

RS2-91 型レーウィンゾンデと RS92-SGP 型 GPS ゾンデの比較観測データを用いた雨天時における雲頂付近及び成層圏の気温観測値の特性調査

古林 絵里子*・吉井 博之*・阿部 豊雄*・金子 祐也*

Investigation of characteristic of temperature at cloud top and stratosphere in the rainy weather with comparison observation data of RS2-91 Rawinsonde and RS92-SGP GPSsonde

Eriko KOBAYASHI, Hiroyuki YOSHII, Toyoo ABE and Yuya KANEKO

要旨

2009年12月に、高層気象観測用ラジオゾンデがRS2-91型レーウィンゾンデからRS92-SGP型GPSゾンデへ変更された事に伴い行われた新旧ラジオゾンデの同時飛揚比較観測において、雨天時観測データの気温に特徴的な差が見られた。そこで、雨天時に集中的に両ゾンデの比較観測を実施し、その特性調査を行った。その結果、ラジオゾンデ飛揚時に厚い中・下層雲で覆われる条件の場合、RS2-91型レーウィンゾンデでは捉えられていない雲頂付近での沈降性逆転層がRS92-SGP型GPSゾンデでは観測されており、ほとんどの事例でRS2-91型レーウィンゾンデのセンサーに水滴又は着氷の影響が出ていた。また、このような天候での観測データには成層圏においても約2~3℃の気温差が見られ、これは赤外放射の影響を見積もった場合の気温誤差と同程度であった。さらに、過去のRS2-91型レーウィンゾンデの指定気圧面気温データを解析した結果、雨天時には成層圏の気温が低めに観測される傾向があった。

1. はじめに

高層気象台では、2009年12月より高層気象観測用のラジオゾンデを明星電気株式会社製RS2-91型レーウィンゾンデ(以下91M)からヴァイサラ株式会社製RS92-SGP型GPSゾンデ(以下92V)へ変更した。この変更に伴い、2009年12月~2010年10月にかけて両ラジオゾンデの同時飛揚による比較観測が実施された。その比較結果において、雨天時の観測の場合、気温のデータに特徴的な差が見られることがわかった(高層気象台:2011)。そこで、観測事例数を増やすため2011年は、雨天時に集中的に観測データを取得し、2009年~2010年の比較観測で得られたデータと合わせて解析を行い、主に気温を対象として雨天時における観測データの特性や観測値の差の要因などについて調査した。

2. 比較観測の実施と観測データ

比較観測の実施方法は、一つの気球に両方のラジオゾンデを取り付けて同時に飛揚する方法である。比較観測の実施期間は2009年12月~2011年11月であり、このう

ち解析には27個の観測データを使用した。解析に使用した観測の飛揚時の地上データは表1のとおりであり、ほとんどが飛揚時または飛揚1時間以内に降水現象があった事例である。

図1は得られた全観測データの気温差(92V-91M)である。ここで示した気温差は高層気象台(2011)と同じ方法で、各観測における両ラジオゾンデの観測値を同時刻で比較し、13層の気圧層毎(1000~700, 700~500, 500~300, 300~200, 200~150, 150~100, 100~70, 70~50, 50~30, 30~20, 20~15, 15~10, 10~5hPa)に気温差の平均値を求めた結果である。対流圏と成層圏の両方において、91Mが92Vに比べて大きく低温を示す事例があることがわかる。また、このような大きな気温差を示す事例は観測時刻に関わらず生じており、どの季節においても見られた。

3. 気温観測値における誤差の要因

ラジオゾンデの測定誤差の要因としては、器差、すなわち測定器自体が持つ固有の誤差と、外的条件の変化による誤差が挙げられる(気象庁:2004)。

器差については、ラジオゾンデの使用前に各センサー

*高層気象台 観測第二課

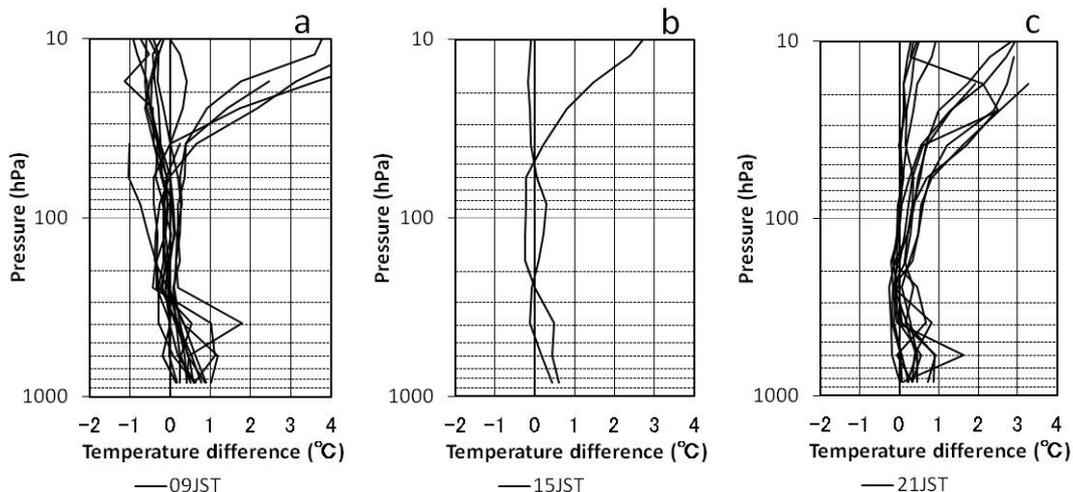


図1 観測時刻毎の気温差(92V-91M)

a : 9時観測, b : 15時観測, c : 21時観測.

