

令和元年度 文部科学省

ポスト「京」で重点的に取り組むべき社会的・科学的課題に関する
アプリケーション開発・研究開発（萌芽的課題）

令和元年度

「複数の社会経済現象の相互作用のモデル構築とその応用研
究（堅牢な輸送システムモデルの構築と社会システムにおけ
る最適化の実現）」

成果報告書

令和2年5月29日

東京理科大学

藤井 孝藏

本報告書は、文部科学省の科学技術試験研究委託事業による委託業務として、学校法人東京理科大学が実施した令和元年度「複数の社会経済現象の相互作用のモデル構築とその応用研究（堅牢な輸送システムモデルの構築と社会システムにおける最適化の実現）」の成果を取りまとめたものです。

目次

1. 委託業務の題目	1
2. 実施機関（代表機関）	1
3. 委託業務の目的	1
4. 令和元年度（報告年度）の実施内容	2
4-1. 実施計画	2
4-2. 実施内容（成果）	3
4-3. 活動（研究会等）	18
4-4. 実施体制	19

別添1 学会等発表実績

別添2 実施計画

1. 委託業務の題目

「複数の社会経済現象の相互作用のモデル構築とその応用研究（堅牢な輸送システムモデルの構築と社会システムにおける最適化の実現）」

2. 実施機関（代表機関）

代表 機 関	機関名		学校法人 東京理科大学			
	所在地		〒162-8601 東京都新宿区神楽坂一丁目3番地			
	課題 責任者	ふりがな	ふじい こうぞう	生年	西暦 1951年10月17日（68歳）	
		氏名	藤井 孝藏	月日	※2020年4月1日現在	
		所属部署名	工学部 情報工学科		役職	教授
	連絡先	Tel. 03-5876-1691		Fax. 03-5876-1691		
		E-mail: fujii@rs.tus.ac.jp				
	事務 連絡 担当者	ふりがな	うざわ しんじ			
		氏名	鶴澤 真治			
		所属部署名	研究戦略・産学連携センター	役職	コーディネータ/URA	
連絡先	Tel. 03-5228-7433		Fax. 03-5228-7442			
	E-mail: chizai@admin.tus.ac.jp					

3. 委託業務の目的

航空機，列車，船舶といった計画に基づいて運行（運航を含む）される大規模輸送システムは近年急速に複雑化し，これら社会を支える輸送システムにおける遅延は近年日常的になっている。この課題に対し，個別事象に対する改善が図られてはいるが，相互作用を有する全体問題として捉え，これを効率化する努力はほとんど見られない。本研究では，安全性と効率性を両立する運行システムを策定するモデルとシミュレーション手法を開発，それを利用して社会の構成要素が互いに影響し合う効果を分析・予測する技術を構築する。主に航空機や首都圏の鉄道を対象に，一定規模の地域を1つのシステムと捉え，堅牢性を有する全体最適な運行方式策定に結びつける。これまでにないスーパーコンピュータの社会経済の基盤課題への適用により，急速に複雑化する大量輸送システムの効率化に資することを目的とする。

このため，中核機関の学校法人東京理科大学は，分担機関の国立大学法人東京大学，国立大学法人大阪大学，国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所と密接に連携し，再委託により研究開発を実施する。

学校法人東京理科大学は，上記の目的を達成するため，研究開発全体のとりまとめを行うとともに，プロジェクトの総合的推進を実施する。

4. 令和元年度（報告年度）の実施内容

4-1. 実施計画

平成31年度（2019年度）は本格実施フェーズの最終年度になるので、これまで開発してきたモデルのさらなる高度化を継続するとともに、その適用により効率的で安全な航空交通流の設計に有用なデータを提供することを試みる。以下により具体的な業務内容について記す。

① 堅牢な輸送システムモデルの構築と社会システムにおける最適化の実現

国内主要空港の離着陸機すべてを対象としたシミュレーションツールを完成させ、それを利用した多目的最適化を実施する。また、羽田空港着陸機に限定したシミュレーションを利用し、さらに多様な多目的最適化を実施する。想定される複数の目的を設定し、それらの最適解の特徴を分析することで、安全性と堅牢性の評価を行うとともに、効率的で安全な航空交通の管理手法を議論、提案に結びつける。ポスト京利用の前段階として、モデルのさらなる改善を進め、本課題内で開発してきたセルオートマトンモデルを利用した航空交通流のアプリケーションソフトウェアを一定の完成形に仕上げる。インターフェイスを明確化することで、空港内タキシングを模擬するシミュレーションソフトウェアと上記開発ソフトウェアとの連携を可能にする。数学モデルによる航空交通流のモンテカルロシミュレーションをさらに幅広く進め、航空機間監視情報運航利用システム（ASAS）による運航制御手法の効果検証など最新の航空交通流管理の有効性を検討・検証する。列車の運行に関しては、モデル開発を継続し、具体的な路線を対象としたシミュレーションを実施、今後の課題などを整理する。以上の業務を、以下に記載する個別テーマについて、再委託によって分担機関と連携し、研究を進める。

a) 航空交通モデルの検証と高度化、および成果の社会活用に向けた方向性の検討

<再委託機関：国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所>

b) 種々の運航離散モデルの数理とデータ解析および空港内移動モデルの構築

<再委託機関：国立大学法人東京大学>

c) 大規模並列計算モデルの高速化と一般向け/利用者向け表示技術の検討

<再委託機関：国立大学法人大阪大学>

d) 個別エージェントモデルの高度化と航空交通モデル統合最適化の実施

e) 首都圏列車データを利用した基盤モデルの開発と初期的適用

② プロジェクトの総合的推進

本プロジェクトの総合的推進として、プロジェクト全体の連携を密としつつ円滑に運営していくため、中核機関は業務参加者からなる運営委員会を定期的開催、さらに研究協力者や関連研究者との個別会合の設定や拡大検討会の開催などにより参画各機関の連携・調整にあたる。また、必要に応じて当該研究成果についてステークホルダーとなり得る機関との意見交換の場を用意する。プロジェクト全体の進捗状況を確認しつつ、計画の合理化を検討し、必要に応じて、調査あるいは外部有識者を招聘して意見交換を行うなどプロジェクトの推進に資する。また、プロジェクトで得られた成果については、可能な限り積極的に公開して今後の展開に資する。

4-2. 実施内容（成果）

実施計画に記載した2つの項目について研究を実施した。項目1については冒頭に成果の概要を記し、その後に業務項目に対応する形で個別成果の詳細を記す。

本格実施フェーズの2年次かつ全体計画の最終年度として、これまで開発してきた航空交通プロトエージェントモデルを利用した具体的なシミュレーションの更なる実施と残されてきた課題の解決を進め、最終アプリケーションとして一定レベルの完成を終えた。すなわち、航空交通流を対象に、本研究提案の目標であった「将来の運航・運用方式の基盤となる安全かつ効率的な最適交通輸送システムの検討手法が一定の検証も含めて完成する。」を実現した。

加えて、残された課題を整理することで、将来の「富岳」利用に向けた準備を終了させた。効率的で安全な航空機の運航実現に関する提案など副次的な関連したデータサイエンス的研究も進めた。

① 堅牢な輸送システムモデルの構築と社会システムにおける最適化の実現

（項目a）航空交通モデルの検証と高度化，および成果の社会活用に向けた方向性の検討

（担当：国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所）

昨年度に実施したデータ駆動型分析および待ち行列理論に基づいて構築した航空交通モデルを発展させ、東京国際（羽田）空港に到着する将来の航空交通に対する到着遅延時間の増加を定量的に予測し、遅延削減のために導入する管制支援ツールである拡張型到着管理システムの設計要件を提示した。待ち行列理論を適用したデータ分析により、新しい最小間隔基準の導入と正確な間隔づけのための管制支援ツールの導入が効果的であることを明らかにした。研究成果は、複数の学会発表、招待講演などによって公表するとともに、複数の国際論文誌として、広く社会に還元した。

（項目b）種々の運航離散モデルの数理とデータ解析および空港内移動モデルの構築

（担当：東京大学 先端科学技術研究センター）

セル・オートマトン手法を利用した、空港内のタキシングとスポットアサインを扱う地上航空交通流のシミュレーションプログラムの開発をさらに進めた。国内3大空港として、羽田空港、福岡空港、新千歳空港の3つを対象としたシミュレーションプログラムを完成させることで空港内地上交通流に関する取り組みを終えることができた。開発プログラムは新規の空港にも対応できるようなソフトウェア構成としている。また、昨年度に開発したセル・オートマトンを用いた羽田空港内の地上交通を対象としたATM（Air Traffic Management）シミュレーションプログラムの高度化に取り組み、東京理科大学を中心に開発を進めてきたエンルートATMシミュレーションプログラムとの連携を実現することで、地上からエンルートまでをシミュレーションするソフトウェア連携を確立した。加えて、実用化に向けた取り組みとして、シミュレータの入出力部の大幅な機能拡充を進め、開発ソフトウェアの基盤を構築した。

（項目c）大規模並列計算モデルの高速化と一般向け/利用者向け表示技術の検討

（担当：大阪大学 サイバーメディアセンター）

航空交通流の分析に資する可視化システムの開発を継続した。同可視化システムは、単なるデモンストレーション用ではなく、データ分析等においても有用な機能を有するもので、その特徴は、高いフレームレートを維持しながら大規模航空交通流データをリアルタイムレンダリングし、インタラクティブな操作によって必要データを絞り込み、視覚的な分析を行うことにある。今年度は、複数ビューアを利用した複数ケースの比較など、特に分析を目的とした機能強化を図り、開発可視化ソフトウェアの実利用をさらに有効なものとした。最終的に、航空機渋滞モデルのシミュレーション結果、CARATS オープン

データ等の実フライトデータ双方に対応する形で航空機の軌跡や関連情報を効率よく分析できる一定レベルの可視化ソフトウェアの開発を終了した。今後の研究での利用に加えて、一般の研究者の航空交通流分析の利用にも十分耐える可視化ソフトウェアの提供が可能となった。

大規模並列計算モデルの高速化に関しては本年度特に新たな試みは行わなかった。各エージェントの現時点での計算負荷を考え、昨年同様エージェント個体ごとの並列化を基本方針としていたため、富岳や各 HPCI システムに特化した工夫は不要となっている。下記 d) の多目的最適化においてもケース毎の並列化を利用することで全体に高い並列化効率を得ている。

(項目d) 個別エージェントモデルの高度化と航空交通モデル統合最適化の実施

(担当：東京理科大学)

メインとなるエンルート航空交通のシミュレーションに関しては、(1) 更なる最適化作業、(2) 国際線フライトの導入、(3) 羽田出発便の導入、(4) ロバスト性向上の一例として天候変化に応じた runway change (到着利用滑走路の変更) などへの対応機能などを導入した。特に (1) については、昨年度実施した多目的最適化による効率的なフライト管理に加え、下降区間 (空港に向かう降下開始位置、もしくは降下角度) を設計変数に加えた多目的最適化を実施し、下降区間を調整することで、遅延時間と消費燃料をともに減らすことができることを明らかにした。また、遅延と消費燃料にはトレードオフ関係があり、下降区間を短くすると遅延時間を短縮でき、長くすると消費燃料を削減できることを明らかにした。

さらに、項目b) に記載した羽田空港内の地上航空交通流を対象としたシミュレーションプログラム (東京大学担当) とのインターフェイスを明確にすることによって、本プロジェクトで開発する主たるソフトウェアとして、羽田空港を対象とした地上とエンルートを含んだ航空交通流の総合シミュレーションシステムの構築につなげた。

(項目e) 首都圏列車データを利用した基盤モデルの開発と初期的適用

(担当：東京理科大学)

首都圏列車オープンデータを利用した基盤モデルの初期開発については、具体的な路線を対象としたモデル開発と初期的シミュレーションの実施を目指したが、昨年来の課題であるモデル作成のために必要な具体的な追加データ (首都圏鉄道各社の相互乗入を含む複数運航会社の列車運行の実態情報、各列車の乗客数や各駅での車両乗降者数に関する情報等) の提供を受けることができず、残念ながら明確な進展は得られなかった。そもそも、鉄道運行会社はこれらの情報を保存しておらず、今後、個別企業ではなく国もしくは首都圏レベルのデータ整備がこの研究を進める上で強く求められることが得られた結論となった。

以上、最終年度として、国内航空交通流全体を模擬し、遅延解消方策などを議論するプラットフォームとなりえる統合的なシミュレーションプログラムとそれを利用して進める航空交通流効率化の議論に供する可視化などの周辺ソフトウェアを完成したことが本研究課題の令和元年度における成果である。加えて、海外関連機関との連携を進めたことで、本プロジェクトと開発プログラムとその成果を海外の航空管制に関わる研究者にも知って頂くことができた。今後は個別エージェントの高度化などさらなるプログラムの充実を図ると同時に、長期的な目的として設定した、航空機からの乗降客や地上交通のシ

ミュレーションと連携する多層構造のセルオートマトンを利用した複合的交通流のシミュレーションプログラムを目指した活動を継続していくことになる。

以下、研究項目ごとに成果の詳細を記す。それぞれ項目タイトルの下に業務項目名を付し、業務との対応がわかるように記載した。

①-1 航空交通モデルの検証と高度化、および成果の社会活用に向けた方向性の検討
(業務項目a)

昨年度に実施したデータ駆動型分析および待ち行列理論に基づいて構築した航空交通モデルを発展させ、東京国際（羽田）空港に到着する将来の航空交通に対する到着遅延時間の増加を定量的に予測し、遅延削減のために導入する管制支援ツールである拡張型到着管理システムの設計要件を提示した。

本研究で構築した待ち行列モデルの概要を図1に示す。待ち行列モデルのパラメータであるサービス

時間および到着の時間間隔について、到着空港である羽田空港を中心とした同心円を半径 10 NM から 300 NM まで（注：1 NM (nautical mile = 1.852km) 10NM 刻みで描くことで定義した。まず、サービス

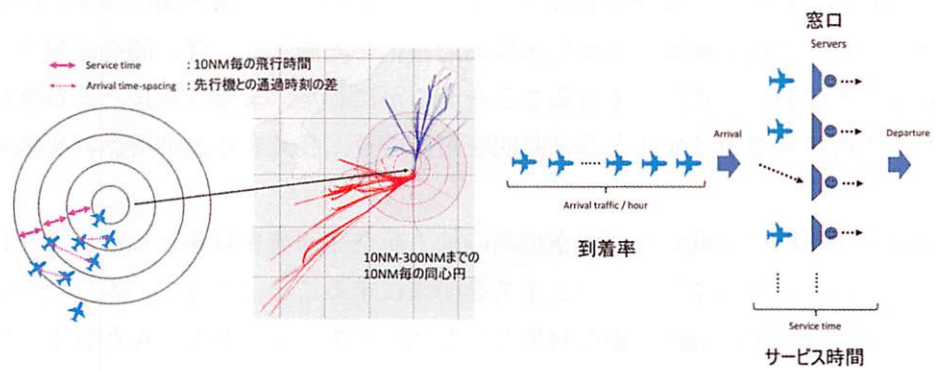


Fig.1 待ち行列モデルの概要

ら内側の円を通過するまでの飛行時間とした。次に、先行機が円を通過してから後続機が通過するまでの時間差を到着の時間間隔とした。外側の円と内側の円に囲まれたドーナツ形状の 29 個の空域を飛行する航空機数を、サービスを受ける窓口数として定義した。これらの確率分布を 2016 年および 2017 年の奇数月における 71 日分の航空交通データより同定し、到着遅延時間の予測に利用した。確率分布の性質より、G/G/c および M/G/c/k モデルを応用し、定量的に遅延時間を推定した。

図2に、羽田空港の南西方面から到着する航空交通流（図2赤線の航跡に対応）について、到着遅延時間の予測結果を示す。現状（1時間あたり30機が到着・各空域の窓口数2）の場合、30NMから50NMの空域で最大20秒程度の遅延時間が生じていることがわかる。一方で、将来（1時間あたり36機が到着）の航空交通を仮定した場合では、現状の空域容量（窓口数）を維持すると、20NMから60NMの空域で到着遅延が増加し、最大110秒程度の遅延時間が生じることがわかった。図2には示していないが、1時間あたり40機の到着を仮定すると、航空交通流の系が不安定になることがわかった。これを解決する手段として、空域容量を現状より増加させる（図2における窓口数 $c=3$ ）と効果的であり、1時間あたり36機の到着を見積もっても、現状よりも到着遅延時間を削減できることがわかり、1時間あたり40機の到着を見積もっても安定した航空交通流を実現できることを示すことができた。

