

ラジオゾンデの歴史的変遷を考慮した気温トレンド(第2報)

古林 絵里子*

Temperature Trend Considering Historical Changes of Radiosonde (Part 2)

Eriko KOBAYASHI

要旨

ラジオゾンデによる高層気象観測データを気候変動監視目的として長期的に利用する場合、ラジオゾンデの変更に伴い観測データに「段差」が生じる可能性があり、均質なデータとして取り扱うためにはその「段差」を補正する必要がある。高層気象台ではこれまで、観測に使用されるラジオゾンデが変更されるたびに新旧ラジオゾンデの同時飛揚による比較観測を実施してきており、その比較観測結果から気温データにおける「段差」の補正を試みている(上里ほか：2008)。本報告では、上里ほか(2008)と同じ手法を用いて最新のRS-11G型GPSゾンデによる比較観測結果を含めた補正值を作成し、これをもとに高層の気温トレンド解析を行った。補正を行うことにより、成層圏での低温化傾向、対流圏での高温化傾向が顕著となり、補正前と比べて30hPaでは約 $-0.15^{\circ}\text{C}/10$ 年、850hPaでは約 $+0.1^{\circ}\text{C}/10$ 年変化率が大きくなった。また、作成した気温データセットの検証のため、気象庁の長期再解析データと比較した結果、成層圏の気温変化率はおおよそ一致していたが、対流圏の気温変化率は本報告で作成した気温データセットの方が大きい値を示した。

1. はじめに

ラジオゾンデ(レーウィンゾンデ、GPSゾンデを含む、以下特に区別しない限りゾンデという)による高層気象観測データは、数少ない高層大気の直接観測データとして、近年、長期的な気候監視において重要視されている。しかし、長い期間では観測に使用されるゾンデが変更されることがあり、それに伴って温度計が変更になると、観測データにこの変更に伴う「段差」が生じている可能性がある。気候変動に伴う気温変化は、この「段差」と同程度か小さいため、長期間の観測データを均質なデータセットとして取り扱うためには、「段差」を補正する必要がある。このような問題に対応するため、2006年から、気候監視のための基準高層気象観測網、GCOS Reference Upper Air Network (GRUAN, GCOS: 2013, 藤原: 2011)を運用するための活動が開始され、高層気象台(以下、館野という)は2009年より基準観測サイトとしてその活動に参加している。館野ではこれまで、国内の高層気象観測の拠点としてゾンデの測器変更時には、新旧ゾンデのデータ特性の違いを把握するための比較観測を実施してきており(気象庁観測部高層課: 1983, 迫田ほか: 1999, 高層気象台: 2011,

古林: 2015), 上里ほか(2008)では、RS2-91型ゾンデ(以下、91型という)までの比較観測結果を利用して「段差」の補正を試みている。本報告では上里ほか(2008)の手法を用いて、最新のRS92-SGPJ型ゾンデ(以下、92型という)とRS-11G型ゾンデ(以下、11G型という)の比較観測結果までを利用して気温データの補正值を作成し、補正した気温データセットから高層大気の長期気温トレンド解析を行った。なお、本報告では「トレンド」は全解析期間にわたる気温の長期変動の意味で用い、「気温変化率」はある一

表1 館野におけるゾンデの変遷

変更年月	型名	気温センサ
1951.1	S50型	バイメタル温度計
1952.6	S52型	
1952.7	RS52型	
1954.4	RS53型	
1956.7	RS56型	
1957.2	RSII-56型	
1981.3	RS2-80型	サーミスタ温度計
1992.10	RS2-91型	サーミスタ温度計
2009.12	RS92-SGPJ型	静電容量式ワイヤ温度計
2013.7	RS-11G型	サーミスタ温度計

*高層気象台 観測第二課

定期間の気温変化の割合の意味で用いることとする。

2. ゾンデの変遷と比較観測

館野において定常観測に使用されたゾンデの変遷を表1に示す(気象庁観測部高層課：1995, 阿部：2015)。2009年まで使用された91型まではレーウィンゾンデが使用され、92型からはGPSゾンデに変更された。また、RSII-56型ゾンデ(以下、56型という)からRS2-80型ゾンデ(以下、80型という)へ変更された際は、気温センサがバイメタル温度計からサーミスタ温度計へ変更された。このようなゾンデの変更が行われることにより、得られる観測データには、測器変更時期を境にゾンデの性能や観測データ処理方法の違いに起因する差が生じることになる。

表2は、館野においてゾンデ変更時に実施された新旧ゾンデの同時飛揚による比較観測の概要である(気象庁観測

部高層課：1983, 迫田ほか：1999, 高層気象台：2011, 古林：2015)。56型から11G型まで4回の比較観測が実施されている。比較観測では09時(日中)と21時(夜間)の両方の観測データが取得されているが、本報告では日射の影響を受けない夜間の観測データを使用する。比較観測によって図1に示すように新旧ゾンデの相対的な観測値の差が得られる。この相対的な観測値の差は、測器変更時に見られる観測データの「段差」の大きさと考えられ、観測値の補正に利用することができる。ここで、56型と80型、80型と91型の気温差については上里ほか(2008)で報告されている値を使用し、91型と92型の気温差は高層気象台(2011)、92型と11G型の気温差は古林(2015)で報告されている値を使用している。

3. 補正值の算出

補正值の算出には、比較観測結果で求められた各指定気圧面における気温差のうち、21時観測の全季節で平均し

表2 ゾンデ変更に伴い実施された比較観測

実施期間	旧ゾンデ 新ゾンデ	実施回数
1981年	RSII-56型 RS2-80型	四季, 09時と21時に各5回の計40回.
1993年~ 1994年	RS2-80型 RS2-91型	四季, 11回又は12回の合計59回. 内21時観測は37回.
2009年~ 2010年	RS2-91型 RS92-SGPJ型	四季, 09時と21時に各15回の計120回.
2013年~ 2014年	RS92-SGPJ型 RS-11G型	四季, 09時と21時に各10回の計80回.

