

## 8. 成田空港のスポット出発時刻調整の適用条件に関する考察

航空交通管理領域 ※山田 泉

### 1. はじめに

航空交通需要の成長に伴い、国内主要空港では、交通量増加に伴う地上走行の混雑緩和が課題となっている。航空交通流においては滑走路が主なボトルネックとなり、ボトルネックの上流側に混雑が生じる。このため、地上走行の混雑は、専ら出発便の走行機数過多による滑走路付近の待ち行列となって現れる。よって、地上走行の混雑緩和は、出発便の走行機数を適正な水準以下に保つためにスポット出発時刻を調整することが主な手段となる。

国際線の運航が主となる成田空港では、旅行先との時差に応じてダイヤが設定されるため、出発、到着それぞれに交通量がピークとなる時間帯が存在する。このため、成田空港は、スポット出発時刻調整による混雑緩和の必要性が高い空港のひとつである。

本稿では、成田空港の管制運用において出発便の混雑を抑制するため行われているスポット出発時刻調整について、調整を開始・終了する契機、調整中の交通量の推移等の特徴を分析する。次に、スポット出発時刻調整における調節可能要素について考察し、交通管理の諸観点（とりわけ、滑走路端の待ち時間の不確かさの克服）から見て性能向上を達するための条件について検討する。最後に、空港面の交通管理をシステム的に行う DMAN (Departure Manager) と現行のスポット出発時刻調整の関連性について考察する。

## 2. 成田空港の特徴

### 2.1 レイアウトの特徴

成田空港は、図 1 に示すように、2,500m の間隔で設置された 1 対の平行滑走路（A 滑走路：4,000m、B 滑走路：2,500m）と、それらの間に設置された約 200 個のスポットによって構成されている。スポットと滑走路出入口の間の走行距離は、約 1km から約 10km の間で幅広く分布する。

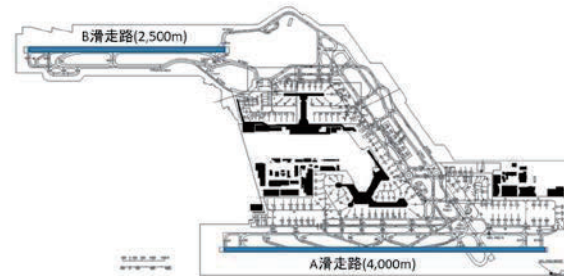


図 1 成田空港のレイアウト

### 2.2 交通量の特徴

成田空港では、7 割以上を占める国際線において、出発便の目的地までの所要時間と時差を考慮してダイヤが編成されることから、交通量は時間帯によって大きく変化する。成田空港が繁忙となった典型的な日について、時間帯あたりの交通量の例を図 2 に示す。

図 2 から明らかなように、成田空港では、夕方に出発便数が顕著に多くなるピーク時間帯が存在する。これは、成田空港の主要な路線であるアジア便、北米便、国内便の間の乗り継ぎにおいて、いずれも夕方の出発が最も利便性が高いことによる<sup>[1]</sup>。

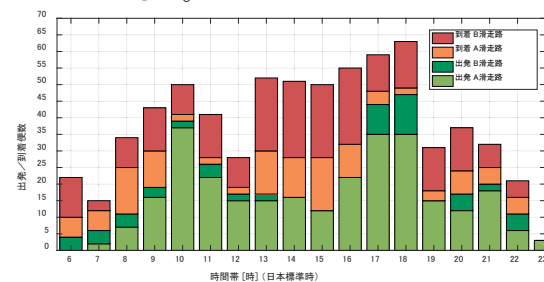


図 2 成田空港における時間帯ごとの交通量

### 2.3 管制運用の特徴

成田空港では、出発便は長い方の A 滑走路を主に用いる。出発ピーク時間帯においては、同時平行出発方式 (SPID: Simultaneous Parallel Independent Departure)<sup>[2]</sup> と呼ばれる管制運用により、出発便の一部を B 滑走路に振り分け、両滑走路から同時に離陸させることにより、A 滑走路への出発便の集中を防いでいる。気象条

