

マルチエージェント交通シミュレーション による温室効果ガス排出削減策の影響分析

奥嶋 政嗣¹

¹正会員 徳島大学准教授 大学院社会産業理工学研究部（〒770-8506 徳島市南常三島町2-1）

E-mail: okushima.masashi@tokushima-u.ac.jp

自動車依存度の高い地方都市圏を対象に、環境意識と社会的同調効果を考慮して、都市交通政策およびCEV普及促進策が、自動車利用抑制と低排出車両への更新の両面から、温室効果ガス排出削減の進展に与える影響を把握することを目的とする。このため、通勤バス運行および課金政策に関するアンケート調査結果から、通勤交通手段転換モデルおよびCEV保有モデルを構成する。ここで、環境意識および社会的同調性を要因として考慮した通勤交通手段選択モデルおよびCEV保有意向モデルに社会的ネットワークモデルを組み合わせて、交通行動者の意思決定に社会的同調性が与える影響を把握するためのマルチエージェント交通シミュレーション（MAS）を構築する。このように構成したMASを用いて、各種の交通政策に関して通勤交通手段転換状況とCEVの普及促進状況および温室効果ガス排出削減状況を推計する。

Key Words : transport policy, Bayesian modeling, social interaction, mode choice, clean energy vehicle

1. はじめに

環境的に持続可能な交通システムの実現のためには、自動車技術の革新による温室効果ガスの排出量抑制だけでなく、過度な自動車利用の抑制が課題として挙げられる¹⁾。このため、代替交通手段となる公共交通、自転車などのサービス水準の向上を図るとともに、地球環境問題への認識を深めることにより、交通手段転換を促進する必要がある²⁾。しかしながら、自動車依存度の高い地方都市圏では、公共交通のサービス水準が低く、交通手段転換の促進は容易ではない。このため、自動車からの温室効果ガス排出削減を図るためには、電気自動車（EV）・プラグインハイブリッド自動車（PHV）のようなクリーンエネルギー車両（CEV: clean energy vehicle）への保有車両の更新を促進することも必要である。

交通手段転換の促進に関して、先行研究では、地方都市の郊外部に位置する勤務地への通勤者を対象に、その環境意識を考慮して、通勤交通手段転換に関わる意思決定構造について分析を行っている³⁾。ここでは、公共交通機関のサービス水準向上による転換意図の形成に「地球温暖化への関心」が関係していることが示されている。

一方で、環境負荷の低い通勤交通手段の利用促進に関する既往研究において、他の交通行動者の協力率が交通手段選択に影響することが明らかにされている⁴⁾。個人

の行動は、他者の意見及び行動に影響を受けることが認識されており、社会的同調性と呼ばれている⁵⁾。

交通行動における社会的相互作用に着目した研究としては、体系的なレビューに基づいて、違法駐輪問題を対象とした交通行動主体の同調行動についての均衡分析が参照できる^{6,7)}。そこでは、個人が属する準拠集団の全構成員から平均的に影響を受ける大域的相互作用（global interaction）を仮定したアプローチが採用されている。その後の海外での研究レビュー⁸⁾を参照すると、交通手段選択モデルに社会的相互作用が内包され、その影響を定量的に推計している研究⁹⁻¹¹⁾もみられる。

一方、EVの普及促進に関しても、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¹²⁾。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。

ここで、特定個人間における社会的相互作用である局所的相互作用（local interaction）に着目すると、パーク&バスライド選択行動を対象としたマルチエージェントシミュレーション（MAS）による研究が試行されている¹³⁾。さらに、エージェント間の関係性の表現し、関係性の強弱によって、交通手段転換の促進に与える影響の差異が発現することを表現した研究例もある¹⁴⁾。CEVの普及に関しても、局所的な同調効果を表現するためのMASモ

デルが構築されている¹⁵⁾。また、環境意識に関する局所的相互作用が社会全体のCEV普及に及ぼす影響についても推計がなされている¹⁶⁾。これらのMASモデルの特徴は、エージェント間の局所的相互作用の表現のために、small world network モデル¹⁷⁾により社会的ネットワークを記述していることである。

本研究では、この局所的相互作用に主眼をおいて、交通政策による影響を、通勤交通手段転換およびCEV保有促進の両面から分析することとする。しかしながら、社会的同調性は個人により相違すると考えられる。したがって、社会的同調性についての個人の異質性を明示的に組み込んだ分析フレームを適用することが必要となる。ここでマーケティングの分野では「消費者は同質ではなく異質である」との認識に基づいて、個々の消費者の異質性に対応した戦略が提唱されている。これに対応して、ミクロ計量経済学の分野においては、消費者は異質であるが共通する部分もあるとの論理で、異質性を推定する際に不足する情報を共通性で補うといったモデリング法である階層ベイズモデルが提案されている¹⁸⁾。

このようなことから、個人の異質性および社会的同調性が通勤交通手段転換意向へ与える影響の分析に、階層ベイズモデルを適用し、MASモデルにより、その波及効果を計測している¹⁹⁾。しかしながら、交通政策がCEVの普及促進に与える影響が考慮されていないことが課題として残されている。一方、CEV保有に関しても、個人の異質性および社会的同調性を車種選択モデルに取り込んだ階層ベイズモデルを構築し、MASモデルにより普及過程への影響を計測している²⁰⁾。こちらでは、通勤交通手段転換は表現されず、CEV普及政策が通勤交通手段転換意向へ与える影響は考慮されていない。

そこで本研究では、個人の異質性および社会的同調性が通勤交通手段転換意向だけでなくCEV保有意向にも与える影響を考慮して、温室効果ガス排出削減のための交通政策が自動車利用抑制と低排出車両への更新の両面へ与える影響およびその進展を把握することを目的とする。このため、通勤交通手段転換および車両保有に関する意向調査結果に基づいて、温室効果ガス排出削減に向けた交通政策に対する交通行動者の意思決定構造をモデル化する。個人の異質性および社会的同調性を考慮した通勤交通手段選択モデルおよび保有車種選択モデルに small world network モデルによる社会的ネットワークモデルを組み合わせることで、交通行動者の意思決定に社会的同調性が与える影響を把握するためのMASモデルを構築する。このように構成したMASモデルを用いて、温室効果ガス排出削減のための交通政策に関して通勤交通手段転換状況とCEVの普及促進状況を推計する。

