

都心上空到着機の先進的管制処理システム 導入効果の分析

作中 祐介¹・阪本 真²・屋井 鉄雄³

¹非会員 (元)東京工業大学 環境・社会理工学院 土木・環境工学系 都市・環境学コース
(〒226-8502 横浜市緑区長津田町4259)
E-mail: yusuke.tou0401@gmail.com

²正会員 パシフィックコンサルタンツ株式会社
社会イノベーション事業本部 東北社会イノベーション事業部
(〒980-0811 宮城県仙台市青葉区一番町一丁目9番1号 (仙台トラストタワー))
E-mail: shin.sakamoto@tk.pacific.co.jp

³正会員 東京工業大学 環境・社会理工学院 土木・環境工学系 都市・環境学コース
(〒226-8502 横浜市緑区長津田町4259)
E-mail: tyai@enveng.titech.ac.jp

新興経済国を中心に世界の航空需要は年々増加しており、首都圏空港では早急な機能強化が最優先課題となっている。海外では効率的な管制処理システムの導入といったソフト面の整備が進んでおり、管制官のワークロード改善や燃料消費の削減、環境負荷の低減などの効果を上げている。本研究では、羽田空港に適した新たな管制処理システムを検討し、その導入効果を分析することを目的とする。そこで、管制処理システムの導入効果を管制面や運航面、環境面に関して、定量的に評価できる空域シミュレータの開発を行った。次に、都心上空を活用した管制処理システム案を作成し、その導入効果について開発した空域シミュレータによるシミュレーション分析を行った。分析結果から管制処理システムの導入効果に関して検討を行った。

Key Words : *Air Traffic Control, Point Merge System, The sky of Tokyo, Simulator*

1. はじめに

世界の航空需要は、アジアや南米など新興経済国を中心に年々増加しており、日本においても、首都圏空港の容量は逼迫することが想定され¹⁾、早急な機能強化が最優先課題である。この機能強化策として、滑走路の増設といったハード面の整備が考えられるが、費用や時間等の制約が多い。そこで、ハード面のみに限らずソフト面も含めた機能強化策を検討する必要がある。

このソフト面による機能強化策として、羽田空港では、進入制限エリアである横田空域の一部と都心上空を活用した飛行経路が検討されている。これが実行された場合、時間当たりの滑走路容量を増やすことができる。一方、海外では到着機を効率的に処理する新しい管制処理システム(以下、先進的管制処理システム)を取り入れることで、空港容量拡大や燃料消費の削減、騒音影響やCO2排出量の低減などの効果を上げている。この先進的管制処理システムを羽田空港に導入した場合も同様の効果が期

待できると思われ、検証する意義は大きいと考える。また、現在活用されていない都心上空を対象とし、先進的管制処理システムの導入効果を管制面や運航面、環境面などの様々な視点から明らかにすることは、今後の都心上空の活用を議論する上で必要となると考える。

以上を踏まえて本研究の長期的な目的は、羽田空港の機能強化策として管制運用の改善による航空交通の効率化を行うことを目標に、管制面や運航面、環境面などの様々な視点で新たな管制処理システムの導入を検討することである。本研究では、その長期的な目標を達成するため、管制処理システムの導入効果を定量的に評価できる空域シミュレータを開発することと作成した管制処理システム案の導入効果についてシミュレーション分析することを目的とした。そこで、阪本ら²⁾が開発した空域シミュレータをもとに改良し、管制処理システム案の導入効果の定量的な評価を可能にした。そして、都心上空の活用した管制処理システム案を作成し、シミュレーション分析からその導入効果の検討を行った。

2. 既往研究と本研究の位置づけ

運用方式に関する研究として、蔭山³⁾は、羽田空港の北風運用時を対象に、新たな運用方式を再現した高速シミュレーションを用いて分析を行い、運航効率に関する便益を示している。また、石原⁴⁾は全航空機で実行可能なCDO方式を想定し、混雑時における飛行時間の決定方法を提案及び実データで実証し、便益を示している。

都心上空の活用に関する研究として、平田⁵⁾は羽田空港の容量の拡大の方法の一つに、都心上空を活用した運用方法について検討している。この研究では、騒音分散に着目されているが、既存の管制処理システムをベースに検討している。また、杉原⁶⁾は、音圧レベルと人口密度に比例した重みから計算した騒音指標を計算し、地上一人あたりに与える騒音を低減する軌道計画にアルゴリズムを提案している。

このように、運用方式に関する研究や都心上空の活用に関する研究は存在する。しかし、運用方式と都心上空の活用を同時に考えている研究は見当たらない。本研究では、都心上空を活用した新たな運用方式に関する検討を行う。また、木下⁷⁾の研究で明らかにされた管制指示特性や気象等の実運用で発生する不確実性を考慮して分析を行う。これらの点で既往研究と大きく異なる。

3. 航空管制の概要と海外空港の実態分析

(1) 羽田空港で行われている管制処理システム

航空機が安全に着陸するためには、先行機との一定の間隔を維持し続ける必要がある。通常、到着機は様々な方面から空港手前の合流地点に向けて飛行する。管制官は、航空機的位置、速度、高度、型式が表示される管制卓をみて、交通状況に応じた速度の増減や迂回のための針路変更などの指示を航空機に出し、規定の間隔で整列させる。羽田空港では、ベクタリングと呼ばれる運用方式が行われている。ベクタリングとは、図-1で示すように、FIXと呼ばれる経路上の通過地点を目指して飛行する航空機に対し、針路をずらすことで寄り道をさせてFIXの通過時間を調整し、先行機との間隔を維持する。これは、明確な基準がなく、その場の管制官の判断で指示が行われるため、管制官の技量に頼った運用方式である。羽田空港は到着機数が多く、到着機の70%は西側からに偏っているため、T09やT14セクターで常に航空機の混雑が発生している。混雑時にベクタリングを行う場合、管制指示回数が多くなり管制負荷が大きい。また、管制官の技量によっては円滑な交通流を形成するのは難しくなる。今後の航空機需要増加に対応するためにも、効率的な運用方式へ改善は重要な課題である。

