

# 充電インフラの適正配置に関する検討

石亀 篤司, 松田 真典

電気自動車 (EV) の普及には充電インフラの構築が重要である。特に、EV の電池性能の有効活用を促す急速充電器の広域的な配備はとりわけ重要なものである。本稿では、この急速充電器の適正配置問題にポロノイ図を適用しており、その原理と最適配置検討手法の流れ、充電インフラのあり方などについて解説を行う。また、ポロノイ図を用いた本手法を、大阪府 EV アクションプロジェクトの一環として、大阪府の急速充電器の配置場所を決定する際の一つの評価項目に応用した。

キーワード：ポロノイ図、急速充電器、施設配置最適化

## 1. はじめに

近年、低炭素社会への実現に向け、通信技術を生かした新しい電力送電網に関する取り組みとして、電気自動車 (EV: Electric Vehicle) のバッテリーを電力貯蔵装置ととらえて、電力系統 (Grid) 側に貢献させる Vehicle to Grid (V2G) の研究もさかんに行われており、スマートグリッドの中核要素の一つとなりうる と期待されている。

従来から EV は、走行中の二酸化炭素排出量がないため環境保護対策の一環として期待されており、また、EV のバッテリーを蓄電池として扱うことは、夜間電力を充電することで、電力需要の昼夜間格差を改善する方法として期待されてきた [1]。だがこれまで EV の普及は、搭載される電池の容量、充電の繰り返しによる電池の消耗劣化、一回の充電による走行可能距離の制約などといった問題によりごく限られた利用にとどまっていた。しかし近年は、電池の飛躍的な高性能化によって実用的な EV が開発され関心が高まっている。

政府は、平成 20 年 7 月に閣議決定された「低炭素社会づくり行動計画」の中で“次世代自動車について、2020 年までに新車販売台数のうち 2 台に 1 台の割合で導入する”という目標を掲げた [2]。この目標実現に向け、平成 20 年 12 月に環境省は EV を用いた大規模実証試験事業を行うことを決定した [3]。また大阪府でも、平成 20 年 6 月に EV の普及とインフラや社会整備を推進する「大阪 EV アクションプログラム」

を発表した [4]。このように、EV の普及拡大に向けた取り組みが積極的に行われている。

こういった中、EV の普及に重要なことは充電インフラの構築であるといわれている。充電インフラには、100 V/200 V 充電装置、急速充電器、バッテリー交換ステーションなどが挙げられる。これら充電インフラの主な目的は、安心できる走行を可能とすることである。特に、外出先でバッテリーの残量が心もとなくなつた際でも近くで素早く充電できるような、急速充電器の広域的な配備はとりわけ重要なものである。そこで、急速充電器の効率的な配置場所の選定や、配置場所の中でも特に優先して設置すべき場所の判定などを行う、最適配置の検討が必要となる。これまでに小柳氏らがポロノイ図を用いた適正配置の検討を行ってきた [5]。また、姉川氏により、EV の実証実験を通して充電インフラの開発や規格化の取り組みがなされてきた [6]。

本稿では、大阪 EV アクションプログラムの一環として行ったポロノイ図を用いた急速充電器の配置問題について説明を行う。その結果は大阪府の急速充電器の設置場所を決定する際に一つの評価項目として実際に応用されている。

急速充電器の配置を考える上では、設置地域の幹線道路や交通量といった地理情報や交通情報などを考慮することに加えて、EV の実走行挙動データの解析および評価が必要であると考えられる。しかし、平成 21 年段階における大阪府では急速充電器は一基しか存在せず、そのため EV の走行台数は極めて少なく実用的な実走行データが得られていない。そこで EV の普及を目指す第一フェーズとして、実走行データに頼らない急速充電器の配置選定を行った。次に第二フェ

