

上昇軌道における質量推定による巡航飛行時間の予測精度向上の試み

芹田, 樹
首都大学東京

武市, 昇
首都大学東京

原田, 明德
高知工科大学

<https://hdl.handle.net/2324/7358028>

出版情報 : JOURNAL OF THE JAPAN SOCIETY FOR AERONAUTICAL AND SPACE SCIENCES. 68 (1), pp.7-11, 2020. 日本航空宇宙学会

バージョン :

権利関係 : © 2020 The Japan Society for Aeronautical and Space Sciences



上昇軌道における質量推定による巡航飛行時間の予測精度向上の試み^{*1} Feasibility Study on Improvement of Cruise Flight Time Prediction via Aircraft Mass Estimation during Climb Trajectory

芹 田 樹^{*3}・武 市 昇^{*2,*3}・原 田 明 徳^{*4}
Tatsuru SERITA, Noboru TAKEICHI and Akinori HARADA

Key Words: Air Traffic Management, Trajectory Based Operation, Trajectory Prediction, Mass Estimation

Abstract: A precise and accurate trajectory prediction is indispensable for efficient air traffic management with a large traffic throughput achieved by four-dimensional trajectory prediction. Recent aircraft are able to fly along their optimum trajectories. The configurations of these optimum trajectories also depend on aircraft mass. However, information on aircraft mass are generally unavailable for air traffic controllers; they are seldom applied for actual operations. To overcome such inconvenience, recent studies demonstrated aircraft mass estimation from their flight trajectories. This study further aims at applying the mass estimation for the prediction of cruise flight time. Aircraft mass are estimated from actual climb trajectory data, and the correlation between the estimated mass and flight time error are confirmed. The regression and correction has revealed that the presented methodology is able to reduce the mean square error of the flight time prediction by half.

1. は じ め に

航空機の運航を三次元の位置と時間により管理する四次元航法は、各国・地域における将来の航空交通管理の計画における中核的な技術となるものと期待されている¹⁻³⁾。これらを利用した運航方式として、巡航経路上での特定の地点の通過時刻を指定することにより混雑空域の交通量を調整する CFDT (Calculated Fix Departure Time) 運航⁴⁾などが挙げられる。

近年の航空機はその機上装置によりほぼ最適な軌道を飛行することができる。そしてこのときの軌道は航空機の質量によっても変化する⁵⁻⁷⁾。四次元航法を用いた運航管理においては、その軌道の予測の中でも特に飛行時間を精度良く予測することが重要である。したがって、航空機の質量は飛行時間を精度良く予測するための重要なパラメータの1つである。しかし、通常、管制機関は航空機の質量の情報を得ることができないため、実際の運航においてもそれを利用することができない。これに対し、これまでに航空機の質量の推定を試みた研究が行われている⁸⁻¹⁰⁾。これらの研究では上昇中の ADS-B データ¹¹⁾ および運航モデル¹²⁾を用いて質量を推定し、おおむね運航モデルで想定されている範囲の推定値が得られることが示されている。

一方、航空機の最適軌道は、同機種であれば質量が大きい

ほど低い巡航高度を高速に、軽い機体ほど高い巡航高度を低速に飛行する傾向があることが明らかとなっている⁵⁻⁷⁾。したがって、実際の運航においても質量の推定値を利用して軌道を予測することができるはずである。そこで本研究では、過去の研究⁹⁾の手法を用いて質量の推定値を求め、それを用いて特定のウェイポイントまでの飛行時間の予測精度を向上させることを試みる。ただし、実際の運航では質量の真値を知ることができないが、各便の質量の推定値の大小を評価することは可能である。そこで、本研究では質量の推定値を質量パラメータと呼ぶこととする。

2. 評価対象と各データ

2.1 解析対象の飛行経路 本研究では、国内線としては最大の便数が運航されている福岡空港から羽田空港への経路を対象とする。そして YOKAT, KOHZA, BRAID, LUFFY, SANJI, YANKS の 6 つのウェイポイント (以下 WP) を経由して FLUTE に至る標準的な経路での飛行時間の予測精度を研究対象とする。各 WP の位置を第 1 図に示す。

2.2 運航データ 運航データとしては、2015 年度の CARATS オープンデータ¹³⁾ および ADS-B データを用いる。ADS-B データは、機体識別情報、緯度、経度、高度、速度、飛行方位といった動態情報を時刻と共に周囲に放送するシステムであり、およそ 100 NM 程度の範囲で受信可能である。本研究では、第 2 図 (a) に示す全便から、第 2 図 (b) に示すように YOKAT をほぼ正確に通過した便の内、運航便数の多いナローボディ機の 120 便を対象とする。これ

