

スマートシティに関する マルチエージェント型交通行動モデル

長谷川 陽平¹・秋山 孝正²・井ノ口 弘昭³

¹学生員 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三丁目3番35号)

E-mail: k055307@kansai-u.ac.jp

²正会員 関西大学教授 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三丁目3番35号)

E-mail: akiyama@kansai-u.ac.jp

³正会員 関西大学准教授 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三丁目3番35号)

E-mail: hiroaki@inokuchi.jp

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、自動車利用率の高い地方都市におけるスマートシティ開発の妥当性を検証する。具体的には、エネルギーマネジメントを中心としたスマートハウス地区を想定する。交通行動者をエージェントと設定し、都市活動と空間移動を分析する。すなわち、スマートハウス地区を住宅開発の中心として交通行動パターンの変化を、電気自動車、スマートモビリティの利用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、スマートハウスの導入による交通行動変化について言及する。

Key Words : *smart city, traffic behaviour analysis, person trip survey, electric vehicle, smart mobility*

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、スマートハウスにおける低炭素車両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、スマートハウスや低炭素車両の導入は、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、スマートハウス導入時の低炭素車両の普及について述べる。具体的には、交通行動者をエージェントと設定し、スマートハウスの導入による交通行動変化の記述を考える。まず交通行動者のガソリン自動車(PV)から電気自動車(EV)やハイブリッド車両(HV)への利用車両に変更モデルを作成する。これら提案される交通機関選択モデルは、スマートシティの都市交通現象推計についての基本部分を構成する。環境指標として二酸化炭素排出量を経年的に分析し、都市交通政策の評価を行う。本研究の成果は、スマートシティの動向を表現するマルチエージェントモデルの構築にきわめて有効に利用可能である。

2. スマートシティの都市交通の概要

近年、環境未来型の都市をスマートシティとして多数の提案が行われている。環境共生を意図した都市計画に関して、大都市圏と地方都市圏の自動車利用実態の相違は極めて重要である。本研究では、自動車中心の地方都市における都市交通の低炭素化に着目して分析を行う。また本研究では、具体的な地方中核都市として岐阜市を取り上げて分析を試みる。

2. 1 地方都市交通の推移

まず地方都市の交通機関利用実態を分析する。図1は岐阜市における経年的な交通機関分担の推移を示している(中京都市圏パーソントリップ調査)。これより、経年的には鉄道・バスの公共交通機関シェアが減少し、自動車交通が増加している。また自動車交通と対称的に徒歩交通が経年的に減少している。これらの観察より、地方都市の都市交通の中心は明らかに自動車利用である。一方で中心市街地のにぎわいに関係する徒歩交通、環境共生型の交通機関としての自転車(二輪車)の増加が今後の重要課題であることがわかる。

