

離着陸順序の実態からみた滑走路容量算定手法に関する研究 ～成田国際空港を対象として～

二見康友（茨城大学工学部都市システム工学科 4 年）

指導教員：平田輝満（茨城大学工学部都市システム工学科准教授）

1. 研究の背景と目的

国土交通省¹⁾によると首都圏空港における 2032 年の発着回数予測は最大で 94.1 万回/年になるとされている。一方で、羽田空港と成田空港の発着回数はそれぞれ 2014 年度中に 44.7 万回/年、30 万回/年を目指すと言われており、合計でも 74.7 万回/年にとどまるため、中長期的にさらなる容量拡大が必要とされている。

我が国の混雑空港の容量（発着枠数）は、安全に処理可能な滑走路容量を統計的な方法で算出している。その際、離着陸及び機材の大きさの組み合わせごとに必要な処理時間を算出し、その組み合わせが発生する確率から単位時間当たりの処理可能な機数の期待値を算出し容量としている。この時、離陸が連続、もしくは着陸が連続する場合に比べて、離着陸が交互に処理された方が処理間隔は短縮できるため、離着陸の順序付けが滑走路容量に大きな影響を与える。通常、その順序は確率的にランダムを仮定し、各空港で発着枠を決めている。しかし、実際の航空管制では、特に混雑時にはなるべく処理効率を上げるために管制官が一定程度の意図をもって離着陸を交互に運航している可能性があるのではないかと考えた。もしそうであれば離着陸機がランダム発生であるという仮定によって得られた滑走路容量は実際に比べ過小評価されていることになる。我が国の管制組織の体制からは積極的に発着枠を上げようとするインセンティブは必ずしも高くなく、順序付けにそのような傾向が仮にあっても発着枠算定に反映させることは容易ではないかもしれない。そのためまずは、信頼性のある客観的な事実が必要となる。

一方、国土交通省²⁾は航空サービスの向上を図るために将来の航空交通システムに関する長期ビジョン（CARATS）の一環として 2014 年に我が国で初めて“航空機の大規模な飛行軌跡データ CARATS Open Data”（以下、軌跡データ）が公開された。

以上のことから、本研究では成田空港を対象に軌跡データを用いて離着陸順序の実態と滑走路容量算定方式の離着陸順序の仮定（ランダム発生）との乖離について明らかにすることを目的とする。また、両者が乖離していた場合には、離着陸順序の実態を考慮した場合の滑走路処理容量の拡大可能性を検討する。

なお、本研究の発展段階で到着管理システムにおける離着陸順序付けについても検討予定であるが、到着管理システムにおいて各到着機を滑走路や特定の FIX に到着させるべき時刻を決める必要がある。独立の到着専用滑走路であれば、例えば 2 分間隔で時刻を簡易に割り当てることが考えられるが、到着空港からの出発機や他の滑走路との従属関係にある場合、到着機間隔と離着陸順序付けが滑走路全体の容量に大きな影響を与える。現状では EDCT や CFDT による出発・FIX 通過時刻制御による需要容量バランス（ボリュームコントロール）が実施されている。このようなマクロな到着管理と、離着陸順序付けからみた滑走路容量最大化を目的としたミクロな到着管理を統合したシステムの検討が必要と考える。基本的にはマクロなボリュームコントロールにおいて滑走路容量の予測精度向上と容量最大化のための離着陸処理機数配分の考慮（例えば参考文献 [3] など）をしつつ、一定範囲内に混雑状況を抑える。そ

の下でマイクロな離着陸順序付けシステムによる到着時刻割り当て（例えば，[4] など）を飛行局面の極力早い段階で行うことが考えられる．しかしながら，予測時期と予測精度のトレードオフの問題を十分吟味する必要がある．

2 離着陸順序付けと滑走路容量の実態解析

2.1 滑走路容量の決定要因

滑走路容量に影響する主な要因は，滑走路レイアウト，滑走路の運用方法（離陸・着陸専用，離着陸共用），出発・到着経路設定，大型機比率（後方乱気流区分の Heavy 率など），滑走路占有時間，離着陸の順序付け，その他要因（騒音等の環境制約など）が挙げられる．滑走路レイアウトや出発到着経路などの条件が与えられた中で滑走路処理の効率化を図る場合には，離着陸の順序付けが重要な要因となる．

通常，滑走路処理容量の算定は統計的算定方法を基にしている．つまり，連続する離着陸機で先行機*i*，後続機*k*の間の機*j*の実際の処理時間を t_{ijk} (i, j, k はそれぞれ先行機，当該機，後続機の使用滑走路・離陸 or 着陸・機材を表す) とすると，容量算定時に想定する1機当たり処理時間 T_{ijk} は t_{ijk} の平均値にバラツキを考慮したバッファを加えて以下のように表わされる^[5]．

$$T_{ijk} = \bar{t}_{ijk} + \sigma \Phi^{-1}(1 - p_v) \quad (1)$$

$$t_{ijk} \sim N(\bar{t}_{ijk}, \sigma^2). \quad (2)$$

ここで， σ は処理時間の標準偏差， Φ^{-1} は標準正規分布の累積分布関数， p_v は最低管制間隔をきる確率である．ただし，後続機が離陸機の場合は地上で待機可能であるため，容量計算上のバッファ時間が必要ない．この T_{ijk} (i, j, k はそれぞれ先行機，当該機，後続機の使用滑走路・離陸 or 着陸・機材を表す) に関して連続する離着陸機材の組み合わせの発生確率 P_{ijk} で 1 機当たり処理時間の期待値を計算することで単位時間あたりの滑走路処理容量 C を算定する (式(3))．

