

交通運輸技術開発推進制度
研究成果報告書
(ダイジェスト版)

航空機の到着管理システムに関する研究

平成29年3月

電子航法研究所

九州大学

首都大学東京

早稲田大学

茨城大学

構造計画研究所

研究成果報告要約

作成年月	平成29年3月
研究テーマ名	交通・輸送システムの安全性・信頼性向上 ー交通の利便性向上、円滑化、効率化と地域活力の向上ー
研究課題名	航空機の到着管理システムに関する研究（2014-2）
研究代表者名	（国研）電子航法研究所 福島 幸子
研究期間	平成28年5月9日～平成29年3月31日
研究の目的	現状の航空交通を分析し、スケジュール準拠による運航効率性の高い降下軌道を実現可能な到着管理方式のアルゴリズムを開発する。シミュレーションにより便益（燃料の節約、飛行時間の短縮、交通容量の増大）を明らかにする。
研究成果の要旨	<p>羽田空港に到着する航空交通流の効率的な到着管理を目指して、到着管理システムの運用コンセプトを昨年提案した。この運用コンセプトについて、運航の不確実性にも対応でき、燃料効率もよく、処理容量も低下しないことをシミュレーションにより明らかにした。軌道最適化については昨年よりもさらなる精度向上として3変数モデルを提案し、飛行管理装置の生成する軌道を模擬した。気象データの活用として先行機のデータを用いるときの有効な範囲を示した。滑走路処理については羽田空港の処理効率の実態を解析するとともに、着陸間隔の設定により平均遅延が低減されることを示した。スケジューリングとしては3種類のスケジューリングを開発し、運航コストが低減される方式を提案し、運航評価システムによりスケジューリング結果の実現に問題がないことを示した。</p> <p>これらの研究成果について、国土交通省航空局交通管制部が主催するCARATSの会議において報告し、成果の普及と活用を目指した意見交換を行った。今後CARATSの施策へ反映・活用できるように、成果を出すための過程も含めて適宜情報提供を続けたい。</p>
知的財産権 取得状況	特許出願 0件 著作権登録 0件
研究成果発表実績	論文発表：国内 1件、海外 5件 口頭発表：国内 12件、海外 1件 その他：国内 2件

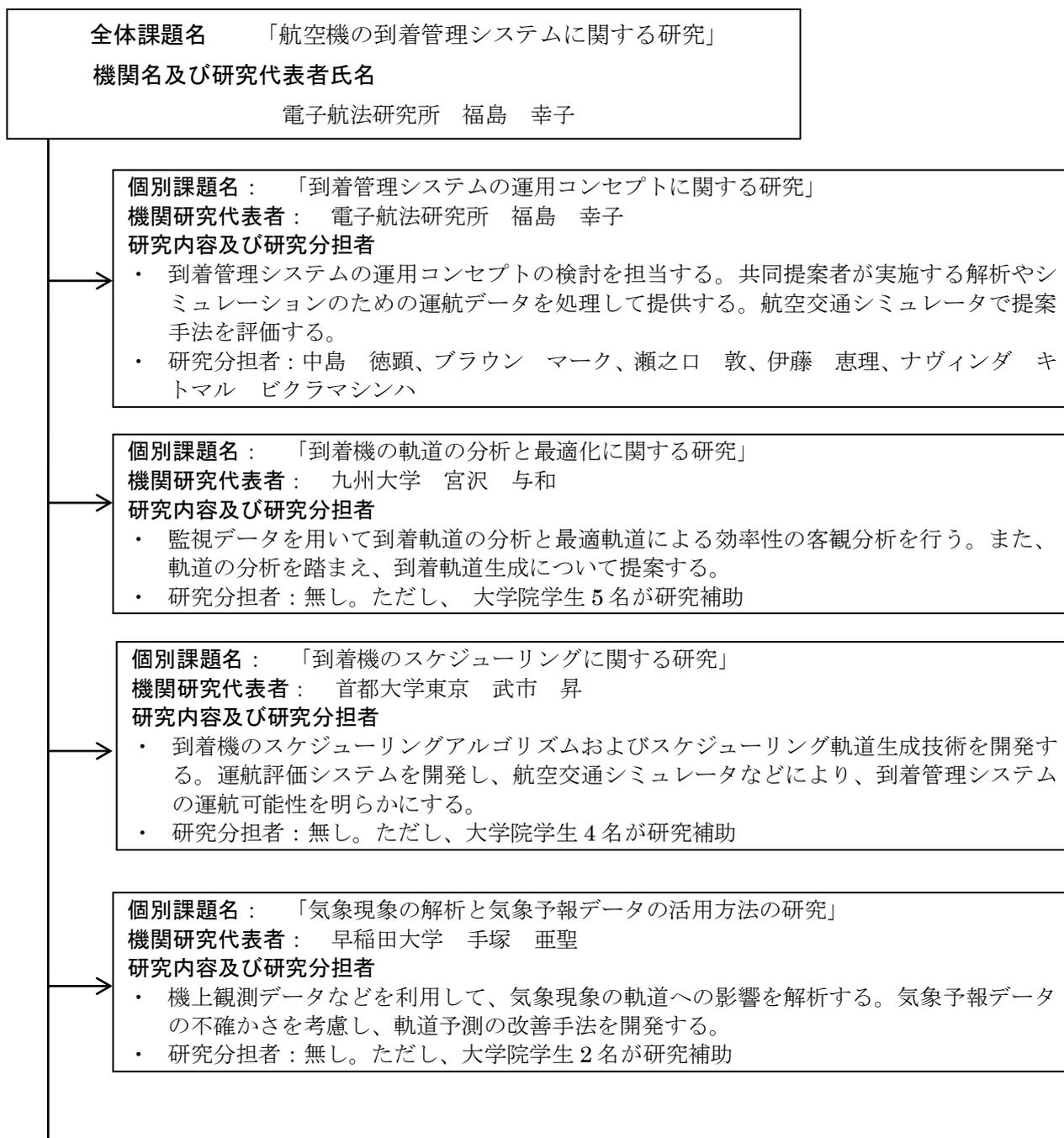
研究開発の目的と実施体制

研究開発の目的

現状の航空交通を分析し、スケジュール準拠による運航効率性の高い降下軌道を実現可能な到着管理方式のアルゴリズムを開発する。シミュレーションにより便益（燃料の節約、飛行時間の短縮、交通容量の増大）を明らかにする。

研究実施体制

本研究は、電子航法研究所を総括研究機関とし、九州大学、首都大学東京、早稲田大学、茨城大学、構造計画研究所と共同して実施した。担当機関の研究実施体制を示すチャートは以下の通りである。



