

# 平行RNAV到着経路の横 方向重畳確率の推定

藤田雅人・天井治  
ATM領域

- 導入
  - RNAV
  - 目的
  - 衝突リスク
- 衝突リスク推定式及び横方向重畳確率
- 横方向逸脱量の分布のモデル化
- 横方向重畳確率推定法
- 結果

# RNAV (Area Navigation) (1)



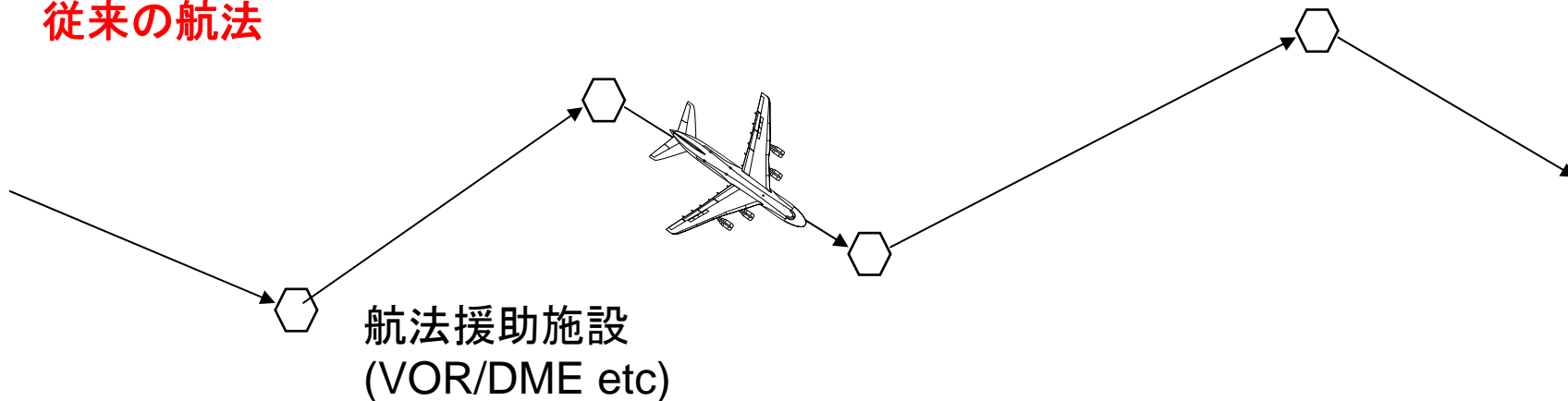
## RNAV (Area Navigation)

地上の航法援助施設の覆域内もしくは自蔵航法装置の能力の範囲内もしくはその両方を用いた航法による能力の範囲内で任意の飛行経路での航空機の運航を可能にする航法的方式

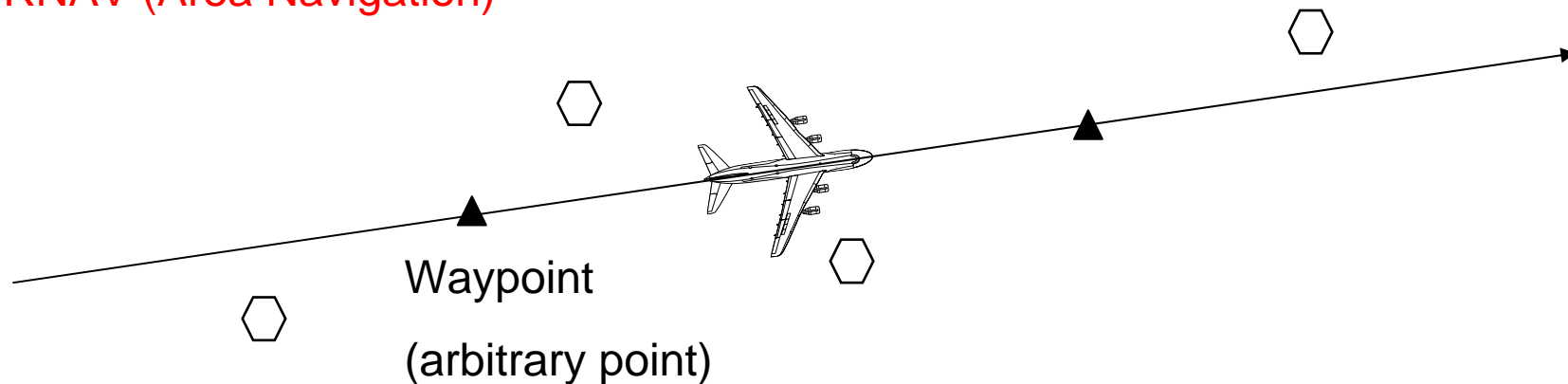
# RNAV (Area Navigation) (2)



