

# 蟻コロニー最適化法を用いた 4次元TBOの実現に向けた干渉回避経路設計手法の構築

© Osaka Metropolitan University All Rights Reserved.

2023.12.05

- 盆野 裕明, 辻井 利昭(大阪公立大学大学院 工学研究科),  
松野 賀宣, アンдреエバ森 アドリアナ(宇宙航空研究開発機構)

1. 研究背景・目的
2. 最適経路設計手法について
3. シミュレーション解析
4. まとめ・将来的な展望

# 1. 研究背景・目的

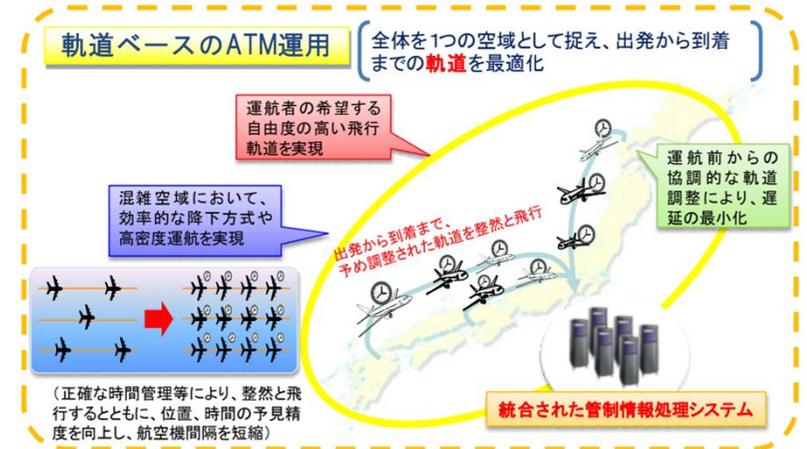
## ○将来的な4次元TBO(軌道ベース運用, Trajectory Based Operation)の実現

水平座標、高度、時刻

- 混雑空域における航空交通容量の拡大
- 運航効率の向上(=燃料消費量・CO2排出量の低減)

- 安全上、航空機間の干渉回避は必要
- 「軌道上の全ての地点においてコンフリクトのない軌道を生成」  
(令和5年度3月時点のCARATSロードマップ TBO3-3より)

干渉が生じないような最適経路設計手法の検討。



TBOの概念図\*

# 1. 研究背景・目的

## ○4次元TBOの実現に向けた飛行経路の設計・干渉回避

- ・干渉を回避する飛行経路自体を得る手法は元々存在する。  
(特定地点で間隔を取る、軌道を予測して距離を計算する、等)

但し…

気象、航法誤差、  
パイロット自身の意図 等

- ・ **不確実性**の影響。より遠い将来であるほど、予測・指示した通りの経路を飛ぶとは限らなくなる。  
→もし予測が外れたとしても、干渉が回避でき安全が保障できるか。
- ・ 「特定地点で間隔を取る」だけでは、その地点間で生じうる干渉は考慮できない。



