

回収された落下ゾンデに関する調査

熊本 真理子*・佐藤 昌志*・日野原 正巳*・金子 哲治*

Investigation Concerning Collected Fall Sondes

Mariko KUMAMOTO, Masashi SATO, Masami HINOHARA and Tetsuji KANEKO

要旨

2002年10月より観測終了後の落下ゾンデについて、発見者からのフリーダイヤルによる通報受付が始まり、高層気象台では2004年12月までに97件の落下ゾンデに関する通報があり、観測第二課職員による落下追跡で回収した4件を含め、101件について調査を実施した。

事例を調査したところ、パラシュートが開き正常に機能している場合は、地上付近での落下速度が4m/s以下で、気球の残量による落下速度の差異が認められなかった。また、落下速度が5m/s以上の場合、パラシュートの中ひもや支えひも付近に、巻下器やパイプ取付板、気球残骸が絡んで次第にパラシュートの支えひもが撚れて絡むことにより、パラシュートの開傘が妨げられたと思われる状況がほとんどであった。

1. はじめに

高層気象観測では飛揚したラジオゾンデを、観測終了後緩降下させるため、パラシュートを使用している。高層気象台でラジオゾンデを飛揚した場合、通常その多くは上空の強い西風に流されて海上に落下するが、上空の西風が弱まり成層圏付近で東風となる暖候期は、大気の状態によっては陸上に落下することがある。パラシュートが開いても、まれに電線や家屋の屋根等にひっかかる場合もある(肆矢ほか：2001)。

このため高層気象台では、パラシュートの改良やパラシュートの機能を阻害しないための中間取付タイプのパイプセパレータ方式によるパラシュート接続方法(以下「中間セパ」と称す。形態と各部の名称について図1に示す)などの開発を行っている(成田ほか：1999)。なお、中間セパ使用時は約93%の開傘率となっている(地上付近の落下速度5m/s以下の場合を「開傘」、それより大きい場合を「非開傘」と称す)。

気象庁では2002年10月以降、フリーダイヤルによる落下ゾンデ発見者からの通報受付、および「ゆうパック」による回収を開始した。高層気象台には2004年12月まで97件の通報があり、このうち回収を行ったものは63件であった。これらの他に観測第二課で降下中のゾンデを追跡し、回収した4件を加え、落下ゾンデ通報の時期や落下状況等についての調査を行った。

2. 落下ゾンデ通報と落下状況

落下ゾンデ通報の件数は2002年10月～2003年12月までに52件、2004年は45件で、通報のあったゾンデは、各年とも4月から10月までの間に飛揚したものであった。落下ゾンデ通報の月・旬別件数を図2に示す。通報は7月から8月にかけて多く、この期間に全体の約3分の2があり、なかでも8月上旬が最も頻度が高く2003年は13件、2004年は11件であった。多い時には1日に3件の通報があった。

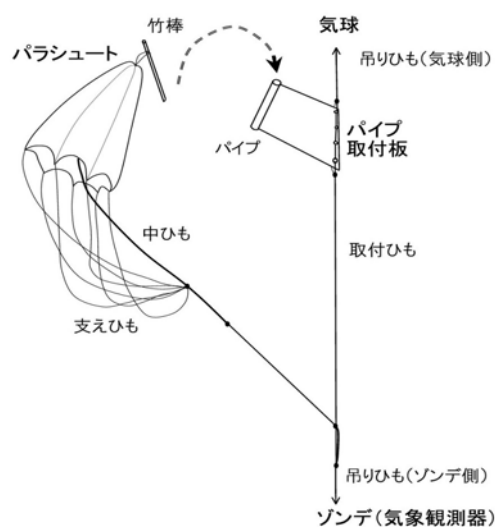


図1 中間取付タイプのパイプセパレータ方式の接続

*高層気象台 観測第二課

追跡して回収した4件を含む101件の県別落下ゾンデ件数は、茨城県が49件(約半数)、千葉県20件、東京都10件、埼玉県9件、栃木県6件、福島県・群馬県・神奈川県が各2件、山梨県が1件であった。落下した主な場所は、水田・畑・堤防などが27件、民家や会社が24件で、立木や電線などにひっかかったのが28件であった。

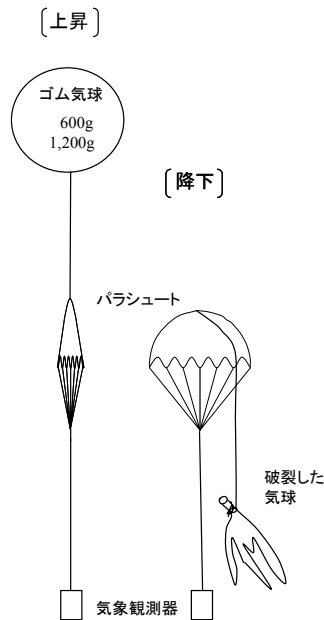
3. 回収ゾンデに関する調査

回収された67件の内、気球残骸を含め飛揚器材が回収された47例について、気球残量等の調査を行った(レーウィンは2例しかないため、これ以降の調査では除く)。気球には製造過程の違うものがあり、それぞれA気球、B気球で示す。気球の種類は、ラジオゾンデの種類によって600g、1,200g、2,000g気球と異なり、また飛揚器材の重量に対応してパラシュートの大きさ(1辺の長さ)や素材が異なる。