$$C = 1 / \sum_i \sum_j \sum_k P_{ijk} T_{ijk} \quad (3)$$

式(3)は，確率的に完全ランダムな離着陸順序を想定した際の容量であるが，処理の効率化や容量拡大のための戦略的順序付けを考慮し，アприオリな固定の順序付けを想定することもある．この場合は固定の順序に対する処理間隔が式(1)と式(2)から算出されるため，その処理間隔をもとに単位時間当たりの処理容量を算出することになる．特に，本研究で着目する離着陸順序付けでは，処理効率が比較的高い離着陸交互運用戦術 (Alternate Tactic^[6]) が実績としてどの程度行われているか，その発生頻度が通常のランダム仮定とどの程度差があるか，について分析を行う．また，離着陸順序だけでなく，特に羽田空港においては Heavy, Medium といった後方乱気流区分からみた順序付けの実績についても分析を行う．

2. 2 羽田空港便・成田空港便の抽出と離着陸時刻の推計

2012 年度の飛行軌跡データである CARATS OPEN DATA（約 10 秒ピッチの飛行位置と機材データ）から成田空港・羽田空港便を抽出し、各便の使用滑走路、離着陸時刻の推計を行った。その方法は以下の通りである。

羽田空港・成田空港便の抽出

まず、各便のデータの開始点と最終点の緯度、経度、高度から各空港便を抽出した。その条件を表 6.1 に示す。これら条件の設定の際には、低高度帯のデータ精度の問題や誤差を考慮して決めている。なお、着陸復行機は 1 機で滑走路を複数回占有するため、別途抽出を行っている。具体的には表 1 に示すように抽出高度条件を緩和し、一定時間（約 90 秒）の降下後に一定時間の上昇があった場合に復行機として抽出し、データを作成した。

表 1 各空港発着便の抽出条件

	羽田空港		成田空港	
	最大値	最小値	最大値	最小値
緯度 (度)	35.7	35.3	36	35.2
経度 (度)	140	139.5	141	140.2
高度 (feet)	5000	\	5000	\
復行機条件高度 (feet)	8000		8000	

使用滑走路の判別

次に、各便の通過位置から使用滑走路端の判別を行った。複数滑走路のレイアウトや滑走路直近のデータの欠損などを考慮して、各滑走路の離着陸経路上に滑走路端から一定程度離れた位置・範囲を判別条件として設定した。具体的な設定条件を表 2、図 1、図 2 に示す。なお羽田空港については分析対象とした南風時の C 滑走路離陸と D 滑走路着陸のみの抽出を行っている。

表 2 使用滑走路の判断条件

成田空港				羽田空港			
滑走路		最大	最小	滑走路		最大	最小
16R	緯度 (度)	35.83	35.8	23 着陸	緯度 (度)	35.57	35.54
	経度 (度)	140.35	140.32		経度 (度)	139.85	139.825
34L	緯度 (度)	35.71	35.68	34R 離陸	緯度 (度)	35.53	35.49
	経度 (度)	140.435	140.41		経度 (度)	139.845	139.82
16L	緯度 (度)	35.87	35.84		高度 (ft)	5000	\
	経度 (度)	140.36	140.33				
34R	緯度 (度)	35.75	35.72				
	経度 (度)	140.44	140.42				
共通	高度 (ft)	8000	\				