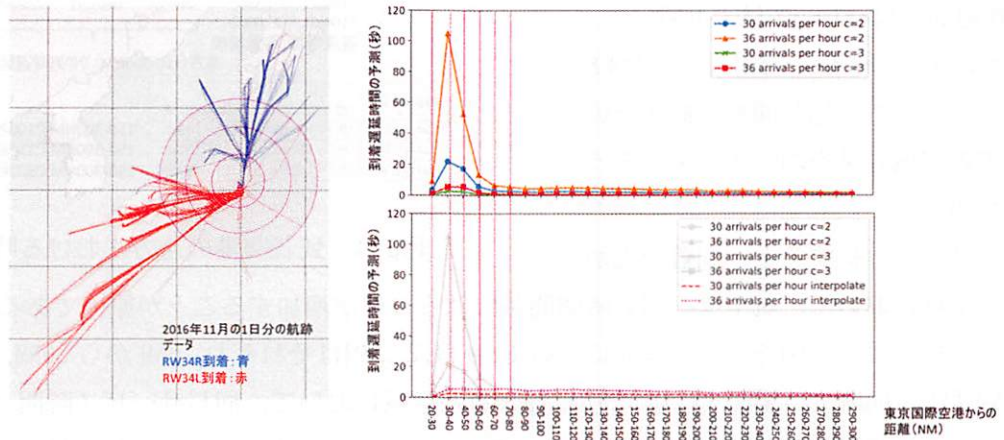


Fig. 2 将来的な航空交通量の増加に起因する遅延時間の定量予測

この知見を、図3に示すように、実運用に照らし合わせて解釈する。これまでは、羽田空港のターミナル管制が管轄する空域に移管する際に、安全性を確保する理由で7NMの航空機間隔をつけており、航空機が同経路に並んで飛行（イントレイル）した場合は、20NMから40NMまでの20NMあたりの空域に3機が飛行したことになる。一方で、待ち行列モデルによる分析結果に基づくと、これを4機に増加することで、遅延時間を短縮できることが示唆された。これは、5NMから6.7NMの間隔をつけてイントレイルすることを意味する。これは、航空路管制およびターミナル管制に適用されるレーダー最小間隔を満たしており、例えば6NMの間隔をつけての移管は実運用の観点からも現実的であるというコメントを、管制経験者の方々から得ることができた。

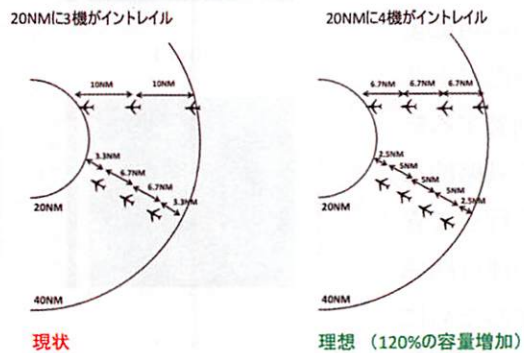


Fig. 3 実運用における解釈

また、空港から近い 50NM 以内の空域での到着遅延を、遠方の空域で戦略的に吸収することができれば、燃料消費量の削減などが期待できるため、近方の空域容量を増やす方法との遅延時間削減効果の比較を行った。図 4 に示すように、3つの戦略 (Strategy 1 は 150NM 以内の飛行時間の平均値を 100 秒短縮して 150NM に 100 秒追加, Strategy2 は 150 秒, Strategy3 は 180 秒) を用意して比較したところ、最も遅延時間を削減するのは近方での空域容量を増やす運用であることがわかった。

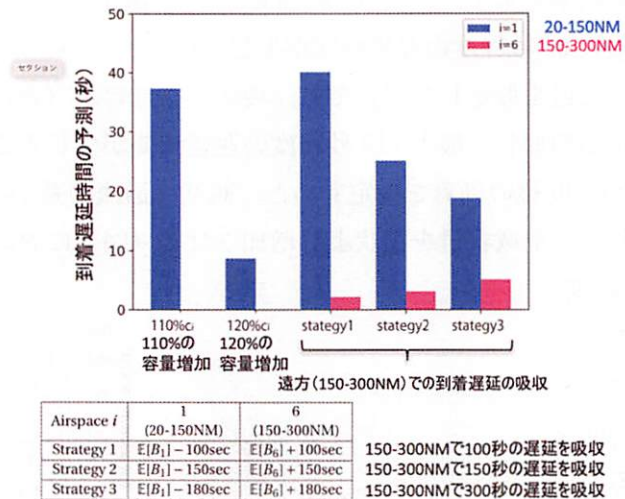


Fig. 4 到着空港の遠方における時間管理効果

この理由を分析すると、到着空港から遠方の空域において、航空機の到着時間間隔のばらつきが増加することが原因であることがわかった。図 5 に分析結果の一例を示す。図 5 において $i \in \{1, 2, \dots, 9\}$ はそれぞれ 10NM から 20NM, 20NM から 30NM, \dots 90NM から 100NM の半径を持つ同心円に囲まれた空域において、同じサービス時間 (飛行時間) を与えた場合の遅延時間 ($E[D_i]$) をヒートマップで示している。遠方の空域においては、到着率の増加を空域容量の増加によって削減することができず、到着間隔のばらつきを小さくすることが、到着遅延時間を吸収する運用を可能にする方法であることがわかった。

これらのデータ駆動型分析および待ち行列理論の応用により、羽田空港に南西方面から到着する航空交通流の戦略的な到着管理を行って管制官などの運行関係者を支援するために導入する拡張型到着管理システムの設計について、4つの飛行段階に応じた設計要件を示した。図 6 に示すように、1つ目の段階は空港から

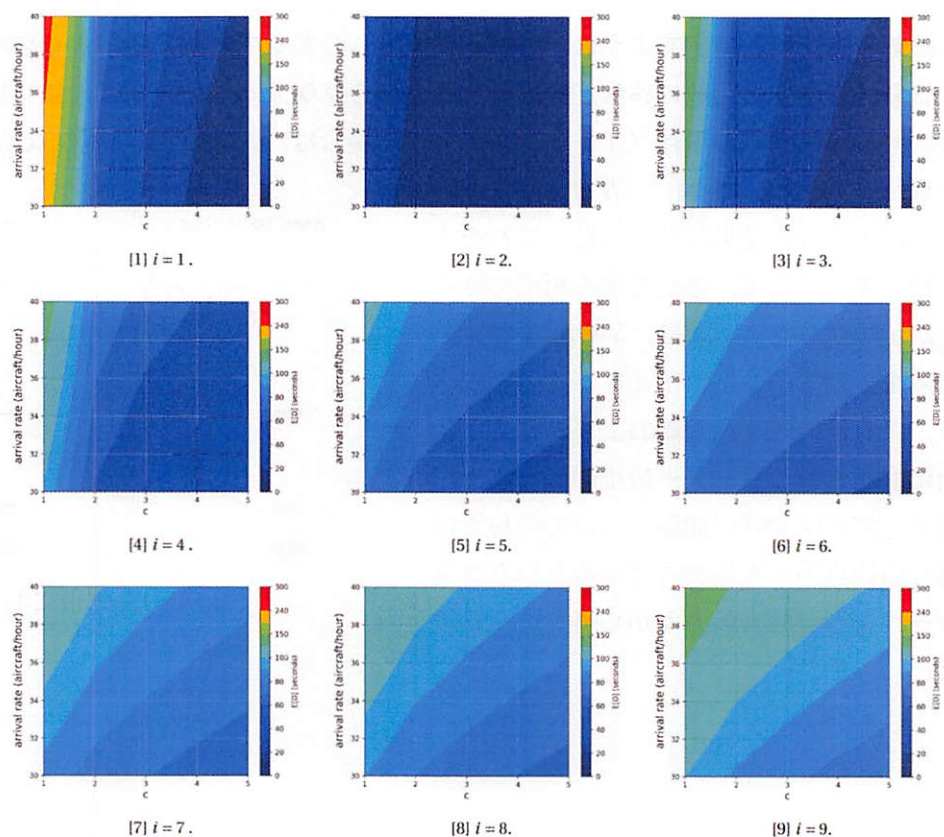


Fig. 5 空域における到着遅延時間と因子の分析

約 50NM 以内の空域であり、ターミナルレーダー管制という到着空港で行うレーダー管制の対象を含んでいる。この段階は、滑走路に到着する航空機間隔の調整業務が主に行われている。2つ目は、約 50NM から 150NM 以内の空域である。この区間は、到着機が巡航から降下を開始する地点を含んでおり、到着の順序づけが決定される必要がある。3つ目は、約 150NM 付近から 250NM 以内の空域であり、航空交通流を適切に管理し、かつエアラインが希望する飛行の実現が求められる。また、近隣の空港を出発した航空機が合流する区間でもある。4つ目は、それ以遠の空域であり、出発空港から離陸する航空機の出発時間を調整する必要がある。本研究で明確にしたのは以下である。まず、3つ目の段階 (Stage 3) では、先行機との相対的な時間間隔を制御することで到着時間のバラツキを減少させることが重要であることを示した。このためには、新たな管制支援ツールを導入することが求められる。1つ目の段階 (Stage1) では、例えば飛行経路や滑走路の利用方法の見直しなど種々の工夫を通じて、現状より約 20%、50NM 以内の空域容量を増加させることで、より遅延の短縮が実現できることを示した。これを実現するためには、新しい機体間の最小間隔基準の導入と正確な間隔づけのための管制支援ツールの導入などが求められる。さらに、到着航空交通と空港での出発を含めた運用を統合的に行うことが、航空交通流全体の効率的な運用に貢献することを示した。具体的には、航空機が到着する約 40 分から 1 時間前の段階である Stage3 において、単位時間あたりの滑走路への到着機数を予測し、滑走路割り振りとう到着順序を決定すること、Stage 1 においては、指定した到着順序に沿って正確な間隔づけを達成しながら航空機を着陸させることが、統合的な運用を実現する。次の段階として、機械学習による到着順序と到着・出発機の容量予測、および待ち行列モデルによる実際の空域に即した容量推定を実施し、より具体的な設計要件につなげる計画である。

これらの研究成果を、複数の学会発表、招待講演で発表した他、国際論文誌に(査読中1本を含む)4本の論文としてまとめるなど、広く社会に還元した。

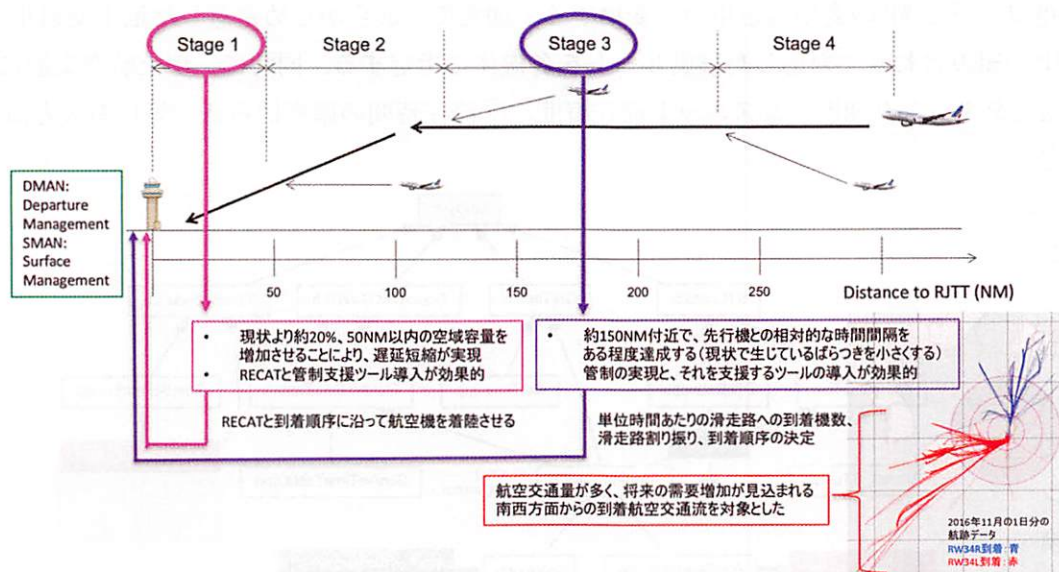


Fig. 6 航空機の拡張型到着管理システム設計の提案

①-2 種々の運航離散モデルの数理とデータ解析および空港内移動モデルの構築 (業務項目b))



Fig. 7 GAiA-EnSimから出力される時刻表（左側）および ICAO 空港コードの変換表（右側）

昨年度に開発したセル・オートマトンを用いた羽田空港内地上交通を対象とした ATM (Air Traffic Management) シミュレータ (シミュレーションプログラム) の高度化に取り組み、本プロジェクトにおいて理科大を中心に開発を進めているエンルートの ATM シミュレータ (以下、本報告書中では GAiA-EnSim (仮称)) との連携シミュレーションを実現した。

実用化に向けた取り組みとして、シミュレータの入出力部の大幅な機能拡充を行った。特に、GAiA-EnSim から (A) 時刻表、および (B) 空港と WP (ウェイポイント：航空経路上の地点情報) の参照テーブルを入力として受け取り、シミュレーション用の時刻表を出力する点が重要な変更点である。より具体的には、図 7A の時刻表 1 列目に列挙された各機体の到着時刻の時間差分を算出してシミュレーションの計算ステップ間隔へと変換する。さらに、図 7A における 3 列目、4 列目に示した①到着機体の出発元の空港、②出発後に目的地とする空港それぞれの ICAO 空港コードから、到着前と後に通過する各 WP を図 7B に示す空港コードと WP の変換表を用いて変換する。加えて、あらかじめ用意した地上交通ルートの一覧から、WP の組み合わせに対応した移動ルートを各機体に指定する。同時に、地上航空交通に関する設定値 (①地上タキシング速度、②スポット滞在時間、③滞在時間の確率揺らぎ、等) も入力値として各機体に指定

する。ATM シミュレーションの実行後は、GAiA-EnSim に対応したデータ形式にシミュレーション結果を再変換して出力する。

図 8 は本プロジェクトで開発した ATM

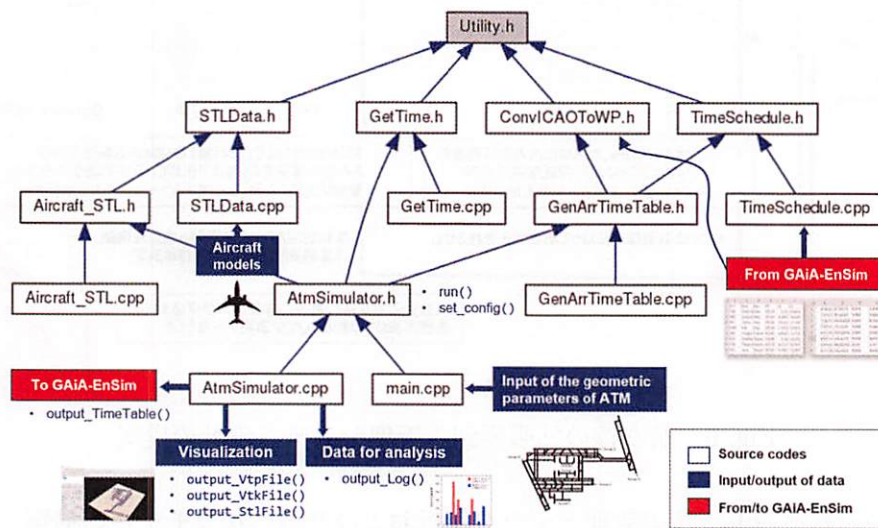


Fig. 8 ATM (地上航空交通) シミュレータのファイル構成図と GAiA-EnSim との関係

シミュレータを構成するソースコードの依存関係を図示するファイル構成図（ダイアグラム）である。中抜き（四角囲い）はソースファイルまたはヘッダ・ファイルを示し、青く塗りつぶされた四角囲い（塗りつぶし）は、それらに対する必要な入出力の操作を記述している。汎用性の高いモジュールほど階層が上位のファイルに記載される仕様になっており、STL等の標準ライブラリは、すべて最上位のUtility.hからのみ参照される仕様になっている。このようなファイル構成は、グローバル・ヘッダを有するために多人数での開発には向かないものの、設計の見通しに優れるなどの利点を有している。

