

空港面を対象とした高速シミュレーション・モデルの検討

蔭山 康太*

A Study on Fast-time Simulation Modeling for Airport Surface Movement

Kota KAGEYAMA

Abstract

As a result of air traffic demand growth, delay on airport surface increases in congested airports. To mitigate the increased delay, airport expansion programs, in which runways and taxi-ways are expanded, need to be implemented. On the other hand, because the expansion programs require tremendous amount of money and time, prior assessment for the expansion effect is indispensable. Numerous elements including airport layouts and traffic operations need to be covered in the assessment.

Conducting fast time simulation experiments provides valuable information for the prior assessment of airport surface expansion programs in an efficient way. To obtain more reliable information, the simulation experiments should be conducted on valid models. Validation process for simulation models is thus required. In consideration of aspects specific to modeled airports, the simulation models should be validated.

A fast-time simulation model of a Japanese airport is introduced in this paper. The modeling process such as operational rules for spot and taxi-way assignment is presented. The validation process of the model follows. Comparing the simulation result with the field observation data, the model is validated and the model proves to yield reliable simulation result. As an application of the simulation model, fast time simulation experiments are conducted on the model. The simulation is to study the consequence of air traffic volume increase on airport surface delay.

1 まえがき

今後の航空需要の増加に伴い、特に利用者の多い混雑空港においては空港面における遅延時間の増大が予想される。長時間の遅延時間の解消には滑走路や誘導路の増設など空港面の拡張が必要とされるが、拡張に際しては現在の空港面構成において交通量の増大が遅延時間に与える影響や、拡張による遅延時間の低減効果などについて事前の十分な検討が必要とされる。

高速シミュレーションは、この検討に有用な手法と成り得る。一方で信頼度の高いシミュレーション結果の取得には、妥当なシミュレーション・モデルの構築が必要である。また、モデル構築に際しては各国の航空管制方式などを考慮する必要がある。

現在までに我が国の空港面を対象としたモデルの構築および妥当性の検証は、ほとんど行われていない。一方、近年の計算機性能の発展によりパーソナル・コンピュータなどの汎用的な計算機上での高速シミュレーション実施が可能であるとともに、高精度なモデル化を可能とするシミュレーション・ツールが開発されてきている。そこで我が国の空港面を対象として高速シミュレーション・モデルを構築するとともに、その妥当性を検証した。

本稿ではモデルを構築した手順および、その妥当性の検証結果を述べる。現在、我が国における単一の滑走路を有する空港では最も過密な空港である福岡空港の空港面全体をモデル化の対象とし、構築モデル上のシミュレーション結果と実運用の観測データを比較することでモデルの妥当性を検証した。

また、構築モデルによる高速シミュレーションの例として同空港における今後の交通量の増大が空港面の遅延時間に与える影響を予測した結果を示す。

2 空港面シミュレーション・モデル

2.1 空港面管制

空港面は滑走路や誘導路、駐機場などの要素から構成される。空港面において航空機は滑走路の近傍に位置する管制塔で飛行場管制を担当する航空管制官（以下、管制官）からの指示に従い移動を行う。出発機はスポットから離脱した後指示された経路を経由して進入誘導路から滑走路手前まで進む。管制官は安全を確認した後離陸許可を与え、出発機は滑走路に進入した後離陸する。

また、滑走路に到達した到着機は指示に従って離脱誘

導路から滑走路を離脱し、指示された経路を経由してスポットに到達する。各到着機が使用するスポットは予め決められている。飛行場管制では地上走行中の航空機の衝突が生じないように管制官により判断が行われ、必要な場合には待機などの管制指示が発出される。このように空港面管制では、航空機の滑走路とスポット間の移動を担当する。

今後の航空需要の増加に伴い、特に利用者の多い混雑空港においては空港面における遅延時間の増大が予想される。現在の空港面構成における交通量増加時の遅延時間の予測が必要とされる。また、遅延時間増大の対応策として滑走路や誘導路など空港面の設備拡張が考えられるが、拡張に際しては、その効果の予測も有効である。

2.2 高速シミュレーション

空港面の設備拡張の効果予測には解析モデルや航空管制シミュレーションの適用が考えられる。単純なモデル化が可能な場合、待ち行列理論などの応用による解析モデルの適用により比較的容易に将来の条件の変化の検討が可能である。しかし、空港面全体における遅延時間の検討には通常、運用上の制約事項などに対する考慮が必要のために単純なモデル化は困難であり、航空管制シミュレーションの適用が必要とされる。

航空管制シミュレーションは、高速シミュレーションと実時間シミュレーションの2種類に分類することができる。実時間シミュレーションでは管制官役がシミュレーションの系として参加し、判断業務など実運用とほぼ同様の業務を担当するため、管制官の作業量などヒューマン・ファクタに関わる要素の検討が可能となる⁽¹⁾。一方で実時間シミュレーションは管制官役の参加を要するため、長時間のシミュレーション実施が困難であると同時に実施に要員や時間を要する。また、シミュレーション実施の準備作業に多大な時間が必要とされる。

高速シミュレーションでは、航空交通流および航空管制業務を計算機プログラムによりモデル化する。空港面を構成する各要素の配置や運用ルールの適切なモデル化により様々な条件下での遅延時間などの検討が可能となるため、将来の条件の変化に対する効率的な予測が比較的容易に可能となる。

高速シミュレーションでは、はじめに現在の状況を対象としたモデル（現状モデル）の構築が必要とされる。そして、現状モデルを基本として交通量増加時などのモデル化を行い、シミュレーションにより影響を予測す

