

# 社会的相互作用を考慮した CEV普及シミュレーション

奥嶋 政嗣<sup>1</sup>・石井 亜也加<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 徳島大学准教授 大学院ソシオテクノサイエンス研究部 (〒770-8506 徳島市南常三島町2-1)  
E-mail: okushima.masashi@tokushima-u.ac.jp

<sup>2</sup>学生会員 徳島大学 大学院先端技術科学教育部建設創造システム工学コース

温室効果ガス排出削減に向けて、運輸部門においてもモーダルシフトの促進に加えて、EV・PHVといったクリーンエネルギー車両（CEV）への転換を促進することも必要である。ここでCEVの普及に関しては、社会的相互作用が影響することが考えられる。本研究では、局所的相互作用および社会的同調効果を考慮して、CEV普及促進策を検討するためのマルチエージェントシミュレーションモデルを構成する。ここでエコカー購入意向に関するアンケート調査結果を用いて、環境意識と社会的相互作用を考慮してCEV保有意向モデルを記述する。また、燃費と車両走行距離の関係についてもモデル化し、二酸化炭素排出量を算出可能とする。さらにスモールワールドネットワークにより社会的ネットワークを記述する。このシミュレータを用いて各種のシナリオに関して、CEVの普及促進状況を比較する。これより、CEVの普及に関して社会的相互作用の影響を把握することが可能となる。

**Key Words :** *multi agent simulation, local interaction, social conformity, small world network, clean energy vehicle*

## 1. はじめに

温室効果ガス排出による地球温暖化問題が深刻化しており、持続可能な低炭素型社会を早期に実現する必要がある。運輸部門においても、過度な自動車利用の抑制の取り組みがなされてきた<sup>1)</sup>。しかしながら、地方都市圏では公共交通機関などのサービス水準が低く、自動車依存型社会となっており、他の交通手段への転換は実現が容易ではない。このため、モーダルシフトの促進に加えて、電気自動車（EV）・プラグインハイブリッド自動車（PHV）のような地球環境への負荷が低いクリーンエネルギー車両（CEV:clean energy vehicle）への転換を促進することも必要である。

ここでCEVの普及に関しては、社会的相互作用が影響することが考えられる。これまでに、EV普及促進に関するWebアンケート調査結果に基づいて、社会的同調効果がEV保有意向に影響することが明らかにされている<sup>2)</sup>。ここでの社会的同調効果とは、社会全体でのEVの購入シェアの向上が、各個人のEV保有意向を高めることを指す。一方、筆者らはCEV保有意向に関するWebアンケート調査結果に基づいて、環境意識（温室効果ガス排出削減の必要性の認識）がCEVの保有可能性に影響するこ

とを検証している<sup>3)</sup>。また、地球環境問題に関わる環境意識には、親近者の環境意識が影響し、局所的相互作用が働くことを検証している<sup>4)</sup>。したがって、CEVの普及に関しては、社会的同調効果だけでなく環境意識とその局所的相互作用も考慮する必要があると考えられる。ここで、筆者らは通勤交通手段転換促進策を検討するために、環境意識に関する局所的相互作用を表現したマルチエージェントシミュレーションモデル（MAS）を構築している<sup>5)6)</sup>。このMASモデル<sup>6)</sup>の特徴は、エージェント間の局所的相互作用の表現のために、スモールワールドネットワークモデル<sup>7)</sup>により社会的ネットワークを記述していることである。このMASモデルの枠組みを利用することで、環境意識に関する局所的相互作用が社会全体に及ぼす影響を捉えることが可能となる。

そこで本研究では、既存研究<sup>6)</sup>におけるMASモデルを参考として、CEVの保有に関する社会的同調効果および局所的相互作用を考慮して、CEV普及促進策を検討するためのマルチエージェントシミュレーションモデル（CEVMAS）を構成する。ここで、CEV保有意向に関するアンケート調査結果を用いて、CEV保有意向モデルを記述する。ここで環境意識だけでなく、社会的同調効果と直接的な局所的相互作用の影響を把握する。このよう

な枠組みで構成したシミュレータCEVMASを用いて、各種のシナリオに関して、人工社会におけるCEVの普及促進状況を観察する。これより、CEVの普及促進に関して、社会的同調効果と局所的相互作用を考慮したMASモデルの有用性を示す。

## 2. CEVの保有意向に関する分析

ここでは、CEV保有意向アンケート調査結果データを用いて、次回の購入車両に関して、EVあるいはPHVを候補とする可能性について分析する。また、社会的相互作用および経済的インセンティブがCEVの保有意向に与える影響について分析を行う。

### (1) CEV保有意向調査アンケートの概要

既存研究において、現状でのCEV保有意向を把握するために、徳島県民を対象にWebアンケート調査が実施されている<sup>3)</sup>。アンケート調査期間は、大手メーカーによるEVの販売時期及びPHVの販売時期よりも早い2011年10月21日～28日および11月15日～24日である。有効サンプルとして464サンプルが得られている。主な調査項目は世帯属性、現状の保有車両、次回保有意向車両である。次回保有意向車両については、CEVを含む車種、車型、購入時期、購入希望価格の4項目について回答が得られている。また、CEVのデザインおよびメーカーなどが多様化した前提で、仕様を具体化した質問を行い、CEVの選択傾向が把握されている。さらに、局所的相互作用として、親近者がCEVを保有している場合の選択および、社会的同調効果として、社会全般での保有率が与えられた場合の選択について回答が得られている。

### (2) 次期車両保有意向に関する整理

ここでは、世帯での自動車の購入予定時期について整理した後、購入予定車両の車型および購入予定価格について分析する。さらに、これらを踏まえてCEVの保有可能性について分析する。

#### a) 購入予定時期

世帯での自動車の購入予定について、買い替えおよび新規購入（買い足しを含む）の時期に関する回答の割合を整理して、図-1に示す。ここでは、買い替えについては自動車保有世帯の443サンプル、新規購入については全被験者の464サンプルを対象として、それぞれについて回答を得ている。

買い替えについては、時期を想定しているのは自動車保有世帯の54%であり、5年以内での更新可能性を検討している世帯は35%であった。このことから、地球環境負荷の低い自動車の普及期間に関しては、たとえ販売さ

