

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

阪本 真¹・屋井 鉄雄²

¹正会員 パシフィックコンサルタンツ株式会社 社会マネジメント本部 東北社会マネジメント部
(〒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

²正会員 東京工業大学教授 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 神奈川県横浜市緑区長津田町4259)

E-mail: tyai@enveng.titech.ac.jp

航空需要の増加に伴い、首都圏空港は更なる機能強化が必要とされている。海外では、従来の管制運用方式とは異なる先進的な管制運用方式の導入によって空港の機能強化が達成されている。本研究では、この先進的な管制運用方式の導入が国内大規模空港に与える効果を検証するためのツールとして、管制指示の特性を反映した空域シミュレータの開発を行うことを目的とする。本稿ではPoint Merge System (以下、PMS) と呼ばれる運用方式に着目し、従来の研究には見られない管制指示音声データを利用した分析により、PMS における管制指示及び航空機挙動の特性を定量的に明らかにした。次にこの結果を踏まえて以前の研究で開発した基礎的なシミュレータの改良を進め、羽田空港にPMSを導入した場合の効果について基礎的な検討を行った。

Key Words : ATC(Air Traffic Control), ATC instructions, Simulator, Point Merge System

1. はじめに

近年、航空需要は拡大を続けており、今後も航空旅客数は増加し続けると見込まれている¹⁾。航空局の需要予測によると、この世界的な航空需要の拡大を背景に、将来的に首都圏空港（羽田空港と成田空港）の容量は逼迫することが想定されており²⁾、中長期的な首都圏空港の機能強化は最優先課題となっている。

日本では、将来の航空交通システムに関する長期ビジョン (CARATS) が策定されており³⁾、航空交通量増大への対応や運航の効率性向上など、7項目が目標として掲げられている。CARATSでは、特に今後検討・実施される空域編成や高密度運航といった管制運用の面の施策が細かく示されている。また、羽田空港では、従来騒音の問題から使用されていなかった都心上空を活用した飛行経路の運用が検討されている⁴⁾。この運用が実現すれば1時間あたりの滑走路容量を増やすことができるが、都心上空を航空機が飛行するため、騒音や安全性等の問題も同時に検討する必要がある。一方海外では、空港の処理容量拡大や運航効率性の向上、騒音の低減などを目的とした、従来の管制運用方式に様々な工夫を加えた新しい

管制運用方式 (以下、先進的な管制運用方式) が複数の空港や空域で導入されて効果を上げている。

管制運用面から空港の機能強化を目指す方策には、導入コストの安さ、導入にかかる時間の短さ、導入後の運用の柔軟性などのメリットがあり、国内大規模空港でもこのような先進的な管制運用方式を取り入れ、管制運用の面から空港の機能強化を図る意義は大きいと考える。

以上を踏まえ、本研究の長期的目標は国内大規模空港の機能強化方策について、先進的な管制運用方式や新たな飛行経路の導入といった視点から検討を行うこととする。導入効果は、飛行距離や燃料消費量といった航空機の運用効率面と騒音や管制負荷といった周辺分野の双方から分析する。

本稿ではこのような長期的目標を達成するため、先進的な管制運用方式や新たな飛行経路の導入が空港の機能強化に与える影響を定量的に分析するためのツールとして、管制指示の特性と航空機挙動を再現した空域シミュレータの開発を目的とした。また、国内大規模空港として羽田空港、先進的な管制運用方式としてPoint Merge System (以下、PMS) と呼ばれる到着機の管制方式に着目した。研究の流れとしては、最初にPMSが導入されているダ

ブリン空港の実運航下の管制指示音声データと飛行軌跡データを独自に取得することでその運用実態を明らかにした。さらにその結果を踏まえ、以前の研究⁵⁾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、羽田空港の到着機管制にPMSを導入した場合のシミュレーション分析を実施し、その効果に関する基礎的な検討を行った。

2. 既往研究の整理

本研究では、最初にPMSの運用実態を管制指示と飛行軌跡の双方の視点から分析する。管制指示に関する研究として、福島・東福寺⁶⁾は、仮想的な空域を模したシミュレータを作成し、管制官役の人間を配置したシミュレーション実験を実施することによって到着機の管制処理に関する評価を行っている。北詰ら⁷⁾は、羽田空港到着機の現状の管制処理について、実運航下の飛行軌跡データを用いて飛行時間や遅延の観点から分析を行っている。先進的管制運用方式を扱った研究として、PMSを開発したEUROCONTROL⁸⁾はPMSの導入効果についてフランスの空域を対象とした管制官参加型の実時間シミュレーション実験を行っており、管制官のワークロードの減少や、安全性と容量の増加などの効果を確認している。蔭山⁹⁾は日本の空域へのPMSの導入効果について、羽田空港への到着機処理を対象としたモデル化を行い、高速シミュレーションによって運用効率の面での便益を検討しているが、既存のシミュレーションソフトを用いているため、シミュレーションの中で交通流の処理を行う管制指示の部分がどの程度実運航下の管制指示を再現できているのかは不明である。

このように管制運用の特性を解析している研究は多いが、仮想的な空域におけるデータや飛行軌跡データからの分析にとどまっており、本研究のように実運航下の管制官とパイロットの指示とやりとりのデータを取得し、飛行軌跡データと組み合わせて分析を行っている研究は見られない。また、先進的管制運用方式を扱った研究は航空機の運航効率に着目したものが多く、管制指示を考慮した評価を行っている研究は少ない。本研究では、実際の管制官の音声データと飛行軌跡データを組み合わせた分析を行っており、より実態に近い管制指示特性の把握が可能である。また管制指示特性を反映した高速シミュレータを開発し、先進的管制運用方式を再現することで管制指示と航空機挙動間の特性や不確実性を考慮した先進的管制運用方式の導入効果の検証を短時間で行うことができる。

3. 日本における航空管制業務と羽田空港の到着機管制の実態把握

本章では、日本で実施されている航空管制業務の概要と、本研究が対象とする羽田空港における到着機の管制運用の実態について述べる。

(1) 航空管制の概要

航空機は音速に近い速度で飛行している、運航中に静止できない、機上から周囲の航空機を視認できない等の、他の交通手段にはない特徴を有している。したがって、航空機の安全で効率的な運航を実現するため、地上にいる航空管制官（以下、管制官）がレーダーなどで航空機の位置や速度を把握し、方位や速度、高度などの指示をパイロットに発出することで航空機を誘導している。このような航空管制業務は、航空機の飛行フェーズ毎に飛行場管制業務、ターミナルレーダー管制業務、航空路管制業務の3つに区分される。

また世界の空は、各国の航空管制業務の担当空域を示す、FIR（Flight Information Region：飛行情報区）と呼ばれる空域に分割されている。FIRはICAO（国際民間航空機関）によって設定されたもので、日本の担当FIRは福岡FIRと呼ばれる。福岡FIRは日本の領土よりも広大な領域に設定されているのが特徴で、札幌、東京、福岡、那覇の4つの管制部と洋上の管制を担当している航空交通管理センターの5つに分かれており、それぞれの管制空域を分担している。各航空交通管制部の所轄空域は、航空機を安全かつ効率的に管制できるようにセクターと呼ばれる空域に細分化されており、通常1つのセクターに2人の管制官が配置されている。

(2) 羽田空港到着機管制の実態

到着機の管制では、各方面から飛来する航空機の間隔や順序を設定し、合流させる、到着機の整流作業が行われている。この整流作業にはベクタリングと呼ばれる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。どのようなベクタリングを行うかは、一律の基準がなく、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発出しており、管制官への負荷が大きくなる手法である。特に羽田空港西方面到着便の管制が行われているT14セクター（以下、T14）およびT09セクター（以下、T09）は非常に混雑した空域となっており、ベクタリングは複雑になる傾向にある。羽田空港西方面到着便の羽

