

平成 30 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）

平成 30 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

令和元年 5 月 31 日
学校法人東京理科大学
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平成30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. 平成 30 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）	14
4-4. 実施体制	15

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 氏名	ふじい こうぞう 藤井 孝藏	生年 月日	西暦 1951年10月17日（67歳） ※2019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 氏名	うざわ しんじ 鵜澤 真治			
		所属部署名	研究戦略・産学連携センター			
		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. 平成 30 年度（報告年度）の実施内容

4-1. 実施計画

平成 30 年度は、本格実施フェーズの初年度として、調査研究・準備研究フェーズで開発したプロトタイプモデルによる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を実施、その課題を抽出し、必要な改良を加えることで本格的なモデルと最終アプリケーションプログラムに向けた改修を進める。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

対象を羽田着陸から国内主要空港すべてに拡大する。これまで開発してきたプロトタイプモデルを利用し、国内空港全体の離着陸機を対象としたシミュレーションを実施する。検証などを通じてプロトタイプモデルの課題を抽出し、その改善を図るとともに、さらなるモデルの高度化を進める。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を継続的に進め、適宜モデルの改良に反映する。進入航空機数などのパラメータを変化させ、重要な設計パラメータを明らかにする。列車の運行に関しては、昨年までの成果をベース、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を実施する。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およびその高度化と成果の社会活用に向けた課題抽出
＜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) 階層的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) 大規模並列エージェントモデルの検証・高速化と表示技術開発
＜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) 首都圏列車オープンデータを利用した基盤モデルの初期開発

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で開催、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。平成 29 年度は、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から、前年に策定した開発計画の実現可能性の確認、必要な修正点を明らかにする。また、調査研究・準備研究フェーズをまとめるにあたり、策定した開発計画の実現可能性を確認するとともに、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）を進める。以下により具体的な業務内容について記す。

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。

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

本格実施フェーズの初年度として、調査研究・準備研究フェーズで開発したプロトタイプモデルによる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を実施、その課題を抽出し、必要な改良を加えることで本格的なモデルと最終アプリケーションプログラムに向けた改修を進めた。また、効率的で安全な航空機の運航実現の議論に有用な副次的プログラムの開発も進めた。

数学的簡易シミュレータSPICAに対して昨年度並列化を実施し、これまで3日かかっていた1シナリオの計算が20分程度で評価できるようになったことを受け、実応用として大規模モンテカルロシミュレーションにより羽田空港への到着航空機交通流に運用を適用した場合のFIM（Flight-deck Interval Management）の性能を評価した。この成果を国連の専門機関であるICAO（国際民間航空機関）が定める国際基準に反映した。また、2016年から2年間の航跡データおよびフライトプランを利用して、羽田空港に到着する航空交通の統計分析を行った。この成果は下記①-4（項目d）にも反映されている。また、新たな取り組みとして、羽田空港に到着する航空交通流を模擬する待ち行列モデルを作成し、交通需要に伴う遅延時間の将来予測を行い、初期的な研究成果を得た。今後、局所的な渋滞予測モデルとしてb) およびd) の課題と並行して取り組んでいく。（項目a）電子航法研究所）

航空機遅延への影響が大きいという事実が明らかになったことから、空港内のタキシングと地上オペレーションのシミュレーションプログラムの開発を進めた。前年度構築した空港内における地上航空交通における地上オペレーション解析のプロトタイプモデルをさらに発展させ、実空港（福岡空港）に適用した。ここでは、多種多様な空港誘導路形状や地上オペレーションに対応した新たな計算モデルを構築した。これを利用して、中規模空港として福岡空港を選び、開発プログラムを利用したシミュレーションを実施した。結果を分析し、スループットのボトルネックを明らかにするとともに、スループット最大のための最適な地上オペレーションを検討した。その結果、国際線ルートと国内線ルートのそれぞれの稼働状況は、単調増加・減少、一定値への収束・減少というような単純な傾向を示しているにもかかわらず、空港面全体としては複雑な振る舞いを示すことが明らかになった。さらに羽田空港を対象としたプログラムの開発にも着手した。（項目b）東京大学先端科学研究所）

航空機渋滞モデルのエージェントシミュレーション結果、CARATSオープンデータ等の実際のフライトデータ、のどちらにも対応する形で航空機の軌跡や関連情報を効率よく分析するため、分析用の可視化ソフトウェアを開発している。今年度は、当初より開発を進めてきた可視化ソフトウェアを実利用段階に高めた。プランも含めた複数のフライト状況の比較や航路状況の確認なども容易にできる作りとなっており、当研究グループにとどまらず、航空交通流管理や航空管制に携わる方やそれらを対象とする研究者にも有用な可視化ソフトウェアになっている。最終年度にかけて、当萌芽的課題の研究チーム全体でこのソフトウェアをブラッシュアップしていく。（項目c）大阪大学）

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、羽田到着便を完成、その信頼性を確認した上で、遅延機数や遅延総時間（平均時間）、および燃料消費の最小化を目的とした多目的最適化を実施した。設計変数は出発予定時間の変更とし、変更はフライトダイヤから5分以内という制約条件を課

した。その結果、一部の航空機の出発時間調整をすることで大幅に遅延を解消できることが明らかになった。研究代表者の知る限りでは、このようなシミュレーションプログラムは世界的にも存在せず、シミュレーションの信頼性を更に高めることで社会的な利用に結びつけたいと考えている。(項目d) 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、山手線を模した簡単なモデルを構築、シミュレーションを実施した。また、首都圏鉄道を対象としたシミュレーションに向けて複数の鉄道会社にデータ提供を依頼し、東京地下鉄株式会社(東京メトロ)から千代田線、東西線のデータ提供を得られることが確認できた。鉄道会社が有するデータには、実利用可能なモデル構築における情報が不足している点などいくつかの課題がある。(項目e) 東京理科大学)

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およびその高度化と成果の社会活用に向けた課題抽出

(業務項目a)

本項目に関しては、電子航法研究所を中心として2つの研究事業を実施した。最初のテーマは「FIM (Flight-deck Interval Management) の評価と成果の社会還元」である。昨年度の成果として、数学的簡易シミュレータ SPICA に対して並列化を実施し、これまで3日かかっていた1シナリオの計算が20分程度で評価できるようになっている。この成果を活用して、FIM性能を大規模モンテカルロシミュレーションにより評価した。FIMは航空機監視応用システム(ASAS: Aircraft Surveillance Applications System)の応用方式の一つである。今回、FIMを羽田空港に適用した場合を模擬し、様々な飛行シナリオ(飛行経路、風、制御則のパラメータ設定など)を仮定して、京コンピュータによる大規模シミュレーションを実施、航空機の到着時間間隔づけの精度を検証した。京コンピュータ120ノードを利用することで、これまで使用していた一般計算機で350日以上かかる計算時間を3日以下に処理することができた。ASASは、飛行情報の送受信によって自律飛行を可能にするシステムであり、ASASの応用方式であるFIMの実用化に向けた研究開発が進んでいる(図1参照)。航空機の自律速度調整により、管制官の指示通りに到着機順序と時間間隔を達成する運用であり、68パーセントの割合で±5秒以内の誤差の範囲内に収まるように速度制御則の研究開発と評価が進行中である。本研究では、NASAが開発したASTARアルゴリズムを搭載し、FIMの性能を検証した。シミュレーションの結果、航空機が同方向から到着する場合、ASTARアルゴリズムは優れた速度制御性能を達成するが、速度変更の指示数が多いことが指摘された。実