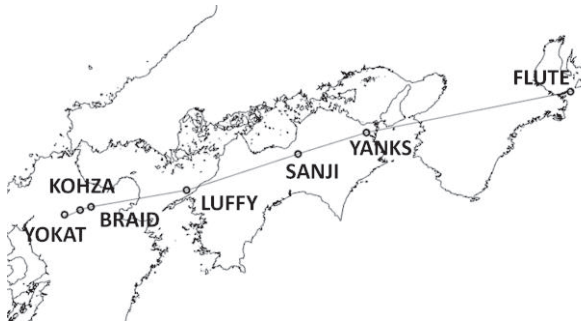
^{*1} © 2020 日本航空宇宙学会

2019 年 4 月 26 日原稿受付

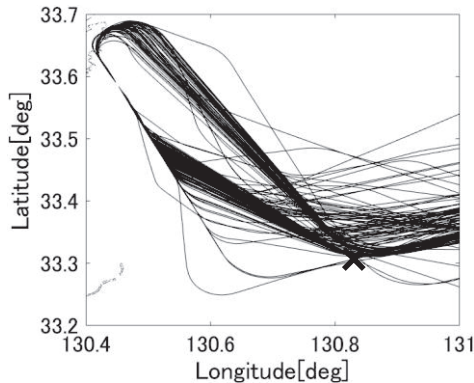
^{*2} 連絡先著者 (Corresponding author): takeichi@tmu.ac.jp

^{*3} 首都大学東京

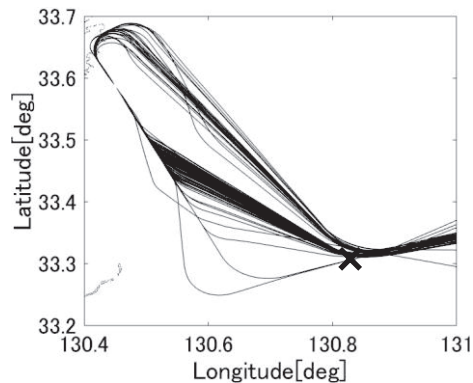
^{*4} 高知工科大学



第 1 図 福岡空港から羽田空港へ至る標準的な経路および各 WP



(a) 2015 年度全便



(b) 評価対象軌道

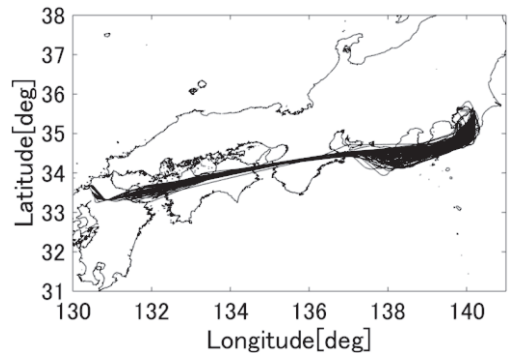
第 2 図 福岡空港から羽田空港へ至る航跡 (× 印: YOKAT)

らの便の福岡空港から羽田空港までの航跡を第 3 図に示す。

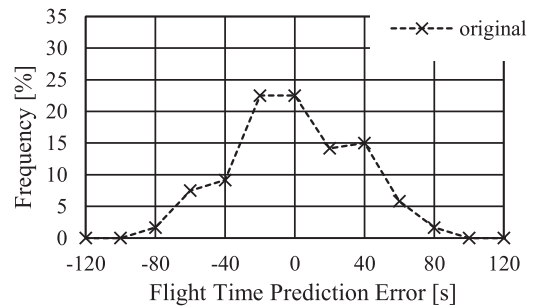
2.3 気象データ 本研究では、気象予報値として気象庁の提供するメソ数値予報モデル MSM を用いる¹⁴⁾。MSM は水平 5 [km] 間隔、鉛直 50 層の格子点での 3 時間ごとの気象情報を含む。本研究では、軌道予測の他、ADS-B データの対地速度の真対気速度への変換と、大気密度の算出に MSM で取得した気象情報を使用する。

3. 飛行時間の予測とその誤差評価

本研究では、飛行時間を EUROCONTROL が提供する BADA モデル¹²⁾ に含まれる標準運航モデルを用いて予測する¹⁵⁾。この予測では、BADA モデルの標準質量の標準飛行速度と標準上昇率および MSM の気象予報データを用いる。CARATS オープンデータに含まれる初期位置か



