

スマートシティの環境対応型車両の普及に関するモデル分析

井ノ口 弘昭¹・秋山 孝正²・長谷川 陽平³

¹関西大学 環境都市工学部 都市システム工学科 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町3-3-35)
E-mail:hiroaki@inokuchi.jp

²関西大学 環境都市工学部 都市システム工学科 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町3-3-35)
E-mail:akiyama@kansai-u.ac.jp

³関西大学大学院 理工学研究科 ソーシャルデザイン専攻 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町3-3-35)

長期的な少子高齢社会にあつて、地方都市における環境共生型の都市交通システムの創生に多くの課題が存在している。本研究では、マルチエージェントモデルを用いて、スマートシティにおける交通行動変化を検証する。具体的には、交通行動者をエージェントと設定し、電気自動車やスマートハウスの普及による都市活動と空間移動の変化を分析する。すなわち、自動車購入とスマートハウス導入に関する意思決定構造を明確にし、スマートシティにおける交通行動の変化を、電気自動車、スマートハウスの増加と合わせて検討する。これより、運輸交通部門におけるスマートシティ化のインパクトを算定する。最終的に、スマートシティの導入による都市圏交通流動と二酸化炭素排出量の削減効果、電気自動車、スマートハウスに基づく都市活動変化について言及する。

Key Words : *clean energy vehicle, smart city, multi agent model, fuzzy reasoning*

1. はじめに

環境共生を目指したスマートシティにおいては、省エネルギー住宅での都市活動に加えて、高度な都市交通システムの運用が中心的課題である。特に、都市交通の視点から、環境対応型車両やスマートハウスにおける電気自動車の導入が検討されている。自動車中心の都市交通環境である地方都市では、スマートハウスや環境対応型車両の導入は、都市交通の環境負荷軽減からも重要性が高い。本研究では、マルチエージェントモデルを用いて、電気自動車やスマートハウスの普及における交通行動変化について述べる。具体的には、交通行動者をエージェントと設定し、パーソントリップ調査に基づくエージェント行動を記述する。そして、電気自動車やスマートハウスの導入に関する意思決定構造を明確化し、電気自動車やスマートハウスの普及過程を観測する。スマートシティにおける都市交通環境変化の考察から、低炭素社会の創生プロセスを検討する。最終的に、これらの分析を踏まえて、運輸部門の低炭素化を目指し都市交通政策を評価する。

2. 環境対応型車両の概要

ここでは、環境対応型車両について、その特徴・現状の課題を整理する。また、環境対応型車両とスマートハウスとの関係について整理する。

(1) 環境対応型車両の特徴

環境対応型車両 (CEV: クリーンエネルギー自動車) は、ハイブリッド自動車・電気自動車・天然ガス自動車・燃料電池自動車・メタノール自動車などの二酸化炭素の排出量が少なく、環境に優しい自動車である。これらの車両の研究開発が進められている。環境対応型車両の保有台数は、PHV: 24,708 台、電気自動車: 55,988 台、ハイブリッド自動車: 2,852,105 台 (平成 24 年) となっている¹⁾。したがって、ハイブリッド自動車は普及が進んでいるが、電気自動車・PHVの普及率は低い。

電気自動車などは、ガソリン自動車と比較して高価である場合が多い。このことから、環境対応型車両は、価格面での優遇策が講じられている。主要な優遇策を表-1に整理する。主として、車両購入時の補助、保有に関する税金の減免に分けられる。また、自治体独自の補助金

表-1 環境対応型車両の優遇策

時期	内容
車両購入時	クリーンエネルギー自動車等導入補助金（次世代自動車振興センター） 自動車取得税の減免
購入翌年度	自動車税の減免
車検時	自動車重量税の減免
その他	自治体の導入補助金・税金の減免

