

24. 高速シミュレーションによるターミナル空域内遅延時間の一検討

管制システム部 ※蔭山 康太

1 はじめに

増大する航空需要への対応を目的として、新空港の建設や新たな航法技術の導入が進められている。これらの効果を最大限にするためには、航空管制運用方式や空域設計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では、航空管制運用方式や空域設計が航空交通流に与える影響を容易に検討することが可能であり、事前の検討に有用な手法となりうる。

本稿では、高速シミュレーションによるターミナル空域内遅延時間の検討結果を、そのシミュレーション・モデル化の手順とともに示す。

2 航空交通管制シミュレーション

航空交通管制シミュレーションは、実時間シミュレーションと高速シミュレーションに大別することができる。実時間シミュレーションでは、航空管制模擬システムの一要素として航空管制官が参加し、航空管制業務を模擬することが一般的である。当研究所においてもターミナル管制、エンルート管制を対象とした実時間シミュレーション施設の整備が進められてきた [1]。

高速シミュレーションではコンピュータ・プログラムなどにより、航空交通流および航空管制業務がモデル化される。そして、圧縮された時間枠でモデルに基づいて航空交通流が模擬される。実時間シミュレーションでは本質的に航空管制官の参加が不可欠であるのに対して、高速シミュレーションでは人的要因は十分に含まれていない。このため、航空管制官の作業負荷に代表されるヒューマン・ファクタに関する研究では、高速シミュレーションは多用されていない [2]。

その一方で、人間の介在を必要としないために長時間の航空管制業務などの模擬が可能であることや、圧縮された時間枠で実施されるために多数回のシミュレーション実施が可能であることなどの理由により、高速シミュレーションは航空交通流の効率性を検討するのに適している。通常、高速シミュレーションは航空管制運用方式や空域設計の代替案間での相対評価に用いられる。効率性の指標としては、主に航空機の遅延時間が用いられる。

本シミュレーションでは、Preston Aviation Solutions 社製の TAAM (Total Airspace and Airport Modeller) Plus Version1.1.2（以下、TAAMと記す）を高速シミュレーション・ソフトウェアとして使用した。TAAMは大規模、かつ高精度なモデル化を可能とするソフトウェアである [3]。

3 対象ターミナル空域のモデル化

3.1 モデル化する進入方式

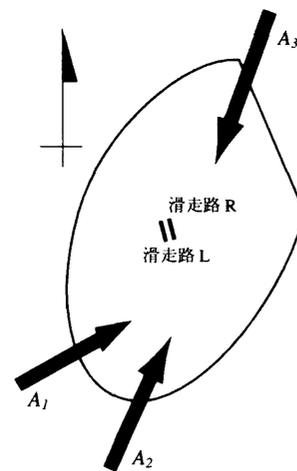


図 1: ターミナル空域境界線と到着機の流れ

本シミュレーションでは、同時進入方式の導入による到着機のターミナル空域内での遅延時間への効果を検討した。図 1 に対象とするターミナル空域境界線と到着機の流れを記す。図において、太線の矢印は到着機の流れを表す。到着機は南側の A_1, A_2 、および北側の A_3 の 3 方向から進入し、原則として予め定められた標準経路上を飛行して滑走路へ到達する。本ターミナル空域では、2 本の滑走路（以下、それぞれの滑走路を滑走路 R、滑走路 L と記す）が使用される。

同時進入方式における滑走路割り当て手法には、航空会社毎の割り当てや進入方向による割り当てなどが考えられる。本シミュレーションでは滑走路 R を A_3 方向から進入する到着機および出発機用に使用し、同滑走路 L をそれ以外の方向から進入する到着機専用に使った場合をモデル化した（図 2 参照）。本モデルでは出発機の予定離陸時刻に滑走

路 R への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、その到着機が着陸して滑走路を離脱するまで地上待機を行うこととした。

相対評価のために、滑走路 L を到着機専用、滑走路 R を出発機専用とする専用滑走路方式もモデル化し（図3参照）、シミュレーション結果を比較した。専用滑走路方式では、到着と出発は独立に実施されるものとした。

