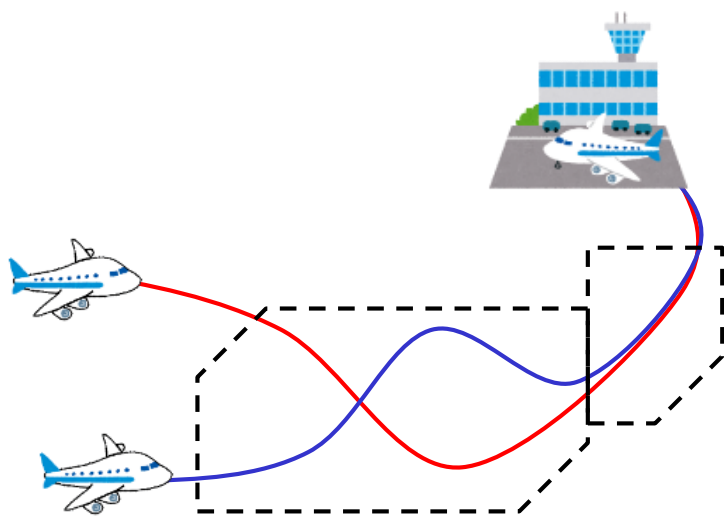


# セクタ形状を考慮した軌道最適化手法



2019/11/27

CARATSオープンデータ活用促進フォーラム

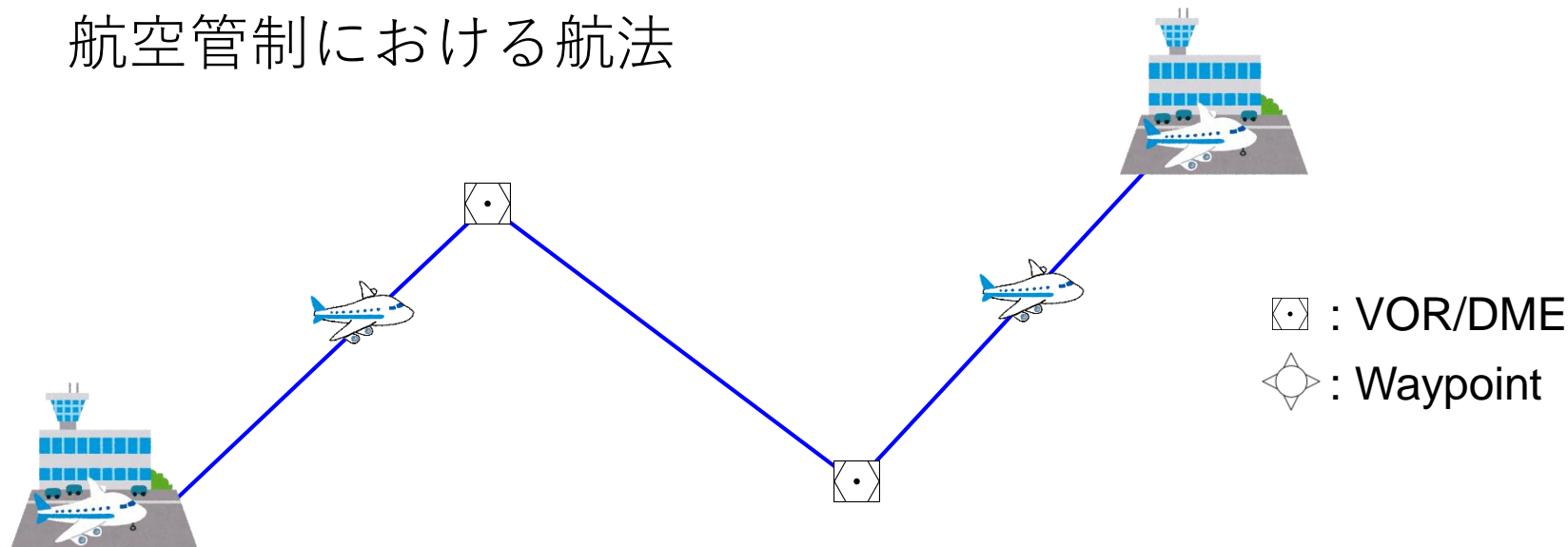
(国研) 海上・港湾・航空技術研究所  
電子航法研究所 航空交通管理領域

虎谷 大地



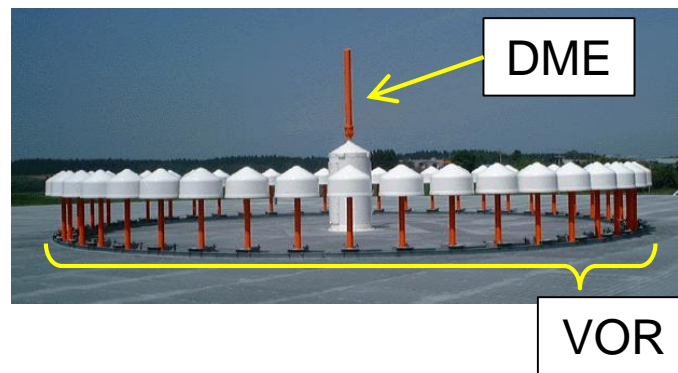
1. 研究背景
2. 軌道最適化手法
3. シミュレーション結果
4. まとめと今後の展望