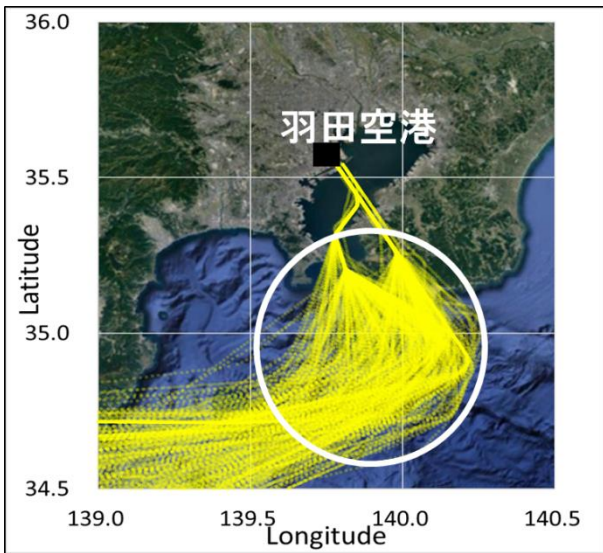


図-1 羽田空港西方面到着便の航跡例
(CARATS Open Dataを元に作成)

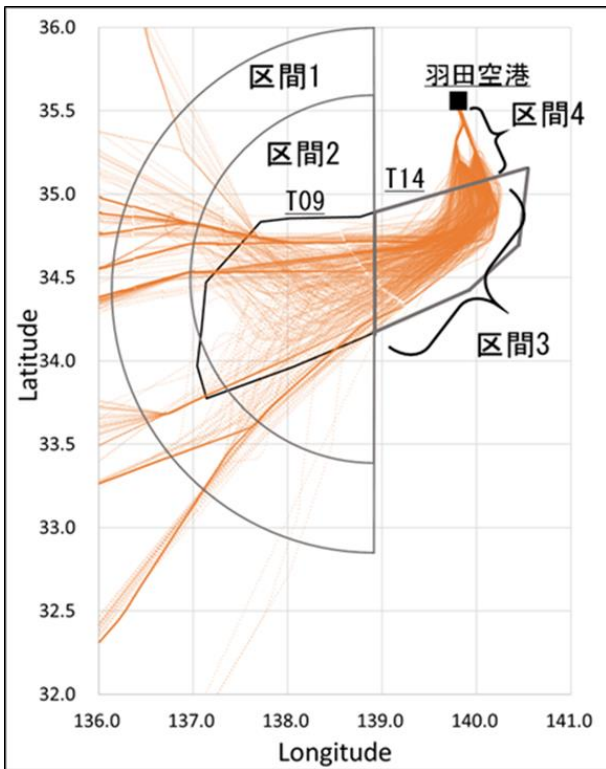


図-2 羽田空港西方面到着機の航跡と区間1~4の位置関係

田空港手前における航跡例を図-1に示す。

図-1の円の中の航跡は非常に複雑になっており、各便でそれぞれ異なったベクタリングが行われていることが確認できる。

ベクタリングによる到着機の整流作業を、より簡単で、どのような交通状況でも一律の基準で到着機の整流作業を行うことができる運用方式に置き換えることができれば、飛行時間や空域処理容量、燃料消費量等の運用効率面で改善の余地があると考えられる

(3) T14とT09の役割分担

最後にCARATS Open Dataを用いたT09とT14におけるベクタリングと航空機の順序の変化に関する考察を示す。なおここでは2014年11月10日のデータから羽田空港西方面到着機の航跡のみを抽出し、解析対象とした。

最初にT09の手前から羽田空港までの空域を区間1 (T09とT14の境界の手前100NM~60NMの空域)、区間2 (T09とT14の境界の手前60NM以内の空域)、区間3 (T14)、区間4 (T14を出てから着陸まで) の4つの区間に分け、各区間での航空機の入域及び出域時刻を算出、比較することで順序の変化を調べた。

図-2に到着機の航跡とT09, T14, 区間1~4の位置関係を示す。各区間での全便の入域時刻及び出域時刻から航空機の通過順序の変化を調べると、区間内では順序が変化した航空機の組は区間1では28組、区間2では27組、区間3では7組、区間4では0組であった。

また航跡に着目してみると、本来の飛行経路は直線的だが、航跡は各便によって様々な曲線を描いており、ベクタリングが盛んに行われていることが確認できる。ベクタリングの量を見ると、区間1や2では比較的大きなベクタリングが、区間3では細かいベクタリングが行われているが、区間4ではベクタリングはほとんど行われておらず航跡は滑走路に向かって収束している。

以上より、空港から遠い空域 (区間1, 区間2) では大きなベクタリングにより各方面から飛来する航空機の順序設定が行われていると考えられる。一方、区間3や4では順序の変更はあまり行われていないため、細かいベクタリングによって着陸のために必要な航空機間の間隔調整が行われていることが推測され、空域ごとに管制作業の役割分担がなされていることがわかる。

したがって、T09やT14の管制運用の効率向上を達成するためには、到着機の間隔設定や順序設定を行いやすくする運用方式の導入が効果的であると考えられる。

4. ダブリン空港におけるPMSの運用実態分析

(1) PMSの概要

本研究では、ベクタリングに代わる到着機の合流手法として、PMS (Point Merge System : ポイント・マージ) と呼ばれる運用方式に着目した。

PMSは、EUROCONTROL (欧州航空航法安全機構) によって開発された、ターミナルレーダー管制業務が行われるターミナル空域やその少し手前の空域で運用する到着機の合流手法である。戦略的に航空機の間隔付けを行い、空港に着陸させることができ、管制官への負荷が小さいのが特徴である。PMSは現在、オスロ(2011)、ダブリン(2012)、ハノーファー(2014)等の世界14空港で導入

されている¹⁰⁾。

PMSでは、空域上に設定された扇形の経路を使用することで到着機の間隔付けや合流作業を行う。扇形の経路は、一般的に図-3のような形態を取る。具体的には、到着機は必ずこの経路を通過するように定められており、図-3における[1]の方向からEntry Point (以下、EP) を通ってPMSに進入する。EPを通過した到着機は、シーケンスレグ (以下、レグ) と呼ばれる円弧上の経路に進入し、管制官から指示があるまでレグ上を反対側に向かって飛び続ける ([2])。管制官は先行機と安全な間隔が保たれたと判断すると、航空機にレグを離脱して扇形の中心であるMerge Point (以下、MP) に向かうように指示を発出する。指示を受けた航空機はレグを離脱し、降下しながらMPを目指す ([3])。レグを離脱した航空機に対しては原則として速度指示のみで間隔の調整を行う。レグは一般的には2本であり、それぞれ高度が異なっている (外側のレグの高度の方が1,000ft低いことが多い)。一般的な運用では、レグ上での高度や速度の変化はない。

PMSは、前章で紹介したベクタリングと異なり、どの到着機に対しても空域上に固定された経路を使用して間隔付け及び合流作業を行うため、視覚的に将来の交通状況を予測しやすく、単純な指示で航空機の間隔設定を行うことができるという特徴がある。理論上高度指示と方位指示に関しては、それぞれレグを離脱しMPに向かわせる指示、MP通過時の高度を指定する指示のみで管制可能である。(速度指示は微調整を行うため、指示の内容や回数にはばらつきが生じると考えられる。)

また、燃料消費量の削減、騒音の低減、安全性の向上、容量増加の可能性、管制官ワークロードの低減などの効果もある。実際に、PMSを導入したダブリン空港では、2013年の着陸機において1フライトあたり、燃料消費量が127kg (93.10ユーロ相当, 19.1%)、飛行距離が11.3マイル (17.0%)、CO₂の排出量が23,500トン (19%) 削減されるという効果が生まれている¹¹⁾。羽田空港においても、ベクタリングに代えてPMSを導入することで、現状のベクタリングによる運用と比較して、運用効率を向上させることが期待できる。

(2) 分析の概要と目的

PMSにおける航空機挙動と管制指示の特性を定量的に明らかにし、後述する空域シミュレータに組み込むパラメータを抽出することおよび実運用におけるPMSの有効性の確認を目的として、PMS導入空港であるダブリン空港の運用実態の分析を行った。