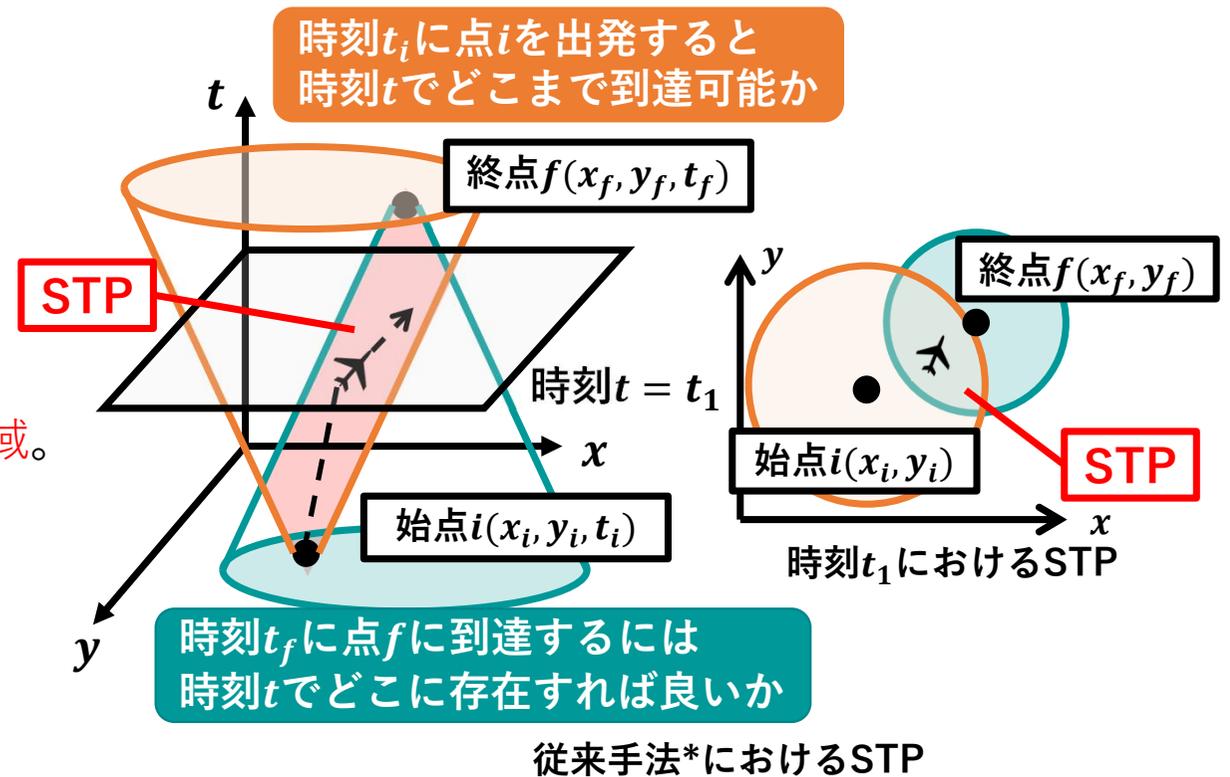
- ・ STP(Space-Time Prism)
  - ・ STPCS(Space-Time Potential Conflict Space)
- } の概念

# 1. 研究背景・目的

## ○“STP(時空間プリズム, Space-Time Prism)”

・ 航空機の飛行可能領域を定義した図形。

・ 各時刻にて物理的に存在しうる全ての領域。  
→ 軌道設計における不確実性の考慮。

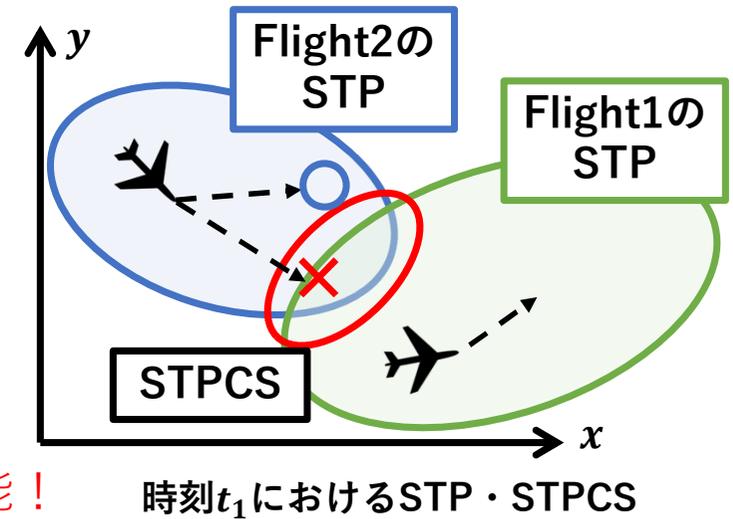


\*Hao, S., Cheng, S., and Zhang, Y., "A multi-aircraft conflict detection and resolution method for 4-dimensional trajectory-based operation", 07-2018, Chinese Journal of Aeronautics, 31, pp.1579–1593.

# 1. 研究背景・目的

○“STPCS (時空間における潜在的干渉領域, Space-Time Potential Conflict Space)”

- ・ 複数機のSTPが幾何的に重なる、干渉リスクのある領域。
- ・ STPCSを避けた経路→不確実な要素があってもリスク低減が可能！



但し...

