



研究紹介

主要管制地点を母点とした ボロノイ図に基づく 航空管制のセクター形状最適化*

2017/12/4

東北大学 井上 亮

*吉田 幸司氏との共同研究成果

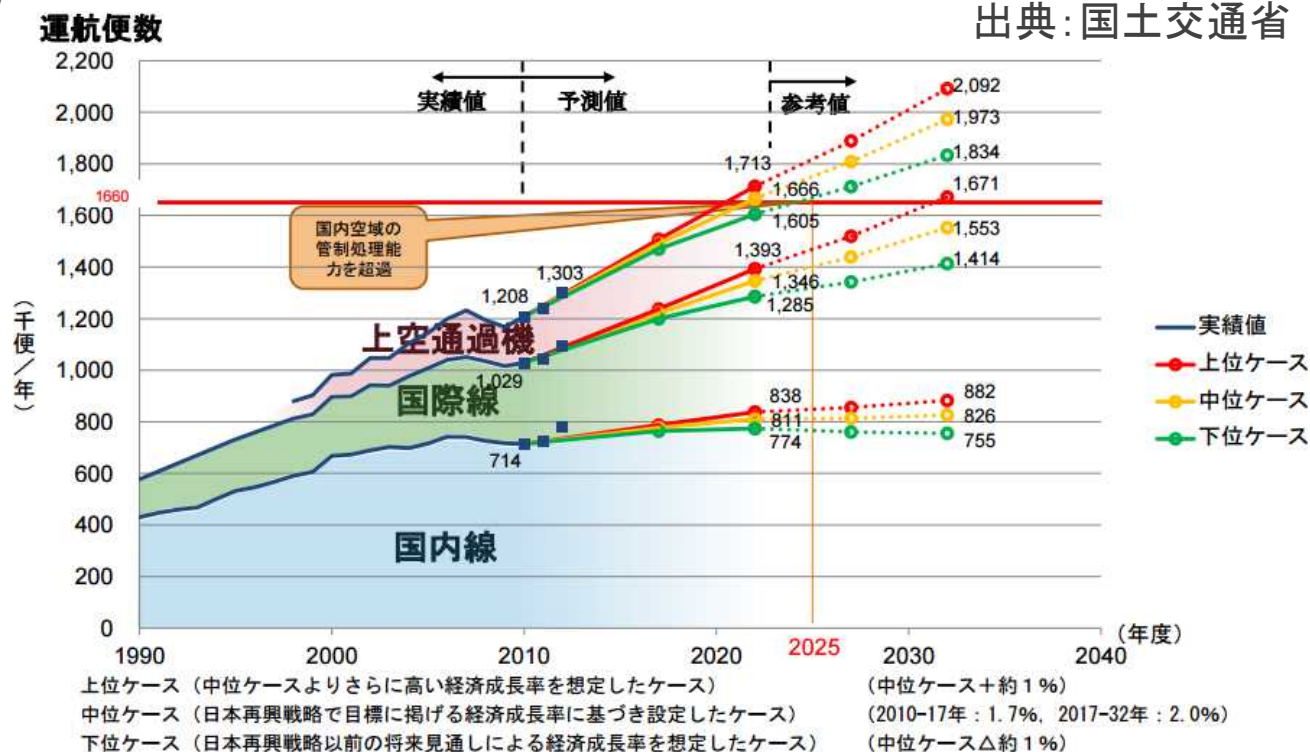
航空交通需要の増加

- ・新興国の経済発展
- ・グローバル化の進展
- ・LCCの普及

などによって、世界的に航空交通需要が増加

日本でも2025年に、
航空交通量が**現行の管制処理能力を超過**する見込み
(国土交通省航空局, 2013)

処理能力の拡大や
安全性の確保を
目指し
航空管制業務を
改善する必要性



これまで

主要空港周辺や一部空域での混雑の常態化が課題

▶ 一部空域の改善

- 混雑空港の離発着の効率化
- 混雑空域でのセクタの形状や数の変更

今後

広範囲で混雑が発生する可能性

▶ 広域の管制効率化

- 広域のセクター設定の最適化
- 軌道ベースの管制

セクター設定の最適化に関する既往研究

「航跡データ」を容易に入手可能なアメリカを中心に、セクター設定の最適化手法が数多く提案

既往研究の分析アプローチ

1. 航跡データなどを基に管制業務の「仕事量」を指標化
2. 「セクターの仕事量の最大値を最小化」
「各セクターの仕事量を平準化」などの目的関数を設定して
セクター設定を最適化問題として定式化

+

効率的な管制が可能なセクターを設定するには…

- 位置通報点や航空路の交差・合流地点などの
近傍にセクターの境界を配置しない
- 航空機が一つのセクターに何度も出入りする可能性が生じる
複雑な形状のセクター設定を行わない

しかし、既往手法は、
上記の**セクター境界に関する条件を明示的に考慮できない！**

新たなセクター設定手法の提案

セクターの境界線の位置や形状に関する条件を明示的に考慮しながら、
管制仕事量指標の低減を図るセクター設定手法を提案

本提案手法のアプローチ

- **主要管制地点**を母点とした**ボロノイ面**を分析の最小空間単位に設定
- **隣接ボロノイ面の組合せ**でセクターを構成することを前提
- **管制仕事量指標を低減させる目的関数**を設定し、**セクター形状に関する制約**を満たす下で、**目的関数を改善**するセクター設定を探索する。

既往のセクター設定手法

グラフ分割による手法

(Li et al., 2009)

ノード (主要管制地点を表す)に
[監視仕事量][接近・衝突回避仕事量]
 リンク (航空路を表す)に
[通信仕事量]を設定

目的関数(例: 管制仕事量の均等化など)を
 最適化する**グラフを分割を求める**

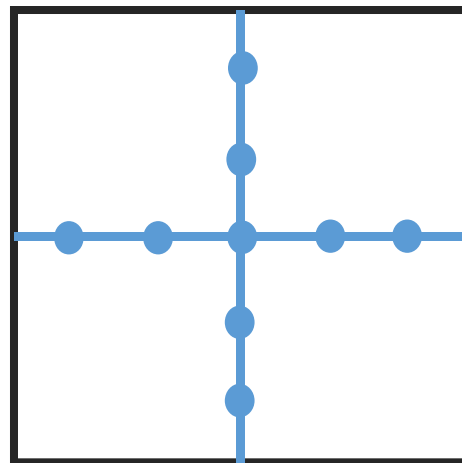
格子領域の分割による手法

(Yousefi & Donohue, 2004;
 Kulkarni et al. 2012 など)

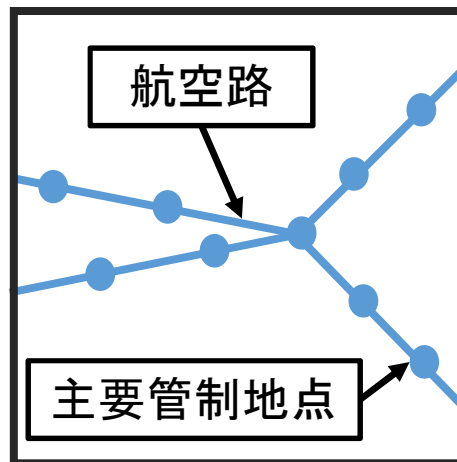
空域を
 (正方・六方)格子に分割し
 各格子に**[管制仕事量]**を設定

目的関数を最適化する
格子の組合せを求める

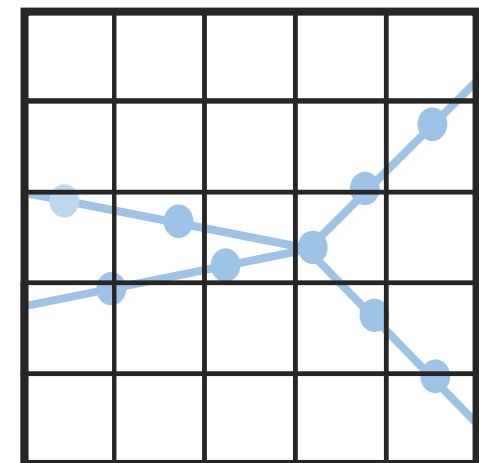
地理的位置を捨象



グラフ
 で表現



格子で
 表現



既往のセクター設定手法

グラフ分割による手法

(Li et al., 2009)

