

## 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

田村, 恵一  
九州大学大学院工学府航空宇宙工学専攻

原田, 明德  
九州大学大学院工学府航空宇宙工学専攻

樋口, 雄紀  
九州大学大学院工学府航空宇宙工学専攻

松田, 治樹  
九州大学大学院工学府航空宇宙工学専攻

他

<https://hdl.handle.net/2324/7358030>

---

出版情報 : AEROSPACE TECHNOLOGY JAPAN, THE JAPAN SOCIETY FOR AERONAUTICAL AND SPACE SCIENCES.  
16, pp.27-36, 2017. Japan Society for Aeronautical and Space Sciences  
バージョン :  
権利関係 : © 2017 The Japan Society for Aeronautical and Space Sciences



## 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<sup>\*1</sup>

## A Study on Aircraft Performance Model by using Cargo Flight Data

田村 恵一<sup>\*2</sup>・原田 明徳<sup>\*2,\*3</sup>・樋口 雄紀<sup>\*2</sup>・松田 治樹<sup>\*2,\*4</sup>・宮沢 与和<sup>\*5</sup>  
Keiichi TAMURA, Akinori HARADA, Yuki HIGUCHI, Haruki MATSUDA and Yoshikazu MIYAZAWA

**Key Words:** Air Traffic Management, BADA Model, Flight Data, Aircraft Performance Model, Optimal Trajectory, Flight State Estimation

**Abstract:** Many papers have been published on air traffic management research. In those papers, BADA model which was developed by EUROCONTROL is often used, however, few papers have discussed accuracy of the BADA model. This paper investigates the accuracy of BADA model by using cargo flight data which includes weight data recorded more accurately than passenger aircraft. Fuel flow, its statistic tendency and fuel consumption with different Cost Index (CI) calculated by BADA model are compared with flight data. The results show that fuel flow is almost identical for every part of flight phase except for descent phase with flaps and landing gear extended. Furthermore, flight state estimation information is compared with the flight data. Flight state estimation only requires the position information such as surveillance radar data from the ground, numerical weather prediction data and aircraft weight. The results have revealed that flight state information including fuel flow can be estimated accurately in most parts of flight. Next, the optimal trajectories generated by BADA model and numerical weather prediction data are studied as another part of the model evaluation analysis. The optimal trajectory calculated so as to minimize fuel consumption and flight time plays key role in the future four-dimensional trajectory based operation as well as potential benefit analysis. The tendency of fuel consumption and flight time change due to CI is almost agree. The air speeds, however, are different. Therefore, it is difficult to estimate flight time even if the CI is given.

### 記号の説明

$D$ : 抵抗  
 $F$ : 推力  
 $H$ : 高度  
 $L$ : 揚力  
 $R$ : 気体定数  
 $S$ : 翼面積  
 $T$ : 温度  
 $V$ : 速度  
 $f$ : 燃料流量  
 $g$ : 重力加速度  
 $m$ : 機体質量  
 $p$ : 気圧  
 $\gamma$ : 飛行経路角  
 $\eta$ : 推力比燃料流量係数  
 $\rho$ : 空気密度  
 $\psi$ : トラック角

### 添字の説明

$V$ : 鉛直  
 $G$ : 対地  
 $CAS$ : 較正対気速度  
 $TAS$ : 真対気速度  
 $a$ : 相対空気流  
 $s$ : 静的

### 1. はじめに

近年の航空交通量の増大に伴う様々な課題を解決するために、航空交通管理に対する研究が米国における NextGen、欧州における SESAR、我が国における CARATS を中心に実施されている。本論文は、EUROCONTROL が開発し、航空交通管理の研究において多く利用されている BADA (Base of Aircraft Data) の精度とその影響に関する研究である。

今日の旅客機や貨物機の運航においてエアラインは気象予報データと性能モデルに基づいて飛行計画を作成し航空機を運航している。一方、地上の航空管制は、監視と干渉回避のための管制指示が基本であるため性能モデルを利用することはない。しかし、交通量の増大にともない、混雑空港の到着機のベクター制御に代表されるように大きな飛行計画の変更を指示する必要が発生しており、遅延や燃料消費量の増大などの運航性能への影響を最小限にするためにエアラインと同様に気象予報データと性能モデルに基づ

<sup>\*1</sup>©2017 日本航空宇宙学会

平成 28 年 4 月 14 日, 第 47 期日本航空宇宙学会年会講演会にて発表.  
平成 28 年 6 月 21 日原稿受付

<sup>\*2</sup>九州大学大学院工学府航空宇宙工学専攻

<sup>\*3</sup>現 高知工科大学

<sup>\*4</sup>現 川崎重工業

<sup>\*5</sup>九州大学大学院工学府航空宇宙工学部門

いた航空交通管理が必要になる。この軌道ベース運用 (Trajectory Based Operation, TBO) と呼ばれる将来の航空交通管理においては気象予報データと性能モデルをエアラインと共通化することがあるべき姿である。しかし、現状は、気象予報データは公開されているので共通化が可能であるのに対し、機体メーカーは性能に関する情報を公開していないので、航空交通管理の研究を進めるためにはエアラインが使用する性能モデルに類似したモデルが必要となり、BADA モデルが多くの研究において利用されている。BADA モデルの精度とその影響について評価する必要があるが、BADA モデルは研究のための便宜的な利用に留まるという理解もあり公開されているデータは少ない。EUROCONTROL は飛行領域全体での精度を追求した Revision 4 を開発して一部に公開しているが、九州大学をはじめ我が国の多くの研究において Revision 3 を使用しており、その精度の性質について評価をする必要がある。また、九州大学においては BADA モデルを利用して実際と理想の飛行の燃料消費量の差から航空交通管理の改善による潜在便益を分析しており、結果の信頼度を確認する観点からも BADA モデルの精度の評価が重要である<sup>1)</sup>。

本論文は、航空機に搭載された飛行記録装置 (Quick Access Recorder, QAR) のデータを用いて BADA モデルの精度とその影響を評価する。まず初めに、機体で記録された飛行状態量および機体で計測、推定された風などの気象情報を利用して BADA モデルから燃料流量を推定し、実際の燃料流量との比較を行い、他の誤差の影響が最も少ない状態による BADA モデルの誤差評価を行う。時歴、フェーズ毎の燃料消費量について評価を行う<sup>2)</sup>。次に、性能モデルを利用することによって解析が可能となる2つの方法において実際の飛行データと比較することによって性能モデル以外の誤差の影響も評価して解析方法の有効性を議論する。一つは、地上監視データからの燃料流量推定解析においてどれほどの影響があるかを確認するために、地上の解析を模して、QAR の時刻、緯度、経度、気圧高度の情報と数値予報気象データから燃料流量を推定して実際の燃料流量との比較を行う。BADA モデルの誤差以外に気象予報データの誤差の影響も含むが、地上が監視データを用いて燃料流量推定を行う時の誤差を評価することができる<sup>3)</sup>。もう一つは、BADA モデルと気象予報データ、運航において使用したコストインデックス (Cost Index, CI) を用いて軌道最適化を行い、実際の飛行軌道との相違を評価する。実際の運航において計画される飛行軌道と同様の前提に立って最適軌道を求めた場合、地上がどこまで実際の飛行計画を再現することができるかを検討するものである。BADA モデルと気象予報データの誤差以外に、軌道最適化には動的計画法を用いているので実際の飛行計画ならびに飛行管理装置 (Flight Management System, FMS)<sup>4,5)</sup> の最適化との相違による影響を受ける。