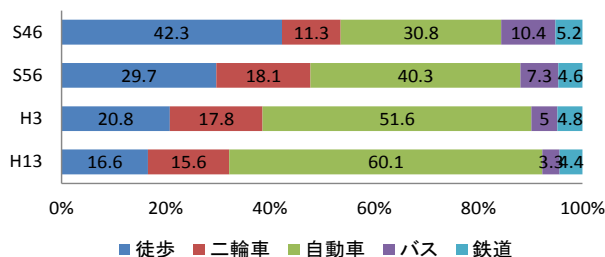


図1 岐阜市における交通機関の変化

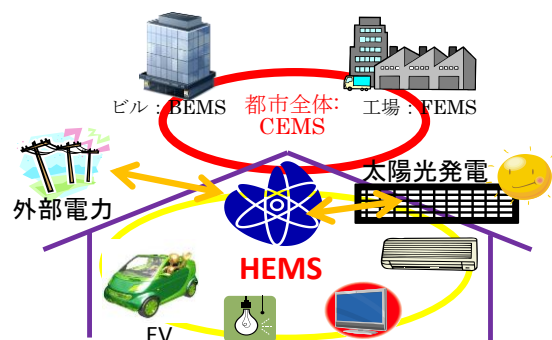


図3 スマートハウスの概念図

2. 2 スマートシティの都市活動

スマートシティは、エネルギー消費と環境負荷を考慮した環境未来型都市であり、最新技術を利用したマネジメントシステムを備えている。したがって、スマートシティは、省エネ都市として持続可能な経済活動を展開し、市民の生活質向上を目指した都市であるといえる。図2に本研究で考えるスマートシティの概念図を示す。スマートシティの実現には、二酸化炭素排出量の削減やエネルギー効率の向上、省資源化の徹底、市民のライフスタイルの転換などを複合的に組み合わせる必要がある。そのため、エネルギーや情報通信、水、交通、廃棄物など各分野における最新技術やソリューションを用いて、地域のエネルギーを有効活用する次世代の都市システムを構成する。したがって、地域中心としてCEMSと、住居地区のHEMS、業務地区のBEMS、さらには工業地区のFEMSを用いて街区のエネルギーをトータルマネジメントする。そのため、電力の融通ができ、効率的な電力供給が可能となる。

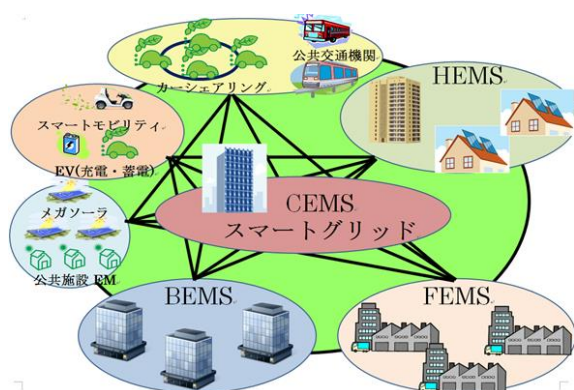


図2 スマートシティの概念図

ここで、住宅地区のスマートハウスはHEMSを用いて家庭内のエネルギー利用を最適にコントロールする住居である。図3に示すように、太陽光発電システムが創った電力を蓄電池に蓄え、電気自動車の充電などの暮らしに必要な電力として使用。それをHEMSが効率よく賢くコントロールし、エネルギーの省エネを実現する。

2. 3 スマートモビリティの概要

近年、環境に配慮しながらスムーズで快適な移動を実現する交通手段やシステムなどが開発されている。ここでは、表1に示すようなハイブリッド車(HV)、電気自動車(EV)、超小型モビリティを紹介する。

①ハイブリッド車(HV)

ハイブリッド車は、ガソリンで動くエンジンと電気でも動くモーターの動力源を組み合わせ使用して使用する自動車である。これら動力源を使い分け、排出ガスや燃料消費を抑制することができ、バッテリーとモーターのみで駆動する電気自動車と比較し、航続距離において強みを持っている。ガソリンを効率良く使えない発進時には電気で動くモーターを使用する。効率良く走行できる速度になったときにガソリンで動くエンジンに切り替える。そのために、燃費の向上と二酸化炭素排出量をガソリン車の1/2削減できる。エネルギーの補給を従来のガソリンスタンドで行うことができる。

②電気自動車(EV)

電気自動車は、電動モーターで車を駆動させる自動車である。走行中にCO₂を排出しないため、地球環境問題に貢献する。安価な夜間電力を利用して自宅で充電でき、減速時にエネルギーを回収できるため、エネルギー効率はガソリン車の約3倍である。

③超小型モビリティ

超小型モビリティは、自動車よりコンパクトで小回りが利き、環境性能に優れ、地域の手軽な移動の足となる1人～2人乗り程度の車両のことである。現在では、介護サービスやデリバリーサービスなどの業務用として主に利用されている。二輪車や軽自動車に比べて燃費が良く経済的であり、小回りが利くことが利点である。これから超高齢化社会を迎える中で、その活用については大きな可能性が期待される。各メーカーより、車両の開発が行われている。車両タイプは、速度が遅く歩道走行型や車道を走行する車道走行型がある。