表3 各指定気圧面における気温補正值(21時)

指定気圧面 (hPa)	56型 (°C)	80型 (°C)	91型 (°C)	92型 (°C)
1000	-0.2	0.0	0.2	0.0
925	-0.3	-0.1	0.2	0.0
900	-0.3	-0.1	0.2	0.0
850	-0.3	-0.1	0.2	0.0
800	-0.3	-0.1	0.2	0.0
700	-0.3	-0.1	0.1	-0.1
600	-0.3	-0.1	0.0	-0.1
500	-0.3	0.0	0.1	0.1
400	-0.1	0.2	0.1	0.2
350	-0.1	0.2	0.1	0.3
300	-0.3	0.1	0.0	0.2
250	-0.4	0.0	0.0	0.2
200	-0.4	0.0	0.0	0.2
175	-0.4	0.0	0.0	0.2
150	-0.4	0.0	0.0	0.1
125	-0.2	0.1	0.1	0.1
100	0.0	0.0	0.1	0.1
70	0.4	0.0	0.1	0.1
50	0.7	0.3	0.2	0.1
40	0.6	0.2	0.1	0.1
30	0.8	0.5	0.3	0.1
20	1.6	1.0	0.5	0.1
15	1.8	0.9	0.3	-0.1
10	3.4	1.9	1.2	-0.2

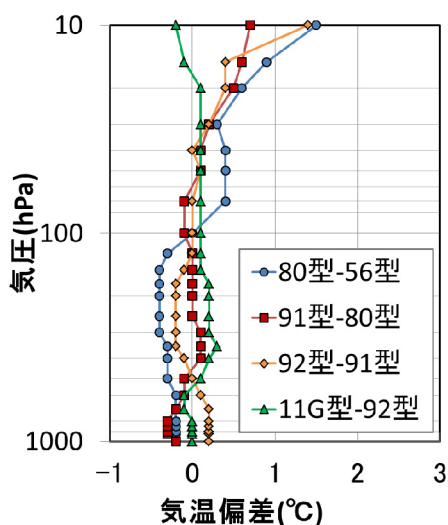


図1 各比較観測(21時)で得られた新旧ゾンデの指定気圧面における気温差(全季節での平均値)

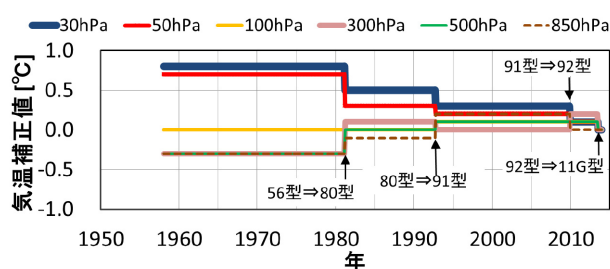


図2 各指定気圧面における年代毎の気温補正值

た気温差を使用する。最新の 11G 型の観測値を基準として各年代に使用されたゾンデまでさかのぼり、それぞれの比較観測結果で示される相対的な観測値の差を加えることによって、各年代の補正值が求められる(上里ほか：2008)。例として、80型によって観測された気温データの補正值は、91型-80型、92型-91型、11G型-92型のそれぞれのゾンデ間の気温差を指定気圧面毎に加えた値となる。

算出された気温補正值を表3に、年代毎の補正值を図2に示す。補正值は測器毎の値となるため、各測器の使用年代に合わせて補正值を適用することになる。ゾンデが変更されることによって測定精度が改善されているため、年代が古いゾンデの補正值は大きい傾向がある。56型使用時の補正值が大きい要因は、図1からわかるように56型と80型の気温差である。この気温差について気象庁観測部高層課(1983)では、56型のバイメタル温度計の方が80型のサーミスタ温度計よりも時定数が大きいことが主因であると示している。また、比較観測時の気温差を求める際のサンプル数はより多いことが望ましいため、本報告では30hPaより下層の比較観測結果を使用する。

4.トレンド解析に使用する気温データ

気温トレンド解析には、札幌、館野、鹿児島島の3地点でのゾンデによる観測データを使用する。これら3地点ではゾンデの変更日に多少違いはあるものの、同時期に同じゾンデが使用されている。また、ゾンデ変更時の比較観測は

館野のみで実施されているため、札幌と鹿児島島の気温データにも館野の比較観測結果から算出した補正值を使用することとする。比較観測結果は56型以降のゾンデデータのみ利用できるため、気温データは3地点ともに56型が使用されている1958年から11G型が使用されている2014年までの指定気圧面における21時観測の月平均気温データとする。