等を設定している。これらの優遇策の活用で、例えば本体価格 279 万円の車両で、65 万円程度の優遇を受けることが可能である²⁾。

つぎに、電気自動車の特徴を整理する。代表的なガソリン自動車・電気自動車の比較を表-2に示す。

表-2 ガソリン自動車と環境対応型車両の相違点

車両	ガソリン自動車 (トヨタカローラアクシオ)	電気自動車 (日産リーフ)
原動機	エンジン	モーター
二酸化炭素の排出	あり (JC08 モード: 116g/km)	走行時は排出しない
航続可能距離	長い (JC08 モード: 840km)	やや短い (JC08 モード: 228km)
最大トルク	やや小さい (136N・m)	やや大きい (254N・m)
車両価格	普通 (137万円～)	高価 (298万円～)

電気自動車はモーターで走行し、トルクが高く、加速性能は良い。また、二酸化炭素は走行時には排出しないが、発電段階では発電方法により発生する。現状では充電時間は家庭では 8 時間程度必要であり、航続可能距離はやや短い。また、家庭で充電を行うためには駐車場に充電施設の設置が必要である。これらのことから、現状では、全ての車両について電気自動車に置き換えることが可能であるという想定は困難である。

(2) スマートシティの特徴整理

つぎに、スマートシティ・スマートハウスについて整理する。国家戦略として、「環境未来都市」「環境モデル都市」「スマートシティ」を設定し、実証実験などを積極的に行っている。また、住宅メーカーではスマートハウスの設備を導入した住宅を販売している。スマートハウスの導入に関して、自治体からの補助金・減税措置が設定されている。

スマートシティを実現する地区単位のエネルギーマネジメントシステムとして、CEMS (Cluster/Community Energy Management System) が存在する。また、家庭内の

エネルギーマネジメントシステムとして、HEMS (Home Energy Management System) が存在する。これは、太陽光発電・蓄電池・家電機器を情報ネットワークで接続し、家庭内のエネルギー管理を行うシステムである。現在では、電気自動車に蓄えた電気を住宅の家電機器で利用するシステムも開発されており、電気自動車を合わせてエネルギーマネジメントを行うことで、更なるエネルギー利用の効率化が期待されている。

3. 地方都市を対象とした人工社会モデルの構築

ここでは、地方都市を対象としてスマートシティにおける交通行動変化、環境影響を把握するための人工社会モデルを構築する。

(1) 仮想社会の設定

本研究では、地方都市である岐阜市を対象地域とした。図-1に岐阜市の概略図を示す³⁾。

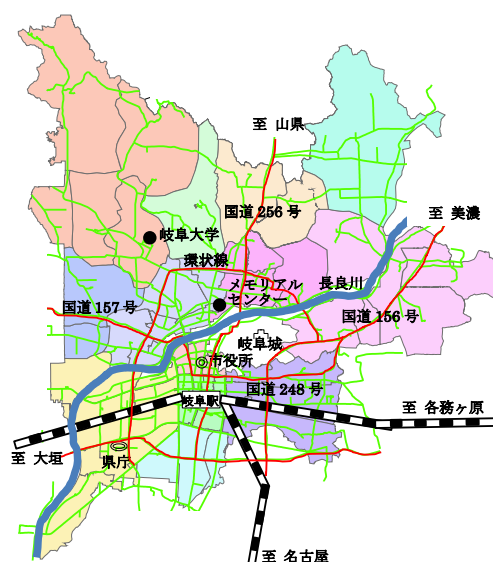


図-1 対象地域の概要

岐阜市は、長良川より南部に中心市街地が位置している。また、環状線の内側に多くの施設が立地している。鉄道網は乏しく、公共交通機関はバスが中心である。

ここで構築する仮想空間は岐阜市の都市構造を参考としている。本研究では図-2に示すように、岐阜市をパーソントリップ調査のゾーンを基本とした23区分で構成される仮想空間を設定している。本モデルでは、岐阜市外との転出や転入は考慮していない。また、居住地・勤務地は、ゾーン内で座標によって位置が特定されている。

