

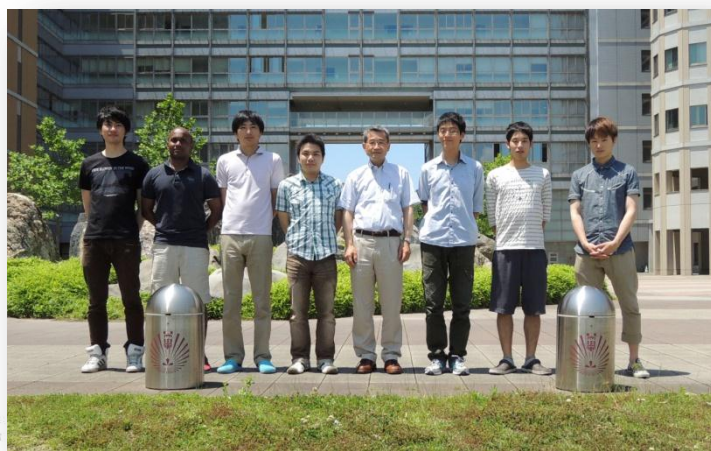
平成24年度公募型研究 成果報告

# 国内定期旅客便の運航効率の客観分析に関する研究

電子航法研究所 研究発表会 平成25年6月7日

九州大学 宮沢与和, ナビンダ・キトマル, 原田明德, 宮本侑斗, 小塚智之

電子航法研究所 福田 豊



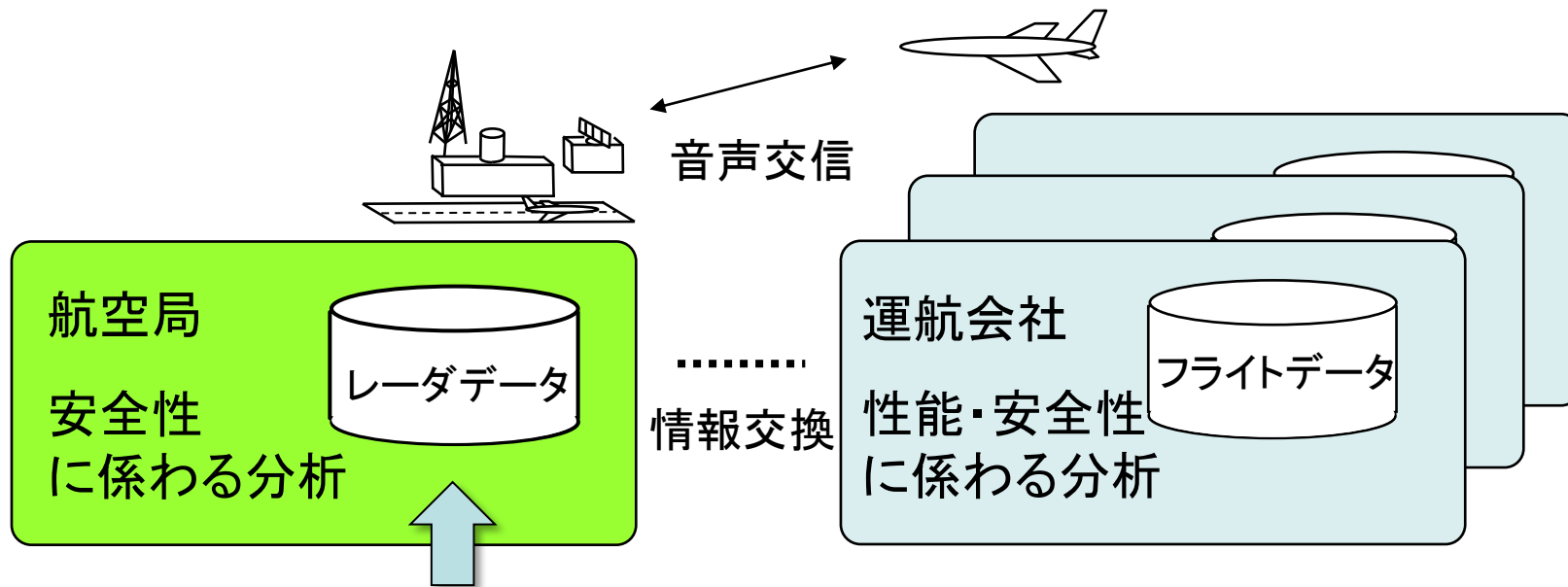
## 発表の構成

1. はじめに 研究背景と目的
  - 公募型研究の計画
2. 運航効率の客観分析とは？
3. これまでの代表的な成果
  - レーダデータを用いた飛行解析と便益の検討
4. 解析法（気象モデル，性能モデル，軌道最適化）
5. 今後の計画
6. まとめ

## 1. はじめに 研究の背景と目的

- 燃料節約による経済性の向上とCO<sub>2</sub>環境負荷の軽減が求められている。
- 個々の航空機の性能は世代とともに向上しているが、全体システムを見た場合、交通量の増大が効率を下げる傾向があり、航空管制の改良により**運航効率の向上**と**容量の拡大**が望まれる。
- **現状を客観的に分析**することによって、効率向上の可能性を定量的に明らかにし、容量拡大のための方策を提案する。
- 我が国の航空交通管理の研究に貢献し、**CARATSの推進**に資する。

