洋上航空路における横方向経路逸脱量の解析－II.

天井 治*・長岡 栄*

Analysis of Cross Track Deviations for an Oceanic Airway, part II

Osamu AMAI and Sakae NAGAOKA

Abstract

This paper describes analytical results of cross track deviations (CTDs) of aircraft flying on the R220 route in North Pacific routes. The data obtained from Kushiro Air Route Surveillance Radar (ARSR) together with flight plan data are used for analyzing CTDs. CTDs classified by the aircraft type and the range from a fix are investigated.

The results obtained are as follows.

- 1) The widths of 50% intervals of CTD distributions depend on aircraft types.
- 2) The shapes of CTD distributions depend on the range from a fix. A bimodal distribution is observed in the data obtained from the airspace where two or more VOR / DME stations are available.

1. はじめに

航空交通管制 (ATC) では、航空機相互間の安全な間隔を保証するために管制間隔の基準を設けている。この管制間隔下における空域の安全性の尺度として、国際民間航空機関 (ICAO) の管制間隔検討パネル (RGCSPP) では、数学モデルに基づく衝突危険度を用いている。

衝突危険度を推定するためには、まず衝突危険度モデル⁽¹⁾を記述する幾つかのパラメータの値を求める必要がある。これらのパラメータは航法誤差や交通流の特性を表し、その値は空域や航空機の特性を反映し、空域ごとに固有である。このため、パラメータの推定にあたっては観測空域における実測データの解析が不可欠である。

航空機の航法精度は、使用する航法装置すなわち機種や機体等に依存すると考えられる。しかし実際に、航法精度を機種等の違いにより比較した報告は日本ではまだない。そこで今回は、洋上における横方向の航法精度に着目し、横方向経路逸脱量の特性の機種等による差異を調べた。

本稿では、まず横方向経路逸脱量について概説し、次いで使用データおよび観測空域を示す。そして横方向経路逸脱量の特性の機種および観測地点による差異等を調べ、それらを考察する。

2. 衝突危険度と横方向経路逸脱量

2.1 衝突危険度

同一高度で横間隔 S_y だけ離れた平行ルート⁽²⁾の衝突危険度 N_{ay} は次式で表すことができる。

$$N_{ay} = P_z(0) \cdot P_y(S_y) \cdot [N_x(\text{same}) \cdot C1 + N_x(\text{opp}) \cdot C2] \quad (1)$$

ここで、 $P_z(0)$ は垂直重畳確率⁽²⁾、 $P_y(S_y)$ は水平重畳確率⁽³⁾、 $N_x(\text{same})$ 、 $N_x(\text{opp})$ はそれぞれ同航、反航の場合の近接通過頻度⁽⁴⁾、 $C1$ 、 $C2$ は航空機の大きさや速度等に関するパラメータである。ここで水平重畳確率は、航空機対が水平方向で重なる確率で、この値の推定には、割当経路の中心線上からの横方向の逸

*正会員 運輸省 電子航法研究所 (〒181 三鷹市新川 6-38-1)

脱量すなわち横方向経路逸脱量⁽⁵⁾の解析が不可欠である。

2.2 横方向経路逸脱量の計算方法

図1に横方向経路逸脱量 d_l の幾何学的関係を示した。 d_l は航空機の位置から、地球の中心 O と飛行経路を構成する2定点 $WP1$, $WP2$ を含む平面に下した垂線の長さとして定義する。

SSR から得られる位置情報はレーダーサイト (アンテナ設置場所) からの距離 r , レーダー回転角 θ , 気圧高度 h である。取り扱いを簡単にするために地球を球面と見做し, 球面座標 (地球の中心からの距離 $R+h$, 緯度 Λ_d , 経度 λ_d) を用いて計算した。 d_l の計算式を表1に示した。ここで地球の半径を R ($=6,368\text{km}$), レーダーサイトの位置座標を $(R+h_0, \Lambda_s, \lambda_s)$, $WP1, WP2$ の位置座標をそれぞれ $(R, \Lambda_1, \lambda_1)$, $(R, \Lambda_2, \lambda_2)$ とした。

