4	92	180	2.3
	6/23	23:30:18	7	3	2	X	7	X	2	1005.1	23.5	62	130	1.5
7/7	23:33:17	6	4	2	X	3	0	2	1006.1	26.2	79	330	2.7	
12 UTC	5/24	11:30:16	8	8	7	X	X	X	60	995.0	22.4	92	200	5.1
	5/25	11:30:18	6	1	1	X	3	2	2	994.6	21.8	73	180	6.6
	5/28	11:30:18	7	7	2	X	X	X	2	1008.7	16.0	68	130	2.5
	6/2	11:30:19	1	0	0	9	0	1	2	1017.0	16.5	71	130	2.2
	6/3	11:30:18	2	1	1	X	0	2	2	1014.6	19.1	78	160	2.4
	6/4	11:30:26	7	6	2	X	0	2	25	1011.0	17.9	63	90	6.0
	6/7	11:30:18	7	1	1	X	3	2	2	1013.9	20.8	70	120	2.3
	6/15	11:30:20	8	7	2	X	7	X	80	1004.3	24.0	84	170	2.9
	6/16	11:30:18	7	7	2	X	X	X	2	1001.0	24.4	88	70	2.4
	6/17	11:30:16	7	2	1	X	0	2	2	1004.8	25.0	70	110	2.1
	6/18	11:30:17	8	7	7	X	2	X	61	1002.6	18.6	94	330	1.1
	6/21	11:30:19	7	1	1	X	7	X	2	1002.6	24.6	80	150	1.7
	6/22	11:30:17	7	2	5	X	7	X	3	1004.9	25.4	76	130	2.0
6/23	11:30:18	6	1	1	X	3	0	10	1001.2	21.4	95	200	0.7	

付録 第1.4表 秋季地上気象観測データ

観測時刻	日付	放球時刻 (UTC)	雲・天気							地上値				
			N	Nh	CL	h	CM	CH	WW	P (hPa)	T (°C)	H (%)	Dir (°)	Vel (m/s)
00 UTC	9/26	23:30:16	8	4	7	X	7	X	61	1019.7	15.7	96	60	2.6
	9/27	23:30:18	8	8	7	1	X	X	20	1007.6	20.9	98	150	1.5
	9/28	23:31:16	6	3	8	X	3	1	2	1014.3	19.3	77	110	1.2
	9/30	23:30:19	7	7	2	X	X	X	2	1017.9	18.9	94	310	1.7
	10/3	23:30:18	8	8	7	X	X	X	21	1006.4	18.7	94	30	1.3
	10/4	23:30:19	6	6	2	X	0	0	2	1006.5	20.6	80	40	1.5
	10/7	23:30:18	3	1	2	X	3	0	1	1021.2	20.4	76	20	3.1
	10/14	23:40:20	8	8	5	X	X	X	2	1005.8	18.9	89	40	1.7
	10/17	23:30:17	3	2	5	X	3	1	2	1021.8	17.8	69	50	2.5
	10/18	23:30:18	8	6	0	9	7	7	2	1024.4	17.1	76	30	2.9
	10/19	23:30:18	8	2	5	X	7	X	2	1019.1	16.5	86	320	1.4
	10/20	23:30:19	8	6	7	X	2	X	60	1012.5	16.8	96	320	1.0
	10/21	23:30:17	7	3	5	X	3	X	2	1017.2	16.5	73	40	3.8
	10/24	23:30:16	8	8	6	2	X	X	21	1002.2	15.5	96	290	1.7
10/25	23:30:18	8	7	5	X	7	X	60	1003.1	16.5	92	60	2.0	
12 UTC	9/27	11:30:17	8	8	7	X	X	X	61	1016.2	15.5	99	310	1.6
	9/28	11:30:16	7	1	5	X	7	X	10	1004.9	19.6	98	240	0.9
	9/29	11:30:16	7	2	1	X	7	1	2	1017.0	19.4	76	90	1.6
	10/1	11:30:21	7	7	5	X	X	X	2	1018.3	18.9	89	60	1.6
	10/4	11:30:17	8	8	6	X	X	X	10	1003.6	20.5	97	300	1.9
	10/8	11:30:19	3	0	0	9	0	2	2	1019.1	17.3	81	60	2.6
	10/14	11:30:18	7	1	1	X	7	X	2	1006.9	18.8	86	50	2.0
	10/15	11:30:17	7	5	2	X	3	1	2	1007.8	20.0	85	110	1.7
	10/18	11:30:18	7	2	5	X	0	8	2	1022.6	15.9	75	50	2.3
	10/19	11:30:17	6	6	5	X	0	0	2	1022.3	16.9	81	40	2.0
	10/20	11:30:17	8	2	5	X	1	X	10	1015.1	15.8	97	310	1.8
	10/21	11:30:15	8	3	6	X	2	X	10	1012.4	15.3	99	350	1.5
	10/22	11:30:18	8	6	5	X	1	X	2	1019.7	15.0	72	50	2.4
	10/25	11:30:17	8	8	7	X	X	X	61	1000.3	17.5	98	340	1.2
10/26	11:30:18	8	1	6	X	7	X	2	1011.7	10.5	81	70	1.3	