ノード (主要管制地点を表す)に
[監視仕事量][接近・衝突回避仕事量]
 リンク (航空路を表す)に
[通信仕事量]を設定

目的関数(例: 管制仕事量の均等化など)を
 最適化する**グラフを分割を求める**

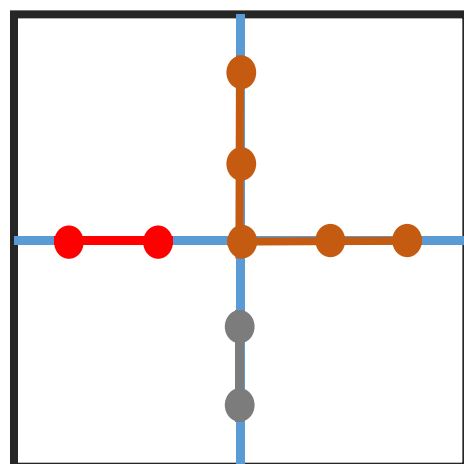
格子領域の分割による手法

(Yousefi & Donohue, 2004;
 Kulkarni et al. 2012 など)

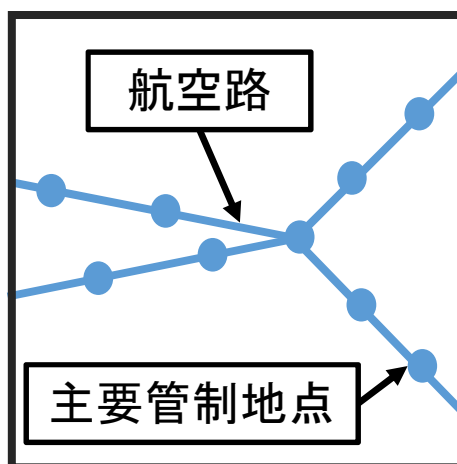
空域を
 (正方・六方)格子に分割し
 各格子に**[管制仕事量]**を設定

目的関数を最適化する
格子の組合せを求める

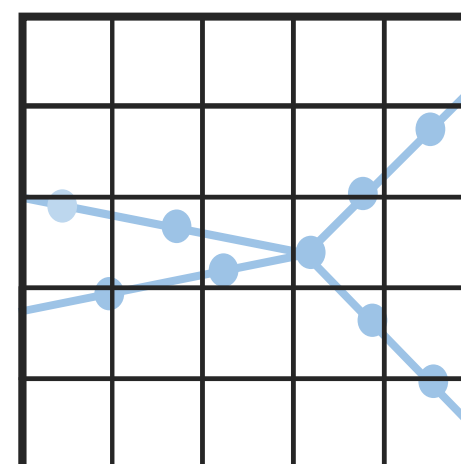
地理的位置を捨象



グラフ
 で表現



格子で
 表現



既往のセクター設定手法

グラフ分割による手法

(Li et al., 2009)

ノード (主要管制地点を表す)に
[監視仕事量][接近・衝突回避仕事量]
 リンク (航空路を表す)に
[通信仕事量]を設定

目的関数(例: 管制仕事量の均等化など)を
 最適化する**グラフを分割を求める**

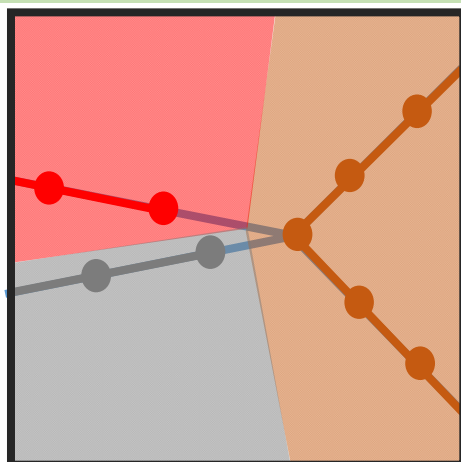
格子領域の分割による手法

(Yousefi & Donohue, 2004;
 Kulkarni et al. 2012 など)

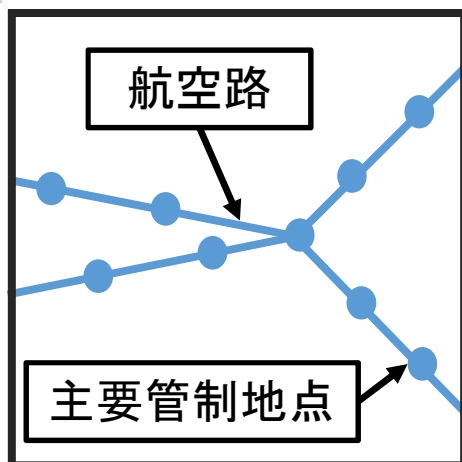
空域を
 (正方・六方)格子に分割し
 各格子に**[管制仕事量]**を設定

目的関数を最適化する
格子の組合せを求める

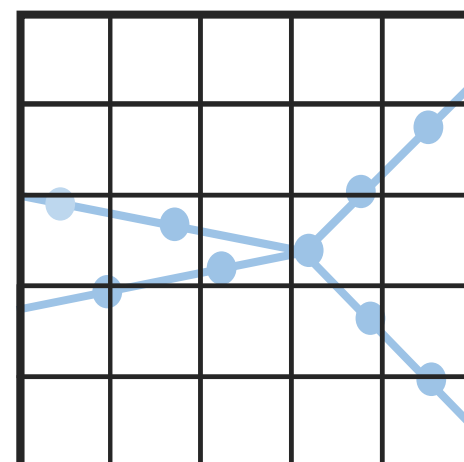
航空路の接続関係や交通量を反映可能



グラフ
 で表現



格子で
 表現



地理的位置を考慮できない

既往のセクター設定手法

グラフ分割による手法

(Li et al., 2009)

ノード (主要管制地点を表す) に
[監視仕事量][接近・衝突回避仕事量]
 リンク (航空路を表す) に
[通信仕事量]を設定

目的関数 (例: 管制仕事量の均等化など) を
 最適化する**グラフを分割を求め**る

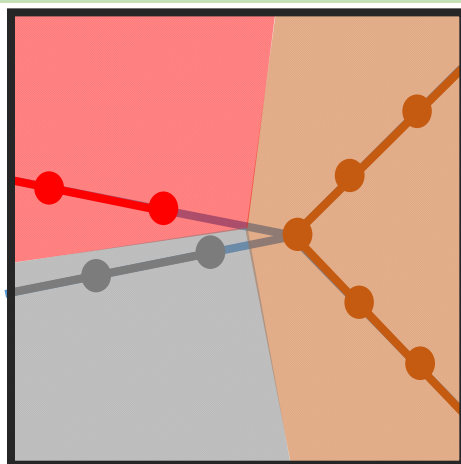
格子領域の分割による手法

(Yousefi & Donohue, 2004;
 Kulkarni et al. 2012 など)

