

2022 年度 学位論文（修士）

飛行計画と質量推定を活用した巡航飛行時間の予測精度向上の試み

2023 年 1 月 27 日

東京都立大学大学院

システムデザイン研究科 システムデザイン専攻

航空宇宙システム工学域 博士前期課程

21863613 金子 洸大

指導教員 武市 昇 教授

# 目次

第1章 背景と目的.....	1
1.1 研究背景と目的.....	1
1-2 本論文の構成について .....	2
第2章 使用データと解析対象便の選定.....	3
2-1 使用データ .....	3
2-1-1 実績データと飛行計画データ.....	3
2-1-2 気象予報データ .....	6
2-2 解析対象便の選定.....	7
第3章 運航モデルと飛行時間予測誤差の算出方法.....	10
3-1 運航モデル.....	10
3-2 飛行時間予測誤差の算出方法.....	17
第4章 質量推定手法及び軌道予測評価方法の解説と評価結果 .....	18
4-1 質量推定手法の解説 .....	18
4-2 実績データを用いた軌道予測及び評価 .....	19
4-2-1 (case1)実巡航高度を用いた予測 .....	19
4-2-2 (case2)実巡航高度を用いた質量推定による予測 .....	23
4-3-1 (case3)実巡航高度の最頻巡航高度を用いた軌道予測 .....	30
4-3-2 (case4)最頻巡航高度を用いた質量推定による軌道予測.....	32
5-1 (case5)飛行計画の予定巡航高度を用いた軌道予測.....	38
5-2 (case6)予定巡航高度を用いた質量推定による軌道予測.....	40
5-3 (case7)予定巡航高度と実巡航高度を用いた軌道予測 .....	49
第6章 結言.....	59
参考文献 .....	60
謝辞.....	61

## 第1章 背景と目的

### 1.1 研究背景と目的

アジア太平洋地域を中心に世界的な航空交通需要の増加が予想される中、我が国においても長期的な航空交通量の増加が予想されている。これに対応するべく我が国では将来の航空交通管理手法として軌道ベース運用が計画されている<sup>1)</sup>。これは我が国の飛行情報区(FIR: Flight Information Region)全体を一つの空域とみなし、すべての航空機の出発から到着までを一元的に管理する手法である。これの実現のためには、航路の特定位置における航空機の通過時刻を正確に管理する必要があり、可能な限り高精度な軌道予測をすることが重要な課題となる。

現在の飛行軌道モデル(運航モデル)<sup>2)</sup>を用いた軌道予測においては、巡航高度と航空機の質量が重要なパラメータである。その一方で、巡航高度の情報が得られない場合、後処理においては実軌道の高度を準用するなどし、予測の段階では実績値の最頻値などを参考に決めていた。また実際の運航では、管制機関は航空機の質量の情報を事前に得ることはできないというのが現状である。

軌道予測精度向上意図し、これまでに巡航高度の予測<sup>3)</sup>や質量の予測<sup>4)5)</sup>などが行われている。これらの研究ではそれらのパラメータの正確な推定を目指している一方で、そこからさらに軌道予測へと応用した研究例は一例<sup>6)</sup>のみである。

このような実情に対し、例えば、1: 飛行計画に含まれる巡航高度の情報、2: 実績データから推定した質量の情報、3: 飛行計画の巡航高度ごとの実績データから推定した質量の情報、などを活用した軌道予測を行うことにより、その精度の段階的な向上が期待できる。本研究では、実績データを用いた質量推定および飛行計画の巡航高度情報の活用による軌道予測精度の向上可能性を明らかにすることを目的とする。



図1 軌道ベース運用の概念図

## 1-2 本論文の構成について

本論文は、以下の 6 章で構成される。

1 章では、本論文における研究背景と目的を明確にした。

2 章では、解析に使用した各種データの解説を行うとともに、解析対象となる軌道の選定方法について述べた。航空機の実績データとして 2022 年 6 月の 1 ヶ月分の ADS-B Data、飛行計画として、ADS-B Data の各軌道に対応した OFP (Operational Flight Plan) を用いた。本研究では、軌道ベース運用における理想的な上昇・巡航軌道を解析すべく、標準経路を大きく逸脱する軌道や巡航中の高度変更があった軌道は解析対象便から除外した。また気象情報として気象庁提供のメソ数値気象予報モデル (MSM : Meso Scale Model) <sup>7)</sup>を用いた。

3 章では、飛行軌道モデルについての解説を行うとともに、軌道予測方法として 2 次元航路上の WP を結んだ直線に対する垂線を用いた飛行時間予測誤差の算出方法について説明する。

4 章では、質量推定手法を解説した後、実際の巡航高度を用いて質量推定を行った場合の軌道予測精度を評価する。その後、現実的に実際の巡航高度が得られないことを考慮した場合の実現可能な手法として、機種ごとの実巡航高度の最頻高度を用いた軌道予測精度を評価する。

5 章では、飛行計画を最大限に利用することで、入手できるデータで得られる最高精度の軌道予測を行う。その後、巡航高度を完全に予測できた場合の理想的な場合として、飛行計画と実巡航高度を使用する場合の軌道予測精度を評価し、軌道予測精度の向上可能性を評価する。

6 章では、以上の章で得られた結果を総括し結論を述べる。



## 第2章 使用データと解析対象便の選定

### 2-1 使用データ

#### 2-1-1 実績データと飛行計画データ

本研究では、航空機の実績データとして2022年6月の1ヶ月分のADS-B Dataと、飛行計画としてADS-B Dataの各軌道に対応したOFP (Operational Flight Plan) を用いた。ADS-B DataにはGPS測位によって得られた航空機監視情報(緯度, 経度, 対地速度など)が記録されている。機種はB788とB763の2種類を用いた。便数はB788で60便, B763で84便収録されている。OFPには各軌道の予定された巡航高度(以下, 予定巡航高度と呼称する)が記録されている。実績データから得られる実際の巡航高度(以下, 実巡航高度と呼称する)は, ADS-B Dataの高度履歴の中で最大値となる高度としている。

図2, 図3に機種ごとの全便の航路と高度-経度の図を示す。なお図中の赤丸はWPの位置関係を示している。

表1 ADS-B Data の概要

データ期間	2022年	6月01日から30日
飛行路線	福岡空港発 - 東京国際空港(羽田空港)	
総便数	B788(60便), B763(84便)	
機種	B788, B763	
データ	時刻(約10s), 緯度, 経度, 気圧高度, 対地速度, 便名等	

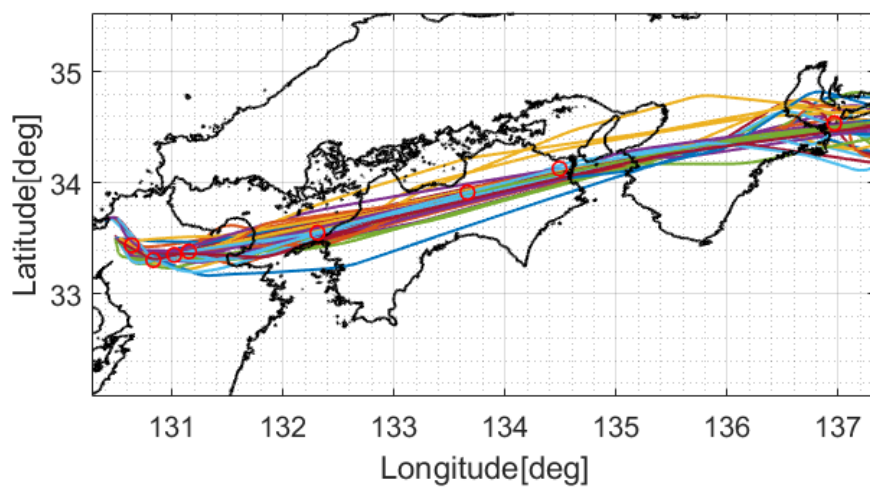
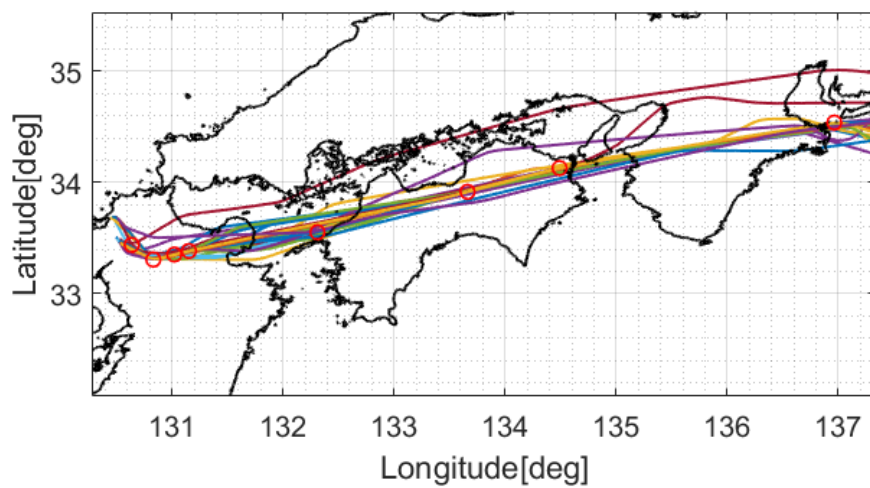


図 2 全便の航路（上：B788，下：B763）

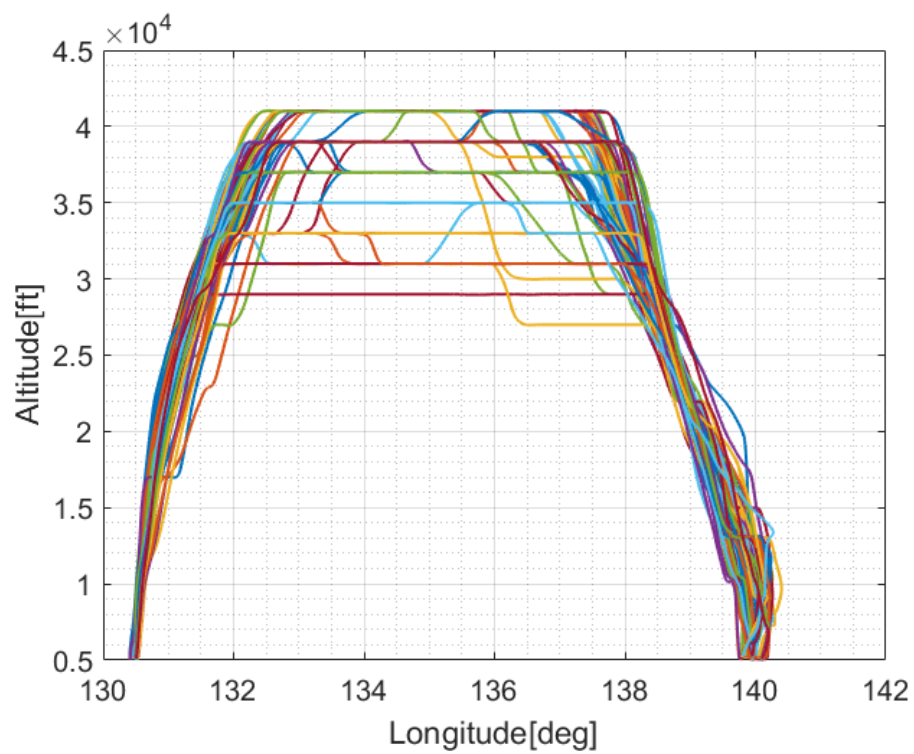
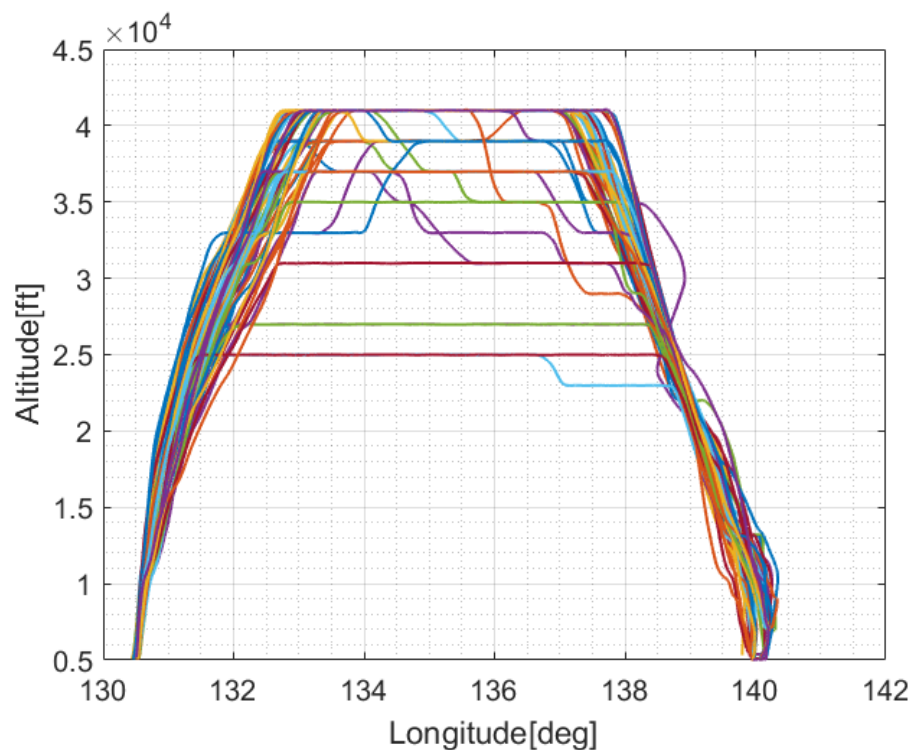


図3 全便の経度-高度図（上：B788，下：B763）

## 2-1-2 気象予報データ

航空機の飛行に影響を及ぼす風や温度などの気象情報を、気象庁が提供しているメソ数値予報モデル（MSM：MesoScale Model）を用いて算出する。MSM には、日本全域を覆う領域の気象予報データを格納しており、水平解像度は 5km、鉛直層数は 50 層に格子化し、3 時間毎に 39 時間後までの予報を行っている。

MSM データの例として、以下に日本付近における 2022 年 6 月 1 日の 16:00（JST：日本標準時）の平均海面での風と気温の様子を示す。風向と風速を青矢印の向きと大きさと、温度[K]をカラーバーで表示してある。

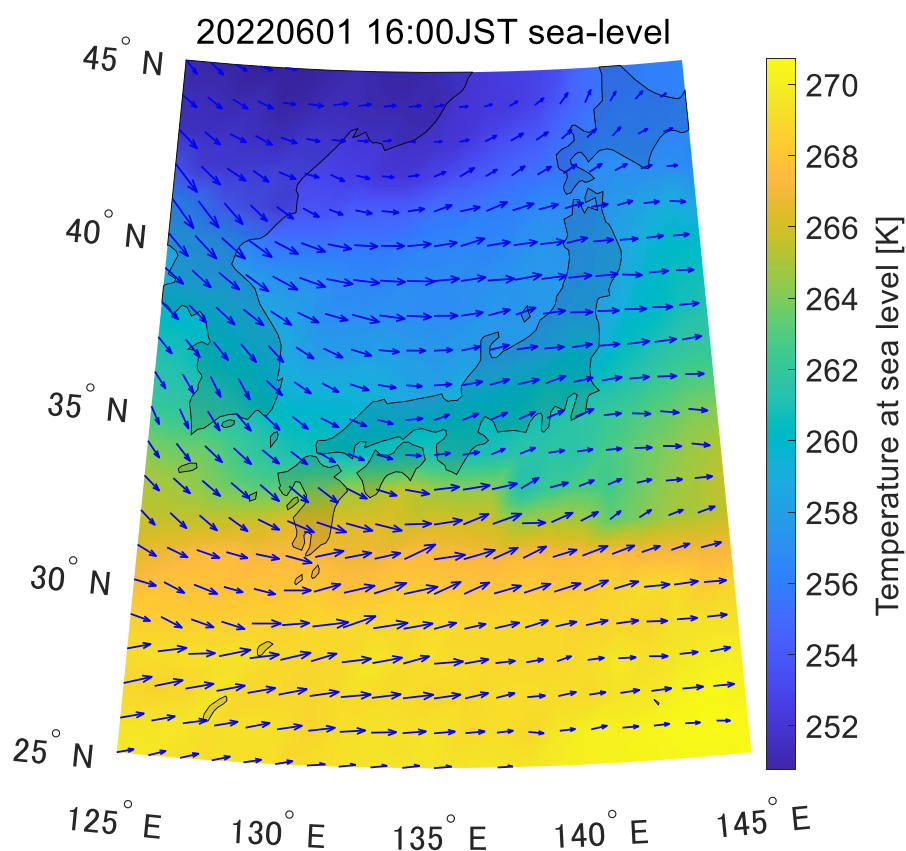


図 4 MSM のデータの例

## 2-2 解析対象便の選定

すべての航空機は、航空路設計法として一般的である RNAV（広域航法）航路に従って飛行しているものとする。従来の航法は、地上の航行援助施設の位置に左右され、折れ線構造になることが多いが、RNAV は機上の自蔵航法機器等を利用することで自機の位置を算出し、任意の経路、ウェイポイント(WP：Way Point)を設定して飛行する航法である。航空機が福岡空港(ICAO：RJFF, IATA：FUK) から羽田空港(ICAO：RJTT, IATA：HND)へ飛行する際にも、多数のウェイポイントを経由して飛行する。今後計画されている軌道ベース運用では、これらの WP を通過して経路の大幅な伸縮や迂回がないように飛行することになる。本研究では福岡空港を離陸した航空機の YURRY, YOKAT, KOHZA, BRAID, LUFFY, SANJI, YANKS の 7 つのウェイポイントを経由して FLUTE に至るまでの巡航軌道を解析する。各ウェイポイントの位置関係は図 5 に示す。



図 5 YURRY から FLUTE までのウェイポイントの位置関係

本研究では、将来の軌道ベース運用環境を想定しているため、飛行中の針路変更や高度変更は想定しない。よって上述した標準経路を大きく逸脱する軌道や巡航中の高度変更があった軌道は解析対象便から除外する。また天候不良や空域混雑などの理由で航空機が上空待機(Holding：ホールディング)を行うことがあるが、そういった軌道も同様の理由で除外する。ホールディングパターンの検出には、機首方位角が 360 度一周する飛行が見られる便を除くことでその有無を判断した。また巡航高度を変化させて飛行する軌道は、同様の理由で本研究では除外する。

以上の処理を踏まえた結果、解析対象便数は B788 で 34 便、B763 で 33 便となった

図 6 に B788, B763 のそれぞれ解析対象便の航路を青色で示す。また図 7 に同様に離陸から着陸までの経度に対する高度の図を示す。なお図中の赤丸は WP の位置関係を示している。

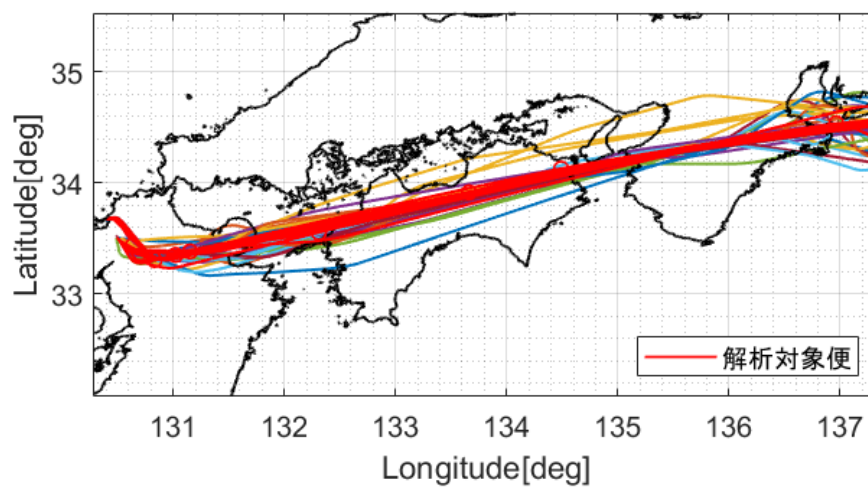
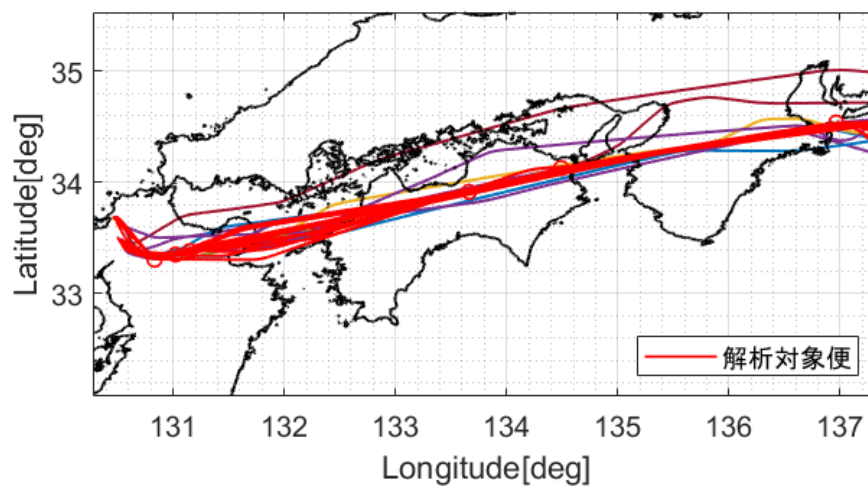