対象となる飛行は貨物便とした。過去には原田らがボーイング 777 型機の旅客便を使用して同様の評価を行っているが<sup>1)</sup>、旅客便は旅客をある重量で仮定して重量計算を行

っており、実重量からの誤差を生じている。貨物便は貨物を実測して搭載するため旅客便と比較して重量データと実重量の誤差が小さく、BADA モデルの評価を行う上で最適である。また、この研究では深夜便を対象とした。深夜は他機との干渉が少なくベクターなどが発生しにくいいため、最適軌道との比較を容易に行うことができる。

## 2. 飛行データと BADA モデル

**2.1 飛行データ** 使用した飛行データは第 1 表に示す 2015 年 8～10 月に東京国際空港と佐賀空港を運航したボーイング 787 型機の貨物便の飛行である。各便に便番号を割り当て本文、図および表中で該当する便を表している。

第 1 表 解析に使用した飛行データ

| 便番号 | 年月      | 出発空港／到着空港 | Cost Index |   |
|-----|---------|-----------|------------|---|
| ①   | 2015/8  | 東京国際／佐賀   | 20         |   |
| ②   | 2015/8  | 佐賀／東京国際   | 20         | * |
| ③   | 2015/9  | 東京国際／佐賀   | 40         |   |
| ④   | 2015/9  | 佐賀／東京国際   | 40         | * |
| ⑤   | 2015/10 | 東京国際／佐賀   | 80         |   |
| ⑥   | 2015/10 | 佐賀／東京国際   | 80         |   |
| ⑦   | 2015/10 | 東京国際／佐賀   | 80         |   |

\*: 上昇のデータが欠損している

それぞれの便に含まれる主要なデータは時刻、重量、緯度、経度、風向、風速、対地速度、真対気速度、較正対気速度、昇降率、マッハ数、気圧高度、機首方位角、トラック角、外気温度、燃料流量である。データの記録間隔  $\Delta t$  は 1 秒である。一部の便においては上昇中のデータが欠損しており、その他のフェーズのデータのみを使用した。

離陸推力は一定度低減しているが上昇推力は低減推力を使用していない。使用フラップは羽田出発では Flaps5 を、佐賀出発では Flaps15 を使用した。全ての飛行において上昇時は指示対気速度一定、Mach 領域では Mach 数一定とした。降下時は佐賀到着便では Cost Index に対応する指示対気速度一定で降下を行った。羽田到着便では FMS が計算する降下経路に基づき降下した。言い換えると佐賀到着便では速度一定で風が変化すると降下経路が変化し、羽田到着便では降下経路一定で風の変化は速度の変化として現れる。着陸に使用したフラップは羽田着では Flaps25、佐賀着では Flaps30 である。

**2.2 BADA モデル** BADA モデル<sup>6)</sup> は European Organization for the Safety of Air Navigation (EUROCONTROL) がメーカーおよび航空会社とともに開発した航空機性能モデルである。この解析では Revision 3.11 を使用する。

## 3. 燃料流量の計算

**3.1 推力** 推力  $F$  は以下の運動方程式から導くことができる。

$$\begin{aligned}
 m \left\{ \frac{dV_G}{dt} \cos(\psi - \psi_a) - \frac{d\psi}{dt} V_G \sin(\psi - \psi_a) \right\} \cos \gamma_a \\
 + m \frac{dV_V}{dt} \sin \gamma_a = F - D - mg \sin \gamma_a
 \end{aligned} \quad (1)$$

$V_G$ は地上速度，すなわち慣性速度ベクトルの局所水平成分の絶対値であり，トラック角  $\psi$  はその方位角である．昇降率  $V_V$  は慣性ベクトルの鉛直成分である．式(1)は，右辺の機体に働く力と左辺の加速度のつり合いの関係について対気速度ベクトル方向の成分により導かれたものである． $\psi_a$  と  $\gamma_a$  はそれぞれ対気速度ベクトルの方位角および経路角である．

$V_G$ ， $\psi$ ， $V_V$  および機首方位角  $\psi_a$  は慣性データであり，QAR に記録されている． $\gamma_a$  は QAR に記録されている  $V_V$ ，および  $V_{TAS}$  から計算できる．微分項は以下の式(3)，(4)のように中心差分を用いて導き，フィルタによるノイズの処理は特に行っていない．また，本解析では式(1)の左辺の最後の項は小さいため省略している．

$$\gamma_a = \sin^{-1} \frac{V_V}{V_{TAS}} \quad (2)$$

$$\frac{dV_G(t_i)}{dt} = \frac{V_G(t_{i+1}) - V_G(t_{i-1})}{2\Delta t} \quad (3)$$

$$\frac{d\psi(t_i)}{dt} = \frac{\psi(t_{i+1}) - \psi(t_{i-1})}{2\Delta t} \quad (4)$$

**3.2 大気モデル** 飛行データに記録された QNE 気圧高度は国際標準大気（International Standard Atmosphere, ISA）の定義に従っているので，気圧高度から静圧  $p$  を容易に計算することができる．また，飛行データは静温（Static Air Temperature, SAT）を記録しているので式(5)より空気密度  $\rho$  を導くことができる．

$$\rho = \frac{p}{RT_S} \quad (5)$$

**3.3 BADA 空力モデル** 揚力と抗力は以下の式で表される．

$$L = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_L \quad (6)$$

$$D = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_D \quad (7)$$

定常飛行を仮定して揚力係数は以下の式で求められる．

$$C_L = \frac{2mg \cos \gamma_a}{\rho V^2 S} \quad (8)$$

BADA モデルにおいて  $C_L$  と  $C_D$  の関係は以下の式で定義されている．

$$C_D = C_{D0} + C_{D2} \times C_L^2 \quad (9)$$

$C_{D0}$  は有害抗力係数， $C_{D2}$  は誘導抗力係数であり，フラップ角に応じて定数の係数が与えられる．推力は抗力を式(1)に代入することで得られる．

**3.4 BADA 燃料流量モデル** BADA モデルではノミナル燃料流量，巡航燃料流量，最小燃料流量のモデルが定義されている．なお， $C_{f1}$ ， $C_{f2}$ ， $C_{f3}$ ， $C_{f4}$ ， $C_{fcr}$  は BADA モデルのパラメタである

