電気軽トラックを活用する農村のための
バッテリー交換ステーションの最適配置方法に関する研究

Study on the Optimum Arrangement Model of the Battery Exchange Station in a Farm Area where Electric Light Trucks are Used

水　林　義　博 [i]　　　上　坂　博　亨
MIZUBAYASHI Yoshihiro　　UESAKA Hiroyuki

農村地帯において，日々の農業活動に使用する軽トラックをEV（電気自動車）化する事でガソリン代を節約する事が期待されている。本研究ではEV化した軽トラックに40km走る程度の交換型バッテリーを搭載し，農業地帯に複数個所の小水力発電所を設けてその場所で充電し，電力の低下したバッテリーを交換するための「バッテリー交換ステーション」を考案した。本論文ではバッテリー交換ステーションを農村地帯に適切に配置するためのモデル化を行い，最適な配置をするためのパラメータを抽出した。その結果，軽トラックの走行密度を表すトリップ密度がある事が示唆された。

キーワード：　バッテリー交換，小水力発電，軽トラック，トリップ密度関数

はじめに

用水など比較的小さな水路に流れる水で発電する小水力発電は，新エネルギー利用等の促進に関する特別措置法における新エネルギーとして定義され，昨今注目を集めているが，本研究では農業用水を流れる水の水力による小水力発電の電気を電気軽トラックに活用することを考える。 JST 社会技術研究開発センターの研究費による研究プロジェクト「小水力を核とした脱温暖化の地域社会形成」では，富山県の黒部川扇状地に広がる農業地帯である入善町において，電気軽トラックの活用方法，及び農業におけるエネルギー需要についてアンケート調査を行った。農業従事者から得られた回答によれば，農業において 1 年を通して安定的にエネルギー需要がある機器は，農作物保管用冷蔵庫と農事用軽トラックのみであった(水林，前田[8])。
また，同アンケート調査では，小水力発電によって発電した電気を電気軽トラックに用いる場合の仕組みとして，次の 1 から 5 の中から最も利用したいものを選択してもらった。

1. バッテリーを供給するバッテリー交換ステーションに行く仕組み
2. バッテリーを配達してもらう仕組み
3. 電気自動車をレンタルにし，自動車ごと交換する仕組み
4. 家の近くの充電スタンドに充電に行き，歩いて家に戻る仕組み

5. 急速充電スタンドまで車で向かう仕組み

最も利用したいものとして最も多くの回答者が選択した方式は，1 のバッテリー交換ステーションでの交換方式であり，全体の 33.7% を占めた[1]。そこで，本研究では小水力発電による電気を電気軽トラックに用いるにあたり，バッテリー交換ステーションにおいてバッテリーを交換する仕組みを考える。1 日の仕事を終えた電気軽トラックは自宅に戻るが，自宅においては電力会社からの電気が供給されているため，自宅において電気軽トラックのバッテリーを充電することも可能であると仮定する。以上の仮定におけるバッテリー交換ステーションの最適配置が，本研究での問題である。

ところで，電気自動車のバッテリーを交換するシステムに関しては，既に提唱され研究されてきた。小柳，瓜生 [4] ではバッテリー交換ステーションの最適配置を考えるにあたり，自宅や職場からの距離に着目し，重み付きボロノイ図を用いて，バッテリー交換ステーションへの平均距離を最小化する手法を議論している。また，本間 [7] ではバッテリー交換ステーションを運用する場合のバッテリーの安全在庫問題に関する研究がある。この研究ではバッテリー交換ステーションにおけるバッテリー数の確率過程を M/M/*s*/*N* 待ち行列モデルを用いて定式化し，バッテリー交換ステーションにおける安全在庫数を見積もっている。

