

19. 空港面交通シミュレータの開発

航空交通管理領域 ※山田 泉、住谷 美登里、海津 成男、
青山 久枝、マーク ブラウン、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、効率的な航空交通流や定時性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、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^[1]。

欧米では、空港運用の関係者（管制機関、エアライン、空港管理者等）の間で、航空機運航やスポット運用のスケジュールについて、詳細に情報共有し、共同で管理することにより、空港面運用を効率化する空港 CDM (Collaborative Decision Making)のコンセプトが具体化され、いくつかの空港で方式化されている^[2]。空港 CDM が導入された空港では、空港 CDM 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^[3]。

1.2 本稿の目的

当所では、日本の混雑空港である東京国際空港（羽田空港）について、空港 CDM の考え方を参考に、航空機の地上走行の滞留を緩和する空港面交通管理手法のアルゴリズム開発とシミュレーション検証を行ってきた。

本稿では、羽田空港における空港面交通流を模擬するために当所で開発した空港面交通シミュレータについて機能の概要を述べる。また、当所で開発した羽田空港の地上走行データベース（以下、地上走行 DB と称する）から抽出したシナリオによるシミュレーション結果と地上走行 DB のデータを比較し、シミュレータの妥当性を検証した結果を述べる。

2. 航空機の空港面地上走行の特徴

空港面において地上走行する航空機は、主に出発便と到着便である。それぞれの動作は、次のように構成される。

a) 出発便

スポットにおいて、ブロックアウトの承認を受けてプッシュバックを行う。プッシュバック終了位置で牽引車を切り離すため停止したのち、滑走路入口への経路指示を受けて地上走行を開始し、離陸滑走路からの離陸滑走を行う。

混雑時には、滑走路入口付近において出発便の離陸待ちが発生する。これは待ち行列現象であり、出発便の交通流が合流する地点（本稿では common point と称する）よりも滑走路寄りの区間で生じる^[4]。

b) 到着便

最終進入経路上の飛行から始まり、着陸後、滑走路出口において、スポットへの経路を指示されて地上走行を行う。

上記の構成に注目すると、地上走行時間は、図1に示すような、それぞれ特徴を持つ①～③のフェーズに分けて把握することができる。

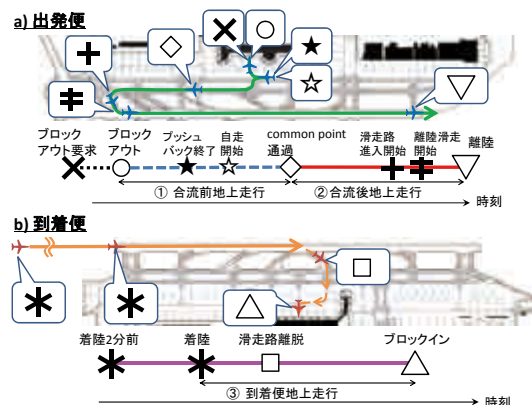


図1 航空機地上運航のフェーズ分け

3. 地上走行 DB

本研究では、羽田空港の空港面運用の特徴について分析し、この特徴を模擬するシミュレータを開発した。分析の元となるデータとしては、当所が作成した羽田空港の地上走行DBを用いた。これは、国土交通省航空局から提供を受けている空港面の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の地上走行データを算定・作成し、飛行経路・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^[5]。

4. 羽田空港の特徴

羽田空港は、日本で最大の交通量を有する空港であり、1日あたり1,000便以上の離着陸が行われる。羽田空港では、2組の平行滑走路が井桁状に配置されている。このうち2本が離陸用、2本が着陸用に用いられ、常に3本あるいは4本の滑走路が離着陸に用いられる運用が行われている。用いられる滑走路の組み合わせは風向きによって異なる。本稿では、図2に使用滑走路と滑走方向を示す北風運用の場合について述べる。

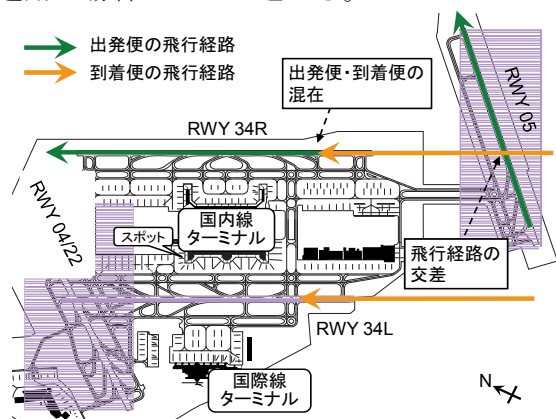


図2 羽田空港の滑走路運用 (北風運用の例)

