

# ボロノイ図を用いた 電気自動車用急速充電器の適正配置

石亀 篤司



大阪府立大学 大学院 工学研究科

第4回 CHAdeMO協議会

2010/9/22, 東京電力 電気の史料館 ミュージアムホール

# 講演概要

---

## 大阪EVアクションプログラムに基づく急速充電器の配置

1. 実施内容:手法の概要
  2. ボロノイ図について
  3. ボロノイ図を利用した施設配置
  4. 利用者密度
  5. 提案手法
  6. 数値シミュレーション
  7. まとめ
-

# 実施内容 大阪EVアクションプログラム:急速充電器の配置

1. **ポロノイ図**を用いた**平均距離を最小**とする施設配置法を応用した、急速充電器の配置について検討  
(配置地域モデルは大阪府とする)
2. 利用者密度として、二種類を用いる
  - ・ **ガソリンスタンドの数**を参考
  - ・ **EV走行データ**を参考
3. 設置候補地の地理的条件による**優先順位付け**
3. 重み付き距離を提案することで、**二器併設**した充電器にも対応可能に
4. 最適化手法として、**メタヒューリスティクス**手法の一つである遺伝的アルゴリズム(**GA**)を用いる
5. 最適配置シミュレータ開発を目指す

# ボロノイ図

勢力圏

様々な施設配置問題で活用  
例. 郵便ポスト、小学校

n個の点の集合  $p_1, \dots, p_n$  に対して

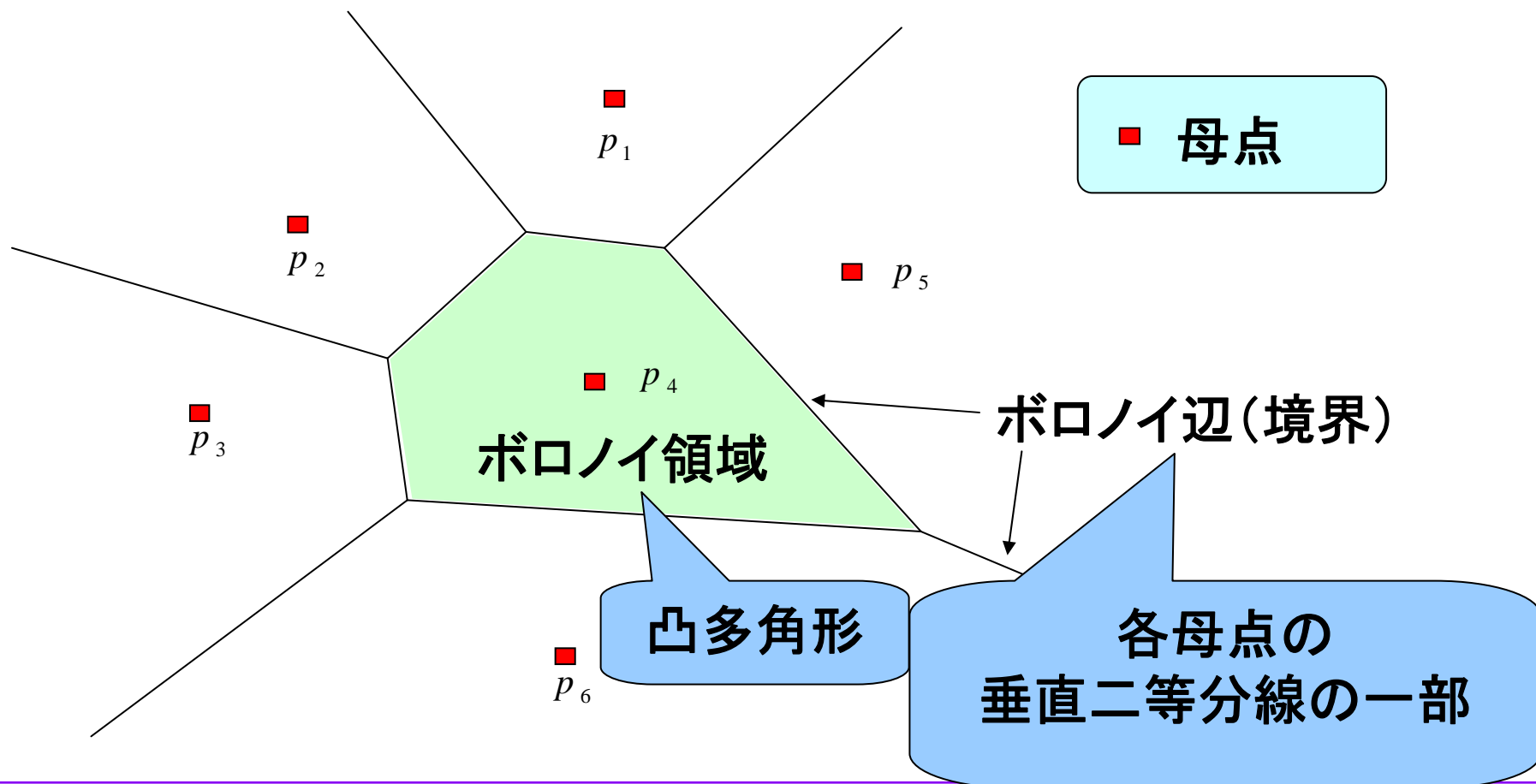
$$V(p_i) = \{p \mid d(p, p_i) \leq d(p, p_j), j \neq i, j = 1, \dots, n\} \quad (1)$$

が成り立つ点pの集合  $V(p_i)$  **ボロノイ領域**

$V(p_i)$ により分割された図形: **ボロノイ図**

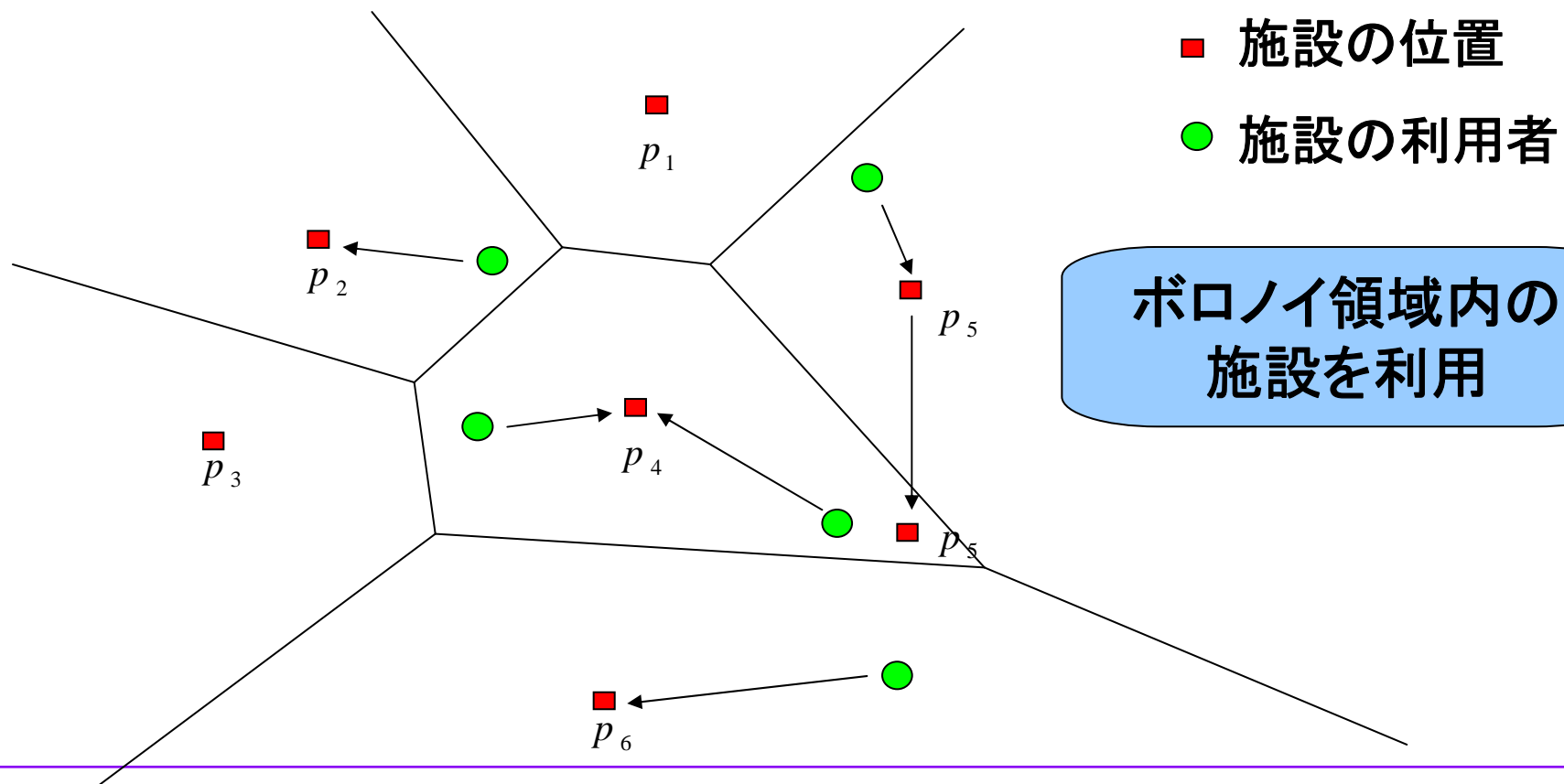
# ボロノイ図

$$V_i = \{p_i \mid d(p, p_i) \leq d(p, p_j), j \neq i, j = 1, \dots, n\} \quad (1)$$



