

管制仕事量の低減を目指した 航跡データを用いた日本の空域分割

吉田 幸司¹・井上 亮²

¹非会員 東北大学大学院情報科学研究科 博士課程前期 (〒 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)
E-mail: koji.yoshida@plan.civil.tohoku.ac.jp

²正会員 東北大学大学院情報科学研究科 准教授 (〒 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)
E-mail: rinoue@tohoku.ac.jp

近年、国内外の航空需要の増大に伴い、航空交通量が現行の航空交通システムの管制処理能力を超過し、航空交通の安全性を損なう可能性があるとして予測されている。本研究は、航空交通の安全性向上を目指し、航跡データを利用して算定した管制仕事量を基に、その低減を図る空域分割手法を提案する。提案手法では、航空路上の管制地点を母点としたポロノイ図の作成、ポロノイ面単位の管制仕事量の算定を通して、管制仕事量の二乗和を最小化するポロノイ面の組み合わせを求める最適化問題として空域分割問題を定式化し、焼きなまし法を用いて解く。日本の航跡データに対する適用を通してその有効性を確認した。

Key Words : 航空交通, 空域分割, 管制仕事量

1. はじめに

近年、アジア周辺諸国をはじめとした新興国での急激な経済成長やグローバル化の進展、格安航空サービスの増加によって世界的に航空交通需要が増加している。日本においても、将来的に現行の管制処理能力を超過する航空交通量が予測されている¹⁾。これを受けて、航空交通の安全性を確保するために、航空交通量の増加に対応した航空管制業務の改善の必要性が指摘されている。

日本では東京国際空港や成田国際空港といった一部の空域で航空混雑が常態化しており、これまで当該地域を対象とした航空管制業務の改善が行われてきた。この改善策として、混雑空港での離発着の効率化や、混雑状況を考慮した管制区域の形状や数の変更が検討されてきた。

しかし、前述の背景から、将来的に混雑空域が広範囲に拡大することが見込まれ、一部の空域を対象とした改善策では対応できない可能性がある。広域を対象とする航空管制業務の改善策の1つは、各管制官が担当する管制区域であるセクタの見直しである。

航空管制業務では、管制官は担当セクタ内の航空機の挙動を監視し、場合によっては管制指示を行う。また、航空機が隣接するセクタや周辺諸外国の管轄空域へ移るときは、航空機の引継ぎ業務が行われる。この際にかかる管制官の仕事量は、航空機数や引継ぎ業務の回数といった、定量的に観測できる要素を指標として

近似的に表されてきた²⁾。また、管制仕事量は航空交通流の挙動を表す航空交通流の状態と隣接するセクタの形状による境界線の設定によって変化する。これらを考慮したセクタ設定を行うことで、効率の良い管制業務を行うことができる。

セクタ設定を管制仕事量指標を基準として行う研究³⁾が多く行われている。既存研究では、空域分割を管制仕事量指標の最大値を低減する問題や、空域全体の管制仕事量指標を均等化する問題として定義している。ただし、管制が必要な地点の近くにセクタの境界線が設定されるなど、効率的な航空管制の妨げとなるセクタ設定を避ける必要がある。しかし、既存の空域分割手法では、管制仕事量指標とセクタ境界線の配置を同時に考慮したセクタ設定を行うことが難しい。

本研究では、航空交通の安全性向上のために、管制仕事量の低減を図るアプローチとして、ポロノイ図により空域の分割最小単位を設定し、その組み合わせによりセクタを生成する事で、航空交通流とセクタ形状を考慮したセクタ設定をする空域分割手法を提案する。また、日本における航空機の挙動を記録した航跡データである「CARATS Open Data」から算出した管制仕事量指標を用いた空域分割を行い、提案手法の有用性を確認する。

表-1 既存研究と管制仕事量指標の要素

管制仕事量の要素	既存研究
監視仕事量	
航空機の数	Brinton et al. (2008) ⁵⁾ , Kulkarni et al. (2012) ⁶⁾ , Li et al. (2009) ⁷⁾⁸⁾ , Raphael et al. (2003) ⁹⁾ , Sherali et al. (2011) ¹⁰⁾ , Xue. (2009) ¹¹⁾ Yousefi et al. (2004) ¹²⁾
飛行時間	Brinton et al. (2008) ⁵⁾ , Li et al. (2009) ⁷⁾⁸⁾ , Xue. (2009) ¹¹⁾ , Yousefi et al. (2004) ¹²⁾
航空路の交差の数	Raphael et al. (2003) ⁹⁾
角度の小さい合流点の数	Raphael et al. (2003) ⁹⁾
コンフリクト回避仕事量	
コンフリクトの種類	Brinton et al. (2008) ⁵⁾ , Raphael et al. (2003) ⁹⁾ , Yousefi et al. (2004) ¹²⁾
コンフリクトの危険度 解決にかかる時間	Brinton et al. (2008) ⁵⁾ , Raphael et al. (2003) ⁹⁾ , Sherali et al. (2011) ¹⁰⁾ , Yousefi et al. (2004) ¹²⁾
コンフリクトの数	Raphael et al. (2003) ⁹⁾
通信仕事量	
管制業務の種類	Li et al. (2009) ⁷⁾⁸⁾ , Sherali et al. (2011) ¹⁰⁾ , Yousefi et al. (2004) ¹²⁾
航空機への指示の種類	Brinton et al. (2008) ⁵⁾ , Raphael et al. (2003) ⁹⁾ , Yousefi et al. (2004) ¹²⁾
飛行計画とのズレ	Raphael et al. (2003) ⁹⁾ , Sherali et al. (2011) ¹⁰⁾
境界線を越える航空機数	Xue. (2009) ¹¹⁾
隣接するセクタの数	Brinton et al. (2008) ⁵⁾ , Raphael et al. (2003) ⁹⁾ , Xue. (2009) ¹¹⁾

