

令和 4 年 5 月 14 日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K04395

研究課題名(和文) フローコリドールの導入要件の解明とその便益向上の試み

研究課題名(英文) Assessment of Air Corridor Installation and its Efficiency Improvement

研究代表者

武市 昇 (TAKEICHI, NOBORU)

東京都立大学・システムデザイン研究科・教授

研究者番号：90371153

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：将来の航空交通管理においては、フローコリドールと呼ばれる細長い空域により航空輸送需要の大きな都市圏或いは空港を接続することが構想されている。自律間隔維持の機能を持つ航空機は、その内部を航空管制を要せずに最適軌道に沿って飛行できるので便益の大幅な向上が期待される。一方、それ以外の航空機は、フローコリドールの空域を避けながら飛行しなければならない、運航コストが増加する。本研究では、実運航データの解析により、我が国へのフローコリドールの導入が便益をもたらす要件として、自律間隔維持の所要の普及率を明らかにし、さらにその要となる四次元航法の精度の評価及び気象条件によるモデル化を実施した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、自律間隔維持の機能を大型機に優先的に導入することにより、その普及率が低い段階においても我が国の空域へのフローコリドールの導入が便益をもたらすことが明らかとなった。また、自律間隔維持の機能を持つ機体ほど大きな便益を得ることになるため、フローコリドールの導入が自律間隔維持の機能の普及を促進することも明らかとなった。また、その実現の要となる四次元軌道の精度を評価し、気象条件によるモデル化の手法を明らかにした。このモデルの活用により、気象条件に寄らず常にフローコリドールを安全かつ効率的に運航できるようになる。また、このモデルは今後の航空交通管理において広く活用できるものと期待される。

研究成果の概要(英文)：In the future air traffic management, the concept of flow corridors - long, narrow airspaces connecting metropolitan areas or airports with high air traffic demand - is envisioned. Aircraft with the ability of maintaining autonomous spacing will be able to fly within the corridor on an optimal trajectory without the need for the air traffic control, which is expected to significantly increase their benefits. On the other hand, other aircraft must fly while avoiding the flow corridor airspaces, which will increase operating costs. In this study, through the analysis of actual flight data, the required penetration rate of maintaining autonomous spacing was clarified as a requirement for the introduction of flow corridors into Japan to bring benefits. Furthermore, evaluation of the accuracy of four-dimensional trajectory, which is a key element to realize the flow corridor, and modeling of the flow corridor as a function of weather conditions were carried out.

研究分野：航空交通管理

キーワード：航空交通管理 フローコリドール 軌道最適化 四次元航法 データ解析

1. 研究開始当初の背景

将来の航空交通管理の計画では、自律間隔維持の機能を持つ航空機だけが飛行できる細長い空域の導入が計画されている。これは“フローコリドー”と呼ばれる。その内部では、自律間隔維持の機能を持つ航空機がほぼ最適軌道を飛行できる一方、自律間隔維持の機能が無い航空機はその外部を従来通り航空管制を受けながら飛行する。フローコリドーの導入は、従来の空域に高密度の運航が可能な細長い空域を付加することになるので、安全性を損なうことなく空域全体として交通容量を拡大できるものと期待されている。しかし、自律間隔維持の機能が無い航空機にとってフローコリドーは進入が禁止された巨大な障害物となり、回避するためには運航コストが増加してしまう。したがってフローコリドー導入の判断基準となる便益は、その内部および外部を飛行する航空機の運航コストの減少量および増加量の和で決定される。

また、フローコリドーの内部を飛行する航空機は、フローコリドーを出てから空港に着陸するまでの間に、フローコリドーを利用しない一般の航空機と合流して混雑空港へ着陸することとなる。将来の航空交通管理では、混雑空港の近傍のある特定の地点に置いて全ての航空機が、安全のために必要な一定以上の時間間隔を確保して合流することが想定されている。そしてフローコリドー内部では航空管制を受けないため、安全な運航のためにはその内部を飛行する航空機は各々の合流地点への到着時刻を自律的に遵守することが必要となる。したがって、合流地点への到着時刻の精度がフローコリドーの実現性のもう一つの要となる。