## 2. 運航効率の客観分析とは？



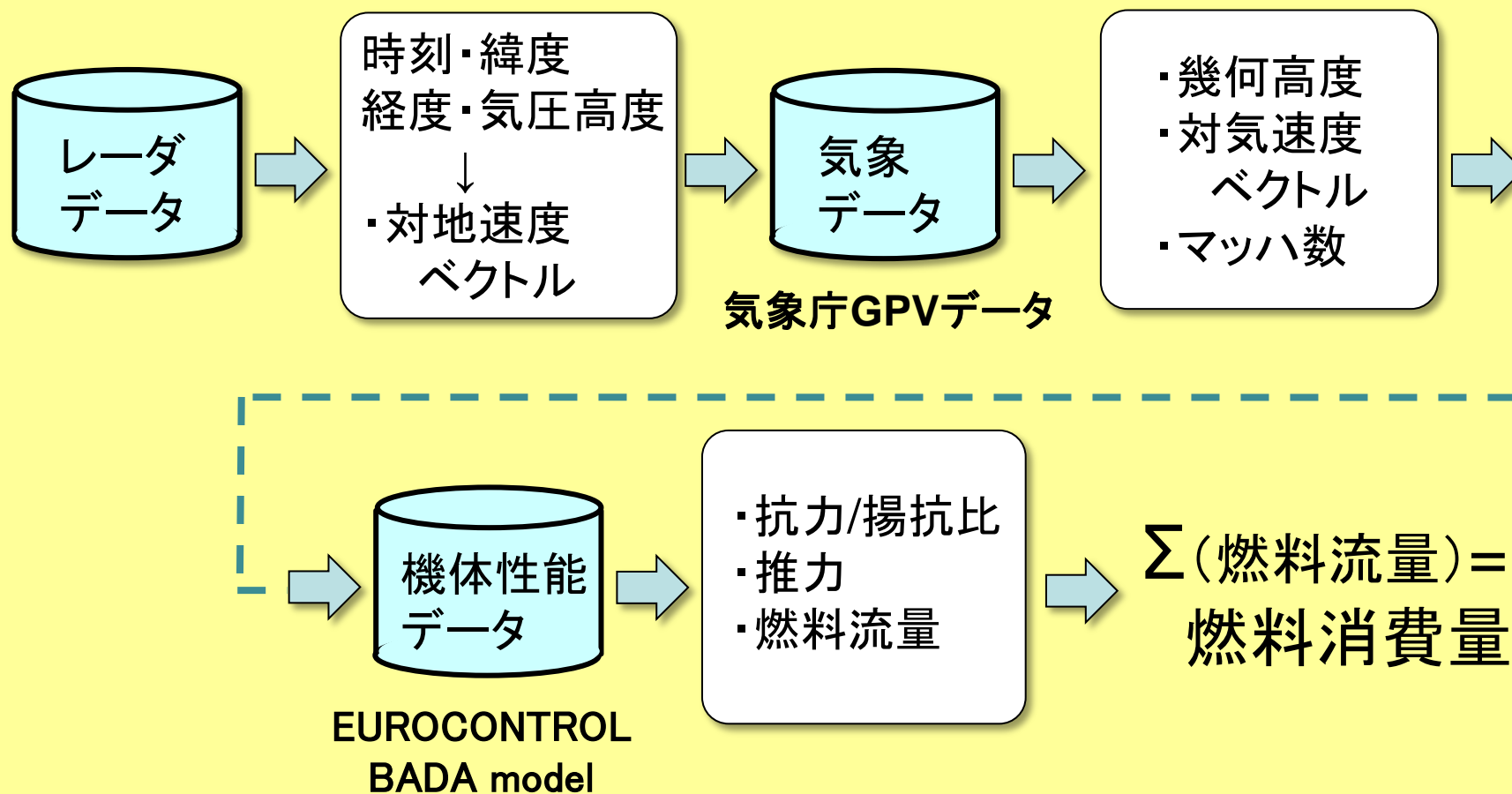
レーダデータを使って運航効率を分析することを提案

### ＜解析法の特徴＞

- 航空機の飛行状態を推定する。
- 理想状態など実際のフライトと違った飛行の性能を推定する。
- 気象条件や管制方式などの制約を考慮する。

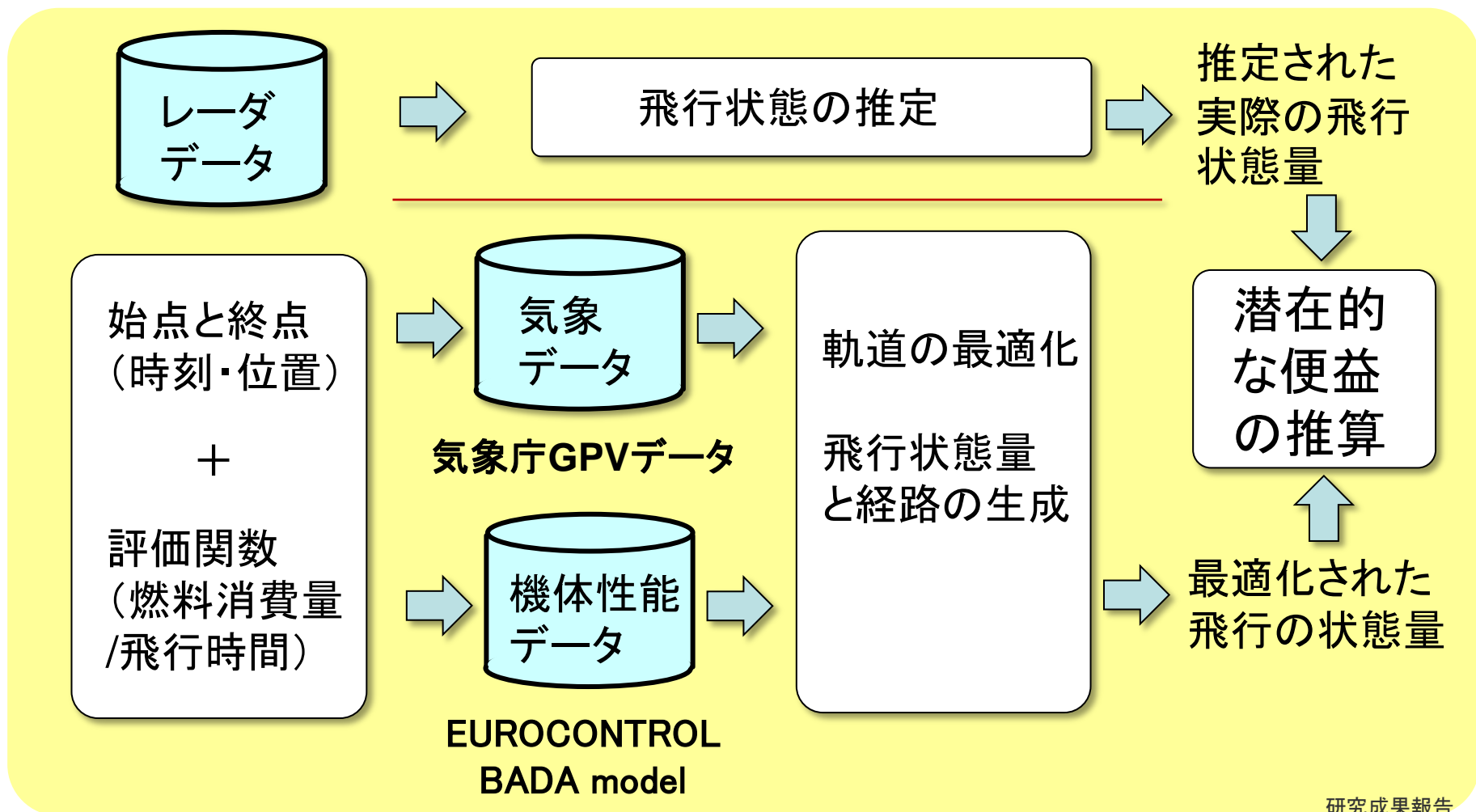
## 2. 運航効率の客観分析 <飛行状態の定量化>

気象データと機体性能モデルに基づく飛行状態の推定



