ゾンデ飛翔予測プログラムの精度検証と TOMACS 観測への適用

清野直子 (気象研究所予報研究部)
中野辰美 (地球環境・海洋部環境気象管理官付オゾン層情報センター)
能登美之 (高層気象台観測第三課)
大野恭治 (高層気象台観測第二課)

Validation of aerological observation simulation program and application to radiosonde observations in TOMACS

by

Naoko Seino¹, Tatsumi Nakano², Yoshiyuki Noto³ and Kyoji Oono⁴

1. Forecast Research Department, Meteorological Research Institute
2. Ozone Layer Monitoring Center, Atmospheric Environment Division, Global Environment and Marine Department
3. Ozone and Radiation Division, Aerological Observatory
4. Aerological Observations Division, Aerological Observatory

(Received June 24, 2013; Accepted November 7, 2013; Published February 18, 2014)

Abstract

Radiosonde observations were conducted at Tsukuba in the warm seasons of 2011 and 2012 as a part of the research program Tokyo Metropolitan Area Convection Study for Extreme-Weather-Resilient Cities (TOMACS). The Aerological Observation Simulation (AOS) program, a system for simulating radiosonde track, was utilized in the observation for predicting the radiosonde landing area. The AOS program performance was validated based on the landing location data in operational radiosonde observations. Landing locations predicted by AOS were generally well correlated with those observed. The mean difference in landing location between simulation and observation was 16 km for 728 cases in the warm seasons of the past seven years. The AOS program adopted a Monte-Carlo method to account for uncertainties in (1) horizontal wind forecast, (2) radiosonde ascending speed, (3) pressure level reached, and (4) descending speed. This enables predicting the probability ellipse around the most likely landing location, which represents the possible landing area with a certain probability. Seventy-five percent of the observed landing locations were inside the 70% probability ellipse. Approximately 90% of the observed landing locations were inside the 90% probability ellipse. This means that the 90% probability ellipse is a reliable index of the landing area in the operational observations. However, 96% of the observed landing locations were inside the 99% probability ellipse, falling slightly short of the expected probability. The higher-than-expected rate of landing in the 70% probability ellipse was closely related to the performance of the horizontal wind forecast in the numerical weather prediction model. AOS prediction accuracy was lower on rainy days for multiple causes.

The AOS prediction was applied to the radiosonde observations in the 2011 and 2012 TOMACS Intensive Observation Period (IOP). In these observations, a 200 g balloon was chosen, and the heights reached were lower than those of operational observations. This reduced influences of summertime easterly wind in the lower stratosphere. Parameters used in the AOS probabilistic distribution (radiosonde ascending speed, pressure level reached, and descending speed for 200 g balloons) were revised using data obtained in the present observations. Parameter revision improved AOS predictions for 200 g balloons.

Corresponding author: Naoko Seino
Meteorological Research Institute
1-1 Nagamine Tsukuba, Ibaraki 305-0052, Japan
E-mail: nseino@mri-jma.go.jp

1. 研究の背景と目的

数多くのリモートセンシング技術が開発されている今日でも、ゾンデ観測は大気鉛直構造を知るためのもっとも有効な手段のひとつである。気温や水蒸気量等の鉛直分布は大気の実況監視のみならず数値予報にとっても基本的なデータといえるが、これらを他の観測機器によってゾンデと同等以上の精度で求めることは依然難しく、その手法は発展途上といえる。そこで、気象庁の高層気象観測だけでなく、研究観測においてもゾンデ観測によるデータ取得が試みられてきた（たとえば、吉崎ほか、1999）。

気象庁が実施する高層気象観測では、ゾンデとパラシュートを気球に取り付けて放球し上昇時にデータを取得する（気象庁、2004）。通常、高度 30 km 以上まで到達した後、気球破裂によってゾンデと気球残骸が降下をはじめ、パラシュートが開傘して地上あるいは海上に落下するようになっている。日本付近では、偏西風によってゾンデは放球地点から東に流されることが多いが、夏季には偏西風が弱く成層圏下部（高度 20～30 km 付近）では東風となるため、ゾンデの落下域が放球地点の周辺、あるいは放球地点より西側になる場合がある。たとえば館野における観測では、例年 6 月中旬から 9 月中旬頃にかけてゾンデが陸上に落下するケースが出てくる。ただし、落下位置は気圧配置などの気象条件に左右され日々異なり、陸上落下の例数も年により違う。ゾンデが陸上に落下した場合、器物の破損や事故につながる可能性がある。そこで、安全性向上の観点から、ゾンデの緩降下のための飛揚手法の改良（成田ほか、1999；熊本ほか、2005）が行なわれるとともに、あらかじめ落下に関する情報を得るためのゾンデ飛翔予測プログラムの開発、検証および改良が進められてきた（中野・藤田、2002；藤田、2003；岩坪、2005；伊藤・奥山、2008）。オゾンゾンデ観測では、このプログラムによる予測が観測実施日の検討材料の一つとして活用されている。

研究目的のゾンデ観測においても、ゾンデ飛翔予測を行うことで、ゾンデの飛行経路や落下域を事前に把握し、人口密集地等への落下が予想されるときは観測を避けるといった判断が可能になる。気象研究所が参画している研究プロジェクト「気候変動に伴う極端気象に強い都市創り」（Tokyo Metropolitan Area Convection Study for Extreme Weather Resilient Cities, TOMACS）では、短時間の強雨をもたらす対流システムの実態把握と機構解明のために、首都圏においてレーダーや GPS 可降水量観測、稠密地上観測網など様々な手法による観測に取り組んでいる（石原、2011）。この一環として、気象研究所では、高層気象台の協力を受け、首都圏において積乱雲が発達する際の大気環境場の把握等を目的として 2011 年と 2012 年の夏季を中心に GPS ゾンデ観測を実施した。この研究観測では、安全対策として、前述のゾンデ飛翔プログラムを利用したゾンデ落下予測を導入した。利用にあたって、夏季におけるこのプログラムの予測精度を確認する目的で、館野に

おける最近 7 年のルーチン観測結果に基づく精度検証を行った。前記の研究観測では、その目的からルーチン観測とは一部異なる観測設定とし、それに応じたパラメータを落下位置予測に用いた。このパラメータは、過去の限られた観測例から決められた暫定的なものであったため、今回の観測結果からその見直しも行った。本稿では、まず次節でプログラムの概要と検証方法について述べ、3 節でその結果を示すとともに予測特性に関する考察を行う。4 節では、研究観測の概要と落下予測について紹介し、さらに観測データに基づくパラメータの見直しとその効果について述べる。

