

# 航跡データを用いた航空交通流の分析および 交通流制御の導入効果に関する検討

松野 賀宣<sup>1</sup>・アンドレエバ森 アドリアナ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 非会員 宇宙航空研究開発機構 航空技術部門 (〒181-0015 東京都三鷹市大沢 6-13-1)

E-mail:matsuno.yoshinori@jaxa.jp

<sup>2</sup> 非会員 宇宙航空研究開発機構 航空技術部門 (〒181-0015 東京都三鷹市大沢 6-13-1)

E-mail:andreevamori.adriana@jaxa.jp

航空交通需要は拡大を続けており、首都圏空港及び周辺空域では、交通量の増加により、混雑が深刻化している。そこで、特定空域における交通量を抑制し、混雑緩和を目的とした交通流制御の検討が進められている。交通流制御には、混雑が予測された際に出発空港において離陸前に地上で遅延させる地上遅延の制御、飛行中に特定地点への通過時刻を遅延させる空中遅延の制御、の 2 つの制御方法が検討されている。本稿では、国土交通省航空局より公開されている航跡データを用いて、現状の交通流の分析を行うとともに、交通流制御の導入効果について、遅延及び燃料消費の観点から定量的に評価を行う。

**Key Words:** *Air Traffic Flow Management, Calculated Fix Departure Time, Expected Departure Clearance Time, Speed Control, Trajectory-Based Operations*

## 1. はじめに

航空交通需要は拡大を続けており、遅延による利便性の低下等、様々な問題が顕在化しつつある。そこで、拡大する航空交通需要に対応するため、航空交通管理 (Air Traffic Management (ATM)) の長期ビジョンとして、米国の Next Generation Air Transportation System (NextGen)、欧州の Single European Sky ATM Research (SESAR)、そして我が国の Collaborative Actions for Renovation of Air Traffic Systems (CARATS) <sup>1)</sup> が各々策定され、次世代運航システムの実現に向けた研究開発が進められている。これらの長期ビジョンでは、離陸から着陸までの段階にある全ての航空機の運航を総合的に管理し、航空機の飛行経路に時間管理を導入した軌道ベース運用の実現による運航の効率化を目指している。そこで、現在 CARATS では、離陸から着陸までの全飛行フェーズにわたる軌道ベース運用の初期段階として、交通流制御の検討が進められている <sup>2)</sup>。

航空交通管制 (Air Traffic Control (ATC)) が単位時間当たりに処理することができる航空機数の上限は管制処理容量と呼ばれる。東京国際空港をはじめとする混雑空港やその周辺の混雑空域では、最大処理容量で運用されることが多いため、混雑時や悪天時には交通が集中し、交通量が管制処理容量を超過することになる。交通量が

管制処理容量を超過すると、空中待機が必要となり、空中待機を課せられた航空機は、余分な燃料消費を要することになる。そこで、混雑空域内の交通量を事前に抑制するため、交通流制御を実施する。現在我が国では、交通流制御として、Expected Departure Clearance Time (EDCT) 制御及び Calculated Fix Departure Time (CFDT) 制御が検討されている。

EDCT 制御は、離陸前の航空機に対し、本来の計画出発時刻よりも遅い出発時刻 (EDCT) を指定することにより、出発を遅延させる交通流制御方法である。出発を遅延させることにより、混雑空域内の交通量を事前に抑制し、余分な空中待機を低減することが期待されており、現在既に実施されている運用である。EDCT 制御は離陸前の出発空港における地上待機であるので、制御対象となるのは国内線のみである。

一方 CFDT 制御は、飛行中の航空機に対し、飛行経路上にある特定地点 (CFDT Fix) の通過時刻 (CFDT) を指定することにより、飛行中に遅延させる交通流制御方法である。CFDT 制御では、指定された CFDT を達成するために、機上で飛行速度の調整を行う。混雑空域への入域を遅延させることにより、混雑空域内の交通量を事前に抑制し、余分な空中待機を低減することが期待される。CFDT 制御は、飛行中の空中待機であるため、国内線・国際線どちらも対象となる。しかし、国内線のみが

対象となる EDCT 制御との公平性を保つため、導入初期段階において CFDT 制御は国際線のみを対象とすることが検討されている。この CFDT 制御の試行運用が 2011 年 8 月より開始されたが、地上と機上での軌道予測精度の乖離等が原因で、2014 年 9 月以降一時的に中断されている。現在、再試行に向けた検討<sup>2)</sup>が進められており、2019 年度以降に再開される予定である。なお、交通流制御の概要については、文献<sup>24)</sup>を併せて参照されたい。

本稿では、過去の航跡データを用いて、現状の交通流の分析を行う。そして、CFDT 制御を模擬するシミュレーションを行い、CFDT 制御の導入効果を定量的に評価する。