第 3 図 評価対象便の全航跡



第 4 図 YOKAT における FLUTE までの飛行時間の予測誤差の分布

ら YOKAT を経由して第 1 図に示す標準的な飛行経路に沿って FLUTE に至る軌道を、標準運航モデルの上昇率および対気速度と MSM の風速から求められる対地速度を時間積分する。なお、YOKAT 前後の旋回ではバンク角を 30 deg として計算した。これにより、経路上の任意の地点から FLUTE までの飛行時間を予測することができる。このようにして求めた予測飛行時間と、CARATS オープンデータの補間により求まる FLUTE 最接近時刻の差として、予測飛行時間の誤差を求めた。ただし、上述の BADA モデルを用いた軌道予測には、実機と BADA モデルの差異に起因する系統誤差が含まれるはずである。しかし、定常的な運用が行われるようになれば多くの便の実際の飛行時間を計測できるようになり、これにより予測飛行時間の系統誤差を求め、系統誤差が無くなるよう予測飛行時間を補正することができるはずである。そこで本研究では、系統誤差の補正後に残る偶然誤差の補正を試みる。一例として、YOKAT からの予測飛行時間誤差の分布を第 4 図に示す。この場合、飛行時間の予測誤差の分散および標準偏差はそれぞれ 1424.0 s² および 37.7 s となった。

4. 上昇軌道における質量パラメータ算出

4.1 質量パラメータの推定方法 本研究では、これまでの研究⁹⁾ に従い、式 (1) に示す標準飛行モデルのエネルギー保存則に基づき質量パラメータを求める。

$$(Thr - D)V_{TAS} = mg \frac{dh}{dt} + mV_{TAS} \frac{dV_{TAS}}{dt} \quad (1)$$

ここで m は航空機の質量、 V_{TAS} は対気速度、 Thr はエンジン推力、 D は抗力、 h は高度、 g は重力加速度を示す。こ

の式に、以下の抗力、抵抗係数 C_D 、揚力係数 C_L 、経路角 γ に関する式を代入して整理すると、質量が満たすべき方程式 (6) を得る。ただし、 x は飛行距離を示す。式 (7) のように式 (6) の左辺を質量の関数 $f(m)$ と定義する。

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

$$C_D = C_{D0} + k C_L^2 \quad (3)$$

$$C_L = \frac{2mg \cos \gamma}{\rho V_{TAS}^2 S} \quad (4)$$

$$\gamma = \tan^{-1} \left(\frac{dh}{dx} \right) \quad (5)$$

$$\frac{2kg^2 \cos^2 \gamma}{\rho V_{TAS}^2 S} m^2 + \left(\frac{dV_{TAS}}{dt} + \frac{g}{V_{TAS}} \frac{dh}{dt} \right) m \quad (6)$$

$$+ C_{D0} \frac{1}{2} \rho V_{TAS}^2 S - Thr = 0$$

$$f(m) \triangleq \frac{2kg^2 \cos^2 \gamma}{\rho V_{TAS}^2 S} m^2 + \left(\frac{dV_{TAS}}{dt} + \frac{g}{V_{TAS}} \frac{dh}{dt} \right) m \quad (7)$$

$$+ C_{D0} \frac{1}{2} \rho V_{TAS}^2 S - Thr$$

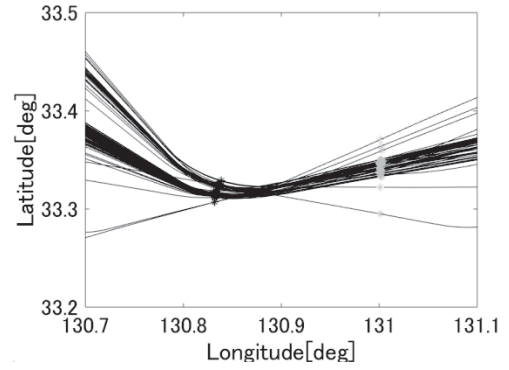
本研究では、航空機の推力として標準飛行モデル¹²⁾で与えられる最大上昇推力を利用する。これまでの研究では、最大上昇推力の 100% の推力を仮定した際に最も精度良く質量が推定できることが明らかとなっている⁹⁾。そこで、本研究でも最大上昇推力の 100% の値を推力として与えることとした。