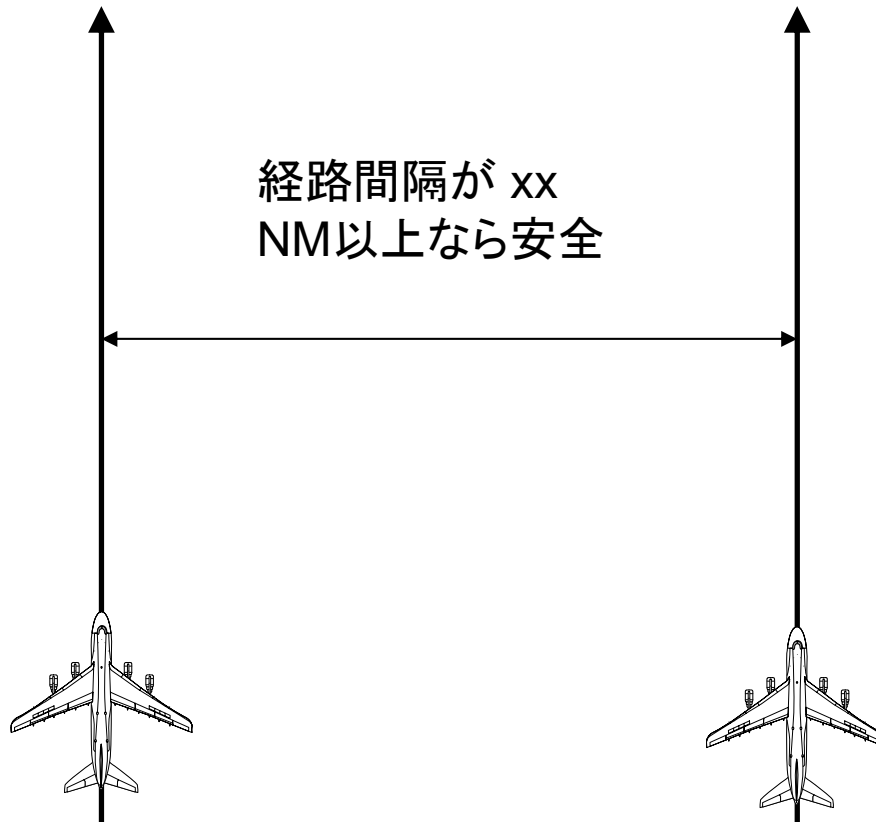
## 従来の航法



## RNAV (Area Navigation)



# 目的



平行 Standard Terminal Arrival Route (STAR)