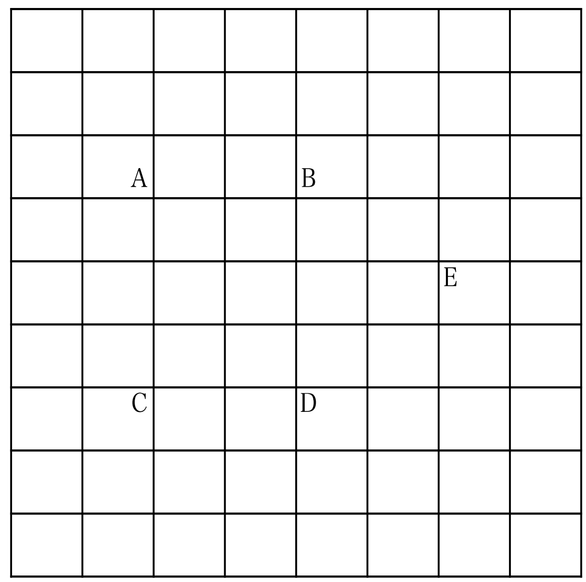

図 1　電気軽トラックのトリップと追加コスト

一方，本研究では電気軽トラックが満充電で自宅を出発し，終日電気軽トラックで動き回るケースを考察する。その場合，通常のボロノイ図を用いて自宅から至近距離にあるバッテリー交換ステーションを考察することは，何の意味も成さない。ここで考察したいことは，満充電のバッテリーを積んだ電気軽トラックがその航続距離よりも長く走る場合，移動の途中で立ち寄りやすいようにバッテリー交換ステーションを配置する問題である。

電気軽トラックのバッテリー交換のタイミングを考えるにあたり，ガソリン自動車での給油のタイミングを考えたい．合理的に給油のタイミングを考える人は，1 日の走行ルートとガソリンスタンドの位置をあらかじめ想定し，どこからどこまで移動する間に，どのガソリンスタンドで給油すべきかを導き出すかもしれない。しかしながら，そのように合理的に給油のタイミングを考える人は希であり，燃料がなくなりそうになってから給油のタイミングを考える人の方が多数を占める。そこで本研究では，電気軽トラックの各トリップに対して，最寄り

[1]最も利用したいものとして 2 番目に多く回答者が選択した方式は，5 の急速充電スタンドに車で向かう仕組みであり，全体の 28.3% を占めた

のバッテリー交換ステーションに立ち寄るための迂回ルートの道のりの総和が最小になるようなバッテリー交換ステーションの配置を考える。

その際，小水力発電による電気によってバッテリーの充電を行うことによって発生する，特殊な制約を考える必要がある。電力系統からの電気を用いて充電スロットを設置する場合は，常識的な範囲内で十分に多くの充電スロットを準備することができる。その場合とは異なり，小水力発電による電気によってバッテリーの充電を行う場合には，設置できる充電スロットの数が制限される。なぜならば小水力発電の発電量は水路を流れる水量によって決まるためである。そこで，場所によって設置可能な充電スロットの数が制限される中で，バッテリー交換ステーションが待ち行列モデルにおいての定常状態が保たれ，かつバッテリーの呼損が起きないバッテリー交換ステーション数，及び充電スロット数を考察したい。

1. モデル

1.1. モデルの説明

まず，本研究における電気軽トラックのトリップについて説明する。電気軽トラックが自宅 A_0 を出発し，1 日を掛けて地点 A_1，地点 A_2，… ，地点 A_n と回る場合，電気軽トラックのトリップとは，2 地点の対 (A_1，A_2)，(A_2， A_{30})，…，(A_{n-1}， A_n) を差す。ただし，各地点 A_1， A_2，… ， A_n は電気軽トラックの運転手が目的を持って訪れる場所であるとする。

ところで，図 1 の直線部分に道があり，電気軽トラックは地点 A から地点 D に向かうものとする。このとき，長方形 ABCD の内部，及びその周上にバッテリー交換ステーションがあるならば，電気軽トラックは地点 A から地点 D への最短の道のりの走行でバッテリー交換ステーションに立ち寄ることができる。しかし，同じく地点 A から地点 D に向かう軽トラックが地点 E のバッテリー交換ステーションに立ち寄るならば，地点 A から地点 D に向かう最短の道のりに加えて，長方形 ABCD と点 E との距離の 2 倍分だけ，余計に走行する必要がある。

このように考えると，トリップ (A， D) に対して，軽トラックがバッテリー交換ステーションに立ち寄る場 合の追加コストは，長方形 ABCD とバッテリー交換ステーションとの距離の 2 倍分の走行であると考えることができる。

