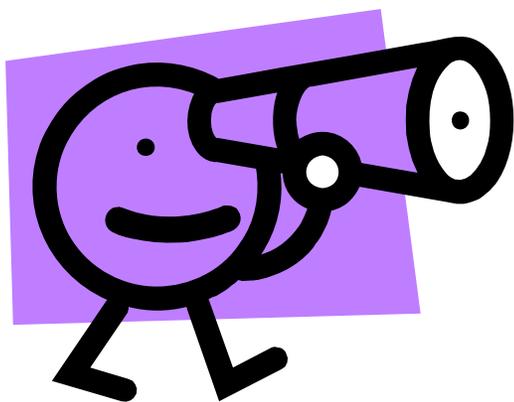


広域航法運航に対する 安全性評価のための一手法

航空交通管理領域 天井 治



研究の背景

背景

増大する航空交通量への対応

航空機の運航効率の向上
環境・騒音等を考慮した柔軟な経路

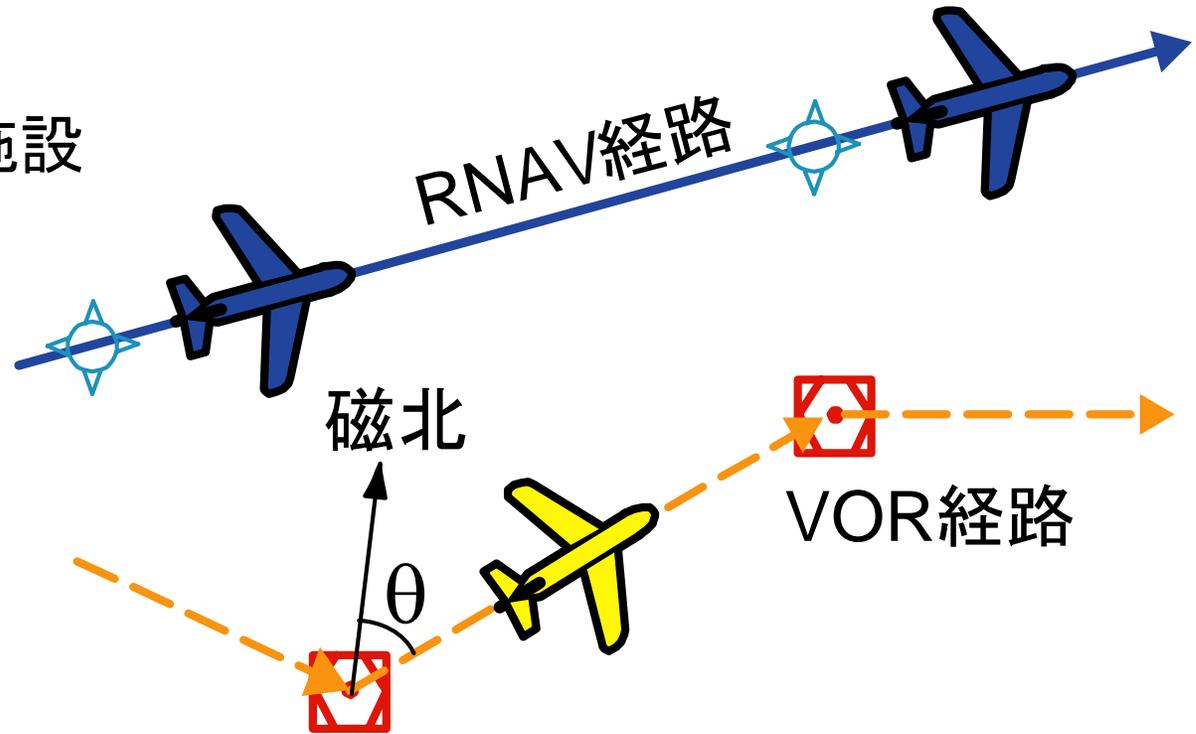
RNAV (Area Navigation: 広域航法)