2. 管制仕事量の指標

(1) 既存研究における管制仕事量の指標

管制仕事量を表す指標として適切な要素の選定²⁾⁴⁾など、管制仕事量を表す指標についての多くの研究が行われている。その中で Delahaye et al.³⁾は、管制仕事量を航空機を監視するための「監視仕事量」、接近や衝突など危険な状態を回避するための「コンフリクト回避仕事量」、航空機や隣接するセクタとの通信を行うための「通信仕事量」に分類できると述べている。これと同様の考え方で、多くの既存研究が航空管制に関わる定量的に観測できる要素を指標として各管制仕事量を表している（表 1）。

(2) 本研究で検討する管制仕事量指標

本研究では、既存研究で多く用いられ、航跡データから抽出が可能な要素を各管制仕事量の指標として設定する。

a) 監視仕事量

管制官は担当セクタ内に存在する全ての航空機の位置を監視し、管制指示の必要性を判断し指示を行う。そこで、既存研究では監視仕事量を表す指標として航空機数が多く用いられており、本研究では、「航空機数」を監視仕事量の指標として設定する。

b) コンフリクト回避仕事量

重大な事故につながる可能性のあるコンフリクトを防ぐために、管制官は航空機間で適切な間隔が維持されるように指示を行う必要がある。そのため、管制官は航空機の位置関係に多くの注意を払う。本研究では、「予想針路上での接近回数」をコンフリクト回避仕事量の指標として設定する。

c) 通信仕事量

航空機がセクタを移る時は、隣接セクタを担当する管制官と引き継ぎ業務のために通信を行う必要がある。本研究では、「航空機がセクタの境界線を越える回数」を通信仕事量の指標として設定する。

3. 空域分割に関する既存研究

(1) 既存の分割手法

空域分割には、グラフ分割による⁸⁾手法と格子領域の分割による⁶⁾¹¹⁾¹²⁾手法の2種類の手法が提案されている。

a) グラフ分割による手法

グラフ分割による手法は、航空交通が流れる航空路をリンク、航空路上の管制地点や空港など航空管制にとって重要な地点をノードとして、航空交通流をグラフで表現し、空域分割問題をグラフ分割問題として扱う（図 1 左）。航空路に従って航空機はセクタを移動するため、航空機の移動に伴う管制仕事量である通信仕事量をリンクに設定する。一方、セクタ内に存在するノードには地点ごとに計測される監視仕事量やコンフリクト回避仕事量を設定する。この設定に従い、管制仕事量を平準化したグラフ分割を求める。

グラフ分割による手法では、航空交通流の構造を反映した空域分割が可能である。一方で、グラフ分割では航空路や管制地点の地理的位置を考慮する事ができないため、「地理的位置は近いがリンクが張られていないノードが、別のセクタに分割されてしまう」などの短所がある。

b) 格子領域の分割による手法

格子領域の分割による手法は、空域を格子状に分割し、格子の組み合わせ問題として空域分割を扱う（図 1 右）。各格子に地点ごとに計測される管制仕事量である監視仕事量やコンフリクト回避仕事量を設定、航空機の移動を表す通信仕事量を格子の各辺に設定し、管制仕事量を均等化する組み合わせを求める。