表1 比較観測の飛揚時の地上データ

N : 全雲量(8分量), 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

日付	放球時刻	N	Nh	CL	h	CM	CH	ww	気圧(hPa)	気温(°C)	湿度(%)	風向(°)	風速(m/s)
2009/12/3	8:31	8	8	2	/	/	/	80	1012.7	8.0	96	310	0.6
2009/12/3	20:30	7	7	7	/	/	/	21	1002.1	10.1	96	70	1.0
2009/12/11	8:30	8	6	2	/	7	/	80	1021.5	7.4	92	340	2.0
2009/12/17	8:30	7	7	2	7	/	/	27	1010.2	3.9	62	40	2.4
2010/1/12	20:30	8	7	7	/	2	/	60	999.7	2.2	96	310	1.6
2010/3/1	8:38	8	8	7	/	/	/	21	1016.3	6.5	91	10	1.8
2010/3/4	20:30	8	8	7	/	/	/	61	1019.0	5.4	95	330	2.1
2010/5/24	8:30	8	7	7	/	2	/	61	1004.7	17.2	94	70	3.3
2010/5/24	20:30	8	8	7	/	/	/	60	995.6	22.4	92	200	5.1
2010/6/4	20:30	7	6	2	/	0	2	25	1011.6	17.9	63	90	6.0
2010/6/15	20:30	8	7	2	/	7	/	80	1004.9	24.0	84	170	2.9
2010/6/18	20:30	8	7	7	/	2	/	61	1003.2	18.6	94	330	1.1
2010/6/23	8:30	8	8	2	2	/	/	80	1002.5	23.4	92	180	2.3
2010/9/27	8:30	8	4	7	/	7	/	61	1020.3	15.7	96	60	2.6
2010/9/27	20:30	8	8	7	/	/	/	61	1016.8	15.5	99	310	1.6
2010/9/28	8:30	8	8	7	1	/	/	20	1008.2	20.9	98	150	1.5
2010/10/4	8:30	8	8	7	/	/	/	21	1007.0	18.7	94	30	1.3
2010/10/21	8:30	8	6	7	/	2	/	60	1013.1	16.8	96	320	1.0
2010/10/25	8:30	8	8	6	2	/	/	21	1002.8	15.5	96	290	1.7
2010/10/25	20:30	8	8	7	/	/	/	61	1000.9	17.5	98	340	1.2
2010/10/26	8:30	8	7	5	/	7	/	60	1003.7	16.5	92	60	2.0
2011/6/13	8:30	8	8	6	/	/	/	10	998.7	18.8	95	40	2.1
2011/6/17	8:30	8	8	5	/	/	/	61	1007.7	18.8	96	60	2.4
2011/10/5	20:30	8	7	7	/	2	/	63	1011.7	17.7	98	60	1.4
2011/11/11	14:30	8	7	7	/	2	/	61	1014.2	11.0	96	330	2.7
2011/11/11	20:30	8	8	7	/	/	/	61	1012.1	12.2	98	300	1.6
2011/11/18	14:30	8	8	5	/	/	/	02	1018.9	12.7	78	310	1.0

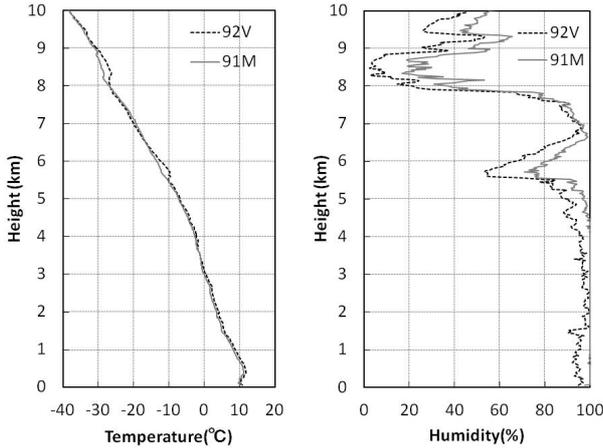


図2 2011/11/11 15時観測における気温(左図)と湿度(右図)の比較データ

について基準器との比較を行い、望ましい観測精度の範囲を超えるものは使用せず、誤差が小さいものについては補正を行う。

外的条件の変化による誤差すなわち観測環境の変化による誤差には、日射による気温センサーへの影響などが含まれる。気温センサーで測定される気温観測値 T と周囲の大気の実際の気温 T_a の差は次の式で表される(気象庁：2004)。

$$T - T_a = P_s/H + P_l/H + J/H + K/H - C/H \cdot dT/dt \quad (1)$$

(a) (b) (c) (d) (e)

- T : 気温センサーによる観測値
- T_a : 周囲の大気気温
- H : 対流によるセンサーと大気間の伝達熱量
- C : センサーの熱容量
- (a) P_s/H : 日射による誤差
- (b) P_l/H : 赤外放射による誤差で正または負
- (c) J/H : ジュール熱誤差
- (d) K/H : センサー取付具の熱伝導による誤差
- (e) C/H : 遅れ(時定数)

このうち、右辺第3項(c)のジュール熱誤差及び第4項(d)のセンサー取付具の熱伝導による誤差は、ゾンデの構造を工夫することでほとんど無視できる。また、日射による影響については 91M, 92V とともに観測値の補正を行っており、さらに 92V では赤外放射による影響の補正も行っている。91M と 92V の気温の日射補正量をそれぞれ図3(気象庁：2004)、表2(Vaisala：2005)に示す。どちらの気温センサーもアルミニウムのコーティングが施されており、日射及び赤外放射の両方に対して吸収率を小さくす

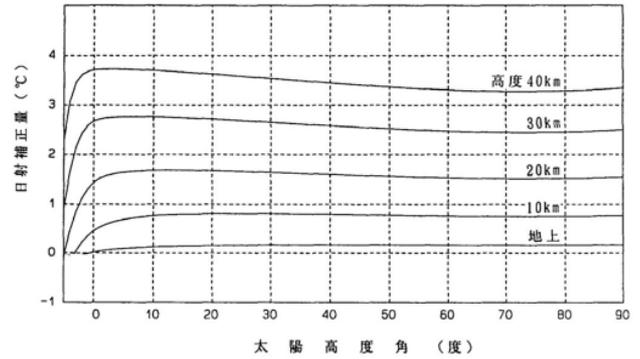


図3 91M の気温の日射補正量の例(気象庁(2004)より抜粋)

表2 92V の日射・長波放射補正量(Vaisala(2005)より抜粋)

Elevation angle [degrees]	Night	-5	-3	0	3	10	30	45	60	80
Sea Level	0°C	0°C	0°C	0°C	0.01°C	0.04°C	0.06°C	0.07°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	0.06°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

