



# 定点通過時刻予測のための 最適軌道に基づく軌道予測手法

CARATSオープンデータ活用促進フォーラム  
令和元年11月27日, 東京

原田 明德 (高知工科大学)

武市 昇 (首都大学東京)

# 発表構成

## 1. はじめに

- 研究の背景と目的

## 2. 軌道最適化に基づく軌道予測

- 定点通過時刻予測精度の評価方法
- 上昇フェーズにおける機体質量の推定
- 飛行軌道最適化

## 3. 定点通過時刻予測精度の評価結果

## 4. まとめ

# 研究の背景

## 時間管理を導入した軌道ベース運用

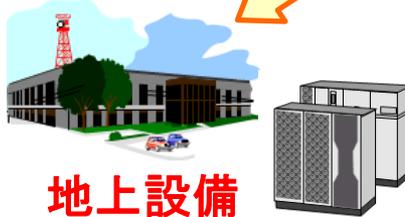
### 軌道ベース運用(TBO)

日本の飛行情報区を一つの大きな空域とみなし、出発から到着までを一体的に管理

福岡飛行情報区 (FIR)

国土交通省ホームページ [http://www.mlit.go.jp/koku/15\\_bf\\_000339.html](http://www.mlit.go.jp/koku/15_bf_000339.html) より

データリンク



地上設備

国土交通省ホームページ [http://www.mlit.go.jp/koku/15\\_bf\\_000355.html](http://www.mlit.go.jp/koku/15_bf_000355.html) より

定点の通過時刻が事前に予測可能

過密エリアにおける混雑を予測可能

通過時刻を再設定(速度で制御)することで**混雑・遅延の改善**につながる。

10:20

### 期待される効果

- TBOによるメリット: 空域や高度などによる制限を可能な限り排し、各々の機体が性能や気象条件を最大限に考慮することで**運航効率が向上**
- 交通流を考慮した時間管理によるメリット: **混雑や遅延の改善**, **空域全体の容量が拡大**

# 研究の目的

我が国の交通流管理システムの構築に貢献するため、地上において定期便の軌道を予測し正確な定点通過時刻を与える解析ツールを確立する。

## 目指すべきポイント

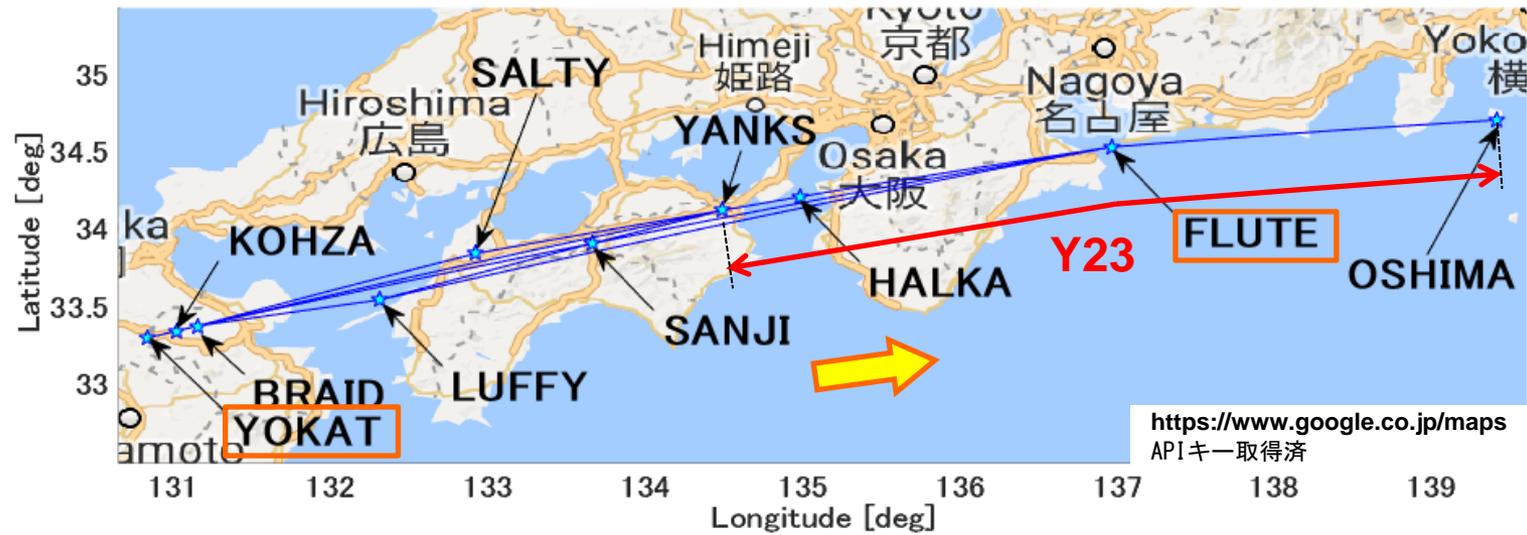
- 地上において、飛行管理システムFMSの軌道を上昇から降下まで連続的に精度よく再現する能力を有する。
- 飛行前に決まるCost Index (CI), 飛行ルート, 機体重量を入力すれば高度と速度の軌道が決定され定点通過時刻を精度よく予測することができる。

## 本研究の内容

- 所定の飛行ルートを一定の巡航高度で飛行する便に対し、最適軌道に基づく軌道予測を適用し、実際の飛行時間との差から定点通過時刻の予測精度を評価する。
- 上昇フェーズの軌道予測の精度の問題<sup>1,2)</sup>に対し、BADAの低減上昇パワーモデルを用いて上昇時の機体質量を推定することで予測精度の改善を図る。

1) Alligier, R., Predictive Distribution of the Mass and Speed Profile to Improve Aircraft Climb Prediction, ATM seminar 2019.  
2) Thipphavong, D.P., "Top-of-Climb Matching Method for Reducing Aircraft Trajectory Prediction Errors," Journal of Aircraft, Vol. 53, No. 5, 2016, pp. 1211–1223.

# 軌道予測解析に用いる実運航データ



## CARATS Open Data2016の概要

データ期間	2016年 5,7,9,11月の各月1週間分
	2017年 1,3月の各月1週間分
対象	計器飛行方式による定期運航便
データ項目	時刻, 仮想便名, 緯度, 経度, 高度, 型式
データ周期	約10秒
ソース	RDPデータ(4つの航空交通管制部) ARTSデータ(羽田空港) ODPデータ

