

## 10. 成田空港出発便の地上走行時間に関する分析

航空交通管理領域 ※山田 泉、住谷 美登里、マーク ブラウン、青山 久枝、森 亮太

### 1. はじめに

#### 1.1 背景

今後の航空交通量の増加に向けて、航空交通の効率性や定時性の向上のための対応策が求められている。この問題意識から、欧米では、航空交通流管理の考え方を空港面に適用して、スポット出発時刻の事前調整によって空港面の滞留の解消や離陸の定時性向上を図る空港面交通管理方式が導入されている<sup>[1]</sup>。空港面交通管理方式の導入された空港では、本方式が空港面運用の効率化や定時性の向上に有効であることが報告されている<sup>[2][3][4]</sup>。

日本においても、国土交通省航空局の長期ビジョン CARATS (Collaborative Actions for Renovation of Air Traffic Systems)では、首都圏をはじめとする混雑空港におけるボトルネックの解消を課題の一つに挙げている<sup>[5]</sup>。また、羽田空港において空港面交通管理方式の試行運用が行われている<sup>[6]</sup>。

#### 1.2 本稿の目的

当所では、日本の主要な国際線ハブ空港である成田国際空港(以下、成田空港と称する)について、欧米の空港面交通管理の考え方を参考に、航空機の地上走行の滞留を緩和する手法の検討を進めている。空港面交通管理は、出発便の地上走行時間(以下、出発走行時間と称する)の予測とスポット出発予定時刻情報に基づいて単位時間あたりに離陸を予定している出発便数を算出し、出発便のスポット出発時刻等を調整することが主な手段とされている。そのためには、空港面の交通状況に応じた出発走行時間の予測が重要である。

本研究では、成田空港について、空港面地上交通データベースを用いて出発走行時間予測手法の構築を進めている。本稿では、成田空港の出発便が多く使用するA滑走路の出発便について、離着陸機数や走行機数を元に空

港面の混雑を表す変数(以下、混雑変数と称する)を定義し、ゲートウェイと呼ばれるエプロン出入り口の通過から離陸までの出発走行時間と混雑変数の関連性に関する分析を行ったので、結果を報告する。

### 2. 成田空港の特徴

#### 2.1 レイアウトと管制運用の特徴

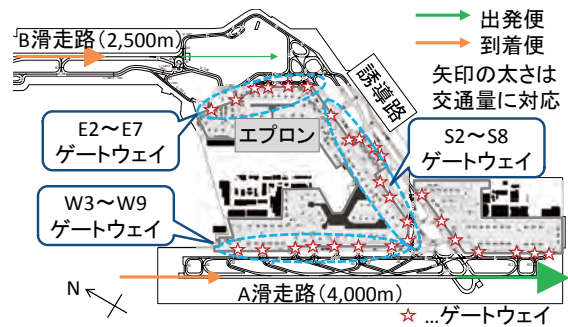


図1 成田空港のレイアウトと滑走路運用(南風運用の例)

成田空港は、図1に示すように、平行な2本の滑走路によって構成されている。滑走路の規格(滑走路長)の違いにより、出発便は主にA滑走路を用い、これに対応して到着便はB滑走路を用いる割合が多い。また、滑走路および誘導路の管制業務を航空管制官が行い、エプロン内は成田空港株式会社のランプコントローラーが交通管理している。両者の所掌は、ゲートウェイと呼ばれるエプロンの出入り口によって分けられている<sup>[7]</sup>。

#### 2.2 出発便の地上走行の特徴

出発便の地上走行は、図2に示すように、速度など動態の違いによって以下の5つのフェーズに分けることができる。

- ① プッシュバック待機：管制承認要求後、プッシュバック開始までの待機
- ② プッシュバック：プッシュバック開始から終了までの走行、および、牽引車の切

- り離し等による自力走行開始前の停止
- ③ エプロン内走行：自力走行開始からゲートウェイを通過するまでの走行
- ④ 誘導路走行：ゲートウェイを通過してから滑走路停止線を通るまでの走行
- ⑤ 滑走路使用：滑走路停止線を通るしてから離陸までの滑走路進入および離陸滑走

