

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成30年6月28日現在

機関番号：26402

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2016～2017

課題番号：16H07143

研究課題名（和文）高効率航空交通システム実現のための定期旅客便の運航解析

研究課題名（英文）Operational Analysis of Scheduled Flight for Efficient Air Traffic System

研究代表者

原田 明德（Harada, Akinori）

高知工科大学・システム工学群・講師

研究者番号：70785112

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,300,000円

研究成果の概要（和文）：世界的な航空交通需要の増加を背景に、我が国においても航空交通量のさらなる増加が予測されており経済性、利便性の低下が懸念されている。本研究は、我が国において交通量の増加に対応できる高効率な航空交通システムを実現するために現在の国内定期便の運航効率を軌道最適化の観点から客観的かつ統計的に分析、評価することで効率向上につながる重要な知見を得ることが目的である。実際の飛行航跡データを用いて客観分析を実施し、効率の良い運航により削減できる燃料消費量および飛行時間を定量化するとともに効率の低下を招く複数の要因を明らかにすることができた。また、最適軌道を用いて地上側で軌道予測を行う手法を新たに提案した。

研究成果の概要（英文）：With regard to the significant increase in global air traffic demands, by 2027, Japanese air traffic is anticipated to increase by half of that recorded in 2005. This research project aims to obtain the important findings which contribute realizing an efficient air traffic system in Japan, by statistically analyzing operational efficiency of current Japanese air traffic system from the perspective of flight trajectory optimization. The potential benefits which are represented by fuel consumption and flight time savings could be quantified by applying the developed analysis method to the actual flight track data. The analysis also revealed major factors which cause significant deterioration of operational efficiency. Further, a novel trajectory prediction method based on the developed trajectory optimization procedures could be proposed.

研究分野：航空宇宙工学

キーワード：航空交通管理 実運航データ 運航効率向上 飛行軌道最適化 到着管理 潜在便益評価 軌道予測

1. 研究開始当初の背景

世界的な航空交通需要の増加を背景に、我が国においても航空交通量のさらなる増加が予測されている。交通量の増加は経済性、利便性および安全性の低下を招くため、航空交通量の増加に対応すべく新たな航空交通システムの実現に向け米国では NextGEN、欧州では SESAR と呼ばれる長期ビジョンが掲げられている。我が国においては国土交通省航空局が中心となり長期的な展望にもとづく開発計画 CARATS (Collaborative Actions for Renovation of Air Traffic Systems, 将来交通システムの変革に向けた協調的行動) が策定され研究開発の促進が図られている。CARATS が目指す高効率な運航方式の一つとして軌道ベース運用が提案されている。これは日本の飛行情報区を一つの大きな統合された空域として捉え、すべての航空機が最大限の経済効率を達成できるように出発から到着までを一体的に管理するものである。本研究は軌道ベース運用の考え方をもとに現在の国内定期旅客便の運航効率を客観的かつ統計的に分析、評価するものであり、我が国において高効率な航空交通システムを実現するために必要な新たな知見を得ることができると期待される。

2. 研究の目的

経済的に高効率な運航を実現するためには時々刻々変化する気象条件や空力、推進装置などの機体性能を考慮し、各機体が飛行高度や速度、経路を自由に選択、変更できることが望ましい。すなわち機体の 3 次元位置と速度を最適化する 4 次元飛行軌道最適化が中核技術となる。本研究は時間管理の機能が備わった 4 次元軌道最適化の計算方法を確立し、経済効率の高い運用方式と現在の運用方式を比較することで、運航効率の向上につながる重要な知見を得ることが目的である。具体的には以下の 2 つである。

(1) 交通量の多い国内主要空港を発着する定期旅客便の飛行軌跡を軌道最適化の観点から分析し、消費燃料および飛行時間について潜在的な便益を評価することで運航効率向上の可能性を示す。

(2) 国内すべての空域について、実際の飛行と最適化された飛行を比較することで効率を低下させる要因を抽出するとともに、混雑や他機との干渉、空域制限により運航効率が低下している部分を特定する。

