



CARATS2040推進フォーラム

2025年11月19日

空域容量の精緻化に向けた クラスタリング解析

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
村田 暁紀



MMB法：交通流制御のためセクタ容量算出手法



MMB法に基づき算出された予測値のモニタリング
数時間先の交通流の制御の判断基準

イベント例
セクタ移管, 速度調整, 高度変更等
(複数イベントが定義)

1機の航空機に必要な作業量
(見込)

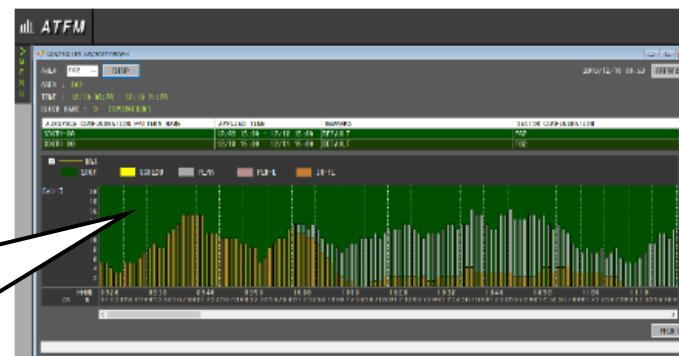


管制負荷単価 × 滞在時間
(単位時間（分）の管制負荷)

イベント毎の入力頻度は過去の交通流から算出

何機まで対応が可能か管制作業時間から空域容量を見積もる

| イベント | 総管制負荷 作業負荷 | 頻度 |
|-------|---------------|------|
| セクタ移管 | 15.0 | 2.0 |
| 高度変更 | 30.0 | 0.33 |
| ・ | ・ | ・ |



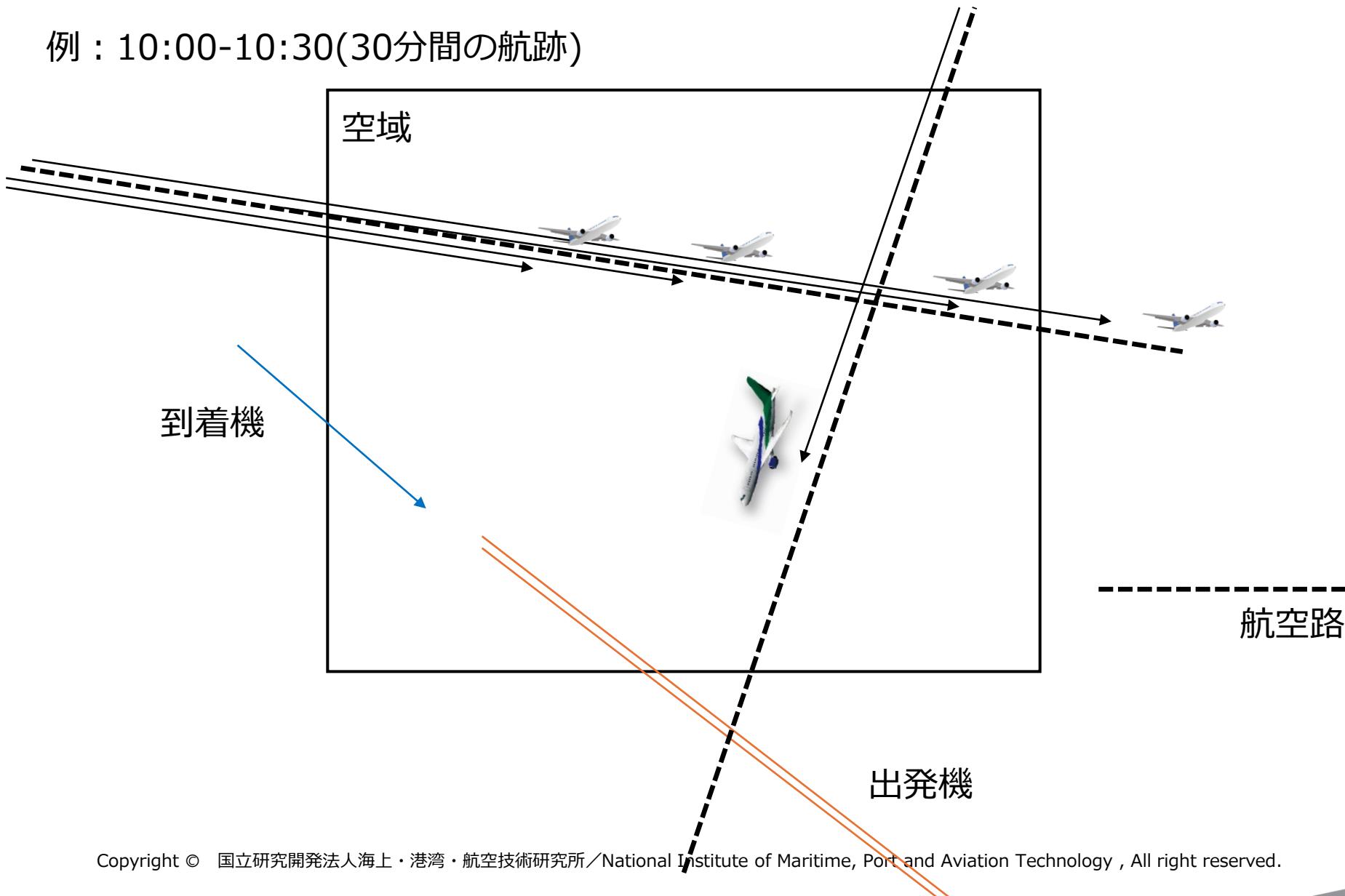
出展：航空保安業務の概要（2024）

*Modified-Messerschmidt, Bölkow und Blohm method

空域内における管制負荷算出の考え方



例：10:00-10:30(30分間の航跡)



