

1 1. 航空交通流管理と到着間隔づけの相互運用性の検討

航空交通管理領域 虎谷 大地, ※岡 恵
首都大学東京 武市 昇

1 序論

航空機が空港や空域の処理容量を超えて到着すると、ホールディング等による空中待機が発生する。空中待機を行うと航空機は燃料消費を余計に消費する。非効率な空中待機を抑制し、円滑な交通流を維持するための一手法として、我が国においては出発時刻調整等により到着空港における混雑を避ける、航空交通流管理 (Air Traffic Flow Management: ATFM) が実施されている[1]。ATFMは航空機が離陸する数時間から数十分前に調整を行うことから、戦略的な交通管理であると言える。

一方、戦術的な交通管理として、近年、到着管理 (Arrival Management: AMAN)、空港面管理 (Surface Management: SMAN)、出発管理 (Departure Management: DMAN) といったコンセプトの研究開発が盛んに行われ、世界的に一部実用化されている。これらの交通管理は円滑な交通流の形成に貢献するが、各フェーズの交通管理同士が協調し合わなければ、一部に負荷が集中したり、不整合による非効率が発生したりする可能性があるため、相互に連携する必要がある。本稿ではそのような連携ができる性能を相互運用性と呼ぶこととする。特に将来の軌道ベース運用では、出発から到着まで事前に調整された最適な軌道に沿って航空機が飛行するとされているため、戦略的な ATFM と、戦術的な各交通管理の相互運用性が重要となってくる。

そのようなコンセプトのひとつが米国で提案されている Integrated Demand Management (IDM) である[2]。IDM では戦略的な ATFM を担っている Traffic Flow Management System (TFMS) と、戦術的な ATFM である Time Based Flow Management (TBFM) を協調させることが検討されている。TFMS とは米国の National Airspace System におけるデータ共有システムであり、そのサブシステムとして、出発の数時間から数十分前までの戦略的 ATFM を担う機能を有して

いる。戦略的 ATFM では、Miles-in-Trail/Minutes-in-Trail や、Ground Delay Programs (GDP) といった Traffic Management Initiatives (TMIs) と呼ばれる各手法を用いて、航空交通需要と空港・空域容量のバランスを行っている[3]。TBFM は米国の様々な空港に実装されている戦術的な ATFM であり、到着交通流の順序付けと間隔付けを行っている[4]。到着順序付けは、メタリングフィックスと呼ばれる合流点と滑走路上における適切な間隔維持を考慮しつつ、First-come first-served (FCFS) ルールに従って実施されている。

米国の空域では国際線到着機に比べて、GDP によって地上待機可能な国内線の方が待機させられる傾向にあり不利益を被っていると言われている。IDM コンセプトでは Required Time of Arrival (RTA) 等の機能を用いて航空機の軌道、及び到着時刻を調整することで、国際線と国内線の不公平をバランスすることが提案されており、様々なシミュレーション環境を用いた検証がなされている[5]。

本研究の目的は、戦略的な ATFM と、近い将来導入が予定されているポイントマージシステム (Point Merge System: PMS) の相互運用性を検討することである。PMS はいわゆる AMAN ではないが、到着前に合流する航空機の間隔付けに用いられるため、ATFM と PMS が互いに与える影響の検証、及び両者の連携は重要であると考えられる。本稿では ATFM と PMS を連結したシミュレーション環境の構築について述べる。各パートのシミュレーション手法を示し、両者を連結したシミュレーションの例を示す。

2 研究背景

2.1 航空交通流管理

本研究では ATFM 手法として、出発制御時刻 (Expected Departure Clearance Time: EDCT) 割り当てと、Calculated Fix Departure Time (CFDT)

割り当てを扱う。

現在の日本のATFMでは、空港や空域の処理容量を超える交通需要が予想されたとき、国内空港から出発する航空機に対してEDCTの割り当て等を実施している。予定されていた出発時刻よりも遅いEDCTを割り当てることで、到着空港や空域の容量超過を抑制することができる。