2. 予測および検証手法

2.1 ゾンデ飛翔予測（AOS）プログラム

本研究で用いたゾンデ飛翔予測（Aerological Observation Simulation, 以下 AOS）のプログラムは、中野・藤田（2002）を基に、ゾンデ飛揚に関わるパラメータに改良を加え発展させたものである（藤田、2003；岩坪、2005；伊藤・奥山、2008）。AOS では、気象庁の現業数値予報モデルの格子点値（GPV）に基づき大気中の水平風の三次元的な分布を与え、ゾンデの航跡を予測する。その際、水平風には GPV の予報誤差を考慮して風速の偏差（ばらつき）を加えるとともに、ゾンデの上昇速度・到達高度・気球破裂後の降下速度についても過去の観測に基づく確率分布を与え、多数回の計算から、代表航跡だけでなく、落下可能性のある範囲も予測するようになっている。これが AOS の大きな特徴である。

使用した GPV は気象庁全球モデル（GSM）の水平風 p 面予報値で、鉛直 24 層（上端は 1 hPa）、水平 40 km 間隔、3 時間毎のデータである。この GPV の時空間分解能を考慮して、高度と時間については近傍の 4 点から 3 次内挿し、水平については直近の格子点の値を用いて、ゾンデの移動を時間間隔 $\Delta t = 4$ 秒で計算した。なお、2007 年 11 月 20 日までは地上から 10 hPa までの層に気象庁領域モデル（RSM）予報値の GPV が使用されている。GPV 予報値の対ゾンデ検証（藤田、2003）によれば、全高度平均の水平風速の予報誤差 δV (ms^{-1}) は予報時刻 Ft (hr) に依存し、その標準偏差は東西・南北方向を平均すると

$$\delta V(Ft) = 0.035 Ft + 0.73 \quad (1)$$

と表される。そこで、AOS では、水平風の予測誤差を表現するために、GPV から得られる東西・南北方向の風速に、標準偏差が δV の正規分布となる風のばらつきを付加している。ただし、この風の偏差は 1 回の航跡計算においては高度によらない一定値である。計算は、便宜上、気象庁メソ数値予報モデルと同じランベルト座標（基準経度：東経 140 度）上で行なわれており、本稿で取り扱う領域においては、この座標系の x 軸、y 軸はほぼ東西、南北方向とみなすことができる。

風のばらつきのほかに、ゾンデの航跡を左右する飛翔要素である、ゾンデの上昇速度、到達高度（気圧）、

および降下速度に関するパラメータは、気球の大きさや浮力、パラシュートの種類、ゾンデの重量といった観測機材に依存する。これらのパラメータについては過去の観測データに基づいて観測設定に応じた確率密度分布の近似式が求められている(付録 A 参照)。なお、ゾンデの上昇・下降運動に関しては、鉛直風速の影響は十分小さいと考えられるため考慮していない。

Fig. 1 に示すように、AOS では 1 回の観測に対し乱数を利用した多数回の航跡計算を行うモンテカルロ法(たとえば、岩崎、2004)を採用している。現行の計算

試行回数は、計算コストと精度の双方を勘案して 1000 回としている。各航跡計算では上述の可変パラメータの値がそれぞれ乱数により決定され、これらの計算から、風速誤差・上昇速度・到達高度・降下速度の組み合わせが異なる 1000 個の落下予測点の組が得られる。主成分分析からこの落下予測点分布の長径軸(第一主成分の方向)と、それに直交する短径軸(第二主成分の方向)が求められるとともに、それぞれの軸方向の落下予測点分布の標準偏差が見積もられる。落下予測点の分布は二次元正規分布で近似することができ、あ

Fig. 1 Flowchart of AOS for (a) entire process and (b) individual tracking calculation (quoted from Nakano and Fujita, 2002).

る確率でゾンデが落下すると考えられる楕円形の落下予測域（以下、予測楕円）が得られる。確率 P に対する予測楕円の長径・短径の長さ R_l 、 R_s は、それぞれの方向の落下予測点分布の標準偏差 σ_l 、 σ_s を用いて、

$$R_l = C\sigma_l \quad (2)$$

$$R_s = C\sigma_s \quad (3)$$

$$C = \sqrt{-2\ln(1-P)}, \quad 0 \leq P \leq 1 \quad (4)$$

と表される。たとえば、確率 70% ($P = 0.7$) では $C = 1.55$ で、各軸の方向に標準偏差の 1.55 倍の長さの径を持つ楕円内に全体の 70% の落下予測点が含まれる。これを 70% 予測楕円と呼ぶ。

予測楕円の向き（偏角）や大きさは事例ごとに異なるが、 σ_l 、 σ_s により長径・短径方向の長さを規格化することで、予測楕円に対する相対的な位置を比べることができる。この規格化により、予測楕円は真円に変換され、予測楕円上での位置 (x_l, x_s) の楕円中心からの規格化距離 r_n は

$$r_n = \sqrt{\left(\frac{x_l}{\sigma_l}\right)^2 + \left(\frac{x_s}{\sigma_s}\right)^2} \quad (5)$$

あるいは (2)、(3) 式を用いて、

$$r_n = C \sqrt{\left(\frac{x_l}{R_l}\right)^2 + \left(\frac{x_s}{R_s}\right)^2} \quad (6)$$

と表される (Fig. 2)。

2.2 検証データと評価方法

本稿では、まず、館野における高層気象観測データに基づく AOS の落下予測精度の検証を行った。対象期間は、計算に利用する GPV が入手可能な 2004 年から 2010 年までの 7 年間のうち、6 月～9 月とした。高層気象台では、過去のゾンデ観測について、降下速度や

落下位置のデータを蓄積している。落下位置は、降下時のゾンデ位置の追跡によるもので推定を含むが、飛揚地点から 40 km 以内では概ね誤差 1 km、40 km 以遠でも数 km の範囲で実際の着地位置と一致する（中野・藤田、2002）。また、GPS が導入された 2010 年以降では、落下位置の推定誤差はさらに小さくなっている。600 g 気球を使用して行われる朝 9 時の高層気象観測のうち、落下位置が特定されていた 728 事例（上記期間中の 85%）について AOS による計算結果との比較を行った。予測には、前日 2100 JST を初期値とする 0900 JST（予報時刻 12 時間目）の GPV を用いた。

計算された落下予測中心、つまり予測楕円の中心と、観測に基づく落下位置（以下、落下観測点）の分布状況や位置ずれを調べた上で、落下範囲の予測についても、70%、90% および 99% 予測楕円内に落下観測点が入った割合から、確率的な妥当性を調べた。また、2.1 節で述べた方法により、落下観測点の予測楕円中心からの規格化距離を求め、この“規格化された距離誤差”の分布から落下範囲の予測特性を考察した。