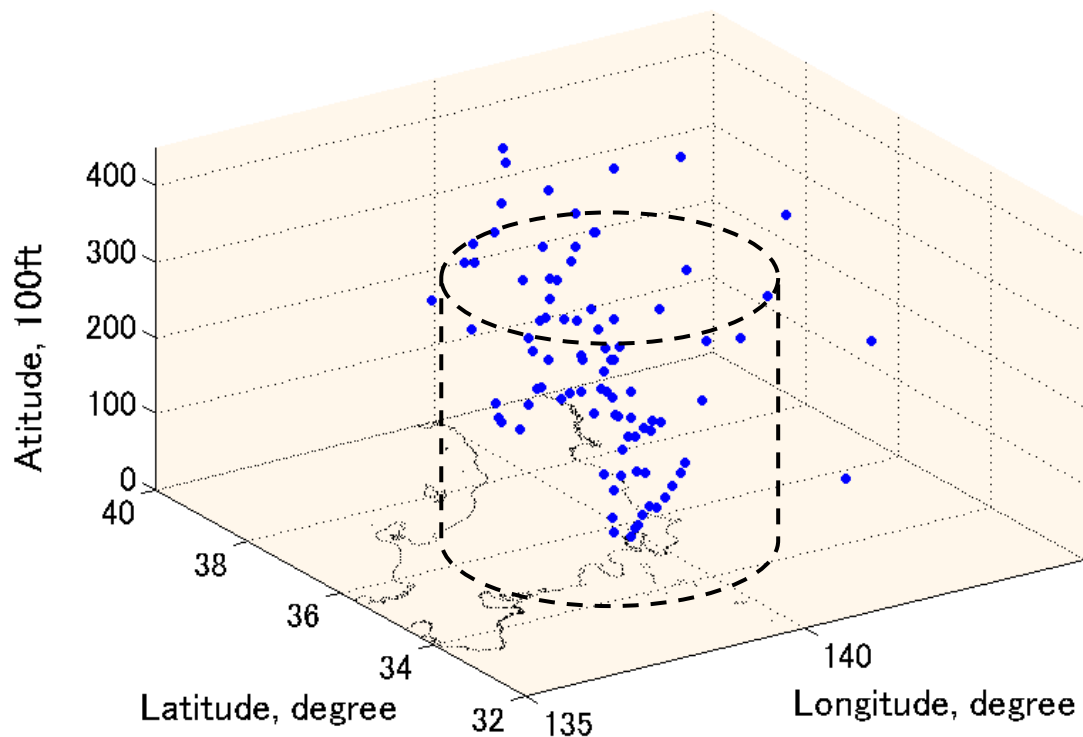
## 2. 運航効率の客観分析 <実際と違う飛行の解析>

運航効率を考慮した飛行を仮定して軌道を生成し，実飛行と比較



### 3. これまでの代表的な成果 <解析例>

電子航法研究所で試験運用されている2次監視レーダ(SSR)のデータへ適用



SSR mode S データ  
2012年2月21日 18:00

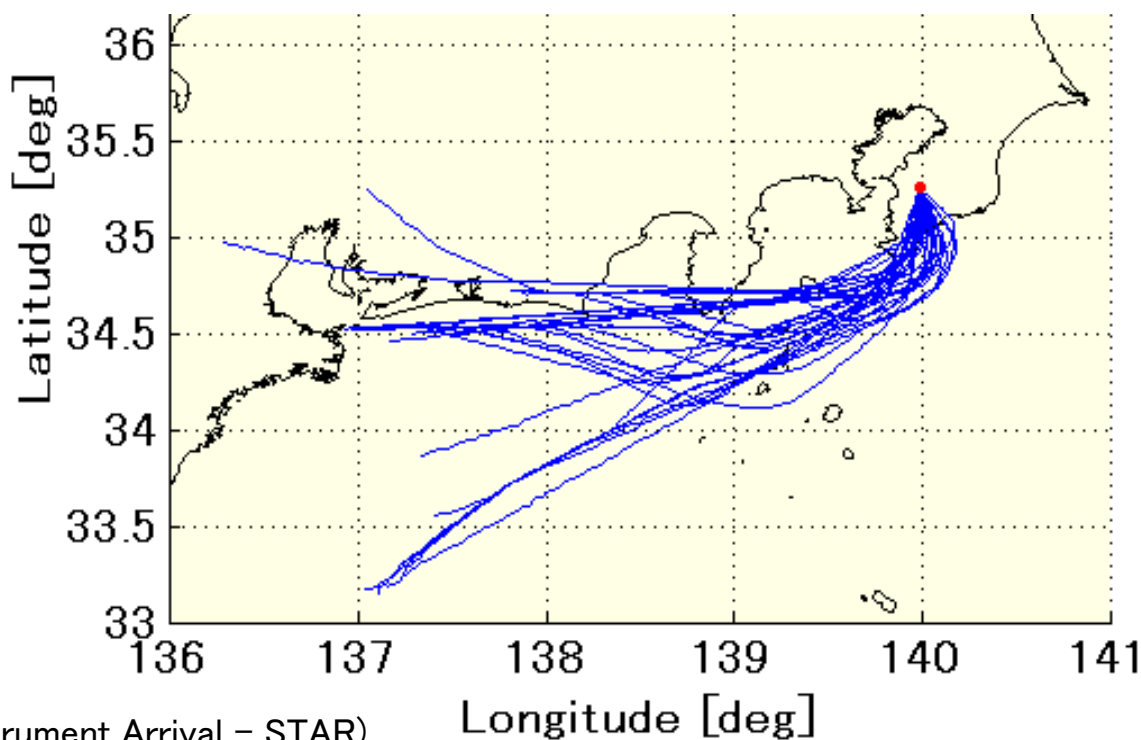