個別課題名： 「滑走路処理容量の予測と運用最適化手法の研究」

機関研究代表者： 茨城大学 平田 輝満

研究内容及び研究分担者

- ・ 滑走路処理容量の予測手法および滑走路運用の最適化手法についての検討を担当する。
- ・ 研究分担者：無し。ただし、大学院学生 2 名が研究補助

個別課題名： 「航空交通シミュレータの開発」

機関研究代表者： 構造計画研究所 矢野 夏子

研究内容及び研究分担者

- ・ 到着管理方式を検証、評価するための航空交通シミュレータの開発を行う。数値計算言語とのインターフェイスにより、さまざまな管理方式を実現可能とし、評価が行えるものとする。
- ・ 研究分担者：請川 克之、加藤 雅樹、岩崎 慧、関 幸一

研究開発成果

1. 序論

本研究は現状の航空交通を分析し、スケジュール準拠による運航効率性の高い降下軌道を実現可能とする到着管理方式のアルゴリズムの開発を目的とする。また、シミュレーションにより便益（燃料の節約、飛行時間の短縮、交通容量の増大）を明らかにする。本年度は、運用コンセプトの有効性の確認、軌道最適化のさらなる精度向上、運航コストを低減できるスケジューリングの開発、気象データの活用方法の具体的提案、遅延が低減できる滑走路処理方法の提案を行った。

2. 到着機の運航の分析とモデル化

2.1 到着機の軌道モデルの精度向上

昨年度までに実施した運航効率の解析や最適軌道による到着時刻調整の便益評価の解析において燃料消費量と飛行時間を最適化する軌道を動的計画法（Dynamic Programming）により求めていたが、航空機の飛行管理装置（FMS）により生成されるコマンドに従う実際の飛行軌道は、上昇、巡航、降下においてそれぞれ速度一定などの定常飛行状態を基本とし、フェーズの切り替えにおいて遷移が行われる単純なものである。図1はボーイング 737-700 に搭載されている FMS のシミュレータを用いて得られた軌道である。この通常の運用における軌道をモデル化するために図2に示すような 3 変数モデル（TPM; Three Parameter Model）を提案し、到着管理システムの最適化の解析において使用する。

軌道最適化の計算において使用する運航性能モデル BADA Revision 3.11 の精度に関する検討をボーイング 787-8 の飛行データを用いて行い、同時に昨年度までの解析で使用した動的計画法の軌道最適化を行って実際の飛行との相違を確認した。図3の左は、機体で計測記録された飛行の速度等の物理量と BADA モデルを使用して推定した燃料流量と実際の燃料流量を比較したものであり、図3の右は両者の上昇、巡航、降下の燃料消費量および飛行全体の燃料消費量を比較したものである。7フライトを解析し、燃料消費量の差は最大で3%程度であった。

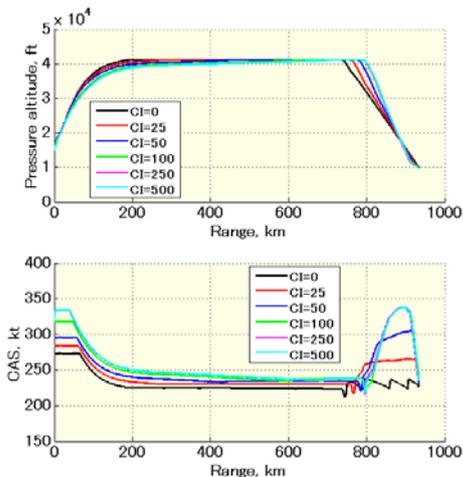


図1 FMS が生成する軌道の例

上図：気圧高度

下図：校正対気速度

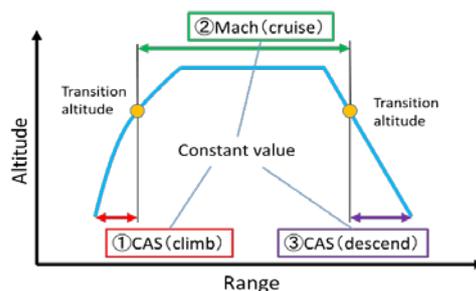


図2 3変数軌道モデル (TPM)

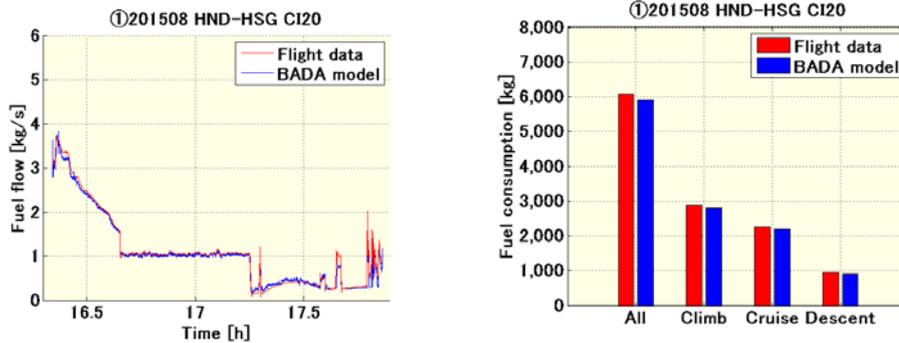


図3 燃料流量（左図）および燃料消費量（右図）の比較の一例（B788）

2. 2 気象データの活用方法の整理

2. 2. 1 先行機のダウンリンクデータを用いた風況予測

先行機の風速をそのまま後続機に当てはめた場合、数値予報モデルに比べて、どの程度風速の予測精度が向上もしくは悪化するかを調べた結果を図4に示す。プロットの色相が紫や青で示される、先行機の数値予報モデルとの風速差のRMSが5kt以内と精度が高い場合でも、先行機との時間間隔が5分程度以内と短い場合は更に改善する。プロットの色相が緑系の8kt前後の場合では、先行機との時間間隔が30分程度以内ならば、先行機の風速を後続機の風速予測値とすることで精度が向上するケースがほとんどである。

