

国内定期旅客便の運航効率の客観分析

原田, 明德
九州大学大学院工学府航空宇宙工学専攻

小塚, 智之
九州大学大学院工学府航空宇宙工学専攻

宮沢, 与和
九州大学大学院工学研究院航空宇宙工学部門

ビクラマシンハ, ナヴィンダ キトマル
国立研究開発法人電子航法研究所

他

<https://hdl.handle.net/2324/7358031>

出版情報 : AEROSPACE TECHNOLOGY JAPAN, THE JAPAN SOCIETY FOR AERONAUTICAL AND SPACE SCIENCES.
14, pp.171-178, 2015. Japan Society for Aeronautical and Space Sciences
バージョン :
権利関係 : © 2015 The Japan Society for Aeronautical and Space Sciences



国内定期旅客便の運航効率の客観分析^{*1}

Quantitative Operational Flight Efficiency Analysis of Passenger Aircraft Scheduled Flight

原 田 明 徳^{*2}・小 塚 智 之^{*2}・宮 沢 与 和^{*3}

Akinori HARADA, Tomoyuki KOZUKA, Yoshikazu MIYAZAWA,

ビクラマシンハ ナヴィンダ キトマル^{*4}・ブラウン マーク^{*4}・福 田 豊^{*4}

Navinda Kithmal WICKRAMASINGHE, Mark BROWN and Yutaka FUKUDA

Key Words: Flight Efficiency, Surveillance Radar, Trajectory Optimization, Dynamic Programming

Abstract: Flight efficiency of passenger aircraft scheduled flights is analyzed by using surveillance radar data. Flight parameters which are necessary to evaluate the flight efficiency such as air speed and fuel flow are estimated from position data of the radar data by combining weather prediction data and aircraft performance models. Trajectory optimization is applied to the estimated flights in order to evaluate the flight efficiency by comparing with the minimized fuel and flight time. Arrival flights to Tokyo International Airport are analyzed to demonstrate the approach.

1. は じ め に

航空交通の更なる拡大と効率向上を可能にするために CNS/ATM の研究開発が国内外で活発に行われている。欧米の NextGen, Sesar と同様に我が国も国土交通省が長期的な展望にもとづいた開発計画 CARATS (Collaborative Actions for Renovation of Air Traffic Systems) を作成し、その推進を図ろうとしている¹⁾。すでに多くの研究が行われているが、本研究は監視データを解析して現状を分析することによって潜在的な便益を示し、新しいシステムの提案や実現に役立てようとするものである。

一般に旅客機ごとの飛行計画は運航会社に委ねられており、それぞれ効率の良い飛行が計画されているが、悪天候や他の航空機との干渉などさまざまな要因によって計画が変更され、効率は影響を受けている。特に混雑空港への到着便においては、到着時刻の調整が空中で行われるため運航効率が低下している。それぞれの飛行の運航効率に関しては、計画と実際の飛行を比較することによって運航会社において分析を行うことができる。一方、地上の航空管制システムにおいては、航空機の位置を監視する SSR (Secondary Surveillance Radar) 監視レーダの情報が記録されているので飛行の安全性の分析を行うことができる。SSR モード S のように航空機の飛行情報をダウンリンクする新しい方式も整備されつつあるが、全ての航空機について得られるのは SSR モード A/C による位置情報だけであり、飛行状態までは分析できない。このため、全ての航空機の

航跡を記録している監視情報を利用した飛行効率の分析は飛行時間や飛行距離のような簡単なものに留まっていた²⁾。本論文は、すべての航空機に共通な SSR モード A/C のデータを前提に、監視データの位置情報から飛行状態を推定し、機体の性能モデルを使って燃料消費量を推定、さらに同じ条件で最適軌道を求めて比較することにより運航効率を定量化する。この方法は、旅客機の客室内の窓際で計測した GPS ロガーデータを使って飛行と運航効率を検討するために九州大学において開発した方法である³⁻⁵⁾。監視データを使うことによって運航会社によらず全ての機体を分析することができ、航空交通の状況による運航効率の低下を定量的に評価することができる。

応用の具体例として電子航法研究所が試験運用している SSR のデータを使用して羽田空港に着陸する定期旅客便の運航効率を定量化することを試みた⁶⁾。データはレーダの覆域内だけであり、飛行の到着部分を切り取ることになるが、提案する解析方法は飛行全体へも適用可能であり、CARATS の研究開発に役立つものと思われる。

2. 運航効率の評価方法

第 1 図は、運航効率の評価方法の概要を表したものである。上の部分の飛行状態の推定と下の部分の軌道最適化からなり、両者の飛行時間や燃料消費量を比較することによって効率を評価する。以下、それぞれの方法を紹介する。

2.1 飛行状態の推定 監視データは一般に 10 秒などの定期的な周期でサンプルされた航空機の位置データである。慣性速度は直接に推定することができるが、対気速度や燃料流量などの航空交通管理において必要となるパラメータの推定には別のデータが必要となる。すなわち、気象データである風、気温・気圧および時間を含めた 4 次元分布を利用することにより対気データを推定し、さらに機体の性能