5.解析結果

5.1 補正前後の気温トレンドの比較

札幌、館野、鹿児島島における指定気圧面月平均気温平年偏差を補正前後で比較したものを図3, 5, 7に示す。平年値は1981年から2010年の30年間の月別平均値とした。気温の長期的な変化傾向は、3地点ともに成層圏で低温化、対流圏で高温化であり、補正值を適用することによってこれらの変化傾向がより顕著となっている。3地点での1958年から2014年における10年あたりの気温変化率を表4に示す。補正前の気温変化率は30hPaで $-0.22 \sim -0.34^{\circ}\text{C}/10$ 年、850hPaで $+0.05 \sim +0.10^{\circ}\text{C}/10$ 年であるが、補正值の適用によって、それぞれ30hPaでは約 $-0.15^{\circ}\text{C}/10$ 年、850hPaでは約 $+0.1^{\circ}\text{C}/10$ 年変化率が大きくなり、30hPaで $-0.37 \sim -0.48^{\circ}\text{C}/10$ 年、850hPaで $+0.16 \sim +0.20^{\circ}\text{C}/10$ 年となった。対流圏の高温化傾向は、500hPa, 300hPaでも見られ、地上気温や海面水温の長期的な変化傾向で見られる昇温傾向(気象庁：2014)が対流圏全体で一貫して見られる。また、成層圏の低温化傾向の要因については、温室効果ガス濃度の増加による宇宙への赤外放射を強める効果から生じる気温低下や、オゾン層破壊による成層圏オゾンの減少によりオゾンの紫外線吸収による大気加熱が弱まることが要因であるといわれている(気象庁：2005)。また、鹿児島では他の地点に比べて対流圏での気温変化率が大きい。これは、1960年代に札幌や館野に比べて平年より低い傾向が強かったためと考えられる。

表4 札幌、館野、鹿児島島における10年あたりの気温変化率

データの期間は1958年から2014年。差は「補正後」から「補正前」を引いた値。()は信頼区間95%の範囲を示す。

気圧 (hPa)	10年あたりの気温変化率 ($^{\circ}\text{C}/10$ 年)								
	札幌			館野			鹿児島		
	補正前	補正後	差	補正前	補正後	差	補正前	補正後	差
30	-0.34	-0.48 (± 0.07)	-0.14	-0.22	-0.37 (± 0.07)	-0.15	-0.29	-0.43 (± 0.07)	-0.14
50	-0.37	-0.50 (± 0.06)	-0.13	-0.25	-0.38 (± 0.07)	-0.13	-0.36	-0.49 (± 0.07)	-0.13
100	-0.19	-0.16 (± 0.07)	0.03	-0.13	-0.11 (± 0.07)	0.02	-0.27	-0.25 (± 0.07)	0.02
300	0.05	0.14 (± 0.06)	0.09	0.05	0.14 (± 0.06)	0.09	0.15	0.24 (± 0.07)	0.09
500	0.08	0.18 (± 0.07)	0.10	0.07	0.17 (± 0.07)	0.10	0.15	0.25 (± 0.05)	0.10
850	0.05	0.16 (± 0.06)	0.11	0.07	0.18 (± 0.05)	0.11	0.10	0.20 (± 0.06)	0.10

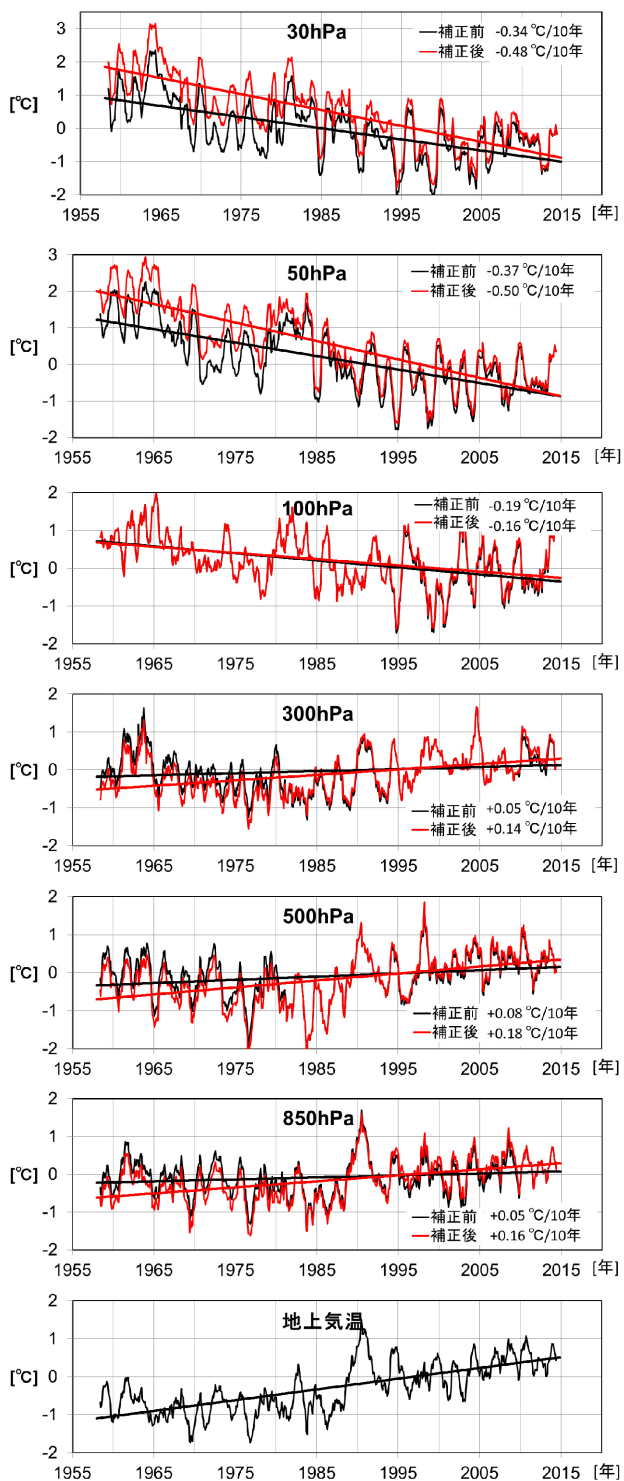


図3 札幌の各指定気圧面における気温年平均偏差
 曲線は12ヶ月移動平均値、直線は一回帰直線、黒は補正前、
 赤は補正後の気温データセットの値。グラフ中の数値はそれぞ
 のデータセットで求められた10年あたりの気温変化率。