図 6 解析対象便の航路（上：B788，下：B763）

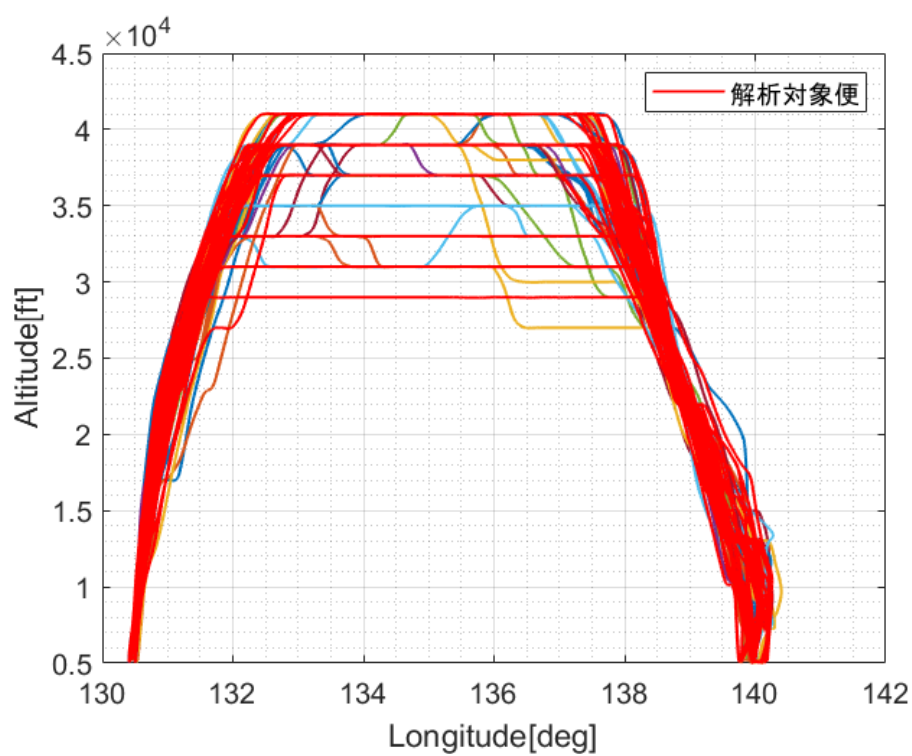
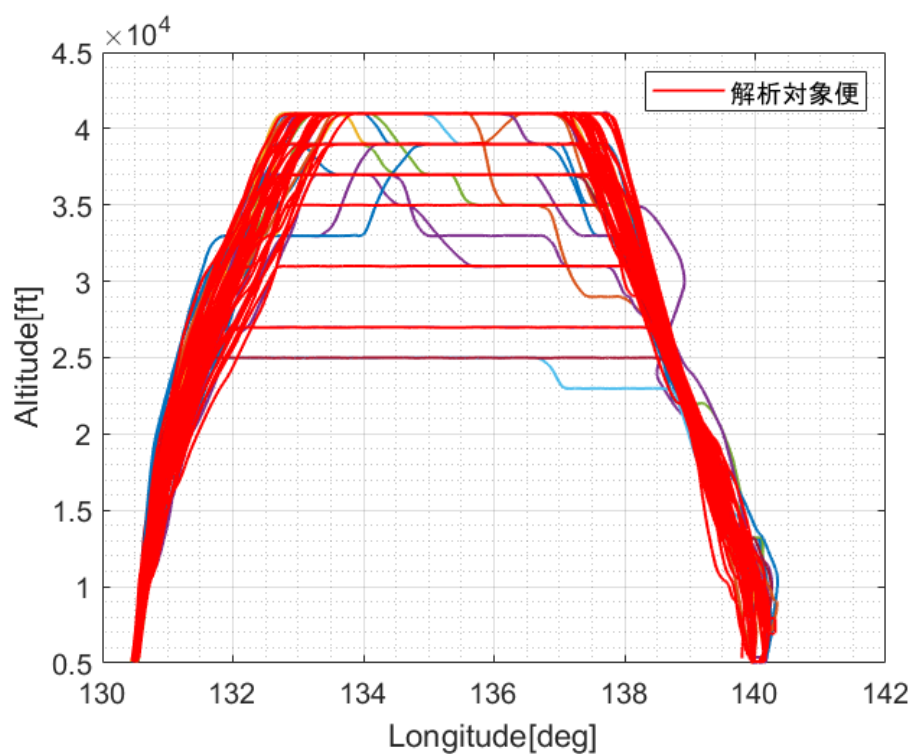


図 7 解析対象便の経度-高度図（上：B788，下：B763）



## 第 3 章 運航モデルと飛行時間予測誤差の算出方法

### 3-1 運航モデル

本研究では，飛行軌道予測を行う際に，EUROCONTROL が提供する航空機の運動性能モデルである BADA Ver.3 (Base of Aircraft Data Ver.3) モデル(運航モデル)を用いた。このモデルから航空機の機種と質量ごとに，高度別の速度や上昇率などが記載された運航モデルを用いて軌道を作成し，飛行時間の予測を行う。運航モデルとは，航空機の飛行性能や標準的な飛行軌道をデータとしてまとめたものである。運航モデルには，航空機の質量が標準質量時と，軽量質量時について，標準的な真対気速度や上昇率等の飛行時のパラメータが含まれる。それらの値と MSM の気象予報データより得られる風速は位置，高度，時間の関数で表すことができるので，以下の微分方程式を立てることができる。これを解くことにより予測飛行軌道を作成する。

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{h} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{TAS}(h) + V_w(h, x, t) \\ ROCD(h) \end{pmatrix} \quad (1)$$

$V_{TAS}$	: 真対気速度 [m/s]	$V_w$	: 風速 [m/s]
$ROCD$	: 上昇率 [m/s]		

各航空機は先述の標準経路に従って飛行することとし，福岡空港から WP である YURRY, YOKAT, KOHZA, BRAID, LUFFY, SANJI, YANKS を経由して FLUTE に到達するものとした。

本研究では，FLUTE 通過時刻を予測することを対象とする。そのため，まず ADS-B Data より YOKAT に最接近した際の緯度，経度，高度，時間のデータを抽出し始点とする。運航モデルには各高度における標準真対気速度が含まれているので，これらの値に MSM から得られる現在位置における東西風，南北風を加え，対地速度を得ることができる。そして導出された対地速度と，同様に運航モデルより得られる標準上昇率を時間積分することにより飛行距離および上昇高度を求めることができる。巡行高度に達するまで計算することで上昇軌道を作成し，以降は巡航高度一定として巡行軌道を作成する。これにより FLUTE に至るまでの軌道を予測しその通過時刻を求める。図 8 に予測軌道作成の流れを示す。図 9～図 11 に実軌道と軽量質量の予測軌道，標準質量の予測軌道について，航跡と高度変化，速度変化の様子を示す。



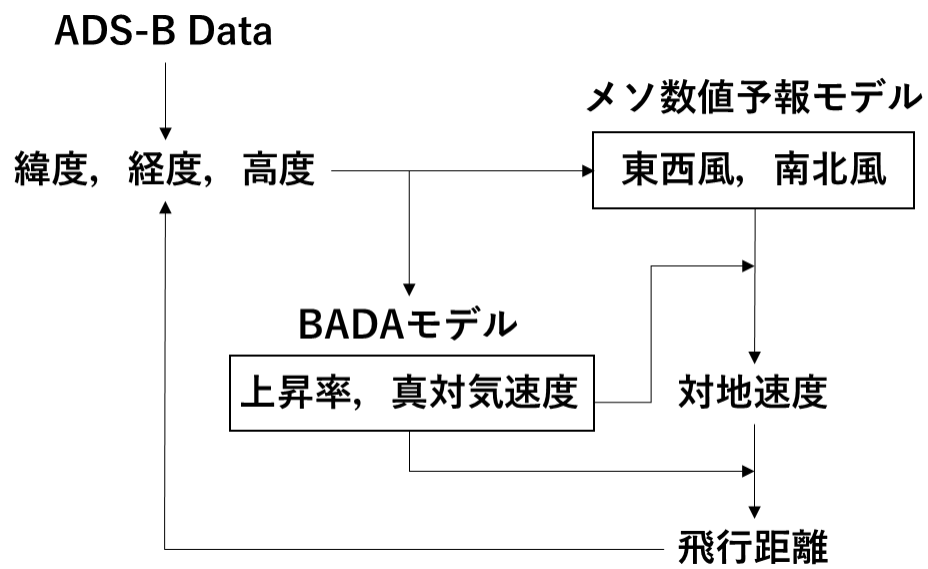


図 8 予測軌道作成の流れ

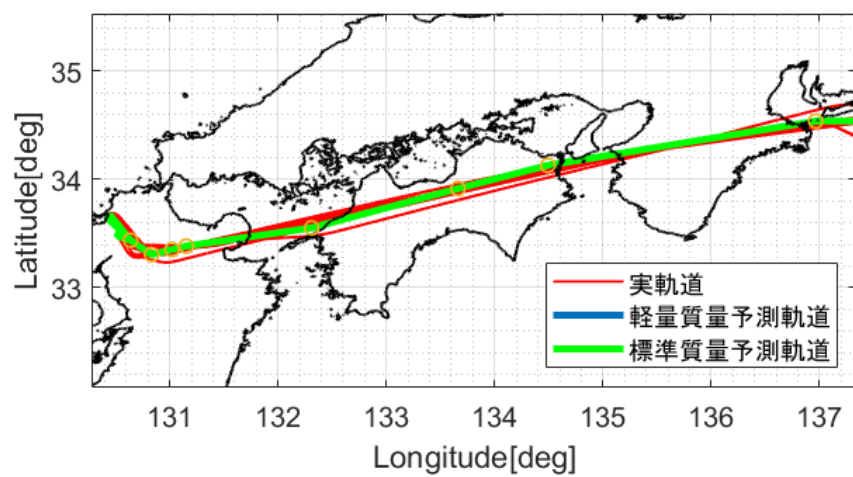
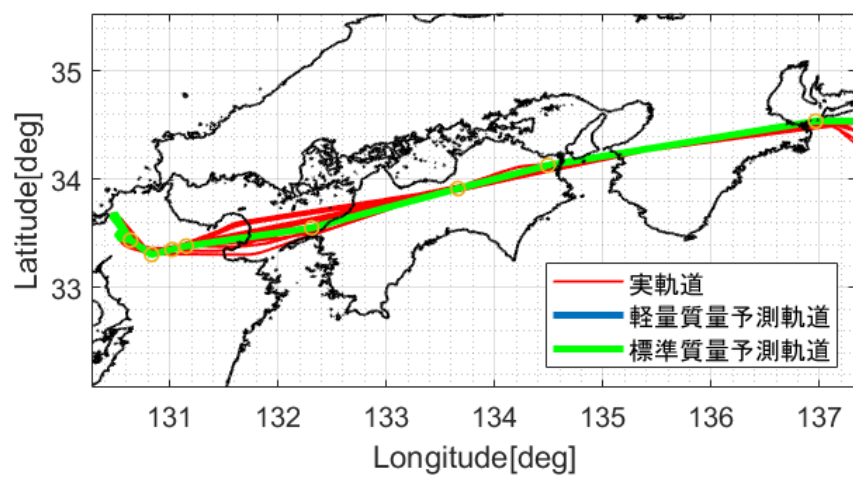
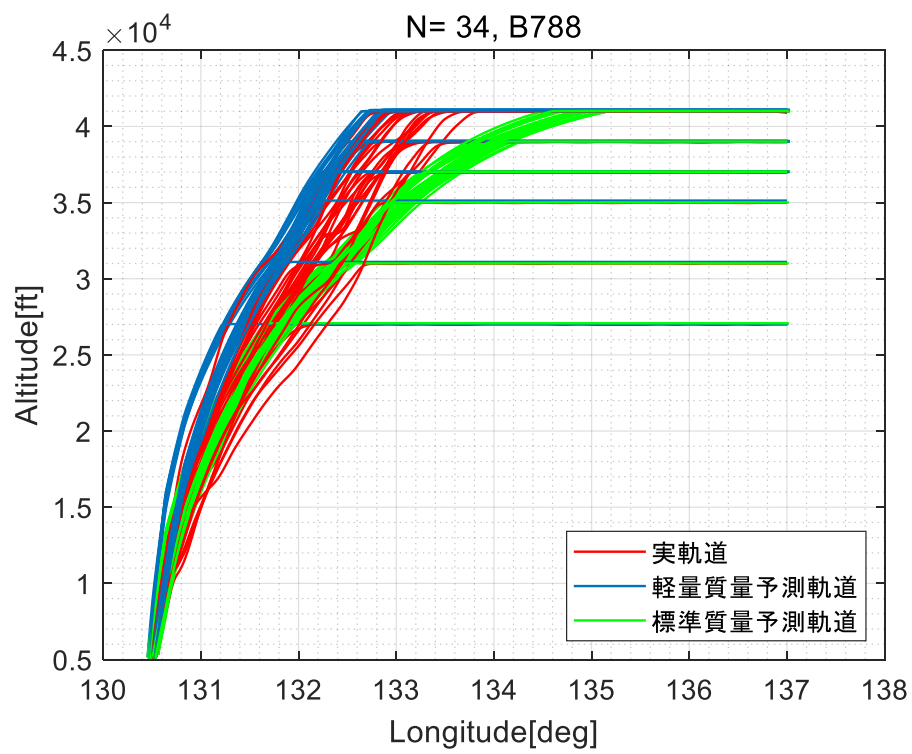
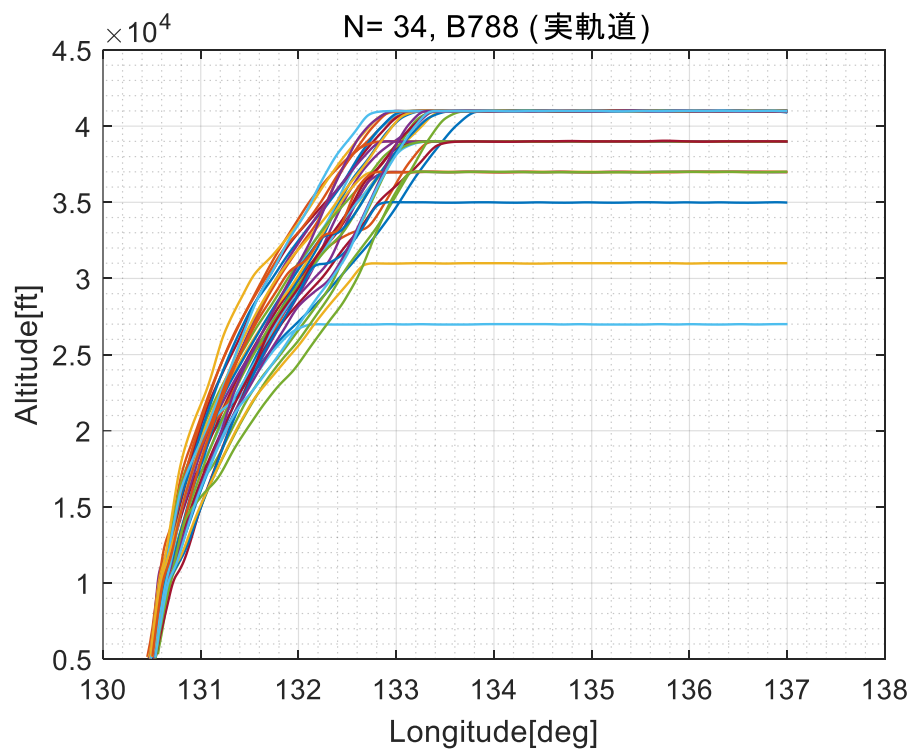


図 9 実軌道と BADA 軌道の航跡比較（上：B788，下：B763）



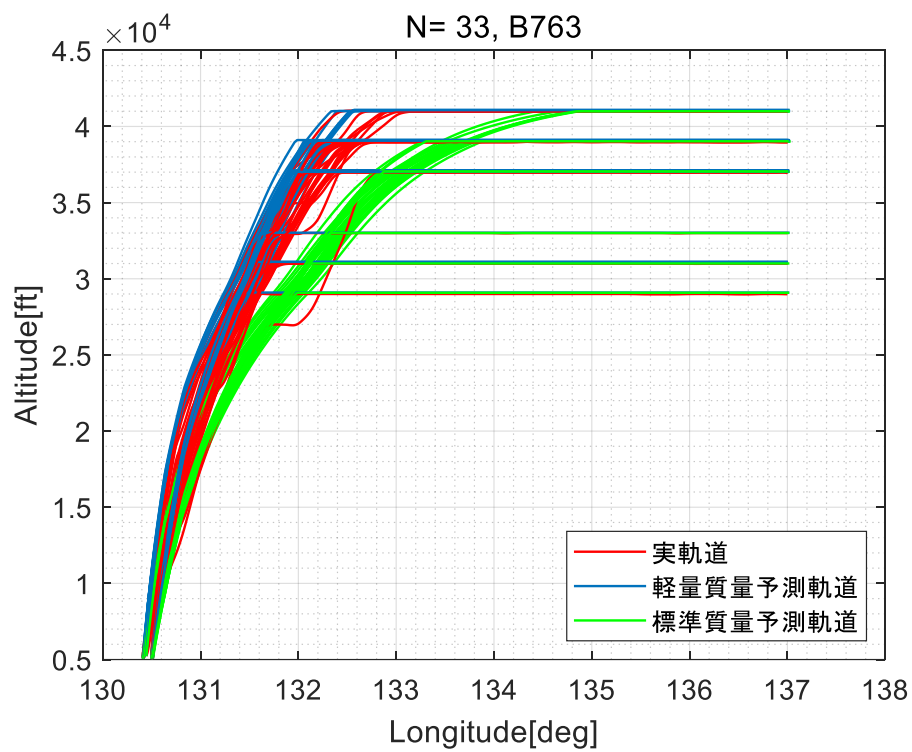
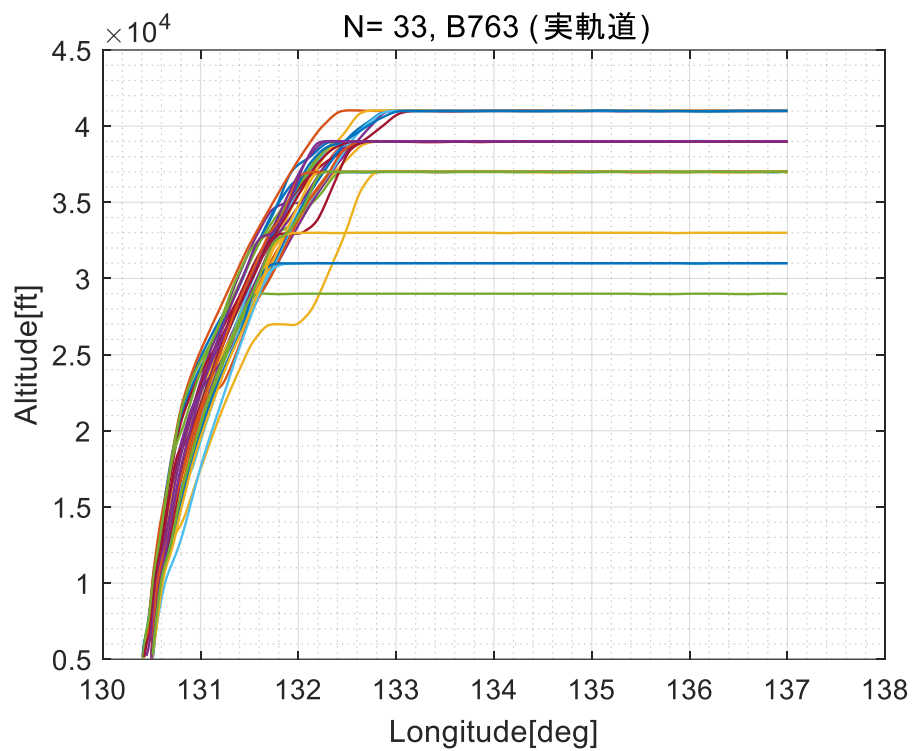
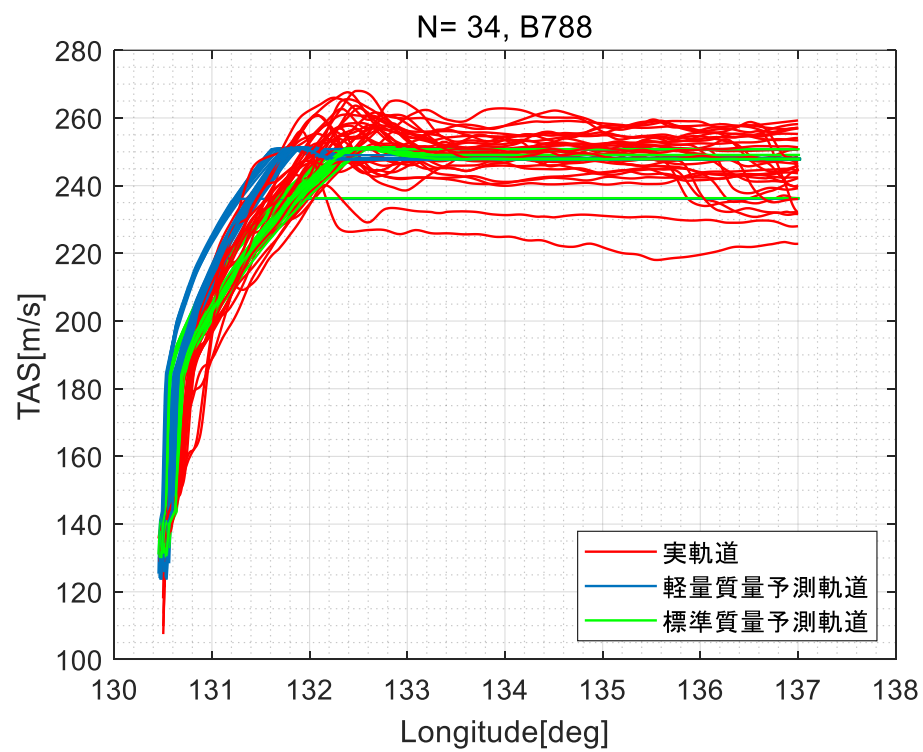
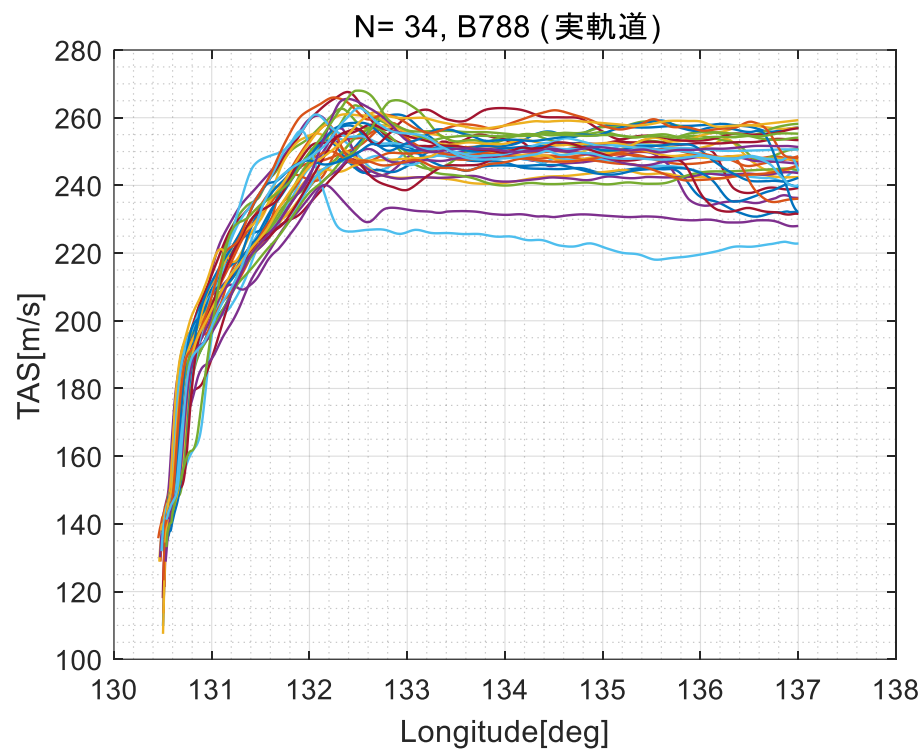


