

2022 年度 学位論文（修士）

航空交通流管理における  
時間管理アルゴリズムの検討

2023 年 1 月 27 日

東京都立大学大学院

システムデザイン研究科 システムデザイン専攻

航空宇宙システム工学域 博士前期課程

20863614 櫻井隆介

指導教員 武市昇 教授

# 目次

1. 緒言.....	1
1.1 背景.....	1
1.2 本研究の目的.....	2
1.3 本論文の構成.....	3
2. 使用するデータおよび ATFM の模擬.....	4
2.1 実運航データ.....	4
2.2 気象予報データ.....	4
2.3 BADA モデル.....	5
2.4 出発時刻誤差.....	6
2.5 飛行時間予測誤差.....	7
2.6 シャドーオペレーションデータおよび到着時刻予測誤差.....	10
2.7 メタリング.....	15
3. 航空交通流の評価指標.....	17
3.1 到着間隔および到着間隔のばらつき.....	17
3.2 セクター内調整時間.....	18
3.3 セクター内調整超過時間.....	18
3.4 キャパシティロス.....	19
3.5 運航コスト.....	19
3.6 メタリング調整時間.....	20
4. 航空交通流管理における時間管理アルゴリズムの検討と評価.....	21
4.1 航空交通流管理における様々な時間管理アルゴリズム.....	21
4.2 様々な時間管理アルゴリズムの評価手順.....	22
4.3 各評価結果および考察.....	24
4.3.1 到着間隔の評価.....	24
4.3.2 セクター内調整時間・セクター内調整超過時間の評価.....	26
4.3.3 キャパシティロスの評価.....	27
4.3.4 運航コストの評価.....	28
4.3.5 セクター入域までの運航コストの考察.....	30
4.3.6 各アルゴリズムの考察.....	31
4.3.6 到着間隔のばらつきと遅延時間と運航コストの関係.....	35
4.4 理想的な時間管理アルゴリズム.....	37

5. 結言 .....	39
参考文献 .....	40
謝辞 .....	41

## 1. 緒言

### 1.1 背景

今日の航空交通需要はアジア太平洋地域を中心に世界的に拡大傾向にあり、我が国の航空交通量も 2027 年までに 2005 年の約 1.5 倍に達すると予測されている<sup>[1]</sup>。これに伴い、管制処理容量不足や航空機の遅延などの問題が顕在化しつつあり、航空交通量の増大や効率的な航空サービスの実現をするために航空交通システムの大胆な変革が必要となっている。そして、分割された空域および予め定められた経路に基づく航空管制を基本とする、空域ベースの航空交通管理（ATM：Air Traffic Management）に代わる新たな運用方式として、軌道ベース運用（TBO：Trajectory Based Operation）が考えられている。これは、我が国の飛行情報区（FIR：Flight Information Region）の全体を一つの空域として捉え、全ての航空機の出発から到着までを一元的に管理するとともに、全飛行フェーズにおいて時間を基準として管理するという運航概念である。初歩的な軌道ベース運用として、交通量制御をすることによりセクター内の管制処理容量の超過を未然に防ぐ航空交通流管理（ATFM：Air Traffic Flow Management）がこれまでに実施されている<sup>[2]</sup>。ATFM における交通量制御の手段として、出発時刻制御（EDCT：Expected Departure Clearance Time）および飛行時間制御（CFDT：Calculated Fix Departure Time）が挙げられる<sup>[2]</sup>。EDCT とは、離陸前の航空機に対し本来の予定出発時刻より遅い時刻を出発時刻として与えることにより出発を遅らせる制御方式である<sup>[3][4]</sup>。また CFDT とは、飛行中の航空機に対し間隔調整セクターまでの途上にある特定ウェイポイント（CFDT Fix）の通過時刻を指示することにより遅延させる制御方式である<sup>[3][4]</sup>。しかし、CFDT はアルゴリズムが複雑で、管制指示のやり直しが生じ、かえって管制官のワークロード増加していたため、2014 年度から 2020 年 6 月まで中断されていた。2021 年度以降は時間管理運航の実現への取り組みとしてシャドーオペレーション<sup>[5]</sup>（実際には CFDT を行わないものの、地上システムで CFDT を計算し、管制官とパイロット間で管制指示のやり取りのみを行うこと。）が実施された。また、ATFM を実施する際には出発時刻誤差や飛行時間予測誤差といった不確かさを避けることができず、その影響を考慮する必要がある。そこで、不確かさを緩和する時間管理手法として CFDT に代わるメタリングによる到着時刻管理が提案されている<sup>[6]</sup>。メタリングとは巡航区間を飛行する航空機に対して先行機との安全な間隔設定のための間隔調整である。

## 1.2 本研究の目的

本研究では、航空交通流管理における時間管理アルゴリズムに焦点を当てる。CFDT に代わる時間管理運航として、メタリングによる到着時刻管理が検討されているが、アルゴリズムの確立には至っていない。そこで様々なパターンの時間管理手法を模擬した解析を行い、効率的なアルゴリズムの提案することを本研究の目的とする。対象とするのは、交通流制御実施回数の最も多い、東京国際空港（羽田空港）に到着する西方面からの便である。これらの便が関東南セクター（T09, T10）に入域し、ウェイポイント ADDUM を経由するものと仮定する（図 1）。不確かさは、出発時刻誤差、飛行時間予測誤差、到着時刻予測誤差の 3 種類を扱う。出発時刻誤差とは、EDCT と実際の離陸時刻との乖離時間であり、主に航空機が駐機場からタキシングを行い、滑走路から離陸に至るまでの管制官からの待機指示によって生じる。飛行時間予測誤差とは、航空機がある距離を飛行する場合の予測飛行時間と実際の飛行時間の差である。到着時刻予測誤差とは、管制官またはパイロットが予測する到着時刻と実際の到着時刻の差である。

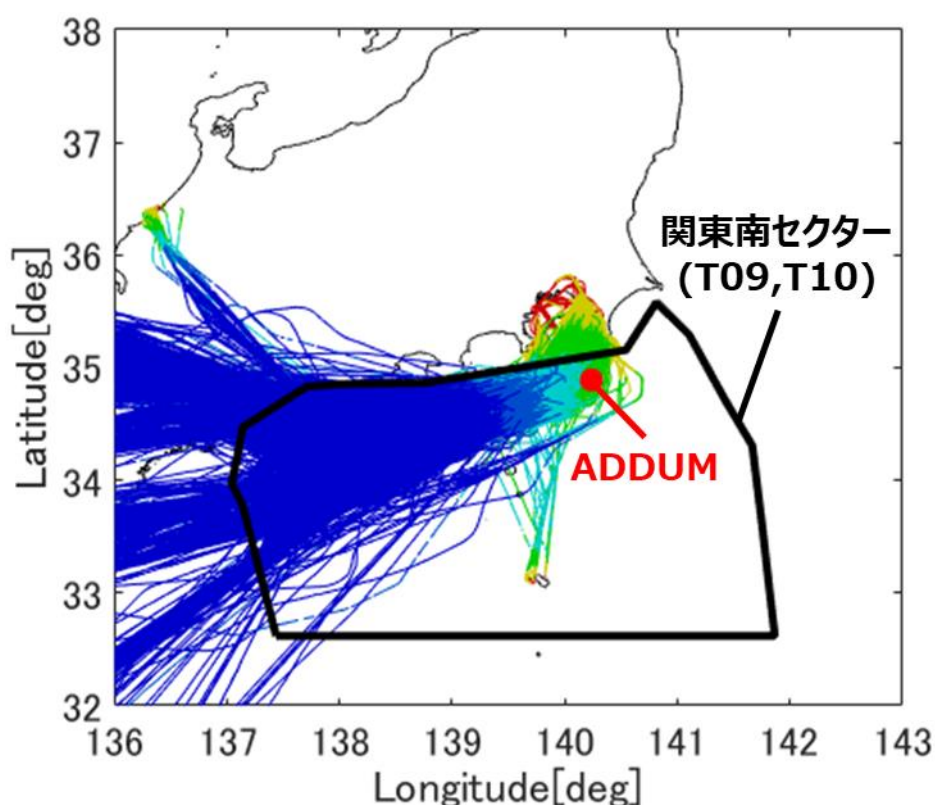


図 1 東京国際空港（羽田空港）に到着する西方面からの便，関東南セクター，ウェイポイント ADDUM

### 1.3 本論文の構成

第 2 章では，使用するデータおよび ATFM の模擬の説明を行う．第 3 章では，航空交通流の評価指標について述べる．第 4 章では，時間管理アルゴリズムの各シミュレーションにおける条件を説明し，結果と考察を述べる．第 5 章では，これまでの章で得られた結果を総括し結論を述べる．

## 2. 使用するデータおよびATFMの模擬

### 2.1 実運航データ

本研究では、国土交通省交通局が提供している航空機のレーダーデータである、CARATS Open Data を使用する<sup>[7]</sup>. 日本が管轄する福岡飛行情報区(FIR:Flight Information Region)を飛行中の航空機の、ある時刻における緯度・経度・気圧高度・機種の情報が約 10 秒間隔で格納されている. 2019 年 4 月～2020 年 1 月のデータ(各月 1 週間 計 70 日)を対象とする. 2020 年 2 月および 3 月のデータは、世界的に大流行した新型コロナウイルス(COVID-19)の影響が考えられるため、対象外とした.

### 2.2 気象予報データ

本研究では、気象モデルとしてメソ数値予報モデル(MSM:Meso Scale Model)と全球数値予報モデル(GSM:Global Spectral Model)を使用する<sup>[8]</sup>. MSM は気象庁が公開している日本およびその近海の大気を対象としたモデルであり、北緯 22.4 度～47.6 度、東経 120 度～150 度の範囲で 3 時間毎のデータで配信されている. 緯度間隔 0.1 度、経度間隔 0.125 度であり、風や気温などの気象情報が格納されている. GSM は気象庁が公開している日本域・全球域の大気を対象としたモデルであり、日本域は、北緯 20 度～50 度、東経 120 度～150 度の範囲で 3 時間毎のデータで配信されている. 緯度間隔 0.2 度、経度間隔 0.25 度であり、風や気温などの気象情報が格納されている. 本研究では、MSM および GSM 日本域(MSM 範囲外の箇所)を使用し、線形補間を用いることで任意の位置・時刻における風・気温データを抽出し、利用する. 図 2 に MSM データの例を示す.

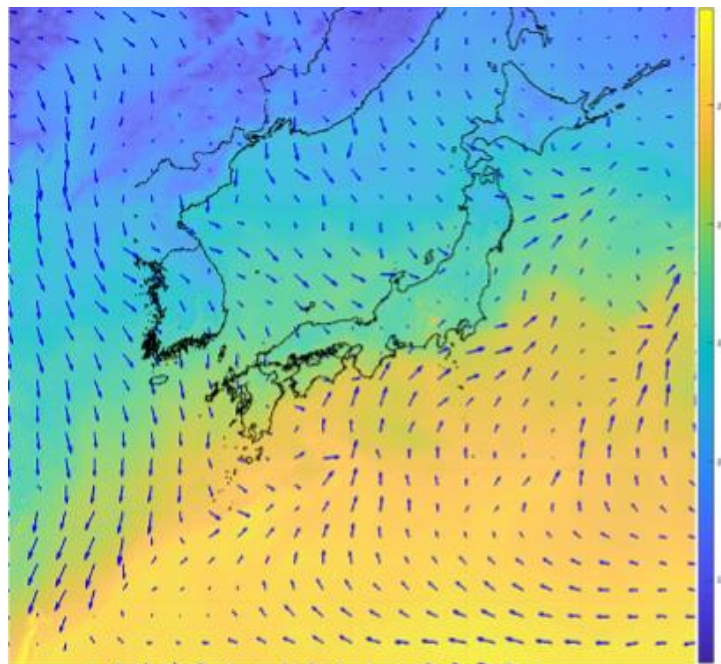


図 2 MSM のデータ

## 2.3 BADA モデル

本研究では，西方面から東京国際空港までの航空機の標準軌道を作成するにあたり，航空機運航モデルとして欧州航空法安全機構（Eurocontrol）が提供している BADA（Base of Aircraft Data）モデルを使用した<sup>[9]</sup>．CARATS Open Data の初期時刻・初期三次元座標，BADA モデル，MSM・GSM を利用し，上昇，巡航，降下の標準的な軌道（BADA 標準軌道）を作成した．BADA モデルには，標準質量時の標準的な真対気速度 $V_{TAS}$ や上昇降下率 $ROCD$ 等の飛行時のパラメータが含まれる．それらの値と MSM/GSM の気象予報データより得られる風速 $V_W$ は，位置，高度，時間の関数で表せるため，以下の式(1)の微分方程式をたてることができる．これを解くことにより BADA 標準軌道を作成する．

図 3 に飛行軌道予測の流れを示す．また，図 4 に BADA 標準軌道を示す．なお本研究では，図 4 のように，すべての航空機は，航空路設計法として一般的である RNAV（広域航法）航路に従って飛行しているものとする．

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{h} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{TAS}(h) + V_W(x, h, t) \\ ROCD(h) \end{pmatrix} \quad (1)$$

$V_{TAS}$  : 真対気速度 [m/s]       $V_W$  : 風速 [m/s]  
 $ROCD$  : 上昇率 [m/s]

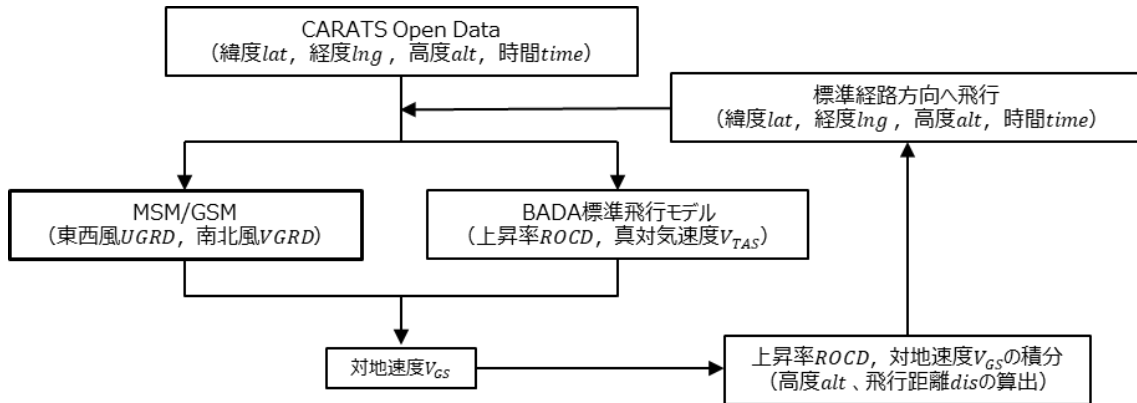


図 3 飛行軌道予測の流れ



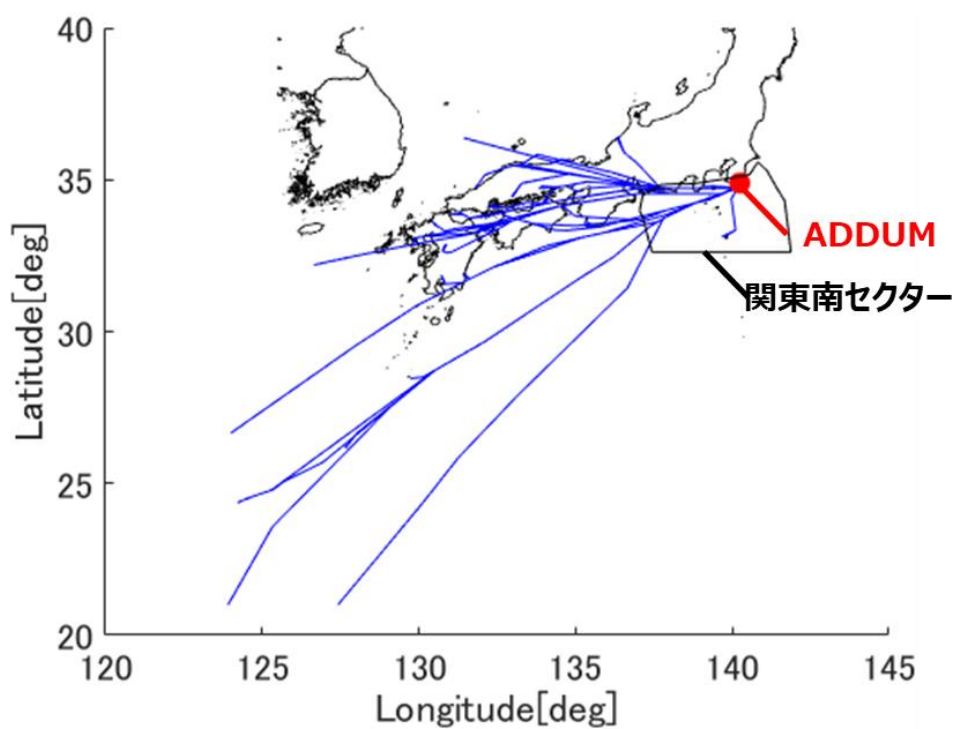


図 4 BADA 標準軌道

## 2.4 出発時刻誤差

不確かさの 1 つである出発時刻誤差は、前章で述べたように、EDCT と実際の離陸時刻の差である。国土交通省航空局提供の出発時刻乖離データからモデルを作成し、利用する<sup>[10]</sup>。出発時刻誤差は、以下の図 5 に示すように、-1 分から+20 分の範囲を扱うものとする。

