

飛行軌跡データを活用した滑走路処理容量の分析

岡山空港

西南飛行場

高松空港

徳島飛行場

大阪国際空港

神戸空港

関西国際空港

八尾空港

南紀白浜空港

平田 輝満

茨城大学

工学部 都市システム工学科

我が国の混雑空港と容量拡大

✓混雑空港指定→成田, 羽田, 関西, 伊丹, 福岡(H28~)

✓航空交通量の増加に伴う混雑悪化

→各空港で滑走路の増設や管制運用の工夫・高度化による容量拡大策が進行・検討中

- 滑走路の増設, 誘導路の改修(福岡, 那覇)
- 監視技術の高度化(WAM)による同時平行離陸(成田)
- 都心上空ルートを活用(羽田)

etc

滑走路容量に影響を与える要因

固定的



- 空港・滑走路のデザイン
- 出発・到着飛行経路のデザイン
- 滑走路の使用方法(離陸, 着陸, 共用)
- 環境影響(騒音, GHG)
- 管制ルール(航空機相互間の最低間隔)

- 航空機の機材構成 → ✓ 機材サイズ(重量)
✓ 離着陸速度
✓ 滑走路占有時間
- 航空管制運用上の戦術
(離着陸順序付けなど)

- 気象条件 → ✓ 滑走路運用モード
✓ IMC, VMC
✓ 対地速度

変動的

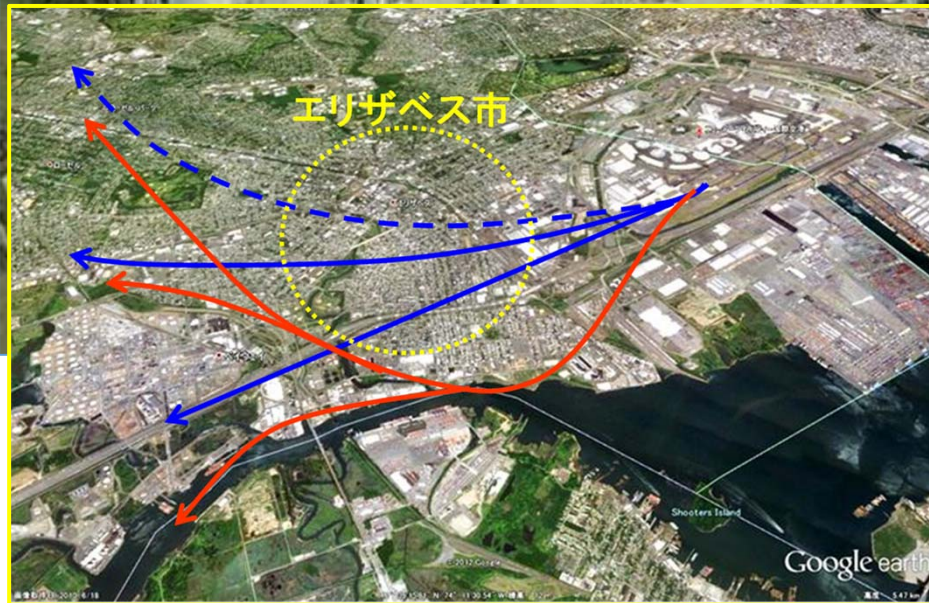
管制運用の効率化に関する海外の取り組み事例

- ✓ 方面別交互離陸 (Dispersal Headings, Fanned Departure) : ヒースロー, ニューアーク, など
- ✓ 着陸順序の最適化 : ヒースロー
- ✓ デュアル滑走路端 (HALS/DTOP) : フランクフルト
- ✓ Side-by-Side 平行着陸・オフセット同時着陸 (SOIA) : サンフランシスコ
- ✓ 時刻ベース着陸間隔制御 (TBS: time-based separation) : ヒースロー, など
- ✓ 横風時の後方乱気流間隔短縮 (WIDAO, CROPS) : パリ, など
- ✓ 開削型の滑走路横断誘導路 (Perimeter Taxiway) : アトランタ, など
- ✓ 到着合流支援 (Linear Holding, Point-merge System, Traffic Management Advisor) : フランクフルト, オスロ, ソウル, パリ, 米国, など
- ✓ 空域再編・統合型管制機関 (ICC: Integrated Control Complex) : NY など

etc

よくある事例：離陸方面からみた順序付け

ヒースロー：離陸機の飛行方面を考慮した処理効率のよい順序付け：方面別に交互に離陸



ニューアークの例

OAKの例 (2006年マスタープランでの計画)

OAK

出発方面別のTAXIWAYを新設し、交互出発をより柔軟に可能とすることで出発間隔の短縮(2min. → 1min.)を促進する計画



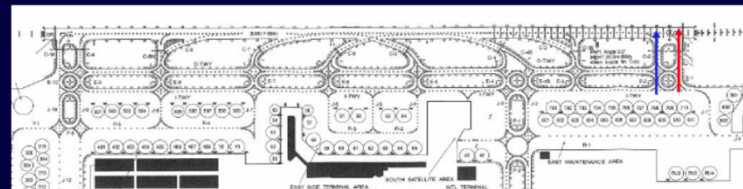
方面別TAXIWAYの新設

東向き出発機

西向き出発機

このような方法も活用して出発便の順序付けを柔軟化可能

HND



52

* 先行機が大型機(Heavy機)では離陸間隔の短縮は無理(後方乱気流)

離陸専用滑走路の容量試算 (Heavy率, 経路分散の影響)

管制間隔の仮定:

- ① 先行機がHeavy機の場合 → 後方乱気流間隔 120秒
- ② 先行機がそれ以外の場合で経路分散なし → レーダ一間隔を考慮した95秒
- ③ 先行機がそれ以外の場合で経路分散あり → 短縮間隔を考慮した60秒

ヒースロー:

(Heavy率 0.3, 経路分散率0.8)

推計容量 ⇒ 43回
(実際も同程度)

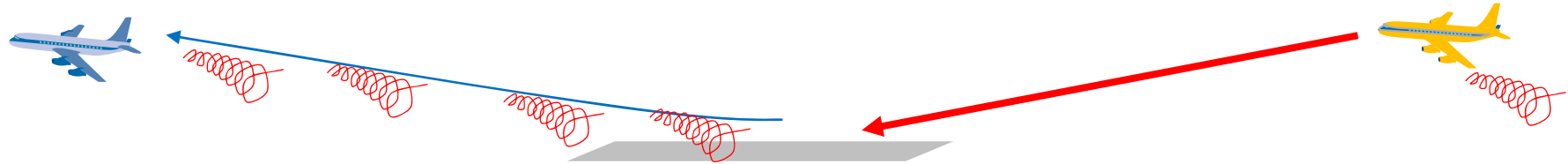
羽田:

(Heavy率 0.7, 経路分散率0)

推計容量 ⇒ 32回
(実際も同程度)

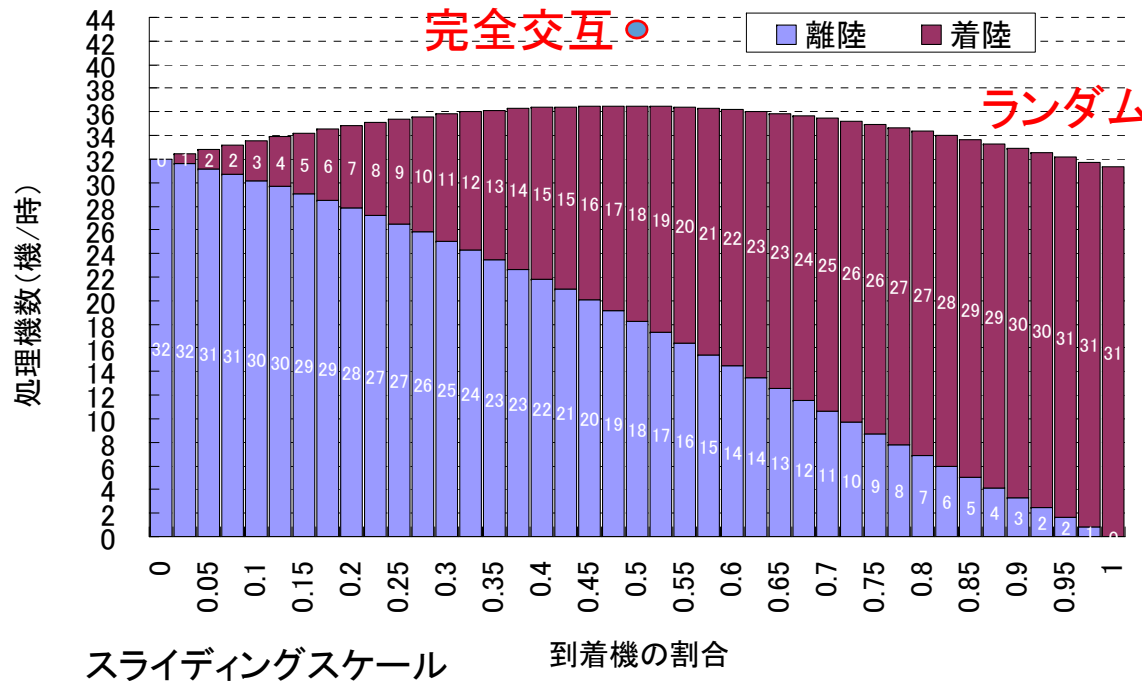
		Heavy比率	
		30%	70%
経路分散率	0%	35.1	32.0
	80%	43.4	34.6

