

混雑空港の滑走路容量と 離着陸順序付けに関する分析

平田 輝満

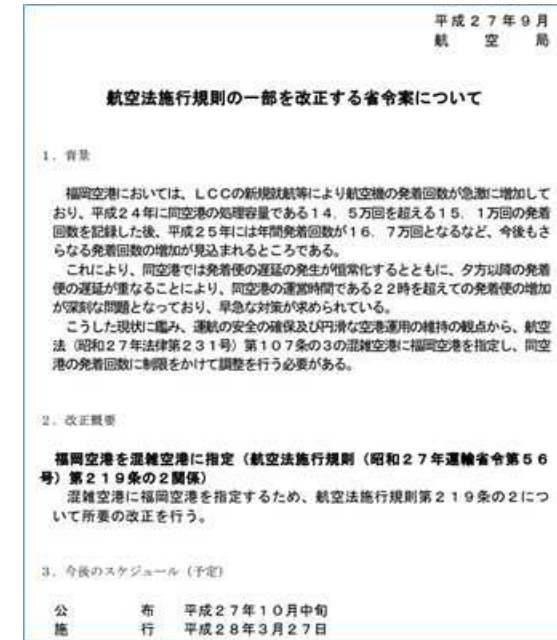
茨城大学工学部都市システム工学科

我が国の混雑空港と容量

- ✓ 成田，羽田，関西，伊丹，（福岡（H28年度末から予定））
- ✓ 首都圏空港の容量は慢性的に不足しており，現在，いくつかの容量拡大策が検討中
- ✓ 福岡等の地方空港もLCC増加等により，近年，需給が逼迫し，遅延が増加



- 滑走路増設といったハード整備のみならず，管制運用の工夫・高度化といったソフト策も十分に検討すべき
- 従来は，異常な機材の大型化もあり，管制運用の工夫の余地も限られていた？



出典）e-GOVパブコメ <http://search.e-gov.go.jp/servlet/PcmFileDownload?seqNo=0000132341>

よくある事例：離陸方面からみた順序付け

ヒーロー：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

西向き出発機

東向き出発機

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

* 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 → レーダー間隔を考慮した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)

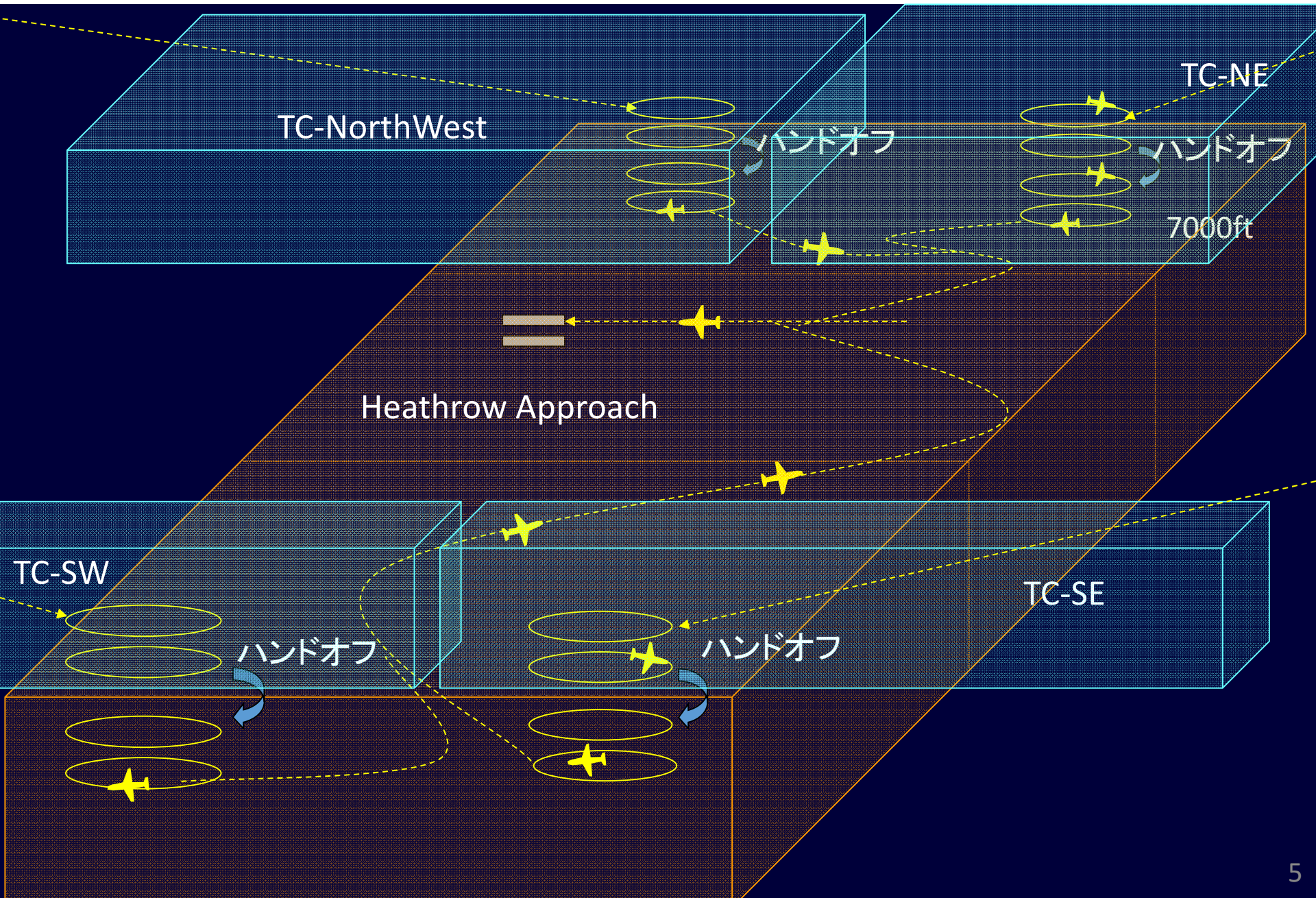
羽田:

(Heavy率 0.7, 経路分散率0)

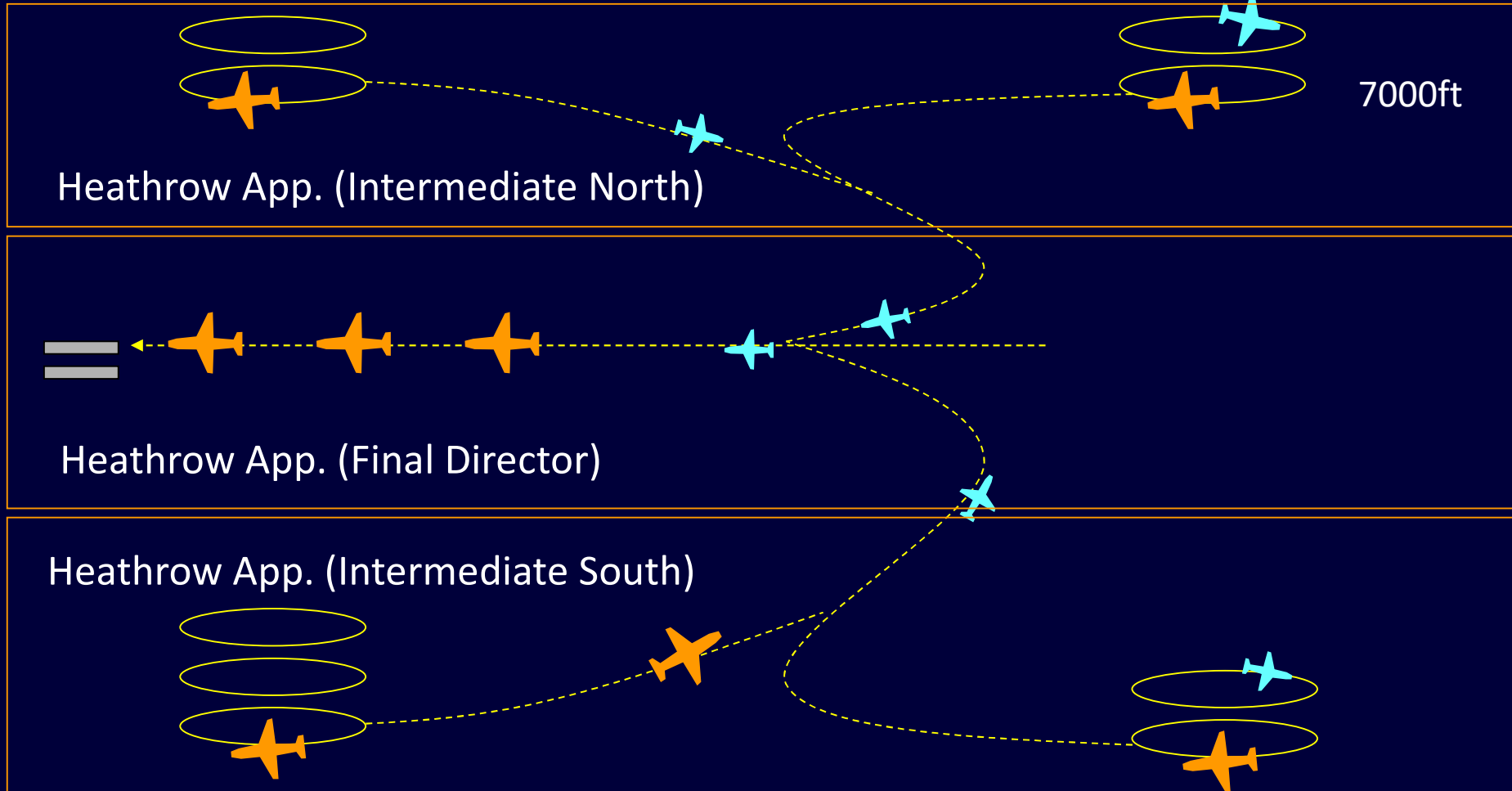
推計容量 ⇒ 32回
(実際も同程度)

