GPS を用いた航空管制用レーダの較正のための飛行実験

長岡 栄*・天井 治*

Flight Experiments for Calibrating a Radar Used for Air Traffic Control Using GPS

Sakae NAGAOKA and Osamu AMAI

Abstract

This paper describes the method and the results of flight experiments carried out for calibrating a radar used for air traffic control by using GPS. Two GPS sensors, i.e., one equipped on an aircraft and another installed at the control tower of Kushiro airport, were used for the experiments. Offline DGPS data processing was carried out for improving the positioning accuracy. The tracks of the aircraft were observed by the radar and by the airborne GPS sensor. Two tracks were compared with each other in order to estimate the biases in the range and azimuth measurement systems of the radar. The biases were estimated on the basis of the least squares method. Reconstructed radar tracks based on the estimated biases were in good agreement with those of DGPS/GPS after compensating the biases.

1. まえがき

航空管制の研究では、しばしば、航空機の航跡の観測が必要となる。これには、航空路監視レーダ (Air Route Surveillance Radar: ARSR) などの航空管制用レーダで得た情報が利用される。通常利用する情報はデジタル・データで、測角系が 0.088 度、測距系は 1/8NM を最小単位 (Least Significant Bit: LSB) として量子化されている。二次監視レーダ (SSR) の総合表示確度の要件は角度系が ± 0.5 度、距離系が ± 0.2 NM であるため、これらの測定系は LSB 程度の精度で正しく設定されていれば運用には問題ない。

しかし、航法精度の調査等¹⁾では、最大覆域近傍における航跡をできるだけ正確に観測することが望まれる。こうした場合、LSB 程度のバイアス誤差も十分問題となるため、バイアス誤差を極力小さくする必要がある。このため、何等かの方法によりバイアス誤差を較正することが必要となる。この方法としては、地上の固定目標を用いる方法があるが、影像の大きさによる不確定性の存在や、必ずしも適当な目標が存在しないなどの難点がある。

近年、全世界測位システム (GPS)²⁾ の受信機が手軽に利用可能となり、様々な応用が試みられている。航空管制用レーダの較正にも使用できると思われるが、これまで GPS を用いた報告例はみられない。そこで、筆者らは GPS センサを搭載した航空機による ARSR のバイアス誤差の較正実験を試み良好な結果を得たので報告する。

本論文では、まず ARSR の誤差要因、実験の方法について概説し、ついで、バイアス誤差を補正するための解析方法について述べる。最後にディファレンシャル GPS (DGPS) を含めたデータを用いた解析結果について報告する。

* 正会員 運輸省 電子航法研究所 (〒181 東京都三鷹市新川 6-38-1)

2. ARSR の誤差要因

ここでは較正対象とする航空路監視レーダ (ARSR) の誤差要因とそのデータの抽出方法について概説する。

2.1 ARSR システムの概要

ARSR は航空路を飛行する航空機の監視を目的とするレーダで、航空路レーダ情報処理 (Radar Data Processing: RDP) システムの重要なセンサである。ARSR には一次監視レーダ (PSR) と二次監視レーダ (SSR) が併設されている。表 1 に釧路 ARSR の諸元を示す。

これらのレーダからは航空機の位置データ (距離 r , 方位角 θ , 高度 h) が得られる。距離は PSR では航空機までの電波の往復時間、SSR では質問の送信から応答信号の受信までの時刻から求める。高度は SSR のモード C により得られる航空機の気圧高度計の情報に基づいている。

角度情報は、磁北を基準とし、360 度を 4096 に分割 ($\text{LSB}=0.088^\circ$) した角度信号から成る。これは、アンテナに取り付けたシャフトエンコーダにより、そして基準信号はアンテナ回転軸に取り付けたマグネットスイッチにより発生させている。距離は LSB が 0.125NM のデジタル信号に変換されている。

これらの信号はディジタイザで相関処理や目標の方位角を推定するスライディング・ウィンドウ処理などを施される。このあと、航空機の航跡の追尾などの種々の処理が行われる。

