

# 気温急変時に於ける高層ゾンデのアネロイド気圧計 のエラーについて

平 沢 尚 彦\*・木 津 暢 彦\*\*

## 1. はじめに

ゾンデ観測値のエラーについては気温の時定数の遅延, 放射過程からの影響, 湿度計の限界温度等がよく知られ, これらに対する補正方法が提出されている (Luers and Eskridge 1995; Elliott and Gaffen 1991; Schwartz and Doswell 1991; Mahesh *et al.*, 1997). 気温データの遅延は成層圏などの空気密度の小さな領域で顕著であることや日射によるセンサー部の加熱の問題が分かっている。

一方, 高層気象ゾンデの気圧計として広く利用されているものの1つはアネロイド気圧計である。アネロイド気圧計は2枚の金属板の間を真空にして組み合わせ, 空気とその空洞を押しつぶそうとする力 (気圧) と金属の弾性力とをつり合わせることによって気圧を測定するものである。金属の弾性が温度の関数になっていることから, これまでにいくつかの研究結果が報告されている (気象庁, 1995; 阿保・荒井, 1997; 石田, 1970; 岩井, 1983)。バイサラ (株), 及び明星電気 (株) のゾンデの気圧測定値にはこの影響に対する補正処理が施されている。

これとは別に, アネロイド気圧計は環境温度が急激に変化する時にエラー値を出力する。これはキャメル現象と呼ばれるが (バイサラ (株)), そのエラーの大きさや時間的变化については一般的にはあまり知られていない。ゾンデメーカーからも整理された情報は公表されていない。

第36~38次南極地域観測隊ドームふじ観測拠点 (1995年~1998年) で使用された高層気象ゾンデ, 及び南極昭和基地を含む気象庁の高層気象観測に使用され

ている高層気象ゾンデの気圧計はいずれもアネロイド気圧計である。ドームふじ観測拠点ではバイサラ (株) 製の RS80型と GPS 測風システムを搭載した RS80-15G 型, 昭和基地では明星電気 (株) 製の RS2-91型を使用した。ドームふじ観測拠点の年平均気温は $-50^{\circ}\text{C}$ を下回り, ゾンデ立ち上げ場所の気温が室温の $10\sim 20^{\circ}\text{C}$ 程度であるため, ゾンデは放球直前に非常に大きな気温差を経験することが多かった。

ドームふじ観測拠点での調査の結果, バイサラ (株) 製のゾンデに関して, 惑星境界層など対流圏下部の精密なデータを取得するためには, 気圧計のエラーは無視出来ないほどに大きい場合があることが分かった。本稿では, アネロイド気圧計を大きな温度差に曝した場合のエラーの諸特性を記述することを目的とする。主な実験はドームふじ観測拠点で行ったが, 昭和基地における明星電気 (株) 製のゾンデに関する実験データも示す。

## 2. 立ち上げ直後の気圧計の出力値

第1図にドームふじ観測拠点における実験の例を示す。ゾンデからの信号を受信し始めてから6分50秒後に気温が急激に下がったのは, 室内から屋外 (実際は雪洞) に移したためである。この時の気温変化は $15.5^{\circ}\text{C}$ から $-54.7^{\circ}\text{C}$ で, 気温差は $70.2^{\circ}\text{C}$ であった。ドームふじ観測拠点の年平均気温は $-50^{\circ}\text{C}$ を下回り, 多くのゾンデ観測に際して気温差が $70^{\circ}\text{C}$ を超えたと考えられる。

6分50秒に気温が下がると同時に気圧の出力値が上がり始め, 12分42秒でピークに達した。気圧変化は $620.3\text{ hPa}$ から $623.9\text{ hPa}$ で, その差は $3.6\text{ hPa}$ であった。その後30~40分を要してエラーは徐々に解消した。