管制負荷の積算例

滞在時間



- 航空機1
- 航空機2
- 航空機3
- 航空機4
- 航空機5
- 航空機6
- 航空機7
- 航空機8

10:00

管制作業負荷

10:30



10分

8分

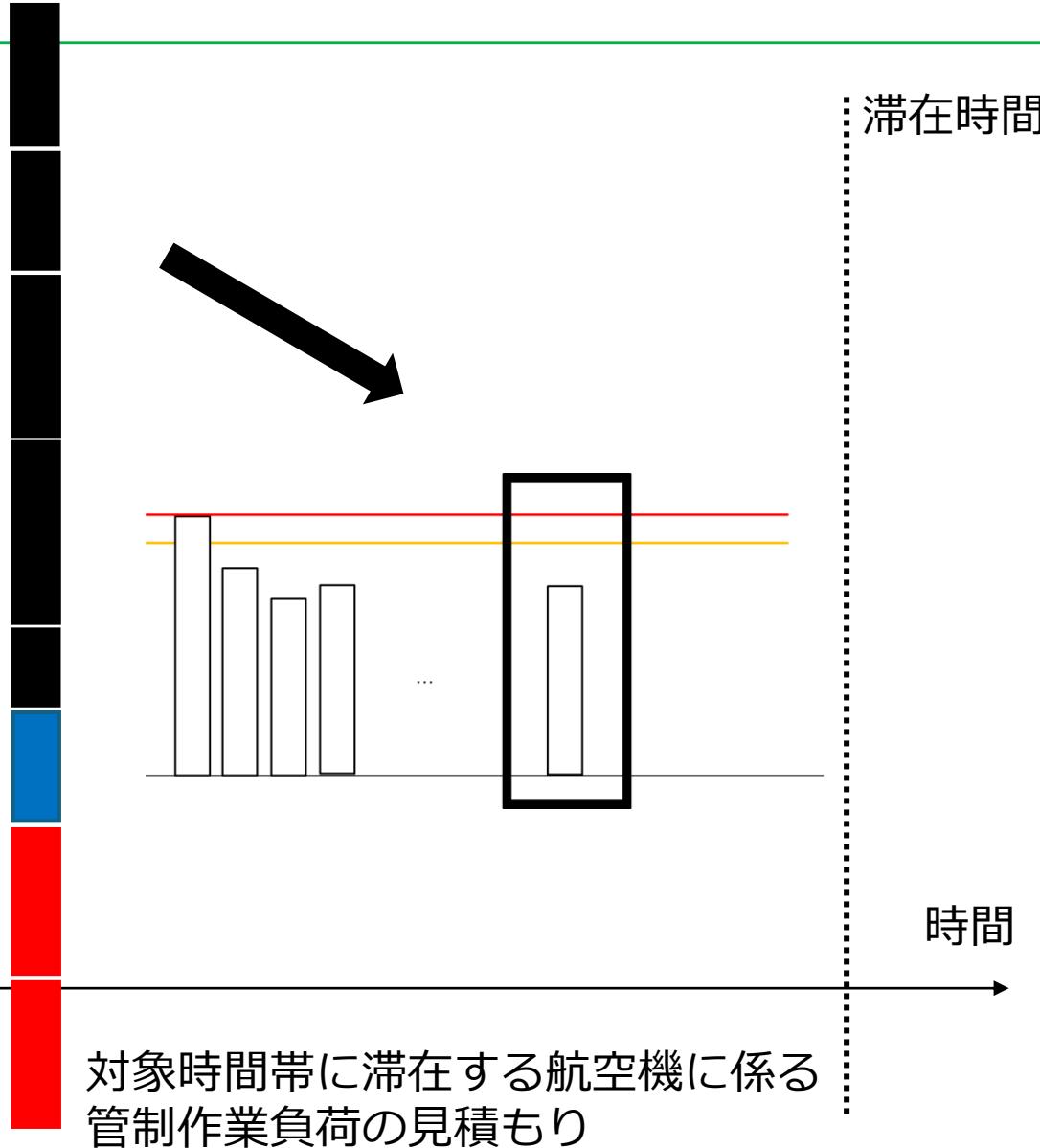
滞在時間
10分

時間

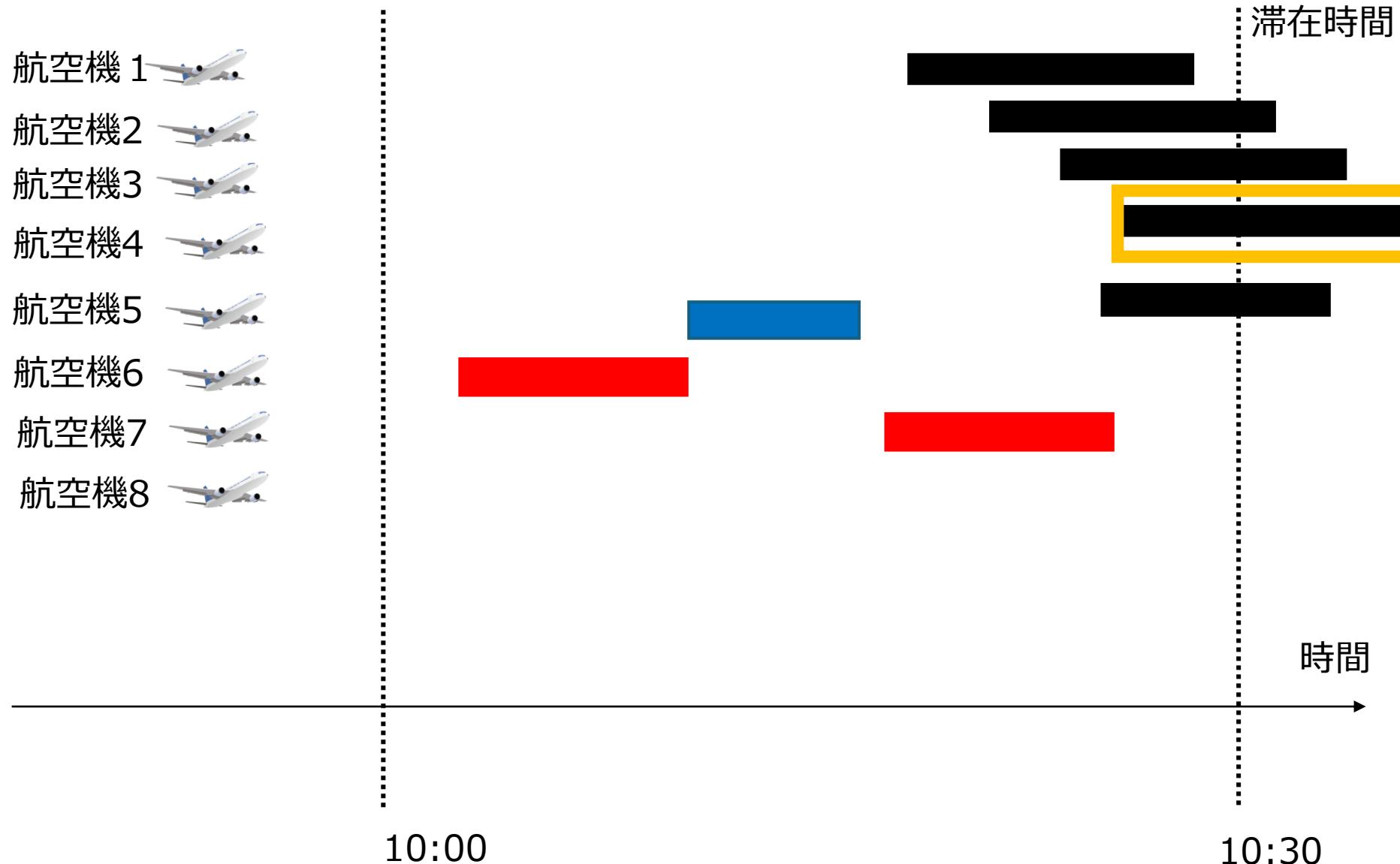
作業量の積算例



- 航空機 1
- 航空機 2
- 航空機 3
- 航空機 4
- 航空機 5
- 航空機 6
- 航空機 7
- 航空機 8



管制負荷単価の考え方

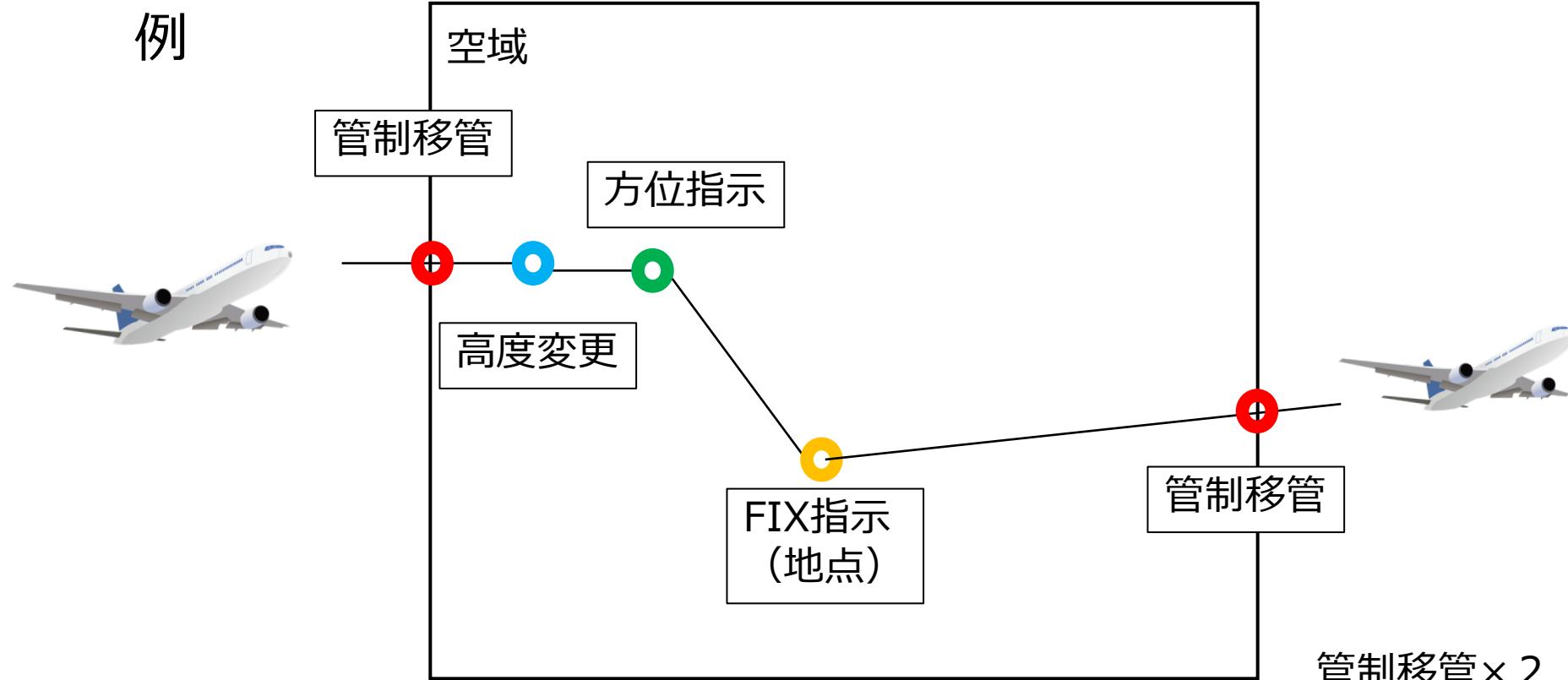


1機あたりの管制負荷



管制官の作業イベントに基づき管制負荷を算出

例



1機あたりの指示は
□ 1機あたりの作業量が算出

1機あたりの管制負荷



管制移管×2



高度変更



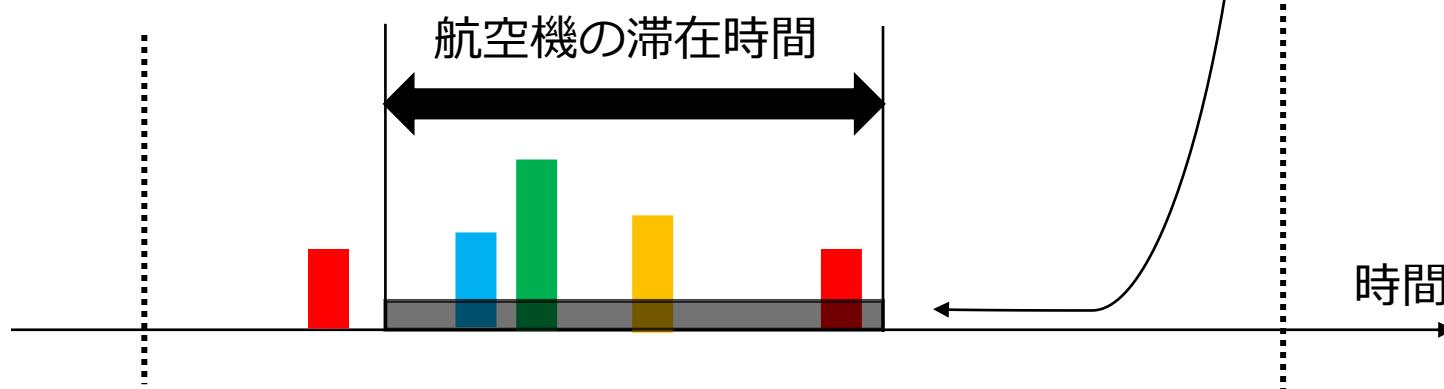
方位指示



FIX指示



