

13. 羽田空港における航空機地上運航の滞留に関する分析

航空交通管理領域 ※山田 泉、青山 久枝、
福田 豊、森 亮太

1. はじめに

航空交通量の増加に伴い、幹線空港における混雑による航空機の定時運航への影響の増加が懸念される。現状においても、国内航空路線の主要な起点である羽田空港では、出発便の地上運航時間の大きさが指摘されている^[1]。空港面の混雑による地上運航の滞留は、各航空機の地上運航時間の増加と、それに伴う燃料消費の増加を招くばかりでなく、運航時間に関する不確定要素となる。

また、将来の航空機運用方式として、運航軌道について詳細に時間管理を行うトラジェクトリベース運用(Trajectory Based Operation : TBO)が検討されている^[2]。これは、航空交通流管理の対象となる個々の航空機の運航軌道に対し、詳細な時間管理を計画的に行うことにより、航空交通流の効率性を向上する航空機運用方式である。飛行段階の TBO を有効に行うためには、出発空港での離陸に関する時間管理が可能であることが必要条件となる。このため、空港面においては、出発スポットから滑走路までの地上運航時間について予測と管理が可能であることが要求される。地上運航の滞留が不確定要素として存在すれば、TBO における離陸時刻の計画が確実に実施されないおそれがある。

混雑などによる地上運航時間の変動のメカニズムを明らかにすることで、地上運航時間の予測が可能になれば、空港面における時間管理が可能となり、滞留の低減や TBO の確実な実施といったメリットが期待される。このような予測を行うためには、空港面における実際の運航を分析し、地上運航時間の変動メカニズムを定量的に把握することが必要である。

従来、地上運航時間の予測のための分析は、管制機関の運航実績データなどから得られるスポット出発、離陸、着陸、スポット到着の各時刻といった限られた情報を用いて進められてきた^{[3][4]}。近年、マルチラレーション監視システム (MLAT) 等の空港面監視システムの整備により、時間的、空間的に精度の高い空港面監

視データを得ることが可能となっている。このような空港面監視データを用いて、走行経路の特性など詳細な走行条件の違いに注目した地上運航所要時間の分析や^{[5][6][7]}、航空機の走行特性に関する分析^[8]などが行われている。

本稿では、空港面監視データの分析に基づいて、羽田空港における航空機の地上運航時間の特徴を抽出する手法を紹介し、実際の空港面監視データに本手法を適用した結果について報告する。まず、空港面の混雑による地上運航中の滞留について、主要な滞留箇所と、滞留の要因となる交通流の特徴を抽出する手法と結果を述べる。次に、主要な滞留である離陸滑走路付近での出発便の滞留について、傾向や時系列的な変化の可視化する手法と結果を述べ、この滞留の特徴について考察する。

2. 運航時間抽出のためのデータ処理

2.1 空港面監視データ

羽田空港の空港面監視データ（以下、監視データと称する）としては、当研究所が国土交通省航空局からの委託により導入評価を行った MLAT の評価運用時のログデータを用いた^[9]。MLAT は、航空機に搭載されたトランスポンダが約 1 秒おきに発するパルス状の電波信号を複数の受信局で受信し、各局の受信時刻差から航空機位置を測定する監視システムである。MLAT の監視精度については、欧州の規格において、滑走路および誘導路について 7.5m 以内、エプロンについて 12m 以内という精度要件が定められており、羽田空港に設置された MLAT はこの要件をほぼ満たしている^[9]。

本稿では、平成 20 年 8 月から平成 21 年 6 月までの間に取得した監視データのうち、偶数月の 6 ないし 7 日分、計 38 日分を用いて分析を行った。

2.2 各便の航跡の抽出

トランスポンダの信号に含まれる ICAO24 ビットアドレスは、個別の航空機に恒久的に割り

当てられる識別符号である。このため、本アドレスを用いることで監視データを航空機ごとに切り分けることが可能である。各航空機の監視データには、複数回の離着陸が含まれる。そこで、10 分間を超える欠測によって同一の航空機の監視データを区切ることにし、1 便ごとのデータに切り分けた。10 分間を超える欠測には、主として下記の 2 つの場合がある。