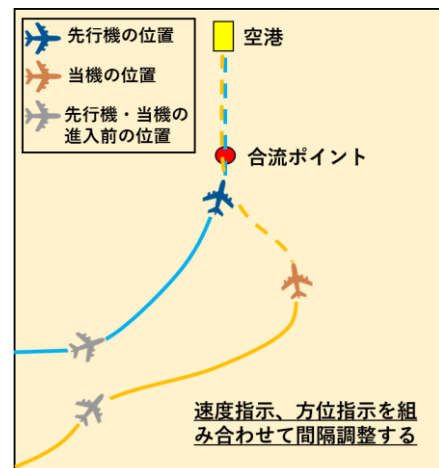


図-1 ベクタリングによる合流方法

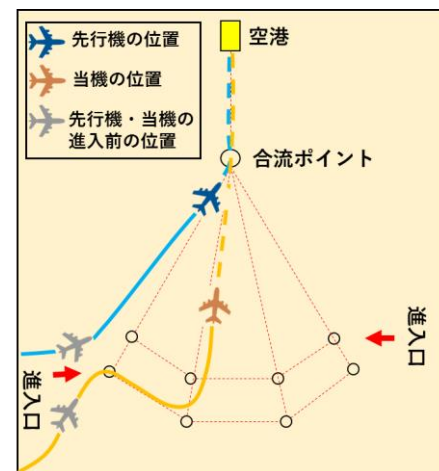


図-2 PMSによる合流方法

(2) 海外で行われている先進的管制処理システム

海外では運用方式の効率化や環境影響の低減のため、様々な先進的管制処理システムが導入されている。その一つに、効率的に航空機を合流させるポイントマージシステム(以下、PMS)と呼ばれる合流手法がある。図-2に到着機の流れを示す。これは、EUROCONTROL(欧州航空航法安全機構)⁸⁾によって開発され、先行機との間隔付けが容易で管制指示回数が少なく管制官の負荷も小さいこと、継続降下を行いやすく燃料削減や騒音低減が行えること、着陸間隔を短縮させる機材順序入替などの他の運用方式と組み合わせやすいことなど、多くの利点がある。すでに14空港で導入されており、2012年に導入したダブリン空港では燃料消費量や飛行距離が削減されるなど効果が確認されている。

PMSでの運用方式では、方位指示を活用して先行機との間隔を調整する。具体的な流れとして、まず到着機がPMSの進入口であるEntry Point(以下、EPとする)を目指し飛行する。EPに到着した航空機はあらかじめ設定された円弧上の経路のシーケンスレグ(以下、レグとする)を水平飛行し、管制官の指示を待つ。管制官が先行機と一定の間隔が確保できたと判断したら、航空機に合流地

点であるMerge Point(以下、MPとする)へ向かうように方位指示が出される。レグを離脱後は連続して降下を行いながらMPまで直線で飛行する。レグを離脱してからMPまでは基本的に速度指示で先行機との間隔調整が行われる。このように、MPを中心として設置されたレグを活用し、EP進入前からMPまでの誘導をシステム化することで、簡単な管制指示内容かつ少ない管制指示回数で先行機との間隔調整を容易に行うことができる。

このPMSをベクタリングが行われている羽田空港に導入することでダブリン空港と同様に燃料消費量や飛行距離の削減、管制負荷の低減などの効果が期待できる。しかし、羽田空港のような西便に偏った到着機の混雑や井形滑走路、都心の未活用など世界的にも珍しい特徴を持つ空港でPMSをどのように活用するかは十分に検討する必要がある。

(3) 先進的管制処理システムの導入空港の実態分析

実際に先進的管制処理システムが導入された空港について実態分析を行うことは、実際の活用方法や生じる不確実要素を把握することに繋がるため重要である。ここでは、過去の研究²⁾に追加して、管制指示内容と航空機挙動に着目して分析した。使用したデータは、管制官とパイロットのやり取りが記録された音声データと指示を受けた航空機の時刻、位置座標、速度、高度等に関する飛行データを用いて行った。音声データはLiveATC⁹⁾と呼ばれる世界の有志の方々が受信した航空無線データを無料で配信しているサイトから取得できる。航跡データは、FlightRadar24¹⁰⁾と呼ばれるADS-Bを搭載した航空機の位置情報や対地速度、高度の飛行データを集めて配信しているサイトから取得できる。図-3にダブリン空港到着機の航跡を示す。航跡からわかるように到着機は大きく、PMSを使用する航空機とPMSをショートカットする航空機の二つに分かれる。通常、これら航空機は共通してMPのLAPMOに向かうが、実際はLAPMOを飛行せず、MAXEVに向かう航空機も確認できた。これは、始めはLAPMOへ方位指示が出されていたが、LAPMOを通過する前でMAXEVに方位指示の変更が行われるからである。つまり、航空機の飛行経路がわかりやすいPMSでは、PMS内でも方位指示を変更することで先行機との間隔を調整していると考えられる。一方で、レグの離脱指示発出時において、先ほどと同様にLAPMOへの方位指示でなく、LAPMOの先にあるMAXEVへの方位指示が出されるケースがPMSを利用した30機のうち2機確認できた。PMSを利用している航空機は、先行機との間隔が確保された時点で離脱指示が発出される。しかし、これらの航空機は他のPMS利用機と比較して先行機との間隔がINM程長い時に離脱指示が発出されていた。この原因として考えられるのは、離脱指示が遅れたためと考える。そこ

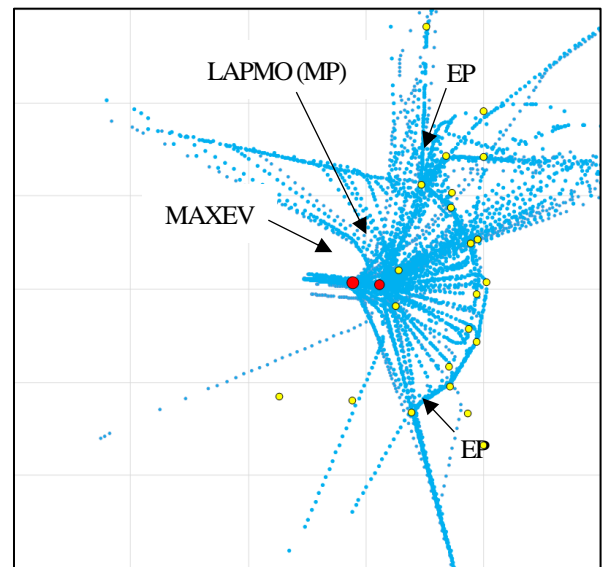


図-3 ダブリン空港到着機の航跡

で、PMS利用機毎に離脱指示が行われた管制指示前の他の連続した指示時間を足し合わせたところ、30s以上連続していることが確認できた。つまり、他の航空機への指示が継続したことで、離脱指示を行いたかった時刻と実際に指示を行った時刻でズレが生じたと考える。