他方，4 つの異なるトリップ (A， D)，(D， A)，(B， C)，(C， B) に対して，地点Eのバッテリー交換ステーションへ立ち寄る際の追加コストはすべて等しい。従って，追加コストの考察において，先の 4 つの異なるトリッ プ(A， D)，(D， A)，(B， C)，(C， B)を区別する必要がない。そこで，この 4 つの異なるトリップを同一視し，これらすべてを [A， D] と書くことにする[2] 。すなわち，$[A, D] = [D, A] = [B, C] = [C, B]$ である。

図 1 における考察では，道が長方形を成すように敷設されている状況を考えたが，一般的な農村において，田畑は長方形に区画整理され，それを取り囲むように道が整備されているため，図 1 のように農村を捉えること

[2]厳密な定式化は後で行う.

は妥当であると考えられる。さらにモデルをより単純化するため，道の場所を仮定せず，2 地点間の距離として Manhattan 距離[3]を用いるものとした。

ところで，農村には複数の軽トラックの所有者が存在する。それぞれの軽トラックに対して，複数のトリップが存在し，それらのトリップには密度が考えられる。本研究では，バッテリー交換ステーションの個数 ν を所与とし，ν 個のバッテリー交換ステーションを配置した場合，すべてのトリップに対するバッテリー交換ステーションへの迂回ルートの道のりの総和が最小になるようなバッテリー交換ステーションの配置を考察したい。以下，この問題を厳密に定式化する。

1.2. モデルの検討

農村において複数の電気軽トラックが用いられており，それらの電気軽トラックのバッテリーはすべて取り替え可能であるとする。バッテリーは自宅で充電が可能であるが，村落に存在するバッテリー交換ステーションにおいて交換可能である。村落は平面であると考え，そこに直交座標系を導入する。考えている村落のエリアを S とし，S は 2 次元 Euclid 空間 $\mathbb{R}^2$の部分集合であるとみなす。

次にバッテリー交換ステーションをエリア S 内に ν ヶ所設置するものとする。ただし，$\nu > 0$とする。 ここで，$N = \{1, 2, \cdots, \nu\}$ とする。また，$z_k \in S$ $(k = 1, 2, \cdots, \nu)$ は k 番目のバッテリー交換ステーションの位置を表すものとする。

各トリップには単位時間あたりの軽トラックの発生トリップを表すトリップ密度関数が定義されるものとする。このトリップ密度関数が連続であるものを，以下「理想的なモデル」ということにする。ただ，実際には連続なトリップ密度関数を与えることは難しい。そこで，現実に即した問題を考えるため，エリア S を適当な格子に区切って，離散的にトリップ密度を扱うことにしたい。そのときのモデルを以下では「分析時に用いるモデル」ということにする。

さらに，バッテリー交換ステーションにおける呼損確率も考察したい。そこで，地点 $z \in S$ における設置可能最大充電スロット数を $s(z)$ とする。これは地点 $z \in S$ 付近を流れる水路の流量によって決定される[4]。また，バッテリー交換を希望する電気軽トラックのバッテリーステーションへの到着は，平均 $1/\lambda$ のポアソン過程に従って発生し，バッテリーの充電時間は平均 $1/\mu$ の指数分布に従うものと仮定する。さらに，バッテリー交換ステーション z_k に準備する総バッテリー数を N_k とする。

理想的なモデル

ここでは理想的なモデルを記述する。まず電気軽トラックのトリップを定義する。$\mathbb{R}^2$ の要素に対して同値関係 ~ を次のように定義する。

$$((x,y),(x',y')) \sim ((x',y'),(x,y)) \text{ または } ((x,y),(x',y')) \sim ((x,y'),(x',y)) \tag{1}$$

---

[3] $\mathbb{R}^2$ における Manhattan 距離は、$\boldsymbol{x} = (x、 y)$、$\boldsymbol{x}' = (x'、 y')$ に対して、$\mathrm{dist}(x、x') = |x - x'| + |y - y'|$ により定義される。