## 航空管制における航法



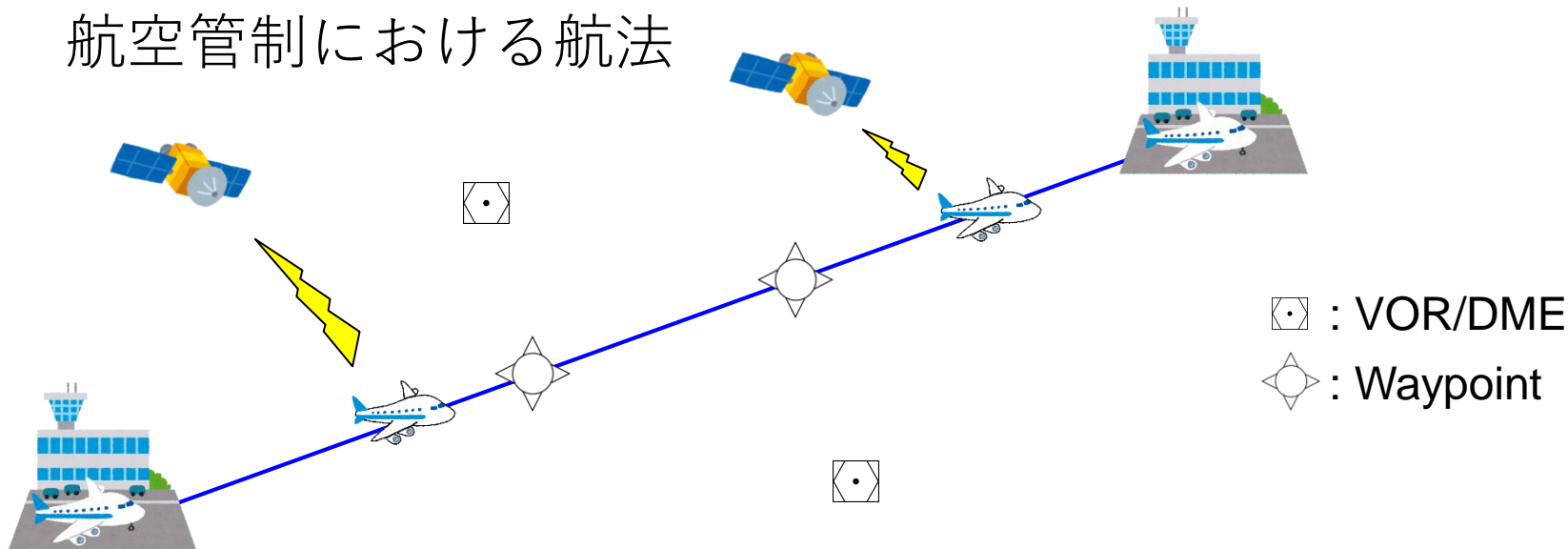
- 従来の航法  
地上の航行援助施設 (VOR/DME等)  
の配置による制約
- 広域航法 (Area navigation: RNAV)  
VOR/DMEや衛星航法等を組み合わせ、  
柔軟な経路選択が可能

VOR/DME (Source: 国交省)



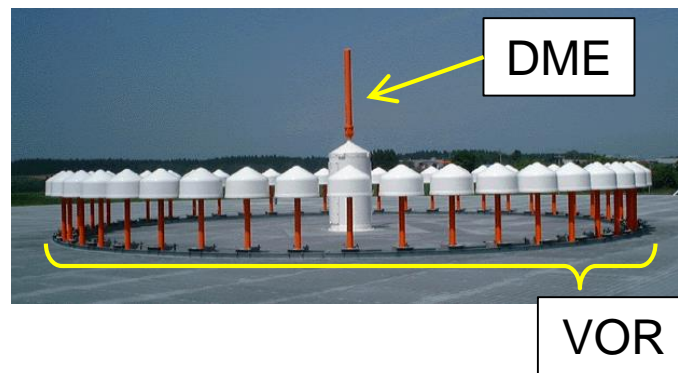
VOR: VHF Omnidirectional Radio Range  
DME: Distance Measuring Equipment

## 航空管制における航法



- 従来の航法  
地上の航行援助施設 (VOR/DME等)  
の配置による制約
- 広域航法 (Area navigation: RNAV)  
VOR/DMEや衛星航法等を組み合わ  
せ、柔軟な経路選択が可能

VOR/DME (Source: 国交省)




VOR: VHF Omnidirectional Radio Range  
DME: Distance Measuring Equipment

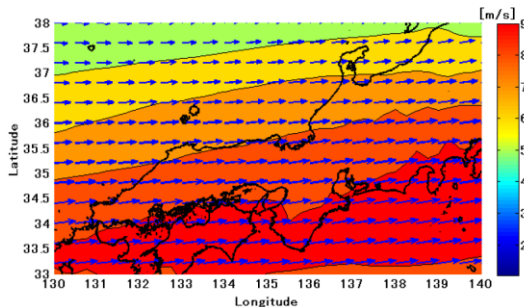
## 航空管制と軌道最適化

- 航空機ダイナミクスや実際の風を考慮した軌道最適化

航空機性能モデル

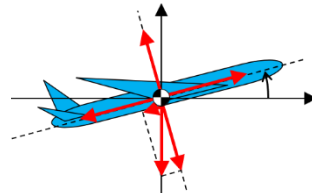
 Base of Aircraft Data (BADA)