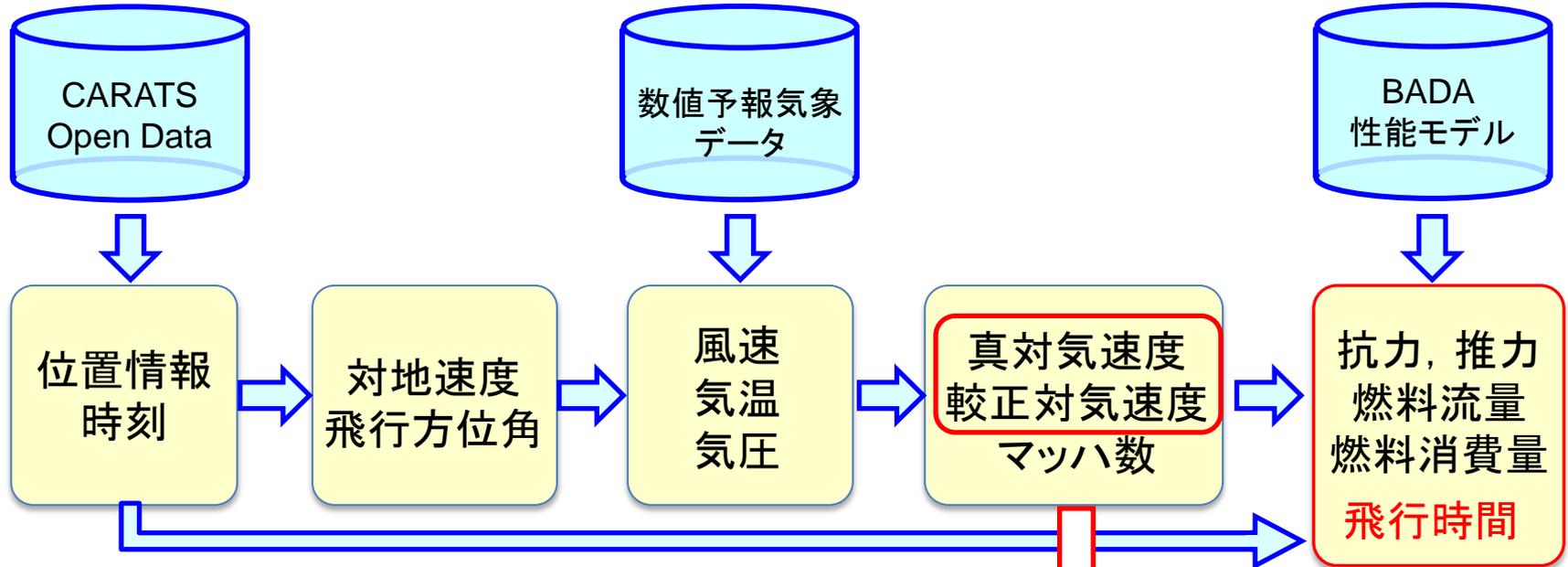
## 解析対象とする便数

条件	YOKAT-FLUTE間において、 経路延伸および高度変更なし			
	A320	B738	B763	B772
2016年5月 9, 12, 15日	18	25	20	41
2017年1月 9, 12, 15日	20	32	20	38

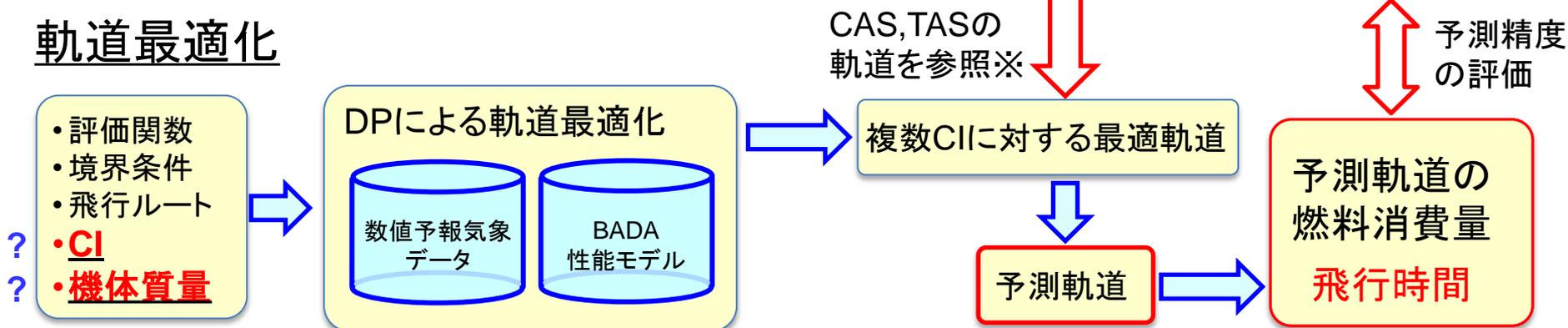
⇒ 合計214便

# 定点通過時刻予測精度の評価方法

## 飛行状態推定



## 軌道最適化

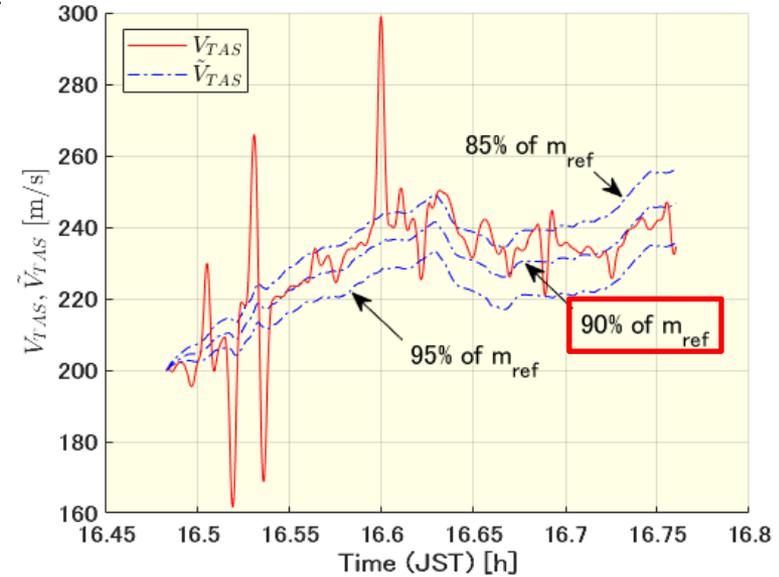
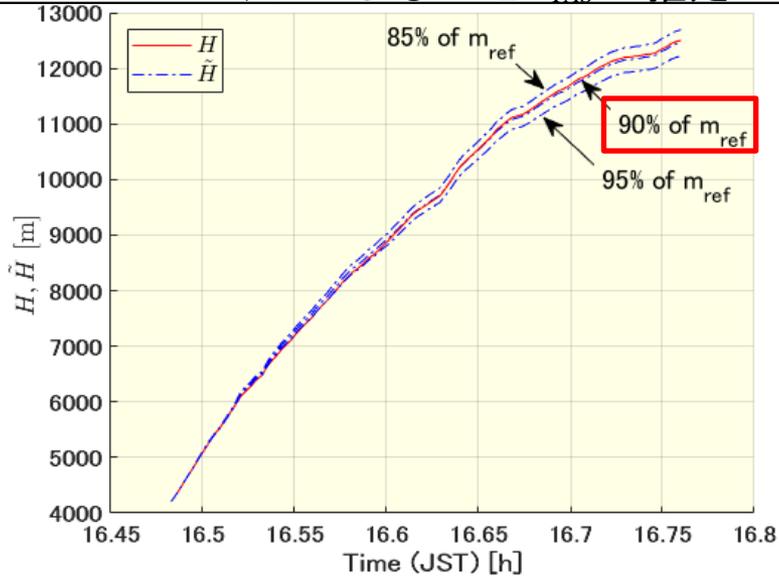


※予測軌道の決定指標:

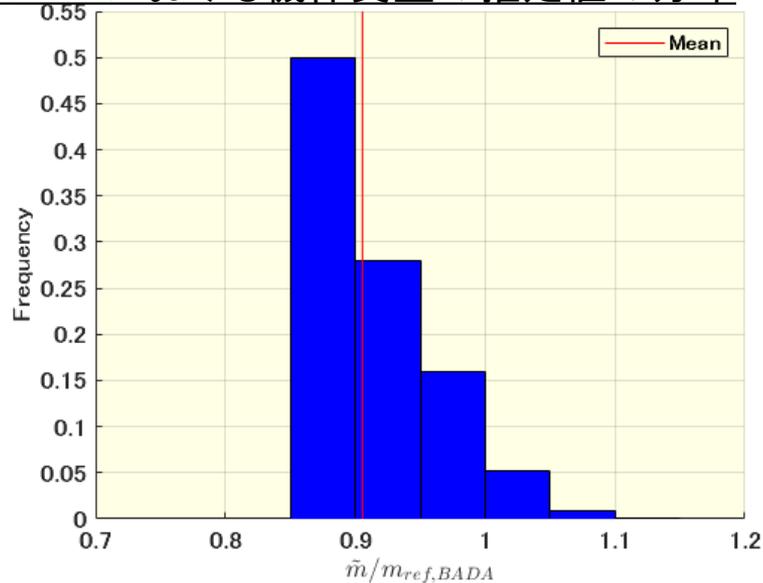
$$a_{pred} = \arg \min_{a \in \{a_0, a_1, \dots, a_n\}} \left[ \|V_{CAS} - V_{CAS_{opt}}(a)\|_2 + \|V_{TAS} - V_{TAS_{opt}}(a)\|_2 \right]$$

