

電波の大気屈折を考慮した測距による気球飛翔高度の補正

本田秀之¹・矢島信之¹・井筒直樹¹

Elimination of Atmospheric Refraction of Radio Wave from Balloon Altitude Data Derived from Ranging

By

Hideyuki HONDA¹, Nobuyuki YAJIMA¹ and Naoki IZUTSU¹

Abstract : Using a GPS receiver onboard a balloon, the realtime positioning accuracy has been improved very much. The conventional positioning method, or the ranging method has a systematic error in the altitude, when compared with the GPS data, which is resulted from refraction of a radio wave in the atmosphere. This paper deals with a more precise calculation method of the balloon altitude using the atmospheric parameters (pressure, temperature, and vapor pressure) as well as the conventional ranging data, such as the elevation of a tracking antenna and the range value. The calculation results are shown to fit the GPS values and also compared with those by other methods. A software has been programmed so as to combine with the conventional position-calculation program, and hence it is easy to introduce it.

概 要

近年の気球にはGPS受信機が搭載され、気球飛翔位置は非常に精度良く分かるようになってきた。これと比較することによって、従来の測距による高度計算には系統的な誤差が混入していることが判明し、その一部として電波の大気屈折による曲がりの影響があげられた。ここでは、屈折の主たる原因である大気パラメータ（気温、気圧、水蒸気圧）を使って電波の曲がりを逐一計算し、より正確な気球高度を計算する方法を示す。計算結果はGPSで得られたものとよく一致し、他の簡易な電波屈折の計算方法との比較も試みた。本プログラムは、従来の測距による位置計算プログラムに前置できるよう考慮したので、すぐにも導入可能である。

¹宇宙科学研究所

キーワード：電波の大気屈折，測距，気球高度，GPS

記号表

Hr ：真の気球高度	Hi ：見かけの高度
SRr ：真の直距離，	SRI ：直距離観測値
Dr ：真の Distance	Di ：見かけの Distance
ELr ：真のアンテナ仰角	ELi ：アンテナ仰角観測値
dHr ：真の気球高度の微小区間	$dSRI$ ：直距離観測経路上の微小区間
dDr ：真の Distance の微小区間	k ：等価地球半径係数
Hs ：受信アンテナ高度	Re ：地球半径
α ：屈折角	β ：入射角
r ：界面の曲率半径	n ：屈折率
P ：気圧 (hPa)	N ：屈折指数 ($n = 1 + N \times 10^{-6}$)
T ：気温 (K)	Pv ：水蒸気圧 (hPa)
A, B ：定数	

1. はじめに

最近の大気球にはGPS受信機も搭載されるようになり，気球の飛翔位置がかなり精度良く分かるようになってきた。2000年5月以降はSA（意図的な誤差の混入）も廃止され，以下に示すように20m程度の精度で3次元的位置が決定できるようになった。その結果，GPS受信機を搭載した気球の飛翔によって得られた測位結果と，測距によって得られたデータから計算した気球位置とを比較すると，両者には系統的な差があることが明らかとなった[1]。その後，測距による高度計算に大気による電波の屈折を考慮に入れ，伝播経路が標準大気として等価地球半径の概念を導入して近似計算すれば，おおざっぱではあるが補正できることを示した[2]。宇宙科学研究所で開発された“さきがけ”，“すいせい”のための軌道決定プログラムISSOP [3] では，対流圏内と電離層内での屈折のみを考慮に入れ，成層圏内は直進するとしてアンテナ仰角を補正して実用に供している。しかし，気球は正に対流圏と成層圏内を飛翔しかつその高度も変わるので，気球が飛翔する領域の実際の大気パラメータを考慮して電波伝搬経路の湾曲を求めることが必要となり，ここではその方法を述べる。こうした方法を採ればこれらの報告よりさらに精密な計算が可能であり，より高い精度での高度決定が可能であることを示す。

大気球においてGPS受信機は基本搭載機器となっており，機能的にはそれのみで必要且つ十分な位置計測装置ではあるが，現在でも測距はバックアップという意味で重要である。また小型気球では測距が主たる位置決定手段であるので，単独で十分な位置決定精度を有することには意味がある。ここで示す計算方法を導入すれば，従来の測距計算プログラムに前置するだけで位置決定精度の改善が可能となる。

2. 使用した測距とGPSデータについて

ここで使用したのは，三陸から遠距離まで飛翔した気球の測距とGPSデータである。B120-2は1996年9月13日午後4時14分に放球され，15日午前7時30分まで飛翔し，直距離の最大値は570km程度であった。またB15-82は2001年6月4日午前5時58分に放球され，同日23時30分に切り離された。直距離の最大値は350km程度であった。海上を遠方まで飛行した場合には，海面反射により測距が乱れることがしばしばあるが，これらの気球の場合には，ほとんど全ての時間にわたって近海上及び陸上空，あるいは日本海上空を飛行しており，近距