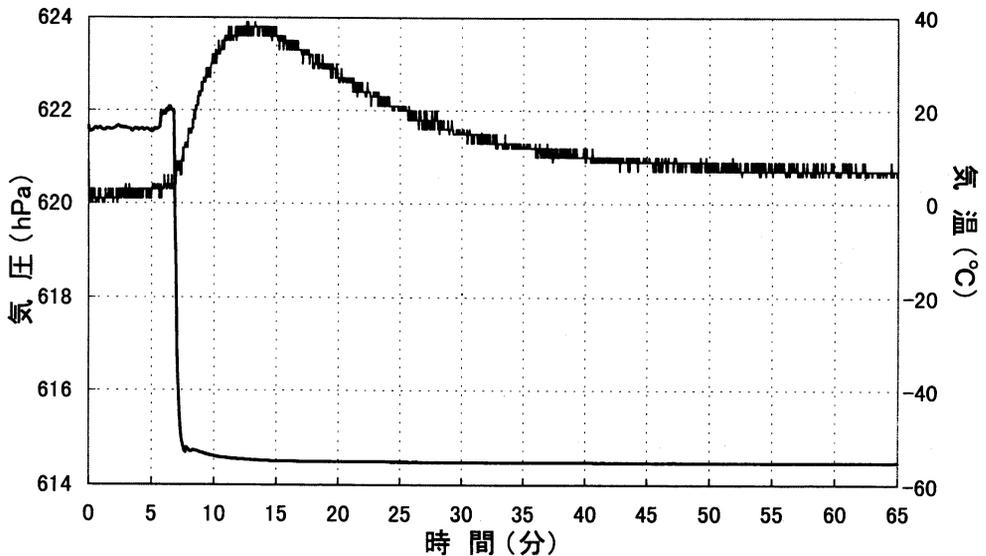
気圧エラーは気圧データと気温データから算出するゾンデの高度にも影響する。この例では, 室内にある時の高度が約 $3820\text{ m}$ であったのに対して, 気圧のピーク時には約 $3780\text{ m}$ と $40\text{ m}$ 程度標高が低く評価され

\* 国立極地研究所情報科学センター。

\*\* 気象庁高層気象台。

—1998年7月27日受領—

—1998年11月9日受理—



第1図 バイサラ(株)製のRS80型ゾンデを急激な気温変化に曝した場合の気圧計出力値の時間変化。細かい変動を示す細線が気圧、太線が気温の変化を示す。実験は1997年12月2日午後10時(現地時間)のドームふじ観測拠点で行われた。実験中の現地気圧の変化は0.1 hPa以下であった。

第1表 バイサラ(株)製のRS80型ゾンデの気温差別の気圧エラーの諸特性。実験はドームふじ観測拠点で行った。

	室内		雪洞内		ピークまでの時間(秒)	気温差(°C)	気圧差(hPa)
	気温(°C)	気圧(hPa)	気温(°C)	気圧(hPa)			
実験1	11.0	610.1	-34.9	612.6	566.0	45.9	2.5
実験2	14.4	612.0	-47.3	615.0	356.0	61.7	3.0
実験3	15.5	620.3	-54.7	623.9	352.0	70.2	3.6

た。40 mの誤差は境界層の観測にとっては無視出来ない。

### 3. いくつかの違った条件での比較

#### 3.1 気温差の大きさと気圧値エラーの関係

前章と同じゾンデを用いて、気温差の違いと気圧値のエラーの関係を調べた。およその気温差が70°C, 60°C, 45°Cの場合について行った結果を第1表に示す。それによると気温差が大きくなると気圧差が大きくなることが示唆される。

エラーのピーク出現時間は2例が6分程度、1例が9分以上であり、気温差に対して明確な関係は見出されない。9分以上かかった例は、気温が2°C程度の振幅で変動していたことが影響していると考えている(図示せず)。

#### 3.2 ゾンデの違いによる気圧値エラーの違い

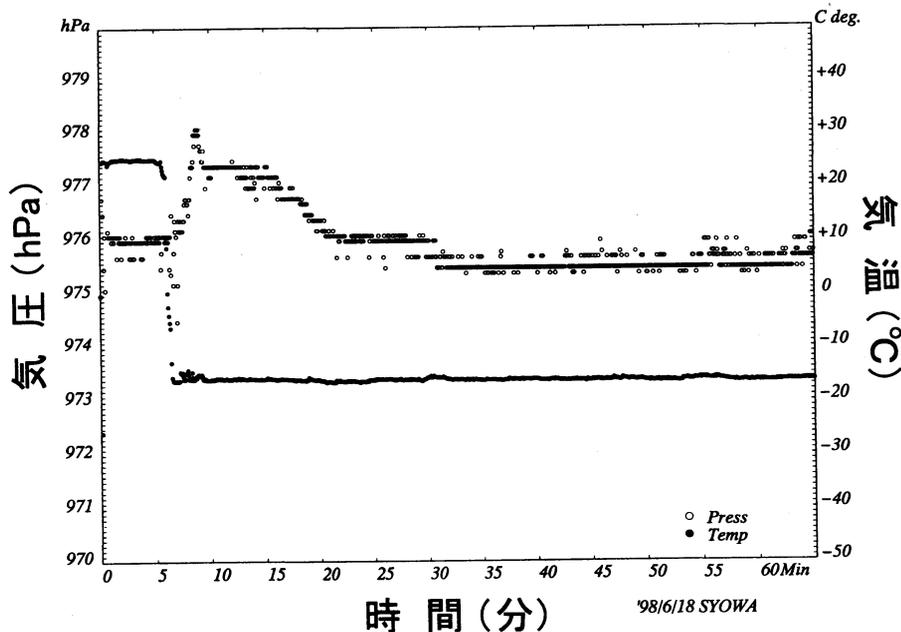
次に、5種類のゾンデについて、およそ70°Cの気温差に曝した場合の気圧エラーの大きさを比較した。その結果を第2表に示す。