- 1機あたりの作業を累積することで算出
- 空域の平均滞在時間により1分間当たりの管制負荷を算出

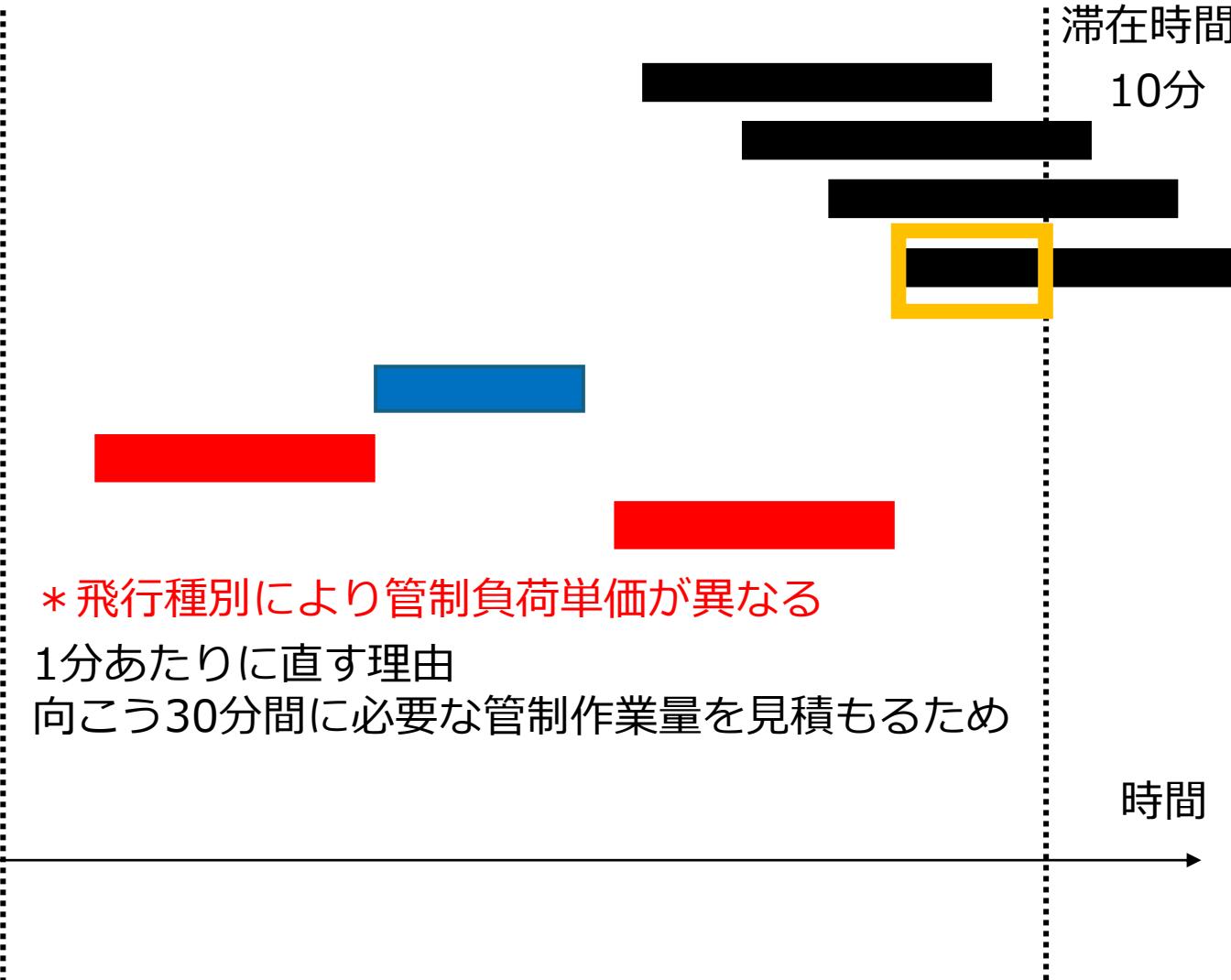


例：平均滞在時間10分，1機あたりの管制作業時間90秒

1分間当たりの管制負荷9秒



- 航空機1 
- 航空機2 
- 航空機3 
- 航空機4 
- 航空機5 
- 航空機6 
- 航空機7 
- 航空機8 



*飛行種別により管制負荷単価が異なる

1分あたりに直す理由

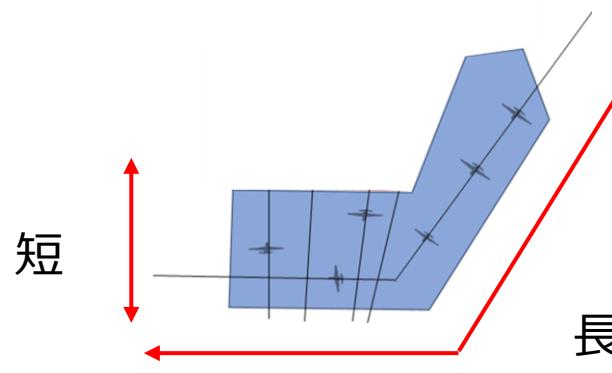
向こう30分間に必要な管制作業量を見積もるため

課題とアプローチ



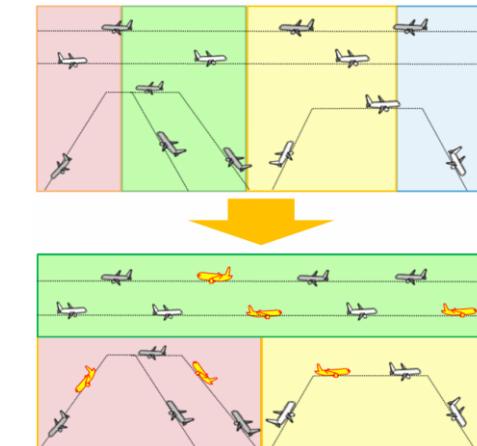
□ MMBB法は過去の航跡情報に頻度や空域内での巡航時間を計算

頻度、巡航時間の平均値を用いるために空域の構成や時間帯別の交通流に影響を



航空路による巡航時間の差異

アプローチ



(出典：航空保安業務概要（一部抜粋）)

クラスタリングによる巡航時間と管制官の指示頻度を比較

航跡分類により統計的な巡航時間や頻度の分散を小さくする

クラスタリングに利用する特徴量



入力とする特徴量

緯度, 経度, 高度 (10秒毎)

航跡

| Time | Latitude | Longitude | Altitude |
|---------|-----------|------------|-----------|
| 0:00:01 | 35.679828 | 139.559923 | 31000(ft) |
| 0:00:11 | 35.685862 | 139.565358 | 31000 |
| 0:00:21 | 35.692032 | 139.572565 | 31000 |
| • | • | • | • |

航跡長
 m

対象の空域に一定時間滞在

DBSCAN (Density-based spatial clustering of applications with noise) を採用

航跡のクラスタリングでは多く適用

パラメータ : ε , $minPts$

特徴量の総数 $3S$ 個 (S 個地点を特徴量の点として採用)