風データ



 気象庁 数値予報  
Japan Meteorological Agency

運動モデル

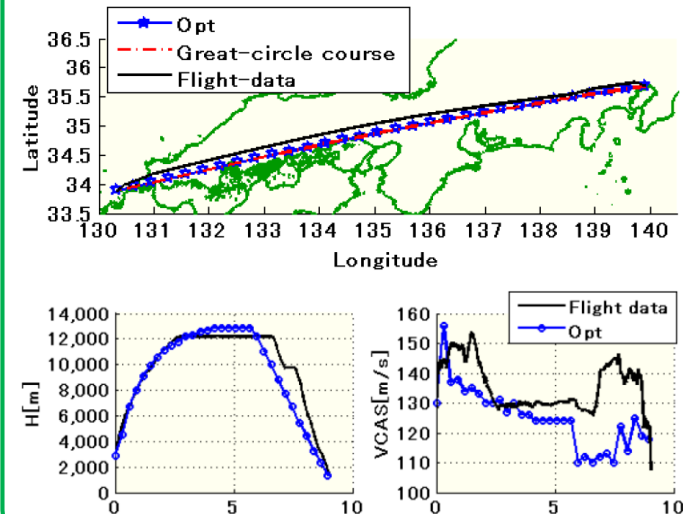


最適制御

$$H = L + \lambda^T \mathbf{F}(\mathbf{x})$$
$$\partial H / \partial \mathbf{u} = 0$$
$$\dot{\lambda} = -(\partial H / \partial \mathbf{x})^T$$

Y. Miyamoto, et al., "Analysis of Fuel-Efficient Airliner Flight via Dynamic Programming Trajectory Optimization", 2013.

最適軌道

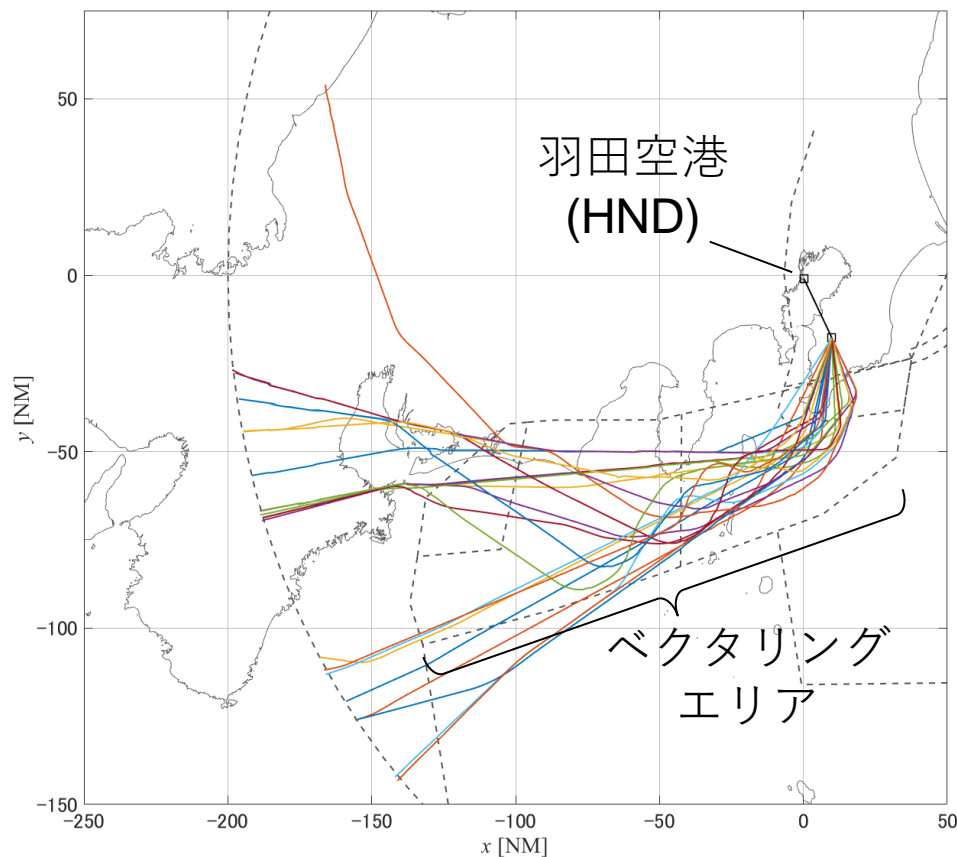


## 実運用を考慮した 軌道最適化

! 従来の研究では、セクタによる制約を考慮していなかった。

### セクタごとの運用

管制官は間隔順序づけのために、各担当セクタ内で航空機をベクタリングする。



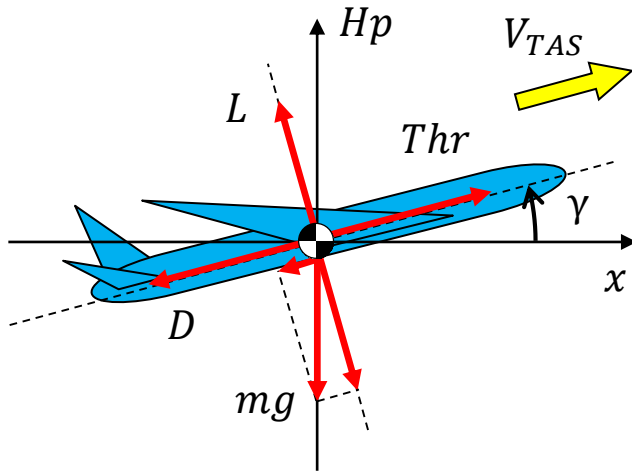
- セクタ内でのベクタリング → 経路に対する拘束条件
- セクタの形状は空域によって異なる