る工夫がなされている。このほか、気象状態によっては、センサーに付着した水滴が蒸発または凍結することにより、(1)式で表現されない誤差が生じることがある。

4. 対流圏における気温差

対流圏において大きな気温差が見られた事例について両ラジオゾンデの気温と湿度を比較したものが図2である。これは2011年11月11日15時の観測において得られたデータであり、放球時の現在天気(ww)は61で、弱い雨があった。この図において、高度8km付近に雲頂と思われる湿度の急減層があり、気温のグラフではその雲頂付近で両ラジオゾンデの気温差が大きい。91Mは湿度が急減し始めた高度8km付近から92Vに比べて気温が大きく低温を示していることがわかる。これは、ラジオゾンデが高湿度域(雲の層)を通過することによって気温センサーに水滴または氷が付着し、それらが蒸発または昇華することによってセンサーが冷やされるために起こる測定誤差と考えられ、この事例では91Mがより強く蒸発または昇華による潜熱の影響を受けていると思われる。このようなセンサーに付着した水滴または氷の影響は、起こりやすい測定誤差要因の一つである。Nash *et al.* (2011)では、2010年に中国で行われたラジオゾンデの国際比較において、ラジオゾンデが雲の層から出た時の気温観測値を比較し、蒸発または昇華による潜熱の影響によってセンサーが冷やされる影響を評価した結果、92Vは気温センサーに撥水加工が施されているため、他のラジオゾンデ

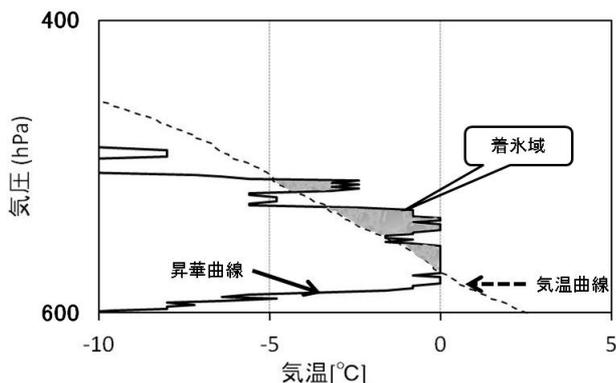


図4 気温曲線と昇華曲線(−8D 曲線)の模式図

に比べて潜熱の影響を受けにくく、センサーの回復が早いという結果を報告している。

5. 気温センサーへの着氷の影響

気温観測値の誤差要因となる水滴・氷の影響について、雨天時に取得した比較観測データを用いて、センサーへ着氷する可能性がどの程度あるかを調査した。着氷とは、一般的には、過冷却水滴または水蒸気が物体表面に付着し凍結する現象であり、0℃以下の雲の中に多く存在する過冷却水滴が主な要因となる。着氷の発生を予測するには気温と湿度は重要な要素であり、過冷却水滴が豊富にある場所ほど起きやすくなる(工藤：2006)。着氷の判定基準には森(1956)や菊池(2004)で示されている−8D法を使用した。

5.1 −8D法

湿潤空気の氷面に対する飽和の限界を示す昇華曲線は次式で表される(森：1956)。

$$-\left(8.494 \frac{T_0}{T} - 1\right) D \geq t \quad (2)$$

ここで

t : 気温(℃)

T₀ : 273(K)

T : 絶対温度で表した気温(K)

D(=t−t_d) : 気温と露点温度の差(℃)

である。(2)式の括弧内の値を8と簡略化し、この条件を満たす観測点で着氷の可能性があるとされる。これを−8D法と呼び、航空機を安全に運航するための着氷域予測にも用いられている。本稿では、菊池(2004)と同様に−8D法を用いて着氷域を推定することとした。図4で示したように、P-T線図に(2)式の左辺で示される昇華曲線(以下、

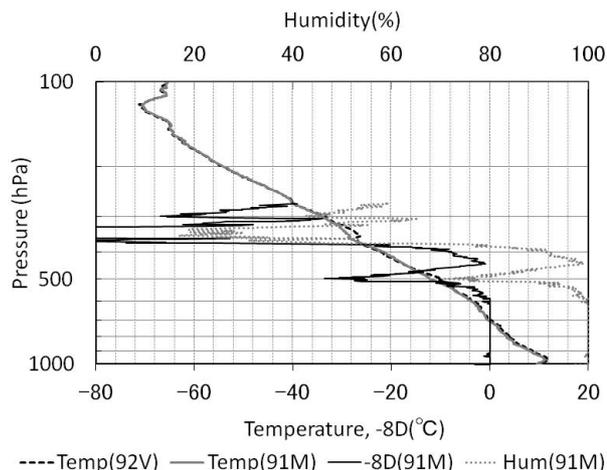


図5 2011/11/11 15時観測におけるP-T線図と−8D曲線
Temp(92V)とTemp(91M)はそれぞれ92Vと91Mの気温のグラフ、
−8D(91M)とHum(91M)はそれぞれ91Mの観測データから得られた−8D曲線と湿度のグラフ。

−8D曲線)を書き入れると、気温曲線と昇華曲線で囲まれた図4の陰影範囲の観測点が着氷域にあったと判断できる。

5.2 着氷の判定

2011年11月11日15時の比較観測データについて、−8D法により着氷の可能性の有無を判定したP-T線図の例が図5である。−8D曲線は91Mの観測値から算出した結果である。図の気温曲線と−8D曲線に注目すると、700hPa～500hPa(3000m～5500m)と450hPa～400hPa(6500m～7400m)付近において着氷域が見られ、この高度では気温センサーに着氷の可能性があったことがわかる。また、このときの91Mと92Vの気温を比較すると、雲域を抜けて低湿層に入った領域では92Vは沈降性の逆転層と見られる気温変化が生じているのに対し、91Mは気温が低下しており、着氷による昇華の影響を受けていると考えられる。

本稿で解析対象とした比較観測データすべてにおいて、着氷の影響の有無を判定し、まとめたものが表3である。表中の気温差は92Vと91Mを比較した結果(92V−91M)である。91M、92Vの両方の観測データを比較し、91Mに着氷域が存在したかどうかを(2)式とP-T線図により判断した。そのうち着氷域が見られる高度付近で大きな気温差(差が0.5℃以上)が生じている事例を、表3の中では「着氷により気温差大」として「*」で示している。また、表3におけるσは高層気象台(2011)で示されている91Mと92Vの比較観測解析結果より求められた両ラジオゾンデの、系

表 3 着氷判定結果と対流圏・成層圏の最大気温差

「着氷により気温差大」：*の事例は着氷域付近で大きな気温差(差が 0.5°C 以上)が生じた事例, 「着氷域の面積」：P-T 線図上での着氷域の面積, σ : 91M と 92V の比較観測解析結果(高層気象台: 2011)より求められた両ラジオゾンデの系統的な季節別気温差の標準偏差, 3 列目の「-」: -8D 法で着氷域が見られなかった事例, 8~10 例目の「-」: 成層圏において気温差が 2σ より小さい事例, 対流圏: 1000~200hPa, 成層圏: 70hPa より上空.