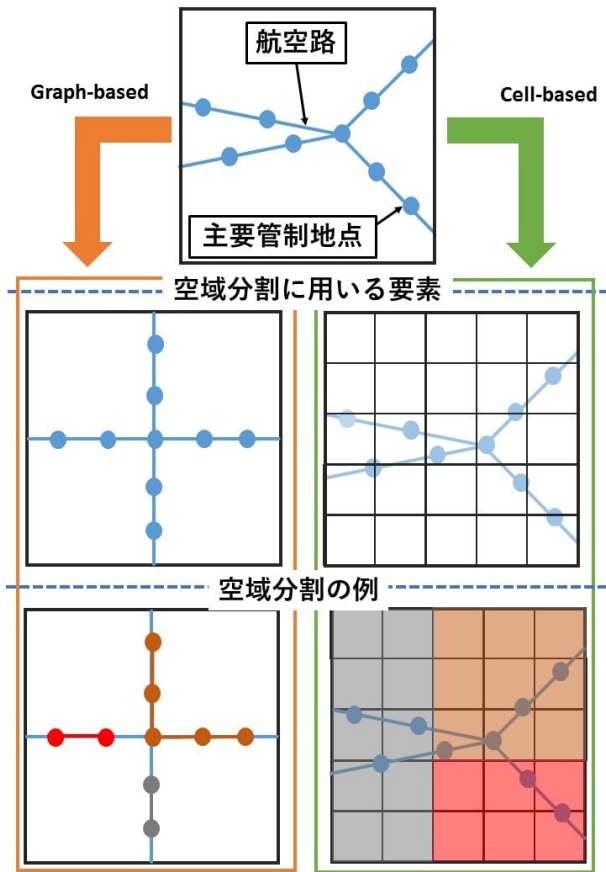


図-1 グラフ分割による手法と格子領域の分割によるの手法のイメージ図

格子領域の分割による手法では、隣接関係のある格子の組み合わせでセクタを生成するために、地理的位置を考慮した単純なセクタの形状を設定しやすい。しかし、空域を一定の格子状に分割するために、「セクタの境界線が航空路や管制地点の近くに設定される」などの短所を持つ。

(2) 既存手法の問題点

グラフ分割による手法では航空交通流を位置情報を含まないグラフで表現するために、地理的位置を考慮したセクタ形状の設定が難しい。一方、格子領域の分割による手法では空域を一定の格子状に分割するため、航空交通流を表す要素とセクタの境界線との位置関係を考慮することが難しい。このように、既存の手法では管制仕事を指標に空域分割を行う際に、航空交通流の配置を考慮したセクタの境界線設定と、セクタの形状制御を同時に行う事が難しい。

4. 空域の分割最小単位をボロノイ図により設定する空域手法の提案

(1) 航空交通流の配置を考慮した空域の最小分割単位の設定

本研究では、航空交通流と地理的なセクタの形状を考慮した空域分割を行うために、航空路上の管制にとって重要な地点（主要管制地点）を母点としたボロノイ図¹⁴⁾の組み合わせによってセクタを生成する手法を提案する。

ボロノイ図の性質として、ボロノイ面の境界線は近傍の母点对の垂直二等分線となる。これは境界線が、母点对から最も遠い位置に引かれるということを表す。従って、主要管制地点を母点としたボロノイ面の組み合わせでセクタを生成する時、その境界線は近傍の主要管制地点から最も離れたところに引かれることが保障される。また、近傍の母点から構成されたボロノイ面は接するという性質から、同一航空路上の隣接する主要管制地点を母点としたボロノイ面はボロノイ辺を共有するため、ボロノイ面の隣接関係で航空路の接続関係を表現することができる。

このように、主要管制地点を母点としたボロノイ面の組み合わせによってセクタを生成する事で、航空交通流とセクタの境界線を同時に考慮した空域分割が可能となる。

(2) ボロノイ面の組み合わせに形状制約を課した空域分割

生成した各ボロノイ面には、各管制仕事を表す指標の線形和で表す式 (1) で管制仕事量指標を設定する。管制仕事を表す指標において、監視仕事量指標はその業務にかかる所要時間が存在しないが、コンフリクト回避仕事量指標と通信仕事量指標はその業務にかかる所要時間が存在する。このことから、本研究では係数 α, β を置き、管制仕事量指標の重み付けを管制所要時間を基に設定する。

$$WL_i = \alpha NWL_i + (1 - \alpha) \left(\beta CWL_i + (1 - \beta) \sum_{j=1}^n \delta_{ij} BWL_{ij} \right) \quad (1)$$

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & (\text{ボロノイ面 } ij \text{ が属するセクタが異なるとき}) \\ 0 & (\text{その他}) \end{cases}$$

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

WL_i : ボロノイ面 i の管制仕事量指標, NWL_i : ボロノイ面 i の監視仕事量指標, CWL_i : ボロノイ面 i のコンフリクト回避仕事量指標, BWL_{ij} : ボロノイ面 i, j 間の通信仕事量指標, n : ボロノイ面の総数, α, β : 各仕事量指標の重み係数

ボロノイ図による空域分割最小単位の設定を基に、管

制仕事量指標の低減を図る空域分割問題を、セクタの管制仕事量指標の二乗和を最小化するボロノイ面の組み合わせを求める最適化問題として定式化する。

$$\min \left(\sum_{k=1}^m \left(\sum_{i \in S_k} WL_i \right)^2 \right) \quad (2)$$