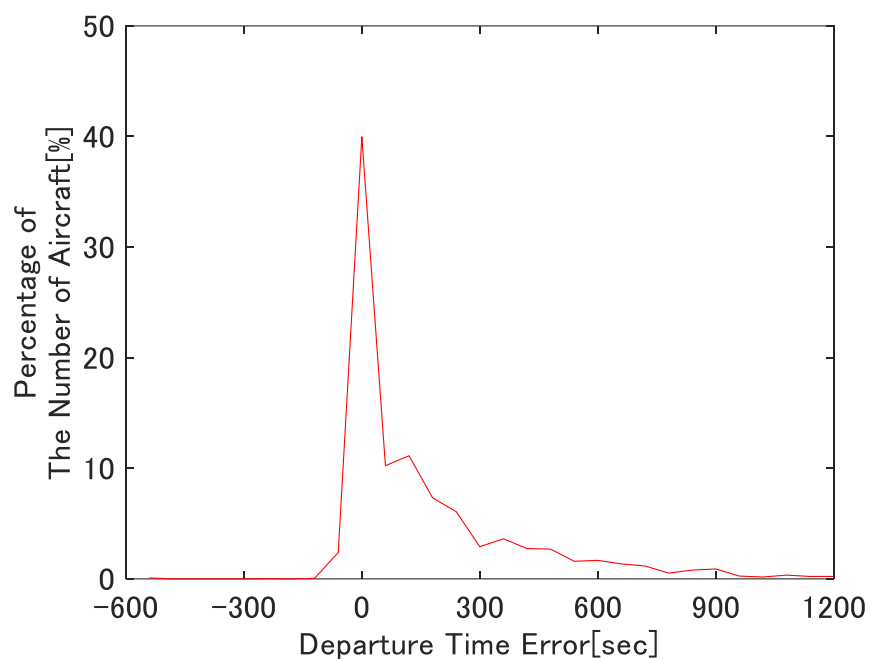


図 5 出発時刻誤差

## 2.5 飛行時間予測誤差

2 つ目の不確かさである飛行時間予測誤差は、前章で述べたように、ある距離を航空機が飛行する場合の予測飛行時間と実際の飛行時間の差である<sup>[11]</sup>。航空機で扱う速度は、指示対気速度 $V_{IAS}$  (Indicaeted Air Speed), 真対気速度 $V_{TAS}$  (True Air Speed), 対地速度 $V_{GS}$  (Ground Speed) の 3 種類がある。指示対気速度 $V_{IAS}$ は、機体に装備されているピトー管により算出された速度で、パイロットが機上で確認できる速度である。しかし、指示対気速度 $V_{IAS}$ には、高度によって変化する空気密度や気温が考慮されていない。それに対し、真対気速度 $V_{TAS}$ は、指示対気速度 $V_{IAS}$ を高度による空気密度や気温を考慮し、補正した速度である。対地速度 $V_{GS}$ は、静止した地面に対しての速度であり、式(2)に示すように真対気速度 $V_{TAS}$ と飛行方向の風速 $V_W$ の和で求めることができる。

$$V_{GS} = V_{TAS} + V_W \quad (2)$$

飛行方向の風速 $V_W$ は MSM/GSM から、予測地点における東西風 $UGRD$ と南北風 $VGRD$ を抽出し、以下の式(3)より算出する。 $tta$ は東を  $0^\circ$  とした場合の機種の方角である (図 6)。

$$V_W = UGRD \cos(tta) + VGRD \sin(tta) \quad (3)$$

BADA モデルに格納されている真対気速度 $V_{TAS}$ と MSM/GSM の風速から各地点の対地速度 $V_{GS}$ を算出し、目的地まで飛行した場合の飛行時間を $t_{pred}$ 、CARATS Open Data の実際の飛行時間を $t_{act}$ とすると、飛行時間予測誤差 $t_{flight\ error}$ は、以下の式(4)で定義される。

$$t_{flight\ error} \triangleq t_{act} - t_{pred} \quad (4)$$

また、飛行時間予測誤差の標準偏差は飛行距離に比例するという関係が他研究で明らかとなっている<sup>[11]</sup>ため、それを基に本研究では飛行時間予測誤差を各便に与えるものとする。本研究では、福岡～羽田便の実運航データと標準軌道の飛行時間のばらつきから比例係数を求めた。対象は、福岡から羽田に向かう場合の巡航区間 YOKAT から FLUTE までの 3789 便のうち、YOKAT から FLUTE までの各ウェイポイント (LUFFY, SANJI, YANKS) を通る意思のある 2766 便とし、各ウェイポイントから FLUTE までの飛行時間の標準偏差を計算した。各ウェイポイント、使用した実運航データ、BADA 標準軌道を図 7 に示す。例として、ウェイポイント YOKAT-FLUTE 間の飛行時間予測誤差の分布を図 8 に示す。この図より飛行時間予測誤差は、ほぼ左右対称の山形分布となり、平均を 0 とした正規分布として近似することができる。故に、標準偏差を基に飛行時間予測誤差を設定することが可能になる。図 9 に飛行距離に対する飛行時間予測誤差の標準偏差の関係を示す。この図より、飛行距離と飛行時間予測誤差の標準偏差が概ね比例していることが分かる。飛行距離が 0 m のときは標準偏差が 0 であることから原点を通過する直線を引き、比例係数を求めた。この時の比例係数は約  $8 \times 10^{-2}$  となった。各便の飛行距離と比例係数より飛行時間予測誤差の標準偏差を求め、中心極限定理より平均 0 の正規分布から飛行時間予測誤差を無作為に抽出し、各便に与えるものとする。例として、飛行距離 50 km, 100 km, 200 km, 300 km の時の飛行時間予測誤差の分布を示す (図 10)。

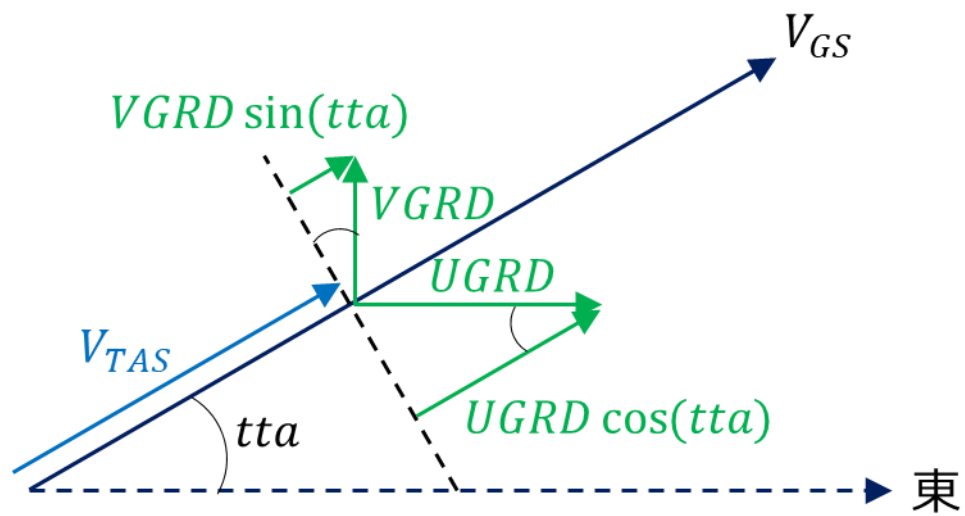


図 6 各速度と風の関係

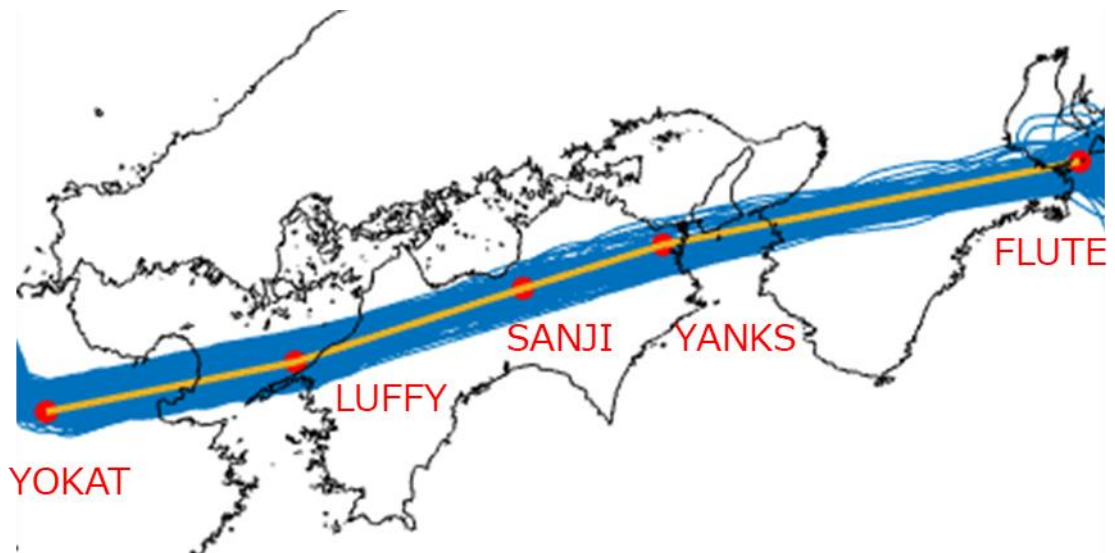


図 7 各ウェイポイント，福岡ー羽田便の実データ（青），BADA 標準軌道（橙）

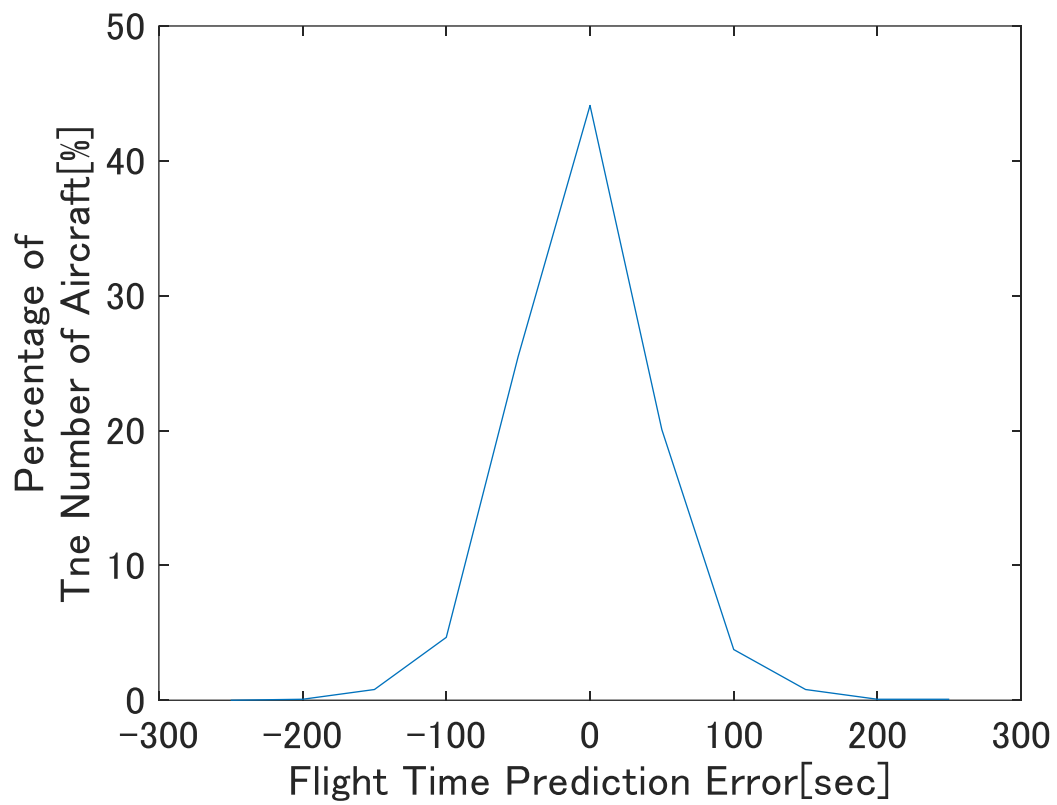


図 8 YOKAT-FLUTE 間の飛行時間予測誤差

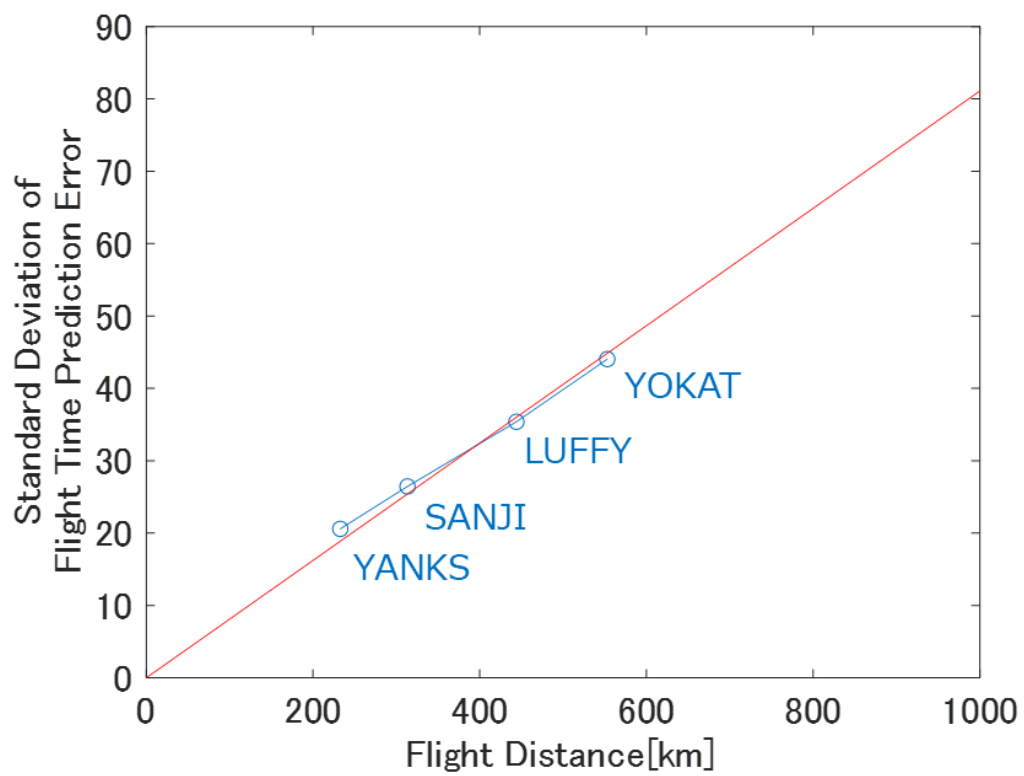


図 9 飛行距離と飛行時間予測誤差の関係

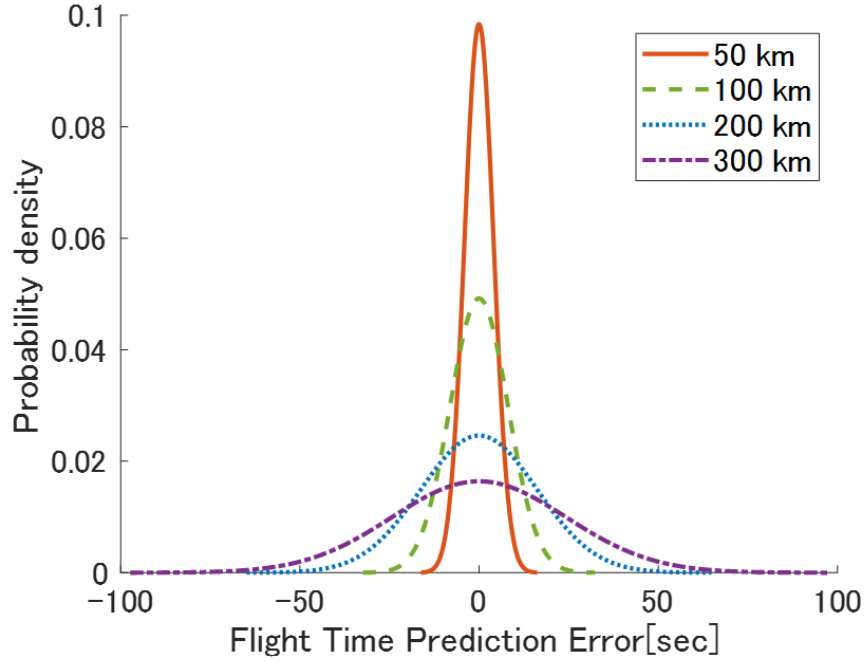


図 10 飛行距離 50 km から 300 km までの飛行時間予測誤差

## 2.6 シャドーオペレーションデータおよび到着時刻予測誤差

シャドーオペレーション<sup>5)</sup>とは、前章で述べたように 2014 年度から 2020 年 6 月まで中断されていた CFDT に代わる、時間管理運航の実現に向けた取り組みとして行われたものである。実際には CFDT を行わないものの、地上システムで CFDT を計算し、管制官とパイロット間で管制指示のやり取りのみを行う運用を指す。地上/機上データの収集および検証、システム機能の確認、航空機の速度に関するデータの取得等が主な目的である。シャドーオペレーションデータ<sup>5)</sup>とは、その際に収集されたデータのことで、国土交通省航空局が提供するものである。図 11 に示すように、データには、地上（管制官）/機上（パイロット）システムが予測する CFDT Fix の通過時刻と実通過時刻、現在速度と加減速可能な速度等が格納されている。また、図 12 にデータ取得点および CFDT Fix を示す。