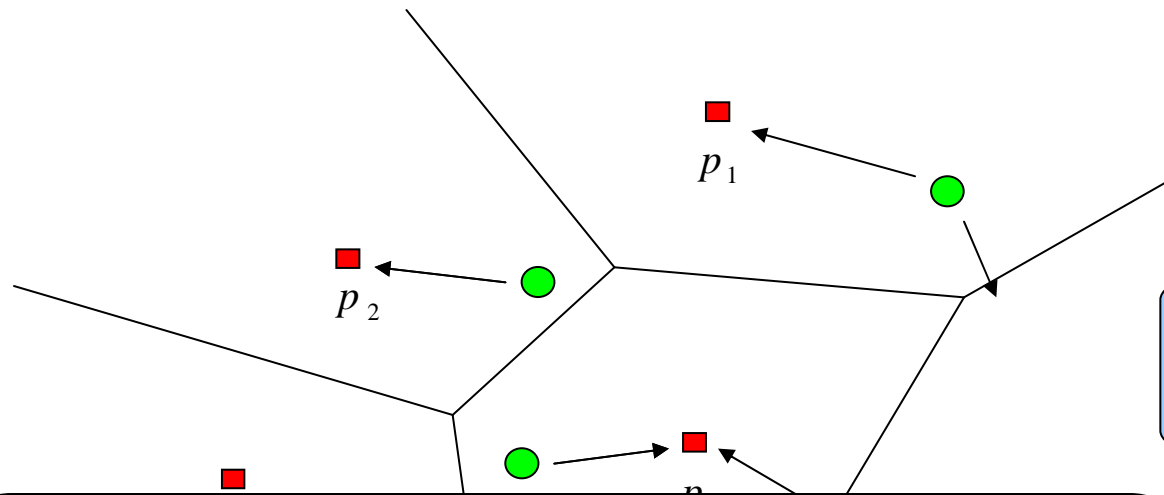
# 施設配置問題

仮定1. 施設の利用者は最も距離の近い施設を利用する  
仮定2. 施設までの距離はユークリッド距離で判断する



# 施設配置問題

仮定1. 施設の利用者は最も距離の近い施設を利用する  
仮定2. 施設までの距離はユークリッド距離で判断する



- 施設の位置
- 施設の利用者

ボロノイ領域内の施設を利用

施設までの平均距離が変化

施設の利便度 = 施設への近さ  
全利用者の施設までの平均距離

→ 最小化

# 平均距離の最小化

面的地域にn個の施設がある場合の平均距離最小化

$$\min_{x_i, y_i, i=1, \dots, n} \sum_{i=1}^n \iint_{V_i} \underline{d(x_i, y_i, x, y) f(x, y)} dx dy \quad (2)$$

$V_i$  : ボロノイ領域

$x_i, y_i$  : 母点の位置

$d(x_i, y_i, x, y)$

: 最近隣母点までの距離

$$\sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2}$$

利用者の分布

施設に応じた設定

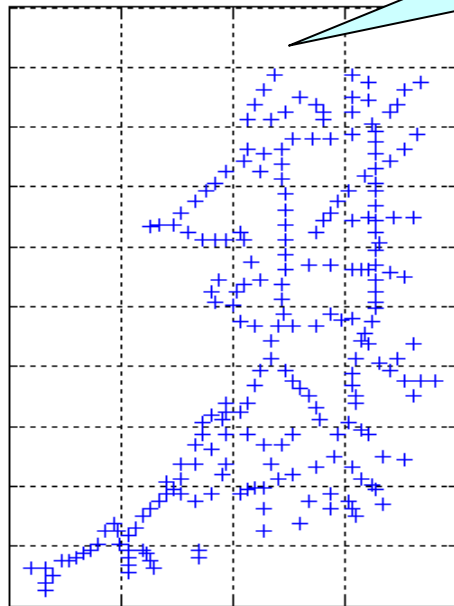
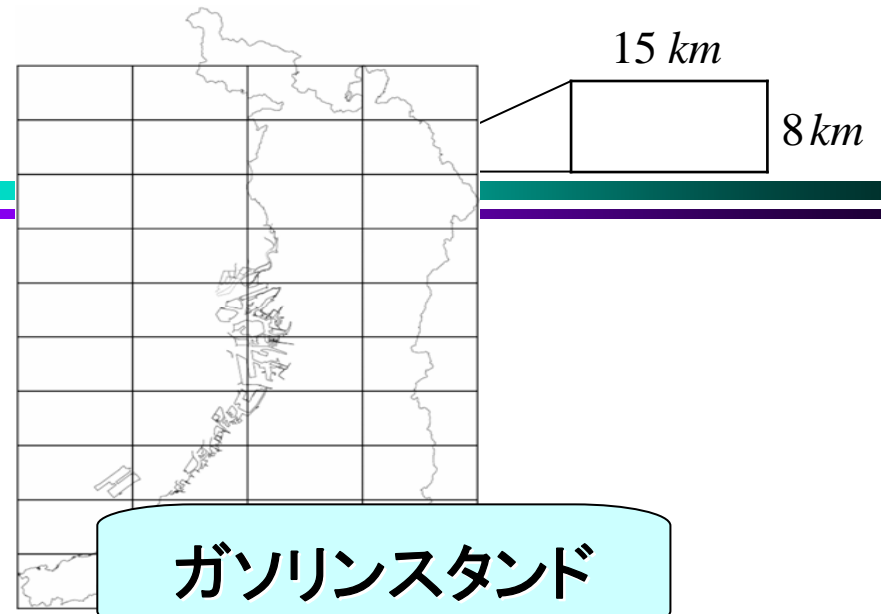


# 急速充電装置への適用

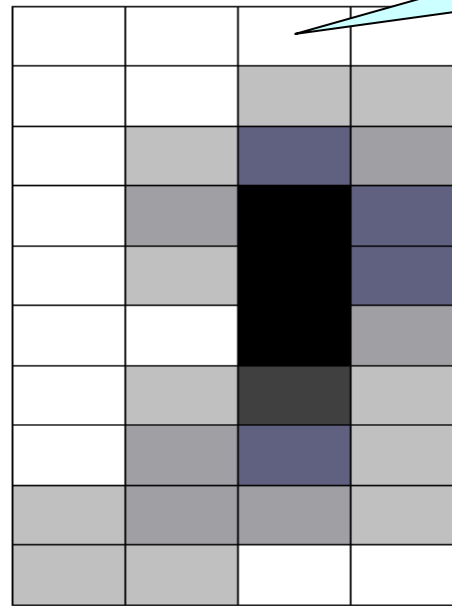
大阪府をモデルとして

利用者密度関数  $f(x, y)$  の設定

(EV)



利用者位置代表点



利用者量メッシュ

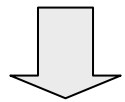
GS数	
1~99	1
100~199	2
200~299	3
300~399	4
400~499	5