#### ノミナル燃料流量

ノミナル燃料流量  $f_{nom}$  は推力  $F$  と推力比燃料流量係数  $\eta$  から以下の式で導かれる．

$$f_{nom} = \eta \times F \quad (10)$$

$\eta$  は真対気速度  $V_{TAS}$  を用いて以下の式で表される．

$$\eta = C_{f1} \times \left( 1 + \frac{V_{TAS}}{C_{f2}} \right) \quad (11)$$

#### 巡航燃料流量

巡航燃料流量  $f_{cr}$  はノミナル燃料流量  $f_{nom}$  に巡航時の修正係数  $C_{fcr}$  を乗じたものとして定義される．

$$f_{cr} = \eta \times F \times C_{fcr} \quad (12)$$

#### 最小燃料流量

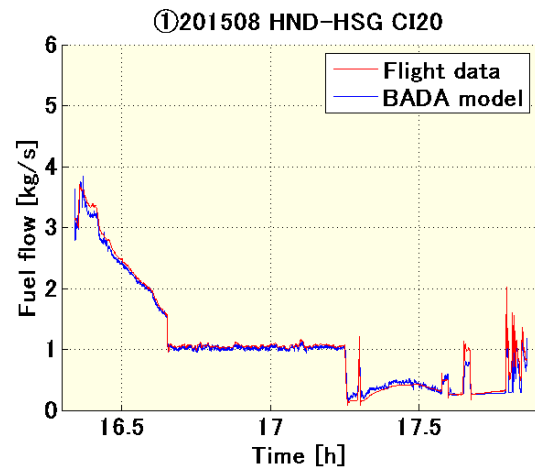
降下時のアイドル推力に対応する最小燃料流量  $f_{min}$  は高度  $H$  を用いて以下の式で表される．

$$f_{min} = C_{f3} \left( 1 - \frac{H}{C_{f4}} \right) \quad (13)$$

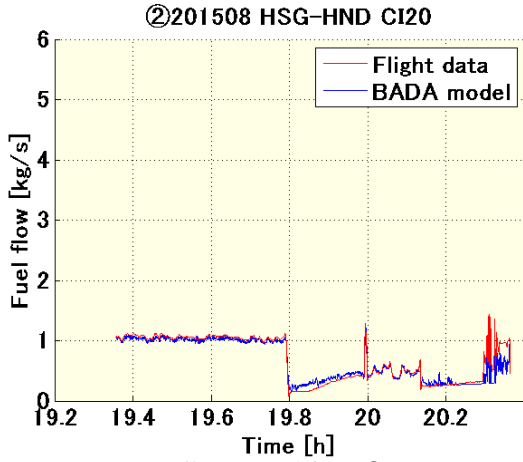
上昇，巡航時の燃料流量はそれぞれ式(10)，式(12)から求められる．また降下時の燃料流量は式(10)と式(13)のいずれか大きい方を選択する．

### 4. BADA モデルの精度の直接評価結果

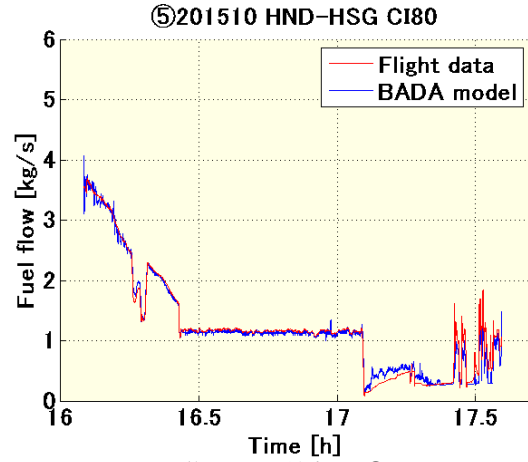
**4.1 燃料流量の比較** 第1図から第7図はBADAモデルと飛行データの燃料流量を比較したものである．横軸は時刻（UTC）であり離陸から着陸までをプロットしている．飛行フェーズは飛行データより Air mode になった時から巡航高度までを上昇フェーズ，巡航高度を飛行しているときは巡航フェーズ，巡航高度から離脱し Ground mode になった時までを降下フェーズとした．Landing Gear, Flaps を使用しているフェーズでは Configuration を考慮して推定値を算出したが誤差が見られる．しかし，その他の全ての飛行フェーズでは概ね一致していることが確認できる．なお，第5図において上昇中一時的に燃料流量が減少しているがこれは管制の指示により巡航高度に到達する前に一時的な水平飛行を実施したためである．



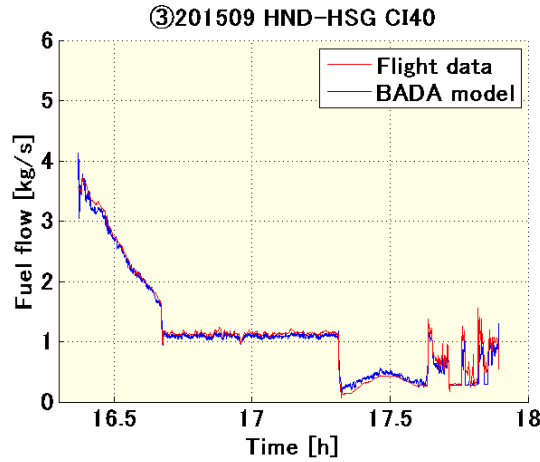
第1図 燃料流量 ①



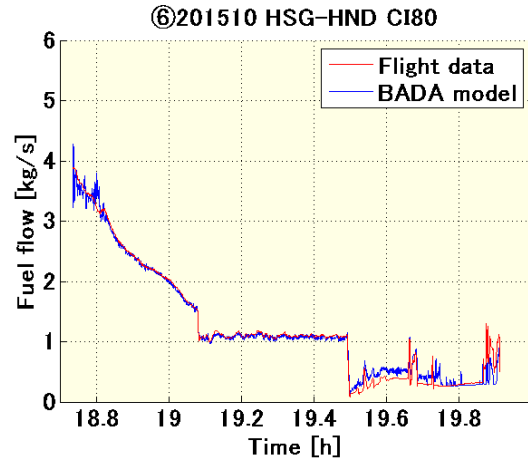
第2図 燃料流量 ②



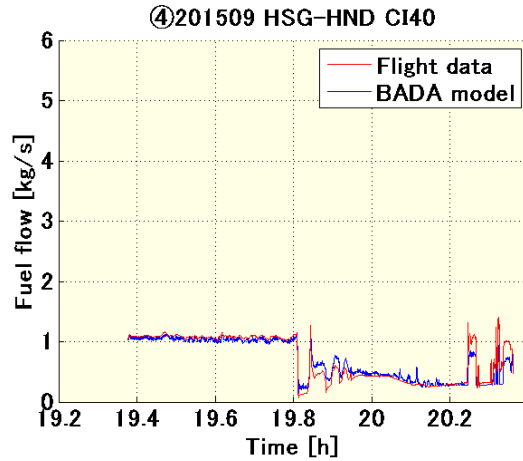
第5図 燃料流量 ⑤



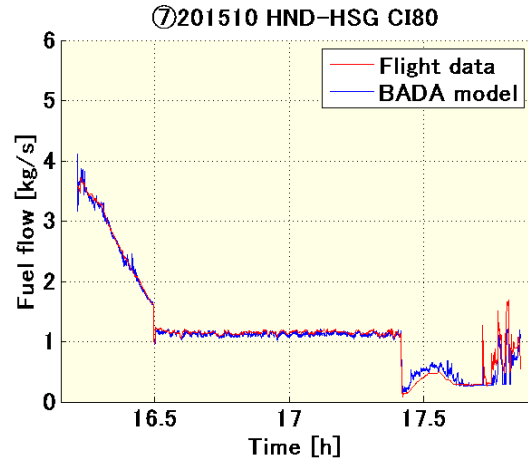
第3図 燃料流量 ③



第6図 燃料流量 ⑥



第4図 燃料流量 ④



第7図 燃料流量 ⑦

**4.2 燃料流量誤差の解析** BADA モデルで計算した燃料流量の飛行データの値からの誤差を平均値および標準偏差を用いて解析する．平均値並びに標準偏差は式(15), 式(16)から得られる．全ての飛行フェーズにおいて1秒ごとに計算を行っている．

$$\Delta f(t) = f_{BADA}(t) - f(t) \quad (14)$$

$$\Delta \bar{f} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^{t_f} \Delta f(t) \quad (15)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum \{\Delta f(t) - \Delta \bar{f}\}^2} \quad (16)$$

