

混雑空港における離着陸順序付けの 実態と容量算定に関する分析

二見 康友¹・平田 輝満²

¹学生会員 茨城大学大学院 理工学研究科都市システム工学専攻

(〒316-8511茨城県日立市中成沢町四丁目12-1)

E-mail:15nm817l@hcs.ibaraki.ac.jp

²正会員 茨城大学 工学部都市システム工学科 (〒316-8511茨城県日立市中成沢町四丁目12-1)

E-mail:hirata-t@mx.ibaraki.ac.jp.

我が国では、航空需要の増加が予測されており、現在設定されている首都圏空港のスロット枠では将来的に不足するとされていることから、首都圏空港の容量不足が中長期的な課題となる。本研究では成田空港と羽田空港を対象に飛行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）との乖離について分析を行った。その結果、成田空港においては1本の滑走路を離着陸共用で使用する場合に、処理効率の高い離着陸交互運用の発生確率がランダム仮定よりも有意に高く、羽田空港においても交差する滑走路における後方乱気流区分を考慮した離着陸順序が処理効率の高い順序付けの発生確率がランダム値よりも同様に有意に高いことが分かった。最後に、これら乖離の実態を考慮した滑走路処理容量について考察を行った。

Key Words : *runway capacity, congested airport, sequencing of departures and arrivals*

1. はじめに

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/年を目指すとしており、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、離着陸が連続、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であることを仮定し、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。実際の発着枠増加に結び付けるためには、そのような意図的な順序付けが安定的に実施できるかが重要となる。そのためまずは、信頼性のある客観的な事実として順序付けの統計値が必要となる。しかし、国内外の研究³⁾で滑走路容量の算定方法や容量拡大方法を検討しているが、実績の離着陸順序付けの統計値から分析している例はない。

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”を公開した。

以上のことから、本研究では首都圏空港を対象に軌跡データから得られた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。

2. 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⁹⁾。

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

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

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 Tactic⁶⁾) 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。

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	\diagdown	5000	\diagdown
復行機条件 高度 (feet)	8000		8000	

3. 羽田空港・成田空港便の抽出

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。

(1) 羽田・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-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。

(2) 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。具体的な成田空港、羽田空港の設定条件それぞれ図-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。

(3) 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、各便が基準地点を通過した時刻を

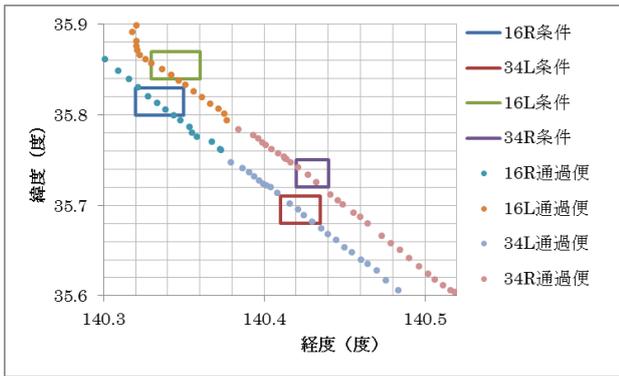


図-1 成田空港周辺の軌跡と判別条件区域

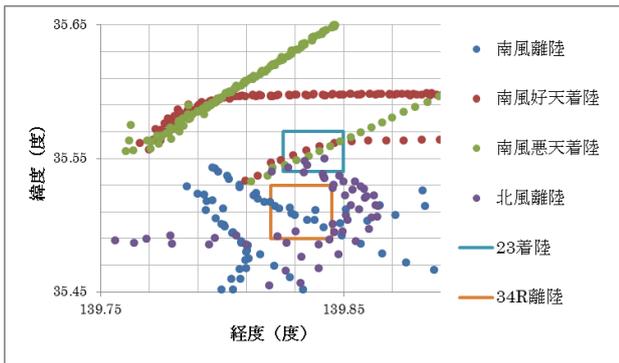


図-2 羽田空港周辺の軌跡と判別条件区域

求めた。

次に、基準地点と滑走路端到達時の速度を設定し、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-2に示す。これら所要時間を使用して滑走離着陸時刻（滑走路端到達時刻）を推計した。

