

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

伊藤 智志*・奥山 順健*

Reparameterization of the Ozonesonde Flight Simulation Program

Satoshi ITO and Junken OKUYAMA

要旨

オゾンゾンデの飛翔予測シミュレーションプログラムについて、最新データを加えた観測データを用いて到達気圧および降下速度についてのパラメータの再設定を行った。落下位置監視プログラムによる落下監視位置を基準に現行と新規の到達気圧および降下速度についてのパラメータを用いて落下予測位置の比較検証を行ったところ、新規到達降下パラメータは予測楕円の範囲が広がる傾向があるものの、パイプセパレータ付パラシュートを使用した場合の改善は予測楕円内に落下監視位置が含まれる確率で 15.9%分、規格化距離でみた予測位置誤差の平均で 0.341、絶対距離で 1.9km の精度向上が認められた。本稿におけるパラメータ導出手順や評価手法の記述は、使用実績のない器材導入時におけるパラメータ設定やそのデータの蓄積に応じた精度評価とパラメータの更新にも参照できるものである。

1. はじめに

オゾンゾンデ観測に用いるオゾンゾンデはレーウィンゾンデより大きく重量も約 1kg あることから、使用する気球やパラシュートも大型になり、気球の後流の影響を少なくするため気球とオゾンゾンデ間の吊り紐も 50m が必要である。したがって、オゾンゾンデの落下位置が主要空港周辺や大都市市街地等に予測される場合は、落下時の安全を考慮して翌日以降に飛揚を延期している(気象庁：1997)。落下位置の予測を行ううえで、飛翔予測シミュレーションプログラム(中野・藤田：2002，藤田：2003)は重要なツールであり、オゾンゾンデ観測官署ではオゾンゾンデ観測の実施に先立ち、このプログラムを用いて落下位置を予測して飛揚の可否判断材料の 1 つとしている。

最近、気球原材料の変更等があり、当初飛翔予測プログラムのパラメータで設定した気圧に到達しない事例が多くみられる。また、オゾンゾンデ観測に使用するパラシュートには開傘面積が 2.5m^2 のパイプセパレータ付パラシュート(以下、セパ付パラという)と 1.0m^2 のオゾンゾンデ用パラシュート(以下、オゾンパラという)があり、重

量や取付形態も異なるこれら 2 種類のどちらかを飛揚ごとに選択しているが、飛翔予測プログラムの降下速度の一部パラメータについては共通の設定値が用いられている。これらのことから、到達気圧およびパラシュート別の降下速度についての調査、さらには関連するパラメータの再設定についての検討が必要となった。最新データを加えた観測データから算出したパラメータを再設定することにより、落下位置の予測精度向上が期待できる。本稿では到達気圧に加えて降下速度に関するパラメータの再設定も実施したので、パラメータの再計算過程と予測精度の検証結果について報告する。

2. 落下位置に関する各種プログラムの現状

2.1 飛翔予測プログラム

飛翔予測シミュレーションプログラムは落下位置予測プログラムとも呼ばれ、各種ゾンデを飛揚する前に数値予報データ(GPV)を用いて、高層気象観測に使用する飛揚器材(以下、ゾンデという)に応じて使用後の器材の落下位置を予測するプログラムである。この飛翔予測シミュレーションプログラムはゾンデの構成に応じたパラメータが設定されている。パラメータは個別器材の重量のほか、気球の種類(重量)別に上昇速度、到達気圧および標準の浮

* 高層気象台 観測第二課

力、パラシュートの降下速度、パラシュートの種類別に開傘面積等について設定されている。このうち上昇速度、到達気圧、降下速度についてのパラメータは実際の観測結果をもとにして作成されているが、現行のものは KC96 型オゾンゾンデ採用後 2000 年までの約 4 年間の観測データを用いて作成されたものである。

なお、この飛翔予測シミュレーションプログラムを基にして、気象庁内のイントラネットにおいて利用者がどこからでもシミュレートして必要とする落下位置情報を入手できるように、Web ブラウザ上で操作できるようにした飛翔予測情報システム(藤田：2003, 岩坪：2005)が稼働している。

2. 2 落下位置に関するその他のプログラム

観測終了後の推定落下位置を求めるプログラムとして、落下位置推定プログラム(木津・川上：1994)および落下位置監視プログラム(中野ほか：1999)がある。前者は観測時の高層風資料を使用して観測終了後のゾンデが代表的な速度で降下した場合の着地点を推定し、後者は降下するゾンデを追跡し、落下状況(気球残骸、降下速度、大気の状態)の刻々の変化を監視して着地点を推定する。本稿では後者の結果を実際の落下地点とみなし、飛翔予測シミュレーションプログラムの予測精度の検証に使用する。

3. 到達気圧に関するパラメータ

3. 1 到達気圧の頻度分布の調査

到達気圧の実態を把握するため、札幌、つくば、鹿児島、那覇のオゾンゾンデ観測の過去資料から到達気圧値を抽出し、頻度分布の調査を行った。鹿児島はすでにオゾンゾンデ観測を終了した官署であるが、事例数を十分確保するために対象に加えた。

オゾンゾンデは2000g気球を用いて通常浮力3600gで飛揚するが、飛揚形態によっては3600g以外の浮力で飛揚する場合もある。気球の破裂はゴム膜の張力の限界により生じることから同種の気球は同じ大きさを破裂すると仮定すると、充填ガス量が少なく浮力の小さい気球ほど到達気圧値が小さい(到達高度が高い)(澁江ほか：2001)。このため、気球内ガスの温度による差を無視すれば、浮力変更時の到達気圧は(1)式で換算できる。

$$P = P' \frac{M_b + L}{M_b + L'} \quad (1)$$

P : 浮力 L [kg] に換算後の到達気圧 [hPa]

P' : 実際の到達気圧 [hPa]

M_b : 気球の質量 [kg]

L : 換算する浮力 [kg]

L' : 実際の浮力 [kg]

$L=3.6$, $M_b=2$ として P' , L' を(1)式に代入すれば、浮力 3600g に換算した到達気圧値を算出できる。なお、換算式の妥当性は、浮力 3600g で飛揚した場合の平均到達気圧と、浮力 3600g 以外で飛揚した代表的な浮力の平均到達気圧を比較することにより確認した。

図1に浮力を 3600g に換算した到達気圧の頻度分布を示す。頻度の集中する 9.0hPa 面以上でみると、全期間では平均 4.8hPa、現行パラメータの設定までの期間にあたる 2000 年以前は平均 4.5hPa、2001 年以降は平均 4.9hPa であり、2001 年以降は到達気圧値が大きい(到達高度が低い)傾向が認められる。季節や官署による差は特に認められなかった(図略)。

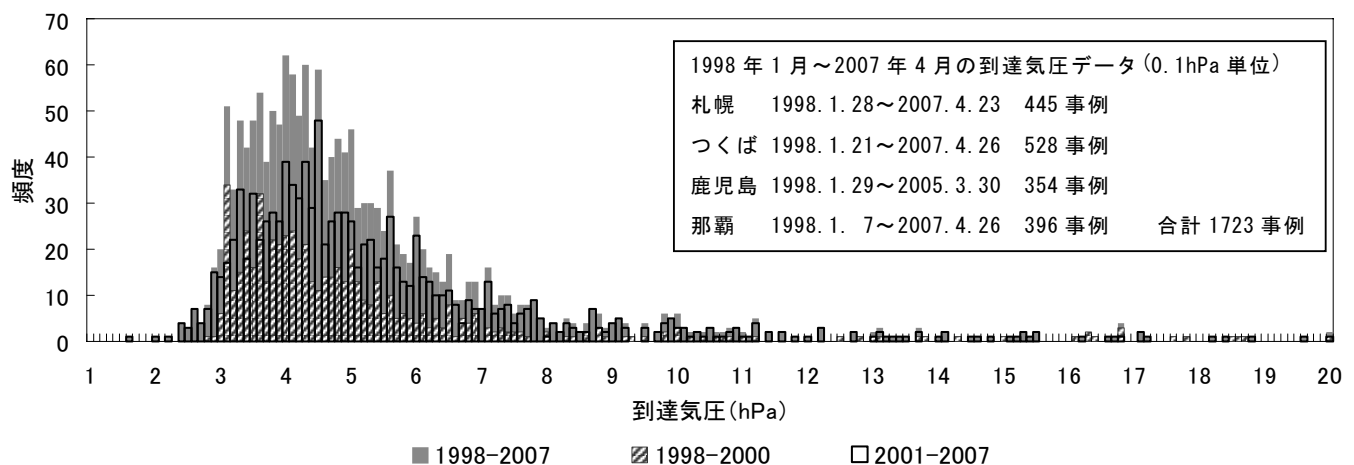


図1 4官署のデータによる到達気圧(浮力3600gに換算)の頻度分布(20hPa以上)

表1 算出したパラメーター一覧

(到達気圧に関して設定するパラメータ $\mu \cdot \sigma \cdot f$ ・境界値)

