

ABL 用ゾンデの飛翔予測シミュレーションプログラムの パラメータの設定

阪本 実紀*・山崎 杏莉**・阿保 敏広***

Parameterization of the Radiosonde Flight Simulation Program for observations using the Automatic Balloon Launcher

SAKAMOTO Miki, YAMAZAKI Anri and ABO Toshihiro

要旨

高層気象台(以下、観測地点名を表す館野という)では、ラジオゾンデの飛揚前にその落下位置を予測する飛翔予測シミュレーションプログラム(AOS)を開発し利用してきた。この AOS は観測器材による飛翔経路の違いを表現するため、観測器材ごとにパラメータを設定している。本調査では、2023 年 3 月に館野に集合型 GPS 高層気象観測装置(ABL)が整備されたことを受け、ABL 観測器材に対応したパラメータを作成し、精度の評価を行った。

館野と同型の ABL を運用している 4 官署(八丈島、名瀬、石垣島及び南大東島)における 2 年分の観測データから、ABL における到達高度や降下速度の特性を反映させた ABL 用のパラメータを作成した。このパラメータを使用して館野における約 10 か月間の 09 時及び 21 時観測に対して AOS で落下位置の予測を行い、ABL 観測後にラジオゾンデが実際に落下した位置との比較を行った。この検証には落下予測範囲を表す予測楕円(70%の確率で落下する範囲)内への実際の落下率やその楕円の領域の面積を用いた。予測楕円内に実際に落下した割合(捕捉率)は 74.5%となった。また、夏季の予測楕円が、ABL 用の AOS による予測結果に比べやや広いことがわかった。これは、夏季は偏西風が弱まることで捕捉率が高くなることが理由である。捕捉率 70%が最適なパラメータリゼーションであることから 4.5%の誤差が見積もられるが、今回作成したパラメータを用いることで、ABL 観測において AOS による落下位置予測が可能となった。

1. はじめに

ラジオゾンデ(以下、ゾンデ)を用いた高層気象観測は、観測機器であるゾンデに気象観測用気球、パラシュートなどの器材を取り付け、気球の浮力を利用して地上から高度 30km 程度まで上昇させることで鉛直方向に連続した気象データを電波により遠隔で収集する観測手法である。この観測では、高度の上昇とともに気球の内圧と周囲の大気圧の差が大きくなり気球が膨張限界を迎え破裂することで観測終了となる。観測を終えた器材は、主にパラシュートが受ける空気抵抗により減速し

ながら地上又は海上までゆっくりと降下する。

これらの器材が地上又は海上に降下する位置(以下、落下位置)を事前に予測するため、館野ではゾンデ飛翔予測シミュレーション(Aerological Observation Simulation, 以下、AOS)のプログラムを開発し、利用している(中野・藤田:2002)。使用する観測器材によっては、落下時に人や物へ接触することで損傷を与えうる。飛揚前に空港や人口密集地に落下する可能性が低いことを確認し安全性を確保するうえで AOS は重要な役割を担っている。

AOS は、気象観測用気球の到達高度、気球破裂後の降下速度の統計的な分布、および大気の状態の予測値である数値予報の GPV データを用いる

*気象庁 大気海洋部 環境・海洋気象課 南極観測事務室

**高層気象台 観測第一課

***元気象庁 大気海洋部 業務課

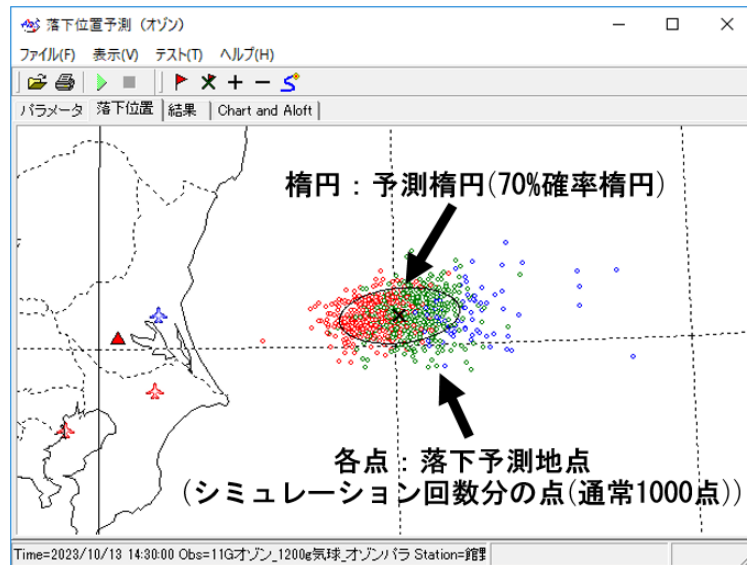


図 1 AOS 実行例

ことで、ゾンデの落下位置を予測する。AOSでは、与えられた大気の状態でも多数(通常1000回)の飛揚シミュレーションを行うことで1000点の落下予測地点を得る。この多数のシミュレーションでは、計算に用いる各要素に乱数の誤差を加えることで落下位置にばらつきが生じる。予測された落下地点の分布に基づき、70%の確率でゾンデが落下する範囲を予測楕円で表示する(図1)。

AOSでは、器材の重さ、気球の浮力、空気抵抗、到達高度、パラシュートの降下速度をパラメータとして計算に用いている。このうち到達高度や降下速度は観測ごとに異なるため、実際の観測結果をもとに確率分布を推定しパラメータ化している。パラメータは、同じ器材においても種類が異なる場合、個別に設定する必要がある。例えば、気球は600gサイズのものよりも1200gサイズのものの方がより高高度まで破裂せずに到達する割合が高いことが澁江ほか(2001)により示されている。このように、高層気象観測に用いる器材の仕様や大きさが上昇、降下の過程における挙動に影響する。つまり、AOSにおいてより現実に即したシミュレーション結果を得るためには、使用する器材のパラメータを適切に設定する必要がある。

館野では、毎日定時(09時と21時)にゾンデを用いた高層気象観測を実施している。この観測においてゾンデを飛揚する方法が2023年に変更となった。従前は職員によりゾンデを吊した気球

を飛揚する方法(MBL: Manned Balloon Launching)を採用していたが、2023年3月31日21時より集成型GPS高層気象観測装置(ABL: Automatic Balloon Launcher)が定時の観測と臨時観測に導入された。このABLではパラシュートの開傘を促すセパレータを使用していないなどMBLとは使用する飛揚器材が異なっている。また、ABLでは逆止弁付パラシュート内蔵型ゴム気球(以下、ABL用気球)を用いており、ゴム気球とゾンデの間にパラシュートを配置したMBLとは器材の取り付け方法も異なっている(図2及び表1)。このため、ABLにおいてAOSを利用する場合、ABLで使用する器材の特性を反映させたABL専用のパラメータを作成する必要がある。本調査では、ABL用の各種パラメータを作成し、その精度の検証を行い、ABLにおいてもAOSが利用できるようにすることを目的とした。

