

電気自動車の将来市場予測シミュレーションの構築

古田 琢也

指導教員：茂木源人准教授

1.本研究の概要

現在、自動車会社にとって最も大きな課題となっているのは、環境及びエネルギー問題対策である。そのための対応策を各企業が様々な形で行っているが、その中で特筆すべき動きが低公害である次世代自動車の研究開発の推進である。現在主流となっているガソリンを燃料とする内燃式自動車は排気ガスやエネルギー使用量などの点で環境負荷が大きいので、その代替とするため様々な種類の低公害である次世代自動車が研究・開発されている。

しかし、現実にはどの種類の次世代自動車にも既存のガソリン自動車にはない普及を妨げる障害が存在し、さらに消費者が使用したことのない低公害車をどう評価するかを既存の市場の状況から予測することは難しいため、企業側のアプローチだけでは低公害車の普及に対する正確な予測が難しい。そのため、どの様な自動車の開発に投資すべきか、あるいはどういった研究開発計画を行うべきか、といった意思決定には常にリスクが伴う。すなわち、結果的に投資コストが無駄になるリスクを背負い、あらゆる可能性を視野に入れつつ、企業は低公害車の研究開発をせざるを得なくなっている。

低公害車の普及予測を行うシミュレーションにより、将来の市場状況を予測することができれば、このようなリスクを多少なりとも低減することが可能となる。また、将来の市場予測を行うことは、CO₂排出量やガソリン消費量の予測を行うことにもつながる。本研究では、企業が適切な投資を行い社会及び企業のために最適な次世代自動

車の開発を行う事を可能にするために、次世代自動車の普及予測モデルを構築することを目的とする。

そこで現在一部で市販が始まり普及が進められている、次世代自動車の中でもガソリン自動車の代替として有力な選択肢の一つである電気自動車の販売予測及びその普及要因の探索を行う事を目的とする。消費者間の社会ネットワークを考慮してエージェントベースモデリングを行い、市場を構築した上でモンテカルロシミュレーションを実行し、その結果について論じる。

2.モデルの解説

消費者がイノベーション的な製品を評価する際には自分の尺度で評価する、というイノベーター部分とその製品を実際に使用している他者の評価を考慮し評価する、というイミテーター的な部分の2つの要素に影響を受ける^[1]。

そこで、製品に関する評価の情報がネットワークを通して伝達する、というモデルを構築する。ネットワークモデルを構築するために各消費者をエージェントとしたマルチエージェントシステムを用いる。

まず、今回シミュレーションを行う消費者エージェントの集合をコミュニティC、とする。自動車の中で、コミュニティCに所属する消費者エージェントが自らの持つ基準や使用条件に基づいて効用を評価し、選択して自動車を購入する。

ここで、自動車に設定された、消費者が効用を評価するための判断基準を説明する。自動車は以下の3項目によりそれぞれ定義される。

- 電気自動車, ハイブリッド自動車(プラグインハイブリッド車含む), ガソリン自動車の3タイプの車種
- 高級車, 普通車, 軽自動車の3タイプのグレード
- 年式(自動車の年式と販売年が同じであればその車は新車, 自動車の年式が古ければその車は中古車となる)

上記3項目を定義することで以下の属性が決定される

- 購入価格(円)
- 燃費(単位はハイブリッド車・ガソリン車の場合 km/l, 電気自動車の場合 km/kWh)
- CO₂排出量(g-CO₂)

2.1 燃料価格

資源価格が

$$dX_{i,t} = \eta(\overline{X_{i,t}} - X_{i,t})dt + \sigma X_{i,t}dz \quad (1)$$

という平均回帰過程に従い推移するとした^[2]. この式に基づき, 電力価格(¥/kWh), ガソリン価格(¥/l)を算出する.

2.2 個人の効用評価

消費者は自らの評価基準に基づく効用とネットワークにより繋がっている他人が評価した効用の2つの効用の和として自動車の効用を算出とする. まず, 前者の自らの評価基準に基づく評価について説明する.

i をユーザー, j を自動車の種類(電気自動車, ハイブリッド自動車等), g をグレード, l を年式, k を価格などの判断項目, $x_{i,j,g,l,k,t}$ を時点 t における各ユーザーの車両ごとの項目 k の値(ただし, $k=1$ をランニングコスト, $k=2$ を購入価格, $k=3$ をCO₂排出量, $k=4$ をインフラ, $k=5$ を評判の評価とする),

$f_{i,j,g,l,k,t}$ を t におけるユーザー i の項目ごとの効用,

C_k を k 項目の重み係数, すなわち差異の感度, $x_{0.5,k}$ は効用が最大値と最小値の中心値である0.5となる項目 k の値とする.