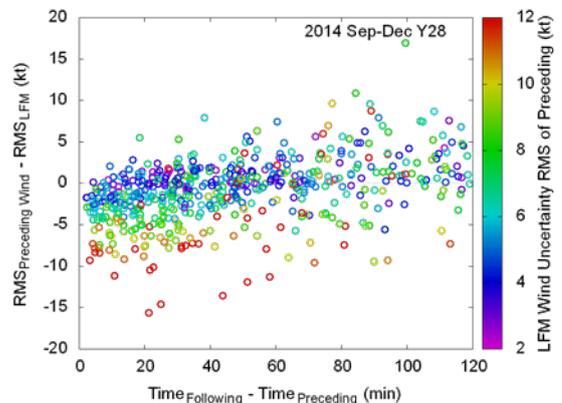


図4 先行機の風速を後続機の風速とした方が数値予報モデルよりRMSが減少

2. 2. 2 風速の可視化手法の検討

同一の経路を飛行した先行機のみならず、羽田空港と成田空港の離発着機のデータを比較・考察するため、緯度・経度の2次元情報を色情報に変換する方法を考案した。図5に示すように、西方向からの到着機は赤から橙系の色で、北方面からの到着機は青系の色とした。水平面位置と高度による風速の変化を図6に示す。Mode Sデータから算出した風速に加え、QAR（Quick Access Recorder）データの風速は四角形のプロットと線で結んで示している。高度による細かな風速

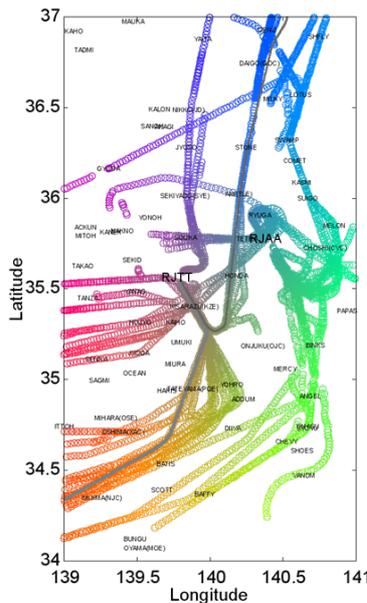


図5 首都圏空域 30,000ft 以下の Mode S データ航跡

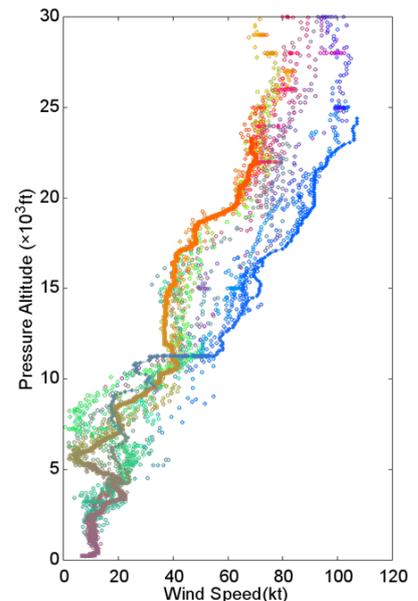


図6 水平面位置と高度による風速の変化

の変化は各航空機により異なるため、高度と風速の関係には、ある程度のばらつきが見られるが、高度と風速の関係を大まかに見ると、同色系の色で示された風速分布には類似した傾向が見られる。気圧高度 20,000ft 前後では、橙系の色で示された風速と青系の色で示された風速には、15kt 程度の風速差があることが、本手法により可視化されるようになった。

2. 3 滑走路運用の検討

2. 3. 1 羽田空港の離着陸従属運用滑走路における処理効率の実態解析

羽田空港は大きく分けて北風運用と南風運用の2つで運用され、南風運用時の方が容量制約が厳しく、特に D 滑走路着陸機と A・C 滑走路離陸機の相互従属運用が課題である。つまり、D 滑走路着陸機の間を縫って A・C 離陸機を処理することになるが、D 着陸の間隔設定と A・C 離陸の需要に応じて、滑走路全体で見た時の処理効率上のロスがどうしても発生してしまう。このロスの最小化の観点から分析を行った。まず、CARATS OPEN DATA(2014)を活用し、上記のロスが実際にどの程度の確率で発生しているかを解析した。D 着陸機は基本的に北方面からの到着機であり、羽田空港のターミナル空域には約 160～180 秒の最低間隔で入域させている関係で、仮に A・C 離陸機が存在しない場合でも連続着陸の最低間隔まで D 着陸間隔を狭めることが困難であるため、そのような場合に着陸機間に余分な間隔が一定程度発生してしまうことを示した。また、D 着陸の間に離陸する A・C 滑走路出発機について、両滑走路の出発需要のアンバランスにより発生するロスを一定の仮定の下集計したところ、離陸機の後方乱気流制約の強い C 滑走路の離陸機の処理で発生するロスが比較的多いが（例えば、D 滑走路着陸機の間、A 滑走路から 2 機離陸し、C 滑走路から 1 機離陸していたら、C 滑走路で 1 機分の離陸処理上のロスがあるとカウント）、A 滑路上でも同程度のロスが観測され、交通需要管理や D 滑走路着陸の間隔設定の工夫などの運用上の課題が示唆された。

2. 3. 2 ターミナル空域の到着管理と滑走路処理の統合シミュレータの開発と処理効率解析

現状の羽田空港南風時の滑走路運用と処理効率の実態をもとに、ターミナル空域またはそれに接続するより広域な到着管理空域における着陸間隔設定が滑走路処理効率に与える影響を評価するための新たなシミュレータを開発した。シミュレータでは、到着管理空域をエンルート部(空域 I)とターミナル部(空域 II)に分割しつつ、その境界を変更できるようにし、着陸間隔調整の自由度の影響を評価できるようにした(図7)。空域 II における着陸間隔調整は A・C 滑走路で関連するであろう離陸機数を予測するモジュールを内包させ、その数に応じて着陸間隔を任意に調整するアルゴリズムを開発した。離着陸処理間隔は管制方式基準や離着陸速度のバラつきを考慮して設定した。

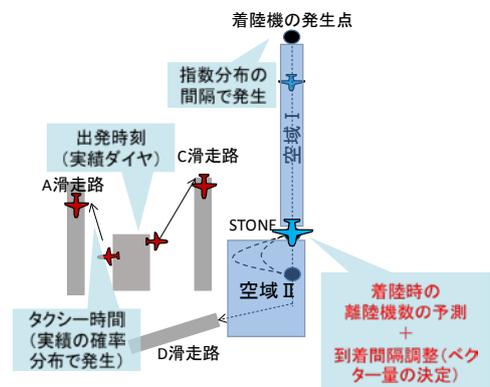


図7 シミュレータの概要

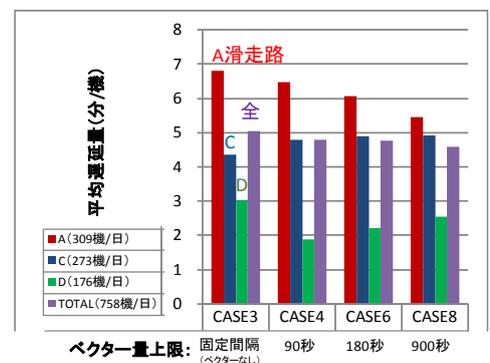


図8 到着間隔調整の自由度の影響

開発したシミュレータにより、着陸間隔設定戦略によって滑走路処理効率がどのように変化するかを解析した結果、単純な固定着陸間隔戦略でも適切な間隔設定をすれば平均遅延が大きく抑えられ、さらに A・C 滑走路の離陸機数の予測数に応じた間隔設定をした場合にターミナル空域の拡大（着陸間隔調整のためのベクター量上限の拡大）によって平均遅延の軽減（処理効率の向上）が達成できる可能性を示した（図 8）。なお、凡例中の機数はシミュレーションを行った日の 1 日分の各滑走路の使用機数である。