図 10 実軌道と BADA 軌道の高度履歴比較 (上 : B788, 下 : B763)



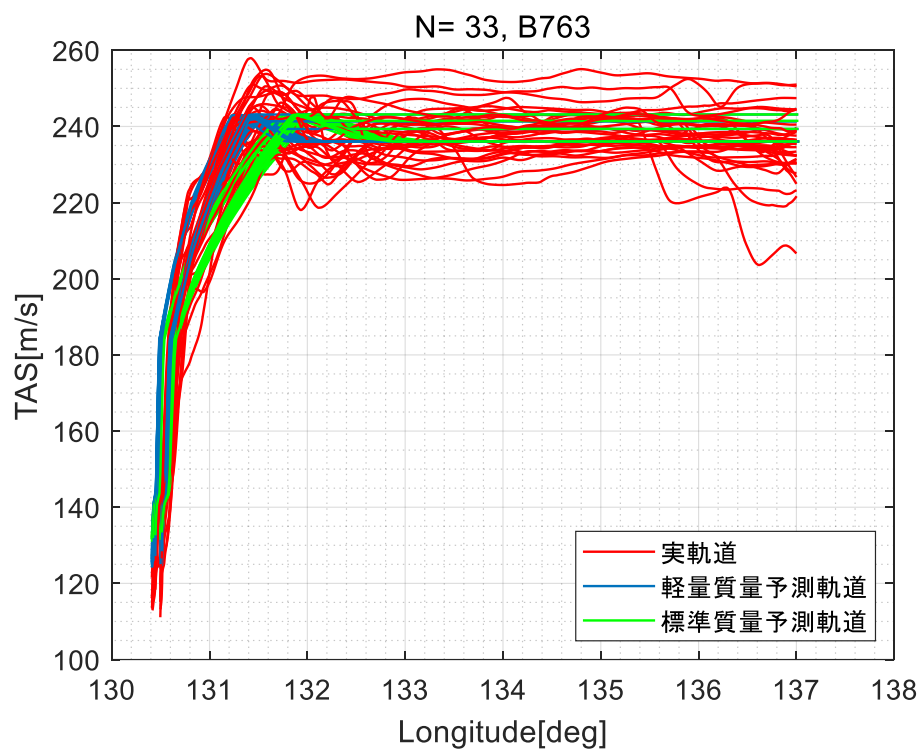
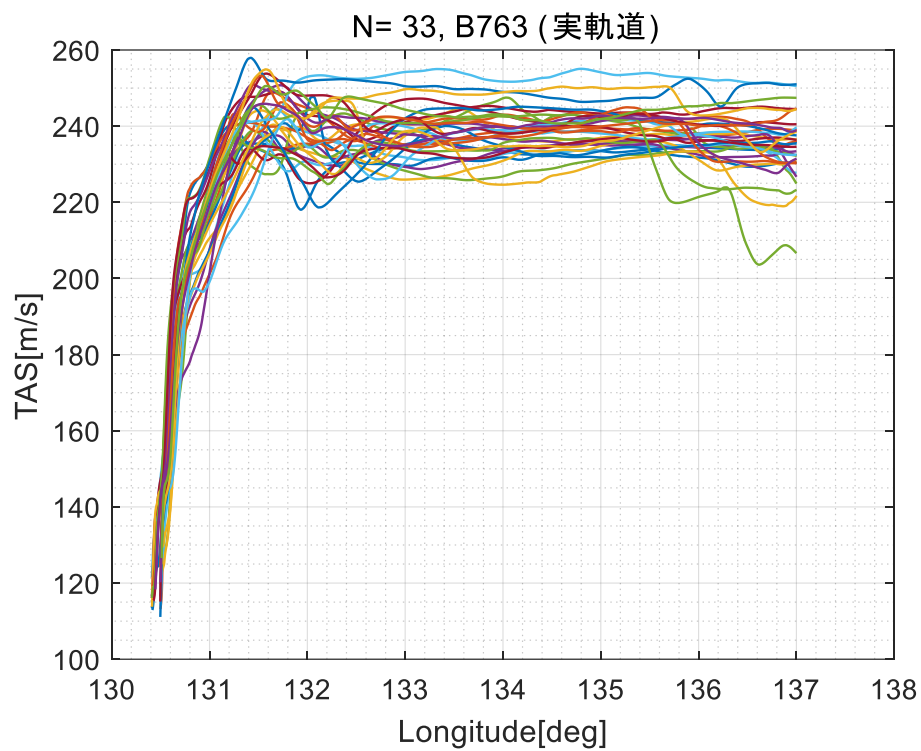


図 11 実軌道と BADA 軌道の真対気速度履歴比較（上：B788，下：B763）

### 3-2 飛行時間予測誤差の算出方法

先述の方法で求めた予測軌道を用いて、任意の予測区間内の ADS-B Data の実飛行時間から予測軌道の予測飛行時間を差し引いたものが飛行時間予測誤差である。本研究では、予測区間を WP である LUFFY から FLUTE までの飛行区間として定めて評価する。ここで LUFFY, FLUTE の通過時刻を求めるに際して各軌道の標準経路からのばらつきがあるため、WP を外れて通過する軌道がほぼ大半を占める。そのため LUFFY から FLUTE までの正確な飛行時間が算出されない。よって統一された各 WP の通過基準を定める必要がある。以下では 2 次元航路上の WP を結んだ直線に対する垂線を用いた、予測区間内の飛行時間予測誤差の算出方法について説明する。

まず上昇軌道において、ある 1 つの経度を指定したとき最も近い 2 つの WP の直線で結びその直線に対する垂線を考える。LUFFY と SANJI を結んだ直線に対する垂線と、YANKS と FLUTE を結んだ直線に対する垂線をそれぞれ基準線とする。図 12 に予測軌道と基準線の関係を示す。次に LUFFY を通る基準線と各軌道の交点の通過時刻、FLUTE を通る基準線と各軌道の交点の通過時刻をそれぞれ計算する。予測区間内で実軌道と予測軌道のそれぞれについて飛行時間を算出する。以上で求めた 2 つの飛行時間の差を飛行時間差とする。飛行時間差は実軌道の区間飛行時間（実飛行時間）から予測軌道の区間飛行時間（予測飛行時間）を差し引いた値として算出する。

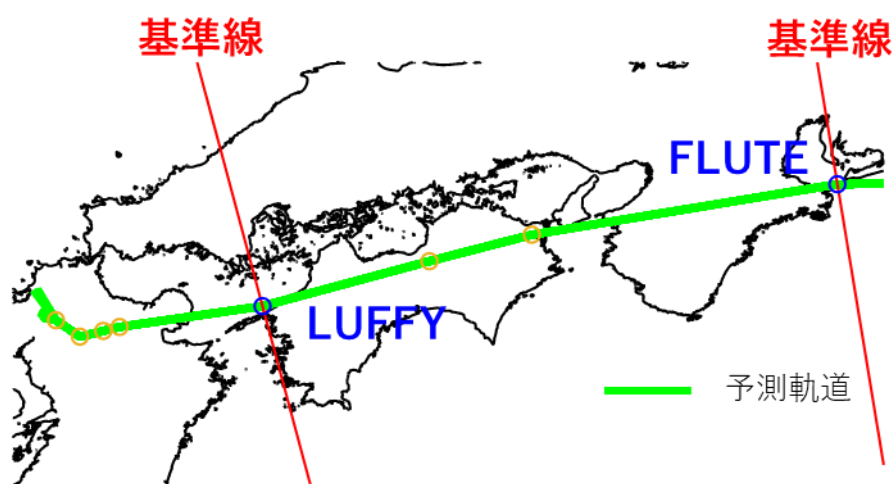


図 12 予測軌道と基準線の関係

## 第 4 章 質量推定手法及び軌道予測評価方法の解説と評価結果

### 4-1 質量推定手法の解説

以下では運航モデルを用いた質量推定の手順を説明する。まず任意の機種における解析対象便を学習データとテストデータに分割し、学習データを巡航高度別にグループ化する。

次に質量推定値を設定し、軽量質量と標準質量の運航モデルの値で補間することで求めた運航モデルを用いて軌道予測を行い、その不確かさが最小となる質量推定値を決定した後、テストデータで質量推定値を用いて軌道予測精度を評価する。以上の一連の手法を 5 回行い軌道予測の不確かさの平均を評価することで軌道予測評価とする。運航モデルから軽量質量と標準質量それぞれについて、高度別の上昇率・真対気速度が使用できるため、その値を線形補間することで任意の質量における予測軌道を作成し軌道予測をすることができる。軽量質量は運航モデルによると以下の様に定義されている。本研究でも軽量質量はこの算出方法に倣った。

$$\text{軽量質量} = 1.2 \times \text{空虚質量} \quad (2)$$

また機種毎の運航モデル記載の空虚質量、標準質量、最大離陸重量と、算出した軽量質量を以下の表 2 に記載する。

表 2 機種毎の運航モデルの記載質量値と軽量質量

	B788	B763
空虚質量[t]	111.49	90.01
軽量質量[t]	133.79	108.01
標準質量[t]	189.11	154.59
最大離陸重量[t]	227.93	186.88

質量推定範囲を軽量質量から最大離陸重量の間として、標準質量に対する比率を 5 % 刻みで設定し各質量推定値を用いて軌道予測を行い、質量推定値と軌道予測の不確かさの関係を評価する。次に質量推定値の極小値の前後 ± 2 % の値の質量で軌道予測の不確かさを 4 通り計算し、もし質量推定値の極小値と異なる質量推定値が極小値となれば、その新しい質量推定値の極小値の -1.5% から +1.5% の 0.5% 刻みで軌道予測の不確かさが最小となる質量推定値を決定する。以上で求めた質量推定値とテストデータを用いて予測軌道を作成し、巡航区間における飛行時間予測誤差を算出した後、不確かさの指標として平均 2 乗誤差 (MSE : Mean Squared Error) を算出する。5 回分の軌道予測の不確かさ MSE の平均をとり、その平方根である 2 乗平均平方根 (RMS : Root Mean Square) を最終的な軌道予測の評価指標とする。例えば極小値が標準質量の 95% であれば、次の段階では標準質量の 91%, 93%, 97%, 99% の質量推定値を調べる (2% 刻み)。ここで例えば 97% が極小値であれば次の段階で標準質量の 95.5%, 96.0%, 96.5%, 97.5%, 98.0%, 98.5% の質量推定値を調べる (0.5% 刻み)。以上で質量推定値を決定する。



#### 4-2 実績データを用いた軌道予測及び評価

軌道予測をする際に航空機の質量と巡航高度が重要なパラメータである。しかし航空機の質量は航空会社によって公開されておらず我々は入手することができないため、現在の軌道予測では、運航モデルに機種ごとに記載されている質量（軽量質量，標準質量または参照質量）を代用している。また軌道予測の際に使用する予定巡航高度は、現状，実績データの巡航高度の最頻値（以下最頻巡航高度と呼ぶ）を代用している。この場合実巡航高度と予定巡航高度が等しい，つまり実軌道は飛行計画通りの巡航高度を飛行したと仮定していることになる。本研究では各軌道の予定巡航高度は飛行計画に記載されているが，本セクションではまず飛行計画が入手できない場合の軌道予測精度を評価考察し，第 5 章にて飛行計画が入手できた場合を評価考察することにする。

##### 4-2-1 (case1)実巡航高度を用いた予測

はじめに，理想的に実巡航高度を用いることができた場合の軌道予測精度の評価をする。実際のデータが使える場合，解析対象便全便を用いて標準質量と実巡航高度で軌道予測する場合を検討する。

図 13 に解析対象便の巡航高度別の便数を，図 14 に実巡航高度と予定巡航高度の差をそれぞれ示す。図 15 にテストデータの予測誤差のヒストグラムに示す。RMS は B788 で 37.1[s]，B763 で 40.4[s]となった。

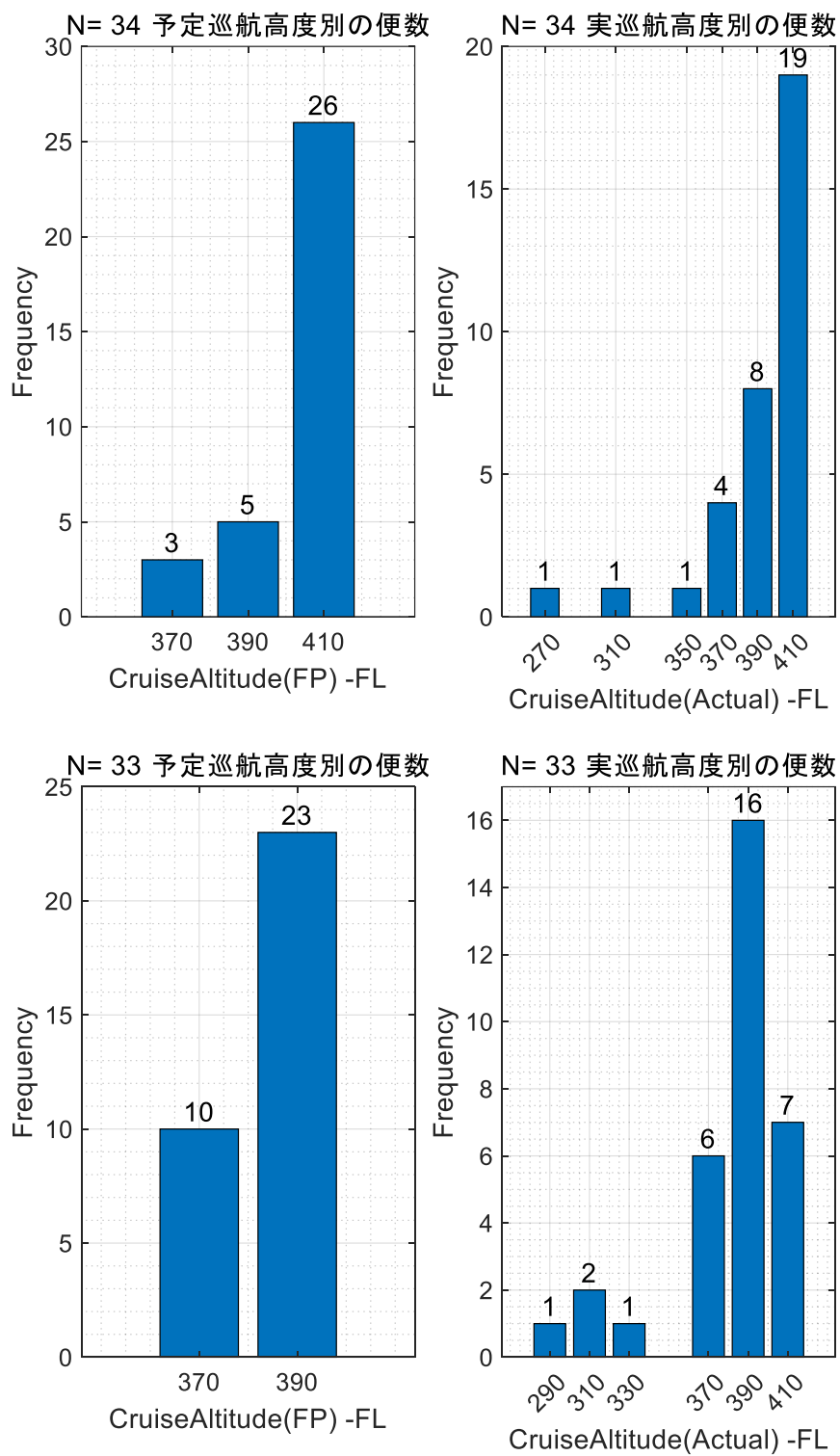


図 13 巡航高度別の便数（上：B788, 下：B763）

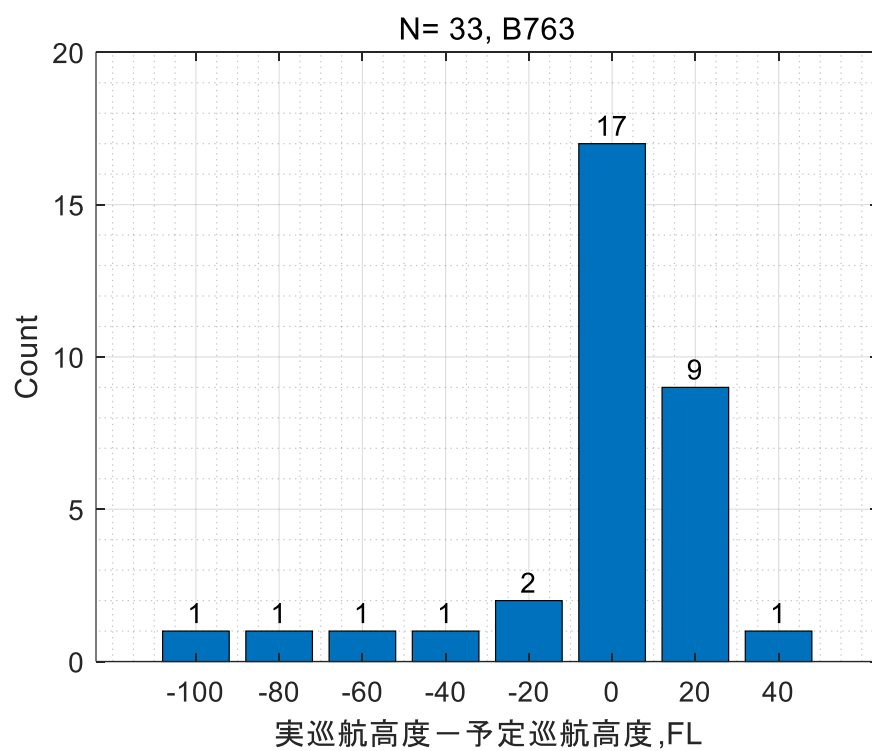
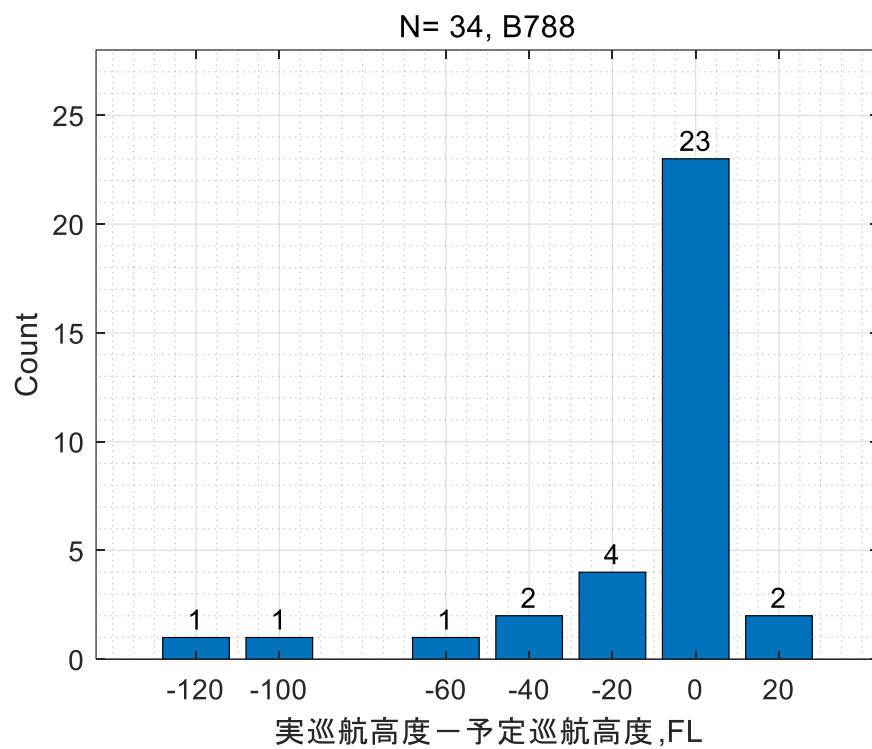


