

# 人工社会モデルを用いた運輸部門の自律的 低炭素化の可能性に関する研究

秋山 孝正<sup>1</sup>・井ノ口 弘昭<sup>2</sup>

<sup>1</sup>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3丁目3番35号)

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

<sup>2</sup>正会員 関西大学助教 環境都市工学部都市システム工学科

(〒1564-8680 大阪府吹田市山手町3丁目3番35号)

E-mail:hiroaki@inokuchi.jp

低炭素社会の実現に関して、運輸部門での二酸化炭素削減の方向性が検討されている。一方で自律的な低炭素社会の実現に関して、複雑な社会構造を基本とした議論の必要性が大きい。このため、本研究では仮想的な都市空間を人工社会モデルとして設定して、運輸部門の自律的な低炭素化の可能性について検討する。具体的には、MAS（マルチエージェントシミュレータ）を利用して、交通行動を基本とした運輸部門の活動変化を表現する人工社会モデルを構成する。運輸部門の活動変化として、①交通行動変化（特に交通機関分担）、②エコ車両導入（EV、HVを含む）の動向に関して定式化する。すなわち、都市の交通行動者を自律的エージェントとして、公共交通機関による運輸部門全体のシステム変化、低炭素車両の増加パターンなどを観測する。このような個別エージェントの、公共交通機関利用の増加、EV車両の購入増加などに対する低炭素化対応策に関する局所の変化から、自律的に生成される交通現象変化と低炭素化レベルを定量化することで、今後の運輸部門に関する自律的な低炭素社会の実現可能性を議論する。

**Key Words :** low-carbon society, multi agent simulator, transport sector, low carbon car, modal split

## 1. はじめに

低炭素社会を目指した各種検討が行われている。交通部門においても、都市構造、交通機関分担、低炭素車両の増加などの方策が行われている。このとき、持続可能な都市社会という視点から、都市市民の自律的なまちづくりと協調する低炭素社会の実現が期待される。

本研究では、低炭素社会に関する運輸部門に関する政策的アプローチを検討する。具体的には、都市交通に関する人工社会モデルを構成して、都市圏の運輸部門における低炭素化の可能性について検討する。実際的なモデル化には、複雑系の記述可能な既存のMAS（マルチエージェントシミュレータ）を利用する<sup>1)</sup>。ここでは、低炭素化に関する運輸部門の動向として、交通機関分担と低炭素型自動車を取り上げ、交通行動者をエージェントとした人工社会を構成する。これより、運輸部門における自律的な低炭素化の可能性を検討するものである。

## 2. 運輸部門の人工社会モデル

本研究では低炭素社会に関する検討のなかでも運輸部門に関する環境負荷低減の具体的な検討を行う。このとき、交通行動者行動を基本として都市交通における低炭素化を考察する。特に運輸部門の複雑現象を表現する技術として、人工社会モデルの構成について検討する。

### (1) 運輸部門のモデルの基本概念

わが国における部門別二酸化炭素排出量（2008年）によれば、全12億1400万トンのうち、産業部門：34.5%、民生部門：19.4%、運輸部門：19.4%である。したがって、運輸部門は全部門の20%程度の二酸化炭素排出量を占めており、運輸部門の低炭素化は、重要な課題である。

ここでは、運輸部門の低炭素化を、①自動車交通量の低減と②自動車燃料の低炭素化の側面から検討する。このとき、いずれも都市圏の交通行動者の意思決定に基づ

いて、都市圏の低炭素化の進展状況を検討できる。このため、交通行動者を自律エージェントとした人工社会モデルを構成する<sup>2)3)</sup>。

## (2) エージェントモデルの構成

ここでは、人工社会の構築に関して、既存のマルチエージェントモデルシミュレータ (artisoc) を用いる<sup>4)</sup>。このシミュレータは人工社会として社会現象のモデルをシミュレーションすることを念頭に開発されたものである。したがって、人工社会モデル構築に必要となるエディターあるいは人工社会の空間表示あるいは時系列グラフを生成する機能が設定されている。