2. ABLの飛揚特性調査

AOSにおいてパラメータ化が必要となるABL用気球の降下速度と到達高度の統計調査を行った。降下速度と到達高度の調査には、館野に先行して明星電気製のABLを運用している4官署(八丈島・名瀬・石垣島・南大東島)(以下、ABL4官署)と館野のABL(以下、館野ABL)の観測データを用いた。また、比較および検証のため館野のMBL(以下、館野MBL)の観測データも使用した。ABL4官

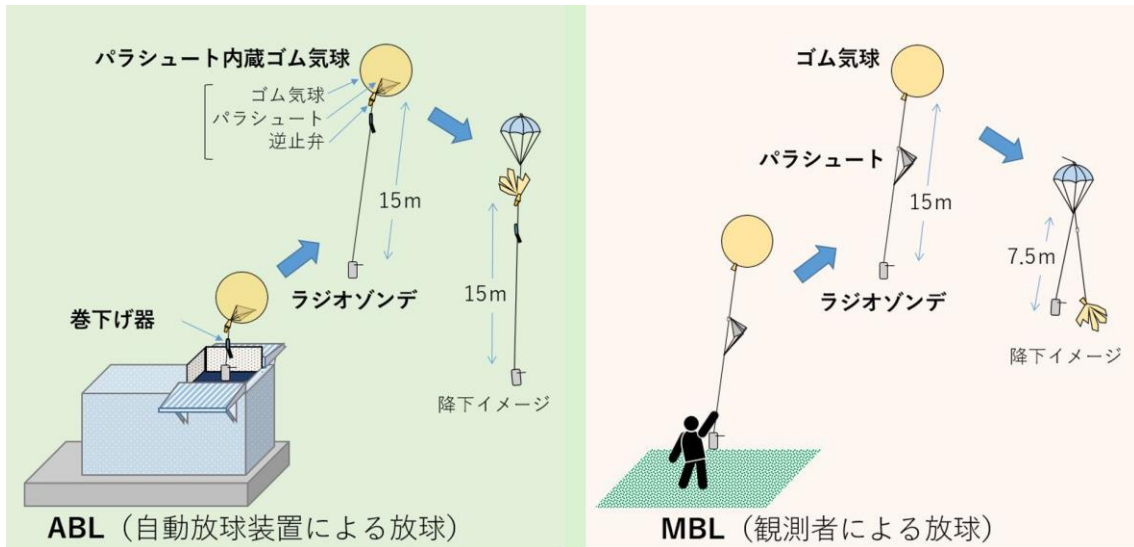


図 2 ABL と MBL の飛揚形態の違い

表 1 飛揚器材の違い

飛揚器材		MBL において使用	ABL において使用
ラジオゾンデ	名称	iMS-100(eco)	iMS-100(A)
	重さ	43[g]	46[g]
	材質	生分解性プラスチック	生分解性プラスチック
気球	名称	600g ゴム気球	逆止弁付パラシュート内蔵型 600g ゴム気球
	重さ	600[g]	600[g]
	浮力	1600[g]	1700[L] (水素ガスの充填量)
	材質	天然ゴム	天然ゴム
セパレータ ※ABL では 使用しない	名称	中間取付パイプセパレータ	
	重さ	1[g]	
パラシュート	名称	気象観測用パラシュート (全天候型)	気象観測用パラシュート (自動放球装置対応型)
	重さ	20[g]	38[g]
	直径	880[mm]	800[mm]
	高さ	1500[mm]	570[mm]
巻下器 ※MBL では 使用する場合と しない場合あり	材質	生分解性プラスチック	生分解性プラスチック
	名称	気象観測用小型巻下器 (CUW-17 型)	気象観測用小型巻下器 (CUW-12 型)
	重さ	9[g]	12[g]
	紐の長さ	15[m]	15[m]

署でのデータを比較したところ飛揚特性に大きな傾向の違いはなかったため、本研究では ABL4 官署のデータをまとめて扱うこととした。これらの観測データの期間と事例数は、ABL4 官署は 2021 年 1 月 1 日 09 時から 2022 年 12 月 31 日 21 時までの 2 年、5793 事例、館野 ABL は 2023 年 4 月 1 日 09 時から 2024 年 2 月 13 日 09 時までの約 10

か月、477 事例、館野 MBL は ABL と同種である iMS-100 型 GPS ゾンデを定時観測に使用していた 2022 年 6 月 7 日 21 時から 2023 年 3 月 30 日 21 時までの約 10 か月、564 事例とした。

2.1 降下速度の特性調査

ゾンデを用いた高層気象観測において得られる

落下監視ファイル(以下, rkk ファイル)から降下速度を求め, その特性を調べた.

ここで用いる降下速度は, rkk データに収録されている 1 秒間毎のゾンデの高度から 20 秒間毎(20 個)の単純平均を求めることで得た. 降下速度は算出に使用した 20 個のデータの平均高度における値とした. 求めた降下速度データについて, 縦軸を降下速度(m/s)の自然対数, 横軸を高度(m)として相関を求め, その回帰式から地上又は海上に相当する高度 0m での降下速度を推定した. ただし, 降下中のデータが少ないもの, 回帰式の傾きが異常なものは除いている.

図 3 は ABL4 官署, 館野 ABL 及び館野 MBL について, 観測を終え落下するゾンデの地上付近における推定降下速度(以下, 降下速度)の頻度分布を示している. ABL4 官署, 館野 ABL 及び館野 MBL はいずれも概ね 2~3m/s 付近を最頻値とした単峰性の分布であるが, ABL4 官署, 館野 ABL は館野 MBL に比べて, 最頻値より降下速度が大きい範囲における出現頻度が高いことがわかった.

2.2 到達高度の特性調査

到達気圧は観測状況ファイル(以下, env ファイル)に記録された値を使用した. ただし, env ファイルに示された観測終了理由が IP(気球破裂)である事例のみを対象としている. その他の観測終了理由の場合は, 気球が破裂し観測器材が落下し始める高度が観測終了高度と異なるため使用しないこととした.

図 4 は ABL4 官署と館野 ABL, 館野 MBL について, 観測の到達高度(気球の破裂高度)の頻度分布を示している. ABL の観測においては, 到達高度に明瞭な 2 つの峰があることがわかる. 館野 MBL では到達高度の最頻値は 34km 付近のみの単峰性で, ABL4 官署, 館野 ABL とは明らかに異なった分布となっている. また, 図 4 上図に示すように, 館野 ABL は ABL4 官署に比べ低高度側の峰の頻度が少なく高高度側の峰はより突出した形状となっている. これについては, 事例総数が少ないこと, 集計期間が異なること, 地域特性や気球性能の違いなどが考えられるが, 二峰性という特徴が共通していることから本調査では ABL4 官署を基にパラメータ作成を行うこととした.

3. 各種パラメータの算出

AOS では使用する器材に応じた複数種類のパラメータの値を設定し, 落下位置の予測に用いる. 例えば, 気球では重さや浮力のほか, 到達気圧など計 17 種類, パラシュートでは重さ・最大開傘面積, 降下速度などの計 10 種類の要素がありそれぞれ事前に設定しておく必要がある. 各パラメータの詳細については, 中野・藤田(2002)を参照.

