

# 南極昭和基地上空の気温の経年変化(1969~2007)

押木 徳明\*

## Annual Changes on the Atmospheric Temperature observed from 1969 to 2007 at the Syowa Station in the Antarctica

Noriaki OSHIKI\*

### 要旨

南極昭和基地の高層気象観測データを用いて、気温の経年変化について t 検定及び Mann-Kendall 検定を適用し概観した。1969年1月~2007年12月の39年間における各指定気圧面の月別平均気温を直線回帰により求めた昭和基地上空の気温の変化傾向は、対流圏で高温化の傾向が大きく、8月の700 hPa(00UTC)で最大+0.8 K/10年の変化傾向があった。成層圏では、11月の100 hPa で最大-4.8 K/10年の変化傾向があった。年平均気温でも、500~350 hPa で+0.2 K/10年の有意な変化傾向が見られた。

### 1. はじめに

Turner ほか(2006)は南極地域の9地点の高層気象観測データから南極上空の気温の長期変化傾向を調べ、1979~2001の30年間に対流圏で+0.5~+0.7℃上昇していることを示した。地上気温に関しては、Scientific Committee on Antarctic Research (SCAR)のReference Antarctic Data for Environmental Research (READER)プロジェクト(Turner *et al.*: 2004)で作成している南極各観測地点の地上気象観測データを用いて英南極調査所が最新の解析結果をホームページ (<http://www.nerc-bas.ac.uk/icd/gjma/>)で公開している。これによると、南極半島周辺の観測地点では顕著な気温上昇傾向があるものの、昭和基地を含め南極大陸のほとんどの観測地点で有意な上昇傾向は見られない。南極地域の地上気温の変動に関しては、南半球環状モード、南方振動の寄与が大きいことが1982年から1998年の17年間のデータ解析結果から指摘されている(Kwok and Comiso: 2002)。南半球環状モードについては、極値フェーズの維持・遷移過程に短周期の擾乱の寄与があること(例えば、塩竈ほか: 2003)など、様々な波長スケールの擾乱の作用による大気循環場の変動の仕組みが調査されているが、南極地域の地上気温、対流圏の気温変動がどのようなしくみで起きているかという点については明確には説明されていない。

南極地域の気温変動の実態を把握するため、まずは昭

和基地での高層気象観測で得られた時系列データを解析することとし、高層気象観測で得られた上空の月別平均気温の変化傾向を調査したので報告する。

### 2. 使用した観測データと連続性の検証

#### 2.1 観測データの期間および統計方法

気象庁発行のCD-ROM「南極気象資料(2007)」(以下、DATAREPORT という)に収録されている指定気圧面データ、DATAREPORT で足りない期間については気象庁ホームページで公開されている気象資料電子データベースを使用した。主に、1969年1月から2007年12月までの期間の00UTC(現地時間03時)の高層気象観測資料を対象として解析を行った。連続性の検定に限り、期間を広げ1968年3月~2008年1月の資料を使用した。925 hPaについては1989年2月以降のデータとなり統計期間が短いため除外した。

月別平均値、季節別平均値、年平均値は気象観測統計指針(気象庁: 2005)に基づき算出した。

変化傾向の有意さの検定は t 分布を利用した仮説検定(以下 t 検定という)のほか、Mann-Kendall 検定(例えば、松山・谷本: 2005)も利用した。Mann-Kendall 検定を行う際には、資料不足値となった気圧面のデータは各時系列値の前後の期間から時間に対して線形に内挿して求めることとした。また、変化傾向の検定において、各気圧面の時系列データのうち全データ数の30%以上が資料不足値だった場合又は、10%以上の連続した資料不足値があった

\*高層気象台 観測第三課

場合は評価しなかった。

## 2.2 調査期間における高層気象観測測器の変遷

観測に用いられた高層気象観測測器(以下、ラジオゾンデという)の型名と気温センサの種類等を表1に示す。一般的に測器の切り替えにより測器間の特性の差が観測結果に表れることがあるので、器差を把握するため気象庁では切り替え時に比較観測を行っており、その結果は観測部高層課(1983)、WMO(1996)、迫田ほか(1999)で報告されている。迫田ほか(1999)での RS2-80型と RS2-91型の計 59回の特性比較(同時比較)結果では、00UTC、12UTC の観測とも対流圏では差は小さいが、成層圏では RS2-80型の方が RS2-91型より気温が低く観測され、上空ほど気温の差が大きくなっている。この原因として、00UTC の観測については、RS2-80型の日射補正量が過大であることが指摘されている。12UTC にも表れている偏差については、RS2-80型のサーミスタの白色塗料からの赤外放射はアルミ蒸着されている RS2-91型より多く、放射による冷却により RS2-80型が低くなることが述べられている。

近年では上里ほか(2008)が館野の高層観測資料について、これらの報告を基にラジオゾンデの特性の違いを考慮した解析を行っている。この報告では、RS II -56型から RS2-80型、RS2-80型から RS2-91型への切り替え時の器差を補正することにより、成層圏では補正後における低温化の変化傾向がより顕著となり、補正前と比べて1.5~1.6倍大きくなると述べている。対流圏では補正により高温化の変化傾向が顕著となり、3倍程度大きくなることが示されている。

南極昭和基地でもラジオゾンデの切り替え時に特性比較(同時比較観測)を行っている。報告として残っているものとしては、RS2-80型と RS2-91型の比較に関する稲川ほか(1997)、佐藤ほか(1999)及び宮本ほか(1999)、江崎ほか(2000)の報告がある。これらは第35次隊から第37次隊で行われた特性比較の報告と第38次隊で行われた追試の結果である。

稲川ほか(1997)、佐藤ほか(1999)は、対流圏では一年を通して RS2-80型と RS2-91型の器差は小さく(±0.5K 程度)、成層圏で夏季+1.5K「RS2-91型 - RS2-80型」、冬季-1.5K程度の差が生じたと報告している。迫田ほか(1999)の国内の特性比較の結果と対比してみると、夏季の傾向は RS2-80型が低い傾向は合っているものの、0.5K 程度差は大きく、冬季は逆に RS2-80型の気温が高くなっている点で迫田ほか(1999)の結果とは異なる。宮本ほか(1999)は、冬季に差が大きくなる原因について考察し、ラジオゾンデ内部の変換器部の-65℃以下での温度特性に起因する