3. 運用コンセプトとスケジューリング技術開発

3. 1 運用コンセプトの提案

3. 1. 1 通過時刻を指定した軌道作成

2. 1 において提案した実用的な軌道モデル（TPM）を用い、さらに現在関東南 A セクタにおいて行われている間隔調整のための管制とほぼ同様の条件で軌道最適化を行い、運用コンセプトの基本として現状を分析するとともに最適化の結果と比較することによって到着管理システムの潜在便益を明らかにする。すなわち、昨年度の解析においては、自由度の大きな動的計画法（DP; Dynamic Programming）により最適軌道を求め、また、制御開始のタイミングも到着 60 分前から実施していたが、TPM を用いて軌道の自由度を限られたものとし、制御開始も約半分の 200NM 圏内の領域から実施し、現状の管制に近い条件で最適化を行う。

解析例として昨年度と同様のケース、すなわち CARATS Open Data の羽田空港の RW34L に着陸する 1 日（2012 年 5 月 9 日）の全便を用い、合流点（ADDUM）において 90 秒以上の時間間隔を保つことを制約条件として 200NM 圏内に到着した航空機に対して到着時刻を調整・制御する最適化を行う。図 9 は実際の航跡と最適化された航跡である。北方面からの到着便も RW34L を利用しているが、便数は少ないのでそのまま含めて解析を行い、西方面からの到着便の間隔を制御するエンルートの管制を自動化するシステムのコンセプトを検討する。図 10 は全 375 便の 200NM 圏飛行時間および燃料消費量の最適化された軌道の実際からの差を到着時刻でプロットしたものである。飛行時間が短縮され燃料消費量が削減されている傾向がわかる。図 11 は飛行時間と燃料消費量の差の 1 日分をプロットしたものである。飛行時間の差の平均値は -130 秒、燃料消費量の差の平均値は -154kg と軌道最適化によってそれぞれ便益があることが分かる。

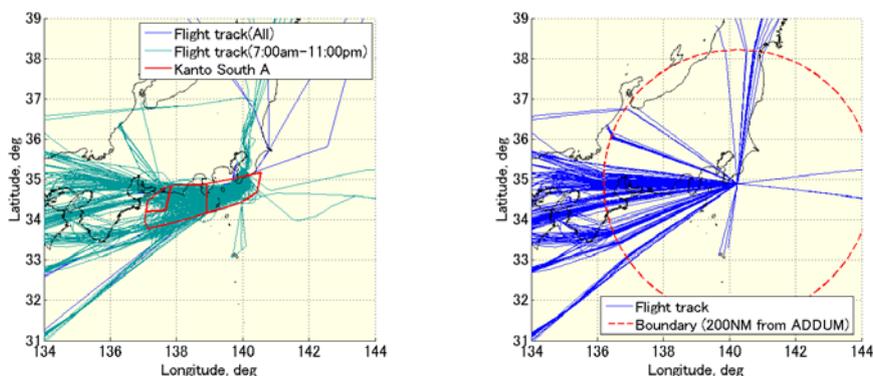


図 9 実際の航跡（左図）と最適化された航跡（右図）（RW34L への着陸）

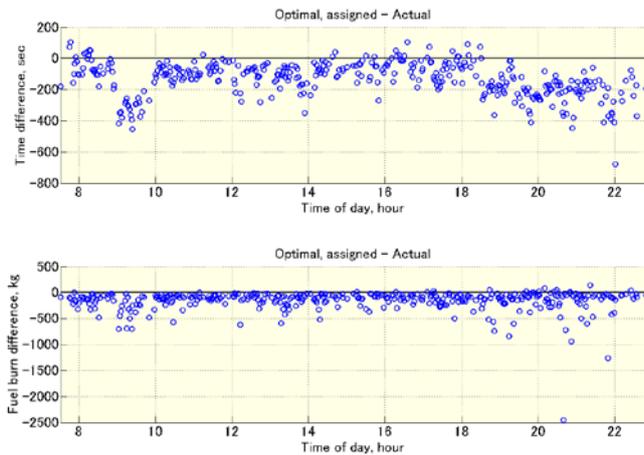


図 1 0 飛行時間（上図）および燃料消費量（下図）の差

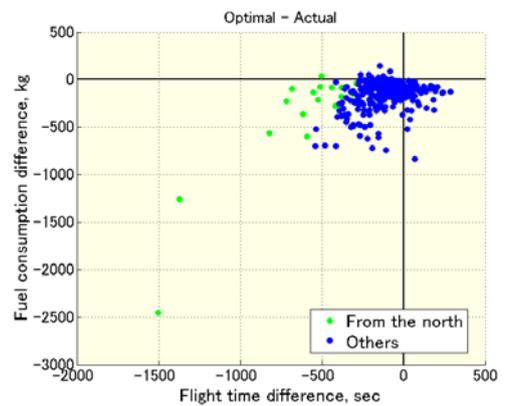


図 1 1 燃料および飛行時間の差

3. 1. 2 運用コンセプトの航空交通シミュレータによる検証

昨年度、軌道運用と協調する到着管理システムの運用コンセプトを提案した（図 1 2）。

具体的には空港（図では羽田空港：RJTT）への到着交通流を想定し、空港周辺約 100～150NM の空域を運用の対象とし、時間軸ベースで空港から遠いところから、四次元軌道最適化フリーズホライズン（軌道を到着管理システムの外部システムから更新する最終的な地点、図中 O-FH）、到着管理フリーズホライズン（到着スケジューリングを更新するために設けられた時間軸、図中 A-FH）、ターミナルゲート（図中 STONE、ADDUM）、ターミナルエリア（ターミナルゲート内）において、適宜時間管理を行うものである。