離から遠距離にわたって比較的良好な測距データが得られている。

GPS自体の測位精度に関しては、三陸実験場において放球前のかみ合わせ時から放球までの間に得られたデータから、SA有りの下 (B120-2) では、緯経度方向と高度方向の変動はそれぞれ $\pm 60\text{m}$ と $\pm 130\text{m}$ 程度 [1]であった。一方、SA無しの場合 (B15-82) は、緯経度方向と高度方向の変動はそれぞれ $\pm 20\text{m}$ と $\pm 30\text{m}$ 程度と観測された (図1参照)。なお、使用しているGPS受信機の測位の分解能は、緯経度方向が0.1秒 (2~3mに対応)、高度は10mである。

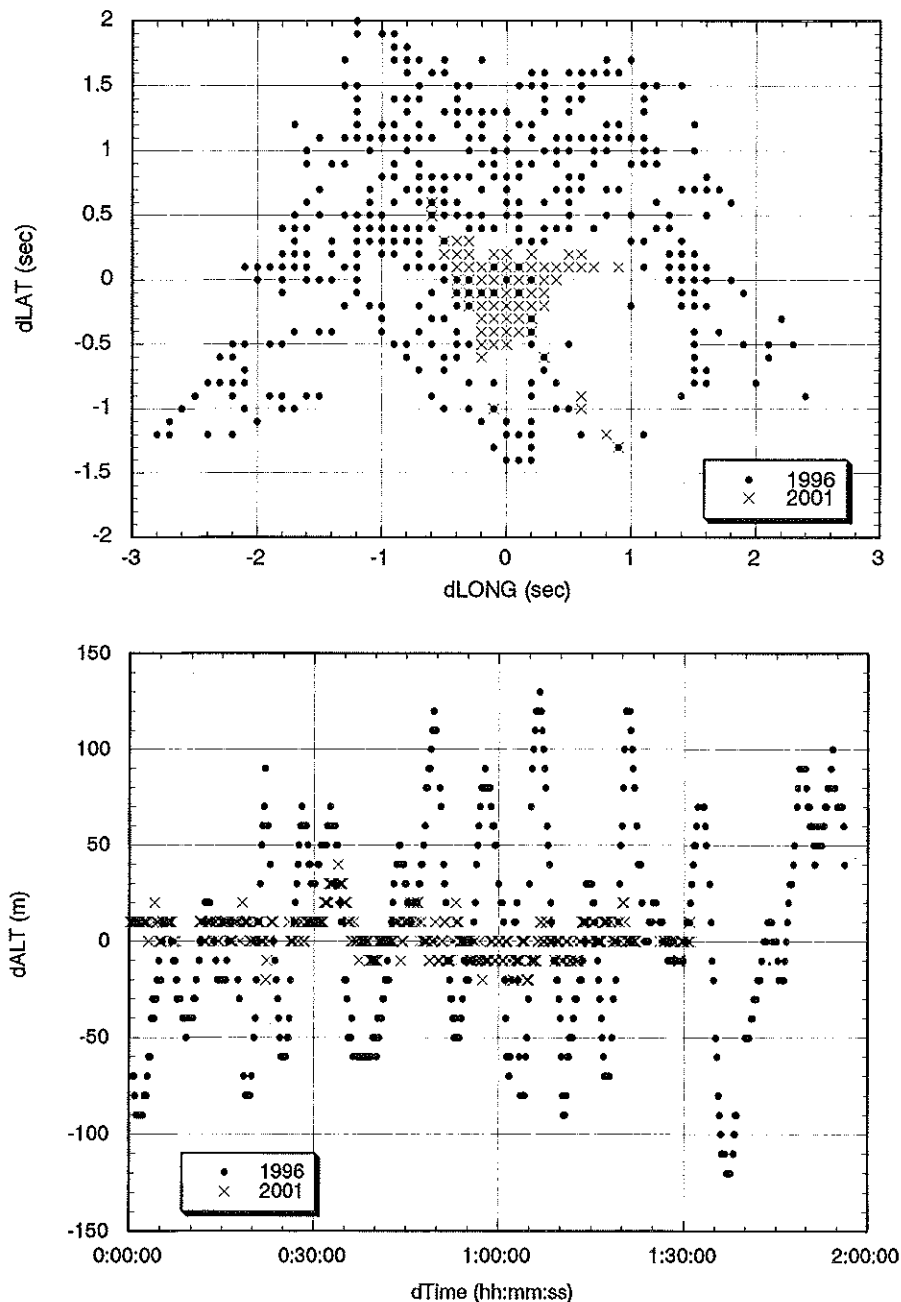


図1 SAの有(1996年)無(2001年)での固定点の測位結果の変動
緯経度方向の変動(上)と高度方向の時間変化(下)である。緯経度1秒は、それぞれ約31m、約24mである