# レーダデータによる運航効率の客観分析の例

## 羽田空港到着機の実分析

電子航法研が試験運用するレーダで記録された2012年2月21日の1日分の以下の条件を満たす31機を分析

- ① 機種がBoeing 777-200    ② STAR上の点 (ARLON) を通過



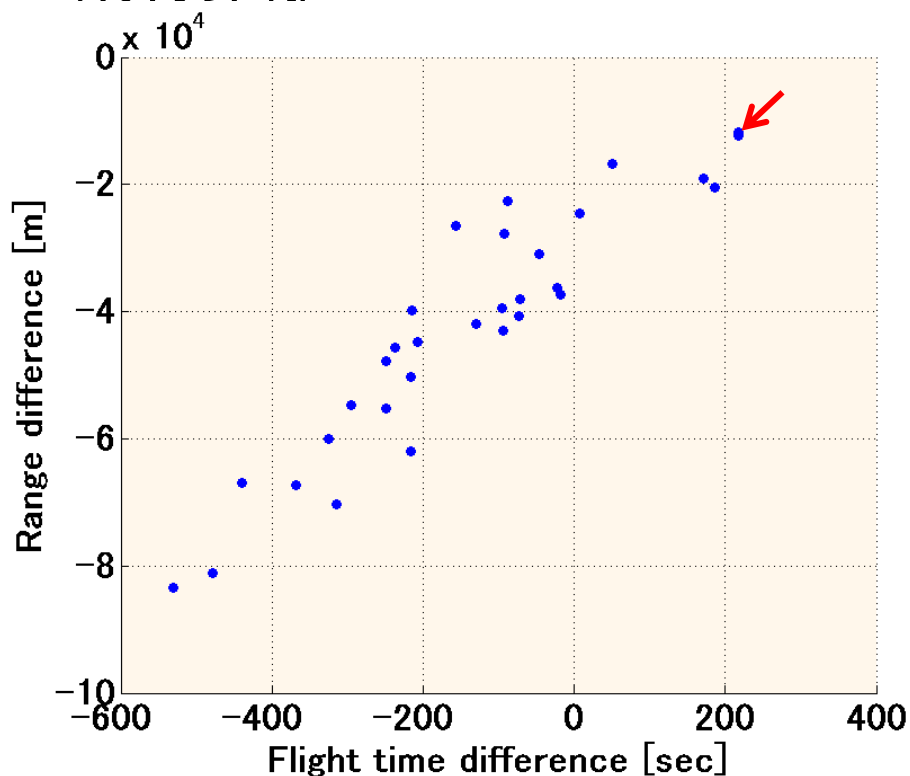


# レーダデータによる運航効率の客観分析

飛行距離/燃料消費量/飛行時間

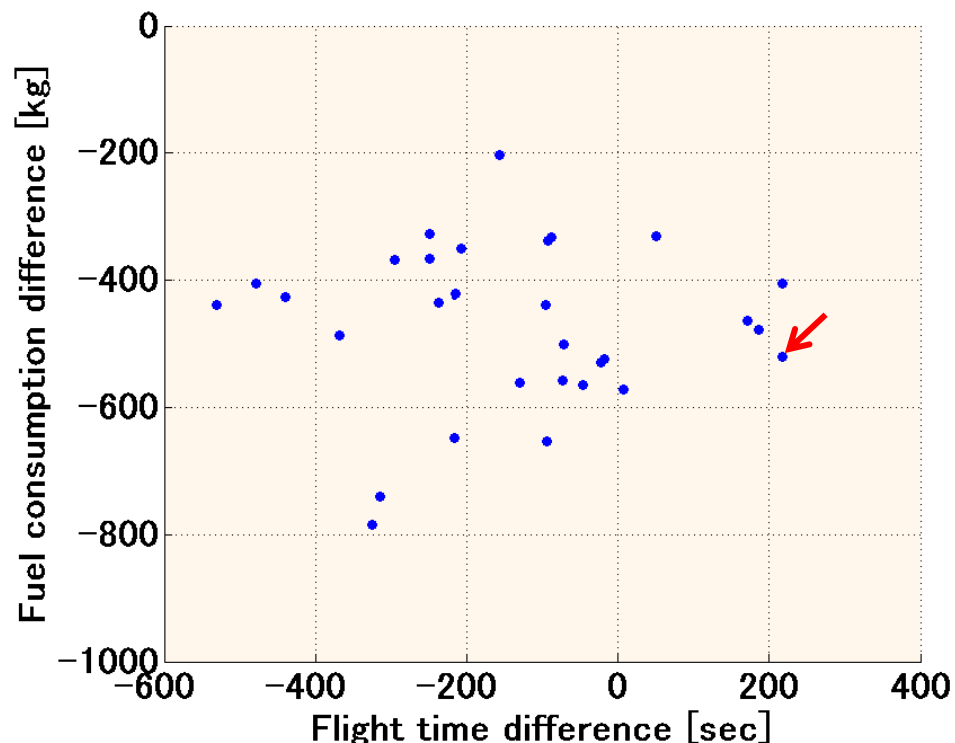
比較(差異) = 燃料最小最適軌道 - 実飛行(推定量)