パラメータ算出条件	μ	σ	f	境界値(lnP)
現行	1.100	0.169	5.30	1.316
浮力3600gのみ	1.394	0.282	4.38	1.629
浮力換算なし(生観測値)	1.409	0.273	4.40	1.644
浮力換算(低圧側交点)	1.390	0.272	4.25	1.685
浮力換算(高圧側交点)	1.390	0.272	4.25	1.727

■: 落下位置予測プログラムの新規パラメータとして使用

3.2 近似式の導出とパラメータの算出

(1) パラメータ算出の方法

飛行予測シミュレーションプログラムの到達気圧に関するパラメータの算出は、浮力3600gに換算した到達気圧(以下、単に到達気圧という)をもとに行う。到達気圧の頻度分布を曲線で近似する場合、低圧側から凸部(最頻値)付近にかけては正規分布、凸部より高圧側のある気圧値(境界値)以降は指数分布からなる複合分布で近似できる。近似式はそれぞれ(2)、(3)式のとおりである。

$$\text{正規分布: (頻度)} = ae^{-(\ln x - \mu)^2 / 2\sigma^2} \quad (2)$$

$$\text{指数分布: (頻度)} = de^{-f \ln x} \quad (3)$$

a : 正規分布の量的な係数

μ : 正規分布の軸の位置

σ : 正規分布の尖り度合い

d : 指数分布の量的な係数

f : 指数分布の傾斜の度合い

x : 到達気圧 [hPa]

到達気圧に関して必要なパラメータは μ , σ , f および境界値の4つである。このため、図1の到達気圧に(2)式と(3)式をフィッティングすることで近似し、そのときの各値を求めればよい。ここでは(2)式と(3)式のそれぞれ両辺の自然対数をとる。これにより、“ln(頻度)”は“ln(到達気圧)”に関して、(2)式は二次式に、(3)式は一次式に変換され、これらについてフィッティングを行う。つまり、図1において両軸の自然対数をとったうえで、二次式と一次式を近似させることになる。

(2) 近似式の適用範囲

図2は図1の到達気圧の頻度分布(棒グラフ)を自然対数の散布図に表し、正規分布近似曲線(二次式)と指数分布近似直線(一次式)を示したものである。二次式は凸部分をできるだけ正確に近似するよう、頻度の大きな範囲に絞ってフィッティングを行うことにした。二次式と一次式に

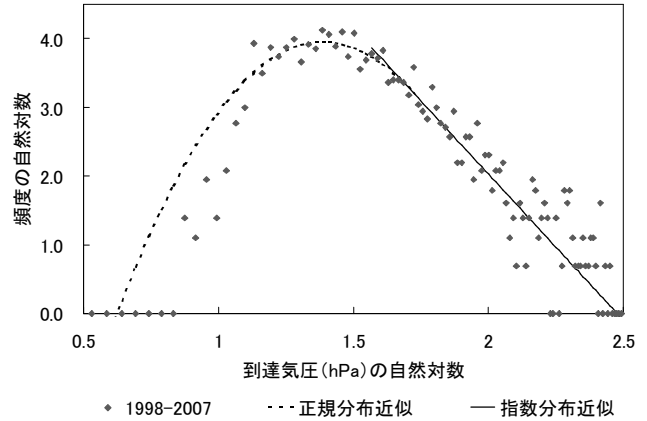


図2 4官署の全データによる到達気圧(浮力3600g換算)の頻度分布および正規分布近似曲線(二次式)と指数分布近似直線(一次式)

よる複合分布を近似させる際には、二次式近似計算対象域と一次式近似計算対象域の重複を許容して、両近似式(図2の放物線と直線)の接続部付近が滑らかになるよう試行錯誤し、各近似計算対象域を次の通りとした。

二次式(頻度が最頻値の概ね半値以上の範囲) :

3.0hPa～5.7hPa(図1), 自然対数表記: 1.10～1.74(図2)

一次式(凸部の高値側の概ね頻度1以上の範囲) :

4.8hPa～9.0hPa(図1), 自然対数表記: 1.57～2.20(図2)

(3) パラメータの境界値

図2に示した到達気圧の頻度分布に対する近似曲線(直線)において、重複区間1.569(4.8hPa)～1.740(5.7hPa)内に正規分布近似曲線と指数分布近似直線の交点が2点(1.685(低圧側交点: 5.39hPa), 1.727(高圧側交点: 5.62hPa))があるが、浮力3600gのみの場合のデータセットを基にして算出した交点の値(境界値)に近い低圧側交点の1.685(5.39hPa)を新しいパラメータの境界値とした。交点を境界値にするのは、両近似式の接続部分にずれを生じさせないためである。

境界値以外のパラメータについては導出した近似式の係数から算出した。各条件で算出したパラメータの一覧を表1に示す。表1の「浮力換算(低圧側交点)」の各値をパラメータとして採用し、以下、新規到達気圧パラメータという。新規到達気圧パラメータの μ (正規分布の軸の位置)は現行の約3hPaに対して高圧側(低高度側)の約4hPaに移動しており、最近の到達気圧値が大きい(到達高度が低い)傾向(図1)を反映している。

3.3 新規到達気圧パラメータの予測精度検証

新規到達気圧パラメータにより予測精度がどの程度改

善するかについて、検証用資料や検証方法を含めて以下に述べる。

3.3.1 予測精度の検証用資料

落下位置は正確に特定できないことが多いため、落下位置監視プログラムの計算結果を実際の落下位置とみなした。つくば周辺80km程度までの事例の統計(1999～2001年)によると、誤差は1km前後であることが多く、飛揚地点からの距離が長いほど大きくなりやすい。オゾンゾンデ観測の落下位置監視プログラムの計算結果とGPVデータが保存されている2004年6月以降の206事例(札幌105事例、つくば96事例、那覇5事例)を検証対象とした。この対象事例全てについて、現行パラメータによる落下予測位置と新規到達気圧パラメータを用いた落下予測位置および落下位置監視プログラムによる落下位置(以下、落下監視位置という)を計算し、予測精度の検証資料とした。

3.3.2 落下予測位置中心と落下監視位置間の距離

飛翔予測シミュレーションプログラムでは、実測または理論に基づいた分散を有する乱数を用い、1度の実行によりGPVで与えられた大気の状態の中で多数の飛翔シミュレーションを行い、70%の確率で落下すると予測された範囲を予測楕円として表示する(中野・藤田:2002)。現行・新規到達気圧パラメータによる落下予測位置の精度比較検証方法は藤田(2003)などにならない、予測楕円中心(落下予測位置の中心)と落下監視位置間の距離を求め、その出現頻度から確率的な妥当性を検証することとした。

予測楕円は事例によってその大きさや形状がまちまちである。そこで、異なる事例間を比較するために、予測楕円を対応する真円に変換(規格化)した場合の相対的な落下監視位置を求めた。変換の概念図を図3に示す。具体的には、(4)式により予測楕円の中心を原点とする落下監視位置(x_l , x_s)を、予測楕円を真円に見立てた場合における真円の中心からの距離(r : 以下、規格化距離という)に変換する。確率 P の場合の真円の半径(C)は(5)式により与えられ、 P が0.7(70%)の場合、約1.55である。(4)式において確率 P の場合の真円の半径(C)を乗ずることで、3.3.3において確率 P の場合の予測の妥当性を検証できる。206事例について、現行・新規到達気圧パラメータによりこの変換を実施し、規格化距離(r)を求めた。