航空局ではRNAVロードマップを作成
積極的なRNAV経路の導入

RNAVの概念

☐ ● 航行援助施設

✧ Waypoint



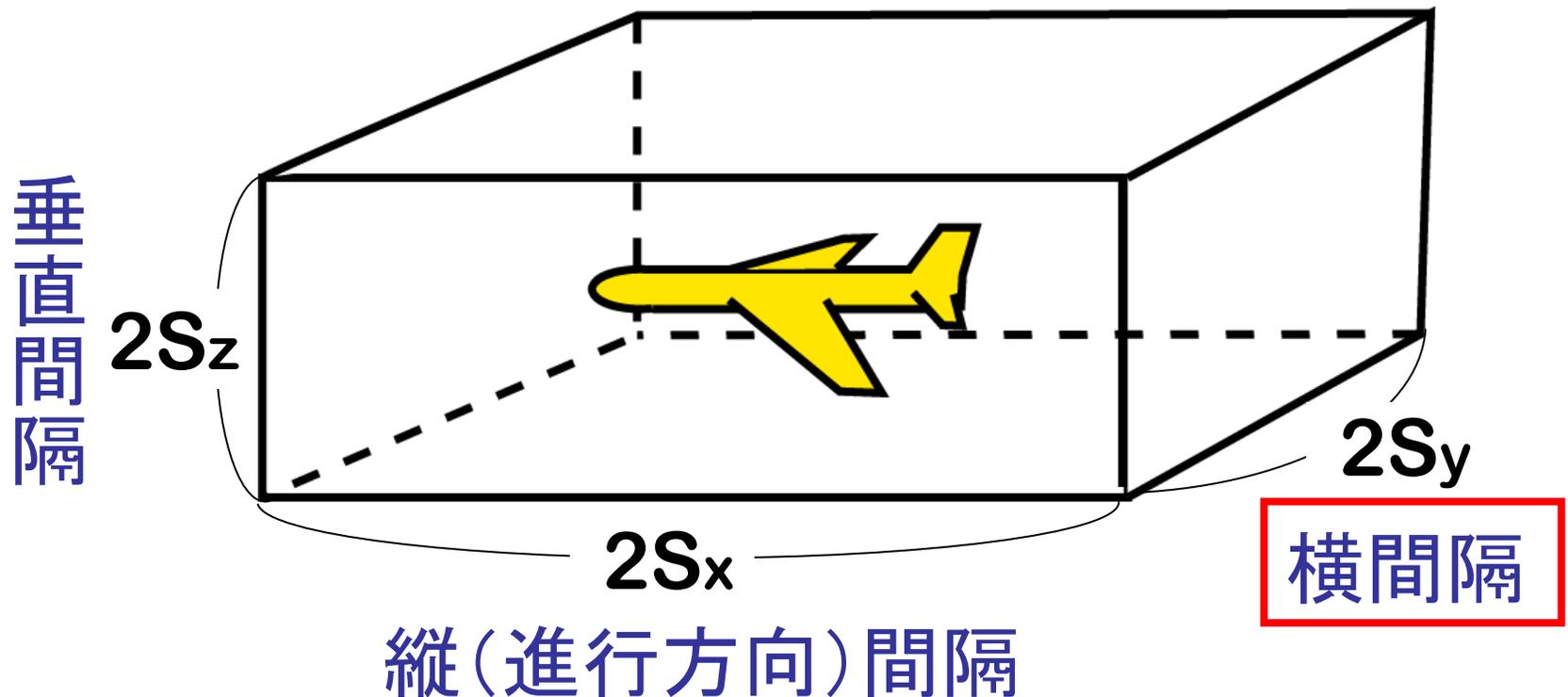
複数の機上センサーの情報から位置を算出

航法援助施設の位置に制約されない柔軟なルートの設定が可能

管制間隔

安全で効率的な航空機の運航

管制間隔の基準



安全性の向上→管制間隔の増大
運航効率の向上→管制間隔の短縮



安全性を保ちつつ、
管制間隔をどこまで縮められるか？

安全性評価の必要性

国際民間航空条約 第11付属書
(Annex11)「航空交通サービス」

ATCシステムの安全性に関わる重要な変更は、安全性の評価により安全性の許容レベルが満たされることが示され、そして、利用者の意見を聞いた後で行われるべきである。

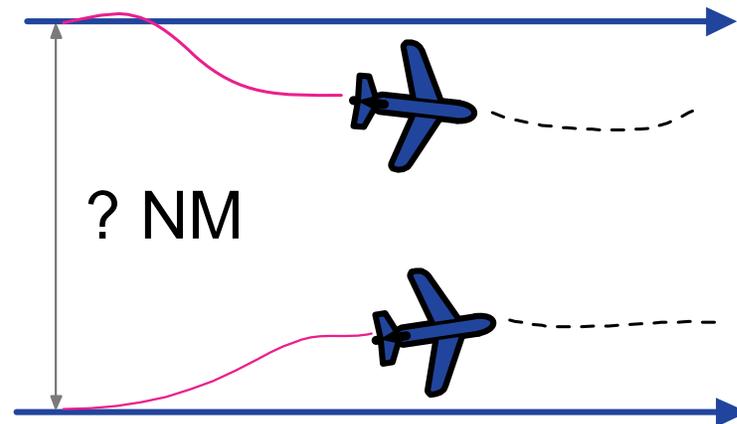
更に、適当な時期にその安全性のレベルが満たされ続けているかを確認するべきである。

RNAV平行経路の導入

RNAV経路の安全で効率的な経路間隔
(最小経路間隔)の推定が必要



- 最小経路間隔の推定方法を考案
- 幾つかの仮定の下でRNAV1およびRNAV5における経路間隔を衝突リスクモデルにより推定

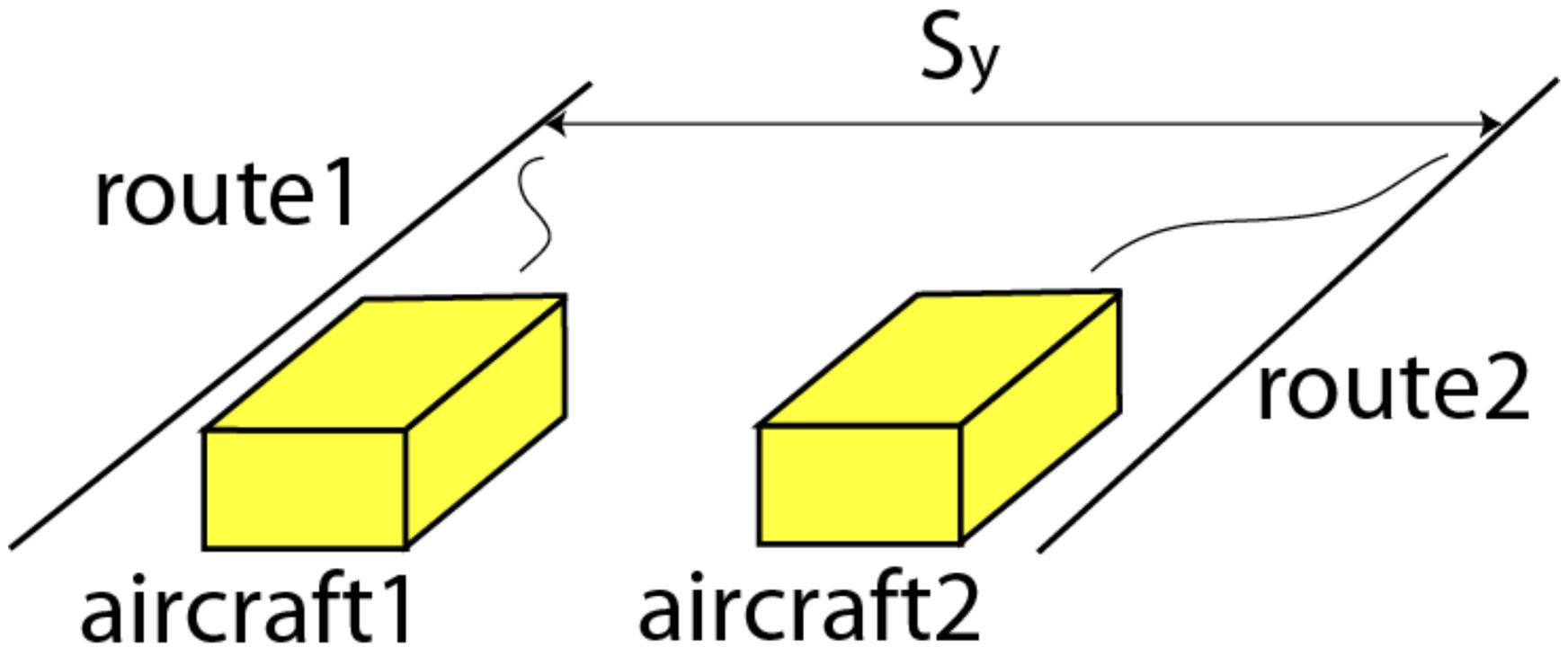


内容

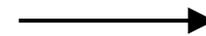
1. 研究の背景(RNAV)
2. 衝突リスクモデル(定量的安全性評価)
3. RNAV機の横方向航法誤差分布
4. RNAV経路の**最小経路間隔**の推定
 - 4.1 **RNAV95%含有要件**
 - 4.2 **精度の悪い航空機の割合**
5. 考察(Bootstrap法)
6. まとめ

衝突リスクモデル

衝突リスクモデルの概念



横方向で重なる & 垂直方向で重なる
& 進行方向で重なる



衝突

横方向衝突リスク

横間隔の喪失により起こる航空機衝突事故件数の
単位飛行時間あたりの期待値(1衝突=2事故)

[件/飛行時間]

$$N_{ay}(o+s) = P_z(0) P_y(S_y) N_x^y(e) K$$

進行方向
近接通過頻度

横方向重畳確率 横方向

垂直方向重畳確率
高さ方向

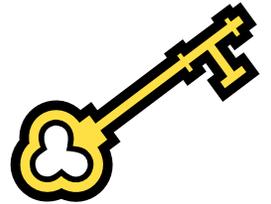
目標安全度

(Target Level of Safety: TLS)

衝突リスクの最大許容値

横方向衝突リスクに対するTLS

5×10^{-9} [件／飛行時間]