図2に示すように、羽田空港の滑走路配置では、出発便と到着便の飛行経路が干渉する場合があります。このため、各滑走路の単位時間あたりの離着陸数は、飛行経路の干渉する他

の滑走路の離着陸数の影響を受けて変化する。

また、羽田空港は旅客ターミナル付近にスポットが密に配置されているため、プッシュバック経路が複雑に設定される。さらに、プッシュバックを誘導路まで行うスポットが多いため、エプロン周辺では、誘導路を走行する航空機と、プッシュバックする出発便との間で干渉が生じる場合がある。

これらのレイアウトや管制運用の複雑さのため、汎用の空港面交通シミュレータを用いて羽田空港の運用を模擬することは困難である。そこで、羽田空港の管制運用に対応した空港面交通シミュレータを開発した。

5. 経路探索・衝突回避アルゴリズム

5.1 マップの定義

地上走行DBから抽出した航跡と平成24年1月の空港地図を元にマップを定義した。滑走路16R/34L周辺の滑走路、誘導路、エプロンのマップを図3に示す。

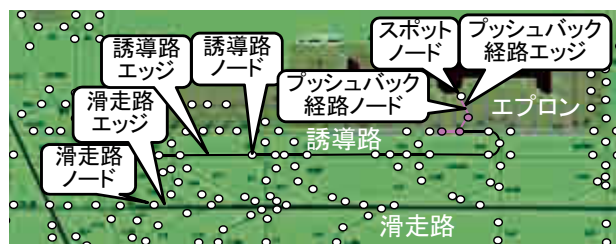


図3 マップ定義

5.2 誘導路の経路探索・衝突回避の模擬

管制運用では、航空機の地上走行について、おおむね次のような原則に基づいて走行経路が設定される。

- 他の航空機との衝突を生じないこと
- 走行経路が可能な限り短いこと

上記の経路設定条件を模擬するため、下記の経路探索アルゴリズムを導入した。

1. スポットと滑走路出入り口の間を結ぶ最短経路を探索し、経路の候補とする。このとき、スポットと滑走路の組み合わせに対して特定の通過ノードが定義されていれば、それらを順に通る最短経路を探索する。これは、管制運用において、空港面交通の動線を整えるため、地図上の

最短経路と異なる経路が用いられる場合を模擬するためである。

2. 経路候補の中に、他の航空機によって既に使用が予定されているエッジがあり、当エッジにおいて他の航空機と経路の方向が逆になる干渉がある場合は、当経路候補を破棄し、干渉がなくなるまで探索し、経路を確定する。このとき、最短経路の2倍以下の長さの経路を探索できない場合は、経路探索を中止する。
3. 確定した経路の全エッジを占有する。

上記の経路探索条件を用いて、出発便のプッシュバック終了位置や到着便の滑走路出口からの走行開始時の動作については、衝突を防止するために次のように設定した。

1. 経路探索アルゴリズムが中止された場合、走行を開始せずに待機し、経路が確定するまで10秒おきに経路探索を再度行う。
2. 確定済みの経路の中に他の航空機によって占有されているエッジがあっても、当該エッジにおける走行方向が同じ場合は、追突しない距離を保って走行する。

このうち1.は、衝突を動的に予測するために膨大な計算量を要することから、静的な衝突判定を行うことで衝突回避を模擬したことによるものである。

5.3 プッシュバック経路設定の模擬

羽田空港では、スポットの配置による制約から、出発便のプッシュバック経路が限定される場合がある。また、スポット周辺の交通状況のため、プッシュバック経路が様々に使い分けられる場合や、プッシュバックせずに待機することを指示される場合がある。このような運航を模擬するために、プッシュバックについては、各スポットについて最大3個のプッシュバック経路を優先順位付きでリスト化し、次のような動作ルールを設定した。

1. プッシュバック経路リストで優先順位1番の経路のいずれのエッジも他の航空機によって占有されていないならば、この経路を選択し、プッシュバックを開始する。
2. 1.で他の航空機によって占有されているエッジが見つかった場合、リスト中で優

