

卒業論文要旨

レーダデータを用いた上昇フェーズにおける航空機の質量推定

Estimation of Aircraft Mass in Climb Phase using Radar Data

システム工学群

機械・航空システム制御研究室 1210026 入江 康平

1. 記号の説明

D	: Drag force
g	: Gravitational acceleration above sea level
H	: Altitude
m	: Weight
T	: Thrust
t	: Time
V_{TAS}	: True air speed
γ	: Flight path angle

2. 緒言

今般、新型コロナウイルス（COVID-19）の世界的な蔓延による影響で航空交通量は一時的に大きく減少している。しかし、将来の航空機需要は、コロナウイルス蔓延以前の水準に回復、その後は増加に向かうと予測されている。国内外への旅客の移動のみならず、国境を越えた医療物資などの貨物の移動による需要増加も関連しているためである。それに伴い航空機の便数が増え、効率のよい運航を考えなければならない。便数の増加により、周囲の環境に与える影響や管制官の負担増加などの問題が懸念される。特に便数増加に伴う先行機と後続機との時間調整のため、最短距離ではないルートでの飛行、それに伴う燃料消費量の増加、到着時刻の遅延が課題となる。そこで以上の点を改善するために航空機の軌道最適化を行えば、効率のよい運航に直結する。その最適化に密接に関わるのが航空機の質量である。一般的に機体質量によって飛行高度や速度が異なり、質量が大きいと緩やかに上昇し、任意の高度に到達するのに時間を要する。すなわち、機体の質量が最適軌道に影響を及ぼす。そこで、本研究では、軌道最適化に大きく影響する航空機の質量に着目し、レーダデータを利用して、航空機の質量を推定する方法を提案し、実飛行データと比較して精度評価を行う。

3. 航空機の質量推定

3.1 CARATS Open Data

本研究では、レーダデータとして CARATS Open Data 2017 を利用し、航空機の質量を推定することを目的とする。同データは、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」で 2025 年に向けた目標として定め、

将来の航空システム構築のため、研究開発の促進のために公開している定期旅客便の航跡データである。実際に公開されている CARATS Open Data の期間から抽出した本研究で使用する便の概要を第 1 表に示す。CARATS Open Data は非常に数多くの便のデータがあり、有効活用したいが、格納されているデータ項目は少ない。また、機体質量などの運航に関する詳細な QAR（Quick Access Recorder）実飛行データは、非常に機密性が高く、非公開のデータであることを付記し、CARATS Open Data（航跡データ）のみを用いて、質量を推定する方法を提案する。

Table 1 Data overview

Data term	17 th ~23 rd , April		6 flights
	2017	10 th ~16 th , July	7 flights
		9 th ~15 th , October	10 flights
	2018	10 th ~14 th , January	7 flights
Aircraft type	B777-200		
Data item	Time, Virtual flight number, Altitude, Latitude, Longitude		
Data cycle	Approx 8 seconds		

3.2 解析対象

本研究では、国内線で 1 日あたりの便数が最多である福岡（RJFF/FUK）－東京羽田（RJTT/HND）路線を対象とし、これらの便が使用するウェイポイントを基準に解析範囲を設定する。解析範囲の概要を第 2 表に示す。また、一例として実際に解析した A01 便（仮想設定、以下同じ便を示す）の飛行軌跡を第 1 図に示す。なお、同便の解析範囲は、始点が YOKAT、終点が SALTY である。

Table 2 Analysis target

Flight route	Departure airport	Fukuoka (RJFF/FUK)
	Arrival airport	Tokyo (RJTT/HND)
Analysis range	Extracted 30 flight	
	YOKAT to LUFFY, SALTY, or SANJI (Way point)	