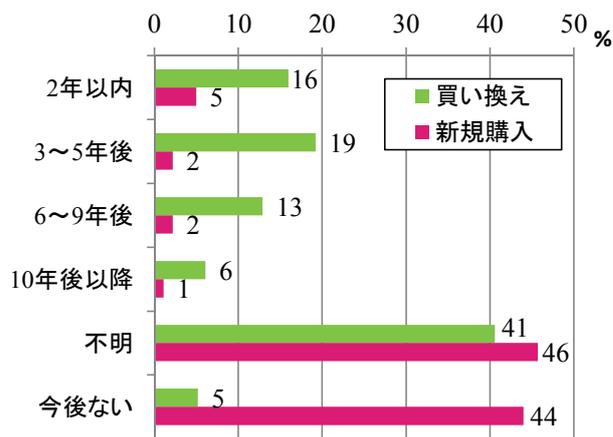


図-1 自動車購入予定時期

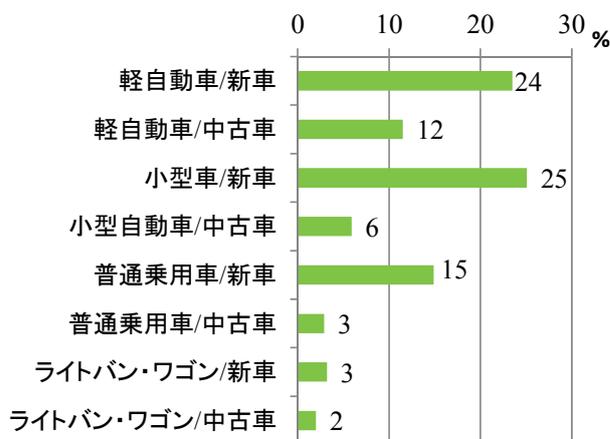


図-2 購入候補車種

れる車両のシェアが大幅に増加したとしても、5年程度の短期間では十分ではないことが明確である。

一方、新規購入に関しては、時期を想定しているのは11%であった。また5年以内での新規購入可能性を検討している世帯は7%であった。買い替えおよび新規購入の可能性について両方に「今後一切ない」と回答した割合は5%であり、大多数の世帯では今後も自動車の購入可能性があることがわかる。

以下では、買い替えおよび新規購入の可能性のないサンプルを除いた442サンプルを対象に、次回の購入車両についての分析を行う。

#### b) 次期購入予定車両の傾向

次回に世帯で購入する自動車について、車型および新車・中古車を区分して、購入の可能性の高い上位3位までの回答を得ている。ここでは、購入予定車両候補の第1位の選択割合を算出した結果を図-2に示す。

購入予定車両候補の第1位としては、新車の割合が78%と高いものの、中古車の購入意向も22%あり、地球環境負荷の少ない車両の普及検討では、中古車の存在も無視できないものと考えられる。一方、車型に関しては、軽自動車および小型乗用車について、現状の保有割合と

同程度の購入意向がみられる。しかしながら、普通乗用車の購入意向については、現状の保有割合よりも減少する傾向がみられる。

つぎに、購入予定車両の車両価格に関してしてみると、100万～200万円が全体の45%を占め、300万円以上の回答は6%と非常に少ない。したがって、現在販売されているEVおよびPHVに関しては、販売価格の観点からは購入予定者が限定されることになる。

### c) CEVの保有可能性

今回に世帯で購入する自動車の車種（動力形式）について購入の可能性の高い上位3位までの回答を得ている。なお、候補として第2位、第3位が特にない場合は「不明」を選択するように指示をしている。車種別に、回答順位の割合を算出した結果を図-3に示す。第1位に選択された車種の割合についてみると、低燃費型ガソリンエンジン自動車を候補とする割合が32%と高く、ついで（非低燃費型）ガソリンエンジン自動車およびHVの選択意向が高いことがわかる。

低燃費型ガソリンエンジン自動車については、アンケート実施時に燃費が25 km/L以上であることを明示して提示している。現状の保有車両と比較して、低燃費型ガソリンエンジン自動車およびHVのシェアが大幅に増加する可能性が伺える。これは燃費を考慮する利用者層が拡大しつつあることを示していると考えられる。一方で、低燃費型でないガソリンエンジン自動車の購入意向についても、以前として一定以上の割合で存在していることにも留意が必要である。

一方、EVあるいはPHVを候補として第1位に挙げる被験者の割合はあわせて6%であり、少数であった。なお「プラグインハイブリッド自動車（PHV）とは、家庭などで充電が可能なハイブリッド自動車で、主にモーターで走行する車両である」ことを被験者に提示している。ここで、第1位から第3位までにEVあるいはPHVを挙げている回答者の割合は全体の22%であった。以上のようなことから、当面は低燃費型ガソリンエンジン自動車およびHVの普及が先行し、EVあるいはPHVの普及はその後の状況次第であると考えられる。

つぎに、EVあるいはPHVのデザインおよびメーカーなどが多様化した前提で、仕様を具体化した質問を行い、選択傾向を把握する。被験者に対して、次回の購入を検討した車両のなかで、最も購入可能性の高い仕様の車両と比較して、EVあるいはPHVを購入するかの選択について質問している。具体的なEV・PHVの車両条件は以下の項目を提示している。

- ・ハイブリッド自動車を除く（電気自動車あるいはプラグインハイブリッド自動車）
- ・温室効果ガス排出量：ゼロ（モーターでの走行中には二酸化炭素を発生しない）

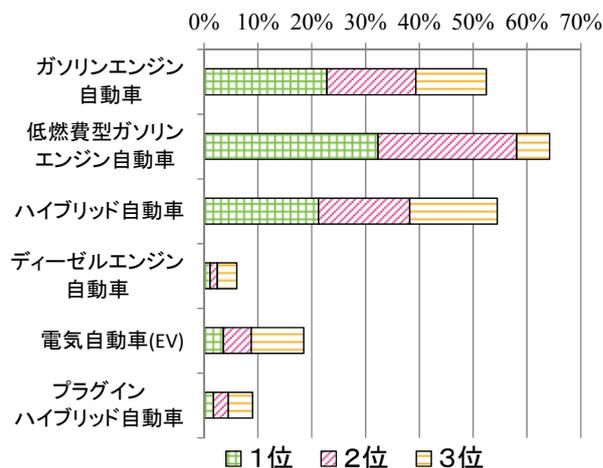


図-3 購入候補車種

- ・車両購入価格：現行補助金（上限100万円）を差し引いて、比較車両より100万円程度高額
  - ・家庭でのフル充電までの時間：8時間程度
  - ・平均走行コスト：1円/km程度（通常のガソリン車：10円/km程度、その他の低燃費車両：6円/km程度）
  - ・モーターでの航続可能距離：200km程度
  - ・デザイン・定員・メーカーなど：比較する車両と同一
- これは、デザイン・定員・メーカーなどの条件を除いては、現在販売されているEVの仕様を提示したものである。以上のような条件設定に対して得られた回答では、EVが17%、PHVが25%となっており、次回の購入予定車両の候補として第1位に選択された車種の割合と比較すると、大幅に高いことがわかる。したがって、EVあるいはPHVのデザインおよびメーカーなどが多様化し、従来の車両と燃費性能と車両価格のみで比較できるようになった場合には、シェアが拡大する可能性が伺える。また、選択対象の候補となった場合には、一定以上のシェアが確保できる可能性があることが示唆される。