## 2. 航空交通流の分析

### (1) 航跡データの概要

航空交通流の分析のため、実航跡データとして CARATS オープンデータ<sup>3)</sup>を使用する。CARATS オープンデータは、航空路監視レーダから得られる航跡データであり、我が国が管轄する福岡飛行情報区 (Flight Information Region (FIR)) を飛行する航空機の約 10 秒間隔の位置データ (緯度・経度・高度)、機種、仮想便名が含まれている。2012 年度から 2016 年度の奇数月の 7 日分 (1 年間当たり 42 日分) のデータが、国土交通省航空局から公開されている。本研究では、CFDT 制御の試行運用が中断された 2014 年 9 月以降から 2017 年 3 月までの計 112 日分の航跡データを用いる。そして、CFDT 制御の導入が検討されている 4 つの航空路 (以下、Stream と呼ぶ) について分析を行う。表-1 に、各 Stream の概要をまとめる。表-1 に示すように、計 112 日分のデータから、各 Stream について約 500 から 2000 便の航跡データが抽出される。

表-1 Stream の概要

Stream	福岡 FIR 入域から CFDT Fix までの距離 (nmi)	抽出便数
1	540	1331
2	830	1993
3	960	521
4	290	2178

### (2) 分析結果

航跡データに加えて、気象庁より提供されるメソ数値予報モデル (Meso Scale Model (MSM)) を使用する。MSM では、3 時間毎に 1 日 8 回分の気象予測データとして、風速や気温等の格子点値 (Grid Point Value (GPV)) が取得される。我が国上空は、1 年を通して西から東に偏西風が吹いており、一般的に、夏季では弱く、冬季では強い傾向がみられるため、同一 Stream を

飛行する航空機においても風速の影響により飛行時間にばらつきがあると考えられる。そこで、航跡データの日に合わせた気象予測データを用い、飛行距離や飛行時間、風速について分析を行う。

図-1 に福岡 FIR 入域から CFDT Fix までの全航空機の航跡を、図-2 に CFDT Fix から東京国際空港までの全航空機の航跡を各々示す。また、各 Stream の CFDT Fix までの飛行計画経路を黒線で示す。図-1 に示すように、福岡 FIR 入域から CFDT Fix までの航跡は、飛行計画経路からの逸脱が少ないことがわかる。一方、図-2 を見ると、CFDT Fix から東京国際空港までの航跡は、ベクタリング (経路延長) が多くされ、滞留していることがわかる。つまり、福岡 FIR 入域から CFDT Fix までの非混雑空域、CFDT Fix から東京国際空港までの混雑空域と大別して分析することができると考えられる。そこで、図-3 に福岡 FIR 入域から CFDT Fix までの飛行距離、飛行時間、風速の散布図を、図-4 に CFDT Fix から東京国際空港までの飛行距離、飛行時間、風速の散布図を各々示す。ここで、各図中の赤線は線形回帰を仮定した回帰直線である。図-3 からわかるように、福岡 FIR 入域から CFDT Fix までには非混雑空域であるため、飛行距離のばらつきは小さい。一方、飛行時間や風速のばらつきは大きく、風速と飛行時間の関係を見ると、追い風が大きいほど飛行時間が短いことがわかる。さらに、飛行距離と飛行時間、飛行距離と風速との相関関係は弱く、飛行時間と風速との相関関係が強いことから、飛行時間のばらつきの主要因は風速であると考えられる。一方、図-4 に示すように、福岡 FIR 入域から CFDT Fix までの場合と比べて、CFDT Fix から東京国際空港までの飛行距離のばらつきは大きく、飛行距離と飛行時間の相関関係が強いことがわかる。また、福岡 FIR 入域から CFDT Fix までの場合と比べて、飛行時間と風速との相関関係が弱いことがわかる。つまり、飛行時間のばらつきの要因として、風速の影響は弱くなり、飛行距離の影響が強くなっていると考えられる。CFDT Fix から東京国際空港までの混雑空域において、経路延長により飛行距離が長くなるのが主要因となり、飛行時間が長くなると考えられる。現在、風速の影響について考察を深めるため、風速の影響を除去した交通流の分析を進めている<sup>9)</sup>。

航空機の運航では、各航空機の出発時刻や飛行時間に不確実性が生じる。そのような不確実性を吸収し、混雑空港での着陸容量の損失を避けるために、現在の運航では、一定量の航空機を混雑空域内で意図的に空中待機させている。混雑空域内での間隔調整のためのバッファを設け、バッファ内の空中待機時間を、混雑空域内での経路延長により調整している。バッファを超過した時間に対して、EDCT や CFDT により調整することとなる。

