

首都圏空域の活用による航空交通の 環境改善効果の研究

木下 恵太¹・屋井 鉄雄²

¹非会員 東海旅客株式会社(株) (〒450-6101 名古屋市千代田区名駅1丁目1番地の4)
E-mail:kinoshita.k.ag@m.titech.ac.jp

²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

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、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。一方で、近年社会情勢や自然環境の急激な変化に伴い、環境影響への対策が求め始められている。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。また、日本では進入制限エリアである横田空域や騒音影響の理由により首都圏空域の有効な活用は行われていない現状となっている。本研究では、羽田空港を対象として首都圏空域を活用した新たな飛行経路を検討し、その効果を分析することを目的としている。そこで近年我が国に導入された先進的管制運用方式として Point Merge System に着目し、羽田空港における運用実態を明らかにした。さらにその結果を踏まえ、先行研究²⁾で開発した空域シミュレータの改良を行い、再現性の検証を行った後、西側到着便を対象に首都圏空域を活用した場合のシミュレーション分析を実施し、その効果の基礎的な検討を行った。

Key Words : Air traffic control, Simulator, Advanced methods for controlling air traffic flows

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、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。一方で、近年社会情勢や自然環境の急激な変化に伴い、環境影響への対策が求め始められている。我が国では、脱炭素社会の実現のため機材の軽量化や新技術の導入といった技術面だけでなく管制の高度化による運航方式の改善といった管制運用面からの施策が進められている¹⁾。

この管制運用面からの施策として、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。また、日本では進入制限エリアである横田空域や騒音影響の理由により首都圏空域の有効な活用は行われていない現状となっている。特に横田空域は第2次大戦後から現在に至るまで米軍の管理下におかれ、我が国の民間機が恒常的に利用することはできない。そのため羽田空港発着機が迂回を余儀なくされてきたが、既に80年近い年月が経過し、

他国に同様な空域が存在しないと考えられることから、今後の民間活用の促進と返還に向けた取り組みが肝要と考える。特に、航空交通への依存を容易に下げられない島国日本が、脱炭素に向けた施策を加速化する上でタブーにすべきテーマではないと考える。

このように効率的な管制処理システムを導入し、現在十分に活用されていない首都圏空域を有効活用することの効果は管制面や運航面、環境面など様々な視点から明らかにすることは、今後の首都圏空域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、主に環境問題に着目して羽田空港を対象に先進的管制運用方式を用いた新たな首都圏空域における飛行経路を検討することである。飛行経路の検討には、飛行距離や燃料流量等の航空機の運用面に限らず、騒音影響や管制官の負荷など様々な評価指標を用いて総合的に評価していく。

本研究ではその長期的な目標を達成するため、作中ら²⁾が開発した管制指示の特性を考慮した先進的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改良することと作成する首都圏空域の活用案の効

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。研究の流れとして、近年我が国に導入された先進的管制運用方式として Point Merge System (以下、PMS) に着目し、羽田空港における PMS の運用実態を明らかにした。さらにその結果を踏まえ、先行研究²⁾で開発した空域シミュレータの改良を行い、再現性の検証を行った後、西側到着便を対象に首都圏空域を活用した場合のシミュレーション分析を実施し、その効果の基礎的な検討を行った。

2. 既往研究

運用方式に関する研究として、蔭山³⁾は、羽田空港における先進的管制運用方式の導入高kを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。また武市ら⁴⁾は戦略的な航空交通管理 (Air Traffic Flow Management : ATFM) と PMS の連結シミュレーションを作成し、ATFM と到着段階における到着間隔づけの相互運用性を検証している。石原ら⁵⁾は現状のほぼすべての航空機で実現可能な CDO 方式 (Continuous Descent Operation) を想定し、混雑時の飛行時間決定方法を提案し、実運航データを用いた実証によってその便益を処理機数や燃料消費量、管制負荷といった運用効率面の指標から明らかにしている。

都心上空の活用や環境影響に関する研究として、平田・清水⁶⁾は羽田空港では従来使われてこなかった都心上空空域の活用による羽田空港の騒音分散と容量拡大政策に関して既存ストックの活用を前提にして検討している。また、屋井ら⁷⁾は空域制約 (東京都心上空飛行制約) を緩和した場合にはどの程度の容量拡大が可能で、騒音影響は環境基準と比べて許容可能なレベルかを検討している。さらには寺田・平田ら⁸⁾は、市街地上空を飛行し発着を行っている福岡空港周辺の住民を対象に、質問紙調査とヘッドホン面接調査を用いて、屋内騒音レベルや騒音への敏感さが騒音への不快感へ与える影響について考察している。

このように運用方式に関する研究や都心上空の活用、環境影響に関する研究は存在する。しかし、運用方式と首都圏空域 (横田空域を含む) の活用を同時に考慮している研究は見当たらない。また、首都圏空域の活用について運用効率や管制官の負荷、騒音影響について総合的に評価している研究は見当たらず、本研究を行う意義は大きいと考えられる。

