

### 3. 航空機の質量と気象データが運航性能推定に及ぼす影響

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

#### 1 まえがき

近年の旅客機は経済性や環境適合性などの性能が高まると同時に、航法精度と飛行管理装置・自動操縦装置の能力が向上することにより機体の性能を最大限に発揮する能力も向上している。しかし、航空機の性能が高まる一方で、航空交通量の増大によって航空機同士の調整が必要になり、予め決められた経路と高度を飛行し、さらに混雑した空域では航空管制の誘導を受けて飛行するため、必ずしも航空機本来の性能を発揮できなくなっている。また、空域を基本とする従来の航空管制の処理容量の限界についても指摘されている。さらに、燃料価格の不安定さや、CO<sub>2</sub>・NO<sub>x</sub>など環境へ悪影響を与える排気ガスの抑制のため、機体同士の干渉を考慮した最適な軌道の実現が強く望まれている。

これらの問題に対して有望な対策を提案するため、国土交通省航空局が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）を策定した[1]。提案されたコアな技術の一つとして、軌道ベース運用（TBO, Trajectory Based Operations）が求められており、全体を一つの空域として捉え、全ての旅客機において出発から到着までの最適な軌道を実現可能とすることにより、燃料消費量の削減、飛行時間の短縮、航空交通容量の拡大などが可能となると考えられている。昨今、軌道ベース運用の実現に向けた様々な軌道最適化の研究がなされてきた[2-5]。さらなる研究開発を進めるにあたり、実際の飛行性能の評価、そして実際の飛行と比べて最適な飛行により見込める効率向上の評価を定量的に議論することは重要である。

航空機の運航性能推定と軌道最適化による便益評価を実施するための対象データとして、①航空機に搭載されたデータ記録装置（QAR, Quick Access Recorder）に記録されたデータ、②二次監視レーダ（SSR, Secondary Surveillance Radar）データ、③放送型自動従属監視（ADS-

B, Automatic Dependent Surveillance - Broadcast）データ、④航空路監視レーダ（ARSR, Air Route Surveillance Radar）データ等が挙げられる。QAR データは実際の運航において記録された詳細な飛行情報である。しかし、他のデータソースから航空機の性能を表す燃料消費量を計算する際には、初期質量を適切に仮定しなければならない。また、対気速度などのエアデータを推定するためには、その飛行航跡における風速や外気温等の情報も必要である。②～④においては、飛行状態を推測するために得られるパラメータは時刻・緯度・経度・気圧高度のみであり、仮定質量や気象データを用いる必要がある。この評価を有効なものとするためには、気象条件や機体質量の仮定が運航性能推定や最適軌道による便益推定にどのような影響を与えるかについて明らかにしなければならない。

そこで本稿では、航空機の質量や大気状態の記録がある QAR データを基に、初期質量の仮定や気象予報データの誤差が飛行状態推定と燃料消費量推定に与える影響を調べる。さらに、実際の機体質量と仮定した機体質量を用いて軌道最適化を行い、燃料削減量を比較することによって質量誤差の影響を考察する。この定量的な検討から質量と気象予報の不確かさの影響をある程度把握できると思われる。文献[6,7]において、それぞれ QAR データを基に気象予報データと機体性能モデルデータの直接比較評価による解析を行ったが、本研究は異なる機種に対してさらに運航性能推定と燃料消費量の再現計算を行い、推定誤差が性能推定に及ぼす影響を評価する。

#### 2 解析に使用するモデル

ここでは、評価対象の飛行データおよび気象予報データモデルと機体性能モデルについて紹介する。解析に用いた運動方程式や最適化手法についても簡潔に述べる。

## 2.1 フライトデータ

機体質量と気象予報データが燃料消費量推定にどのような影響を与えるかを調べるためには、基本となるデータが必要となる。本研究では、QAR データより得られた実際のフライトデータを使用する。評価対象は、離着陸を除くクリーン形態（脚や高揚力装置を下ろしていない状態）のデータのみとする。表1に示すように東京国際空港及び成田国際空港を中心に他の空港を往復する38 ケース（33 国内フライト、5 国際フライト）について評価を行う。全てのデータは、2014 年 3 月から 7 月の間で取得したものであり、現在運用している主な 4 つのジェット旅客機において行ったフライトである。出発・到着空港は ICAO コードで示しており、評価する機種は航空機のカテゴリー・型式・シリーズの組み合わせで与えた仮想の記号で表す。記号に含まれる英字は、M: 中型機 (Medium), H: 大型機 (Heavy) を示す。機種によって様々なアビオニクスが搭載されていることから、取得するデータ項目や取得頻度が異なる。従って、文献[8]で示されている平滑化アルゴリズムを参考にデータの平滑化処理を

行った。

## 2.2 気象予報モデル

フライトデータの再現計算や最適軌道生成において必要になる気象データは、気象庁提供の数値予報モデルによる GPV (Grid Point Value) データを用いる[9]。国際線と国内線の解析にはそれぞれ、GSM (Global Spectral Model) 全球域と日本域モデルの気象データを用いる。これらのデータは、高度方向の運動方程式に静圧近似を用いて生成したものである。モデルによって決められた時間間隔で発表されるデータには、緯度、経度と気圧面で構成される格子点上に、ジオポテンシャル高度、風速、大気温度と湿度等の物理量が格納されている。両モデルの予報精度は同程度であることから[6]、解析対象のフライトにおいて、モデル化誤差の影響を無視できると仮定する。データの各ポイントにおける風速と外気温を推定するため、飛行時間における一次補間と航空機の位置における重み付き三次補間の方法を用いた。本解析では、実況値のみの気象データを使用しており、大気温度、東西風速と南北風速を評価対象の気象データとする。

