# 擬似衛星の対流圏遅延補正モデルの評価

## 福島荘之介 吉原 貴之

Evaluation of a Tropospheric Delay Correction Model for Pseudolite Sonosuke FUKUSHIMA $^{\dagger}$  and Takayuki YOSHIHARA $^{\dagger}$ 

あらまし 擬似衛星を利用した航空機の着陸航法システムでは,地表付近の対流圏遅延が測距誤差の最大要因となる.このため,ラジオゾンデ観測に基づく大気屈折率の高度分布モデルから近似的に導出された対流圏遅延補正モデルが提案されている.しかし,この屈折率モデルの構築にはラジオゾンデ観測の地表付近の低い高度情報が利用されていない.また,地表付近の気象観測値は,局所的な影響により屈折率モデルとの差が大きくなる場合がある.現在までに擬似衛星の補正モデルを実験的に評価した例はなく,補正モデルの妥当性は未検証であった.そこで,本論文では擬似衛星の飛行実験により,搬送波位相の二重差による対流圏遅延を求め,提案された補正モデルと比較する.更に,1年間の国内17個所のラジオゾンデの高層気象観測データから地表付近の対流圏遅延を求め,補正モデルと比較する.この結果,補正モデルによる対流圏遅延は,飛行実験ともラジオゾンデともよく一致し,国内南方の高温多湿の気象状態においても,着陸航法システムへ適用可能であることを示す.キーワード GPS,擬似衛星,対流圏遅延,ラジオゾンデ

## 1. まえがき

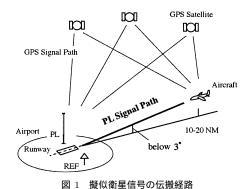
擬似衛星 (Pseudolite: PL)とは, GPS (全地球測 位システム)衛星と似た信号を放送する地上に設置し た送信機を指す[1]. 擬似衛星の目的は,ユーザの受信 機で,GPS 衛星と同様に擬似衛星からの信号を受信 し,これを GPS 衛星と見立て,測位に利用すること である. 擬似衛星の研究の歴史は古く, GPS 開発の初 期段階である 1970 年代から, その概念が提案されて いた. 擬似衛星の開発は, 提案当初から存在していた 遠近問題 (near-far problem)を克服することが課題 であったが,その後パルス方式[1]により,この問題 に一定の解決策が見出された.1990年代前半には,航 空機の着陸航法への利用が提唱され,研究開発が促進 された[2]. また, DGPS を基本とする航空機の次世 代着陸システムである LAAS (Local Area Augmentation System)の研究[3]が進むのと平行し,米国の RTCA, Inc. (航空技術諮問機関,旧Radio Technical Commission for Aeronautics ) は , LAAS の測距源と

このような擬似衛星の利用形態では, ユーザである 飛行中の航空機位置付近に基準局を設置することがで きない.このため擬似衛星からの擬似距離に対しては 有効な DGPS を構築することができず, 擬似衛星の 伝搬経路上の対流圏遅延が測距誤差の最大要因となる. 擬似衛星信号の伝搬経路は, GPS 衛星と異なり地表 面に近い大気層を通過することに特徴がある(図1). 対流圏遅延の推定には, GPS と同様に大気屈折率の 高度分布モデル(以下,屈折率モデル)から導出した 補正モデルの利用が有効であり, RTCA はラジオゾン デ観測に基づく Chao の屈折率モデル [10] から近似計 算により導出した擬似衛星の対流圏遅延補正モデルを 提案している、大気の屈折率モデルは、地表面の気象 観測値と地表面からの高さの関数であるが,受信機位 置付近の気象観測値が入手困難で,平均的な気象観測 値を仮定する場合が多い.これに比較して,擬似衛星

Electronic Navigation Research Institute, Independent Administrative Institution, 7–42–23 Jindaijihigashi-machi, Chofu-shi, 182–0012 Japan

して, 広帯域パルス型の空港擬似衛星(APL: Airport Pseudolite)の信号仕様を提案している[4]. その後, 米国を中心に擬似衛星プロトタイプの開発[5], 航空機による実証実験[6], [7]が行われた. 筆者らも国産の空港擬似衛星のプロトタイプ開発に参加し[8], 航空機による測位性能の評価実験により, 擬似衛星によるDGPS の測位精度向上を実証している[9].

