

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 4 月 19 日現在

機関番号：82642

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25871210

研究課題名(和文)混雑空港における管制運用を考慮した効率化策に関する研究

研究課題名(英文)Efficiency Improvement Considering ATC Operations at Congested Airports

研究代表者

森 亮太(MORI, RYOTA)

国立研究開発法人電子航法研究所・その他部局等・主任研究員

研究者番号：30560114

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、出発・到着の両面から、空港周辺における効率向上を行うために実施した。出発機に関しては、空港における不確定性を考慮した上で、空港運用をシミュレーションする手法について開発を行った。そして、そのシミュレーションモデルを用いて、燃料消費を抑えるためのプッシュバック許可時刻の設定手法を提案した。到着機に関しては、操縦が難しいとされる実在する空港をターゲットとして、着陸経路の最適化計算を実施し、飛行距離と燃料消費およびパイロットのワークロードに関して新たな知見を得ることができた。

研究成果の概要(英文)：This research was conducted to improve efficiency around airports and focused on both departure and arrival flights. As for departure, first an airport operation simulation model was developed considering various uncertainties. Using the simulation model, a new algorithm of pushback time assignment was proposed. The proposed pushback time assignment strategy reduced the fuel burn of departure aircraft. As for arrival, arrival route was optimized at the existing airport where the pilot control was difficult. Based on the result, the relationship between flight distance and fuel consumption/pilot workload was revealed.

研究分野：航空交通管理

キーワード：航空交通管理 管制 空港 不確定性

### 1. 研究開始当初の背景

世界の航空交通量は、今後も増大が見込まれており、それに伴い空港およびその周辺における混雑が深刻化している。一般に空港におけるボトルネックは滑走路であり、離着陸の際には安全のため最低限必要な離着陸間隔(通常 1 分半~2 分程度)が定められているため、混雑空港においては離陸機・着陸機それぞれが滑走路待ちで列をなしているのが現状である。本研究では、地上走行中の離陸機の燃料消費削減、および、効率的な着陸経路の設定、の 2 点について検討を行う。

### 2. 研究の目的

本研究では、地上走行中の離陸機の燃料消費削減、および、効率的な着陸経路の設定、の 2 点について研究を行う。

前者については、離陸機は滑走路が混雑している場合に、滑走路手前で順番待ちをする必要がある。順番待ちをしている間も、航空機はエンジンを動かし続けているため、不必要な燃料を消費している。それを避けるため、各離陸機が離陸可能な時刻にちょうど到着するよう、プッシュバック時刻を調整する手法がその 1 つの解決策として知られており、TSAT(Target Start-up Approved Time)運用と呼ばれている。その際、各離陸機にプッシュバック時刻を割り当てるのは簡単ではない。空港運用には、様々な不確実性が存在するため、出発前からすべてを予想できるわけではない。しかし、不確実性が存在したとしても、その中でできるだけ燃料消費を減らせるような(つまり、できるだけ遅いプッシュバック時刻を設定するような)プッシュバック時刻の設定手法を提案するのが、本研究の目的である。

後者については、着陸機は通常飛行方式と呼ばれるあらかじめ指定されたルートで飛行することとなっているが、通常これらのルートは最短経路となるよう設計されている。設計の際には、日本では飛行方式設定基準と呼ばれる基準に従い設定され、その基準を満たす必要がある。通常、最短経路が最もよい経路となることが多いのだが、空域の制限等により飛行できる区域(つまり方式が設定できる区域)が限られていたり、高度の制限が生じたりする場合には必ずしも最短経路の方式が最適とは限らない場合がある。ここでいう最適とは、必ずしも燃料消費だけではなく、パイロットのワークロードや、飛行時間、容量など様々な要素を含むものとし、何ををもって最適とするかについても議論が必要な部分である。今回は、数ある着陸方式の中で RNP AR と呼ばれる方式を対象として、研究を行う。RNP AR は、従来の方式に比べて設計の自由度が増しており、近年日本の各空港にて主に経路短縮目的で導入が進められている。本研究では、既存の RNP AR 経路を対象として、現状よりよい方式の設計を行う手法の確立を目的としている。

### 3. 研究の方法

前者の研究については、不確実性を考慮する上で、まず空港におけるシミュレーションモデルの構築を目指した。その際、羽田空港を対象として、まず空港表面およびその周辺のデータを取得した。そのデータをもとに、例えば離陸・着陸間隔や、地上タキシング速度といった様々なパラメータがどのような不確実性を含有しているかを調査した。その上で、実際の交通状況をベースとした空港のシミュレーションを行い、実際のデータと結果が合致するかの確認を行った。

