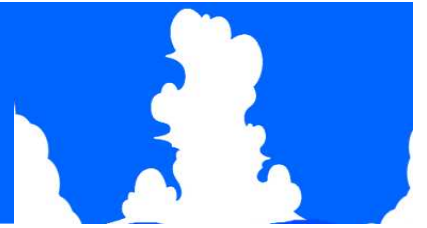


# 航空交通流過密状態における 進化計算に基づく着陸順最適化

国立研究開発法人 海洋・港湾・航空技術研究所  
電子航法研究所  
航空交通管理領域  
村田 暁紀

電気通信大学：高玉 圭樹



航空需要は増加：40.7億人  
数十年以内で現在の2倍

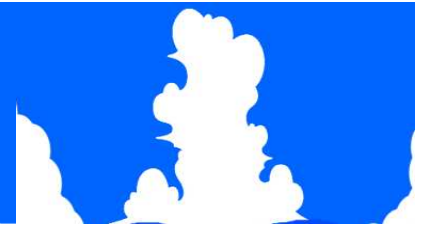
COVID-19の影響はあるが今後回復の見込み

航空管制官：複数航空機の管理  
レーダーにより航空機の状態を把握

多くの航空路からの航空機の合流  
滞留が生じる

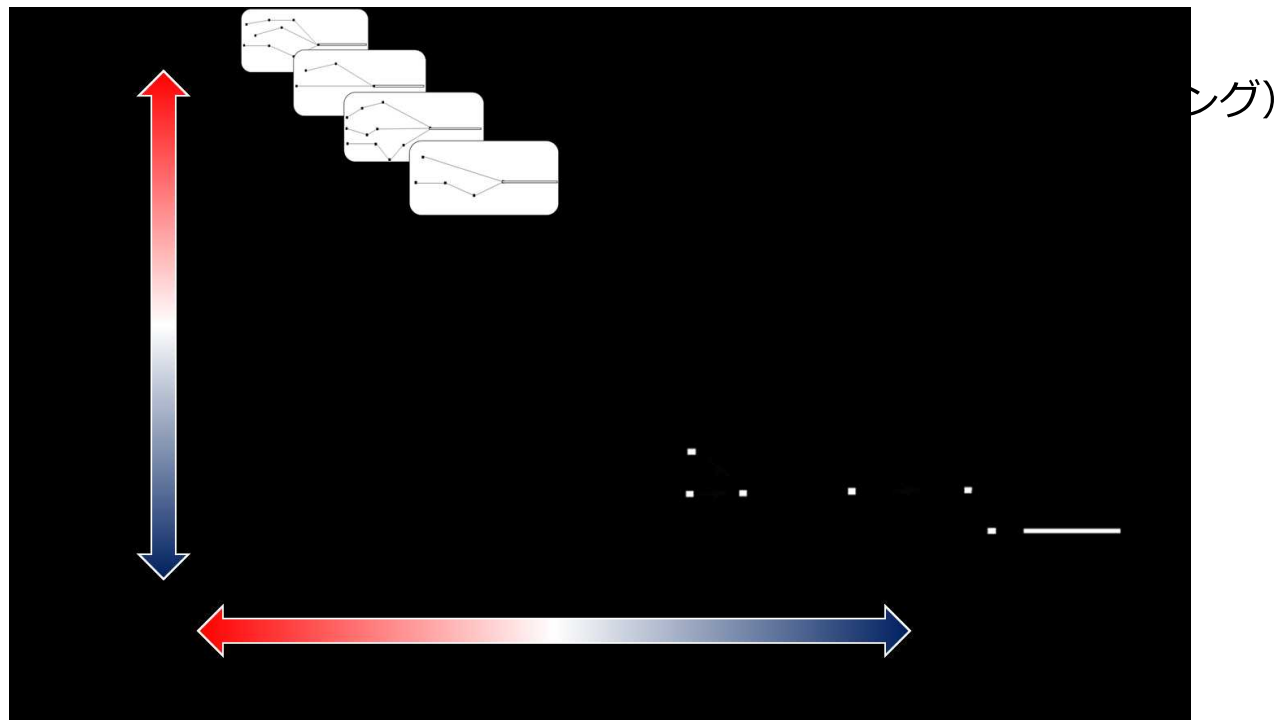
到着機の集中(滞留)がボトルネック

# 研究目的



過密状態における航空管制官が制御可能な  
着陸順最適化手法の提案とその有効性の検証

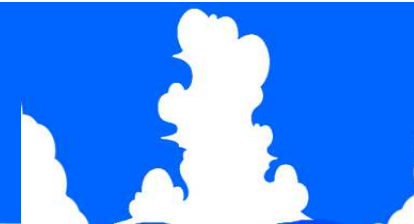
□ ベクタリングを有する経路・着陸順最適化手法の提案



評価：羽田空港を例題として手法を適用

□ 実際のトラフィックデータに基づく実験

# 航空機着陸問題適用される最適化手法 (何故, 進化計算なのか)



## 決定論的手法

### 動的計画法

厳密解の保証

モデル化可能な問題に対処可

## メタヒューリスティックス

### 進化計算, 焼きなまし法

最適性の無保証

モデル化困難な問題に対処可



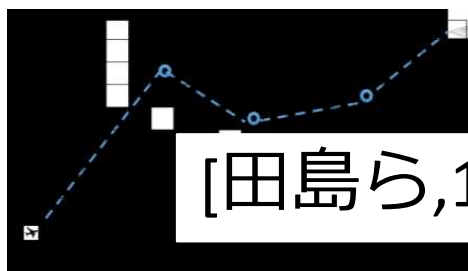
## □ メタヒューリスティックに着目

(実際の航空機の航行はモデル化が困難)

## □ 進化計算(Evolutionary Computation)を採用

複数の解候補の情報を活用:

多様性を考慮するため(過密状態において代替解が重要)



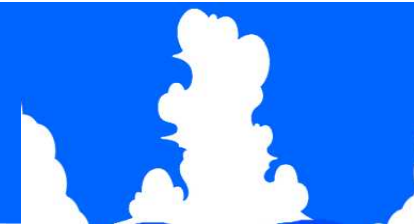
アプローチ

□ 離散値による経路生成が可能  
(ベクタリング可能)

□ 進化計算を用いた経路探索

+ 複数航空機の合流 (他機の影響)

# 進化計算：（遺伝的アルゴリズム）

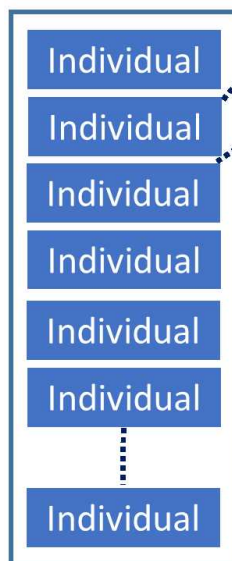


生物現象から想起された最適化手法  
解を個体と見立て情報を活用

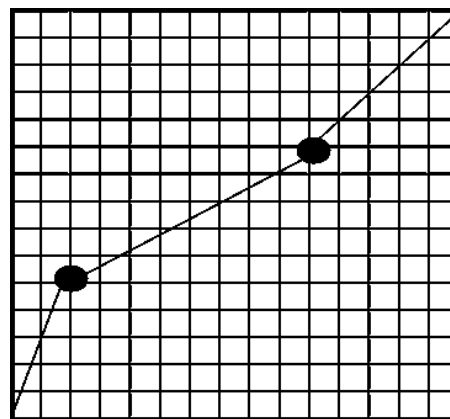


遺伝子 + 評価値

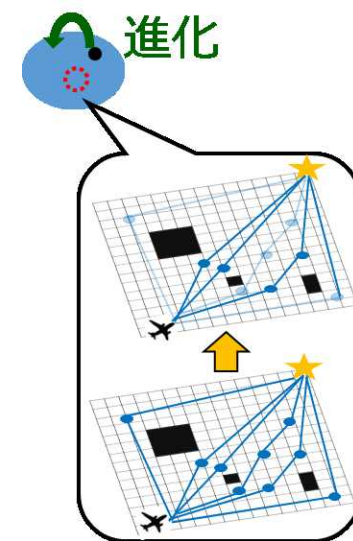
Population



individual	
Waypoint 1	Waypoint 2
(2,5)	(10,10)



