

管制指示情報のデータ化による ターミナル空域の容量分析

木下 隼斗¹・阪本 真²・屋井 鉄雄³

¹学生会員 東京工業大学大学院 総合理工学研究科人間環境システム専攻
(〒226-8502 神奈川県横浜市緑区長津田町4259)
E-mail: kinoshita.h.ad@m.titech.ac.jp

²学生会員 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 神奈川県横浜市緑区長津田町4259)
E-mail: sakamoto.s.ae@m.titech.ac.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 神奈川県横浜市緑区長津田町4259)
E-mail: tyai@enveng.titech.ac.jp

近年のアジア地域の急激な経済成長などの影響によって世界的な航空需要は増加の一途を辿っており、将来的な航空需要に対応するため、首都圏空港の機能強化を早急に図っていく必要がある。そうした中、海外では容量拡大方策として、日本では行われていない先進的な管制運用方式が多数実施されており、実際に効果が認められた施策も存在する。本研究の長期的な目標は、先進的運用方式を羽田空港に導入した場合の効果を容量や飛行時間、燃料消費量など様々な観点から定量的に分析することである。本研究ではこの目標を達成するため、管制指示情報を用いて管制指示の特性を明らかにした後、定量的な分析を行った。さらに管制官の指示特性を反映させた空域シミュレータの開発を行い、先進的運用方式としてPoint Mergeを再現するとともに、管制指示特性が航空機の運用に与える影響を分析した。

Key Words : air traffic control, airspace capacity, simulator, Point Merge

1. はじめに

近年、アジア地域の急激な経済成長などを背景に、世界の航空旅客輸送量は年々増加している。特に、アジア太平洋地域における航空旅客輸送量は急激な伸びを示しており、ICAO（国際民間航空機関）の国際航空旅客輸送量予測によると、アジア太平洋横断路線においては、2005年の9670億人キロから、2025年で2兆9800億人キロまで成長するとされている¹⁾。また、羽田空港や成田空港といった首都圏空港の機能強化は最優先課題であり、首都圏空港の年間合計発着枠を2013年の74万7000回から2020年時点で最大7万9000回増やす目標を掲げた²⁾。一方、航空局の需要予測によると将来的には容量が逼迫することが想定されており、将来的な国際線需要や小型多頻度化の動向によってピーク時容量はすぐに満杯になることが予想される³⁾。

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（以下、CARATS）が策定されており、航空交通量増大への対応や運航効率性の向上など7項目が目標とし

て掲げられている⁴⁾。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ソフト面の施策が細かく示されており、ソフト面から容量拡大を達成するメリットを活かし、海外で行われている先進的な管制運用方法を日本でも柔軟に取り入れていくべきであると考えられる。

本研究の長期的目的は、羽田空港の容量拡大方策について、従来研究ではあまり行われてこなかった先進的管制方式による運用方法の視点から分析を行うとともに、燃料消費量や飛行時間といった航空市場分野に加え、騒音や環境、許容遅延時間といった社会環境制約・地域計画などの周辺分野からも同時に検討することである。

本研究では、そのような長期的目標を達成するために、管制指示の特性を定量的に分析した上で、管制指示特性や世界で導入されている先進的な管制運用方式を再現したシミュレータの開発を進め、現状の管制指示データを用いた分析とシミュレータを用いた分析の双方よりターミナル空域における容量分析を行うことを目的とする。

研究の流れとして、まず初めに世界で行われている様々な先進的管制運用方式の整理を行い、容量最大化、

運用効率化のための知見を得る。その後、管制指示情報を用いて管制官の指示特性を明らかにし、管制指示特性を再現したシミュレータを開発することでターミナル空域の容量を分析する。

2. 既存研究の整理

航空管制に関する既往研究は、航空交通管理や管制システムの研究、容量拡大方策の研究、シミュレータ開発の研究の3つに大きく分けることができる。石原ら⁴⁾は、今日のほぼ全ての航空機で実現可能なCDO方式を想定し、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りその便益を明らかにしている。また平田ら⁶⁾は、羽田空港を対象として新規滑走路整備による容量拡大効果を分析するための容量算定方法について既存の方法をベースに検討を行っている。狩山ら⁷⁾は、管制官養成訓練支援を目的とした管制処理プロセス可視化ツールCOMPASiを開発し、同一の航空交通状況に対する異なる2つの管制処理戦術について、COMPASiを用いて安全性、効率性、状況変動に対する許容性の観点から可視化を試みている。しかし、様々な先進的な運用について研究がなされてはいるものの、その分析手法は数値解析に留まっているものが多く、本研究のように管制官の指示特性を反映させた高速シミュレーションを用いた分析は少ない。

3. 航空管制の概要および先進的管制運用方式

航空機は、日本と世界を結ぶ主要公共交通機関として、国内、国外の空港間を毎日複雑に入り乱れて飛行している。音速に近い速度で飛行する航空機をパイロットのみで操縦することは現実的に不可能であり、実際には、航空管制官がレーダーなどで航空機の位置を把握し、方向やスピード、高度などを指示しながら航空機を誘導することで安全運航を実現している。

本章では、日本における航空管制の実態を紹介した後、世界で行われている様々な先進的管制方式のレビュー結果を報告する。

(1) 日本における航空管制の実態

世界の空は、ICAOによって設定された航空管制や捜索救難を担当するいくつかの空域に分けられており、この空域のことをFIRと呼ぶ。FIRは領空及び公海上空を含んだ空域で領空主権よりも航空交通の円滑で安全な流れを考慮して設定されており、その名称には国名だけでなく