図 14 実巡航高度と予定巡航高度の関係（上：B788，下：B763）

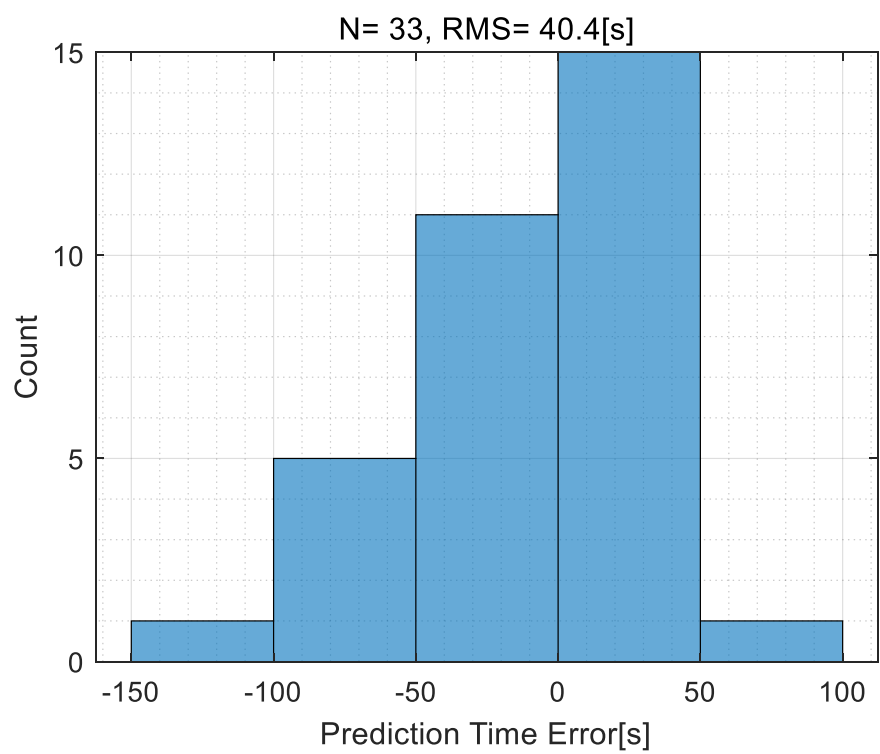
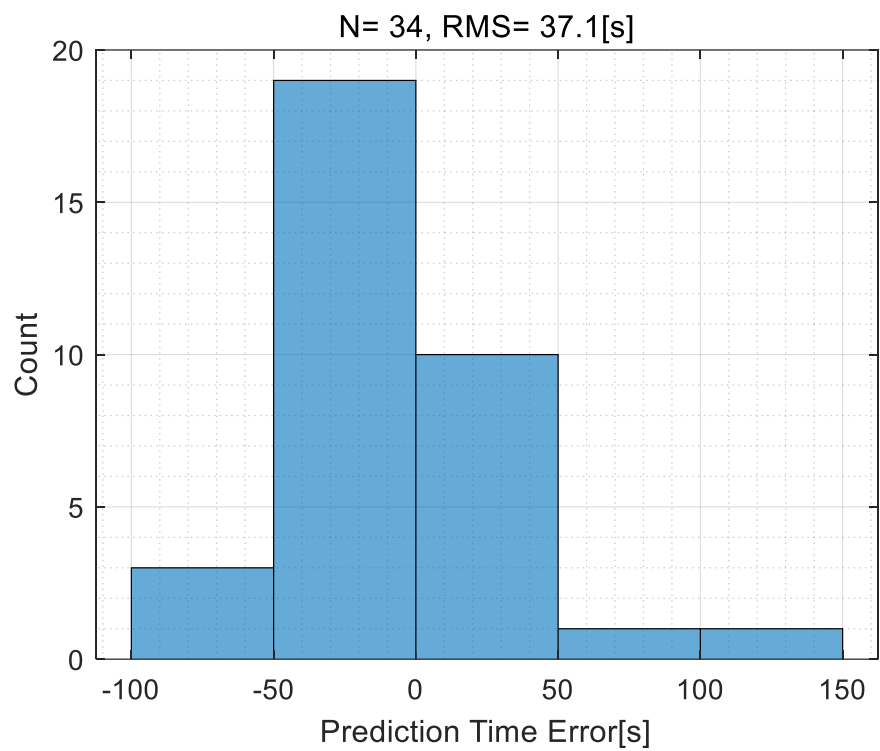
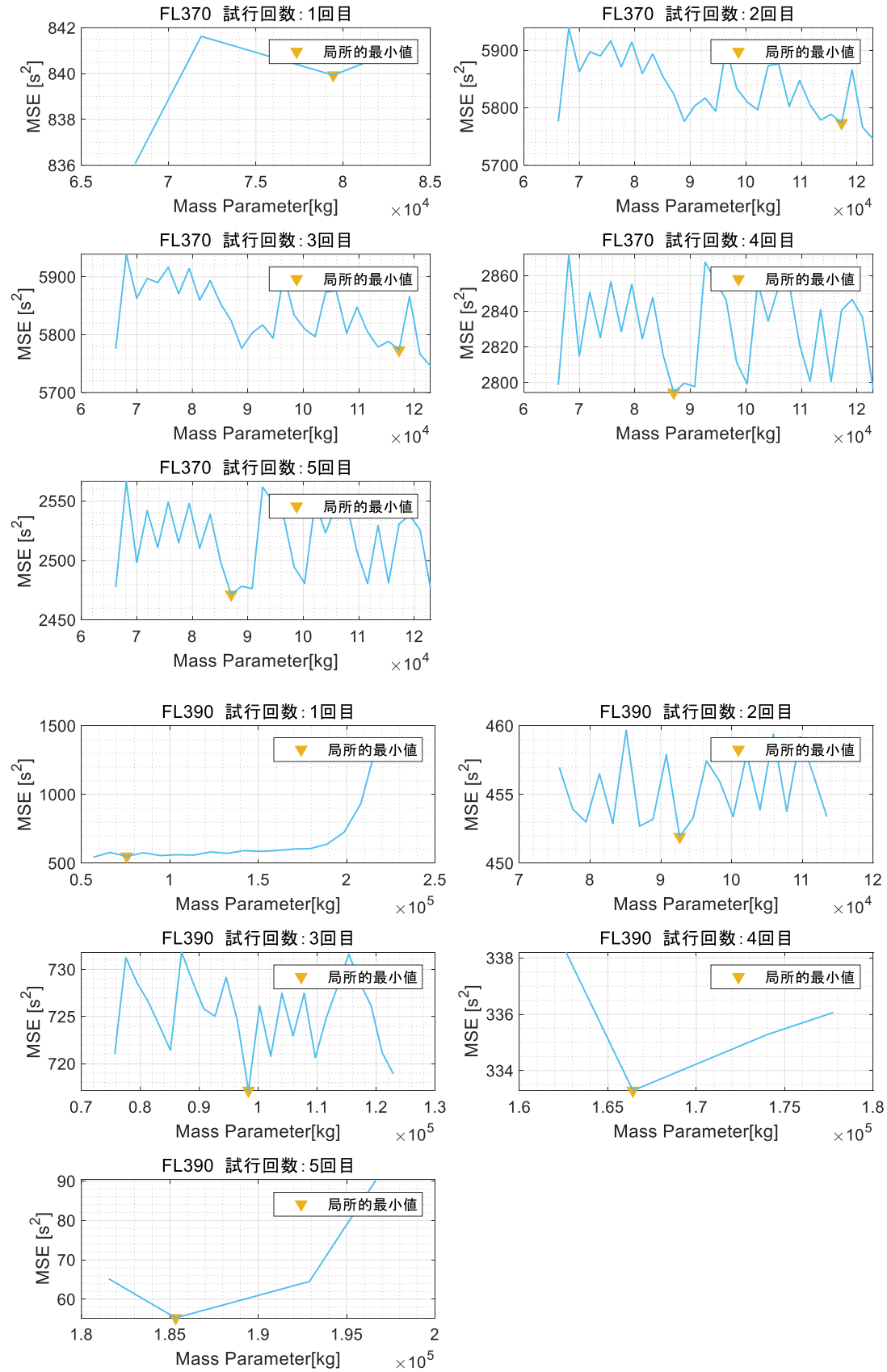


図 15 テストデータの予測誤差（上：B788, 下：B763）

#### 4-2-2 (case2)実巡航高度を用いた質量推定による予測

次に質量推定を行う場合の精度評価を行う．可能な限り手元のデータで軌道予測の高精度化を目指すために，実巡航高度ごとの質量推定を行うことが考えられる．質量推定の効果測定のため，学習データにおいて実巡航高度ごとに質量推定値を算出した後，テストデータの実巡航高度と先で求めた高度ごとの質量推定値を対応付けすることでテストデータの質量推定値とする．軌道予測の際の巡航高度には実巡航高度を用いる．学習データにおける質量推定値と予測誤差の MSE の関係は図 16，図 17 のようになった．

また予測誤差の平均 MSE が最小になる質量を用いてテストデータで軌道予測を行った結果を図 18 に示す．



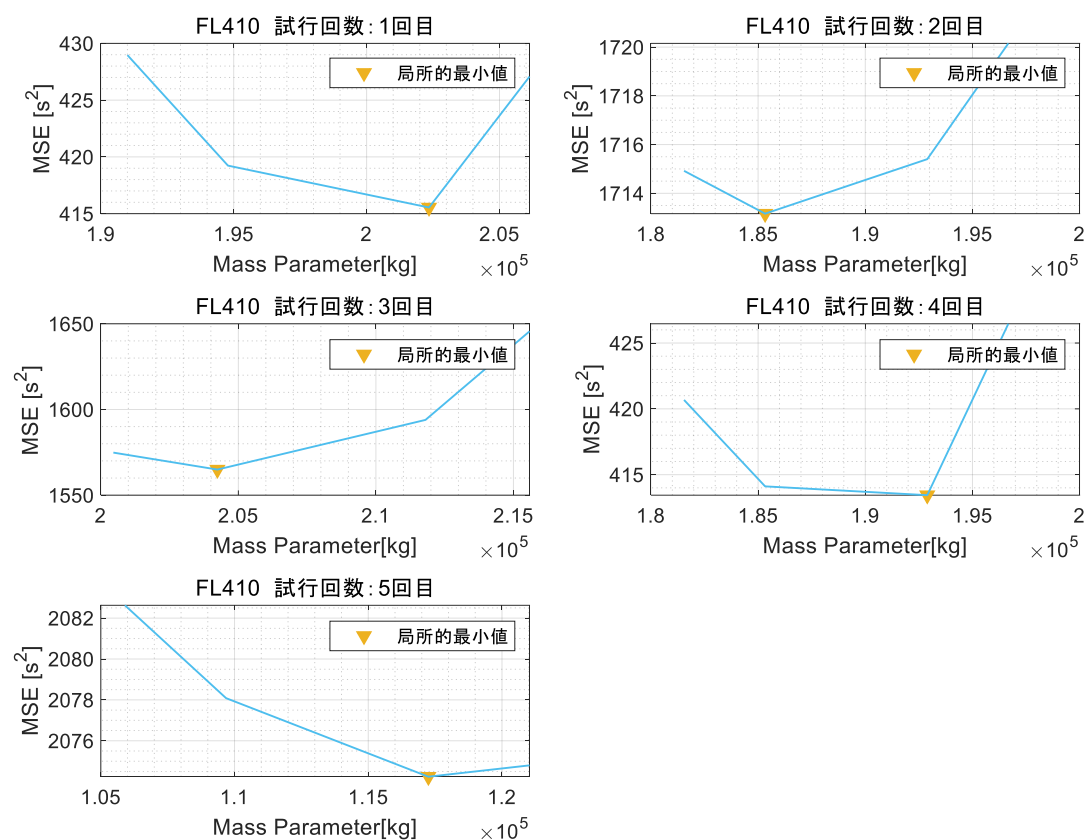
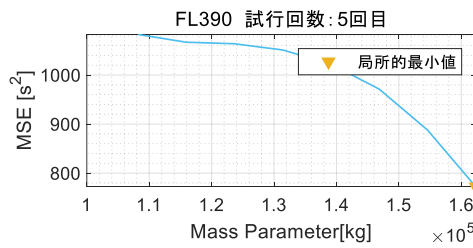
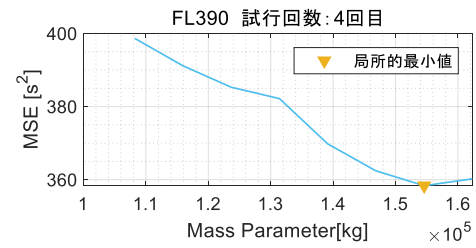
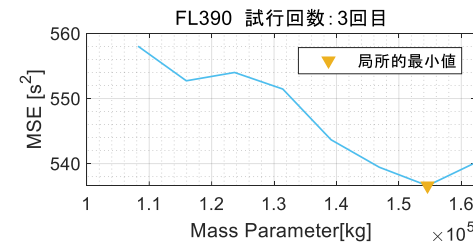
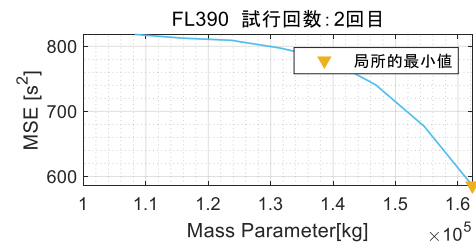
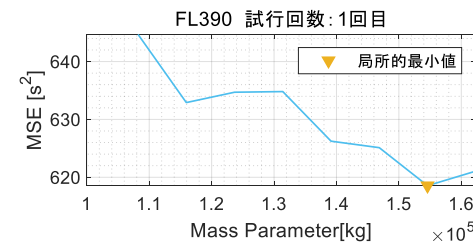
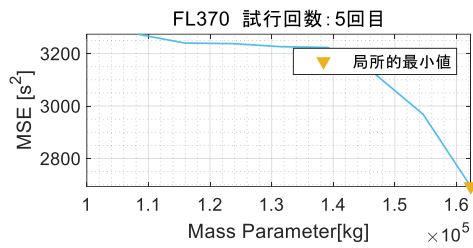
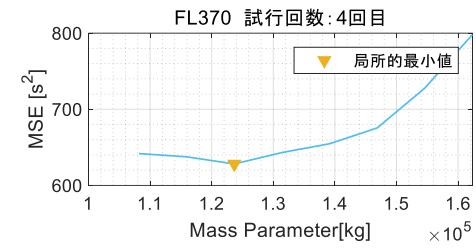
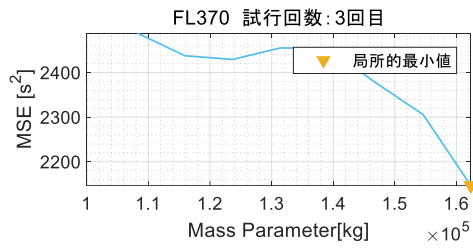
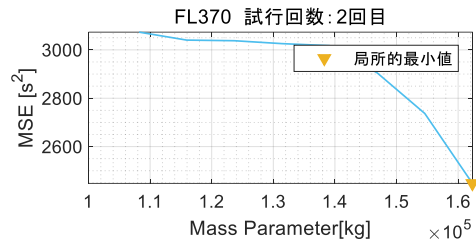
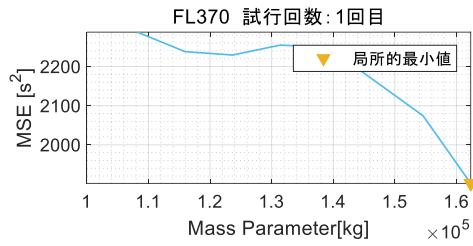


図 16 試行回数別の質量推定値と予測誤差の MSE (高度別, B788)





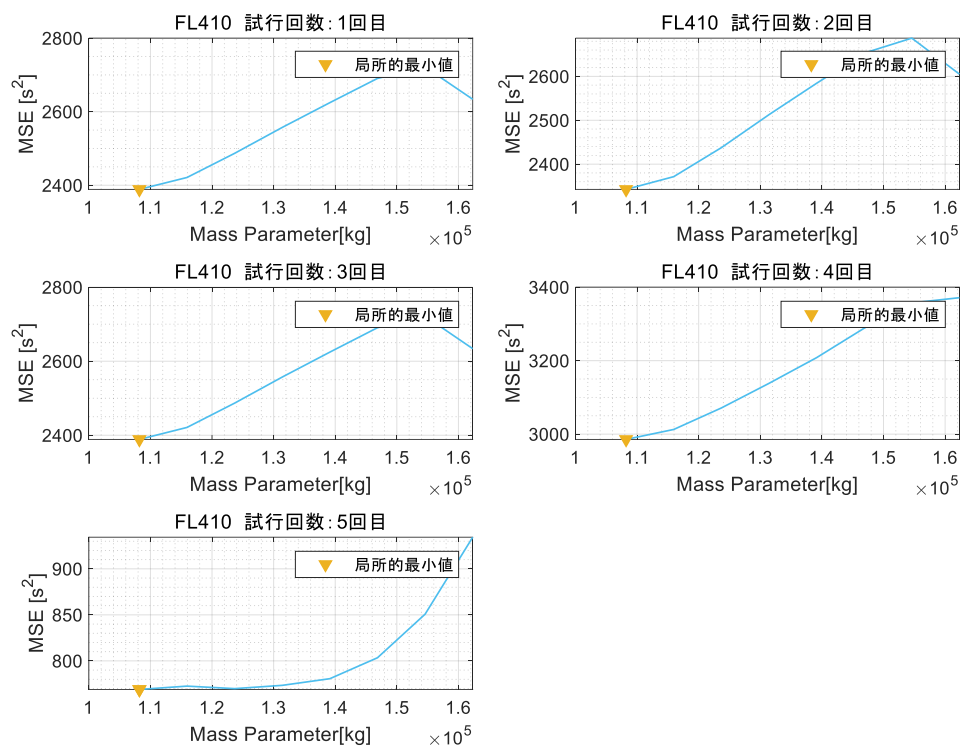


図 17 試行回数別の質量推定値と予測誤差の MSE（高度別，B763）

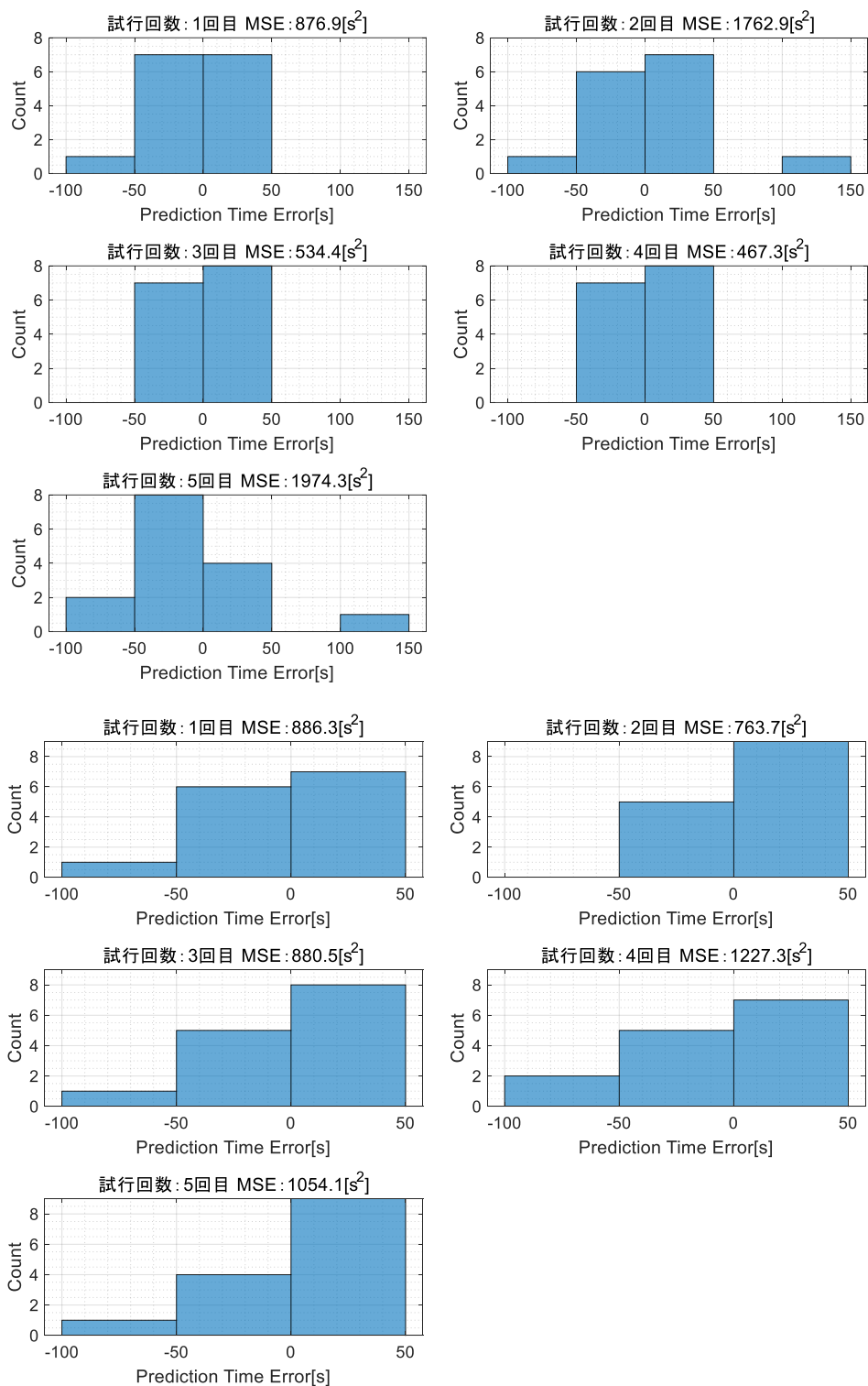


図 18 (case2)質量推定値と実巡航高度を用いた予測結果 (上 : B788, 下 : B763)