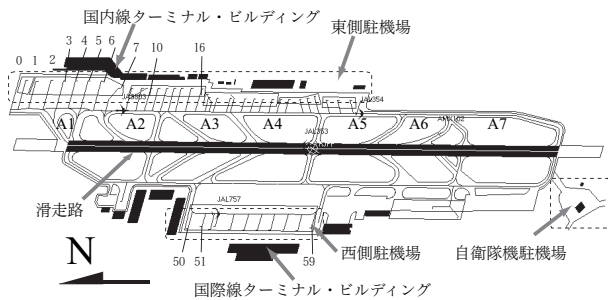


図1 空港面のレイアウト

る⁽²⁾。

シミュレーション結果はモデルの完成度に大きく依存する。このため、現状モデルの構築はシミュレーション作業において本質的な役割を担うと同時に、シミュレーション実施に際してはモデルの妥当性の検証が必要とされる。

3 モデル構築の手順

3.1 空港面レイアウト

本節では、現状モデルを構築した手順を示す。空港面レイアウトとして、空港面の構成要素である滑走路、誘導路および各スポットの配置を入力した。入力した空港面レイアウトを図1に示す。図中の番号は対応するスポット番号を表す。国内線は東側駐機場の各スポットを、国際線は西側駐機場の各スポットを使用する。また、西側には自衛隊機用の駐機場も存在する。

図中のA1～A7は誘導路の構成要素の名称を表す。本稿では滑走路の構成要素の中、特に出発機が滑走路に進入する直前に使用するものを進入誘導路、到着機が滑走路から離脱した直後に使用するものを離脱誘導路と表すこととする。

各空港の滑走路構成は風向きにより変化するが、福岡空港では北風時・南風時の2種類の滑走路構成が存在する。

3.2 交通流シナリオ

高速シミュレーションの実施には各航空機の出発時刻や到着時刻を定義する交通流シナリオ（シナリオ）の作成が必要となる。平成14年2月に記録された1日分の実運用の観測データを取得し、観測データに基づき2種類（北風時・南風時）の滑走路構成を対象としたシナリオを作成した。

各日の観測データの国内線・国際線・その他（軍用機など）の便数を表1に示す。それぞれの使用方位につい

表1 観測便数

	国内線		国際線		その他	
	出発	到着	出発	到着	出発	到着
北風	156	155	19	17	0	5
南風	167	165	22	21	7	7

て、表に示される通り、同空港では国内線の割合が非常に高く、北風時・南風時ともに9割近くを占める。

観測データより各出発機の

- スポット離脱時刻
 - 使用誘導路
 - 滑走路進入時刻
- および各到着機の
- 滑走路離脱時刻
 - 使用誘導路
 - スポット到達時刻

を得た。

一方、シナリオには

- 航空機呼出符号
- 航空機型式
- 予定出発時刻
- 予定到着時刻

といった項目が定義される。シミュレーション中、出発機はシナリオに定義された予定出発時刻に基づいてスポットを離脱し、到着機はシナリオに定義された予定到着時刻に基づいて滑走路に着陸する。シナリオ中の各予定時刻は分単位で定義した。

観測データに記録された各出発機のスポット離脱時刻をシナリオの予定出発時刻として入力した。観測データには到着機が滑走路に着陸した時刻が含まれていなかったため、以下のように各到着機の滑走路への予定到着時刻を定義した。観測データにおける到着機の滑走路占有時間の平均値が1分間程度（北風時1.2分、南風時1.0分）であることから、到着機が着陸してから滑走路を離脱するまでの滑走路占有時間を一律に1分間と仮定し、観測データに記録された滑走路離脱時刻から1分間を減じた値を予定到着時刻として入力した。

表2 航空機型式の割合

分類	北風	南風
大型	0.24	0.23
中型	0.33	0.31
小型	0.13	0.15
その他	0.30	0.31

3.3 運用ルール

3.3.1 スポット割り当て

シミュレーション実施には、各条件下での航空機の動きを運用ルールとして定義する必要がある。構築モデルでは観測データなどに基づいて運用ルールを設定した。

空港面でのスポットに関する運用ルールは以下のよう

- 使用スポット…観測データにおいて使用されていなかったスポットを使用の対象外とした。
- 国内線・国際線山T年国内線は東側駐機場に位置するスポット、国際線は西側駐機場、自衛隊機は自衛隊機駐機場に位置する各スポットを使用することとした。
- 航空機型式の割り当て…隣接するスポットとの間隔により駐機が可能な航空機の大きさが異なるため、各スポットについて使用可能な航空機型式を定義した(例。型式がB747, B777の航空機は1番から7番までのスポットのみを使用可能)。
- 優先されるスポット…国内線はターミナル・ビルディングに近い(番号が小さい)スポットを優先的に使用することとした。

3.3.2 進入誘導路

航空機型式の分類

出発機の滑走路への進入誘導路の割り当てを以下のような運用ルールで設定した。はじめにシナリオ中の航空機の各型式を観測データにおいて使用した進入誘導路に応じて、

- 大型 (B747, B777)
- 中型 (B737, MD81)
- 小型 (F50, GLF4 など)
- その他 (B767, A320 など)

に分類した。表2に、北風時、南風時の2種類のシナリオにおける各型式の割合を示す。

次いで分類した航空機の型式と使用する進入誘導路を関連付けた。観測データより型式と進入誘導路の関連付けができなかった場合や同一の型式分類で複数の進入誘導路が使用されていた場合には、観測データの値に基づ