離着陸共用 (Mixed-Mode) の場合の処理容量～順序付けの影響



離陸後の着陸機には後方乱気流は影響しない. 逆もしかり.

⇒ 処理容量: 共用 (離着陸交互運用) > 共用 (ランダム) > 分離 (平行滑走路など)



43.1回/時
(離着陸完全交互)
36.5回/時
(ランダム, 離着陸同数)



通常, 容量算定時には
ランダム順序を仮定

飛行軌跡データを活用した滑走路容量の分析例

- (1) 単一滑走路(離着陸共用)の離着陸順序付け実態と処理容量への影響に関する分析
- (2) 風況による滑走路処理容量の変動特性に関する分析
- (3) 離着陸機数の最適配分による遅延軽減に関する分析

(1) 離着陸の順序付け実態と処理容量～成田

容量算定時は通常、離着陸順序はランダムを仮定

⇔ 戦略的な順序付けで処理容量は増加

→ 実際の運用では、どの程度、処理効率の良い順序付けが行われている傾向があるか？

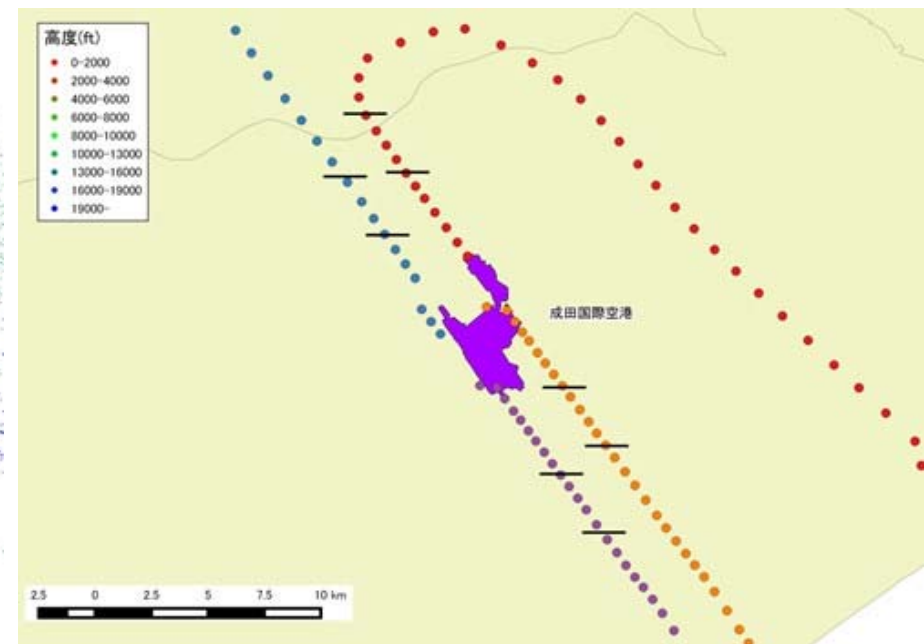
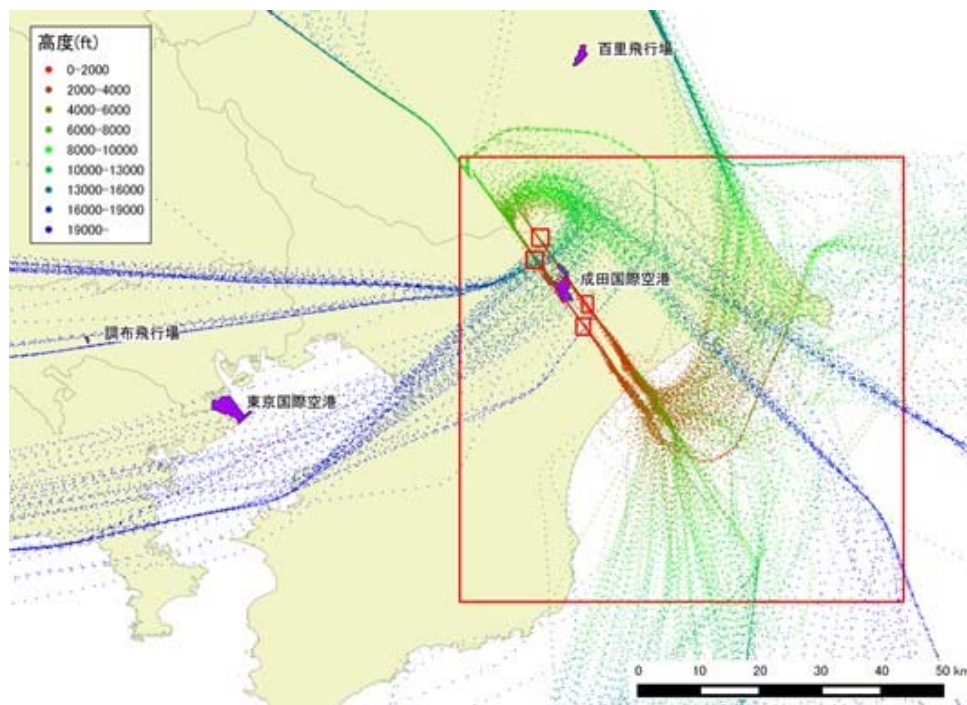
→ 効率の良い順序付けが安定的に行われていれば、算定容量(理論値)は過小評価される

CARATS OPEN DATAから離着陸順序をデータ化

2012年度奇数月各1週間の飛行軌跡データ(CARATS OPEN DATA)

⇒成田空港発着の全便を抽出し、離着陸時刻を算出

(低高度データの欠損が多いため、滑走路端から3NM, 5NM地点の通過時刻から機材別の標準的な離着陸速度を仮定して推計)