図-1. 福岡FIR⁸⁾

飛行情報業務を担当するセンターの名称がつけられている。

日本が担当する空域は福岡FIRと名称がつけられており、領土に比べて非常に広大な空域が設定されているのが特徴的である(図-1)。

福岡FIRはさらに5つの空域に分けられており、それぞれ札幌航空交通管制部、東京航空交通管制部、福岡航空交通管制部、那覇航空交通管制部、そして航空交通管理センターに分担されている。札幌、東京、福岡および那覇航空交通管制部ではそれぞれ管轄する空域において航空路監視レーダーを用いた管制業務を行っている。一方、監視レーダー覆域外の洋上管制区については、航空交通管理センターが担当することになっている。

各航空交通管制部の所轄空域は、さらにセクターと呼ばれる空域に細分化されている。通常1つのセクターにつき2人の管制官が配置され、レーダー管制席、レーダー調整席に分かれて管制業務を行う。繁忙時間帯等にはマルチ支援席も使用する。

(2) 羽田進入空域における航空管制の実態

本研究で対象とするターミナル空域ではターミナルレーダー管制が行われており、到着機に対しては安全間隔を保持しつつ順序付けを行い、一列に整流させて飛行場管制にハンドオフするという役割を担っている。

羽田進入空域における整流作業は、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。ベクタリングは管制官への負が大きくなる手法であり、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。羽田空港では管制官の作業負荷を減らすために、北方面便と西方面便で使用滑走路を区別し、負荷が大きい北方面便と西方面便の合流

作業をなくしている (図-2)。

羽田空港の容量拡大を考える上では、ターミナル空域における交通整理が重要になると考えられる。

(3) 世界の先進的管制運用方式

航空管制運用の効率化や環境影響への対応のため、世界中で先進的管制方式が検討、導入されている (図-3)。

例えばEUROCONTROL (欧州航空航法安全機構) では、戦略的に航空機を順序付けし一列に整流させるための手法としてPoint Mergeが開発されている⁹⁾ (図-4)。Point Mergeとは、主にターミナルレーダーエリアで航空機を合流ポイントまで誘導するための手法であり、合流作業の効率化や予測性の向上、管制官ワークロードの低減などに貢献している。現在オスロやパリなど11の空港で運用されている。

また、ヒースローで行われている戦略的ホールディング (空中待機: 以下, HLD) 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)¹⁰⁾なども先進的な管制方式の一つであり、運航効率性や管制官ワークロード、環境影響などの面から、日本においても積極的に先進的管制運用方式の導入を検討する必要があると考える。

(4) 本研究の対象空域

本研究では、羽田空港ターミナル空域における容量分析を目標としているため、羽田空港到着機が集中する湘南セクター (以下, T14) を対象空域とした (図-5)。T14は西方面からの羽田到着機を取り扱うセクターであり、日本の空域の中でも最も混雑している空域の1つであると考えられる。

4. 管制指示情報を用いた指示特性分析

(1) 分析の概要

本分析では、羽田空港着陸機が集中する湘南セクターを対象として、実際の管制指示音声データおよび音声データを取得した便の飛行軌跡データ (以下, ADS-Bデータ) を用いて管制指示特性の抽出を試みた。既往研究においても管制指示特性の抽出は行われてきたものの、データ数や精度といった面で問題があった。一方、管制音声データを用いた抽出は、実際に行われている管制指示を抽出するためより実態に近いデータを得ることができ、将来的に管制音声データの自動テキスト化ができれば、更に大量の管制指示データ取得が可能となる。

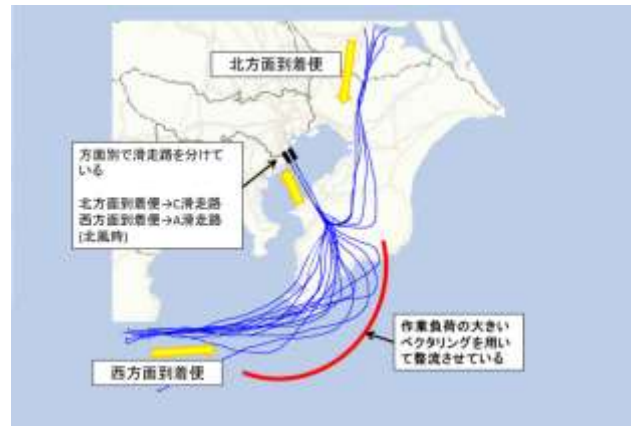


図-2. 羽田空港到着機の航跡イメージ図 (羽田空港飛行コース 公開サービス (航空局) をもとに作成)

