

4. 東京国際空港を対象とした到着管理の研究開発と応用

※伊藤 恵理^{1, 2}, 蔭山 康太¹, 大津山 卓哉¹, 天井 治¹, 宮沢 与和¹,
立川 智章³, 関根 将弘³, 加藤 古都², 日笠 航希², 森川 暢明²,
Juergen Rataj⁴, Michael Fineke⁴, Mihaela Mitici⁵,
Michael Shultz⁶, Srinivas Athota⁷, Vu Duong⁷

¹電子航法研究所 航空交通管理領域, ²東京大学, ³東京理科大学,
⁴ドイツ航空宇宙研究所, ⁵デルフト工科大学, ⁶ドレスデン工科大学, ⁷南洋理工大学

1 まえがき

大規模空港の効率運用のために、航空機の巡航・降下区間を含む広範囲の空域にわたる戦略的な到着管理が求められる。そこで、航空機の到着順序の決定と間隔づけを行う管制官の業務を支援する到着管理システム（AMAN: Arrival Management）の研究開発と実用化が世界各地の主要空港を対象に進められている。AMAN の設計条件は、対象とする空港・空域、到着および出発・空港面の航空交通の特徴に依存する。

そこで本研究（平成 29 年度から令和 2 年度実施の指定研究「航空機の拡張型到着管理システムの研究」）は、東京国際（羽田）空港に到着する航空交通流を対象に、飛行の段階に応じて到着交通流を制御する多段階到着管理（Multi-stage Arrival Management）を提案し[1]、データサイエンス、待ち行列理論、数理シミュレーションを組み合わせた分析と評価結果に基づいて、AMAN 設計条件を表した[2-9]。さらに、研究成果を ASEAN 地域の到着交通流管理である LRATFM（Long-Range Air Traffic Flow Management）の概念設計と、AMAN を利用した将来運用である IM（Interval Management）の ICAO 国際基準策定に応用した[10-15]。本稿は、これらの研究成果と今後の展望をまとめる。

2 羽田空港を対象とした到着管理

2.1 羽田空港の運用

2.1.1 北風時の空港運用

羽田空港は、日本で最も混雑する空港であり、離着陸機の約 60%が北風運用を実施している。北風時の空港運用を、図 1 に表す。到着交通は、

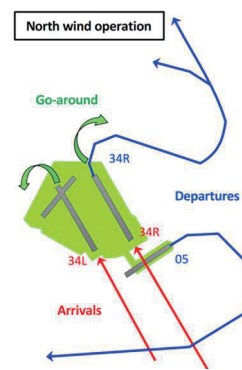


図 1 羽田空港の北風運用

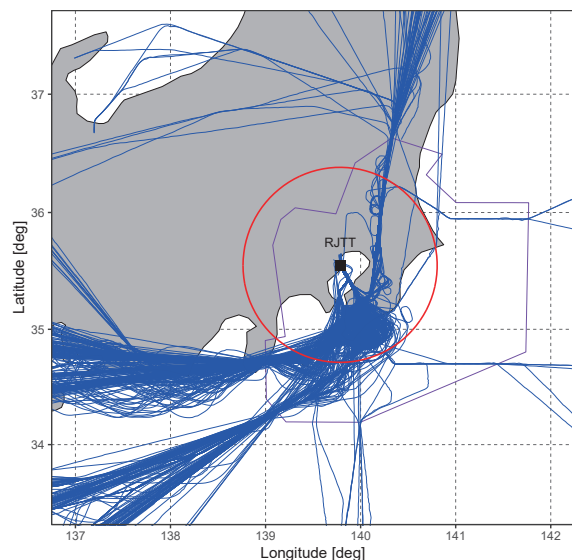


図 2 ターミナル空域の拡大とポイントマージ

通常、南西方面からの到着機を RW34L、北方面からの到着機を RW34R に着陸させる。南西方面からは、北方面からと比較して到着率が約 3 倍である。本研究では、南西方面から RW34L に到着する航空交通を AMAN の対象とした。