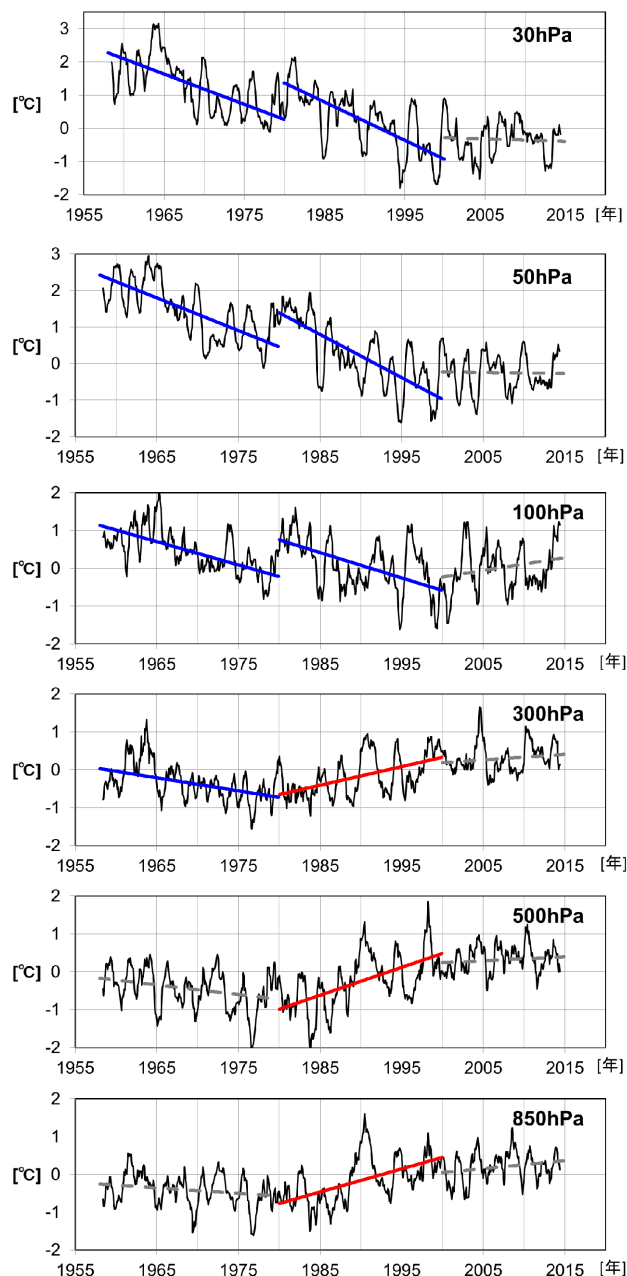


図4 札幌の各指定気圧面における気温年平均偏差の年代
 別特徴

3つの期間はそれぞれ1958年～1979年、1980年～1999年、2000年～2014年。黒曲線は補正後の気温年平均偏差の12ヶ月移動平均値。赤線、青線は各期間においてそれぞれ上昇、下降トレンドが有意水準5%で統計的に有意であることを示し、灰色点線はトレンドが統計的に有意ではないことを示す。