先順位が後の経路を順にチェックし、他の航空機と干渉するエッジのない経路を選択し、プッシュバックを開始する。

3. 2.までで他の航空機と干渉しない経路が見つからなかった場合、プッシュバックせず待機し、プッシュバック経路の選択が可能となるまで10秒おきに経路探索を再度行う。

このプッシュバック経路設定手法は、図4に例を示す、羽田空港の混雑時に特徴的な、プッシュバック経路を複雑に使い分ける運用を模擬する必要から導入したものであり、本シミュレータの特徴的な機能である。



図4 混雑時のプッシュバック運用の模擬

5.4 滑走路での衝突回避の模擬

4章に述べたように、羽田空港では、3本あるいは4本の滑走路を同時に用いる複雑な管制運用が行われている。これを模擬するため、次のような滑走路運用条件を設定した。

1. 出発便が連続して離陸する場合：先行する出発便が離陸滑走を開始した後、パラメータで設定する滑走路進入待ち時間を経て滑走路進入を開始する。先行する出発便が離陸後の飛行経路上で動作を終了した後、パラメータで設定する離陸滑走待ち時間を経て離陸滑走を開始する。
2. 出発便に到着便の干渉がある場合：表1に示す干渉がある場合は、到着便が着陸するまで出発便は離陸滑走しない。
3. 到着便に出発便の干渉がある場合：表1に示す干渉がある場合は、出発便が離陸するまで到着便は最終進入経路からの飛行を開始しない。

表1 運用が相互に干渉する滑走路ペア

| | 北風運用 | | | 南風運用 | |
|-------|------|-----|-----|------|-----|
| | 05 | 34R | 34L | 16R | 16L |
| 離陸滑走路 | 05 | 34R | 34L | 16R | 16L |
| 着陸滑走路 | 34R | 34R | なし | 23 | 23 |

6. シミュレータの妥当性検証方法

6.1 地上走行DBからのシナリオ生成

地上走行DBから2012年5月のある日を選び、シミュレーションシナリオを作成した。

この日は午前2時以降、1日を通して北風運用であり、出発便526便（うち滑走路05：352便、滑走路34R：164便、その他16便）、到着便536便（うち滑走路34R：129便、滑走路34L：403便、その他2便）が運航した。

主要な運航時間帯である6時台から22時台までの1時間ごとの交通量を図5に示す。

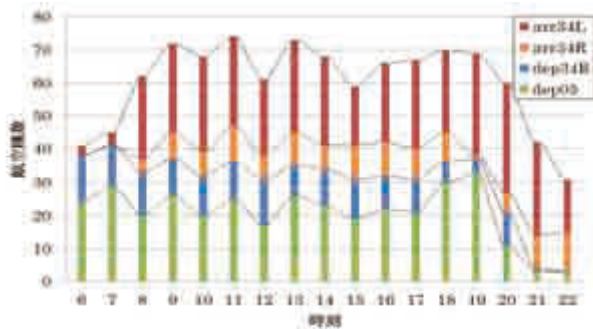


図5 時間帯あたりの交通量

出発便、到着便について、地上走行DBから下記のシナリオ項目を抽出した。

- 出発便
便名、型式、出発スポット、ブロックアウト時刻、離陸滑走路、滑走路入口
- 到着便
便名、型式、着陸滑走路、滑走路出口、到着スポット

6.2 検証の概要

現実の航空機には、積載重量やパイロットの操縦特性など個別の違いがあるため、シミュレータによる模擬には精度の限界がある。そこで、図1に示した走行フェーズ①～③の走行時間、および、滑走路使用状況について、地上走行DBとシミュレータそれぞれの平均

的な性質を示す統計値を算出して比較することにより、シミュレータの妥当性を検証する。

7. 検証結果

7.1 合流前地上走行時間（フェーズ①）

先行研究を参考に、common point を滑走路末端の停止線から経路距離で1,250m手前の地点に設定した。出発便のcommon pointに至るまでの地上走行時間（以下、合流前地上走行時間と称する）は、混雑の影響をあまり受けず、おおむね走行距離に対応した値となることが示されている^[4]。そこで、合流前地上走行時間については、滑走路とスポットのペアごとに平均値を求め、シミュレーション結果と地上走行DBからの計算値を比較した。

125組のスポットと滑走路のペアの、合流前地上走行時間平均値について、地上走行DBとシミュレーション結果からの計算値の比較を図6に示す。図6の散布図において、相関係数は0.77となり、高い相関が示された。