衝突リスクの推定値 < TLS



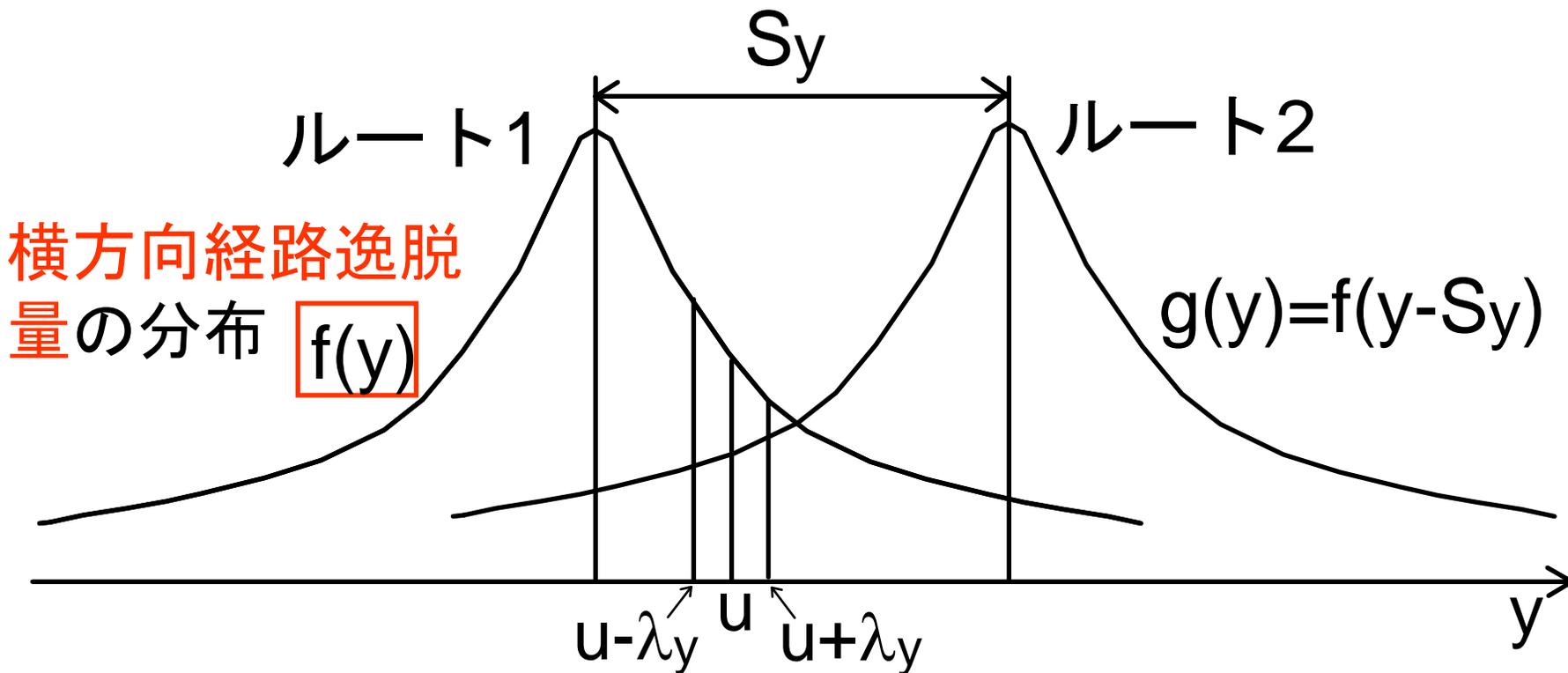
安全と見なす



横方向重畳確率

$$P_y(S_y) = \int_{-\infty}^{\infty} f(u) \int_{u-\lambda_y}^{u+\lambda_y} f(y - S_y) dy du$$