付録2 同時刻における比較結果の統計値表

付録 第2.1表 各観測時刻における気温差, 湿度差, 気圧差

気圧層(hPa)	気温差 (°C)			湿度差 (%)			気圧差 (hPa)		
	00UTC and 12UTC	00UTC	12UTC	00UTC and 12UTC	00UTC	12UTC	00UTC and 12UTC	00UTC	12UTC
999.9~700.0	0.30	0.38	0.23	-4.48	-4.56	-4.39	0.06	0.09	0.03
699.9~500.0	0.22	0.27	0.16	-3.67	-3.24	-4.13	0.21	0.27	0.15
499.9~300.0	0.05	0.15	-0.05	-4.30	-3.53	-5.11	0.37	0.42	0.30
299.9~200.0	-0.02	0.06	-0.11	-5.19	-3.51	-6.62	0.43	0.49	0.37
199.9~150.0	0.03	0.10	-0.04				0.48	0.55	0.41
149.9~100.0	0.09	0.15	0.02				0.53	0.58	0.48
99.9~70.0	0.12	0.16	0.08				0.55	0.60	0.51
69.9~50.0	0.10	0.10	0.10				0.58	0.60	0.55
49.9~30.0	0.07	0.04	0.11				0.59	0.60	0.58
29.9~20.0	0.10	-0.01	0.21				0.61	0.61	0.60
19.9~15.0	0.08	-0.06	0.24				0.61	0.61	0.61
14.9~10.0	0.05	-0.09	0.22				0.60	0.59	0.60
9.9~5.0	0.11	-0.11	0.40				0.60	0.58	0.62

付録 第2.2表 季節別の気温差

気圧層(hPa)	気温差 (°C) [00UTC]				気温差 (°C) [12UTC]			
	春	夏	秋	冬	春	夏	秋	冬
999.9～700.0	0.39	0.34	0.50	0.25	0.10	0.30	0.32	0.19
699.9～500.0	0.18	0.34	0.41	0.17	0.00	0.27	0.36	0.02
499.9～300.0	0.06	0.20	0.28	0.07	-0.09	-0.05	0.04	-0.12
299.9～200.0	0.07	0.04	0.02	0.08	-0.11	-0.18	-0.03	-0.12
199.9～150.0	0.13	0.09	0.07	0.12	0.02	-0.10	0.03	-0.12
149.9～100.0	0.10	0.17	0.17	0.15	0.04	0.00	0.15	-0.10
99.9～70.0	0.12	0.20	0.19	0.14	0.08	0.06	0.24	-0.06
69.9～50.0	0.08	0.15	0.07	0.11	0.19	0.03	0.23	-0.05
49.9～30.0	-0.02	0.13	-0.01	0.07	0.22	0.03	0.22	-0.03
29.9～20.0	-0.04	0.10	-0.10	0.06	0.35	0.22	0.31	-0.01
19.9～15.0	-0.17	0.06	-0.12	0.06	0.26	0.25	0.44	0.05
14.9～10.0	-0.11	0.09	-0.16	-0.11	0.19	0.14	0.43	0.14
9.9～5.0	-0.11	0.15	-0.27	-0.09	0.23	0.30	0.90	0.32