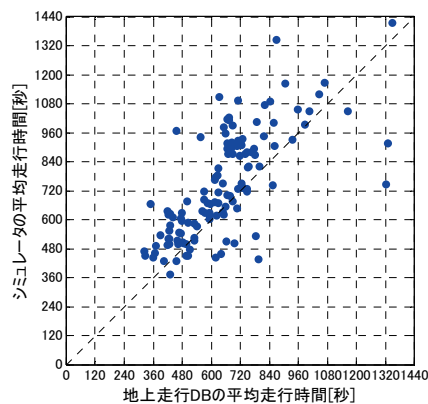


図6 合流前地上走行時間平均値の比較

7.2 合流後地上走行時間（フェーズ②）

2章に述べたように、出発便における滞留は主に図1のフェーズ②（合流後地上走行）で生じていることから、合流後地上走行時間について、地上走行DBとシミュレーション結果からの計算値を累積度数分布で比較した。全出発便について、合流後地上走行時間の分布を図7に示す。

図7から、合流後地上走行時間については、85%程度まで地上走行DBとシミュレーション結果が一致していることが示された。

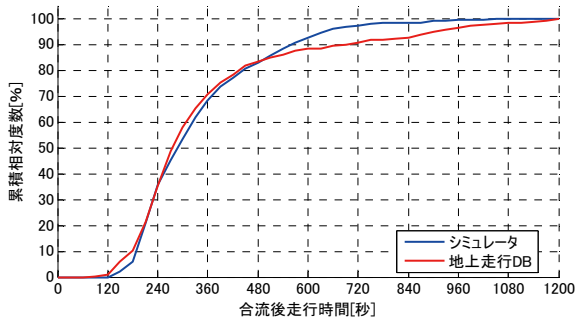


図7 合流後地上走行時間の比較

7.3 到着便地上走行時間（フェーズ③）

7.1 節と同様の比較を、到着便の着陸からブロックインまでの走行時間（到着便地上走行時間）について行った。

149 個のスポットと滑走路のペアの到着便地上走行時間平均値について、地上走行 DB とシミュレーション結果からの計算値の比較を図8に示す。図8の散布図において、相関係数は0.88 となり、高い相関が示された。

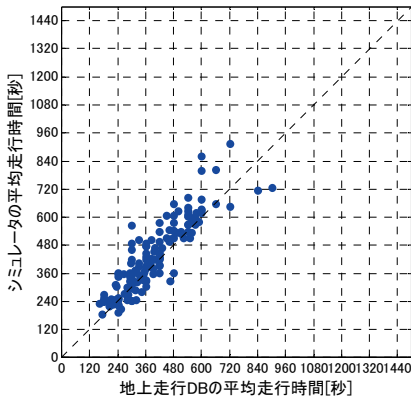


図8 到着便地上走行時間平均値の比較

7.4 5 分間あたり離着陸数

飛行経路の干渉する滑走路の組み合わせについて、Gilbo の提案する手法^[6]を参考として、5 分間あたりの離着陸数を把握し、シミュレータと地上走行 DB を比較した。これは、各滑走路の離陸、着陸時刻の履歴から、各5 分間あたりの離着陸数を数えた結果を1 サンプルとして、1 分おきに1 サンプルを取得し、サンプル全体に対する各離着陸数の組み合わせの割合を算出することにより、用いられることの多い5 分間あたり離着陸数の組み合わせを把握するものである。ここで、離陸、着陸ともに行われない時間帯については計算の

対象外とした。

シミュレーション対象日について、シミュレーション結果と地上走行 DB から、表1 に示した干渉のある滑走路ペアについて上記の計算を行って比較した。滑走路 05 の離陸と滑走路 34R の着陸について、5 分間あたり離着陸数の組み合わせの割合を算出した結果を、地上走行 DB について表2 に、シミュレータについて表3 に示す。

表2 地上走行 DB の5 分間離着陸数割合

| | 離陸0 | 離陸1 | 離陸2 | 離陸3 | 離陸4 |
|-----|-------|-------|-------|-------|------|
| 着陸0 | | 9.4% | 14.3% | 15.7% | 3.9% |
| 着陸1 | 10.5% | 12.8% | 14.8% | 8.9% | 0.4% |
| 着陸2 | 3.7% | 3.2% | 1.9% | 0.4% | 0 |

