

17. 国内定期旅客便の運航効率の客観分析に関する研究

九州大学 ※宮沢 与和, 原田 明德, ビクラマシンハ ナビンダ, 宮本 侑斗, 小塚 智之
航空交通管理領域 福田 豊

1. はじめに

航空交通において、個々の航空機の性能は世代とともに向上しているが、交通量の増大にともなう運航の効率が低下する傾向にあり、航空交通システムの改善が望まれている。我が国においては CARATS[1]が提案され、研究も進められているが、新しい技術を導入してどれほどの便益が得られるかについて必ずしも定量的に明らかになっていない。本研究の目的は、現状を客観的に分析して効率向上の可能性を定量的に明らかにする方法を提案することである。具体的には、電子航法研究所で取得した地上レーダデータを用い、国内定期旅客便の飛行軌跡を軌道最適化の観点から分析し、運航効率向上の可能性を定量化するものである。

九州大学においては、これまで航空機の性能を最大限に発揮する飛行を解析する観点から研究を行っている。具体的には、客室内の窓側席で記録した GPS の飛行軌跡データを使って飛行を解析し、気象予報データと航空機の性能モデルを使って軌道の最適化を行い、実際の飛行と最適軌道との比較を行った[2]-[4]。また、気象予報データや性能モデルの精度についても実際のフライトデータを使って評価を行っている。本研究はそれらの研究によって確立した方法を応用するものである。

2. レーダデータから飛行情報の推定

2.1 エアデータの推定

解析の源となるレーダデータは、約 10 秒毎に記録された機体の緯度、経度、気圧高度と時刻からなる。DAPs (Downlink Aircraft Parameters) と呼ばれる磁気方位角や対気速度の情報を応答する機体もあるが、多くはまだ対応していないので、ここでは、位置情報のみから飛行情報を推定

する方法を採用する。基本的には客室内で記録した GPS の飛行軌跡の解析[5]と同様であるが、以下に簡単に手法を紹介する。

航空機の性能モデルから燃料流量を推定するためには機体のエアデータ（対気速度、温度）が必要になる。レーダデータから推定される速度は慣性速度なので気象データを使ってエアデータを推定する。気象データは、気象庁が発表している数値予報の実況値の格子点データ（客観解析 GPV, GSM と MSM があるが、GSM を使用）[6]を利用し、空間ならびに時間方向に内挿して機体の緯度、経度、気圧高度および時刻に対応する幾何高度、気温、風（東西成分と南北成分）を求める。

位置情報からフィルタリングして推算した慣性速度ベクトルから風ベクトルを除いて対気速度ベクトルを求め、さらに気象データから導いた気温と空気密度を使用してマッハ数と動圧を求め航空機の性能モデルの入力とする。

2.2 燃料流量の推定

燃料流量などの航空機の性能は、BADA (Base of Aircraft Data) モデルと呼ばれるユーロコントロールが開発・維持しているものを使用する[7]。性能モデルに含まれるパラメータは、機種ごとに異なるが、現在使用されているほとんど全ての機体のデータが用意されている。燃料流量は推力と速度に依存し、推力は、抗力、経路角、加速度から推定する。抗力は、先に導いたエアデータと空気力モデルから導く。最大推力、速度や高度などの運用制限についても BADA モデルのデータを使用する。

3. 軌道最適化による燃料節約の推算

前節で推算した飛行情報に対し、機体モデルにおいて定められた制限値の内側であれば自由に飛行が可能であるとして最適化された飛行を求

める。公平に比較するために前節の飛行情報推算で用いた気象データおよび性能モデルと同じものを用いる。以下に定める燃料消費量と飛行時間からなる評価関数の最小化から最適軌道を導く。

$$J = \int_0^{t_f} (\mu(t) + a\mu_o) dt \quad (1)$$

ここで、 μ は燃料流量であり、 μ_o は標準的な燃料流量を表す定数である。 a は飛行時間とのトレードオフを考慮するための重み係数であり、Cost Index と呼ばれるパラメタに比例するものである。ただし、本発表の解析例では、燃料最小の最適軌道を求めるので $a=0$ としている。