^{*1}©2015 日本航空宇宙学会

平成 26 年 10 月 22 日, 第 52 回飛行機シンポジウムにて発表。

平成 27 年 1 月 19 日原稿受付

^{*2}九州大学大学院工学府航空宇宙工学専攻

^{*3}九州大学大学院工学研究院航空宇宙工学部門

^{*4}国立研究開発法人電子航法研究所

モデルを利用することにより推力, 燃料流量を推定する. 気象データは, 気象庁の数値予報の現況値 (数値予報の初期値) を利用し, 格子点データ (GPV, Grid Point Value) を空間, 時間方向に内挿して機体の位置と時刻に対する風, 気温, 気圧を求める. 気象予報モデルにはいくつかの選択肢があるが, 本論文では GSM (Global Spectral Model) 全球域を利用した⁷⁾. 機体性能モデルは, EUROCONTROL が開発し公表している BADA モデルのバージョン 3.9 を利用する⁸⁾.

気象情報および機体性能の誤差については, エアラインから提供を受けた実機の記録データと比較することによって評価を行い, 風については誤差の自乗平均平方根 (RMSE, Root Mean Square Error) が 3 [m/s] 程度, 飛行全体での燃料消費量の誤差は ±5% 程度以下という結果が得られている^{9, 10)}.

気象および機体性能モデルによる誤差の他に, 燃料消費については機体の質量の影響があるが, 質量に関する情報は得られないので BADA モデルの標準重量をそのまま使用する. 飛行情報の推定結果において気象データや性能モデルによるある程度の誤差はやむを得ないが, 解析は現状を理解するうえで有効性を損なうほどではないと考えられる. 推定方法は, 客室内で計測した GPS ロガーデータを用いて飛行を解析するために九州大学において開発した方法をほぼそのまま使用している¹¹⁾.

2.2 軌道最適化 飛行情報を推定するとき用いた気象データと機体の性能モデルが与えられれば, 別の飛行を行った場合の消費燃料と飛行時間について計算することができる. さらに, 評価関数を定めて初期状態と終端状態を同じにして軌道を最適化し, 元の実際の飛行と比較すれば運航の効率についても定量化することができる. 軌道最適化の計算は, 高度, 速度, 最短経路からの横の変位を自由に選択できるとし, さらにそれらの変数を離散化することによって組み合わせ最適化問題として求める. 動的計画法を適用することにより最適解を効率良く容易に求めることができる³⁻⁵⁾.

一般に飛行の効率は, 燃料消費量と飛行時間によって評価することができるが, 両者にはトレードオフの関係があ

るので, 以下のような重みを付けて評価関数を定める.

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

ここで, a は飛行時間の重み係数である. 2 つの異なった物理量を評価する場合, それぞれを貨幣価値に置き換えると分かりやすいので, コストインデックスと呼ばれるパラメータを使った評価関数が使われる^{12, 13)}.

$$J_{\text{dollars}} = \int_0^{t_f} \left(\frac{1}{100} C_{\text{fuel}} \frac{1}{0.4536} \mu(t) + C_{\text{time}} \frac{1}{3600} \right) dt \quad (2)$$

ここで, C_{fuel} は燃料の価格 [cent/lb] であり, C_{time} は時間あたりのコスト [dollar/hour] である. コストインデックス CI は以下で定義される. さらに式(1)と式(2)から重み a とは以下の関係がある.

$$CI = \frac{C_{\text{time}}}{C_{\text{fuel}}}, \quad CI = \frac{3600}{100 \times 0.4536} a = 79.37a \quad (3)$$

C_{time} が 1 機あたりの時間コストであるために機体規模にほぼ比例するので, コストインデックスも機体規模に比例する.

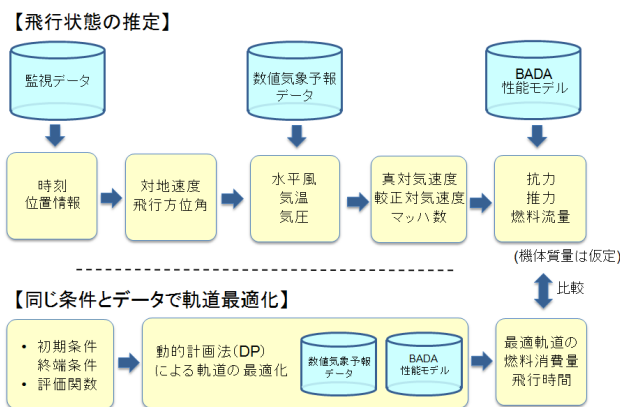
飛行時間の重み $a=0$ とする燃料最小の最適軌道はどこまで燃料を節約できるかを示すので分かりやすい評価関数であるが, 揚抗比最大の低速度で降下を行うため飛行時間は長くなる. 燃料最小の最適軌道の近傍では飛行時間に対して燃料消費の感度が小さい, すなわち僅かの燃料増大で飛行時間を短縮することができるので, 小さくともある程度の時間の重みを考慮した最適軌道が実用的である¹⁴⁾.