- ・ 出発便として離陸後、監視覆域外へ出てから、到着便として監視覆域内に入るまで。
- ・ 到着便としてスポットに到着した際にトランスポンダを停止させてから、出発便としてスポットを出発する際にトランスポンダを作動させるまで。

後者については、航空機がトランスポンダを作動させたまま駐機する場合があるため、到着便としての運航と、出発便としての運航を切り分けられない場合がある。これについては、スポットで長時間停止している時間帯で航跡を切り分けることにより、到着便の航跡と出発便の航跡に分けた。

そして、このように 1 便ごとに切り分けたデータについて、下記の条件により、出発便と到着便の判別を行った。

- ・ 航跡の起点が空港の外であり、終点が空港の中であるもの：到着便
- ・ 航跡の起点が空港の中であり、終点が空港の外であるもの：出発便
- ・ 上記以外：スポット間移動、上空通過など

2.3 走行軌跡と速度履歴

毎秒の位置情報は前述の誤差範囲を上限とする誤差を含んでいるため、走行速度を算出するためには十分な平滑化を行う必要がある。そこで、地上運航における速度変化が緩やかであることを考慮し、それぞれの時刻について前 7 秒から後ろ 7 秒までの監視データを用いた最小二乗法による線形近似によって平滑化を行った。その結果、上記の誤差の影響を抑制し、かつ、停止状態と移動状態の切り替わりを判別できる程度に鋭敏な平滑化結果を得た。

出発便 1 便の監視データについて平滑化を行い、走行軌跡、および、速度の時間履歴を算出した例を図 1 に示す。図 1 の走行軌跡において、

軌跡の色はそれぞれの走行箇所における走行速度を表している。

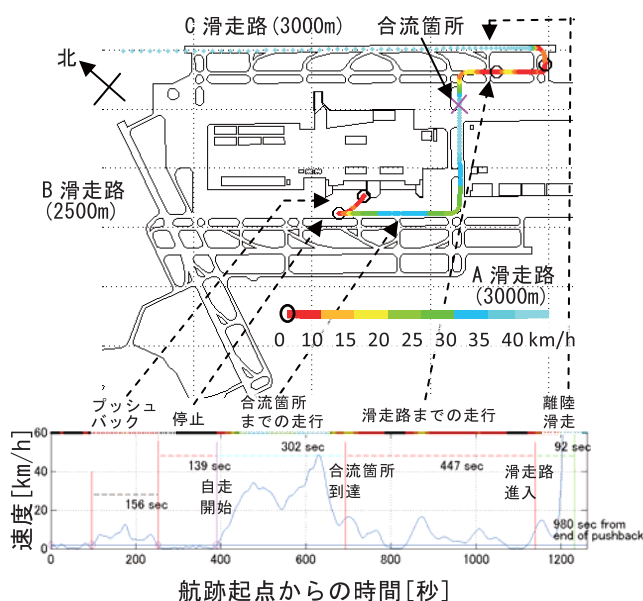


図 1 出発便の航跡と速度履歴の導出例

2.4 主要な動線

監視データ取得時期には、羽田空港では 3 本の滑走路が設置されており、このうち 2 本を、それぞれ出発便専用と到着便専用で使い分ける運用が行われていた。使用滑走路は風向きによって選択され、北風や弱風の場合の運用（北風運用）では、出発便が C 滑走路、到着便が A 滑走路を北西向きに用いる。ただし、出発便が少ない時間帯には、一部の到着便が C 滑走路を用いる場合がある。羽田空港では北風運用が行われる場合が多く、監視データ取得時期 38 日の出発便 15,907 便のうち、10,648 便（66.9%）が C 滑走路を北西向きに用いた。

1 日を通して北風運用であった平成 21 年 4 月 25 日（以下、ケース 1 と称する）の監視データを用いて、1 日分の航跡を重ね描きすることにより、地上交通流の動線を可視化した結果を図 2 に示す。背景の写真は Google Earth を使用した。図中に付した矢印は、誘導路上の交通流の主要な向きを示している。