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

Heathrowのターミナル空域での着陸機処理



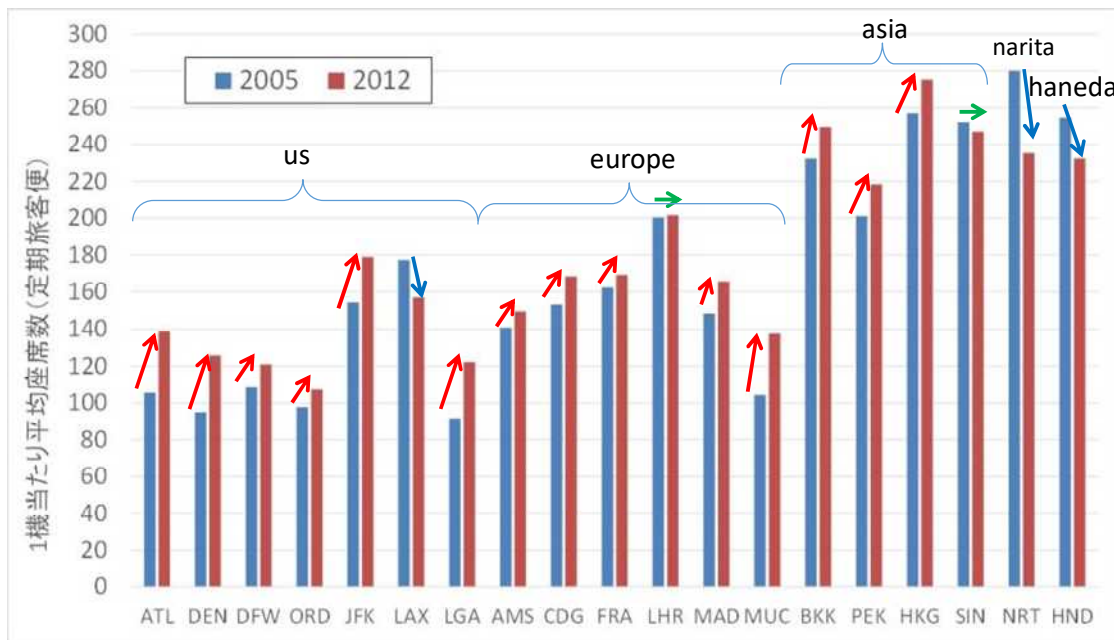
後方乱気流間隔の観点からみた着陸順序の入れ替え



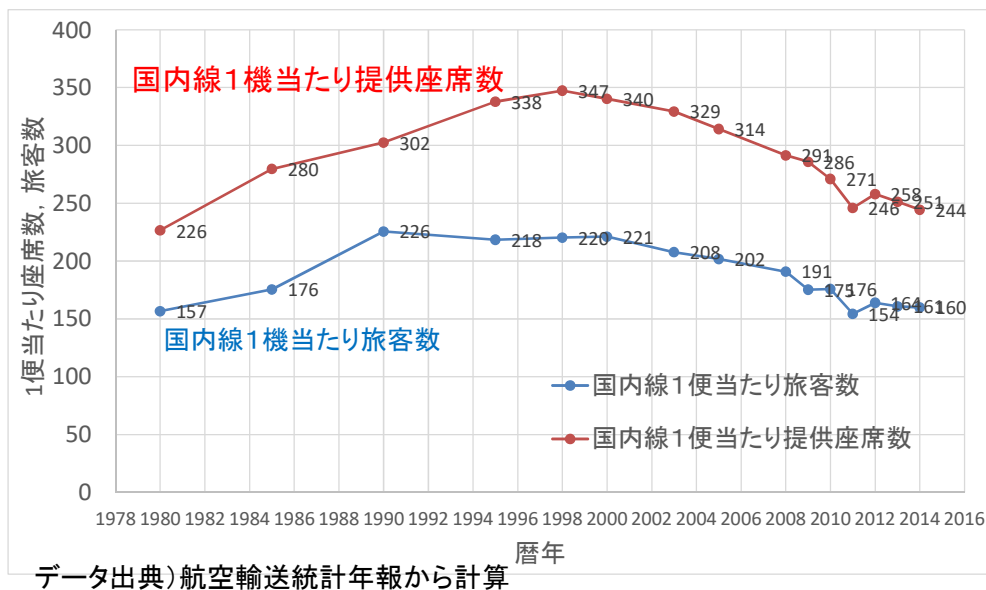
4つのHLD Stackからの着陸機をFinalに引き出す際、管制支援システムから推奨順序が提供される(Delayが10分を越えている時)

* ある程度の遅れ時間の許容(10分)(管制機関, 空港, エアライン等で組織したCommitteeで合意)
→過去, 許容遅れ時間を段階的に大きくし, 容量(スロット数)を拡大

機材の平均サイズ



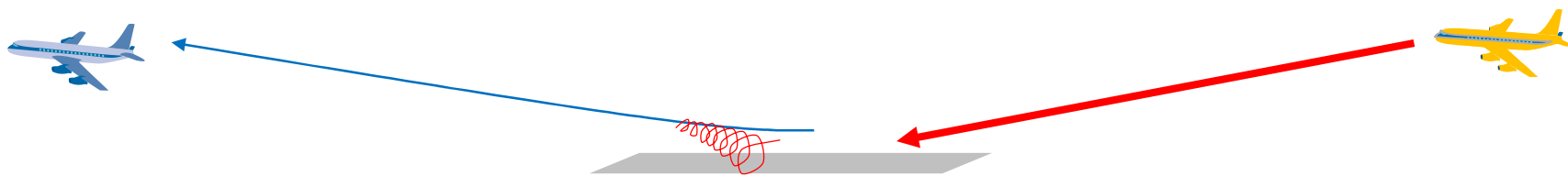
データ出典) OAG時刻表9月データから計算 (定期旅客便のみ)



Heavy率 = 約55% (2012年: CARATS OPEN DATA)
 → 現在は50%以下?