空域を
 (正方・六方) **格子に分割し**
 各格子に**[管制仕事量]**を設定

目的関数を最適化する
格子の組合せを求める

航空路の接続関係や交通量を反映可能



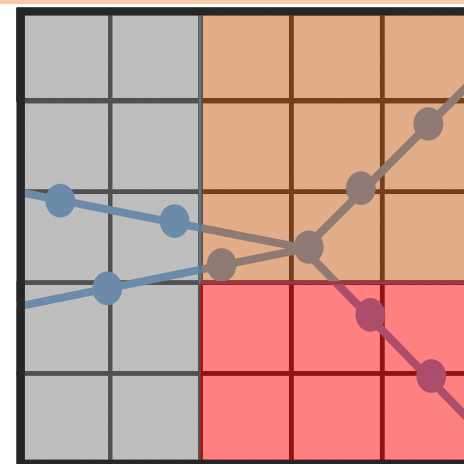
グラフ
 で表現

地理的位置を考慮できない

航空路

主要管制地点

航空路の接続関係を考慮できない



格子で
 表現

セクターの形状を簡単に制御可能

既往のセクター設定手法の課題

グラフ分割による手法		格子領域の分割による手法
ノード (主要管制地点を表す)に [監視仕事量][接近・衝突回避仕事量] リンク (航空路を表す)に [通信仕事量] を設定 目的関数を最適化するように (例: 管制仕事量の均等化など) グラフを分割	概要	空域を (正方・六方)格子に分割し 各格子に [管制仕事量] を設定 目的関数を最適化するように 格子の組み合わせを求め
△	航空路ネットワーク の構造を考慮	×
×	セクター形状の 制御	○

ここで、両者の長所を組み合わせた手法を提案

航空路の接続関係やその交通量など、
航空路の構造を考慮したセクター分割を達成するため、
航空路上の主要管制地点を母点としたボロノイ図で空域を分割、
隣接ボロノイ面の組み合わせでセクターを設定

ボロノイ図・ボロノイ面とは？

ボロノイ図とは、
空間に配置された**どの母点への距離が一番短いか**によって
領域を分割した図。

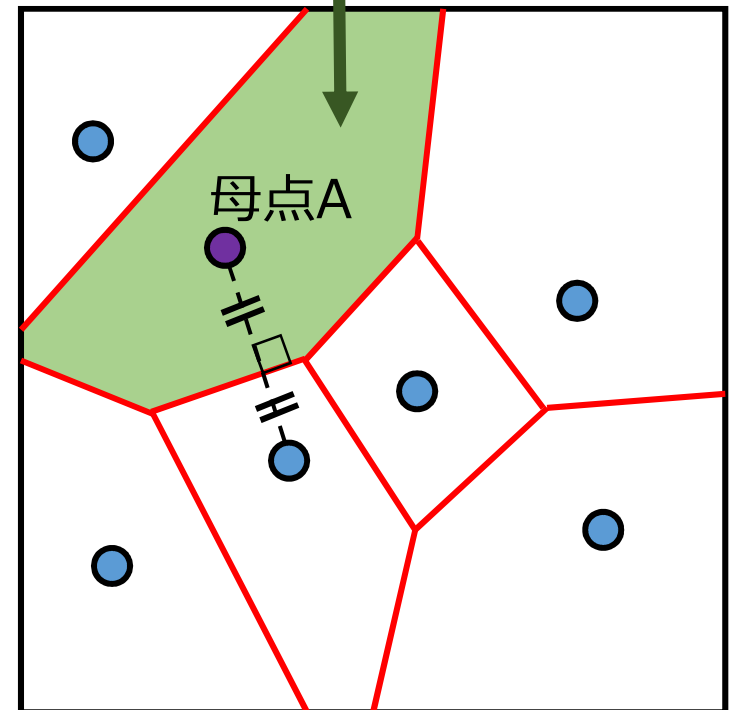
(例) 駅を**母点**にボロノイ図を作成
⇒ 各**ボロノイ面**は
最寄り駅が同じ地域を表す

各母点に対応した領域: **ボロノイ面**
各領域の境界線: **ボロノイ辺**

<ボロノイ図の性質>

ボロノイ辺は、
近傍に位置する**二つの母点**を結ぶ
線分の**垂直二等分線**。
母点から**最も遠い場所**を表す。

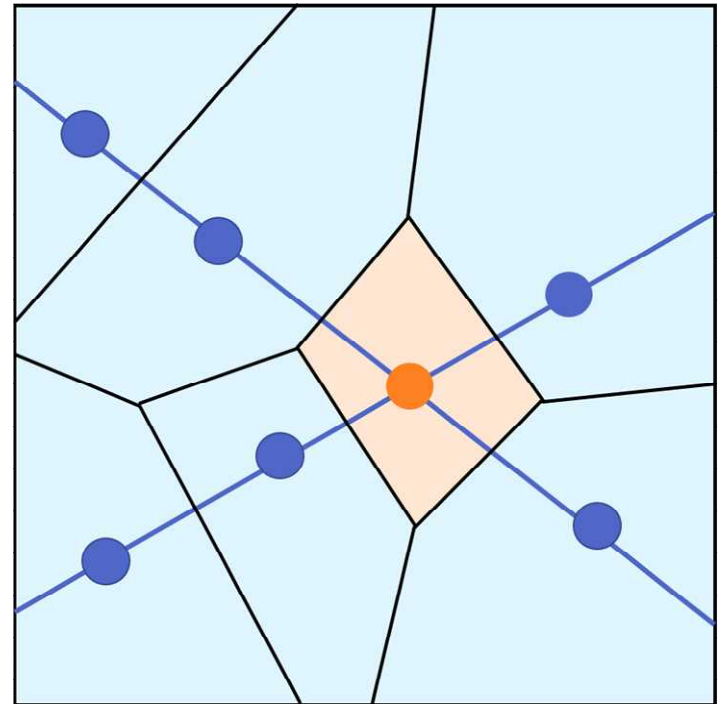
母点Aが
他の母点よりも近い領域



主要管制地点を母点としたボロノイ図

<ボロノイ図の性質>から、
航空路の接続関係や地理的位置を考慮でき、
セクター設定の最小単位と設定するのに適した領域となる

ボロノイ図の性質	主要管制地点を母点としたボロノイ図の性質
境界線は、 近傍の母点を結ぶ 線分の垂直二等分線	境界線は、 主要管制地点から 最も遠い場所に配置
近傍の母点对に対応 したボロノイ面は、 必ずボロノイ辺を 共有して接する	航空路の接続関係は、 ボロノイ面の隣接関係の 一部として表現



ボロノイ図に基づくセクター設定

ボロノイ面←主要管制地点周辺の

[監視仕事量][衝突・接近回避仕事量]