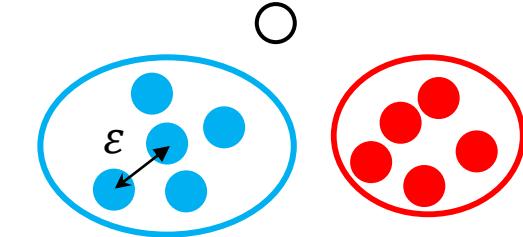
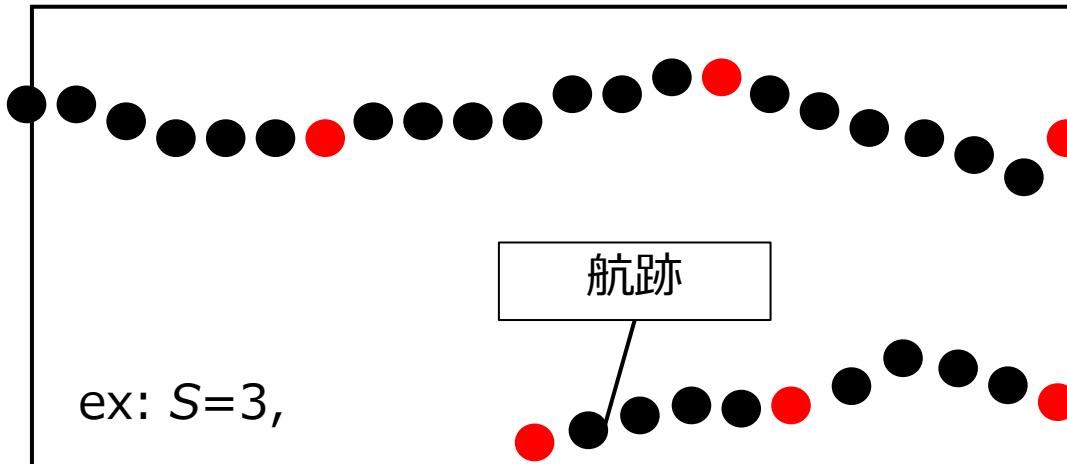
$$T_i = \left\{ T_i \mid l = \text{floor} \left(\frac{k \cdot m_i}{S} \right), k = 1, 2, \dots, S \right\}$$

m_i : i 番目の航空機の航跡のデータ点数

クラスタリングに利用する特徴量



空域



DBSCAN (Density-based spatial clustering of applications with noise) を採用

航跡のクラスタリングでは多く適用

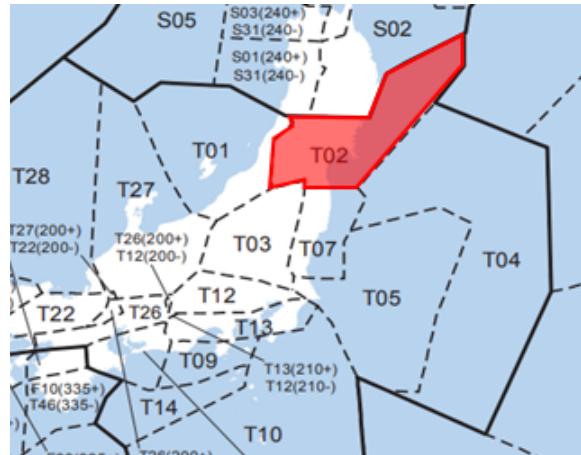
パラメータ : ε , $minPts$

特徴量の総数 $3S$ 個 (S 個地点を特徴量の点として採用)

$$T_i = \left\{ T_i \mid l = \text{floor} \left(\frac{k \cdot m_i}{S} \right), k = 1, 2, \dots, S \right\}$$

m_i : i 番目の航空機の航跡のデータ点数

解析条件



対象セクター

T02

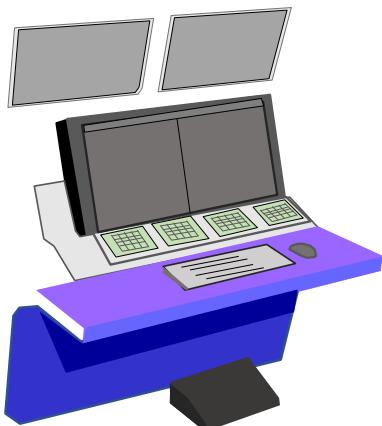
対象期間

2022/06/01- 2022/06/30

TEPS : En-route control operation in Air Traffic Control Center

航空路を飛行する航空機の管制業務を支援するシステム

レーダー等の位置情報に基づく航跡及び管制官指示データを記録



管制官指示データ(CARATS オープンデータに含まれず)

3種の入力データに着目

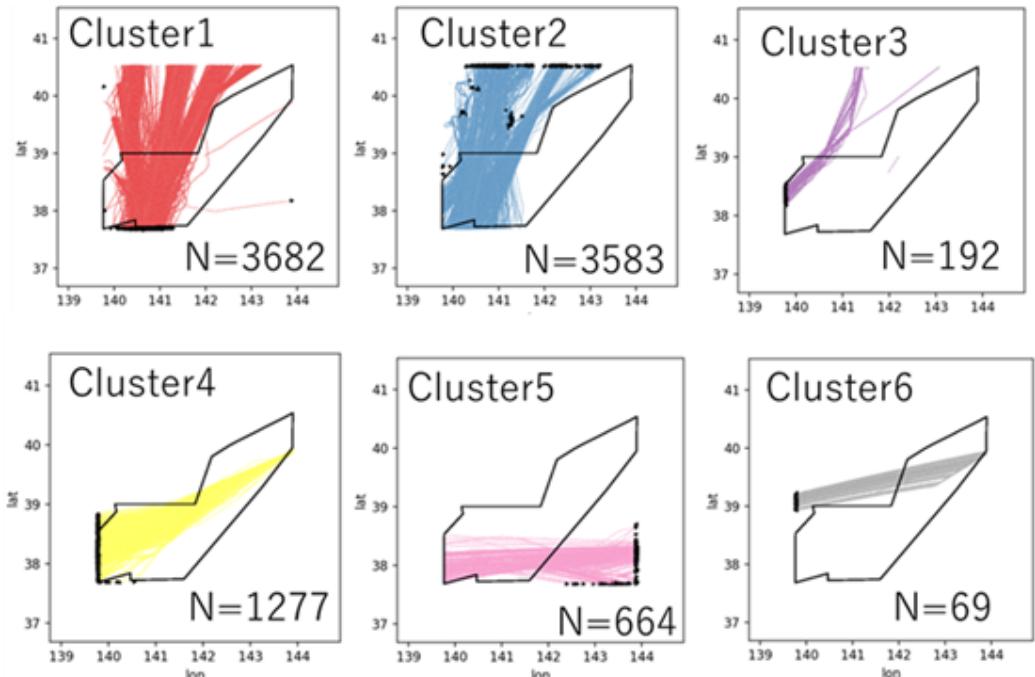
(方位・地点指示, 速度指示, 高度指示)