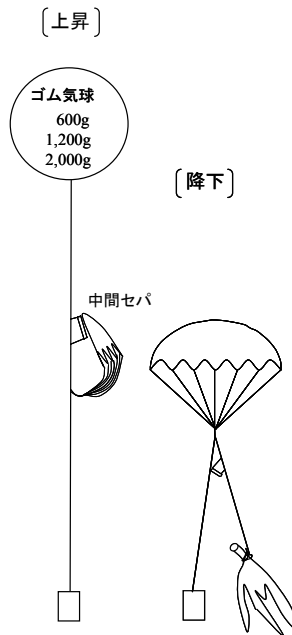
観測時(上昇)と気球破裂後の降下時の形状について図3に示す。通常は①直列のように気球とパラシュートおよび気象観測器を吊りひもで連結し(観測値への気球の影響を防止するため、気球と気象観測器は一定距離の間隔をおくこととしている)、気球が割れた後はパラシュートが開いて約半分の長さになって緩降下する。600g、1,200g、2,000g気球を使用する場合は、吊りひもの長さはそれぞれ約15m、30m、50mである。なお、予め陸上落下が予想

される場合は、パラシュートに気球残骸やひもが絡むことを防ぐために、②のように中間セパを使用する。また、強風時には③のように気球と観測器の距離が短く、上昇するにつれてひもが次第に伸び、十分な長さになる巻下器を使用する。

①直列(レーウィンゾンデ)



②中間セパ使用時



③巻下器使用(強風時)

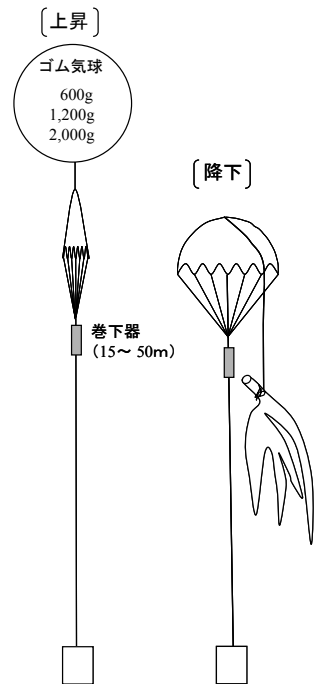
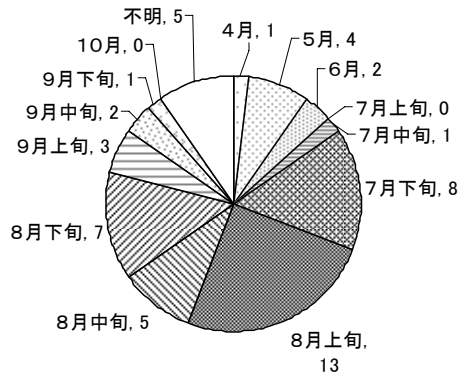


図3 飛揚形態別の上昇および降下時の形状

2002年10月~2003年(52件)



2004年(45件)

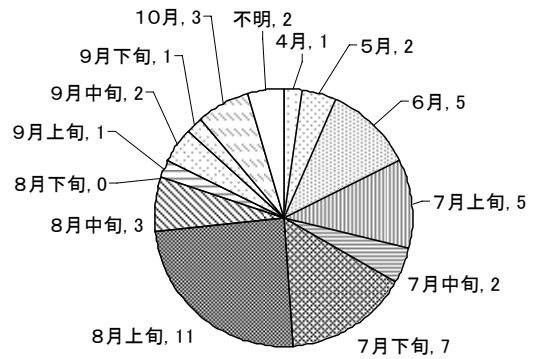


図2 通報があった落下ゾンデの飛揚月・旬別件数

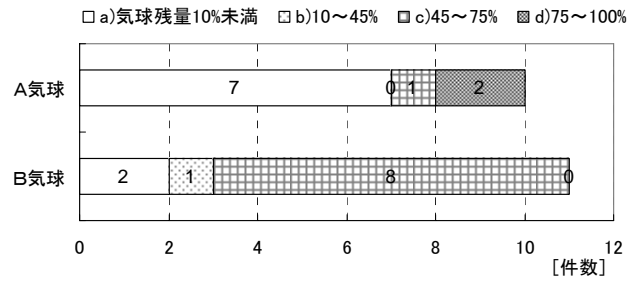
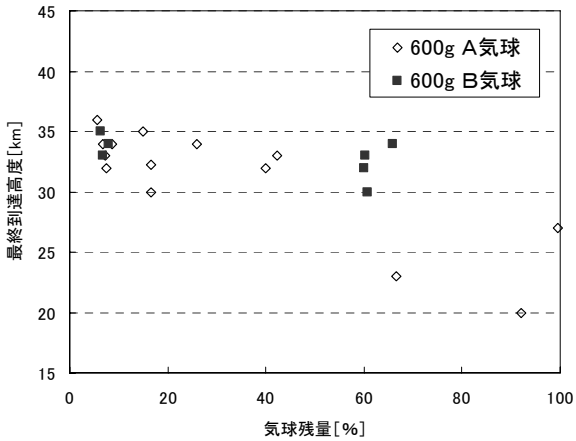