図1にCFDT割り当てのイメージ図を示す。CFDT割り当てにおいてパイロットは、管制官の指示によりCFDTフィックスと呼ばれる特定のフィックス上空を、CFDTと呼ばれる特定の時刻で通過することが要求される。ただし、割り当てられたCFDTが達成不可能な場合、パイロットはその旨を管制官に伝え、CFDTを達成可能な時刻に変更する、達成可能な範囲でCFDTに近い時刻での通過を目指す等の措置がとられる。

CFDT割り当ては過去に、フィックス離脱時刻の指定による航空交通流管理方式 (Specifying CFDT for Air Traffic Flow Management: SCAS) という名称で2011年から試行されていたが、いくつかの技術的課題により2014年に中断されている。現在、ATFMシステムとCFDT割り当ての運用手順の改良が行われており、再開が検討されている。

2.2 PMSによる到着間隔づけ

現在、空港周辺における到着交通流の間隔づけは主に、管制官のレーダー誘導による飛行経路の延伸で行われている。しかしながら近い将来、増加し続ける航空需要に対応しつつ、管制官ワークロードの抑制やより柔軟な運用に対応するために、PMSの導入が予定されている。

PMSとは図2に示すような、合流点と合流点から等距離にあるシーケンシングレグで構成される到着経路を用いた、到着交通流の管理手法である。管制官は、シーケンシングレグ上のどのウェイポイントから合流点に向かうかをパイ

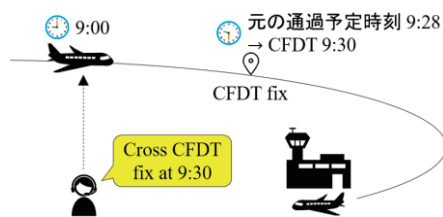


図1 CFDT割り当てのイメージ

ロットに指示するだけで経路延伸ができるため、比較的容易に合流する航空機間の間隔をつけることができる。PMSは、従来のベクタリングベースの間隔づけと比べて柔軟性の観点で劣るものの、パイロット・管制官のワークロード増やさずに、より精度の高い交通流を形成することができると言われている[6]。

2.3 航空交通流管理と到着間隔づけの相互運用性と本研究の目的

CFDT割り当ての再開及びPMSの導入後、ATFMと到着段階における間隔づけの運用環境が現在とは大きく変わると予想される。将来の運用環境においては、到着空港における容量超過が予想される時、現在の運用でも行われているような国内空港を出発する航空機に対するEDCT割り当てが行われる。一方、我が国の管制空域に入域時には既に飛行している国際線に対しては、CFDTの割り当てが実施される。CFDTフィックス通過後、全ての到着航空機はPMSに入域し、管制官によってPMS上で間隔づけと合流が行われる。このとき、ATFMシステムは到着空港や空域の容量を超過しないようにEDCT・CFDT割り当てを行うが、仮にEDCT・CFDT割り当てが上手く働かなかった場合、PMSは超過した容量を吸収しきれず、その結果ホールディングによる空中待機が発生する可能性がある。効率的な運用環境を構築するため、EDCT・CFDT割り当てと、PMSの相互運用性を検証する必要がある。そのため本研究では、ATFMとPMSを模擬するシミュレータを作成し、両者をあわせてシミュレーションすることで、ATFMとPMSの相互運用性を出発から到着までの交通流として評価することを目指す。