この研究で用いたマルチエージェントシミュレータの基本性能について、表-1に整理している。人工社会モデルを構築する上で、特に重要となる特徴として、①エージェントの行動 (エージェント挙動) を定義することで、システム全体の計算を実行できる。特にルール記述が比較的容易である。②エージェントモデルの基本的構成をもつとともに、対応言語 (基本的にはVisual Basic) により追加的プログラムが可能である。③各種の出力方法 (図式表現) が設定されており、比較的容易に仮想空間の表現が可能である。

本研究では、都市圏における交通環境変化を定量的に表現し、個別の交通行動者の挙動を蓄積することで、低炭素社会の実現可能性を検討する。したがって、これらの機能は本研究の意図に合致するものである。

## (3) 人工社会モデルの構成

ここでは、都市圏における運輸部門の低炭素化に関する人工社会モデルの基本的構成を示す。

### a) 人工社会の設定

本研究では、都市圏における低炭素社会の構成を検討する<sup>5)7)</sup>。本研究では、仮想的都市空間を大阪市を参考として構成する。図-1に仮想空間としての都市構成を図示している。これは、前述のMASの基本的機能に含まれる空間マップとして表現される人工社会空間である。具体的には、30×30のメッシュにより表現されている。また、各ゾーン区分は大阪市の各区を単位としている。このため、人口分布、自動車交通量、車両種別台数などの実績値については、必要に応じて大阪市の計測値を参考に設定する。一方で、ここで構築する人工社会モデルは複雑系として都市の低炭素社会の基本的形態を検討するためのものであり、全要因を大阪市域と整合して設定したものではないことを付記しておく。

都市空間における市民を自律エージェントと考える。都市人口 (エージェント数) は、1000個体とする。各エージェントの属性に関しては、個人属性の分布が大阪市

表-1 マルチエージェントシミュレータの概要

最大個体数	21 億エージェント
コンポーネント (構成物)	最上位: Universe といわれる。Universe の下の階層に「空間」, 「エージェント」, 「変数」を配置する
ルールの記述	エージェントルール記述は、「ルールエディタ」を用いる。一部を除き、Visual Basic を利用する。For 文・If 文、組み込み関数・ユーザ定義関数・特殊関数などがある。
結果表示機能	空間描画 (空間マップを出力) 時系列グラフ・棒グラフ・円グラフ・散布図・折れ線グラフ・ヒストグラム 変数値画面出力・ファイル出力

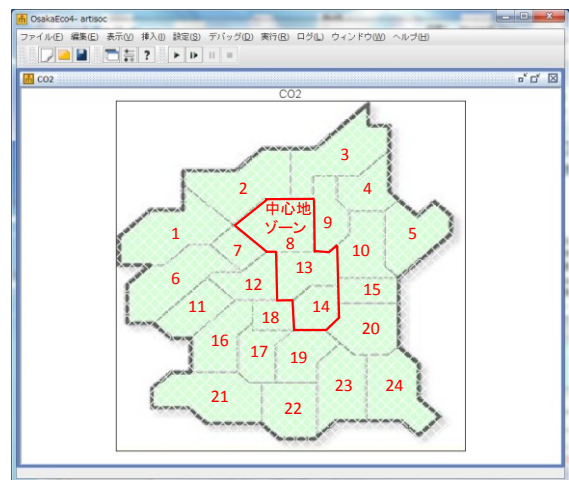


図-1 人工社会モデルの表示画面

表-2 エージェントの基本属性

年齢	大阪市の年齢分布に基づき設定し、毎年更新
性別	大阪市の男女割合に基づき設定
属性	1: 就業者、2: 就学者、3: その他
居住地	区単位 (ゾーン) で設定
勤務地	区単位 (ゾーン) で設定
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 を設定
運転免許の保有	運転免許の保有状況を設定
所得レベル	1: 低所得、2: 中所得、3: 高所得の3分類で表示する。
世帯人数	世帯人数を個体単位に設定