いしがめ あつし, まつだ まさのり  
大阪府立大学 大学院工学研究科  
〒599-8531 堺市中区学園町 1-1

ーズとしてEVの走行データを反映し、追加設置の配置検討を行った。

## 2. ボロノイ図を用いた施設配置最適化

### 2.1 ボロノイ図

施設配置問題を解く上で用いられる代表的な考え方に、ボロノイ図というものがある。これにより、施設が距離的に均一に配置される。ボロノイ図の原理とその性質について説明する[7]。

平面上に  $n$  個の点  $p_1, p_2, \dots, p_n$  があると、任意の点  $q$  と点  $p_i$  とのユークリッド距離を  $d(q, p_i)$  とする。このとき集合  $V(p_i)$  を「 $p_1, p_2, \dots, p_n$  の中で最も近いものは  $p_i$  である」という点  $p$  をすべて集めた集合とし、(1)式のように定める。ここで、 $V(p_i)$  を用いて分割された多角形をボロノイ領域もしくはボロノイ多角形と呼び、この分割図形をボロノイ図と呼ぶ(図1)。

$$V(p_i) = \{p | d(q, p_i) \leq d(q, p_j), j \neq i, j=1, 2, \dots, n\} \quad (1)$$

ここで  $n$  個の点  $p_1, p_2, \dots, p_n$  は各ボロノイ多角形の母点と呼び、それぞれの分割線をボロノイ辺もしくはボロノイ多角形と呼ぶ。このとき、ボロノイ辺は、各母点の垂直二等分線の一部となっている。各母点の位置を施設が配置される位置と考えると、ボロノイ領域は各施設の勢力圏を表す図であるとみなすことができる。

### 2.2 施設配置の考え方

ボロノイ図を用いた施設配置の考え方について説明する。まず、ある区域の施設の利用者が、どの位置にある施設を利用するかについて、次の二つの仮定が成り立つとする。

仮定1. 施設の利用者は、利用者の居場所から最も近い距離の施設を利用する

仮定2. 利用者は、施設までの距離を直線距離で判

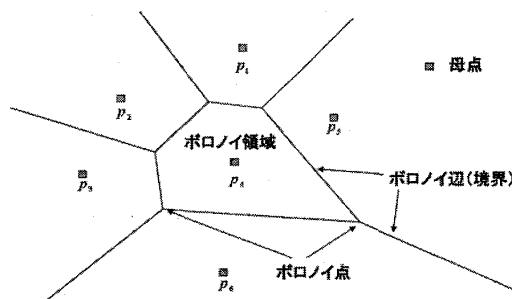


図1 ボロノイ図

断する

これらの仮定は場合によっては非現実的であるかもしれない。しかし、仮定1に関しては、各施設の機能が全く同一であれば、それなりの信憑性がある。EVの急速充電器においては、各充電器の機能(充電速度・充電料金など)が同一であると考えられるため、仮定1は十分な妥当性を有すると考える。また、仮定2に関しても道路距離と直線距離は図2に示したように高い相関関係があることは認められている[8]。仮定1, 仮定2がともに妥当である場合、この二つの仮定から図1に示したように、施設における利用圏を求めることができる。施設  $p_i$  の利用圏  $V(p_i)$  は、直線距離で施設  $p_i$  の方が他の施設より近い地点よりなる領域として表され、これは前述のボロノイ図と同じものであり、施設配置問題においてボロノイ図を考えることが有効であることが分かる。

### 2.3 平均距離の最小化

次に、EV用急速充電器の最適な配置について考える。EV用急速充電器では前述の二つの仮定が成立することから、各利用者からの最近隣施設までの距離の全利用者にわたる平均値を評価関数とすることは妥当であると考えられる。

ある地域に  $n$  個の施設が地点  $p_1, p_2, \dots, p_n$  があると、これらの地点を  $x-y$  平面上の  $(x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)$  で表す。また対象地域を領域  $S$  で表し、この地域  $S$  に施設の利用者が  $N$  人存在するとする。この利用者の分布を密度関数で表現し、地点  $(x, y)$  での利用者の分布を  $f(x, y)$  と表す。この  $f(x, y)$  を利用者密度関数と呼ぶ。地域  $S$  内のある地区  $A$  にいる施設の利用者数  $P(A)$  は式(2)で表される。

$$P(A) = \iint_A f(x, y) dx dy \quad (2)$$

さて、次に平均距離の数式化を行う。いま、地域  $S$  内の方形の微小地区  $s$  について考える。微小地区  $s$  の中心点を  $q$  とし、施設  $p_i$  のボロノイ領域  $V_i$  の中