シミュレーションにおけるワーク・フローは次の通りである。GAIA-EnSimから出力された前述の2種類のテーブル（時刻表、変換表）は、2段目右側のTimeSchedule.h/cppに記述されたC++のクラスTimeSchedule (...)に取り込まれる。クラスTimeSchedule (...)は、機体番号を与えると、その機体が到着する計算ステップと空港コードを返す仕様になっている。また、ICAO 空港コードとWPの変換はConvICAOToWP.h内のクラスConvICAOToWP (...)により行われる。そこで、シミュレーション用の時刻表の生成に必要な一連の操作は、GenArrTimeTable.cpp内のモジュールで生成される。すなわち、シミュレーションの実行時においては、GenArrTimeTable.h/cpp内の関数GenArrTimeTable (...)において、TimeSchedule (...)を呼び出して時刻表を読み込み、計算用の時刻表に変換する一方、ConvICAOToWP.hからクラスConvICAOToWP (...)を呼び出して空港コードをWPに変換し、WPのペアに応じた地上移動ルートを各機体に指定する。地上移動ルートの候補が複数ある場合には、その中からランダムに選出する。以上により、シミュレーションに必要な時刻表の生成が完了する。

生成された計算用の時刻表はシミュレーションの実行時に実施者が確認できるよう、一旦ファイルとして外部出力されるが、AtmSimulator.h/cppの初期設定モジュールset_config (...)で再度読み込まれ、機体ごとに分割して保持される。すなわち、(a)機体の到着ステップ、(b)移動ルート、(c)移動速度、(d)滞在スポットをメンバ変数に持つ機体の構造体にそれぞれ格納される。AtmSimulator.h/cppの実行モジュールrun ()において、各機体に記載された移動開始時刻（到着時刻）、移動ルートと移動速度をもとに機体の位置と速度を更新していく。機体同士が接近する際には、接近する2機体の前後関係を位置と法線ベクトルから図9に示す要領で判定し、優先順序を決定する。

分岐レーンなどで機体 i が複数の機体に接近した場合、次に示すアルゴリズムにより機体の停止を判断する。すなわち、停止命令は包括的論理和 (Inclusive-OR) の論理に従って発行され、機体 i に対して接近判定が真であった機体の数を N_i 、0 から N_i 番目の機体のうち m 番目の機体との位置関係において機体 i

に対して発行される判定（一旦停止命令であれば1、そうでなければ0）を I_i^m とすると、機体 i に対する停止命令は以

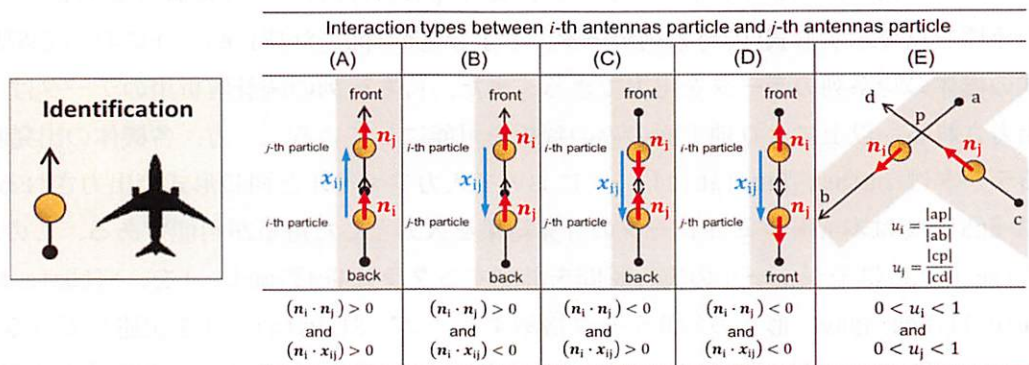


Fig. 9 機体の位置と法線ベクトルによる前後関係の推定

下のように判定できる：

$$I_i^S = \sum_{m \in N_i} I_i^m$$

$$D_i = \begin{cases} \text{true} & (I_i^S \neq 0) \\ \text{false} & (\text{otherwise}) \end{cases}$$

D_i が真である場合に機体 i に停止命令が出される。

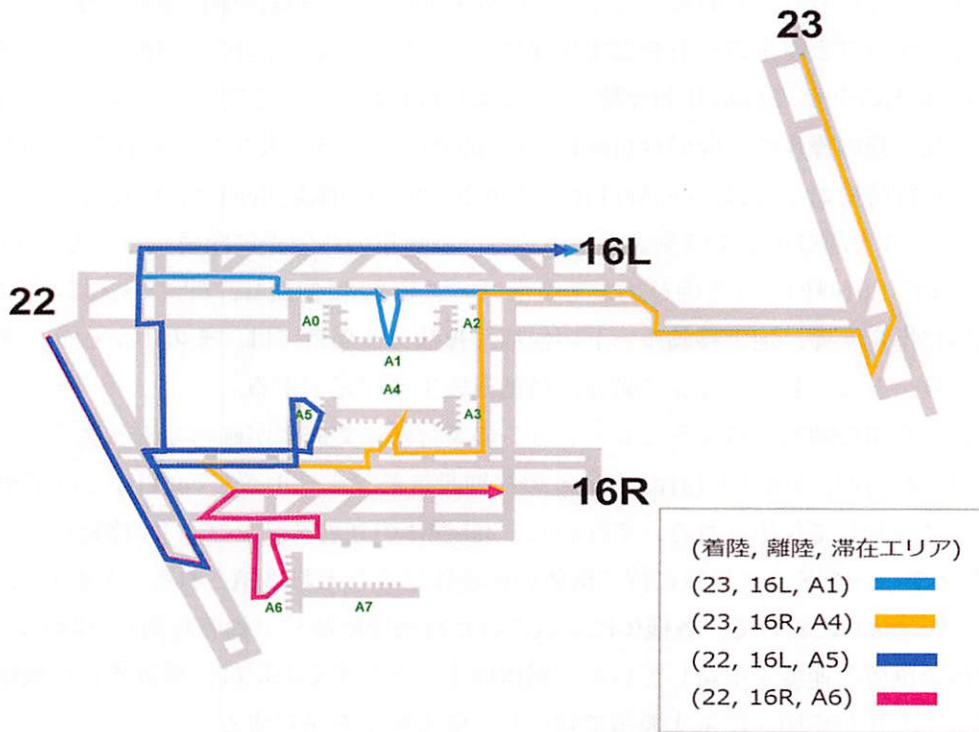


Fig. 10 4種類の地上移動ルート

AtmSimulator.h/cppでは可視化用に3種類のモジュールが用意されており、①output_VtkFile(...)においてVTK形式の地上ジオメトリのデータ、②output_VtpFile(...)においてVTKパーティクル形式(機体の座標を点で示す形式)の時系列データ、および③output_StlFile(...)においてSTLおよびPOV-Ray形式の機体の時系列のデータを出力できる。また、待ち行列の統計解析用のデータはoutput_Log(...)に出力される。以上により地上面のみの解析を可能にしている。一方、各機体の出発時刻と目的地に関するデータはoutput_TimeTable(...)において入力ファイルと同じ形式で出力される。これにより、GAiA-EnSimでは本ATMシミュレータの計算結果を入力とした解析が可能である。このほか、GetTime.h/cppはモジュールの実行時間を計測するクラスGetTime(...)を、STLData.h/cppはSTL(stereolithography)形式のCADデータ格納するクラスSTLData(...)を記述している。また、Aircraft_STL.h/cppはSTLData(...)に格納されたCADデータに対する行列操作および可視化フォーマットへの変換操作を行うためのモジュールを提供する。

以上のもと、各機体の地上での滞在時間を半正規分布で(平均, 標準偏差) = (67分, 6分)(正規分

布で(60分, 10分)とし, 左半分を棄却)で与え, 地上走行速度を27.6 knot (=14.7m/秒, 4.73m/セルおよび1セル/秒から算出)に設定する. また, 図10に示す4通りの移動ルートを機体のWPから判定して各機体に与える. このとき, 各ルートで通過するそれぞれのエリア内(A0, A1, …etc.)では, 地上での滞在先スポットをエリア内のスポットからランダムに選出し, 滞在先として各機体に割り当てる. GAIa-EnSimで出力された①オリジナル解, ②遅延最小解, ③燃料消費解それぞれの計算結果を入力として実施したATMシミュレーション結果を図11に示す.

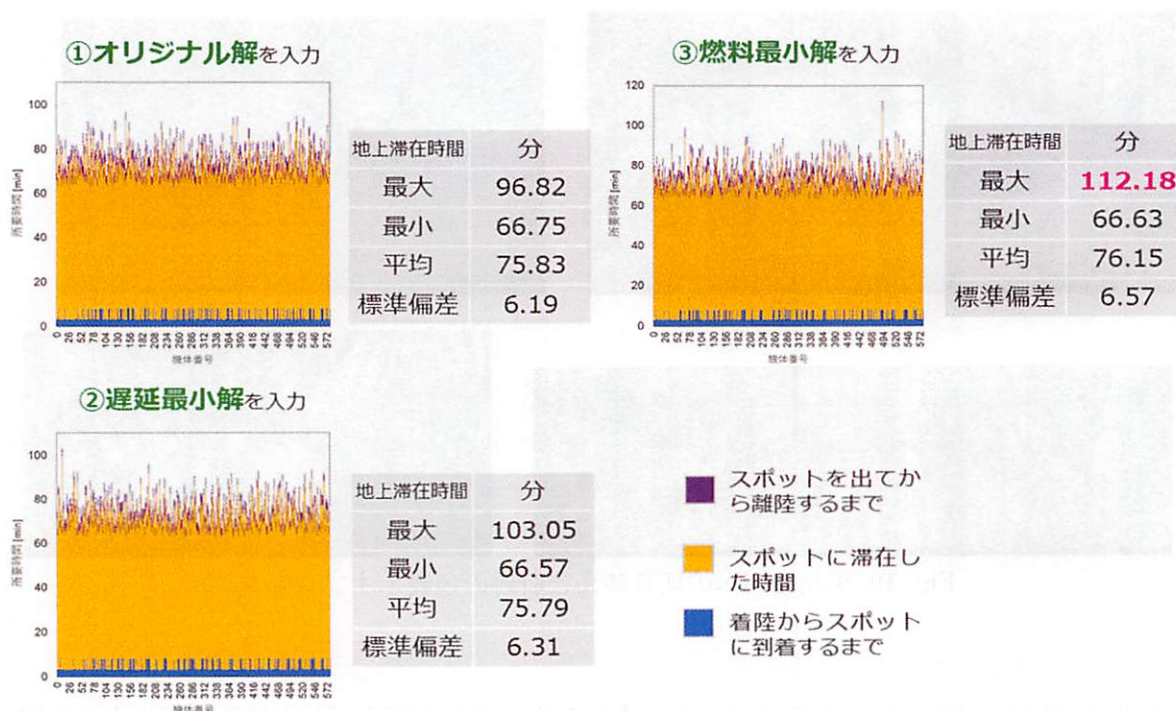


Fig. 11 ①オリジナル解, ②遅延最小解, ③燃料消費解

図11の各部分図における横軸は, 左側が早朝に到着する機体, 右側が深夜に到着する機体を示している. 縦軸は各時刻の機体それぞれが要した地上交通時間の内訳を示している. 3種類のいずれも移動時間の平均値, 最小時間に大きな違いは見られないものの, 最大時間では3種類で分かれる結果となった. 特に③燃料最小解を入力とした場合, ①のオリジナル解を用いた場合と比較して最大時間の比較で15分以上の差が生じている. それぞれの図を見比べると, ③燃料消費解の場合に, 地上のスポット滞在時間(黄色部分)が極端に長いケース(図5③右側)が確認できる. これは, 機体がスポットから出ようとするものの, 前方に別の機体がある, もしくは機体同士の見合わせのために一旦停止する必要が生じた結果, スポットアウトできず, 滞在時間が伸びてしまったケースに該当する. 一方で, スポット滞在時間以外の地上での所要時間(ルートの移動に要する時間)に大きな違いは確認されなかった. このことから, 空港全体の最適化のためにはまず各エリア内(誘導路から各スポットに向かう部分/各スポットから誘導路に向かう部分)での最適化が必要であると判断できる. なお, 本解析の出力結果はGAIa-EnSimに対応したフォーマットで出力され, GAIa-EnSimで取り込むことが可能になっている.

本研究により, ATMシミュレータの設計概要が詳らかになったと言え, 近い将来において萌芽段階から社会実装へと研究フェーズを進める上で必要な基盤を構築できた.

①-3 大規模並列計算モデルの高速化と一般向け/利用者向け表示技術の検討

(業務項目c)

本研究で開発している可視化システムの特徴は、大規模な航空交通流データを高いフレームレートを維持しながらリアルタイムレンダリングし、インタラクティブな操作によって必要なデータを絞り込み、視覚的な分析を行うことである。今年度は、航空交通流の軌跡をより直観的に把握できる機能と、シミュレーション結果と実データの比較およびシミュレーションの最適化前後の結果を並列して表示す

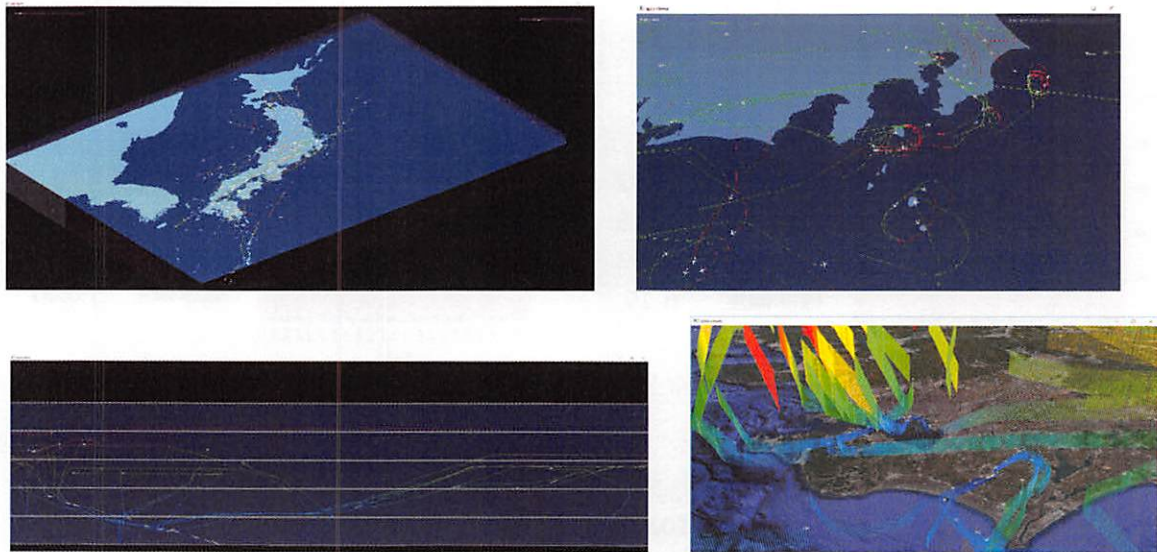


Fig. 12 平面地図への切り替えと航跡の色表示オプション

る機能を主として追加した。

航空交通流の軌跡を直観的に把握できるようにするため、3D地球儀モデルと平面地図の表示を切り替える機能を追加した。平面地図に対応することで、航空機の高度がフラットな地上面からの距離として表示されるため、航空機同士の高度比較が視覚的に容易となる。また、平面地図モデルで直立投影すれば、高度の目盛りが表示され、グラフアニメーションによる比較が可能になる。さらに航跡の色表示に視覚的情報を付加した。色表示のオプションには高度、速度、目的地への接近がある。航跡色を高度にした場合は、航跡を地上に投影したときの投射線を描画するオプションを付けて、視覚的に地上面からの高さを把握しやすいようにしている(図12)。

航空交通流のシミュレーション結果と実データ（CARATS オープンデータ）との比較およびシミュレーションの最適化前後の結果を並列して表示するため、2つのファイルを同時に開くことに対応した。2つのファイルを開いた場合は、ファイルごとにサブメニューが表示される。サブメニューには、タイムライン、航空機と航跡の表示・非表示およびカラー設定があり、各ファイルで色分けして表示することで、一つの画面で2つのデータの軌跡を比較することができる。メインメニューには、2つのファイル