における空間分布と整合するように設定をしている。また世帯単位の交通行動は想定せず、各エージェント単位で意思決定行動が実行されるものとする。したがって、

交通行動パターンおよび車両の購入に関してもエージェント単位の行動を想定している。

### b) 人工社会における運輸部門の動向記述

都市空間における交通行動者（エージェント）の意思決定結果の集合として、運輸部門の活動が構成される。

エージェントの意思決定過程を図-2に整理する。ここでは、人工社会全体の計算過程について説明する。本モデルでは、運輸部門の交通行動者の意思決定として、①交通機関分担（通勤目的）、②交通機関分担（自由目的）と、③車両の購入車種決定（ガソリン、ハイブリッド、EV、低炭素化車両）を考える。このうち、交通機関分担（①・②）は比較的短期の意思決定であり、自動車・公共交通機関・徒歩二輪の交通機関分担を想定する。

車両購入（③）は長期の意思決定である。人工社会の都市交通環境および地域別の二酸化炭素排出量が経年的に算定される。

### c) 交通機関分担モデルの構造

エージェントの意思決定を上記のように3種類のモデルにより表現する。まず、「交通機関分担モデル」に関して、各意思決定過程を簡単に説明する。

#### 【通勤目的の交通機関分担】

通勤交通機関は、就業者の交通行動パターンを決定づける主要な要因である。ここでは、交通行動者の通勤交通機関の日常的な変更は想定せず、交通経験の集積に基づいて一定期間の後（一年間）、交通機関の変更を検討すると考える。具体的には、自宅から勤務先までの所要時間・所要費用に加えて、当該交通機関の利用実績（混雑経験程度）を検討する。すなわち、就業者が毎年一度、通勤交通機関を見直す行動をモデル化したものである。これは、特に自動車利用者の交通混雑に対する経験から交通の不確実性を考慮した意思決定過程を表現している。

また、人工社会におけるエージェントの意思決定モデルの構成では、エージェントの意思決定に関して、各交通機関に対する選好程度をIF/THEN形式の推論ルールにより構成する<sup>89)</sup>。これは多様なエージェントの判断過程をモデル化するためのものである。さらに、交通行動者の判断のあいまい性を考慮して、ファジィ推論を用いた定式化を利用する。したがって、近似的推論の結果としてエージェントの交通機関選択結果が示される。具体的な算定方法としては、簡略ファジィ推論を用いている。

簡略ファジィ推論においては、自動車利用と公共交通利用の関係をモデル化するため、前件部の推論ルールの適合度を決定する。このとき各説明変数に関するメンバーシップ関数を定義する必要がある。図-3に具体的なメンバーシップ関数の形状を示す。これらは意思決定のた

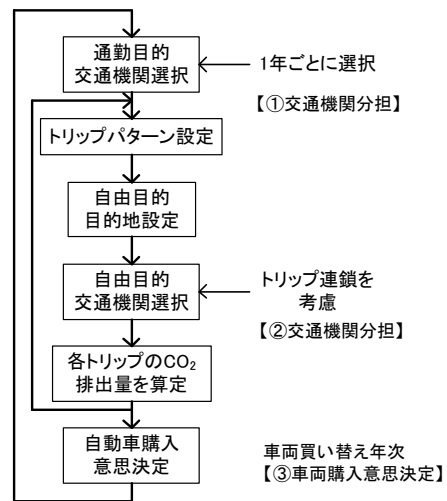
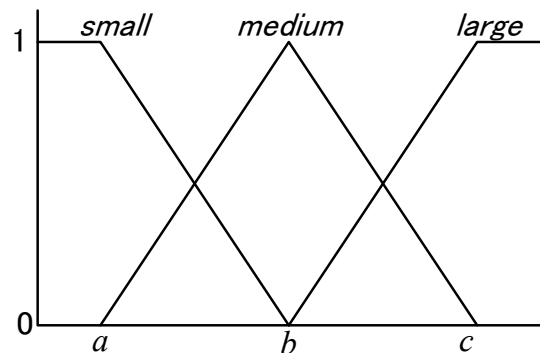


図-2 エージェントの意思決定過程



	a	b	c
所要時間(分)	0	20	40
所要費用(円)	100	300	500
混雑経験割合(%)	5	10	20

図-3 各変数のメンバーシップ関数

めの各入力変数に対応して設定している。

各推論ルールにしたがい、後件部の程度（グレード）を三段階（large, medium, small）で規定する。さらに各推論結果である各交通機関の選好程度の比較により交通機関を決定する。