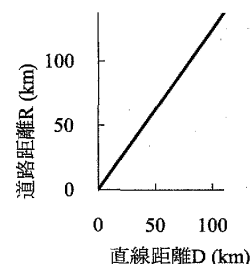


図2 直線距離と道路距離の関係

るとする。  $q$  から最も近い施設はもちろん  $p_i$  であるため、  $q$  から最近隣施設までの距離は  $d(q, p_i)$  である。微小地区  $s$  の辺長を  $dx, dy$  とすれば、微小地区  $s$  内の利用者から最近隣施設までの延べ距離  $t$  は式(3)で表される。

$$t = d(q, p_i) f(x, y) dx dy \quad (3)$$

施設  $p_i$  のボロノイ領域  $V_i$  にいる利用者の最近隣施設までの総距離  $T_i$  は、  $V_i$  内の微小地区の総距離を足し合わせればよいので、次のようになる。

$$T_i = \iint_{V_i} \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2} f(x, y) dx dy \quad (4)$$

地域  $S$  にいる全利用者の最近隣施設までの総距離  $T$  と平均距離  $M$  はそれぞれ式(5)、(6)となる。

$$T = \sum_{i=1}^n \iint_{V_i} \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2} f(x, y) dx dy \quad (5)$$

$$M = \frac{T}{N} \quad (6)$$

利用者総数  $N$  は一定であるため、平均距離  $M$  を最小化することは総距離  $T$  を最小化することと同義である。総距離  $T$  は、  $n$  個の施設の配置  $(x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)$  が定めれば一意的に定まるため、  $x_1, y_1, \dots, x_n, y_n$  の関数として式(7)のように書ける。

$$T = F(x_1, y_1, x_2, y_2, \dots, x_n, y_n) \quad (7)$$

面的地域に  $n$  個の施設がある場合の平均距離を最小化する配置問題は、式(7)を最小とする  $(x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)$  を求める問題となり、式(8)で表すことができる。

$$\min_{x_i, y_i} \sum_{i=1}^n \iint_{V_i} \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2} f(x, y) dx dy \quad (8)$$

(8)式はボロノイ図を用いた施設配置検討の最も基本となるモデルであり、利用者密度  $f(x, y)$  を適当に設定することで、郵便ポストやEV用急速充電器など種々の配置検討を行うことができる。

## 2.4 平均距離最小化法

$f(x, y)$  が一様でない場合、(8)式を解くことは非常に困難である。そこでボロノイ多角形の三角形分割を行い、7つの計算代表点とそれに対応する重み付けを行うことで、(9)式のように近似計算可能であることが知られている[8]。

$$T_i = W \sum_{j=1}^{n_i} \sum_{k=1}^7 w_k \sqrt{(u_{ijk} - x_i)^2 + (v_{ijk} - y_i)^2} \times f(u_{ijk}, v_{ijk}) \quad (9)$$

ここで、  $(u_{ijk}, v_{ijk})$  はボロノイ多角形  $V_i$  を三角形分割したそれぞれの三角形  $\Delta_j$  ( $j=1, \dots, n_i$ ) の7つの代

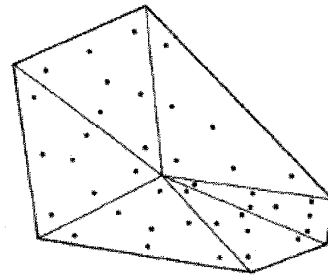


図3 ボロノイ多角形の三角形分割

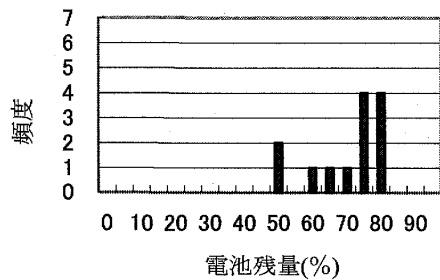
表点の座標である。  $w_k$  はそれぞれの代表点の重みを表す。ボロノイ多角形の三角形分割とその代表点の一例を図3に示す。詳しい原理など詳細は文献[8]を参照されたい。