### (3) CEV保有への社会的相互作用による影響

ここでは、CEV保有意向への社会的相互作用による影響について分析する。社会的相互作用として、親近者（友人・同僚など）からの影響（局所的相互作用）および社会全体での市場シェアの影響（社会的同調効果）について検討する。

まず、局所的相互作用に関して、CEV保有意向への影響を分析する。アンケート調査では、被験者の一番身近な人（友人・同僚など）を1人想定し、その親近者がCEVを保有している場合について、CEVを購入する可能性について質問している。次回の購入予定車両の候補としてCEVが含まれているかでCEV保有可能性を区分して、親近者のCEV保有の局所的影響によるCEV購入可能性の回答割合を算出した結果を図-4に示す。

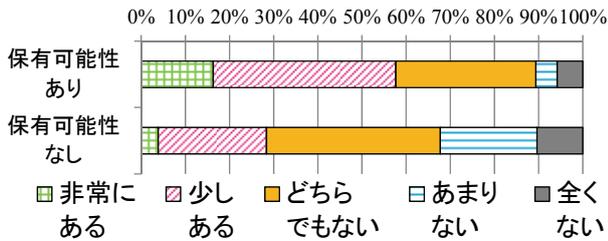


図4 CEV保有可能性への局所的影響

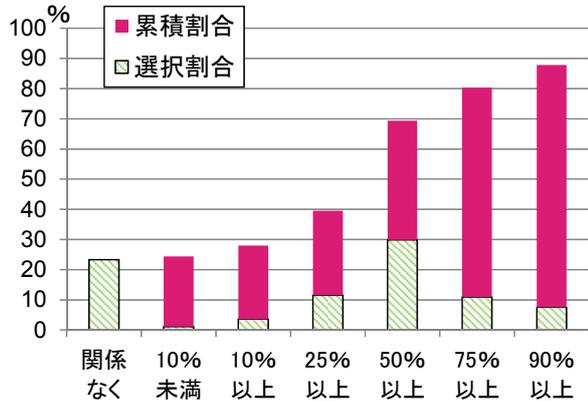


図5 市場シェアとCEV保有可能性の関係

CEV保有可能性がない被験者（購入予定車両の候補外である被験者）においても、親近者の影響により購入可能性が「非常にある」または「少しある」との回答が合わせて28%である。したがって、CEV保有意向に関して、親近者の影響（局所的相互作用）を考慮する必要性が示唆された。

つぎに、社会的同調効果に関して、CEV保有への影響を分析する。アンケート調査では、CEVを保有する自動車保有者の割合を示し、CEVの購入有無について質問している。市場シェア（CEVの保有割合）に対応したCEV保有意向を示した回答の割合を図5に示す。

市場シェアが90%以上の場合を除いては、市場シェアよりも購入意向を示す累積割合が高い結果となっている。したがって、市場シェアは拡大する方向で推移する可能性が高いことが考えられる。特に、50%以上の保有割合の場合には、購入意向は70%に達する。このように、社会的同調効果が強いことがわかる。

### 3. CEV普及MAシミュレーションの構成

ここでは、既存研究でのMASモデル<sup>6)</sup>を参考としながら、CEV普及促進策の検討のためのマルチエージェントシミュレーションモデルCEVMASを構成する。

#### (1) MASモデルの構成

本研究でのMASモデル全体の基本フローを、図6に

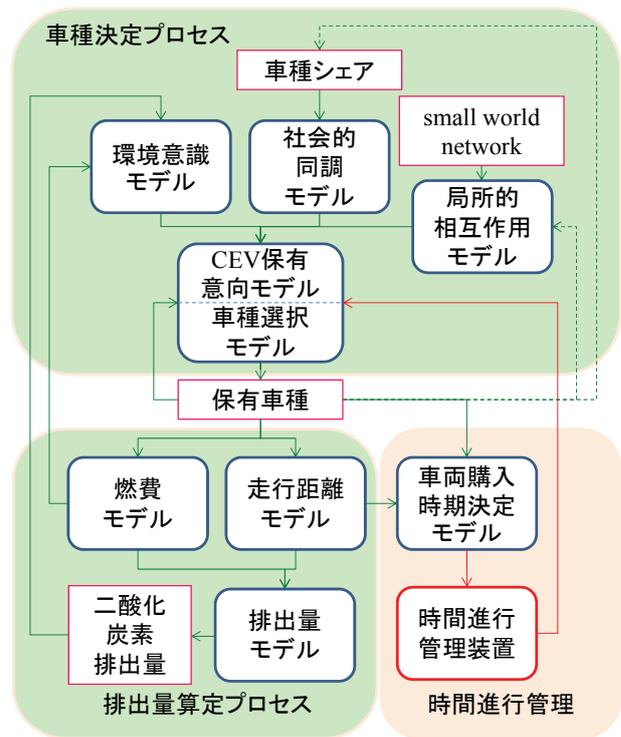


図6 マルチエージェントシミュレーションの全体フロー

示す。「車種選択プロセス」および「排出量算定プロセス」に加えて、「時間進行管理プロセス」を含めた構成としている。

「車種決定プロセス」では、エージェントの車両購入時点での車種選択の意思決定を記述する。このとき、世帯属性および保有車両だけでなく、環境意識、社会的同調、局所的相互作用を考慮する。「環境意識モデル」では、自己の保有車両の燃費に社会全体の「二酸化炭素排出量」を含めて交通環境を評価すると仮定する。一方、「社会的同調モデル」では、社会全体のCEV車両のシェアにより、CEV保有意向に影響する同調効果を表現する。また、「局所的相互作用モデル」では、社会的ネットワークにおいて関連するエージェントの保有車種により、CEV保有意向に影響する相互作用効果を記述する。このとき、社会的ネットワークをスモールワールドネットワークモデルにより表現する。車種選択に関しては、これらの要素を考慮して、「CEV保有意向モデル」ではCEV保有意向の程度を測定し、「車種選択モデル」により保有車種を確率的に決定する2段階のモデル構造としている。

「排出量算定プロセス」では、保有車両の利用による二酸化炭素排出量を推計する。このとき、保有車両の燃費および走行距離を考慮する。「燃費モデル」では、世帯属性と保有車両に対応した確率分布（ワイブル分布）に基づいて、確率的に保有車両の燃費を決定する。「走行距離モデル」についても同様に、世帯属性と保有車両に対応した確率分布に基づいて、確率的に平日休日別の

1日の総走行距離を決定する。これらの要素に基づいて、「排出量モデル」ではエージェントの保有車両利用による二酸化炭素排出量を推計する。この個々のエージェントの排出量を総和して、社会全体での二酸化炭素排出量を算定する。

「時間進行管理プロセス」では、時間の進行とエージェントの車両購入イベントを管理する。「車両購入時期決定モデル」では、世帯属性、保有車両および走行距離に対応した確率分布に基づいて、確率的に車両購入時期を決定する。この各エージェントの車両購入イベントの生起により、当該エージェントにおける「車種選択プロセス」および「排出量推計プロセス」が実行される。このように、人工社会の状況を順次更新することで、シミュレーションを実行し、CEVの普及状況および二酸化炭素排出量の推移を観察する。