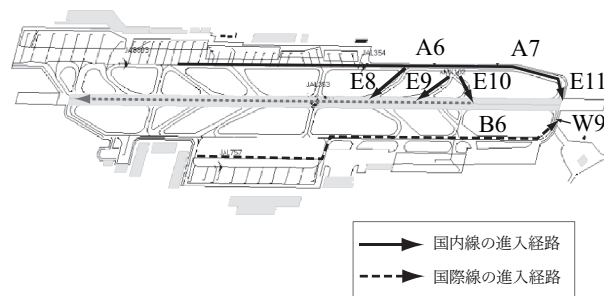


図2 北風時の進入誘導路

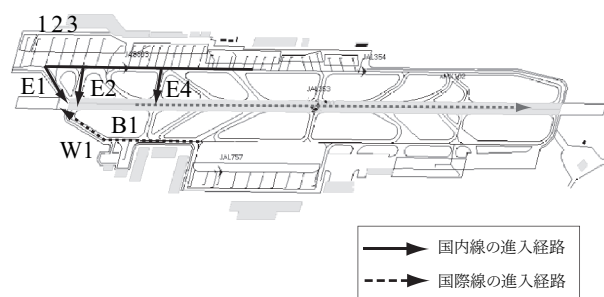


図3 南風時の進入誘導路

いて各進入誘導路の使用頻度を算出し、乱数により割り振りを行うことで観測データの使用頻度を再現した。各出発機はA1～A7など滑走路と平行な誘導路を経由して進入誘導路に到達することとした。

以下に、設定内容を滑走路構成別に示す。

北風時

図2に北風時の滑走路構成において、運用ルールで設定した進入誘導路を示す。図においてE8～E11、およびW9は進入誘導路の名称を表し、B6は誘導路の名称を表す。観測データから得られた値に基づき、北風時には小型機はE8, E9をそれぞれ30%, 70%の割合で滑走路に進入するように割り当てた。また、中型機はE10, 大型機とその他の型式はE11から滑走路に進入することとした。

国際線の出発機は、航空機型式に関わらずW9から滑走路に進入することとした。

南風時

南風時には、使用スポットと進入誘導路の関連付けを行った。図3に南風時の滑走路構成において、設定した進入誘導路を示す。国内線出発機が使用する進入誘導路については、使用スポットが1番から3番の出発機はE1から進入するようにし、それ以外のスポットを使用する出発機については小型機はE4を、小型機以外はE2

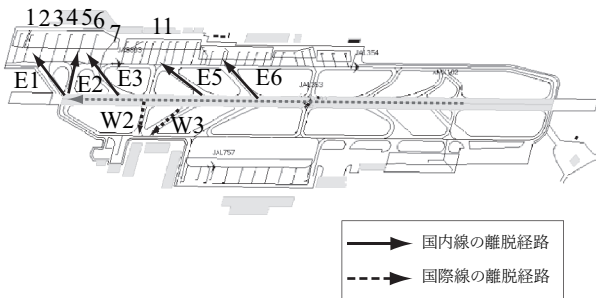


図4 北風時の離脱誘導路

から進入するように型式による割り当てた。

全ての国際線出発機はW1から進入することとした。

3.3.3 離脱誘導路

北風時

同様に到着機の滑走路からの離脱誘導路を型式の分類などに応じて運用ルールで設定した。設定内容を滑走路構成別に示す。図4に北風時の滑走路構成において運用ルールで設定した離脱誘導路を示す。図においてE1～E3, E5, E6, W2, W3は離脱誘導路の名称を表す。

観測データにおける傾向に基づき、小型機はE6を使用することとした。型式が小型機以外の場合、使用スポットと離脱誘導路の関連付けを行い、使用スポット番号が1番から3番の到着機はE1, 4番から7番の到着機はE2, 7番から10番の到着機はE3を、それぞれ使用することとした。また、11番以降のスポットを使用する到着機はE5を使用することとした。

国際線到着機に関しては使用スポットや航空機型式と離脱誘導路の関係が観測データから認められなかったため、W2, W3を50%ずつ割り当てた。

南風時

南風時の国内線到着機が使用する離脱誘導路は型式により振り分けを行った。図5に南風時の滑走路構成において運用ルールで設定した離脱誘導路を示す。図においてE7～E9, W6～W8は離脱誘導路の名称を表す。

小型機はE7, 小型機以外はE8, E9をそれぞれ乱数により70%, 30%の割合で割り当てた。また、南風時の国際線到着機は機種に関わらず、離脱誘導路としてW6, W7, W8をそれぞれ73%, 8%, 19%の割合で割り当てた。

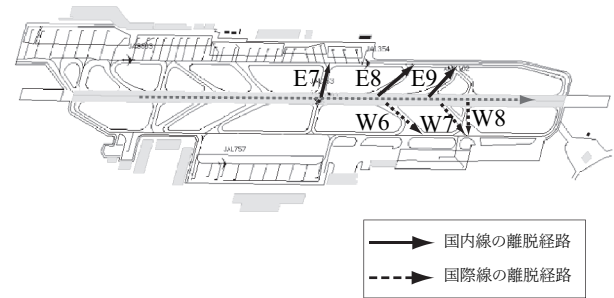


図5 南風時の離脱誘導路

3.3.4 間隔値など

表3 間隔基準値 (NM)

先行機	後続機	基準値
ヘビー	ヘビー	4
	ミディアム	5
ミディアム	ヘビー	3
	ミディアム	3

運用ルールでは、各間隔値なども設定した。出発機の離陸間隔値を5NMと設定し、予定離陸時刻に先行機との間隔が5NM未満の場合、当該出発機は離陸を待機することとした。同様に出発機と到着機の間隔値を運用ルールにおいて2NMに設定し、出発機が滑走路へ進入可能な時刻に到着機が滑走路端から2NM以内に位置している場合、出発機は、到着機が着陸後に滑走路を離脱するまで滑走路への進入を待機することとした。

到着機の着陸間隔には、先行機の運航に伴い発生する乱気流（後方乱気流）が後続機に与える影響を回避するために間隔基準値が定められている⁽³⁾。基準値は先行機と後続機の重量区分の組み合わせに応じて表3のように定められている。表においてヘビー機は最大離陸重量が136トン以上、ミディアム機は最大離陸重量が7トン以上136トン未満の航空機を表す。

