# 電気自動車のインフラ整備計画手法の検討 -待ち行列理論による-

卜部　静香[†1]　　奥田　隆史[†1]
井手口　哲夫[†1]　　田　学軍[†1]

我々は，地球温暖化や化石燃料の枯渇問題などの環境問題を抱えている．これらの解決策として，排気ガスを出さず，CO2 排出量が少ないなどの利点をもつ電気自動車を普及させることが挙げられる．しかし，電気自動車は連続航続距離が短い，電気自動車のバッテリー充電時間が長い，そして充電設備などのインフラ整備が不十分である，などの問題を抱えている．本稿では，インフラ整備が不十分である問題に着目していき，消耗したバッテリーの充電，もしくは交換のどちらかをおこなう EV ステーションの構成を提案する．そして，それぞれの設備のサーバー数について確率モデルによって検討する．

# Planning Method of Electric Vehicle Infrastructure -Using Queuing Theory-

Shizuka URABE,[†1] Takashi OKUDA,[†1]
Tetsuo IDEGUCHI[†1] and Xuejun Tian[†1]

There are environmental concerns such as global warming and oil fuel depletion. In order to solve these problems, we need to increase the use of the electric vehicles. But electric vehicles have problems such as the shortage of mileage range of electric vehicles, long recharging time for batteries, and the lack of infrastructures for electric vehicles such as EV charging station, to support their widespread use.

In this paper, we will discuss the shortage of electric vehicle infrastructure and make a proposition for EV station that can either charge or exchange batteries. We will also discuss the required equipment that is needed by probabilistic models of EV stations.

## 1. はじめに

我々は，地球温暖化という深刻な危機に直面している[1)]．この問題は十数年前から指摘されていたが，2007 年 2 月に発表された IPCC(気候変動のための政府間パネル) による第四次評価報告書により，改めてその深刻さが明らかにされた[2)]．第四次評価報告書によると，地球温暖化の原因は，$CO_2$ などの「温室効果ガス」の急激な増加と考えられている．大気中の $CO_2$ 濃度は今から 200 年ほど前に起きた産業革命以前と比較して 30% 以上増加し，その影響により過去 100 年間に平均気温が 0.74 ℃上がると予想している．また，人類がこのままのペースで温暖化ガス ($CO_2$ の他フロン，メタンなども含む) を排出し続けると，今世紀末までに気温がさらに 1.1〜6.4 ℃上がると予想している．気温上昇が 1 ℃程度なら，我々の生活には大きな影響はない．しかし，もし 6 ℃上がると，海面の上昇，気候パターンの大きな変動，病虫害の蔓延などにより，農業をはじめとする産業が大きな影響を受け，現在の文明を維持することが難しくなると予想されている．

このような地球温暖化に加えて，我々は，石油を中心とした化石燃料資源の枯渇問題にも直面している．石油はあと数十年で枯渇するといわれている．もともと資源量が限られていることに加えて，近年の中国，インドなど新興国での需要増が主な原因である．

さて，石油を一番多く使うのは自動車である．全石油使用量のうち，日本では 40% 弱，アメリカ，カナダなどでは 60% が自動車によって消費されている．そこで，石油に代わって電気を使用し，走行中に排気ガスを出さない電気自動車 (以下，EV) が注目されている．

EV は，バッテリーに蓄えた電気でモーターを回転させて走るため，$CO_2$ の排出量が少なく，走行騒音も大幅に減少される[3)]．しかし，EV には 3 つの問題点がある．

**(1)** 連続航続距離の短さ

例えば，三菱自動車の軽自動車「i」は，1 回の給油で 650km 以上走れる．対する「i-MiEV」は，一充電で可能な走行距離は 160km であり,「i」の四分の 1 でしかない[4)]．また，車内の冷暖房を使用することによって，連続航続距離をさらに短くする．冷房については，ガソリン車の場合と同様に，EV も燃費が悪化する．しかし，暖房については，ガソリン車ではエンジンからの廃熱をそのまま使用するため航続距離に影響はないが，EV の場合モーターはほとんど発熱しないため，わざわざ熱を発生させなければな