ボロノイ辺←境界を越える航空機に対する**[通信仕事量]**

ただし、隣接ボロノイ面が同一セクターを構成するなら0

を与え、

管制仕事量の最小化や**平準化**を図る目的関数を改善する

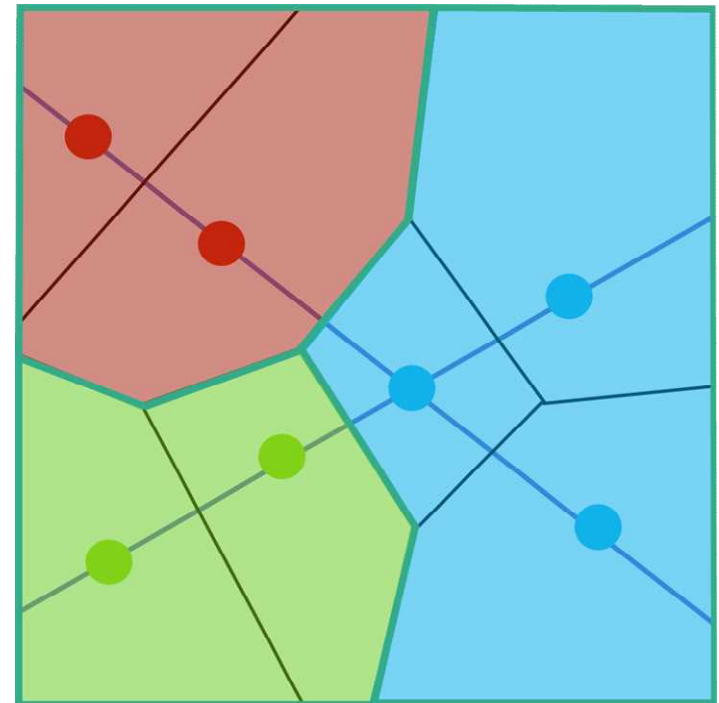
隣接ボロノイ面の組合せを求める

最適化問題として定式化。



- 主要管制地点周辺に境界がない
- 交通量の多い航空路に沿った領域は分割されにくい

セクター設定が可能に！



管制仕事量を低減する目的関数

セクター ($k=1, \dots, m$) の管制仕事量の二乗和を最小化する,
ボロノイ面の組合せを求める問題として定式化

$$\min \left(\sum_{k=1}^m \left(\sum_{i \in S_k} [\text{管制仕事量}]_i \right)^2 \right)$$

ただし, 「ボロノイ面 i に関する管制仕事量」は

$$[\text{管制}]_i = \alpha [\text{監視}]_i + (1 - \alpha) \left(\beta [\text{衝突・接近回避}]_i + (1 - \beta) \sum_{j=1}^n \delta_{ij} [\text{通信}]_{ij} \right)$$

$$0 \leq \alpha, \beta \leq 1$$

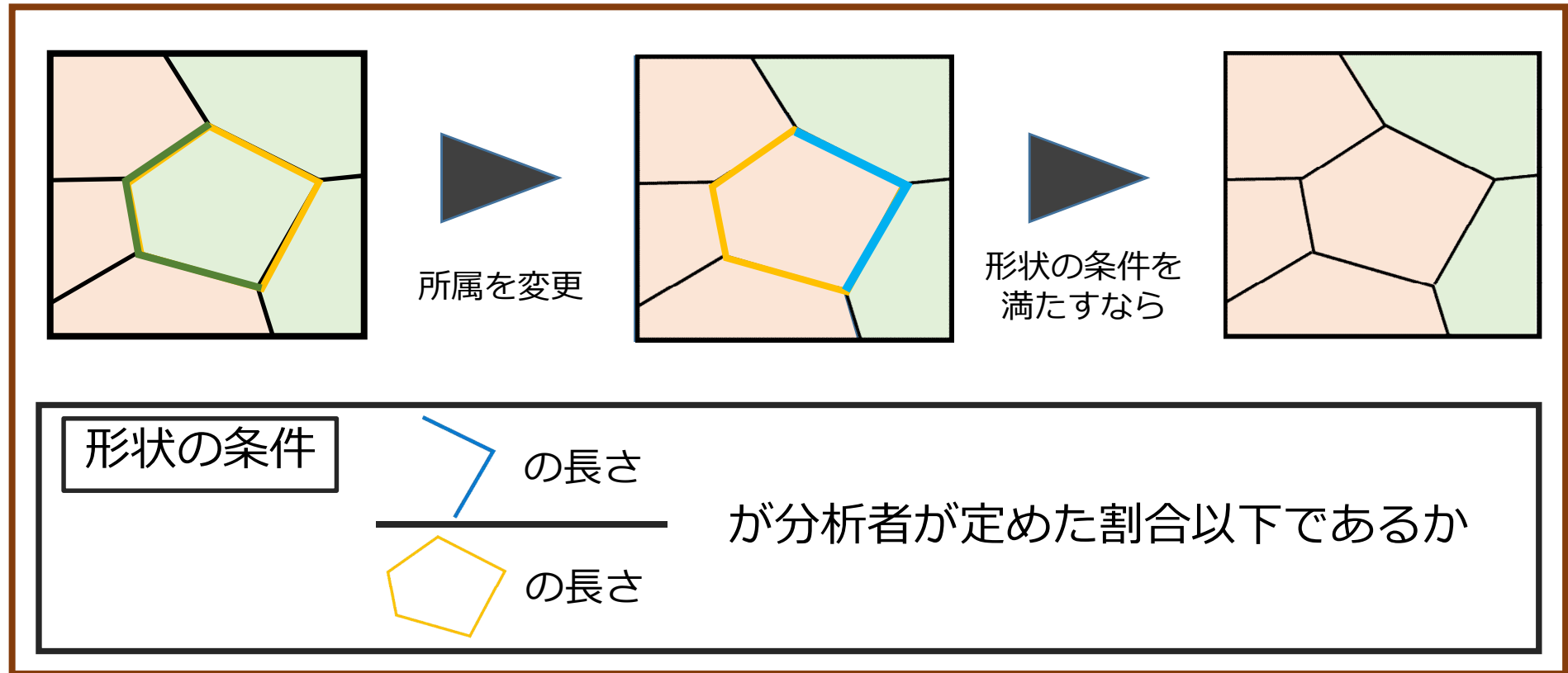
α, β : 各仕事量指標の重み係数

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & (\text{ボロノイ面 } i, j \text{ のセクタが異なる}) \\ 0 & (\text{ボロノイ面 } i, j \text{ のセクタが同じ}) \end{cases}$$

この組合せ最適化問題を, 焼き鈍し法で解く.