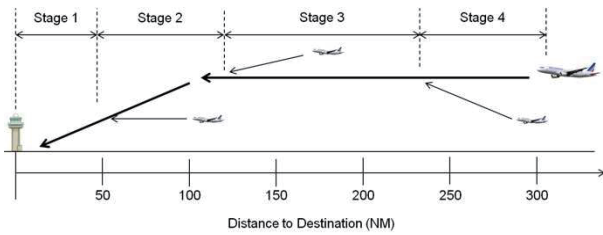


図3 多段階到着管理の概念

2.1.2 ターミナル空域の拡大

図2に、ターミナル空域の形状と、北風運用時の1日分（2019年10月）の到着交通流の航跡を表す。2019年7月より、再編したターミナル空域内でのポイントマージ運用が開始した。南西方面からの主要な到着交通流は、2つのFIXを経由してターミナル空域に移管され、ポイントマージ経路を通過してから、滑走路に到着する。滑走路割り振りを実施可能なように、2本の滑走路に対してポイントマージ経路が設計されている。

2.2 多段階到着管理の提案

2.2.1 概念

航空機の到着交通流は、到着空港から遠方の空域を飛行するほど、気象・ポップアップ機の出現・管制運用などの要因に起因する不確実性の影響を大きく受ける。そこで、不確実性の大きさに応じて到着交通の運用を段階別に分類し管理する、多段階到着管理の概念を提案した（図3参照）。4つの段階に対応する空域（Stage4から1）と運用を以下にまとめる。

Stage 4: 航空交通流制御を実施する空域

到着空港から最も遠方のエンルート空域では、出発空港を離陸して到着交通流に合流する航空機の出発時刻や、気象の影響、管制運用や流量管理などの不確実性の影響を、到着するまでに最も大きく受ける。羽田空港や空域の容量制限に基づいて、航空交通の流量を制御する空域である。

Stage 3: 航空交通流制御から時間管理（到着機の間隔づけ）に移行する空域

巡航区間を飛行する到着機に対して、飛行の安全確保や先行機との間隔づけのために、間隔調整（メタリング）を実施する。航空交通の流量管理から時間管理に移行する空域である。

Stage 2: 時間管理を実施する空域

到着機の巡航と降下区間を含む空域で、Stage 3において実施するメタリングの効果を受けながら到着間隔の管理を行う空域である。ここでは、ターミナル空域への入域間隔を調整するメタリングも行われる。

Stage 1: 正確な時間管理を実現する空域

到着空港に隣接するターミナル空域を含む空域で、飛行経路や速度・高度の制限などもあり、最小間隔を確保して滑走路に着陸するために、より正確な時間管理を実現する空域である。

本研究では、各段階において、羽田空港の到着交通の混雑を緩和し、遅延時間を削減するAMAN設計条件を提案し、有効性の定量的評価を行った。データ分析、理論、シミュレーション実験に基づく成果を以下にまとめる。利用したデータは、本研究の期間中（2017年度から2020年度）に、ターミナル空域の再編等を含む新運用が開始したため、一部旧運用のものを利用したが、新運用のデータと比較して、到着交通流の本質的な性質を捉えていることを確認している[8]。

2.3 AMAN 設計条件の提案

2.3.1 ターミナル空域での条件（Stage1）

(a) RECAT 管制間隔の適用

航空機の到着率について、現状を維持した場合でも、到着間隔を短縮すると滑走路のスロットを確保しやすくなるため、例えば、滑走路横断が生じたり、出発機と共有で利用したりする滑走路の有効活用につながる。そこで、到着間隔を短縮するためには、RECAT 管制間隔の適用が、羽田の機材バランスにおいて有用であることを示した。RECAT を適用した場合と、RECAT 導入以前の ICAO 基準（後方乱気流間隔）を適用した場合の滑走路端での到着間隔を比較すると、RECAT の適用により、全体の約40%の到着機の間隔が10秒程度短縮していることがわかった。

(b) 空域容量の拡大

空港および周辺空域における運用の安全性を担保するためには、直ちに実用化が可能であるか

議論の余地があるが、ターミナル空域容量の拡大は、航空機の到着交通流全体の遅延時間を大幅に削減する。表1に、RECAT 管制間隔を適用し、ターミナル空域の到着率を現行（1時間あたりRW34Lと34Rに合計40機）からRW34Lの到着機数を4機増やして、1時間あたり44機とした場合の到着遅延時間（ターミナル空域でのベクタリング時間と、エンルート空域および出発空港での遅延時間の合計）の平均値を比較する。ただし、4機増加の根拠は、2.3.3章に説明する。表1に表すように、空域容量を4機拡大した場合、到着交通流全体の到着遅延時間を現行運用（RECATなし、RW34Lと34Rに到着する1時間あたり合計40機）と比較すると、60%程度の遅延時間を削減することが示された。