較正対象である ARSR のデータは、図 1 のように、ディジタイザの出力をカートリッジ磁気テープ (CGMT) に記録したものをを用いた。なお、ここでは、距離は SSR の情報を用い、角度データは PSR データがある場合は PSR を優先し、それ以外は SSR のデータを用いている。

2.2 誤差の要因

ARSR の測角系、測距系の誤差要因としては下記のものが考えられる。

- 1) 装置の設定 (較正) 誤差 (距離系の補正值, 磁北の設定など)
- 2) 信号処理による推定誤差 (スライディング・ウィンドウなど)
- 3) マルチパス等による信号の (欠落などの) 劣化
- 4) 雑音 (ジッター等) による誤差

ここで、1) はバイアス誤差で、2), 3) は場合によりバイアス誤差となりうる。4) はランダム誤差である。なお、SSR の距離系についてはトランスポンダの応答信号の遅延 (ICAO の規格[®] は $3 \pm 0.5 \mu\text{s}$) がバイアスとして、ジッター成分がランダム誤差として影響する。

通常、ARSR は運用に先立ち、種々の試験を行いバイアス誤差を極力軽減するように設定してある。PSR の精度要件は測角系で 0.2 度、測距系で 1/6NM または実距離の 5% のいずれか大きい方となっている。

測角系の較正は日昇時の太陽ノイズによる影像や地上の固定目標などの影像を頼りに行うが、確度が 0.5 度程度といわれている。距離系については、これまで、山や島など固定目標によらざるを得なかった。

図 1 レーダシステム構成とデータ抽出部分

表 1 釧路 ARSR の諸元

項 目	P S R	S S R
空中線	センター型複合給電方式	
空中線回転数	6.18 rpm	
最大覆域	200 NM	
水平ビーム幅	1.4度以下	2±0.5度
周波数 (送信)	1320 MHz	1030 MHz
(受信)	1320 MHz	1090 MHz
送信尖頭電力	2 MW	1.5 kW
送信繰り返し周波数	約346 pps	約346 pps

3. 実験の方法

3.1 実験用航空機と飛行経路

GPS センサ (パイオニア AVIC-G10) を搭載した実験機 (ビーチクラフト B99) を釧路空港→紋別→札幌→紋別→釧路のコースで飛行させた。これを釧路 ARSR により約 10 秒毎に観測した。この航跡と GPS で約 1 秒毎に取得した航跡とを比較し、4 章の計算を行う。できるだけ既存の航空路の中心線上を、高度変更の場合を除き水平飛行させた。

図 2 に実験機の概観図を示す。マイクロストリップ・アンテナが機体ほぼ中央部に設置されている。図 3 には飛行コースと高度などを示す。

図 2 実験用航空機 (B99) とアンテナ位置

図 3 B99 による飛行コースと航跡例

3.2 GPS 受信機とデータ収集

GPS の測位精度は SA (Selective Availability) のため、2drms 値で 100m 程度とされている。しかし、ディファレンシャル GPS (DGPS) 処理を行うとダイナミックな利用で 5~20m 程度の精度⁽⁴⁾⁽⁵⁾が期待できる。

そこで、本実験では、DGPS により測位精度を向上させるため、既知地点 (釧路空港) に機上と同一規格のセンサ (パイオニア GPS-303PT) を設置し、当該時間の GPS データを併せて取得した。GPS-303PT は 6 チャンネルで最大 12 個の衛星を追跡する。主な性能を表 2 に示す。なお、機上の GPS センサはデータ出力端子がないため、GPS-303PT と同様に信号を RS-232C で取り出せるように改造した。RS-232C の出力をパソコン (PC-98 シリーズ) に取り込みオフラインで処理した。

地上と機上の GPS データのうち、測位時刻と使用衛星の組合せとが共に一致したデータのみを DGPS データとして採用した。オフラインで DGPS に相当する処理を行った。図 4 にデータ処理の手順を示す。