日付	放球時刻	着氷域の 高度範囲 (hPa)	着氷域の 面積 ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{hPa}$)	着氷により 気温差大 *	対流圏での 最大気温差 ($^{\circ}\text{C}$)	対流圏で 気温差 $>2\sigma$ となる層厚 (km)	成層圏での 最大気温差 ($^{\circ}\text{C}$)	成層圏 最大気温差 の出現気圧 (hPa)	成層圏で 気温差 $>2\sigma$ となる 最低高度 (hPa)
2009/12/3	8:31	729.4~305.0	1.78		1.3	3.5	7.6	10.1	61.2
2009/12/3	20:31	676.6~451.5	0.98	*	1.5	5.2	3.6	10.2	69.6
2009/12/11	8:30	834.7~332.3	1.43	*	0.6	1.3	3.0	16.1	69.8
2009/12/17	8:30	830.5~805.5	0.22	*	0.9	0.1	0.7	63.2	68.9
2010/1/12	20:30	780.9~344.9	0.52	*	0.9	0.5	1.0	28.0	69.4
2010/3/1	8:38	417.4~319.9	2.28		3.6	0.5	2.6	60.7	61.0
2010/3/4	20:30	796.4~303.0	6.34		0.5	0.2	3.8	18.9	70.0
2010/5/24	8:30	317.8~247.4	0.17		1.0	0.0	1.0	36.6	70.0
2010/5/24	20:30	464.8~248.1	5.11		2.5	2.5	3.1	17.4	69.7
2010/6/4	20:30	649.4~390.4	1.21	*	1.7	1.0	-	-	-
2010/6/15	20:30	567.7~252.5	3.23	*	1.5	0.2	3.3	16.1	69.9
2010/6/18	20:30	354.7~242.5	4.04		2.1	5.4	0.8	12.4	69.8
2010/6/23	8:30	437.9~399.1	0.11	*	1.6	4.2	6.0	10.1	61.6
2010/9/27	8:30	-	0.00		3.3	5.4	5.3	11.1	67.2
2010/9/27	20:30	607.8~265.9	3.51	*	5.6	1.7	3.1	10.1	69.2
2010/9/28	8:30	548.3~259.1	0.51	*	1.8	2.3	-	-	-
2010/10/4	8:30	-	0.00		2.4	1.4	0.9	61.3	61.5
2010/10/21	8:30	533.3~257.2	1.19		1.3	2.5	0.8	70.0	70.0
2010/10/25	8:30	-	0.00		1.4	0.5	-	-	-
2010/10/25	20:30	577.9~314.6	1.90	*	1.0	1.2	2.4	16.5	70.0
2010/10/26	8:30	607.1~336.9	1.25	*	1.1	1.0	-	-	-
2011/6/13	8:30	307.2~296.8	0.05		4.0	3.3	0.5	58.3	58.3
2011/6/17	8:30	-	0.00		3.6	5.5	-	-	-
2011/10/5	20:30	626.2~268.8	4.96		0.0	0.0	3.3	24.9	69.7
2011/11/11	14:30	558.1~384.6	1.79	*	2.4	0.7	3.8	10.3	39.2
2011/11/11	20:30	-	0.00	*	1.6	2.7	1.9	10.1	59.7
2011/11/18	14:30	632.1~614.1	0.12		4.6	0.1	0.8	53.4	53.8

統的な季節別気温差の標準偏差である。

この結果より, 全27事例のうち着氷域が見られた観測は8割程度であり, さらに図5で見られたような, 着氷による昇華・蒸発の影響により91Mの気温が低下していると判断した事例(表3の*)は5割程度(13観測)であった。これらの事例では対流圏(1000~200hPa)における最大気温差は, 昇華や蒸発の影響を受けやすい雲頂付近に現れることが多く, その最大気温差の平均は約 1.7°C であった。表3の*以外の観測のうち, 対流圏で $3\sim 5^{\circ}\text{C}$ 程度の大きな気温差が生じている事例については, 水滴の付着による影響を受けている可能性がある。91Mと92Vの系統的な気温

差は高層気象台(2011)によると 0.5°C 以下であると示されている。このことから, 雨天時の観測では気温センサーへの水滴・氷の付着による影響が小さくないことがわかる。

さらに, 表3では氷や水滴の付着による気温観測値への影響の大きさを見るため, ほぼ連続して気温差が 2σ より大きい値を示した高度の層厚「対流圏で気温差 $>2\sigma$ となる層厚」を示す。この層厚は, 表3の*で示された事例では平均で約 1.7km であった。したがって, センサーへの着氷によって, 厚さが最大 5.2km , 最小 0.1km , 平均 1.7km に渡って気温観測値に影響を及ぼしていることがわかる。