パラシュートの降下速度及び気球の到達気圧に関する各種パラメータについては, rkk データや env ファイルから統計処理をして得られた頻度分布を正規分布と指数分布の関数((1)及び(2))に近似して求めている(伊藤・奥山(2008)の方法を参照).

$$\text{正規分布: } f(x) = ae^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

$$\text{指数分布: } f(x) = de^{-fx} \quad (2)$$

ここで, a は正規分布の量的な係数, μ は正規分布の軸の位置, σ は正規分布の尖り度合い, d は指数分布の量的な係数, f は指数分布の傾斜の度合いを表している.

以下で求めるパラメータ(表 2 及び表 3)以外の抵抗係数等の一般的なパラメータは, 館野 MBL と同じ値を用いた.

また, 降下速度, 到達気圧以外のパラメータは実測, 単位換算により算出した.

3.1 降下速度のパラメータ算出

AOS では, 降下速度に関するパラメータとして, 理論降下速度(V_{zm})に対する実測の降下速度(V_{zo})の比(降下速度比)の 2 乗(K^2)を用いている. ここで理論降下速度とは, 気球の残骸が全て残り, かつパラシュートが完全に機能していると仮定した場合の降下速度のことである(伊藤・奥山:2008). すでに作成されている MBL で用いるパラメータは K^2 の確率分布を正規分布と指数分布を組み合わせた関数に回帰させ求めている. ABL で用いるパラメータにおいても MBL で用いるパラメータと同様に正規分布と指数分布を組み合わせることで表現できると考え, 図 5 に示した ABL4 官署の K^2 の分布を正規分布と指数分布に回帰することで「正規分布の中央値 μ 」, 「正規分布の標準偏差 σ 」, 「正規分布と指数分布の境界値 bd 」, 「指数分布の傾き f 」をパラメータとして求めた(表 2).

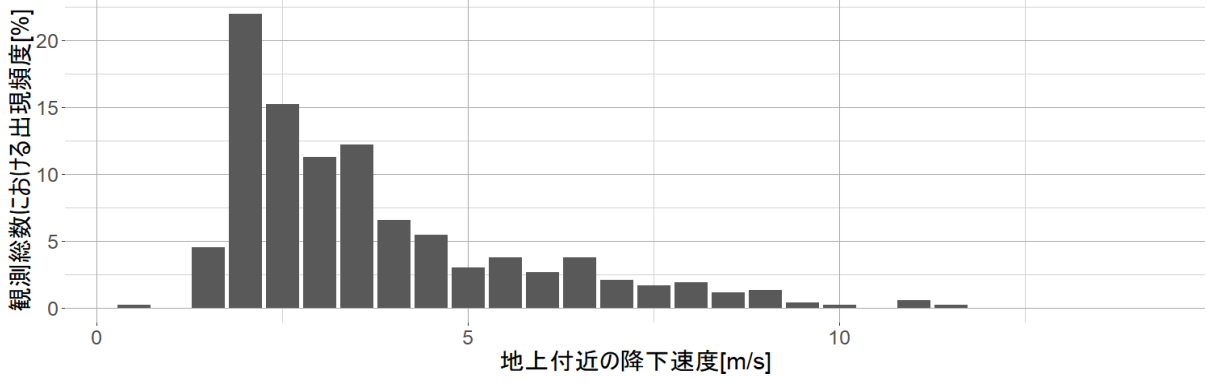
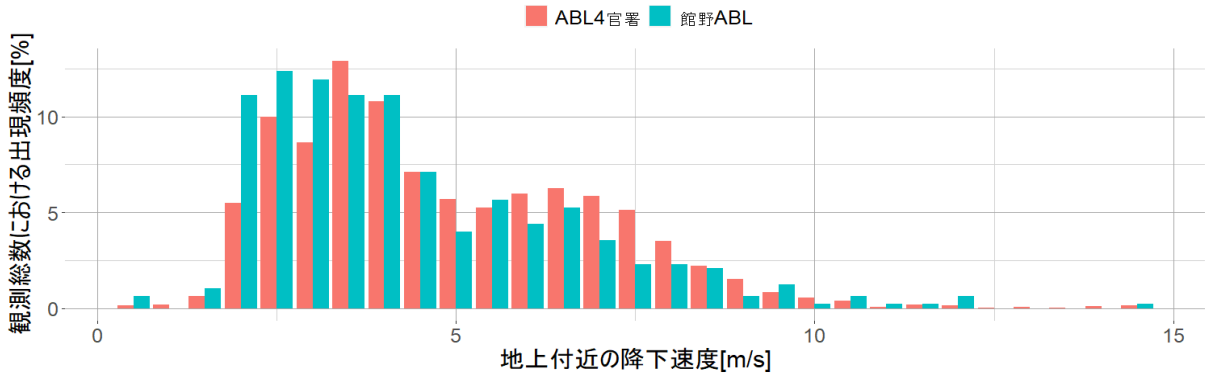


図3 降下速度の頻度分布図
上：ABL4 官署と館野 ABL，下：館野 MBL

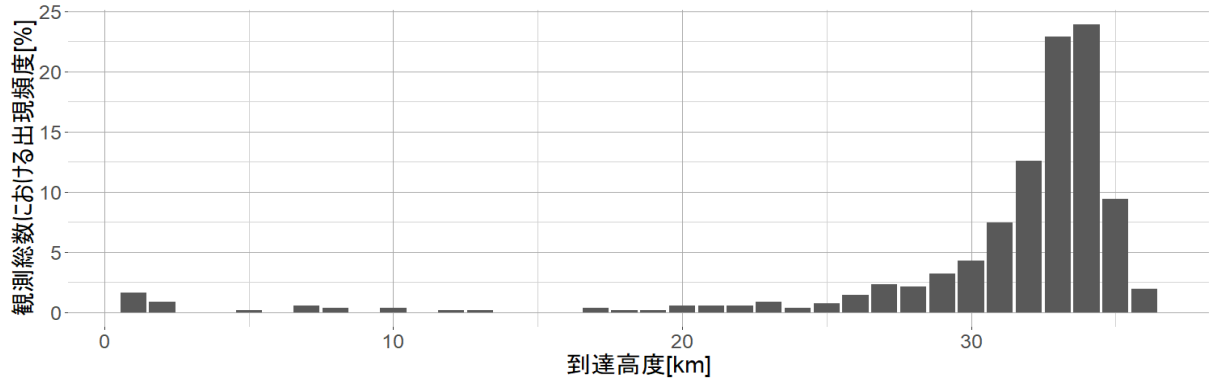
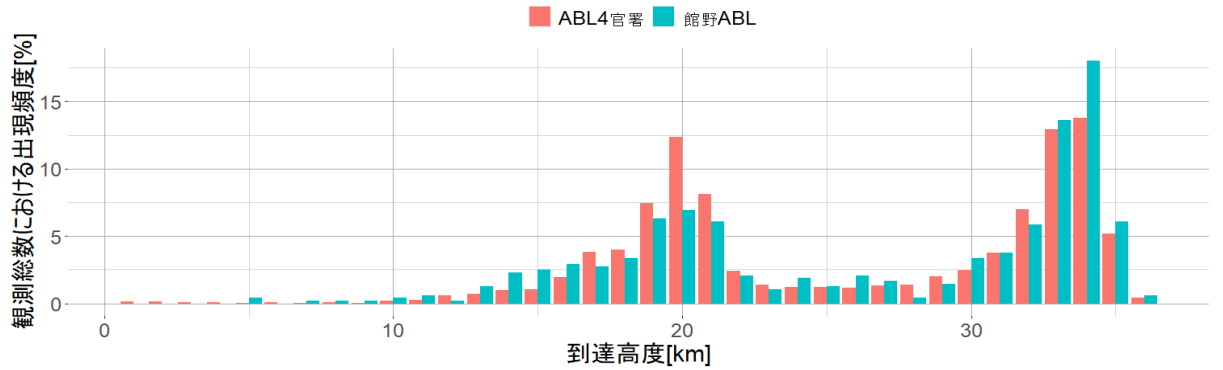