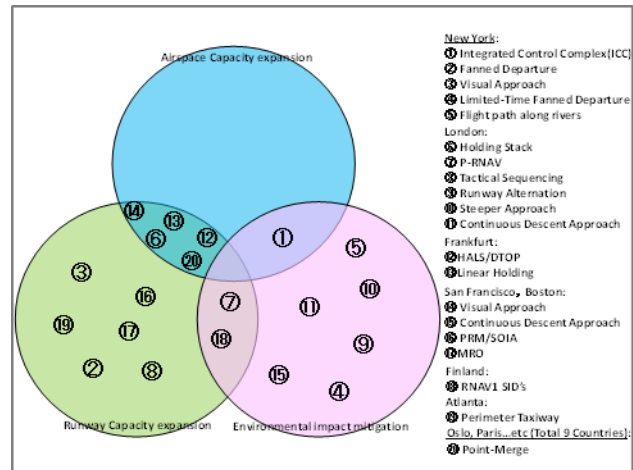


図-3. 世界の先進的管制方式

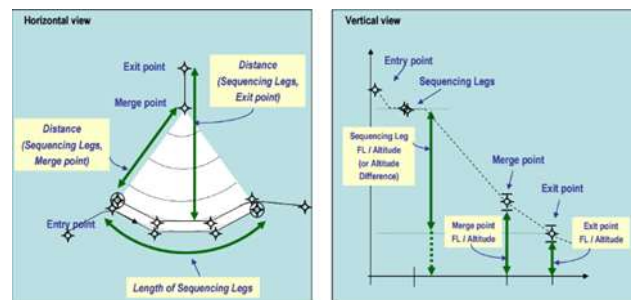


図-4. Point Mergeのイメージ図

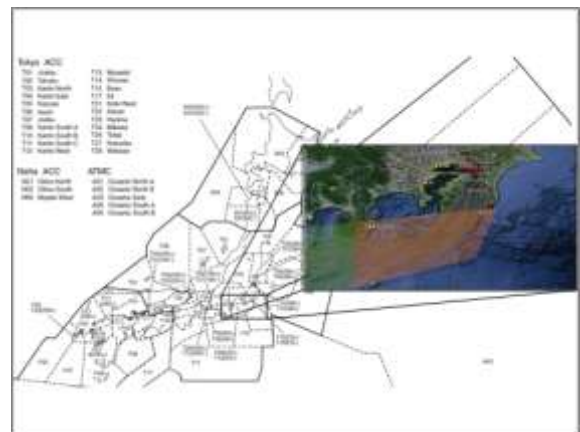


図-5. 本研究の対象空域T14

(2) 使用データの説明

本分析で用いる管制指示情報は、実際の管制指示音声データおよび音声データを取得した便の ADS-B データである。

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。航空機に搭載されたADS-BがGPSを用いて位置情報を絶えず計測し、地上に送信するため、設備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。

(3) 指示特性分析の方法および取得データの概要

観測実験で収集した音声データおよびADS-Bデータの概要を表-1に、管制指示情報データセット構築フロー図を図-6に示す。

観測実験は、ADS-Bおよび航空管制無線用のアンテナを東京工業大学すずかけ台キャンパスJ2棟（20階建て）の屋上に設置し同時受信した。観測時間は5日間合計20時間であり、ADS-Bによる飛行軌跡データは合計2561機、音声データの観測機数合計は549機分取得できた。また、管制指示回数の合計値は2833回である。但し管制指示回数は、高度指示・速度指示・針路指示といった指示の種類については分類していない。

データセットは、無線通信音声データから記録した管制指示とADS-Bデータの機体や時刻を同期させることにより構築した。これにより、指示と実際の航空機挙動を比較分析することが可能となる。管制指示とパイロットからの復唱は交互に行われるため、音声データをテキスト化の際は管制指示が終了した時刻と指示内容を記録し、記録データの時間間隔を管制指示間隔とした。また、TOTAL管制時間を求める際は、得られた時間データに既定値を加えて算出している。

表-1. 収集データの概要

観測日	2015/10/14	2015/10/15	2015/10/16	2015/10/20	2015/10/21
観測時間	10:00-14:00 (4時間)	10:00-14:00 (4時間)	10:00-14:00 (4時間)	10:00-14:00 (4時間)	10:00-14:00 (4時間)
観測機数(機)	108	114	105	111	110
管制指示回数(回)	540	534	423	521	543
管制指示回数(回)	442	533	447	434	559
天候	晴	晴	晴	晴	晴

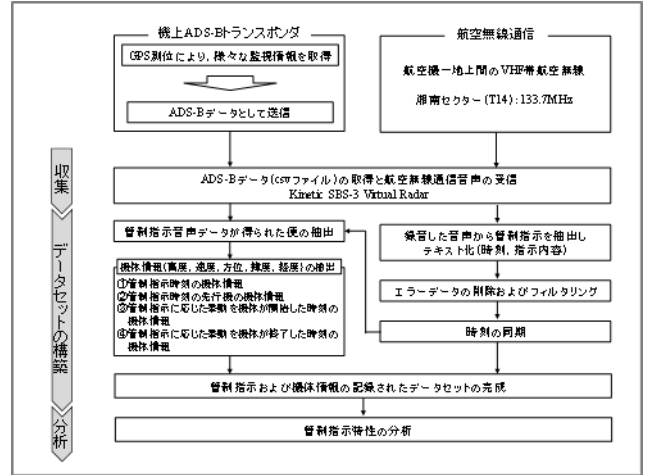


図-6. 管制指示情報データセットの構築フロー図

(4) 管制指示特性分析の結果

a) 各観測日の管制指示実態分析

各観測日の管制指示実態について考察を行う。図-7は10月15日に観測された全機のTOTAL管制時間を表している。各長方形は管制指示開始時刻から終了時刻までを表しており、長方形の高さがその便のTOTAL管制時間となる。また、対象機の底辺（管制指示開始時刻）と後続機の底辺の間隔が狭いほど、より密な交通流であったことを示しており、管制官はより短時間で次の航空機に指示を出す必要があったことになる。

図-7をみると、管制指示開始時刻が連続した場合、1機に必要なTOTAL管制時間は自然と長くなることがわかる。これは、限られた空域の中で多くの航空機を誘導しなくてはならないため、高度や速度、進路指示をより頻繁に行っているためである。逆に管制指示開始時刻が離れた場合は後続機のTOTAL管制時間は短