3. 羽田空港及び海外空港の先進的管制運用方式

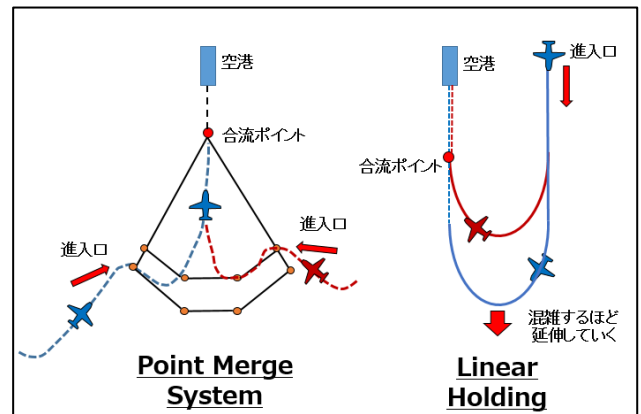


図-1 海外空港における先進的管制運用方式

(1) 羽田空港で行われている管制運用方式

到着機の管制では、様々な方面から飛来する航空機の順序及び間隔を設定し、到着機の整流作業が行われている。この整流作業は、ベクタリングという手法が用いられている。ベクタリングは、FIXと呼ばれる経路上のポイントを最短距離で経由するのではなく、途中で飛行針路を変針すなわち寄り道をさせることでFIXを通過する時間を調整し、先行機との間隔を保つという手法である。ベクタリングによって変針させる飛行経路には一定の基準やルールはないため、どの航空機をどの程度変針させて間隔付けを行うかは、その時々交通状況を見ながら管制官が経験をもとにして指示を發出しており、管制官への負荷が大きくなる手法である⁹⁾。特に羽田空港のような混雑空港は多数の航空機を同時に管制しながら整流作業を行う必要があるためその傾向が顕著である。そのため、羽田空港では2019年7月より、再編したターミナル空域内のPMSの運用が開始された¹⁰⁾。PMSとはEUROCONTROL¹¹⁾によって開発された手法であり、戦略的に航空機を順序付けし空港に着陸させるために開発された方法である。現在、オスロ空港やダブリン空港、クアラルンプール等の数多くの空港で導入されている。

具体的な流れとして、まず到着機がPMSの進入口をを目指し飛行する。進入口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、管制官の方位指示を待つ。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²⁾。航空機の挙動のしやすさや神瀬指示の減少

による管制官のワークロードの低減、消費燃料削減、騒音被害の低減などに貢献している。

(2) 先進的航空管制運用方式の紹介

海外では管制運用の効率化や環境影響の低減のため、様々な先進的管制運用方式が導入されている。例えばヒースローで行われている戦略的ホールディングやボストン・ローガン国際空港で安全評価書の取りまとめが終了しているMRO (Multi Runway Operation) ¹²⁾などがある。その一つに、フランクフルト空港で行われているリニアホールディングがある。これは予めトロンボーン型の経路を対照的に設計しておき、2方面からの到着機の位置をみながらタイミングの良いときに最終進入方向へ旋回させる方式である。これと通常の楕円形のホールディング(サーキュラーホールディング)を組み合わせることにより、合流という比較的管制負荷の高い業務の簡易化と間隔設定の精度の両立や騒音低減することが意図されているようである¹³⁾。このように様々な先進的管制運用方式があるだけでなくPMSと他の運用を組み合わせた管制処理システム案を導入している空港もあり、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) 羽田空港におけるPMSの実態分析

実際に現在羽田空港で導入されているPMSについて実態分析を行うことは、我が国での航空管制の実態を明らかにするとともに、後述する首都圏空域の活用効果について現在との比較をする際に重要である。本分析ではFlightRadar24¹⁴⁾と呼ばれるサイトより、南風時の西側到着便でPMSを使用した便のデータをダウンロードし、使用した。このサイトは世界の有志の人が受信した、航空機に搭載されたADS-Bから送信される航空機の位置情報データを集めて配信しており、リアルタイムの飛行軌跡を見ることが可能である。なおADS-Bとは、GPSを用いて航空機の位置情報を観測し、さらにはその他の監視情報(機材、対地速度、高度等)と併せて監視者に一括送信する装置である。ADS-Bを搭載していない航空機のデータは取得できない課題がある一方、ADS-Bを用いることで高精度かつ信頼性の高い監視情報を得ることが出来る。また、コロナ渦で一時的に発着数が増加した2020/10~11を対象期間とした。

分析の結果より、現状羽田空港では主に2つのPMSを使用しており、大阪・鳥取方面からの着陸機(以下、ルート1)と沖縄・南紀白浜方面からの着陸機(以下、ルート2)とで使用されるPMSが異なることが確認できた。また、ルート1から飛来する航空機が使用するレグの高