また、本モデルでは所要時間と移動距離は、OD間ごとの所要時間と移動距離を設定する。



図-2 対象地域内のゾーン区分

(2) エージェントの意思決定過程のモデル化

つぎに、エージェントの意思決定過程について検討する⁴⁾⁶⁾。ここでは、エージェントとして個人エージェントと個人エージェントを束ねる世帯エージェントから構成される。個人エージェントに設定する基本属性を表-3に示す。個人エージェントの属性は、第5回中京都市圏パーソントリップ調査（平成23年実施）の岐阜市内のデータを用いて設定する。パーソントリップ調査に記載がない項目については、既存の統計調査結果などを用いて設定する。

表-3 個人エージェントの基本属性

年齢・性別	パーソントリップ調査結果（属性レコード）
就業状況	1：就業者，2：就学者，3：その他
居住地	区画単位に設定（ゾーン内の一様乱数）
勤務地	区画単位に設定（ゾーン内の一様乱数）
就業曜日	曜日ごとに出勤・休日を設定
保有自動車の種類	0：保有なし，1：軽自動車，2：小型乗用車，3：普通乗用車，4：ハイブリッド乗用車，5：電気自動車
運転免許の保有	運転免許の保有状況を設定（免許の有無）
世帯人数	パーソントリップ調査結果（世帯人数）
所得	年齢などに基づき設定

つぎに、エージェントの意思決定過程を図-3に示す。エージェントの個人属性や世帯に関する情報は1年単位で更新される。また、エージェントの意思決定として、

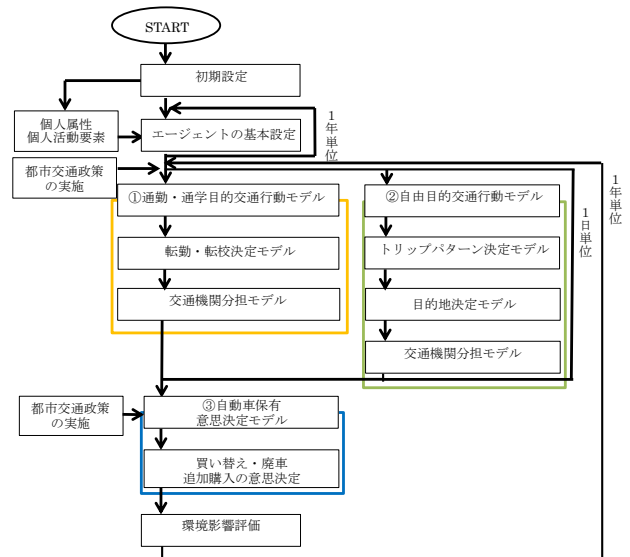


図-3 エージェントの意思決定過程

①交通行動モデル、②自動車購入意思決定モデルの2種類を考える。また、交通手段選択では通勤目的では、各エージェントはイベント時に交通手段変更の判断を行う。また、自由目的では、日常的な意思決定に対応するため、1日単位で意思決定を行う。車両の購入車種決定やスマートハウスの導入決定は、1年単位でエージェントの意思決定を行う。

(3) 自動車購入に関する意思決定過程のモデル化

保有車両の構成は、スマートシティを検討する場合に影響を与える。したがって、自動車購入に関する意思決定過程をモデル化する。自動車購入意思決定モデルのフローを図-4に示す。乗用車について車両の大きさ・排気量から、軽自動車・小型乗用車・普通乗用車・HV・EVの5種類に分類する。各エージェントは上記の選択肢から購入車種を決定する。はじめに世帯で自動車の保有継続や新規購入、廃車などを意思決定する。次に自動車を購入する場合は、自動車使用予定者の個人単位で意思決定を行う。

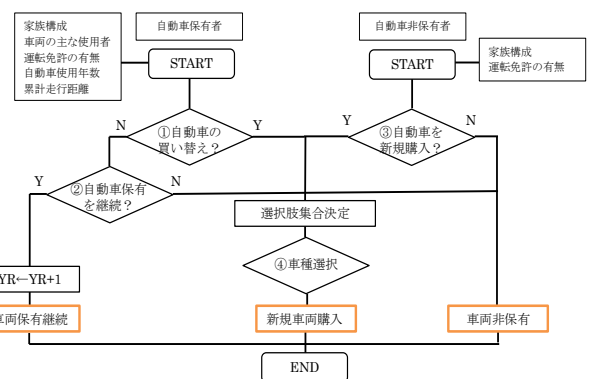


図-4 自動車購入意思決定モデルの構造

ここでは、購入意思決定過程の中で特に重要な購入車種の決定モデルについて検討する。車種の決定は、選択肢集合を設定した後、購入車種を選択を行うと仮定する。本研究では、各車種について表-4に示す費用を設定する。