軌道の最適化には動的計画法と呼ばれる手法を適用する[8]。離着陸のような複雑な運動は扱わないと仮定し、始点と終点を結ぶ大圏コースを基準にその進行方向に距離(レンジ)を定義する。高度、速度(CAS)、横のオフセット(クロスレンジ)の3変数と合わせて4次元の空間に等間隔格子を定義し、進行距離方向に高度、速度(CAS)、横のオフセットの3変数を自由に選択、遷移することができるかと仮定して、全ての組み合わせの中から評価関数を最小にする経路を導く。組み合わせの数は膨大になり全ての組み合わせの計算は不可能であるが、最適性の条件から進行方向に隣り合う面の関係が与えられ、計算量を格段に減じることができる。図1は動的計画法において用いる4次元格子のうち速度を省略して示した3次元格子である。

4. 解析結果

提案する手法の有効性を検討するため、平成24年2月21日の1日分のレーダデータから、①羽田空港に到着する便②機種は B777-200③STAR (Standard ARrival)上にある ARLON (北緯 35 度 15 分 25.3 秒, 東経 139 度 58 分 59.8 秒)を通過する、の3つの条件を満たす31ケースを選択して解析を行った。2節で述べた方法により燃料消費量等の飛行データを推算し、さらに3節で述べた方法で燃料最小の最適軌道を求め比較した。軌道最適化においては、始点と終点を定める必要があるが、始点はデータの開始点、終点は、ARLONとし、対気速度(CAS)を与えた。方位角については影響が小さいとして自由にして解析している。格子の分解能は、進行方向には10分割(おおよそ30 km 前後)、高度は100 m、速度(CAS)

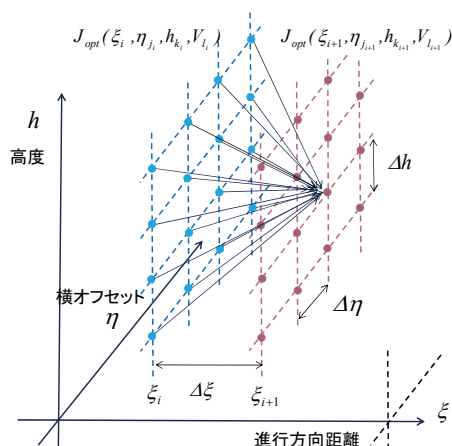


図1 動的計画法のための格子（速度を省略）

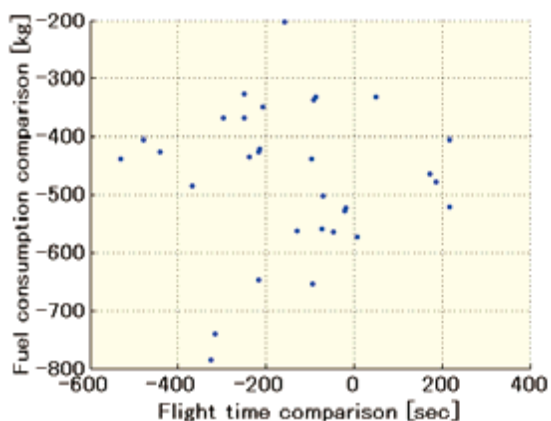


図2 最適軌道の燃料消費量と飛行時間の変化量

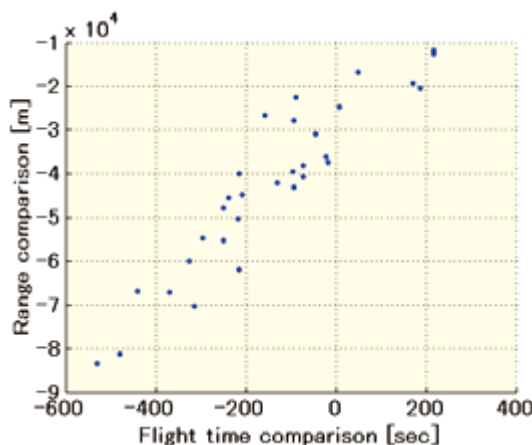


図3 最適軌道の飛行距離と飛行時間の変化量

は、1 m/s, クロスレンジ（横オフセット）は5.5 km としている。解析における変数の中で機体質量は重要なパラメータであるが、簡単に標準重量（208.7ton）を使用した。実際のフライトは機体

