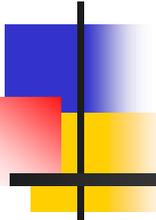


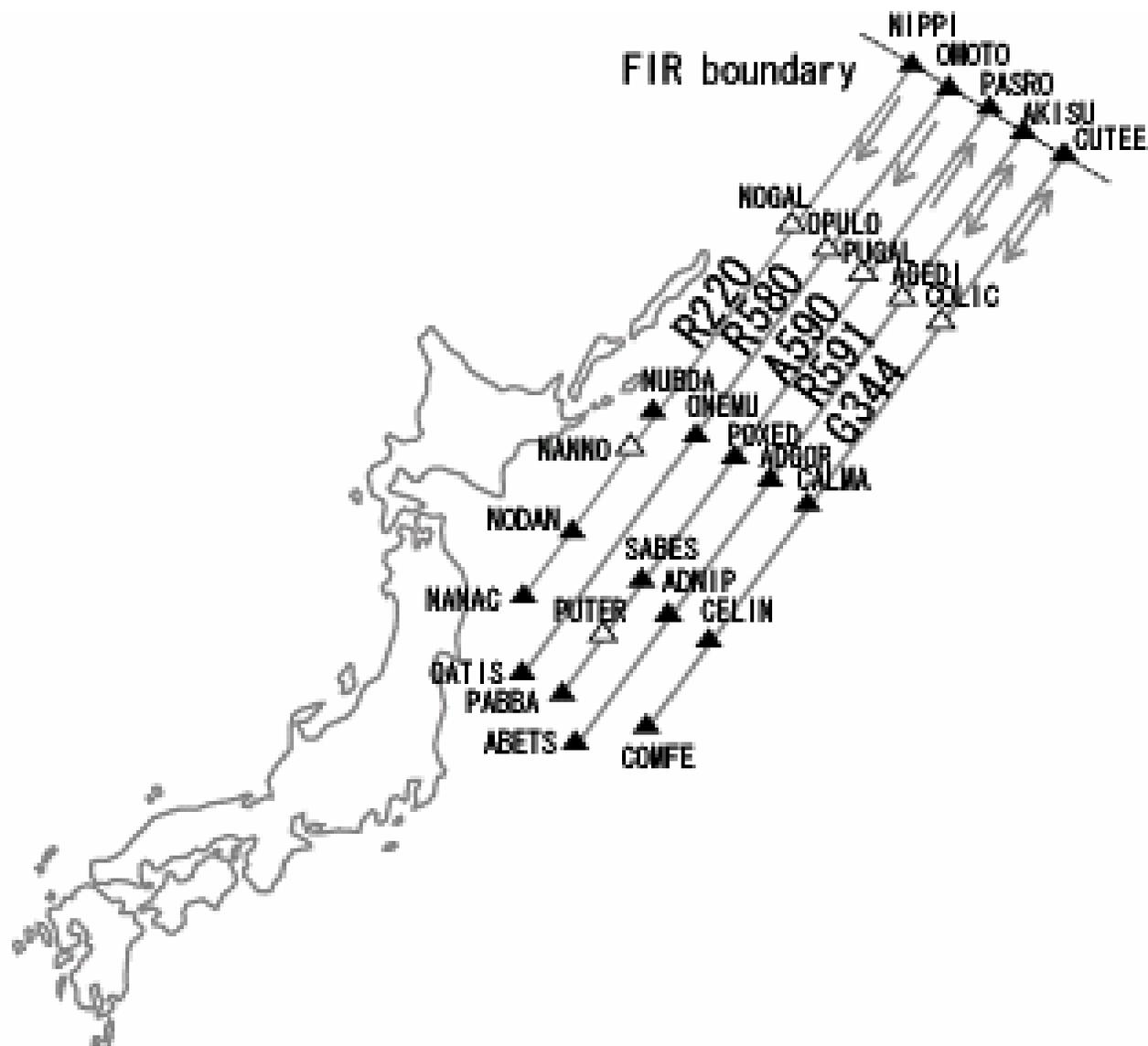
# MTSAT運用下での 縦方向衝突リスクの推定

A decorative graphic on the left side of the slide. It features a vertical black line that intersects a horizontal black line. To the left of the vertical line, there are three overlapping rectangular shapes: a blue one at the top, a red one in the middle, and a yellow one at the bottom.