[4]地点 $\boldsymbol{z} \in S$ に水路が流れていない場合であっても、付近の水路に発電機を設置し、地点 $\boldsymbol{z} \in S$ まで電線で送電できる場合は、その付近の水路で発電可能な電気料で $s(\boldsymbol{z})$ を決定する。

この同値関係 $\sim$ によって定義される商集合を T と表し，Tの要素をトリップと定義する。この同値関係 $\sim$ による $((x, y), (x', y'))$ の同値類を $[(x, y), (x', y')]$ と表すものとする。この同値類の代表元 $((x, y), (x', y'))$ は $x \leq x'$ かつ $y \leq y'$ をみたすように取ることができる。この空間 T には$\mathbb{R}^4 \cong \mathbb{R}^2 \times \mathbb{R}^2$から自然に誘導される可微分構造が導入できる。また，T には $\mathbb{R}^4$か から自然に誘導される測度が定義できる。その測度を ξ で表す。

トリップ密度を定義する。各トリップ $\tau \in T$ に対して，トリップ τ の密度を $f(\tau)$ で表す。すなわち，単位時間あたり$f(\tau)$ 台の電気軽トラックのトリップ τ が発生するものとする。従って $f(\tau) \geq 0$ である。この関数 $f : T \longrightarrow \mathbb{R}$ をトリップ密度関数というものとする。理想的なモデルにおいては，トリップ密度関数 f が連続であることを仮定する。

トリップとバッテリー交換ステーションとの距離 $d : T \times S \longrightarrow \mathbb{R}$ を定義する。トリップ $\tau = [(x, y), (x', y')] \in T$（ただし，$x \leq x'$ かつ $y \leq y'$とする。）と，バッテリー交換ステーション $\boldsymbol{z} \in S$ に 対して，それらの距離 $d(\tau, \boldsymbol{z})$ を

$$d(\tau, \boldsymbol{z}) = \mathrm{dist}([x, x'] \times [y, y'], \boldsymbol{z}) \tag{2}$$

により定義する。ただし，$[x, x']$ 及び $[y, y']$ は $\mathbb{R}$ における閉区間を表し，dist は $\mathbb{R}^2$ における Manhattan 距離を表すものとする。

ここで，バッテリー交換ステーションの数 ν を所与とし，ν 個のバッテリー交換ステーションの位置からなる列 $(\boldsymbol{z}_1, \cdots, \boldsymbol{z}_\nu)$ を考える。このとき，各トリップからすべてのバッテリー交換ステーションまでの距離の最小値を与える関数 $m(\boldsymbol{z}_1, \cdots, \boldsymbol{z}_\nu) : T \longrightarrow \mathbb{R}$ を定義する。すなわち，任意のトリップ $\tau \in T$ に対して,

$$m(\boldsymbol{z}_1, \cdots, \boldsymbol{z}_\nu)(\tau) = \min_{k \in N} d(\tau, \boldsymbol{z}_k) \tag{3}$$

と定義する。 T 上にはボロノイ領域を定義することができる。k 番目のバッテリー交換ステーションに対するボロノイ領域 $V(\boldsymbol{z}_k)$ は

$$V(\boldsymbol{z}_k) = \{\tau \in T; \arg\min_{\ell \in N} d(\tau, \boldsymbol{z}_\ell) = k\} \tag{4}$$

により定義できる。すなわち，k 番目のバッテリー交換ステーションを利用するのは，電気軽トラックのトリップが$V(\boldsymbol{z}_k)$ に属する場合であると考えられる。$k \neq l$ のとき，2 つのボロノイ領域 $V(\boldsymbol{z}_k)$ と $V(\boldsymbol{z}_l)$ はそれらの交わり $V(\boldsymbol{z}_k) \cap V(\boldsymbol{z}_l)$ が空集合ではないこともあり得るが，T 上で測度 0 の集合である。

以下，バッテリー交換ステーションにおけるバッテリーの呼損確率に関する考察を行いたい。バッテリー交換を目的としてバッテリー交換ステーション $\boldsymbol{z}_k$ を訪れる電気軽トラックの到着は

$$\tilde{\lambda}_k = \tilde{\lambda}_k(\boldsymbol{z}_1, \cdots, \boldsymbol{z}_\nu) := \lambda \int_{\tau \in V(\boldsymbol{z}_k)} f(\tau)\, d\xi \tag{5}$$