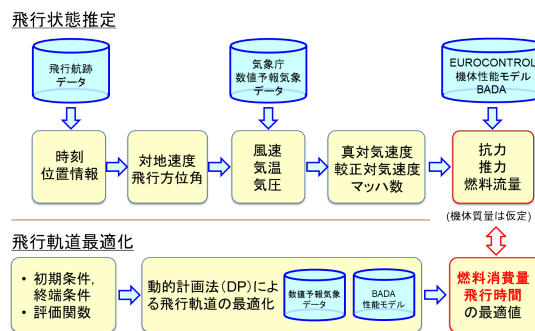
3. 研究の方法

4 次元軌道最適化技術および飛行状態推定技術からなる客観分析手法を研究の柱とし実際のデータを用いて上記の目的を達成するための解析を行う。

(1) 到着管理を考慮した 4 次元軌道最適化

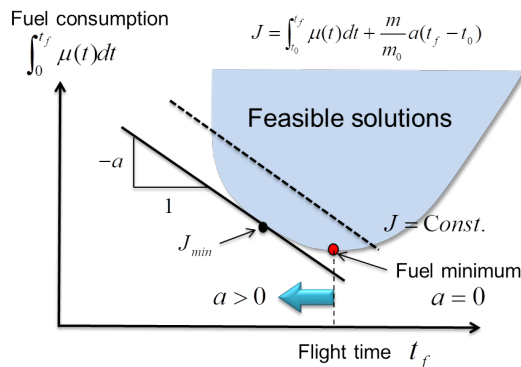
理想的な運航により得られる便益を明らかにするには、まず現行の運用において旅客機の燃料消費量を把握する必要がある。これ

は第 1 図の上段のように、与えられた時刻と位置のデータから対地速度を算出し、気象庁発表の気象データおよび航空機性能モデル BADA を組み合わせることで推定することができる。この一連のプロセスを飛行状態推定と呼んでいる。これに対し実際の飛行と境界条件を揃え、燃料消費量と飛行時間からなる評価関数を定めて飛行軌道の最適化を行うことで燃料消費量と飛行時間の最適な値を得ることができる。これらを実際と比較することで最適な運航により得られる便益を定量化することができる。



第 1 図 飛行状態推定と飛行軌道最適化

第 2 図に旅客機 1 機に対する最適化に用いる評価関数の概念図を示す。燃料と飛行時間からなる評価関数 J を定義しており a は時間調節のためのパラメタである。この a は実際の運航で使用されているコストインデックス (Cost Index, CI) と呼ばれるパラメタに対応している。 a を変化させることで異なる飛行時間に対する燃料最小軌道が得られパレート面が形成される。



第 2 図 評価関数とパレート面との関係

到着便については滑走路まで誘導される前の合流点で適切な間隔を維持する必要があるが、これは到着順序と到着時刻を最適化することで求める。航空機識別のための番号と軌道最適化で使用した a の 2 変数に組み合わせ最適化を適用することで、各機体に到着順序が割り当てられ適切な到着時刻となるようパラメタ a の値が決まる。この到着順序・時刻の最適化では評価関数は対象とする全到着機の燃料消費量の総和とした。安全性確保のため到着時刻間隔の最小値は実運用で定められている 90 秒とした。この 2 段階方式により全ての機体が最適な時間および

順序で合流点を通過するようになり到着管理を考慮した最適飛行軌道が得られる。

(2) 使用データ

実際の運航データとして以下のデータを使用する。

・ CARATS Open Data2012

国土交通省航空局が公開するレーダデータで、日本の飛行情報区内を飛行する定期便の時刻と位置情報が 42 日分格納されている。現在では 2015 年度版まで公開されている。

