

5. RNAV(広域航法)到着経路における航空機の横方向の航法精度の推定

航空交通管理領域 ※天井 治、藤田 雅人

1. まえがき

安全で効率的な航空機の運航が望まれている。航空交通管制では、航空交通の安全および効率的な運航を確保するために、航空交通管制官(以後、管制官と呼ぶ)が確保すべき航空機同士の最小間隔(管制間隔)の基準を定めている。

航空機の運航効率の向上や空域の有効活用のためにRNAV(Area Navigation: 広域航法)を活用した飛行経路の展開が計画されている^[1]。国土交通省 航空局では短期、中期、長期の達成目標を定めたRNAVロードマップを作成して、この展開計画を推進している。

RNAVは幾つかの機上センサーで取得した情報から自機の位置を算出して飛行する航法の一方法である。RNAVを用いると、従来の航法のように地上の航行援助施設の位置に制約されることなく飛行経路を設定できる。

RNAV運航の推進にあたり、2本の平行滑走路に進入するための到着経路の最小経路間隔の検討が必要となった。この検討のためには、到着経路をRNAVで飛行している航空機の承認経路の中心線からのずれ(横方向経路逸脱量と呼ぶ)を知ることが重要である。

RNAV機の横方向の航法誤差に関する研究は既に行われているが^{[2]、[4]}、その多くは航空路におけるもので、使用されたデータが古く現在飛行している航空機の航法精度を得ることができない。また文献[5]ではRNAV到着経路における横方向経路逸脱量が推定されているが、標本数がとても少なく分布モデルの推定には至っていないため今回の検討には使用できない。

そのため本研究では、RNAV到着経路の評価運用が行われていた鹿児島空港の空港監視レーダ(Airport Surveillance Radar: ASR) / 二次監視レーダ(Secondary Surveillance Radar: SSR)で取得した航跡情報を用いて横方向経路逸脱量の分布を推定した。更に得られ

た実測分布に最も良く合う分布モデルを検討した上、パラメータを最尤推定法により推定した。

本稿では、最初にRNAVについて述べる。次に空域の安全性評価にしばしば使用される衝突リスクモデルおよびモデルの重要なパラメータの1つである横方向重畳確率について述べる。そして横方向重畳確率の推定に必要な横方向経路逸脱量の計算方法を説明する。その後、横方向経路逸脱量の観測対象機と解析に使用したデータを示す。ついで、鹿児島空港到着経路飛行便の横方向経路逸脱量の分布の推定結果およびその分布を最も良く近似する分布モデルの推定結果を示す。

2. RNAV

2.1 定義

RNAVは「航行援助施設の覆域内、または自蔵航法装置の能力の限界内、もしくはこれらの組合せにより任意の希望する飛行経路上での航空機の運航を可能とさせる航法の一方法」と国際民間航空条約第11付属書^[6]では定義される。

2.2 従来の航空路とRNAVルート^[7]

従来の方法で陸上空域を飛行する航空機は、地上に設置された航行援助施設を用いて飛行している。この施設には、方位情報を得るためのVOR(VHF Omni-directional Radio Range: 超短波全方位式無線標識)や距離情報を得るためのDME(Distance Measuring Equipment: 距離測定装置)等がある。

図1に従来のルートとRNAVルートの概略図を示した。従来の方法では、航空路は地上に設置された航行援助施設を結ぶ線分を繋ぎ合わせた経路として設定されている。このため、航行援助施設の配置状況により遠回りの経路になったり、航空路新設のために、新たな航行援助施設の設置が必要になったりする。

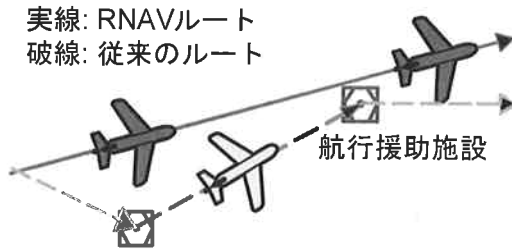


図1 RNAV ルートの概念

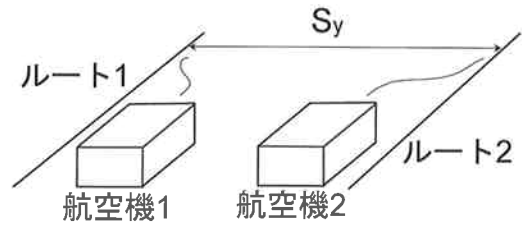


図2 横方向衝突リスクの概念

一方 RNAV では、既存の航行援助施設から得られる情報や慣性基準装置 (Inertial Reference Unit : IRU) などの既存の機上自蔵航法装置から得られる情報などを用いて、自機の位置を常に計算しながら飛行する。このため航行援助施設の設置位置にとらわれずに飛行経路を設定できる。従って RNAV の利用により、既存施設の有効利用を図ることができ、効率の良い航空路の設計が可能となる。