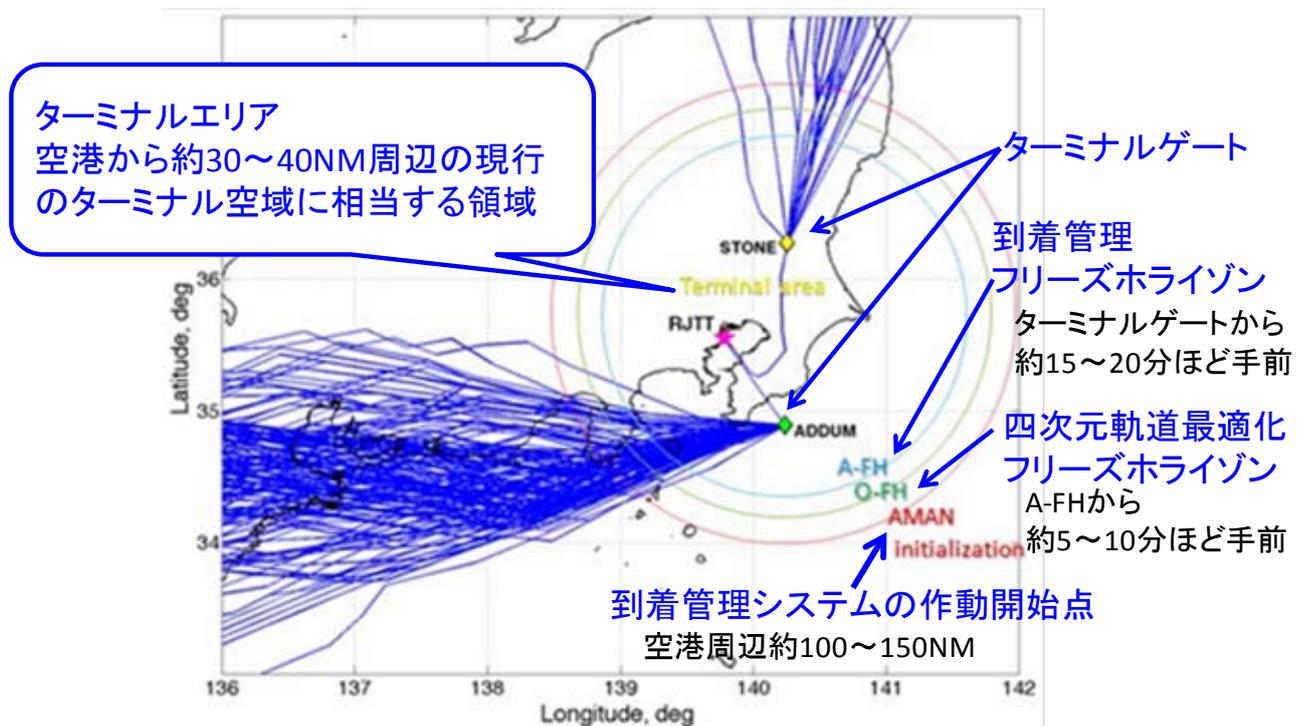


図 1 2 提案した運用コンセプト

今年度は羽田空港への到着交通流に対して、コンセプトの有効性を検証するために航空交通シミュレータを用いたシミュレーション（4. 2 参照）を実施した。実際の飛行データである CARATS オープンデータを参考に 3. 1. 1 のアルゴリズムを使用した飛行軌道を作成し、3. 2. 2（1）のアルゴリズムによるスケジューリングを行った。さらに、フリーズホライズン内側である近距離の空港から出発する到着機をリスケジュールが必要な飛行として誤差を吸収できるかを検証した。その結果、消費燃料などの効率性の向上や処理容量の保存、近距離便の影響の吸収にも対応できることがわかり、運用コンセプトの有効性が示された。

3. 2 スケジューリング開発技術

3. 2. 1 FMS によるスケジューリング開発技術の検証

FMS の Full Phase RTA (Required Time of Arrival) の機能、性能については、昨年度に検討を行い、合流点での到着時刻制御に用いることが有望であることが示された (RTA 機能は巡航フェーズでのみ機能する FMS も多いが、Full Phase とは出発、巡航、降下全てのフェーズにおいて RTA が機能することを示す)。今年度は、FMS の生成する軌道を模擬することを目的に 2. 1 において提案した TPM モデルを使用して最適軌道を求め FMS の軌道との比較を行った。運航性能モデルの相違 (FMS で使用されるモデルと BADA モデルとの相違) により一致はしないものの傾向は類似している。図 1 3 は FMS のシミュレーションの結果と DP の結果も含めた最適軌道との比較である。運航性能モデルについては BADA Rev. 3.11 を使用して解析を行っているが、このモデルは通常使用される飛行領域における精度を追求したもので飛行領域の限界付近での精度が低下しており、その点を改良して飛行領域全体の精度を追求したとされる BADA family 4 を用いて軌道最適化を行って実用性の追求を行うことが今後必要と思われる。

Full Phase RTA の制御ロジックは、RTA と ETA (Estimated Time of Arrival) の差に対して図 1 4 に示すような閾値を用いて速度計画を再計算する。Full Phase RTA 非対応機に対して音声交信による速度指示によって到着時刻を制御する場合、指示回数は気象誤差などに依存するが、なるべく少ないこと、および 5kt 程度の分解能で指示することを考慮すると指示のタイミングが重要であり、実際に運用されている Full Phase RTA の制御ロジックを参考にすることが有用である。

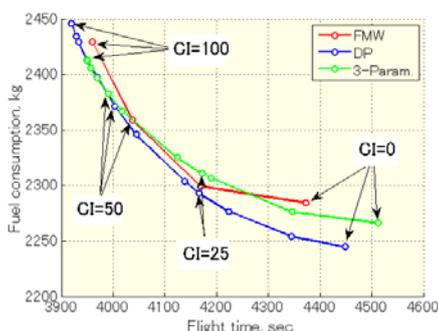


図 1 3 FMS と軌道最適化との比較

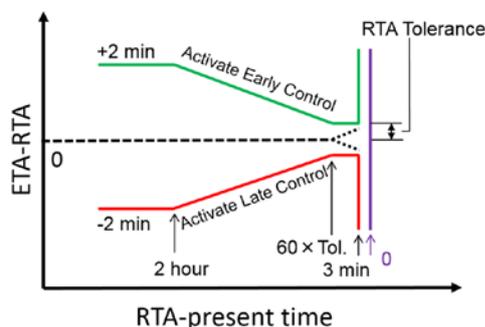


図 1 4 RTA の制御における閾値

3. 2. 2 スケジューリングアルゴリズムの提案

本研究で想定するスケジューリング軌道は、高度 10,000ft に想定する合流地点の 250km 手前から、水平経路と降下経路との組み合わせにより構成される。FMS の VNAV PATH (入力した飛行計画どおりに垂