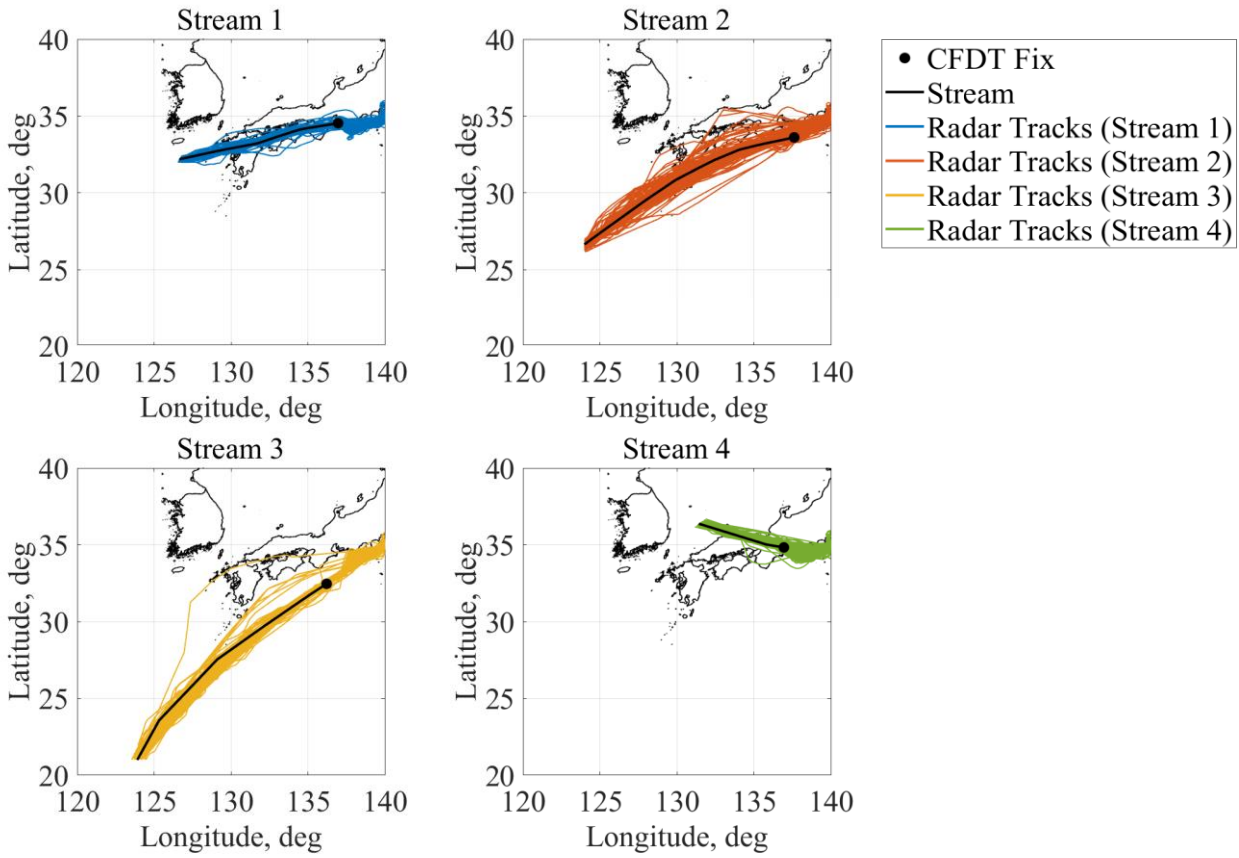


図-1 福岡 FIR 入域から CFDT Fix までの航跡

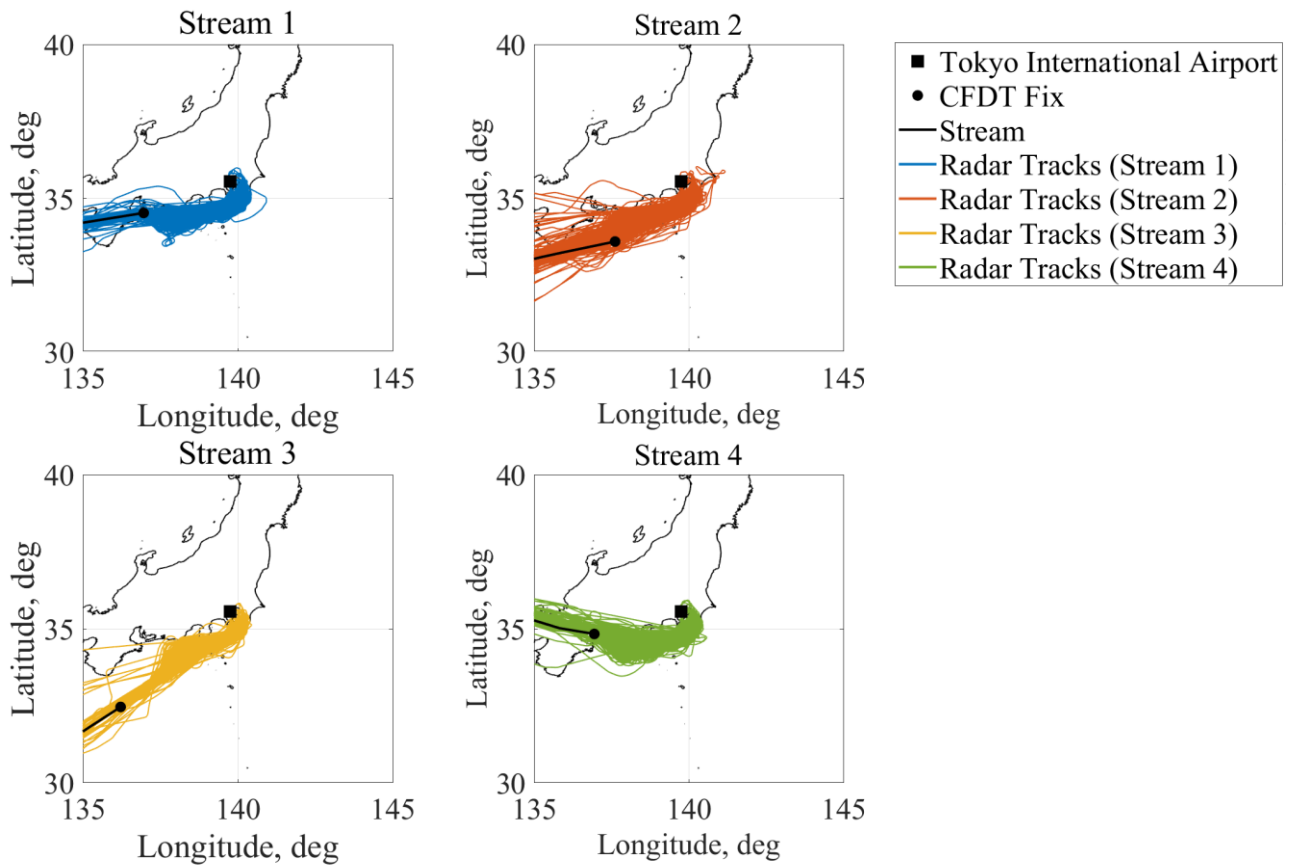