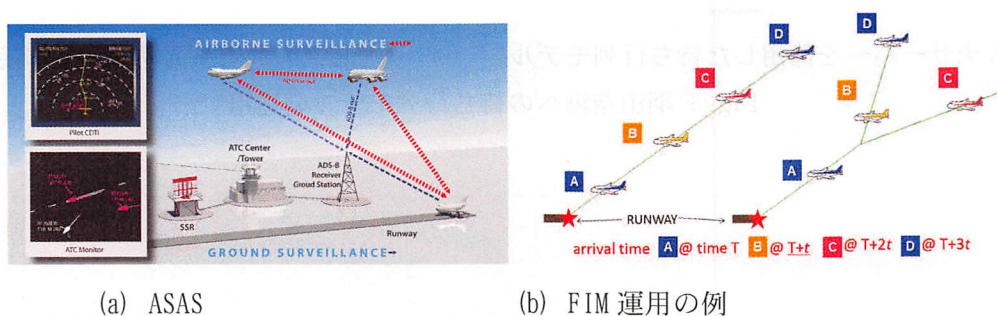


Fig. 1 FIMの概念図

運用化に向けて、速度変更の指示数を最小化する必要があるため、引き続き新たな速度制御則の研究開発を実施する。

国連の専門組織である国際民間航空機関（ICAO: International Civil Aviation Organization）は、FIMの実運用化を目指した国際基準の策定作業を進めている。国際基準策定グループに参加し、本研究成果を国際基準に反映したほか、ICAO 環太平洋局で研究成果を発表し、本研究成果を幅広く社会に還元した（図2 参照）。

2つめのテーマは「待ち行列理論に基づく航空交通モデルの構築と遅延予測」である。シミュレーションモデル作成の材料となるデータを分析することで新たなモデル開発の可能性を探っている。具体的には、東京国際（羽田）空港に到着する航空交通モデルを構築して将来の航空交通需要の増加に伴う遅延を予測し、その結果に基づいた解決策を提案

した。まず、2016年から2017年における71日分の航空交通データを活用し、最も混雑する19:00から22:00までの南西方面からの到着交通流について、データ駆動型の待ち行列モデルを構築した。図3に示すように、羽田空港を中心とした同心円の半径を10NMずつ拡張し、10NMから300NMまでの29区間（ $i = 1, 2, \dots, 29$ ）の空域を対象とした。例えば、 $i = 1$ の区間は、半径20NMの同心円から半径10NMの同心円を除いた空域、 $i = 2$ の区間は、半径30NMの同心円から半径20NMの同心円を除いた空域、というように定義した。航空機が各空域に入域してから出域するまでの飛行時間をサービス時間、各空域に入域する時間間隔を到着間隔、各空域を飛行する航空機数を仮想窓口数と仮定し、それぞれの確率分布を実データから推定した。

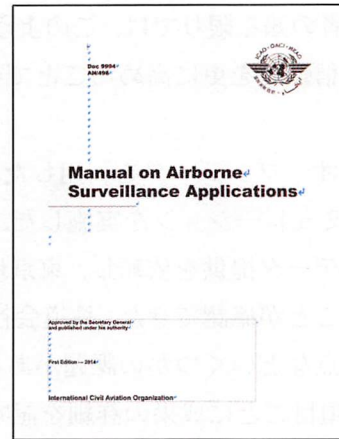
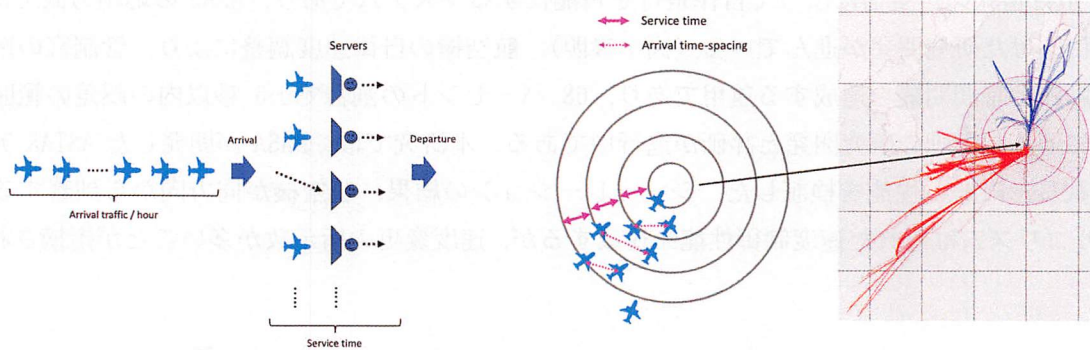


Fig. 2 ICAO 国際基準文書（Doc 9994 Manual on Airborne Surveillance Applications）



(a) マルチサーバーを適用した待ち行列モデル (b) サービス時間と到着時間間隔の定義

Fig. 3 羽田空港への待ち行列モデルの適用

図 4 に、29 区間の空域におけるサービス時間を正規分布で比較している。特に 30NM から 50NM において、サービス時間のばらつきが顕著であり、現状の管制サービスでは、到着遅延の制御をこの区間で積極的に行っていることが

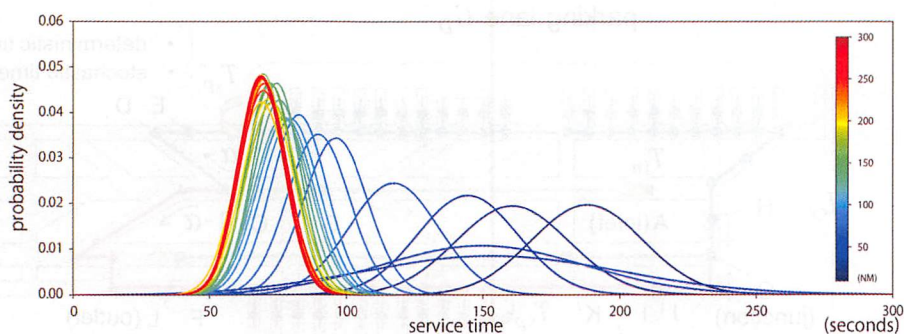


Fig. 4 正規分布によるサービス時間の比較

わかる。詳細は省略するが、各区間を飛行中の航空機数の分布を確認した結果、空港に近い空域では、各区間において飛行中である航空機数の中央値は 2 機程度となっており、現状を再現している。これに対して、最小機体間隔を適用した場合は 3 機に増加することが可能であるため、現状の仮想窓口数を 2、将来の仮想窓口数を 3 と仮定し、これらのデータの特徴を利用していくつかの待ち行列モデルを適用した将来の遅延予測を実施した。図 5 に、将来の到着交通量を現状の 1.2 倍と仮定し、G/G/c モデルを利用した遅延予測結果を比較する。現状の管制サービスを継続した場合（仮想窓口数 2）、到着交通量が 1.2 倍に増加すると、30NM から 50NM における到着遅延が約 2 分程度増加する。一方で、仮想窓口数を 3 とし、到着時間間隔を短縮した場合は、到着遅延が解消される。これらの結果から、将来的に 70NM 付近で到着時間間隔づけを可能とする管制支援ツールの導入が遅延時間解消に役立つことが示唆された。引き続き、M/G/c/K モデルを利用した検証を進める予定である。