インフライトで発生する到着遅延時間を削減する方法として、空域容量の拡大だけでなく、羽田空港から150NM以遠のエンルート空域において到着間隔のばらつきを削減する方法も有効である。詳細は、2.3.3章にまとめる。

表1 ターミナル空域の容量拡大に伴う遅延時間の削減 [6]

到着率 [ac/hr]	1機あたりの 到着遅延時間 [min/ac]	1日あたりの 到着遅延時間 [min/day]
40	10.97	3391.71
44	5.97	1463.36

2.3.2 ターミナル空域への移管 FIX での条 (Stage2)

(a) 移管間隔の短縮

エンルート空域からターミナル空域に入域する到着機には、移管するFIXにおいて、安全な運用を実現するため、イントレイル間隔が適用されている。しかし、安全のために裕度を大きくとったイントレイル間隔の適用は、遅延時間を増加させる[4, 5, 8]。そこで、最小間隔を確保しながらイントレイル間隔を20%程度短縮することで、RW34Lの到着率が1時間あたり36機まで増加しても、遅延時間を現状より削減できることを示した[4]。

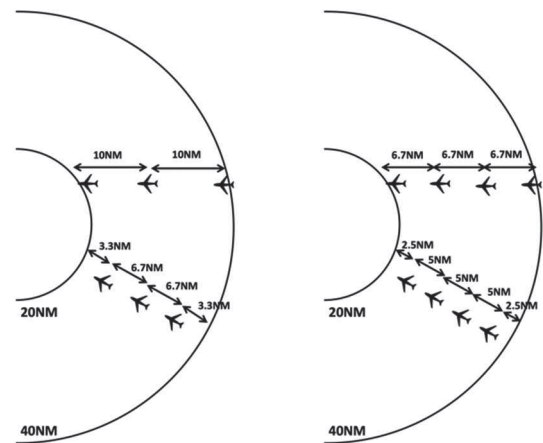


図4 イントレイル間隔の削減

図4に表すように、現状では20NMに2,3機の到着機が飛行しており、仮に3機がイントレイルで飛行している場合は6.7NMから10NMの間隔になる。イントレイル間隔を20%短縮すると20NMに3,4機の到着機が飛行する。4機が飛行した場合も、5NMから6.7NMの間隔となり、例えば40NM付近で一列に並ぶ場合は、約6NMの間隔を満たせば良いことがわかる。

2.3.3 エンルート空域での条件 (Stage3)

(a) 到着順序の決定

滑走路の効率運用のために、到着の約40分前を目安に、到着順序を決定し、空港での出発機の管理と調整を行う必要がある。

羽田空港の滑走路容量について、対象としたRW34Lの1時間あたりの処理容量が36機以下である場合は、羽田の機材バランスにおいては、RECATを適用すると、現行の先着順則に基づいた到着順序づけを変更する必要がないことがわかった[7]。AMANの実装を仮定すると、RECATを導入した場合は、1時間あたり4機程度の増加が見込める。3.2章に紹介するIM運用を適用すると、1時間あたりの到着率の許容値は最大で41機と試算できる。しかし、滑走路処理容量は、空港面での安全な運用を十分に評価して設定しなければならず、ただちに容量増加を実用化できるものではない。