S_y : 管制間隔基準、 λ_y : 航空機の平均幅

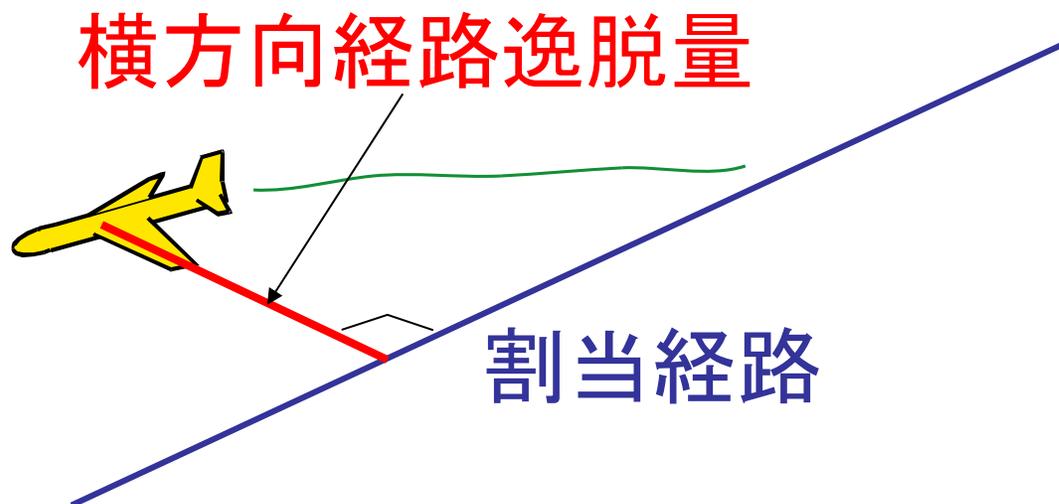


RNAV機の 横方向経路逸脱量の 推定

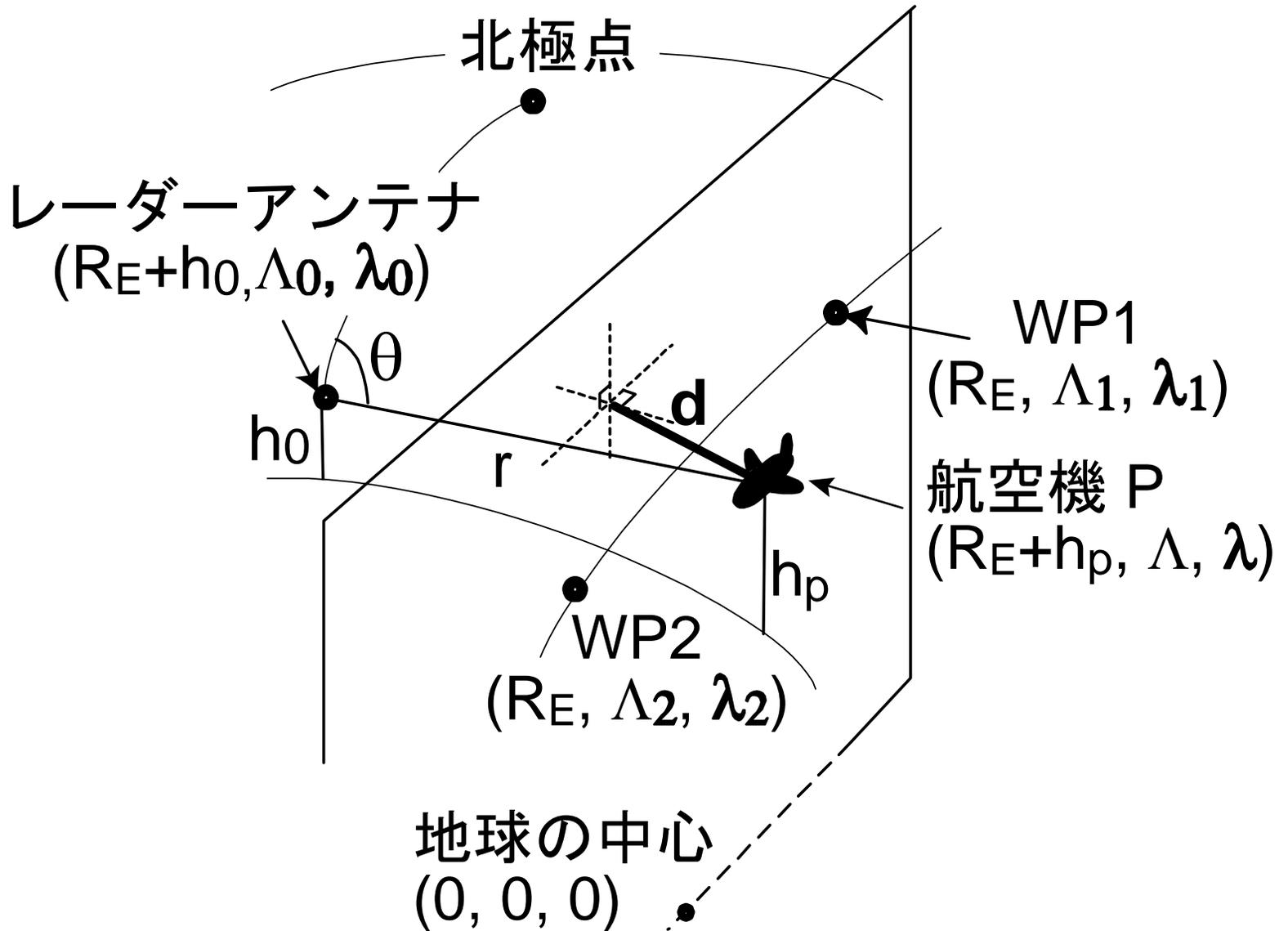
横方向経路逸脱量

割当経路の中心線上を飛行しようとしている
航空機の中心線からの横方向のずれ

航法誤差や計器の故障、人的過誤等が原因



横方向経路逸脱量dの幾何学的関係



観測対象

鹿児島空港RNAV到着経路をレーダ誘導なしでRNAVで飛行した航空機

鹿児島空港ARTSデータ

2005年10月1日～2006年3月15日

データ取得時刻

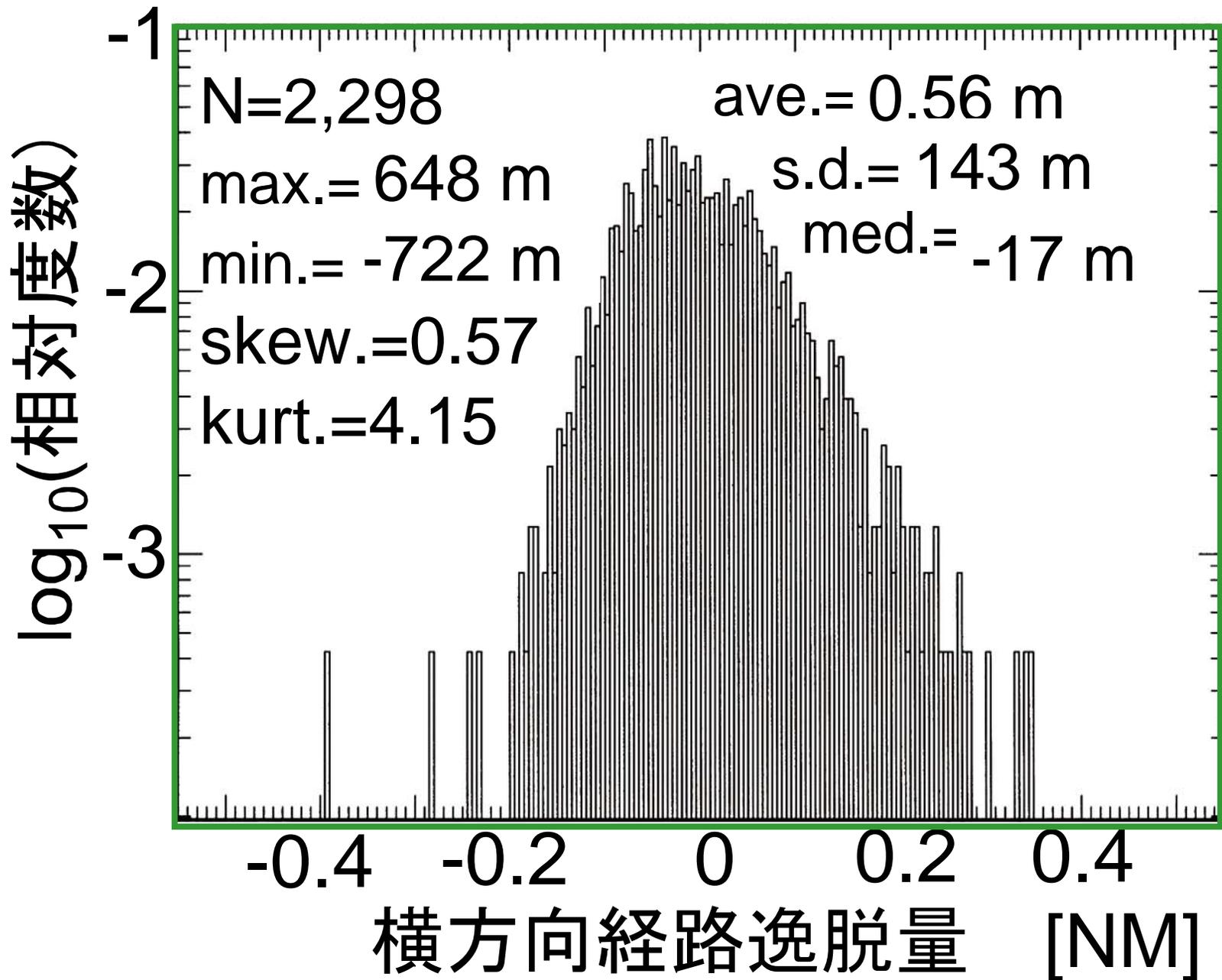
ASRによる航空機的位置情報(r,q,h)