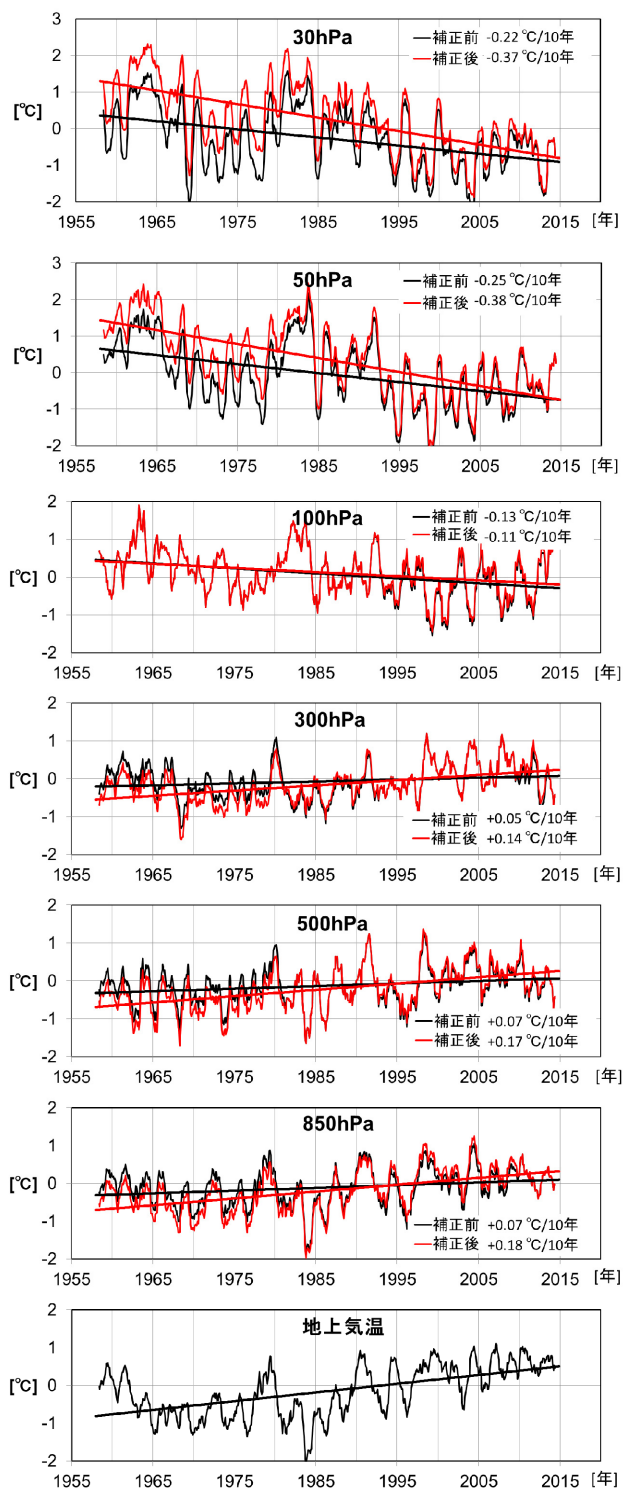


図5 館野の各指定気圧面における気温年平均偏差
図の説明は図3に同じ。

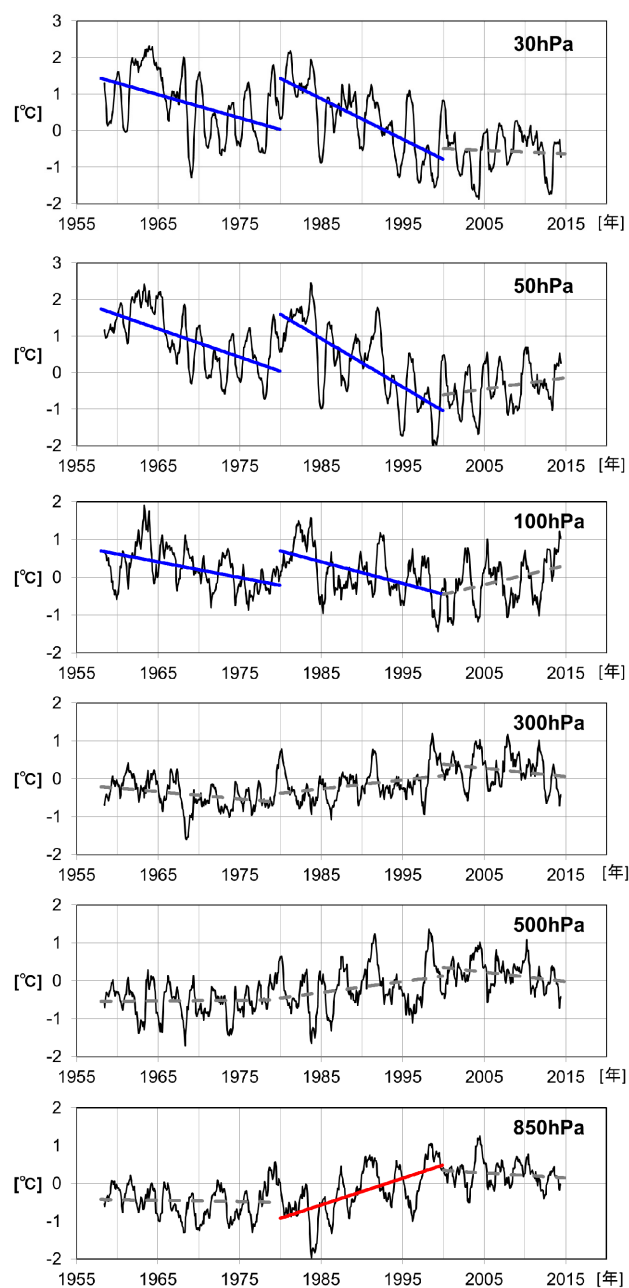


図6 館野の各指定気圧面における気温年平均偏差の年代別特徴
図の説明は図4に同じ。

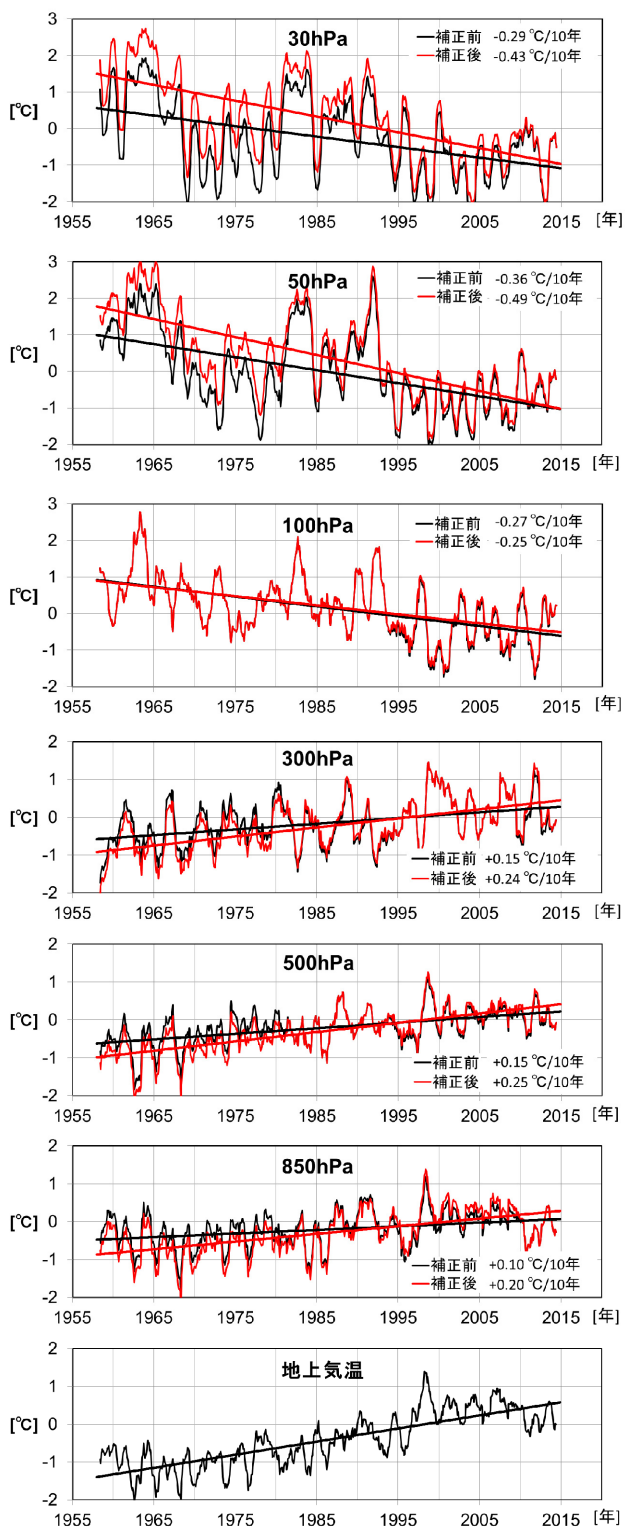


図7 鹿児島各指定気圧面における気温年平均偏差
図の説明は図3に同じ。

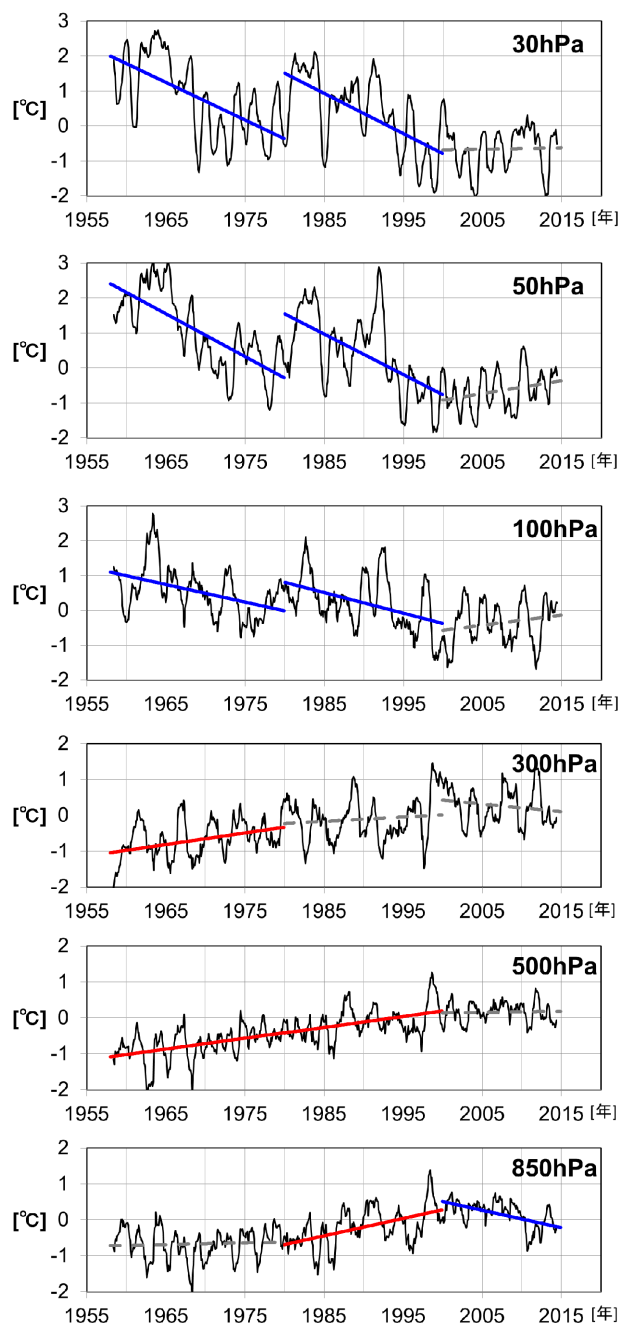


図8 鹿児島各指定気圧面における気温年平均偏差の年代別特徴
図の説明は図4に同じ。

5.2 年代別気温変化の特徴

気象庁(2014)によると、日本の地上気温の長期変化傾向では、1980年代後半に急速に気温が上昇し、顕著な高温を記録した年は1990年以降に集中していると示されており、図3、5、7の500hPaや850hPaでも1980年代や1990年代に顕著な高温のピークが見られる。そこで、解析対象期間を約20年毎の1958年～1979年、1980年～1999年、2000年～2014年の3つの年代に区切り、年代別の気温変化の特徴を見る。図4、6、8はそれぞれ補正後の3地点の気温平年偏差であり、各年代で下降、上昇の傾きが有意水準5%で統計的に有意であるものをそれぞれ青、赤の直線で示している。30hPa、50hPaでは3地点ともに1958～1999年の気温低下が大きく、2000～2014年は気温の変動は小さくなるが平年より低い状態が続いている。また、館野と鹿児島では1981～1984年と1991年頃に顕著な正偏差が見られるが、これは1982年3～4月のエルチヨン火山噴火(メキシコ)、1991年6月のピナトゥポ火山噴火(フィリピン)の時期と一致している。対流圏の500hPa、850hPaでの気温上昇は1980～1999年の期間で大きいことがわかり、この期間850hPaでは3地点ともに有意な上昇傾向となっている。また、300hPa～850hPaの2000年以降は平年より高い状態が続いている。

