

## 8. 受動型 SSR の ADS-B に対する位置誤差解析

監視通信領域 ※北折潤，福井医療大学 塩見 格一

### 1 はじめに

Secondary Surveillance Radar (SSR: 二次監視レーダ) は航空機の位置や識別情報を得るためのシステムである。民間航空で使う SSR の質問信号形式にはモード A, モード C, モード S の 3 種類があり, 航空機搭載のトランスポンダが SSR からの質問信号の種類に対応した応答信号を返す。このうちモード S は航空機に対する個別質問及び空地間データ通信機能を有するが, モード S 対応トランスポンダは主に大型機を中心に搭載されている。一方, モード A/C はどのトランスポンダでも応答できるため今日でも広く使われている。

Passive Secondary Surveillance Radar (PSSR: 受動型二次監視レーダ) は, 自らは電波を発することなく, 近傍にある SSR 局からの質問信号及びトランスポンダからの応答信号を受信することによって, 航空機を識別し測位できるシステムである [1,2]。PSSR は安価に設置・運用できるため, 航空機騒音等の空港環境評価の際に航空機測位センサとして用いられており, また様々な用途への活用が期待されている。

PSSR は近傍にある SSR 局を親局として各航空機を識別し測位できるが, 動作原理上測位誤差となる要因が多く考えられ, 実際にどの程度の精度で測位できるかについての検証が不十分である。一方で, Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B: 放送型自動従属監視) の普及に伴い, 航空機自身の位置情報が利用しやすくなってきている。ADS-B の航空機位置情報は通常, 航空機に搭載されている Global Positioning System (GPS: 全地球測位システム) から得られ, 機体のスケールに対して十分な精度を持っているとみなせることから, PSSR の測位精度評価に関するリファレンスとして有用と考えられる。

本稿では, PSSR で得られた航跡の測位精度について, ADS-B の位置情報と比較検証した誤差解析結果について報告する。



図 1 PSSR 装置外観

### 2 比較検証データの概要

2012 年に伊丹（大阪国際）空港及び関西国際空港, 2014 年に中部国際空港及び名古屋（小牧）空港近傍において, 市販の PSSR 装置 PRIUS-1 [3,4] を使って受信したデータを検証に用いた。PRIUS-1 は図 1 のような外観の装置である。また受信データは, 取得期間がそれぞれ 1~2 日程度で, 各空港に設置されている SSR 局の回転アンテナ周期に合わせてトランスポンダ応答信号及び ADS-B ダウンリンク信号を記録したログである。

トランスポンダ応答信号にはモード A の航空機識別情報（スコークコード）とモード C の飛行高度情報（気圧高度）が含まれている。PSSR は, 応答信号受信時刻と質問信号送信時刻の差及び SSR 回転アンテナの向いている方位角から航空機の位置を測位する（ここでは楕円測位と呼ぶ）[2,5]。測位結果は, 対象としている SSR 局を原点として真東方向を x 軸, 真北方向を y 軸とする xy 座標系に変換された上で回転アンテナの回転カウント, モード A/C の各情報とともにログに記録されている。

一方, ADS-B ダウンリンク信号については様々な情報が含まれているが, ここでは航空機が取得した自身の位置情報のみを抽出し利用することとした。ただし ADS-B 位置情報は緯度・経度で得られるため一旦上記の xy 座標系へ変換し

て比較用とした。

## 2.1 ログの分離と対応付け

トランスポンダ応答信号及び ADS-B 位置情報が1つのログに時系列順に記録されているため、一旦各個別の航空機の航跡へ分離し、比較のための対応付けを行う必要がある。まず、応答信号はスコークコード毎、ADS-B 位置情報は国際民間航空機関で定められている24ビット符号毎に航跡を分離した。分離した各航跡は PSSR 航跡及び ADS-B 航跡と呼ぶこととする。さらに PSSR 航跡と ADS-B 航跡のうち同時刻帯で最も似た動きの航跡ペアを抽出し、スコークコードと24ビット符号の対応を特定した。