図5 到達高度約36km以上における気球残量 (1,200gと2,000g気球)

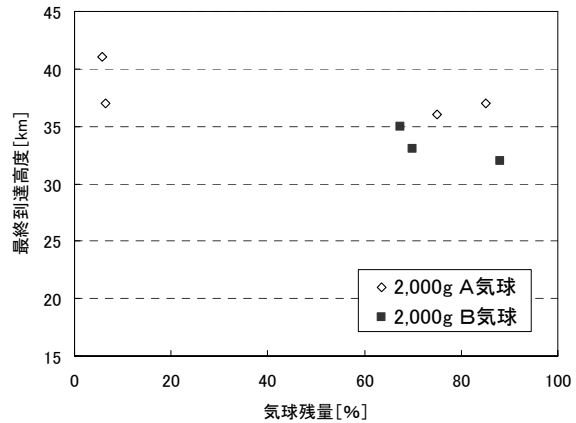
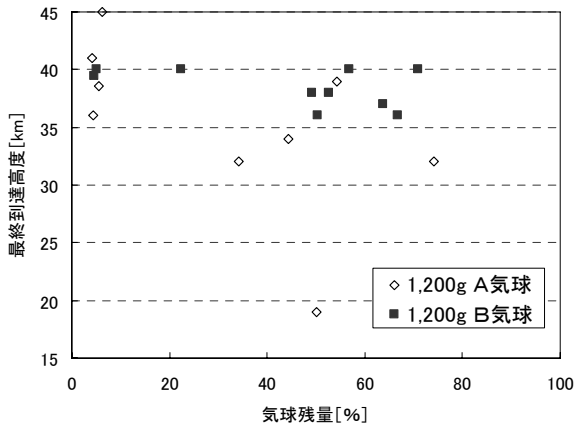


図4 到達高度と気球残量 [%] の関係 (上:600g気球, 中:1,200g気球, 下:2,000g気球)

3.1 到達高度と気球残量の関係

600g, 1,200g, 2,000g気球について, 到達高度と気球残量(気球の総重量に対する回収された重量の比率)の関係を図4に示す. 到達高度30km以下の場合, 4件で(600g A気球が3件, 1,200g A気球が1件)気球残量は40%以上

あり, 中でも2件は気球残量90%以上と多いが, 到達高度30~45kmでは5~90%の範囲に様々に分布している. A, B気球ともに到達高度が高くなるにつれて, 気球残量が減少する傾向がある. 気球が高い高度で破裂する場合は気球全体がゴム膜の伸張限界に達して割れ, 低い高度で破裂する場合はゴム膜への着氷などによって傷がついたり(菊池:2004), ゴム膜の弱い部分から割れて, その割れ方によって気球残量が異なると考えられる.

図5は1,200gと2,000g気球で到達高度が約36km(5hPa)より高かった場合について, A気球とB気球の気球残量の分布を図示したものである. 気球残量別 a)口管部のみの10%未満, b)10~45%, c)45~75%, d)75~100%の件数を比較すると, A気球ではa)が7例で最も多く, B気球ではc)が8例で最も多い. A気球とB気球の残量に顕著な差が認められ, 気球の製造過程の違いによって, 破裂の状態が異なると推測される.

3.2 気球残量および飛揚形態と地上付近の落下速度との関係

調査を行った事例の飛揚形態(図3)は, ①直列2例, ②中間セパ使用43例, ③巻下器使用2例(オゾンゾンデのみ)である. 飛揚形態別に, 地上付近の落下速度と気球残量の関係を図6に示す.

1) 気球残量別

パラシュートの違いによって地上付近の落下速度は異なるが, パラシュートが機能していれば気球残量が多くても, 落下速度は2~4m/sである(渋谷ほか:2001). このことは図6からもわかる. 特に気球残量が10%未満(口管部のみの場合)は, 落下速度は1~3m/sと遅い. 非開傘は10例で, a)気球残量10%未満2例(小型の調査用パラシュート使用, 以下「調査パラ」と称す), b)10~45%1例,

