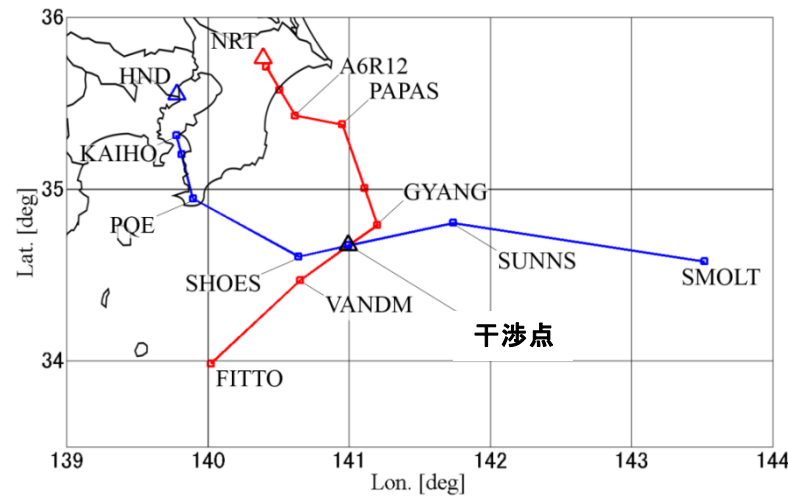
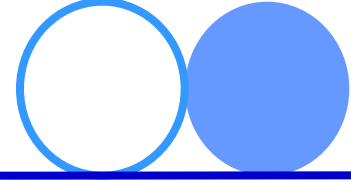


6. 継続上昇運航(CCO)に関する研究



2016年 6月 9日 電子航法研究所研究発表会
横浜国立大学 上野誠也
航空交通管理領域 虎谷大地



1. 研究の背景と課題

課題1 他機との時間的・空間的間隔の確保

2-1 時空間座標系 2-2 単機の軌道最適化

課題2 干渉点での通過順序の最適化

3-1 評価関数曲線 3-2 軌道と順序の最適化

課題3 実運用システムへの展開

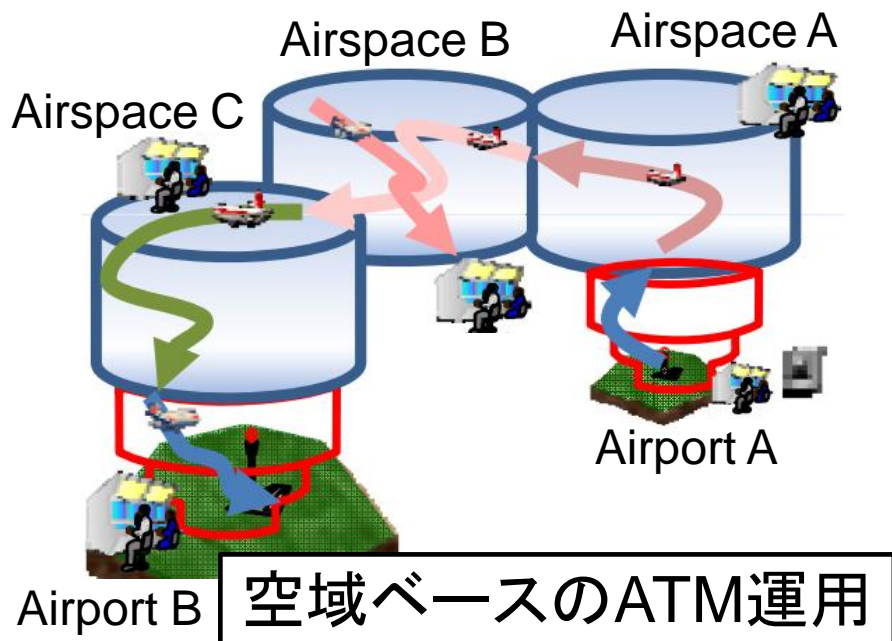
4-1 継続的最適化 4-2 計算量の低減

5 研究の成果

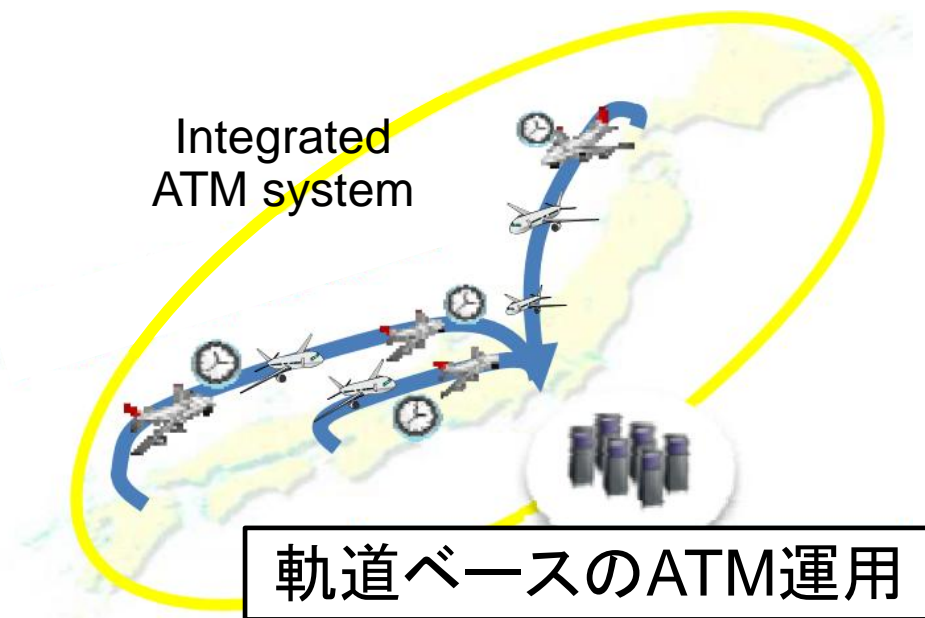
1. 研究の背景と課題 1/5

航空交通管理(ATM)の変革

- 現行のATM



- 将来のATM



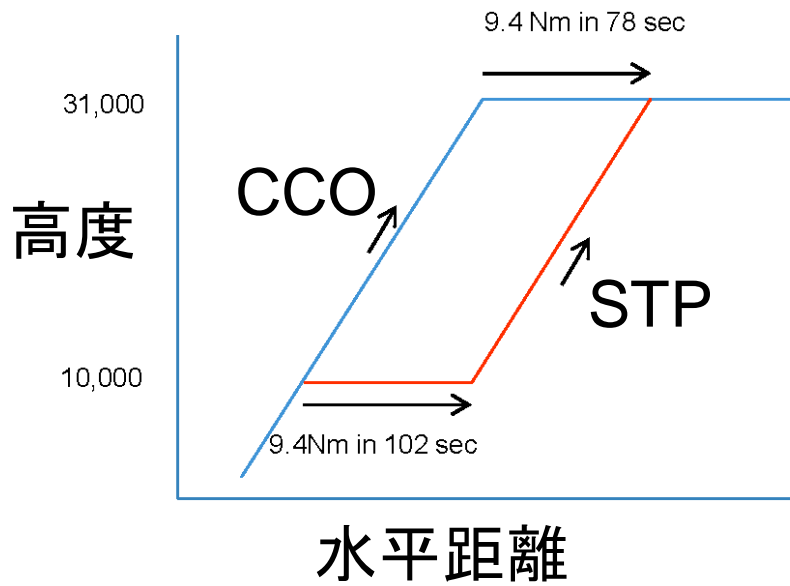
! 4次元(位置と時間)軌道運用が必要とされる

1. 研究の背景と課題 2/5

◆ 継続上昇運航 (CCO) : 離陸からの上昇区間において、水平飛行区間を用いずに、上昇する運航方式

- ✓ 消費燃料の削減
- ✓ 運航時間の短縮

- ✓ 環境影響の軽減
- ✓ 管制作業の低減

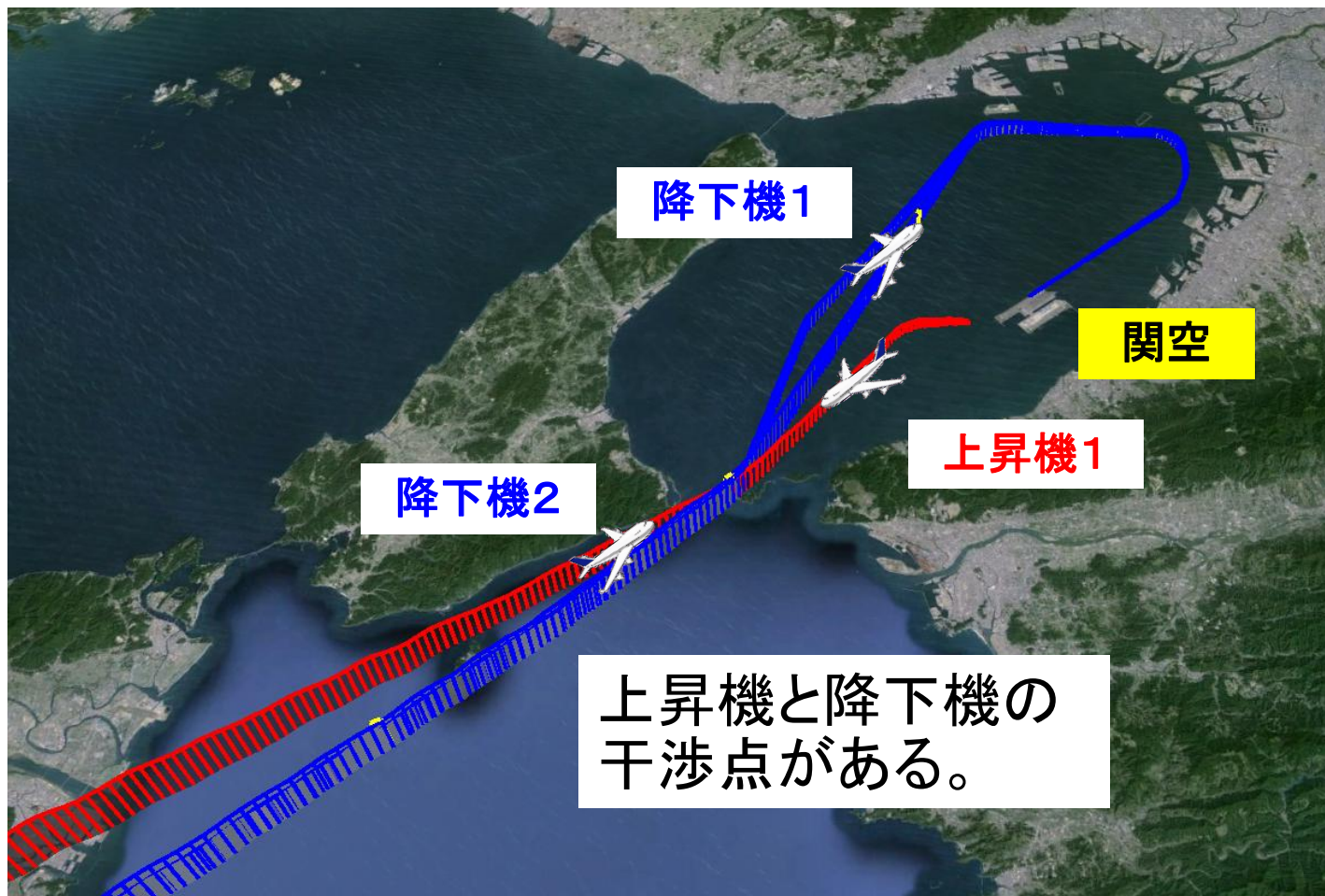


| | 高度 [ft] | 消費燃料 [kg] | 飛行時間 [s] |
|------------|------------|--------------|-------------|
| <u>CCO</u> | 31,000 | 58 | 78 |
| STP | 10,000 | 76 | 102 |