PSSR は応答信号を無指向性アンテナで受信するため、False Replies from Unsynchronized Interrogator Transmission (FRUIT: 非同期質問送信による誤応答, フルーツ) によるゴーストやその他不要な応答信号が混じりやすい。このためゴースト等の除去に Directed Acyclic Graph (DAG: 有向非巡回グラフ) 航跡抽出法 [5] を用いた。

実際には PSSR 航跡と ADS-B 航跡が測位点単位で一対一に対応することはないため、SSR 回転アンテナの1回転中に取得できたそれぞれの測位点のうち最も近距離となる点同士を比較することにした。

## 3 測位精度比較

伊丹空港付近のある航跡例を図2に示す。緑が ADS-B 航跡、青が PSSR 航跡を表す。また橙の菱形が空港の SSR 局、赤の丸印が PSSR 局の設定位置である。ADS-B 航跡を正確な位置リファレンスとした場合、PSSR 航跡は遠方ほどずれが大きくなるのがわかる。一方で、ADS-B 航跡に対して平行移動したような PSSR 航跡が得られることがある。関西国際空港付近で得られた平行移動様の航跡例を図3に示す。

PSSR 航跡の ADS-B 航跡に対する測位誤差を考えると、大別して

- オフセット誤差
  - － 角度オフセット
  - － 距離オフセット
- ランダム誤差

といった要素に区分できる。ランダム誤差を見積もるにはオフセット誤差の影響を取り除く必

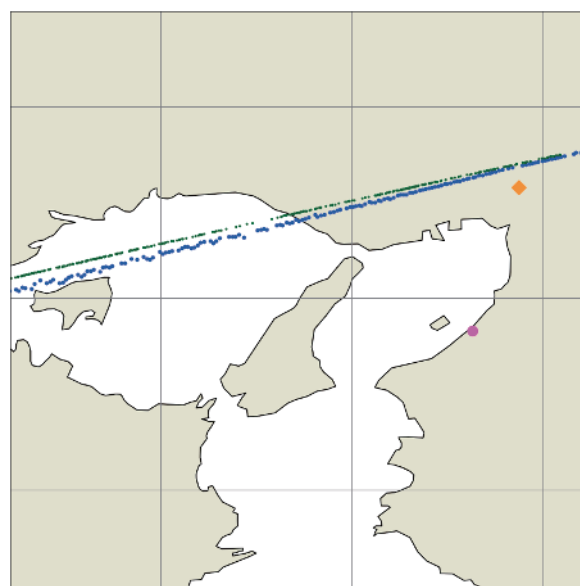


図2 伊丹空港付近航跡例

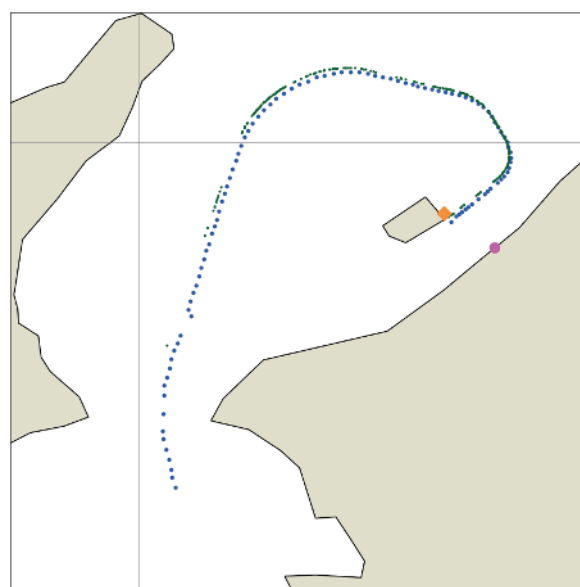


図3 関西国際空港付近航跡例

要があるため、最初にオフセット誤差について評価を試みた。

### 3.1 角度オフセット

先の図2のように、特に伊丹空港でのデータでは長い直線状の ADS-B 航跡と PSSR 航跡は交差するように引かれる例が多数あった。PSSR 局ないし SSR 局から遠距離であるほど角度オフセットによる測位のずれが大きくなることから、以下の方法でそれぞれの航跡の交差角を求め角度オ

