

# 10. 航空機位置情報等を用いた出発走行時間の予測手法

航空交通管理領域 ※山田 泉, 青山 久枝, 住谷 美登里

## 1. まえがき

航空交通量の増加に伴う繁忙空港の空港面における混雑は、滑走路がボトルネックとなることに起因する出発便の滞留をもたらす、地上走行時間の増加につながる。このため、出発便の地上走行をスケジュール管理することによって空港面の交通を円滑にする対応策の導入が求められている。このようなスケジュール管理では、出発便のスポット出発時刻について、各便がどれだけの離陸待ち時間を経て、いつ離陸するかの予測を行い、その予測をもとに調整を行う。よって、スポット出発時刻を起点とした離陸までの走行時間（出発走行時間）および離陸時刻の予測は、出発便の地上走行のスケジュール管理において主要な構成要素となる。

本研究では、日本の主要な国際線ハブ空港である成田空港の出発便を対象に、空港面の混雑緩和のための交通管理手法について検討を進めるとともに、出発走行時間および離陸時刻を予測する手法の開発に向けて、出発走行時間に関する分析を進めている。これまでの分析では、出発走行時間について、空港面の混雑によらず要する基準走行時間と、混雑による滑走路端の待ち時間に分け、滑走路端の待ち時間について、空港面の混雑を表す変数との相関を明らかにした<sup>[1][2]</sup>。しかしながら、混雑を表す変数は離陸時刻をもとに定義するため、前もって知ることのできない量となることから、分析結果をただちに離陸時刻の予測に用いることはできない。

本稿では、滑走路端の待ち時間を待ち行列過程としてモデル化しなおすことにより、予測を行う時点で取得可能である航空機位置情報、スポット出発時刻情報、到着便の着陸時刻の予測情報をもとに離陸時刻の予測を行う計算モデルを提案する。次に、これらのデータのサンプルとなる参照データを用いて離陸時刻の予測を行った結果から、計算モデルの妥当性について検討し、離陸時刻の予測に航空機位置情報を用いる利点について考察する。

## 2. 成田空港と出発走行時間の特徴

### 2.1 空港レイアウトと管制運用

成田空港は、図1に示すように、1対の平行滑走路で構成されている。滑走路長の違いにより、出発便は長い方のA滑走路を主に用いる。出発便の地上走行の距離は、出発する駐機スポットによって大きく異なり、1kmから7kmの範囲で広がっている。また、地上走行の管制運用は、エプロン内の走行の管理と、エプロン外の誘導路および滑走路の交通管制に分かれており、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おいて受け渡される。



図1 成田空港のレイアウト

### 2.2 出発走行時間の特徴

当所の先行研究では、ゲートウェイ通過から離陸までの走行時間について、下記の式(1)の構造を仮定し、分析を進めている<sup>[1]</sup>。

$$\begin{aligned} \text{ゲートウェイ通過から離陸までの走行時間} \\ = \text{誘導路の基準走行時間} \\ + \text{滑走路端の待ち時間} \end{aligned} \quad (1)$$

式(1)の右辺は下記のように定義する量である。

- ・ 誘導路の基準走行時間：ゲートウェイと離陸滑走路の組み合わせごとに、空港面の混雑の影響を受けなかった出発便のゲートウェイ通過から離陸までの走行時間を平均した値。
- ・ 滑走路端の待ち時間：ゲートウェイ通過か

ら離陸までの走行時間のうち、基準走行時間を超過した分。

上記の定義により、式(1)の仮定は、出発便が滑走路端まで誘導路の基準走行時間で走行したのち、滑走路端において点状の（空間的な広がりを持たない）待ち行列を形成するという仮定を意味している。