本研究では、データを取得した点毎にデータを分け、到着時刻予測誤差（管制官やパイロットが予測する到着時刻と実際の到着時刻の差）の解析を行った。まず、所要時間 $t_{required}$ は以下の式(5)で示すように、データを取得した時刻 $t_{data}$ と実通過時刻 $t_{ATO}$  (ATO: Actual Time of Overfly) の差で算出し、平均値を評価した。

$$t_{required} = t_{ATO} - t_{data} \quad (5)$$

また、到着時刻予測誤差 $t_{arrival\ error}$ は以下の式(6)で示すように、地上または機上システムが予測する CFDT Fix の通過時刻 $t_{ETO}$  (ETO: Estimated Time of Overfly) と実通過時刻 $t_{ATO}$  の差で算出し、平均値および標準偏差を評価した。

$$t_{arrival\ error} = t_{ATO} - t_{ETO} \quad (6)$$

到着時刻予測誤差は、管制官およびパイロットのどちらも平均・標準偏差が所要時間に比例することが判明した（図 13, 図 14）。また、例として図 15, 図 16 に FUE-FLUTE 間の到着時刻予測誤差の分布を示す。この図より到着時刻予測誤差は、橙色の平均値を中心とするほぼ左右対称の山形分布となり、正規分布として近似することができる。故に、平均値、標準偏差を基に到着時刻予測誤差を設定することが可能になる。この時の（平均値、標準偏差）の比例係数は、管制官が約  $(6 \times 10^{-2}, 7 \times 10^{-2})$ 、パイロットが  $(-9 \times 10^{-3}, 3 \times 10^{-2})$  となった。各便の所要時間と比例係数より到着時刻予測誤差の平均値および標準偏差を求め、正規分布から到着時刻予測誤差を無作為に抽出し、各便に与えるものとする。例として、CFDT Fix までの所要時間が 20 分、40 分、60 分、80 分の時の到着時刻予測誤差の分布を示す（図 17, 図 18）。第 4 章で説明する到着時刻予測誤差を考慮する時間管理アルゴリズムを検討する際に使用する。

NO	DATE	CALL SIGN	TYPE	DEP	EOBT	ALT	CFDT FDX	CFDT
(例1)	2020/9/1	ABC1234	B788	VHHH	0:15	350	OTOWA	3:10
(例2)	2020/9/1	ABC456	B789	VTBS	1:30	370	NUMKO	⋮
1					⋮			⋮
2					⋮			⋮

DLA	CFDT 確定時刻	データ取得位置	データ取得時刻	PILOT ETO	TEPS ETO	PRESENT MACH NUMBER	ACCEPTABLE MAXIMUM MACH NUMBER	ACCEPTABLE MINIMUM MACH NUMBER	ATO	備考 (経路等)
0	2:10		2:10	3:09	3:10	M83	M85	M80	3:10	
		YULIA	7:54	8:19	8:20	M82	M85	M79	8:19	
			⋮	⋮	⋮				⋮	
			⋮	⋮	⋮				⋮	