・ GPS ロガーで記録したデータ

市販の GPS ロガーにより客室内で計測したデータ。1 秒間隔で取得でき精度が高い。

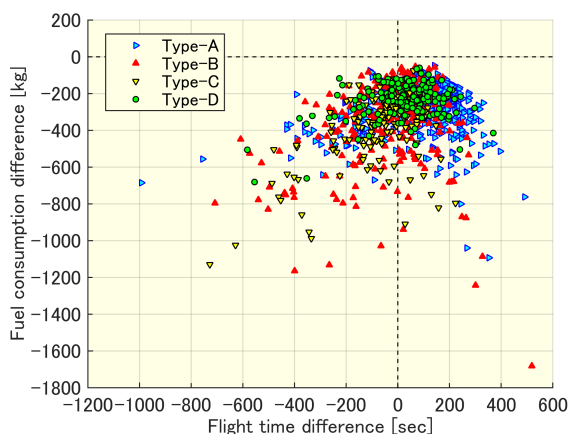
・ ADS-B データ

自動従属監視システムにより機体から放送されるデータを地上で取得したもの。一度に複数の機体の情報が得られる。

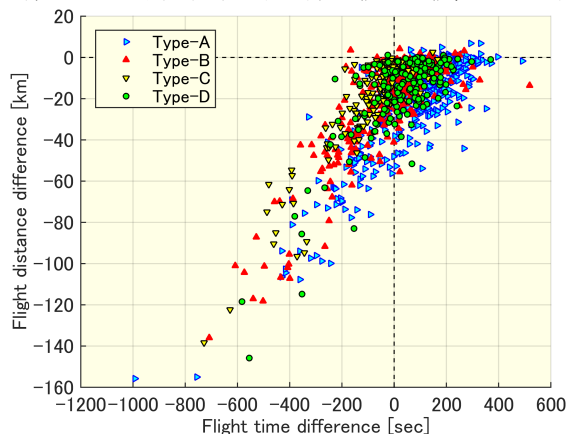
4. 研究成果

(1) 最適運航により得られる便益の客観分析

CARATS Open Data2012 より主要 4 機種による国内線定期便のデータを抽出し、軌道最適化による客観分析を実施したところ燃料消費量と飛行距離の 1 日 1 便当たりの平均削減量がそれぞれ約 300 [kg]、約 20 [km]であることが分かった。第 3 図および第 4 図は最適軌道の飛行時間の実際の飛行時間からの差を横軸にとって燃料消費量と飛行距離の差をプロットした結果である。



第 3 図 時間と燃料の差 (最適値-実値, 1087 便)



第 4 図 時間と距離の差 (最適値-実値, 1087 便)

これら統計解析の結果を羽田または成田空港の出発便と到着便およびそれ以外に分けて図示したところ両空港への到着便において効率低下が顕著である一方、両空港からの出発便の効率はほとんど影響を受けていないことが明らかとなった。また、効率が低下するケースとして、管制からの迂回指示がある場合意外にも、長い路線で風の影響が出る場合、目的空港へ早く到着するために低高度を高速で飛行する場合などの特徴を抽出することができた。

(2) 到着管理機能を有する軌道最適化ツールによる運航効率評価

2014 年にミュンヘン国際空港周辺で取得した飛行データを用いて到着便の運航効率を評価した結果、同空港の効率は維持されていることが分かった。これにより同空港に導入されている到着管理システム AMAN の有用性が示された。

(3) Dynamic Weather Routing による長距離路線の最適化

現在の運用ではすべての定期便は航空路に沿って運航しているが、この航空路によらず風向きなどの気象条件を考慮した効率の良い経路を自由に飛行できた場合の巡航フェーズにおける時間と燃料の削減量を求めた。国内線であっても羽田-那覇、新千歳-福岡などの長距離路線では最大で 6 分程度、燃料消費量にして約 450 [kg]削減可能であることが明らかとなった。また、ジェット気流の強い冬季に向かい風で飛行する便ほど風最適経路と実際に飛行した経路との差が顕著であり時間と燃料の削減量も大きくなることが分かった。

(4) 動的計画法による新たな軌道最適化手法の提案

本研究の軌道最適化計算では数値最適化手法である動的計画法を用いている。この手法では状態を格子点で表現しそれらの組み合わせを効率よく調べることで大域的最適解を得ることができるが、状態変数と入力変数の数に差がある場合は格子点同士をつなげられないという課題があった。この問題に対し、研究代表者が過去に所属した研究グループにおいて、格子点の間の点での評価関数値を線形近似により得る区分線形近似動的計画法が提案されておりこの方法を高度、速度、経路角の 3 変数を最適化する縦の軌道最適化問題に適用できることを示した。これにより、次世代飛行管理システム NG-FMS で提案されている参照軌道が動的計画法により生成可能であることが示唆された。