モデル化された同時進入方式では、滑走路 R において出発機が到着機のために地上待機を行う場合が生じるため、出発機の遅延時間の増大が予想される。単位時間毎の到着機数および出発機数は時間帯に応じて変化するため、時間帯に応じて進入方式を変更することで、より全体の遅延時間減少の効果が大きくなると考えられる。しかし、本シミュレーションでは到着機の遅延時間を主たる検討対象とし、各モデルにおいて進入方式は固定とした。

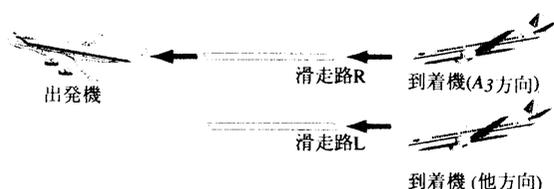


図 2: 同時進入方式

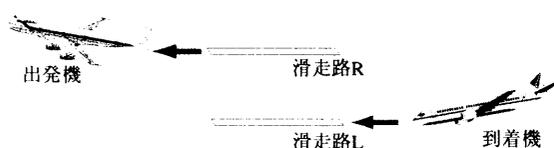


図 3: 専用滑走路方式

3.2 交通流シナリオの作成

航空交通管制シミュレーションの実施に際しては、管制の対象となる各航空機の飛行経路や巡航高度、機種などの飛行情報を定義した交通流シナリオを作成する必要がある。本ターミナル空域における、ある1日分の運航ダイヤに基づいて基準となる交通流シナリオ（以下、シナリオ1と記す）を作成した。また、シナリオ1に基づいて交通量を30%程度増加したシナリオ（シナリオ2）、および50%程度増加したシナリオ（シナリオ3）も作成した。表3.2に各シナリオ中での出発・到着機数を

示す。各シナリオとも、 A_3 方向から進入する到着機の到着機全体における割合は30%程度である。

表 1: シナリオ中での出発・到着機数

	出発機数	到着機数
シナリオ 1	325	333
シナリオ 2	420	421
シナリオ 3	483	487

3.3 レーダベクタ

各航空機間の間隔値確保は、航空管制における主要な目的のひとつである。間隔値確保のために航空管制官より発出される管制指示は、我が国ではレーダベクタと呼ばれる手法が中心となる。この手法は、主としてレーダより得られる情報に基づき、管制機に標準経路とは異なる針路を指示することで飛行経路長を変更し、間隔値を確保するものである [4]。レーダベクタ実施に際しては、ターミナル空域境界線からの逸脱を防ぐために、空域の形状に対する考慮が不可欠となる。

一方、TAAMでは間隔値の確保は、主として速度調整および空中待機により実現される。また、飛行経路長の変更も可能であるが、経路長変更の際に空域境界線に対する考慮は行われなため、管制機の空域逸脱が生じうる。

このため、TAAMによる高速シミュレーションからは実情に合致した航跡データの取得は困難であるが、遅延時間などについて相対評価に用いることが可能なデータを得ることは可能であると考えられる。

TAAMでは、到着予定時刻に基づいて先着順則で到着機の順序付けが実施される。一方、実運用では、効率的な到着機の流れをレーダベクタにより実現するために、ターミナル空域の形状によっては先着順則は必ずしも維持されない場合がある [5]。TAAMでは、設定により、先着順則以外のルールにより到着機の順序付けを行う機能も実装されている。しかし、実運用における正確な順序付けルールの取得が不可能であったため、本シミュレーションにおける順序付けは先着順則に基づくものとした。

3.4 空域進入時の間隔設定

到着機が、ターミナル空域の外側からエンルート管制を受けてターミナル空域に進入するに際して、同一方向から進入する到着機間の間隔は、通常10NMの基準値を維持する必要がある。本シミュ

レーションにおける各交通流シナリオでは、エンルート管制の介入は考慮されていないため、シミュレーションを実施した場合に、同一進入方向の到着機間で基準値が維持されない可能性が生じる。

ターミナル空域進入時の縦間隔の基準値を維持するため、本シミュレーションでは、交通流シナリオ中の各到着機の出発空港における離陸時刻を以下のような手順で調整した。TAAMは短時間でのシミュレーション実行が可能のため、予備シミュレーションを実施して得られた結果に基づいて、各交通流シナリオ中の離陸時刻の調整を行った。