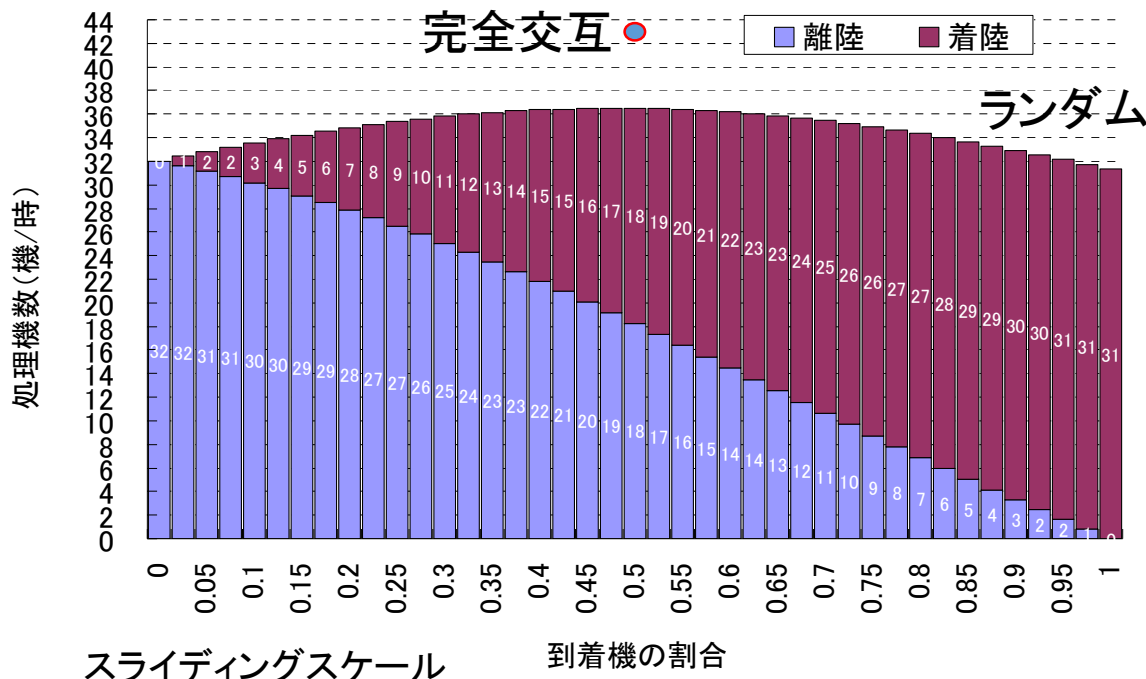
データ出典) 航空輸送統計年報から計算

離着陸共用 (Mixed-Mode) の場合の処理容量～順序付けの影響：例



離陸後の着陸機には後方乱気流は影響しない。逆も亦然り。

⇒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

羽田滑走路運用例：交差滑走路からの離着陸の場合

着陸機が近づき過ぎていない（離陸後、
最接近したときに最低安全間隔を切ら
ない）ことを確認して離陸を許可

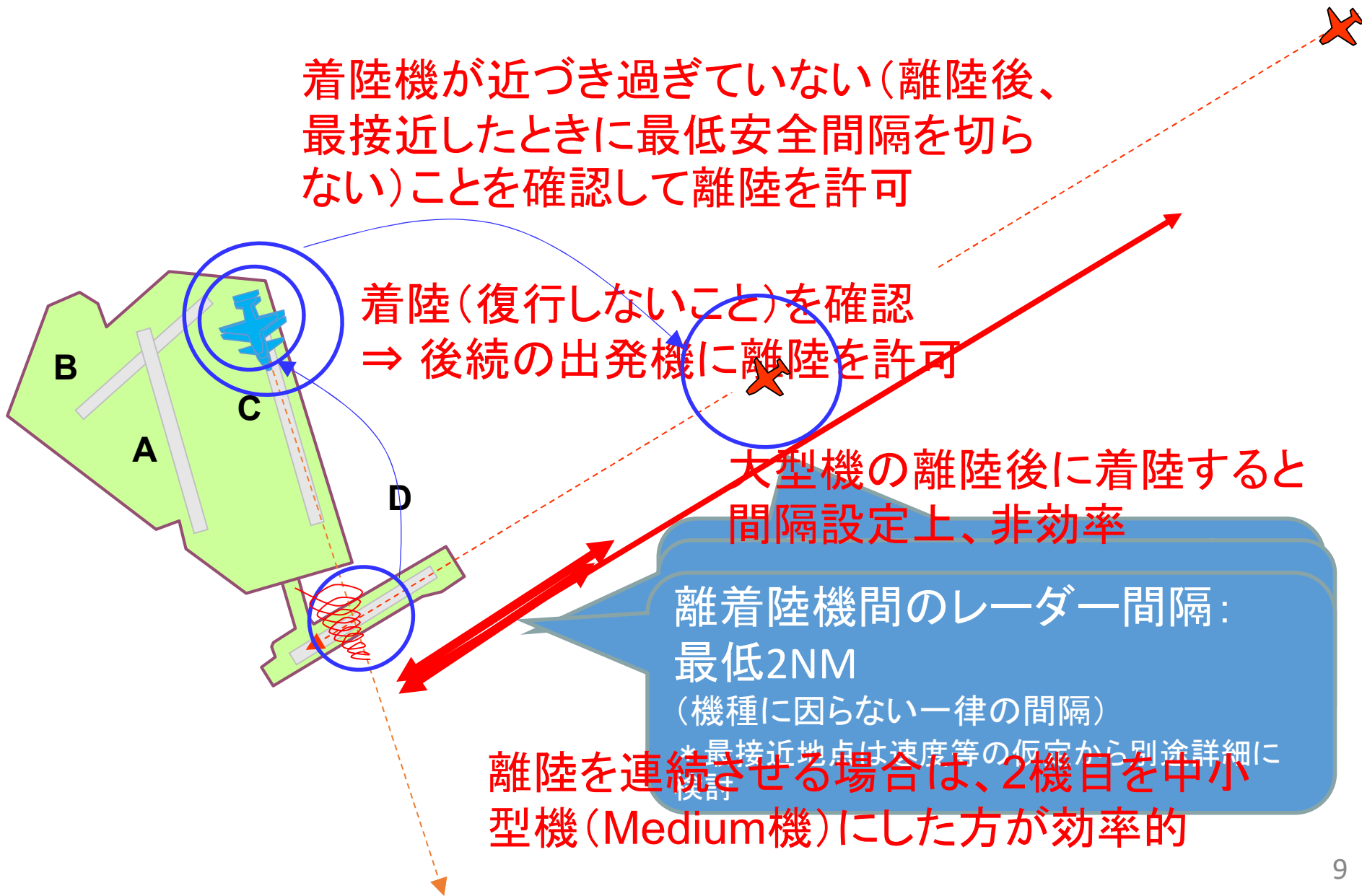
着陸（復行しないこと）を確認
⇒ 後続の出発機に離陸を許可

大型機の離陸後に着陸すると
間隔設定上、非効率

離着陸機間のレーダー間隔：
最低2NM

（機種に因らない一律の間隔）

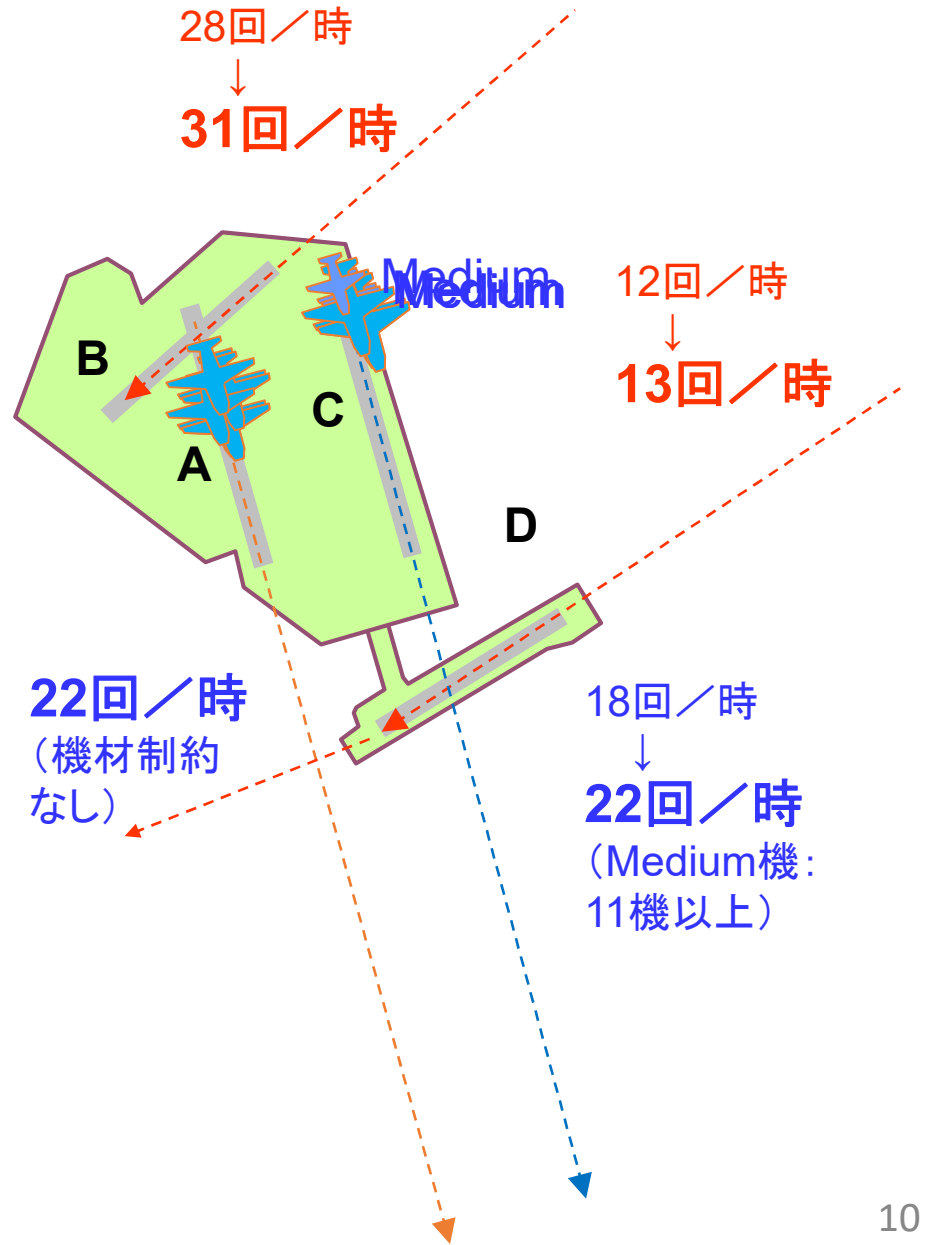
離陸を連続させる場合は、2機目を中小
型機（Medium機）にした方が効率的



離着陸順序付けの効果例

- D着陸機は極力連続させない(D着陸とC離陸を交互運用. ただし, 2機のC離陸機を間に挟む)
- D着陸に先行するC離陸機を**Medium機に限定**. そのために, Medium機はC滑走路をメインに離陸させる.
- これらによりC離陸およびD着陸を増加可能