表1 フライトデータ一覧

フライト	年/月	出発/到着	機種	フライト	年/月	出発/到着	機種
1	2014/07	RJTT/RJFF	H3-1	20	2014/05	RJOR/RJTT	M1-3
2	2014/03	RJCW/RJTT	M1-3	21	2014/05	RJEB/RJTT	M1-2
3	2014/03	RJEB/RJTT	M1-2	22	2014/05	RJCN/RJTT	M1-2
4	2014/05	RJEB/RJTT	M1-3	23	2014/05	RJCC/RJTT	H3-1
5	2014/05	RJCW/RJTT	M1-2	24	2014/05	RJCC/RJTT	M1-1
6	2014/05	RJCC/RJTT	H2-1	25	2014/07	RJTT/RJFF	H1-1
7	2014/05	RJCC/RJTT	H2-1	26	2014/07	RJFF/RJTT	H1-1
8	2014/05	RJCC/RJTT	M1-1	27	2014/07	RJTT/RJFS	M1-3
9	2014/05	RJOH/RJTT	M1-3	28	2014/03	ROAH/RJTT	M1-2
10	2014/07	RJFF/RJTT	H3-1	29	2014/07	RJTT/RJFF	H2-1
11	2014/05	CYVR/RJTT	H1-2	30	2014/07	RJFF/RJTT	H3-1
12	2014/05	RJOS/RJTT	M1-2	31	2014/07	RJFS/RJTT	M1-2
13	2014/05	RJOO/RJTT	H2-1	32	2014/07	RJFF/RJTT	H2-1
14	2014/05	RJBE/RJTT	M1-3	33	2014/05	RJTT/RJFF	H3-1
15	2014/05	RJNW/RJTT	M1-2	34	2014/05	RJAA/RJGG	H1-1
16	2014/05	RJCW/RJTT	M1-3	35	2014/05	RJAA/RCTP	H1-2
17	2014/05	RJCC/RJTT	H2-1	36	2014/03	EGLL/RJAA	H2-2
18	2014/05	RJCK/RJTT	M1-2	37	2014/03	EDDF/RJAA	H2-2
19	2014/05	EDDF/RJTT	H2-2	38	2014/03	RJCC/RJAA	M1-1

### 2.3 機体性能モデル

運航性能推定に係る燃料消費量の再現計算および、最適化に必要な機体性能データは欧州航空航法安全機構（EUROCONTROL, European Organization for the Safety of Air Navigation）が開発・維持している BADA（Base of Aircraft Data）機体性能モデルから抽出する[10]。BADA モデルでは、空力・燃料流量・最大推力モデルなどのパラメータが与えられており、現在使用しているほとんど全ての航空機を扱うことができる。解析に用いる機種に関する BADA 性能データは表 2 に示す。燃料消費量の再現計算においては、短距離と長距離のフライトの初期質量として、それぞれ BADA モデルの標準質量と最大質量を与えており、該当する数値は表 2 の緑色で表す。モデル化誤差の影響を抑えるために、BADA モデルを適用して燃料消費量の再現計算と軌道最適化計算を行う。

### 2.4 航空機の運動モデルと最適化手法

航空機の運動モデルとして、質点近似を適用する。航空機の速度の方向変化は力学的エネルギーに影響を及ぼさないので省略できると仮定することにより状態変数は、航空機の位置（緯度、経度、高度）と速度の4つとし、経路角、方位角と推力の3つを状態変数から求める制御変数とする。各フライトの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（較正対気速度）と横方向の距離（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の格子点を定義し、進行方向の距離に対して高度、速度とクロスレンジを自由に選択・遷移することができると仮定して、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。本解析で使用する評価

関数は、式(1)で示す。

$$J = \int_0^T FF(t)dt + a \int_0^T dt \quad (1)$$

ここで、 $FF$  は燃料流量であり、 $a$  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る Cost Index と呼ばれるパラメータに相当するものである。ただし、本解析では、燃料消費量最小の最適軌道を評価するので、 $a=0$  とする。

### 3 解析的アプローチ

初期質量・気象モデルの影響による燃料消費量や軌道最適化による便益推定の比較評価にあたり、解析方法を表 3 に示す。方法 A~D は、フライトデータに記録された位置情報をもとに、それぞれ異なる初期質量・気象データを用いて燃料消費量を再現計算したものである。これらで得た結果を最適化の比較参照データとする。方法 A は、質量・気象データにおいて実データを用いて再現計算したものであり、これをフライトデータ再現計算の基準として使用する。最適軌道による便益評価において機体性能モデル・運動モデルのモデル誤差を排除するために、フライトデータの燃料消費量の再現計算においても同じ BADA モデルデータ・運動方程式を用いる。仮定する初期質量として下記を用いる。