式(1)の右辺の各量について、それぞれの特徴を分析した結果、下記の特徴が明らかとなっている。

- ・ 誘導路の基準走行時間：ゲートウェイから滑走路入口までの経路距離におおむね比例し、平均的には経路距離が 1km 増えるごとに 2 分間の割合で増加する。
- ・ 滑走路端の待ち時間：下記の 2 つの量を説明変数とする重回帰分析により、決定係数 0.9 を超える相関が見出される。
  - 離陸待ち機数：ある出発便が滑走路端の待ち行列に並んだ時点（ゲートウェイ通過後、誘導路の基準走行時間が経過した時点）において地上走行中であり、かつ、当該出発便よりも先に離陸した出発便数。
  - 干渉着陸数：ある出発便が滑走路端の待ち行列に並んだ時点から離陸までの間に、同じ滑走路に着陸した到着便数。

また、エプロンにおけるスポット出発からゲートウェイ通過までの所要時間は、スポットとゲートウェイの位置関係に対応した値となることが明らかとなっている<sup>[2]</sup>。このため、エプロンについても、スポットとゲートウェイの組み合わせごとの所要時間の平均値として、エプロンの基準走行時間が得られる。

以上から、出発走行時間は下記の式(2)の構造となり、スポット出発時刻と離陸時刻については下記の式(3)の関係となる。

$$\begin{aligned} & \text{出発走行時間} \\ &= \text{エプロンの基準走行時間} \\ &+ \text{誘導路の基準走行時間} + \text{係数} \times \text{離陸待ち機数} \\ &+ \text{係数} \times \text{干渉着陸数} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{離陸時刻} &= \text{スポット出発時刻} \\ &+ \text{出発走行時間} \end{aligned} \quad (3)$$

### 3. 提案する離陸時刻予測計算モデル

#### 3.1 予測計算モデルの構成

式(2)を構成する 4 つの変数のうち、離陸待ち機数と干渉着陸数については、離陸時刻の情報がなければ得られない値であるため、出発走行時間および離陸時刻の予測を行うためには、滑走路端の待ち時間についての予測が必要となる。

2.2 節に述べた滑走路端の待ち時間の特徴から、滑走路端の離陸待ちは、同じ滑走路への到着便の着陸によって割り込みを受ける待ち行列過程としてモデル化しなおすことが妥当と考えられる。

そこで、本稿では、予測を行う時点に取得可能な出発便の位置情報、スポット出発時刻情報、他の手段によって得られる到着便の着陸時刻の予測情報をもとに離陸時刻の予測値を得る計算モデルを提案する。これは、図 2 に構成を示すように、基準走行時間の性質をもとに、予測を行う時点で得られる出発便の位置およびスポット出発時刻から各出発便が滑走路端の待ち行列に至る時刻（滑走路端到達時刻）を推定し、到着便の着陸時刻の予測値とともに待ち行列過程の入力とすることにより、滑走路端の待ち行列を経た離陸時刻の予測値を得るものである。

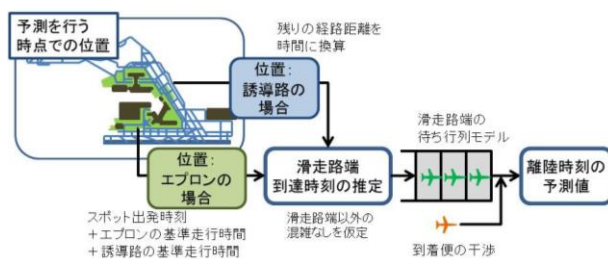


図 2 離陸時刻予測の計算モデルの模式図

#### 3.2 滑走路端到達時刻の推定

滑走路端到達時刻の推定では、各出発便の基準走行時間のうち、予測を行う時点での残り時間を推定し、予測を行う時点からこの残り時間だけ経過した時刻を滑走路端到達時刻の推定値とする。この推定では、予測を行う時点において、出発便が走行中の場所がエプロンであるか誘導路であるかによって場合分けを行う。

### 3.2.1 エプロンを走行中の場合

予測を行う時点においてエプロンを走行中の出発便については、図3に示すように、スポット出発時刻とエプロンの基準走行時間からゲートウェイ通過時刻を推定し、この時刻に誘導路の基準走行時間を足して滑走路端到達時刻の推定を得る。

