

# 航空機遅延と滑走路処理容量に関する研究

平田 輝満 (茨城大学大学院 都市システム工学専攻)

## (1) 国内航空ネットワーク上の波及遅延解析

# 我が国の航空サービスの定時性率 On-Time Performance

- ▶ 我が国の定時性率は世界トップクラス
- ▶ 一方、近年は徐々に悪化傾向
  - ⇒ 交通量の増加？ LCCの影響？ 折り返し時間の短縮？ 悪天候？

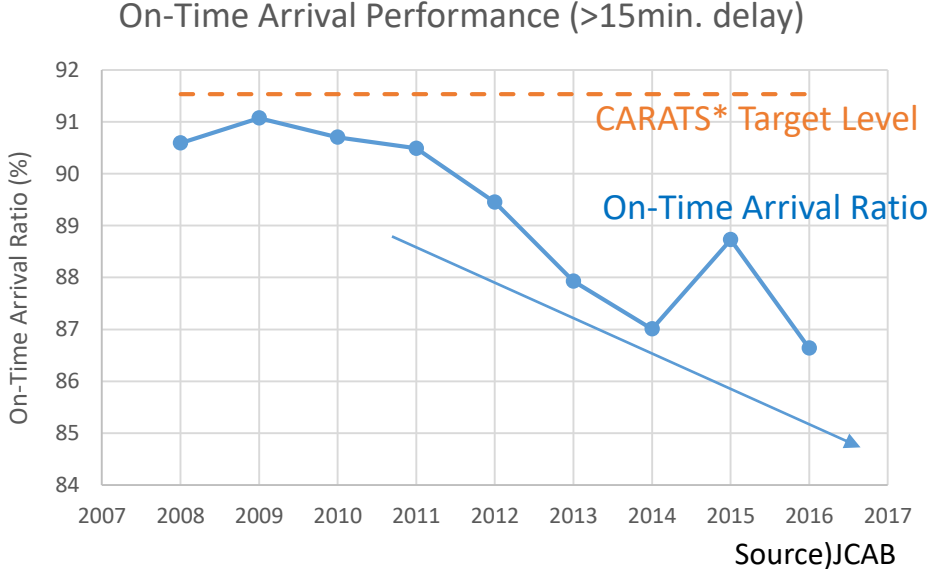
Source) OAG 2018 Punctuality League

Table 14: Top 20 mega airports by OTP

Rank	Coverage	Airport Name	Code	OTP 2017
1	91.9%	Tokyo Haneda	HND	86.75%
2	91.0%	Madrid	MAD	83.63%
3	99.5%	Atlanta	ATL	82.38%
4	97.0%	Denver	DEN	82.24%
5	97.8%	Dallas/Fort Worth	DFW	81.36%
6	97.4%	Singapore Changi	SIN	80.57%
7	98.4%	Chicago O'Hare	ORD	79.85%

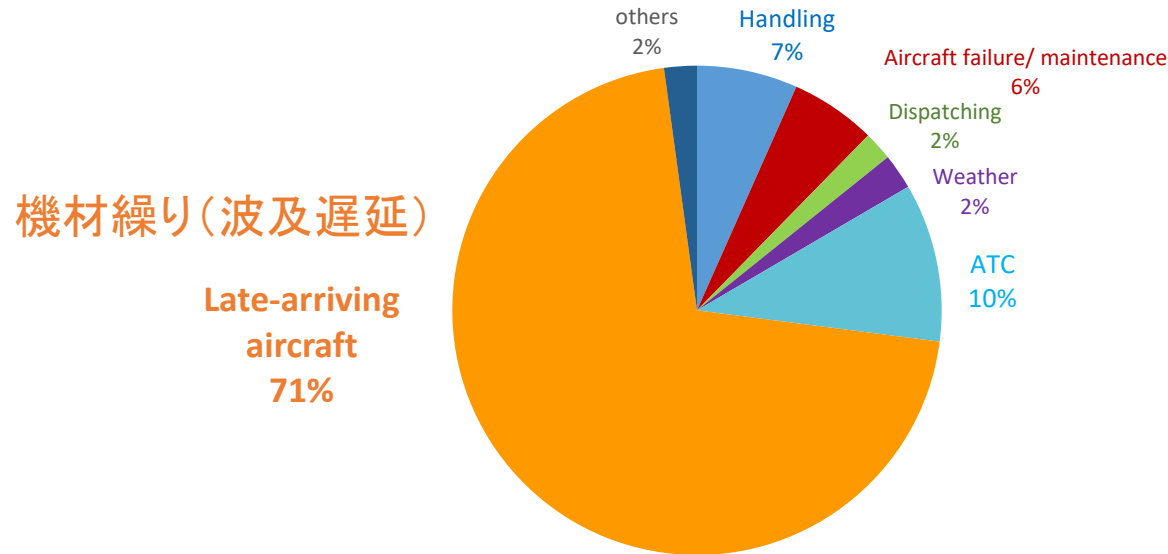
Table 1: Top 20 mega airlines by OTP\*

Rank	Coverage	Airline Name	Code	OTP 2017
1	99.1%	Japan Airlines	JL	85.27%
2	97.4%	All Nippon Airways	NH	83.81%
3	99.7%	Delta Air Lines	DL	82.76%
4	97.1%	IndiGo	6E	81.22%
5	99.7%	Alaska Airlines	AS	81.06%
6	99.5%	SAS	SK	80.90%
7	99.7%	United Airlines	UA	79.86%



\*CARATS: Collaborative Actions for Renovation of Air Traffic Systems

# 遅延要因



出発便の遅延要因別シェア (2016, JCAB: aggregated departure delay cause of the flights with 15 minutes or more delay at the number of flight basis)

- 「機材繰り遅延」が70%と高いが、その真の要因(発生源)は別にある
- ネットワークレベルの遅延軽減策を検討するには、ネットワーク上での波及遅延の実態を把握する必要がある

# 遅延データベースの作成



Airline website

Delay time



FlightRadar24

Aircraft ID



これらを統合して、波及遅延を把握可能なデータベースを作成

- FY2016 data samples: 261,451 flights
- データ欠損等があり、国内線全便の45%強のみのデータサンプル

# 観測された遅延を「オリジナル遅延」と「波及遅延」に分離

(Welman (2010), Kafle et al (2016))

a) Original delay  $o_1$  of the first flight ( $i=1$ ) of the day

$$o_1 = d_1$$

b) At node  $i=2, \dots, I$

$$p_{i-1,i} = o_{i-1} \times \min(1, d_i / d_{i-1})$$

$$p_{k,i} = p_{k,i-1} \times \min(1, d_i / d_{i-1})$$

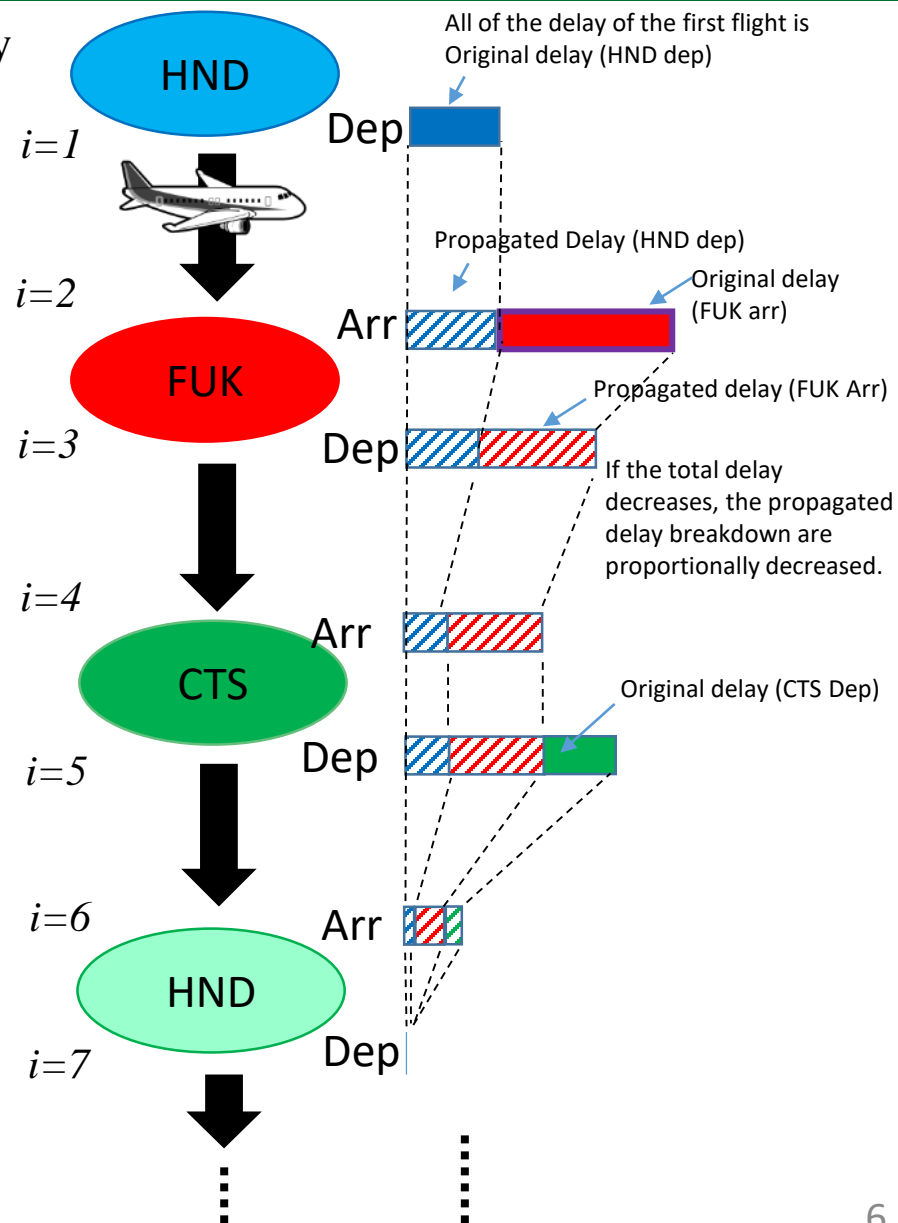
$$o_i = d_i - \sum_{k=1}^{i-1} p_{k,i}$$