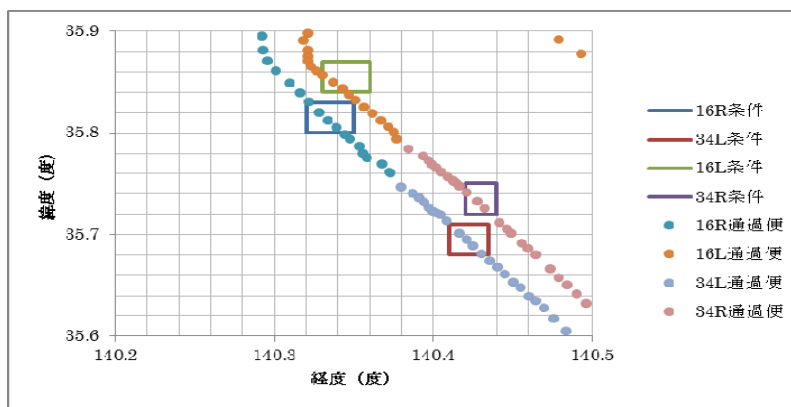


図 1 成田空港周辺の軌跡と判別条件区域

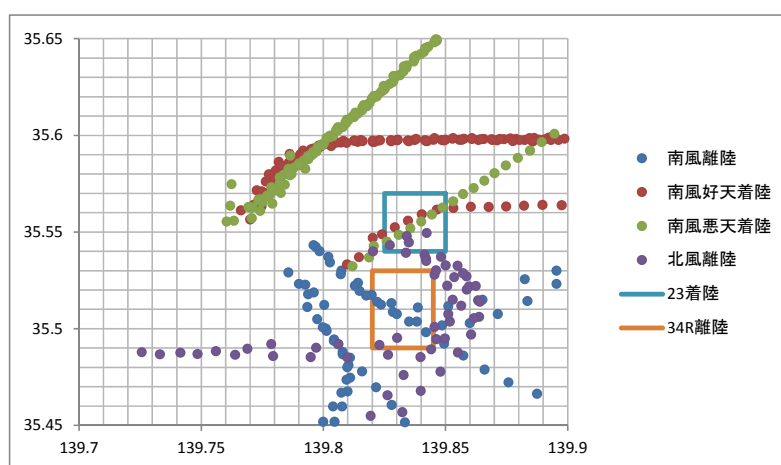


図 2 羽田空港周辺の軌跡と判別条件区域

離着陸時刻の推計

航空機の離着陸順序を分析するために各便の離着陸時刻（滑走路端通過時刻）を推計した。使用データは低高度において誤差が大きく、便ごとにデータの存在する範囲にばらつきがあるため空港直近のデータは使用せず、一定程度離隔した位置と標準的な離着陸速度を用いて滑走路端到達時刻を推計した。

まず、成田空港の場合は、離着陸時刻の推計の基準に使用する軌跡データの位置は滑走路端から滑走路方向に 3NM もしくは 5NM 地点（3NM 地点前後のデータがない場合）のデータとした。3NM, 5NM の位置は地球を真球と仮定した座標系から求めた（表 6.3）

表 3 算出した閾値の位置

		34L	34R	16R	16L
5NM 地点	緯度(度)	35.67156969	35.71402909	35.8461511	35.8769603
	経度(度)	140.4427937	140.4442235	140.3161898	140.3259822
3NM 地点	緯度(度)	35.7002707	35.74273079	35.81744621	35.84825618
	経度(度)	140.4219774	140.4233975	140.3370362	140.3468383

各便が基準地点とした 3NM か 5NM 地点を通過した時刻を求めるため、その位置の直前のデータと直後のデータ間は等速運動をしていると仮定して (5) 式を用いて基準地点の通過時刻を求めた。

$$t_0 = t_1 \pm \Delta t \times \frac{|\phi_1 - \phi_0|}{|\phi_1 - \phi_2|} \quad (5)$$

t_0 : 基準地点通過の時刻

t_1 : 機銃地点通過直前のデータの時刻

Δt : 基準地点直前と直後のデータ間の時間

ϕ_0 : 基準地点の緯度 ($i=0$ の時は基準地点, $i=1$ の時は直前, $i=1$ の時は直後)

ϕ_1 : 基準地点通過直前の緯度

ϕ_2 : 基準地点通過直後の緯度

次に、基準地点と滑走路端到達時の速度 (表 4) を設定した。着陸機の場合は AIS-Japan より羽田空港の速度を参考に決定した。また、着陸機の滑走路端到達速度は 3NM 地点と同速度と仮定している。離陸機の場合は実績の離陸速度を参考とした。これらの設定速度を用いて基準地点から滑走路端までは等加速度運動をすると仮定し、所要時間を求めたものを表 5 に示す。これら所要時間を使用して滑走路端到達時刻 (滑走路端到達時刻) を推計した。

表 4 各基準地点と滑走路端到達時の設定速度

	滑走路端からの距離 (NM)	閾値の通過速度 (kt)	滑走路端到達時速度 (kt)
着陸機	3	H 機は 145, M 機は 135	H 機は 135
	5	160	M 機は 145
離陸機	3	185	H 機は 160
	5	220	M 機は 150

表 5 成田便に対する基準位置から滑走路端に到達するのに必要と設定した時間

	滑走路端からの距離 (NM)	所要時間 (s)	
		H	M
着陸	3	74.48	80
	5	121.69	128.1
離陸	3	62.61	64.48
	5	98.17	100.04

羽田空港の場合も同様の考え方で算出したが、基準地点が異なる。まず、RWY23 着陸機は天候によって飛行経路が変わるため、図 3 より天候に関わらず通過する点として閾値を緯度 35.56, 経度 139.85 (滑走路端からの距離は約 1.793NM) と設定した。16R 離陸機は成田便と異なり、離陸後様々な方向へ散ら

ばってしまうため、離陸便の各データの位置と滑走路端との距離を算出し、直線距離が 3NM, 5NM となる地点を基準地点とした。設定速度は成田便と同じ値を用いて閾値から滑走路端までの所要時間(表 6)を算出し、成田便と同様の処理を行った。

表 6 基準地点から滑走路端に到達するのに必要と設定した時間

	滑走路端からの距離 (NM)	所要時間 s	
		H	M
着陸機	1.79	44.52	47.82
離陸機	3	62.61	64.48
	5	98.17	100.04

2. 3 離着陸順序付けの実態解析

前節の方法で抽出および離着陸時刻を推計した成田空港便の滑走路ごとの機数、離陸機割合、Heavy 機割合を表 7 に示す。1 日あたりの 30 分毎の平均機数を図 3 に示す。離陸機割合、Heavy 機割合ともに A 滑走路が非常に高いが、これは B 滑走路の滑走路長が 2500m しかなく特に必要滑走路長の長い離陸機が 4000m の A 滑走路を優先して使用しているからである。本研究では離着陸順序付けをみるため、後述する分析サンプル抽出においては、結果として離着陸共用で使用する事が多い A 滑走路が主な分析対象となっている（分析サンプルの 9 割以上が A 滑走路）。図 3 より 17 時頃と 20 時頃にピークを迎えていることが分かる。日別でみると 12 時前後にもピークがあるのだが、42 日分のデータの平均であるためピークがほとんど存在しないように見えてしまっている。これらのピーク時間帯の滑走路の運用方法は A 滑走路が離陸、B 滑走路が着陸専用となっている時間帯が多く、同一滑走路上では離陸機と着陸機はあまり混合していないのが分かる。一方、同一滑走路上で離陸機と着陸機が混合している時間帯として主に A 滑走路の 15 時~17 時があげられる。