この推定方法では、スポット出発時刻からの経過時間がエプロンの基準走行時間を過ぎている場合について例外的な扱いが必要となる。そこで、このような場合には、ゲートウェイにおいて停止しているものとして、誘導路を走行中の出発便として扱う。

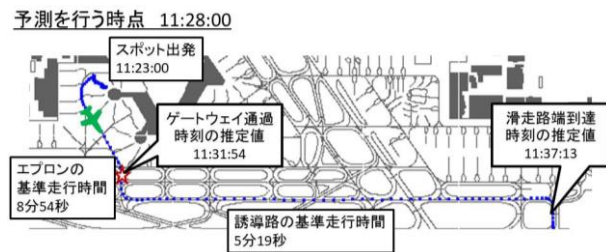


図3 エプロンを走行中の出発便における滑走路端到達時刻の推定例

### 3.2.2 誘導路を走行中の場合

予測を行う時点で誘導路を走行中の出発便については、図4に示すように、滑走路端までの経路長を時間に換算して滑走路端到達時刻の推定を得る。誘導路の基準走行時間の性質から、誘導路において混雑の影響によらず滑走路端に至るまでの走行に要する時間は1kmあたり平均2分間の割合であることが明らかとなっているので、この割合を換算の係数として用いる。



図4 誘導路を走行中の出発便における滑走路端到達時刻の推定

### 3.3 滑走路端の待ち時間を経た離陸時刻の推定

滑走路端の待ち時間を経た離陸時刻の推定は、予測を行う時点において走行中の全出発便について滑走路端到達時刻の推定が得られたのち、

まず離陸順を推定し、離陸順が早いものから順に、各出発便の滑走路進入時刻、離陸滑走開始時刻、離陸時刻を推定する。これら3つの時刻の推定は、滑走路処理容量の試算に用いられる一般的な計算方法<sup>[3]</sup>を参考としたものである。

#### 3.3.1 離陸順の推定

3.2節の要領により、各出発便の滑走路端到達時刻が推定される。この時刻の順のとおり離陸するものとして離陸順を推定する。

#### 3.3.2 滑走路進入時刻の推定

滑走路の管制運用において、出発便の滑走路進入は、離陸順がひとつ前である出発便の離陸滑走開始、または、干渉する到着便の着陸まで許可されない。このため、進入時刻の推定値として、下記のうち最も遅い時刻を用いる。

- ・ 滑走路端到達時刻の推定値
- ・ ひとつ前の出発便の離陸滑走開始時刻の推定値
- ・ 干渉する到着便の着陸時刻の予測値

干渉する到着便については、到着便が連続して着陸する場合など、複数の到着便について考慮を必要とする場合があり、干渉の条件が複雑であるため、一旦3.3.3の離陸時刻の推定までを行ったのちに、干渉する到着便の検出と、干渉に応じた再計算を行う。

#### 3.3.3 離陸滑走開始時刻および離陸時刻の推定

滑走路の管制運用において、出発便の離陸滑走は、離陸順がひとつ前である出発便の離陸滑走開始から一定時間の経過、または、干渉する到着便の滑走路離脱まで許可されない。このため、離陸滑走開始時刻の推定値として、下記のうち最も遅い時刻を用いる。

- ・ 滑走路進入時刻の推定値+離陸滑走開始位置までの移動時間 (パラメータ)
- ・ ひとつ前の出発便の離陸滑走開始時刻の推定値+離陸間隔 (パラメータ)
- ・ 干渉する到着便の着陸時刻の予測値+着陸から滑走路離脱までの所要時間 (パラメータ)

このようにして得られた離陸滑走開始時刻の推定値に離陸滑走時間 (パラメータ) を加え、



離陸時刻の予測値を得る。

### 3.3.4 干渉する到着便の検出

3.3.3 までの計算により、滑走路進入時刻、離陸滑走開始時刻、離陸時刻の各推定値が得られる。到着便の着陸時刻の予測値が、推定された出発便の滑走路進入時刻から離陸時刻までの時間に含まれるような到着便が見つかった場合には、このような出発便の滑走路使用は不可能であるので、この関係となる到着便を干渉する到着便として検出し、3.3.2 および 3.3.3 の計算を再度行う。到着便が連続して着陸する場合には、再計算した結果、次の到着便も干渉する到着便となる場合がある。このため、干渉する到着便の検出は、再計算を繰り返し、干渉する最後の到着便が検出されるまで行う。