表-4 各車種の運行費用の設定

	車両価格 (万円)	燃費(走行可 能距離)	燃料費	走行単価(円/km)
軽乗用車	150	15km/l	150円/l	10円/km
小型乗用車	200	12km/l	150円/l	12.5円/km
普通乗用車	250	10km/l	160円/l	16円/km
ハイブリッド乗用車	300	30km/l	150円/l	5円/km
電気自動車	350	0.125kWh/km	20円/kWh	2.5円/km

電気自動車は、他の車種と比較して車両価格は高価であるが、走行単価を安価としている。

現在保有している車種に応じて、車種を選択肢集合を限定するモデルを構成する。ここでは、以下の4ルールを設定する。

- 1)以前保有していた車種は0台にしない。
- 2)車種のグレードアップはしない。
- 3)環境対応型車両(CEV)を選択肢に含める。
- 4)新規に自動車を購入する場合は、すべての車種から選択する。

ここでは、ハイブリッド車や電気自動車は近年、低炭素車両として普及が進んでいるため、全てのエージェントが選択肢に含めると考える。

また、EVの購入条件設定として総走行距離制約を考慮する。EVは航続距離が短いため、一日の総移動距離に制約が加わる。EVの航続距離は160km程度が最大とすると、80%程度の充電で移動可能距離は130kmが限度である。そのため、現状の総移動距離が130kmを超える場合は、購入検討車種からEVを除く。

つぎに、選択肢集合の中から購入車種を決定する。このとき、電気自動車やハイブリッド車など、普及があまり進んでいない車両は、購入の際にイメージや感覚的に購入すべきか判断していると考えられる。そのため、曖昧性を考慮した簡略ファジィ推論を用いて購入車種を選択を行う⁷⁾。説明変数として、車両総保有費用(CP)、収入(IN)、環境性能(CO)、環境意識(EN)を用いる。

車両総保有費用(CP)は、式(1)より求められる。

$$CP_i = (CV_i + l_s \times e_i) \quad (1)$$

ここで、CP_i：車両*i*の総費用(円)、CV_i：車両*i*の購入費用(円)、l_s：エージェント*s*の予定走行距離(km)、e_i：車両*i*の走行単価(円/km)である。

エージェントは自動車に対する総保有費用に基づいて意思決定を行うと考える。本モデルでは、総保有費用は車両の購入費用と走行費用の総和とする。

収入(IN)は式(2)より求められる。

$$IN_y = (IN_s \times GD_y) \quad (2)$$

IN_y：y年の収入(万円)、IN_s：エージェント*s*の年収(万円)、GD_y：y年のGDP成長率(%)

年齢が上がるにつれて、年収は変化する。また、社会の経済情勢を考慮するためにGDP成長率を用いる。

環境性能(CO)は、各車種の1kmあたりの二酸化炭素排出量で評価する。軽乗用車：95g-CO₂/km、小型乗用車：120g-CO₂/km、普通乗用車：140g-CO₂/km、ハイブリッド車：75g-CO₂/km、電気自動車：0g-CO₂/kmとする。

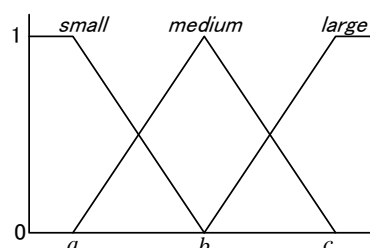
環境意識(EN)は、ゾーン別の交通機関分担率を評価指標とする。公共交通機関の利用率が高いと、環境意識が高いと考えられる。また、環境意識が高いと環境負荷の少ないHV・EVを選択肢に追加しやすくなる。