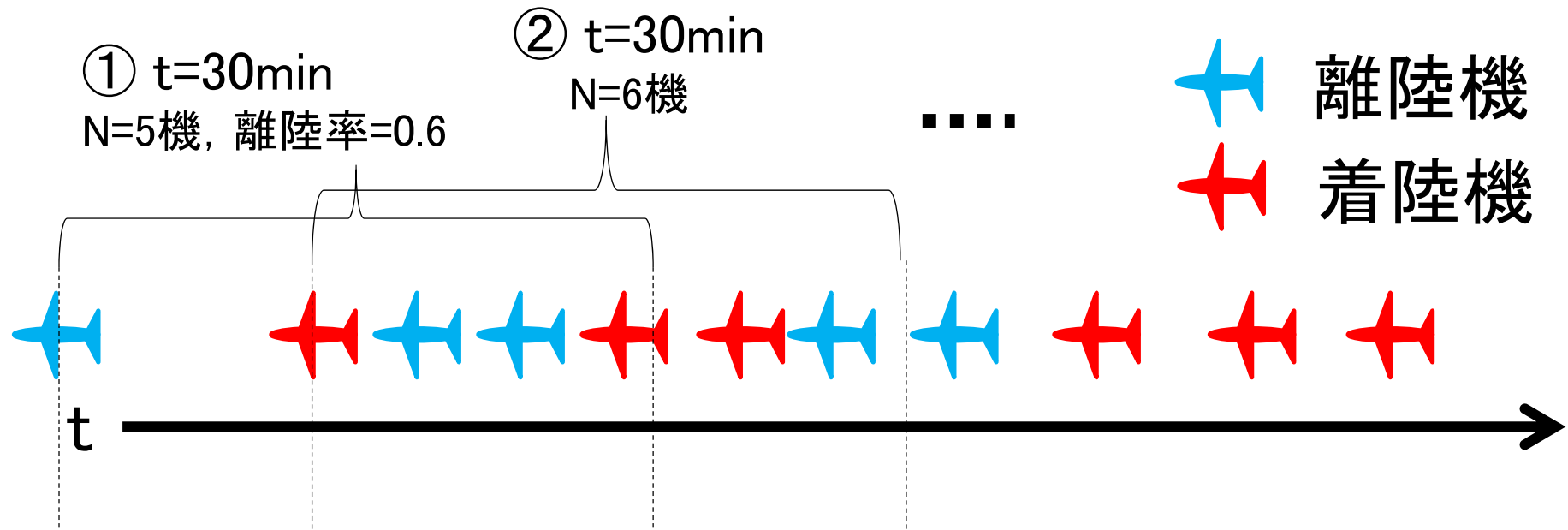


分析サンプルとする機材列の抽出 ($N \geq 12$, 連続数 < 9)

- ✓ 30分に含まれる機材列を1サンプルとする
- ✓ 混雑時間帯(12機以上/30分)とする
- ✓ 離着陸の共用時間帯(離陸または着陸が9機以上連続しない)とする
- ✓ 他のサンプルと同一機を含むサンプルは除外する

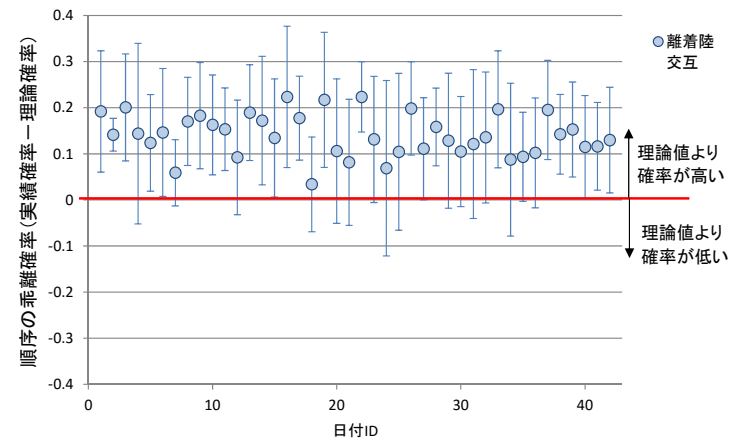
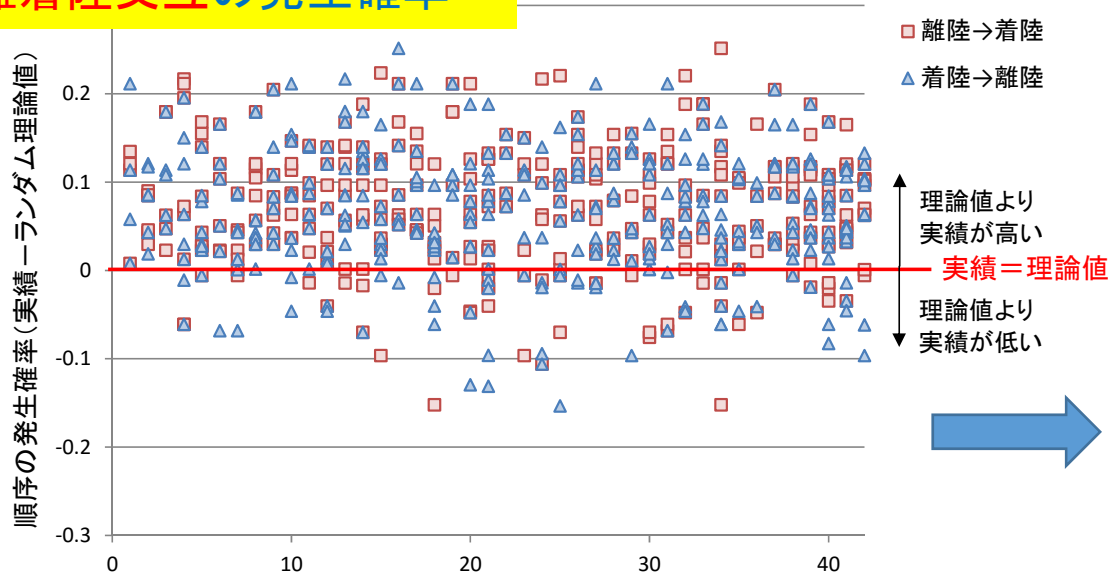
30分間の連続2機の離着陸順序の組み合わせ(離/離, 離/着, 着/離, 着/着)の実績数を集計