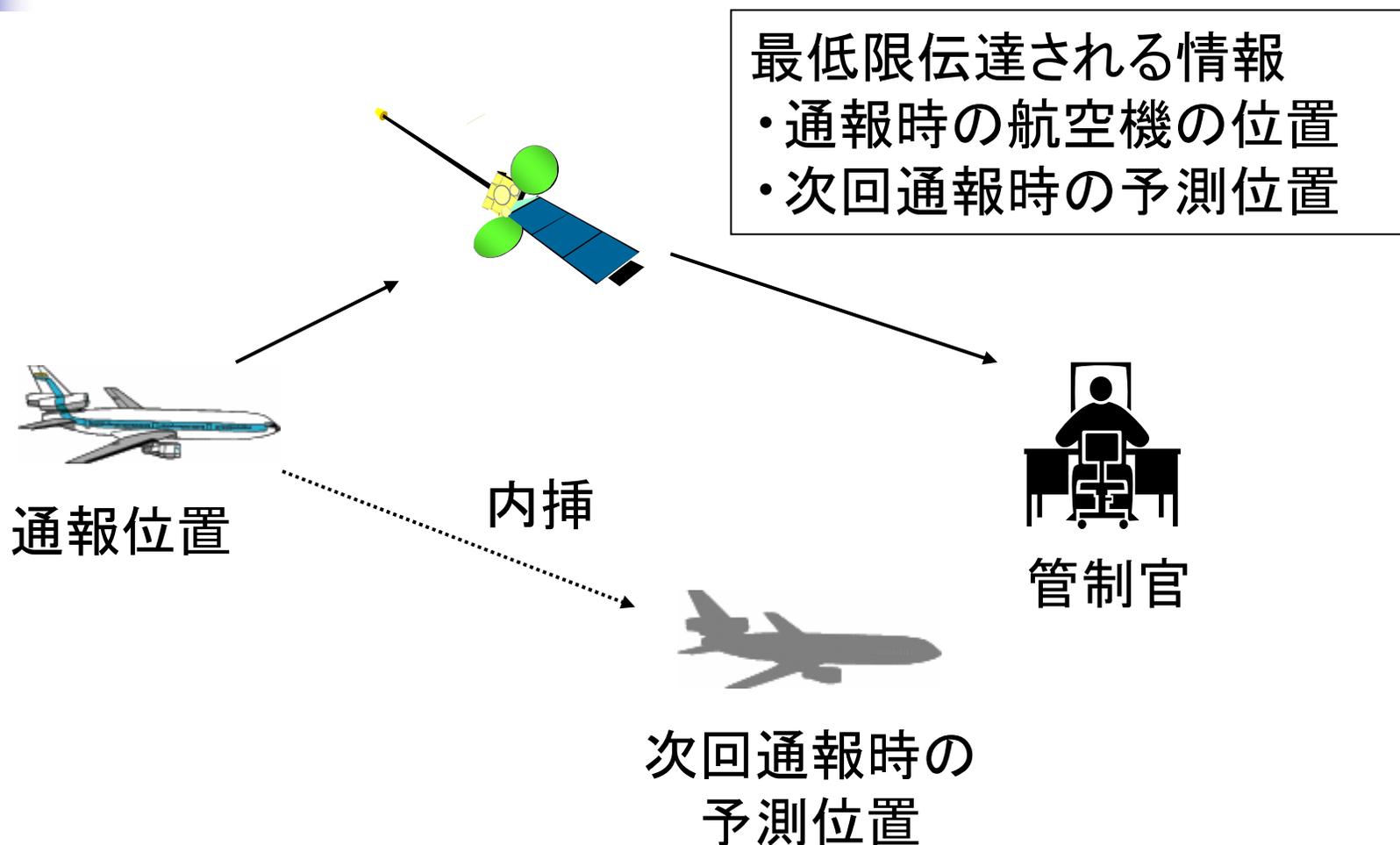
航空交通管理領域

\* 藤田 雅人、長岡 栄、天井 治

# NOPACルート構成



# ADS-C概念図



# 巡航中の航空機の安全

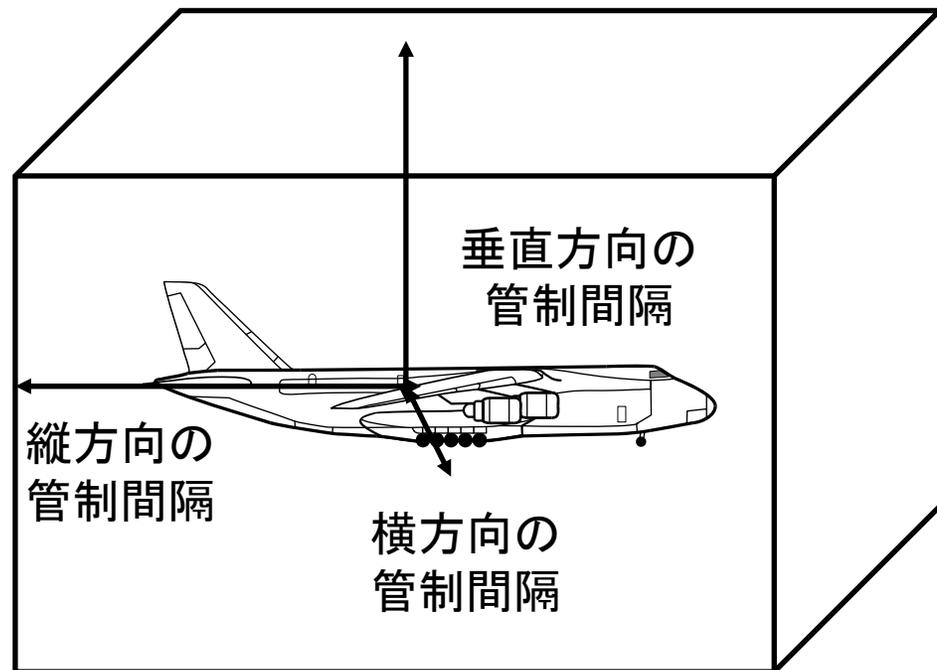
想定されるリスク

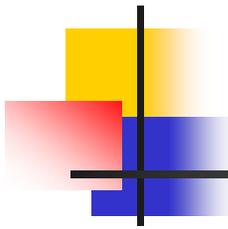
航空機の衝突

リスクへの対応方法

管制間隔の確保

1. 縦方向
2. 横方向
3. 垂直方向





# 安全性の指標

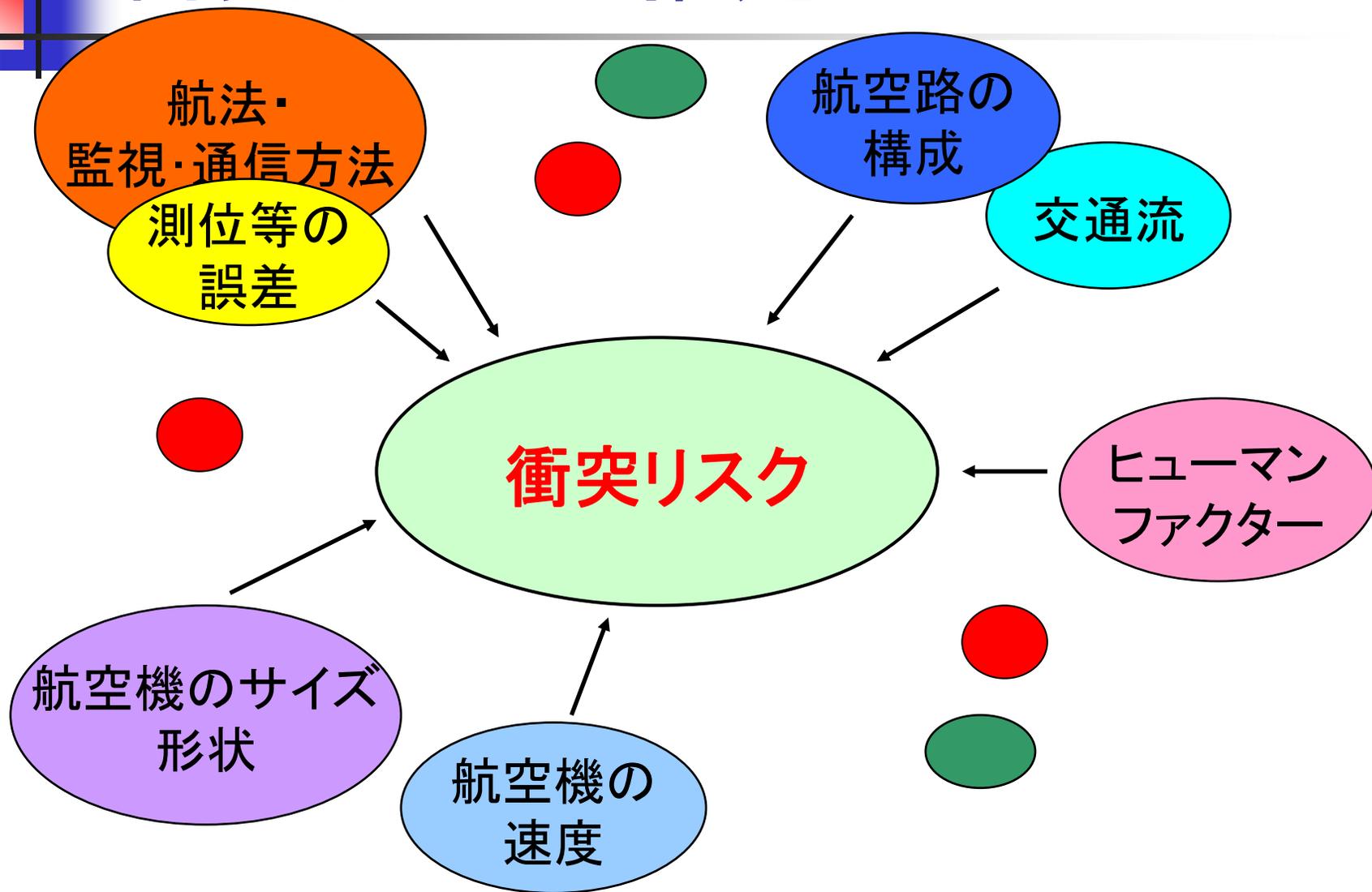
衝突リスク＝単位飛行時間当たりの衝突  
事故件数の期待値

目標安全度 (TLS: Target Level of Safety)