表 1 昭和基地の00UTC高層観測で使用したラジオゾンデの変遷

使用期間	観測機器(飛揚器材)	センサ等の主な特徴	昭和基地での連結飛揚による比較
1966~1968	RS II -64型	南極用に開発された。 温度センサ：ガラスコートサーミスタ(白色塗装) 気圧センサ：60mmφ空こう気圧計(150接点)	-
1969	RS II -68型	RS II 64型の発信器の一部にトランジスタを用い軽量化したもの。	-
1970~1976	RS II -69型	RS II 68型の縦型を横型に変更。小型化、気圧計も改良されているが、サーミスタ、湿度計はRS II 68型と同じものを使用している。	-
1977~1979	RS II -69A型	RS II 69型の横型から縦型へ形状を変更。アンテナパターンが改良され、真空管は全てトランジスタに置き換えられ小型軽量化された。	-
1980~1986	南極78型	ラジオゾンデからの受信を自動処理が可能な地上設備(AMOS)に対応 温度センサ：ダイオード型サーミスタ(白色塗装) 気圧センサ：スミスパン製60mmφ空こう気圧計(抵抗板式)	-
1987~1994	RS2-80型	パルス幅等の仕様に若干の違いがあるのみで南極78型と同じセンサを使用。 日射補正を行うようになった。	第35次~37次南極地域観測隊で連結方式による比較観測を実施。
1995~2007	RS2-91型	センサ類がすべてRS2-80型から変更された。 気温センサ：ビード型ガラスコートサーミスタ(アルミ蒸着) 気圧センサ：鉄ニッケル製46mmφ空こう気圧計(静電容量変化式) 湿度センサ：高分子膜(静電容量変化式)	-

ものであると指摘している。江崎ほか(2000)はさらに特性比較を行い宮本ほかと同様な結果を確認し、RS2-80型のデータに対し-65℃以下で-1K、-65℃以上で+1Kの補正を行い気温の変化傾向を解析している。このように、南極昭和基地上空で特別な低温状態になることに起因する器差が生じるため、ラジオゾンデの器差の補正に、国内の特性比較の例をそのまま使用することはできず、南極昭和基地でのラジオゾンデの特性を考慮した取り扱いが必要となる。そのためには現地での特性比較結果が不可欠である。しかし、調査期間中のラジオゾンデには昭和基地のみで使用されたものもあり、切り替え時の特性比較に関する資料が残っていないものもある。

今回の統計期間中のラジオゾンデの特性の違いをすべて把握したうえで補正することは困難であると判断し、本稿では個々の観測値の補正については検討せず、統計的な手法により観測値の連続性を検定した。

## 2.3 時系列データの連続性の検定

ラジオゾンデの切り替えによる器差が、月別平均値程度の時間スケールの統計値へ与える影響の有無を確認す

表 2 月別平均値の変化傾向(1969～2007年)

月別平均値の時系列データの回帰直線の傾き (K/10年)。( )内は 99%信頼区間 (K/10年) を示す。第 2 圏界面以上は省略。シェードのかかっている欄は 90%以上の信頼限界では有意でない。斜線は時系列値がそろっている場合にあるデータ数の 30%以上が得られていないか、10%以上の連続した資料不足値があったことを示す。95%の信頼限界で有意な傾きを太字に、99%の信頼限界で有意な傾きに下線を付記している。