として，平均 $1/\tilde{\lambda}_k$ のポアソン過程に従う。 このとき，本間 [7] によれば，バッテリー交換ステーションにおけるバッテリー在庫の確率過程は M/M/s/N待ち行列モデルで表現される。それに従えば，k 番目のバッテリー交換ステーション $\boldsymbol{z}_k$ におけるバッテリーの呼損確率$p_{N_k}(k) = p_{N_k}(\boldsymbol{z}_1, \cdots, \boldsymbol{z}_\nu)(k)$ は,

$$s_k := s(\boldsymbol{z}_k) \tag{6}$$

$$\rho_k := \rho_k(\boldsymbol{z}_1, \cdots, \boldsymbol{z}_\nu) = \frac{\tilde{\lambda}_k(\boldsymbol{z}_1, \cdots, \boldsymbol{z}_\nu)}{s(\boldsymbol{z}_k)\mu} \tag{7}$$

とおくとき,

$$p_{N_k}(k) = p_{N_k}(\boldsymbol{z}_1, \cdots, \boldsymbol{z}_\nu)(k) = \frac{{s_k}^{s_k}}{s_k!}{\rho_k}^{N_k}\left(\sum_{n=0}^{s_k}\frac{(s_k\rho_k)^n}{n!} + \frac{{s_k}^{s_k}}{s_k!}\sum_{n=s_k+1}^{N_k}{\rho_k}^n\right)^{-1} \tag{8}$$

と表される。なお，$\rho_k < 1$ となることが定常分布となるための必要十分条件である。この ρ_k は充電スロットの利用率を表す。

考察する問題は，バッテリー交換ステーションの個数 ν，トリップ密度関数 f，設置可能最大充電スロット数 $s(\boldsymbol{z})$ を所与として，条件

$$\rho_k < 1 \quad (k = 1, 2, \cdots \nu) \tag{9}$$

の下,

$$\int_{\tau \in T} m(\boldsymbol{z}_1, \cdots, \boldsymbol{z}_\nu)(\tau) f(\tau)\, d\xi \tag{10}$$

を最小化する ν 個のバッテリー交換ステーションの位置 $\boldsymbol{z}_1, \cdots, \boldsymbol{z}_\nu \in S$ を求めることである[5]。

最後に呼損確率について考える。許容可能な呼損確率を δ とする。いま上記最小化問題の解 $\boldsymbol{z}_1, \cdots, \boldsymbol{z}_\nu \in S$ が存在すれば，それらの解が条件 (9) をみたしていることから,

[5]条件 (9)，(12) を満たす $\boldsymbol{z}_1, \cdots, \boldsymbol{z}_\nu \in S$ が存在する最小の ν を考察することにより，エリア S におけるバッテリー交換ステーションの最低限必要な設置箇所数を求めることができる．また，式 (10) は，ボロノイ領域 $V(\boldsymbol{z}_k)$ を用いて

$$\int_{\tau \in T} m(\boldsymbol{z}_1, \cdots, \boldsymbol{z}_\nu)(\tau) f(\tau)\, d\xi = \sum_{k=1}^{\nu} \int_{\tau \in V(\boldsymbol{z}_k)} d(\tau, \boldsymbol{z}_k) f(\tau)\, d\xi$$

と書くことができる．

$$\lim_{N_k \to \infty} p_{N_k}(k) = 0 \quad (k = 1, 2, \cdots \nu) \tag{11}$$

である。従って，N_k を十分に大きく選ぶことにより，呼損確率を δ 未満に抑えることができる。

分析時に用いるモデル

ここでは，分析時に用いるモデルについて記述する。なお，理想的なモデルにおける記述と異なる部分についてのみ詳述する。$A = \{1, 2, \cdots \alpha\}$, $B = \{1, 2 \cdots \beta\}$ とし，実数 $x_i\ (i = 0, 1, \cdots, \alpha)$ と実数 $y_j\ (j = 0, 1, \cdots, \beta)$ を，次のように取る。

$$x_{i+1} - x_i = x_i - x_{i-1} > 0 \ (i = 1, 2, \cdots, \alpha - 1) \tag{12}$$

$$y_{j+1} - y_j = y_j - y_{j-1} > 0 \ (j = 1, 2, \cdots, \beta - 1) \tag{13}$$

$$x_{i+1} - x_i = y_{j+1} - y_j \ (i = 0, 1, \cdots, \alpha; j = 0, 1, \cdots, \beta) \tag{14}$$