## (2) 時間進行管理プロセス

時間進行管理プロセスでは、車両購入時期決定モデルにより確率的に車両購入時期を決定するエージェントの車両購入イベントの生起を実行する。ここでは、次回車両購入までの期間を確率的に決定することを目的として、CEV保有意向に関するアンケート調査結果を用いて、車両購入時期決定モデルを構築する。各種要因 $x_k$ の影響（係数パラメータ $\beta_k$ ）も考慮できるパラメトリックな加速ハザードモデル<sup>8)</sup>の枠組を用いる。ここで、車両購入時期の確率分布としてワイブル分布を仮定すると、次回車両購入までの期間  $s$  (年)の累積確率 $F(s|x)$ は、式(1)のように記述できる。

$$F(s|x) = 1 - \exp\left[-s^p \cdot \exp\left(\sum -p\beta_k x_k\right)\right] \quad (1)$$

統計的に有意でない要因は順次削除していくことにより、最終的に得られた車両購入時期決定モデルのパラメータ推定結果を表-1に示す。

次回車両購入までの期間について、世帯構成員に幼児・乳児が含まれる場合には長く、高収入の世帯では短いことがわかる。

マルチエージェントシミュレーションでは、この車両購入時期決定モデルを用いて確率的に次回車両購入時期を決定することとする。このため、決定された車両購入時期になったエージェントのみが車両選択プロセスにしたがって車両選択を行うこととし、それ以外のエージェントに関しては各時点における保有車両の変更はないものとする。

## (3) 排出量算定プロセス

排出量算定プロセスでは、「燃費モデル」、「走行距離モデル」および「排出量モデル」により個々のエージェントについて保有車両の利用による二酸化炭素排出量

表-1 車両購入時期決定モデルのパラメータ推定結果

要因名称	パラメータ	t値
定数項	1.503	29.69
幼児・乳児ダミー	0.293	2.43
高収入ダミー	-1.046	-4.50
形状パラメータ $p$	1.426	-7.04

表-2 燃費モデルのパラメータ推定結果

要因名称	パラメータ	t値
定数項	2.308	66.23
軽自動車ダミー	0.431	10.36
小型乗用車ダミー	0.305	7.82
HVダミー	0.750	6.81
メインドライバー30才未満女性	0.304	3.43
メインドライバー50～64才女性	0.273	4.77
車両走行距離	0.002	2.04
形状パラメータ $p$	3.840	-29.98

を推計し、社会全体での二酸化炭素排出量を算定する。ここでは、これらのモデルの具体的な構成を行うこととする。

### a) 燃費モデル

既存研究において、現在の保有車両の特性を表す指標として燃費の分布について分析し、保有車両の燃費モデルを構築している<sup>9)</sup>。ここで燃費のヒストグラムの分布形状からワイブル分布が採用されている。各種要因 $x_k$ の影響（係数パラメータ $\beta_k$ ）も考慮して、前述の車両購入時期決定モデルと同様に、式(2)に示すパラメトリックな加速ハザードモデル<sup>8)</sup>の枠組を用いて燃費 $y$ の累積確率 $F(y|x)$ が分析されている。

$$F(y|x) = 1 - \exp\left[-y^p \cdot \exp\left(\sum -p\beta_k x_k\right)\right] \quad (2)$$

統計的に有意でない要因は順次削除していくことにより、最終的に得られた燃費モデルのパラメータ推定結果を表-2に示す。車種については「HV」の燃費が高く、車型では「小型乗用車」よりも「軽自動車」の燃費が高いことを示す妥当な結果が得られている。また、30才未満および50～64才の女性がメインドライバーである場合および、1日あたりの車両走行距離が長い場合には、燃費の高い車両を保有・利用する傾向がうかがえる。このように、車型、メインドライバー属性および車両走行距離などの要因と現状保有車両の環境性能との関係が統計的に示されている。本研究では、この既存研究で構築された燃費モデルを、CEV以外の保有車両の燃費を確率的に決定するために適用する。

### b) 走行距離モデル

保有車両利用による1日における走行距離を確率的に

決定することを目的として、CEV保有意向に関するアンケート調査結果を用いて、走行距離モデルを構築する。各種要因 $x_k$ の影響（係数パラメータ $\beta_k$ ）も考慮して、前述の車両購入時期決定モデルおよび燃費モデルと同様に、式(3)に示すパラメトリックな加速ハザードモデル<sup>8)</sup>の枠組を用いて走行距離 $d$ の累積確率 $F(dx)$ を分析する。

$$F(d|x) = 1 - \exp\left[-d^p \cdot \exp\left(\sum -p\beta_k x_k\right)\right] \quad (3)$$

統計的に有意でない要因は順次削除していくことにより、最終的に得られた走行距離モデルのパラメータ推定結果を表-3に示す。ここでは形状パラメータおよび定数項を除くすべての要因が有意とならなかった。

### c) 排出量モデル

排出量モデルでは、「走行距離モデル」により決定された走行距離 $d$ に、単位走行距離あたりの二酸化炭素量の排出原単位 $ef$ を乗じて、個々のエージェントの二酸化炭素排出量 $ce$ を式(4)のように算定する。

$$ce = ef \cdot d \quad (4)$$

ここで、二酸化炭素量の排出原単位 $ef$ については、CEVおよびCEV以外の車両に区分して算定する。CEVでは、国内大手メーカーにより市販されている電気自動車の単位走行距離あたりの二酸化炭素量の公表値 $0.048\text{kg/km}$ を排出原単位 $ef$ とする。一方で、CEV以外の車両では、単位距離 $1\text{km}$ の走行により排出される二酸化炭素排出量原単位 $ef_0$ は、ガソリン $1\text{L}$ の消費による二酸化炭素排出量 $ef_0 (=2.3\text{kg/L})$ <sup>9)</sup>と「燃費モデル」により決定された保有車両の燃費 $y$ により式(5)のように算定する。

$$ef = ef_0 / y \quad (5)$$

社会全体での二酸化炭素排出量は、すべての自動車利用エージェントについて、二酸化炭素排出量 $ce$ を集計することで算定できる。また、全体での二酸化炭素排出量と二酸化炭素排出枠 $ce_{\max}$ の差から、超過排出量を算定し、これをオフセットするための一人あたりの平均費用 $ac$ を式(6)で求める。

$$ac = \frac{p}{n} \left( \sum_i ce_{[i]} - ce_{\max} \right) \quad (6)$$

なお、全体での二酸化炭素排出量が二酸化炭素排出枠よりも少ない場合には、平均費用 $ac$ は発生しないものとする。ただし、ここでは二酸化炭素排出枠 $ce_{\max}$ を推計開始年次において $5.0[\text{ton-CO}_2/\text{day}]$ としている。また、二酸化炭素排出枠は徐々に減少することとし、16年後には50%減少することとして設定する。