第8図から第11図にフェーズごとの燃料流量誤差の平均値および標準偏差を示す．これらの結果より平均値は $\pm 0.1$  kg/s 以下となっており高い精度で一致していることが確認できる．また，第10図から Landing Gear, Flaps を使用しない巡航フェーズにおいては標準偏差も 0.05 kg/s 以下となっており特に高い精度で一致していることが確認できる．

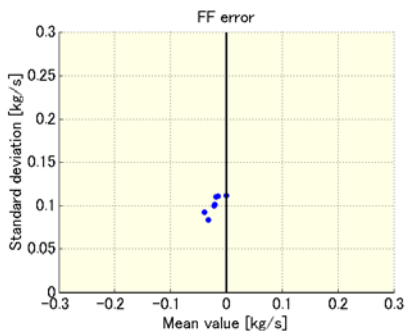
第12図から第18図は，フライトごとに全体と3つの

フェーズの燃料消費量を示したものである。第 2 表は、燃料消費量の差（BADA モデルー飛行データ）および実際の燃料消費量に対する割合である。燃料消費量の差は全体で 4%以下に収まっており概ね一致していると判断できる。

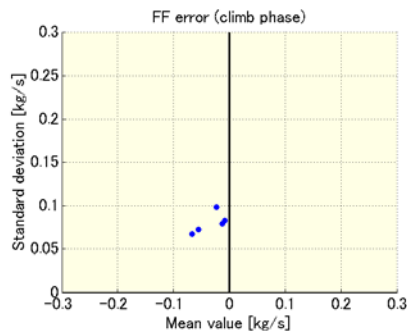
この燃料消費量の差については、④、⑥の降下フェーズを除き全て実際より小さい値となっている。BADA モデルから燃料流量を求める計算においては旋回による揚力ならびにそれによる抗力の増大を考慮していないことから旋回中の燃料流量が少なく見積もられている事も要因の一つと考えられる。降下フェーズでの燃料流量は Landing Gear, Flaps を使用していない時、BADA モデルよ

り実際の方が燃料流量は少ないが、使用時は多くなる。上昇フェーズでは短時間の使用であるが降下フェーズでは運航便により使用時間は異なる。④、⑥の降下フェーズでは使用している時間が他の便と比較して短時間であるため燃料消費量が実際より大きくなっていると推測される。

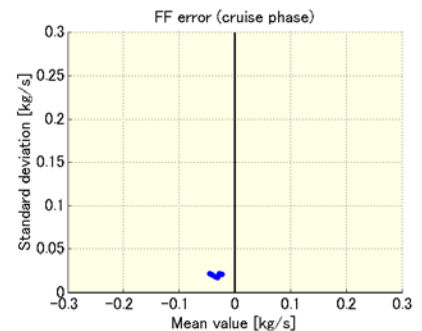
参考文献 7)では昇降率に設定した閾値のみで巡航の判定を行っていたため地上走行のデータが巡航に含まれていた。佐賀到着便においては逆噴射装置を最大限使用し、羽田到着時は最小限の使用にとどめたことから、東向きと西向きの飛行で相違が発生していた。本論文では地上走行を解析の対象外としているため、そのような相違は発生していない。