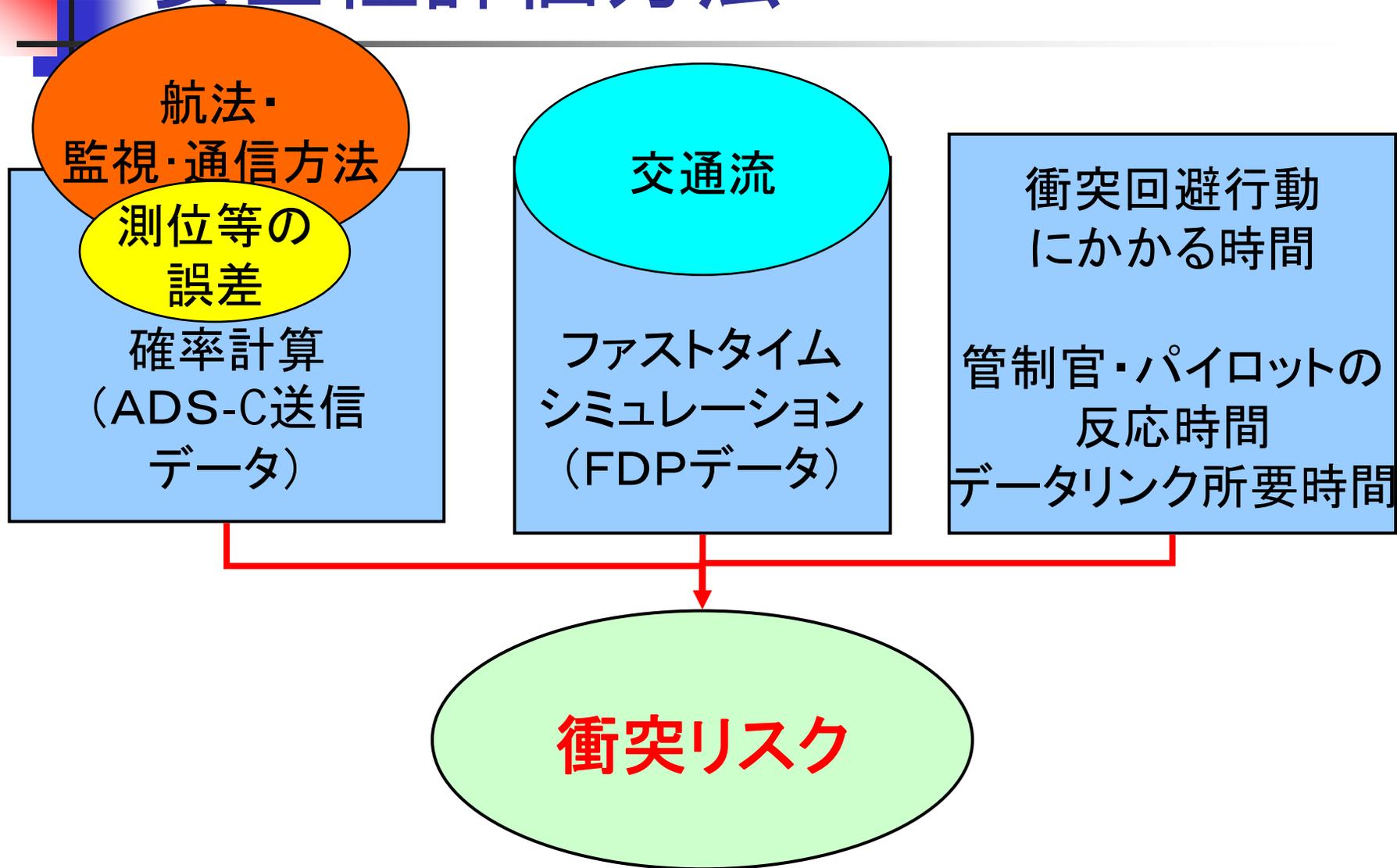
衝突リスクの最大許容値

**$5.0 \times 10^{-9}$  [件/飛行時間]**

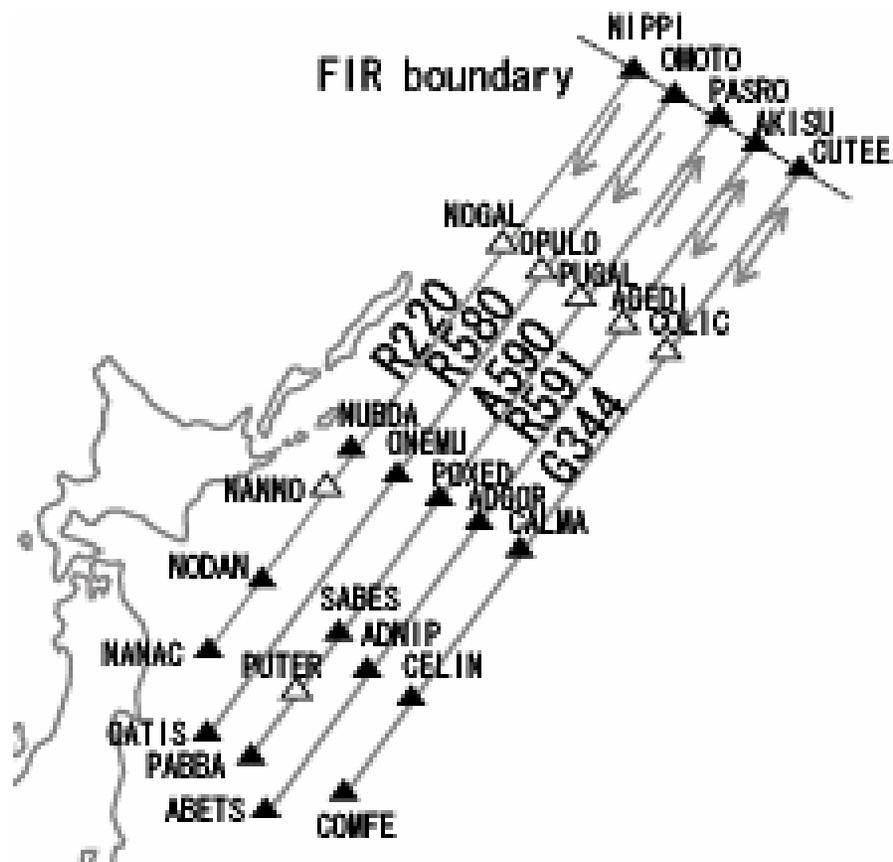
# 衝突リスクの推定



# 安全性評価方法



# シミュレーションで用いたデータ



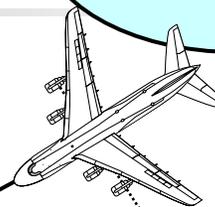
- 西行き航路R220及びR580を2004年4月から2005年3月までに通過した航空機のFDPデータ
  - 飛行計画情報
  - 通過フィックス名と通過時刻
  - 通過高度

# 飛行計画シート(一部)

FLIGHT PLAN 飛行計画			
PRIORITY 優先順位    ADDRESSEE(S) 送付先 << ≡ FF →			
FILING TIME 受付時刻		ORIGINATOR 発信機関	
SPECIFIC IDENTIFICATION OF ADDRESSEE(S) AND/OR ORIGINATOR 略号が指定されていない送付先又は発信機関の名称			
<< ≡			
3 MESSAGE TYPE 通報型式 << ≡ ( FPL	7 AIRCRAFT IDENTIFICATION 航空機識別 _____	8 FLIGHT RULES 飛行方式 - <input type="checkbox"/>	TYPE OF FLIGHT 飛行の種類 <input type="checkbox"/> << ≡
9 NUMBER 航空機の数 - _____	TYPE OF AIRCRAFT 航空機の型式 _____	WAKE TURBULENCE CATEGORY 後方乱気流区分 <input type="checkbox"/>	10 EQUIPMENT 使用する無線設備 - _____ << ≡
13 DEPARTURE AERODROME 出発飛行場 - _____	TIME 移動開始時刻 _____ << ≡		
15 CRUISING SPEED 巡航速度 - _____	LEVEL 巡航高度 _____	ROUTE 経路 _____	
<< ≡			
16 DESTINATION AERODROME 目的飛行場 - _____	TOTAL EET 所要時間 HR. MIN _____	ALTN AERODROME → _____	2ND. ALTN AERODROME → _____ << ≡

# 仮定(水平方向)

境界通過時刻  
実データを使用



## 飛行速度

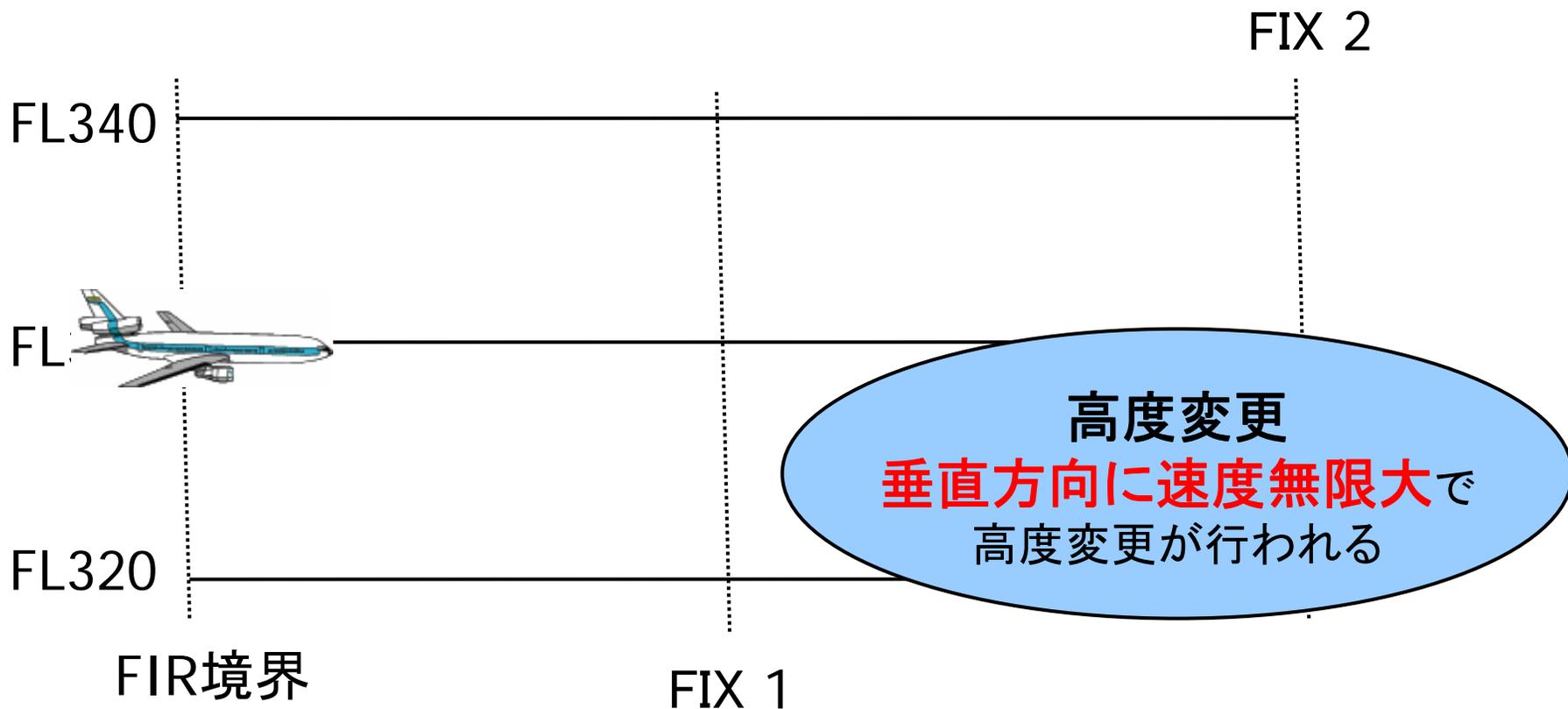
「希望データ」と「実データ」が  
似た経路を飛行している場合は  
実データを使用。  
それ以外は、希望速度を整形