表 7 抽出したデータの集計結果（42 日分）

	A 滑走路	B 滑走路	合計
サンプル数（復行機数）	15605（17）	8236（5）	23841（22）
離陸機割合	0.691	0.131	0.498
Heavy 機割合	0.777	0.563	0.703

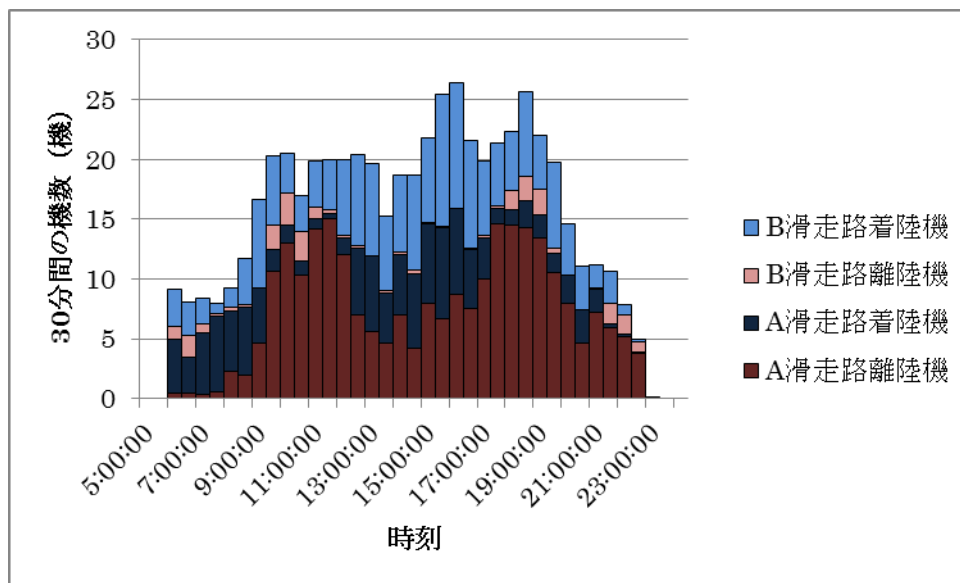


図3 1日あたりの時間帯別処理機数の平均

続いて、離着陸順序の実績をどのように計測するかであるが、本研究では 30 分間を分析単位として、その間の離着陸の順序を統計データとして整備する。順序については連続する 2 機の組み合わせ、つまり、「離陸→離陸」「着陸→着陸」「離陸→着陸」「着陸→離陸」の 4 種類の発生頻度（確率）を分析する。成田空港のケースでは特に 1 本の滑走路（A 滑走路もしくは B 滑走路）において滑走路処理容量上効率の良い離着陸交互の順序、つまり上記の組み合わせで言えば「離陸→着陸」「着陸→離陸」の発生頻度の実績を調べることが主目的であるため、機材の大きさ（後方乱気流区分）については分析しない（例えば、着陸の間に Heavy と Medium の 2 機の離陸を挟む場合には、その順序付けが処理効率に影響するが、成田の交通条件ではそのような状況の発生頻度が非常に稀であるため、分析の対象外とした）。

どこの 30 分間を分析サンプルとして抽出するかであるが、上記のような離着陸順序を分析するためには、まず同一滑走路上で離陸と着陸が共用運用されていなければならない。また、オフピークなど単位時間当たりの処理機数が少ないと、そもそも離着陸間隔が粗となり意図的に順序付けをする必要性も低下する。これらのことを考慮すると分析サンプルとする 30 分間データの抽出条件として、離陸もしくは着陸が多く連続していないこと、単位時間あたりにある程度の機体を処理していることが条件として必要であると言える。したがってこれらを満たす条件として、

① 離陸もしくは着陸が 9 機以上連続していないこと（A 滑走路の平均離陸機率約 0.7 で 9 機以上離陸の確率が 0.05 未満となる）、

② 30 分以内に 12 機以上の機体が滑走路を通過していること、

の 2 点と設定した。

また、すべての機を起点とした 30 分間の離着陸データを 1 サンプルとして扱うため、上記の条件で抽出しただけだと 1 機ずつだけの重複が多いサンプルデータを異なる独立サンプルとして扱うこととなり、分析上望ましくないため、そのような移動平均的な重複データについてはその中から 1 つを代表サンプルとしてさらに抽出した。以上の抽出プロセスの詳細を図 4 に示す。