†1 愛知県立大学大学院 情報科学研究科
Graduate School of Information Science and Technology, Aichi Prefectural University

らず，EV のバッテリーの電気を消耗し，航続距離を低下させる．

**(2)** バッテリー充電時間の長さ

EV は，一般家庭で充電する家庭充電 (100V，200V) と，出先などで短時間で充電できる急速充電 (3 相 200V) の電源に対応している．一般家庭の 100V 電源を使った場合，フルに充電するには 14 時間かかり，200V 電源を使えば半分の 7 時間になる．また，急速充電では約 30 分で 80% 程度の充電が可能である．

**(3)** 充電設備などのインフラ整備の不十分さ

(1) の問題点から，EV は充電設備を従来のガソリンスタンドより多く利用する必要がある．しかし，まだ充電設備は整っていないことが現状である．また，(2) の問題点から，充電設備で大混雑が発生する恐れがある．

本稿では，(3) の問題点に着目し，EV のバッテリーを充電，または交換をおこなう EV ステーションの構成を提案する．そして，それぞれの設備のサーバー数について確率モデルによって検討する．

以下，2 節では，本稿で提案する EV ステーションの構成について説明する．3 節では，EV ステーションの構成を待ち行列モデルとして表す．4 節では，EV ステーションの構成のシミュレーションをおこない，その結果に対する検討と考察をおこなう．最後に 5 節で，まとめと今後の課題について述べる．

## 2. EV ステーション

本稿で提案する EV ステーションは大別すると，EV のバッテリー充電をおこなう**充電スタンド**と EV のバッテリー交換をおこなう**バッテリー交換ステーション**で構成されている．また，**バッテリー交換ステーション**ではさらに**バッテリー交換スペース**と**充電システム**で構成されている (図 1 参照)．

以下，2.1 節では充電スタンド，2.2 節ではバッテリー交換ステーションの詳細を述べる．

### 2.1 充電スタンド

充電スタンドでは，EV のバッテリー充電をおこなう．EV のバッテリー充電方法は，2 種類ある[5]．ひとつは，一般家庭用電源と同じ交流電源 (単相 100 ボルト (普通充電) あるいは単相 200 ボルト (倍速充電)) を用いた充電器で満充電する方法である．この充電方法では，バッテリーが満充電状態になるまでおおよそ 4〜8 時間程度要する．もうひとつは，急速充電器でバッテリーを急速充電する方法である．EV 用の急速充電器は，一般的に約 30 分で EV の空のバッテリーを約 80%充電することができる．

充電スタンドでは，後者の急速充電器で EV のバッテリー充電をする．

### 2.2 バッテリー交換ステーション

ここでは，2.2.1 節でバッテリー交換スペース，2.2.2 節で充電システムの説明をする (付録 B 参照)．

#### 2.2.1 バッテリー交換スペース

バッテリー交換スペースでは，EV の消耗したバッテリーを交換設備で EV から取り外し，満充電状態のバッテリーと交換する仕組みになっている[7]．交換作業は全て機械によっておこなわれ，その交換時間はガソリンスタンドでの給油よりも短時間で完了する．

#### 2.2.2 充電システム

バッテリー交換スペースで交換されたバッテリーは，充電システムに移動される．移動されたバッテリーは，2.1 節で述べた充電器でバッテリー充電がおこなわれる．

バッテリー交換スペースで EV から取り外したバッテリーは，充電システムの収納棚 A に収容される．①充電システムが保有している充電器が空くまで，バッテリーは，充電器が空くまで収納棚 A で待機し，②充電器が空き次第，バッテリーを収納棚 A から取り出し，充電器を用いて充電を開始する．③充電終了後，満充電状態となったバッテリーは収納棚 B に収容される．よって，バッテリー交換スペースに到着した EV のバッテリーは，収納棚 B から取り出した満充電済みのバッテリーと交換される仕組みとなる．