2. 自動車保有・利用意向調査と現状把握

本章では、温室効果ガス排出削減のための交通政策を検討し、その交通政策に応じた自動車通勤者の転換意向を把握するための調査概要を整理するとともに、通勤交通と環境意識の現状を把握する。

(1) 温室効果ガス排出削減のための交通政策

温室効果ガス排出削減に向けて、通勤交通手段の転換およびCEV保有を促進することを目指し、交通政策を検討する。自動車依存度の高い地方都市圏においては、少々の公共交通サービス水準向上のみでは、通勤交通手段の転換を促進することは期待できない。このため、複数の自動車利用抑制策を組み合わせたパッケージ政策の策定が必要となる。

地方都市における公共交通サービス水準の向上のためには、基幹交通としてのLRT導入が考えられる。しかしながら、導入には費用負担など多くの議論を要する。このため、バス交通サービスを向上させることを目指した「エコ通勤バス（BRT）」の導入を検討する。具体的には、居住地の最寄バス停留所と勤務先の最寄バス停留所間を結ぶバス路線が設置され、通勤時間帯（6～9時台および17～20時台）に1時間2本の運行頻度で、乗り換え無しで到着できるサービスを想定する。

この「エコ通勤バス」による公共交通サービス水準の向上により代替交通手段を確保した上で、自動車利用の抑制のために経済的インセンティブ政策を検討する。地球温暖化問題への経済学的アプローチの一例として、環境税が挙げられる。本研究では、ガソリンの消費に対して課金する「排出量課金」を検討する。このため、同一距離を走行する場合においても、利用車両の燃費により課金額が異なる。たとえば、片道の通勤距離が10kmであり、利用車両の燃費が10km/lであるときに、税率が100円/lの場合には、課金額は100円となる。

以上のように、公共交通サービス水準の向上のための「エコ通勤バス」の運行に加えて、経済的インセンティブとして「排出量課金」について、通勤交通手段転換の促進効果およびCEV保有促進効果を分析することとする。

(2) 自動車保有・利用意向調査の概要

自動車依存度の高い地方都市圏である徳島県を対象に、通勤交通手段転換意向およびCEV保有意向を把握するために、インターネットアンケート調査サイトを利用してWebアンケート調査を実施した。20歳以上の徳島県在住者を対象に、2012年11月にアンケート調査依頼を行い、有効回答サンプル 480 票を得ている。調査項目の構成は、個人属性、保有車両と利用の現状、現状の通勤交通、交通政策に対する交通手段転換意向およびCEV保有意向、

環境意識と取り組みに分類できる。

被験者属性に関して、性別は男性が61%とやや多い。年齢層構成では、徳島県の人口構成と比較して、60歳以上の高い年齢層の被験者が少なく、30-49歳の被験者が多い。また、被験者の自動車運転免許保有率は99.4%であり、ほとんどの被験者が自動車運転免許を保有している。世帯構成については、夫婦と子の二世帯世帯が46%と多く、ついで夫婦のみの世帯の20%となっている。また単身世帯および三世帯同居世帯もそれぞれ1割以上の割合で含まれている。

(3) 通勤交通の現状に関する整理

上記のアンケート調査結果に基づいて、通勤交通の現状について整理する。ここでは通勤していないサンプルを除いた381サンプルを対象とする。自動車利用通勤者の割合は77%と高く、ついで二輪の割合が15%であり、公共交通利用者は極めて少数であるのが特徴的である。徳島広域都市圏パーソントリップ調査結果（2000年実施）と比較すると、自動車利用割合が若干高いものの、概ね同様な構成比となっている。自動車利用通勤者の通勤距離は平均で約11kmとなっている。また、自動車利用通勤者の保有車両の平均燃費は約13km/lであった。

つぎに、自動車利用通勤を行っている292サンプルを対象に、代替交通手段について整理する。公共交通手段などのサービス水準が低いこともあり、「代替交通手段はない」との回答が最も多く36%を占めている。また代替交通手段としては、公共交通が25%、自転車が24%とほぼ同程度である。

(4) 環境意識に関する整理

自動車利用通勤者の環境意識として、被験者の地球温暖化問題への関心および温暖化防止のための協力意向について分析する。温暖化防止のための協力意向としては、温室効果ガス排出削減のために「労力」を負担する意向、「時間」を負担する意向および「費用」を負担する意向について回答を得ている。これらの環境意識に関する質問への回答の割合を図-1に示す。

地球温暖化問題への関心については、「非常にある」および「ややある」を含めて64%となり、多くの被験者が地球温暖化問題への関心を示している。温室効果ガス排出削減のための協力意向について、「非常にある」および「ややある」を合わせると、労力負担意向では44%と地球温暖化問題への関心よりも低く、時間負担意向では38%、費用負担意向では31%となっている。