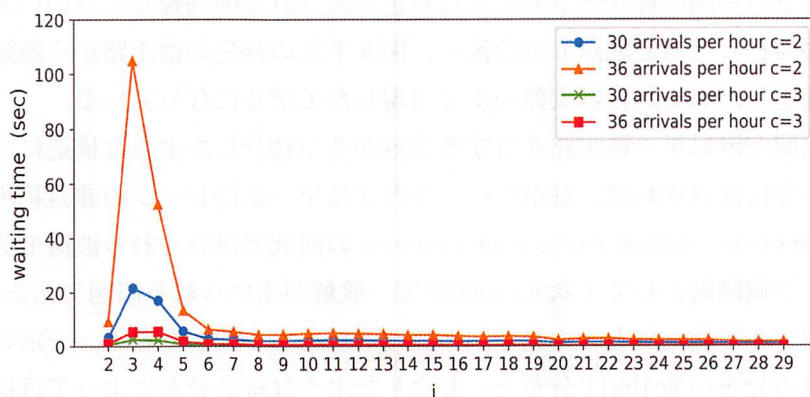


Fig. 5 待ち行列モデルによる遅延予測

①-2 階層的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))

東京大学先端科学研究センターを中心として、昨年度構築した空港内における地上航空交通におけるスポット・アサイン解析のプロトタイプモデルをさらに発展させ、福岡空港に適用した。ここでは、多種多様な空港誘導路形状や地上オペレーションに対応した新たな計算モデルを構築、これを利用している。開発プログラムを利用して実施したシミュレーション結果を分析し、スループットのボトルネックを明らかにするとともに、スループット最大のための最適な地上オペレーションを理論面、シミュレーション面から検討した。以下に詳細を述べる。

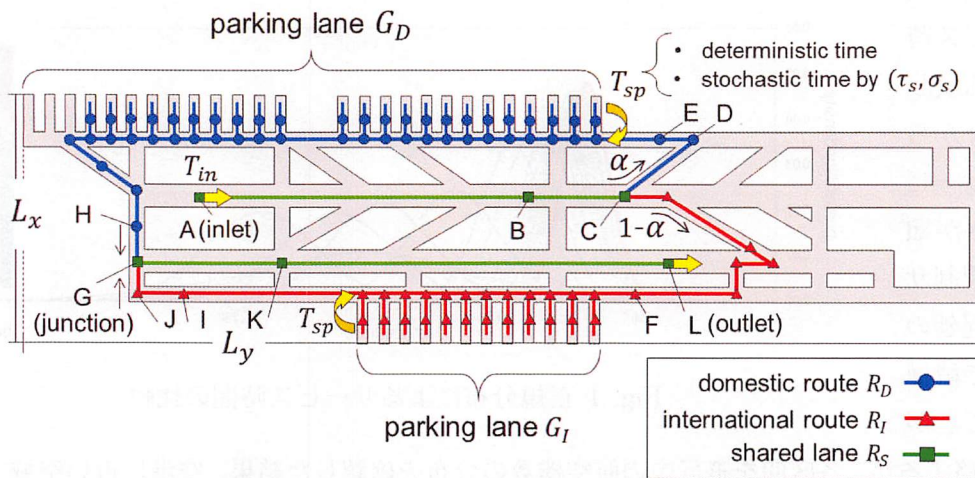


Fig. 6 福岡空港のシミュレーション図面

福岡空港を模擬した図面を図6に示す。福岡空港の国際線ターミナルと国内線ターミナルは滑走路を挟んで反対側に位置しており、空港に到着する機体は各ターミナルにある空スポットに滞在するようになっている。本研究では最初のアプローチとして図6上部の緑色の滑走路を到着専用とし、下部の緑色の滑走路を離陸専用とした。シミュレーションでは、図6上部の緑色の滑走路に到着した機体は、赤色で表される国際線ルートもしくは青色で表される国内線ルートのいずれかに進み、空きスポットに一定時間滞在したあと地点Gで合流し、図6下部の緑色の滑走路から離陸する。このように、滑走路の用途を固定した点を除けば実際によく再現したモデルになっている。

福岡空港は単一滑走路を有する空港が2つ結合したような構造になっている。そのため、片方のルートのみ注目すれば、駐車レーンを有する単一走行レーンの非対称単純排他過程 (ASEP : totally asymmetric simple exclusion process) の研究で用いられる渋滞モデルであることが理解できる。最初に、予備段階として1次元のASEPで一般解が求められる問題であるかどうかについて検証した。確率過程と非平衡統計力学の見地から数理解析をおこなった結果、一定の条件下においては、スポットの使用量の分布がWeibull分布を一般化したような統計分布によって近似できることがわかった(都築ら、