件等のため SPID が運用できない場合には、出発便が A 滑走路に集中することとなる。この場合に、もしも出発便が出発準備完了次第ただちに出発すると、A 滑走路付近に長大な待ち行列が生じ、到着便等の交通を妨げるおそれがある。このため、成田空港の管制運用では、通常であれば出発便からの出発準備完了の通報次第ただちに行われる出発に係る管制承認の発出<sup>[2]</sup>を敢えて遅らせることで出発便の走行機数を抑え、空港面の混雑を防ぐ対応策が実施されている<sup>[3]</sup>。本稿では、この対応策を「スポット出発時刻調整」と称し、本調整によって出発準備完了の通報から管制承認の発出までに設けられる待機時間を「スポット待機時間」と称する。

スポット出発時刻調整は、図3に示すとおり、スポット出発の手前に仮想的な待ち行列を設け、誘導路および滑走路の系へのお客の流入のペースを調整することによって、滑走路端における待ち行列を間接的に操作するプロセスとして理解することができる。成田空港で現在行われているスポット出発時刻調整は、平均的な特性として、滑走路端の待ち時間の一部とスポット待機時間をほぼ等価交換するように作用していることが先行研究において確認されている<sup>[4]</sup>。これは、滑走路端の待ち行列が枯渇しない限りにおいて、スポット待機時間と滑走路端の待ち時間の和が一定となることを意味している。すなわち、図3の「仮想的な待ち行列」は、平均的な特性として、滑走路端の待ち行列の一部がスポットに場所を移したように振る舞うものと見ることができる。

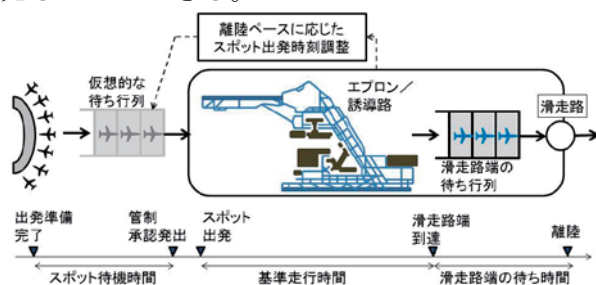


図3 出発便の工程の待ち行列モデル

## 2.4 本稿の対象とする交通状況と用いたデータ

本稿では、スポット出発時刻調整が多数の出発便に対して行われたある1日を対象に（以下、「対象日」と称する）、成田空港において行わ

れているスポット出発時刻調整において適用されている規範について分析する。そして、スポット出発時刻調整において調節可能な要素に変更を加えることにより、交通状況にどれだけの改善が見込めるかについて、電子航法研究所（以下、「当所」と称する）において開発した空港面交通シミュレータを用いたシミュレーションによって検討する。

成田空港にはマルチラレーションを用いた空港面監視システムが導入されており、当所では、本システムによって取得された毎秒の航空機位置データの提供を国土交通省航空局より受け、補間・平滑化して、離着陸時刻等の算出、および、走行経路の抽出を行っている。また、スポットの出入りについては、成田国際空港株式会社よりスポット管理の実績データの提供を受け、用いている。また、出発前の工程については、成田空港事務所より運航票の記載事項に関するデータ、また、国土交通省航空局より出発の管制承認に係るデータリンク通信のデータの提供を受け、これらのデータを相互補完的に用いている。本稿では、これらのデータを総称して「空港面交通データ」と称する。

## 2.5 量の定義

以降の議論で用いる量を次のように定義する。

- ・ 基準走行時間： 出発便がスポットを出発してから離陸するまでの地上走行時間のうち、空港面の混雑の有無によらず必要となる時間。本研究においては、出発便のスポット出発から離陸までの地上走行時間について、スポットと滑走路の組ごとに集計したサンプルのうち、滑走路端における待ち行列の影響を受けなかったとみなせるサンプルにおける地上走行時間の平均値として、スポットと滑走路の組ごとに算出する。
- ・ 滑走路端の待ち時間： 出発便の地上走行時間のうち、当該出発便の用いたスポットと滑走路の組み合わせにおける基準走行時間を超過した時間。
- ・ 滑走路端の待ち行列の長さ： 出発便のうち、ある時点においてスポット出発から基準走行時間だけ経過し、かつ、離陸していない便の数。