図1 横方向経路逸脱量 d_l の幾何学的関係

3. 洋上における航法誤差

陸上の電波航法施設の覆域外となる洋上の航空路では, 陸上の航法援助施設が利用できない。洋上では航空機は通常, 慣性航法装置 (Inertial Navigation System: INS)⁽⁶⁾⁽⁷⁾ または慣性センサである慣性基準装置 (Inertial Reference System: IRS) と飛行管理システム (Flight Management System: FMS) とを結合した航法装置を用いて飛行する。

この INS / IRS による航法誤差は, 飛行時間と共に増大する傾向があり, 1時間あたり 2NM (95%) の誤差が許容されている⁽⁸⁾。INS の航法精度は, 一般に陸上の航法援助施設を利用した場合よりも精度が劣る。但し, 1つ以上の航法援助施設の覆域内では, その情報を用いて INS の誤差の修正を行うことが可能である。

従って, 洋上における航法誤差の特性を調べるためには, 次の条件を満足することが望ましい。

- (1) 洋上を INS を用いて長時間飛行してきた航空機を対象とする。
- (2) INS の誤差が陸上の航法援助施設によって修正される前のデータを用いる。

今回は上記の条件を満足させるために, 北太平洋上を日本に向かって長時間飛行してきた航空機の日本の入口におけるデータを使用した。次の章で, その詳細を示す。

表1 横方向経路逸脱量 d_l の計算式

$$d_l = \frac{ax_d + by_d + cz_d}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}}$$

ここで

$$x_d = (R+h) \cos \Lambda_d \cos \lambda_d$$

$$y_d = (R+h) \cos \Lambda_d \sin \lambda_d$$

$$z_d = (R+h) \sin \Lambda_d$$

$$a = y_2 z_1 - y_1 z_2$$

$$b = z_2 x_1 - z_1 x_2$$

$$c = x_2 y_1 - x_1 y_2$$

$$\left. \begin{aligned} x_i &= R \cos \Lambda_i \cos \lambda_i \\ y_i &= R \cos \Lambda_i \sin \lambda_i \\ z_i &= R \sin \Lambda_i \end{aligned} \right\} (i=1, 2)$$

但し

$$\phi_d = \cos^{-1} \left\{ \frac{(R+h_0)^2 + (R+h)^2 - r^2}{2(R+h_0)(R+h)} \right\}$$

$$\Lambda_d = \sin^{-1} (\sin \Lambda_s \cos \phi + \cos \Lambda_s \sin \phi \cos \theta)$$

$$\lambda_d = \lambda_s + \sin^{-1} \left(\frac{\sin \theta \sin \phi}{\cos \Lambda_d} \right)$$

4. 観測空域と測位誤差

4.1 使用データと観測空域

横方向経路逸脱量の算出には、釧路航空路監視レーダ (Air Route Surveillance Radar : ARSR) で1991年4月から1992年8月までの17か月間に取得したデータを用いた。ARSRの覆域は200NMで、測角／測距系の最小量子化単位はそれぞれ 0.088° 、 $1/8\text{NM}$ である⁹⁾。

図2に、ARSRの設置場所と観測空域を示した。観測対象航空路は、アンカレッジと日本を結ぶ北太平洋の洋上航空路のうち日本に向かう航空機が最も多いR220とした。飛行計画情報を用いてR220を日本に向かって飛行しようとした航空機のみを抽出し、これを観測対象機とした。R220では、位置通報点名NOGAR以西の空域のみでレーダ管制が行われている。今回は、NOGAR以西の空域は観測対象から外した。

観測対象としたフライトの総数は14,475で、総機体数は約650機体であった。また、観測対象機の飛行高度はすべてフライトレベル (FL) 280 (高度28,000ftに相当) 以上で、FL280を飛行したものは8フライトあった。

4.2 測位誤差の見積

測位に使用したデータはレーダデータであり、観測値にはレーダ自身の誤差も含まれる。そこで、測距誤差の標準偏差を σ_r 、測角誤差の標準偏差を σ_θ 、気圧高度計誤差の標準偏差を σ_h 、レーダの測位誤差の標準偏差を σ_d として、次式により大まかな誤差の範囲を見積った。

$$\sigma_d = \sqrt{\left(\frac{\partial d_l}{\partial r}\right)^2 \sigma_r^2 + \left(\frac{\partial d_l}{\partial \theta}\right)^2 \sigma_\theta^2 + \left(\frac{\partial d_l}{\partial h}\right)^2 \sigma_h^2} \quad (2)$$