80回／時
↓
88回／時



JAXAモデル(2014)の例

羽田の4本滑走路を対象とした非線形数理計画法+制約プログラミングによる離着陸順序最適化ツール

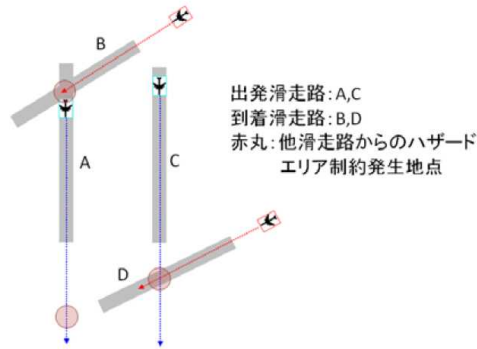


図8 羽田空港南風運用図



図2 ハザードエリアガントチャート

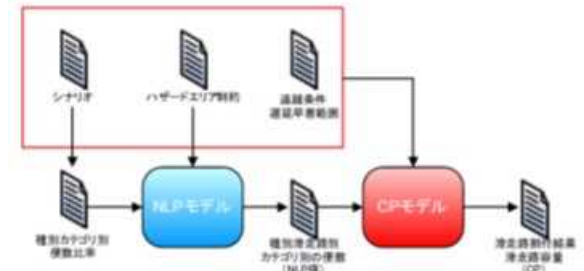


図3 離着陸容量計算の処理フロー概要

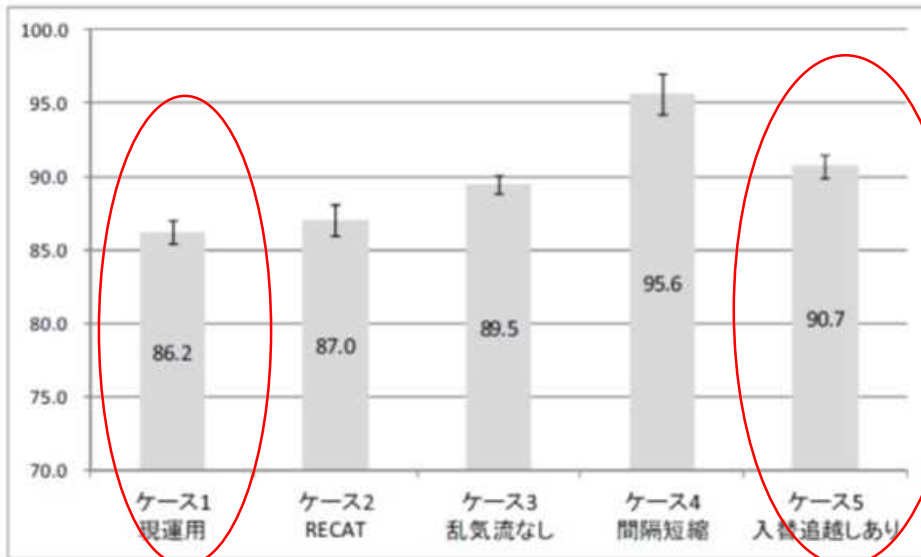


図9 1時間あたりの空港離着陸回数

平均値±SD

+5%増

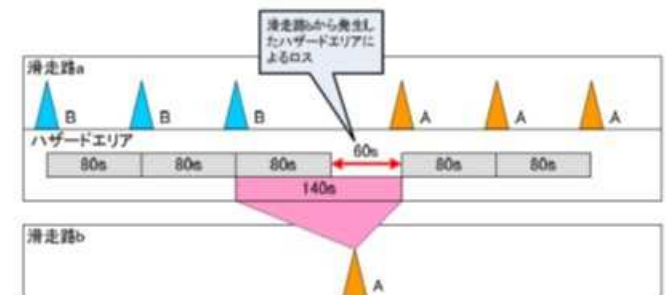
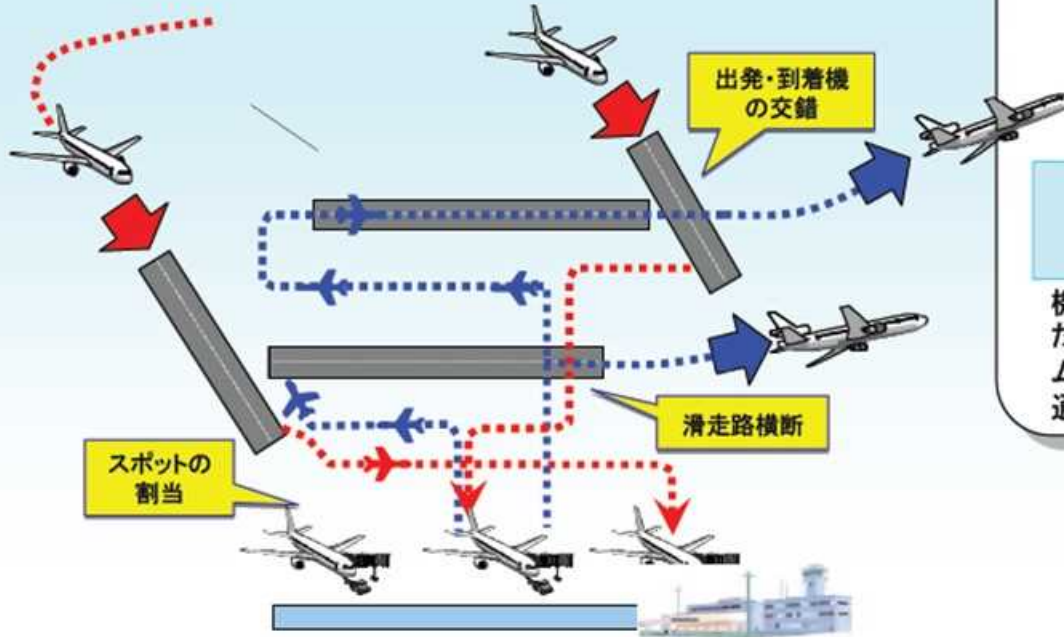


図6 他滑走路からのハザードエリアによる容量ロス

CARATS:高精度な時間管理と混雑空港の処理効率向上

空港面における時間管理の導入



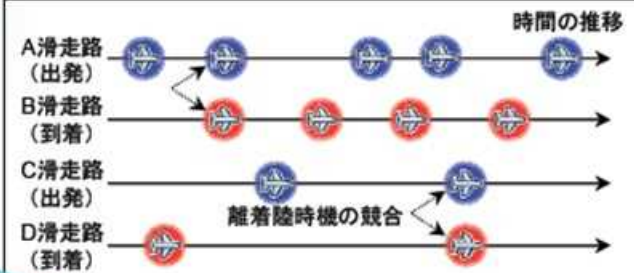
時間軸精度を含む性能準拠型航法



機上アビオニクス向上により、時間軸の精度を含んだ航法(4D-RNAV)が実現され、更に、ATMシステムの高度化等により、高精度な時間管理(特定地点の通過時刻指定等)を実現

離陸時刻・地上交通量を考慮した
スポットアウトの時間管理
【実現時期:短期】

離着陸順序を考慮した時間管理
【実現時期:中期】



各滑走路における離着陸予定時刻等を高精度で予測し、最適な離着陸順序等の調整を支援するツールが必要

交通状況、滑走路変更等に対応したスポットアウト時刻の最適化による滑走路端(誘導路)における出発順番待ちの解消など

出発・到着交通量の割合、出発・到着機の組み合わせ等を考慮した離着陸順序の最適化による容量の最大活用など

滑走路容量からみた到着管理手法に関する研究

- ✓ 特に混雑時にはなるべく容量を最大化(遅延を最小化)するための順序付けや離着陸機数の優先配分が行えないか？
- ✓ 到着管理においては, この順序付けや機数比率が, 個々の機体に与えるべき滑走路到着時刻を決定する前提条件となる.
- ✓ 出発制御などのVolume Controlにおいては, 容量の予測精度向上が課題となる.