付録 第2.3表 季節別の湿度差

気圧層(hPa)	湿度差 (%) [00UTC]				湿度差 (%) [12UTC]			
	春	夏	秋	冬	春	夏	秋	冬
999.9～700.0	-3.97	-3.04	-6.38	-4.57	-3.19	-3.79	-5.96	-4.59
699.9～500.0	-1.28	-3.52	-5.14	-3.22	-2.77	-4.34	-5.76	-3.61
499.9～300.0	-1.09	-2.45	-6.82	-3.71	-4.64	-3.95	-8.97	-2.61
299.9～200.0		-2.56	-4.60	0.21	-3.18	-5.18	-9.36	0.52

付録 第2.4表 季節別の風向差

気圧層(hPa)	風向差(°)[00UTC]				風向差(°)[12UTC]			
	春	夏	秋	冬	春	夏	秋	冬
999.9~700.0	0.03	-0.28	1.27	0.28	-0.58	-2.52	0.30	0.37
699.9~500.0	-0.47	-0.99	-0.12	-0.03	0.19	0.57	0.75	-0.08
499.9~300.0	-0.35	-0.92	-0.07	0.08	0.02	-0.03	-0.27	0.06
299.9~200.0	0.27	0.25	0.33	0.35	0.11	0.04	-0.26	0.15
199.9~150.0	-0.12	0.10	0.77	0.66	0.18	0.18	0.51	0.29
149.9~100.0	0.95	-0.33	0.47	0.62	-0.47	0.56	-0.41	0.77
99.9~70.0	0.87	0.00	-0.38	1.01	0.14	1.25	-1.59	0.36
69.9~50.0	-0.90	-11.29	8.44	0.79	11.00	2.17	4.63	0.65
49.9~30.0	-5.53	4.62	-10.71	-6.72	6.50	-4.98	5.74	-5.97
29.9~20.0	-1.34	-1.08	9.19	-5.65	-11.80	-1.19	-11.28	-4.15
19.9~15.0	-0.34	-2.19	-0.90	-4.18	6.77	3.57	-0.96	-7.38
14.9~10.0	2.04	-0.64	1.86	-2.45	-3.86	0.10	-10.70	-1.75
9.9~5.0	0.37	-1.54	13.58	-0.51	-3.06	1.04	-8.25	-1.97

付録 第2.5表 季節別の風速差

気圧層(hPa)	風速差(m/s)[00UTC]				風速差(m/s)[12UTC]			
	春	夏	秋	冬	春	夏	秋	冬
999.9~700.0	0.16	0.04	-0.14	0.18	0.12	0.06	0.16	0.00
699.9~500.0	0.46	0.00	0.01	-0.01	0.09	-0.07	-0.05	-0.01
499.9~300.0	-0.42	0.16	-0.09	0.12	0.19	-0.08	0.12	0.25
299.9~200.0	0.28	0.13	0.45	0.96	0.43	0.16	-0.27	0.99
199.9~150.0	0.27	1.20	0.51	0.83	0.45	0.95	0.28	1.19
149.9~100.0	1.00	0.39	-0.36	0.79	2.34	0.02	0.41	1.10
99.9~70.0	0.91	-0.56	0.47	0.38	-0.49	0.20	0.07	0.06
69.9~50.0	0.61	0.58	0.67	-0.40	2.90	0.70	0.86	-0.88
49.9~30.0	-0.78	0.71	0.96	0.62	2.40	0.79	0.64	0.83
29.9~20.0	0.49	0.56	1.00	1.09	-1.03	0.76	0.94	0.68
19.9~15.0	-0.30	0.51	0.92	0.51	0.86	0.22	1.36	1.04
14.9~10.0	-0.11	0.66	0.28	1.08	-0.13	0.89	1.21	1.06
9.9~5.0	-0.08	0.86	0.05	0.71	0.92	0.47	3.87	1.19