また、既存研究<sup>6)</sup>における通勤交通手段転換に関わるMAシミュレーションと同様に、二酸化炭素排出権の平均取引価格 $p$ は排出量に比例して式(7)のように設定されることとする。

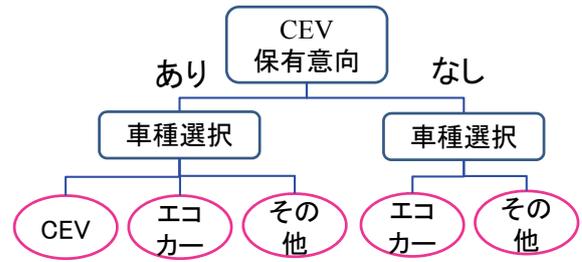


図-7 車種選択についての意思決定構造の仮定

$$p = \frac{p_0}{ce_{\max}} \sum ce_{[i]} \quad (7)$$

ここで環境省JVETSによる二酸化炭素排出権の平均取引価格を参考に、二酸化炭素の単位排出削減費用 $p_0$ を $1,212\text{円/ton-CO}_2$ と設定する<sup>10)</sup>。

以上のように、CEV普及促進策検討のためのマルチエージェントシミュレーションの基本的な構成を行った。

### (4) 車種決定プロセス

本研究では、保有車種決定過程に関して、環境意識、局所的相互作用を考慮して、車両購入時点での車種選択を確率的に表現する。このため、車種決定プロセスを「CEV保有意向モデル」、「車種選択モデル」に加えて、「環境意識モデル」および「局所的相互作用モデル」で構成する。

#### a) 車種選択に関する意思決定構造の仮定

車種選択に関しては、図-7に示すような2段階のモデル構造としている。上位では「CEV保有意向モデル」によりCEV保有意向の程度を測定する。下位ではCEV保有意向の有無に対応して、それぞれの区分に応じた「車種選択モデル」により保有車種を確率的に決定する構造としている。本研究では、CEVはEVあるいはPHVのいずれかの車種選択を表し、エコカーはHVあるいは燃費 $25\text{km/L}$ 以上の低燃費型ガソリンエンジン自動車のいずれかの車種選択を表すこととする。

#### b) CEV保有意向モデル

ここでは、エコカー保有意向アンケート調査結果のデータを用いて、非集計二項ロジットモデルによりCEV保有意向モデルの構築を行う。被説明変数となるCEV保有意向の有無に関しては、次回保有車両候補に関する質問への回答に加えて、局所的相互作用の影響への回答も合わせて分析することとする。次回保有車両候補に関する質問への回答については、候補車種上位3位までにCEVを挙げたサンプルについて「CEV保有意向」を「有り」とする。一方、局所的相互作用の影響への回答については、「非常にある」または「少しある」との回答を「CEV保有意向」を「有り」とする。このように、442サンプルの2種類の質問への回答として、884の選択結果を分析の対象とした。

CEV保有意向に関わる要因として、世帯人数、運転免許保有者数、世帯構成属性、保有車両の車種・車型、メインドライバー、次回保有車型、車両価格、走行距離、利用頻度、地球温暖化への関心、車両排出ガスの削減必要性の認識および局所的影響を検討した。各説明変数はカテゴリー化によりダミー変数とし、「CEV保有意向あり」の選択肢固有変数とした。統計的に有意でない要因は順次削除していくことにより、最終的に得られたCEV保有意向モデルのパラメータ推定結果を表-3に示す。なお、尤度比は0.201となり、モデルの適合度は概ね良好である。

CEV保有可能性に関わる要因として、「地球環境問題への関心」が有意となっており、関心の高さに応じて保有可能性が高くなる傾向があることがわかる。また、多人数世帯では保有可能性が高い。さらに局所的相互作用の影響についても有意となっており、親近者のCEV保有が影響を与える構造となっていることがわかる。定数項は負で有意となっており、全体的には保有意向が少ない傾向が表現されている。

### c) 車種選択モデル

ここでは、CEV保有意向の有無に対応して、それぞれの区分に応じた「車種選択モデル」により保有車種を確率的に決定するモデルを構築する。被説明変数として、次回保有車両候補に関する質問への回答より、候補車種第1位とした車種を選択結果とする。車種選択に関わる要因としては、CEV保有意向に関わる要因として検討した項目と同一として検討した。

CEV保有意向有りの場合の車種選択モデルに関しては、CEV保有意向がある104サンプルを対象に分析する。ここで車種に関しては「CEV」「エコカー」「その他」の3種類に区分することとし、マルチロジットモデルを適用する。統計的に有意でない要因は順次削除していくことにより、最終的に得られたCEV保有意向有りの場合の車種選択モデルのパラメータ推定結果を表-4に示す。尤度比は0.378となり、モデルの適合度は良好である。

パラメータ推定結果より、中高年男性がメインドライバーである場合にエコカーの選択可能性が高く、特に高齢男性ではCEVの選択可能性が高いことがわかる。また、自動車排出削減の必要性について認識が高い場合にはCEVの選択可能性が高く、認識が低い場合にはエコカーの選択可能性が低い傾向となること表現されており、自動車排出削減の必要性が車種選択に関わる事が統計的に示されている。また、地球環境問題への関心が高い場合には、非低燃費型ガソリン自動車の選択可能性が低いこともわかる。一方、直近（2年以内）での自動車購入予定がある場合には、非低燃費型ガソリン自動車の選択可能性が高く、購入時期も車種選択に影響することがわかった。またエコカーの定数項が正で有意となっており、

表-3 CEV保有意向モデルのパラメータ推定結果

要因名称	係数	t値
定数項	-1.529	-7.895
局所的影響	0.623	3.976
多人数世帯	0.527	2.910
地球環境問題への関心:高	0.665	3.754
地球環境問題への関心:低	-1.316	-5.385

表-4 車種選択モデル（CEVあり）のパラメータ推定結果

選択肢	要因名称	係数	t値
CEV	メイン車両:ライトバン	2.840	2.027
	高齢男性運転	2.240	2.631
	排出削減認識:高	1.389	2.496
エコカー	排出削減認識:低	-1.335	-2.006
	中高年男性運転	1.693	2.463
	日走行距離:10-35km	1.050	1.996
	定数項	1.383	3.478
その他	直近購入予定あり	2.976	3.111
	地球環境関心:高	-2.705	-2.023

表-5 車種選択モデル（CEVなし）のパラメータ推定結果

要因名称	係数	t値
メイン車両:小型	0.837	3.712
排出削減認識:低	-1.067	-4.592

CEV保有意向のある被験者に関してはCEVよりもエコカーの選択傾向が強いことが表現されている。

つぎに、CEV保有意向無しの場合の車種選択モデルに関しては、CEV保有意向があるサンプルを除いた338サンプルを対象に分析する。ここで車種に関しては「エコカー」「その他」の2種類に区分することとし、二項ロジットモデルを適用する。統計的に有意でない要因は順次削除していくことにより、最終的に得られたCEV保有意向無しの場合の車種選択モデルのパラメータ推定結果を表-5に示す。