本分析は、管制官とパイロットのやり取りを録音した音声データ (以下、音声データ) と飛行軌跡データ (以下、航跡データ) を独自に取得し、これらを組み合わせ

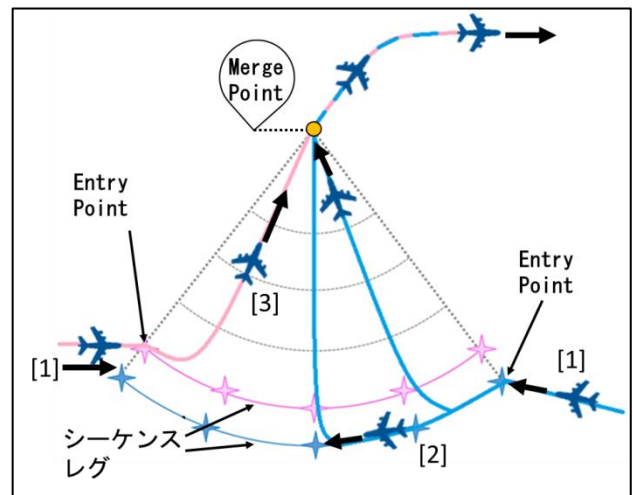


図-3 PMSの運用イメージ図

る形で行った。音声データは、すべて聞き取ってテキスト化する必要があるため、データ化に時間がかかるものの、実際に行われている管制指示を精度良く抽出することができるという点が優れている。また、いずれのデータも2017年11月7日、8日、13日の各2時間、計6時間のデータを取得した。

(3) 対象空域

PMS導入空港として、ダブリン空港を今回の分析対象とした。ダブリン空港では2012年よりPMSが運用されている。ダブリン空港では、使用する滑走路に応じて2種類のPMSが設定されているが、RWY28に着陸する到着機を対象に行われるPMSを対象とした。MPはLAPMO、最終進入が始まるFinal Approach FIX (以下、FAF) はMAXEVという名前がついている。北側飛来する便が内側のレグ、南側から飛来する便が外側のレグに進入する。

PMS周辺では、Dublin Approach管制 (ダブリン空港アプローチ管制) によって管制が行われている。到着機はPMSを通過した後、MAXEV周辺でDublin Tower管制に移管される。音声データは、Dublin Approach管制でおこなわれたやり取りを取得した。以後、Dublin Approach管制と到着機の最初のやり取りが始まった時を入域、最後のやり取りが終わった時を出域と呼称する。

(4) 分析に使用したデータ

最初にデータの取得方法について説明する。

音声データは、LiveATC.net¹²⁾ と呼ばれるサイトを活用した。このサイトは、世界の有志の航空ファンが受信した航空無線データを集めて無料で配信している。データはリアルタイムで配信しているものを聴くことができるほか、過去30日の録音データが30分前後の長さのMP4ファイルとして公開されており、ダウンロード可能である (アーカイブ機能)。データの配信状況にムラがあり、

聞けないときもある。また、データ提供者がいない空港の音声は聞くことができない。今回は音声と時刻を同期させるために、配信されている音声をすべてリアルタイムで録音し、音声をすべてテキスト化することで指示の内容を抽出した。

航跡データは、FlightRadar24¹³⁾と呼ばれるサイトより必要な便のデータをダウンロードし、使用した。このサイトではLiveATC.net同様、世界の有志の航空ファンが受信した、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、世界中の航空機のリアルタイムの飛行軌跡を見ることができる。なおADS-Bとは、GPSを用いて自らの位置情報を観測し、またその他の監視情報（識別、速度など）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問題がある一方、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。

音声データ及び航跡データの概要は表-1に示す。

表-1 取得した音声データと航跡データの概要

取得日時	2017年11月7日, 8日, 13日 9~11時(UTC+0)	
内容	管制官とパイロットの指示のやりとりの音声	UNIX time, 時刻(UTC), Callsign, 緯度 経度, 高度, 対地速度, 方位
対象	上記の時間帯にダブリン空港アプローチ管制が管制した便	
便数	7日: 36機, 8日: 43機, 13日: 44機	7日: 35機, 8日: 39機, 13日: 38機
指示回数	7日: 626回, 8日: 624回, 13日: 559回	
取得元	LiveATC.net ¹²⁾	FlightRadar24 ¹³⁾

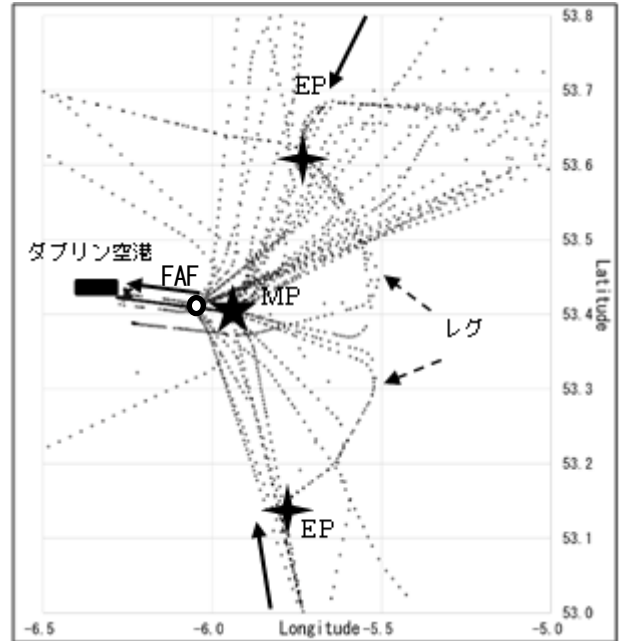


図-4 ダブリン空港到着機の航跡(11月7日)

(5) 運用実態分析の結果

a) 航跡に関する分析

図-4に11月7日のダブリン空港到着機の航跡を示す。図中の実線矢印は大まかな航空機の流れる向きを表す。到着機は、北方面から来る便と南方面から来る便の2種類があり、北方面から来る便は内側の半径が小さいレグ、南方面から来る便は外側の半径が大きいレグを使用する。

図-4から、レグに沿って航跡が形成されており、PMSが十分活用された運用が行われていることがわかる。一方で、レグを無視して直接MPに向かっている（PMSをショートカットしている）航跡も多く確認できる。このような便にはかなり空港から遠い場所からショートカットしているものもある。3日間を通じて、PMSを通過した便が38機、PMS手前からショートカットした便が53機、EP付近からPMSをショートカットした便が21機、航跡データなしが11機であり、航跡が判明している便の中で約66%の便がどこかの段階でPMSをショートカットしていることが明らかになった。ショートカットの発生原因としては、先行機との間隔が十分大きく、PMSをわざわざ通過させる必要がなかったこと、などが考えられる。

b) 発出された指示に関する分析

発出された管制指示の回数やその内容について、PMSを通過した便とPMSをショートカットした便で比較を行った。

最初に入域から出域までの過程で行われた管制官とパイロットのやり取りの回数の比較を行う。図-5にPMSを通過した便に発出された管制指示の回数の分布、図-6にPMSをショートカットした便に発出された管制指示の回数の分布を示す。

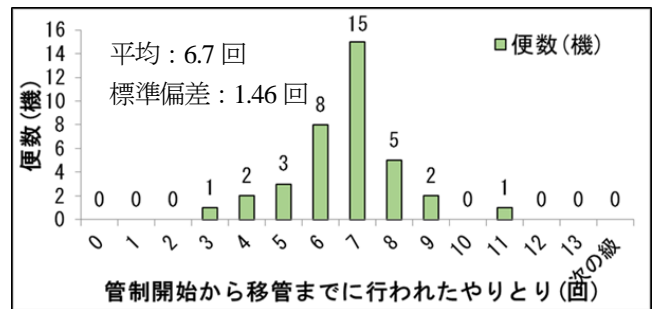


図-5 PMSを通過した便

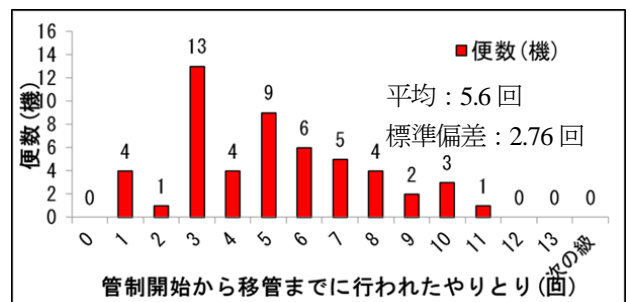


図-6 PMSをショートカットした便

PMSを通過した便は平均で6~7回の指示が発出されて

いるのに対し、PMSをショートカットした便は平均で5~6回の指示で入域から出域まで管制されている。さらに指示回数の分布もPMSをショートカットした便の方が少ない方に偏っている。