0 1 2 3 4 5

# シミュレーション

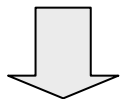
候補地M箇所



N箇所に設置

充電器既存のL箇所も考慮

L+N箇所についてボロノイ図

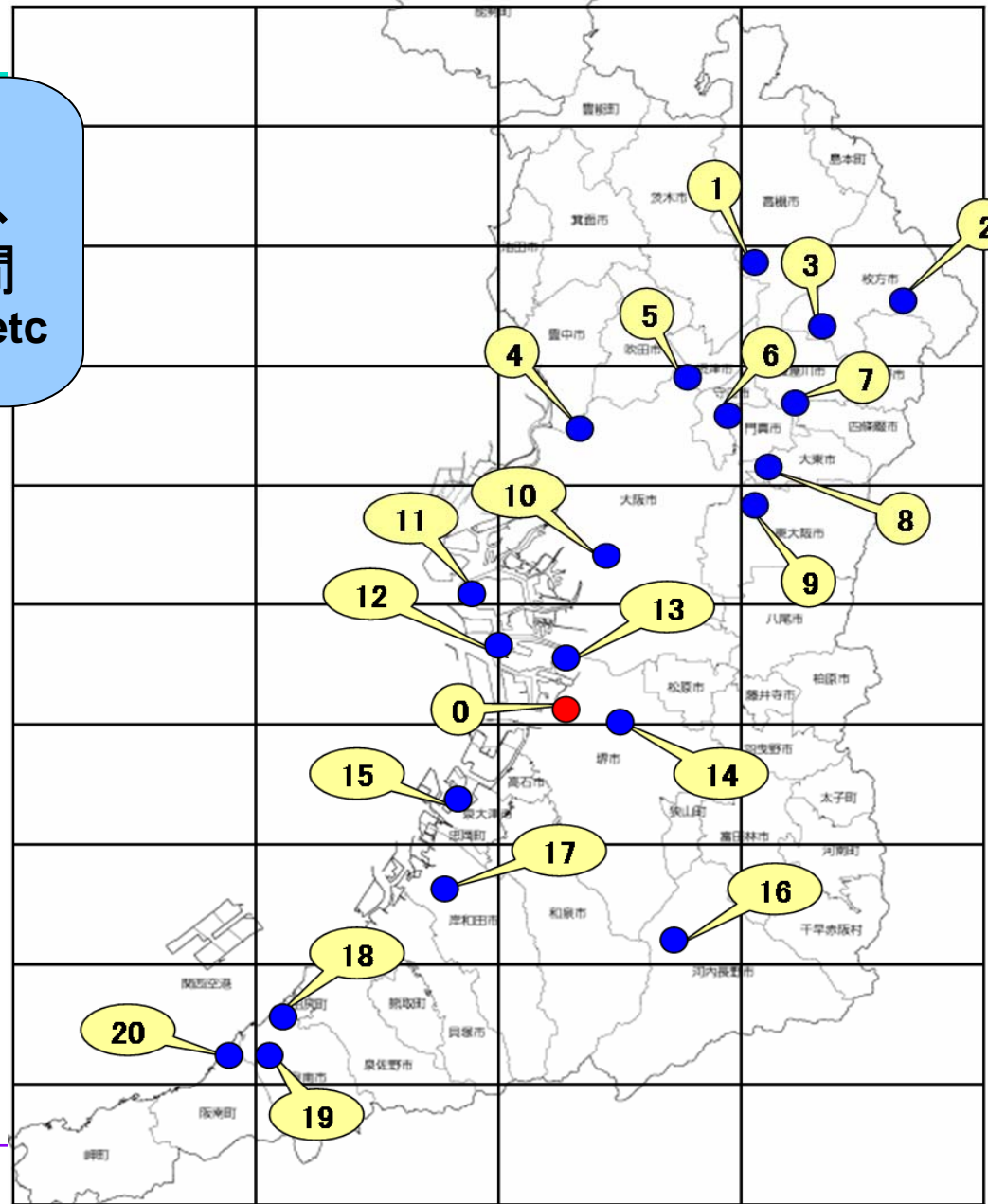


利用者の平均距離最小化

L=1, M=20, N=6~14

最小化には列挙法

高圧受電  
設置スペース  
開放可能時間  
etc



# シミュレーション結果

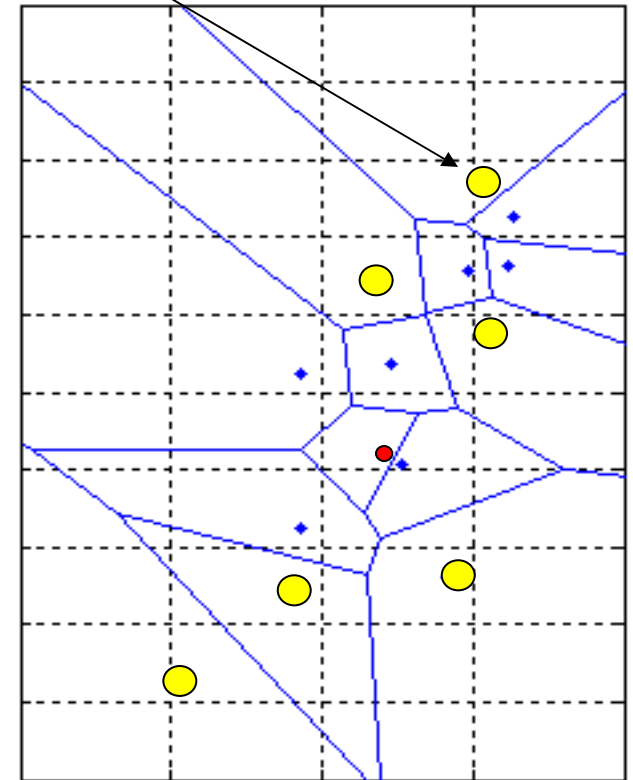
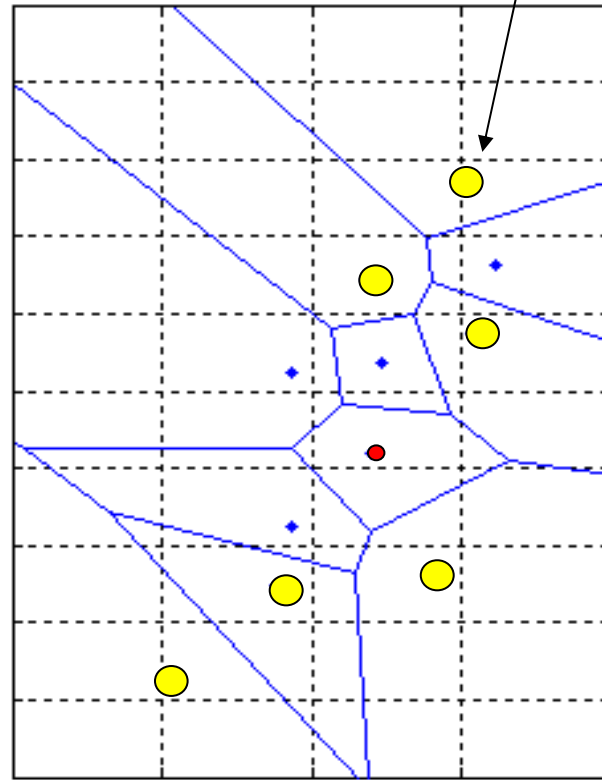
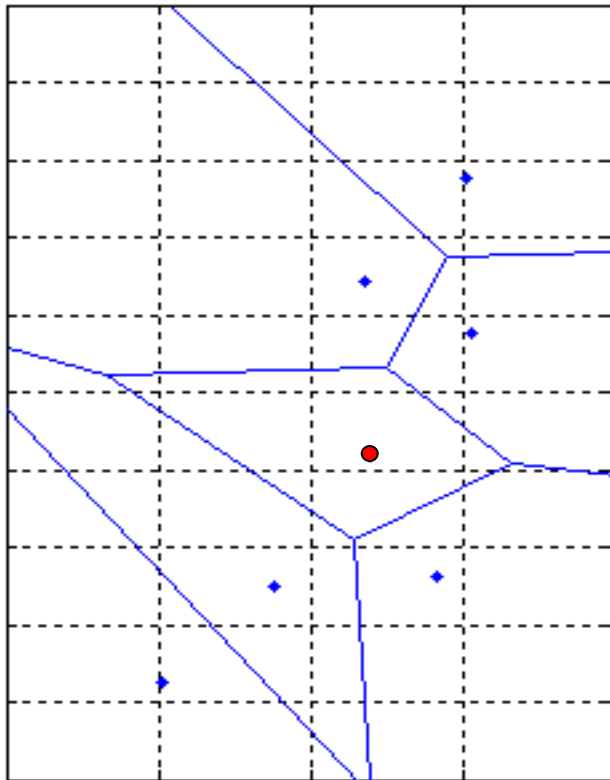
N: 設置数