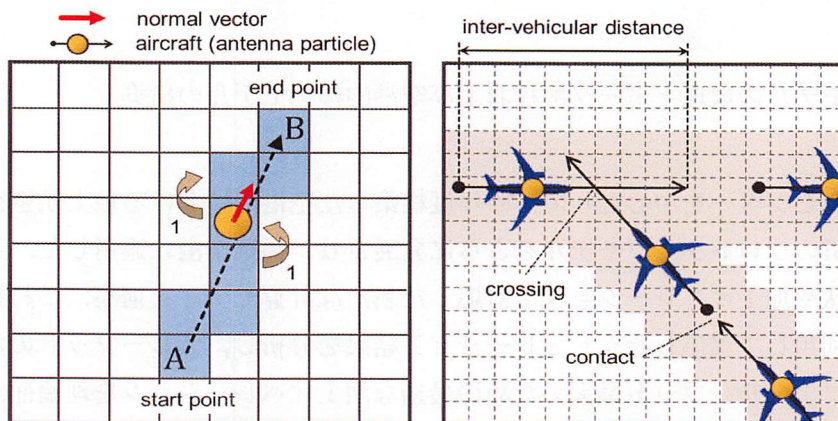


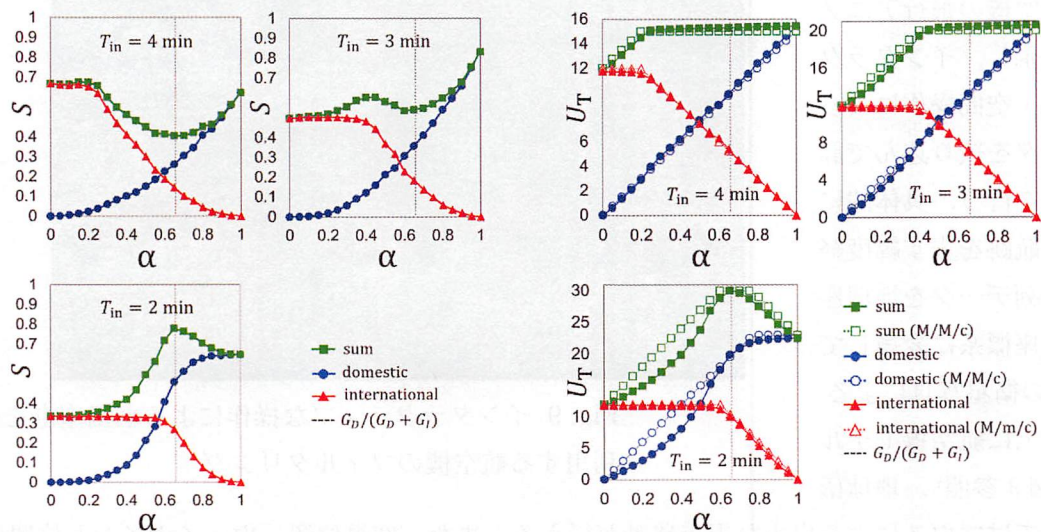
Fig. 7 提案する二次元確率格子モデルの概要

Phys. Rev. E 98, 042102 など, 詳細は別添 1 を参照). 一方で, より一般的な場合はスポットの使用量分布やスループットなどシステムの特性を解析的に求めることは容易ではないことも明らかになった. この結果を踏まえ, 空港の地上交通シミュレーションに有効な二次元確率格子モデルを新たに開発し, 福岡空港に対するシミュレーションに適用した.

図 7 は提案する確率格子モデルの概念図を示している. 図中黄色の粒子は機体の重心を表している. 図 7 右側に示されるように機体は細粒度の背面セルに含まれる複数のセルに跨るように存在し, 背面セル上を任意方向に移動する. ある位置 A から位置 B まで機体を移動する場合, 図 7 左側に示すように 2 地点の各セルの中心を結ぶ線に平行な方向に法線ベクトルを定義し, 移動方向に対して最近接のセルに機体の重心を格納する. 通常の 2 次元 ASEP と異なり, 機体が複数のセルに跨るため機体同士の接近判定や交差点の優先ルールの設定は難しくなる. そこで, 空港の地上交通で想定される機体同士の位置関係を系統的に分類し, 各機体の重心の位置と法線ベクトルの向きのみから接近判定する方法を考案した. 機体間の位置関係とそれに対する判定条件などは別途投稿中の論文に譲る.

到着, 出発する航空機間隔の入出データを与えるエンルートシミュレーションとの連結は次年度に実施予定である. ここでは, 空港に機体が到着する時間間隔を一定間隔 T_{in} とし, 各機体に対して空港への到着時刻をスケジュールの段階で指定する. 加えて, 到着後の進行ルート (国際線ルート or 国内線ルート) についても幾何分布 α (以下, 国内線への分配率) を用いて確率的に指定する. さらに, それぞれのルートで滞在する予定のスポットの番号も一様乱数で指定しておく. 今回の場合, 国際線ルートの場合には 1~12 のいずれか, 国内線ルートの場合には 1~23 のいずれかのスポット番号があらかじめそれぞれの機体に割り当てられる. これらはいくまで予定であり, シミュレーションでは地点 E または F の時点で滞在予定先のスポットの空き状況を確認する. すでに他の機体を使用している, もしくは前方を移動中の機体の先約がある場合には, その段階で空いているスポットをランダムに選択して新たな滞在予定スポットとする. 各スポットには T_s だけ滞在する. 典型的なケースを想定し, ここでは $T_s = 60 \text{ min}$ とする.

以上の計算条件のもと, T_{in} を 2min~4min, 国内線への分配率 α を 0~1 で変化させた場合について



スケジュールの変更率 S

スポットの稼働量 U

Fig. 8 スケジュールの変更率 S とスポット稼働量 U の国内線への分配率 α への依存性

て、空港のスループット Q 、スケジュールの変更率(予定スポットが使用できなかった頻度) S 、及びスポットの平均的な稼働量 U を調査した。スケジュールの変更率 S とスポットの稼働量 U の国内線への分配率 α への依存性について、 T_{in} がそれぞれ 2min, 3min, 4min である場合を抜粋して図 8 に示す。国際線ルートと国内線ルートのそれぞれの稼働状況は、スループット Q と同様に、単調増加・減少、一定値への収束・減少というような単純な傾向を示している。それにもかかわらず、空港面全体としては複雑な振る舞いを示す。図 8 右側のスポットの稼働量 U はそれぞれスループット Q と対応関係にある。図 8 右側における中抜きのプロットは $M/M/c$ 待ち行列理論により求めたスポット稼働量 U の理論値を表示しており、今回得られた知見、すなわち国内線への分配率 α が大きくなるにつれて国内線が飽和している状態で、さらに国際線の稼働率が下がり、空港全体としてのスループットの低下が引き起こされることが待ち行列理論によって説明できることを示している。一方、 $M/M/c$ 待ち行列理論による理論値と計算値は T_{in} が小さくなるにつれ乖離する傾向にある。 $M/M/c$ 待ち行列理論に渋滞効果が考慮されていないためであり、今後、理論モデルの整備が期待される。なお、これまでは計算負荷が小さく京の利用には至っていないが、次年度に向けてすでに羽田空港の空港内タキシングと地上オペレーションのシミュレーションを開始している。4 月以降は、京および HPCI 計算資源(東北大もしくは阪大を予定)による多数ケースの計算が計画されている。

①-3 大規模並列エージェントモデルの検証・高速化と表示技術開発 (業務項目c)

大阪大学を中心として、データ同化の検証やモデル最適化の有効性を直観的に把握するための航空交通流可視化システムの開発を行った。本システムは、昨年度から開発を行っているフライスループログラム(地球儀 3D モデル上で飛行する大量の航空機群を自由な視点で高いフレームレートを維持しながら確認できるソフトウェア)をベースに、GUI による各種機能の追加とマルチプラットフォーム

(Windows, Mac OS) への対応を行ったものである。可視化システムのワークフローとしては、航空交通

データを読み込み、高いフレームレートを維持しながらリアルタイムで航空機の飛行アニメーションを表示し、インタラクティブな時間・空間操作によって必要なデータを絞り込んで詳細な比較分析を行う。具体的には、航空機の航跡を表す緯度経度高度の時系列データを地理座標系から直交座標系に変換して 3D-CG 空間内の衛星写真による地球儀モデル上に航空機モデルを表示する(図 9 参照)。地球儀



Fig. 9 インタラクティブな操作による羽田空港を利用する航空機のフィルタリング

モデルに対してはマウスによる自由な視点移動が行える。また、空港位置、ウェイポイント位置の表示・非表示を切り替えることができる。航空機モデルに対しては、地球儀モデル上で時系列データからある時刻の位置に 3D モデルを表示し、時刻変化によるアニメーション、再生速度変更、シークバーに

よる時刻移動，航跡長の時間単位設定，全航跡の表示・非表示，色の設定，スケール設定などの操作が行える．特に，地球儀モデル全体を表示した状態から，衛星写真で空港の詳細が見える状態まで視点を移動する中で，航空機の動きを直観的かつシームレスに把握できるような 3D-CG 投影手法を実装した．また，CARATS オープンデータのように空港の離発着情報が含まれていない航跡データにおいても，インタラクティブな GUI 操作によって任意の空港への到着機，発着機のフィルタリングを行うことができる．上記のような機能を使って，任意に抽出された航空機のデータの比較，さらにグラフベースの Information Visualization により，さらに詳細な分析を行うことができる（図 10 参照）．開発には，C++言語，表示には OpenGL，マルチプラットフォーム対応用のツールキットとして GLFW を使用した．また GUI 機能の実装には ImGui* というオープンソースライブラリを利用した．今後の評価が必要ではあるが，当研究グループにとどまらず，航空交通流管理や航空管制に携わる方やそれらを研究対象とする研究者にも有用な可視化ソフトになったと考えており，利用の拡大を図る予定である．