表1 スマートモビリティの種類

	HV TOYOTA プリウス	EV 日産リーフ	超小型モビリティ コムスロング
			
走行位置	車道	車道	車道
車種	乗用車	乗用車	ミニカー
最高速度(km/h)	-	-	50
車輪の数	4輪	4輪	4輪
乗車定員(人)	5	5	1
航続距離(km)	-	228	45
充電時間(h)	-	30	13
免許	普通	普通	普通

次に、ハイブリッド車(HV)と電気自動車(EV)の普及について述べる。図4はハイブリッド車(HV)と電気自動車(EV)の保有台数を示す。2011年度末の保有台数はハイブリッド車(HV)は約202万9千台、電気自動車(EV)が約3万2千台、合計206万1千台である。2009年よりハイブリッド車(HV)の普及が増加している。電気自動車(EV)の問題点として、充電施設の整備がある。2012年12現在の充電施設設置箇所は、全国で6,900箇所である。ガソリンスタンド設置数の37,743箇所と比較すると、まだ十分に整備がされていないことが分かる。また、設置数上位3位は神奈川県：655箇所、愛知県：481箇所、東京都：390箇所となり、大都市圏では整備が進んでいる。

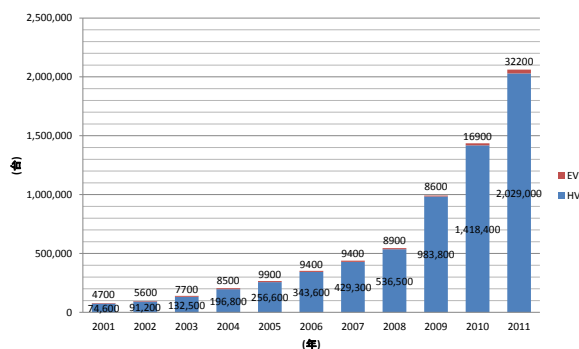


図4 EV・HV保有台数の推移

2.2 マルチエージェントモデルの意義

知的情報処理において、複雑系とは、複数の構成要素をもち、エージェントが有機的に結合している全体的なシステムである。システムのエージェントは自律的規則にしたがって変化することから、システム全体の状態が決定される様相を持つ。したがって、複雑系モデルは多数の研究分野において、要素還元的な分析方法での解決の困難な問題に対する応用が検討されている。複雑系モデルにおいて、人間をエージェントとして、社会現象を複雑系として表現したマルチエージェントモデルが提案されている²¹⁾。

マルチエージェントモデルでは、交通行動者をエージェントとするため、個別の交通行動を都市圏で集計的に

交通現象として算定する。具体的な特徴としては、エージェント単位の行動規範の多様性を前提として、確率的効用理論などの統一した行動規範で定式化していない。また、エージェントのランダム性・あいまい性を考慮し「相互作用」の記述を前提とする。多様なエージェントの局所的行動変化が都市交通現象全体に波及する「創発現象」を観測する意図を持っている²¹⁾。

スマートシティの創出を目指した運輸部門に関する政策的アプローチを検討するため、マルチエージェント型の人工社会モデルを提案する。交通行動者をエージェントとし、スマートハウスの普及に伴う交通行動変化の分析を行う。①実証的なモデル構成を実現するため、現実のパーソントリップ調査結果に基づくエージェント行動を記述する。エージェントのスマートハウスの導入やEV・HVにおける購入意識のプロセスを明確化し、普及過程を観測する。③現実的な都市交通環境変化についての考察から、スマートシティの創生プロセスを検討する。以上より、スマートシティを目指した都市交通政策の可能性について整理する。

3. マルチエージェントモデルの基本構成

本研究では、マルチエージェントシミュレータを応用した人工社会モデルを作成する。本研究では、中京都市圏の岐阜市を研究対象地域として設定した。

3.1 人工社会モデルの都市空間設定

本研究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。岐阜市総合計画「ぎふ躍動プラン・21」に位置図けられる「13の地域生活圏」と第4回パーソントリップ調査(PT調査:平成13年実施)との整合をとる。そのため、本研究では図5に示すように、岐阜市を13区分で構成される仮想空間を設定している。

