RNAV 平行経路の最小経路間隔の一推定方法

天井 治*

A Methodology for Estimating the Minimum Route Spacing for RNAV Parallel Routes

Osamu AMAI

Abstract

An area navigation (RNAV) road map was prepared by the Japan Civil Aviation Bureau for effective aircraft operation and effective utilization of air space. Following the road map, RNAV routes have been implemented in Japan. RNAV is a method of navigation which permits aircraft operation on any desired flight path within the coverage of station-referenced navigation aids or within the limits of the capability of self-contained aids, or a combination of these.

This paper describes a methodology for estimating safe minimum route spacing for RNAV-approved aircraft. Radar track data of aircraft which flew on a Kagoshima RNAV standard terminal arrival route (STAR) were collected for six months for the purpose of analyzing the cross-track deviations for RNAV-approved aircraft. The distribution of cross-track deviations was estimated using this data set. A probability distribution model of it was then found. The lateral overlap probability was estimated using the empirical distribution and its deformation. Collision risk was estimated using the estimate of lateral overlap probability together with other given parameters. Comparing the estimated collision risk with the target level of safety (TLS) for the lateral dimension separation minimum, safe minimum route spacing was obtained.

As a result, in the case that the population of aircraft with poor navigation performance, i.e., barely meeting the 95% containment requirement for RNAV-approved aircraft, is assumed to be 10 percent, estimates of safe minimum route spacing are 8 nautical miles (NM) for RNAV1-approved aircraft and 32 NM for RNAV5-approved aircraft, respectively. Additionally, safe minimum route spacing which takes into account of the fluctuation of data is estimated using the Bootstrap method. The result shows that the estimated ranges of minimum route spacing are 7 NM - 9 NM for RNAV1-approved aircraft and 29 NM - 38 NM for RNAV5-approved aircraft, respectively.

Keywords: *air traffic control, safety assessment, area navigation, route spacing, collision risk model*

キーワード: 航空交通管制、安全性評価、広域航法、経路間隔、衝突リスクモデル

1. はじめに

現在、日本の上空では上空通過機を含め 1 日当たり約 4,000 便もの航空機が飛行している。混雑する航空交通の下で安全を確保するため、多くの航空機は計器飛行方式 (Instrument Flight Rule : IFR) にて航空管制官の指示に従って定められた経路を飛行する。

従来の飛行経路である 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にて、その施設の上空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等により、最短距離を飛行できない場合もあり、柔軟な経路の設定も難しかった。このため、より運航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広域航法 (Area Navigation

* 正会員 独立行政法人 電子航法研究所 (〒182-0012 東京都調布市深大寺東町 7-42-23) amai@enri.go.jp

: RNAV) 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ずに、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 (Air Traffic Control : 航空管制) 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。

空域の有効な、そして積極的な活用のため、RNAV 運航機専用の経路である RNAV 経路の複線化 (RNAV 平行経路) が計画された。これに当たり RNAV 平行経路の導入に際し、安全で効率的な RNAV 経路間隔 (最小経路間隔) の推定が必要となった。そこで、衝突リスクモデルに基づく定量的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、値を推定した。

RNAV 平行経路の最小経路間隔の推定に当たり、航空機の横方向の航法誤差 (横方向経路逸脱量) の実測分布を調べた。鹿児島空港の RNAV 到着経路を飛行した航空機の航跡データを解析し、横方向経路逸脱量の分布を推定した⁽³⁾。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、安全かつ効率的な経路間隔を推定した。

RNAV 平行経路の最小経路間隔については、文献(4)～(6)等に値が見られる。文献(3)では、危険因子分析が行われ、またリアルタイムシミュレーションに基づく管制官の介入の成功率なども考慮して解析が行われている。文献(5)では、横方向経路逸脱量の分布の推定に極値理論が用いられている。本論文では、実測データに良く当てはまるモデルを変形して、精