$$r = C \sqrt{\frac{x_l^2}{r_l^2} + \frac{x_s^2}{r_s^2}} \quad (4)$$

ただし、

$$C = \sqrt{-2 \ln(1 - P)} \quad (5)$$

r : 予測楕円中心と落下監視位置間の規格化距離

r_l : 予測楕円の長軸径

r_s : 予測楕円の短軸径

x_l : 落下監視位置の予測楕円長軸成分

x_s : 落下監視位置の予測楕円短軸成分

C : 確率 P の真円の半径

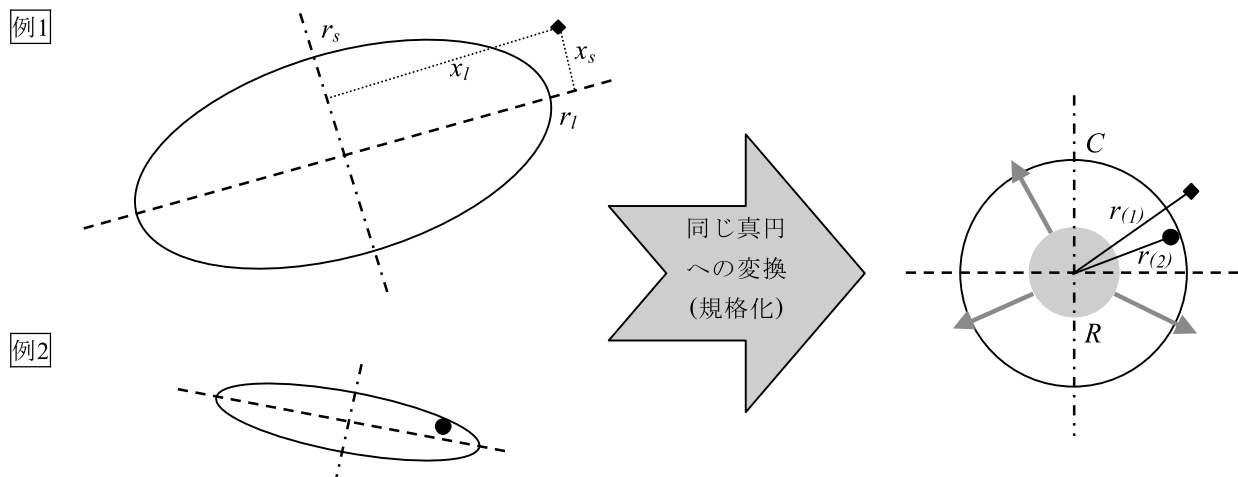


図3 飛翔予測シミュレーションプログラムによる予測楕円中心と落下監視位置間の距離の変換(規格化)の概念図

現行・新規到達気圧パラメータそれぞれについて、各事例の落下監視位置が同じ真円に対する相対的な位置に変換される。

◆●は落下監視位置の例、 $r_{(1)}$ および $r_{(2)}$ は規格化距離の例。

網掛けの真円はある確率の範囲を表し、その半径が C のときは確率 P の場合を示す。

3.3.3 規格化距離を用いた予測の妥当性の指標

現行・新規到達気圧パラメータの予測精度を評価するために、予測の妥当性の指標(A)(中野・藤田：2002)を定義して累積度数の理論分布と実際の分布を比較する。

$$\text{理論：(累積度数分布)} = 1 - e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{R}{A}\right)^2} \quad (6)$$

$$\text{実際：(累積頻度の割合)} = \sum_{x=0}^R P(x) \quad (7)$$

R ：規格化後の予測楕円中心からの半径($0 \leq x \leq R$)

A ：予測の妥当性の指標

(6)式は半径(R)に従う理論的な累積度数分布曲線を表す。(7)式は206事例の予測楕円中心と落下監視位置との規格化距離(r)について、落下予測位置の中心から遠ざかる(半径(R)が大きくなる)につれて出現する(図3右の網掛けの円に含まれる)落下監視位置の累積頻度の割合を表す。理論値である(6)式中の A^2 は分散を表し、その値が1ならば理想曲線となる。また、 A の値を調整することで(7)式の実際の分布曲線とフィッティングさせることができる。つまり A の値は理論分布に対する実際の分布の当てはまり具合を定量的に示すことから、 A は予測の妥当性の指標となる。フィッティングおよび A の算出は、まず(6)式=(7)式として、(6)式の1を移項したうえで両辺の自然対数を取り、 R^2 に関する一次式とみて実際の出現頻度の分布に近似し、その係数から A の値を求める。

予測の妥当性の指標 A の値は想定する確率のデータが予測楕円内に入るために予測楕円を拡大・縮小しなければならない倍率を表し、その値が1に近いほど予測がより妥当であり、 $A=1$ の場合は想定した確率通りであることを示す。すなわち、(7)式にしたがって半径(R)を0から無限遠に向かって広げて出現数を累積していった場合(図3右の網掛け部を拡大)、 $A=1$ ならば、理論分布にしたがって $P=0.7$ に相当する真円の半径($C \approx 1.55$)のところで累積70%となり、想定した確率といえる。 $A < 1$ ならば、 $P=0.7$ に相当する真円の内側で70%に達する場合であるため予測精度が想定以上に良く、逆に $A > 1$ ならば、この真円の外側で70%に達する場合であるため予測精度が悪い。

また、フィッティングにより求めたこの A の値を用いることで、(8)式により確率密度分布が導出される。確率密度分布は、指標 A の値についての規格化距離ごとの出現確率を示す。

$$P(R) = \frac{R}{A^2} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{R}{A}\right)^2} \quad (8)$$

3.3.4 現行・新規到達気圧パラメータの予測精度比較

現行・新規到達気圧パラメータによる全206事例についての予測位置誤差の累積度数分布・確率密度分布を図4に示す。両分布とも、破線は理想曲線($A=1$)、実線は各パラメータによる実際の結果である。すなわち、図4の理想累積(太い破線)は(6)式において $A=1$ とした場合の累積度数分布の曲線であり、現行累積および新規累積(太い実線)はそれぞれ(7)式に相当して実際の頻度(棒グラフ)の累積比率を表し、理想確率(細い破線)は(8)式において $A=1$ とした場合の確率密度の曲線であり、現行確率および新規到達確率(細い実線)は(6)式と(7)式のフィッティングにより求めた A の値を(8)式に代入することで実際の状況を反映させた確率密度の曲線である。

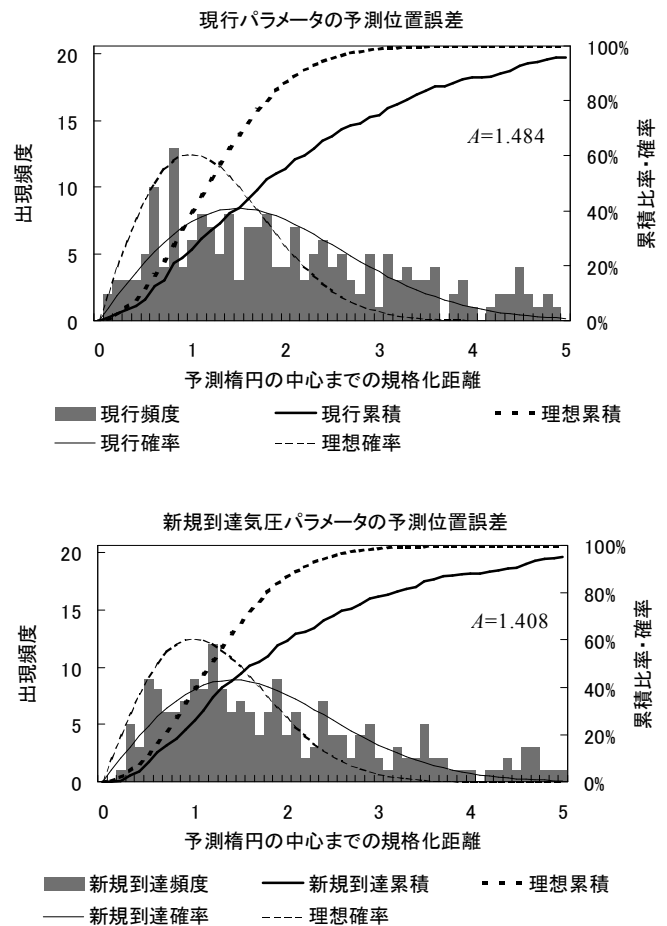


図4 現行・新規到達気圧パラメータの予測位置誤差の累積度数分布と確率密度分布

上：現行パラメータ 下：新規到達気圧パラメータ

規格化距離5以内について表示、比率を示す右縦軸は%で表示。横軸は0.1刻み、小数点第2位以下切り上げ。

妥当性の指標 A は規格化距離2以下について算出。

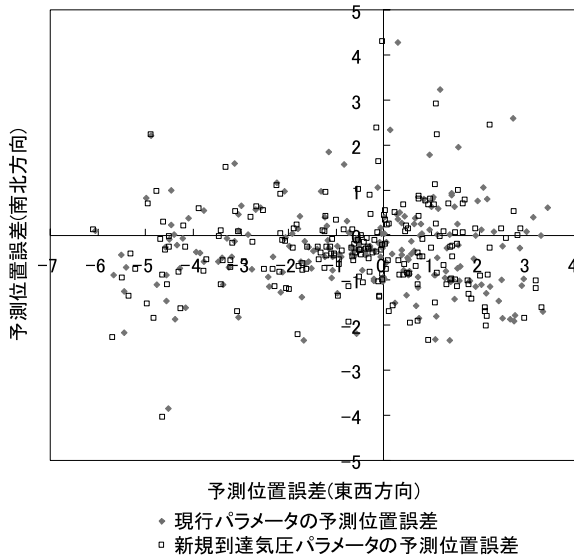


図5 現行・新規到達気圧パラメータの予測位置誤差の平面分布(規格化距離)

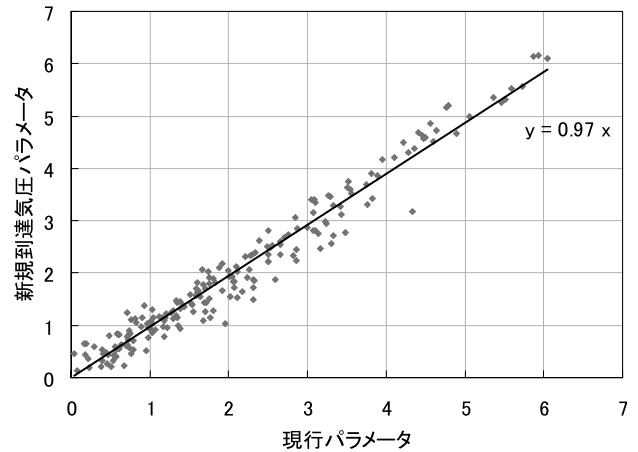


図7 現行・新規到達気圧パラメータの予測位置誤差の比較(規格化距離)