- ・3時間未満のフライト
  - ➡BADA 標準質量 (SHORT HAUL)
- ・3時間以上、6時間未満のフライト
  - ➡BADA 標準質量 (MEDIUM HAUL)
- ・6時間以上のフライト
  - ➡BADA 最大質量 (LONG HAUL)

表 2 BADA モデルデータ一覧

パラメータ	評価対象の機種				
	M1-1	M1-2, M1-3	H1-1, H1-2	H2-1, H2-2	H3-1
標準質量, $10^3$ kg	60	65.3	154.59	208.7	189.11
最大質量, $10^3$ kg	70.08	78.3	186.88	299.3	227.93
翼面積, $m^2$	124.65	124.65	283.35	427.82	360.46
運用上限マッハ数	0.82	0.82	0.86	0.87	0.90
失速速度 (標準質量), kt	143	149	167	149	164
運用上限速 (CAS), kt	340	340	360	330	350
運用下限速度 (CAS), kt	失速速度×1.3				

表3 解析方法詳細

方法	解析目的	必要 パラメータ	参照データ		
			気象データ	初期質量	性能データ
A			フライトデータ	フライトデータ	
B	機体性能パラメータ の再現計算	航空機の時刻・位置 (フライトデータ)	GSM データ	フライトデータ	BADA データ
C			フライトデータ	標準 (BADA)	
D			GSM データ	標準 (BADA)	
E			GSM データ	フライトデータ	
F	便益推定	位置・速度の初期値 と終端値	GSM データ	標準 (BADA)	

方法 E, F は, QAR データの初期・終端の位置および速度を境界条件とし, 飛行経路を燃料消費量において最適化したものである。気象データについては, 航空機の位置におけるデータしかないため, 軌道最適化は初期質量の仮定を変えた 2 方法のみで実施した。

#### 4 運航性能に関する推定結果

本節では, 方法 A~D を用いて気象データと初期質量の推定誤差が航空機の運航性能推定に与える影響について議論する。式(2)と式(3)から, 燃料消費量の推定に航空機質量(推力  $T$  が依存)と気象データ(真対気速度  $V_{TAS}$  とジオポテンシャル高度  $H_p$  が依存)は大いに関わることが分かる。

$$f_{nom} = C_{f1} \cdot \left( 1 + \frac{V_{TAS}}{C_{f2}} \right) \cdot T \quad (2)$$

$$f_{min} = C_{f3} \cdot \left( 1 - \frac{H_p}{C_{f4}} \right) \quad (3)$$

ここで,  $f_{nom}$  は上昇及び巡航フェーズの燃料流量であり,  $f_{min}$  は降下フェーズの燃料流量である。 $C_{f1-4}$  は燃料流量計算に関する BADA モデル係数を表す。

##### 4.1 気象データの推定誤差

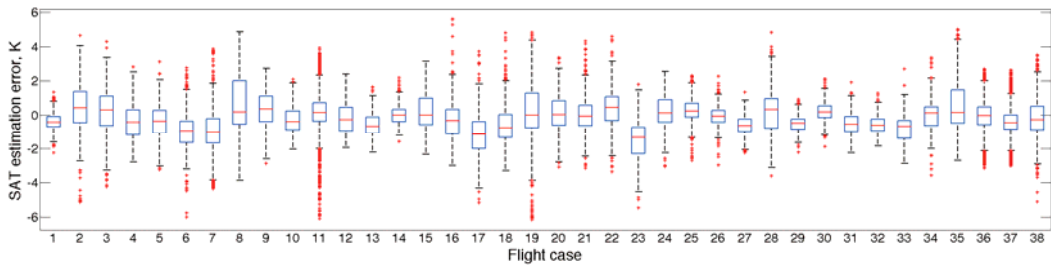
本節では, 気象予報データにより推定した航空機の位置における風速と外気温の推定誤差について定量的に評価する。

図 1~3 は, それぞれ 38 フライトケースに対する外気温, 東西風速と南北風速成分の推定誤差の統計結果を示す。各図の上図は箱ひげ図であり, 下図は二乗平均平方根誤差 (RMSE, Root Mean Squared Error) である。

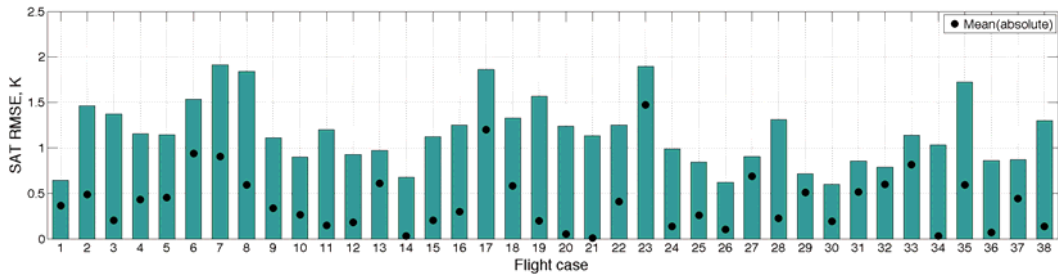
箱ひげ図の各プロットにおいて, 赤線は推定誤差の中央値を表しており, 箱の下側線と上側線は, それぞればらつきの第 1 四分位数と第 3 四分位数を表す。箱の上下の短いヨコ線は, それぞれ誤差の最小値と最大値を示す。一番外側の赤点は「外れ値」と呼ばれ, 第 1 四分位数から四分位範囲の 1.5 倍を引いた値よりも下回った要素と第 3 四分位数に四分位範囲の 1.5 倍をたした値よりも超えた要素を示す。二乗平均平方根誤差を表す棒グラフでは, 該当の絶対平均値を黒点で図示している。