3. SSR モード S 監視データ

3.1 監視装置の概要 電子航法研究所の敷地内で試験運用されている SSR モード S のデータを使って解析を行った¹⁵⁾. 第2図は建屋の屋上に設置されたアンテナの写真である. アンテナが 10 秒間で一回転する航空路用監視レーダである. 航空機の位置情報として直距離と方位角, トランスポンダーの信号に含まれる機体情報と気圧高度が記録される. モード S に対応した航空機からは DAPs (Downlink Aircraft Parameters) と呼ばれる飛行情報 (動態情報) も送信されるが, 国内の定期旅客便はかならずしも全てがモード S のトランスポンダーを装備しているわけではないので, なるべく多くの機体を同じ条件で解析するため DAPs は利用しないこととした.

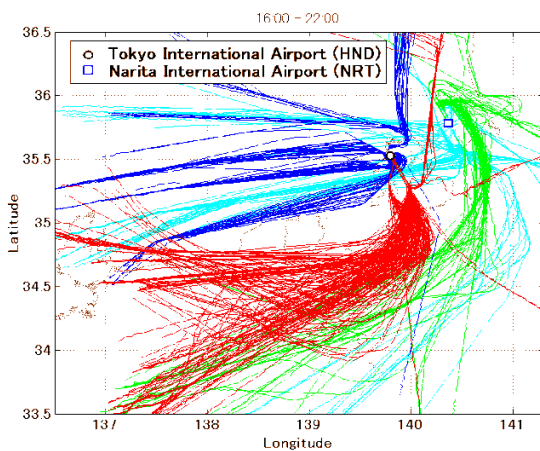


第2図 電子航法研究所の SSR モード S のアンテナ

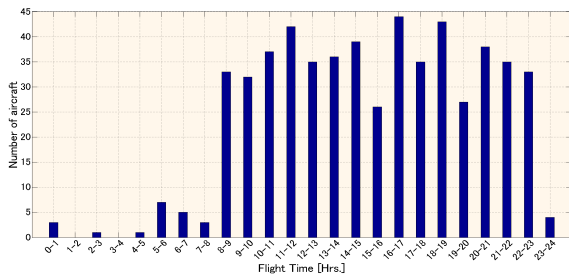


第1図 運航効率の定量化の概要

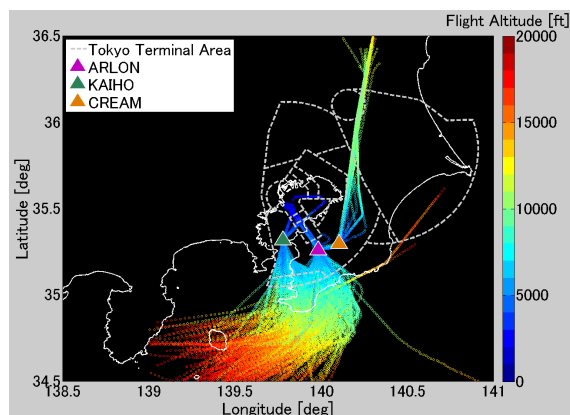
3.2 航跡データ 第3図は上空通過機等を除き、羽田空港と成田空港に離発着する航空機の航跡をプロットしたものである。2012年2月11日の16時から22時までのデータである。ターミナル空域においては、出発機はSID（Standard Instrument Departure）、到着機はSTAR（Standard Instrument Arrival）によって飛行方法が定められており、図を見て分かるように安全を確保するためにそれぞれ経路は固定されている。出発機の場合は、連続した効率の良い上昇が行われているのに対して到着機の場合は、着陸進入の前に順序良く間隔を確保して並ぶ必要があり、ターミナル空域に入る前に間隔調整の経路迂回制御を行うため機体毎にその航跡にばらつきがあり、混雑するほど全体の飛行効率が低下すると考えられる。第4図は、同日の到着便の数



第3図 羽田と成田の到着機と出発機の飛行航跡（赤：羽田到着，青：羽田出発，緑：成田到着，シアン：成田出発）



第4図 1時間ごとの到着便数



第5図 解析データの航跡，羽田到着機とその合流点

を1時間ごとに示したものであり、第5図は1日分の到着便について高度情報も含めて表示し直したものである。本研究は、この到着機のターミナル内で整列する前までの飛行効率に着目して第5図に位置が示されている ARLON, KAIHO, CREAM の3つの FIX までの解析を行った。

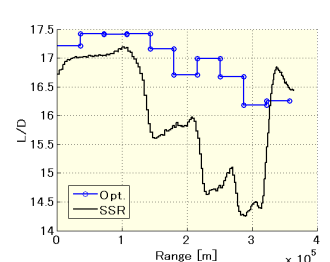
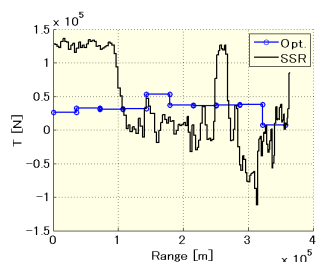
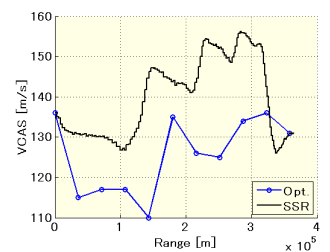
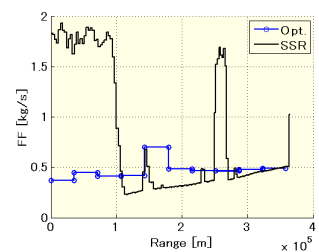
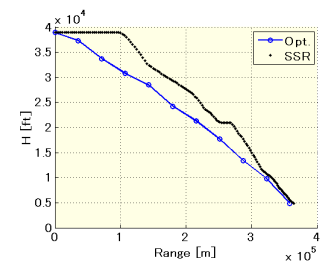
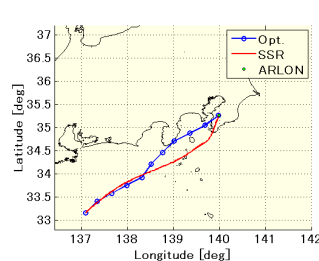
4. 解析結果