ゾンデ1とゾンデ2は気温差が74°C台、ゾンデ3～5は気温差が70°C台である。前者グループの気圧エラーの違いは0.5 hPa、後者グループの気圧エラーの違いは0.4 hPaである。この2つのグループ間には前節で述べた気温差の違いによる気圧エラーの違いが系統的に含まれていると考えられるが、同じ気温差に対する気圧エラーの違いは非常に小さい。

エラーのピーク出現時間は全ての実験で5～6分程度であり、ゾンデ間の違いは非常に小さい。

### 4. 明星電気(株)製RS2-91型ゾンデの実験結果

ここでは参考データとして、昭和基地の定常観測で



第2図 明星電気(株)製のRS2-91型ゾンデを急激な気温変化に曝した場合の気圧計出力値の時間変化。白丸が気圧、黒丸が気温の変化を示す。実験は1998年6月18日午前10時(現地時間)に昭和基地で行われた。

第2表 バイサラ(株)製のRS80型ゾンデの異なるゾンデに関する気圧エラーの諸特性。実験はドームふじ観測拠点で行った。

	室内		雪洞内		ピークまでの時間(秒)	気温差(°C)	気圧差(hPa)
	気温(°C)	気圧(hPa)	気温(°C)	気圧(hPa)			
ゾンデ1	19.5	613.2	-54.8	617.6	364.0	74.3	4.4
ゾンデ2	20.4	620.6	-54.3	624.5	330.0	74.7	3.9
ゾンデ3	15.5	620.3	-54.7	623.9	352.0	70.2	3.6
ゾンデ4	16.0	617.0	-54.4	621.0	362.0	70.4	4.0
ゾンデ5	17.0	616.2	-53.4	620.1	344.0	70.4	3.9

使用されているRS2-91型ゾンデの実験データを示す。ドームふじ観測拠点の実験に対して、異なるメーカーであること、気温差が小さいこと、気圧が高いことが比較要素である。

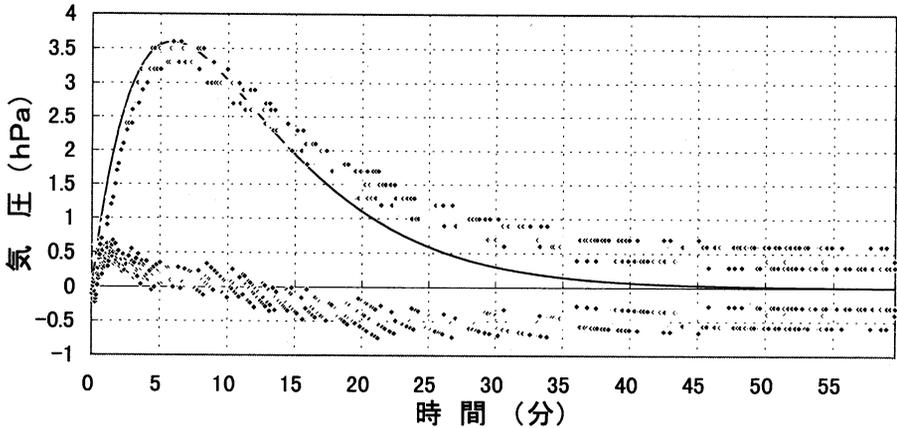
第2図にゾンデの気圧および気温の変化を示す。この時、室内温度は25°C、屋外気温は-16°Cで、気温差は41°Cであった。ゾンデの気圧指示値は室内では976 hPaであったが、外気に曝してから約3分後にはピーク値978.1 hPaまで2.1 hPa上昇し、約20分で元の気圧に戻っている。このことは、明星電気(株)のゾンデにおいても、また、40°C程度の気温差でもキャメル現象が起きている可能性を示唆している。

今回我々が行った実験はこの1例のみであり、RS2-91型ゾンデに関して今後実験数を増やして確認する必要がある。

今回の結果では、気圧ピークの出現時間、復元時間ともにドームふじ観測拠点に比較して短かい。気圧エラーの原因とされるのはアネロイド気圧計の金属の歪みであるが(バイサラ(株)、私信)、これをもたらず顕熱輸送が気圧の関数になっていることを想像させる。この点についても今後の詳細な実験が必要である。