#### 【自由目的の交通機関分担】

交通行動者のうち、就業者の場合には、自宅～勤務地の移動に加えて、「付加的自由活動」に関する移動を考える。また非就業者の場合には、「自由活動の組み合わせ」により交通行動パターンが形成される。

この場合は日常的行動として、①各交通行動者の自由活動数と目的地を特定する、②各トリップの起終点間に関する所要時間・所要費用に基づいて交通機関を設定する。この場合の交通機関分担モデルは、通常の効用関数を基本としたロジット型関数により定式化できると考え

る。これより、各エージェントの選択確率が算定される。したがって、各エージェントは選択確率の割合に応じて、交通機関を選択する。さらに、この段階では交通機関として、自動車・公共交通に加えて「徒歩・二輪」を考慮しており、トリップ長の短い場合に選択を優先する二段階モデルを構成している。

#### d) 車両購入モデルの構造

交通行動者のうちは、自動車所有者は、数年単位の期間で、車両の購入を検討する。交通行動者は個人属性に基づいて、異なる環境意識を持っている。

車種構成に関しては、ガソリン車両（普通乗用車・小型乗用車・軽乗用車）、ハイブリッド車、電気自動車の5種類を想定する。車両購入モデルは、①車両購入の有無と②車種選択の2段階の意思決定で構成される。

ここで、①車両購入の有無に関しては、車両の平均使用年数に対して、確率的分布を仮定して（全国的数値）、これに基づいて、エージェントは購入の意思決定を行う。

つぎに、②車種選択プロセスでは、各車両構成割合を規定値として用いるとともに、エージェントの属性を考慮する。基本的には、車両価格、維持費用を主として検討する。ここで、維持費用は燃料費用を考え、過去にエージェントが走行した距離・各車両の燃費・燃料単価を用いて算出する。また、所得レベルおよび世帯人数のエージェント属性を用いて選択肢を限定する。例えば、所得レベルが低く、世帯人数が少ないエージェントは、普通乗用車を選択肢から除く。

一方で、低炭素化車両（EV、ハイブリッド車）においては、エージェント属性（所得レベル・環境意識）を考慮している。

すなわち、一定の所得レベルがあり環境意識の高い場合に低炭素対応型車両に移行する可能性が高いと考える。

### 3. 人工社会モデルによる記述

前章で構成した人工社会モデルにより、運輸部門における今後の動向を検討する。ここでは、運輸部門に関する社会現象を複雑系として表現する方法を検討する。

#### (1) 運輸部門の推移動向

現在の初期設定値に基づいて、社会的変化を経年的推移を算定することで、モデル挙動の妥当性を検証する。人工社会においては、時系列的に年齢構成の変化が発生する。これより、各エージェントの交通行動パターンおよび車両の利用状態が推移する。このような社会的変化を踏まえて、各エージェントは前章で示した意思決定を繰り返すことから、運輸部門においても交通現象の変化を生じる。運輸部門における自動車台数（機関分担）の

推移を検討する。

図-4に交通機関分担割合の経年的推移を示す。本図より、全国的な人口減少の傾向を踏まえて、自動車利用は継続的に減少する傾向にあることがわかる。これは、本モデルでは、現行の交通機関の相対的な分担関係を反