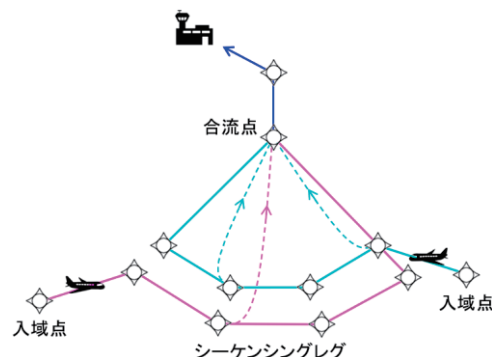


図2 ポイントマージシステム

3 シミュレーション手法

3.1 軌道シミュレータ

本シミュレーションでは航空機の軌道を、EUROCONTROL により開発された Base of Aircraft Data (BADA) 3 と、気象庁提供の数値予報を用いて計算する[7, 8]。数値予報はメソスケールモデル (Mesoscale model: MSM) のものを用い、軌道計算に必要な風の推定に利用する。図3に軌道シミュレータの計算の流れを示す。

3.2 ATFM シミュレータ

実際の ATFM を模擬するため、本シミュレータでは EDCT・CFDT を以下のように計算する。

- シミュレーションへの入力として、交通流における各航空機の航空機型式、フライトプラン（経路と巡航高度）、国内線に対しては出発予定時刻、日本到着の国際線に対しては福岡飛行情報区 (Flight Information Region: FIR) への入域予定時刻を設定する。
- 各航空機の軌道を、3.1 で述べた軌道計算手法を用いて PMS の入域点まで計算する。ここで計算された到着時刻をオリジナルの到着予定時刻 (Estimated time of arrival: ETA) と仮定する。
- ATFM システムでは時刻の計算が 1 分単位で行われるため、PMS の入域点におけるオリジナルの ETA を 60 秒で丸める。この時の ETA を ETA_{round} とする。
- 各航空機の ETA_{round} を FCFS で並べ、もし ETA_{round} の間隔が最小間隔 Δt_{min} より小さい場合、後ろの航空機の ETA を Δt_{min} を満たすように遅延させる。本シミュレーションでは Δt_{min} を 2 分と設定する。
- Δt_{min} を満たすために ETA を遅延させる遅延時間をプッシュバック時間 t_{PB} とする。この

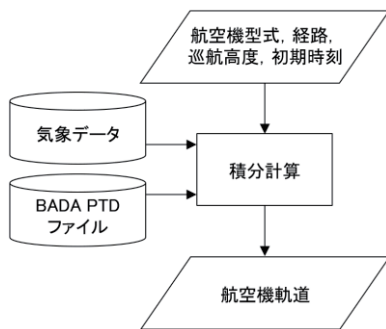


図3 軌道シミュレータの計算の流れ

「プッシュバック」とは、空港面における航空機のスポットからの後退移動ではなく、ETA 列における時間の後ろ倒しを指していることに注意されたい。もし t_{PB} が PMS の最大吸収時間 t_{maxAbs} より大きくなったとき、EDCT・CFDT 割り当てによって $t_{PB} - t_{maxAbs}$ の遅延を吸収する。 t_{maxAbs} は PMS における吸収可能な飛行時間であり、本シミュレーションでは 8 分と設定する。ただし、地上で航空機を待機させる EDCT 割り当てと異なり、CFDT 割り当てが航空機を遅延させられる量は限られているため、CFDT 割り当ての最大遅延吸収可能時間は、福岡 FIR 入域から PMS の入域点までの残り飛行時間 30 分あたり 1 分とする。基本的に到着順序は FCFS で決定されるが、この CFDT 割り当ての最大遅延吸収可能時間の制約により、国際線の順序が繰り上がることもある。

図4に EDCT の計算の流れを示す。CFDT も同様の手順で計算されるが、上述の最大遅延吸収可能時間の制約がある。EDCT・CFDT の計算後、EDCT・CFDT が付加された後の到着予定時刻 ETA_{ATFM} は以下のように計算される。

$$ETA_{ATFM} = ETA_{round} + t_{PB}, \quad (1)$$

ただし、航空機は様々な不確実性により必ずしも ETA_{ATFM} ちょうどに到着できるとは限らないため、実際の到着時刻 (Actual time of arrival: ATA) を以下のように計算する。

$$ATA = ETA_{ATFM} + err_{dep} + err_{flt}, \quad (2)$$

ここで err_{dep} は割り当てられた EDCT と実際の出発時刻の誤差を表しており、以降 EDCT 誤差と呼ぶ。 err_{flt} は飛行中に発生する飛行時間誤差を表す。