3. 大気屈折による電波伝搬経路

3. 1. 大気屈折による電波伝搬と現状での問題点

現在の測距法では、アンテナ仰角 (EL)、アンテナ方位角 (AZ)、直距離 (SR) を計測し、気球はアンテナ指向方向に存在するとして飛翔位置 (緯度・経度・高度) を計算している。図 2 に示すように、実際には電波は大気中を屈折しながら進行する。観測される直距離はこの曲線の長さであり、アンテナ仰角はこの曲線への接線と水平とのなす角となる。現状では、電波が直進するとして気球の位置を計算しているため、図 2 に示すような受信基地と気球の位置関係になり、計算で得られた高度は真の値より高く ($H_i > H_r$)、地表に沿った距離 ($Distance$) も異なることになる。受信基地から 600km 程度の遠方を飛翔している場合には、高度方向の誤差が +3 ~ 4 km にもなっており、飛翔制御上も無視できないほどの量である。一方緯経度に関しては、伝播経路の曲がりによる見かけの直距離と真の距離との差 ($SR_i - SR_r$) が上向きとなる仰角による見かけの高度の増加で相殺され、結果的に直距離に比例して差がそれほど増減してはいない (付録 A 参照)。

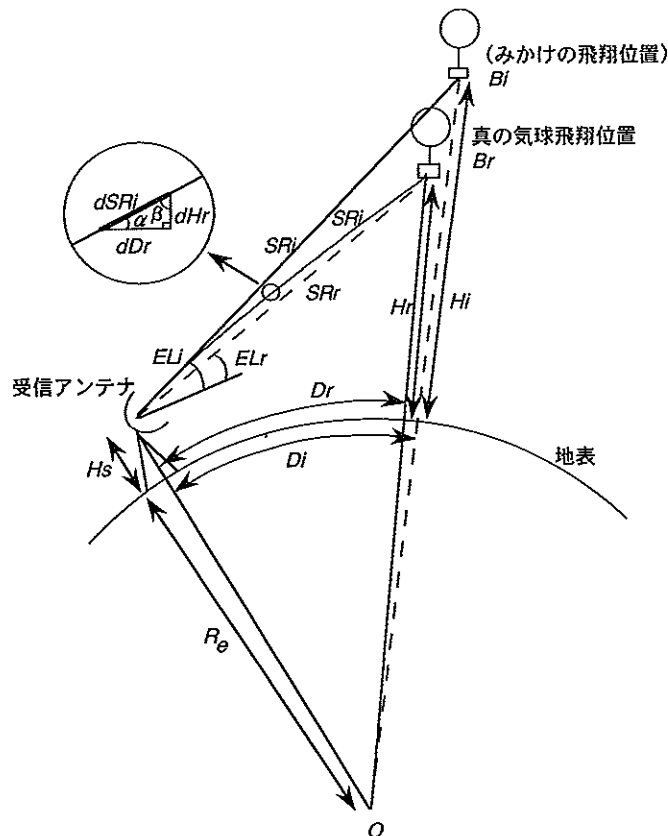


図 2 測距の計算手法に起因する誤差の原因と計算式で使用する記号の意味

Br : 真の気球飛翔位置, Bi : 現在の位置計算法による (見かけの) 気球飛翔位置, H_r : 真の気球高度, H_i : 見かけの高度 ($H_i > H_r$), SR_r : 真の直距離, SR_i : 直距離観測値 (測距測定経路は大気屈折により湾曲, $SR_r < SR_i$), Dr : 真の Distance, Di : 見かけの Distance, EL_r : 真のアンテナ仰角, EL_i : アンテナ仰角観測値 ($EL_r < EL_i$), H_s : 受信アンテナ高度, R_e : 地球半径, dSR_i : 直距離観測経路上の微小区間, dH_r : 真の気球高度の微小区間, dDr : 真の Distance の微小区間, α : 屈折角, β : 入射角

3. 2. 大気パラメータを考慮した電波伝搬経路の計算

直距離観測値 (SR_i)、仰角観測値 (EL_i) とそのときの気象条件から真の直距離 (SR_r) と真の仰角 (EL_r) を計算することができれば、それらの値を従来の計算プログラムに引き渡すのみで、大幅な位置決定精度の改善を

簡単に行うことができる。このためには、微少な直距離観測値の領域に関して逐次屈折率を計算し、直距離観測値全体に対して高度とDistanceを積分して求める必要がある。図2で示す記号を使用すれば、このための計算式は以下ようになる。

$$Hr = \int dHr = \int_0^{SR} dSRi \sin \alpha \quad (1)$$

$$Dr = \int dDr = \int_0^{SR} dSRi \cos \alpha \quad (2)$$

$$SRr = \sqrt{(Re + Hs)^2 + (Re + Hr)^2 - 2 (Re + Hs) (Re + Hr) \cos \left(\frac{Dr}{Re} \right)} \quad (3)$$

$$ELr = \arccos \left(\frac{(Re + Hs)^2 + SRr^2 - (Re + Hr)^2}{2 (Re + Hs) SRr} \right) - \frac{\pi}{2} \quad (4)$$

式(1)(2)で必要となる屈折角(α)を知るには、厳密に言えば信号伝搬経路に沿っての気象条件その他を知り、屈折率を逐一計算する必要がある。大気による屈折率の高度分布が図3に示すように同心円の層状であると近似すれば、それによる電波の屈折(スネルの法則)は式(5)で表される。