図 2 北風運用時の地上交通流の動線

3. 滞留時間の可視化

3.1 手法

監視データから得られる各便の位置と速度の時間履歴を元に、走行箇所ごとの滞留時間の計測を行った。これには、以下の手法を用いた。

- ・ 空港地図を 50m×50m のセルに区切る。
- ・ 走行速度が 10km/h を下回った場合を滞留とみなす。ただし、下記の状況では、混雑によらず停止あるいは 10km/h 以下の低速走行を行うため、滞留に含めない。
 - 出発便：プッシュバック、プッシュバック後の停止、自走開始後 1 分間、停止線および離陸滑走開始地点での待機
 - 到着便：スポット到着前 1 分間
- ・ 各便について滞留箇所を抽出し、対応するセルの通過に要した時間を、当該セルでの滞留時間とする。
- ・ 1 日分の監視データについて、出発便と到着便に分け、各セルでの滞留時間を集計する。

3.2 結果

ケース 1 の 1 日分の監視データについて、3.1

節の要領でセルごとの滞留時間を集計し、空港地図上に棒グラフとして表示した結果を図 3 に示す。この日は出発便と到着便のいずれも、443 便の航跡が得られた。

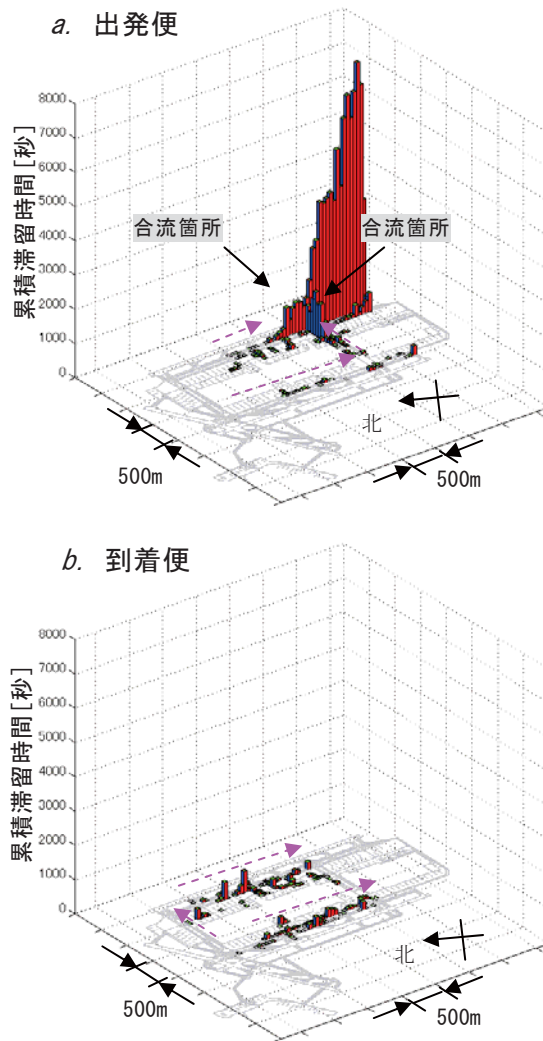


図 3 滞留時間の 1 日累積値（ケース 1）

図 3 の a と b の比較から、滞留は出発便において顕著であることが示される。また、出発便の主要な滞留は、動線の合流する交差点の 500m 程度手前の地点（以下、合流箇所と称する）から滑走路入口までの区間で発生していることが示される。

3.3 出発便と到着便の滞留の差異

出発便と到着便の滞留状況の違いは、それぞれの交通流の性質から以下のように説明される。

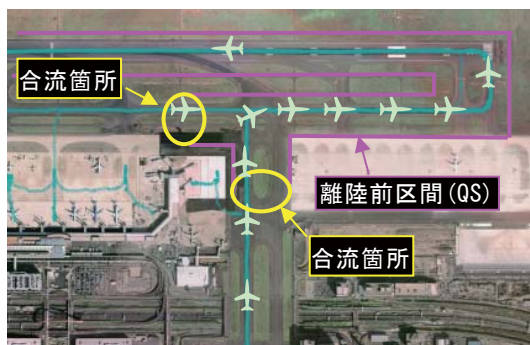


図 4 出発便の滞留発生状況の例

図 4 に示すように、出発便の地上運航の交通流は、各スポットから 1 本の滑走路に向かう。このため、混雑時間帯には滑走路の手前で交通流が合流する。よって、合流から離陸までの走行区間（以下、Queueing Segment = QS と称する）は、出発便の交通量の最も多い場所となる。QS の中に交通容量の制約のある箇所があれば、その箇所よりも手前側に滞留が生じる。図 3a に示された滞留箇所から、交通容量の制約は滑走路にあり、QS での滞留は、合流後の交通量が滑走路の交通容量を上回ることによって発生することが示される。