図-2 CFDT Fix から東京国際空港までの航跡

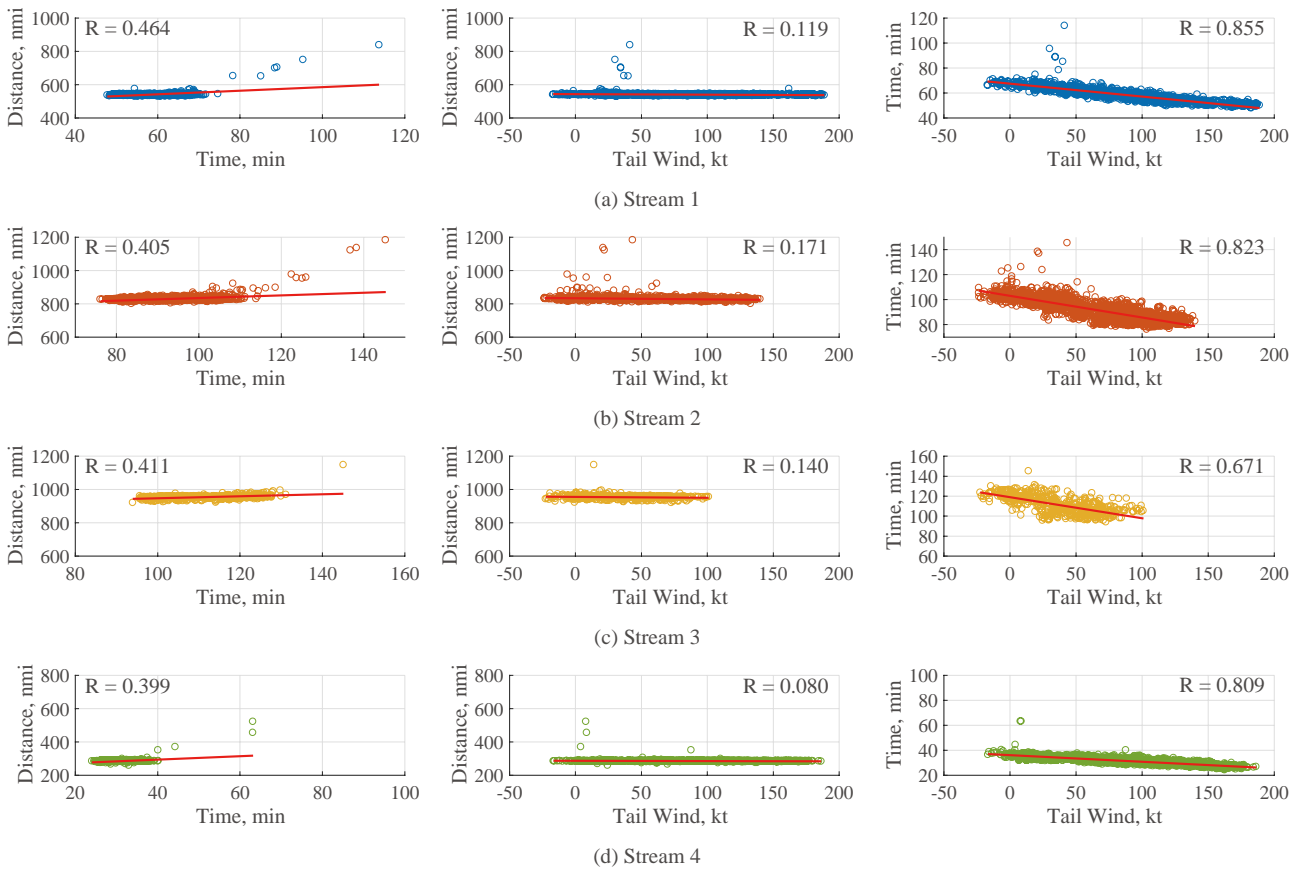


図-3 福岡 FIR 入域から CFDT Fix までの飛行距離・飛行時間・風速と相関関係 (R: 相関係数, 赤線: 回帰直線)

