

エージェントモデルを用いた地方都市における 環境未来都市の形成過程に関する考察†

井ノ口 弘昭*・秋山 孝正*・尹 禮分*

自動車交通が中心である地方都市では、二酸化炭素排出量が相対的に多く、そのために対策が必要である。本研究では地球環境問題に対応する環境未来都市の形成のため、地方の都市交通における低炭素化を検討する。はじめに個別交通行動者の交通機関選択および車両購入時の車種選択に関する意思決定過程を記述したマルチエージェントシステムを構築する。本提案システムを地方都市に適用し、ART およびトランジットセンター整備による公共交通利便性向上政策および中心市街地を発着する環境負荷量の多い車両に対する環境課金政策の導入を提案することで、政策なしの場合と比較して都市交通の低炭素化に一定の効果があることを示す。

キーワード：マルチエージェントモデル、環境未来都市、超小型モビリティ、公共交通システム、都市形成過程

1. はじめに

地球環境問題に対する都市システムデザインに関して、都市交通の低炭素化が重要な課題となっている。特に、自動車交通が中心である地方都市においては自動車の抑制は難しく、賢く使うことが求められているなか、道路交通ではガソリン自動車からハイブリッド車（HV）や電気自動車（EV）などの低炭素車両への転換期に直面している。さらに、次世代のモビリティとして小型電気自動車である超小型モビリティ（ULV）の普及が期待されている。一方で、近年 LRT・BRT などの多様な公共交通機関とアクセス交通の運用に基づいて、自動車交通の抑制が課題となっている。

日本政府は、今後世界的に進む都市化を見据え、環境や高齢化対応などの課題に対応しつつ、持続可能な経済社会システムを持った都市・地域づくりを目指す「環境未来都市」構想を進めてきた [1]。平成 23 年度に 11 都市が、環境未来都市として選定され、環境・社会・経済の価値を創造することで、「誰もが暮らしたいまち」、「誰もが活力のあるまち」を目指している。

そこで、本研究では環境未来都市の考え方を取り入れた都市交通政策の提案を目的とし、マルチエージェントシステムを用いて都市環境問題における市民の自律的行動変化を含んだ低炭素社会の交通システムの形成過程を明示化する。はじめに個別交通行動者の交通機関選択および車両購入時の車種選択に関する意思決定過程を構築し、個別エージェントの環境意識に基づく複雑な意思決定を統合的な社会変化として記述する。さらに交通機関分担および保有車種の変化、二酸化炭素排出量の削減効果を評価し、個別交通行動者の車両選択と交通機関分担に関する意思決定結果に基づく都市環境変化モデルを構成する。つぎに、中心市街地の環境改善および周辺部のトランジットセン

ター整備、周辺部と中心市街地を結ぶ ART（Advanced Rapid Transit）の整備による公共交通利便性向上政策および中心市街地を発着する環境負荷量の多い車両に対する環境課金政策の導入を提案することで、政策なしの場合と比較して都市交通の低炭素化に一定の効果があることを示す。

2. 地方都市における環境未来都市の形成

本章では、地方都市における環境未来都市の形成に関して、既存研究を整理する。また、現実に実施されている都市交通政策を整理する。

2.1 既存研究成果の整理

ここでは、既存研究を整理する。はじめに、環境未来都市の形成に向けた取り組みに関する研究を整理する。地域特性に応じたスマートコミュニティの構築に関する研究が行われている [2]。この研究では、川崎市を対象として、エネルギーシステムの検討が行われている。地域データベースに基づき、地域分析を行ってその地域に適したエネルギーシステムを検討している。データベースの拡充が有益であると述べられている。

また、街区型環境未来都市の道路交通に関して、電気自動車を含む交通運用を検討する研究が行われている [3]。この研究では、街区内に EV 専用ゾーンを設定した場合の環境負荷量・道路交通状態を検討している。EV は加速性能が高く、EV 専用ゾーンの設定により走行速度は若干向上し、二酸化炭素排出量は若干減少することが示されている。

つぎに、マルチエージェントモデルを都市交通計画に適用した研究を整理する。エージェントモデルを用いて、交通流シミュレータを構築する研究が行われている [4]。この交通流シミュレータは、自律性をもつ多数の知的エージェントの相互作用により、道路交通流を表現している。千葉県柏市周辺を対象としてシミュレーションを行い、現況再現性を確認している。

また、歩行者・自転車道の評価にマルチエージェントモデルを用いた研究が行われている [5]。これは、歩行者・自転車をそれぞれエージェントとし、追い越し・すれ違い・追従の回避

† Development Process of Environmental Smart City in Local Area with Multi-agent Model