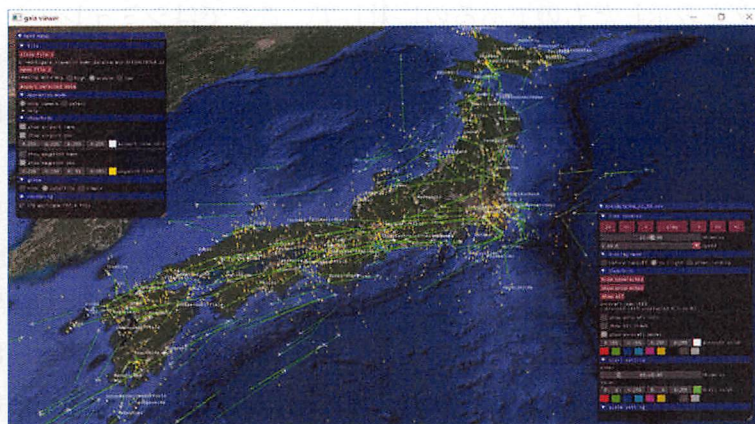


Fig. 10 航空交通流可視化システム

* <https://github.com/ocornut/imgui>

なお，当初，解析用に開発した Unity ベースの可視化ソフトウェアはコンピュータの負荷が大きいため，利用者視点の機能を上記の独自開発ソフトウェアに移植することによって有効利用する方針とした．

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), c) の一部)

東京理科大を中心として研究を進めている．開発してきた各エージェント（航空機）の運動（セル移動）モデル（詳細は昨年度成果報告書を参照）に，比較的簡単な気象モデル，個別航空機の姿勢，それらの結果として決まる燃料消費量の影響などを組み込んだ．また，飛行高度なども考慮するようにすることでモデルの精度を向上させた．このモデルを利用し，国内各空

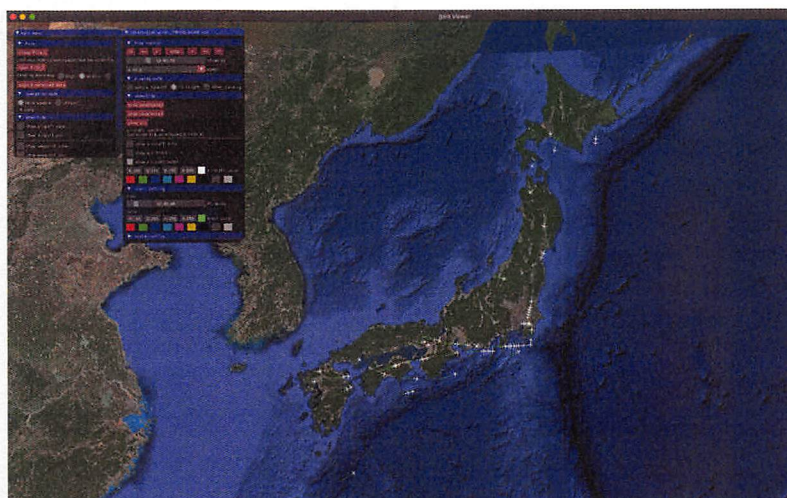


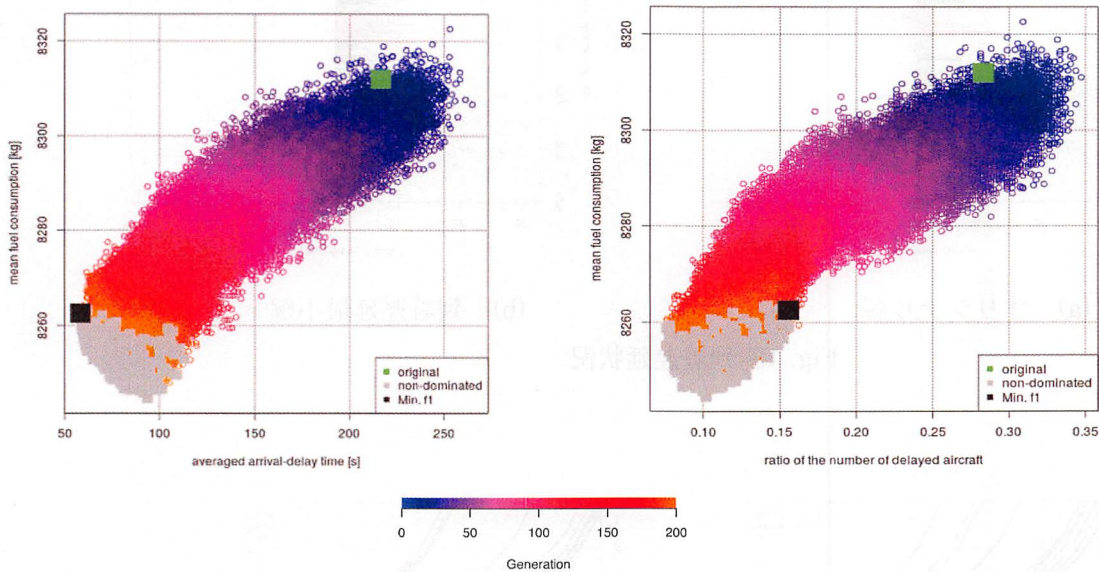
Fig. 11 シミュレーション結果の一例

港から羽田に到着する便すべて（海外路線を除く）を対象とした1日分のフライト履歴を比較対象として、その遅延状況を明らかにした（長岡ら、第31回計算力学講演会演説論文集、詳細は別添1を参照）。