車種選択の推論ルールを図-5に示す。

Rule 1: If CP is small	and IN is small	then GR is large.
Rule 2: If CP is small	and IN is medium	then GR is large.
Rule 3: If CP is small	and IN is large	then GR is small.
Rule 4: If CP is medium	and IN is small	then GR is medium.
Rule 5: If CP is medium	and IN is medium	then GR is large.
Rule 6: If CP is medium	and IN is large	then GR is medium.
Rule 7: If CP is large	and IN is small	then GR is small.
Rule 8: If CP is large	and IN is medium	then GR is large.
Rule 9: If CP is large	and IN is large	then GR is large.
Rule 10: If EN is large	and CO is small	then GR is large.

図-5 自動車車種選択の推論ルール

推論ルールは、緑色部分の車両総保有費用と収入の関係に対するルールと青色部分の車両の環境性能と環境意識に対するルールに分かれている。また、ファジィ推論で用いられる前件部メンバシップ関数を図-6に示す。



パラメータ設定値

変数名	a	b	c
総保有費用(万円)	200	300	400
収入(万円)	200	400	600
環境性能(g-CO ₂ /km)	40	80	120
環境意識(%)	4.0	7.0	1.0

図-6 前件部メンバシップ関数

推論ルールをIf x is A_i and y is B_j then Z is C_k とする. 入力値 $(x, y) = (x_0, y_0)$ のとき, ルール i の前件部適合度 w_i は, 式(3)で求められる.

$$w_i = \mu_{A_i}(x_0) \times \mu_{B_j}(y_0) \quad (3)$$

ここで各推論ルールは, 推論の帰結を三段階 (*large, medium, small*) の言語変数で表現する. 簡略ファジィ推論では, 後件部のあいまい性を省略して, クリस्प数 (実数値) RG_i で定義する. したがって, 本モデルでは, 各車種の購入評価値として, (*large, medium, small*) = (1.0, 0.5, 0) を定義している. さらに, ファジィ推論では複数ルールの推論結果を総合化する. このとき, 簡略ファジィ推論では, 結論部が実数値であり, 各ルール前件部の適合度を用いて加重平均して, 推論結果が算定できる. すなわち, 式(4)を用いて確定値 z^* が決定される.

$$z^* = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \cdot GR_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (4)$$

この推論結果は, 車種ごとの購入評価値である. これは, 一種の効用に対応する変数であり, エージェントの購入評価値を表わす. 最終的にエージェントは各車種に対して購入評価値を算定し, その評価値の大きい車種を購入する.

4. 地方都市の交通環境評価

ここでは, 人工社会モデルを用いて, 交通環境の変化動向を観測する. これにより, スマートシティ化のインパクトを算定する.

(1) 現況の交通環境評価

ここでは, 人工社会モデルを用いて20年間の推移を観測する⁹⁾. 初期状態での二酸化炭素排出量と低炭素型車両保有状態を図-7に示す.

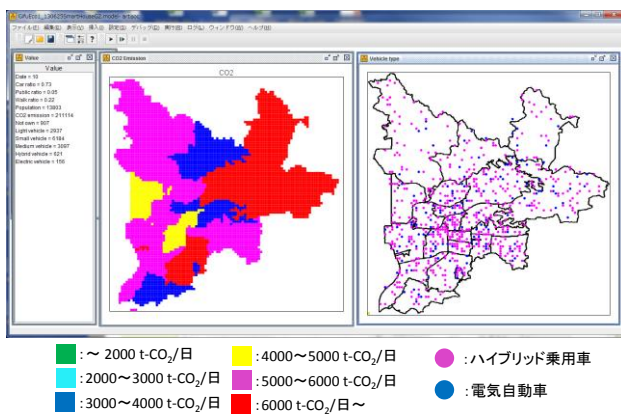


図-7 初期状態の CO₂ 排出量・低炭素型車両保有状況

初期状態では, 二酸化炭素排出量が高レベルであるゾーンが多い. また, ハイブリッド自動車は普及しているが, 電気自動車の普及台数は僅かであることがわかる.