R220

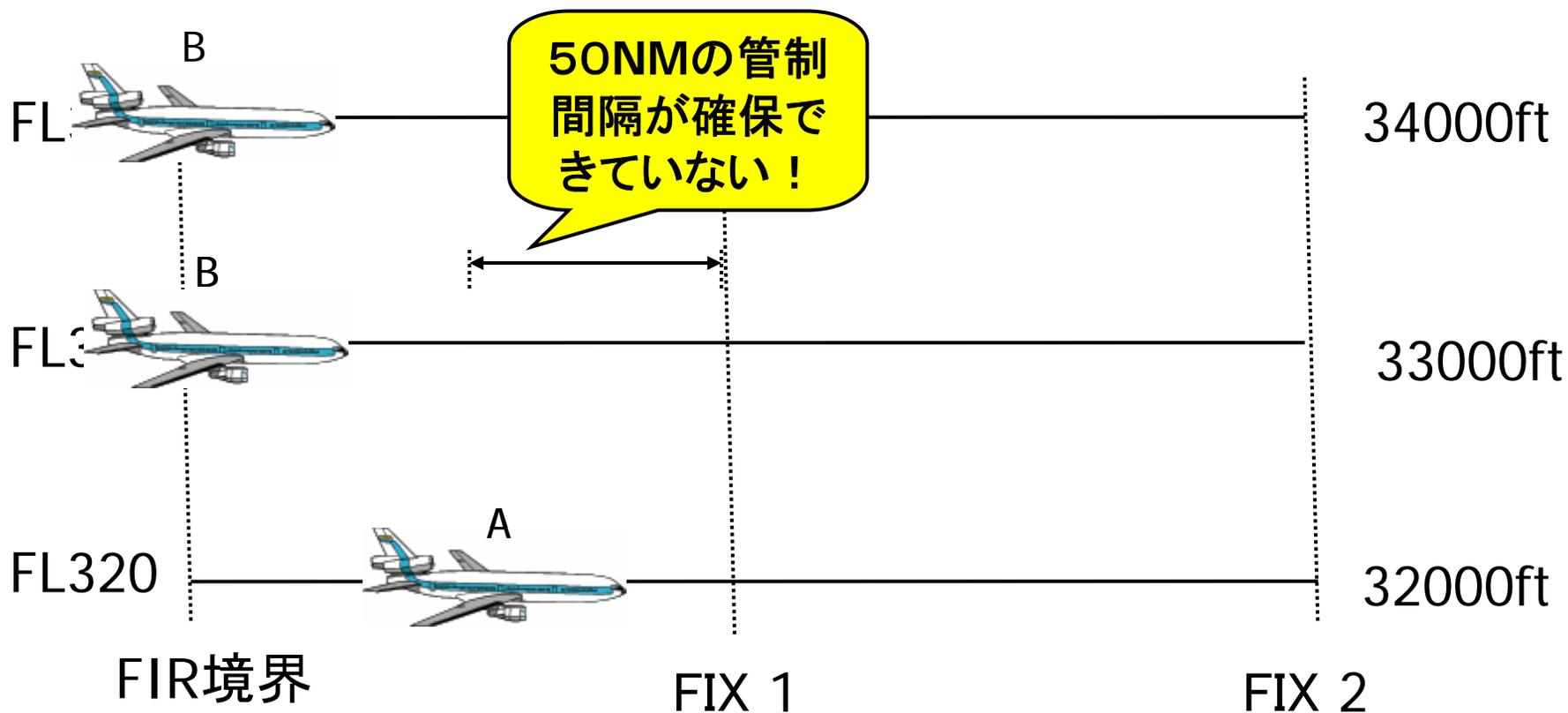
R580

飛行コース・飛行高度  
「希望データ」を元に  
NOPACルート上で常に  
**50NMの短縮縦間隔が  
維持できるように設定**

# 仮定(垂直方向)



# 経路割り当てアルゴリズム(例)

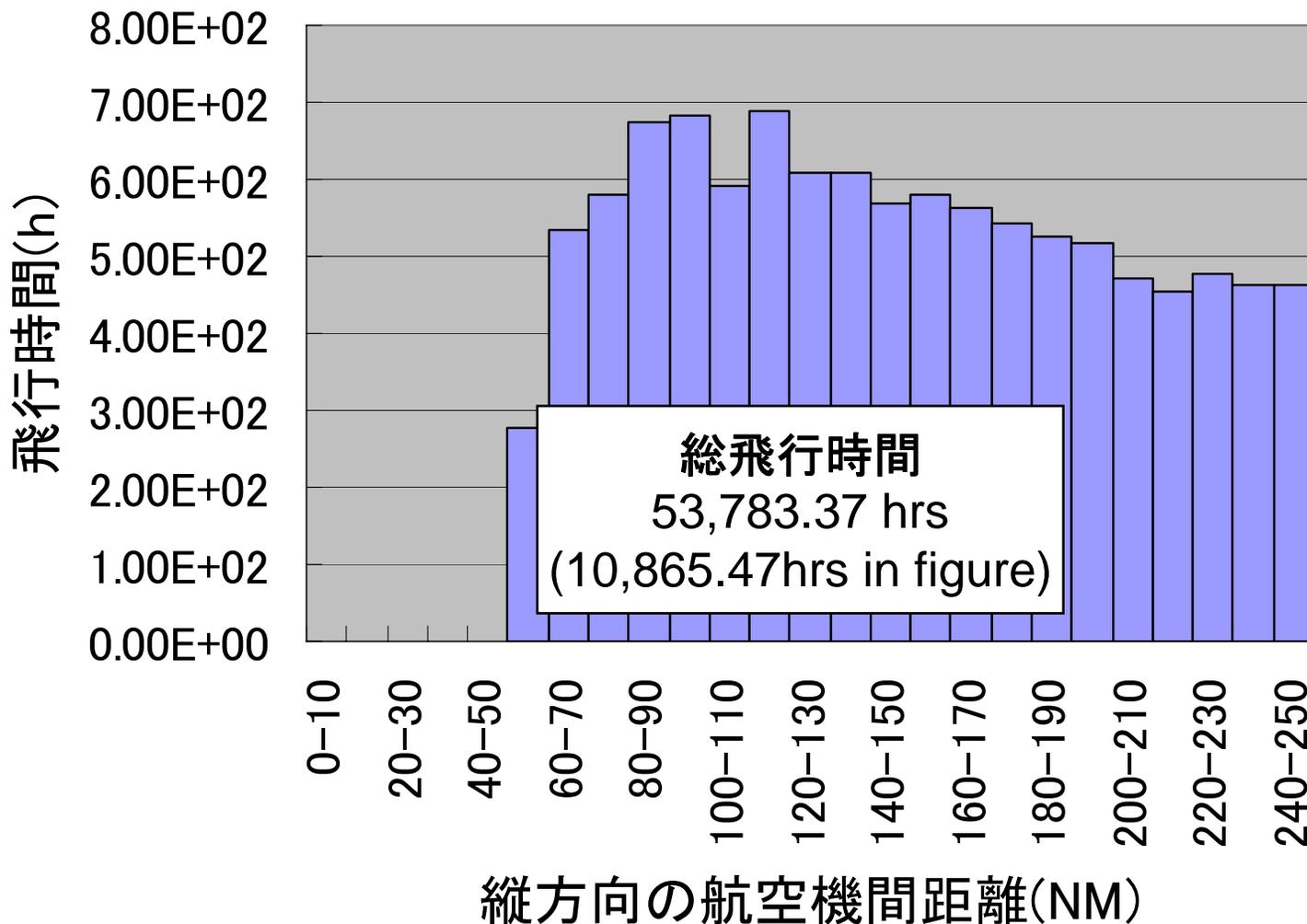


# 高度・経路変更優先度

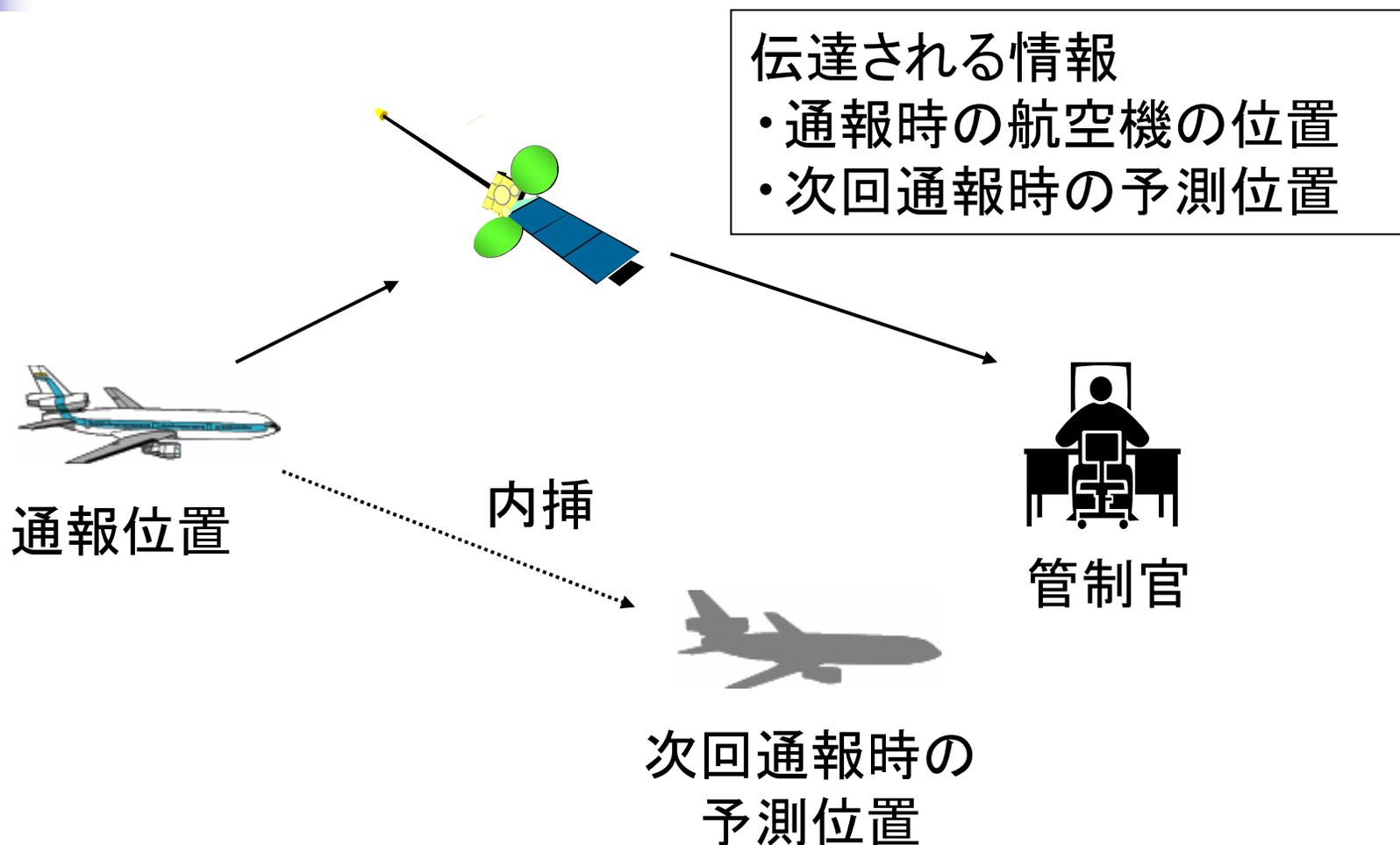
優先度	高度(ft)	経路
1	0	×
2	+1,000	×
3	-1,000	×
4	+2,000	×
5	-2,000	×
6	0	○