このように、先行機との間隔調整において管制官は通常のPMSの運用ルールに従って管制指示を行うだけでなく、状況に応じたFIXへの方位指示を活用して先行機との間隔調整を行っており、また、不確実要因による管制指示の遅れが発生した場合でも、方位指示を変更することで距離の短縮が行われているのも確認できた。

4. 空域シミュレータの開発

(1) 空域シミュレータの概要

本研究では、羽田空港に適した新たな管制処理システムを検討し、その導入効果を分析することを目的としている。そこで、新たな管制処理システムの導入効果を定量的に分析するツールとして、空域シミュレータの開発に取り組む。開発はMicrosoft Visual Studio Professional 2012で行い、開発言語はC++を用いた。画面上ではスクリーンタイム毎に航空機の現在地を表示することで、交通流を視認できる。この空域シミュレータの原型は過去の研究で開発されており、特徴として音声データから抽出した管制指示の特性や気象条件が反映されており、不確実性を考慮したシミュレーション分析が可能となる。今回、この空域シミュレータの航空機挙動モデルや航空機制御モデルの改良を行い、評価指標として重要な燃料流量の計算や地上への騒音影響の計算などを可能にした。また、都心上空から羽田空港への着陸を想定したシミュレーシ

ョンも可能にした。一方、ベクタリングのような管制官の特性が出やすい運用をプログラムで再現することは難しく、できていないため、羽田空港の実運用の再現や妥当性の検証は課題である。現状、PMSを用いた管制運用の再現は可能であり、それを用いてシミュレーションを行う。

(2) 空域シミュレータの構成

空域シミュレータの構成を図4に示す。大きく、入力と航空機挙動の計算、結果の出力に分かれる。以下では、これらについて説明する。

a) 航空機挙動モデル

航空機挙動の再現には、航空機の型式毎に高度、速度、方位の計算をする必要がある。そこで、EUROCONTROLが管理するBADAモデル¹¹⁾から空域シミュレータに航空機挙動の計算式を反映する。また、型式毎の違いを再現するため、羽田空港到着機のうち、着陸回数が多い小型機2機、中型機2機、大型機2機の計6機種種の航空機パラメータをBADAデータベースから取得して用いる。(1a)の計算式は、航空機を質点と仮定したエネルギー保存則に基づく式であり、航空機に作用する推力と抗力の仕事量が、航空機が持つ位置エネルギーと運動エネルギーに等しくなる。

$$(Thr - D) \cdot V_{TAS} = mg_0 \frac{dh}{dt} + mV_{TAS} \frac{dV_{TAS}}{dt} \quad (1a)$$

Thr: 推力(N) m: 航空機重量(kg)
 D: 抗力(N) g₀: 重力加速度(m/s²)
 V_{TAS}: 真対気速度(m/h) $\frac{dh}{dt}$: 降下速度(h/t)

この計算式に含まれる変数のうち、推力と抗力の2つを定めることで、降下率が計算できる。推力と抗力は飛行フェーズに応じた式で高度、速度、航空機パラメータ等を用いて計算する。降下時はアイドル推力と仮定して計算する。対地速度は高度、風速、風向によって真対気速度から計算される。航空機の初期値はあらかじめ入力し、その後の挙動はシミュレータ内で計算する。この初期値は、発生間隔、速度、高度、航空機型式等であり、今回のシミュレーションでは実データを使用する。

b) 航空機制御モデル

空域シミュレータには、管制官による指示を再現することで、実運用で生じる不確実要因を考慮した分析を可能としている。不確実要因の一つとして、航空機の挙動開始に管制官とパイロットのやりとりによるタイムラグが発生する。そのため、管制指示発出時にはタイムラグが付加され、タイムラグ経過後に航空機の挙動が開始する。また、管制指示の発出中は他の航空機に管制指示が発せられないように制限を設けることで管制指示の遅れ

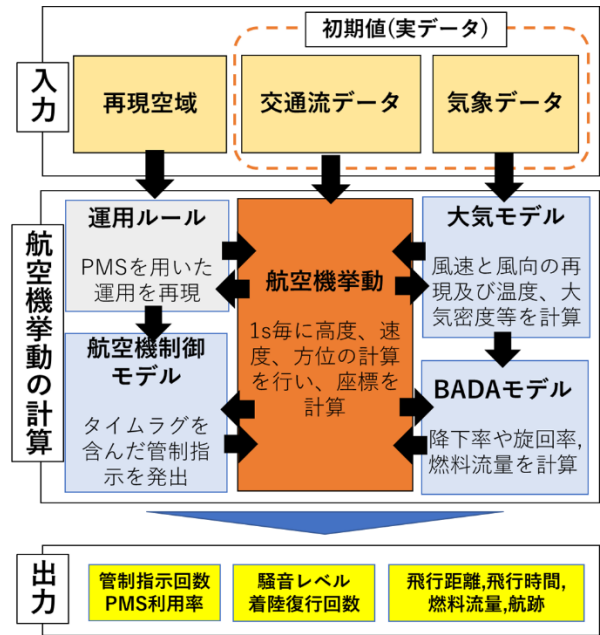


図4 空域シミュレータの構成

を再現した。管制指示の内容は、運用ルールに従って発出され、航空機はこれに従って飛行する。また、航空機の挙動で通過予定FIXの制限高度に降下が間に合わない場合は、降下角を調整して飛行する。速度の変化量1kt/1sとし、通常運用のように速度の変更中はBADAの運動モデルに従って降下率も変化する。航空機の旋回率は通常時とレグの離脱時で異なり、通常時はBADAモデルの設定値、レグの離脱時は先行研究の結果を使用する。旋回開始タイミングや最終侵入後の航空機挙動などに関しては実運用データをもとに設定した。

c) 大気モデル

気象の中でも風速と風向は航空機の対地速度に影響を与えるため、空域シミュレータ内でも再現されている。風速や風向の再現には、気象庁が公開する数値予報データのMSM¹²⁾を用いており、3次元上のエリア毎に風速と風向が変化する。一方、時間による変化は考慮せず、午前9時の数値予報データを用いる。