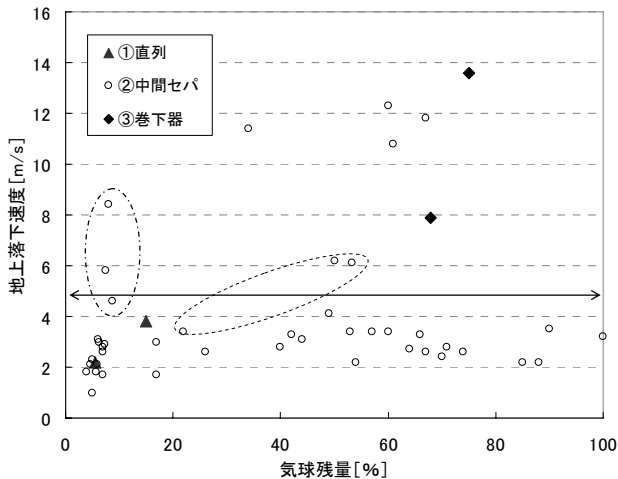


図6 飛揚形態別による地上付近の落下速度と気球残量の関係

(一点鎖線：調査パラ，点線：雨パラを使用，実線の矢印は地上落下速度 5m/s を示す。)

c) 45～75% 7例(気象観測用雨天パラシュート使用2例含む，以下「雨パラ」と称す)であった。

2) 飛揚形態別

直列(図3①)2例(図6，▲印)は，共に気球残量が20%未満と少なく開傘していた。オゾンゾンデ観測で巻下器を使用(図3③)した2例(図6，◆印)は，それぞれ大型パラシュート(以下「大パラ」と称す)とオゾンゾンデ用パラシュート(以下「オゾンパラ」と称す)を使用した，ともに落下速度は13.6m/s，7.9m/sと非開傘であった。中間セパ(図3②)を使用した43例については，落下速度の平均が3.9m/sであった。

3.3 着地予想位置と回収位置の関係

調査期間中に落下するゾンデを追跡し回収に赴き，地上落下直前の模様を2例画像に記録することができた。この内，1例はビデオ撮影を行った。どちらも降下速度が1.7m/s，3.3m/sと開傘している状況であった。写真1は2004年8月13日にパラシュートが立木に引っ掛かりゾンデと気球残骸が地面に落下した事例で，上空2,000m位から視認できた。中間セパを接続した(図3②)パラシュートからゾンデと気球残骸は垂直に吊り下がった状態で降下し，着地直前にはパラシュートがやや先行し緩やかに降下していた。

地上落下直前の着地予想位置との差は0.5km，地上付近の落下速度は3.3m/sで，パラシュートの支えひもや中ひもの燃れや絡みはほとんど見られなかった。

ゾンデを回収した位置と落下位置監視プログラム(中野ほか：1999)による着地予想位置との誤差は，調査を行った19例について，平均3.3km(最小0.4km，最大18.3km)で，地上風向の風下側にずれる場合が多かった。

3.4 非開傘で降下した回収ゾンデの状況

回収した落下ゾンデの内，非開傘は10例あった(図6)。これらの回収ゾンデは以下の状況であった。

- (1) 巻下器を使用した場合は2例あり(図6，◆印)，1例はパラシュートの支えひもに気球残骸が絡みつき，頂部まで絡みついていた場合(写真2)で，他の1例は支えひもを束ねた上部についている支えひもの絡み防止の発泡スチロール製ボール(写真2の黄色ボール)の部分に，パイプ取付板が絡みつき，その後パラシュートまで絡んでいた。
- (2) 小型の調査パラと中間セパを使用した場合は2例あり(図6，1点鎖線で囲み)，このうち1例はパラシュートの支えひもにパイプ取付板の取付ひもが絡みつき，支えひもも燃れていた。また，もう1例はパラシュートの中ひもと支えひもに何も絡んでいなかったが，支えひもが燃れていた。
- (3) 雨パラと中間セパを使用した場合は2例あり(図6，点線で囲み)，このうち1例はパラシュートの中ひもと支えひもにパイプ取付板の取付ひもが絡みつき，支えひもがパラシュートの根元まで燃れて開口部まで絞られていた。もう1例は回収した飛揚器材の中にパラシュートがなかったため，パラシュート機能の阻害状況は不明である。
- (4) 気象観測用パラシュート(以下「晴れパラ」と称す)または高高度観測用パラシュート(以下「高パラ」と称す)と中間セパを使用した場合(図3②)はそれぞれ2例ずつ4例あった。このうち3例は，パイプ取付板がパラシュート支えひも3本以上に絡んでいた。

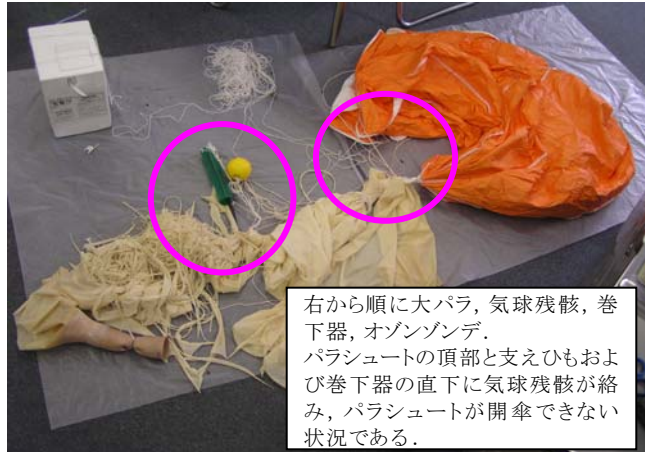
パラシュートが絡んだ状況を写真3に示す。パラシュートの支えひもは，(a)③や(b)②のように，パイプ取付板が絡んだところからパラシュート支えひもを束ねた部分までの長さだけ短くなり，パラシュートの開口部は狭められている。また，パラシュートの支えひもは，パイプ取付板が絡んだ中央部分から上下方向に向かって燃れてゆき，(b)①のように気球残骸を巻き込んでパラシュートの開傘を阻害したことがわかる。