<sup>†</sup> 独立行政法人電子航法研究所,調布市



の補正モデルでは,地表面の気象実測値(気温,気圧,相対湿度)を入力とするため,精度が高い.

Fig. 1 Pseudolite signal path.

Chao モデルは,1970年ごろのラジオゾンデ観測に基づいて構築された.しかし,擬似衛星の伝搬経路となる地表付近の低い高度情報は,利用されていない.また,地表付近の観測値は地形など局所的な影響が大きく,屈折率モデルとの差が大きくなる場合がある.現在までに,この擬似衛星の対流圏補正モデルを実験的に評価した例はなく,補正モデルの妥当性は未検証であった.

そこで,本論文では,筆者らの飛行実験データ(夏 期・冬期)から搬送波位相の二重位相差により対流圏 遅延を推定し,実験時の地上気象に基づいて補正モデ ルと比較する.この結果,二重位相差による推定値と 補正モデルの傾向はよく一致することが分かった.し かし,飛行実験の期間は短期で気象条件は限定される. そこで,1年間のラジオゾンデによる高層気象データ (国内17個所)から地表付近の遅延量を求め,国内の 異なる場所で長期に,補正モデルと比較した.その結 果,提案されたモデルの誤差は,擬似衛星と受信位置 の斜距離に比例し, 10 NM (18.52 km) 地点での差は 最大 68 cm, rms は最大 15 cm であることが分かった. これらの結果は,この補正モデルを擬似衛星に適用し, 次世代の航空機の着陸進入である LAAS (国際標準は GBAS: Ground Based Augmentation System)に 利用した場合,測位精度に大きな影響を与えないこと を意味する.この対流圏遅延補正モデルは,航空利用 以外の用途においても, 広覆域の擬似衛星に応用可能 である.

### 2. GPS の対流圏遅延と擬似衛星の補正式

GPS の対流圏遅延は , そのほとんどが対流圏に存在する中性大気による屈折に原因する . 屈折指数 N は , 大気屈折率 n を用いて

$$N \triangleq (n-1) \times 10^6$$

と定義され,乾燥項  $N_{dry}$  と湿潤項  $N_{wet}$  により,

$$N = N_{dry} + N_{wet}$$

と表される.対流圏遅延d(m)は屈折による経路長の増加であり、屈折指数Nの経路に沿った積分として、

$$d = 10^{-6} \int \{N_{dry}(l) + N_{wet}(l)\} dl$$
  
=  $d_{dry} + d_{wet}$  (1)

と求められ,通常乾燥項  $d_{dry}$  が全体の 90%を,残りの 10%が湿潤項  $d_{wet}$  であることが知られている.地表面 の屈折指数  $N_{dry,0}$  と  $N_{wet,0}$  は,地表面の気温 T ( K ),気圧 P ( hPa ),相対湿度 RH ( % ) の関数となる.海抜 h の屈折指数  $N_{dry}$  , $N_{wet}$  は,h の関数としての経験式が利用される.GPS では,この屈折率モデルに,1970 年ごろのラジオゾンデ観測による Hopfield モデル [11] (または,その改良),気体の法則から導出された Saastamoinen モデル [12] を用いることが多い.

擬似衛星では,この屈折率モデルに Hopfield とほぼ 同様の Chao モデルの採用が提案されている.Chao モデルは Hopfield モデルの数年後に,ラジオゾンデ 観測により発表されたモデルであり,海抜 h の 4 乗に 比例する式は同様であるが,約 2,000 ft を下限とする より低い高度の観測値が含まれることもあり,異なる 係数が採用される.Chao モデルで,h の関数として の乾燥項  $N_{dry}$  は, $h \leq 12.2$  km について,