表1 角度オフセット推定結果と SSR/PSSR 局設定位置関係

SSR 局	角度 オフセット [°]	PSSR 局設置場所	SSR 局-PSSR 局 間距離 [km]	SSR 局座標 設定のずれ [m]
伊丹	1.15	大阪府 泉佐野市	43.0	1110
関西国際	0.32	大阪府 泉佐野市	5.0	493
中部国際	0.49	愛知県 常滑市	2.7	36
名古屋	-0.32	愛知県 丹羽郡 扶桑町	9.8	24

フセットとした。

まず取得した ADS-B 航跡と PSSR 航跡でそれぞれ開始点から終了点への xy 座標としてのベクトルを計算する ( $(A_x, A_y)$  と  $(P_x, P_y)$ )。xy の平面座標で考えると、両ベクトルとその交差角  $\theta$  との間に

$$\sin \theta = \frac{A_x P_y - A_y P_x}{\sqrt{A_x^2 + A_y^2} \sqrt{P_x^2 + P_y^2}} \quad (1)$$

の関係が成立する。ランダム誤差の影響を小さく抑えるため、ベクトルの大きさが 130km を超えるものを対象に  $\theta$  の平均値を求めた。表 1 に角度オフセット推定結果を示す。

一般的に PSSR 局が SSR 局を見込む方位角が本来の値からずれている場合に角度オフセットが現れる。表 1 の結果から、伊丹空港では他の 3 空港に比べて 2~3 倍程度の角度オフセットがあることがわかった。これは伊丹空港での測定時の SSR 局座標設定が本来の位置から 1.1 km 程度ずれており、またこのずれの方向が PSSR 局から SSR 局への向きから 50 度程度で交差していたことが直接の原因と考えられる。同表には SSR 局座標設定のずれ（本来の座標から設定上の座標までの直線距離）も示した。関西国際空港も 500 m 近くずれはあるものの PSSR 局から SSR 局への向きとの交差角が小さく角度オフセットへの影響は少なかった。中部国際空港、名古屋空港においてもある程度は角度オフセットが観測されたが、これらには SSR 局座標設定のずれ以外の要因も含まれていると思われる。

### 3.2 距離オフセット

角度オフセットは PSSR 局ないし SSR 局から遠距離であるほど測位のずれが大きくなるため、逆に局の近傍ではずれに対する寄与が少ないといえる。局近傍では距離オフセットが角度オフ

表2 距離オフセット推定結果

SSR 局	x 方向オフ セット [m]	y 方向オフ セット [m]
伊丹	1166	-1659
関西国際	267	-319
中部国際	-40	-115
名古屋	-68	44

セットに比べ優勢となるため、本稿では角度オフセットと距離オフセットとは独立な誤差要因とみなして、近距離の航跡に限定して距離オフセットを評価した。手法としては、空港近傍で得られた ADS-B 航跡の点からそれに対応する PSSR 航跡の点へのベクトルを計算し、これらのベクトルの平均から x 座標及び y 座標の距離オフセットを求めた。表 2 に推定結果を示す。

距離オフセットについては、局近傍に限定しての結果であるが 4 空港ともに概ね設定位置のずれの量に比例した距離オフセットとなった。

### 3.3 ランダム誤差

前述のように PSSR の測位誤差としては、角度オフセット、距離オフセット以外にランダム誤差がある。今回は、元の PSSR 航跡のデータからまず表 2 の距離オフセットを減じ、次に表 1 の角度オフセット量に従い SSR 局（原点）中心に座標回転を施した変換 PSSR 航跡の座標値を用いてランダム誤差の影響を見積もった。なおランダム誤差は ADS-B 航跡と変換 PSSR 航跡の各対応点における二乗平均平方根値を用いた。図 4 にランダム誤差の推定結果を示す。