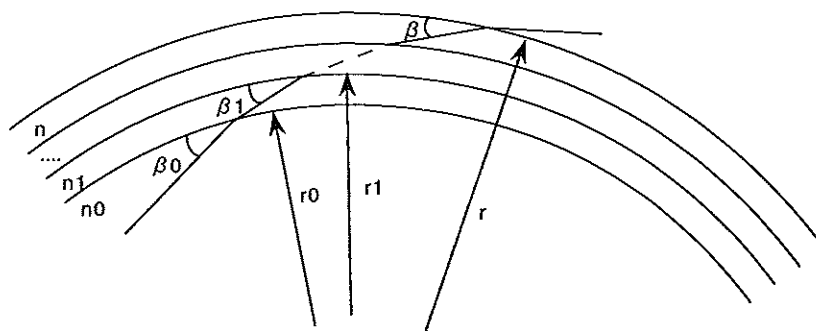


図3 屈折率分布が同心円状になっている場合の屈折
 n : 各層の屈折率, β : 各層への入射角, r : 各層の曲率半径

$$n_0 r_0 \sin \beta_0 = n_1 r_1 \sin \beta_1 = n r \sin \beta \quad (5)$$

図2で $\alpha = \pi/2 - \beta$ であるので、受信アンテナの仰角観測値(ELi)を初期値として各層の屈折率を知ることができれば、式(1)(2)から電波伝搬経路が計算可能となる。よく知られているように、電波の大気屈折の大きさは主に気象条件(気温 T , 気圧 P , 水蒸気圧 Pv)により大気の誘電率分布が一様でないことに由来している。ここでは、各高度の屈折率は以下の実験式(6)を使用し、高層気象データを用いて求める[4]。

$$N = A \left(\frac{P}{T} + B \frac{Pv}{T^2} \right) \quad (6)$$

定数 A , B は研究者によりいくつかの数値の組み合わせが存在し、ここでは新版無線工学ハンドブックが採用している $A=77.6$, $B=3.73 \times 10^5$ を使用する[4]。また、電波伝搬経路に沿った水蒸気圧や気温と気圧の高度分布は三陸の気象条件に近い秋田の高層気象データで代表することにし、各高度の気温と露点温度から水蒸気圧を計算して使用する。ただし、対流圏内で露点温度測定値が無くなる高度以上や成層圏内では水蒸気量は無視しうる程度の量になるので、式(6)の Pv を0として屈折指数を計算する。また高層気象データで取得できない領域の気圧と高度の関係はバルーンマニュアルの表を使用し、またその領域の温度はUS標準大気の高層分布を用いる。

計算では、実際の電波伝搬経路を微少な区間(図2の $dSRi$)に分割し、その領域の屈折指数を高層気象データを使用して式(6)より求める。これから式(5)を使って入射角 β が、そして屈折角 α が求まる。式(1)と

(2) から真の Distance (D_r) と真の気球高度 (H_r) が求まり、式 (3) と (4) で受信アンテナと気球を結ぶ直線 (真の直距離 SR_r) と地表との成す角 (真の仰角 EL_r) を計算する。この計算のフローチャートを図 4 に示す。計算の結果得られた真の仰角と真の直距離を従来の位置計算プログラムに渡せば、より正確な気球高度が従来のソフトウェアでそのまま計算できる。この計算によって得られた高度方向の補正量を、図 5 の曲線 B に、また仰角の補正量も合わせて示す。ここで示した計算方式では、補正量が測距と GPS の高度差 (曲線 A) に比例して増加しており、適切な補正が可能であることを示している。なおこのとき、放球当日午前 9 時の秋田高層気象データを使用した。

3. 2. 他の計算方法との比較

ここでは他の計算方法との高度補正量の比較をする。

以前報告した等価地球半径を使用する方法 (地球半径を拡大することにより、電波伝搬経路を直線と見なす)