3. 結果と考察

3.1 落下予測の精度検証

前節で述べた方法により、AOS の精度検証を行った。はじめに、対象とした 728 事例の落下観測点位置の分布を見ると、放球地点の周囲の東西約 150～200 km、南北約 150 km の範囲内に分布している (Fig. 3)。この図において、落下観測点が 90% 予測楕円の外にあった事例を × 印で示してあるが、特定の落下位置や方角への集中はみられない。Fig. 4 の散布図に示すとおり、落下予測中心の位置は、東西方向、南北方向とも落下観測点の位置と高い正相関を持ち、ほぼ原点を通る回帰直線が得られる。すなわち、平均としては偏りなく適

Fig. 2 Schematics of probability ellipse predicted by AOS indicating sonde landing areas with a certain probability P . For convenience in comparison between cases, major and minor axes were normalized using standard deviations of simulated landing points (σ_l and σ_s). The probability ellipse with radii (R_l, R_s) (left panel) is transformed to the precise circle of radius C (right panel). Normalized distance r_n between the center of the circle and the observed landing point is used later in validating AOS.

Fig. 3 Observed sonde landing positions relative to launch site Tateno. The 728 data points acquired from June to September for seven years beginning in 2004 are plotted. Circles represent cases in which the observed landing position was inside the 90% probability ellipse; 'x' marks represent those outside the 90% probability ellipse.

切な落下予測中心が得られていたといえる。落下観測点と落下予測中心との位置ずれ、予測楕円の形状等を Table 1 に示す。東西方向、南北方向の位置ずれは、全事例の平均ではそれぞれ、0.5 km と 3.1 km、年毎の平均値でも 7 km 以内である。距離誤差は平均で 16 km、年別では 14~18 km の範囲だった。また、70% 予測楕円の長径・短径の長さは年による変動が少なく、ほぼ長径が 21 km、短径が 18 km である。

Fig. 5 に、各事例の落下予測中心からみた落下観測点の分布を示す。落下予測中心の周りの落下観測点のばらつきは東西方向に大きい傾向があるが目立った偏りは見られない。さらに、距離を規格化した上で落下観測点の予測楕円上での位置を示したのが Fig. 6 である。この図では、これまでの図と異なり、予測楕円の長径方向を横軸にとっている。規格化後でも長径方向のばらつきが短径方向に比べやや大きいことがわかる。この図における落下観測点の予測楕円中心からの距離が規格化された距離誤差で、その平均値は 1.21 だった (Table 1)。図には、落下予測範囲の目安となる、70%、

Fig. 4 Scatter plot between observed and simulated sonde landing positions in (a) east-west direction, and (b) north-south direction. Distance from Tateno in each direction is shown. Corresponding regression lines and squares of correlation coefficients are also shown.

Table 1. Mean prediction errors in sonde landing position and mean probability ellipse parameters in individual year and total. Errors in distance are defined as (observed landing position) – (simulated center position of landing, i.e., center of probability ellipse). The angle of the ellipse is measured anticlockwise from the x-axis. Normalized distance error is also shown.

Year	Number of cases	Mean error (OBS-AOS landing position)			70% probability ellipse			Normalized error		
		E-W (km)	N-S (km)	Distance (km)	Angle (deg)	R_l (km)	R_s (km)	R_l -direction	R_s -direction	Distance
2004	118	-6.7	-1.7	17.9	17	22.0	17.8	-0.30	0.11	1.32
2005	113	4.2	-3.5	16.5	5	21.6	18.0	0.16	0.04	1.26
2006	102	-2.9	-3.4	18.2	15	21.4	17.9	-0.10	-0.08	1.34
2007	109	5.1	-1.2	14.5	17	21.3	17.6	0.20	-0.12	1.12
2008	99	-1.2	-2.7	14.7	8	21.2	17.9	-0.07	-0.02	1.11
2009	89	-4.8	-6.0	15.6	19	21.8	17.9	-0.33	-0.10	1.15
2010	98	2.5	-3.6	14.2	9	20.8	18.0	0.06	-0.09	1.12
Total	728	-0.5	-3.1	16.0	13	21.4	17.9	-0.05	-0.03	1.21

Fig. 5 Observed sonde landing positions relative to the center of probability ellipse.

Fig. 6 Observed sonde landing positions relative to probability circle in normalized coordinates.

90%、99%予測楕円に相当する円も示している。

Table 2 に、70%、90%、99%予測楕円内に入った落下観測点の割合を示した。予測上着目されることの多い70%予測楕円内には全期間の平均で落下観測点の75%が含まれ、予測よりも高率でこの範囲内に落下していた。70%予測楕円内に含まれる落下観測点の割合が70%未満だったのは2004年のみだった。いっぽう、99%予測楕円内に含まれる落下観測点の割合は平均で96%にとどまり、4%にあたる29例が99%予測楕円よりも外側に落下していた。これらの中に当たる90%楕円には、全期間の平均で落下観測点の87%が含まれ、予測された落下確率に近い比率となっていた。落下位置予測に用いるGPVがRSMからGSMに切り替えられてからの夏季3年分(2008年～2010年)で見ると、90%の落下観測点が90%予測楕円に含まれていることから、現行のモデルによる予測では、90%予測楕円が落下観測点の90%分布範囲と合致している、つまり、90%予測楕円は落下範囲の予測指標として適当であるといえる。

落下観測点の予測楕円上での分布をさらに詳しく見るため、規格化された距離誤差(2.2節)の出現度数分布をFig. 7(a)に示す。図の横軸は、予測楕円の中心からの規格化距離 r_n で、実線はAOSで予測された二次元正規分布の出現度数分布を示している。 $r_n = 1$ が落下予測点分布の標準偏差に、 $r_n = 1.55$ 、 2.15 、 3.03 がそれぞれ70%、90%、99%予測楕円の径に相当する。規格化された距離誤差の出現度数は予測値(実線)に比べ $r_n \leq 1$ で大きく、 $r_n = 2$ 前後では少なめ、 $r_n \geq 3$ で再び大きくなっている。累積出現度数(Fig. 7b)を見ると、 $r_n = 1$ で0.5を超え、落下観測点の半数以上は予想楕円の中心から $r_n = 1$ までの範囲内にあったことがわかる。累積出現度数は $r_n = 1.5$ 付近までは予測値(実線)よりも大きい、 $r_n = 2$ 付近で一致したあとは $r_n = 4$ 付近まで予測値を下回る。つまり、落下観測点は予測された落下範囲に比べて規格化距離の小さい範囲に集中する傾向があるいっぽう、規格化距離の大きいところにも予測以上に存在していた。Table 2で示した各予測楕円の予測精度にもこの分布特性が現れているといえる。

Table 2. Number and rate of observed landings within 70, 90, and 99% probability ellipses.