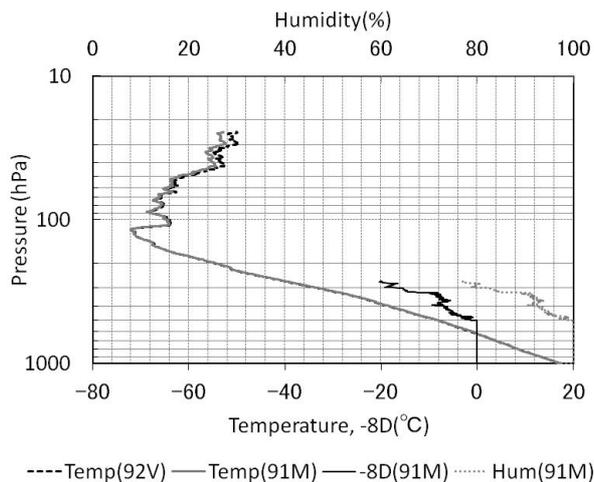
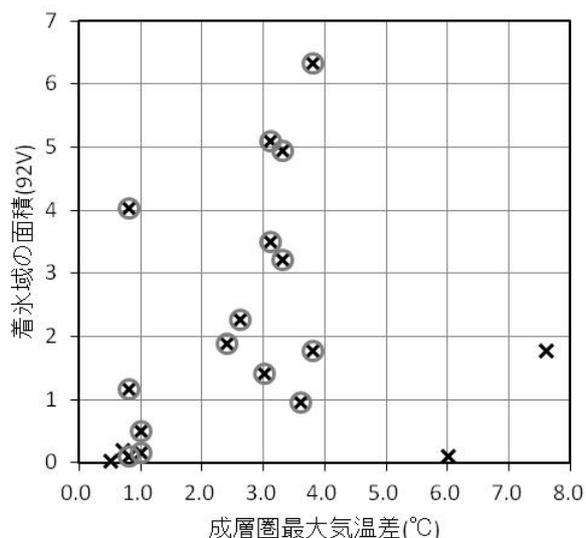


図6 2011/10/5 21時観測におけるP-T線図と-8D曲線
Temp(92V)とTemp(91M)はそれぞれ92Vと91Mの気温のグラフ、
-8D(91M)とHum(91M)はそれぞれ91Mの観測データから得ら
れた-8D曲線と湿度のグラフ。



×表2において着氷域の面積が0より大きい事例
○平均値+σ≧成層圏最大気温差≧平均値-σ

図7 成層圏の最大気温差と着氷面積の関係
着氷面積は92Vの観測データによるP-T線図から算出した。ま
た、「平均値」と「標準偏差」はそれぞれ×で示された成層圏
最大気温差の平均値と標準偏差を示す。

6. 成層圏における気温差

成層圏において両ラジオゾンデに大きな気温差が見ら
れた事例が図6である。これは2011年10月5日21時の観測デ
ータであり、30hPa付近で約2°Cの気温差が見られた。また、
-8D曲線と気温グラフより、対流圏では着氷の可能

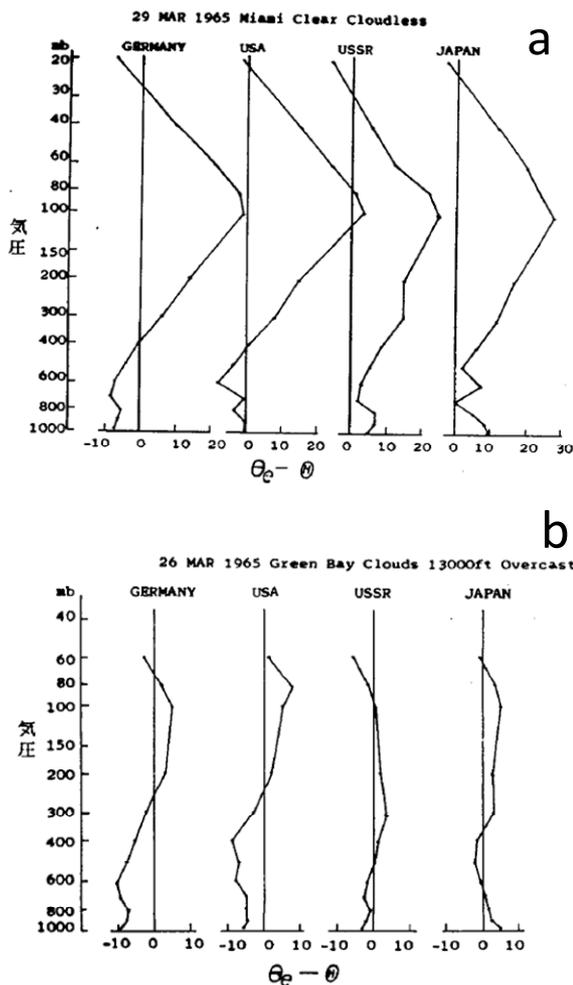


図8 輻射ゾンデ比較観測による放射の有効温度(θ_e)と
外気の温度(θ)の差の実測例
観測部高層課(1974)より抜粋, (a)快晴時, (b)曇天時での観測
結果。

性があったこともわかる。

成層圏において見られる91Mと92Vの気温差について
は、図1や高層気象台(2011)の解析結果より、雨天時または
厚い下層雲が広がる条件において発生していることが
わかり、これについても91Mは着氷により何らかの影響を
を受けていると考えられる。また、表3で示すように、その
気温差は70hPaより上空で大きくなることが多い。

成層圏における着氷の影響を見るために、成層圏の最
大気温差と対流圏における着氷域の面積の関連を示した
ものが図7である。着氷域の面積は図4で示されたP-T線図
における、気温曲線と昇華曲線で囲まれた陰影部分の大
きさであり、この面積が大きいほど気温センサーは過飽
和の状態による影響を大きく受けていると考えられ、面

積が大きいほどセンサーへの着氷量が増え、気温の測定誤差が大きくなることが予想される。図7において×のデータは、表3の着氷域の面積が $0(\text{C} \cdot \text{hPa})$ より大きい事例である。また、×のうち成層圏の最大気温差がそれらの平均値±標準偏差に含まれるものを○で示した。図7の結果から、成層圏の最大気温差と着氷域の面積との関係ははっきりせず、特に気温差が約 $2\sim 4\text{C}$ の事例は、着氷域の面積の大小に関わらず出現している。したがって、長時間着氷域を通過することが必ずしも成層圏の気温誤差の増大につながるわけではないと思われ、定量的に評価するための指標を今後も検討する必要がある。