本稿では、文献(9)の値を参考にして、 $\sigma_r = 0.063\text{NM}$ 、 $\sigma_\theta = 0.112^\circ$ 、 $\sigma_h = 300\text{ft}$ とした。ただし、バイアス誤差はないものとした。

5. 横方向経路逸脱量の機種による差異

5.1 飛行形態と航法誤差のバラツキ

洋上空域における横方向経路逸脱量は高度により差異がみられない⁽¹⁰⁾ので、本稿では以後、高度に無関係であるとして扱う。

横方向経路逸脱量の統計量を20NM区間毎に一纏めにして計算した。図3はその各区間における中央値、50%区間、95%区間を箱ひげ図で示したものである。図3では、25%～75%の幅として50%区間を、2.5%から97.5%の幅として95%区間を表した。中央値は、実際には点となるが図中では正方形で表し、正方形の中央の点が中央値を表すように描画した。

横軸は各観測区間におけるNANACからの距離 L を、縦軸は横方向経路逸脱量 d_l を表す。縦軸の0はルートを中心線を示し、北極側への逸脱を+とした。また、NANACはR220の位置通報点名で、NANACからの距離 L はアンカレッジの方向を正として測った。図中に示した曲線は(2)式により計算したレーダの測位誤差 ($3\sigma_d$) の値である。

図2 観測空域の概略図

図3では、機種がB747-400, DC10, B747の場合を示した。B747には幾つもの型があるが、本稿ではB747-400, B747SP (Special Performance) 以外のものを一括してB747で表した。図3から、機種によって飛行形態や横方向経路逸脱量のバラツキが異なることが分かる。またB747-400では、途中からそのバラツキが収束していることが分かる。

図3の各図とも、その中央値の航跡はルートに対し歪んだ曲線となっており、測位誤差の推定値の範囲外になっている所もある。実際にそのように飛行したのか、レーダの測角／測距におけるバイアス誤差や大気の影響による影響等の原因によるものかは現在検討中である。

5.2 観測対象機の機種の内訳

観測対象機の機種の内訳を表2に示す。表から総計14,475フライト中、6割弱がB747で、次いでB747-400が2割弱、DC10が1割強であることが分かる。C5は軍用の大型輸送機である。

図4に各機種の20NM区間毎の50%区間の幅の変化を示した。図から50%区間の幅は、機種によりその値が異なることが分かる。

C5が1NM程であるのに対し、L1011は約2.0NM, B747SPは約2.5NMである。観測地点による差を見ると、B747-400およびMD11では、NANACからの距離 L が270NMの付近から急激な変化が見られる。それ以外の機種では、 L が小さくなるに従って50%区間の幅が大きくなる傾向がある。

表2 観測対象機の機種の内訳

機種	フライト数	機体数	50%区間幅 $L=360\text{NM}$ (NM)	50%区間幅 $L=140\text{NM}$ (NM)
B747	8,180 (57%)	305	1.47	1.68
B747-400	2,549 (18%)	73	1.05	0.16
DC10	1,698 (12%)	63	1.59	2.01
MD11	743 (5%)	30	1.04	1.03
B747SP	424 (3%)	20	2.33	2.76
L1011	402 (3%)	21	1.88	1.98
C5	125 (1%)	?	0.91	1.12
その他	354 (2%)			
合計	14,475	約650

図3 横方向経路逸脱量の機種による差異

図4 各機種の50%区間の幅の変化

図5 各機種別の横方向経路逸脱量の分布
(NANACからの距離 $L=130\text{NM}$)

5.3 機種毎の横方向経路逸脱量の分布

図5にNANACからの距離 L が130NMの地点における横方向経路逸脱量の相対度数分布を示す。相対度数は対数表示とし、B747-400, DC10, B747の場合を示した。

図5より、 $L=130\text{NM}$ の地点では機種により分布の形に顕著な差異が見られる。B747-400では0付近に鋭いピークが見られ、DC10では-2NM付近に中心をもつ正規分布の様な分布となっている。B747は上の2つを合わせたような、峰が2つある分布となっている。この分布は、文献(10)に示されているR220の分布と同じ傾向の分布である。また、図5を良くみると、程度の差はあるがどの分布も-2NM付近と0付近に2つのピークを持つことが確認できる。