柔軟な拘束条件を扱うことができる軌道最適化手法

1. 研究背景
2. 軌道最適化手法
3. シミュレーション結果
4. まとめと今後の展望

### 航空機モデル



- Total Energy Model (TEM)

$$(\underline{Thr} - D)\underline{V_{TAS}} = mg \frac{dHp}{dt} + m\underline{V_{TAS}} \frac{d\underline{V_{TAS}}}{dt}$$

- 入力

- Thr : 推力

-  $V_{CAS}$  : CAS ( $M$  : マッハ数)  $\xrightarrow{\text{TAS 変換}}$   $V_{TAS}$  : TAS

-  $\frac{dHp}{dt}$  : 上昇降下率 ( $\gamma$  : 飛行経路角)

CAS: Calibrated Airspeed(校正対気速度)

TAS: True Airspeed(真対気速度)

3つの入力の内、2つを指定  
例) アイドル推力降下

- アイドル推力  $Thr_{min}$
- 一定降下CAS  $V_{CAS,dec}$   
→ TEMより  $\frac{dHp}{dt}$  計算

- 以下のパラメータは、航空機の型式ごとにBADA3から取得。
  - 抵抗 :  $D$       - 質量 :  $m$
  - アイドル推力 :  $Thr_{min}$
  - 燃料流量 :  $FF$



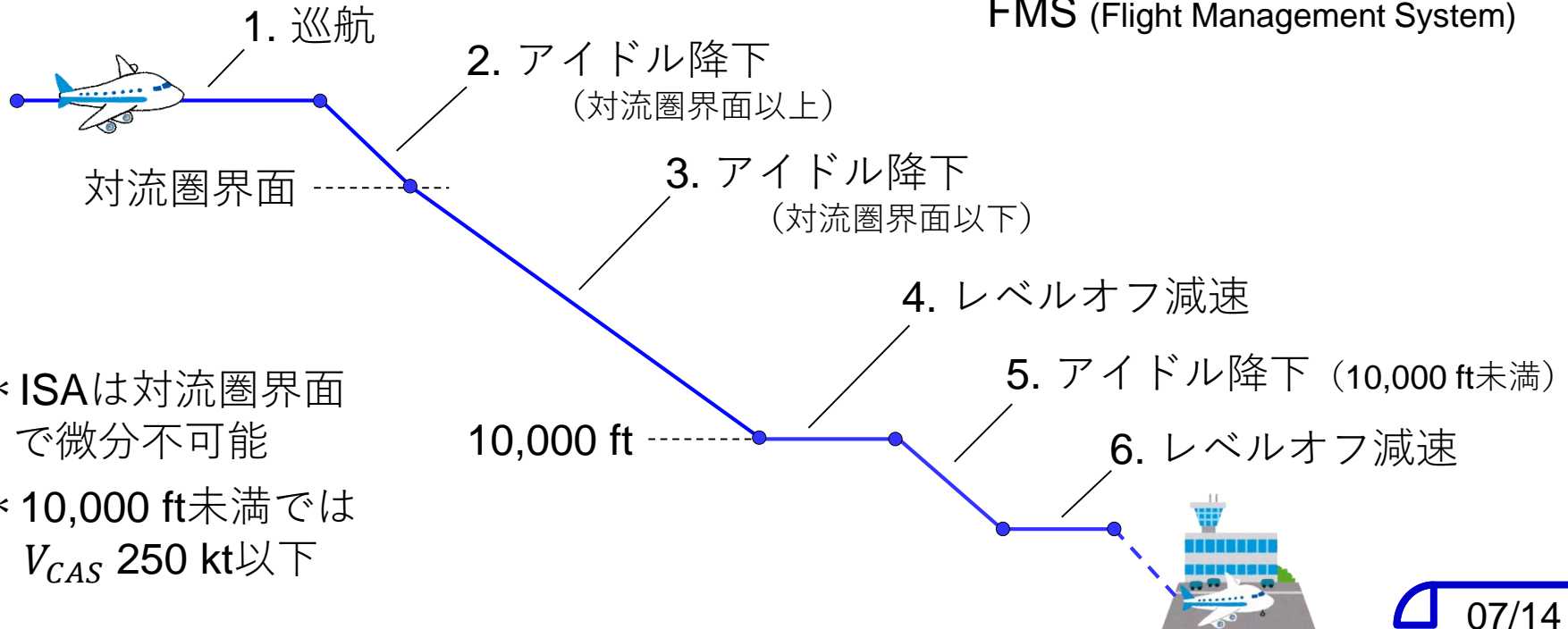
## 軌道モデル

- 降下軌道・FMSの計算を模擬
- 降下軌道を複数のフェーズに分割
- 大気モデルにISAを使用

ISA: International Standard Atmosphere  
(国際標準大気)



FMS (Flight Management System)