付録 3 指定気圧面における比較結果の統計値表

付録 第 3.1 表 各観測時刻における気温差, 湿度差, ジオポテンシャル高度差

気圧面(hPa)	気温差 (°C)			湿度差 (%)			ジオポテンシャル高度差 (hPa)		
	00UTC and 12UTC	00UTC	12UTC	00UTC and 12UTC	00UTC	12UTC	00UTC and 12UTC	00UTC	12UTC
1000	0.10	0.10	0.20	-4.20	-3.80	-4.70	-0.20	-0.30	-0.20
925	0.20	0.30	0.20	-4.70	-4.80	-4.50	0.30	0.40	0.20
900	0.20	0.30	0.20	-4.30	-4.30	-4.20	0.60	0.70	0.50
850	0.30	0.40	0.20	-4.80	-5.20	-4.40	1.10	1.40	0.90
800	0.30	0.40	0.20	-4.60	-4.70	-4.60	1.60	2.00	1.20
700	0.20	0.30	0.20	-4.50	-4.40	-4.50	2.90	3.60	2.30
600	0.10	0.20	0.10	-3.50	-3.20	-3.90	3.90	4.80	2.90
500	0.10	0.20	0.00	-3.80	-3.40	-4.30	4.90	6.10	3.60
400	0.00	0.10	-0.10	-5.10	-4.40	-5.70	5.20	7.10	3.40
350	-0.10	0.00	-0.20	-5.30	-4.60	-6.00	5.10	7.20	3.00
300	-0.20	-0.10	-0.20	-6.00	-4.00	-7.60	4.50	7.10	1.90
250	-0.20	-0.10	-0.20	-7.90	-4.80	-11.80	4.00	6.90	1.10
200	-0.10	0.00	-0.20				3.20	6.70	-0.40
175	-0.10	0.00	-0.20				3.00	6.80	-0.80
150	0.00	0.00	-0.10				3.00	7.10	-1.20
125	0.00	0.00	0.00				3.00	7.60	-1.60
100	0.00	0.10	0.00				3.10	7.90	-1.70
70	0.10	0.10	0.00				4.70	10.40	-1.00
50	0.10	0.00	0.10				6.80	12.60	0.60
40	0.20	0.30	0.00				7.90	13.40	2.00
30	0.30	0.30	0.20				9.70	15.00	4.30
20	0.30	0.20	0.40				13.20	18.10	7.70
15	0.20	0.10	0.40				14.90	17.80	11.80
10	0.90	0.50	1.40				24.40	25.30	23.20
5	2.70	2.60	2.80				47.50	47.50	47.60

付録 第3.2表 季節別の気温差

気圧面(hPa)	気温差 (°C) [00UTC]				気温差 (°C) [12UTC]			
	春	夏	秋	冬	春	夏	秋	冬
1000	0.00	-0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.20	0.30
925	0.30	0.20	0.50	0.20	0.20	0.10	0.20	0.20
900	0.20	0.30	0.50	0.20	0.10	0.20	0.30	0.10
850	0.30	0.30	0.60	0.30	0.10	0.30	0.30	0.10
800	0.50	0.40	0.50	0.20	0.00	0.40	0.20	0.10
700	0.10	0.30	0.40	0.20	0.20	0.10	0.40	0.20
600	0.10	0.20	0.40	0.10	0.00	0.20	0.10	0.00
500	0.00	0.20	0.40	0.20	-0.20	0.10	0.20	-0.10
400	0.00	0.20	0.20	0.00	-0.10	-0.20	0.00	-0.20
350	-0.10	0.00	0.00	-0.10	-0.20	-0.30	-0.10	-0.30
300	-0.20	-0.10	0.00	-0.10	-0.30	-0.30	-0.10	-0.20
250	-0.20	-0.20	-0.10	-0.10	-0.10	-0.30	-0.20	-0.20
200	0.30	-0.20	-0.20	0.20	-0.20	-0.30	-0.30	-0.10
175	0.10	-0.10	-0.10	0.00	0.00	-0.30	-0.10	-0.40
150	0.00	0.10	0.00	0.10	-0.10	0.00	-0.20	-0.10
125	-0.20	0.00	0.00	0.00	-0.10	0.00	0.10	-0.20
100	0.00	0.20	0.00	0.20	-0.10	0.00	0.10	-0.20
70	0.10	0.20	0.00	0.20	-0.20	0.50	-0.10	0.00
50	0.20	0.10	0.00	-0.20	0.40	0.00	0.30	-0.20
40	0.10	0.20	0.60	0.20	0.10	0.10	0.10	-0.10
30	0.20	0.50	0.00	0.70	0.00	0.40	0.50	0.00
20	0.10	0.50	0.00	0.40	0.50	0.70	0.50	0.10
15	-0.30	0.60	0.10	0.20	1.20	0.10	0.30	0.10
10	1.00	0.50	0.50	0.10	1.20	0.70	1.80	1.70
5			-0.30	4.00				2.80