両オフセットの影響を取り除いてみたところ、伊丹空港のランダム誤差は他に比べ大きいという結果になった。図 4 の直線は 4 空港の結果に

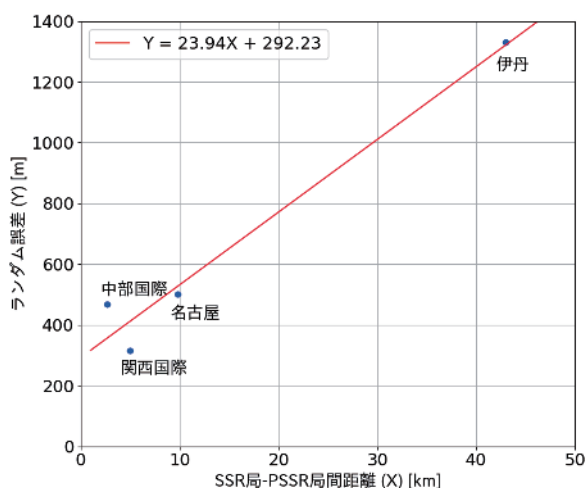


図4 ランダム誤差推定結果

対して最小二乗法を適用した近似直線である。表1に示すように伊丹空港はSSR局-PSSR局間距離が他に比べて4倍以上長い。PSSRでの測位位置は一連の応答信号の平均位置によるため、応答信号が幾つか受信できない場合に測位位置にランダム誤差が生じる原因となる。そしてSSRアンテナの角度誤差はSSR局-PSSR局間距離が長いほど距離誤差を生む。これらが特に遠方におけるPSSR測位精度の劣化原因になるものと考えられる。

なお本検証はxy座標系での単純な距離計算による比較であり、飛行高度や地球表面の曲率を考慮していないため、ランダム誤差量の原点からの距離依存性については検証していない。

#### 4 まとめ

本稿では、過去取得したPSSR及びADS-Bの測位データを用いてPSSR航跡の測位精度がADS-B航跡に比べてどの程度のものであるかを比較検証した。ADS-Bの位置情報はGPSによるもののため測位精度が高く、今回リファレンスとして使用した。

比較の結果、SSR局及びPSSR局の座標設定でのずれが角度オフセット及び距離オフセットとして現れることが明らかになった。座標設定についてはSSR局のずれとPSSR局のずれが両方とも測位精度に影響するため、PSSRの運用における座標設定の重要性を再認識することとなった。またオフセットの影響を取り除いたランダム誤差についても評価してみた。SSR局と

PSSR局間距離が長い場合には楕円測位の原理上、ランダム誤差が大きくなる傾向がある。

少なくともSSR局及びPSSR局の座標を正確に設定すれば角度オフセット、距離オフセットの影響を大きく軽減できると考えられる。両オフセットの影響のほぼない測位データを得た上でランダム誤差について再度検証することが望ましい。

#### 謝辞

PRIUS-1の受信データをご提供下さいましたIRT社の青山氏に感謝致します。

#### 参考文献

- [1] T. Ueda, K. Shiomi, M. Ino, and K. Imamiya. "Passive Secondary Surveillance Radar System for Satellite Airports and Local ATC Facilities," In *Proc. of 43rd Annual Air Traffic Control Association*, pp. 20–24. ATCA, Nov. 1998.
- [2] 塩見格一, 植田知雄. "受動型SSRの機能構成及び評価," 電子情報通信学会技術研究報告SANE, Vol. 97, No. 590, pp. 41–48, Feb. 1998.
- [3] 塩見格一, 瀬之口敦. "受動型SSR試作開発の成果と今後の課題," 第11回独立行政法人電子航法研究所発表会講演概要, pp. 101–104, June 2011.
- [4] 青山秀次, 塩見格一. "受動型レーダーの開発の現状と展望," 日本航海学会誌NAVIGATION, Vol. 190, pp. 19–28, 2014.
- [5] 北折潤, 塩見格一. "受動型二次監視レーダ受信データからの航跡抽出法," 電子情報通信学会技術研究報告SANE, Vol. 117, No. 403, pp. 95–100, Jan. 2018.