WL_i : ボロノイ面 i の管制仕事量指標,
 S_k : セクタ k を構成するボロノイ面の集合,
 m : セクタの総数

なお、この問題は局所探索アルゴリズムである焼きなまし法¹⁵⁾を用いて、各セクタの境界線を形成する辺を持つボロノイ面のみを対象に、ボロノイ面の組み合わせを変更することにより解く。これにより、セクタの境界線設定が更新され、セクタ形状の変更を行うことができる。加えて、提案手法では、ボロノイ面の組み合わせ変更によって、効率的な管制の妨げとなる複雑なセクタ形状が生じることを避けるために、「組み合わせを変更するボロノイ面の辺で、セクタの境界線となる辺の合計の長さが、当該ボロノイ面の周の長さに対して一定の割合以上であった時に、組み合わせの変更を行わない」という制約(図2)を焼きなまし法を用いた組み合わせ変更アルゴリズムに設ける。この制約を設けることで、複雑な形状を持つセクタが生成されるボロノイ面の組み合わせを防ぐ形状制御を行う。制約で使用する、「セクタの周長に対する境界線となるボロノイ辺長の合計の割合」を分析者が形状制約パラメータ a として定める。

以上の設定を基に、提案手法は以下のアルゴリズムに従い空域分割を行う。

Step1 : 現行の空域分割に基づきボロノイ面を組み合わせ、セクタを設定する。初期温度を $T = (\text{管制仕事量指標の最大値} / \text{管制仕事量指標の最小値})$ とし、温度減少関数を $f(T) = T \times 0.8$ 、終了条件を「管

制仕事量指標の平均値が変わらずに温度変化が 10 回起こった時、または $T < 10^{-20}$ となった時」と設定する。形状制約パラメータ a を任意に設定する。

Step2 : ボロノイ面の所属するセクタを変更し、セクタの形状を変化させる。

Step2.1 現在のセクタの組み合わせを α 、1 つのボロノイ面の属するセクタを変えることにより起こりえる組み合わせを $Neigh(\alpha)$ とし、 $Neigh(\alpha)$ に含まれる組み合わせの総数を d 、同一温度内での試行回数を $n = 1$ とする。

Step2.2 ランダムに形状変化後の組み合わせ $\beta \in Neigh(\alpha)$ を選択し、 β の管制仕事量指標の値 ($cost(\beta)$) を計算する。 β となるために所属するセクタを変更するボロノイ面を ϕ とする。

Step2.3 if ボロノイ面 ϕ およびボロノイ面 ϕ とボロノイ辺を共有するボロノイ面に対し、一つでも、自身が所属するセクタと接する辺の長さが自身の周の長さの $a \times 100\%$ 以下
 then Step2.5 へ

Step2.4 if $cost(\beta) \leq cost(\alpha)$ then $\alpha := \beta$
 where. $cost(x) = (WL(x)_i^2 + WL(x)_j^2)$
 i : ボロノイ面 ϕ の所属していたセクタ,
 j : ボロノイ面 ϕ が所属を変更するセクタ
 else begin (0,1) から一様に乱数 γ を生成する;

$$\text{if } \gamma < e^{-\frac{cost(\alpha) / cost(\beta)}{T}} \text{ then } \alpha := \beta$$

end;

Step2.5 $n := n + 1$;
 if $n < d$ then Step2.2 へ。
 else $T := f(T)$

Step3 :
 if 終了条件を満たす then 空域分割終了。
 else Step2 に戻る。

5. 日本の航跡データを用いた提案手法の適用

(1) 使用データと分析対象空域

a) 管制仕事量指標の算出に用いるデータ

CARATS Open Data を用いて各管制仕事量の指標を算出する。これは、航空交通システムに関する研究開発の促進を図り一般の研究機関・大学に公開されたデータであり、日本が管制を担当する空域である福岡 FIR(Flight Information Region) における約 15 万便の(約 3,600 × 7 日 × 6 週間)の航空機の時刻・位置情報が記録されている。

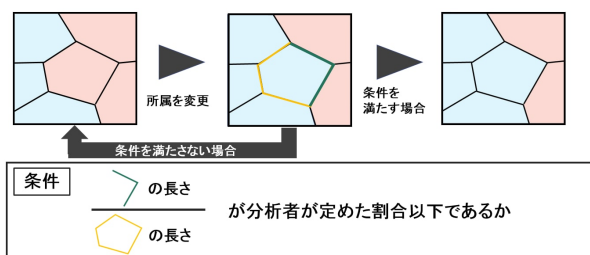


図-2 組み合わせの変更の例

b) 分析対象空域

対象領域は、福岡 FIR 内の札幌・東京・福岡・那覇管制部が管轄する空域で、管制方法の異なる洋上空域は除く。また、本研究では高高度の領域を分析対象とするため、上記の空域で 14,000ft 以上を分析対象空域とする。

(2) 航跡データを用いた管制仕事量指標の設定

CARATS Open Data から各管制仕事量の指標を抽出し、管制仕事量を算出する。

a) 監視仕事量指標

航跡データから航空機の機数として、「ポロノイ面内の平均航空機数」を抽出する。

b) コンフリクト回避仕事量指標

航跡データは管制官が管制指示を行いコンフリクトが回避されたデータであり、コンフリクトの有無をデータから直接検出することはできない。そこで、航跡データからコンフリクト回避のための管制が起きていたと予測される場所を推定し、管制官が続けて業務を行う平均時間である 1 時間を単位時間として設定し、「1 時間あたりの各セクタ内における予想針路上での接近回数」を抽出した。推定方法は以下の通りである。