### 3. スポット出発時刻調整に関する分析

対象日の夕方における A 滑走路を用いる出発便の交通量について、下記の4つの状態に仕分け、各状態の機数の時間変化を把握する。

- ① 出発準備完了済み：出発準備完了を通報済みであり、かつ、離陸していない状態。
- ② 管制承認発出済み：出発の管制承認を発出済みであり、かつ、離陸していない状態。
- ③ 出発済み：スポットを出発済みであり、かつ、離陸していない状態。以下、この状態の機数を「走行機数」と称する。
- ④ 離陸待ち：スポット出発後、基準走行時間だけ経っており、かつ、離陸していない状態。

図4に、各状態の出発便数について、空港面交通データから求めた対象日夕方における1分おきの変化を示す。

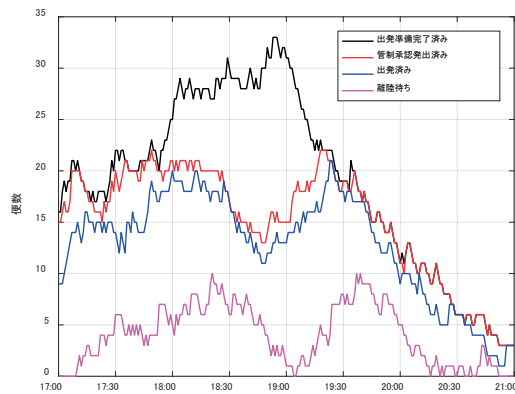


図4 出発便交通量の変化（実測値）

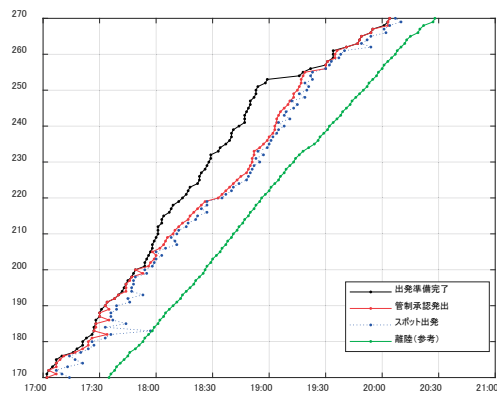


図5 スポット出発時刻調整の交通量累積図

また、図3における「仮想的な待ち行列」の特徴を把握するため、交通工学における「交通量累積図」<sup>[5]</sup>の考え方によってスポット待機時間の増加および減少の過程を可視化する。対象日のA滑走路の出発便について、出発準備完

了時刻順に並べて番号を付け、横軸を出発準備完了、管制承認発出、スポット出発の各時刻とし、縦軸を上記番号とした折れ線グラフを図5に示す。図5には、参考のため、離陸順によって出発便を並べたときの離陸時刻を横軸、離陸順を縦軸とした折れ線グラフを付す。

図4および図5から下記の特徴が観察される。

- ① 管制承認の発出順は、出発準備完了の通報順と概ね一致する。すなわち、図3における「仮想的な待ち行列」は先入れ先出しとみなしてよい。
- ② 17時50分ごろまでは、出発準備完了の通報のペース（ペースは図5の折れ線の傾きに対応）は、離陸のペースとほぼ同等であり、出発準備完了の通報次第ただちに管制承認が発出された。
- ③ 17時55分ごろ、出発準備完了の通報のペースが離陸のペースを上回る傾向となり、また走行機数が増え続ける傾向となったことから、スポット出発時刻調整が開始された（出発準備完了の折れ線と管制承認発出の折れ線の間が開きが生じることに対応）。
- ④ スポット出発時刻調整の開始以降、18時45分ごろの管制承認発出までは、概ね2分に1機のペースで管制承認が発出された。
- ⑤ 18時45分ごろ、走行機数が少なくなり、なおも減り続ける傾向となったことに対応して、管制承認発出のペースが変更された。
- ⑥ 19時15分ごろ、出発準備完了の通報のペースが離陸のペースに比べて小さくなったことから、スポット出発時刻調整の適用が終了した。

### 4. 離陸間隔に一致した間隔付けによりスポット出発時刻調整を行った場合の振る舞い

3章に示したスポット出発時刻調整においては、離陸と同じペースで管制承認を発出することを目指して管制承認発出の間隔付けが行われていると考えられる。ところが、図4および図5から示されるように、スポット出発時刻調整の始まりにおいては、管制承認発出のペースは離陸のペースを下回っていたため、後の時間帯（18時30分から19時ごろ）において滑走路端の待ち行列の抑制が過剰気味となっている。