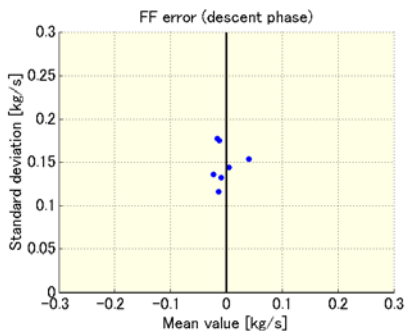
第 8 図 燃料流量誤差（全飛行フェーズ）



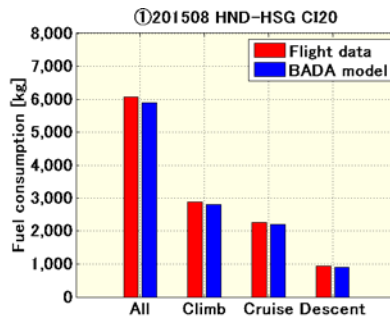
第 9 図 燃料流量誤差（上昇）



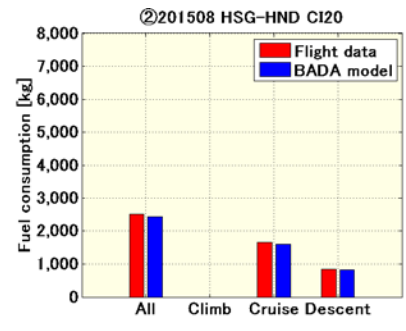
第 10 図 燃料流量誤差（巡航）



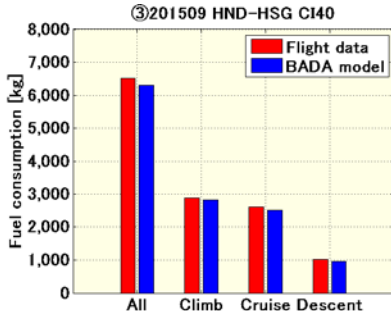
第 11 図 燃料流量誤差（降下）



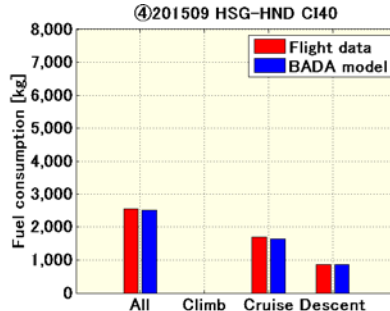
第 12 図 燃料消費量 ①



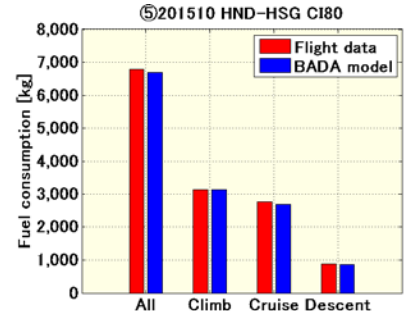
第 13 図 燃料消費量 ②



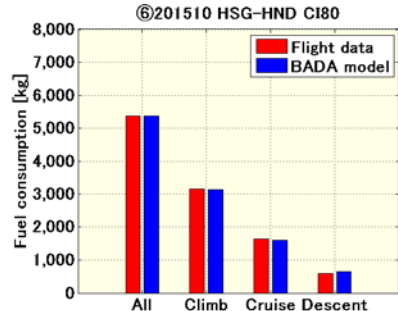
第 14 図 燃料消費量 ③



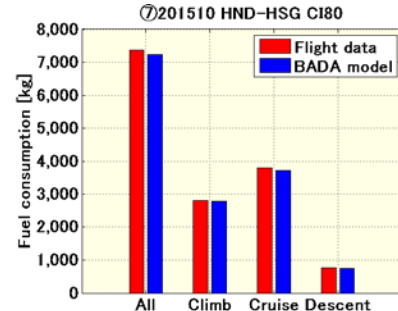
第 15 図 燃料消費量 ④



第 16 図 燃料消費量 ⑤



第 17 図 燃料消費量 ⑥



第 18 図 燃料消費量 ⑦

第2表 推定燃料消費量の飛行データからの差

| CI | 20               |           |                  |           | 40               |           |                  |           | 80                |           |                   |           |                   |           |
|----|------------------|-----------|------------------|-----------|------------------|-----------|------------------|-----------|-------------------|-----------|-------------------|-----------|-------------------|-----------|
| 経路 | ①2015/8<br>羽田ー佐賀 |           | ②2015/8<br>佐賀ー羽田 |           | ③2015/9<br>羽田ー佐賀 |           | ④2015/9<br>佐賀ー羽田 |           | ⑤2015/10<br>羽田ー佐賀 |           | ⑥2015/10<br>佐賀ー羽田 |           | ⑦2015/10<br>羽田ー佐賀 |           |
|    | 差<br>[kg]        | 割合<br>[%] | 差<br>[kg]        | 割合<br>[%] | 差<br>[kg]        | 割合<br>[%] | 差<br>[kg]        | 割合<br>[%] | 差<br>[kg]         | 割合<br>[%] | 差<br>[kg]         | 割合<br>[%] | 差<br>[kg]         | 割合<br>[%] |
| 上昇 | -76.0            | -2.6      | -                | -         | -60.6            | -2.1      | -                | -         | -9.5              | -0.3      | -28.3             | -0.9      | -12.8             | -0.5      |
| 巡航 | -67.1            | -3.0      | -54.8            | -3.3      | -104.2           | -4.0      | -62.2            | -3.7      | -68.0             | -2.5      | -33.8             | -2.1      | -92.0             | -2.4      |
| 降下 | -31.0            | -3.3      | -19.3            | -2.3      | -48.8            | -4.8      | 10.0             | 1.2       | -23.5             | -2.6      | 61.3              | 10.4      | -26.4             | -3.4      |
| 全体 | -174.1           | -2.9      | -74.1            | -3.0      | -213.7           | -3.3      | -52.2            | -2.0      | -101.0            | -1.5      | -0.7              | 0.0       | -131.2            | -1.8      |

## 5. 飛行状態推定と飛行データの比較

BADA モデルを利用した解析は種々行われている．ここでは地上の監視データと同様に時刻，緯度，経度，気圧高度のみのデータを用いた飛行状態推定<sup>9)</sup>を行い，実際の飛行の燃料流量と比較する．これらの解析においては BADA モデルばかりでなく気象データなどの誤差が影響を及ぼすが，飛行データと結果を比較することにより地上の解析の精度を総合的に評価することができる．

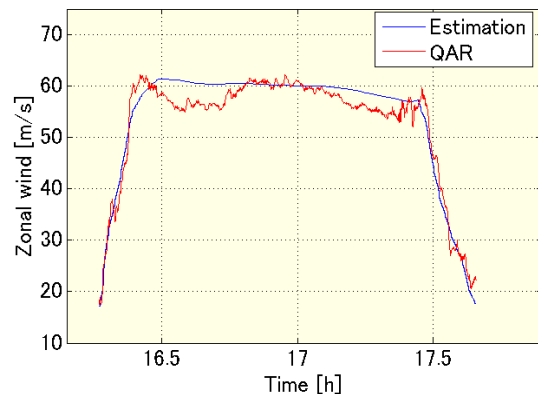
気象データは数値予報気象データ<sup>9)</sup>を空間および時間方向に内挿したものを使用している．また，高度 10,000ft 以上の飛行を評価対象とした．

羽田発佐賀着 CI80 の⑦を対象便とした．第 19 図から第 25 図に飛行状態推定の結果と飛行データを示す．青の Estimation が飛行状態推定，赤の QAR は飛行データを示す．ここで，上昇および巡航中の燃料流量は機体重量にほぼ比例し，その影響が大きいため，この解析では初期重量は飛行データの値を用いている．

第 19, 20 図の Estimation は数値予報気象データから求めた東西方向および南北方向の風速である．第 21 図の Estimation は位置情報から対地速度を推定したものである．これらから TAS, CAS, Mach 数, Heading の対気情報を推定することができる．第 22 図から第 24 図はそれらを飛行データと比較した結果であり，高い精度で一致していることが分かる．第 25 図の燃料流量の結果において振動が発生しているがこれは緯度，経度の分解能が不足しているため対地速度の推定にフィルタを使用しているが加速度にはノイズが残るためである．燃料流量もよく一致していると言える．

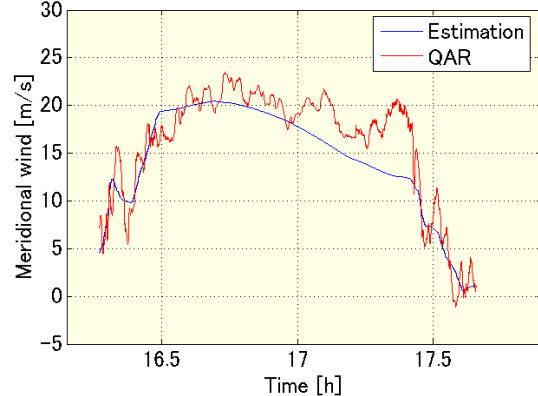
第 3 表は，飛行状態推定から得られた燃料消費量と実際の飛行データとを比較したものである．誤差は 4% 以下であるが，BADA モデルの直接比較とは対照に推定値は実際より大きくなっている．