前節で示した1日分のデータを使用し、羽田空港を利用する機数の最も多い3種類の機体タイプについて解析した。また、レーダは試験運用の制約のために必ずしも全飛行のデータを完全に記録しているわけではないので、データが不完全なものを除いている。解析した機数は256便で全到着便の約半数である。

4.1 飛行解析の一例 統計的な議論を行う前に飛行状態の推定と軌道最適化について代表的な一例を示す。第6図は沖縄方面からの大型の到着機の飛行状態の推定値とその最適軌道である。先の時間の重みを0.5としている。左上の水平面の飛行軌跡にはそれほど差がないが、右上の高度の軌跡から分かるように最適化された飛行は実際の飛行より約100km手前の初期値（レーダデータの始まりの点）

第1表 運航効率評価の一例

	A.実飛行の推定値(SSR)	B.最適軌道(Opt)(A-B)
飛行時間 [秒]	1464	1647 (+183)
燃料消費量[kg]	1141	644 (-497)
飛行距離 [km]	364.6	358.1 (-6.5)



第6図 推定した飛行情報と最適軌道の比較

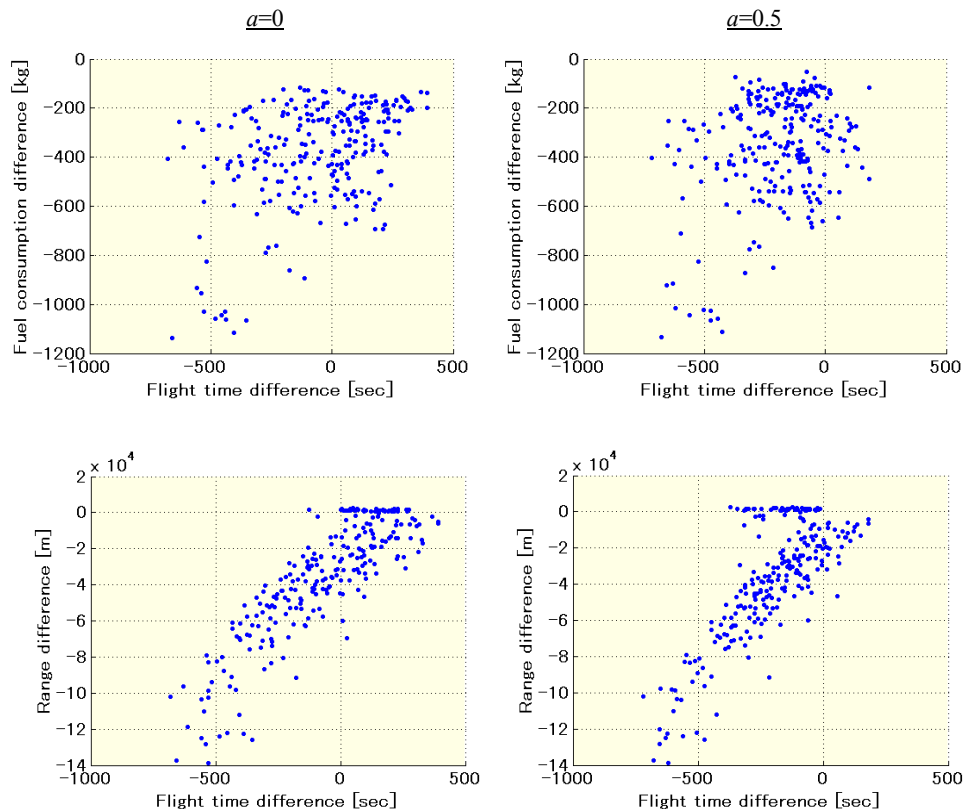
から降下を開始し、連続降下を行っている。右中の速度と右下の揚抗比の図からわかるように速度を落とし、揚抗比を上げることによって降下開始点を早め燃料を節約している。左中の燃料流量、左下の推力に示されるように途中の水平飛行がないために燃料を節約することができる。さらに左下の推力でわかるように実際の飛行は水平飛行の後、降下角を深くするためにスピードブレーキを使用している。第1表は、飛行時間、燃料消費量、飛行距離についてこの区間の飛行における実際の飛行の推定値と最適軌道を比較したものである。最適軌道は燃料消費量において 500 [kg] 程度節約されるのに対して飛行時間は3分ほど増加している。実際の飛行においては、飛行時間を重視して比較的大きなコストインデックスを使用していると推測される。次にこのような解析を256便について行い、統計的な性質を検討する。