図 1(a)から外気温の推定誤差における四分位範囲は  $\pm 2 \text{ K}$  であることが分かる。他のフライトに比べて長距離飛行 (フライト 11・19・35・36・37) には, 外れ値が比較的によく現れるが, 四分位範囲が似ていることから推定精度が同程度であると言える。また, 推定誤差の最大平均値は  $1.5 \text{ K}$  (フライト 23) であり, 他の全てのフライトにおいて誤差平均値は  $1 \text{ K}$  未満である。得られた結果から, 気象データに格納されている外気温は航空機の運航性能推定に適用するため十分な精度を持つと推測できる。

図 2(a)と 3(a)から風速成分の四分位範囲は  $\pm 5 \text{ ms}^{-1}$  以内に収まることが分かる。外気温の推定結果と同様に長距離フライトの外れ値が比較的によく現れる。長距離フライトの解析に使用する気象データの格子間隔は, 短距離フライトに適用するデータの格子間隔より荒いことにより生じる補間の誤差等が原因と思われる。なお, 両者の全ての解析において誤差平均値が  $4 \text{ ms}^{-1}$  未満であることから, 風速における気象予報データも高精度であり, 航空機の運航性能推定に十分に使用可能であると考えられる。

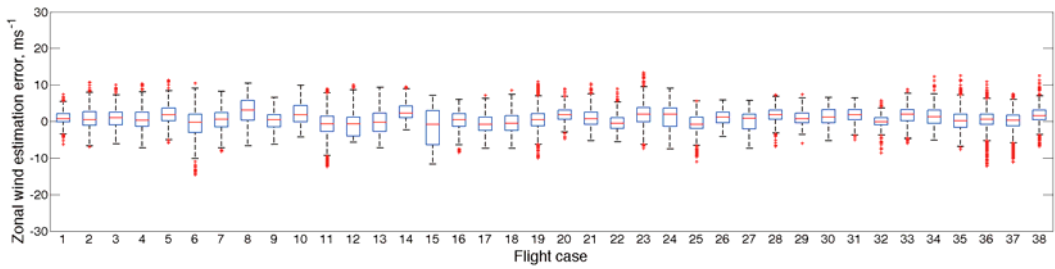


(a) 箱ひげ図

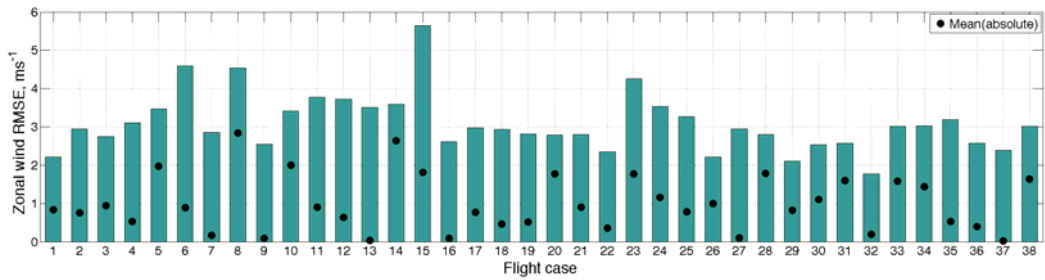


(b) 二乗平均平方根誤差と平均値

図1 推定誤差の統計結果（外気温）

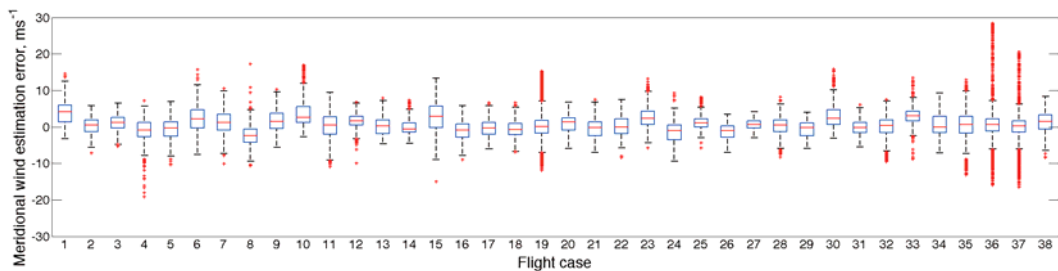


(a) 箱ひげ図

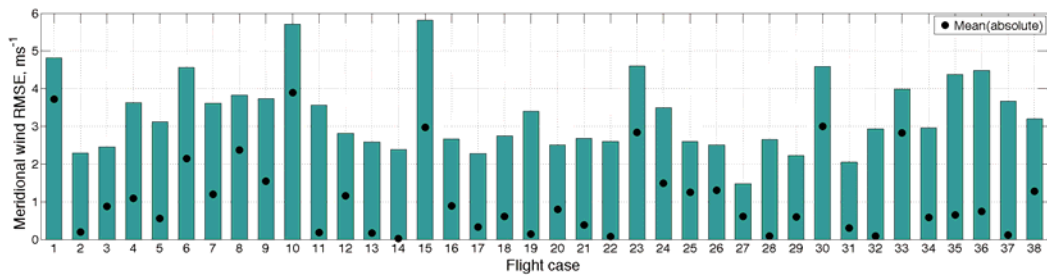


(b) 二乗平均平方根誤差と平均値

図2 推定誤差の統計結果（東西風速成分）



(a) 箱ひげ図



(b) 二乗平均平方根誤差と平均値

図3 推定誤差の統計結果（南北風速成分）