次に、成層圏の気温差の原因について考察を行った。WMOで示されているWMO Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation Seventh edition (WMO: 2008)によると、「飛揚中に気温センサーに氷が付着した場合、その赤外線吸収率は通常とは異なるものとなる。そのため気温観測値には、赤外放射による熱交換に伴う誤差が生じる。また夜間の観測では、アルミニウム処理を施したセンサーに氷が付着している場合、そのセンサーは赤外放射に対して黒色のセンサーのように振る舞うため、低温の誤差の原因となる」とある。そこで、(1)式において、91Mの赤外放射による誤差のみを考えてみる。中村ほか(1983)によると、センサーを構成するサーミスタとリード線が吸収する正味の赤外放射エネルギー(P_{It} , P_{II})は、上側と下側に2分してそれぞれ放射伝達の式を適用することにより次のように表すことができる。

$$P_{It} = S_t \varepsilon_{It} \left\{ \frac{1}{2} (\sigma \theta_{e1}^4 + \sigma \theta_{e2}^4) - \sigma \theta_{It}^4 \right\} \quad (3)$$

$$P_{II} = S_I \varepsilon_{II} \left\{ \frac{1}{2} (\sigma \theta_{e1}^4 + \sigma \theta_{e2}^4) - \sigma \theta_{IK}^4 \right\} \quad (4)$$

S_t : サーミスタの表面積, S_I : リード線の表面積

ε_{It} : サーミスタの平均長波放射吸収率

ε_{II} : リード線の平均長波放射吸収率

θ_{e1} : 大気の下向き長波放射の有効温度

θ_{e2} : 大気の上向き長波放射の有効温度

θ_{It} : サーミスタの温度, θ_{IK} : リード線の温度

σ : ステファン・ボルツマン定数

さらに、中村ほか(1983)によると、長波放射による誤差に対する補正值 $\Delta\theta$ は次のように表される。

$$\Delta\theta = -[P_{It} + 2P_{II} \{ \coth(L\delta) - \operatorname{cosech}(L\delta) \} / (L\delta)] / Q \quad (5)$$

$$Q = h_t S_t + 2kA_I \delta \coth(L\delta) \quad (6)$$

$$\delta = \left(\frac{h_t S_t}{kA_I L} \right)^{1/2} \quad (7)$$

h_t : 空気とサーミスタとの熱伝達率

h_I : 空気とリード線との熱伝達率

k : リード線の熱伝導率

A_I : リード線の軸直角断面積

L : リード線(1本あたり)の長さ

ここで、簡単のために長波放射の有効温度について次のように変形する。

$$\theta_e = \left(\frac{\theta_{e1}^4 + \theta_{e2}^4}{2} \right)^{1/4} \quad (8)$$

(3)~(8)式を用いて、サーミスタの長波放射吸収率が変化した場合にどの程度気温誤差が変化するかを見積もってみる。

気温誤差を見積もるためにいくつかの仮定を用いた。まず、(8)式で表される長波放射の有効温度については、図8のように観測部高層課(1974)で実測による例が示されており、図8(b)のように曇天時の場合、放射の有効温度と外気の温度(Θ)は $-10\sim 10\text{K}$ の差が見られる。本稿でも中・下層雲が厚く広がる条件での観測を対象としているため、 $30\sim 10\text{hPa}$ の高度では $\theta_e - \Theta = -10(\text{K})$ または $-5(\text{K})$ と仮定し、 $\theta_{It} = \theta_{IK} = \Theta$ とした。また、長波放射に対する気温センサーの特性の変化を見るため、2種類のセンサーを仮定する。一つは通常のアルミ蒸着のセンサーであり、もう一つはアルミ蒸着よりも長波放射吸収率が高くなる黒色センサーを仮定する。(3), (4)式の長波放射吸収率については $\varepsilon_{It} = \varepsilon_{II}$ とし、アルミ蒸着の場合は観測部高層課(1974)で示されている値から $\varepsilon_{It} = \varepsilon_{II} = 0.02$ 、黒色センサーの場合はSchmidlin *et al.*(1986)に示されている値から $\varepsilon_{It} = \varepsilon_{II} = 0.86$ と仮定した。

以上の条件の基で2011年10月5日21時と2011年11月11日15時の92Vの気温観測値を Θ と仮定して算出した長波放射による誤差の補正值と観測で得られた両ラジオゾンデの気温差はそれぞれ表4, 表5ようになる。この結果から、どちらの事例においても、 $\varepsilon_{It} = 0.02$ の場合に必要な補正值は 0.05C 以下である。しかし、 $\varepsilon_{It} = 0.86$ の場合、10月5日の観測では、両ラジオゾンデの気温差は91Mが $2.5\sim 2.7\text{C}$ 低い値を示したのに対し必要な補正值は約 $1.0\sim 1.9\text{C}$ 、11月11日の観測では91Mが $0.4\sim 3.4\text{C}$ 低い値を示したのに対し必要な補正值は約 $0.8\sim 2.3\text{C}$ である。このことから、91Mの気温センサー等に着氷することによってその長波放射の吸収率が大きくなった場合、比較観測で得られた気温差と同程度の気温補正が必要であることがわか

表4 2011年10月5日21時の比較観測結果から見積もった長波放射による誤差の補正值と両ラジオゾンデの気温差

$\theta_e - \theta$	気圧 (hPa)	$\Delta \theta$ $\epsilon_{lt}=0.02$	$\Delta \theta$ $\epsilon_{lt}=0.86$	気温差(°C) 91M-92V
-5	25.5	0.02	0.97	-2.7
	30	0.02	0.98	-2.5
-10	25.5	0.04	1.87	-2.7
	30	0.04	1.90	-2.5

表5 2011年11月11日15時の比較観測結果から見積もった長波放射による誤差の補正值と両ラジオゾンデの気温差

$\theta_e - \theta$	気圧 (hPa)	$\Delta \theta$ $\epsilon_{lt}=0.02$	$\Delta \theta$ $\epsilon_{lt}=0.86$	気温差 (°C) 91M-92V
-5	10	0.03	1.18	-3.4
	20	0.02	0.83	-0.7
	30	0.02	0.79	-0.4
-10	10	0.05	2.29	-3.4
	20	0.04	1.60	-0.7
	30	0.04	1.52	-0.4

った。

したがって、成層圏で観測された気温差の誤差要因の一つとして、着氷によって気温センサーの長波放射に対する特性が変わったことによる影響が考えられる。この他、対流圏と同様に着氷した氷が昇華することによる影響も含まれると思われる。