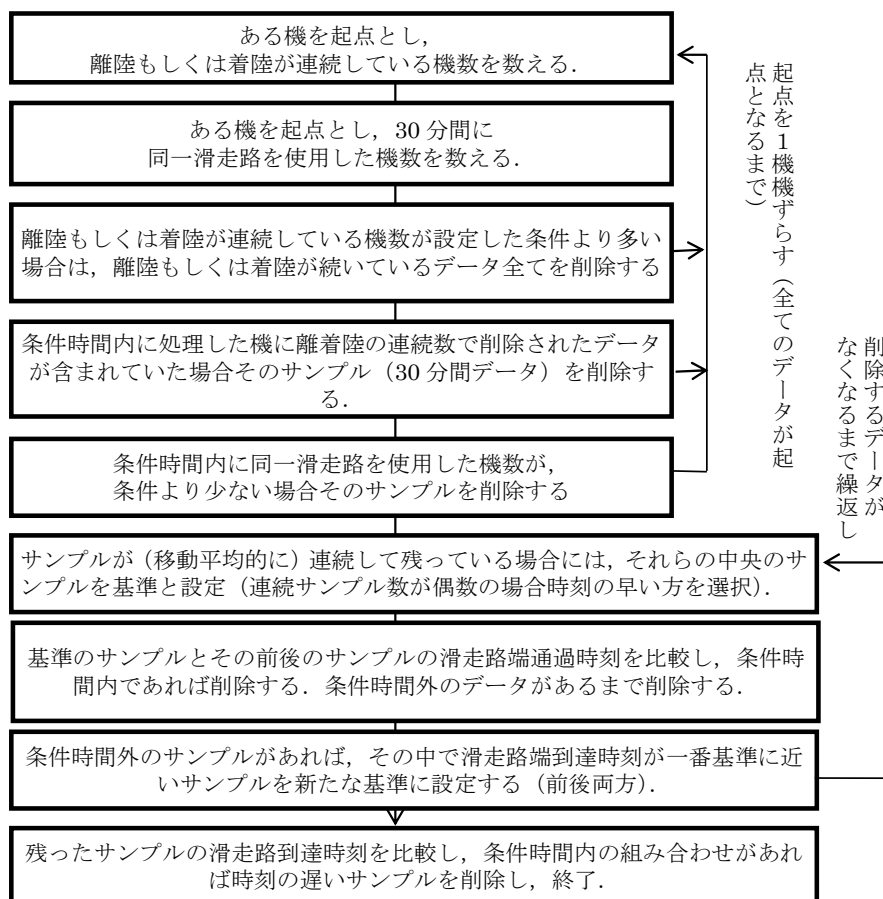


図 4 分析サンプルの抽出フロー

得られた分析サンプル個々について、その 30 分間の離着陸順序の実績（前述の 4 種の組み合わせの発生頻度）と確率的完全ランダムを仮定した理論値を比較し、その差（「実績の確率」－「理論確率」）を「乖離確率」として算出した。ここで、離着陸順序の理論値は、各 30 分間サンプルの離着陸機数割合から算出することになる。例えば、離着陸が同数であれば、連続 2 機の 4 種類の順序組み合わせはそれぞれ同じ発生確率 $0.5 \times 0.5 = 0.25$ となる。

抽出された分析サンプルごとの乖離確率すべてを日ごとに示したものを図 5、図 6 に示す。図 5 には処理効率の高い離着陸交互順序、つまり「離陸→着陸」と「着陸→離陸」の発生確率の実績と理論値との差（乖離確率）を示しており、図 6 は離陸もしくは着陸連続の乖離確率である。これらから明らかに離着陸交互が離陸もしくは着陸連続よりも発生確率の実績が理論値よりも高い傾向にあることが分かる。図 7 には「離陸→着陸」と「着陸→離陸」の乖離確率の分布を示しているが、理論上は両者の発生確率に差はないはずであるが、実績においても両者の分布に統計的な差がなかったため、両者の発生確率を合計してその乖離確率の日ごとの平均と標準偏差を示したものが図 8 である。これから全ての日において乖離確率の平均は 0 より大きいことが分かる。また離着陸交互順序の乖離確率の全データをプールして平均値の検定 (t 検定) を行ったところ、統計的に有意に 0 より大きいことが分かった ($t=19.4$, $p=0.00$)。

以上から、成田空港においては滑走路を離着陸共用で運用する際、処理効率の良い離着陸交互順序の発生確率が完全ランダム仮定よりも有意に高く、通常のスロット数算定や容量予測よりも平均して高い処理容量が達成されている傾向が強いことが示唆された。図 9 は離陸機比率別 (0.1 間隔) の離着陸交互

の乖離確率を示しているが、離着陸比率がイーブンに近いほど値が大きくなっている傾向がある。これはある意味当然であるかもしれないが、離着陸が同程度発着する時ほど交互運用できる確率や必要性が高いからであると考えられる。