(5) 社会的同調による転換意向

通勤交通手段転換に関して、社会的同調性が影響すると考えられる。そこでエコ通勤バス運行のみを実施した

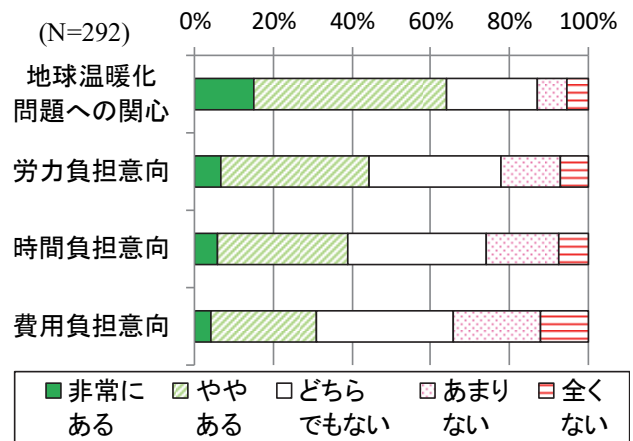


図-1 温室効果ガス排出削減のための協力意向の割合

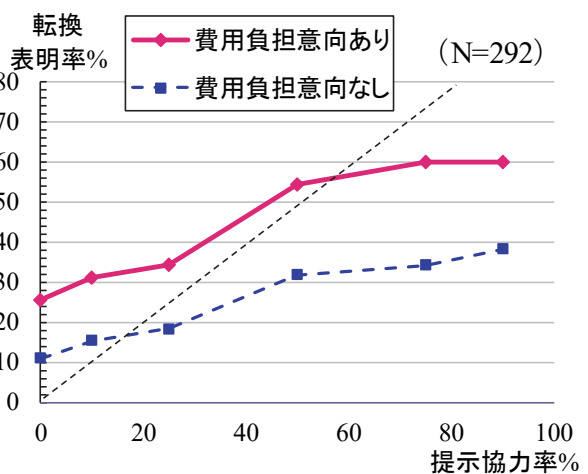


図-2 提示協力率に応じた交通手段転換意向表明率

場合について、地域での協力率（交通手段転換率）と交通手段転換意向の関係について分析する。通勤交通手段が自動車利用である292サンプルを対象とする。

意向調査では、エコ通勤バスの説明に続いて、「エコ通勤バスの運行により、温室効果ガス削減のために、この地域で勤務する一部の通勤者が自動車通勤を週1回以下に控えています。この地域で勤務する何%の通勤者が自動車通勤を週1回以下に控えていたら、自動車通勤を週1回以下に控えますか。」と質問している。温室効果ガス排出削減のための費用負担意向の有無別に、提示協力率に応じた交通手段転換意向の表明率を図-2に示す。

提示協力率が同一であれば、交通手段転換意向の表明率は、「費用負担意向あり」の場合に高い。協力率を提示した場合において、交通手段転換の可能性を示した回答者が増加しており、交通手段転換における社会的同調の影響がみられる。また、提示協力率10%のときには、表明率が10%を上回っている。一方、提示協力率50%以上の範囲では、表明率の変動はあまり大きくない。したがって、社会的同調の影響を受けない自動車通勤者が存在し、社会的同調の影響は逓減する傾向がみられる。

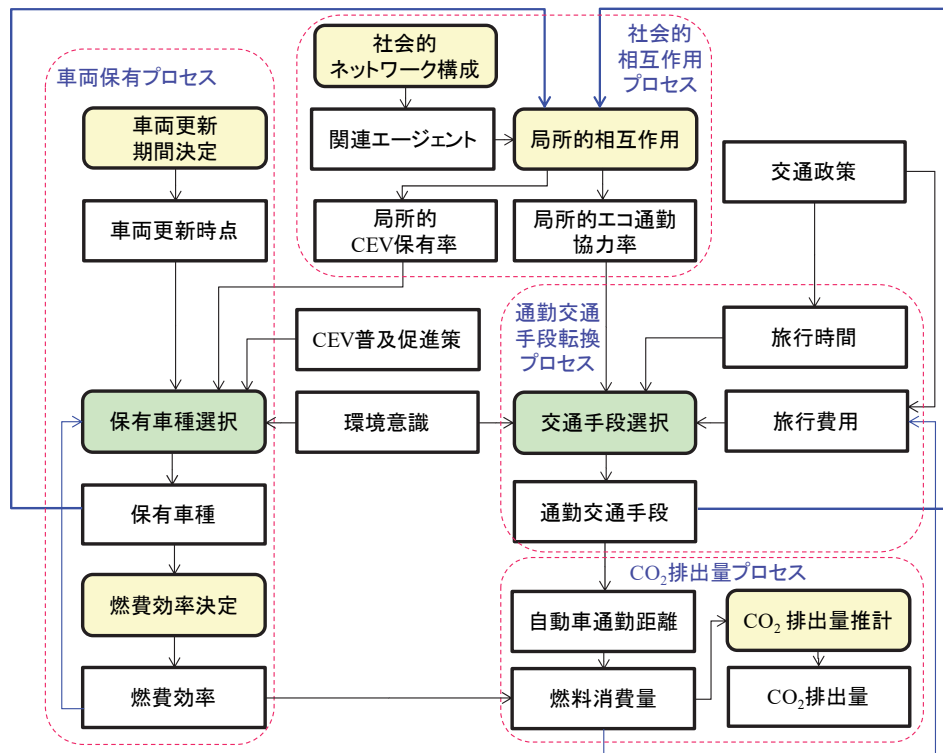


図-3 マルチエージェント交通シミュレーションの全体構成

3. マルチエージェントモデルの構成

本章では、既存研究でのMASモデル^{19,20)}を参考として、通勤交通手段転換とCEV普及促進が相互に影響を及ぼす過程の観察が可能なMASモデルを構成する。

(1) 全体構成および通勤交通手段転換の表現

通勤交通手段転換およびCEV普及促進が相互に影響を及ぼす過程の観察を目的とするため、通勤交通手段転換プロセスおよび車両保有プロセスを含むことが必要条件となる。また、社会的同調効果を考慮することを念頭に、社会的ネットワークにおける局所的相互作用を表現する社会的相互作用プロセスが必要となる。一方、温室効果ガス排出削減効果を計測するためには、燃料消費量算定を含む温室効果ガス排出量推計プロセスが必要となる。さらに、保有車種選択のタイミングを与える車両更新時期決定のプロセスも必要である。

以上のような検討に基づいて、既往研究¹⁹⁾を参考として、通勤交通手段転換プロセス、車両保有プロセス、社会的相互作用プロセスおよび温室効果ガス排出量推計プロセスを含むMASモデルを構成した。この構成の全体フローを図-3に示す。