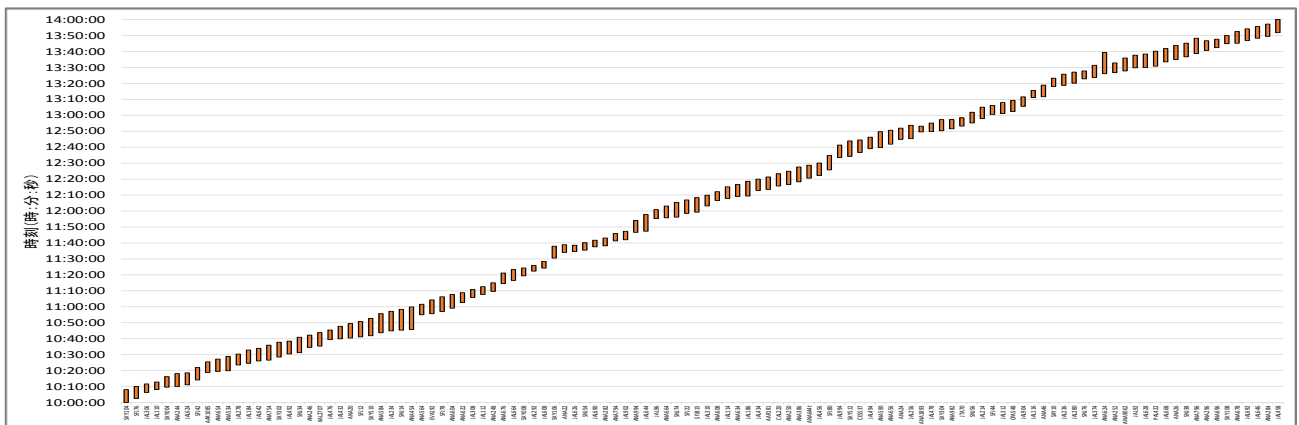


図-7. 各便のTOTAL管制時間(10月15日)

くなる傾向にある。これは、空域にある程度余裕ができたために後続機を必要最小限の指示で出域FIXまで誘導できたためである。管制指示開始時刻が連続した場合、1機に必要とするTOTAL管制時間は自然と長くなっていることがわかる。一方管制指示開始時刻が離れた場合は後続機のTOTAL管制時間は短くなる傾向にある。

1機当たりの管制指示回数をみると、管制指示回数が4機の場合が最も多く、全体の28%を占める結果となった(図-8)。また、指示回数が15回を超えるものも観測されており、密な交通流の中で航空機を誘導するため非常に多くの管制指示が行われていたことが明らかとなった。

b) パイロットー管制官の意思疎通に着目した分析

管制指示音声データを分析した際、パイロットー管制官の意思疎通が正常に行われていないケースが多くみられた。従って、パイロットが管制官の指示の一部のみ聞き取れている、もしくは、全く聞き取れていない場合をmiscommunication(以下、mc)と定義し、mc箇所を抽出した後基礎的分析を行った。

図-9に国籍別全管制指示回数に対するmc数の割合を示す。国籍のアルファベットはそれぞれ国名の頭文字であり、J=日本、K=韓国、C=中国、P=フィリピン、H=香港である。分析の結果、日本が1.1%と最も低い結果となり、全体平均の1.4%を下回る結果となった。一方、最も高い割合となったのがフィリピンであり、その割合は6.5%である。これらの結果から、羽田空港へのアプローチに慣れていない外国籍パイロットの場合は、日本人パイロットに比べmcが起りやすいことが明らかとなり、特に混雑した空域においては、mcに起因するロスタイムが空域容量低下の原因となる可能性が示唆された。

c) タイムラグに着目した分析

パイロットが航空機の高度や速度、方位等を変更する際には、必ず管制官からの指示を受けなければならない。現在レーダー覆域内での管制は主に音声によって行われているため、管制官からの指示をパイロットが実行する際、管制指示の発呼からパイロットが航空機を操作し挙動が終了するまでの間にタイムラグが生じる。従って、管制指示音声データおよびADS-Bデータを使用してタイムラグを算出し傾向を分析した。

高度、速度、方位指示のタイムラグを算出した結果を図-10に示す。各指示タイムラグの平均値および標準偏差は、高度指示が $\mu=20$ 秒、 $\sigma=9$ 秒、速度指示が $\mu=19$ 秒、 $\sigma=6$ 秒、方位指示が $\mu=11$ 秒、 $\sigma=6$ 秒となった。従っていずれの指示においても、管制指示から実際に航空機が挙動に移るまでに十数秒のタイムラグがあることが今回の分析で定量的に明らかとなり、管制指示の特性を把握する上で重要な結果であるといえる。