度の悪い航空機の割合を考慮したモデルを提案する。また、Bootstrap 法を用いてデータ変動を考慮した最小経路間隔の推定結果を示す。

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。次いで文献(3)で紹介した 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、精度の悪い航空機を考慮したモデルについて述べる。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 Bootstrap 法を用いた最小経路間隔の区間推定結果を示す。

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 (国際民間航空条約第 11 付属書⁽²⁾)」と定義される。

Fig.1 Concept of RNAV route

2.2 従来の航空路と RNAV ルート⁽⁷⁾

Fig.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 VOR や DME (Distance Measuring Equipment : 距離測定装置) 等の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で経路が定まるため、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。

3. 衝突リスク

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⁽⁸⁾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、単位飛行時間あたりに両機(2つの直方体)が三次元的に重なる(衝突する)回数の期待値を推定する。これを衝突リスクと定義する。

3.2 横方向の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。

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

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)

$N_x^v(e)$: 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(3)を参照のこと。

(1)式では、縦、横、高さの各方向の事象を独立と仮定し、横および高さ方向で重なる確率および進行方向ですれ違い頻度をそれぞれ推定し、それらの積

として衝突リスク N_{ay} を求めている。

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 L_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。

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

$f(y)$ 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。

Fig.2 Geometric configuration of cross track deviations

4.2 横方向重畳確率の計算方法

本論文では、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 p 、経度 l)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 $P (R_E + h_p, p, l)$ から 2 つのウェイポイント $WP1 (R_E, p_1, l_1)$ 、 $WP2 (R_E, p_2, l_2)$ および地球の中心 $(0, 0, 0)$ を含む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。Fig.2 に幾何学的関係を示した。垂線の足を X として図示した。

まず、レーダー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(方位角) θ 、気圧高度 h_p) を球面三角法にて位置座標に変換する。

$$p = \sin^{-1}(\sin p_0 \cos \Phi + \cos p_0 \sin \Phi \cos \theta) \quad (3)$$

$$l = l_0 + \sin^{-1} \left[\frac{\sin \theta \sin \Phi}{\cos p} \right] \quad (4)$$

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

ここで、 $(R_E + h_0, p_0, l_0)$ はレーダー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

$$x = (R_E + h_p) \cos p \cos l \quad (7)$$

$$y = (R_E + h_p) \cos p \sin l \quad (8)$$

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

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

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

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

$$x_i = R_E \cos p_i \cos l_i \quad (13)$$

$$y_i = R_E \cos p_i \sin l_i \quad (14)$$

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

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。

Fig.3 Distribution of Cross Track Deviations of aircraft flying RNAV arrival route obtained from 1 Oct. 2005 to 15 Mar. 2006

N, skew., kurt. and s.d. stand for sample size, skewness, kurtosis and standard deviation, respectively.

5. 横方向経路逸脱量の解析

RNAV 機の横方向経路逸脱量の実測分布を得るため、鹿児島空港の RNAV 到着経路をレーダー誘導な

しで RNAV により飛行した航空機を観測対象にして、鹿児島空港の空港監視レーダー (Airport Surveillance Radar : ASR) のデータを解析した。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ー情報処理システム (Automated Radar Terminal System : ARTS) のデータ、飛行計画情報および運航票である。こちらについても詳細は文献(3)を参照のこと。

Fig.3 に横方向経路逸脱量の相対度数分布を示した。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 (分布の 95% 含有区間) は $[-0.13$ NM, 0.17 NM] であった。

6. 分布モデルの推定

横方向の衝突リスクの計算に最も重要なパラメータは横方向重畳確率であり、この値は横方向経路逸脱量の裾部の値により大きく変わる。 10^{-9} オーダーの衝突リスクを推定するため、ここでは実測分布を外挿するための分布の当てはめを行う。

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。

Table 1 Probability density function models used for fitting the distribution of the cross track deviations

Model	Probability density function
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	$(1-\alpha)N(y \sigma) + \alpha DE(y \lambda)$ $0 < \alpha < 1$

6.1 当てはめた分布モデル

Table 1 に当てはめに使用した分布モデルを示した。N は正規 (Normal または Gauss) 分布、DE は両側指数 (Double Exponential または Laplace) 分布を表す。N-N、N-DE はそれぞれ、2 つの正規分布の

混合型分布および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。

6.2 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)を区間が十分小さくなるまで繰り返す。

Table 2 Estimates of model parameters

Model	Estimated Parameters	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 $\sigma_2=0.129$ NM	-5313 (0)
N-DE	$\alpha=0.121$ $\sigma=0.071$ NM $\lambda=0.084$ NM	-5304 (9)

AIC stands for Akaike information criterion.

