

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

本間 裕大

近年、地球温暖化対策や石油依存からの脱却を目指し、電気自動車に改めて注目が集まっている。過去、何度も電気自動車の可能性が追及されたにもかかわらず、普及に至らなかった最大の原因としては、バッテリーの性能限界が挙げられる。具体的には、連続航続距離の短さ、充電時間の長さが課題となっていた。この問題に対し、“バッテリー交換方式”という新たな運営形態が、Better Place 社によって提案されている。ただし、当該方式を導入するためには、電気自動車の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”を整備し、かつ、そこにはある程度のバッテリー在庫を確保しておく必要がある。そこで本研究では、新たな電気自動車の支援インフラとして、バッテリー交換ステーションに焦点を当て、バッテリー在庫という観点からその適切な運用形態を評価することを試みる。具体的には当該ステーション内における、バッテリーの在庫管理を待ち行列モデルを用いて定式化した上で、系内状態の変化やバッテリーの呼損確率、安全在庫の導出方法について考察する。また、バッテリー交換方式の導入が、社会全体にもたらす追加負担についても議論する。

キーワード：電気自動車、バッテリー交換ステーション、安全在庫、待ち行列モデル

1. はじめに

20 世紀以降、人類は膨大な量の化石燃料を消費してきた。今日の繁栄は、この大量のエネルギー消費を支えられてきたといっても過言ではない[7]。しかしながら、この過去 100 年における急激な消費は、同時にいくつかの問題を引き起こしている。

なかでも化石燃料の枯渇は、最も深刻かつ早急に対処すべき問題のひとつであろう[10]。特に、石油の枯渇は様々な機関あるいは科学者によって大きく議論されている。自動車産業を中心とした輸送業界でも現在、いまだそのほとんどを石油に依存しているため、CO₂ 排出の削減と、石油依存からの脱却は特に深刻な問題となっている[5]。

そのような背景から近年、電気自動車 (EV: Electric Vehicle) に改めて注目が集まっている。そのアイデア自体は古くからあるにもかかわらず、今日まで電気自動車が普及しなかった背景には、いくつかの要因が考えられる。なかでも、バッテリー性能の限界による航続距離の短さと、その再充電に要する時間の長さは、大きな課題である[2]。

この問題に対し、“バッテリー交換方式”という新

たなる電気自動車の運用形態が、Shai Agassi 氏率いる Better Place 社によって提案されている[9]。これは、電気自動車のバッテリーを“充電”するのではなく、“交換”することによって、あたかもガソリン車の給油のように電気自動車を支援しようというアイデアである。走行によりバッテリー残量が少なくなった際、それを充電しようとする時間がかかるわけであるが、満充電されたバッテリーと交換するならば、わずかな停止時間で電気自動車は利用可能となる。

ただし、上述のアイデアを導入するためには、電気自動車の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”を整備することが必須である。そして、そこには交換するための満充電済みのバッテリーが常に用意されていなければならない。

そこで本研究では、新たな電気自動車の支援インフラとして、バッテリー交換ステーションに焦点を当て、バッテリー在庫という観点からその適切な運用形態を評価することを試みる。具体的にはバッテリー交換ステーション内における、バッテリーの在庫管理を待ち行列モデルを用いて定式化した上で、系内状態の変化やバッテリーの呼損確率、安全在庫の導出方法について考察する。加えて、バッテリー交換方式の導入が、社会全体にもたらす追加負担についても議論する。

2. バッテリー交換ステーションとは

本節では、今日の電気自動車が抱えている課題と、

ほんま ゆうだい
早稲田大学 高等研究所
〒169-8555 新宿区大久保 3-4-1

それに対するバッテリー交換方式の狙いを整理する。

2.1 電気自動車の現状

まず、今日における電気自動車の技術水準について整理したい。前述の通り、これまで電気自動車が普及しなかった要因には、搭載するバッテリーに関する種々の制約が挙げられよう。

近年ではリチウムイオン電池の開発や、ハイブリッド車の普及なども後押しし、極めて精力的にバッテリー開発が進められ、その性能向上は著しい。しかしながら、現在の電気自動車でもなお、一回の充電で走れる連続航続距離は、せいぜい100~160 km程度である。ガソリン車が一回の給油で400 km以上走行することを考えると、これは不十分といわざるを得ない。