図6 横方向経路逸脱量の機体による差異

図7 異なる観測地点における横方向経路逸脱量の分布 (s. d.: 標準偏差)

5.4 機体による差異

B747型機の2つの機体についての横方向経路逸脱量 d_l の分布を図6に示した。図6から、同じ型であっても機体の違いにより飛行形態や d_l のバラツキが異なることが分かる。

6. 横方向経路逸脱量の観測地点による差異

6.1 観測地点毎の横方向経路逸脱量の分布

3つの異なる観測地点における横方向経路逸脱量の度数分布を図7に示す。観測地点は、それぞれNANACからの距離 L が370NM, 250NM, 130NMである。このグラフから観測地点によって、分布の形が異なることが分かる。中心付近の分布に注目すると、 $L=370\text{NM}$ の地点では正規分布に近く、 $L=250\text{NM}$ の地点では両側指数分布の様になり、 $L=130\text{NM}$ では峰が2つの分布になっている。

6.2 陸上の航法援助施設によるINSの誤差の修正

ここで峰が2つの分布になる原因を考察する。INSの誤差の修正に関わる陸上の航法援助施設には、DME (Distance Measuring Equipment: 距離測定装置)、VOR (VHF Omnidirectional radio Range: VHF 全方向式無線標識) 等がある。図8には、これらの航法援助施設の設置場所と各設置場所から半径200NM⁽¹¹⁾の円を示した。

実際の航法援助施設の覆域は高度や地形などにより変わるが、ここでは簡単化のために半径200NMの円をその覆域と考えることにする。

図8から、観測ルート上で地上の航法援助施設の情報に2個以上受かり始まる地点はNOKKAとNOGARの間の地点(NANACからの距離が200NM程度)であることが分かる。この地点は、図7の真ん中のグラフの位置とほぼ一致し、図4

のB747-400の50%区間の幅が集束し始める地点ともほぼ一致する。これらのことを考慮すると、図7のグラフの変化は陸上の航法援助施設の影響による可能性が高いと考えられる。

表3に日本の旅客用のB747-400等に搭載されているINSの諸元を纏めた⁽¹²⁾。B747-400では次の点がある他の機種と大きく異なる。

- (1) プラットホーム機能をソフトウェアにより実現するストラップダウン方式を採用。
- (2) 陸上の航法援助施設の情報によりINSの誤差を自動的に修正。

著者は、B747-400ではDME/DMEによってINSの誤差が自動修正された結果、図3の航跡になったと考える。図5のB747-400のグラフには-2NM付近にも小さな山が見られるが、これらは飛行計画の記述ミスで実際にはB747-400ではなかったと考えることも可能である。しかし、これを確認する術がないため、本当の理由は明らかではない。

手動による修正の場合は、修正したかどうかにより航跡が異なると思う。図6における航跡の違いは、修正の有無によることも考えられる。

図8 航法援助施設の設置場所とその覆域

○は航法援助施設, △は位置通報点

表3 日本の旅客機に搭載されているINSの諸元

	B747-400	DC10	B747	L1011
製造業者	Honeywell	Litton	Delco	Delco
航法援助施設による誤差修正の優先順位	DME/DME VOR/DME ILS	DME/DME DME	DME/DME DME	DME/DME VOR/DME
修正方式	自動	手動	手動	自動/手動
構造方式	ストラップ ダウン	安定プラッ トホーム	安定プラッ トホーム	安定プラッ トホーム

6.3 考 察

今回使用した釧路 ARSR の覆域内では、覆域の入口でも既に、釧路 VOR / DME により INS の誤差の修正が行われている可能性がある。洋上における航法精度を検討する場合、本来ならば陸上の航法援助施設からの情報を利用できない空域を観測空域とする必要がある。しかし、実際にはそのような空域においてはレーダ情報が利用できないため、INS データの収集⁽¹³⁾等を除いて、多量のデータを収集することは困難である。

