

3. 高速シミュレーションによる到着機処理の比較

航空交通管理領域 ※蔭山 康太, 秋永 和夫, 宮津 義廣

1 はじめに

航空交通管理の性能（パフォーマンス）向上などを目的とした新たな施策の導入に際しては、便益や運用に与える影響などの事前推定が重要となる [1]。高速シミュレーションは迅速な結果の取得が可能であり事前評価に有効な手法であるが、信頼性の高い結果の取得には妥当性（実運用の再現性）の高いモデルの構築が必要とされる [2]。到着機処理のシミュレーション・モデルを構築し、施策の導入が運用に与える影響の事前評価を行った。到着機の円滑な運航の実現は我が国の航空交通管理の長期ビジョンにおいて重要な課題の一つである [3]。

シミュレーションから得られる推定結果は相対比較に基づくが、信頼性の高い推定には、ある程度のモデルの妥当性（再現性）が必要である。そこで、運航実績との比較によりモデルの妥当性を検証した。検証したモデルに基づき、ポイント・マージと呼ばれる到着機の処理方式を例として施策の導入が運用に与える影響を予測した。

2 モデルの構築

我が国の国内線の主要な空港である東京国際（羽田）空港への到着機の流れの概略を図1に示す。同空港への到着機は大きく北と西の2つの方向から進入する。この2本の交通流はそれぞれ別個の着陸滑走路を使用する。着陸滑走路毎に多方向から進入する到着機の流れを1本にまとめ、かつ先行機と後続機の間で定められた間隔を維持する必要がある。2本の交通流は分離されているため、独立したシミュレーションが可能である。到着機の70%以上が使用する西方向からの交通流を対象として、羽田空港における現在の到着機処理をモデル（現状モデル）化した。

運航実績が記録されたレーダ・データを用いて、交通流シナリオ（以下、シナリオ）を作成した。シナリオでは、シミュレーション中の到

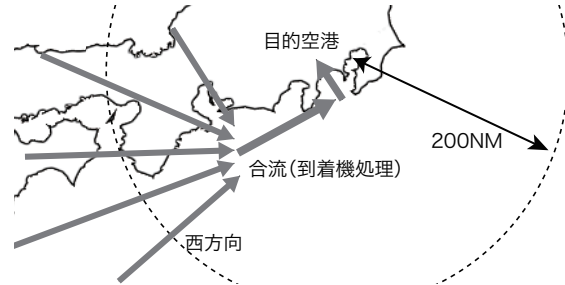


図1 羽田空港の到着機の流れ

着機の出現時刻・位置・高度や予定飛行経路が必要とされる。羽田空港から半径200NM以内の範囲をモデル化の対象として、この範囲に到着機が進入した時刻、位置および高度をレーダ・データより取得し、出発空港に応じて各到着機の予定飛行経路を割り当てた。

風向き（北風・南風）により交通流は大きく異なるため、各風向きを対象としてシナリオを作成した。北風時の12日間分、南風時の6日間分、のべ18日間分のレーダ・データを取得し、1日分のデータより1シナリオ、のべ18シナリオを作成した。各シナリオには約320飛行の到着機が定義される。レーダ・データを解析し、レーダ誘導が可能な範囲、目的空港における最終進入経路上の間隔の最短値などの運用条件を推定した。現実の運用では気象条件や交通流の状況に応じて、これらの条件は変動する可能性があるが、シミュレーションでは全てのシナリオに一定の値を適用した。

航空機の上昇・降下率や飛行速度などを定義する航空機特性データとして、ユーロ・コントロールで開発・保守が行われているBADA（Base of Aircraft Data）を用いた [4]。高層風の風向・風速は到着機の対地速度に影響する。対地速度の再現性向上のため、記録日に対応した高層風データを取得した。風向・風速は時間帯により変動し得るが、各シナリオに対して日本時間で午前9時の記録データを1日を通じて適用した。構築したモデルによるシミュレーションのソフトウェアとして、ベルギー国 AirTOP SA 社の

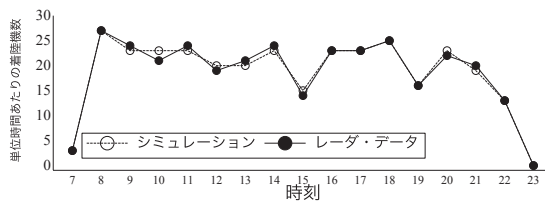


図 2 単位時間あたりの着陸機数の比較例

製品である AirTOp V2.3（以下、AirTOp）を使用した。AirTOp は順序・間隔付けなど到着機処理の詳細なモデル化を可能とする [5]。

3 妥当性の検証

現状モデルの妥当性を検証した。シミュレーション開始時の到着機の時刻・位置および高度はレーダ・データに基づく一方、シミュレーション中の到着機の位置や高度の推移は設定した運用条件や航空機特性データから決定される。

