

# クラスタリングに基づく災害時の移動電源車 巡回地点決定法の評価

高木俊彰<sup>†1</sup> 森野博章<sup>†1</sup>

東日本大震災の例に見られるように、地震等の災害発生時には家庭やオフィスにおいて停電により固定網通信に支障が生じるケースがあり、その場合携帯電話は重要な通信手段となる。ただし停電が長時間継続する場合には携帯電話端末にも電源供給が必要であり、対策の一つとして対象エリア内に移動電源車を巡回させ端末の充電を行うことが考えられる。その近似解法として k-means 法を拡張したアルゴリズムを用いて対象エリアを分割し各エリアの中心を巡回地点とすることで移動経路を定める手法が提案されているがある特定地域のみを想定してシミュレーションを行っており汎用性が低い。本論文では、前研究を踏まえ、面積や人口、人口密度が異なる地域を想定した場合と電源車の台数を変更した場合のシミュレーションの結果を報告する。

## Performance study on serving point decision problem of vehicle mounted generators for disaster relief

TOSHIAKI TAKAGI<sup>†1</sup> HIROAKI MORINO<sup>†1</sup>

As can be seen in the cases of the Great East Japan Earthquake, fixed communication lines in the home and offices can be unavailable for a long time after disaster due to the power failure in which case mobile phones are important means of communication. When the power failure continues for a long time, alternative power supply will be required to the mobile phone terminals. And providing vehicle mounted generators to the target area is one of promising approaches to cope with this issue. In the previous literature, we have proposed a method to decide serving points of the vehicle mounted generators within the area, in which the area is divided into small subareas using modified k-means++ and set the centroid of each subarea as a serving point. In this paper, we report performance evaluation of the proposed method by simulation for several areas with different sizes and population density.

### 1. はじめに

地震などの災害時において、通信インフラは情報を得る手段として主要な役割を果たす。しかし、災害時には、電柱倒壊、管路・ケーブルの損壊などにより固定通信網が使用できない状況が生じる。先の東日本大震災では通信事業者3社合計で約190万回線が被災し、完全な復旧までに約2ヶ月を要した[1]。携帯電話基地局も同様に被災したが、車載型基地局等の配置により一部のエリアでは比較的早期にサービスの部分的な復旧がなされた。こうした状況ではユーザにとって携帯電話が重要な通信手段となる。この場合、当該エリアで停電が長時間継続するケースに備えて定期的に端末への充電を行う仕組みを構築する必要がある。

対象地域で長時間の停電が発生している状況でユーザ端末の充電作業を効率化する方法の一つとして移動電源車を巡回させることが考えられる。本稿では電源車が地域内の複数地点を巡回するものとして、電源車がどの地点にいつ到着するのかを事前にスケジュールし、供給対象のユーザを周知しておくようなケースを考える。このモデルでは各ユーザは事前に割り振られた停車地点へ、電源車の到着

時刻に間に合うように移動し、充電を行うとする。ここでは、ユーザが移動を開始する時間から、全ユーザの充電が完了し、自宅に戻るまでの時間を最小化するための停車位置の決定が課題となる。この場合、各ユーザが自宅から停車地点へ移動する時間、その地点で充電の待ち行列に並んでから充電が完了するまでの時間(待ち時間)、さらに電源車が全ての地点を巡回する時間に着目し、ミニマックス基準に基づいて停車地点と地点間の移動順序を最適化するのが適切である。

この問題の最適解は総当りで求める必要があるため、対象ユーザ数が多いほど処理膨大な時間が必要であり現実的ではない。そこで、我々は近似解法として k-means++法[2]を拡張したアルゴリズムを用いて地域を複数のより狭いエリアに分割し各エリアの中心を巡回地点とする手法を提案している[3]。

[3]では一つの地域を対象に性能評価を行っているが、本論文では、面積や人口、人口密度が異なる多様な地域に対して提案する方式を評価し、その適用領域を明らかにすると共に、電源車の台数を変化させた場合の結果についても報告する。

<sup>†1</sup> 芝浦工業大学大学院理工学研究科  
Graduate School of Science and Engineering, Shibaura Institute of Technology