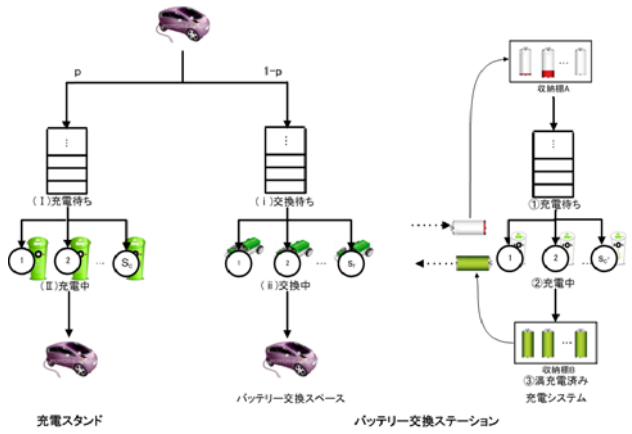



**図 1** EV ステーション

## 3. 評価モデル

EV ステーションでは，EV は確率 $p$ でバッテリー充電，確率 $1-p$ でバッテリー交換のどちらかを利用する．EV が，EV ステーションに到着してからの流れを説明する (図 2 参照)．

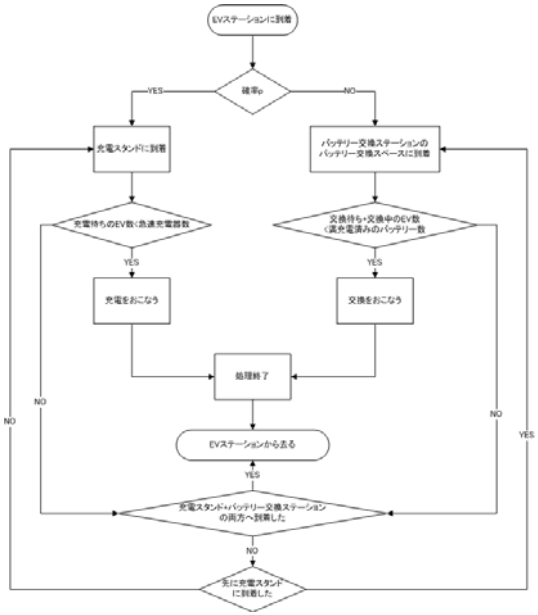



**図 2** EV ステーションの流れ

### 3.1 充電スタンド (充電スタンド非利用率 ($P_{L1}$))

EV は，EV ステーションに到着した時，確率 $p$ である場合，充電スタンドへ移動する．EV は充電スタンドに到着したら，(I) 急速充電器が空くまで待機し，(II) 急速充電器が空き次第，充電をおこなう．EV は充電終了次第，充電スタンドから去る．

ただし，充電スタンドで充電待ちが可能な EV の数は，急速充電器の数までとする．もし EV が充電スタンドに到着した時点で，急速充電器と同数の EV が充電待ちをしていた場合，充電スタンドを利用することができないので，EV はバッテリー交換ステーションを利用することとする．充電スタンドが利用できない時の確率を，ここでは充電スタンド非利用率 ($P_{L1}$) という．

なお，充電スタンドは，待ち行列モデルとして表せれる．この待ち行列の EV の到着間隔は間隔が独立な一般分布，サービス時間 (充電時間：$\mu_c^{-1}$) は指数分布に従っており，窓口 (サーバ：急速充電器) は $s_c$ 個ある．また，この待ち行列の系内数である EV の台数は，急速充電器の 2 倍の数までという制限をつけているため，待ち行列 $GI/M/s/N$ となる[6]．

### 3.2 バッテリー交換ステーション

EV が EV ステーションに到着した時，確率 $1-p$ である場合，バッテリー交換ステーションへ移動する．そしてさらに，バッテリー交換ステーション内のバッテリー交換スペースへ移動する．

#### 3.2.1 バッテリー交換スペース (バッテリー交換スペース非利用率 ($P_{L2}$))

EV はバッテリー交換スペースに到着したら，(i) 交換設備が空くまで待機し，(ii) 交換設備が空き次第，バッテリー交換をおこなう．交換終了後，EV はバッテリー交換スペースから去る．そして，交換終了後，EV は EV ステーションから去る．