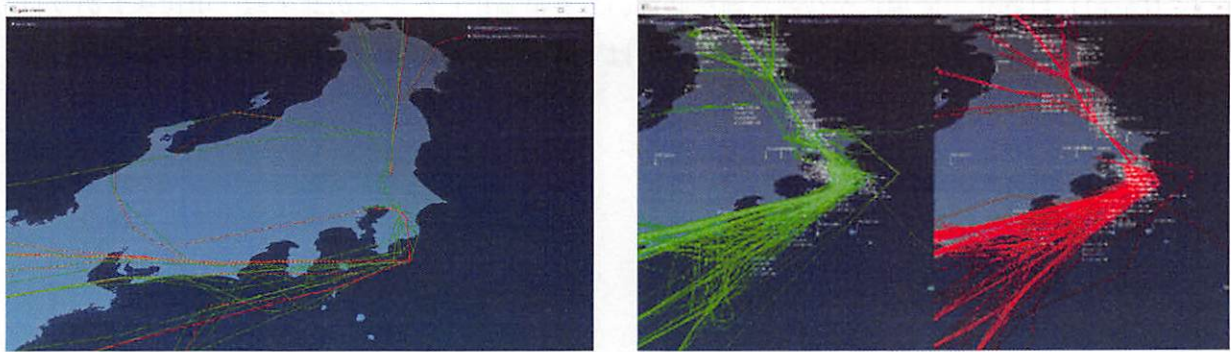


Fig. 13 2つの結果ファイルの比較（左：1画面，右：画面2分割）

共通のタイムラインが表示されており、こちらを操作すると2つのデータを同時にコントロールすることができる。さらに画面は左右に2分割することができ、それぞれの画面に2つのデータを表示して比較する機能を加えた（図13）。また、オプションによって左右のカメラの位置を別々に操作するか、同時に操作するかを選択可能とした。画面分割状態で一つのファイルを開いたときは左右に同じデータが表示されることになり、異なる視点から同じデータを見て分析するという使い方も可能となった。

大規模並列計算モデルの高速化に関しては、本年度特に新たな試みは行わなかった。各エージェントの現時点での計算負荷を考え、昨年同様エージェント個体ごとの並列化を基本方針としていたため、富岳や各HPCIシステムに特化した工夫は不要となっている。①-4にある多目的最適化を利用した研究についても、ケース毎の並列化で特段の問題はなく、すでに全体に高い並列化効率を得られている。

①-4 個別エージェントモデルの高度化と航空交通モデル統合最適化の実施

（業務項目d）およびa）、b）の一部）

東京理科大学を中心として研究を進めた。より幅広い最適化とデータ分析に基づいた遅延解消提案を研究の中核とし、加えて、ロバスト性向上に関するランウェイチェンジ時刻の影響評価などシミュレーションに利用しているモデルの高度化などを研究を進めた。

航空機は実際にもウェイポイントと呼ばれる通過点を基準にフライトしているが、本プロジェクトで開発しているソフトウェアでは、このウェイポイントを通過する飛行ルートを航空機が航行するものとしている。異なる空港を出発した航空機は、合流を繰り返すことで最終的に羽田空港に着陸する。一般に、飛行ルートは、最終合流地点により大きく2つに分類することができ、北方からきてSTONEと呼ばれる地点を通過する北方ルートと南西方向からきてDIIVAを通過する南方ルートである。本稿に示すシミュレーション結果は、晴れの日羽田空港に着陸する国内線579機の1日分を対象としており、北方、南方それぞれの航空機数は144機と435機である。昨年設計変数（プラスマイナス5分以内の各空港出発時間の変更）に、羽田空港着陸降下角度、言い方を変えると着陸開始位置を加えたシミュ

レーションを実施し、その影響を評価した。着陸開始位置には、CARATS オープンデータなどを参考に、羽田空港からの距離で 150 Km から 350 Km までという制限を設定した。目的関数は、平均遅延時間、遅延機数割合、平均消費燃料の 3 つそれぞれの最小化である。シミュレーションに利用するパラメータは昨年と同様である。

目的関数空間における非劣解の分布を図14 に示す。黒色矩形プロットは離陸時刻調整を行わず時刻表通り航空機が離陸し、下降区間距離を250km とした最適化前のオリジナル解である。灰色のバツ印プロット (Case1) は昨年、関根らが行った離陸時刻のみを最適化したときの非劣解、中抜き丸のプロット (Case2) は今回得られた非劣解である。Case2 は下降区間距離によって色分けされている。Case1

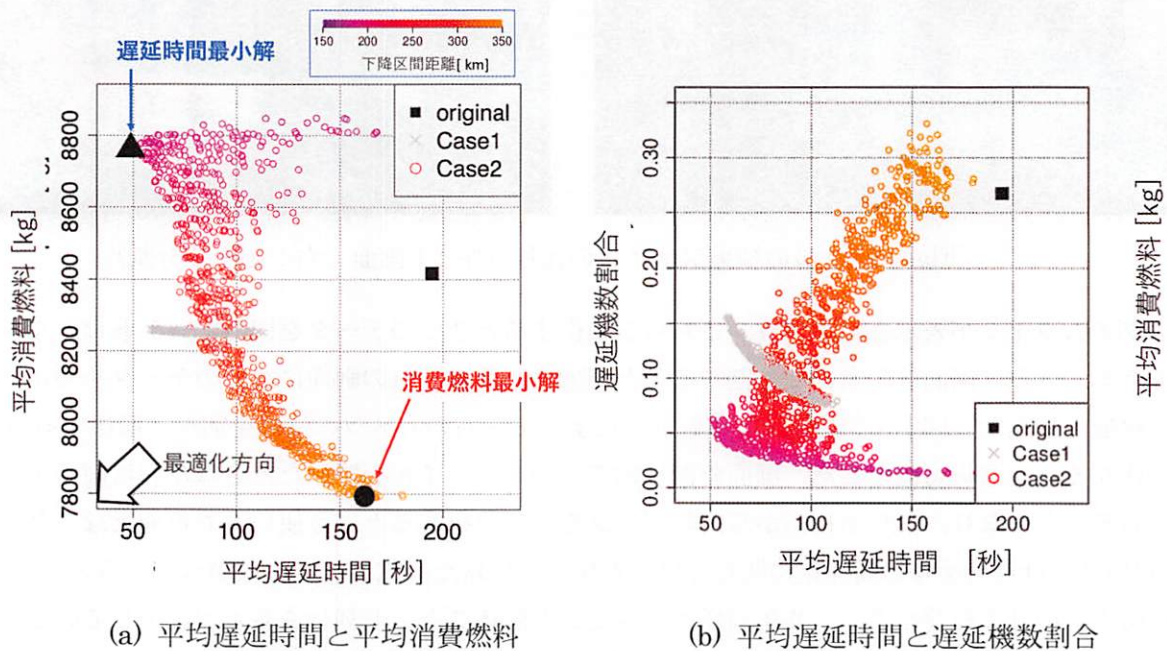
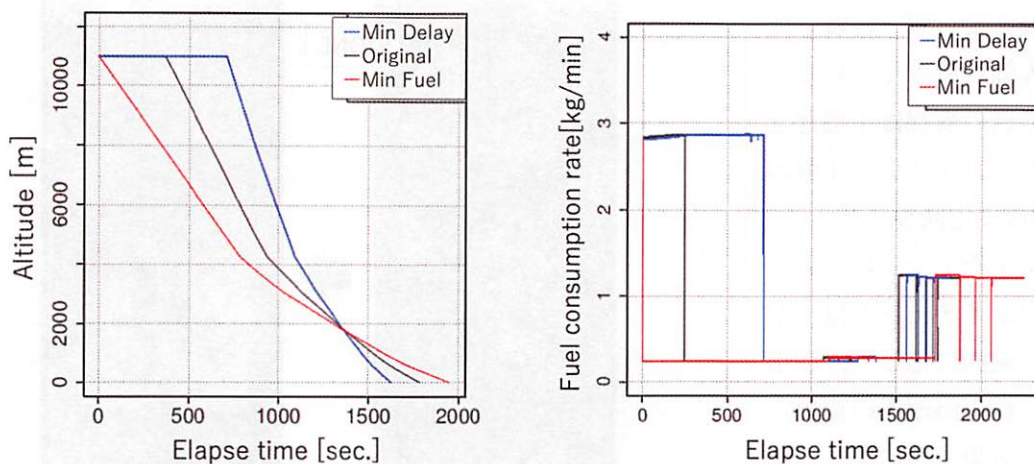


Fig. 14 目的関数空間の非劣解プロット

とCase2 を比較すると、目的関数の範囲が広がり多様な解を得られていることから、新たに設計変数に加えた下降区間距離が目的関数に大きな影響を与えていることがわかる。特に、平均消費燃料は大きく変化することがわかる。図14 (a) より平均遅延時間と平均消費燃料にはトレードオフ関係があることがわかる。また色分けをみると、下降区間距離が短いほど平均遅延時間は短くなるが、平均消費燃料は大きくなっている。図14 (b) より、平均遅延時間と遅延機数割合の間には正の相関が見られる。紫色のプロット付近でトレードオフ関係が見られるが、これは一部の航空機の遅延時間を長くすることで遅延機数を最小化していると考えられる。

次に、非劣解の中で平均遅延時間を最小とするものを遅延時間最小解、平均消費燃料を最小とするも

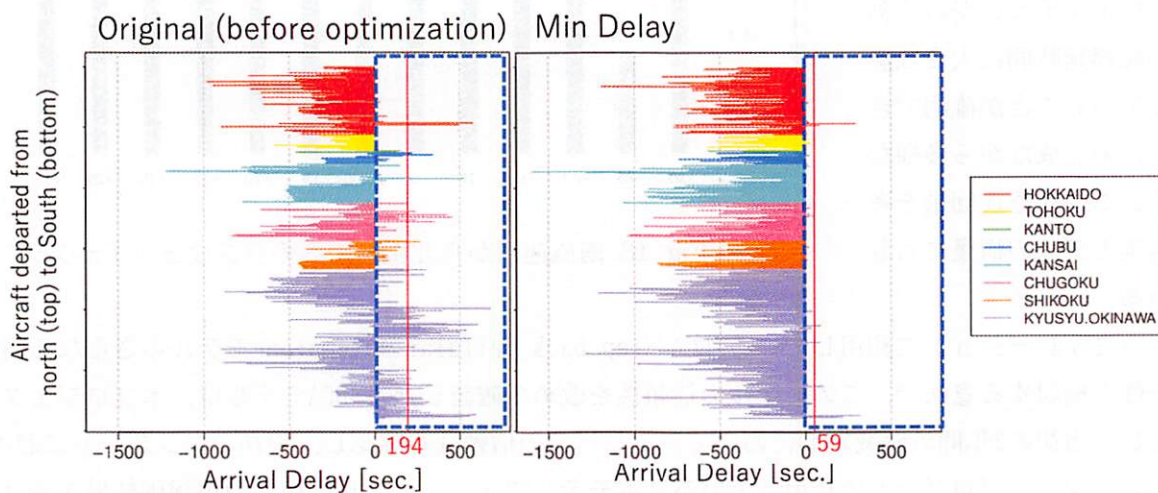


(a) フライト時間と降下の推移 (b) フライト時間と燃料消費の推移

Fig. 15 オリジナルと2種の最適解の特性

のを消費燃料最小解として詳細に解析していく。図15 (a) に飛行時間の比較を示す。横軸は羽田空港手前350km 通過時から着陸までにかかる時間である。所要時間は遅延時間最小解，オリジナル解，消費燃料最小解の順に長くなり，下降区間距離が短いほどフライト時間が短くなっていることがわかる。全体のフライト時間が短くなったことにより着陸予定時刻を超える航空機が減少し，遅延時間の減少につながったと考えられる。次に，図15 (b) に燃料消費率の推移を示す。燃料消費率は巡航時が約2.8kg/sec なのに対し，下降時は約0.3kg/sec と小さい。グラフ右側の燃料消費率の変動は滑走路への進入，着陸などの細かな調整によるものだと考えられる。以上のことから，下降区間は消費燃料率が小さいため，この区間を長くすることで消費燃料を削減できていることがわかる。

図16 にオリジナル解と遅延時間最小解の遅延時間の比較を示す。横軸は正であれば遅延時間を，負であれば早着時間を表す。縦軸は579 機の航空機を出発空港の地域ごとに色分けし北海道から沖縄まで



(a) オリジナル解 (b) 到着遅延最小解

Fig. 16 遅延時間の比較

を順に並べたものである。図より、出発空港の地域によらず、各航空機の遅延時間は大幅に減少していることがわかる。赤色の縦線は平均遅延時間を表しており、オリジナル解の194秒から51秒まで減少した。

次にランウェイチェンジについて述べる。ランウェイチェンジは、空港付近の風力、風向に応じて、利用滑走路の変更（滑走路運用の変更）を行うもので、気象条件によっては1日に数回発生する。年間平均をとると1日1回程度の発生確率となる。ランウェイチェンジは航路の大幅な変更を伴うため、遅延の拡大を伴うことが多い。ここでは、1回のランウェイチェンジのタイミングが到着遅延

にどの程度影響するかを、ランウェイチェンジのモデルを組み込んだ開発ソフトウェア（エンルートシミュレータ）を利用して評価した。図17はCARATSオープンデータ上で確認できる実際のランウェイチェンジの様子である。ランウェイチェンジの時刻を5分刻みで変化した場合の総遅延時間の推移を図18に示す。総遅延時間の差は最大で約1時間となっており、ランウェイチェンジの時刻の変化が総遅延時間に大きな影響を与えていることが確認できる。また、未完成ながら多様なベクタリングに伴う迂回量を考慮した遅延モデルの構築にも着手している。

また、シミュレーションに利用しているSBCA (Step-back Cellular Automaton) モデルのさらなる高度化の必要性を検討する意味で、このモデルの信頼性を改めて確認した。SBCAモデルは、本プロジェクトにて開発し、当初の2年間の研究期間において一定レベルの信頼性を確認し、現在のエンルートにおけるシミュレーションプログラムで利用している基本モデルである。モデル信頼性の再評価結果を受けて、現SBCAモデルにベクタリング（渋滞を避けるために遠回りをするような航路変更）における航路の多様性を加えることで、すでに予測できていた通過時間間隔に加えて、通過時間間隔ヒストグラムの広がりについても実際の航跡データとよい一致を得ることができるようになった。

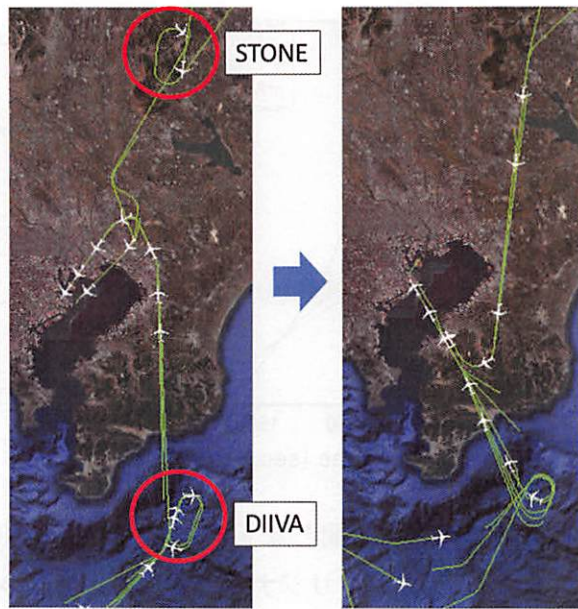


Fig. 17 南風運用から北風運用へのランウェイチェンジ (CARATS オープンデータから)

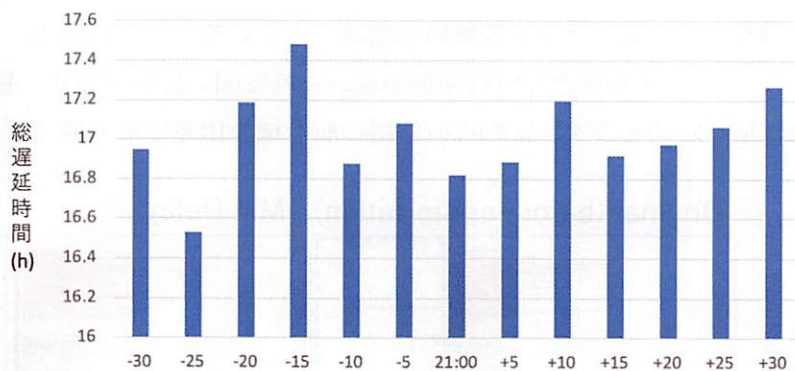


Fig. 18 南風運用から北風運用へのランウェイチェンジ

以上のように、本プロジェクトで開発する主たるソフトウェアとして、羽田空港を中心とした地上とエンルートを含んだ航空交通流の総合シミュレーションシステムの構築につながった。モデルの詳細化などさらなる改良は期待されるが、開発したソフトウェアは、フライトの遅延や航空機の消費燃料などさまざまな観点から航空交通流の改善手法を議論するのに足る基盤ソフトウェアとなっている。すなわち、本研究提案当時の目標であった「究極の時刻表、すなわち、将来の運航・運用方式の基盤となる安全かつ効率的な最適交通輸送システムの検討手法が一定の検証も含めて完成する。」を実現できたと考えている。