## 最適制御問題の定式化

- 運動方程式

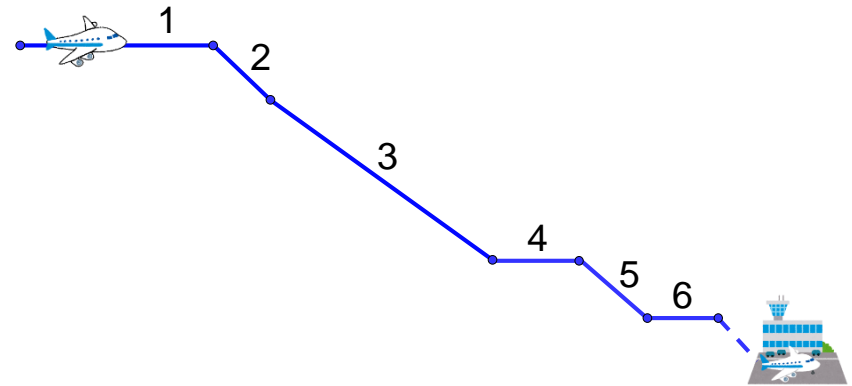
$$\mathbf{F}(\mathbf{x}) \dots \begin{cases} \dot{V}_{TAS} = (Thr - D)/m - g \sin \gamma \\ mV_{TAS}\dot{\gamma} = L \cos \phi - mg \cos \gamma \\ mV_{TAS} \cos \gamma \dot{\psi} = L \sin \phi \\ \dot{x} = V_{TAS} \cos \gamma \cos \psi + w_x \\ \dot{y} = V_{TAS} \cos \gamma \sin \psi + w_y \\ \dot{h} = V_{TAS} \sin \gamma \end{cases}$$

- 評価関数

$$J = \int_0^{t_f} \left( \underbrace{w_{FF} FF}_{\text{燃料流量}} + \underbrace{\frac{w_{\dot{\gamma}}}{2} \dot{\gamma}^2 + \frac{w_{\dot{\phi}}}{2} \dot{\phi}^2}_{\text{入力の総和}} \right) dt$$

- 境界条件

- 初期・終端条件
- 各フェーズ間の接続条件



- 最適制御理論

$$H = L + \boldsymbol{\lambda}^T \mathbf{F}(\mathbf{x})$$

$$\partial H / \partial \mathbf{u} = 0$$

$$\dot{\boldsymbol{\lambda}} = -(\partial H / \partial \mathbf{x})^T$$

二点境界値問題

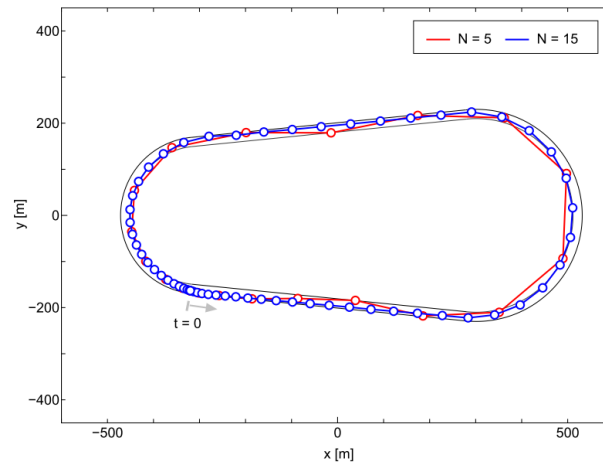
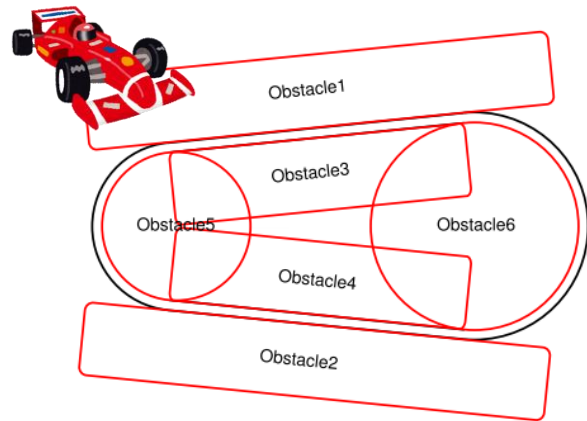
- 離散化

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{x}(k/N)$$

$$2N(\mathbf{x}_{k+1} - \mathbf{x}_k) = \mathbf{F}(\mathbf{x}_{k+1}) + \mathbf{F}(\mathbf{x}_k)$$

$$\partial H / \partial \mathbf{u}(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k, \boldsymbol{\lambda}_k) = 0$$