● 優先順位 高

N=6

N=10

N=13



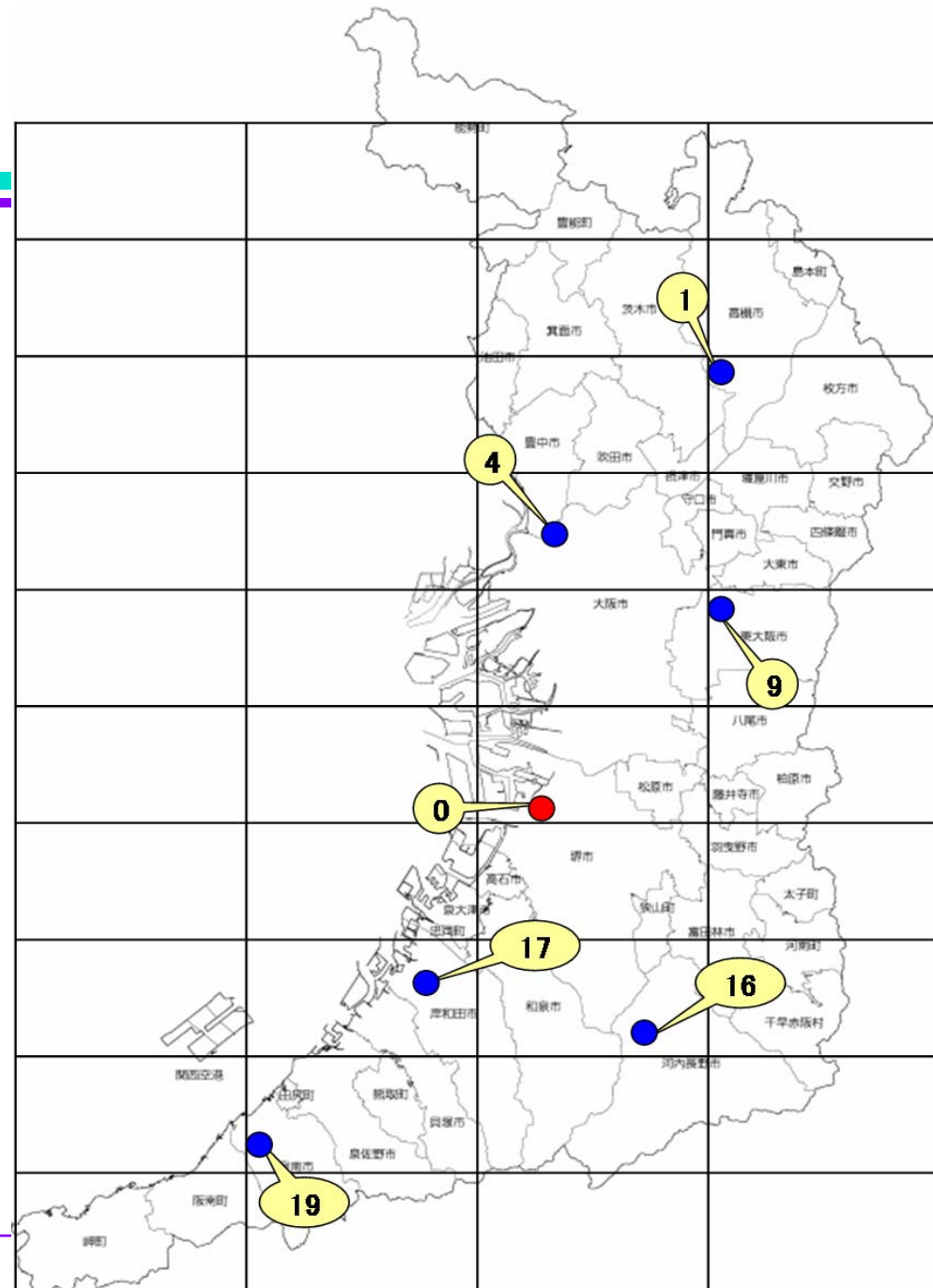
● 既存地点

◆ 選択された候補地点

# シミュレーション結果

優先順位表

優先度	候補地番号
高 ↑	1, 4, 9, 16, 17, 19
	11
	7
	10
	15
	14
	3
	13
	低 ↓



# 大阪EVアクションプログラムに基づく急速充電器の配置

## 順位付け方法の補足

- ・「施設の利便度」とは「施設への近さ」  
→ 「全利用者の施設までの平均距離」を最小化
- ・ $N=6,7,8\cdots$ の順にボロノイ図を描き、登場回数に応じて順位をつける。  
Nを増やしても登場しない施設があれば同率最下位とする
- ・過剰に近接(4km)している施設について補正を実施  
→ 近接候補地は最上位の候補地に準じる

# 平均距離の最小化

面的地域にn個の施設がある場合の平均距離最小化

$$\min_{x_i, y_i, i=1, \dots, n} \sum_{i=1}^n \iint_{V_i} \underline{d(x_i, y_i, x, y) f(x, y)} dx dy \quad (2)$$

$V_i$  : ボロノイ領域

$x_i, y_i$  : 母点の位置

$d(x_i, y_i, x, y)$

: 最近隣母点までの距離

$$\sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2}$$

利用者の分布

施設に応じた設定

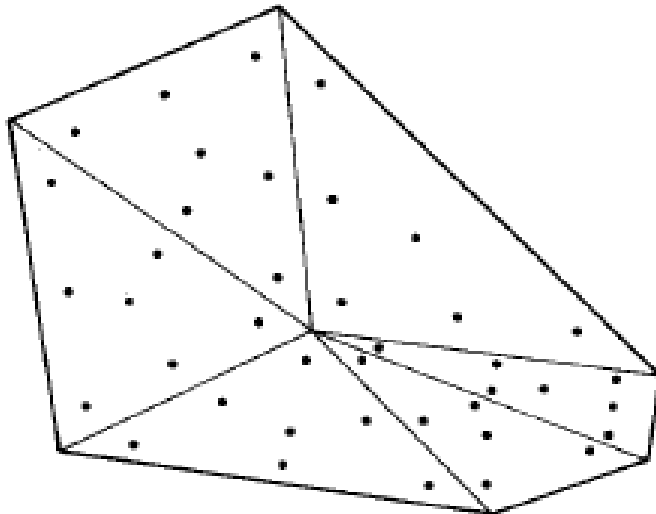
# 平均距離の最小化

連続的な  $f(x, y)$  に対して積分を行うことは非常に困難

$$\min_{\substack{x_i, y_i \\ i=1, \dots, n}} \sum_{i=1}^n \iint_{V_i} d(x_i, y_i, x, y) f(x, y) dx dy \quad (2)$$

近似的な数値計算

ポロノイ多角形を三角形分割



7つの代表点を取り出し計算

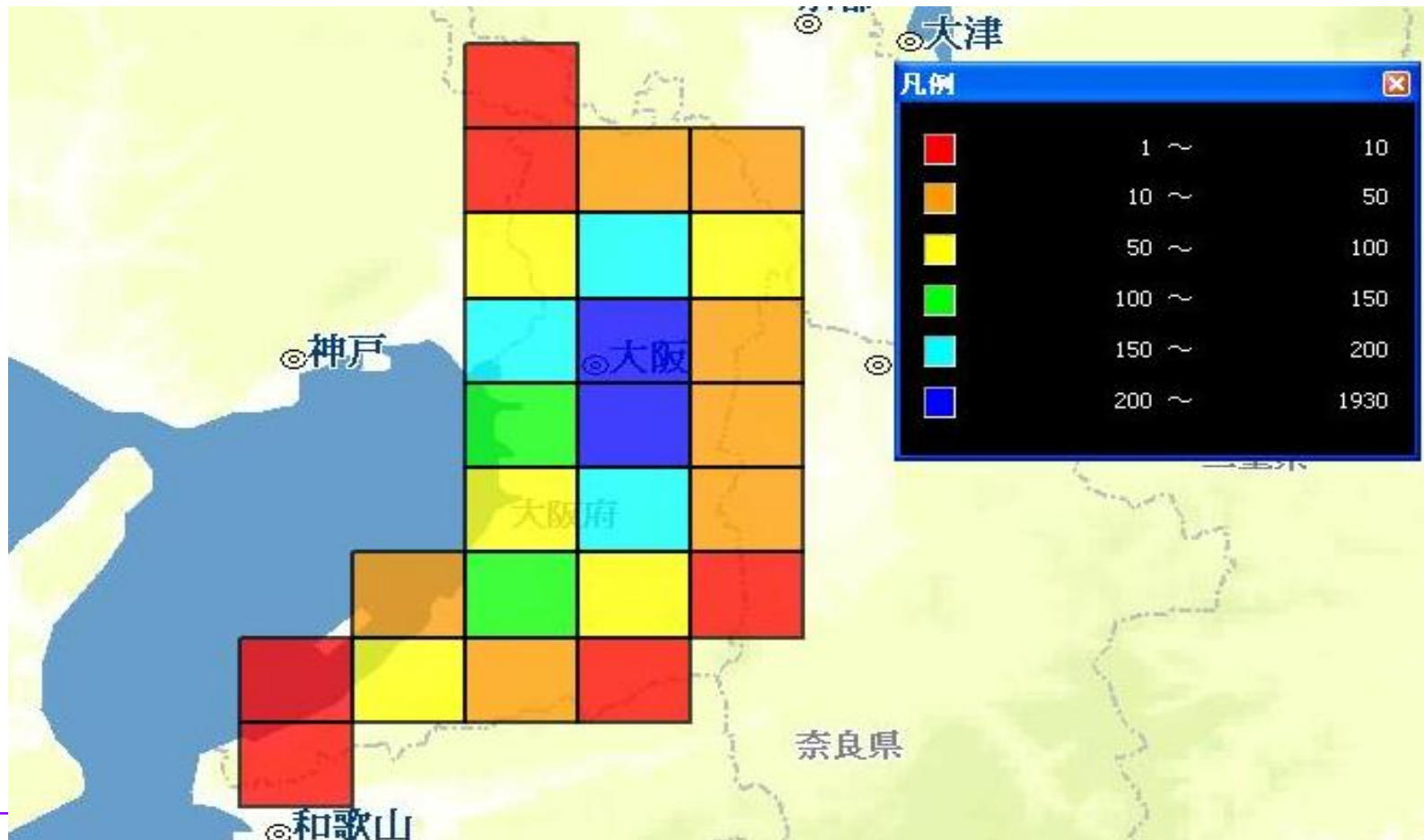
点番号	$(x_k, y_k)$	$w_k/S$
1	$(0, 0)$	$270/1200$
2	$\left(\left(\frac{\sqrt{15}+1}{7}\right)R, 0\right)$	$\frac{155-\sqrt{15}}{1200}$
3,4	$\left(\left(-\frac{\sqrt{15}+1}{14}\right)R, \pm\left(\frac{\sqrt{15}+1}{14}\right)\sqrt{3}R\right)$	
5	$\left(\left(-\frac{\sqrt{15}-1}{14}\right)R, 0\right)$	$\frac{155+\sqrt{15}}{1200}$
6,7	$\left(\left(\frac{\sqrt{15}-1}{14}\right)R, \pm\left(\frac{\sqrt{15}-1}{14}\right)\sqrt{3}R\right)$	