## 2. 問題設定

この章では、電源車の巡回経路とユーザの移動に関して本研究で設定するモデルを述べ、従来研究と現状の問題点について説明する。

### 2.1 想定モデル

本稿で設定する巡回モデルにおけるユーザと電源車の動きについて図 1 を例に説明する。電源車は同時に  $n_{\text{charge}}$  台の端末を充電可能で、1 台の端末の充電は全て  $T$ [秒]で完了するとする。電源車は対象エリアに 1 台のみ存在し、ある時刻に対象エリアの外部のある地点を出発し、エリア内の予め決められた複数地点（エリア内の交差点から選択）に停車する。図 1 の例では A,B,C,D に一時停止し、この順に巡回する。エリア内の各ユーザは 1 台ずつ端末を所持しており、その位置に応じて集合する巡回地点が決める。電源車がその地点に停止する時刻は予め周知されており、各ユーザはその時刻に地点に到着するように移動する。各地点では、電源車が到着すると直ちにユーザ端末の充電が開始され、ユーザは充電が完了したら自宅に戻る。電源車はその地点に集合する全てのユーザの充電を完了したら次の地点に移動する。従って各地点では電源車は  $T \times$

$$\left\lceil \frac{\text{集合するユーザ数}}{n_{\text{charge}}} \right\rceil \text{ [秒]} \text{ だけ停車することになる。}$$

（ $\lceil x \rceil$  は  $x$  以上の最小の整数）本稿では電源車が最初に停車する巡回地点に集合するユーザの中でその地点から最も遠い位置にいるユーザが移動を始める時刻を  $t=0$  とし、全ユーザが充電を終え自宅に戻る時刻  $t_{\text{end}}$  までの時間を総サービス時間と定義する。ここでは総サービス時間を最小化するような巡回地点の数および各地点の位置をなるべく少ない計算量で求める方法を検討する。図 1 の例でいえば、A から最も遠いユーザが移動し始めた時刻から、電源車が最後に停車する D 地点において最後のユーザの充電が完了し D から最も遠いユーザが自宅に戻る時刻までの時間を最小化することを目的とし、電源車の巡回地点の数と各地点を求める方法を検討する。

筆者らは[2]において、図 1 のようにクラスタリングを用いて対象エリアをより小さいエリアに分割し、巡回地点を各小エリア内に限定して選出することで、総当たり法とほぼ総サービス時間特性を実現しつつ、計算時間の短縮を行う方式を提案した。[3]ではこの方式について単一の地域を対象に評価を行ったが、提案手法の有効性をさらに適切に評価するためには、面積、人口密度が異なる様々な地域での評価が必要である。また、そのような地域は山地だと考えられ、災害時において大きな被害を受け、長時間停電することが考えられるので、電源車が特に必要となる。また、面積が大きな地域を被災地として想定した場合、電源車 1 台のみでは大きな被災地をまかなうことができない、そこで、電源車の台数を変更した場合の性能評価を合わせて行

った結果を示す。

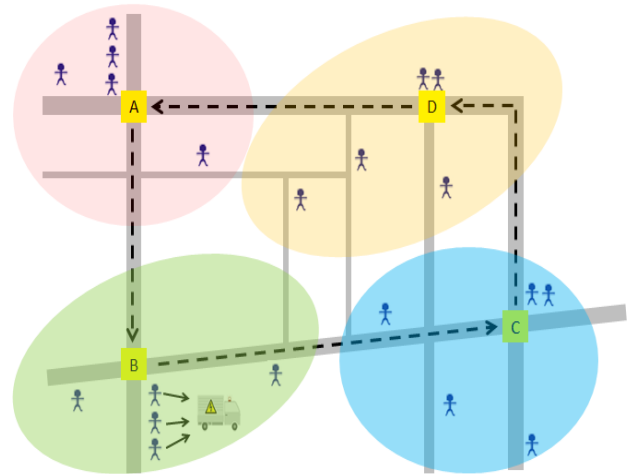


図 1 想定モデル

### 2.2 従来研究の問題点と本論文の問題点

従来研究として、本研究である電源車巡回経路設計の類似研究として給水問題[4]が挙げられる。しかし、給水問題では基本的に一人ずつへの給水を想定しており、今回のように同時に複数の端末に給電可能なモデルにこの手法をそのまま適用すると、後述するように各地点に集合するユーザを決定する際に分割損による総充電時間の増加の問題が生じる。したがって、分割損が生じないような新たな手法を提案する必要がある。