続いて、これをオリジナル解とし、進化論的な多目的最適化手法を適用することで、最適解による渋滞状況の改善と改善に影響するパラメータ評価を行った。まず、最適化の基準となるオリジナル解を示す意味で、図11にシミュレーション結果として得られた1日のある瞬間の航空機のフライト状況を表示した例を示す。表示には①-3で開発した可視化ソフトウェアを利用している。図10がCARATSオープンデータを表示したものであるのに対して、ここではシミュレーション結果（羽田空港到着便）の航跡データである。最適化については、次年度にかけて多種多様な設計変数、目的関数を対象として実施予定である。今年度は初期的検討として、予定時刻からわずかに離陸時刻を変更させることで到着遅延や遅延機数、さらに燃料消費をどの程度減少させようかを調査した。目的関数は、(1)航空機の平均到着遅延時間の最小化(f_1)、(2)遅延機の割合の最小化(f_2)、(3)平均消費燃料の最小化(f_3)の3つとした。タキシング時間を考慮して、ダイヤの出発時刻から7.80分を加えた時刻を離陸予定時刻、ゲート到着を基準として決められているフライトダイヤから3.35分を引いた時刻を着陸予定時刻とし、この着陸予定時刻から実際の着陸時刻との差をもって遅延時間と定義した。離陸予定時刻と実際の離陸時刻との差（どれだけ出発時間をずらすか）を唯一の設計変数としている。制約条件として、設計変数である離陸予定時刻の変更可能な範囲を-300秒から+300秒以内とした。最大で5分程度の出発時刻の変更は旅客輸送やダイヤ構成に大きな影響を与えないという判断によるものである。羽田空港に向かう国内線の機数は579機であったことから設計変数の数は579個である。本研究では、多目的最適化手法として進化計算手法の一つであるNSGA-IIを使用した。進化論的多目的最適化における集団サイズと世代数は共に200とした。この時点では特定の1日分のダイヤを利用する。今後、目的関数、設計変数などを多様に変化させ、さまざまな知見を得ていく予定である。なお、並列化は各個体の評価を並列実行することとし、1ノードで1個体(ケース)の評価を行う。今回の3目的、1変数の最適化については、現時点で1個体の評価にかかる時間は10分弱であるが、それでも特定の1日だけを対象とした多目的最適化実施に必要な計算資源は約6,500ノード時間程度となった。最適化から得られる結果の検証には、年間を通じて状況が異なる多くの日を対象としたシミュレーションとその最適化が必要であり、さらに最終年度で予定しているロバスト性を加えた評価では計算負荷が数十倍以上となる。

進化計算で得られた全個体の目的関数値を図 12 の散布図に示す。3次元の分布を2次元的に見ている。横軸、縦軸はそれぞれ特定の2つの目的関数を表している。図 12 から離陸時間調整を行わない場合であるオリジナル解（図 12 の緑のプロット）の目的関数値よりも良い値の非劣解（図 12 の灰色のプロット）が多く得られたことがわかる。ここで、遅延時間解消に貢献する要因を調べるため、非劣解の中で遅延時間最小解（図 12 の黒のプロット）を用いてオリジナル解と比較する。

図 13 に各航空機の羽田空港到着遅延時間を示す。図 13 (a) はオリジナル解，図 13 (b) は遅延時間最小



(a) f1 (平均遅延時間) と f3(燃料消費) (b) f2 (遅延機数) と f3(燃料消費)

Fig. 12 目的関数の2つを各軸とした総ての解の分布図

解を示す。横軸は到着遅延時間を示しており、正であれば遅延時間、負であれば早着時間を表す。縦軸は各航空機を表しており、およそ出発空港が北から南へと上下方向に並べ、出発地の地方ごとに色分けしている。中央より右に分布している機数が遅延機に相当する。遅延時間最小解では遅延機の数が大きく減っている。また、遅延する場合でもそのほとんどの遅延時間が5分以内に収まっており、大幅に遅延が改善されていることがわかる。なお、早着が多い点に関しては、実際には空港や時間帯によって異なるタキシング時間など地上オペレーションに要する時間をすべて一定としていることなどが主たる要因と考えているが、詳細は次年度の研究の中で明らかにしていく。

さらに、遅延が改善された航空機の飛行状況を調べるため、着陸機数も遅延機数も最大となっている10時台の航空機の時空図を図14に示す。図14(a)はオリジナル解、図14(b)は遅延時間最小解である。横軸は時間、縦軸は羽田空港からの距離を示しており、正の領域は北方向から来る航空機、負の領域は

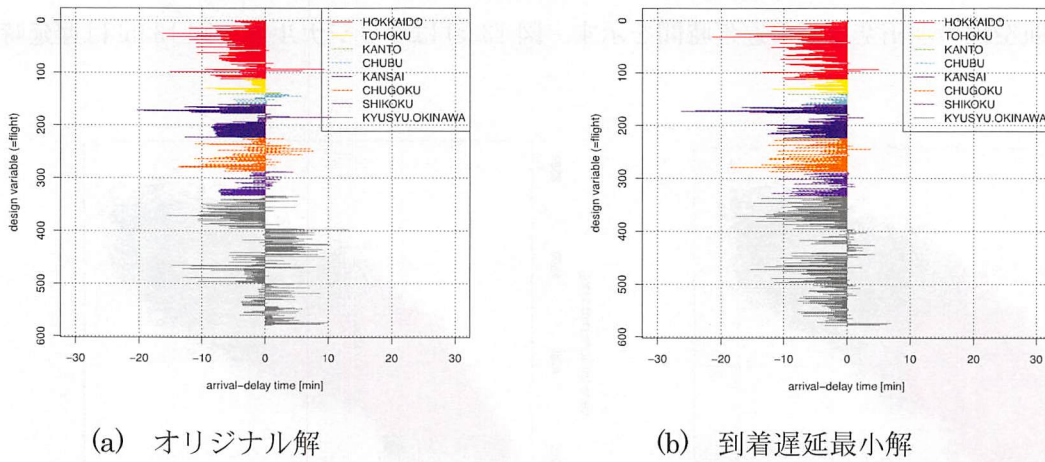


Fig. 13 到着遅延状況

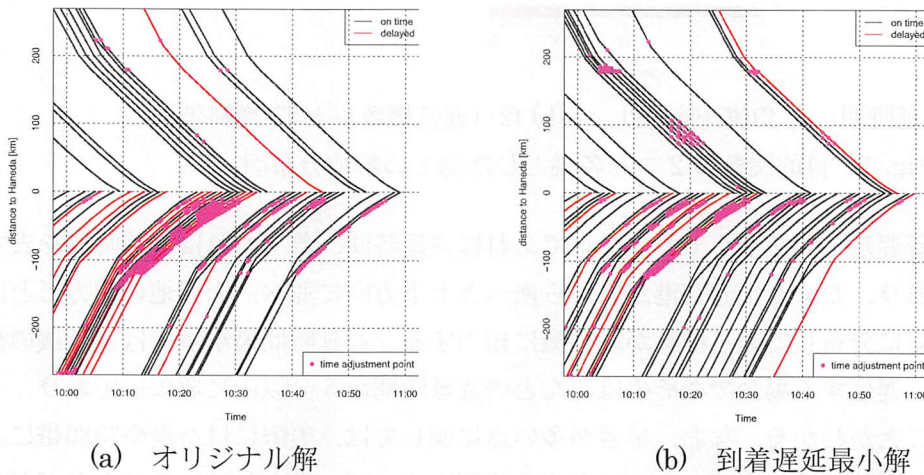


Fig. 14 到着地付近のフライトの時空図

南西方向から来る航空機を示している。黒線が定刻通りに到着した航空機、赤線が遅延して到着した航空機を示している。さらにピンクの点はシミュレータ上でHoldもしくはSet Backした箇所を表している。オリジナル解では航空機が着陸する時間の疎密の差が大きく、特に10:20から10:40の間では南西方向から来る航空機の遅延機数、時間調整回数が多い。一方、遅延時間最小解では航空機が着陸する時間間隔がほぼ等間隔に調整され、遅延機数も時間調整回数も減っている。すなわち、出発時間を多少調整することによって、到着近くでの航空機間隔を一定にすることで遅延を減少させられることが明らかになった。

本稿では省略するが、さらに詳細の分析から、同時刻出発の航空機が存在する場合は、離陸時間のわずかな調整、もしくは空港での地上オペレーションやタキシング時間のわずかな調整によって到着遅延