RNAV では、経路を構成する地理上の点はウェイポイント (Way-point : WP) と呼ばれる。航空機では、このウェイポイントの位置座標を機上のデータベースに登録し、飛行経路を定めている。

3. 衝突リスク

3.1 概念

空域の安全性評価を行う場合、しばしば衝突リスクモデルが使用される。このモデルは 1966 年に Reich によって提案されたモデル⁸⁾に基づいて、国際民間航空機関の管制間隔検討パネルで改良されたもの⁹⁾である。

衝突リスクモデルでは、簡単化のため、航空機の形状を直方体もしくは円柱と考える。航空機は予め管制機関により割り当てられた経路の中心線を飛行することになっているが、実際には航法誤差や計器の故障、人的過誤等のために割り当て経路や割り当て高度から逸脱して飛行する可能性がある。この逸脱により管制間隔を喪失し、両機 (2つの直方体) が三次元的に重なる (衝突する) リスクを推定する。図 2 に横方向の衝突リスクモデルの概念図を示す。

3.2 横方向衝突リスクの計算式

横方向の衝突リスク N_{ay} は次式で推定できる。

$$N_{ay} = P_z(0)P_y(S_y)[N_x^y(o)K(o) + N_x^y(s)K(s)] \quad (1)$$

ここで、 $P_z(0)$ は垂直方向重畳確率、 $P_y(S_y)$ は横方向重畳確率、 $N_x^y(o)$ 、 $N_x^y(s)$ は隣接経路との反航/同航近接通過頻度、 $K(o)$ 、 $K(s)$ は航空機の大きさや相対速度に関わる係数を表す。各パラメータの詳細については次節以降で述べる。

これは航空路システム内を飛行する航空機が横間隔を喪失して起こる単位飛行時間あたりの空中衝突事故件数の期待値である。1回の衝突には2機が関与しており2事故と見なす。

航空機の位置関係は、航空機対の飛行方向が同じ場合 (同航) と飛行方向が反対の場合 (反航)、幾つかのルートが交差している場合 (交差路) が考えられる。ここでは平行ルートにおける衝突リスクを考えており、同航と反航の場合のみを考慮する。以後、同航を s、反航を o の文字で示す。

衝突は、縦 (進行方向)、横、高さの各方向で同時に重なりが起こった場合にのみ起こる。航空機が経路を飛行するとき、技術的要因などにより、その中心線からのずれが発生する。これは横方向のみならず、高さ方向でも発生する。横間隔 S_y の平行ルートでの横間隔喪失による衝突を考える場合、経路からの大きな横方向でのずれ (横方向経路逸脱量) は衝突リスクを高める。しかし、両機は同一高度帯を飛行しているため、高さ方向でのずれ (高度維持誤差) は逆に衝突リスクを小さくするように働く。

(1)式では、高さ方向、横方向、進行方向での事象をそれぞれ独立と見なし、ばらばらに考えてそれを掛け合わせることで衝突リスクを推定している⁹⁾。

3.3 衝突リスクのモデルパラメータ

3.3.1 垂直方向重畳確率

$P_z(0)$ は垂直方向重畳確率と呼ばれ、同一高

度を割り当てられた航空機対が高さ方向で重なる確率を表す。

この値は高度維持誤差の分布から推定できるが、航空管制では航空機の飛行高度は気圧高度計による高度を用いており、高度維持誤差を測定するにはなんらかのシステムが別途必要になる。文献[10]で使用されている $P_z(0)$ の値は 0.538 である。これは、2機が同一高度に居ようとしても、その航法性能などのため5割強の確率でしか重畳が起こらないことを示している。