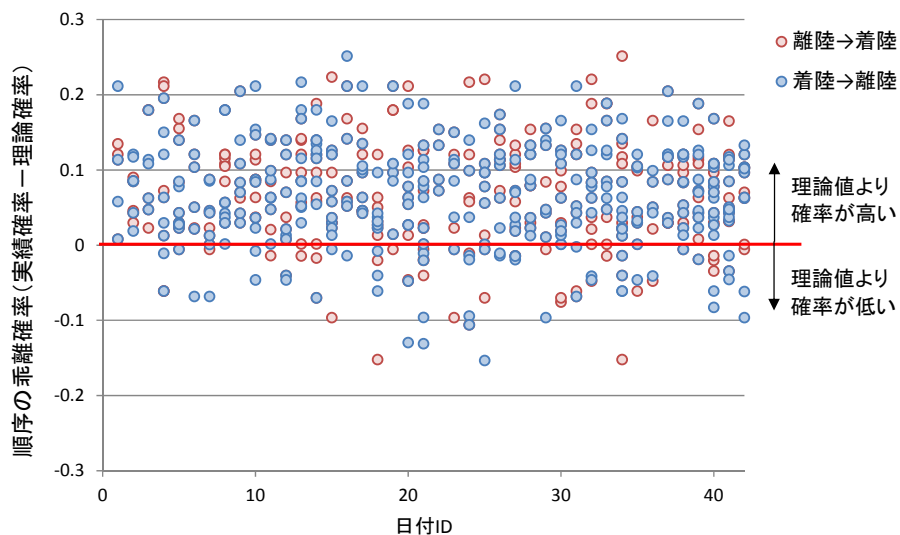


図 5 日別の離着陸交互順序の乖離確率（離陸→着陸，着陸→離陸）

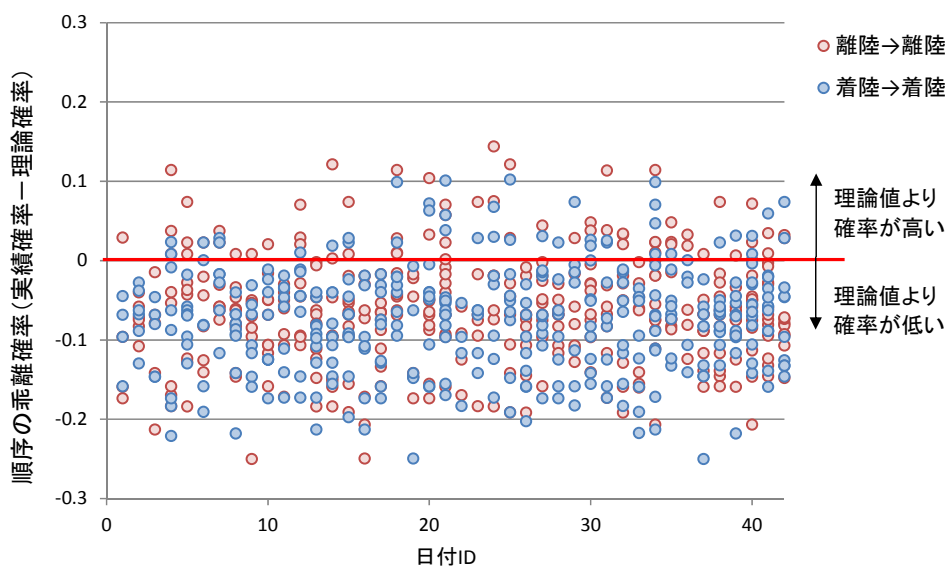


図 6 日別の離陸または着陸連続順序の乖離確率（離陸→離陸，着陸→着陸）

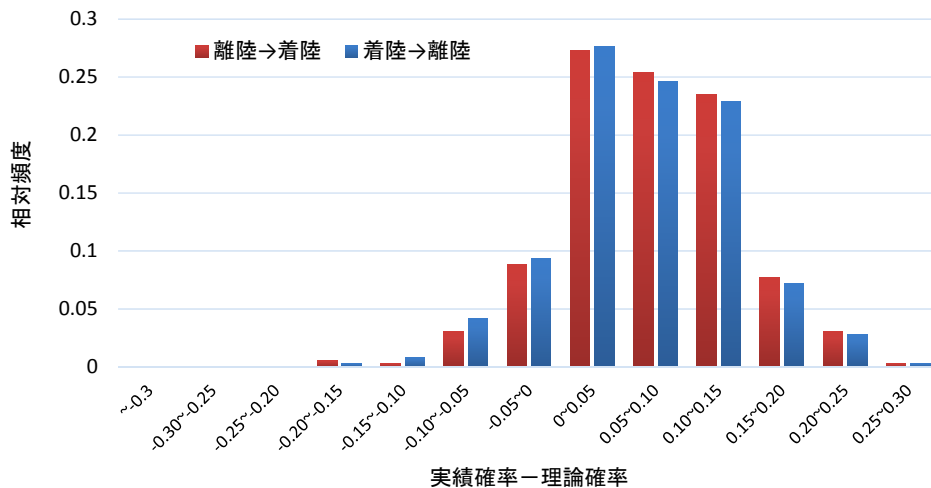


図 7 離着陸交互順序の乖離確率の分布

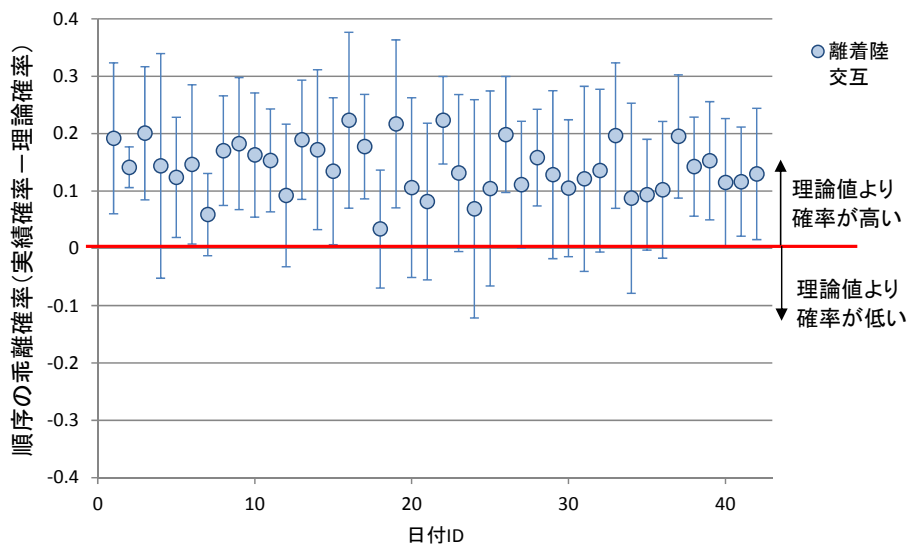


図 8 日別の離着陸交互順序の乖離確率の平均と標準偏差

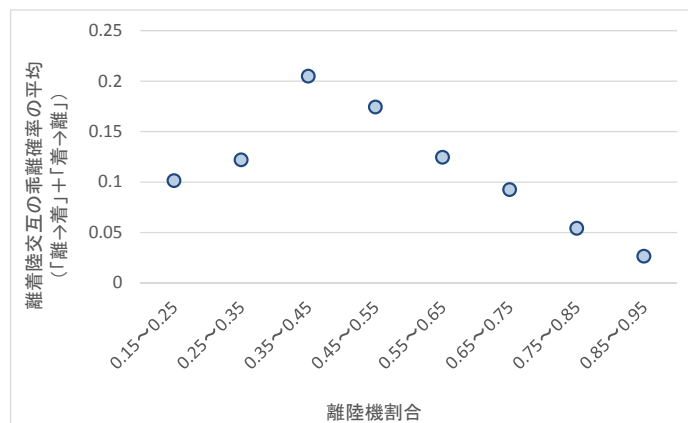


図 9 離陸率ごとの乖離確率の平均値

続いて、実績の順序付け確率を考慮した場合の滑走路容量を試算した。容量算定は我が国で一般的に使用されている統計的な方法を使用した。ここでは簡易的に離着離機の連続 2 機の組み合わせ別にその先行機を処理する時間を与え、組み合わせ別の発生確率で 1 機当たり処理時間の期待値を計算し、処理容量を求めた。より正確には連続 3 機の組み合わせを考える必要があるため、容量値自体は参考値である。

ここで使用する離着陸の組み合わせ、つまり順序の発生確率に対して、従来は確率的に完全ランダムを仮定しているが、そこに実績の確率を考慮した。ここでは、乖離確率は離陸→着陸、着陸→離陸の乖離確率の平均をそれぞれの組み合わせの発生確率の補正值として理論値に加え、離陸連続または着陸連続の発生確率には、同じ補正值をそれぞれの理論発生確率から差し引いて容量を算出した。離着陸同比率の場合の計算例を図 10 に示す。各滑走路で 2 回/時程度の容量増があり、2 本の平行滑走路合計では北風、南風運用時それぞれで合計 4 回/時程度の容量増加となる。