図 11 シャドーオペレーションデータ<sup>[5]</sup>

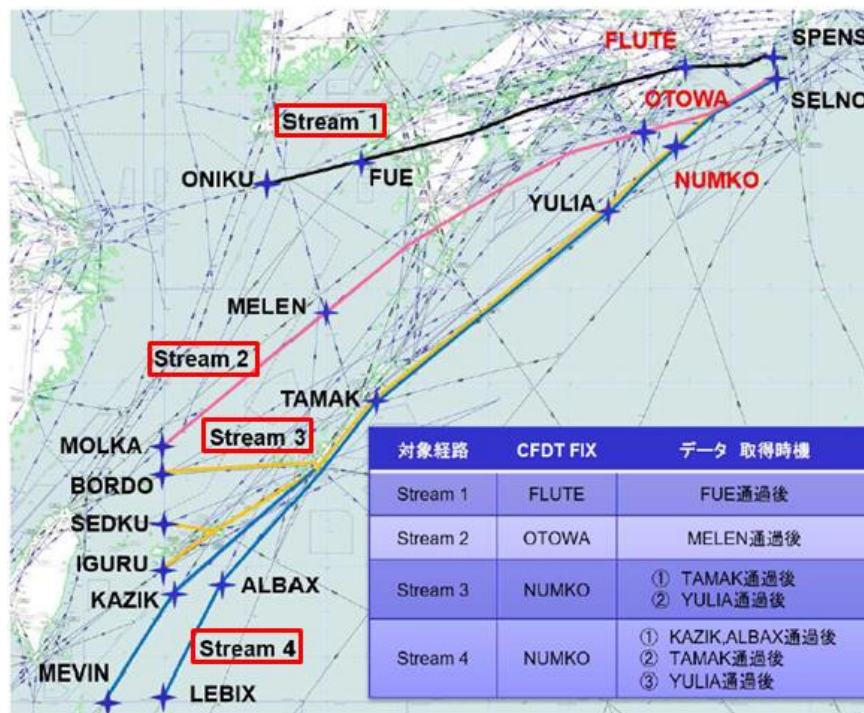


図 12 シャドーオペレーションデータのデータ取得点および CFDT Fix<sup>[5]</sup>

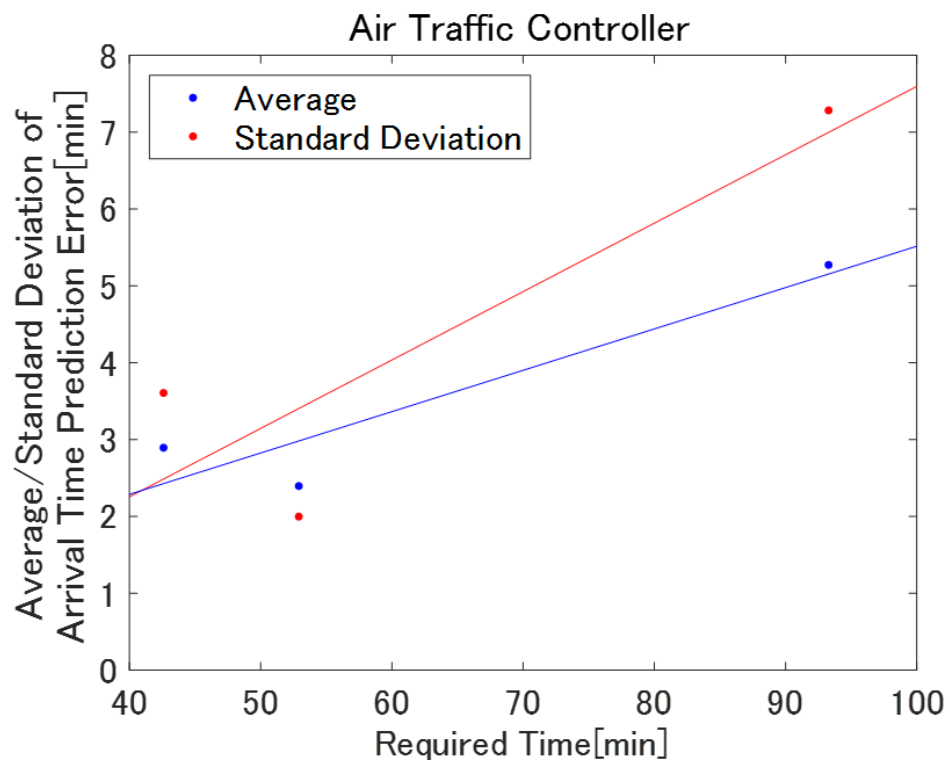


図 13 所要時間と管制官の到着時刻予測誤差の平均値および標準偏差の関係

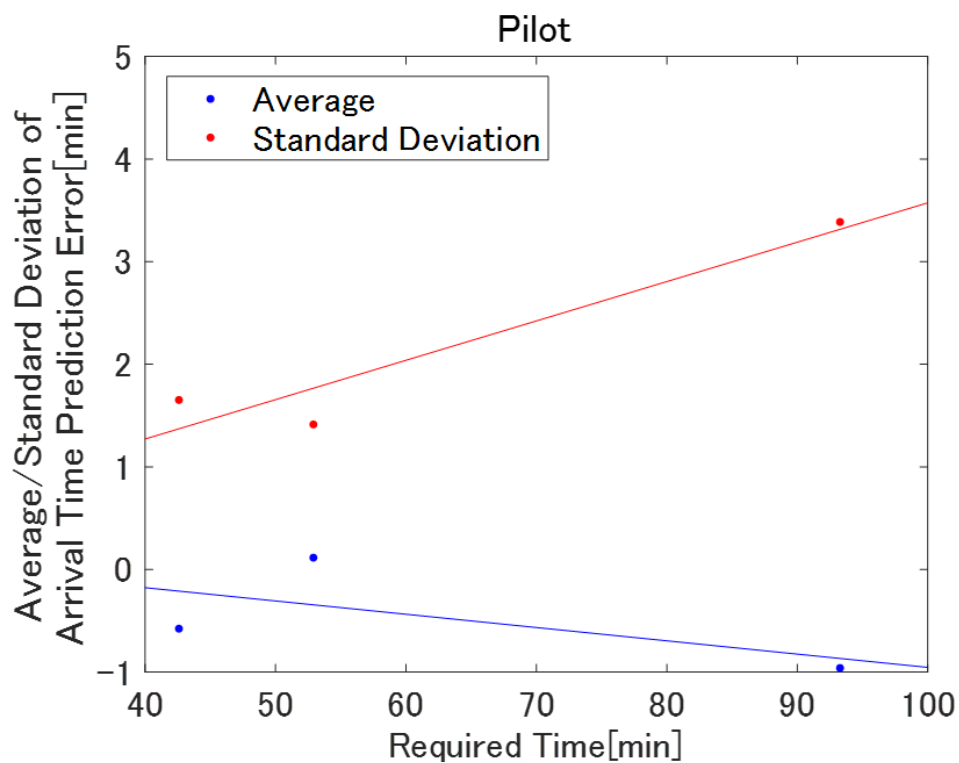


図 14 所要時間とパイロットの到着時刻予測誤差の平均値および標準偏差の関係

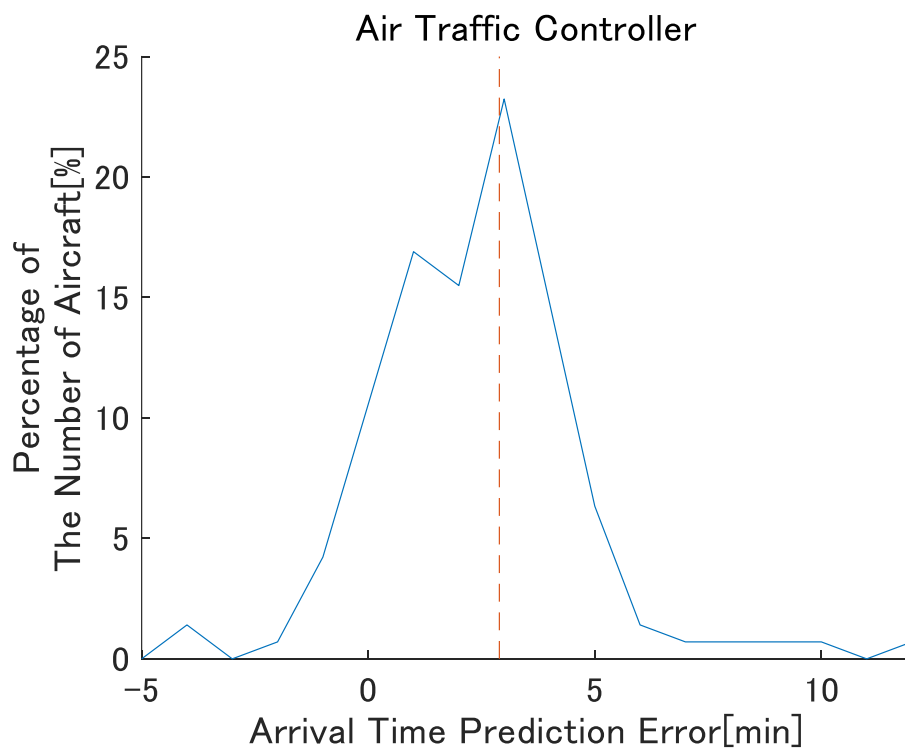


図 15 FUE-FLUTE 間の管制官の到着時刻予測誤差の分布



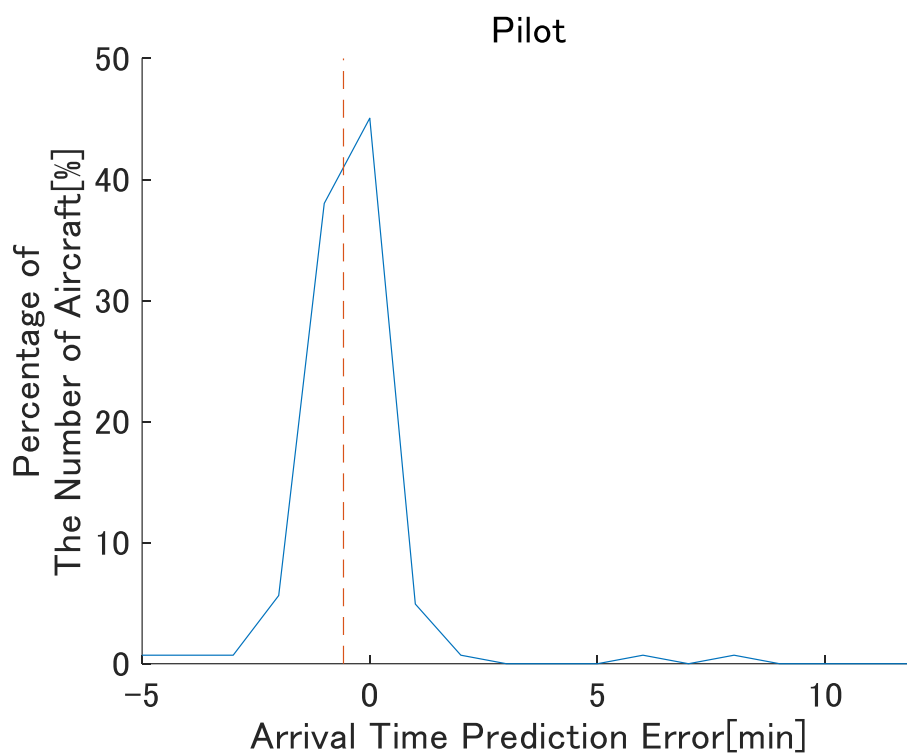


図 16 FUE-FLUTE 間のパイロットの到着時刻予測誤差の分布

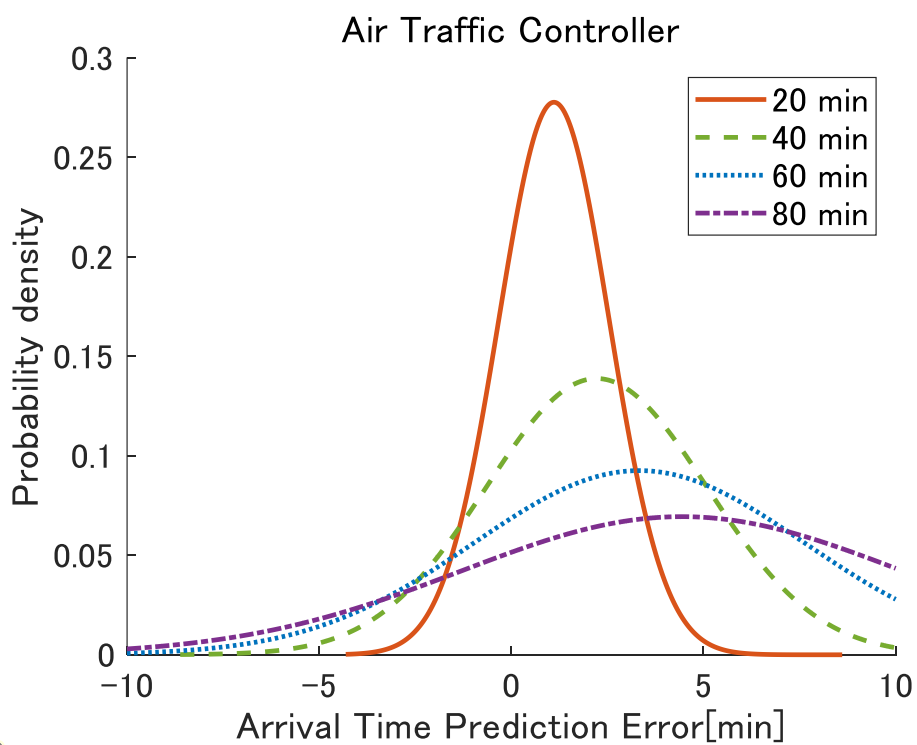


図 17 所要時間 20 分から 80 分までの管制官の到着時刻予測誤差

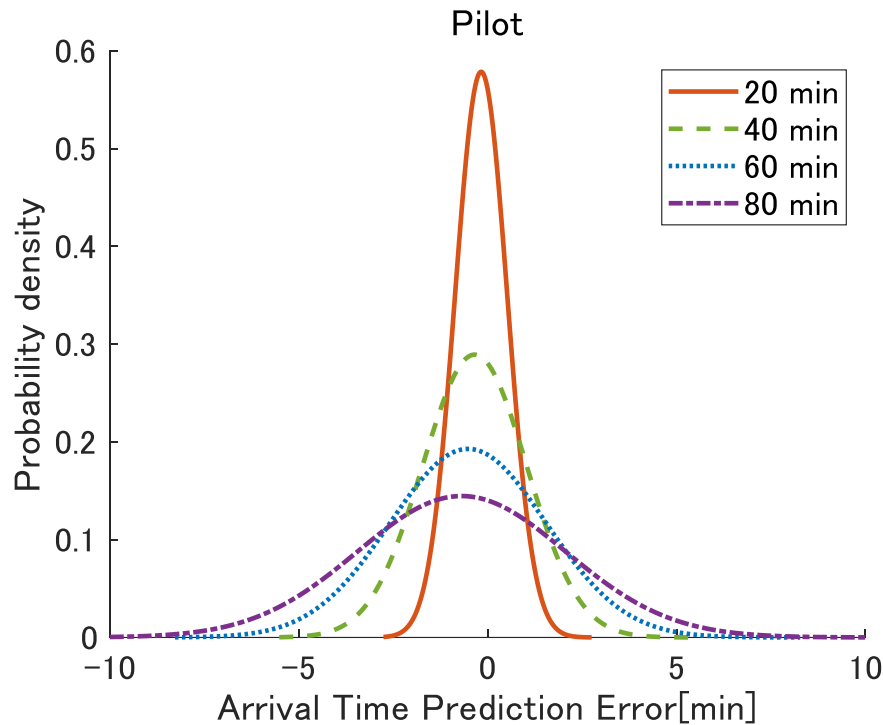


図 18 所要時間 20 分から 80 分までのパイロットの到着時刻予測誤差

## 2.7 メタリング

ATFM の不確かさを緩和する時間管理手法として、先行研究によりメタリング<sup>5)</sup>が提案されている。これは、EDCT や CFDT のコンセプトである交通量の調整ではなく、予測到着時刻に基づいた到着時刻管理である。時間管理を実施する点において到着間隔が 120 秒となるように調整すべき時間の一部を、CFDT Fix の通過時刻を指定することで、間隔調整を行う関東南セクター (T09,T10) に入域するまでに飛行時間を調整し、ATFM の不確かさを緩和する。メタリングの一連の流れの例を以下の図 19 に示す<sup>6)</sup>。また、CFDT Fix の位置を図 20 に示す。

メタリングを行う際は、既に到着時刻が決定している便 (以後「既決定便」と表現する。), 到着時刻を決定する便 (以後「対象便」と表現する。), 未だ到着時刻が決定していない便 (以後「未決定便」と表現する。) の 3 つの場合を考える。ここで、既決定便は到着予定時刻が、対象便の到着予定時刻よりも前の便を、未決定便は EDCT 時刻に基づいた到着予定時刻が、対象便の到着予定時刻よりも前の便とする。既決定便、対象便、未決定便を到着予定時刻順に並べ、対象便が先行機との間隔を調整するのに必要な時間 (以後「必要調整時間」と表現する。) を算出する。飛行時間 1 時間あたり 3 分までの延長を許容し、最大許容時間の範囲内でメタリングを行う。また、必要調整時間が最大許容時間を上回る際の調整時間の不足分は、間隔調整セクター内の管制に委ねるものとする。

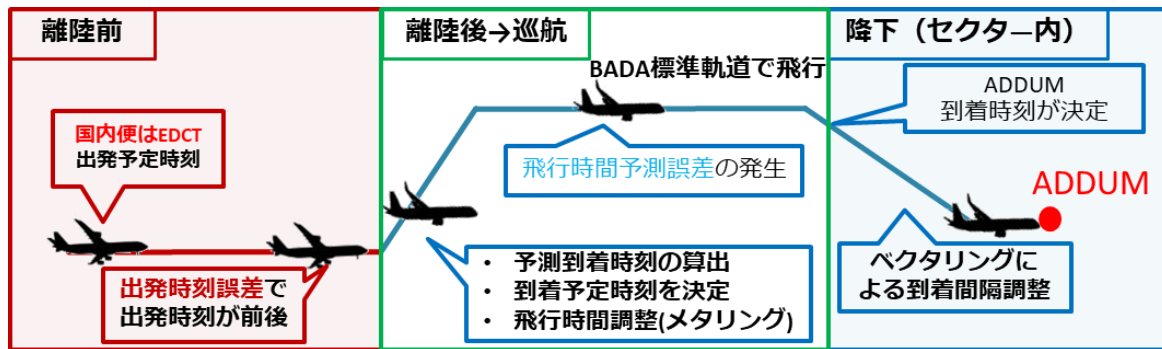


図 19 メタリングの一連の流れの例

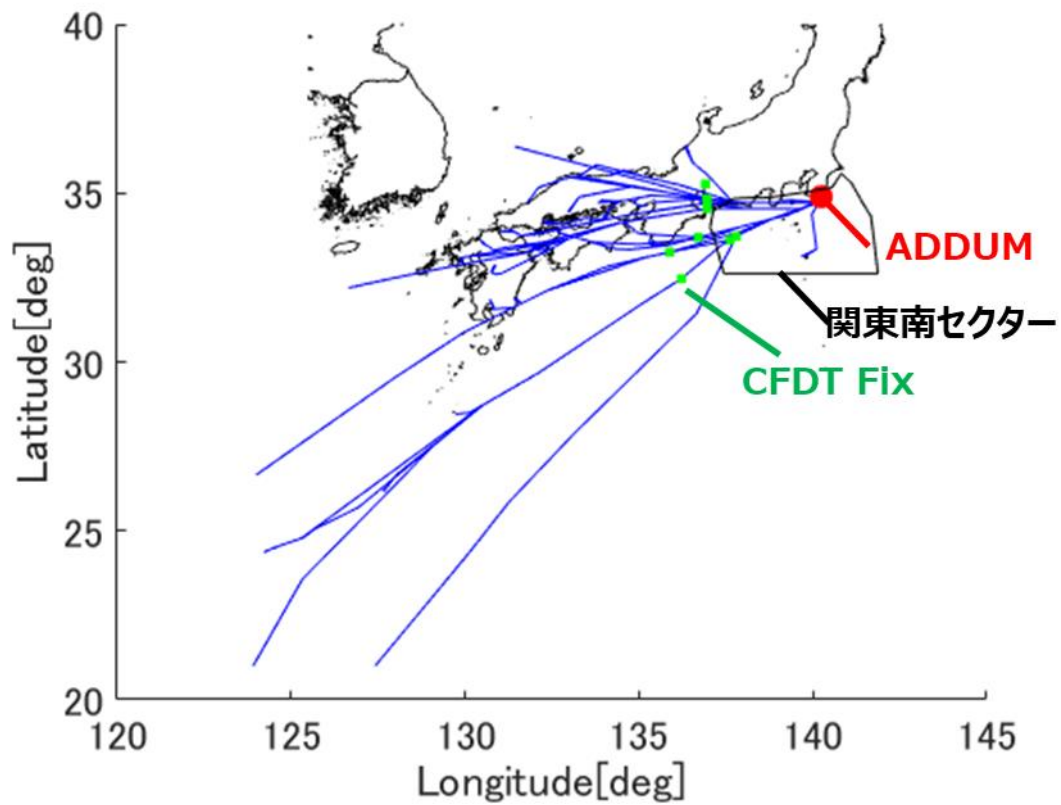


図 20 BADA 標準軌道 (青) と CFDT Fix (緑) と ADDUM (赤)

### 3. 航空交通流の評価指標

本研究の評価指標として、到着間隔、セクター内調整時間、セクター内調整超過時間、キャパシティロス、運航コスト、メタリング調整時間の6つを取り挙げる。各指標について以下で説明する。

#### 3.1 到着間隔および到着間隔のばらつき

本研究では各便のウェイポイント ADDUM への到着間隔を評価する。ADDUM 到着の理想的な時間間隔を120秒とし、対象期間70日間の便数割合で評価を行う。図21はCARATS Open Data から間隔調整を行う関東南セクター (T09,T10) への入域時刻を抽出し、セクター入域から標準軌道で ADDUM に到着した場合の到着時間間隔70日分の分布を示したものである。これはセクター内で無管制とした場合に相当する。この図より現行の時間管理運航の到着間隔がポアソン分布、つまりランダム到着となっていることがわかる。時間管理によって、無管制であっても到着間隔が120秒付近に集中することが理想的である。このようになると、セクター内で到着間隔を調整するために必要な時間が減少し、燃料消費量の削減や管制官の負荷の低減が期待される。

また、考察の過程で一部セクター入域間隔も扱う。

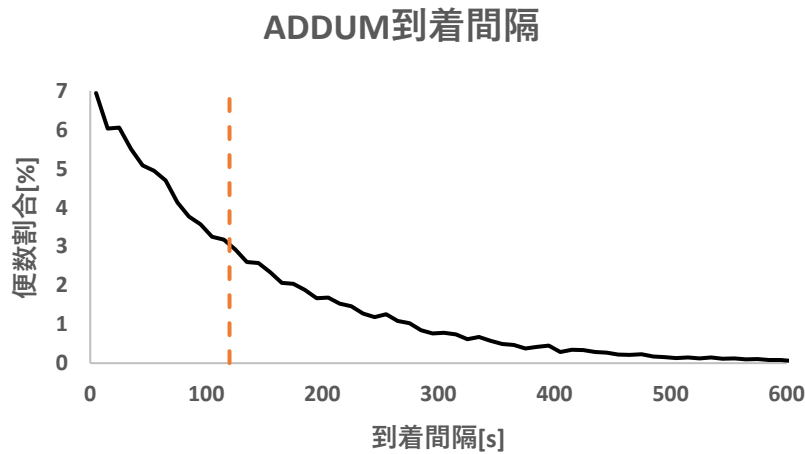


図 21 現在の到着間隔

到着間隔のばらつきは、理想的な到着間隔である120秒からのずれのRMSの全便の値で評価し、以下の式(7)で算出する。 $x_i$ は各便の到着間隔である。

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - 120)^2} \quad (7)$$

### 3.2 セクター内調整時間

前項で述べたように、関東南セクター（T09,T10）内では東京国際空港へ向かう航空機同士の間隔調整が行われる。CARATS Open Data の実際の離陸時刻に基づいて不確かさを考慮した航空交通流の模擬を行うと、図 22 に示すように ADDUM 到着間隔がばらつき、間隔が 120 秒未満となることがある。このような場合、安全に着陸を行うために間隔調整セクター内で到着間隔を 120 秒に調整する必要がある。この時、到着間隔を 120 秒とするために各便が要した飛行時間をセクター内調整時間と定義する。この指標は、セクター内の管制官の業務負荷を意味する。セクター内調整時間は、一日の調整時間の総和の、70 日間の平均で評価する。

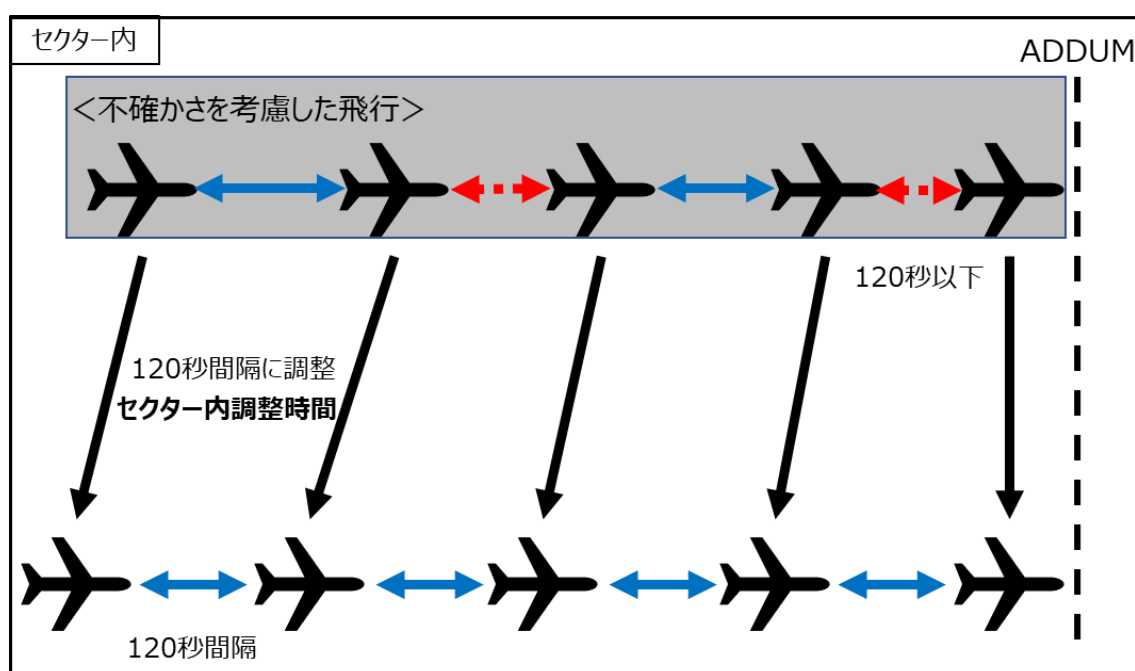


図 22 セクター内調整時間の概念図

### 3.3 セクター内調整超過時間

セクター内調整超過時間とは、セクター内調整時間がセクター内調整可能時間を超過した時間として定義する。セクター内調整可能時間とは、管制官がセクター内の航空機を適切な間隔にする際に、実現し得る調整時間の最大値のことである。セクター内調整可能時間は一般的に 540 秒とされており、本研究でもこの時間を採用する。図 23 の青色の実線はある一日（452 便）のセクター内調整時間を表したもので、橙色の破線はセクター内調整可能時間 540 秒を示している。セクター内調整超過時間は、橙色の破線を超えた調整時間と定義し、一日の調整超過時間の総和の、70 日間の平均で評価する。