テストデータの予測誤差の平均 MSE が  $1122.3 \text{ [s}^2\text{]}$  であるから、RMS はその平方根をとり  $33.5 \text{ [s]}$  と求まる。(case1)におけるテストデータの予測誤差の RMS は  $37.1 \text{ [s]}$  であり、予測誤差の不確かさが減少していることから、質量推定は実際の巡航高度を用いても精度向上に有効であることが分かった。また最頻巡航高度を用いた場合の  $\text{RMS} 61.4 \text{ [s]}$  と比較すると、実高度を用いたほうが高精度な軌道予測ができていることも分かる。これは図 13 から分かる通り、実巡航高度が最頻巡航高度から大きくばらついているためであると考えられる。表 3、表 4 に機種ごとの(case1)と(case2)の軌道予測誤差の不確かさをまとめて示す。

表 3 (case1)と(case2)の軌道予測誤差の不確かさ(B788)

	RMS[s]	MSE[s <sup>2</sup> ]
(case1)	37.1	1373.2
(case2)	33.5	1122.3

表 4 (case1)と(case2)の軌道予測誤差の不確かさ(B763)

	RMS[s]	MSE[s <sup>2</sup> ]
(case1)	40.4	1630.1
(case2)	31.0	962.4

#### 4-3-1 (case3)実巡航高度の最頻巡航高度を用いた軌道予測

実運航であっても過去の実績データから最も利用頻度の高い巡航高度（以下、最頻巡航高度と呼称する）を用いて軌道予測することが可能である。そこで最頻巡航高度を用いて軌道予測を行う。運航モデル記載の標準質量を用いて機種ごとの解析対象便全便の実績データの最頻巡航高度を予定巡航高度として軌道予測を行う。最頻巡航高度はフライトレベルで B788 では FL410, B763 では FL390 であった。解析の結果、軌道予測の結果は図 19 のようになった。飛行時間予測誤差の RMS は B788 で 60.7[s], B763 で 58.9[s]となった。

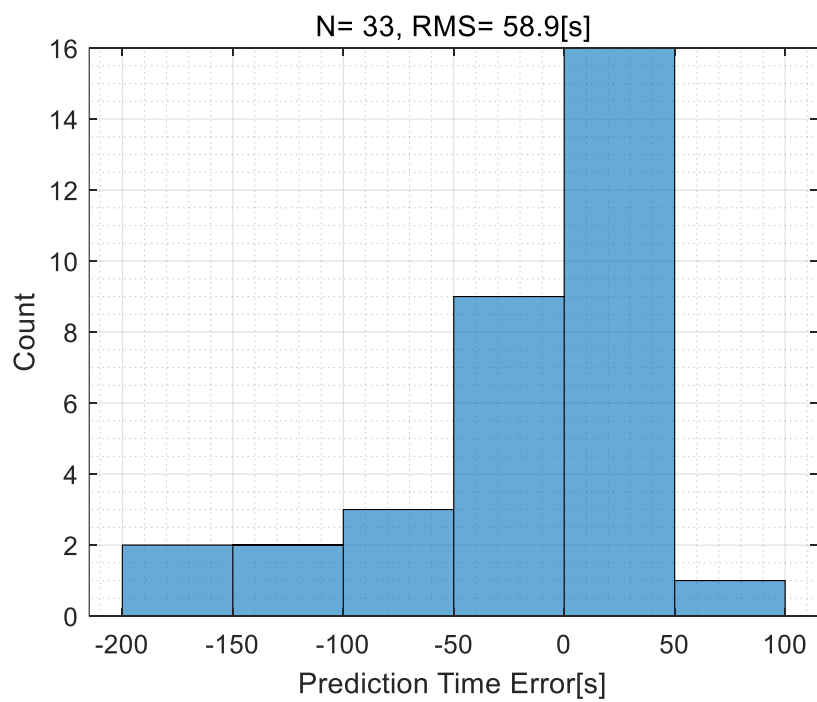
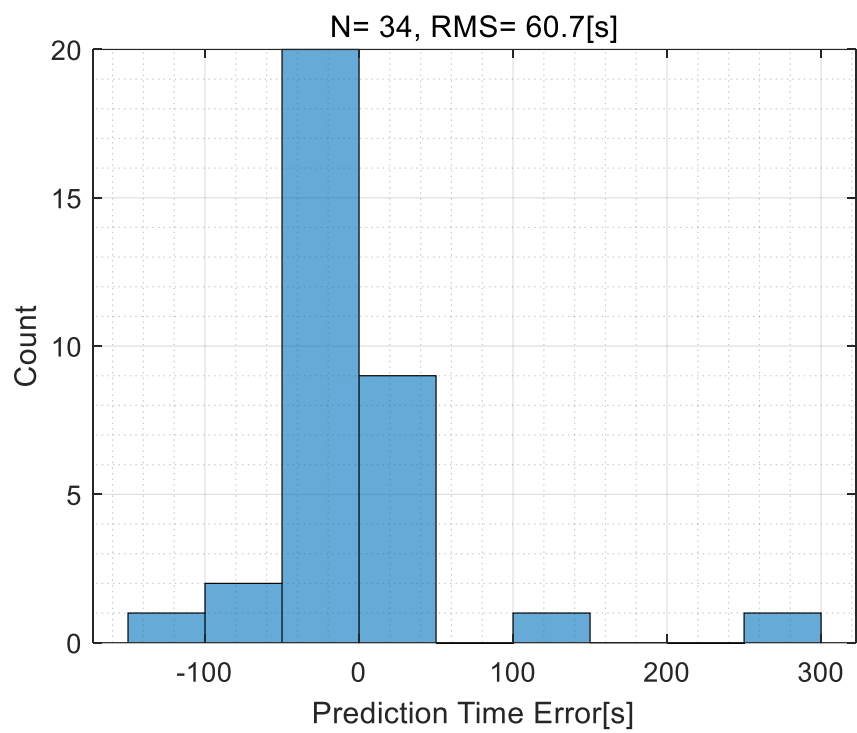
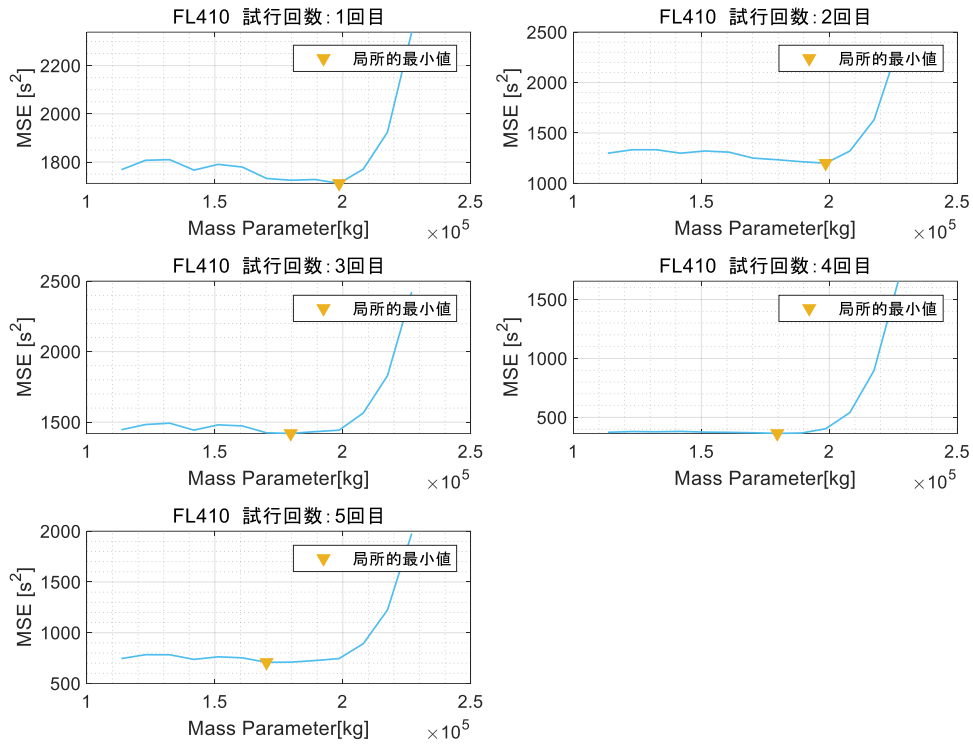


図 19 (case3)標準質量と最頻巡航高度を用いた予測結果（上：B788，下：B763）

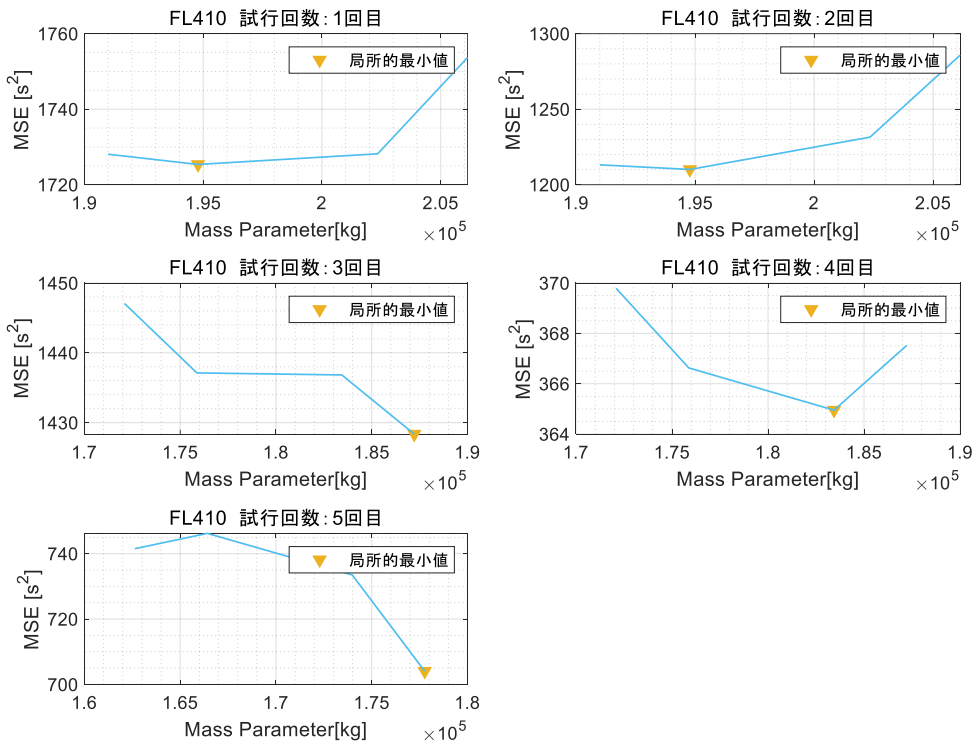
#### 4-3-2 (case4)最頻巡航高度を用いた質量推定による軌道予測

次に(case3)に対して質量推定を加えることによる軌道予測精度を評価する。質量推定は、飛行計画の予定巡航高度を用いることができないため、学習データの全便の質量を一律に推定する。そして、各便の実巡航高度での予測飛行時間が、各々の実飛行時間と一致するように質量を推定し、その平均値を質量の推定値とする。以下に評価方法をまとめる。解析対象便を 5:5 の割合で学習データとテストデータに分割し、学習データにおいて、実巡航高度を用いて質量推定を行う。その後求めた質量推定値と機種ごと最頻巡航高度を用いてテストデータで軌道予測を行い精度評価する。以上の一連の処理を機種ごとに 5 回行うことで、飛行時間予測誤差の不確かさの平均を評価する。

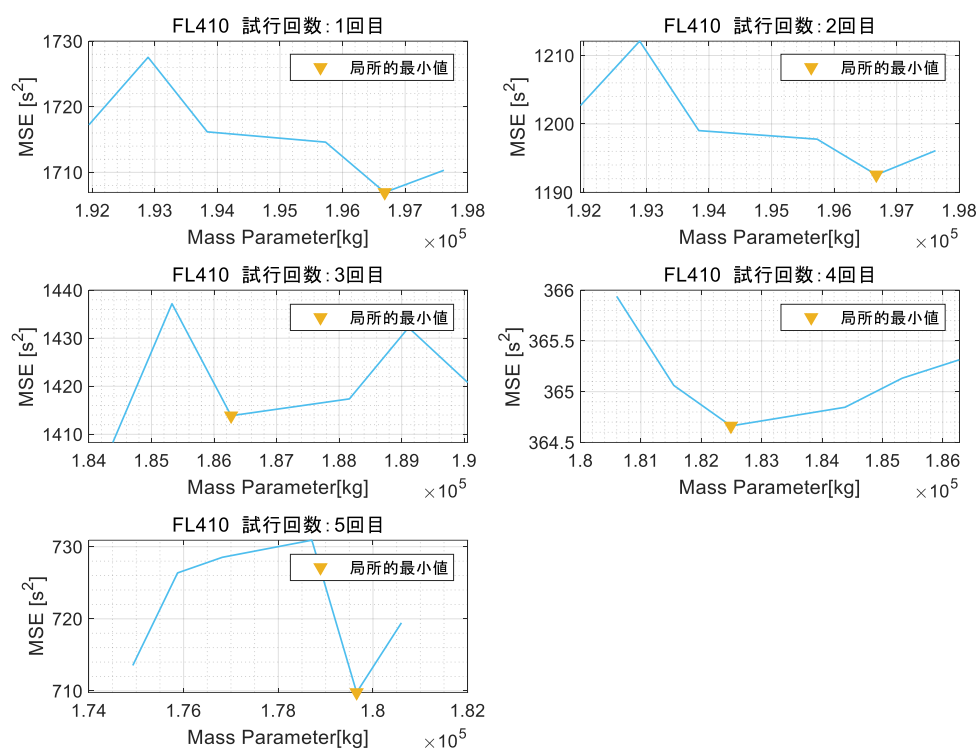
図 20、図 21 に学習データを用いた質量推定値とその軌道予測の不確かさの関係図を示す。図 22 にテストデータを用いた軌道予測結果を示す。



a. 質量推定値の近似(1 回目)



b. 質量推定値の近似(2 回目)



### c. 質量推定値の近似(3 回目)

図 20 (case4)試行回数別の質量推定値と予測誤差の MSE (B788)



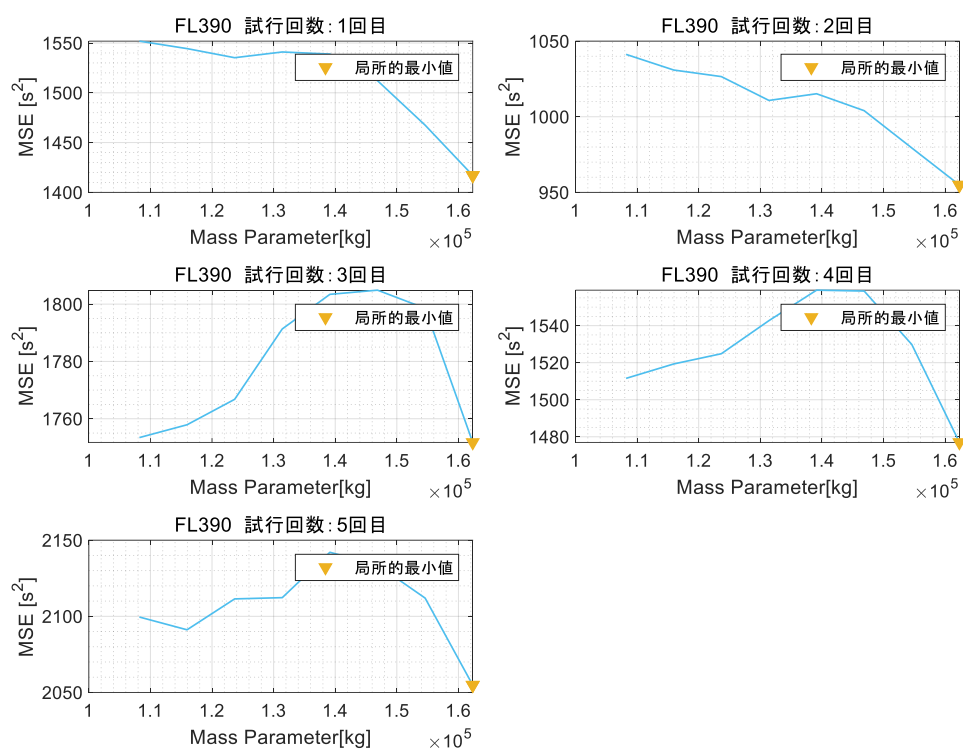


図 21 (case4)試行回数別の質量推定値と予測誤差の MSE (B763)

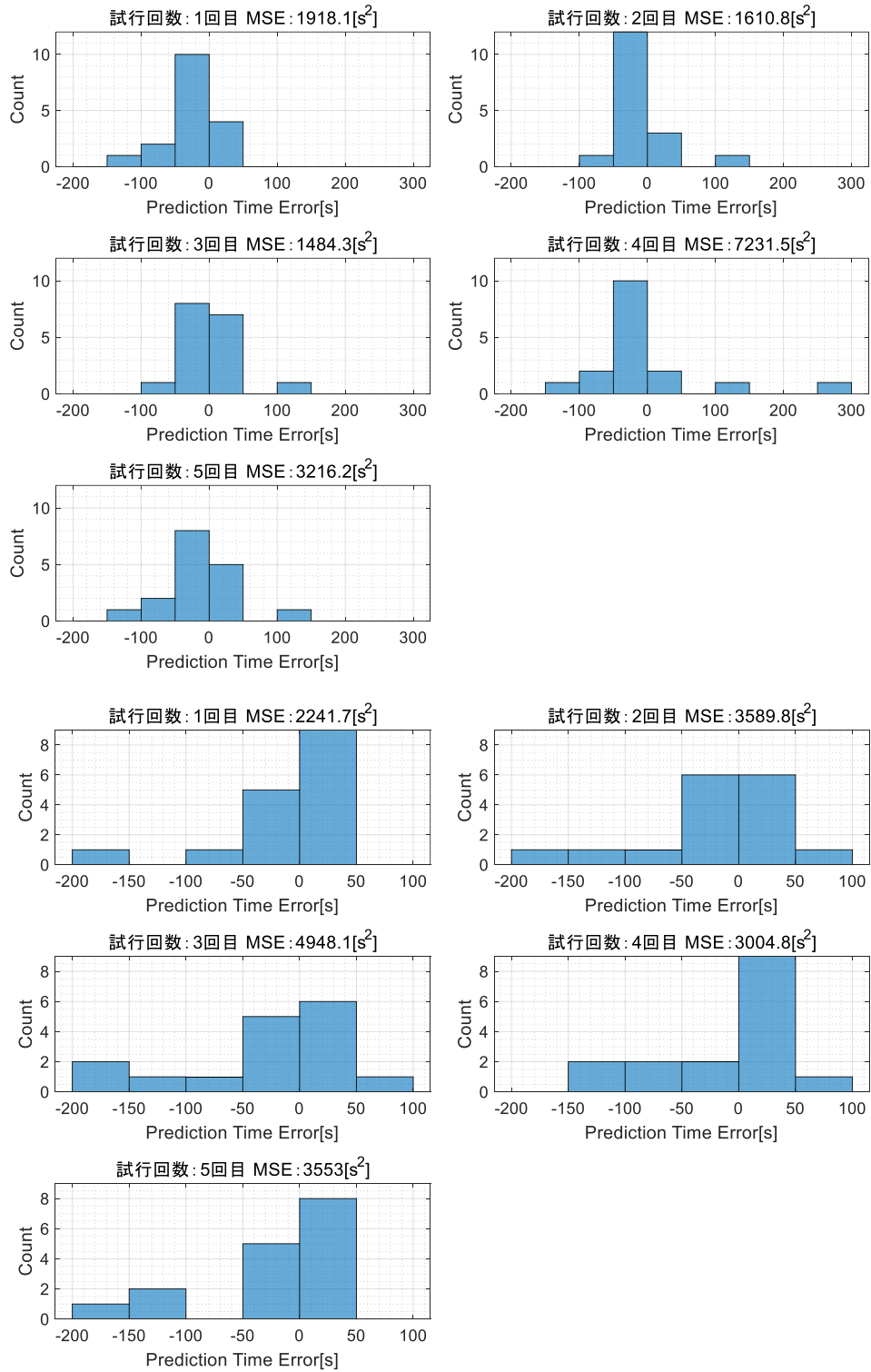


図 22 (case4)質量推定値と最頻値高度を用いた予測結果 (上 : B788, 下 : B763)

解析の結果、(case4)のテストデータの飛行時間予測誤差の RMS が 55.6[s]となり、(case3)の予測誤差の RMS が 60.7[s]であったことと比較すると、不確かさが減少していることがわかる。

実際の巡航高度を用いて質量推定を行った場合の軌道予測の不確かさが質量推定を行わない場合の不確かさよりも小さくなったことから、質量推定は軌道予測精度向上に貢献することが分かった。これは軌道予測の際に、実軌道ごとに実質量の標準質量からのばらつきを反映しているためだと考えられる。また表 3、表 4 の各機種の場合の(case2)の予測誤差の RMS と比較すると、(case4)の質量推定値と実巡航高度の軌道予測の方が、高精度な軌道予測ができていることも分かる。これは図 13 から分かる通り、実巡航高度が最頻巡航高度から大きくばらついているためであると考えられる。表 5、表 6 に(case3)と(case4)の軌道予測誤差の不確かさをまとめて示す。

表 5 (case3)と(case4)の軌道予測誤差の不確かさ(B788)

	RMS[s]	MSE[s <sup>2</sup> ]
(case3)	60.7	3684.6
(case4)	55.6	3092.2

表 6 (case3)と(case4)の軌道予測誤差の不確かさ(B763)

	RMS[s]	MSE[s <sup>2</sup> ]
(case3)	58.9	3469.2
(case4)	44.4	1970.3

## 第5章 飛行計画を最大限に利用した軌道予測及び評価

本章では飛行計画を最大限に利用することで、入手できるデータで得られる最高精度の軌道予測を行う。その後、巡航高度を完全に予測できた場合の理想的な場合として、飛行計画と実巡航高度を使用する場合の軌道予測精度を評価し、軌道予測精度の向上可能性を評価する。