Stage3において取得可能な到着機の飛行情報を利用し、ターミナル空域に入域する順序を機械学習（教師あり学習）で予測したところ、

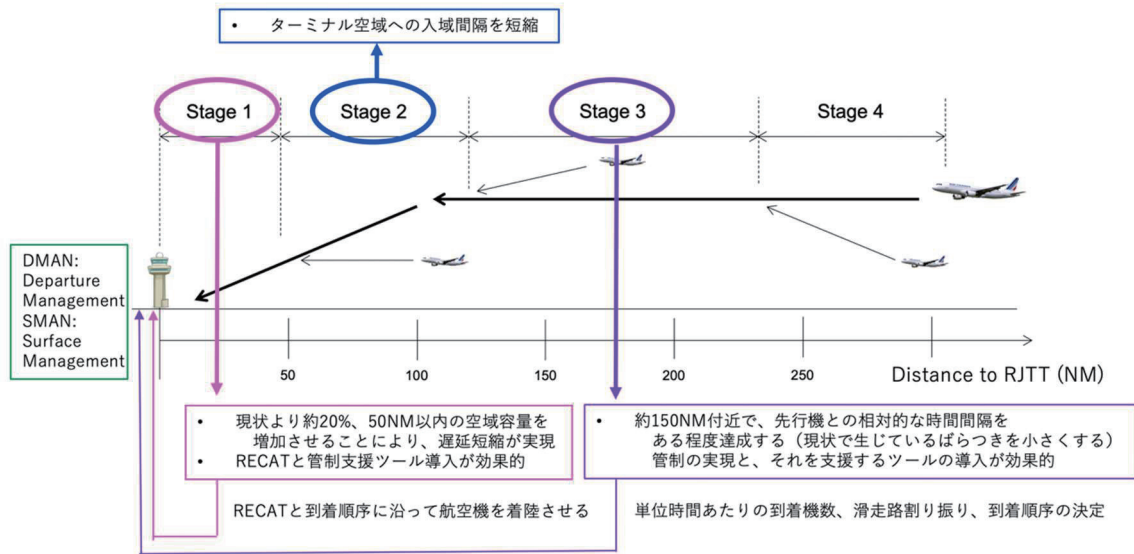


図 5 AMAN 設計条件の提案

80%以上の確率で一致することがわかった[9]。手法の改善により、より高い精度での予測が期待できる。

表 2 羽田空港の機材バランスと先着順則に基づいて実現可能な最大到着率

実装されるシステム	到着率の許容値 (1時間あたりの機数)	
	RECAT あり	RECAT なし
なし	35	32
AMAN	36~38	32~33
IM	41	36

(b) 滑走路割り振り

Stage 3 で到着順序を決定する際に、同時に滑走路割り振りを決定する必要がある。通常、南西方面からの到着機は RW34L を使用するが、RW34R に 1 時間あたり 3 機を割り振る（同時に、RW34R に北方面から到着する国際便 3 機を RW34L に割り振る）ことで、到着遅延時間を削減することが示された。

(c) 到着間隔のばらつきを削減

Stage3 で決定した到着順序（滑走路割り振りを含む）に基づいて、先行の到着機との時間間隔のばらつきを削減する到着管理が、到着交通全

体の遅延時間削減に有効であることがわかった [3, 4]。これは、2.3.1 章に示した、ターミナル空域の容量増加と同等の効果がある。

文献[4]では、羽田空港から 150NM 以遠のエンルート空域において、実現可能な範囲で到着間隔のばらつきを削減すると、ターミナル空域の容量を 10% 拡大するよりも遅延時間の削減に効果的であることがわかった。具体的には、Stage3 において、到着間隔のばらつきを削減する目的での速度制御の適用が有効である。

2.3.4 AMAN 設計条件のまとめ

2.3.1, 2.3.2, 2.3.3 章に提案した各段階における AMAN 設計条件を、以下にまとめ、図 5 に表す。

(a) エンルート空域 (Stage3) : 羽田空港から約 150NM 以遠の空域で、到着順序と滑走路割り振りを決定し、到着間隔のばらつきを（速度制御により）削減する。

- 北風運用時は、RW34L 滑走路容量が 1 時間あたり 36 機以下であれば、先着順則に基づく到着順序を変更する必要はない。
- 1 時間あたり 3 機程度の RW34L と RW34R の滑走路変更が、到着交通流全体の遅延時間削減に有効である。

(b) ターミナル空域 (Stage1 および Stage2) : 先行機との管制間隔を短縮する。

- RECAT 管制間隔を適用し、先行機との最小間隔を削減することで、現状の空域・滑走路容量においても、遅延削減と滑走路の有効活用に寄与できる。
- 空域容量を拡大できると、遅延削減効果が大きくなる。

3 研究成果の応用

3.1 ASEAN 地域の到着交通流管理

3.1.1 LRATFM

ASEAN 地域では、シンガポールチャンギ国際空港を対象とした到着管理である LRATFM (Long-Range Air Traffic Flow Management) の研究開発が進められている[13, 14]。LRATFM は、指定した FIX において目的通過時刻 (TTO: Target Time Over) を達成するよう、エアラインと管制機関が連携する運用である (図 6 参照)。そこで、本研究の手法を応用し、ドレスデン工科大学および南洋理工大学と共同で、LRATFM 運用概念を提案した[13-15]。