$$N_{dry}(h) = N_{dry,0} \times \left(\frac{h_d - h}{h_d - h_s}\right)^4$$

と表される.ここで, $h_d=42.7\,\mathrm{km}$ , $h_s$  は地表面高度( $\mathrm{m}$ )である.同様に湿潤項  $N_{wet}$  は, $h\leq 13\,\mathrm{km}$  について,

$$N_{wet}(h) = N_{wet,0} \times \left(\frac{h_w - h}{h_w - h_s}\right)^4$$

である.ここで, $h_w=13\,\mathrm{km}$ ,地表面の  $N_{dry,0}$  と  $N_{wet,0}$  は,

$$N_{dry,0} = 77.64 \times \frac{P}{T}$$
  
 $N_{wet,0} = 2.277 \times 10^4 \frac{RH}{T^2} \times 10^{\frac{7.4475(T - 273)}{T - 38.3}}$  (2)

である[13].

各 GPS 衛星の対流圏遅延量を求めるには,屈折指数 N から天頂方向の垂直遅延量を求め,マッピング関数により任意の衛星仰角 E ( $^\circ$ ) の遅延量に変換する.GPS 衛星では,いくつかのマッピング関数が提案されているが,これは地球の丸みにより,低仰角衛星での近似が不十分になり,モデルの誤差が増幅されるためである.擬似衛星では,ユーザまでの距離が短いため,地球を平面と考え  $1/\sin(E)$  をマッピング関数とする.

RTCA は、Chao モデルとマッピング関数から近似計算を用い、撥似衛星の対流圏遅延補正を

$$\delta R_{Tr} = N_R \times (1 - \Delta h_u / h_0) \times R \times 10^{-6} \tag{3}$$

とモデル化している.ここで, $N_R$ は地表面の屈折指数

$$N_R = N_{dry,0} + N_{wet,0}$$

で,GBAS のデータリンクにより値を放送する. $\Delta h_u$  は擬似衛星とユーザの高度差(m),R は同様の斜距離(m), $h_0$  は

$$h_0 = rac{N_R \, h_{wet,0} \, h_{dry,0}}{N_{dry,0} \, h_{wet,0} + N_{wet,0} \, h_{dry,0}} \ h_{dry,0} = rac{h_d - h_s}{2} \ h_{wet,0} = rac{h_w - h_s}{2}$$

と求める[14].式(3)の導出は文献[13],[15]による.

## 3. 飛行実験による対流圏遅延補正量の推 定結果と比較

筆者らは、航空機による進入着陸実験により擬似衛星の測位性能の評価を 2002 年 1 月に実施している . 実験は、電子航法研究所の実験用航空機 ( Beach Craft 99 Airliner )を用い、仙台空港で実施された . 実験では、空港に擬似衛星を設置し、空港内に設置した送信アンテナから GPS の L1 周波数の信号を RTCA の提案する仕様で送信する . この信号と GPS 信号を航空機に搭載した受信機と空港内の基準局に設置した受信機で受信する . 航空機の位置は、搭載受信機とは別に併設した測量用の GPS 受信機により後処理で求め

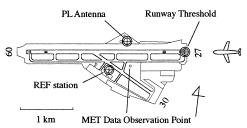


図 2 擬似衛星アンテナ及び基準局の配置(仙台空港)

Fig. 2 Site configuration for the pseudolite transmitter and the reference antenna in Sendai airport.

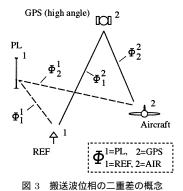
表 1 飛行実験:進入着陸回数と地上気象観測値 Table 1 Flight test summary:number of dataset analyzed and ground meteorological measurements.