飛行距離



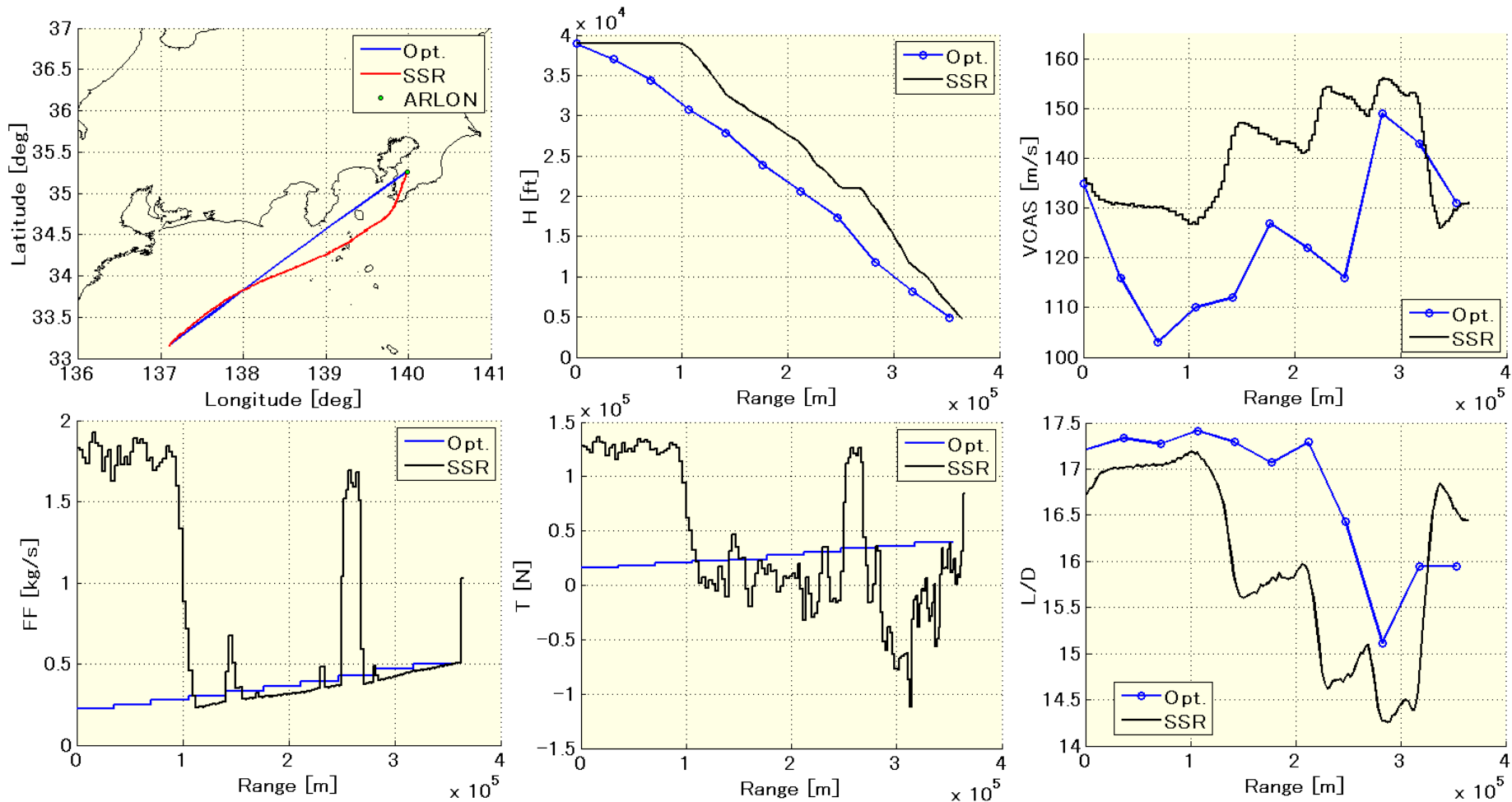
飛行時間

燃料消費量



飛行時間

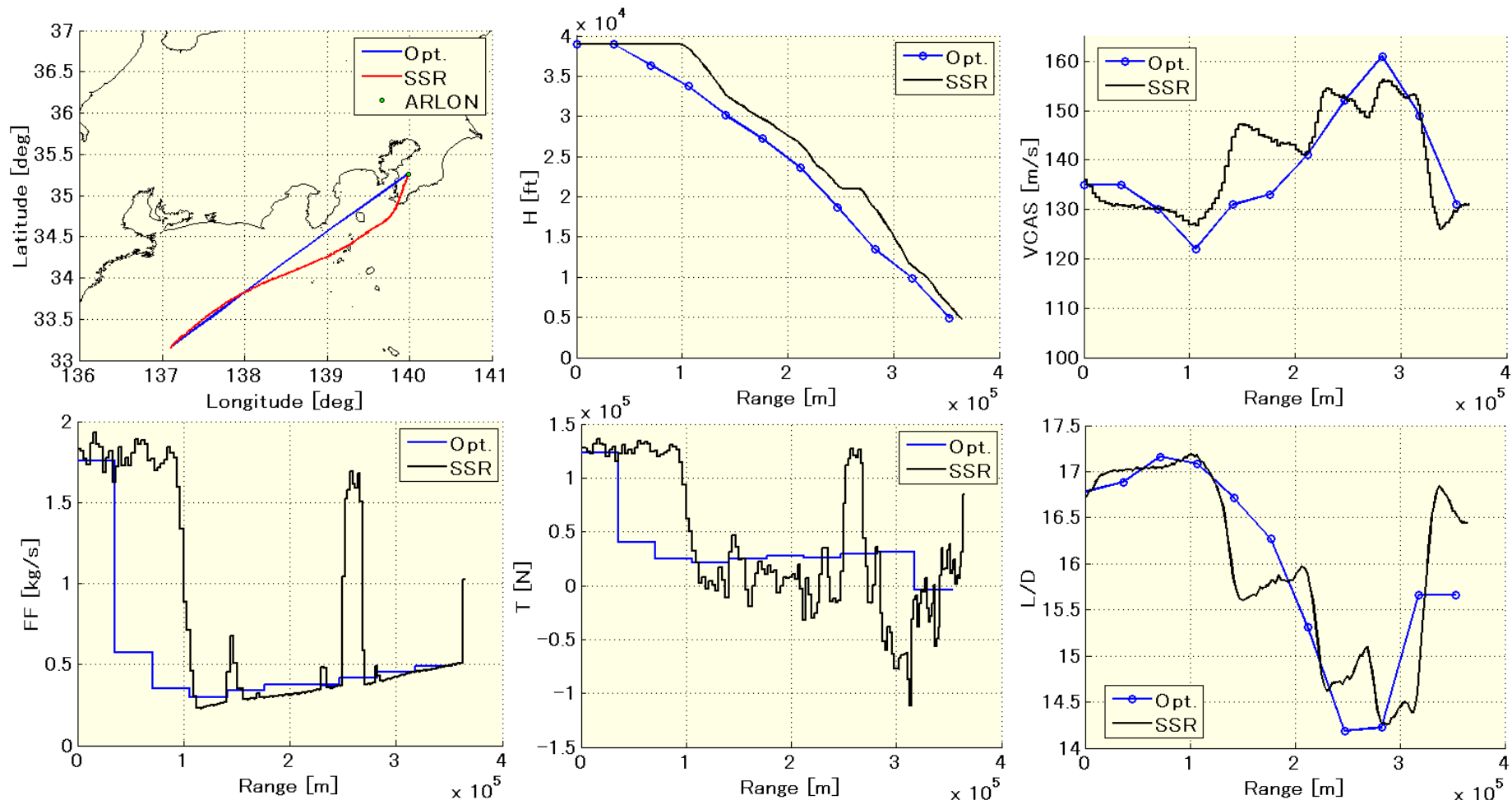
# 解析例1 燃料最小(飛行時間自由)の最適軌道



(FF: Fuel Flow)

	SSRデータ	最適軌道(opt)
飛行時間[sec]	1464	1681 (+217)
燃料消費量[kg]	1141	621 (-520)
飛行距離[km]	364.7	352.9 (-11.8)

## 解析例2 燃料最小(同一飛行時間)の最適軌道



(FF: Fuel Flow)

終端時刻指定	SSRデータ	最適軌道(opt)
飛行時間[sec]	1464	1469 (+5)
燃料消費量[kg]	1141	760 (-381)
飛行距離[km]	364.7	352.9 (-11.8)