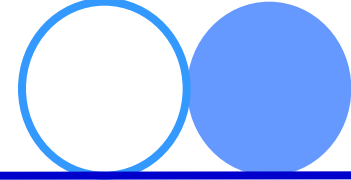
Roachら AIAA-2010-9379より引用

1. 研究の背景と課題 3/5

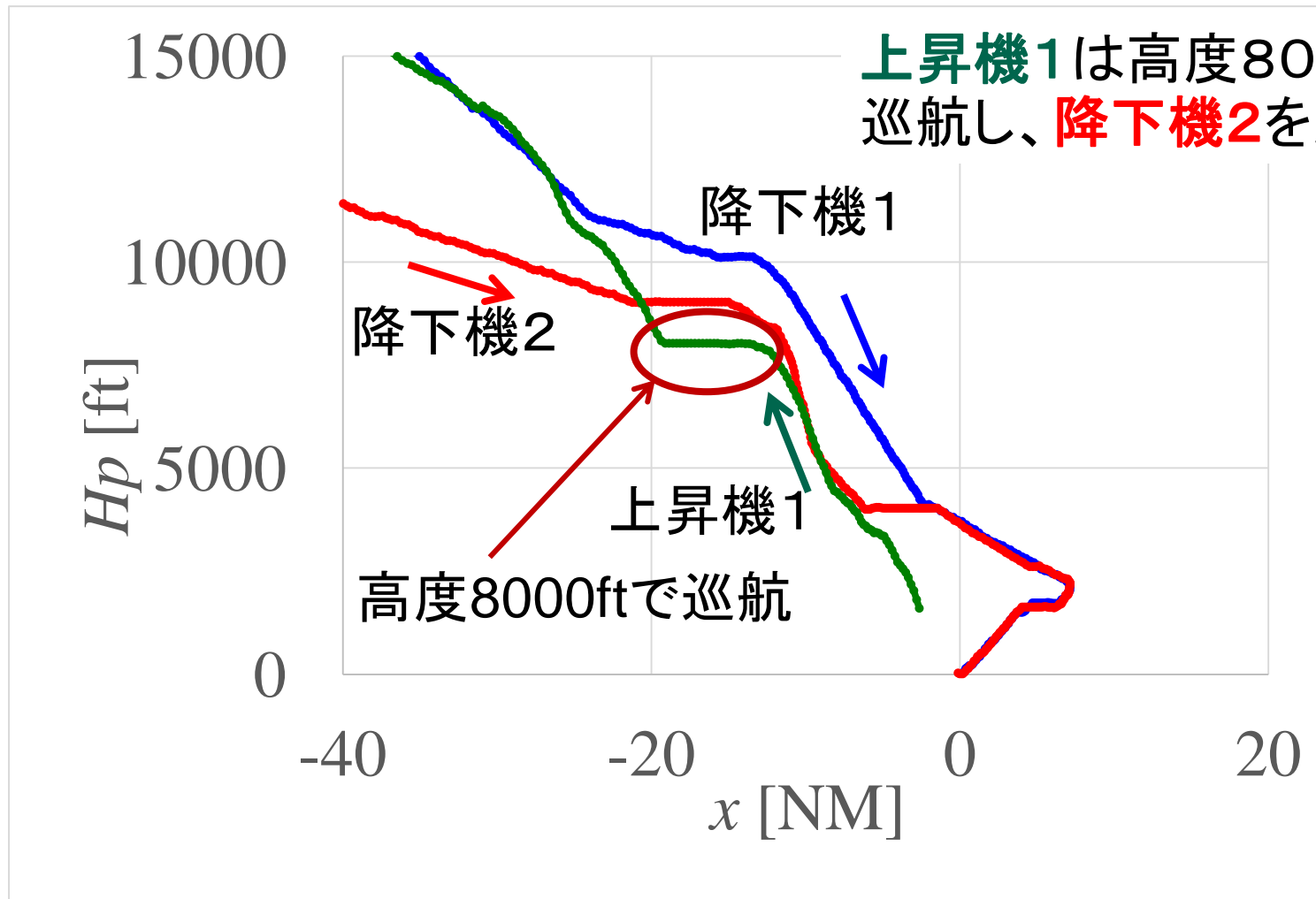
関空における上昇機と降下機の干渉



1. 研究の背景と課題 4/5



高度



課題1 他機との時間的・空間的間隔の確保

⇒ 単機の軌道最適化

課題2 干渉点での通過順序の最適化

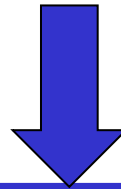
⇒ 複数機の軌道と順序の最適化

課題3 実運用システムへの展開

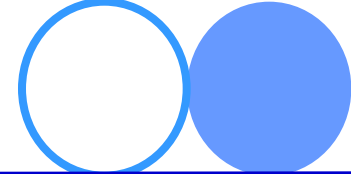
⇒ 連続的な軌道生成

⇒ 計算処理時間の短縮

課題1 他機との時間的・空間的間隔の確保

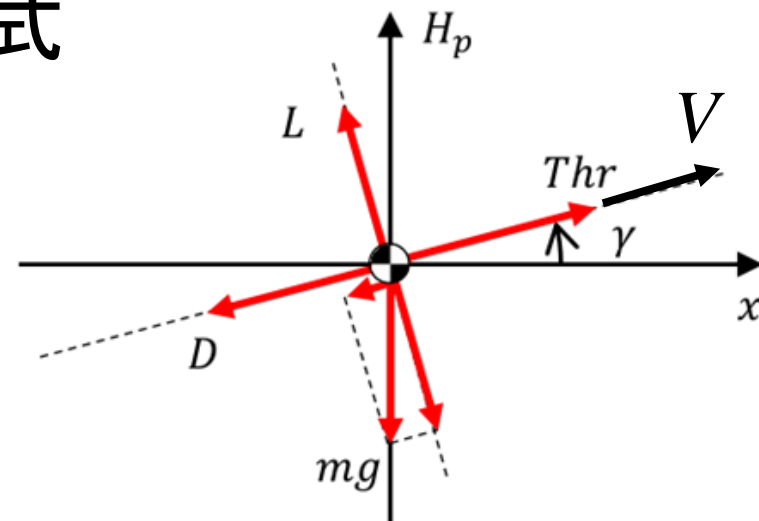


時空間座標系を導入し、時間を空間座標と同じ状態変数として扱うことで、時間的間隔と空間的間隔のバランスを考慮した最適軌道が生成できる。**単機の軌道最適化**でその有効性を示す。



航空機の垂直面内運動方程式

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} V \\ \gamma \\ x \\ H_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (Thr - D - W \sin \gamma) / m \\ (L - W \cos \gamma) / (mV) \\ V \cos \gamma \\ V \sin \gamma \end{pmatrix}$$



推力モデル (BADA 参照)

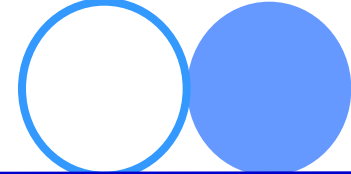
- 燃料流量

$$FF = C_{f1} \left(1 + \frac{V_{TAS}}{C_{f2}} \right) Thr \text{ [kg/min.]}$$

- 最大上昇推力

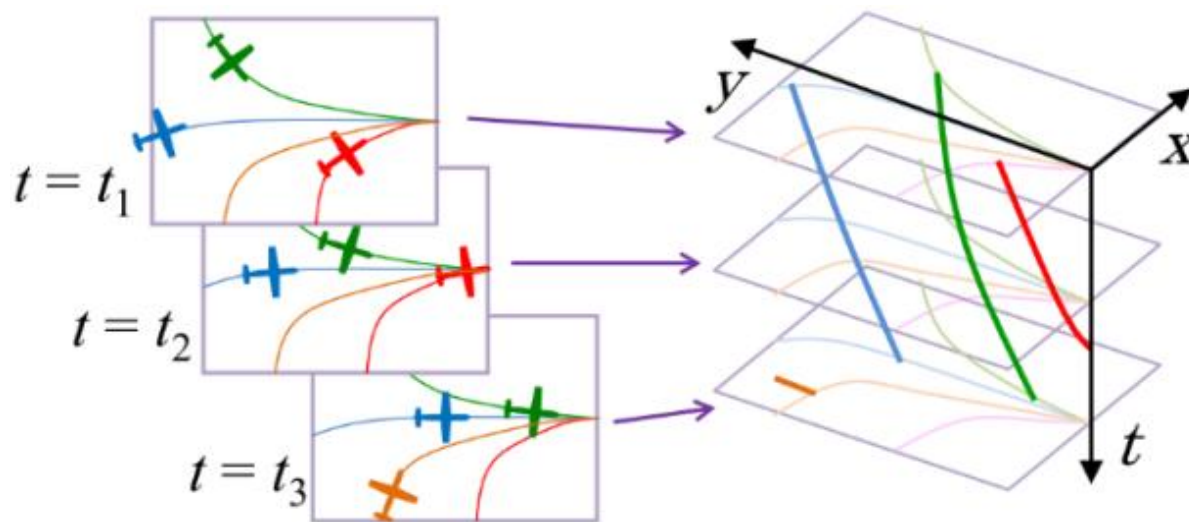
$$Thr = C_{Tc,1} \left(1 - \frac{h_p}{C_{Tc,2}} + C_{Tc,3} h_p^2 \right)$$