6. JRA-55 との比較

本報告で補正値の算出に使用した比較観測結果については、各々の比較ゾンデの相対的な観測値の平均差で求められているが、その差はゾンデの性能や季節などのデータ取得環境によってある程度のばらつきを持っている。そこで、今回作成した補正値と気温変化率の信頼性を客観的に評価するため、他の手法によって均質化された気温データとの比較を行った。比較に使用したデータは気象庁の長期再解析データ(気象庁地球環境・海洋部:2015, 以下, JRA-55 という)である。JRA-55はゾンデによる観測値も含まれているが、最先端のデータ同化システムを過去の観測データに適用することによって作成された均質な気候データセットであり、一地点の直接観測のみによるデータセットとは異なるものである。また、JRA-55ではラジオゾンデの気温補正値として Radiosonde Observation Correction using Reanalysis (Haimberger : 2007, 以下, RAOBCORE という)を採用している。RAOBCOREでは測器変更に依存する観測値の誤差を求めめるため、参照値としてヨーロッパ中期予報センター(ECMWF)の再解析データを用いており、測器変更などに因って生じる気温データの breakpoint を統計的に検出している。したがって、本報告で採用した比較観測におけるゾンデ観測値を使用した補正方法とは異なる

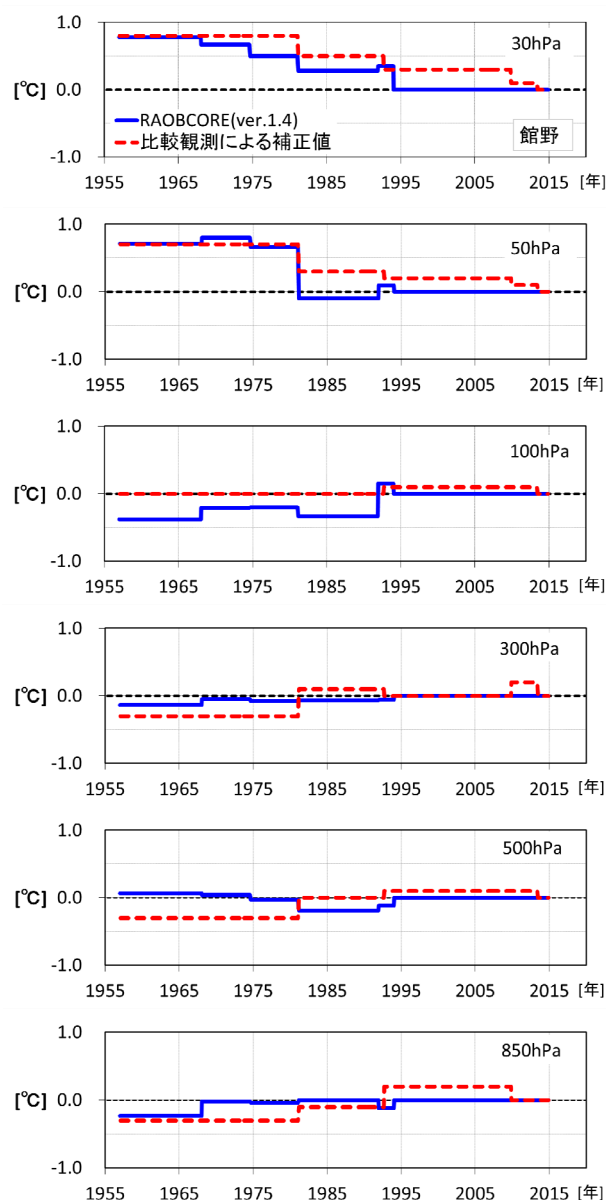


図9 気温補正値の比較

青 : RAOBCORE(バージョン1.4)の館野におけるラジオゾンデ気温補正値(21時観測), 赤 : 比較観測結果から求めた館野の気温補正値(21時観測).

方法である。

図9は、比較観測結果から求めた補正値とJRA-55で使用されている館野のラジオゾンデ気温補正値を比較したものである。JRA-55の補正値は2006年まではRAOBCOREバージョン1.4、2007年からはバージョン1.5を使用しており、図9はバージョン1.4の値である。30hPa、50hPaではどちらの補正値も1981年まで大きい正の値となっており、breakpoint、補正値の大きさともによく一致している。一方、300hPa、500hPa、850hPaでは比較観測結果から求めた補正値は1981年まで -0.3°C 、850hPaでは1992年

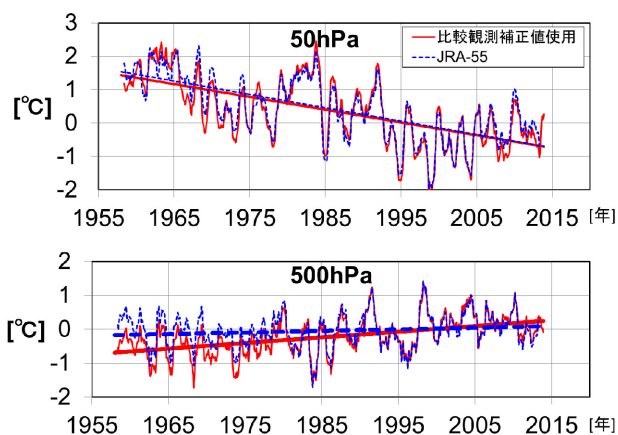


図 10 館野における JRA-55 との気温年平均偏差の比較
上：50hPa，下：500hPa。青曲線：JRA-55 の格子点値の気温年平均偏差 12 ヶ月移動平均，赤曲線：比較観測結果から補正した気温年平均偏差 12 ヶ月移動平均，直線はそれぞれの一次回帰直線。