# 急速充電装置への適用

利用者密度関数  $f(x, \theta)$  の設定

ガソリンスタンドを参考

(10km,10km) 6段階



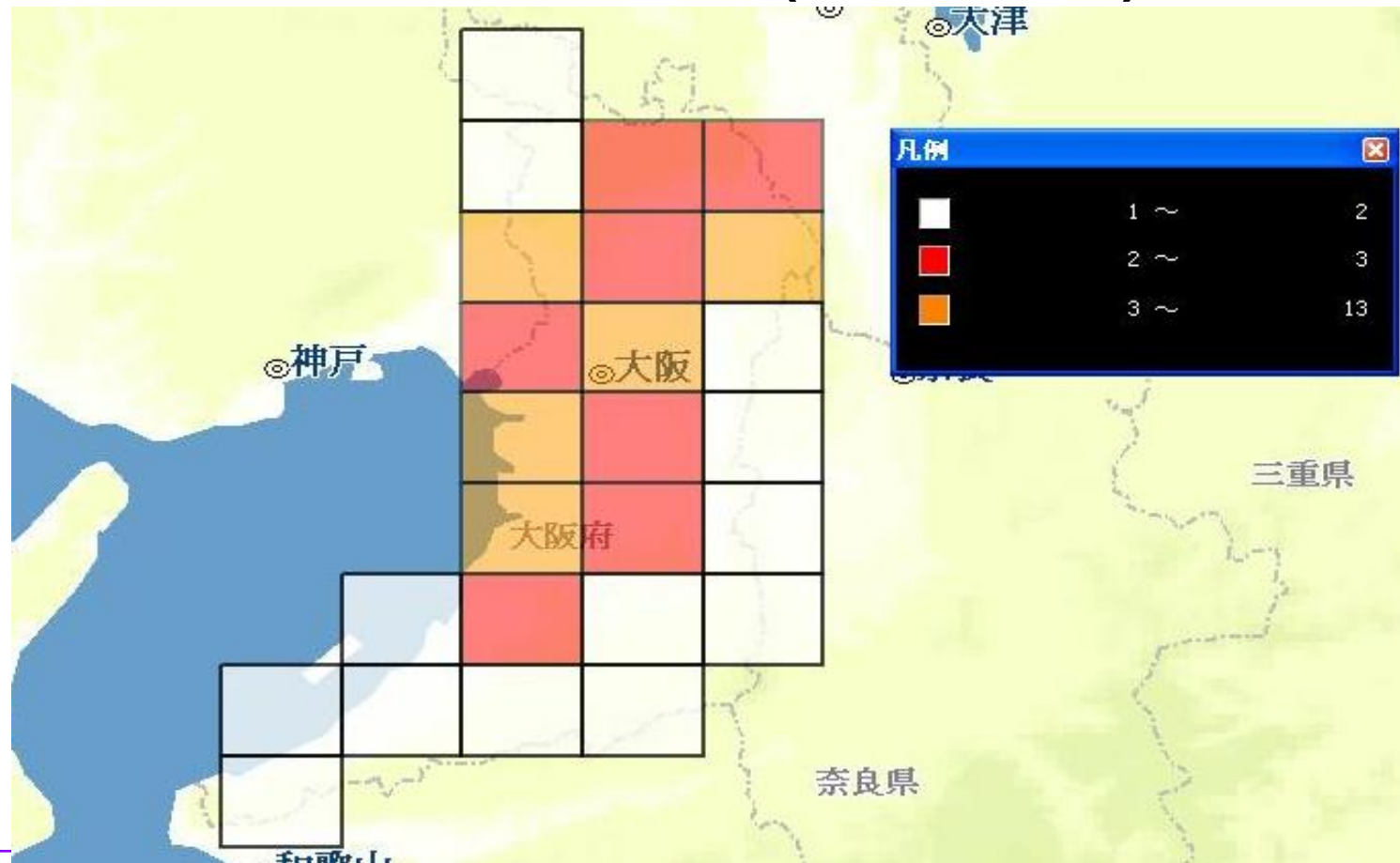


# 急速充電装置への適用

利用者密度関数  $f(x, \theta)$  の設定

EV走行データを参考

(10km,10km) 3段階



# 提案手法

1kmメッシュ (50km,90km)

各メッシュ・・・**設置候補地点**

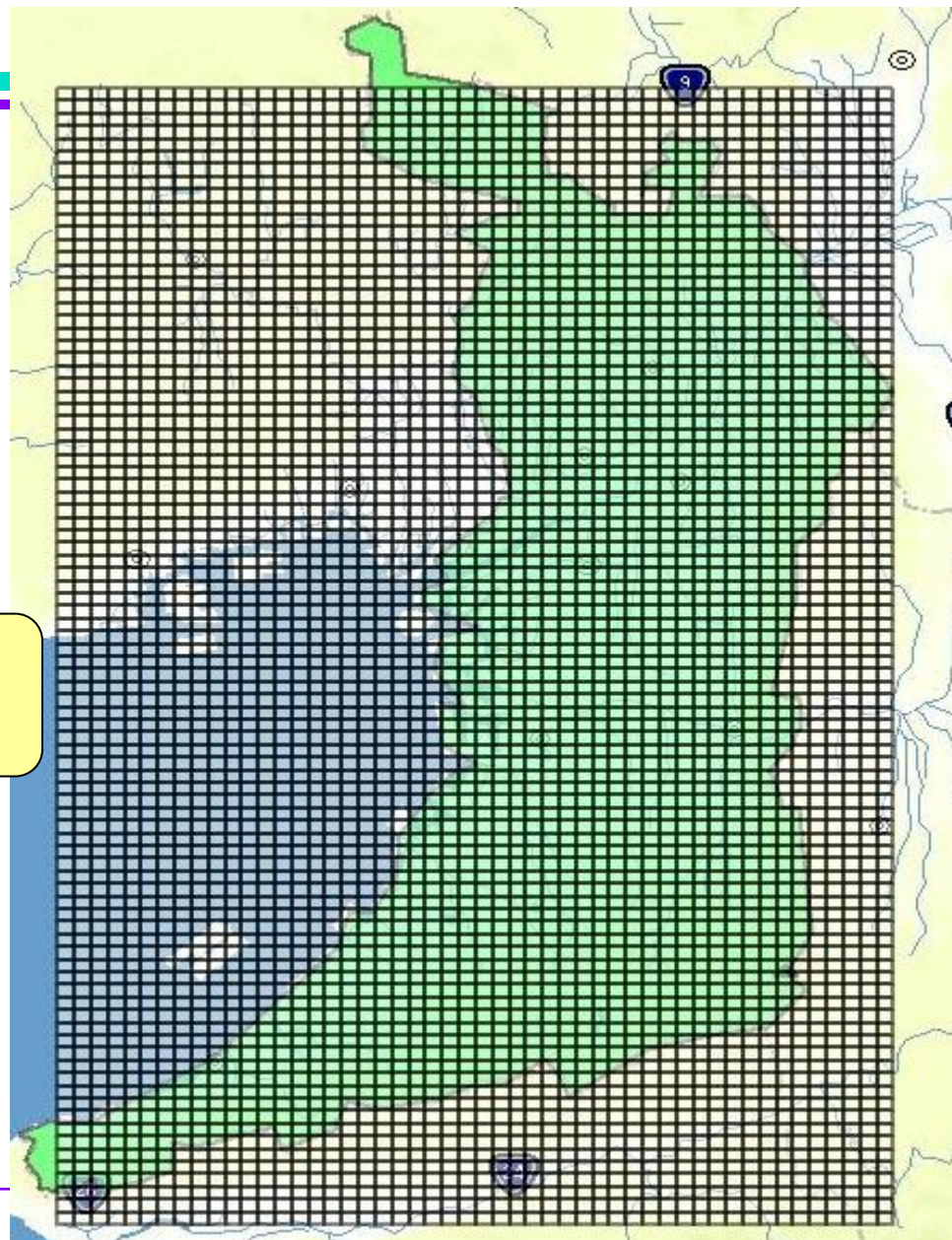
海や他府県などの  
設置不可領域も考慮

目的関数

$$\min_{\substack{x_i, y_i \\ i=1, \dots, n}} \sum_{i=1}^n \iint_{V_i} d(x_i, y_i, x, y) f(x, y) dx dy$$