2. 研究の目的

フローコリドーの導入便益はそれを利用できる航空機の割合により決定されるので、運航コストの評価から便益をもたらすための利用率の要件が求まる。そこで本研究では、まず、フローコリドー導入が便益をもたらす利用率の条件、および利用率を向上させる方策を明らかにする。次に、フローコリドーを利用する航空機の合流地点への到着時刻の精度の評価及び気象条件や飛行条件を考慮したモデル化の手法を明らかにする。

3. 研究の方法

本研究では、ジェット旅客機の実運航データ、航空機の性能データ、気象データを用いる。まず、フローコリドーの内部/外部を飛行する航空機の運航コストの減少量/増加量の評価により、フローコリドーが便益をもたらすための利用率の要件を明らかにする。また、フローコリドー内部の最適軌道に沿って飛行する航空機の飛行時間に生じるばらつきの大さを求めるとともに、それを気象条件と飛行条件の関数としてモデル化する。

4. 研究成果

4.1. 便益評価によるフローコリドーの導入要件の解明

本研究では、単一の航空路としては最大の交通量を有する福岡発東京着の経路に注目する。図1にそのある一日の飛行軌跡を示す。全ての便がFLUTEというウェイポイントを通過してATC Sector内で管制指示を受ける。本研究では、フローコリドーを航空管制の妨害とならないように配置することを想定し、FLUTE付近までは福岡から東京へ向かう標準的な経路に従い、FLUTE付近の通過後はこのセクターの最も内側を通るようにフローコリドーを配置することとした。この経路を図1に赤線で示す。

次にフローコリドーの導入前後の運航コストを比較する。実際に運航されている代表的な大型機、中型機、小型機に着目し評価する。フローコリドーの内部を飛行する便に関してはその最適軌道と実軌道の比較により期待されるコスト低減量を求めた。複数の機種・質量の最適軌道を図2に示す。この解析により、一便あたりのコスト低減量が求まる。また、フローコリドーの外部を運航する便は、フローコリドーの空域を回避するため遠回り或いは高度の変更が必要となる。これによるコスト増加量を評価した。回避する飛行軌道の具体例を図3に示す。この解析により一日あたりのコスト増加量が求ま

る。

一便あたりのコスト低減量と、一日あたりのコスト増加量から、コストを低減するために必要なフローコリドー利用率が求まる。結果として大型機の35.6%以上の機材が自律間隔維持の機能を導入してフローコリドー内を飛行できるようになるだけで、その導入の便益を得られることが明らかとなった。

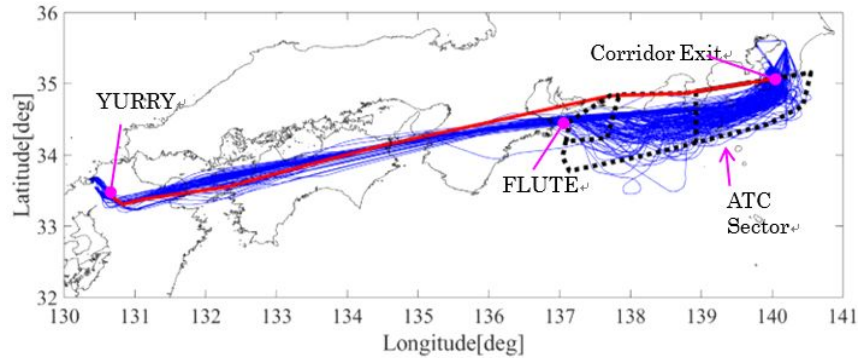


図1 ある一日の福岡発東京着の便の水平面内の軌跡およびフローコリドー空域 (青線: 実運航軌道, 赤線: フローコリドー空域)