気圧はあらかじめ計算し、高度毎の温度や大気密度等に関しては、BADAモデル等の式で計算され、航空機挙動の計算に用いる。

d) 運用ルール

航空機は飛行経路上の高度、速度、方位の制限や航空法に従って飛行する。また、先行機との間隔を一定以上にするため、速度指示や方位指示で間隔調整が行われる。本シミュレータでは再現する空域や飛行経路上に高度、速度、方位の制限を設け、これらを満たすように管制指示が発出されることで航空機を制御する。また、ダブルラン空港での実運用と同様に、PMSを用いた方位指示による間隔調整と速度指示による間隔調整、ショートカットによる間隔調整によって航空機の管制運用が行わ

表-1 シミュレータ内で発せられる管制指示内容

指示項目	指示の内容
速度指示	FIX毎に設定された速度へ減速させる
	間隔調整のため10knotの倍数で減速させる
方位指示	設定されたFIXへ進行させる
	レグを離脱し、MPに向かわせる
	進行先を変更し、ショートカットさせる

れる。表-1に空域シミュレータ内で発せられる管制指示内容をまとめた。管制間隔について、気象条件や交通状況によって変動する可能性があるが、今回はEPから滑走路までの航空機について先行機との最低間隔基準値を設け、先行機との通過予測時刻の差が90sを下回らないように設定し、着陸間隔が100s~120s程になるようにした。PMSでのレグの離脱指示もこれに従って行われるが、レグの最終点まで飛行した航空機は先行機との間隔に関係なくレグを離脱し、MPへ合流させる。また、実際は空域の混雑を避けるため、フリーコントロールによる空域への入域機数や間隔の調整が行われるが、今回はそのことを考慮せず、実データの発生間隔をそのまま用いて行う。

e) 着陸復行

到着機が滑走路に着陸する際、滑走路端手前でそのまま着陸するか着陸をやり直す着陸復行を行うか管制官が判断する。着陸復行の判断材料は先行機が滑走路に残っているかどうかである。着陸復行が生じる場合、滑走路容量を下げ、管制官の負荷も増加する。

シミュレーションでは、様々な要因によって管制官による間隔制御が十分に行えなかった場合を想定して、着陸復行アルゴリズムが導入されている。この着陸復行アルゴリズムでは、先行機の滑走路占有時間を計算し、着陸復行の発生の有無を判断され、その発生回数を記録する。

f) 燃料流量

運航効率の評価を行ううえで、燃料流量は重要な評価指標である。燃料流量の計算は以下の式を用いる。

$$f_{nom} = \eta \times Thr \quad (1b)$$

$$\eta = C_{f1} \times \left(1 + \frac{V_{TAS}}{C_{f2}}\right) \quad (1c)$$

$$f_{min} = C_{f3} \left(1 - \frac{H_p}{C_{f4}}\right) \quad (1d)$$

C_{f1} や C_{f2} 、 C_{f3} 、 C_{f4} は、型式毎の係数で、 H_p は気圧高度である。(1b)と(1c)の式を用いて求められる f_{nom} は一般的な燃料流量である。降下時はアイドル推力で降下するため、気圧高度を用いて求められる f_{min} が降下時の燃料流量である。また、巡航時や着陸時といった航空機の飛行フェーズや条件によって異なる場合もあるが、基本的

に空域シミュレータではこれらの式を用いて1s毎に燃料流量を計算する。そして、全ての航空機が着陸するまでに必要とした総燃料流量を算出する。

g) 騒音レベル

都心を飛行する航空機は地上に騒音影響が発生する。この騒音影響を評価するため、メッシュで設定した受音地毎で生じる騒音レベルを計算可能にした。騒音レベルを計算するため、航空機の機種毎に音のパワーレベルを設定する。以下の式(1e)を用いて、航空機と受音地との距離による減衰後の騒音レベルを求める。

$$L_r = L_w + 10 \times \log_{10} \left(\frac{1}{4\pi r^2} \right) \quad (1e)$$

L_w は音のパワーレベルで、 r^2 は距離の二乗、 L_r は距離による減衰後の騒音レベルである。空域シミュレータでは1s毎にこの騒音レベルを計算する。

メッシュ毎で計算された騒音レベルを評価するため、等価騒音レベルに変換する。等価騒音レベルとは、ある時間で不規則に変動する騒音レベルのエネルギーを時間平均したものである。算出したメッシュ毎の等価騒音レベルをQGISソフトで可視化した図を評価に用いる。推力の変化や空気密度など距離以外の減衰要因を考慮できてないため、騒音レベルを大きめに見積もる傾向にあるが、比較するうえでの参考として用いる。

5. 管制処理システムの検討とその効果検証

(1) 分析の概要と本研究の視点

現在、国土交通省では都心上空を利用した飛行経路が検討されていることや先進的管制処理システムによって管制負荷の低減、燃料消費の削減、騒音影響の低減などの効果が期待できることなど、都心上空を活用を検討する必要性は高い。そこで、本分析では、都心上空を活用する羽田空港到着機にPMSを活用した管制処理システムのシミュレーション分析を行い、導入効果を検討する。

対象は、南風時の運用であり、到着機数の多い西側からの羽田空港到着機の処理を想定する。そのため、C滑走路への着陸のみを考え、空域構成や他の交通流などによる影響は厳密に考慮していない。管制方式基準に従って着陸までの経路を設定し、複数の管制処理システム案の比較を行う。

(2) 再現する交通流

空域シミュレータ内で再現する交通流は、実際の交通流データに基づき作成した。交通流データは、航空局が提供するCARATS Open Data³⁾から抽出した航空機を用いており、一日を通して南風運用が行われた2015年5月14日の羽田空港到着便である。これら航空機の再現範囲へ