日本ではレーダー管制の場合、管制間隔を水平方向距離で 5nm、垂直方向距離を計器飛行方式で 41,00ft 以下で 1,000ft、41,00ft 超で 2000ft としており、これらの両方の間隔が確保できない場合コンフリクトとされる¹⁷⁾。本研究では、航空機の高度を考えないため、水平方向距離のみを考える。Eurocontrol¹⁶⁾によるとコンフリクト回避のための管制指示に平均して約 84 秒かかることから、本研究ではコンフリクトの回避に必要な管制が十分に余裕をもって行える 3 分前の位置情報と、その 10 秒前の位置情報から算出する進行方向と速度が変わらなると仮定して 3 分後の航空機の位置を算出する。算出した航空機間の距離が 5nm 以内となった時にコンフリクトが起きたとし、その位置は航空機同士の重心の位置として数える。

c) 通信仕事量指標

コンフリクト回避仕事量と同様に、「1 時間あたりにポロノイ面の境界線を越えた航空機の機数」を抽出する。この際、国内セクタのみでなく、福岡 FIR と隣接する諸外国が管轄する空域との境界線を越える航空機数もポロノイ面の境界線を越える航空機数とする。

(3) 対象空域におけるポロノイ図の作図

ポロノイ面の母点に対象領域内の RNAV 航空路上の Waypoint を設定し、空域の分割最小単位を設定する。RNAV 航空路は、日本において大半の航空機が使用する航空路である。また、Waypoint は航空機が自機の位

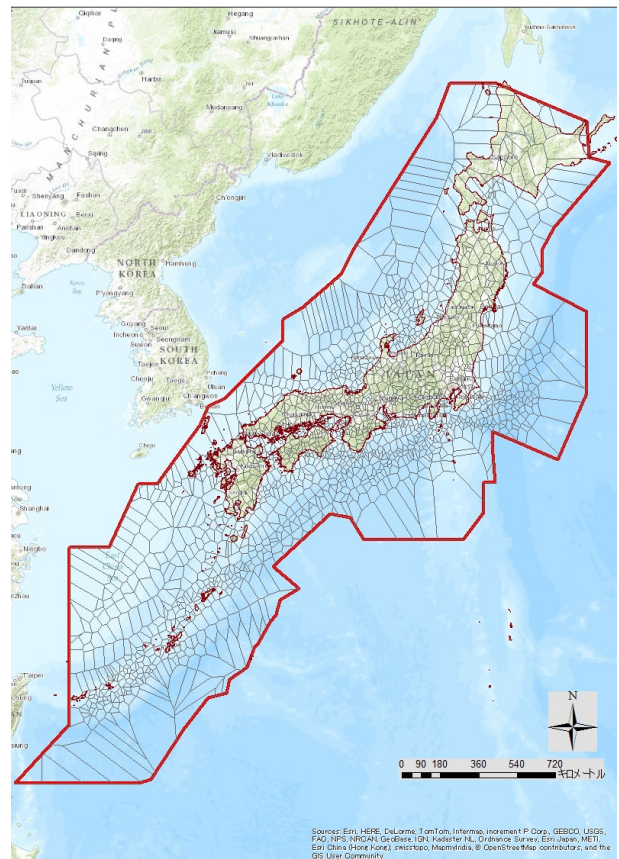


図-3 対象領域とポロノイ図を用いた最小分割単位の設定

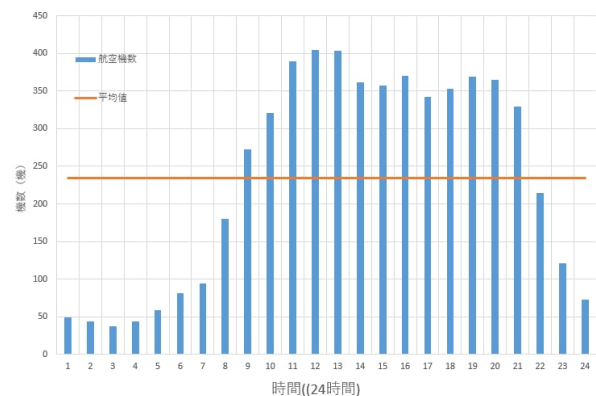


図-4 1 日の航空交通量の変化

置を報告し、状況によって管制指示を受ける地点であり、657 の Waypoint が RNAV 航空路上に存在した。

また、Waypoint のみを用いた場合にポロノイ面の大きさに不均一が生じてしまうため、RNAV 航空路上の母点間の距離が 50nm 以下になるように、各母点間の中点に新たな母点を追加し、1967 点の母点を基にポロノイ図を作図した (表 3)。