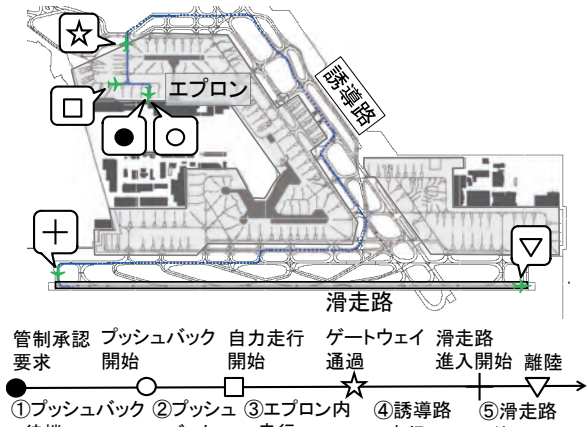


図2 出発便の地上走行のフェーズ分け

本稿では、ゲートウェイ通過から離陸までのフェーズ④と⑤の所要時間を出発走行時間と定義する。

### 2.3 空港面地上交通データベースから示される交通量の特徴

本研究では、成田空港の空港面運用の特徴について、当所が作成した成田空港の空港面地上交通データベースを用いた分析を進めている。本データベースは、国土交通省航空局から提供を受けた空港面の空港面地上交通データを補間、平滑化することにより、各航空機の毎秒の位置、速度、使用スポット及びスポットの出入り時刻などを算定・作成し、機種などの対応する飛行計画情報とともに、データベース化したものである<sup>[8]</sup>。

本稿の出発走行時間分析のため、平成 25 年 5、7、9、11 月の各 7 日間、計 28 日間を対象期間として、以下の値を抽出した。

- ・ 出発便：通過ゲートウェイ、ゲートウェイ通過時刻、滑走路、離陸時刻、ゲートウェイから滑走路停止線までの走行距離
- ・ 到着便：滑走路、着陸時刻

対象期間の各滑走路の離着陸数を表 1 に示す。表 1 より、出発便の概ね 9 割が A 滑走路を用い、到着便では A 滑走路と B 滑走路の着陸数の比は概ね 4:6 となることが観察される。

表 1 対象期間（28 日間）の離着陸数

| 運用方向 | 南風運用  |       | 北風運用  |       |
|------|-------|-------|-------|-------|
| 滑走路  | A     | B     | A     | B     |
| 離陸数  | 4,882 | 572   | 2,727 | 441   |
| 着陸数  | 2,088 | 3,297 | 1,333 | 1,898 |

また、各滑走路について、30 分あたりの平均離着陸数を図 3 に示す。図 3 から、9 時台から 12 時台、17 時台から 19 時台では出発便の運航が主となり、6 時台から 9 時台、13 時台から 16 時台では到着便が主となる傾向が観察される。この傾向は、成田空港での運航の約 8 割を占める国際線において、日本との時差のある目的地の到着時間帯を考慮してダイヤが編成されることによる<sup>[9]</sup>。このダイヤ編成の結果、毎日 9 時から 12 時の間は欧州、北米、アジア方面、17 時から 19 時の間は北米、アジア方面の出発便の交通量がピークとなる。一方、到着便は 13 時から 17 時の間に交通量がピークとなる。

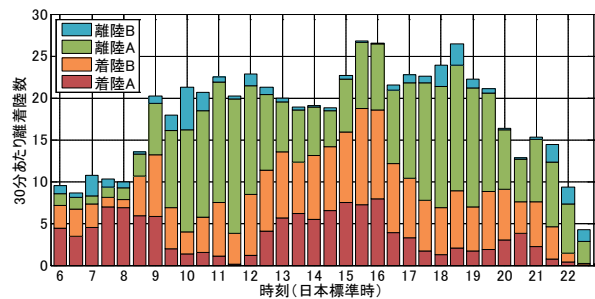


図 3 30 分あたりの平均離着陸数

### 2.4 誘導路の交通流の特徴

成田空港の航空機の地上走行では、ゲートウェイと滑走路の組み合わせに対応した標準走行経路が公示されている<sup>[7]</sup>。

また、出発便の地上走行で走行速度が低下する場所について、先行研究<sup>[10]</sup>と同じ要領によって、出発便の低速走行時間（走行速度が 15km/h を下回った場合の走行時間の 50m メ

