

3. 広域航法運航に対する安全性評価のための一手法

航空交通管理領域 ※天井 治

1. はじめに

現在、上空通過機を含め1日あたり約4,000便もの航空機が日本の上空を飛行している。航空交通の安全のため、多くの航空機は航空管制官の指示に従って定められた経路を飛行する。従来の飛行経路（VOR（VHF Omni-directional Radio Range：超短波全方位式無線標識）経路）は、地上に設置された航行援助施設から発信される電波を利用して飛行する方式で、その施設の直上を結ぶように設定されている。そのため、施設の設置位置の制約により、最短距離を飛行できない場合があり、柔軟な経路の設定も難しかった。このため、より経済効率の良い飛行経路の設定が望まれていた。

これに応えるべく、航空機の運航効率の向上や空域容量の拡大が期待できるRNAV（Area Navigation：広域航法）を活用した飛行経路が導入されている。国土交通省 航空局では短期、中期、長期の整備の達成目標を定めたRNAVロードマップ^[1]を作成して、RNAVの導入を積極的に推進している。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に設置された既存の航行援助施設の位置に制約されることなく、効率の良い柔軟な飛行経路を設定できる。

国際民間航空条約の第11付属書^[2]には、2001年以降、安全性評価の必要性に関する項目が追加された。これ以降、管制間隔の短縮や新しい方式の導入などATCシステムの安全に関わる重要な変更にあたっては安全性評価が必須となった。

RNAV平行経路の導入のため、安全なRNAV経路間隔（最小経路間隔）の算出が必要となった。そこで、衝突リスクモデルに基づく安全性評価手法を用いて最小経路間隔を推定する方法を考案し、推定を行った。まずRNAV到着経路を飛行した航空機の航跡データを解析し、横方向の航法誤差（横方向経路逸脱量）の分布を推

定した。そして最尤推定法を用いてこの分布に分布モデルを当てはめて、実測分布を良く近似できる分布モデルと、そのときのモデルパラメータを推定した。更に、推定された分布モデルと推定された分布モデルを幾つかの条件下で変形した分布モデルを用いて、航空機同士が横方向で重なる確率（横方向重畳確率）を推定した。この推定値を既知のパラメータ値と共に用いて幾つかの経路間隔の下での衝突リスクを求めた。衝突リスクが、その最大許容値（目標安全度）よりも小さいならば安全とみなされる。そこで、衝突リスクの推定値と目標安全度との比較を行い、安全な最小経路間隔を推定した。

本稿では、初めにRNAVの概念について紹介する。次に衝突リスクモデルおよび横方向重畳確率、横方向経路逸脱量について述べる。次いでRNAV到着経路飛行便の横方向経路逸脱量の実測分布と推定した分布モデルを示す。更にRNAV95%含有条件の適用方法について述べる。そして横方向重畳確率の推定結果および最小経路間隔の推定結果を示し、最後に考察を加える。

2. RNAV

図1に従来のVOR経路とRNAV経路の概略図を示す。VOR経路は、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て作られている。この方式では、航行援助施設の設置位置の制約の下に経路が定まるため、最短経路や柔軟な経路の設定が難しかった。また航空路の新設のために、新たな航行援助施設の設置が必要になることもあった。

一方RNAVでは、複数の航行援助施設から得られる情報やGPS（Global Positioning System：全地球測位システム）、IRU（Inertial Reference Unit：慣性基準装置）といった機上自蔵航法装置などから得られる情報を用いて自機の位置を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。RNAV の利用により，効率的な経路の設定，地上の航行援助施設の有効利用，騒音等を考慮した柔軟な経路の設定などが可能となる。