図4 到達高度の頻度分布図
上：ABL4 官署と館野 ABL，下：館野 MBL

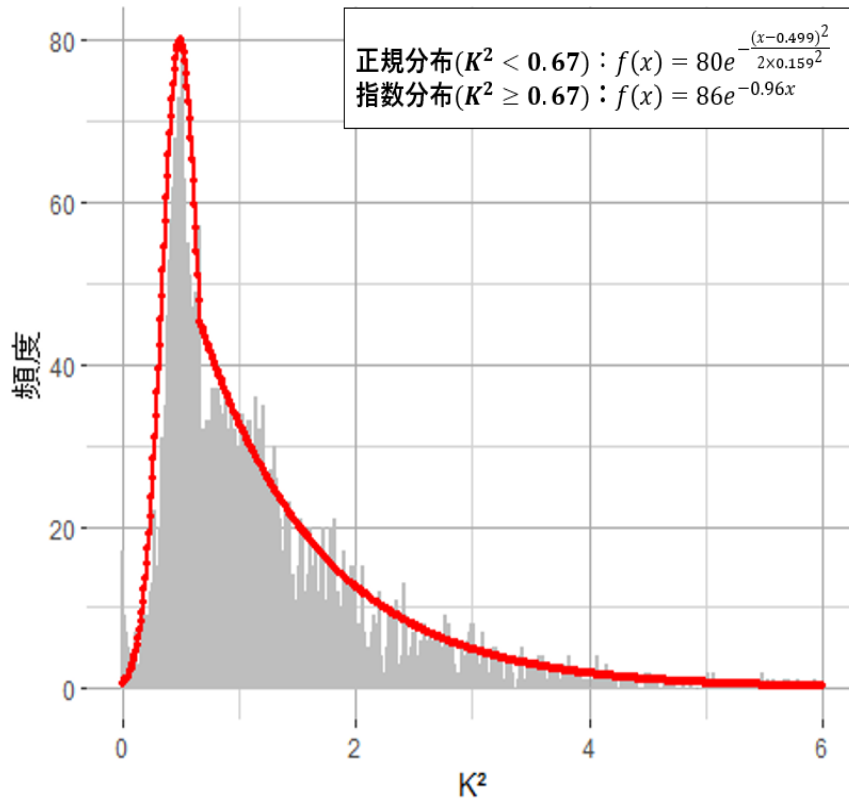


図5 降下速度比の2乗分布とフィッティング曲線(ABL4 官署)

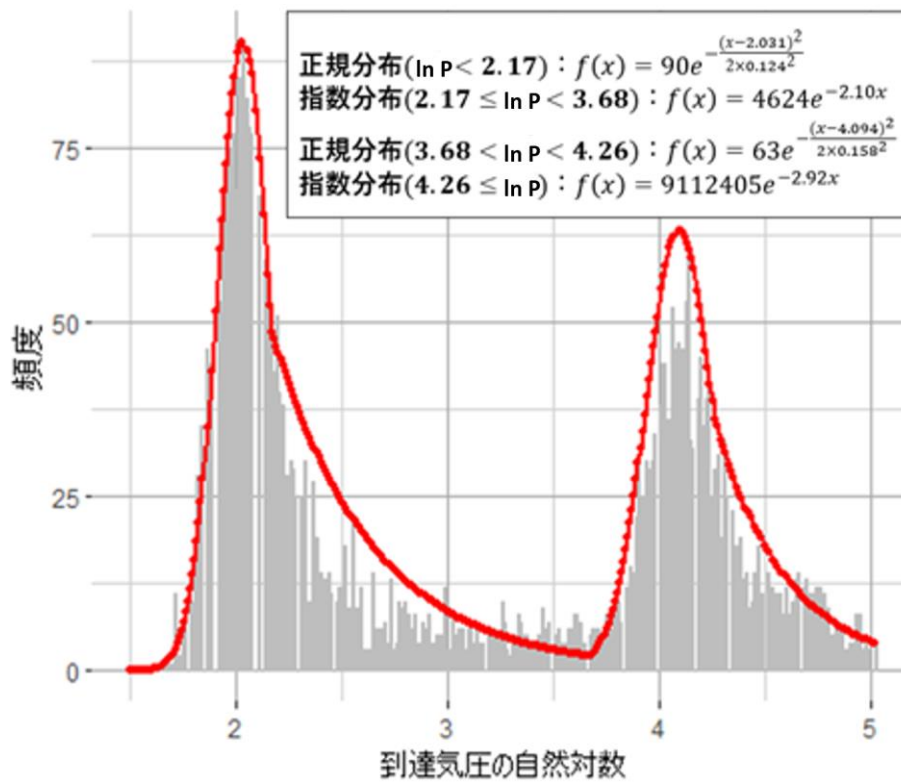


図6 到達気圧分布とフィッティング曲線(ABL4 官署)

表 2 降下速度の各パラメータ値

	各パラメータ値
正規分布の中央値 μ	0.499
正規分布の標準偏差 σ	0.159
正規分布と指数分布の境界値 bd	0.67
指数分布の傾き f	0.96

表 3 到達気圧の各パラメータ値

	各パラメータ値	
	高高度破裂	低高度破裂
正規分布の中央値 μ	2.031	4.094
正規分布の標準偏差 σ	0.124	0.158
正規分布と指数分布の境界値 bd	2.17	4.26
指数分布の傾き f	2.10	3.507

3.2 到達気圧のパラメータ算出

AOS で用いる到達気圧のパラメータは降下速度と同様に単峰性の分布に対して正規分布と指数分布を組み合わせた関数に回帰させ求めている。図 6 は ABL4 官署の到達気圧の分布を示したものでこれを正規分布と指数分布に回帰することで「正規分布の中央値 μ 」,「正規分布の標準偏差 σ 」,「正規分布と指数分布の境界値 bd 」,「指数分布の傾き f 」をパラメータとして求めた(表 3)。なお、図 6 の横軸は気圧の自然対数である。回帰の手法としては降下速度と同様であるが、2.2 項で示した ABL4 官署、館野 ABL のような二峰性の分布に対しては、同じ方法でこの分布を再現することができない。そこで、二峰の境界となる高度に対応した 40hPa を閾値とし、到達気圧が 40hPa より高い高度の事例(以下、高高度破裂)と、到達気圧が地上から 40hPa までの高度の事例(以下、低高度破裂)のそれぞれに対して関数に回帰させることで 2 種類のパラメータを作成した。