効用曲線を, 以下の2種類の形で表すものとする.

$$f_{i,j,g,l,k,t} = \frac{1}{1 + \exp(Z_{i,j,g,l,k,t} = C_k(x_{i,j,g,l,k,t} / x_{0.5,k} - 1))} \quad (2)$$

$$f_{i,j,g,l,k,t} = \frac{\exp(Z_{i,j,g,l,k,t} = C_k(x_{i,j,g,l,k,t} / x_{0.5,k} - 1))}{1 + \exp(Z_{i,j,g,l,k,t} = C_k(x_{i,j,g,l,k,t} / x_{0.5,k} - 1))} \quad (3)$$

ただし, (2)式が効用の値が項目の値に

時点 t におけるユーザー i の車 j , グレード g , 年式 l の項目 k は重み付けを掛けた項目ごと効用値

$F_{i,j,g,l,k,t}$ は以下の式で表される.

$$F_{i,j,g,l,k,t} = w_{i,k} f_{i,j,g,l,k,t} \quad (4)$$

効用項目値の総和である個人の評価による総合効用 $IF_{i,j,g,l,t}$ は以下の式になる.

$$IF_{i,j,g,l,k,t} = \sum_{k=1}^K F_{i,j,g,l,k,t} \quad (5)$$

ユーザー i について, 自動車を買換えるタイミングを決定し, 個人の効用を算出するために設定されている選好の基準となる属性は以下のようになっている.

- 買い替え期間 $life_i$ (年)
- 年間走行距離 run_i (km)
- 効用に対する重み付け $w_{i,k}$
- シミュレーション開始直後の所有している車の車齢 old_i (年)
- 購入対象となるグレード g
- 中古車評価下落率 d_i
- 電気自動車バッテリー交換期間 $bc_{e,i}$
- ハイブリッド車バッテリー交換期間 $bc_{h,i}$

まず, 自動車を買換えるタイミングについて説明する. 基本的に, 前回自動車を購入してから買い替え期間 $life_i$ 後に購入する. だし初回に関し

ては old_i 年前に自動車を買った, として, そこから経過した年数が $life_i$ となった時点で購入する, とした.

今回は消費者が欲しいグレードは消費者ごとに固定されている, とした.

今回消費者の自己評価による判断基準の項目として, ランニングコスト, 車体価格, CO₂ 排出量, インフラ推移の 4 項目とした. 以下でその 4 つの算出方法について説明する.

2.2.1 ランニングコスト

燃料価格は過去数年間のトレンドから, 将来価格を予測するのが妥当だと考えられる. そこで, 過去 3 年間の燃料価格から予想燃料価格推移を算出するとして, 車両 j の時点 t での単位あたりの燃料 (電力) 価格を $fuel_{j,t}$ と置いたときに, 消費者の予想燃料価格推移 $ffuel_{j,t}$ を,

$$ffuel_{j,t} = fuel_{j,t} + t \cdot ((fuel_{t-1} - fuel_{t-2}) + (fuel_t - fuel_{t-1}))/2 \quad (6)$$

となる, と仮定する.

燃料価格燃料費の算出は, 各自動車の燃費を $mileage_{j,g,t}$, 割引率を r , 車両 j の時点 t での単位あたりの予想燃料 (電力) 価格を $ffuel_{j,t}$, 自動車を購入する時点 t_a としたとき, t_a 時点での割引燃料費用は

$$\sum_{t=t_a}^{t_a+life_i} \frac{1}{(1+r)^{t-t_a}} \frac{run_i}{mileage_{j,g,t}} ffuel_{j,t} \quad (7)$$

となる.

バッテリー交換期間を以下のように定義する. ハイブリッド車の場合 5 年ごとに 1 回, もしくは 100000km 総走行距離が超えた場合電池を取り替える, とする. また電気自動車は 500 回充電する毎に電池の交換が必要であるとする.