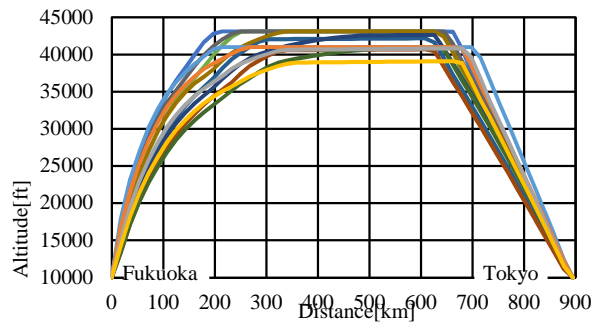


図2 複数の離陸質量の複数の機種種の最適軌道の気圧高度の履歴

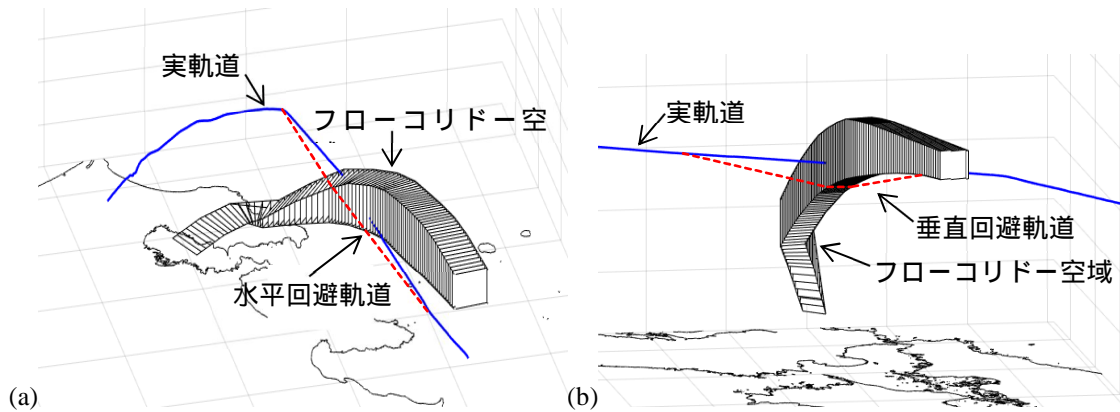


図3 回避軌道の具体例, (a) 水平回避, (b) 垂直回避

4.2. 飛行時間のばらつきの評価とそのモデル化

対地速度 V_{GS} , 対地速度ベクトルに沿う真対気速度 V_{TAstr} , 追い風 W_t , 横風 W_c , 機上で計測されるIASに対応する真新対気速度 V_{TASm} の関係式の全微分から以下の関係を得た。ただし、マッハ数 M , 比熱比 κ , 気体定数 R , 気温 T としている。

$$dt = \frac{D}{(\sqrt{M^2\kappa RT - W_c^2} + W_t)^2} \left(-dW_t + \frac{W_c dW_c}{\sqrt{M^2\kappa RT - W_c^2}} - \frac{M^2\kappa R dT}{2\sqrt{M^2\kappa RT - W_c^2}} - \frac{M\kappa RT dM}{\sqrt{M^2\kappa RT - W_c^2}} \right) \quad (7)$$

$$= -\frac{D}{V_{GS}^2} \left(dW_t - \frac{W_c}{V_{TAstr}} dW_c + \frac{M^2\kappa R}{2V_{TAstr}} dT + \frac{M\kappa RT}{V_{TAstr}} dM \right)$$

これより飛行時間のばらつきモデルの理論式を得る。

$$\sigma_t^2 = \left(\frac{D}{V_{GS}^2}\right)^2 \left(1 + \left(\frac{W_c}{V_{TAStr}}\right)^2\right) \sigma_W^2 + \left(\frac{D}{V_{GS}^2}\right)^2 \left(\frac{M^2 \kappa R}{2V_{TAStr}}\right)^2 \sigma_T^2 + \left(\frac{D}{V_{GS}^2}\right)^2 \left(\frac{M \kappa R T}{V_{TAStr}}\right)^2 \sigma_M^2 \quad (8)$$

