

## 2. 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，小塚 智之，重富 貞成

航空交通管理領域 ビクラマシンハ ナヴィンダ キトマル，マーク ブラウン

航法システム領域 福田 豊

### 1 まえがき

航空交通の更なる拡大と効率向上を可能にするため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計画 CARATS (Collaborative Actions for Renovation of Air Traffic Systems) を作成し、実現のための研究開発を推進している[1]。本研究は監視データを解析して運航の効率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つようとするものである。

一般に旅客機の飛行は運航会社によって計画されているが、悪天候や他の航空機との干渉、混雑した空域などの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。それぞれの飛行の効率は、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レーダ SSR (Secondary Surveillance Radar) などの情報があるので機体相互の間隔など飛行の安全性の分析を行うことができるが、詳細な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運航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、監視レーダの位置情報から燃料流量などの飛行状態を推定し、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方法を提案した。こ

の方法は、旅客機の客室の窓際席で計測した 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された方法である[3][4]。監視データを使うことによって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ので CARATS の研究開発に役立つものと思われる。応用例として電子航法研究所が試験運用している SSR Mode S 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。

### 2 運航効率の評価方法

図 1 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、両者の解析結果の飛行時間や燃料消費量を比較することによって運航効率を評価する。以下、それぞれの方法を紹介する。

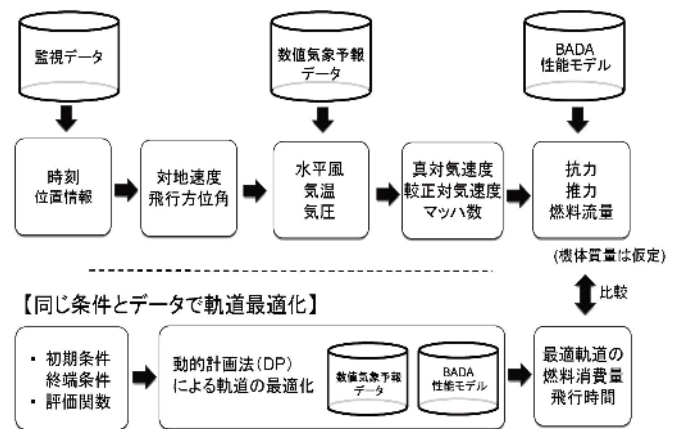


図 1 監視データによる運航効率の客観分析

## 2.1 飛行状態の推定

監視データは定期的な周期でサンプルされた航空機の3次元位置データである。慣性速度は直接に推定できるが、対気速度や燃料流量などの航空交通管理において必要なパラメータを推定するためには別のデータが必要となる。すなわち、風・気温・気圧の位置と時間の4次元分布からなる気象データを利用することにより対気データを推定し、さらに機体の性能モデルを利用することにより推力、燃料流量などを推定する。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緯度経度・気圧高度と時刻に対する高度、風、気温を求める。気象予報モデルにはいくつか選択肢があるが、本論文ではGSM（Global Spectral Model）全球域を利用した[5]。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を利用した[6]。

気象データおよび機体性能モデルの誤差については、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 Squared Error）が3m/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[7],[8]。

気象データ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、質量を推定するのは困難なので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これら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。

## 2.2 軌道最適化

飛行状態を推定するために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、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して動的計画法を適用することにより効率良く容易に最適解を求めることができる。

飛行の性能は、燃料消費量と飛行時間によって評価できるが、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[9],[10]。

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

ここで、 $\mu[\text{kg/s}]$  は燃料流量、 $a[\text{kg/s}]$  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。

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

ここで、 $C_{\text{fuel}}$  は燃料の価格[cent/lb]であり、 $C_{\text{time}}$  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[11]。

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

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、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。 $C_{\text{time}}$ が1機あたりの時間コストであるために機体規模に比例するので、与えるべきCIも機体規模に比例

するが、応用例では共通の値を与えた。

### 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 Mode S [12] のデータを使って解析を行った。図2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。

#### 3.2 解析した監視データ

2012年2月11日の1日分のデータから東京国際空港へ着陸する定期便を抽出し、同空港を利用する機数の最も多い3種類の、大型機 (Type-A, 標準重量は208.7 ton), 中型機 (Type-B, 同154.6 ton), 小型機 (Type-C, 同65.3 ton) 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。Type A,B,Cの機数は、それぞれ、72機、90機、94機である。図3に示すARLON, KAIHO, CREAMの3つの地点 (FIX)まで解析を行った。図3は高度20,000 ft以下を表示しているが、解析はレーダデータの開始点から行った。冬の季節であり、北風運用が行われ、滑走路は34R, 34Lが使用されている。