ランダムに経路生成



評価値：80  
(距離最小化)

特徴：複数の経路候補を同時生成

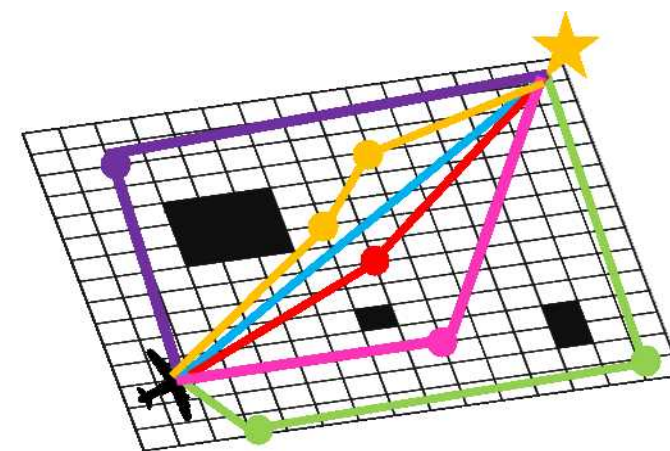
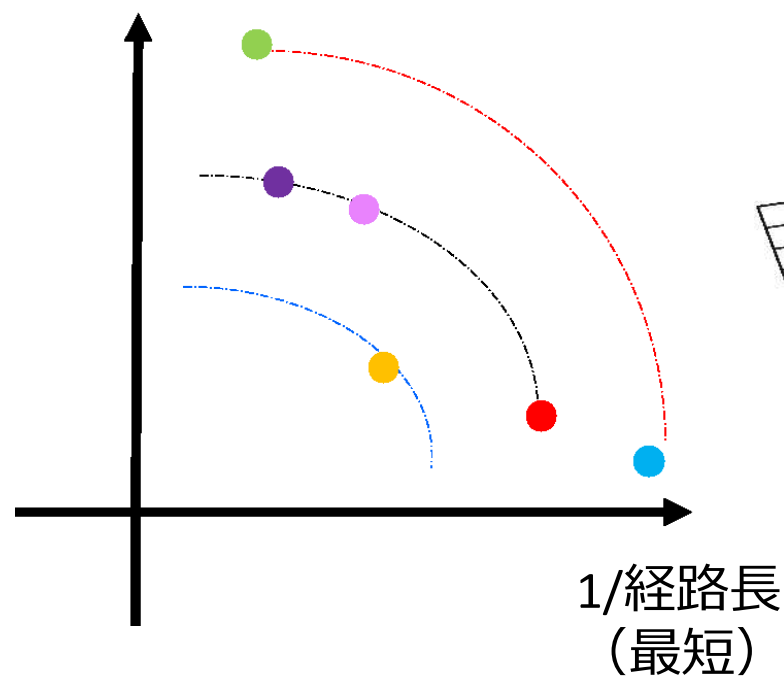
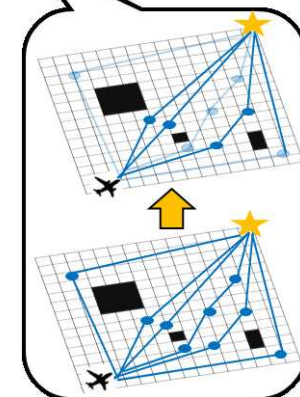
# 進化計算：遺伝的アルゴリズム（個体レベル）



多様性  
(ノベルティ)

$$\rho(x) = \frac{1}{k} \sum_{i=0}^k dist(x, \mu_i)$$

[Lehman et al.(2008)]



# 分散多群探索型進化計算

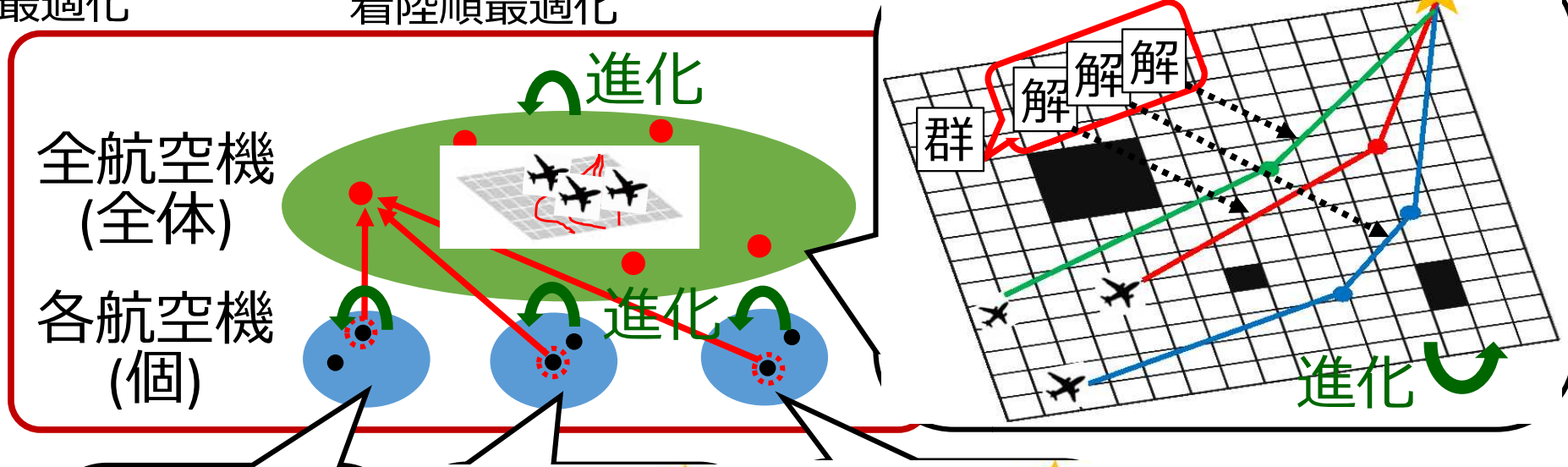
(①経路最適化→②着陸順最適化)

• [個体レベル] → [全体レベル]