さらに，$\mathbb{R}$ の部分集合 $X_i\ (i \in A)$ と $Y_j (j \in B)$ は，$(x_i)_{i \in A \cup \{0\}}$ と $(y_j)_{j \in B \cup \{0\}}$ を用いて，

$$X_i = \{x \in \mathbb{R}; x_{i-1} \le x < x_i\} \ (i \in A) \tag{15}$$

$$Y_j = \{y \in \mathbb{R}; v_{i-1} \le y < v_i\} \ (j \in B) \tag{16}$$

と表されるものとする。このとき，$\{X_i \times Y_j\}_{(i,j) \in A \times B}$ がエリア S を被覆すること，すなわち

$$S \subset \bigcup_{(i,j) \in A \times B} X_i \times Y_j \tag{17}$$

を仮定する。また，インデックス対の集合 I を

$$I = \{(i, j) \in A \times B; (X_i \times Y_j) \cap S \neq \emptyset\} \tag{18}$$

により定義する。以上により，S が格子によって正方形の区画に分けられ，1 つの区画は I に属する (i, j) により $X_i \times Y_j$ と表される。この $X_i \times Y_j$ をエリア (i, j) と呼ぶことにする。

また，k 番目のバッテリーステーションの存在エリアを (m_k, n_k) と表すことにする。すなわち，$z_k \in X_{m_k} \times y_{n_k}$ をみたしている。

トリップを定義する。まず，I^2 の要素に対して同値関係 $\sim$ を次のように定義する。

$$((i,j),(i',j')) \sim ((i',j'),(i,j)) \text{ または } ((i,j),(i',j')) \sim ((i,j'),(i',j)) \tag{19}$$

この同値関係 $\sim$ によって定義される商集合を T と表し，T の要素をトリップと定義する。この同値関係 $\sim$ による $((i, j), (i', j'))$ の同値類を $[(i, j), (i', j')]$ と表すものとする。この同値類

$[(i,\ j),\ (i',\ j')]$ の代表元 $((i,\ j),\ (i',\ j'))$ は $i \le i'$ かつ $j \le j'$ をみたすように取ることができる。実際には，表 1 に示す次の 4 つの移動を同一視し，記号 $[(i,\ j),\ (i',\ j')]$ で表すものとする。

表 1　トリップ $[(i,\ j),\ (i',\ j')]$ の出発エリアと到着エリア

出発エリア	到着エリア
$(i,\ j)$	$(i',\ j')$
$(i,\ j')$	$(i',\ j)$
$(i',\ j)$	$(i,\ j')$
$(i',\ j)$	$(i,\ j)$

トリップ密度を定義する。各トリップ $\tau \in T$ に対して，τ の密度を $f(\tau)$ で表す。ただし，$f(\tau) \ge 0$ である。この関数 $f : T \longrightarrow \mathbb{R}$ をトリップ密度関数というものとする。

トリップとバッテリー交換ステーションの存在エリアとの距離 $d : T \times I \longrightarrow \mathbb{Z}$ を定義する。トリップ $\tau = [(i,\ j),\ (i',\ j')] \in T$（ただし，$i \le i'$ かつ $j \le j'$ とする。）と，バッテリー交換ステーションの存在エリア $(m,\ n) \in I$ に対して，τ と $(m,\ n)$ の距離 $d(\tau,\ (m,\ n))$ を

$$d(\tau, (m,n)) = \mathrm{dist}([i,i'] \times [j,j'], (m,n)) \tag{20}$$

により定義する。ただし，$[i,\ i']$ は R における閉区間を表し，dist は $\mathbb{R}^2$ における Manhattan 距離を表すものとする。