# 機体質量の推定 (BADA低減上昇パワーRCPモデル)

## BADA RCPモデルによる $H$ と $V_{TAS}$ の推定の一例



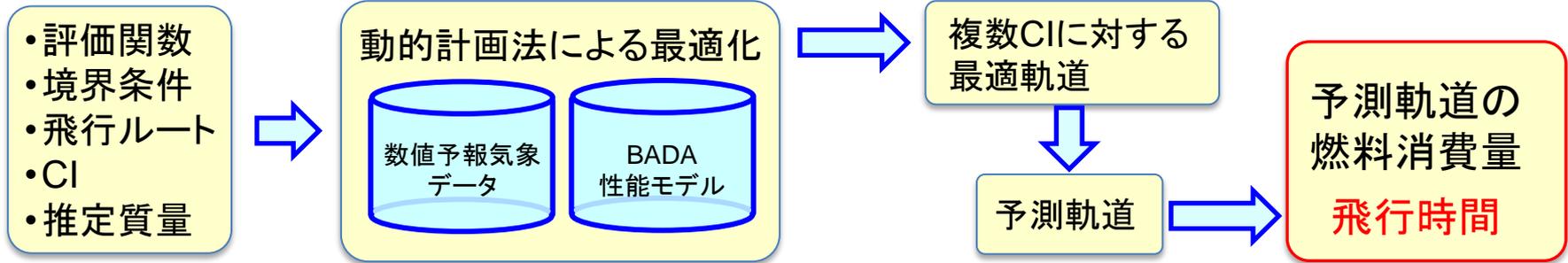
## YOKATにおける機体質量の推定値の分布



- 85～90%となるケースが全体の半分.
- 全214ケースの平均値は91%.

# 飛行軌道最適化

## 軌道最適化による軌道予測



## 評価関数

燃料消費量と飛行時間からなる性能指標 (Performance Index) により経済性を定義し, 最適化における評価関数  $J$  とする.

$$J = \int_{t_0}^{t_f} \mu(t) dt + at_f \quad \begin{array}{l} \mu : \text{燃料流量 [kg/s]} \\ a : \text{時間調節パラメタ [kg/s]} \end{array}$$

CI (Cost Index) との関係

$$CI = \frac{C_{time} [\$/hour]}{C_{fuel} [¢/lb]} = 79.37a$$

## 直接運航経費DOC

$$J_{DOC} [\$/] = \frac{C_{fuel} [¢/lb]}{100 \times 0.4536} \times \int_{t_0}^{t_f} \mu(t) dt + \frac{C_{time} [\$/hour]}{3600} \times \int_{t_0}^{t_f} dt$$

[\$/kg]
[kg]
[\$/s]
[s]

# 定点通過時刻予測精度の評価結果

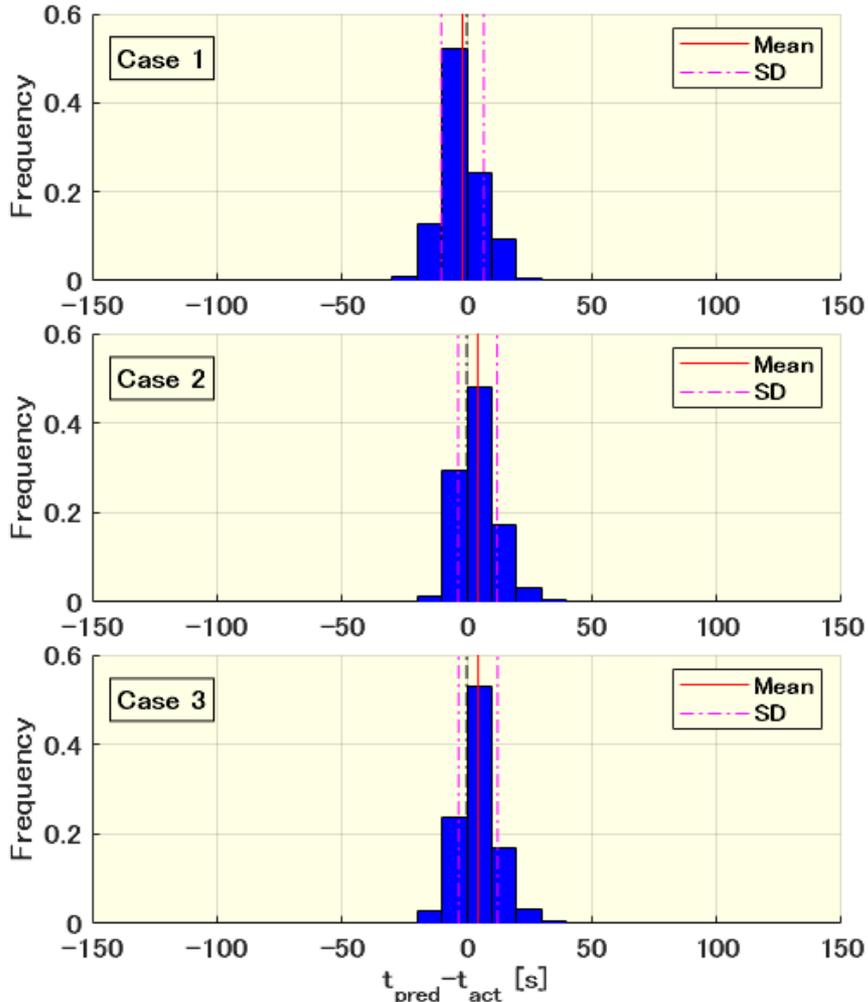
Case 1: BADA標準質量の80%

Case 2: RCPモデル推定質量

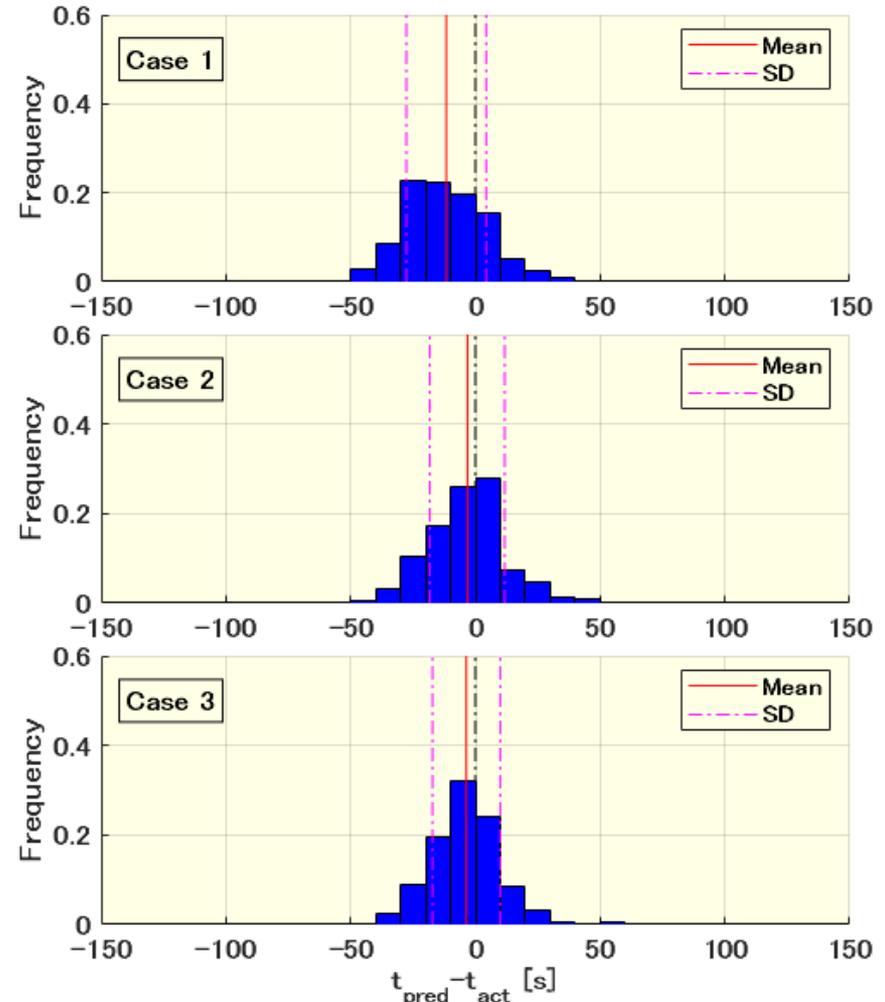
Case 3: RCPモデル推定質量+気象データの時間方向の内挿

(時間差) = (予測値) - (実際の値)