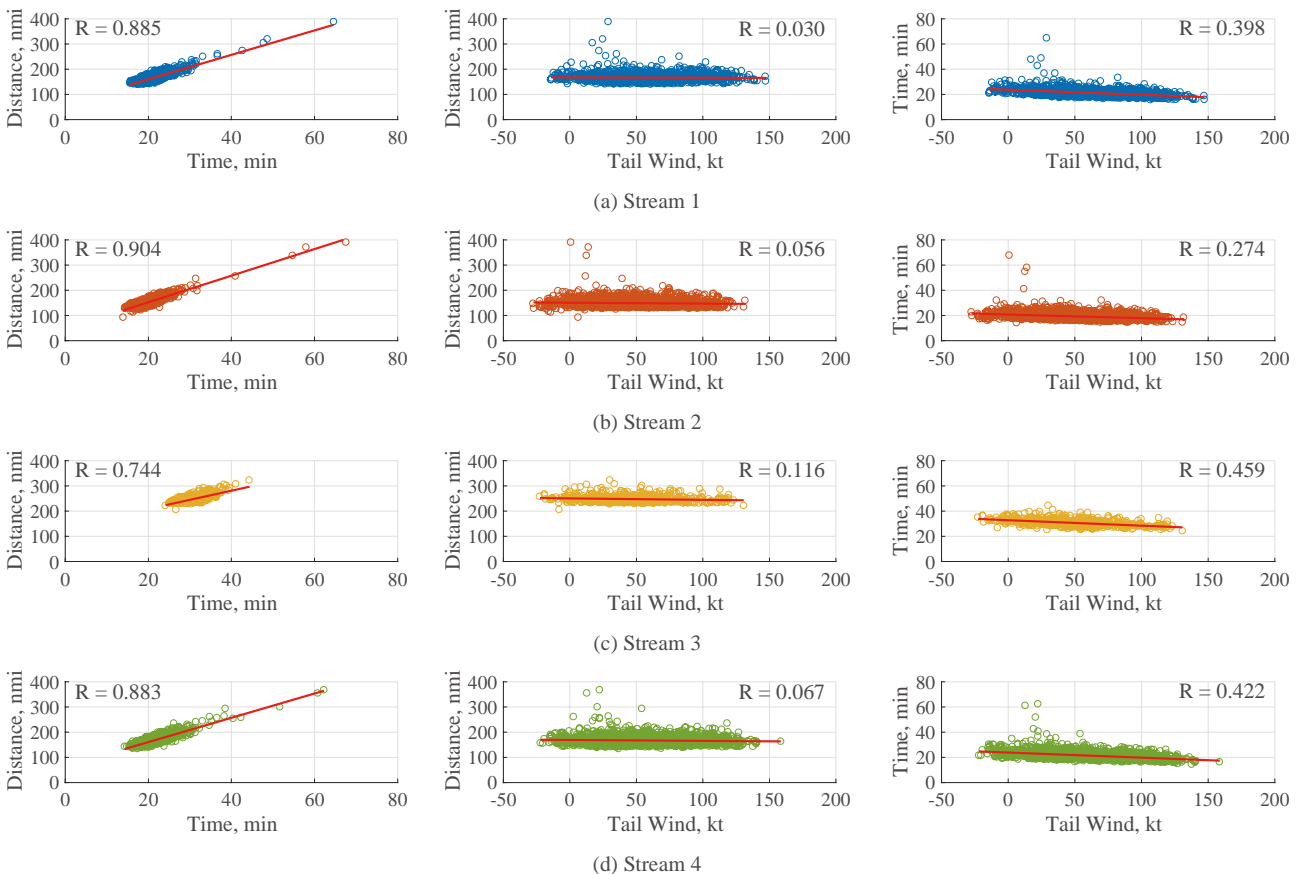


図-4 CFDT Fix から東京国際空港までの飛行距離・飛行時間・風速と相関関係 (R: 相関係数, 赤線: 回帰直線)



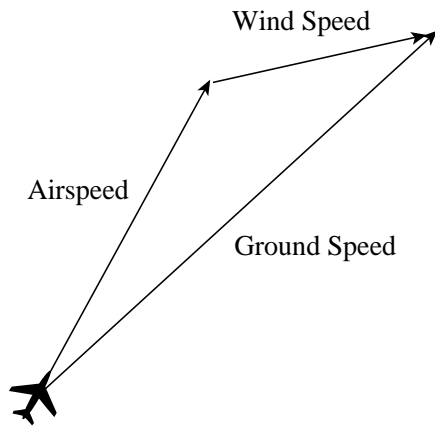


図-5 対地速度・対気速度・風速の関係速度

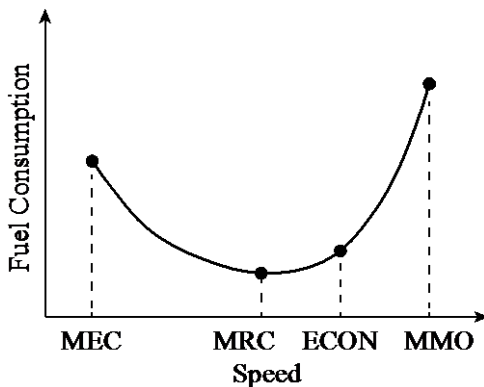


図-6 速度と燃料消費の関係

### 3. CFDT 制御の導入効果

#### (1) シミュレーション概要

航空機は、対気速度もしくはマッハ数を基準に巡航している。図-5 に対地速度 (Ground Speed), 対気速度 (Airspeed), 風速 (Wind Speed) の関係を示す。2 章で述べた CARATS オープンデータは、約 10 秒間隔の航跡データであり、対地速度を算出することはできるが、対気速度を算出することはできない。そこで、気象予測データを用いて、対気速度を推定する。ここで推定された飛行速度を巡航中のノミナル速度とし、CFDT 制御における速度調整前の飛行速度とする。通常、ノミナル速度は、ECON と呼ばれ、飛行時間と燃料消費等の経済性とのバランスを考慮して、各運航者により決定される。本研究では、CARATS オープンデータと気象予測データを用いて、表-1 及び図-1, 2 に示す全便に対して、各航空機の ECON を推定する。

本研究では、CFDT 制御による速度調整後の速度として 3通りの速度を検討する。1つ目は、Mach Max Operating (MMO) であり、運用上の最大速度である。2つ目は、Maximum Range Cruise (MRC) であり、CFDT Fix までの燃料消費量が最小となる速度である。3つ目は、Maximum Endurance Cruise (MEC) であり、CFDT Fix まで

の飛行時間が最大となる速度であり、運用上の最小速度とする。図-6 に一般的な速度と燃料消費との関係を示す。通常、ECON は MMO と MRC の間に設定される。また、MRC よりも MECの方が速度は遅くなる。

本解析では、速度調整により調整可能な時間幅及び速度調整による燃料消費への影響について解析を行う。機体性能モデルとして EUROCONTROL の Base of Aircraft Data (BADA) Family 4<sup>7)</sup>を使用する。BADA を用いることで、飛行時間や燃料消費等の機体性能に関連する解析が可能となる。ここで、MMO は機体性能に基づいて決定され、BADA により与えられる。また、MRC 及び MEC は、CFDT Fix までの燃料消費を最小化もしくは CFDT Fix までの飛行時間を最大化する最適化問題を解くことにより決定する。