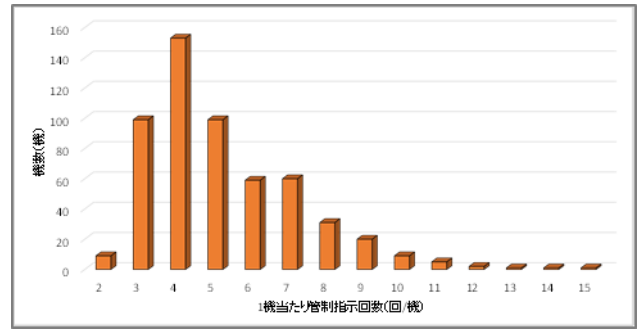


図-8. 1機当たりの指示回数の分布

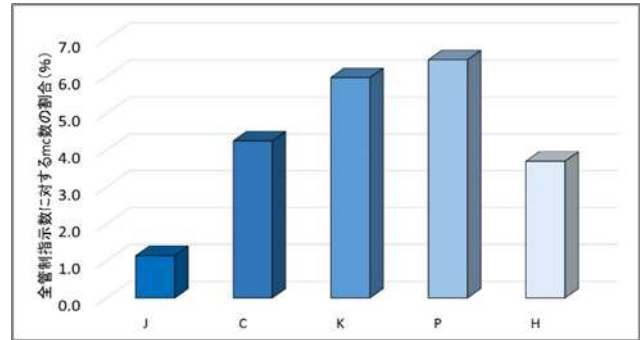


図-9. 国籍別全管制指示回数に対するmc数の割合

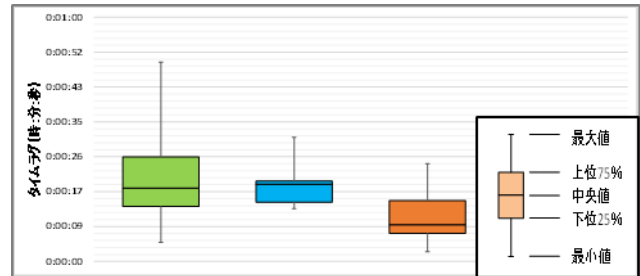


図-10. 各指示のタイムラグ

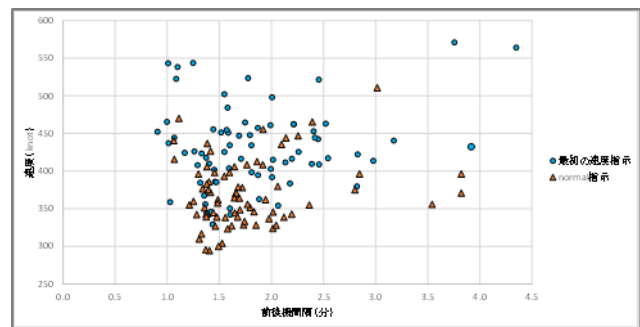


図-11. 速度調整指示及びnormal指示時の前後機間隔と速度

d) 速度調整時および調整終了時の速度と前後機間隔に着目した分析

本分析対象である湘南セクターでは、次のセクターへ移管する際必ず「RESUME NORMAL SPEED」の指示が出される。これは、速度調整の必要がなくなった場合に航空機に対し管制官から通報されるものである。

図-11をみると、速度調整指示時とnormal指示時で

はばらつきが異なることがわかる。GRG非線形法を用いて分散最大軸と直行軸の分散を速度指示時とnormal時と比較したところ、分散最大軸の回転角および分散最大軸と直行軸の分散比はほぼ同じ値となり、分散の広がり傾向は変わらなかった。一方、normal時の分散は速度指示時に比べ小さくなっており、前後機間隔平均1.8秒、速度平均370knotに向けて収束していた。従って対象空域の管制官は、normal時の速度はどの機もおおよそ同じ速度に調整し、かつ前後機間隔も一定に整流させ次のセクターに移管させていることが示唆される。

また、管制指示速度とnormal指示時速度との関係をみると、決定係数は0.53となっており、高い相関があることがわかる(図-12)。つまり、速度調整終了時の速度を予め想定し速度指示を出していることになる。また、そのばらつき具合をみてみると、概ね指示速度と同じ速度になった時点でnormal指示を出していることがわかる(赤い線が指示速度=normal時速度のライン)。管制指示速度とnormal指示時速度の差が±60knotの領域(図の赤点線内)には全データの95%が含まれており、±30knotの領域においても73%が含まれていた。前分析より、normal指示を出す際は速度および前後機間隔がほぼ同じになるように管制指示をすることが明らかとなっており、管制官はそうなるための速度を勘と経験から計算し、速度指示が出されていると推測される。

最後に、間隔確保機および間隔短縮機に着目して分析を行った。ここで、間隔確保機とは、「速度指示時の先行機との間隔<normal指示時の先行機との間隔」の機体であり、間隔短縮機はその逆である。つまり、先行機との間隔が安全間隔を切っているために速度指示が出されている場合と、逆に空き過ぎているため速度指示が出されている場合の2種類に分け、速度指示時およびnormal時の速度と先行機との間隔、管制指示速度の平均、分散について検定を行った。

表-2に検定を行った結果を示す。検定の結果、間隔確保機と間隔短縮機で、先行機との間隔、normal時の速度、管制指示速度の平均に有意な差が認められ、逆に、速度指示時の速度とnormal時の先行機との間隔には有意な差はみられなかった。従って、間隔確保か短縮かを定める判断材料は先行機との間隔であり、管制指示速度に明確な差をつけることにより先行機との間隔調整を行っていることが明らかとなった。

5. 空域シミュレータの開発

(1) シミュレータの概要

本シミュレータの開発はMicrosoft Visual Studio

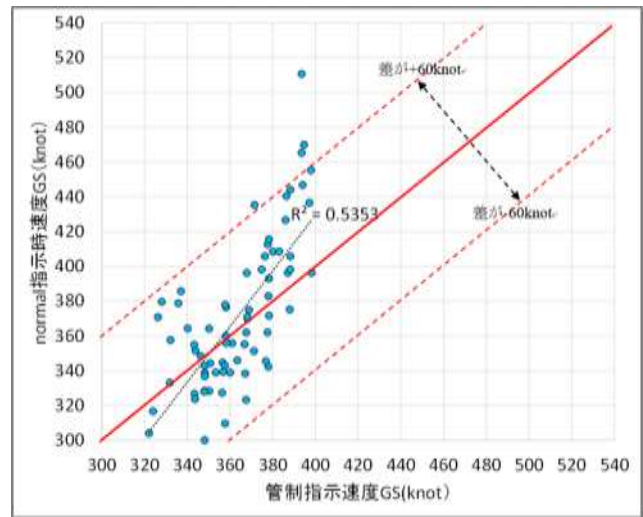


図-12. 各指示のタイムラグ

表-2. 間隔確保機と間隔短縮機の色度・間隔・指示速度の検定

検定項目	間隔確保機		間隔短縮機		F値	t値
	平均	分散	平均	分散		
速度指示時の速度(knot)	430	3218	433	2897	1.1	-0.2
速度指示時の先行機との間隔(min)	1.5	0.2	2.3	1.7	0.1*	-3.8*
速度調整終了時の速度(knot)	358	1163	381	2356	0.5**	-2.3*
速度調整終了時の先行機との間隔(min)	1.8	0.3	1.8	0.3	1.1	0.2
管制指示速度(knot)	264	282	274	333	0.9	-2.3*