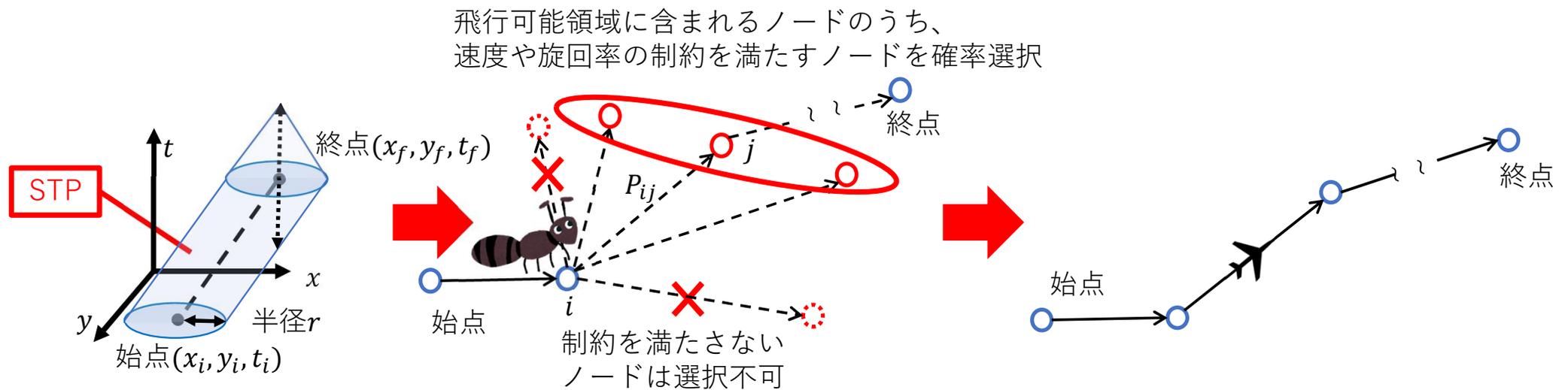
- ・ STPCSが過大になり、設定空域を埋め尽くしてしまう。
- 繁忙空域において、リスク評価に基づいた適切な経路設計が行えない！