本研究では、交通行動者を自律エージェントとする人工社会モデルを構築する。各エージェントには、表2に示す個人属性が設定されている。各エージェント単位の交通行動をモデル化する。

- 1) 就業者・就学者エージェントの対する就業日の設定をする。平均的な就業者・就学者の異なる行動を想定した設定である。①就業者：月曜～金曜：80%、土曜：40%、日曜：20%の確率を用いて、一様乱数を発生させる。②就学者：月曜～金曜：100%、土曜：40%、日曜：0%の確率を用いて、一様乱数を発生させる。③その他：日曜～土曜：0%の確率を用いる。
- 2) 2011年自動車保有台数(全国)の実績値を参考に、自動車を保有するエージェントに対して、確率に従って車種構成を決定する。①軽自動車：30%、②小型乗用車：35%、③普通乗用車：25%、④ハイブリッド乗用車：9%、⑤電気自動車：1%の確率を用いる。

- 3) 所得レベルは低所得者層，中所得者層，高所得者層がそれぞれ3分の1の割合で存在すると設定する。

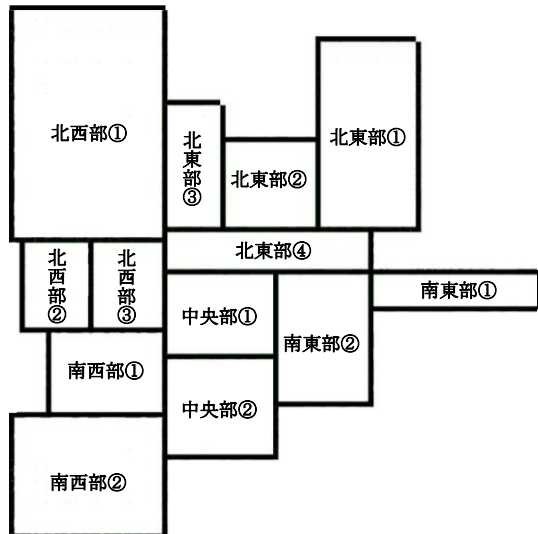


図5 人工社会モデル対象地域(岐阜市)

表2 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・勤務地	小ゾーン単位に設定
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・世帯主	パーソントリップ調査結果(世帯人数)
所得レベル	1: 低所得、2: 中所得、3: 高所得

3.2 エージェントの意思決定構造過程

人工社会モデルでは、各エージェントは日常的に交通行動パターンを決定するとともに、スマートハウスの導入と交通行動者のガソリン自動車からEV・HVへの利用車両の変更にに関する意思決定を行う。都市空間におけるエージェントの意思決定結果の集合として、スマートシティにおける都市活動が構成される。図6にエージェントの意思決定過程を示す。

交通行動者（エージェント）の意思決定として、①スマートハウス導入の検討、②交通手段選択の2種類を考える。また、交通手段選択では、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。スマートハウスの導入の決定と車両の購入車種決定は、比較的長期のエージェントの意思決定である。ここでは、一定の割合で車両の更新時期に至ったエージェントのみが意思決定を行う。