運用条件や航空機特性データの実運用に対する再現性の検証を目的として、シミュレーション結果とレーダ・データを比較した。単位時間あたりの着陸機数、飛行時間、飛行距離そして降下プロファイルを指標とした。以下に比較結果の一例を示す。

図 2 に、1つのシナリオより得られた単位時間あたりの着陸機数の比較を示す。図において横軸は各時間帯（1時間単位）の始まりを表し、縦軸は各時間帯における着陸機数を表す。実線でレーダ・データ、点線でシミュレーション結果より得られた値を示す。時間帯により1機から2機の差異が生じるが、シミュレーション結果からはレーダ・データとほぼ等しい単位時間あたりの着陸機数が得られており、増減の傾向も類似していることが表される。

増減の傾向を定量的に比較するため、時間帯毎の着陸機数についてシミュレーション結果とレーダ・データ間の相関係数（積率相関係数）をシナリオ毎に算出したところ、範囲は0.97~0.99となり、シナリオに関わらず増減の傾向が近いことが示される。

図 3 に1つのシナリオより得られた飛行時間の相対度数分布の比較例を示す。出現から滑走路近傍の最終進入点到達までの所要時間が飛行時間となる。分布の形状に若干の違いはあるが、シミュレーション結果における飛行時間の範囲

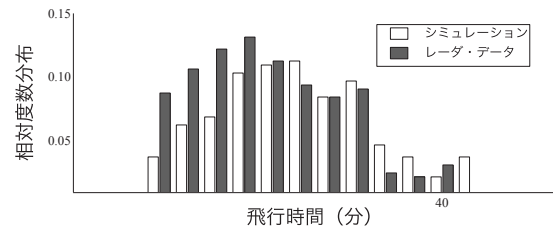


図 3 飛行時間の相対度数分布の比較例

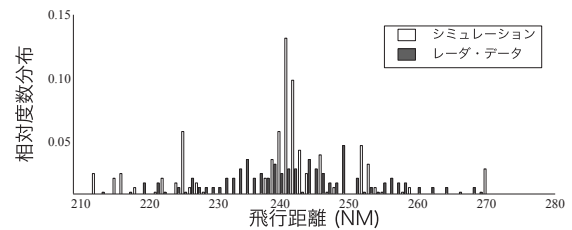


図 4 飛行距離の相対度数分布の比較例

はレーダ・データとほぼ等しい。他のシナリオ上での比較結果からも同様な類似性が確認された。

飛行距離の相対度数分布の比較は図 4 のようになる。同じシナリオである図 3 と異なり、シミュレーション結果とレーダ・データの分布に大きな違いが認められる。これは、AirTOp のレーダ誘導モデルでは航跡の組み立て方が実運用と異なるためである。羽田空港では大幅なレーダ誘導もありえることがレーダ・データから確認されている [6] が、AirTOp は滑走路近傍のレーダ誘導のみをモデル化しており、航跡が蛇行するような大幅な誘導の表現は不可能である。飛行距離の再現性の向上には、航跡の組み立ての表現について検討が必要である。