の進入間隔は1hあたり28機前後であり、8時から22時までの着陸機数422機を交通シナリオとした。また、18時台の29機と19時台の28機を合わせて57機分の交通流データも交通シナリオとし、分析に用いた。シミュレータ内で再現する交通流の初期値は、先ほどの交通流データの発生間隔、高度、速度、航空機の型式である。シミュレータ内の発生地点は二点とし、実際に再現範囲に進入した時間間隔で発生させた。ただし、着陸順序は発生順として発生後の順序入替は行わないこととした。

(3) 都心上空を活用する管制処理システム案の検討

今回、再現する管制処理システム案は、管制負荷の軽減や燃料削減が期待できるPMSを活用したものである。最終進入開始地点までのルートは大きく二つ考えられ、千葉県上空側を飛行して着陸する千葉上空ルートと横田空域及びその上空を飛行して着陸する横田空域ルートとの二つが挙げられる。それぞれのルートに合わせて管制処理システム案を作成した(以下、千葉上空案、横田空域案とする)。千葉上空案と横田空域案ではそれぞれ感度分析や実運用から検討を行うことで通過するFIXでの高度や速度などPMSの設定値を決定した。航空機の発生場所はそれぞれ異なるが、現状の交通流を参考に二点設定した。

(4) シミュレーション結果の比較

a) 千葉上空案

千葉上空案のイメージ図を図-5に示す。PMSの合流地点を東京湾と千葉県の境目付近に設置し、最終進入入口(以下、FAF)手前まで直線に進んだ後、旋回して滑走路に進入するように経路を設定した。PMSの進入場所は現状の交通流に重なるように二か所設置し、それぞれのレグ(内側をLeg1, 外側をLeg2とする)の間隔は3NM、飛行高度は1000ftの差をつけている。

これらの条件に加え、PMSの半径をLeg1は28NM、Leg2は31NMとして、高度をLeg1は20000ft、Leg2は19000ftとした。MP通過前までは11000ft以上、FIX2までは5000ft以上とする高度条件を加えた。この条件でシミュレーション分析を行った結果、PMSで間隔維持ができず、離脱指示が出された航空機が発生した。そこで、PMSの半径を変えてシミュレーション分析を行ったところ、Leg1は45NM、Leg2は48NMの大きさに422便すべてを処理することができた(以下、Leg1が28NMのPMSを管制案①、Leg1が45NMのPMSを管制案②とする)。

図-6にシミュレーション結果より得られた管制案②の航空機の航跡を示す。管制案②はレグ上の飛行距離が長くなったことで、すべての航空機がPMS内で処理できているのが確認できる。運航効率に着目して比較したと

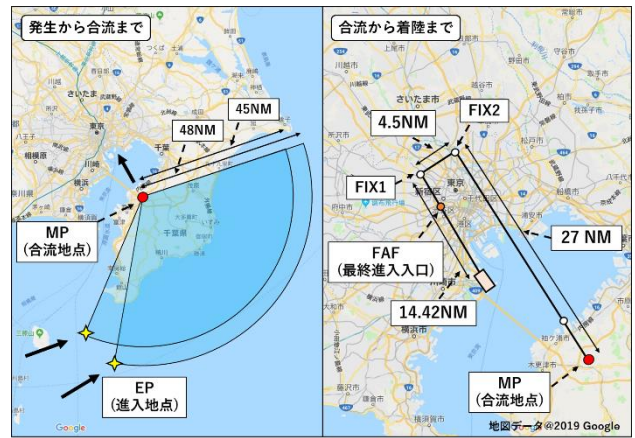


図-5 千葉上空案のイメージ図(管制案②)

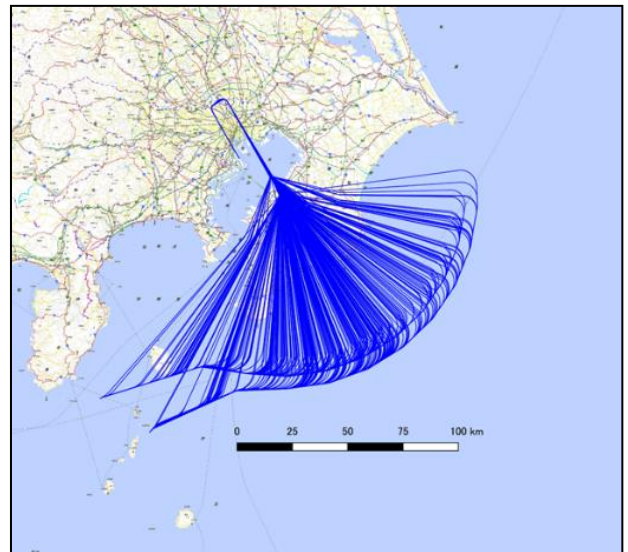


図-6 全交通における航空機の航跡(管制案②)

表-2 飛行距離、飛行時間、燃料流量の平均値の比較

	飛行距離 (NM)	飛行時間 (sec)	燃料流量 (kg)
管制案①	141.94	1787.15	946.94
管制案②	146.93	1878.4	1090.85

ころ、飛行距離、飛行時間、燃料流量すべてにおいて管制案①の方が管制案②より大きい結果となった。特に、燃料流量は15%の増加と飛行距離の増加量3%や飛行時間の増加量5%に比べ大きい。これは、レグを離脱後は降下を開始するため、管制案②は管制案①に比べ降下開始が早くなり、MPの制限高度で水平飛行する航空機が増えたからと考える。

これらのことから、現状の空域シミュレータにおいてすべての着陸機数を処理するにはある程度のPMSの大きさが必要であることが確認できたが、一方でレグ上の飛行距離を延伸するためPMSを大きくすると降下開始が早まり燃料流量の増加を引き起こすことが確認された。一方、PMSの処理能力はPMSの配置によって変化するため、大きさに限らずPMSの配置も再検討することで、改善される可能性は高い。

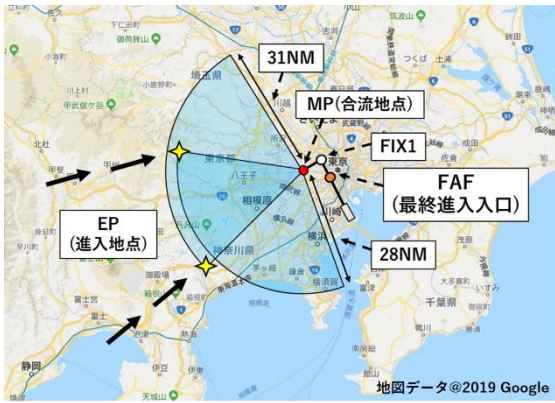


図-7 横田空域案のイメージ図(管制案③)