その後、実際に TSAT をどのように設定すればよいかの考察を行った。従来の TSAT 設定手法では、不確実性の考慮が不十分であったため、不確実性がどの程度影響があるのかといった考察もなされていなかった。本研究では、まず極めてシンプルな TSAT 設定を行った場合、どのような結果になるかということを確認した。そして、その結果をもとに、よりよい TSAT 設定手法の考案を行った。ここで「よりよい」とは、燃料消費削減だけでなく、TSAT を設定しない場合に比べて、離陸時刻が遅れていないかどうかを判断材料として用いた。TSAT を設定する方法としては、空港の状況から意味があると思われる情報を数値化し、それらの数値から TSAT の値を動的に設定するという手法を用いた。動的に設定するにあたり、当初は Q-Learning をベースとした強化学習による手法を検討していたが、後にタブーサーチ手法の方がより安定してよい解を生成できそうなことがわかったため、最終的にはタブーサーチによる手法を採用することとした。

そして、提案する TSAT 設定手法を用いて、どの程度現状と比べて運航効率があがるかどうかの試算を行った。

後者の研究については、まず飛行距離と燃料消費の間にどのような関係性があるかどうかということについて、最適化計算を実施した。機体データとしては、欧州 Eurocontrol が提供している BADA3 と呼ばれるモデルを用いた。最適化にあたっては、質点モデルを用い、横方向の運動については計算を行わず、旋回に伴うバンク角の考慮を行い、2 次元(進行方向と垂直方向)で計算を行った。最適化変数としては、CL と Thrust とし、目的関数として、燃料消費、飛行時間、あるいはこれらの重みづけした和などで行った。

そして、ウェイポイントの配置に関しても最適化計算を行えるよう、その手法の開発を行った。地形などのデータについては、国土地理院が公開している地形データを用いた。方式設計の基準として、ノミナル経路に対して確保すべきマージンというものがあるため、それらを制約条件として最適化の中で考慮した。

また、航空会社から実際のフライトデータの入手を行い、そのデータ分析も行った。

#### 4. 研究成果

前者の研究については、まずシミュレーションモデルの構築を行った。まず不確実性についてのデータを得た。図1は、その一例として離陸間隔の分布を示している。これらは実際のデータから推計されたデータであり、それを今回アーラン分布と正規分布の混合分布で近似させた上で、シミュレーションで用いた。なお、離陸間隔は前後の航空機サイズおよび視程にも影響されることがわかったため、これらについても考慮してある。得られた不確実性のデータから、シミュレーションを行ったところ、実際のデータと大きく変わらない結果が得られ、シミュレーション手法として妥当との結論を得られた。この結果については、雑誌論文に掲載されている。

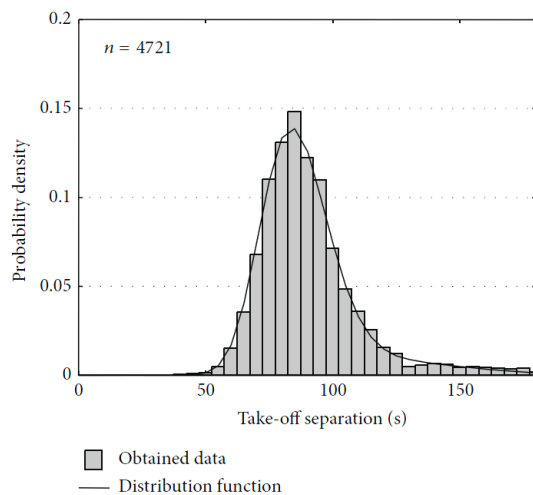


図1 離陸間隔の分布

また、構築されたシミュレーションモデルを用いて、TSAT 設定手法の開発を行った。それにあたり、以下の3つの値を説明変数としてTSATを動的に切り替える手法を考案した。各変数は離散的に定義を行い、その取りうる範囲を10~20の計50、TSAT切り替えの選択肢を各6とすることで、合計 $6^{50}$ の選択肢から最適解を探索するという組み合わせ最適化問題に落とし込み、計算を行った。その際に、タブーサーチと呼ばれる最適化手法を用いた。その計算の際、同一の選択を行った場合でも、その時々不確実性により有利に働く場合も不利に働く場合もあるため、目的関数の計算の際に、十分な回数のシミュレーションを行い、その平均を用いることで対処した。