## 3. 従来のユーザグループングと巡回地点決定方式のコンセプト

本節では、筆者らが[3]で提案した、給電車の最大同時給電端末数を考慮したユーザグループングとそれに基づく巡回地点決定方式のコンセプトを述べる。

### 3.1 基本方針

ここでは設定する巡回地点の数  $N$  をまず決定し、次いで  $k$ -means++法をベースとした手法でユーザのグループングを行い、対象地域を  $N$  個のエリアに分割する。その後、各エリア内での中心点から最も近い地点を電源車の巡回地点とする。なお各地点を結ぶ巡回経路は最近追加法[5]により決定する。電源車を複数台巡回させる際には、作成した巡回経路を分割するといった処理を加える。

### 3.2 クラスタリングの効率化に向けたアプローチ

既存の一般的なクラスタリング手法である  $k$ -means++法では、各データを、評価関数の値（通常はそのデータからの距離）が最も小さい中心メンバを持つクラスタに配属させる。 $k$ -means++法を 2.1 節で示したモデルでのユーザグループングにそのまま適用すると、分割損が生じ、総当たり法で求めた最適解と比較して電源車の総充電時間（純粋に全てのユーザの充電を行う総時間を指し、ユーザの移動時

間と電源車の移動時間(含まない値)が増加する。分割損とは、各クラスタのデータ数が 2.1 で定義した  $n_{\text{charge}}$  の整数倍になるようにグルーピングを行わないと電源車の総充電時間が増加する現象のことである。今、対象地域で充電を行うユーザの総人数を  $h$  とすると、 $N=1$  の場合、総充電時間は  $T_{\text{total}} = T * \left\lceil \frac{h}{n_{\text{charge}}} \right\rceil$  ( $\left\lceil \frac{h}{n_{\text{charge}}} \right\rceil$  は  $h/n_{\text{charge}}$  の小数点以下を切り上げた値) である。一方  $N > 1$  の場合、巡回地点  $x_i$  に集合するユーザの数を  $h_i$  とすると総充電時間は  $T_{\text{total}} = T * \sum_{i=1}^N \left\lceil \frac{h_i}{n_{\text{charge}}} \right\rceil$  となる。従って、クラスタリングを行った後、 $x_i$  のクラスタに属するユーザの数  $h_i$  について、 $h_i/n_{\text{charge}}$  が極力整数値にならないと総充電時間が増加する。

[3]では k-means++法でクラスタリングを行った後、各クラスタのデータの数が  $n_{\text{charge}}$  の整数倍になるよう、クラスタ間でデータの所属変更を行う手法を提案した。この手法は所属変更に計算時間を要することが課題になっていた。

本稿では、k-means++によるクラスタリングにおいてデータ間距離の評価指標に適切な重みを加えることで、クラスタリングのみで上記の条件を満たすグルーピングを行う新たな手法を提案する。

#### 4. データ間距離への重み付与によりクラスタメンバ数を調整するユーザグルーピング方式の提案

前節の問題点を解決するため、k-means 法を拡張し、データ間の距離に適応的に重み付けを付与することで各クラスタのメンバ数を予め決められた任意の値、ここでは  $n_{\text{charge}}$  の整数倍に近づける手法を提案する。

1. k-means++法を用いてクラスタ中心の初期値を巡回地点の数に等しい  $N$  個設定する。以下では各々を  $x_i$  ( $i=1,2,\dots,N$ ) と表記する。
2. 対象地域での各ユーザの位置をここではデータと呼び、データの集合を  $X$  で表わす、 $X$  のすべての要素について、 $x$  と各クラスタの中心点  $x_i$  との間で距離コストと呼ぶ値を定義する距離コストはデータと  $x_i$  を結ぶ直線の物理距離に以下で定義される重み  $w(x_i)$  を加えた値である。

$$w(x_i) = D \left( \frac{m}{n} - \text{floor} \left( \frac{m}{n} \right) \right) \quad (1)$$

$m$  は各クラスタに属するデータの数、 $n$  は電源車の最大同時給電端末数、 $D$  は  $x_i$  のクラスタにおける電源車が 1 回充電する間にユーザが移動できる距離を表す。距離コストは後述するようにデータをどのクラスタに所属させるかを決定する際の指標として用いる。

3. クラスタリングを以下の手順で行う。1.で設定した初

期クラスタ中心点  $x_i$  について、 $x_i$  からの物理距離が最も近いデータを 1 つ選び、そのデータから  $x_i$  を含むすべてのクラスタ中心点への距離コストを式(1)で計算し、距離コストが最も小さくなる中心点のクラスタにそのデータを所属させる。すべてのクラスタ中心点でこの処理を行った後、同様に、まだクラスタに割り当てられていないデータの中で各クラスタ中心点から物理距離が最も近いデータを 1 ずつ選び、そのデータからの距離コストが最も小さい中心点そのクラスタに割り当てる処理を繰り返す。