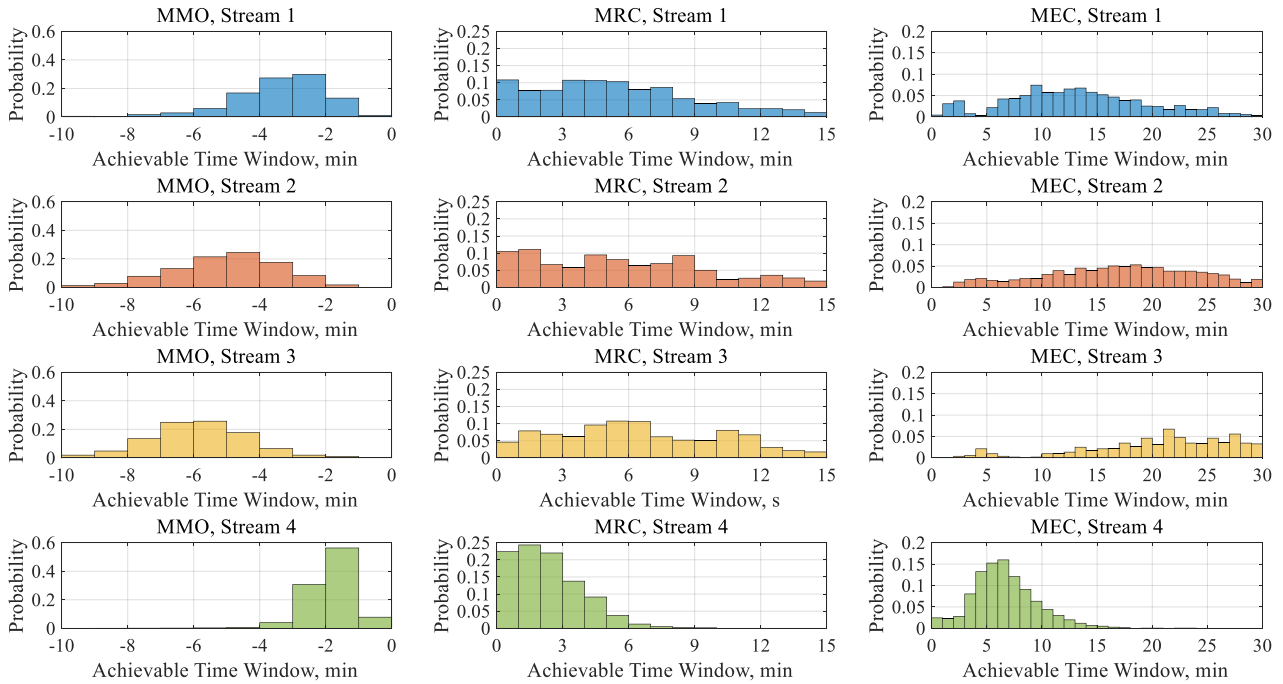
#### (2) シミュレーション結果

表-1 及び図-1 に示すように、東京国際空港に到着する国際線が飛行する Stream 1~4 を対象に、速度調整による調整可能時間幅及び燃料削減率について解析を行う。ECON からの速度調整による飛行時間の差分を調整可能時間幅 (=飛行時間 (速度調整後) -飛行時間 (速度調整前)) として算出する。ここで、調整可能時間幅が負であれば早着を、正であれば遅延を表している。また、燃料消費の差分についても、燃料削減率 (= (燃料消費 (速度調整後) -燃料消費 (速度調整前)) /燃料消費 (速度調整前)) として算出する。ここで、燃料削減率が正であれば、燃料消費の低減を表している。本解析では、巡航区間のみを対象としており、福岡 FIR 入域から CFDT Fix までの飛行時間及び燃料消費を算出する。ここで、文献<sup>8)</sup>を参考に、福岡 FIR 入域時点での機体重量を BADA で与えられる標準重量の 80%に設定する。本解析では、各航空機毎に ECON が推定されるため、調整可能時間幅及び燃料削減率についても各航空機毎に算出される。そのため、調整可能時間幅及び燃料削減率の統計的評価を行うことが可能となる。