## 3. 急速充電器の必要性

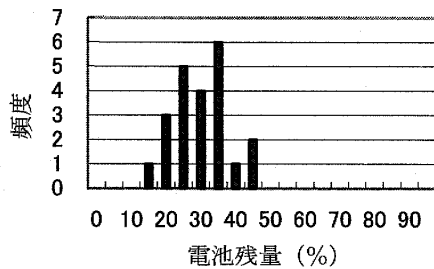
EVの普及を妨げてきた大きな要因として、航続距離が短いこと、車両価格が高いことが挙げられる。これら二つの要因は、EV用の電池が高価であるという問題に帰着されることから、電池の積載量は必要最小限とするのが有効であり、その必要最小限の量、すなわち、EVに求められる航続距離がどの程度か考慮する必要がある。

ところで、給油の時間間隔が長いガソリン車とは異なり、EVでは、主に家庭用コンセントと同じ单相100Vもしくは单相200Vで毎晩行うことが想定されている。EVが夜間に充電され、朝から使用する際には常にフル充電されているとすれば、EVの航続距離は乗用車の一日の走行距離を満たせば問題ないといえる。都市部において乗用車の一日の走行距離の平均は20km~30kmであるといわれており、またほとんどが80km以下であることが示されてことから、EVの航続距離は一充電80km程度でよいといえる[6]。

しかし、80km程度の航続距離があれば理論上は問題ないとしても、運転者にとって航続距離が短い自動車を運転するという事は非常に不安を抱かせるものである。たとえ目的地にたどり着けるだけの電池残量が残っていたとしても、想定外の事態が起こった際の対処が不可能であれば運転をためらうことになる。結果、電池残量が残っていても出発地に一度戻って充電を行い、再び出発するという無駄を行ってしまう。これを解消するためには、外出先での補充電が行えるようなインフラ設備が必要となる。自由に利用できる充電装置が外出先があれば、運転者は電池切れの不安なく運転が可能となる。このとき重要なことは、実際に



(a) 急速充電器増設前



(b) 急速充電器増設後

図4 EVの電池残量分布状況

充電装置で充電が行われるかどうかは問題ではないということである。充電装置が存在することによって、EVの積載する電池容量が有効に活用されるようになればよいのである。

図4は、東京電力の行った実証実験結果であり、ある地域のある一日でEVの電池残量が最も少なくなった状態を記録したものである[6]。図4(a)では、電池残量が半分以下となる前に充電を始めていることが分かるが、充電装置を増設したところ、図4(b)のように、電池容量を有効に利用した後に充電を行っていることがわかる。急速充電器の意義はこのような電池切れに対する不安解消としての意味合いが大きいとされている。

#### 4. 充電器配置手法とシミュレーション結果

##### 4.1 第一フェーズ (1基→11基)

平成21年における大阪府内の急速充電器は、堺市役所に設置された一基のみである(高速道路設置の一基を除く)[9]。この状況ではEVの普及は当然望める状況ではなく、EVの普及活動と充電インフラの整備では、まず充電インフラの整備から行う必要がある。そこで、充電インフラの第一フェーズとして、まず10基の急速充電器を設置する。