⇒実績と理論値(対象時間帯の離着陸比率から求めたランダム順序仮定時の発生確率)を比較

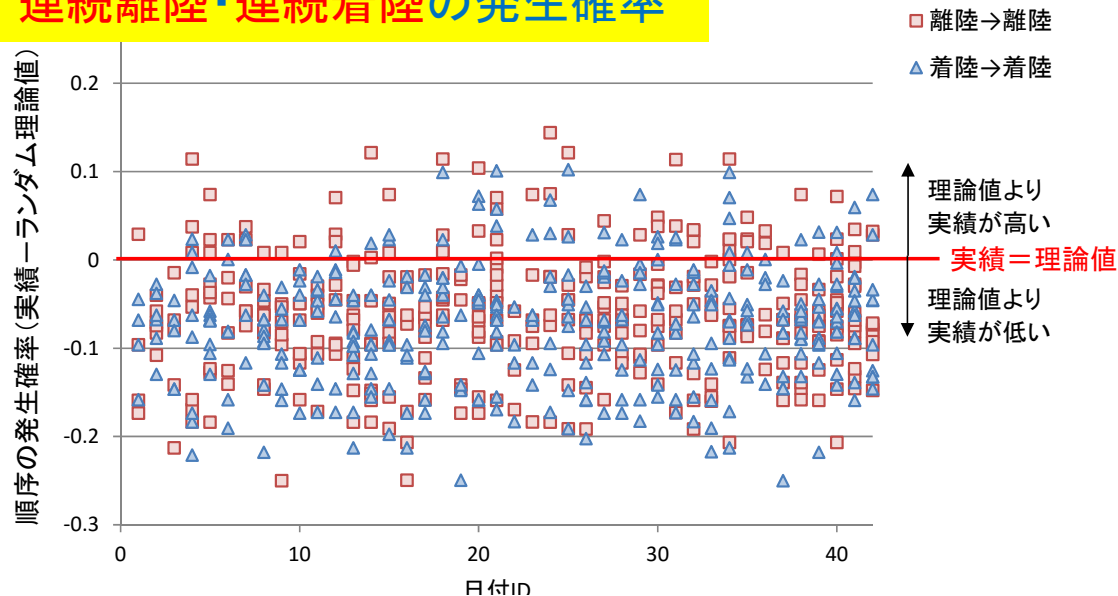


離着陸の順序付けの実績～理論値(完全ランダム)との比較

離着陸交互の発生確率

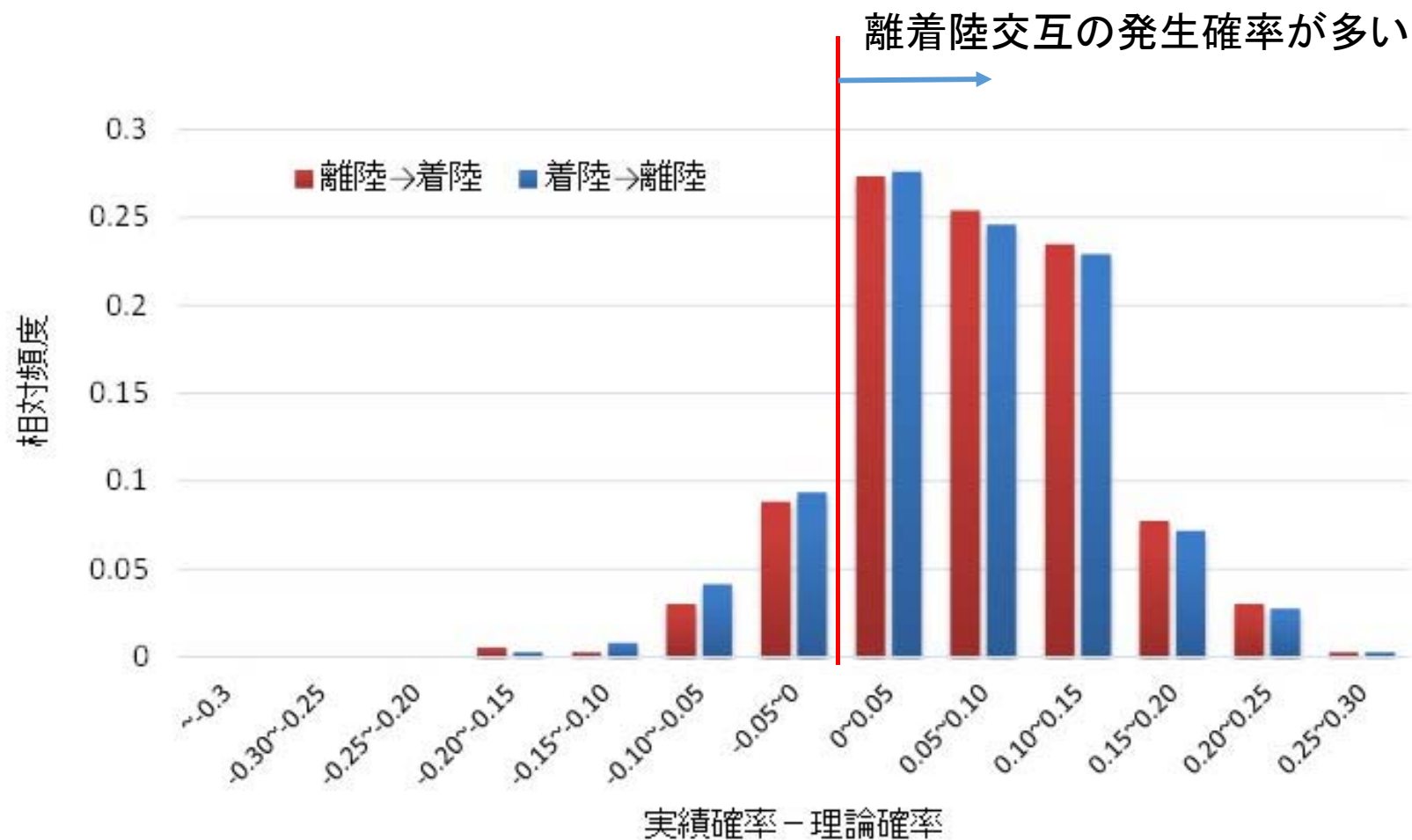


連続離陸・連続着陸の発生確率

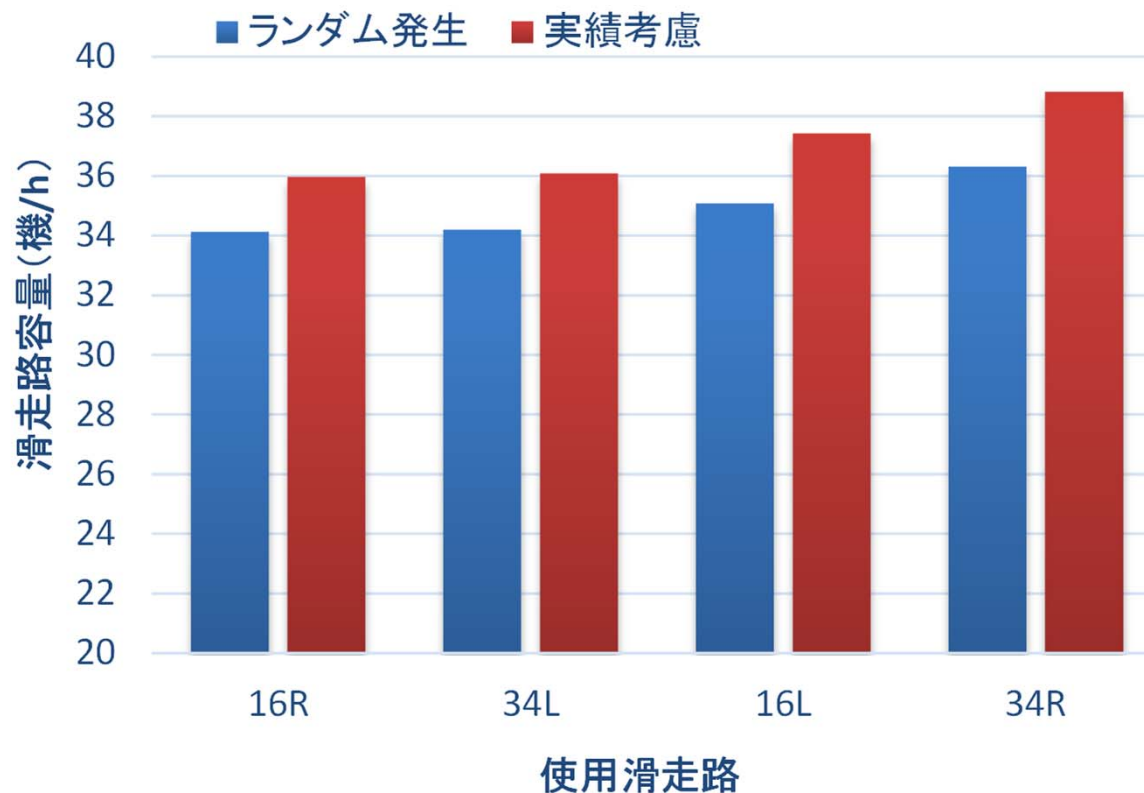


処理効率の高い
「離着陸交互」
の実績発生確率
↓
統計的に有意に
理論値(ランダム順序)より
大きい

離着陸の順序付けの実績～理論値(完全ランダム)との比較



処理容量に換算すると

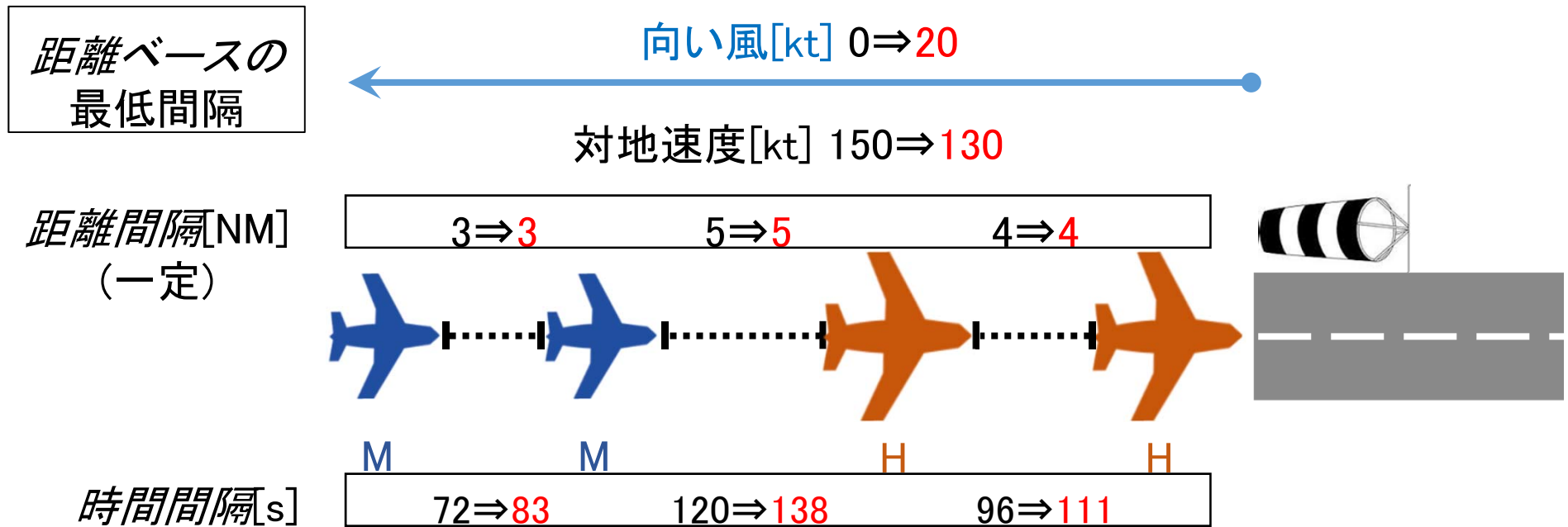


通常、容量(スロット)算定などで仮定するランダム順序と比べて、平均的に+2回/時(2本の滑走路では+4回/時)程度の差

飛行軌跡データを活用した滑走路容量の分析例

- (1) 単一滑走路(離着陸共用)の離着陸順序付け実態と処理容量への影響に関する分析
- (2) 風況による滑走路処理容量の変動特性に関する分析
- (3) 離着陸機数の最適配分による遅延軽減に関する分析