PMSを通過した便とショートカットした便のやり取りの回数の分散と平均値に対して、それぞれF検定とt検定を行った結果、分散、平均共に有意な差が認められた(有意水準5%)。すなわち、PMSをショートカットする便は、PMSを通過する便に比べて少ない指示で管制が行われていることが明らかとなった。音声データを見ると、ショートカット便はあまり細かい指示は発出されず、目指すFIXや高度などの簡単な指示のみ発出されている傾向が確認できた。大まかな指示で管制を行うことができているのは、ショートカット発生時は交通流が少ないため、細かい飛行高度や速度の設定はパイロット側に任せても安全上問題ないためであると考えられる。パイロット側は飛行時間や燃料消費量等の観点から最適な高度や速度を選んで飛行していると思われる。

次に、PMS通過便37機を対象とし、発出された指示の内訳を図-7~9に示す。なお高度、速度、方位に関する指示のみ集計しており、高度計規正值(QNH)やILSに関する情報などのその他の指示は内訳に含めていない。

図-7から、1機あたりの高度指示の回数は1回程度となっており、その指示内容はどの機も同じような内容となっていることがわかる。図-8から、方位指示に関しても同様の傾向が確認できる。一方で図-9より、速度指示は指示内容のばらつきが大きく、発出され指示回数も高度指示や方位指示に比べて多いことがわかる。この特徴は、4章1節で述べたPMSの特徴に合致しており、実運用においても、単純な指示で到着機の管制が可能であるというPMSの有効性が発揮できているといえる。

c) 域内管制機数と管制指示回数・管制されていた時間の関係

通常のベクタリングによる管制運用では、交通流が増加すると指示回数が増えたり、複雑になったりする。一方、PMSは単純な指示のみで到着機の合流を行うことができる手法であり、交通量がある程度増加しても管制指示回数を増やさずに管制することができると考えられている。このことを、域内管制機数と管制指示回数・管制されていた時間の関係に着目して図示した。域内管制機数とは、その瞬間にDublin Approachが管制している機数のことを表す。これらの関係を日付別に示す(次ページ図-10, 図-11, 図-12)。なおグラフにおいて、矢印の高さはその便に対して発出された指示の回数を表す。

各日、域内管制機数が4機以上になるとPMSを利用して到着機の管制を行っていることがわかる。これは、交通量が少ない時間帯は積極的にPMSのショートカットが行われているともいえる。さらに11月8日は観測した時

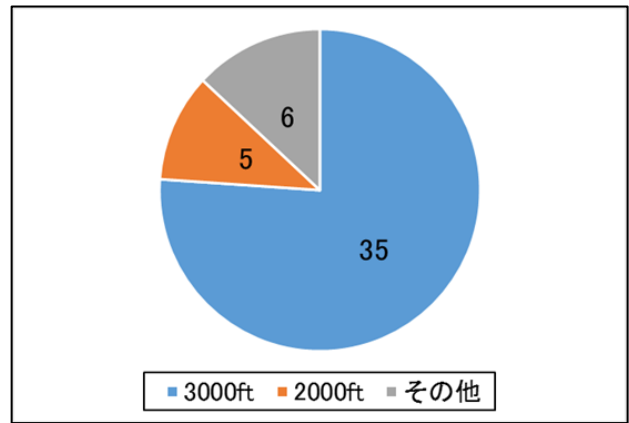


図-7 高度指示の内訳

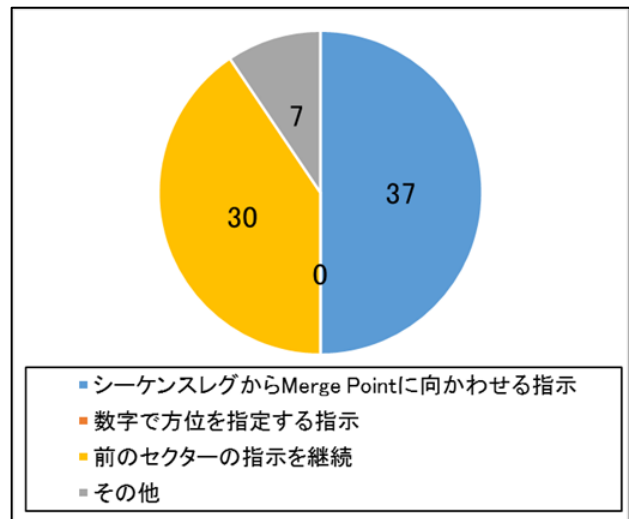


図-8 方位指示の内訳

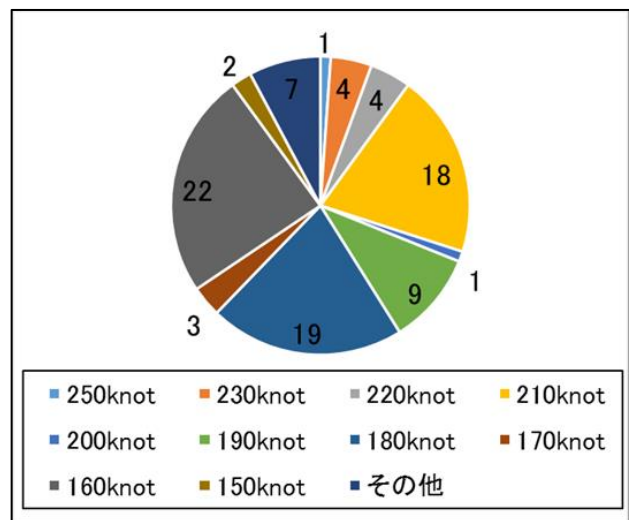


図-9 速度指示の内訳

帯はほぼすべてでPMSを利用した管制が行われているが、域内管制機数が増加しても管制指示回数に大きな変化は見られない。これは、交通量が増えてもPMSを利用することで、管制指示回数を増やさなくても到着機の合流作業を行えている可能性を表している。

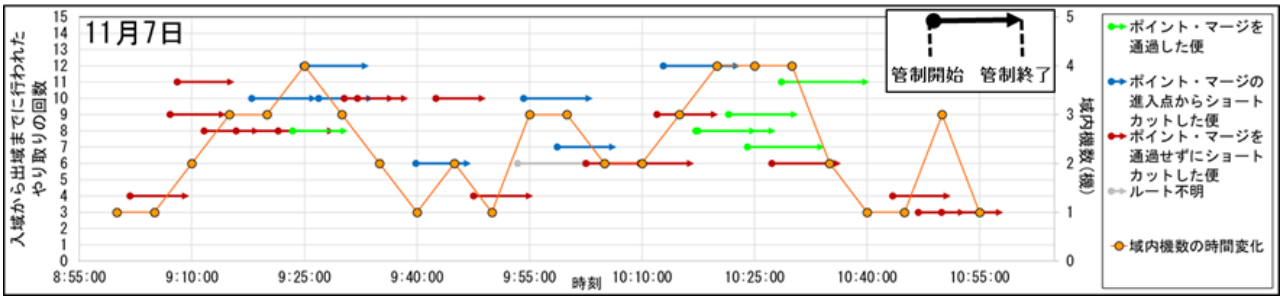


図-10 域内管制機数と管制指示回数・管制されていた時間の関係 (11月7日)