ポロノイ図を用いた適正配置の検討を行う場合、利用者密度をどのように設定するかが重要となる。本来

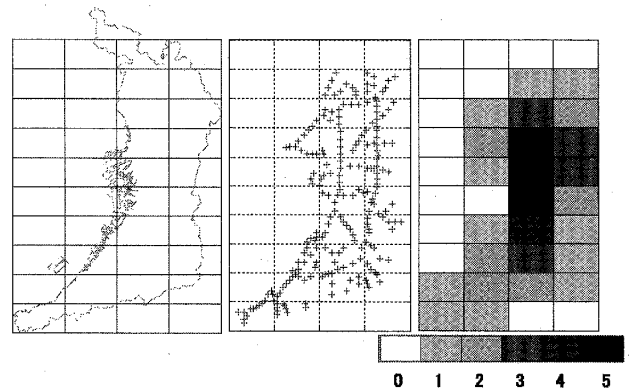


図5 利用者密度

はEVの実走行挙動データの解析と評価を行い、利用者密度に反映させることが望まれるが、急速充電器が設置されていない現段階においてはEVの走行台数は極めて少ない。そのため第一フェーズでは、EVの実走行データを用いない利用者密度の設定が必要となる。

そこで自動車全体の交通量が利用者の分布とみなすことができると考え、交通量との相関性が高いと思われるガソリンスタンドの分布(GS)と主要な幹線道路を用いて利用者密度を設定した[10][11]。大阪府を東西15km、南北8kmの長方形メッシュに分割し、メッシュごとのガソリンスタンドの数から、メッシュ内の利用者量を1~5の五段階で決定した。メッシュサイズに関しては、東京電力の実証実験で用いられた判断基準を参考としている。これらを図5に示す。

また、第一フェーズの段階では、現実的に設置可能な候補地は極めて限定的となる。設置場所の条件としては、急速充電器を設置できる受電設備や設置スペースが考えられるが、第一フェーズにおいては、急速充電器の存在を大衆にアピールする目的から、集客力、利用可能時間の長さ、堅実な設備保守が可能であること、などの条件も重要視される。そこでこれらの条件を満たす20箇所の施設を事前に設定し、それらの候補地に対して、ポロノイ図を用いた配置選定を行う。また20箇所の施設の優先順位付けも行う。

そこで急速充電器設置箇所の候補地20箇所に対してN箇所に設置するとして、設置箇所の選定を行った。図6に急速充電器設置候補地20箇所の位置を示す。なお通し番号0番は既存の充電器設置点を示している。

20箇所の候補地からN箇所を選択し既存地点1箇所を含めたN+1箇所についてポロノイ図を考え、図5に示した全利用者の最近隣施設までの平均距離を最小

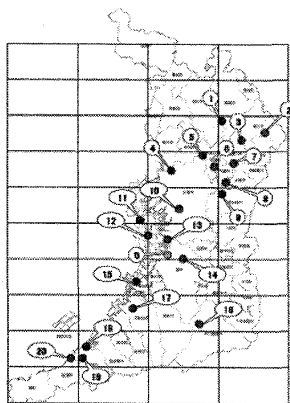


図6 配置候補地

表2 配置優先順位

優先順位	位置番号
1位	1, 4, 9, 16, 17, 19 or 20
7位	11
8位	7
9位	10
10位	15
11位	14
12位	3
13位	13
14位	2, 5, 8, 12, 18, 19 or 20

表1 シミュレーション結果

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

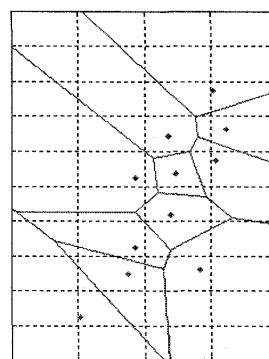


図7 配置結果

とする候補地の組み合わせを求め、最小化法には、候補地が20箇所ですべて探索計算が可能であるため列挙法を用いる。以上の手順を  $N=6, \dots, 14$  に対して行い、それぞれの最適解と、上位第二位と第三位の解を求め、これらの結果を表1に示す。

最適解では選ばれたが、第二位解・第三位解では選ばれない候補地と、それらの代わりに二位解・三位解で選ばれた候補地は競合関係にあるといえ、前者と後者の候補地の適正度の差は少ないといえる。そのため、候補地の利便性条件などに多少の差があれば優先順位は逆転しようと考えられる。また、最適・二位解・三位解すべてに共通して選ばれている候補地は特に優先順位が高いといえる。それら競合性をふまえると表2のような結果が得られる。また、10基を設置した場合のポロノイ図を図7に示す。