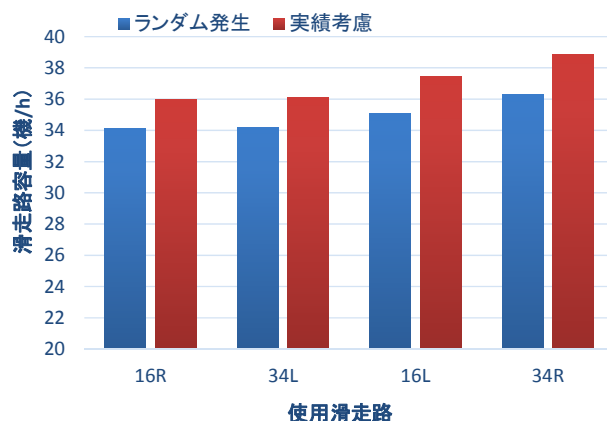


図 10 実績の順序付け確率を考慮した場合の滑走路容量変化

続いて、羽田空港のケースである。羽田空港については CARATS OPEN DATA の公開対象時期の 2012 年度は管制の慣熟期間で、D 滑走路供用後の最大容量の計画値まではスロットを上げていなかったため、2014 年度現在に比べて混雑度は低い（離陸・着陸をそれぞれ 35 回/時に抑えていた）。そのため、処理効率を上げるための戦略的な順序付けの実態を分析するには多少限界があるとも考えられたが、羽田空港の滑走路容量の最大のボトルネックの一つと考えられる南風運用時の C 滑走路離陸と D 滑走路着陸に関して、後方乱気流間隔の最小化の観点から分析を行った。図 11 に示す通り、南風時には D 滑走路着陸の合間を縫って C・A 滑走路から離陸機を出すことになる。この際、C 滑走路離陸機が Heavy 機の場合、後続する D 着陸機に対して後方乱気流間隔が適用され、経路の構造上、その場合の処理間隔が他の組み合わせに比べて相対的に大きくなる。たとえば、D 滑走路着陸の合間に Heavy 機と Medium 機の 2 機を C 滑走路から離陸させる場合、全体の処理効率は Heavy→Medium の方が逆の順序よりも高い^[7]。そのため、D 滑走路着陸の間隔によっては C 離陸の順序を変えないと 2 機を離陸させることができないケースもあり得る。