質量に応じて最適化をしていると思われるが、その影響は小さいと仮定している。

図2, 図3は解析した31ケースについて最適軌道の燃料消費量, 飛行時間, 飛行距離をレーダデータから推算した実際の値からの差によって図示したものである。燃料最小化の結果なので全てのケースについて燃料消費量は少なくなり, 飛行時間については, 飛行距離の短縮に比例して少なくなっている。図3の傾向から飛行距離が同じであれば, 燃料最小の飛行は, 実際の飛行に対して飛行時間がおおよそ5分程度増加すると推測される。

31ケースの中から代表的な1つのケースを選択して飛行の様子を紹介する。図4は, その航跡である。SSRがレーダデータ, optが最適軌道である。図5はレーダデータから推算した飛行情報と最適軌道について主要な変数を示したものである。上段は, 高度, 速度(CAS), マッハ数, 下段は, 燃料流量, 揚抗比, 推力であり, いずれ

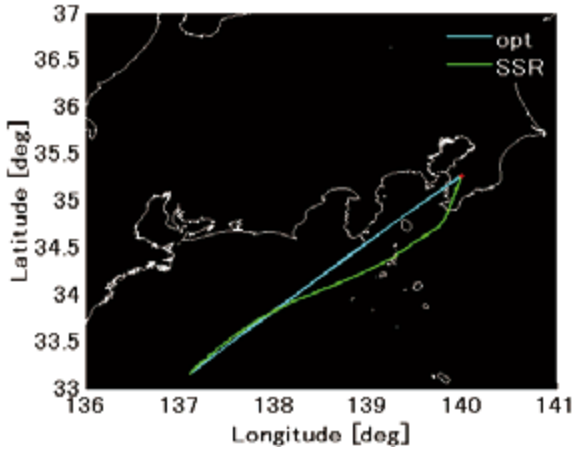


図4 解析した飛行の一例 レーダデータと最適軌道の航跡

	SSR データ (A)	最適軌道 (B)	B-A	(B-A) × 100/A
飛行時間 [sec]	1464	1681	217	14.8 [%]
燃料消費量 [kg]	1141	621	-520	-45.6 [%]
飛行距離 [km]	364.652	352.891	-11.761	-3.2 [%]