#### 4.2 第二フェーズ (11基→16基)

EVの実走行データを利用した配置検討を考える。また第二フェーズでは、特定の設置候補地を設けず、大阪府全域で設置する場所を考える。設置候補地をメッシュ状に区切り、各メッシュ内に充電器を設置するものとする。このときの最適化手法としては、充電器を設置するメッシュを1、設置しないメッシュを0とした行列を遺伝子とする、遺伝的アルゴリズムが有効であるという小柳氏の研究報告がある[1]。

GAを用いるにあたって、遺伝子の設定、親の選択方法、交叉方法、突然変異方法を定める必要がある。GAの各遺伝子は行列とし、各行数と各列数は、配置の位置を表す。各要素にはそこに配置される新規充電器の数が入り、設置しないならば“0”とする(図8)。

GAの親の選択確率はルーレット法で決定する。また、交叉は一点交叉とし、突然変異は設置する要素(“0”以外の要素)に対し、一定確率で与える。初期解は乱数により決定し、多スタート法を用いる。手法の流れは以下の通りである。

- ① 乱数により初期解集団を構成する。
- ② 初期解集団の各個体を(9)式で評価する。

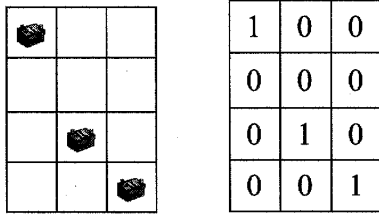


図8 遺伝子の行列

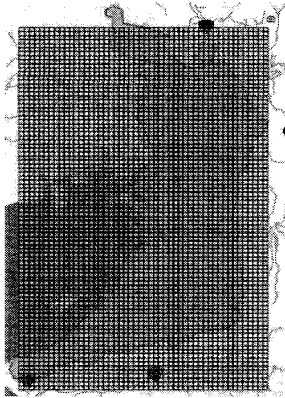


図9 配置候補メッシュ

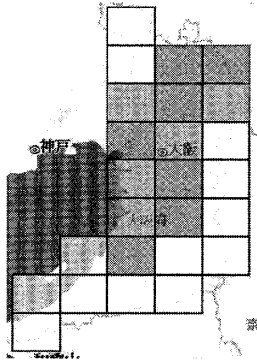


図10 EV 走行密度

- ③ 親の選択, 交叉, 突然変異を行い, 子の遺伝子を生成する.
- ④ 子の遺伝子集団の各個体を(9)式で評価する
- ⑤ 子の遺伝子と現世代遺伝子の中から評価値が上位のものを取り出し, 次世代遺伝子とする。(淘汰を行う)
- ⑥ 入力した世代数まで, ③~⑥を繰り返す.
- ⑦ 多スタート法により, ①~⑥を繰り返す.
- ⑧ 最も良い評価値の解を出力する.

第二フェーズでは図9に示すように1km四方のメッシュを考える。配置候補地点は約4,500箇所となる。また利用者密度は図10に示すEVの走行データ分布を考慮する。これに第一フェーズで用いたガソリンス

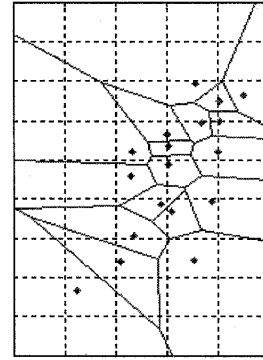


図11 配置結果 (フェーズ2)

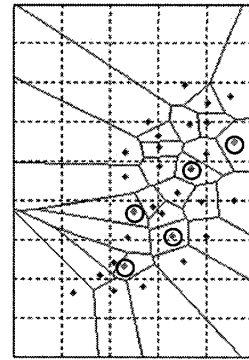


図12 配置結果 (フェーズ3)