表-1 PMSの実態分析のデータ概要

取得日時	2020/10~11
取得元	Flight rader21
対象	南風時西側到着便でPMSを使用した航空機
機数	88機
天候	抽出日すべて天候は晴天

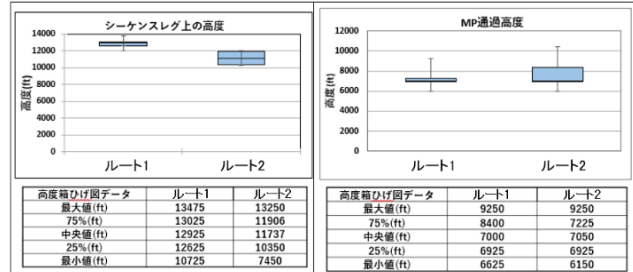


図-2 羽田空港におけるPMSの実態分析の結果

度は13000ft、ルート2から飛来する航空機が使用するレグの高度は12000ftであり、PMSの合流地点(以下、MP)は7000ftであることが確認できた。これは世界的に導入されているPMSの降下角度や高度差と近い値となっている。一方でPMSのレグの大きさについては比較的小さいことが確認できた。さらには、ルート1とルート2から同時に多数の航空機が飛来する場合、航空機がPMSに進入する前のある程度のベクタリングを行っていることが確認できた。これはPMS進入前に間隔調整を行うことで、PMSの容量を超過しないようにすることと効率的にPMSを活用すること、管制負荷の低減をするためであると考えられる。

4. 既存空域シミュレータの改良

(1) 空域シミュレータの概要

本研究では、主に環境問題に着目し、首都圏空域における新たな飛行経路を検討することを目的としている。そこで管制処理システム及び飛行経路の効果を定量的に分析するツールとして、作中ら²⁾の開発した空域シミュレータを用いる。開発はMicrosoft Visual Studio Professional 2012で行い、開発言語はC++を用いている。これはリアルタイムシミュレータであり、1s毎に航空機の方位、速度、高度、座標が計算され、管制官を模擬したアルゴリズムにより指示された方位、速度、高度にしたがって移動する。対象空域は千葉上空や都心上空とその周辺であり、PMSを再現している。また、今回この空域シミュレータの航空機挙動モデルや初期条件の改良を行い、さらには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などが可能となっている。

(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-3に示す。構成は主に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、これらについて先行研究を参考に説明する。

a) 交通流初期値

本研究では横田空域上に航空路を設計していくこととなるが、新しく FIX を設けた場合現行の飛行ルートと変更することが想定される。そこで、新しく設定した航空路に対して、比較的現在のばらつきと近い入力値を作成した。まず初めに、南風運用であり比較的風速が穏やかな 2017/07/15 の羽田着陸機を対象に房総半島上の FIX 計 12 個の使用率の調査を行った結果、ADDUM が全体の使用率の 30% と一番使用頻度の高い FIX ということが確認できた。

次に ADDUM を中心とした同心円上にある緯度経度を算出した。この際入力値の初期値として管制指示がされていない個所からの入力値を作成するため、航空機の降下開始地点を調査した。その結果 ADDUM を中心とした半径約 170NM 以内で降下が開始されていたため、ADDUM から直径 170NM とする同心円状の緯度経度を抽出した。さらに、横田空域上に羽田空港を中心として ADDUM までの距離を半径とする同心円上に仮 FIX を設定し、その FIX を中心とするように上記で抽出した緯度経度を平行移動させた。また、各空港から仮の FIX に対する平均ベクトルを算出し、平均ベクトルが抽出した緯度経度全体の円弧と直角になるよう回転移動させ、その際の緯度、経度、速度、高度、方位を入力値とした(図-4)。最後に、発生時刻に多少のばらつきが生じた場合でも、上記の結果と同様の効果が期待されるかの検証を行った。2 時間に 57 機が発生しているため、約 120s/機を処理していることから 12s の標準偏差の正規分布に従ったばらつきを与え、シミュレーションを行ったところばらつきがない場合と同様の結果が算出されることは確認した。

b) 航空機制御モデル

対象となる空域及び経路上に航空機の数や高度に関する制限を設け、これらを満たすような管制指示をあたえることにより航空機挙動の制御を行った。また、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定要因を考慮した分析が可能としている。具体的には、航空機の挙動開始時に管制官とパイロットの通信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。

表-2 シミュレータ内での管制指示内容

指示項目	都心上空案	横田空域案
高度	設定された高度の制限を満たす	
速度	[1] 設定された速度の制限を満たす。 [2] 先行機との間隔が小さくなりすぎた際に後続機を 10knot の倍数で減速させる。	
方位	[1] 設定された FIX へ進行させる <PM 進入前> [2] 先行機との間隔が取れていない場合設定された FIX に向かわせる。先行機との間隔を満たす、又は設定された FIX に到達した場合に PMS 進入地点に進行させる。 <PM 進入後> [2] 先行機と一定の間隔が取れたらレグを離脱して MP に向かわせる。	
	一定の条件下で PMS をショートカットし、MP に直接向かわせる。	一定の条件下で PMS をショートカットし、特定の FIX に直接向かわせる。