東経132.0度

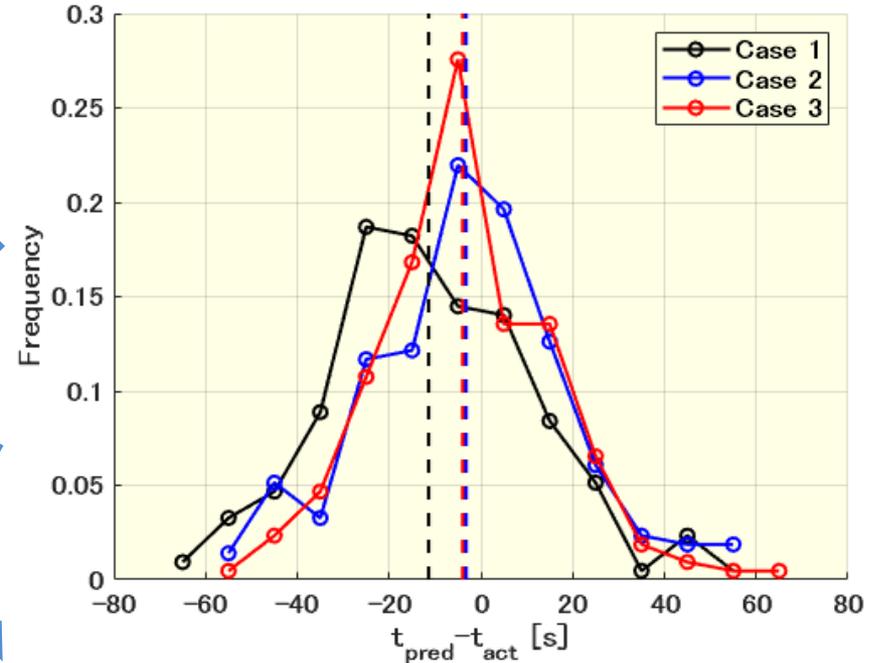
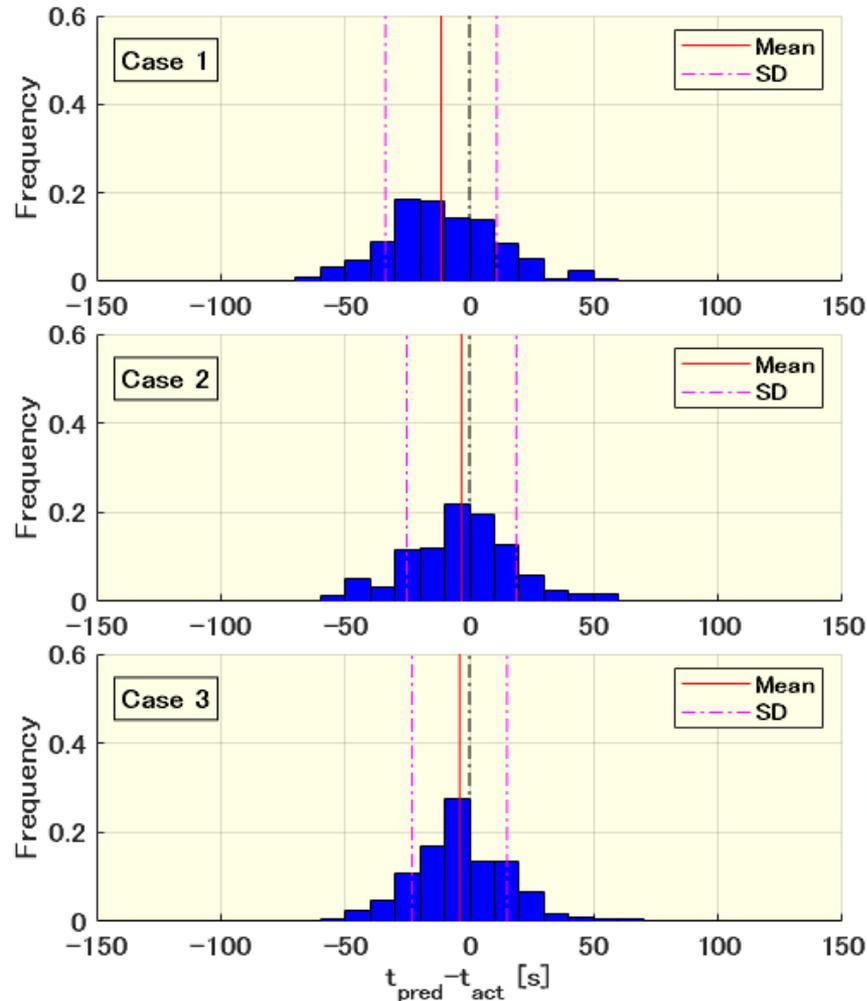


東経135.0度 (HALKA)