コールサイン、機種、識別符号

RNAV飛行の有無、レーダ誘導の有無等は**運航票**により調査

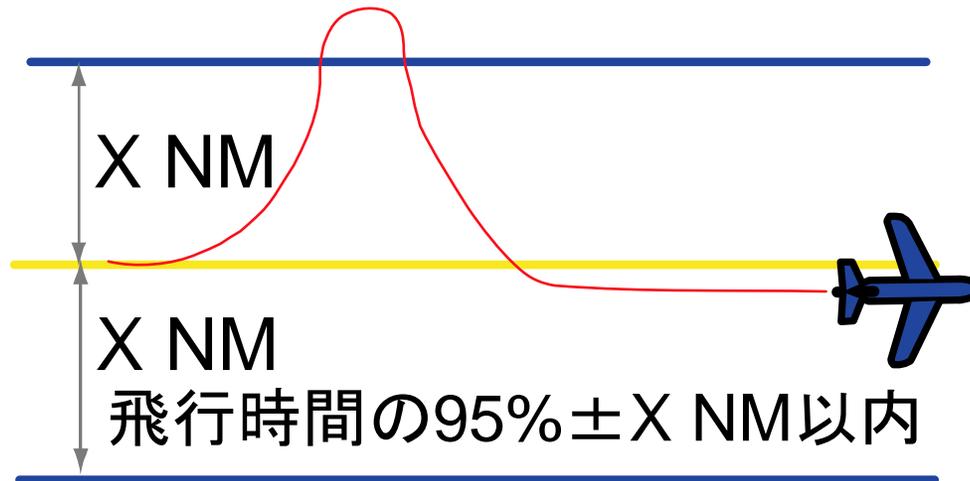
誤差の要因

- ・レーダ設置位置の誤差 最大21.3m(計算)
- ・レーダの測角、測距系のバイアス誤差
磁北修正値は、 6.17° W 固定
- ・レーダの測角、測距系のランダム誤差
→ 航跡の平滑化により低減



RNAV X相当範囲

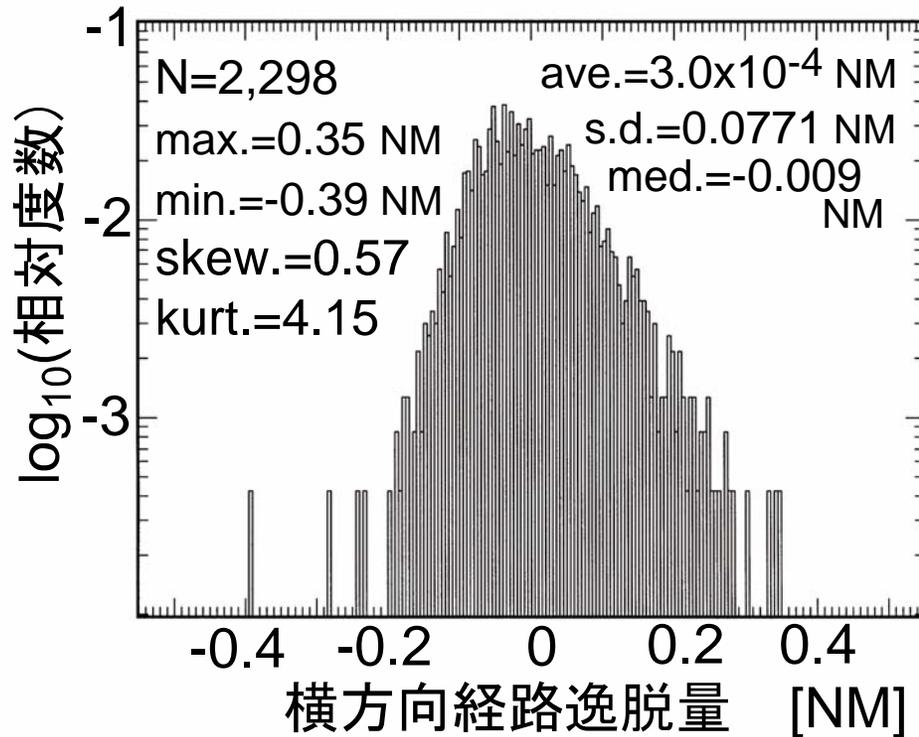
総飛行時間の95%の時間を
±X NM以内で飛行できる能力→**RNAV X**