図 4 データの処理手順

表 2 GPS センサの仕様

項 目	仕 様
受信方式	LI、C/Aコード、SPS受信機
チャンネル数	6チャンネルマルチチャンネル
受信可能衛星	最大12衛星
測位更新時間	約1秒
インターフェイス	RS-232C規格に準拠
伝送速度	9,600 bps
出力データ	日本測地系の経度、緯度、高度 移動速度、移動方位、時刻
アンテナ	マイクロストリップ平面アンテナ 右旋円偏波
電源電圧	10.8~15.6 V

3.3 使用データ

航空機の航跡を比較するため下記のデータを用いた。

① 地上 GPS (釧路空港管制塔の屋上に設置) データ

測位時刻 t_g , 緯度 Φ_g , 経度 Ψ_g , 高度 h_g , 使用衛星, HDOP

② 機上 GPS データ

測位時刻 t_a , 緯度 Φ_a , 経度 Ψ_a , 高度 h_a , 使用衛星, HDOP

ここで、緯度、経度は WGS-84 系から日本測地系に変換されて出力される。

③ レーダ (釧路 ARSR) データ

図 1 の CGMT に記録した釧路 ARSR (PSR/SSR) のデータのうち次の情報を使用した。

時刻 T' , 距離 r , 角度 θ , 気圧高度 h (SSR モード C)

なお、時刻 T' は観測時刻ではなく、データの転送時刻である。このため、アンテナ回転周期 (9.71 秒) と方位角とから推定した観測時刻 τ を用いた。

3.4 DGPS 処理

DGPS を実現するには幾つかの方式がある。このうち疑似距離等の補正值を利用する方式がよく使用されている。しかし、著者らは、ソフトウェアを改修せずに容易に実現できることから、位置の補正值を利用する方式を採用した。

地上 GPS と機上 GPS のデータで、使用衛星の組合せと測位時刻が共に同一であるデータだけを使用し、次式の緯度 Φ_d , 経度 Ψ_d を DGPS による測位値とした。

$$\Phi_d = \Phi_a - (\Phi_g - \Phi_g^\circ) \quad (1)$$

$$\Psi_d = \Psi_a - (\Psi_g - \Psi_g^\circ) \quad (2)$$

ただし、 Φ_g° , Ψ_g° はそれぞれ地上 GPS のアンテナの設置位置の緯度、経度である。

アンテナは釧路空港の管制塔の屋上に設置した。縮尺 1/5,000 の地図から読み取った座標は、 Φ_g° が N 43° 2' 27.60" ± 0.06", Ψ_g° が E 144° 11' 58.39" ± 0.09" である。なお、アンテナ高は約 115m である。読み取り誤差は 0.4mm 程度で、距離にして 2m 程度である。

3.5 レーダ座標系の変換

図 5 はレーダによる測位の幾何学的関係である。地球の形状を球で近似し、次式によりレーダ情報を緯度 l_p , 経度 L_p に変換した。

$$l_p = \sin^{-1}(\cos \delta \sin l_o + \sin \delta \cos l_o \cos \theta) \quad (3)$$

$$L_p = L_o + \sin^{-1}(\sin \delta \sin \theta / \cos l_p) \quad (4)$$

ただし

$$\delta = \cos^{-1} \left\{ \frac{(R+h_o)^2 + (R+h)^2 - r^2}{2(R+h_o)(R+h)} \right\} \quad (5)$$

であり、 l_o , L_o , h_o はアンテナ位置の緯度、経度、高度である。 R は地球の半径 (= 6,371km) である。

図 5 レーダによる測位の幾何学的関係

4. 解析方法

4.1 航跡の比較

ここでは、高度を考慮しない平面座標系を考え、測角系と測距系のバイアス、 $\Delta\theta$ と Δr とを考察する。バイアスがあるとレーダによる観測航跡と GPS による航跡とは合致しないが、 r , θ にバイアスに相当する補正量 $\Delta r'$, $\Delta\theta'$ を減じることによりほぼ合致させられる。合致の度合の指標として次式の S による距離 2 乗和を考える。

$$S = \sum_{i=1}^{N_r} |P_{\pi}(\Delta r', \Delta\theta') - P_g(t_i)|^2 \quad (6)$$