付録 第3.3表 季節別の湿度差

気圧面(hPa)	湿度差 (%) [00UTC]				湿度差 (%) [12UTC]			
	春	夏	秋	冬	春	夏	秋	冬
1000	-3.00	-0.90	-4.60	-5.80	-4.00	-0.90	-5.80	-7.50
925	-4.50	-2.40	-5.60	-6.30	-5.00	-2.80	-5.50	-4.60
900	-3.90	-3.10	-5.50	-4.50	-3.30	-2.00	-7.10	-4.30
850	-4.10	-3.00	-7.00	-6.20	-2.80	-3.80	-7.20	-3.80
800	-4.40	-4.00	-7.00	-2.90	-3.20	-5.70	-5.50	-4.00
700	-2.50	-5.50	-6.30	-3.50	-3.00	-4.60	-6.20	-4.40
600	-1.30	-3.90	-4.20	-3.70	-2.50	-3.50	-5.40	-4.20
500	-0.60	-2.20	-6.10	-4.50	-3.60	-4.60	-6.50	-2.50
400	-0.80	-3.10	-8.90	-4.40	-4.90	-4.50	-9.60	-3.40
350	-1.30	-3.50	-6.90	-6.40	-5.20	-3.80	-9.90	-3.00
300		-3.20	-5.00	0.00	-3.00	-5.10	-11.50	0.50
250		-3.00	-7.50			-13.50	-20.00	0.00

付録 第3.4表 季節別のジオポテンシャル高度差

気圧面(hPa)	ジオポテンシャル高度差 (m) [00UTC]				ジオポテンシャル高度差 (m) [12UTC]			
	春	夏	秋	冬	春	夏	秋	冬
1000	-0.60	-0.10	0.00	-0.40	-0.40	-0.20	-0.10	-0.20
925	0.10	0.60	0.80	0.00	-0.10	0.20	0.40	0.20
900	0.10	1.00	1.20	0.40	0.20	0.60	0.80	0.20
850	0.60	1.50	2.20	1.10	0.40	1.50	1.00	0.70
800	1.60	2.30	3.00	1.20	0.50	1.90	1.60	0.90
700	3.60	4.00	4.60	2.20	1.60	3.00	3.00	1.60
600	4.40	5.80	6.30	2.90	1.90	4.20	3.90	1.80
500	4.90	7.40	8.50	3.70	1.60	5.10	6.20	1.60
400	4.90	8.50	10.80	4.10	1.10	4.80	6.60	0.90
350	5.10	9.10	11.00	3.80	0.90	4.40	6.20	0.30
300	4.40	9.20	11.40	3.50	-0.40	3.30	5.70	-1.10
250	4.20	8.70	11.10	3.60	-1.20	2.10	5.20	-1.80
200	4.30	7.80	10.80	4.00	-2.20	0.20	3.60	-3.10
175	4.80	7.50	10.70	4.20	-2.10	-1.10	3.20	-3.20
150	5.50	8.00	10.60	4.50	-1.90	-1.70	2.70	-4.20
125	5.80	8.70	11.10	5.10	-2.40	-2.20	2.70	-4.90
100	5.60	9.20	12.10	4.70	-2.00	-2.20	3.50	-6.20
70	7.10	12.00	15.50	6.90	-1.60	-1.40	5.80	-7.00
50	10.10	15.00	17.20	8.10	0.60	0.50	8.60	-6.80
40	11.50	16.00	17.90	8.30	0.60	1.90	11.90	-5.90
30	12.20	18.80	18.70	11.10	3.70	4.50	15.10	-5.20
20	15.00	23.40	21.00	14.50	4.70	9.50	23.80	-4.70
15	15.10	27.00	18.90	13.70	9.50	15.00	27.00	-1.50
10	29.50	33.10	22.20	19.80	21.40	26.60	46.80	10.00
5			48.00	47.20				47.60