# 定点通過時刻予測精度の評価結果

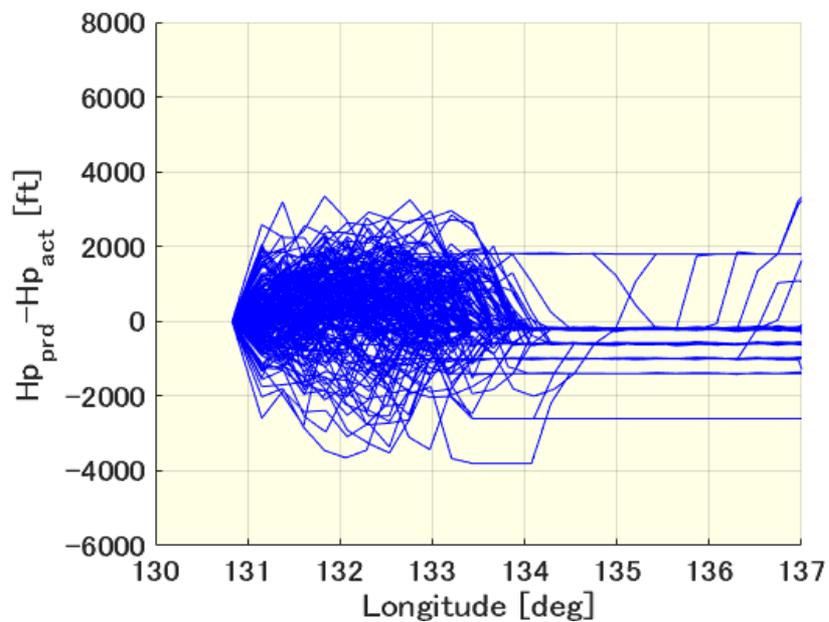
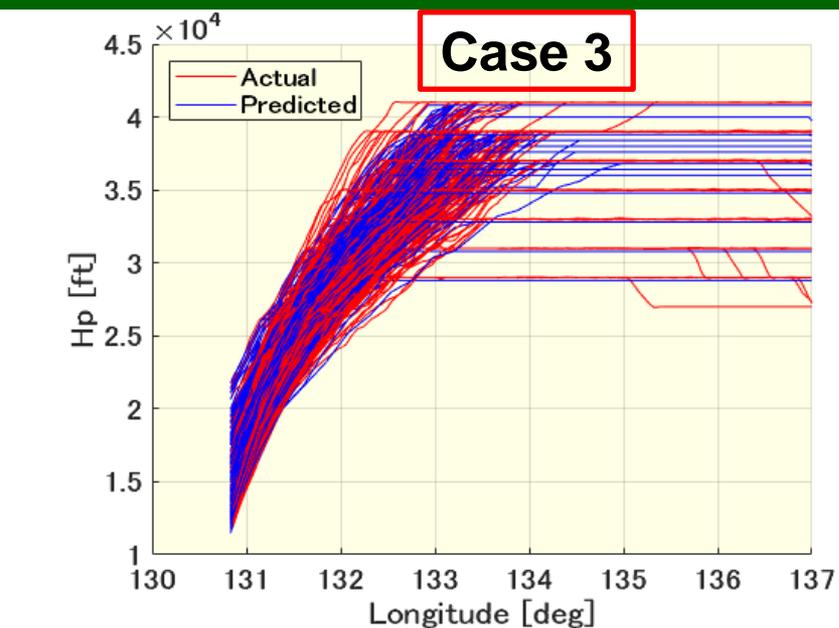
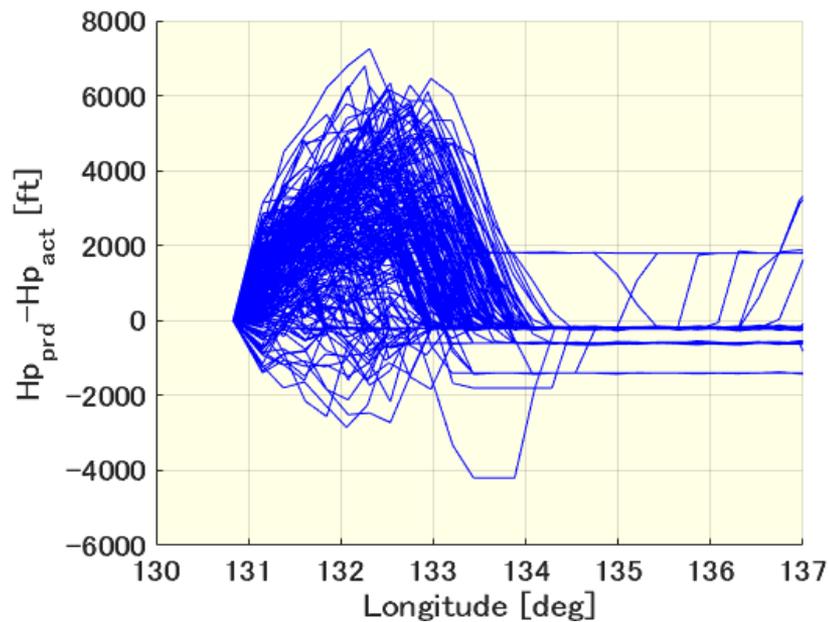
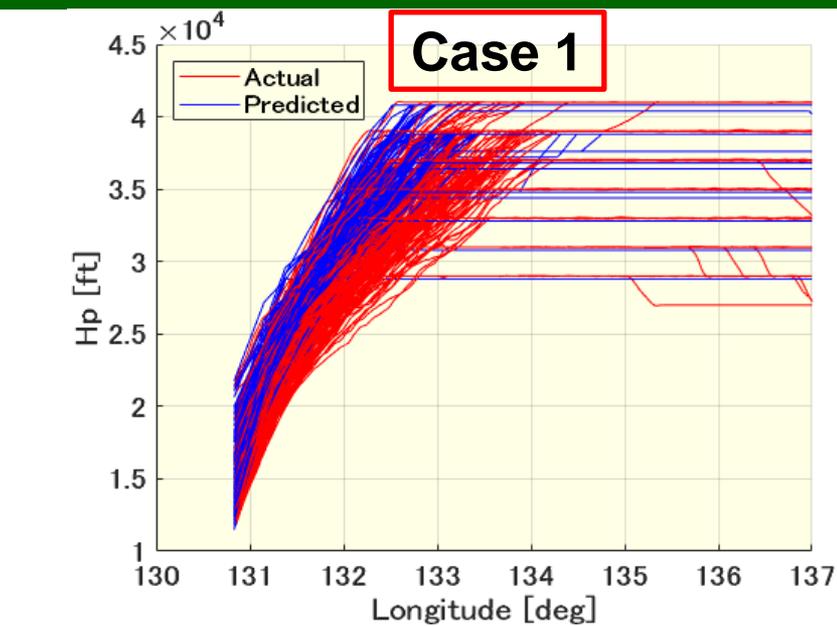
東経137.0度 (FLUTE)



定点通過時刻の誤差, 平均±標準偏差

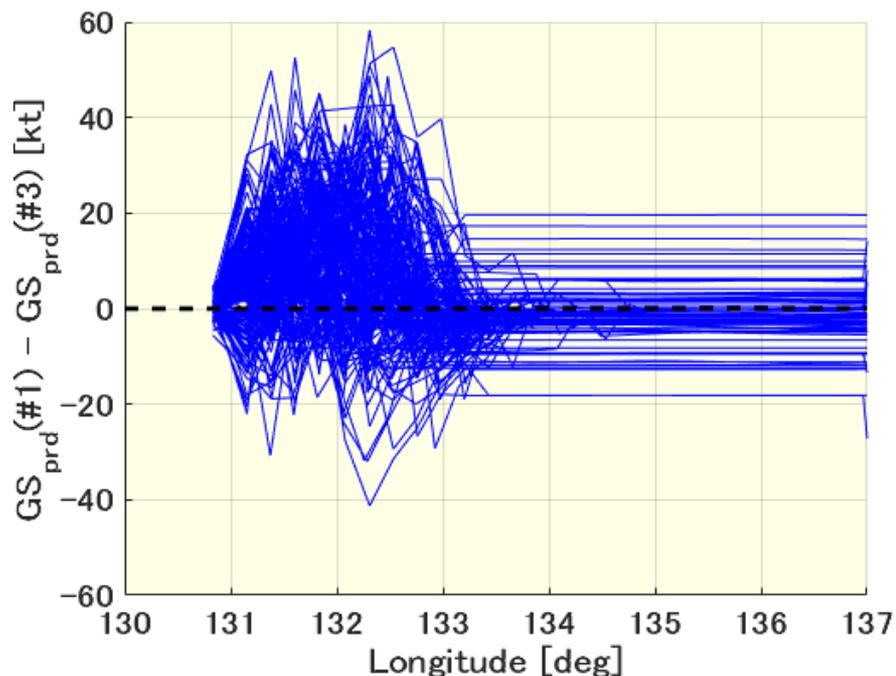
	Case 1	Case 2	Case 3
132.0° E	$-1.7 \pm 8.5$	$4.4 \pm 7.8$	$4.5 \pm 7.9$
135.0° E	$-11.7 \pm 16.0$	$-3.2 \pm 15.0$	$-3.7 \pm 13.6$
137.0° E	$-11.4 \pm 22.4$	$-3.2 \pm 22.0$	$-4.0 \pm 19.1$
139.4° E	$-75.1 \pm 92.5$	$-58.4 \pm 93.0$	$-60.3 \pm 89.1$