また、ひとたび電気自動車のバッテリーが空になれば、当然ながら何らかの手段で搭載バッテリーを満充電状態にする必要がある。ただし、単純にバッテリーを再充電しようとしても少なからず時間を要する。例えば、家庭用の200 V電源では6~8時間近くかかるのが現状であるし、100 V電源になると17時間とも見積もられている。専用設備を用いた、いわゆる急速充電でも満充電の80%前後に戻すまで30分程度はかかる[4]。すなわちバッテリーを繰り返し充電する現状の方式に基づき、電気自動車でも長距離のトリップを行おうとした場合、現状では大体120 kmごとに30分程度、頻繁に停車しながら運転することになる。

バッテリー単体の価格も普及の妨げとなっていることは否定できない。現在の電気自動車では、バッテリー本体だけで200万円以上かかる。そのため、政府も電気自動車普及のために補助金を導入しているが、最大でも139万円であり(2010年3月現在)[6]、結果として同等グレードのガソリン車に比べ、費用負担はかなり高価にならざるを得ない。

2.2 バッテリー交換方式の狙い

このように、現段階におけるバッテリーの性能限界は、電気自動車の普及に対し大きな妨げとなっている。これらの問題点を、バッテリーの運用形態を変えることによって解決する試みが、Better Place社による電気自動車インフラ運動“Project Better Place”で提唱されている“バッテリー交換方式”である[1]。

Better Place社のビジネスプランでは、電気自動車の残量がわずかなバッテリーと、満充電済みのバッテリーを“交換”することを提案している。これによって、ドライバーは、ごく短時間の停車によって、再び電気自動車を利用することが可能となる。連続航続距

離の短さ自体は変わらないものの、従来方式では少なからず要する充電時間の問題を解決することによって、電気自動車でも不便なく長距離のトリップを行えることが期待できる。

また、交換方式を導入することによって、電気自動車本体とバッテリーを分離できることも注目である。Better Place社では、各ユーザーにバッテリーを購入させるのではなく、リースする形式を提案している。これによって、(高価なバッテリーが含まれないので)新車購入時の初期費用が抑えられることになる。

加えて、トラブルが起きたバッテリーや寿命が尽きたものを、最新型のバッテリーと容易に交換できるため、各ユーザーがバッテリーの技術進化の恩恵を、直ちに受けられる。他にも、専用設備でバッテリー充電や管理を行うため、各ユーザーが個別に管理するのに比べ、バッテリーの劣化を抑えられるといったメリットも考えられよう。このように、バッテリー交換方式の導入で、電気自動車が抱えていた多くの問題点を緩和できることが期待されている。

2.3 バッテリー交換ステーションの整備

バッテリー交換方式を社会で導入するためには、その支援インフラとして“バッテリー交換ステーション”が必要となる。200 kg以上あるバッテリーをユーザーが自分で交換することは不可能なので、(ガソリンスタンドに相当する)バッテリー交換ステーションを訪れた上で、燃料補給を行うわけである。

ここでステーションには、交換に応じる満充電済みのバッテリーが、常に用意されている必要があることに注意されたい。そして、このような“予備バッテリー”がどれほど必要かは、電気自動車の到着率やステーション設備の大小、バッテリー性能などに依存するのは明らかである。そこで次節以降では、このバッテリー交換ステーションにおける予備バッテリーの安全在庫数を評価すべく、待ち行列モデルを用いて考察を試みる。

さて、最後にバッテリー交換方式の短所についても少し整理しておこう。まず、交換方式では上述のように予備バッテリーを準備する必要があるため、社会全体に存在するバッテリー数は、充電方式に比べ増加することになる。また、燃料補給ステーションの規模も、交換方式では充電方式に比べ大規模とならざるを得ないことは明らかである。これらの設備投資にかかる費用は、“短時間で燃料補給を行う”ための対価として、税金や交換費用など何らかの形で、各ユーザーが負担

表1 充電方式と交換方式の比較

項目	充電方式	交換方式
燃料補充にかかる時間	×	○
新車購入時の初期費用	△	○
バッテリー技術進歩の導入	×	○
バッテリーの管理	△	○
バッテリーに対する総費用	○	△
支援インフラの規模	○	×

しなければならない。以上、従来から提案されてきた充電方式とバッテリー交換方式を、種々の項目について比較したものを表1にまとめる。

3. バッテリー交換ステーションの定式化

前節の通り、バッテリー交換ステーションでは、予備バッテリーを準備する必要がある。その安全在庫数を導出するために、本節では、待ち行列モデルを用いてバッテリー交換ステーションの定式化を行う。