通勤交通手段転換プロセスでは、交通政策による影響を反映させた旅行時間、旅行費用などの交通サービス水準と、個人の環境意識に加えて、社会的相互作用を考慮して局所的エコ通勤協力率を意思決定に関わる要因と

して、通勤交通手段転換についての意思決定を表現する。この意思決定タイミングについては、1 カ月単位と設定する。意思決定構造については、個人の異質性を考慮して階層ベイズ型二項ロジットモデルの枠組みを適用する。この通勤交通手段転換モデルの詳細については後述する。

(2) 車両保有の表現

車両保有プロセスは、車両更新期間決定モデルによる車両更新時点の決定、車両更新時点における保有車種選択モデルによる保有車種更新、更新後の保有車両における燃費効率決定モデルから構成される。

車両更新期間決定モデルでは、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、確率的に車両更新時点を決する。ここでは既往研究²¹⁾で構築された車両更新期間決定モデルを適用する。この車両更新期間決定モデルでは、各種要因 x_j の影響（係数パラメータ α_j ）も考慮できるパラメトリックな加速ハザードモデルの枠組が用いられている。車両更新期間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。

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

既往研究において、車両更新期間の平均値 4.2 年、標準偏差 3.0 年と分析されている。また、車両更新期間決定モデルの影響要因の係数パラメータはそれぞれ、定数項 1.50、幼児・乳児ダミー -0.29、高収入ダミー -1.05 およ

び形状パラメータ $p: 1.43$ と推定されている。この車両更新期間決定モデルにより、各エージェントの車両更新期間を決定し、車両更新時点において保有車種選択モデルにより保有車種を更新する。

保有車種選択モデルでは、世帯属性および保有車両だけでなく、環境意識、局所的相互作用（社会的同調）を考慮する。また、CEV 普及促進策の影響を考慮する。保有車種の選択肢として、EVあるいはPHVのいずれかの車種を表す「CEV」、HVあるいは燃費25km/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を表す「エコカー(LV)」および一般的なガソリン車を表す「その他(GV)」の3区分に整理している。

保有車種選択モデルは、2段階のモデル構造となっている。下位では、CEVを選択肢から除き、LVとGVの選択を二項ロジットモデルで確率的に表現している。上位では、CEVとそれ以外（LVまたはGV）の選択を、階層ベイズ型二項ロジットモデルで確率的に表現している。

推定された結果として、CEV 選択モデルの上位階層における説明要因の係数パラメータ β の事後分布についての基本統計量を表-1に示す。車両価格差、環境税支払額、航続距離向上およびCEV多様化ダミーの係数パラメータ推定値は、いずれも正の領域に分布しており、妥当な推計結果である。ログサム値の係数パラメータ推定値についても、妥当な範囲に分布している。社会的同調を表す「局所的CEV保有率」の係数パラメータ推定値の事後分布は正の領域の分布が多数ではあるが、負の領域にも分布がみられる。したがって、CEV保有に関する社会的同調性は個人により異なり、正負両方の影響がある。

燃費効率決定モデルでは、個人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効率を決定する。既往研究において、燃費効率に関しての基本統計量は、平均値 12.9km/l、中央値 12.0 km/l、標準偏差 4.5 km/l となっている。また、燃費効率決定モデルの影響要因の係数パラメータはそれぞれ定数項 2.31、軽自動車ダミー-0.431、小型車自動車ダミー-0.305、HVダミー-0.750、30才未満女性 0.304、50～64才女性 0.273、日車両走行距離 0.002 および形状パラメータ $p: 3.83$ と推定されている。

(3) 社会的相互作用の表現

社会的相互作用プロセスでは、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 small world network モデル¹⁷⁾により表現する。このため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。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

表-1 CEV選択上位階層の係数パラメータ事後分布特性値

	平均値	標準偏差	中央値
定数項	-4.006	11.951	-2.573
車体価格差[万円]	0.262	0.205	0.197
環境税支払額[円/月]	0.046	0.082	0.016
航続距離向上[km]	0.081	0.108	0.032
局所CEV保有率	0.245	0.253	0.171
CEV多様化ダミー	6.742	1.946	6.653
ログサム値	0.511	0.313	0.525

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。参考文献¹⁷⁾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%と設定した。

コミュニティで局所的エコ通勤協力率 $w_{[h]}^{Other}$ については、リンクで関連づけられたエージェント数 M と、関連エージェント m のエコ通勤交通手段利用の有無 $\delta_{[m]}^{Other}$ に基づいて、式(2)のように算定することとする。

$$w_{[h]}^{Other}(t) = \frac{\sum \delta_{[m]}^{Other}(t)}{M_{[h]}} \quad (2)$$

同様にして、コミュニティでの局所的 CEV 保有率 $w_{[h]}^{CEV}$ については、リンクで関連づけられたエージェント数 M と、関連エージェント m の CEV 保有の有無 $\delta_{[m]}^{CEV}$ に基づいて、式(3)のように算定することとする。

$$w_{[h]}^{CEV}(t) = \frac{\sum \delta_{[m]}^{CEV}(t)}{M_{[h]}} \quad (3)$$

(4) 温室効果ガス排出の表現

温室効果ガス排出量プロセスでは、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。燃費消費量の算定では、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。二酸化炭素排出量推計では、保有車両の利用による二酸化炭素排出量を推計する。具体的には、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 を算定する。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、発電時における二酸化炭素排出量を考慮して、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 0.048kg/km を排出原単位 ef とする。CEV 以外の車両では、1km の走行により排出される二酸化炭素排出量原単位 ef は、ガソリン 1 l の消費による二酸化炭素排出量 ef_0 (=2.3kg/l) を保有車両の燃費 y で除して算定する。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。