3.1.2 巡航機の FIX 通過時刻指定と AMAN

提案した LRATFM 運用概念では、まず TTO を達成する FIX (TTO 地点) を決定した。管制によるメタリングが発生するよりも遠方の空域での時間調整が適切であるとし、チャンギ空港より約 220NM 遠方の FIX を TTO 地点に決定した。つまり、約 220NM 以遠の空域から到着する航空機に TTO を設定し、220NM 以内の空域から出発する近距離便は、出発時刻の調整、および AMAN による到着間隔づけを行う。提案手法により、ターミナル空域の混雑を緩和できることを示し[14][15]、研究成果をまとめて ICAO に提供した[13]。

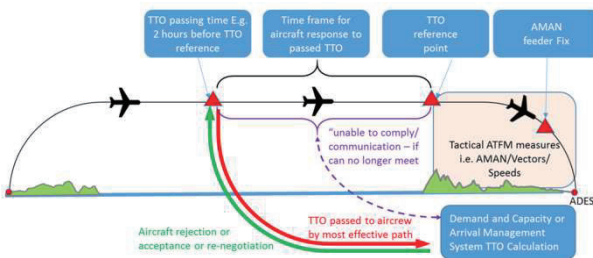


図 6 LRATFM の概念[14]

3.2 ICAO 国際基準の策定

3.2.1 航空機監視応用システムと AMAN

AMAN を応用する将来運用として、航空機の自律飛行である航空機管理応用システム (ASAS: Aircraft Surveillance Application System) が期待されている。

ASAS は、ADS-B を介して、航空機が飛行情報を送受信するシステムである。さまざまな ASAS 応用方式が検討されており、AMAN と連携する運用を IM (Interval Management) という。

3.2.2 IM

IM の概要を図 7 に表す。管制官は、パイロットに、「B 機は A 機の後、90 秒の間隔をつけて滑走路に着陸せよ」というように、到着順序と間隔づけの目標を指示すると、パイロットはコックピットに設置された IM 用アビオニクスを操作し、速度調整を実施する。このように、IM では、到着管理を指示するのが管制官であるため、AMAN の地上システムへの実装が前提条件となる。

そこで、本研究成果を ICAO SP AIRB (Surveillance Panel Airborne Surveillance Working Group) がまとめる IM 国際基準策定に反映し、2020 年度に刊行したマニュアルの執筆に貢献した[10]。さらに、複数の技術資料を提供するなど[2-4, 11-13]、研究成果を広く社会還元した。

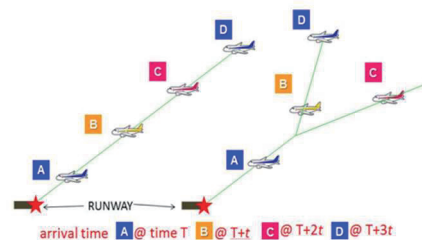
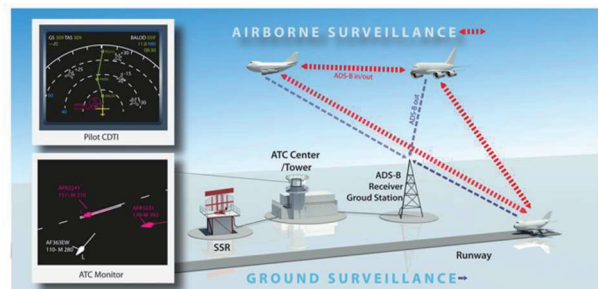


図 7 ASAS (上図) と IM (下図) の概念

4 今後の展望

4.1 AMAN/DMAN/SMAN 統合運用

本研究では、到着管理に注目して空港の効率運用を目指したが、到着遅延時間を短縮する滑走路・ターミナル空域の容量拡大については、空港における出発管理（DMAN: Departure Management）と空港面の管理（Surface Management）にも言及すべき課題である。特に、RW34Lは、第3ターミナルの出発・到着機が横断するため、安全な空港面運用との両立を議論すべきである。そこで本研究結果を発展させ、令和3年度より重点研究「到着・出発・空港面の交通管理（AMAN/DMAN/SMAN）統合運用に関する研究」を実施し、より効率的な空港運用の実現を目指す。