そこで、対象日の交通状況を精度よく模擬できたシミュレーション（以下、「現状模擬シミュレーション」と称する）において設定した離陸間隔のパラメータ（=103 秒）によって管制承認発出時刻に間隔を付け、スポット出発時刻を設定したシナリオによるシミュレーション（以下、「間隔再設定シミュレーション」と称する）を行った。本シミュレーションにおける交通量の時間変化を図 6 に示す。

図 6 から、スポット出発時刻調整が行われている時間帯（18 時ごろから 19 時 30 分ごろまで）には、管制承認発出済みの出発便数は 18 便程度の一定値となり、対応して、走行機数、および滑走路端の待ち行列の長さがほぼ一定に保たれることが示された。

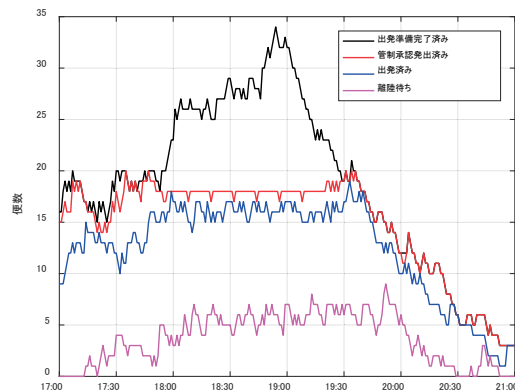


図 6 出発便交通量の変化（間隔再設定シミュレーション）

### 5. スポットから滑走路までの所要時間に応じた順序付けを施した場合の振る舞い

4 章では、管制承認発出の間隔を滑走路容量と一致させることで、走行機数を一定にできることが確認された。しかしながら、スポットと滑走路の位置関係により、基準走行時間がスポットごとに異なることから、出発準備完了時刻順に管制承認発出時刻を設定した場合には、かえって滑走路端の待ち行列に至る時刻に粗密の不均一が生じ、結果として滑走路端の待ち時間にバラツキを生じる可能性がある。

そこで、上記の不均一を解消するため、出発準備完了時刻と基準走行時間とによって滑走路端の待ち行列に至る時刻の系列の混み具合を予測し、平準化することを検討する。具体的には、出発準備完了時点 + 基準走行時間となる時刻順

に出発便を順序付けし、この時刻に対して間隔付けを施すように管制承認発出時刻を設定する。この手法においては、出発準備完了の通報が後である出発便に対して先に管制承認を発出する場合が生じるため、出発準備完了となる時刻については、遅くとも 20 分程度前（基準走行時間が 20 分程度の広がりを持つことに対応する）に知ることができると仮定する。間隔付けのパラメータは、4 章と同じく 103 秒を用いる。

本手法によって管制承認発出時刻を設定したシナリオによるシミュレーション（以下、「順序・間隔再設定シミュレーション」と称する）について、生成された交通状況における交通量の時間変化を図 7 に示す。

図 7 から、スポット出発時刻調整が行われている時間帯（18 時ごろから 19 時 30 分ごろまで）には、滑走路端の待ち行列の長さについては、図 6 に示した間隔再設定シミュレーションに比べて変化が平坦となることが示された。

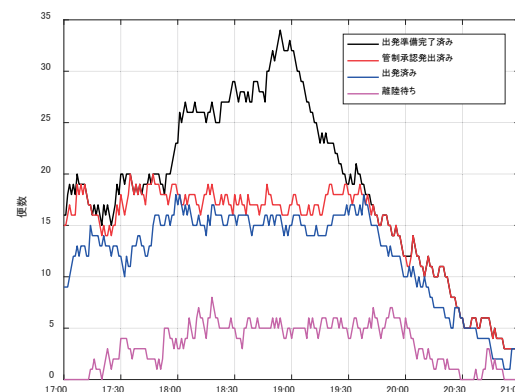


図 7 出発便交通量の変化（順序・間隔再設定シミュレーション）

### 6. シミュレーション結果の比較

スポット出発時刻調整の対象となった出発便を含む夕方の出発ピーク時間帯における出発便について（図 5 において、17 時 34 分に出発準備完了となった 191 番から、20 時 4 分に出発準備完了となった 270 番までの 80 便）、現状模擬、間隔再設定、順序・間隔再設定の 3 つのシミュレーション結果から求めたスポット待機時間と滑走路端の待ち時間の総和を表 1 に示す。