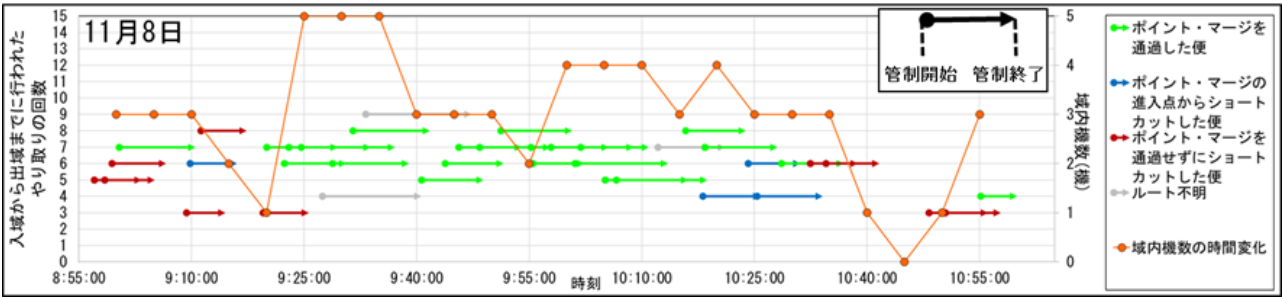


図-11 域内管制機数と管制指示回数・管制されていた時間の関係 (11月8日)

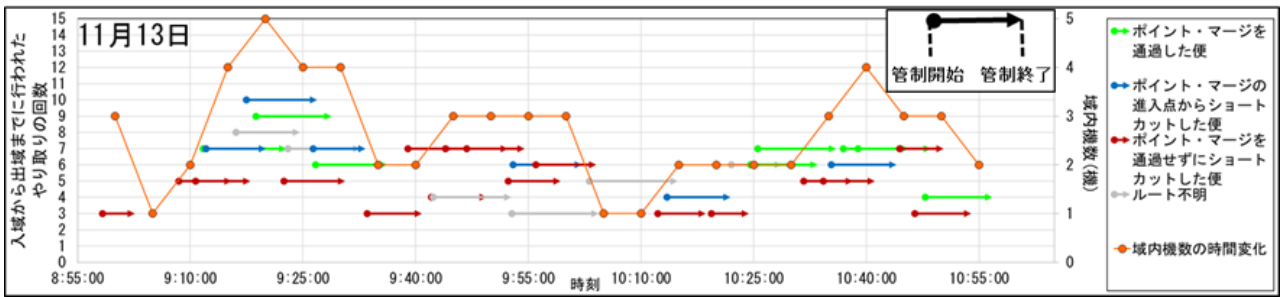


図-12 域内管制機数と管制指示回数・管制されていた時間の関係 (11月13日)

d) PMSのショートカットの発生条件に関する分析

PMSのショートカットが発生する条件について分析を行った結果を示す。ショートカット発生時の先行機と自機の対地速度(GS)の差と道のり差(2機が一直線上にあると仮定した時の直線距離)をプロットした結果を図-13に示す。なおショートカット発生時とは、PMSをショートカットした便に対してMPに向かわせる指示が発出されたタイミング、すなわちPMSを通過させずに直接MPに向かわせることが指示されたタイミングを示す。

これらの相関係数は-0.78となっており、強い負の相関が認められた。つまり管制官は、先行機に対して自機の速度が速いときは十分な間隔が確保できている場合のみショートカット指示を出し、逆に自機の速度が先行機の速度に対して遅いときは2機の間隔が狭い場合でもショートカットさせていることになる。すなわち、管制官は先行機との速度差に応じて柔軟に飛行距離を短縮させる運用を実施していることが明らかになった。

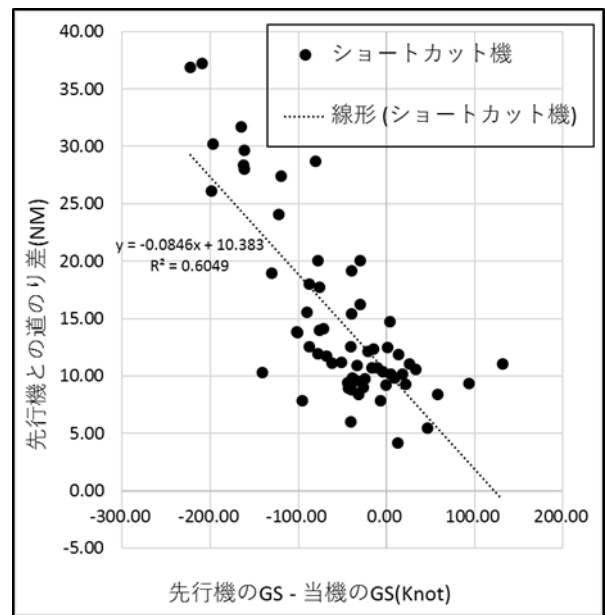


図-13 MPに向かわせる際の先行機との速度差と道のり差の関係(GSは対地速度を表す)

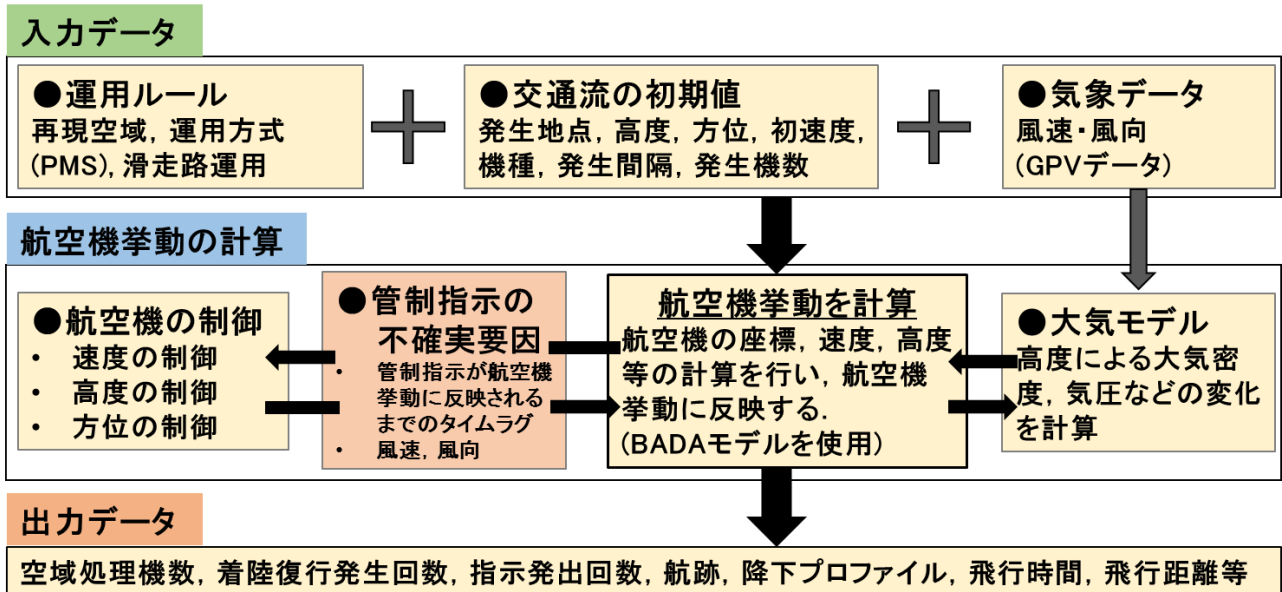


図-14 シミュレータの構成

5. 管制指示特性を考慮した空域シミュレータの開発

(1) シミュレータの概要

本シミュレータは、PMSのような先進的管制運用方式の導入が国内大規模空港の管制運用に与える影響を、定量的に分析するためのツールと位置づけている。従来の研究で用いられるシミュレータとの違いは、航空機挙動の特性だけでなく、音声データより抽出した管制指示の特性を反映している点にある。これによって、後述する管制指示の持つ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。本シミュレータの開発はMicrosoft Visual Studio Professional 2012で行った。開発言語はC++を用いている。本シミュレータはスキャンタイムごとに航空機の位置を表示することで交通流の流れを表示することができる。さらに本シミュレータは管制指示を发出するアルゴリズムを内蔵した高速シミュレーションの形態をとっているため、短時間で多くのシミュレーションを実行可能である。本シミュレータの原型は以前の研究⁹⁾で開発したものであるが、航空機挙動の再現性が低い、気象要因を部分的にしか反映できていない等の課題があった。本稿では、運動モデルと気象データの反映を行い、さらに4章の分析結果を踏まえた改良を行った。