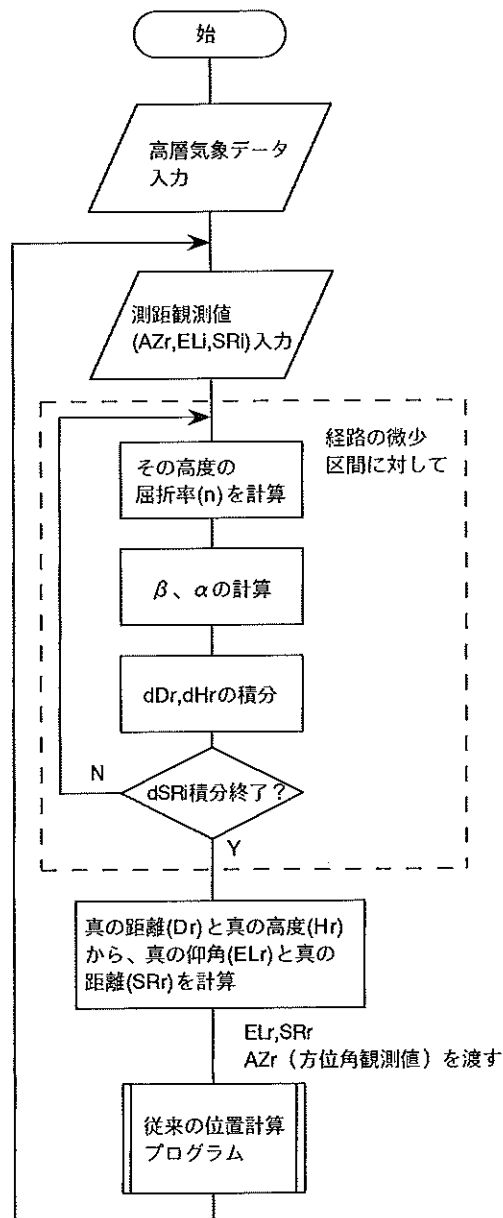


図 4 計算のフロー

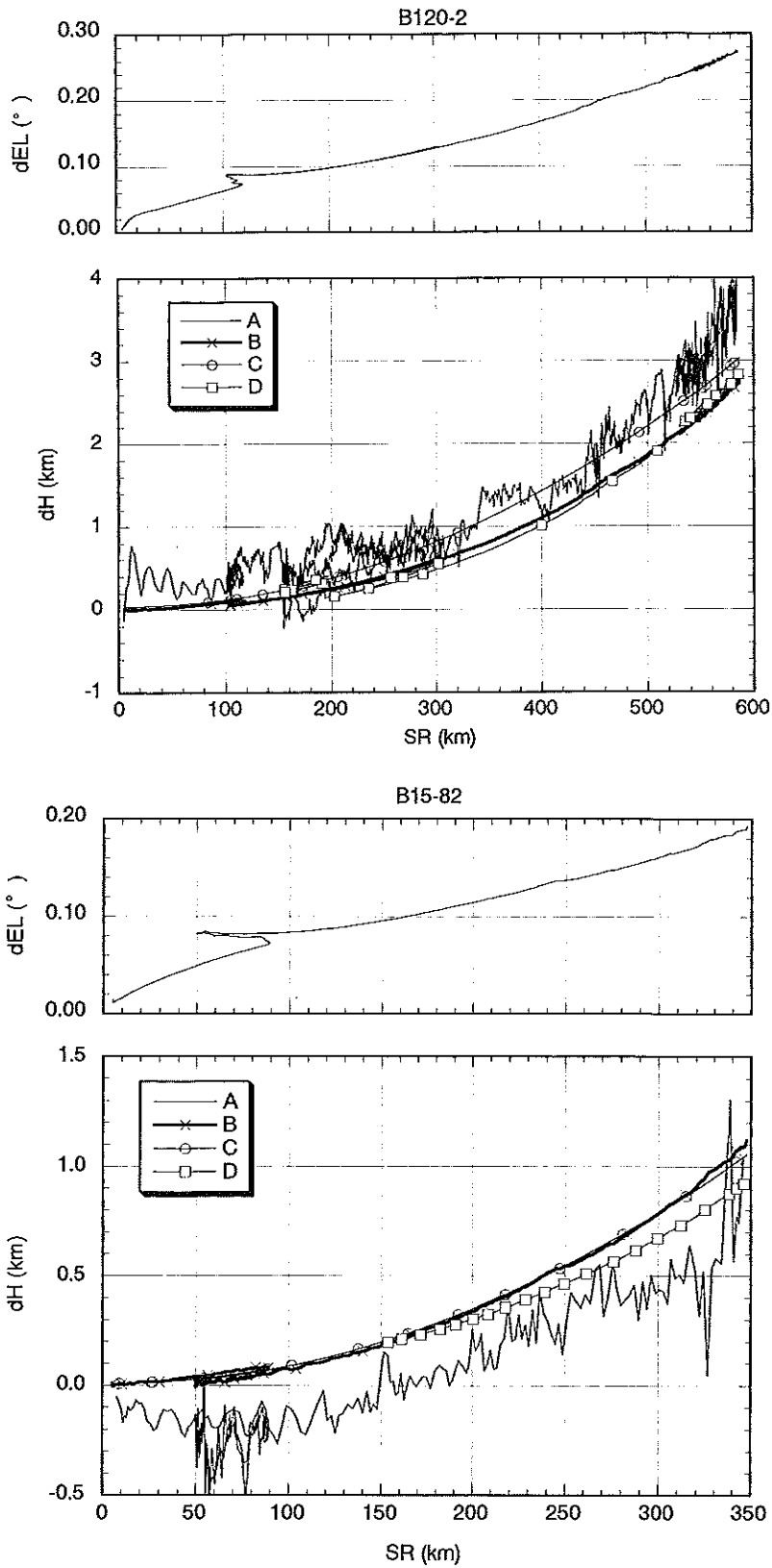


図5 種々の計算方式による高度の補正量の比較およびアンテナ仰角の補正量
 従来の測距の計算方式による高度とGPS高度との差(A), 新しい計算方式による補正量(B), 等価地球半径 ($k = 1.12$)
 による補正量(C), ISSOPによる補正量(D), およびアンテナ仰角観測値と新しい計算方式で得られた仰角計算値との差