# 衝突リスク



衝突リスク = 単位飛行時間あたりの衝突事故数の  
期待値

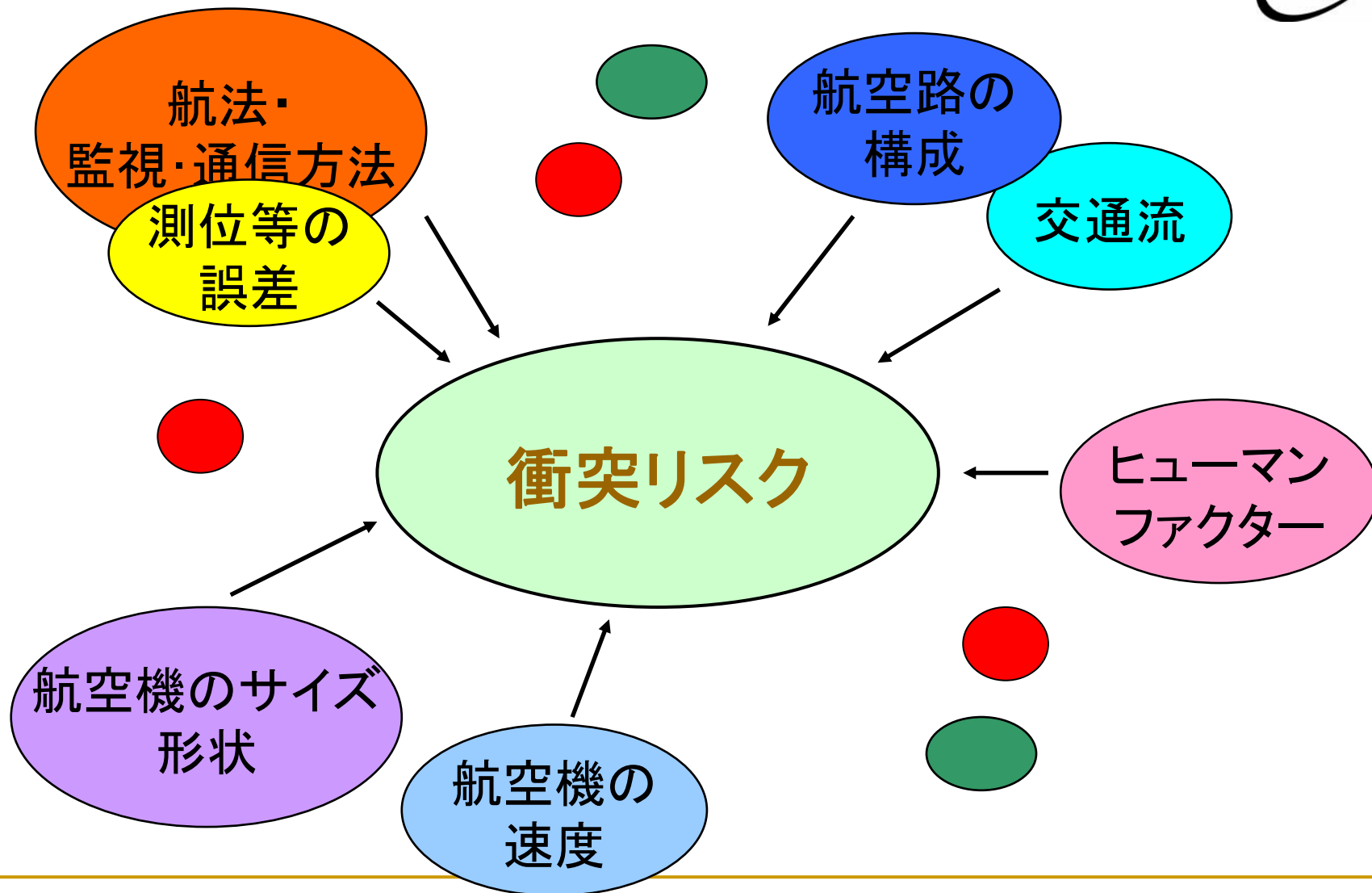
TLS: Target Level of Safety 目標安全度

**$5.0 \times 10^{-9}$  (件/飛行時間)**

## 保守性の原則 Conservative Principle

リスクの過小評価は認められない。  
(過大評価ならよい。)

# 衝突リスク推定



# 衝突リスク計算式



横方向重畳確率

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

$N_{ay}$ : 衝突リスク

$P_z(0)$ : 同じフライトレベルを飛行する航空機が垂直方向で重なる確率

$P_y(S_y)$ : 隣接する平行経路を飛行する航空機が横方向で重なる確率

$N_x^y(s)$ : 同方向に飛行する航空機がすれ違う頻度

$N_x^y(o)$ : 反対方向に飛行する航空機がすれ違う頻度

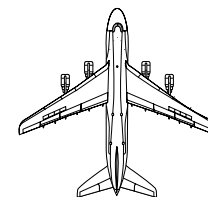
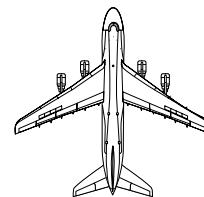
$K(s), K(o)$ : 航空機の平均サイズや相対速度から決まる定数 ('o'は反対方向, 's'は同方向を表す。)