7. 過去の雨天時における気温観測値の特徴について

6. で示した解析結果から、雨天時における観測の場合、着氷等の影響を受けることにより、降水がない場合の観測に比べて成層圏で低い観測値を示す可能性があることがわかった。そこで、過去の91Mの観測による成層圏の気温データについて、放球時の現在天気をもとに、雨天時の観測では低温バイアスの傾向が見られるかを調べた。調査には、高層気象台における1992年10月～2009年11月の91Mによる09時、21時の観測の指定気圧面データを利用し、現在天気の降水の有無による特徴を見た。

図9は70, 50, 30, 15hPaの各指定気圧面において1992年10月～2009年11月の月毎の気温平均値を求め、その平均値からの偏差について、「降水あり($ww \geq 50$)」と「降水なし($ww < 50$)」に分けて月毎の偏差の階級度数分布を示したものである。図中の割合は、「降水あり」と「降水なし」それぞれに含まれる合計データ数に対する割合を示す。「降水なし」の場合は中心がやや正の側に偏り、左右でほぼ対称的な分布を示しているのに対し、「降水あり」では正偏差に比べて負偏差の方で分布が膨らむ傾向がある

表6 各指定気圧面の気温偏差について、降水の有無での階級分布の差を検定した結果(有意水準5%)

指定気圧面	70hPa	50hPa	30hPa	15hPa
分布に 有意差が みられる月	1月			4月
	5月	5月		5月
	6月	6月	6月	6月
	11月	7月	9月	7月
			11月	8月
			9月	

ことがわかる。そこで、「降水なし」と「降水あり」の分布の比率に差があるか、有意水準5%で月毎に検定を行った。その結果、表6で示された月で降水の有無により気温偏差の階級分布に有意差が見られた。特に6月はどの指定気圧面においても有意差が見られた。

有意差が見られた月の中で、15hPaにおける6月の気温偏差の階級度数分布を図10に、各年の気温偏差を降水の有無で分けた平均値を図11に示す。図10より「降水あり」の方が-4°C以下の階級の割合が大きいがわかる。また図11より、半数以上の年で「降水あり」の方が低温側に偏り、特定の年だけが低温を示しているわけではない。図11において、年毎の全体数に対する「降水あり」の割合を求めると、平均で約12%であるが、大きい正偏差を示す1995年と2005年はそれぞれ19%と16%、大きい負偏差を示す1997年と2007年はそれぞれ6%と8%である。したがって、必ずしも「降水あり」の事例が多い年に大きな負偏差を示すわけではなく、大きい負偏差を示す年は極端に低温を示す事例の影響であることがわかる。15hPaにおける6月の気温偏差の標準偏差(σ)は1.6°Cであり、「降水あり」の事例のうち気温偏差が -2σ より低い事例は、全データ数の1.5%であり、それはすべての「降水あり」の事例の12%を占めている。

15hPaにおける6月の気温偏差について、Smirnov-Grubbsの棄却検定法(Grubbs: 1950, 石川: 1955)により低温側に大きく外れている観測データについて有意水準5%で外れ値の検定をおこなったところ、2事例が外れ値として検出された。それらの観測はどちらも全雲量(N)が8、現在天気(ww)が80と21で、本稿で解析対象とした高湿度環境での観測事例であった。したがって、雨天時の観測では着氷等の影響を受けることにより、極端な低温バイアスを持つ可能性があることがわかる。

8. まとめ

高層気象台では、2009年12月に高層気象観測に使用するラジオゾンデを、明星電気株式会社製の91Mからヴァイサラ株式会社製の92Vへ変更した。この変更に伴い、2009

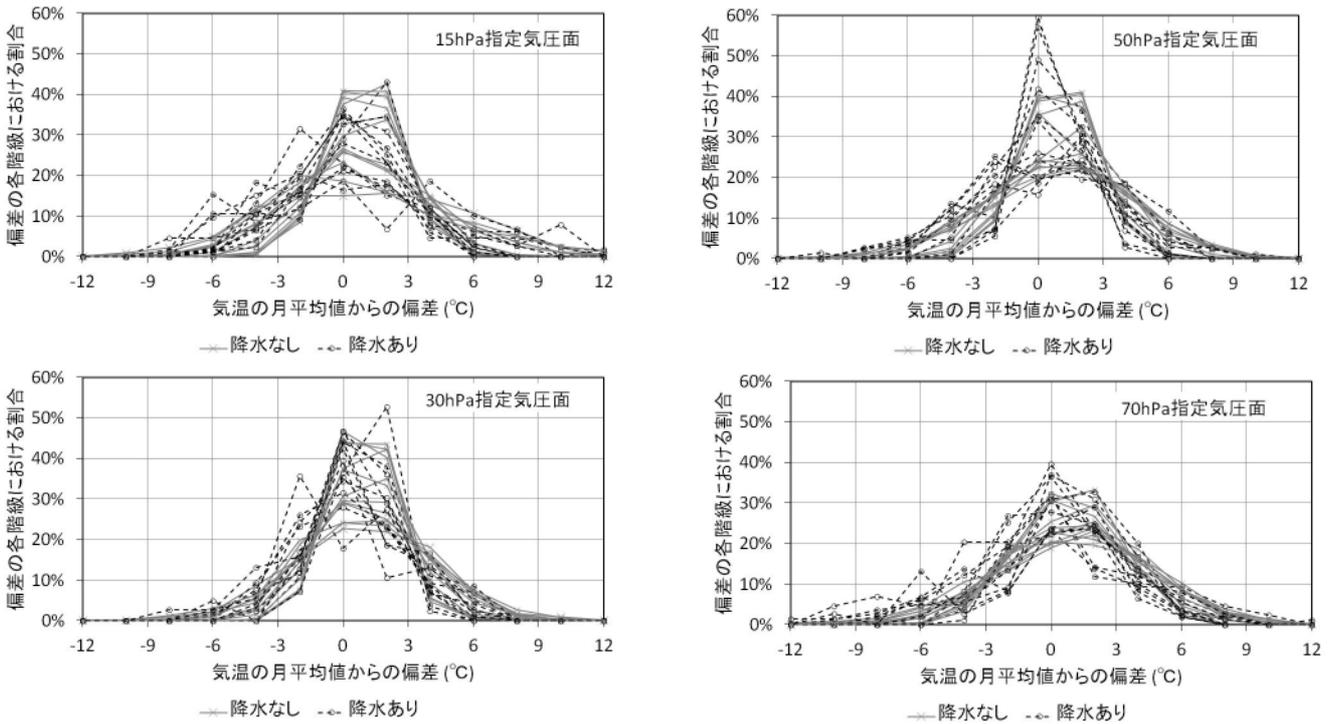


図9 1992年10月～2009年11月(09時, 21時)の各指定気圧面における気温の月別平均値からの偏差の階級度数分布
月毎に降水なし($ww < 50$)と降水あり($ww \geq 50$)で区分して統計をとり、降水のあり・なしに含まれるそれぞれの全体における割合を示している。