降下プロファイルの比較を目的として、羽田

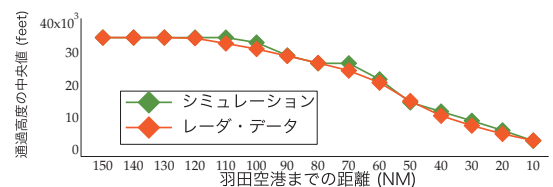


図 5 通過高度の中央値の比較例

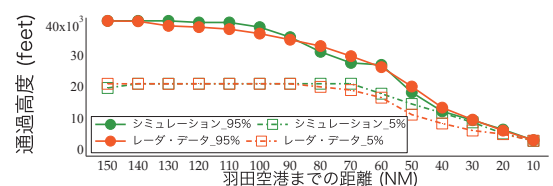


図 6 通過高度の範囲の比較例

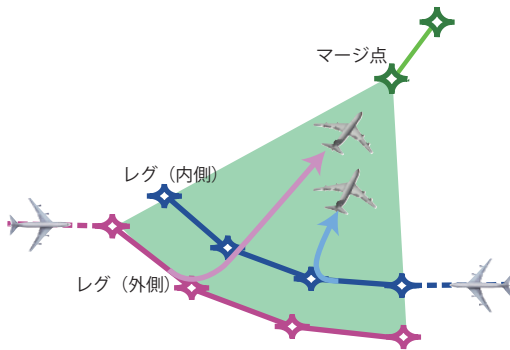


図7 ポイント・マージの経路構成

空港の標点までの距離が150NMから10NMまでの範囲において10NM間隔で通過高度を抽出した。1つのシナリオより得られた通過高度の中央値を図5に、範囲（5%値と95%値）を図6に示す。シミュレーション結果より得られる通過高度の中央値と範囲はレーダ・データより得られる値に近い。

以上の比較から、飛行距離を除いた各項目でシミュレーション結果の実運用に対する再現性が高いことが示された。

4 施策の検討

4.1 モデル化する施策

本章では、到着機処理の施策が運用に与える影響の検討例を紹介する。ポイント・マージ（Point Merge）と呼ばれる施策をモデル化した。ユーロコントロールで開発されたポイント・マージは、P-RNAV（Precision RNAV）の活用により現在のレーダ誘導を代替する到着機の合流手法である[7]。ポイント・マージにおいて到着経路は合流点（マージ点）および合流点を中心点とする円弧であるレグより構成される（図7）。初めに、各到着機はレグ上を指定された一定の高度で飛行する。FMS（Flight Mangement System）機能の活用により単純な指示でレグ上の飛行は可能である[8]。先行機との間隔が確保された時点で到着機はマージ点へ直行し、降下を開始する。直行以降は速度調整により先行機に対する間隔は維持される。

ポイント・マージの導入により期待される便益として①管制作業の単純化による通信量および作業負担の軽減、②予測性の向上による安全性の確保などがある。同時にレグよりマージ点

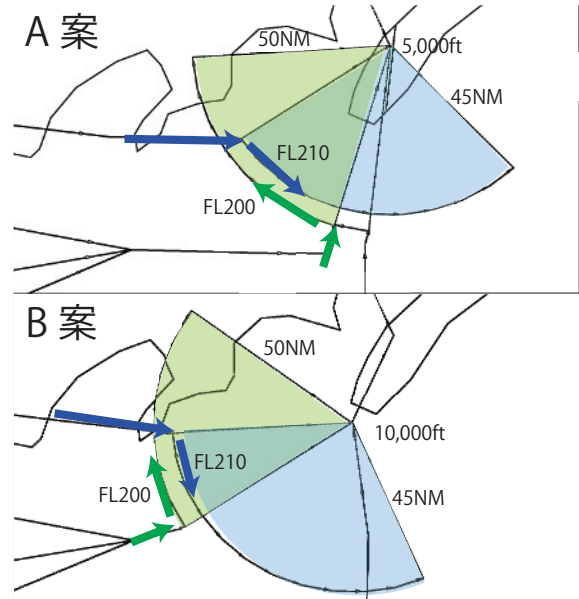


図8 モデル化した経路設計

までの連続的な降下の実現による効率の向上の可能性もある[8]。今回の妥当性の検証作業では、通信量や作業負担については対象としていない。また、予測性を高速シミュレーションで定量的に表現する手法は現在までに確立していない。このため、上記のポイント・マージの便益に対する信頼性の高い推定は困難である。

一方、レーダ誘導に比して自由度が制限されることから、ポイント・マージの導入により飛行時間や燃料消費の増大など便益低下の可能性も考えられる。そこで、ポイント・マージの導入が飛行時間や燃料消費に与える影響を高速シミュレーションにより検討した。

4.2 代替案の検討

経路設計が異なる2種類（A案、B案）のポイント・マージをモデル化し、シミュレーション結果を比較した。経路は当所独自の設計であり、他空港の交通流などによる制約は考慮していない。2種類の経路設計ではレグの半径やレグ上の飛行高度は同一であるが、レグおよびマージ点の位置およびマージ点の通過高度は図8のように異なる。A案と比較してB案ではレグおよびマージ点が羽田空港から離れて位置しており、マージ点上の通過高度も高い。羽田空港への到着機の巡航高度を考慮してレグ上の通過高度を決定し、決定した値は2つのモデルで共通とした。レグ上からマージ点への直行はレグの円弧