3.1 バッテリーの管理フロー

最初に、バッテリー交換ステーションにおける、バッテリーの管理フローについて整理する。まず、バッテリーの充電をどこで行うかであるが、本研究では、各ステーションが自前の充電設備を所有しており、回収した空バッテリーは各ステーション内で独立して再充電するものと想定する。言い換えると、例えば回収したバッテリーを中央施設などへ輸送し充電をしたり、あるいは充電済みのバッテリーを他の施設から調達したりすることはしないものとする。

このとき、ステーションにおいてバッテリーがどのように取り扱われるかを示したものが図1である。すなわち、(I)まず車の到着によって空バッテリーと満充電済みのバッテリーが交換される。そして、(II)回収した空バッテリーは、充電設備が空くまで待機し、(III)充電スロットが空き次第、充電を行うことになる。そのようにして、(IV)充電が完了したバッテリーは交換用の満充電済みのバッテリー在庫として保管される。

3.2 バッテリー交換ステーションの特性

ここで、バッテリー交換ステーションにおける総バッテリー数に関する性質を述べる：

【バッテリー本数に関する性質】

バッテリー交換ステーション内における、バッテリーの総本数は常に一定である。

電気自動車はバッテリーの“交換”を行っているわけであり、交換作業によって、満充電済みのバッテリーが1本減る一方、空バッテリーが1本増えることを

(I) 車の到着 (II) 充電待ち (III) 充電中 (IV) 満充電済み

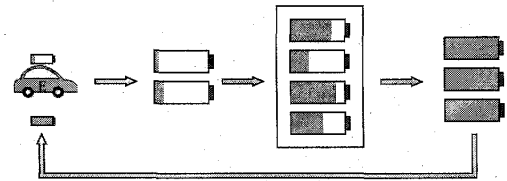


図1 ステーション内におけるバッテリーの流れ

考えれば、ごく自然である。上記の性質は見落とされがちであるが、バッテリー在庫の定式化において極めて重要となる。

3.3 バッテリー在庫の分類

次に、バッテリー交換ステーションにおける在庫の状態変化を、いかに記述するかについて説明する。

図1から明らかな通り、ステーション内には、(i)充電待ち、(ii)充電中、(iii)満充電済み、3種類のバッテリーが存在する。本研究では、これらおのおのの状態のバッテリーがそれぞれ何本あるかによって、ステーション内の状態が記述されるものとする。ここで、ステーション内に存在する総バッテリー数を N ($=$ 一定)、充電待ち+充電中 (以下、充電フェーズと呼ぶ) のバッテリー数を n 、ステーション内におけるバッテリー充電設備のスロット数 (すなわち同時に充電できる本数) を s としよう。ただし、 $s \leq N$ 、 $0 \leq n \leq N$ と仮定する。このとき、各状態のバッテリー本数は s と n の大小関係によって場合分けされ

$$\begin{aligned} & \{\text{充電待ち, 充電中, 満充電済み}\} \\ & = \begin{cases} \{0, n, N-n\} & (0 \leq n \leq s) \\ \{n-s, s, N-n\} & (s \leq n \leq N) \end{cases} \quad (1) \end{aligned}$$

で与えられる。すなわち、 N と s が所与である (確率的に変動しない) ことに注意すると、ステーション内の状態は、充電フェーズの系内バッテリー数 n のみで記述できることが分かる。

3.4 バッテリー在庫の確率過程

以上の準備をした上で、ステーション内のバッテリー在庫の確率過程を定式化する。

保有する総バッテリー数が N 、充電設備のスロット数が s のバッテリー交換ステーションを考える。また、交換を希望する電気自動車の到着間隔は、平均 $1/\lambda$ の指数分布に伴うポアソン到着とし、また、バッテリーの充電時間も平均 $1/\mu$ の指数分布に伴うものと仮定する。このとき、充電フェーズの系内バッテリー数 n の確率過程は、どのように記述できるだろうか。

いま、ステーション内で生じる事象を列挙してみる

表2 待ち行列モデルとの対応関係

待ち行列モデル	交換ステーション	記号
客	空バッテリー	n
到着間隔	車両の到着(交換)間隔	$1/\lambda$
窓口数	充電スロット数	s
サービス時間	充電時間	$1/\mu$
最大系内客数	総バッテリー数	N