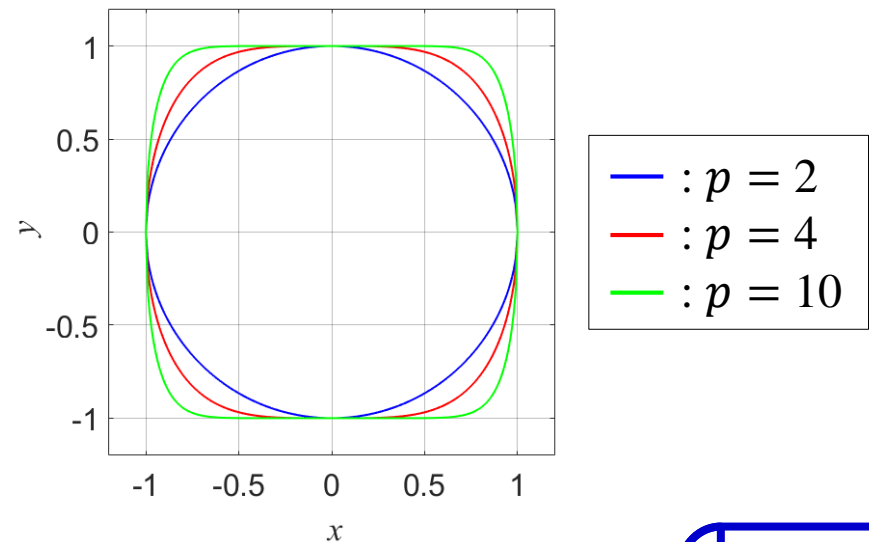
## セクタによる制約の導入 - 障害物配置法



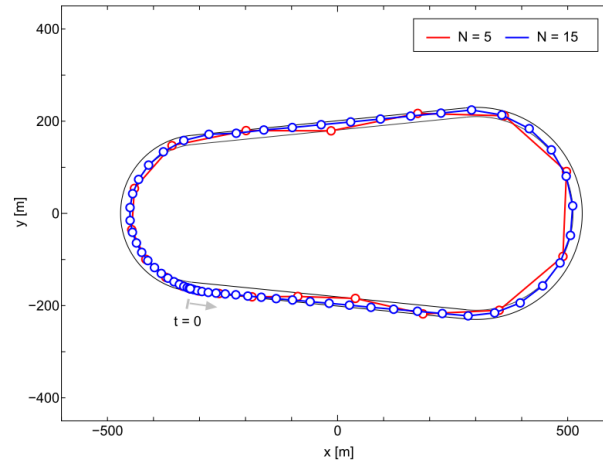
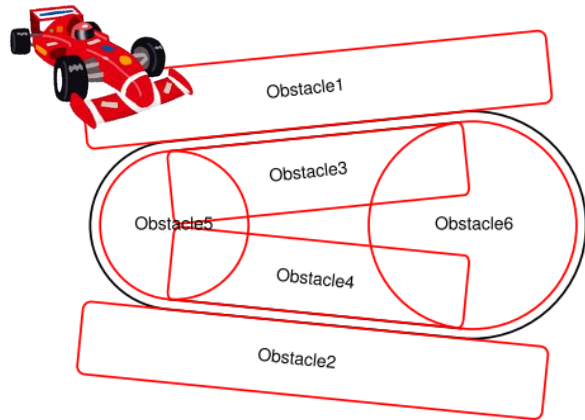
- 渡辺, 原田: 障害物配置法を用いた最適走行の解析, 2014.
- 大久保, 渡辺, 原田: 飛行経路および高度拘束下における最適進入軌道, 2017.

- $p$ -ノルム関数による制約

$$x^p + y^p = c^p$$



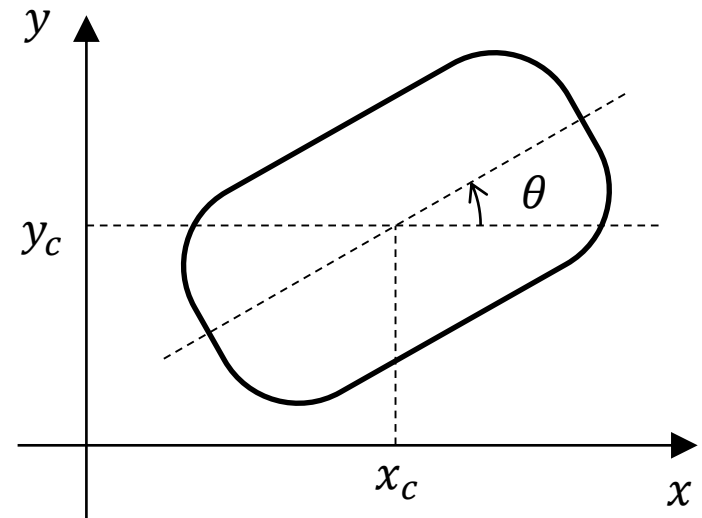
## セクタによる制約の導入 - 障害物配置法



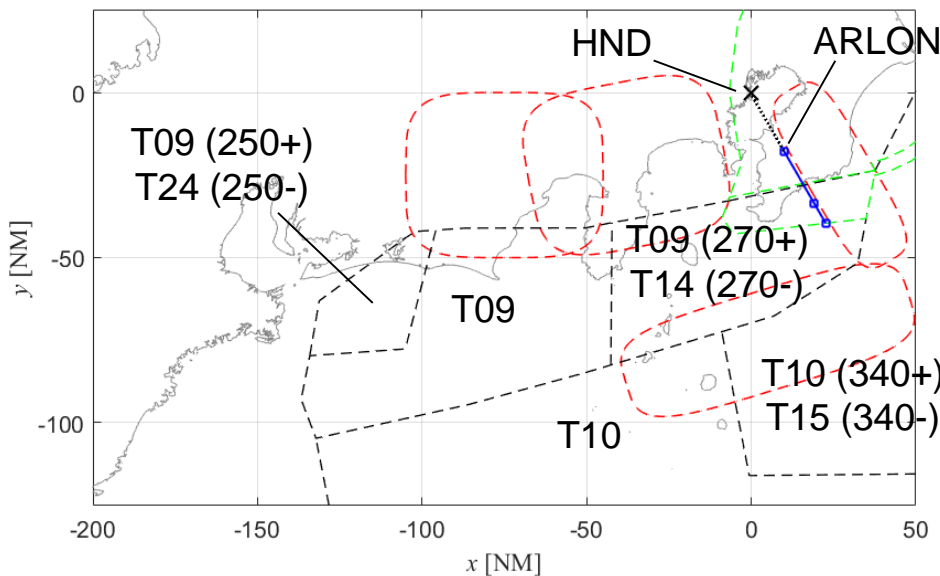
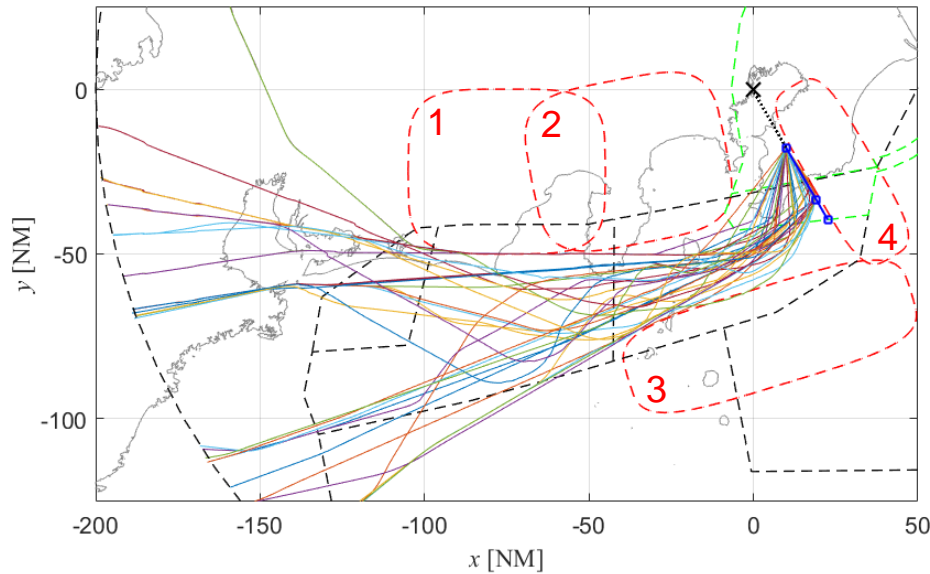
- 渡辺, 原田: 障害物配置法を用いた最適走行の解析, 2014.
- 大久保, 渡辺, 原田: 飛行経路および高度拘束下における最適進入軌道, 2017.