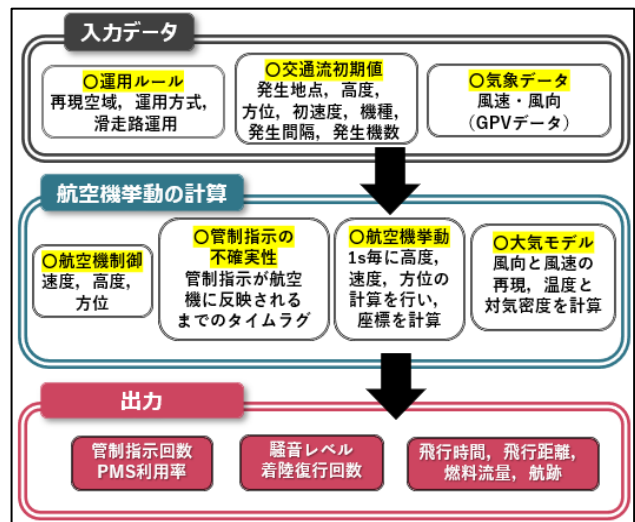


図-3 シミュレータ構成図

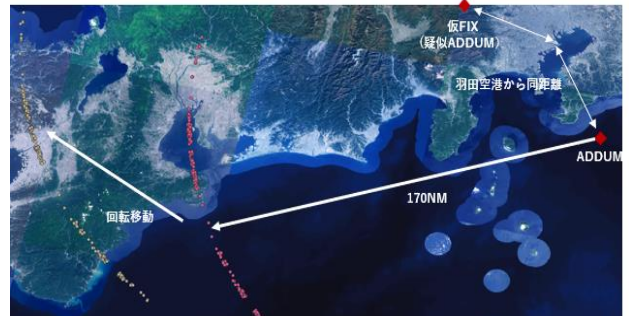


図-4 交通流初期値の作成概要図

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、管制指示の遅れを再現している。

さらに先行研究をもとに一定の条件で PMS をショー

トカットさせるアルゴリズムを組み込んだ。後述する都心上空案ではPMSを使用せずにMPに、横田空域案では騒音分散を目的に特定のFIXへとショートカットさせる。具体的にはそれぞれの案で式 (1a) と (1b) を使用し、先行機との間隔が既定の間隔を満たすと判断した場合にショートカットの管制指示を行う。

① 都心上空案のショートカット判断の計算式

$$\frac{D_{MP2}}{V_2} - \frac{D_{MP1}}{V_1} \geq t_{saf} \quad (1a)$$

② 横田空域案のショートカット判断の計算式

$$\frac{D_{IF2}}{V_2} - \frac{D_{IF1}}{V_1} \geq t_{saf} \quad (1b)$$

D_{MP1} : 先行機のMPまでの距離 (NM) D_{MP2} : 当該機のMPまでの距離 (NM)
 V_1 : 先行機の対地速度 (NM/s) V_2 : 当該機の対地速度 (NM/s)
 D_{IF1} : 先行機の特定のFIXまでの距離 (NM) D_{IF2} : 当該機の特定のFIXまでの距離 (NM)
 t_{saf} : 既定の航空機間隔

また、PMS進入以降先行機との間隔が既定の間隔を満たさない場合は後続機を減速させる速度指示を发出する。PMSに進入前に先行機との間隔が管制方式基準に満たしていない又はPMSの容量が超過する見込みがある場合には実運用を参考にPMS進入前に特定のFIXにベクタリングを行う方位指示を发出することとした。表-2に空域シミュレータ内で発せられる管制指示内容を示す。

c) 航空機挙動モデル

航空機挙動の再現には、航空機の型式毎に速度、高度、方位の計算はEUROCONTROLが管理するBADAモデル⁷⁾を用いている。さらには、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 (B738, A320), 中型機2機 (B788, B763), 大型機2機 (B77W, B772) 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。

航空機を質点と考えた全エネルギーの釣合い式に従って、推力と抗力、重量、真対気速度を用いて計算する。全エネルギーの釣合い式を1sあたりの降下量に置き換えたのが次の式である。

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

$$\frac{dh}{dt} = \frac{(Thr - D) \cdot V_{TAS}}{mg_0} \left[1 + \left(\frac{V_{TAS}}{g_0} \right) \left(\frac{dV_{TAS}}{dh} \right) \right]^{-1} \quad (1d)$$

Thr : 推力 (N) m : 航空機重量 (kg)
 D : 抗力 (N) g_0 : 重力加速度 (m/s²)
 V_{TAS} : 真対気速度 (m/h) $\frac{dh}{dt}$: 降下速度 (h/h)