4. ここで、重み  $w(x_i)$  の値は、 $x_i$  のクラスタに割り当てられるデータ数が増加すると共に増大するが、割り当てられたデータ数が電源車の同時充電可能な人数  $n_{\text{charge}}$  の整数倍に達すると 0 に戻る。従って、まだクラスタに割り当てられていないデータから見て、ある中心点への物理距離が小さくともそのクラスタのデータ数が  $n_{\text{charge}}$  の整数倍から離れていればその点への距離コストはより大きくなり、そのクラスタへは割り当てられにくくなる。これにより、前述した分割損の問題にも対応できる。

すべてのデータの割り当てを終えた後、各クラスタについて、クラスタに属するすべてのデータの重心を求めこれを新たなクラスタ中心点とする。

5. 前の反復からクラスタ中心点に変化がないか、または反復数が予め決めた最大反復数  $\text{maxIter}$  に達したら終了し各クラスタ中心  $\{x_i\}$  を巡回地点に決定する。そうでなければ、ステップ 3 に戻る。

各ユーザは自分が属するクラスタ内の巡回地点に移動することとする。

#### 5. 性能評価モデル

対象地域の例として表 1 に示すような面積や人口、人口密度の異なる 3 つの地域を挙げ、2.2 で述べたように地域の交差点および各ユーザの自宅をノード、道路をリンクでモデル化したグラフを対象にシミュレーションによる評価を行った。

表 1 各町の面積や人口、人口密度

	南牧村(低人口密度・広域)	亀岡町(高人口密度・狭域)	草津町(中程度の人口密度・面積)
面積 (km <sup>2</sup> )	118.78	0.92	49.74
人口 (人)	2154	1828	6782
人口密度(人/km <sup>2</sup> )	18	1987	136

各地域は図2～図4のそれぞれで太線で示されている。  
 各々において、電源車は50km/h、ユーザは徒歩を想定して4km/hでそれぞれ道路上を移動することとする。

地点間の移動距離はGoogle mapより求めた。

設定する各巡回地点においてユーザ端末一台が充電する時間を $T=60$ 分、電源車は大型と小型の2種類があり、時間 $T$ で同時に充電できるユーザ端末数の最大値を大型の電源車で $n_{charge}=300$ 、小型の電源車で $n_{charge}=100$ とした。大型と小型はどちらか一方の種類のみが地域を巡回するものとして、大型の電源車の場合は1台が巡回、小型の電源車の場合は $N$ 個の巡回地点を3つに分割してそれぞれを1台が巡回、計3台が巡回するとした。

評価指標としては2. で定義した総サービス時間を用いる。

提案方式の比較対象方式は、総当たり法とk-means++法によるクラスタリングの2つとする。この2方式において選出した巡回地点間の移動順序は最近追加法により決定し、また各ユーザが向かう巡回地点は自宅から最寄りの地点とした。