ただし，バッテリー交換スペースに到着した時，すでに充電システムの収納棚 B 内の満充電済みのバッテリー数と同数の EV が交換待ちと交換処理をおこなっていた場合，EV はバッテリー交換スペースを利用することができない．そのため，EV はバッテリー交換スペースから去り，充電スタンドへ移動する．バッテリー交換スペースが利用できない時の確率を，ここではバッテリー交換スペース非利用率 ($P_{L2}$) という．

なお，バッテリー交換スペースも充電スタンドと同様に，待ち行列モデルとして表せれる．この待ち行列の EV の到着間隔は間隔が独立な一般分布，サービス時間 (交換時間：$\mu_r^{-1}$) は一定分布に従っており，窓口 (サーバ：交換設備) は $s_r$ 個ある．また，この待ち行列の系内数である EV の台数は，充電システムの収納棚 B 内の満充電済みのバッテリー数と同数までという制限をつけているため，待ち行列 $GI/D/s/N$ となる．

#### 3.2.2 充電システム

充電システムには，バッテリー交換スペースで交換されたバッテリーが収納棚 A に到着する．収納棚 A にバッテリーが増えるたびに，収納棚 B からバッテリーが引き抜かれるため，充電システム内のバッテリー数 ($N$ 個) は常に一定であるといえる．

充電システムも待ち行列モデルとして表すことができる．この待ち行列の EV の到着間隔は間隔が独立な一般分布，サービス時間 (充電時間：$\mu_{c'}^{-1}$) は指数分布に従っており，窓口 (サーバ：充電器) は $s_{c'}$ 個ある．また，この待ち行列の系内数であるバッテリー数は $N$ 個という制限があるため，待ち行列 $GI/M/s/N$ となる．

### 3.3 EV ステーション非利用率 ($P_{L3}$)

確率 $p$ で充電スタンドに到着したが利用できない場合，バッテリー交換スペースを利用する．しかし，バッテリー交換スペースも利用できない場合がある．同様に，確率 $1-p$ でバッテリー交換スペースに到着したが利用できず，充電スタンドへ移動したが，充電スタンドも利用できない場合がある．この時，充電スタンドとバッテリー交換スペースの両方利用できない確率を，ここでは EV ステーション非利用率 ($P_{L3}$) という．

## 4. 数 値 例

本稿では，待ち行列モデルとして表した EV ステーションの構成のシミュレーションをおこなう．シミュレーションには，離散シミュレータ CSim20 を利用した[8]．また，シミュレーション結果は 5 回の平均で算出する．

充電スタンド，バッテリー交換スペース，充電システムの 3 つの設備には，サーバーである急速充電器，交換設備，充電器をそれぞれ計 $s_c$，$s_r$，$s_{c'}$ 個保有している．各サーバーの処理時間は，平均 $\mu_c^{-1}$，$\mu_r^{-1}$，$\mu_{c'}^{-1}$ の指数分布，一定分布，指数分布に伴うものとする．また，充電システム内に存在するバッテリー数は常に一定であり，その数を $N$ 個とする．

本稿では，$\mu_c^{-1}=30$，$\mu_r^{-1}=240$，$\mu_{c'}^{-1}=1.25$ とした．単位時間は [分] を想定してある．また，確率 $p=1/10$ とする．

### 4.1 シミュレーション結果

#### 4.1.1 EV の到着間隔が指数分布に従う場合

ここでは，EV の到着間隔が平均 $\lambda^{-1}$ の指数分布に従う場合のシミュレーションをおこなう．図 3〜5 は，充電スタンド非利用率 ($P_{L1}$)，バッテリー交換スペース非利用率 ($P_{L2}$)，EV ステーション非利用率 ($P_{L3}$) である．この時，$\lambda^{-1}=3$，急速充電器 $s_c=2,3,4$ 台，交換設備 $s_r=1$ 台，バッテリー $N=110,130,150$ 個とする．