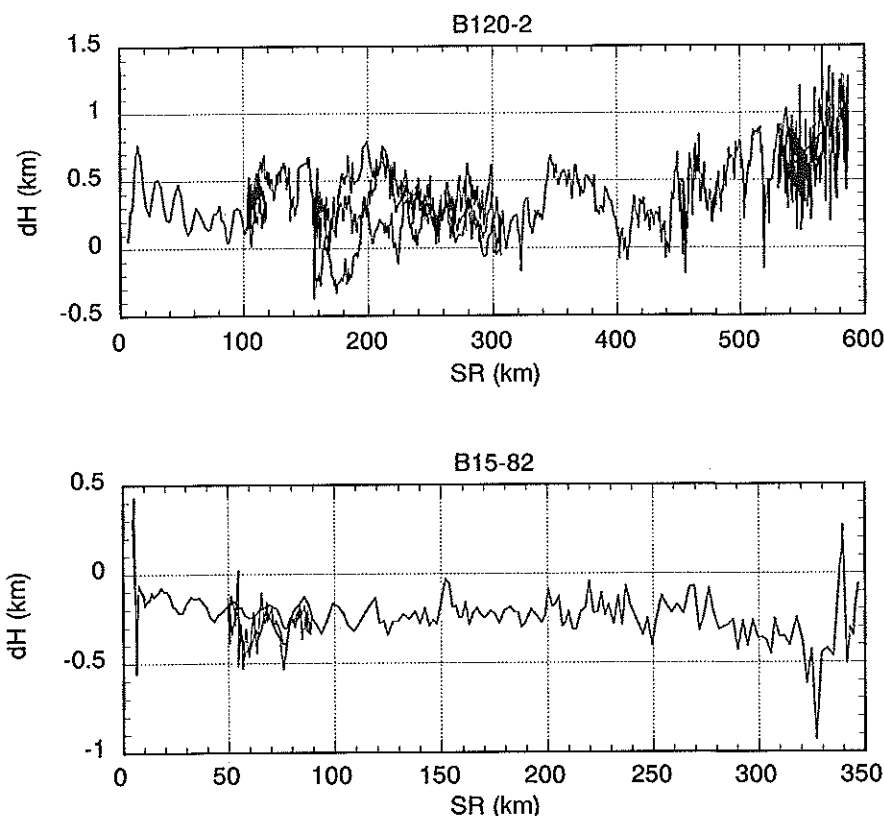


図 6

[2]による高度補正量を図5のCに示す。この補正計算では、屈折率の高度変化 dn/dh が一定で電波は円弧を描いて進むとし、B120-2の場合にフィッティングして求めた電波の屈折半径は $8Re$ (Re は地球半径)、等価地球半径 k は1.12を用いて計算した(なおこの場合 k が $4/3$ では過補正になる)。また、ISSOPに使われた対流圏効果の補正[3]による高度補正量をDに示す(計算式は付録C参照)。このとき、当日の秋田の気象データから計算した大窪山高度の屈折指数を使用した。なお、ISSOPでは気球が比較的近距离(仰角が 10° より高いあるいは対流圏内を飛行中)の場合には計算誤差が大きくなるので、ここでは直距離が150km以上の場合についてのみ示した。図6には、本計算方式を適用して測距による高度を補正した後の誤差量を示す。誤差は全体として300mから800mの範囲まで改善されている。これらと比較すると、電波屈折による誤差以外に、測距観測結果から計算した高度にはオフセットがあるように見えるが、このことについては付録で検討する。

B120-2の場合、曲線Aを多項式近似したものと曲線Bは曲率がほぼ一致している。B15-82の場合はSRが280km以遠で測距が乱れているため判断は難しいが、その時点まではかなりの一致を示している。またここで示した計算方式とISSOPによる計算結果を比較すると、B120-2ではSRが300km付近の差が最も大きくなっているが高々150m程度である。しかしB15-82ではSRが200km以遠で差が徐々に広がってゆく傾向があるが、B120-2のように500km以遠で再度一致するかどうかは定かではない。ISSOPでは受信基地の N_s のみで対流圏内全体の屈折量が決定されているので、その時々の詳細な気象条件を考慮するかどうかがこのような両者の差となって現れると考えられる。一方、等価地球半径を使用する方法では、大気屈折率の分布(電波の屈折半径の値)を仮定した時点で既に現実のものとの開きがあること、対流圏の比較的高度が低い部分の屈折を主に考えているため、屈折率が大きくなっていることが挙げられる。そのときどきの状況に応じて大気屈折率の分布と k の値を適切に選択すれば、B15-82の場合のようにかなり合わせ込むことは可能となるが、運用上必要とされるリアルタイムでの補

正に適用することは難しい。

仰角の補正值 ($dEL = EL_i - EL_r$) のSRが100km付近で変化の傾向が他の部分と大きく異なっているのは、気球が水平浮遊に入った状態でSRが減少しても、屈折の総計が余り変化しない(あるいは対流圏での屈折が支配的である) ためである。