$f(m)$ は実データから求まる推力や速度情報などを代入したときに必ずしも厳密に満たされるとは限らない。そこで本研究ではこれまでの研究⁹⁾に従い、(8) 式のように $f(m)^2$ を最小化する質量 $\hat{m}$ を求めることにより質量パラメータを推定する。

$$\hat{m} = \arg \min(f(m)^2) \quad (8)$$

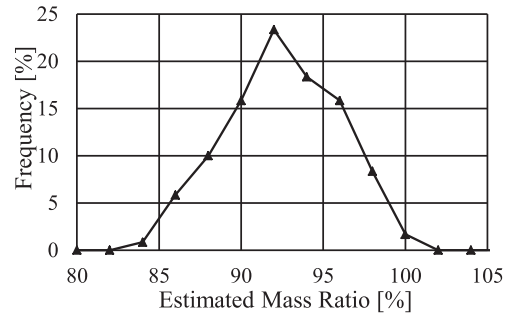
本研究ではある推定点のデータ、および前後一定時間のデータとの差分から求めた加速度および上昇速度を $f(m)^2$ に代入した方程式の最小二乗解を求め、質量パラメータを推定した。

4.2 質量パラメータ推定と飛行時間の補正 本研究では、YOKAT 通過後の東経 131 度通過時の質量パラメータを推定し、その質量パラメータを用いて YOKAT 通過から FLUTE 通過までの予測飛行時間の補正を試みる。各便の推定地点を第 5 図に示す。まず、推定地点通過前後の時間差分幅を変化させ、算出された質量パラメータと飛行時間予測誤差との単回帰分析の決定係数が最も高くなる時間差分幅を求めた。その結果、東経 131 度地点通過の前後 270 秒のデータを用いた中心差分により、決定係数の最大値 0.50 (相関係数 0.71, p 値 < 0.01) を得た。このときの東経 131 度通過時の質量パラメータの推定値の分布を、標準質量を 100% として第 6 図に示す。この結果より、推定した質量パ

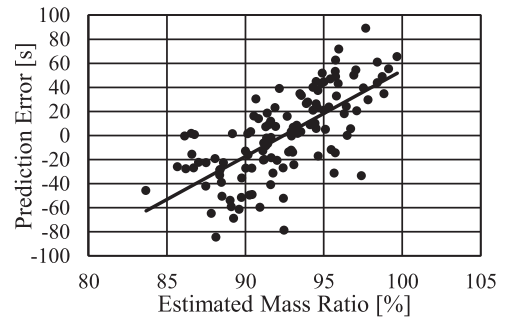


第 5 図 各便の推定地点

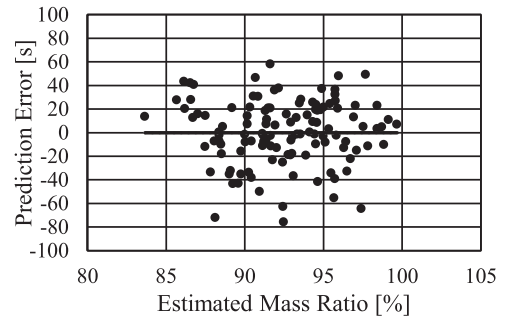
黒点：YOKAT 通過時、灰点：東経 131 度通過時。



第 6 図 推定した質量パラメータの分布



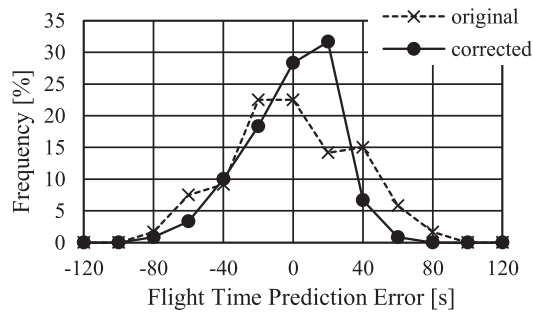
(a) 補正前



(b) 補正後

第 7 図 質量パラメータと飛行時間の予測誤差の散布図および回帰直線

ラメータが標準運航モデルの 80~100% の間に多く分布することが確認できる。これは実運航で用いられる質量分布に近い値となっている¹⁶⁾。また、質量パラメータと飛行時間の予測誤差の散布図を第 7 図 (a) に示し、この単回帰分