*5%有意



図-13. 実装したPoint Merge
(矢印は航空機の流れを表す)

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リアルタイムで表示することができる。また、管制官の指示特性を再現しているため、数値解析では困難な管制指示と航空機挙動間の不確実性を考慮した分析を行うことが可能な点が特徴である。

(2) 再現した運用方式

本研究では、先進的運用方式としてPoint Mergeの再現を行った(図-13)。Point Merge内において、進入地

点に到達した航空機は、旋回して円弧部分（以下、シーケンスレグ）上を飛行し、管制官から指示が発信されるとシーケンスレグを離脱し、マージポイントを目指す。

本来Point Mergeはターミナル空域に適用される方式であるが、現在の羽田空港ではターミナル空域外にて航空機の整流作業が行われており、本シミュレータにおいても、EUROCONTROLの文献を参考にし、ターミナル空域外にPoint Mergeを再現した¹¹⁾。

Point Mergeの寸法及び各地点における目標速度と高度を図-13に示す。なお本研究では、羽田空港北風晴天時西方面到着便を再現の対象としている。

(3) 航跡データを用いた分析

シミュレータの開発に際してシミュレータ内で発生させる交通流の機種割合及び初速度の決定のために、CARATS Open Dataを用いて到着機交通流の機種割合及び初速度、到着間隔に関する分析を行った。ここでCARATS Open Dataとは、航空局が公開している日本の空域を飛行する全航空機データであり、約10秒ピッチの飛行位置や速度、高度などが取得できる。使用データに関する情報を表-3に示す。

分析の結果、機種については15種類が確認できた。本研究では最大離陸重量を基準として便宜的にB737・B767・B777の3区分に分けている。

(4) シミュレータの構成

図-14に本シミュレータのアルゴリズムを示す。本シミュレータは航空機発生アルゴリズム、管制官アルゴリズム、航空機挙動アルゴリズム、着陸復行判定アルゴリズムの4つから成っている。シミュレータ内の数値は管制指示特性分析と航跡データを用いた分析の結果をもとにしている。

a) 航空機発生アルゴリズム

発生する航空機の属性（機種）、発生間隔、初期値を与えるアルゴリズムである。これらは航跡データの分析結果を用いて決定している（表-4）。

b) 管制官アルゴリズム

管制指示特性を反映しており、航空機挙動アルゴリズムに指示を与え、安全間隔を保持しつつ航空機を合流させ、着陸まで誘導する役割をもつ。さらに航空機間の時間間隔を調整することで容量の最大化を目指した運用を行う。容量最大化は、経路上に3つのポイントを設け、各ポイントでの予想到達時刻（以下、ETA）を常に計算しており、この結果を元に間隔調整指示を出すことによって行っている。具体的な指示内容を図-15に示す。

図-15におけるタイムラグ等の数値は4章の管制指示特性に関する分析の結果に基づいている。

表-3. 使用データ詳細

使用データ日	11月5日
時間帯	8~23時
抽出対象	北風晴天時西方面到着便



図-14. シミュレータのアルゴリズム

表-4. 発生させる交通流のデータ

項目	決定の仕方	
属性	機種	
	B737, B767, B777をそれぞれ45.4%, 20.9%, 33.7%の確率で発生させる。	
発生	間隔	
	$\mu=186.264\text{sec}, \sigma=84.708\text{sec}$ の正規分布を仮定して決定。最初の機体は時刻0に発生。	
初期値	発生地点	発生地点①と②から交互に発生。
	初速度	正規分布を仮定して決定。 B737: $\mu=420.95\text{kt}, \sigma=27.79\text{kt}$ B767: $\mu=423.30\text{kt}, \sigma=34.72\text{kt}$ B777: $\mu=427.00\text{kt}, \sigma=26.49\text{kt}$
	方位	発生地点①: 90°, 発生地点②: 30°
	高度	21,000ft

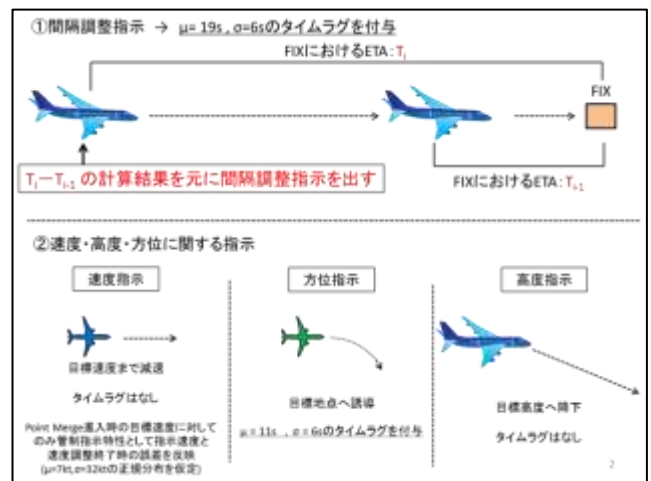


図-15. 管制官アルゴリズムのはたらき

c) 航空機挙動アルゴリズム

管制官アルゴリズムの指示を航空機の挙動に反映させる役割をもつ。

d) 着陸復行アルゴリズム

着陸復行アルゴリズムとは、着陸か着陸復行かを判定するアルゴリズムであり、ある機体が滑走路端1NM手前に到達した際に先行機が滑走路に残っていれば着陸復行とし、それ以外の場合は着陸させる。着陸復行に必要な滑走路占有時間は表-6に示す正規乱数を用いて決定している。