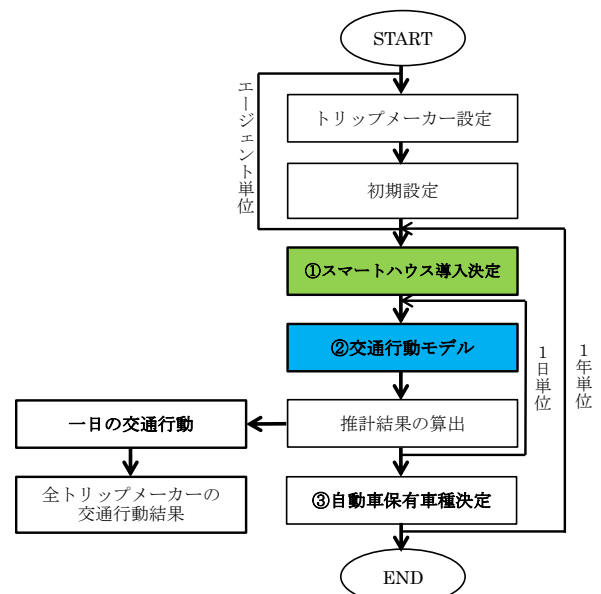


図6 エージェントの意思決定過程

①スマートハウス導入の検討

「スマートハウス導入決定」（図6における黄緑色）の意思決定過程を図7に示す。スマートハウス導入地区を設定する。そのエリア内における住居者を対象にスマートハウス導入を検討する。ここでは、世帯あたりで考える。エリア内の居住者を対象に補助金などのスマートハウス導入政策を実施する。居住者はスマートハウス導入政策や近隣住民の環境問題に対する意識より、スマートハウスの導入を決定する。スマートハウス導入決定後は、EV保有選択を行う。

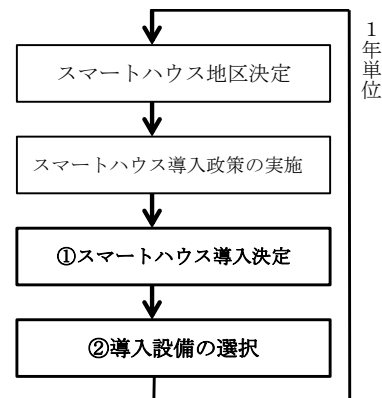


図7 スマートハウス導入に対する意思決定過程

②交通行動モデル

「交通行動モデル」（図6における水色）の意思決定過程を図8に示す。利用交通手段は、①自動車（EV・HVを含む）、②公共交通機関、③徒歩・二輪とする。図9に、利用距離に対応した徒歩・二輪の選択確率を設定する。ここでは移動距離として、自宅と勤務先のユークリッド距離を用いる。決定される選択確率に応じて徒歩・二輪の選択を決定する。徒歩・二輪の非選択者となった

エージェントは、①自動車、②公共交通機関の選択を行う。ここでは、EV や HV は航続距離の制限を考慮する。EV の選択において、過去 1 年間の 1 日平均移動距離が 50km 未満のみ選択の対象となる。HV の選択において、過去 1 年間の 1 日平均移動距離が 10km 未満であり、世帯人数 1 人の方か世帯主以外の方が選択の対象となる。

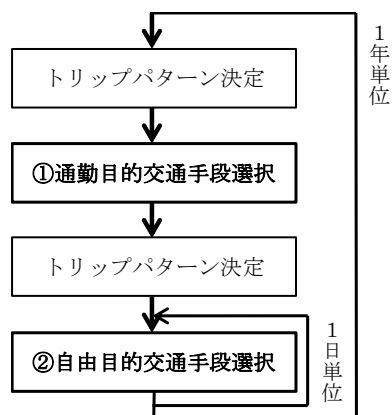


図 8 交通行動の意思決定過程

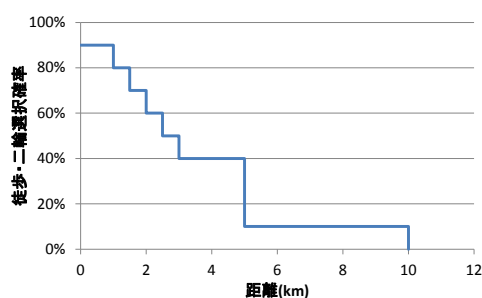


図 9 徒歩・二輪の選択確率

上記のエージェントの①自動車、②公共交通機関の交通機関選択プロセスについて簡略ファジィ推論を用いて定式化する。これは、エージェントの意思決定において、あいまいな情報処理と経験的知識に基づく推論過程を表現するものである。ここでは、自由目的を例に具体的に述べる。説明要因として、TM：所要時間、TC：所要費用を用いる。具体的には、TC：所要費用として、①自動車燃料費、②公共交通機関の運賃を用いる。この場合の簡略ファジィ推論で用いられる推論ルールを図 10 に示す。