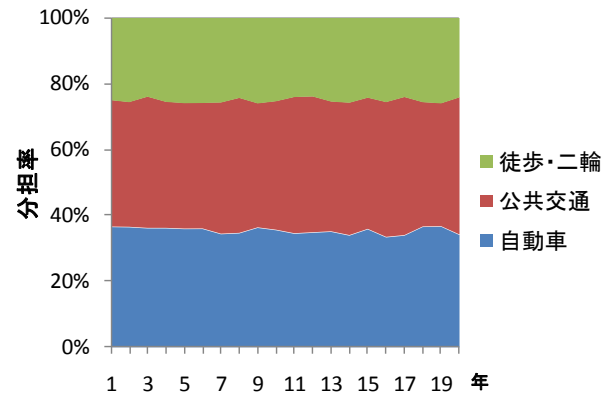


図-4 利用交通機関の時間的推移

映しており、自動車交通若干の減少傾向を示している。しかしながら、交通機関分担の側面からは全般的に大きな変化が与えられないことがわかる。

つぎに、自動車の車種構成に関して時間的推移を検討する。図-5に車種構成の時間的推移を示す。車種構成

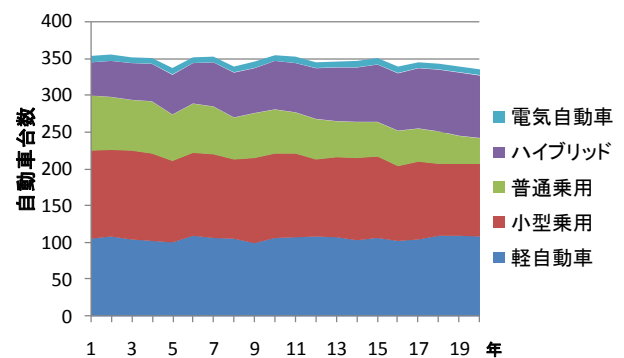


図-5 車種構成の時間的推移

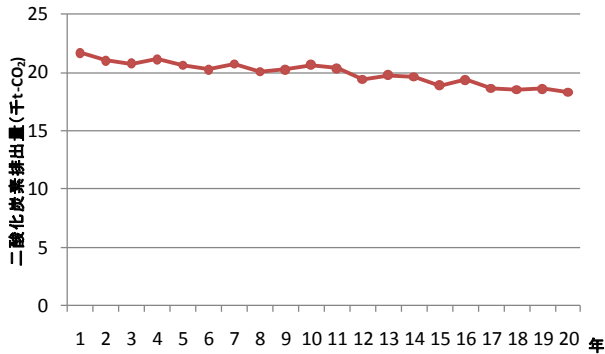
では、現在の全国的な動向としてハイブリッド車の増加と軽自動車の増加が知られている。人工社会モデルにおいても、この傾向を反映してハイブリッド車の増加が観測される。一方で普通乗用車台数は経年的に減少する。さらに、EV車両に関しては現時点（初期設定値）において普及台数は少なく、政策的な誘導を実行しない場合には、顕著な増加が期待できないことがわかる。

#### (2) 低炭素化の時間的推移

現時点の動向を踏まえて、仮想都市空間における将来の低炭素化の状況について、人工社会モデルの機能を用いて表現することができる<sup>10)</sup>。

現行で実行されている各種の低炭素施策を継続するこ

とで、一定の都市の低炭素化が達成されるかどうかを検討する必要がある。図一6に都市圏全体のCO<sub>2</sub>の年間総排出量(単位:トン)の経年的推移を示す。前項の自動車台数の減少傾向および低炭素車両の増加傾向を踏まえて、若干ではあるが都市の低炭素化が進展する。



図一6 都市の低炭素化 (CO<sub>2</sub>) の推移

都市においては、人口減少の影響などから、従来の傾向に類似した自動車の増加は見られない。しかしながら、ガソリン車の需要が急激に減少する場合もなく、二酸化炭素排出量の経年的減少分は極めて軽微である。

ここでは、地域別(ゾーン)の交通環境の相違を検討していない。すなわち、いずれも初期設定の変化がなく推移した場合の計算結果である。すなわち、現在の動向が同様に推移した場合の将来予測の意味をもっている。

すなわち、無政策時においても人口減少等の影響から、約16%(3,368トン)二酸化炭素の削減が観測される。

#### 4. 低炭素化政策の検討

つぎに、本研究では低炭素社会に関して、いくつかの視点から運輸部門に関する交通政策を検討する。

特に都市圏の交通行動者の動向に関して、低炭素化社会に向けた自律的な行動変化を観測する。ここで課題として、①公共交通機関のサービス水準の向上、②低炭素車両の利用促進について検討する。