図5に ATFM シミュレーションの計算例を示す。この例では HND に到着する 416 便の交通流が示されている。 err_{dep} と err_{flt} は 0 とした。上段の図は交通流全体を表しており、横軸が時刻、縦軸が PMS 入域点までの距離を表している。中段と下段は ATFM ありと無しの結果の拡大図を表している。中段の図では EDCT も

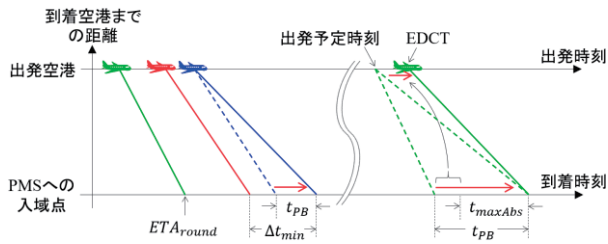


図4 EDCT計算のイメージ

CFDTも割り当てられていないため、航空機がPMSへの入域点における間隔を保つことができていない。一方、ATFMありの結果では、EDCTとCFDTを割り当てることにより、適切な間隔を保つことができています。

3.3 PMSシミュレータ

東京国際空港到着のためのPMS経路は実際にはまだ公示されていない。そこでPMSを模擬するため、図6に示す先行研究[9]で用いられていたHND RWY34Lに接続するPMS経路を用いてシミュレーションを行う。この経路はシミュレーションで利用するために設計されたもので、周辺空域や周辺交通流との干渉を考慮していない。実運用において、北風運用時にRWY34Lは主に西から到着する航空機の着陸専用滑走路として使用されているため、本シミュ

レーションにおいてもPMSからの着陸専用滑走路として使用する。PMSには2つの入域点があり、それぞれの入域点に対する経路がある。経路1をマゼンタ、経路2をシアンで示しており、両方の経路は合流点で合流する。入域点と合流点にはそれぞれ、図に示すように高度の制約を設けている。滑走路に着陸する航空機は先行機との適切な間隔を保つ必要がある。この時の間隔は、表1に示す、前後の航空機のサイズの組み合わせによって決まる後方乱気流間隔を満たさなければならない。

PMSによる到着交通流を模擬するため、本シミュレータでは以下のように計算を行う。

- シミュレーションへの入力として、各航空機の型式、どちらの入域点から入域するか、入域時刻を設定する。
- 最初に全航空機の軌道を、3.1で示した軌道シミュレータを用いて、最短経路に沿って計算する。この時、軌道は高度の制約を満たすように計算される。
- 最短経路に沿って計算された軌道は滑走路における到着順にFCFSで並べられ、順序づけされる。

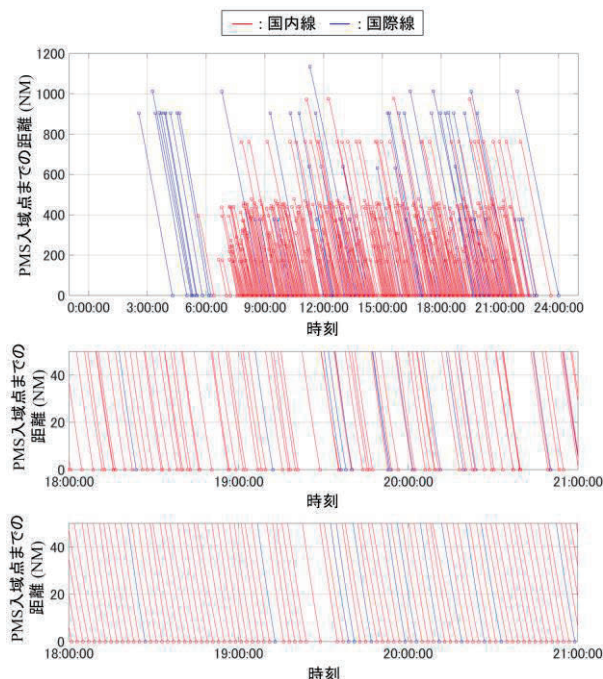


図5 ATFMシミュレーションの例
(上段：全ての交通流，中段：ATFM無しの拡大図，下段：ATFMありの拡大図)