### 5. 気圧エラーのフィッティング関数

我々はエラーの原因を同定するための実験を行って



第3図 気圧エラー値(点)と補正関数で作られる気圧エラー値(実線)の時間変化。時間軸の周辺にプロットされた点は両者の差を示す。

いない。ここでは、急激な気温変化に曝されたアネロイド気圧計に起こる物理過程は考えず、気圧出力値の時間変化の特徴に着目して簡便なフィッティング関数を提案する。

第3図には第1図で議論した実験について、ゾンデを雪洞に入れた時間を基点とし、エラー値の変化を点で示した。

下記の関数

$$F(X) = A \times X \times \exp(-B \times X)$$

をフィッティング関数として採用する。ここで、 $A > 0$ 、 $B > 0$ 、 $X$ は時間(秒)、 $F(X)$ はエラーの大きさである。一般に、この関数は、 $X = 1/B$ で極大値  $F(X) = (A/B) \cdot (1/e)$ をとる。ここで、 $e$ は自然対数の底である。

先の実験の場合、気圧エラーが極大に達したのは352秒で、その値は3.6 hPaである。ここから  $A$ 、 $B$ を決定した関数を第3図にフィッティング関数として実線で示す。このフィッティング関数と観測値との差を第3図に点で示す。気圧エラー極大後の気圧の減少はフィッティング関数の方が早く、最大で0.5 hPa程度気圧を低く見積もっている。

この見積もりの修正についてここでは深く議論しないが、アネロイド気圧計の出力値が立ち上げ時の出力値より0.5 hPa程度高い値で安定していくようにも見える。1節で述べたアネロイド気圧計の金属の温度による変化補正(メーカーからのアルゴリズムで既に考慮されている)の精度が極低温では悪くなるためとも

考えられる。

我々が実験を行った中では、このフィッティング関数をバイサラ(株)のゾンデに関しての第一近似の補正として使うことは可能である(詳細は示さず)。この関数はゾンデそれぞれに対して定義されるものであり、各ゾンデに関して気圧エラーの極大出現時間と極大値を知ることが必要である。

## 6. ゾンデ観測に関するコメント

ここでは特にバイサラ(株)のゾンデを使用した高層気象観測作業に関して述べる。明星電気(株)のゾンデに関する調査は今後の課題である。

前節で放球直後のデータに対する補正方法を議論した。補正を行わずにこのエラーを回避する方法は、放球の前に30分程度の間ゾンデを屋外に出し、気圧計を屋外の気温に馴染ませておくことである。それは気圧が正常値に戻るためには30分程度の時間が必要であることによる(第1図)。4節で述べたとおり、気圧が高ければ気圧エラーの復元に要する時間が短くなるとすれば、ゾンデを屋外温度に馴染ませる時間は短くすることができる。

気温の低いところから高いところへの急激な気温変化に対しても気圧計はエラー値を出力する。それは、第1図の気圧出力値をちょうど逆にした時間変化を示す。すなわち、気圧エラーの結果、実際よりも低い値を出力する。従って、屋外から室内にゾンデを持ち込んでからゼロチェックを行ってはならない。それらの前処理はゾンデを外に出す前に済ませる必要がある。観測のための注水電池の立ち上げは、放球直前に行う

ので、ゼロチェック、及び外でのゾンデ待機中に受信機が処理終了プロセスに入ることを防ぐために定電圧装置、注水電池などでデータ送信を続けることになる。

気圧エラーは前線面や圏界面を通過する場合にも出現することが予想されるので、詳細なデータ解析を行う場合には注意を要する。3.1の気温差45°Cの結果に見られるように、外気温が変化する場合には、ピーク出現時間が遅くなる等、気圧エラーの時間変化は複雑になる。今後は、実際の観測データ（連続データ）に対するエラーの大きさを検討することが望まれるし、それが気象電報の精度向上につながる可能性もある。

なお、高層気象観測指針（気象庁、1995）では、放球前15分間は外気に馴染ませる時間をとることが指示されており、気圧エラーのピークを過ぎてからの放球が確保されている。エラーの補正処理を行うためにはピーク出現時間とエラーの大きさを知る必要があるので、ゾンデを外に出す数分前からデータ受信を開始することが望まれる。

## 7. まとめ

アネロイド気圧計を使ったバイサラ（株）製のゾンデが急激な気温変化に曝された場合に気圧出力に現れるエラー値の大きさを示した。比較例として明星電気（株）製のゾンデを使用した比較的小さな気温差における結果（南極昭和基地）を示した。