以上のように、社会的相互作用を考慮して、通勤交通手段転換および CEV 普及促進の過程を観察する MAS モデルの全体構成を規定した。

4. 通勤交通手段転換モデルの構築

本章では、交通政策に対する通勤交通手段転換意向に基づいて、階層ベイズモデルを用いて、通勤交通手段転換モデルを構築する。

(1) 通勤交通手段転換分析のためのデータ設定

ここでは、交通手段転換要因を整理し、その分析のためのデータセットを整備する。自動車利用通勤者の代替交通手段は、意向調査の回答によりサンプルごとに設定した。「代替交通手段がない」と回答したサンプルについて、いずれの交通政策に対しても転換意向を示さないサンプルについては、自動車利用固定層として分析対象から除外した。一方、いずれかの交通政策に対して転換意向を示したサンプルについては、「代替交通手段がない」と回答している場合、通勤距離2km以内では代替交通手段を「徒歩」、それ以上の距離の場合は代替交通手段を「公共交通利用」とした。

対象地域における通勤交通手段の転換要因について、意向調査結果などから設定可能な要因について整理する。交通サービス水準について、旅行時間 t に関しては、PT 調査結果より算出された各交通手段別の旅行速度の平均値と、意向調査結果の通勤距離の報告値より算定する。また自動車の旅行費用 tc_{car} に関しては、ガソリン代を140円/lとして、通勤距離および燃費の報告値に応じて算定した。燃費の認知のないサンプルについては、平均値である13km/lと設定した。自動車以外の交通手段利用の旅行費用 tc_{other} に関しては、代替交通手段が公共交通の場合にはバス運賃表を利用して、居住地最寄バス停留所から勤務地最寄バス停留所までの運賃を設定した。バス停留所の認知のないサンプルについては、初期料金80円、単位距離料金24円/kmとして、通勤距離に応じて算定した。

エコ通勤バス運行時の通勤交通手段転換については、社会的同調効果と経済的インセンティブに関わる要因を考慮して分析する。社会的同調効果に関しては、アンケート調査での提示協力率を説明変数 sc として設定する。また、経済的インセンティブに関しては、固定課金、距離課金および排出量課金の実施の有無をそれぞれダミー変数として設定する。ここで固定課金に関しては、意向調査で提示された課金額を旅行費用に加算している。ま

た、距離課金に関しては、提示された単位課金額と通勤距離の積を旅行費用に加算している。排出量課金に関しても、提示された単位課金額と通勤距離の積を燃費で除して、旅行費用に加算している。

交通サービス水準以外の要因として、性別、年齢、世帯構成、自動車運転頻度、利用車両車種について検討する。これらは意向調査の一部の選択肢を集約して、ダミー変数として設定した。また、地球温暖化防止のための協力意向に関しては、「非常にある」「ややある」の回答を集約し、ダミー変数として設定した。以上のような設定により、意向調査において回答の得られたデータを用いて、通勤交通手段転換に関する分析を実行する。

(2) 通勤交通手段転換モデルの構造

通勤交通手段転換モデルを構築するにあたり、個人の異質性を明示的に組み込んだ分析フレームとして、階層ベイズモデルを適用する。階層ベイズモデルでは、上位階層において、効用関数における説明変数の係数パラメータがサンプルごとに異なると仮定する。一方、サンプルごとの係数パラメータは、いくつかの属性に関連づけて説明可能であると仮定し、下位階層において、係数パラメータと属性の関係が線形回帰モデルとして表現される。各階層における係数パラメータは、ベイズ推定によりパラメータの事後分布が推定可能となる。

ここでは、この階層ベイズモデルの枠組みを利用して、交通行動者の通勤交通手段選択における意思決定構造を記述する。上位階層において、各交通手段の効用関数における説明変数として、旅行時間 tt 、旅行費用 tc 、エコ通勤協力率（社会的同調性） sc および定数項を採用する。したがって、交通行動者 h についての自動車利用の確定効用を式(4)、エコ通勤（自動車以外）の確定効用を式(5)のように表すことができると仮定する。

$$V_{[h]}^{car} = \beta_{[h]}^{tt} tt_{car,[h]} + \beta_{[h]}^{tc} tc_{car,[h]} \quad (4)$$

$$V_{[h]}^{other} = \beta_{[h]}^{tt} tt_{other,[h]} + \beta_{[h]}^{tc} tc_{other,[h]} + \beta_{[h]}^{sc} sc_{[h]} + \beta_{[h]}^{const.} \quad (5)$$

ここで、 $\beta_{[h]}^{tt}, \beta_{[h]}^{tc}, \beta_{[h]}^{sc}, \beta_{[h]}^{const.}$ は、交通行動者 h についてのそれぞれの説明変数の係数パラメータである。

つぎに下位階層において、それぞれの説明変数の係数パラメータは、交通行動者 h の属性に関連づけて説明可能であるとし、式(6)のように記述できると仮定する。

$$\beta_{[h]}^j = \sum_m \Delta_{j,m} \cdot z_{m,[h]} + u_{[h]}^j \quad (6)$$

$\Delta_{j,m}$: 要因 j の係数 β^j に係る属性 z_m の係数パラメータ、

$u_{[h]}^j$: 要因 j の係数 β^j についての誤差。

また、この誤差項は正規分布すると仮定して、以下のよう表すことができる。

$$u_{[h]}^j \sim N(0, \sigma_j) \quad (7)$$

$N()$: 正規分布関数, σ_j : 要因 j の係数 β^j の標準偏差。

以上のように、社会的同調性および個人の異質性を明示的に組み込んだ構造とした。

(3) 階層ベイズモデルパラメータのベイズ推定

下位階層の線形回帰モデルのパラメータベクトル Δ および σ についての同時事前分布を $f(\Delta, \sigma)$ とする。通勤交通手段転換の交通行動者 h の状況 s における選択結果データ y_{hs} のベクトル Y と、説明変数データベクトル X_{hs} が与えられたとき、同時事後分布 $f(\Delta, \sigma | Y)$ は、ベイズの定理に基づいて、同時事前分布と尤度の積に比例することから、以下のよう表される。

$$f(\Delta, \sigma | Y) \propto$$

$$f(\Delta, \sigma) \prod_{h=1}^H \left\{ \prod_{j=1}^J f(\beta_{[h]}^j | \Delta, \sigma, z_h) \prod_{s=1}^S P_{[h]}^{\text{car}}(\beta_{[h]}^j, X_{h,s}) \right\} \quad (8)$$