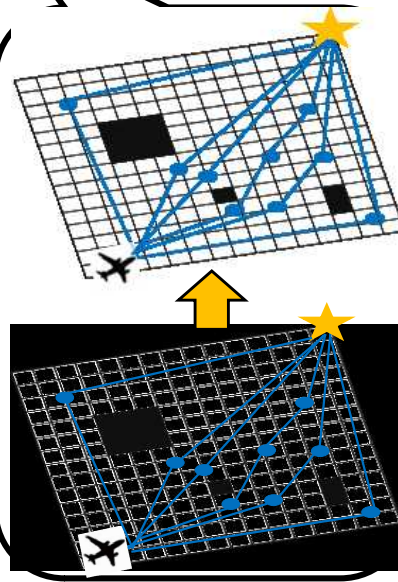
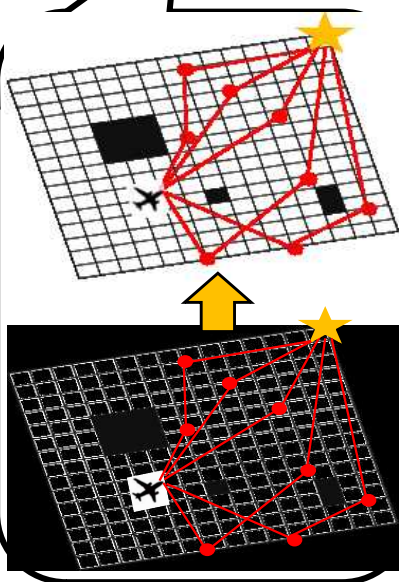
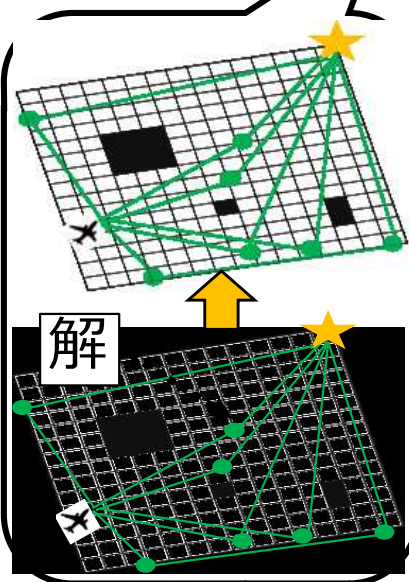
経路最適化

着陸順最適化

適切な組合せを探索



上位Y組  
選択  
( $Y < X$ )



(Y個)

(X個)

有望な経路候補の選択

# 分散多群探索型進化計算

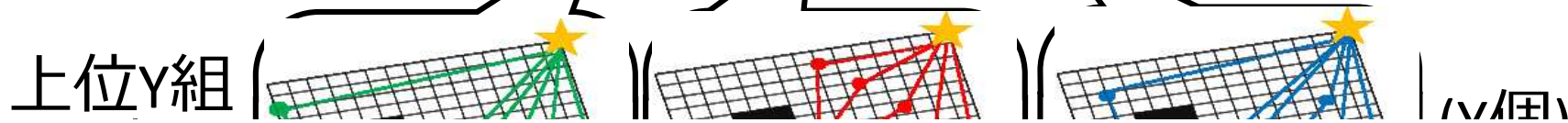
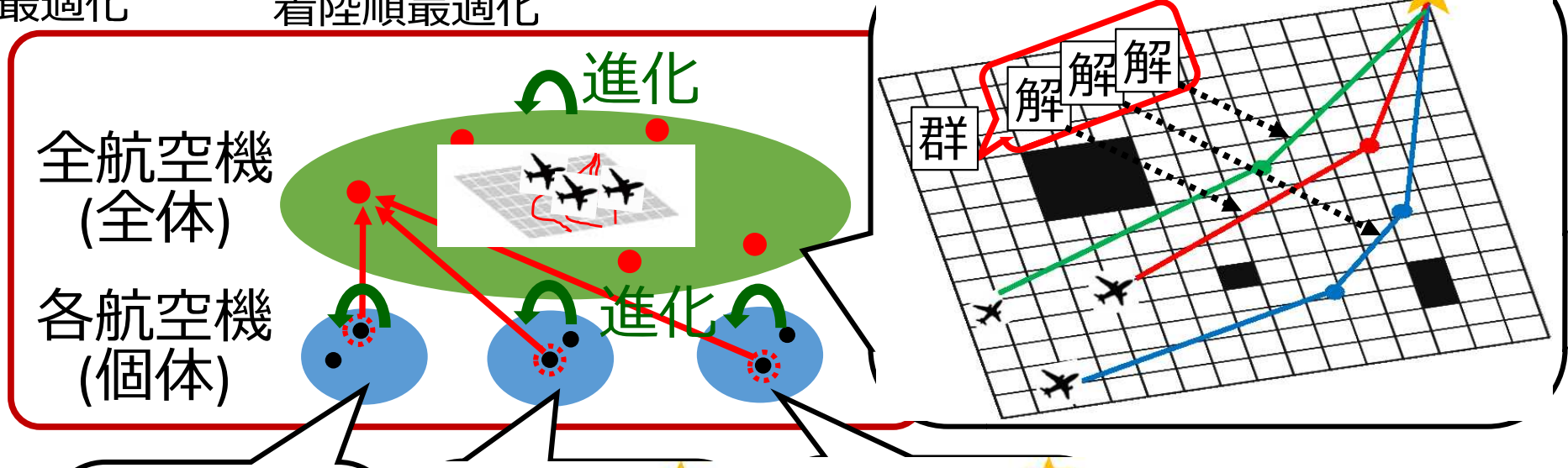
(①経路最適化→②着陸順最適化)

• [個体レベル] + [全体レベル]

経路最適化

着陸順最適化

適切な組合せを探索



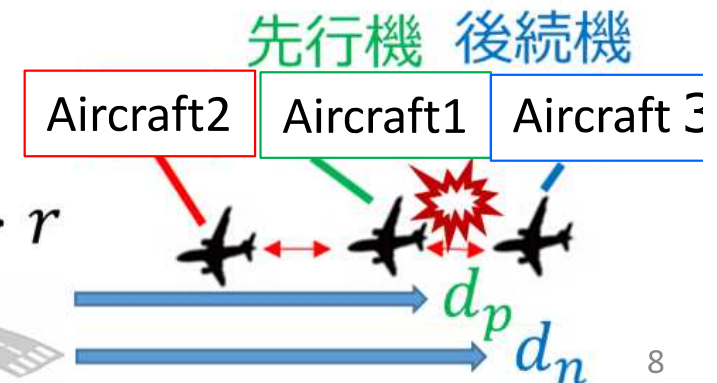
• 最小化：総距離の最小化

$$\text{Fitness} = \sum_{i=1}^n d_i$$

(n : 航空機数)