#### 4.2 初期質量による燃料消費量の推定誤差

本節では、初期質量の仮定が燃料消費量の推定に及ぼす影響について調べる。図4は各フライトの飛行時間に対する実際の機体質量とBADA機体質量の差異（BADA機体質量 - 実際の初期質量）を示す。

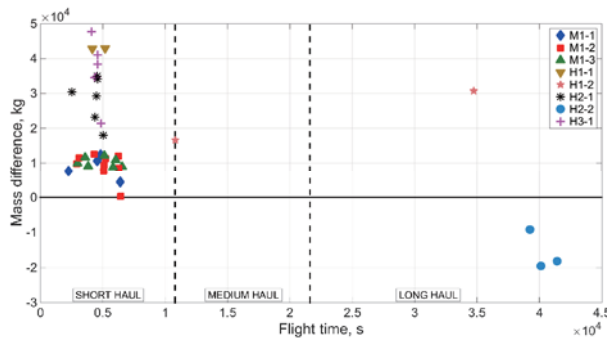


図4 飛行時間に対する初期質量の差異

図4の結果から、H2-2機種を使用するフライト以外の全てのフライトにおいて、BADAモデルは初期質量を過大評価していることが分かる。一方、国際線ではより多くの燃料を搭載しなければならないため、標準質量に比べ実際の初期質量は重くなっている。この結果から、将来のシステムにおいて必要とされるリアルタイムの軌道予測技術や軌道ベース運用方式等を精密に行うため、飛行中の航空機から逐次的に機体質量を地上に知らせることが重要であると考えられる。

図5(a)はフライトデータを基準に方法Aによる燃料消費量の推定誤差結果を示しており、図5(b)～図5(d)は方法Aで推定した燃料消費量を基準にそれぞれの仮定を用いた場合の燃料消費量の推定誤差を示している。全ての図において縦軸は、燃料消費量の差の割合を示す。図5(a)と(b)の横軸は初期質量を示しており、図

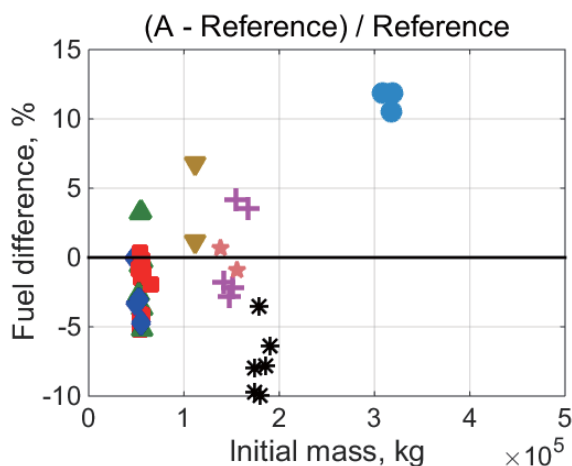
5(c)と(d)の横軸は標準質量と実際の質量の差と実際の質量の割合として示す。

図5(a)の解析では、フライトデータに記録されている初期質量及び気象データを使用していることから、得られた誤差結果がBADAモデルの推定精度を表すと言える。データの平滑化処理による誤差も含まれているが、ほとんどのフライトにおいて燃料消費量の推定誤差が $\pm 5\%$ に収まることが分かる。この結果は、文献[7]で得られた結果に相当する。推定誤差の最大値はH2-2機種での長距離フライトで得られており、累積誤差が飛行時間に比例することによって生じると推測できる。

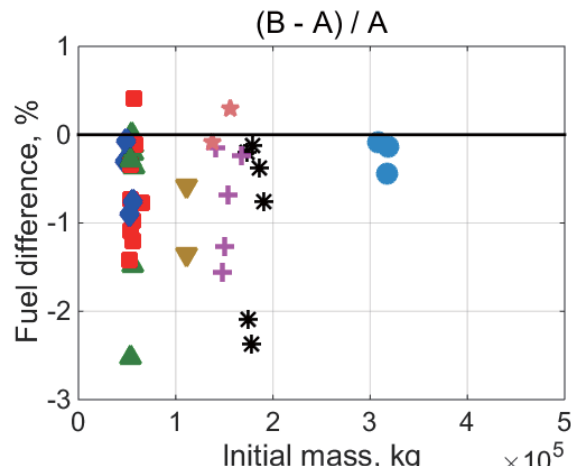
図5(b)は、方法Bとの比較を示している。この場合、初期質量は共通のため、気象条件による誤差が生じると考えられる。対象の38フライトにおいて、燃料推定の誤差は実際の燃料消費量の $\pm 3\%$ に収まっている。