$d_i$  is the observed total delay time at node  $i$

$o_i$  is the original delay time

$p_{k,i}$  is the propagated delay at node

ノード*i*(空港)で観測された遅延はノード*i*自身に起因するオリジナル遅延と上流からの波及遅延に分離が可能

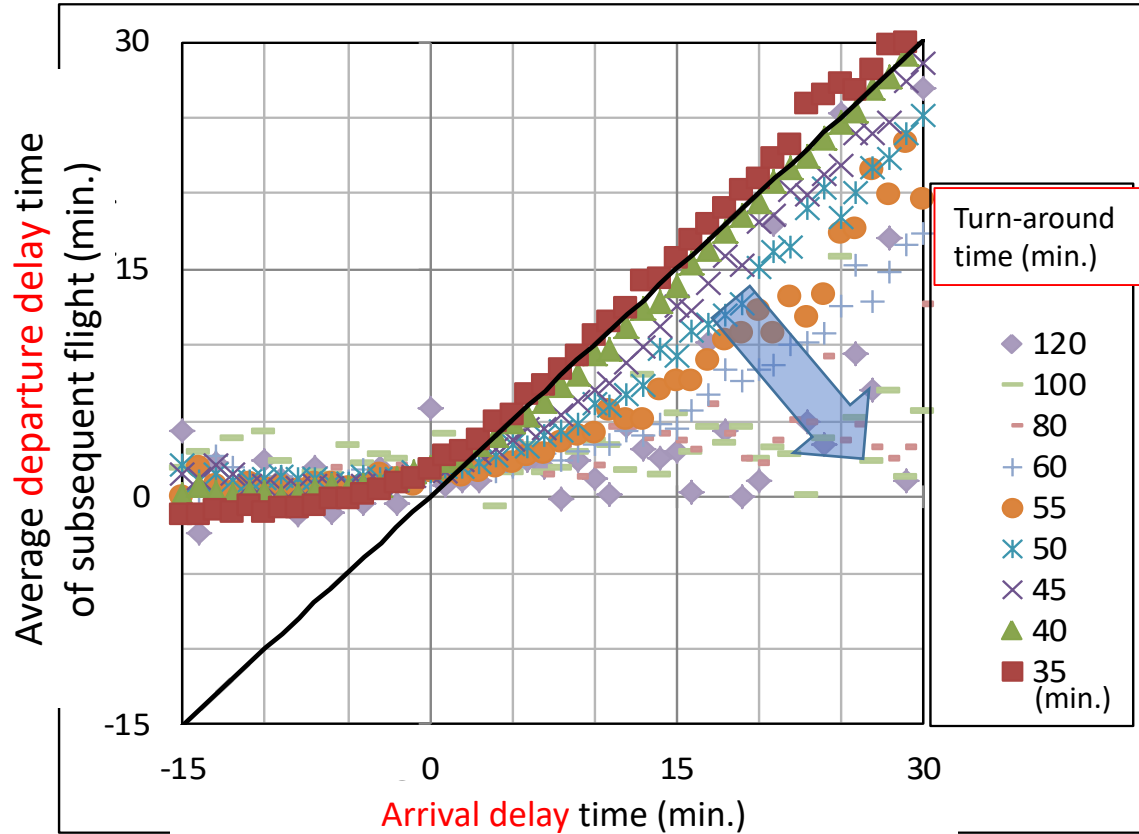


# 遅延の発生源はどこか？

## ➤ 各空港で観測された波及遅延の原因空港の構成比

波及遅延(分)の 構成比		原因空港										総計	
		羽田	成田	福岡	関西	伊丹	那覇	新千歳	中部	鹿児島	仙台		その他
観測空港	羽田	37.0%	0.0%	6.8%	1.4%	3.1%	6.8%	7.2%	0.7%	3.4%	0.1%	33.6%	100%
	成田	0.1%	29.3%	17.6%	11.5%	1.1%	10.6%	12.1%	4.8%	3.4%	0.3%	9.1%	100%
	福岡	20.3%	11.4%	25.9%	4.2%	3.3%	13.5%	3.8%	4.6%	1.1%	1.0%	10.7%	100%
	関西	7.1%	13.0%	9.0%	32.7%	1.3%	11.4%	13.0%	0.5%	2.3%	1.5%	8.2%	100%
	伊丹	15.8%	1.3%	3.8%	0.6%	27.7%	9.6%	10.4%	1.8%	4.2%	1.8%	22.9%	100%
	那覇	17.3%	6.5%	8.3%	7.1%	6.0%	35.5%	2.8%	2.2%	0.6%	0.3%	13.4%	100%
	新千歳	18.9%	7.6%	4.6%	6.5%	7.5%	5.6%	28.1%	8.2%	0.7%	1.8%	10.4%	100%
	中部	4.5%	5.8%	10.3%	0.8%	3.9%	8.9%	19.4%	20.4%	7.7%	1.4%	16.9%	100%
	鹿児島	29.0%	6.3%	2.2%	3.3%	14.5%	1.9%	3.7%	9.5%	21.5%	0.6%	7.5%	100%
	仙台	2.6%	1.1%	6.6%	3.8%	14.9%	6.4%	32.9%	12.0%	0.2%	10.1%	9.4%	100%
その他空港	41.0%	1.6%	4.2%	1.5%	7.8%	7.7%	5.6%	3.5%	1.0%	0.3%	25.7%	100%	
総計	27.0%	4.9%	7.8%	4.6%	6.9%	10.0%	9.9%	4.1%	2.7%	0.8%	21.3%	100%	

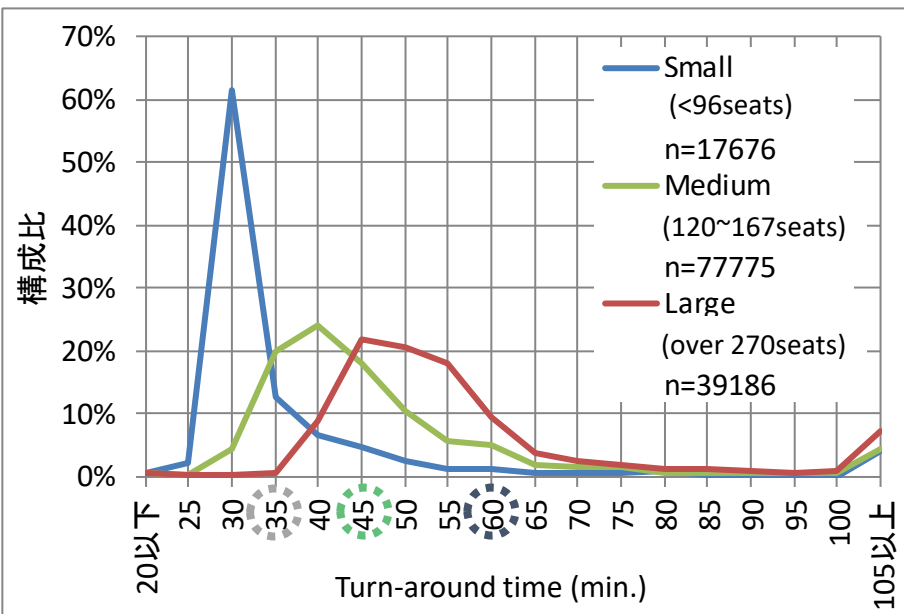
# 折り返し時間 (Turn-around Time) 別の波及遅延： 到着⇒出発