次にこの理論式に基づき、実運航データを用いて定量的にも正しいばらつきモデルを得る。そのため本研究ではクラスタリングにより似たような飛行条件及び気象条件のデータを得て、そのばらつきと各パラメータの重回帰分析により定量的にも正しいモデルを得られることを明らかにした。さらにこのモデルにより、任意の速度や距離などの飛行条件および気象条件において正確にばらつきを予測できることを明らかにした。

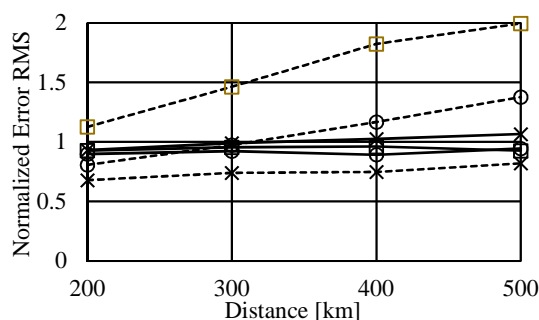


図 20 正規化誤差の RMS，実線：提案モデル，点線：従来モデル，□：厳しい気象条件，○：通常の気象条件，×：穏やかな気象条件，

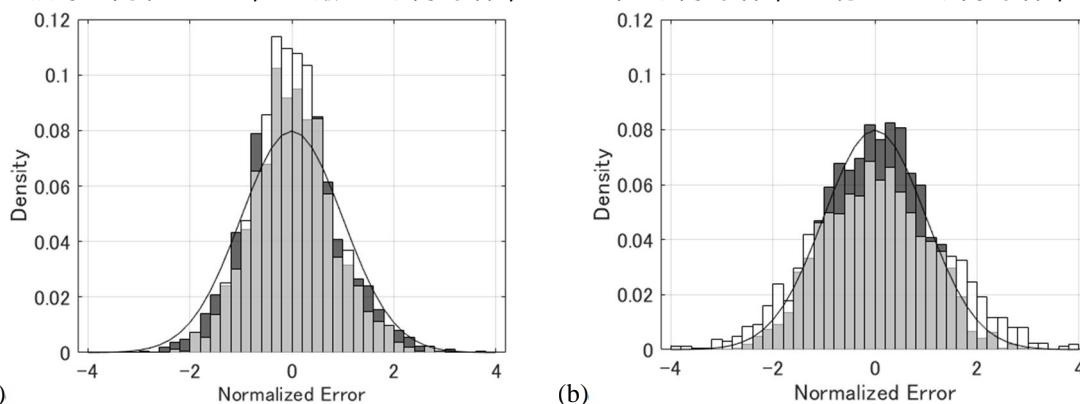


図 21 200km における正規化誤差のヒストグラム，実線：N(0,1)の正規分布，黒：提案モデル，白：従来モデル，a: 穏やかな気象条件，b: 厳しい気象条件

4.3. まとめ

本研究では、福岡から東京へ向かうフローコリドーを対象にしたコスト評価により、大型機のうち3分の1強が自律間隔維持の機能によりフローコリドーを利用できるようになるだけで、空域全体として運航コストを低減できることを明らかにした。この結果から、自律間隔維持の機能を大型機から優先的に導入することにより、その普及率が低い条件にあってもフローコリドーの導入が便益をもたらすことが明らかとなった。さらに、フローコリドーの導入そのものが、自律間隔維持装置の普及を促進することにもなるものと考えられる。次に、フローコリドーを利用する航空機の予測飛行時間の不確かさの正確な予測方法を明らかにした。理論に基づいてモデル式を導出し、実データ解析によりその係数を決定することにより予測モデルを求めた。このような手順により、極めて精度の高いモデルを得ることができた。また、この予測モデルは、将来の軌道ベース運用において広く活用し得るものである。その実運航への適用方法とその有効性を明らかにすることも今後の重要な課題となる。