優先度	高度(ft)	経路
7	+1,000	○
8	-1,000	○
9	+2,000	○
10	-2,000	○
11	+3,000	×
12	-3,000	×

# シミュレーション結果

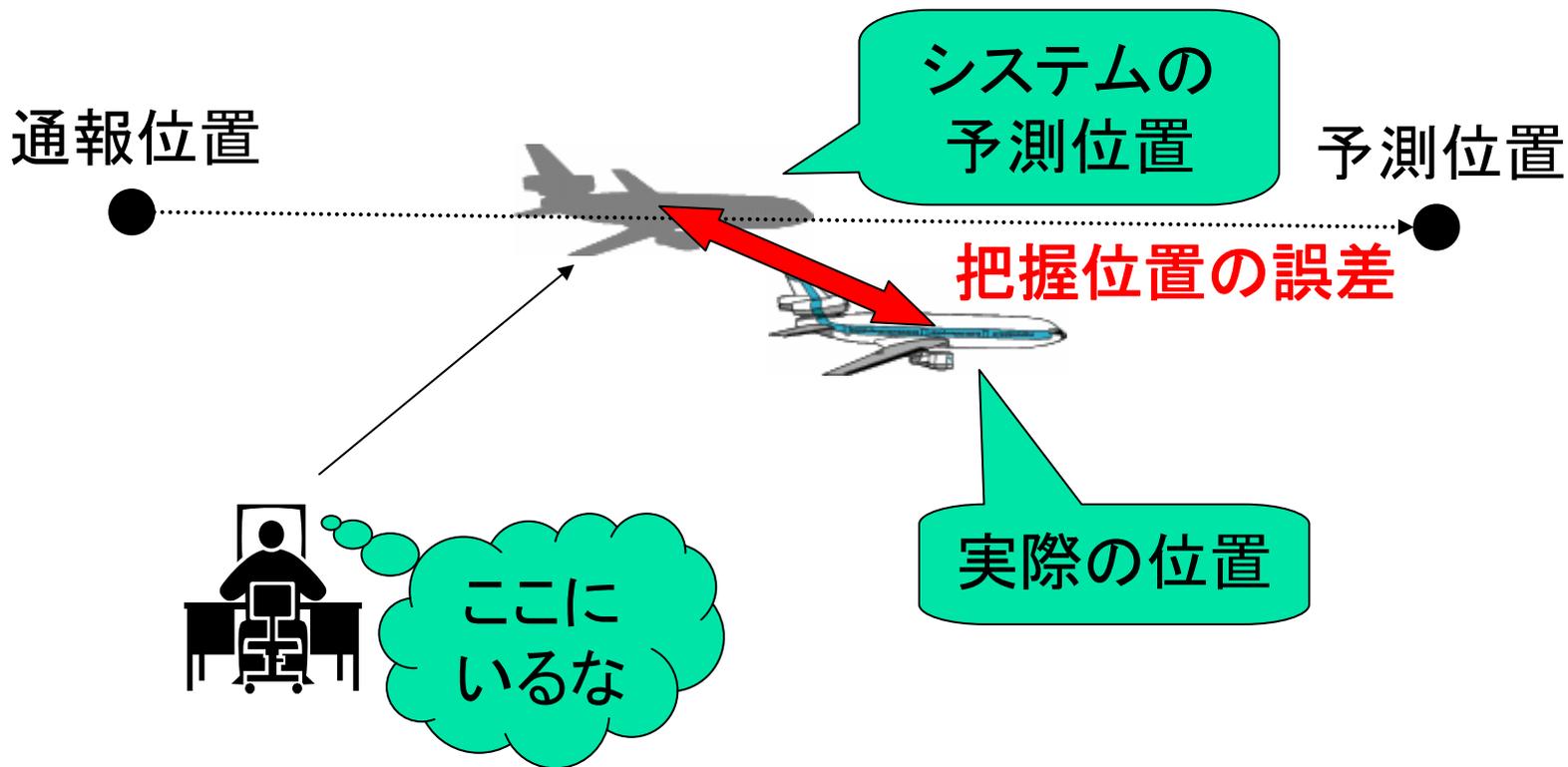


# ADS-C概念図(再掲)

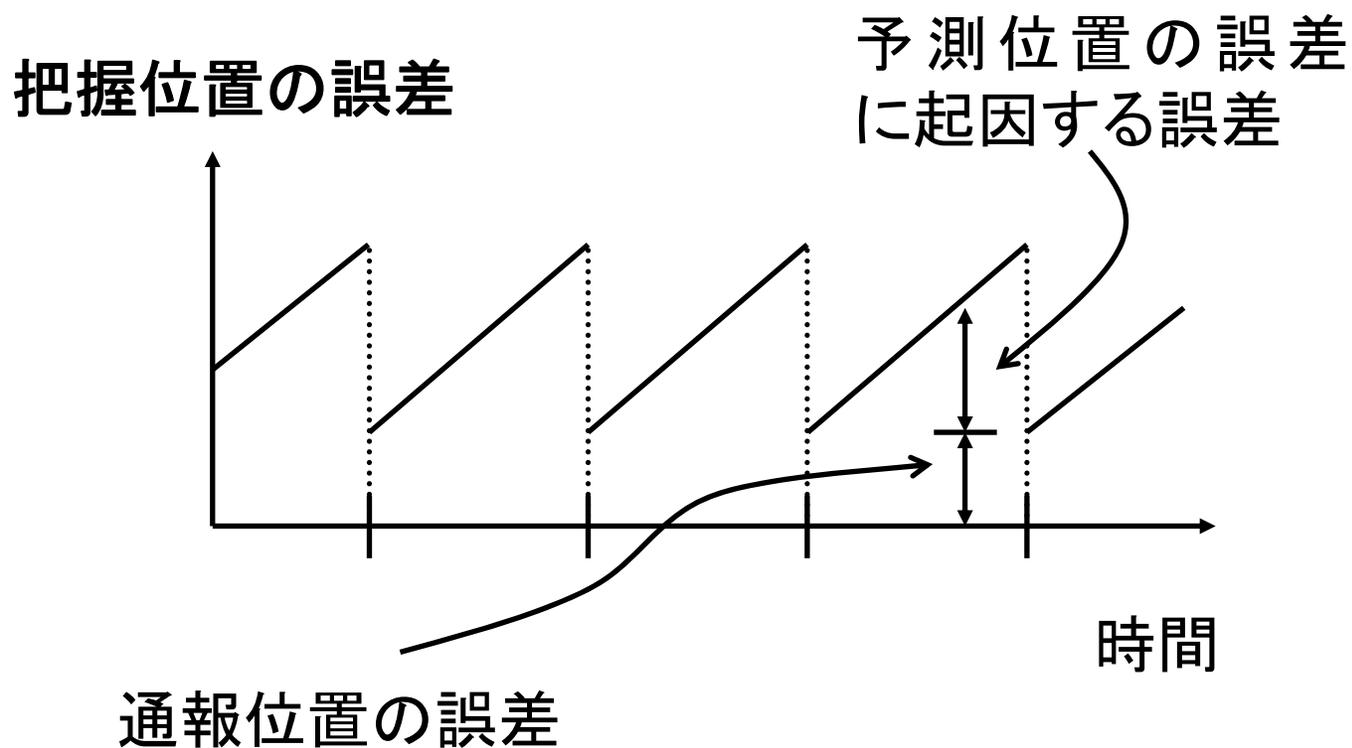


# 把握位置の誤差

管制官がシステムを通して「見ている位置」と  
航空機が「実際にいる位置」の差



# 把握位置の誤差の時間変化



# 誤差の式表示

航空機1の  
通報位置の誤差

航空機2の  
通報位置の誤差

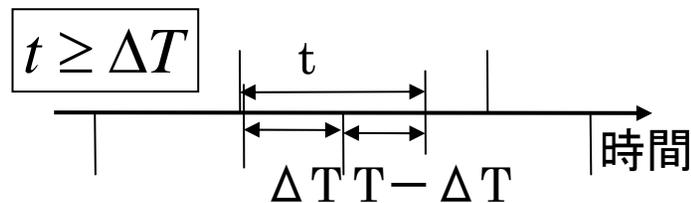
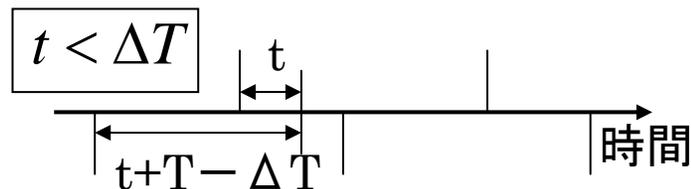
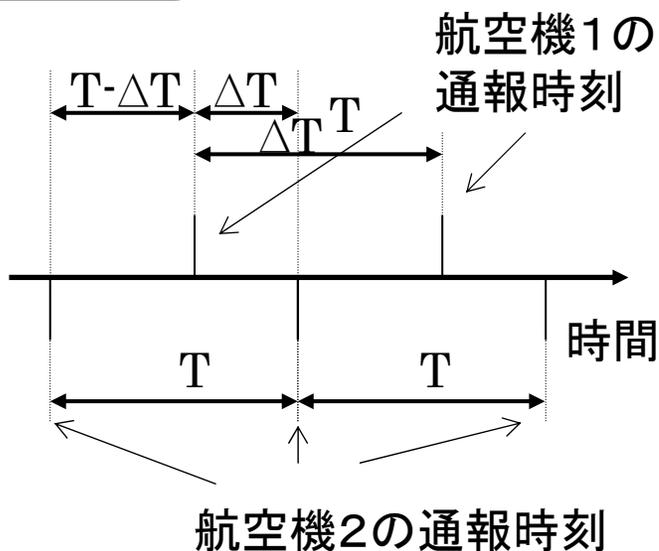
$$d = \begin{cases} x_1 - x_2 + v_1 t - v_2 (T - \Delta T + t) & t < \Delta T \\ x_1 - x_2 + v_1 t - v_2 (t - \Delta T) & t \geq \Delta T \end{cases}$$

航空機1の  
速度誤差

航空機2の  
速度誤差

$T$  : 通報周期 = 27min

$\Delta T$ : 二機の航空機のずれ



# 通報位置誤差および 推定速度誤差の分布

縦方向**通報位置**誤差：両側指数分布

$$f_x(x) = (2\lambda)^{-1} \exp(-|x|/\lambda)$$

航法にGPS受信機を使用している航空機

$\lambda = 0.3/2.996 = 0.0100$  [NM] (RNP0.3相当の場合)

$\lambda = 10/2.996 = 3.34$  [NM] (RNP10相当の場合)

注：「RNP0.3相当」とは誤差の95%含有率のことを指す。

RNP0.3に対応する航空機の承認基準は存在しない。

それ以外

縦方向**推定速度**誤差：バイアスのある両側指数分布

$$f_v(v) = (2\lambda_v)^{-1} \exp(-|v - m|/\lambda_v)$$

$\lambda_v = 5.7$  [NM/hr],  $m = -5.62$  [NM/hr]\*

\* Kodo, T., Nagaoka, S and Amai, O, Analysis of Prediction Error of an ADS, ICAO, SASP-WG/WHL/1-WP/33, Canberra, May 2002.

# GPS搭載比率を考慮した 同時通報モデルの主な仮定



- 考察対象の2機の航空機のADS報告は同期を取って行われる。(  $\Delta T=0$  )
- 2機の航空機の名目上の相対速度は0 kts
- GPS搭載機:通報位置誤差RNP0.3相当。  