このとき、効用関数の係数パラメータの条件付き事後分布は以下のように表すことができる。

$$f(\beta_{[h]}^j, j=1, J | \Delta, \sigma, z_h, y_h, X_h) \propto$$

$$\prod_{j=1}^J f(\beta_{[h]}^j | \Delta, \sigma, z_h) \prod_{s=1}^S P_{[h]}^{\text{car}}(\beta_{[h]}^j, X_{h,s}) \quad (9)$$

ベイズ統計のモデリングでは、共役事前分布とマルコフ連鎖モンテカルロ法（MCMC法）を適切に組み合わせることで、パラメータ事後分布の効率的な推定が可能となっている。しかしながら、階層ベイズ型二項ロジットモデルのパラメータ推定に関しては、式(9)の評価に共役関係が利用できない。このため、Rossi, et al.²⁹⁾により階層ベイズロジットモデルのパラメータ推定法が開発されている。ここで、効用関数の係数パラメータの推定はMetropolis-Hastings法であるランダムウォークアルゴリズムによりサンプリングを行っている。また下位階層の線形回帰モデルについての係数パラメータの推定ではギブスサンプラーを用いてサンプリングしている。詳細については、参考文献(22)および参考文献(18)を参照されたい。

このアルゴリズムによる具体的な計算では、20,000回の繰り返し計算を行い、初期値の影響を避けるため推定開始から2,000回までを推定結果の対象外としている。

(4) モデルパラメータの推定結果

階層ベイズモデルのモデル構造の選択では、周辺尤度が最大となるモデルを選択することが提案されている²⁹⁾。周辺尤度とは、ベイズ推定において、与えられたモデル

表-2 交通手段転換下位階層の係数パラメータ事後分布特性値

	費用負担意向			
	旅行時間	旅行費用	エコ通勤協力率	定数項
平均値	-0.058	-0.001	0.075	1.583
標準偏差	0.057	0.011	0.029	0.787
2.5%	-0.18	-0.02	0.02	0.10
5%	-0.16	-0.02	0.03	0.32
中央値	-0.06	0.00	0.07	1.56
95%	0.03	0.02	0.12	2.90
97.5%	0.046	0.02	0.13	3.16

表-3 交通手段転換上位階層の係数パラメータ事後分布特性値

	旅行時間	旅行費用	エコ通勤協力率	定数項
平均値	-5.916	-8.013	1.017	-2.196
標準偏差	4.380	0.620	0.270	3.330
最小値	-10.779	-18.484	-3.946	-45.690
5%値	-9.401	-15.717	-2.993	-34.968
10%値	-8.799	-14.329	-2.453	-29.456
25%値	-7.587	-10.745	-0.698	-21.655
中央値	-6.265	-8.461	1.088	3.395
75%値	-4.007	-6.010	2.800	10.797
90%値	-2.865	-0.212	3.984	18.790
95%値	-2.212	0.810	4.567	23.621
最大値	-0.946	6.059	5.907	43.505

により、観測された選択結果と同一の選択状況が推計される確率を表している²⁹⁾。実際のモデル選択では、周辺尤度を対数変換した対数周辺尤度が用いられる。具体的な対数周辺尤度の計算は、Gelfand & Deyの方法²⁹⁾を用いることとした。説明変数の組み合わせについて試行を繰り返した結果として、上位階層においては定数項と3種類の説明変数すべてを採用し、下位階層においては説明変数として温室効果ガス排出削減のための費用負担意向のみを採用した場合に、対数周辺尤度が最大となった。このため、この説明変数の組み合わせで構築したモデルを採択することとした。

説明要因 j の係数パラメータ β^j に係る属性 Z のパラメータ Δ_j の事後分布の推定結果について、属性 Z として費用負担意向についての係数パラメータ推定値の事後分布の推定結果を表-2に示す。社会的同調性に関しては、費用負担意向は正の影響を与えている傾向がみられる。また、定数項についても、費用負担意向は正の影響を与えている傾向がみられる。したがって、環境意識は交通手段転換意向に直接的にも関係することがわかる。一方、旅行時間、旅行費用に関しては影響の正負が明確でない。

つぎに、効用関数についての説明要因の係数パラメータ推定値の事後分布の特性値を表-3に示す。旅行時間については、負の領域に分布しており、妥当な推定結果である。旅行費用の係数パラメータ推定値では、大半が負の領域に分布しており、概ね妥当な推計結果であると考えられる。ただし、一部ではあるが、係数パラメータ推定値が正の値となる不合理な結果が混在していることに留意する必要がある。これは経済的インセンティブ政策に対応した交通手段転換意向が示されないサンプル（自動車キャブティブ層）が存在することを意味している。

エコ通勤協力率（社会的同調性）の係数パラメータ推定値の分布を図-4に示す。全体としては正の領域の分布が多数ではあるが、負の領域にも分布がみられる。したがって、社会的同調性は個人により異なり、正負両方の影響があることがわかった。

5. シミュレーションによる推計

本章では、これまでに構築したMASモデルを用いて、通勤交通転換状況、CEV普及状況の推移および二酸化炭素排出削減量を推計する。

(1) シミュレーションの条件設定

意向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通勤交通手段転換および CEV 普及状況の推移を推計するためのシミュレーション条件を設定する。交通行動者（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、属性を設定した。基本エージェントを均等に複製することで、合計 100,000 人を設定した。推計期間は、1 サイクルを 1 週間単位とし、10 年後（520 週）までの推移を観察することとした。シミュレーションケース設定としては、無政策ケースを比較対象として、排出量課金ケースを設定した。排出量課金ケースでは、ガソリン 1 リットルあたりの消費に対して 10 円～50 円の課税がなされることを想定する。