図2 南牧村



図3 亀岡町



図4 草津町

## 6. 評価結果

### 6.1 大型電源車1台で巡回する場合の対象地域毎の方式性能比較

ここでは大型電源車が1台で巡回する場合において、対象地域ごとに方式間の性能比較を行う。

結果に先立って、提案方式により選出される巡回地点の例として、対象地域が亀岡町（高人口密度・狭域）で巡回地点数 $N=3$ の場合のものを例に、図5に示す。

次に表1に示した3つの地域のそれぞれにおける、各方式による総サービス時間の評価結果を図6から図8に示す。

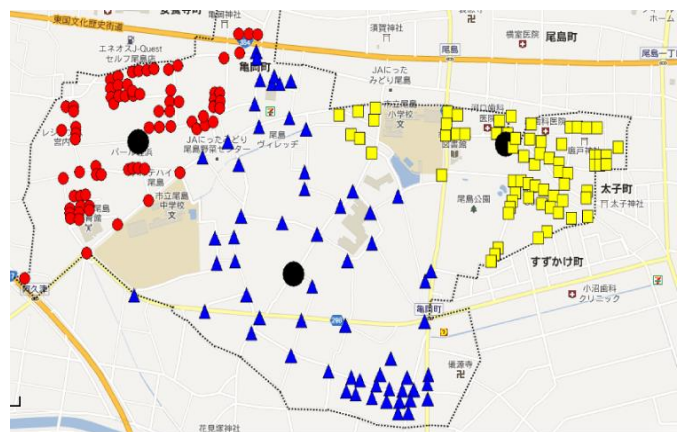


図5 亀岡町を対象とした場合に提案方式で選出される巡回地点（クラスタ数3）

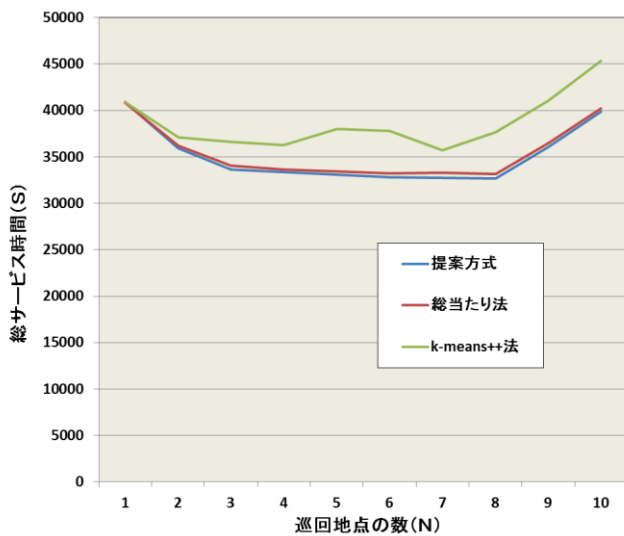


図 6 各方式の性能比較

(対象地域：南牧村 (低人口密度・広域))

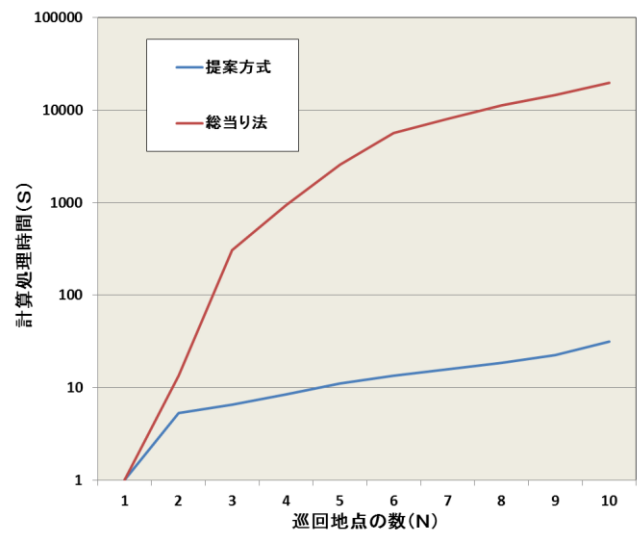


図 9 各方式の計算処理時間の比較

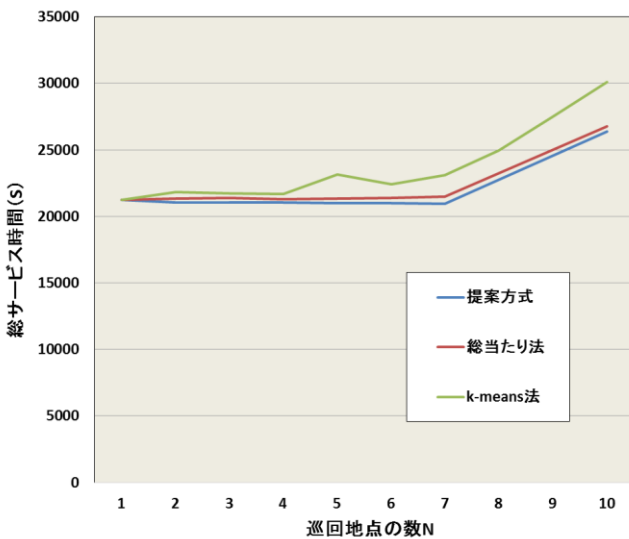


図 7 各方式の性能比較

(対象地域：亀岡町 (高人口密度・狭域))