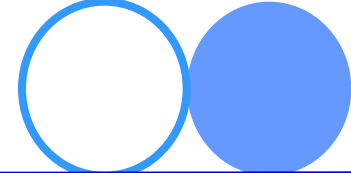
2-1 時空間座標系 2/3



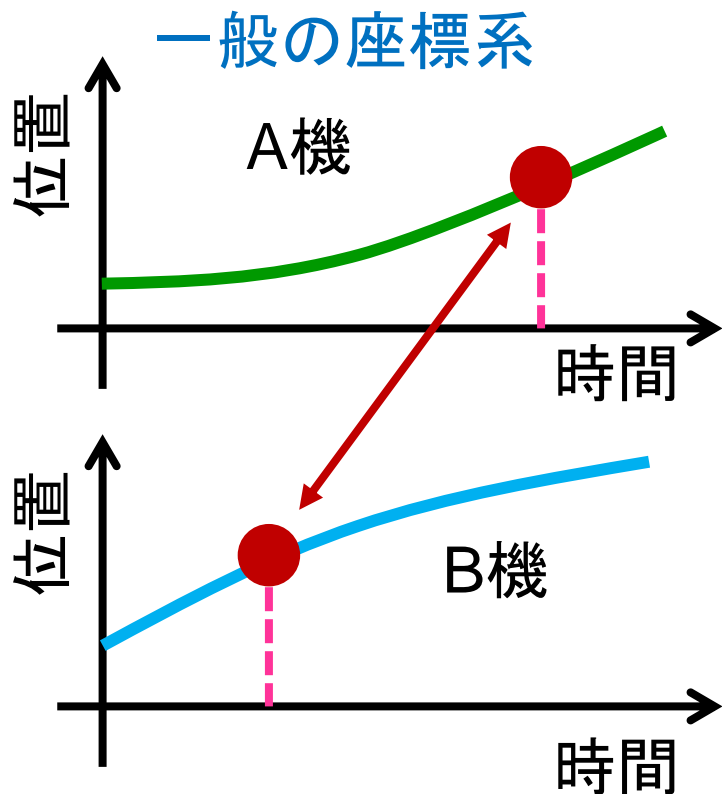
$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} V \\ \gamma \\ x \\ H_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (Thr - D - W \sin \gamma) / m \\ (L - W \cos \gamma) / (mV) \\ V \cos \gamma \\ V \sin \gamma \end{pmatrix} \xrightarrow{\text{red arrow}} \frac{d}{ds} \begin{pmatrix} V \\ \gamma \\ x \\ H_p \\ t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (T - D - W \sin \gamma) / (mV) \\ (L - W \cos \gamma) / (mV^2) \\ \cos \gamma \\ \sin \gamma \\ 1/V \end{pmatrix}$$

$ds = Vdt$

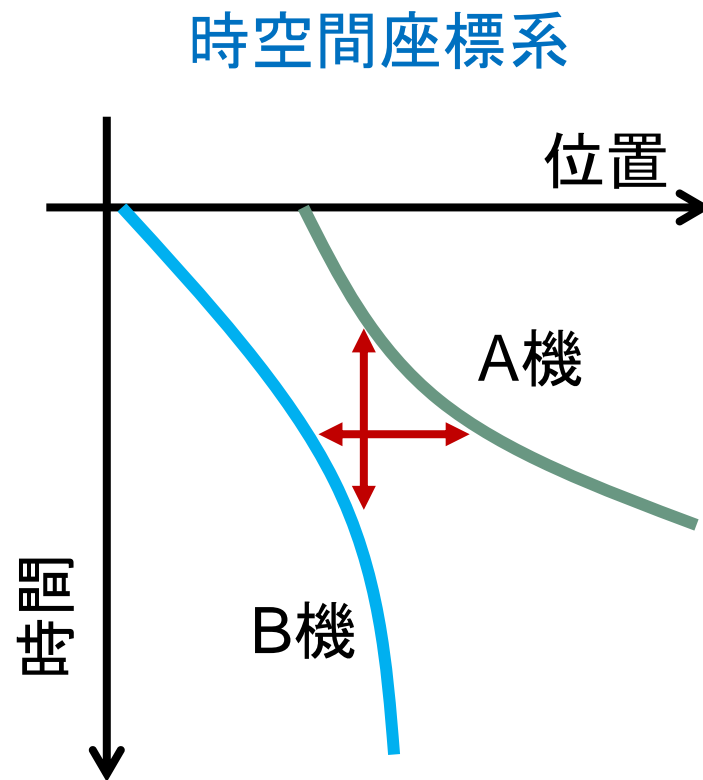




◆時空間座標系の利点

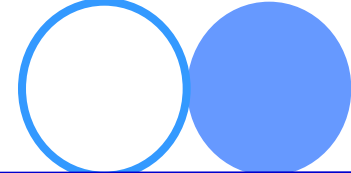


異なる時間の比較が
困難である



時間的間隔と空間的間隔を
同等に扱うことができる

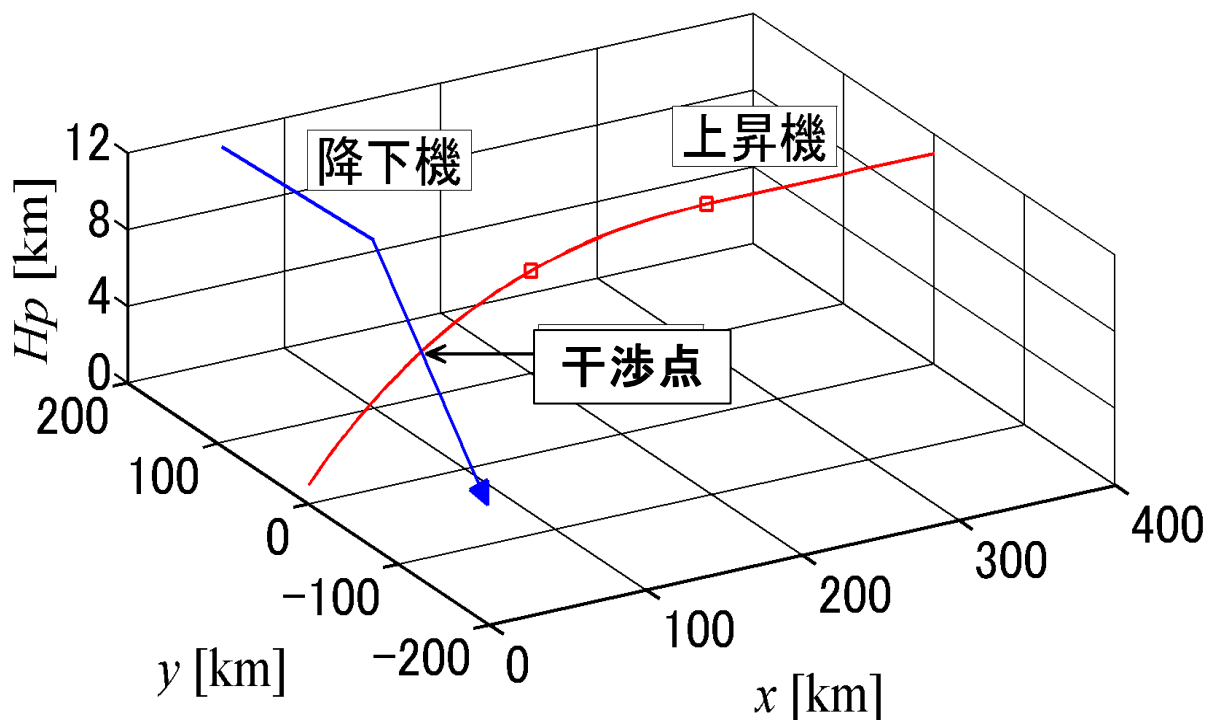


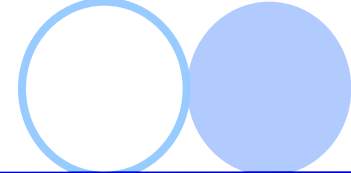


◆問題の設定

降下機： CDOによる降下（優先度が高い）

上昇機： CCOによる上昇→最適回避

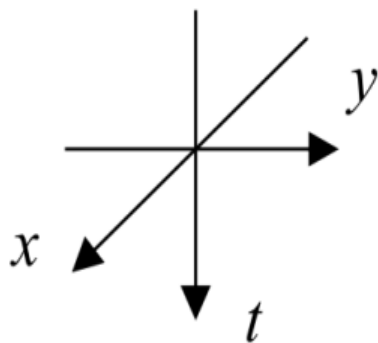




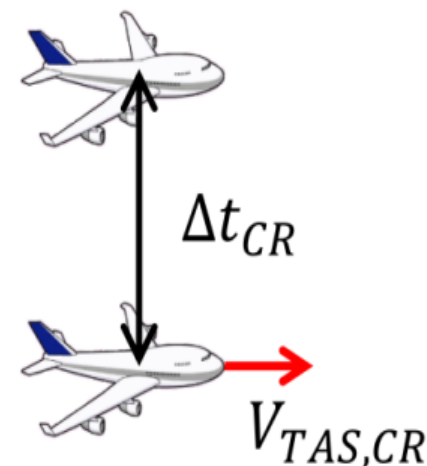
◆回避の条件

空間的間隔: $R_{CR}=5[\text{nm}]$ (約9260[m])

時間的間隔: $\Delta t_{CR}=44.0[\text{s}]$ (=9260[m]/210[m/s])