					2002年
	月日	回数*	気圧(hPa)	気温(℃)	湿度(%)
冬	/ 1.22am	3 (4)	1002.8	9.4	64.5
	1.23am	1 (5)	1007.0	7.6	43.0
	1.24am	4 (5)	1015.5	4.5	57.0
	1.25am	1 (1)	1023.0	4.5	48.0
夏	7.29am	1 (3)	1012.0	24.0	83.3
	7.29pm	1 (3)	1012.0	25.0	83.5
	7.31am	4 (7)	1009.5	29.0	70.1
	8. 1am	5 (7)	1005.5	35.0	50.0
	8. 1pm	4 (7)	1004.0	37.0	39.6
	計	24 (42)			

<sup>\*:</sup>対流圏遅延の推定に使用した試行回数。括弧内は進入 着陸の回数

る.航空機は滑走路から約8NMの海上から滑走路27へ進入を開始し,ILS(Instrument Landing System)を利用し,1,500ftでの一定高度飛行後,5NM付近から3度の経路に沿って降下し着陸する.その後,航空機は静止することなく離陸して,進入開始地点に戻り,再び進入着陸を繰り返す.実験時の擬似衛星の送信アンテナと基準局,滑走路の位置関係を図2に示す.この実験に利用した擬似衛星の仕様,実験方法と測位性能は,文献[16],[17]に詳しい.

この実験は冬期に1週間程度実施された.このため,2002年7月に同様の飛行実験を実施し,夏期のGPS及び擬似衛星の受信データを取得した.本論文で利用した実験データと滑走路付近の気象観測値を表1に示す.気象観測値は,航空測候所が発表する定時航空気象実況(METAR)を補間し,実験時刻(開始と終了の中間)の値を求めた.



Explanation for the Pseudolite-GPS double Fig. 3

difference.

図 3 に GPS と擬似衛星の搬送波位相の二重差の概 念を示し,実験データから対流圏遅延を求める方法を 示す. 航空機上で受信される GPS 衛星(または擬似 衛星)からの距離に換算した搬送波位相(単位 m)は,

$$\Phi = \rho + dt_r + dt_s + d_{eps} + d_{ion} + d_{trop} + d_{mul} + \lambda N$$
(4)

と記述される.ここで, $\rho$  は GPS 衛星(または擬似 衛星)とユーザ受信機間の真距離, $dt_r$ は受信機のク ロックバイアス,  $dt_s$  は GPS 衛星(または擬似衛星) のクロックオフセット,  $d_{eps}$  はエフェメリス誤差(ま たは擬似衛星アンテナの設置位置測定誤差),  $d_{ion}$  は GPS 衛星の電離層遅延(擬似衛星には存在しない),  $d_{trop}$  は GPS 衛星 (または擬似衛星)の対流圏遅延,  $d_{mul}$  はマルチパス誤差, $\lambda$  は波長 ( $c/f_{L1}$ ),N は整 数値バイアス,である.この搬送波位相 $\Phi$ に,上付き 及び下付きの数字 (1 または 2) を与え , 図 3 に示す ように,実験データ中のどの搬送波位相かを表記する (例えば, $\Phi_2^1$ は航空機で受信される擬似衛星信号の搬 送波位相). 搬送波位相のある衛星(または擬似衛星) に関する差(一重差)を記号 △ で表記し,その差(二 重差)を記号 $\nabla\Delta$ で表せば,式(4)から搬送波位相の 二重差は,

$$\nabla \Delta \Phi = \nabla \Delta \rho + \Delta d_{trop}^{1} \tag{5}$$

となる.ただし,ここでは基準局と航空機間の距離が 近いことを仮定する.ここで, $\Delta d_{trop}^1 = d_{trop2}^1 - d_{trop1}^1$ であるため,擬似衛星と航空機間の対流圏遅延 $d^1_{trop2}$ は

$$d_{trop2}^{1} = \nabla \Delta \Phi - \nabla \Delta \rho + d_{trop1}^{1} - \Delta d_{trop}^{2} - \lambda \nabla \Delta N$$
(6)

と求められる.ここで, $d^1_{troy1}$ は擬似衛星と基準局間 の対流圏遅延(約 $0.19\,\mathrm{m}$ ),  $\Delta d_{trop}^2$  は GPS 衛星に関 する航空機と基準局間の対流圏遅延の差分 (10 NM で 約 $0.13\,\mathrm{m}$ ) である. $\Delta d_{trop}^2$  は文献 [18] により,

$$\Delta d_{trop}^2(n) = \frac{N_R h_0 10^{-6}}{\sqrt{0.002 + \sin^2 E^n}} \left( 1 - e^{-\Delta h/h_0} \right)$$
(7)

と求められることが知られている.ここで, $\Delta h$  は基 準局と航空機の高低差 (m),  $E^n$  は n 番 GPS 衛星の 仰角  $, h_0$  は対流圏スケールハイト  $, N_R$  は屈折指数で あり、地上気象観測値から求められる[19].