ッシュごとの総和)を空港地図上に棒グラフで示したものを図4に示す。図4において、A滑走路の両端付近に高い棒グラフが観察されるのは、一日の間に滑走路の使用方向が切り替わったことに対応している。

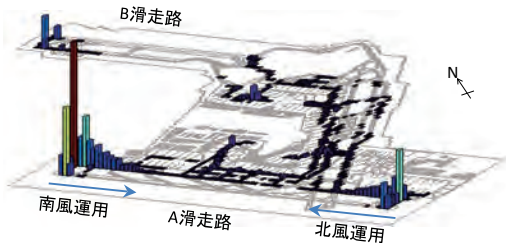


図4 出発便の低速走行時間マップ

図4から、出発便の滞留は主にA滑走路の入口付近における離陸待ちであることが観察される。そこで本稿では、離陸待ちを生じさせる混雑要因を分析する。

誘導路の混雑による離陸待ちの発生状況の例を図5に示す。図5から、離陸待ちの主な要因として、次の二つが挙げられる。

- 単位時間あたりに離陸可能な数を上回る出発便がA滑走路に来ることにより、滑走路入口を先頭に待ち行列が生じる。
- A滑走路への到着便の着陸のため、単位時間あたりに離陸可能な数が減少することによって待ち時間が長くなる。

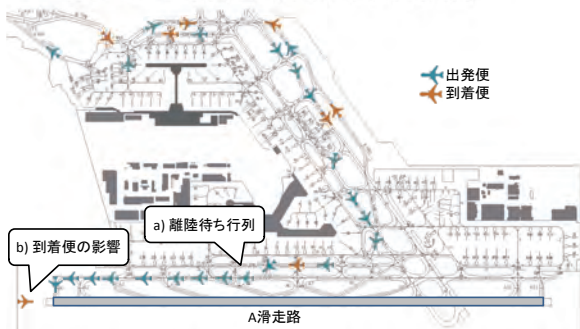


図5 誘導路の混雑状況例(南風運用の場合)

### 3. 出発走行時間に関する分析

#### 3.1 各ゲートウェイからの最短走行時間

ゲートウェイと滑走路の組み合わせによって出発走行時間を集計する。各ゲートウェイから滑走路までの出発走行時間のサンプル数と最小値について、航空路誌の標準走行経路図<sup>[7]</sup>に重ね書きしたものを図6(次ページ)

に示す。図6から、出発走行時間最小値は概ね走行経路の長さに対応した値となることが観察される。

#### 3.2 滞留時間と混雑変数の定義

下記の式(1)のように、出発走行時間を構成する要素は、混雑にかかわらず走行に必要な時間(非滞留時間)と、混雑のため生じる滞留時間であると仮定する。これにより、2.4節に挙げた混雑要因が出発走行時間に及ぼす影響を分析する。

$$\text{出発走行時間} = \text{非滞留時間} + \text{滞留時間} \quad (1)$$

式(1)のように出発走行時間を切り分けるため、次の変数を定義した。

- ・ 出発走行時間  $T_d$ : 個別の出発便  $d$  のゲートウェイ通過時刻  $t_{Gd}$  から離陸時刻  $t_{Td}$  までの走行時間
- ・ 非滞留時間推定値  $U_g$ :  $T_d$  を集計して得られるゲートウェイごとの出発走行時間分布の最小値となる時間
- ・ 滞留時間推定値  $E_d$ : 出発便  $d$  の出発走行時間  $T_d$  から、通過したゲートウェイの非滞留走行時間推定値  $U_g$  を引いた時間