表-6. 滑走路占有時間に関する正規乱数を与える値¹²⁾

滑走路端から滑走路縁までの時間	$\mu=58.8\text{sec}, \sigma=9.2\text{sec}$
滑走路縁から停止線までの時間	$\mu=12.0\text{sec}, \sigma=4.5\text{sec}$

表-7. 先行機との時間間隔が120秒未満の機体数(カッコ内はその割合)

Point Merge進入前	マージポイント通過時	滑走路端通過時
137機(13.8%)	1機(0.1%)※1	1機(0.1%)※2

※1,2これらの機体はPoint Merge進入前では先行機との間隔は120秒以上であった。

(5) シミュレーションシステムの検証

シミュレーションシステムについて、先行機との時間間隔の変化、交通量とPoint Merge内での管制指示回数との関係の2点から、シミュレータ内の航空機挙動に関する検証を行った。

a) 経路上の各ポイントにおける先行機との間隔の変化

発生機数が100機のシミュレーションを10回行い、経路上にあるPoint Merge進入地点、マージポイント、滑走路端の3つのポイントにおける各機の通過時刻を計測し、先行機との時間間隔の変化を調べた。

ここで、Point Mergeにおいてシーケンスレグに進入した機体に対しマージポイントへ向かわせる指示が発せられる基準は、マージポイントにおけるETAが120秒以上になった瞬間としている。同様に間隔確保指示も、先行機との時間間隔が120秒以上となるように指示が出される。

表-7に各ポイントでの先行機との時間間隔が120秒を切っている機体の数と割合を示す。各シミュレーションにおいて1番目に発生する機体は先行機が存在しないため、サンプル数は990機(99機×10回)となっている。尚、表中の計139機は全て別個の機体である。

各機の先行機との時間間隔の変化を詳細に分析したところ、Point Merge進入前の時点で先行機との間隔が120秒を切っていた137機は、マージポイント通過時に全て120秒以上の間隔を達成していた。一方、マージポイント通過時と滑走路端通過時において120秒を下回っていた2機(表-7における※)はPoint Merge進入前では120秒以上の間隔を確保できていたにもかかわらず、その後120秒を下回る形となっていた。しかし、この2機の先行機との間隔はいずれも116秒で、120秒を大幅に下回ってはならず、管制指示のタイムラグによる管制指示と実際の挙動のずれが原因である可能性が大きい。

以上の結果より、Point Mergeの間隔確保の機能はほぼ達成できているといえる。

b) Point Merge内での管制指示回数に関する分析

Point Mergeとは、先行機との間隔確保や順序付けのための管制指示回数を最小限に抑えつつ、航空機を合流

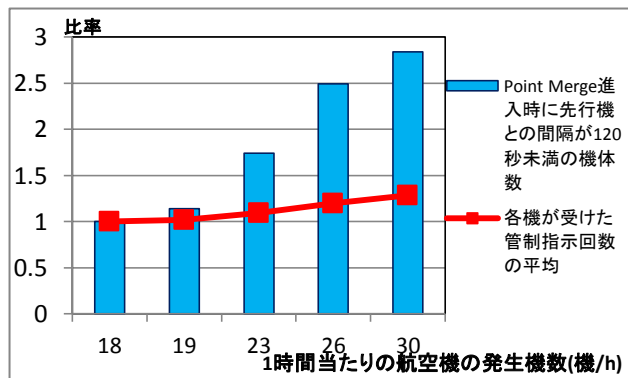


図-16. Point Merge進入時に先行機との間隔が120秒を切っていた機体数と各機が受けた管制指示回数の平均値の変化(交通量が18機/hの場合を1とした比率で表している)

FIXまで誘導するための運用方式である。従ってここでは、Point Mergeの有効性について、交通量と管制指示回数に着目した検証を行う。

検証では1時間当たりの平均発生機数が18, 19, 23, 26, 30機の5つのパターンで、それぞれ発生機数が100機のシミュレーションを10回ずつ行い、各パターンでPoint Merge内において管制指示が何回発せられたかを比較した。ここで、管制指示とは、シーケンスレグを離脱する際の方角指示とシーケンスレグを離脱してからマージポイントに向かうまでの間に発せられる間隔確保指示を指す。方角指示はどの機体も1回必ず発せられるため、各機が受ける管制指示回数は1回以上となる。

図-16はパターンごとに、Point Merge進入時に先行機との間隔が120秒を下回っていた機体数と各機が受けた管制指示の平均回数を示している。グラフはそれぞれ交通量が18(機/h)の時を1とした比率で表している。図-16より、航空機の発生間隔が小さくなる、すなわち交通量が増えると、それに比例して先行機との間隔が120秒を切る機体数が増加していることがわかる。具体的には交通量が18(機/h)から30(機/h)に増加すると、120秒を切ってPoint Mergeに進入してくる機体数はおよそ2.84倍に

なっている。一方、各機が受ける管制指示回数はほぼ変化がなく、交通量が30(機/h)の場合も18(機/h)の場合の1.28倍にとどまっている。したがって、Point Mergeを用いることで、交通量が増加した際にも必要最小限の管制指示回数で航空機を合流FIXまで誘導できることが明らかとなった。

6. シミュレータを用いたターミナル空域の容量分析

ターミナル空域の容量について、航空機の発生間隔の平均値を変化させ、シミュレータ内で再現したPoint Mergeの処理率の感度分析を行った。分析は各発生間隔の平均値につき発生機数が100機の試行を10回ずつ行っており、各試行でマージポイントへ向かわせる指示が出る前にシーケンスレグをはみ出してしまう機体が1機でも発生した場合は処理できなかったと扱い、10回の試行の中で100機全てを処理できた試行の割合を処理率として定義している。例えば10回の試行の中で、処理できなかった試行が1回存在する場合は、処理率は90%となる。感度分析の結果を図-17に示す。