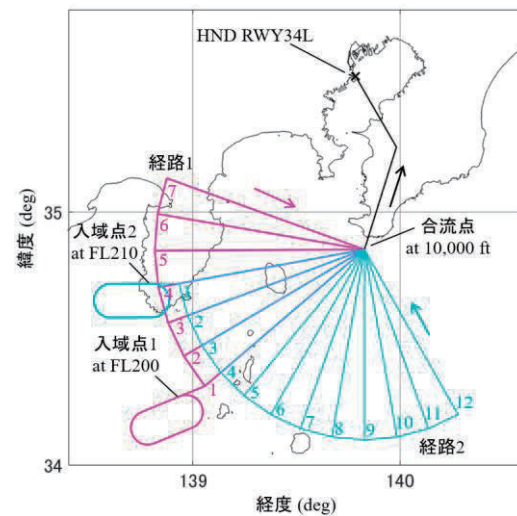


図6 PMS経路

表1 後方乱気流間隔 [10]

後続機 \ 先行機	Heavy	Medium	Light
Heavy	4 NM	5 NM	6 NM
Medium	3 NM	3 NM	5 NM
Light	3 NM	3 NM	3 NM

- もし滑走路における航空機の間隔が後方乱気流間隔より小さい場合、軌道は後方乱気流間隔を満たすまで、シーケンシングレグを通る、より長い経路に沿って再計算される。例えば経路 1 の場合、もし最短経路（入域点 1－ウェイポイント 1－合流点－滑走路）で飛行した軌道が間隔を満たせていない場合、軌道はウェイポイント 2 を通る経路に延伸されて再計算される。ウェイポイント 2 を通る経路でも間隔を満たせない場合、ウェイポイント 3 を通る経路で再計算される。最も遠いウェイポイントを経由しても間隔を満たせない場合、航空機は入域点でホールディングされる。軌道生成において、シーケンシングレグを飛行中の航空機は水平飛行を行うものと仮定する。
- 航空機の間隔が後方乱気流間隔を満たしたとき、通過経路が確定される。

図 7 に PMS シミュレータのシミュレーション例を示す。各航空機は適切な間隔を保ちつつ合流点で合流して滑走路にアプローチするために、異なる経路を通っていることが分かる。また、高度の制約を満たすため、各軌道は適宜レベルオフしていることが分かる。

3.4 ATFM・PMS 連結シミュレーション

EDCT・CFDT 割り当てと PMS の相互運用性を検証するため、ATFM シミュレータと PMS シミュレータを連結してシミュレーションを行う。連結シミュレーションでは、ATFM シミュレーションにより計算された交通流を PMS シミュレーションの初期条件として設定する。

本シミュレーションでは、例えば ATFM の性能が PMS に与える影響を検証することができると期待される。ATFM により到着機の交通量が調整されるため、PMS においても円滑な交通流が形成されると予想されるが、3.2 で述べたような err_{dep} や err_{flt} が大きく発生すると、PMS において滞留が発生する可能性がある。これらの誤差の設定を変化させてシミュレーションを行うことで、EDCT・CFDT がどれくらいの精度で守られると、PMS において滞留が発生しないかを検証することができる。

4 シミュレーション

4.1 シミュレーション条件

ATFM・PMS 連結シミュレーションで得られる結果を示すため、簡単なシミュレーション例を示す。シミュレーション条件として、CARATS オープンデータの 2015 年 5 月のある日のデータより仮想的な交通流シナリオを作成した。本シミュレーションでは HND RWY 34L に到着する航空機のみを対象とした。当該日には約 400 便が RWY34L に到着していた。