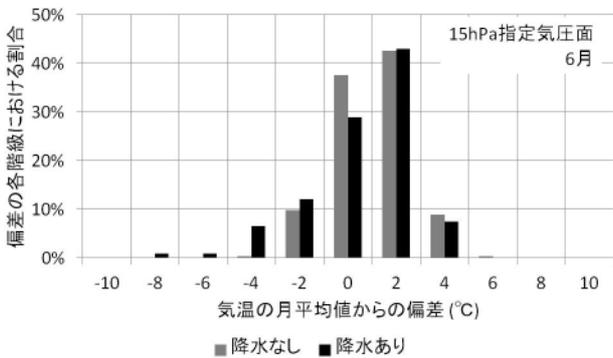


図10 図9に同じ。ただし、6月の15hPa指定気圧面における気温の月別平均値からの偏差の階級度数分布

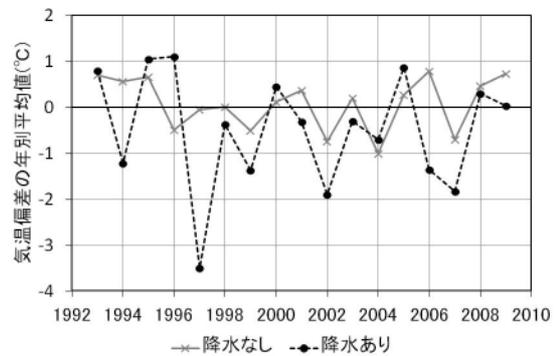


図11 6月の15hPa指定気圧面における気温の平均値からの偏差の年別平均値

平均値は図9に同じ。降水なしは $ww < 50$ 、降水ありは $ww \geq 50$ を示し、それぞれの場合で平均値を求めたもの。

年12月～2010年10月にかけて両ラジオゾンデの同時飛揚による比較観測が実施された。その比較観測データ及び、2011年に実施された比較観測データを利用して、雨天時における気温観測データの特性について調査をおこなった。対流圏において見られた91Mと92Vの気温差の原因については、ラジオゾンデが雲を通過することで気温センサーに付着した水滴または氷の影響が考えられた。そこで着氷の影響について調査した結果、放球時に降水現象がある場合は気温観測値が着氷の影響を受ける可能性が高

いことがわかり、その影響の大きさを91Mと92Vの気温観測値の差で見積もると、対流圏で1～5°C程度であった。

また、気温センサーへの水滴または氷の付着の影響は成層圏でも認められ、着氷による気温センサーの長波放射に対する特性の変化が原因と仮定した場合、その影響は30hPa付近で2°C程度であり、観測データに見られた両ラジオゾンデの気温差と同程度であった。

さらに過去の91Mの観測データを統計的に解析した結果、放球時に降水現象を伴う観測では成層圏の気温観測値が極端な低温を示す可能性があることがわかった。

このようなラジオゾンデの比較観測データの解析により個々のラジオゾンデの特性をとらえることが出来たことから、気候変動等の調査解析における高層気象観測資料の利用にあたっては、データの均質性を確保するために、ラジオゾンデの違いによる観測値の特性のみでなく、測定値が着氷等による影響をどの程度受けているかについても考慮する必要がある。今後も、ラジオゾンデが更新された場合は比較観測を実施し、そのときの気象条件も考慮した観測データの特性を把握し、その情報についてユーザーに提供することが重要である。

謝 辞

本調査では、観測第二課の皆様には、観測データの取得、解析方法など数々のご協力、ご助言を賜った。厚くお礼申し上げます。

引用文献

- Grubbs, F. E. (1950) : Sample criteria for testing outlying observations. *Annals of Math. Statistics*, **Vol.21**, 27 - 58.
- 石川栄助(1955) : 棄却検定の比較表. 岩手大学学芸学部研究年報, **9**, 第2部, 1 - 15.
- 観測部高層課(1974) : 高層気象観測の近代化計画について. 測候時報, **41.2,3**, 39 - 88.
- 菊池康友(2004) : 着氷が原因のレーウィンゾンデ強制降下事例. 高層気象台彙報, **64**, 1 - 12.
- 気象庁(2004) : 高層気象観測指針.
- 高層気象台(2011) : 明星電気 RS2-91 型レーウィンゾンデとヴァイサラ RS92-SGP 型 GPS ゾンデの相互比較試験観測と検証結果. 測候時報, **78.6**, 221 - 257.

- 工藤淳(2006) : 着氷について. 航空気象ノート, **65**, 17 - 22.
- 森俊八(1956) : 着氷の予報. 気象庁研究時報, **8**, 443 - 449.
- 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誤差の見積もりについて. 測候時報, **50.2**, 117 - 138.

- Nash, J., T. Oakley, H. Vomel 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 online at

http://www.wmo.int/pages/prog/www/IMOP/publications/IM-107_Yangjiang.pdf]

- Schmidlin, F. J., J. K. Luers and P. D. Huffman (1986) : Preliminary estimates of radiosonde thermistor errors. *NASA Technical Paper*, **No.2637**, NASA, 15pp.

- 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>, accessed June 22, 2012]

- WMO (2008) : WMO Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation. WMO-No.8 (Seventh edition), World Meteorological Organization, Geneva. [Available online at http://www.wmo.int/pages/prog/www/IMOP/publications/CIMO-Guide/CIMO_Guide-7th_Edition-2008.html]