そこで, 消費者 i が購入した t_a 時点で保有して

いる車の年式を s と置くと, s 分だけ電池が消耗していることを考慮して, 1 年あたり平均ランニングコストの式として以下の式を立てる. 時点 t でのバッテリー 1kWh の価格を B_t とおいて,

$$x_{i,j,g,t,t_a} = \frac{1}{life_i} \sum_{t=t_a}^{t_a+life_i} \frac{1}{(1+r)^{t-t_a}} \frac{run_i}{mileage_{j,g,t}} ffuel_{j,t} \quad (8)$$

$$x_{i,j,g,t,t_a} = \frac{1}{life_i} \sum_{t=t_a}^{t_a+life_i} \left(\frac{1}{(1+r)^{t-t_a}} \frac{run_i}{mileage_{j,g,t}} ffuel_{j,t} + bt_{j,g} \cdot B_t \right)$$

とする. ただし, 上式がバッテリー交換をしない場合, 下式がバッテリー交換を行う場合である.

2.2.2 車体価格

車体価格の評価式を説明する前に, まず新車の車体価格の算出式を説明する.

リチウムイオン二次電池の価格の算出式は,

$$B_{t+\Delta t} = B_t - vB_t \varepsilon \Delta t \quad (9)$$

ただし, v : 価格低下速度, ε : 乱数 (0~2) である.

そして, バッテリー価格とガソリン自動車の車体価格の和が電気自動車の車体価格となる.

t 時点でのバッテリー容量 $m_{j,g}$ (kWh) の価格 $P_{m,t}$ は,

$$P_{m,t} = m_{j,g} B_t \quad (10)$$

で表すことができる.

ガソリン自動車の価格を G_g とすると, バッテリー $m_{j,g}$ を搭載した新車の電気自動車の価格 $EV_{g,m,t}$ は

$$EV_{g,m,t} = m_{j,g} B_t + G_g \quad (11)$$

となる.

また, ハイブリッド自動車の場合ガソリン自動車の車体価格にプレミア分 pr が上乘せられて価格がつけられる, と仮定する. 新車価格を $HV_{g,m,t}$ と置くと

$$HV_{g,m,t} = m_{j,g} B_t + G_g + pr \quad (12)$$

という形になる.

ここから, 車体価格を評価していく仕組みについて説明する.

まず, ハイブリッド自動車とガソリン自動車の

場合を説明する。ハイブリッド車とガソリン自動車の場合、中古車の価格は年率一定割合 $dp_{j,g}$ で下降する、として算出した。 $dp_{j,g}$ は、各グレードや車種に相当する代表的な車が中古車市場で価格下落率がどの程度か、という調査を行った上で算出した。

新車価格を $c_{l,g,t}$ と置くと、

$$x_{i,j,g,2,t} = c_{l,g,t} (dp_{j,g})^t \quad (13)$$

とする。ただし、中古車から得られる価格による効用は消費者ごとに異なる率 d_i で下がるものとした。そこで購入価格評価の場合のみ(4)式を

$$F_{i,j,g,l,2,t} = (1 - d_i(t-l)) w_{i,k} f_{i,j,g,l,2,t} \quad (14)$$

と修正するものとする。

次に、電気自動車の中古車の価格決定モデルと評価方法について説明する。電気自動車の場合、電池の劣化を考慮した上で中古車価格をつけることが求められる。

まず、電気自動車の新車価格 $EV_{g,m,t}$ をバッテリー価格 $P_{m,t} = m_{j,g} B_t$ と自動車本体価格 G_g に分ける。自動車本体価格は、ガソリン自動車の場合と同じく年率一定割合 $dp_{j,g}$ で下がるとする。バッテリー価格は、ガソリン自動車とは異なる年率一定割合 db で下がる、と仮定する。