The value in () of AIC column is relative value.

Fig.4 Result of model fitting

6.3 当てはめ結果

Table 2 に各モデルのパラメータの推定値を示す。AIC (Akaike Information Criterion) は赤池情報量基準⁽⁹⁾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。

Fig.4 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。Table 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。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。

しかし、Fig.4 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。

7. 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

7.1 95%含有要件

RNAV X は、「総飛行時間の 95%の時間を $\pm X$ NM 以内で飛行できる能力」(95%含有要件)と定義されている⁽¹⁰⁾。これは次式で表せる。

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

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）。

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

7.2 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。以下を仮定する。

- 1) 考察する分布の α は、観測値から得られた分布モデルの α と同一

2) σ と λ の比も観測値から得た分布モデルと同一

RNAV1 の場合(18)-(21)式の連立方程式が成立する。

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

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

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

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

この連立方程式の解を Table 3 に示す。

Table 3 Parameter values of considered distributions

Model parameter	α	σ [NM]	λ [NM]
Empirical	0.121	0.071	0.084
RNAV1	0.121	0.47	0.56
RNAV5	0.121	2.4	2.8

7.3 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。

$$h(y) = (1-\gamma)f(y) + \gamma g(y) \quad (22)$$

Fig.5 に $h(y)$ のイメージを示した。

Fig.5 Concept of $h(y)$

7.4 横方向重畳確率の推定

7.4.1 RNAV1 機に対応する横方向重畳確率

(22)式の $f(y)$ として実測分布の N-DE モデル ($\alpha=0.121$, $\sigma=0.071$ NM, $\lambda=0.084$ NM) を、 $g(y)$ として RNAV1 の95%最低要件を満たす N-DE モデル ($\alpha=0.121$, $\sigma=0.47$ NM, $\lambda=0.56$ 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、 $\lambda_y=0.032$ NM, $\gamma=0.1$ とした。推定結果を Table 4 に示す。

Table 4 Lateral overlap probability $P_y(S_y)$ calculated from the mixed distribution obtained from the RNAV1 containment requirement ($\gamma=0.1$)

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}

7.4.2 RNAV5 機に対応する横方向重畳確率

(22)式の $f(y)$ として RNAV1 での95%最低要件を満たす N-DE モデル ($\alpha=0.121$, $\sigma=0.47$ NM, $\lambda=0.56$ NM) を、 $g(y)$ として RNAV5 での95%最低要件を満たす N-DE モデル ($\alpha=0.121$, $\sigma=2.4$ NM, $\lambda=2.8$ NM) を用いた場合を考え、同様に横方向重畳確率を計算する。推定結果を Table 5 に示す。

$f(y)$ として RNAV1 での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⁽¹¹⁾。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、従って安全性を重視した推定になると考える。

Table 5 Lateral overlap probability $P_y(S_y)$ calculated from the mixed distribution obtained from the RNAV5 containment requirement ($\gamma=0.1$)

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}

7.5 最小経路間隔の推定

7.5.1 推定に用いた仮定

以下に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。
- レーダー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]。

7.5.2 最小経路間隔の推定値

Table 6 に示すパラメータを(1)式に代入して変形すると次式を得る。

$$N_{cy}=1.49 \times P_y(S_y) \quad (23)$$

更に N_{cy} 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。

$$P_y(S_y) < 3.4 \times 10^{-9} \quad (24)$$

この条件を満たす S_y の最小値を Table 4 および Table 5 から求めると、RNAV1 の場合 8 NM、RNAV5 の場合 32 NM となる。文献(5)には、RNAV1 の場合の最小経路間隔の推定値として 7 NM の記載がある。今回の推定結果は、これと比べて若干大きめの値となっている。