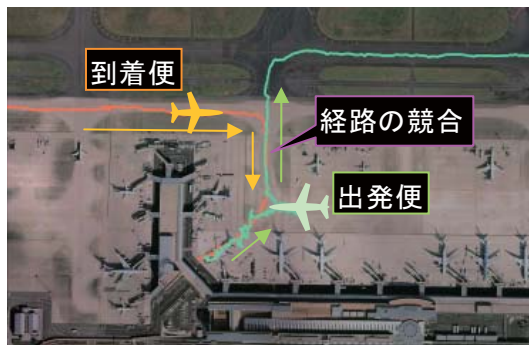


図 5 到着便の滞留発生状況の例

一方、到着便では、地上運航の交通流は滑走路から各スポットに向かって分岐するため、出発便の交通流のように集中する場所がない。図 3b から示されるように、到着便の滞留は、主にエプロンの周辺で散発的に発生している。これは、エプロンにおける出発便との経路の競合や、到着予定スポットの出発便による占有のため、到着便がエプロンの外で待機する必要が生じたことによる。

図 5 に、到着便が出発便との経路の競合によりエプロンの外で停止した状況の例を示す。この例では、出発便（緑シンボル）が自走を開始する直前に到着便（橙シンボル）がエプロン出入口口に到達し、両者の経路が競合したために到着便が停止した。

このような到着便の滞留は、スポットの配置や交通状況によって、エプロンの出入口となる誘導路の選択が制約される場合に生じる。よって、到着便の滞留の発生は、他の航空機と競合しない経路の選択が困難な場合に限られる。

以上の考察から、空港面での地上運航中の主要な滞留は、出発便の交通流が滑走路へ集中することによって生じるものであることが示された。よって、空港面における滞留の緩和について方策を検討するためには、この種の滞留の緩和が最優先の課題であり、この滞留の特徴に関する分析を進めることが重要である。

4. QS における滞留の特徴

4.1 用語の定義

本章での議論に用いる語を下記のように定義する。

- ・ 合流箇所：走行経路上で滑走路末端の停止線から 1,250m 手前の距離にある地点。滑走路末端以外の停止線を用いた場合は、用いた停止線と滑走路末端の停止線との距離を差し引いて定義する。
- ・ 合流時刻：合流箇所を通過した時刻
- ・ 離陸時刻：滑走路の中央を通過した時刻
- ・ 合流間隔：直前に離陸した出発便との合流時刻の差
- ・ 離陸間隔：直前に離陸した出発便との離陸時刻の差
- ・ 合流頻度：1 時間あたりの合流便数
- ・ 離陸頻度：1 時間あたりの離陸便数
- ・ QS 滞在時間：離陸時刻と合流時刻の差

このうち、離陸時刻については、監視データが高度の情報を含んでいないため、上記のように定義した。

4.2 QS 滞在時間の分布

3 章の議論から、出発便の主要な滞留は、QS の混雑によって生じる QS 滞在時間の増加であ

ることが示された。そこで、QS 滞在時間の分布と合流の頻繁さの関係について検討した。これには、まず、QS 滞在時間の分布を求め、離陸間隔と合流間隔の大小関係によって分類した。データ取得期間 38 日間に北風運用の離陸を行った出発便のうち、合流間隔、離陸間隔、QS 滞在時間を算出できた 8,507 便について、QS 滞在時間の分布を図 6 に示す。

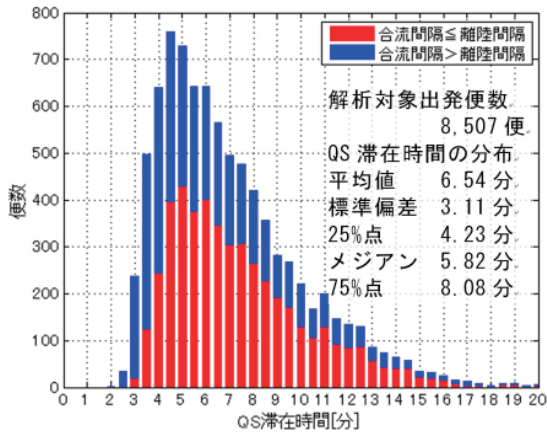


図 6 QS 滞在時間の分布

図 6 から示されるように、QS 滞在時間が大きな値となるほど、合流間隔が離陸間隔を下回る場合の占める割合が大きくなり、合流間隔が離陸間隔を上回る場合の占める割合が小さくなる。このことは、合流の頻繁さと QS 滞在時間の増加に相関があることを示している。