その際に, セクター形状が著しく複雑にならないよう条件を設定

セクター形状の制御



焼き鈍し法の計算過程で、周長を基準にセクター形状の変更に制約を課し、複雑な形状になることを防ぐ

課題 制約を設定 ⇒ 大域的な最適解に近づくことは不可能。
ただし、初期値として与えたセクター設定の近くで、目的関数値を改善するセクター設定を探すことは可能。

提案手法のまとめ

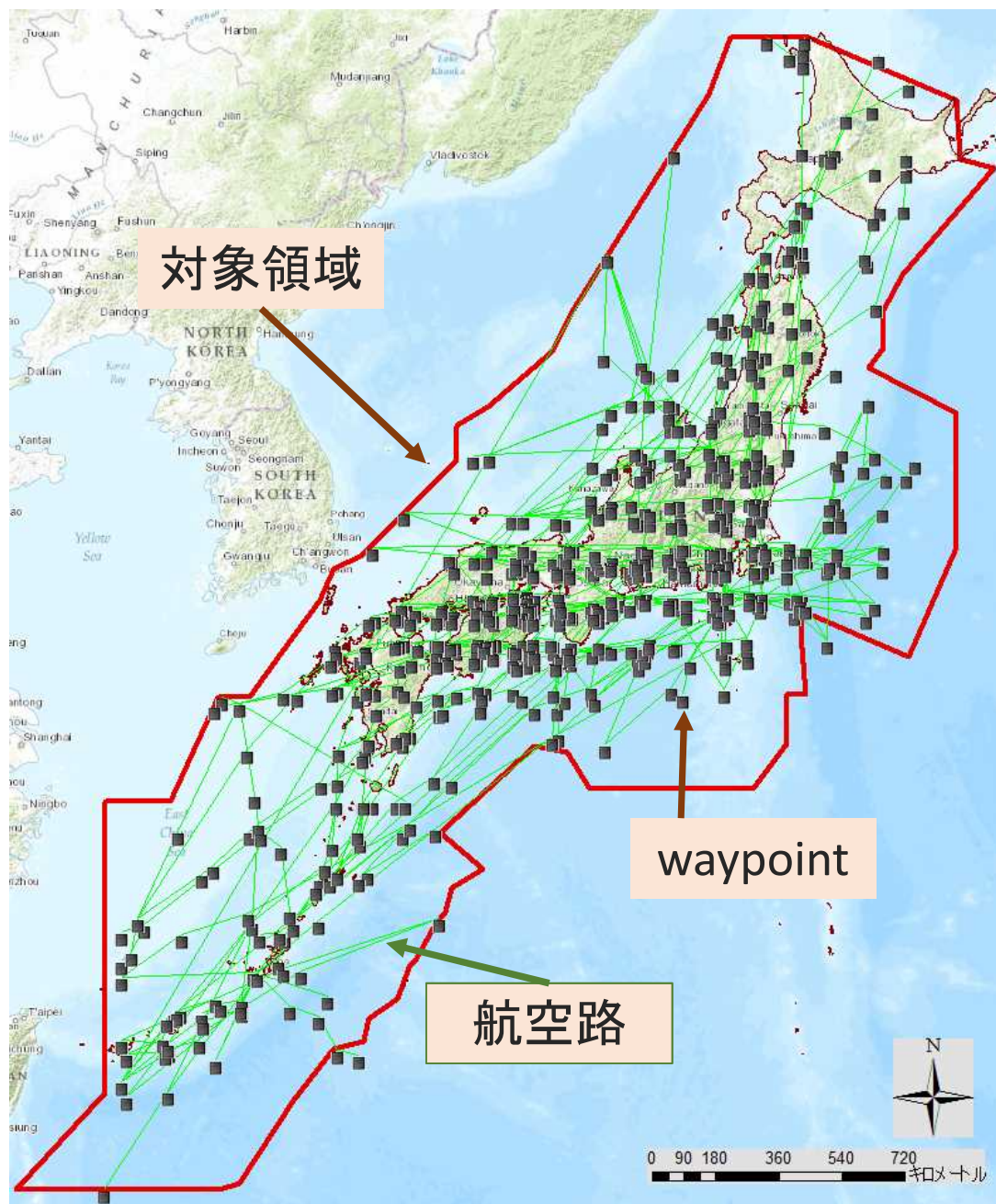
ポイント

- **主要管制地点を母点としたボロノイ図**を作成し、ボロノイ面をセクター設定の最小単位に設定
- 管制仕事量を低減するセクター設定を求める問題を**ボロノイ面の組合せ最適化問題**として定式化
- 組合せ最適化問題を解く過程で、**セクター形状に関する制約**を考慮

利点

- 主要管制地点の近傍にセクター境界が配置されない
- 航空路の地理的配置・接続関係や航空路上の交通量を考慮したセクター設定が可能
- 焼き鈍し法による探索過程で、セクター形状を制御することが比較的容易

日本の空域への適用 対象領域と母点設定



<対象領域>

洋上を除く福岡FIR内
各管制部管轄の
14,000ft以上の空域

<ボロノイ図の母点の設定>

RNAV航空路上のWaypoint

657点

+

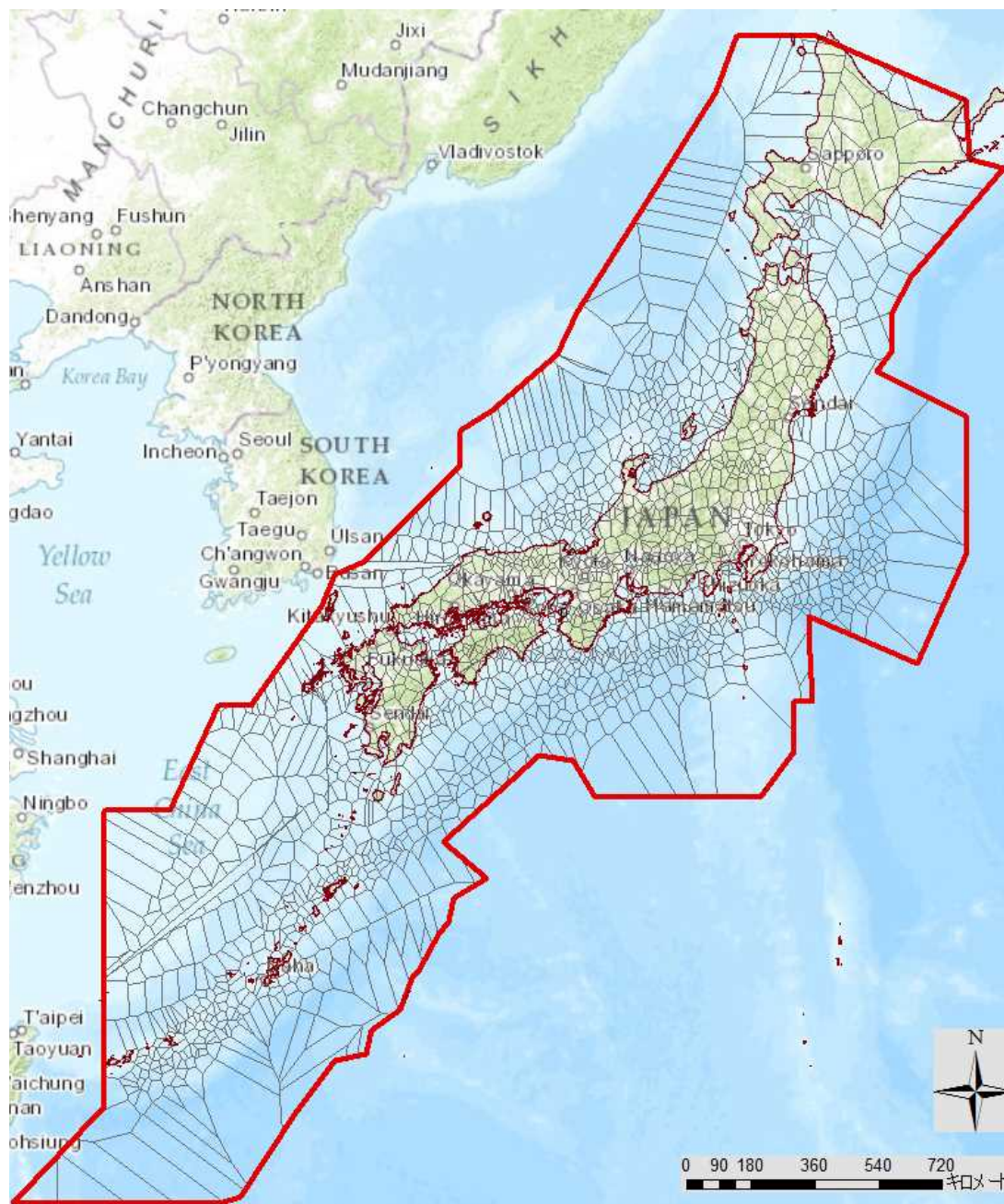
航空路上の点間距離が50nm以上の
場合、その中点に母点を追加
(ボロノイ面のサイズが大きく異なる
ため)

1,310点

計1,967点

<背景地図出典> ESRI

日本の空域への適用 対象領域と母点設定



<対象領域>

洋上を除く福岡FIR内
各管制部管轄の
14,000ft以上の空域.