T 上におけるボロノイ領域を定義する。k 番目のバッテリー交換ステーションの存在エリアに対するボロノイ領域 $V(m_k,\ n_k)$ は

$$V(m_k, n_k) = \{\tau \in T; \arg\min_{\ell \in N} d(\tau, (m_\ell, n_\ell)) = k\} \tag{21}$$

により定義できる。すなわち，k 番目のバッテリー交換ステーションを利用するのは，電気軽トラックのトリップが $V(m_k,\ n_k)$ に属する場合であると考えられる。理想的なモデルにおいては，$k \neq l$ のとき， 2 つのボロノイ領域 $V(\boldsymbol{z}_k)$ と $V(\boldsymbol{z}_l)$ の交わり $V(\boldsymbol{z}_k) \cap V(\boldsymbol{z}_l)$ は T 上で測度 0 の集合であったため，確率的にはこの交わりを無視できた。しかしながら，分析時におけるモデルにおいては，離散化したために，その交わり $V(m_k,\ n_k) \cap V(m_l,\ n_l)$ を無視できない。そこで，バッテリー交換ステーション $\boldsymbol{z}_k$ への電気軽トラックの到着間隔 $\tilde{\lambda}_k = \tilde{\lambda}_k\left((m_1,\ n_1),\ \cdots,\ (m_v,\ n_v)\right)$ を記述するため，どの最寄りのエリアのバッテリー交換ステーションが選択されるかは，最寄りのエリアのバッテリー交換ステーションの中から等しい確率で選択されるものと仮定する。各トリップ $\tau \in T$ に対して，離散化された最寄りのバッテリーステーションの個数 $\sigma(\tau)$ を

$$\sigma(\tau) := \#\{k \in N; \tau \in V(m_k, n_k)\} \tag{22}$$

により定義するとき，

$$\tilde{\lambda}_k = \tilde{\lambda}_k(\boldsymbol{z}_1, \cdots, \boldsymbol{z}_\nu) := \lambda \sum_{\tau \in V(\boldsymbol{z}_k)} \frac{f(\tau)}{\sigma(\tau)} \tag{23}$$

と表される。ただし，記号 # は集合の要素の個数を表す。

バッテリー交換ステーションにおけるバッテリーの呼損確率 p_{N_k} 充電スロットの利用率 ρ_k は，先の理想的なモデルと同様に与えられる。なお，設置可能最大充電スロット数は各エリアごとに与えられ，各エリア $(m,\ n)$ に対して，設置可能最大充電スロット数 $s(m,\ n)$ が与えられているものとする。

ここで，バッテリー交換ステーションの数 ν を所与とし，バッテリー交換ステーションの存在エリアからなる列 $\left((m_1,\ n_1),\ \cdots,\ (m_\nu,\ n_\nu)\right)$ を考える。このとき，各トリップからすべてのバッテリー交換ステーションまでの距離の最小値を与える関数 $m((m_1, n_1), \cdots, (m_\nu, n_\nu)) : T \longrightarrow \mathbb{Z}$ は，理想的なモデルと同様に

$$m((m_1, n_1), \cdots, (m_\nu, n_\nu))(\tau) = \min_{k \in N} d(\tau, (m_k, n_k)) \quad (\tau \in T) \tag{24}$$

と定義される。

考察する問題は，バッテリー交換ステーションの個数 ν，トリップ密度関数 f，設置可能最大充電スロット数 s(m,　n) を所与として，条件

$$\rho_k < 1 \quad (k = 1, 2, \cdots \nu) \tag{25}$$

の下，

$$\sum_{\tau \in T} m((m_1, n_1), \cdots, (m_\nu, n_\nu))(\tau) f(\tau) \tag{26}$$

を最小化する ν 個のバッテリー交換ステーションの配置エリア $\left((m_1,\ n_1),\ \cdots,\ (m_\nu,\ n_\nu)\right)$ を求めることである。