• 制約条件

$$d_n - d_p > r$$

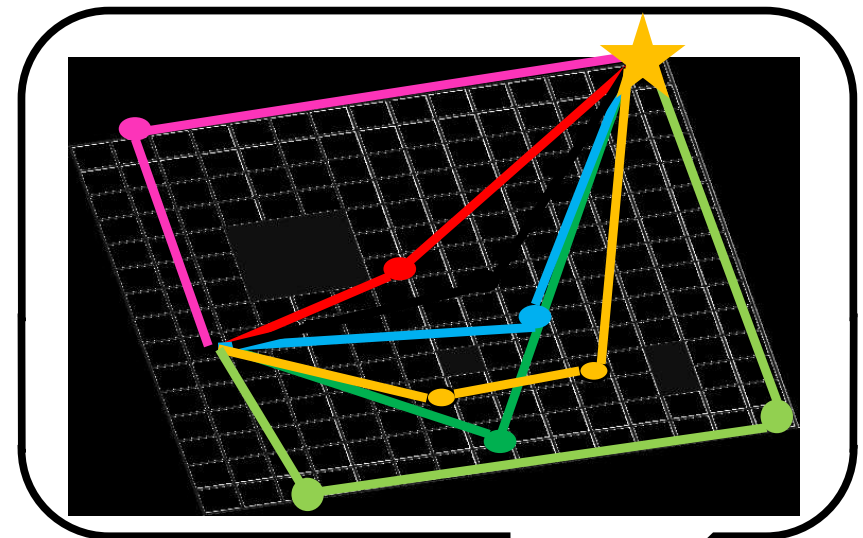
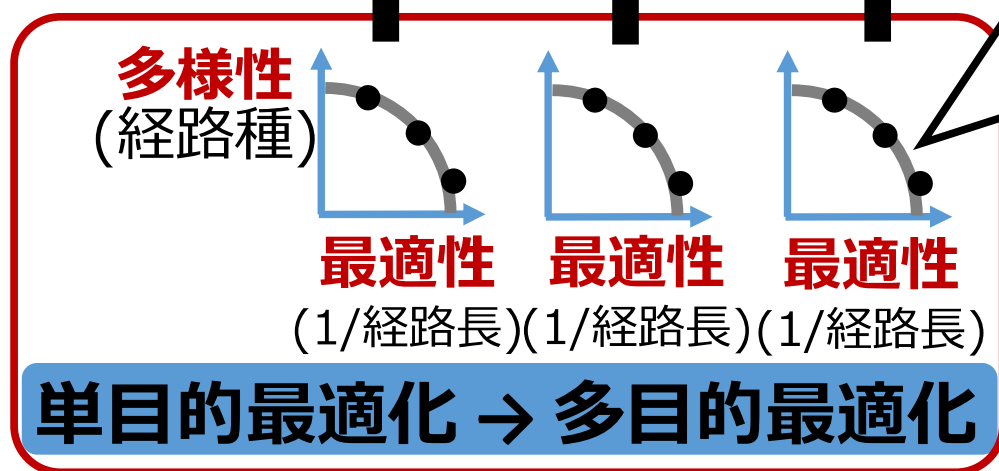
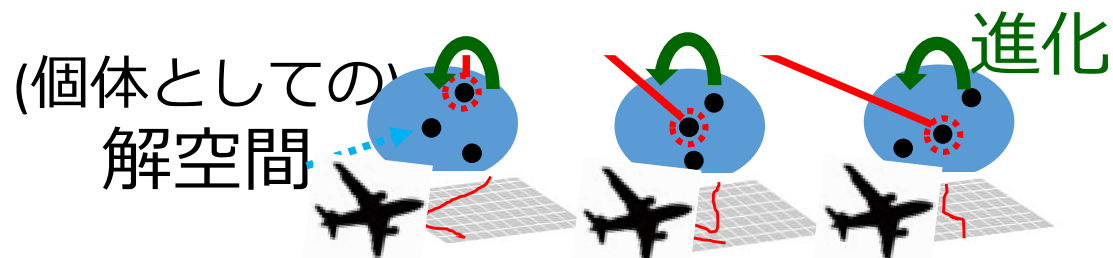


問題：経路長に多様性がないため過密状態に対応困難



# 分散多群探索型進化計算(個体レベル)

- [個レベル]  
最適性と多様性の同時考慮



ノベルティ  $\rho(x)$

多様性  
(経路種)

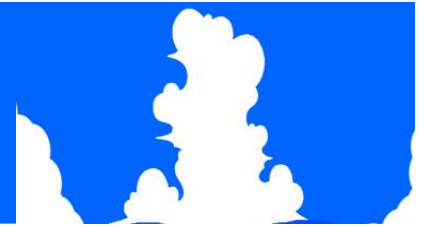
NSGA-II  
[Deb(2002)]

最適性  
(1/経路長)

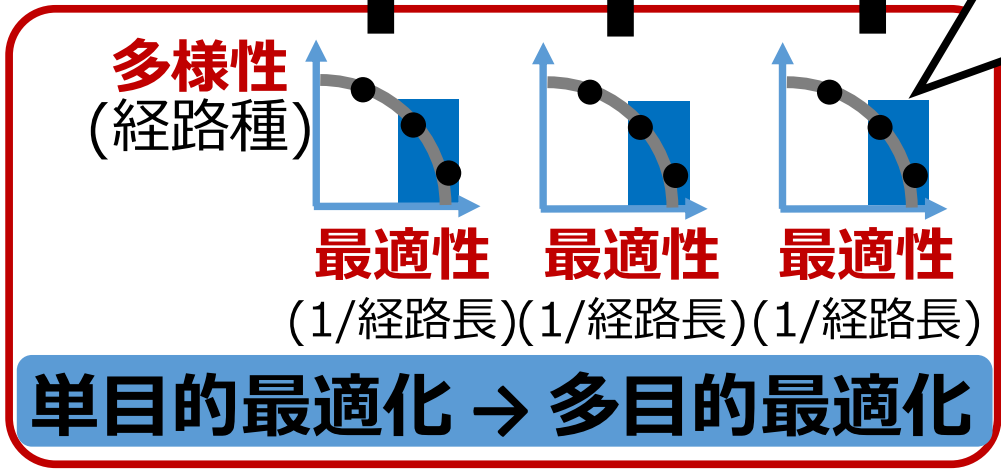
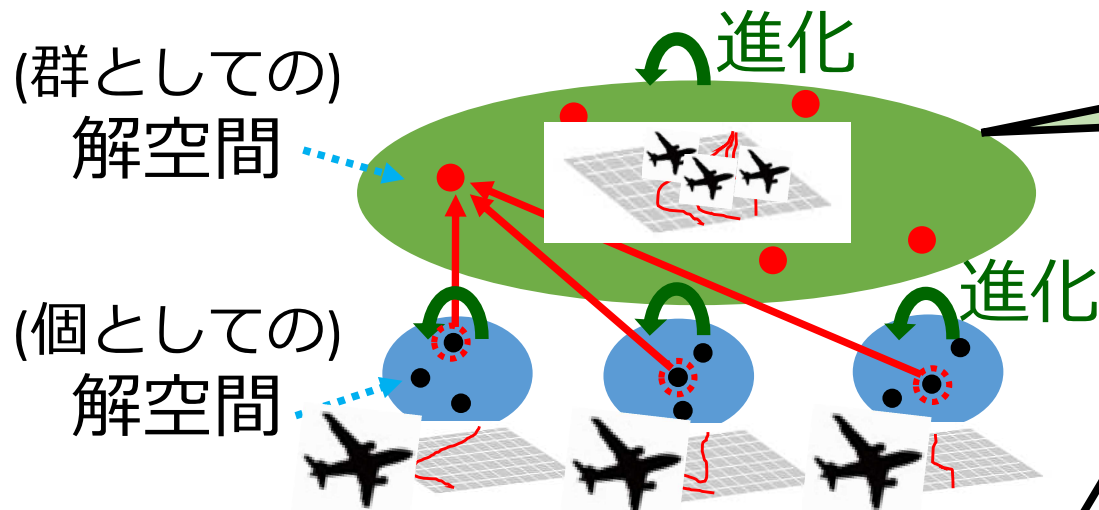
$$\rho(x) = \frac{1}{k} \sum_{i=0}^k \text{dist}(x, \mu_i)$$

[Lehman et al.(2008)]