それ以外:通報位置誤差RNP10相当
- 横方向の経路逸脱量の分布は実測値をもとに導出したモデルを使用

# 衝突リスク評価式導出(1)

$$P_x(D; v_1, v_2, t) = \int_{D-\lambda_x}^{D+\lambda_x} f_x(d; v_1, v_2, t) dx \approx 2\lambda_x f_x(D; v_1, v_2, t)$$

確率変数 $d$ の確率密度関数  $d = \begin{cases} x_1 - x_2 + v_1 t - v_2(T - \Delta T + t) & t < \Delta T \\ x_1 - x_2 + v_1 t - v_2(t - \Delta T) & t \geq \Delta T \end{cases}$

速度誤差を定数と考えたときの衝突リスク

$$N_{ax}^{const-v}(D, v_1, v_2, t) = 2P_y(0)P_z(0)P_x(D, v_1, v_2, t) \times \left( \frac{|v_1 - v_2|}{2\lambda_x} + \frac{|v_y|}{2\lambda_y} + \frac{|v_z|}{2\lambda_z} \right)$$

名目距離が $D$ である航空機対の  
衝突リスク(空域全体のリスクで  
はない。)

# パラメータ値(1)

- $\lambda_x = 0.036 \text{NM}^*$  航空機の平均機長
- $\lambda_y = 0.032 \text{NM}^*$  航空機の平均翼長
- $\lambda_z = 0.010 \text{NM}^*$  航空機の平均機高
- $|v_y| = 20 \text{kts}^{**}$  横方向平均相対速力
- $|v_z| = 1.5 \text{kts}^{**}$  垂直方向平均相対速力
- $P_z(0) = 0.5380^{**}$  垂直方向重畳確率

\* Amai, O., Nagaoka, S., Recent Collision Risk Model Parameters of the North Pacific Routes, ICAO RGCSP-WG/A-WP/15, St. Petersburg, May, 1999

\*\* MAAR, Summary of the Airspace Safety Monitoring Review for the RVSM implementation in Asia Region, ICAO RASMAG/3, Bangkok, June, 2005

## パラメータ値(2)

横方向重畳確率は航空機の横方向経路維持性能から決まる。



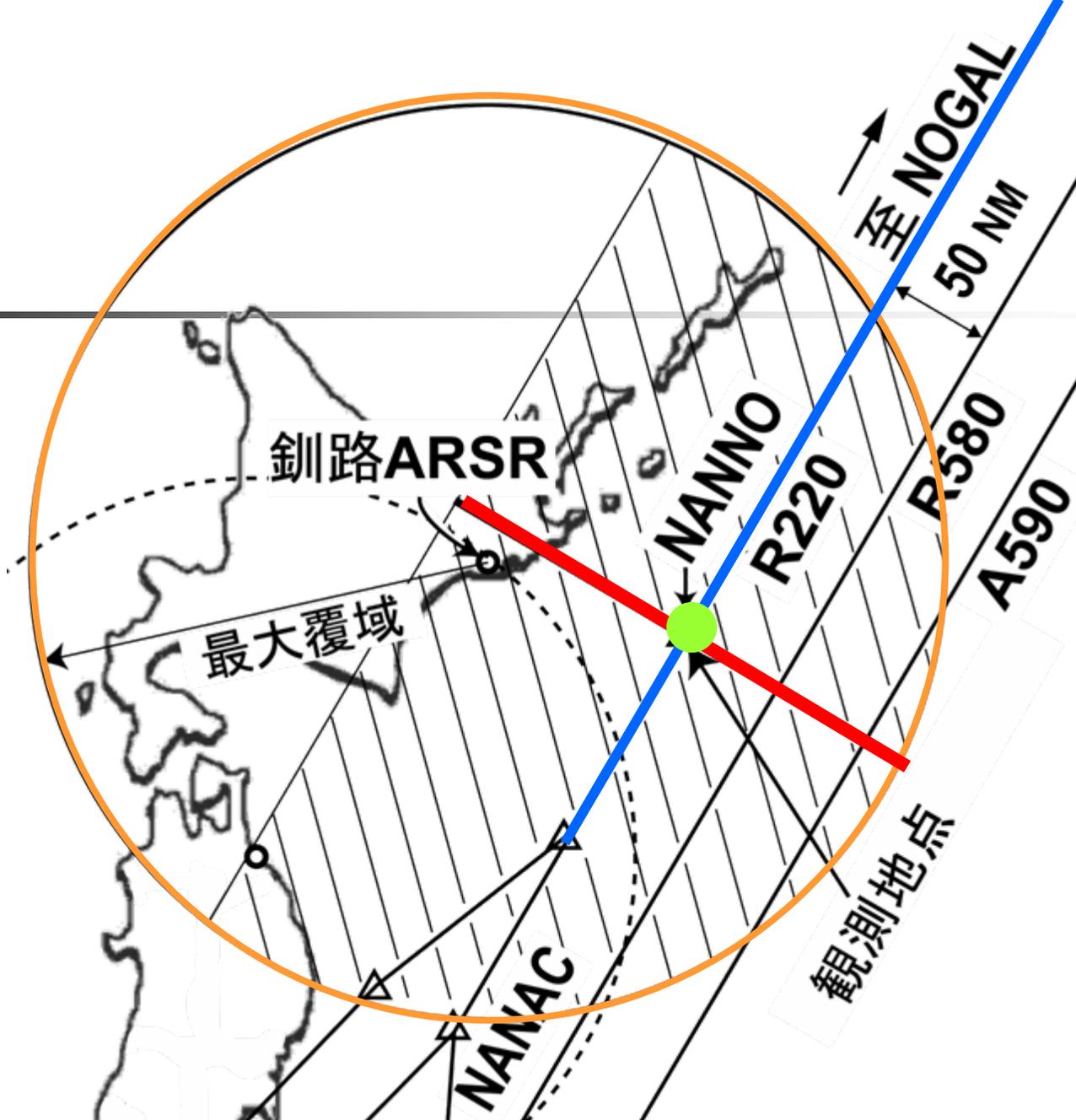
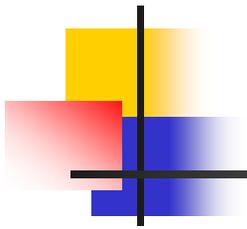
GPS搭載機とGPS非搭載機では経路逸脱量(経路維持性能)が異なる。