マクロな制御

+

ミクロな制御

離着陸の時間帯別便数配分(Volume Control)

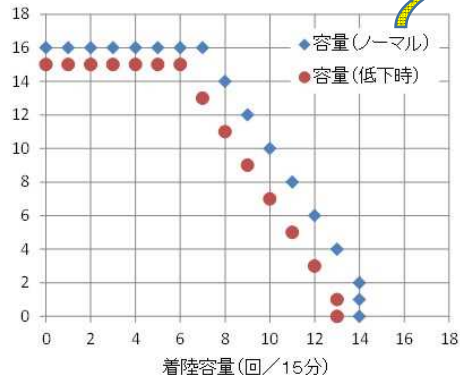
⇒ 出発制御・SCASを高度化するイメージ

1機1機の離着陸順序(Sequence Control)

⇒ 課題: いつ順序を決めるか, どの程度の順序付けなら可能か

時間帯別の予測需要

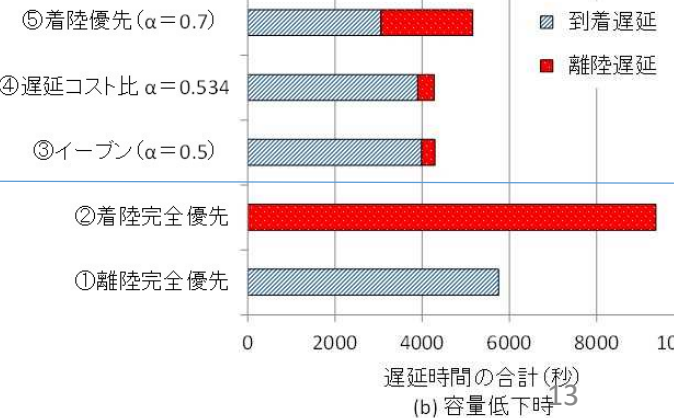
羽田の平均的容量カーブ



離着陸機数の最適配分

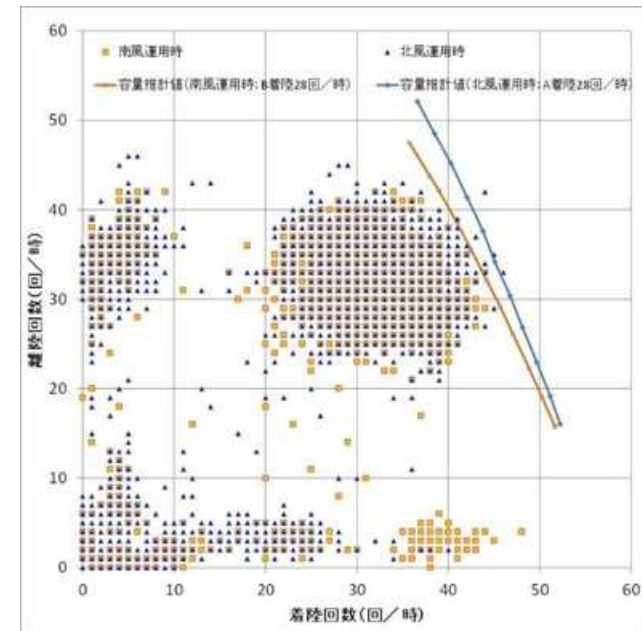
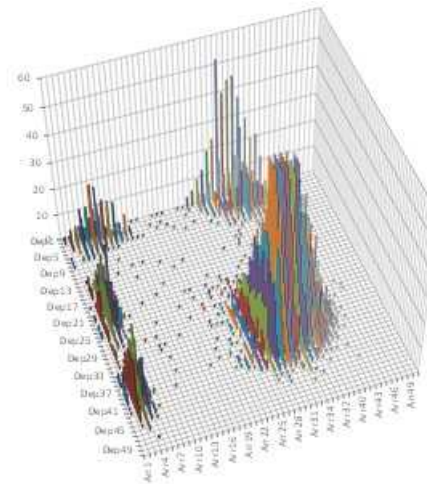
	Capacity		Demand	
	Dep	Arr	Dep	Arr
8:00	12	9	12	10
8:15	8	11	9	13
8:30	8	11	14	9
8:45	10	10	11	10

最適化
非最適化



(b) 容量低下時

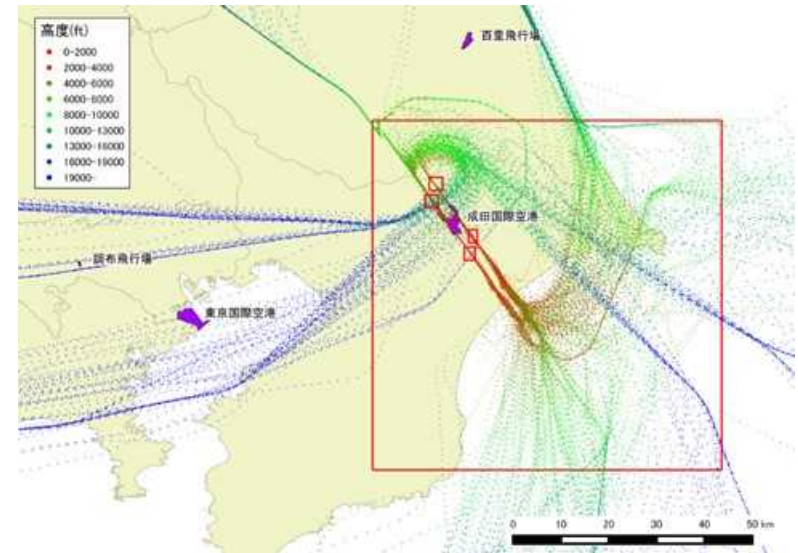
- ✓ 順序付けの最適化問題に関する研究論文は数多い
- ✓ ただし、到着機の戦略的な順序付けは、実フィールドでの実行は困難かつそれほどの効果も得られない、と言われることが多い(ヒースローくらい？最大+5%(+2~3回/時程度？)
- ✓ 連続離陸や離着陸の順序付け(非FCFS)は、日常的に行われていると考えられるが、現状においてどの程度実行されているのか、その最適化はどの程度可能か？
- ✓ 処理容量(回数)の変動特性と要因(容量予測)



CARATSオープンデータによる離着陸順序付け実績の分析

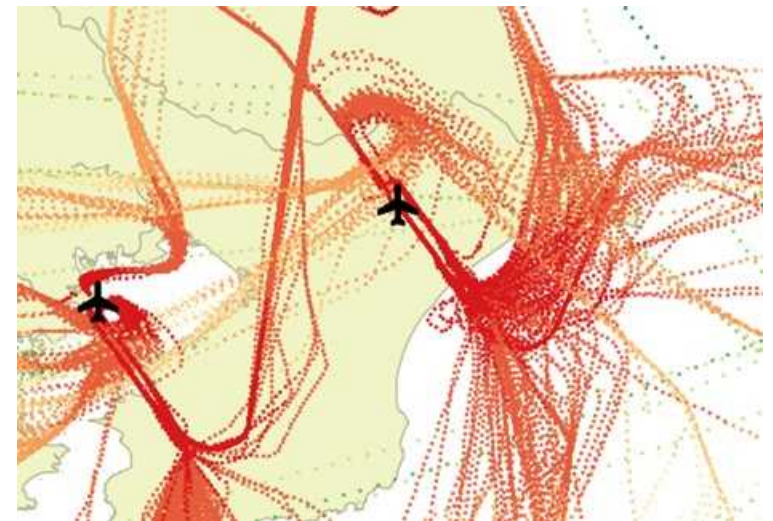
(1) 離着陸共用滑走路(単一滑走路)における離着陸の順序付け

成田空港における離着陸の処理



(2) 交差滑走路における後方乱気流区分からみた離陸の順序付け

羽田空港における離陸機の処理(南風時のD滑走路着陸とC滑走路離陸)



(1) 成田における離着陸の順序付け

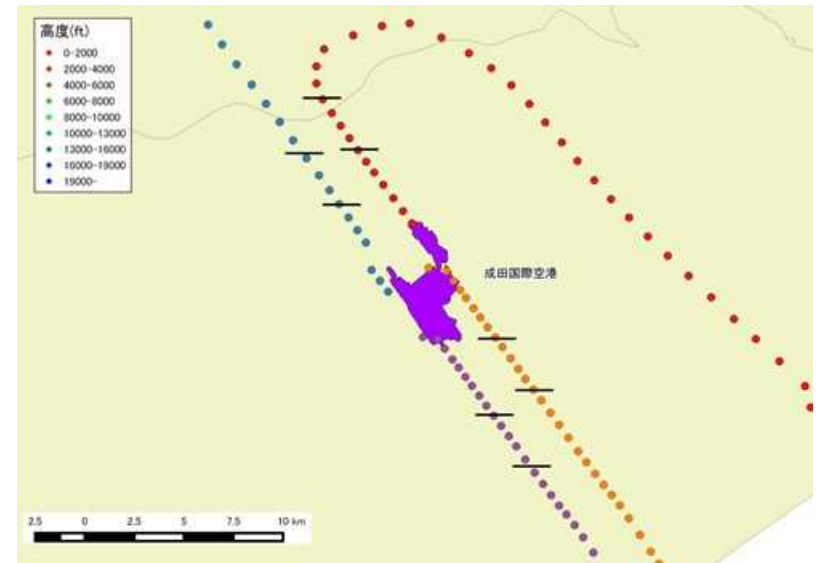
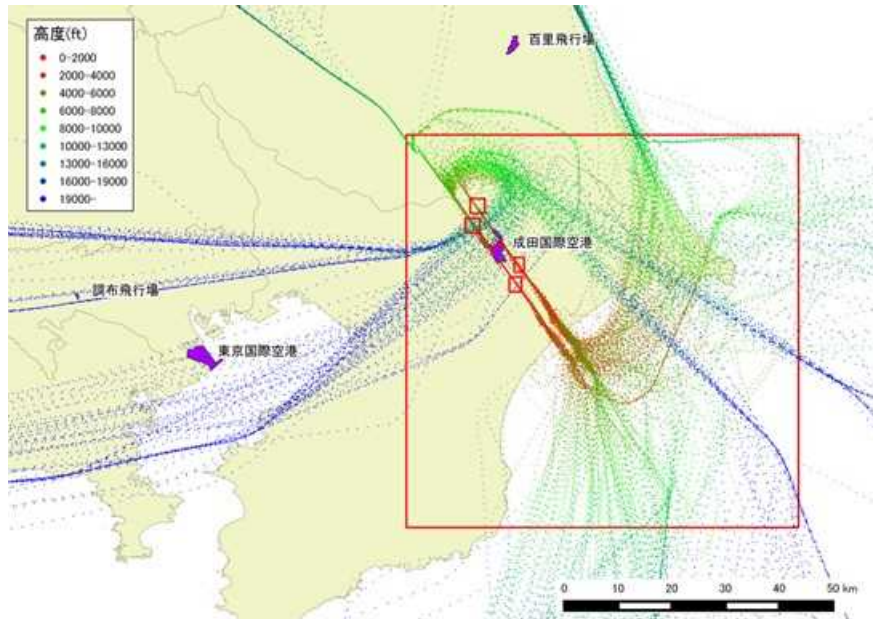
2012年度奇数月各1週間の飛行軌跡データ(CARATS OPEN DATA)