この計算式に含まれる変数のうち、推力と抗力の2つを定めて、降下速度を計算する。また、航空機の推力と抗力は航空機の機材型式別の性能によって大きく異なる

ため、航空機の高度と航空機の機材型式毎のパラメータを用いて計算する。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、方位、航空機型式であり、今回のシミュレーションでは実データを使用する。さらには、航空機の降下開始地点として実データをもとに東経 137.5 度付近で降下を開始することとした。

d) 大気モデルと気象データ

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。そのため、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MSM¹⁴⁾を用いており、3次元上のエリア毎に風速風向が変化する。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。航空機の速度計算に必要な気温、気圧、対気密度の大気モデルはBADAモデルを用いる。

e) 着陸復行の計測

着陸機が滑走路に着陸する際、滑走路端手前で先行機が滑走路に残っているかどうかを判断し、残っていた場合には着陸復行を行う。着陸復行が生じると滑走路の処理容量は大きく低下する。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、燃料流量の計算は以下のフェーズごとに分けて行う。

① 水平飛行時の燃料流量の計算式

$$f_{cr} = \eta \times Thr \times C_{fcr} \quad (1e)$$

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

② アイドル推力で降下する時の燃料流量の計算式

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

③ アプローチフェーズと着陸フェーズ時の燃料流量の計算式

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

C_{f1} や C_{f2} , C_{f3} , C_{f4} は、型式毎の係数であり、 H_p は気圧高度である。(1e) と (1f) の式を用いて求められる f_{cr} は水平飛行時の燃料流量である。また、BADAモデルにおいてアプローチフェーズと着陸フェーズを除いて、すべての降下はアイドル推力による降下と仮定して計算するため、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。さらに、アプローチフェーズと着陸フェーズ時の燃料流量として (1g) と (1h) の式で計算された値のうち、大きい値を採用することとした。基本的に空域シミュレータではこれらの式を用いて1s毎に航空機毎の燃料流量を計算し、全ての航空機が特定の位

置から発生して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

本研究では、環境影響の一つとして、シミュレーションによってメッシュで設定した受音地毎で生じる騒音レベルをを推計し、環境影響の評価に用いる。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。航空機の音源パワーレベルは、国土交通省が公開している資料で、航空機の機種毎の高度と騒音量の平均値から、距離による音の減衰式を使って逆推定を行った平均値を使用する(表-3)。

一方で、音が伝わる過程での減衰量について一般的に距離、空気、気象などが存在するが、今回は距離による減衰のみを考慮した。以下の式 (li) 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。次に単発騒音暴露レベル L_{AE} :を式 (lj) により算出する。ただし、単発騒音暴露レベルは、(最大騒音レベル-10) dB 以上のものを対象とし、継続時間内の騒音量から算出している。また、航空機の騒音を算出する上で重要な値となる暗騒音は受音地の土地状況によって値が大きく異なる。今回は、45dB (住宅地周辺の音) を一様に設定した。

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

$$L_{AE} = 10 \log_{10} \left(\sum_k 10^{\frac{L_{Acq,ls,k}}{10}} \right) \quad (lj)$$

$$L_{den} = 10 \log_{10} \frac{T_0}{T} \left(\sum_k 10^{\frac{L_{AE,di}}{10}} + \sum_k 10^{\frac{L_{AE,ej}+5}{10}} + \sum_k 10^{\frac{L_{AE,nk}+10}{10}} \right) \quad (lk)$$

L_r : 距離による減衰後の騒音レベル (dB) L_w : 航空機毎の騒音パワーレベル(dB)

Q : 定数1 r : 距離 (km)

L_{AE} : 単発騒音暴露レベル (dB) $L_{Acq,ls,k}$: 1 秒間平均騒音レベルの k 番目の値 (dB)

L_{den} : 等価騒音レベル (dB) $L_{AE,di}$: 昼間の時間帯での単発騒音暴露レベルの i 番目の値(dB)

$L_{AE,ej}$: 夕方の時間帯での単発騒音暴露レベルの j 番目の値(dB) $L_{AE,nk}$: 夜間の時間帯での単発騒音暴露レベルの i 番目の値(dB)

T_0 : 基準の時間 (1 sec) T : 観測時間 (7200 sec)

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、式 (lk) を用いて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

表-3 航空機毎の音源のパワーレベル

項目	機種	音源のパワーレベル (dB)
小型機	B737-800	132.0
	A320	137.6
中型機	B767-300	133.8
	B787-8	136.6
大型機	B777-200	140.4
	B777-300	139.8

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及び土地利用状況や人口データを用いて住宅や人々への騒音影響を評価する。具体的には対象範囲となるメッシュ毎に住宅と人口の重みづけを行い、それに騒音値を掛け合わせることで騒音影響を評価することとした。また、土地利用状況や人口データは国土数値情報のメッシュ毎の値を使用している¹⁸⁾。

5. 首都圏空域の活用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、都心上空を利用した飛行経路が活用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、首都圏空域を活用を検討する必要性は高い。そこで、本分析では、首都圏空域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、新たな飛行経路の提案を検討する。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、横田空域を活用する案ではA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。また、管制方式基準に従って着陸までの経路を設定し、現行の都心上空ルートについては、AIPチャート及び分析結果による値を使用することとする。