気圧面	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
地上	-0.09 (0.35)	0.08 (0.37)	-0.02 (0.66)	-0.06 (0.60)	0.26 (0.84)	0.65 (0.93)	0.21 (1.14)	0.68 (0.88)	-0.14 (1.05)	0.20 (0.61)	-0.18 (0.41)	0.00 (0.35)
1000 hPa												
900 hPa	<b>-0.32 (0.35)</b>	-0.04 (0.29)	-0.02 (0.37)	-0.03 (0.44)	0.16 (0.58)	0.50 (0.59)	0.29 (0.90)	<b>0.67 (0.76)</b>	-0.08 (0.84)	-0.05 (0.48)	-0.24 (0.42)	-0.23 (0.39)
850 hPa	<b>-0.35 (0.32)</b>	-0.01 (0.29)	0.00 (0.36)	0.07 (0.39)	0.10 (0.57)	0.46 (0.59)	0.38 (0.91)	<b>0.70 (0.76)</b>	-0.07 (0.82)	0.03 (0.48)	-0.23 (0.43)	-0.24 (0.40)
800 hPa	<b>-0.33 (0.30)</b>	-0.03 (0.32)	-0.01 (0.35)	0.06 (0.40)	0.06 (0.54)	0.44 (0.51)	0.43 (0.84)	<b>0.76 (0.72)</b>	-0.04 (0.76)	0.15 (0.47)	-0.21 (0.45)	-0.26 (0.41)
700 hPa	<b>-0.33 (0.37)</b>	0.03 (0.35)	-0.05 (0.39)	0.12 (0.42)	0.04 (0.54)	0.46 (0.49)	0.53 (0.72)	<b>0.76 (0.61)</b>	0.01 (0.60)	0.26 (0.48)	-0.08 (0.58)	-0.36 (0.54)
600 hPa	-0.27 (0.48)	0.17 (0.46)	0.04 (0.51)	0.24 (0.47)	0.18 (0.62)	0.45 (0.56)	<b>0.62 (0.71)</b>	<b>0.67 (0.58)</b>	0.10 (0.57)	0.32 (0.49)	0.01 (0.61)	-0.40 (0.58)
500 hPa	-0.22 (0.47)	0.14 (0.49)	0.16 (0.55)	0.34 (0.51)	0.23 (0.65)	0.45 (0.63)	<b>0.65 (0.73)</b>	<b>0.57 (0.61)</b>	0.22 (0.58)	<b>0.47 (0.49)</b>	0.06 (0.60)	-0.34 (0.57)
400 hPa	-0.18 (0.44)	0.26 (0.46)	0.20 (0.49)	0.34 (0.47)	0.18 (0.56)	0.37 (0.64)	<b>0.64 (0.66)</b>	0.42 (0.59)	0.30 (0.58)	<b>0.52 (0.48)</b>	0.01 (0.53)	-0.28 (0.55)
350 hPa	-0.17 (0.42)	<b>0.35 (0.41)</b>	0.32 (0.49)	0.31 (0.41)	0.10 (0.48)	0.34 (0.59)	<b>0.57 (0.57)</b>	0.37 (0.55)	0.32 (0.51)	<b>0.50 (0.44)</b>	0.01 (0.48)	-0.27 (0.55)
300 hPa	-0.11 (0.35)	0.23 (0.42)	0.28 (0.47)	0.11 (0.40)	-0.01 (0.35)	0.21 (0.48)	0.37 (0.43)	0.21 (0.46)	0.25 (0.41)	0.30 (0.41)	-0.14 (0.48)	-0.33 (0.60)
250 hPa	-0.56 (0.61)	-0.54 (0.72)	-0.25 (0.58)	-0.22 (0.54)	-0.17 (0.45)	0.01 (0.46)	0.10 (0.28)	-0.05 (0.41)	-0.02 (0.33)	-0.03 (0.53)	<b>-0.64 (0.74)</b>	<b>-1.18 (1.19)</b>
200 hPa	<b>-0.91 (0.56)</b>	<b>-0.49 (0.50)</b>	-0.18 (0.39)	-0.05 (0.44)	-0.18 (0.67)	-0.47 (0.71)	-0.20 (0.41)	<b>-0.42 (0.50)</b>	-0.30 (0.46)	-0.37 (0.85)	<b>-1.62 (1.18)</b>	<b>-2.02 (1.48)</b>
175 hPa	<b>-0.97 (0.52)</b>	<b>-0.48 (0.40)</b>	-0.08 (0.33)	0.06 (0.41)	-0.14 (0.58)	<b>-0.51 (0.68)</b>	-0.30 (0.45)	<b>-0.52 (0.56)</b>	-0.38 (0.56)	-0.57 (0.98)	<b>-2.16 (1.31)</b>	<b>-2.31 (1.51)</b>
150 hPa	<b>-0.98 (0.49)</b>	<b>-0.45 (0.35)</b>	-0.08 (0.27)	0.06 (0.37)	-0.13 (0.55)	-0.44 (0.69)	-0.26 (0.38)	<b>-0.54 (0.57)</b>	<b>-0.48 (0.61)</b>	<b>-0.96 (1.11)</b>	<b>-2.87 (1.47)</b>	<b>-2.69 (1.56)</b>
125 hPa	<b>-0.99 (0.44)</b>	<b>-0.48 (0.33)</b>	-0.12 (0.26)	0.01 (0.39)	-0.13 (0.57)	-0.43 (0.69)	-0.23 (0.39)	<b>-0.53 (0.56)</b>	-0.52 (0.71)	<b>-1.62 (1.33)</b>	<b>-3.87 (1.70)</b>	<b>-2.93 (1.60)</b>
100 hPa	<b>-0.94 (0.43)</b>	<b>-0.58 (0.31)</b>	-0.13 (0.26)	0.02 (0.39)	-0.17 (0.59)	-0.47 (0.75)	-0.20 (0.43)	<b>-0.53 (0.56)</b>	<b>-0.70 (0.86)</b>	<b>-2.33 (1.65)</b>	<b>-4.78 (2.01)</b>	<b>-2.84 (1.51)</b>
70 hPa	<b>-0.83 (0.39)</b>	<b>-0.48 (0.28)</b>	-0.07 (0.30)	0.03 (0.42)	-0.17 (0.68)	-0.38 (0.85)	-0.16 (0.46)	-0.53 (0.68)	-0.81 (1.19)	<b>-2.95 (2.19)</b>	<b>-4.63 (2.27)</b>	<b>-1.98 (1.13)</b>
50 hPa	<b>-0.59 (0.34)</b>	<b>-0.39 (0.29)</b>	0.05 (0.36)	0.01 (0.45)	-0.28 (0.81)	-0.33 (0.93)	-0.17 (0.54)	<b>-0.68 (0.84)</b>	-0.81 (1.60)	<b>-2.76 (2.69)</b>	<b>-3.34 (2.28)</b>	<b>-0.95 (0.63)</b>
40 hPa	<b>-0.52 (0.33)</b>	<b>-0.39 (0.32)</b>	0.07 (0.41)	-0.05 (0.49)	-0.34 (0.86)	-0.40 (1.00)	-0.27 (0.66)	-0.71 (0.98)	-0.67 (1.85)	-2.14 (2.97)	<b>-2.30 (2.08)</b>	<b>-0.51 (0.53)</b>
30 hPa	<b>-0.56 (0.40)</b>	<b>-0.55 (0.36)</b>	0.16 (0.52)	-0.12 (0.62)		-0.26 (1.14)	-0.49 (0.87)	-0.81 (1.21)	-0.48 (2.24)	-1.05 (3.35)	-1.45 (1.68)	-0.25 (0.71)
20 hPa												
15 hPa												
10 hPa												
5 hPa												
第1圏界面	-0.05 (0.42)	0.07 (0.46)	0.24 (0.44)	0.07 (0.42)	-0.14 (0.52)	-0.33 (0.72)	-0.49 (0.55)	<b>-0.94 (0.71)</b>	-0.54 (0.74)	<b>-0.89 (1.01)</b>	<b>-1.12 (0.98)</b>	-0.73 (0.91)

るため、月平均値時系列データを対象に検定した。

調査対象を次の 5 つの期間に分類し、それぞれの期間の切り替わりにおける段差を検定した。

- ① 1968年3月～1970年1月 (RS II-64型・RS II-68型)
- ② 1970年2月～1980年1月 (RS II-69型・RS II-69A型)
- ③ 1980年2月～1987年1月 (南極 78 型)
- ④ 1987年2月～1994年12月 (RS2-80 型)
- ⑤ 1995年1月～2008年1月 (RS2-91 型)

観測開始当初は短期間でラジオゾンデが変わったこともあるなど、かなり短い間隔での変更があるためすべての切り替え時について統計的な検定を行うのは困難なので、RS II-64型とRS II-68型は同質の測器として取り扱った。データ伝送のための部品に変更があったが、基本的にセンサ類は変わりなく、同質のデータが取得されていたと考える。また、RS II-69型からRS II-69A型への変更もセンサに大きな変更があったという情報はないので、同質のデータと考え、ひとつの期間に含めることとした。また、サンプル数を増やすため、調査期間以前の1968年3

月～1968年12月、以後の2008年1月の資料も使用した。多くの場合期間の初め(終わり)を2月(1月)としているのは、南極地域観測隊の人員の交代が2月1日に行われるのに合わせて、測器の運用も切り替わる場合が多いことを考慮したものである。1995年1月の切り替えに限っては、切り替え日が報告資料に明記されているのでこれに従った。