3.3 気球とパラシュートに関するその他のパラメータ算出

ABL 用の飛揚器材に対応して新規作成すべきパラメータには、降下速度と到達気圧のほかに気球の浮力、パラシュートの重さ、パラシュートの最大開傘面積がある。

気球の浮力は気球充填時に気球に与える浮力のことであり、充填する水素ガスの体積(1700L)から換算して浮力(1400g)とした。また、パラシュートの重さと最大開傘面積は、それぞれ実測により 0.04kg と 0.337m²とした。

4. 各種パラメータの精度評価

前項で求めたパラメータを用いて AOS のシミュレーションを実行し、その結果から精度評価を行った。対象期間は 2023 年 4 月 1 日 21 時から 2023 年 12 月 31 日 21 時の定時観測(09 時, 21 時)として、AOS による予測落下地点と同時刻の館野における ABL 観測でゾンデが落下した位置を比較した。

AOS の実行に際しては、3 章で得たパラメータを用いて ABL 用のパラメータセットを作成しこれを使用した。ただし、3.2 項で示したとおり、到達気圧のパラメータについては高高度破裂、低高度破裂の場合の 2 種類を作成しているため、高高度破裂のパラメータを用いた高高度破裂のパラメータセットと低高度破裂のパラメータを用いた低高度破裂のパラメータセットの 2 種類を作成した。これら 2 種類のパラメータセットをそれぞれ用いて AOS を実行すると高高度破裂のみ、低高度破裂のみを予測した結果がそれぞれ得られる。ここでは、この結果を合成することで両者を含んだ予測範囲を作成することとした。

合成方法は、高高度破裂のパラメータセットを用いた落下予測位置 548 点、低高度破裂のパラメータセットを用いた落下予測位置 452 点を用い、合計 1000 点から計算により 1 つの予測楕円を作成した。この高高度破裂と低高度破裂の割合は、3.2 項において到達気圧分布を 40hPa で区分した事例数の比から得たものである。

以後、このようにして合成したデータから作成した予測楕円の妥当性について検証を行う。現在の AOS は異なるパラメータセットを用いた落下点を複数重ね合わせて表示することができる一方で、このような合成した予測楕円を描画させる機能はないため、AOS で出力した図に合成した予測楕円を書き足したイメージを図 7 に示した。なお、ゾンデの地上の着地地点は正確な位置を取得できないため、rkk データファイルから推定した地上高度での緯度経度を落下位置として扱った。

4.1 捕捉率によるパラメータの精度評価

対象期間内の 09 時と 21 時観測それぞれすべてに対して AOS で 1000 点の落下位置を予測した。1000 点の落下予測位置の 70% が含まれる領域(70%予測楕円)に、実際に行われた ABL 観測後のゾンデの地上の着地地点が入っていた割合を捕捉率として妥当性を検証した。捕捉率が 70% より小さい場合は予測楕円の大きさ(径)が過少であり(70%予測楕円の中に実際に落下した割合が 70%に満たない)、70%より大きい場合は予測楕円の径が過大である(予測落下位置の不確実性が過大評価されている)ことを意味する。

高高度破裂、低高度破裂の場合のパラメータセットを用いたそれぞれの結果を合成した場合の捕捉率は 74.5% となり、AOS の 70%予測楕円がやや大きい結果となった。なお、高高度破裂のパラメータセットのみと低高度破裂のパラメータセットのみを使用して捕捉率をそれぞれ求めたところ、高高度破裂の捕捉率は 78.1%と予測楕円が大きくなりすぎる傾向があった。一方で、低高度破裂の捕捉率は 73.5%となり、低高度破裂のパラメータセットの方がより適切に設定されていることがわかった。図 4 の上図で示したとおり、高高度破裂群では ABL4 官署に比べて館野 ABL の方が到達気圧の中央値付近でより高頻度であるのに対して、低高度破裂群では館野 ABL よりも ABL4 官署の方が高頻度を示している。ここでは ABL4 官署の分布を反映させたパラメータを使用して館野 ABL の落下位置予測を行っているため、このような気球破裂の頻度分布の違いが予測楕円の捕捉率に影響を与えている可能性が考えられる。

4.2 予測楕円と落下地点の位置関係

予測楕円の中心及び円周と rkk ファイルに示されるゾンデの地上の着地地点(以下、rkk 落下地点)との位置を比較した。予測楕円中心との比較にはこれらの水平距離を用い、弧との比較には予測楕円中心から rkk 落下地点、弧のそれぞれまでの距離の比を用いた(図 8)。図 9 左のグラフは各観測事例について、予測楕円中心と rkk 落下位置との東西・南北方向への距離を示したものである。距離は南北方向よりも東西方向にばらつきが大きくなっており、その距離の差は最大で南北方向に約 90km であるのに対して東西方向では 140km 程度となっている。これは、偏西風の影響で気球が南北よりも東西に流される距離が大きいためである。また、図 9 右のグラフは予測楕円の円周と落下地点との位置関係を示している。各点は各観測事例における楕円中心から弧の距離を 1 とした場合の楕円中心から rkk 落下位置までの距離(つまり楕円の径で規格化した距離)を表しており、円は予測楕円の円周に対応する。この円の内部に含まれる点はゾンデ及び器材が予測楕円の中に落下した事例であり、約 70%が予測楕円の中に含まれていることが確認できた。円に含まれない点の多くは、図 9 左図と同様に東西方向への乖離が目立った。

図 9 と同様に予測楕円と rkk 落下地点との位置関係について、高高度破裂のみの場合を図 10 に、低高度破裂のみの場合を図 11 に示す。高高度破裂の場合は、2 種類のパラメータセットを用いた結果を合成したものと同様の傾向となっている。一方で、低高度破裂のみの場合は図 11 の右図に示すように予測楕円に入らない場合における半径 1 の円からの外れ具合が大きくなっており、地上着地点が円周までの距離の 2 倍以上になった事例は東西・南北方向合わせて 8 件で高高度破裂のみの場合の 2 件に比べて多い。しかしながら、高高度破裂のパラメータセットを用いた結果と低高度破裂の結果を用いた結果を合成した結果、捕捉率は低高度破裂のパラメータセットを用いた場合のみの 73.5%よりも期待する 70%からはさらに離れた 74.5%となるものの、このような外れを低減することが分かり、合成する手法は有効であることがわかった。

4.3 予測楕円の大きさ

AOS を使用する上では捕捉率の成績に加え予測楕円の大きさ(面積)も考慮しなければならない。予測楕円を大きくすればするほど実際の落下位置を捕捉しやすく捕捉率は上昇するが、過剰に広範囲を示しては実用に適さない。そこで、本調査で作成した ABL 用のパラメータセットを用いた予測楕円の面積と、従来の MBL における予測楕円との面積の比較を行い予測楕円の大きさを確認し