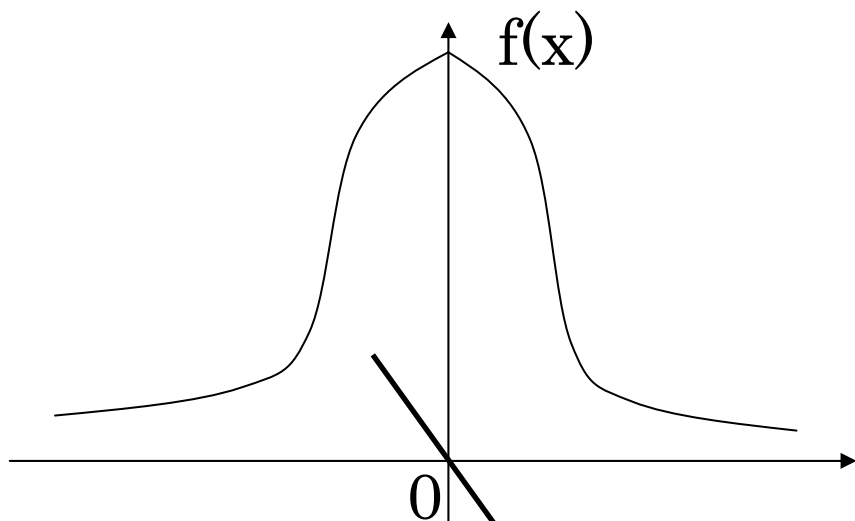
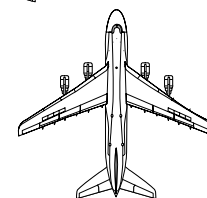
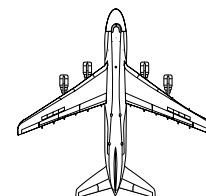
# 横方向重畳確率



横方向で重なっていない



横方向で重なっている



割当経路

x: 経路逸脱量

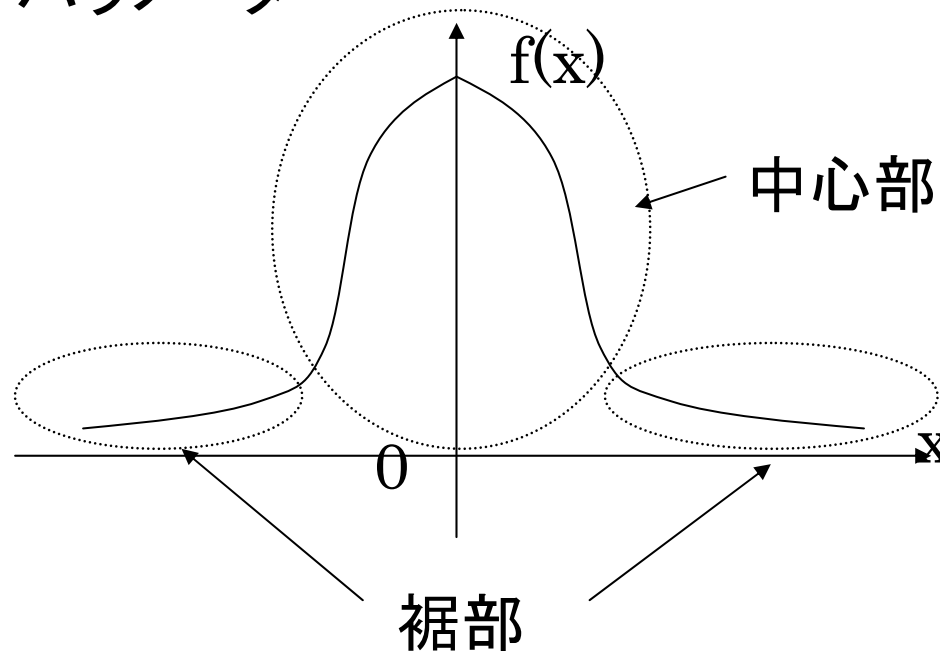
$$P_y(S_y) = \int_{S_y - \lambda_y}^{S_y + \lambda_y} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x - s) \cdot f(s) ds dx$$

# 経路逸脱量の分布

$$f(x) = (1 - \alpha) f_{\text{typical}}(x) + \alpha f_{\text{atypical}}(x)$$

「通常のエラー」項  
重み付けパラメータ

「通常でないエラー」項



# 「通常のエラー」項

- 2298の経路逸脱量のデータが鹿児島で収集された (ref. [2])

$$f_{fitted}(x) = (1 - \alpha_c)N(x; \sigma_{c,1}) + \alpha_c N(x; \sigma_{c,2})$$

$$N(x; \sigma) = \frac{\exp(-x^2 / 2\sigma^2)}{\sqrt{2\pi}\sigma}$$

$$\alpha_c = 0.117, \sigma_{c,1} = 0.0673(\text{NM}), \sigma_{c,2} = 0.129(\text{NM})$$