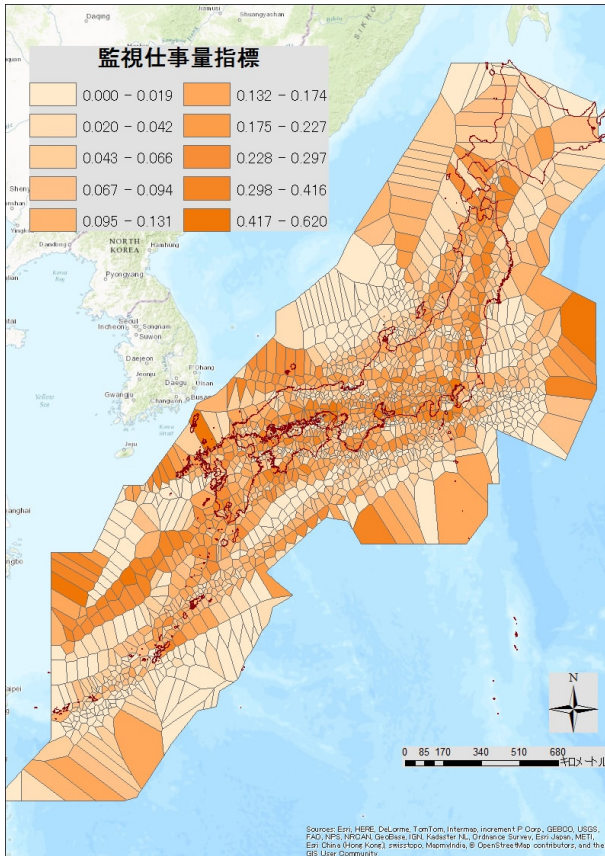


図-5 9時から21時における一時間あたりの平均監視仕事量指標の分布

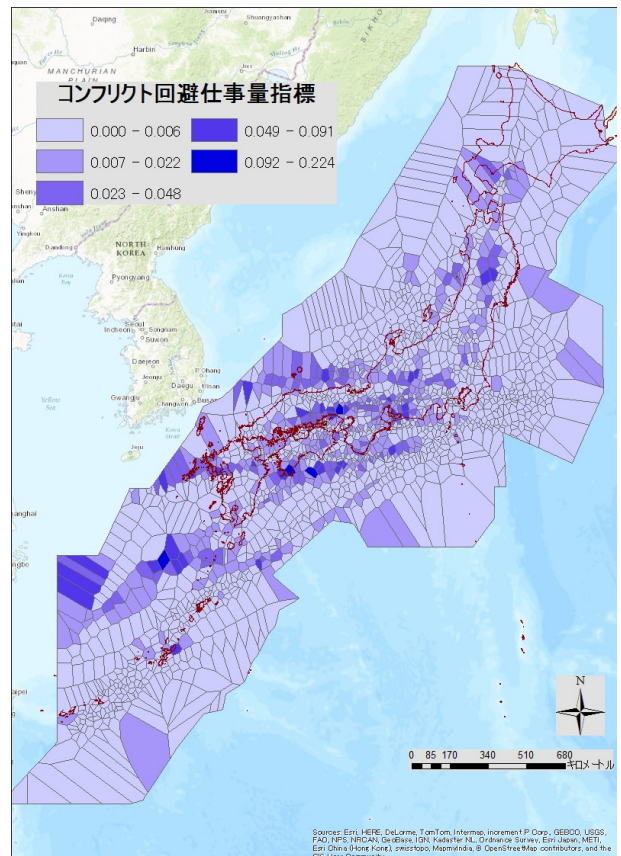


図-6 9時から21時における一時間あたりの平均コンフリクト回避仕事量指標の分布

(4) 空域分割の検討

本研究では、空域の最大の航空交通量を考えるために、1時間当たりの航空交通量が平均値を越える9時から21時までの12時間の航空交通を対象として提案手法を適用する(図4)。この時間での監視仕事量とコンフリクト回避仕事量の分布を、図5と図6に示す。これらの図から、航空交通量の多い西日本と東日本を結ぶ航空路が、管制仕事量の多い箇所として現れていることがわかる。

本研究では、管制仕事量指標の管制所要時間¹⁶⁾として、コンフリクト回避のために約84秒、引継業務に約60秒かかるとして、これらの比をとり $\beta = 0.58$ とした。一方、監視仕事量指標は管制所要時間が存在しないため、係数 α を定めることができない。そこで、提案手法の一例として $\alpha = 0.5$ として分析を行う。出力されたセクタごとにポロノイ面の色分けを行い、現行セクタに対応した境界線形状を青線で表した空域分割結果を図7に示し、各セクタにおける管制仕事量指標の変化を図8に示す。

図7,8から、効率的な管制の妨げとなる複雑なセクタ形状を避けながら、初期分割時に管制仕事量指標の値が大きいセクタの管制仕事量指標の低減が図れたことが確認できる。また、一部のセクタで管制仕事量指標の上昇がみられたが、これは組み合わせの変更による