図5(c)は方法Cとの比較を示している。青線は $y=x$ の参考線を示す。赤線の最小二乗近似線から、仮定した質量との差が0になる場合は、燃料推定誤差も0になることが分かり、燃料消費量の推定誤差は、仮定した初期質量との差に比例すると考えられる。仮定した質量が実際の質量より大きい場合（質量仮定が正）は、より多くの燃料を消費するという推定結果は適当である。推定した燃料の近似線は参考線よりも傾きが小さい。これは、以下の理由により説明できる。

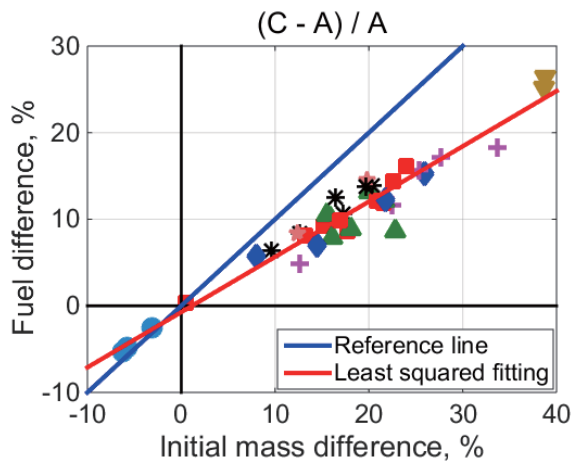
今回使用したBADAモデルでは、一般的に航空機の空力モデルと同様の式(4)～(6)が使用される。ここで、巡航での釣り合い飛行を仮定すると推力 $T$ は抗力 $D$ と等しくなる。



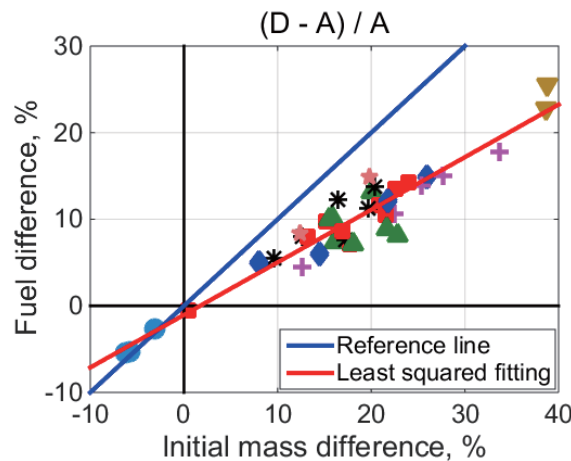
(a) フライトデータと方法 A の比較



(b) 方法 A と方法 B の比較



(c) 方法 A と方法 C の比較



(d) 方法 A と方法 D の比較

図 5 再現計算による燃料消費量推定の誤差

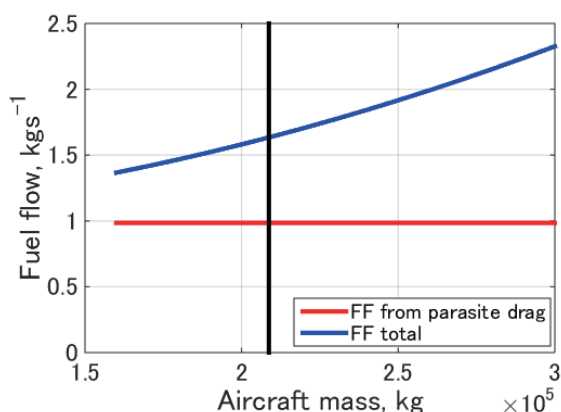


図 6 質量が燃料流量に与える影響

巡航飛行のように動圧が一定ならば、航空機の抗力は式(6)の第 1 項のように質量の影響を受けない有害抗力と、第 2 項のように質量の影響

$$C_L = mg/qS \quad (4)$$

$$C_D = C_{D0} + KC_L^2 \quad (5)$$

$$D = qSC_D = (qSC_{D0}) + (qSKC_L^2) \quad (6)$$

を受ける誘導抗力に分けられる。したがって、式(2)から燃料流量も質量の影響を受けない固定の燃料流量が存在することが分かる。

図 6 では、高度 12,000 m をマッハ数 0.84 で飛行する航空機に対して仮定した燃料流量を横軸に質量を用いて図示している。赤の実線は、質量に依存しない有害抗力による燃料流量を示しており、青の実線は燃料流量の総和である。質量によらない燃料流量が総和の半分以上占めている。そのため、質量が変化しても燃料流量は、1 対 1 で増加しない。

図 5(d)は方法 D との比較を示している。この場合、気象モデルの影響よりも質量の影響が現れることから、図 5(c)の結果とほぼ同じとなり、実際の質量と標準質量との差に比例する傾向が分かる。しかし、方法 D は方法 B と方法 C の 2 つの誤差が含まれている。