3.3.2 横方向重畳確率

$P_y(S_y)$ は横方向重畳確率と呼ばれ、横間隔 S_y だけ離れた平行経路を飛行しようとする航空機対が横方向で重なる確率を表す。

この値は横方向経路逸脱量の分布から推定できる。今回はこの値を推定するために鹿児島空港のレーダデータを解析し、横方向経路逸脱量の分布を推定した。衝突リスクの値を目標安全度 (Target Level of Safety : TLS) と呼ばれる衝突リスクの最大許容値 5×10^{-9} [件/飛行時間] 以下に抑える S_y の値を推定することにより、平行ルート上の最小経路間隔を求めることができる。

3.3.3 近接通過頻度

$N_x^y(o)$ 、 $N_x^y(s)$ は近接通過頻度と呼ばれ、隣接経路の同一高度を飛行する2機の航空機の追い抜きあるいはすれ違いの頻度を表す。 $N_x^y(o)$ は反航近接通過頻度を、 $N_x^y(s)$ は同航近接通過頻度を表す。図3に近接通過の概念図を示す。

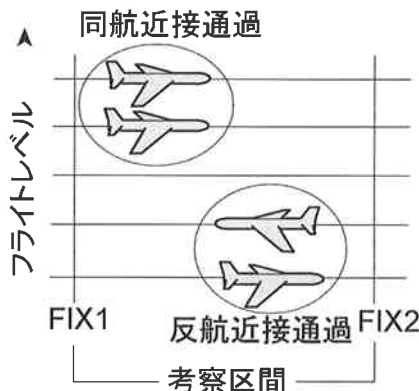


図3 近接通過の概念

近接通過頻度は、飛行計画情報と呼ばれる航空機の飛行記録やレーダデータ等による航空機の位置情報などから計算できる。この値は交通量や交通流の状況などにより変化する。近接通過頻度を低減することにより衝突リスクを抑えることができる。

$K(o)$ 、 $K(s)$ は航空機の大きさや相対速度に関わる値で、航空機が重なっている時間を考慮した係数である。次式により計算できる。

$$K(o) = 1 + \frac{\lambda_x}{2|\bar{V}|} \left(\frac{|V_{rel}^y|}{\lambda_y} + \frac{|V_{rel}^z|}{\lambda_z} \right) \quad (2)$$

$$K(s) = 1 + \frac{\lambda_x}{|V_{rel}^x|} \left(\frac{|V_{rel}^y|}{\lambda_y} + \frac{|V_{rel}^z|}{\lambda_z} \right)$$

記号の意味は次の通り。

λ_r : 航空機の平均長、幅、高 ($r=x, y, z$)

$|\bar{V}|$: 航空機の平均速力

$|V_{rel}^r|$: 航空機対の縦、横、垂直方向の平均相対速力 ($r=x, y, z$)

4. 横方向経路逸脱量

4.1 横方向重畳確率

横方向重畳確率は横方向衝突リスクモデルのパラメータのうちで最も重要なパラメータである。

前章でも述べたように、横方向重畳確率は横方向経路逸脱量から推定できる。その値は経路毎に統計的に独立で同一の分布に従うと仮定し、確率密度関数を $f(y)$ とする。航空機の平均幅を λ_y とすると S_y だけ離れた平行経路を飛行する航空機対が横方向で重なる確率は次式で計算できる。

$$P_y(S_y) = \int_{S_y - \lambda_y}^{S_y + \lambda_y} \int_{-\infty}^{\infty} f(y)f(y+u)dydu \quad (3)$$

図4に横方向重畳確率の概念図を示す。 $f(y)$ は、実測データから計算できる横方向経路逸脱量の分布の解析により推定できる。

4.2 横方向重畳確率の計算方法

本稿では、位置座標として極座標 (地球の中心からの距離 R_E+h 、緯度 Λ 、経度 λ) で表す。地球は半径 $R_E (=6,371 \text{ km})$ の球と考える。