と次の3通りである：

- (a) 電気自動車の到着→満充電済みのバッテリーと交換 (変化率 λ で充電フェーズの系内個数 n が1増加)
- (b) 電気自動車の到着→満充電済みのバッテリーがなく、交換不可 ($n=N$ のとき呼損)
- (c) バッテリーの充電が完了 (変化率 $\min\{n, s\}\mu$ で充電フェーズの系内個数 n が1減少)

すなわち、 n の確率過程は、典型的なM/M/s/N待ち行列モデルとなる(表2に対応関係をまとめる)。ゆえに、よく知られているように定常分布として

$$p_0 = \left(\sum_{n=0}^s \frac{(s\rho)^n}{n!} + \frac{s^s}{s!} \sum_{n=s+1}^N \rho^n \right)^{-1} \quad (2)$$

$$p_n = \begin{cases} \frac{(s\rho)^n}{n!} p_0 & (n \leq s) \\ \frac{s^s}{s!} \rho^n p_0 & (s < n \leq N) \end{cases} \quad (3)$$

を得る[8]。ただし、 p_n は

$$p_n \stackrel{\text{def}}{=} [\text{充電フェーズの系内バッテリー数が } n \text{ 本である確率}] \\ = [\text{満充電済みのバッテリーが } N-n \text{ 本ある確率}] \quad (4)$$

を意味する。また、 $\rho = \lambda/s\mu$ であり、 $\rho < 1$ が定常分布の成立条件であるので、到着率や充電完了時間(充電完了率)に応じて、必要とされる充電スロット数の下限値が定まることになる。図2に p_n の概形を示す。ただし、 $\lambda=1/3$ 、 $\mu=1/240$ 、 $s=90$ 、 $N=140$ とした。なお、本研究では単位時間として[分]を想定している。

4. 呼損確率ならびに安全在庫の評価

前節の議論により、交換ステーションにおけるバッテリー数の確率過程が定式化された。本節では、これに基づき、ステーションにおける呼損の発生や、安全在庫数などの評価を行う。

4.1 呼損確率の計算

まず、電気自動車がステーションを訪問しても、バッテリーが交換できない事象、すなわち呼損が生じる

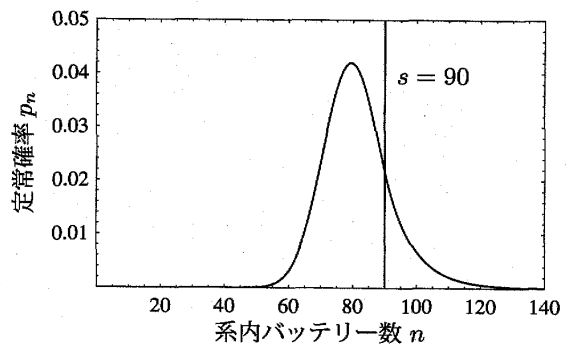


図2 充電フェーズ系内バッテリー数の定常分布

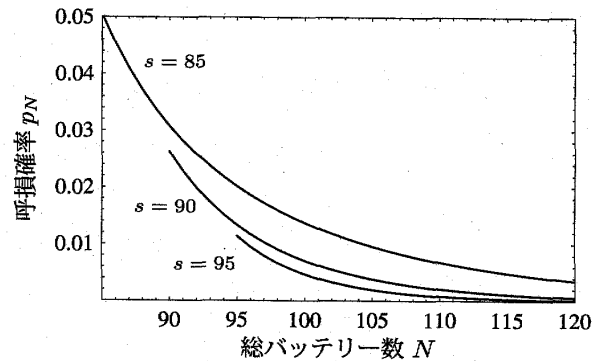


図3 総バッテリー数Nを変化させたときの呼損確率

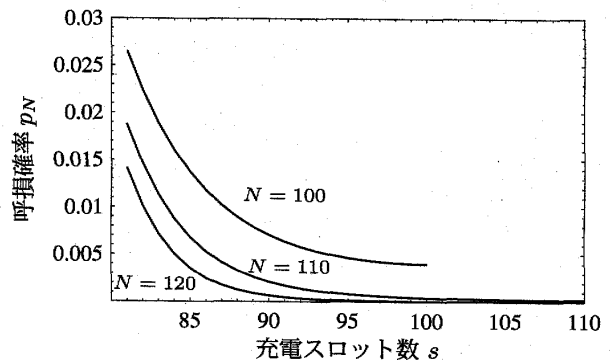


図4 充電スロット数sを変化させたときの呼損確率 (N=110)