Year	Total number	Number of cases inside of probability ellipse			Rate (%)		
		70% ellipse	90% ellipse	99% ellipse	70% ellipse	90% ellipse	99% ellipse
2004	118	81	98	114	69	83	97
2005	113	84	101	108	74	89	96
2006	102	72	80	94	71	78	92
2007	109	85	99	108	78	91	99
2008	99	75	90	96	76	91	97
2009	89	66	78	85	74	88	96
2010	98	80	89	94	82	91	96
Total	728	543	635	699	75	87	96
2008–2010	286	221	257	275	77	90	96

Fig. 7 Distribution of (a) normalized frequency and (b) normalized accumulated frequency of normalized distance between observed and simulated landing positions.

3.2 検証結果の考察

AOS に用いるパラメータのうち、予測楕円の拡がりにもっとも大きく影響するのは風速の予報誤差を表現するために水平風 GPV に付加する風のばらつきである (中野・藤田、2002)。2.1 節で述べたように、AOS では水平風速 GPV に (1) 式の標準偏差を持つ正規分布の風速偏差を付加することで航跡のばらつきを与えているが、仮に実況に対する数値予報モデルの水平風速予報誤差がこれより小さければ、予測楕円の中心近くに落下する例は予測された割合よりも多くなると考えられる。そこで、前節で示した距離誤差の出現特性の考察のため、検証期間の 12UTC イニシャル・FT = 12 における館野直近の GPV について、00UTC における館野のゾンデ観測による実況値 (852 例の指定気圧面データ) に対する全層平均風速の予報誤差を調べた。すると、平均誤差 (バイアス) は東西風では -0.12 ms^{-1} 、南北風では 0.01 ms^{-1} 以下と十分小さく、また、標準偏差は、東西風が 1.06 ms^{-1} 、南北風が 0.93 ms^{-1} で、AOS で用いた風のばらつきの標準偏差 ((1) 式より、FT = 12 では 1.15 ms^{-1}) と比べ、若干小さいことがわかった。さらに、Fig. 8 に示すとおり、風速偏差の出現度数は、上記の平均誤差と標準偏差から決まる一次元正規分布に比べて、ずれの小さい部分に集中する傾向が見られ、正

規分布では 70% のデータが含まれる範囲内に、東西風では 78%、南北風では 74% のデータが含まれていた。3.1 項で示した距離誤差の分布特性のうち、70% 予測楕円内に 7 割以上の落下観測点が含まれていたことには、このような数値予報モデルの予報特性が関わっていると考えられる。いっぽう、風速偏差の大きい部分での出現度数は正規分布とほぼ一致しており、AOS の予測において 99% 予測楕円の外にあった落下観測点が予測よりも多かったことは水平風速の予報特性では説明できない。なお、2004 年から 2010 年までの通年データにおいても、GPV の誤差には夏季と同様の傾向が認められた。

水平風速予測値のばらつき以外に AOS で使用されるパラメータのうち、降下速度比 (付録 A.3 参照) は、2004 年から 2009 年までの期間、観測された降下速度に基づく値が算出されていた。この、実測に基づく降下速度比二乗値 (K^2) の出現分布を AOS で用いている分布と比べたところ、実測による K^2 の最頻値は AOS で採用されている確率分布よりも絶対値の小さい側に出現し、そのいっぽうで極端に K^2 の大きい例の出現比率は AOS の確率分布に比べ大きかった。Fig. 9 に、 $K^2 \leq 3$ における両者の出現分布を示す。AOS では $K^2 \leq 1.8$ の範囲に 99% 以上が含まれると仮定されているが、観測データでは、 K^2 値が 1.8 を超えた事例が約 10%、 K^2 値が 3.0 を越えた事例が約 7% (630 例のうち 44 例) あった。 $K^2 > 3.0$ では、過半数 (23 例) が 90% 落下予測楕円外に落下していた。なお、検証期間中の 600 g 気球使用時の標準的な機材設定 (懸垂物重量 300 g) では、降下速度 5.0 ms^{-1} が $K^2 = 1.7$ に、降下速度 6.6 ms^{-1} が $K^2 = 3.0$ に相当する。90% 落下予測楕円外に落下していた事例 (対象事例の 13%) では、そうでない事例に比べ、 K^2 の極端に小さい事例の割合は低く、 K^2 の大きい事例の割合が相対的に高かった。さらに、2004 年から 2010 年の全期間で 99% 予測楕円外に落下した 29 例中では、降下速度が 5.0 ms^{-1} を超えるケースが半数以上の 17 例あった。このことから、 K^2 が大きい (降下速度の大きい) ケースが AOS で仮定していたよりも多く出現していたことが 99% 予測楕円外に落下した事例数が予測よりも多かった一因と考えられる。

AOS の予測精度は気象条件によっても異なると推察される。放球地点において放球時に降水のあった場合と降水のなかった場合に分けて、落下観測点が 90% 予測楕円に入ったかどうかを調べると、Table 3 のように、降水ありの場合には 90% 予測楕円外に落下した割合が明らかに高かった。つまり、90% 予測楕円を指標とした場合、AOS の予測精度と降水の有無は独立ではなく依存性があるといえる。上述の水平風 GPV データを降水があった場合と降水がなかった場合にわけて調べたところ、東西風、南北風とも全層平均風速の実況に対する標準偏差は、片側 t 検定により有意水準 5% で降水ありの場合のほうが大きいという結果が得られた。また、降下速度と降水の有無にも関連のあることがわかる (Table 4)。全体の 88% を占める降水なしの観測では、降下速度が 5.0 ms^{-1} を超えた割合は 9% だったの

Fig. 8 Histogram of error in predicted wind speed (1200 UTC initial, FT = 12) at Tateno versus 0000 UTC sonde observation for (a) east-west wind and (b) north-south wind. Solid lines denote fitting normal distribution curves.

Fig. 9 Frequency distribution of squared rate of descending speed to reference speed, K^2 . Bar chart indicates observation, and solid line, the assumed K^2 distribution in AOS for 600 g balloon and normal parachute.

Table 3. Relation between observed landing position and weather at launch (unit: number of cases).