パラメータ推定結果より、CEV保有意向がない場合には、小型自動車世帯で最もよく利用する車両であれば、エコカーの選択可能性が高いことがわかる。一方、自動車排出削減の必要性について認識が低い場合には、エコカーの選択可能性が低い傾向となることがわかった。

### d) 環境意識モデル

通勤者エージェントの環境意識更新プロセスは、「交通環境評価」、「経験的学習による意識変容」、「社会的同調性更新」および「環境意識更新」により構成する。

「交通環境評価」では、通勤交通手段の効用の差で表される満足度だけでなく、社会全体の運輸部門での二酸化炭素排出削減費用の負担を考慮する。二酸化炭素排出量に応じた平均オフセット費用の負担は、エージェント

の環境意識  $eco$  に応じた感度  $\rho$  で評価されるものとする。環境意識とオフセット費用に対する感度の関係を図-8に示す。ここで環境意識指標は、「地球環境問題への関心」の程度に対応して規定することとしている。

交通手段の効用差で表される自動車利用の満足度を貨幣価値換算したものと、エージェントの環境意識  $eco$  に応じた感度  $\rho$  で評価されるオフセット費用の負担感を併せて、交通環境評価値  $g$  を式(8)で算定する。

$$g_{[i]} = \frac{u_{[i]}^{car} - u_{[i]}^{pub}}{|\theta_{ic}|} - \rho_{[i]} \cdot ac \quad (8)$$

「経験的学習による意識変容」では、内発的な環境意識の向上（あるいは減退） $\lambda$  を式(9)で表されるルールによって規定する。

$$\left. \begin{array}{l} \text{if } g \text{ is neg and } \Delta g \text{ is neg then } \lambda \text{ is pos} \\ \text{if } g \text{ is pos and } \Delta g \text{ is pos then } \lambda \text{ is neg} \end{array} \right\} \quad (9)$$

具体的な算定プロセスでは、簡略ファジィ推論を利用する。ここで交通環境評価値のメンバシップ関数は図-9に示すように設定することとする。

「社会的同調性更新」では、関係の深いエージェントから自身の環境意識の向上（あるいは減退）に受ける影響の程度を、式(10)のように設定する。ここで  $w_{[i]}(t)$  は後述するように、周囲のエージェントからの影響の強さを表している。

$$\beta_{[i]} = w_0 w_{[i]}(t) \quad (10)$$

「環境意識更新」では、内発的な変化および関係の深いエージェントからの影響による変化にしたがって、式(11)のようにエージェントの環境意識  $eco$  を更新する。

$$eco_{[i]}(t) = eco_{[i]}(t-1) + \lambda_{[i]} + \beta_{[i]} \quad (11)$$

以上のように交通環境とエージェントの環境意識の関係を仮定した。

#### e) 局所的相互作用モデル

エージェント間の相互作用を記述するために、既存研究<sup>6)</sup>と同様にWSモデルにしたがって、small world networkモデルにより、概念空間において近接するすべてのエージェント間を相互にリンクで結節する。本研究においても、概念空間でのエージェントの相互作用の影響範囲を規定する限界距離  $L_{max}$  を設定し、概念空間での距離  $l$  が  $L_{max}$  以下となるエージェント間を連結する。つぎに、一定の確率でリンクを削除して、ランダムに選択した別のエージェントと連結しなおす。本研究においても、参考文献<sup>7)</sup>に示されている例と同様に、リンクの再連結を行う確率を5%と設定している。また、再連結したリンクの距離は限界距離の1/2と設定する。

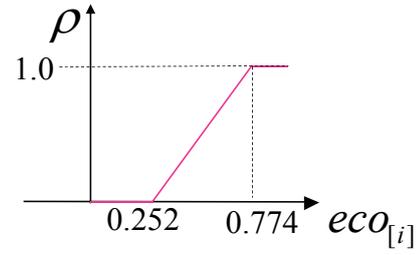


図-8 環境意識に対応したオフセット費用に対する感度

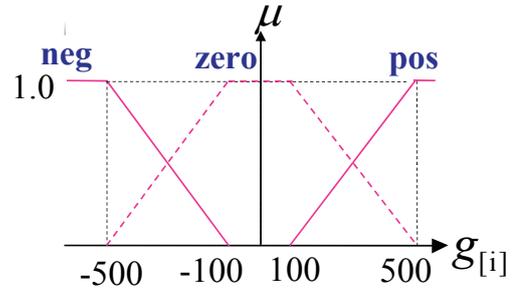


図-9 交通環境評価値のメンバシップ関数

このときエージェントの概念空間上の再配置は行っておらず、これらのリンクに関しては概念空間上の配置あるいは距離とエージェント間の関係性が連動していない。ここでは、概念空間での距離  $l$  によってエージェント間  $(i, k)$  の関係性の大きさ  $\gamma_{[i,k]}$  を式(12)のように表現する。

$$\gamma_{[i,k]} = \frac{L_{max} - l_{[i,k]}}{L_{max}} \quad (12)$$

環境意識に関する周囲のエージェントからの影響の強さ  $w_{[i]}^{eco}$  を、この関係性の大きさ  $\gamma_{[i,k]}$  および周囲のエージェント  $k$  の環境意識に基づいて、式(13)により算定する。

$$w_{[i]}(t) = \frac{\sum \gamma_{[i,k]} \cdot (eco_{[k]}(t) - eco_{[i]}(t))}{\sum \gamma_{[i,k]}} \quad (13)$$

これは周囲のエージェントとの環境意識の差異を関係性の大きさによって案分し、関係性のあるすべてのエージェントに関しての影響を集積するというものである。したがって、関係性の大きいエージェントの環境意識が高い場合には、そのエージェント自身の環境意識が向上することになる。

また、CEV保有に関する周囲のエージェントからの影響の強さ  $w_{[i]}^{CEV}$  については、この関係性の大きさ  $\gamma_{[i,k]}$  および周囲のエージェント  $k$  のCEV保有の有無  $\delta_{[k]}^{CEV}$  に基づいて、式(14)のように算定することとする。

$$w_{[i]}^{CEV}(t) = \frac{\sum r_{[i,k]} \cdot \delta_{[k]}^{CEV}(t)}{\sum r_{[i,k]}} \quad (14)$$