これを最小化する $\Delta r'$, $\Delta\theta'$ を求め、バイアスを見積もる。但し、 $P_{\pi}(\Delta r', \Delta\theta')$ は観測時刻 $t = t_i$ のときのレーダによる観測位置である。 $P_g(t)$ は時刻 t における真の位置の推定値で、これは時刻 t 近傍の

GPS データを平滑化して求める。 N_r は使用レーダデータ数である。

4.2 GPS データの平滑化

航空機の航跡の平滑化には、約 1 秒毎に得られる DGPS または GPS データの観測時刻 t_i 、緯度 ϕ_i 、経度 Ψ_i 、($i=1, 2, \dots, N$) を用いる。まず、基準点 Q (緯度 ϕ_q 、経度 Ψ_q) を原点とした X, Y 座標に次式⁽⁶⁾で変換する。

$$x_i = d_i \cos \alpha_i \quad (7)$$

$$y_i = d_i \sin \alpha_i \quad (8)$$

ただし

$$d_i = R \tan^{-1} \{ (A_1^2 + A_3^2)^{1/2} / A_2 \} \quad (9)$$

$$\alpha_i = \tan^{-1} (A_1 / A_3) \quad (10)$$

ここで

$$A_1 = \cos \phi_i \sin (\Psi_i - \Psi_q) \quad (11)$$

$$A_2 = \sin \phi_i \sin \phi_q + \cos \phi_i \cos \phi_q \cos (\Psi_i - \Psi_q) \quad (12)$$

$$A_3 = \sin \phi_i \cos \phi_q - \cos \phi_i \sin \phi_q \cos (\Psi_i - \Psi_q) \quad (13)$$

である。

こうして作成した位置データを用いて最小 2 乗法により次のモデルの係数を決める。

$$X(t) = C_1(t - t_i)^2 + C_2(t - t_i) + C_3 \quad (14)$$

$$Y(t) = C_4(t - t_i)^2 + C_5(t - t_i) + C_6 \quad (15)$$

$$\text{for } t_i - (t_i - t_{i-1})/2 \leq t < t_i + (t_{i+1} - t_i)/2$$

ここで、 C_j ($j=1, 2, \dots, 6$) は時刻 t_i の前後の k 個のデータ (総数 $2k+1$ 個) を用いて求めた最小 2 乗推定量である。これは X 方向および Y 方向の運動を等加速度運動と仮定している。これにより、 $t=t_j$ における真の位置の推定値を $P_g(t_j) = P_g(X(t_j), Y(t_j))$ で表す。

4.3 GPS の航跡とレーダの航跡の距離

いま、(7)、(8) 式により、(3)、(4) 式で求めたレーダによる航跡を基準点 Q を原点とする平面座標に変換して得た値を (ξ_j, η_j) とする。レーダにおける観測時刻を τ_j ($j=1, 2, \dots, Nr$) とする。GPS の時刻 t とレーダの時刻 τ が ΔT だけずれているとして

$$\tau = t + \Delta T \quad (16)$$

とする。このとき、レーダによる観測位置と真の位置の推定値との 2 次元距離を ε_j として、この 2 乗和

$$\begin{aligned} S &= \sum_{j=1}^{Nr} \varepsilon_j^2 \\ &= \sum_{j=1}^{Nr} \{ (\xi_j - X(\tau_j - \Delta T))^2 + (\eta_j - Y(\tau_j - \Delta T))^2 \} \end{aligned} \quad (17)$$