単一滑走路を使用する福岡空港では到着機と出発機が滑走路を共用するため、運用ルールでは到着機の着陸間隔値を表中の値より大きな5NMに設定することで、2機の到着機が着陸する間に1機の出発機が離陸することを可能とした。

実運用では、空港へ到着機として到達した航空機の大部分はスポット到達後に出発機として離脱すると考えられる。シミュレーションでは、このような到着機と出発機の連結はモデル化の対象外とし、出発機と到着機を独立してモデル化した。ただし、乗客の乗降などによるスポットの占有のモデル化のため、到着機は到達後の20分間、出発機は離脱予定時刻の20分前から離脱までの間、

スポットを占有することとした。

また、航空機は空港面を一律に速度15ノットで走行すると仮定した。

3.4 シミュレーション・ツールの利用

構築したモデル上でのシミュレーション実施のためのツールとして、Preston Aviation Solutions 社製の TAAM (Total Airspace and Airport Modeller) Plus Version1.2を使用した。代表的な高速シミュレーション・ソフトウェアの一つである TAAM は滑走路や誘導路の配置の具体的かつ詳細なモデル化が可能である⁽⁴⁾。

また、TAAM では3.3節で示した各種の運用ルールを適用したシミュレーションの実施が可能である。

4 モデルの検証

4.1 離着陸機数

本章では構築モデルの妥当性の検証結果を示す。3.1節で記したように、モデルにおける出発機のスポット離脱時刻や到着機の滑走路到達時刻は観測データに基づいて定義したが、使用経路などの運用ルールによりシミュレーション結果における出発機の滑走路への到達時刻は観測データと異なる可能性がある。また、3.3.4節で示した各種の間隔設定値などの影響で、滑走路からの離陸機数や到着機の滑走路への着陸機数も観測データと異なる可能性がある。

同様に出発機・到着機のスポットと滑走路間の移動時間も、定義した使用経路や地上走行速度の設定により観測データと異なる可能性が存在する。そこでシミュレーション結果と観測データ間で離着陸機数および航空機の地上走行時間を比較し、構築モデルの妥当性を検証した。

北風時・南風時の各滑走路構成について、単位時間あたりの離着陸機数を比較した。図6および図7に、それぞれの比較結果を示す。各図において横軸は各時間帯(1時間単位)の始まり、縦軸は各時間帯における離着陸機数を表す。実線で構築モデル上のシミュレーション結果、点線で観測データより得られた機数を示す。若干の差異を生じる場合があるが、シミュレーション結果では離陸機数・着陸機数とも各時間帯で観測データとほぼ等しい値が得られている。

機数の増減の傾向を定量的に比較するため、1時間単位の離陸機数・着陸機数についてシミュレーション結果と観測データの間の相関値を計算した。計算ではシミュレーション結果および観測データのそれぞれより得られ

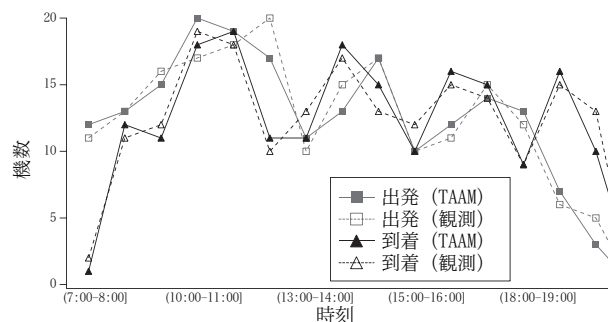


図6 離着陸機数の比較（北風時）

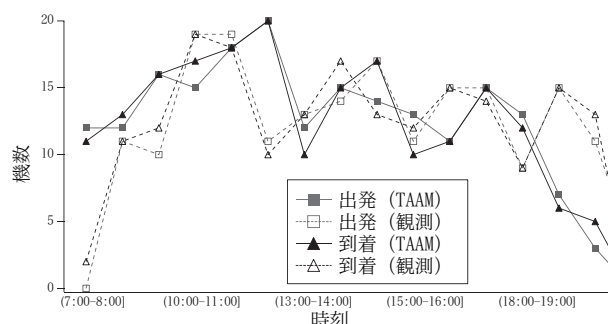


図7 離着陸機数の比較（南風時）

た各時間帯の離陸（着陸）機数をデータ列として使用した。

相関値は1に近いほど2つのデータ列の増減の傾向が近いことを表すが、計算結果からは各滑走路構成について離陸機数・着陸機数とも0.96以上の非常に強い相関が得られ、構築モデルの観測データに対する再現性は高いと考える。

表4 地上走行時間の平均値（分）

	出発		到着	
	実運用	TAAM	実運用	TAAM
北風	10.7	11.4	2.4	2.1
南風	8.0	7.3	4.3	4.6

4.2 地上走行時間

地上走行時間をシミュレーション結果と観測データで比較した。厳密な地上走行時間の検討には各機についての比較が必要となる。一方、構築モデルでは誘導路などの割り当てには一部で乱数を使用しており(3.3.2, 3.3.3参照)、観測データの厳密な再現は行っていない。このため、各機について比較した場合、シミュレーション結果より得られる地上走行時間は観測データを再現していないことが予想される。

そこで、全体の平均値に基づいて比較した。表4に出発機・到着機毎の全体の平均値の比較を示す。シミュレーション結果では、観測データとほぼ等しい平均値が得られていることを確認した。

以上のように、離着陸機数および地上走行時間を指標として、シミュレーション結果の観測データに対する再現性を検証することで構築モデルの妥当性を確認した。

5 増便の影響の予測

5.1 遅延時間

構築モデル(以下、基本モデル)による高速シミュレーションの適用例として、現在の空港面レイアウトにおいて離着陸機数を増便したモデル(増便モデル)上のシミュレーション結果を示す。影響の指標には到着機と出発機の遅延時間を用いた。本稿における遅延時間の定義を以下に示す。