RNAV では，ウェイポイントと呼ばれる経路を構成する地理上の点の位置座標を機上のデータベースに登録して，そのデータを元に経路を飛行する。

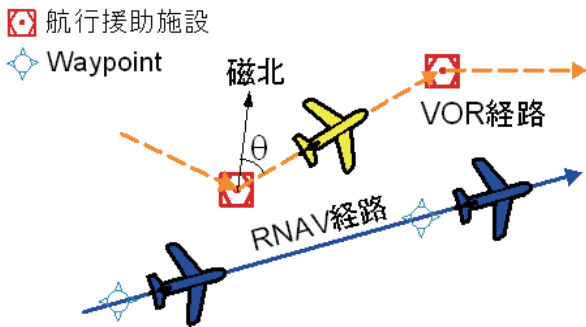


図1 従来の（VOR）経路と RNAV 経路

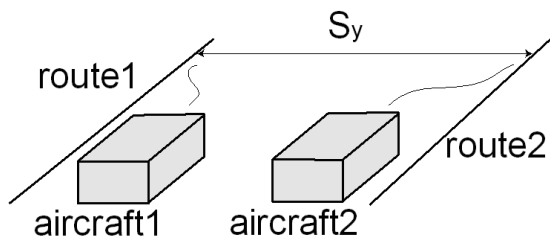


図2 衝突リスクモデルの概念

3. 衝突リスクモデル

3.1. 概念

空域の安全性評価では，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^[3]され，その後，国際民間航空機関の管制間隔検討パネル等で改良されてきた。

衝突リスクモデルでは，簡単のため，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から割り当てられた経路の中心線上を割当高度で飛行しようとするが，実際には航法誤差や計器の故障，人的過誤等のために割当経路や割当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（航空機同士の安全とみなせる最小の間隔）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）頻度を推定する。この頻度を衝突リスクと定義する。図2に横方向の衝突リスクモデルの概念を示した。

3.2. 横方向衝突リスクの計算式

横方向衝突リスク N_{ay} は，航空路システム内の航空機が横間隔（横方向の管制間隔）を喪失して起こる単位飛行時間あたりの衝突事故件数（1衝突は2事故とみなす）の期待値である。

横方向衝突リスクは次式で推定できる。

$$N_{ay} = P_z(0)P_y(S_y)N_x^y(e)K \quad (1)$$

記号の意味は次の通りである。

$P_z(0)$: 同一高度を飛行しようとする航空機対が垂直方向で重なる確率（垂直方向重畳確率）

$P_y(S_y)$: 横間隔 S_y だけ離れた隣接経路（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（横方向重畳確率）

$N_x^y(e)$: 進行方向での航空機のすれ違い頻度（等価反航近接通過頻度）

K : 航空機の平均サイズや平均相対速度から得られる係数。計算式は参考文献[4]を参照のこと。

安全性の評価は，得られた衝突リスクの推定値を目標安全度（Target Level of Safety : TLS）と呼ばれる衝突リスクの最大許容値と比較することにより行われる。管制間隔基準の喪失による空中衝突を考える場合，TLS の値は縦横高さのそれぞれの方向毎に 5×10^{-9} [件/飛行時間] という値が通常用いられる。

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モデルパラメータの中で最も重要なパラメータである。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，その確率密度関数を $f(y)$ 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。

$$P_y(S_y) = \int_{S_y - \lambda_y}^{S_y + \lambda_y} \int_{-\infty}^{\infty} f(y)f(y+u)dydu \quad (2)$$

$f(y)$ は、実測データから計算できる横方向経路逸脱量の解析により推定できる。

4.2. 横方向経路逸脱量の計算方法^[4]

本稿では、位置座標を極座標（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。

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 $P (R_E+h_p, \Lambda, \lambda)$ 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3に幾何学的関係を示した。球面三角法を用いて計算した。

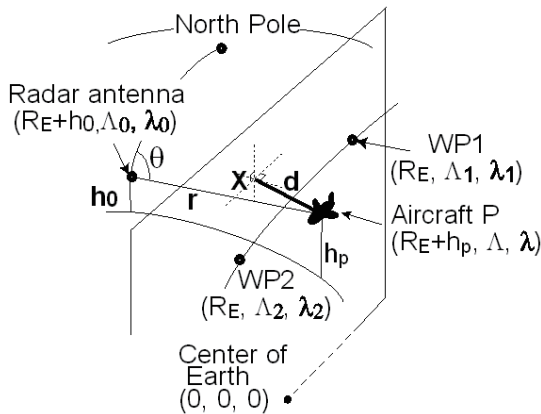


図3 横方向経路逸脱量の幾何学的関係

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。

$$\Lambda = \sin^{-1}(\sin \Lambda_0 \cos \Phi + \cos \Lambda_0 \sin \Phi \cos \theta) \quad (3)$$

$$\lambda = \lambda_0 + \sin^{-1} \left[\frac{\sin \theta \sin \Phi}{\cos \Lambda} \right] \quad (4)$$

$$\Phi = \cos^{-1} \left[\frac{(R_E + h_0)^2 + (R_E + h_p)^2 - r^2}{2(R_E + h_0)(R_E + h_p)} \right] \quad (5)$$