表 5 JRA-55 との 10 年あたりの気温変化率の比較
差は JRA-55 の気温変化率から，比較観測結果により補正した気温の変化率を引いた値。

気圧 (hPa)	館野における10年あたりの気温変化率 (°C/10年)		
	JRA-55	比較観測資料 により補正	差
30	-0.35	-0.37	0.02
50	-0.40	-0.38	-0.02
100	-0.16	-0.11	-0.05
300	0.05	0.14	-0.09
500	0.05	0.17	-0.12
850	0.12	0.18	-0.06

からは正の補正值となっており，RAOBCORE とは異なっている。本報告で作成した館野の気温データと JRA-55 の気温データを年平均偏差で比較したものを図 10 に，それぞれの気温データから算出した 10 年あたりの気温変化率を表 5 に示す。ただし，JRA-55 の気温データは館野の緯度，経度に近い格子点値を使用しており，1958 年から 2013 年の気温データから変化率を算出し，比較観測結果から補正した気温の変化率は 1958 年から 2014 年の気温データから変化率を算出している。図 10 の 50hPa では 1981 年まで同程度の補正值が適用されていることもあり，気温の変化傾向や 10 年あたりの気温変化率もよく一致している。一方，500hPa では本報告で作成した気温データの高温化傾向が顕著であり，特に図 9(500hPa)の補正值に差が見られる 1981 年頃までの気温年平均偏差に差が見られ，10 年あたりの気温変化率で見ると， -0.12°C の差がある。この気温変化率の差には，ラジオゾンデによる観測値の誤差，再解析に使用されるモデルの誤差，補正值の違いなど各々のデー

タの誤差が含まれる。

7. まとめ

高層気象観測に使用されるラジオゾンデ変更時に実施されてきた比較観測結果を利用して，気温データにおける測器変更に依存した「段差」を補正することによって均質な高層大気の気温データを作成し，そのデータから長期的な気温変化傾向を調べた。補正を行うことによって，成層圏の低温化傾向，対流圏の高温化傾向が顕著となり，札幌，館野，鹿児島での 1958 年から 2014 年における気温変化率は，30hPa と 50hPa で $-0.37\sim-0.50^{\circ}\text{C}/10$ 年，500hPa と 850hPa で $+0.16\sim+0.25^{\circ}\text{C}/10$ 年となった。成層圏では 1958～1999 年の期間での気温低下が大きく，対流圏では 1980～1999 年の期間での気温上昇が大きいことがわかった。また，本報告で示した館野の気温変化率は，IPCC 第 5 次評価報告書第 2 章(Hartmann *et al.*:2013)で示されているラジオゾンデ観測や衛星観測から求められた北半球平均での対流圏，下部成層圏の気温変化率と良く一致していることから，本報告で適用した補正方法は有効であると考えられる。

本報告で扱った気温データはラジオゾンデによる観測データのみで作成されており，再解析データなど異なる手法により作成された気温データの検証用データとして活用することができる。

今後，GRUAN の基準観測サイトとしての館野では，測器変更時の比較観測の継続に加え，定期的な高性能ゾンデとの比較観測が計画されている。それらの観測データから測器の特性を把握することにより，様々なデータセットの基準となり得る高精度な観測データの取得が可能となり，ラジオゾンデによる高層気象観測データの長期的な利用が可能となる。また，GRUAN を通じてそれらの情報を国際的に提供することにより，観測データの気候研究分野への利用が可能となる。

謝 辞

本稿を草するに際し，札幌管区気象台の能登高層気象観測室長および高層気象台観測第一課，二課の皆様には多大なご協力を賜った。これらの方々に厚くお礼申し上げます。

引用文献

- 阿部豊雄 (2015) : 気象庁における高層気象観測の変遷と観測値の特性 第 1 部 高層気象観測の変遷. 天気, **62**, 161 - 185.
- 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.
- GCOS (2013) : The GCOS Reference Upper-Air Network (GRUAN)

- GUIDE. GCOS-171, Version 1.1.0.3, WIGOS Technical Report No. 2013-03, World Meteorological Organization (WMO).
- Haimberger, L. (2007) : Homogenization of Radiosonde Temperature Time Series Using Innovation Statistics. *Amer. Meteor. Soc.*, **20**, 1377 - 1403.
- Hartmann, D.L., A.M.G Klein Tank, M. Rusticucci, L.V. Alexander, S. Brönnimann, Y. Charabi, F.J. Dentener, E.J. Dlugokencky, D.R. Easterling, A. Kaplan, B.J. Soden, P.W. Thorne, M. Wild and P.M. Zhai, (2013) : Observations: Atmosphere and Surface. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 159 - 254.
- 気象庁 (2005): 異常気象レポート 2005 近年における世界の異常気象と気候変動～その実態と見通し～(VII).
- 気象庁 (2014) : 気候変動監視レポート 2014 世界と日本の気候変動および温室効果ガスとオゾン層等の状況について.
- 気象庁観測部高層課 (1983) : RS2-80 型と RSII-56 型レーウィンゾンデの比較観測について. 測候時報, **50**, 373 - 384.
- 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—.
- 気象庁地球環境・海洋部(2015) : 平成 26 年度季節予報研修テキスト 1 か月予報システムの更新・JRA-55 の概要.
- 古林絵里子 (2015) : 明星 RS-11G 型 GPS ゾンデと Vaisala RS92-SGP 型 GPS ゾンデの相互比較試験観測による特性評価. 高層気象台彙報, **73**, 11 - 24.
- 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.
- 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.
- 上里至・伊藤智志・熊本真理子・茂林良道・中村雅道 (2008) : ラジオゾンデの歴史的変遷を考慮した気温トレンド(第 1 報). 高層気象台彙報, **68**, 15 - 22.