表 1 の実験データ(42回)から,式(6)により擬 似衛星と航空機間の対流圏遅延量を求める.GPS 衛 星には実験中最も仰角の高い、マルチパスの少ない衛 星を選択する.ただし, $d^1_{troy2}$  には整数値バイアスを 含む項  $\lambda 
abla \Delta N$  があるため,ほとんどの試行にサイク ルスリップによるデータの不連続が含まれる.そこで, 二重差の観測時刻に対する差分(三重差)を用いて, 不連続なデータを編集する.残るバイアスの補正には, 擬似衛星から 1.1 km の場所にある滑走路末端での遅 延量が等しいと仮定し,残差をオフセットする.しか し,編集処理ですべての試行で二重差が完全に連続 になるわけではなく, 不連続な個所が残る場合もあっ た.このような試行には何らかの異常が含まれている と考え,手動で区間を決めたり,試行を省いたりして 連続な部分だけを使用する、この結果遅延量の推定に 利用できた試行は 24 回であった [20], [21]. 以上の手 法では,完全にサイクルスリップを編集できないため, データを効率的に利用できない問題が残る. 慣性航法 システムなど,他の観測データと組み合わせた場合に は,利用効率を上げることが可能と考えられる.

図 4 に以上の方法で実験データから求めた遅延量 (TROP-DD) と前述の RTCA 提案モデルから地上 気象観測値により求めた遅延量(TROP-MDL)を 示す.図から両者の傾向はよく一致しており,8NM での遅延量は夏期に 5.2 m, 冬期に 4.5 m で明りょう な差があることが分かる.この差は主に気温の影響に よる . 図 5 は , TROP-MDL と TROP-DD の差 分である.両者の差は,遅延量に比例し,8NMで約 20 cm が最大となる.また,この差の最大は,常に全 遅延量の 10%以下といえる.これらの差が生じる理由 は,(1) 地表面の気象データを使ったモデルは,伝搬 経路の実気象データと一致するわけではない,(2)対

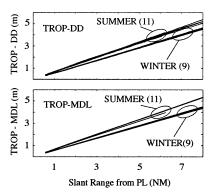


図 4 実験データから二重差により求めた対流圏遅延 (TROP-DD)とモデルから求めた対流圏遅延 (TROP-MDL)

Fig. 4 The tropospheric delay based on the flight tests and on the theoretical model.

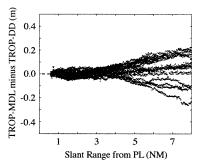


図 5 モデルから求めた対流圏遅延(TROP-MDL)と 実験データから二重差により求めた対流圏遅延 (TROP-DD)の差分

Fig. 5 The difference between tropospheric delay based on the flight tests and on the theoretical model.

流圏遅延の湿潤項  $d_{wet}$  は,全遅延量の約 10%で,短期の変動をもつ,(3) 航空機位置の精密測位に用いた後処理の誤差(航空機位置誤差)は,TROP-DDの誤差となる,ためと考えられる.

# 4. ラジオゾンデによる対流圏遅延補正量 の推定結果と比較

飛行実験による補正モデルの比較は,ある特定の気象状況での測定結果となる.季節変動を含めた様々な気象で補正モデルの比較を行うため,1年間のラジオゾンデ観測値を利用し,高層大気の屈折率の積分により求めた遅延量と補正モデルを比較する.ラジオゾンデ観測値は,気象庁の 18 観測点のうち,南鳥島を除く 17 観測点(図 6)の 2002 年のデータから,気温 T(K),気圧 P(hPa),相対湿度 RH(%)を用いる.