STPCSを通らなければ  
どこにも行けない？

**➡ STPの縮小・再定義が必要**

## 2. 最適経路設計手法について

### ○経路設計の流れ・概念図



①STP・STPCSによる  
飛行可能領域の決定

②蟻コロニー最適化法(ACO)を用いた  
飛行経路の候補の生成・評価

③干渉の生じない飛行経路の生成

## 2. 最適経路設計手法について

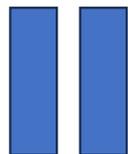
### ① 航空機の飛行可能領域の決定

#### ○ STP (Space-Time Prism) の再定義

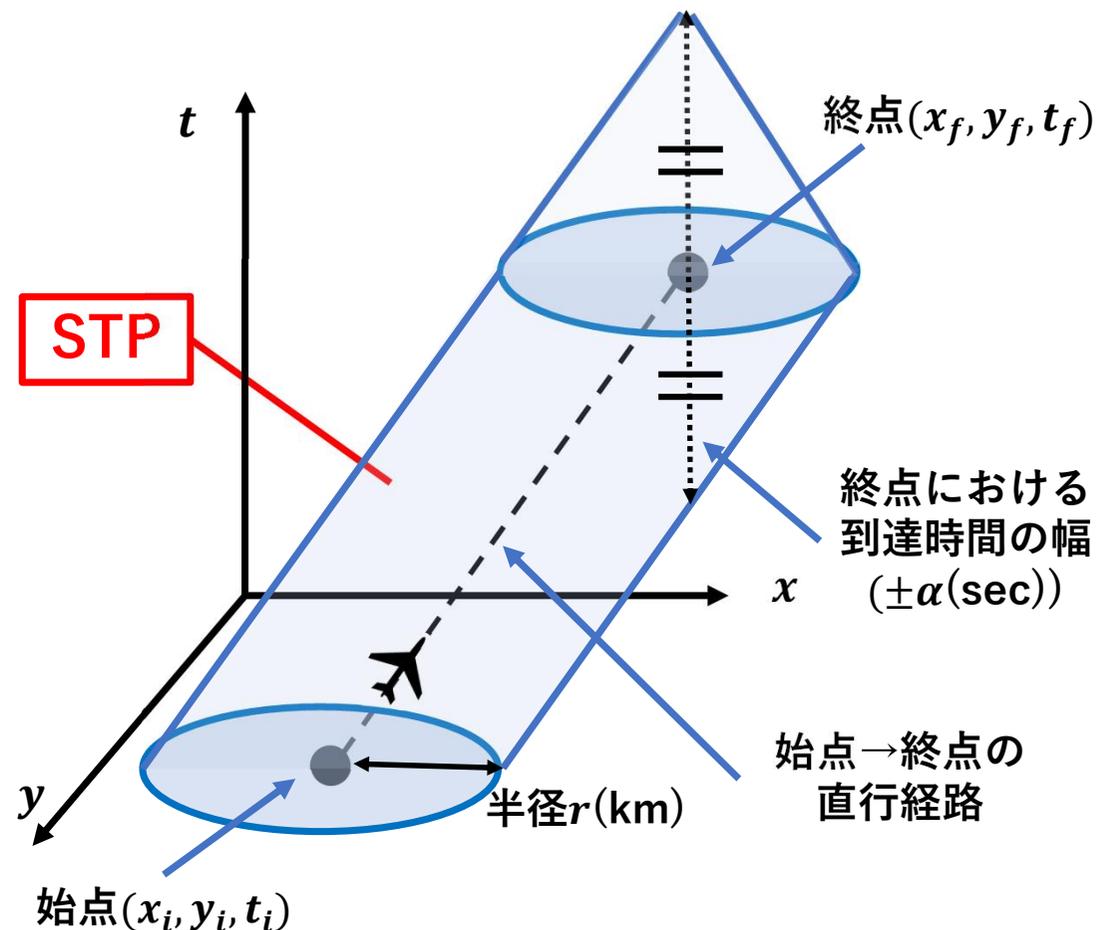
始点→終点間、指定時刻間の  
直行経路から半径 $r$ の領域



終点における到達時間幅 $\alpha$ を  
高さとする円錐内



STP

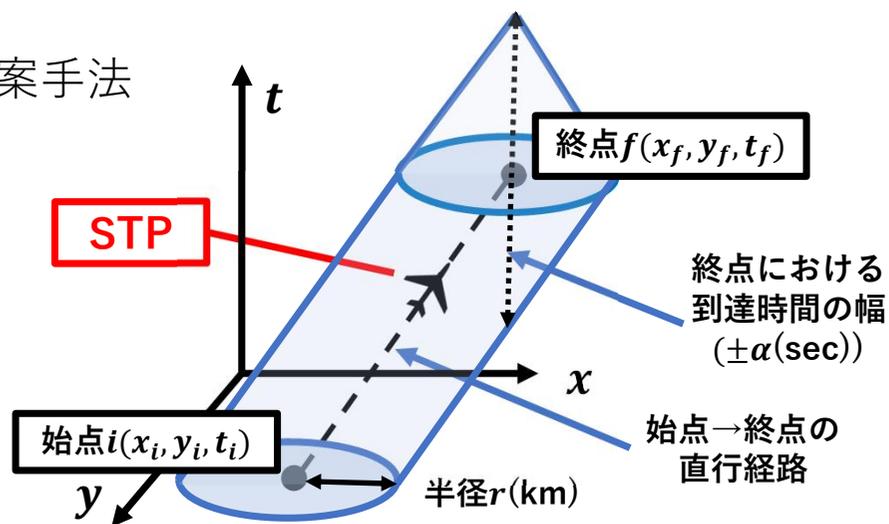


1機の航空機のSTP

## 2. 最適経路設計手法について

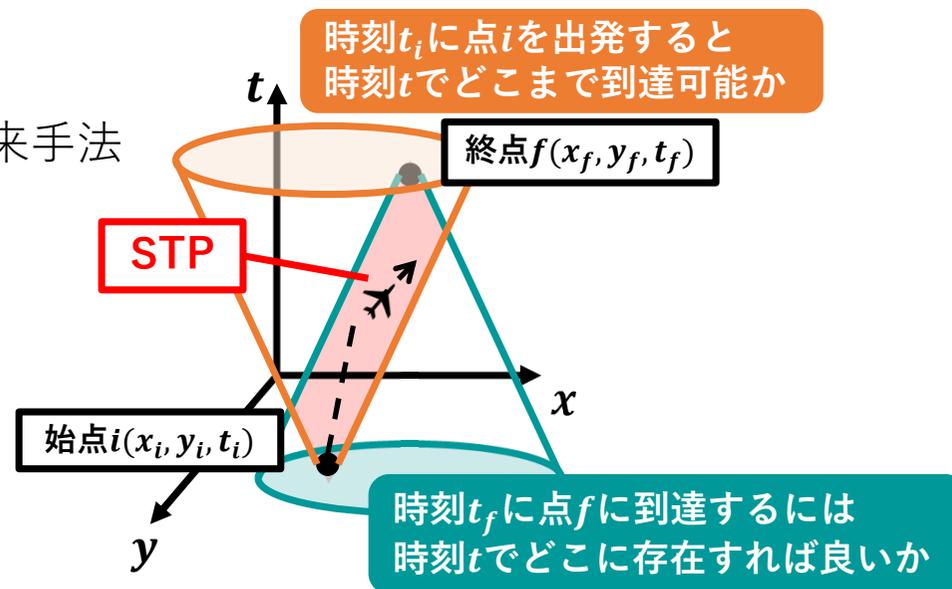
～従来手法との比較～

### ①提案手法



- ・ 直行経路から半径  $r$  の領域のみを飛行可能。  
→STP・STPCS領域が比較的小さい。

### ②従来手法



- ・ 発着点間で実現可能な全座標と時刻。  