5 . 学術論文及び学会発表

・査読付き論文

1. Takeichi, N., Yamada, T, Senoguchi, A., and Koga, T, “Development of a Flight Time Uncertainty Model for 4D Trajectory Management,” AIAA Journal of Air Transportation, Vol. 28, No. 3, 2020, pp. 134–143.
2. 山田大輝, 武市昇, “飛行時間の機上予測の不確かさのモデリングとその時間管理への応用,” 日本航空宇宙学会論文集, Vol. 68, No. 1, 2020, pp.38-46.
3. 芹田樹, 武市昇, 原田明德, “上昇軌道における質量推定による巡航飛行時間の予測精度向上の試み,” 日本航空宇宙学会論文集, Vol. 68, No. 1, 2020, pp.7-11.
4. 山本聡史, 諸岡康郎, 武市昇, 原田明德, “フローコリドールの導入が便益をもたらすための利用率の推定,” 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol. 75, No. 2, 2019, pp. 90-96.
5. Takeichi, N., “Adaptive Prediction of Flight Time Uncertainty for Ground-Based 4D Trajectory Management,” Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Vol. 95, 2018, pp.335–345.

・学会発表

1. 武市昇, 橋本涼太, “予測飛行時間の不確かさの正確な予測,” 3A08, 第 59 回飛行機シンポジウム, オンライン開催, 2021 年 11 月 30 日 ~ 12 月 2 日.
2. Takeichi, N. and Hashimoto, R. “Modeling of Flight Time Prediction Uncertainty for Four-Dimensional Descent Trajectory Management,” 14th Air Traffic Management Research and Development Seminar (ATM2021), Online, Sep. 20-23, 2021.
3. 古堅翔大, 橋本涼太, 武市昇, “航空機の降下軌道における予測飛行時間の不確かさの評価,” 第 58 回飛行機シンポジウム, オンライン開催, 2020 年 11 月 25-27 日.
4. Takeichi, N., and Yamada, T., “Direct Modelling of Flight Time Uncertainty as a Function of Flight Condition and Weather Forecast,” 13th Air Traffic Management Research & Development Seminar, Vienna, Austria, June 17-21, 2019.
5. 芹田樹, 武市昇, 原田明德, “上昇軌道における質量推定を活用した巡航軌道の予測精度の向上,” 日本航空宇宙学会第 50 期年会講演会, 東京, 2019 年 4 月 18-19 日.
6. Morooka, Y., Takeichi, N., Yamamoto, S. and Harada, A., “Feasibility Study of a Layered Air Corridor through Direct Operational Cost Evaluation,” AIAA-2019-1362, AIAA Digital Avionics Conference, San Diego, CA, 7-11 Jan. 2019.
7. Takeichi, N., Yamamoto, S., Morooka, Y. and Harada, A., “Potential Cost-Benefit Analysis for the Assessment of Air Corridor Installation into Japanese Airspace,” Winter Simulation Conference 2018, December 9-12, Gothenburg, Sweden, 2018.
8. 山本聡史, 諸岡康郎, 原田明德, 武市昇, “フローコリドール空域の改善による便益向上の試み,” 第 56 回飛行機シンポジウム, 山形, 2018 年 11 月 14 日 ~ 16 日.
9. 山田大輝, 武市昇, “機上軌道予測の不確かさのモデリングとその時間管理への適用,” 第 56 回飛行機シンポジウム, 山形, 2018 年 11 月 14 日 ~ 16 日.
10. 山田大輝, 武市昇, “機上軌道予測の不確かさのモデリングとその時間管理への応用,” 2018 年度航空交通システム研究会, 那覇, 2018 年 9 月 3 日.
11. 諸岡康郎, 武市昇, “フローコリドール内部への層経路構成の導入,” 2018 年度航空交通システム研究会, 那覇, 2018 年 9 月 3 日.
12. 武市昇, 山本聡史, 諸岡康郎, 原田明德, “フローコリドール : 期待される効果と導入要件,” 第 57 回土木計画学研究発表会・春大会, 東京, 2018 年 6 月 9-10 日.