得られた分布のRNAV Xに相当する範囲(分布の95%含有区間)は[-0.13 NM, 0.17 NM]。

モデルの当てはめ

横方向重畳確率の推定 ↓ 分布の裾部の情報重要

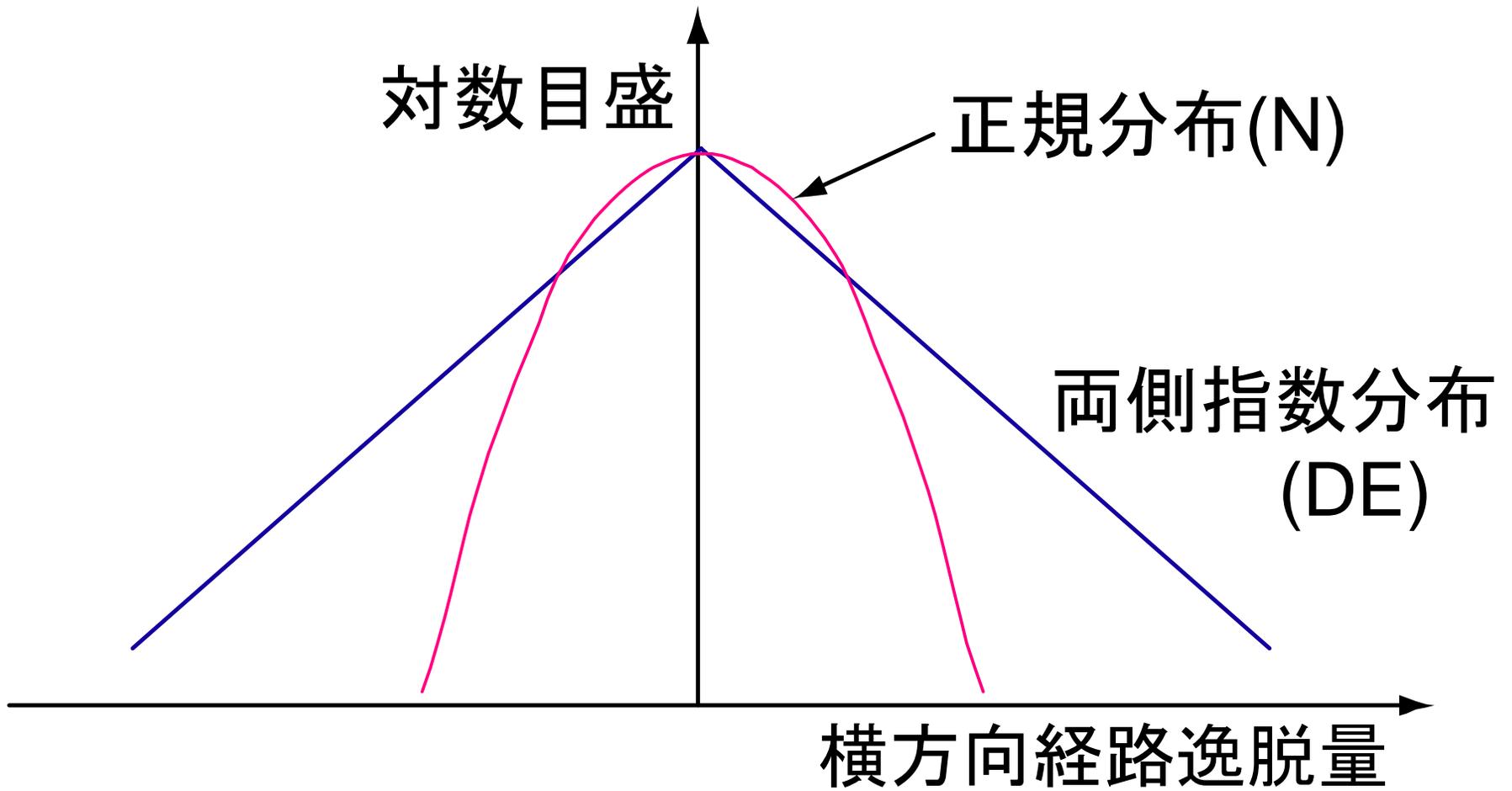


最大値0.35 NM、
最小値-0.39 NM
で、これより裾の
情報は得られず。

裾部の頻度の推定値を得るため、
当てはめを行い分布モデルを推定

当てはめたモデル

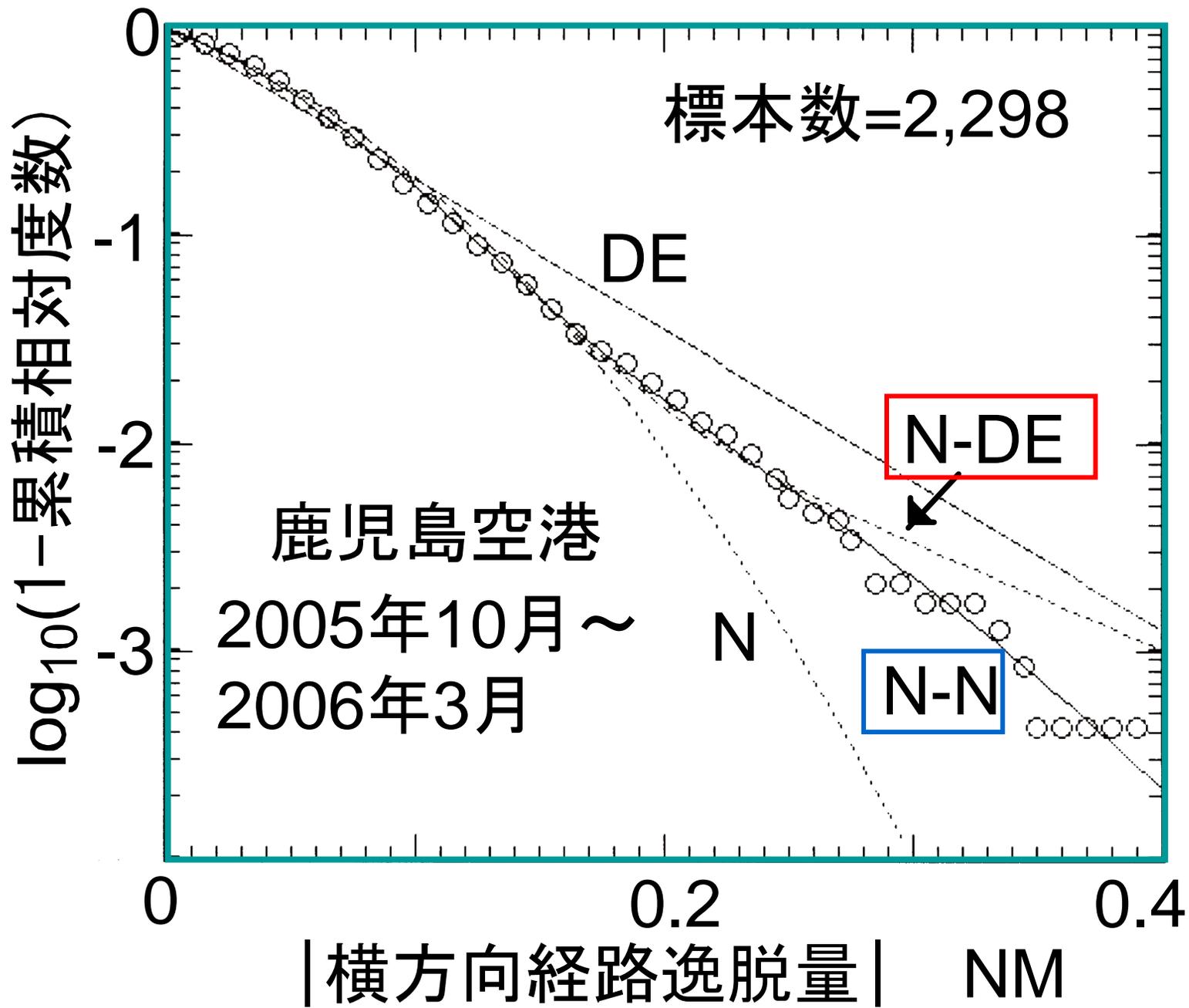
モデル	確率密度関数
N (正規分布)	$\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{y^2}{2\sigma^2}} \equiv N(y \sigma)$
DE (両側指数分布)	$\frac{1}{2\lambda} e^{-\frac{ y }{\lambda}} \equiv DE(y \lambda)$
N-N (2つの正規分布の混合型分布)	$(1 - \alpha)N(y \sigma_1) + \alpha N(y \sigma_2)$ $0 < \alpha < 1$
N-DE (正規分布と両側指数分布の混合型分布)	$(1 - \alpha)N(y \sigma) + \alpha DE(y \lambda)$ $0 < \alpha < 1$



正規分布と両側指数分布の概要

モデルの当てはめ結果

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 $\sigma_2=0.13$ NM	-5313 (0)
N-DE	$\alpha=0.121$ $\sigma=0.071$ NM $\lambda=0.084$ NM	-5304 (9)