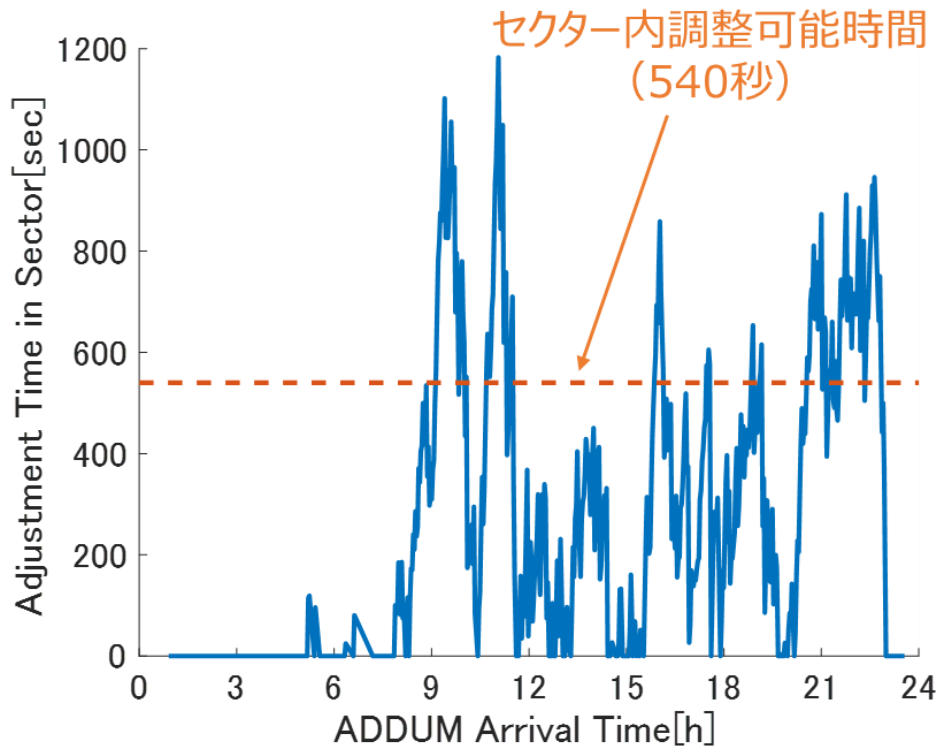


図 23 ある一日のセクター内調整時間およびセクター内調整可能時間

### 3.4 キャパシティロス

キャパシティロスは、航空機の着陸間隔が大きく開くことによる滑走路の非使用時間と定義する。キャパシティロスの増加は、滑走路運用効率の低下を意味する。キャパシティロスは、基準となる航空交通流の場合に ADDUM 到着間隔が 120 秒である便が、何かしらの航空交通流管理の制御方法を実施または変更した場合に、到着時刻が遅延し、到着間隔が 120 秒以上となった場合の到着間隔の差で定義する。キャパシティロスは、一日の総和の、70 日間の平均で評価する。

### 3.5 運航コスト

運航コスト<sup>[12]</sup>は、航空機の燃料消費量と飛行時間で定義されたコストで、重量の単位に変換し評価するものである。コストインデックス  $CI$  は機種ごとに重み付けされ、運航コスト  $J$  は式(8)で表される。

$$J = \int_0^t \mu(t) dt + \frac{CI}{79.4} t \quad (8)$$

$\mu(t)$	: 燃料流量 [kg/s]	$t$	: 飛行時間 [s]
$CI$	: コストインデックス [kg/s]		

コストインデックス $CI$ は BADA モデルで示された各機種種の参照質量をもとに、大型の機種は 80, 中型の機種は 60, 小型の機種は 40 とする。また、本研究で考慮するセクター内調整に関する情報はセクター内調整時間のみである。そこで、この過程の燃料消費量は、実運航データから各機種種のセクター内調整時間と燃料消費量を算出し、その分布に近似直線を引くことで求めた。例として、図 24 に大型機のセクター内調整時間と燃料消費量の相関および線形回帰直線を示す。決定係数は 0.84 となった。運航コストは一日の総和の、70 日間の平均で評価する。

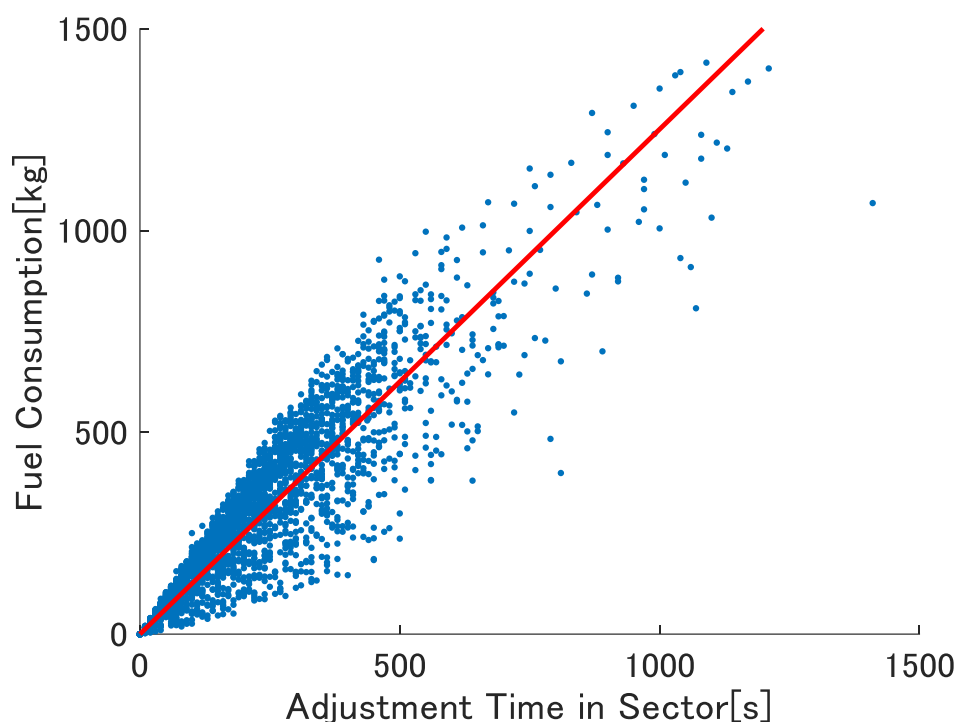


図 24 セクター内調整時間と燃料消費量の関係（大型機の例）

### 3.6 メタリング調整時間

メタリング調整時間とは、関東南セクター（T09,T10）内で予測される遅延や混雑を吸収するために、各便がセクター入域までに遅延させた時間と定義する。各便のメタリングによる延長の許容時間は飛行時間 1 時間あたり 3 分であり、許容時間の範囲内でメタリング調整時間を設定する。メタリング調整時間は、一日の総和の、70 日間の平均で評価する。

## 4. 航空交通流管理における時間管理アルゴリズムの検討と評価

### 4.1 航空交通流管理における様々な時間管理アルゴリズム

前章までで述べたように、先行研究により航空交通流管理における不確かさを解消する方法としてメタリングが提案された<sup>5)</sup>。しかし、アルゴリズムについては未だ確立しておらず、より理想的なアルゴリズムを追求する必要があると考える。そこで本章では、(1)到着時刻決定タイミング、(2)時間管理点、(3)到着時刻予測誤差、(4)指定時刻決定方法の4つのパターンについてそれぞれ2種類のアルゴリズムの航空交通流を模擬し、評価を行う。それぞれのシミュレーションの条件を以下の表1に示す。

表1 シミュレーション条件

シミュレーション条件	到着時刻決定タイミング	時間管理点	到着時刻予測誤差	指定時刻決定方法
①	離陸後	ADDUM	なし	1秒単位
②	離陸前	ADDUM	なし	1秒単位
③	離陸後	セクター入域点	なし	1秒単位
④	離陸後	ADDUM	管制官	1秒単位
⑤	離陸後	ADDUM	パイロット	1秒単位
⑥	離陸後	ADDUM	なし	1分単位繰り下げ
⑦	離陸後	ADDUM	なし	1分単位四捨五入

(1)到着時刻決定タイミングでは、①離陸後または②離陸前のどちらで ADDUM 到着時刻の決定を行うかで比較を行う。①離陸後のシミュレーションでは、EDCT 時刻+出発時刻誤差を含んだ時刻（実運航データの初期値）に基づいて、ADDUM 到着時刻の決定を行う。②離陸前のシミュレーションでは、EDCT 時刻に基づいて ADDUM 到着時刻の決定を行う。ここで、実運航データの初期値は、EDCT 時刻+出発時刻誤差を含んだ時刻のため、出発時刻誤差に相当する時刻を取り除いて EDCT 時刻とみなすこととする。

(2)時間管理点では、離陸後に①ADDUM または③セクター入域点のどちらの地点で時間管理を行うかで比較を行う。①ADDUM のシミュレーションでは、EDCT 時刻+出発時刻誤差を含んだ時刻（実運航データの初期値）に基づいて、ADDUM 到着時刻の決定を行う。

(※(1)離陸後のシミュレーションと(2)ADDUM のシミュレーションは同じ条件のためシミュレーション条件番号を①に統一している。) ③セクター入域点のシミュレーションでは、EDCT 時刻+出発時刻誤差を含んだ時刻（実運航データの初期値）に基づいて、各便のそれぞれのセクター入域点における到着時刻の決定を行う。

(3)到着時刻予測誤差では、離陸後に④管制官または⑤パイロットのどちらの到着時刻予測誤差を使用して ADDUM 到着時刻を決定するかで比較を行う。EDCT 時刻+出発時刻誤差を含んだ時刻（実運航データの初期値）に基づいて計算を行った標準軌道の ADDUM 予定到着時刻に、④管制官または⑤パイロットの到着時刻予測誤差を足し合わせた時刻を



ADDUM 予測到着時刻とし、この時刻に基づいて ADDUM 到着時刻の決定を行う。以上(1)~(3)のパターンでは ADDUM 到着時刻は 1 秒単位で決定するものとする。

(4)指定時刻決定方法では、離陸後の EDCT 時刻+出発時刻誤差を含んだ時刻（実運航データの初期値）に基づいて、ADDUM 到着時刻を 1 分単位で決定する。計算上では適切な間隔を維持するための時刻（以後「必要調整時刻」と表現する。）は 1 秒単位で計算しているが、実際の運航では ADDUM 到着時刻は 1 秒単位では指定できないため、⑥必要調整時刻を上回るように到着時刻を指定する場合（以後「繰り下げ」と表現する。）と、⑦必要調整時刻に近づけるように到着時刻を指定する場合（以後「四捨五入」と表現する。）が考えられる。⑥繰り下げの場合では、必要調整時刻が 30 秒未満か 30 秒以上かに関わらず、次の 1 分を指定するものとし、安全上の理由を想定している。⑦四捨五入の場合では、30 秒未満の場合には前の 1 分を指定し、30 秒以上の場合には次の 1 分を指定するものとし、時間指定の都合を想定している。概念図を以下の図 25 に示す。

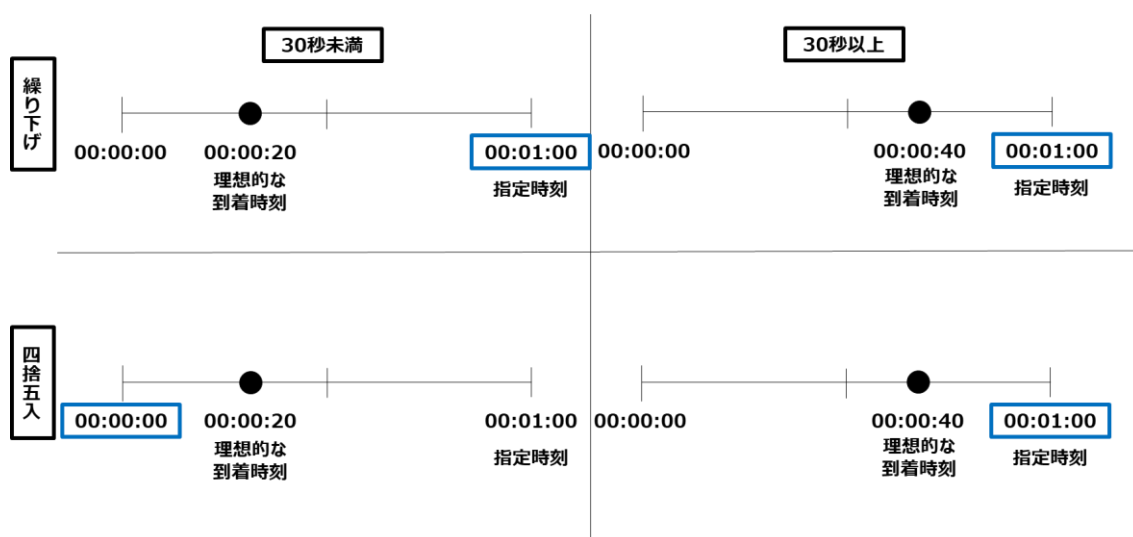


図 25 指定時刻決定方法の概念図

## 4.2 様々な時間管理アルゴリズムの評価手順

(1)到着時刻決定タイミング、(2)時間管理点、(3)到着時刻予測誤差、(4)指定時刻決定方法の航空交通流管理の模擬の手順について以下の[1]~[5]で述べる。[2.1]~[2.4]において対象便の到着時刻決定時に、その便の前に到着する可能性がありながら未決定の便については、図 5 に示す分布し従う乱数を出発時刻誤差として離陸時刻から差し引くことにより EDCT 時刻に換算し、この時刻に基づいて推定した到着予定時刻を用いる。

[1]CARATS Open Data から各便の離陸時刻における 3 次元座標データ（緯度、経度、高度）を取得し、BADA 標準軌道を作成する。

[2.1]国内便は①離陸後または②離陸前に、海外便は福岡 FIR 入域時に、[1]で作成した BADA 標準軌道から ADDUM 予測到着時刻を算出する。ADDUM 予測到着時刻をもとに ADDUM 到着間隔が 120 秒となる必要調整時刻を計算し、ADDUM 予定到着時刻を 1 秒単位で指定する。

[2.2]国内便は離陸後に、海外便は福岡 FIR 入域時に、[1]で作成した BADA 標準軌道から①ADDUM または③セクター入域点における予測到着時刻を算出する。予測到着時刻をもとに到着間隔が 120 秒となる必要調整時刻を計算し、予定到着時刻を 1 秒単位で指定する。

[2.3]国内便は離陸後に、海外便は福岡 FIR 入域時に、[1]で作成した BADA 標準軌道から求まる ADDUM 予測到着時刻に④管制官または⑤パイロットの到着時刻予測誤差を加味し、新たに ADDUM 予測到着時刻を算出する。ADDUM 予測到着時刻をもとに ADDUM 到着間隔が 120 秒となる必要調整時刻を計算し、ADDUM 予定到着時刻を 1 秒単位で指定する。

[2.4]国内便は離陸後に、海外便は福岡 FIR 入域時に、[1]で作成した BADA 標準軌道から ADDUM 予測到着時刻を算出する。ADDUM 予測到着時刻をもとに ADDUM 到着間隔が 120 秒となる必要調整時刻を計算し、⑥繰り下げまたは⑦四捨五入により ADDUM 予定到着時刻を 1 分単位で指定する。

[3]対象便は必要調整時刻から算出される必要調整時間のうち、延長が許容できる時間の範囲内で CFDT Fix まで飛行時間調整を行う。延長が許容できる時間は飛行時間 1 時間あたり 3 分とする。また、メタリングで補えない調整時間は関東南セクター内の管制に委ねるものとする。