つぎに, 保有車両の車種構成の経年変化を図-8に示す.

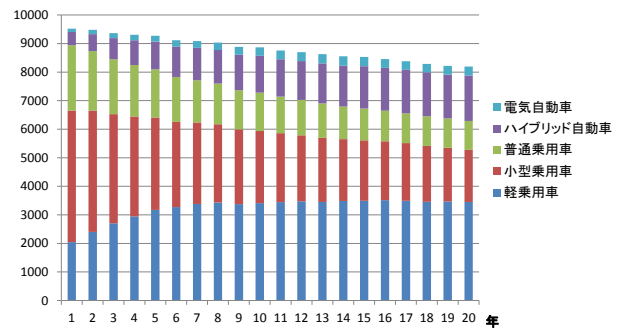


図-8 保有車種構成の経年変化

車両をガソリン車両 (普通・小型・軽) とエコカー (HV・EV) に大別すると, ガソリン車両は, 経年的に減少傾向が見られる. このうち燃費の小さい軽乗用車は増加傾向がみられる. 一般的にはエコカーの増大傾向とガソリン車両の減少傾向がある. 一方で, HV 車両は現時点の普及拡大の傾向にしたがい増加する. また, EV 車両に微増であるが増加傾向がみられる.

つぎに, エージェントの日常的活動の蓄積に基づく利用交通機関の経年変化を図-9に示す.

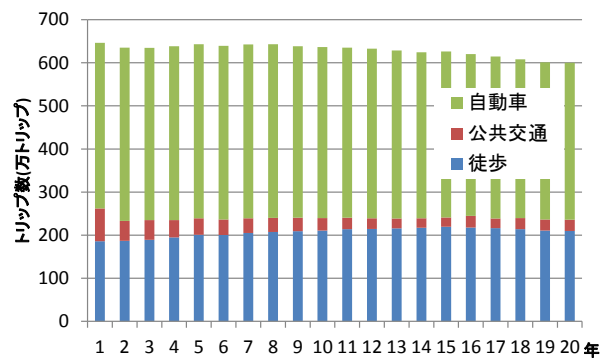


図-9 交通機関分担の経年変化

本モデルでは, 外生的にエージェント数が 10 年目まで増加し, 減少に転じる. そのため, 都市圏のトリップ数は 10 年目まで増加し, 減少する傾向となる.

つぎに, 20 年間の二酸化炭素排出量の経年変化を図-10に示す. 二酸化炭素排出量はトリップ数との関係が強く都市圏のトリップ数は 10 年目まで増加し, 減少する傾向と似たような傾向となる. 一般的には自動車トリップ数の減少とエコカーの普及により, 二酸化炭素排出量は逡減する傾向にある.

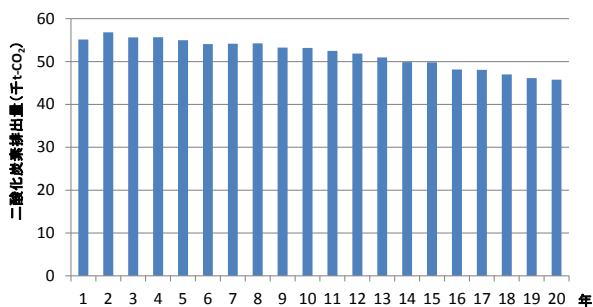


図-10 二酸化炭素排出量の経年変化

(2) スマートハウス増加による交通環境評価

つぎに、スマートハウスの増加に伴う交通環境を観測する⁹⁾。ここでは、スマートシティを重点的に進める地区として則武地区を設定する。本地区が所在するゾーンにおいて、スマートハウスとともに電気自動車の導入が促進されると設定する。このときの最終状態の状況を図-11に示す。