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-2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-3）を算出し、成田便と同様の処理を行った。

3. 離着陸順序付けの実態解析

(1) 成田空港

前章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-

表-2 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

表-3 羽田便に対する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

表-4 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

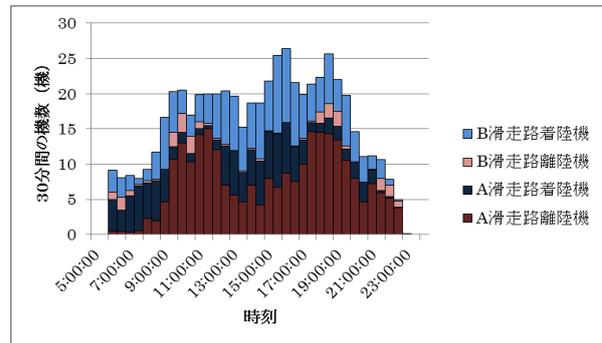


図-3 1日あたりの時間帯別処理機数の平均

4に示す。1日あたりの30分毎の平均機数を図-3に示す。

表-4より離陸機割合、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ことが多い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。日別で見ると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。

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。

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（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）、②30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、連続するサンプルの真ん中の1つを代表サンプルとしてさらに抽出することで重複を削除した。

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。

図-4に「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り、実績においても両者の分布に統計的な差

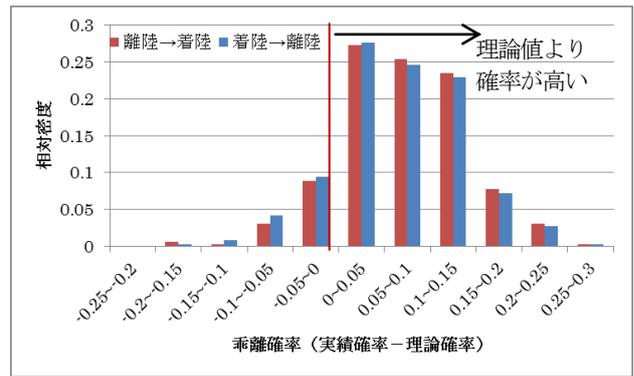


図-4 離着陸交互順序の乖離確率の分布

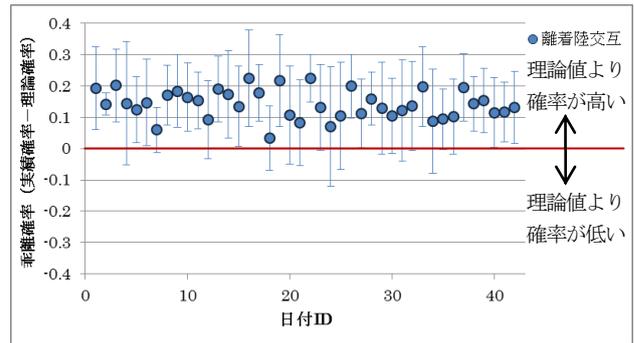


図-5 日別の離着陸交互順序の乖離確率の平均と標準偏差

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-5である。

図-4から明らかに離着陸交互の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-5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。

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陸機の連続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

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(Heavy機率0.7)の場合の計算例を図-6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。

(2) 羽田空港

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-7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³⁾。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。

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-5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-8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