なお，開傘事例(地上付近の落下速度1.8～4.1m/s)にもパイプ取付板がパラシュートの支えひもに絡んでいる

回収された落下ゾンデに関する調査

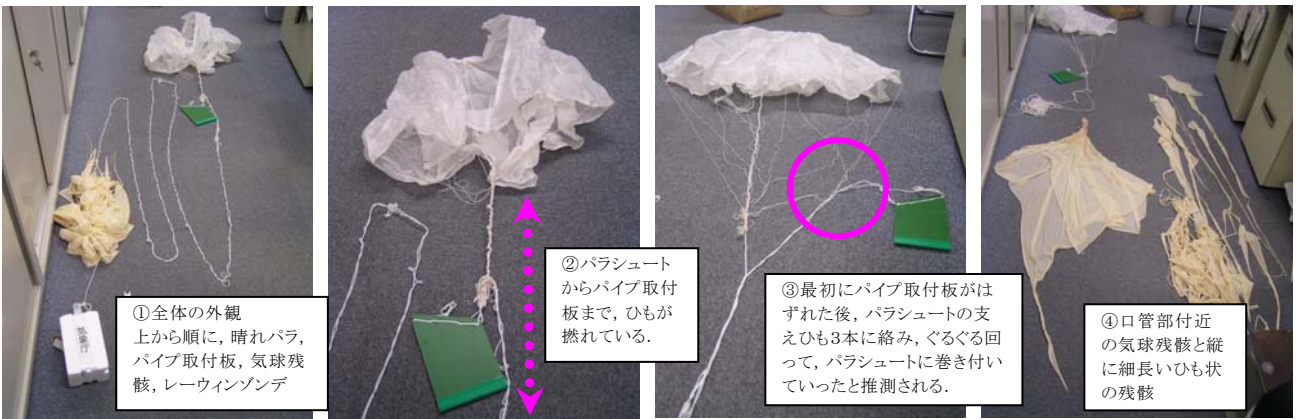


写真1 地上落下直前のレーウィンゾンデ(加筆)



右から順に大パラ、気球残骸、巻下器、オゾンゾンデ。
パラシュートの頂部と支えひもおよび巻下器の直下に気球残骸が絡み、パラシュートが開傘できない状況である。

写真2 巻下器を使用した場合の非開傘の事例
(地上付近の落下速度 13.6m/s)



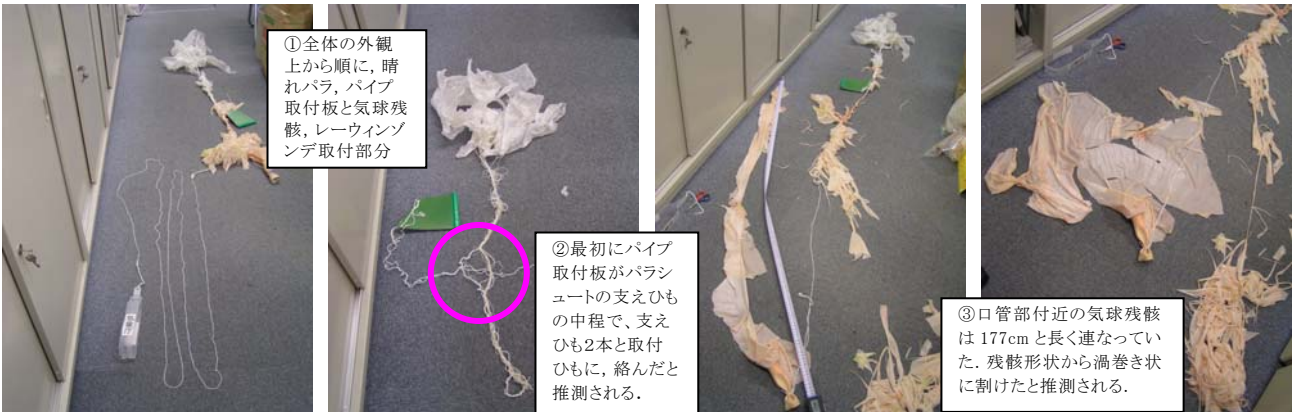
①全体の外観
上から順に、晴れパラ、パイプ取付板、気球残骸、レーウィンゾンデ

②パラシュートからパイプ取付板まで、ひもが燃れている。

③最初にパイプ取付板がはずれた後、パラシュートの支えひも3本に絡み、ぐるぐる回って、パラシュートに巻き付いていったと推測される。

④口管部付近の気球残骸と縦に細長いひも状の残骸

(a) 地上落下速度 10.8m/s の事例 (A気球, 気球残量 364g : 気球総重量の 61%)