6 . 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名 : 原田 明德

ローマ字氏名 : (HARADA, Akinori)

所属研究機関名 : 高知工科大学

部局名 : システム工学群

職名 : 准教授

研究者番号 : 70785112

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Takeichi Noboru, Yamada Taiki, Senoguchi Atsushi, Koga Tadashi	4. 巻 28
2. 論文標題 Development of a Flight Time Uncertainty Model for Four-Dimensional Trajectory Management	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Air Transportation	6. 最初と最後の頁 134 ~ 143
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2514/1.D0185	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 山田大輝, 武市昇	4. 巻 68
2. 論文標題 飛行時間の機上予測の不確かさのモデリングとその時間管理への応用	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本航空宇宙学会論文集	6. 最初と最後の頁 38-46
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2322/jjsass.68.38	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 山本聡史, 諸岡康郎, 武市昇, 原田明德	4. 巻 75
2. 論文標題 フローコリダーの導入が便益をもたらすための利用率の推定	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 土木学会論文集D3 (土木計画学)	6. 最初と最後の頁 90-96
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejipm.75.90	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 芹田樹, 武市昇, 原田明德	4. 巻 68
2. 論文標題 上昇軌道における質量推定による巡航飛行時間の予測精度向上の試み	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本航空宇宙学会論文集	6. 最初と最後の頁 7-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2322/jjsass.68.7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takeichi Noboru	4. 巻 95
2. 論文標題 Adaptive prediction of flight time uncertainty for ground-based 4D trajectory management	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Transportation Research Part C: Emerging Technologies	6. 最初と最後の頁 335 ~ 345
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.trc.2018.07.028	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

[学会発表] 計11件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 古堅翔大, 橋本涼太, 武市昇
2. 発表標題 航空機の降下軌道における予測飛行時間の不確かさの評価
3. 学会等名 第58回飛行機シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takeichi, N. and Yamada, T.
2. 発表標題 Direct Modeling of Flight Time Uncertainty as a Function of Flight Condition and Weather Forecast
3. 学会等名 13th Air Traffic Management Research and Development Seminar (ATM2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Morooka, Y., Takeichi, N., Yamamoto, S. and Harada, A.
2. 発表標題 Feasibility Study of a Layered Air Corridor through Direct Operational Cost Evaluation
3. 学会等名 AIAA Digital Avionics Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takeichi, N., Yamamoto, S., Morooka, Y. and Harada, A.
2. 発表標題 Potential Cost-Benefit Analysis for the Assessment of Air Corridor Installation into Japanese Airspace
3. 学会等名 Winter Simulation Conference 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山本聡史, 諸岡康郎, 原田明德, 武市昇
2. 発表標題 フローコリドー空域の改善による便益向上の試み
3. 学会等名 第56回飛行機シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 武市昇, 山本聡史, 諸岡康郎, 原田明德
2. 発表標題 フローコリドー：期待される効果と導入要件
3. 学会等名 第57回土木計画学研究発表会・春大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 諸岡康郎, 武市昇
2. 発表標題 フローコリドー内部への層経路構成の導入
3. 学会等名 2018年度航空交通システム研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山田大輝, 武市昇
2. 発表標題 機上軌道予測の不確かさのモデリングとその時間管理への適用
3. 学会等名 第56回飛行機シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 芹田樹, 武市昇, 原田明德
2. 発表標題 上昇軌道における質量推定を活用した巡航軌道の予測精度の向上
3. 学会等名 日本航空宇宙学会第50期年会講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takeichi, N. and Hashimoto, R.
2. 発表標題 Modeling of Flight Time Prediction Uncertainty for Four-Dimensional Descent Trajectory Management
3. 学会等名 14th Air Traffic Management Research and Development Seminar
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 武市昇, 橋本涼太
2. 発表標題 予測飛行時間の不確かさの正確な予測
3. 学会等名 第59回飛行機シンポジウム
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	原田 明德 (Harada Akinori) (70785112)	高知工科大学・システム工学群・准教授 (26402)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------