付録 第3.5表 季節別の風向差

気圧面(hPa)	風向差(°)[00UTC]				風向差(°)[12UTC]			
	春	夏	秋	冬	春	夏	秋	冬
1000	0.30	4.50	-0.50	0.50	1.20	-3.00	2.80	1.20
925	-1.50	11.10	13.30	4.90	1.20	-11.30	1.20	0.20
900	0.10	7.70	-3.00	3.30	2.60	9.00	-6.00	-1.10
850	-11.40	6.00	0.20	1.40	-7.60	6.10	2.80	-0.50
800	2.80	-5.40	0.40	-1.60	-14.30	-4.20	2.80	-4.10
700	2.80	-0.60	-0.40	0.20	-0.50	1.90	0.40	-0.50
600	0.00	-2.30	0.60	-0.40	0.50	0.20	2.60	-0.80
500	0.50	-6.50	-0.50	0.40	0.30	-0.90	-1.40	-0.10
400	-1.20	-0.60	0.20	-0.10	0.60	0.70	-0.20	0.00
350	-2.30	-0.60	-0.30	0.10	0.60	0.10	0.20	-0.30
300	0.20	-0.10	-0.60	0.60	0.40	0.00	-1.00	0.20
250	1.90	0.20	1.20	-0.20	-0.20	0.20	-0.20	0.00
200	-0.20	0.50	1.20	0.10	-0.20	0.40	1.00	0.30
175	-0.10	0.70	-0.50	1.10	-0.20	0.50	-0.50	0.20
150	1.00	-0.40	3.50	0.30	1.00	0.90	0.20	0.30
125	1.50	1.60	1.80	-0.10	1.00	-0.70	3.20	-0.10
100	-0.70	-0.20	8.80	-0.50	5.00	-0.80	-2.20	2.10
70	1.60	14.80	-2.80	0.10	-11.00	0.40	5.80	-2.00
50	5.60	21.90	-30.00	12.10		-9.60	-10.80	-4.10
40	-2.00	-14.90	-2.00	-10.50		-0.90	-21.50	6.90
30	12.60	0.40	-3.20	-5.10	1.00	1.50	32.00	7.30
20	2.40	-5.10	16.00	-2.20	5.00	-2.50	-10.30	-7.40
15	6.80	-4.10	-8.20	-1.00	-14.70	2.30	1.50	-9.40
10	-1.80	-3.30	0.70	-1.90	22.20	2.30	19.00	-5.50
5								

付録 第3.6表 季節別の風速差

気圧面(hPa)	風速差 (m/s) [00UTC]				風速差 (m/s) [12UTC]			
	春	夏	秋	冬	春	夏	秋	冬
1000	0.50	0.00	0.30	0.90	0.60	0.60	0.40	1.20
925	0.50	-0.10	0.20	0.20	0.00	-0.40	-0.20	0.00
900	0.50	0.30	0.30	0.10	0.30	0.10	0.40	0.10
850	0.00	0.30	-0.30	0.30	-0.30	0.10	-0.20	0.00
800	0.80	-0.10	-0.20	-0.10	-0.20	0.20	0.20	-0.10
700	-0.20	-0.10	-0.40	0.20	0.10	-0.10	0.40	0.30
600	0.30	0.10	0.00	-0.20	0.20	0.00	-0.60	0.10
500	0.40	0.00	0.70	0.10	-0.10	-0.10	0.40	0.30
400	0.10	0.50	0.00	0.30	0.00	0.10	0.80	-0.10
350	-1.50	-0.30	0.50	0.40	0.80	0.50	-0.50	0.20
300	-0.80	0.80	0.60	0.10	0.50	0.00	1.00	0.60
250	-0.30	0.20	0.20	1.40	0.20	-0.40	-1.00	1.60
200	-0.30	0.60	1.00	1.10	0.70	0.80	0.50	0.90
175	1.40	0.10	0.80	0.40	-0.80	1.60	1.00	1.20
150	-0.10	1.20	-1.20	0.90	2.30	0.40	-0.50	2.10
125	0.70	0.30	-1.20	1.40	0.50	-0.50	-0.50	0.00
100	1.50	0.10	-0.20	0.50	3.00	-0.60	2.50	-1.10
70	-3.80	-0.90	-0.20	-1.90	1.00	0.30	2.00	1.30
50	2.20	1.40	2.00	1.50		2.30	2.80	-0.70
40	-0.60	0.00	3.00	0.50		0.70	1.20	2.90
30	0.60	1.20	0.80	-0.10	-3.00	1.50	0.80	0.50
20	-1.00	0.90	0.80	0.20	1.20	1.20	1.30	1.90
15	0.70	1.20	0.00	1.30	0.00	1.60	1.50	1.20
10	0.10	3.00	1.30	2.50	1.40	0.00	2.50	2.60
5								