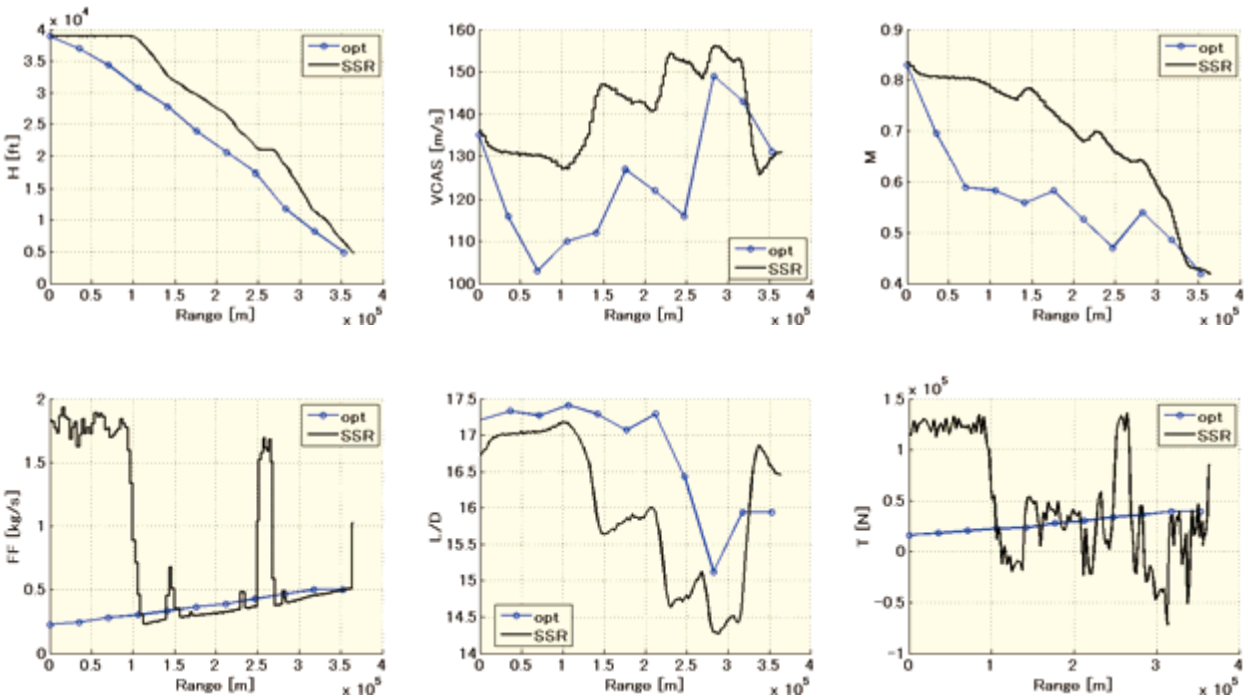


図5 レーダデータから推算した飛行データと最適軌道の飛行データ

も進行距離に対してプロットしている。比較的長い飛行データであり、図4に示されるように経路もほとんど無駄がないので、燃料消費の観点から両者を比較しやすいケースである。図5の上の表に燃料と飛行時間の違いが示されているように、燃料は節約される代わりに飛行時間が増えている。これは、降下開始地点 (TOD, Top of Descent) の差であり、降下飛行中の速度の選択によるものである。最適軌道は開始点から推力を最小にして降下を始め、揚抗比のよい飛行速度を選択して飛行距離を増し、推力を必要とする巡航飛行を短くしている。レーダデータが始まる点を開始点として固定しているので、終点を合わせるように降下の後半に速度を増して揚抗比を下げている。もしレーダの覆域が広く、開始点より前のデータがあれば、さらに TOD を早くして燃料を節約し、飛行時間が長くなることが予想される。実際の飛行では推力が負となるところがあり、スピードブレーキを使用していると推測される。なおこのケースにおいて長い距離を最小推力で飛行できるのは強い追い風を利用しているためである。

5. まとめ

レーダデータを用いて国内定期旅客便の運航効率を解析する手法を提案し、実際のデータを使った解析例を示した。BADA モデルと気象予報 GPV データの実況値を利用し、位置情報からなるレーダデータから燃料消費などの飛行情報を推算し、さらにこれらのモデルに基づいて動的計画法により燃料最小の最適軌道を求め、両者を比較する方法である。実際の飛行は、機体に搭載された飛行管理装置 (FMS) によって燃料消費量と飛行時間をトレードオフして飛行計画を作成して飛行していると思われる。本研究で提案された軌道最適化は同等の機能を持つものであり、飛行時間をどの程度考慮するかについても同様に調節可能である。到着時刻の調節を含めた軌道最適化を行うことを今後予定している。また、機体同士の安全な間隔を確保することや実際の制約条件を考慮するなど条件を付加して軌道最適化を行い、我が国の定期旅客便の効率を客観的に分析する手法を確立する予定である。

参考文献

- [1] 航空交通システム研究会, “将来の航空交通システムに関する長期ビジョン- 戦略的な航空交通システムへの変革”, 2010年.
- [2] 宮沢, ビクラマシンハ, “フリーフライトによる便益に関する一考察”, 第49回飛行機シンポジウム, 2011年10月
- [3] Wickramasinghe, N.K., Harada, A. and Miyazawa, Y., “Flight Trajectory Optimization for an Efficient Air Transportation System,” ICAS 2012-5.8.3, Brisbane, 2012.
- [4] 宮沢, ビクラマシンハ, 原田, 宮本, “到着時刻を指定した旅客機の軌道最適化”, 航空宇宙技術, Vol.12, pp. 31-38, 2013.
- [5] 十時, ビクラマシンハ, 濱田, 宮沢, “旅客機キャビン内で計測した GPS データからの飛行情報の推定”, 航空宇宙技術, Vol. 11, pp. 43-50, 2012.
- [6] 京大大学生存圏研究所, “生存圏データベース”
<http://database.rish.kyoto-u.ac.jp>
- [7] Eurocontrol Experimental Center, “User Manual for the Base of Aircraft Data (BADA),” Revision 3.9, EEC Technical/Scientific Report, No. 11/03/08-08, April 2011.
- [8] Hagelauer, P. and Mora-Camino, F., “A Soft Dynamic Programming Approach for on-line aircraft 4D-trajectory Optimization,” European Journal of Operational Research, No. 107, pp. 87-95, 1998.
- [9] Vinh, N.X., “Flight Mechanics of High-Performance Aircraft,” Cambridge Univ. Press, 1995.