候補点は約3000個

**メタヒューリスティクス**を用いて  
最適化を行う



# 提案手法

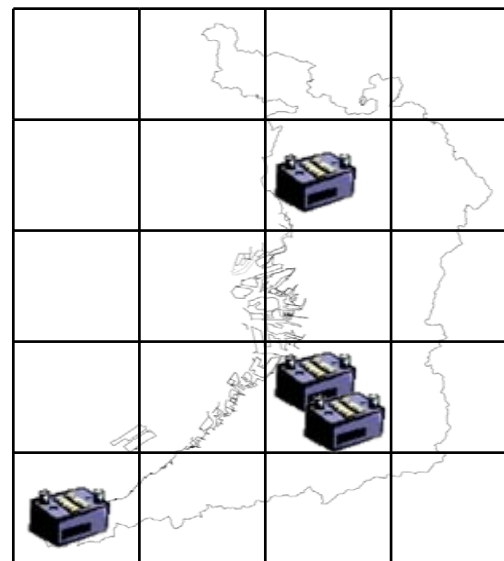
最適化手法として**遺伝的アルゴリズム**(GA)を用いる

遺伝子・・・50行90列の行列

設置点の要素 1 or 2 (二器併設を2で表す)

設置しない点の要素 0

例. 新規設置3カ所、内併設が1カ所場合

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$


# 提案手法

最適化手法として **Genetic Algorithm (GA)** を用いる

適応度の評価関数

$$\sum_{i=1}^n \iint_{V_i} d(x_i, y_i, x, y) f(x, y) dx dy \quad (3)$$

ただし、二器併設点を母点とするボロノイ領域では  
利用者から充電器までの距離に**重み0.5**を加える

初期解・・・乱数により決定し、多スタート法を用いる

交叉　・・・一点交叉

突然変異・・・設置点に対して一定確率 0.01

各パラメータ

個体数： 200　　世代数： 50　　スタート回数： 50

# 提案手法

既存の充電器 18ヶ所

## 入力要素

配置領域サイズ(90行50列)

利用者密度(GSとEVの二種類)

既存充電器座標(右図)

新規設置数

二器併設数

## GAの各パラメータ

個体数(200)

世代数(50)

突然変異率(0.01)

スタート回数(50)



# 数値シミュレーション

## case1.

利用者密度・・・ガソリンスタンド

新規設置数・・・5ヶ所、 内二器併設・・・2か所

## case2.

利用者密度・・・ガソリンスタンド

新規設置数・・・10ヶ所、 内二器併設・・・4か所

## case3.

利用者密度・・・EV走行データ

新規設置数・・・5ヶ所、 内二器併設・・・2か所

## case4.

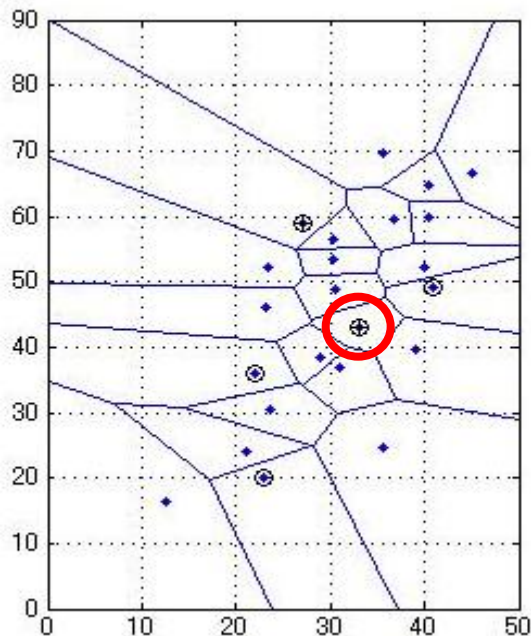
利用者密度・・・EV走行データ

新規設置数・・・10ヶ所、 内二器併設・・・4か所

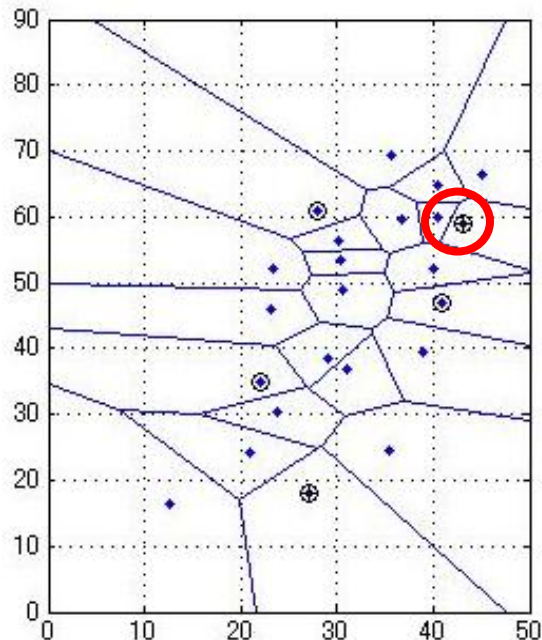
# シミュレーション結果

利用者密度

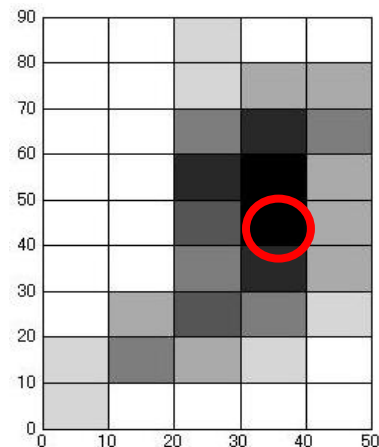
case1. GS



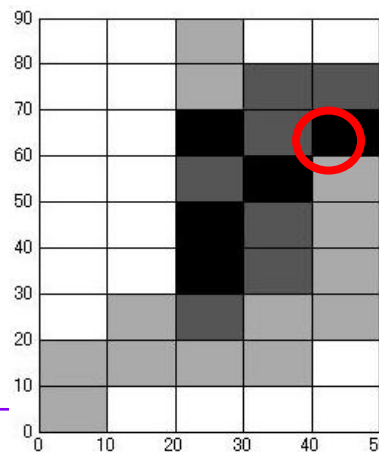
case3. EV



GS



EV



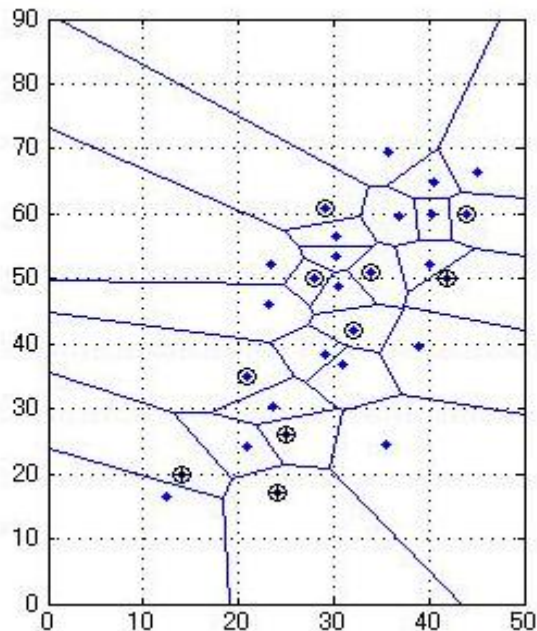
丸で囲まれた点が新規設置場所  
十字模様があるものは二器併設

計算時間・・・約2時間15分

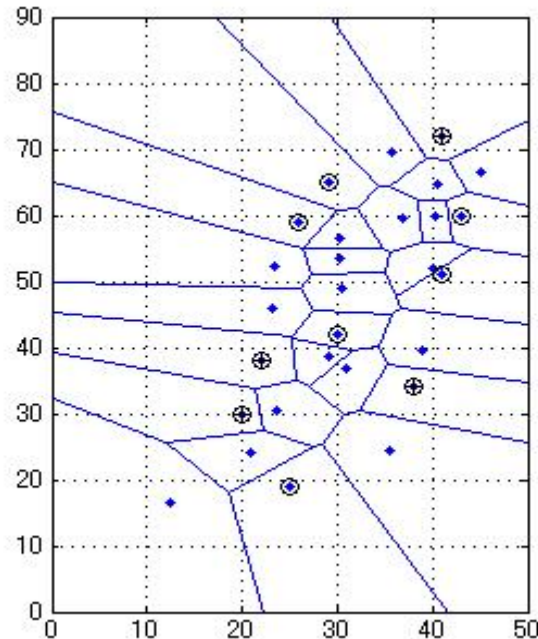
# シミュレーション結果

利用者密度

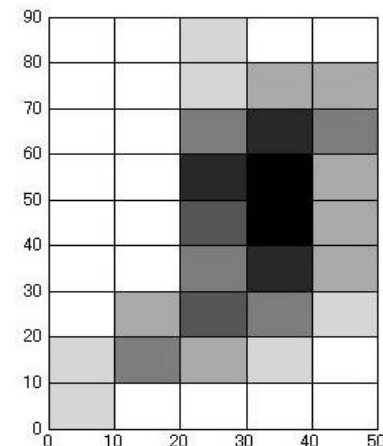
case2. GS



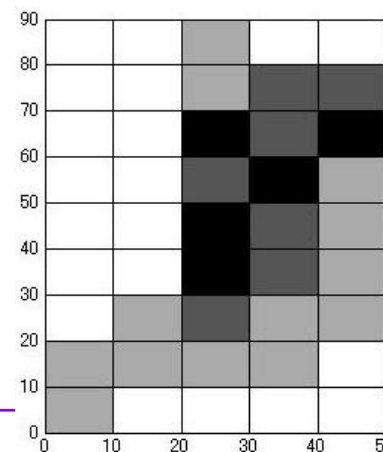
case4. EV



GS



EV



丸で囲まれた点が新規設置場所  
十字模様があるものは二器併設

計算時間・・・5時間50分



# まとめ

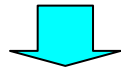
- 幹線道路、ガソリンスタンドやEV走行データを参考にした利用者密度関数の設定により、**ボロノイ図**を用いた施設配置問題を急速充電装置の配置に応用した
- 大阪府をモデルに設置候補地の**地理的条件**による優先順位付けを行った
- **メタヒューリスティクス**による最適配置を試みた