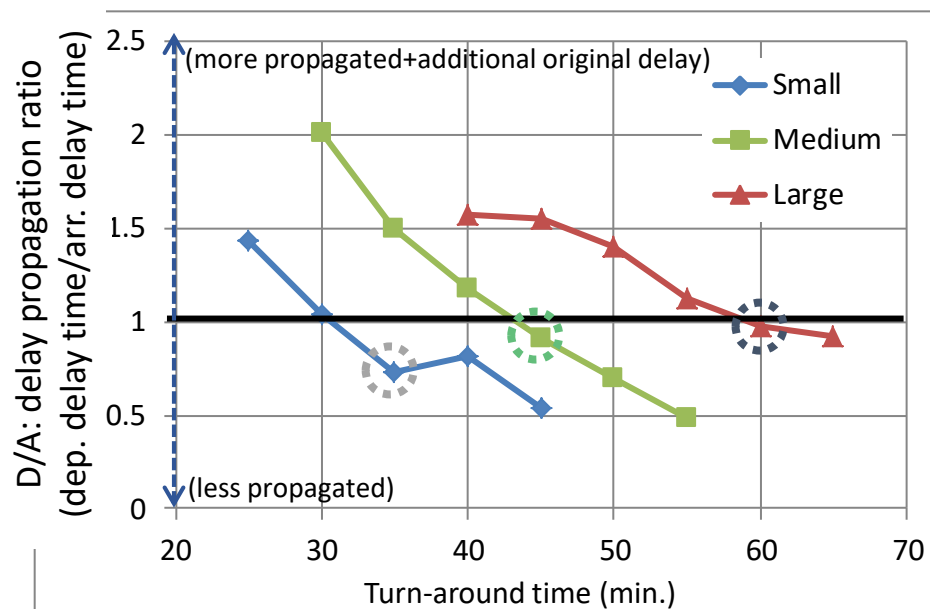
長い折り返し時間(バッファ時間)により遅延の波及が軽減



# 機材の大きさ別の折り返し時間と波及遅延

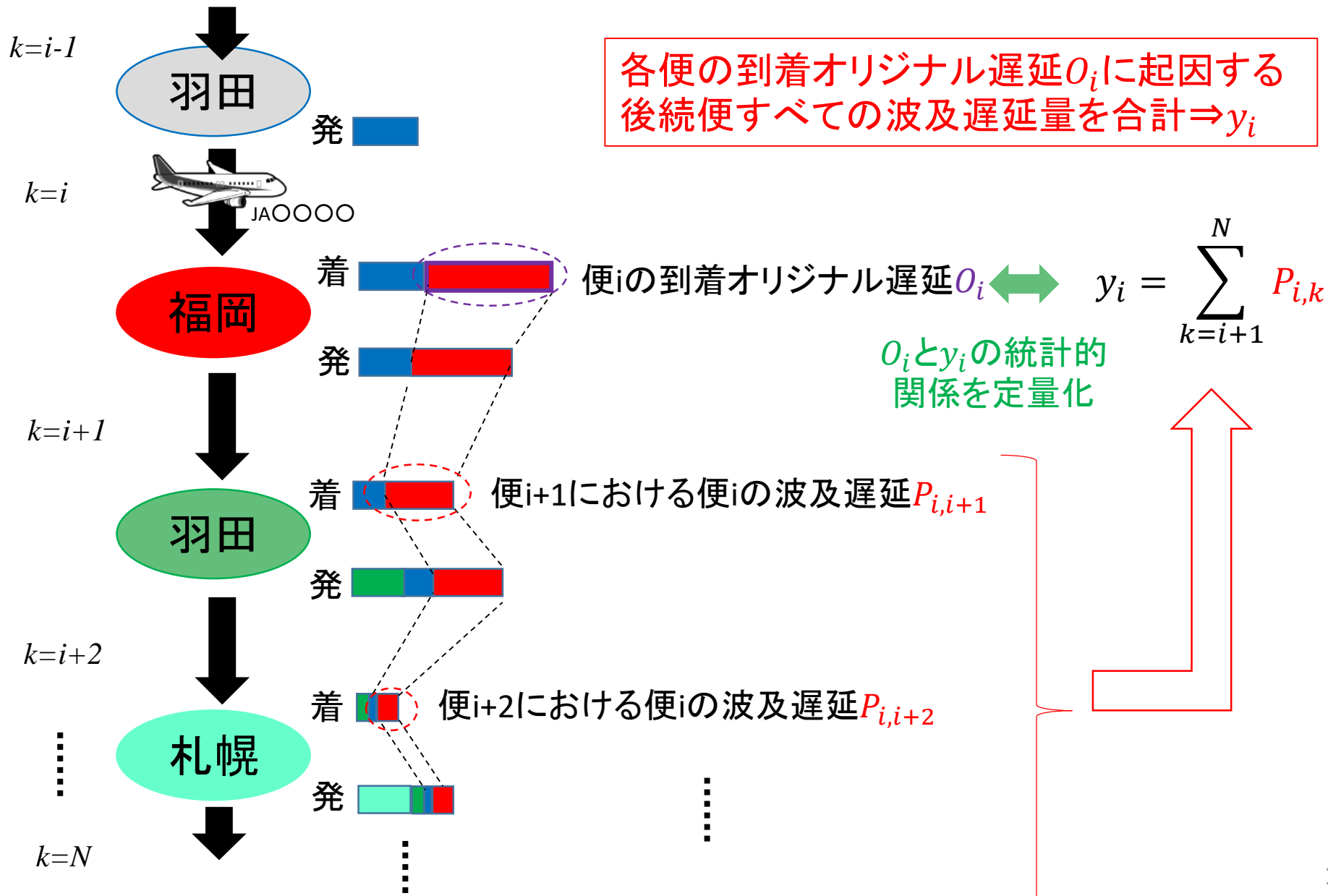


Turn-around time distribution by aircraft-size



D/A<1: some recovery with buffer time (less delay propagation)  
 D/A=1 : no recovery of delay (same delay time after turn-around)  
 D/A>1: additional original delay when turn-around

# 波及遅延乗数のモデル化のためのデータ作成



各便の到着オリジナル遅延 $O_i$ に起因する  
 後続便すべての波及遅延量を合計 $\Rightarrow y_i$

便 $i$ の到着オリジナル遅延 $O_i$

$$y_i = \sum_{k=i+1}^N P_{i,k}$$

$O_i$ と $y_i$ の統計的  
 関係を定量化

便 $i+1$ における便 $i$ の波及遅延 $P_{i,i+1}$

便 $i+2$ における便 $i$ の波及遅延 $P_{i,i+2}$

# 波及遅延量を説明する計量経済モデル

## ● 離散-連続モデル(Type1-Tobit model)

$$y_i = \begin{cases} y_i^* & y_i^* > 0 \\ 0 & y_i^* \leq 0 \end{cases}$$

便*i*のオリジナル遅延に起因した総波及遅延

オリジナル遅延のパラメータに時間帯・運航バッファ・折り返しバッファとの交差項を導入

$$y_i^* = \beta_0 + \left( \sum_{t=1}^4 \beta_t \delta_i^t + \beta_5 B_i^O + \beta_6 B_i^G \right) O_i + \varepsilon_i$$

(潜在変数)

時間帯ダミー
便*i*+1以降の運航時間バッファの合計
便*i*+1以降の折り返し時間バッファの合計
便*i*のオリジナル遅延

$O_i$ ; オリジナル遅延(分)  $\beta_i (i = 0, \dots, 6)$ ; パラメータ  $\varepsilon_i$ ; 誤差項  $N \sim (0, \sigma^2)$   
 $\delta_i^t (t = 1, \dots, 4)$ ;  $O_i$ が観測された時間帯*t*を示すダミー (任意の時間区分でよい)  
 $B_i^O$ ; 予定運航時間に含まれるバッファ (分)  
 $B_i^G$ ; 予定折返し時間に含まれるバッファ (分)

# 波及遅延量を説明する計量経済モデル

Tobit modelから導出される対数尤度関数から最尤法により各パラメータを推定

$$\beta = \underset{\beta}{\operatorname{argmax}} \{ \log L \} = \underset{\beta}{\operatorname{argmax}} \left\{ \sum_{y_i^* \leq 0} \log \left[ 1 - \Phi \left( \frac{x_i \beta}{\sigma} \right) \right] + \sum_{y_i^* > 0} \log \left[ \frac{1}{\sigma} \phi \left( \frac{y_i - x_i \beta}{\sigma} \right) \right] \right\}$$

- 時間帯 $t$ においてオリジナル遅延が単位時間変化した場合の波及遅延量変化 $D_p^t$  (分)\*

$$D_p^t = (\beta_t + \beta_5 + \beta_6) \Phi \left( \frac{\beta \bar{x}}{\sigma} \right) \quad (\Phi(\cdot) \text{標準正規分布の累積分布関数})$$