次に、合流状況と QS 滞在時間の時系列的な変化の関心に注目して、滞留時間が上記のような性質を持つメカニズムについて考察する。

4.3 QS 滞在時間の時系列変化の可視化

出発便の QS 滞在時間の時系列的な変化を把握し、QS での滞留の特徴を抽出するため、複数の出発便の地上運航時間を 1 枚のグラフに表示する可視化を行った。これには、図 7 に示すように、時刻を横軸として、各出発便の地上運航開始（プッシュバック開始）から終了（離陸）までの時間経過を 1 本の線分として表示し、離陸順に従って線分を縦軸方向に等間隔で積み上げる表示方法を用いた。そして、合流時刻を線分上に表示することで、QS 滞在時間の変化の傾向を把握できるようにした。

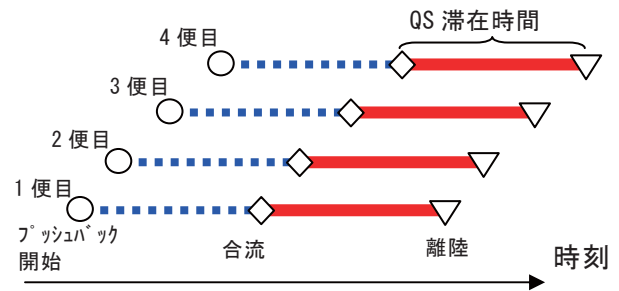


図 7 複数出発便の地上運航状況の時系列表示

QS で滞留が生じた時間帯の 27 分間に離陸した出発便 15 便について、上記の要領で運航状況を表示した例を図 8 に示す。

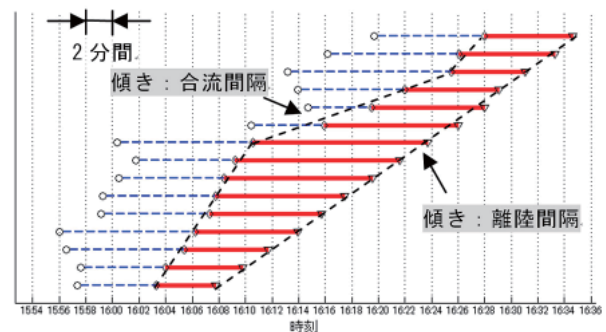


図 8 合流状況と QS 滞在時間の変化

図 8 から示されるように、混雑時間帯には、各便の離陸時刻は連続した 1 本の直線上に並ぶものとみなすことができる。これは、滑走路運用が密であるため、離陸がほぼ一定の最低間隔で行われていることを示している。離陸時刻を結んだ近似直線の傾きは、離陸間隔の平均値を意味している。

一方、合流時刻を結んだ線の傾きは、各便の合流間隔を意味している。

離陸間隔と合流間隔を比較すると、図 8 から、離陸間隔に比べ合流間隔が短い時間帯には、QS 滞在時間が単調に増加することが示される。一方、離陸間隔に比べ合流間隔が長い時間帯には、QS 滞在時間は単調に減少することが示される。

4.4 待ち行列モデルの適用

QS 滞在時間の変化について、上記の特徴に注目すれば、次のような理論的なモデル化が可能である。

まず、QS に先行機が存在しない場合には、出発便は混雑の影響を受けない所要時間で QS

を通過する。先行機が存在する場合には、誘導路上での追い越しができないため、合流後、離陸までの所要時間は、先行機の所要時間に依存した値となる。先行機との離陸間隔に比べて合流間隔が短い場合には、先行機の所要時間に加えて、この 2 つの間隔の差の分だけ長い所要時間となる。逆に、先行機との離陸間隔に比べて合流間隔が長い場合には、先行機の所要時間に対し、この 2 つの間隔の差の分だけ短い所要時間となる。そして、先行機との合流間隔が十分に長ければ、QS 滞在時間は、混雑の影響を受けない場合の所要時間に近づく。