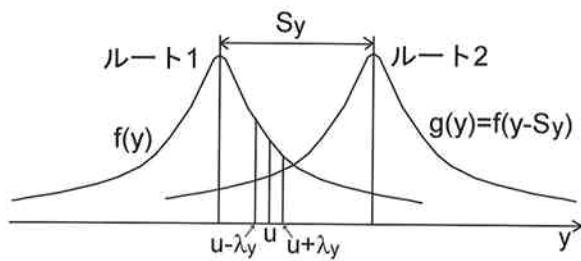


図4 横方向重畳確率の概念図

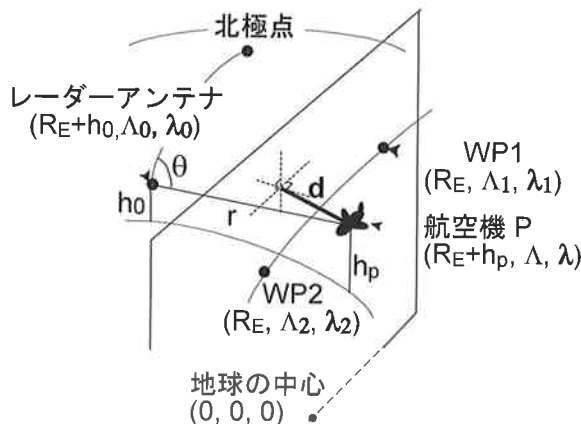


図5 横方向経路逸脱量の幾何学的関係

割当経路の中心線上を飛行しようとしている航空機の位置 $P (R_E+h_p, \Lambda, \lambda, h)$ から2つのウェイポイント $WP1 (R_E, \Lambda_1, \lambda_1)$ 、 $WP2 (R_E, \Lambda_2, \lambda_2)$ で定まる経路の中心線および地球の中心 $(0,0,0)$ を通る平面に下ろした垂線の長さで横方向経路逸脱量 d を近似した。図5に幾何学的関係を示した。

まず、レーダから得られる測位情報（アンテナからの距離 r 、アンテナ回転角 θ 、気圧高度 h_p ）を球面三角法を用いて位置座標に変換する。

$$\Lambda = \sin^{-1}(\sin \Lambda_0 \cos \Phi + \cos \Lambda_0 \sin \Phi \cos \theta) \quad (4)$$

$$\lambda = \lambda_0 + \sin^{-1} \left[\frac{\sin \theta \sin \Phi}{\cos \Lambda} \right] \quad (5)$$

$$\Phi = \cos^{-1} \left[\frac{(R_E+h_0)^2 + (R_E+h_p)^2 - r^2}{2(R_E+h_0)(R_E+h_p)} \right] \quad (6)$$

ここで、 $(R_E+h_0, \Lambda_0, \lambda_0)$ はレーダアンテナの位置座標である。

次式で横方向経路逸脱量 d を求める。

$$d = \frac{C_1 x + C_2 y + C_3 z}{\sqrt{C_1^2 + C_2^2 + C_3^2}} \quad (7)$$

ここで

$$x = (R_E + h_p) \cos \Lambda \cos \lambda \quad (8)$$

$$y = (R_E + h_p) \cos \Lambda \sin \lambda \quad (9)$$

$$z = (R_E + h_p) \sin \Lambda \quad (10)$$

$$C_1 = y_2 z_1 - y_1 z_2 \quad (11)$$

$$C_2 = z_2 x_1 - z_1 x_2 \quad (12)$$

$$C_3 = x_2 y_1 - x_1 y_2 \quad (13)$$

$$x_i = R_E \cos \Lambda_i \cos \lambda_i \quad (14)$$

$$y_i = R_E \cos \Lambda_i \sin \lambda_i \quad (15)$$

$$z_i = R_E \sin \Lambda_i \quad (16)$$

尚、 $i=1,2$ である。横方向経路逸脱量の符号は、上記平面に対して進行方向の右側を負、反対側を正にとった。

5. 観測対象機と使用データ

データ収集開始時の2005年10月には、函館空港、大阪国際空港、高松空港、福岡空港、鹿児島空港にてFMS（Flight Management System：飛行管理システム）を利用したRNAV到着経路の評価運用が実施されていた。このうち、最もRNAVでの到着便数が多い空港であった鹿児島空港をデータ収集の対象とした。

観測対象機は、鹿児島空港のRNAV到着経路をレーダ誘導なしで飛行した航空機とした。当該経路は南側から空港に進入する経路のため、風向きによってはこの経路は使用できない。

解析に使用したデータは、2005年10月1日から2006年3月15日までの鹿児島空港のターミナルレーダ情報処理システム（Automated Radar Terminal System：ARTS）のデータ、飛行計画情報および運航票である。但し、未収集等の理由により2005年11月16日から12月3日のデータは使用できなかった。2006年3月15日以降もデータ収集を続ける予定であったが、DME局の移設によりRNAVルートが設定出来なくなったため、断念した。