<ボロノイ図の母点の設定>

RNAV航空路上のWaypoint

657点

+

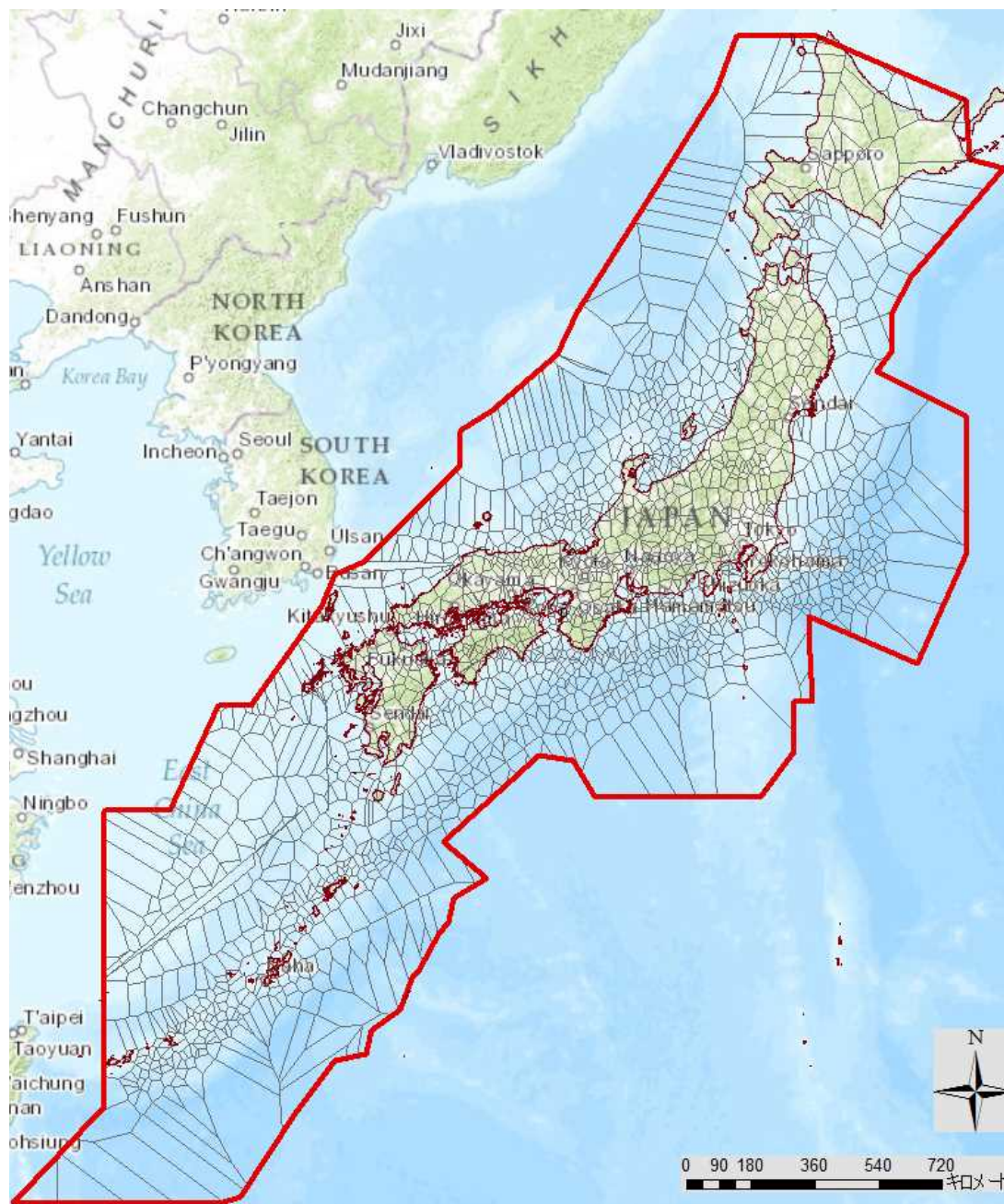
航空路上の点間距離が50nm以上の
場合, その中点に母点を追加
(ボロノイ面のサイズが大きく異なる
ため)

1,310点

計1,967点

<背景地図出典> ESRI

日本の空域への適用 管制仕事量指標の設定



CARATS Open Data

の航跡データを用いて設定.



[監視仕事量]

ボロノイ面内の平均航空機数

[衝突・接近回避仕事量]

予想針路上での航空機の接近回数

[通信仕事量]