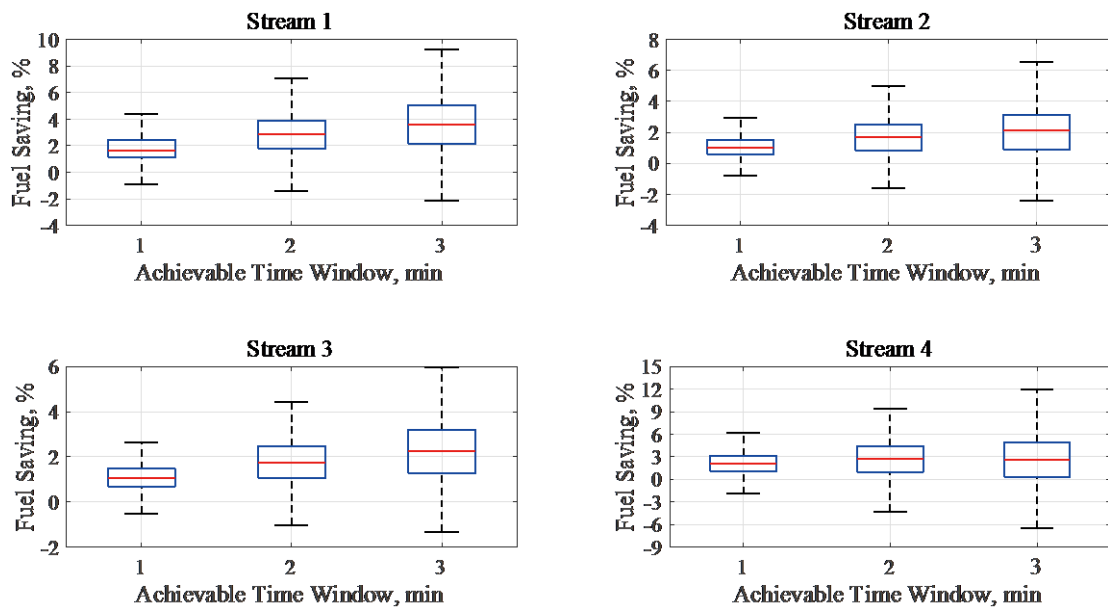
図-7 に、調整可能時間幅の度数分布を示す。表-1 に示すように、Stream 1~4 の飛行距離が異なるため、飛行距離の大小に応じて、調整可能時間幅も異なることがわかる。飛行距離が長い Stream 2 や 3 では、調整可能時間幅も長く、飛行距離が短い Stream 4 では、調整可能時間幅が短い。図-7 からわかるように、MMO までの加速により、80%以上の確率で Stream 1 では 2分、Stream 2 では 3分、Stream 3 では 4分、Stream 4 では 1分の早着が各々期待される。また、MRC までの減速により、約 80%の確率で Stream 1, 2 では 2分、Stream 3 では 3分、Stream 4 では 1分の遅延が期待される。さらに、MEC までの減速により、約 90%の確率で Stream 1~3 では 5分以上、Stream 4 では 3分の遅延が期待される。

さらに、**図-8** に調整時間幅と燃料削減率の関係を示す。1~3 分程度の遅延により、燃料消費の削減が期待できることがわかる。これは、**図-7** からわかるように、1~3 分程度の遅延であれば、高確率で MRC までの減速で達成可能であり、燃料消費の削減が期待されるため

ある。このように、飛行中の速度調整により遅延する場合、燃料消費の削減が期待されることから、CFDT 制御の導入にあたり、運航者に対してのインセンティブとして期待できる。



**図-7** 調整可能時間幅の度数分布



**図-8** 調整可能時間幅と燃料削減率の関係

#### 4. まとめ

本稿では、過去の航跡データを用いて、現状の交通流の分析を行った。非混雑空域及び混雑空域に大別した分析により、非混雑空域に比べて混雑空域では、飛行時間に対する風速の影響が低減し、経路延長により飛行距離を調整していることを主要因として、飛行時間が調整されていると考えられる。そして、CFDT 制御を模擬するシミュレーションにより、CFDT 制御の導入効果を定量的に評価した。1~3 分程度の遅延であれば、高確率で達成可能であり、燃料消費についても削減が期待される。飛行中の速度調整により遅延する場合、燃料消費の削減が期待されるため、運航者に対してのインセンティブとして CFDT 制御の導入が期待される。

#### 謝辞：

本研究を遂行するにあたり、国土交通省航空局より公開された CARATS オープンデータ及び京都大学生存圏研究所が運営する生存圏データベースにより配布された気象予測データを使用した。また、EUROCONTROL より提供された運航性能モデル BADA を使用した。ここに感謝の意を表す。

#### 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，2010.
- 2) Japan Civil Aviation Bureau: ATFM/CDM in JAPAN, *The 3rd Meeting of the International Civil Aviation Organization Asia/Pacific Air Traffic Flow Management Steering Group*, 2014.
- 3) 武市昇ほか：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，2018.
- 4) アンドレエバ森アドリアナほか：空中待機と地上待機のコストを考慮した出発制御時刻，日本航空宇宙学会論文集。(印刷中)
- 5) 岡恵ほか：航空交通の運用データの一般公開と活用，第 52 回飛行機シンポジウム，2014.
- 6) Andreeva-Mori, A. *et al.*: Congestion evaluation and unimpeded flight time calculation based on radar data analysis, *The 6th ENRI International Workshop on ATM/CNS*, 2019.
- 7) EUROCONTROL Experimental Centre: User Manual for the Base of Aircraft Data (BADA) Family 4 Version 1.3, 2016.
- 8) Nakamura, Y. and Kageyama, K.: Validation study of fuel-burn estimation, 2013 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology, 2013.