図6に鹿児島空港RNAV到着経路（Kihoku RNAV Arrival：KRA）飛行便の航跡例を示す。図中には、鹿児島空港の滑走路およびレーダのアンテナ設置位置（ASR #n と記載）を示した。

飛行計画情報からは、便名、機種名、出発/目的空港、飛行経路、位置通報点の実通過時刻・実高度など航空機の運航に関する様々な情報を

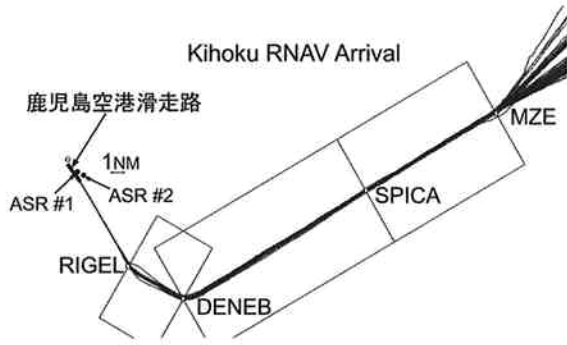


図6 鹿児島空港 RNAV 到着経路の航跡例

得ることができる。今回は、KRA を構成するウェイポイントの1つである SPICA を通る飛行便の情報の抽出に使用した。

KRA 使用の有無、レーダ誘導の有無などを調べるため鹿児島空港事務所にて2005年10月1日から2006年3月15日までに鹿児島空港に着陸した全ての飛行便の運航票を調査した。運航票には管制官が行った管制内容のメモが記録されている。これは RNAV 到着経路をレーダ誘導無しで RNAV により飛行した飛行便の航跡の抽出に使用した。

ARTS データからは、ASR/SSR で取得した航空機の位置情報、便名、機種名等の情報、使用中の ASR/SSR の情報などが得られる。識別符号等の情報を基に同一航空機の位置情報を一纏めにして、航跡情報を作成した。

鹿児島空港の ASR/SSR は2基あり、それぞれのレーダアンテナの位置座標 (WGS84 座標系) は、第1 ASR/SSR が北緯31度48分06秒、東経130度43分29秒、第2 ASR/SSR が北緯31度47分43秒、東経130度43分49秒であり、900 m 程離れている。表1に鹿児島空港の SSR の諸元を示す。

6. 解析結果

6.1 横方向経路逸脱量の分布

図7に分布の推定に使用する横方向経路逸脱量の観測位置を示す。同一観測位置での横方向経路逸脱量の分布を得るため、1航跡に対して1つの横方向経路逸脱量のみを使用する。

ウェイポイント名 MZE (宮崎 VOR/DME) と SPICA の間の距離は 13 NM (海里、1 NM=1,852m) である。今回は MZE から経路

に沿って 6 NM の位置で観測された横方向経路逸脱量を用いて分布を作成した。6NM の位置を選んだのは、MZE での旋回の影響を受けずに、航空機は当該地点では直進していると考えられるためである。実際には ASR/SSR の回転周期は 4 秒でデータは離散的に得られる。10,000 ft (1 ft=0.3048m) 以下を飛行する到着機には 250 kt (指示対気速度) の速度制限があり、4秒間の移動量は 0.3 NM 程と見込まれる。このため、この位置から ±1 NM の空域内で得られる横方向経路逸脱量の推定値のうち、最もこの観測位置に近いデータ (1 航跡に対して 1 つ) を用いて分布を作成した。

横方向経路逸脱量の推定に当たっては、平滑化処理 ([付録] 参照) を用いレーダの測角/測距系のランダム誤差の軽減を図った。

表1 鹿児島空港の SSR の諸元

項目	仕様
アンテナタイプ	プレーナアレイ
アンテナ回転周期	約 4 秒
最大覆域	60 NM
周波数 (アップリンク)	1030 MHz
(ダウンリンク)	1090 MHz
最大出力	1 kW
パルス繰り返し周期	297 pps
データの最小量子化単位	測距系: 1/64 NM 測角系: 0.088°

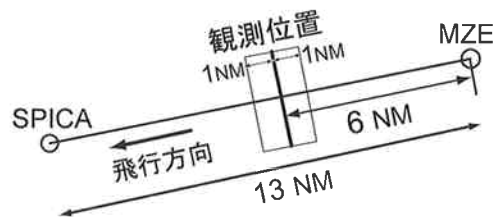


図7 横方向経路逸脱量のデータ取得位置

図8に横方向経路逸脱量の相対度数分布を示す。横軸は横方向経路逸脱量を、縦軸は対数目盛で表した相対度数を示す。標本数は 2,298、平均値は 3.0×10^{-4} NM、標準偏差は 0.077 NM であった。