[4]これらの運航について各指標の計算を行う。

メタリングを行う際は飛行時間を調整するために速度調整が必要になる。この速度を計算するために、BADA 標準軌道から予測された予測飛行時間を  $t_{pred}$  とし、メタリングにより ADDUM 到着予定時刻が決定した後の飛行時間を  $t_{metering}$  とする。飛行時間調整を行う際の対地速度  $V_{GS,metering}$  を、BADA 標準軌道から予測される予測対地速度  $V_{GS,pred}$  を用いて以下の式(9)より計算する。

$$V_{GS,metering} = V_{GS,pred} \frac{t_{pred}}{t_{metering}} \quad (9)$$

その後  $V_{GS,metering}$  と MSM/GSM から抽出した各地点における風速から、式(2)を基に調整後の真対気速度  $V_{TAS,metering}$  を算出した。 $V_{TAS,metering}$  は燃料消費量の計算に使用される。

このシミュレーションを 2019 年度の CARATS Open Data 計 70 日 31441 便について行った。

### 4.3 各評価結果および考察

様々な時間管理アルゴリズムの航空交通流について、第 3 章で述べた各評価指標について評価および考察を行った。

#### 4.3.1 到着間隔の評価

ADDUM 到着間隔の結果を図 26～図 29 に示す。

到着時刻決定タイミングの結果について説明する。図 26 より、①離陸後に到着時刻を決定した場合の到着間隔は、120 秒にわずかなピークが表れる分布となり、精度が良いことが確認できるが、②離陸前に到着時刻を決定した場合の到着間隔は、120 秒にピークが表れない分布となってしまうことが読み取れる。

時間管理点の結果について説明する。図 27 より、①ADDUM で時間管理を行う場合の到着間隔は、120 秒にわずかなピークが表れる分布となり、精度が良いことが確認できるが、③セクター入域点で時間管理を行う場合の到着間隔は、120 秒にピークが表れない分布となってしまうことが読み取れる。

到着時刻予測誤差の結果について説明する。図 28 より、④管制官の到着時刻予測誤差を用いるより、⑤パイロットの到着時刻予測誤差を用いた方が 120 秒付近の便数の割合が多いことが読み取れる。どちらの誤差を用いても 120 秒付近にピークが表れるわけではないが、⑤パイロットの到着時刻予測誤差を用いた方が、より精度は良いことがわかる。

指定時刻決定方法の結果について説明する。図 29 より、⑥繰り下げの場合も、⑦四捨五入の場合もどちらも到着間隔は、120 秒にわずかにピークが表れることが確認できた。

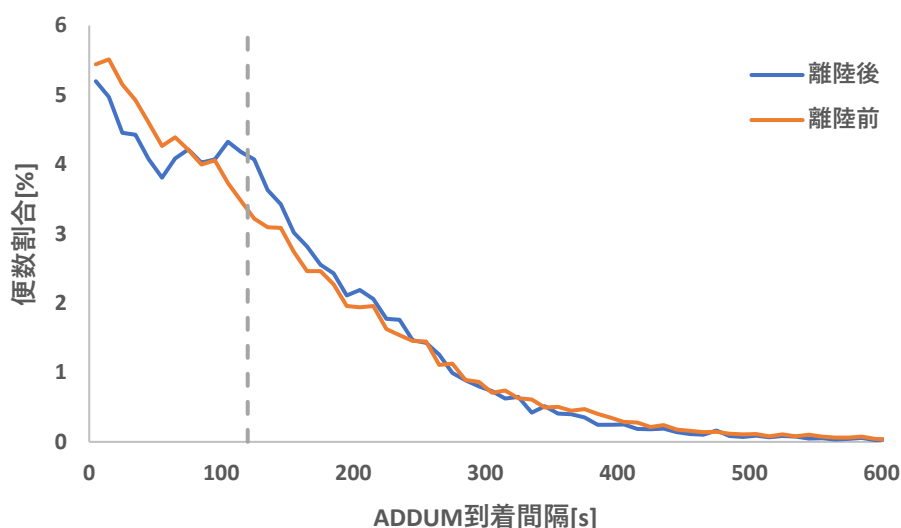


図 26 到着時刻決定タイミングの ADDUM 到着間隔

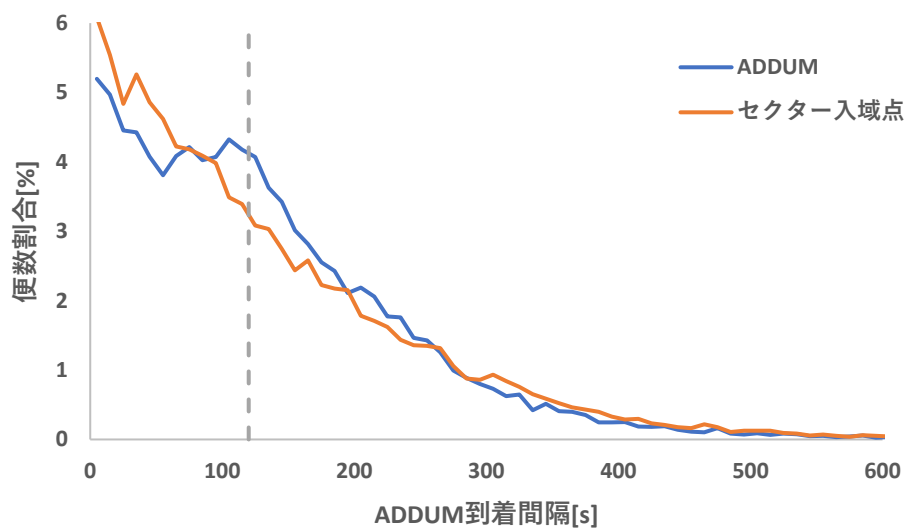


図 27 時間管理点の ADDUM 到着間隔

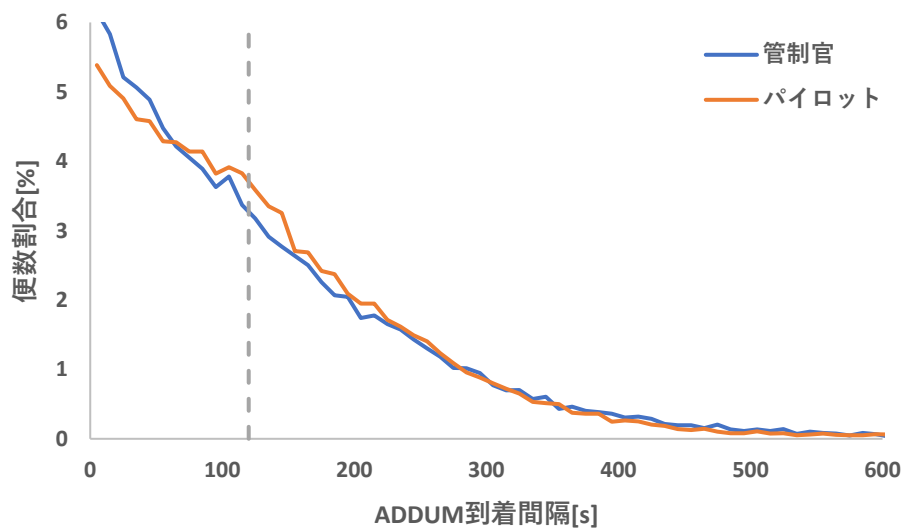


図 28 到着時刻予測誤差の ADDUM 到着間隔

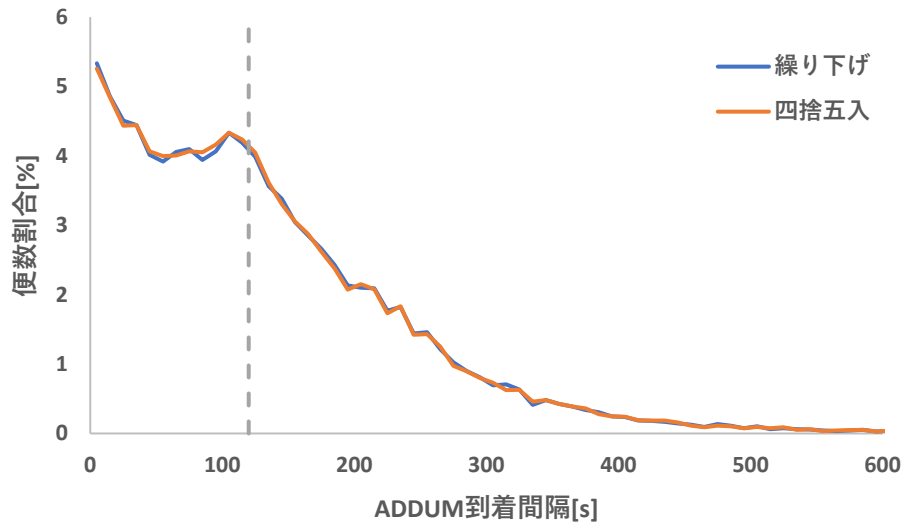


図 29 指定時刻決定方法の ADDUM 到着間隔

#### 4.3.2 セクター内調整時間・セクター内調整超過時間の評価

各アルゴリズムのセクター内調整時間およびセクター内調整超過時間の結果を図 30, 図 31 に示す。セクター内調整時間は、①離陸後と②離陸前では約 97 分、①ADDUM と③セクター入域点では約 31 分、④管制官と⑤パイロットでは約 48 分、⑥繰り下げと⑦四捨五入では約 18 分の差が確認できた。また、セクター内調整超過時間は、①離陸後と②離陸前では約 29 分、①ADDUM と③セクター入域点では約 5 分、④管制官と⑤パイロットでは約 18 分、⑥繰り下げと⑦四捨五入では約 7 分の差が確認できた。セクター内調整時間、セクター内調整超過時間ともに、①離陸後より②離陸前、①ADDUM より③セクター入域点、⑤パイロットより④管制官、⑦四捨五入より⑥繰り下げの方が大きいという結果となった。アルゴリズムの違いによって管制官の負荷に大きな差が出る事が分かる。

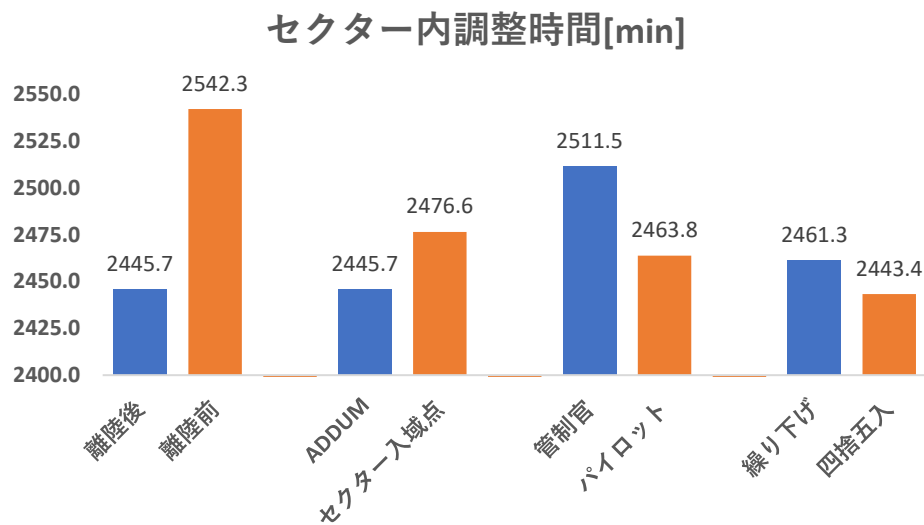


図 30 セクター内調整時間

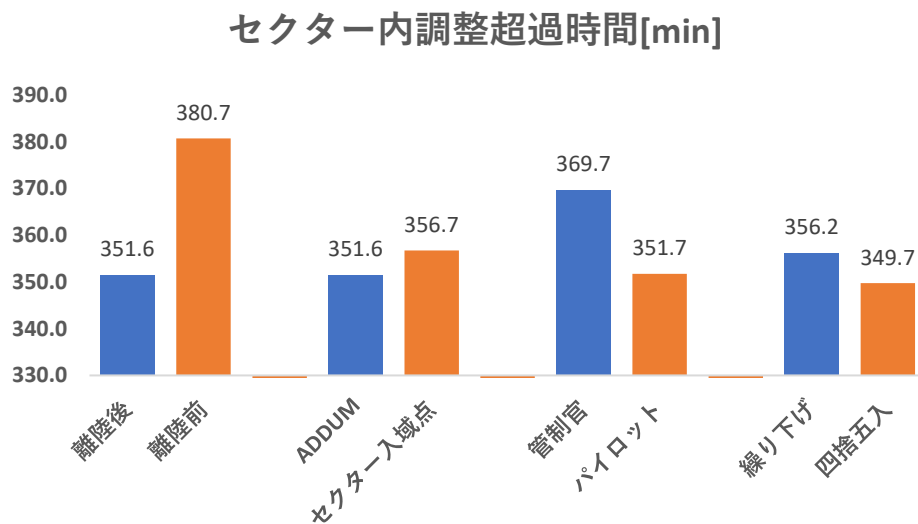


図 31 セクター内調整超過時間

#### 4.3.3 キャパシティロスの評価

キャパシティロスの結果を以下の表 2 に示す。①離陸後と②離陸前では約 2.2 分、①ADDUM と③セクター入域点では約 0 分、④管制官と⑤パイロットでは約 0.5 分、⑥繰り下げと⑦四捨五入では約 0.5 分の差が確認できた。到着時刻決定タイミングの違いでは約 2 分の差が出たことから、離陸前の到着時刻の決定により約 1 便分滑走路運用効率が悪くなっているが、その他のアルゴリズムでは大きな差は確認できなかったため、時間管理アルゴリズムの違いによるキャパシティロスへの影響はあまり大きくないといえる。

表 2 キャパシティロスの結果

キャパシティロス[min]	
離陸後	3.76
離陸前	5.93
ADDUM	3.76
セクター入域点	3.80
管制官	4.16
パイロット	3.63
繰り下げ	4.26
四捨五入	3.78

#### 4.3.4 運航コストの評価

各アルゴリズムの運航コストの結果を以下に示す。セクター入域までの結果を図 32 に、セクター内の結果を図 33 に、全体の結果を図 34 に示す。

まずセクター入域までの結果では、①離陸後と②離陸前では約 1 t、①ADDUM と③セクター入域点では約 0.1 t、④管制官と⑤パイロットでは約 0.2 t、⑥繰り下げと⑦四捨五入では約 0.2 t の差が確認でき、①離陸後より②離陸前、①ADDUM より③セクター入域点、⑤パイロットより④管制官、⑦四捨五入より⑥繰り下げの方が小さいという結果となった。

次にセクター内の結果では、①離陸後と②離陸前では約 8.3 t、①ADDUM と③セクター入域点では約 2.6 t、④管制官と⑤パイロットでは約 4.1 t、⑥繰り下げと⑦四捨五入では約 1.5 t の差が確認でき、②離陸前より①離陸後、③セクター入域点より①ADDUM、④管制官より⑤パイロット、⑥繰り下げより⑦四捨五入の方が小さいという結果となった。これは前述したようにセクター内の運航コストは、セクター内調整時間に比例するようなモデルを使用しているため、セクター内調整時間の結果に符合する結果になったと考えられる。

最後に全体の結果では、①離陸後と②離陸前では約 7.3 t、①ADDUM と③セクター入域点では約 2.5 t、④管制官と⑤パイロットでは約 3.8 t、⑥繰り下げと⑦四捨五入では約 1.3 t の差が確認でき、②離陸前より①離陸後、③セクター入域点より①ADDUM、④管制官より⑤パイロット、⑥繰り下げより⑦四捨五入の方が小さいという結果となった。セクター内の結果と全体の結果が符合していることから、セクター入域までの結果が全体に与える影響よりも、セクター内の結果が全体に与える影響の方が大きいことが分かる。