第 8 図 補正前後の飛行時間の予測誤差の分布

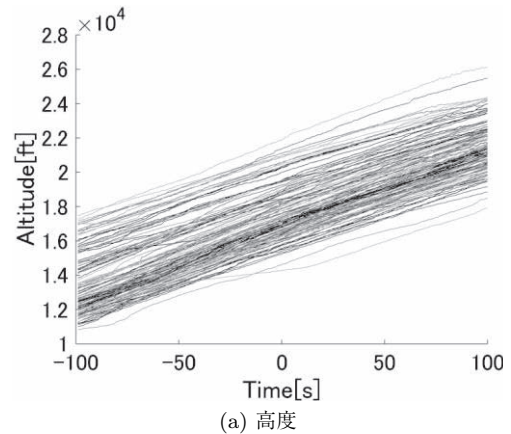
第 1 表 飛行時間補正の結果

相関係数	0.71*
決定係数	0.50*
予測誤差分散 [s ²]	1424.0
補正予測誤差分散 [s ²]	714.0
分散低減率 [%]	49.9

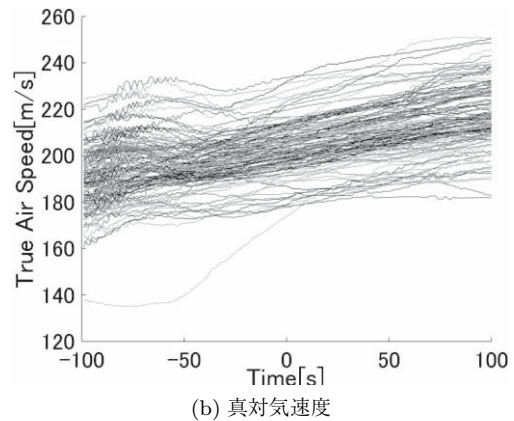
* $p < 0.01$.

第 2 表 YOKAT 通過時の飛行時間補正の結果

相関係数	0.52*
決定係数	0.27*
予測誤差分散 [s ²]	1424.0
補正予測誤差分散 [s ²]	1048.9
分散低減率 [%]	26.3

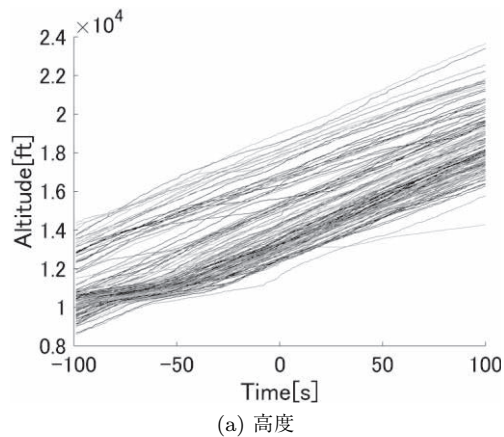
* $p < 0.01$.

(a) 高度

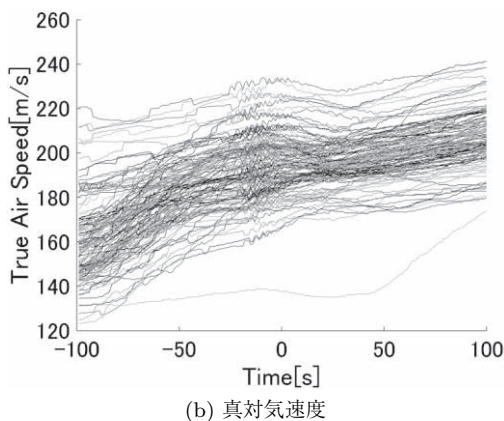


(b) 真対気速度

第 10 図 東経 131 度通過前後の履歴



(a) 高度



(b) 真対気速度

第 9 図 YOKAT 通過前後の履歴

析結果および回帰関数を用いた補正の結果を第 1 表にまとめ、その散布図を第 7 図 (b) に示す。また、補正前後の飛行時間予測誤差の分布を第 8 図に示す。これらの結果より、質量パラメータの推定を利用した補正により、飛行時間予測誤差の分散をほぼ半減できることが明らかとなった。

4.3 質量パラメータ推定地点の最適化の可能性 前節では、東経 131 度通過時の質量パラメータ推定および予測飛行時間の補正を試みた。本節ではこれに加え、YOKAT 通過時の質量パラメータ推定およびそれによる予測飛行時間の補正を試みる。この場合も、YOKAT 通過の前後 270 秒のデータの中心差分による推定において決定係数の最大値を得た。単回帰分析結果および回帰関数を用いた補正結果を第 2 表に示す。東経 131 度通過時の推定および補正と比べ、決定係数は小さく補正後の誤差分散は大きいことが確認できる。