4.2 HITL シミュレーション実験評価

エンルート空域（Stage 3）において、到着間隔のばらつきを小さくする戦略的な速度制御を実現するために、運用手法やレーダー卓のHMI設計などを検討し、統合管制情報処理システムへの実装も含め、実現性を評価しなければならない。そこで、本研究では、ユーロコントロール実験研究所と連携し、レーダー卓を模擬するHITL（Human-In-The-Loop）シミュレータを導入した。令和3年度から開始する重点研究では、HITLシミュレータ実験によるAMAN評価を実施し、社会実装を目指す。

5 むすびに

本稿は、羽田空港を対象としたAMAN設計条件を明らかにした。さらに、研究手法と成果をASEAN地域の到着管理システムの設計やICAO国際基準策定に応用した。本研究成果を発展させ、令和3年度に開始する重点研究を実施し、空港の効率運用への寄与を目指す。

謝辞

本研究を実施するにあたり、航空局のご関係各所から、データ提供や技術支援を頂きました。ご協力に感謝いたします。

参考文献

- [1] Eri Itoh, Yoshikazu Miyazawa, Michael Finke, and Juergen Rataj, “Macroscopic Analysis to Identify Stage Boundaries in Multi-Stage Arrival Management”, Air Traffic Management and Systems IV, Springer nature, 2020 (in press)
- [2] Eri Itoh and Mihaela Mitici, “Queue-Based Modeling of the Aircraft Arrival Process at a Single Airport”, Aerospace, 6(10), 103, 2019; <https://doi.org/10.3390/aerospace6100103> .
- [3] Eri Itoh and Mihaela Mitici, “Evaluating the Impact of New Aircraft Separation Minimum Available Airspace Capacity and Arrival Delay”, The Aeronautical Journal, 124(1274), pp.447-471, April 2020.
- [4] Eri Itoh and Mihaela Mitici, “Analyzing Tactical Control Strategies for Aircraft Arrivals Using Queue-based Modeling”, Journal of Air Transport Management, 89(101938), October 2020.
- [5] 宮沢与和, 伊藤恵理, “確率モデルによる到着交通流の制御性能の解析と予測”, 日本航空宇宙学会論文集, 68巻6号, pp. 213-222, 2020.
- [6] Katsuhira Sekine, Furuto Kato, Kota Kageyama, Eri Itoh, “Data-driven Simulation for Evaluating the Impact of Lower Arrival Aircraft Separation on Available Runway and Airspace Capacity”, Under review, 2021.
- [7] 加藤古都, “東京国際空港の滑走路処理容量の推定と待ち行列モデルによる到着遅延予測”, 東京大学工学部 学士論文, 2020年11月.
- [8] 日笠航希, “待ち行列モデルに基づく東京国際空港への到着流分析と改善策の提案”, 東京大学工学部 学士論文, 2020年11月.
- [9] 森川暢明, “機械学習を用いた航空機の到着時間予測”, 東京大学工学部 学士論文, 2020年11月.
- [10] International Civil Aviation Organization (ICAO), “Manual on Airborne Surveillance Applications”, Doc 9994, Chapter 3 Interval Management, 2020.
- [11] Eri Itoh and Takuya Otsuyama, “Designing Ground-based Interval Management (GIM) for aircraft arrival traffic at Tokyo International Airport”, International Civil Aviation Organization (ICAO) Information Paper, SP-AIRB8-IP/05, September 2020.
- [12] Eri Itoh and Takuya Otsuyama, “International Civil Aviation Organization ICAO, “Manual on Airborne Surveillance Applications”, Doc 9994, Chapter 3 Interval Management, 2020.
- [13] Eri Itoh, Michael Schultz, Srinivas Athota, and Vu Duong, “Ground-based Interval Management (GIM) related international collaborative research targeting arrivals at Singapore Changi International Airport” International Civil Aviation Organization (ICAO) Information Paper, SP-AIRB WG/10-IP/01, September 2020.
- [14] Michael Schultz, Daniel Lubig, Judith Rosenow, Eri Itoh, Srinivas Athota, VuDuong, “Concept of a Long-Range Air Traffic Flow Management”, SESAR Innovation Days, December 2020.
- [15] Eri Itoh, Michael Schultz, Srinivas Athota, Vu Duong, “Devising Strategies for Aircraft Arrival Processes via Distance-based Queuing Models”, SESAR Innovation Days, December 2020.