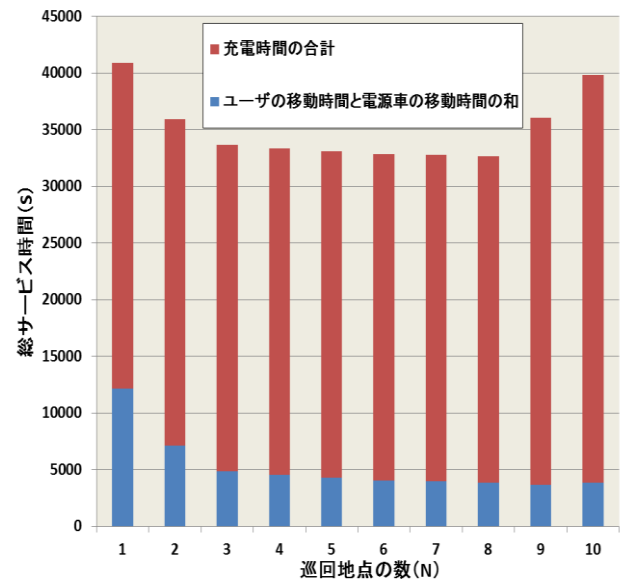


図 10 提案方式の総サービス時間特性

(対象地域：南牧村)

図 5 の結果から、拡張した k-means++法を用いることで均一とはいえないがある程度均等にエリア分割を行うことができた。

図 6, 図 7, 図 8 の結果から、どの地域においても提案方式の総サービス時間は k-means++法から改善がみられ、総当たり法とほぼ同等の結果が得られることが分かる。特に、人口密度が低く、面積が広い地域である南牧村において大きな改善が見られた。これは、人口密度が低く、面積が広い地域の場合、人口分布均等に分散しておらずある数地点に人口が集中すると考えられる。この場合従来の k-means++法を用いると、人口の過密なクラスターと人口が過疎なクラスターに分かれてしまい分割損が多く存在してしまうため、総充電時間が増加してしまうことが考えられる。

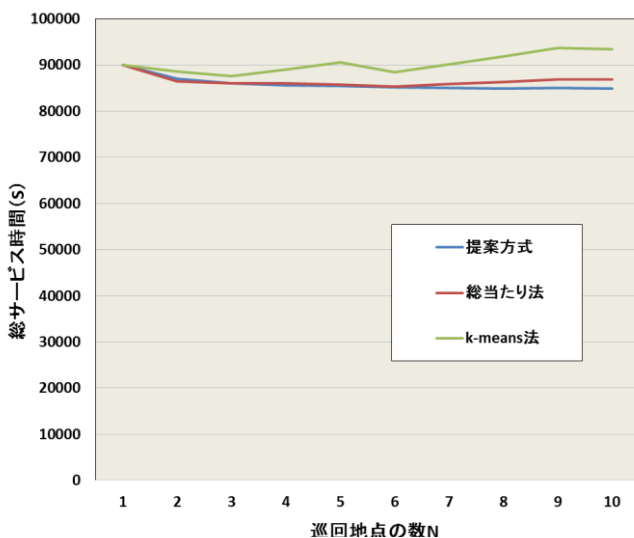


図 8 各方式の性能比較

(対象地域：草津町 (中程度の人口密度・面積))

また、総当たり法より、若干良い結果になるのは、評価基準として用いた総当たり法が巡回地点のみに着目したためである。総当たり法では、巡回地点の位置のみを総当たりで決定しており、ユーザは最寄りの巡回地点に移動するという条件で評価しているため、クラスタ内のメンバ数を調整による補正を行っている提案方式と比較すると総充電時間が増加するためにこのような結果になっている。

さらに図9の結果から、計算処理時間については総当たり法と比較して約90%短縮していることがわかる。

次に各地域において巡回地点Nの数の変化に伴う提案方式による総サービス時間の変動を見ると、人口密度が高く面積が狭い地域である亀岡町では、総サービス時間はNにほとんど依存していない。一方、南牧村や草津町では複数の巡回地点の設けることで総サービス時間が改善することができている。特に、人口密度が低く、面積の広い南牧村において大きな改善が見られた。ただしNの値が8を超えると総サービス時間は増加に転じており、従ってNの最適値は8であると言える。

なおユーザの負担軽減という点ではNの値が大きいほど、各ユーザが割り当てられた巡回地点へ自宅から移動する時間は短くなるため、総サービス時間がNに依存しない場合はNをより大きな値に設定する必要があると考えられる。