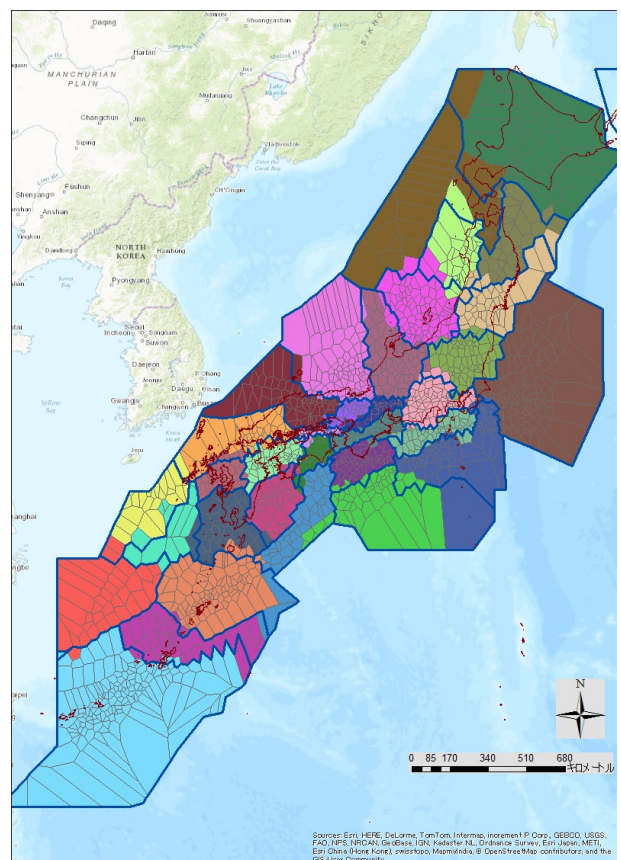


図-7 手法適用後の空域分割

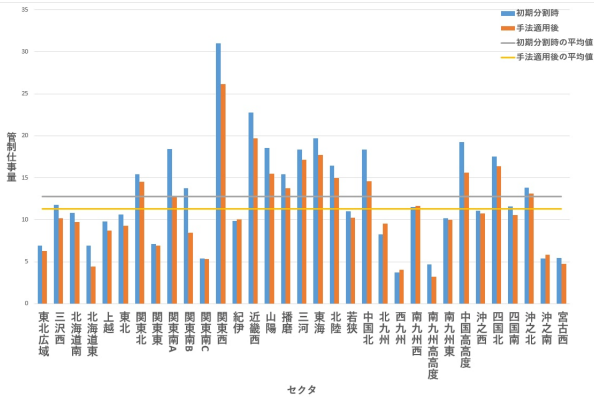


図-8 管制時間に基づく空域分割による管制仕事量の変化

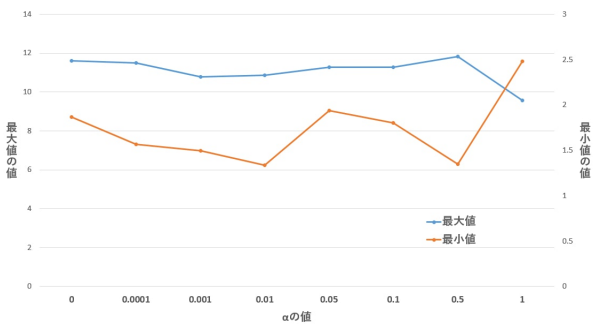


図-9 α の設定による監視仕事量指標の変化

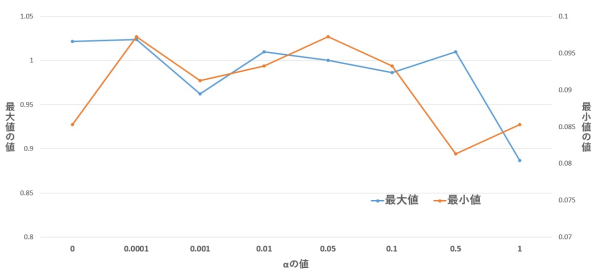


図-10 α の設定によるコンフリクト回避仕事量指標の変化

もので、その値が改善されたセクタ設定における管制仕事量指標の最大値より小さいことから、航空交通の安全性に問題はないと考えることができる。

(5) 監視仕事量指標に関する感度分析

管制所要時間の指標が存在しない監視仕事量指標が、空域分割に対しどの程度の影響があるのかを確認するために、 β を 0.58、形状制御パラメータ a を 0.33 に固定して、 α の値を変化させ感度分析を行う。