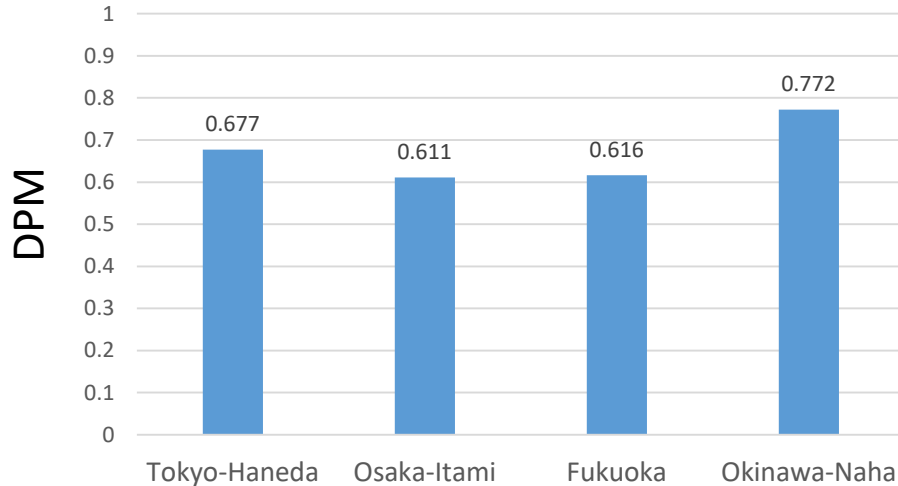
- 時間帯 $t$ においてオリジナル遅延が単位時間変化した場合の総遅延削減量(波及遅延乗数: Delay Propagation Multiplier $_t$ (DPM $_t$ ))を定義

$$\text{DPM}_t = \frac{1 + D_p^t}{1}$$

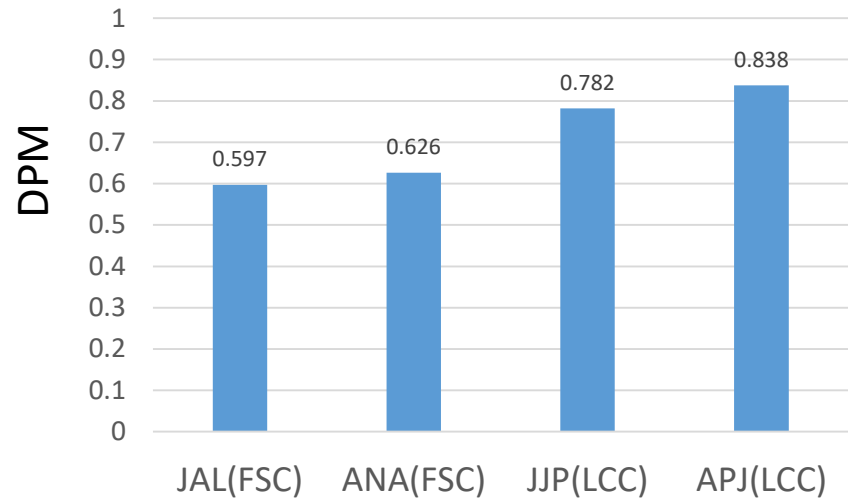
\*Tobitモデルにおいて説明変数が1単位増加する際の被説明変数の増分は該当するパラメータ $\beta_i$ と一致しない。説明変数 $x_k$ が1単位増加する際の期待値は $\beta \Phi((\bar{x} \beta) / \sigma)$ である。

# 推定結果の一例: Delay Propagation Multiplier (DPM)

Delay Propagation Multiplier (Time1) by Airport



Delay Propagation Multiplier (Time1) by Airlines



\*10 major airports average in Japan: 0.58

\*50 major airports average in US: 0.61 (ref. Welman 2010)

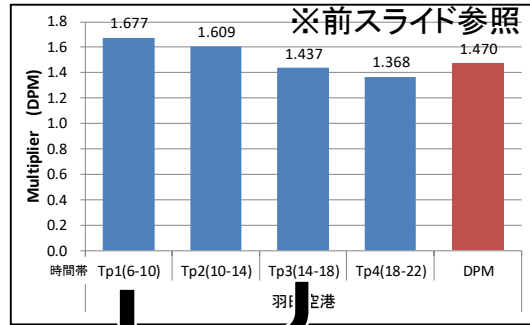
- 例えば、羽田での1分の遅延軽減は国内ネットワーク全体では1.677分の遅延軽減に繋がる
- LCCの遅延はFSCよりも波及しやすい
- LCCの増加 (and/or折り返し時間の短縮) により波及遅延は増大し、それらの影響を統計的に推計可能

# DPMの適用例：波及遅延を考慮した総遅延削減効果

CARATS事業 羽田空港における「RECAT+AMAN/DMAN/SMANの導入」への遅延波及率指標の適用例

➤ 施策により回避された年間総遅延(CATRATS報告書<sup>3)</sup>より抜粋)

	2014	2019	2020	2021	2022	2032	2033
夕方3時間で回避された年間総遅延(h)	642	642	756	756	756	756	756
朝1時間で回避された年間総遅延(h)	214	214	214	214	214	214	214
上記の合計(h)	857	857	970	970	970	970	970

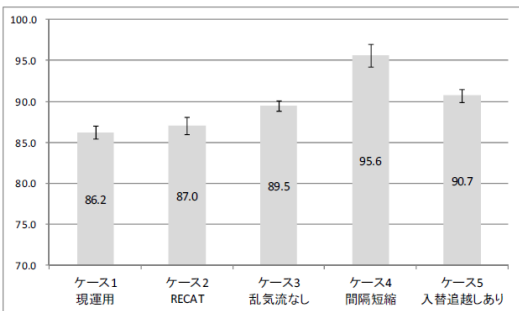
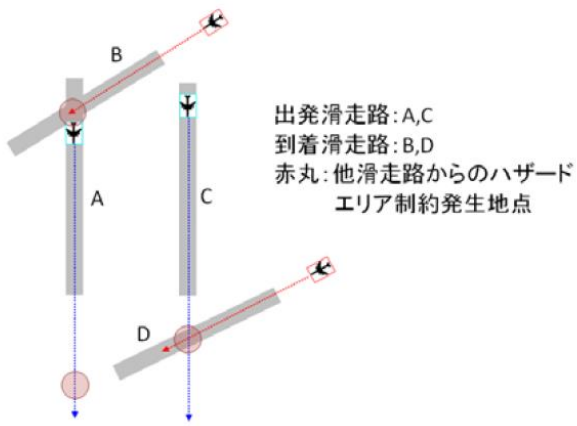


朝時間帯のDPMt: 1.677  
夕方時間帯のDPMt: 1.437

2020年における波及遅延を含む年間総遅延削減量は...

$$\begin{array}{c}
 \text{朝時間帯} \\
 214\text{時間} \times 1.677
 \end{array}
 +
 \begin{array}{c}
 \text{夕方時間帯} \\
 756\text{時間} \times 1.437
 \end{array}
 = 1445.3\text{時間}$$

※本事業の便益評価は朝1時間・夕方3時間のピーク時間帯を対象に実施(他時間帯では効果をゼロとしている)  
 ※2020年以降は朝時間帯で80回/時・夕方時間帯で90回/時のシナリオを想定  
 ※環境変数(バッファ)が変動しない想定



3) CARATS推進協議会ATM検討WG:平成26年度活動報告書

図9 1時間あたりの空港離着陸回数

# DPMの適用例：航空市場環境変化の影響の推計

2020年における波及遅延を含む年間総遅延削減量(前スライドより)

$$\begin{array}{l} \text{朝時間帯} \\ 214\text{時間} \times 1.677 \end{array} + \begin{array}{l} \text{夕方時間帯} \\ 756\text{時間} \times 1.437 \end{array} = \mathbf{1445.3\text{時間}}$$

## LCCシェアが50%に増加

モデル推定 係数 $\beta_5$ および $\beta_6$ より

朝時間帯のDPM:  $1.677 \Rightarrow 1.809$   
夕方時間帯のDPM:  $1.437 \Rightarrow 1.569$

8.9%増

$$214\text{時間} \times 1.809 + 756\text{時間} \times 1.569 = \mathbf{1573.3\text{時間}}$$

## バッファ50%削減時

モデル推定 係数 $\beta_5$ および $\beta_6$ より

朝時間帯のDPM:  $1.677 \Rightarrow 2.585$   
夕方時間帯のDPM:  $1.437 \Rightarrow 2.345$

61%増

$$214\text{時間} \times 1.809 + 756\text{時間} \times 1.569 = \mathbf{2326.0\text{時間}}$$