確率を導出したい。上述のような事象が生じるのは、満充電済みのバッテリー数 $N-n$ が0である場合と他ならない。したがって、呼損確率は $n=N$ である確率

$$p_N = \frac{s^s}{s!} \rho^N p_0 \\ = \frac{s^s}{s!} \rho^N \left(\sum_{n=0}^s \frac{(s\rho)^n}{n!} + \frac{s^s}{s!} \sum_{n=s+1}^N \rho^n \right)^{-1} \quad (5)$$

で与えられる。図3、4に、 N ならびに s を様々な値に変化させた場合の呼損確率の変化を示す($\lambda=1/3$ 、 $\mu=1/240$)。なお、当該パラメータ設定では $\lambda/\mu=80 < s \leq N$ であることに注意されたい。総バッテリー数

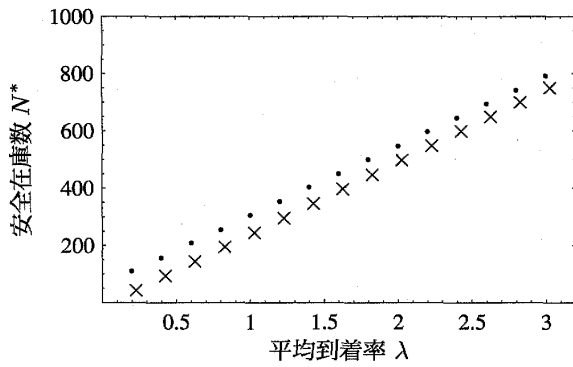


図5 平均到着率を変化させたときの安全在庫数 $N^*(\lambda)$
($\rho=0.9$)

N や充電スロット数 s が多くなるほど、急速に呼損確率が低下することが見て取れる。

4.2 安全在庫数の導出

次に、安全在庫数の導出について考える。具体的には前項で導出した呼損確率を、ある一定水準以下にするための条件について整理する。

いま呼損が生じる確率を δ 以下にするためには、(5)より以下の不等式が成り立っていれば良い：

$$p_N = \frac{s^s}{s!} \rho^N \left(\sum_{n=0}^s \frac{(s\rho)^n}{n!} + \frac{s^s}{s!} \sum_{n=s+1}^N \rho^n \right)^{-1} \leq \delta. \quad (6)$$

上記の不等式が、利用率 ρ と総バッテリー数 N 、そして充電スロット数 s の関係式となる。

ここで、ステーションへの平均到着率の増加が安全在庫数に与える影響を考察しよう。具体的には、平均充電時間を $\mu=1/240$ に固定し、また利用率がほぼ $\rho=0.9$ となるようスロット数 s を設定した上で、呼損率が0.1%未満となる安全在庫数 $N^*(\lambda)$ を数値的に解いた(図5)。ステーションへの平均到着率が増加するにつれ、必要な安全在庫数がほぼ線形(ただし、厳密には線形でないことに注意)に増えていることが確認できる。なお、 $N^*(\lambda)$ を λ で線形回帰すると

$$N^*(\lambda) \approx 62 + 242\lambda \quad (7)$$

を得る。すなわちバッテリーの平均充電時間を4時間とした場合、各ステーションでは最低でも60個前後のバッテリー在庫を保持しておく必要性が、以上の分析から判明する。

5. 都市全体における予備バッテリー数の見積もり

本節では、上述で得られたステーション当りの安全在庫数を用いて、都市全体における予備バッテリー数の見積もりについて考察する。

5.1 問題の位置付け

第4節までの議論を通し、バッテリー交換ステーションに関する種々の特性と、その安全在庫数の導出方法を明らかにした。このように、バッテリー交換ステーションでは、電気自動車に取り付けられていない予備バッテリーを在庫として保持しておくことによって、安定した運営を行う必要がある。

したがって、都市全体における予備バッテリー数が、電気自動車数に対してどの程度の割合なのか、見積もっておくことには、意味があるものと考えられる。そこで本節では、バッテリー交換方式という運営形態が、都市全体にどれだけの予備バッテリーを準備させることになるのか、簡単な試算を行ってみたい。