4.2 運航効率の統計解析 初めに、軌道最適化の飛行時間に対する重みの影響について検討する。軌道最適化に

おいては、2つの重み係数、すなわち燃料最小の $a=0$ とわずかに飛行時間を考慮する $a=0.5$ の2種類を考慮する。第7図は、全ての256便について飛行時間と燃料消費量の違いをプロットしたものである。それぞれ実際の飛行の推定量を基準に最適軌道の差を示している。第2表はケース数とその平均値を示している。重み係数をゼロから0.5に増大することによって平均すると飛行時間が136秒短くなるのに対して、燃料消費量は24[kg]と僅かに増大するだけである。また、重み係数0.5とした時に、平均して燃料消費量では362[kg]、飛行時間が202秒節約できる。図から分かるように燃料消費量、飛行時間、飛行距離ともにばらつきがある。これは、滑走路へ向かう進入における航空機の間隔、すなわち到着時刻を調整するために経路迂回が管制によって指示されるためである。飛行距離と飛行時間には強い相関があり、重みが大きい0.5のケースの方が少しだけ相関が強い。飛行距離と飛行時間の強い相関は速度の選択が機体ごとにあまり違いがないことを示している。

第2表 最適軌道の推定された実際の飛行との差, $a=0$ と $a=0.5$.

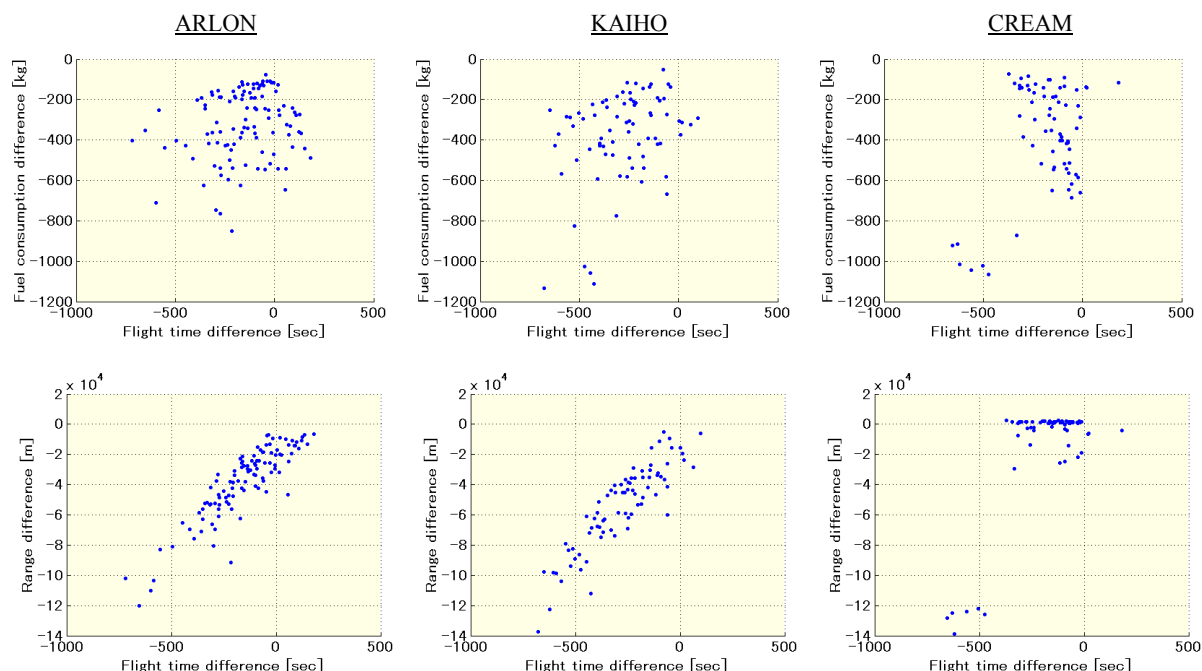
	重み係数 $a=0$	重み係数 $a=0.5$
燃料消費量の差, 平均値 [kg]	-386	-362
飛行距離の差, 平均値 [m]	-36,228	-36,615
飛行時間の差, 平均値 [秒]	-66	-202
解析便数	256	256



第7図 最適軌道の実際の飛行に対する消費燃料、飛行時間、飛行距離の差, $a=0$ (左) と $a=0.5$ (右).