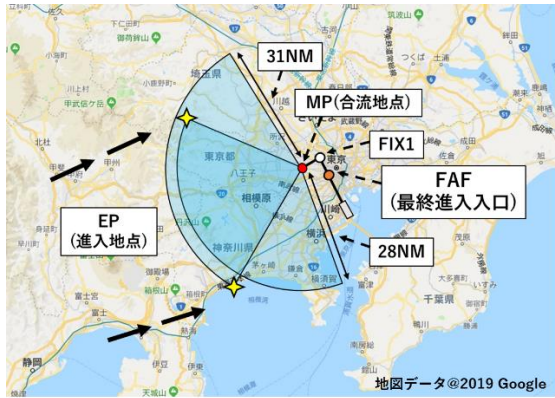


図-8 横田空域案のイメージ図(管制案④)

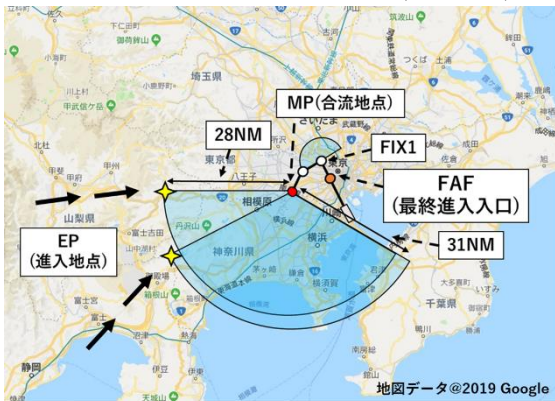


図-9 横田空域案のイメージ図(管制案⑤)

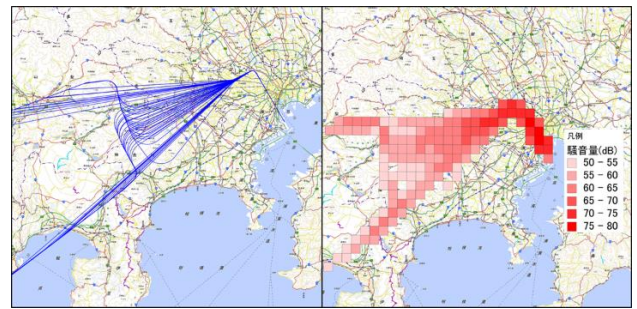


図-10 航空機の航跡と騒音影響図(管制案③)

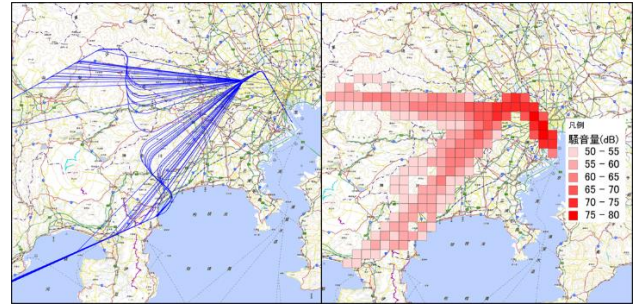


図-11 航空機の航跡と騒音影響図(管制案④)

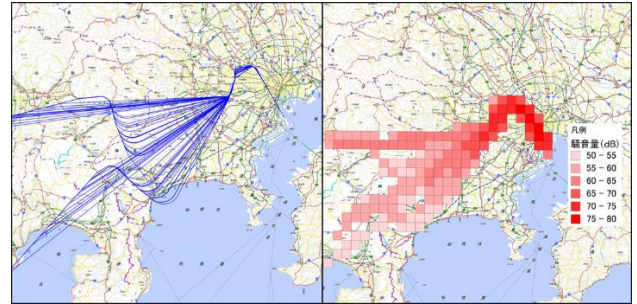


図-12 航空機の航跡と騒音影響図(管制案⑤)

表-3 飛行距離, 飛行時間, 燃料流量の平均値の比較

	飛行距離 (NM)	飛行時間 (sec)	燃料流量 (kg)
管制案③	100.9	1284.1	619.4
管制案④	101.1	1283.7	605.6
管制案⑤	101.8	1335.6	635.1

b) 横田空域案

横田空域案のイメージ図を図-7, 図-8, 図-9に示す(図-7は管制案③, 図-8は管制案④, 図-9は管制案⑤). どれもMPをFAFに可能な限り近づけて設置した, PMSの進入場所は富士山の北側と南側に二か所設置し, それぞれのレグ(内側をLeg1, 外側をLeg2とする)の間隔は3NM, 飛行高度は1000ftの差をつけて設置した. 管制案③と管制案④はFAF手前の横にMPを設置している. これらの違いはEPの設置場所が異なっており, 管制案④の方はEPを離して設置している. 管制案⑤は管制案③や管制案④と比べPMSの配置場所が異なる. また, MP通過先に小さなPMSを設置し, FAF手前で間隔調整が行えるようになっている. PMSの半径をLeg1は28NM, Leg2は31NMとし, MP手前までは管制案③と管制案④は5000ft

以上, 管制案⑤は6000ft以上で統一した. PMSの進入高度やPMSの進入速度は2時間分の57機を用いて感度分析を行い, 運航効率が高くなる値を調べた. その結果, 高度をLeg1は15000ft, Leg2は14000ftとし, すべての管制処理システム案において同じとした. 進入速度は管制案③, と管制案④は240knot, 管制案⑤は230knotとした. それ以外の諸条件は実運用を参考に値を決定し, すべての管制処理システム案において同じとした. これらの条件において, これらの管制処理システム案のシミュレーションを行い比較を行った.