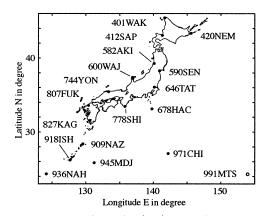


図 6 国内のラジオゾンデサイトの位置 Fig. 6 Geometry of radiosonde site in Japan.

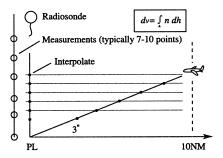


図 7 ラジオゾンデデータを用いた対流圏遅延の計算法 Fig. 7 The calculation method for the tropospheric delay from radio sonde measurements.

ラジオゾンデは,1日2回定時(JST:9時と21時) に放球され観測される.

図 7 にラジオゾンデによる気象観測値から対流圏遅 延量を計算する方法の概念を示す. ラジオゾンデは, 上空約 30 km (98,000 ft) までを観測するが, 本計算 では放球高度から 3,000 ft までの低い高度を対象とす る. ラジオゾンデの放球点から高度 3,000 ft までの観 測点数は,放球点の高度にも依存するが,10点弱であ る場合が多い.これは,多量の観測データから,異常 値を除去し,データを間引いて,顕著な変化点(及び 指定気圧高度)のデータのみが記録されるためである. そこで,この記録データを線形補間し,補間点での屈 折率の乾燥項  $N_{dry}$  , 湿潤項  $N_{wet}$  を , 式 (2) と同様に 計算する.次に,式(1)に基づき,放球点からの積算 値を求めて垂直遅延量とする.補正モデルとの比較の ため,放球点には擬似衛星が設置されたと仮定し,放 球点から仰角 3° 斜距離 10 NM の位置を評価地点とし て,垂直遅延量の  $1/\sin(3^\circ)$  により,この地点の対流

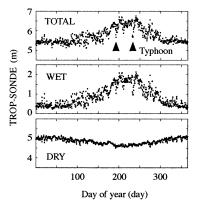


図 8 ラジオゾンデによる 1 年間の対流圏遅延 (TROP-SONDE) の推移 (10 NM 地点, 仙台)

Fig. 8 The tropospheric delay from radio sonde measurements at 10 NM point in Sendai (one-year).

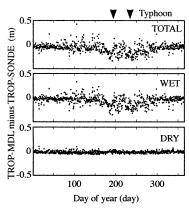


図 9 1 年間の対流圏遅延 TROP-MDL と TROP-SONDE の差 (10 NM 地点, 仙台)

Fig. 9 The difference between TROP-MDL and TROP-SONDE at 10 NM point in Sendai (one-year).

圏遅延を求める.また,前節と同様,放球点の気象観測値から補正モデルにより地上気象観測値を用いて,上記と同じ斜距離  $10\,\mathrm{NM}$ ,仰角  $3^\circ$  地点の対流圏遅延( $\mathbf{TORP-MDL}$ )を求める.このとき,補正モデルの地表高(擬似衛星のアンテナ高とほぼ同じ)は,ラジオゾンデの放球地点の高度とした.

図 8 に仙台観測点(仙台空港の北  $13.7\,\mathrm{km}$ )のラジオゾンデデータから求めた  $10\,\mathrm{NM}$  地点の対流圏遅延( $\mathbf{TORP\text{-}SONDE}$ )の 1 年間の推移を示す.図から全遅延量は, $5.2 \sim 6.8\,\mathrm{m}$  ほど変化し,その原因は主に湿潤項にあることが分かる.図 9 は同様の地点で求めた  $\mathbf{TORP\text{-}MDL}$  と  $\mathbf{TORP\text{-}SONDE}$  の差分であ

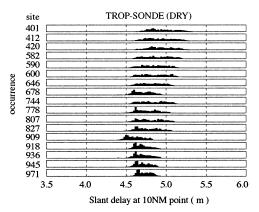


図 10 ラジオゾンデによる年間の乾燥項の分布 Fig. 10 Distribution of dry term calculated by radiosonde data (one-year).

