

ゴム気球による成層圏試料回収技術について*

佐々木 徹**・牧野 行雄**・堤 之智**
 広田 道夫***・村松 久史****

1. はじめに

気象研究所においては1978年以来、夏の上層風の弱い時期を選んで、ゴム気球を使った成層圏試料回収実験を重ねてきている(広田他, 1982)。これまでに50回の実験を行い、そのうち47個のゾンデの回収に成功している。回収率は、94%である。

採集された成層圏試料はガスクロマトグラフィにより分析され、CFC-11や12、一酸化二窒素等の鉛直分布が測定されている(Hirota *et al.*, 1988)。

ゴム気球を使った実験は、搭載重量が限られているために、1度に採集できる空気試料が少ないなどの欠点があるが、大気球などに比べはるかに安価で、高層気象観測設備のあるところならばどこでも行えるなどの利点もある。ただ、回収に関して、従来は地上落下後に発見者からの連絡を待つという方法に頼らざるを得ず、回収の遅れから試料の劣化を招いたこともあった。しかし最近、落下位置の予測と探索の技術に関して顕著な進歩を遂げ、迅速な回収が可能となった。

気象ゾンデの落下位置の予測技術は既に開発され、特殊ゾンデの落下時の事故防止を目的として利用されてきた(三浦, 1966)。また、大気球を使った実験では、ガス抜きやバラストの投下によって巡航高度を調節し落下位置を制御する技術や、落下したゴンドラをその発信電波を頼りに探索する技術も確立している。ここで紹介する技術は、小型ゴム気球に関する回収技術の発展を目的として、パソコンによる落下位置の迅速正確な予測と、

携帯型の受信機による確実な探索を実現したもので、安価なゴム気球を使うことによって、これまでになく広い利用を可能とするものである。

2. 落下位置予測技術

三浦(1966)は、気球実験の安全の確保を目的として、落下位置を飛揚前に予測することを行っている。その方法は、ある層内を移動するゾンデの向きは上昇時も下降時も一定で、その距離はその層を通過する時間に比例するとの仮定をおいて求めるものである。その際使用したデータは直前のルーチン観測の飛行経路であり、また厚さ10 kmの大気層毎の標準的な上昇下降速度を使っていたので、11例についての落下位置の予測誤差は、10~42 kmであった。

ここでは、事前の安全確保のためばかりではなく、気球が下降中に実験者が落下位置に事前に赴き、確実にゾンデを回収することも目的とし、迅速かつより精度の高い予測法の開発を試みた。予測法の基本は三浦の方法と同じであるが、観測中の実際の上昇速度と水平位置を元に落下位置を予測できるよう改良し、予測誤差は1 km~数 kmと格段に向上させることができた。もちろん実験の安全確保を目的として、直前のレーウィンゾンデの上昇データから、飛揚前に予め落下位置を推定することも可能である。

第1図に、ゾンデの飛行経路(上)及び上昇下降の曲線(下)が模式的に描かれている。上昇時の飛行経路、及び上昇曲線のデータをもとに、経験的に得られた下降曲線を利用して、下降時の飛行経路と地上での落下位置を予測する方法を述べる。

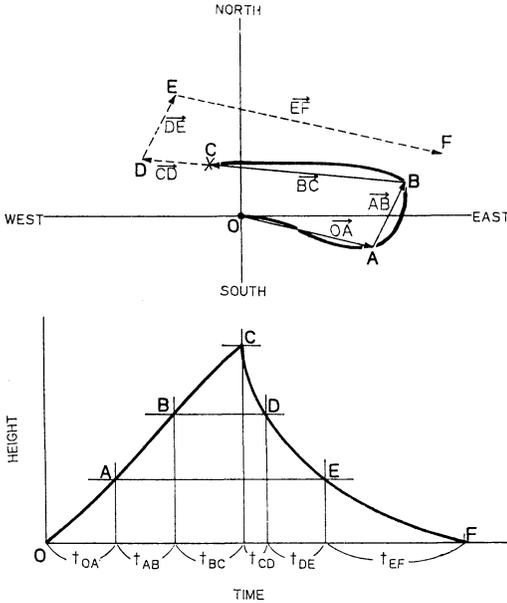
本実験の場合、約4 kgのゾンデ重量に対し、2.4 kgの純浮力を与えて、毎分350m~400mの上昇速度で飛揚する。上昇中の上昇速度の変化は小さい。一方、BB(気球破裂)あるいは気球切り離し後のゾンデは自由落下を開始した後、まもなく半径1.3 mのパラシュートによる減速を受けた落下状態にはいる。空気抵抗が少ない高層

* Technics of Recovery Experiment of Stratospheric Grab-sampling by Rubber Balloon Sonde.