# 高度の比較



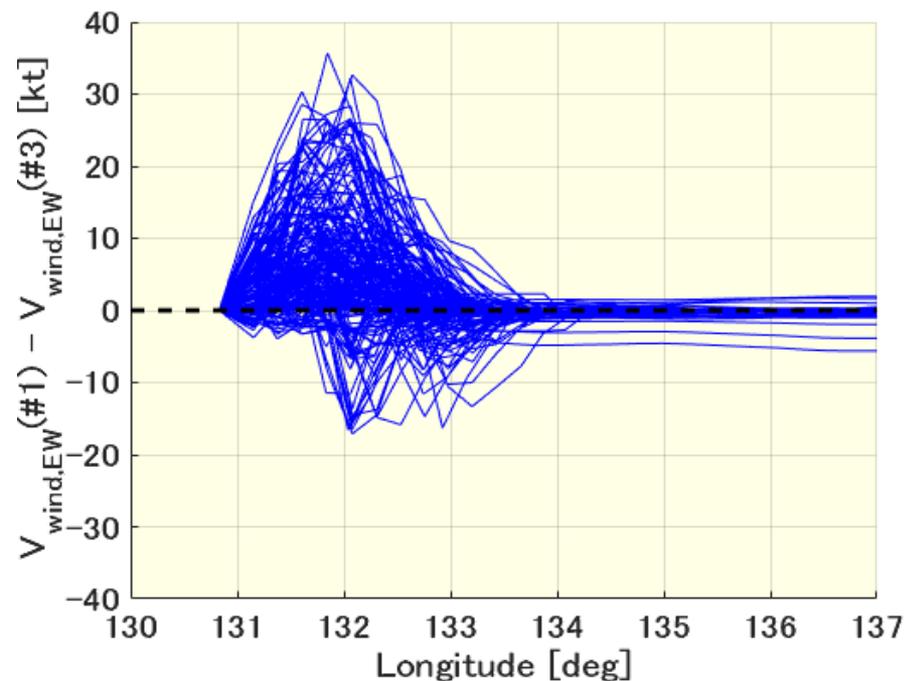
# Case1で対地速度が大きくなる理由

## 対地速度の比較



(Case1) > (Case3)

## 風速(東→西)の比較

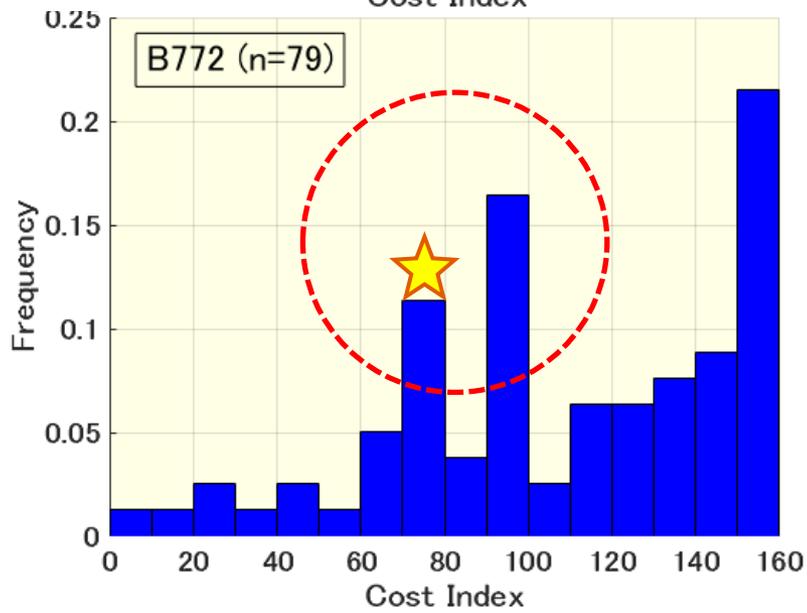
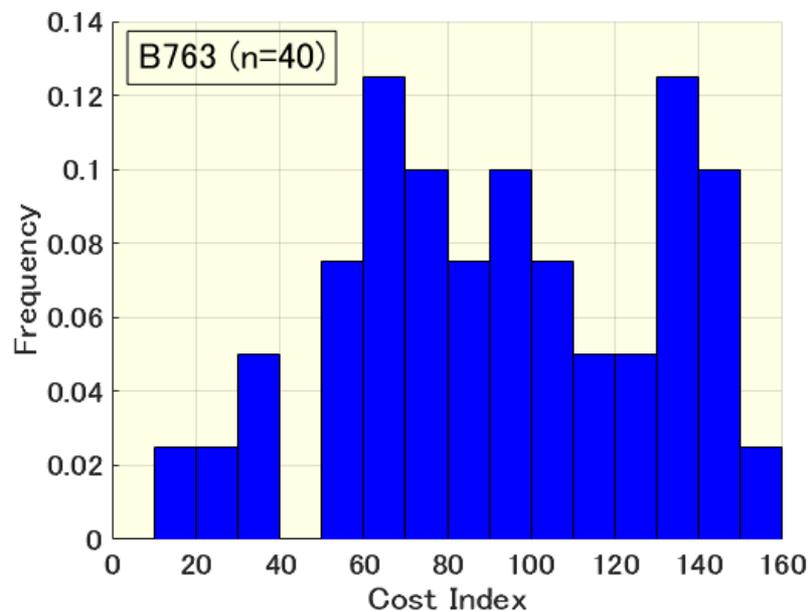
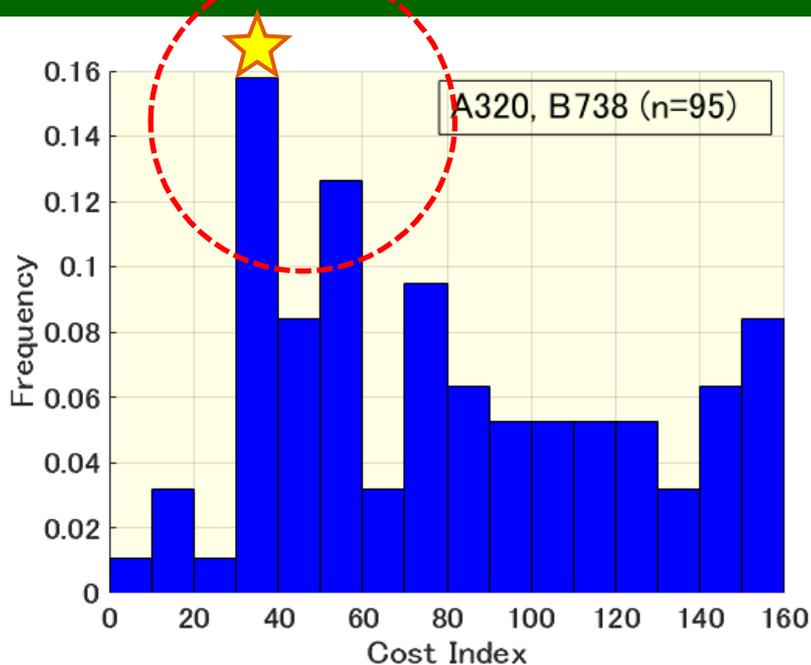


(Case1) > (Case3)

- Case1ではより早く上昇することで高高度の追い風を早く受け、対地速度がCase3よりも大きくなった。
- 真対気速度については対地速度ほど明確な差異は認められなかった。

正確な定点通過時刻の予測には上昇軌道の予測精度はひとつの重要なポイント。

# コストインデックス（予測軌道のCI値をヒストグラムで表示）



CIの設定値は航空会社により異なるが、

- 小型機→比較的小さい値
  - 大型機→比較的大きい値
- という傾向は得られている。

# まとめ

1. 本研究では、運航コストを最小にする最適軌道によりFMSの軌道を再現し、定点通過時刻を精度よく予測するための解析ツールの開発を行った。
2. CARATS Open Data2016を用いて、福岡発羽田着の4機種計214便を対象として軌道予測を行った結果、予測到着時刻の誤差は $-4.0 \pm 19.1$  [s]となり、BADA標準質量を用いた場合と比較して予測精度を改善することができた。
  - BADAの低減上昇パワーモデルにより機体質量を推定  平均値の改善
  - 気象データの時間方向への内挿  ばらつきの抑制に多少の効果
3. CIの整合性あるいは機体性能モデルによる誤差の検証は今後の課題。
4. 最適軌道に基づく軌道予測によりFMSの軌道を正確に再現でき到着時刻を精度よく予測できる可能性を示した。
  - ✓ 実際の機体質量とCIを用いて軌道予測。
5. 本研究成果は、我が国の定期運航便の効率向上を支える軌道管理システムの構築に寄与するものである。