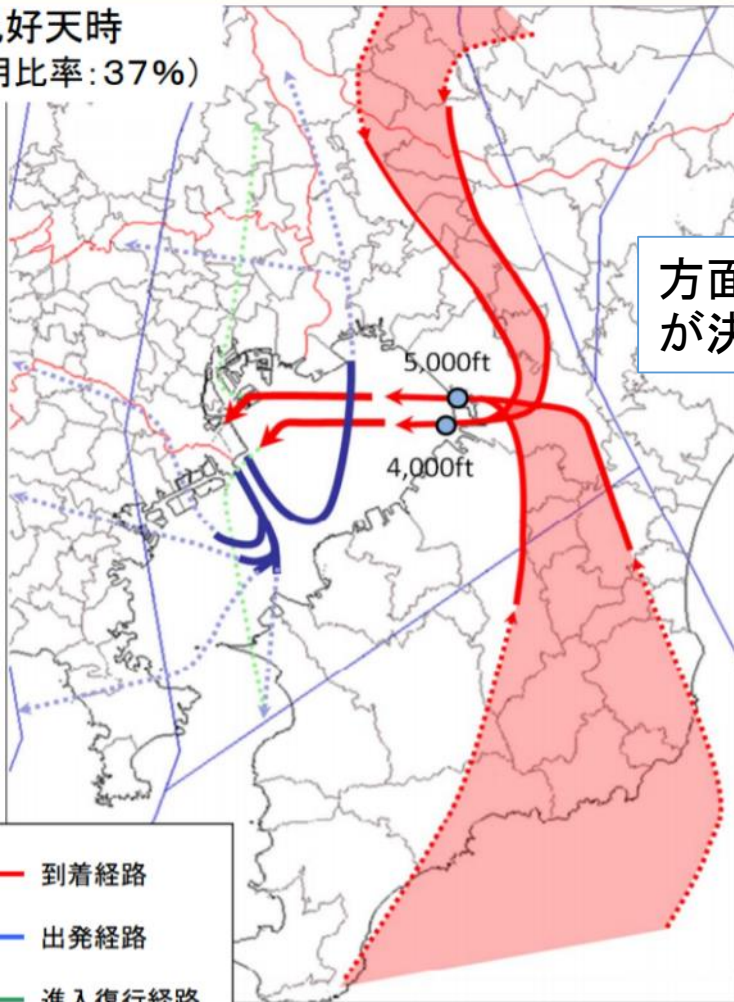
\* 逆に、バッファ時間の拡大による波及遅延の削減量の推定も可能  $\Leftrightarrow$  機材の稼働率低下

## (2)羽田空港における離陸機数予測と到着間隔制御による 遅延軽減方策に関する研究



# 羽田空港 南風運用時の飛行経路

南風好天時  
(運用比率:37%)

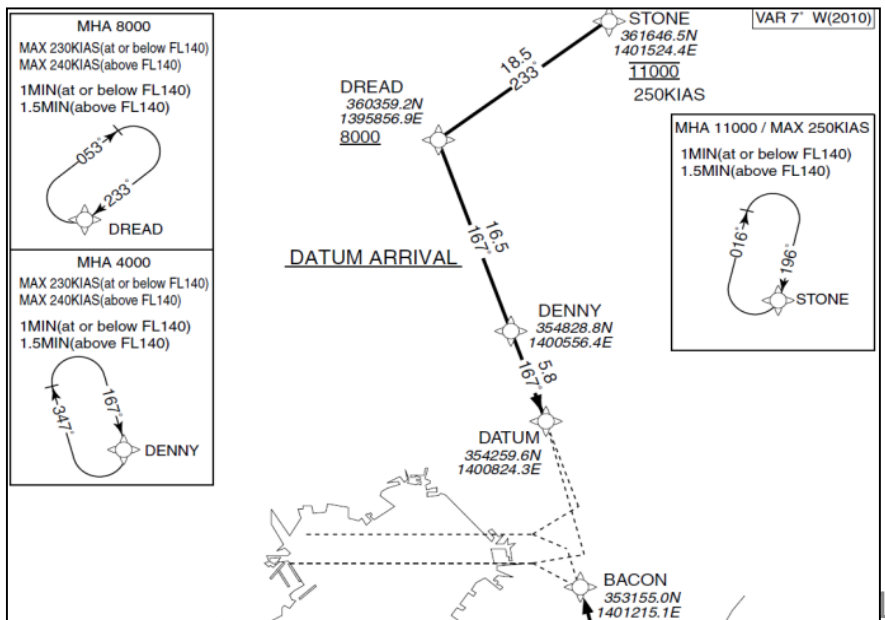
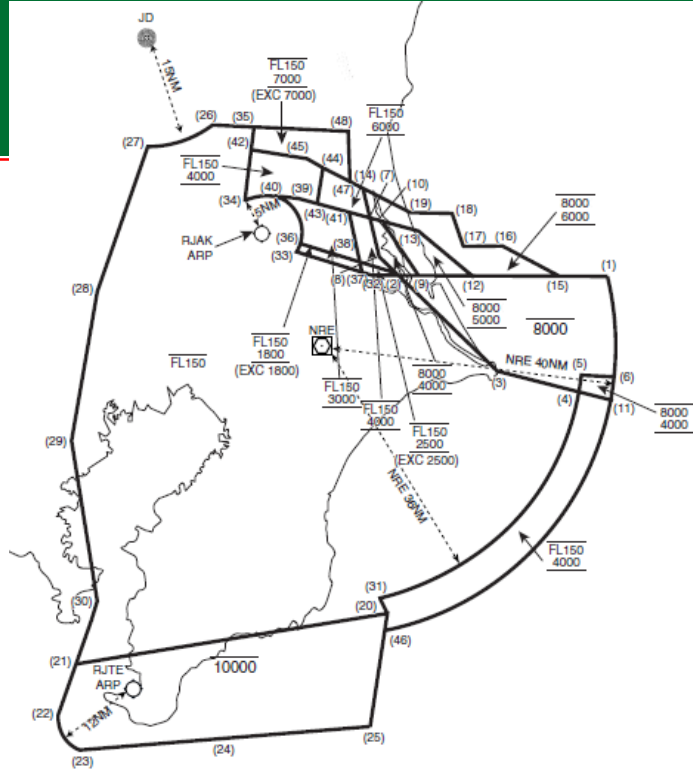


方面別に滑走路が決まっている

— 到着経路  
— 出発経路  
— 進入復行経路

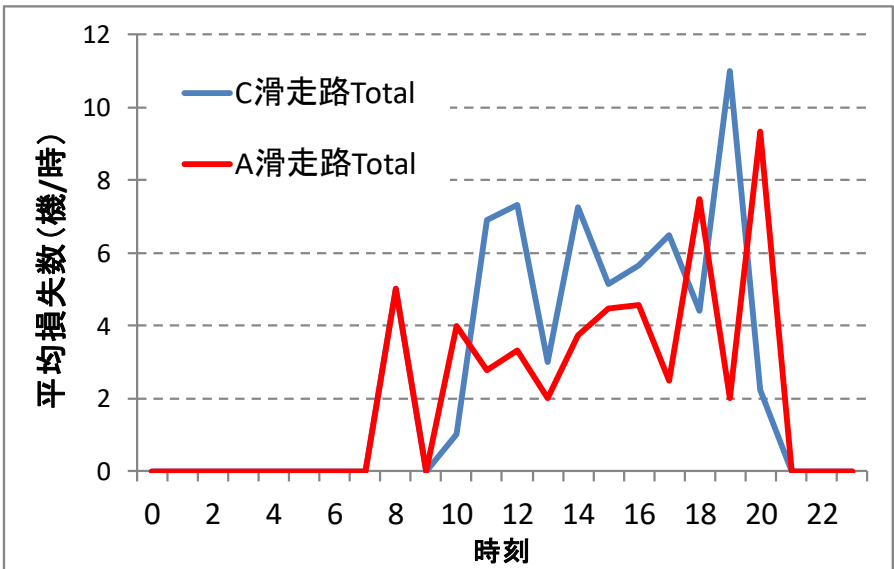
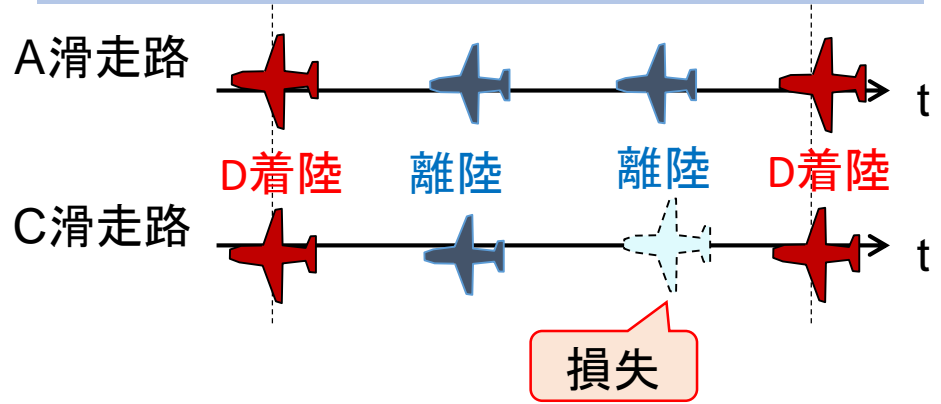
実線:6000フィート未満  
 点線:6000フィート以上