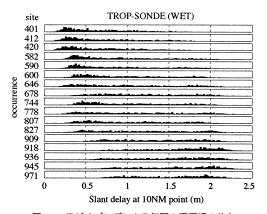


図 11 ラジオゾンデによる年間の湿潤項の分布 Fig. 11 Distribution of wet term calculated by radiosonde data (one-year).

り、湿潤項に原因して、夏期にモデルとの差が増大することが分かる。全遅延量の年間のモデルとの差は、10 NM 地点で標準偏差 9 cm、最大 42.3 cm であった。また、図 8 (上段)に、台風通過に伴う気圧変化により、前後日と比較して湿潤項が大きく減少している日(通算日:192 及び 232)を 印で示す。このような特異な変化は、年間の平均的な気象を仮定したモデルを用いる場合には、除くことができず、この変化分相当の誤差を生じる。しかし、図 9 から台風通過日(印)に差が増大することはなく、地表面の気象実測値を使った提案モデルの有効性も確認できる。

今までと同様の方法により,ラジオゾンデデータにより,1年間の17観測点の遅延量の頻度分布を求めた結果を図10,図11に示す.図から比較的温暖な南方のサイトは,(1)乾燥項の変動が小さいこと,(2)湿潤

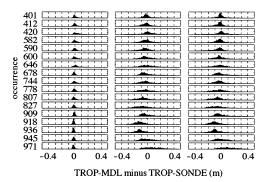


図 12 ラジオゾンデとモデルの差の分布(乾燥項,湿潤項,全遅延)

Fig. 12 Error distribution between radiosonde and theoretical model.

項の変動幅はほぼ同じであるが,増加期間(夏期)が長いこと,が分かる.図 12 は,同様の方法による,ラジオゾンデとモデルの差の頻度分布を示しており,特に南方のサイトで湿潤項の差が大きくなる傾向がある.年間の差は,最大  $68\,\mathrm{cm}$  (名瀬),rms は最大  $15\,\mathrm{cm}$  (鹿児島)であった.

### 5. む す び

RTCA により擬似衛星用に提案された対流圏遅延補正モデルを,飛行実験とラジオゾンデ観測データにより評価した.

飛行実験では,擬似衛星と GPS 信号を受信して搬送波位相の二重差により,遅延量を求めた.その結果,実験結果と RTCA の補正モデルとはよく一致し,その差は最大でも全遅延量の 10%以下であった.しかし,実験は7日間と短期で気象状況は限定される.

一方, ラジオゾンデでは国内の17サイト,1年間の高層気象データを利用し,屈折率の積分により,遅延量を求めた.対流圏遅延は高温多湿の気象状態で湿潤項の変動が増加するので,特に南方のサイトでの補正モデルの有効性が興味の対象となった.しかし,補正モデルとの差は,北方のサイトに比較して南方のサイトで分散が大きく,バイアスが生じるものの,航空機の着陸進入に応用する場合には,許容される誤差と考えられる.

大気屈折率は周波数に依存しないため,この補正モデルは擬似衛星以外にも利用可能であり,送信機を地上に設置した測距システムにも利用可能となる.

謝辞 擬似衛星の設計・製造を担当され,実験データの処理についてもアドバイス頂いた,東芝社会イン

フラシステム社の須賀秀一氏,角田寛人氏,ラジオゾンデとの比較結果について議論頂いた,東京海洋大学の安田明生教授をはじめ研究室の関係者に感謝します.