①-5 首都圏列車データを利用した基盤モデルの開発と初期的適用 (業務項目e)

首都圏列車オープンデータを利用した基盤モデルの初期開発については、具体的な路線を対象としたモデル開発と初期的シミュレーションの実施を目指した。東京地下鉄株式会社（東京メトロ）の協力を得て利用可能な情報の提供を受けていたが、昨年来の課題であるモデル作成のために必要な具体的な追加データ（首都圏鉄道各社の相互乗入を含む複数運航会社の列車運行の実態情報、各列車の乗客数や各駅での車両乗降者数に関する情報等）の提供を受けることができず、残念ながら明確な進展は得られなかった。そもそも、各鉄道運行会社はこれらの情報を保存しておらず、今後、この研究を進める上で、個別企業ではなく国もしくは首都圏レベルのデータ整備が強く求められるということがある意味での得られた結論である。

② プロジェクトの総合的推進

上記①に記載した個別の担当開発業務の推進に加えて、頻繁に参加者全員の会合を開き、課題参加者間の意思疎通を図るとともに、研究の進捗を全員で把握することによってプロジェクトを総合的に推進した。また、全体会合以外にも個別機関同士の会合も頻繁に行った。これまで得られた成果を国内外の会議で積極的に公開した。特に、海外への情報提供と今後の「富岳」利用に向けた国際共同研究の準備につながる活動を重点的に行った。令和元年5月には、フランスパリにあるEUROCONTROLの実験センターを訪問し、管制官・パイロットのhuman in the loopタイプのシミュレーションシステムの無償提供を受けることができた。ソフトウェアの再整備とデータの入れ替えが必要となるため当該研究の期間を超えるが、このシステムを日本国内用のデータに適用することで、開発ソフトウェアの一部を切り出して特定の空港における管制作業の補助とする可能性を検討するために非常に有意義なものとなる。これは、今後のリアルタイム型のスーパーコンピュータ利用への一歩と位置づけられる。また、令和2年2月には、シンガポールの南洋理工大学(Nanyang Technological University)で開催された航空交通流におけるデータサイエンス利用に関する国際会議に招待され、本研究課題の成果を発表した。世界各国から同分野を代表する研究者が一同に介した会議であり、本ソフトウェアの普及に大きな効果があったと考えている。

4-3. 活動（研究会等）

10名以内の小さなチームなので、できる限り参加者全員が集まる会合を開催している。具体的には、月1回弱を基本として運営に関する議題と研究開発内容に関する議論をほぼ全員で行ってきた。これに

加えて、TV会議などを積極的に利用することで個別機関同士の議論なども進めてきた。下記に、運営委員会兼研究内容討論会の開催状況を示す。

2019年04月11日	第27回研究会兼運営委員会	(理科大学神楽坂)
2019年05月31日	第28回研究会兼運営委員会	(理科大学神楽坂)
2019年07月11日	第29回研究会兼運営委員会	(大阪大学)
2019年07月12日	理化学研究所計算科学研究センター三好建正研究員らとの研究議論 (欠席2名, 理化学研究所 計算科学研究センター)	
2019年08月28日	第30回研究会兼運営委員会, 国土交通省との研究議論 (欠席2名, 国土交通省)	
2019年09月24日	第31回研究会兼運営委員会	(理科大学神楽坂)
2019年10月10日	第32回研究会兼運営委員会	(理科大学神楽坂)
2019年11月25日	第33回研究会兼運営委員会	(理科大学神楽坂)
2019年12月16日	第34回研究会兼運営委員会	(理科大学神楽坂)
2020年02月13日	第35回研究会兼運営委員会	(TV会議)
2020年03月30日	第36回研究会兼運営委員会	(TV会議)

* 年度を通じて、Web会議による参加を含む

4-4. 実施体制

業務項目	担当機関	担当責任者
① 堅牢な輸送システムモデルの構築と社会システムにおける最適化の実現		
a) 航空交通モデルの検証と高度化, および成果の社会活用に向けた方向性の検討	国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 電子航法研究所	電子航法研究所 航空交通管理領域 主幹研究員 伊藤恵理
b) 種々の運航離散モデルの数理とデータ解析および空港内移動モデルの構築	国立大学法人 東京大学 先端科学技術研究センター	先端科学技術研究センター 教授 西成活裕
c) 大規模並列計算モデルの高速化と一般向け/利用者向け表示技術の検討	国立大学法人 大阪大学 サイバーメディアセンター	サイバーメディアセンター 講師 安福健祐
d) 個別エージェントモデルの高度化と航空交通モデル統合最適化の実施	学校法人 東京理科大学 工学部 情報工学科	工学部 情報工学科 教授 藤井孝蔵

e) 首都圏列車データを利用した基盤モデルの開発と初期的適用	学校法人 東京理科大学 工学部 情報工学科	工学部 情報工学科 教授 藤井孝藏
② プロジェクトの総合的推進	学校法人 東京理科大学 工学部 情報工学科	工学部 情報工学科 教授 藤井孝藏

様式第21

学会等発表実績

委託業務題目: 「複数の社会経済現象の相互作用のモデル構築とその応用研究」(堅牢な輸送システムモデルの構築と社会システムにおける最適化の実現)

機関名: 学校法人 東京理科大学

1. 学会等における口頭・ポスター発表

発表した成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表した場所（学会等名）	発表した時期	国内・外の別
航空機の拡張型到着管理システムとAMAN/DMAN/SMANに関する検討状況	伊藤恵理	東京（国土交通省航空局）	2020年2月10日	国内
Cellular Automation Air TrafficFlow Simulators toward Efficient and Robust Managements	K. Fujii	Nanyang View, Singapore (AIDA-AT 2020)	2020年2月4日	国際
Experiments on Exit-Choice Behavior in Walking and Running Scenarios in Straight and L-shaped Corridors	D. Yanagisawa, M. Haghani, and M. Sarvi	Washington, D.C., U.S.A. (2020 TRB Annual Meeting)	2020年1月15日	国際
Experiments on the influence of wall-shaped obstacle on pedestrian egress efficiency	X. Jia, D. Yanagisawa, C. Feliciani, and K. Nishinari	Washington, D.C., U.S.A. (2020 TRB Annual Meeting)	2020年1月15日	国際
Development of an Effective Computing Framework for Stochastic Multi-body Systems on Parallel Computing Platforms	S. Tsuzuki, D. Yanagisawa, and K. Nishinari	Phuket, Thailand (APCEAS 2019)	2019年12月27日	国際
Multi-objective Air Traffic Optimization Considering Descent Start Position by Using Cellular Automaton	C. Matsumoto, K. Sekine, T. Tatsukawa and K. Fujii	Taipei, Taiwan (APCOM2019)	2019年12月20日	国際
離陸時刻と下降開始位置を考慮した航空交通流の多目的最適化	松本千尋, 関根将弘, 立川智章, 藤井孝藏	東京（国土交通省CARATSオープンデータフォーラム）	2019年11月27日	国内
Macroscopic Analysis to Identify Stage Boundaries in Multi-Stage Arrival Management	E. Itoh, Y. Miyazawa, M. Finke, and J. Rataj	Tokyo, JAPAN (EIWAC 2019)	2019年10月30日	国際
Evaluating Speed Logics for Flight-deck Interval Management	T. Riedel, E. Itoh, M. Takahashi, T. Feuerle, and	Tokyo, JAPAN (EIWAC 2019)	2019年10月30日	国際
羽田空港の遅延削減を目指した拡張型到着管理システムの研究開発	伊藤恵理	東京（航空管制セミナー）	2019年10月24日	国内

An Interactive Visual Analytics Tool for Air Traffic Flow	K. Yasufuku	Vancouver, Canada (IEEE VIS 2019)	2019年10月23日	国際
データ駆動型の待ち行列モデルを適用した東京国際空港における到着遅延予測	伊藤恵理, ミハエラ ミティシ	下関 (第57回飛行機シンポジウム)	2019年10月17日	国内
東京国際空港における到着便の高密度な交通流制御に関する一考察	宮沢与和, 伊藤恵理	下関 (第57回飛行機シンポジウム)	2019年10月17日	国内
多目的最適化を用いた効率的な航空交通流のための下降区間距離の影響評価	松本千尋, 関根将弘, 立川智章, 藤井孝藏	埼玉 (第32回計算力学講演会 (CMD2019))	2019年9月18日	国内
Designing Ground-based Interval Management (GIM) for aircraft arrival traffic at Tokyo International Airport	E. Itoh and T. Otsuyama	International Civil Aviation Organization (ICAO) Information Paper, SP-AIRB8-	2019年9月1日	国際
Development of Interactive Visualization System for Trajectory Analysis of Air Traffic (Poster)	K. Yasufuku	Kunming, China (AFGS 2019)	2019年8月10日	国際
Experimental study on crowds with different velocity composition	A. Fujita, C. Feliciani, D. Yanagisawa, and K.	Pamplona, Spain (Traffic and Granular Flow 2019)	2019年7月5日	国際
Exit-choice behaviour in evacuation through an L-shaped corridor	D. Yanagisawa, M. Haghani, and M. Sarvi	Pamplona, Spain (Traffic and Granular Flow 2019)	2019年7月4日	国際
Preliminary Study of Multi-Objective Air Traffic Optimization by Using Step Back Cellular Automaton	K. Sekine, T. Tatsukawa, S. Nagaoka, and K. Fujii	Dallas, U.S.A. (AIAA Aviation 2019)	2019年6月19日	国際
航空交通流のシミュレーション：私たちは何故これをはじめたか？	藤井孝藏	長野 (第29回CFD&HPC研究会)	2019年5月12日	国内
航空交通流分析のためのインタラクティブ可視化	安福健祐	東京 (SS研汎用VRシステムの活用研究WG)	2019年4月23日	国内

2. 学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載した論文 (発表題目)	発表者氏名	発表した場所 (学会誌・雑誌等名)	発表した時期	国内・外の別
---------------	-------	-------------------	--------	--------

Evaluating the Impact of New Aircraft Separation Minima on Available Airspace Capacity and Arrival	E. Itoh and M. Mitici	The Aeronautical Journal, 124(1274), pp. 447 - 471 (2020)	2020年3月	国際
Reducing Speed Commands in Interval Management with Speed Planning	T.Riedel, M. Takahashi and E. Itoh	The Aeronautical Journal, Vo124, Issue 1272, pp. 189-215 (2020)	2020年2月	国際
Car-following characteristics of various vehicle types in respective driving phases	A. Nagahama, D. Yanagisawa and K. Nishinari	Transportmetrica B: Transport Dynamics, 8(1), pp. 22-48 (2019)	2020年1月	国際
ポスト「京」に向けた航空交通流の大規模計算と可視化プログラムの開発	安福健祐	大阪大学サイバーメディアHPCジャーナル, No.9, pp.7-10 (2019)	2019年12月	国内
Evaluating Speed Logics for Flight-deck Interval Management	T. Riedel, E. Itoh, M. Takahashi, T. Feuerle, and	Air Traffic Management and Systems IV, Springer nature (Accepted)	2019年11月	国際
Macroscopic Analysis to Identify Stage Boundaries in Multi-Stage Arrival Management	E. Itoh, Y. Miyazawa, M. Finke, and J. Rataj	Air Traffic Management and Systems IV, Springer nature(Accepted)	2019年11月	国際
Evaluating Applied Flight-deck Interval Management using Monte Carlo Simulations on the K-	T. Riedel, M. Takahashi, T. Tatsukawa and Eri Itoh	Transactions of JSASS, Vol. 62, No. 6, pp. 299-309 (2019)	2019年11月	国内
Dependence of the transportation time on the sequence in which particles with different hopping probabilities enter a lattice	H. Yamamoto, D. Yanagisawa and Katsuhiko Nishinari	PHYSICAL REVIEW E, Vol.100 (2019)	2019年10月	国際
ステップバック・セルオートマトンを用いた航空交通シミュレーション	長岡慎介, 立川智章, 藤井孝藏	HPCI利用研究成果集、Vol.4, No.2 (2019)	2019年10月	国内
Queue-Based Modeling of the Aircraft Arrival Process at a Single Airport	E. Itoh and M. Mitici	Aerospace, 6(10), 103, (2019)	2019年9月	国際
Auto-generation of a centerline graph from a geometrically complex roadmap of real-world traffic systems using a hierarchical quadtree for cellular	S. Tsuzuki, D. Yanagisawa and K. Nishinari	INFORMATION SCIENCES, Vol.504, pp.161-177 (2019)	2019年7月	国際
Traffic flow in a crowd of pedestrians walking at different speeds	A. Fujita, C. Feliciani, D. Yanagisawa and K. Nishinari	PHYSICAL REVIEW E, Vol.99 (2019)	2019年6月	国際
Design of Ad Hoc Mesh Network for Aircrafts	I. Kanaya and E. Itoh	Wireless Mesh Networks – Security, Architectures and Protocols (2019)	2019年5月	国際
Body-rotation behavior of pedestrians for collision avoidance in passing and cross flow	H. Yamamoto, D. Yanagisawa, C. Feliciani and K. Nishinari	Transp. Res. Part B, 122, pp. 486-510 (2019)	2019年4月	国際

(注1) 発表者氏名は、連名による発表の場合には、筆頭者を先頭にして全員を記載すること。

(注2) 本様式はexcel形式にて作成し、甲が求める場合は別途電子データを納入すること。

「複数の社会経済現象の相互作用のモデル構築とその応用研究
(堅牢な輸送システムモデルの構築と社会システムにおける最適化の実現)」

実施計画

平成 31 年 3 月 29 日

東京理科大学

藤井 孝藏

【改訂履歴】

版	項目	主な改訂内容（概要）
1.0 (2016. 11. 30)		額の確認後、制定
2.0 (2017. 12. 22)	目次 1. (2) 1. (3) 1. (4) 3	中間評価における指摘事項、課題の進捗状況等を踏まえ、修正。(赤字) ・目次項目追加。 ・実施概要(2)(3)(4)更新。中間評価における指摘事項への対応状況を追記。指摘事項に対応した内容を記述。 ・項目3「中間評価における指摘事項への対応状況」を新設。
3.0 (2018. 3. 26)	改訂履歴 1. (2) 1. (7) 1. (8)	予算と計算資源量の配分決定を受け修正。 ・改訂履歴追加。 ・実施概要(2)(7)(8)追記、更新。
4.0 (2019. 3. 29)		予算と計算資源量の配分決定を受け修正。 ・改訂履歴追加。 ・実施概要(8)更新。

目次

1. 実施概要.....	1
(1) 目的・意義.....	1
(2) 研究開発内容.....	3
(3) 目標・期待される成果.....	7
(4) 周辺領域への波及効果、課題全体における計算科学やシミュレーションの位置づけ.....	7
(5) 「京」でできていること、ポスト「京」でなければできないこと.....	8
(6) 年次計画.....	10
(7) 実施体制.....	11
(8) 必要計算資源.....	12
2. 採択時の留意事項への対応状況.....	13
3. 中間評価における指摘事項への対応状況.....	15

1. 実施概要

(1) 目的・意義

(概要)

航空機、列車、船舶といった計画に基づいて運行（運航を含む）される大規模輸送システムは近年急速に複雑化している。そのため、混雑、システムや乗客トラブル、気象の影響などに対して脆弱となり、最近はこちらら社会生活に不可欠な輸送システムに日常的な遅延が生じている。安全性と効率性という相反要素を有する計画運行システムには、人や車の移動問題よりも複雑な拘束や不確定影響要素が存在する。結果、安全性が優先され、非効率なシステムに留まっている。また、監視技術等により個別課題の改善が図られてはいるが、これを複数運行システムに跨がる相互作用を有する全体問題と捉える努力はほとんど見られない。