⇒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)

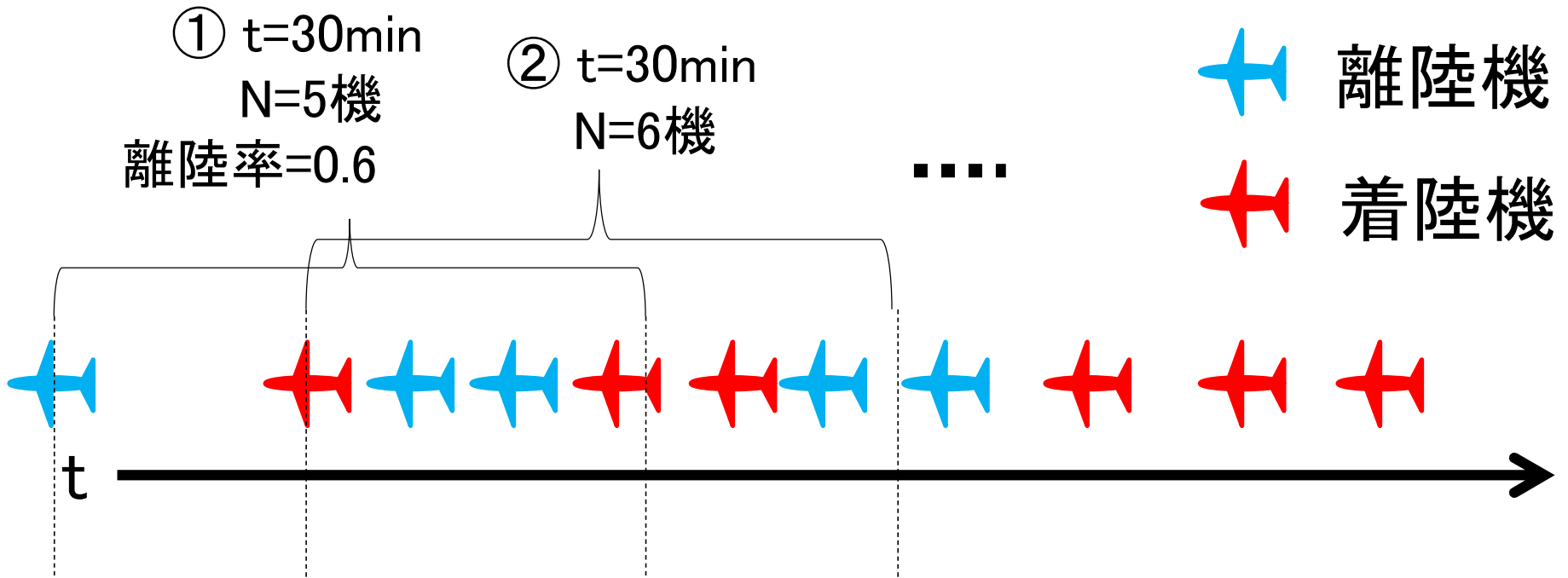
⇒混雑時間帯(12機以上/30分)かつ離着陸混合時間帯を抽出し、30分間の連続2機の離着陸順序の組み合わせ(離/離, 離/着, 着/離, 着/着)の実績数を集計

⇒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



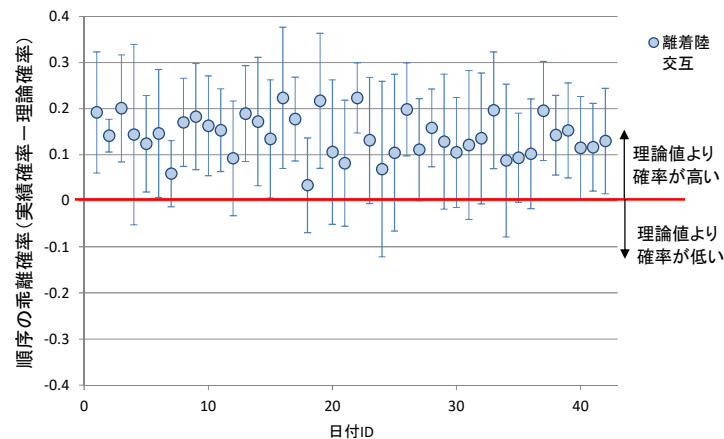
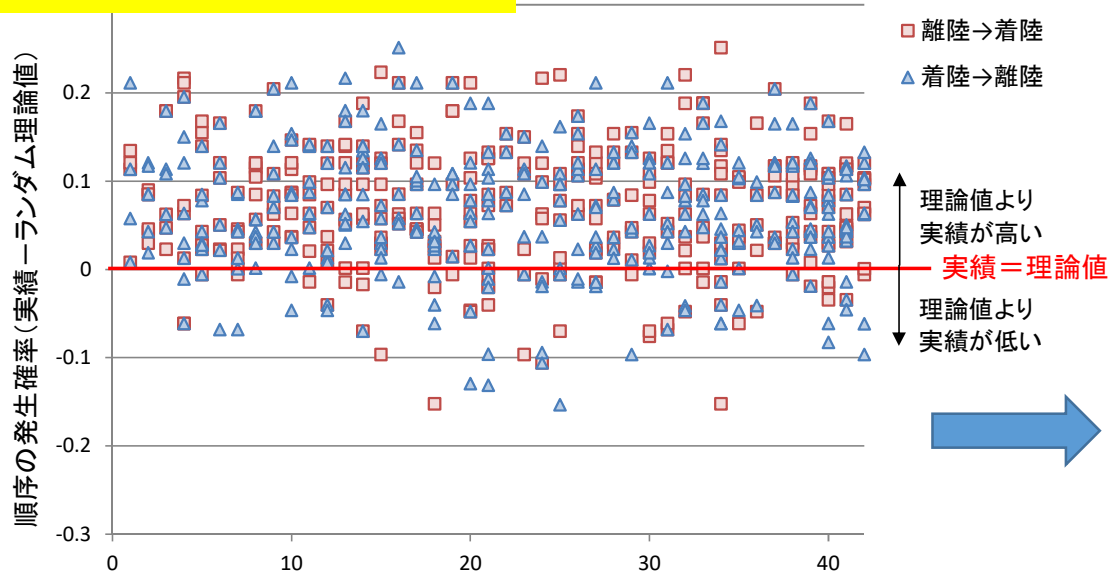
分析サンプルとする機材列の抽出 ($N \geq 12$, 連続数 < 9)