Landing point	Weather		Total
	No rain	Rain	
Within 90% ellipse	568	67	635
Outside 90% ellipse	69	24	93
Total	637	91	728

に対し、降水有りの場合は、28%だった。降水時の観測では、観測機材への着氷等により、降下過程におけるパラシュートの開傘状況などに影響することがその原因と考えられる。このように、降水時のAOS予測ではいくつかの要因が複合して的中率を下げてしていると推察される。降水時には、撥水性の高い雨天用パラシュートを用いて観測機材への降水影響の低減が図られている

Table 4. Relation between observed descending speed and weather at launch (unit: number of cases).

Descending speed \ Weather	No rain	Rain	Total
$vz < 5.0 \text{ ms}^{-1}$	585	71	656
$vz \geq 5.0 \text{ ms}^{-1}$	52	20	72
Total	637	91	728

るが、AOSにおいても、雨天時には晴天時と異なるパラメータ設定を導入することが落下予測精度の向上につながる可能性がある。

4. 研究観測への適用

4.1 観測の概要

2011年の8月から10月、および2012年の8月と9月に、TOMACSプロジェクトの集中観測期間（Intensive Observation Period, IOP）を中心として29回のGPSゾンデ観測が実施された。放球場所は、高層気象台放球場（茨城県つくば市）である。この観測では、対流圏内での気象データ取得が主目的となるため、現業の高層気象観測で使用されている600 g気球に代えて200 g気球を用いた。これにより、期待される到達高度は通常の観測時よりも低い22 km程度となって成層圏での夏季の東風の影響を受けにくくなる。観測時の気球浮力は2011年8月は1800 gまたは1600 gとして到達高度と飛距離を確認し、この試行結果を踏まえそれ以降は1200 gとした。その他の観測設定は現業観測と同様だが、気球残骸によるパラシュート開傘の障害が起りにくいよう通常夏季にのみ使用されているパイプセパレータ（成田ほか、1999；熊本ほか、2005）を全ケースで使用した。気球からパラシュートまでの距離、およびパラシュートからゾンデまでの距離はいずれも7.5 mである。放球時に降水がある場合は、雨天用パラシュートを用いた。

4.2 落下予測の適用とパラメータの見直し

この観測において、上述の観測設定に合わせたパラメータを用いてAOSによる落下予測を行い、観測当日の実施判断の参考とした。ただし、200 g気球については、これまでの観測事例数が少ないため、暫定的なパラメータが設定されていた。そこで、200 g気球用の落下予測に必要なパラメータについて、今回の29事例の研究観測のデータから見直しを行った。例数が限られることから、上昇速度、到達気圧、降下速度の代表値にかかわるパラメータを中心に見直した。

4.2.1 上昇速度

今回、300 hPaより上空までデータが取得された25例のうち、上昇速度が他と大きく違った2例（25例の平均値に対し、標準偏差の2倍以上のずれがあったもの）を除く23例で観測された上昇速度をFig. 10に示す¹。AOSの上昇速度算出においては、200 g気球の抵

Fig. 10 Dependency of sonde ascending speed on pressure level. Thin lines denote observed profiles of 23 soundings in 2011 and 2012 IOP, in which 200 g balloons were used. Light blue line shows average of these observations. Ascending speeds used in AOS before (after) parameter revision are shown in red (blue).

抗係数のパラメータ (c_0, c_1, g, h) に600 g気球用の値(0.82, -0.381, 2.4, 5.07)をそのまま使用していたが、これらを用いて見積もられた上昇速度 (Fig. 10の赤線) は観測値に比べて過大な傾向があった。これは、200 g気球の抵抗係数が、600 g気球用に設定された抵抗係数より大きかったことを意味している。その理由としては、気球の大きさと上昇速度から決まるレイノルズ数が600 g気球使用時と200 g気球使用時で異なる（200 g気球使用時のほうがレイノルズ数は小さい）ことが影響していると考えられるが、高層での気球の性状など不明な点も多く、実効的な抵抗係数が何によって決まるのかを詳しく考察することは難しい。

観測された上昇速度に基づいて(A.1)式から見積もられた抵抗係数の高度分布をFig. 11に示す。これらに対するフィッティングにより、200 g気球使用時に適用する抵抗係数のパラメータをあらたに(0.94, -0.38, 2.3, 4.5)とした (Fig. 11、青線)。23事例の平均的な気温プロファイルに対して見直し後の抵抗係数から見積もられる上昇速度の分布をFig. 10に示した。40 hPaまでの全層平均上昇速度は、パラメータ見直し前が5.4 ms^{-1} 、見直し後は5.1 ms^{-1} で、見直し後は実測（23事例平均で5.0 ms^{-1} 、200 hPa以上まで到達した事例の平均では5.1 ms^{-1} ）と合うように改善されていることがわかる。

¹ 1000~40 hPaまでの20の気圧面に対し、大気密度はその気圧面での気温から気体状態方程式より算出した。気球の断面積も、気球内の空気の温度が一樣で大気気温と等しいと仮定し同様に求めた。上昇速度は、変動成分の影響を抑えるために、隣り合う気圧面との中間高度（幾何平均高度）間での平均上昇速度とした。すなわち、気圧面 $p(i)$ の中間高度を幾何平均 $p_h(i) = \sqrt{p(i-1)p(i)}$ で定義し、 $p_h(i) \leq p < p_h(i+1)$ の平均上昇速度を用いた。ただし、 $i=1$ の1000 hPaについては、 $p_h(1)$ を地上気圧としている。

Fig. 11 Same as Fig. 10, but for drag coefficient.

4.2.2 到達気圧

200 g 気球使用時の到達高度（気圧）に関する暫定パラメータは、2000 年頃に気象研究所が行った研究観測を元にしており、この時得られた到達高度は、1200 g の浮力を与えた場合に約 60 hPa となっていた。今回の観測データ（受信不良で観測終了となった 6 例と、上昇速度と同様の基準で除外した 2 例を除く 21 事例）で見直した結果、到達高度は約 38 hPa と暫定パラメータより高高度となった。その理由としては、過去データには、受信不良で観測終了となった事例が含まれていた可能性や、気球に充填するヘリウムガス（過去の研究観測で使用）と水素ガス（今回の観測で使用）の密度差、充填量のバラつき、気球の性能向上といったことが考えられる。観測された到達高度の頻度分布を Fig. 12 に示す。なお、気球浮力が 1200 g 以外の事例では、気球浮力 1200 g とした場合に換算した到達気圧を用いた（付録 A.2 参照）。