本研究では、個別の遅延やトラブルへの効果的な対応の策定を越えて、一定規模の地域や国内全体（さらに将来には国際社会）の大規模輸送手段を1つのシステムと捉え、相互作用を考慮した上で全体最適を実現、加えてトラブル時への対処が容易な堅牢性を有する運行方式によって安全性と効率性という相反する要求を両立する手法の確立とそれを目指している。社会の構成要素が互いに影響し合う効果を分析・予測する技術、さらにそれに基づいて安全性と効率性を両立する全体最適な運行システムを策定するシミュレーション手法の構築とその手法を実現するソフトウェアの開発は、社会経済の基盤として急速に複雑化する大量輸送システムの将来に十分な意義を有する。また、このような複雑な社会的課題に対して先端スーパーコンピュータを利用した取り組みはこれまでに例がなく、社会問題を対象とした新たな利用分野を創出するというスーパーコンピュータ利用技術の拡大という観点でも高い意義がある。

(詳細)

航空機、鉄道、バス、船舶など予め計画されたスケジュールにもとづいて運行/運航される大規模輸送システムは日常生活の基盤インフラであり、運行が複雑化するに伴い、事故や遅延が日常的に発生しているという現状がある。首都圏のJR、私鉄、地下鉄で遅延のない日は全くなく、路線乗り入れの複雑化に伴って、遅延の頻度や遅れ時間も年々増えている。通勤に利用される鉄道1つを対象に、遅延5分程度と想定して計算すると、遅延によって失われる勤務分給与は一千万円以上に相当する。首都圏の鉄道数を考えると、毎日の損失は首都圏だけで億レベルの損失といえる。航空機についても、ホールディング(特定経路での待機飛行)やベクタリング(回避経路飛行)などによって到着時間の調整を行うことが時間の損失だけでなく無駄な燃料消費にもつながっている。米国連邦航空局によれば、米国内空港の混雑およびフライトの遅延による国全体の損失は2012年に220億ドル近くに達し、2020年には340億ドルまで上昇すると試算されている。フライト数でスケールすると、国内航空輸送に関する経済損失は年間数千億円を超えると想定される。自動車の渋滞による経済的損失の試算である年間12兆円を元に、損失の効果が同様と仮定し、現状の航空機一機辺りの平均遅延時間(ダイヤから見える分だけで約6分)、年間利用者数9500万人といった数字を利用して試算した結果からも年間数千億円という同様の数字を得ることができる。これは乗客側のみの数字であり、運用(運航)側の損失は入っていない。後述の国土交通省CARATSプロジェクトにおけるデータに基づいた試算では、運航側の損失は遅延時間に対応す

る燃料消費分だけで500億円にのぼる。それ以外の影響も考慮すると、数兆円の経済的損失があり、今後はさらに増えると予想される。

経済的効果に加えて、安全や信頼性の面での向上が大切である。航空機を例にとると、パイロットや管制官の負担軽減が大きな課題として認識されている。航空機の運航に関しては、米国航空宇宙学会が2016年1月のSciTech会議において航空管制のセッションを新たに設け、2016年度には新たなジャーナル「Journal of Air Transportation」を立ち上げるなど、米国でも当該研究の重要性が急速に高まっている。

このような課題を克服するため、国土交通省は将来の航空交通システムの構築の重要性から将来の航空交通システムに関する推進協議会を設立し、関連研究者の議論によって「将来の航空交通システムに関する長期ビジョン（CARATS）」を平成24年度にまとめた。また、社会的要請や関連研究を推進する目的で、平成27年にはCARATSオープンデータとして国内の航空機運航に関する研究者らへの情報提供を開始した。鉄道についても東京メトロオープンデータとして、スマホアプリ「ココメトロ」などによってリアルタイムの列車位置が確認できる状況がすでに生まれている。

このような課題に対するアプローチとして有効なのがマルチエージェントモデルを利用したシミュレーションである。雑踏での人の移動、災害時の避難、車の渋滞など個々のエージェントが自由に動く問題についてはすでに多くの研究がある（西成（東大先端研）、伊藤（東大、理研AICS）、堀（東大地震研）、安福（阪大）など）。国内では、スーパーコンピュータ利用もはじまっている（伊藤（東大、理研AICS）など）。一方で、意外なことに航空機や鉄道など計画運航される大規模輸送システムに関する同種の研究は少なく、運輸政策研究機構、土木学会などに個別の事象を対象としたシミュレーションなどの論文が散見される程度である。さらに、交通網全体の姿を対象とした研究となると全くないと言っても過言ではない。このようなことから、本研究の中心メンバーであり、渋滞学とエージェントモデルでよく知られる西成（東京大学）のもとには各種交通を担う企業などから多数の研究相談がきている（これらの企業に研究協力機関を依頼）。研究未成熟のままで残っている背景には、個別エージェントの行動原理（ルール）が複雑かつ多数の不確定要因を有することがあると考えられる。

計画に基づいて運行（運航）される大規模輸送システムを対象とした研究ではこれまでスーパーコンピュータ利用を導入するという発想がなかった。最先端のスーパーコンピュータを利用することによって、複雑なルールや不確定性を考慮したマルチエージェントシミュレーションモデルの確立を目指す本研究の推進は日本が航空管制の分野で世界を先導するチャンスである。

本研究は、個別の遅延やトラブルへの効果的な対応の策定を越え、一定規模の地域や国内全体（さらに将来には国際社会）の大規模輸送手段を1つのシステムと捉え、相互作用を考慮した上で全体最適を実現、加えてトラブル時への対処が容易な堅牢性を有する運行方式によって安全性と効率性という相反する要求を両立する手法の確立とそれを具現化するソフトウェアの開発を目指すものである。開発されるソフトウェアは、国や運航会社をはじめとする種々のステークホルダーによって短期的、長期的な運航管理を検討・決定する目的で利用されることが期待される。

例えば、航空機運航の最適化の実現に必要な設計パラメータは、出発、到着をはじめとした航空機のあらゆる飛行関連データからなり、さらに気象や不可抗力的な効果など不確定な要素も含まれる可能性が高い。また、ポスト京時代、もしくはそれ以降には単一の交通機関ではなく、交通機関同士や人の流れなどさらに高いレベルのシステム間連携にまで研究が発展する可能性を有する。大きな目標への第一

歩である本萌芽的課題研究においては、社会の構成要素が互いに影響し合う効果を分析・予測する技術確立し、その技術に基づいて安全性と効率性を両立し、かつ高い Resilience 力をもってトラブルを早期に復旧するなどの高い堅牢（ロバスト）性を有する全体最適な運行システムを策定する。このようなシミュレーション手法の構築は、今回の研究開発の主眼として社会経済の基盤として急速に複雑化する大量輸送システムの将来に十分な意義を有する。また、このような複雑な社会的課題に対して先端スーパーコンピュータを利用した取り組みはこれまでに例がない。航空機の燃費や離着陸に向けた飛行の安全性など個別エージェントのモデル化に高い複雑性を求めることで結果の信頼性向上を図ろうとすると、京やポスト京に代表される先端スーパーコンピュータの利用が不可欠となってくる。ポスト京利用時期における本研究は、これらの不確定要因を高度なシミュレーションやオープンデータを利用したデータ同化などの技術と京以上の性能を有するスーパーコンピュータを利用することで評価し、それに基づいたモデルを個々のエージェントに適用する。計画に基づいて運行（運航）される大規模輸送システムを対象とした本研究は、このような社会問題を対象とした新たな利用分野を創出するというスーパーコンピュータ利用技術の拡大という観点でも高い意義がある。

（2）研究開発内容

（概要）

航空機、列車、船舶といった計画運行（運航）される大規模輸送システムを対象にさまざまな不確定要素を加味した最適な運行策定手法を構築する。気象、環境、燃料消費計算等のシミュレーションをベースに航空機等個別エージェントの動きを把握し、それを地域や国といった大域的なマクロシミュレーションに結びつける階層的シミュレーション手法を構築する。多目的最適化とデータ探査（マイニング）技術等を活用した全体運行の最適化を行い、「究極の時刻表」を生み出すことを目指す。加えて、オープンデータを利用し、実社会での複合輸送システムを対象とした実問題シミュレーションを通じて、将来の運航・運用方式の基盤となる堅牢性も含めた最適な交通輸送システムの提案につなげる。

計画運行される交通システムに対する「究極の時刻表」は種々の条件によって変化する。また、安全性と効率性という相反する要求があり、何をもって最善とするのかの指標の考え方もさまざまである。そこで、本研究で最終的に開発を目指すソフトウェアは、このような交通システム（主に航空機運行システムを対象）に対する「究極の時刻表」自体ではなく、さまざまな視点からそれを議論するための優れたツールとなる。すなわち、空港のキャパシティ、乗客数の推移など状況を踏まえた上で、航空機運航全体スケジュールや航空機発着機数、各航空機の発着時間、飛翔経路、飛翔速度、機材要件や後方乱気流に依存する飛行間隔などを設計パラメータとして「究極の時刻表」を議論・設計するための多目的最適化および多目的データ探査を実施する高信頼性ツールを作成することが本研究の目指すところである。各エージェント同士の干渉、膨大なパラメータと多数目的からなる階層的最適化、今後期待される個別エージェントの高度化により HPCI レベルの資源が必要となる。4年間の研究期間では、このような目標に向って、エージェントモデルの構築、モデルに基づいた並列プログラムの作成、シミュレーションの実施、設計パラメータの設定と最適化プロセスの構築、最適化の実施による検証といった個別要素開発業務を順次効果的に進める。

(詳細)

初年度前半の調査研究から航空機運航の現状は複雑性を有しており、そのモデル化にかなりの時間を要することがわかってきた。本萌芽的課題研究に求められるのはポスト京時代の成果創出に向けた知見の獲得と計算手法の確立（募集要項による）であること、4年弱という限られた研究期間であること、モデル化の困難さを考慮した結果、計画運行を行う大規模輸送システムの中でも航空機運航に研究対象の主体として研究とシミュレーションを進める。他の輸送システムとしては、首都圏の鉄道を対象とし、期間後半に集中的に取り組む。例えば、空港内やさらにそこからの人の動きなども含めた複数交通システムに跨がる拡張など高いレベルの社会における相互作用についてはポスト京利用の段階で実施することとし、本研究期間内ではモデル化の検討に留めることとする。

調査研究・準備研究フェーズの2年間は以下のように研究開発を進める。

最初に、アプリケーション開発・研究開発についての開発計画（研究開発内容、目標・期待される成果、実施体制、必要計算資源、工程表、所要経費等）の詳細の策定を分担機関の国立大学法人東京大学、国立大学法人大阪大学、国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所と共同で開始する。続いて、策定した開発計画の実現可能性を調査するとともに、本格実施フェーズに向けた準備（実施体制構築の着手、研究等）を始める。全く異なる分野の研究者が集まるため、当初は意識と知識の共有化、京の利用に向けた準備などを重視し、月1回程度の全体会合と機関間の個別会合により効率的に研究業務を進める（全機関）。研究の基盤となる CARATS オープンデータなどを利用した航空交通の現状分析、航空機間監視情報運航利用システム (ASAS) による運航制御手法の理解などを進める。その上で、特定個別空港を対象とした（離）着陸のエージェントモデル策定と個別レベルの試行的シミュレーションを実施、さらに大規模並列シミュレーションに向けたプログラミング方針と評価など今後必要となる大規模シミュレーションのプログラム開発の準備を進める。列車の運行に関しては机上検討に留める。

具体的には、羽田空港への到着交通流を対象としてプロトタイプとなるソフトウェアの作成と検討を行う。羽田進入空域に進入する航空機を対象に、エージェントモデルの構築、モデルに基づいた並列プログラムの作成、シミュレーションの実施を進める。まずモデルが現状を記述できるかを確認、その上で航空機発着機数、各航空機の発着時間、飛翔経路、飛翔速度、飛行間隔などを設計パラメータとし、さらに空域に進入する機体数を変化させるなどして各パラメータの影響評価を行った後、最適化のための設計パラメータの設定と最適化プロセスの構築・実施へと進む。この段階では、対象空域への航空機の出入りは境界条件となり、エージェント間の干渉もその空域内を対象となる。当面の目的関数としては、予定到着時刻からの遅れ時間と総フライト距離などを想定するが、研究期間後半では簡単なモデルの範囲で個別機体や高度、飛翔状況にあわせた燃料消費等も含む形への高度化を検討、可能な範囲で開発アプリケーションソフトウェアに組み込んでいく。研究参加者の伊藤が実運用を目指している ASAS（航空機間監視情報を運航に利用するシステム）とその応用方式の考え方も一部この段階で設定パラメータの1つとして組み込まれる。この段階の開発ソフトウェアはプロトタイプであり、研究の進捗や議論の結果を踏まえて適宜アップデートして完成版のソフトウェアを目指す。ソフトウェアは、マルチエージェントモデルに基づいた大域的なセルオートマトンベ

ースのマクロシミュレーション手法を利用するもので、大量の設定パラメータを有する多数の個別エージェントが、相互作用を持ちながら蜘蛛の巣状に配置された 1 次元セル上を移動するモデルとなる。研究の進捗が順調な場合は、これに高度方向の要素を加えた 2 次元ブロック状モデルへと高度化を進める。なお、空港内の航空機のタキシングが遅延に大きく影響する可能性があるため、航空路を対象としたエージェントモデル開発に加えて、中規模の空港内の航空機移動を対象に試行的なシミュレーションモデルとシミュレーションプログラムを開発、その効果を検討していく。ただし、調査研究・準備研究フェーズにおいては適切なインターフェイスを設定することで航空路を対象としたモデルとは独立に考えて研究を進める。また、参加機関の電子航法研究所が所有する数学モデルによる航空交通管制シミュレータ SPICA の改良と利用が本研究の目的にとって有意義と考えられることから、そのスーパーコンピュータ利用による高速化を検討する。なお、気象や燃費などの組み込みもできる範囲で早期に進めていく。

コンパクトなチーム構成なのでこの期間は一体となって研究開発を進めるが、その中でも各機関の特徴を活かして、後述の年次計画にも記載のようにそれぞれが以下の項目を主として担当する。

- (a) 東京理科大：航空機交通流モデルの構築、ソフトウェア並列化、最適化
- (b) 東京大学先端科学技術センター：運航離散モデルの数理とデータ解析
- (c) 電子航法研究所：将来航空管制システムの設計と航空交通モデルの構築
- (d) 大阪大学：大規模並列エージェントモデルの開発と表示技術

各項目は相互に強い連携を必要とするため、各項目の開発はアジャイル的であり、研究進行とともに個別開発要素の姿も次第に明確になっていく。

本格実施フェーズの 2 年間は以下のように研究開発を進める。

まず、羽田進入空域と同様に国内数十の進入管制空域に関して羽田進入空域と同様のシミュレーションモデルを準備する。空港内のタキシングが航空交通に影響を与えうることを考慮して、主たる空港については必要に応じて空港内の航空機移動もシミュレーション対象とするが、100 程度ある個別の空港については、空港管理の段階に入ったところまでがシミュレーション対象とする。羽田進入空域モデルが適用可能と想像されること、また羽田空港が圧倒的な離着陸数を有することから一連の研究作業は大きな負担とはならないと想定される。これによって階層的シミュレーションの一次階層（個別進入空域レベル）モデルが構築できる。国内の航空管制空域は、航空交通管制センターを中心に、札幌、東京、福岡、那覇から構成されている。羽田空港を対象に調査研究・準備研究フェーズで進めたように、各管制空域内に進入する航空機を対象としたモデルとシミュレーションプログラムが完成する。最終的に、国内の管制空域全体を 1 つのシミュレーション対象として統合する。空港内のタキシングとゲートへの割り当てが航空交通に大きな影響を与えることが確認された場合は、これらのシミュレーションプログラムと接続し、航空路交通と空港内交通を連携したシミュレーションを可能とする開発アプリケーションプログラムとする。これらの要素を加えシミュレーションと最適化の実施へと移行する。現時点では、（1）全体を 1 つの系として最適化プロセスに進むか、（2）各空港を対象とした着陸機体の交通流最適解を利用して境界接続を緩和的に進めるかは、効率やプログラムの観点で決定していく。以上のように、本格実施フェーズの最終段階では、4 つの各管制空域を統合して日本全体を 1 つのシステムとして考える段階にまで進む（第三階層）。最適化の実施にあわせて、設計探査技術を適用し、各設定パラメー