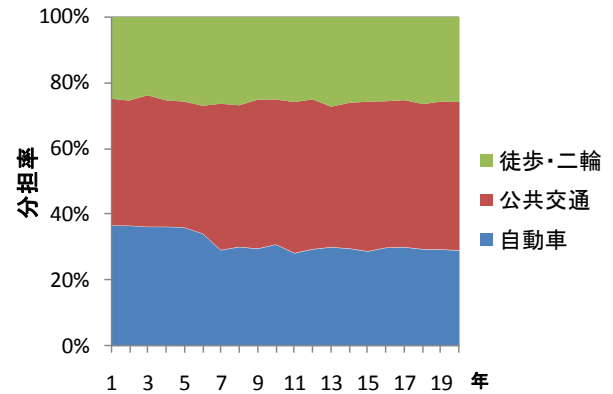
##### (1) 公共交通のサービス水準

ここでは、公共交通機関のサービス水準の向上を検討する。中心市街地の都市活動を主体として、中心地ゾーン(ゾーン8・13・14)に関連する公共交通機関のサービス水準を変化させる場合を検討する。

具体的には、関連の起終点間の所要時間に関してのサービス改善を想定する(都心部までの所要時間が30%短縮される)。具体的には、①経過年数5年次に公共交通サービス水準の向上が図られる。つまり、中心ゾーンとの結節の向上が与えられる。②このサービス水準の向上

策の市民行動変化への定着に一年間の期間を要すると考える。

図一7に利用交通機関の時間的推移を示す。



図一7 利用交通機関の時間的推移

公共交通のサービス水準の向上は、相対的に自動車利用から、公共交通利用への転換を促進する。したがって、全体的な傾向として、自動車利用交通の構成割合が経年的に減少するとともに、公共交通利用割合が増加する。また徒歩二輪の割合に対しては大きな影響を与えないことがわかる。

この場合には、20年目の二酸化炭素排出量は1年目と比べて5,032トン削減され、無政策時(図一4)の場合に比べて、8%(1,664トン)の追加的削減効果が得られる。

##### (2) 炭素化車両の利用促進

つぎに低炭素車両の利用促進政策として、車両購入の補助金を検討する。具体的には、電気自動車の利用促進を勘案して、電気自動車(EV車):100万円、ハイブリッド車:30万円の購入時補助金を想定する。

現行において、電気自動車の価格は相対的に高価格である。また車両性能(特に連続使用可能時間)の関係から、ハイブリッド車に比べて普及率が非常に小さい。このような点から、仮想的な政策設定としてEV車両についての高額補助金を考えている。

この設定から、算定される各車種の構成割合の時間的推移を図一8に示す。具体的には無政策時の動向(図一5)と比較することで政策効果を検討できる。

この場合には、当然のことながら、EV車両は時間的な変動は発生するものの、全般的に顕著な増加が見られる。また、ハイブリッド車に対しても一定額の補助を与えることから、現状の傾向を踏まえて、ハイブリッド車両の増加も顕著である。

この場合には、20年目の二酸化炭素排出量は1年目と比べて4,152トン削減され、無政策時(図一4)の場合に比べて、4%(784トン)の追加的削減効果が得られる。



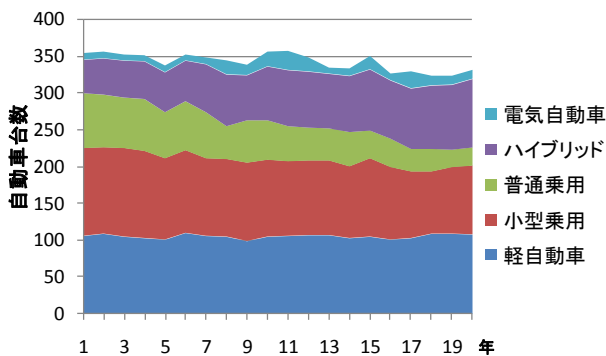


図-8 車種構成の時間的推移

## 5. おわりに

本研究では、都市圏における低炭素社会の実現のため、運輸部門の交通政策を検討した。特に少子高齢化した社会環境の変化、モータリゼーションと都市構造など都市環境を含んだ検討が必要である。このため本研究では、都市の複雑現象を記載した人工社会モデルを構成して、具体的な低炭素化施策に関して比較検討を行った。これらの検討より、本研究における主要な成果は以下のように整理できる。