- $p$ -ノルム関数による制約

$$g = - \left( \frac{(x - x_c) \cos \theta + (y - y_c) \sin \theta}{a} \right)^p - \left( \frac{-(x - x_c) \cos \theta + (y - y_c) \sin \theta}{b} \right)^p + c^p \leq 0$$

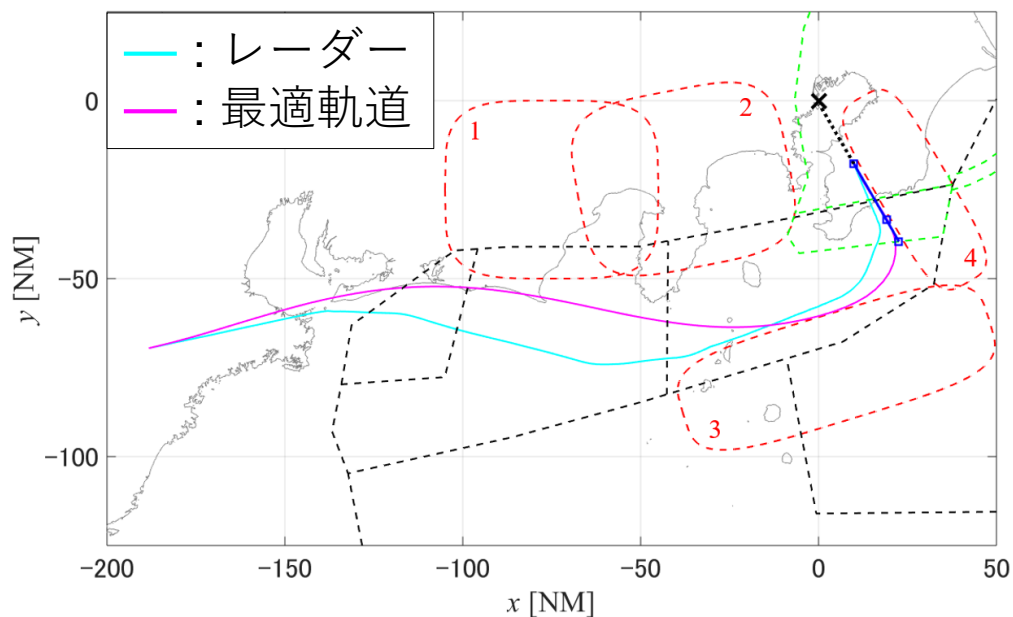


1. 研究背景
2. 軌道最適化手法
3. シミュレーション結果
4. まとめと今後の展望

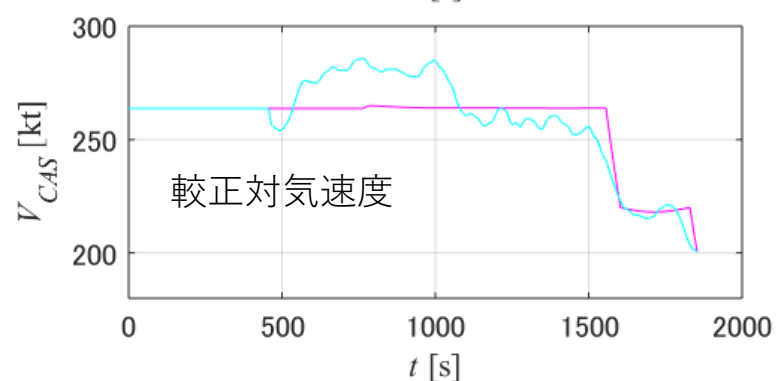
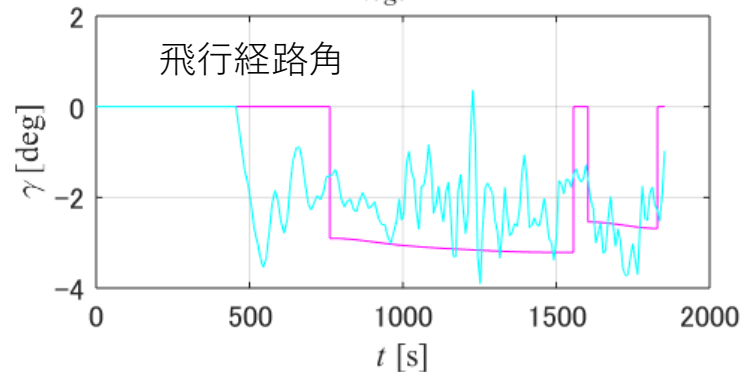
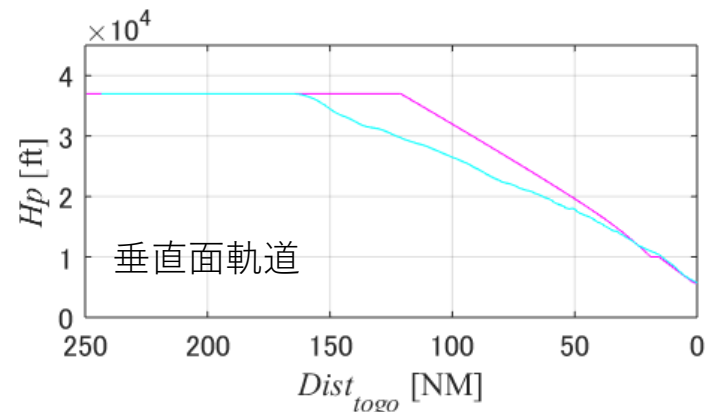


- CARATS Open Dataより、レーダーデータ取得
- 羽田空港 (HND) 到着機は、主にセクタT09, T14を通る。  
(北風運用時)