## 4. 計算モデルの妥当性検証

### 4.1 検証に用いる参照データ

#### 4.1.1 航空機位置とスポット出発時刻

航空機位置情報とスポット出発時刻については、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から参照データを得た。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>[4]</sup>。

#### 4.1.2 到着便の着陸時刻

3.3 節に述べた計算で用いる到着便の着陸時刻の予測値については、事前に得られる情報が不確かさを含んでいること、および、着陸前の早い段階では予測値そのものが得られない場合があることが制約として考えられるが、本検証においては、便宜的に、スポット出発時点に行く最初の予測計算から離陸直前に行く最後の予測計算まで、1 分単位の正しい着陸時刻の予測値を用いることができると仮定して、参照データから得られる到着便の着陸時刻を 1 分単位に丸めた値を用いる。この仮定により、本検証における離陸時刻の予測は、到着便の着陸時刻の事前情報について不確かさの影響を含まないも

のとなる。

### 4.2 検証の要領

本検証では、ある 1 日に A 滑走路を用いた出発便 (270 便) について、位置情報、スポット出発時刻情報、A 滑走路の到着便 (127 便) の着陸時刻情報の参照データを用いて、提案した計算モデルによる離陸時刻の予測を 1 分おきに継続して行い、離陸時刻の予測値と、参照データの離陸時刻について下記の検証を行う。

- ・ 出発走行時間の比較：  
スポット出発時点に予測した出発走行時間と、参照データの出発走行時間を比較する。
- ・ 離陸時刻の予測精度の検証：  
スポット出発時点、ゲートウェイ通過時点、誘導路走行中のそれぞれの時点における離陸時刻の予測値と参照データの離陸時刻を比較し、予測の精度を検証する。

### 4.3 検証結果

#### 4.3.1 スポット出発時点での計算結果

各出発便のスポット出発時点に予測した出発走行時間について、参照データの出発走行時間との分布の比較を図 5 に示す。図 5 から、出発走行時間について、参照データをほぼ再現する予測が得られていることが観察される。

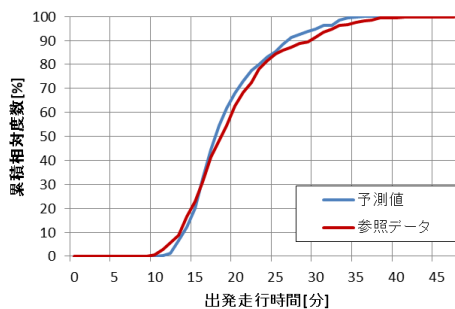


図 5 スポット出発時点に予測した出発走行時間の分布

また、スポット出発時点で計算した離陸時刻の予測値について、参照データとの差分によって求めた誤差の分布を図 6 に示す。誤差のうち 50% (25 パーセントイルから 75 パーセントイル) までは -2.6 分から 1.0 分、90% (5 パーセントイルから 95 パーセントイルまで) が -5.4 分から 4.3 分の範囲となった。

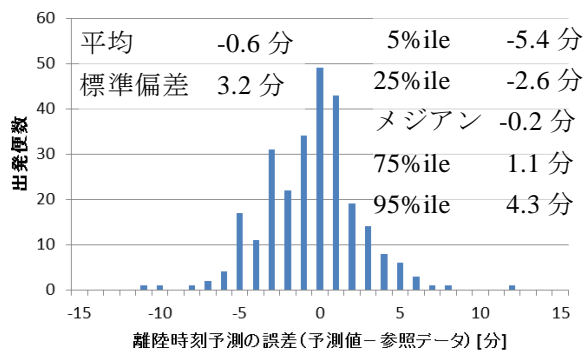


図 6 スポット出発時点における離陸時刻の予測誤差の分布

#### 4.3.2 ゲートウェイ通過時点での計算結果

各出発便のゲートウェイ通過時点で計算した離陸時刻の予測値について、誤差の分布を図 7 に示す。誤差のうち 50% (25 パーセンタイルから 75 パーセンタイルまで) が -0.9 分から 0.9 分、90% (5 パーセンタイルから 95 パーセンタイルまで) が -4.1 分から 3.2 分の範囲となった。