向かい風による処理容量低下



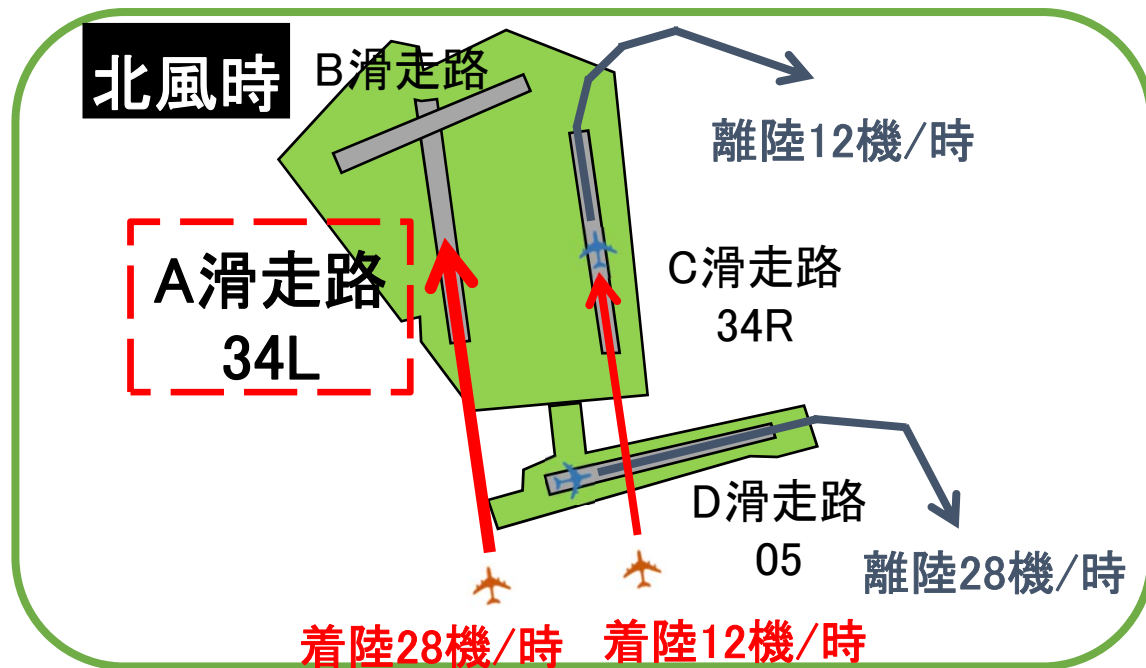
距離ベースの管制では、向かい風による対地速度の減少が着陸処理容量を低下させる

風況による容量変動を実際の間隔制御の特性を加味して予測(交通流制御における容量予測への応用)

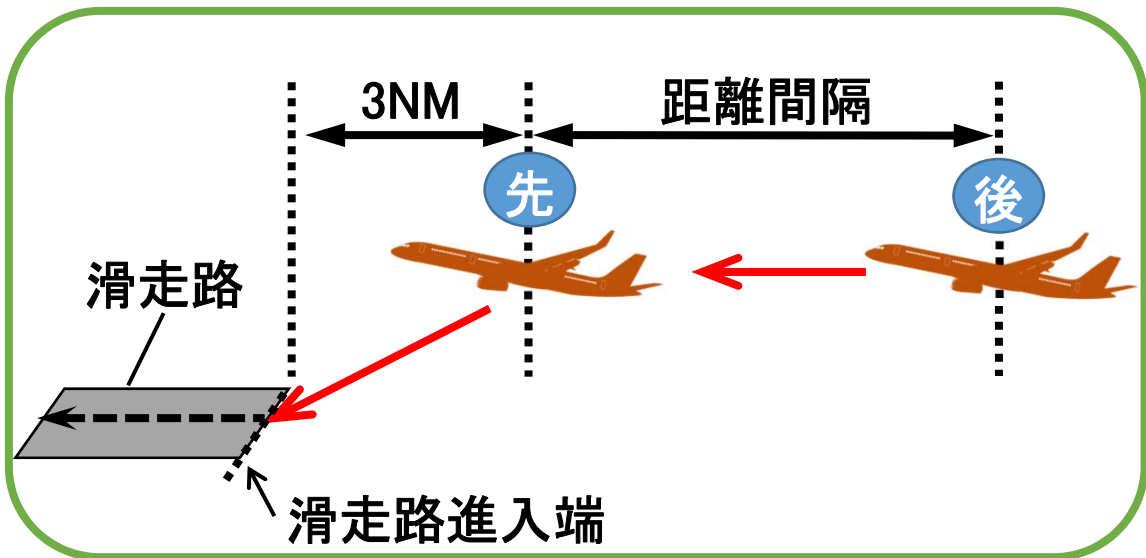
使用データ

- 飛行軌跡データ(SSRモードSデータ:電子航法研究所提供)
- データ数:2014年度の42日分
- 内容:時刻,航空機識別番号,緯度,経度,高度,型式,
対地速度, 真対気速度, 風速, 風向など
- 対象:関東・東北地方を通過するほぼ全ての航空機

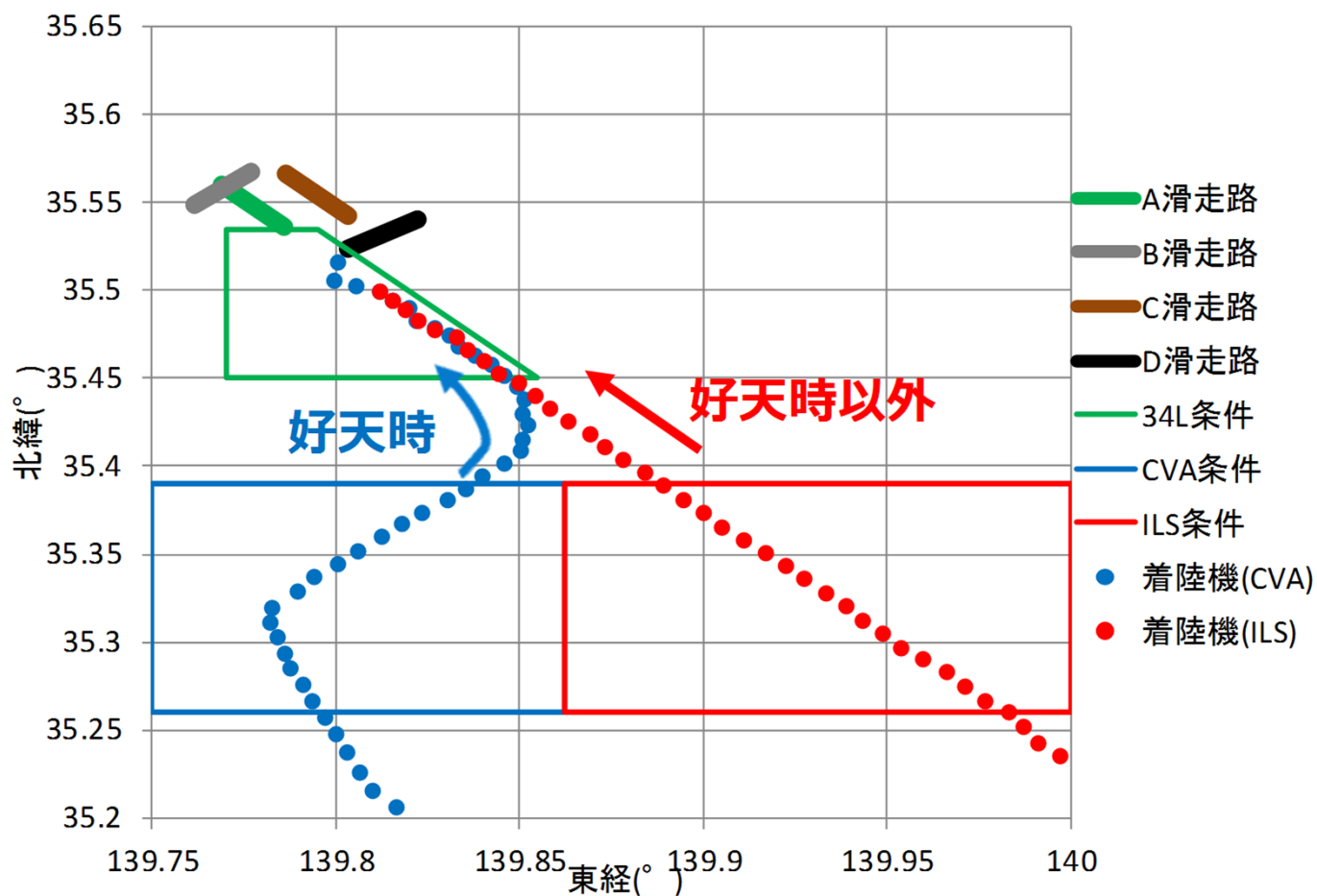
対象滑走路：羽田の着陸専用滑走路(34L)