を合致の良さの評価量とした。図 6 に航跡の関係図を示す。

測定値 ξ_j, η_j はレーダの測定系のバイアス誤差 $\Delta r, \Delta \theta$ の関数で、 τ_j は時刻のずれ ΔT の関数である。よって、観測値 (r, θ, τ) から補正值 $(\Delta r', \Delta \theta', \Delta T')$ を引いたものを用いて (17) 式の S を計算し、これを最小とする補正值を求めることによりバイアス誤差を推定できる。

5. 解析結果

5.1 固定点での測位結果

図 7 は釧路空港における GPS 単独測位の結果である。観測期間は飛行実験期間中の約 2 時間半である。表 3 にその統計値を示す。文献 [7] [8] 等で指摘されているように、SA の変動はランダムではない。SA の影響と思われるが、観測分布は必ずしも対称とはならず平均値もゼロにはなっていない。なお、

図 6 航跡の合致の度合を評価するための距離

HDOP は 1.1~1.9 で、2drms 値は 69.2m であった。

図 8 は飛行実験を終えた航空機が空港内を走行し駐機位置に停止するまでの航跡を比較したものである。航空機の停止後の期間は 10 秒ほどである。GPS 単独、DGPS の場合と固定点での観測値を示した。DGPS では SA 等による誤差が相殺されて真の駐機位置に 5m 程度の誤差で一致していることがわかる。

図 7 固定地点(釧路空港)による観測結果

図 8 DGPS による航跡の比較例 (○印が駐機位置)

5.2 レーダの航跡との比較

図 9 は実験機の離陸から着陸までの航跡である。地上 GPS 近傍に駐機していた実験機は上から 2 番目の誘導路を通り、滑走路を針路約 160°(右下)で離陸し右旋回の後、地上 GPS 上空を通過し中標津に向かった。帰路は約 340°(左上)の方向から着陸し、上から 3 番目の誘導路を通り駐機位置に戻った。

図 9 では GPS 単独, DGPS, レーダの航跡を併せてプロットした。レーダは離陸時のみで DGPS データは一部しかとれていない。GPS 単独の航跡では、SA 等の誤差により、実験機が誘導路からはみ出ている部分が見られる。また、レーダのプロットは GPS のそれと 0.2NM 前後ずれていることがわかる。レーダサイトから約 20NM と近距離なので、測距系のバイアスの影響が大きいと推測される。

5.3 バイアス誤差の推定

図 3 の航跡のうちバイアスの推定に利用した航跡の部分を図 10 に示す。観測時間は 11 時 32 分から 11 時 45 分までの 13 分間である。この部分のデータを利用したのは DGPS のデータがほぼ連続的に取得できているためと、紋別で針路が変わるためである。すなわち、札幌→紋別の部分では測距誤差の影響が大きく紋別→中標津の部分では測角誤差の影響が現れ易いため、双方のバイアスを検出するのに都合がよい。

DGPS と GPS 単独の双方の場合について、紋別ビーコン (NDB) を基準点にとり X, Y 座標に変換し、バイアスの推定の計算を行った。平滑化では $k=10$ とし隣接した 21 個のデータを用い、各点における係数を計算した。なお、(14), (15) 式で t と t_i が 3 秒以上離れている場合にはデータとして使用しないことに

図 9 釧路空港近傍における航跡の比較例

表 3 釧路空港における定点測位結果

方向	平均 (m)	標準偏差 (m)	最大 (m)	最小 (m)	歪度	尖度	標本数 N
X	2.27	23.7	85.8	-70.1	0.30	2.91	7,919
Y	-3.22	24.9	84.5	-90.3	0.05	3.98	7,919
D	29.6	17.8	109.2	0.58	0.88	3.33	7,919

ただし $D = (X^2 + Y^2)^{1/2}$, $drms = \left[\sum_{i=1}^N D_i^2 / N \right]^{1/2} = 34.6 \text{ m}$