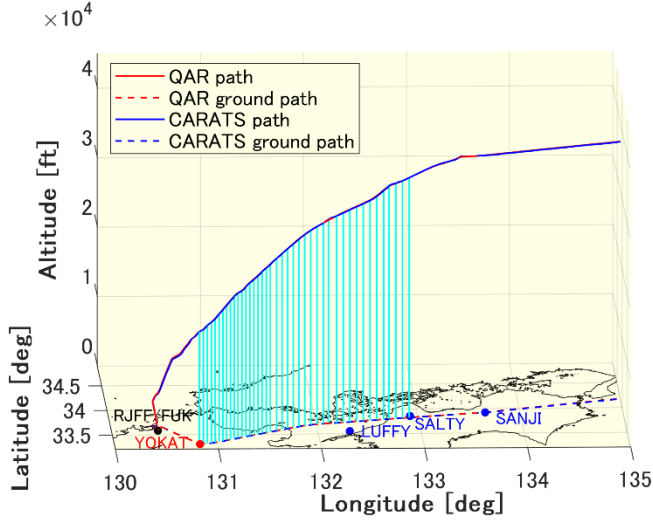


Fig.1 Flight Trajectory

3.3 支配方程式

機体の質点運動モデルを利用し、真対気速度 V_{TAS} 、気圧高度 H 、機体質量 m の変化について考える。まず、CARATS Open Data の緯度、経度、時刻より対地速度を算出し、そこに気象庁が公開している気象データを加えて、真対気速度 V_{TAS} 、飛行経路上昇角 γ を算出する。ここまでの計算過程を“飛行状態推定”と呼ぶ。また、同データに加え、欧州航空航法安全機構が発表している機体性能モデル BADA を利用して、抗力 D や最大上昇推力 T (0.90~1.00 倍まで 0.01 間隔で変化させる)、燃料流量係数等を算出する。次に、推定質量として、機体性能モデル BADA の基準質量をもとに 85%~115%まで与える。YOKAT 通過時の飛行状態推定より求めた値を真対気速度の初期値として、気圧高度に関しては CARATS Open Data における YOKAT 通過時のデータをそのまま初期値としてそれぞれ設定し、以下の支配方程式(1),(2)をそれぞれ数値積分し、式(3),(4)で与えられる推定真対気速度および推定気圧高度を飛行状態推定で求めた真対気速度と CARATS Open Data の気圧高度とそれぞれ比較し、両者が最も近い値になる、すなわち、グラフが最も合致したときの初期質量を推定値として用いる。式(3),(4)に関して、積分範囲は YOKAT 通過時刻を t_0 、解析対象となる上昇中に通過したウェイポイントにおける通過時刻を t_f とする。グラフの合致の評価は平均二乗誤差を利用し、同誤差が最小のときの初期質量をその便の推定値とする。

$$\frac{dV_{TAS}}{dt} = \frac{1}{m}(T - D - mg \sin \gamma) \quad (1)$$

$$\frac{dH}{dt} = V_{TAS} \sin \gamma \quad (2)$$

$$\tilde{V}_{TAS} = \int_{t_0}^{t_f} \dot{V}_{TAS} dt \quad (3)$$

$$\tilde{H} = \int_{t_0}^{t_f} \dot{H} dt \quad (4)$$

3.4 解析結果

一例として A01 便の推定真対気速度および推定気圧高度を第 2 および第 3 図に示す。数値積分の間隔は CARATS Open Data のデータ取得間隔と一致している。真対気速度の比較より初期値の誤差が見られるが、これは飛行状態推定で真対気速度を求める際の気象データによる影響だと考えられる。利用している気象データは 6 時間毎の現況値であるため、実際のデータとの誤差が含まれる。第 2 および第 3 図は、推力が BADA の最大上昇推力の 0.91 倍、質量が BADA 基準質量の 94%のとき、推定質量と実際の質量との差が 0.138%となり、今回解析を行った 30 便の中で最も誤差が小さく、最も精度よく推定できた。