→STP・STPCS領域が非常に大きい。

・ STPCSの縮小による正しいリスク評価、同時多数機に対する経路設計等に期待！

繁忙空域においても安全を確保した経路設計が可能に！

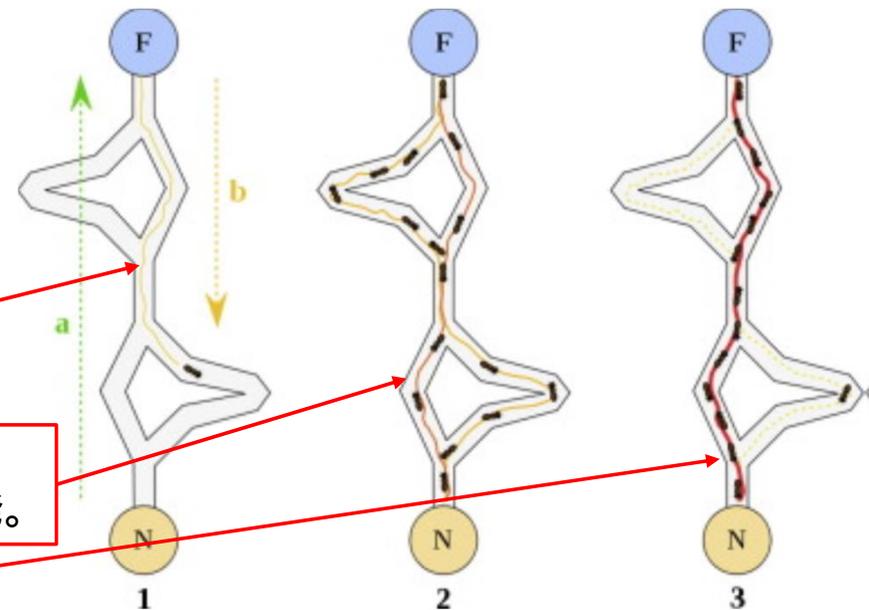
## 2. 最適経路設計手法について

### ②最適経路の作成

#### ○蟻コロニー最適化法(ACO)



→蟻の採餌における効率的な経路選択の過程を確率選択によってシミュレーション



①蟻：食物→コロニー間にフェロモン散布。

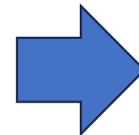
②フェロモン：誘引作用。揮発性有。  
経路が短い→増強(蟻が強く誘引)。経路が長い→蒸発。

③全ての蟻が最短(最適)経路を通過。

蟻コロニー最適化法(ACO)の概念図\*

#### 利点

- ・状況が動的に変化する問題に強い。
- ・少ない計算量・計算時間で優良解への到達が可能。



- ・航空機・ドローンの飛行経路設計
- ・道路の線形最適化
- ・地上交通流の最適経路探索 等

\*上四元 謙, トーマス オット, 上手 洋子, 西尾 芳文, “高い精度の解を求める蟻コロニー最適化”, 08-2018, [Osaka Metropolitan University All Rights Reserved.](#) 9  
電子情報通信学会技術研究報告, 118(174), pp.39-42