- ・ 網掛けは、レーダー誘導による標準的  
を越えて飛行する可能性があります。
- ・ 想定運用比率は、環境影響評価時の想

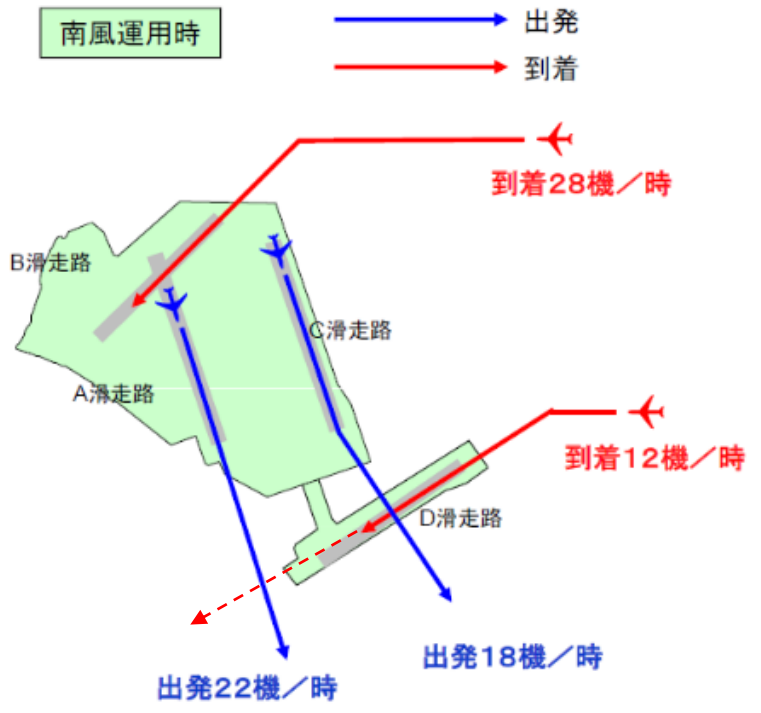


# 現状の運用における非効率性の例

## 着陸機の中に離陸機を処理する場合



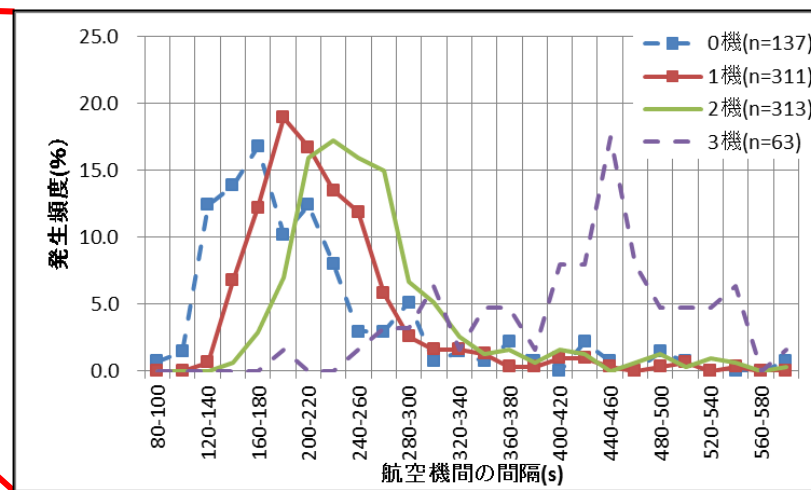
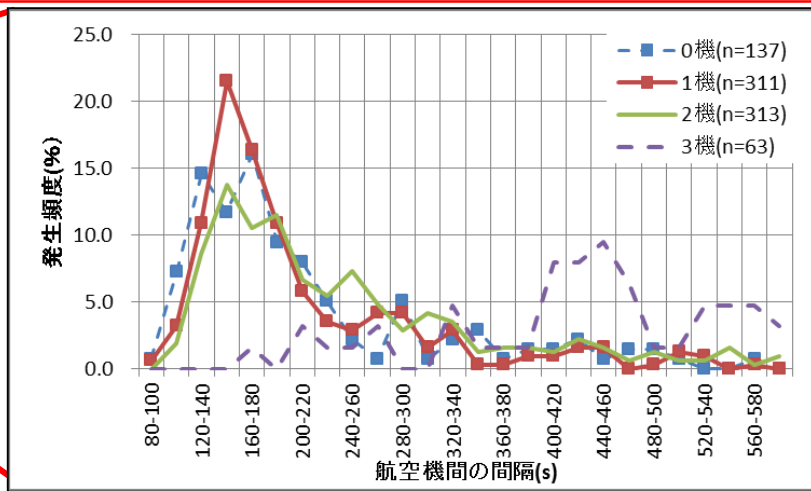
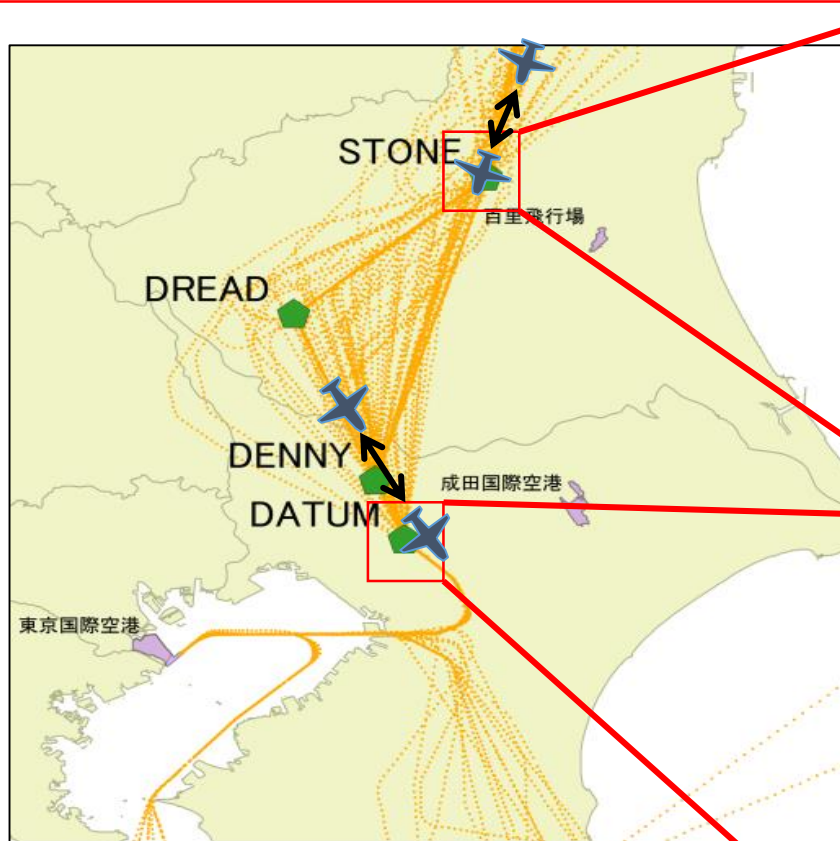
離陸機数の差によって生じた損失機数  
(CARATS DATA2014から集計)