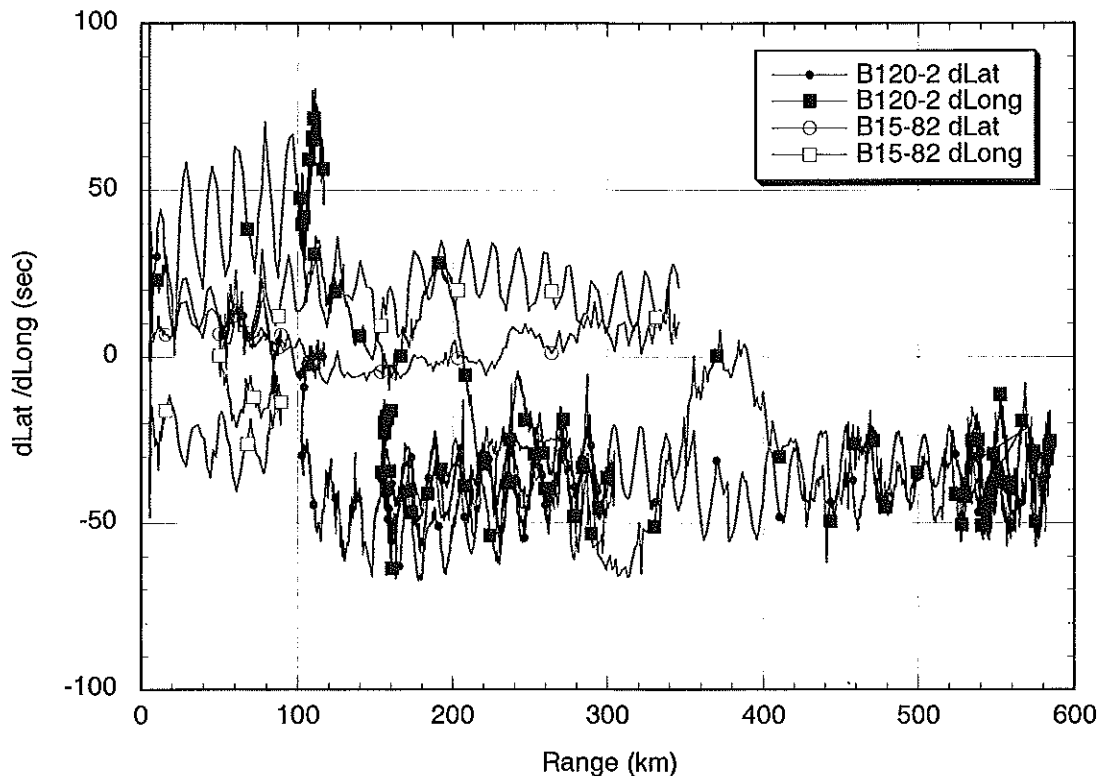
4. 終わりに

現在の測距による観測結果を使用した位置計算法では、電波伝搬の大気屈折を考慮していないため、受信点から遠距離を飛翔した場合、高度に無視できないほどの誤差が生じている。ここでは、気球放球当日の高層気象データを使用し、大気屈折の影響による電波伝搬経路の曲がり方を考慮した計算を導入すると、それを相当程度改善できることを示した。すなわち、この手法を使えば、直距離が500km以上においても3.5kmから200m以下(現在の測距のオフセット分を除く)へ改善できる。この新しい補正法は、等価地球半径を使用した方法やISSOPによる計算結果より改善の程度が優れていることも示した。この計算法は現在の測距による位置計算に前置するようにしたので、現在の計算アルゴリズムにはほとんど変更を加えなくても導入可能である。

付 録

[付録A] 測距データから計算した緯経度とGPS測位データとの差

図A1には、測距データから計算した緯経度とGPS測位データとの差を示す。初期からのオフセットや周期的振動に関しては付録C参照。SRの増加によっても100km付近のギャップを除きほぼ差は一定している。



図A1 測距データから計算した緯経度とGPS測位データとの差

2つの気球の飛翔時の測距データから計算した緯経度とGPS測位データとの差である。縦軸は緯経度の差を秒で表した

[付録B] 他の大気屈折率の推定法

大気の高高度に対する屈折指数は以下の式で表される [4].

$$N = N_s \exp(-C_e h) \quad (\text{A1})$$

N_s : 表面屈折指数

C_e : 定数 0.136

h : 高度 (km)

$N_s = 315$, $C_e = 0.136$ の場合を基本大気 (basic reference atmosphere) という。これを B120-2 の場合に適用し、放球当日の秋田の地上の気象データから計算した屈折指数を用いると、屈折率が大きくなりすぎる傾向がある。そこで、

$$N = N_s \exp(-C_e (h - h_s)) \quad (\text{A2})$$

N_s : 受信基地高度の表面屈折指数

C_e : 定数 0.136

h : 高度 (km)

h_s : 受信基地高度

とし、まず当日の秋田の高層気象データから大窪山高度での N_s を (6) 式で計算して求め、以降は (A2) 式を用いて各高度の N を求めて屈折率の計算を行うと、その結果は先に示した計算法による結果とかなりよく合うので、簡易な補正法として使用可能である。