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。

$$d = \frac{C_1 x + C_2 y + C_3 z}{\sqrt{C_1^2 + C_2^2 + C_3^2}} \quad (6)$$

ここで

$$x = (R_E + h_p) \cos \Lambda \cos \lambda \quad (7)$$

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

$$z = (R_E + h_p) \sin \Lambda \quad (9)$$

$$C_1 = y_2 z_1 - y_1 z_2 \quad (10)$$

$$C_2 = z_2 x_1 - z_1 x_2 \quad (11)$$

$$C_3 = x_2 y_1 - x_1 y_2 \quad (12)$$

$$x_i = R_E \cos \Lambda_i \cos \lambda_i \quad (13)$$

$$y_i = R_E \cos \Lambda_i \sin \lambda_i \quad (14)$$

$$z_i = R_E \sin \Lambda_i \quad (15)$$

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. RNAV 到着経路飛行便のレーダデータの解析

RNAV 機の横方向経路逸脱量の実測分布を得るため、レーダデータの収集・解析を行った。

5.1. 観測対象機と使用データ

鹿児島空港の RNAV 到着経路をレーダ誘導なしで RNAV により飛行した航空機を観測対象とした。当該経路は南東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を使用できない。そのような場合、航空管制官は、空港周辺の状況を映したレーダ画面を見ながら操縦士に飛行方向を指示して航空機を安全に空港まで誘導する。このような誘導をレーダ誘導と呼ぶ。

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。図4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アンテナ設置位置（ASR #n と記載）を示した。

ARTS データからは、空港監視レーダで取得した航空機の位置情報、便名、機種名などが得られる。識別符号等の情報を基に同一飛行便の位置情報を一纏めにして、航跡情報を作成した。

飛行計画情報では、鹿児島空港 RNAV 経路を

構成するウェイポイントの SPICA の飛行の有無を調べた。

飛行計画情報にはレーダ誘導の有無は記載されていない。このため管制官が行った管制指示のメモが記録されている運航票を用いて、レーダ誘導の有無、RNAV 飛行の有無を調べた。

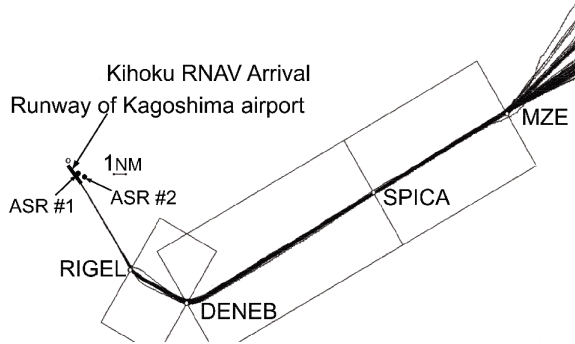


図 4 RNAV 到着機の航跡例

5.2. 横方向経路逸脱量の分布

図 5 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。MZE（宮崎 VOR/DME）から経路に沿って 6 NM の位置を観測位置とした。同一観測位置で相関のない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した。

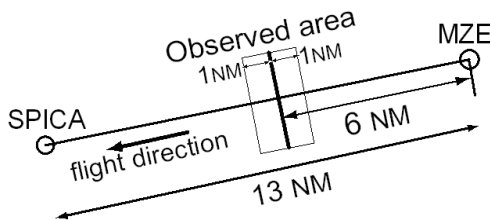


図 5 観測位置

空港監視レーダの回転周期は約 4 秒でデータは離散的に得られる。このため、まず、観測された全てのデータに対し横方向経路逸脱量の推定値を計算した。この推定に当たっては、平滑化処理^[4]によりレーダの測角/測距系のランダム誤差の軽減を図った。そして、この観測位置から ± 1 NM の空域内で得られるデータのうち、観測位置に最も近い観測データの横方向経路逸脱量の推定値を分布の作成に用いた。

図 6 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 で、平均値は 3.0×10^{-4} NM (≈ 0.6 m)、標準偏差は 0.077 NM (≈ 143 m) であった。

総飛行時間の 95% の時間を $\pm X$ NM 以内で飛行できる能力を RNAV X と呼ぶ。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 (95% 含有区間) は $[-0.13$ NM, 0.17 NM] であった。