また、2.4節に示した混雑要因に対応する混雑変数として、次の二つの変数を定義する。

- ・ 待ち行列長さの推定値  $Q_d$ : 各出発便  $d$  のゲートウェイ通過から非滞留走行時間推定値だけ経過した時点 ( $t_{Gd} + U_g$ ) で地上走行中であり、かつ、離陸順が当該出発便よりも先であるA滑走路出発便数
- ・ 干渉着陸数の推定値  $L_d$ : 各出発便  $d$  のゲートウェイ通過から非滞留走行時間推定値だけ経過した時点から、離陸時刻までの間 ( $[t_{Gd} + U_g, t_{Td}]$  の時間帯) にA滑走路に着陸した到着便数

#### 3.3 混雑変数と滞留時間の関連性

$Q_d$ 、 $L_d$  と  $E_d$  の関連性を調べるため、下記の式(2)を用いて重回帰分析を行う。これは、式(1)において、出発走行時間  $T_d$  のうち、ゲートウェイのみに依存し、混雑に依存しない部分



が非滞留時間  $U_g$  によって表されるとみなし、 $T_d$  から  $U_g$  を差し引いた滞留時間  $E_d$  について、 $Q_d$  および  $L_d$  との関連性を調べるものである。

$$E_d = K_Q \times Q_d + K_L \times L_d + \text{定数項} \quad (2)$$

ここで、 $K_Q$  と  $K_L$  は定数の係数を表す。

式(2)を用いた重回帰分析の結果、決定係数は南風運用について 0.9、北風運用について 0.912 と、いずれも高い値となった。また、式(2)の各項の優位性を示す t 値は、滑走路の使用方向によらず、 $Q_d$  について 100 以上、 $L_d$  について 50 以上となり（一般的に、t 値の絶対値が 2.35 を超える項は有意水準 1% で有意であるとされる）、 $Q_d$  と  $L_d$  のどちらも式(2)において有意であることが示された。

これらの結果から、出発走行時間のうち滞留時間に影響する主な要因は待ち行列長さと同着陸数であることが確かめられた。

一方で、式(2)の定数項は、南風運用で 1.78 分、北風運用で 1.93 分となった。これは、最小値によって定義した  $U_g$  によって  $E_d$ 、 $Q_d$ 、 $L_d$  を定義して式(2)を適用した場合には、 $Q_d =$

$L_d = 0$  であっても、0 分として算出されるべき  $E_d$  が、図 6 に示した非滞留時間推定値  $U_g$  と比べて無視できない正の値として算出されることを示している。

## 4. 出発走行時間モデル

### 4.1 非滞留時間の推定

3.3 節の結果のうち、式(2)の定数項が大きいことは、最小値を用いて  $U_g$  を定義することが  $E_d$  の過大評価につながることを示している。確かに、混雑の影響を受けない出発便であっても、出発走行時間はゲートウェイごとに様々な値となることが考えられるため、最小値によって混雑の影響を受けない出発走行時間を代表させることは適当ではない。

そこで、各ゲートウェイについて、二つの混雑変数が共に 0 である出発便の出発走行時間の平均値から非滞留時間を推定する手法を提案する。これは、混雑変数を定義する際に非滞留時間を用いることから、次のような繰り返し計算を行うものである。