- ✓ 30分に含まれる機材を1サンプル(機材列)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

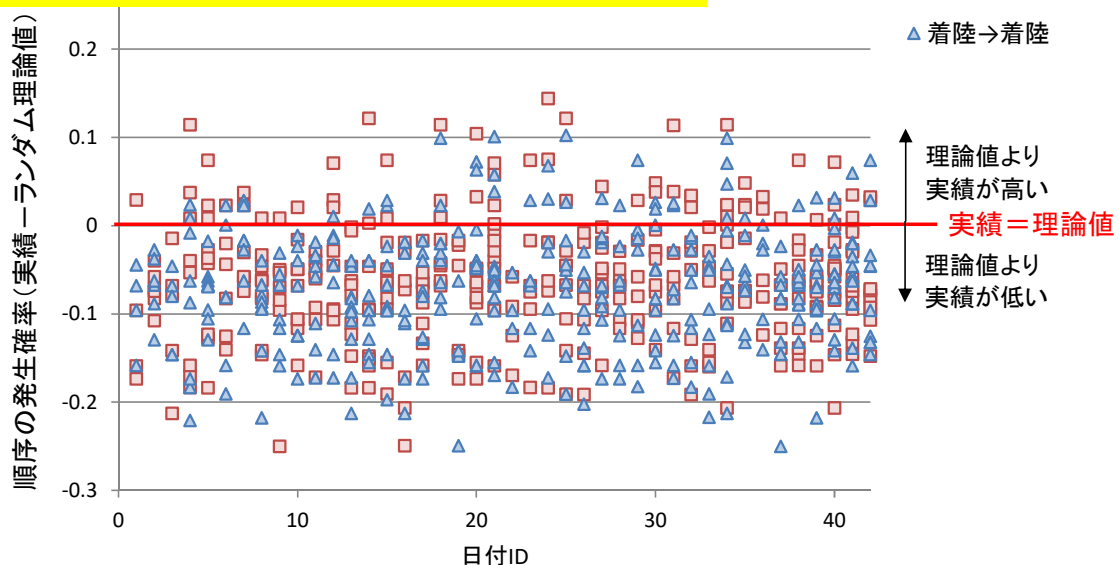


離着陸の順序付けの実績～理論値(完全ランダム)との比較

離着陸交互の発生確率



連続離陸・連続着陸の発生確率

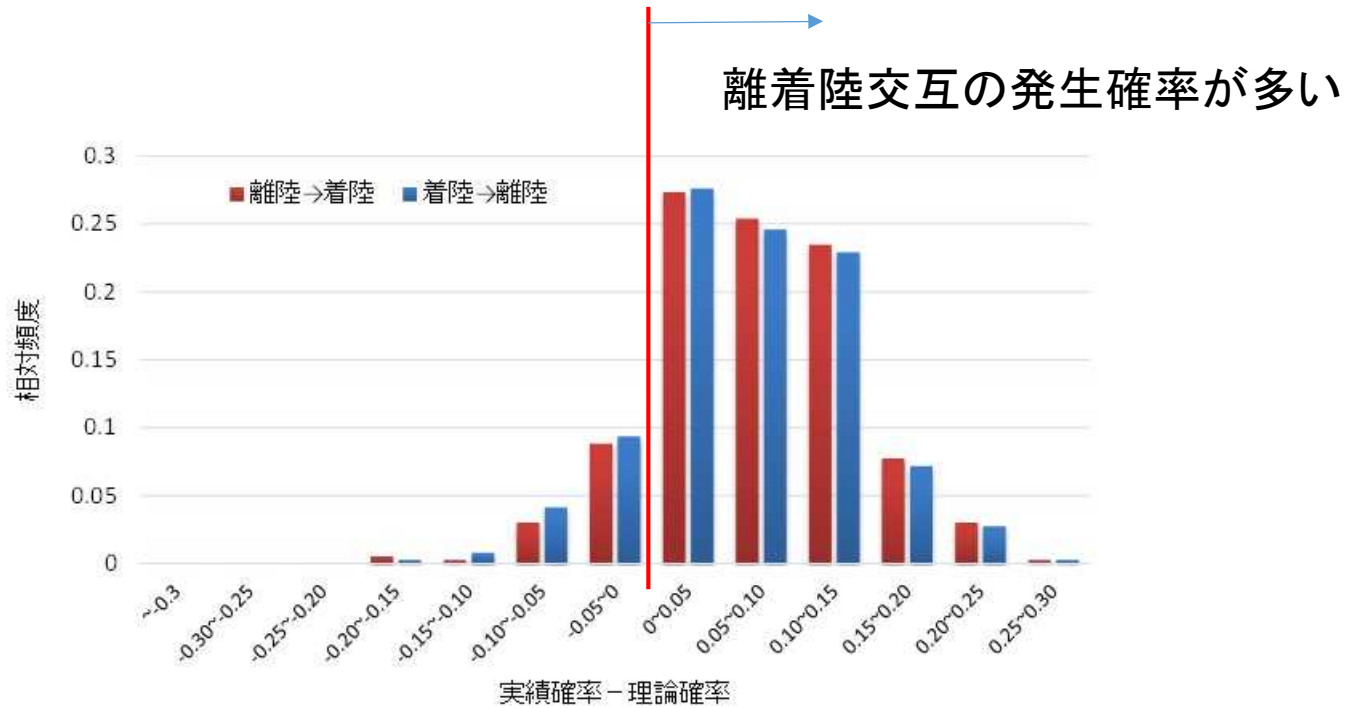


処理効率の高い「離着陸交互」
の実績発生確率



統計的に有意に
理論値(ランダム順序)より大きい

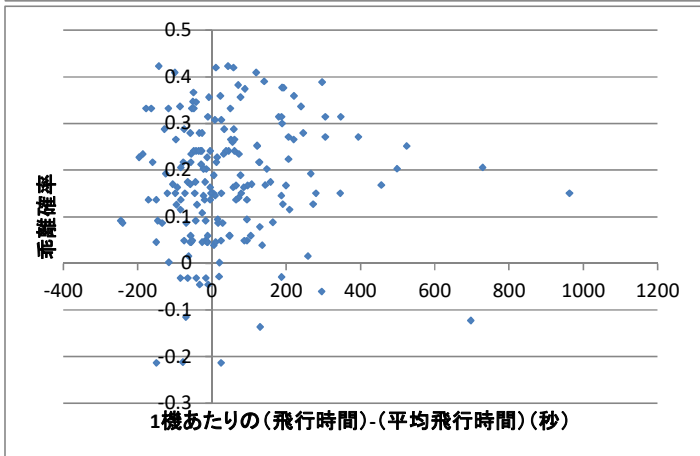
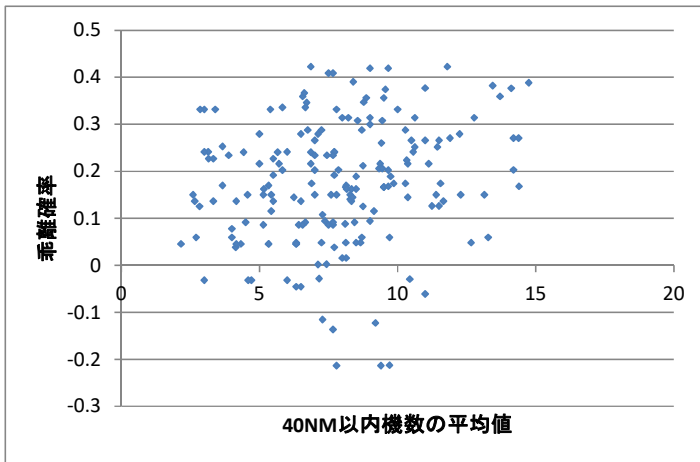
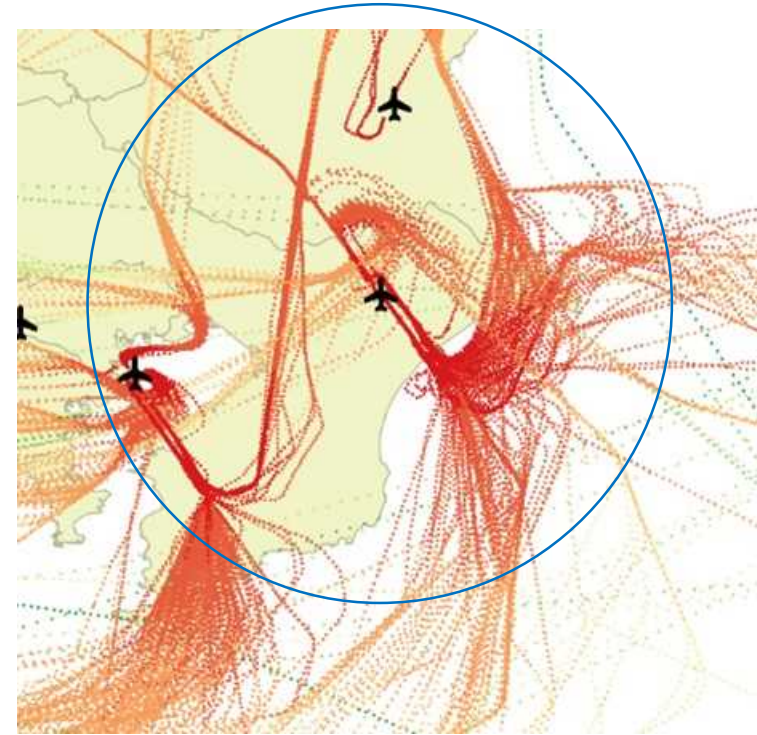
離着陸の順序付けの実績～理論値(完全ランダム)との比較



ターミナル空域の混雑度との関係

ターミナル混雑度:

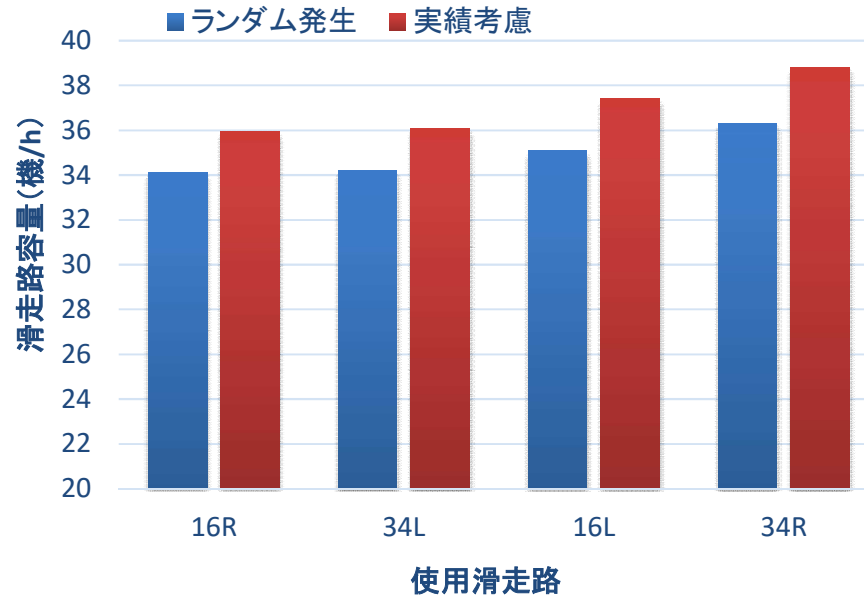
- ・オープンデータから、ターミナル空域(空港から40NM以内と仮定)の範囲内に存在する到着機数を時間帯別に集計
- ・各到着便のターミナル内飛行時間について、方面別に平均飛行時間からの増分を計算.