図中の直線および数式は散布図に対する近似直線(原点通過)。

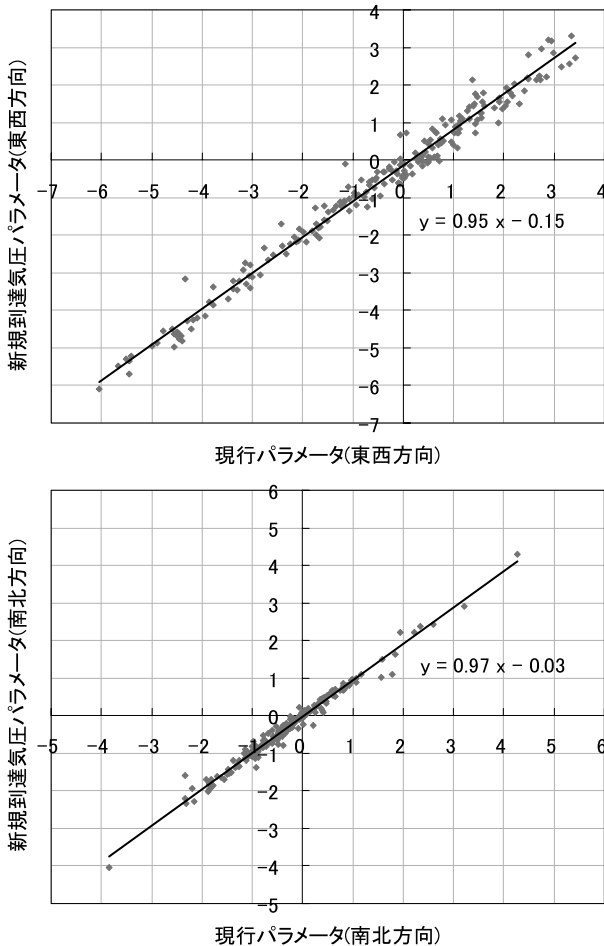


図6 現行・新規到達気圧パラメータの予測位置誤差の比較(方位別, 規格化距離)

上: 東西方向(東+) 下: 南北方向(北+)

図中の直線および数式は散布図に対する近似直線。

理想と実際との差は新規到達気圧パラメータ(図4下)のほうが小さい。飛翔予測シミュレーションプログラムの予測楕円の中心までの規格化距離(約1.55)内に落下監視位置が含まれる確率(理想:70%)は, 現行パラメータが42.2%(図4上), 新規到達気圧パラメータが48.1%(図4下)であり, 5.9%分の改善が図られる。妥当性の指標 A の値も新規到達気圧パラメータ($A=1.408$)のほうが1に近く, 改善を裏付けている。

現行・新規到達気圧パラメータそれぞれで予測したときの予測位置誤差(落下予測位置の中心と落下監視位置間の規格化距離)の平面分布(図5)をみると, 新規到達気圧パラメータによる予測は現行のものに比べてやや誤差が小さい。各種ゾンデは飛揚官署からみて東方に大きく流されることが多いため, 誤差も東西方向で大きくなりやすい。方位別の改善の割合に差がないかを調べるために東西・南北成分別の予測位置誤差(図6)をみると, 新規到達気圧パラメータによる予測位置誤差は両方向とも現行のそれに対して同程度の改善がみられる。現行パラメータによる予測位置誤差と新規到達気圧パラメータによる予測位置誤差を比較した図7からは, 現行パラメータによる予測位置誤差のおよそ4以内で改善がみられるが, 4より大きいところでは両パラメータの差はほとんど同じである。なお, それぞれの予測位置誤差の平均値は, 現行パラメータが2.093, 新規到達気圧パラメータが2.027である。 $A>1$ である限り, 予測位置誤差の平均値は小さいほうが理想に近いことから, 0.066の改善が図られたといえる。

4. 降下速度に関するパラメータ

4.1 降下速度比の頻度分布の調査

オゾンゾンデ観測では開傘面積の異なる2種類のパラシュートを飛揚ごとに選択して使用するが、飛翔予測プログラムの降下速度にかかわる現行の一部パラメータには共通の設定値が用いられている。到達気圧に関するパラメータを再設定したところ若干の予測精度の向上が認められた(3.3.4)ものの、予測楕円の中心までの規格化距離(約1.55)内に落下監視位置が含まれる確率(理想:70%)は48.1%にとどまり、十分な改善は図られなかったのは、このことが一因であると考えられる。このため、降下速度に関しても調査した。

降下速度にかかわるパラメータは、降下速度比の2乗に関するパラメータとして設定されている。ここで、降下速度比とは実際の降下速度値と理論値(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値)の比であり、(9)式のように表される。また、降下速度比の2乗は(10)式で表されるような降下時の状態を表す指標であり、気球の残骸を含む実際の総質量とパラシュートの実開傘面積に関する値である。

$$K = \frac{V_{zo}}{V_{zm}} = \frac{\sqrt{\frac{2gM_{obs}}{c\rho S_{obs}}}}{\sqrt{\frac{2gM_{max}}{c\rho S_{max}}}} = \sqrt{\frac{S_{max}}{M_{max}}} \cdot \sqrt{\frac{M_{obs}}{S_{obs}}} \quad (9)$$

右辺第一項中の S_{max} 、 M_{max} は定数であり、 S_{max}/M_{max} を a とおくと、

$$K^2 = a \frac{M_{obs}}{S_{obs}} \quad (10)$$

K : 降下速度比

V_{zo} : 実際の降下速度 [m/sec]

V_{zm} : 降下速度の理論値 [m/sec]

g : 重力加速度 [m/sec²]

c : パラシュートの抵抗係数 [無次元]

ρ : 大気の密度 [kg/m³]

M_{obs} : 実際の総重量 [kg]

M_{max} : 最大総重量 [kg]

S_{obs} : 実際の抵抗面積 [m²]

S_{max} : 最大抵抗面積 [m²]

(9)、(10)式より、降下速度比の2乗値が1未満の範囲ではパラシュートの機能が發揮され、降下速度比の2乗の頻度分布は主に気球残骸重量に対応すると考えられる。一方、1を超える範囲ではパラシュートの開傘面積が減少し、パラシュートに何らかの機能障害が起きていると考えられる。

図8に降下速度比および降下速度比の2乗の頻度分布をセパ付パラとオゾンパラを分離してそれぞれ表示した。セパ付パラ(図8上)は166事例(札幌101事例、つくば57事例、那覇8事例)、オゾンパラ(図8下)は50事例(つくばのみ)である。オゾンゾンデ観測で使用するパラシュートの一覧を表2に示す。セパ付パラは2004年度から導入され、気球残骸による開傘の障害が起こりにくい構造であり、その取付形態(成田ほか:1999)からオゾンパラよりも降下速度比が小さい値をとる。セパ付パラ166事例にはパイプセパレータを付けない同じパラシュート(大型パラシュート)による観測事例も含まれるが、本稿では両者を区別していない。オゾンパラはパイプセパレータを付けないため気球残骸による開傘の障害が発生しやすい。図8の両者を比較すると、セパ付パラは降下速度比の値が小さくてパラシュートの機能がよく發揮され、オゾンパラは頻度のば

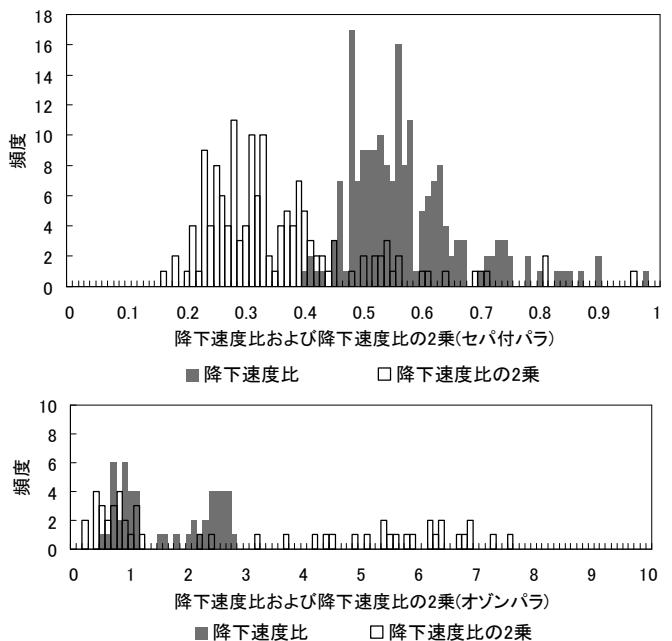


図8 降下速度比および降下速度比の2乗の頻度分布

上: セパ付パラ(横軸0.01刻み, 1以下)

下: オゾンパラ(横軸0.1刻み, 10以下)

降下速度比は落下監視中の平均値による。

表2 オゾンゾンデ観測で使用するパラシュートの種類

本稿での呼称	内訳	パラシュート	開傘面積	セパレーター
セパ付パラ	セパ付パラ	大型パラ	2.5㎡	あり
	大型パラ	大型パラ	2.5㎡	なし
オゾンパラ	オゾンパラ	オゾンパラ	1.0㎡	なし