30 hPa～5 hPa の気圧面では各期間における月平均値が数個しかない場合もある。検定は事前にフィルターをかけることなく行ったため、データが少なすぎる場合、季節の変動の方が顕著に表れることになる。このため、少なくとも1年分(12個)の月平均値が存在しない期間は評価しないこととした。

まず f 分布を用いた仮説検定により分布型の検定を行った。この結果、20 hPa の①RS II-64型・RS II-68型と②RS II-69型・RS II-69A 型のデータ間で分布が異なるという結果になったが、前後のデータ数がそれぞれ1年分にも満たないため、この結果は評価できない。20 hPa とデータ数が少ないため計算できない期間を除けば、95%以上の信頼限界で、分布型の相違は検出されなかった。各期間で月平均値の分布型が同じであることが分かったので、

表3 季節別平均, 年平均値の変化傾向(1969~2007年)  
季節別平均値, 年平均値の時系列データの回帰直線の傾き(K/10年).  
表内の太字, 下線, 斜線, シェードについては表3と同様.

気圧面	夏(12~2月)	秋(3~5月)	冬(6~8月)	春(9~11月)	年平均
地上	0.01 (0.25)	0.06 (0.54)	0.51 (0.68)	-0.04 (0.45)	0.13 (0.33)
1000 hPa					
900 hPa	-0.18 (0.22)	0.04 (0.32)	<b>0.49 (0.50)</b>	-0.13 (0.35)	0.05 (0.19)
850 hPa	-0.18 (0.23)	0.05 (0.30)	<b>0.51 (0.50)</b>	-0.09 (0.35)	0.07 (0.18)
800 hPa	-0.18 (0.23)	0.04 (0.29)	<b>0.54 (0.45)</b>	-0.03 (0.34)	0.09 (0.17)
700 hPa	-0.18 (0.26)	0.04 (0.30)	<b>0.58 (0.37)</b>	0.07 (0.32)	0.12 (0.15)
600 hPa	-0.13 (0.30)	0.15 (0.35)	<b>0.58 (0.40)</b>	0.14 (0.33)	0.18 (0.17)
500 hPa	-0.10 (0.31)	0.25 (0.37)	<b>0.56 (0.43)</b>	0.25 (0.31)	<b>0.23 (0.18)</b>
400 hPa	-0.05 (0.28)	0.24 (0.33)	<b>0.47 (0.42)</b>	0.28 (0.30)	<b>0.23 (0.17)</b>
350 hPa	-0.02 (0.28)	0.24 (0.29)	<b>0.43 (0.39)</b>	0.28 (0.27)	<b>0.23 (0.16)</b>
300 hPa	-0.07 (0.31)	0.13 (0.24)	0.26 (0.31)	0.14 (0.25)	0.11 (0.16)
250 hPa	<b>-0.79 (0.60)</b>	-0.21 (0.32)	0.02 (0.24)	-0.23 (0.36)	<b>-0.30 (0.23)</b>
200 hPa	<b>-1.19 (0.68)</b>	-0.14 (0.34)	<b>-0.36 (0.32)</b>	<b>-0.76 (0.65)</b>	<b>-0.60 (0.36)</b>
175 hPa	<b>-1.30 (0.68)</b>	-0.05 (0.29)	<b>-0.44 (0.35)</b>	<b>-1.04 (0.75)</b>	<b>-0.70 (0.39)</b>
150 hPa	<b>-1.42 (0.68)</b>	-0.05 (0.27)	<b>-0.42 (0.36)</b>	<b>-1.44 (0.86)</b>	<b>-0.82 (0.42)</b>
125 hPa	<b>-1.50 (0.67)</b>	-0.08 (0.27)	<b>-0.40 (0.38)</b>	<b>-2.00 (1.04)</b>	<b>-0.99 (0.47)</b>
100 hPa	<b>-1.47 (0.63)</b>	-0.09 (0.28)	<b>-0.40 (0.40)</b>	<b>-2.60 (1.27)</b>	<b>-1.14 (0.52)</b>
70 hPa	<b>-1.07 (0.48)</b>	-0.07 (0.30)	<b>-0.36 (0.45)</b>	<b>-2.79 (1.59)</b>	<b>-1.08 (0.56)</b>
50 hPa	<b>-0.63 (0.32)</b>	-0.07 (0.36)	<b>-0.40 (0.53)</b>	<b>-2.30 (1.80)</b>	<b>-0.87 (0.59)</b>
40 hPa	<b>-0.46 (0.32)</b>	-0.05 (0.33)	-0.46 (0.63)	<b>-1.70 (1.88)</b>	<b>-0.73 (0.67)</b>
30 hPa	<b>-0.47 (0.38)</b>			-0.89 (2.08)	
20 hPa					
15 hPa					
10 hPa					
5 hPa					
第1圏界面	-0.25 (0.40)	0.05 (0.28)	<b>-0.59 (0.38)</b>	<b>-0.85 (0.72)</b>	<b>-0.41 (0.33)</b>

連続性の検定は通常の t 検定により行った.

t 検定の結果は f 検定と同様, 評価できない 20 hPa で不連続となっている他は, 信頼限界 95% で, 各期間の月別平均値の間には不連続は検出されなかった. ラジオゾンデの切り替えによる器差は明瞭には表れていないという結果が得られた.

### 3. 解析結果

#### 3.1 月別平均気温の直線近似による変化傾向

1969~2007年の月別平均気温の変化傾向を, 月別平均値時系列データへの回帰直線の傾きにより見ることとした. 変化傾向の有意さの検定をt検定及びMann-Kendall検定で行った. Mann-Kendall検定はノンパラメトリック検定の一つであり, 理想化された値からの小さなずれに敏感でない堅牢な手法とされる. 二つの検定の結果が共に有意である時に変化傾向が有意であると判断した. 各月別平均値の変化傾向を表2に示す. 対流圏界面を含めた28気圧面17期間の計476個の時系列データに対する信頼限界 95%とした検定で, t検定のみで変化傾向が有意と判定された時系列データは25個, Mann-Kendall検定でのみで有意と判定された時系列は16個となった.

