

# 逆探索と ZDD を用いた避難所の地域割り当てパターンの列挙

瀧澤重志, 武知祥史, 大田章雄, 加藤直樹

## Enumeration of Region Partitioning for Evacuation Centers Using Reverse Search and Zero-suppressed Binary Decision Diagram

Atsushi TAKIZAWA, TAKECHI, Yukio OHTA and Naoki KATOH

**Abstract:** It is important to provide sufficient evacuation centers and to appropriately partition the whole region into small areas, such that a unique evacuation center is located in each area and the people living in the area can easily evacuate to the center. However, it is hard to find an optimal region partitioning. In this research, we propose a method to enumerate all partitioning patterns using reverse search (Avis and Fukuda, 1996) and Zero-suppressed Binary Decision Diagram (ZDD; Minato, 1993) that satisfy several conditions. We apply the proposed method to Kamigyo Ward of Kyoto City, Japan.

**Keywords:** 避難所 (evacuation center), 地域分割 (region partitioning), 列挙 (enumeration), 逆探索 (reverse search), ZDD (zero-suppressed binary decision diagram)

### 1. はじめに

大規模災害が発生すると、地域住民は最寄りの避難所を利用する事が予想されるが、特定の避難所に避難者が集中する可能性があるので、避難者の平準化は避難計画の重要な課題である。避難所を離散的な地域に割り当てる問題は、集合分割問題に属するため、厳密解を求めるのが困難である。例えば重み付きボロノイによる解法が提案されているが、この方法は必ずしも最適解を保証するわけではなく、解のバリエーションを得ることも難しい。本研究では、従来の解法と異なるアプローチとして、逆探索と ZDD の二つの手法を用いて、制約を満たす地域分割を効率的に全列挙する手法を提案し、老朽家屋が多い京都市上京区に適用する。

---

瀧澤重志 〒558-8585 大阪市住吉区杉本 3-3-138

大阪市立大学大学院工学研究科

Phone: 06-6605-2712

E-mail: takizawa@arch.eng.osaka-cu.ac.jp

### 2. 対象地域

本研究では、京都市上京区での花折断層地震を対象とする。上京区には京都市が密集市街地対策を優先的に行う「安心安全のまちづくりを働きかける地区」が 5 つあり、大きな被害が懸念されている。花折断層地震では、上京区のほとんどで震度 6 強が予想され、避難者数は 19,900 人となっている（京都市情報館, 2009）。上京区の東側には御所があるので、図-1 で示した烏丸通から西の地域を対象地域とした。200m の正方形セルで地域を分割し、その単位で避難所の割り当てを行う。図-1 の色つきのセルがそれに対応する。各セルとその集合（地域）を  $c \in C$  と表す。本研究では、 $|C| = 138$  であり、図-1 に示すようにそれぞれ 0, ..., 137 の整数がふられている。セルによる分割は、領域形状が単純で計算が簡単になり、大きすぎる行政単位の場合は適切なサイズに分割できるなどの有用性がある。その反面、実際の地域の指定時に問題が生ずる可能性がある。平成 22 年

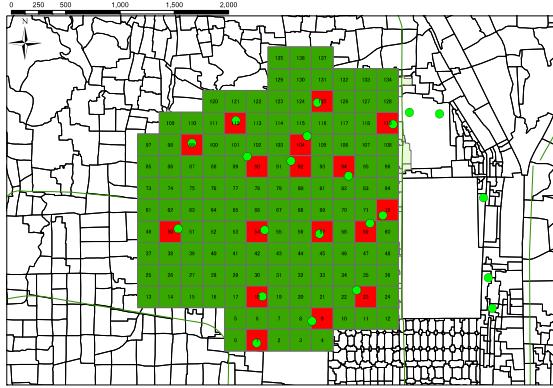


図-1 対象地域

国勢調査によると、対象地域にはおよそ 73,678人が居住している。資料(京都市情報館, 2012)によると、対象地域には17の避難所があり収容人数の合計は5,296人である。図2の緑色の丸は避難所を示し、それを含むセルを赤く表示している。

### 3. 提案手法の概要

避難所とその集合を  $e \in E$  とする。また、避難所  $e$  を含むセルを避難所セル  $c_e$  と表す。提案手法は二つのステップからなる。まず、次章で説明する制約条件を満たす、 $c_e$  に関する全ての実行可能領域を列挙する。 $R_e \in \mathcal{R}_e$  をそれぞれ、 $e$  に関する実行可能領域とその集合とし、 $\mathcal{R}_e$  をZDDで表現する。次のステップでは、全ての  $e \in E$  について  $\mathcal{R}_e$  を集約し、全ての可能な地域分割  $\mathcal{P}$ を求める。ここで、任意の分割  $P \in \mathcal{P}$  は、(1)を満たしつつ、地域  $C$  を  $R_e, e \in E$  に分割する。

$$\bigcup_{e \in E} R_e = C, R_e \cap R_f = \emptyset (f \in E, e \neq f) \quad (1)$$