⑦201510 HND-HSG CI80



第19図 東西方向の風 CI80 ⑦

⑦201510 HND-HSG CI80



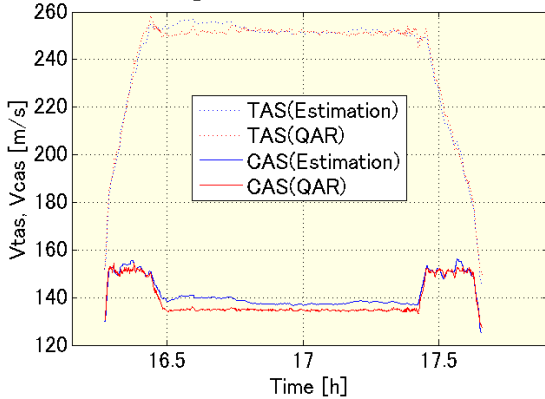
第20図 南北方向の風 CI80 ⑦

⑦201510 HND-HSG CI80



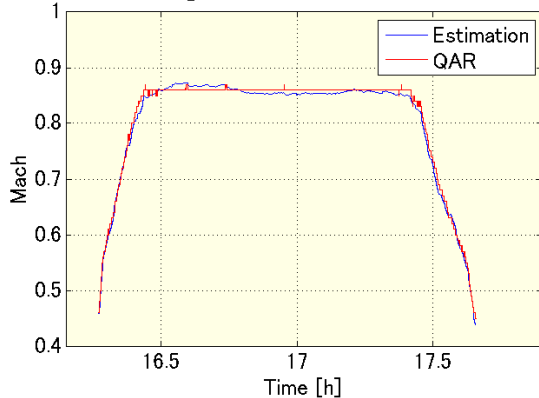
第21図 Ground Speed CI80 ⑦

⑦201510 HND-HSG CI80



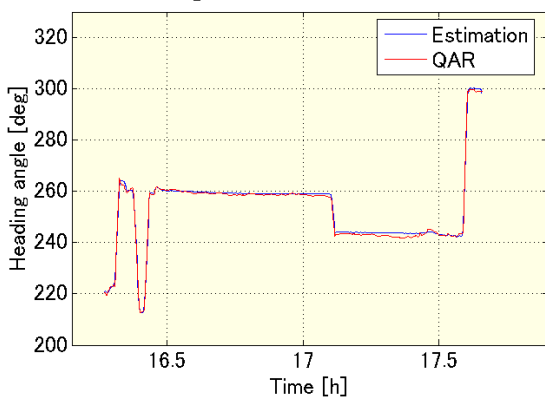
第22図 CASおよびTAS CI80 ⑦

⑦201510 HND-HSG CI80



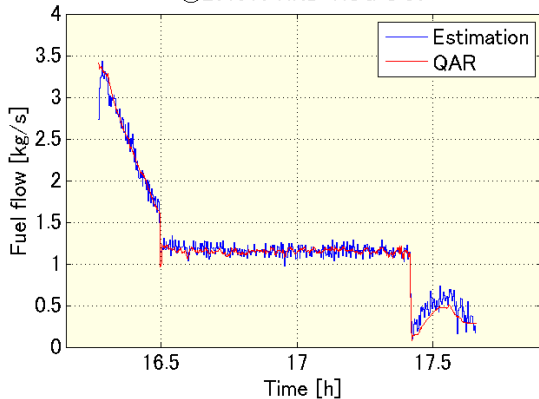
第23図 Mach数 CI80 ⑦

⑦201510 HND-HSG CI80



第24図 Heading CI80 ⑦

⑦201510 HND-HSG CI80



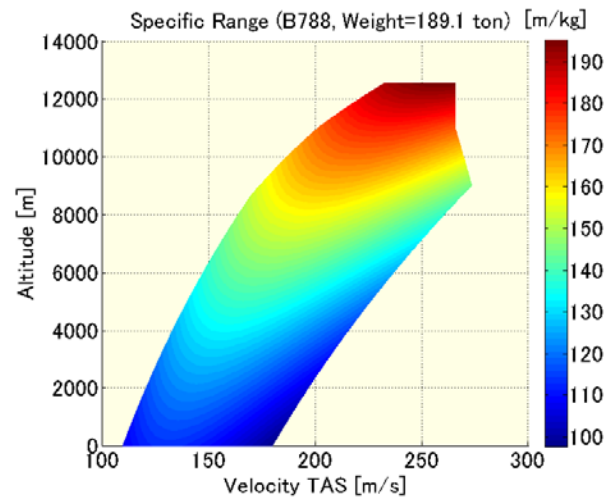
第25図 燃料流量 CI80 ⑦

第3表 燃料消費量の比較

| 便番号 | 飛行データ<br>[kg] | 飛行状態推定<br>[kg] | 差<br>[kg] | 割合<br>[%] |
|-----|---------------|----------------|-----------|-----------|
| ①   | 4947          | 5033           | 86        | +1.74     |
| ③   | 5176          | 5238           | 62        | +1.20     |
| ⑤   | 5407          | 5596           | 189       | +3.50     |
| ⑦   | 6133          | 6252           | 119       | +1.94     |

## 6. 最適軌道と飛行データの比較

BADA モデルと気象予報データ、運航において使用した Cost Index を用いて軌道最適化を行い、実際の飛行軌道との相違を評価する。九州大学において開発された最適軌道生成ツール<sup>10~12)</sup>で軌道最適化を行い、地上がどこまで実際の飛行計画を再現することができるかを検討するものである。第26図はBADAモデルの標準重量による巡航飛行における単位燃料質量あたりの飛行距離を表すSR(Specific Range)線図である。BADA Revision 3の特徴として高マッハ数の空力モデルおよび高高度のエンジン推力モデルについて詳細なモデル化を避けており、多くの機種種のSR線図において最大速度、最大高度のポイントで燃料、飛行時間のどちらかを評価しても最適であるという結果になる傾向がある。本研究で対象とする航空機においても最大マッハ数MMO 0.9, 最大高度 43,100 ftで燃料、飛行時間のどちらかで評価しても最適となる。この事態を避けるために、モデルの適用範囲が飛行可能領域の内側にあると考え、巡航高度の最大値、速度の最大値を実運航を参考にして予め運用限界として与えるという便宜的な方法を採用している<sup>13)</sup>。本解析では飛行計画で予め定めた巡航高度を最大高度、BADAモデルによる運用最大マッハ数 0.84, 運用最大速度 CAS 310 kt を与えて解析を行った。



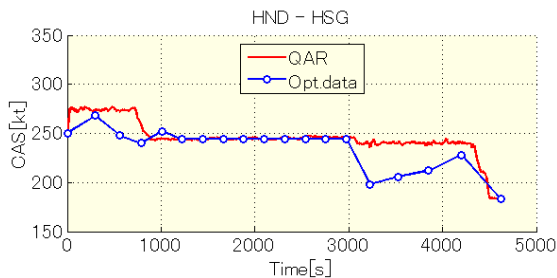
第26図 巡航性能 (ISA, 無風条件)

第27図から第28図は羽田発佐賀着①, ③, ⑤の飛行に対するCAS, Mach数, 高度および降下経路角の比較図である。10,000 ft以上を解析対象としているのでCAS, Mach数および高度の横軸は離陸後高度10,000 ftを通過した後の時間である。降下経路角の横軸は降下フェーズにおける40,000 ft以下の高度を示している。青のOpt dataが最適軌道、赤のQARは飛行データを示す。

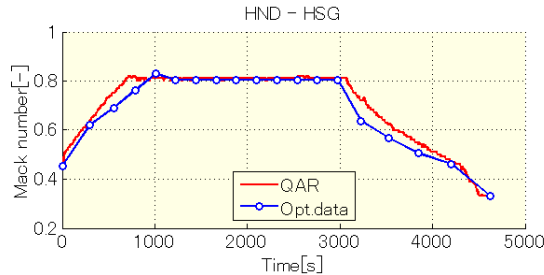
第27図から第30図から、CI20および40における最適巡航速度はCAS, Mach数とも飛行データとよく一致していることが分かる。第30, 31図からCI80では差が見られる。CI80で見られる差はBADAモデルが仮定する運用最大速度が飛行データの値より遅いためである。

降下速度について、羽田発佐賀着ではFMSが指示した速度を維持するように運航が行われた。CI20, 40では降下開始時に最適軌道の方が低い値を示し、最大揚抗比となる速度により近い値を使用する。CI80では概ね一致していると考えられる。第33図から第38図からBADAモデルはCost Indexの違いにより異なる降下経路角を再現していることが分かる。

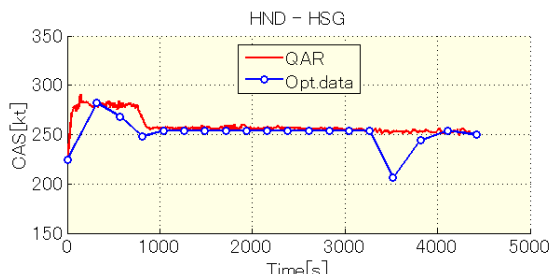
第39図から第42図は佐賀発羽田着の便で全体の飛行データが使用できたCI80の結果を示している。巡航速度は先ほど同様CI80では差が生じている。降下速度について、FMSの計算した降下角に従って運航が行われた佐賀発羽田着では第39, 40図から速度が一定でないことが分かる。降下角について、第42図からFMSの指定したほぼ一定の降下角で降下していることが分かる。実際の飛行の降下角は最適軌道よりわずかに浅い角度となっている。