滑走路端から3NM
地点で、到着機の着
陸間隔をデータ化
⇔風況データと関連
付けて分析



34Lの着陸方式



➤ RNAV(実際は34RのCVA(Charted Visual Approach)の気象条件下)

⇒ 計器飛行方式の航空機が地上の物標等を視認しながら行う視認進入(目視間隔)が可能

➤ ILS(Instrument Landing System)

⇒ 電波により飛行コース・降下角の情報を与えて行う精密進入(管制間隔)

到着機間隔に関する回帰分析

目的変数	説明変数
y 到着機間隔[NM]	x ₁ 対地速度[kt]
	x ₂ 混雑度(着陸処理機数[機/30分])
	D _{M-H} 先行機M, 後続機Hの組合せ(3NM)
	D _{H-H} 先行機H, 後続機Hの組合せ(4NM)
	D _{H-M} 先行機H, 後続機Mの組合せ(5NM)

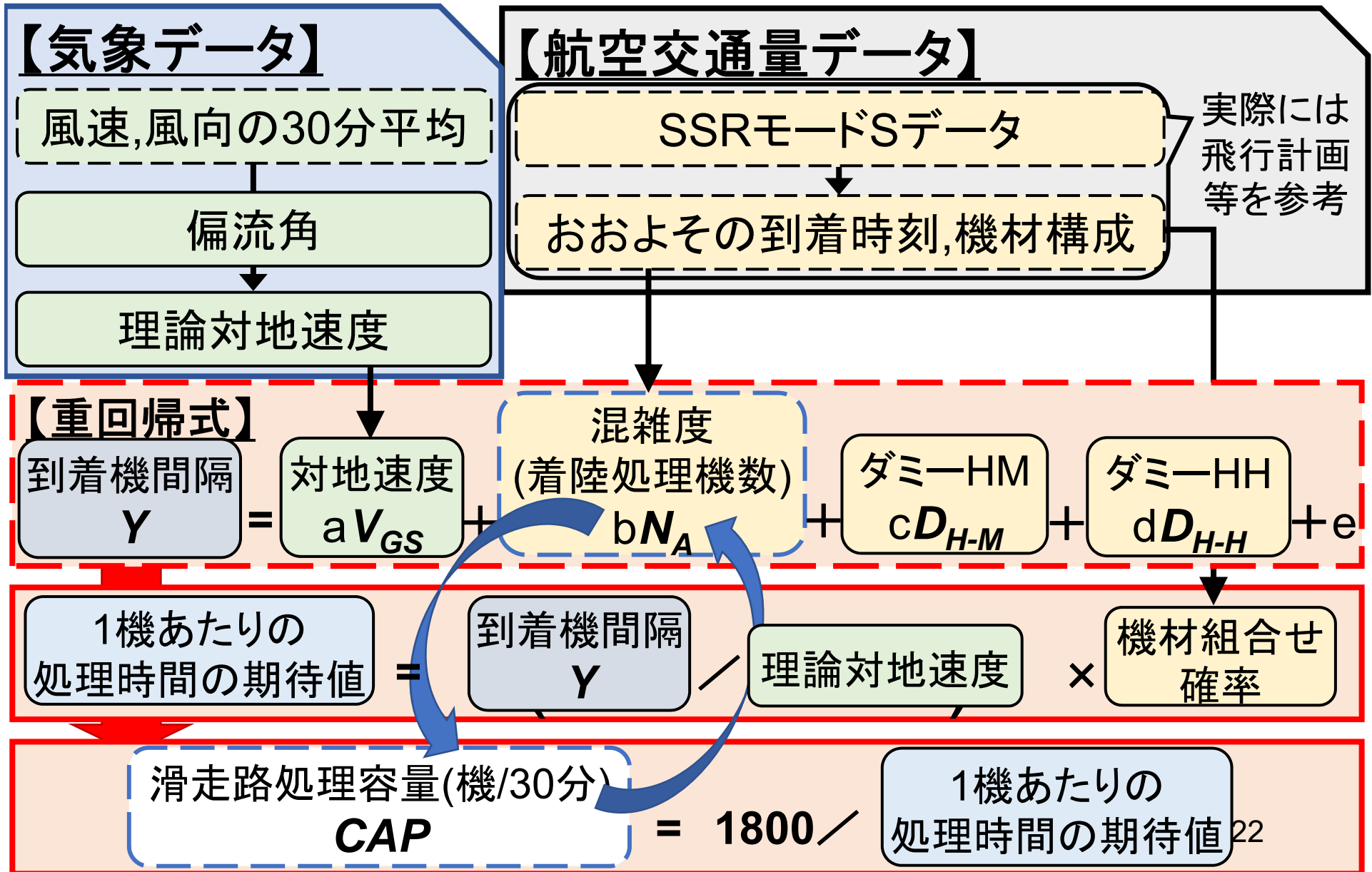
風況の強弱を表す代理変数

到着機間隔に関する回帰分析の結果

	好天時(RNAV・CVA)		悪天時(ILS)	
	係数	t	係数	t
切片	2.557	12.2	3.056	14.5
対地速度kt	0.028	22.9	0.019	15.7
混雑度 (着陸処理機数回/30分)	-0.126	-14.4	-0.074	-11.4
H-H(ダミー)	0.278	7.9	0.246	7.2
H-M(ダミー)	0.572	16.5	0.566	16.2
補正R ²	0.301		0.187	