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。因みに $\gamma=1$ の場合の推定値は、RNAV1 の場合 9 NM、RNAV5 の場合 40 NM となる。

Table 6 Other parameter values of collision risk model in the lateral dimension

Parameter	Value	Data source
$P_z(0)$	0.54	Ref.(12)
$N_x^y(e)$	2.5	Ref.(13)
K	1.1	An estimate using average aircraft sizes and average relative speeds

8. 考察

8.1 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。

8.2 γ の値

本稿では、 $\gamma=0.1$ と仮定して計算を行った。Fig.3 に示した鹿児島空港 RNAV 到着経路での 2,298 便の飛行便の観測結果は $\gamma=0$ 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

では大きめの値であるかもしれない $\gamma=0.1$ を用いた。

8.3 $N_x^y(e)$ の値

本稿では、等価反航近接通過頻度 $N_x^y(e)$ 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り、安全な最小経路間隔は、より小さい可能性がある。この結果、経路間隔の短縮が可能となるかもしれない。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どう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、衝突リスクを軽減し、経路間隔を短縮することが可能となる場合もある。

8.4 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、データの信頼性に不安がある。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。Bootstrap 法は、無作為復元抽出によりデータの抽出を繰り返し、推定量の偏りや分散、推定量の分布などを推定する手法で、一般に計算機を使って実行される。

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うち、 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。

Table 7 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。

これらのパラメータ値を(17)式に代入して同様の連立方程式を解き、RNAV1 に対する計算を行うと、 λ 最大のパラメータの場合、 $S_y=9$ NM 以上のとき、(24)式が満たされ、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も同様にして最小経路間隔の推定値は 7 NM となる。

Table 7 Maximum likelihood estimator of the model parameters of N-DE distributions with minimum λ value and maximum λ value among 5,000 parameter sets

λ min.	Empirical distribution	λ max.
$\alpha=0.0939$ $\sigma=0.069$ NM $\lambda=0.072$ NM	$\alpha=0.121$ $\sigma=0.071$ NM $\lambda=0.084$ NM	$\alpha=0.0845$ $\sigma=0.069$ NM $\lambda=0.106$ NM

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える。

同様に RNAV 5 の場合を計算すると、 $\gamma=0.1$ の場合、 λ 最小で 29 NM、 λ 最大で 38 NM となった。Table 8 に数値をまとめる。

Table 8 Estimates of minimum route spacing using Bootstrap method.

RNAV type	Estimates of minimum route spacing		
	λ min.	Empirical	λ max.
RNAV 1	7 NM	8 NM	9 NM
RNAV 5	29 NM	32 NM	38 NM

8.5 両側指数分布の場合

国際民間航空機関の管制間隔と空域安全性パネルでは、RNAV 機に対する横方向経路逸脱量の分布として簡単のため両側指数分布のみであると仮定している。両側指数分布を(4)式に代入し、 $X=1$ (RNAV 1) として計算すると、 $\lambda=0.334$ NM となる。同様に $X=5$ (RNAV 5) では、 $\lambda=1.67$ NM となる。

これらのパラメータを用いて最小経路間隔を推定すると、RNAV 1 の場合は 7 NM、RNAV 5 の場合は 30 NM となる。Table 9 に結果をまとめる。

実測データに基づいて N-DE 分布で推定した場合よりも、少し小さな推定値となっている。

Table 9 Estimates of minimum route spacing in case of DE distribution

RNAV type	Value of λ [NM]	Estimates of minimum route spacing
RNAV 1	0.334	7 NM
RNAV 5	1.67	30 NM

8.6 本手法の有効性

本手法の開発は、実測分布からは情報が得られない精度の悪い航空機の精度をどのように見積もるかを考えるところから始まった。実測分布のモデルの当てはめ結果からは、管制間隔と空域安全性パネルで仮定されている両側指数分布よりも裾の長い分布 (N-DE 分布) の方が良く当てはまることが分かった。