直パスを維持するように飛行するモード)を用いて、その時々々の風速を考慮した降下開始位置とその前後のIAS(指示対気速度)を指定することにより終端位置の到着時刻を最小の燃料消費量で満たす軌道を得ることが出来る。航空機の運航コストは次式に従い算出する。

$$C = \alpha(T_{flight} - T_{ref})[sec] + W_{fuel}[kg] \quad (1)$$

これは燃料消費量と飛行時間の関数となっている。燃料消費量はBADAモデルと気象庁GPVデータを用いて解析する。平成28年度は、昨年度までに明らかにしたCDO(連続降下運航)を将来の交通流を想定して評価し、さらに2通りのスケジューリングアルゴリズムを新たに検討した。

(1) 将来の交通流を想定したCDOの評価

今後は航空輸送の需要の増加および四次元航法や出発遅延などの時間管理手法が向上することが想定される。そこで、交通量の増加とその時間管理精度の向上を想定したCDOスケジューリングの運航効率を評価する。ここでは昨年度示した以下のスケジューリングアルゴリズムを用いる。

- ・遅延のみによる間隔調整・最短時間基準(以下アルゴリズムAとする)

初期位置において各航空機の最短の飛行時間を用いて合流地点のETAを決定し、それに従い着陸順序を決定する。前方の航空機との時間間隔が不足する場合には自機のSTA(Scheduled Time of Arrival)を遅延させ時間間隔を確保する。

- ・遅延のみによる間隔調整・最小コスト時間基準(以下アルゴリズムBとする)

ETAを各航空機の運航コストが最小となるように決定する。他はアルゴリズムAと同様である。

- ・遅延及び短縮を用いた間隔調整・最小コスト時間基準(以下アルゴリズムCとする)

アルゴリズムBに加え、後続の航空機との時間間隔が不足する場合には、自機と先行機および後続機間に最低限の時間間隔を確保しつつ、合計の運航コストが最少となるように自機のSTAを決定する。

降下開始地点での時間間隔のデータとして、現在の高度3,000ftでのデータを用いる。これによりある程度時間間隔が調整された交通流を模擬する。評価結果を図15に示す。縦軸は実データの運航コストに対する削減率を示している。これらの結果より、交通量が増加すると削減率が減少すること、および特に1.5倍まで増加するとそれが顕著になることが明らかとなった。これは1.5倍の交通量では航空機間の平均間隔が基準間隔としている90秒を下回るためであると考えられる。交通量が1.25倍に増加した場合であっても、時間間隔の管理精度が向上すれば運航コストの削減率が向上する。したがって、運航効率向上のためには降下の段階だけでなく、巡航の段階や出発の段階からの時間管理精度の向上が不可欠であると結論できる。

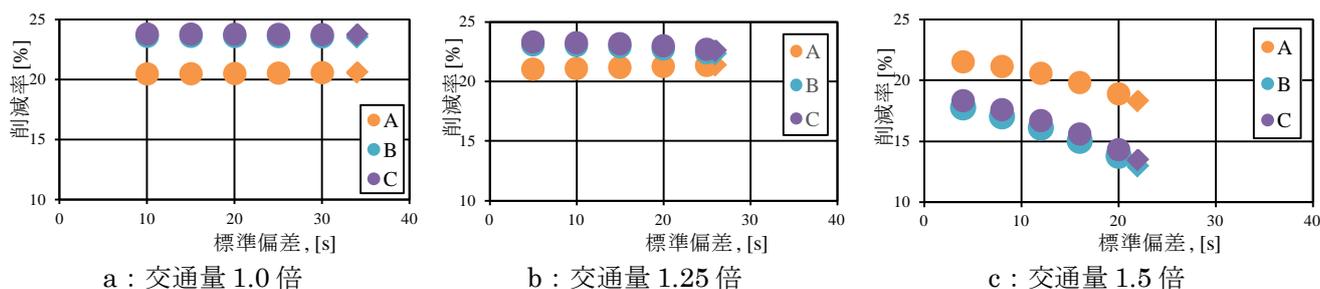


図15 CDO運航コスト評価結果

(2) 遅延予測を用いたスケジューリング

CDO では多くの場合、後続機の遅延により合流地点での時間間隔を確保するため、遅延が交通流の後方へと蓄積し運航コストが増加する。これに対し、遅延時間をあらかじめ予測し、それをスケジューリングに反映して運航コストを最小化できるものと考えられる。CDO により生じる遅延時間は交通量により決定され、またその日々の運航計画は大きく変化しないものと考えられる。そこで本研究では平日の運航計画がほぼ変化しないものと考え、金曜日の遅延時間を月曜から木曜日から予測し、予測される遅延時間だけあらかじめ短縮した ETA を用いることとした。通常の CDO 解析、スケジューリングを無視して全ての航空機が最適飛行時間で飛行した場合と比較して、一機あたりの平均運航コストの評価結果を図 1 6 に示す。スケジューリングを無視した場合の評価結果は全ての航空機がコスト最小となる飛行時間で合流した場合に相当するので、この値が最小値となる。これらより、最適飛行時間を基準とした CDO を導入した場合に比べさらにコストを低減できることが明らかとなった。

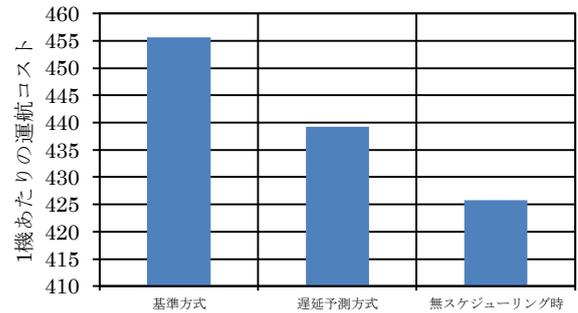


図 1 6 一機あたりの平均運航コスト

(3) 巡行経路における一時的な時間短縮を許容したスケジューリング

本研究では、現行の CFDT 運航の発展型として四次元 CDO に至る 50 分前にも到着時刻を定めることを想定する。そして四次元 CDO 開始時において一時的に時間間隔が着陸間隔を下回ることを許容するスケジューリングを提案し、その効果を評価する。以下の 3 通りの間隔調整アルゴリズムと標準とする飛行軌道の組み合わせからなるスケジューリングアルゴリズムを想定する。

- ・ A : 延長のみによる間隔調整

標準飛行軌道：上昇軌道：BADA 標準軌道、巡航軌道・降下軌道：BADA 標準軌道

- ・ B : 延長と短縮を活用した間隔調整

標準飛行軌道：上昇軌道：BADA 標準軌道、巡航軌道・降下軌道：運航コスト最小軌道 (※)