①全体の外観
上から順に、晴れパラ、パイプ取付板と気球残骸、レーウィンゾンデ取付部分

②最初にパイプ取付板がパラシュートの支えひもの中で、支えひも2本と取付ひもに、絡んだと推測される。

③口管部付近の気球残骸は 177cm と長く連なっていた。残骸形状から渦巻き状に割けたと推測される。

(b) 地上落下速度 12.3m/s の事例 (B気球, 気球残量 360g : 気球総重量の 60%)

写真3 パイプ取付板がパラシュートのひもに絡んだ2つの事例

のが 4 例あったが、いずれもパラシュートの支えひも 1 ~2 本への絡みで開傘を阻害するまでに至らなかった。

4. 気球製造会社における気球破裂試験

気球を製造している会社の協力の下、100g、600g、1,200g 気球の破裂試験に立ち合い、破裂の瞬間等をビデオ撮影した。気球破裂試験は口管部を天井に吊し、空気を充填して行われた。破裂試験の様子を写真 4 に示す。①は 100g 気球が膨張限界に達して、口管部と小さい多数の破片に炸裂した例、②は 600g 気球が膨張限界に達する少し前に、

気球の左下((b)の白矢印)から針で刺したことにより、縦方向に細長く 6 片に分かれて破裂した例、③は 1200g 気球が膨張限界まで膨らんで大きく 3 分割した事例である。

ビデオ画像の分析からは写真 4 の各気球(b)のように、割れた瞬間の 0.1 秒後に気球が分裂し、0.1~0.2 秒後には破片は最初に亀裂が入った部分から反対方向へ縮みながら飛び散った。