## 4. 解析法 <モデルの検討>

旅客機のフライトデータを使って比較

### ①機体性能モデル



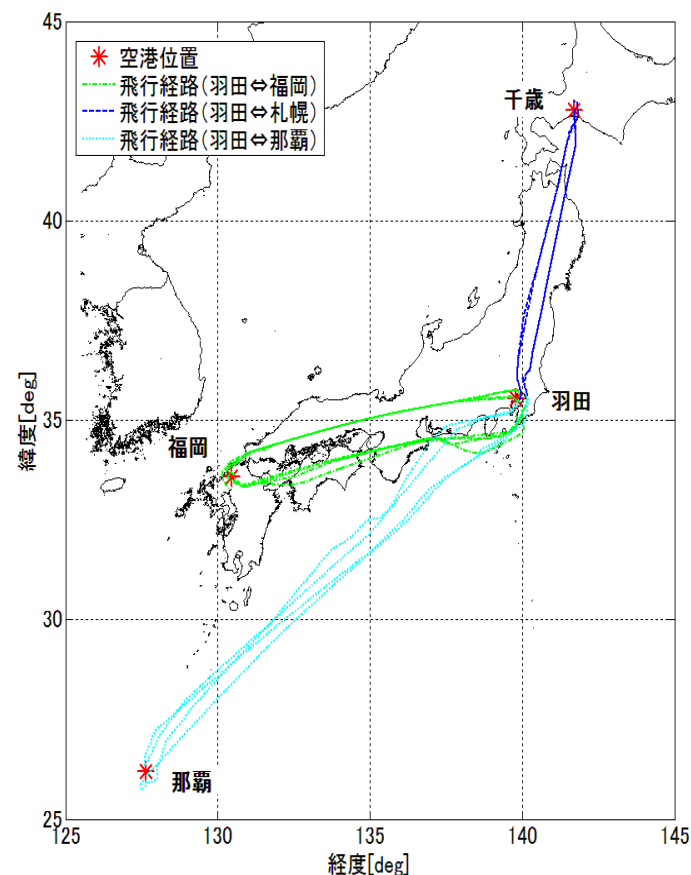
- EUROCONTROL BADA model  
(The Base of Aircraft data)  
燃料消費量誤差 6%以内