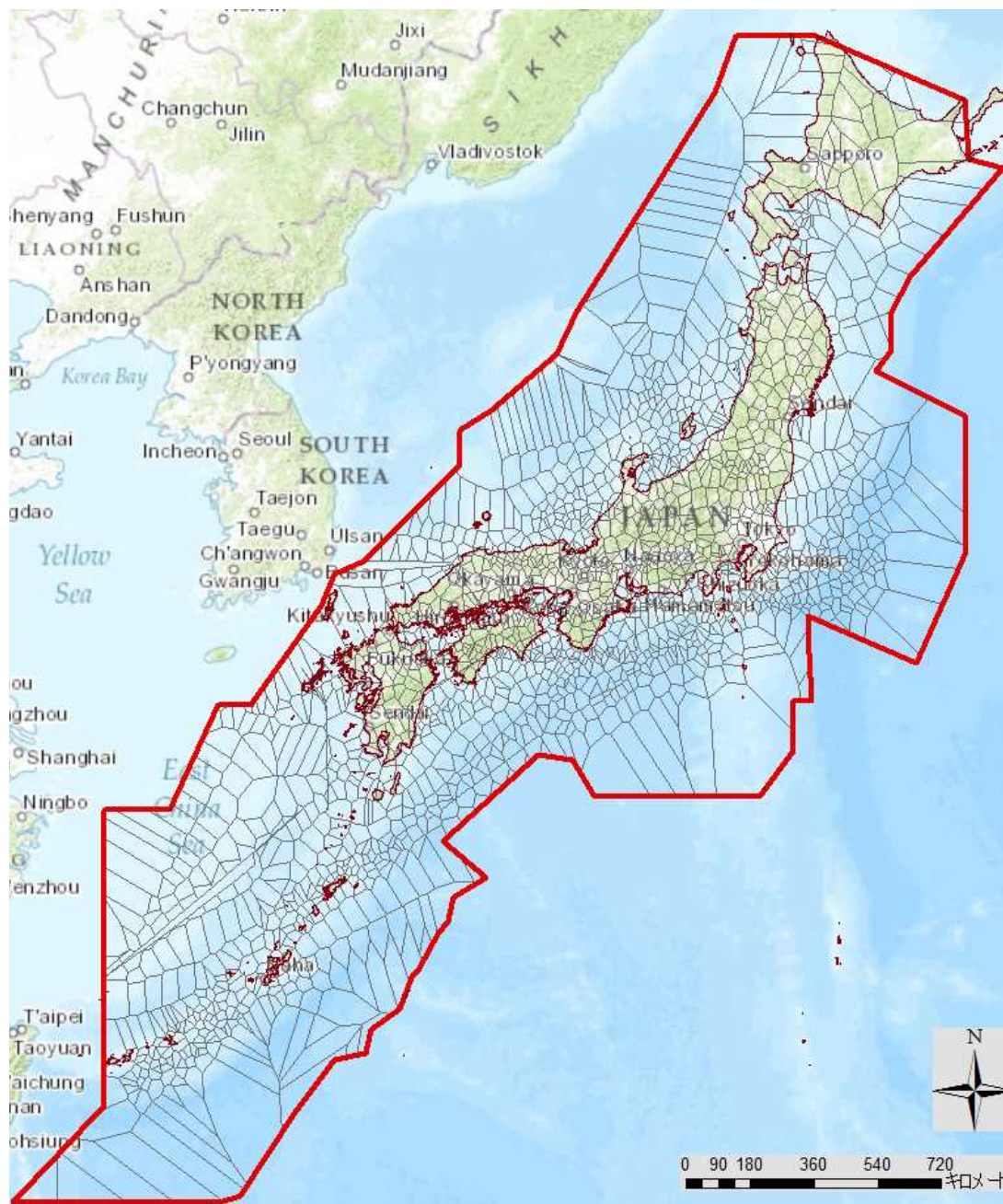
セクター境界線を越える機数

<対象時間帯>

9~21時

<背景地図出典> ESRI

日本の空域への適用 管制仕事量指標の設定



$$[\text{管制}]_i = \alpha[\text{監視}]_i + (1 - \alpha) \left(\beta[\text{衝突・接近回避}]_i + (1 - \beta) \sum_{j=1}^n \delta_{ij}[\text{通信}]_{ij} \right)$$

$$0 \leq \alpha, \beta \leq 1$$

α, β : 各仕事量指標の重み係数

仕事量指標間の重み設定

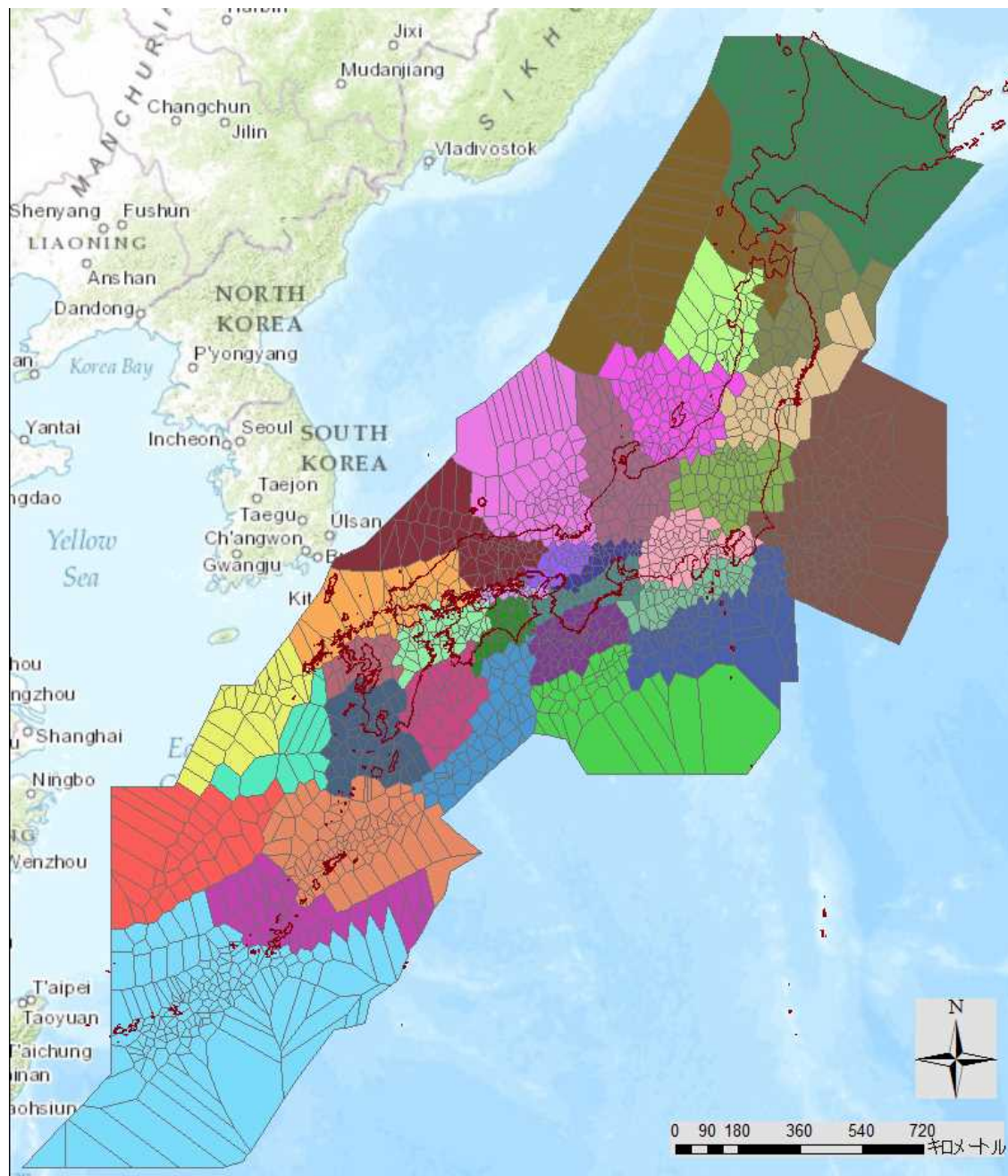
Eurocontrol (2000)によると、衝突・接近回避に約84秒、航空機の引継ぎに約60秒要するとされていることから、 $\beta = 0.58$ と設定。

一方、監視仕事量に適切な指標がないため、 $\alpha = 0.5$ と設定。

(感度分析を実施したが結果に大きな変化なし)