① (b)のように口管部付近で割れた場合は、口管部を残して小さい破片に分裂し、破片は気球の頂部に向かい、瞬時に気球の頂部のあった真下へ落下した。気球製造会

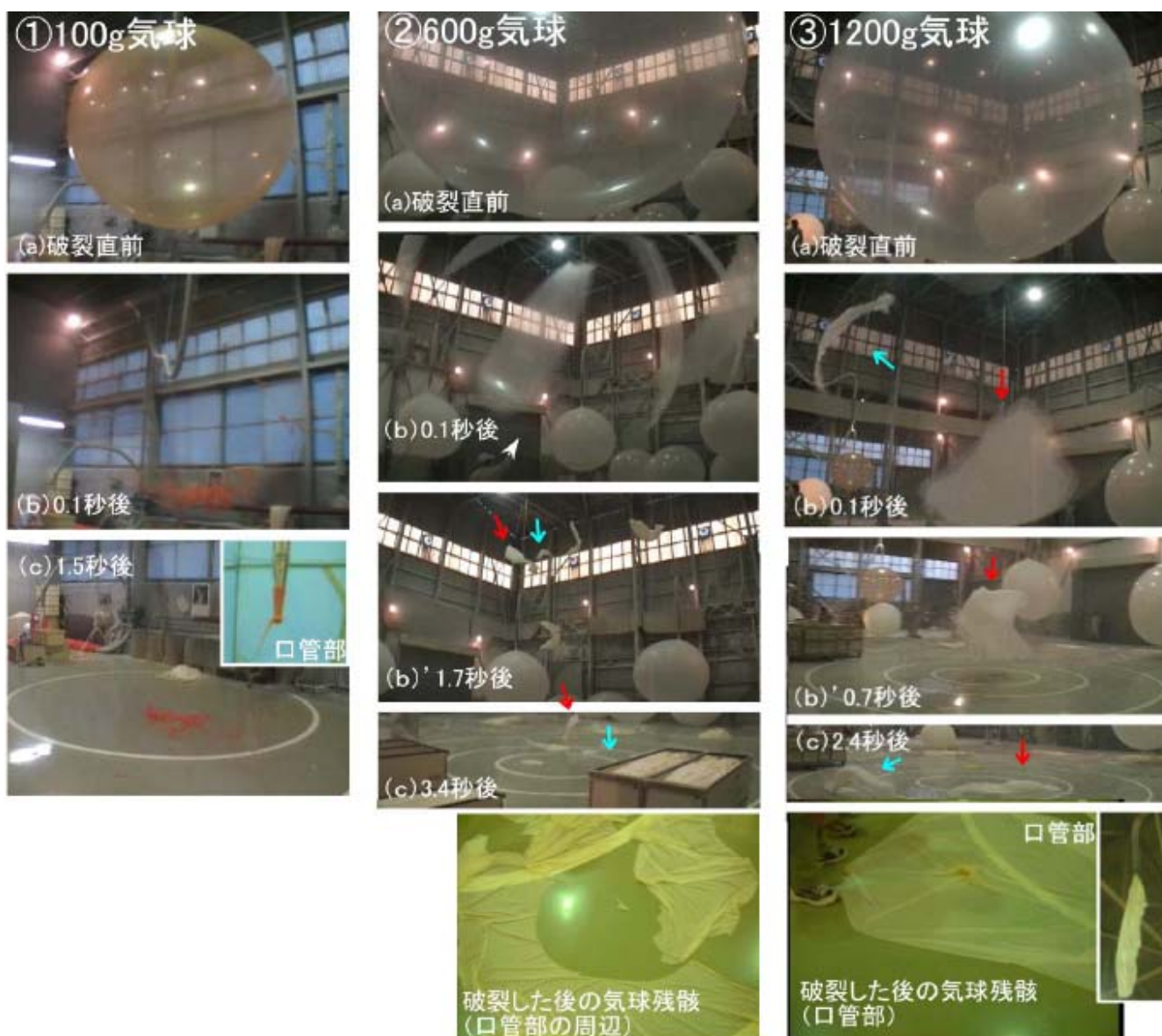


写真 4 気球の破裂試験

左：100g 気球が上下方向に細かく破裂して飛散した例，中：600g 気球に左側下方から針を刺して((b)白矢印)故意に破裂させた例，右：1,200g 気球が大きく 3 分割した例。
赤・青矢印：それぞれの気球の破片を示す。2004 年 12 月 20 日気球製造会社で撮影。

社の説明によると、ゴムとしての弾性限界に達して破裂した場合は、このような小さい多数の破片に分裂することである。

② (b)のように気球の頂部へ針を刺して割った場合、破片は割れたところと反対側の口管部へ飛び散った後、3～4秒後に変動しながらゆっくり降下した。

③ (b)のように口管部から3片に大きく割れた場合は、気球頂部の大きな残骸は約1秒後に直下に落ち、側方の破片は一度口管部方向へ飛び散り、2.4秒後にやや離れた位置に降下した。

②、③のように、気球が8m近く大きく膨らんだ場合であっても、気球残骸は中心から約2～3m付近に大部分が降下した。

5. 非開傘に至る過程について

1) 回収ゾンデからの考察

非開傘にいたる過程として、図3②の飛揚形態の場合は、パイプ取付板がパラシュートの支えひもに引っかかって絡みつき、その後支えひもが撚れて(この時気球残骸が絡みつくこともある)、パラシュート本体の方向に進み、結果的にパラシュートの開口面積を縮小させたと推測される。

2) 気球破裂試験からの考察

破裂試験では口管部が上部に吊されていたが、上空では口管部が下部にあり前節の破裂試験とは上下逆となる。また上空では低温下のため、ゴムの弾性が小さくなるなど気球破裂時の条件は地上での試験と異なり、上空の風の強弱や風向の変化など、破裂時の気象状況によって破裂した破片の飛ぶ方向や速度は異なるであろうが、気球製造会社における破裂試験から以下のことが推測される。

(1) 気球の口管部付近で破裂し、多数の小さな破片に分裂する場合、

気球破裂と同時に破片は気球の頂部に向かって縮み、その後降下を始める。このため、破片がパラシュート付近まで到達する時間は長くなり、破片は空気抵抗を受けて様々に運動し散らばる。このことから気球の破片がパラシュート本体もしくは支えひも付近に絡む可能性は低い。

(2) ゴム気球頂部への着氷等により、損傷を受け破裂する場合、

破裂試験では口管部が上にあったため、6～8片の縦に炸裂した後、写真4の②(b)のように上に向かって縮み空気抵抗を受けて様々に運動し、パラシュート付近に到達する頃には、やや離れた所に降下する破片が多

かった。しかし、上空では下方に向かって縮むため、破裂試験よりも破片の落下速度は速くなる。このため破片が絡む可能性はあるが、破片はそれほど大きくなく、パラシュートの開傘を妨げる可能性は高くない。

(3) 気球の頂部または側方で破裂する場合、

気球残骸は数個の大きな破片に分裂し、口管部付近の大きな破片は直後に真下に落下し、パラシュート本体もしくは支えひも付近に絡む可能性が高い。

6. 非開傘防止のための改善に関する考察

回収された落下ゾンデの調査から、パラシュートの非開傘を防止するためには、以下の点について改良が必要と考えられる。

(1) 中間取付タイプのパイプセパレータ方式に関する改善。

パイプ取付板が気球破裂直後に真下に落下して、パラシュートの支えひもに絡むことや、パイプ取付板が回転して、パラシュートの中ひもや支えひもが撚れていくのを防止する方策として、次の改善が考えられる。

ア. パイプ取付板を小型化するか、もしくは風が通り抜けやすい形状にする。

イ. 図1のパラシュートの中ひもを現行より長くし、取付ひもとの結び位置をパラシュートから遠くする。また、中ひも、支えひもおよび取付ひもに用いるひもを撚りのないものに替える。