2.　トリップ密度関数の推定

前述の最小化問題を考えるにあたり，ある農村におけるトリップ密度関数を推定したい。前節「分析時に用いるモデル」において述べた通り，農村のエリア S をいくつかの格子に分割する。次に，トリップ密度関数の推定のため，農村のエリア S 内の複数の軽トラックに GPS と測位の記録装置を取り付ける。軽トラックの位置が 5 分以上変わらない場合，その場所が軽トラックの運転手の目的地のひとつであると見なし，その位置を記録する。これによってトリップがカウントされトリップ密度関数を推定できる。

おわりに

本稿では，電気軽トラックが運用されている農村において電気軽トラックのバッテリーの電気を小水力発電で賄うことを想定した。バッテリー交換ステーションの設置場所によって，小水力発電によって発電できる発電量の上限が決まることから，バッテリー交換ステーションのバッテリーが呼損しないためのバッテリーの数と充電スロットの個数の条件を導出した。バッテリー交換ステーションが設置できる条件についてM/M/s/N 待ち行列モデルを元に検討した結果，その必要十分条件は，バッテリー交換ステーションの稼働率が1 以下であることが明らかになった。また，バッテリー交換ステーションの稼働率が1 以下であれば，バッテリーの在庫を十分に大きくすることによって，呼損確率をある値未満に抑えられることが明らかになった。また，対象としている農村全体において，バッテリー交換スタンドに立ち寄るための迂回路の総和が最も小さくなるという条件を数式を用いて表現した。本稿では，最適配置の問題を明らかにしただけであり，その解き方を示していない。続く研究では，その数値的な解き方を与えたい。

また，今回提示した問題も修正の余地がある。特に，本稿ではバッテリー交換スタンドへ立ち寄る電気軽トラックの分布が終日一定であることが仮定されているが，その台数の分布は時間帯によって変化すると考えられる。その場合のバッテリー交換ステーションが設置できる条件については本稿では検討していない。以上の課題を踏まえて，今後はより実用に近いバッテリー交換ステーションの配置問題を検討し，バッテリー交換ステーションの配置を求めるプログラムを作成したい。

謝辞：前田隆先生（金沢大学人間社会研究域経済学経営学系教授）にはモデルの作成に関する提案とアドバイスを賜りました。ここに謹んで御礼申し上げます。

参考文献

[1] S. Rahman, G. B. Shrestha:'An investigation into the impact of electric vehicle load on the electric utility distribution system', "IEEE Transactions on Power Delivery", Vol. 8, No. 2, pp. 591-597, 1993.

[2] M. M. Collons, G. H. Mader:'The timing of EV recharging and its effect on utilities', "IEEE Transactions on Vehicular Technology", Vol. 32, No. 1, pp. 90-97, 1983.

[3] P. T. Staats, W. M. Grady, A. Arapostathis, R. S. Thallam:'A statistical analysis of the effect of electric vehicle battery charging on distribution system harmonic voltages', "IEEE Transactions on Power Delivery", Vol. 13, No. 2, pp. 640-646, 1998.

[4] 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」, 『電気学会 論文誌 B』, Vol. 119, No. 12, pp. 1412-1419, 1999.

[5] 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」, 『電気学会 論 文誌. B, 電力・エネルギー部門誌』, Vol. 117, No. 1, pp. 41-46, 1996-12-20.

[6] 石亀 篤司, 松田 真典: 「充電インフラの適正配置に関する検討」, 『オペレーションズ・リサーチ：経営 の科学』, Vol. 56, No. 7, pp. 388-394, 2011-07-01.

[7] 本間 裕大: 「EV バッテリー交換ステーションにおける安全在庫モデル」, 『オペレーションズ・リサーチ：経営の科学』, Vol. 55, No. 6, pp. 347-352, 2010-06-01.

[8] 水林 義博, 前田 隆:「農業用水を利用した小水力発電を取り巻く法律・制度の現状と課題」, 『金沢大学大学院人間社会環境研究』, Vol. 21, pp. 69-82, 2011-03-31.

[9] 岡部 篤行, 鈴木 敦夫: 『最適配置の数理』, 朝倉書店, 1992.

[10] 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.

---

i 金沢大学大学院人間社会環境研究科、〒920-1192 金沢市角間町、電話：076-264-5454, 5555