表 1 から、いずれのシミュレーション条件においても、スポット待機時間の増加または減少の分だけ滑走路端の滑走路端の待ち時間が減少

または増加し、二つの待ち時間の和はほぼ一定に保たれることが示された。

表 1 各待ち時間の総和の比較（括弧内は現状模擬シミュレーションとの差）

	スポット待機時間 [分]	滑走路端の待ち時間 [分]
現状模擬	878	705.6
間隔再設定	840 (-38)	741.6 (+36.0)
順序・間隔再設定	914 (+36)	664.4 (-41.2)

次に、間隔再設定シミュレーションおよび順序・間隔付け変更のシミュレーションについて、上記 80 便の滑走路端の待ち時間の分布を、現状模擬シミュレーションとの対照によって比較する。各シミュレーションにおける滑走路端の待ち時間のヒストグラムを図 8 に示す。

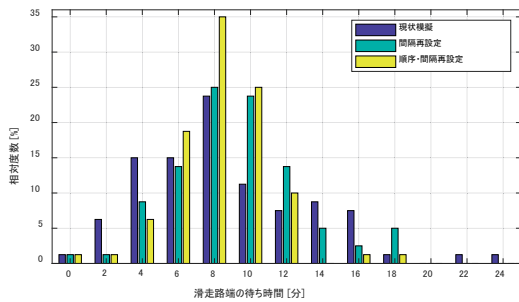


図 8 滑走路端の待ち時間の分布の比較

図 8 から、現状模擬シミュレーションでは滑走路端の待ち時間が幅広く分布するのに対し、間隔再設定および順序・間隔再設定シミュレーションでは分布の範囲が狭まり、順序・間隔付け変更シミュレーションにおいて最も狭まることが示された。

表 2 各シミュレーションにおける滑走路端待ち時間の統計量の比較（単位：分）

	平均	標準偏差	四分位範囲
現状模擬	8.82	4.67	5.88
間隔再設定	9.27	3.62	4.16
順序・間隔再設定	8.31	2.70	3.22

また、滑走路端の待ち時間の平均、ならびに、バラツキを表す指標として標準偏差および四分位範囲（75 パーセンタイルと 25 パーセンタイルの差）を表 2 に示す。

表 2 から、滑走路端の待ち時間の平均については、3 つのシミュレーションではほぼ差がないことが示された。一方で、バラツキは減少し、四分位範囲においては、現状模擬シミュレーションに比べ間隔再設定シミュレーションで 70.7%、順序・間隔再設定シミュレーションで 54.8%に減少することが示された。

以上の結果から、スポット出発時刻調整においては、滑走路容量を正確に把握し、なおかつ滑走路端の待ち行列に至る時刻の均一性を考慮することにより、滑走路端の待ち時間のバラツキを最も小さくしうることが示された。

## 7. 考察

### 7.1 滑走路容量の不確かさへの対処について

4 章および 5 章に示した各シミュレーションでは、現状模擬シミュレーションに用いた離陸間隔の値を明示的に用いてスポット出発時刻調整における間隔付けを行うことにより、滑走路端の待ち行列の長さをほぼ一定とすることができた。このことから、スポット出発時刻調整は、滑走路容量の正確な知識を用いるときに最良の性能があると考えられる。しかしながら、滑走路容量は、気象条件、後方乱気流管制方式の適用される出発便の割合などの要因により、日ごと、時間帯ごとに異なりうるものである。このため、スポット出発時刻調整を行う際に、滑走路容量に関する正確な知識を得ることは難しい。

一方、不確かさを含む滑走路容量について、敢えて僅かに過小評価してスポット出発時刻調整のパラメータを設定することは、誘導路における混雑を抑制する目的においては有効と考えられる。また、滑走路端の待ち時間は間接的に操作される量である一方で、スポット待機時間はスポット出発時刻調整を行った時点で確定する量である。このため、待ち時間の総量のうち予め確定するスポット待機時間の占める割合を高め、不確かさを含む滑走路端の待ち時間そのものを結果的に小さく抑えることは、待ち時間の総量における不確かさを抑え込む戦略として