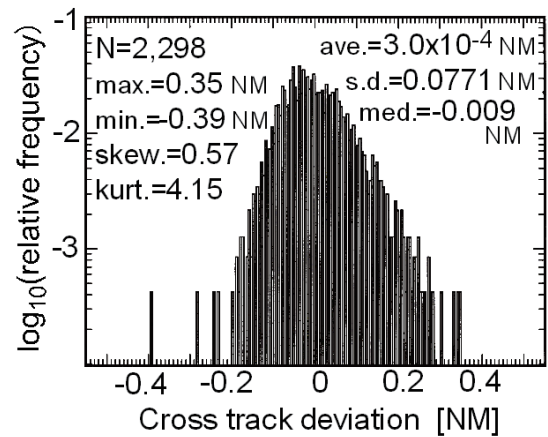


図 6 RNAV 到着機の横方向経路逸脱量の分布

5.3. 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良く近似する確率密度関数 $f(y)$ を求める。これにより (2) 式の $f(y)$ が求まり、横方向重畳確率が推定できる。

5.3.1. 当てはめた分布モデル

表 1 に当てはめ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。混合型分布では、中心部分の正常時の航法誤差に起因する誤差と、裾部の何らかの異常、過誤等に起因する誤差の両方を表現できると考えられている。

5.3.2. 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。

表1 当てはめに使用した分布モデル

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	$(1-\alpha)N(y \sigma) + \alpha DE(y \lambda)$ $0 < \alpha < 1$

5.3.3. 当てはめ結果

表2に各モデルのパラメータの最尤推定値を示す。AICは赤池情報量基準^[5]を表す。これは異なるパラメータ数のモデル間での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が良いこと示す。

表2 モデル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	$\sigma=0.077$ NM	-5257 (56)
DE	$\lambda=0.060$ NM	-5134 (179)
N-N	$\alpha=0.117$ $\sigma_1=0.067$ NM $\sigma_2=0.130$ NM	-5313 (0)
N-DE	$\alpha=0.121$ $\sigma=0.071$ NM $\lambda=0.084$ NM	-5304 (9)

図7にモデルの当てはまり具合を示す。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2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。N-Nモデルのパラメータの最尤推定値は、 $\alpha=0.117$, $\sigma_1=0.067$ NM, $\sigma_2=0.130$ NMであった。

しかし、図7をみるとN-N分布は、分布の端(右下)で実測値を下回っており、N-N分布を適用したのでは過小評価になる可能性がある。そのため以下では $\alpha=0.121$, $\sigma=0.071$ NM, $\lambda=0.084$ NMの正規分布と両側指数分布の混合

型分布(N-DE分布)を用いて計算を行うこととする。

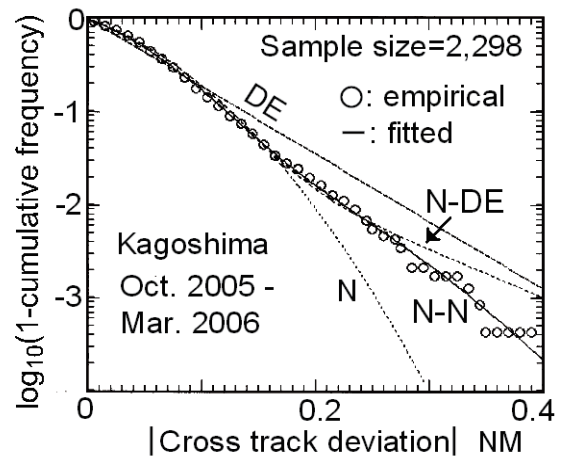


図7 モデルの当てはまり具合

6. 最小経路間隔の推定

鹿児島空港の実測データの標本数は2,298便である。今回観測された逸脱は、すべて通常の航法誤差によるもので、衝突の原因となるような大きな逸脱は観測できなかったと考える。このため、観測できなかった大きな逸脱も考慮した横方向経路逸脱量の分布の推定方法を考案した。この方法で推定した分布を用いて、以下の手順で最小経路間隔を推定した。

1. 推定した分布を基に大きな逸脱を考慮した横方向逸脱量の分布モデルを決定
2. 分布モデルを基に横方向重畳確率を推定
3. 既知のパラメータと併せて衝突リスクを計算
4. 目標安全度を満たす条件から最小経路間隔を決定