図 3 と図 5 のグラフより，結果が 3 種類に分かれる結果となった．これらの結果より，$P_{L1}$ と $P_{L3}$ はバッテリーの数ではなく，急速充電器の数によって結果が異なることがいえる．また図 4 より，$P_{L2}$ はほぼ一つの結果になり，この結果からバッテリー交換スペースでは，$P_{L2}$ は急速充電器とバッテリーの数に依存しないということがいえる．また，各図を見ていくと，充電システムの充電器が 80 台以上になると，各設備の非利用率が収束することとなった．これらの結果から，今回の数値例においては，充電システムの充電器数は 80 台以上用意する必要はないということがわかる．

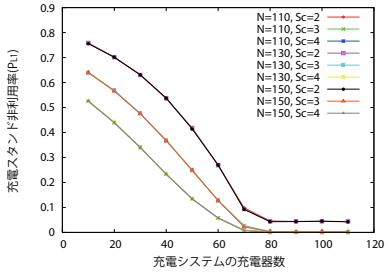



**図 3** 充電スタンド非利用率： PL1

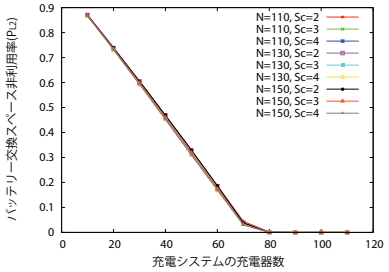



**図 4** バッテリー交換スペース非利用率：PL2

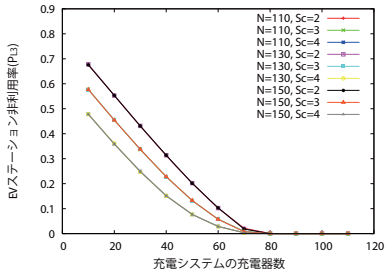



**図 5** EV ステーション非利用率：PL3

#### 4.1.2 EV の到着間隔がさまざまな分布に従う場合

ここでは，EV の到着間隔が平均 $\lambda^{-1}$ の

- 指数分布
- 超指数分布
- 一定分布

に従う場合のシミュレーションをおこない，それらの比較結果を考察する．図 6〜8 は，先ほどと同様に充電スタンド非利用率 ($P_{L1}$)，バッテリー交換スペース非利用率 ($P_{L2}$)，EV ステーション非利用率 ($P_{L3}$) である．この時，$\lambda^{-1}=3$，急速充電器 $s_c=2$ 台，交換設備 $s_r=1$ 台，バッテリー $N=110$ 個とする．また，超指数分布は平衡条件を満たすものとし，平方変動係数 $Ca^2=16$ とする (パラメータの決め方は，付録 A 参照)．

各図より，EV の到着間隔が超指数分布に従う時が，充電スタンド非利用率 ($P_{L1}$)，バッテリー交換スペース非利用率 ($P_{L2}$)，EV ステーション非利用率 ($P_{L3}$) がともに一番高いことがわかる．このことから，EV の到着間隔が超指数分布に従う場合，指数分布，一定分布

と比べるとさらに充電システムの充電器の数が必要であることがわかる．

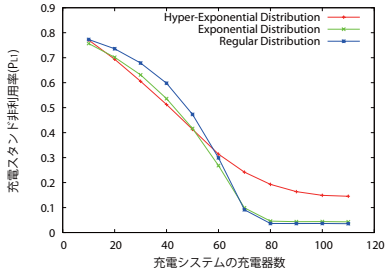



**図 6**　充電スタンド非利用率： PL1

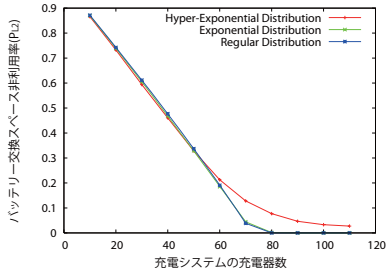



**図 7**　バッテリー交換スペース非利用率：PL2

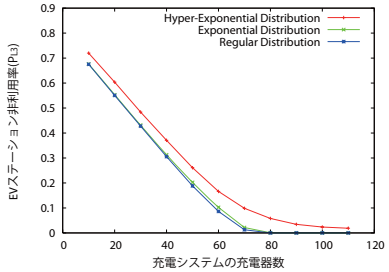



**図 8**　EV ステーション非利用率：PL3

### 4.1.3　バッテリー劣化を考慮した場合

バッテリーは，使い続けると劣化し，その寿命は 1000 回である[9)]．劣化したバッテリーは消耗するのが早いため，充電システムから取り除くとする．つまり，前節で充電システム内のバッテリー数は一定であると述べたが，バッテリー劣化を考慮した場合，一定ではなくなる．