今回、21 事例から求めた到達高度の標準偏差は、暫定値（付録 A.2 の 600 g 気球に対する標準偏差）と比べ有意な差はなかった。そこで、到達気圧に関する暫定パラメータのうち、正規分布の平均値のみを変更した。これにあわせて、指数分布との接続点は、見直し前後の分布形が変化しないよう変更した。

4.2.3 降下速度

降下時のデータは 15 時観測の 10 例で取得された。この 10 例の降下速度の平均値は 2.9 ms^{-1} だった。200 g 気球使用時の理論降下速度は 2.936 ms^{-1} であることから、この平均速度に対する降下速度比二乗値 (K^2) は約 1 となる。そこで、 K^2 の代表値（正規分布の平均値で最頻値に一致）として、暫定パラメータでは 600 g 気球使用時の値 0.658 を使用していたが、あらたに 200 g 気球に対する値として 1.0 を採用した。いっぽう、10 例の K^2 の標準偏差は約 0.72、（外れ値を除いた 9 例では 0.53）だった。これは、暫定パラメータで K^2 の正規分布近似部分の標準偏差を 0.108 と設定しているの比べて、かなり大きい値である。仮に今回得られた標準偏差を適用した場合、予測楕円の径が大幅に広がり、

Fig. 12 Frequency distribution of pressure level sonde reached for 200 g balloon used in observed data (grey bar), AOS before revision (broken line), and AOS after revision (thick line).

予測としては実用上ふさわしくない。しかし、暫定パラメータの標準偏差を変更せずに、 K^2 の代表値を 0.658 から 1.0 に変えると、降下速度の増大に伴って滞空時間が減少するために予測楕円の径が小さくなってしまう。そこで、200 g 気球の K^2 代表値を 1.0 としたときの予測楕円の径が、暫定パラメータ使用時と同程度になる K^2 の標準偏差として 0.24 を用いることにした。Fig. 13 に、 K^2 の観測度数、および見直し前後のパラメータによる度数分布を示す。AOS 予測における地上付近の降下速度代表値は、200 g 気球に 300 g の懸垂物があった場合、見直し前は約 2.4 ms^{-1} 、見直し後は 2.9 ms^{-1} である。今回の降下速度パラメータ見直しでは事例数が限られたため、今後のデータの蓄積を待って降下速度の代表値と K^2 標準偏差の妥当性をさらに検討する必要がある。

4.3 パラメータの見直しによる予測結果の改善

200 g 気球による観測（落下位置データの取得された 10 事例）に対し、見直し前後のパラメータを用いて AOS シミュレーションを行ったところ、Table 5 のよう

Fig. 13 Same as Fig. 12, but for square of descending speed ratio to the reference descending speed.

Table 5. Same as Table 1, but for the AOS results of 10 cases in 2011 and 2012 IOP before and after parameter revision.

AOS	Number of cases					Mean error (OBS-AOS landing position)			70% probability ellipse			Normalized error		
	Total	inside 70%	70–90%	90–99%	outside 99%	E–W (km)	N–S (km)	Distance (km)	Angle (deg)	R_l (km)	R_s (km)	R_l -direction	R_s -direction	Distance
OLD	10	4	3	2	1	–18.0	3.5	20.3	9	23.9	12.5	–1.32	0.66	1.80
REVISED	10	4	5	0	1	–11.4	3.8	15.9	10	24.1	12.9	–0.85	0.62	1.49

に、見直し前の暫定パラメータ使用時は、ゾンデの落下位置が90%予測楕円内だったケースは7割(7例)だったが、見直し後は9割が90%予測楕円内に落下し、より適切な予測結果が得られた。距離誤差は、10例の平均で20.3 kmから15.9 kmと改善されている。見直し前後での70%予測楕円の径の違いは3%以下と小さい。4.1~4.3節で述べたAOSパラメータの見直しのうち、上昇速度の減少と到達高度の上昇は予測されるゾンデの飛距離を大きくする方向に、降下速度の増加は予測飛距離を短くする方向に働く。これら全体の効果によって、ゾンデ落下までの飛距離の予測値は10事例の平均で約7 km短くなっていた。規格化された予測楕円上での落下観測点の分布をFig. 14に示す。見直し前(OLD)に比べ、見直し後(REVISED)は、規格化された距離誤差が小さくなり、落下観測点が90%予測楕円内に収まる例が増えているが、全体に落下予測中心の左側(放球地点に近い側)への偏りが見られる。これは、ゾンデの落下までの飛距離の予測がパラメータの見直し後においても過大だったことを意味する。

そこで、考察のため、AOSにおいて予報モデルGPVに替えてゾンデ観測による実況風を用いた計算(実況風計算)も行った。この計算による予測楕円上の落下観測点の分布をFig. 15に示す。ここで、規格化のために用いた予測楕円の径はFig. 14と同一である。実況風計算においては、水平風速の予報誤差は除かれている

ため。Fig. 15における予測楕円上の落下観測点のばらつきは、AOSで用いた上昇速度・到達高度・降下速度のパラメータ設定に依存する。見直し前の落下観測点分布が落下予測中心より左側に偏っているのは、暫定パラメータにおいては実際よりも遠方に到達する予測バイアスを持っていたことによる。パラメータ見直し後は、1例を除き落下観測点は70%楕円内に位置し、観測条件に関わるパラメータ設定に起因する偏りは改善されていることがわかる。

モデルGPVを用いたFig. 14と、実況風に基づくFig. 15における落下観測点の分布の違いは、モデルの水平風速バイアスに起因するものであり、今回の10事例においては、モデルで予報された長径方向の風速値が全般に過大だったことを示している。すなわち、Fig. 14でみられる、パラメータ見直し後の落下予測楕円上での落下観測点の偏りには、水平風の予測誤差が影響していた。こうした傾向が一般的なものかどうかについては、さらに調べていく必要がある。また、600 g気球使用時のルーチン観測(館野、2004-2010年の6~9月分)では、7割以上が70%予測楕円内に落下していたのに対し、200 g気球では70%予測楕円内に落下したケースは見直し後も4割にとどまった。データの蓄積により、予測精度の確認を進め、精度向上を図ることが今後の課題といえる。

Fig. 14 Same as Fig. 6, but for 10 cases in 2011 and 2012 IOP in which landing positions were detected. ♦ Results obtained from AOS before parameter revision. ● Those obtained after AOS parameter revision.

Fig. 15 Same as Fig. 14, but for observed sonde landing positions relative to probability circle in the AOS simulation using observed horizontal wind data.