図-10, 図-11, 図-12にシミュレーション結果より得られた航跡と騒音影響図を示す. 表-3には, それぞれの管制案の飛行距離, 飛行時間, 燃料流量の平均値を示す. まず, 運航効率に関して比較を行う. 管制案③と管制案

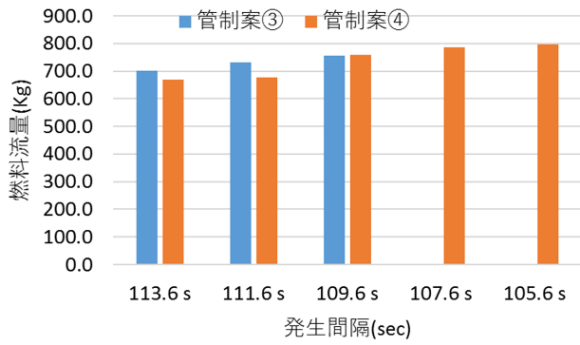


図-13 燃料流量の平均値の比較(管制案③と管制案④)

表4 PMS利用率の比較(管制案③と管制案④)

	113.6s	111.6s	109.6s	107.6s	105.6s
管制案③	86%	88%	88%	—	—
管制案④	75%	81%	88%	89%	91%

④に関して、飛行距離と飛行時間は大きな違いがなく、燃料流量は管制案④が少ない結果となった。また、PMSの処理能力を評価するため、PMSの利用率を比較する。PMS利用率とは、全航空機の中でPMSを利用した割合を意味する。PMSの利用率は管制案③は61%、管制案④は51%と管制案④の方が低い結果であった。飛行距離や飛行時間に大きな差がないのは、進入口が異なってもショートカットを活用することで柔軟に先行機との間隔調整が行われているからと考える。燃料流量に差があるのは、管制案④はPMS進入口手前までの距離が伸びたことで降下状態での飛行が伸びたこと、PMSの利用率が下がることでレグ上での水平移動距離が減ったことが影響したと考える。PMSの利用率に差が出るのは、管制案③と管制案④でEPの位置が異なっており、管制案④の方がショートカットによる先行機との間隔が狭まりやすく、後方機との間隔が開きやすい。そのため、EPの配置によるショートカットのしやすさがPMSの利用率を下げたと考える。

これらに関して、混雑度が異なる状況での違いを確認するため、航空機の発生間隔を狭めてシミュレーションを行った。シミュレーションの結果は、図13に燃料流量の変化と表4にPMS利用率の比較を示す。結果、管制案③は109.6s(32.8機/1h)、管制案④は105.6s(34.1機/1h)の発生間隔までならPMS内で処理が可能であり、管制案④は管制案③よりも処理能力が高いということが確認された。また、燃料流量で比較すると、113.6s、111.6sにおいて管制案④は管制案③よりも燃料流量が低く、109.6sでは管制案③と管制案④の燃料流量にも大きな違いはないことが確認できる。これについて、PMSの利用率に着目すると113.6s、111.6sにおいて管制案④は管制案③よりもPMSの利用率が低く、109.6sでは管制案③と管制案④のPMSの利用率が同じことがわかる。つまり、先ほどで

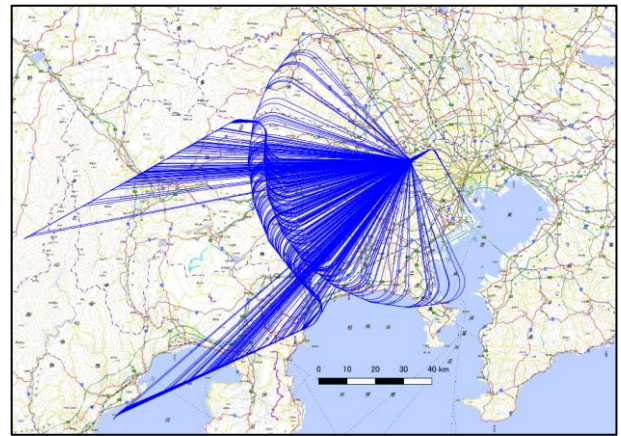


図-14 全交通における管制案④の航空機の航跡

も言及したように、ショートカットのしやすさがPMSの利用率を下げたと考えられ、それが先ほどと同様に燃料流量や処理能力の差に影響したと考える。つまり、一定程度混雑度が増した状況でもショートカットのしやすさがPMSの利用率を下げるということが確認できた。管制案⑤に関して、飛行距離と飛行時間は管制案③と管制案④に比べ増大し、燃料流量も増大した。特に、飛行時間と燃料流量の増加が大きいがこれはMP通過後の飛行距離が増加したことで、低高度における低速の飛行が影響したと考える。また、管制指示回数にも大きな差は確認できなかった。間隔調整のための速度指示がMP通過前で発生しやすいため、管制指示回数に差がつかなかったと考える。第二のPMSの使用に関しては、PMSを用いて簡略的に間隔調整を行うことを考えたが、運航効率面において悪化し、騒音値も低空飛行が増加するため、影響が大きいことが確認できた。しかし、北側や東側から航空機が合流する場合、第一のPMSのEPまで飛行させるのではなく、第二のPMSで合流させることで全体の運航効率は上がる可能性がある。そのため、他の運用との組み合わせを考慮すると効果が期待できる。

次に、騒音影響について管制案③、管制案④、管制案⑤を比較するとどれもMP通過前はPMSにより音が分散されていることが確認できる。Leg2のEP付近では、管制案③は特定の経路に集中し騒音レベルが高くなるが、管制案④はショートカットにより騒音が分散している。

最後に、長時間でのPMSの利用が可能を確認するため、全交通流422便でのシミュレーション分析を行った。結果、管制案④と管制案⑤では、PMSで間隔維持ができず、離脱指示が出された航空機が発生したが、管制案④では422便すべて処理することができた。管制案④の航跡を図-14に示す。

これらのことから、管制案③、管制案④、管制案⑤で比較を行った場合、管制案④が一番運航効率がよく、PMSの処理能力が高いことがわかった。また、PMSの配置の違いによる影響も確認できた。

表-5 飛行距離, 飛行時間, 燃料流量の平均値の比較

	飛行距離 (NM)	飛行時間 (sec)	燃料流量 (kg)
千葉上空案	146.93	1878.4	1090.85
横田空域案	112.12	1417.82	718.59

c) 千葉上空案と横田空域案の比較

今までのシミュレーション結果から千葉上空案の管制案②と横田空域案の管制案④で比較を行う。全交通流422便での運航効率の比較を表-5に示す。比較した結果、横田空域案が千葉上空案より運航効率面で良い結果となった。この原因として、横田空域を活用する場合と比べて、千葉上空は反時計回りに回り込むため、MP通過後からFAF手前まで長距離の飛行が必要であるからと考える。また、千葉上空案と横田空域案で全交通流を処理可能とするPMSの大きさが異なる。このPMSの処理能力が異なるのは、レグ上の高度が千葉上空案の方は高いため、レグ上で待機する航空機の対地速度が速くなり、時間当たりの飛行距離が増加するからと考える。千葉上空案の比較でも確認されたように、PMSを大きくすることで燃料流量は増加する。それは千葉上空案と横田空域案で燃料流量の差が大きい要因の一つである。