精度の悪い航空機のみが飛行していると考えことは、安全性を重視した推定にはなるが、現実的ではないと考えた。そこで、精度の悪い航空機と良い航空機の割合を考慮できるようにした。実際にその割合を調べることは難しいため、本報告では精度の悪い航空機の割合は 1 割と仮定して、最小経路間隔の推定を行った。

RNAV 1 平行経路における最小経路間隔の推定結果を他の方法と比べてみると、文献(5)や両側指数分布を仮定した場合には 7 NM であるのに対し、8 NM と若干大きめの推定値になった。これは実測分布が両側指数分布よりも裾の長い分布であることを考えると妥当な結果であると考ええる。但し、より適切なモデルの当てはめを行うためには、中心部が正規分布で裾部が一般化ラプラス (Generalized Laplace) 分布である分布で当てはめを行うことが有効と考える。

また、何らかの方法で精度の悪い航空機の割合の現実的な値 (もしくは納得できる値) が推定できれば、過大評価を避けられ、より有効な推定手法になると考える。

9. 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 到着経路をレーダー誘導なしで RNAV 運航した航空機の横方向経路逸脱量の分布を作成し、分布をモデル化した。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、衝突リスクは目標安全度よりも小さいという条件下で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である。

- 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

Bootstrap 法を用いてデータの変動範囲を考えた

結果は次のようになった。

- ・ RNAV1 経路同士の最小経路間隔 7～9 NM
- ・ RNAV5 経路同士の最小経路間隔 29～38 NM

今後の課題としては以下のようなものがある。

- (1) 仮定の検証。例えば、航空路も到着経路も横方向の航法精度は不変など。
- (2) 正規分布と両側指数分布の間の値を取れる分布である一般化ラプラス分布による当てはめ（正規分布と一般化ラプラス分布の混合型分布）

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および航空局の関係各位に感謝いたします。

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) 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.
- (4) DNV, "Hazard Analysis of Route Separation Standards", Report for EUROCONTROL, Revision 3, September 1997
- (5) P. Brooker, "P-RNAV, Safety Targets, Blunders and Parallel Route Spacing, *Journal of Navigation*, 57, No.3, pp.371-384, September 2004
- (6) Ed. Smith, "Safety assessment of RNP1- RNAV Route Spacing", ICAO SASP- WG/WHL/8-WP11, Rio de Janeiro, Nov. 2005
- (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) H.Akaike, "Information Theory and an Extension of the Maximum Likelihood Principle", 2nd International Symposium on Information Theory, Budapest, 1973.
- (10) Performance Based Navigation Manual, ICAO RNPSORSG, Working Draft 5.1-final, Mar. 2007.
- (11) 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.
- (12) U.S.A.: "Summary of Pacific Reduced Vertical Separation Minimum (RVSM) Safety Assessment", ICAO RVSM TF/9-IP/2, Bangkok, January, 2001.
- (13) 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

質疑応答

藤坂貴彦（東京海洋大学）：

研究の背景、目的である航空機の運航効率を上げるには、航空路内での航空機間隔を短くする今回のご検討の効果と目的地（空港）の滑走路上の離着陸間隔を短くすることを比較すると、その寄与の割合はどうなっているのでしょうか？

天井 治：

残念ながら具体的な数値は把握しておりません。

空港での離着陸間隔がボトルネックになることは十分承知していますが、航空路もシビアなため、RNAV 平行経路の設定が必要になっていると考えます。

久保田 崇（大島商船高等専門学校）：

RNAV 経路導入に際して最小経路間隔に関する基準は有ったのでしょうか？

天井 治：

従来の VOR 経路に関しては経路間隔の基準値はあったはずですが、RNAV 平行経路に関する基準は、少なくとも日本にはございませんでしたので、今回推定致しました。

海外ではいくつかの推定例があるのを存じています。例えば RNAV1 では最小経路間隔 7 NM の記載が見つかります。