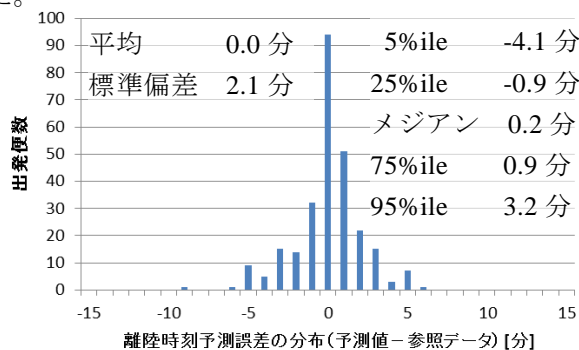


図 7 ゲートウェイ通過時点における離陸時刻の予測誤差の分布

#### 4.3.3 誘導路での計算結果

誘導路を走行中の出発便について計算した離陸時刻の予測値について、誤差の範囲と、滑走路までの経路距離の関係を図 8 に示す。滑走路端までの経路距離は、予測計算を行う 1 分ごとの時点ではさまざまな値となることから、図 8 では、250m 単位で区切った経路距離の範囲に対して、対応する離陸時刻の予測誤差のサンプルの 5 パーセンタイルから 95 パーセンタイルまでの各値を点で表し、折れ線で結んでいる。図 8 から、予測誤差のうち 25 パーセンタイルから 75 パーセンタイルまでの範囲は、滑走路

端までの経路距離によらず ±2 分以内となっていることが観察される。一方、5 パーセンタイルから 95 パーセンタイルまでの範囲は、滑走路端の 750m 手前よりも滑走路に近い側では ±2 分程度となるものの、遠い側では ±3 分から ±5 分程度の幅を持つことが観察される。

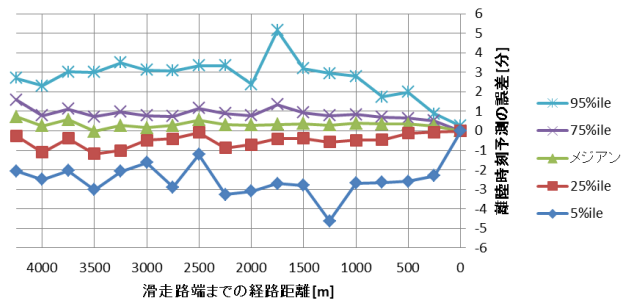


図 8 誘導路における離陸時刻予測誤差の範囲と滑走路端までの経路距離の関係

## 5. 考察

### 5.1 離陸順の推定について

提案した計算モデルでは、基準走行時間によって滑走路端到達時刻を推定し、この順に離陸することを仮定している。この仮定は、滑走路端までの経路距離のみによって離陸順が付けられる仮定を意味している。一方、現実には、離陸後の飛行経路の振り分けや、航空路における管制間隔設定のための離陸時刻の制限など、滑走路端からの経路距離以外の規範によって離陸順が設定される場合が考えられる。

図 8 において、滑走路端までの経路距離が 750m 以内の側で、離陸時刻の予測誤差のうち 90% が ±2 分程度に含まれるという高い精度が得られているのは、滑走路端から至近の場所では離陸順の変更が難しいため、離陸順が滑走路端までの経路距離によってほぼ確定することと対応していると考えられる。一方、750m よりも遠い側で予測誤差の 90% が ±3 分から ±5 分程度の範囲に広がっているのは、経路距離以外の規範により離陸順が決定され、出発便が並べ替えられている場合があることに対応すると考えられる。