<背景地図出典> ESRI

日本の空域への適用 セクター初期設定



現行セクターに従い
ボロノイ面の組合せに
関する初期設定を実施。

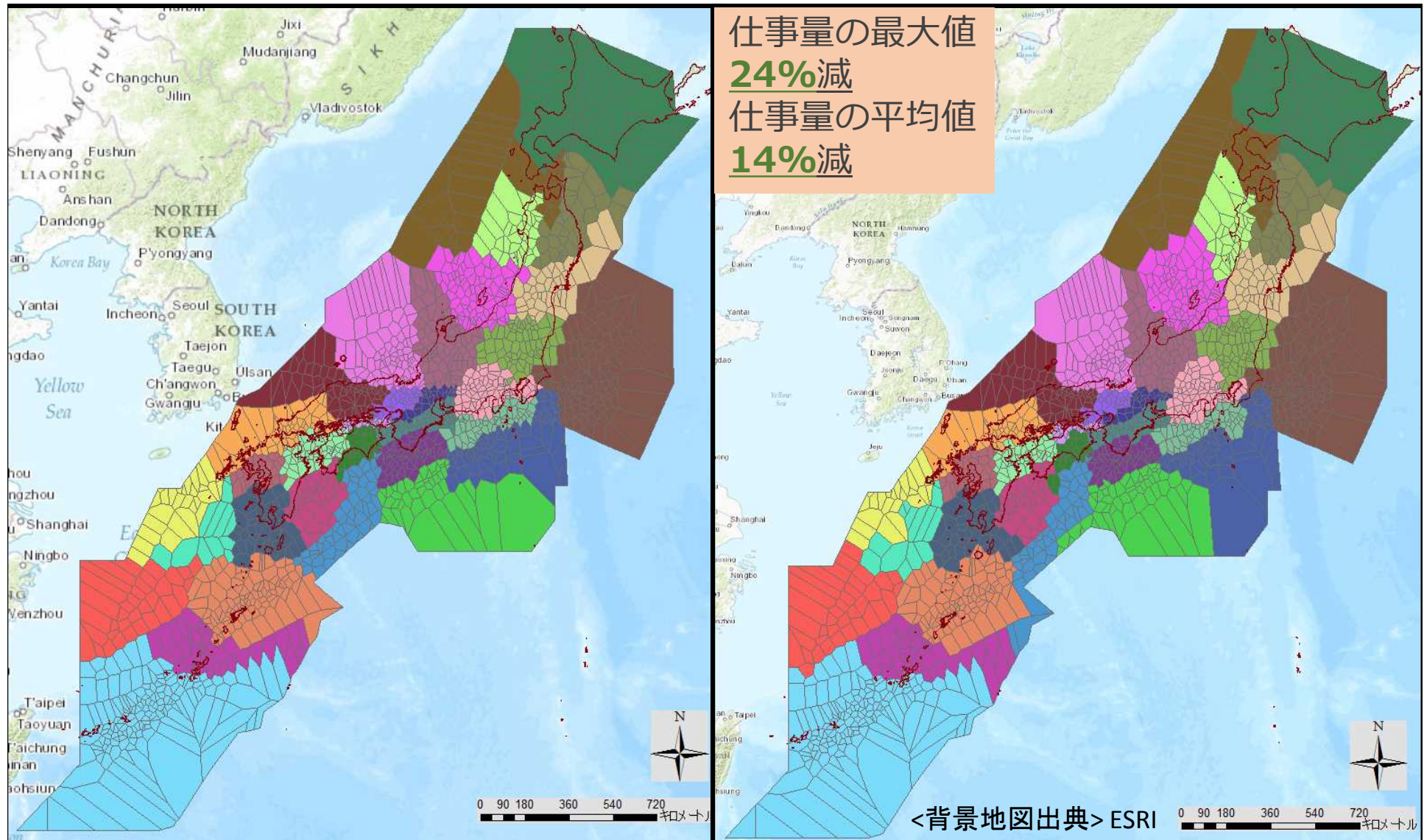
本適用では、
高高度のセクター設定を対象。
最も高い高度でのセクターを
下に初期設定を行った。
(33セクター)

この初期設定から
ボロノイ面の組み替えを行い
管制仕事量の低減を図る

日本の空域への手用 セクター設定の変化

現行セクター (初期設定)

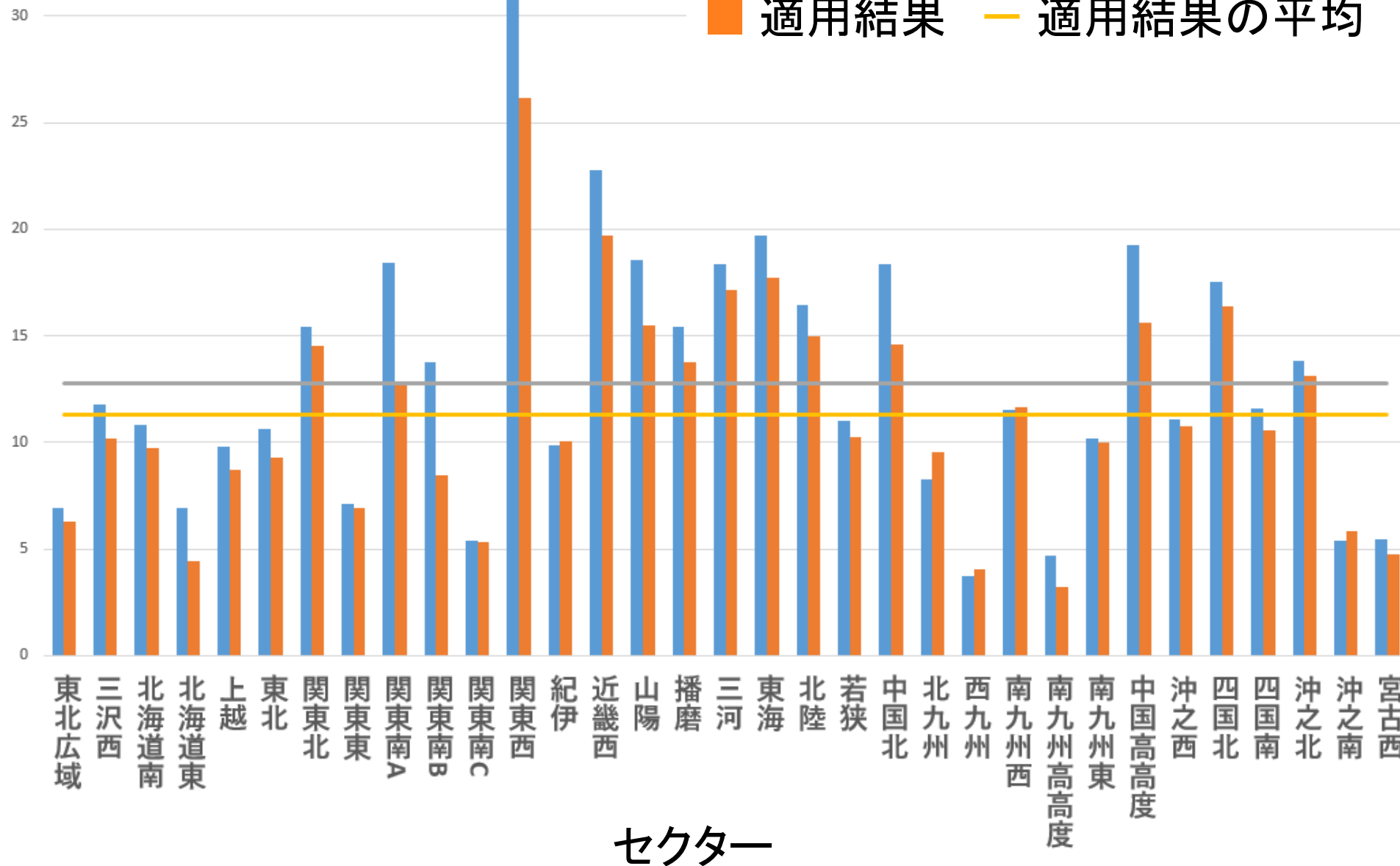
手法適用後



管制仕事量指標の変化

管制仕事量

■ 初期設定 — 初期設定の平均
 ■ 適用結果 — 適用結果の平均



提案手法のまとめ と 展開の可能性

管制仕事量指標を軽減するセクター設定方法を提案

アプローチ

- ✓ 航空路の主要管制地点に基づくボロノイ分割
- ✓ セクター形状に関する制約下で、ボロノイ面の組合せ最適化問題を解く

特徴

提案手法は、地点・エリア・ルートに設定した**管制仕事量**を基に、
(仕事量の大きさなど) **目的関数値**を改善するセクターを探索する手法。

展開の可能性

適用例では、**航跡データ**を用いて、簡易的に**管制仕事量**を設定したが、
「地点・エリア・ルートに対するより精緻な(管制官の生体情報?)仕事量評価」
「将来交通量シナリオ下での航空管制シミュレーションによる仕事量評価」

などが得られれば、

それに対応した**“現行のセクター設定に近い”**が、**仕事量を軽減できる**
セクター形状を設計可能

⇒ 例えば、時間帯別の混雑度に応じた動的なセクタ形状設定、
などへ応用可能か？