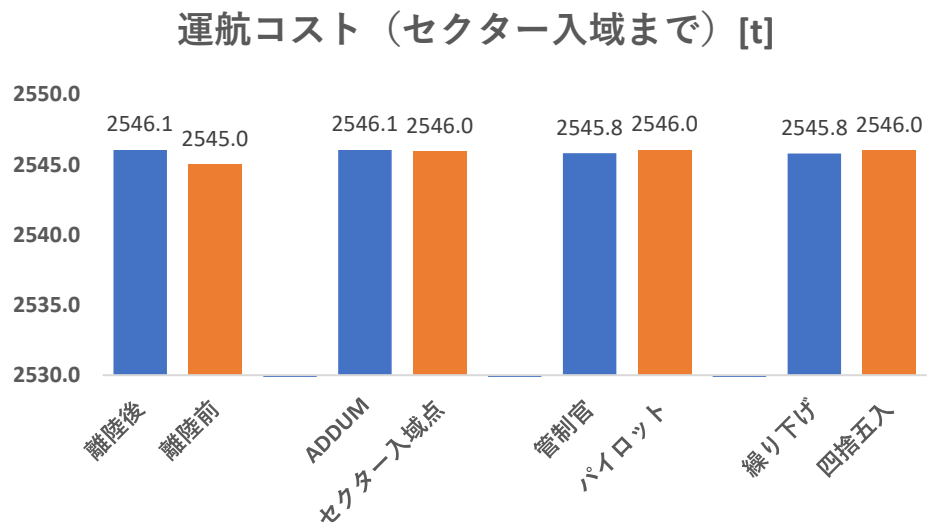


図 32 運航コスト（セクター入域まで）

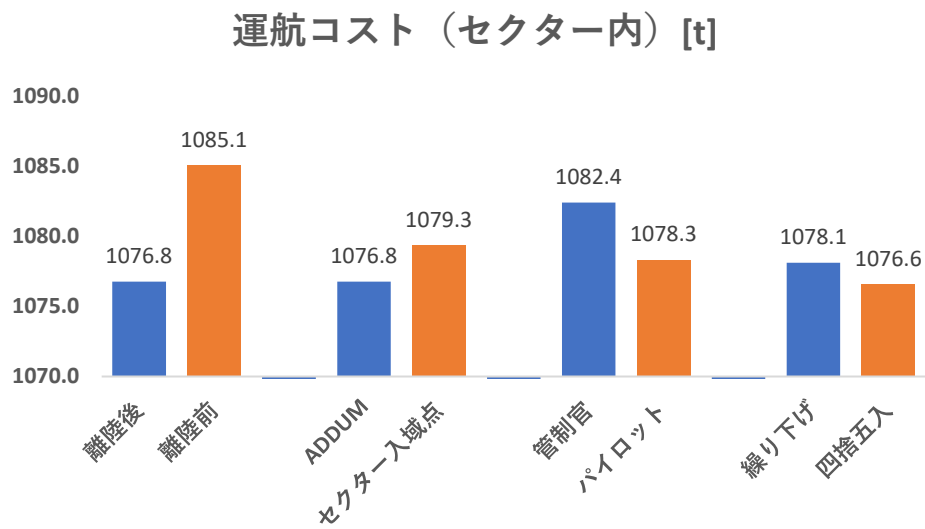


図 33 運航コスト（セクター内）



## 運航コスト（全体）[t]

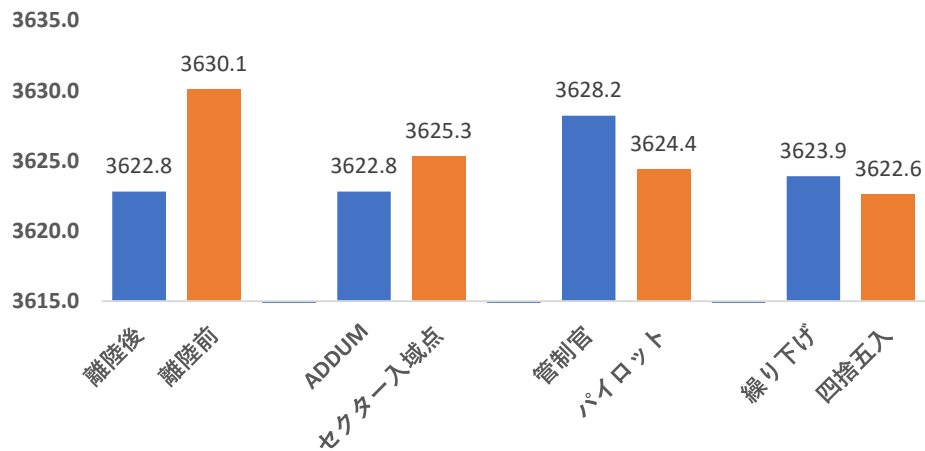


図 34 運航コスト（全体）

### 4.3.5 セクター入域までの運航コストの考察

セクター入域までの運航コストに差が出た要因についての考察を行う。運航コストは前章で述べたように、航空機の燃料消費量と飛行時間で定義されたコストである。メタリングを実施しない従来の運航方式と比較した燃料消費量項と飛行時間項の運航コストの変化量、および総運航コスト変化量、1 便当たりの平均メタリング調整時間の結果を以下の表 3 に示す。表の値は、各アルゴリズムの値から従来の運航方式の値を引いているため、正の場合は従来の運航方式より増加していることを示し、負の場合は従来の運航方式より減少していることを示す。表 3 より、各アルゴリズムの燃料消費量項は従来の運航方式の場合に比べ全て減少していることが分かる。これは図 35 に示すように、メタリングによって到着時刻を遅延させることで、対気速度の減少に伴って燃料流量も減少するからであると考えられる。一方で、各アルゴリズムの飛行時間項は従来の運航方式の場合に比べ全て増加していることが分かる。これは、メタリングによって到着時刻を遅延させることで、飛行時間が増加するからであると考えられる。最後に総運航コスト変化量に注目すると、どのアルゴリズムの値も全て負の値となっていることから、セクター入域までの運航コストは従来の運航方式に比べて減少していることが分かる。メタリング調整によって運航コストの燃料消費量項は減少し、飛行時間項は増加するが、飛行時間が増加した影響よりも燃料流量が減少した影響の方が大きいため、このような結果になると考えられる。以上よりメタリング調整時間が大きいほど、セクター入域までの運航コストは小さくなることが分かる。

表 3 運航コスト変化量および平均メタリング調整時間の結果

運航コスト変化量	燃料消費量項[t]	飛行時間項[t]	全体[t]	1便当たりの平均メタリング調整時間[s]
離陸後	-37.73	24.40	-13.33	84.07
離陸前	-41.08	26.72	-14.36	87.64
ADDUM	-37.73	24.40	-13.33	84.07
セクター入域点	-37.98	24.56	-13.43	84.36
管制官	-38.57	24.99	-13.58	85.19
パイロット	-37.85	24.50	-13.34	84.32
繰り下げ	-38.59	25.00	-13.60	85.74
四捨五入	-37.80	24.45	-13.35	84.14

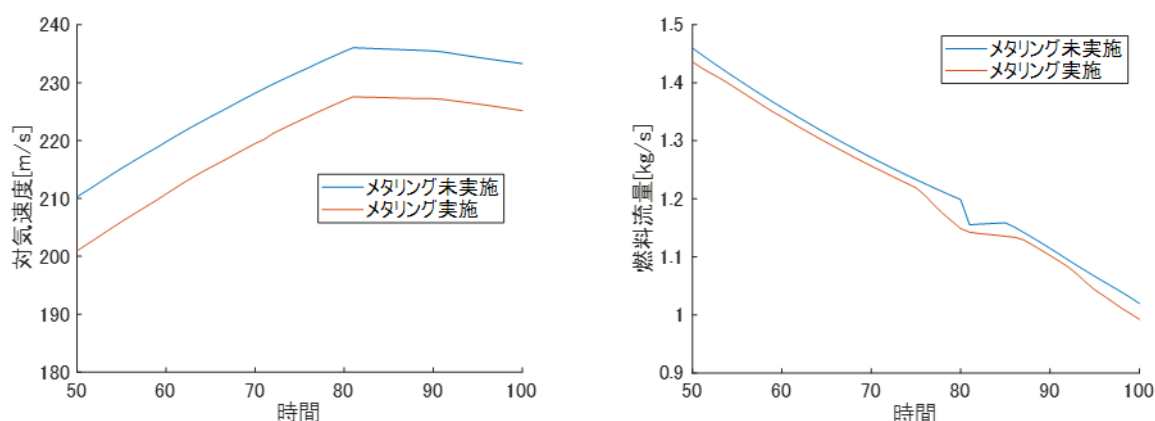


図 35 メタリング調整による対気速度と燃料流量の変化

#### 4.3.6 各アルゴリズムの考察

各アルゴリズムについての考察を行う。

到着時刻決定タイミングによる違いでは、②離陸前よりも①離陸後の方が全体的に良い結果となった。これは、離陸前に到着時刻を決定すると、離陸するまでに出発時刻誤差が生じ、到着時刻を決定する際に予測された交通流と実際の交通流で大きな乖離が生じてしまうからであると考えられる。その結果、離陸後に到着時刻を決定するよりもセクター内調整時間が大きくなり、それに伴って運航コストも大きくなると考えられる。

時間管理点による違いでは、③セクター入域点よりも①ADDUMの方が全体的に良い結果となった。これは、セクター入域点で時間管理を行うと、図 36 に示すようにセクター入域間隔は 120 秒付近に便数を集中させることができるが、図 37 のようにセクター内の飛行時間はばらつきがあるため、セクター内で交通流の乱れが生じてしまうからであると考えられる。表 4 は、離陸空港ごとのセクター内飛行時間および福岡ー羽田便の機種ごとの飛行時間を示したものである。表より飛行経路 (Stream1~4 の経路は図 12 を参照) や機種によってセクター内飛行時間にばらつきがあることが読み取れる。その結果、ADDUM で時間管理を行うよりもセクター内調整時間が大きくなり、それに伴って運航コストも大きくなると考えられる。

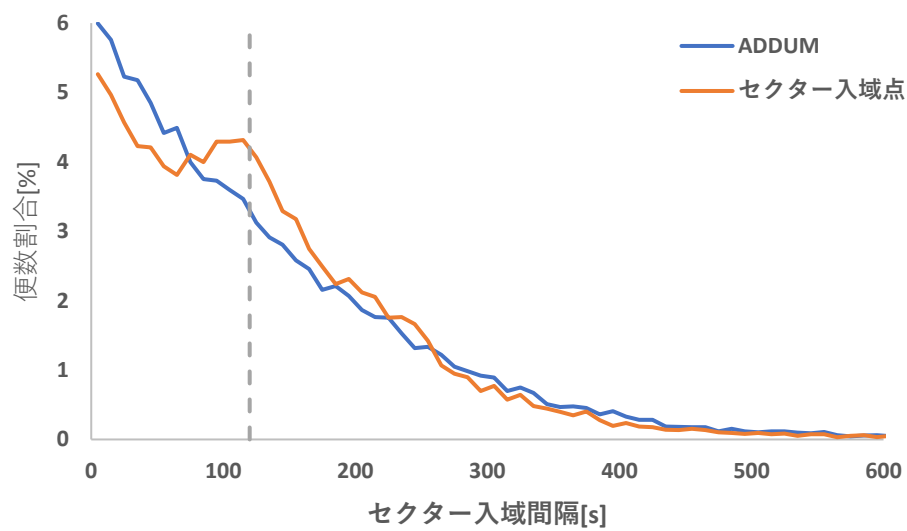


図 36 セクター入域間隔（時間管理点の違い）

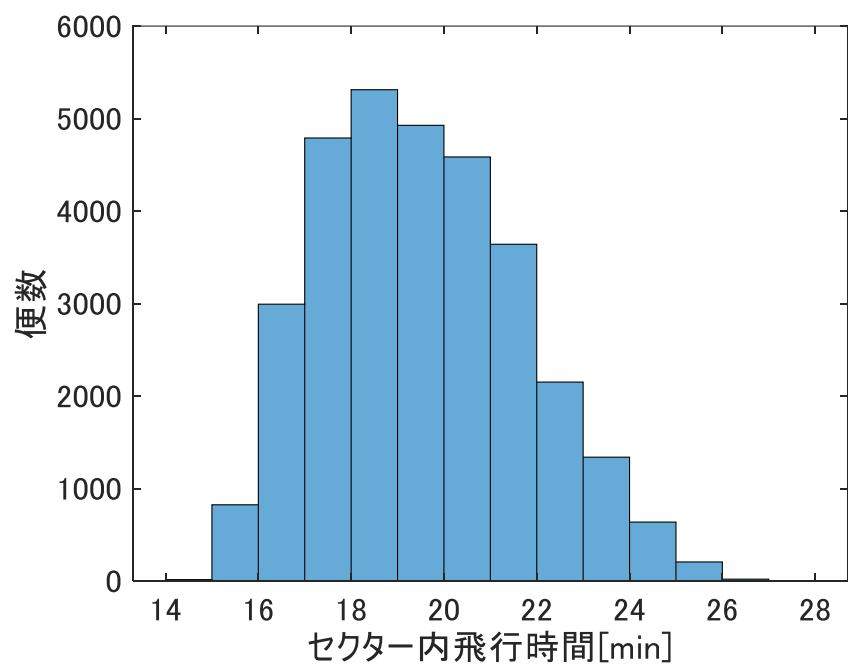


図 37 セクター内飛行時間の内訳

表 4 離陸空港ごとおよび福岡－羽田便の機種ごとのセクター内飛行時間

離陸空港	平均[分]	機種	平均[分]
福岡	19.5	A21N	20.9
関西	18.0	A320	19.6
那覇	21.9	A359	18.7
伊丹	17.8	B735	19.9
中部	20.5	B737	19.2
鹿児島	21.5	B738	20.0
熊本	19.4	B763	19.5
宮崎	21.8	B772	19.4
長崎	19.7	B773	19.2
広島	17.4	B788	18.6
松山	21.3	B789	18.6
神戸	18.0		
小松	17.9		
石垣	22.0		
大分	19.9		
高松	17.7		
北九州	17.8		
岡山	17.7		
高知	21.6		
宮古島	22.0		
徳島	21.6		
山口	17.8		
出雲	17.5		
米子	17.1		
奄美大島	22.5		
岩国	18.0		
佐賀	19.9		
鳥取	17.6		
南紀白浜	22.2		
石見	17.5		
Stream1	19.2		
Stream2	21.3		
Stream3	21.4		
Stream4	24.4		

到着時刻予測誤差による違いでは、④管制官よりも⑤パイロットの方が全体的に良い結果となった。これは、以下の表 5 で示すように、パイロットの到着時刻予測誤差のばらつきが管制官の到着時刻予測誤差のばらつきに比べて小さいためであると考えられる。

表 5 管制官とパイロットの到着時刻予測誤差のばらつき

Fixまでの所要時間[分]	標準偏差（管制官）[分]	標準偏差（パイロット）[分]
42.6	3.6	1.7
52.9	2.0	1.4
93.3	7.3	3.4

指定時刻決定方法による違いでは、⑥繰り下げよりも⑦四捨五入の方が全体的に良い結果となった。この理由は、ある日のある時間帯の交通流の図 38 を用いて説明する。1 段目の点はメタリング実施前の ADDUM 予定到着時刻、2 段目の点はメタリング実施後の ADDUM 予定到着時刻、3 段目の点はセクター内間隔調整後の ADDUM 到着時刻を示している。図の 2~5 便目の 1 段目と 2 段目に注目すると、どちらのアルゴリズムも同じ挙動を示していることが分かる。これは、2~5 便目の各必要調整時間がメタリング上限時間を大きく、メタリング上限時間以上にメタリングをすることができないためである。一方で、1 便目の 2 段目は異なる挙動を示している。⑥繰り下げは遅い時刻を、⑦四捨五入は早い時刻を指定していることが分かる。この図から、混雑時に先頭の便が必要以上のメタリングを行うと、後続の便に遅延が蓄積してしまうことが読み取れる。多少の違いであっても積み重なると大きな遅延に繋がるため、⑦四捨五入の方が遅延の蓄積を抑制できると考えられる。