** Toru Sasaki・Yukio Makino・Yukitomo Tsutsumi, 気象研究所.

*** Michio Hirota, 気象庁海洋気象部海洋課汚染分析センター.

**** Hisafumi Muramatsu, 京都大学防災研究所.
 ——1990年3月20日受領——
 ——1990年7月7日受理——



第1図 ゾンデの飛行経路(上)及び上昇下降曲線(下)の模式図。破線は、予測される下降時の飛行経路である。

では下降速度はきわめて速く、30 km 付近では毎分1,500 mにも達する。下降するにつれ指数関数的に減速し、地表付近では毎分 160 m 程度にまで落ちる。

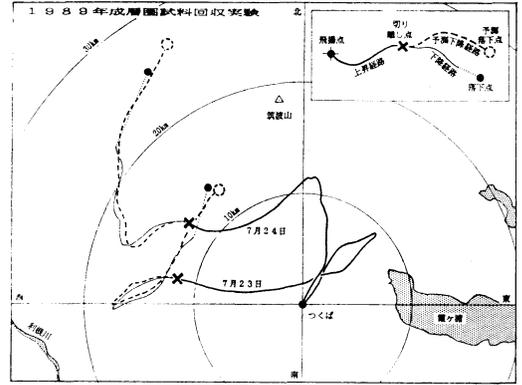
簡単のため、ゾンデの到達高度を、O、A、B…と記号をつけて3層に分割し、それぞれの層内での飛行経路を考えることにする。それぞれの層内での平均の風は、上昇時においても下降時においても変化しないものとする。すると、ある層内を通過する間に風で流されるゾンデの移動は、上昇時も下降時も方向は同じで、距離はその層を通過するのに要する時間に比例するはずである。

そこでまず、CからDまでの移動を計算する。上昇下降曲線を見ると、上昇時のBからCまでの経過時間は t_{BC} 、また下降時のCからDまでの経過時間は t_{CD} であり、BからCまでの水平位置変化を、ベクトルで \overline{BC} と表現すれば、下降時のCからDまでの水平位置変化は、

$$\overline{CD} = (t_{CD}/t_{BC}) \times \overline{BC}$$

となる。同様にして、DからE、EからFまでの水平位置変化が求められる。下降時の水平位置変化を次々に繋ぎ合わせるにより、下降時の途中の飛行経路、及び最終的な地上落下位置が求められる。

下降曲線は、これまでの実験による経験式を用いる。半径 1.3 m の特殊ゾンデ用パラシュートを用い、およ



第2図 1989年夏の成層圏試料回収実験におけるゾンデの飛行経路。実線が実際の経路、破線が気球から切り離されたときに予測された経路。

そ 4 kg の荷物を搭載する採集ゾンデの場合には、
 $t - t_{cut} = 0.064 \times (p - p_{cut}) + 3.3 \times \ln(p/p_{cut})$
 という経験式が得られている。t は分単位の時間、p は mb 単位の気圧で、添え字の CUT はゾンデが気球から切り離されたときの時間、気圧を意味している。ゾンデの重量等により、この経験式は常に適用できるとは限らないが、パラメータを調整することで、どのようなゾンデにも応用可能と思われる。

採集ゾンデの場合、実際には2分毎のデータを用いて下降時の水平位置を予測するようにしている。第2図は、1989年夏の2回の実験でのゾンデの水平位置の変化を示している。太い実線が上昇時、細い実線が下降時の実際の飛行経路であり、飛行経路の不明確な点線部を経て黒丸が確認された地上落下位置である。破線は、気球を切り離れた時点で、上の方法を用いて予測された下降時の飛行経路と地上落下位置である。2回の実験での地上落下位置の誤差は、約 1 km および約 3 km であった。