### 4. 制約条件

以下の3つの制約条件を満たす避難所の被覆領域を、実行可能領域とする。

#### 4.1 矩形和橢円型領域制約

避難所を中心とする領域が凸であると、避難動線が他の領域のそれと交わりにくく、地域のまとまりも明瞭である。避難所セル  $c_e$  に関する領域  $R_e$  は、おのおのが  $c_e$  を含むような長方形領域の和として表現できる場合に、矩形和橢円型領域

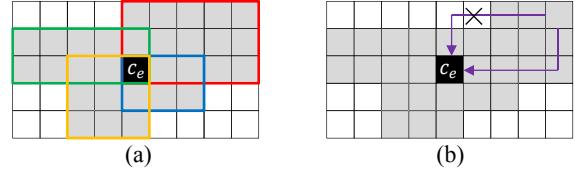


図-2 矩形和橢円型領域(a)とそれ以外(b)

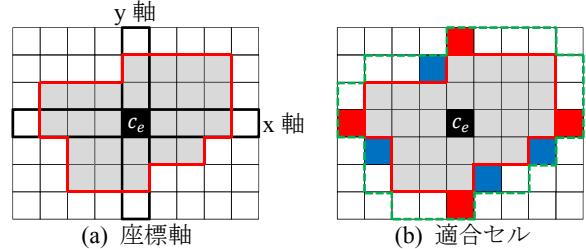


図-3 適合セル

と呼ばれ、これは直方凸領域(Chen et al., 2004; 図-2)の部分族である。以降では、この領域の性質を簡単に凸と呼ぶ。図-2では、グレーと黒の領域が  $R_e$  を示している。(a)は4つの長方形領域で  $R_e$  が構成されるが、(b)では右上の直方形領域が、 $R_e$  以外にはみ出してしまうため凸ではない。

避難所セル  $c_e$  に関する直方凸領域  $R_e$  を考える。この領域において、 $c_e$  を通る垂直な直線上、水平な直線上のセルをそれぞれ x 軸、y 軸とする(図 3-(a))。図 3-(a)のグレーもしくは黒のセルが  $R_e$  を構成しているとする。図 3-(b)の緑の点線領域内で、かつ、 $R_e$  に含まれないセルが、 $R_e$  に隣接するセルであるが、それらの中で、 $R_e \cup c'$  が凸となるようなセル  $c' \notin R_e$  が存在する。もしセル  $c'$  がセル  $c \in R_e$  に隣接し、以下のいずれかを満たす場合、 $c'$  を適合セルと呼ぶこととする。

- ① x 軸上か y 軸上にあるセル(赤色のセル)
- ②  $R_e$  の凹角にあるセル(青色のセル)

#### 4.2 距離制約

避難所セルの中心から、遠い辺までの距離が変数  $maxdist$  以内のセルを領域範囲とする。

#### 4.3 容量制約

避難所間で、 $R_e$  の収容率(=避難者数/避難所の容量)のばらつきを小さく抑える必要がある。上京区は花折断層地震でほとんどに地域に一律な震度が予想されているので、想定避難者をエリ

ア内の夜間人口に比例するものと考え、各セルに小地域統計の夜間人口を面機按分し、収容率の最大値を  $maxcap$  として、領域の収容率がこの値を超えないこととする。

## 5. 単一凸領域の列挙アルゴリズム

逆探索では、連結グラフのノードを全てたどるが、探索グラフの各ノードは、避難所セル  $c_e$  を含む実行可能領域  $R_e$  を示す。以下では  $R = R_e$  と略し、本問題の逆探索の定義を示す。

ある避難所を含むセルだけからなる領域を根と定義する。すなわち、 $R_{root} = \{c_e\}$ 。また、 $\delta(R)$  を  $R$  の適合セルの数を表すものとする。また、隣接関数  $Adj(R, j), j < \delta(R)$  を領域  $R \cap c'$  を返す関数とする。ここで、 $c'$  を  $R$  の適合セルのなかで  $j$  番目に小さいインデックスを持つセルとする。もしそのようなセルが無ければ、NULL を返す。さらに、 $R_c = R \setminus c$  とする。また、 $c_{max}$  を  $c \in R$  の中で最大のインデックスを有する  $c$  で、かつ、 $R_{c_{max}}$  が凸の時、 $R_{c_{max}}$  は  $R$  の親となる。親子関数  $f_{parent}(R)$  が定義でき、 $R_{c_{max}}$  を返す。