(2) シミュレーション結果

CEV 保有割合の推移を図-5に示す。無政策での最終的な CEV 保有割合は 4%程度となり、次期の車両更新時の最上位候補車両についての意向調査結果と概ね一致している。排出量課金ケースでは、いずれも期間前半の保有率の増加に対して、期間後半では増加率が通減する。また、排出量課金額に対応して、最終時点での CEV 保有割合は増加する。排出量課金額が 10 円/L の場合でも、最終的な CEV 保有割合は 21%程度と増加する。課金額が 40 円/L までの場合では、10 円/L の課金額の増加に対し

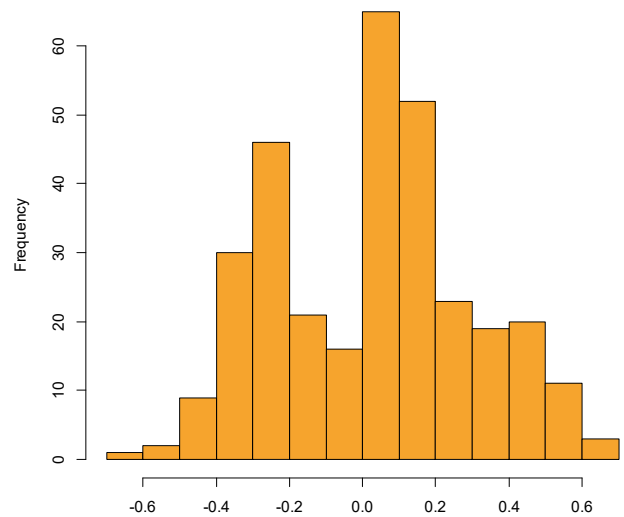


図-4 社会的同調性の係数パラメータの事後分布

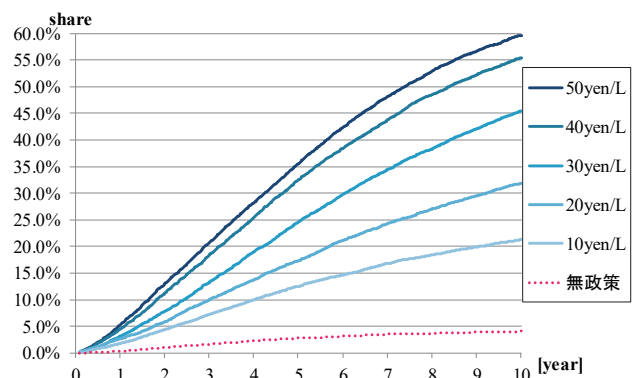


図-5 CEV保有推移の推計結果

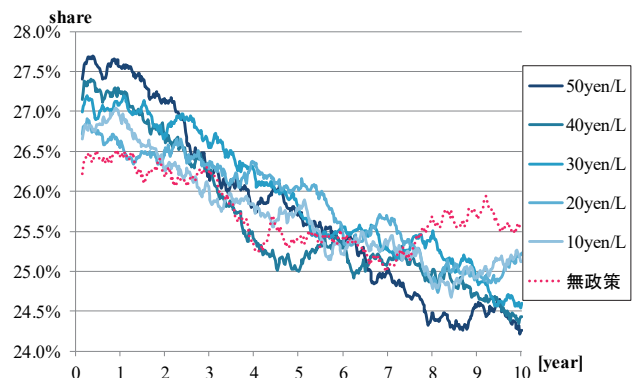


図-6 交通手段転換率推移の推計結果

て、最終的な CEV 保有割合は 10%程度ずつ増加する。課金額が 50 円/L となると、CEV 保有割合の増加は抑制された結果となっている。

交通手段転換割合の推移を図-6に示す。いずれの設定についても、交通手段転換率は初期より減少する傾向がみられる。また課金額によるエコ交通手段利用率の差異は明確には見られない。

保有車両の利用にともなう二酸化炭素排出量を比較する。初期時点での二酸化炭素排出が 10 年間継続した場合の総排出量を 100%として、10 年間での二酸化炭素排

出削減量の割合を図-7に示す。無政策ケースにおいても、低排出車両（エコカー）の普及によって、二酸化炭素排出量は 18%程度の削減となっている。排出量課金に関しては、CEV 普及率が高くなるにしたがって、二酸化炭素排出量は減少する傾向がみられる。

7. おわりに

本研究では、温室効果ガス排出削減に向けた交通政策に対する通勤交通手段転換意向および CEV 保有意向についての調査結果に基づいて、個人の異質性および社会的同調性を考慮して交通行動者の意思決定構造をモデル化し、交通手段転換および CEV 保有の推移へ与える影響を定量的に把握した。本研究の成果は、以下のように整理できる。

- [1] 通勤交通手段選択および保有車種選択に関わる要因として環境意識だけでなく「社会的相互作用」を考慮して、温室効果ガス排出削減効果を計測する枠組みをマルチエージェント交通シミュレーションとして構成した。特に、局所的な社会的同調性を要因とした階層ベイズ型選択モデルに関して、その具体的な社会的相互作用の波及過程を明示的に表現するための枠組みとしてのマルチエージェントシミュレーションの適用方法を提示した。
 - [2] 階層ベイズ型二項ロジットモデルの枠組みを適用することで、交通サービス水準および社会的同調性に関する通勤交通手段転換への影響についての個人の異質性を表現するとともに、環境意識との関係を明示的に記述できた。個人の異質性を考慮することで、社会的同調性について個人により正負それぞれの影響を表現できた。
 - [3] 温室効果ガス排出削減に向けた交通政策として、公共交通サービス水準の向上のためのエコ通勤バス(BRT)の運行に加えて、経済的インセンティブ政策としての排出量課金について通勤交通手段転換および CEV 保有に与える影響を把握した。課金額に相応して、転換意向形成が促進されるが、その効果は課金額に対して通減することがわかった。
- 今後の課題としては、以下の2点が挙げられる。
- [1] 通勤交通手段選択モデルと保有車種選択モデルを統合することで、通勤交通手段選択と保有車種選択の相互関係を明示的に考慮して、交通政策の効果の推移を観察可能とすることが望まれる。
 - [2] 交通政策による交通手段転換者数と交通渋滞の関係、交通渋滞と温室効果ガス排出量の関係を明示的に考慮し、交通政策の温室効果ガス排出削減効果を適切に推計可能とすることが望まれる。