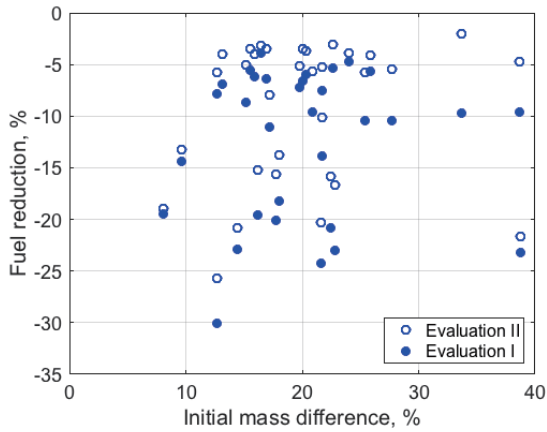


図 7 初期質量の影響

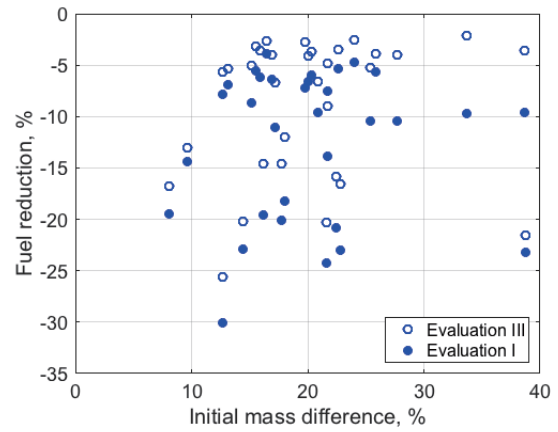


図 8 気象データ・初期質量の影響

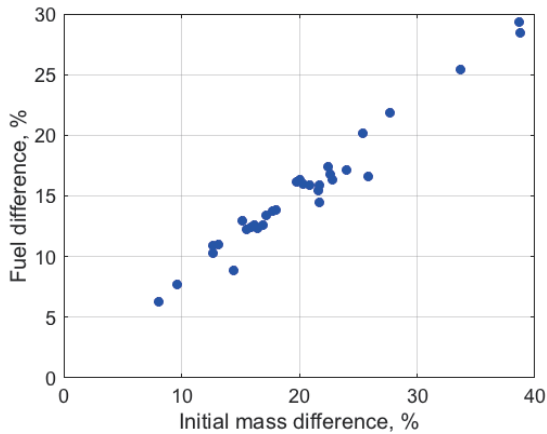


図 9 初期質量の差に対する最適燃料推定の差異

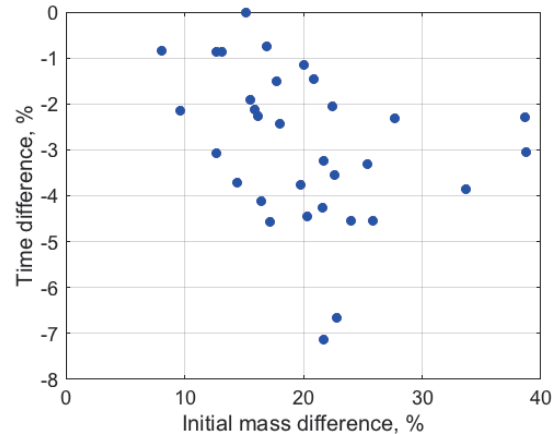


図 10 初期質量の差に対する最適飛行時間推定の差異

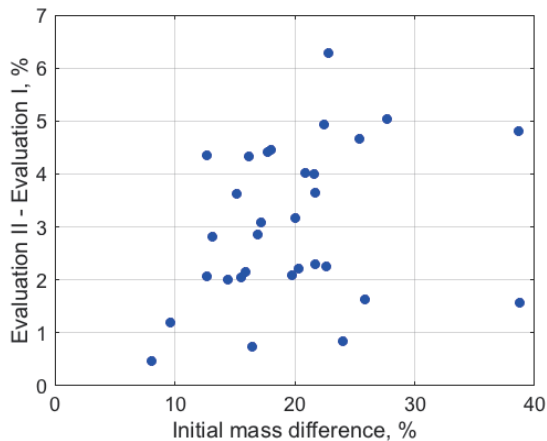


図 11 ケース I とケース II の比較評価

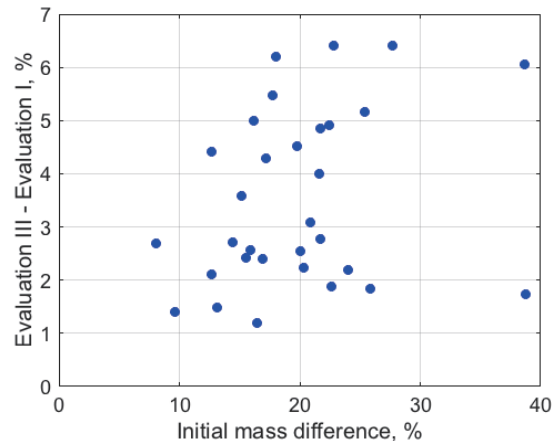


図 12 ケース I とケース III の比較評価

## 5 軌道最適化による便益への影響

4 章ではフライトデータの再現計算をいくつかの仮定を用いて行い、その影響を検討した。本章では、それらの仮定が最適軌道の便益を評価する際にどのような影響を与えるかを考察する。表 4 に示すケース I を基準として、ケース II, III との比較を行う。