## 今後の課題

- EV普及シナリオに対応できる、より汎用的な急速充電器最適配置シミュレータの開発

# その他の検討

配置候補位置に何らかの差異を見出し、重み付けが出来ると仮定  
例. EV走行目的地に近い、幹線道路に面している、交通量 etc

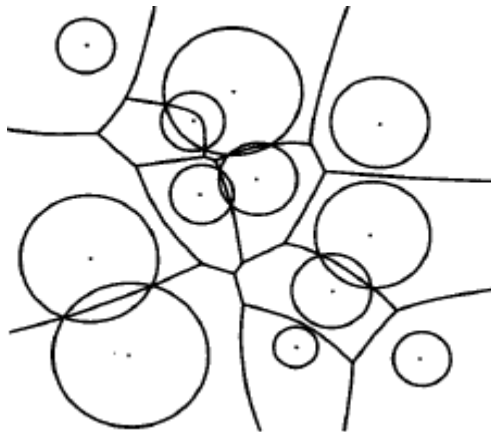


## 重み付きボロノイ図を利用

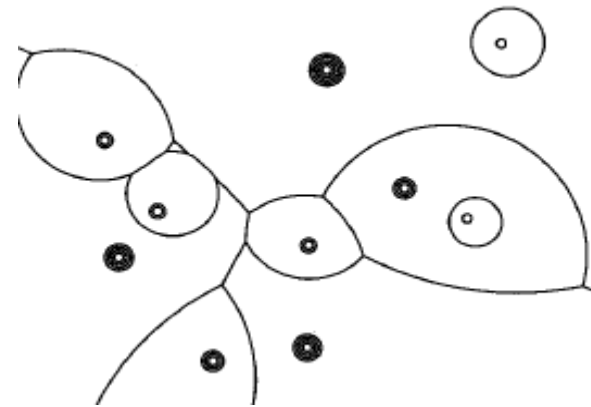
母点の影響に差がある場合に用いられる。(ラジオ放送局の配置など)

各母点に重み  $v_i, w_i$  を設定

利用者から最近隣母点までの距離  $\frac{1}{v_i} d(x, y, x_i, y_i) - w_i$



加法重み



乗法重み

# 重み付きボロノイ図の応用

## 重み付けによる優先順位円図

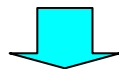
成蹊大学理工学部の小柳文子先生、岩田影新さんの研究

成蹊大学理工学部研究報告. Fac. Sci. Tech., Seikei Univ. Vol.46 No.1 (2009) pp.35-40

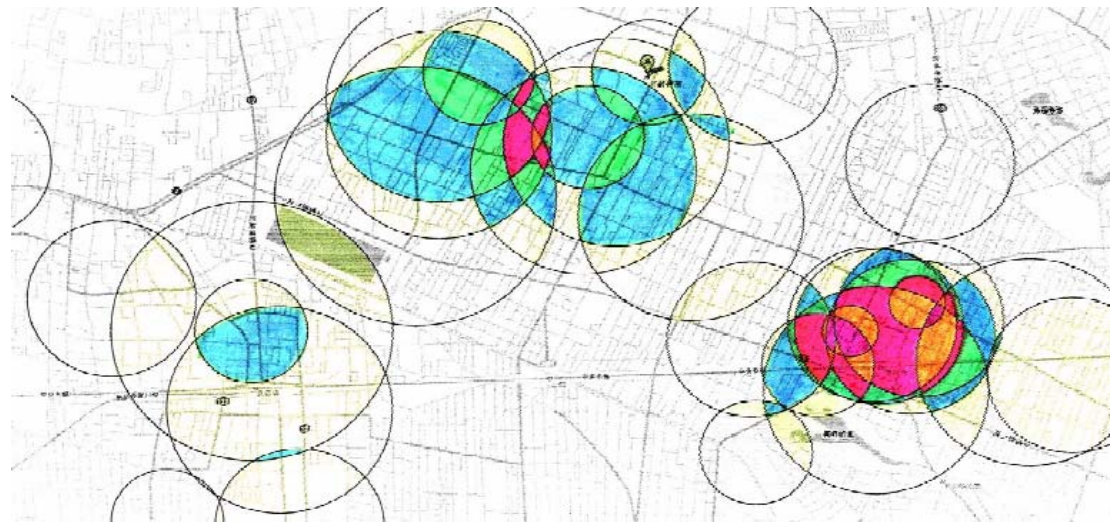
設置候補地に以下の条件から、加重円Rの計算を行う

- ・ 駅等の公共交通機関からの距離
- ・ 設置場所の進入口数
- ・ 主要道路からの距離
- ・ 周囲施設の集客力

まず、ボロノイ図を用いて配置候補地を決定する



その後、各候補地の加重円を図示しその重なるの度合いから配置場所を決定する



# 今後の展望

入力条件の変更により、EVの目的対象に対応させる。

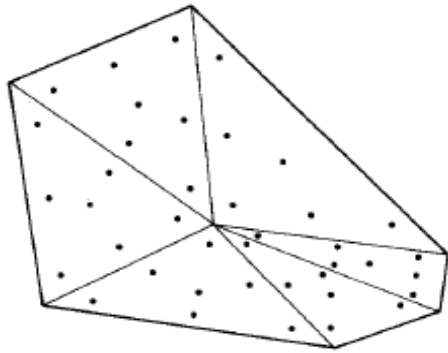
- 例えば、大阪市のタクシーをEV化する場合配置領域を大阪市とし、候補地を200mメッシュなどとする。
- 利用者密度のメッシュサイズも連動して変更する。
- また、鉄道駅の分布を参考に利用者密度を決定する。  
などが考えられる。



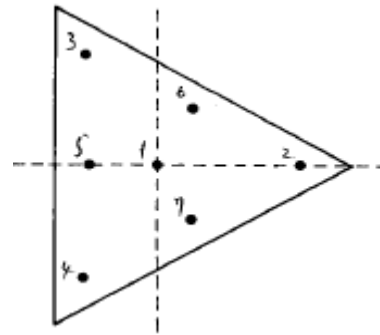
# 近似的な数値積分

$$\min_{\substack{x_i, y_i \\ i=1, \dots, n}} \sum_{i=1}^n \iint_{V_i} d(x_i, y_i, x, y) f(x, y) dx dy \quad (2)$$

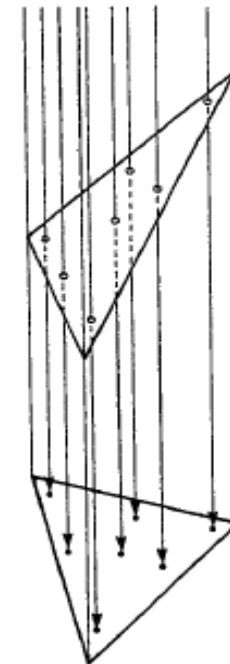
ポロノイ多角形を三角形分割



代表点座標  
(正三角形の場合)



代表点座標  
(三角形でない場合)



7つの代表点を取り出し計算

点番号	$(x_k, y_k)$	$w_k/S$
1	$(0, 0)$	$270/1200$
2	$\left(\frac{\sqrt{15}+1}{7}R, 0\right)$	$\frac{155-\sqrt{15}}{1200}$
3,4	$\left(\pm\frac{\sqrt{15}+1}{14}R, \pm\frac{\sqrt{15}+1}{14}\sqrt{3}R\right)$	
5	$\left(-\frac{\sqrt{15}-1}{14}R, 0\right)$	$\frac{155+\sqrt{15}}{1200}$
6,7	$\left(\pm\frac{\sqrt{15}-1}{14}R, \pm\frac{\sqrt{15}-1}{14}\sqrt{3}R\right)$	