(2) 対象とする交通流

空域シミュレータ内で対象とする交通流は、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 Data2017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2017年7月15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、本分析では8時から10時までの着陸機数57機を交通シナリオとし、

分析に用いた。シミュレータ内で対象と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、方位、航空機の型式、発生地点である。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) 首都圏空域を活用する飛行経路の検討

a) 都心上空案

都心上空案のイメージ図を図-5に示す。現行の運用と同様にPMSの合流地点を千葉県上空に設置している。PMSの進入場所は現状の交通流に重なるように2か所設置し、それぞれのレグ(内側をLeg1, 外側をLeg2とする)の半径は分析結果よりLeg1は24NM, Leg2は26NMと間隔は2NM, 飛行高度はLeg1は13000ft, Leg2は12000ftと1000ftの差をつけている。また、MP通過前までは7000ft以上、SANDY手前までは5000ft以上とMP通過後の制限速度や高度はAIPチャートを参考に設定した。さらにはMP通過後から着陸までの経路が長いいため、速度指示により航空機の間隔調整をすることとした。

b) 横田空域案

横田空域案のイメージ図を図-6に示す。特徴として西側からの着陸便が着陸経路に進入する際の旋回行動が北方面から飛来する着陸機の着陸経路に影響がないようにMPとFIX1をFAFと羽田空港の直線状から1.5NM西側に設置している。FIX1はショートカットする航空機が使用し、FIX1を通過後FAFに向けて旋回行動を開始する。また、MPを通過する航空機はFIX2に向けて旋回行動をし、FIX2を通過後はFAFに直進する。FIX1からFAFまではショートカットをする航空機の間隔調整がFAF進入前に完了するように3NMの距離を設定している。さらにはPMSの進入地点は神奈川県側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)の間隔は都心上空案と同様に2NM, 飛行高度は1000ftの差をつけて設置した。PMSの半径をLeg1は30NM, Leg2は32NMとし、MP手前までは5000ft以上とした。PMSの進入高度やPMSの進入速度は海外で導入されているPMSの平均的な降下角度や進入速度を参考に設定した。また、首都圏上空にPMSを設置しているため、騒音の分散を目的として都心上空案よりもPMSのレグの長さを大きめに設定した。それ以外の諸条件は実運用を参考に値を決定した。

(4) シミュレーション結果の比較

上記の設計をもとに、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-7, 図-8にシミュレーション結果より得られた航跡図を示す。横田空域案はす

表-4 設定した飛行地点の高度と速度制限の比較

	飛行地点	高度制限	速度制限
都心上空案	PMSLeg(内側)	13000ft	230kt以下
	PMSLeg(外側)	12000ft	230kt以下
	MP (PMSの合流地点)	7000ft	230kt以下
	SANDY手前	4000ft	210 kt以下
	FAF(最終進入口)	3400ft	180 kt以下
	滑走路端	50ft	150 kt以下
横田空域案	PMSLeg(内側)	13000ft	230kt以下
	PMSLeg(外側)	12000ft	230kt以下
	MP (PMSの合流地点)	5000ft	210kt以下
	FAF手前	4000ft	210 kt以下
	FAF(最終進入口)	3400ft	180 kt以下
	滑走路端	50ft	150 kt以下

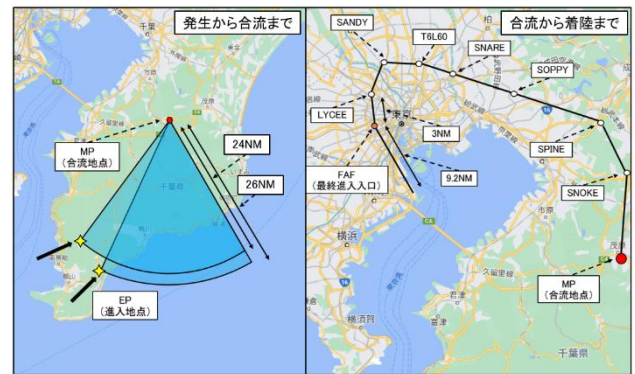


図-5 都心上空案の設計図



図-6 横田空域案の設計図

べての航空機がPMSで処理できたことが確認できた。一方で都心上空案はすべての着陸機を処理できないと判断したため、9機がPMS進入前にベクタリングによる間隔調整をしていることが分かる。これはPMS進入20NM前までは速度指示を発出していないため機体によって速度が大きく異なること、また横田空域案より都心上空案の方がPMS進入地点までの飛行距離が長いことから先行機との間隔が縮まってしまったことが要因であると考えられる。運航効率に着目して比較したところ、飛行距離、

飛行時間、燃料流量すべてにおいて横田空域案の方が都心上空案より小さい結果となった。特に、燃料流量は65.5%の減少と飛行距離の減少量30.7%や飛行時間の減少量40%に比べ大きい。この理由として横田空域案は都心上空案に比べ降下開始地点～PMSまでとPMS離脱後～着陸までの距離が短いため、長時間水平飛行する航空機が減少したからと考える。