対流圏中層から上層にかけては, 南半球では冬季にあたる7~8月に+0.6~+0.8 K/10年の顕著な変化傾向があった. 最も気温の変化率が大きいのは8月の700 hPaで+0.8 K/10年だった. 1月には900~700 hPa面で, -0.3~-0.4 K/10年の変化傾向があった.

成層圏の6~12月, 1~2月の多くの気圧面で負の変化傾向があった. 最も変化傾向が大きかったのは11月の100 hPaで-4.8 K/10年であった.

99%信頼区間の大きさは対流圏では7~9月に特に大きくなっていて, 年毎の変動も大きいことを示している. 特に下層ほど信頼区間は大きくなっていることが特徴的である.

#### 3.2 季節別平均気温の直線近似による変化傾向

季節別平均気温, 年平均気温について求めた変化傾向を表3に示す. 対流圏で南半球の冬季に当たる6~8月に, 900~350 hPaにかけて+0.4~+0.6 K/10年の有意な正の変化傾向があった.

成層圏では, 南半球の夏季にあたる12~2月に250~30 hPaで, -0.5~-1.5 K/10年. 冬季にあたる, 6~8月に200~50 hPaで-0.4 K/10年, 春季にあたる9~11月に200~40 hPaで-0.8~-2.8 K/10年の有意な負の変化傾向があった.

#### 3.3 年平均気温の直線近似による変化傾向

対流圏では500~350 hPaにかけて, +0.2 K/10年の有意な正の変化傾向があった.

成層圏では250~40 hPaで-0.3~-1.1 K/10年の有意な負の変化傾向があった.

### 4. 考察

本稿の解析が, これまで行われた調査と調和的であることを確認する目的で以下に Turner ほか(2006), Marshall(2002)の報告と比較した.

Turnerほか(2006)は, 昭和基地の気温について, 1979年~2001年の期間では冬季に500 hPaで+0.92 K/10年の正の変化傾向があったと述べている. 本稿で使用した DATAREPORT を用いて同じ期間について計算すると, 冬季(6~8月)の変化傾向は+0.94 K/10年となった. 長期間の気候変動をとらえる上では小さく無い値と思われる. Turnerほか(2006)も回帰直線による傾きにより変化傾向を見ているので, 変化傾向のとらえ方は本稿も変わらない. 異なる点としては, データセットの情報源, 品質管理の手法があげられる. データの情報源の面では, Turnerほか(2006)はREADERデータセットを使用している. READERデータセットの情報源は主にWMOのGlobal

表4 1979年1月~2001年12月までの500hPa各月別平均値の00UTC日別値取得率の分布  
表中の数字は月別値の個数を示す。

日別値取得率	100%	96%	93%	90%	87%
DATAREPORT	225	46	5	0	0
READER	206	55	11	3	1

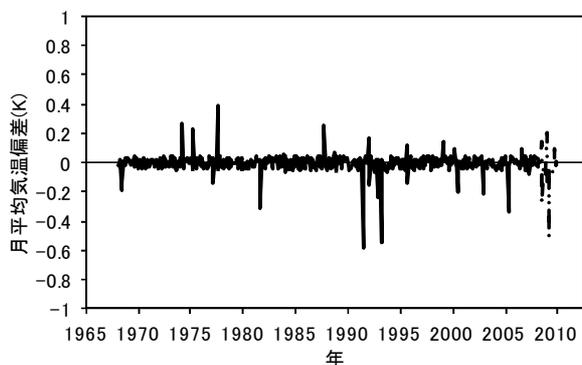


図1 500hPa月別平均気温の偏差「READER-DATAREPORT」  
DATAREPORTの収録範囲外のため、代わりに気象資料電子データベースより取得した月別平均値を利用した期間を点線で示した。

Telecommunication System(GTS)で交換されているCLIMAT TEMPデータであり、本稿で使用しているDATAREPORTは現業的な品質管理を行って日々の観測データ(TEMP報)をGTSに送信した後、さらに担当者の確認・修正を経て発行される点で異なる。この点について月別値毎のデータ取得率の分布を1979年1月~2001年12月の期間でみる(表4)と、READERデータセットはDATAREPORTと比較してやや取得率が小さくなっていることが分かる。トレンドを議論する場合は同一のデータセットを用いる必要があり、日本で手に入るデータとREADERデータの違いについて月ごとに比較することが必要であろう。

品質管理の面では、Turnerほか(2004)は1ヵ月に取得できたデータが完全に取得できた場合のデータ数の90%に満たない場合採用しないこととしているが本稿では、データ数は1ヵ月に20日(約70%)未満の場合か、連続した欠測が5日(約17%)以上の場合、採用しないこととしている点で異なっている。READERとDATAREPORTの500hPaにおける月別平均値の差を図1に示した。ほとんどのデータは±0.1K以内の偏差に収まっているが、1977年8月、1981年9月など、0.3Kを超える偏差がある月平均値もあった。これらについて、READERデータセットの日別値取得率を見ると、取得率がDATAREPORTに比べて低いときに該当した。これらの月別平均値におけるデータ

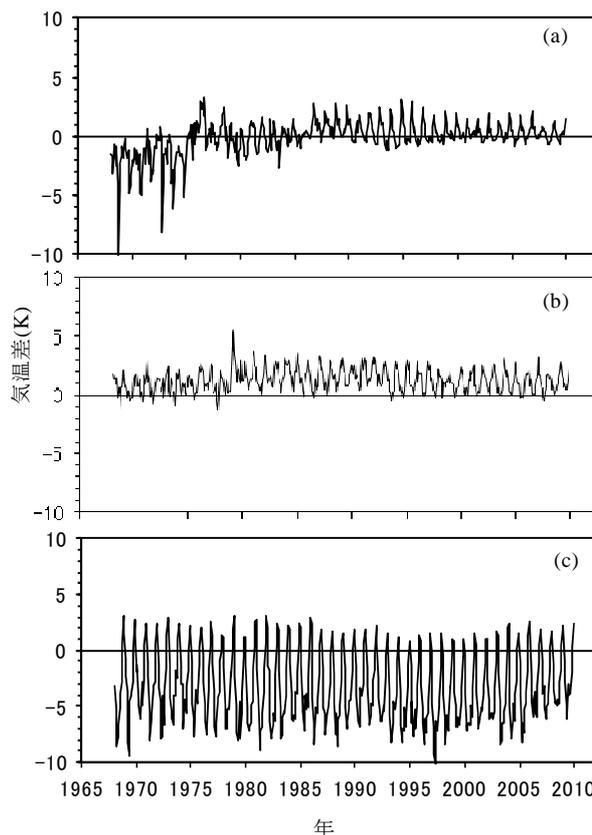


図2 100,300,850 hPaにおけるDATAREPORTとNCEPの月別平均気温の差(K)  
「NCEP-DATAREPORT」を実線で示す。NCEPデータは45°E, 70°Sのグリッドを使用。(a)100 hPa, (b)300 hPa, (c)850 hPa。