(2) シミュレータの構成

シミュレータの構成を図-14に示す。

a) 航空機の制御モデル

構築した空域及び経路上に航空機の高度や速度に関する制限を設け、これらを満たすように航空機に速度や降下の指示を与えることで航空機の制御を行った。

表-2 シミュレータ内での航空機の制御の種類

制御方法の種類	制御方法の内容内訳
高度	[1] 設定された高度の制限を満足させる。
速度	[1] 設定された速度の制限を航空機に満足させる。 [2] 先行機との間隔が小さくなりすぎた際に後続機を減速させる。
方位	[1] 設定された経路に沿って飛行させる。 [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。 [3] 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。

さらにPMS特有の航空機の制御方法として、4章5節d項の結果をもとに、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。またPMSの運用ルールに基づき、PMS内部においてのみ、先行機との間隔が小さくなりすぎた際に後続機を減速させる速度指示を发出させた。

表-2にシミュレータ内で行われる航空機の制御方法を整理する。表の中で、[1]はどの航空機にも共通で行われる制御、[2]や[3]は特定の条件を満たしたときに行われるもので航空機によって制御の内容やタイミングが異なる制御である。

b) 航空機の運動モデル

これは、航空機の制御モデルの速度や高度、方位といった指示を、航空機挙動に反映する役割を果たすモデルである。航空機挙動に関わる対気速度、対地速度、旋回

率、降下率の計算には、EUROCONTROLが管理するBADAモデル¹⁴⁾を用いた。

c) 気象モデル

航空機は空気の流れとの相対速度を基準に運航が行われているため、風は航空機の運航に大きな影響を及ぼす。

高層風のデータとして、気象庁の数値予報値（GPVデータ¹⁵⁾）より再現する空域・日にちにおける風向・風速データを取得し、反映した。数値予報に用いるモデルは用途に応じて複数存在するが、本研究では海外の空域はGSM(Global Spectral Model)全球域、日本の空域はMSM(MesoScale Model)による値を用いた。また、本来風向・風速は時間によって変化しているが、本稿では各シミュレーションの開始時刻に一番近い時間の値を、シミュレーション全体を通じて再現した。

航空機の速度の計算に必要な気温、気圧、大気密度の大気モデルは、BADAモデル¹⁴⁾を用いた。

d) 管制指示の不確実性の考慮

以前の研究⁵⁾で、管制官が航空機に指示を発してから指示の内容が航空機の挙動に反映されるまでには若干のタイムラグが存在することを明らかにした。タイムラグの存在によって管制官が指示内容を決定する際に想定した挙動と実際の航空機の挙動にずれが生じる結果となり、不確実性が生まれると考えられる。

本シミュレータは、このタイムラグを組み込んでおり、現在表-2における速度指示の[2]、方位指示の[2]と[3]に反映している。タイムラグの平均値と標準偏差を表-3に示す。タイムラグの大きさは、正規分布を仮定し、正規乱数を用いて決定する。発生させた正規乱数は下限を（平均-σ）、上限を（平均+σ）とし、この範囲に必ず収まるように発生させている。

e) 着陸復行の計測

ある機体が滑走路に着陸する際、滑走路端1NM手前に到達した時点で滑走路に先行機が残っている場合は着陸復行と呼ばれる着陸のやり直しを行う必要がある。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。

本シミュレータ内においては、管制指示の不確実性(タイムラグ)によって間隔が短縮されすぎてしまうことで、着陸復行が発生するアルゴリズムを導入した。着陸復行アルゴリズムはこのような着陸復行機の発生確率を把握するために実装されている。

(3) シミュレータの再現性検証

a) 再現性の検証方法

シミュレータにダブリン空港のPMS及び運用実態分析でデータを取得した3日分の交通流を再現し、シミュレーション結果と取得した実データを比較することで、シミュレータの再現性の検証を行った。現段階のシミュレータでは、到着機の合流手法としてPMSのみ再現してお

表-3 タイムラグに関する値

速度指示のタイムラグ	平均(s)	19.0
	標準偏差 σ(s)	6.0
方位指示のタイムラグ	平均(s)	11.0
	標準偏差 σ(s)	6.0

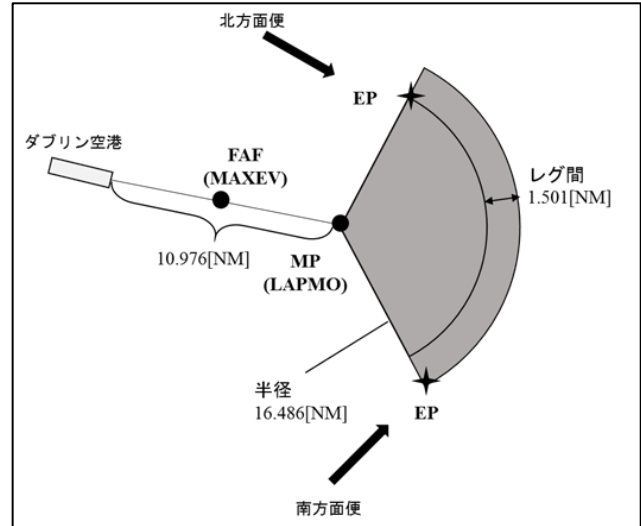


図-15 再現したダブリン空港のPMS及び周辺航路

り、再現性の検証もPMS内部やPMS周辺の管制指示および航空機挙動に対して行った。具体的な検証項目は以下の通りである。

- ・降下プロファイル
- ・対地速度
- ・レグ離脱時の航空機挙動
- ・飛行距離
- ・飛行時間

b) 再現した運用ルールと交通流シナリオ

再現性の検証にあたって、シミュレータ上にダブリン空港で運用されているPMSと周辺の航路を再現した。再現したPMSを図-15に示す。なお、再現範囲はMP(LAPMO)から半径25NMの範囲にした。再現した交通流シナリオの作成は、実データを取得した11月7, 8, 13日の航跡データを元に行った。航跡データよりMPから25NMの範囲に進入した時の各便の情報を取得し、初期値として、緯度、経度、高度、方位、対地速度、指示対気速度、発生時刻、機材型式を与えた。各シナリオで発生させた機数は、7日が35機、8日が39機、13日が38機であった。航跡データが存在しない便がわずかにあったが、これらの便は再現対象から除外した。

また、11月8日は実際にはPMS手前でホールディングを行っている便が存在したが、シミュレータ内でホール

ディングの再現は行っていない。

c) 降下プロファイルと対地速度の検証

降下プロファイルと対地速度の変化について、各日でシミュレーション結果と実データの比較を行った。ここでは13日の結果を図-16, 17に示す。

降下プロファイル、対地速度のいずれも、平均値はおおむね7%程度、最大15%程度のずれに収まっており、グラフ上も比較的一致した値をとっていることが確認できる。降下プロファイルに関しては、最大値、最小値ともに実データより大きい値をとっている区間が長く、結果として平均値もシミュレーション結果のほうが若干大きい値を示している。対地速度に関しては、滑走路端からの飛行距離が10NM以下の区間において、速度のばらつきが実データに比べてシミュレーション結果は小さくなっている傾向が確認できる。

d) レグ離脱時の航空機挙動に関する検証

レグ離脱時の航空機挙動として、レグを離脱しMPに向かうときの航空機の旋回率について検証を行った。レグを離脱する際の旋回率に実データと大きな差が出ると、レグによって確保した先行機との間隔が意味をなさなくなってしまう可能性がある。