以上の準備により、逆探索により  $e$  の実行可能領域を全て列挙するアルゴリズムを以下に示す。このアルゴリズムの時間複雑性は、すべての実行可能領域の数を  $n$  とすると  $O(n)$  である。

図-4 に、逆探索による  $3 \times 3$  の正方形での実行可能領域の列挙の様子を示す。

## 6. ZDD による分割の列挙

セルがどの避難所に割り当てられるかは 17 次元の 0-1 ベクトルで表現されるので、全てのセル 138 個の避難所への割り当てパターンは、 $17 \times 138$  次元の 0-1 ベクトルで表現される。セルには必ずしも全ての避難所が割り当てられるわけではないので、実装では高速化とメモリの節約を図るために、各セルに対して割り当てられる可能性のある避難所だけでベクトルを構成している。可能な割り当てパターンのベクトルの集合を、ZDD を用

Algorithm 1 逆探索による単一避難所の領域列挙

```

1.  $R \leftarrow R_{root}; j \leftarrow 0;$ 
2. repeat
3.   while  $j < \delta(R)$  do
4.      $j \leftarrow j + 1;$ 
5.     If  $Adj(R, j) \neq \text{null}$  and
6.        $f_{parent}(Adj(R, j)) = R$  then
7.          $R' \leftarrow Adj(R, j);$ 
8.         if  $R'$  does not satisfy the
9.           capacity constraint or
10.          the distance constraint then
11.            go to line 3;
12.          end if
13.         $R \leftarrow R'; j \leftarrow 0;$ 
14.        Output(R);
15.      end if
16.    end while
17.    if  $R \neq R_{root}$  then
18.       $R'' \leftarrow R; R \leftarrow f_{parent}(R); j \leftarrow 0;$ 
19.      repeat  $j \leftarrow j + 1$ 
20.      until  $Adj(R, j) = R'$ 
21.    end if
22.  until  $R = R_{root}$  and  $j = \delta(R_{root})$ 

```

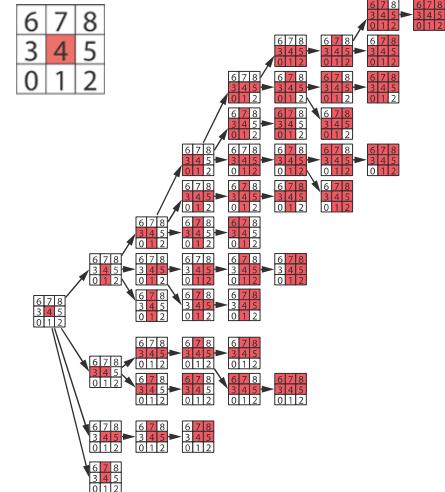


図-4 逆探索による  $3 \times 3$  正方形での実行可能領域の列挙 (4 セルを避難所セルと想定)

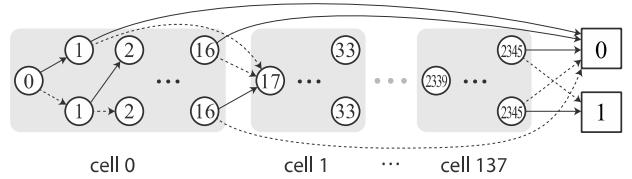


図-5 ZDD の構成

いて図-5 のように保存する。各○は ZDD ノードで、その中の番号  $n = 0, 1, \dots, 2345$  は、各セル

### Algorithm 2 地域全体の分割パターンの列挙

```

1.  $ZDD \leftarrow \emptyset$ , construct  $OZDD$ ,  $SZDD_c, c \in C$ 
2. For all  $e \in E$ 
3. Apply Algorithm 1 to  $e$  and obtain the set of
regions  $\mathcal{R}_e$ 
4. Construct  $ZDD_e$  for  $\mathcal{R}_e$ 
5. If  $ZDD = \emptyset$ 
6.  $ZDD \leftarrow ZDD_e$ 
7. else
8.  $ZDD \leftarrow ZDD \times ZDD_e$ 
9.  $ZDD \leftarrow ZDD \setminus ZDD.\text{Restrict}(OZDD)$ 
10. end if
11. end for
12. For all  $c \in C$ 
13.  $ZDD \leftarrow ZDD.\text{Restrict}(SZDD_c)$ 
14. end for