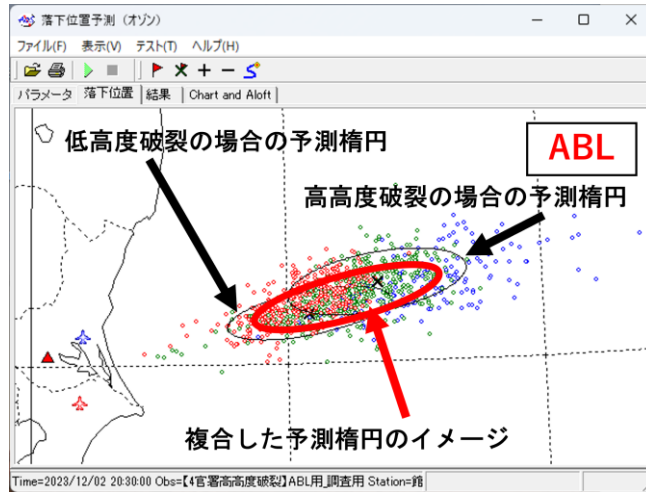


図7 複合した予測楕円のイメージ

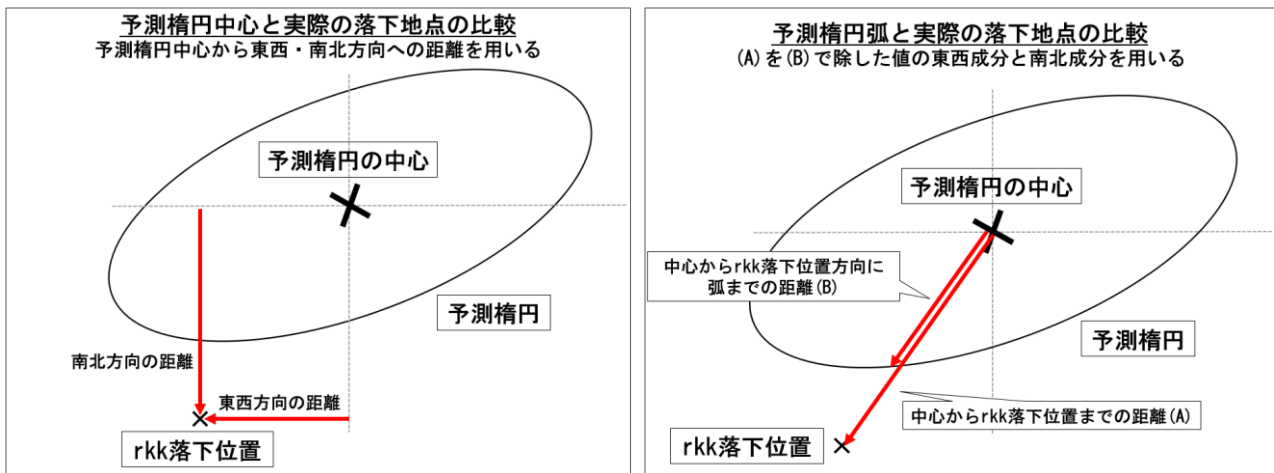


図8 予測楕円と落下地点の比較方法

左：予測楕円中心との比較方法，右：予測楕円弧との比較方法

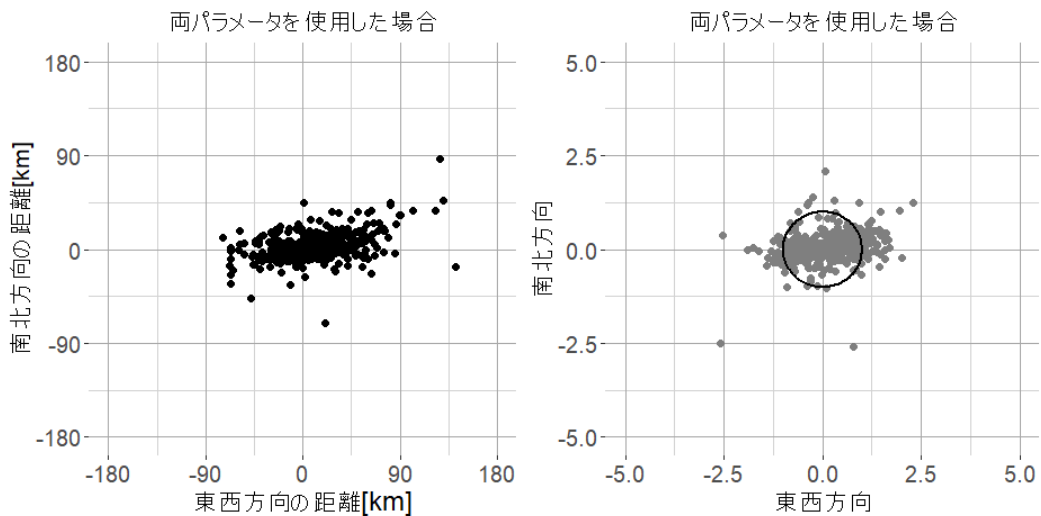


図9 予測楕円と rkk 落下位置との関係

右図で円(実線)は予測楕円の円周を示し，横(縦)軸は東西(南北)の規格化距離を示す。

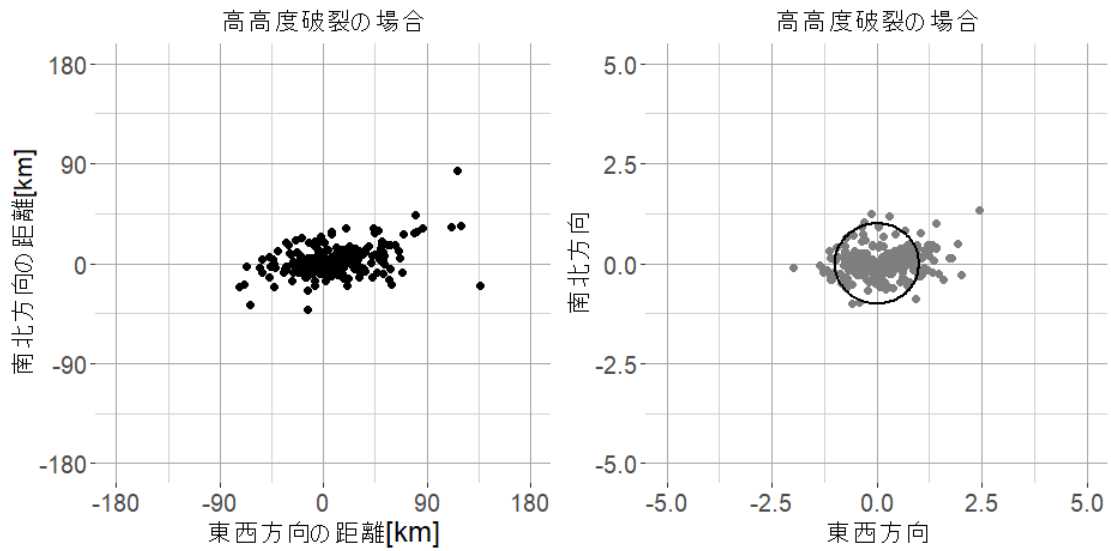


図 10 高高度破裂の場合の予測楕円中心と rkk 落下位置との位置関係
 右図で円(実線)は予測楕円の円周を示し、横(縦)軸は東西(南北)の規格化距離を示す。

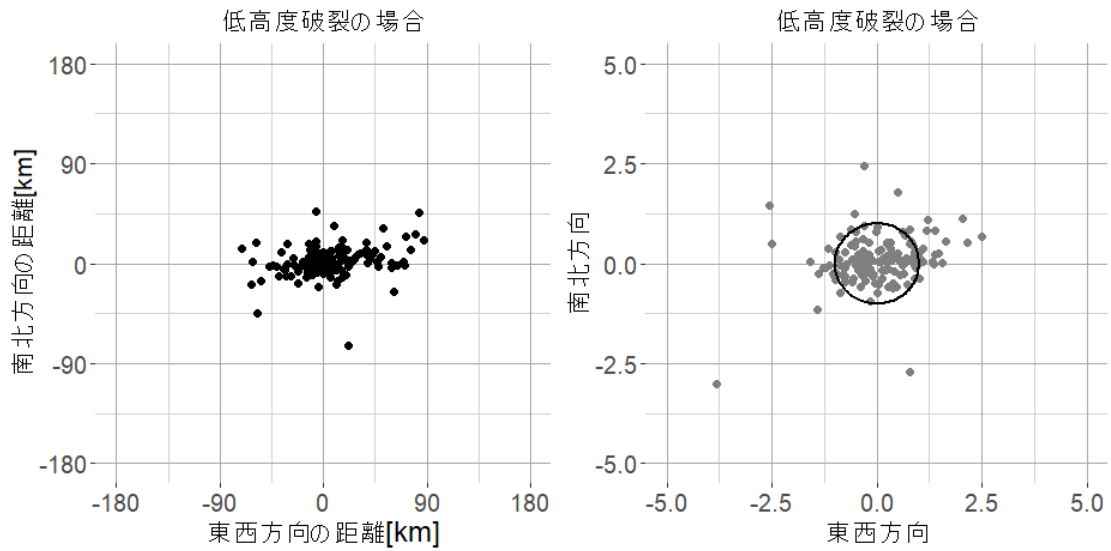


図 11 低高度破裂の場合の予測楕円中心と rkk 落下位置との位置関係