この2つの仮定により、年式 l の時点 t における電気自動車中古車価格は、

$$x_{i,j,g,2,t} = G_g (dp_{j,g})^t + m_{j,g} B_t (db)^t \quad (15)$$

とする。この値を用いて、ハイブリッド車やガソリン自動車と同様に効用値を決定する。

2.2.2.3 CO₂排出量

車両 j の CO₂ 排出量を $em_{g,j}$ とすると、消費者 i の年間排出量は、

$$x_{i,j,g,3,t} = run_i em_{j,g} \quad (16)$$

この値を評価に用いる。

2.2.2.4 インフラストラクチャー

インフラについては、今回はガソリン自動車及びハイブリッド自動車は現状ではガソリンスタンドの数がインフラの指標となり、電気自動車の場合は急速充電スタンドの数がインフラの指標となる、とする。ガソリンスタンド1店舗の持つ効用=急速充電スタンド1機の持つ効用とみなし、現状のガソリンスタンドの店舗数を1とした時にどれだけガソリンスタンド数及び急速充電スタンド数があるかを、指標として x に代入する。時点 t のガソリンスタンドと現時点でのガソリンスタンドの数の比を ss_t とおくと、

$$x_{i,j,4,t} = ss_t \quad (17)$$

とする。

また、まずガソリンスタンドは予測されているガソリン需要に比例して下がっていく(年率2%)^[4] こととした。

急速充電スタンドの普及に関しては、シナリオ分析を行うこととした。

ベースケースとして、現状で存在するガソリンスタンドを1とした時に、毎年0.025ずつ普及していく、というケースでシミュレーションを行った。2008年度末でガソリンスタンド数が約4200ヶ所なので、年間約1000台増やしていく、ということになる。

以上4つの値から算出される総効用値を消費者エージェントが自分の価値観で感じる効用とする。

3.他者評価

ここからは、ネットワークで繋がる他人の効用から各自動車を評価していくモデルについて説明する。

今回使用するスモールワールドモデル^[3]は、以下のアルゴリズムで生成される。

1. すべてのノードを環状に配置し、近隣の a 個のノードとエッジでつなぐ。
2. すべてのエッジのうち割合 p で選ばれたエッジはどちらか一方の橋を切り離し、ランダムに選択された先のノードに接続することでエッジを繋ぎ変える

このスモールワールドモデルを用いて、今回は消費者ネットワークモデルを構築した。

その時の他者から得た情報から得られる効用は、GV, HV, EV ごとに繋がりのある消費者 ne の平均評価値を算出した。

$$FF_{i,j,t} = \frac{wt_{i,5}}{ne_{i,j,t}} \sum_q^{ne_{i,j,t}} IF_{q,j,g,l,t-1} \quad (18)$$

そして最終的な効用 $TF_{i,j,g,l,t}$ は

$$TF_{i,j,g,l,t} = IF_{i,j,g,l,t} + FF_{i,j,t} \quad (19)$$

とした。消費者は買い替え期間が来る事にこの値が最も大きい車種と年式を選択して購入する。

今まで述べてきたことをまとめたモデルの概要図は図1のようになる。

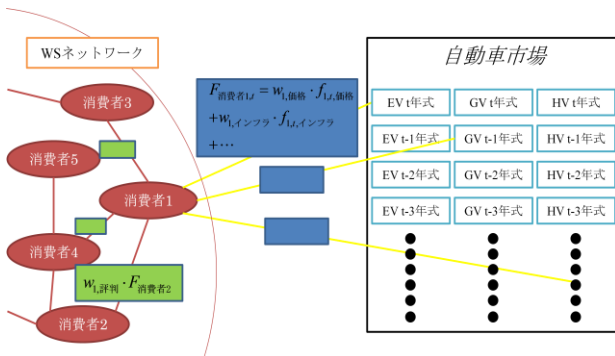


図1 シミュレーションモデル概要図

4. シミュレーション結果

EV, HV, GV のそれぞれの販売台数推移を算出したシミュレーション結果は図2のようになった。消費者3000名のコミュニティの中での電気自動車, ガソリン自動車, ハイブリッド自動車の販売台数の推移である。