6.1. 95%含有要件

RNAV Xは、「総飛行時間の95%の時間を±X NM以内で飛行できる能力」(95%含有要件)と定義されている^[6]。これは次式で表せる。

$$0.95 \geq \int_{-X}^X f(y) dy \tag{16}$$

95%含有要件をぎりぎり満たす航法精度は次式で表せる(以下、95%最低要件と呼ぶ)。

$$0.95 = \int_{-X}^X f(y) dy \tag{17}$$

6.2. 95%最低要件を満たす分布の計算

鹿児島空港の観測値から得られた分布を用いて、95%最低要件を満足する分布モデルを構成する方法を提案する。考察する分布の α は観測値から得られた分布モデルと同一、 σ と λ の比も観測値から得られた分布モデルと同一と仮定し、RNAV1の場合を計算する。

このとき、以下(18)式から(21)式の連立方程式が成立する。

$$0.95 = \int_{-X}^X \{(1-\alpha)N(y|\sigma) + \alpha DE(y|\lambda)\} dy \quad (18)$$

$$\alpha=0.121 \quad (19)$$

$$\lambda=1.19\sigma \quad (20)$$

$$X=1 \text{ NM} \quad (21)$$

この連立方程式を解くと、

$$\alpha=0.121 \quad (22)$$

$$\sigma=0.47 \text{ NM} \quad (23)$$

$$\lambda=0.56 \text{ NM} \quad (24)$$

となる。同様に RNAV5 (X=5 NM) の場合は、

$$\alpha=0.121 \quad (25)$$

$$\sigma=2.4 \text{ NM} \quad (26)$$

$$\lambda=2.8 \text{ NM} \quad (27)$$

となる。

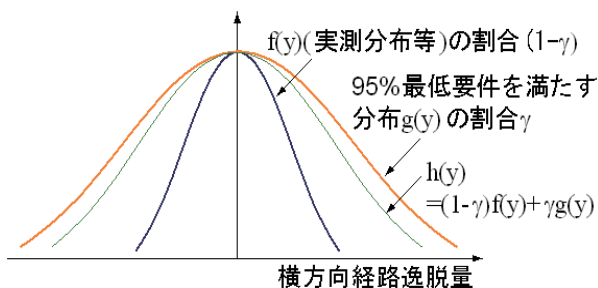


図8 $h(y)$ のイメージ

6.3. 95%最低要件満たす分布の割合

得られた分布パラメータは、全ての航空機の航法精度が飛行時間の95%で ± 1 NMとなる場合である。しかし、全ての航空機が95%最低要件を満たす航法精度で飛行するという仮定は現実的ではなく、航法精度を悪く見積もり過ぎていると考える。そこで実測分布 $f(y)$ の割合が $(1-\gamma)$ 、RNAV1 の95%最低要件を満たす分布

$g(y)$ の割合が γ の分布 $h(y)$ を考える。これは次式で表せる。

$$h(y) = (1-\gamma)f(y) + \gamma g(y) \quad (28)$$

図8に $h(y)$ のイメージを示した。

6.4. 横方向重畳確率の推定

6.4.1. RNAV1 機に対応する横方向重畳確率

(28)式の $f(y)$ として実測分布の N-DE モデル ($\alpha=0.121, \sigma=0.071 \text{ NM}, \lambda=0.084 \text{ NM}$) を、 $g(y)$ として RNAV1 95%最低要件を満たす N-DE モデル ($\alpha=0.121, \sigma=0.47 \text{ NM}, \lambda=0.56 \text{ NM}$) を用いた場合を考え、(2)式を用いて横方向重畳確率 $P_y(S_y)$ を計算する。ここで、 $\lambda_y=0.032 \text{ NM}, \gamma=0.1$ とした。推定結果を表3に示す。

表3 RNAV1 機に対応する $P_y(S_y)$ の推定値 ($\gamma=0.1, \lambda_y=0.032 \text{ NM}$ の場合)

S_y [NM]	$P_y(S_y)$
5	2.0×10^{-7}
6	3.3×10^{-8}
7	5.7×10^{-9}
8	9.6×10^{-10}
9	1.6×10^{-10}
10	2.7×10^{-11}

6.4.2. RNAV5 機に対応する横方向重畳確率

(28)式の $f(y)$ として RNAV1 95%最低要件を満たす N-DE モデル ($\alpha=0.121, \sigma=0.47 \text{ NM}, \lambda=0.56 \text{ NM}$) を、 $g(y)$ として RNAV5 最低要件を満たす N-DE モデル ($\alpha=0.121, \sigma=2.4 \text{ NM}, \lambda=2.8 \text{ NM}$) を用いた場合を考え、(2)式を用いて横方向重畳確率を計算する。 $\lambda_y=0.032 \text{ NM}, \gamma=0.1$ とした。推定結果を表4に示す。