方位・地点指示 : Heading • FIX

速度指示: Speed

高度指示: Altitude

解析:クラスタリング後の航跡群



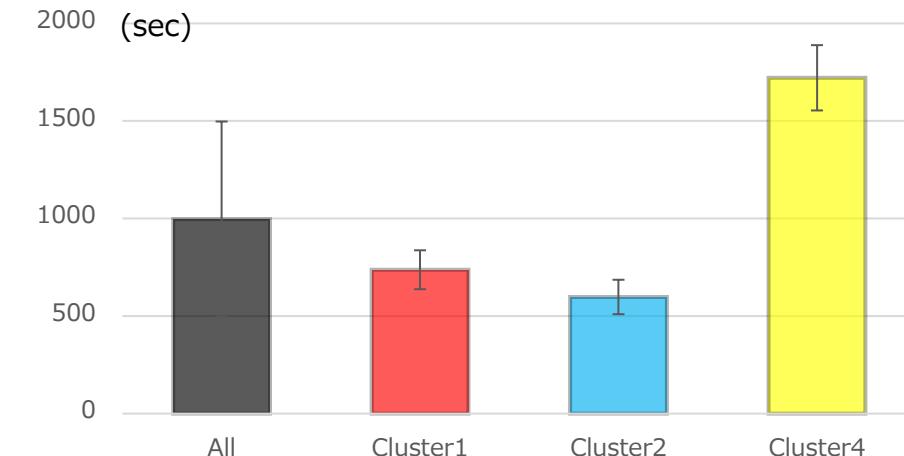
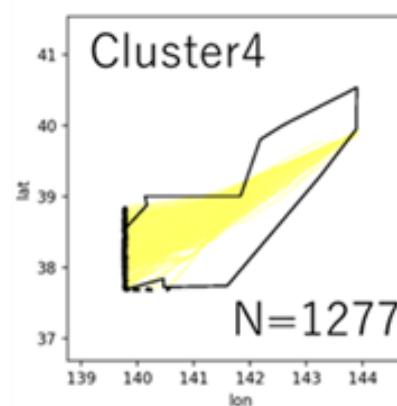
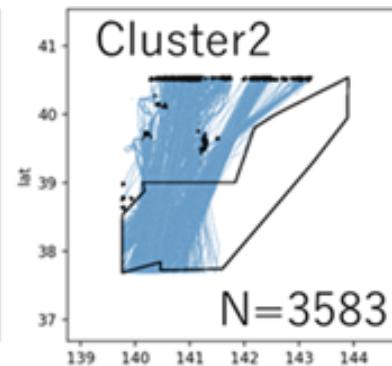
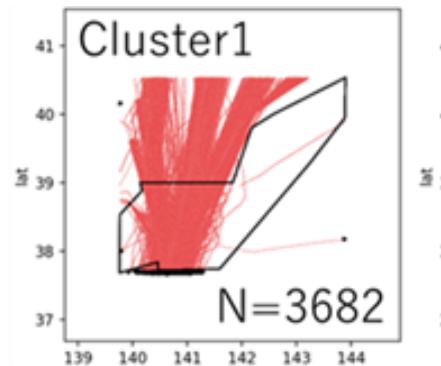
縦軸：緯度
横軸：経度

- 主要な交通流は南北方向の航跡
 - 7,000機以上の航跡
- 東西の交通流もある程度存在
 - クラスタ4～6は洋上空域へ入出域する交通流
- クラスタ6はセクタが統合運用される時間帯におけるショートカットの航跡

解析: クラスタ毎のセクタ通過時間



| | all | Cluster1 | Cluster2 | Cluster3 | Cluster4 | Cluster5 | Cluster6 | 平均巡航時間 | 巡航時間の標準偏差 |
|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--------|-----------|
| average | 996.8888 | 737.4463 | 597.8543 | 542.2529 | 1721.29 | 666.7081 | 1677.782 | | |
| std | 500.4661 | 99.66718 | 88.29372 | 65.91216 | 167.4024 | 45.38812 | 107.6297 | sec | |

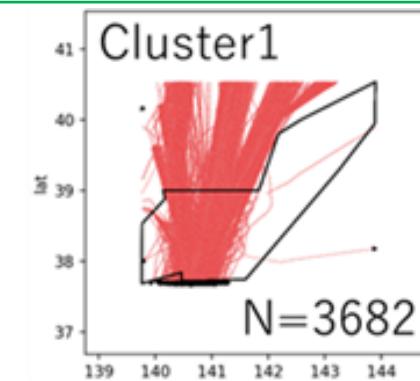
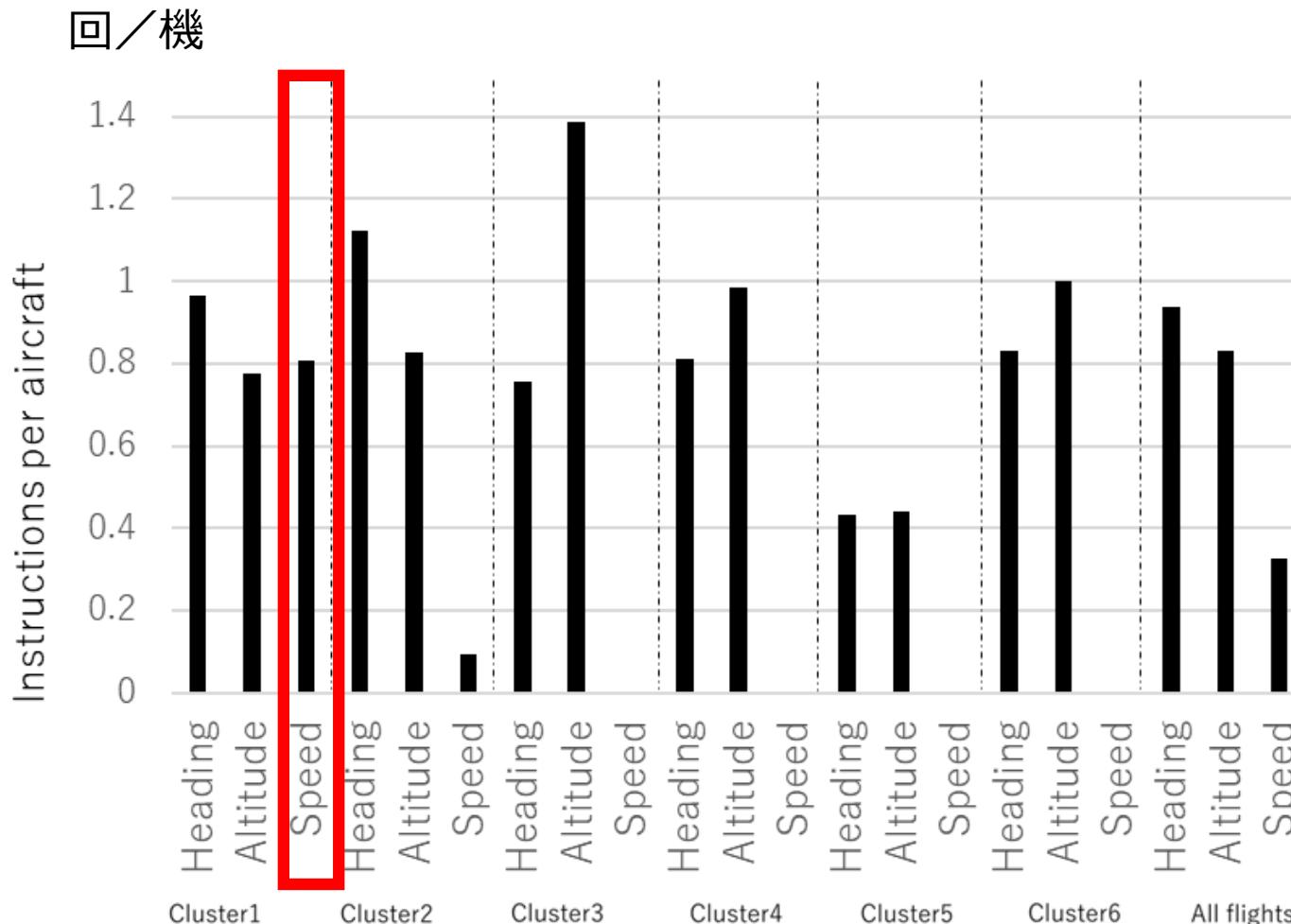