5. まとめ

2011 年および 2012 年の夏季を中心におこなわれた TOMACS ゾンデ観測への利用のため、ゾンデ飛行予測 (AOS) プログラムの精度検証を行なった。館野における 7 年間の夏季における 600 g 気球使用時のデータについて調べたところ、落下予測中心位置の落下観測点に対する位置ずれ誤差は平均で東西方向に 0.5 km、南北方向に 3.1 km とほぼ偏りがなく、両者の距離誤差は平均 16 km だった。落下範囲の予測については、70% の確率で落下すると予測された範囲である 70% 予測楕円の中に、76% の落下観測点が収まっていた。90% 予測楕円には 90% 近い落下観測点が含まれ、これが実際の落下範囲の予測指標として概ね適当であった。このように、AOS プログラムはゾンデの落下範囲について有用な情報を提供できるものであるといえる。ただし、99% 予測楕円の中に含まれていた落下観測点は全体の 96% にとどまり、99% 予測楕円を指標として用いる場合にはこの程度の誤差があることに留意する必要がある。

この AOS の予測特性のうち、距離誤差の小さい事例の割合が予測よりも多いことについては、「計算に用いる水平風速 GPV の実測風に対する誤差は、AOS で設定されている水平風速のばらつきよりも標準偏差が小さく、また、誤差の小さい部分に集中する傾向がある」という数値予報モデルの水平風予測特性を反映していることがわかった。いっぽう、99% 予測楕円外となるような距離誤差の大きい事例が予測よりも多かったことは、降下速度の大きい事例が想定された確率分布よりも多く出現していたことが一因だと考えられる。また、降水のあるときには水平風速予測の標準偏差と観測される降下速度がともに大きい傾向があり、降水時の AOS 予測では風速の予測精度と観測に起因する要因が複合して的中率を下げていると考えられる。そこで、降水が予測される場合には、晴天時とは異なるパラメータ設定を用いて AOS の精度向上を図ることが望ましい。

TOMACS における一連の観測においては、成層圏でのゾンデの西進を少なくし落下域が海上になりやすいよう 200 g 気球を用いた。観測設定に合わせたパラメータを用いて AOS による落下予測を行い、29 事例のゾンデ観測を実施した。200 g 気球については、これまでの観測事例数が少ないため、暫定的なパラメータが設定されていたが、今回の取得データから、上昇速度、到達気圧、降下速度の代表値にかかわるパラメータを中心に見直しを行った。その結果、見直し前は、落下位置が確認された 10 事例のうち、90% 予測楕円に落下したものは 7 例だったのに対し、見直し後は 9 例となり、予測に改善が見られた。ただし、70% 予測楕円内への落下割合はパラメータの見直し後も 4 割にとどまり、予測性能向上のためには、今後さらなるデータ蓄積が必要である。

謝 辞

本研究は、文部科学省・社会システム改革と研究開発の一体的推進「気候変動に伴う極端気象に強い都市創り」の支援により実施されました。2011 年および 2012 年のゾンデ観測は、気象研究所の当該研究メンバーと、高層気象台観測第二課のご協力により実施されました。ここに御礼申し上げます。

付 録

A. ゾンデ飛行予測におけるパラメータの設定

ゾンデの上昇から降下・着水までの飛行経路は、風などの大気条件と観測設定に応じて決まるが、同一の観測設定であっても、気球の個体差や大気状態、与える浮力の誤差などによって、個々の観測における上昇速度・到達高度・降下速度にはばらつきがある。そこで、落下予測の際には、過去の観測資料を基にこれらの分布形のパラメータ化を行っている。ここでは、中野・藤田 (2002) に沿って、600 g 気球使用時の例を中心にその概要を述べる。

A.1 上昇速度

ゾンデの上昇速度は、水素ガスまたはヘリウムガスを充填した気球の浮力、ゾンデ等懸垂物にかかる重力、主に気球が大気から受ける抵抗力のつりあいによって決まる終末速度と考えられる (気象庁、2004)。なお、観測に用いる気球の種類 (大きさ) や設定する浮力については、適正な通風および到達高度を確保できるよう、高層気象観測指針 (気象庁、2004) で観測種別毎に規定されている。これによって決まる上昇速度を計画上昇速度という。

AOS では、高度毎の上昇速度を

$$V_z = \sqrt{\frac{2g(L-M)}{c_d \rho S}} \quad (\text{A.1})$$

V_z : 上昇速度	[ms ⁻¹]
g : 重力加速度	[ms ⁻²]
L : 気球の浮力	[Kg]
M : 懸垂物質量	[Kg]
c_d : 気球の抵抗係数	[無次元]
ρ : 大気密度	[Kg m ⁻³]
S : 気球の断面積	[m ²]

から求め、さらにこの代表値からのばらつきを過去の観測に基づいて与えている。ここで、気球の浮力は気球に充填された気体と大気密度差で決まる浮力から気球の重量を引いたものとして定義され、観測時の浮力・重量に一致する。(A.1) 式右辺の分母に現れる抵抗係数 c_d は、気圧 (高度) に依存する経験式

$$c_d(p) = c_0 + \frac{c_1}{1 + \exp\{-g(\ln p - h)\}} \quad (\text{A.2})$$

から算出される。パラメータ (c_0, c_1, g, h) は気球種類

に応じて決まると考えられ、600 g 気球については、このパラメータの組として (0.82, -0.381, 2.4, 5.07) が使用されている。

1996 年から 2001 年までに高層気象台で得られた観測資料から、600 g 気球を用い、気球浮力 1900 g とした場合、地上から 200 hPa までの平均上昇速度の二乗がほぼ正規分布になることが確かめられている。そこで、AOS では、正規分布に従う速度二乗のばらつきを仮定し、試行計算毎に高度によらない一律なばらつきを (A.1) 式の上昇速度に付加している。600 g 気球に対しては標準偏差 3.66 (m²s⁻²) の正規分布を採用している。

A.2 到達気圧

ゾンデを懸垂する気球は天然ゴムでできており、上昇（気圧の減少）に伴い膨張し、ついにはその張力の限界に達し破裂する。一般に、ある上昇速度を持つよう浮力を設定した場合、その到達高度は気球のサイズが大きいほど高くなる。また、同一の気球の場合、与える浮力が大きいほど到達高度は低くなる（渋江ほか、2001）。

気球内の温度差を無視すれば、浮力変更時の到達気圧は次式で補正できる。

$$P' = P \frac{Mb + L'}{Mb + L} \quad (\text{A.3})$$

ここで、

P' : 補正後の到達気圧	[hPa]
P : 標準の到達気圧	[hPa]
L' : 変更時の気球浮力	[kg]
L : 標準の気球浮力	[kg]
Mb : 気球の質量	[kg]