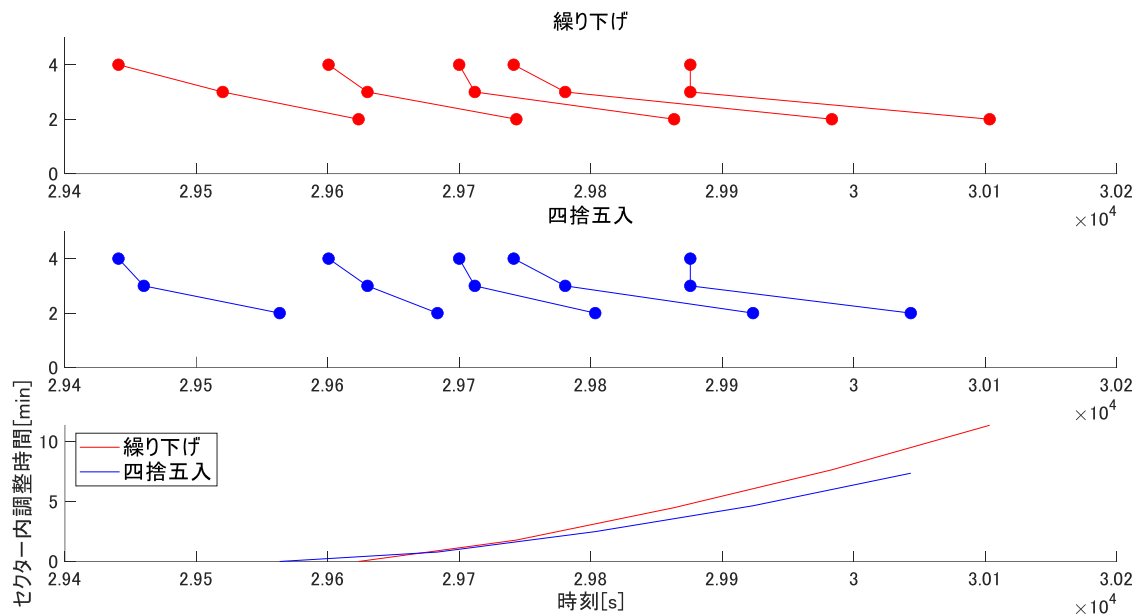


図 38 ある日のある時間帯の交通流の例

#### 4.3.6 到着間隔のばらつきと遅延時間と運航コストの関係

これまでの結果より、メタリング調整時間が大きいほどセクター入域までの運航コストは小さくなり、セクター内調整時間が小さいほどセクター内の運航コストは小さくなることが分かった。しかし、全体としてはセクター入域までの影響よりも、セクター内の影響の方が大きいことも判明した。そこで、セクター内調整時間が小さくなる時は具体的にどのような状況なのかを解析し、効率的な時間管理アルゴリズムを追求する。以下の図 39 はメタリング調整時間とセクター内調整時間の関係を表したものである。図より、①離陸後/ADDUM、③セクター入域点、④管制官、⑤パイロットの 4 つのアルゴリズムはメタリング調整時間が大きくなるにしたがって、セクター内調整時間も大きくなる関係であることが見て取れる。また、③セクター入域点、⑤パイロット、⑥線り下げの 3 つのアルゴリズムはメタリング調整時間が大きくなるにしたがって、セクター内調整時間は小さくなる関係であることが見て取れる。この 2 組の組み合わせで到着間隔のばらつきとセクター内調整時間の関係を調べた結果を以下の図 40、図 41 に示す。どちらの結果も到着間隔のばらつきの RMS が大きいほどセクター内調整時間も大きくなる関係であることが判明した。以上の結果より、セクター内調整時間は到着間隔のばらつきに依存し、メタリング調整時間に依らないといえる。このことから、メタリング調整時間が大きくかつセクター内調整時間が小さいアルゴリズムであるのが理想だが、到着間隔のばらつきの抑制に重点を置いたアルゴリズムの方がより重要であるといえる。よって、到着間隔のばらつきがより小さい時間管理アルゴリズムが管制官の負荷やコストを削減できると考えられる。

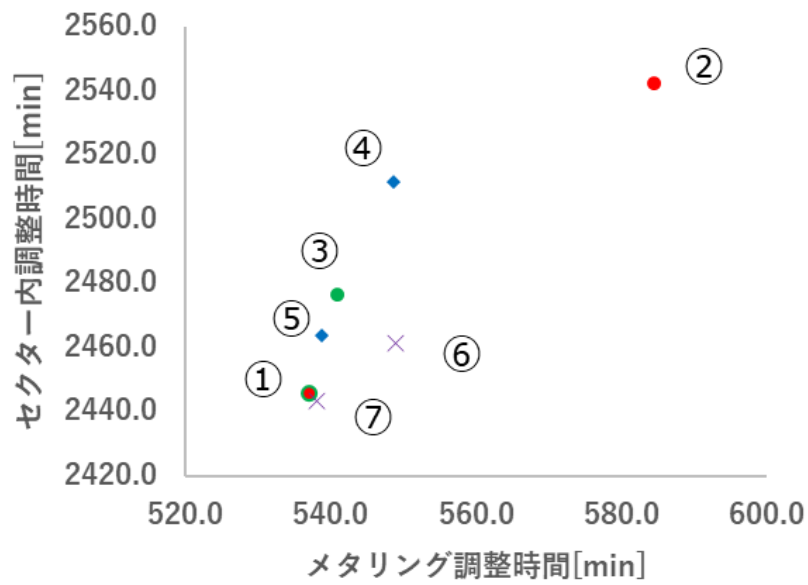


図 39 メタリング調整時間とセクター内調整時間の関係

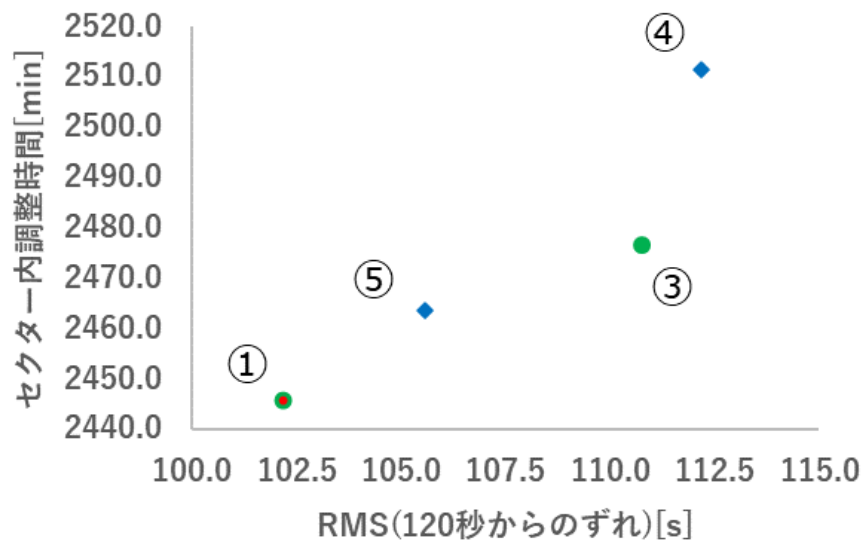


図 40 到着間隔のばらつきとセクター内調整時間の関係 (①, ③, ④, ⑤)

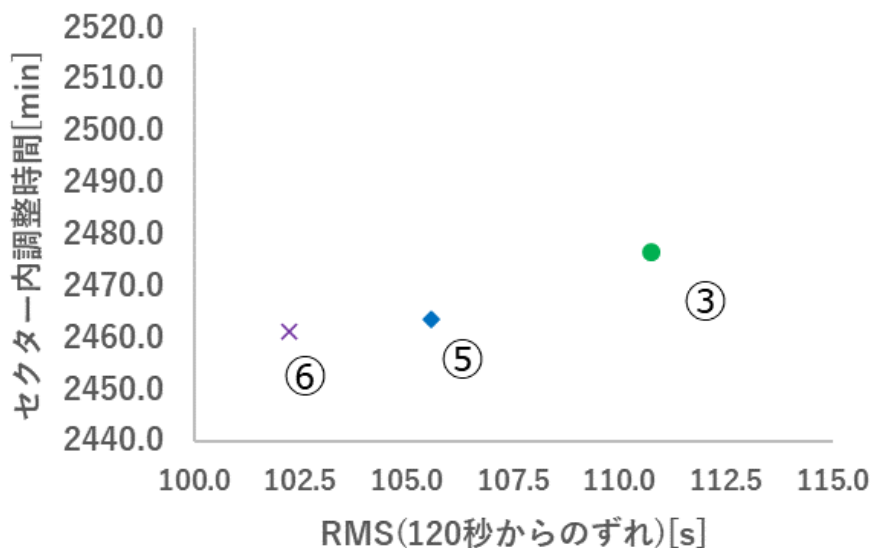


図 41 到着間隔のばらつきとセクター内調整時間の関係 (③, ⑤, ⑥)

#### 4.4 理想的な時間管理アルゴリズム

これまでの結果より、理想的な時間管理アルゴリズムは到着間隔のばらつきが小さいものが良いということが明らかとなった。そこで、到着時刻決定タイミング、時間管理点、到着時刻予測誤差、指定時刻決定方法からそれぞれ一つずつアルゴリズムを選出する。図 42 より到着間隔のばらつきが小さいものを選ぶと、到着時刻決定タイミングは①離陸後、時間管理点は①ADDUM、到着時刻予測誤差は⑤パイロット、指定時刻決定方法は⑦四捨五入の組み合わせとなる。この時の ADDUM 到着間隔を図 43 に示す。従来の運航方式と比べ、到着間隔 120 秒以下の便が減少し、120 秒付近の便数が向上していることが分かる。120 秒付近にピークが来ないのは図 26～図 29 の結果から、到着時刻予測誤差のパイロットの誤差が影響しているからであると考えられる。また、従来の運航方式と比較した理想的な時間管理アルゴリズムの効果を表 6 に示す。表より、一日当たりセクター内調整時間は約 158 分、セクター内調整超過時間は約 61 分、運航コストは約 24t 削減できる結果となった。これを実際の CO<sub>2</sub> の排出量に換算すると、航空機の燃料であるケロシン 1 [kg]あたりの CO<sub>2</sub> 排出量を 3.08 [kg]とした場合、年間約 26423[ton]もの削減になる。キャパシティロス は 3.8 分増加つまり、約 2 機分ロスという結果となっているが、セクター内調整時間や運航コストの面でそれ以上に大きな効果が得られ、管制官の負荷軽減や CO<sub>2</sub> 排出の抑制による環境汚染対策に有効であると考えられる。



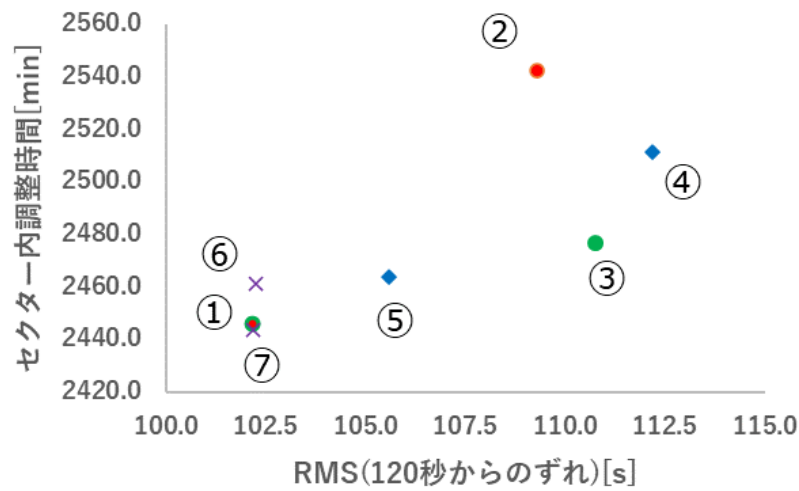


図 42 到着間隔のばらつきとセクター内調整時間の関係

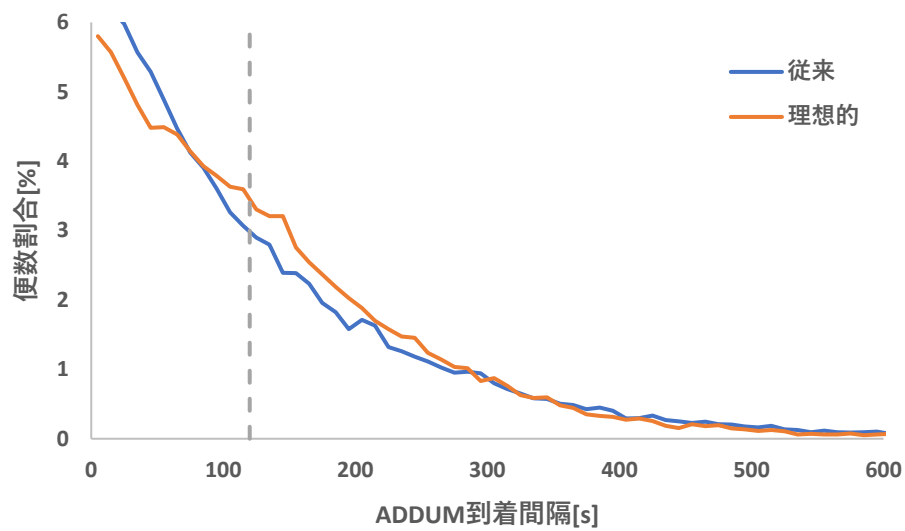


図 43 ADDUM 到着間隔（従来，理想的）

表 6 従来の運航方式と比較した理想的な時間管理アルゴリズムの効果

	セクター内調整時間[min]	セクター内調整超過時間[min]	キャパシティロス[min]	運航コスト（全体）[t]
従来	2619.2	410.4	0.0	3647.7
理想的	2461.5	349.9	3.8	3624.2
削減量	157.7	60.5	-3.8	23.5

## 5. 結言

本研究では、様々な時間管理アルゴリズムの航空交通流を模擬し、各アルゴリズムの効果を評価した。アルゴリズムの違いで、セクター内調整時間や運航コストに大きな差が出ることが分かった。運航コストの結果からは、セクター入域までの結果よりセクター内の結果の方が全体に与える影響が大きいという結果が得られた。セクター内の運航コストはセクター内調整時間と符合することから、セクター内調整時間が小さくなる状況を調べた結果、メタリング調整時間の大小に依らず、到着間隔のばらつきに依ることが分かった。メタリングによってセクター内で予測される混雑を吸収するため、メタリング調整時間はできるだけ大きいのが理想だが、到着間隔のばらつきが大きいとメタリングの効果が小さくなってしまいうため、到着間隔のばらつきの抑制に重点を置いたアルゴリズムが理想であることが明らかとなった。このことから、到着時刻決定タイミングは離陸後、時間管理点は ADDUM、到着時刻予測誤差はパイロット、指定時刻決定方法は四捨五入の組み合わせが理想的な時間管理アルゴリズムであると考えられる。

## 参考文献

- [1] 将来の航空交通システムに関する研究会, 将来の航空交通システムに関する長期ビジョン (CARATS), 国土交通省, 2010.
- [2] 武市昇, 又吉直樹, アンドレエバ森アドリアナ, 松野賀宣, 平田輝満, “CARATS 重点施策に係る研究開発: CFDT を用いた交通流制御の再開・高度化に向けた研究開発,” 第 56 回飛行機シンポジウム, 山形, 2018 年 11 月 14 日~16 日.
- [3] JCAB: ATFM/CDM in JAPAN, The 3rd Meeting of ATFM Steering Group, Singapore, 10-14 Mar., 2014.
- [4] 国土交通省航空局: 航空保安業務の概要,  
[http://www.mlit.go.jp/koku/15\\_bf\\_000316.html](http://www.mlit.go.jp/koku/15_bf_000316.html).
- [5] 国土交通省航空局, シャドーオペレーション概要説明, 第 10 回 航空交通流時間管理 WG, 2020 年 12 月 22 日
- [6] 川根祥範, 武市昇: “航空交通流管理における到着時刻管理の効果”, 第 58 回飛行機シンポジウム, 2020 年, 11 月 25 日~27 日
- [7] 国土交通省航空局提供, CARATS Open Data, 2019.
- [8] Japan Meteorological Agency.<http://www.jmbc.or.jp/jp/online/file/f-online10200.html>, <http://www.jmbc.or.jp/jp/online/file/f-online10100.html>.
- [9] Eurocontrol Experimental Center, User Manual for the Base of Aircraft Data(BADA), REVISION 3.15, EEC Technical/Scientific Report No.19/03/18-45.
- [10] 国土交通省航空局提供データ, 2018 年 6 月.
- [11] 十朱和博, “巡航経路での四次元軌道の予測精度と調整可能時間の分析”, 第 55 回飛行機シンポジウム, 島根, 2017 年, 11 月 20 日~22 日.
- [12] Robertson, B.: Fuel Conservation Strategies, Cost Index Explained, Boeing Aero Quarterly Vol. 02, No. 7, 2007, pp. 26-29.

## 謝辞

本研究を遂行するにあたり、指導教員である武市昇教授にはお忙しい中多くのご助言やご指導をしていただきました。心より御礼申し上げます。また、研究室の方々と日々の議論を通して多くの刺激やアイデアをいただいたことで、ここまで進めることができたと思います。心より感謝申し上げます。

最後に、常に温かく見守り、大学および大学院生活を支えてくれた家族に深く感謝申し上げます。