### 5-1 (case5)飛行計画の予定巡航高度を用いた軌道予測

実績データを利用しない方法として、飛行計画に記載された巡航高度（以下予定巡航高度とする）を用いた軌道予測を評価する。ただし質量情報は得られないため標準質量を用いる。これは実運航の軌道予測で用いることができる手法である。解析対象便全便を用いて軌道予測を行った結果、RMS は B788 で 62.0[s]、B763 で 55.5[s]となった。

図 23 に飛行時間予測誤差のヒストグラムを示す。

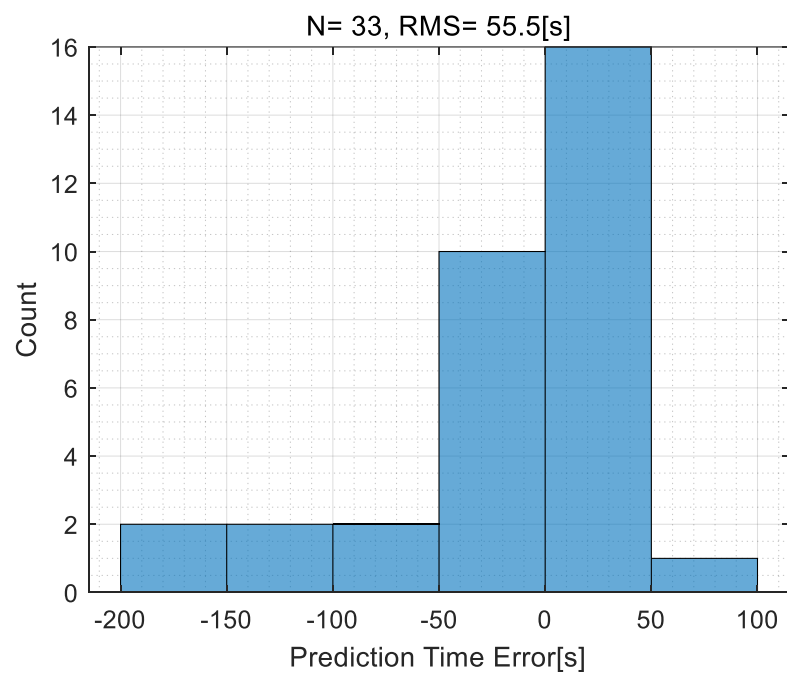
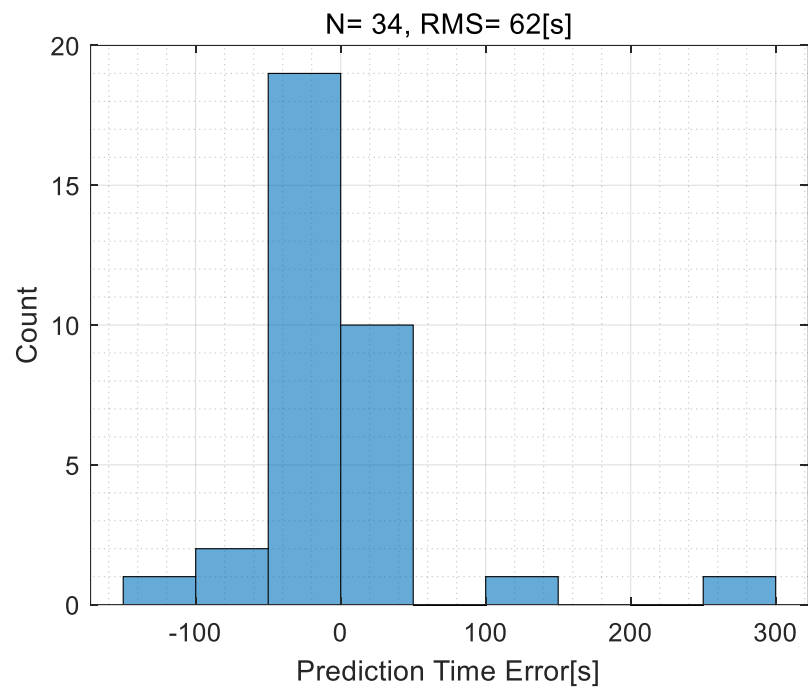


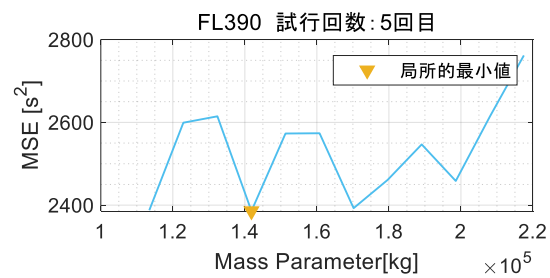
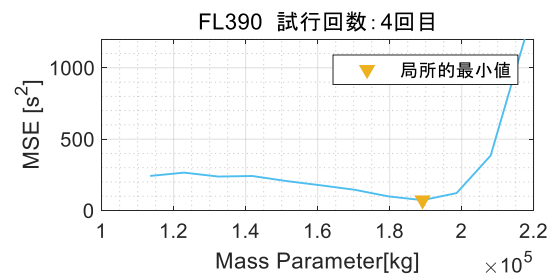
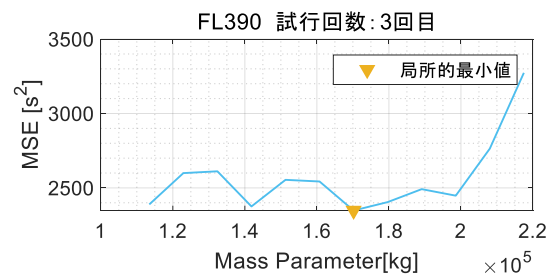
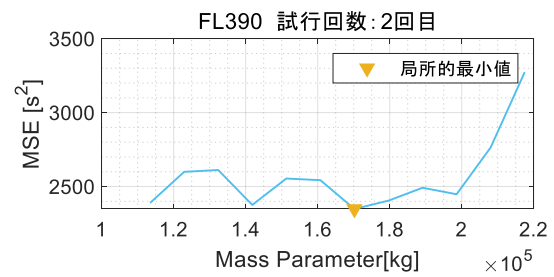
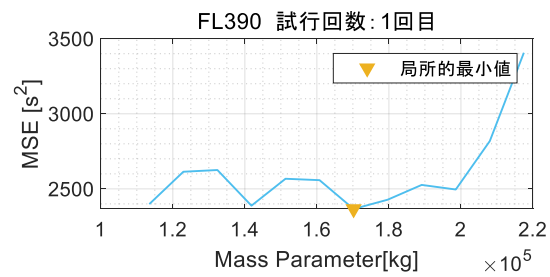
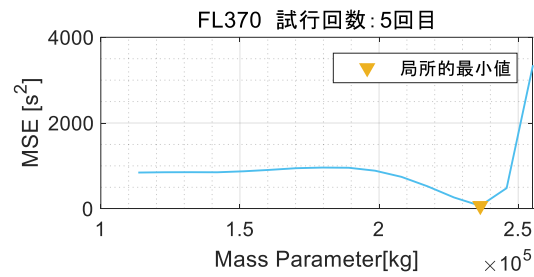
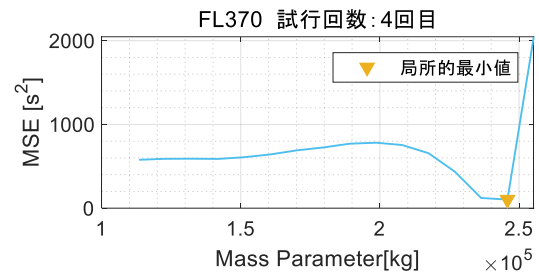
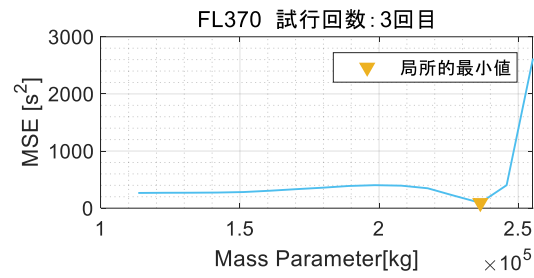
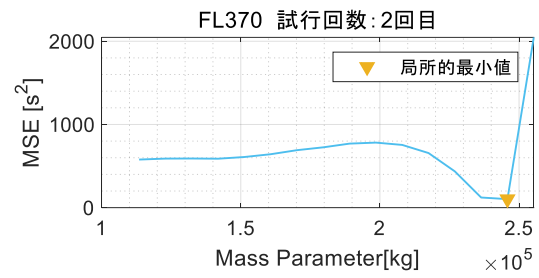
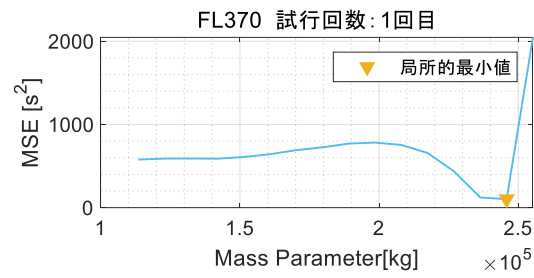
図 23 (case5)標準質量と予定巡航高度を用いた予測結果（上：B788，下：B763）

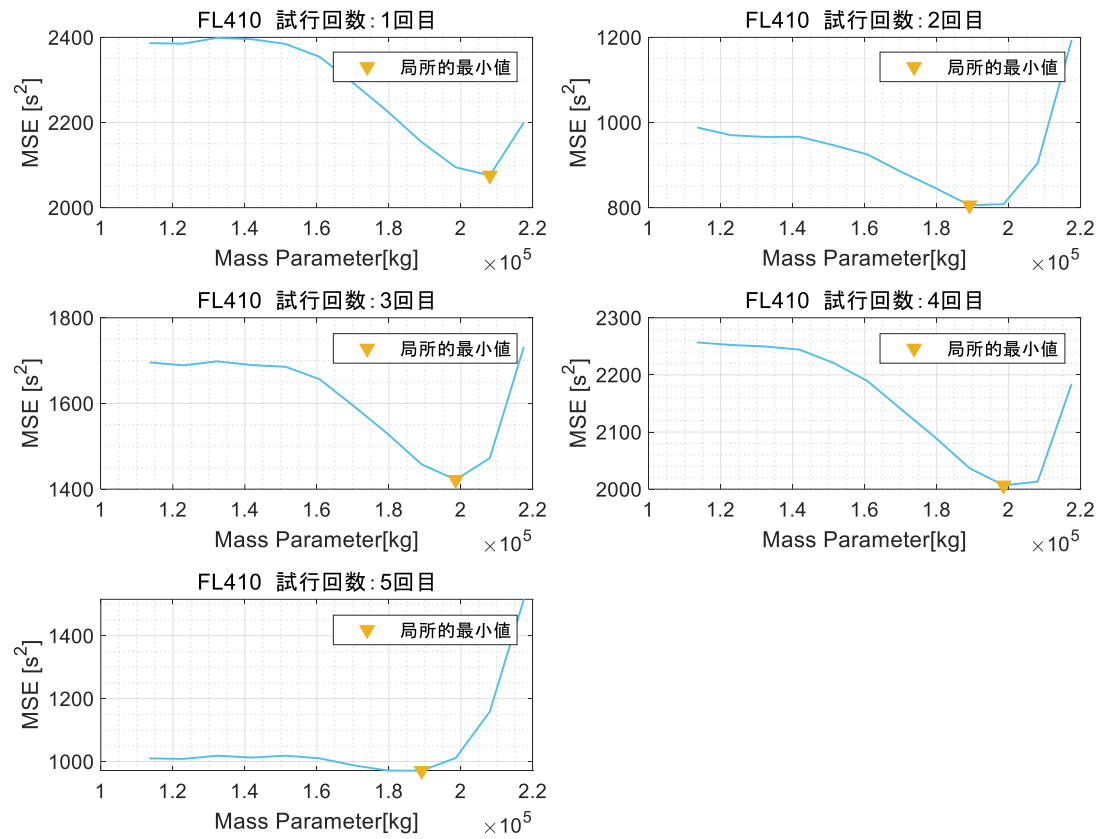
## 5-2 (case6) 予定巡航高度を用いた質量推定による軌道予測

(case5)に引き続き、飛行計画の予定巡航高度を用いることができる場合、飛行計画の巡航高度ごとに質量推定を行う。各軌道の予定巡航高度ごとに軌道をグループ化し、各グループ内の各軌道の予定巡航高度の予測飛行時間が、実飛行時間と一致するような質量値を求め、それらの平均として質量を推定する。そして推定した質量を用い、各軌道の予定巡航高度で軌道予測精度を評価する。実運航の予測で用いることができる最も高精度な予測になることが期待される。飛行計画の予定巡航高度別の便数は図 13 を参照されたい。

学習データを用いた質量推定段階においては、飛行計画の巡航高度ごとに軌道をグループ化し、各高度で質量推定を行う。また手元のデータで可能な限り高精度な軌道予測をするために、高度は実巡航高度を利用する。テストデータを用いた軌道予測評価段階では、以上で得られた予定巡航高度別の質量推定値を、テストデータの予定巡航高度と対応付け決定し、各軌道の予定巡航高度で軌道予測を行う。

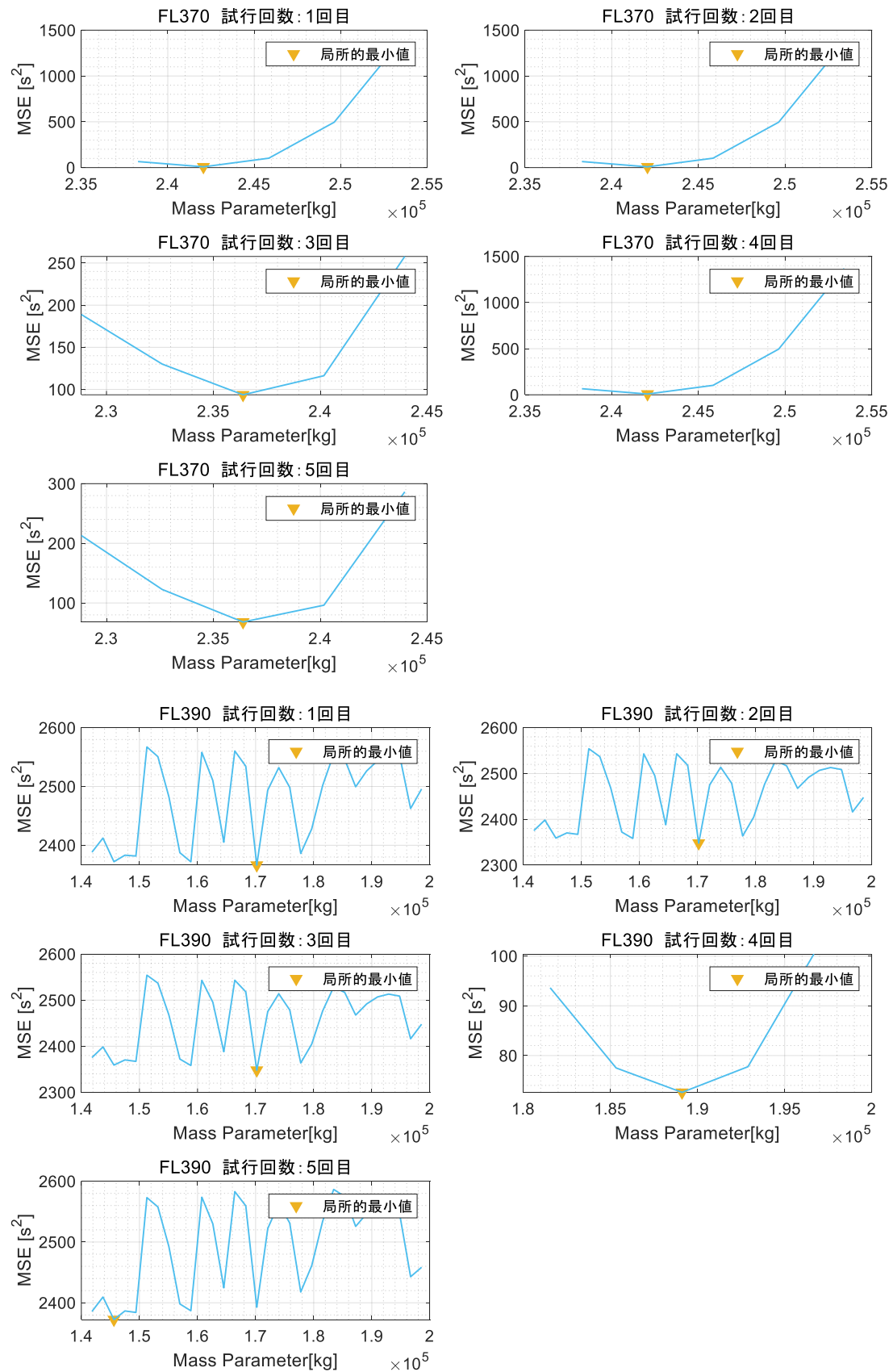
質量推定の結果を図 24、図 25 に示す。なお図 24.c について FL390 の場合については近似 1 回目と近似 2 回目の質量推定値がすべての試行回数で一致しており、FL370、FL410 については、質量推定値が近似 1 回目と近似 2 回目で一致している場合以外を図で示している。図 26 にテストデータを用いて質量推定値と予定巡航高度を用いた軌道予測結果を示す。

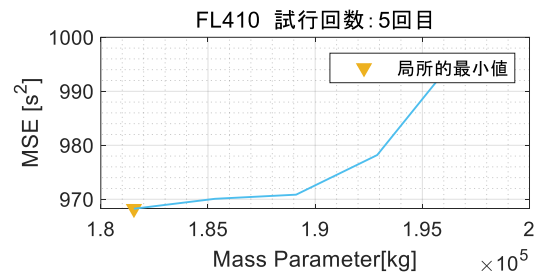
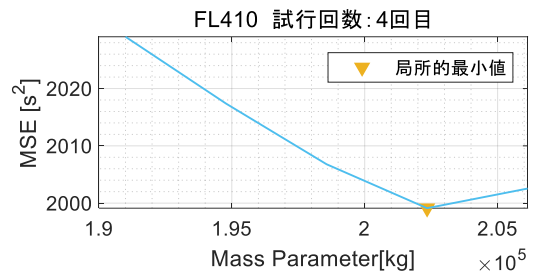
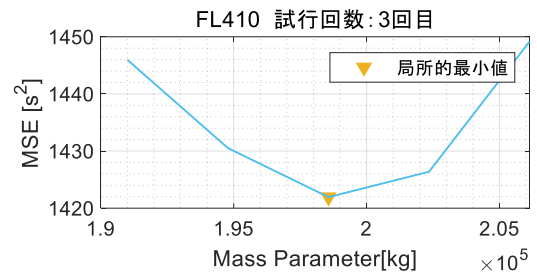
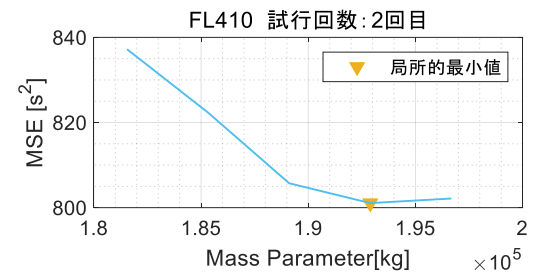
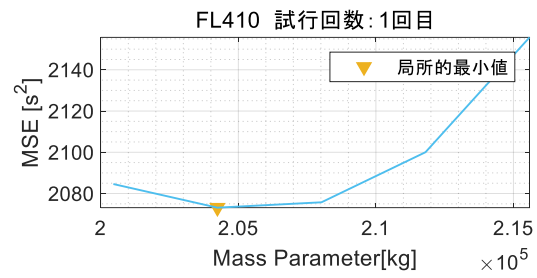




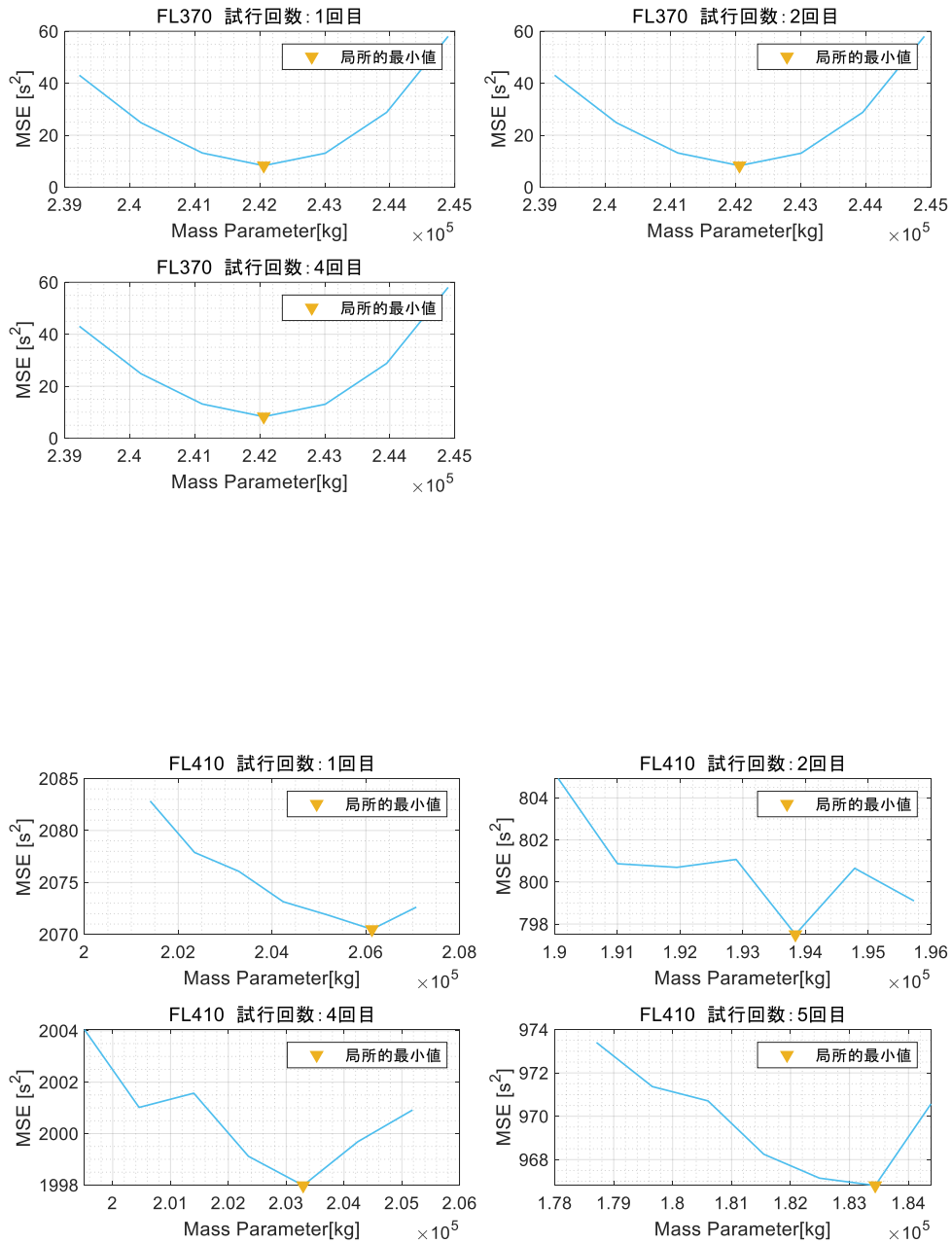
a. 質量推定値の近似(1回目)







b. 質量推定値の近似(2 回目)



c. 質量推定値の近似(3 回目)