取得率の差が、変化傾向にも影響を与えていると考えられる。

Marshall(2002)は1960~1999年の40年間において、Mawson, Davis, Casey, Halleyの4地点の高層気象観測データを用いて、高度、気温の経年変化傾向の解析を行っている。Marshall(2002)と本稿では調査地点も期間も異なる。しかし、地点については、Halleyを除く3地点が昭和基地と同じ東南極の沿岸部に位置しているので、大まかな傾向の確認はできると考えた。Marshall(2002)の表3から、95%信頼限界の変化傾向を引用すると、Mawsonの850 hPaで-0.4576 K/10年となっている。DATAREPORTでの年平均値で見ると、昭和基地では1969~2007年の間に90%以上の信頼限界で有意な変化傾向はない。100 hPaではMawson(-2.1990 K/10年), Davis(-3.0711 K/10年), Casey(-1.9353 K/10年)の変化傾向が示されているのに対し、昭和基地では、-1.1 K/10年の変化傾向となっている。100 hPaについては傾向としては合っている。地点が異なる他、Lanzante(1996)の手法を用いて高層気象観測データの品質

表 5 NCEP 再解析データの月別平均値の変化傾向(1969~2007 年)

経度 45°E, 緯度 70°S の格子点の月平均値から算出. 月別平均値の時系列データの回帰直線の傾き (K/10 年). 表内の太字, 下線, 斜線, シェードについては表 3 と同様.

気圧面	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
1000 hPa	-0.74 (0.43)	-0.51 (0.50)	-0.62 (0.72)	-0.45 (0.66)	0.52 (0.92)	0.97 (0.81)	0.32 (1.11)	0.43 (0.86)	-0.32 (0.96)	-0.14 (0.55)	-0.56 (0.42)	-0.54 (0.44)
850 hPa	<b>-0.71 (0.44)</b>	-0.50 (0.50)	-0.65 (0.66)	-0.51 (0.63)	0.32 (0.79)	0.64 (0.66)	0.15 (0.96)	<b>0.31 (0.78)</b>	-0.33 (0.86)	-0.21 (0.51)	-0.48 (0.44)	-0.49 (0.48)
700 hPa	<b>-0.64 (0.46)</b>	-0.23 (0.45)	-0.32 (0.55)	-0.16 (0.53)	0.19 (0.72)	0.68 (0.61)	0.29 (0.85)	<b>0.53 (0.69)</b>	-0.07 (0.74)	0.06 (0.44)	-0.24 (0.49)	-0.47 (0.52)
600 hPa	-0.49 (0.45)	-0.08 (0.43)	-0.10 (0.49)	0.15 (0.44)	0.15 (0.62)	0.48 (0.56)	<b>0.35 (0.70)</b>	<b>0.53 (0.57)</b>	0.11 (0.59)	0.27 (0.41)	-0.08 (0.54)	-0.40 (0.55)
500 hPa	-0.29 (0.49)	-0.03 (0.49)	-0.03 (0.55)	0.22 (0.50)	0.11 (0.64)	0.47 (0.58)	<b>0.50 (0.69)</b>	<b>0.51 (0.52)</b>	0.21 (0.56)	<b>0.36 (0.40)</b>	0.07 (0.57)	-0.27 (0.57)
400 hPa	-0.15 (0.45)	0.07 (0.45)	0.06 (0.52)	0.19 (0.47)	0.00 (0.55)	0.28 (0.52)	<b>0.42 (0.60)</b>	0.26 (0.48)	0.13 (0.53)	<b>0.37 (0.42)</b>	0.16 (0.50)	-0.13 (0.53)
300 hPa	0.17 (0.38)	0.27 (0.39)	0.20 (0.47)	0.1 (0.37)	-0.08 (0.33)	0.06 (0.39)	0.27 (0.41)	0.04 (0.41)	0.10 (0.43)	0.34 (0.43)	0.17 (0.46)	-0.06 (0.68)
250 hPa	0.16 (0.44)	0.21 (0.52)	0.25 (0.46)	0.08 (0.40)	-0.04 (0.37)	-0.16 (0.38)	0.11 (0.30)	-0.13 (0.38)	0.01 (0.38)	0.12 (0.55)	<b>-0.05 (0.68)</b>	<b>-0.38 (1.05)</b>
200 hPa	<b>-0.24 (0.51)</b>	<b>-0.14 (0.52)</b>	0.09 (0.40)	0.09 (0.43)	-0.04 (0.51)	-0.43 (0.52)	-0.07 (0.34)	<b>-0.29 (0.42)</b>	-0.13 (0.43)	-0.29 (0.80)	<b>-0.81 (1.06)</b>	<b>-1.16 (1.42)</b>
150 hPa	<b>-0.39 (0.46)</b>	<b>-0.28 (0.41)</b>	0.00 (0.33)	0.12 (0.45)	-0.13 (0.51)	-0.54 (0.63)	-0.22 (0.40)	<b>-0.41 (0.48)</b>	<b>-0.28 (0.59)</b>	<b>-0.94 (1.14)</b>	<b>-1.96 (1.48)</b>	<b>-1.77 (1.57)</b>
100 hPa	<b>-0.06 (0.44)</b>	<b>-0.19 (0.39)</b>	0.08 (0.28)	0.14 (0.48)	-0.17 (0.57)	-0.50 (0.75)	-0.16 (0.47)	<b>-0.25 (0.54)</b>	<b>-0.39 (0.84)</b>	<b>-1.84 (1.65)</b>	<b>-3.02 (2.03)</b>	<b>-1.57 (1.49)</b>
70 hPa	<b>0.27 (0.37)</b>	<b>-0.01 (0.30)</b>	0.24 (0.32)	0.13 (0.48)	-0.23 (0.69)	-0.48 (0.94)	-0.15 (0.58)	-0.14 (0.68)	-0.32 (1.10)	<b>-2.14 (2.11)</b>	<b>-2.81 (2.32)</b>	<b>-0.71 (1.15)</b>
50 hPa	<b>0.56 (0.39)</b>	<b>0.16 (0.30)</b>	0.29 (0.39)	0.02 (0.54)	-0.39 (0.78)	-0.47 (0.98)	-0.13 (0.68)	<b>0.07 (0.87)</b>	0.03 (1.47)	<b>-1.62 (2.50)</b>	<b>-1.58 (2.25)</b>	<b>0.25 (0.77)</b>
30 hPa	<b>0.94 (0.51)</b>	<b>0.35 (0.35)</b>	0.46 (0.49)	0 (0.64)	-0.38 (0.81)	-0.08 (0.92)	0.28 (0.72)	1.00 (1.20)	1.29 (2.04)	0.14 (2.88)	0.36 (1.69)	1.25 (0.81)
20 hPa	1.43 (0.75)	0.64 (0.48)	0.48 (0.52)	-0.07 (0.71)	-0.31 (0.87)	0.25 (1.06)	0.81 (0.99)	2.13 (1.71)	2.40 (2.57)	1.07 (3.16)	1.33 (1.41)	1.99 (1.11)
10 hPa	1.52 (0.80)	0.55 (0.65)	0.30 (0.67)	-0.45 (0.77)	-0.34 (0.88)	1.81 (1.61)	3.52 (2.15)	5.75 (3.23)	4.04 (3.29)	1.20 (3.41)	1.99 (1.88)	2.75 (1.35)