したがって、関係性の大きいエージェントがCEVを保

有している場合には、そのエージェント自身のCEV保有可能性が向上することになる。

以上のように、環境意識と社会的相互作用を考慮してCEV普及促進策の検討のためのマルチエージェントシミュレーションモデルCEVMASを構成した。

#### 4. CEV普及状況推計への適用

これまでに構築したCEVMASを用いて、仮想社会でのCEV普及状況と環境意識の推移を観測する。

##### (1) 仮想社会の条件設定

ここでは、CEV 保有意向アンケート調査の対象地域である徳島都市圏を参考に、地方都市圏における CEV 普及状況の推移を観察するための仮想社会を構成する。

エージェントは世帯単位とし、アンケート調査のサンプルを基本エージェントとした。基本エージェントについては、当該サンプルのそれぞれの質問項目に対する回答に基づいてエージェント属性を設定した。基本エージェントを均等に拡大して複製することで、合計 10000 エージェントを設定した。これは参考とした徳島市の26分の1程度のスケールに相当する。

エージェントの環境意識指標に関しては、「地球環境問題への関心」の程度に対応して、それぞれの回答の割合に応じて閾値を規定した。この閾値に応じてランクごとの範囲を確定した後、エージェントごとの「地球環境問題への関心」の程度に対応して、一様乱数によりランダムに指標を設定した。

推計期間に関しては、1サイクルを1週間単位とし、20年後（1040週）までの推移を観察することとした。ここでは車両技術革新などは考慮しないこととする。また、環境意識の更新および局所的相互作用の影響について、CEV普及状況への影響をみるために表-6に示すようなケースを設定している。

ここで、環境意識の更新が「なし」のケースでは、式(11)による更新を実行しないこととする。また、局所的相互作用の影響が「なし」のケースではCEV保有に関する周囲のエージェントからの影響がないものとし、「弱影響」のケースでは式(14)によりを算定することとする。一方、「強影響」のケースでは、関係するいずれかのエージェントがCEVを保有していた場合に、影響の強さを最大値の「1」とすることとした。

##### (2) CEV普及状況の推移

構築した CEVMAS を用いて、仮想社会における CEV 普及状況として、各ステップでの車両保有状況、二酸化炭素排出状況および環境意識の推移を観察する。

表-6 ケース設定

ケース名称		環境意識の更新	局所的相互作用の影響
case-0	ベース	なし	なし
case-1	弱影響	なし	弱影響
case-2	意識	あり	なし
case-3	意識+弱影響	あり	弱影響
case-4	意識+強影響	あり	強影響

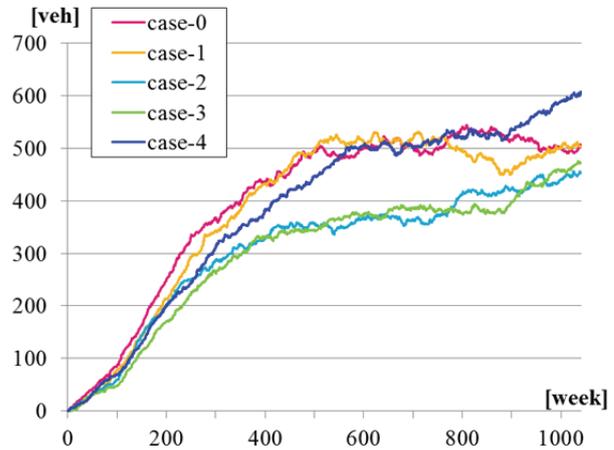


図-10 CEV保有台数の推移

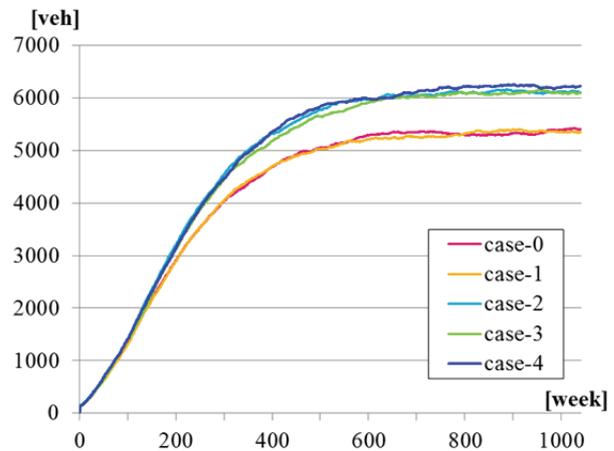


図-11 HVおよび低燃費型ガソリン自動車の保有台数の推移

##### a) 車両保有状況の推移

ここでは仮想社会における車両保有状況を観察する。仮想社会における CEV 保有台数の推移を図-10 に示す。最終的に CEV 選択割合 5%程度となり、アンケート調査結果とほぼ一致している。また、case-4での CEV 保有台数が比較的大きいことから、局所的相互作用の影響が強い場合のみシェアに作用することがわかる。

つぎにHVおよび低燃費型ガソリン自動車の保有台数の推移を図-11に示す。最終的にエコカー選択割合 50-60%程度で安定しており、アンケート調査結果とも概ね一致している。また、最終的な普及状況は環境意識の更新の有無により大きな影響を受けることがわかる。

## b) 二酸化炭素排出状況の推移

エージェントの保有車両の利用にともなう二酸化炭素排出量の推移を図-12に示す。CEVおよび低燃費型自動車の普及にともなって、3~10年までは排出削減目標を達成できている。最終的には二酸化炭素排出量は30%-40%の削減が見込まれる。これは主にHVおよび低燃費型ガソリン自動車の普及の影響が大きいことと考えられる。しかしながら、CEVおよび低燃費型自動車の普及が停滞する10年後以降に排出削減も停滞する傾向がみられる。これは、現状のCEVおよび低燃費型自動車の普及による二酸化炭素排出削減の限界を示すものと考えられる。このため、中長期的には、車両の技術革新を含むCEV普及促進へのさらなる対策が求められることとなる。

つぎに二酸化炭素排出削減平均費用の推移を図-13に示す。排出削減目標を達成できない10年目以降に関して、オフセット費用は増大していくことがわかる。しかしながら、その影響によりCEVおよびエコカーの保有に転換するエージェントはあまり多くはみられない。

## c) 環境意識の推移

ここでは、エージェントの環境意識の推移に関して分析する。環境意識指標 $eco$ の社会全体での平均値の推移を図-14に示す。環境意識の更新のあるケースではすべて、一貫して環境意識の向上がみられる。このように、構築した環境意識モデルでは環境意識には正のフィードバックが働く構造になっている。しかしながら、CEVおよび低燃費型自動車の普及は10年目以降では停滞することから、社会全体での環境意識が向上していきただけでは、CEVおよび低燃費型自動車の普及にも限界があることがわかる。

## 5. おわりに

本研究では、クリーンエネルギー車両 CEV の普及促進策の検討に関して、社会的相互作用を考慮して、マルチエージェントシミュレーションモデル CEVMAS を構築した。本研究の成果は以下のように整理できる。