(2) 巻下器使用時には、気球残骸がパラシュートに悪影響を与えないように、気球とパラシュート間に用いるひもを長くする。

気球は破裂直前には直径約8～13mもの大きさに膨らむため破片は広がって飛び散りそうであるが、破裂試験においてはゴムの弾性によって縮むため、中心から半径2～3m付近にほぼ大部分が落下していた。このことから、気球とパラシュート間の距離を4～5m以上に離れた方が、気球残骸がパラシュートの支えひもに絡む可能性を少なくすると考えられる。

(3) 気球破裂形状の画一化。

写真4の①(c)のように、気球が多数の小さな破片に裂けるようにする、また、口管部から割れるように、気球の製造過程を工夫し画一化を図る。

7. まとめ

回収された落下ゾンデは、開傘率の高い中間セパによるパラシュート接続で飛揚したものが大半であった。回収した落下ゾンデを調査することによって、気球破裂後の気球残骸やパラシュート、巻下器、またそれらを結ぶ

取付ひもの状態について、これまで得られなかった情報を得ることができた。また、落下ゾンデの追跡調査により、地上付近に落下する様子や着地直後の状況について情報を得ることができた(郵送により回収したゾンデは、梱包することによるひもの絡みが加わっている可能性がある)。

これらの調査から以下のことがわかった。

(1) 落下ゾンデ通報に関すること。

- ア. 1年間の通報は約50件で、7月から8月に集中し、中でも8月上旬に最も多く11~13件の通報があった。
- イ. 県別では茨城県が約半数の49件で、千葉・東京・埼玉・栃木の順に多く、福島・群馬・神奈川・山梨からも通報があった。
- ウ. 落下した場所は、水田・畑・堤防などが27件、民家・会社が24件で、合わせると約半数であった。立木・電線にひっかかる事例も28件あった。

(2) 回収ゾンデの調査からわかったこと。

- ア. 気球残量と到達高度の関係から、到達高度が高くなるにつれて、気球残量が減少する傾向にあった。到達高度約36km以上の場合、気球の製造過程の違いによる差が認められ、A気球では気球残量10%未満(口管部のみ)が最も多いが、B気球では気球残量45~75%が多い。
- イ. 気球残量および飛揚形態と地上付近の落下速度の関係から、パラシュートが障害なく機能していれば、気球残量100%であっても地上付近の落下速度は3m/s以下であった。非開傘は10例あり、気球残量10%未満(口管部のみ)の場合は2例(小型の調査用パラシュートを使用)で、気球残量10~45%は1例、45~75%は7例であった。

(3) 非開傘の状況。

- ア. 巻下器を使用した2例の非開傘状況は、1例はパラシュートの支えひもに気球残骸が絡みつき、頂部まで絡みついていた。他の1例は支えひもの絡み防止の発泡スチロール製ボールに、パイプ取付板が絡みつきパラシュートまで絡んでいた。
- イ. 晴れパラまたは高パラと中間セパを使用した場合の非開傘はそれぞれ2例ずつ4例あった。このうち3例は、パイプ取付板がパラシュートの支えひも3本以上に絡んでパラシュートの開傘を阻害していた。

(4) 非開傘防止の改善点。

- ア. 中間セパ方式により飛揚する場合は、気球破裂直後にパイプ取付板がパラシュートの支えひもに絡まないようにするため形状を改善する。
- イ. 巻下器により飛揚する場合は、気球とパラシュート間のひもを長くすることにより、気球残骸がパラシュートに与える影響を少なくする。
- ウ. 気球製造過程による気球破裂形状の画一化を図る。

今回の調査では、2002年10月~2004年12月の101例について調査したが、実際、気球残量を調査できたものは47例と事例数が少なかった。

今後さらに事例数を増やし、落下状況を詳細に調査することにより、開傘率向上のための改善点を検討する必要がある。

謝 辞

今回の調査に関して、気象庁観測部高層気象観測室にご協力頂きました。観測第二課の阿部豊雄課長をはじめ課員の皆様にはご助言、ご協力を頂きました。また本稿の執筆に際し、気球を製造している会社には気球の製造に関する情報や貴重な御助言を頂きました。また、本稿に貴重なご助言を下された査読者及び担当編集委員の方々に深く感謝の意を表します。

引用文献

- 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(CD-ROM). 気象庁.
- 中野辰美・坂尻政市・肆矢朗久・長井勝栄・阿部豊雄(1999): ゾンデ落下位置監視プログラムの開発. 高層気象台彙報, 59, 13-24.
- 成田 修・大胡田輝信・瀬堀パトリック・鳥井克彦・峯野秀美(1999): パイプセパレータ方式パラシュートの開発. 高層気象台彙報, 59, 1-12.
- 渋谷 昇・鎌田浩嗣・阿部豊雄(2001): 高層気象観測用気球に関する諸特性の調査一到達高度・上昇速度・ガス漏洩量一. 高層気象台彙報, 61, 59-68.
- 肆矢朗久・中野辰美・鎌田吉博(2001): 吊り紐の長さに関する調査・試験(レーウィン観測). 高層気象台彙報, 61, 69-74.