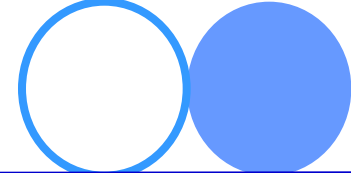


空間的回避

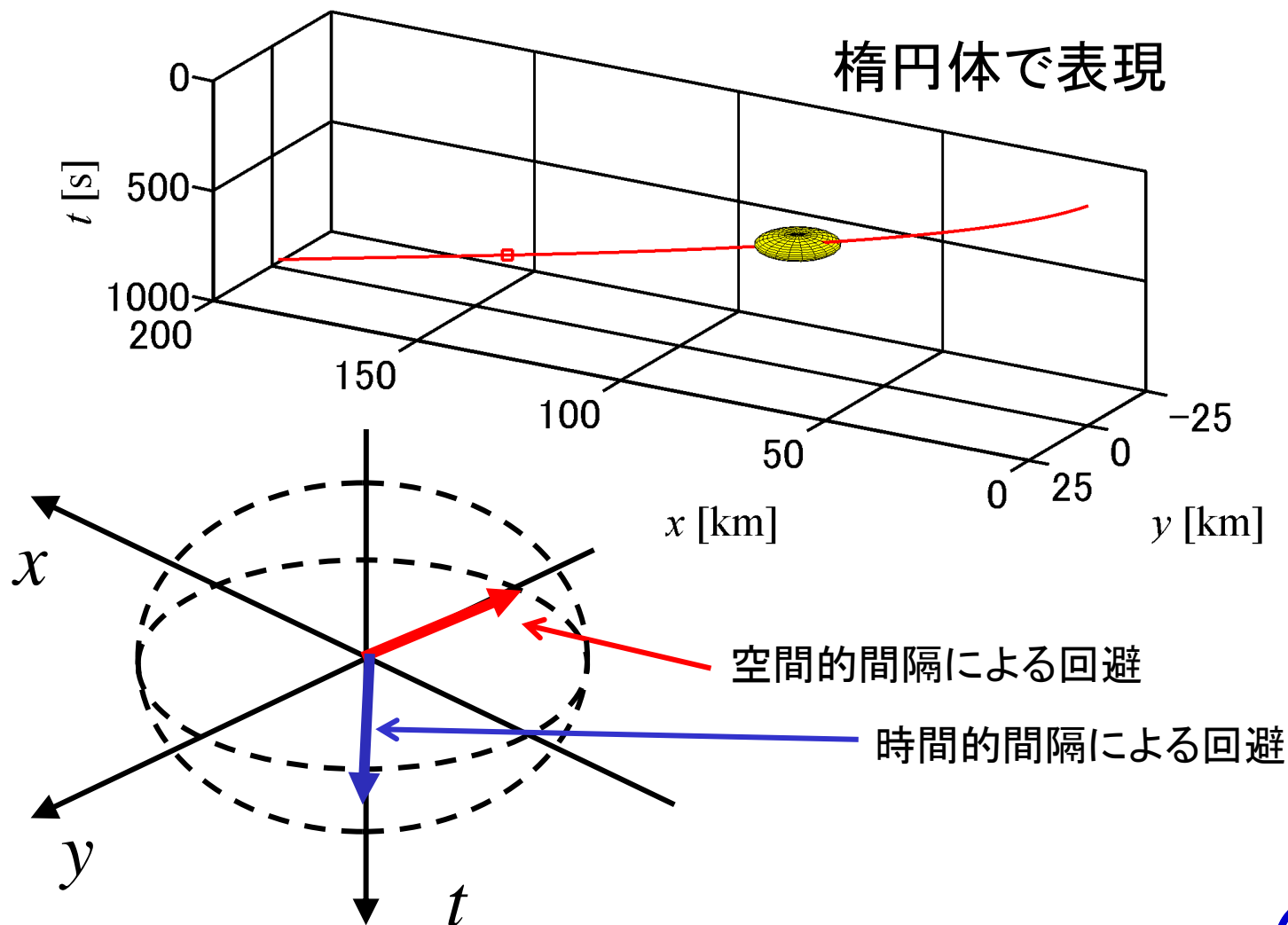


時間的回避

従来の座標系ではどちらかを選んで最適化計算を行った。

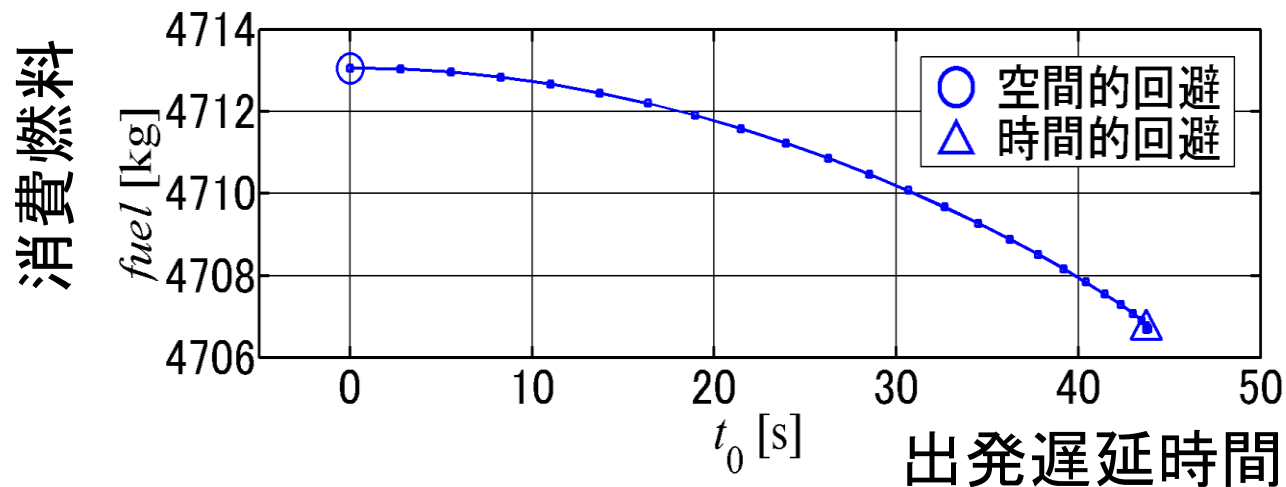


◆時空間座標系における空間的間隔と時間的間隔



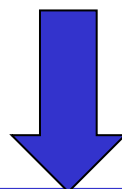
- ・楕円体上の一点を通過する経路を求める
- ・出発時間も最適化する計算を行う

消費燃料の比較(出発時間の調整)



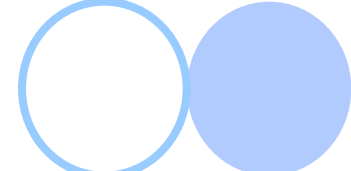
出発時間を変更する時間的回避を行うと消費燃料が減る

課題2 干渉点での通過順序の最適化

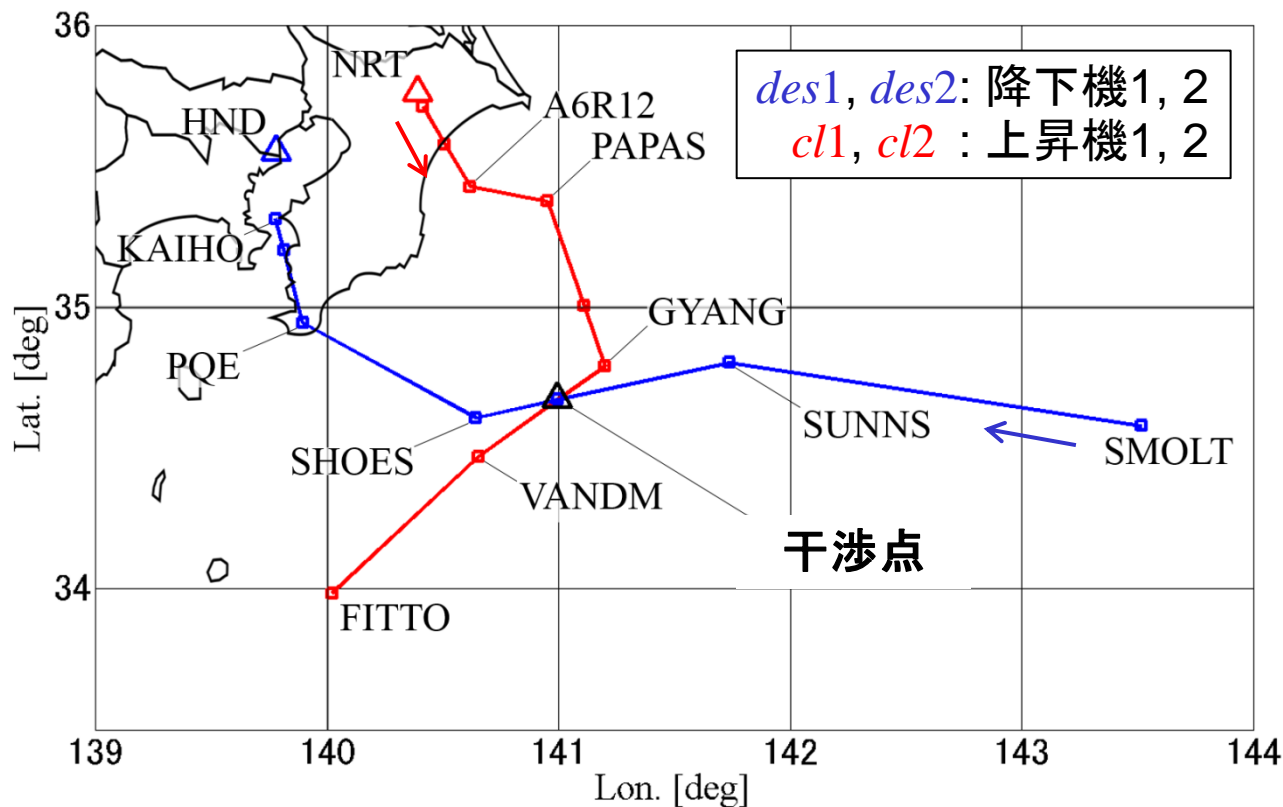


各機体の干渉点を通過する時間に対する評価関数値を示した**評価関数曲線**を導入し、時間間隔を確保した順序を混合線形計画法で解いた。**複数機の軌道最適化**でその有効性を示す。

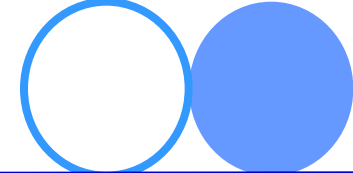
3-1 評価関数曲線 1/3



軌道順序同時最適化問題 (CCO機とCDO機の干渉)