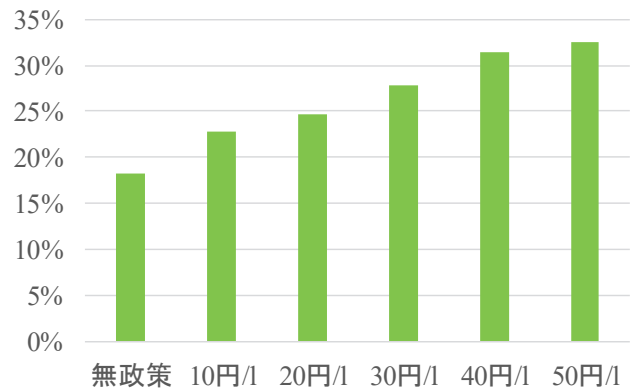


図-7 期間全体での二酸化炭素排出量の削減比率

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) 16K06540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，丸善，2009。
- 2) Nilsson, M. and Kuller, R.: Travel behaviour and environmental concern, *Transportation Research Part D*, Vol. 5, pp. 211-234, 2000.
- 3) 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.
- 4) 森川高行，田中小百合，萩野成康：社会的相互作用を取り入れた個人選択モデルー自動車利用自粛行動への適用ー，*土木学会論文集*, No.569/IV-36, pp.53-63, 1997.
- 5) Rose, J., Hensher, D.A.: Modeling agent interdependency in group decision making, *Transportation Research Part E*, Vol. 40, pp. 63-79, 2004.
- 6) 福田大輔，上野博義，森地茂：社会的相互作用存在下での交通行動とミクロ計量分析，*土木学会論文集*, No.765/IV-64, pp.49-64, 2004.
- 7) Fukuda, D. and Morichi, S.: Incorporating Aggregate Behavior in an Individual's Discrete Choice: An Application to Analyzing Illegal Bicycle Parking Behavior, *Transportation Research A*, Vol. 41, No. 4, pp. 313-325, 2007.
- 8) Dugundji, E. R., Páez, A., Arentze, T. A., Walker, J. L.: Transportation and social interactions, *Transportation Research Part A* 45, pp. 239-247, 2011.
- 9) Dugundji, E. R., Gulyás, L.: Sociodynamic discrete choice on networks in space: impacts of agent heterogeneity on emergent outcomes. *Environment and Planning B: Planning and Design* 35 (6), pp. 1028-1054, 2008.
- 10) Dugundji, E. R., Walker, J. L.: Discrete choice with social and spatial network interdependencies—an empirical example using mixed generalized extreme value models with field and panel effects. *Transportation Research Record* 1921, pp. 70-78, 2005.
- 11) Goetzke, F., Andrade, P. M.: Walkability as a summary measure in a spatially autoregressive mode choice model: an instrumental variable approach. In: Páez, A. et al. (Eds.), *Progress in Spatial Analysis: Methods and Applications*. Springer-Verlag, Heidelberg-Berlin, 217-232, 2009.
- 12) Kuwano, M., Tsukai, M. and Matsubara, T.: The influence of social conformity in promoting electric vehicle sales,

- Travel Behavior Research: Current Foundations, Future Prospects, pp. 369-385, 2013.
- 13) 奥嶋政嗣, 秋山孝正: 局所的相互作用を考慮した都市交通政策評価のための人工社会モデル, 土木学会論文集 D, Vol.63, No.2, pp.134-144, 2007.
 - 14) 奥嶋政嗣, 秋山孝正: 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.
 - 15) 奥嶋政嗣, 石井亜也加: 社会的相互作用を考慮したCEV 普及シミュレーション, 土木学会論文集 D3, Vol.70, No. 5, pp.521-534, 2014.
 - 16) Okushima, M.: Multi-Agent Simulation for Promoting Clean Energy Vehicle Considering with Concern for Environment and Local Interaction, Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol.11, 2015.
 - 17) Watts, D. J. and Strogatz, S. H.: Collective dynamics of 'small-world' network, Nature, Vol. 393, pp.440-442, 1998.
 - 18) 照井伸彦, ウィラワン・ドニ・ダハナ, 伴正隆: マーケティングの統計分析, 朝倉書店, 2009.
 - 19) Okushima, M.: Simulating social influences on sustainable mobility shifts for heterogeneous agents, Transportation, Vol.42, No.5, pp.827-855, 2015.
 - 20) 奥嶋政嗣: クリーンエネルギー車両普及促進に関するマルチエージェントシミュレーション, 知能と情報, Vol. 28, No. 5, pp. 846-854, 2016.
 - 21) 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.
 - 22) Rossi, P.E., Allenby, G.M., Culloch, R. M.: Bayesian Statistics and Marketing, WILEY, 2005.
 - 23) 照井伸彦: Rによるベイズ統計分析, 朝倉書店, 2010.
 - 24) Gelfand, A.E., Dey, D.: Bayesian Model Choice: Asymptotics and Exact Calculations, Journal of the Royal Statistical Society B, Vol.56, No.3, pp.501-514, 1994.

(2017. 4. 28受付)

IMPACT ANALYSIS OF TRANSPORT POLICY FOR REDUCTION OF GREENHOUSE GAS EMISSION WITH MULTI-AGENT SIMULATION

Masashi OKUSHIMA