# 分散多群探索型進化計算 (全体レベル)



- [全体レベル]  
最適性 > 多様性



ノベルティ  $\rho(x)$

多様性 (経路種)

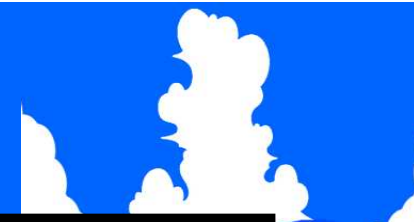
最適性 (1/経路長)

NSGA-II [Deb(2003)]

$$\rho(x) = \frac{1}{k} \sum_{i=0}^k dist(x, \mu_i)$$

[Lehman et al.(2008)]

# 連続的な航空機の出現への対応(過密状態)



1回目

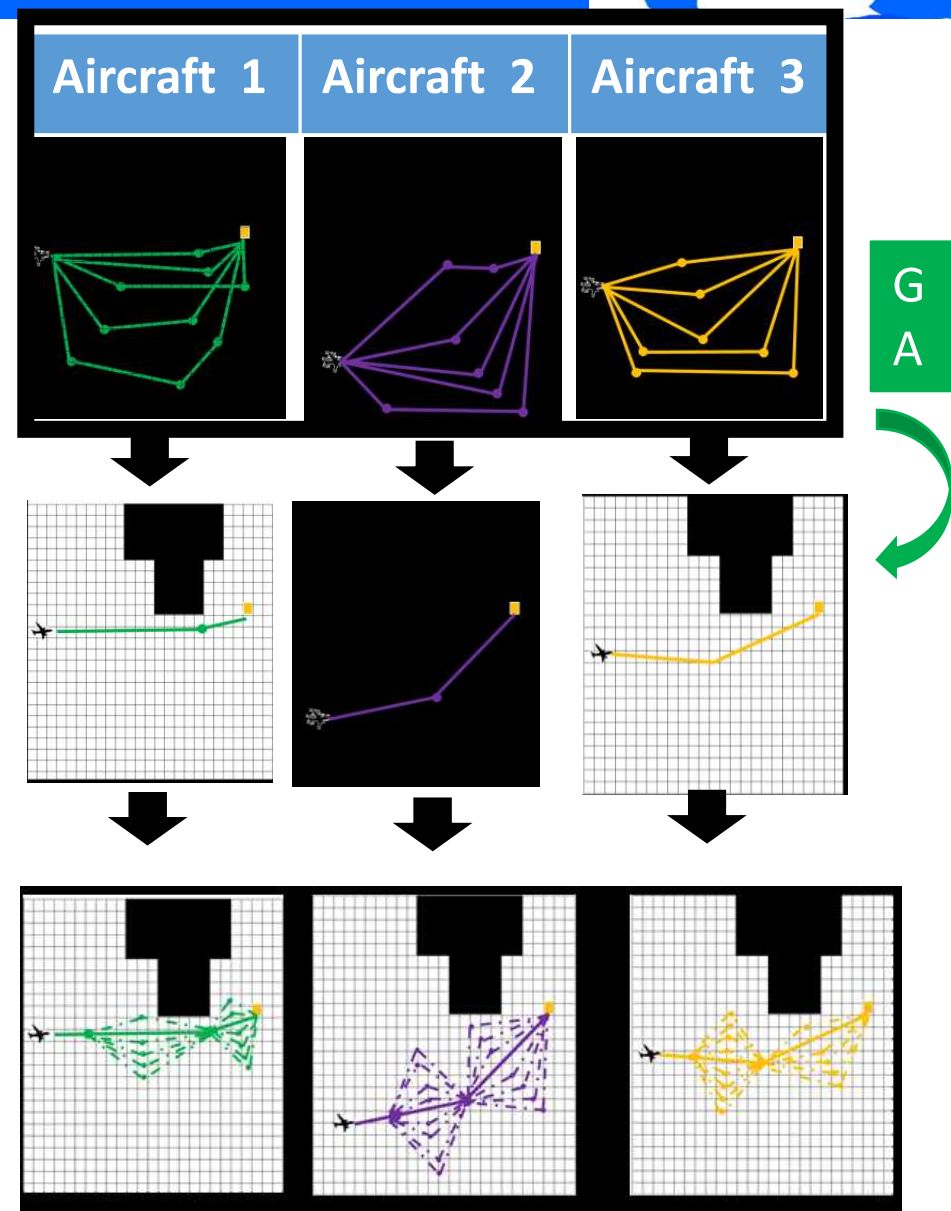
全体レベル

経路最適化

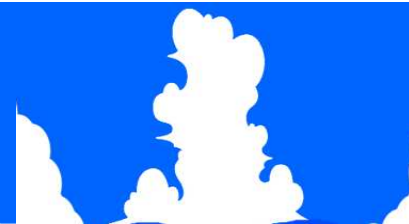
- 多様な経路生成

着陸順最適化

- 着陸順生成後迂回経路を付加



航空機の間隔の調整のため使用  
(次の着陸順最適化の際)



Aircraft 1

Aircraft 2

Aircraft 3

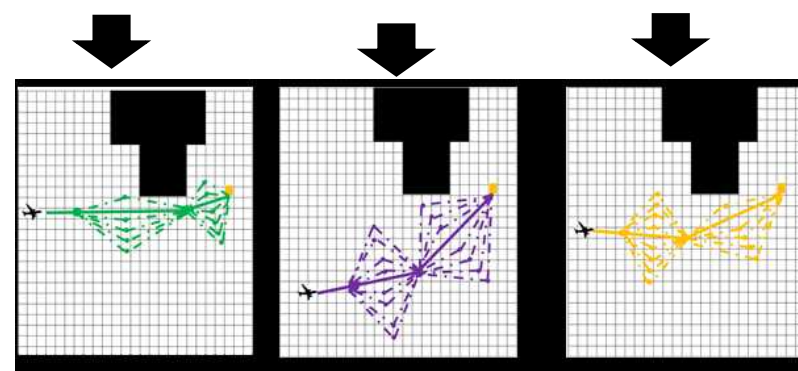
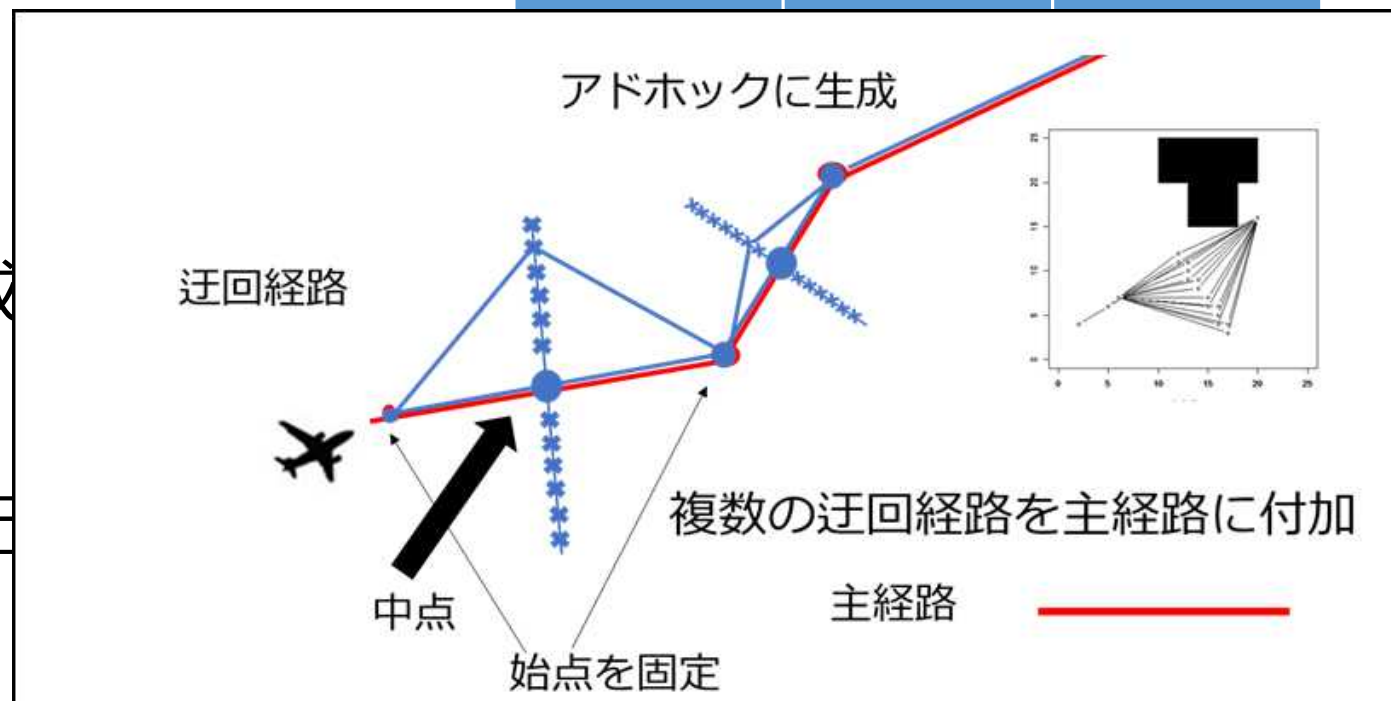
## 1回目