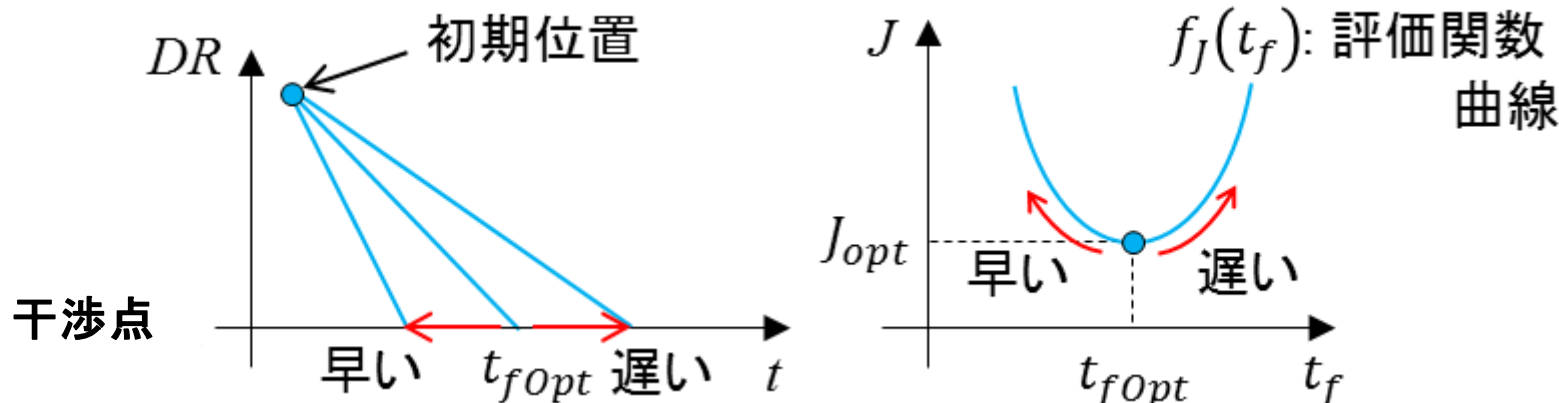


- 降下機と上昇機がCDOとCCOで飛行. 速度の変更は可能.
- CDOとCCOなので, 干渉点における回避を時間間隔で回避.
- 干渉点における**通過時間**と終端における**燃料消費量**で評価.



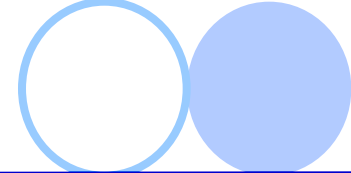
評価関数曲線の導入

通過時間に対する燃料消費量(評価関数)を示した曲線を「評価関数曲線」と呼ぶ。



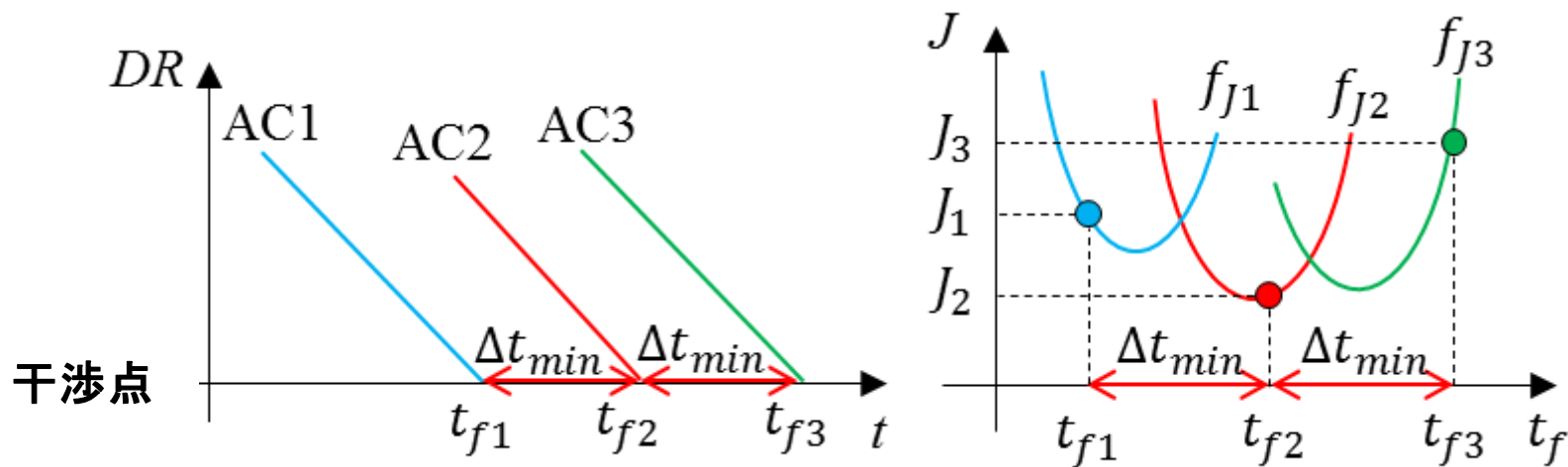
評価関数曲線は最適な通過時間(t_{fOpt})で最小となる下に凸の曲線になる。

- ◆求めるためには最適制御問題を多数回解く必要がある。
計算量が多いので実時間システムには不利となる。
⇒高速化アルゴリズムで解決



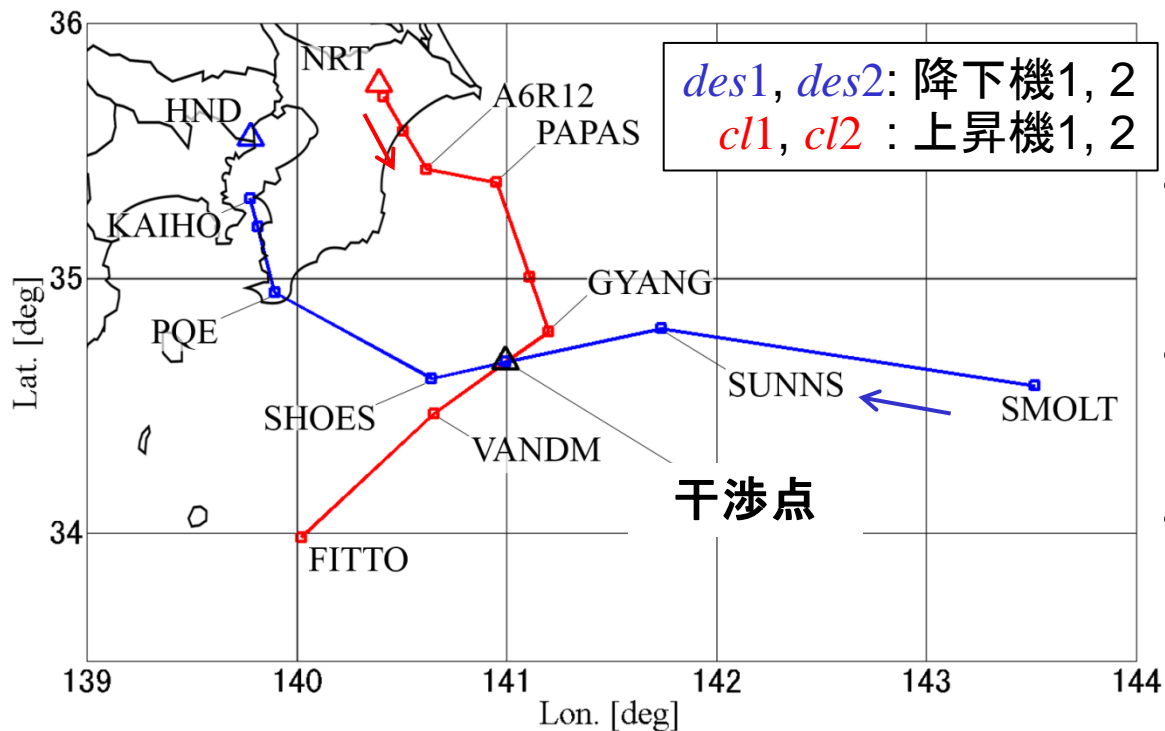
◆ 評価関数曲線の複数機へ適用

干渉点の時間間隔を保ちながら最適軌道を採用する



- 混合整数計画法を用いて、軌道と順序を同時に最適化することができる。

計算条件



- CCO機とCDO機が2機ずつ飛行
- 干渉点にて最小時間(60秒)間隔を確保
- 燃料消費量で評価

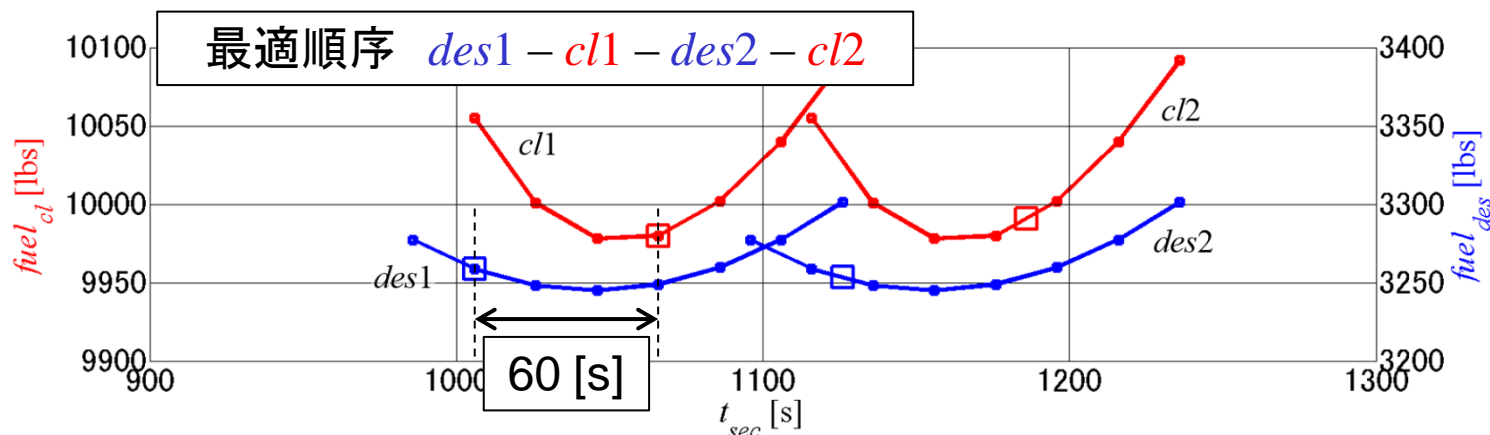
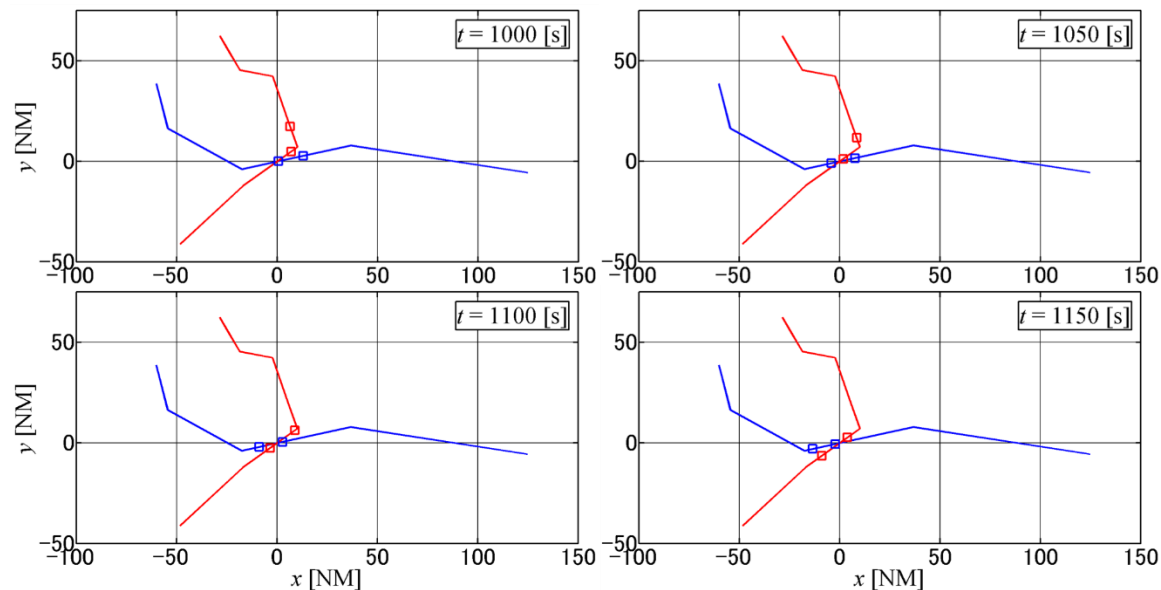
ケース1 4機が同一機種(B772)