データ量が少ない

「通常でないエラー」に起因する経路逸脱は観測されなかったと判断

$$f_{typical}(x) = f_{fitted}(x)$$

# 「通常でないエラー」項



$$f_{\text{atypical}}(x) = DE(x; \lambda)$$

$$DE(x; \lambda) = \frac{\exp(-|x|/\lambda)}{2\lambda}$$

理由:

$f_{\text{atypical}}(x)$ が両側指数分布に従うという理論的な究明があまり成されていないがよく使われている。

RNAV-X承認機は全飛行時間の95%以上を経路の中心線から $\pm X$  NM以内を飛行することを求められる。

$$\int_{-X}^X f(x) dx \geq 0.95$$

$$\alpha \leq \min\left(\frac{C_X - 0.95}{\exp(-X / \lambda)}, 1\right) \quad C_X = \int_{-X}^X f_{\text{typical}}(x) dx$$

# 「保守性の原則」を適用すると...



## 保守性の原則

リスクを過小評価してはならない(過大評価ならよい)

## 衝突リスク計算式

横方向重畳確率

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

## 過小評価にならない衝突リスク評価とは？

$N_{ay}$ の最大値を求める =  $P_y(S_y)$ の最大値を求める

# 計算過程 (1)



$$\begin{aligned} P_y(S_y) &= \int_{S_y - \lambda_y}^{S_y + \lambda_y} \int_{-\infty}^{\infty} f(x-s) \cdot f(s) ds dx \\ &\cong 0 \quad \begin{aligned} &= (1-\alpha)^2 \int_{S_y - \lambda_y}^{S_y + \lambda_y} \int_{-\infty}^{\infty} f_{\text{typical}}(x-s; \alpha_c, \sigma_{c,1}, \sigma_{c,2}) \cdot f_{\text{typical}}(s; \alpha_c, \sigma_{c,1}, \sigma_{c,2}) ds dx \\ &+ 2\alpha(1-\alpha) \int_{S_y - \lambda_y}^{S_y + \lambda_y} \int_{-\infty}^{\infty} f_{\text{typical}}(x-s; \alpha_c, \sigma_{c,1}, \sigma_{c,2}) \cdot f_{\text{atypical}}(s; \lambda) ds dx \\ &+ \alpha^2 \int_{S_y - \lambda_y}^{S_y + \lambda_y} \int_{-\infty}^{\infty} f_{\text{atypical}}(x-s; \lambda) \cdot f_{\text{atypical}}(s; \lambda) ds dx \end{aligned} \end{aligned}$$

# 計算過程(2)

$$P_y(S_y) \leq$$

$$\left( \min\left(\frac{C_X - 0.95}{\exp(-X / \lambda)}, 1\right) \right)^2 \int_{S_y - \lambda_y}^{S_y + \lambda_y} \int_{-\infty}^{\infty} f_{atypical}(x - s; \lambda) \cdot f_{atypical}(s; \lambda) ds dx$$

RNAV条件の適用

$\lambda$ の関数

RNAV条件

$$\alpha \leq \min\left(\frac{C_X - 0.95}{\exp(-X / \lambda)}, 1\right)$$

$$C_X = \int_{-X}^X f_{typical}(x) dx$$



# 結果

X=1 (航法精度要件)

$S_y$	$\lambda(\text{NM})$	$\alpha$	$\max P_y(S_y)$
3	0.51	0.3557	7.60E-05
4	1.11	0.1232	2.74E-05
5	1.71	0.0897	1.59E-05
6	2.32	0.0770	1.10E-05
7	2.93	0.0704	8.40E-06
8	3.54	0.0663	6.76E-06
9	4.15	0.0636	5.65E-06
10	4.77	0.0617	4.85E-06

X=0.1725 (確認された航法精度)

$S_y$	$\lambda(\text{NM})$	$\alpha$	$\max P_y(S_y)$
3	1.59	0.0227	2.26E-06
4	2.21	0.0220	1.61E-06
5	2.83	0.0216	1.24E-06
6	3.45	0.0213	1.02E-06
7	4.07	0.0212	8.58E-07
8	4.69	0.0210	7.43E-07
9	5.30	0.0210	6.54E-07
10	5.92	0.0209	5.85E-07

大きな差

- RNAV1条件は実際の航法精度を反映しておらず、TLSを満たすような極めて高い安全性を満たすには不十分である。
- 安全性検証においては、実際の航法精度をもとに推定した横方向重畳確率を使用する事が適当と考えられる。

ご清聴ありがとうございました。

# 概要図