- ・ C : B に加え一時的な時間間隔の短縮を許容

※ 運航コストが最小となる速度履歴の軌道、BADA 標準軌道より低速である

シミュレーション評価の結果を図 1 7 に示す。飛行時間および燃料消費量・運航コストもアルゴリズム C において最小となった。

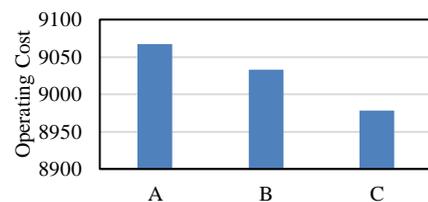


図 1 7 一機あたりの運航コスト (上昇・巡航含む)

4. 到着機の軌道生成技術開発

4. 1 軌道生成技術の開発及び評価

到着機の軌道生成技術を開発するため運航評価システムによる実現性を調査した。

本研究で想定したスケジューリング軌道の実現性を、運航評価システムを用い、現役の運航乗務員 (ボーイング 737 型機機長) による試行により検証した。試行の内容を以下に示す。

- ・ ウェイポイント間の直線経路上の飛行の試行

- ・意図的な TOD（降下開始点）の位置の設定（任意のウェイポイント設定を含む）
- ・MCP（Mode Control Panel）の Speed Intervention 機能による IAS 維持および変更

上記の試行に対して、以下の項目の評価を得た。

①一般的な FMS の使い方とは異なるが、訓練されたパイロットであればすぐに慣れるか？

回答：通常のパイロットであればすぐに慣れる。ウェイポイント設定・MCP 入力はいずれも容易。

②一般的な FMS の知識の範囲内か？

回答：一般的な FMS の知識の範囲内。ウェイポイントの設定は容易であり、任意位置のウェイポイント設定についても緯度・経度の指定は入力ミスの懸念があるものの十分可能。

③習熟には時間を要するか？

回答：習熟には時間がかからない。正規の運航乗務員であれば、通常の業務の範囲内。

④一般的な FMS の入力手順と比べて時間がかかりそうか？

回答：一般的な FMS の入力手順と比べて時間がかかるものではない。ウェイポイントがすでに CDU 上にあり、その通過高度を入力するだけならば 10 秒程度で十分。任意の位置のウェイポイント設定を「緯度・経度の指定」にすると、確認の時間を要するために時間はかかるものの、1 分程度で十分可能。

⑤パイロット或いはエアラインはこのような飛行方法を受け入れ可能か？

回答：パイロットやエアラインには受け入れやすい飛行方式。機上側は、FMS および MCP の操作により、受信した軌道に沿って飛行するだけでありあまり負担にはならない。地上側が軌道を解析できればあとは機上へ伝達するだけであり、現在は ACARS も使えるので大きな障害はない。

⑥その他

回答：各航空会社が別々にシステムを開発した場合には、STA の算出に自社便の情報しか使えなくなる可能性がある。管制サイドからの懸念が寄せられるのではないか。STA を実行する目的だけであれば十分達成可能だが、少なくとも例えば羽田到着便の情報は全部把握する必要がある。

以上の検証結果から、本研究で想定しているスケジューリング軌道は、実際の航空機においても再現可能であるものと考えられる。

4. 2 シミュレーションの実施に関する支援

4. 2. 1 航空交通シミュレータ用入力データの作成

対象とする航空交通流は 2014 年 9 月 20 日の 18～20 時頃に地点 ADDUM を通過する羽田 RW34L 到着便（計 63 便）とし、以下の 3 つのシナリオデータを作成した。

①CARATS Open Data と同一の軌道

②時間調整を考慮した最適軌道

③シナリオ②に対し STA を設定

気象データは、各時刻における MSM 解析値を用いた。ここで、シナリオ②は、3. 1. 1 にて提案した到着時刻調整の最適化結果を、本シミュレータの入力フォーマットへ修正したものである。また、シナリオ③は、3. 2. 2 にて提案したスケジューリングアルゴリズムにより算出した STA を、シナリオ②に対して設定したものである。

4. 2. 2 航空交通シミュレータによる軌道計算の概要

4. 2. 1で作成した各シナリオデータを入力として、本シミュレータを通して、各航空機の燃料消費量、飛行距離、飛行時間、地点 ADDUM の通過間隔などを出力した。ここで、シナリオ③に対しては、設定した STA を満たすよう速度調整または経路延伸（Point Merge 方式）を行い、STA を満たしつつ燃料消費量が少なくなるような軌道を計算した。経路延伸のアルゴリズムは、昨年度に実施した方法を利用した。ただし、昨年度では経路延伸を開始する地点を固定としていたが、作成した各シナリオの軌道に合わせて、地点 ADDUM からの半径 10NM の圏内の任意の地点から反時計回りに延伸可能なように改良した（図 18 参照）。シミュレーションの結果を図 19 に示す。STA を満たすように黄色の円弧のように弧を描くように経路が延伸されている。