ケース2 CCO機の1機が異なる機種(B744)

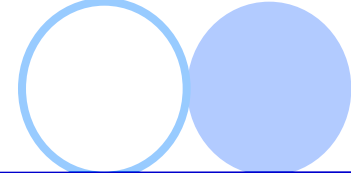
ケース3 出発時刻の遅延を許容

3-2 軌道と順序の最適化 2/5

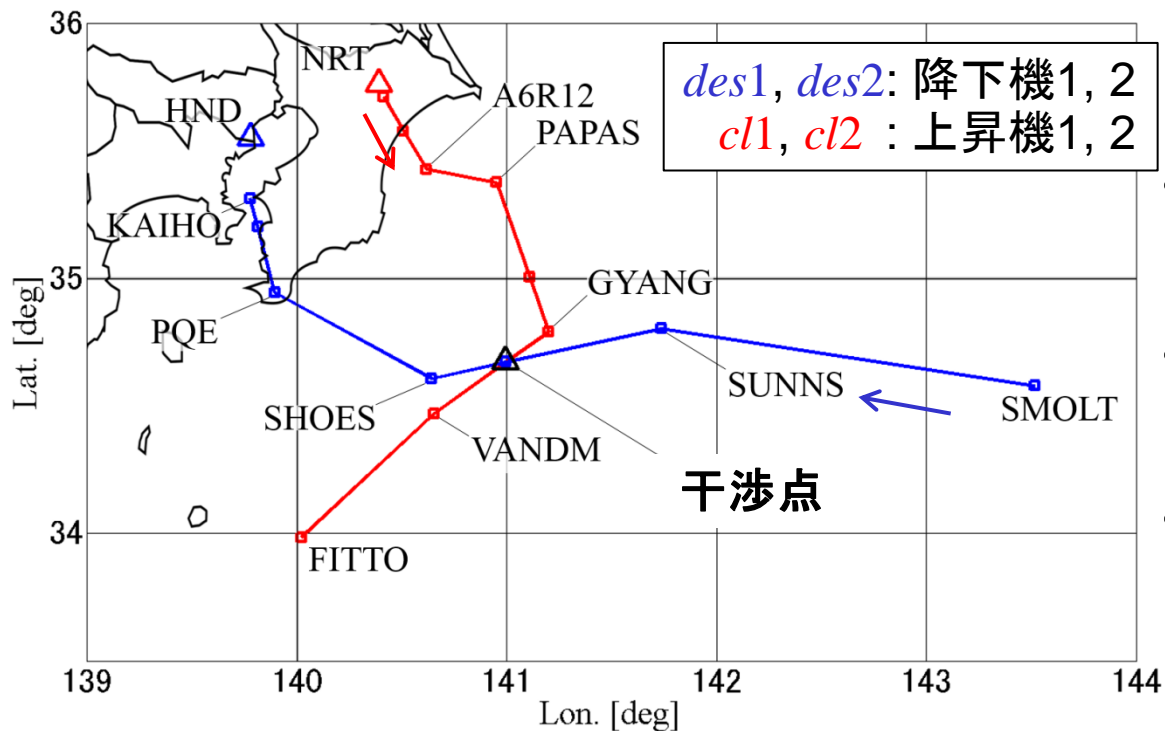
ケース1 (全てB772)



評価関数曲線



計算条件



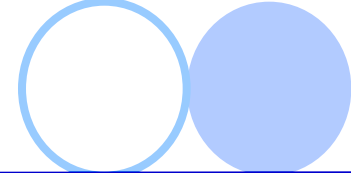
- CCO機とCDO機が2機ずつ飛行
- 交差点にて最小時間(60秒)間隔を確保
- 燃料消費量で評価

ケース1 4機が同一機種(B772)

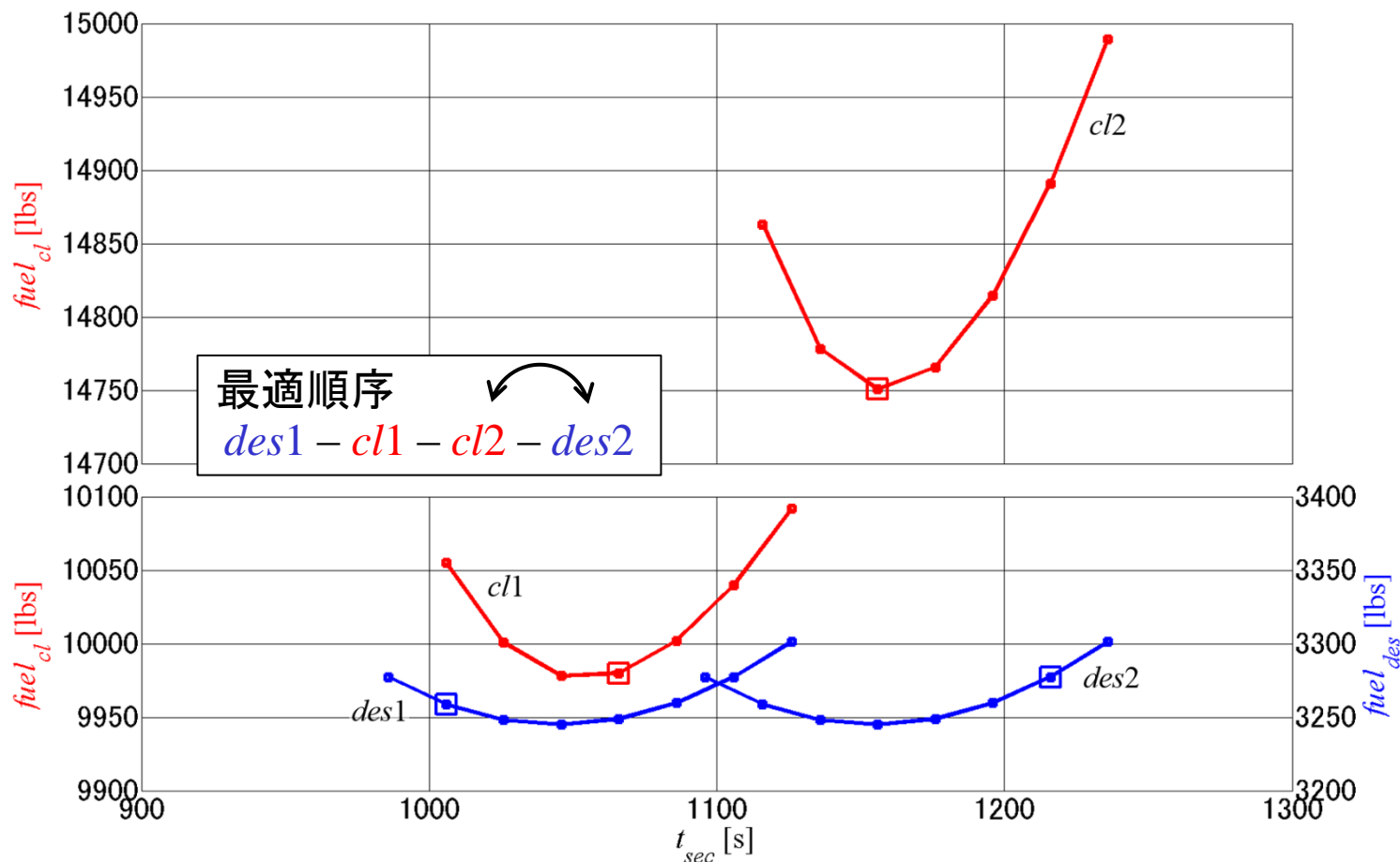
ケース2 CCO機の1機が異なる機種(B744)

ケース3 出発時刻の遅延を許容

3-2 軌道と順序の最適化 4/5



ケース2 (cl2がB744, 軌道順序同時最適化)