Rule 1: If TM is small	and TC is small	then GR is large.
Rule 2: If TM is small	and TC is medium	then GR is large.
Rule 3: If TM is small	and TC is large	then GR is medium.
Rule 4: If TM is medium	and TC is small	then GR is large.
Rule 5: If TM is medium	and TC is medium	then GR is medium.
Rule 6: If TM is medium	and TC is large	then GR is small.
Rule 7: If TM is large	and TC is small	then GR is medium.
Rule 8: If TM is large	and TC is medium	then GR is small.
Rule 9: If TM is large	and TC is large	then GR is small.

図 10 交通手段選択の推論ルール

各説明変数に対する言語変数（メンバシップ関数）の形状を図 11 に示す。メンバシップ関数の形状はパラメータの設定値に依存している。各変数ごとの試行錯誤法により決定される。

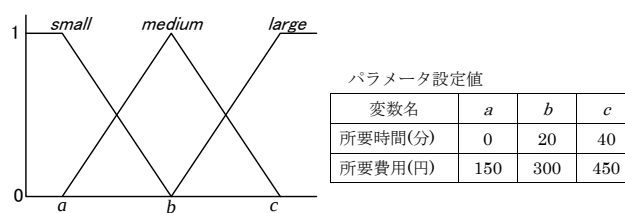


図 11 各説明変数のメンバシップ関数

3.3 行動主体間の相互作用の表現

本研究では、スマートハウス導入に対する交通行動の変化は、講堂主体の相互作用によって変化する可能性がある」と仮定する。周囲の行動者が環境意識が低く、スマートハウス導入に対して消極的な場合、その行動者はスマートハウス導入の意思を阻害される可能性が考えられる。また、周囲の行動者が環境意識が高く、スマートハウス導入に対して積極的な場合は、スマートハウス導入に対して消極的な態度が変化する可能性がある。

3.4 環境影響評価

本研究では、環境影響を表す指標である二酸化炭素排出量を算出する。二酸化炭素排出量は、各エージェントのトリップに対してCO₂排出量を算定する。本モデルでは、交通機関として自動車、公共交通、徒歩・二輪の3種類を用いている。このうち、徒歩・二輪はトリップでは二酸化炭素は排出されない。また自動車の場合は、ガソリン・電気消費量に表3に示すCO₂排出係数を乗じて算定する。電気自動車(EV)では、走行による直接のCO₂排出はないが、発電時に二酸化炭素を排出するため、この値を排出係数としている。また、公共交通機関は鉄道を想定し、この場合の単位距離当たりの排出係数を用いて排出量を算定する。

$$COE = \sum_{k \in K} (\alpha_k \sum_{k=1}^{n_k} d_k)$$

COE=二酸化炭素総排出量(g・CO₂/人・日),

α =二酸化炭素排出量原単位(g・CO₂/人・km)

d_k =移動距離(km)

表-3 交通機関・燃料別CO₂排出量

交通機関・燃料	CO ₂ 排出係数
自動車・ガソリン	2.31 kg-CO ₂ /ℓ
自動車・電気	0.444kg-CO ₂ /kWh
公共交通機関（鉄道）	0.019kg-CO ₂ /人・km

4. おわりに

本研究では、スマートハウス導入における都市交通政策についての検討を行うための人工社会モデルの展開を試みた。具体的な成果を以下に示す。

- 1) 交通行動記述の精緻化を実行した。①パーソントリップ調査結果から、現実的エージェント属性を設定した。②スマートハウス導入モデルでは、EVの購入意識と周辺環境の関係を明確にした。③交通手段選択モデルでは、徒歩・二輪の選択に移動距離を考慮した。
- 2) 現行トレンドの設定として、人口の減少とHV・EVの増加を考えている。