総飛行時間の 95%の時間を ±X NM 以内で飛行できる能力を RNAV X と呼ぶ。本解析の結

果、鹿児島空港の RNAV 到着経路を飛行する航空機の RNAV X に相当する範囲 (分布の 95% 含有区間) は [-0.1266 NM, 0.1725 NM] であった。

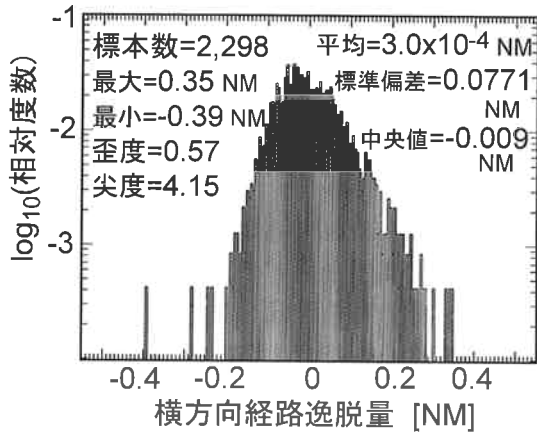


図 8 RNAV 到着機の横方向経路逸脱量の分布 (2005 年 10 月 1 日~2006 年 3 月 15 日)

6.2 分布モデルの推定

推定された横方向経路逸脱量の分布を最も良く近似する確率密度関数 $f(y)$ を求める。これにより(3)式の $f(y)$ が決まり、横方向重畳確率が推定できる。

表 2 当てはめに用いた分布モデル

モデル	確率密度関数
N	$\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma^2} e^{-\frac{y^2}{2\sigma^2}} \equiv N(y \sigma)$
DE	$\frac{1}{2\lambda} e^{-\frac{ y }{\lambda}} \equiv DE(y \lambda)$
N-N	$(1-\alpha)N(y \sigma_1) + \alpha N(y \sigma_2)$ $0 < \alpha < 1$
N-DE	$(1-\alpha)N(y \sigma) + \alpha DE(y \lambda)$ $0 < \alpha < 1$

6.2.1 当てはめた分布モデル

表 2 に当てはめに用いた分布モデルを示す。N は正規 (Normal) 分布、DE は両側指数 (Double Exponential) 分布である。N-N、N-DE はそれぞれ、2 つの正規分布の混合型分布、正規分布と両側指数分布の混合型分布である。

6.2.2 当てはめ方法

各分布のモデルパラメータは最尤推定法により推定した。この方法では、当てはめの良さを示す尤度関数を最大化するパラメータを推定する。パラメータが解析的に計算できる N と DE 以外は、次の区間分割法により求めた。

- 1) 予め定めたパラメータの範囲をいくつかの (実際の計算では 30 個) の区間に分割
- 2) 各区間の中央値で尤度が最大となる区間を選択
- 3) 1)、2)を区間の分割前後の尤度の差が十分小さく (10^{-4}) なるまで繰り返す。

6.2.3 当てはめ結果

表 3 に各モデルのパラメータの推定値を示す。AIC は赤池情報量基準^[4]を表し、この値を用いることにより異なるパラメータ数のモデル間で当てはめの良さを比較できる。AIC の値が小さいほど当てはまり具合が良いことを示す。

図 9 に実測分布と当てはめた分布を示した。横軸は横方向経路逸脱量の絶対値を、縦軸は対数目盛の (1-累積相対度数) を示す。

表 3 から N-N モデルが実測分布に最も良く当てはまることが分かる。パラメータの最尤推定値は $\alpha=0.117$ 、 $\sigma_1=0.0673$ NM、 $\sigma_2=0.129$ NM であった。

表 3 各モデルのパラメータの最尤推定値

モデル	パラメータの最尤推定値	AIC
N	$\sigma=0.0771$ NM	-5257 (56)
DE	$\lambda=0.0602$ NM	-5134 (179)
N-N	$\alpha=0.117$ $\sigma_1=0.0673$ NM $\sigma_2=0.129$ NM	-5313 (0)
N-DE	$\alpha=0.121$ $\sigma=0.0705$ NM $\lambda=0.0840$ NM	-5304 (9)