 右図で円(実線)は予測楕円の円周を示し、横(縦)軸は東西(南北)の規格化距離を示す。

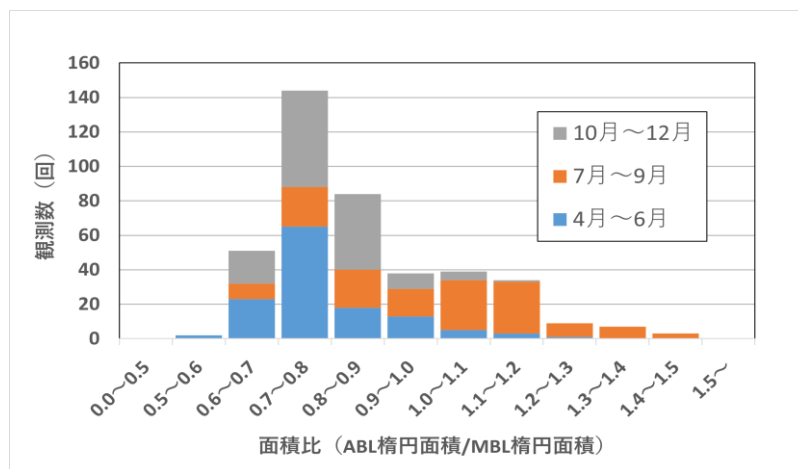


図 12 MBL の予測楕円面積に対する ABL の予測楕円面積

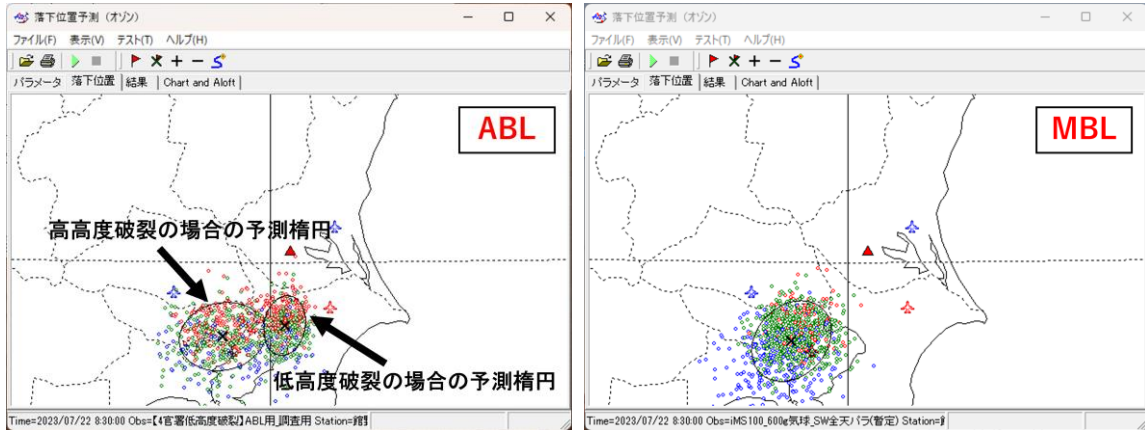


図 13 AOS 実行結果例(2023/7/22 08:30)

左：ABL 用 2 種類のパラメータセットを使用，右：従来の MBL 用パラメータセットを使用

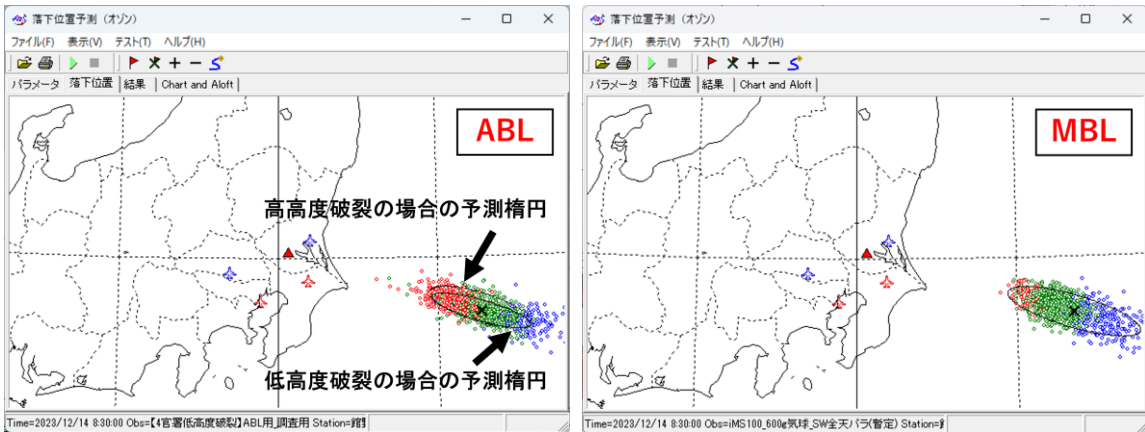


図 14 AOS 実行結果例(2023/12/14 08:30)

左：ABL 用 2 種類のパラメータセットを使用，右：従来の MBL 用パラメータセットを使用

た. 対象とする期間は 2023 年 4 月 1 日 21 時観測から 2023 年 12 月 31 日 21 時観測までで, MBL のパラメータは iMS-100 ゾンデ, 全天候型パラシュート, 600g 気球を用いた観測を対象として作成されたものとした.