第3表 最適軌道の推定された実際の飛行との差, 3つの通過 FIX

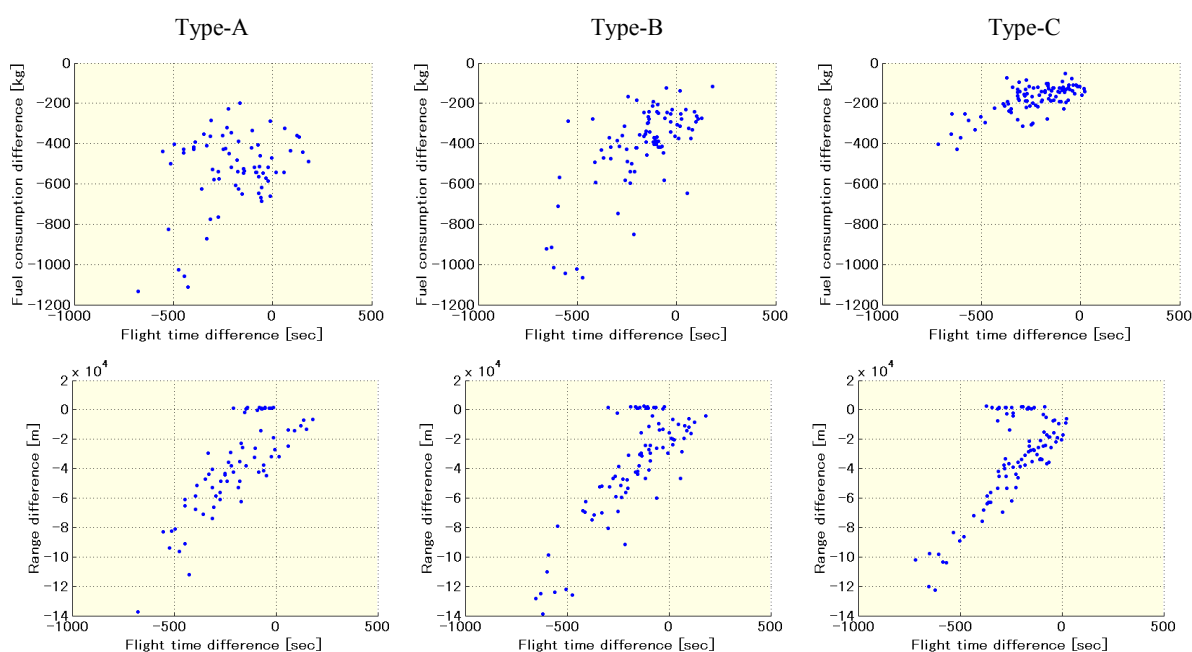
	ARLON	KAIHO	CREAM
燃料消費量の差, 平均値 [kg]	-327	-381	-396
飛行距離の差, 平均値 [m]	-38,305	-54,268	-14,898
飛行時間の差, 平均値 [秒]	-154	-279	-191
解析便数	108	77	71



第8図 最適軌道の実際の飛行に対する消費燃料, 飛行時間, 飛行距離の差, 3つの通過 FIX

第4表 最適軌道の推定された実際の飛行との差, 機種 (Type-A, Type-B, Type-C)

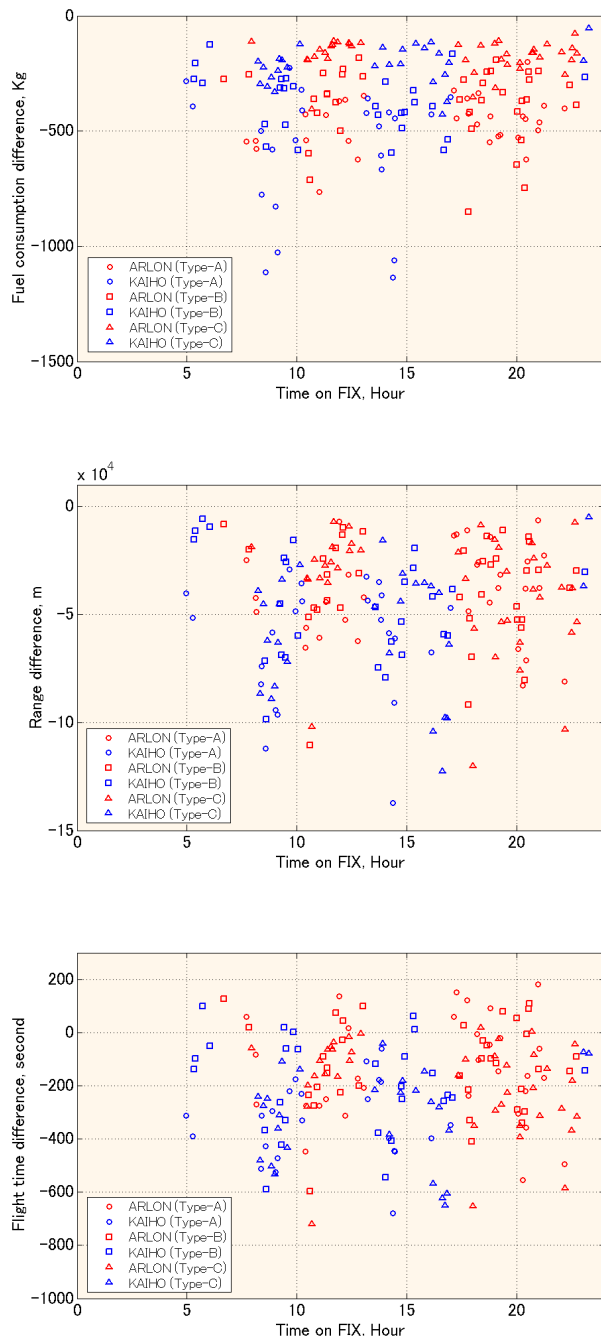
(標準重量 [ton])	Aircraft Type-A (208.7)	Aircraft Type-B (154.6)	Aircraft Type-C (65.3)
燃料消費量の差, 平均値 [kg]	-541	-410	-180
飛行距離の差, 平均値 [m]	-40,063	-37,280	-33,336
飛行時間の差, 平均値 [秒]	-201	-169	-234
解析便数	72	90	94