ATFM シミュレーションを行う際、国内線に対しては出発予定時刻を設定するが、CARATS オープンデータは各空港からの出発予定時刻を含んでおらず、また当該日には ATFM による EDCT 割り当てが実施されていた可能性があるものの、本シミュレーションでは各航空機の軌道の最初の 1 点を出発予定時刻と仮定してシナリオを作成した。同様に日本到着の国際線に対しては、福岡 FIR へ入域した時刻を入域予定時刻とした。 err_{dep} 、 err_{flt} に関しては、実際のデータを元に誤差の確率密度分布を作成し、その分布から各航空機に対する誤差を生成して割り当てた。シミュレーション例では err_{dep} と err_{flt} の影響を検証するため、誤差無しとありで計算を行った結果を示す。

4.2 シミュレーション結果

図 8 に、 err_{dep} と err_{flt} 無しとしたときの、1 日分のシミュレーションで得られた軌道を示す。ATFM シミュレーションにおいて国内線は EDCT 割り当てによって、国際線は CFDT 割り当てによってのみ制御されており、飛行途中の干渉は考慮していないので、全ての航空機は標準的な経路に沿って飛行している。一方 PMS 入域後は、滑走路での間隔付けのために、各航空機が様々な経路に沿って飛行していることが分かる。

表 2 にシミュレーション結果を示す。各行は PMS 内における全航空機の飛行距離の和とホールディングが発生した回数を示している。PMS 内では航空機の到着時刻を遅らせるために飛行距離を延伸するため、全航空機の飛行距離の和が大きいということは、PMS が吸収すべき遅延が増えていることを示す。

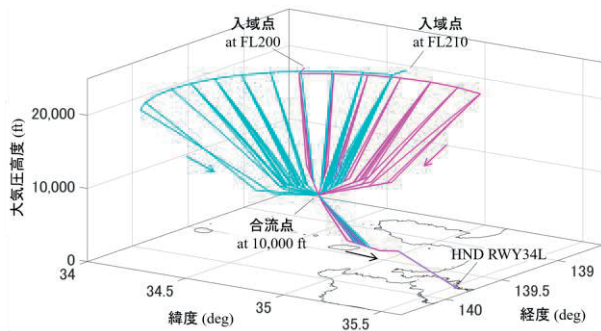


図7 PMS シミュレーションの例

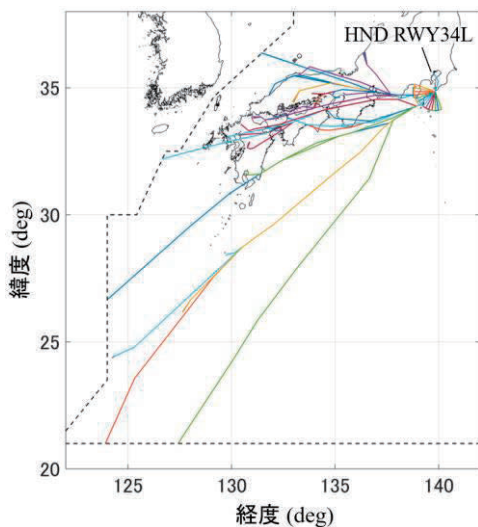


図8 シミュレーション結果

表2 シミュレーション結果

	誤差 無し	誤差 あり
PMS 内における全航空機の 飛行距離の和 (NM)	43,725	48,356
ホールディング 回数 (回)	0	2

err_{dep} , err_{flt} があると飛行距離の和が大きくなっているの、これらの誤差により PMS 内で吸収すべき遅延が増えていることを示している。また同様に err_{dep} , err_{flt} があると、PMS 内でホールディングが発生していることが分かる。この結果は特定のシナリオに対しての一例であるが、 err_{dep} , err_{flt} が発生すると、PMS で吸収すべき遅延が大きくなり、その結果ホールディングが発生する可能性があるという結果が示された。