以上をまとめると、出発便に対して離陸順で番号を付け、 i 番目に離陸する出発便の QS 滞在時間を $T(i)$ とおけば、 $T(i)$ について、先行機 ($i-1$ 番目に離陸する出発便) の QS 滞在時間 $T(i-1)$ との間に次のような関係が導かれる。

$$T(i) = \max(T_{smooth}, T(i-1) + S_d(i) - S_m(i)) \quad (1)$$

ただし、

i : 離陸順、

T_{smooth} : 混雑の影響を受けない場合の QS 滞在時間、

$S_d(i)$: i 番目の出発便と $i-1$ 番目の出発便の離陸間隔、

$S_m(i)$: i 番目の出発便と $i-1$ 番目の出発便の合流間隔。

モデル式(1)は、出口が 1 つの待ち行列の持つ一般的な性質を記述するモデル式と一致する^[10]。よって、QS で発生する滞留は、滑走路での離陸間隔の制約のために生じる待ち行列現象であると考えることができる。

4.5 離陸間隔と滞留時間の関係

QS での滞留が待ち行列によると考えれば、理論的な待ち行列の「サービス時間」にあたる離陸間隔が、QS 滞在時間に大きく影響することが予想される。

そこで、一日を通して北風運用であった日について調査したところ、平成 21 年 4 月 23 日（以下、ケース 2 と称する）の離陸間隔分布がケース 1 と異なった。両日の離陸間隔の分布を図 9 に示す。

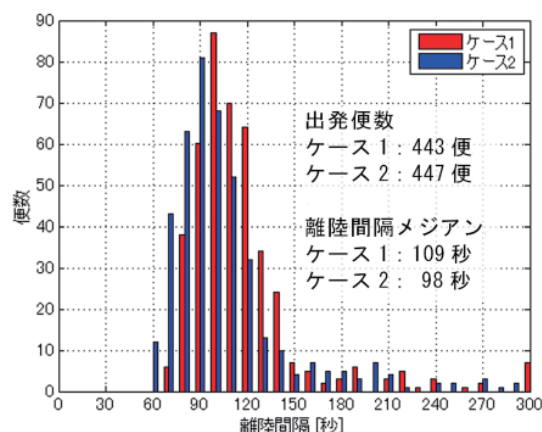


図 9 各日の離陸間隔の分布

図 9 から離陸間隔の分布を比較すると、ケース 1 に比べ、ケース 2 では全般的に離陸間隔が短いことが示される。それぞれの分布には大きな外れ値があるため、代表値としてメジアン(中央値)を求めると、二つのケースでは 11 秒(約 1 割)の差が生じた。

次に、ケース 2 の日の出発便の監視データについて、図 3a と同じ要領で滞留時間の 1 日累積値を表示したものを図 10 に示す。

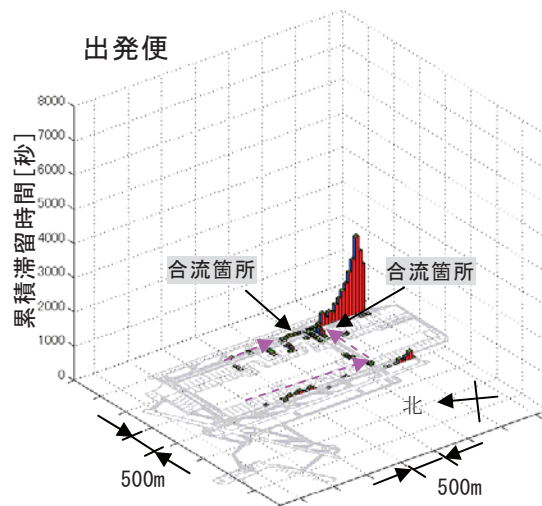


図 10 滞留時間の 1 日累積値 (ケース 2)

図 10 から、ケース 2 の日においても、出発便の主要な滞留箇所は QS であることが示される。また、図 3a と図 10 の比較から、ケース 1 の日に比べケース 2 の日は累積滞留時間が小さいことが示される。