この差異の原因を明らかにするため、それぞれの予測地点の通過前後の高度と真対気速度の履歴を第 9 図および第 10 図に示す。通過時 (図中 0 秒) の前後の高度および真対気速度の変動が、いずれも YOKAT において東経 131 度地点よりも大きくなっていることが分かる。このような変動の差が、決定係数および補正精度に影響しているものと考えられる。

5. ま と め

本研究では、上昇軌道の適切な位置で推定した質量パラメータと予測飛行時間の誤差に相関があることを明らかにした。さらにその相関を利用して予測飛行時間に含まれるであろう誤差を求め予測飛行時間を補正することにより、予測精度の向上が可能であることを明らかにした。これは質量の推定を航空機の四次元航法に活用できることを示した初の成果である。

この過程で、補正の効果が推定地点に強く依存することが明らかとなった。本稿では分散をほぼ半減する結果を得たが、質量推定を行う地点を最適化することによりさらに高精度化できる可能性がある。今後、実運航での利用に適し、かつ精度の高い補正を実現する推定地点を明らかにすることが重要な課題となる。また、本研究では推定地点の前後のデータのみを利用したが、複数の推定地点の利用によりさらに高精度な補正が実現できる可能性もある。

参 考 文 献

- 1) NextGen JPDO: Concept of Operations for the Next Generation Air Transportation System, Version 3.2, JPDO, Washington, D.C., 2011.
- 2) SESAR Joint Undertaking: Roadmap for Sustainable Air Traffic Management, European ATM Master Plan, Edition 2, October 2012.
- 3) Japan Civil Aviation Bureau: Long-term Vision for the Future Air Traffic Systems, 2010.
- 4) Japan Civil Aviation Bureau: ATFM/CDM in Japan, The 3rd Meeting of ATFM Steering Group, Singapore, 10–14 Mar. 2014.
- 5) Takeichi, N., Yamamoto, S., Morooka, Y. and Harada, A.: Potential Cost-Benefit Analysis for the Assessment of Air Corridor Installation into Japanese Airspace, Winter Simulation Conference 2018, Gothenburg, Sweden, 9–12 December 2018.
- 6) Morooka, Y., Takeichi, N., Yamamoto, S. and Harada, A.: Feasibility Study of a Layered Air Corridor through Direct Operational Cost Evaluation, AIAA-2019-1362, AIAA Digital Avionics Conference, San Diego, CA, 7–11 Jan. 2019.
- 7) Harada, A., Takeichi, N. and Oka, K.: An Optimal Trajectory-based Trajectory Prediction Method for Automated Traffic Flow Management, AIAA-2019-1360, AIAA Digital Avionics Conference, San Diego, CA, 7–11 Jan. 2019.
- 8) Alligier, R., Gianazza, D. and Durand, N.: Learning the Aircraft Mass and Thrust to Improve the Ground-based Trajectory Prediction of Climbing Flights, Transportation Res. Part C Emerging Technol., **36** (2013), pp. 45–60.
- 9) Sun, J., Ellerbroek, J. and Hoekstra, J.: Modeling and Inferring Aircraft Takeoff Mass from Runway ADS-B Data, 7th International Conference on Research in Air Transportation, Jun. 2016.
- 10) Sun, J., Ellerbroek, J. and Hoekstra, J. M.: Aircraft Initial Mass Estimation Using Bayesian Inference Method, Transportation Res. Part C Emerging Technol., **90** (2018), pp. 59–73.
- 11) RTCA Inc.: Minimum Aviation System Performance Standards for Automatic Dependent Surveillance Broadcast (ADS-B), DO-242A (including Change 1), Dec. 2006.
- 12) Nuic, A.: User Manual for the Base of Aircraft Data (BADA) Revision 3.13, Eurocontrol Experimental Center, May 2015.
- 13) CARATS Open Data, Japan Civil Aviation Bureau, Press Release on CARATS Open Data, Feb. 2015.
- 14) 気象庁, <http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/whitep/1-3-6.html>
- 15) 十朱和博: 巡航経路での四次元軌道の予測精度と調整可能時間の分析, 1F17, 第 55 回飛行機シンポジウム, 島根, 2017.11.20~22.
- 16) Nakamura, Y. and Kageyama, K.: Validation Study of a Fuel-Burn Estimation Model, Proceedings of the 2013 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology, Takamatsu, Japan, 20–22 Nov. 2013.