表3 シミュレータの5 分間離着陸数割合

| | 離陸0 | 離陸1 | 離陸2 | 離陸3 | 離陸4 |
|-----|------|-------|-------|-------|------|
| 着陸0 | | 9.4% | 11.6% | 18.8% | 3.9% |
| 着陸1 | 9.8% | 13.1% | 16.8% | 6.5% | 0 |
| 着陸2 | 4.8% | 2.7% | 2.3% | 0.2% | 0 |

表2 と表3 の比較から、離陸滑走路 05 と着陸滑走路 34R の5 分間あたり離着陸数については、地上走行 DB とシミュレーション結果がほぼ一致することが示された。

離陸滑走路 34R と着陸滑走路 34R の組み合わせについても、同様の結果が得られた。

8. 考察

8.1 出発便の合流前地上走行時間

7.1 節および7.3 節では、スポットと滑走路のペアごとの平均値を比較することにより、各走行フェーズについてシミュレータと地上走行 DB それぞれの平均的な性質を比較した。

出発便については、図6 から、全体的に120 秒程度、シミュレータの合流前地上走行時間が地上走行 DB に比べ長いことが観察される。これは、全スポットにほぼ等しく作用するプッシュバック速度やプッシュバック後の停止時間の設定によるものと考えられる。これらのパラメータは地上走行 DB から算出された

平均値を採用したが、地上走行 DB を到着便ほど正確に模擬できていない。地上走行 DB から、これらのパラメータの妥当な値を算出する手法が今後の課題である。

8.2 長い滞留時間の再現における課題

図7に示した分布では、合流後地上走行時間が長い側の15%について、地上走行 DB に比べシミュレータの渋滞時間が短いことが示される。一方、表2と表3を比較すると、シミュレータでは、5分間あたりに離陸3便、あるいは離陸2便・着陸1便となる場合が、地上走行 DB に比べて多いことが示される。このことは、地上走行 DB に比べ、シミュレータでは離陸が円滑に行われることを示している。待ち行列現象では、サービス時間（滑走路の場合は離陸間隔）の僅かな差に待ち時間が大きく影響されることが知られている。

本稿の検証では、離陸間隔に係る滑走路進入待ち時間と離陸滑走待ち時間については、シミュレーション結果を観察し、表2と表3がおおむね一致するように設定した。これらのパラメータについて、さらに精密に調整する手法を検討し、シミュレータの性能を向上させたい。

8.3 他空港への拡張性について

5.3節に述べたように、本シミュレータは、プッシュバック経路の複雑な使い分け等のエプロン運用を模擬する必要のある場合に対応可能な機能を有している。また、滑走路運用の模擬については、5.4節に述べたように、他の滑走路との干渉を考慮した滑走路運用条件を柔軟に設定することが可能である。

よって、たとえば成田空港のように、エプロンのレイアウトが複雑であり、同時離着陸方式等により滑走路間で管制運用が相互に影響しあう他の混雑空港の空港面交通流についても、本シミュレータの機能を応用して模擬することが可能であると考えられる。

9. まとめ

本稿では、羽田空港の空港面交通流を模擬するために当所で開発した空港面交通シミュレータについて機能の概要を述べ、地上走行 DB から得られたシナリオによるシミュレーション結果と地上走行 DB の比較により、シミュレータの妥当性検証を行った。その結果、いずれの地上走行フェーズにおいても、シミュレーション結果と地上走行 DB のデータに高い相関が確認され、本シミュレータは地上走行 DB に記録された空港面運用を模擬する性能を有していることが確認された。

今後は、シミュレーションパラメータの調整手法について検討を深め、より精度の高いシミュレーションを行う環境を整えることとしたい。また、本シミュレータを成田空港の地上走行の模擬に応用させていく予定である。

参考文献

- [1] 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.
<http://www.mlit.go.jp/common/000123890.pdf>
- [2] EUROCONTROL, “Airport CDM Implementation Manual”, ver. 4, 2012.
http://www.euro-cdm.org/library/cdm_implementation_manual.pdf
- [3] Deutsche Flugsicherung / Flughafen Munchen, “Airport CDM Munich - Results”, 2008-2013.
<http://www.munich-airport.de/cdm>
- [4] 山田ほか, 「マルチラテ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.
- [5] 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.
- [6] E. Gilbo, “Airport Capacity: Representation, Estimation, Optimization”, IEEE Transactions on Control System Technology, vol. 1, no. 3, pp. 144 - 154, 1993.