各 1 日の出発便数はほぼ同数であった。また、時間帯ごとの出発便数について、両日で明確な

差は認められなかった。

モデル式(1)より、合流状況に違いがない条件では、離陸間隔の差が、QS 滞在時間の差の要因となる。よって、モデル式(1)を用いれば、両ケースの離陸間隔の差の蓄積が、累積滞留時間の大きな違いとして現れることが説明される。このことから、QS 滞在時間の変化が待ち行列現象の性質を持っていることが確認された。

4.6 QS の混雑状況と QS 滞在時間の関係

QS における滞留は待ち行列の性質を持っているため、QS 滞在時間に影響する要素は、離陸の頻度と合流の頻度の関係である。そこで、時間帯ごとの合流頻度と離陸頻度の差異と QS 滞在時間との関係を求めた。これは、以下の流れにより QS 滞在時間の統計値を求めることを行った。

- ① 各日について、30 分間ごとの合流便数、離陸便数を求め、1 時間あたりの頻度（合流頻度、離陸頻度）に換算する。
- ② 上記の各 30 分間に合流した出発便について、QS 滞在時間の平均値を求め、対応する離陸頻度と合流頻度のペアにおける 1 つのサンプルとして用いる。
- ③ 全期間について、合流頻度と離陸頻度のペアごとに、②で求めたサンプルの平均値（QS 滞在時間平均値）を求める。このとき、サンプル数が 15 を下回るペアについては、平均値を求めることが適切でないおそれがあるため除外する。

上記の処理の結果、図 11 に示す関係が得られた。図 11 では、合流と離陸の頻度の差に応じて色分けを行った。青い○印は合流頻度と離陸頻度の差が 1 以内の場合を表し、赤い×印は合流頻度の方が大きい場合、緑色の+印は離陸頻度の方が大きい場合を表している。

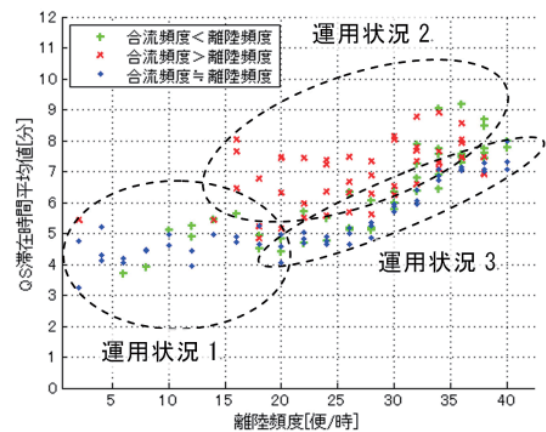


図 11 離陸頻度と QS 滞在時間平均値の関係

図 11 について、図中に示すように 3 つの運用状況に場合分けを行い、QS 滞在時間の変化が待ち行列現象の性質を持つことを考慮すれば、それぞれの状況について、下記のように特徴を述べるができる。

運用状況 1 は、離陸頻度が小さい場合である。この状況では、合流も疎らであるため、待ち行列は形成されにくい。この状況における QS 滞在時間平均値は 4~5 分程度のほぼ一定の値となる。この値は、モデル式(1)の T_{smooth} 項の標準値を推定する際の参考になると考える。

運用状況 2 は、離陸頻度の増加に応じて QS 滞在時間平均値が増加するものの、離陸頻度が小さい場合にも QS 滞在時間平均値が大きな値となる場合である。合流頻度が離陸頻度を上回る場合のほとんどは、この状況に含まれる。これは、モデル式(1)の関係により、QS 滞在時間が単調に増加するためである。また、合流頻度が離陸頻度を下回る場合の一部がこの状況に含まれる。これは、既に待ち行列が形成されている状況から、合流頻度の減少あるいは離陸頻度の増加によって相対的に合流頻度が小さくなる場合に対応する。

運用状況 3 は、離陸頻度の増加に対応して QS 滞在時間平均値は増加するが、運用状況 2 に比べて離陸頻度増加の影響の小さい場合である。この状況では、合流頻度が離陸頻度を越えない場合がほとんどとなった。この場合には、待ち行列が形成されていても、モデル式(1)の関係により QS 滞在時間の増加が抑えられる。このため、運用状況 2 のような QS 滞在時間平均値の