出発機が滑走路から離陸するまでに生じる遅延(出発遅延)を

1. スポット遅延 (D_S)
2. 走行遅延 (D_T)
3. 滑走路遅延 (D_R)

の3種類に分類した。

出発機のスロット離脱の予定時刻にスポット近辺で他航空機が通過中の場合、出発機は他航空機の通過完了までスポット離脱を待機する。スポット遅延 D_S は、このスポット離脱に際して生じる遅延を意味する。

走行遅延 D_T は誘導路上で他の航空機との間隔維持のために生じる遅延である。地上走行中、走行経路上の前方に他航空機が存在する場合、衝突を回避するために航空機は走行経路上で停止し待機し、他航空機が移動した後には走行を再開する。この停止に伴う遅延時間が D_T に相当する。

滑走路遅延 D_R は、先行出発機、あるいは到着機により出発機が滑走路進入の待ち状態にある場合(3.3.4節参照)に生じる遅延である。出発機の滑走路進入待ち行列が発生した場合、待ち行列の先頭および2番目に位置する出発機に滑走路遅延が生じ、3番目以降に位置する出発機には走行遅延が生じることとした⁽⁵⁾。

他の航空機が存在せず遅延が発生しない場合の出発機の地上走行時間を T_{jk} と表す。ここで j は使用するスポット、 k は使用する進入誘導路に対応し、使用するスポット、進入誘導路により T_{jk} の値は異なる。スポット j を離脱して進入誘導路 k を使用する出発機 i の予定スロ

ット離脱時刻を t_{S_i} と表すと、同出発機の滑走路離陸時刻 t_{D_i} は

$$t_{D_i} = (t_{S_i} + D_{S_i}) + (T_{jk} + D_{T_i}) + D_{R_i}$$

と表される。上式中で $(t_{S_i} + D_{S_i})$ は出発機 i のスポット離脱時刻、 $(T_{jk} + D_{T_i})$ は地上走行所要時間、そして、 $(t_{S_i} + D_{S_i}) + (T_{jk} + D_{T_i})$ は滑走路到達時刻を表す。ここで D_{S_i} , D_{T_i} , D_{R_i} は出発機 i に発生した走行遅延時間、スポット遅延時間、滑走路遅延時間のそれぞれを表し、遅延が全く発生しない場合には

$$t_{D_i} = t_{S_i} + T_{jk}$$

となる。

本稿では、出発遅延時間を

- 誘導路遅延時間 ($D_S + D_T$)
- 滑走路遅延時間 (D_R)

に大別して扱う。

到着機のスロット離脱からスポット到達までの遅延(到着遅延)は走行遅延のみにより生じる。離脱誘導路 k よりスポット j に到達する到着機 i の滑走路離脱時刻を t_{L_i} 、遅延が発生しない場合の地上走行時間を T'_{jk} と表すと、スポット到達時刻 t_{A_i} は

$$t_{A_i} = t_{L_i} + T'_{jk} + D_{T_i}$$

となる。

国内線出発機の離脱スポット位置が誘導路遅延時間に与える影響を検討するために、国内線が使用する東側駐機場に配置された各スポットを位置に応じて

- 0～6番スポット
- 7～16番スポット
- 17番以降のスポット

の3つのグループに分類し、各グループの誘導路遅延時間(走行遅延時間 D_T とスポット遅延時間 D_S)の基本モデルにおける平均値を計算した。計算結果を図8および図9に示す。

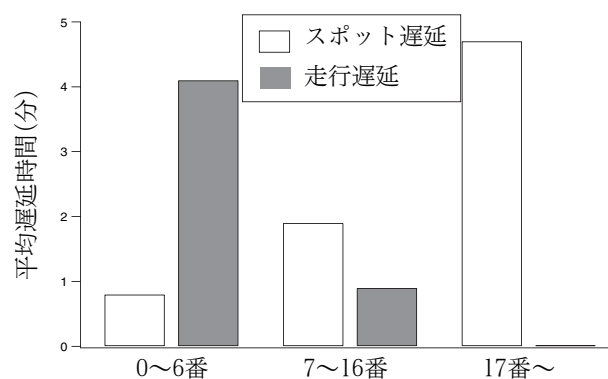


図8 スポット位置による地上面遅延時間の内訳
(北風時・基本モデル)

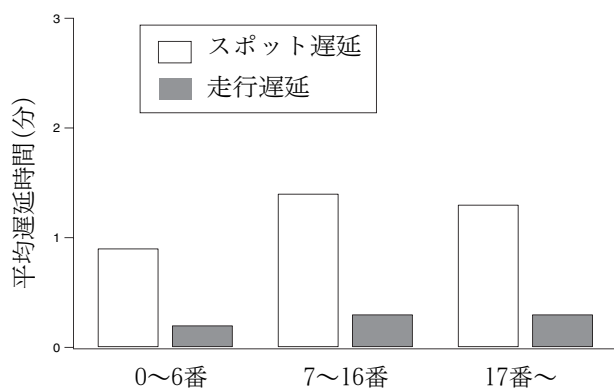


図9 スポット位置による地上面遅延時間の内訳
(南風時・基本モデル)

北風時には進入誘導路から遠くに位置する0～6番スポットの走行遅延時間 D_r が大きい一方で、進入誘導路近くに位置する17番以降のスポットではスポット遅延時間 D_s が大きい傾向や、南風時にはスポット遅延時間 D_s の割合が高い傾向を確認できる。