タの重要性を評価、最終的に設定パラメータとして残すべき重要パラメータ要素を抽出する。

安全かつ効率的なスケジュールを議論する上で重要なのは、スケジュール通りの運航だけでなく、トラブルが生じたときの素早い回復 (Resilience) の実現であり、弾力性もしくは堅牢性に飛んだスケジュールであることが重要である。この点に関しては、2つの方法で最適化のプロセスに組み込むことを想定している。1つは一定レベルの時間内での回復などの要求要件を単純に制約条件として課す方法である。もう1つは、最適化プロセス内で、各パラメータを単独の値だけでなく一定幅内で変化させた一連のシミュレーションを利用することによって堅牢性を定量的評価に組み込む方法である。この場合、個別シミュレーションはノミナルケースを中心として多数ある設計パラメータを一定の幅で変化させた一連の計算から構成されることになり、通常最適化の数十倍のケーススタディを必要とすることになる。可能であれば、さらにその先として、回復力を最適化の目的関数に組み込むことにより、信頼性のシグマレベルを利用した多目的ロバスト最適化手法（藤井らが特許を所有）の導入も検討したい。ロバスト性をどこまで追求するかは他の目的関数とのトレードオフとして利用者が判断することになる。今後の議論によるが、ポスト京の利用がはじまる時期までにはこの多目的ロバスト最適化の利用まで進むことを考えている。

これらの研究と並行して、個別航空機等各エージェントに対する気象、環境、燃料消費計算等の個別エージェントモデルの高度化を進める（主として理科大）。これらも個別エージェントモデルに対するシミュレーションの計算負荷を大きくするものである。

以上、各機関が担当するのは、前述の調査研究・準備研究フェーズのものに加え、主として以下のよ
うな項目である。

- (a) 東京理科大：最適化/設計探査の実施、航空機交通流モデルの高度化
- (b) 東京大学先端科学技術センター：階層的運航離散モデルの数理とそのデータ解析
- (c) 電子航法研究所：航空交通モデルの高度化と研究成果の社会活用に向けた課題の抽出
- (d) 大阪大学：利用における表示技術、並列計算効率の向上

他の輸送システムとしては、主に首都圏の鉄道を対象とし、期間後半に集中的に取り組む。最終年度に、特定の運行会社を対象として、上記で開発したモデルと最適化プロセスを有効利用したエージェントモデルシミュレーションを実施する。現状の遅延や回復状況を再現することで検証し、そこからより優れた運行計画を立案できるシミュレーションソフトウェアを構築する。それを踏まえて、複数の運行会社の連携へと研究を進める。例えば、空港内やさらにそこからの人の動きなども含めた複数交通システムに跨る拡張など高いレベルの社会における相互作用についてはポスト京利用の段階で実施することとし、ここではモデルの構築と方針の確立段階に留める。

なお、最終年度となる平成 31 年度において京の利用が難しくなる可能性が高い。そのため、平成 30 年度中に他の HPCI 計算資源および別途調達予定の高性能サーバ利用に向けた開発プログラムの高速化の検討を実施する。

(3) 目標・期待される成果

調査研究・準備研究フェーズ終了時の平成 29 年度末には、研究開発のアウトプットとして、国内各空港を出発して羽田進入空域に進入する機体を対象として、京クラスの計算機上で稼働する大規模シミュレータのプロトタイプソフトウェアが完成している。具体的には、マルチエージェントモデルを利用した航空機運航の解析モデルと各種設定パラメータの影響を評価できる多目的最適化・設計探索分析ツールが構築できている。評価指標としては、現状のフライト状況の再現、CARATS の中で提案されている種々の航空交通効率化手法の評価、より適切なプランの提供、オフノミナル状況などからのレジリエンス能力の評価などが想定される。この段階では、個別エージェントの計算規模は大きくなく、ソフトウェアの並列化規模は数百ノード程度を利用したシミュレーション実施を計画している。

本格実施フェーズ終了時の平成 31 年度末には、研究開発のアウトプットとして、16 の国内進入空域を対象とし、これらすべてが連携し国内航空交通すべてを記述できる上記モデルの構築が終了している。調査研究・準備研究フェーズでの結果にもとづいて、航空路での航空交通に影響を与えるものについては空港内のタキシングのモデルがあわせて完成し、上記空路内の航空交通モデルとの連携したシミュレーションが実施できる状況にある。この段階では、個別エージェントの計算規模は中レベルとなり、ソフトウェアの並列化規模は数千ノード程度を利用したシミュレーション実施を計画している。

平成 31 年度の本萌芽的課題研究終了時の成果の活用、客観的な成果の測定や評価については以下のようになっている。国では国土交通省を中心に将来の航空交通管制に関する検討が進められ、「将来の航空交通システムに関する長期ビジョン (CARATS)」としてまとめられている。出来上がるソフトウェアの利用者として想定されるのは、ステークホルダーである国土交通省 (航空局) とエアライン各社である。成果の意義として、CARATS 施策の効果がどのように発揮されるのかを本シミュレーションソフトウェアが明確に示すことができれば十分な成果が挙げられたと考えられる。その意味で、本格実施フェーズ終了時に本研究の成果を示し、航空機交通管制の各種ステークホルダーとの議論の機会を設けることを考えたい。研究期間終了の 1 年前を目処に、「同程度の安全性を維持した上で、現状の遅れ時間の総和を〇%程度低減化できる運航計画が立案可能であることを示すこと」といった定量評価の導入可能性を検討してみたい。

ポスト「京」運用開始 5 年後、10 年後の成果としては、本シミュレーションソフトウェアで利用するモデルに関して更なる高度化が進み、ポスト京でなければできない気象予測 (重点課題 4 におけるデータ同化技術の成果) も組み込んだ航空機の空気力・運動シミュレーションなどを含んだシミュレーションと多目的最適化ツールの構築が実現している。また、航空機の離着陸のシミュレーションから航空機空港到着時の後方乱気流などの影響が評価され (重点課題 8 の成果)、その効果も含めた機体間距離の最適化などもあわせて議論できる状況が実現していることが想定される。高度化の状況は今後の進展に依存するが、この時期に航空機交通管制のすべてのステークホルダーがそれぞれの目的で開発ソフトウェアを利用する状況が生まれ始めていることが「社会実装」としてのアウトカムと考えている。また、成果の一部が日常の運航計画に使われる状況まで進めばさらに成果の利活用が進んだと判断できる。

(4) 周辺領域への波及効果、課題全体における計算科学やシミュレーションの位置づけ

「流れ」は社会生活のあちこちに存在する。計画に基づいて運行される大量輸送システムという「交通流」を対象とした研究によって得られる考え方と最適化手法は、コンビニ商品の配送、宅配等、計画性を持って配送される「物流」など幅広い社会における「流れ」に応用が可能である。また、更に将来の航空機パイロット無人化にもつながる技術となる。流体力学研究の連続体モデルとの相関からこれまでにないアイデアにつながる可能性もある。

理化学研究所計算科学研究機構の伊藤伸泰氏らのグループにおいても社会現象を対象としたエージェントモデルのシミュレーションが実施される。伊藤氏とは、今後定期的な意見交換の実施、一定進捗段階でのシンポジウムの共催などで協力していくことを相談している。また、重点課題4や重点課題8等にも関連研究がある。これらとの定期的な連携で裾野拡大につなげたい。

これまで航空機の運航管理や首都圏鉄道の制御などにおいて個々の課題を扱う研究はあっても、全体を最適化するような試みはほとんどなされていない。航空交通を対象としたエージェントモデルシミュレーションの試みもほとんどなされていない。さらに、一気に膨大なケース数を実施することで優れた運航管理を実現しようとする試みは全くなされていない。本研究は、京およびポスト京という先端スーパーコンピュータをこのような課題に世界ではじめて取り組むものであり、社会的課題に対する今後の先端スーパーコンピュータ利用を拓く意味で課題全体における計算科学やシミュレーションの位置づけがある。また、当課題の研究は過去に例のない取り組みであることから、その成果を遅滞することなく国内外の会議等で発表するとともに、学術誌への投稿を積極的に進めていく。同時に国の施策への反映が期待されることから、参加機関の電子航法研究所を通じて国土交通省と情報共有を図る。

(5) 「京」でできていること、ポスト「京」でなければならないこと

新たに萌芽的研究課題として申請した社会システム系のマルチエージェントモデルシミュレーションであり、京、その他のスパコンでの実績はない。計画に基づいて運航される輸送システム、特に最初の対象である航空機の運航に対してはエージェントモデル自体がまだ存在していない。そのため、当初の1年間は主にモデルの議論と開発と大規模シミュレーションへの対応として現有プログラムの言語書き換え、並列化作業などを実施することになる。

京でできることは一定レベルの個別エージェントモデルまでであり、気象、環境、燃料消費計算等のシミュレーションをベースにした高度モデルを利用した実際のシミュレーションにはポスト京レベルの計算機資源が不可欠となる。逆に言えば、ポスト京の利用段階になれば、高いレベルの個別エージェントモデルを利用したより複雑なシミュレーションが実施可能となると期待している。すなわち、ポスト京が利用できる段階では、重点課題4で実施される気象予測と重点課題8で実施の機体姿勢・運動を考慮した空気力算定を利用した燃費計算などを組み込んだ個別エージェントの高度化が実施可能と考えている。輸送機規模の機体を対象とした実スケールの本格的空気力計算はポスト京をもってしても容易ではない。全体モデルのシミュレーション負荷次第で、個別エージェントの高度化は種々のレベルで考えることを想定せざるを得ないが、いずれの場合も個別エージェントのシミュレーション負荷が大きくなることから、ケーススタディが膨大になることも含めポスト京の利用が不可欠となる。

個別空港だけに限定した航空機の離発着や個別鉄道のタイムテーブル検討については、単独のシステムを対象として個々のシミュレーションをする限り、京レベルの計算機資源でグリッドサーチ的に種々の

ケースを実施できると考えている。ただ、各種交通機関や人の流れ、物流なども含めた社会における「流れ」のシミュレーションへと移行する段階では再度の検討が必要となる。

(6) 年次計画

課題全体	中間目標 (平成29年度)	羽田進入空域を対象とした航空機離着陸エージェントモデルの構築
	最終目標 (平成31年度)	ロバスト最適化手法の確立と階層的航空機離着陸エージェントモデルの構築

サブ課題名 (分担機関・責任者)	調査研究・準備研究フェーズ		本格実施フェーズ	
	平成28年度	平成29年度	平成30年度	平成31年度
航空機交通流モデルの構築・高度化 (東大:西成, 柳澤) (理科大:藤井)	(目標) 航空機交通流モデルの構築とプロトタイプ作成	(目標) 航空機交通流モデルの構築とプロトタイプ作成	(目標) 最適化/設計探査の実施, 航空機交通流モデルの高度化	(目標) 最適化/設計探査の実施, 航空機交通流モデルの高度化、首都圏交通個別モデルの構築
運航離散モデルの数理とデータ解析 (東大:西成, 柳澤)	(実施内容) 航空交通の現状分析を行い、羽田進入空域を計算対象として現状が表現できることを確認する	(実施内容) 羽田進入空域を計算対象として、航空機発着機数、各航空機の発着時間、飛翔経路、飛翔速度、飛行間隔などの設計パラメータを変化させた多数のシナリオを計算、各パラメータの影響評価を行う	(実施内容) 国内空域を計算対象として現状が表現できることを確認する。 最適化のための設計パラメータの設定を決定し、最適化を実施する	(実施内容) 国内空域を計算対象として、各パラメータのロバスト性を考慮した最適化を実施する。他課題の成果も考慮しつつ、個別エージェントの高度化を検討する。首都圏の交通データからモデルの構築と初期的シミュレーションを実施する。
将来航空管制システムの設計と航空交通モデルの構築 (ENRI:伊藤)				
大規模並列エージェントモデルの開発と利用における表示技術 (阪大:安福)				

(7) 実施体制

当該研究グループは、(1)「流れ」を扱う流体力学および最適化という研究領域において手法の開発から応用研究まで京の利用も含めて先端スパコン利用を幅広く経験してきた研究者、(2)スパコン利用には全く無縁ではあるが「渋滞学」、「交通流」等本課題の対象となる数理モデルやマルチエージェントシミュレーション分野で国内外を先導してきた研究者、(3)航空機の運航管理を専門とし、本研究に貢献できるのみならず成果を国の施策等に反映できる立場にある研究者、の3者に(1)と(2)の共通経験を有する研究者を加えたコンパクトなチームが1つのテーマを対象に集中的に研究を進めるものである(図を参照)。これに2名のポスドク(平成28年度12月より雇用の理科大研究員、平成29年度4月から雇用の東大先端研研究員)の採用によって、モデルの高度化などの成果を具体的なプログラミングに反映する。当該研究に参加することにより、2名のポスドクは、(1)高度なマルチエージェントモデルの社会問題への適用、(2)多目的最適化、(3)先端的並列プログラミングなどを習得できる。これらの知識や経験は幅広い応用に適用可能なものであり、本研究テーマに留まらないHPC利用分野で将来活躍できる人材として成長してもらいたいと考えている。「研究者情報」の受賞歴などにある通り、提案チームはそれぞれの分野で世界を先導する研究者集団である。藤井らは、ポスト京をはじめ多くのスーパーコンピュータベンダーや大学情報基盤センターなどと継続的にハードウェア・ソフトウェアに関する議論を行っており、このつながりによって計算機科学面でのサポート、プログラミングに関するアドバイスは常に得られる状況になる。西成は、成果の活用を期待する多数の企業と共同研究を実施していて、実利用はデータ提供、さらには定期的な議論などの協力を得られる環境を有している。

全体を統括する藤井(2014年まで)は流体力学分野でのHPCの利用を先導してきた。西成は渋滞学で日本をリードする研究者である。藤井と西成は東京大学の航空宇宙工学専攻の教授としてともに流体力学分野の研究と人材育成に携わってきた。同専攻の卒業生でもある柳澤、立川(研究協力者)、伊藤(航空交通制御の分野で日本を代表する研究者)、加えてエージェントモデルの専門家である安福らを交えてこれ

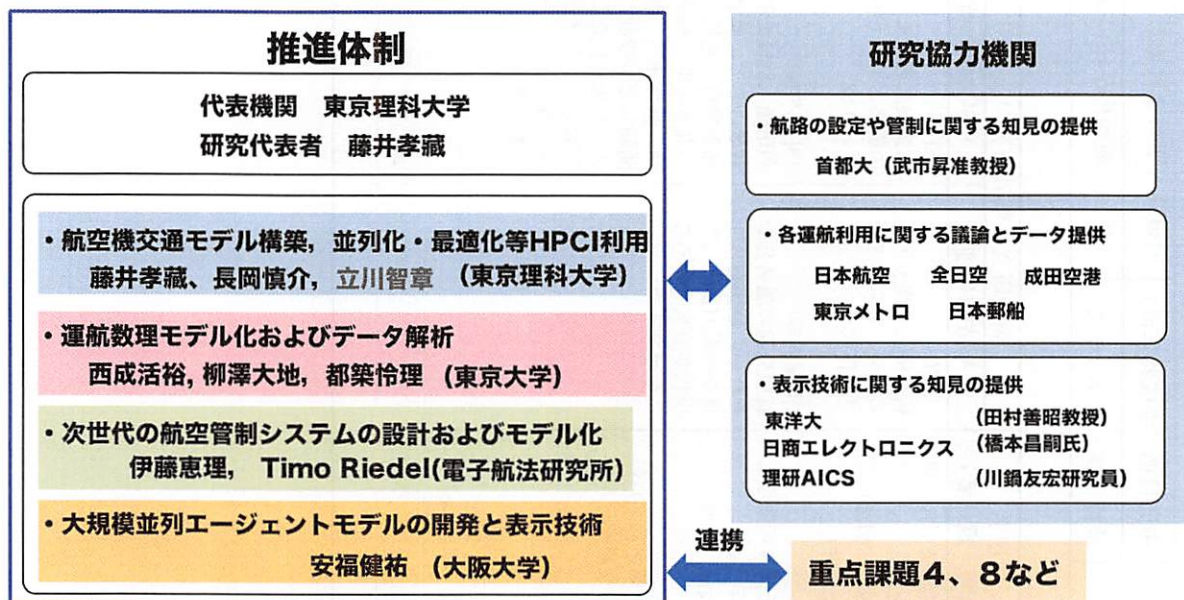


図1 研究開発実施体制 (H30.3改訂)