1. 非滞留時間推定値  $U_g$  を用いて 3.2 節の定

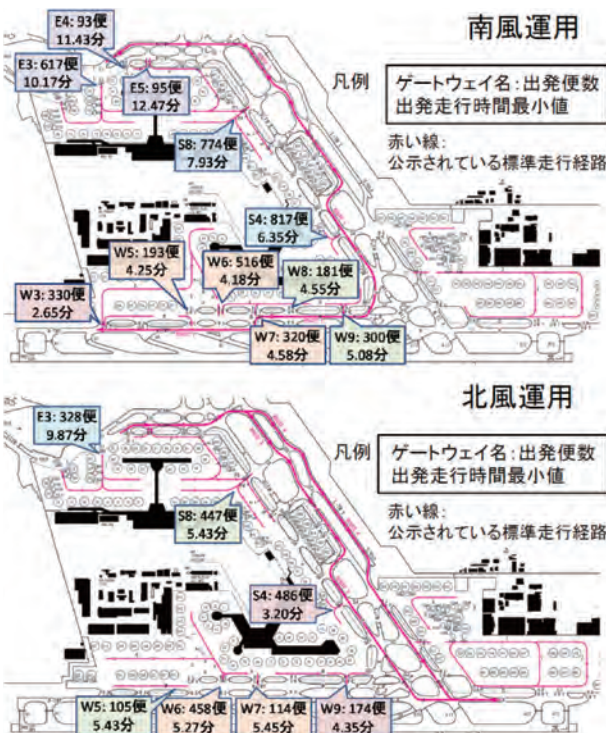


図 6 主要なゲートウェイからの出発便数と出発走行時間最小値

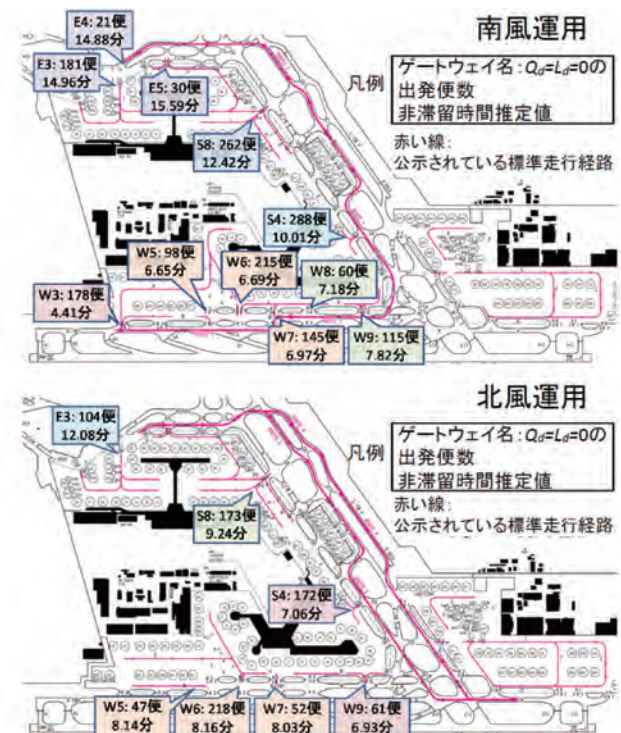


図 7 繰り返し計算で求めた  $Q_d = L_d = 0$  の出発便数と非滞留時間推定値

義のとおり各出発便の待ち行列長さ推定値  $Q_d$  と干渉着陸数推定値  $L_d$  を算出する。

2.  $Q_d = L_d = 0$  である出発便を選び出す。
3. 2. で選んだ出発便の出発走行時間を集計し、ゲートウェイごとの平均値を新しい  $U_g$  として 1. に戻る。

本手法を南風運用と北風運用のデータに適用した結果、繰り返し計算はいずれも 7 回目まで収束した。繰り返し計算の結果として、 $Q_d = L_d = 0$  と判定された出発便数、および各ゲートウェイから滑走路までの非滞留時間推定値について、航空路誌の標準走行経路図<sup>[7]</sup>に重ね書きしたものを図 7 に示す。

また、繰り返し計算によって非滞留時間が推定されたゲートウェイについて、滑走路停止線までの走行距離と、推定された非滞留時間の関係を図 8 に示す。図 8 から、非滞留時間推定値はゲートウェイから滑走路までの距離に概ね比例していることが示される。