### 3. シミュレーション解析

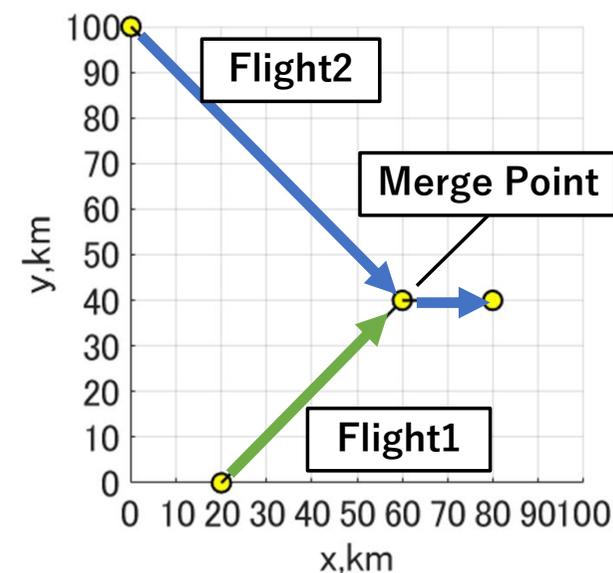
#### ○シミュレーション解析の目標

①繁忙空域での干渉回避経路設計に向けた、再定義後のSTPや得られる解の特性の評価。

時刻にしか変化のない軌道しか得ないなら、  
1次元の(時刻のみ)な設計問題で十分？

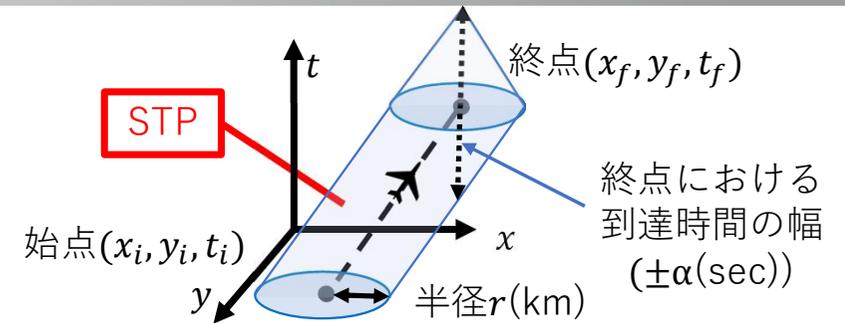
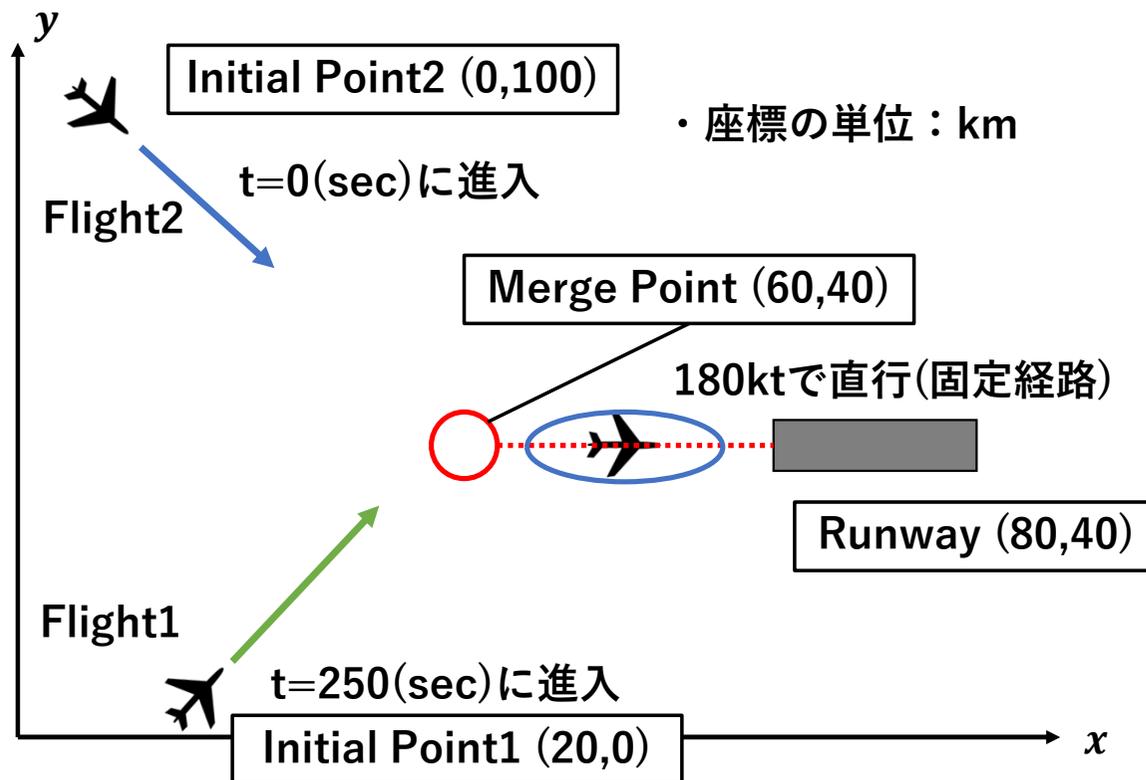
②経路設計を3次元空間(水平座標 + 時刻)で考える意義の提示。