上空の風が比較的弱く、落下地点が飛揚地より 20 km 圏内で、実験の継続中に上空の風が大きく変化しないような条件に恵まれれば、予測落下地点と実際に落下が確認された地点との誤差は、一般的に 1 km 程度以内であった。しかし、上空の風が大きく変化しているときや、下降速度が経験式からはずれるときには、4~5 km の誤差を生むこともあった。そこで下降時には、そのつど確認された位置を基準に、実際に観測された下降速度を

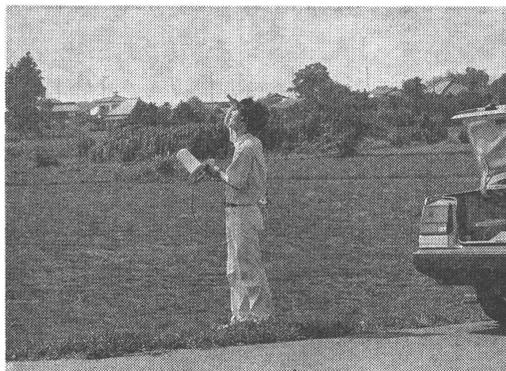


写真1 携帯型のゾンデ受信機によって電波の到来方向を探索する。

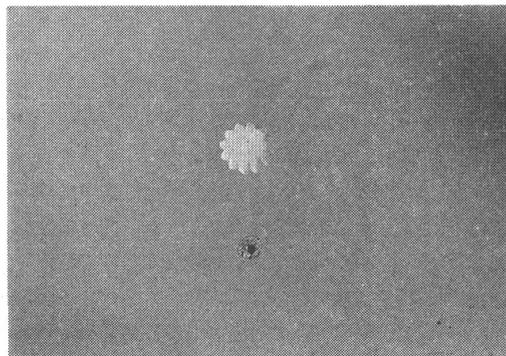


写真2 パラシュートで下降中の採集ゾンデ。

もとに下降曲線にも修正を加えて、その後の下降飛行経路を予測するようにしている。

3. 携帯型ゾンデ受信装置による探索

落下地点が予測地点より 1 km 以内にあるような場合には、現地で下降中のゾンデを視認する事は容易である。しかしそれ以上になると、必ずしも容易とはいえず、また下降中のゾンデを確認しても、最終落下地点を見失うことも珍しくない。この様なときのために、現地でゾンデからの電波を頼りに探索できるよう、回収用受信機（明星電気製 RR-13B）を整備した。

この受信機は、携帯型のゾンデ受信機で、通常の気象ゾンデの信号（周波数 1660~1700 MHz）を受信し、周波数変換、AM 検波を行った後、交流成分信号を出力する。この信号はヘッドホンのスピーカを駆動するとともに、復調機を接続することでゾンデの観測記録をとることも可能である。電源は、リチウム電池を6本使い、24時間以上の使用が可能である。

写真1にみるように、受信機本体（1.4 kg）は肩にかけ、小型のアンテナ（1.5 kg）を手に持ち、受信状態をモニターするヘッドホンをつけ、受信信号の音量により電波の到来方向を探索する。メインロープの角度は約40°で、正確な方向探知には不適當であるが、この程度の電波到来方向がわかれば、後は目視でゾンデを確認することが可能である。ゾンデ落下後も、距離が近ければ、あるいは樹木等に吊り下げられていれば、十分に受信は可能である。

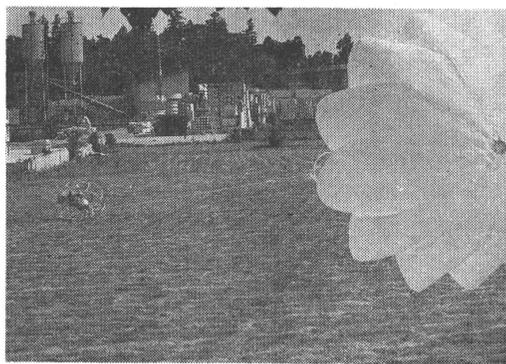


写真3 地表に落下した採集ゾンデ。直ちに回収された。

4. 回収実験の結果

1989年夏には、つくばの高層気象台から2台の試料採集ゾンデを飛揚し、落下位置予測、回収用受信機の機能を十分に活用して、2回とも落下後1時間以内に観測者自身による回収が行われた。