を大きく減少させられることが示唆されている（2019年度国際会議にて発表予定）。

なお、本解析時点では国際線羽田到着便は含まれていないが、その後の研究において、羽田管制空域の境界線を初期状態として羽田到着便を当該プログラムに導入することですすでに対応している。羽田空港出発便（他空港到着便）については、上記①-2の空港内の地上オペレーション（到着ゲートのスポットアサイン、タキシングなど）のシミュレーションと連携させる形で作業を進める予定である。

以上、航空交通流のシミュレーションに関しては、それぞれの項目に関する担当機関を設定してはいるが、実際の研究は各機関が一体となって取り組んでおり、どの項目も個別機関のみの成果ではないことを付記しておきたい。

①-5 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 (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、東京理科大にて、山手線を模した簡単なモデルを構築し、仮想的なダイヤを想定したシミュレーションを実施した。現時点では、比較対象がないことから結果の検証に進むことができず、本格的なモデル構築には実際の列車運行の状況が不可欠である。単独の路線については、首都圏鉄道を対象としたシミュレーションに向けて複数の鉄道会社にデータ提供の依頼をし、東京地下鉄株式会社（東京メトロ）から千代田線、東西線のデータ提供を得られることが確認できた。年度末近くに NDA 契約が結べたので、次年度にこれらを対象としたシミュレーションを実施していく。ただ、鉄道運行会社との議論の中で、提供可能なデータにはいくつかの不足点があることが明らかになってきた。首都圏の列車遅延が広く伝播し回復に遅れが出る主要因の1つは路線の相互乗り入れであり、解析には複数の鉄道会社の乗り入れを含めた情報が必要と考えられる。しかしながら、各社は自社路線の情報しか持たず、希望するデータが得られないことが明らかになってきた。また、駅の入出人数のデータはあるが、列車の乗客数に関するデータがない（一部取得しているが保存していない）なども明らかになり、実用を目指すためのデータ不足が明確になってきた。以上から、対象とする路線が個別路線に限られること、信頼性の検証に課題があること、以上2点を覚悟しながら、今後のシミュレーションソフトウェアの開発を進めることにした。

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。一定の成果が生まれ、かつ利用者視点でも有用なソフトウェアができつつあるので、当該課題のホームページの作成を行った (<https://gaia.ms.kagu.tus.ac.jp/>)。次年度が最終年度となるので、普及・広報および他の研究グループとの意見交換などの機会を作成する準備を進めた。

4-3. 活動（研究会等）

10名以内の小さなチームなので、高い頻度で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。下記は、運営委員会

兼研究内容討論会の開催状況である。

2018年04月25日	第20回研究会兼運営委員会（参加者全員，東大先端研）
2018年05月31日	第21回研究会兼運営委員会（参加者全員，九州大学）
2018年06月01日	福岡空港管制管・情報官との意見交換およびシステム施設見学
2018年08月01日	第22回研究会兼運営委員会（参加者全員，TV会議）
2018年09月25日	第23回研究会兼運営委員会（参加者全員，TV会議）
2018年10月22日	第24回研究会兼運営委員会（参加者全員，理科大神楽坂）
2018年12月04日	第25回研究会兼運営委員会（参加者全員，理科大神楽坂）
2019年01月31日	第26回研究会兼運営委員会（参加者全員，理科大神楽坂）

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およびその高度化と成果の社会活用に向けた課題抽出	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) 階層的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) 大規模並列エージェントモデルの検証・高速化と表示技術開発	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 藤井孝藏
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	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
みんなでつくるAI時代 ビジネスパーソンにとって必要な「STEAM」教育ってなに？	伊藤恵理	大阪(ナレッジキャピタル大学校)	2019年3月22日	国内
セルオートマトンを用いた降下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	神奈川(第15回進化計算学会研究会)	2019年3月8日	国内
AI時代を生きるための新しい教養“STEAM”	伊藤恵理	兵庫(親和中学校・女子高等学校)	2019年2月5日	国内
次世代航空管制システムにおける人間と協働する自動化技術の研究開発	伊藤恵理	東京(SICE安全のための計測・制御・システムを考える会)	2019年1月28日	国内
現象論モデルに基づく航空機交通流の解析と最適化ーその1	藤井 孝藏	山口(平成30年度航空宇宙空カシンポジウム)	2019年1月25日	国内
セルオートマトンによる航空交通モデルの再現性評価	長岡慎介, 伊藤恵理, 立川智章, 藤井孝藏	徳島(日本機械学会 第31回計算力学講演会(CMD218))	2018年11月25日	国内
セルオートマトンを用いた航空交通流最適化問題の初期検討	関根将弘, 立川智章, 長岡慎介, 藤井孝藏	徳島(日本機械学会 第31回計算力学講演会(CMD218))	2018年11月25日	国内
確率モデルによる東京国際空港における到着機制御の性能解析に関する一考察	宮沢与和, 伊藤恵理	山形(第56回飛行機シンポジウム)	2018年11月16日	国内
東京国際空港の到着交通流を模擬する統計モデルの構築に向けた一考察	伊藤恵理, 宮沢与和	山形(第56回飛行機シンポジウム)	2018年11月16日	国内
Studies on the Interval Management targeting Tokyo International Airport	Eri Itoh, Takuya Otsuama	Bangkok (ICAO Workshop on Aeronautical Surveillance Systems)	2018年11月5日	国際

A Novel Control Approach to Improve Speed Commands and Pilot Workload for Flight-deck Based Interval Management	Timo Riedel	Brazil(31st Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS2018))	2018年9月9日～14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	Shenzhen, China(2018 JPNSEC International Workshop in Evolutionary Computation)	2018年9月1日	国際
Interactive Visualization for Analysis of Air Traffic Model	Kensuke Yasufuku, Shinsuke Nagaoka	Milano (The 18th International Conference on Geometry and Graphics 2018)	2018年8月4日	国際
Aircraft Traffic Model Using Step Back Cellular Automaton	S. Nagaoka, T. Tatsukawa, E. ito and K. Fujii	New York, U.S.A.(WCCM2018)	2018年7月26日	国際
航空交通管理の将来ビジョンと研究開発の世界動向	伊藤恵理	東京(航空政策研究会 月例研究会)	2018年7月6日	国内
航空交通流の大域的効率化・最適化に向けたシミュレーションの試み	藤井孝藏, 立川智章, 長岡慎介	宮崎(第50回流体力学講演会/第36回ANSS)	2018年7月4日	国内
Conceptual Design of a Speed Command Algorithm for Airborne Spacing Interval Management	Timo Riedel, Masaki Takahashi, Eri Itoh	Spain(ICRAT 2018)	2018年6月26日～29日	国際
A feasibility study on large-scale TASEP simulations using cutting-edge vector processors	Satori Tsuzuki, Daichi Yanagisawa, and Katsuhiro Nishinari	Glasgow, UK(6th European Conference on Computational Mechanics and 7th European Conference on Computational Fluid Dynamics (ECCM - ECFD 2018))	2018年6月11日	国際
完全非対称単純排他過程を用いた空港の地上交通におけるスポット・アサイン解析	都築 怜理, 柳澤 大地, 西成 活裕	愛知(第23回計算工学講演会)	2018年6月8日	国内
ステップバックセルオートマトンを用いた東京国際空港周辺の航空機渋滞モデルの構築	長岡 慎介, 伊藤 恵理, 立川 智章, 藤井 孝藏	愛知(第23回計算工学講演会)	2018年6月7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
人間社会と自律知能が協働する航空交通管理システムを目指して	伊藤恵理	自動車技術	2019年3月	国内