GPS機同士  $P_y(0) = P_y^{GG}(0) = 0.659$

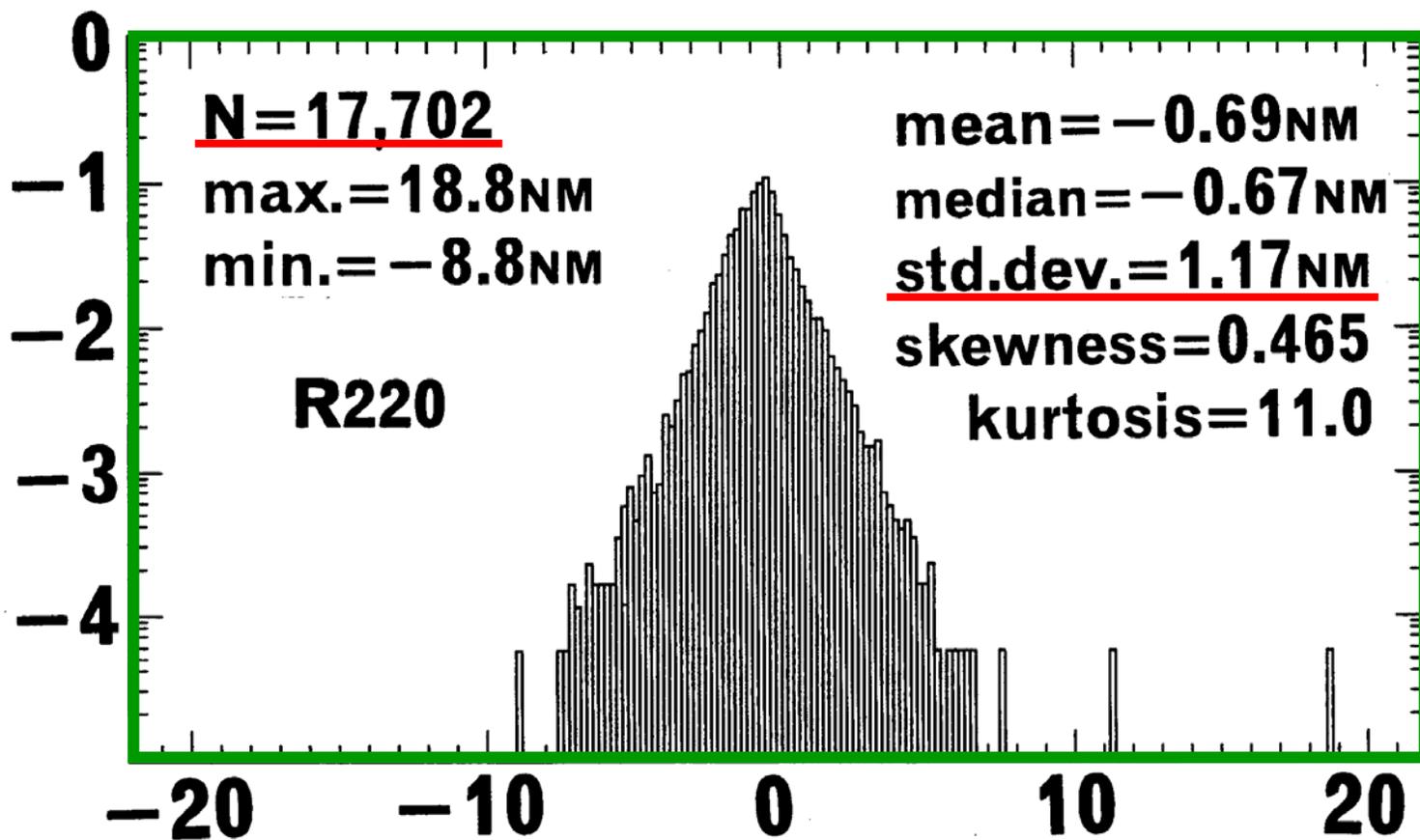
GPS機—非GPS機  $P_y(0) = P_y^{Gn}(0) = 0.0381$

非GPS機同士  $P_y(0) = P_y^{nn}(0) = 0.0196$

- 天井治, 長岡栄, “北太平洋ルートにおける航空機対の水平重畳確率の推定”, 日本航海学会論文集, Vol.96, March 1997
- Amai, O., Nagaoka, S., Evaluating the lateral navigation accuracy of GPS equipped aircraft on a north Pacific route using radar data, Proceedings of 2003 International Symposium on GPS/GNSS, Tokyo, Nov., 2003  
を用いてMathematicaにより計算

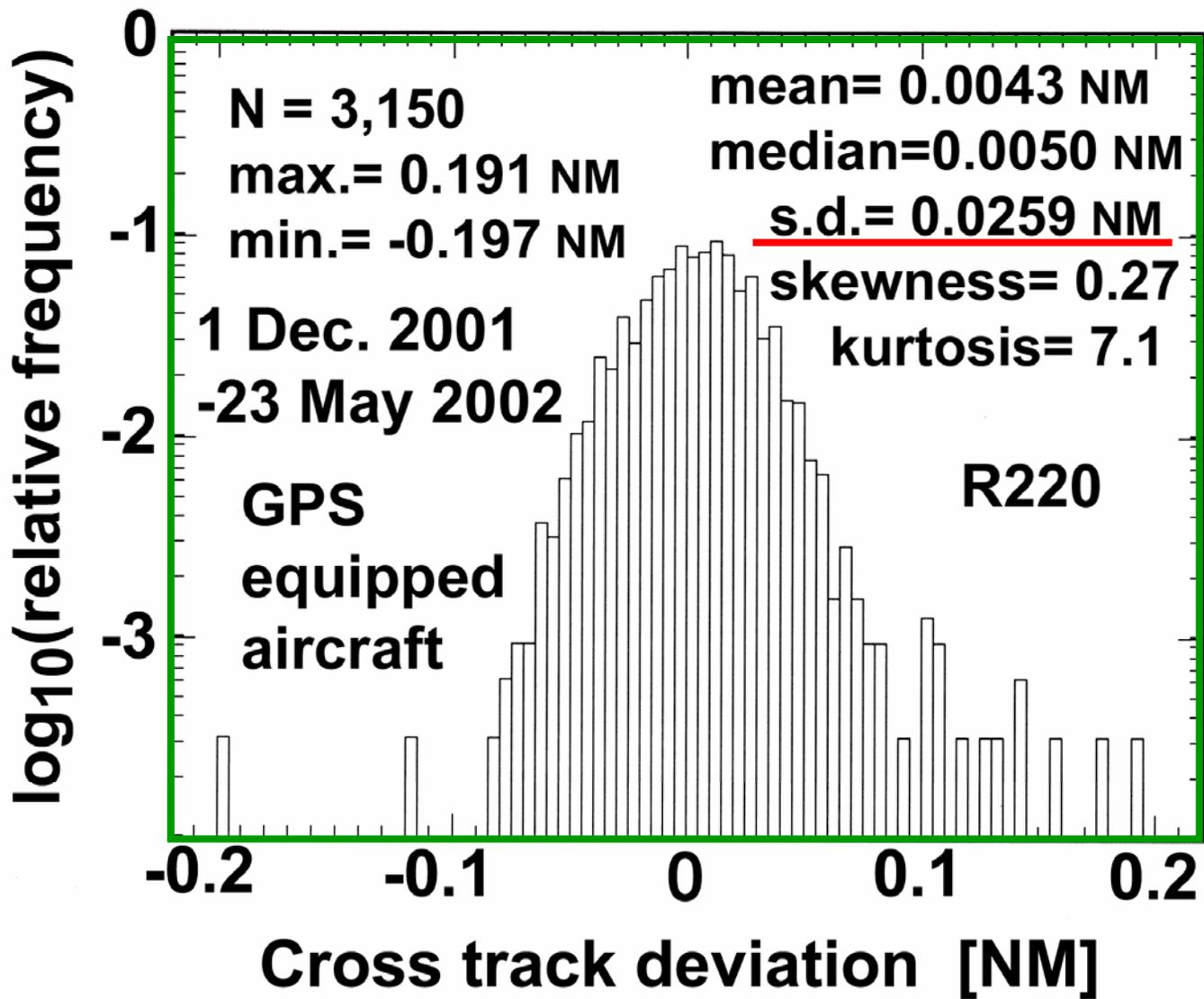


$\log_{10}(\text{relative frequency})$



**Cross track deviation      NM**

GPS非搭載機の横方向経路逸脱量の分布



GPS搭載機の横方向経路逸脱量の分布

## パラメータ値(2)

横方向重畳確率は航空機の横方向経路維持性能から決まる。



GPS搭載機とGPS非搭載機では経路逸脱量(経路維持性能)が異なる。

GPS機同士  $P_y(0) = P_y^{GG}(0) = 0.659$

GPS機—非GPS機  $P_y(0) = P_y^{Gn}(0) = 0.0381$

非GPS機同士  $P_y(0) = P_y^{nn}(0) = 0.0196$

- 天井治, 長岡栄, “北太平洋ルートにおける航空機対の水平重畳確率の推定”, 日本航海学会論文集, Vol.96, March 1997
- Amai, O., Nagaoka, S., Evaluating the lateral navigation accuracy of GPS equipped aircraft on a north Pacific route using radar data, Proceedings of 2003 International Symposium on GPS/GNSS, Tokyo, Nov., 2003  
を用いてMathematicaにより計算