また、東京から福岡までの燃料消費量は7800kg/機（B767型の場合）¹⁹であることから約16%/機の燃料削減がされ、年間では19.6ktの燃料消費量削減につながる（2020/4/3のデータより南風都心ルート運用時の航空機は109機、年間南風割合を4割として計算）。CO2排出量に換算すると（ジェット燃料密度は0.8t/kL、排出係数は3.16-CO2tと設定）49.6kt/年削減でき、これは国内航空が年間に排出するCO2の約0.5%に相当する。

次に管制指示回数について比較をすると、方位、間隔調整指示が都心上空案より減少した。これは都心上空案ではPMSへの進入前にベクタリングによる間隔調整をしていること、さらにはMPを通過してから着陸するまでの距離が長く、その間で機材ごとの速度が異なるため、間隔調整を多く行う必要があったことが考えられる。

（図-9）。

最後に、騒音影響について比較する。騒音量は対象となる範囲のすべての騒音影響(dB)を加算した値、住宅影響、人口影響については対象の区間となる全範囲の住宅、人口の総数から対象となるメッシュの住宅、人口の割合を算出し、それに対象となるメッシュの騒音量を掛け合わせた値の総量となっている。全体的な騒音値の合計で比較をすると横田空域案の方が都心上空案よりやや騒音

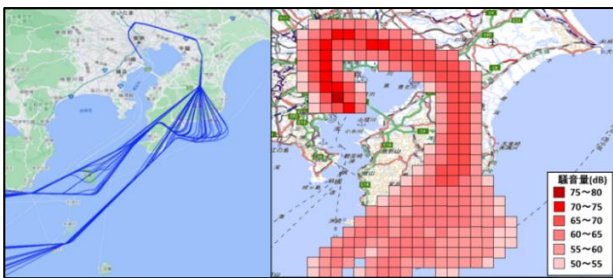


図-7 都心上空案の航跡図と騒音影響図

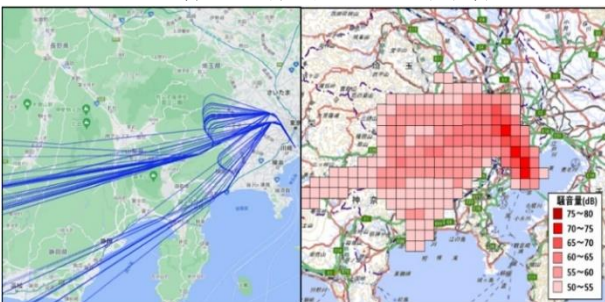


図-8 横田空域案の航跡図と騒音影響図

表-5 飛行距離、飛行時間、燃料流量の平均値の比較

		飛行時間	飛行距離	燃料流量
		(sec)	(NM)	(kg/機)
都心上空案	平均	3415	331.8	1917.5
	最大	3684	354.9	2988.2
	最小	3107	311.4	1308.4
	分散	18543	76.24	238149.5
	標準偏差	137.8	8.73	488.0
横田空域案	平均	2057	228.7	685.0
	最大	2261	245.6	1385.4
	最小	1749	218.3	445.7
	分散	11642	51.7	40335.8
	標準偏差	107.9	7.19	200.8

表-6 騒音の住宅、人口への影響比較

		騒音量	住宅影響	人口影響
		(dB)	(dB)	(dB)
都心上空案	合計	20521.3	1908.4	2025.0
横田空域案	合計	18598.1	1592.4	2207.9

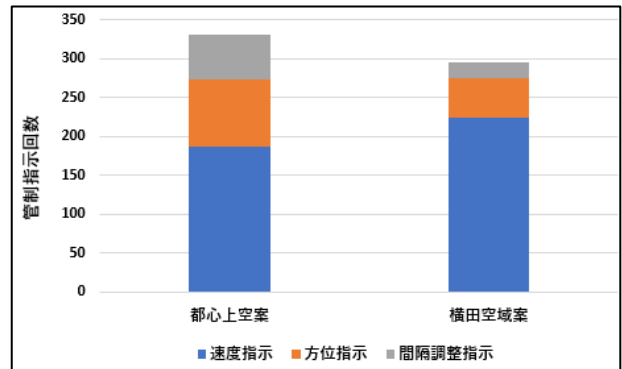


図-9 管制指示の比較

値が小さい値となっている。これは都心上空案では、MP合流地点から着陸までの距離が長く、単一の経路を飛行していることが要因であると考えられる。一方で、平均的に人口と住宅に与える騒音レベルとしてはどちらの案も大きな差はみられなかった。これは横田空域案で導入したショートカットの効果及びPMSの大きさを広めに設定したことにより、騒音が分散されたことが考えられる。

以上のことから、本研究の横田空域案では現状よりも多少の航空機の時間差があったとしても高い効果が期待できることが確認できた。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、今回のシミュレーション対象エリア外においても横田空域案の方