対象期間内の各観測について MBL の予測楕円面積に対する ABL の予測楕円面積の比を求め, その度数分布を図 12 に示した. ABL の予測楕円面積が MBL の予測楕円面積の 1.0 倍以下, つまり小さいか同等となる事例は全体のうち 77.6% が該当し, また全事例において面積比が 1.5 倍未満となることがわかった. さらに, この面積比について季節別の分布に着目すると, 夏季(7 月から 9 月)の予測楕円面積が MBL の予測楕円面積よりも大きい傾向がみられた. ABL の予測楕円面積が MBL の予測楕円面積の 1.0 倍を超過する事例は, 夏季で 77 件, その他の月で 15 件のみであった. このように, ABL の予測楕円面積は, 夏季を

除くと従来の MBL と同程度か小さいが, 夏季には大きい傾向があった. これは, 夏季以外は到達高度の高い MBL が西風に乗って非常に遠くまで飛び予測楕円が広がる傾向があるためで, 夏季は風が弱く比較的近くに落下することで予測楕円が小さく, ABL は MBL より到達高度のばらつきが大きい事が表現されやすくなるためである.

夏季に ABL 用パラメータセットで求めた予測楕円が MBL より大きくなる事例について確認した. ABL, MBL それぞれのパラメータセットを使用して実施した AOS の結果の夏季, 冬季の例を図 13 及び図 14 にそれぞれ示す. 図 13 のように, 夏季は冬季と異なり, 冬に比べ高高度破裂の予測楕円と低高度破裂の予測楕円の重複が少ない傾向にあった.

高高度破裂と低高度破裂の落下位置を予測する場合, 低高度破裂位置(平均約 60hPa)から高高度破裂位置(平均

約 8hPa)まで上昇する間に、ゾンデの位置がどの程度水平方向に移動するかが落下位置予測の差となって現れる。夏季は他の季節と異なり、成層圏の風向が対流圏とは逆の東風となるため落下位置の傾向が変わり、落下位置の差が成層圏の西風に流される他の季節よりも顕著となる。

以上の結果から、高高度破裂と低高度破裂の予測楕円が重なるような場合は、図 7 のようにその結果を合成して使用することができるが、2つの予測楕円が離れる夏季には、図 13 左及び図 14 左のように2つのパラメータセットを用いた結果を合成せずに個別に用いて両方の結果を確認した方がよいといえる。例えば、夏季に陸上落下を避ける判断をするような場合は、高高度破裂と低高度破裂の予測楕円の両方が陸地に掛からないことを確認したうえで飛揚することで、より安全性を確保できる。

5. ABL 用のパラメータの使用法

AOSでABL用のパラメータを使用する方法について示す。4.3項で示したとおり、夏季において高高度破裂の場合と低高度破裂の場合でAOSによる落下予測地点の分布は乖離する傾向にある。また、現在のAOSは異なるパラメータセットを用いた落下点を複数重ね合わせて表示することができる一方で、これらすべての点を対象に予測楕円を描画させる機能はない。これらを踏まえてAOSでABL用のパラメータを使用する具体的な方法として、以下の2パターンが考えられる。

- (i) 主に夏季以外の高高度破裂と低高度破裂の予測楕円が重なるような場合は、2種類のパラメータセットによる計算結果を合成して落下推定位置を求める(1つの予測楕円で表示する)。具体的には、AOSで高高度破裂用パラメータセットを用いて作成した落下予測位置(548点)と低高度破裂用パラメータセットで作成した落下予測位置(452点)を元に合成した70%の予測楕円を算出して使用する。ただし、AOSにはこのような機能がないため、利用に際してはAOSシステムからデータを取得して描画するツールを別途使用(開発)する必要がある。
- (ii) 主に夏季の高高度破裂と低高度破裂の予測楕円が離れるような場合は、2種類のパラメータセットによる計算結果を合成せずに使用する(2つの予測楕円で表示する)。具体的には、高高度破裂用パラメータセットで実行した予測楕円(78.1%確率で落下範囲を推定)と、低高度破裂用パラメータセットで実行した予測楕円(73.5%の確率で落下範囲を推定)のどちらかの楕円内に落下位置があると想定して利用する。

6. まとめ

本調査では、2年分のABL4官署の観測データを用いて降下速度と到達気圧に関するABL用のAOSパラメータを作成した。到達気圧のパラメータについてはABL用気球の破裂特性を反映させるために高高度破裂用と低高度破裂用の2つのパラメータを作成した。作成したこれらのパラメータを組み込んだパラメータセットを用いることで70%予測楕円内に実際の落下位置が含まれる割合(捕捉率)は74.5%となり、期待される70%から4.5%の差が生じることがわかった。また、2種類のパラメータセットを個別に用いた場合の捕捉率を確認したところ、高高度で破裂した場合の捕捉率は78.1%、低高度で破裂した場合の捕捉率は73.5%とともに期待する70%から正の誤差を持ち予測楕円過大となる傾向がみられた。AOSではこれまでMBLに対応したパラメータを使用していたため、これをABL観測に適用した場合、MBLにおいて該当事例が少ない低高度破裂の場合に捕捉率が低下するが、今回、ABL観測向けに到達高度の出現特性を考慮したパラメータセットを新たに作成したことで、より低高度である40hPa以下で破裂した場合を対象としても73.5%の捕捉率となり期待する70%に対して3.5%の差で予測可能となった。ただしAOSは同時に2つのパラメータセットを適用できないことから、これらを別々に実行し、結果を合成してから70%予測楕円を求めて評価を行ったものである。これは、落下位置の予測段階において、気球が破裂する高さがどちらに属するか断定できないためである。また、2種類のパラメータセットを用いた場合の落下予測地点の分布を比較することで、夏季には高高度破裂の場合と低高度破裂の場合で落下位置が乖離することが分かった。これを考慮したAOSの使用法を提示することで、ABL観測においてAOSによる落下位置予測が可能となった。

最後に、本調査でパラメータ作成に用いた母集団は同型ABLを運用している4官署(八丈島・名瀬・石垣島・南大東島)の2年分の観測データであり、検証に用いた館野ABLのデータと傾向がやや異なる。そこで将来、ABL官署の観測データが十分に蓄積された後、パラメータを更新することにより、さらなる改善(捕捉率がより70%に近づくパラメータの作成)が期待できる。

謝 辞

本調査の実施、本稿の作成にあたり、高層气象台観測第一課の皆様及び安達正樹観測第二課長に多数のご助言を賜った。また、パラメータの作成に用いた八丈島・名瀬・石垣島・南大東島の観測データは気象庁大気海洋部観測整備計画課小野景子高層技術係長(現：気象研究所企画室)

にご提供いただいた。これらの方々に厚くお礼申し上げます。

引用文献

伊藤智志・奥山順健 (2008): オゾンゾンデの飛翔予測シミュレーションプログラムのパラメータの再設定. 高層気象台彙報, **68**, 23 - 36.

澁江昇・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－到達高度・上昇速度・ガス漏洩量－. 高層気象台彙報, **61**, 59 - 68.

中野辰美・藤田建 (2002): ゾンデの飛翔予測シミュレーションプログラムの開発－ゾンデの飛翔予測情報システムの実現に向けて－. 高層気象台彙報, **62**, 7 - 16.