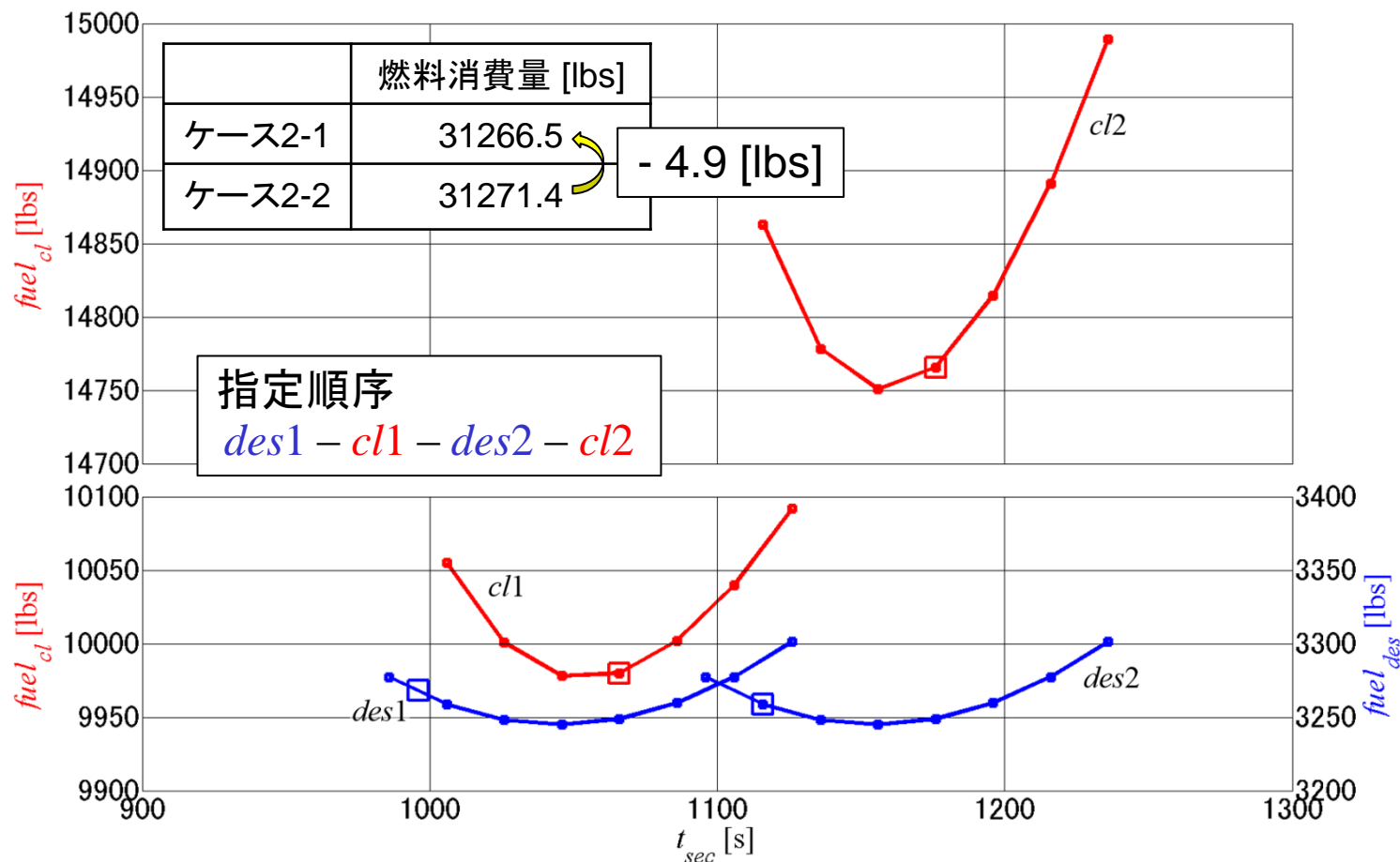


評価関数曲線

- 通過時間で燃料消費量が急変するB744を優先した順序.

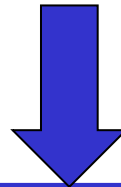
3-2 軌道と順序の最適化 5/5

ケース3(比較: cl2がB744, 順番指定)

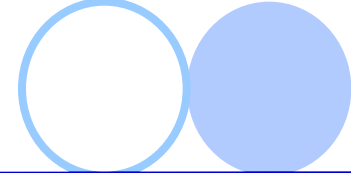


- 軌道と順序を同時に最適化した方が燃料消費量が少なかった。

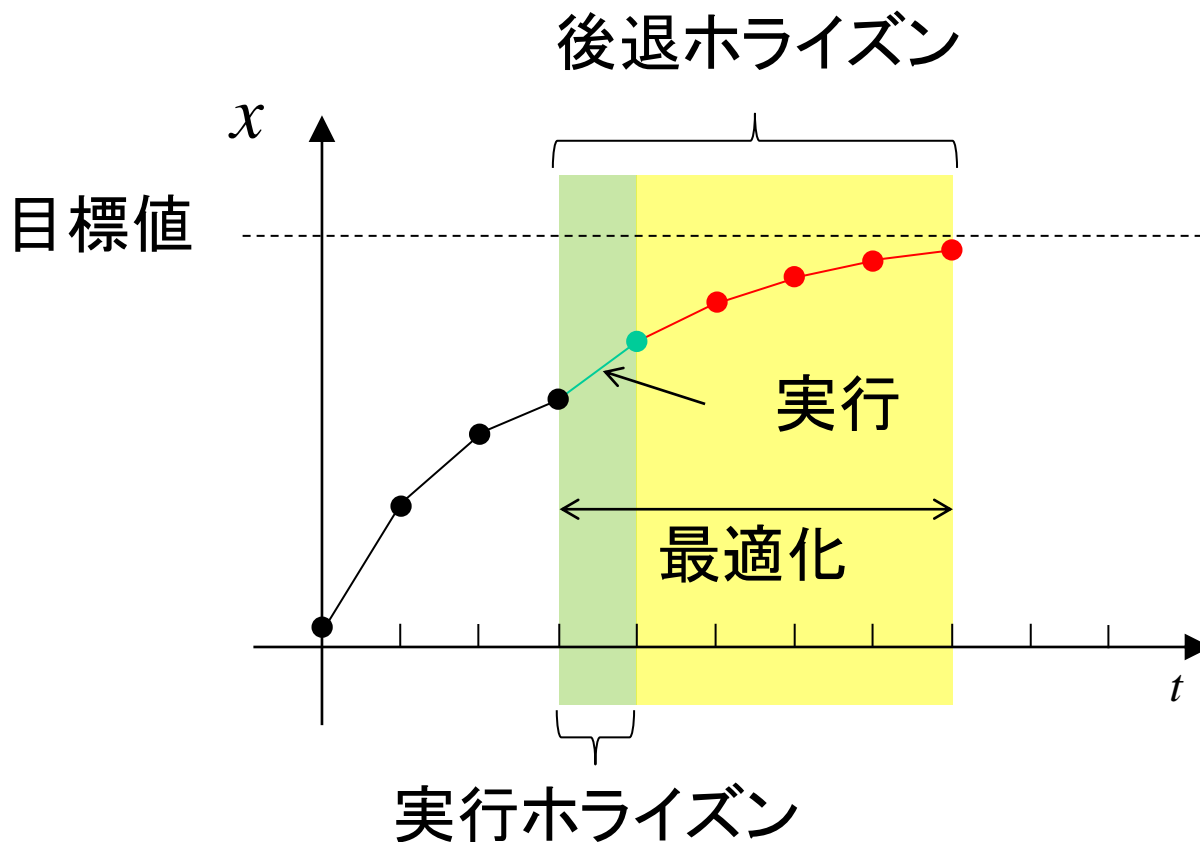
課題3 実運用システムへの展開



実運用システムでは常に新しい離陸機と着陸機が領域に加わり、継続的な最適化が短時間で行う必要がある。継続的な最適化には**レシーディングホライズン**を、計算時間の短縮には**ホモトピー法**を導入した。