[付録C] ISSOP による仰角補正

以下の式で示すように、受信アンテナのある場所の地上の屈折指数のみから、対流圏全体の電波屈折量を推定している。ここでは観測量 γ の値から γ_{rad} を計算することになる。なお、ISSOP の実際の運用では、表面屈折指数の月別・時間別の平均値をテーブルとして持ち、必要に応じて補間して使用している。

$$\Delta_\gamma \gamma = \begin{cases} \frac{N_s}{340} b_1 b_2 & \gamma < 0.17 \text{ rad } (9.74^\circ) \\ \frac{10^{-6} N_s}{\tan \gamma} & \gamma \geq 0.17 \text{ rad} \end{cases} \quad (\text{A3})$$

$\Delta_\gamma \gamma$: 仰角補正量

γ : 補正後の仰角

N_s : 観測局での表面屈折指数

$$b_1 = 1.0 - (1.1216 \times 10^5 b_3 \gamma_{\text{rad}}) - (51.0 - 300.0 \gamma_{\text{rad}}) b_3^{1/2}$$

$$b_2 = \frac{7.0 \times 10^{-4}}{0.0589 + \gamma_{\text{rad}}} - 1.26 \times 10^{-3}$$

$$b_3 = \frac{1}{10^3 (r - a_e)}$$

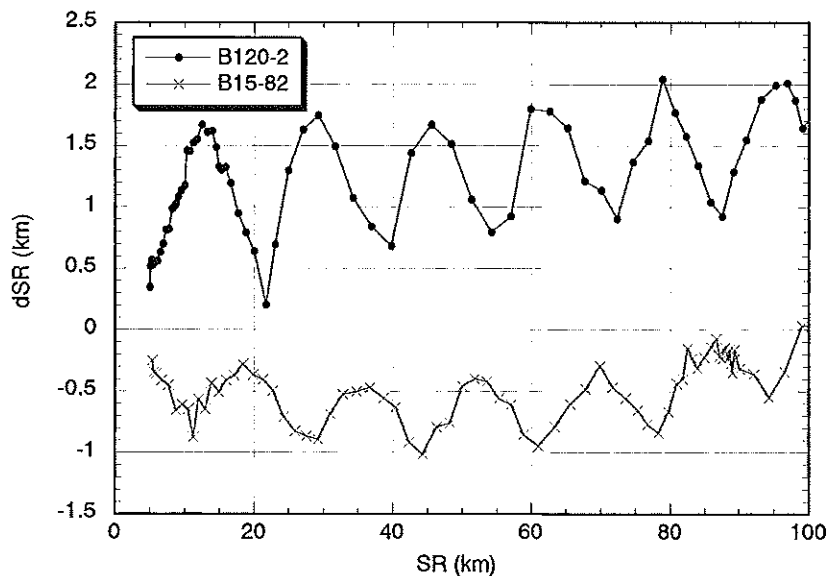
γ_{rad} : 仰角 (rad)

a_e : 平均地球赤道半径 = 6378.160 km

r : 地球中心から飛翔体までの距離 (km)

[付録D] 測距による直距離計測結果に見られる周期的変動

図A2は放球直後の直距離観測値 (SR , 大気屈折による電波の曲がりを含む) とGPS測位データから計算した真の直距離との差を拡大表示したものである。放球直後から平均して SR に 500m から 1 km の差が認められ、か



図A2 放球直後の測距による直距離観測値とGPS測位データより計算した真の直距離との差の変動
B120-2とB15-82では、位相は逆転しているが周期は同一であることが分かる

つ周期的に変化していることが分かる。気球の飛翔による直距離の増減によっても、この変化の極大・極小の位置は変動していない。このような直距離観測結果に周期的変動（周期は約16.5km、振幅の最大値は±1.0km程度）が重畳していることは、以前報告[2]した。

この振動が高度計算結果（振幅±200m）にも現れ、測距の初期化のタイミングによっては大きなオフセットがついてしまうものと考えられる。特に、初期化がこの位相の山や谷付近に当たり、且つ仰角が大きくなる（気球が大窪山受信点方向に移動する）場合、高度差が顕著に現れることになる。過去の多くの気球実験時の測距とGPSデータから、この周期性は気球飛翔中変化しないし、何年にもわたって維持されていることが分かっている。このような振動は搭載機器側ではなく地上機器側に原因があることが推察されているが、どういう原因であるかは特定できていない。測距結果の<30kmが変動していることから、測距に使用している5kHz成分が

$$2 \text{ (km)} / 60 \text{ (km)} \times 2\pi = 0.21 \text{ (rad)}$$

で周期的に変動していることになり、かなり大きな数値となる。現時点ではリアルタイムでこれを解消する方策はない。

参考文献

- [1] 本田秀之, 他気球グループ, GPSを利用した気球測位結果, 平成6年度大気球シンポジウム, 1994年.
- [2] 本田秀之, 矢島信之, 電波の大気屈折と測距高度-GPS高度との比較検討, 平成9年度大気球シンポジウム, 1997年.
- [3] 西村敏充, 加藤隆二, 牛越淳雄, “さきがけ”, “すいせい”の軌道決定と軌道決定プログラムISSOP, 宇宙科学研究所報告42号, 1986年.
- [4] 新版無線工学ハンドブック, 無線工学ハンドブック編集委員会編, オーム社, 1964年.