が都心上空案よりも一定程度の飛行距離が短縮される可能性があると考えられる。

6. 結論と今後の展開

本研究では、環境問題に着目して羽田空港を対象に先進的管制運用方式を用いた新たな首都圏空域における飛行経路を検討するという長期的な目的を達成するため、作中ら²⁾が開発した管制指示の特性を考慮した先進的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改良することと作成する首都圏空域の活用案の効果についてシミュレーション分析することを行った。既存空域シミュレータの改良では、交通流の入力値を導入することで現行の交通流の再現を行った。また、騒音分散を目的に都心上空案ではPMSを使用せずにMPに、横田空域案では特定のFIXへとショートカットさせる管制指示を導入した。さらにはPMS進入前に現行の運用に近いベクタリングを行わせることでPMSの容量超過の調整を行った。シミュレーション分析では、まず都心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。特に燃料消費量は年間で19.6kt、CO2排出量は49.6kt削減でき、これは国内航空が年間に排出するCO2の約0.5%の削減に寄与できることが確認できた。今後の課題としては、実運用で生じる不確定要因を明らかにすることで管制シミュレータの再現性を向上させること、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す。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いています。さらには日本航空株式会社様には、前提資料調査のご提供や共同会議でのアドバイスを賜りました。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：グリーン社会の実現に向けた国土交通省環境行動計画等の改定に向けて、
<https://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/content/001402584.pdf>.
- 2) 作中祐介, 阪本真, 屋井鉄雄：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, 土木学会 論文集 D, Vol. 75, No.6, 2020.
- 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) 武市昇, 虎谷大地, 岡恵：航空交通流管理と到着間隔づけの相互運用性の検討, 電子航法研究所研究発表会, 2018.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 平田輝満, 清水吾妻介, 屋井鉄雄：羽田空港再拡張後の新規滑走路整備による容量拡大方策と騒音影響に関する研究, 土木学会論文集 D3, Vol.67, No.5, 2011.
- 8) 寺田惇郎, 平田輝満, 清水吾妻介, 屋井鉄雄：市街地における航空機騒音への受容意識の分析, 土木学会論文集 D3, Vol.68, No.5, 2012.
- 9) 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回土木計画学研究発表会, 2018.
- 10) 伊藤恵理, 蔭山康太, 大津山卓哉, 天井治, 宮沢与和, 立川智章, 関根蔣弘, 日笠航希, 森川暢明, Juergen Rataj, Michanel Fineke, Mihael Mitici, Michael Shultz, Srinivas Athota, Vu Duong 東京国際空港を対象とした到着管理の研究開発と応用, 第21回電子航法研究所発表会, 2021.
- 11) EUROCONTROL: Point Merge in Extended Terminal Area, 2010.
- 12) 清水哲：米国における航空交通管理の近代化 (Next Gen) について, 運輸政策研究, 2015.
- 13) 混雑空港における騒音負担のあり方と都心上空ルートの活用可能性に関する一考察, 第115回運輸政策コロキウム, Vol.16 No.3, 2013.
- 14) FlightRadar24: <https://www.flightradar24.com/35.69,139.75/7>
- 15) 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.
- 16) 京大生存圏研究所, 気象庁データ, <http://database.rish.kyoto-u.ac.jp/arch/jmadata/data/gpv/>
- 17) 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., <http://database.rish.kyoto-u.ac.jp/arch/jmadata/data/gpv/>
- 18) 国土交通省: 国土数値情報ダウンロード, <https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/>
- 19) 国土交通省: 航空分野における CO2 削減の取り組み状況, <https://www.mlit.go.jp/common/001403136.pdf>

AIR TRAFFIC BY UTILIZING THE AIRSPACE OF THE METROPOLITAN AREA RESEARCH ON ENVIRONMENTAL IMPROVEMENT EFFECTS

Keita KINOSHITA and Tetsuo YAI

Global aviation demand is increasing year by year, especially in emerging economies such as Asia and South America, and urgent functional enhancement is a top priority at metropolitan airports. On the other hand, in recent years, with the rapid changes in social conditions and the natural environment, countermeasures against environmental impacts have begun to be required. Overseas, the development of software such as the introduction of an efficient control processing system is progressing, and the effects of improving the workload of controllers, reducing fuel consumption, and reducing the environmental load are being achieved. Moreover, in Japan, the Yokota airspace, which is an entry restricted area, and the metropolitan area airspace are not being effectively utilized due to the influence of noise. The purpose of this study is to study a new flight route utilizing the airspace of the Tokyo metropolitan area for Haneda Airport and analyze its effect. Therefore, we focused on the Point Merge System as an advanced control operation method introduced in Japan in recent years, and clarified the actual operation at Haneda Airport. Furthermore, based on the results, after improving the airspace simulator developed in the previous research and verifying the reproducibility, we conducted a simulation analysis when utilizing the metropolitan area airspace for flights arriving on the west side. A basic study of the effect was conducted.