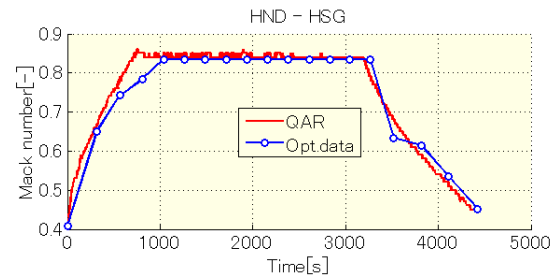
第27図 CASの比較 CI20 ①



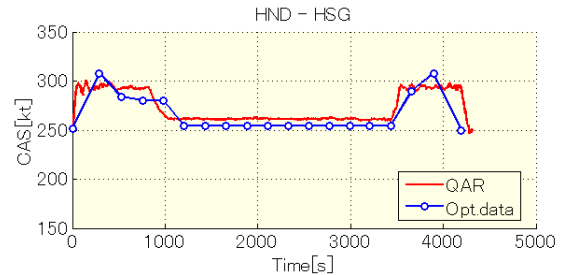
第28図 Mach数の比較 CI20 ①



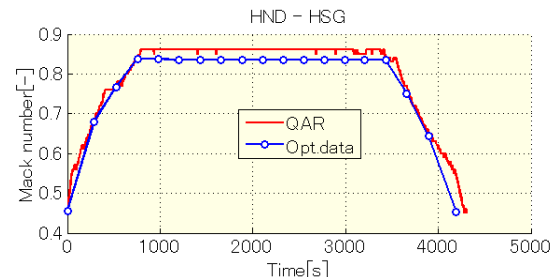
第29図 CASの比較 CI40 ③



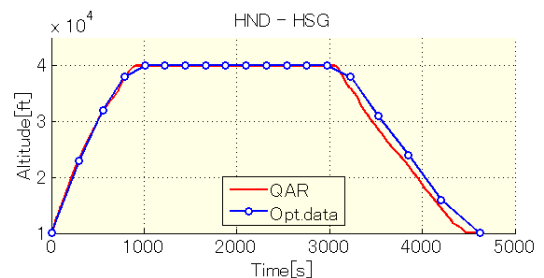
第30図 Mach数の比較 CI40 ③



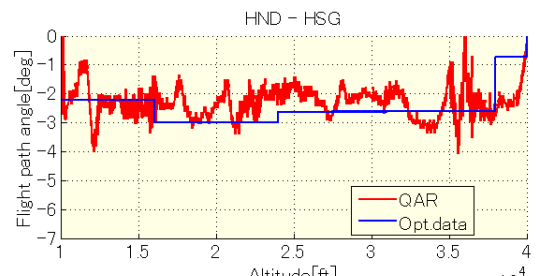
第31図 CASの比較 CI80 ⑤



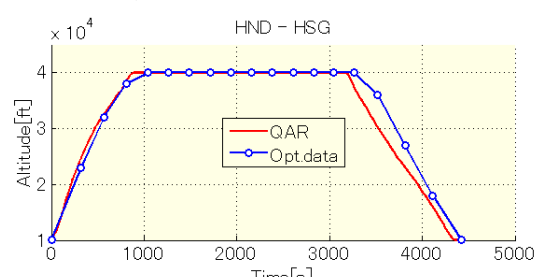
第32図 Mach数の比較 CI80 ⑤



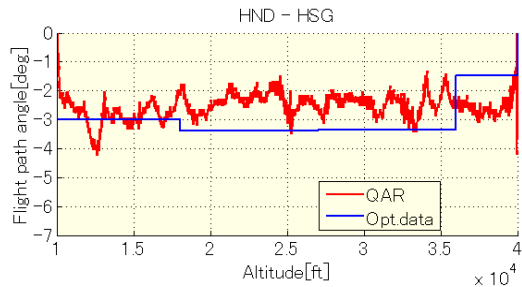
第33図 高度の比較 CI20 ①



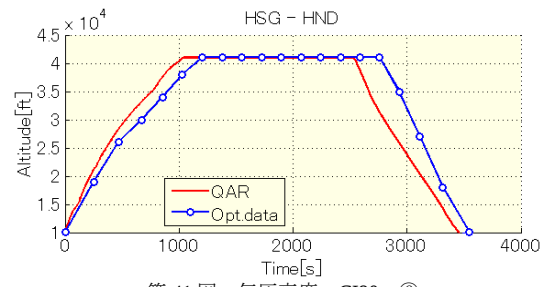
第34図 降下経路角 CI20 ①



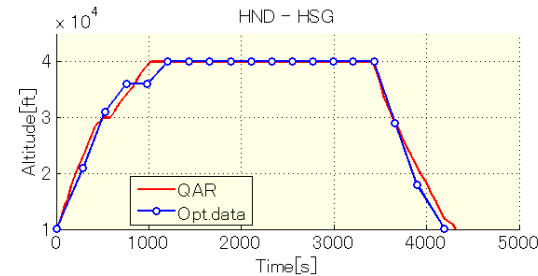
第35図 高度の比較 CI40 ③



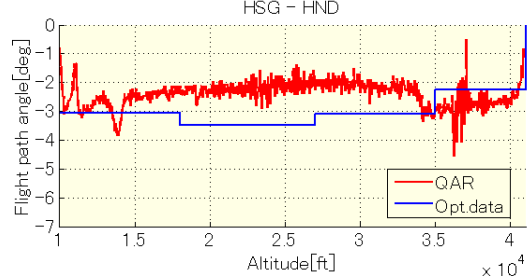
第 36 図 降下経路角 CI40 ③



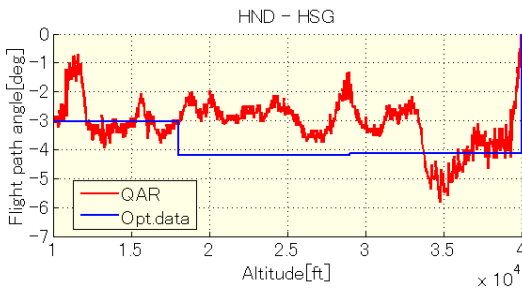
第 41 図 気圧高度 CI80 ⑥



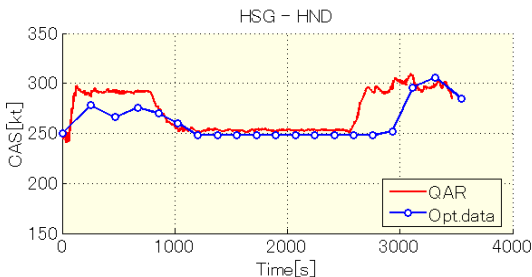
第 37 図 高度の比較 CI80 ⑤



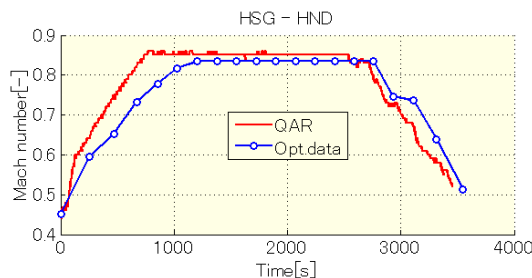
第 42 図 降下経路角 CI80 ⑥



第 38 図 降下経路角 CI80 ⑤



第 39 図 CAS の比較 CI80 ⑥



第 40 図 Mach 数の比較 CI80 ⑥

次に飛行性能について検証する。第 4 表から第 6 表は羽田発佐賀着便に対し、最適軌道の飛行距離、飛行時間、燃料消費量と飛行データの値を比較したものである。第 4 表から深夜時間帯で交通量が少ないにもかかわらず、飛行距離は最適軌道から 18~40 km (2.0~4.3%) 長い。第 5 表から飛行時間は約 120 秒短縮されるものがある一方 18~37 秒増加しているものがある。しかしながら第 6 表から燃料消費量を比較すると全ての便で 150~354 kg (2.4~7.1%) 減少している。飛行距離を考慮すると、BADA モデルによる最適軌道は飛行時間が長くなるものの燃料消費量は少なくなる傾向がある。燃料消費量と飛行時間の関係において Cost Index の変化に対する傾向は一致するものの、速度の選択において差異があることもあり、最適軌道により飛行時間の予測を正確に行うことは困難と思われる。また、文献 13)において議論されているように BADA Revision 3 は飛行領域全体で精度を保証するのではなく通常運航の領域を対象としているため最適軌道の計算など飛行領域全体を使用して計算を行う場合は巡航状態を実際のフライトに合わせるなどの工夫をする必要がある。

第 4 表 飛行距離の比較

| 便番号 | 飛行データ<br>[km] | 軌道最適化<br>[km] | 差<br>[km] | 割合<br>[%] |
|-----|---------------|---------------|-----------|-----------|
| ①   | 926.0         | 895.8         | -30.2     | -3.26     |
| ③   | 899.4         | 881.4         | -18.0     | -2.00     |
| ⑤   | 898.5         | 876.0         | -22.5     | -2.50     |
| ⑦   | 935.0         | 894.4         | -40.6     | -4.34     |

第 5 表 飛行時間の比較

| 便番号 | 飛行データ<br>[s] | 軌道最適化<br>[s] | 差<br>[s] | 割合<br>[%] |
|-----|--------------|--------------|----------|-----------|
| ①   | 4582         | 4619         | 37       | 0.81      |
| ③   | 4397         | 4420         | 23       | 0.52      |
| ⑤   | 4315         | 4191         | -124     | -2.87     |
| ⑦   | 4998         | 5016         | 18       | 0.36      |

第6表 燃料消費量の比較

| 便番<br>号 | 飛行データ<br>[kg] | 軌道最適化<br>[kg] | 差<br>[kg] | 割合<br>[%] |
|---------|---------------|---------------|-----------|-----------|
| ①       | 4947          | 4593          | -354      | -7.15     |
| ③       | 5176          | 4929          | -247      | -4.77     |
| ⑤       | 5407          | 5154          | -253      | -4.68     |
| ⑦       | 6133          | 5983          | -150      | -2.45     |

## 7. ま と め

本論文では、航空交通管理の研究において世界中で広く利用されている BADA モデルの精度を評価するため、燃料消費量の再現計算、飛行状態推定および軌道最適化計算により得られた諸量を貨物便の飛行データと比較した。本解析により明らかとなった結果を以下にまとめる。