AIC の括弧内の値は N-N との相対値を表す。

7. 考察

7.1 レーダ誤差の要因

レーダによる位置推定誤差の要因として主に次のものが上げられる。

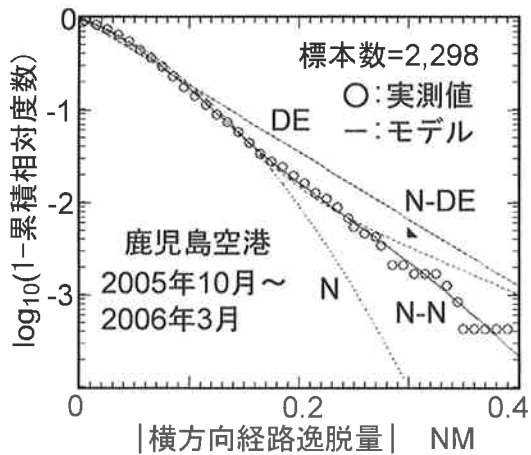


図9 モデルの当てはまり具合

(I) レーダアンテナ設置位置の誤差

レーダアンテナ設置位置の座標（緯度、経度）は秒単位までしか測られていない。このため設置位置に最大で 40m 程の誤差が含まれている可能性がある。

(II) レーダの測角、測距系のバイアス誤差

レーダアンテナ設置時の測角／測距系の微調整で取り切れなかったバイアス誤差等の誤差である。尚、レーダデータの処理の際、真北と磁北とのずれを修正する必要があるが、今回は航空路誌^[12]に記載された鹿児島空港での値を参考に 6.17° W として計算した。実際には $0.8'$ の年変化があるが月毎の変化は無視して、2005 年 10 月からの約半年間同じ値として計算した。

(III) レーダの測角／測距系のランダム誤差

レーダの最小量子化単位等に起因する誤差である。ARTS の最小量子化単位は測距系 $1/64$ NM、測角系 0.088° である。これらは航跡の平滑化処理により軽減されていると考える。

7.2 運航票の調査

ARTS データおよび飛行計画情報を使用して鹿児島空港 RNAV 到着経路（KRA 経路）飛行便の航跡を描画して調べた結果、レーダ誘導と思われる航跡が多数観測された。

本研究の目的は、RNAV 到着経路上を飛行しようとしている航空機の航跡を観測することである。そこで、KRA 経路の飛行の有無、レーダ誘導の有無を確認するために、観測期間内の全対象便について鹿児島空港事務所に保管されて

いる運航票の調査を行った。

調査期間中、KRA 経路の飛行が計画された便数は 4,945 便で、そのうち運航票の記述内容の調査によりレーダ誘導無しで KRA 経路を飛行したと推定された便数は 2,298 便であった。レーダ誘導なしの飛行便は全体の 46%であった。尚、風向きにより空港の北側からの進入となった場合は、全てレーダ誘導となる。

7.3 横方向経路逸脱量の分布について

今回の解析により得られた横方向経路逸脱量は標本数 2,298 便と少ない。我々は、これらの逸脱はすべて航法誤差によるもので、衝突の原因となる人的過誤などによる大きな逸脱は観測されなかったと考える。

そのため、今回得られた分布を分布の中心部と考えて、衝突に大きく係わる裾部の分布のモデルパラメータを推定する方法を考案した。詳細は文献[13]に示した。

8. まとめ

航空局では、現在多くの航空機に搭載されている航法の 1 つである RNAV の有効利用を図るべく RNAV 経路の整備を推進している。これに伴い、RNAV 平行到着経路における最小経路間隔の検討が課題となっている。目標安全度を満たす最小経路間隔を推定するために、鹿児島空港のレーダデータを用いて、RNAV で到着経路を飛行した航空機の横方向経路逸脱量の分布を調べた。得られた横方向経路逸脱量の分布は、横方向の衝突リスクモデルの重要なパラメータである横方向重畳確率の推定に使用される。

2005 年 10 月 1 日から 2006 年 3 月 15 日まで（2005 年 11 月 16 日から 12 月 3 日を除く）の鹿児島空港のターミナルレーダー情報処理システムから抽出したレーダデータ、飛行計画情報および運航票の情報を用いて、レーダ誘導なしに鹿児島空港の RNAV 到着経路を飛行した航空機の横方向経路逸脱量の分布を推定し、得られた分布に最も良く当てはまる分布モデルを推定した。その結果、次のことが分かった。