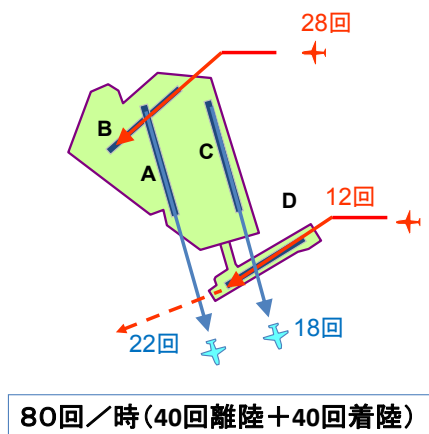


図 11 羽田空港南風時の滑走路運用

以上の羽田空港の滑走路運用特性を考慮して、今回は南風運用時の C 滑走路離陸と D 滑走路着陸に関して、後方乱気流間隔の最小化の観点からの順序付け、つまり D 滑走路着陸の間に出発する C 滑走路離陸機の Heavy・Medium の順序付けの実績について分析を行った。

分析サンプルの抽出については、成田空港と異なり、羽田空港は交通量の時間変動が激しくなく、常に容量一杯使用しているため、混雑状態の時間帯の抽出等は行っておらず、今回は D 滑走路着陸の間に出発する C 滑走路離陸機が Heavy・Medium の 2 機あるサンプルを全て抽出し、その中から、D 滑走路着陸機の間隔が 6 分以下のサンプルを分析対象とした。抽出された C 滑走路離陸の連続 2 機の Heavy・Medium 順序の発生確率を集計した結果が表 8 である。確率的にランダムな順序であれば両者ともに発生確率は 0.5 になるが、母比率検定から統計的に有意に 0.5 からは乖離があり、滑走路処理効率を上げるために順序付けが一定程度行われていることが示唆される。また図 12 には C 滑走路離陸機順序別の D 滑走路着陸間隔の分布を示している。これを見ると分布のモード値が H→M で 4 分半、M→H で 5 分となっており、D 滑走路の着陸間隔が比較的短い場合に H→M の順序付けが行われている傾向が伺える。ただし、6 分以下の間隔でみると、間隔の平均値には両者に差はなく正確なところまでは分からない。再拡張後の計画容量一杯までスロットを使用している近年のデータで精査する必要もある。

表 8 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	0.625
Medium→Heavy	0.375

(N=144)

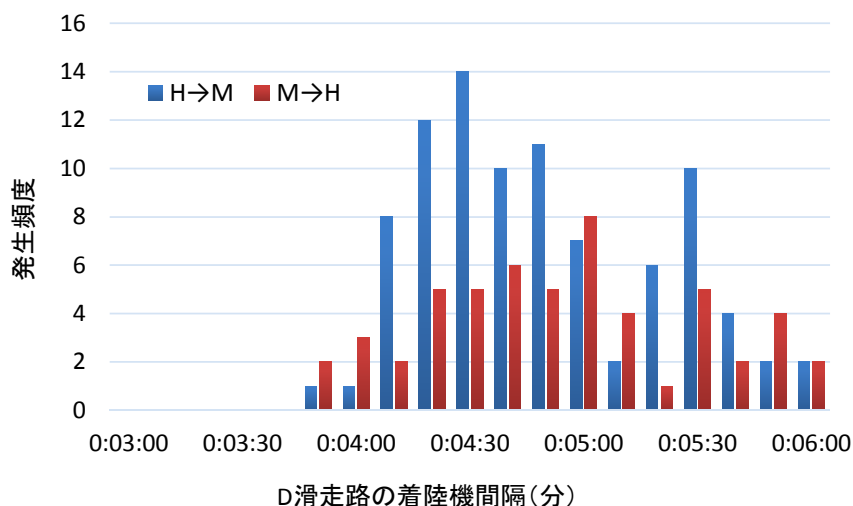


図 12 羽田空港南風運用時の C 滑走路離陸機順序別の D 滑走路着陸間隔の分布 (6 分以下)

以上で、成田空港および羽田空港の離着陸順序付けと容量の関係に関して、実績データから分析を行った。結果として、滑走路の処理効率を上げるための一定程度の順序付け意図が示唆されるデータが得られた。このことは、到着管理システム等で容量予測を行う際の精度向上に対して有益な知見である。さらに、どのような交通状況においてそのような順序付けが可能となっているかを分析することで、滑走路容量の最大化を考慮した順序付け・間隔設定方法をどのように到着管理システムに組み込むことが可能となるか検討する上で参考となると考えている。

参考文献

- [1] 首都圏空港の機能強化策について, 国土交通省, <http://www.mlit.go.jp/common/001047128.pdf>
- [2] 将来の航空交通システムに関する長期ビジョン～戦略的な航空交通システムへの変革～
<http://www.mlit.go.jp/common/000123890.pdf>
- [3] 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 D3 (土木計画学), Vol. 69, No. 5 (土木計画学研究・論文集第 30 巻), I_869-I_880, 2013.
- [4] 相原磨世, 総宜史, 又吉直樹：数理計画手法を用いた空港離着陸容量検討ツールの開発, 第 52 回飛行機シンポジウム, CD-ROM, 2014.
- [5] Hockaday, S. L. M. and Kanafani, A. K. : Development in Airport Capacity Analysis, Transportation Research, Vol. 8, pp. 171-180, 1974.
- [6] Milan Janic : Air Transport System Analysis and Modelling-Capacity, Quality of service and Economics, Transportation Studies Vol. 16, GIB, 2000.
- [7] 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.