エラーの大きさは気温差が大きければ大きい。ドームふじ観測拠点で約70°Cの気温差では4 hPa程度の気圧上昇をもたらし、昭和基地で40°Cの気温差で2 hPaの気圧上昇を示した。この程度の気温差（例えば、室温25°C、外気温-15°C）は日本の観測でも経験する可能性があり、特に境界層の研究観測では注意を要する。

気圧エラーの時間変化に関してフィッティング関数を提示した。この関数はゾンデ毎、気温差毎に異なるので、補正に使う等の目的でこの関数を得るためには気圧エラーのピークを待ってから放球することが必要である。

## 謝辞

昭和基地の実験データ取得を協力していただいた気象庁南極観測事務室、及び第39次南極地域観測隊定常気象部門隊員に感謝いたします。また、気圧計の測定原理等について貴重な情報をいただいたバイサラ（株）、及び明星電気（株）の関係方々に感謝いたします。論文作成にあたって、気象庁高層気象観測室の上林氏、阿保氏、観測技術課の小野寺氏、山本氏には有益な助言をいただきました。「天気」の編集事務局及び査読者の方々には丁寧な助言をいただきました。本研究遂行に対して第38次南極地域観測隊ドームふじ観測拠点越冬隊員の現地での協力を感謝いたします。本研究は国立極地研究所情報科学センターの設備を利用しました。

## 参考文献

- 阿保敏広, 荒井隆司, 1997: 地上におけるRS2-91型レーウィンゾンデの観測値について, 技術時報(札幌), 130, 39-48.
- 石田恭市, 1970: RSII 64型ゾンデの気圧補正について, 研究時報, 22, 547-550.
- 岩井秀夫, 1983: RS2-80型空盒気圧計開発の報告, 高層気象台彙報第43号.
- 気象庁, 1995: 高層気象観測指針.
- Elliott, W. P. and D. J. Gaffen, 1991: On the utility of radiosonde humidity archives for climate studies, Bull. Amer. Meteor. Soc., 72, 1507-1520.
- Luers, J. K. and R. E. Eskridge, 1995: Temperature corrections for the VIZ and Vaisala radiosondes, J. Appl. Meteor., 34, 1241-1253.
- Mahesh, A., V. P. Walden, and S. G. Warren, 1997: Radiosonde temperature measurements in strong inversions. : Correction for thermal lag based on an experiment at the south pole, J. Atmos. Ocean. Tech., 14, 45-53.
- Schwartz, B. E. and C. A. Doswell III, 1991: North-American rawinsonde observations: Problems, concerns, and a call to action, Bull. Amer. Meteor. Soc., 72, 1885-1896.

## Appearance of an Error of the Pressure Measurement by Aneroid Barometer Loaded in Meteorological Sonde under a Sudden Change in Air Temperature

Naohiko Hirasawa\* and Nobuhiko Kizu\*\*

\* (Corresponding author) Information Science Center, National Institute of Polar Research, Kaga 1-9-10, Itabashi, Tokyo 173-8515, Japan.

\*\* Aerological Observatory, Japan Meteorological Agency.

(Received 27 July 1998 ; Accepted 9 November 1998)

### 第16回 IGBP/GAIM 研究会のお知らせ

今回の研究会は IGBP/GAIM 小委員会の主催で、この3月に信州大学（松本）で開かれる第46回生態学会の自由式シンポジウムの1つとして、下記の内容で行われます。

#### シンポジウムのタイトル

新たなフロンティア—地球生態学の確立を目指して

開催日時：1999年3月29日（月）9～12時

会場はI会場【信州大学共通教育センター52番教室（共通教育センター第2講義棟1階）】

#### 企画の趣旨

人間活動による地球環境の変化が生態系へ大きな影響を及ぼすものと予想されている昨今、グローバルな視点から生態学を確立することが重要な研究課題であるとの考えから、関連する方々の講演をふまえて、今後の研究の方向性を論議する。

#### 講演者と演題

1. 地球環境科学関連学会協議会の概要について

講演者 木田秀次（京都大学・理学研究科）

2. 地球生態学を目指した新たな試み

講演者 1) 日浦 勉（北海道大学・苫小牧演習林）

林冠構造と機能量の直接測定とスケーリング

2) ○小泉 博（岐阜大学・流域環境研究センター）・小林和彦（農業環境技術研究所）

イネ FACE 実験の目指すもの

3) 新田慶治・○多胡靖宏（財団法人環境科学技術研究所）

閉鎖型生態系実験施設の技術とその応用

（コメンテーター）森川 靖（早稲田大学・人間科学部）

広瀬忠樹（東北大学・理学研究科）

3. 総合討論