$f(y)$ として RNAV1 95%最低要件を満たすモデルを用いたのは、1990年代に航空路で行った RNAV 試行運用における横方向経路逸脱量の推定値が RNAV1 相当だったことによる^[7]。当時はまだ GPS 搭載機は飛行していなかったため、現在、このモデルを用いることは航空機の航法精度を悪く見積もることになり、従って安全目な推定になると考える。

表4 RNAV5機に対応する $P_y(S_y)$ の推定値
($\gamma=0.1$, $\lambda_y=0.032$ NMの場合)

S_y [NM]	$P_y(S_y)$
30	6.5×10^{-9}
31	4.6×10^{-9}
32	3.2×10^{-9}
33	2.2×10^{-9}
34	1.6×10^{-9}
35	1.1×10^{-9}

6.5. 最小経路間隔の推定

6.5.1. 推定に用いた仮定

衝突リスクの推定に用いた仮定を列挙する。

- 管制官の介入を考慮しない。
- レーダでの監視を前提としない。
- 当該空域周辺の考察する平行経路を除く他の経路を飛行する航空機との衝突の危険はない。
- 航空路も到着経路も横方向の航法精度は不変。
- 等価反航近接通過頻度の値は2.5 [機/飛行時間]。

6.5.2. 最小経路間隔の推定値

表5に示すパラメータを(1)式に代入して計算すると次式を得る。

$$N_{ay}=1.38 \times P_y(S_y) \quad (29)$$

更に N_{ay} は目標安全度 5×10^{-9} [件/飛行時間]より小さいという条件から次式を得る。

$$P_y(S_y) < 3.6 \times 10^{-9} \quad (30)$$

この条件を満たす S_y の最小値を表3および表4から求めると、RNAV1の場合8 NM, RNAV5の場合32 NMとなる。

表5 横方向衝突リスクモデルのパラメータ値

パラメータ	値	備考
$P_z(0)$	0.54	国際的にしばしば利用 ^[8]
$N_x^y(e)$	2.5	RVSM導入の手引き ^[9] (手引き内の値は隣接高度を飛行する航空機との近接通過頻度) 単位 [機/飛行時間]
K	1.02	航空機の平均サイズ, 平均相対速度の推定値から計算 ^[4]

上記推定値はあくまでも $\gamma=0.1$ に対する推定値である。 γ の値によりこの推定値は大きく変わるので注意を要する。

7. 考察

7.1. 本方法の適応条件

本稿で示した横方向経路逸脱量の分布の変形に関する計算方法では、航法精度の悪い航空機も良い航空機もその大きさが異なるだけで、横方向経路逸脱量の発生の要因と発生頻度は同じと暗黙に仮定している。このため、航法精度の悪い航空機は横方向にずれる要因や発生頻度が異なると考えられる場合には、この方法を用いるのは妥当ではないと考える。

7.2. γ の値

本稿では、 $\gamma=0.1$ と仮定して計算を行った。図6に示した鹿児島空港到着経路での2,298便のフライトの観測結果は $\gamma=0$ を示している。しかし、将来95%含有要件ぎりぎりの低い航法精度の航空機が飛行する可能性も否定できない。このため、本稿では大きめの値 $\gamma=0.1$ を用いた。

7.3. $N_x^y(e)$ の値

本稿では、等価反航近接通過頻度の値として2.5 [機/飛行時間]を仮定した。同一方向の一方通行平行経路などの場合は、この値はもっと低くなると予想される。等価反航近接通過頻度が本稿で用いた値より低い場合には、本稿の結果は衝突リスクの過大評価となる。従って、安全な最小経路間隔は、より小さい可能性がある。この場合、経路間隔の短縮が可能となる。いずれの場合でも、仮定した値が実際に満たされているかを定期的に確かめる必要がある。

また、交通流の制御などにより近接通過頻度を一定値以下に抑えることで、経路間隔を短縮することも可能となる場合もある。

7.4. λ の値の変動範囲

今回解析に用いた実測分布は、標本数が2,298と少なく、データの信頼性が気になる。特に今回の解析では、分布の裾部を近似するモデルパラメータ λ の値により結果が大きく変わる可能性がある。