# その他の検討

## 重み付きボロノイによる電気自動車用充電設備の適正配置の検討

成蹊大学理工学部の小柳文子先生、瓜生芳久先生の研究

電学論B, Vol.119 No.12. 1999

ここでは、利用者密度を地区別の「昼間人口」「就業者人口」、「自家用車数」、「営業者登録台数」を用いて決定する

この利用者密度により、東京都を舞台にボロノイ図による平均距離最小化を行い配置位置を求めている

ただし、本論文では急速充電設備と100V補充電設備との区別がなされていない

また、重み係数を、各配置候補地ではなく利用者密度に反映させており、重み付きボロノイ図の有用性が発揮されていない

という欠点が挙げられる

# 付表1 シミュレーション結果

数N 位置番号	配置									
	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
2										
3								○	○	
4	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
5										
6						○	○	○	○	
7			○	○	○	○	○	○	○	
8										
9	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
10				○	○	○	○	○	○	
11		○	○	○	○	○	○	○	○	
12										
13									○	
14							○	○	○	
15					○	○	○	○	○	
16	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
17	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
18										
19	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
20										

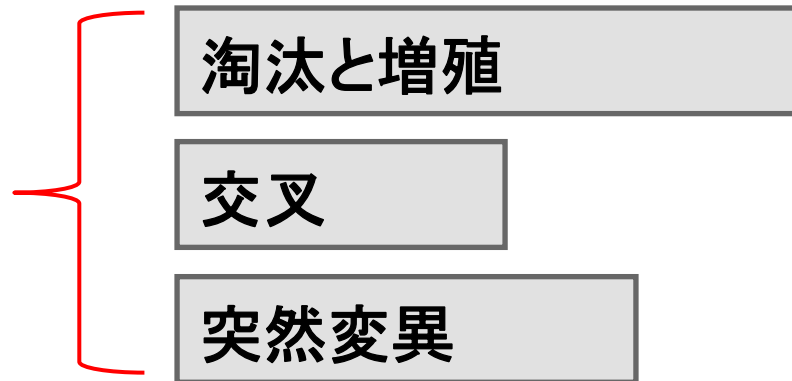
設置数Nが少ないときに選ばれた候補地は、Nが増えても共通して選ばれていることが分かる。これは、急速充電装置を段階的に設置したとしても、この候補地の中には配置の適正度に変化が生じないということである。選択数Nが少ない段階で選ばれた候補地ほど、設置の優先度が高いといえる。



# 遺伝的アルゴリズム

## (Genetic Algorithm:GA)

- 生物進化の原理に着想を得た多点型解探索アルゴリズム
- 各探索点が、遺伝子をもつ仮想的な生物であるとみなす
- 組み合わせ最適化に用いられる



# GAのモデル化

## 適応度の評価

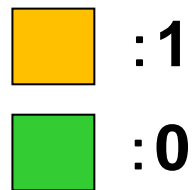
各個体が環境へ適応できるか評価関数により決定

## 最大化問題の場合

評価関数

$$y = x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6$$

$$(x_i = 0,1)$$

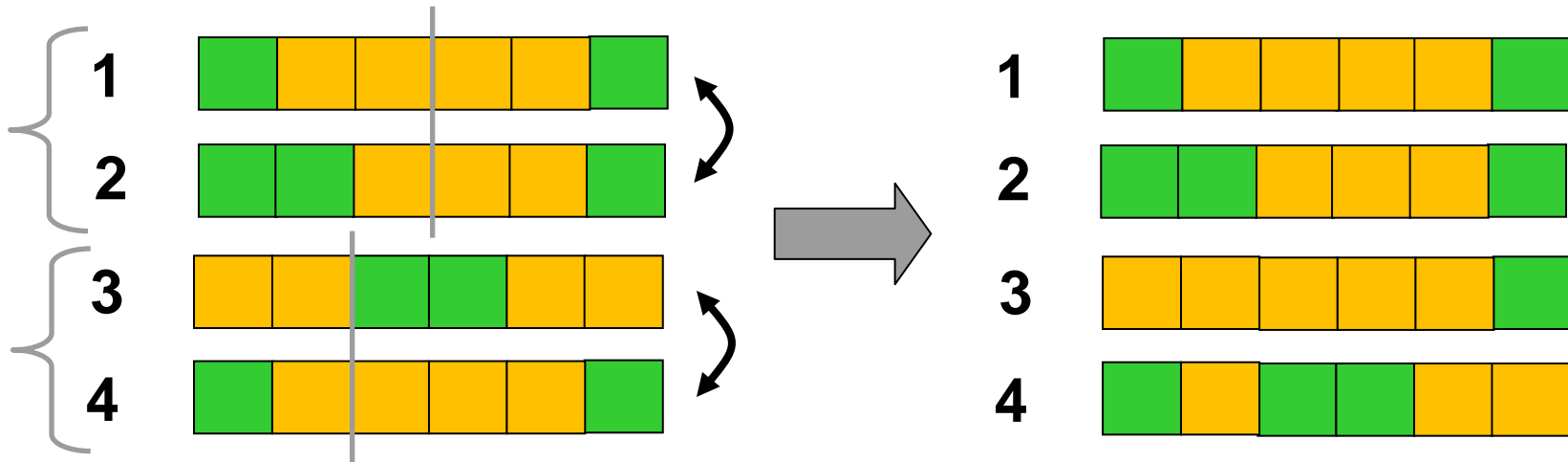


個体番号	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	評価値
1	1	0	0	1	0	0	2
2	0	0	1	1	1	0	3
3	1	1	0	0	1	1	4
4	0	1	1	1	1	0	4

# GAのモデル化(3)

## 交叉

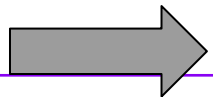
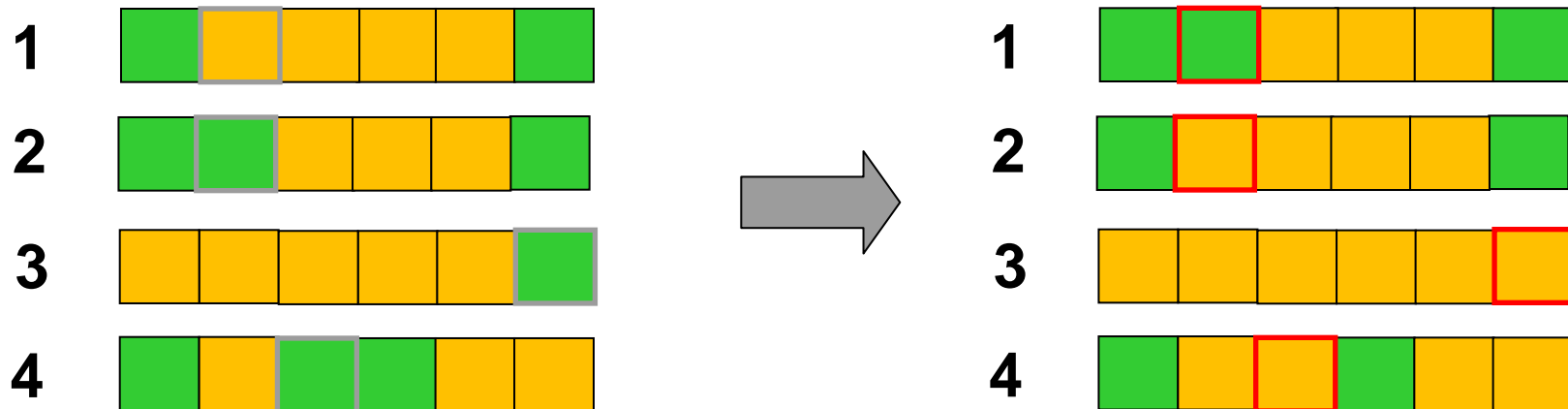
特定の遺伝子対を選び、その特定部位の入れ替えを行う



# GAのモデル化(4)

## 突然変異

記号列の特定部位をある確率で変化させる



突発的によい評価値を持つ個体が生まれる可能性がある

# GAのモデル化(2)

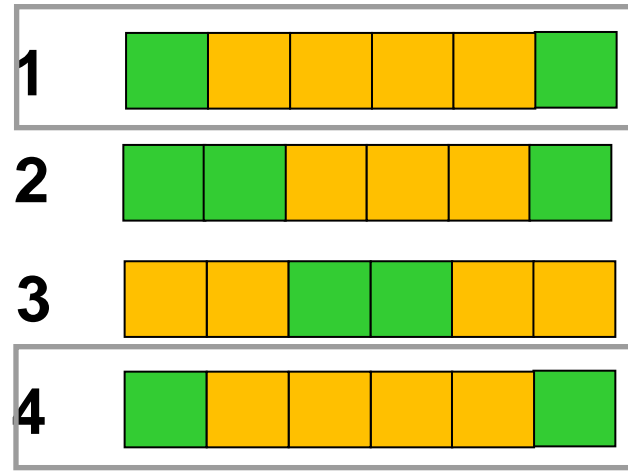
## 淘汰と増殖

生き残れる個体を選択し、減少分をコピーで補う

2



1



➡ 評価値に応じて個体を削除し、残りの個体をある一定比率で増殖

# 急速充電装置の最適配置実験 及びシミュレータの開発

第3回電気自動車 (EV) 導入・低炭素化加速実証事業推進会議

2010/5/28, 大阪科学技術センター, 大阪

三菱オートリース (株)  
(公) 大阪府立大学