表-4に比較結果を示す。旋回率は平均値、分散ともに実データより小さい値となっていることがわかる。平均値が小さくなっている理由は、レグ上での対地速度が実データに対して大きめの値となっていることが考えられる。分散が小さいのは、旋回率の計算に用いるバンク角を一律で与えているためである。ただし、この平均値の差は90°の旋回に要する時間に換算すると6秒程度の差なので、一定程度の再現性はあると考えられる。

e) 飛行距離と飛行時間に関する検証

飛行距離と飛行時間に対して、それぞれ以下のように絶対誤差率を定義した。表-5に各日の絶対誤差率の平均値と絶対誤差率が10%以下の便の割合を示す。

$$\varepsilon_L = \frac{l_s - l_a}{l_a} \times 100$$

$$\varepsilon_T = \frac{t_s - t_a}{t_a} \times 100$$

- ε_L : 飛行距離の絶対誤差率(%)
- l_s : 飛行距離 (シミュレーション) (NM)
- l_a : 飛行距離 (実データ) (NM)
- ε_T : 飛行時間の絶対誤差率(%)
- t_s : 飛行時間 (シミュレーション) (sec)
- t_a : 飛行時間 (実データ) (sec)

11月8日は、実運航で確認されたホールディングをシミュレータで再現していないことによる絶対誤差率の増加

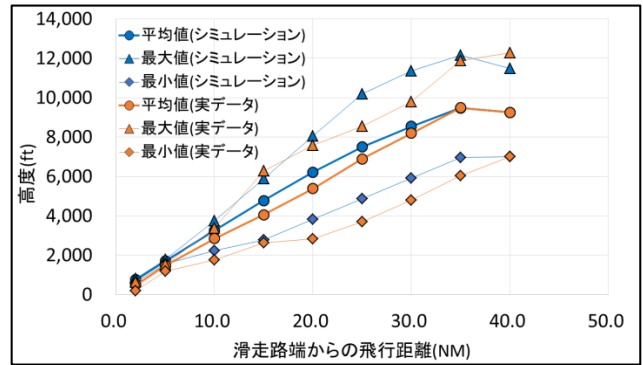


図-16 降下プロファイルの比較 (11月13日)

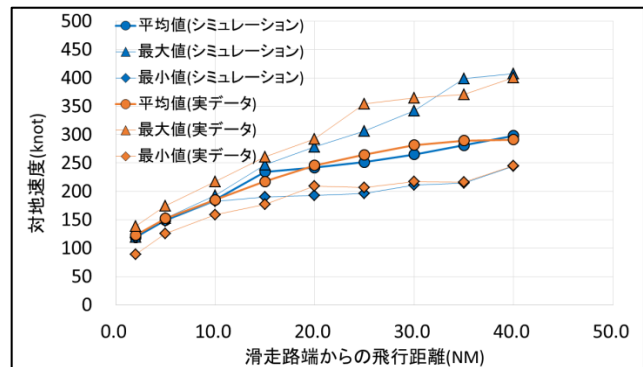


図-17 対地速度の変化の比較 (11月13日)

表-4 レグを離脱しMPに向かうときの旋回率の比較

	シミュレーション	実データ
サンプル数	25	35
平均値(deg/sec)	1.40	1.54
最大値(deg/sec)	1.75	2.18
最小値(deg/sec)	1.14	0.77
分散	0.02	0.10
標準偏差(deg/sec)	0.14	0.31

表-5 レグを離脱しMPに向かうときの旋回率の比較

検証項目	11月7日	11月8日	11月13日
ε_L の平均(%)	11.8	14.3	10.7
ε_L が10%以下の便の割合(%)	47.1	41.0	60.5
ε_T の平均(%)	11.1	20.1	15.3
ε_T が10%以下の便の割合(%)	44.1	28.2	46.1

が認められた。また、飛行距離、飛行時間ともに絶対誤差率の平均値は10~20%と大きな値となっている。これは、実運航でPMSをショートカットしているものの、シミュレーションではPMSを通過している、あるいはその逆の便が存在しているためである。ショートカットの有無が

実運航とシミュレーションで異なると、その便の飛行距離・飛行時間に大きな差が生じるだけでなく、後続機にもその影響が波及してしまう。一方で、絶対誤差率が10%以下の、比較的実運航に近い航空機挙動を再現できている便も一定数存在している。

これらのことから、PMSのショートカットを判断させるアルゴリズムには改善の余地が残るものの、航空機挙動の部分に関しては一定の再現性があるといえる。

f) 再現性の検証のまとめ

シミュレータの再現性について、PMSの内部およびその周辺の航空機挙動に着目した検証を行った。検証の結果、降下プロファイル、対地速度の平均値は比較的再現性が取れていることを確認した。また、レグを離脱する際の旋回率にも、シミュレーション結果に大きな影響を与えるような差は認められなかった。飛行距離と飛行時間に関しては、PMSのショートカットを判断させるアルゴリズムには改善の余地が残るものの、航空機挙動の観点では一定の再現性があることを確認した。

6. 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

(1) 分析の概要

本分析は、羽田空港到着機の管制にPMSを適用した場合のシミュレーション分析を行い、その結果を現状のベクタリングによる管制と比較するというものである。PMSが、羽田空港到着機管制に適用した場合も有効であるか検証する目的で行う。羽田空港を対象空港とした理由は、現在羽田空港では都心上空を利用した飛行経路の設定が検討されており、騒音低減効果もあるPMSの適用は有効だと考えられること、羽田空港の機能強化は必須課題であることの2点である。

(2) 運用ルール

a) 構築した運用と交通流

交通流データは、航空局が提供するCARATS Open Data (航跡データ) より2014年11月10日の9~21時に再現範囲に進入した羽田空港西方面到着便を抽出し、これを元に発生機数331機の交通流を作成した。このCARATS Open Dataより抽出した羽田空港西方面到着便の航跡データを実データ(現状のベクタリングによる運用)とし、シミュレーション結果と比較した。

次に構築したPMSのイメージ図を図-18に示す。滑走路運用は北風晴天時とし、再現範囲はMPから半径45NMの範囲とした。PMSは3章3節の結果を踏まえ、主に航空機間の間隔調整が行われているT14上に、現況の交通流の航跡を考慮しながら配置した。また、飛行距離を比較す

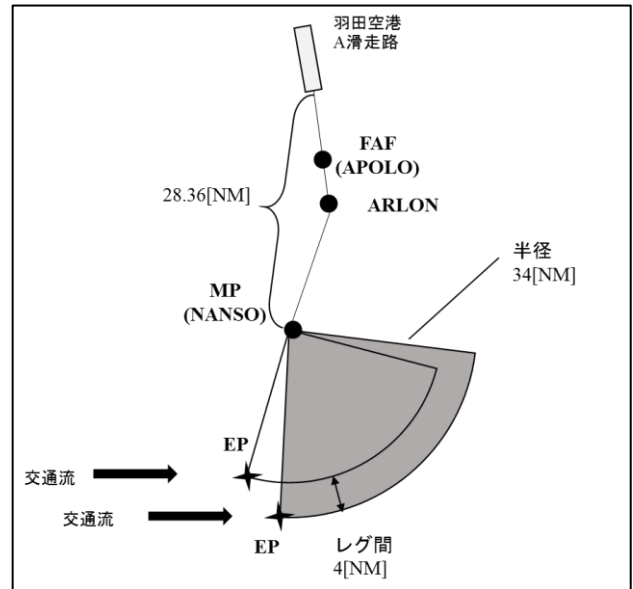


図-18 再現した運用のイメージ図

るため、実データにおける飛行距離の最小値とシミュレーション内の理論上の最短の飛行距離が等しくなるようにした。

b) 後方乱気流区分による比較

本分析では、PMSと合わせて後方乱気流区分も考慮したシミュレーション分析を行った。後方乱気流とは航空機の運航によって引き起こされる乱気流のことで、大きな航空機ほど発生する後方乱気流は大きくなり、小さな航空機ほど後方乱気流の影響を受けやすくなるという特徴がある。最大離陸重量に応じて後方乱気流の大きさを分類したものが後方乱気流区分である。

後方乱気流に巻き込まれると非常に危険であるため、先行機と後続機の後方乱気流区分の組み合わせに応じて満たすべき最低間隔(後方乱気流間隔)が定められている。例えば、先行機が大型機、後続機が小型機である場合は間隔を大きくとる必要があるが、逆の場合は間隔を短くとることができる。先行機と後続機の後方乱気流区分組み合わせによって、柔軟に航空機間の間隔を短縮させることで、処理容量の拡大を達成できる可能性がある。