RNAV経路の 最小経路間隔の推定

RNAV到着機の横方向経路逸脱量の分布

標本数 2,298便

次のように考える。

- ・逸脱は全て通常の航法誤差による。
- ・衝突の原因となる大きな逸脱は非観測。

大きな逸脱を考慮した横方向経路逸脱量の分布の推定方法を考案

RNAV X (95%含有要件)
総飛行時間の95%の時間を
±X NM以内で飛行できる能力

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

95%含有要件をぎりぎり満たす航法
精度の場合は次のように表せる
(95%最低要件)。

$$0.95 \equiv \int_{-X}^X f(y) dy$$

鹿児島空港にて観測された分布を用いて、**95%最低要件を満足**する分布を考える。

α 固定、 σ と λ の比固定と仮定し、**RNAV1**の場合を計算。

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

$$\alpha = 0.121$$

$$\lambda = 1.19 \sigma$$

$$X = 1 \text{ NM}$$

この連立方程式を解くと

$$\alpha=0.121$$

$$\sigma=0.47 \text{ NM}$$

$$\lambda=0.56 \text{ NM}$$

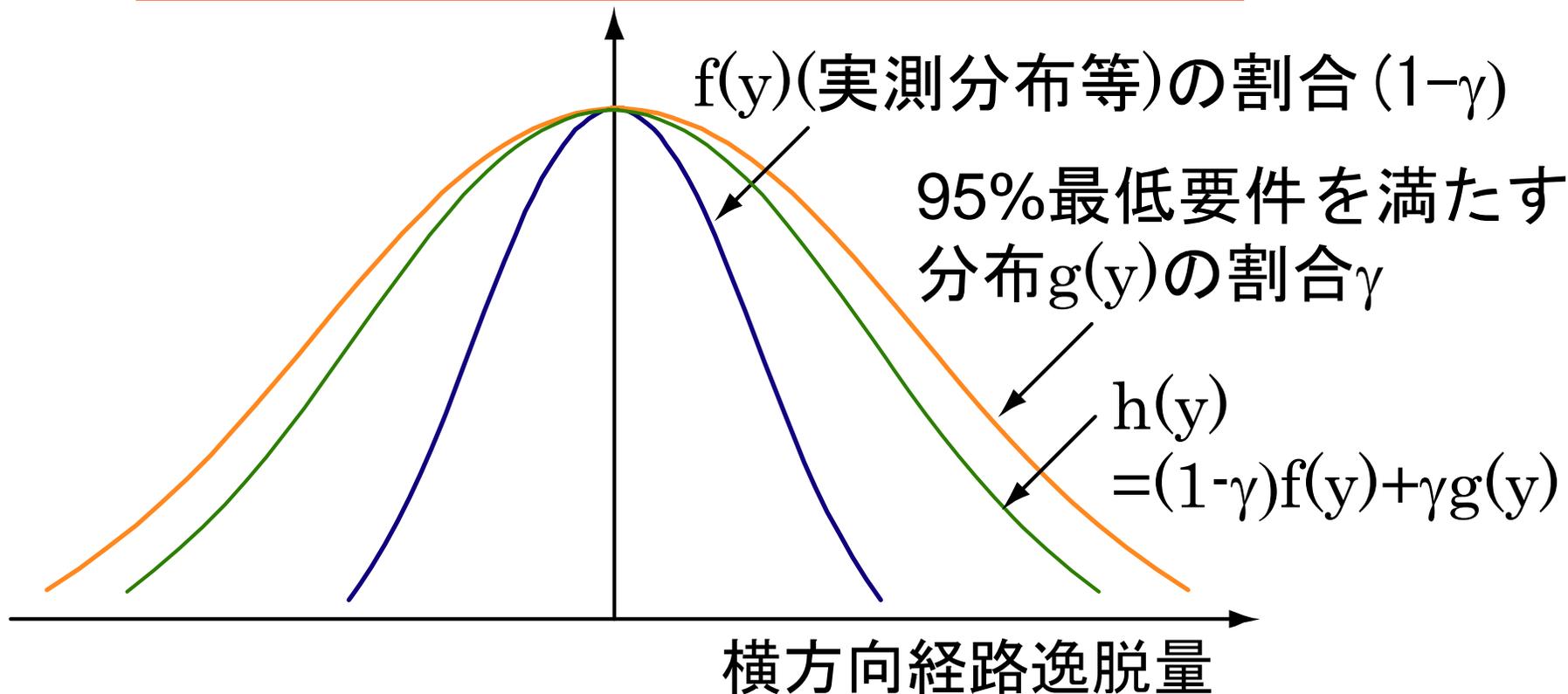
得られた分布パラメータは、全ての航空機の航法精度が、飛行時間の95%で±1NMとなる場合のもの。

このような状態は現実的ではなく過大評価。

精度の悪い航空機の 割合の考慮

実測分布 $f(y)$ の頻度 $(1-\gamma)$ 、RNAV1 の95%最低要件を満たす分布 $g(y)$ の頻度 γ の分布を考える。

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



次式より横方向重畳確率 $P_y(S_y)$ を計算

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

$\lambda_y=0.032\text{NM}$ とし、 $\gamma=0.1$ と仮定。

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

$f(y)$: 実測分布のN-DEモデル

$$\alpha=0.121, \sigma=0.071 \text{ NM}, \lambda=0.084 \text{ NM}$$

$g(y)$: RNAV1最低要件を満たすN-DEモデル

$$\alpha=0.121, \sigma=0.47 \text{ NM}, \lambda=0.56 \text{ NM}$$

RNAV1対応機に対する横方向重畳確率 $P_y(S_y)$ の推定値 ($\gamma=0.1$ 、 $\lambda_y=0.032\text{NM}$)

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}

仮定

- ・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要因と発生頻度は同じ

航法精度の悪い航空機の場合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。

γ の値

$\gamma=0.1$ は、95%最低要件を満たすフライト1割、実測分布と同等の航法精度のフライト9割の場合。

約2,300便のフライトの観測結果は $\gamma=0$ 。

但し、その様な航法精度のフライトも否定できないため、大きめかもしれないが仮に $\gamma=0.1$ とした。

最小経路間隔の推定

推定に用いた仮定 (1)

- 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変わらない。

推定に用いた仮定 (2)

- 等価反航近接通過頻度は、2.5 [機/飛行時間]と仮定。
- 95%最低要件を満たす分布の割合 γ の値は0.1 (1割)と仮定。

$$N_{ay}(o + s) = P_z(0) P_y(S_y) N_x^y(e) K$$

その他のパラメータ

- $P_z(0) = 0.54$

(国際的にしばしば利用されている値)

- $N_x^y(e) = 2.5$ [機 / 飛行時間]

(RVSM導入の手引き(Doc 9574)の値)

- $K = 1.02$

(航空機の平均サイズ、平均相対速度の推定値から計算)

目標安全度(衝突リスクの最大許容値)

5×10^{-9} [件/飛行時間]

$$N_{ay} = 1.38 \times P_y(S_y) \leq 5 \times 10^{-9}$$

$$P_y(S_y) \leq 3.6 \times 10^{-9}$$

この式を満たす最小の S_y が最小経路間隔

S_y が8NM以上なら不等式を満たす。

RNAV1の最小経路間隔の推定値 **8NM**

$\gamma = 0.1$ での値

RNAV1対応機に対する横方向重畳確率 $P_y(S_y)$ の推定値 ($\gamma=0.1$ 、 $\lambda_y=0.032\text{NM}$)

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}

RNAV5対応機に対する横方向重畳確率 $P_y(S_y)$ の推定値 ($\gamma=0.1$ 、 $\lambda_y=0.032\text{NM}$)

S_v [NM]	$P_v(S_v)$
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}

$$P_y(S_y) \leq 3.6 \times 10^{-9}$$

S_y が32NM以上なら不等式を満たす。

RNAV5の最小経路間隔の推定値 **32NM**

$\gamma = 0.1$ での値

$\gamma = 1$ の場合の最小経路間隔の推定値

RNAV1 **9 NM**

RNAV5 **40 NM**

等価反航近接通過頻度 $N_x^y(e)=2.5$

- 同一方向の**一方通行**平行経路の場合など、近接通過頻度が2.5 [機／飛行時間]より低くなる場合には、最小経路間隔を縮めることが可能な場合あり。
- いずれの場合も、この値が満たされているかどうかを定期的に確かめる必要あり。