図6に示した、南牧村を対象とする結果においてNに最適値が存在することについてより詳しく見るために、提案方式の総サービス時間を総充電時間と総移動時間（ユーザ移動時間+電源車移動時間）に分けて示したものが図9である。図9の各結果において、2で述べたモデルでは、ユーザの分割損がない場合、総充電回数は  $x = \lceil \text{全ユーザ数} / n_{\text{charge}} \rceil$  であり、分割損が存在するとこの値より増加することになる。今回の評価結果では、提案する拡張 k-means++ 法により決定した各巡回地点へ集合するユーザ数がいずれも  $n_{\text{charge}}$  の倍数になっており、このため  $N \leq x$  の範囲では総充電時間はNの値によらず一定となっている。xの値は南牧村では  $x = \lceil 2154/300 \rceil = 8$  であり、Nが8より大きいとかならず分割損が生ずるため電源車の総充電回数がxより常に多くなり、総充電時間が増加している。一方、ユーザの移動時間と電源車の総移動時間の和については、N=8が最小になっている。これは地域の地理的条件で決定される。図6の結果では、以上の2つの要因によりN=8が最適になっていることが分かる。これが特性が悪化している原因であると考えられる。

## 6.2 小型電源車3台で巡回する場合の対象地域毎の方式性能比較

ここでは小型電源車が3台で巡回する場合において、対象地域ごとに提案方式を用いた性能比較を行う。なお小型電源車3台の巡回経路は巡回地点を3つに分割した巡回地点間を結ぶ経路を最近追加法[5]により決定する。表1に示

した3つの地域のそれぞれにおける、提案方式による総サービス時間の評価結果を図11に示す。

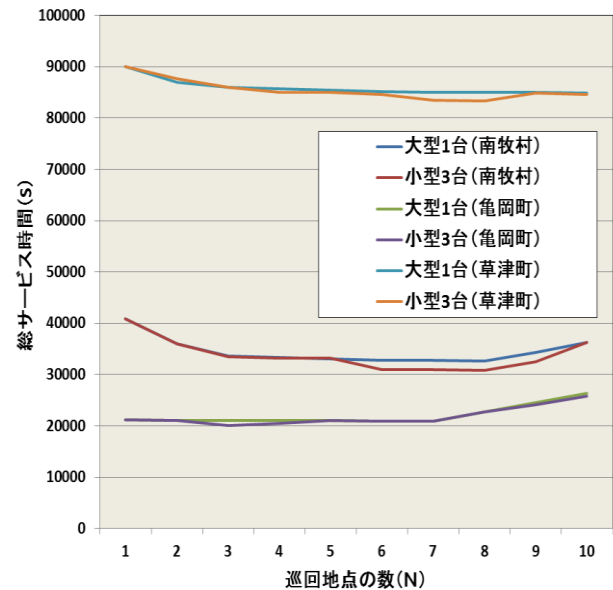


図11 電源車の台数変更時の比較

図11の結果から、大型の電源車1台と小型の電源車3台では、ほぼ同等の結果を得ることができた。これは、同時充電可能な人数が大型1台の場合300人、小型3台の場合100人ずつ可能で合計300人と同人数なためだと考えられる。

## 7. まとめ

本論文では被災時に地域内のユーザ端末を充電するというモデル設定の元で、電源車の巡回地点決定問題を提案し、その解法として総当たり法を用いることなく、拡張したk-means++法を用いたエリア分割法を提案した。性能評価の結果、従来のk-means++法と比較すると、総サービス時間の指標で最大30%の向上を見ることができた。また、計算処理時間についても約90%短縮することができた。

## 参考文献

- [1] 平成23年度 情報通信白書 総務省。
- [2] David Arthur et al., "k-means++: The advantages of careful seeding," Proc. of the eighteenth annual ACM-SIAM symposium on Discrete algorithms, pp.1027-1035, 2007. <http://office.microsoft.com/ja-jp/word-help/CH010097020.aspx>
- [3] 高木俊彰, "災害時の移動電源車巡回を考慮したクラスタリングによる巡回地点決定法の評価" 電子情報通信学会技術研究報告 モバイルマルチメディア通信 MoMuC2012-68, 2013年1月
- [4] 中島和樹 "緊急給水に対する事前防災対策の影響分析手法", 土木計画学研究論文集, 20, pp.331-336, 2003年9月
- [5] Bentley, J. J., "Fast Algorithms for Geometric Traveling Salesman Problem," ORSA Journal on Computing, Vol. 4, pp. 387-411, 1992.