➡ 2次元方向に変化のある(途中で曲がる)経路の生成。



### 3. シミュレーション解析

#### ○シミュレーションの状況



- IPからMPの間においてSTPを定義し、経路設計を行う。

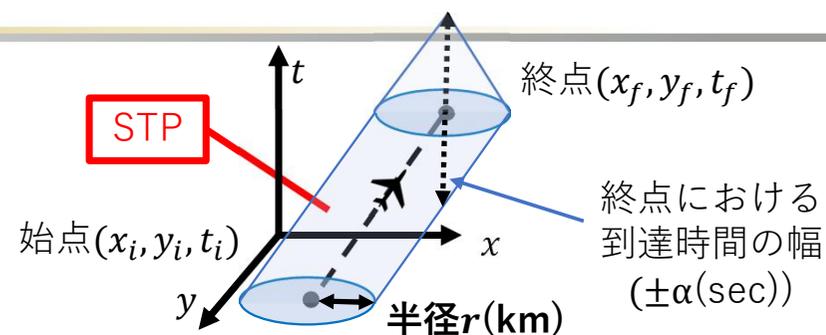
～諸条件～

STPの始点時刻 $t_i$	IP進入時刻
STPの終点時刻 $t_f$	Flight1:710(s), Flight2:690(s)
初期速度	300kt
旋回率	20deg以下
速度制約	<ul style="list-style-type: none"> <li>180~300kt</li> <li>増速禁止</li> <li>一度に変化可能な速度幅<math>\delta V^*</math></li> </ul>

### 3. シミュレーション解析

#### ○シミュレーションの状況

～検証パターン～



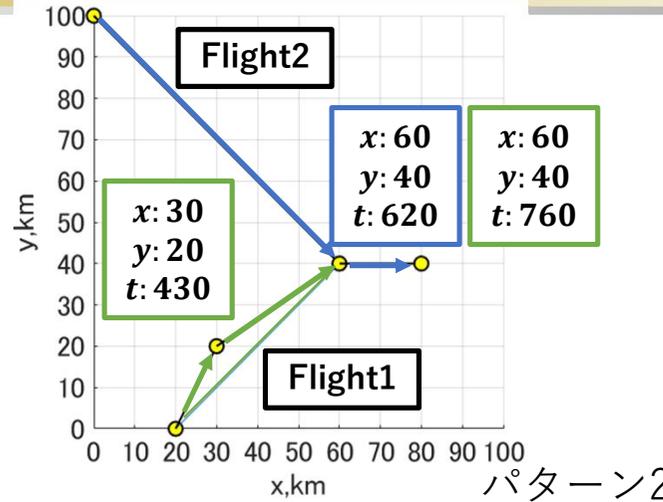
	速度幅 $\delta V = 30\text{kt}$	速度幅 $\delta V = 50\text{kt}$
半径 $r = 10\text{km}$	パターン1	パターン2
半径 $r = 20\text{km}$	パターン3	パターン4

- 本検証における2つの変数(半径 $r$ 、一度に変更可能な速度幅 $\delta V$ )の違いにより計4通り。

### 3. シミュレーション解析

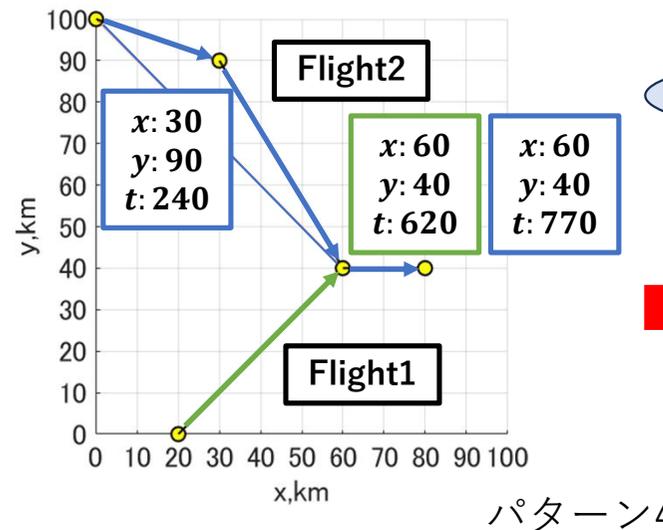
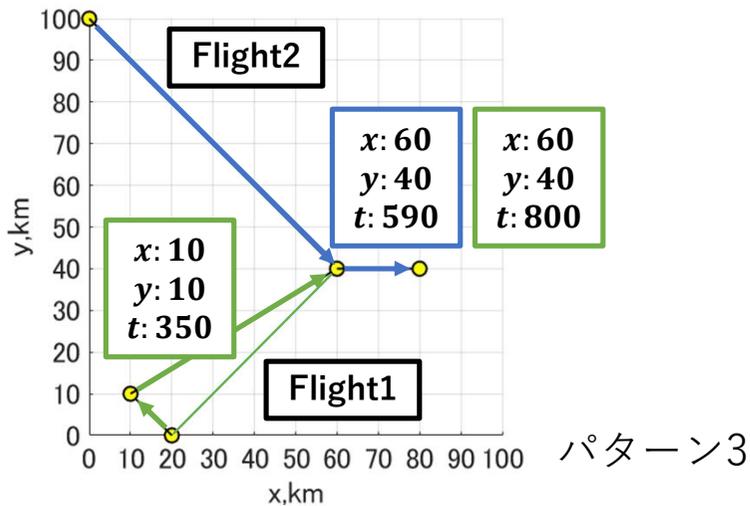
#### ○解析結果