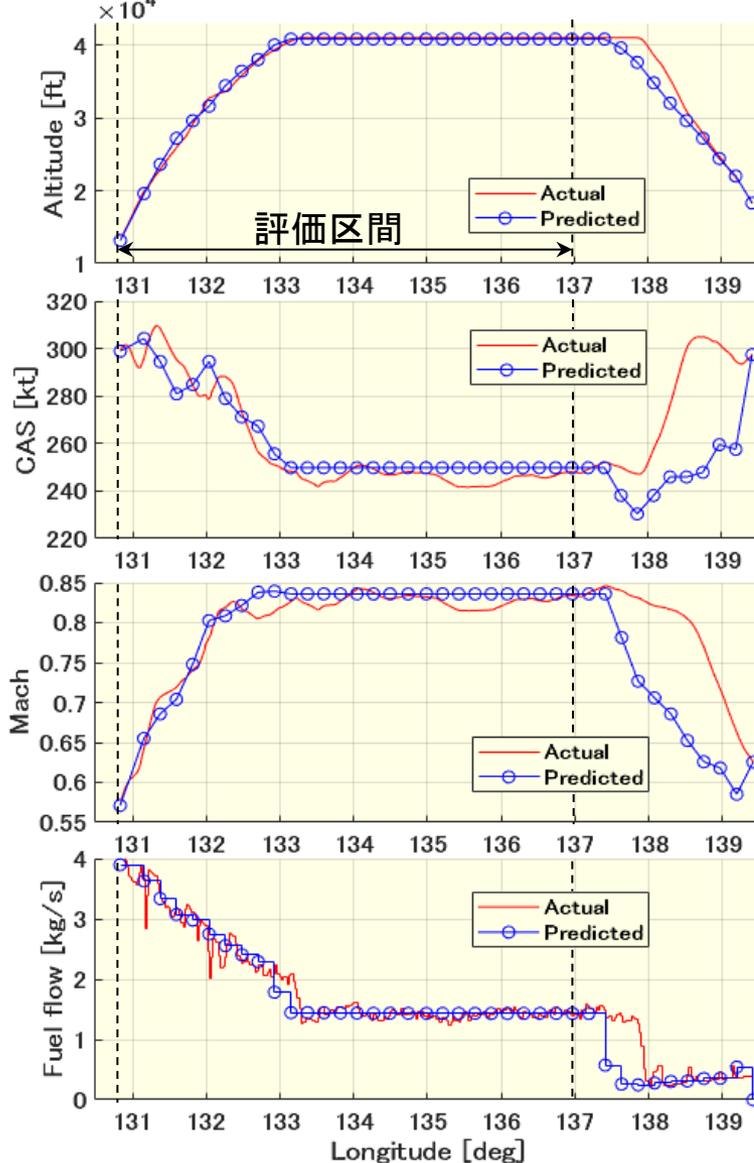
高知工科大学  
KOCHI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

ご清聴ありがとうございました。

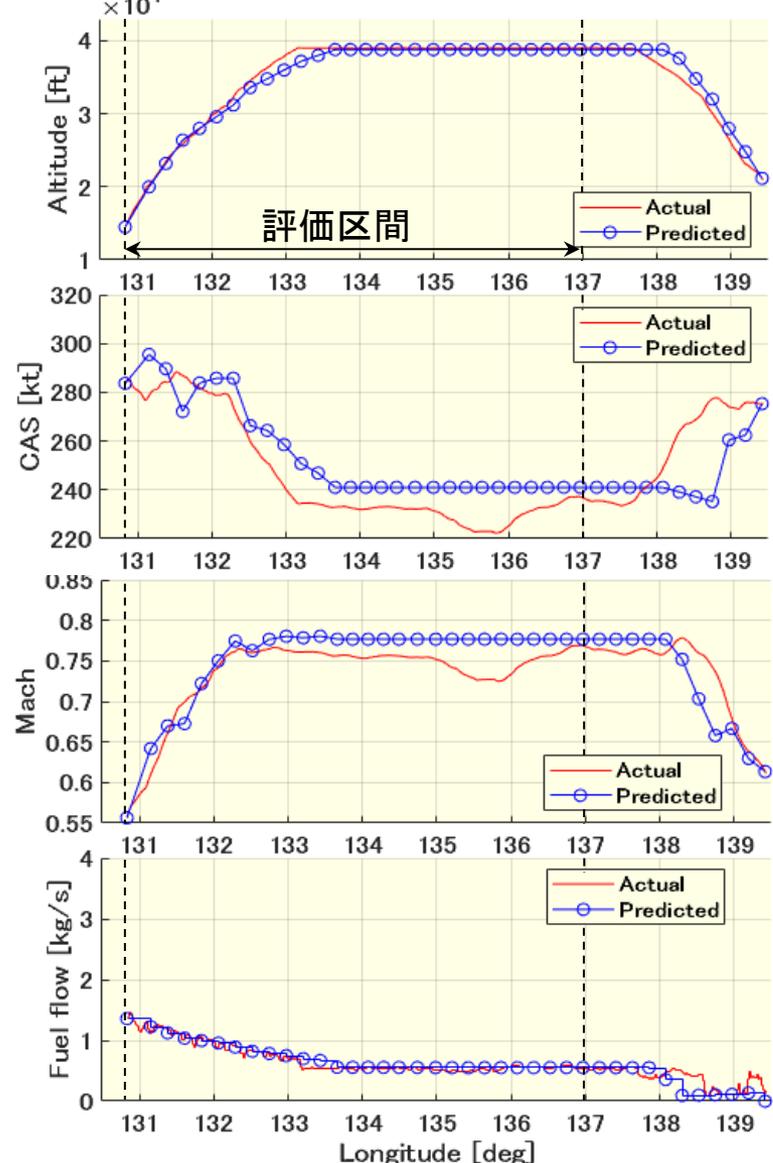
# 予測軌道と実際の軌道との比較

(参考資料)

予測が比較的合うケース (B772, 2016/5/15)



予測が合わないケース (A320, 2016/5/15)



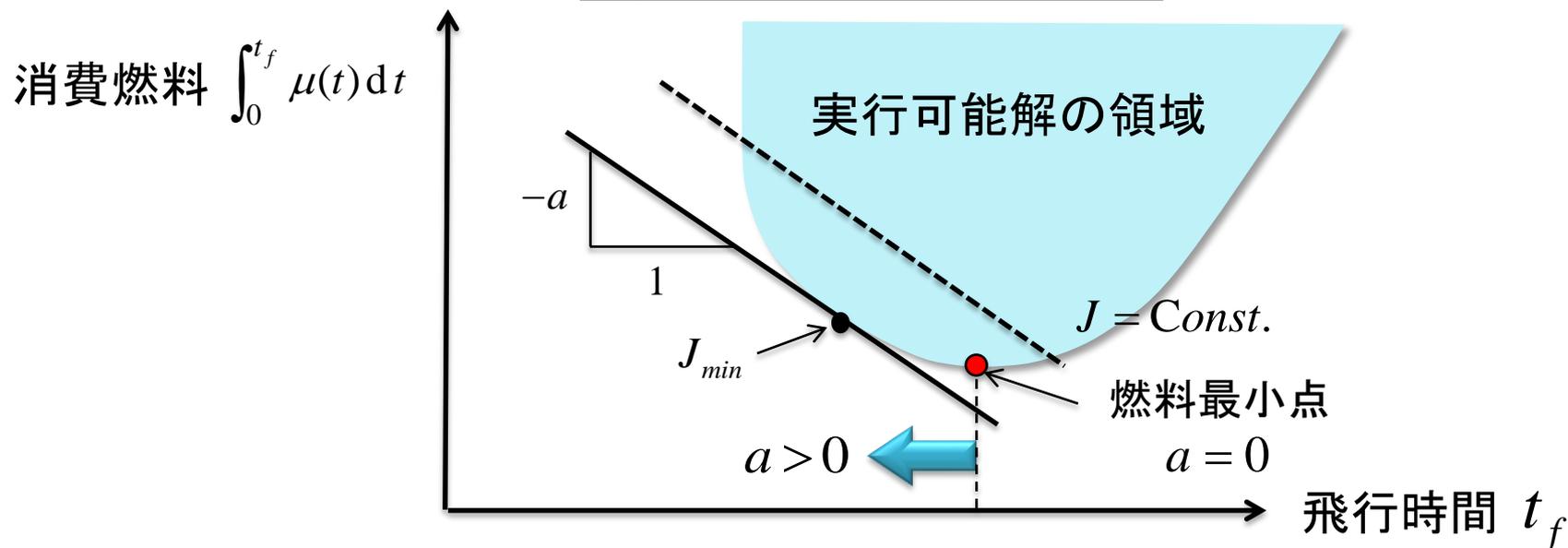
# 動的計画法による軌道最適化 — 評価関数 (参考資料)