次に発生地点の違いを考慮するため、出発からそれぞれの発生地点までの飛行距離の差を比較する。この飛行距離の差は実データの緯度経度から概算で求めた。西側からの到着機のみを対象とし、紀伊半島の中心あたりを境目とするため、南風運用時のFAF手前のFIX(BEAST)を中心に半径220NMの円上を航空機が通過するときの緯度経度を抽出した。それを実際にシミュレーションの再現範囲に侵入した地点までの距離と横田空域案の発生地点までの距離の差を算出した。結果、平均で34.8NM程横田空域案の発生地点までの距離が短くなった。この算出値は概算であり、実際は他の航空機との間隔調整等で航跡距離は変動するものではあるが、一定程度、飛行距離が短縮される可能性があると考えられる。

これらの結果から、都心上空の活用を考える場合、横田空域を活用する管制処理システムが効果的であることが確認できた。また、PMSの再配置や交通状況に対応したショートカット条件の設定、後方乱気流間隔の適応によってより高い効果が期待できるため、今後、検討していく。

6 結論と今後の展開

本研究では、羽田空港の機能強化策として管制運用の視点から航空交通の効率化を行うという長期的な目的を達成するため、管制処理システムの導入効果を評価できる空域シミュレータの開発することと複数の管制処理シ

ステム案の導入効果についてシミュレーション分析を行った。

空域シミュレータの開発では、BADAモデルを反映することで機材別の航空機挙動の再現を行った。また、管制処理システムの導入効果の評価のため、燃料流量やメッシュ毎の騒音レベルを算出できるように改良を行った。

シミュレーション分析では、まず千葉県上空ルートと横田空域ルートに分けて、管制処理システム案を複数作成し、シミュレーション分析を行うことで、飛行距離や飛行時間、燃料流量、騒音影響について比較を行った。比較の結果、横田空域を活用した管制処理システム案の効果が高いことが確認できた。

今後の課題としては、シミュレータ内で再現している管制指示の精度を向上させること、新たな運用方式をシミュレータ内で再現し、PMSと組み合わせた場合の効果を検証することが考えられる。特に、PMSのメリットの一つに他の運用方式との併用のしやすさが挙げられ、羽田空港の方面別運用の解消や後方乱気流間隔に応じた順序入替などは、PMSと併用することで大きな効果が期待できる。今後は、このような他の運用方式との組み合わせに着目し、羽田空港に適した管制処理システムを検討していく。

謝辞

本研究で用いた航空機の実運用データは国土交通省の航空局からいただいたCARATS Open Dataを使用し、気象庁の数値予報データは京都大学生存圏研究所がホームページで公開しているものを取得させていただきました。また、シミュレータ内の航空機挙動の再現には、EUROCONTROLが開発及び管理しているBADAデータを使用させていただきました。これらの関係各所の各位に対して感謝いたします。

参考文献

- 1) 国土交通省 航空局：首都圏空港の機能強化に係る検討について、2013
- 2) 阪本真, 屋井鉄雄：羽田空港到着機の管制処理方式に関するシミュレーション分析, 第 57 回土木計画学研究会発表会, 2018
- 3) 蔭山康太：到着機処理の高速シミュレーション・モデル, 第 52 回飛行機シンポジウム, 2014
- 4) 石原潤一, 武市昇, 鎧陽介：運航データを用いたCDO 導入効果の評価とその運航コスト最少化, 第 52 回飛行機シンポジウム, 2014.
- 5) 平田輝満, 清水吾妻介：混雑空港の航空機騒音負担のあり方と羽田空港における都心上空飛行ルートの活用方策に関する研究, 第 50 回飛行機シンポジウム, 2012

- 6) 杉原有理花,高橋正樹：騒音の分散と到着時刻の調整を目的とした進入管制における軌道計画, 第 54 回飛行機シンポジウム, 2016
- 7) 木下隼斗, 阪本真, 屋井鉄雄：管制指示情報のデータ化による管制指示情報のデータ化によるターミナル空域近傍の空域処理機数に関する分析, 土木学会論文集 D, Vol. 73, No.5, 2017.
- 8) EUROCONTROL : Point Merge in Extended Terminal Area, 2010.
- 9) LiveATC.net : <https://www.liveatc.net/index.php>
- 10) FlightRadar24 : ?
- 11) EUROCONTROL Experimental Centre : User Manual of the Base of Aircraft Data (BADA) Revision 3.14, EEC Technical/Scientific Report No. 17/05/29-143, June 2017.
- 12) 京都大学生存圏研究所, 生存圏データベース : <http://database.rish.kyoto-u.ac.jp/arch/jmadata/data/gpv/original/>
- 13) 国土交通省航空局交通管制部 : 交通管制部の所有するデータの提供について http://www.mlit.go.jp/koku/koku_tk13_000012.html

SIMULATION ANALYSIS OF THE EFFECT OF MERGING ARRIVAL SYSTEM IN THE SKY OF TOKYO

Yusuke SAKUNAKA, Shin SAKAMOTO and Tetsuo YAI

The demand of aviation in the world increases year by year, and it is an important project that Haneda airport wants to strengthen the function of it. Moreover, there are many foreign countries introduced a new operation system which can improve the air traffic management. Because of this system, those countries get many benefits, such as reducing the workload of controller, reducing the consumption of fuel and the environmental load, and so forth.

In this paper, the goal is to create a new operation system that is suitable for Haneda Airport, and to analyze the imported effect of this system in the sky of Tokyo. So, I developed a simulator in airspace that can quantitatively evaluate the imported effects of a new operation system. In addition, I created a new operation system which is used in the sky of Tokyo, and analyzed imported effect of it. And finally, the imported effect of it from the analysis results was examined.