図 24 (case6)予定巡航高度ごとの質量推定値 (B788)

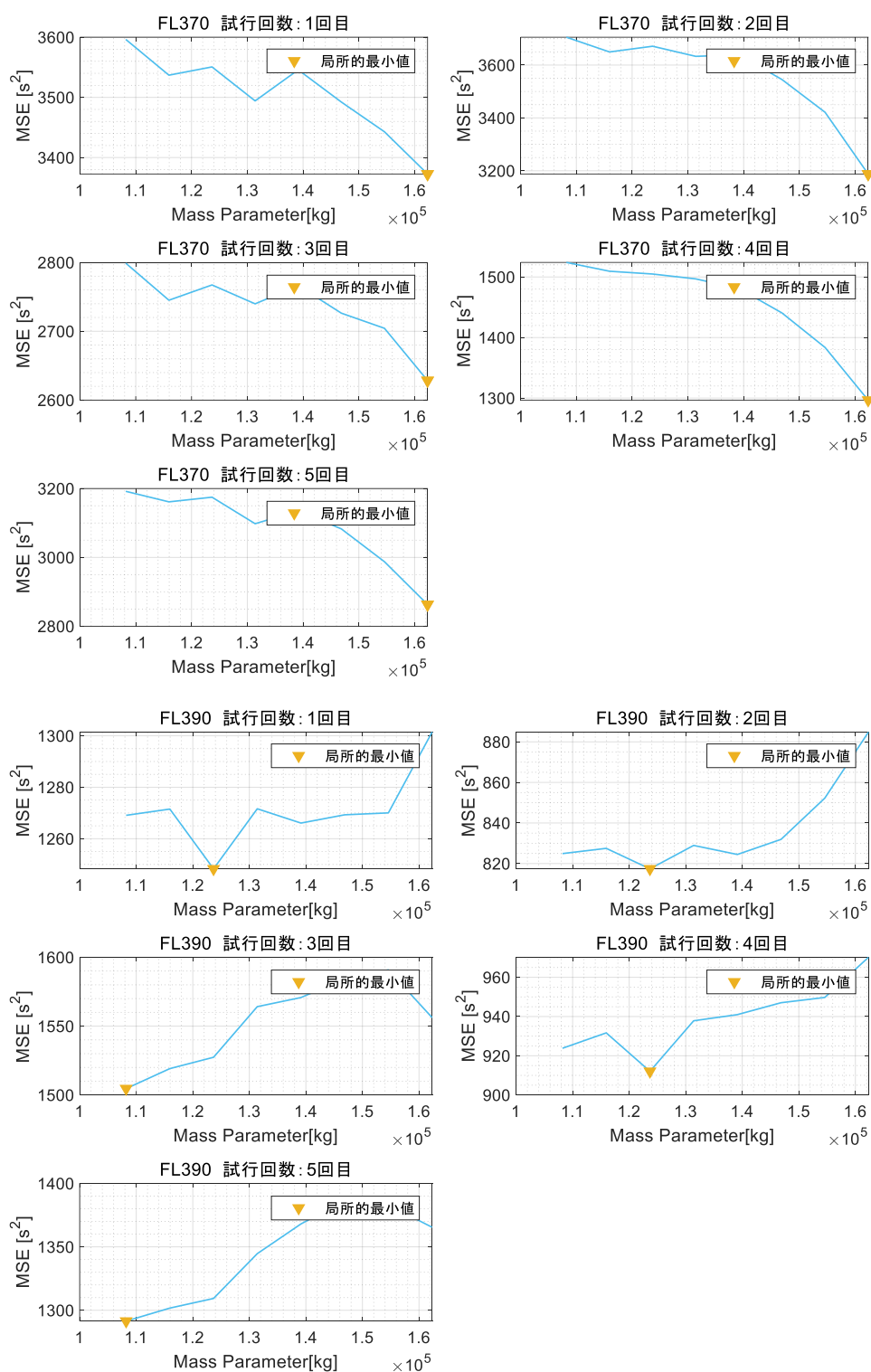


図 25 (case6)予定巡航高度ごとの質量推定値 (B763)

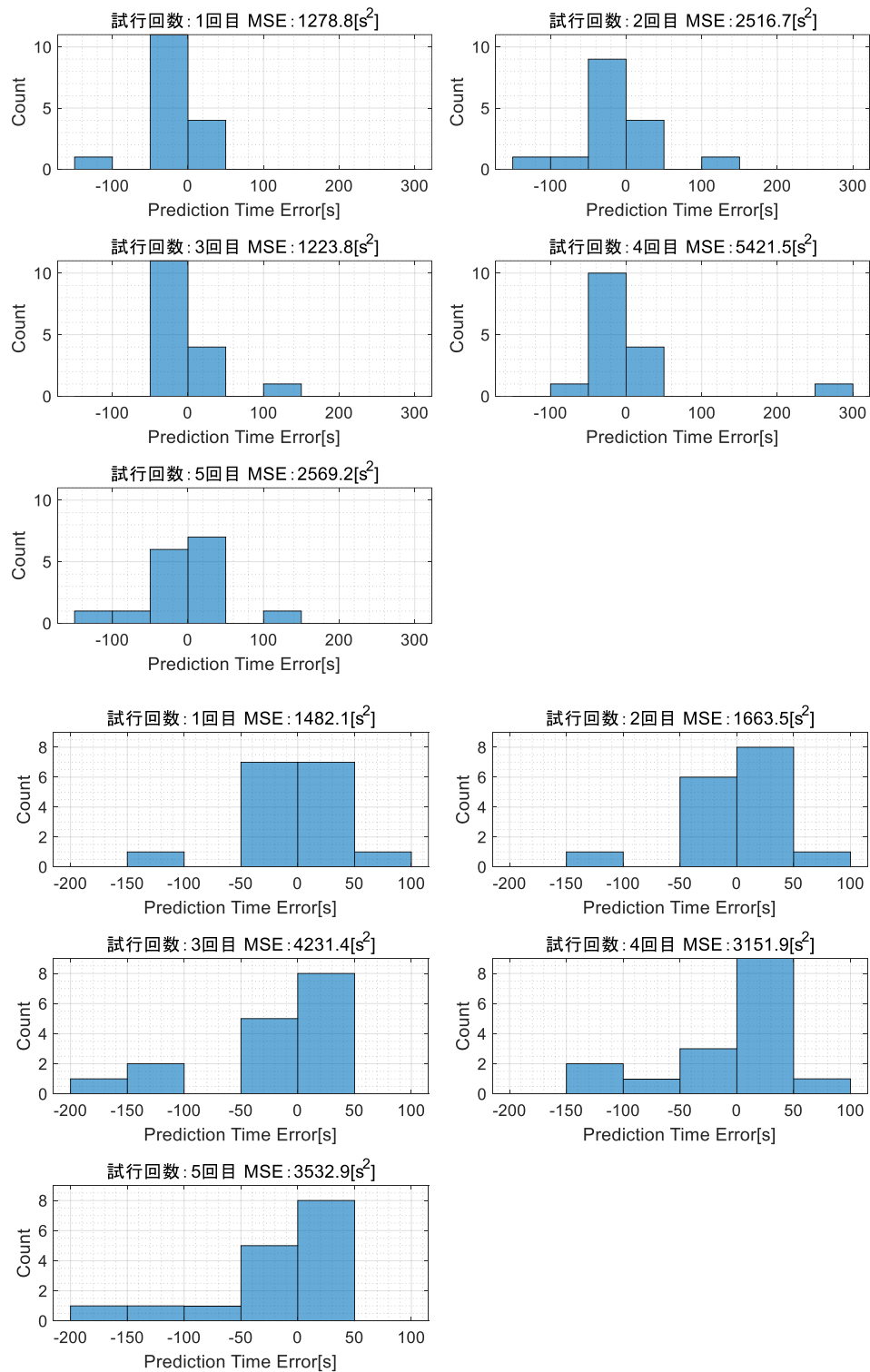


図 26 (case6)質量推定値と予定巡航高度を用いた予測結果 (上 : B788, 下 : B763)

(case5)での軌道予測精度は RMS で 62.0[s]であったのに対し、質量推定を行った際の軌道予測精度は RMS で 51.0 [s]となり不確かさが減少したことから、飛行計画の予定巡航高度別の質量推定を加えることで軌道予測精度をさらに向上させることが可能であることが分かった。表 7 (case5)と(case6)の軌道予測誤差の不確かさ(B788)表 7, 表 8 に機種ごとに(case5), (case6)の結果をまとめて示す。

表 7 (case5)と(case6)の軌道予測誤差の不確かさ(B788)

	RMS[s]	MSE[s <sup>2</sup> ]
(case5)	62.0	3842.0
(case6)	51.0	2602.0

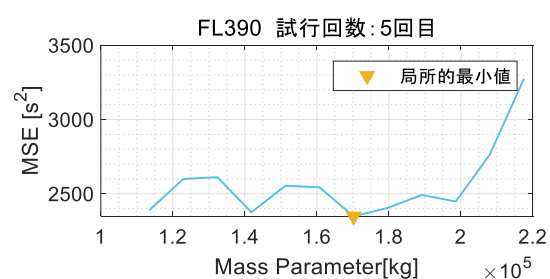
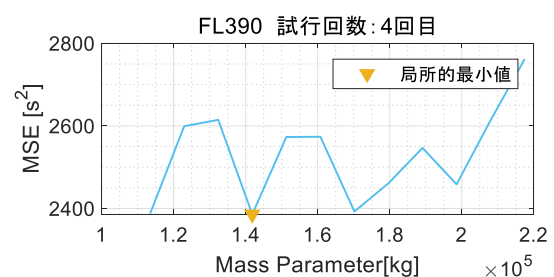
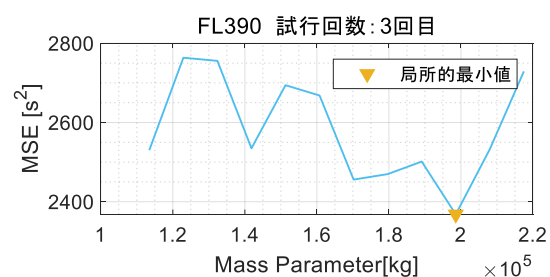
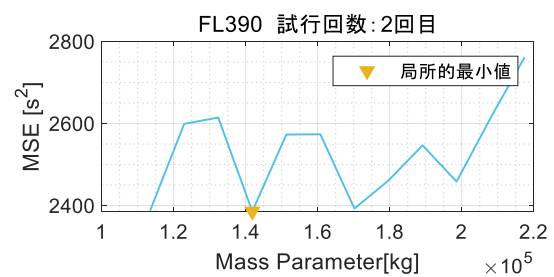
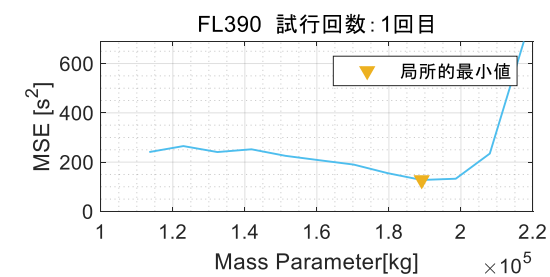
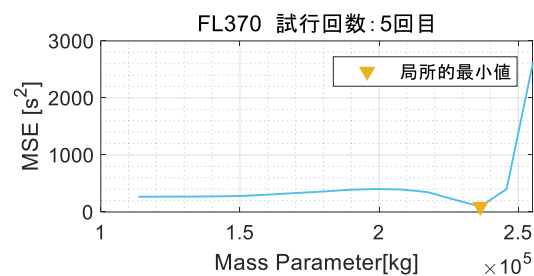
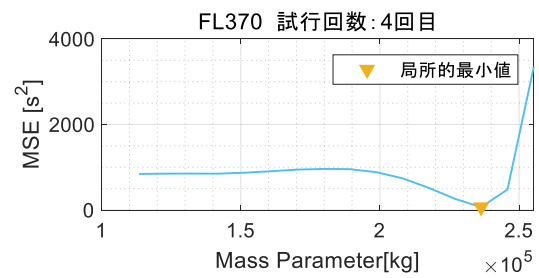
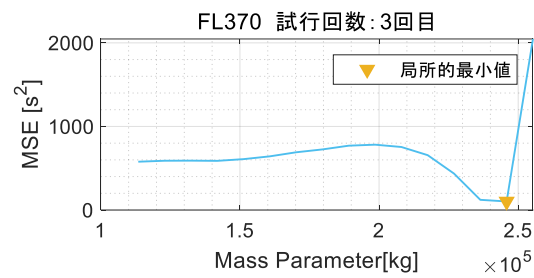
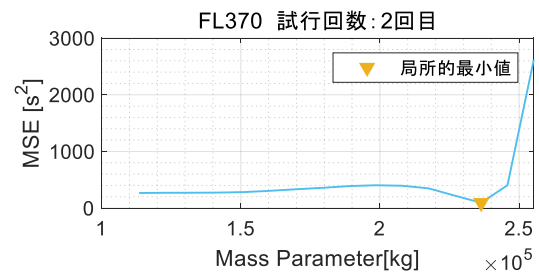
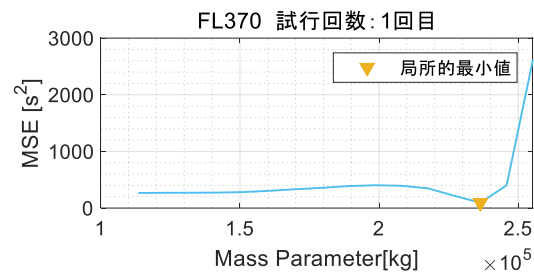
表 8 (case5)と(case6)の軌道予測誤差の不確かさ(B763)

	RMS[s]	MSE[s <sup>2</sup> ]
(case5)	55.5	3081.6
(case6)	53.0	2812.3

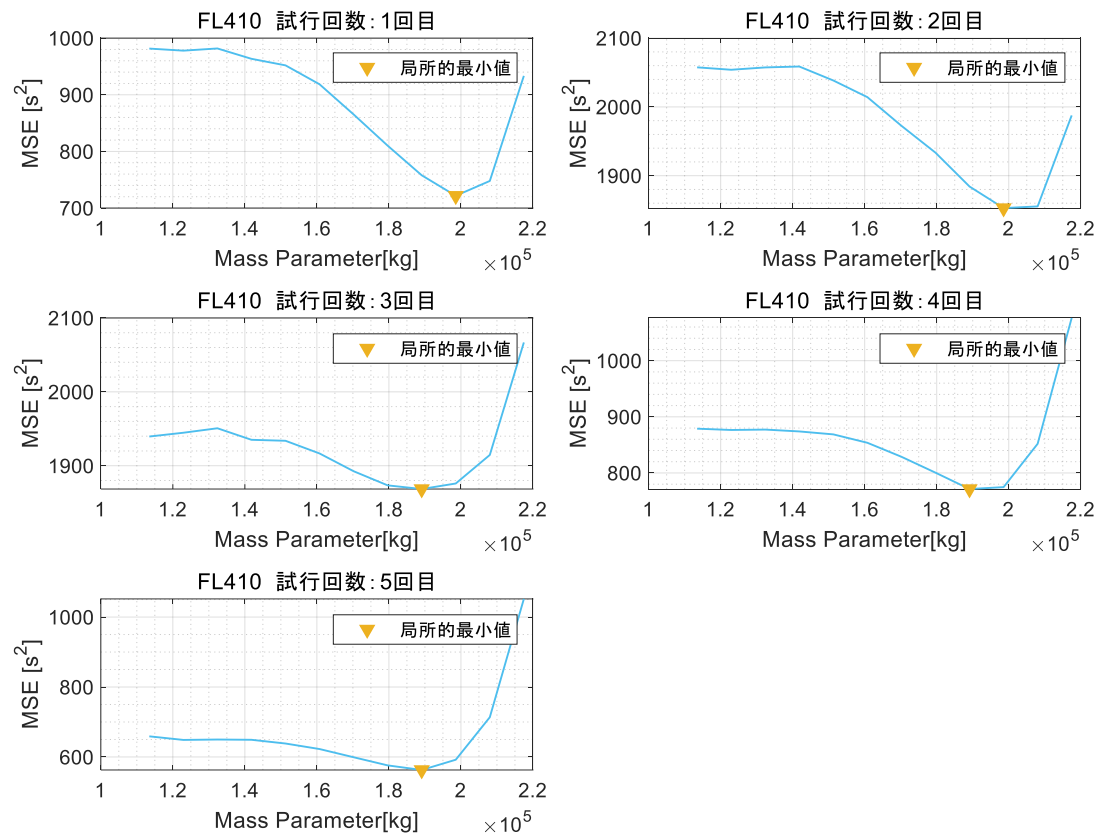
### 5-3 (case7) 予定巡航高度と実巡航高度を用いた軌道予測

次は(case6)の軌道予測手法を基に、(case7)では理想的に、実巡航高度が実際に利用できた場合を想定して軌道予測精度を評価する。質量推定については、(case6)同様に各軌道の予定巡航高度ごとに軌道をグループ化する。ただし、各グループ内の各軌道の実巡航高度の予測飛行時間が実飛行時間と一致するような質量を求め、それらの平均として質量を推定する。そして推定した質量を用いて、実巡航高度で軌道予測を行う。これは、予定巡航高度が完全に予測できた場合の軌道予測を行うことと同じ意味として捉えることができる。

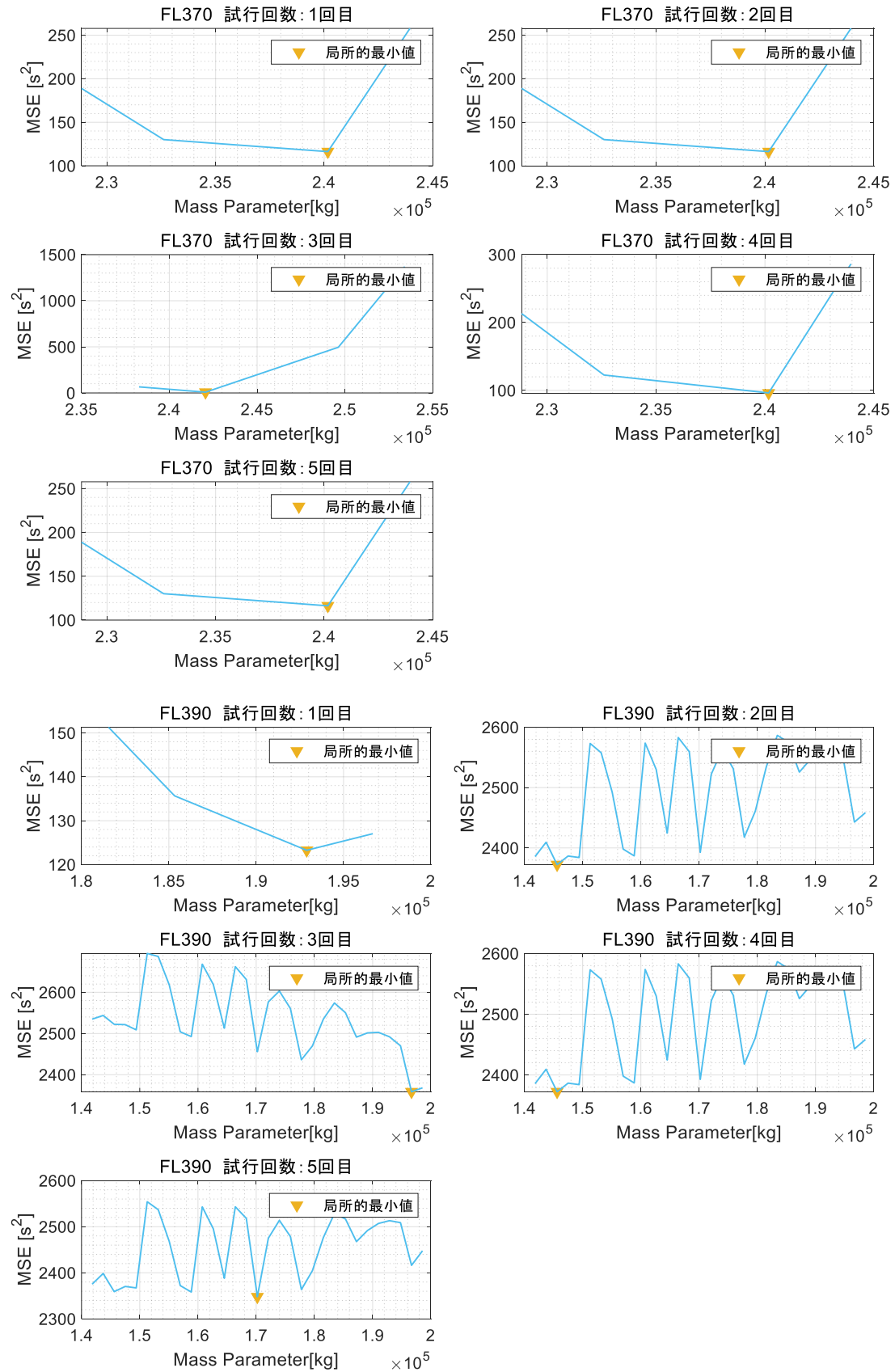
(case6)と同様に、学習データとテストデータを 5:5 で分割し各軌道の予定巡航高度別に質量推定を行うが、テストデータを用いた軌道予測については、予定巡航高度ではなく実巡航高度を用いるため、テストデータの質量推定値は、予定巡航高度別の質量推定値と、実巡航高度と対応付けることで得る。質量推定の結果を図 27、図 28 に示す。また軌道予測の結果を図 29 に示す。B763 の質量推定の結果については近似処置を行う前の図のみを示している。図 27c において、FL390 は試行回数 2~5 回目については、質量推定を 1% 近似で打ち切ったため試行回数 1 回目のみの図を示す。