表4 最適化による便益推定の比較

ケース	解析目的（基準 I との比較）	燃料削減量・飛行時間増減
I	基準	(E-A)/A
II	初期質量の影響	(F-C)/C
III	気象データ・初期質量の影響	(F-D)/D

図 7~12 には、得られた結果の比較評価を示している。図 7 と図 8 の横軸は初期質量の差が実際の質量に対する割合となっており、縦軸は燃料削減率を示す。塗りつぶしマーカーはケース I の結果であり、中抜きマーカーはそれぞれケース II とケース III の結果である。図 7 の結果から初期質量を仮定することによって軌道最適化による燃料削減率が小さくなる（燃料削減率が悪くなる）ことが分かる。同様に、図 8 の結果から初期質量の仮定と気象予報データを用いることによって燃料削減率が小さくなること分かる。なお、図 7 と 8 の結果がほぼ同じであることから、気象予報データが軌道最適化の便益推定に及ぼす影響は少ないと推測できる。

図 9 と 10 の結果はそれぞれ、方法 E を基準に方法 F によって得られた燃料消費量の差の割合と飛行時間の差の割合を示す。横軸は初期質量の差が実際の質量に対する割合である。図 9 の結果から初期質量の差の割合と燃料消費量の差の割合が強い線形の相関性を持つことが分かる。これは、図 6 で示したように燃料消費量は質量に対してほとんど線形に比例することによって生じると考えられる。図 10 の結果から初期質量を重く仮定すれば（横軸正）、飛行時間が短縮される傾向がある。

図 11 と 12 では初期質量の割合を横軸として、ケース I に対してケース II と III から得られる便益の差を評価している。得られた結果からは、基本的に短距離として区別される日本国内フライトにおいて初期質量の差の割合が最大 40% であっても燃料削減率の最大値が 7% 未満であることが分かる。巡航フェーズが短いため、巡航フェーズにおける初期質量の仮定による燃料推定誤差が大きな推定誤差にとりして蓄積されないことが原因として考えられる。

## 6 まとめ

はじめに、フライトデータに基づいて気象予

報データと BADA モデルの精度について調べた。得られた結果から、外気温推定の誤差平均値は 1K 未満、東西と南北風速成分推定の誤差平均値は  $4 \text{ ms}^{-1}$  未満であることが分かった。それは、気象庁発表の GSM データによって得られた結果である。また、燃料消費量の再現計算において、BADA モデルの推定誤差は  $\pm 5\%$  未満であることが明らかになった。

次に、仮定初期質量と気象データを用いた場合、それぞれの誤差が軌道最適化の便益に及ぼす影響を調べた。燃料削減率は初期質量に大きな相関があり、40% の質量仮定の差に対して燃料削減率は 30% の差が生じた。飛行時間の増減率に関しても同様に、40% の質量仮定の差に対して約 8% 短縮された。これらの差は初期重量や気象データの仮定によるものであるが、基準ケースの燃料削減率や飛行時間増減率から大きく外れることはなく、もし初期質量が分からないとしても、軌道最適化における燃料削減率・飛行時間増減率をある程度は推測することが可能である。

以上、最適軌道を求めて燃料消費量や飛行時間などの便益を評価する際に仮定する初期質量や気象データが及ぼす影響を調べ、評価が十分に可能であることが分かった。さらに、離着陸の順番付けや、航空機の軌道予測、TBO における最適軌道の生成など高効率な航空交通システムを実現するためには、精密な燃料消費量の推定が必要となり、そのためには機体質量は重要なパラメータであることも分かった。

## 参考文献

- [1] Study Group for the Future Air Traffic Systems, “Long-Term Vision for the Future Air Traffic Systems,” CARATS, 2010.
- [2] J.W. Burrows, “Fuel-Optimal Aircraft Trajectories with Fixed Arrival Times,”

- Journal of Guidance, Control and Dynamics, vol.6, no.1, pp.14-19, 1983.
- [3] P. Hagelauer, and F. Mora-Camino, “A Soft Dynamic Programming Approach for On-line Aircraft 4D- Trajectory Optimization,” European Journal of Operational Research, no.107, pp.87-95, 1998.
- [4] O.A. Yakimenko, “Direct Method for Rapid Prototyping of Near-Optimal Aircraft Trajectories,” Journal of Guidance, Control and Dynamics, vol.23, no.5, pp.865-875, 2000.
- [5] M.R. Jardin, and A.E. Bryson Jr., “Methods for Computing Minimum-Time Paths in Strong Winds,” Journal of Guidance, Control and Dynamics, vol.35, no.1, pp.165-171, 2012.
- [6] 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.
- [7] A. Harada, Y. Miyazawa, and K. Funabiki, “Accuracy Evaluation of an Aircraft Performance Model with Airliner Flight Data,” Trans. JSASS Aerospace Technology Japan, vol.11, pp.47-52, 2013.
- [8] R.E. Bach, and R.A. Paielli, “A User Guide for Smoothing Air Traffic Radar Data,” NASA/TM 216520, 2014.
- [9] 京都大学生存圏研究所, “生存圏データベース”  
<http://database.rish.kyoto-u.ac.jp>
- [10] Eurocontrol Experiment Center, “User Manual for the Base of Aircraft Data (BADA) Revision 3.11,” EEC Technical/Scientific Report No.13/04/16-01, 2013.