### 4 解析結果

#### 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。図4は沖縄方面からの大型機

(Type-A)の飛行状態の推定値とその最適軌道である。上段が航跡、速度 (CAS), 推力, 下段が高度, 揚抗比, 燃料流量である。時間の重み  $a$  を0.5 (コストインデックスに換算すると40) としている。水平面の飛行軌跡にはそれほど差がないが、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 (レーダデータの始点) から降下を開始し、連続降下を行っている。速度と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。燃料流量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。さらに推力でわかるように実際の



図2 試験運用されている SSR Mode S

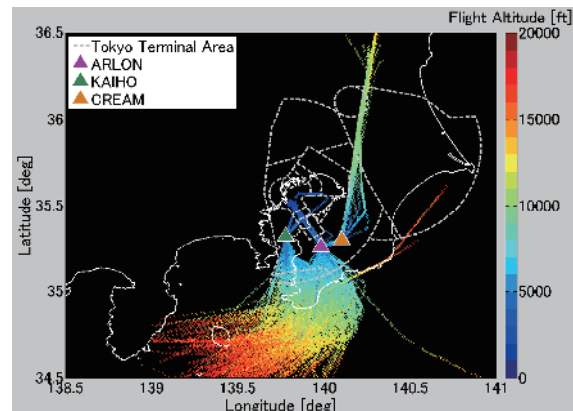


図3 解析データ, 東京国際空港到着便の航跡と合流点 (2012年2月11日)

表1 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)

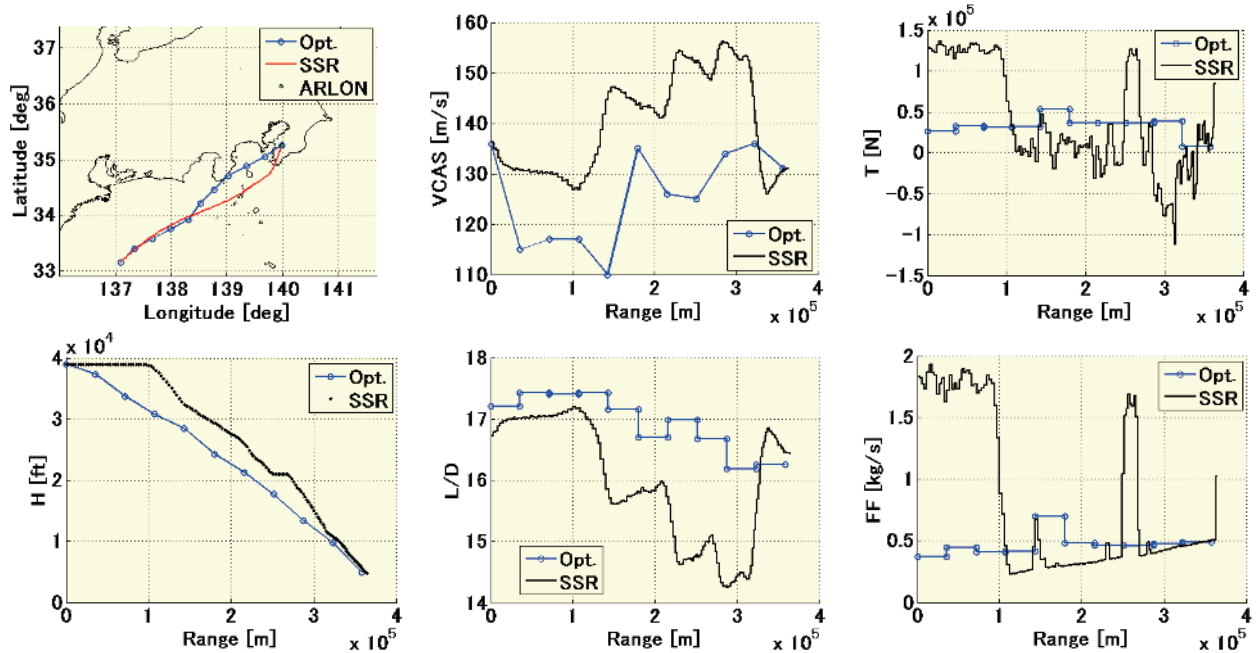


図4 推定した飛行状態と最適軌道との比較

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。表1は、飛行時間、燃料消費量、飛行距離についてこの区間の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500kg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。データの開始点の制約がなければ燃料を更に節約できる可能性がある。また、実際の飛行は、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察される。次に256便についての解析結果から統計的な性質を示す。