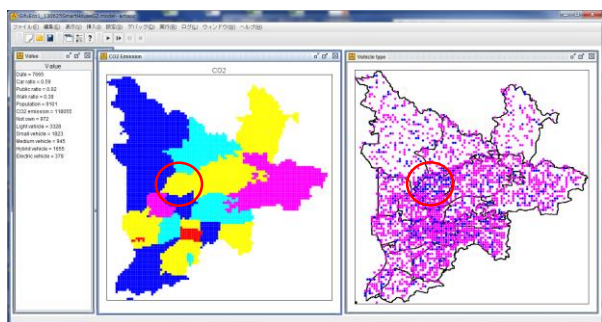


図-11 最終状態のCO₂排出量・低炭素型車両保有状況

則武地区が所在するゾーンにおいては、電気自動車が多く確認できる。また、政策の有無による電気自動車の普及過程の相違を図-12に示す。

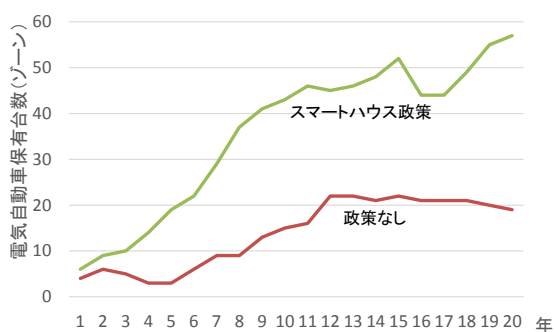


図-12 政策の有無による電気自動車普及状況

政策なしの場合と比較して、最終的に3倍の普及台数となっていることがわかる。

4. おわりに

本研究では、人工社会モデルを用いて、電気自動車やスマートハウスの普及における交通環境変化について観

測し、運輸交通部門におけるスマートシティ化のインパクトを算定した。本研究の主要な成果を以下に示す。

- 1) 低炭素型車両およびスマートシティの特徴を整理した。スマートハウスと電気自動車を一体的にマネジメントを行うことで、更なるエネルギー利用の効率化が期待される。
- 2) 地方都市を対象としてスマートシティにおける交通行動変化、環境影響を把握するための人工社会モデルを構築した。特に、車種選択における意思決定過程を簡略ファジィ推論を用いて表現した。
- 3) 人工社会モデルを用いて、交通環境の変化動向を観測した。この結果、無政策時は電気自動車の普及は限定的であること、スマートハウス増加により電気自動車が普及すると想定した場合のインパクトを算定した。今後の検討課題として、エージェントの意思決定過程を検証すること、スマートシティに関連する政策について検討することなどが挙げられる。

なお、本研究を遂行するにあたって、資料収集に関連して、岐阜市に多大な御尽力を頂きました。ここに記し感謝の意を表する次第です。また本研究は、平成25年度環境省環境研究総合推進費(1E-1202)「街区型環境未来都市モデルの構築とこれに基づく都市政策提案」の研究成果の一部であることを付記する。

参考文献

- 1) 次世代自動車振興センター：EV等保有・生産・販売台数, <http://www.cev-pc.or.jp/>, 2014.
- 2) 日産自動車：NISSAN リーフカタログ, <http://ev.nissan.co.jp/LEAF/>, 2014.
- 3) 岐阜市：岐阜市都市計画マスタープラン, <http://www.city.gifu.lg.jp/8479.htm>, 2010.
- 4) T. Akiyama, H. Inokuchi: Multi-agent simulator in transport sector for low carbon society, The 6th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems, No.391, 2012.
- 5) 日本交通政策研究会：都市環境に着目した道路政策の影響評価に関する研究(PL:秋山孝正), 日交研シリーズA-584, 2013.
- 6) 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.
- 7) 秋山孝正, 奥嶋政嗣：都市交通計画のためのファジィ交通手段選択モデルの構築, 日本知能情報ファジィ学会誌, Vol.19, No.2, pp.176-188, 2007.
- 8) 山影進：人工社会構築指南, 書籍工房早山, 2007.
- 9) 長谷川陽平, 秋山孝正, 井ノ口弘昭：高齢者交通に着目した地方都市のスマートモビリティに関する研究, 第33回交通工学研究発表会, No.85, 2013.

(2014. 4. 25 受付)