までも本課題について頻繁に議論を進めてきた。3つの異なる文化の相互作用として、モデル化、計算アプローチなども含めて高い実現性と成果を期待していただける。

なお、ポスト京以降のスーパーコンピュータの将来利用も見据えて、チーム構成は、全体を統括し(1)と(2)の項目をそれぞれ主担当する2名の経験豊富な研究者(藤井、西成)と30代で当該各分野をリードする気鋭の若手研究者(研究者情報を参照)から構成することとした。重点課題との重複から研究協力の位置づけとなったが、最適化やGP (Genetic Programming) 利用の若手代表研究者である理科大の立川との議論は成果達成に重要な効果を持つ。また、首都大学東京の武市昇准教授は本研究とも深く関係するCARATSデータの利用展開を進める研究者の一人であり、客観的な視点での意見をいただくと考えている。初年度の検討から、航空路、航空機の運航情報の可視化表示が研究の途上においても、また最終的な成果の利用段階においても重要となることから、HPCと大規模データの可視化の専門家である理化学研究所計算科学研究機構の川鍋友宏氏と計算機事情とデータベース等の可視化に高い専門性を有する橋本昌嗣氏(デジタルハリウッド大学客員教授、(株)鉄人化計画)に研究協力者として加わってもらい、ときどきに意見交換を行う予定である。また、ポスト京利用段階では、燃費等の評価を高度化するために時々刻々変化する航空機の空気力評価が必要となるため課題8における成果を利用すると同時に気象予測が必要となる。データ同化を利用した気象予測の専門家であるJAMSTECの三好建正氏にはその準備段階から協力いただけることを確認している。研究協力機関については、これまでの経緯から必要となった段階でほぼすべての機関の協力が得られることが確認されている。また、プログラム具体化の段階では、計算機ベンダーをはじめ、さらに多くの企業の協力が得られるものと考えている。

(8) 必要計算資源

調査研究・準備研究フェーズの2年間では、羽田進入空域を対象とする。羽田、成田空港の交通量は1500機/日。単純モデルで一機のエージェント処理時間1ステップ(0.1[s])に12 μ 秒程度。相互作用はエージェント数の2乗に比例、1日分の計算を1ケースと考え、離陸/着陸遅延、欠航などのシナリオ毎の計算を800ケース行うと仮定すると、羽田空港のシミュレーションに京で88万ノード時間/年となる。予備計算も含めると100万ノード時間/年が必要となる。

本格実施フェーズの2年間では、国内空域へと計算対象を広げる。国内の航空機は6000機/日、空港は約90。準備研究フェーズで開発したソフトをベースに同様のシミュレーションを行うことを考える。エンルート空域を考慮した日本全体の階層的シミュレーションとなりシナリオ数は2倍以上になることが予想される。1600ケースの計算を行う場合、280万ノード時間/年となる。ロバスト最適化を行う場合はさらにケース数が増加する。ロバスト最適化、階層的シミュレーションの検討、予備計算を含めて350万ノード時間/年が必要となる。

ポスト「京」時代では、世界の航空機まで計算対象を広げると7万機/年、さらに列車や船舶シミュレーションも考慮すると京で約180日の計算資源量が必要となる。以上は単純モデルに基づく予測で、航空機の状態量(姿勢、運動自由度(機体6+制御3))の計算、制約条件、気象の影響など個別エージェントの複雑性を向上させるとこの数倍以上の計算機資源が必要になる。

「京」以外の計算資源量は、ソフトウェア開発、テストケース、他のアーキテクチャーの計算機へのプ

ログラム最適化用も加味し、約 10 万ノード時間（本計算の約 10%を想定）が必要と考えている。

「京」の計算資源量 (単位：ノード時間/年)

H28 年度	H29 年度	H30 年度	H31 年度
400,000	650,000	780,000	259,107

「京」以外の計算資源量 (単位：ノード時間/年)

H28 年度	H29 年度	H30 年度	H31 年度
0	0	0	3,990,000

2. 採択時の留意事項への対応状況

(指摘事項)

ポスト京利用に向けて、計算の大規模化等の利用準備の具体的なシナリオを明確にすること

(対応状況)

実施計画書において、プログラム開発に関しての記載を加えた。また、研究開発内容にも記載した通り、調査研究・準備研究フェーズにおける羽田進入空域、本格実施フェーズにおける東京管制区、日本全体という具合に次第に大規模化するシミュレーション対象を明確化した。個別エージェントのモデル化についても段階的に高度化する方針とした。最初の試みとして、現在進めている羽田空港単一滑走路を目指す近傍着陸機を対象とした小規模シミュレーションソフトウェアについては、年度報告にその成果を含めるとともに、次年度早い時期に学会発表する予定である。今年度、現有の一般的なエージェントモデル計算のソフトウェアに対する並列化作業を業務委託により行うこととした。また、結果の理解促進には不可欠と判断してエージェントの動きを表示するソフトウェア作成作業を同じく業務委託により進めることとした。これによって、大規模並列シミュレーションを実施するためのソフトウェア準備を加速させる。今後の議論で変更の可能性が残るが、現時点での検討では、全体領域をセルに分けて一定領域を各ノード（もしくはコア）に配分する領域分割の考え方を採用する。エージェント数自体は一定規模に留まるため並列ループをセルベースで廻さずにエージェントベースで廻すことを想定している。ノード間のエージェント移動や各ノードのロードバランスの崩れが発生することに対応するため、（ちょうど流体計算の解適合手法で行われているように）一定時間積分ごとにデータの再配分を行う方法を採用する方針である。これらの方針は調査研究・準備研究フェーズに固める。

本課題で実施するシミュレーションは多数のケースを一度に実施することで成果を挙げるいわゆる Capability Computing である。大規模化という観点では、(1) 膨大なケース数、(2) エージェント間の複雑なインタラクションに伴う計算負荷、(3) 膨大な最適化の設計パラメータ (4) 確率論的な扱

いとシグマレベルのロバスト性を含めた多目的最適化の実施、(5) モデルの高度化による各エージェントのシミュレーションの計算負荷、の5点となる。以上の5要素それぞれに対してソフトウェア準備を段階的に進めていく。

以上に記載した計算の大規模化へのシナリオを図2にまとめる。

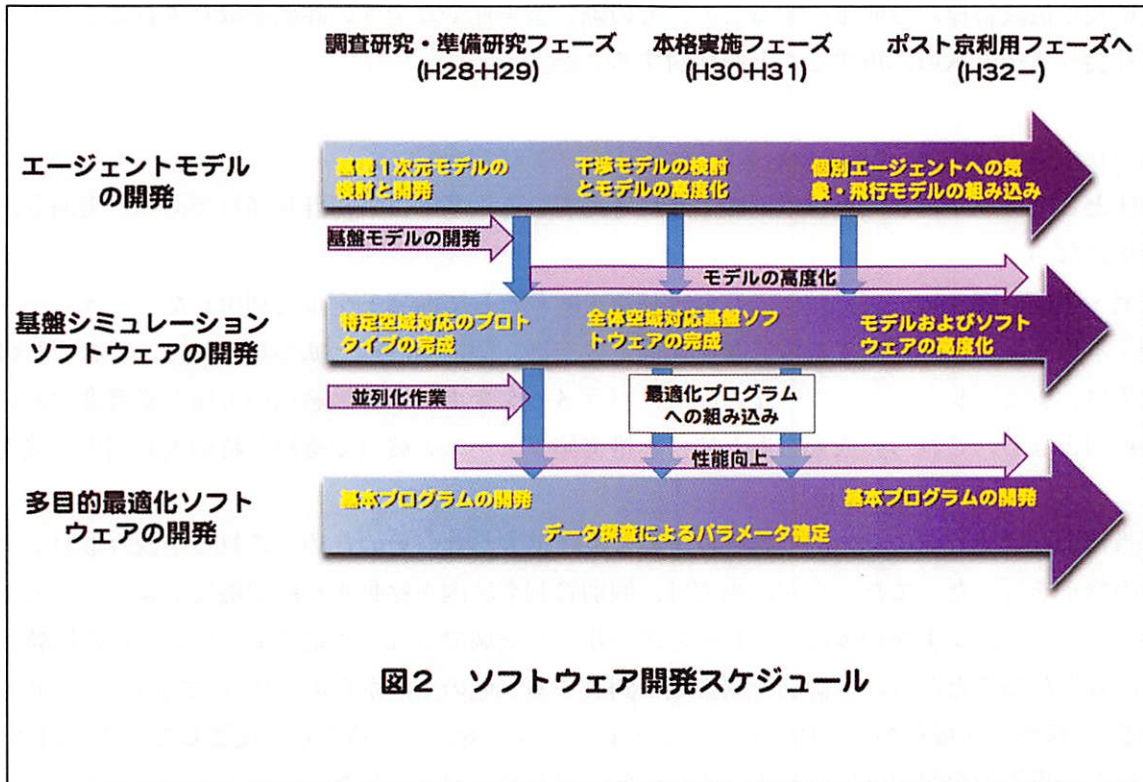


図2 ソフトウェア開発スケジュール

3. 中間評価における指摘事項への対応状況

指摘事項 (1) :

課題全体として達成すべき成果を明確にするとともに、その成果実現に向けた定量的・定性的な目標（年間目標及び最終目標）を明確にすること。その際、堅牢性や安全性の評価を取り入れることならびに、他の社会システムへの応用することを検討すること。

対応状況 (1) :

課題全体として達成すべき成果は以下のように考えている。基本は当初計画通りであり、実施計画に大きな変更はない。

調査研究・準備研究フェーズでは羽田空港着陸便を対象として開発モデルを利用したシミュレーションを実施、本格実施フェーズにてこの成果を他の主要空港、個別空港へと拡張していく。それぞれの段階での成果は、シミュレーションツールの完成、パラメータ変更による最適化の実施と影響度の高いパラメータ抽出となる。これらの成果をもとに、本格実施フェーズの終盤で優れた時刻表候補の作成を目指す。

但し、当初より研究計画の具体的内容を以下のように拡大した。そのため、これらが読み取れるよう実施計画の修正を行った。また、当初計画では、個別管制空域内を移動する航空機を対象としたモデル開発とシミュレーション実施の後に、これらをエンルート空域でつなぐ予定であった。遅延の影響評価において必要となることから、「個別管制空域に到着する（他の空港からの）出発-エンルート-到着管制空域に進入/移動」を最初から一体としてシミュレーション対象とすることに変更した。内容自体に変更はないが、事業内容が明確になるよう実施概要の記載を一部修正した。

（その1）一定規模以上の空港内での航空機の移動が航空交通遅延に影響している可能性が高いことを考慮し、空港内の航空機移動のモデル開発とシミュレーションを実施内容に加えた。

（その2）また、電子航法研究所の開発する数学モデルSPICAシミュレータは航空交通評価に有効であり、かつ本課題研究でもその機能が効果的に利用できることから、SPICAシミュレータの並列化とモデル改良を実施内容に加えた。

達成成果の意義を確認する方法の1つとして、実施概要の（3）項に記載した通り、国が進めるCARATS施策の効果を本シミュレーションソフトウェアが評価できることを想定している。

「堅牢性や安全性の評価を取り入れること」は本研究課題の本来目標の1つであり、提案時からの考慮対象である。目的関数にそれらを組み込んだ形で最適化を実施、得られる効率的な航空機運航計画を評価する。この点は実施計画に記載済みである。

他の社会システムへの応用については以下(a)および(b)のように考えている。この点も当初計画通りであり、実施計画に記載済みである。

(a) 個別課題としての他の社会システムへの展開

遅延の解消を目標とした列車運行のダイヤ最適化に対するシミュレーションソフトウェアの開発をすでに開始している。全体計画としては、特定の運行会社を対象としてここで開発したモデルを利用したシミュレーションを実施する。現状の遅延や回復状況を再現することで堅牢性や安全性を検証し、それをもとに優れた運行計画を立案できるシミュレーションソフトウェアへの構築へとつなげる。情報取得

の可否に依存するが、複数の運行会社の連携に関してもモデルと手法の確立までを今課題内で実施したい。

(b) 高いレベルの社会における相互作用としての複数交通システムに跨がる拡張

実施概要の(2)項に記載のように、空港内やさらにそこからの人の動きなども含めた複数交通システムに跨がる拡張など高いレベルの社会における相互作用についてはポスト京利用の段階で実施することと考えているが、本課題メンバーによる議論を通じてそこに向けてのモデルの構築と方針の確立までを実施する。

指摘事項 (2) :

計算科学技術分野における研究開発の論文数、学会発表数は、研究開発の成果を議論する上で1つの指標となりうるため、分野の特性、体制を考慮の上、論文、学会発表を通じて十分に成果を発信するような計画とすること。

対応状況 (2) :

これまでも意識してきたが、今後も十分考慮して研究計画を進めたい。実施概要の(4)項にこの点を追記した。

本課題はこれまでにない航空交通のエージェントモデルとそれを利用したアプリケーションの開発を目的としているため、初年度は主にモデル関係の成果に留まった。平成29年度には開発したモデルや必要となる現状データ分析が一定レベルまで進み、エージェントモデルに関する基礎研究、手法に関する研究、航空交通に関する研究などの各成果をそれぞれに応じた国内、国外の会議において発表している(別添の参考1を参照)。今後も国内外での成果発表を積極的に行っていく。すでに数件の成果は国際学術誌への投稿を予定しており、本格実施フェーズでは一定数の査読付き学術論文を輩出できると考えている。

指摘事項 (3) :

予備計算などを通じて、サイエンス、エンジニアリング的な目標を明確にすること。その目標に対して、ポスト「京」でいつまでに何をどこまで明らかにすることを目指すのかを明確にすること。その時点でポスト「京」で初めてできる画期的な利活用について具体的に説明すること。

対応状況 (3) :

サイエンス的な目標は、これまでにない航空交通のモデル開発とそこに潜む数理的な要素の分析である。また、中間評価の際にお願いした通り、航空交通の詳細を正確に評価するツール開発に加えて、問題を逆に簡素化したグローバルなマルチエージェントCAモデルの開発と利用の検討を本課題内で実施させていただきたい。これにより、実際の時刻表や現状の再現から離れて、航空交通の全体の動きをグローバルな視点で記述できる数理モデルを検討してみたいと考えている。

エンジニアリング的な目標は以下の通り、当初の実施計画から変更はない。すなわち、計画運行(運航)される大規模輸送システム(ここでは主に航空交通)を対象に、その交通流を分析・予測する技術を開発、それに基づいてシミュレーション手法を構築、これを利用して国内全体を1つのシステムと捉

え、堅牢で安全性と効率性を両立する全体最適な「究極の時刻表」策定を目指す。具体的には、本格実施フェーズ終了時に、将来の運航・運用方式の基盤となる安全かつ効率的な最適交通輸送システムの検討手法が一定の検証も含めて完成することと定義している。

本研究課題で開発するアプリケーションソフトウェアにおける個別エージェントの高度化がポスト「京」の利用によって可能となる。この点は当初の計画通りである。実施概要（５）項に記載がある通り、ポスト京の利用段階では高いレベルの個別エージェントモデルを利用したより複雑なシミュレーションが実施可能となる。すなわち、重点課題４で実施される気象予測や重点課題８で実施の機体姿勢・運動を考慮した高度な空気力算定を利用した燃費計算を組み込んだ「個性を有する」個別エージェントを利用した航空交通流のシミュレーションがポスト「京」の利用により実施可能と考えている。

利活用については、信頼性の高いモデルとシミュレーションツールが完成すれば、ステークホルダーである国がこのツールを利用した評価結果を今後の航空交通施策に反映することが期待できる。また、ツール自体も各運航会社による利用が想定される。なお、ポスト「京」の利用とはならないが、簡素化した利用モデルによる本開発ツールのリアルタイムに近い航空管制における利用も想定して開発を進める。

(別紙1) 実施機関一覧

	実施機関	備考
「堅牢な輸送システムモデルの構築と社会システムにおける最適化の実現」	学校法人 東京理科大学	代表機関 (課題責任者)
	国立大学法人 東京大学	分担機関
	国立大学法人 大阪大学	分担機関
	国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所	分担機関
	首都大学東京	協力機関
	日本航空株式会社	協力機関
	全日本空輸株式会社	協力機関
	東京地下鉄株式会社 (東京メトロ)	協力機関
	日本郵船株式会社	協力機関
	成田国際空港株式会社	協力機関
	デジタルハリウッド大学	協力機関
	理化学研究所 計算科学研究機構	協力機関