大幅な増加は起こりにくい。

以上に述べたように、QS 滞在時間平均値の増加は、離陸に比べ合流が頻繁となって待ち行列が形成される場合に顕著となる。一方、合流頻度が離陸頻度と同程度以下となる状態が維持されている場合には、QS が最も捌ける状況となる。よって、出発便の運航が高密度かつ円滑であるためには、実現可能な離陸頻度に応じて、離陸頻度と釣り合った合流頻度となっていることが理想的であることが示された。

5. まとめ

本稿では、空港面監視データの分析に基づいて、羽田空港における航空機の地上運航時間の特徴を抽出した結果を報告した。まず、空港面の混雑による地上運航中の滞留について、主要な滞留箇所と、滞留の要因となる交通流の特徴を抽出する手法を紹介し、空港面監視データに適用した。その結果、地上運航における主要な滞留は、出発便の交通流が合流して滑走路へ向かう区間 (QS) で生じていることが明らかとなった。次に、QS での出発便の滞留について、傾向や時系列的な変化の可視化を行った。その結果、この滞留は、滑走路の容量を上回る頻度での出発便交通流の合流による待ち行列現象であり、待ち行列理論に基づくモデルの適用が可能であることが明らかとなった。

今後は、まず、待ち行列モデル式(1)の主要なパラメータである離陸間隔について、気象条件や時間帯などの影響の分析を行い、より実用的な待ち行列予測モデルの検討を進める。加えて、滑走路増設により羽田空港の運用方式が大きく変わった平成 22 年 10 月以降の監視データについて、滞留状況の分析を行い、滞留時間のモデル化について検討する。また、(1)式のようなモデル式による滞留時間の予測可能性を考慮すれば、予測に基づく空港面運用スケジュール調整による滞留の軽減を検討することが可能である。たとえば、予測される滞留時間に応じて各便のプッシュバック開始時刻を繰り下げることで合流頻度を調整するなどの具体的な手段を検討することができる。今後は、このような空港面運用スケジュール調整の基本的な考え方について、シミュレーション等により有効性を検証する。

謝辞

マルチラテレーション評価データの取得にあたってご協力を賜りました国土交通省東京航空局の関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 蔭山, 福田: “航空機の運航時間の実績値と計画値の一比較”, 日本航空宇宙学会第 48 回飛行機シンポジウム講演集, JSASS-2010-5008, 2010.
- [2] 福田ほか: “トラジェクトリ予測モデルの開発”, 日本航空宇宙学会第 48 回飛行機シンポジウム講演集, JSASS-2010-5060, 2010.
- [3] F. Carr, A. Evans, E. Feron, and J.-P. Clarke: “Software Tools to Support Research on Airport Departure Planning”, Proceedings of the 21st Digital Avionics Systems Conference, vol. 1, pp. 1D3-1 – 1D3-9, 2002.
- [4] L. Cook, S. Atkins, and Y. Jung: “Improved Prediction of Gate Departure Times Using Pre-Departure Events”, Proceedings of the 8th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operation Conference, AIAA 2008-8919, 2008.
- [5] S. Niemeijer and G. Vale: “Taxi-time Prediction at Amsterdam Schiphol Airport”, LVNL SDI Doc. No. 272, 2007.
- [6] S. Atkins, C. Brinton, and Y. Jung: “Implication of Variability in Airport Surface Operation on 4-D Trajectory Planning”, Proceedings of the 26th AIAA Congress of International Council of Aeronautical Sciences, AIAA 2008-8960, 2008.
- [7] C. Brinton, B. Wood, and S. Engelland: “Microscopic Analysis of Airport Surface Sequencing”, Proceedings of the 26th AIAA Congress of International Council of Aeronautical Sciences, AIAA 2008-8961, 2008.
- [8] C. Gong: “Kinematic Airport Surface Trajectory Model Development”, Proceedings of the 9th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference, AIAA 2009-7076, 2009.
- [9] 宮崎ほか: “空港面マルチラテレーション監視の導入評価結果”, 電子航法研究所報告, 第 125 号, pp. 1-20, 2010.
- [10] U. Bhat: An Introduction to Queueing Theory, Birkhäuser, 2008.