燃料消費量と飛行時間からなる性能指標 (Performance Index) により経済性を定義し, 最適化における評価関数  $J$  とする.

$$J_{opt} = \min \left[ \int_{t_0}^{t_f} \mu(t) dt + at_f \right]$$

$\mu$  : 燃料流量 [kg/s]  
 $a$  : 時間調節パラメタ [kg/s]

## 消費燃料と飛行時間の関係



CI (Cost Index) との関係:  $CI = 79.37a$

## 軌道最適化による軌道予測

- 評価関数
- 境界条件
- 飛行ルート
- CI
- 推定質量

DPIによる軌道最適化

数値予報気象  
データBADA  
性能モデル複数CIに対する  
最適軌道

予測軌道

予測軌道の  
燃料消費量  
飛行時間

## 支配方程式

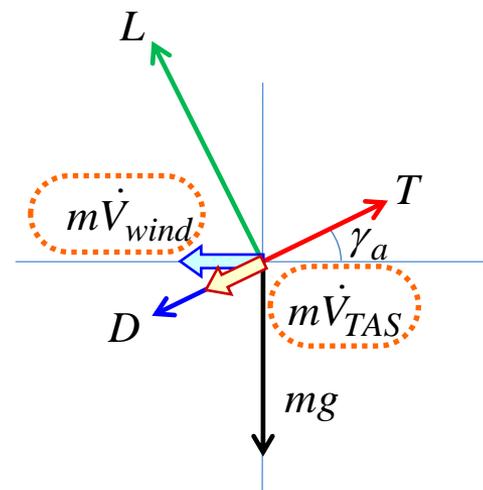
$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{1}{(R_0 + H)\cos\phi} \{V_{TAS} \cos\gamma_a \sin\psi_a + W_x\}$$

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{1}{R_0 + H} \{V_{TAS} \cos\gamma_a \cos\psi_a + W_y\}$$

$$\frac{dH}{dt} = V_{TAS} \sin\gamma_a$$

$$T = D + mg \sin\gamma_a + m \frac{dV_{TAS}}{dt} + m \frac{dV_{wind}}{dt} \cos\gamma_a$$

$$L + m \frac{dV_{wind}}{dt} \sin\gamma_a = mg \cos\gamma_a$$



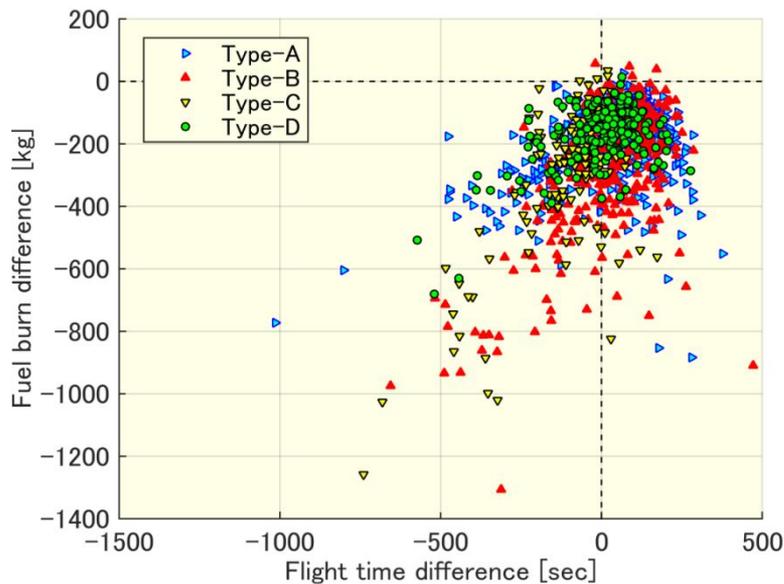
風とともに移動する非慣性座標系

- 状態変数:  $H, V_{TAS}$
- 制御入力:  $\gamma_a, T$

## TBOによる経済効率・便益の評価

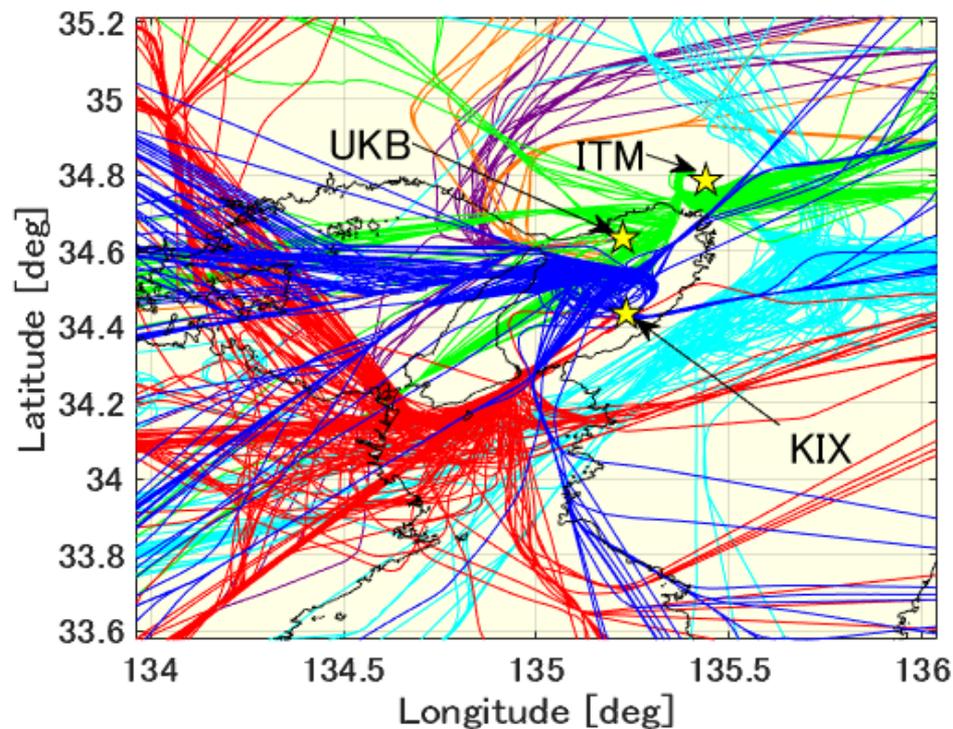
4次元軌道最適化を適用し、TBOにより得られる運航便益を定量的に評価.

国内線1087便の最適化結果



解析便数	燃料の差 平均 [kg]	距離の差 平均 [km]	時間の差 平均 [s]
1087	-230	-20	+7

## 空港隣接空域における継続降下運用の実現可能性



— KIX Dep.	— KIX Arr.
— ITM Dep.	— ITM Arr.
— UKB Dep.	— UKB Arr.

## 空港面データによる機体質量の推定

離陸滑走中の位置データからBADAモデルを用いて機体質量を推定できないか。

2016年5月10日 羽田→福岡の空港面データ



## 市販フライトシミュレータの評価

航空交通管理の研究におけるX-Plane11の利用. 実運航データを再現可能か.



<https://www.amazon.co.jp/>



<https://store.x-plane.org/>