今後の課題として①モデルの実用性を検討するためのデータ整備、②エージェントの意思決定プロセスに関する実証的調査、③視覚的表現を含めた先進的コンピュータ技術の導入があげられる。

謝辞：最後に本研究を遂行するにあたって、資料収集に関連して、岐阜市企画部・都市建設部・自然共生部・まちづくり推進部等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24年度環境省環境総合推進経費「街区型環境未来都市モデルの構築とそれに基づく都市交通政策提案」の研究成果の一部であることを付記する。

参考文献

- 1) 統計局国勢調査, 2005.
- 2) 岐阜市統計資料, 2012.
- 3) 中京都市圏総合交通計画協議会：第4回中京都市圏パーソントリップ調査, 2001.
- 4) スマートシティ岐阜実証事業予備調査報告書, 岐阜市, 2012.
- 5) 岐阜市地球温暖化対策実行計画 - 低炭素社会へのレボリューション-, 岐阜市, 2011.
- 6) 岐阜市まると省エネ住宅ガイドライン, 岐阜市, 2009.
- 7) 超小型モビリティ導入に向けたガイドライン, 国土交通省 自動車局, 2012.
- 8) 太陽光発電フィールドテスト事業に関するガイドライン基礎編(2012年度版), 経済産業省資源エネルギー庁, 2013.
- 9) 長谷川陽平, 秋山孝正, 井ノ口弘昭：「交通行動パターンからみた低炭素社会の交通環境に関する研究」, 平成24年度土木学会関西支部年次学術講演会講演集, CD-ROM, No. 0440, 2012.
- 10) 秋山孝正, 井ノ口弘昭, 長谷川陽平：「交通行動パターンに着目した低炭素社会の構成についての考察」, 第45回土木計画学研究講演集, CD-ROM, No. 318, 2012.

- 11) 長谷川陽平, 秋山孝正, 井ノ口弘昭：「生活質を考慮した都市交通環境の比較分析」, 土木学会第67回年次学術講演会講演概要集, DVD, No. IV-055, 2012.
- 12) 秋山孝正, 井ノ口弘昭, 長谷川陽平：「高齢者交通行動に着目した都市交通の持続可能性評価」, 第46回土木計画学研究講演集, CD-ROM, No. 59, 2012.
- 13) 長谷川陽平, 秋山孝正, 井ノ口弘昭：「高齢層の交通行動パターンに着目した低炭素社会の構成についての考察」, 第32回交通工学研究発表会論文集, No. 063, 2012.
- 14) 北村隆一 編著：ポストモータリゼーション, 学芸出版社, 2001.
- 15) 環境テクノロジー プロフェッショナル用語辞典, 日経BP社[編著], 2011.
- 16) 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.
- 17) 秋山孝正, 奥嶋政嗣：交通機関選択分析のためのファジィ決定木手法の比較検討, 土木学会論文集D, vol. 63, No. 2, pp. 145-157, 2007.
- 18) 秋山孝正, 奥嶋政嗣：人工社会型都市モデルを用いたまちづくり政策の検討, 土木計画学研究・論文集, Vol. 25, 2008.
- 19) 奥嶋政嗣, 秋山孝正, 北村隆一：高齢者の交通行動に着目した鉄道駅とまちに関する分析, 交通学研究／2008年研究年報(通巻52号), pp. 71-80, 2009.
- 20) 日本交通政策研究会(2011)「低炭素社会を目指した都市道路網における道路交通運用方策の研究 低炭素交通研究プロジェクト(PL：秋山孝正)」, 『日交研シリーズA-531』.
- 21) 秋山孝正, 奥嶋政嗣, 和泉範之(2007)「マルチエージェント型ファジィ交通行動モデルの提案」, 『土木計画学研究・論文集』, Vol. 24, pp. 489-490.

(2013. 8. 7 受付)