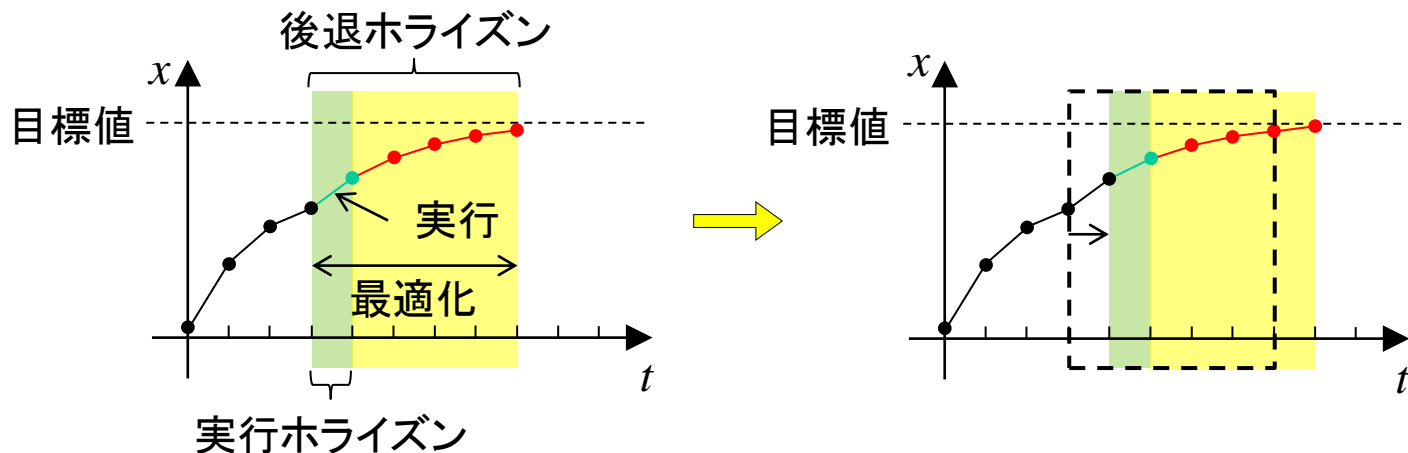


◆ レシーディングホライズン

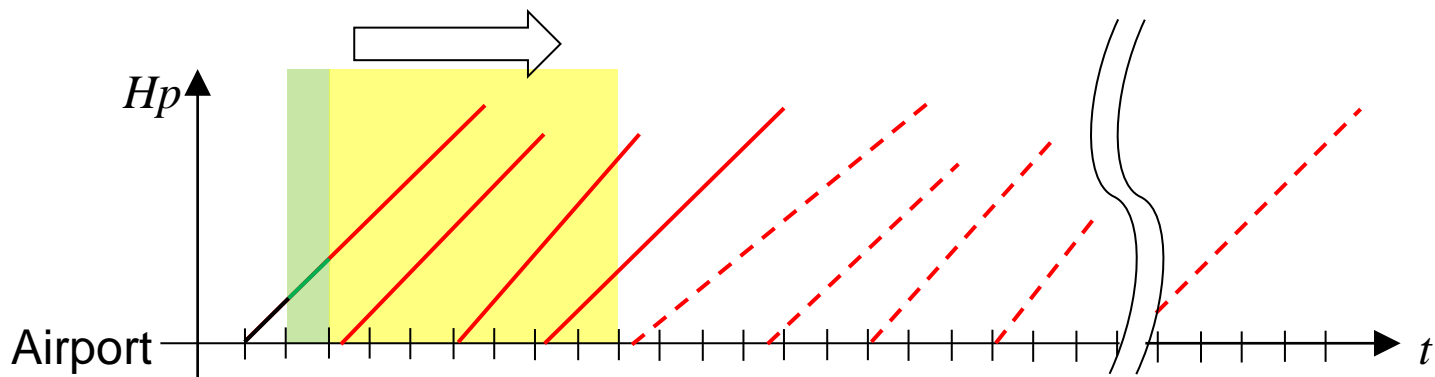


- 後退ホライズンの区間の最適化を行い、得られた最適入力の実行ホライズンの部分区間のみを用いる。

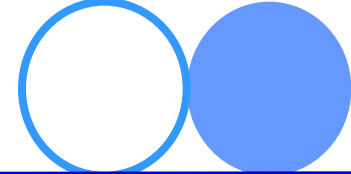
4-1 継続的最適化 2/2



- 問題を分割することで解くべき最適化問題の**計算時間を短縮**
- 繰り返し最適化による**無限時間の最適化**

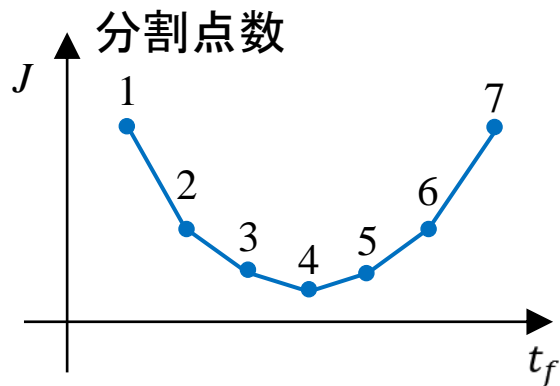


4-2 計算量の低減 1/3



最適化計算の問題点

- 評価関数曲線を得るためには複数点の評価関数値が必要。
- 1点の最適解を得るためには、膨大な繰り返し計算が必要。

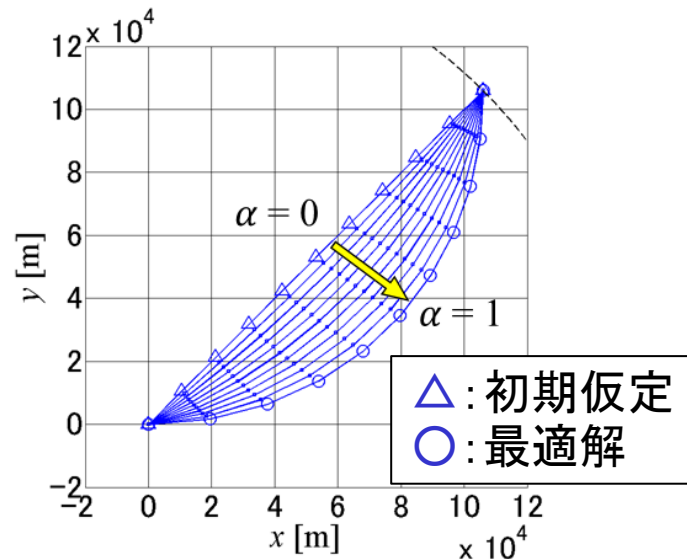


評価関数曲線の計算

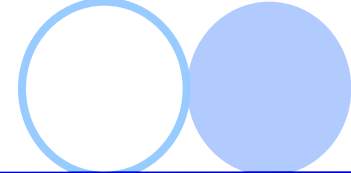
- 各点は軌道最適化計算により得られる。
- 左図では7回の最適化計算が必要。

→ ホモトピー法の特徴を利用

- 非線形連立方程式の数値解法
- 近似を用いないので、計算時間が一定
- 初期仮定解の近傍解を得るには有力

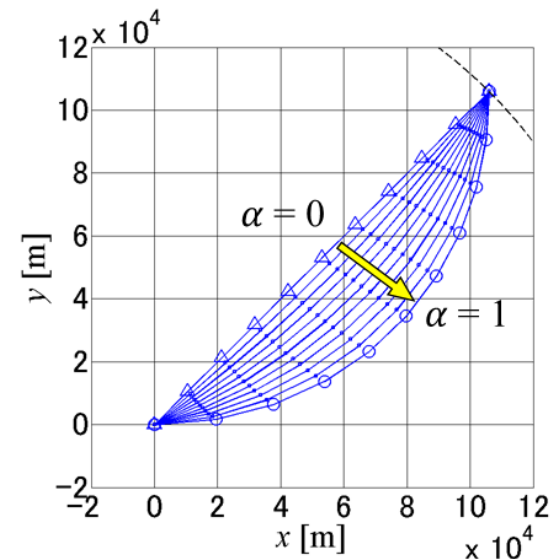


4-2 計算量の低減 2/3



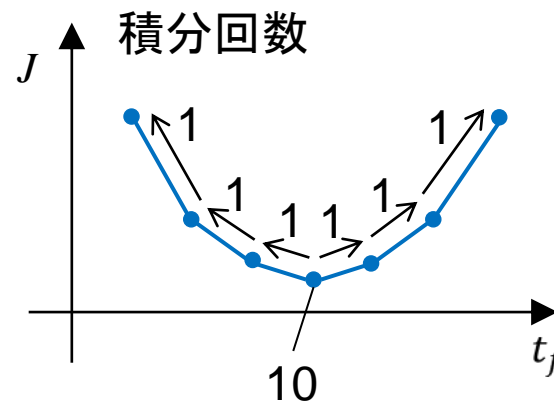
ホモトピーを用いた計算量削減

- ホモトピー法の計算量は $\alpha = 0 \sim \alpha = 1$ の積分区間分割数による.
- 右図では10回の数値積分.
- 7点分の評価関数曲線なら70回数値積分.

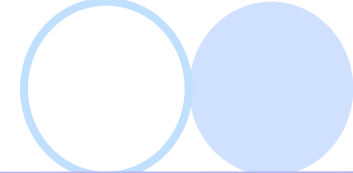


連続変化(ホモトピー)法

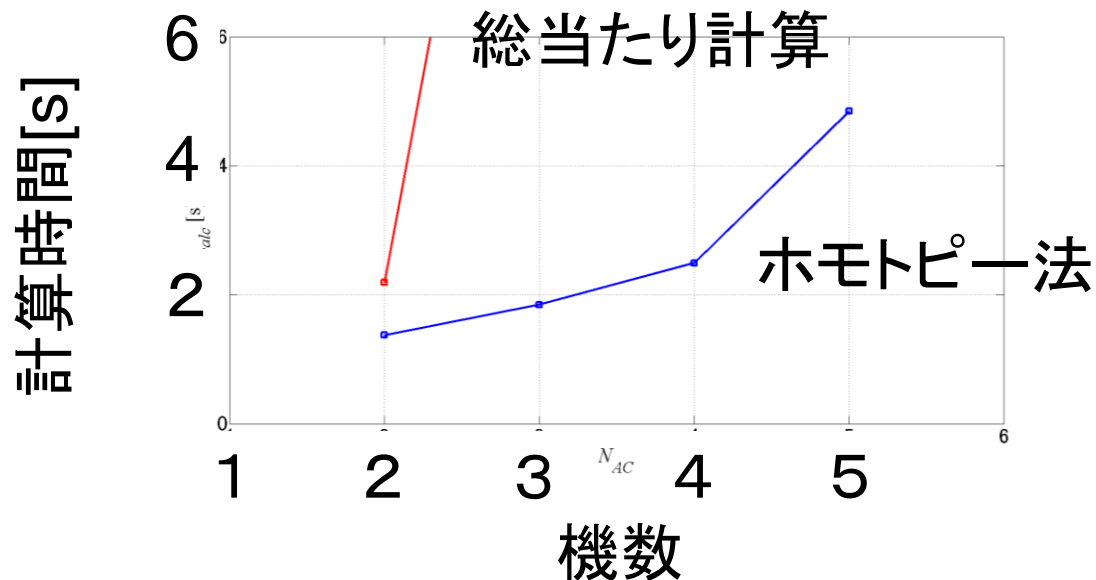
- ある最適解を初期仮定解に用いると, その近傍の解を少ない計算回数で求めることができる.
- 解は滑らかに変化する.
- 右図で, 一番下の点のみ通常通り求め, その点を初期解として他の点を求めると数値積分は16回.



4-2 計算量の低減 3/3

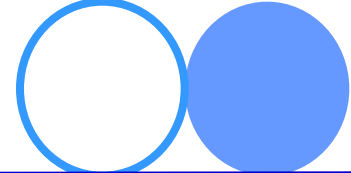


計算時間比較（軌道順序同時最適化 v.s. 順序総当たり）



| 機数 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|------------|------|-------|--------|--------|
| ホモトピー法 [s] | 1.37 | 1.85 | 2.49 | 4.85 |
| 総当たり計算 [s] | 2.19 | 15.00 | 106.51 | 804.50 |

一般的PCを使用



課題1 他機との時間的・空間的間隔の確保

⇒時空間座標系の導入で両者のバランスを考慮した軌道生成を可能とした。

課題2 干渉点での通過順序の最適化

⇒評価関数曲線の導入で混合線形計画問題として解くことができるようになった。

課題3 実運用システムへの展開

⇒レシーディングホライズンの導入で連続的な軌道生成を可能とし、ホモトピー法の利用で処理時間の短縮ができた。

5. 研究の成果 2/2

公表論文

- [1] 虎谷大地、上野誠也、樋口丈浩、“空港周辺空域における上昇機のための最適な回避軌道に関する研究”、航空宇宙技術、Vol.14、pp.105-112、2015.
- [2] D. Toratani, S. Ueno, T. Higuchi, “Simultaneous Optimization Method for Trajectory and Sequence for Receding Horizon Guidance in Terminal Area”, SICE Journal of CMSI, Vol. 8, No. 2, pp.144-153, 2015.
- [3] 虎谷大地, 上野誠也, 樋口丈浩, “継続上昇・降下運航のための干渉回避手法に関する研究”, 航空宇宙技術, (掲載可).

その他: 国際会議にて4件の口頭発表