らつきが大きくパラシュートの機能が完全には発揮されず開傘状態の不安定な事例の多いことがわかる。

4.2 近似式の導出とパラメータの算出

図8から、パラシュートの種類により降下速度比の様相は明瞭に異なる。現行パラメータではセパ付パラとオゾンパラについて共通の値が設定されていることから、セパ付パラとオゾンパラそれぞれについて、最新データを用いて降下速度にかかわるパラメータを個別に設定することにより、落下予測位置の精度の向上が期待できる。そこで、到達気圧と同様の手順で降下速度にかかわるパラメータをパラシュート別に算出することにした。

前述のように、飛行予測シミュレーションプログラムでは降下速度にかかわるパラメータとして、降下速度比の2乗に関するパラメータが設定されている。降下速度比の2乗の頻度分布を曲線で近似する場合、到達気圧の場合と同様に正規分布と指数分布からなる複合分布で近似できる。近似式はそれぞれ(11)、(12)式のとおりである。

$$\text{正規分布：(頻度)} = ae^{-(x-\mu)^2/2\sigma^2} \quad (11)$$

$$\text{指数分布：(頻度)} = de^{-fx} \quad (12)$$

a : 正規分布の量的な係数

μ : 正規分布の軸の位置

σ : 正規分布の尖り度合い

d : 指数分布の量的な係数

f : 指数分布の傾斜の度合い

x : 降下速度比(K)の2乗

降下速度に関して必要なパラメータは到達気圧の場合と同様に μ , σ , f および境界値の4つである。各パラメータの算出方法も到達気圧の場合と同様で、(11)式と(12)式のそれぞれ両辺の自然対数をとったうえで二次式と一次式を近似させることで求める。

二次式と一次式による複合分布の各近似計算対象域は次の通りとした。到達気圧の資料に比べて事例数が少ないため、対象範囲は近似計算結果を確認しながらの試行錯誤により設定した。

【セパ付パラ】(降下速度比の2乗値0.01刻み)

二次式(凸部(最頻値)付近の範囲) : 0.27~0.36(図8,9上)

一次式(凸部(最頻値)付近から概ね1までの範囲) :

0.28~1.03(図8,9上)

【オゾンパラ】(降下速度比の2乗値0.1刻み)

二次式(凸部(最頻値)付近の範囲) : 0.5~1.0(図8,9下)

一次式(凸部(最頻値)付近の高値側近傍の範囲) :

0.4~2.2(図8,9下)

図9は図8の降下速度比の2乗(棒グラフ)を自然対数の散布図に表し、正規分布曲線(二次式：破線)と指数分布近似直線(一次式：実線)を示したものである。

図9に示した降下速度比の2乗の頻度分布に対する近似曲線(直線)において、それぞれ凸部より高値側の重複区間にある正規分布近似曲線と指数分布近似直線の交点を新しいパラメータの境界値とした。

境界値以外のパラメータについては導出した近似式の係数から算出した。各条件で算出したパラメータの一覧(以下、新規降下速度比パラメータという)を表3に示す。新規降下パラメータの μ (正規分布の軸の位置)が現行の

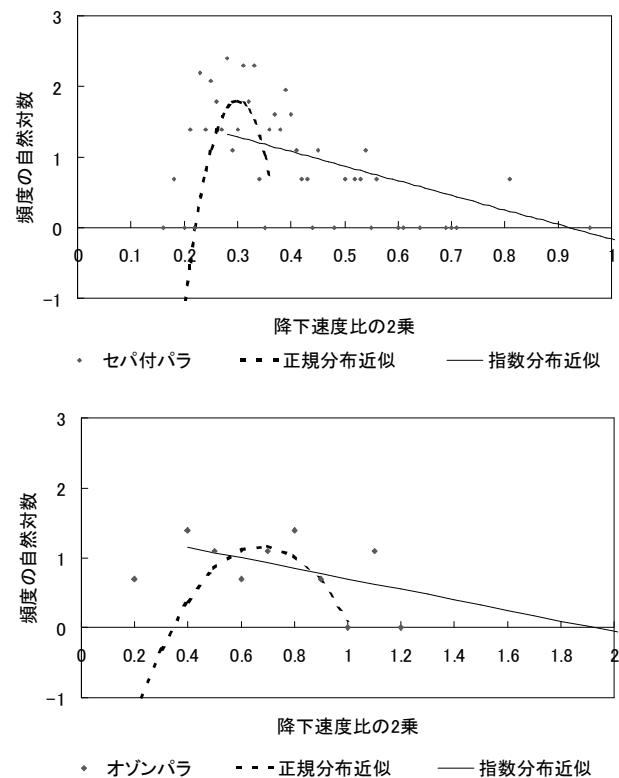


図9 降下速度比の2乗の頻度分布および正規分布近似曲線(二次式)と指数分布近似直線(一次式)

上：セパ付パラ 下：オゾンパラ

表3 算出したパラメーター一覧

(落下速度比に関して設定するパラメータ $\mu \cdot \sigma \cdot f$ ・境界値)

パラメータ算出条件	μ	σ	f	境界値(K^2)
現行(大バラ・オバラ共通)	0.424	0.075	4.30	0.54
大型バラ(セバ付含む)	0.298	0.041	2.07	0.34
オゾンバラ	0.679	0.219	0.75	0.87

■: 落下位置予測プログラムの新規パラメータとして使用

それに比べてセバ付バラでは低値側、オゾンバラでは高値側に移動している。前述のように、実際の降下速度比の2乗の頻度分布は気球残骸重量とパラシュートの開傘面積によるところが大きい。気球残骸重量はパラシュートの種類にほとんど影響されないと考えられるため、オゾンバラは相対的に機能障害が起きやすいといえる。図8や表3はこれらのことを反映している。なお、今回のパラメータの再設定において、飛翔予測シミュレーションプログラムが計算を実行する際に0近傍の値で除算を行うことによるエラーを生じることがわかり、降下速度比の2乗値が0.1より大きい範囲でシミュレーションを行うように飛翔予測シミュレーションプログラム自体も改修した。

4.3 新規到達気圧と降下速度を組み合わせた新パラメータの予測精度検証

3.3と同じく、2004年6月以降の206事例について、新規到達気圧パラメータに新規降下速度比パラメータを組み合わせたもの(以下、新規到達降下パラメータという)を適用した飛翔予測シミュレーションプログラムによる落下予測位置と落下監視位置とを比較した。パラシュート別では、セバ付バラが163事例(札幌105事例、つくば53事例、那覇5事例)、オゾンバラが43事例(つくばのみ)である。なお、GPVデータが保存されていないものは除いたため、4.1の降下速度比の頻度調査や4.2の新規降下速度比パラメータの算出に用いた事例とは一部異なる。

4.3.1 セバ付バラに関する予測精度検証

セバ付バラに関する累積度数分布と確率密度分布を図10に示す。破線で表される理想曲線($A=1$)と実線で表される実際の結果との差は新規到達降下パラメータ(図10下)のほうが縮まっているのがわかる。飛翔予測シミュレーションプログラムの予測楕円(規格化距離: 約1.55)内に落下監視位置が含まれる確率(理想: 70%)は、現行パラメータの49.1%(図10上)、新規到達気圧パラメータの57.1%(図省略)に対して65.0%(図10下)であり、現行に対して15.9%分の改善が図られて理想値の70%に近づく。ただし、セバ付バラの新規到達降下パラメータはが小さくばらつきが増すために予測楕円の範囲が広がる傾向があり、予測

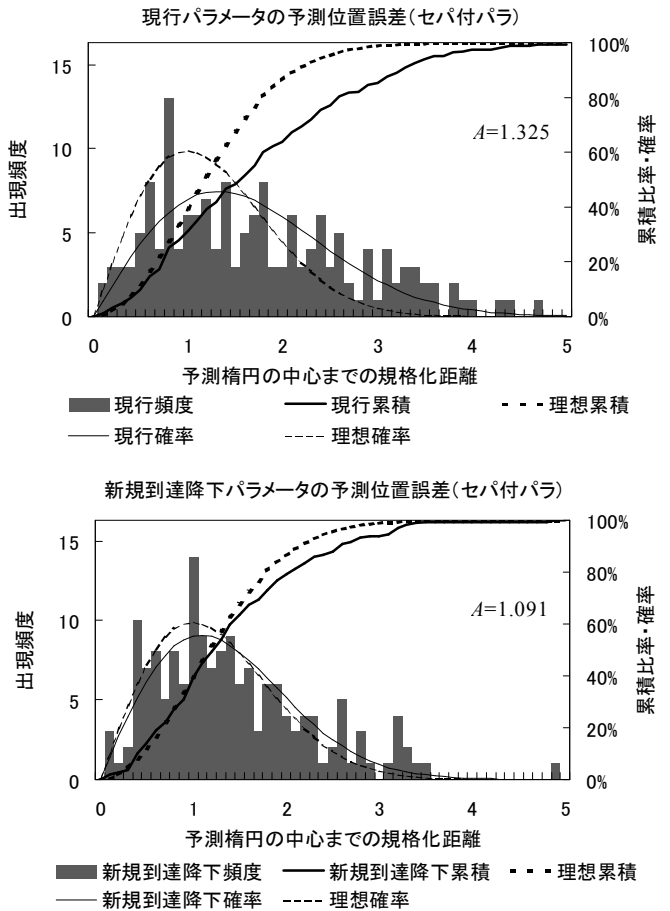


図10 現行・新規到達降下パラメータの予測位置誤差の累積度数分布と確率密度分布(セバ付バラ)