は合理的と考えられる。これらの点で、3章において分析した現行のスポット出発時刻調整は、滑走路容量の不確かさを克服しつつ、待ち時間全体の不確かさを抑制する手段として有効に機能していると考えられる。

滑走路容量を敢えて僅かに過小評価してスポット出発時刻調整を行う場合には、走行機数の減少が続くため、やがて滑走路端の待ち行列が枯渇し、滑走路に不用な空きが生じるおそれがある。このため、滑走路容量を僅かに過小評価する戦略においては、滑走路端の待ち行列が枯渇する前に管制承認発出のペースを滑走路容量以上に上げる操作が必要となる。本操作の最適な仕様（管制承認発出ペースの切替えの時機および切替え後のペース）について、今後検討することとしたい。

## 7.2 現行のスポット出発時刻調整と DMAN の関連性について

5章において検討した順序・間隔再設定は、基準走行時間の知識によって滑走路端の待ち行列に対して順序・間隔付けを施す処理となっている。これは、滑走路端の待ち行列の長さを一定以下に抑制する DMAN の基本的な機能を簡易に実装したものともみることができる。

DMAN では、出発便のスポット出発時刻に関する予定情報を事前に収集し、予定どおりスポットを出発した場合における滑走路端の待ち行列を経た離陸時刻を予測することで、航空路の管制機関との間で離陸時刻の予定を設定する。そして、この離陸時刻での離陸が達成されるように、基準走行時間、および、許容する滑走路端の待ち時間を差し引いてスポット出発時刻を設定する<sup>[6]</sup>。この処理においては、出発便が滑走路端の待ち行列に至る時刻について離陸間隔並みの間隔とする調整が働くため、DMAN では、5章における順序・間隔再設定と同様の処理が行われていると見ることができる。このことから、成田空港における現行のスポット出発時刻調整は、順序・間隔付けの規範を変更することにより、DMAN と相互運用できる手順に発展できると考えられる。現行のスポット出発時刻調整と DMAN を相互運用可能とするための方法について、今後、検討することとしたい。

## 8. まとめ

本稿では、成田空港において行われている出発便のスポット出発時刻調整について、スポット出発の前段階における待ち行列過程として特徴を分析した。次に、スポット出発時刻調整において行われている出発承認発出の間隔付けについて、厳密に離陸間隔と一致させるシミュレーションを行った結果、滑走路端の待ち行列の長さをほぼ一定に保つことができることが示された。さらに、順序・間隔付けの規範を変更し、「出発準備完了時刻+基準走行時間」の順に管制承認を発出した想定でのシミュレーションでは、滑走路端の待ち行列の長さの変化をより平坦にできることが示された。これらにより、滑走路容量を正確に把握してスポット出発事項調整のパラメータとして用いれば、現状並みのスポット待ち時間を保ちつつ、滑走路端の待ち時間のバラツキを低減しうることが示された。

今後は、滑走路容量の不確かさを克服する最適なスポット出発時刻調整の戦略について検討するとともに、現行のスポット出発時刻調整と DMAN を相互運用可能とするための方法について検討することとしたい。

## 参考文献

- [1] 国土交通省航空局，“今後の首都圏空港のあり方について,” 第9回交通政策審議会航空分科会基本政策部会資料, 2013.  
<https://www.mlit.go.jp/common/001018978.pdf>
- [2] 国土交通省航空局，“航空路誌,” 有効日 2016年11月10日, 2016.
- [3] 航空交通管制協会，“平成27年度 関東ブロック合同管制技術交流会,” 航空管制, 2016-No.3, pp. 6-9, 2016.
- [4] 山田ほか，“成田空港における出発便の走行機数調整のシミュレーション検証,” 第16回電子航法研究所研究発表会講演概要, pp. 5-10, 2016.
- [5] 交通工学研究会編，“道路交通技術必携 2007,” 建物物価調査会, pp. 38-41, 2007.
- [6] M. Kögler and R. Nossal, “CDM at Vienna Airport”, SESAR SJU/LC/0121 Final Report, 2011.