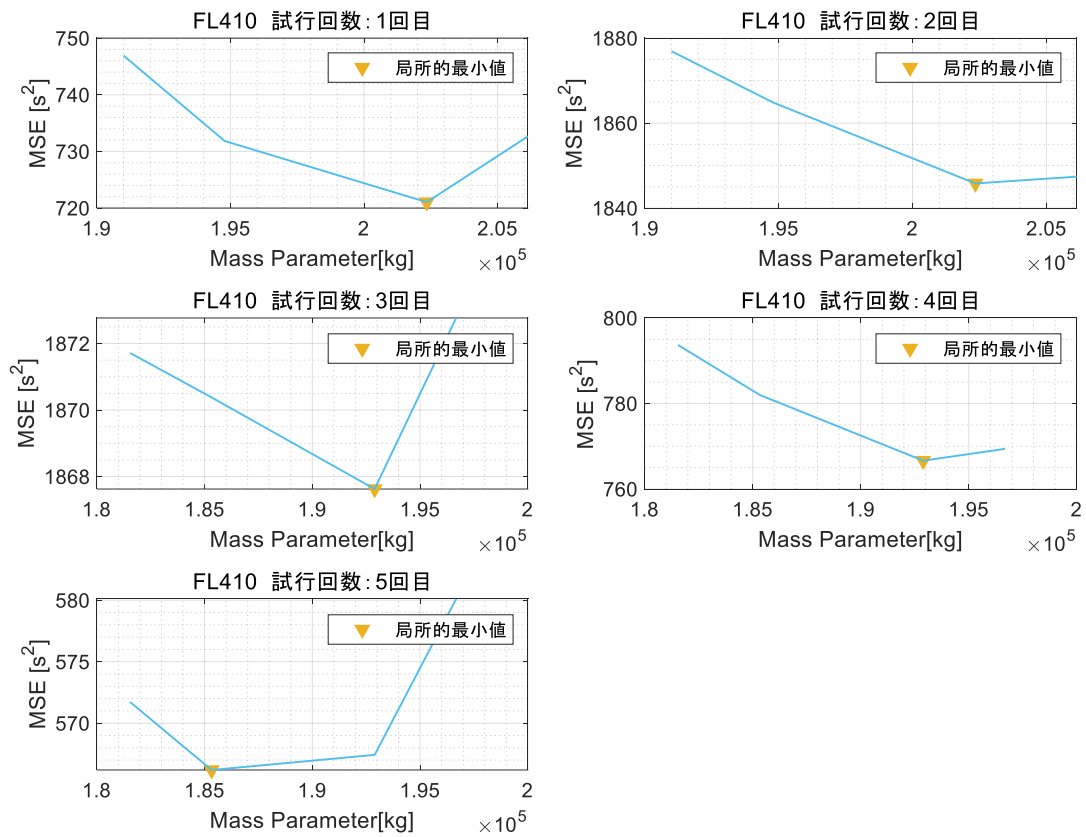




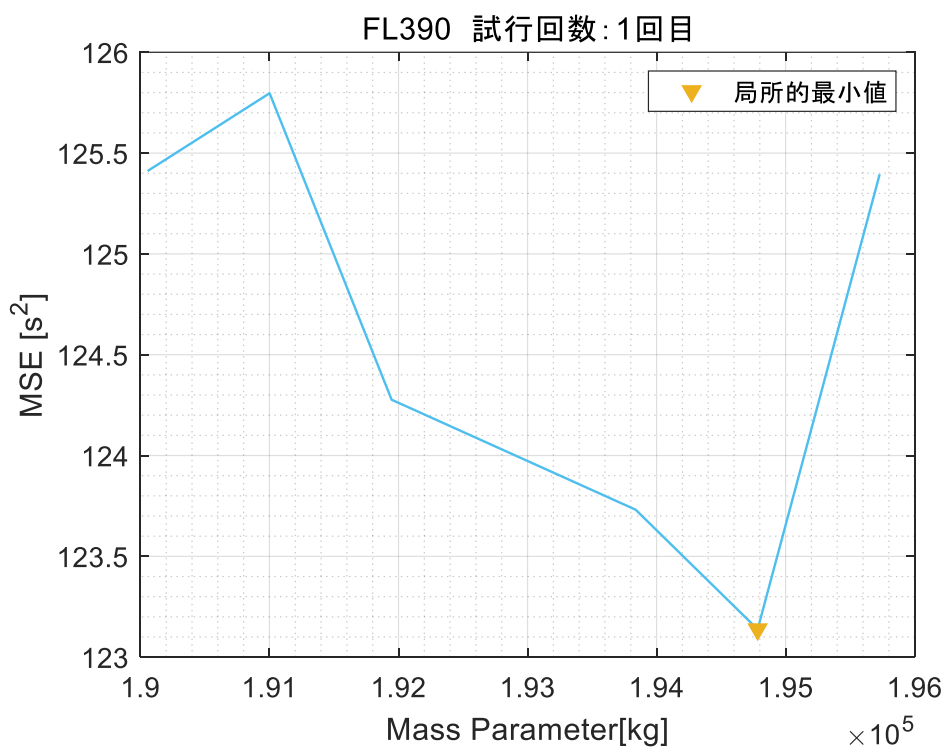
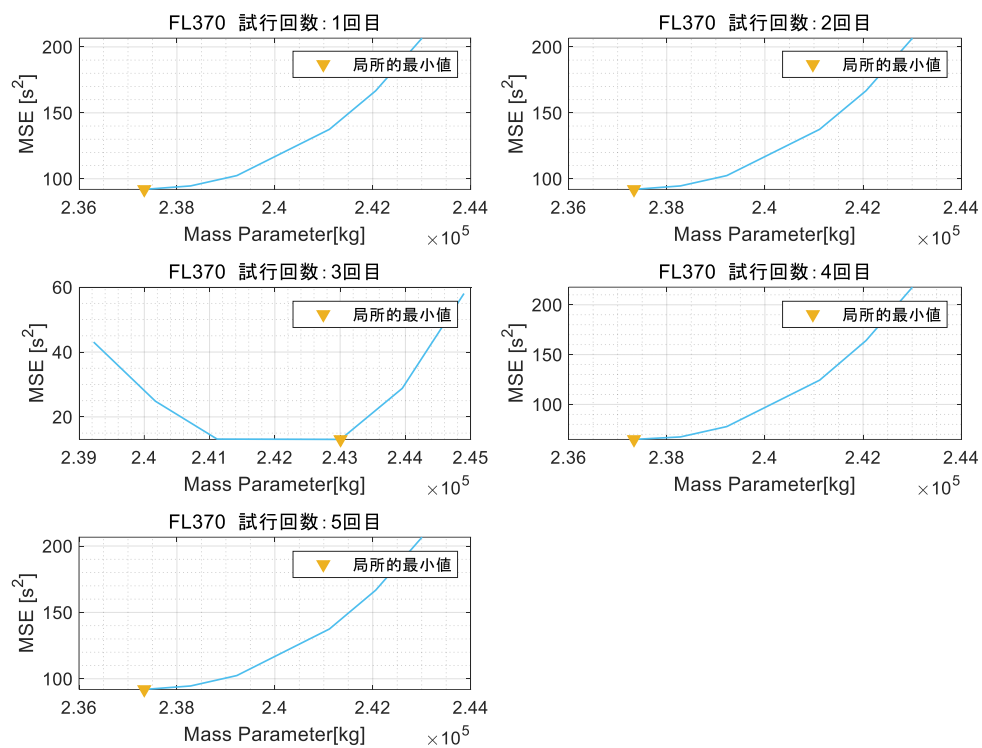


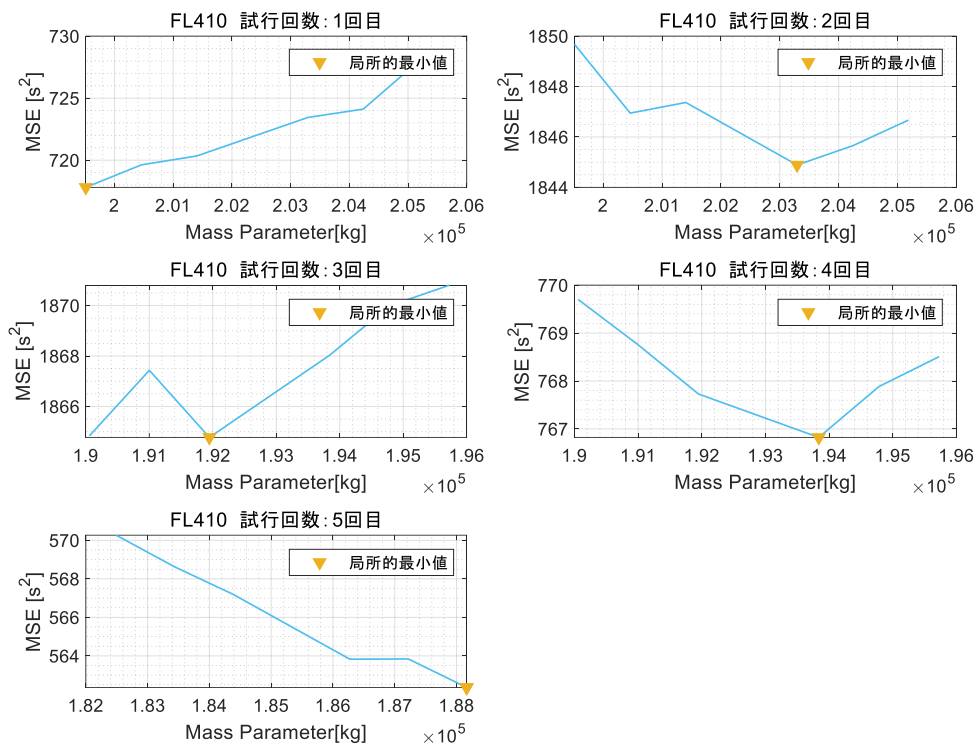
a. 質量推定値の近似(1 回目)





b. 質量推定値の近似(2 回目)





c. 質量推定値の近似(3 回目)

図 27 (case7)予定巡航高度ごとの質量推定値 (B788)

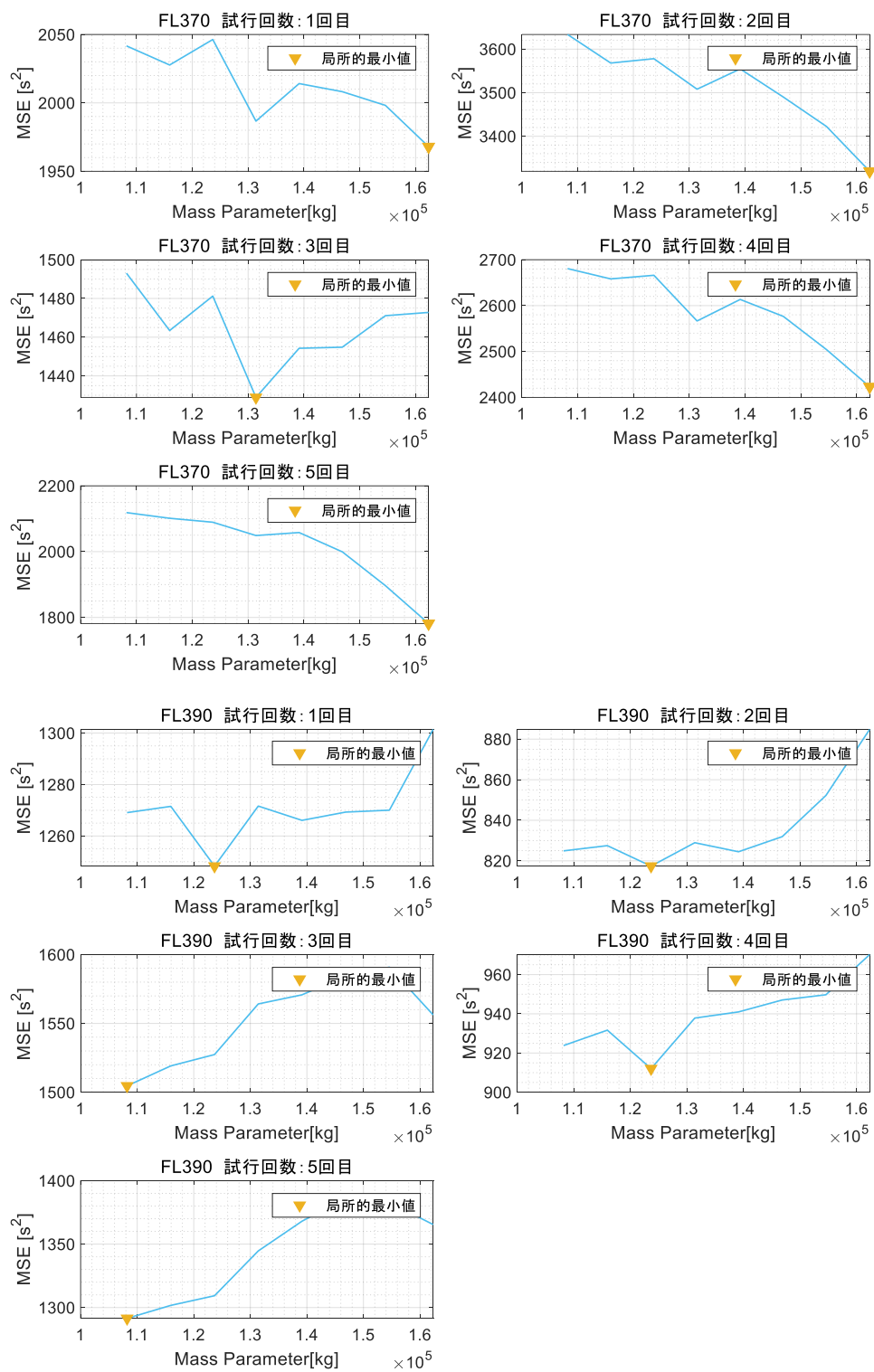


図 28 (case7)予定巡航高度ごとの質量推定値 (B763)

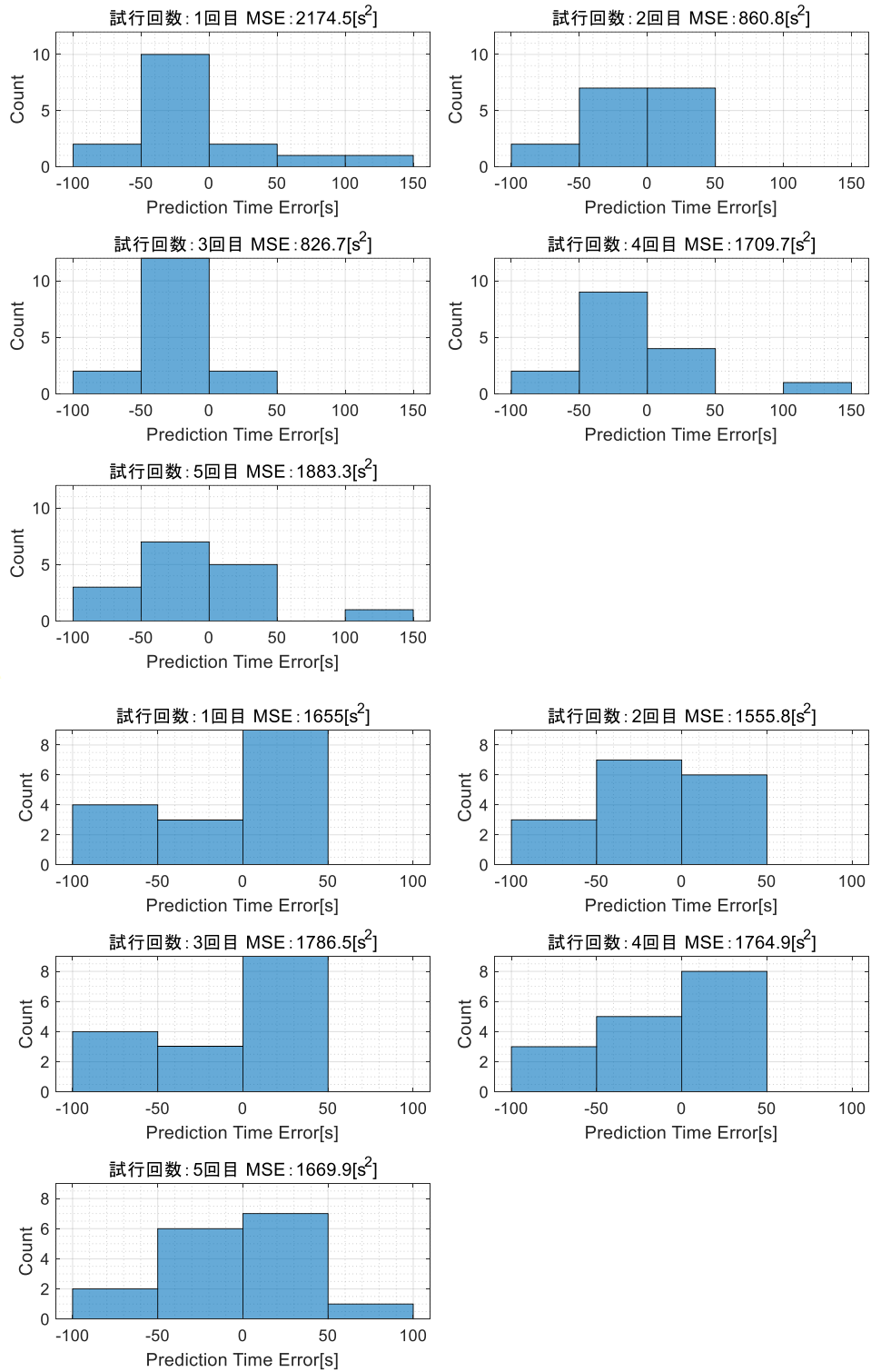


図 29 (case7)質量推定値と実巡航高度を用いた予測結果 (上: B788, 下: B763)

軌道予測の結果，飛行時間予測誤差の RMS は B788 で 38.6[s]，B763 で 41.1[s]となり，(case6)の予測誤差の RMS と比較すると，不確かさが減少することから将来，巡航高度の高精度な予測ができれば予測精度は向上できることが分かる．表 9，表 10 に機種ごとの (case5),(case6),(case7)の軌道予測の不確かさをまとめて示す．

表 9 (case5),(case6),(case7)の予測誤差の不確かさ (B788)

	RMS[s]	MSE[s <sup>2</sup> ]
(case5)	62.0	3842.0
(case6)	51.0	2602.0
(case7)	38.6	1491.0

表 10 (case5),(case6),(case7)の予測誤差の不確かさ (B763)

	RMS[s]	MSE[s <sup>2</sup> ]
(case5)	55.5	3081.6
(case6)	53.0	2812.3
(case7)	41.1	1686.4



## 第 6 章 結言

将来の航空交通管理手法として計画されている軌道ベース運用では、航路の特定の位置における航空機の通過時刻を正確に管理する必要がある、可能な限り高精度な軌道予測をすることが重要となる。本研究では、軌道の実績データを用いた質量推定及び飛行計画の巡航高度情報を最大限活用した場合の軌道予測精度について評価を行った。まず、実績データを基に行った質量推定を行った結果、予定巡航高度、実巡航高度ごとに軌道をグループ化して高度別に推定した場合、質量推定を行うことで軌道予測精度が向上することを明らかにした。また推定質量に加えて、飛行計画の巡航高度を使用した場合と実巡航高度を使用した場合の予測精度を比較した結果、将来、巡航高度の高精度な予測ができれば軌道予測精度の更なる向上が可能であることを明らかにした。

## 参考文献

- 1) 航空局, “将来の航空交通システムに関する長期ビジョン(CARATS)”, 将来の航空交通システムに関する研究会, 2010
- 2) “User Manual for the Base of Aircraft Data (BADA) Revision 3.15” EUROCONTROL EXPERIMENTAL CENTRE
- 3) R. Alligier, et al., Transportation Research Part C, 2013.
- 4) J. Sun, et al., 7th ICRA, 2016.
- 5) Y. Chati, et al., Journal of Air Transportation, 2018.
- 6) 芹田, 武市他, 日本航空宇宙学会論文集, 2020.
- 7) 気象庁, <http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/whitep/1-3-6.html>

## 謝辞

本研究を遂行するにあたり、指導教員である武市昇教授には研究内容に関する助言や、研究方針の相談など、多くの助力をしていただきました。心より感謝申し上げます。

また、同研究室の先輩である櫻井さんや、学部時代からの同期である水津君、青木君、吉野君、そして修士 1 年生や、学部生の皆さんにはいつも心の支えとなっていました。深く感謝申し上げます。

最後に、これまで学業に専念できたのは、生活面を支え応援し続けてくれた家族の存在があったからこそだと思います。深く感謝申し上げます。