### 経路最適化

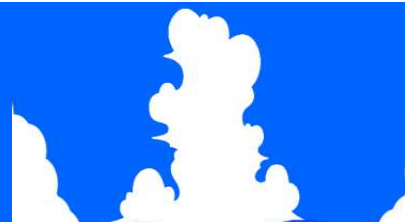
- 多様な経路生成

### 着陸順最適化

- 着陸順生成後迂



航空機の間隔の微調整のため使用  
(次の着陸順最適化の際)



## 2回目

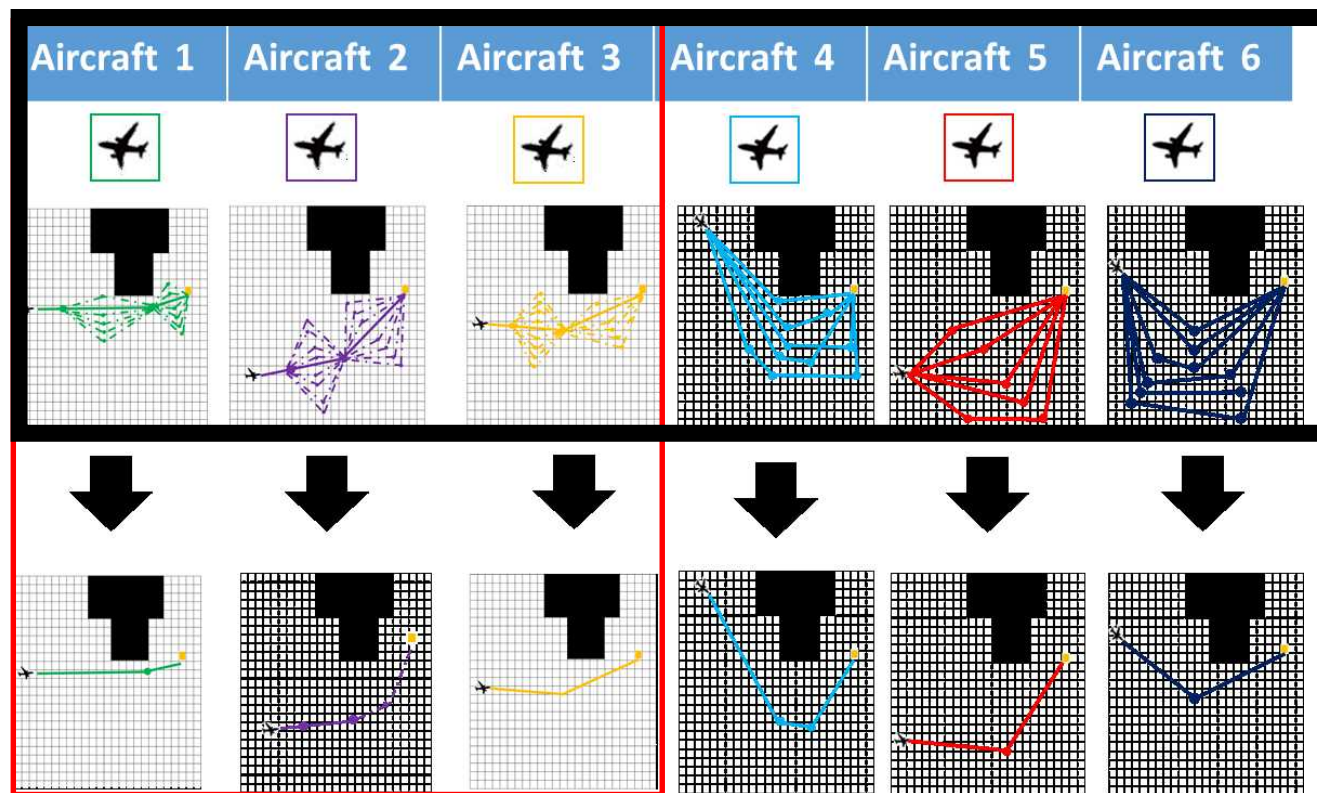
## 経路最適化

## 着陸順最適化

全体レベル

迂回経路から選択

経路候補から選択

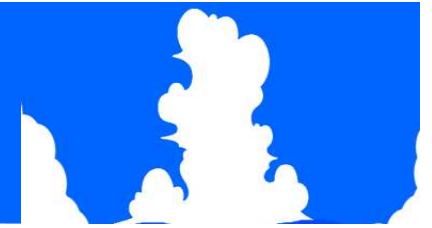


GA

着陸順生成のため迂回経路を含め経路を選択

1回前に経路最適化を行った航空機は迂回経路による変更が可能

# CARATSオープンデータの活用

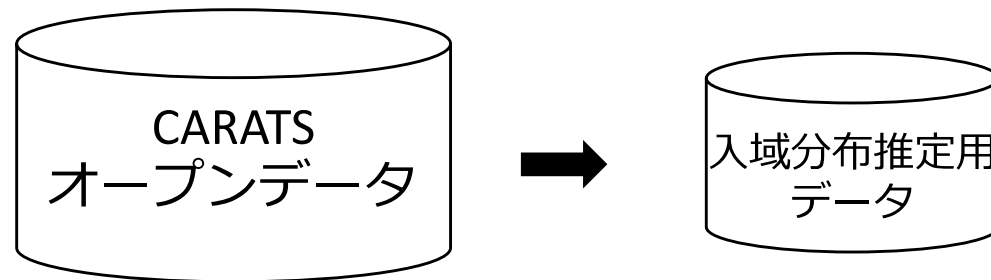
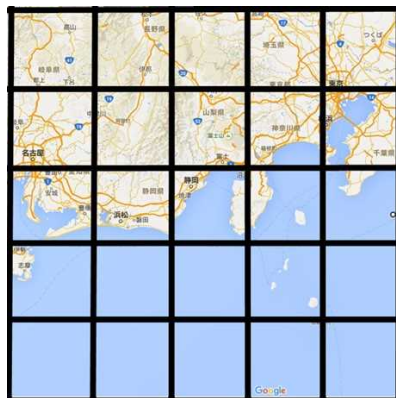