離陸時刻について、さらに精度の高い予測を行うためには、滑走路端までの経路距離以外の規範を考慮した離陸順の推定を行う必要がある。

## 5.2 位置情報を用いる利点について

4章の検証では、着陸時刻情報が事前に高い正確さで得られることを仮定している。ところが、着陸時刻の正確な事前情報は、着陸時刻の管理が精密に行われない限り、取得は難しい。

一方、出発便の地上走行では、到着便が影響する場合には、滑走路付近において出発便が到着便の着陸を待つため減速および停止を行うことから、出発便の位置情報は到着便の影響を受けている場合がある。このため、着陸時刻の事前情報が得られない場合においても、位置情報を用いる提案手法により、ある程度の正確さで離陸時刻の予測を行いうる可能性がある。

4章の検証手順において、着陸時刻情報を用いずに離陸時刻の予測を行い、誘導路を走行中の出発便について図8と同じ要領により離陸時刻予測誤差と滑走路端までの経路距離の関係を示した例を図9に示す。図8と図9の比較から、着陸時刻情報の欠落により、予測される離陸時刻は早まる傾向となるものの、極端に早まることはなく、また、滑走路に近づくに従って、離陸時刻の予測誤差の範囲は、着陸時刻情報を用いた場合と同等の範囲に近づくことが観察される。

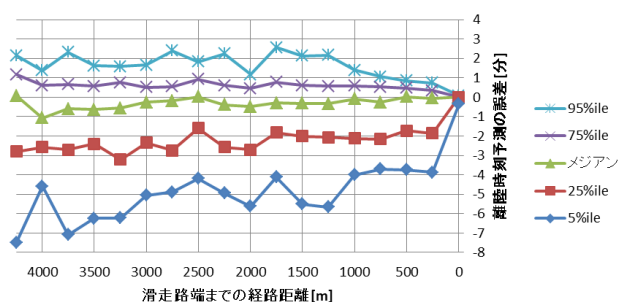


図9 誘導路における離陸時刻予測誤差（着陸時刻の事前情報を用いない場合の例）

位置情報を用いる提案手法は、上記に掲げた着陸時刻の事前情報が得られない場合のほか、滑走路が一時的に使用できなくなるなど、スポット出発時点での離陸時刻予測の前提が崩れた場合に、既にスポット出発済みの出発便について離陸時刻の予測を引き続き行うことができる利点があると考えられる。

## 6. まとめ

本稿では、成田空港のスポット出発から離陸までの出発走行時間の特徴に関する分析結果をもとに、航空機位置情報、出発便のスポット出発時刻、到着便の着陸時刻から滑走路端の待ち行列に至る時刻（滑走路端到達時刻）を推定したのち、待ち行列での待ち時間を推定することにより、各出発便の出発走行時間および離陸時刻を予測する計算モデルを提案した。当所の空港面交通データベースから得られたある1日分の参照データを用いて、提案した計算モデルによる各出発便の離陸時刻の予測計算を1分ごとに行った。その結果、スポット出発時点に予測した出発走行時間は、参照データの出発走行時間とほぼ同じ分布となることが確認された。また、スポット出発時点から滑走路進入に至るまでのいずれの時点においても、離陸時刻の予測計算の誤差は50%の割合で±2分から±3分程度、90%の割合で±5分程度となった。これらの結果は、計算モデルの構造に関する妥当性を示すものと考えられる。

今後は、より精度の高い離陸時刻予測手法を開発するため、本稿で提案した計算モデルの各構成要素について精緻化を進めるとともに、出発便の混雑を緩和する交通管理の方策が予測の性能にもたらす効果について検討を進めるとしたい。

## 参考文献

- [1] 山田ほか、「成田空港出発便の地上走行時間に関する分析」、第14回電子航法研究所研究発表会講演概要, pp. 51-56, 2014.
- [2] 住谷ほか、「成田空港の地上走行時間の特性について」、第15回電子航法研究所研究発表会講演概要, pp. 19-24, 2015.
- [3] 日本土木工業協会、「羽田空港の処理容量拡大策に関する調査研究報告書」、pp. 28-32, 2010.
- [4] 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.