#### 4.2 運航効率の統計的な解析

標準的な到着経路は3つあり、図3に示されるように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つに分類して統計的な評価を行った。先の例と同様に3機種について時間の重みを共通に0.5としている。表2に便数と平均値を示している。いずれのFIXも燃料消費量、飛行時間ともに最適軌道が少ない値を与える。ARLONとKAIHOは西方面から到着する機体がかたらず使用する通過点である。飛行距離と飛行時間とは

強い相関があり、速度の選択が機体毎に違いが少ないことを表している。飛行時間と燃料消費量と相関が弱くばらつきが多いが、スピードブレーキを使用するなど降下のプロファイルが異なるためと推測される。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。機種についても分類して統計的な評価を行ったが、燃料消費量の差が機体規模にほぼ比例する以外は機種による顕著な相違はなかった。

図6はARLONあるいはKAIHOを經由して着陸する機体について時刻を考慮してプロットし直したものである。すなわち、それぞれのFIXを通過する時刻（日本時間）に対して燃料消費量、飛行時間について最適軌道の実際の飛行の推定値からの差をプロットした。Type A, B, Cは解析した3機種のそれぞれ大型機、中

型機，小型機に対応する。到着ルートを変更する時，すなわち色が変わるところで効率が低下する傾向がある。また，ほぼ同じ時間帯でも効率の悪い飛行がある一方で効率の良い飛行があり，機体ごとに差がある。これは，順序付けを行うた

めにいずれかの機体の運航効率が悪くなるためと考えられる。管制において先着順などで優先順位をつけて遅らせる機体を定めて制御を行っていることがこの傾向の理由ではないかと推測される。