感度分析による、各管制仕事量指標の値の変化を図 9 から図 11 に示す。

感度分析の結果から、監視仕事量指標の値には、 α 値の変化による大きな変化は見られなかった。本研究における管制仕事量指標の定義では、監視仕事量指標が

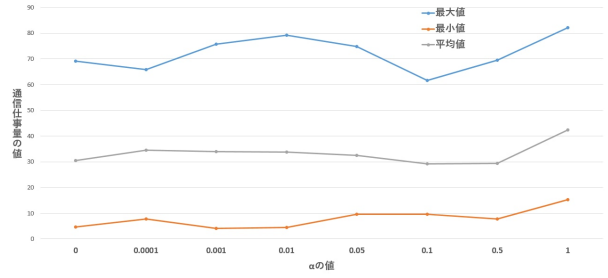


図-11 α の設定による通信仕事量指標の変化

空域分割に与える影響は少ないと考えられる。

6. おわりに

本研究では、管制仕事量の低減を目的とした、航空交通流とセクタの地理的形状を考慮したセクタ設定を行う空域分割手法を提案した。提案手法は、セクタの形状制約を課し、航空路上の主要管制地点を母点としたボロノイ図の組み合わせ最適化を行うことで、航空交通流とセクタの地理的形状を同時に考慮したセクタ設定を試みている。日本の航跡データを用いて管制仕事量指標を算出し、日本の空域への適用を通して、提案手法により複雑なセクタ形状を避けながら、管制仕事量指標を低減した空域分割が行えることを確認した。

また、本分析における管制仕事量指標の重み付けに用いた管制時間の指標が存在しない監視仕事量指標に対して感度分析を行い、空域分割への影響が小さいことを確認した。

今後の課題として、高度を考慮した空域分割への拡張と、管制仕事量指標を構成する要素及び、各仕事量の定義の更なる分析があげられる。

参考文献

- 1) 国土交通省 航空局, (2013), 首都圏空港の機能強化に関わる検討について, (参照 2016-1-16) <http://www.mlit.go.jp/common/001018977>
- 2) Arnab, M. and Washington, Y. O. (2002), *Factors affecting air traffic Controller Workload*, *Transportation Research Record*, Vol.1788, pp. 58-69.
- 3) Delahate, D., Alliot, J. M., Schoenauer, M. and Farges, J. L. (1994), *Genetic algorithms for partitioning air space*, *In 10th IEEE conference on genetic and evolutionary computation*, pp.1637-1644.
- 4) Arnab, M., Washington, Y. O., Gerard, M., Jean, M. L., and Catalin, L. (2004), *The factors affecting airspace capacity in Europe : A cross-sectional time-series analysis using simulated controller workload data*, *The Journal of Navigation*, Vol. 57, pp. 385-405.
- 5) Briton, C. and Pledge, S. (2008), *Airspace partitioning using flight clustering and computational geometry*, *IEEE/AIAA 27th Digital Avionics Systems Conference*, St. Paul, Minnesota.
- 6) Kulkarni, S., Ganesan, R., and Sherry, L. (2012), *Dy-*

- dynamic airspace configuration using approximate dynamic programming*, *Transportation Research Record*, No.2266, pp. 31-37
- 7) Li, J., Wang, T., Savai, M. and Hwang, I. (2009), *A spectral clustering based algorithm for dynamic airspace configuration*, *9th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference (ATIO)*, 21-23 September 2009, Hilton Head, South Carolina.
 - 8) Li, J., Wang, T., Savai, M. and Hwang, I. (2009), *An algorithm for dynamic airspace configuration based on the air route structure*, *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*, 10-13 August 2009, Chicago, Illinois.
 - 9) Raphal, C. and Azzedine, B. (2003), *Air traffic complexity indicators & ATC sectors*, *5th USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar*, Budapest Hungary.
 - 10) Shaye, A., Penelope, S., Andrew, N., and Martijin, M. (2007), *Modeling and predicting mental workload in En route air traffic control : Critical review and broader implications*, *HUMAN FACTORS*, Vol. 49, No. 3, pp.376-399
 - 11) Xue, M. (2009), *Airspace sector redesign based on Voronoi diagrams*, *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*, August 2008, Honolulu, HW.
 - 12) Yousefi, A. and Donohue, G. (2004), *Temporal and spatial distribution of airspace complexity for air traffic controller workload-based sectorization*, *AIAA 4th Aviation Technology, Integration and Operations (ATIO) Forum*, 20 - 22 September 2004, Chicago, Illinois.
 - 13) Sherali, H. D. and Hill, J. (2011), *Configuration of airspace sectors for balancing air traffic controller workload*, *Annals of Operations Research*, Vol. 203, No. 1, pp. 3-31.
 - 14) Okabe, A., Boots, B. and Sugihara, K. (1992), *Spatial tessellations: Concepts and application of Voronoi diagrams*, Springer.
 - 15) ホロムコヴィッチ, J. (2005), 計算困難問題に対するアルゴリズム理論, 初版, 和田 幸一, 増澤 利光, 元木 光雄 訳, Springer.
 - 16) European Organization for the Safety of Air Navigation (2000), *Investigation the air traffic complexity potential impacts on workload and cost*, *EEC Note No.11/00 project Gen-4-E2, Performance and Economy Research*, EUROCONTROL, Bretigny-sur-Orge, France.
 - 17) 瀬之口 敦, 福田 豊, (2009), 航空機の動態情報を利用するコンフリクト検出手法の研究, *Electronic Navigation Research Institute Papers*, No. 122, October 2009.

Airspace configuration for decreasing air traffic controller workload based on flight track data

Koji YOSHIDA, Ryo INOUE