#### 文 献

- B.D. Elrod and A.J. Van Dierendonck, "Pseudolites," in Global Positioning System: Theory and Applications, vol.II, pp.51–79, AIAA, 1996.
- [2] C.E. Cohen, B.S. Pervan, and H.S. Cobb, "Precision landing of aircraft using integrity beacons," in Global Positioning System: Theory and Applications, vol.II, pp.427–459, AIAA, 1996.
- [3] P. Enge, "Local area augmentaion of GPS for the precision approach of aircraft," Proc. IEEE, vol.87, no.1, pp.111-132, Jan. 1999.
- [4] RTCA SC-159, GNSS based precision approach local area augmentation system (LAAS) signal-inspace interface control document (ICD), RTCA DO-246/246A, Sept. 1998/Jan. 2000.
- [5] H.S. Cobb, K.R. Zimmerman, D.G. Lawrence, G.M. Gutt, P.Y. Monotgomery, and L.G. Leckie, "Test results for the IN500 airport pseudolite," Proc. ION-GPS, pp.1517–1521, Sept. 1999.
- [6] J. Warbuton and M. Dickinson, "Integration and testing of a wide-band airport pseudolite," Proc. ION-GPS, pp.1531–1540, Sept. 1999.
- [7] C.G. Bartone and S. Kiran, "Flight test results of an integrated wideband airport pseudolite for the local area augmentation system," J. ION, vol.48, no.1, pp.35–48, Spring 2001.
- [8] 航空振興財団,地上疑似衛星を用いた精密進入援助システムの開発報告書,平成10~13年度.
- [9] 福島荘之介,齊藤真二,藤井直樹,須賀秀一,角田寛人, "広帯域パルス擬似衛星の測位性能評価"信学論(B), vol.J87-B, no.2, pp.265-273, Feb. 2004.
- [10] C.C. Chao, "The tropospheric calibration model for Mariner Mars 1971," JPL Technical Reports 32-1587, pp.61–76, 1974.
- [11] Hopfield HS, "Two-quartic tropospheric refractivity profile for correcting satellite data," J. Geophysical Research, vol.74, no.18, pp.4478-4499, April 1969.
- [12] J. Saastamoinen, "Contribution to the theory of atmospheric refraction," Bulletin Géodésique, vol.107, pp.13-34, March 1973.
- [13] A.J. Van Dierendonck, "Local differential tropospheric delay corrections," Memorandum in RTCA Meeting, Aug. 1997.
- [14] A.J. Van Dierendonck, "What is  $h_0$ ?," Memorandum in RTCA Meeting, Dec. 1998.
- [15] A.J. Van Dierendonck, "Pseudolite technology for GPS augmentation," ION GPS 97 Tutorial, Sept. 1997.
- [16] 福島荘之介,齊藤真二,藤井直樹,須賀秀一,角田寛人, "広帯域パルス擬似衛星の測位性能評価",信学論(B), vol.J87-B, no.2, pp.265-273, Feb. 2004.

- [17] S. Suga, H. Tshunoda, N. Fujii, S. Fukushima, and S. Saitoh, "Airport pseudolite flight experiments," Proc. ION-GPS, pp.60-68, Sept. 2002.
- [18] ICAO, International standards and recommended practices, annex 10 (fifth edition) amendment 76, vol.1, Nov. 2001.
- [19] G.A. McGraw, T. Murphy, M. Banner, S. Pullen, and A.J. Van Dierendonck, "Development of the LAAS accuracy models," Proc. ION-GPS 2000, pp.1212– 1223, Sept. 2000.
- [20] 福島荘之介,吉原貴之,齊藤真二,藤井直樹,須賀秀一, 角田寛人,"空港シュードライトの対流圏誤差の検討"電 子航法研究所研究発表会講演概要,pp.33-38, June 2002.
- [21] S. Fukushima, T. Yoshihara, and S. Suga, "Evaluation of a tropospheric correction model for airport pseudolite," Proc. ION-GPS, pp.2283-2288, Sept. 2004.

(平成 17年 10月 5日受付,18年 2月 2日再受付)



### 福島荘之介 (正員)

昭 60 航空保安大・航空電子卒,平4電通大・電子情報卒,平6同大大学院博士前期課程・情報ネットワーク学専攻了.現在,独立行政法人電子航法研究所主任研究員,GPSによる航空機の進入着陸システムの研究,準天頂衛星によるGPS補強システ

ムの研究に従事.東京海洋大学博士後期課程在学中.



### 吉原 貴之 (正員)

平 8 新潟大・工・電気電子卒. 平 13 京都 大大学院理学研究科博士後期課程了. 平 14 独立行政法人電子航法研究所研究員. GPS 信号に対する電離圏・対流圏の影響に関す る研究に従事.