バッテリー交換ステーションに到着する EV のバッテリーは，充電システムがもともと管理していたバッテリーであるとは限らない．また EV のバッテリーは，家で充電されることもある．よって，バッテリーは，バッテリー交換ステーションに到着する度に 1/1000 の確率で充電システムから取り除かれるとする．図 9〜11 は，前節と同様に充電スタンド非利用率 ($P_{L1}$)，バッテリー交換スペース非利用率 ($P_{L2}$)，EV ステーション非利用率 ($P_{L3}$) である．この時，前節と同様に，EV の到着間隔は平均 $\lambda^{-1}$ の超指数分布，指数分布，一定分布の 3 種類の分布に伴い，$\lambda^{-1} = 3$，急速充電器 $s_c = 2$ 台，交換設備 $s_r = 1$ 台，バッテリー $N = 110$ 個とする．また，超指数分布は平衡条件を満たすものとし，平方変動係数 $Ca^2 = 16$ とする (パラメータの決め方は，付録 A 参照)．

図 9〜11 より，劣化したバッテリーを取り除き続けると，充電システム内のバッテリーの個数が減るため，充電システムの充電器を増やしても各設備の非利用率は前節のように大きく減ることがない．このことから，バッテリーを補充する必要がある．

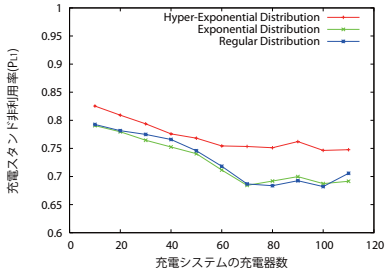



**図 9**　充電スタンド非利用率： PL1

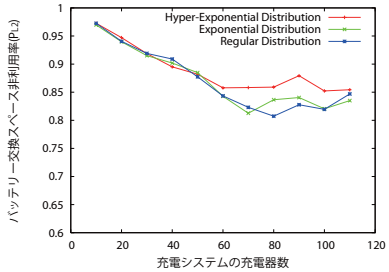



**図 10**　バッテリー交換スペース非利用率：PL2

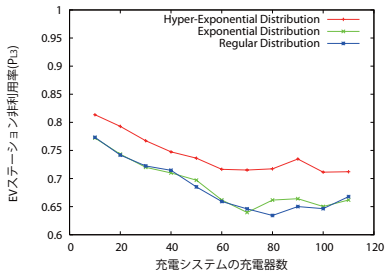



**図 11**　EV ステーション非利用率：PL3

## 5. おわりに

本稿では，充電スタンド，バッテリー交換ステーションを兼ね備えた EV ステーションの構成の提案をした．そして，各設備のサーバー数をいくつかの数値でシミュレーションをお

こない，各設備の非利用率がどのように変化するか確認した．本稿の数値例において，EVの到着間隔が指数分布に従う場合，充電システムの充電器数が 80 台以上あると，各設備の安定した非利用率が得られることを確認し, これ以上の充電器は不要であることがわかる．また，EV の到着間隔が超指数分布に従う時，各設備とも，最も高い非利用率が得られることを確認した．

劣化したバッテリーを取り除くことを考慮した場合，本稿の数値例でおこなう場合，各設備の非利用率は，バッテリーを取り除かない場合と比較すると大きく非利用率の差が出た．このことから，バッテリーを取り除く場合，バッテリーの補充が必要である．