管理を行い, 月別平均値を月毎に分けることをせずに変化傾向を求めている点で本稿とは手法が異なる. この点を考慮すれば, 変化傾向の大きさの差は, 矛盾しているというほどではないと考えられる.

Marshall(2002)は, 高層気象観測データと NCEP再解析データセット(以下, NCEPという)との比較も行っている. この比較結果についても比較した. 本稿では NCEP のデータは米国海洋大気庁地球システム研究所のホームページ(<http://www.esrl.noaa.gov/psd/>)から取得した月別平均値のデータセットの中から昭和基地の位置に近い経度 45°E, 緯度 70°S の格子点の気温を参照した. この点における変化傾向を表 5, 表 6 に示す. また, NCEP と DATAREPORT の月別平均値の偏差を図 2 に記載した. 計算期間は本稿の 1969~2007 年に合わせている.

まず, 変化傾向でみると, 定性的には特徴的な変化傾向は一致しているものの, 変化傾向の大きさは大幅に異なっている. 1 月の月別平均気温では NCEP は 850~700 hPa で -0.7~-0.6 K/10 年と大きくなっている. 顕著な正の変化傾向がみられた 8 月の月別平均気温は NCEP では 700 hPa~600 hPa で +0.5 K/10 年の変化傾向と小さい. 成層圏では, 11 月の 100 hPa で -3K/10 年と NCEP は 2 K/10 年程度も小さくなっている. NCEP に比べると, DATAREPORT の変化傾向は, 対流圏では正の変化傾向が大きめに, 負の変化傾向が小さめになっている. また, 成層圏では負の変化傾向は大きめになっている. この結果は, Marshall(2002)とは異なる. Marshall(2002)では, NCEP に比べて観測データの変化傾向の大きさは小さいことが示されている. 本稿での NCEP と DATAREPORT

表 6 NCEP 再解析データの季節別平均値と年平均値の変化傾向(1969~2007 年)

季節別平均値, 年平均値の時系列データの回帰直線の傾き (K/10年). 表内の太字, 下線, シェードについては表 3 と同様.

気圧面	夏(12~2月)	秋(3~5月)	冬(6~8月)	春(9~11月)	年平均
1000 hPa	-0.60 (0.35)	-0.18 (0.54)	0.57 (0.60)	-0.34 (0.42)	-0.14 (0.30)
850 hPa	-0.56 (0.36)	-0.28 (0.49)	<b>0.37 (0.53)</b>	-0.34 (0.38)	-0.20 (0.27)
700 hPa	-0.43 (0.34)	-0.09 (0.43)	<b>0.50 (0.48)</b>	-0.08 (0.32)	-0.03 (0.24)
600 hPa	-0.31 (0.31)	0.07 (0.36)	<b>0.45 (0.44)</b>	0.10 (0.31)	0.08 (0.21)
500 hPa	-0.17 (0.34)	0.10 (0.39)	<b>0.49 (0.41)</b>	0.21 (0.31)	<b>0.15 (0.20)</b>
400 hPa	-0.04 (0.32)	0.08 (0.36)	<b>0.32 (0.36)</b>	0.22 (0.29)	<b>0.14 (0.18)</b>
300 hPa	0.14 (0.37)	0.07 (0.29)	0.13 (0.29)	0.21 (0.30)	0.13 (0.22)
250 hPa	<b>0.00 (0.54)</b>	0.10 (0.28)	-0.06 (0.26)	0.02 (0.41)	<b>0.01 (0.28)</b>
200 hPa	<b>-0.53 (0.69)</b>	0.05 (0.28)	<b>-0.26 (0.27)</b>	<b>-0.41 (0.62)</b>	<b>-0.28 (0.34)</b>
150 hPa	<b>-0.82 (0.72)</b>	0.00 (0.30)	<b>-0.39 (0.34)</b>	<b>-1.06 (0.92)</b>	<b>-0.57 (0.45)</b>
100 hPa	<b>-0.57 (0.67)</b>	0.02 (0.34)	<b>-0.30 (0.45)</b>	<b>-1.75 (1.34)</b>	<b>-0.66 (0.58)</b>
70 hPa	<b>-0.09 (0.49)</b>	0.05 (0.37)	<b>-0.26 (0.58)</b>	<b>-1.76 (1.63)</b>	<b>-0.53 (0.63)</b>
50 hPa	<b>0.38 (0.39)</b>	-0.02 (0.44)	<b>-0.18 (0.66)</b>	<b>-1.05 (1.81)</b>	<b>-0.23 (0.67)</b>
30 hPa	<b>0.89 (0.48)</b>	0.03 (0.50)	0.40 (0.66)	0.60 (1.87)	0.47 (0.68)
20 hPa	1.37 (0.69)	0.03 (0.53)	1.06 (0.94)	1.60 (1.93)	1.01 (0.75)
10 hPa	1.63 (0.85)	-0.16 (0.58)	3.69 (2.05)	2.41 (1.88)	1.89 (1.12)

の関係は Marshall(2002)で示されている関係とは逆であることになる.