5.2 データの準備

5.2.1 増便シナリオの作成

単一滑走路において出発機と到着機が交互に滑走路を使用する場合の単純な物理的容量を34機/時と仮定して、年間交通量に換算すると約17万回相当となる。物理的容量の前後の遅延時間を検討するために、

- 年間交通量約16万回（以下、16万回モデル）

- 年間交通量約18万回（以下、18万回モデル）

の2種類の増便モデルを作成した。各増便モデルにおいて、空港面レイアウトは基本モデルと同様とした。なお、観測データが記録された平成14年の福岡空港の年間交通量は約14万回である。

以降では基本モデルのシミュレーション結果として、北風時・南風時ともに共通して滑走路構成が南風時の観測データに基づくシナリオによる結果を示す。

各増便モデルは1日分の運航をシナリオとして含み、空港の運用時間を考慮して全ての航空機の予定出発時刻あるいは予定到着時刻は8時から22時の範囲に収まるように調整した。基本モデルのシナリオへ、それぞれの増便数に対応した数の航空機を追加することで各増便モデルのシナリオを作成した。追加した航空機の予定出発・到着時刻は乱数により割り振りをを行った。表5に各モデル中のシナリオの便数内訳を、表6に各型式の分類の割合を示す。

表5 各モデル中の便数

モデル	国内線		国際線		その他	
	出発	到着	出発	到着	出発	到着
基本	167	165	22	21	7	7
16万回	191	188	24	25	6	8
18万回	217	217	26	23	6	8

表6 各モデル中の航空機型式の割合

モデル	大型	中型	小型	その他
基本	0.23	0.31	0.15	0.31
16万回	0.22	0.31	0.15	0.32
18万回	0.22	0.32	0.16	0.30

5.2.2 運用ルール

増便モデル中の運用ルールは、原則として基本モデルと同様としたが、以下のような部分的な変更を加えた。増便によるスポット数の不足が予想されたために、全てのスポットを使用可能とした。また、増便による空港面の過度の混雑を回避するためにスポット離脱から離陸待ちの状態までにある出発機が空港面に同時に存在する機数は10機を超えないものとした。管制官が監視可能な値として、ここでは10機という数値を使用した。シミュレーション実施中に同時機数が10機に達している場合には、いずれかの出発機が離陸するまで新たな出発機のスポット離脱は遅延され、この遅延時間は該当する出発機のスポット遅延時間に加えられることとした。明確なルールが認められなかったために、誘導路の割り当てルールの一部では乱数を使用して観測データにおける各誘導路の使用比率を再現している。結果的に今回の運用ルールでは各誘導路の使用比率を固定した運用を想定したシミュレーション結果となる。一方で、実運用では各航空機の状態に応じた割り当てが行われ、その結果として誘導路の使用比率が観測データより得られた値となっている可能性も存在する。このため、実運用において離着陸機数が増加した場合とシミュレーション結果では差異が生じる可能性が存在する。

5.3 シミュレーション結果

5.3.1 北風時

シナリオ全体より得られた出発遅延時間（誘導路遅延時間 $D_s + D_r$ ）および滑走路遅延時間 D_R の各平均値の比較を表7に示す。18万回モデルでは特に誘導路遅延時間が大きなものとなるが、誘導路遅延時間の1時間単位の

表7 北風時の出発遅延時間の平均値 (単位: 分)

モデル	標本数	誘導路	滑走路	合計
基本	196	4.1	4.5	8.6
16万回	221	8.3	5.7	14.0
18万回	249	57.8	13.2	71.0

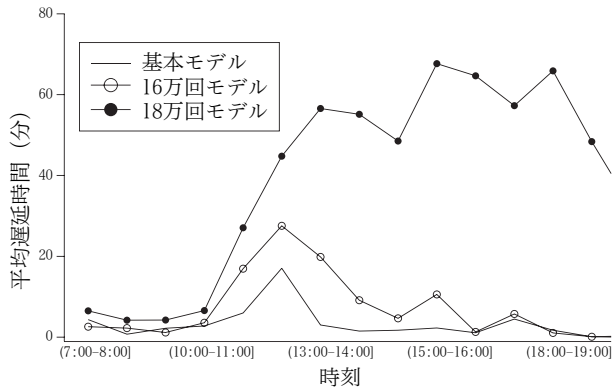


図10 増便による誘導路遅延時間の比較 (北風時)

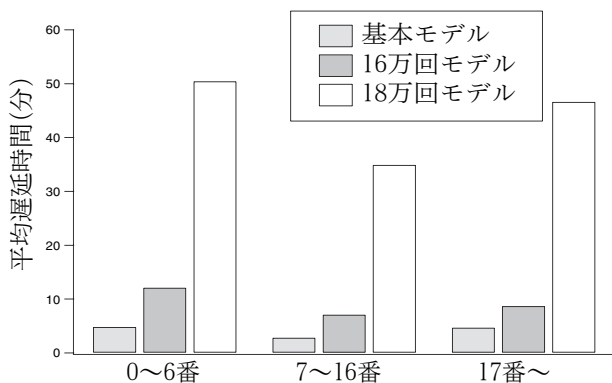


図11 スポット位置による誘導路遅延時間の内訳 (北風時・18万回)

平均値の比較を図10に示す。図において横軸は時間帯の始まりを表し、縦軸は各時間帯における平均値を表す。増便により誘導路遅延時間は増大し、18万回モデルでは11時以降、恒常的に長時間の誘導路遅延が発生する。

誘導路遅延時間の平均値を、図8などと同様にスポット位置により分類した (図11)。各グループとも遅延時間が増大していることが確認できる。

18万回モデルでは長時間の誘導路遅延が発生したが、長時間の走行遅延 D_T が発生するボトルネック箇所を検討するために誘導路上で発生した走行遅延時間 D_T の平均値の18万回モデルと基本モデル間の比較を図12に示す。なお、A1～A5上で発生する走行遅延時間の平均値は全て0.3分間未満であるため表示を省略する。A7上での差は20分間程度と非常に大きな値となり、増便によ