本シミュレーションで示した結果は、 err_{dep} , err_{flt} があると効率が悪化するということを指しているわけではない。出発から到着の全

フェーズにおいてどこで超過需要による遅延を吸収するかは、全体的な ATFM・PMS の設計に関わるものと考えられる。例えば、PMS 内でホールディングを発生させない運用を目指す場合、 err_{dep} , err_{flt} を小さくする必要がある。この誤差をどれだけ小さくすべきかという値は、EDCT・CFDT 割り当てに対する要求仕様の一部となる。本稿で提案したようなシミュレーションを行うことで、ATFM・PMS の相互運用性に関わる機能の要求を検討できるようになり、ATFM と PMS が相互運用可能な運用環境の設計に資すると期待できる。

5 まとめ

本稿では ATFM と到着段階における到着間隔づけの相互運用性を検証するためのシミュレーション環境を提案した。近い将来の運用環境をシミュレーションするため、ATFM として EDCT 割り当てと CFDT 割り当てを模擬し、到着間隔づけとして PMS を模擬した。また ATFM と PMS を連結してシミュレーションすることで、ATFM と PMS の運用が互いに与える影響を定量的に示すことを目標としている。

シミュレーション例として、1 日分の HND RWY 34L に到着する交通流シナリオを作成し、ATFM・PMS 連結シミュレーションを行った。シミュレーション結果は EDCT・飛行時間誤差が発生すると、PMS 内でホールディングが発生し得ることを示した。このような検討は、将来の運用環境を設計するために有効であると考えられる。

今回のシミュレーションでは簡易的なシナリオを用いていたので、今後はより現実的で、かつ様々な交通流に対するシナリオを用いて検証を進めていく。

参考文献

- [1] “航空交通流管理 (ATFM),” 国土交通省, http://www.mlit.go.jp/koku/15_bf_000346.htm 1 (参照, Apr. 2019)
- [2] N. M. Smith, C. Brasil, P. U. Lee, N. Buckley, C. Gabriel, C. Mohlenbrink, F. Omar, B. Parke, C. Speridakos, and H.-S. Yoo, “Integrated Demand Management: Coordinating Strategic

- and Tactical Flow Scheduling Operations,” AIAA AVIATION Forum, 16th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference, Washington, D. C., 2016.
- [3] M. Novak and J. Shea, “Traffic Flow Management System (TFMS),” FAA Industry Forum, Virginia, 2014.
- [4] Federal Aviation Administration, “NextGen Portfolio - Time Based Flow Management,” <https://www.faa.gov/nextgen/snapshots/portfolios/?portfolioid=11> (accessed Apr. 2019)
- [5] C. Moehlenbrink, B. Parke, H.-S. Yoo, C. Brasil, N. Buckley, C. Speridakos, F. Muro, G. Hodell, P. U. Lee, N. M. Smith, “Evaluation of Integrated Demand Management looking into Strategic & Tactical Flow Management,” 12th USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar (ATM Seminar), Washington, 2017.
- [6] L. Boursier, B. Favennec, E. Hoffman, A. Trzmiel, F. Vergne, and K. Zeghal, “Merging Arrival Flows without Heading Instructions,” 7th USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar (ATM Seminar), Barcelona, 2007.
- [7] EUROCONTROL Experimental Centre (EEC), “User Manual for the Base of Aircraft Data (BADA) Revision 3.12,” EEC Technical/Scientific Report No. 14/04/24-44, 2014.
- [8] 気象庁, “数値予報モデルの種類,” <https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/whitep/1-3-4.html> (参照, Feb. 2019)
- [9] 蔭山, “到着機処理の高速シミュレーション・モデル,” 第52回飛行機シンポジウム, 1A13, 2014.
- [10] International Civil Aviation Organization (ICAO), “Air Traffic Management,” Doc 4444, 15th Edition, 2007.