上で10度間隔で設定した地点上のみで可能とした。現状モデルの到着経路の変更により、モデルを作成した。

北風時の滑走路構成の11のシナリオ上でシミュレーションを行い、飛行時間と燃料消費を比較した。シナリオ毎の飛行時間の平均値と標準偏差の比較を図9に示す。A案では現状モデルと飛行時間がほぼ等しい。一方、B案は2.7分間から8.3分間の範囲でA案と比較して飛行時間が増大する。到着機はレグ上を指定された高度で飛行するため、レグ到達までに指定高度まで降下する必要がある。レグが羽田空港から遠くに位置するB案では早期の段階から降下開始が必要となる。降下により、より早く対地速度が低下する結果、B案の飛行時間は増大する。以上のようにシミュレーション結果からは、ポイント・マージでは経路の配置により到着機処理の局面における飛行時間が増大する可能性が示された。飛行時間の増加は空港の処理容量を低下させる可能性がある。

AirTOpはシミュレーション中の運航の消費燃料を推定する機能を有する。推定にはBADAの定義値を用いる。この機能を用いて2種類のポイント・マージの経路案による燃料消費を比較した（図10）。比較は、モデル化の範囲である羽田空港から半径200NM以内での飛行を対象とする。ほぼ全てのシナリオにおいてB案はA案より10%程度、燃料消費が低下する。B案では飛行時間はA案より長い、前述の早期の降下開始により推力が早い段階で絞られる結果として燃料消費が少なくなる。

5 おわりに

本稿では到着機処理のシミュレーション・モデルの再現性の検証結果、検証したモデルの適用例としてポイント・マージの導入が運用に与える影響の予測結果を示した。検証からは実運用の再現性を確認し、シミュレーションによる事前評価の見通しを得ることができた。運用に与える影響の予測からは、ポイント・マージ経路の設計は飛行時間や燃料消費に影響を与えることを確認した。作業負担や状況認識などのシミュレーション・モデル化により、ポイント・マージの導入の影響の包括的な予測が可能となる。

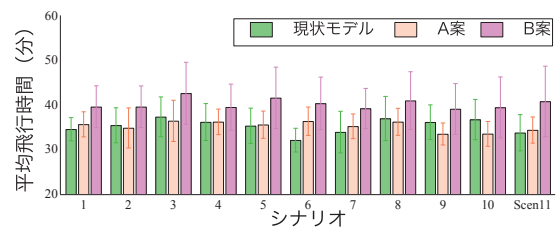


図9 飛行時間の平均

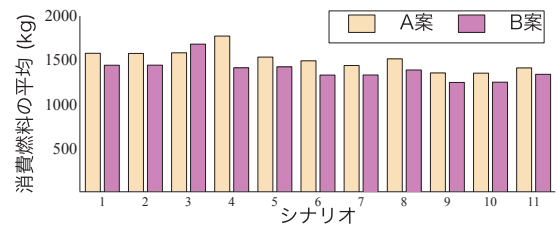


図10 燃料消費の平均

謝辞

運用実績データのご提供を頂きました国土交通省の関係各所の各位のご協力にお礼を申し上げます。

参考文献

- [1] D. N. Sweet, V. Manikonda, J. S. Aronson, K. Roth, M. Blake : Fast-time simulation system for analysis of advanced air transportation concepts AIAA MST Conference and Exhibit, 2002.
- [2] S. Shresta, R.H. Mayer, Modeling of air traffic arrival operations through agent-based simulation, Proc. of the 2008 Winter Simulation Conference, 2008.
- [3] Japan Civil Aviation Bureau, the Ministry of Land, Infrastructure and Transport and Tourism, Japan : CARATS: Long-term vision for the future air traffic system, 2010.
- [4] Eurocontrol, User Manual for the base of aircraft data (BADA) rev. 3.8, 2010.
- [5] AirTopsoft SA., <http://www.airtopsoft.com/tma.html>.
- [6] 岡恵, 福田豊, 蔭山康太, 宮津義廣, "時間管理運用における入域時間の調整幅について," 電子航法研究所研究発表会講演概要, 2012.
- [7] Eurocontrol, <https://www.eurocontrol.int/services/point-merge-concept>.
- [8] D. Ivanescu, C. Shaw, C. Tamvaclis, Models of air traffic merging techniques: evaluating performance of point merge, 9th AIAA ATIO Conference, 2009.