- 1) 低炭素社会に向けた運輸部門の動向を検討するためマルチエージェントシミュレータを用いた人工社会モデルを構築した。特に交通行動者をエージェントとして、知的情報処理を用いて多様な意思決定過程を記述した。これより、運輸部門における低炭素化過程を複雑系システムの動向として把握可能なモデルが提案された。
- 2) 都市圏の交通行動変化として、交通機関分担と車両購入種別に関する意思決定モデルを構成した。これより、都市圏の交通環境変化と二酸化炭素排出量の経年的変化を表示可能となった。また空間的な表現として、地域別（ゾーン別）の各種指標の分布状況が示され、個別エージェントの相互作用の結果として、多面的に低炭素社会の実現可能性を検討できる。
- 3) 自律的な低炭素社会の実現可能性を検討するため、各種の運輸部門における政策を検討した。特に各政策に対する相互作用と波及過程について分析を行った。これより低炭素化の促進においては、いずれの政策に関しても、エージェント属性に応じた定着過程が存在することがわかった。

さらに現実的な運輸部門の低炭素化に関しては、多数の方策を検討することが可能である。このため、今後の検討課題として、①個別エージェントの意思決定パターンを観測して類型化することで、自律的交通環境の形成を検討する、②複数のエージェントの属性分布を仮定し

て都市圏の相違における低炭素化の相違について検討する、③人工社会モデルにおける空間表示機能を活用し、地域別（ゾーン別）の低炭素化方策を検討するなどの点が挙げられる。

**謝辞：**本研究を遂行するにあたって、関西大学低炭素技術システム研究会（先端技術研究所：盛岡通教授代表）および日本交通政策研究会「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」の検討を得た。

## 参考文献

- 1) Joshua M. Epstein, Robert Axtell, 服部 正太, 木村 香代子(訳)：人工社会— 複雑系とマルチエージェント・シミュレーション, 構造計画研究所, 1999.
- 2) 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.
- 3) Takamasa Akiyama, Masashi Okushima : Application of Artificial Society Model to Urban Transport Planning, Proceedings of the SCIS & ISIS 2008, CD-ROM, No. FR-F1-3, pp.1-6, 2008.
- 4) 山影進：人工社会構築指南, 書籍工房早山, 2007.
- 5) 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, No.3, pp.709-716, 2008.
- 6) Takamasa Akiyama, Hiroaki Inokuchi : Urban Renewal Policy Evaluation in Local City by Multi-agent Approach, SCIS & ISIS, No. SA-D5-1, pp.1-6, 2010.
- 7) 秋山孝正, 井ノ口弘昭, 奥嶋政嗣：まちづくり政策評価のためのマルチエージェントモデルの構築, 第26回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, pp.868-873, 2010.
- 8) 秋山孝正：ソフトコンピューティング技術の土木計画における応用と課題, 土木計画学・講演集, Vol. 27, CD-ROM, No. 201, pp.1-4, 2003.
- 9) 秋山孝正, 奥嶋政嗣, 和泉範之：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, 2007.
- 10) 秋山孝正, 盛岡通, 北詰恵一, 井ノ口弘昭, 尾崎平：複雑系モデルを用いた地方都市の低炭素型まちづくり政策についての考察, 土木学会第65回年次学術講演会講演概要集, No.IV-008, pp.15-16, 2010.

(2011.5.6 受付)

Takamasa AKIYAMA, Hroaki INOKUCHI

The reduction of carbon dioxide is discussed to realize the low carbon society. On the other hands, the research of complex social structure is required to develop self-organized urban environment. The virtual urban space is assumed in the artificial society model in the study to produce the low carbon transport sector. The multi agent simulator (MAS) is introduced to construct the artificial society model to demonstrate the behaviour of transport sector based on travel behaviour. The change of transport sector is considered in terms of travel behaviour as well as low carbon vehicles. The reduction of number of vehicle and promotion of low carbon vehicles are particularly investigated. As the trip maker is assumed to be an self-organized agent, the overall system of transport sector can be observed with the service level of public transport and the subsidy for low carbon vehicles. Since the impact of low carbon transport policy can be estimated from local change to global change of the system, it would be discussed if the low carbon society relating the transport sector can be realised in future.