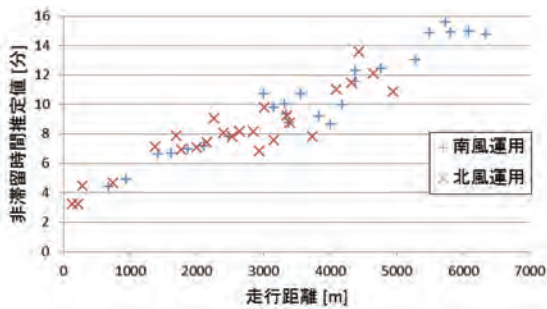


図 8 各ゲートウェイからの走行距離と非滞留時間推定値の関係

#### 4.2 出発走行時間モデル

繰り返し計算によって求めた非滞留時間推定値  $U_g$  を用いたモデル式(1)を推定するため、再び式(2)を用いて、この  $U_g$  によって各出発便の滞留時間推定値  $E_d$ 、待ち行列長さ推定値  $Q_d$ 、干渉着陸数推定値  $L_d$  を求め、3.3 節の議論と同様に  $Q_d$ 、 $L_d$  と  $E_d$  の関係性について重回帰分析を行った。その結果、式(2)の各係数は図 9 のように求められた。

図 9 に示すとおり、式(2)の定数項は 0.4 分程度となり、図 7 に示した非滞留時間推定値に比べて十分に小さいと考えられる。また、 $Q_d$  および  $L_d$  の係数は南風運用と北風運用のいずれについてもほぼ同じ値となった。

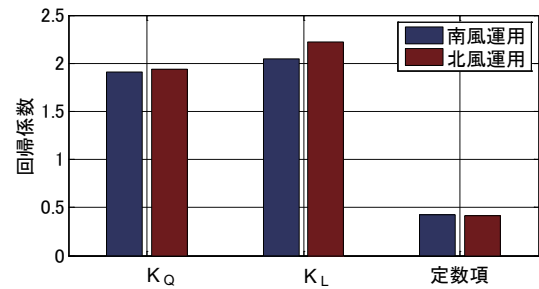


図 9 重回帰式の係数

また、重回帰式(2)の決定係数は、南風運用について 0.909、北風運用について 0.925 と、いずれも高い値となった。また、図 10、図 11 に示すように、 $Q_d$  と  $E_d - K_d \times L_d$ 、 $L_d$  と  $E_d - K_Q \times Q_d$  の間に高い相関が確認された。

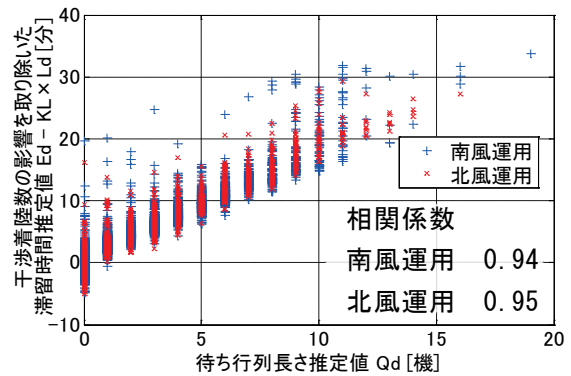


図 10 待ち行列長さと滞留時間の関係

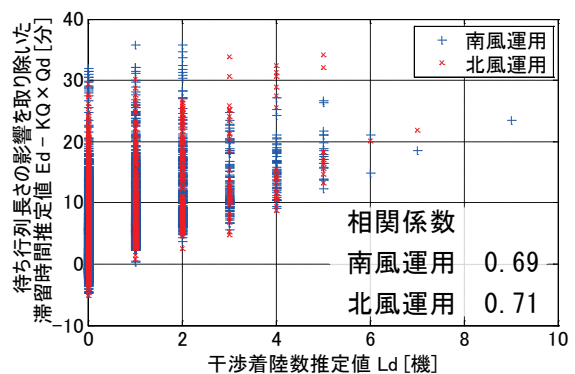


図 11 干渉着陸数と滞留時間の関係

また、モデル式(1)の誤差分布を図 12 に示す。図 12 から観察されるように、誤差分布は 0 分を平均とする正規分布となった。また、南風運用では  $\pm 3.3$  分、北風運用では  $\pm 3.4$  分の範囲に誤差の 95% が含まれた。この結果は、4.1 節の要領で定義した  $U_g$ 、 $Q_d$ 、 $L_d$  を主な構成要素として出発走行時間がモデル化できる