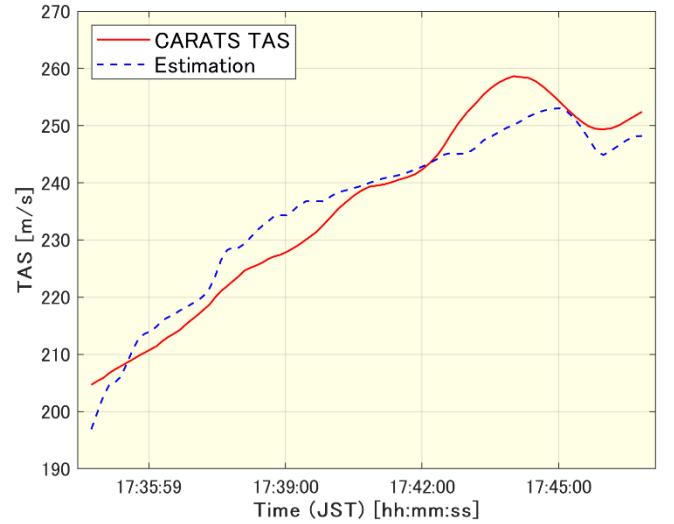


Fig.2 Comparison of True air speed

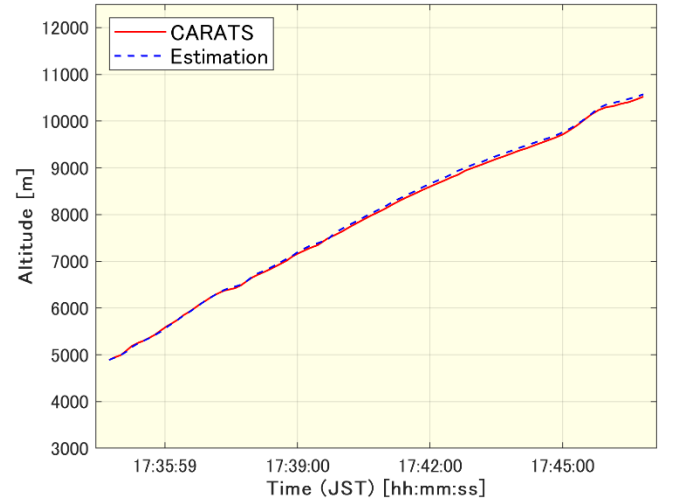


Fig.3 Comparison of Altitude

また、第 4 図に今回解析した 30 便の推定質量における統計誤差評価を示す。なお、今回の評価には誤差の絶対値を利用した。第 4 図より推定気圧高度から推定した初期質量の誤

差の最小値，第一四分位数，第二四分位数（中央値），第三四分位数がいずれも推定真対気速度より推定した質量誤差より小さいため，推定気圧高度を利用して質量を推定した方が精度よく推定できる可能性を示している。

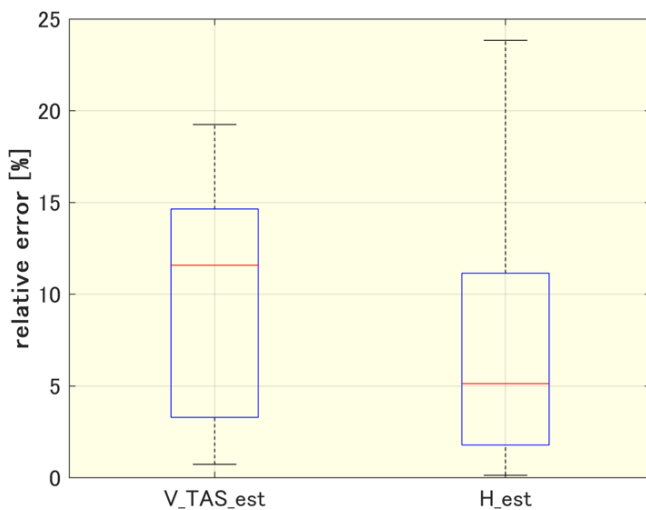


Fig.4 Statistical evaluation of Mass Error

4. 結言

本研究では，レーダデータのみを用いて，航空機の質点運動モデルを数値積分し求めた推定真対気速度および推定気圧高度を，飛行状態推定で求めた真対気速度と CARATS Open Data の気圧高度のグラフを比較し，それぞれの差が最小となるときの推定質量と考え，その航空機の質量を推定する方法の検討を行った．また，今回はグラフの合致評価に平均二乗誤差を用いたが，誤差が非常に大きい場合があるため，これは今後利用を検討する必要がある．今回行った 30 便全体の推定精度は高いとは言えないが，質量が精度よく推定できれば，航空交通容量拡大，混雑解消など運航効率向上につながる定点通過時刻予測に直結することが考えられる．一部の便では高い精度で機体質量が推定できたことで，それ以外の便でも同程度の精度で推定できる可能性を発見できた．また，本研究は，将来の軌道予測に繋がる可能性があるため，今後は解析する便を増やし，質量推定の精度を高める方策を検討する．

謝辞

本研究を進めるにあたり，熱心かつ丁寧に指導していただいた指導教員の前田明徳准教授，岡宏一教授に心より感謝申し上げます．

また，レーダデータとして国土交通省航空局より CARATS Open Data 2017 の提供を受けた．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データを使用した．機体性能モデルに関しては欧州航空航法安全機構が維持，管理している BADA モデルを使用した．QAR データに関しては日本航空株式会社から提供を受けた．これらの機関が提供する便宜に感謝の意を表します．

文献

- (1) IATA, Press Release No:63,
<https://www.iata.org/en/pressroom/pr/2020-07-28-02/>,
(2021 年 3 月 10 日最終アクセス)
- (2) 岡恵：CARATS オープンデータの概要説明，CARATS オープンデータ活用促進フォーラム 2019
- (3) 原田明徳，武市昇，岡宏一：最適軌道を用いた軌道予測の高精度化 第 2 報，第 57 回飛行機シンポジウム
- (4) 宮本侑斗，原田明徳，ナヴィンダ キトマル 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，Vol.13, pp.1-10, 2014
- (5) 国土交通省，航空，航空交通，将来の航空交通システムに関する推進協議会，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～戦略的な航空交通システムへの変革～，2010