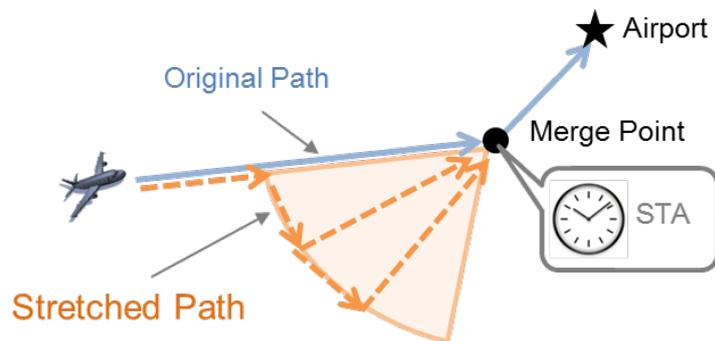


図 18 経路延伸のイメージ

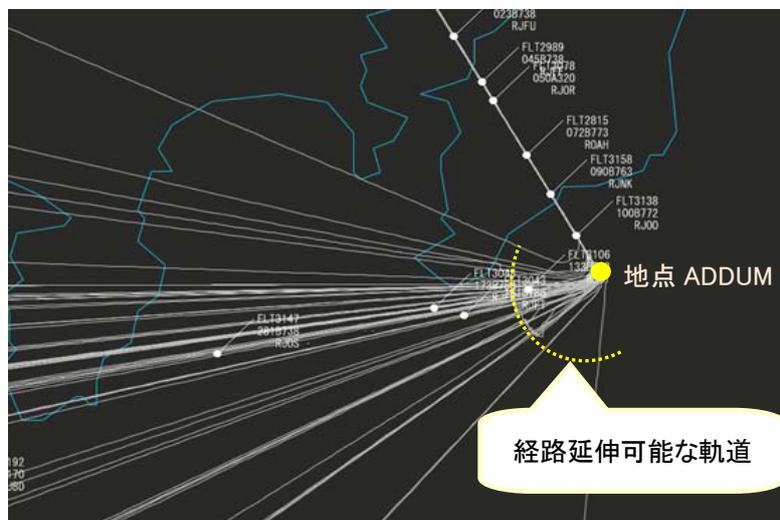


図 19 シミュレーション結果例

5. 結論

昨年提案した運用コンセプトについて、運航の不確実性にも対応でき、遅延も緩和され、燃料効率も良く、処理容量も低下しないことをシミュレーションにより明らかにした。軌道最適化についてはさらなる精度向上として 3 変数モデルを提案し FMS の生成する軌道を模擬した。気象データの活用として先行機のデータを用いるときの有効な範囲を示した。滑走路処理については羽田空港の処理効率の実態を解析するとともに、着陸間隔の設定により平均遅延が低減されることを示した。スケジューリングとし

では 3 種類のスケジューリングを開発し、運航コストが低減される方式を提案した。また運航評価システムによりスケジューリング結果の実現に問題がないことを示した。

これらの研究成果について、国土交通省航空局交通管制部が主催する CARATS の会議において報告し、成果の普及と活用を目指した意見交換を行った。到着時間管理の時間間隔や、SSR モード S データの入手タイミング、スケジューリングにおける TOD の位置、滑走路容量予測などについて質疑応答が行われた。また、本研究の成果により近い将来の課題への活用の可能性も示された。成果を出すための過程も含めて今後 CARATS の施策へ反映・活用できるように、適宜成果の発信を続けたい。

6. 知的財産権取得状況

特許出願 0 件

7. 研究成果発表実績

1) 論文発表

国内 1 件、海外 5 件

第 3 章

[A1] Yuki Higuchi, Naoto Kitazume, Keiichi Tamura, Tomoyuki Kozuka, Yoshikazu Miyazawa and Mark Brown, Optimal Arrival Time Assignment and Control Analysis Using Air Traffic Data for Tokyo International Airport, AIAA Paper 2017-1246, AIAA Guidance, Navigation and Control Conference, Grapevine, Texas, 2017.

[A5] Yuki Higuchi, Naoto Kitazume, Tomoyuki Kozuka, Keiichi Tamura, Yoshikazu Miyazawa and Mark Brown, Efficient Control of Arrival Time at a Congested Airport's Terminal Area, ICAS2016, 2016.

[B1] Takeichi, N., Nominal Flight Time Optimization for Arrival Time Scheduling through Estimation/Resolution of Delay Accumulation, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2017.

[B2] Takeichi, N., Kaida, R., Shimomura, A. and Yamauchi, T., Prediction of Delay due to Air Traffic Control by Machine Learning, AIAA-2017-1323, AIAA Modeling and Simulation Technology Conference, Grapevine, TX, 9-13 Jan. 2017.

[E1] Eri Itoh, Mark Brown, Atsushi Senoguchi, Navinda Wickramasinghe and Sachiko Fukushima, Future Arrival Management Collaborating with Trajectory-Based Operations, Air Traffic Management and Systems II, Springer, Feb. 2017.

[D1] 平田輝満, 二見康友, 蒔田良知, “混雑空港における離着陸順序付けの実態と滑走路処理容量に関する研究”, 土木学会論文集 D3 (土木計画学) Vol.72 No.5, pp.I_1037-I_1045, 2016.

2) 口頭発表

国内 12 件、海外 1 件

第 2 章

[A2] Keiichi Tamura, Akinori Harada, Yuki Higuchi, Haruki Matsuda and Yoshikazu Miyazawa,

Accuracy Evaluation of an Aircraft Performance Model using Cargo Flight Data for Air Traffic Management Research, 2016 Asia Pacific International Symposium on Aerospace Technology (APISAT2016), 2016.

[A6] 田村恵一, 原田明德, 樋口雄紀, 松田治樹, 宮沢与和, “貨物便の飛行データを用いた航空機の性能モデルに関する研究”, 日本航空宇宙学会第 47 期年会講演会, 2016 年.

[C1] 手塚亜聖, 瀬之口敦, “気象庁数値予報モデルと先行機のダウンリンクデータの誤差に着目した風況予測精度向上”, 日本航空宇宙学会第 47 期年会講演会, 2016 年.

[C2] 手塚亜聖, 瀬之口敦, “先行機ダウンリンクデータを用いた後続機の風予報精度向上に関する考察”, 第 48 回流体力学講演会/第 34 回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム講演集, 2016 年.

[C3] 手塚亜聖, 瀬之口敦, “実運航データの活用による気象データの風速予測精度向上に関する考察”, 第 54 回飛行機シンポジウム, 2016 年.

[C4] 手塚亜聖, 瀬之口敦, “羽田空港到着機への影響が大きい気象急変時の運航の分析”, 平成 28 年度航空宇宙空力シンポジウム講演集, 2017 年.

[D2] 蒔田良知, 平田輝満, 二見康友, “気象条件に着目した滑走路処理容量の変動特性に関する研究”, 第 53 回土木計画学研究・講演集, 2016 年.

[D3] 平田輝満, 蒔田良知, 二見康友, “気象条件に着目した滑走路処理容量の変動特性に関する研究”, 第 54 回飛行機シンポジウム, 2016 年.

第 3 章

[A3] 樋口雄紀, 田村恵一, 小塚智之, 北詰有人, 宮沢与和, マークブラウン, “効率的な到着管理のための FMS を利用した到着時刻制御の検討”, 第 54 回飛行機シンポジウム, 2016 年.

[A4] 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, 2016 年.

[B3] 山内貴弘, 武市昇, “混雑空港へ向かう巡航航空交通流の時間管理の効果”, 第 54 回飛行機シンポジウム, 2016 年.

[B4] 下村顕秀, 武市昇, “進入着陸における航空管制による遅延伝搬の解析とその予測”, 第 54 回飛行機シンポジウム, 2016 年.

第 4 章

[F1] 請川克之, 矢野夏子, “経路延伸を考慮したコンフリクトフリー軌道生成アルゴリズム”, 第 54 回飛行機シンポジウム, 2016 年.

3) その他 (研究内容報告書、機関誌発表、プレス発表等)

- ・第 1 回交通運輸技術フォーラムでパネル展示 1 件
- ・航空局で報告 1 件
 - ・ CARATS ATM 検討 WG 軌道ベース運用アドホック会合にて研究報告