上: 現行パラメータ 下: 新規到達降下パラメータ
規格化距離5以内について表示, 比率を示す右縦軸は%で表示。
横軸は0.1刻み, 小数点第2位以下切り上げ。
妥当性の指標Aは規格化距離2以下について算出。

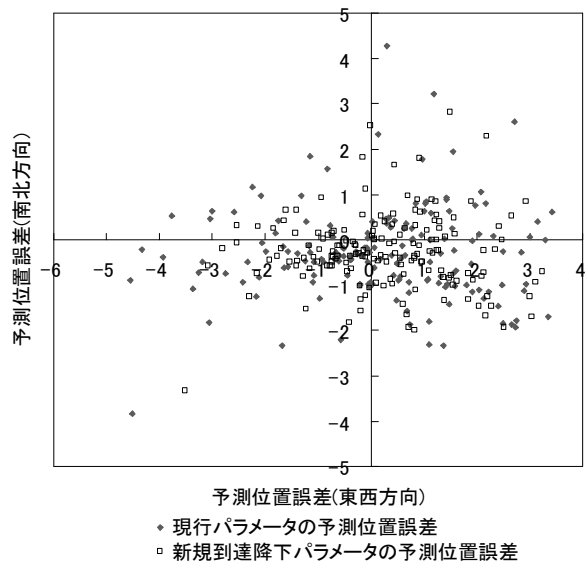


図11 現行・新規到達降下パラメータの予測位置誤差の平面分布(規格化距離, セバ付バラ)

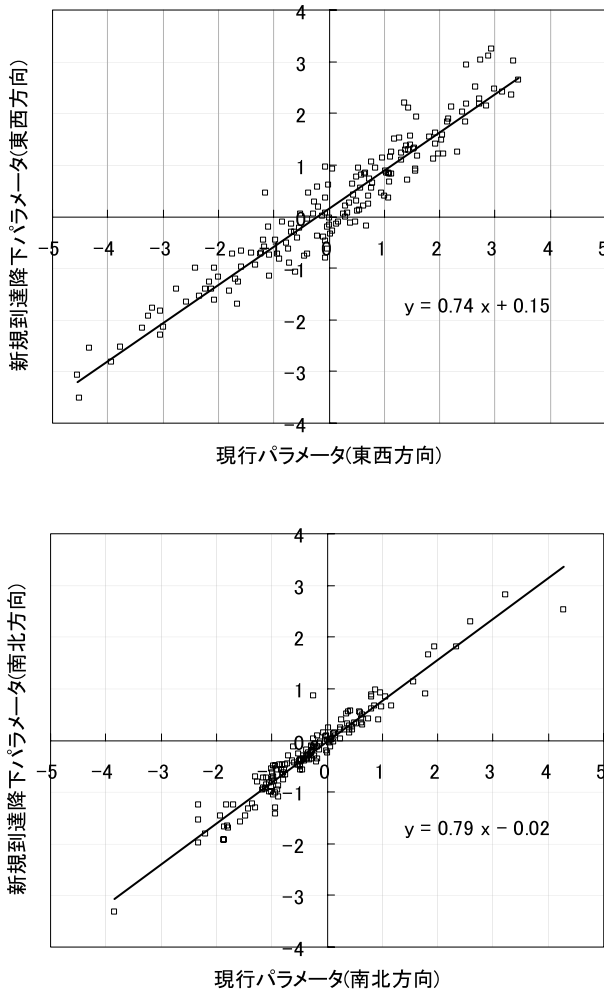


図12 現行・新規到達降下パラメータの予測位置誤差の比較(方位別, 規格化距離, セパ付パラ)

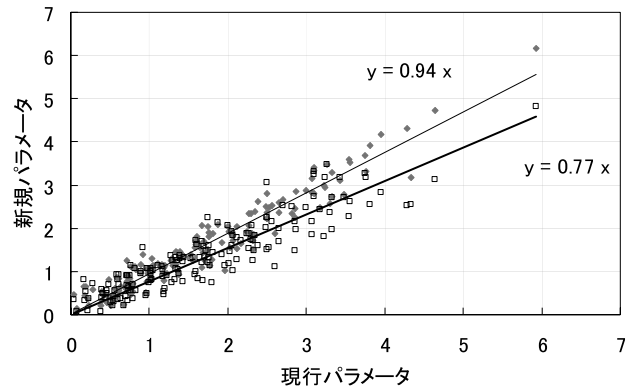
上: 東西方向(東+) 下: 南北方向(北+)

図中の直線および数式は散布図に対する近似直線。

楕円の長軸径の平均値は現行の1.34倍である。妥当性の指標 A の値も新規到達降下パラメータ($A=1.091$)は理想値の1に近いことから、予測楕円がより適切な範囲まで広がることで落下監視位置を内包する確率が理想値に近づいたといえる。

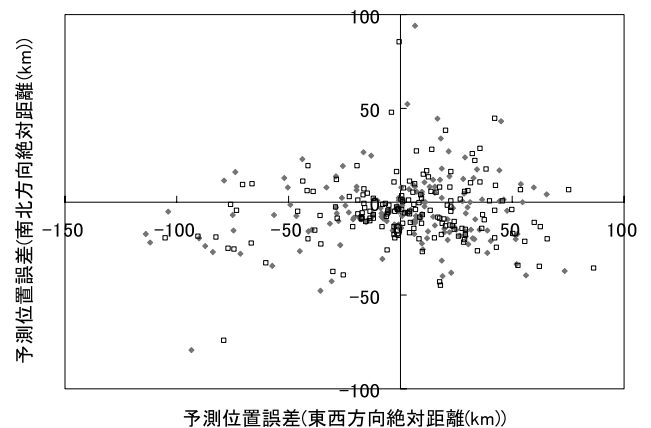
現行・新規到達降下パラメータそれぞれで予測したときの予測位置誤差の平面図(図11)をみると、新規到達降下パラメータによる予測は現行のものに比べて全体的に原点(落下予測位置の中心)に近づき誤差が小さい。

方位別の改善の割合を調べるために東西・南北成分別の予測位置誤差の比較図(図12)をみると、いずれも新規到達降下パラメータの予測位置誤差が小さく、改善の度合いは方位によらず同程度であることがわかる。規格化距



◆ 新規到達気圧パラメータ □ 新規到達降下パラメータ
— 線形(新規到達気圧パラメータ) — 線形(新規到達降下パラメータ)

図13 現行・新規到達・新規到達降下パラメータの予測位置誤差の比較(規格化距離, セパ付パラ)
図中の直線および数式は散布図に対する近似直線(原点通過)。



◆ 現行パラメータの予測位置誤差
□ 新規到達降下パラメータの予測位置誤差

図14 落下監視位置と現行・新規到達降下パラメータの予測位置中心までの距離の平面分布(セパ付パラ)

離による現行パラメータの予測位置誤差と新規到達気圧パラメータおよび新規到達降下パラメータの予測位置誤差を比較した図13では、新規到達降下パラメータは現行パラメータの予測位置誤差の全域で改善がみられ、新規差を比較した図13では、新規到達降下パラメータは現行パラメータの予測位置誤差の全域で改善がみられ、新規到達気圧パラメータ以上に予測位置精度の改善が図られる。それぞれの予測位置誤差の平均値は、現行パラメータが1.714, 新規到達気圧パラメータが1.621であるのに対し、新規到達降下パラメータが1.373と、現行に比べて0.341の改善が図られている。

前述のように、新規降下パラメータの適用により予測楕円の範囲は広がる傾向がみられたため、規格化距離だ

表4 パラメータ別の予測位置精度比較(セパ付パラ)

	予測楕円内包	予測位置誤差	絶対距離
現行パラメータ	49.1%	1.714	32.6km
新規到達降下パラメータ	65.0%	1.373	30.7km
新規到達降下ー現行	15.9%分	0.341	1.9km
現行値に対する改善量の比率	32.5%	19.9%	5.7%

けでは落下予測位置中心の精度の変化は確認できない。そこで落下監視位置から落下予測位置中心までの絶対距離の差の分布(図14)を調べると、新規到達降下パラメータによる改善が認められる。セパ付パラの絶対距離による差の平均は、現行が32.6km、新規到達気圧パラメータ適用では31.2km、新規到達降下パラメータを適用した場合は30.7kmであり、現行に対して新規到達降下パラメータでは1.9kmの改善が図られる。また、それぞれの標準偏差は順に24.6, 23.8, 22.8であり、新規到達降下パラメータを適用した場合は現行より安定して精度が向上するといえる。