```

$c \in C$  における避難所のインデックスを示している。すなわち、各セルの ZDD ノード  $n$  に対応する避難所のインデックス  $\{1, \dots, 17\}$  は、 $i = n \bmod 17 + 1$  で求められる。

ZDD を用いて割り当てを列挙するアルゴリズムを Algorithm 2 に示す。ZDD,  $ZDD_e$  はそれぞれ、地域全体の割り当ての集合を保存する ZDD、避難所  $e$  の領域の割り当ての集合を保存する ZDD を示す。直積演算だけでは(1)を満たさない場合が出てくる。あるセルに異なる二つ以上の避難所が割り当てられる場合、各セルに異なる二つの避難所が割り当てられるパターンを全列挙した  $OZDD$  を用意し、実装で使用した ZDD 演算処理系（北海道大学, 2012）にある Restrict というクラスメソッドによって排除する。セルにどの避難所も割り当てられない場合、セル  $c$  がどこか一つの避難所に割り当てられていることを列挙した  $SZDD_c$  を用意し、Restrict 関数により排除する。

## 7. 計算機実験

$maxdis = 1,100m$ ,  $maxcap = 15.45$  として列挙を行った結果、91,520 個の分割パターンを得た。図-6 にそれらのパターンの散布図を示す。また、効率的フロンティア上にある Solution 3 と最寄りの避難所への分割（収容率標準偏差=9.87、移動距離和=34,030）を図-7 に示す。

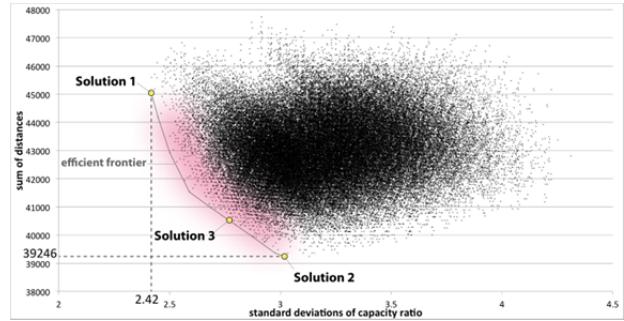


図-6 分割パターン 91,520 個の列挙結果の収容率の標準偏差と移動距離の和による散布図

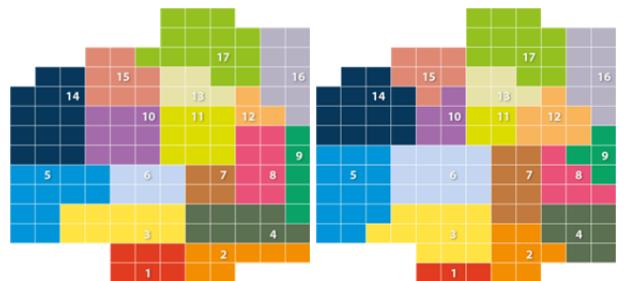


図-7 Solution 3(左)と最寄りの避難所への分割(右)

## 8. まとめ

本研究では、逆探索と ZDD の二つの手法を用いて、制約を満たす地域分割を全列挙する手法を提案し、老朽家屋が多い京都市上京区に適用した。

## 謝辞

本研究は ERATO 湿原プロジェクトの皆様、堀山貴史先生（埼玉大学）、科研費基盤研究(A)の援助下で行われました。

## 参考文献

- 京都市情報館 (2009), 京都市防災マップ , <http://www.city.kyoto.lg.jp/gyoza/page/0000086399.html>
- 京都市情報館(2012), 避難所・広域避難場所・避難救助拠点マップ (on Google map) , <http://www.city.kyoto.lg.jp/gyoza/page/0000109137.html>
- 北海道大学大学院情報科学研究科(2012), 湿原散構造処理系プロジェクト , <http://www-erato.ist.hokudai.ac.jp/index.php>
- Avis, D. and Fukuda, K., 1996, Reverse Search for Enumeration”, Discrete Applied Math, 6, 21-46.
- Chen, D. J. Chun, J. Katoh, N. and Tokuyama, T., 2004, Efficient Algorithms for Approximating a Multi-dimensional Voxel Terrain by a Unimodal Terrain, Proc. 10th Ann. Int. Conf. Computing and Combinatorics, 238-248.
- Minato, S., 1993, Zero-Suppressed BDDs for set manipulation in combinatorial problems, Proc. of the Design Automation Conference, 272-277.