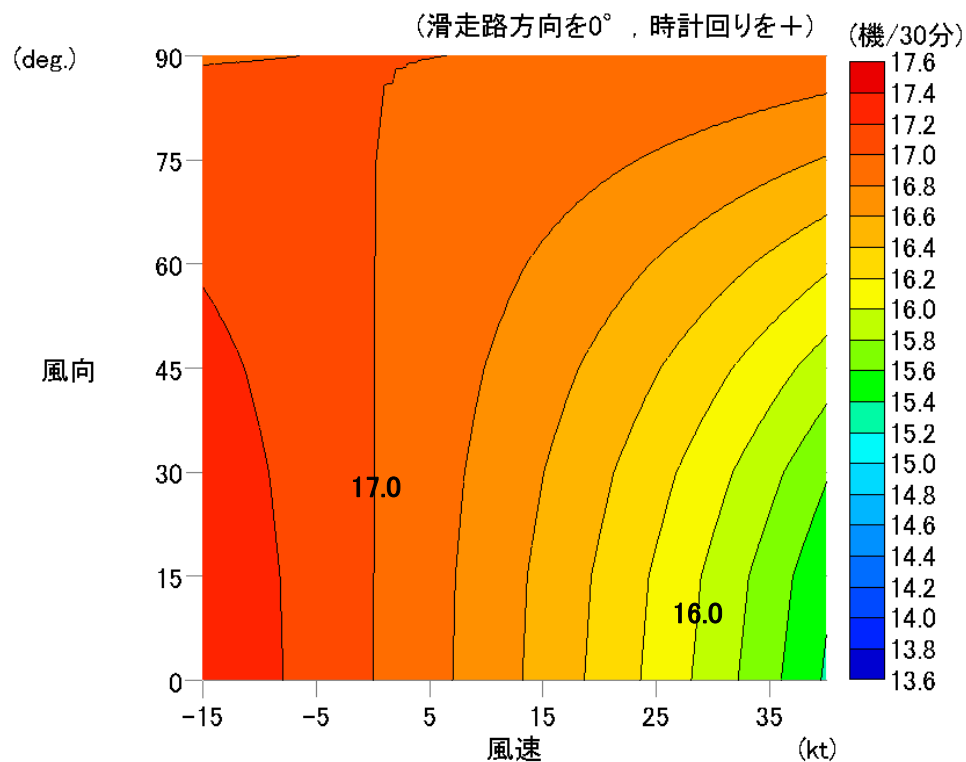
- 対地速度が減少するほど、到着機間隔が短縮
⇒ 向い風が強いほど、到着機間の距離間隔が短縮 (Time-based Separationのように容量低下を緩和)
- 好天時の方が距離間隔を短縮する傾向

風況を考慮した着陸処理容量の推定方法

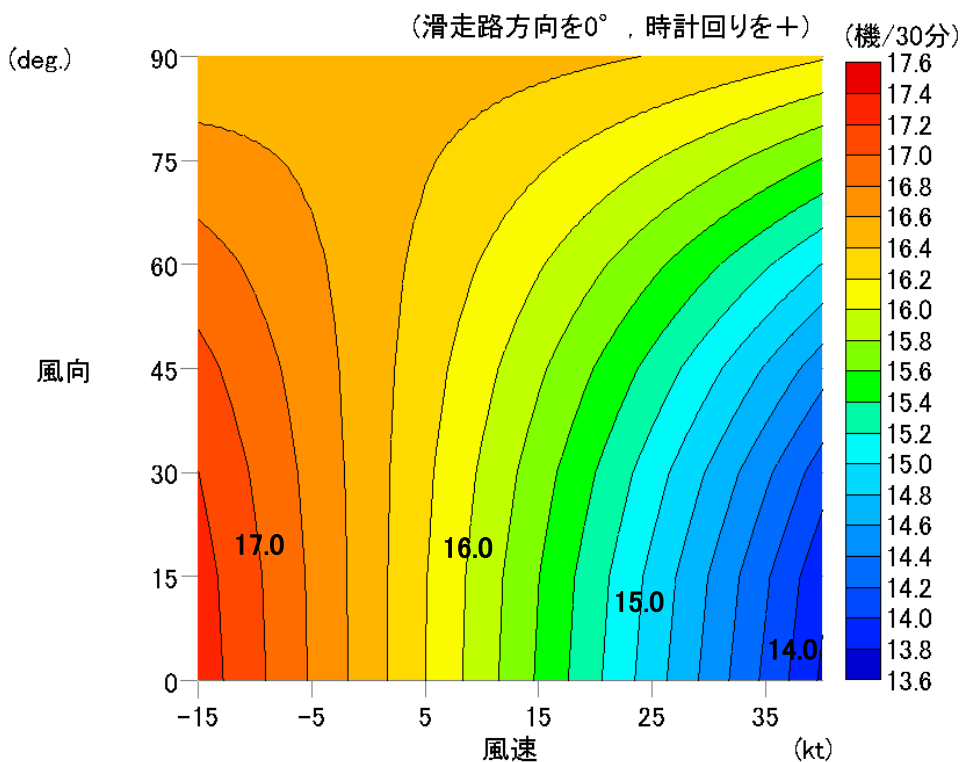


風況を考慮した着陸処理容量の予測結果の例

➤ 好天時 (RNAV・CVA)



➤ 悪天時 (ILS)



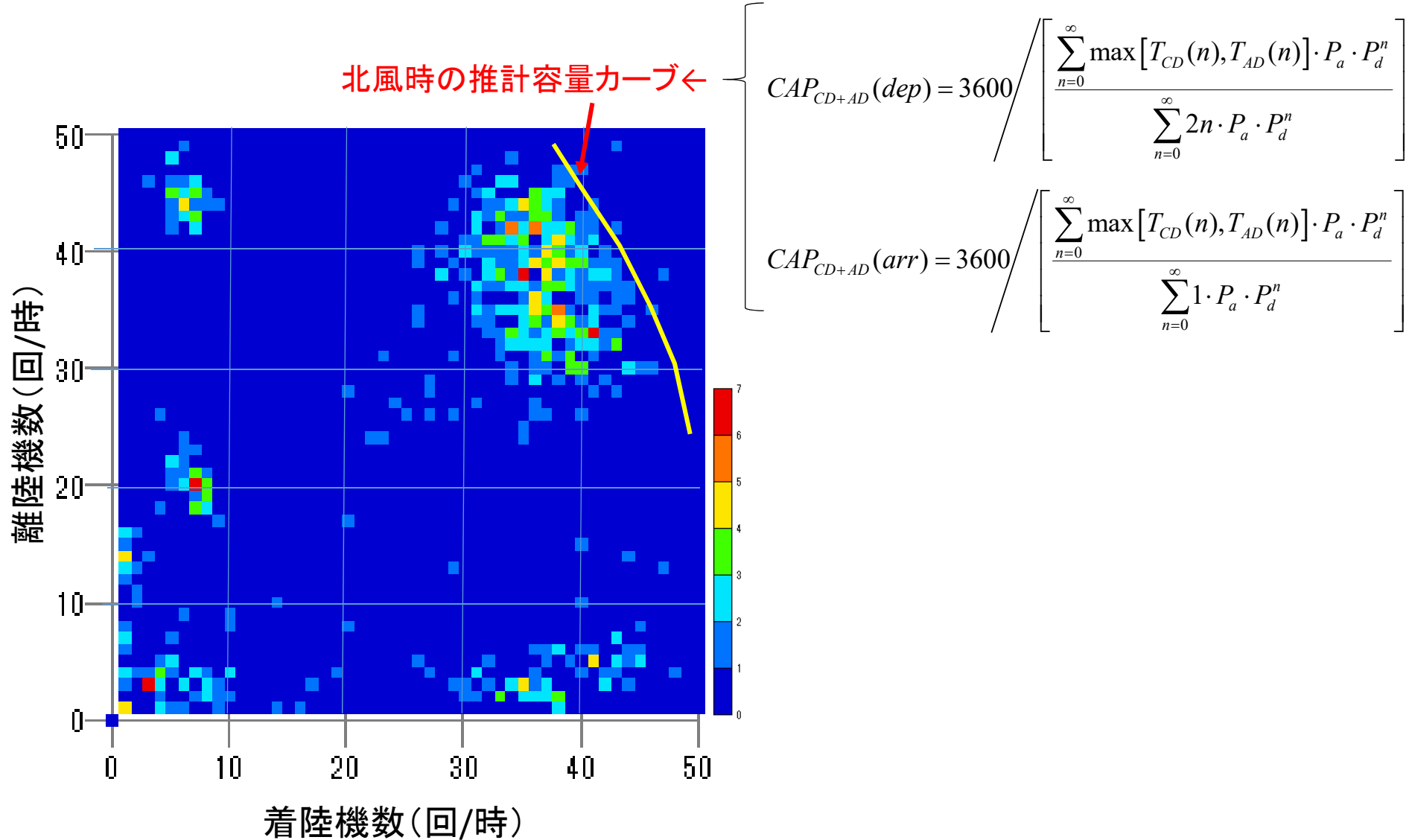
- 風向が0° (向い風成分100%)のときの変動幅が最大
- 好天時は向い風が強い時の容量減少率が低い
⇒ 風況変化に対して容量変動幅が小さい