クラスタ毎の平均巡航時間が異なるため分割しない場合だと標準偏差が大きい傾向

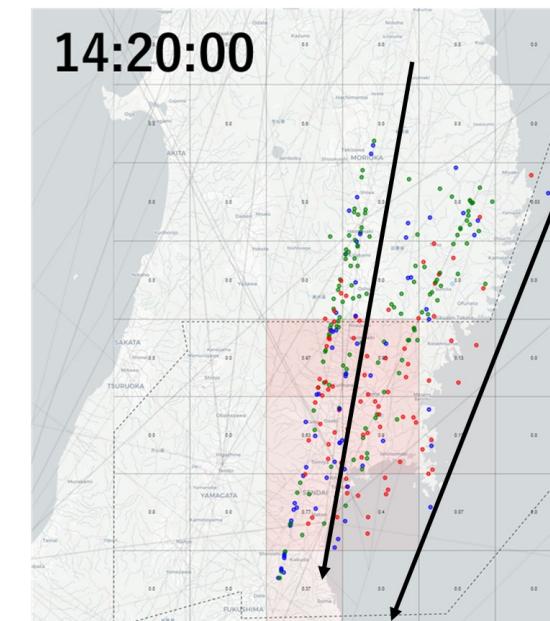
縦軸：平均巡航時間
横軸：全航跡・航跡群

クラスタ毎の巡航時間の分散は小さくなるため空域容量の精緻化が可能

解析：1機あたりの平均指示頻度



管制負荷が比較的高い時間



指示派出位置

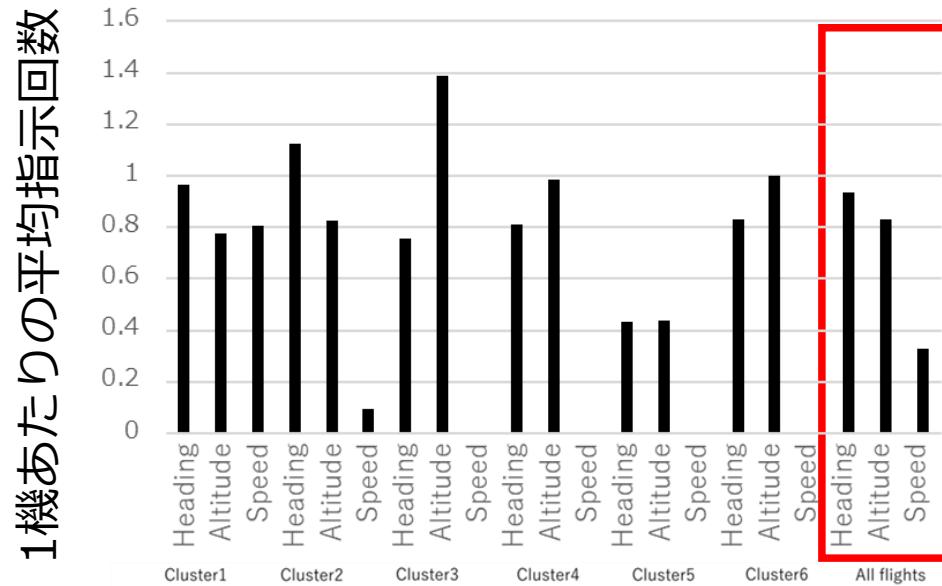
Heading, FIX
Altitude
Speed

羽田空港への間隔調整のため速度指示の頻度増

解析: 集計全時刻と混雑時の指示頻度の違い

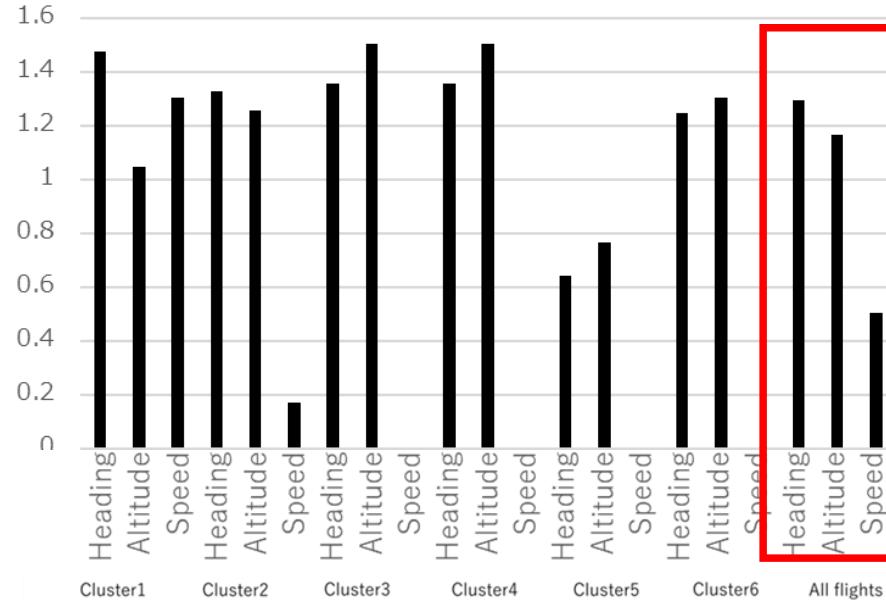


全集計時



混雑時

速度は微増
方位・地点及び高度指示は増加