初期入域点のサンプリング

当時出発・到着空港推定アプリケーションMakeApt無

羽田空港着の抽出が必要

羽田空港マップ

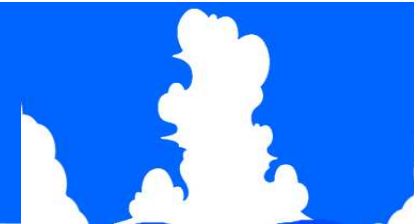


最適化対象範囲に入域  
その後  
羽田空港の範囲内に入域

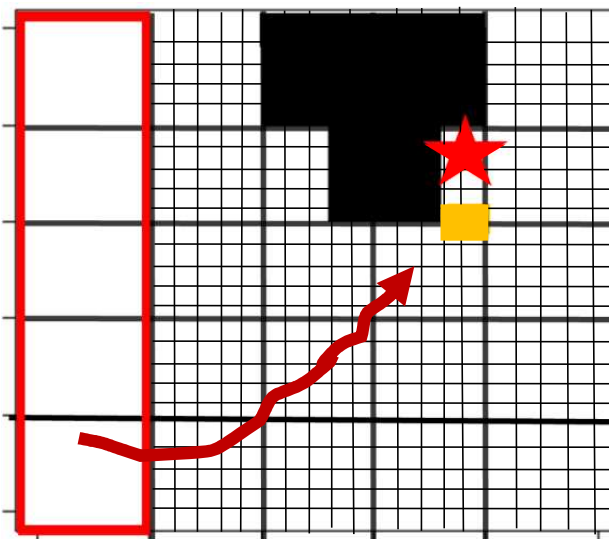
軌道データはおよそ10秒に1点：5分間に1点にリサンプリング

各航空機の初期進入点の分布に基づき入域点を生成

# 例題：羽田空港の着陸



- 名古屋-羽田間の約250km



- 航空機出現エリア
- 進入禁止エリア
- 最終進入地点
- ★ 羽田空港

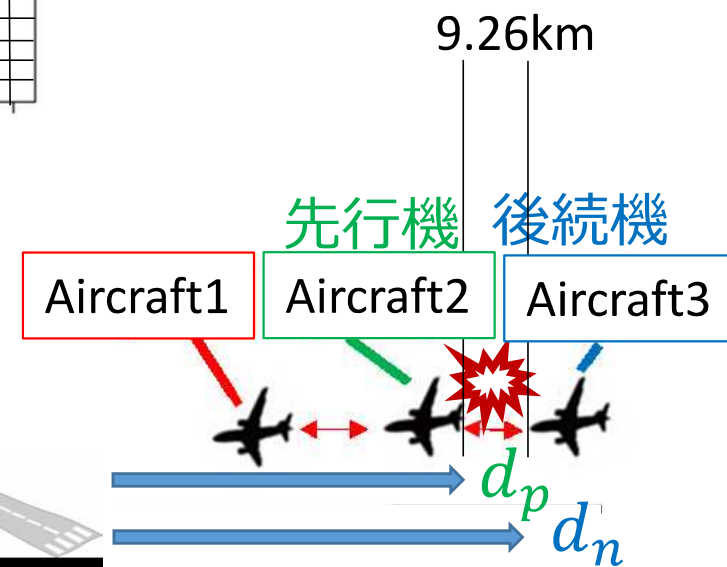
## • マップ

- 1マス：10km

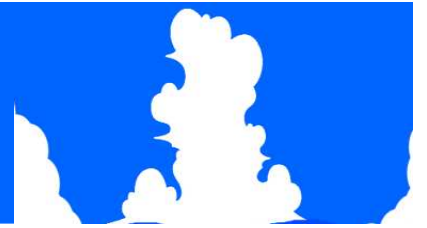
## • 航空機

- 着陸間隔：9.26km (5NM)

- 出現航空機数：3機/5分 (36機/h)



5分に一回：  
最適化を想定



実験1：1回の最適化

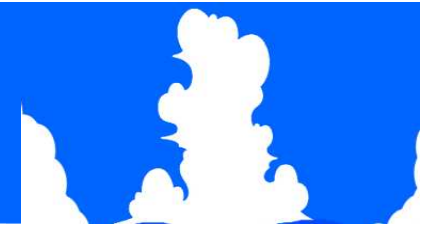
設計の妥当性の検証

実験2：連続的な航空機の出現への対応

提案手法の運用可用性検証



# 実験 1






- ケース

個体レベルの経路

ケース1：経路多様化 (I)

ケース2：経路最短 (II)

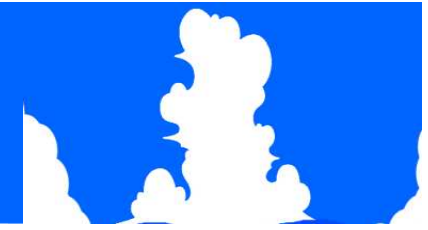
ケース3：(I) + (II)

多様化 最小化	無	有
無	×	ケース1 
有	ケース2 	ケース3 



- 評価基準      全航空機の総経路長

# 結果：



ケース3 ケース1 ケース2

総経路長 (km)

全試行 (25試行)

同試行における経路長の比較

試行番号

	Novelty + Distance	Novelty	Distance
1	669.40	669.25	675.29
2	611.01	613.44	Infeasible
3	624.12	636.40	630.61
4	682.99	692.90	Infeasible
5	655.91	657.57	655.91
6	561.02	572.46	561.59
7	595.16	595.16	598.58
8	634.51	637.86	634.51
9	636.65	639.26	Infeasible
10	598.71	600.27	598.71
11	604.07	603.76	604.33
12	603.85	607.20	Infeasible
13	545.79	547.60	545.79
14	589.76	591.11	589.76
15	568.34	571.83	568.34
16	655.17	655.26	655.17
17	579.51	579.53	579.51
18	540.69	540.69	540.69
19	592.98	594.15	592.98
20	597.30	601.08	597.30
21	590.65	589.72	Infeasible
22	553.70	551.83	548.71
23	543.78	551.44	543.78
24	720.99	765.28	720.99
25	609.18	611.48	609.52