# 衝突リスク評価式導出(2)

GPS搭載率 $a$ を考慮した時の衝突リスク( $a=0.3$ )

$$N_{ax}^{ave-eq}(D, v_1, v_2, t) = a^2 N_{ax}^{GG}(D, v_1, v_2, t) + 2a(1-a)N_{ax}^{Gn}(D, v_1, v_2, t) + (1-a)^2 N_{ax}^{nn}(D, v_1, v_2, t)$$

$$N_{ax}^{GG}(D, v_1, v_2, t)$$

航空機が2機ともGPS機であったときの  $N_{ax}^{const-v}(D, v_1, v_2, t)$

$$N_{ax}^{Gn}(D, v_1, v_2, t)$$

GPS機-非GPS機に対する  $N_{ax}^{const-v}(D, v_1, v_2, t)$

$$N_{ax}^{nn}(D, v_1, v_2, t)$$

航空機が2機とも非GPS機であったときの  $N_{ax}^{const-v}(D, v_1, v_2, t)$

# 衝突リスク評価式導出(3)

$N_{ax}^{ave-eq}(D, v_1, v_2, t)$  は  $v_{rel} = v_1 - v_2$  の式

↳  $N_{ax}^{ave-eq}(D, v_{rel}, t)$  と表示し直す。

確率変数  $v_{rel}$  の確率密度関数

$$f_{rel}(v_{rel}) = \frac{1}{2} \left( \frac{|v_{rel}| \exp(-|v_{rel}| / \lambda_v)}{2\lambda_v^2} + \frac{\exp(-|v_{rel}| / \lambda_v)}{2\lambda_v} \right)$$

速度誤差で平均

速度誤差で「平均」した衝突リスク

$$N_{ax}^{ave-v,eq}(D, t) = \int_{-\infty}^{\infty} N_{ax}^{ave-eq}(D, v_{rel}, t) f_{rel}(v_{rel}) dv_{rel}$$

## 衝突リスク評価式導出(4)

$N_{ax}^{ave-v,eq}(D,t)$  は通報時刻から時間とともに増加する。

航空機の衝突回避行動には無視できない時間  $\tau$  がかかる。



通報時刻からの経過時間で「平均」し、衝突回避行動所要時間  $\tau$  を考慮に入れた衝突リスク

$$N_{ax}^{ave-v,eq,t}(D,\tau) = \frac{1}{T} \int_0^{T+\tau} N_{ax}^{ave-v}(D,t) dt$$

T=27min

通報時刻からの経過時間で平均

## 衝突リスク評価式導出(5)

シミュレーションにより名目距離Dの分布がわかる。

$f_{D,mon}(D)$ : mon月のFDPデータをもとに算出した確率密度関数

名目距離で「平均」した衝突リスク

$$N_{ax,mon}^{ave-v,eq,t,D}(\tau) = \sum_D N_{ax}^{ave-v,eq,t}(D, \tau) f_{D,mon}(D)$$

名目距離で平均

# 衝突回避行動

項目	時間 (秒)
スクリーンの更新・管制官によるコンフリクトの認識	30
送信メッセージの構成	15
アップリンク所要時間	別表
パイロットの反応に要する時間	30
航空機が慣性飛行状態から上昇・下降に至るのにかかる時間	75
合計	$150 + \alpha$

# アップリンクパフォーマンス例

	Jan. 2005	
<b>No. of msg.</b>	<b>19,817</b>	
<b>Max.</b>	<b>0:05:19</b>	
<b>10(s) <math>\geq</math> X</b>	<b>11,906</b>	<b>(60.1%)</b>
<b>20(s) <math>\geq</math> X</b>	<b>4,947</b>	<b>(85.0%)</b>
<b>30(s) <math>\geq</math> X</b>	<b>1,406</b>	<b>(92.1%)</b>
<b>60(s) <math>\geq</math> X</b>	<b>1,000</b>	<b>(97.2%)</b>
<b>90(s) <math>\geq</math> X</b>	<b>174</b>	<b>(98.1%)</b>
<b>120(s) <math>\geq</math> X</b>	<b>101</b>	<b>(98.6%)</b>
<b>180(s) <math>\geq</math> X</b>	<b>53</b>	<b>(98.8%)</b>
<b>180(s) &lt; X</b>	<b>230</b>	<b>(100.0%)</b>

## 衝突リスク評価式導出(6)

上記の表により衝突回避行動の所要時間  $\tau$  の分布がわかる。

$u_{\text{mon}}(\tau)$ : mon月のデータをもとに算出した確率密度関数

衝突回避行動の所要時間で「平均」した衝突リスク

$$N_{ax,mon}^{total-ave} = \sum_{\tau} N_{ax,mon}^{ave-v,eq,t,D}(\tau)u(\tau)$$

考察空域全体で「平均」した  
最終的な衝突リスク

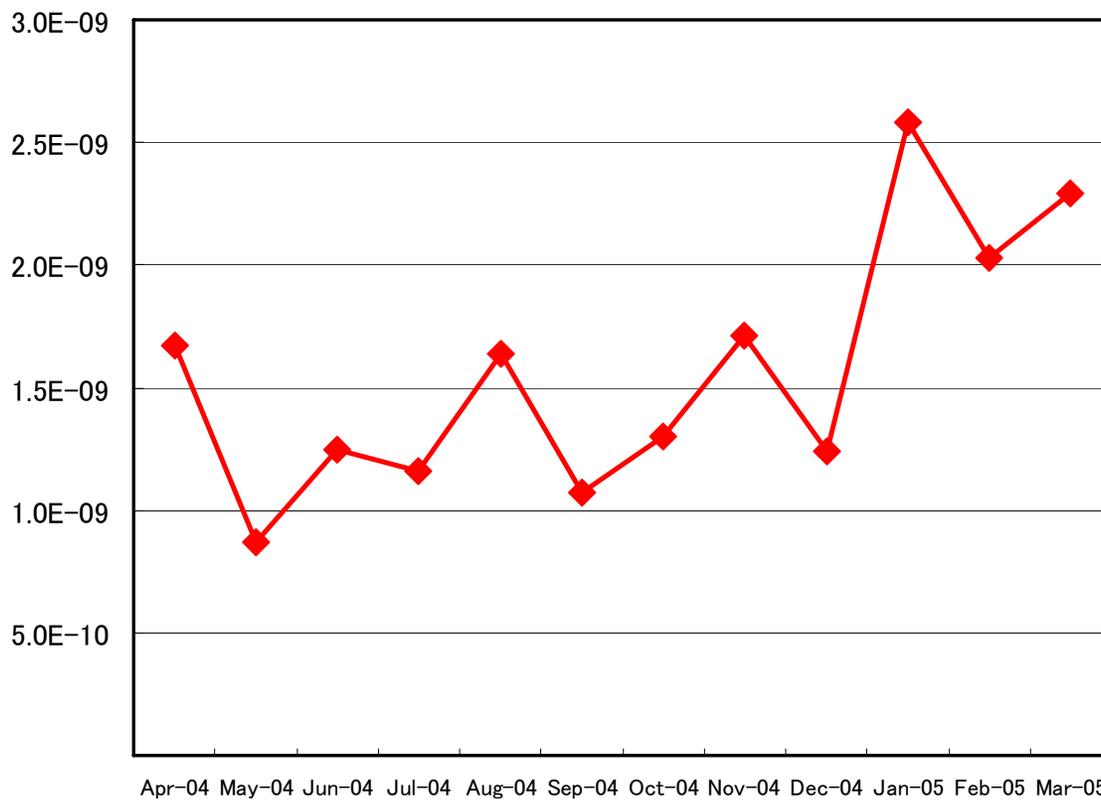
# 計算結果

月	Apr. 2004	May 2004	Jun. 2004
衝突リスク	$1.67 \times 10^{-9}$	$0.87 \times 10^{-9}$	$1.25 \times 10^{-9}$
月	Jul. 2004	Aug. 2004	Sep. 2004
衝突リスク	$1.16 \times 10^{-9}$	$1.64 \times 10^{-9}$	$1.07 \times 10^{-9}$
月	Oct. 2004	Nov. 2004	Dec. 2004
衝突リスク	$1.30 \times 10^{-9}$	$1.71 \times 10^{-9}$	$1.24 \times 10^{-9}$
月	Jan. 2005	Feb. 2005	Mar. 2005
衝突リスク	$2.58 \times 10^{-9}$	$2.03 \times 10^{-9}$	$2.29 \times 10^{-9}$

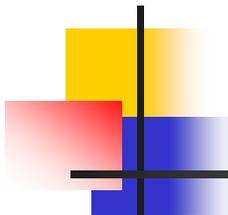
単位は[件／飛行時間]

# 計算結果

衝突リスク  
「件／飛行時間」



月

A decorative graphic on the left side of the slide, featuring a vertical black line and a horizontal black line intersecting. The background behind the lines is composed of overlapping colored rectangles: yellow at the top, red on the left, and blue at the bottom.

# 謝辞

- 国土交通省東京航空交通管制部・航空局関係各位
- 河田・中下両氏