乖離確率への影響度(回帰)

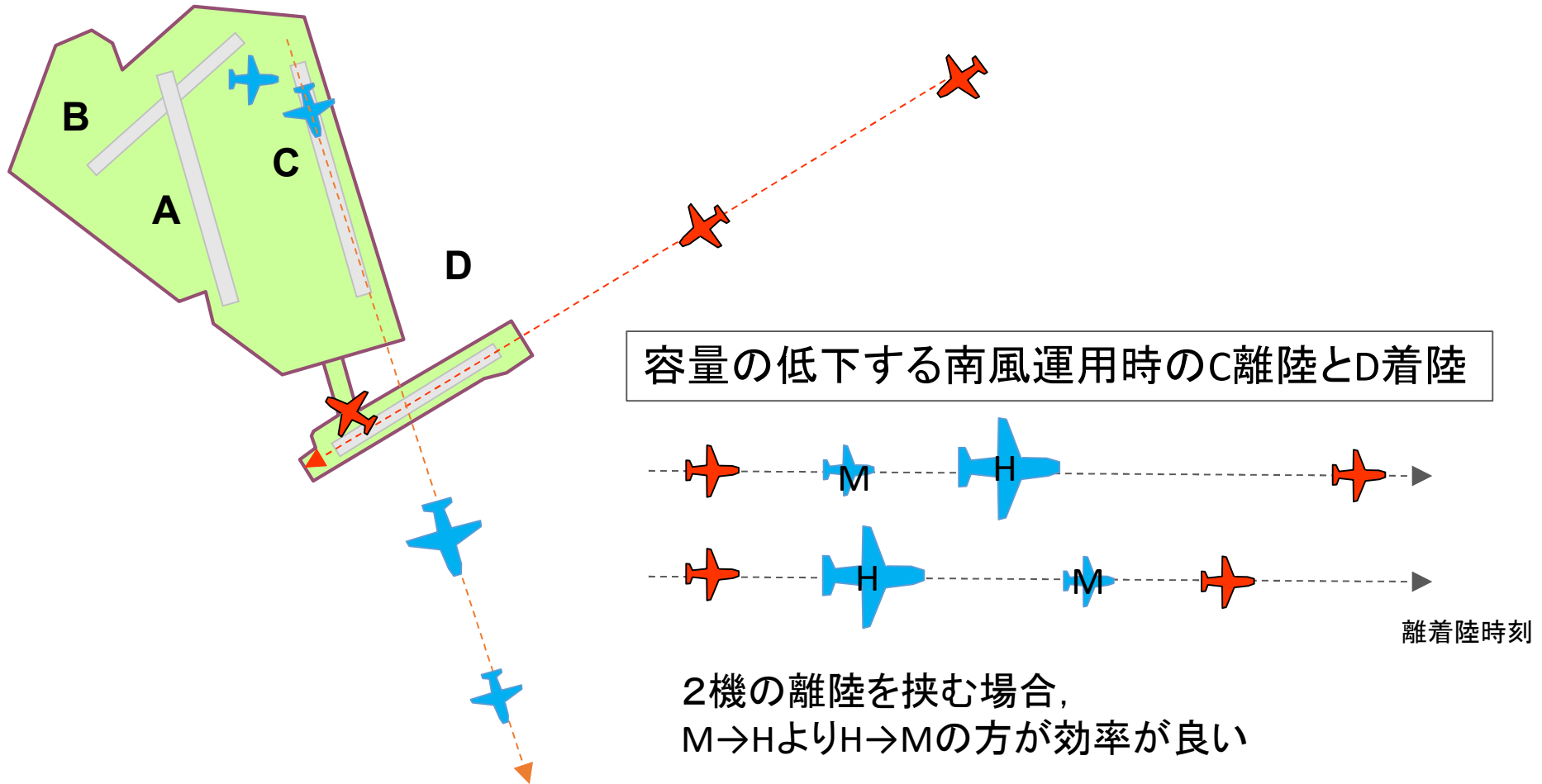
	係数	標準誤差	t	P-値
切片	0.26	0.087	2.97	0.003
30分内離陸率	-0.30	0.15	-1.96	0.050
ターミナル内到着機の飛行時間増加量(秒)	-3.6E-05	6.68E-05	-0.54	0.586
ターミナル内到着機数	0.00905	0.00400	2.26	0.024

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

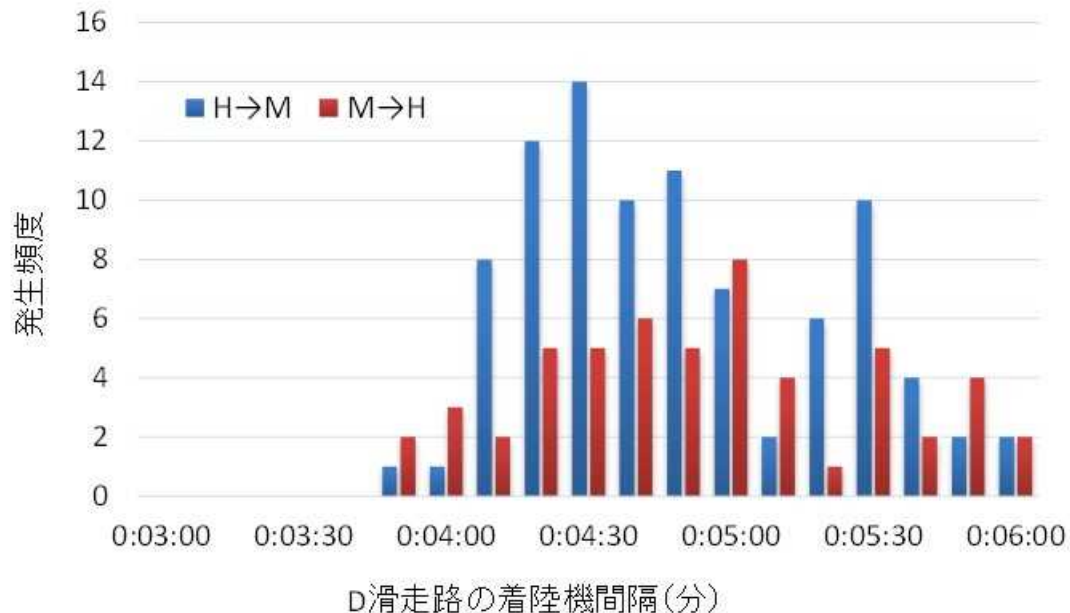
(2) 羽田における離着陸の順序付け



- ✓ オープンデータから「D着陸→C離陸→C離陸→D着陸」の機材列サンプルを全て抽出し、その離着陸時刻を成田のケースと同様に推計し、連続離陸の順序の発生率を集計
- ✓ 機材種からHeavyとMediumに分類.

羽田空港南風運用時のD滑走路着陸間のC滑走路離陸機順序の発生確率(実績)

C滑走路離陸順序	発生確率
Heavy→Medium(処理効率=大)	0.625
Medium→Heavy(処理効率=小)	0.375



羽田空港南風運用時のC滑走路離陸機順序別のD滑走路着陸間隔の分布(6分以下)

分析のまとめ

- ✓ 実績では、離着陸交互の順序の発生確率が容量算定等で仮定しているランダム順序仮定よりも一定程度大きい傾向がある
- ✓ 管制の現場で、処理効率を上げるために、可能な場合は離着陸交互運用を行う場合があると想像される
- ✓ どのような状況で意図的な順序付けが可能かまでは分かっていないが、地上の離陸機の状態等も踏まえれば、より分析が可能
- ✓ 現状の順序付け実態も踏まえつつ、経験的な順序付け・意思決定をサポートするシステムの実現可能性、到着管理システム等への統合可能性を検討したい

今後のデータ活用について

- ✓ 近年、容量拡張やLCC等の躍進で混雑悪化→データの更新
- ✓ 滑走路運用関連の方策を検討するには、地上データも必要
- ✓ スケジュールデータやATFM関連のデータ(EDCTなど)があると、航空サービスや交通流制御との関係も分析可能(米国の例)