交通流シナリオの変更

Step 1 <通過時刻の取得>

予備シミュレーションを実施する。シミュレーション実施中に各航空機の座標、対地速度を一定の時間間隔で記録する。記録結果より各到着機のターミナル空域進入時刻を取得する。

Step 2 <縦間隔の検討>

Step 1で取得された進入時刻に基づいて、各進入方向についてターミナル空域進入時の後続機の先行機に対する縦間隔を計算する。縦間隔が基準値以上の場合は Step 4へ。

Step 3 <離陸時刻の調整>

予備シミュレーションの記録結果より得られた進入時の速度、および Step 2で計算された先行機に対する縦間隔に基づいて、基準値維持のために後続機が必要とする調整時間を計算する。交通流シナリオ中で定義された後続機の離陸時刻を計算値分だけ後ろへずらす。

Step 4 <繰り返し>

後続機と、その次に進入した到着機の組み合わせについて Step 2を実行。全ての組み合わせについて検証が終われば終了。

以上の手続きにより、各交通流シナリオ中の離陸時刻を調整することで、本シミュレーションでは、同一方向から進入する到着機間で縦間隔の基準値が維持されるようにした。

4 シミュレーション結果

4.1 到着機の遅延時間

図4に本シミュレーション結果より得られた到着機の遅延時間を記す。図中の値は到着機1機あたりの平均値を意味する。最終進入点から滑走路へ至る最終進入経路上において、到着機は先行機に対して縦間隔の基準値を維持する必要がある。本シミュレーションでは、到着機の遅延値は、この

基準値の維持に必要なとされる調整時間を意味するものとし、空域内でのレーダ間隔の確保に必要なとされる調整時間などは本シミュレーションでは対象外とした。

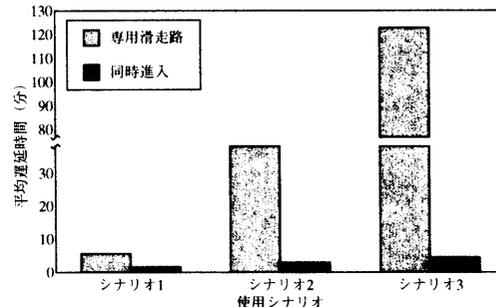


図4: 遅延時間平均値の比較（到着機）

到着機数が増えた場合の平均値の増加幅は専用滑走路方式では非常に大きいものに対して、同時進入方式では小さいことがわかる。シナリオ3の場合、専用滑走路方式では平均値が120分を越えるのに対して、同時進入方式では5分未満となる。本シミュレーションでは、各進入方向毎にターミナル空域進入時の間隔値が予め確保されており、進入方向毎に基づいて滑走路を割り当てたために、同時進入方式における到着機数増加の影響が小さいものと考えられる。それに対して、専用滑走路方式では1本の滑走路にすべての進入方向の到着機が収束するため、到着機数の増加による遅延時間の増加幅は大きなものとなる。

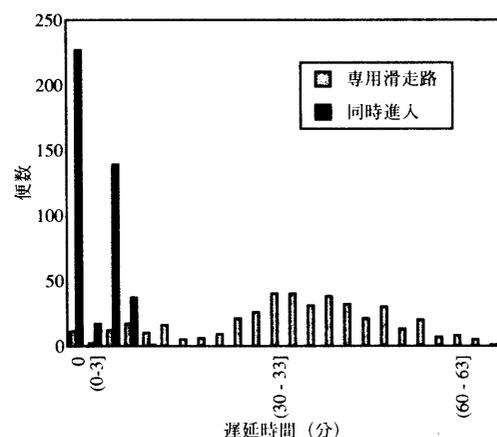


図5: 到着遅延時間の分布例（シナリオ2）

図5にシナリオ2によるシミュレーション結果より得られた到着機の遅延時間の分布例を示す。3.3で述べたとおり、本シミュレーションと実運用では到着機の順序付けルールが異なる場合があるため、特に専用滑走路方式では遅延時間の分布は実運用から得られるものと異なる可能性も存在