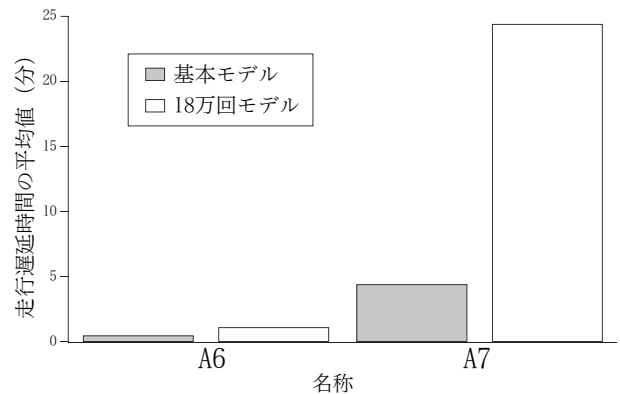


図12 進入誘導路別の出発機の走行遅延時間の平均値

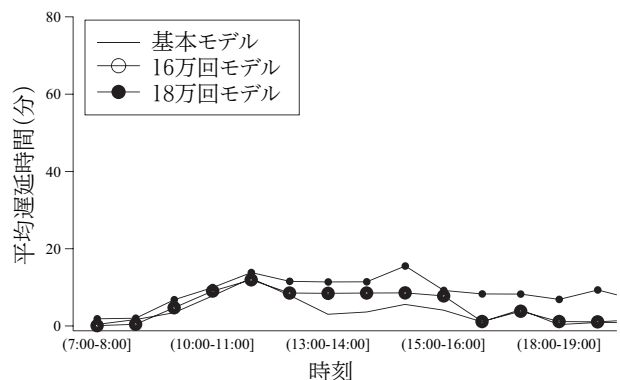


図13 増便による滑走路遅延時間の比較 (北風時)

る影響が特に A7 上で大きく現れることがわかる。

表6に示すように、各シナリオでは大型機と“その他”に分類される航空機型式の割合は半数以上となる。滑走路への進入経路の設定ルールでは、それらの型式の航空機はE11を使用するようにした (3.3.2 参照)。結果として半数以上の出発機がE11を使用したため、E11に接続するA7上で出発機の待ち行列が生じ、18万回モデルではA7上での長時間の走行遅延時間が発生した。

滑走路遅延時間 D_R の1時間単位の平均値の比較を図13に示す。滑走路遅延 D_R は出発機の待ち行列の先頭2機までに発生する遅延としているため、到着機の着陸待ち・先行機の離陸待ちが主要な原因となる。このために、本稿における遅延時間の分類においては、増便による出発機の待ち行列機数の増加は滑走路遅延 D_R には大きく影響を与えず誘導路遅延への影響が大きいことが確認できる。

到着遅延時間の1時間単位の平均値の比較を図14に示す。到着遅延時間の総平均は18万回モデルにおいても0.4分間未満であり、増便が到着遅延時間に与える影響は非常に小さい。この理由としては、使用スポットに応じて一意に離脱誘導路を関連付けたため、さらには使用ス