[1] マルチエージェントシミュレーションモデル CEVMAS として、「車種選択プロセス」および「排出量算定プロセス」に加えて、「時間進行管理プロセス」を含めた構成を提案した。CEV 保有に関わる要因のつながりが明確になるとともに、社会的相互作用として「社会的同調性」と「局所的相互作用」の効果がフィードバックされるフレームを構成できた。

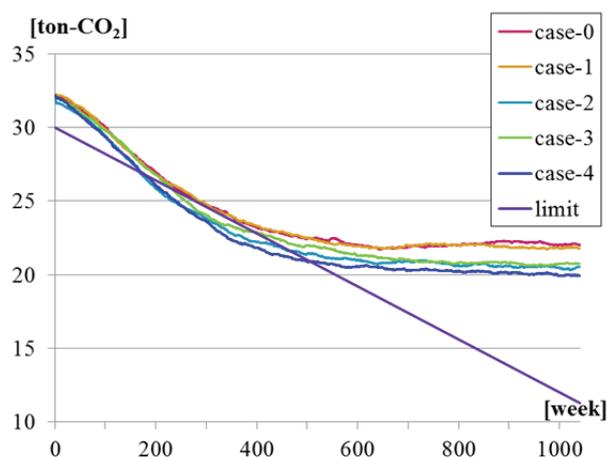


図-12 二酸化炭素排出量の推移

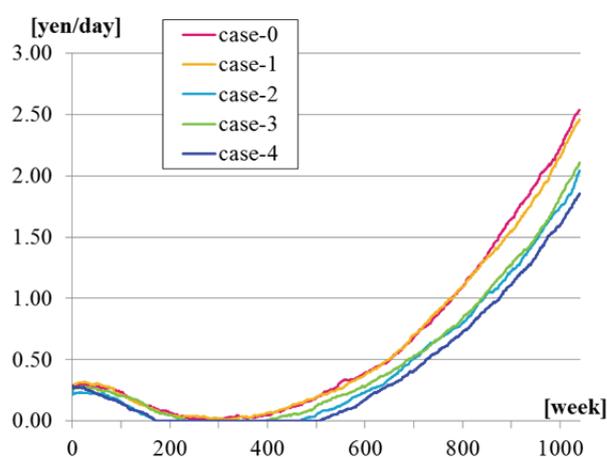


図-13 二酸化炭素排出削減平均費用の推移

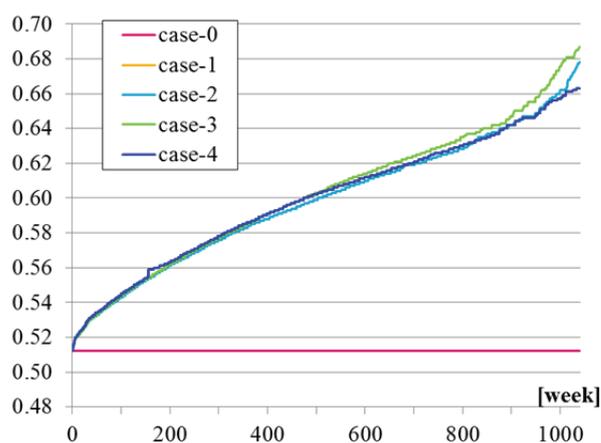


図-14 環境意識指標(平均値)の推移

[2] 車種選択プロセスにおいて、CEV 保有意向モデルおよび局所的相互作用モデルを具体的に構築した。ここでは環境意識を要因として CEV 保有意向を表現できた。また、エージェント間の関係性の表現に *small world network* を適用することで、局所的相互作用の効果を内包したモデルが構築できた。

[3] 排出量算定プロセスにおいて、保有車種とメインドライバー属性および走行距離を要因として、保有車両の燃費をワイブル分布で表現した。また、燃費と走行距離から二酸化炭素排出量を算定するモデルを組み込み、社会全体の二酸化炭素排出量をフィードバックする構造を構築できた。

また、今後の課題としては、(1) 環境意識の更新に関して、実証的なアプローチが必要である。また、(2) 各種の普及促進策の影響を考慮できるように構成することが挙げられる。

謝辞：本研究は、科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）基盤研究(C) 25420549の研究成果の一部です。ここに記し、感謝の意を表する次第です。

#### 参考文献

- 1) 交通工学研究会 EST 普及研究グループ編著：地球温暖化防止に向けた都市交通一対策効果算出法と EST 先進都市に学ぶ一，交通工学研究会，2009。
- 2) 松原司，桑野将司，塚井誠人：選別・選択段階における他者への同調効果を考慮した電気自動車普及要因に関する分析，土木学会論文集 D3，Vol.68，No.5，

pp. 691-699，2012。

- 3) 石井亜也加，奥嶋政嗣：現状保有車両を考慮したクリーンエネルギー車両保有可能性モデルの構築，土木計画学研究・講演集，Vol.46，5pages，2012。
- 4) 今井陽平，奥嶋政嗣，近藤光男：通勤交通手段転換に関わる環境意識とその社会的相互作用の構造分析，土木学会論文集 D3，Vol.68，No.5，pp. 607-614，2012。
- 5) Okushima, M. and Akiyama, T.: Multi-agent transport simulation model for eco-commuting promotion planning, *Journal of Advanced Computational Intelligence & Intelligent Informatics*, Vol.15, No.7, pp.911-918, 2011.
- 6) 奥嶋政嗣，秋山考正：マルチエージェントシミュレーションによるエコ通勤促進策の影響分析，土木学会論文集 D3，Vol.68，No.5，pp.625-634，2012。
- 7) Watts, D. J. and Strogatz, S. H.: Collective dynamics of 'small-world' network, *Nature*, Vol.393, pp.440-442, 1998.
- 8) 森川高行，北村隆一：交通行動の分析とモデリング，技報堂出版，2002。
- 9) 環境省：（家庭からの二酸化炭素排出量算定用）排出係数一覧，2006。
- 10) 西條辰義，新澤秀則，明日香壽川，平石尹彦，戒能一成，鮎川ゆりか，本郷尚：地球温暖化の経済学，大阪大学出版会，2009。

(2013.5.1 受付)

## SIMULATION FOR PROMOTION PLANNING OF CLEAN ENERGY VEHICLE CONSIDERING WITH SOCIAL INTERACTION

Masashi OKUSHIMA and Ayaka ISHII

The global warming problem by greenhouse gas emission has become more serious. Also in the transportation section, clean energy vehicles such as EV or PHV should be promoted as well as the modal shift, since CEV can be moved with the low load to the global environment. However, it is pointed out that the social interaction affects the promotion of CEV. Therefore, the multi agent simulation system for promotion planning of CEV is developed with local interaction process and social conformity in the present study. Intention of holding CEV is described with the database of the questionnaire survey about purchasing Eco-vehicles. On the other hand, the social network of the artificial society is described as the small world network model. According to some scenario, the promotion processes of CEV in the artificial society are observed with the proposed MAS system. Finally, it can be concluded that the proposed multi agent simulation with social interaction is useful for promotion planning of CEV.