第9図 最適軌道の実際の飛行に対する消費燃料, 飛行時間, 飛行距離の差, 機種 (Type-A, Type-B, Type-C)

一方で燃料消費量と飛行距離、あるいは飛行時間とはある程度相関があるもののばらつきが大きい。連続降下を行うことによって燃料を節約できるが、スピードブレーキを使って深い降下を行ったり水平飛行を行って推力を使ったりすることによって燃料消費が増える。燃料消費量と飛行距離の相関の弱さは経路の延伸に対して機体ごとに対応が異なることを示している。

第5図に示すように標準的な到着経路STARは3つあり、3つの通過FIXのARLON, KAIHO, CREAMに向かってターミナル管制を行っているので、その3つに分類して検討



第10図 ARLON, KAIHO を通過する便の運航効率 (燃料消費量, 飛行距離, 飛行時間)

を行った。第3表と第8図は重み0.5の結果を3つの通過FIXで分類したものである。第3表に便数と平均値を示している。ARLONとKAIHOは主に西方面から到着する機体を使用する通過点である。全体で示したのと同様に飛行距離と飛行時間とは強い相関があり、飛行時間と燃料消費量とは強い相関がなく、飛行毎にばらつきがあることが分かる。CREAMは北方面からの到着便が通過するFIXである。多くが最短距離を飛行しているため距離の短縮はないが、燃料、時間ともに他と同様に最適軌道による節約が可能である。これは、比較的早く降下を開始し、低高度での水平飛行があるためである。また、極端に飛行距離の短縮が可能なケースが6ケースほどあるが、途中から合流するケースで最短距離の飛行によって距離が短縮されている。

第4表と第9図は同様に重み0.5の結果を機体の種類によって分類したものである。Type A, Type B, Type Cは標準重量がそれぞれ208.7 ton, 154.6 ton, 65.3 tonの大型機, 中型機, 小型機である。最適軌道による燃料節約はほぼ機体重量に比例していることが分かる。また、飛行時間については小型機がより多く短縮されているが、これは小型機においては大型機にくらべて時間コストは小さいにも関わらず重み係数を0.5と共通にしていることで、飛行時間に相対的により大きな重みをかけることになるためであると考えられる。

3つのFIXのうちARLONとKAIHOを通過する機体は、ほとんどが西方面から到着するものであり、第3図および第5図に示されるようにターミナル空域に入る前の海上の関東南A空域などにおいて到着順序付と間隔のための制御を受けているので、この2つのFIXを通過するものについてFIXを通過する時刻で効率を表す量をプロットした。第10図は上からそれぞれ燃料消費量、飛行距離、飛行時間の最適軌道と実際の差をFIX通過時刻で1日分をプロットしたものであり、通過FIXおよび機種を色とシンボルで分けるように示している。効率の著しく悪い飛行は間欠的に表れるが、同じ時間帯での他の機体の効率は比較的一様にばらついており、全体を俯瞰すると効率は飛行ごとにランダムに異なっていることが分かる。

5. ま と め

監視データと気象データ、各機体の性能モデルを使って航空機の飛行状態を推定し、さらに動的計画法による軌道最適化を行って飛行時間と燃料消費量を最適化して元の飛行と比較し、運航効率を定量的に示す方法を提案した。飛行状態の推定には気象データと機体性能モデルが必要であり、データやモデルには誤差があるので結果の数値は厳密ではないが、気象データ、機体性能モデルともに比較的精度の高いデータが公表されているので現状の運航効率を理解する上で有用なデータを示すことができる。

本論文では、電子航法研究所が試験運用している SSR モード S による監視データを用いて具体的な検討を行った。データは、東京を中心とする約 400 [km] の範囲であり首都圏空港を離発着する定期便の上昇あるいは降下を中心に解析することができるので東京国際空港羽田への到着便に注目して運航効率を解析した。混雑する空港への到着便は、着陸進入の順に必要な間隔を取って飛行する必要がある。ターミナル空域の手前の調整空域で間隔と時間の調整が行われ、単独の飛行に比べて効率が低下せざるを得ない。調整のための経路迂回による時間調整は飛行距離が増えるので燃料消費の観点からは効率を落とすことになるが、燃料消費量にはばらつきがある。また、飛行距離が最適であっても低高度の水平飛行がある場合などは燃料消費が増加し効率が低下する。これらは、飛行距離や飛行時間などの単純な解析では評価できないが、本解析のように最適な飛行と比較することによって定量化できることであり、実際の運航の特徴をより深く把握することができる。以下に本解析において得られた結果をまとめる。

- ・全 256 便に対し燃料消費量と飛行距離の差を飛行時間に対してプロットした第 7 図より、飛行距離と飛行時間には強い相関があることが分かる。これは速度の選択が機体ごとにあまり変化しないことを示している。

- ・燃料消費量と飛行距離あるいは飛行時間とは相関が弱くばらつきが大きい。燃料消費は連続降下を行うことにより節約できるが、スピードブレーキや推力の使用により燃料消費が増加する。燃料消費量と飛行距離の相関の弱さは経路の延伸に対して機体ごとに対応が異なることを示唆している。