図2にシミュレーション結果を示す。横軸がタキシング削減時間で縦軸が離陸遅延を示す。黒線はシンプルな手法で、赤点がタブーサーチを用いた最適化結果になる。一般に、タキシング時間の削減幅が増えるほど、同時に離陸遅延が増えてしまうというトレードオフの関係が確認できる。しかしながら、タブーサーチによる結果は、シンプルな手法に比べて明らかに解が向上している。許容でき

る離陸遅延量を固定した場合に、タブーサーチによる手法を用いた方が、より大きなタキシング時間の削減が期待できることがわかった。

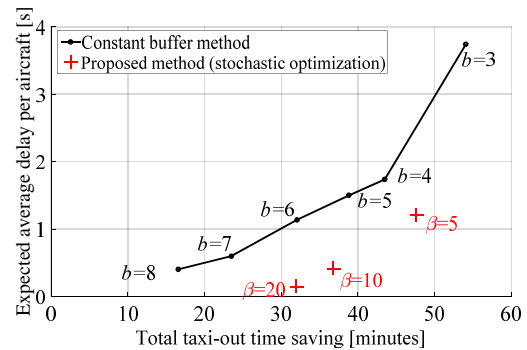


図2 タキシング削減時間と離陸遅延の関係

後者の研究については、高度制限が関する空港において、飛行距離と燃料消費および飛行時間の関係性を解明した。図3にその結果を示す。ケーススタディーとして、熊本空港のRNP AR経路(RNAV(RNP) Y RWY 25)を対象として計算を実施した。仮定した航空機は、B737-800で、重量130,000lbsとした。最初のASONOというウェイポイントで、10000ft以上の高度を通過することを条件として計算した。図の横軸は、現行の経路と比較して経路を延伸した距離、縦軸が燃料消費と飛行時間を示している。全体的な傾向として、距離が長くなればなるほど、燃料消費は増え、飛行時間も増えるといった、当然の結果が出ている。しかしながら、燃料消費の増え方はおよそ7NM付近を境に増え方が急激に変わっていることが分かる。これは、およそ7NM延伸した場合に、何も制約がない場合と同等の経路となることを意味している。つまり、延伸が7NMより短い場合には、通常の降下経路に対して経路角が深くなり、高度処理が大変になることを示している。経路角が深くなると、パイロットのワークロードが高くなることも知られているため、同じ1NMでも、7NM以下と以上とでその意味合いが全く異なることがわかった。

通常、飛行経路は経路長のみで評価される傾向が強く、短い経路長ほどよいと思われがちだが、この結果は、その評価が必ずしも正しくないケースが存在することを示すものである。

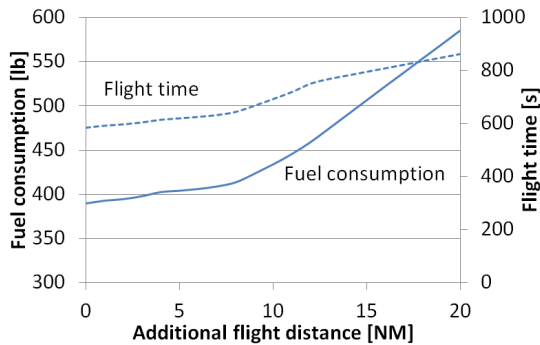


図3 飛行距離と消費燃料および飛行時間の関係

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

Ryota Mori, "Development of Fast-Time Stochastic Airport Ground and Runway Simulation Model and Its Traffic Analysis," *Mathematical Problems in Engineering*, Hindawi Publishing Corporation, Vol. 2015, Article ID 919736, 2015. (査読有)  
DOI:10.1155/2015/919736

〔学会発表〕(計5件)

森亮太, "不確定性を考慮した場合の最適プッシュバック時間の考察" 第51回飛行機シンポジウム, 2013年10月.高松(香川県)

Ryota Mori, "Optimal Spot-out Time - Taxi-out Time Saving and Corresponding Delay," CEAS Air & Space Conference, 2013. Linkoping (Sweden)

Ryota Mori, "Optimal Pushback Time Existing Uncertainties At Busy Airport," 29<sup>th</sup> Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, 2014. St. Petersburg (Russia)

Yoshinori Matsuno, Ryota Mori, Takeshi Tsuchiya, "Aircraft route optimization for RNP AR approach procedure design," EIWAC 2015, 2015. Tokyo (Japan)

Ryota Mori, "Improvement of Pushback Time Assignment Algorithm via Stochastic Optimization," 5<sup>th</sup> SESAR Innovation Days, 2015. Bologna (Italy)

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

森 亮太 (MORI, Ryota)

国立研究開発法人 電子航法研究所・航空交通管理領域・主任研究員

研究者番号：30560114