現行パラメータに対する新規到達降下パラメータ適用時の改善量をまとめたのが表4である。現行の値に対する改善率もあわせて示した。セパ付パラについては、予測楕円の範囲拡大が誤差の縮小に大きく寄与している。

4.3.2 オゾンパラに関する予測精度検証

オゾンパラについての累積度数分布・確率密度分布を示した図15をみると、破線で表される理想曲線($A=1$)と実線で表される実際の結果との差は、小さいとはいえないが、現行よりは新規到達降下パラメータ(図15下)で改善される。妥当性の指標 A の値も新規到達降下パラメータ($A=1.598$)のほうが1に近い。飛翔予測シミュレーションプログラムの予測楕円(規格化距離: 約1.55)内に落下監視位置が含まれる確率(理想: 70%)は、現行パラメータの16.3%、新規到達気圧パラメータの14.0%に対して新規到達降下パラメータでは37.2%となり、現行に対して20.9%分の改善が図られることになる。理想値の70%に遠く及ばないのは、新規降下パラメータの算出において、パラシュートが良く開いて機能している事例に重きをおいて設定したことから、開傘の状態が悪い事例(機能障害発生事例)を必ずしも包括していないことによる。降下速度比の2乗値が1以下の事例(パラシュートの機能が発揮された事例)に限れば、事例数が少ないため参考値ではあるが、予測楕円内に落下監視位置が含まれる確率は現行パラメータが43.8%、新規到達気圧パラメータが37.5%なのに対して新規到達降下パラメータは62.5%となり、現行に対して18.7%分の改善が図られて理想値の70%に近づく(図略)。

現行パラメータと新規到達降下パラメータによる予測

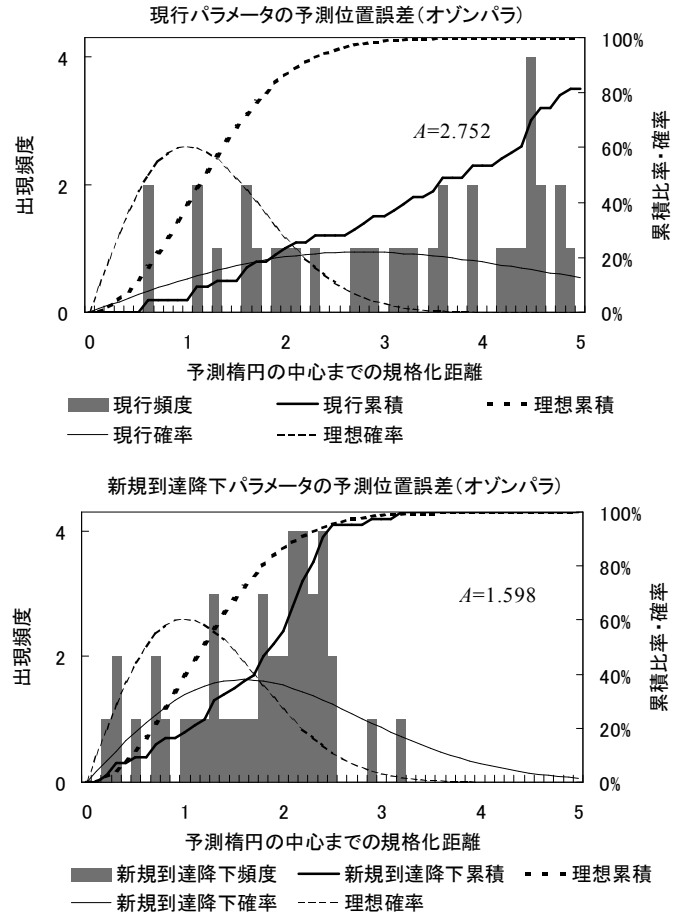


図15 現行・新規到達降下パラメータの予測位置誤差の累積度数分布と確率密度分布(オゾンパラ)

上: 現行パラメータ 下: 新規到達気圧パラメータ
規格化距離5以内について表示, 比率を示す右縦軸は%で表示。
横軸は0.1刻み, 小数点第2位以下切り上げ。
妥当性の指標 A は規格化距離2以下について算出。

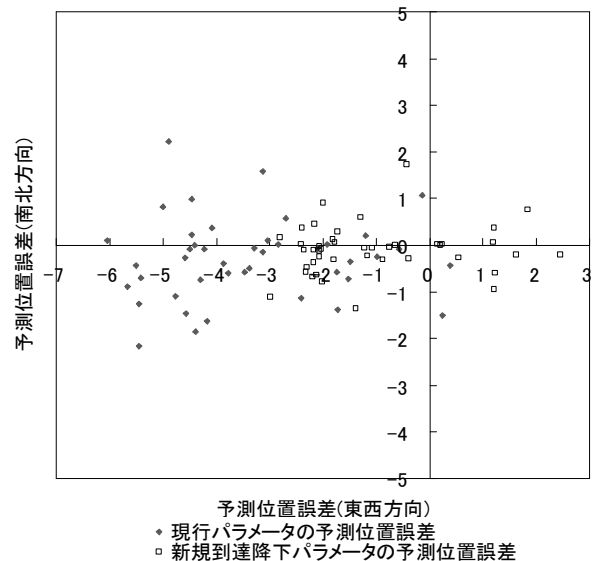


図16 現行・新規到達降下パラメータの予測位置誤差の平面分布(規格化距離, オゾンパラ)

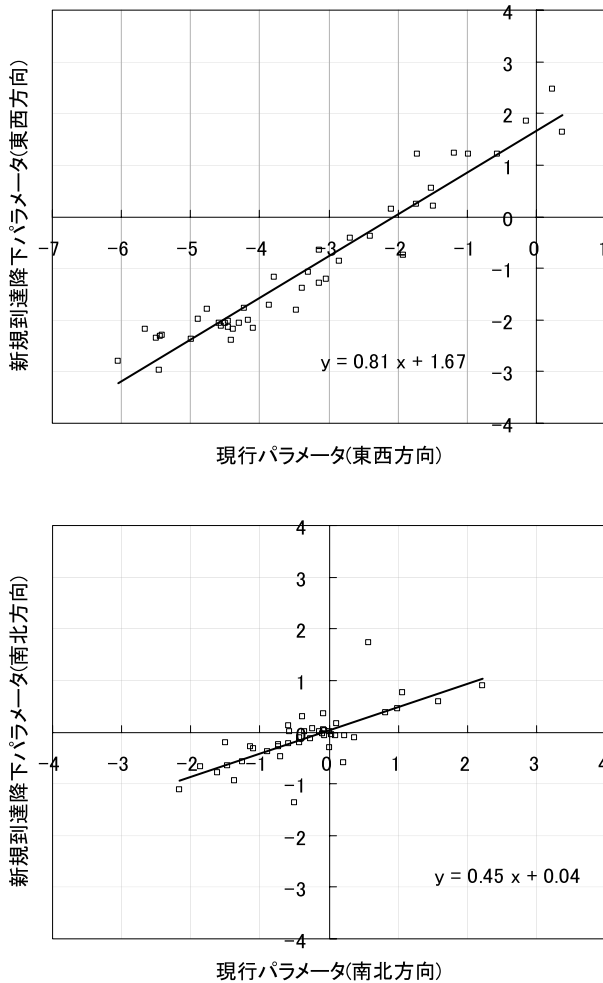


図17 現行・新規到達降下パラメータの予測位置誤差の比較(方位別, 規格化距離, オゾンパラ)

上: 東西方向(東+) 下: 南北方向(北+)

図中の直線および数式は散布図に対する近似直線。

位置誤差の平面図を示した図16において, 現行パラメータの東西方向の予測位置誤差が図中の横軸-4~-6周辺の負(西)側に大きくずれているが, 新規到達降下パラメータでは予測位置誤差が正(東)側にシフトし, 原点に近づき誤差が小さくなっている。これはパラシュートの違いによる降下速度の差(オゾンパラの降下速度>セパ付パラの降下速度)を区別していないためで, 新規到達降下パラメータはパラシュート別にパラメータを設定したことに伴う改善が認められる。

新規到達降下パラメータによる位置誤差の正(東)側へのシフトは, 東西・南北成分別の予測位置誤差の比較図(図17)にも, 東西成分のy切片の値として現れている(図17上)。ここで, 図17の近似式中の傾きとy切片の値の意味につい

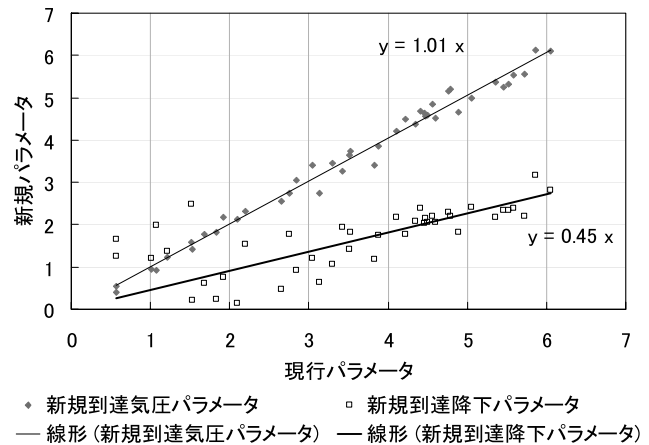


図18 現行・新規到達降下パラメータの予測位置誤差の比較(規格化距離, オゾンパラ)