ことを示すものである。

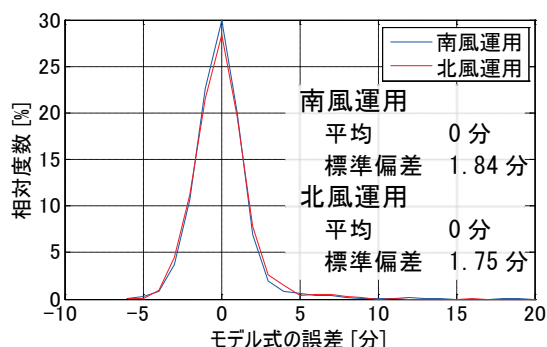


図 12 出発走行時間モデル式(1)の誤差

## 5. 考察

### 5.1 モデル式(1)の活用

出発走行時間が式(1)のように非滞留時間と滞留時間に分けられることは、空港面交通管理手法の検討を進めていく際に有意義となる性質である。たとえば、現状での滞留時間を定量化できるほか、交通管理手法を適用した場合の滞留時間の軽減効果を評価する際に用いることができる。

### 5.2 出発走行時間予測への発展

重回帰式(2)は、既に離陸済みの出発便について算出された待ち行列長さと干渉着陸数を用いている。出発走行時間予測を行う場合には、これらの値について予測が必要となる。この予測を行うためには、単位時間あたりに離着陸可能な航空機数について性質を把握する必要があり、今後の課題である。

## 6. まとめ

本稿では、成田空港の A 滑走路を用いる出発便について、ゲートウェイ通過から離陸までの出発走行時間の予測のため、出発走行時間を、混雑にかかわらず走行に必要となる時間（非滞留時間）と、混雑によって生じる滞留時間に分け、それぞれの特徴を分析した。その結果、滞留時間は、主に離陸待ち行列の長さや離陸待ち時の着陸数（干渉着陸数）の影響を受けることが示された。また、この滞留時間の性質から、ゲートウェイごとの非滞

留時間について、走行距離に概ね比例する推定値が得られた。これらの結果から、出発走行時間は、ゲートウェイごとの非滞留時間、離陸待ち行列の長さ、干渉着陸数の 3 つの変数によってモデル化できる可能性が示された。

今後は、本稿の検討を踏まえて、ゲートウェイから離陸までの走行時間を高い精度で予測する手法を検討する。また、管制承認要求からゲートウェイ通過までの所要時間についても予測手法の検討を進める。これらにより、管制承認要求から離陸までの走行時間の予測手法を構築し、空港面交通管理手法に活用することとしたい。

## 参考文献

- [1] EUROCONTROL, “Airport CDM Implementation Manual”, ver. 4, 2012.
- [2] Deutsche Flugsicherung / Flughafen München, “Airport CDM Munich - Results”, 2008-2013.
- [3] D. Bhadra et al., “Benefits of Virtual Queuing at Congested Airports Using ASDE-X: A Case Study of JFK Airport”, 9<sup>th</sup> USA/Europe ATM R&D Seminar, No. 33, 2011.
- [4] I. Simaiakis et al., “Demonstration of Reduced Airport Congestion through Pushback Rate Control”, MIT Technical Report, No. ICAT-2011-2, 2011.
- [5] 国土交通省航空局, 「将来の航空交通システムに関する長期ビジョン」, 2010.
- [6] 国土交通省航空局, 「将来の航空交通システムに関する推進協議会 平成 25 年度活動報告書」, 2014.
- [7] 国土交通省航空局, 航空路誌, 2013 年 3 月 7 日有効版.
- [8] ブラウンほか, 「空港面交通管理のための羽田空港の駐機スポット情報に関する解析」, 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 111, no. 407, SANE2011-143, pp. 9-14, 2012.
- [9] 国土交通省航空局, 「今後の首都圏空港のあり方について」, 交通政策審議会航空分科会第 9 回基本政策部会資料, 2013.
- [10] 山田ほか, 「マルチラレーション監視データを用いた航空機地上運航時間の分析—大規模空港における滞留時間の特徴に関する一考察—」, 電子航法研究所報告, No. 127, 2011.