図 2 から偏差は一樣ではなく, 300 hPa, 100 hPa では 1970~1985 年にかけて不連続な期間を含み古い年代の方が NCEP で低めになっている. この点については, Marshall(2002)でも指摘されていて, 他にも 850 hPa での季節に依存した周期的な差, 300 hPa で見られる 1979 年の TOVS の同化時期におけるギャップなど他の 4 地点で指摘されている特徴が同様にみられる. また, 1970 年代の NCEP の負偏差は同様に表れている. 一方, Marshall(2002)が示していない 2000 年代の差をみると 100

hPa, 300 hPa では偏差と偏差の振幅は大きく変わっていない。これらのことから、成層圏で NCEP と観測データの変化傾向の差の大きさが Marshall(2002)と本稿で異なるのは調査期間に 2000 年以降のデータが加わったことで、この時期の負偏差の影響が小さくなったためと考えられる。また、対流圏では、季節に依存する差が 1990 年代の終わりごろから次第に小さくなっていることから、夏季の NCEP の正偏差が弱まり、冬季の NCEP の負偏差が小さくなっていることが NCEP の変化傾向の違いに影響していると考えられる。

期間の違いを考慮すれば、本稿の結果は Marshall(2002)の内容と調和的とは言えないまでも、大きく食い違うものではないと考える。

## 5. まとめ

気象庁発行の CD-ROM「南極気象資料(2007)」により 1969~2007年の期間の月別平均値、季節別平均値、年平均値を作成し、ラジオゾンデの変更による測定値の変化などを考慮せず、回帰直線もとめた。95%信頼限界を目安に回帰直線の傾きにより変化傾向をみると、昭和基地の高層気象観測データの月別平均気温には、以下の特徴が見られた。

- ① 月別平均値では1969~2007年の期間に対流圏中層から上層の7~8月にかけて、正の変化傾向があり、8月の700 hPaの月別平均値で+0.8 K/10年の変化傾向があった。1月は負の変化傾向となり、900~700 hPa面では、-0.3~-0.4 K/10年の変化傾向があった。
- ② 月別平均値では1969~2007年の期間に成層圏では6~12月、1~2月の多くの気圧面で負の変化傾向があり、11月の100 hPaの月別平均値で-4.8 K/10年の変化傾向があった。
- ③ 季節別平均値では、1969~2007年の期間に冬季の対流圏中層から上層の900~350 hPaにかけて+0.4~+0.6 K/10年の有意な正の変化傾向があった。
- ④ 季節別平均値では、1969~2007年の期間に成層圏では、南半球の夏季にあたる12~2月に250~30 hPaで、-0.5~-1.5 K/10年。冬季にあたる6~8月に200~50 hPaで-0.4 K/10年、春季にあたる9~11月に200~40 hPaで-0.8~-2.8 K/10年の有意な負の変化傾向があった。
- ⑤ 年平均値では、1969~2007年の期間に対流圏の500~350 hPaで、+0.2 K/10年の有意な正の変化傾向があった。

- ⑥ 年平均値では、1969~2007年の期間に成層圏の250~40 hPaで-0.3~-1.1 K/10年の変化傾向があった。

これらの結果は、Turner(2006)、Marshall(2002)と比較し、調和的とは言えないまでも、大きく矛盾はしていないと考える。

今回の調査では、時系列データの不連続性の検定についてデータの分布が正規分布することを仮定していたので今後、Lanzante(1996)などのノンパラメトリック検定を利用した手法を用いて、詳細にラジオゾンデの切り替えによる影響の有無を確認したい。

## 引用文献

- 江崎 雄治・栗田 邦明・松島 功・木津 暢彦・中嶋 哲二・金戸 進(2000)：第38次南極地域観測隊気象部門報告1997. 南極資料, **44**, 2, 125 - 204.
- 稲川 譲・山本義勝・田口雄二・阿保敏広・居島修(1997)：第35次南極地域観測隊気象部門報告1994. 南極資料, **41**, 2, 549 - 588.
- 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.
- 気象庁観測部観測課(2005)：気象観測統計指針。気象庁, 126pp.
- Kwok, R. and Comiso, J. (2002)：Spatial patterns of variability in Antarctic surface temperature: Connections to the Southern Hemisphere Annular Mode and the Southern Oscillation. *Geophys.Res.Letters*, **29**, No.14, 50,1 - 4.
- Lanzante, J. R. (1996): Resistant, robust and non-parametric techniques for the analysis of climate data: theory and examples, including applications to historical radiosonde station data. *International Journal of Climatology*, **16**, 1197 - 1226.
- Marshall, G. J. (2002): Trends in Antarctic Geopotential Height and Temperature: A Comparison between Radiosonde and NCEP-NCAR Reanalysis Data. *J. Climate*, **15**, 659 - 674.
- 松山洋・谷本陽一(2005):実践気候データ解析。古今書院, 109pp.
- 宮本仁美・中村雅道・成田修・横田歩・森永裕幸(1999)：第37次南極地域観測隊気象部門報告1996. 南極資料, **43**, 3, 477 - 553.
- 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.
- 佐藤尚志・吉見英史・竹川元章・宮内誠司・中村辰男(1999)：第36次南極地域観測隊気象部門報告1995. 南極

- 資料, **43**, 1, 96 - 161.
- 塩竈秀夫・寺尾徹・木田秀次・岩嶋樹也(2003): 南半球環状モードの遷移過程パート3: 極向き遷移過程. 京都大学防災研究所年報, **46**, B, 541 - 560.
- Turner, J., Colwell S. R., Marshall G. J., Lachlan-Cope T. A., Carleton A. M., Jones P. D., Lagun V., Reid P. A., Lagovkina S. (2004): The SCAR READER Project: Toward a High-Quality Database of Mean Antarctic Meteorological Observations. *J. Climate*, **17**, 2890 - 2898.
- Turner, J., Lachlan-Cope T. A., Colwell S., Marshall G. J., Connolley W. M. (2006): Significant warming of the Antarctic winter troposphere. *Science*, **311**, 1914 - 1917.
- 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変化傾向(第1報). 高層気象台彙報, **68**, 15 - 22.
- WMO (1996): WMO International Radiosonde Comparison - Phase IV: Final Report. *WMO*, WMO/TD - No. **742**, 130pp.