(5) 最適軌道を用いた軌道予測手法の提案

開発した軌道最適化ツールではコストインデックスに対応するパラメータを調節することで飛行時間の異なる燃料最適軌道が得ら

れることから飛行管理システムFMSの飛行コマンドの再現を試みた。実際の経路と同一の経路上を飛行し、高度および速度のみ最適化したところ、実際の高度と速度の軌道によく合う最適軌道が得られ、さらに定点通過あるいは定点到着時刻をある程度の精度で予測できることが明らかとなった。このことから、地上側での軌道予測における本手法の可能性が示された。最適軌道によりFMSの軌道を予測する方法は類似の研究が少なく今後のさらなる発展につながると期待される。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計3件)

①A. Harada, T. Ezaki, T. Wakayama and K. Oka, "Air Traffic Efficiency Analysis of Airliner Scheduled Flights Using Collaborative Actions for Renovation of Air Traffic Systems Open Data," Journal of Advanced Transportation, peer reviewed, Vol. 2018, No. 2734763, 2018.

doi.org/10.1155/2018/2734763

②A. Harada, "Numerical Investigation on Flight Trajectory Optimization Methods," Air Traffic Management and Systems II. Lecture Notes in Electrical Engineering, Springer, peer reviewed, Vol. 420, 2017, pp. 89-112.

doi.org/10.1007/978-4-431-56423-2_5

③田村恵一, 原田明德, 樋口雄紀, 松田治樹, 宮沢与和: 貨物便の飛行データを用いた航空機の性能モデルに関する研究, 日本航空宇宙学会航空宇宙技術, 査読有, Vol. 16, 2017, pp. 27-36.

doi.org/10.2322/astj.16.27

[学会発表] (計10件)

①原田明德, 近藤拓茉, 岡宏一: 高精度軌道予測のための飛行管理ツールの開発, 日本航空宇宙学会第55回飛行機シンポジウム, 2017.11.

②永栄賢也, 原田明德, 岡宏一: 国内長距離路線に対するDynamic Weather Routing, 日本航空宇宙学会第55回飛行機シンポジウム, 2017.11.

③A. Harada, T. Ezaki, T. Wakayama and K. Oka, "Cost Index Estimation via Optimization based Trajectory Prediction," 5th ENRI International Workshop on ATM/CNS (EIWAC2017), 2017.11.

④T. Wakayama, T. Ezaki, A. Harada and K. Oka, "A Possibility of Continuous Descent Operation in the Congested Airspace," 5th ENRI International Workshop on ATM/CNS (EIWAC2017), 2017.11.

⑤A. Harada, T. Ezaki and K. Oka, "Dynamic Weather Routing for Japanese

Long-Distance Flight," Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology (APISAT2017), 2017.10.

⑥A. Harada, T. Ezaki, T. Wakayama and K. Oka, "Air Traffic Efficiency Analysis of Airliner Scheduled Flight using CARATS Open Data," Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology (APISAT2016), 2016.10.

⑦K. Tamura, A. Harada, Y. Higuchi, H. Matsuda and Y. Miyazawa, "Accuracy Evaluation of an Aircraft Performance Model using Cargo Flight Data for Air Traffic Management Research, Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology," Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology (APISAT2016), 2016.10.

⑧C. Nami, K. Oka and A. Harada, "Structured H_{∞} Controller Synthesis Applied to the Flight Controller of QTW-UAV by Using Meta-Heuristic Particle Swarm Optimization," Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology (APISAT2016), 2016.10.

⑨原田明德, 江崎亨, 和賀山智晃, 岡宏一: CARATS Open Dataを用いた国内定期旅客便の運航効率解析, 日本航空宇宙学会第54回飛行機シンポジウム, 2016.10.

⑩A. Harada, Air Traffic Efficiency Evaluation by Trajectory Optimization and ADS-B Data, 30th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS2016), 2016.09.

[その他]

ホームページ等

①高知工科大学 教員情報

<https://www.kochi-tech.ac.jp/profile/ja/harada-akinori.html>

②一般社団法人日本航空宇宙学会 航空交通管理部門

<http://branch.jsass.or.jp/atmcom/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

原田 明德 (HARADA, Akinori)
高知工科大学・システム工学群・講師
研究者番号: 70785112

(2) 研究分担者

該当なし

(3) 連携研究者

該当なし

(4) 研究協力者

該当なし