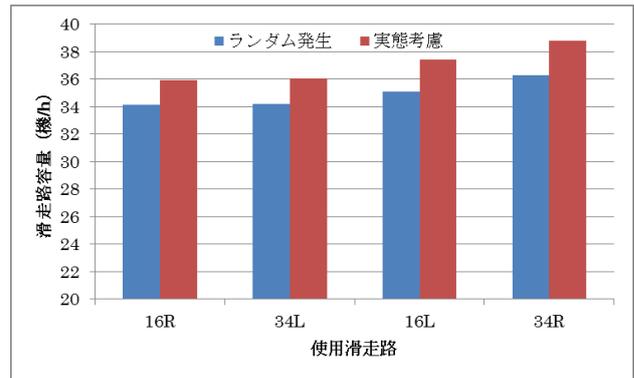


図-6 実績の順序付け確率を考慮した場合の滑走路容量変化

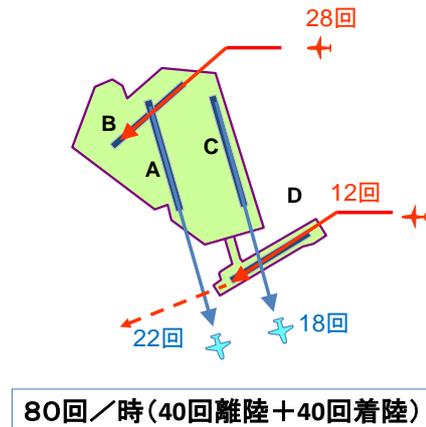


図-7 羽田空港南風時の滑走路運用

表-5 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)

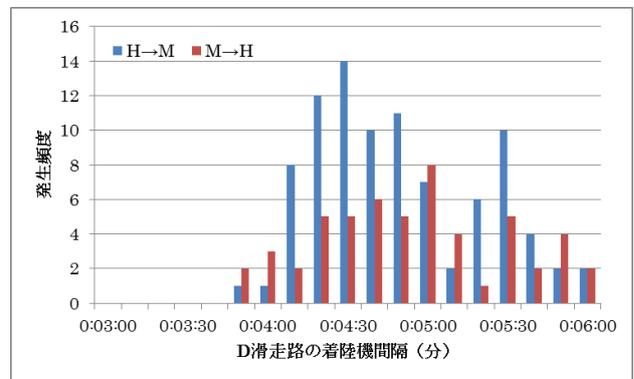


図-8 羽田空港南風運用時のC滑走路離陸機順序別のD滑走路着陸間隔の分布 (6分以下)

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。

4. まとめと今後の課題

本研究では、軌跡データから首都圏空港の便を抽出し、使用滑走路および離着陸時間の推計するアルゴリズムを検討した。また、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、空港の発着枠算定における前提条件の検討に参考になるとともに、将来の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も有益な知見であると考えている。今後はさらに、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必要がある。

謝辞：本研究は、国土交通省の平成26年度交通運輸技術開発推進制度採択の「航空機の到着管理システムに関する研究」の成果の一部である。

参考文献

- 1) 国土交通省:首都圏空港の機能強化策について、
<http://www.mlit.go.jp/common/001047128.pdf>
- 2) 国土交通省: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) 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.
- 4) Janic, M.:Modelling the capacity of closely-spaced parallel runways using innovative approach procedures. Transportation Research Part C,16, 704-730, 2008.
- 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.

(2015.7.31 受付)

Analysis of actual sequencing of departures and arrivals for calculating runway slots in congested Airports

Yasutomo FUTAMI and Terumitsu HIRATA

Most of the congested airports in the world limits the number of airport slots based on the runway capacity. Runway capacity is usually calculated by some statistical methods considering runway layout, aircraft fleet mix, observed runway occupancy time and so on. Another way is to use simulation method. In Japan, statistical method has been used and one of the assumption in the capacity calculation is that the aircrafts sequencing is statistically random. The sequencing of the aircrafts in terms of departure and arrival and wake turbulence category (heavy, medium, light) is well known to be important factor to change the runway capacity. Actually air traffic controllers may change the sequencing of the aircrafts to enhance the efficiency of the runway operation. Therefore the actual sequencing must be considered to some extent for calculating runway capacity (or slots) and/or for considering capacity enhancement measures. In this study, the actual sequencing of the aircrafts in Narita and Haneda airport in Japan are analyzed by using aircraft trajectory data which is open from the Japanese government, and we consider the appropriate assumption of aircraft sequencing in determining runway slots.