- T09, T14内で、間隔順序づけのためのベクタリングが行われる。
- 4つの障害物を定義
- 交通流形成のため、ARLONを5,000 ft / 230 ktで通過。

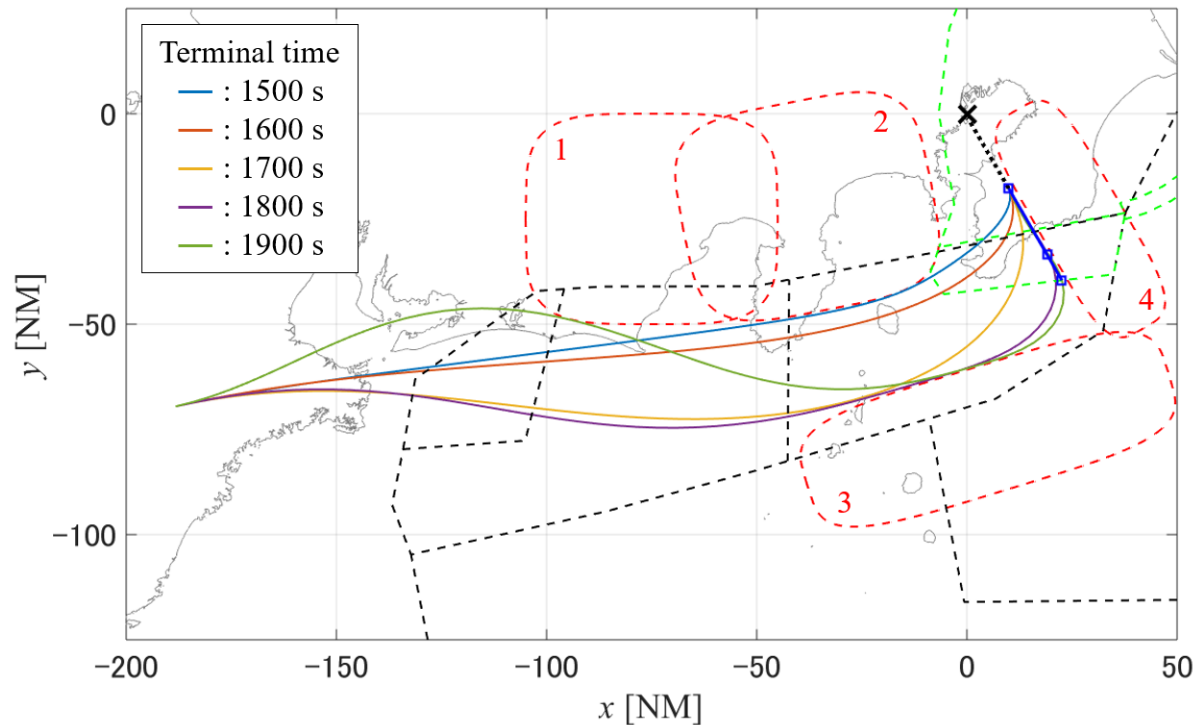
## シミュレーション結果1



- ベクタリングしているケースに対して軌道計算.
- 水平面において、同様のベクタリング軌道が得られた.
- 最適軌道の方が、飛行経路角が大きく、速度が遅い.



## シミュレーション結果2



- 終端時間を変化させてシミュレーション.
- 終端時間 → 小 : 最短経路
- 終端時間 → 大 : 経路延伸, ベクタリング
- セクタ内での飛行時間延長を模擬することができた.



## まとめ

- 航空管制の実運用上の制約（セクタ内のベクタリング）を考慮した，軌道最適化手法を開発した．
- シミュレーションにより，実運用におけるベクタリングを模擬できていることを確認した．

## 今後の展望

- 得られた最適軌道の定量的な解析．
- 到着管理 (AMAN) への応用．