5.2 予備バッテリー数の試算

いま、 M 台の自動車が存在する都市を考え、うち普及率 p で電気自動車に置き換わっているものとする。ここで、各電気自動車の年間交換回数を、週1回に相当する50回と想定し、また、総ステーション数を W 基とすると、1ステーション当りの年間交換回数は

$$\frac{50 \times Mp}{W} \quad (8)$$

である。これらの交換が、1日当り10時間に分散して行われるとすると、つまるところ、各ステーションに対する到着率 $\lambda_{試}$ は

$$\lambda_{試} = \frac{50 \times Mp}{W \times 365 \times 600} \quad (9)$$

となる。

1ステーションが保持する予備バッテリー数 $N_{試}$ は、(9)を(7)に代入することによって求められるので、都市全体における予備バッテリー数の総数は

$$W \times N_{試} = 62W + \frac{242 \times 50 \times Mp}{365 \times 600} \quad (10)$$

で与えられる。一方、都市には Mp 台の電気自動車(稼働中のバッテリー)が存在するわけだから、電気自動車の総数に対する予備バッテリー数の割合は

$$\frac{W \times N_{試}}{Mp} \approx 62 \times \frac{W}{Mp} + 0.0552 \quad (11)$$

と計算される。 W/Mp は、電気自動車数に対するステーション数の割合であり、現在のガソリンスタンド数

¹ 1回の燃料補給での航行距離が、ガソリン車の1/3程度であることを考えると、過小な見積もりにも思えるが、充電式電気自動車のごとく自宅での充電も可能なものと考え、今回はこのように設定した。

が約5万店に対し自動車数が約7,400万台であること[11]や、同じく次世代自動車の一種である燃料電池車に着目したステーション数の分析例[3]を参考にすると、おおよそ $1.5 \times 10^{-4} \leq W/Mp \leq 6.5 \times 10^{-4}$ 程度と思われる。すなわち、バッテリー交換方式を導入することによって、電気自動車数に対し約6.5~9.7%程度、余分にバッテリーが必要となることが示唆される。

6. まとめ

本研究では、電気自動車の支援インフラとして、バッテリー交換ステーションを想定した上で、バッテリー在庫という観点から、その適切な運用形態を評価することを試みた。具体的にはバッテリー交換ステーション内における、バッテリーの管理を待ち行列モデルを用いて定式化し、系内状態の変化、バッテリーの呼損確率、さらには安全在庫の導出方法について考察を行った。本研究で得られた主な知見は次の通りである：

- 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は $M/M/s/N$ 待ち行列モデルで定式化される。
- バッテリーの平均充電時間が4時間のとき、各ステーションにおけるバッテリーの安全在庫数は、車両の到着率を λ [台/分]とすると、おおよそ $60 + 242\lambda$ 個で見積もられる。
- バッテリー交換方式を導入することによって、都市全体では6.5~9.7%程度、余分にバッテリーが必要となる。

本研究ではバッテリー交換方式という運営形態について、その基本的性質を解明することに重点を置いたため、単一のステーションを想定し、それぞれのステーションが独立して運営しているものと仮定した。今後、バッテリー交換方式が広く普及した場合、同一組

織によって運営されているステーションは、管理システムやバッテリーの共有など、なんらかの形で連携して運営される可能性もある。モデルを待ち行列ネットワークへと拡張し、様々な連携方法によって異なるであろう、適切な運営形態を分析することは、魅力的な課題である。

参考文献

- [1] ベタープレイス・ジャパン：better place Web Page, ベタープレイス・ジャパン (2010).
<http://japan.betterplace.com/>
- [2] 船瀬俊介：奔れ！電気自動車, 築地書館 (2004).
- [3] Y. Honma and O. Kurita: A Mathematical Model on the Optimal Number of Hydrogen Stations with Respect to the Diffusion of Fuel Cell Vehicles, *Journal of the Operations Research Society of Japan*, Vol. 51-2, pp. 166-190 (2007).
- [4] 飯塚昭三：燃料電池車・電気自動車の可能性, グランプリ出版 (2006).
- [5] International Energy Agency: World energy outlook 2004, OECD (2004).
- [6] 次世代自動車振興センター：次世代自動車振興センター Web Page, 次世代自動車振興センター (2010).
<http://www.cev-pc.or.jp/>
- [7] J. J. MacKenzie: Oil as a finite resource: When is global production likely to peak?, World Resources Institute (2000).
- [8] 森村英典, 大前義次：応用待ち行列理論, 日科技連 (1975).
- [9] S. Agassi: 世界のキーマンに聞く, 週刊東洋経済, 3月21日号, p. 50 (2009).
- [10] P. Roberts: The end of oil: On the edge of a perilous new world, Houghton Mifflin (2004).
- [11] 全国石油商業組合連合会：次世代自動車対応SSの将来像を考える研究会報告書, 全石連 (2010).