- ・飛行時間の重み係数を 0.5 とした結果を機種ごとに分類した第 9 図より、飛行時間については小型機がより多く短縮されていることが分かる。これは、小型機は大型機よりも時間コストが小さいにも関わらず重み係数を共通にしていることで相対的に飛行時間により大きな重みをかけることになるためであると考えられる。飛行時間をそろえて評価するには機種ごとに重み係数の値を調節する必要があるがこれは今後の課題である。

航空交通管理において軌道ベース運用（Trajectory Based Operation）が将来の姿と考えられている。現行の分割された空域による監視と管制指示からなる方式では交通量の増大にともなう効率低下が避けられないためである。長期的

な展望においては航空機がデジタルデータリンクを装備して地上の交通管理システムと協調して軌道ベース運用が行われ、各機体の希望に沿った飛行が実現されると考えられている。しかし、機材の更新には相当の時間が必要であるため、現行システムの条件の下で交通容量の拡大と効率の向上を図ることが求められている。そのためには現行システムで使用可能な監視データと飛行プランにもとづいて機体に都合の良い飛行を地上側が予測して限られた音声交信により実現することが必要となる。地上システムを工夫して軌道ベース運用を行うことが可能かどうか、が課題となる。監視データの分析結果は機体に都合の良い飛行を実現するために有用な情報であり、将来の軌道ベース運用の開発に役立つものである。

この研究は、平成 24 年度に電子航法研究所が募集した公募研究において採択され九州大学と電子航法研究所が平成 26 年度まで実施する共同研究の成果である。気象庁数値予報データについては、京都大学生存圏研究所が公開しているホームページ上のデータを使用した。また、機体性能モデルについては、EUROCONTROL が開発、維持している BADA モデルを使用した。これらの機関が提供する便宜に対して謝意を表す。

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 CARATS, Collaborative Actions for Renovation of Air Traffic Systems, 2010, URL: <http://www.mlit.go.jp/common/000123890.pdf> (2013 年 2 月 5 日ダウンロード)
- 2) 福田豊，蔭山康太，山本哲士，宮津吉弘，行木宏一：運航実績データによる飛行距離の測定手法の検討，第 7 回電子航法研究所研究発表会，2007.
- 3) Wickramasinghe, N.K., Harada, A., Totoki, H., Miyamoto, Y. and Miyazawa, Y.: Flight Trajectory Optimization for Modern Jet Passenger Aircraft with Dynamic Programming, Air Traffic Management and Systems, Selected Papers of the 3rd ENRI International Workshop on ATM/CNS (EIWAC2013), Springer, 2014, pp. 87-104.
- 4) 宮本侑斗，原田明徳，ナヴィンダ・ピクラマシンハ，宮沢与和，船曳孝三：BADA モデルを用いた旅客機の軌道最適化による運航効率の評価，航空宇宙技術，12 (2014)，pp.1-10.
- 5) Miyamoto, Y., Wickramasinghe, N.K., Harada, A., Miyazawa, Y. and Funabiki, K.: Analysis of Fuel-Efficient Airliner Flight via Dynamic Programming Trajectory Optimization, Trans. JSASS Aerospace Technology Japan, 11 (2013), pp.93-98.
- 6) Wickramasinghe, N.K., Miyamoto, Y., Harada, A., Kozuka, T., Shigetomi, S., Miyazawa, Y., Brown, M. and Fukuda, Y.: Flight Trajectory Optimization for Operational Performance Analysis of Jet Passenger Aircraft, 2013 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology, Takamatsu, Japan, 2013.
- 7) 京都大学生存圏研究所，気象庁データ，<http://database.rish.kyoto-u.ac.jp/arch/jmadata/gpv-original.html>
- 8) Eurocontrol Experimental Center, User Manual for the Base of Aircraft Data (BADA) Revision 3.9: EEC Technical/Scientific Report No. 11/03/08-08, 2011.
- 9) Harada, A., Miyamoto, Y., Miyazawa, Y. and Funabiki, K.: Accuracy Evaluation of an Aircraft Performance Model with Airliner Flight Data, Trans. JSASS Aerospace Technology Japan, 11 (2013), pp.79-85.
- 10) 十時寛典，小塚智之，宮沢与和，船曳孝三：定期便フライトデータ

- と気象庁数値予報 GPV データとの比較評価, 航空宇宙技術, **12** (2013), pp.57-63.
- 11) 十時寛典, ナヴィンダ・ビクラマシンハ, 濱田達郎, 宮沢与和: 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, **11** (2012), pp.43-50.
- 12) Erzberger, H. and Lee, H.: Constrained Optimum Trajectories with Specified Range, Journal of Guidance, Control and Dynamics, **3**, 1 (1980), pp.78-85.
- 13) Roberson, B.: Fuel Conservation Strategies, Cost Index Explained, Aero Quarterly, QTR 02-07, 2007, pp.26-29.
- 14) 宮沢与和, ナヴィンダ・ビクラマシンハ, 原田明徳, 宮本侑斗: 到着時刻を指定した旅客機の軌道最適化, 航空宇宙技術, **12** (2013), pp.31-38.
- 15) 宮崎裕己, 三吉襄, 古賀禎: SSR モード S の開発と監視機能の評価試験, 電子航法研究所報告 No. 92, 1999.