である。

実際の観測においては、気球の種類と観測設定が同じであっても個体差などにより到達高度はばらつきを持つ。この分布は気圧の対数に対する正規分布と指数分布の複合形で近似できる。600 g 気球、浮力 1900 g のレーウィンゾンデ観測においては、平均到達気圧は約 7.2 hPa、対数正規分布の標準偏差は 0.124 となる。この標準偏差よりも低高度側で、指数分布が適用されている。これにより、正規分布の中央値で表される到達気圧の最頻値に対して、低高度側にやや出現頻度の高い分布特性が表現されている。

A.3 降下速度

気球が破裂したあと、ゾンデは落下を始める。このときに緩降下となるよう安全対策としてパラシュートが接続されている。これらの降下速度は、主にパラシュートが大気から受ける抵抗力と、破裂した気球残骸を含む飛揚機材の総重量で決まる終末速度となる。

ここで、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 V_{zm} (理論降下速度) に対する、実際の降下速度 V_{zo} の比 (降

下速度比 K) をとれば、

$$K = \frac{V_{zo}}{V_{zm}} = \frac{\sqrt{\frac{2gM_{obs}}{c\rho S_{obs}}}}{\sqrt{\frac{2gM_{max}}{c\rho S_{max}}}} \quad (\text{A.4})$$

K : 降下速度比

V_{zo} : 実際の降下速度 [m/sec]

V_{zm} : 理論降下速度 [m/sec]

M_{obs} : 実際の総質量 [kg]

M_{max} : 最大総質量 [kg]

S_{obs} : 実際の抵抗面積 [m²]

S_{max} : 最大抵抗面積 [m²]

と表わされる。この降下速度 K の二乗値 (K^2) は気球の残骸を含む総質量の残存率とパラシュート開傘面積に関する値となり、降下時の状態を表すのに適当な指標となる。

$$K^2 = \frac{S_{max}}{S_{obs}} \cdot \frac{M_{obs}}{M_{max}} \quad (\text{A.5})$$

速度比 K を式で表せば次のようになる。

具体的には、 $K > 1$ ($K^2 > 1$) の場合にはパラシュートに何らかの機能障害（開傘が不十分など）が起きていることを示し、 $K \leq 1$ ($K^2 \leq 1$) の場合にはパラシュートの機能が発揮されていると考えることができる。

AOS では、過去のデータから、 K^2 が正規分布と指数分布の複合形で表されるものとして、降下速度の確率分布を表現している。600 g 気球使用時の K^2 の分布を Fig. 9 の実線で示した。主に K^2 が 1 未満の部分で正規分布をなしており、この部分ではパラシュートの機能が発揮され、主に気球残骸重量の分布に対応すると考えられる。また、 K^2 が 1 を超える範囲では、指数分布で近似可能である。

参考文献

- 石原正仁, 2011: 稠密観測による極端気象のメカニズム解明 局地的大雨をもたらす積乱雲の発生・発達メカニズムに迫る. *防災科研ニュース*, **174**, 5-9.
- 伊藤智志・奥山順健, 2008: オゾンゾンデの飛行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**, 23-26.
- 岩崎 学, 2004: 統計的データ解析のための数値計算法入門. 朝倉書店, 216 p.
- 岩坪昇平, 2005: ゾンデの飛行予測情報システムの利用について. *高層気象台彙報*, **65**, 17-22.
- 気象庁, 2004: 高層気象観測指針.
- 熊本真理子, 佐藤昌志, 日野原正巳, 金子哲治, 2005: 回収された落下ゾンデに関する調査. *高層気象台彙報*, **65**, 9-16.
- 渋江 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ー到達高度・上昇速度・ガス漏洩量ー. *高層気象台彙報*, **61**, 59-68.
- 中野辰美・藤田 健, 2002: ゾンデの飛行予測シミュレーション

- 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.
- 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.
- 藤田 健, 2003: ゾンデの飛翔予測情報システムの開発, *高層
気象台彙報*, **63**, 13-18.
- 吉崎正憲, 中村 一, 中村健治, 1999: つくば域降雨観測実験,
気象研究ノート, (193), 288 p.

ゾンデ飛翔予測プログラムの精度検証と TOMACS 観測への適用

清野直子（気象研究所予報研究部）
中野辰美（地球環境・海洋部環境気象管理官付オゾン層情報センター）
能登美之（高層気象台観測第三課）
大野恭治（高層気象台観測第二課）

気象研究所が参画する研究プロジェクト「気候変動に伴う極端気象に強い都市創り」(Tokyo Metropolitan Area Convection Study for Extreme Weather Resilient Cities, TOMACS) では, 2011 年と 2012 年の夏季を中心に, 首都圏における積乱雲の発達環境等を調べる目的でつくばにおいてゾンデ観測を実施した. この観測への利用を図るため, 高層気象台で開発された気象観測用ゾンデの飛翔予測プログラム (Aerological Observation Simulation, AOS) について, 落下予測精度の検証を行った. 館野における 2004 年から 2010 年までの夏季 (6 月～9 月) を対象期間とし, 9 時の高層気象観測のうち落下位置情報が取得されていた 728 事例について, AOS による予測落下位置を観測された落下位置と比較したところ, 予測と観測の位置ずれは平均としては偏りが小さく, 距離誤差の平均は約 16 km だった. 観測された落下位置の 75% は, 70% 予測楕円内に収まっていた. また, 90% 近い事例では, 落下観測位置が 90% 予測楕円内にあり, 落下範囲の予測はしきい値 90% で概ね観測と整合していたといえる. いっぽう, 99% 予測楕円の中に含まれていた観測落下位置は全体の 96% で, 予測よりも低い割合にとどまった. 70% 予測楕円内に落下していた事例が 70% 以上あったことには, AOS で水平風速の予報誤差を表現するために設定されていた風速のばらつきよりも, 計算に用いた数値予報モデルの水平風予報誤差が小さかったことが関係していた. また, 観測時に降水のあった事例では AOS の予測誤差が大きい傾向が見られた.

2011 年と 2012 年の集中観測期間 (Intensive Observation Period, IOP) を中心とするゾンデ観測に, AOS プログラムを適用した. この観測では, 200 g 気球を用いて到達高度を現業観測より低い 22 km 程度とし, 下部成層圏での東風の影響を受けにくくすることで, ゾンデ落下域が海上になりやすい設定とした. 観測で得られたデータに基づき, AOS において 200 g 気球使用時に用いる上昇速度・到達高度・降下速度のパラメータの見直しを行なった. その結果, 落下予測精度が向上することを確認した.