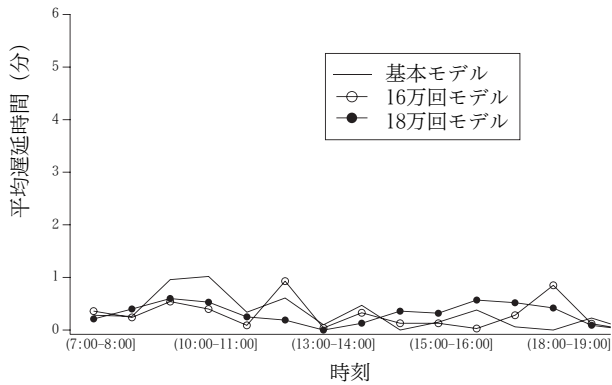


図14 増便による到着遅延時間の比較（北風時）

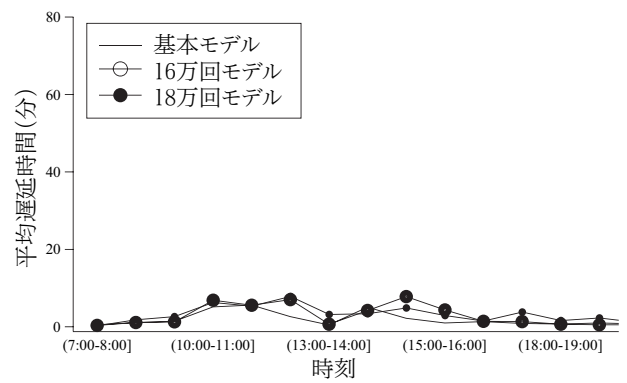


図16 増便による滑走路遅延時間の比較（南風時）

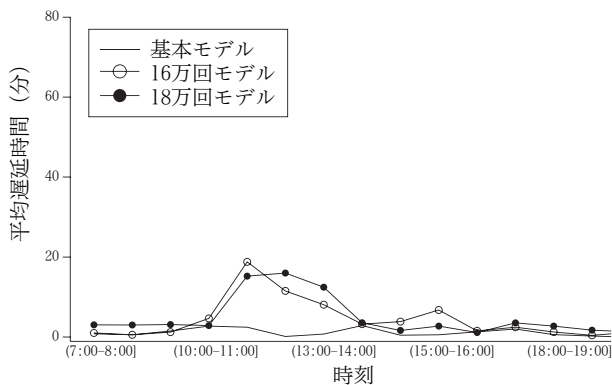


図15 増便による誘導路遅延時間の比較（南風時）

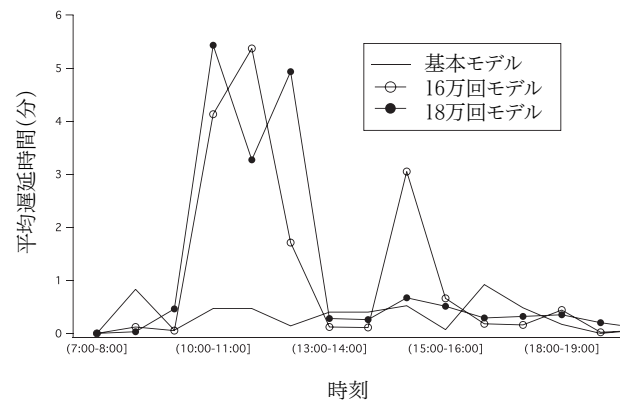


図17 増便による到着遅延時間の比較（南風時）

ポットに近い誘導路を割り当てたためなどの事項が理由として考えられるが、理由の特定には、条件変更の範囲を離脱誘導路の割り当てルールのみに限定したシミュレーション結果の比較が必要である。

5.3.2 南風時

出発遅延時間 ($D_S + D_T$ および D_R) の全体の平均値の比較を表7に示す。また、誘導路遅延時間の1時間単位の平均値の比較を図15に示す。図の意味は図10と同様である。北風時と異なり、増便が誘導路遅延時間に与える影響は比較的小さい。

この理由として、出発機はスポット離脱予定時刻の20分前から到着機も到達後20分間スポットを占有したために単位時間にスポットを離脱する出発機数は制限され増便モデルにおいても特定の誘導路の構成要素上で出発機が集中することはなく長時間の遅延が生じなかった可能性がある。他にスポットと進入誘導路の移動距離が短いことによる影響の可能性も存在する。理由の特定には北風時の離脱誘導路と同様に、変更の範囲を進入誘導路の割り当てルールに限定したシミュレーション結果の比較が必要である。

滑走路遅延時間 D_R の1時間単位の平均値の比較を図

表8 南風時の遅延時間の平均値（単位：分）

モデル	標本数	誘導路	滑走路	合計
基本	196	1.3	2.4	3.7
16万回	221	5.2	3.4	8.6
18万回	249	5.6	5.6	11.2

16に示す。北風時と同様に増便による影響は、誘導路遅延よりも小さいものとなる。

到着遅延時間の1時間単位の平均値の比較を図17に示す。増便の影響を受けて最大で5分間程度、到着遅延時間は増大する。到着機は先行機に対して一定の着陸間隔を与えられて滑走路に到達したため、増便が到着遅延時間に与える影響は比較的小さくなったと考える。

本節では、構築モデルの適用例として、増便時の遅延時間への影響の検討結果を示した。増便モデルのシミュレーションでは運用ルールとして基本モデルとほぼ同一のものを使用した。各種のルールを変更した場合の増便による影響の変化の予測もシミュレーションでは容易に可能である。

6 おわりに

本稿では、我が国の空港面を対象とした高速シミュレーション・モデルの構築手順と妥当性の検証結果を示した。モデルの構築においては実運用の観測データにある程度基づいた運用ルールを設定することで、再現性の向上を図った。妥当性を検証し、単位時間あたりの離着陸機数の相関が非常に高いことや地上走行時間の平均値がほぼ等しいことから、モデルの観測データに対する再現性を確認した。

遅延時間は運用方式により大きく変化することが予想されるが、高速シミュレーションでは運用方式の変化が与える影響の予測が容易に可能である。また、拡張時の空港面レイアウトについても、構築モデルのレイアウトを拡張案へ変更した後のシミュレーション実施により効果の予測が同様に可能となる。このように実運用をある程度再現したモデル化により、様々な条件下での空港面の交通予測が高速シミュレーションにより容易に可能となることが示された。

構築モデルの適用の一例として、同モデル上で離着陸機数を増便した増便モデル上でのシミュレーション結果を示した。シミュレーションでは現在の空港面レイアウト上で増便が与える影響の予測とともに長時間の遅延が発生する誘導路箇所の検討を行った。

なお、本稿で対象とした空港以外についても同様の手順でモデル化を行い、シミュレーションを実施することで拡張の効果などの効率的な検討を可能とする見通しを得ることができた。

謝辞

シミュレーション実施に際して観測データなどのご提供を頂いた株式会社日本工営様、国土交通省九州地方整備局様など関係各位に感謝いたします。

参考文献

- [1] 福島幸子，東福寺則保：“ターミナル空域における到着機の管制処理に関する一考察，” 日本航空宇宙学会誌，Vol. 43, No. 497, pp. 367-373, June 1995.
- [2] A. L. Politano, M. Flores, D. E. Winter and H. C. Czech: “Toward Making the NAS More Productive: GPS-Enabled Direct Routing in the New England Region,” Air Traffic Control Quarterly, Vol. 4, No. 2, pp. 81-107, 1997.
- [3] 国土交通省航空局（編）：管制方式基準（加除式）．鳳文書林出版販売，東京，1988-.
- [4] A. R. Odoni, J. Bowman, D. Delahaye, J. J. Deyst, E. Feron, R. J. Hansman, K. Khan, J. K. Kuchar, N. Pujet and R. W. Simpson: Existing and Required Modeling Capabilities for Evaluating ATM Systems and Concepts, Technical Report, Modeling Research under NASA/AATT and MIT/ICAT, Boston 1997.
- [5] Preston Aviation Solutions: TAAM Reference Manual V1.2, Victoria, 2001.
- [6] 蔭山康太：“高速シミュレーションによる空港面の容量評価の一方法，” 日本航空宇宙学会誌，Vol. 54, No. 630, July 2006.