した。

表 4 に S を最小化する補正値の計算結果を示す。補正値は $\Delta T'$, $\Delta r'$, $\Delta \theta'$ をそれぞれ 0.1 秒, 0.01 NM, 0.001° 毎に変化させ数値計算で最小値を捜した。バイアスの値は DGPS では $\Delta r = 0.15 \text{ NM}$, $\Delta \theta = 0.082^\circ$ 、GPS 単独では $\Delta r = 0.16 \text{ NM}$, $\Delta \theta = 0.084^\circ$ で、双方とも同程度の値である。これらの値が僅かに異なるのは、GPS 単独のデータに含まれる誤差の影響と思われる。

距離系に関しては、SSR トランスポンダの応答遅延を考慮する必要がある。これは $\pm 0.5 \mu\text{s}$ (0.08 NM) の差異が許容されている。このため、真の距離系のバイアスは実験機のトランスポンダの応答遅延の値を差し引いた値となる。この値は未知なので、真の距離系のバイアスは

$$0.07 \text{ NM} < \Delta r < 0.23 \text{ NM}$$

程度と考えるべきであろう。いずれにしても、大体 LSB 程度であり、航空管制で使用する場合は問題にならない程度の大きさである。

図 11 に紋別 NDB 付近の DGPS の航跡とレーダの航跡を示す。図 12 はバイアスを補正後の紋別付近の航跡を示す。図 13 ではバイアス補正前と補正後の釧路空港近傍の航跡を比較する。図 14 は札幌 DME 近傍の航跡の比較結果である。これらから、バイアスを補正した後のレーダの航跡が DGPS または GPS のそれとよく合致することがわかる。釧路 ARSR から航空機までの距離は 20NM から 140NM と異なるが、いずれの場合も、バイアスがよく補正されていることを確認できた。

図 10 校正のための解析に使用したデータ
取得区間

図 11 紋別近傍における航跡 (補正なし)

表 4 S を最小化する補正値

項 目	DGPS	GPS 単独
観測時刻	11:32~11:45	11:32~11:45
標本数 (平滑用)	347	524
Δr (NM)	0.15	0.16
$\Delta \theta$ (deg.)	0.082	0.084
ΔT (s)	18.5	18.2
$(S/Nr)^{1/2}$ (NM)	0.137	0.153
レーダ標本数 Nr	65	66
レーダ観測時刻	11:33~11:44	11:33~11:44

図 12 紋別近傍における航跡 (バイアス補正後)

図13 釧路空港近傍におけるバイアス補正前後の航跡の比較

図14 札幌近傍におけるバイアス補正前後の航跡の比較

6. 考 察

6.1 GPS の誤差の影響

GPS 単独測位では 100m (2drms) 程度の測位誤差が有り得る。本実験では、この誤差を軽減するため DGPS 処理を試みたが、2つの受信機間の距離が最大で 140NM 程度になる。近距離では図8で示したように数 m 程度の精度が期待できると思われるが、この場合の精度は確認できなかった。

最小2乗法による航跡の平滑化ではデータ取得期間に比べて周期の短い変動成分は除去できるが周期の長い変動成分は除去できない。従って SA の周期の長い変動分はバイアス推定の誤差として働く。

いま、最悪の場合として 100m の誤差を想定すると、この値は距離系で 0.054NM に相当する。角度系では、距離が 100NM で 0.03°、20NM で 0.15°である。

バイアスを推定する際の精度は、バイアスの値よりも一桁程度小さいことが望ましい。LSB (距離系 0.125NM, 角度系 0.088°) にくらべ大きなバイアスを推定する場合は DGPS でも GPS 単独でも大差ないと思われる。しかし、LSB 程度のバイアスを問題にする際は、GPS 単独による精度は必ずしも十分ではない。他方、DGPS で誤差を 20m 程度に抑えれば、距離系が 0.011NM、角度系で距離が 100NM で 0.006°、20NM で 0.03°と、近距離を除いて誤差は殆ど問題にならない。