感度分析の結果、今回の条件および再現した空域では、発生間隔の平均値が114(s)以上の時の処理率は100%であったが、114(s)未満の値になると処理率が大幅に減少することが確認できた。現在の条件でこれ以上処理率を上げるには、シーケンスレグを長くする必要がある。

ここで、今回用いたシミュレータは基礎的な航空機挙動の再現にとどまっているため、今後は実データと比較した再現性の検証を行うとともに、気象条件の反映、管制官アルゴリズムの再現性の向上などを行い、より実際の運用に近づけながら分析を行っていく必要がある。

7. 結論

本研究は羽田空港容量拡大方策について、海外で行われている先進的運用方式を導入した場合の分析を行うことを長期的な目標としており、本稿ではこの長期的な目標達成のため、現状の管制指示データを用いた管制指示特性の分析と、管制指示特性を反映した空域シミュレータを用いた分析の2点からターミナル空域における容量分析を行った。

管制指示の音声データおよびADS-Bデータを用いた管制指示情報のデータ化、管制指示特性の分析では、現状のターミナル空域における管制運用の実態を定量的に明らかにした。分析の結果、速度、方位、高度のいずれ

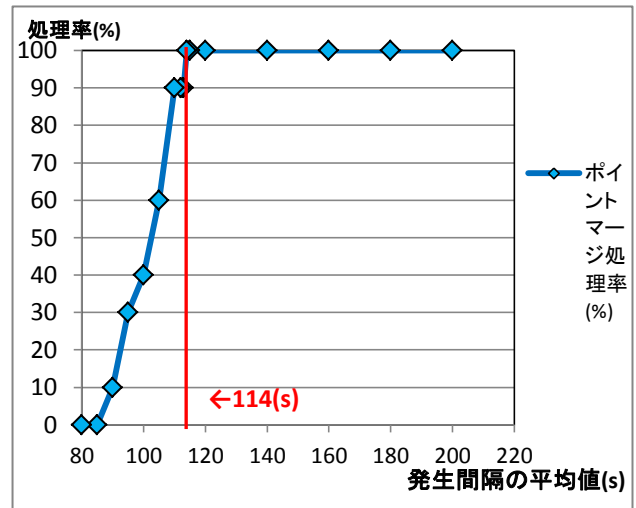


図-17. 発生間隔の平均値とPoint Merge処理率の関係

の指示にも、管制指示があつてからその内容が航空機の挙動に反映されるまで十数秒のタイムラグが存在することが定量的に示された。また、管制官はセクターに進入してきた航空機に対し、どの機もほぼ同じ速度に調整し、かつ前後間隔もほぼ一定にした状態で次のセクターに移管していることも明らかにした。さらに、航空機間の間隔を調整する際に、間隔を確保しようとする場合と短縮しようとする場合で管制指示速度に明確な差をつけることで間隔調整を行っていることが明らかとなった。

また、管制指示特性の分析結果を反映した空域シミュレータの開発を行い、羽田空港ターミナル空域に先進的管制運用方式の一つであるPoint Mergeを再現した。シミュレータはシステムの検証を行い、基礎的な挙動がおおむね再現できていることを確認した。また、シミュレータを用いた仮想的な条件下でのPoint Mergeの処理率に関する容量分析を行った。より詳細な分析を行うためにはシミュレータの再現性を向上させながら進めていく必要がある。

今後の課題として、シミュレータ内での航空機挙動の再現性の向上、気象条件の考慮などより実際の運用に近付けること、Point Merge以外の先進的管制方式の再現などが挙げられる。また、管制指示特性の一つであるタイムラグが管制に与える影響の定量的な分析も行っていく予定である。

参考文献

- 1) ICAO, 世界の航空旅客輸送量予測, Out look for Air Transport to the year 2025, 2005
- 2) 国土交通省交通政策基本計画, <http://www.mlit.go.jp/common/001069407.pdf>
- 3) 国土交通省交通政策審議会航空分科会第10回基本政策部会配布資料,

- <https://www.mlit.go.jp/common/001017432.pdf>
- 4) 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～
<http://www.mlit.go.jp/common/000123890.pdf#search='CARATS%E8%88%AA%E7%A9%BA'>
 - 5) 石原潤一, 武市昇, 鑑陽介, 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小化, 第 53 回飛行機シンポジウム, 2015
 - 6) 平田輝満, 清水吾妻介, 屋井鉄雄: 羽田再拡張後を対象とした滑走路容量算定方法と容量拡大方策に関する研究, 2011.
 - 7) 狩山大輔, 青山久枝, 高橋信, 吉田一雄, 石橋明, 北村正晴, 管制処理プロセス可視化ツールを用いた訓練支援の可能性, 電子航法研究所研究発表会, 2013
 - 8) 日本航空機操縦士協会, Aeronautical Information Manual Japan, pp.0-5, 2011
 - 9) EUROCONTROL, Point Merge Integration of Arrival Flows Enabling Extensive RNAV Application and Continuous Descent - Operational Services and Environment Definition,
<http://www.eurocontrol.int/sites/default/files/content/documents/sesar/point-merge-osed-v2.0-2010.pdf>
 - 10) 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
 - 11) EUROCONTROL : Point Merge in Extended Terminal Area, 2010.
 - 12) 平松健志: 航空管制・騒音を考慮した空港容量算定方式に関する研究, 東京工業大学修士論文, 2004.