### ②気象データ



- 気象庁 GPVデータ(全球GSM)  
誤差RMS  
気温 約1度  
東西風および南北風 約3 m/s

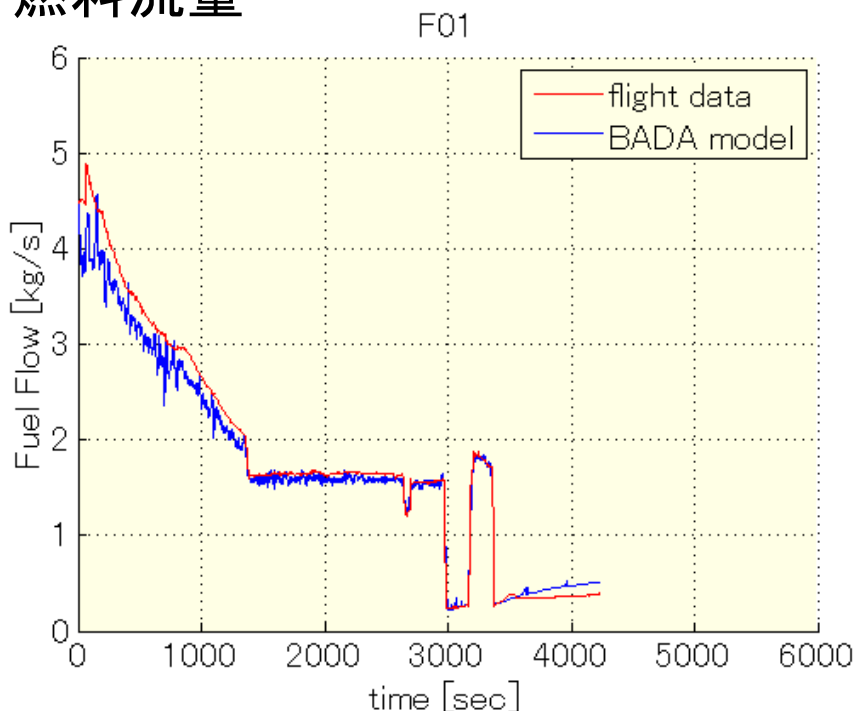
エアラインの協力を  
を得て飛行データの  
提供を受ける



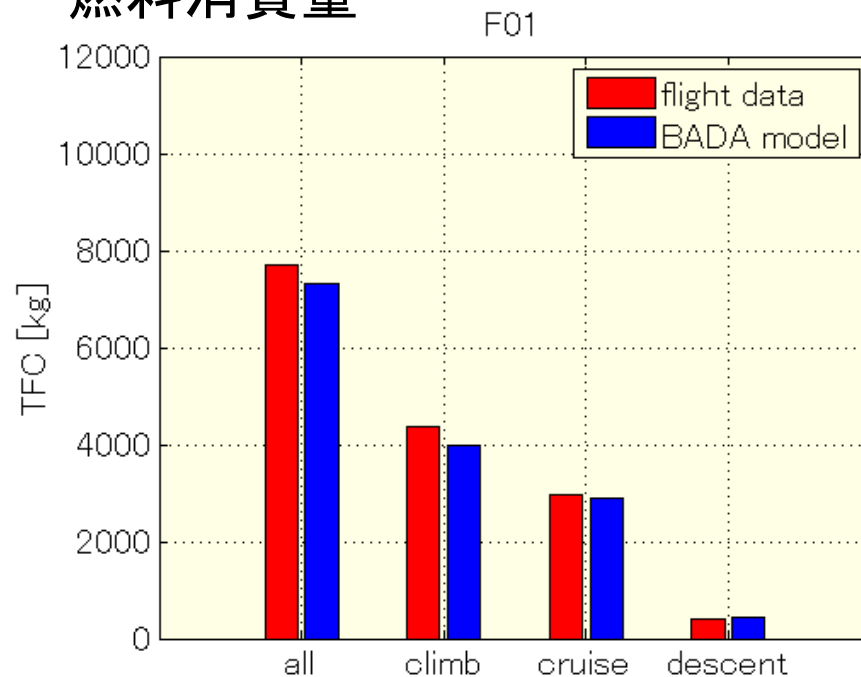
# 機体性能モデルの評価 BADAモデルとの比較

## 燃料流量と燃料消費量の比較例(東京→福岡)

### 燃料流量



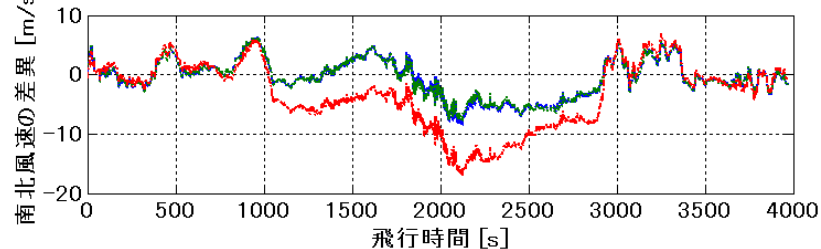
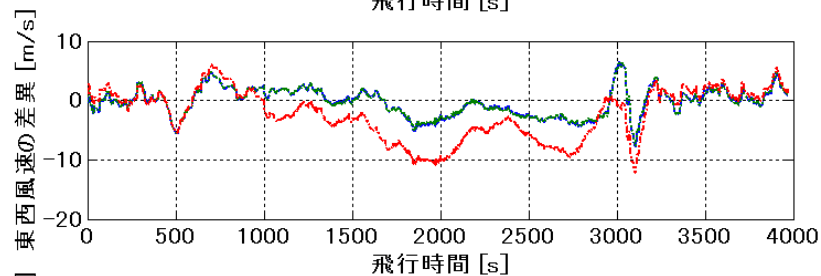
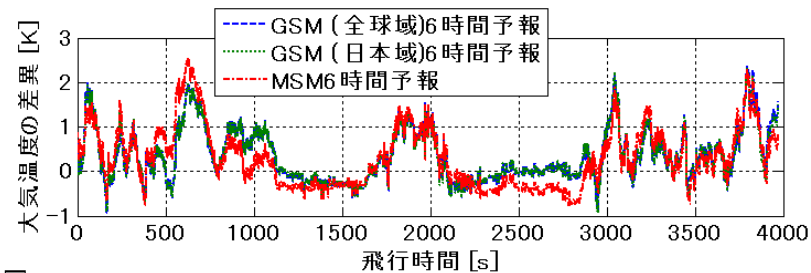
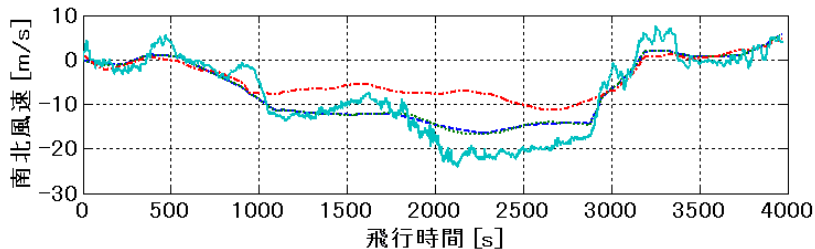
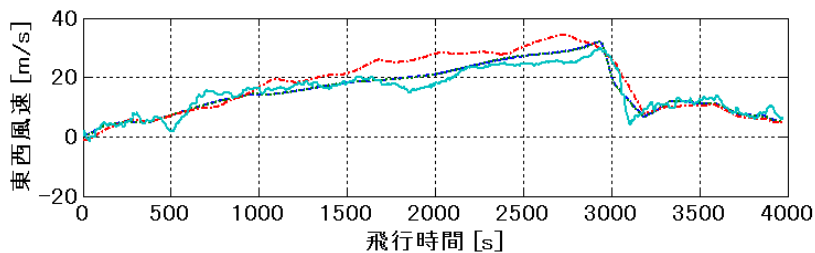
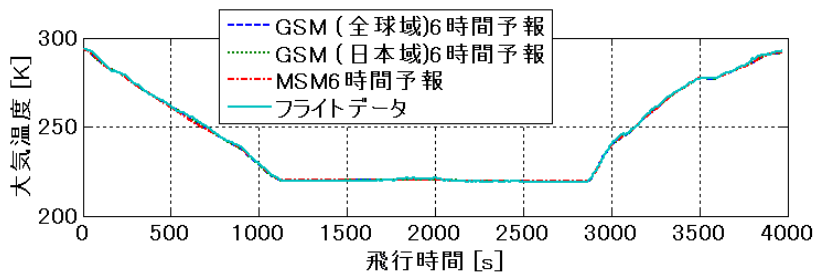
### 燃料消費量



\* Harada, A., Miyamoto, Y., Miyazawa, Y., and Funabiki, K.: Accuracy Evaluation of an Aircraft Performance Model with Airliner Flight Data, submitted for publication, JSASS Aerospace Technology Japan.

# 気象予報データとフライトデータの直接評価

気象庁6時間予報データ(全球GSM, 日本域GSM, MSM)

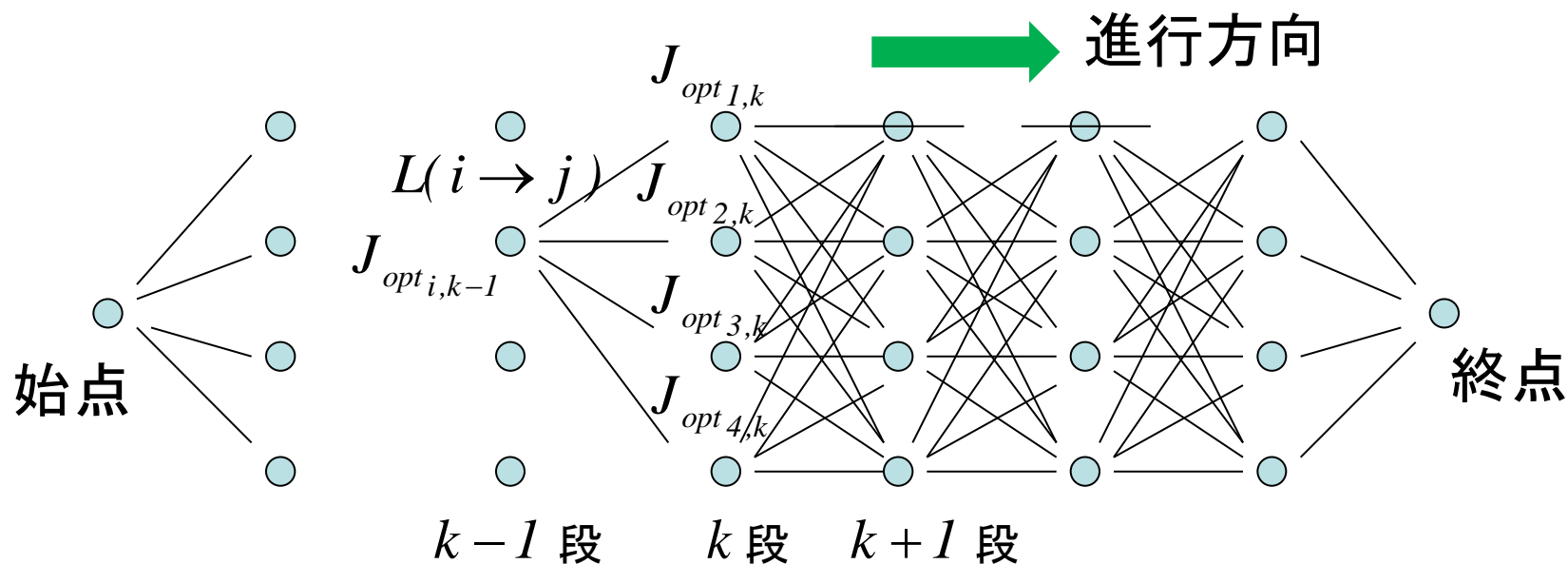


(東京→札幌 2011年8月)

\* 十時, 小塚, 宮沢, 船曳: 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, 日本航空宇宙学会「航空宇宙技術」, Vol.12, pp.57-63, 2013.