ゾンデの飛行経路、及び下降時の予測経路、落下位置については第2図に示した通りである。1回目の7月23日の実験では、32 mb で空気試料を採集、26 mb で気球から切り離し下降を開始した。当初の予測落下位置との誤差は1 km、また下降データをもとにした修正予測位置とは、0.8 km のずれであった。回収班は、予測位置が計算された後速やかに現地に向かい、落下時刻のおよそ20分前には、回収用受信機の助けを借りて、下降中のゾンデを視認する事ができた（写真2）。ゾンデが位置を変えるのにもない、回収班も自動車を使って移動した結果、落下の瞬間には、落下地点から 300 m の距離に接近することができ、ゾンデは直ちに回収された（写真3）。

これまでの回収実験で、最短時間の回収記録であった。

2回目の7月24日の実験では、70 mb で採集、57 mb で切り離しをした。上層の風系が変わり目に当たっていたことにより、落下地点は予測地点より南南西に3 km 程ずれた。回収班は、回収用受信機を使って移動し、落下前には発見することができた。しかし、落下地点は、視界が阻まれたために確認できなかった。落下前の動きから、およそ200 m 四方の位置を目測で推定した後、現場で回収用受信機を使って探索した結果、ある民家の竹林から電波が発信されていることを確信した。真下と思われるところでも、容易には視認できなかったが、その住人に協力を願って探索した結果、竹林の上にかくれたゾンデを発見、回収に成功した。この実験の場合、回収用受信機がなければ、観測者自身による発見はおろか、住人による発見も相当遅れたと思われる。回収用受信機の威力をまざまざと見せつけた実験であった。

5. おわりに

この様に、落下位置予測法、及び、回収用受信機の機能を十分に発揮させることにより、実験者自身による回収、しかも落下後時間をおかずに回収することが可能になった。これは、得られる成層圏試料の品質を高める上にも、実験の安全性を高める上からも、きわめて大きな

進歩であった。

成層圏を含む地球大気について大きな関心が寄せられる現在、気球による実験は直接観測という点からますます重要性を帯びてきている。ここで述べたゴム気球を使った実験は、最も簡便な方法であり、さらに改良を重ね安全性を高めつつ幅広い応用を期待したい。

落下位置予測のプログラム開発は、筆者の一人が行ったが、提供が可能である。関心のある方は、問い合わせ願いたい。プログラムは、MS-DOS 上の N88-BASIC で作られており、PC 98 や PC 286 で使用されている。

参考文献

- 広田道夫, 村松久史, 牧野行雄, 外山芳男, 佐々木徹, 1982: ガスクロマトグラフ法による対流圏及び成層圏微量化学成分の分布の測定, 気象研究所技術報告第6号, 第1章, 5-41.
- Hirota, M., H. Muramatsu, T. Sasaki, Y. Makino and M. Asahi, 1988: Atmospheric concentrations and distributions of CF_2Cl_2 , $CFCl_3$ and N_2O over Japan between 1979 and 1986, J Meteor. Soc. Japan, 66, 703-708.
- 三浦四郎, 1966: ゾンデ落下点の推定法, 研究時報, 18, 522-526.

第4回 WCRP シンポジウム開催のお知らせ

本年度も下記の予定で WCRP シンポジウムを開催致します。参加ご希望の方は講演申込先までお申込み下さいますようお願い申し上げます。

記

開催期日: 平成2年11月26日(月) 13:00~17:00

(夕方懇親会)

11月27日(火) 9:00~17:00

11月28日(水) 9:00~16:30

開催場所: 愛知県勤労会館小ホール

(名古屋市昭和区鶴舞1丁目2番32号)

TEL: 052-733-1141(代表)

申込締切: 平成2年10月20日(土) 必着

申込送付先: 〒464-01

名古屋市中千種区不老町

名古屋大学水圏科学研究所

武田喬男

TEL: 052-781-5111内線5740

問い合わせ先: 石坂 隆

TEL: 052-781-5111内線5733または

研究協力事務局

TEL: 052-781-5111内線5709, 5750