- D着陸機間の離陸機数に差があると損失
- 発着枠の設定数からC滑走路の損失は大きくなるが、それでも多くの時間帯でどちらかの滑走路で滑走路未使用の時間が存在

# ターミナル空域の到着間隔調整と滑走路処理効率

～CARATS OPEN DATA(2014)による分析:D滑走路着陸とA/C滑走路離陸

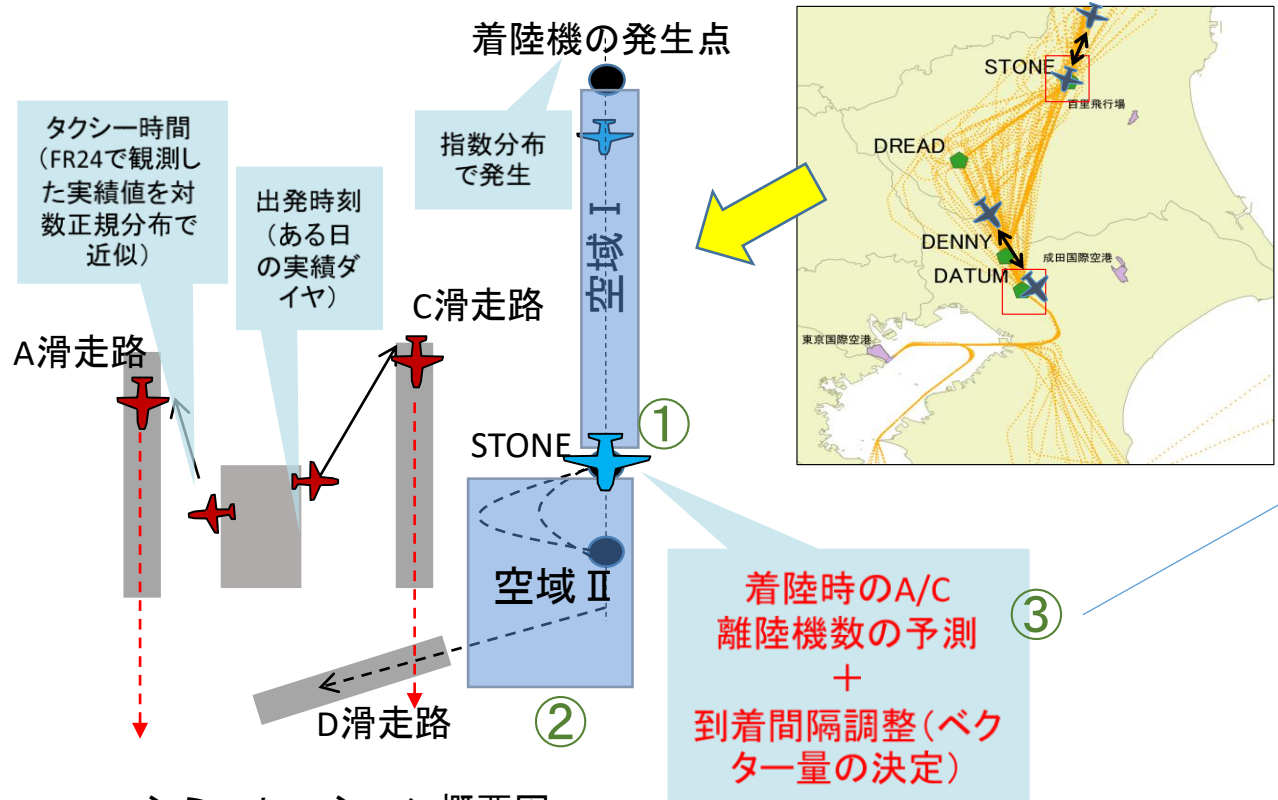


着陸機間隔の分布 (CARATS DATA2014から集計)

- STONEでは離陸機数に関係なく160~180秒程度の間隔に調整
- DATUMでは着陸間に挟む離陸機数が多いと着陸機の間隔が広がる⇒STONE-DATUM間で離陸機数に応じて着陸機の間隔をある程度調整可能 (このセクタの大きさでは最大90秒程度)

# ターミナル空域-滑走路運用シミュレータ

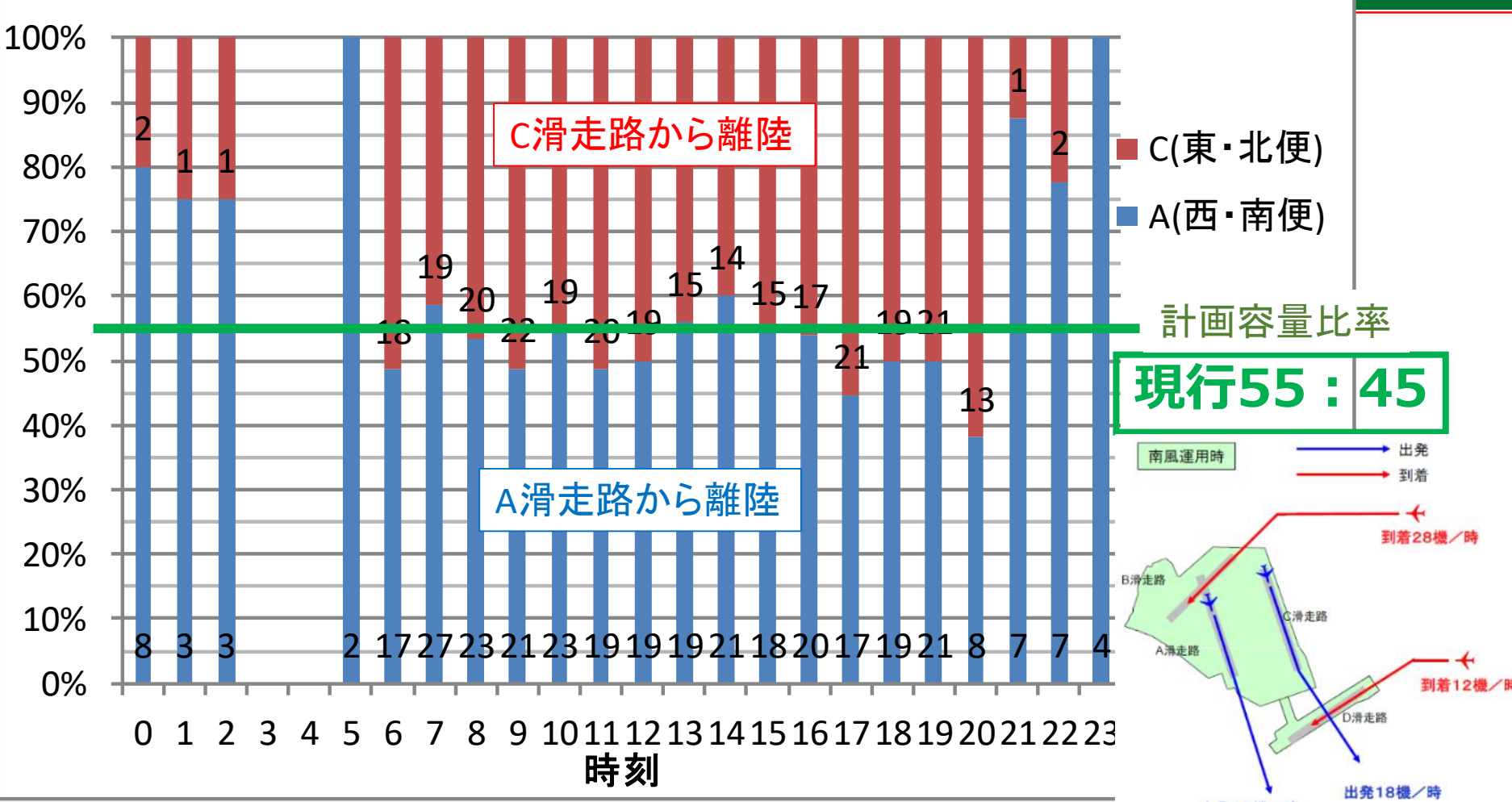
\* 現状のターミナル空域(+α)の到着間隔設定の意思決定をシミュレータで再現  
 → 到着機の間隔設定条件が滑走路処理容量に与える影響を評価



- ③関連する離陸機数(A・C滑走路)の予測
- i. スポットアウト前の出発機: 出発予定時刻(SOBT)+平均タクシー時間
  - ii. スポットアウト後でタクシー中の出発機: 出発時刻(AOBT)+平均タクシー時間
  - iii. 滑走路脇で待機中の出発機: 無条件で離陸機にカウント

- 運用条件・パラメータ
- ①ターミナル空域への入域最低間隔(現状:180秒程度)
  - ②ターミナル空域内の到着ベクター量上限(現状:90秒程度)
  - ③STONE通過時における関連離陸機数の予測と間隔調整(現状:ラフに考慮)

# 離陸機の方面別滑走路の制約



▲時間帯別離陸比率(シミュレーションダイヤ: 2017/1/30)