Novelty+Distance

Distance

\*\*

11/25

>

1/25



Novelty+Distance

Novelty

\*\*

16/25

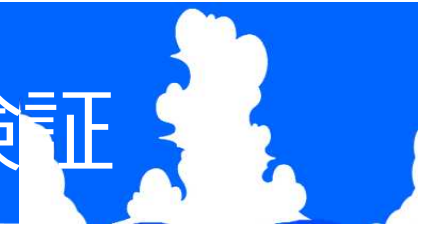
>

4/25

ノベルティを用いた場合にはすべての場合で  
 実行可能解を獲得 (多様性評価の効果)  
 経路最小化 + 経路多様化(ノベルティ)により性能向上

\*\* : 0.5%有意水準

## 実験 2 : 提案手法の運用可用性/限界検証



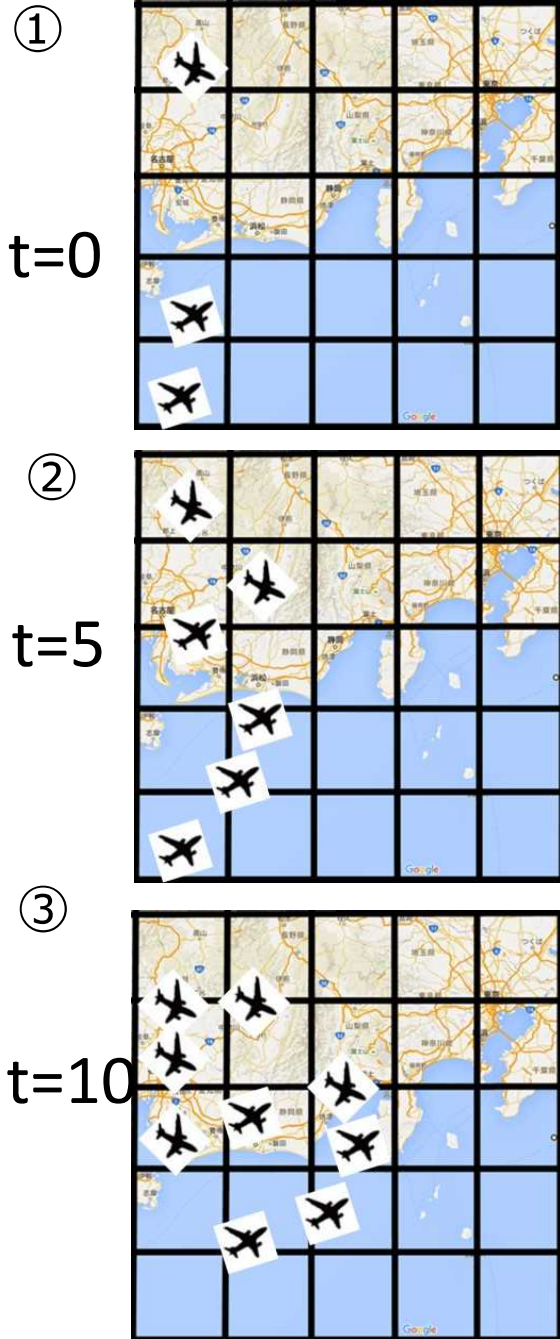
検証内容 : 連続的な最適化で着陸順を生成可能

実験設定 : 5分毎に航空機の状態を更新

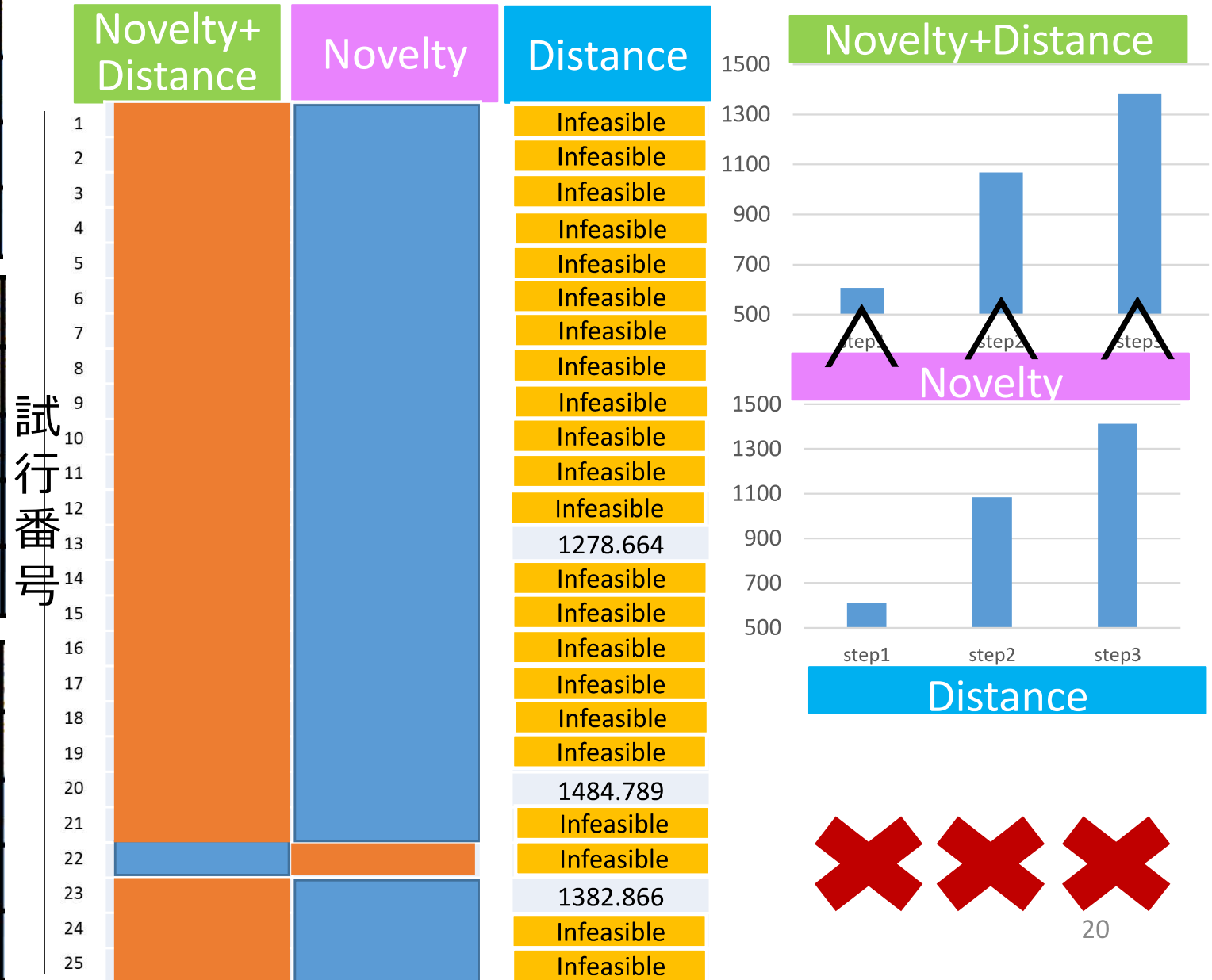
実験ケース

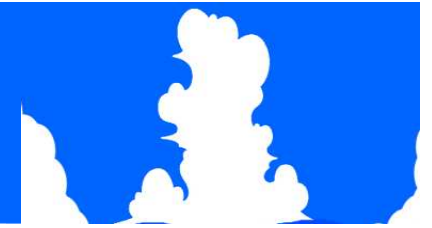
- 3機出現が3回(15分)

# 実験 2 (3 機連続)



## ③ 9 機出現したときの平均経路長





## 過密状態での着陸順最適化手法の提案とその有効性の検証

- 多様性評価アプローチによる着陸順最適化
  - 自由経路：分散多群探索型
- 羽田空港を例題として手法を適用
  - 実際のトラフィックデータに基づく実験

### 知見

- 自由経路
  - 多様性評価を導入により実行可能な着陸順の生成可
  - 最適性と多様性の2目的の導入で最適化性能の向上

### 今後の課題

- 理論的な手法の限界の証明
- 航空機の入域の不確かさへの対応