するが、ここでは同時進入方式における分布に対する比較の指標として示した。

同時進入方式における分布の広がり小さく、すべての到着機の遅延時間が9分未満に収まるのに対して、専用滑走路方式では遅延時間の最大値は60分を超える。

4.2 出発機の遅延時間

同時進入方式は到着機の遅延時間の低減を目的とするものである。一方、本モデルでは3.1で述べたとおり、出発機の遅延時間が同時進入方式の導入により大きくなるのが予想される。

そこで、出発機の遅延時間についても副次的に検討した。本シミュレーションでは、出発機は先行機との間で90秒間の時間間隔が維持される場合にはシナリオに定義されたシミュレーション時刻通りに離陸を行い、維持されない場合には間隔が確保されるまで離陸を遅らせることとした。

本シミュレーションにおいて、出発遅延は、この先行機との間隔確保のための値を意味し、本ターミナル空域からの出域時の間隔確保に必要とされる調整時間などは対象外とした。また、同時進入方式の場合には、先行機との間隔確保のための値に加えて、3.1で記した到着機のための待機時間も出発遅延値に含まれる。

図6に本シミュレーション結果より得られた遅延時間の出発機1機あたりの平均値を記す。各シナリオにおいて、同時進入方式では出発機遅延時間が大きくなることや、交通量の増加に伴い同時進入方式と専用滑走路方式の遅延時間の差が大きくなるのが確認できる。なお、図中の遅延値は全ての時間帯において同一の進入方式を用いた場合の値であり、参考的な種類のものである。

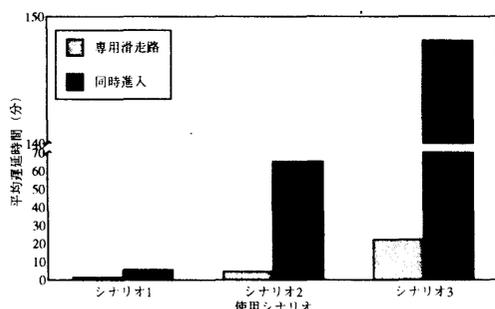


図6: 遅延時間平均値の比較 (出発機)

5 おわりに

本稿では同時進入方式導入が到着機遅延時間に与える効果についての高速シミュレーションを用

いた検討例を、そのモデル化の手順とともに示した。シミュレーション結果から、同時進入方式は到着機の遅延時間の低減に効果があることを定量的に確認した。専用滑走路方式では、到着機数の増加による到着機の遅延時間の増加幅は非常に大きいですが、同時進入方式では小さいため、到着機数の増大への対応に同時進入方式の導入は非常に効果的である。

また、副次的に出発機の遅延時間を検討し、同時進入方式の導入による遅延時間の増大を確認した。なお、本シミュレーションでは到着機数と出発機数の変化などに関わらず、全ての時間帯において同時進入方式を用いたために出発機の遅延時間値が大きな値となっている。

本シミュレーションでは、運用方式が比較的単純化されたモデル化に基づいて遅延時間を検討した。より実運用に近い遅延時間を取得するためには、実運用データの取得などにより運用方式を調査し、到着機の順序付けなどのルールを設定する必要がある。

謝辞

本研究を進めるにあたり、ご協力を頂きました米国 Embry-Riddle 航空大学の関係各位、および当研究所の各位に深く感謝いたします。

参考文献

- [1] 岡, 蔭山, 相澤, 井無田, 福島, 三垣: “航空管制シミュレータの製作,” 第1回電子航法研究所研究発表会講演概要, pp.91-94 (2001).
- [2] Smolensky, Stein: “Human Factors in Air Traffic Control,” pp.327-340, Academic Press (1998).
- [3] Odoni, et al.: “Existing and Required Model Capabilities for Evaluating ATM Systems and Concepts,” pp.50-55, International Center for Air Transportation, Massachusetts Institute of Technology (1997).
- [4] 航空交通管制協会: “航空管制入門,” pp.108-111, 航空交通管制協会 (1995).
- [5] 蔭山, 福田, 塩見, 三垣: “到着機の順序付け手法の比較,” 第31回電子航法研究所研究発表会講演概要, pp.95-100 (1999).