図中の直線および数式は散布図に対する近似直線(原点通過)。

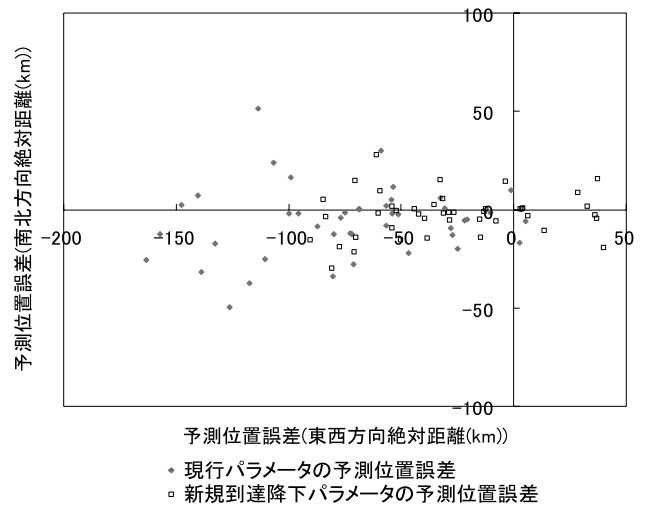


図19 落下監視位置と現行・新規到達降下パラメータの予測位置中心までの距離の平面分布(オゾンパラ)

て整理しておく。傾きはその値が0に近いほど, 位置誤差から全体的な偏り(バイアス)を差し引いた分布のばらつきが, 新規到達降下パラメータによって収束していることを示す。また, y切片の値は, 現行パラメータに対する新規到達降下パラメータのバイアスの変化量を意味する。仮にy切片を0に固定して近似直線を求めると, その傾きの値は, バイアスを含む位置誤差の分布に対するばらつきの変化を示す。3.3.4の新規到達気圧パラメータや4.3.1のセパ付パラのケースはy切片が0に近い値であったため, 傾き<1|ならば, そのことだけで新規のパラメータにより位置誤差分布が0に近づくことみなせた。しかし図17上では, 前述のようにy切片の値が大きい。これは, 新規到達降下パラメータにより位置誤差分布が正(東)側

表5 パラメータ別の予測位置精度比較(オゾンパラ)

	予測楕円内包	予測位置誤差	絶対距離
現行パラメータ	16.3%	3.531	75.6km
新規到達降下パラメータ	37.2%	1.691	41.2km
新規到達降下ー現行	20.9%分	1.840	34.4km
現行値に対する改善量の比率	128.6%	52.1%	45.4%

にシフトしたことで、バイアスが大きく減少したことによる。このため、図17については近似直線の傾きだけから単純に東西・南北成分別の改善の度合いを比較することはできない。そこで、試みにy切片を0に固定した近似直線の傾きを求めると0.41となる。南北方向のy切片はもとも0に近いことから、そのままの傾きと比較すると、方位による改善の度合いに明らかな差は認められない。

規格化距離による現行パラメータの予測位置誤差と新規到達気圧パラメータおよび新規到達降下パラメータの予測位置誤差を比較した図18をみると、現行パラメータと新規到達気圧パラメータは予測位置誤差がほぼ同等であるが、新規到達降下パラメータは大幅に小さくなって予測位置精度の改善が図られる。それぞれの予測位置誤差の平均値は、現行パラメータが3.531、新規到達気圧パラメータが3.566であるのに対し、新規到達降下パラメータでは1.691であり、現行に比べて1.840の改善が図られる。ただし、図16、17にもみられるように、東西方向の予測位置が全体的に平行移動することにより、現行ではたまたま誤差の小さかった事例で逆に誤差が増大している。

落下監視位置から落下予測位置中心までの絶対距離による誤差(図19)をみると、前述のように予測位置が全体的に平行移動したことにより、東西方向で100kmを超える誤差の例がなくなり、やはり新規到達降下パラメータによる改善が認められる。オゾンパラの絶対距離による誤差の平均は、現行が75.6km、新規到達気圧パラメータ適用では75.8km、新規到達降下パラメータを適用した場合は41.2kmであり、現行に対して新規到達降下パラメータでは34.4kmの改善が図られる。また、それぞれの標準偏差は順に43.8、44.2、24.9であり、新規到達降下パラメータを適用した場合は現行より安定した精度の向上が検証された。

現行パラメータに対する新規到達降下パラメータ適用時の改善量をまとめたのが表5である。現行の値に対する改善率もあわせて示した。オゾンパラについては、絶対距離自体が誤差の縮小に大きく寄与している。

5. まとめ

オゾンゾンデの到達気圧および降下速度に関し、最新データを加えて調査を行い、飛翔予測シミュレーション

プログラムにおける該当パラメータを再設定した。そのうえで、落下監視位置を用いて新たなパラメータによる飛翔予測シミュレーションプログラムの計算結果の精度を現行のパラメータによるものと比較検証し、以下の結果を得た。

- (1) 到達気圧について2001年以降の観測データを加えた場合と2000年以前の頻度とを比べたところ、前者の到達気圧値が大きく(到達高度が低く)なっていた。
- (2) 降下速度比の2乗について2001年以降の観測データを加えた場合についてパラシュート別に頻度を調査したところ、セパ付パラはオゾンパラに比べて降下速度比の2乗値が1桁小さかった。
- (3) 予測楕円内に落下監視位置が含まれる確率は新規到達気圧パラメータによる落下予測位置は現行のそれと比べて5.9%分、規格化距離でみた予測位置誤差の平均は0.066と、わずかながら改善された。
- (4) セパ付パラについて新規到達降下パラメータによる比較検証を行ったところ、予測楕円内に落下監視位置が含まれる確率は15.9%分(現行パラメータ：49.1%、新規到達降下パラメータ：65.0%)、規格化距離でみた予測位置誤差の平均は0.341(現行パラメータ：1.714、新規到達降下パラメータ：1.373)、絶対距離でも1.9km(現行パラメータ：32.6km、新規到達降下パラメータ：30.7km)の改善があった。
- (5) オゾンパラについて(4)と同様の比較検証を行ったところ、予測楕円内に落下監視位置が含まれる確率は20.9%分(現行パラメータ：16.3%、新規到達降下パラメータ：37.2%)、規格化距離でみた予測位置誤差の平均は1.840(現行パラメータ：3.531、新規到達降下パラメータ：1.691)、絶対距離でも34.4km(現行パラメータ：75.6km、新規到達降下パラメータ：41.2km)の改善があった。

6. おわりに

今回の作業は、近年納入された気球の性能が変化(到達高度低下)している可能性があることを受けて実施した。2001年以降のデータを加えた調査では、現行のパラメータ設定時(2000年以前の観測データ)に比べて到達気圧値が大きい(到達高度が低い)傾向にあることがわかり、到達気圧に関するパラメータを再設定することで落下位置予測の精度が向上した。

さらに降下速度にかかわるパラメータについても再設定することにより、予測精度が大幅に改善された。このことは、気球到達気圧と降下速度比が実態にそぐわない

ことが判明した場合に対応できるように落下監視等のデータ蓄積を今後も継続して行い、数年程度の定期的な予測精度の検証と設定パラメータの見直しを行うことの必要性を示す。なお、特にオゾンパラについては、開傘の状態の良し悪しによって別々のパラメータを設定することにより、予測精度の向上が見込まれるため、データの蓄積が待たれる。

一方で、今後ECC型オゾンゾンデが導入された場合は、器材重量減少やパラシュートの変更等が予想される。本稿において詳述したパラメータ導出手順や評価手法は、これらの使用実績のない器材導入時におけるわずかな試験結果をもとにしたパラメータ設定やそのデータの蓄積に応じた精度評価とパラメータの更新にも参照できるものである。

謝 辞

調査を進めるにあたっては、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の江崎雄治オゾン層観測係長、地球環境・海洋部環境気象管理官付の藤田 建技術専門官に数々のご助言を賜りました。観測第三課の中野辰美研究官には調査全般にわたって多大なご協力をいただきました。検証用のデータ抽出には観測第二課の佐々木 利測器技術係長のご協力をいただきました。本稿をまとめるにあたっては観測第二課の阿部豊雄課長、中村雅道主任技術専門官にご指導いただきました。また、

観測第二課の皆様には多くの貴重なご意見をいただきました。これらの方々に厚く御礼申し上げます。

引用文献

- 藤田 建(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.
- 岩坪昇平(2005): ゾンデの飛翔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(1997): オゾン観測指針 オゾンゾンデ観測編(追録第 3 号(2007)). 気象庁, 4-1.
- 木津暢彦・川上勝弘(1994): オゾンゾンデ及び現用のレーウィンゾンデの落下予測. 測候時報, **61**, 117 - 122.
- 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.
- 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むけて—. 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.
- 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.