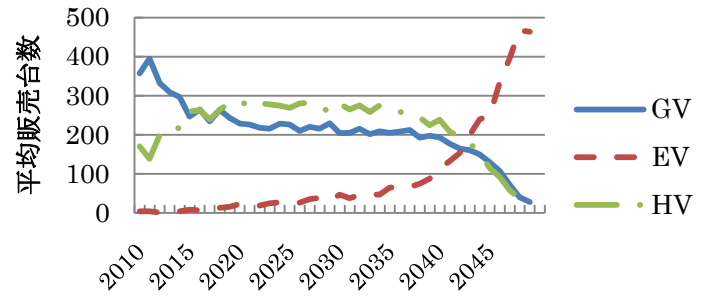


図2 各自動車の販売台数シミュレーション

また、この時の平均一人当たりガソリン使用量及び平均 CO₂ 排出量は図3, 4のようになった。

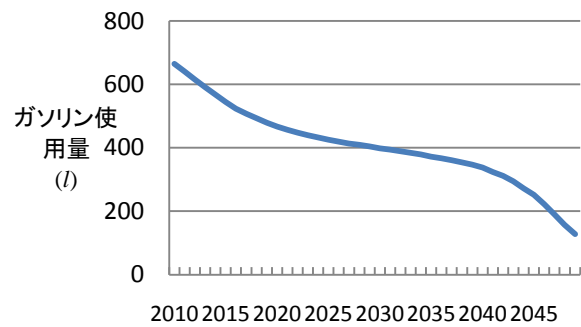


図3 一人当たりガソリン使用量

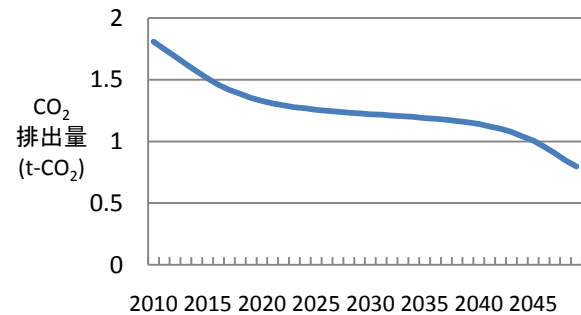


図4 平均一人当たり CO₂ 排出量

電気自動車及びハイブリッド車の普及によって、自動車の使用による石油依存や環境への負荷が大きく軽減されていることが分かる。

また、感度分析や様々なシナリオをおいて行ったシミュレーション結果として、以下のことがわかった。

- EV の販売は、インフラの普及状況を早めると普及が大きく早まり、電気自動車の普及に合わせて遅くすると電気自動車の普及が遅くなる

- バッテリーの価格が下がらない場合、及び電気自動車の寿命が短く交換回数がより多くなる場合電気自動車の販売台数が減る
- ネットワークによる評判を消費者が考慮しない場合と考慮した場合を比較すると、評判がある場合はその時点で最も売れているものが、より販売台数を伸ばし、逆に売れていない自動車よりも売れなくなる

5.結論

本研究では、コミュニティに所属する消費者が自分の判断基準により算出した効用と、コミュニティ内のネットワークで繋がる他者が判断基準に基づき算出した効用を基準とした上で自動車を選択し、購入するモデルを構築し、そのモデルに基づき電気自動車の普及予測を行い、それに加えて電気自動車の普及する条件や普及策について論じた。

結果として判明したことは、電気自動車の普及のためには、本質的な効用の向上が不可欠である、ということである。本質的な効用を改善するうえで重視すべきがインフラ及びバッテリーであることが分かった。

そして、電気自動車やハイブリッド自動車などの次世代自動車の普及により、CO₂ 排出量やガソリンの使用量を大きく引き下げることができることも証明できた。

また、ネットワークが存在することで、より多くの人に評価される製品は個人の基準に基づいてのみ評価するよりも高く評価され、逆に評価されにくい商品はより評価されなくなることが判明した。

これらのことから、課題として、消費者の持つ電気自動車やガソリン自動車のインフラに対する効用の評価のより詳細な調査やモデル化を行った上で、シミュレーションを構築することが挙げられる。

参考文献

- [1] F. M. Bass, "A New Product Growth Model for Consumer Durables," *Management Science* 15 (1969), pp215-227
- [2]Pindyck, "Volatility and Commodity Price Dynamics" *The Journal of Future Markets*, Vol.24 No.11 (2004) pp1029-1047
- [3]D.J. Watts,S.H. Strogatz "Collective dynamics of 'small-world' networks" *Nature* vol393 (1998) pp440-442
- [4] 石油連盟ホームページ
<http://www.paj.gr.jp/index.html>