PMSは単純な指示で管制が可能、将来の交通流の予測がしやすいといった特徴があり、後方乱気流区分の組み合わせに応じて柔軟に間隔を変化させる運用を実施しやすいのではないかと考え、後方乱気流区分を考慮した分析を行うこととした。

後方乱気流区分は現在3区分に分かれているが、この区分を6区分に細分化したRECATと呼ばれる手法も提案されている。本分析ではPMS内部において、全航空機を一律120秒間隔で管制した場合、現状の後方乱気流区分に応じた間隔設定を行った場合、RECATに基づく間隔設定を行った場合の3パターンについて、実データと比較した検証を行った。

(3) シミュレーション分析の結果

今回は、飛行時間と飛行距離に着目して比較を行った。これ以降、全航空機を一律120秒間隔で管制した場合をシミュレーション1、現状の後方乱気流区分に応じた間隔設定を行った場合をシミュレーション2、RECATに基づく間隔設定を行った場合をシミュレーション3とする。

表-6に飛行距離および飛行時間の、各シミュレーションおよび実データの比較を示す。また、図-19, 20にシミュレーション2と実データの飛行距離および飛行時間の分布の比較を示す。

後方乱気流を考慮しているシミュレーション2及び3において、平均で5NM程度、飛行距離が短縮される結果となった。一方で、シミュレーション2と3では飛行距離に大きな差は認められず、後方乱気流区分の分類の仕方による飛行距離の差は現れなかった。4章1節で示したダブリン空港での運用実績を考えると、さらなる短縮ができる可能性もあるので、今後PMSの配置や経路構成、速度や高度の設定などについてさらに検討を進める。

また飛行距離は短縮されたものの、飛行時間については若干実データに対して大きな値となっている。これは、現状のベクタリングにおける運用と比べて、到着機の対地速度が遅いことが理由として考えられる。これについては、航空機の制御を行うアルゴリズムや、PMS内の速度の設定の仕方を改善していく必要がある。

7. 結論と今後の展開

本研究は、PMSのような先進的管制運用方式の導入が国内大規模空港の機能強化に与える効果を、運用効率面と騒音等の周辺分野の双方から検討することを長期的目標としており、本稿では国内大規模空港として羽田空港、先進的管制運用方式としてPMSに着目した。

最初に羽田空港の到着機管制の実態の把握を行い、現状の運用手法であるベクタリングの問題点を整理した。また、T09, T14の到着機管制における役割の違いを考察した。

次に、PMSと呼ばれる到着機の合流手法に着目し、PMSが導入されているダブリン空港の航跡データと音声データを自ら取得し、従来行われてこなかった航跡と管制指示を組み合わせた分析により、PMSにおける航空機挙動と管制指示の特性を図示、定量化した。

分析の結果、交通量が増加しても管制指示回数に大きな変化は見られず、高度及び方位指示の内容も非常に単純な物となっており、実運用においてもPMSは有効性を持っていることを確認した。また、管制官は先行機に対して自機の速度が速いときは十分な間隔が確保できている場合のみショートカット指示を出し、逆に自機の速度

表-6 飛行距離および飛行時間の比較

	飛行距離(NM)		飛行時間(sec)	
	平均	標準偏差	平均	標準偏差
実データ	84.3	9.6	1124.2	143.2
シミュレーション1	94.2	11.5	1342.5	135.7
シミュレーション2	79.5	10.3	1165.1	131.8
シミュレーション3	79.8	8.1	1171.2	103.9

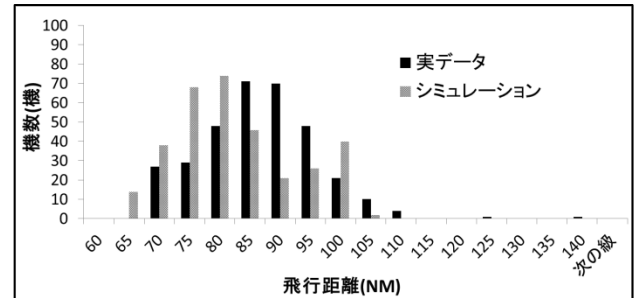


図-19 飛行距離の分布の比較 (シミュレーション2)

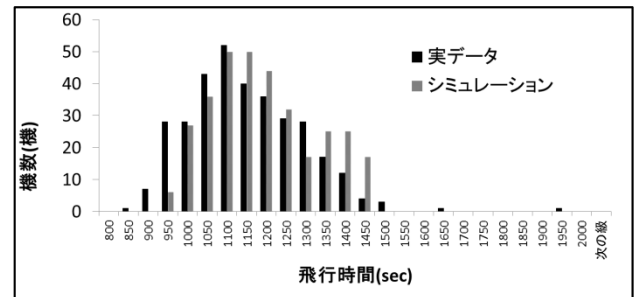


図-20 飛行時間の分布の比較 (シミュレーション2)

が先行機の速度に対して遅いときは2機の間隔が狭い場合でもショートカットさせていることを示し、状況に応じて柔軟に先行機との間隔を短縮する運用が行われていることを明らかにした。

さらに、ダブリン空港におけるPMSの運用実態分析の結果を踏まえて、以前の研究で開発した空域シミュレータの改良を行った。改良したシミュレータは、5つの項目で再現性の検証を行い、PMS内部及びその周辺における航空機挙動の再現性が一定程度あることを確認した。

最後に羽田空港にPMSを導入した場合の効果についてシミュレーション分析を行い、後方乱気流を考慮した間隔設定を行ったシミュレーションでは飛行距離の短縮を確認した。

今後の課題としては、シミュレータ内での航空機の速度等の制御方法の再現性を向上させていくこと、今回扱わなかった南風運用時や北方面到着便も含めたシミュレ

ーション分析の実施, 騒音や燃料消費量等の飛行距離や飛行時間以外の評価指標からの比較検証が挙げられる。また, 都心上空を利用した運用などの将来的に実施されると考えられる運用のシミュレーション分析も行っていく。

謝辞

気象庁数値予報データについては, 京都大学生存圏研究所がホームページ上で公開しているデータを使用した。また, 航空機の運動モデルについては, EUROCONTROL が開発, 管理している BADA モデルを使用した。これらの機関に対して謝意を表す。

参考文献

- 1) IATA: Forecasts Passenger Demand to Double Over 20 Years, <http://www.iata.org/pressroom/pr/Pages/2016-10-18-02.aspx>
- 2) 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.
- 3) 将来の航空交通システムに関する研究会: 将来の航空交通システムに関する長期ビジョン～戦略的な航空交通 システムへの変革～, 2010.
- 4) 国土交通省: 「羽田空港のこれから」, <http://www.mlit.go.jp/koku/haneda/>
- 5) 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.
- 6) 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, 1994.
- 7) 北詰有人, 田村恵一, 宮沢与和: CARATS オープンデータを用いた羽田空港到着便のベクタリング制御に関する一考察, 第 54 回飛行機シンポジウム, 1B02, 2016.
- 8) EUROCONTROL Experimental Centre: User Manual of the Base of Aircraft Data (BADA) Revision 3.12, EEC Technical/Scientific Report No.14/04/24-44, August 2014.
- 9) 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, 1A13, 2014.
- 10) EUROCONTROL: 「Point Merge: improving and harmonising arrival operations」, <http://www.eurocontrol.int/services/point-merge-concept>
- 11) Air Transport News, <http://www.atn.aero/article.pl?categ=&id=47038>
- 12) LiveATC.net, <https://www.liveatc.net/index.php>
- 13) FlightRadar24, <https://www.flightradar24.com/35.69,139.75/7>
- 14) EUROCONTROL Experimental Centre: User Manual of the Base of Aircraft Data (BADA) Revision 3.12, EEC Technical/Scientific Report No.14/04/24-44, August 2014.
- 15) 京都大学生存圏研究所, 気象庁データ, <http://database.rish.kyoto-u.ac.jp/arch/jmadata/data/gpv/original/>