そこで、Bootstrap 法と呼ばれる方法を用いて λ の値の変動範囲を推定した。

以下の手順で推定した。

1. Bootstrap 法に基づき実測データを無作為復元抽出して同一標本数の新たな標本を作成した。
2. 得られた標本に対し、N-DE 分布の当てはめを最尤推定法により行い、パラメータの最尤推定値を記録した。
3. 上記の操作を 5,000 回繰り返した。
4. 5,000 個のパラメータ値の内、 λ の最大値と最小値を持つパラメータセットを記録した。

表 6 に λ が最大および最小となる分布における N-DE 分布のモデルパラメータの最尤推定値を示す。参考に実測分布の場合も記載した。

表 6 λ が最大、最小となる分布におけるモデルパラメータの最尤推定値

λ 最大	λ 最小	実測分布
$\alpha=0.0845$	$\alpha=0.0939$	$\alpha=0.121$
$\sigma=0.069$ NM	$\sigma=0.069$ NM	$\sigma=0.071$ NM
$\lambda=0.106$ NM	$\lambda=0.072$ NM	$\lambda=0.084$ NM

これらのパラメータ値を(18)式に適用して同様の連立方程式を解き、RNAV1 に対する計算を 6 章と同様に行うと、 λ 最大のパラメータの場合、 $S_y=8$ NM のとき $P_y(S_y)=1.2 \times 10^{-8}$ となり、 $S_y=9$ NM のとき $P_y(S_y)=2.5 \times 10^{-9}$ となるので、(30)式と比較すると最小経路間隔の推定値は 9 NM となる。また、 λ 最小のパラメータの場合、 $S_y=6$ NM のとき $P_y(S_y)=9.9 \times 10^{-9}$ となり、 $S_y=7$ NM では $P_y(S_y)=1.4 \times 10^{-9}$ となるので最小経路間隔の推定値は 7 NM となる。

実測分布から求めた最小経路間隔の推定値は 8 NM であったが、Bootstrap 法を用いてデータの変動を考えると、楽観的には 7 NM、悲観的には 9 NM ということを示唆していると考える。

8. まとめ

本稿では RNAV 平行経路の経路間隔の推定方法を提案し、最小経路間隔の推定結果を示した。まず鹿児島空港 RNAV 到着経路をレーダ誘導なしで RNAV 運航した航空機の横方向経路逸脱量の分布を作成し、分布のモデル化を行っ

た。次にその分布に 95%最低要件を適用して分布を変形した。実測分布と変形した分布の混合型分布を考え、それを用いて衝突リスクを計算し、最小経路間隔を推定した。

鹿児島空港 RNAV 到着経路を飛行する航空機と同程度の性能を持つ航空機のなす交通流に、RNAV95%含有要件の最低要件を満たす航空機を 1 割混ぜた場合の RNAV 平行経路の最小経路間隔の推定値は次の通り。

- ・ RNAV1 経路同士の最小経路間隔 8 NM
- ・ RNAV5 経路同士の最小経路間隔 32 NM

今後の課題としては、既導入の RNAV 平行経路における近接通過頻度の値の推定などがある。

参考文献

- [1] RNAV ロードマップ 第 2 版, 国土交通省航空局, Apr. 2007.
- [2] AIR TRAFFIC SERVICES Annex 11 to the convention of International Civil Aviation, ICAO, 13th Edition, 2001.
- [3] P.G. Reich : “Analysis of Long Range Air Traffic Systems, Journal of the Institute of Navigation”, 19, Nos.1, 2 and 3, 1966.
- [4] 天井 : RNAV 到着機の横方向経路逸脱量の推定, 日本航海学会論文集, 117 号, pp.9-17, Sep. 2007.
- [5] H.Akaike : “Information Theory and an Extension of the Maximum Likelihood Principle”, 2nd International Symposium on Information Theory, Budapest, 1973.
- [6] Performance Based Navigation Manual, ICAO RNPSORSG, Working Draft 5.1-final, Mar. 2007.
- [7] 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”, 信学論(B), Vol.J78-B-II No.5, pp.335-341, May 1995.
- [8] U.S.A.: “Summary of Pacific Reduced Vertical Separation Minimum (RVSM) Safety Assessment”, ICAO RVSM TF/9-IP/2, Bangkok, January, 2001.
- [9] Manual on Implementation of a 300 m (1,000 ft) Vertical Separation Minimum between FL290 and FL410 Inclusive, ICAO Doc.9574-AN/934, second edition, 1999