1. 燃料流量の直接評価において、燃料流量は上昇、降下時に Landing Gear, Flaps を使用している場合を除きよく一致している。燃料流量誤差は全てのフェーズにおいて 0.1 kg/s 以下となっており、また、燃料消費量の誤差の平均値は全体で 4% 以下である。また、Cost Index ごとによる違いは見られない。降下フェーズにおいて、Flaps, Landing Gear を使用時は BADA モデルより飛行データの方が燃料流量は多いことから使用時間によって誤差が生じる。

2. 飛行状態推定において、位置情報および気象情報から正確な対気速度を算出することが可能であり、正確な重量が分かれば、位置情報だけから燃料消費量を精度よく推定することができる。

3. 軌道最適化において、飛行データの降下経路角と BADA モデルを用いた最適軌道の降下経路角が概ね一致している。Cost Index が小さい方が降下経路角は浅くなり、BADA モデルはこの点についても再現している。しかし、Cost Index の変化に対する燃料消費量と飛行時間の変化の傾向は実際とおおむね一致するものの FMS のコマンド速度の選択においては差があり、飛行時間の絶対値については、Cost Index から必ずしも予測できるとは言い難く、FMS の軌道生成ロジックを模擬する精度の向上等の工夫が必要である。

以上のことから BADA モデルは航空交通管理の研究において有効であると考えられる。本論文は限られた飛行ケース数による 1 機種についての評価であるが、多数の飛行データについて本論文で示した解析方法を適用することによって他の機種の誤差の統計的な性質を明らかにすることができ、監視データによる燃料消費量の推定や潜在便益の解析など有益なデータを提供することができる。

最後にこの研究のために飛行データを提供していただいた全日本空輸株式会社オペレーションサポートセンターフライトオペレーション推進部に感謝の意を表す。また、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。数値予報気象データについては京都大学生存圏研究所がホームページ上に公開している気象庁のデータを使用した。これらの機関にも感謝の意を表す。

## 参 考 文 献

- 1) Harada, A., Miyamoto, Y., Miyazawa, Y. and Funabiki, K.: Accuracy Evaluation of an Aircraft Performance Model with Airliner Flight Data, Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan, **11**(2013), pp. 79-85.
- 2) 原田明徳, 小塚智之, 宮沢与和, ビクラマシンハナヴィンダ, マークブラウン, 福田豊: 国内定期旅客便の運航効率の客観分析, 航空宇宙技術, **14**(2015), pp. 171-178.
- 3) Nakamura, Y. and Kageyama, K.: Study on Validation and Application of Fuel-Burn Estimation, AIAA Paper 2015-0651, 2015.
- 4) Higuchi, Y., Kitazume, N., Kozuka, T., Tamura, K., Miyazawa, Y. and Brown, M.: Efficient Control of Arrival Time at a Congested Airport's Terminal Area, 30th International Congress of Aeronautical Sciences, 2016.
- 5) 樋口雄紀, 小塚智之, 宮沢与和, マークブラウン: FMSを利用した到着時刻制御のための一検討, 第53回飛行機シンポジウム, 2015.
- 6) EUROCONTROL Experimental Center: User Manual for the Base of Aircraft Data (BADA) Revision 3.11, EEC Technical/Scientific Report No.13/04/16-01, 2013.
- 7) 田村恵一, 原田明徳, 松田治樹, 樋口雄紀, 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, 第47期航空宇宙学会年会, 2016.
- 8) 十時寛典, ビクラマシンハナヴィンダ, 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.
- 9) 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>
- 10) 宮本侑斗, 原田明徳, ビクラマシンハナヴィンダ, 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.
- 11) 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, Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan, **12**, APISAT2013 (2014), pp. a17-a25.
- 12) 松田治樹, 原田明徳, 小塚智之, 宮沢与和, ビクラマシンハナヴィンダ: 動的計画法を用いた軌道最適化による到着時刻指定, 第53回飛行機シンポジウム, 2015.11.
- 13) Damir, P., Angela, N., Vincent, M., EUROCONTROL, Bretigny-sur-Orge: Advanced Aircraft Performance Modeling for ATM : analysis of BADA model capabilities, 29th Digital Avionics System Conference, October 3-7, 2010.