- ・ 経路が得られなかった。
- ➡ 条件が厳しく、経路設計におけるノードの選択肢が少ない事が原因。
- ・ 半径  $r$  : 「解の得やすさ」の考慮が必要。



	速度幅 $\delta V = 30\text{kt}$	速度幅 $\delta V = 50\text{kt}$
半径 $r = 10\text{km}$	パターン1	パターン2
半径 $r = 20\text{km}$	パターン3	パターン4

経路の変更・調整幅



2次元方向に変化有

- ・ パターン2~4：旋回を伴う軌道。
- ➡ 設計空間を3次元とする意義!

### 3. シミュレーション解析

#### ○解析結果

～STP・STPCSのサイズについて～

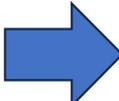
- 各機のSTPに占めるSTPCSの割合  
(=STPに含まれるノードの個数/STPCSに含まれるノードの個数\*)。

	STPCS/STP1	STPCS/STP2
$r = 10$ (パターン1,2)	0.152	0.106
$r = 20$ (パターン3,4)	0.254	0.178
従来手法(参考)	0.621	0.334

	STP1	STP2	STPCS
パターン1,2	184	264	28
パターン3,4	607	863	154
従来手法(参考)	1476	2746	917

\*STP・STPCSに含まれるノードの個数

- 半径 $r$ の大きさと、STPに占めるSTPCSの割合に正の相関。  
→ $r$ が大きいくほど、飛行可能な領域がSTPCSによって埋められてしまう。

 半径  $r$  : 「STPCSのサイズ」の考慮が必要。

- 従来よりSTPに占めるSTPCSの割合が低減→「STPCSが飛行可能な領域を埋め尽くす」現象の改善。

 **繁忙空域における干渉回避経路の設計が可能に！**

## 4. まとめ・将来的な展望

### まとめ

- ・従来の課題：
  - TBO実現に向けた飛行経路の設計→不確実な要素のある中での干渉リスクの低減。
  - 先行研究→繁忙空域における適切な経路設計が困難。
- ・経路設計におけるSTPの定義の変更により、先行研究における課題を克服。  
→ 航空機が集中する状況での干渉回避経路設計の実現に期待！
- ・STPの半径 $r$ ：「解の得やすさ」と「STPCSのサイズ」の要素の考慮が必要。

## 4. まとめ・将来的な展望

### 将来的な展望

- ・半径 $r$ と各要素の相関を基に、**バランスを考慮した $r$ の妥当な値**の決定。
- ・モデルの精度向上(**条件を実運航に近付けつつ評価**)。

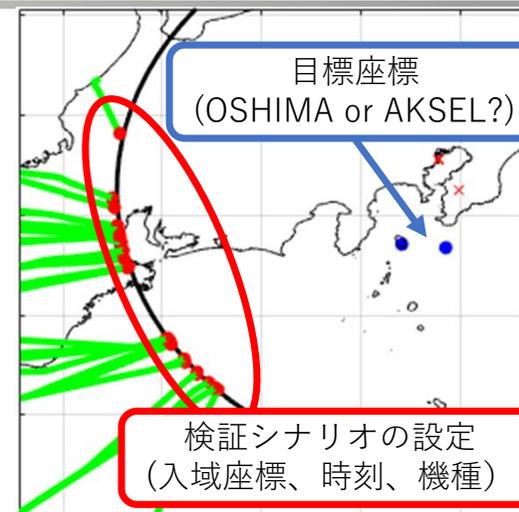
①飛行禁止空域の設定  
→悪天領域・第三機との間のSTPCSのモデル化



②多数機での経路設計  
→全機に対して適切な経路設計が可能か確認



③実空域を対象とした経路設計  
→**CARATS Open Data**の活用。運動方程式の導入等



実空域を対象とする際のイメージ  
(CARATS Open Dataより)

3D→4Dへの拡張(+高度)

繁忙空域における  
干渉回避経路設計手法の確立!

# ご清聴ありがとうございました

謝辞 : CARATS Open Dataをご提供いただいている国土交通省航空局様に感謝の意を表します。