タンク分布を重ねて利用者密度を設定する。以上の条件を用いて, GAを用いた最適化手法を用いて11基の充電器に加えて新たに5基の充電器の追加選定を行った結果を図11に示す。府内全域に分散して配置されると同時に, 利用者が多いと考えられる都市部に集中して配置されている。

#### 4.3 第三フェーズ (16基→35基) (今後の展望)

今後の展開の一つとして, 一箇所に複数の充電器を併設する場合を考慮する配置検討が考えられる。二器併設を考慮した場合の配置シミュレーション結果を示す。ここでは, 新たに14箇所に充電器を設置し, そのうち5箇所を二基併設するものとする。併設した充電器の利用領域(すなわち併設した充電器を母点とするボロノイ領域)での利用者量には重みを加えるものとする。評価関数は重み係数を $W$ として(10)式で表される。配置結果を図12に示す(図中○印は二器併設を示す)。二器併設された充電器を母点とするボロノイ領域の面積は他と比べ比較的大きく, それらが分散されて配置されている。

$$\min_{x_i, y_i} \sum_{i=1}^n \iint_{V_i} W \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2} f(x, y) dx dy$$

$i=1, \dots, n$

(10)

## 5. おわりに

EVの普及に必要な不可欠な急速充電器の最適配置問題について検討を行った。前述の通り、ここでの配置検討結果は、大阪充電インフラネットワークの一環として急速充電器の配置決定に利用されている。平成22年度末までに、大阪府には急速充電器が23カ所に設置され、また31カ所の普通充電器がおおさかエコカー普及環境整備基金の設置補助を受けている。今後、EVの普及のためには、大阪府だけでなく近畿一円に急速充電器が配備される必要がある。また、高速道路への配備なども含めた検討も今後の課題となる。

急速充電器の普及によりもたらされる「EVが溢れる町」が人々を幸せにし、地球に優しい生活を創出してくれることを願っており、本解説がその実現に少しでも役立てば幸いである。

最後に、EV充電器関係の資料を頂いた大阪府商工労働部 片山靖隆様、岡田一郎様、その他有益なご助言を頂いた関係各位に感謝申し上げます。

### 参考文献

- [1] 小柳文子, 瓜生芳久:「電気自動車による消費電力のモデル化と電力需要に与える影響」電学論B, 117巻, 1号, 41/46, 1997.
- [2] 環境省:「低炭素社会づくり行動計画」, 平成20年7月29日.  
<http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=10025>
- [3] 環境省:「電気自動車等に係る実証試験事業について」, 平成20年12月9日.  
<http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=10538>
- [4] 大阪府 商工労働部 新エネルギー産業課 企画グループ大:「EVアクションプログラム」  
<http://www.pref.osaka.jp/energy/top/ev.html>
- [5] 小柳文子, 瓜生芳久:「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」電学論B, 119巻, 12号, 1412/1418, 1999.
- [6] 姉川尚史:「電気自動車のための充電インフラ」エネルギー・資源, Vol. 29, No. 4, 24/28, 2008.
- [7] 杉原厚吉:「なわばりの数理モデル—ボロノイ図からの数理工学入門—」共立出版, 2009.
- [8] 岡部篤行, 鈴木敦夫:「最適配置の数理」朝倉書店, 1992.
- [9] 大阪エコカー普及戦略  
<http://www.pref.osaka.jp/attach/5004/00045655/hukyusenryaku.pdf>
- [10] 大阪府総務部統計課:「平成19年商業統計調査確報/第三表」  
[http://www.pref.osaka.jp/toukei2/shougyou/shougyou\\_k/xlslist.html](http://www.pref.osaka.jp/toukei2/shougyou/shougyou_k/xlslist.html)
- [11] 兵庫県企画県民部政策室統計課:「平成18年事業所・企業統計調査結果/第八表」  
[http://web.pref.hyogo.lg.jp/ac08/ac08\\_4\\_000000037.html](http://web.pref.hyogo.lg.jp/ac08/ac08_4_000000037.html)