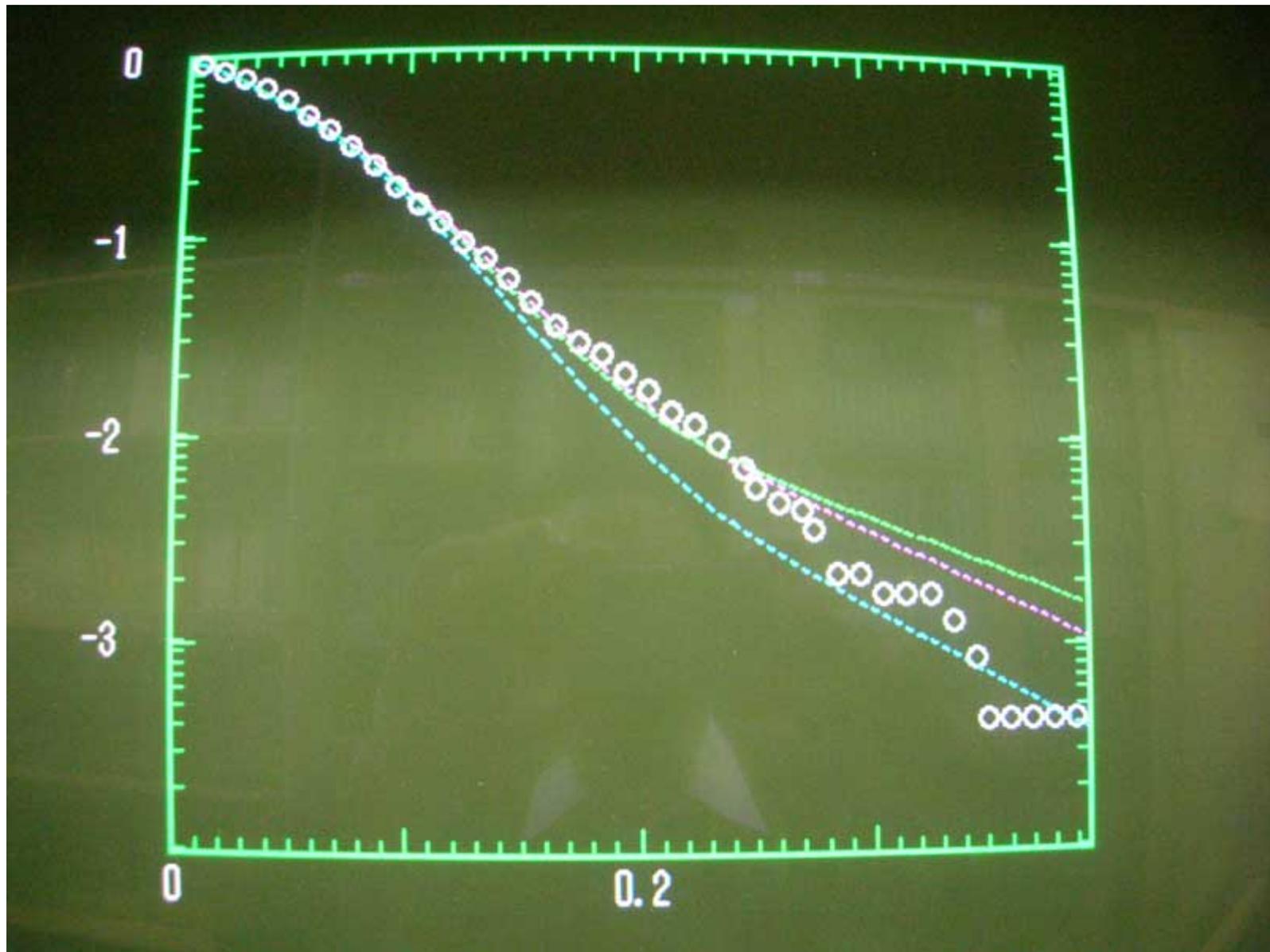
N-DE分布のパラメータ
 λ の値の変動範囲を
考慮した最小経路間隔

今回の解析の結果

分布の裾部を近似するモデル
パラメータ λ の値により大きく
結果が変わる可能性あり



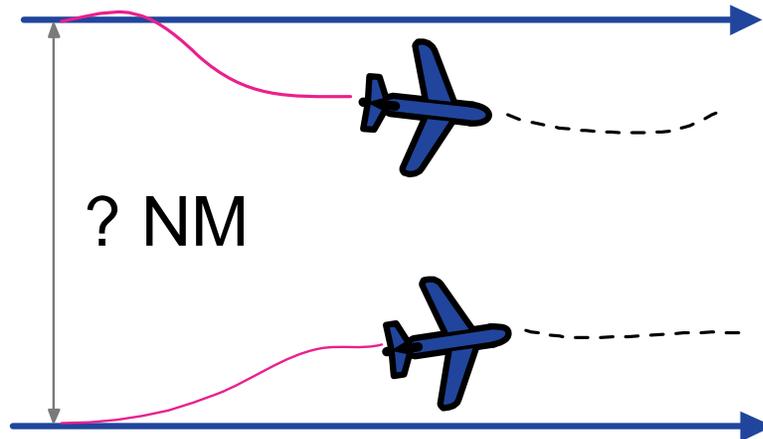
- ・ **Bootstrap法** (無作為復元抽出によるリサンプリング) を5,000回試行
- ・ 各試行毎に **N-DE分布** のパラメータを計算
- ・ λ が最大・最小の場合のパラメータを用いて、**最小経路間隔** を推定



λ の変動を考慮した場合 の最小経路間隔の推定値

	λ 最小	実測分布に基づく	λ 最大
RNAV1	7 NM	8 NM	9 NM
RNAV5	29 NM	32 NM	38 NM

$\gamma = 0.1$ の場合



まとめ

RNAV平行経路の導入



安全で効率的な経路間隔(最小経路間隔)の推定

鹿児島空港RNAV到着経路を飛行した航空機の航跡情報(レーダデータ)

横方向経路逸脱量の分布を推定

平均0.56m、標準偏差 143m

N-DE分布で良く近似でき安全目な推定

実測分布を近似するN-DEモデルのモデルパラメータを用いて、下記の**95%最低要件**を満たすモデルパラメータを推定

$$0.95 = \int_{-x}^x f(y | \alpha, \sigma, \lambda) dy$$

精度の悪い航空機が存在する可能性を考慮
RNAV Xの要件ぎりぎりの精度の航空機が γ 含まれる場合を定式化。

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

既知のパラメータ値 $\lambda_y=0.032$ NM,
 $P_z(0)=0.54$, $N_x^y(e)=2.5$ [機／飛行時間],
 $K=1.02$ を用いて、**最小経路間隔**を推定。

N-DE分布のパラメータ λ の変動範囲を考慮
すると $\gamma=0.1$ (精度がRNAV要件ぎりぎりの
航空機が1割)の場合

RNAV1平行経路の場合 7~9 NM

RNAV5平行経路の場合 29~38 NM

これは γ の値によっても変わる