表 2 最適軌道の実際の飛行に対する差の平均値，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

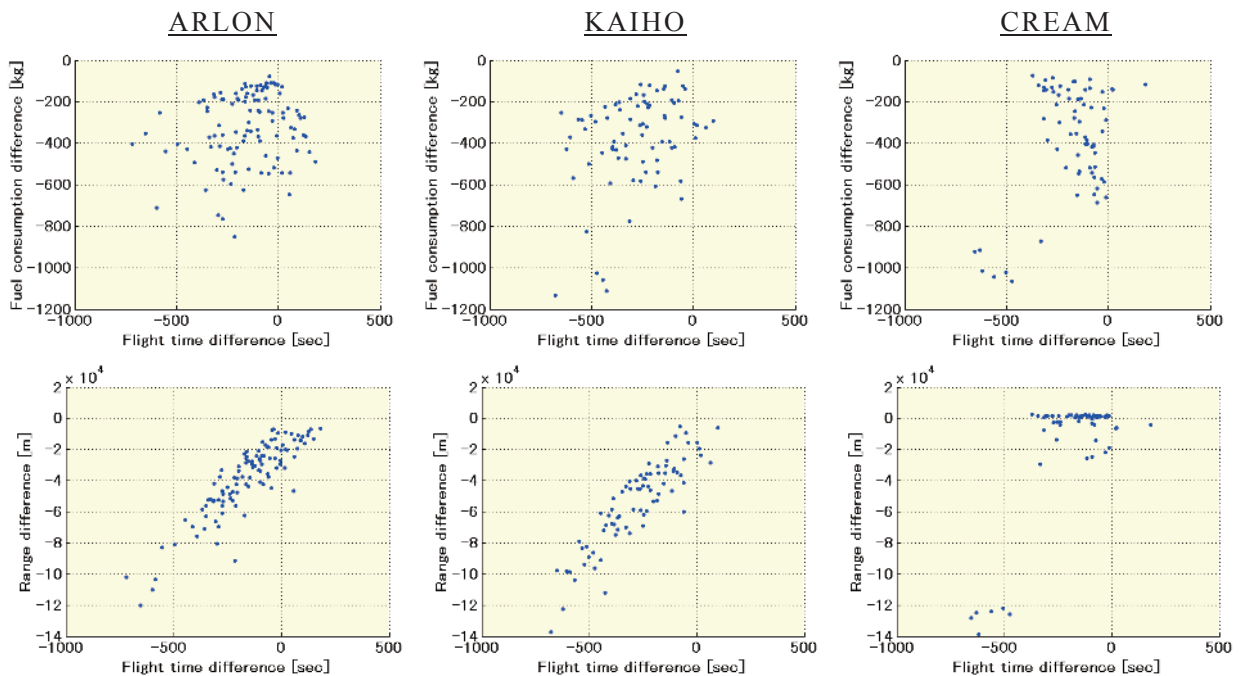


図 5 最適軌道の実際の飛行に対する燃料消費量，飛行時間，飛行距離の差，3つの通過 FIX

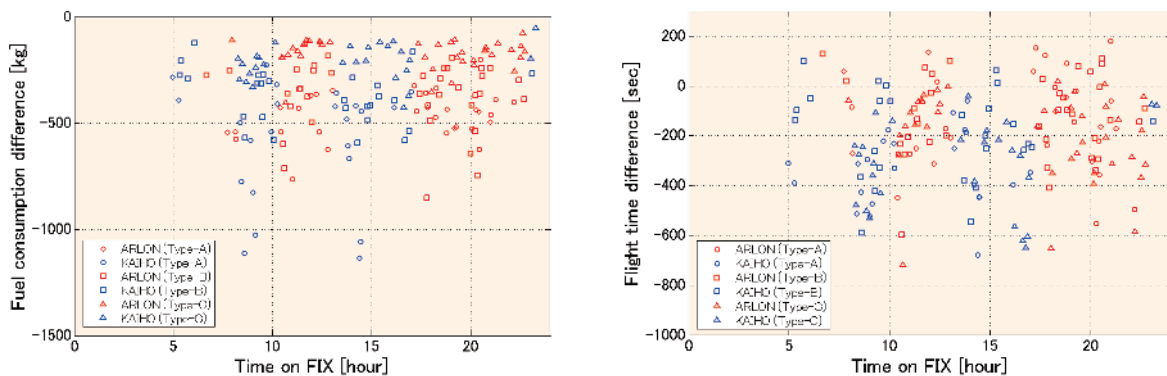


図 6 ARLON, KAIHO を通過する便の運航効率（燃料消費量，飛行時間）

## 5. まとめ

監視データ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両者を比較し、運航効率を定量的・客観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、それぞれに誤差があるので結果の数値は厳密ではないが、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。

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400kmの範囲であるため東京国際空港への到着便に注目して運航効率を解析した。到着便は、ターミナル空域およびそ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。時間調整のための経路迂回は飛行距離が増えるので燃料消費の観点からも効率を落とすことになるが、燃料消費量には選択する飛行方法によってバラつきがある。また、飛行距離が最短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の観点から効率を落とす。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ので運航効率をより深く把握することができる。

航空交通管理において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。現行システムで使用可能な監視データ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通信により実現することが必要になる。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。

## 謝辞

本研究は、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年度まで実施した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、京大生大生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。機体性能モデルについては、EUROCONTROLが開発した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>
- [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] 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, pp.43-50, 2012.
- [4] Wickramasinghe, N.K., et al. "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, pp.87-104, 2014.
- [5] 京大生大生生存圏研究所, 気象庁データ <http://database.rish.kyoto-u.ac.jp/arch/jmadata/gpv-original.html>
- [6] 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.
- [7] Harada, A., et al. "Accuracy evaluation of an aircraft performance model with airliner flight data," Trans. JSASS Aerospace Technology Japan, Vol.11, pp.79-85, 2013.
- [8] 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, Vol.12, pp.57-63, 2013.
- [9] 宮本侑斗, 原田明德, ナヴィンダ・ビクラマシンハ, 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, pp.1-10, 2014.
- [10] Wickramasinghe, N.K., et al. "Flight trajectory optimization for operational performance analysis of jet passenger Aircraft," 2013 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology, Takamatsu, Japan, 2013.
- [11] Roberson, W. "Fuel conservation strategies: Cost Index explained," Aero Quarterly 2/07, Boeing, 2007.
- [12] 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.