現状の設定は、飛行方面別に使用滑走路を限定する**方面別滑走路**  
 ⇒需要比率に応じて、滑走路容量全体の使用効率が低下

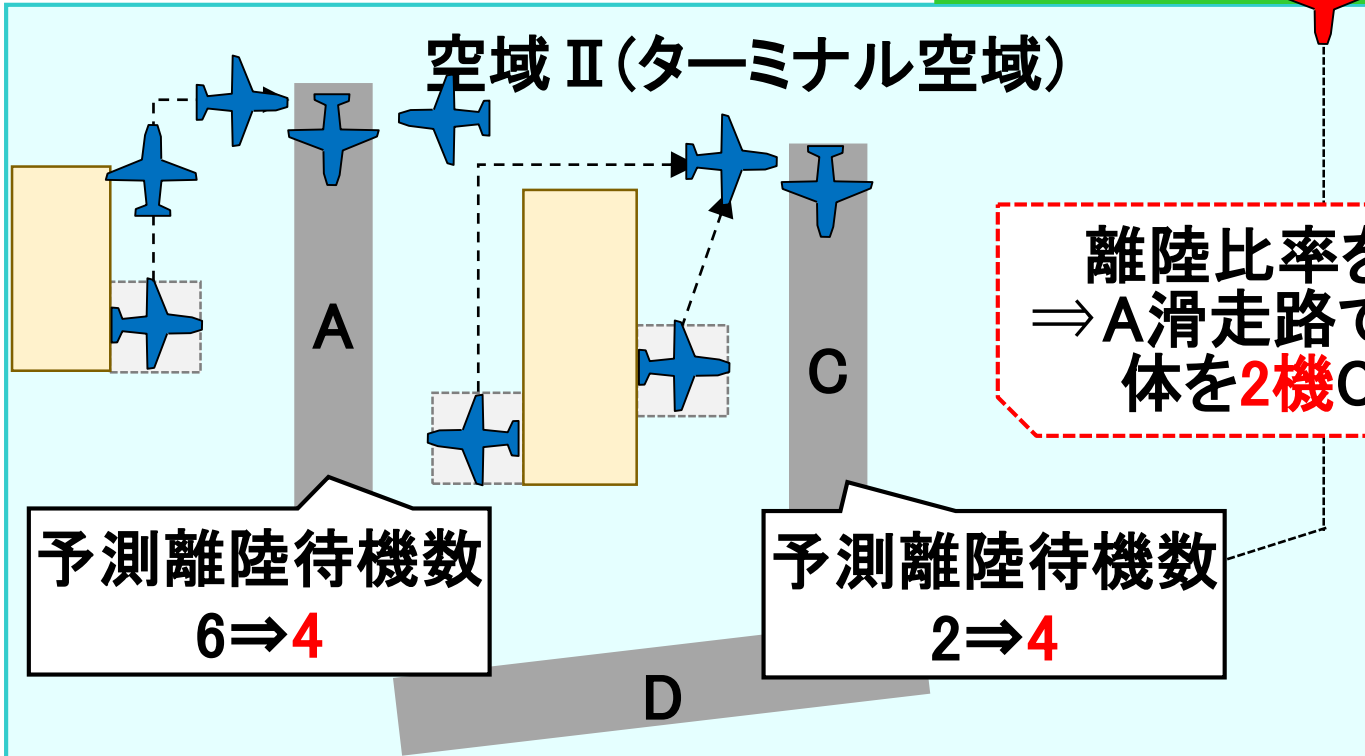


# 動的離陸滑走路指定(離陸比率の調整方法)

方面別離陸滑走路の制約緩和を仮定し、リアルタイムの混雑状況をもとに離陸滑走路を動的に指定

③STONE通過～着陸までに  
離陸可能な機数の予測

空域 I  
(航空路空域)



離陸比率を50:50に設定  
⇒ A滑走路で離陸予定の機  
体を2機C滑走路へ変更

\* 離陸時刻は正確に  
予測できることを仮定

# 動的離陸滑走路指定の遅延軽減効果（容量拡大）

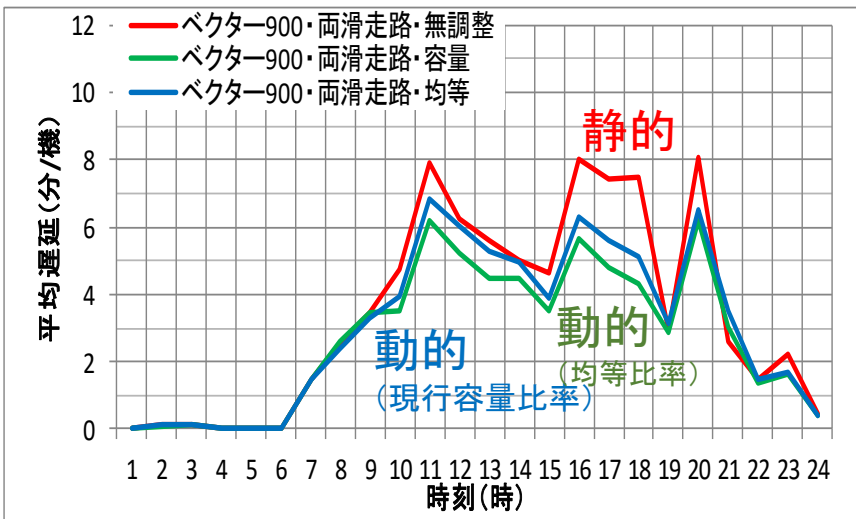


図-7 A滑走路の時間帯別平均遅延量の比較

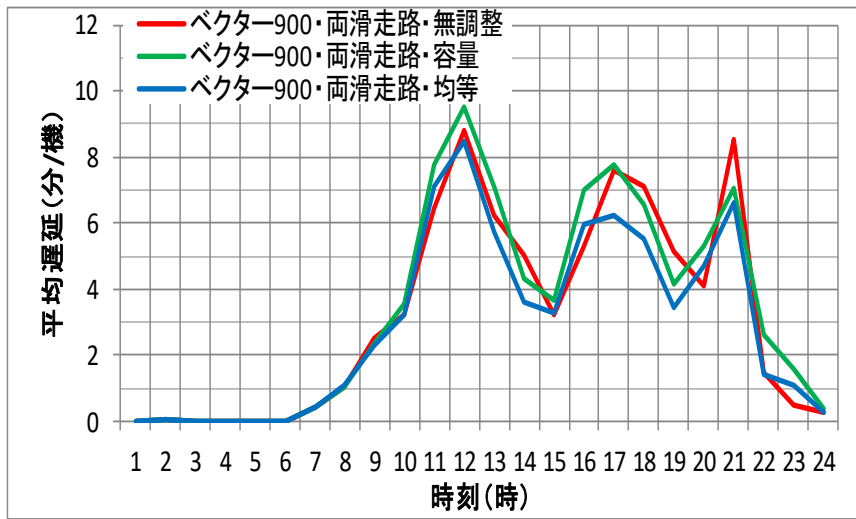


図-8 C滑走路の時間帯別平均遅延量の比較

遅延軽減  
or  
容量拡大  
が可能

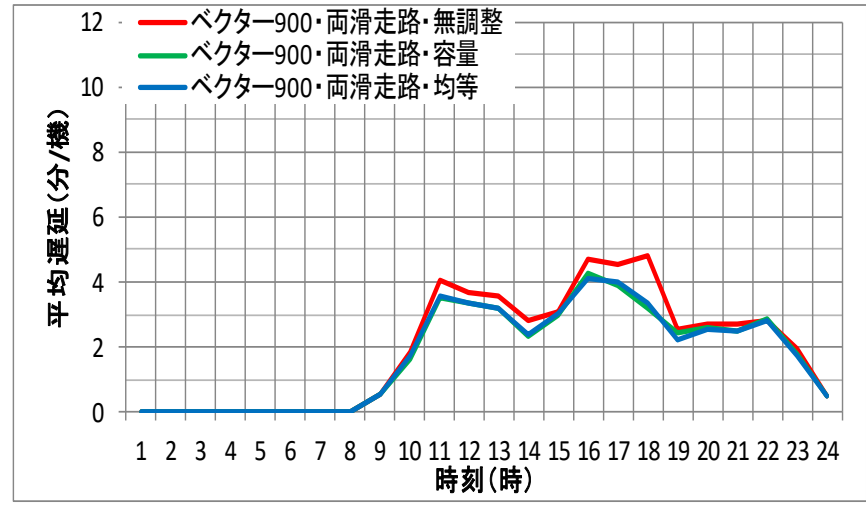
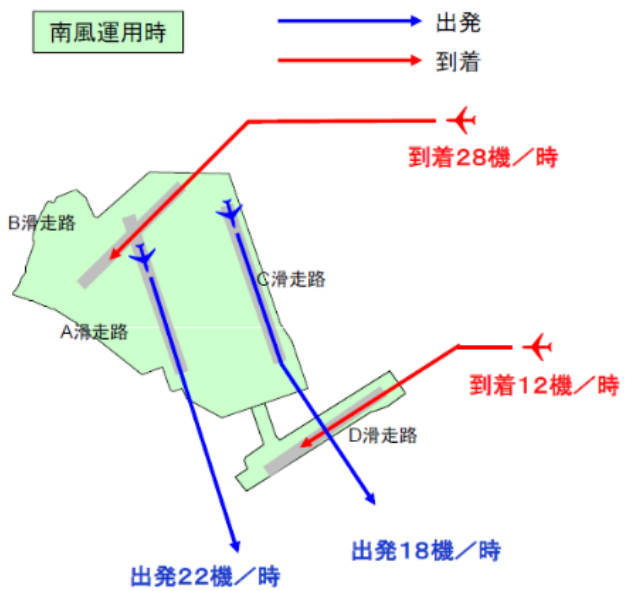


図-9 D滑走路の時間帯別平均遅延量の比較

# 離陸時刻の予測モデルの統合（今後）

- 前便到着遅延などを考慮した出発遅延予測

$$y_i = \begin{cases} y_i^* & y_i^* > 0 \\ 0 & y_i^* \leq 0 \end{cases}$$

出発遅延時間

$$y_i^* = \beta_0 + \sum_{k=1}^K \beta_k x_{ki} + \varepsilon_i$$

(潜在変数)



Flight Radar24+他WEBデータを統合して作成した11万便の折り返し遅延データ(古田土ら, 2017)からパラメータ推定

切片	説明変数（有意な変数）								
-	前便の到着遅延[分]	予定駐機時間[分]	LCCダミー	出発時レグ[時]	繁忙期ダミー	ピーク期ダミー	航空機座席数	日曜ダミー	空港利用者数
4.039	0.924	-0.268	4.673	0.054	0.655	0.723	0.019	1.826	1.9.E-05

R<sup>2</sup>0.65



# 本日の研究紹介のまとめ

## (1) 国内航空ネットワーク上での波及遅延の解析

- オリジナル遅延と波及遅延の分離
- 遅延発生源の把握
- 遅延の波及乗数の推定

## (2) 羽田空港における到着間隔制御と滑走路処理容量を評価可能なシミュレータの開発と、動的な出発滑走路指定による遅延軽減効果の評価