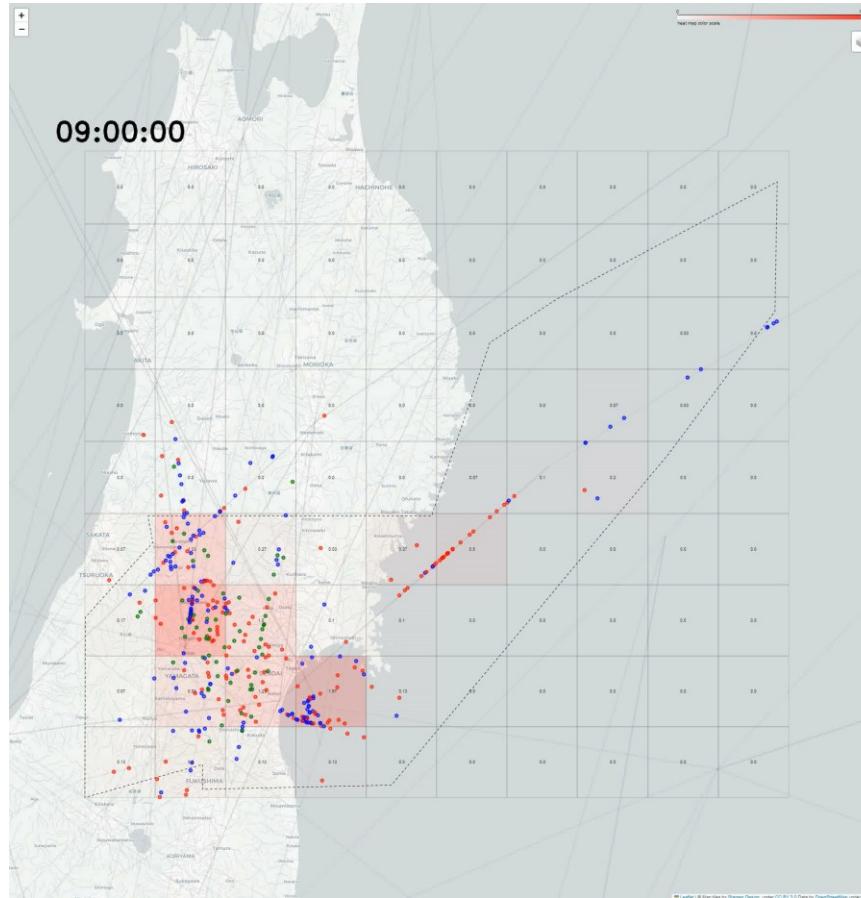


平時・混雑時で別の係数を使用することは頻度の傾向が異なるため有効

柔軟な空域運用に向けて・・・



- 航跡をクラスタリングすると何が良いのか？

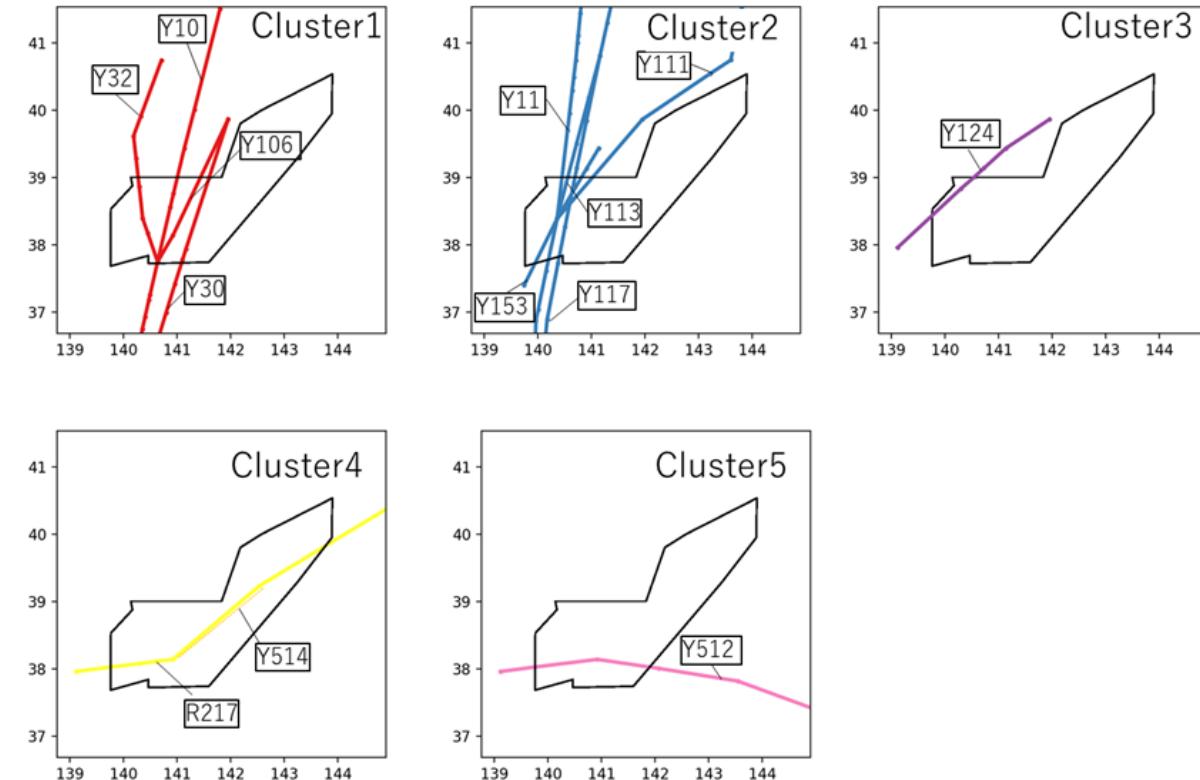


- そのままの情報を可視化
- グリッド上で混雑状況などは把握可能
- 負荷を分散化させるためには空域内部の関係性の把握が重要

柔軟な空域運用に向けて・・・

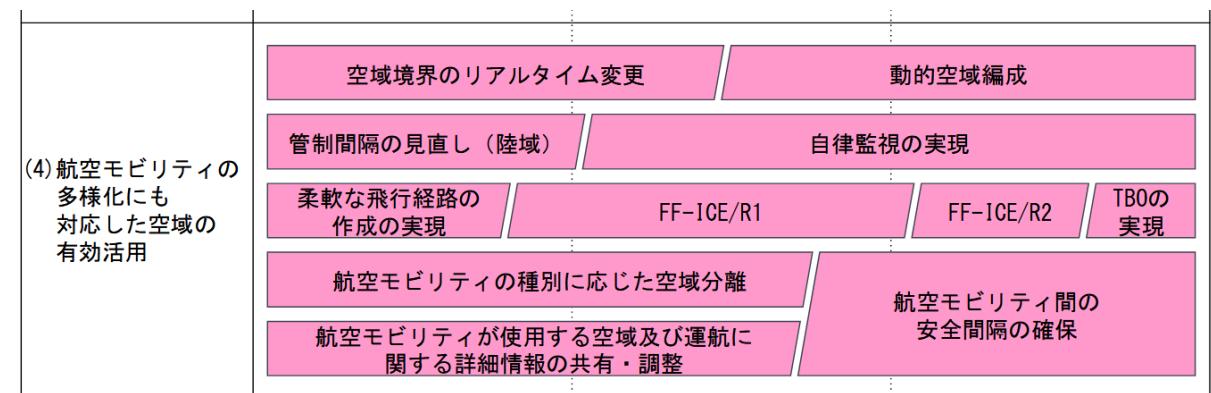


- 航跡をクラスタリングすると何が良いのか？



- 使用頻度の多い航空路を抜粋
- 空域内における航空路や位置での管制負荷を把握可能

リアルタイムでの境界変更や動的空域構成への貢献



参考：第21回 将来の航空交通システムに関する推進協議会より抜粋