今後の課題は，

- EV ステーションのコストの問題
- バッテリーのリサイクル問題
- EV のバッテリーをスマートグリッドへの適用

などの，新たな EV ステーションのモデルの検討が挙げられる．

## 参 考 文 献


1) 村沢義久，『電気自動車「燃やさない文明」への大転換』，筑摩書房，2010.
2) 国土交通省，気象庁，『気候変動 2007:統合報告書 政策決定者向け要約』，2007.
3) 大久保隆弘，『「エンジンのないクルマ」が変える世界』，日本経済新聞出版社，2009.
4) EV ポータル，“-EV(電気自動車) に関連する総合情報ポータルサイト-”，http://www.ev-life.com/.
5) 株式会社高砂製作所, “電気自動車（EV) 用急速充電器”, http://www.takasago-ss.co.jp/products/power_electronics/sp/tqvc/index.html/.
6) 秋丸春夫，川島幸之助，『情報通信トラヒック-基礎と応用-』，オーム社，1990.
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”，社団法人 日本オペレーションズ・リサーチ学会誌, vol. 55, No. 6, pp. 347-352, 2010.
8) Mesquite Software, http://www.mesquite.com/.
9) 清水浩, “多目的高性能電気自動車の開発”，FED レビュー, vol.2，No. 8，pp.1-11，2002.
10) ベタープレイス・ジャパン—EV ネットワークとサービスのグローバル・プロバイダー，http://japan.betterplace.com/.


## 付　　録

### A．超指数分布 (hyper-exponential distribution)

到着間隔が 2 次の超指数分布 ($H_2$) に従うとき，密度関数 $f(x)$

$$f(x) = k\lambda_1 \varrho^{-\lambda_1 t} + (1-k)\lambda_2 \varrho^{-\lambda_2 t} \tag{1}$$

を持つ．また，$\frac{k}{\lambda_1} = \frac{(1-k)}{\lambda_2}$ が平衡条件であり，次のようになる．

$$k = \frac{[1+\sqrt{1-\frac{2}{(1+C_a^2)}}]}{2} \tag{2}$$

$$\lambda_1 = 2k\lambda, \lambda_2 = 2(1-k)\lambda \tag{3}$$

### B．バッテリー交換ステーション

ここでは，本稿で提案した EV ステーションの構成の一部であるバッテリー交換ステーションについて説明する[10)]．

EV で長距離を走行するには，バッテリーと充電用インフラを改善する一方で，バッテリーを使ってすばやく確実に走行距離をのばす方法を開発する必要がある．ベタープレイスは，バッテリー交換ステーションのネットワークを通してこのソリューションを提供する．バッテリー交換ステーションは独創的なロボット・システムで，消耗したバッテリーを新しいものと交換，在庫のバッテリーを冷却，充電し，また，ステーションに来たすべての EV がフル充電されたバッテリーを確実に得られるために，ネットワークを管理している．

ベタープレイスは，EV とバッテリー交換ステーションの互換性を確保するため，自動車メーカーと協力して作業を進めている．エンジン，排気系統および複雑なギア・システムが，EV ではシンプルなギア・ボックス，電気モーターおよび固体バッテリーに置き換えられるため，自動車メーカーは革新的な設計を自由に実践することができる．平らな「パンケーキ型（薄型)」のバッテリーが車体の下に配置されるため，車の重心が低くなって操作がしやすくなり，室内のパッケージングの柔軟性が増す．性能上の利点に加えて，手が届きやすい位置にバッテリーを配置することにより，製造が簡略化され，メンテナンス費用を少なくすることができる．

ベタープレイスのバッテリー交換ステーションでは，ドライバーが EV をレーンに乗り入れた後は，ステーションがすべての作業をおこなう．EV がコンベヤーに沿って進む間に，EV の下側の自動交換プラットフォームがバッテリーの下に移動，ボディーの底面を洗浄し，取り外し作業を開始してバッテリーをはずす．消耗したバッテリーは収納棚に収容され，充電がおこなわれる．バッテリーが外された EV にはフル充電されたバッテリーが上がってきて取り付けられる．このバッテリー交換プロセスは，ガソリンスタンドでの給油よりも短時間で完了し，作業中，ドライバーや乗客は EV から降りる必要がない．