# 動的計画法 (Dynamic Programming, DP) 軌道最適化

状態量 (高度, 速度, 横変位) を離散化し, 状態量の進行方向の遷移を多段階に分解, 最適な経路を求める。



$$J_{opt\ i,k-1} = \min_{j=1,4} [L(i \rightarrow j) + J_{opt\ j,k}]$$

N点/段, M段 のとき, 経路の計算:  $N^M \rightarrow N^2 \times M$



## 動的計画法(DP)の特徴

### 長所

1. 収束のための繰返し計算がなく、**計算時間が事前に予測可能**
2. 状態変数や制御変数の**不等式拘束条件**の取扱いが容易
3. **大域的最適解**が得られる.
4. アルゴリズムが単純

### 短所

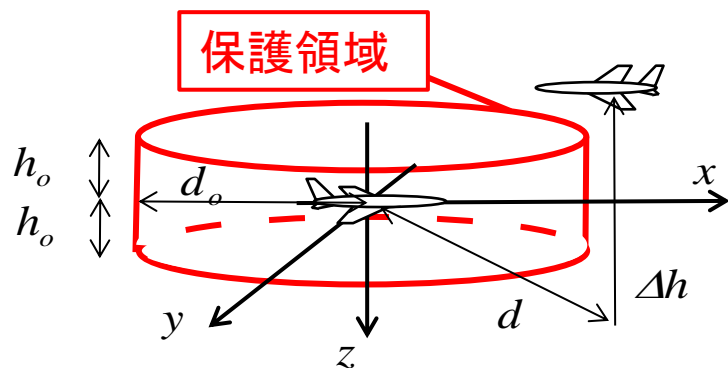
1. 「次元の呪い」次元(格子数)が大きいと計算時間が膨大となる.  
→ 計算時間を短縮する方法を提案
2. 精度を確保するために離散化に工夫を要する場合がある.  
→ 飛行計画生成においては離散化は容易

⇒ 確実に最適解が導かれ、旅客機などの飛行計画生成において最も適している.

## 5. 今後の計画 <機体相互の干渉の評価>

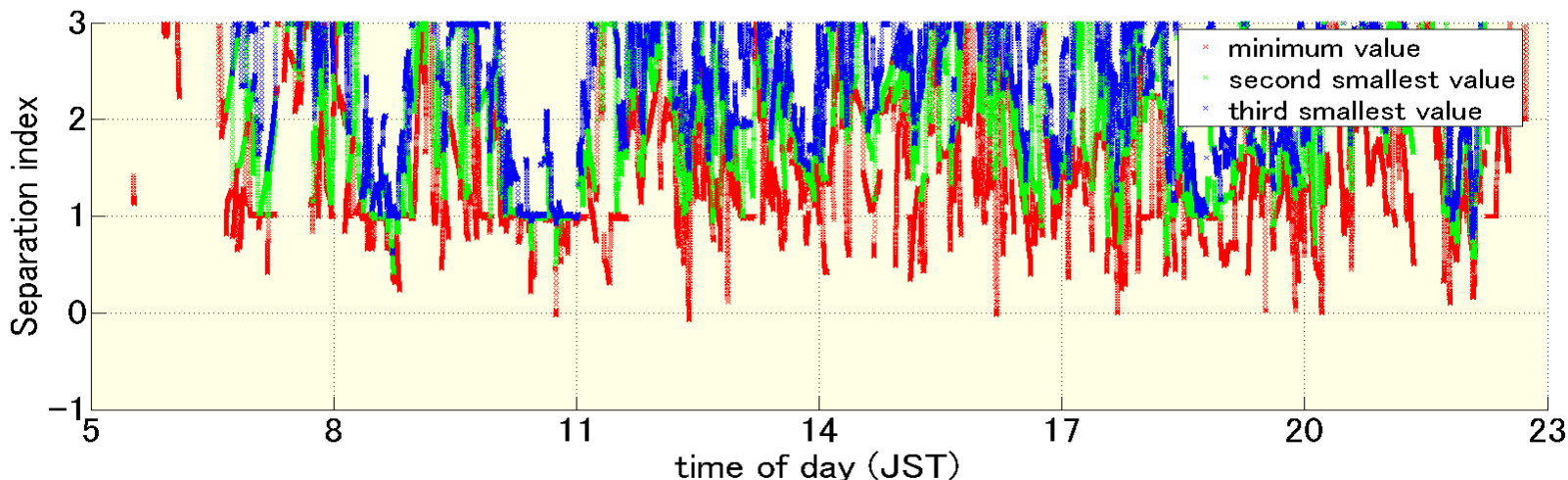
単独機について最適化された軌道の詳細評価が必要

- 他の機体との干渉の評価と対処方策



間隔の指標 (Separation index)

$$I_{spr} = \max \left\{ \frac{|\Delta h|}{h_o}, \frac{d}{d_o} \right\} - 1 \quad h_o = 1000[\text{ft}] \quad d_o = 5[\text{NM}]$$



電子航法研レーダデータ解析例 (2012年2月21日 高度10,000ft以上)

## 6. まとめ

航空交通管理のためのモデルベース軌道最適化ツールを開発,  
レーダによる動態データへ応用した.

モデルベース軌道最適化ツールの特徴は,

- 動的計画法 (Dynamic Programming) により確実に解を求めることができる.
- BADAモデルによりほとんど全ての機種に対応可能
- 気象予報データを組み込むことができる.
- 潜在的な便益を客観的に解析することができる.
- 燃料消費と飛行時間のトレードオフ(コストインデックス)を解析することによって飛行管理装置(FMS)とほぼ同等の結果を得ることができ, 軌道予測においても活用が可能である.

## 6. まとめ(続き)

### 応用の結果

- 燃料節約の可能性, 飛行時間とのトレードオフ等について知見を得た.
- 機体相互の干渉を評価する必要があり評価法を検討した.

### 今後の計画は,

- 対象事例を広げて分析を行う.
- 干渉評価法に基づいて干渉が生じる場合に対してモデルベース軌道最適化のツールを拡張して干渉解消方策を提案する.

## 謝辞

- ・日本航空(株)より提供いただいた飛行データを用いて機体性能モデルおよび気象データについて評価を行いました.
- ・気象庁において解析した気象予報データを使用しました. 使用するにあたり京都大学生存圏研究所が整備するWeb上のデータを利用しました.
- ・EUROCONTROLが開発したBADAモデルを機体性能モデルとして使用しました.

本研究のために便宜を図っていただいたこれらの機関に深く感謝申し上げます.