- (I) 標本数 2,298 の横方向経路逸脱量の分布として、最大値 0.346 NM、最小値 -0.392 NM、平均値 3.0×10^{-4} NM、標準偏差 0.077

NMの分布が得られた。

- (II) RNAV X に相当する 95%含有区間は [-0.1266 NM、0.1725 NM]であった。
- (III) 実測分布を最も良く近似する分布モデルは 2つの正規分布の混合型分布で、そのパラメータの最尤推定値は、 $\alpha=0.117$ 、 $\sigma_1=0.0673$ NM、 $\sigma_2=0.129$ NMであった。今後は、以下のことを行いたいと考える。

- (i) レーダサイト毎の分布の差異の調査
- (ii) ブートストラップ法による信頼区間の推定
現在は、羽田空港に到着する航空機の到着時刻を基に今後の交通量を想定した交通流を模擬し、平行到着経路における近接通過頻度を推定するための準備を行っている。

この結果を用いることにより目標安全度を満たす経路間間隔を推定することができる。

謝辞

データ収集の際にご協力頂いた国土交通省大阪航空局 鹿児島空港事務所、東京航空交通管制部、福岡航空交通管理センターおよび航空局の関係各位に感謝いたします。

また、鹿児島空港事務所における運航票の調査にご協力頂いた酒井美枝派遣職員に感謝します。

参考文献

- [1] 今若善紀：RNAV (広域航法) の導入・展望, 日本航空技術協会「航空技術」, No.607, pp.30-35, Oct. 2005
- [2] 天井 治・長岡 栄：レーダデータを用いた RNAV 機の航法精度の評価, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J78-B-II No.5, pp.335-341, May 1995
- [3] 天井 治・長岡 栄：RNAV 機の航法精度の評価, 電波航法研究会「電波航法」 No.41, pp.47-53, Mar. 1999
- [4] Ed. Smith : Safety assessment of RNP1-RNAV Route Spacing, ICAO SASP-WG/WHL/8-WP11, Rio de Janeiro, Nov. 2005
- [5] 天井 治・長岡 栄：RNAV による到着・出発機の航法精度の評価, 日本航海学会論文集, 100, pp.31-40, Mar. 1999

- [6] AIR TRAFFIC SERVICES Annex 11 to the convention of International Civil Aviation, ICAO, 13th Edition, 2001
- [7] 岡田和男：「航空電子入門」, 日本航空技術協会, pp.148-161, 1986
- [8] P.G. Reich : Analysis of Long Range Air Traffic Systems, Journal of the Institute of Navigation, 19, Nos.1, 2 and 3, 1966
- [9] Report of the Sixth Meeting of RGCSP, ICAO RGCSP-WP/158, chap.5, Montreal, Canada, 1988
- [10] Pacific Approvals Registry and Monitoring Organization : One-year Airspace Safety Oversight for the Reduced Vertical Separation Minimum (RVSM) Implementation in Japan and Republic of Korea Domestic Airspace, ICAO RVSM TF/29-IP/11, Bangkok, Nov. 2006
- [11] H.Akaike : Information Theory and an Extension of the Maximum Likelihood Principle, 2nd International Symposium on Information Theory, Budapest, 1973
- [12] 航空路誌 (Aeronautical Information Publication : AIP Japan), 国土交通省航空局
- [13] 藤田雅人・天井 治：平行 RNAV (広域航法) 到着経路の横方向重畳確率の推定、平成19年度 (第7回) 電子航法研究所研究発表会講演概要、June 2007

[付録] 航跡の平滑化処理

ある一定時間内の航空機の運動を等加速度運動と見なし、x 座標、y 座標がそれぞれ時刻 t に関する 2 次関数で表せるとする。このとき時刻 t_i における平滑位置 x_{s_i} 、 y_{s_i} は次式で表せる。

$$x_{s_i} = a_1 t_i^2 + a_2 t_i + a_3 \quad (a-1)$$

$$y_{s_i} = b_1 t_i^2 + b_2 t_i + b_3 \quad (a-2)$$

これらの 2 次式の係数 (a_j, b_j ($j=1, 2, 3$)) は平滑化処理をしたい i 番目のデータの前後 N 個のデータを用いて、最小二乗法により求めた。今回の処理では $N=6$ (処理に用いるデータ数は 13 個 (52 秒間に相当)) とした。