Effect of walking distance on a queuing system of a totally asymmetric simple exclusion process equipped with functions of	Satori Tsuzuki, Daichi Yanagisawa, and Katsuhiro Nishinari	Phys. Rev. E 98, 042102	2018年10月	国際
Feasibility Study on Fixed-flight Path Angle Descent for Wide-body Passenger Aircraft	Eri Itoh, Navinda Wickramasinghe, Hiroko Hirabayashi, Sachiko Fukushima	CEAS Aeronautical Journal	2018年10月	国際
Evaluating Energy Saving Arrivals of Wide-body Passenger Aircraft via Flight Simulator Experiments	Eri Itoh, Sachiko Fukushima, Hiroko Hirabayashi, Navinda Wickramasinghe, Daichi Toratani	Journal of Aircraft	2018年8月	国際
次世代到着管理システムの運用コンセプト	伊藤恵理	日本航空宇宙学会誌	2018年7月	国内

(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、最近ではこれ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。鉄道に関し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・予測する技術を確認し、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はなく、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、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・設計探査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 (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	(目標) 航空機交通流モデルの構築とプロトタイプ作成 (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、飛行経路、飛行速度、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	(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 (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	(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 (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。
運航離散モデルの数理とデータ解析 (東大:西成, 柳澤)				
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

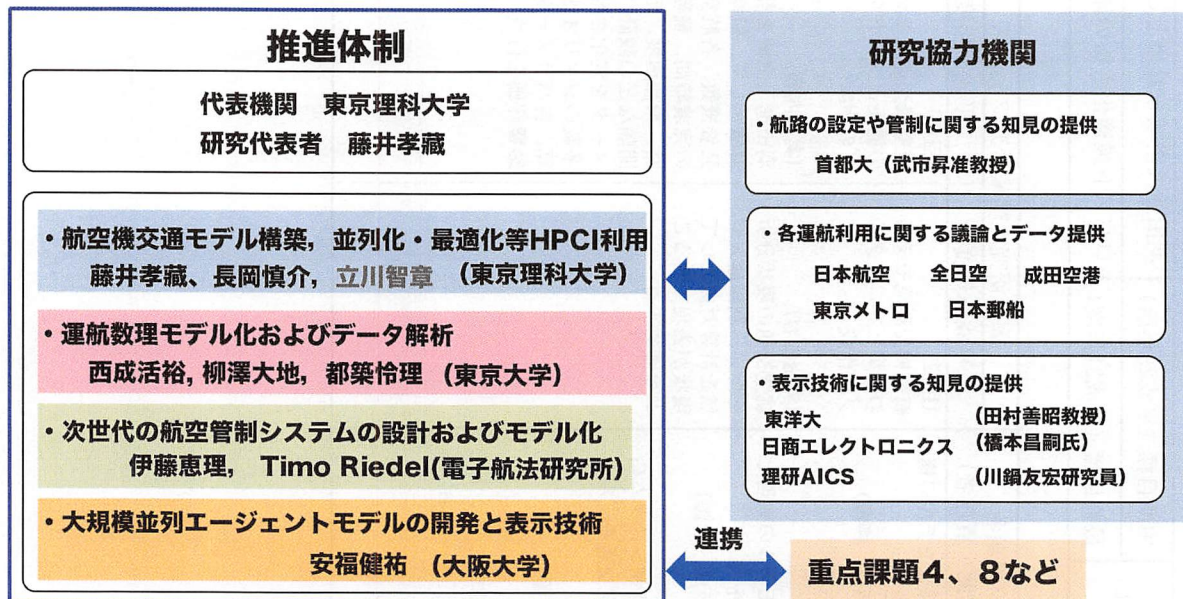


図1 研究開発実施体制 (H30, 3改訂)

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)の項目をそれぞれを担当する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けると考えている。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

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

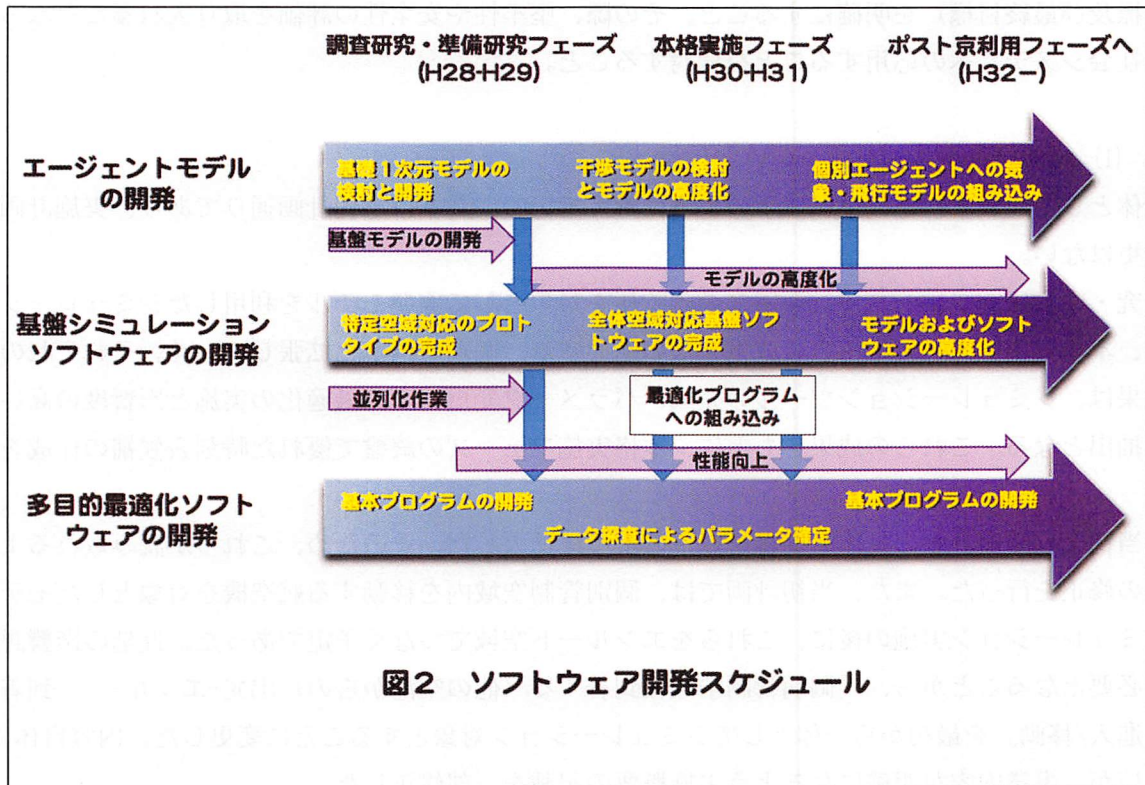
(対応状況)

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。



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