6.2 本方法の特徴

本方法の特徴と注意事項をまとめると次のとおりである。

- 1) (17)式による推定精度は、平滑化する航跡データの精度に依存する。最小 2 乗法は平均が 0 でない変動に対してはあまり有効でないため、このデータにはバイアス誤差がなくランダム成分のみであることが望ましい。
- 2) バイアスを評価するレーダデータについても同様である。レーダ信号の欠落等により局所的なバイアスが現れる空域での実験データは使用しないような配慮が必要である。
- 3) 本方法は飛行した全ての航跡について一貫した方法で評価ができる利点があるが、3 つの未知パラメータがあり、航跡データ数が増えると計算時間が問題になってくる。
- 4) 飛行実験の際はレーダサイトとの幾何学的関係を考慮してバイアス誤差を検出しやすいコースを計画することが肝要である。

7. むすび

航空路監視レーダの測定系を較正するために行った、GPS を利用した飛行実験について報告した。本稿で示したことをまとめると次のようになる。

- i) 航空機の航跡を DGPS/GPS とレーダで観測し、双方による航跡が合致するように測定系のバイアスを補正する解析方法を提案した。
- ii) オフライン DGPS 処理を行った実験データを解析し、上記方法によるバイアス誤差の補正例を示し、その有効性を確かめた。

本方法の推定精度は真の航跡の推定精度に依存するため、できる限り SA のかかった GPS 単独測位ではなく DGPS 測位によるデータを用いることが望ましい。

今後の課題としては、本方法による推定精度の検討やバイアス推定アルゴリズムの改良などがある。

[謝 辞]

GPS 信号を取り出せるように実験装置を改造して下さった電子航法研究所の惟村和宣博士に謝意を表します。また、実験にご協力いただいた運輸省釧路空港事務所の関係各位、実験関連装置を貸与下さった当所設置技術研究室の各位に感謝致します。

参 考 文 献

- (1) 天井, 長岡: "洋上航空路における横方向経路逸脱量の解析", 日本航海学会論文集, 86, p.75-83, 1991
- (2) 日本測地学会編: 「新訂版 GPS—人工衛星による精密測位システム—」, 日本測量協会, 1989
- (3) Aeronautical Telecommunications Part 1: ICAO Annex 10 to the Convention on Int'l Civil Aviation, Vol.1, 1985
- (4) 村田正秋: "GPS の高度利用", 計測自動制御学会, 第 8 回誘導制御基礎講習会テキスト, p.1-20, 1993 年 5 月
- (5) 石川, 小野, 村田: "DGPS の飛行実験", 日本機械学会第 1 回交通物流部門大会講演論文集, p.306-359, 1992 年 11 月
- (6) 長岡 栄: "球面三角法によるルート設計のための計算法", 航空管制, p.28-34, 1978 年 7 月号
- (7) 村田, 張替: "GPS におけるセレクトティブ・アベイラビリティ(選択利用性)の観測と評価解析", 航空宇宙技術研究所報告, NAL TR-1105, 1991 年 4 月
- (8) 片山 晋: "GPS の選択利用性(SA)の観察", 日本航海学会誌, 113 号, p.4-11, 1992

質 疑 応 答

西 周次 (㈱カナデン)：レーダの覆域内で固定誤差が一定でないように思いますが、場所による誤差の差はありませんか。また、固定誤差の経年変化のような長時間の変化はありませんか。

長岡 栄：場所による変化としてはマルチパスなどによるものが考えられます。この影響は通常局所的に現れますので、誤差の傾向をみていれば区別できると思います。経年変化によるものもあるかも知れません。

新井康夫 (海技大学校)：レーダの距離、方位において生じるバイアスの要因を教えてください。

長岡 栄：距離系、角度系ともに設定時の設定誤差があります。デジタル信号処理をしており、最小量子化単位程度の設定誤差は許容されています。また角度系では応答信号の欠落により、特定の空域で局所的なバイアス誤差となる場合などがあります。