飛行軌跡データを活用した滑走路容量の分析例

- (1) 単一滑走路(離着陸共用)の離着陸順序付け実態と処理容量への影響に関する分析
- (2) 風況による滑走路処理容量の変動特性に関する分析
- (3) 離着陸機数の最適配分による遅延軽減に関する分析

羽田空港の離着陸容量カーブの推計

: CARATS OPEN DATA (2014) からカウントした実績値との比較

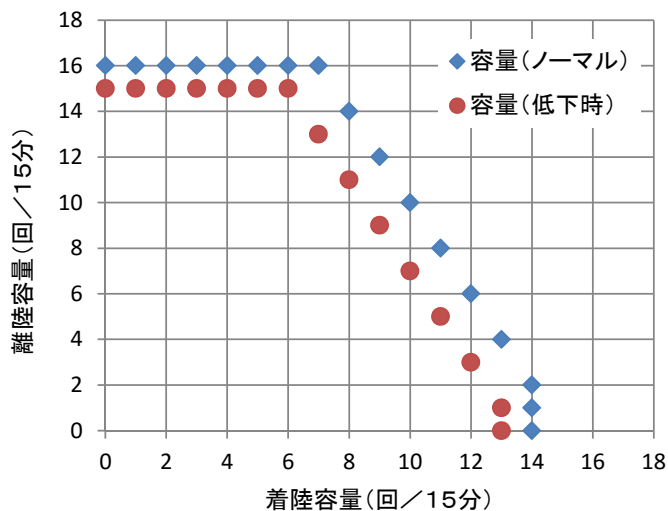


離着陸機数の最適配分による遅延軽減

離着陸容量がトレードオフ関係⇒
 離着陸需要の時間推移に応じて離着陸それぞれへの容量配分(どちらを優先するか)についての最適化(トータル遅延の最小化)

羽田容量モデル

離散的容量カーブ



容量配分
オプション

- (16,7)
- (14,8)
- (12,9)
- (10,10)
- (8,11)
- (6,12)
- (4,11)
- (2,14)

最適配分

	容量		需要		前時間帯までの未処理機数 (遅延機数)	
	Dep	Arr	Dep	Arr	Dep	Arr
8:00	12	9	12	10	-	-
8:15	8	11	9	13	0	1
8:30	14	8	14	9	1	3
8:45	10	10	11	10	1	4
9:00	8	11	10	12	2	4
9:15	14	8	13	9	4	5

⋮

⋮

⋮

離着陸容量配分の最適化モデル

総遅延時間の最小化問題:

$$\min_{v,u} \sum_{i=1}^N \alpha(T/u_{i+1})X_{i+1}a_{i+1} + (1-\alpha)(T/v_{i+1})Y_{i+1}d_{i+1} \quad (2)$$

s.t.

$$X_{i+1} = (X_i + a_i - u_i)^+$$

$$Y_{i+1} = (Y_i + d_i - v_i)^+$$

$$u_i \leq U_i$$

$$v_i \leq \varphi(u_i)$$

$$(A)^+ = \begin{cases} A, & A \geq 0 \\ 0, & A < 0 \end{cases}$$

N : 時間枠数,

X_i : 時間枠 i の到着のキュー(遅延機数),

Y_i : 時間枠 i の出発のキュー(遅延機数),

α : 到着遅延と出発遅延の重み係数,

a_i : 到着予定機数,

d_i : 出発予定機数,

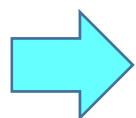
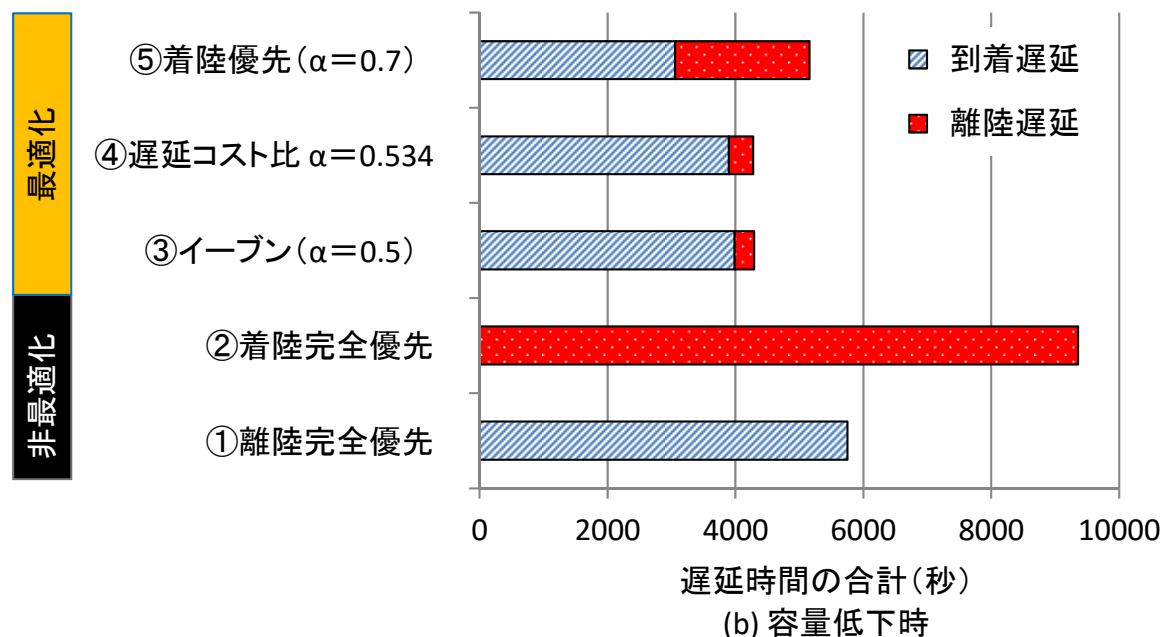
u_i : 各時間枠で設定する到着の容量

v_i : 各時間枠で設定する出発の容量(容量カーブをもとに v_i は u_i の関数で表される)

* ここで、平均処理間隔である $T/u_{i+1}, T/v_{i+1}$ の u, v に適切な初期値を与え整数線形計画問題として解き、その最適解として得られた u, v で新たな平均処理間隔を算出し、再度最適解を求めることを反復 $\Rightarrow u, v$ が収束するまで計算。

計算結果の例(羽田)

離着陸の重み付け係数別の最適容量配分時の総遅延時間



- ✓ 最適化により総遅延時間, 燃料消費(CO2排出)が削減可能.
- ✓ 羽田の容量カーブ特性から基本的には離陸優先が良い.
- ✓ 空中待機削減のため, 管制運用上, 到着優先にすることがあるが, 羽田の遅延対策上は必ずしも良い運用ではない.
- ✓ 容量低下時にはより離陸優先度合いを強める傾向が現れる

まとめ

飛行軌跡データを活用した滑走路処理容量に関する分析例を紹介

1. 単一滑走路における処理効率の良い離着陸順序付けの発生確率の実態 →容量算定時の仮定
2. 風況による滑走路処理容量の変動予測(間隔制御への影響)
3. 需要変動に応じた離着陸機数の最適配分における遅延軽減効果の推計

参考文献:

- 平田輝満, 二見康友, 蒔田良知:混雑空港における離着陸順序付けの実態と滑走路処理容量に関する研究, 土木学会論文集D3, Vol.72 No.5, 2016.
- 平田輝満, 蒔田良知, 二見康友:気象条件に着目した滑走路処理容量の変動特性に関する研究, 第54回飛行機シンポジウム, CD-ROM, 2016.
- Terumitsu HIRATA, Azumanosuke SHIMIZU, Tetsuo YAI: Runway Capacity Model for Multiple Crossing Runways and Impact of Tactical Sequencing - Case Study of Haneda Airport in Japan-, Asian Transport Studies (ATS), Volume 2, No.3, p.295-308, 2013.
- 平田輝満:羽田空港の滑走路運用特性に起因した航空機遅延の軽減方策に関する研究, 土木学会論文集, Vol.69, I_869-I_880, 2013.