2つのDMEにより位置情報を得た場合は、DME単体およびVOR / DME局単体による場合よりも、一般に高精度の位置情報が得られる⁽⁷⁾。図8から、NANACからの距離 L が250NM以上の空域では、釧路VOR / DMEのみの情報しか得られないことが分かる。従って、図7の $L=370\text{NM}$ における分布を得た空域では、少なくとも2つのDMEによるINSの誤差の修正は行われていないと考える。

水平重畳確率の推定のためには、横方向経路逸脱量の分布（特に裾の分布）の特性を調べる必要がある。本稿では、その前段階として釧路 ARSR のデータから洋上における航法精度が求められるかどうかを調べることに重点を置いた。このため、分布の特性を求めることは、今後の課題とする。

7. むすび

飛行計画情報と結合したレーダデータを用いて、北太平洋上の航空路R220における横方向経路逸脱量の分布の機種、観測地点等による違いを調べた。その結果、次のことが分かった。

- (1) 横方向経路逸脱量の度数分布の50%区間の幅は、NANACからの距離 L が380NM付近では0.9NMから2.4NMまでの間の値を取り、機種によりその値が異なる。
- (2) B747-400では(1)の50%区間幅の値は $L=250\text{NM}$ 付近から減少し、0.16NM程度になる。
- (3) 横方向経路逸脱量の度数分布は観測地点により形が異なり、2つ以上の陸上の航法援助施設の情報が取得できる空域（ L が250NM以下）では峰が2つある分布となる。
- (4) (2)および(3)は、陸上の航法援助施設の情報による慣性航法装置の航法誤差の修正の有無等による可能性が高い。

今後検討すべき事項としては、航跡が歪んで観測される原因の究明および陸上の航法援助施設から遠方の地点における横方向経路逸脱量の分布の特性の解析がある。

参 考 文 献

- (1) Reich, P. G. : "Analysis of Long Range Air Traffic Systems", Journal of Institute of Navigation, 19, No. 1, 2 and 3, 1966
- (2) 長岡 栄 : "測高データによる垂直方向の重畳確率の一推定法", 日本航空宇宙学会誌, 32, p. 301-308, 1984
- (3) 長岡 栄 : "位置通報点上の航空交通の水平重畳確率", 日本航海学会論文集, 77, p. 103-113, 1987
- (4) 天井, 長岡 : "日本の空域内の航空路における近接通過頻度", 日本航海学会論文集, 84, p. 149-155, 1991
- (5) Polhemus, N. W. and Livingston, D. : "Characterizing Cross-track Error Distributions for Continental Jet Routes", Journal of Navigation, 34, 1, p. 134-141, 1980
- (6) 高橋 健 : "慣性航法装置の概要", 日本航海学会誌「航海」, 82, p. 54-61, 1984
- (7) 岡田 實編 : 「航空電子システム」, 日刊工業新聞社, 昭和58年
- (8) 加藤 昭英 : "航法システムの変遷と今後の展望(1)", 航空技術, 350, p. 8, 1984
- (9) 天井, 長岡 : "航空管制用レーダの測角／測距誤差分布の解析", 電子情報通信学会技術研究報告 SANE89-1, 1989
- (10) 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, 1992
- (11) 岡田 實編 : 「航空電子装置」, 日刊工業新聞社, 昭和53年
- (12) Nagaoka, S. and Hatakeyama, H. : "A Survey on RNAV Equipments of Japanese Air Carriers", RGCSP WG / A-WP / 2, ICAO, Canberra, 1991

- (13) 長岡 栄：「慣性航法装置の測位誤差分布の解析」，日本航海学会論文集，87，p. 99-106, 1992

質 疑 応 答

石村信道 (神戸商船大学)：B747-400 と DC10 に積まれている INS 装置は機種が異なるのですか？ また航空機機種の違いによって、横方向逸脱量が異なるのはなぜですか？

長岡 栄：その件につきましては，共同研究者からお答え致します。機種によって搭載している航法装置が異なります。B747-400 の INS はハネウェル社製の 3 つの IRS (INS センサ) を用いているはずです。飛行には 3 つの IRS の情報をミックスしたものを用地上、航法援助施設の情報で自動的にアップデートしています。この局の選択にはプライオリティがあり、DME / DME が一番、次いで VOR / DME となっています。DC10 の方は具体的にはまだよくわかりませんが、調査したいと思っております。