Hiroaki INOKUCHI, Takamasa AKIYAMA, and Yeboon YUN

* 関西大学環境都市工学部

Faculty of Environmental and Urban Engineering, Kansai University

行動をモデル化したものである。本シミュレーションより、歩道の整備は自転車の快適性の向上には必ずしもつながらないことを示している。

さらに、地方都市の中心市街地の活性化を検討するためのマルチエージェントモデルが構築されている [6]。都市を中心部・周辺部・郊外部に分け、市民エージェントモデル、商業店舗エージェントモデルが相互に影響を与えるモデルとなっている。まちづくり政策を単独で行うと効果は期待できず、複数のまちづくり政策を組み合わせると相乗効果が期待できることが示されている。

さらに、交通行動モデルを基礎としたマルチエージェントモデルの構築が行われている [7]。これは、追加活動の意思決定、活動種類の決定、目的地選択、交通手段選択、経路選択、時間決定のそれぞれをモデル化したものである。また、GIS を用いて表現するシステムの構築も行われている。

また、マルチエージェントモデルを用いたエコ通勤の効果推計が行われている [8]。これは、公共交通を利用した通勤を促進するため、マルチエージェントモデルを用いて分析するものである。各エージェントは、周囲のエージェントの影響を考慮して行動することが特徴である。

さらに、エコ通勤促進策の影響の分析が行われている [9]。これは、エージェント間の関係性の表現に *small world network* を適用し、運賃割引、意識向上、関係強化の各ケースを検討したものである。また、*small world network* を用いて、自動車から公共交通へのモーダルシフトを検討した研究が行われている [10]。

また、電気自動車の普及が二酸化炭素排出量に与える影響の分析が行われている [11]。これは、大阪市を対象として、交通手段選択と車種選択を行うものである。EV の普及政策と公共交通の利用促進政策を同時に行うことが効果的であることが示されている。さらに、地方都市を対象としてクリーンエネルギー車の普及促進政策をマルチエージェントモデルで検討した研究が行われている [12]。社会的同調効果を考慮したシミュレーションの有用性が示されている。

さらに、地方都市を対象として、交通政策評価を行うマルチエージェントモデルが構築されている [13]。これは、交通手段選択と車種選択を基に二酸化炭素排出量を検討するものであり、本研究の基礎となっている。

このように、マルチエージェントモデルを都市交通計画の分野に適用した研究、環境未来都市の形成に関する研究などが行われている。本研究では、これらの研究を参考として、環境未来都市の構築のための都市交通政策評価を行う。特に、本研究では、既存研究ではモデル化されていない複数の交通機関の組み合わせ（パーク&バスライド）に着目したモデル化を行う。また、新型交通機関である超小型モビリティをモデルに組み込んでいることが特徴である。これらを考慮した環境影響を算定することで、効果的な都市交通政策の検討が可能となる。

2.2 地方都市の都市交通政策

つぎに、地方都市を対象として、現実の都市交通政策を整理する。ここでは、岐阜市を参考として検討する。岐阜市は、面

積：203.6 km²、人口：41.0 万人、世帯数：18.0 万世帯（2019 年 1 月現在）である。また、65 歳以上の高齢化率は 28.11% であり、日本全体の高齢化率 27.7%（2017 年 10 月現在）と同程度である。

公共交通は、市の南部に JR・名鉄の路線が位置しているが、市内の主要な公共交通はバスである。また、モータリゼーションが進展しており、自動車利用者が多い。

岐阜市では、「岐阜市総合交通戦略（2014～2018 年）」を策定し、各種施策が実施されてきた [14]。たとえば、公共交通に関する施策として 24 施策が実施されている。これらの施策により、中心市街地のバス降車人数は 11,058 人（2012 年）から 11,059 人（2018 年）となり、減少は止まっているが、目標（11,720 人）は達成していない状況である。

このような中で、現在「第 3 次岐阜市総合交通戦略」を策定中である。中心市街地では、幹線道路に岐阜市型 BRT（バス高速輸送システム）を導入し、バスや自転車などを気軽に利用できる環境、歩いて回遊できる空間の確保を目指している。また、郊外の拠点には、幹線バスと支線バス・コミュニティバスがネットワーク化されたトランジットセンターの整備を目指している。このトランジットセンターでは、バスの乗り継ぎ機能の他に、パーク&バスライド、サイクル&バスライド機能を備えることが計画されている。

本研究では、環境影響を考慮した交通政策として、中心市街地の環境改善および周辺部のトランジットセンター整備、周辺部と中心市街地を結ぶ ART の整備を検討する。これらの政策に対して、交通機関分担・保有車種の変化、二酸化炭素排出量の削減効果を検討する。

3. マルチエージェントシステムの構築

本章では、地方都市における環境未来都市構築のための都市交通政策を検討するため、交通行動者をエージェントとしたマルチエージェントシステムを構築する。

3.1 マルチエージェントシステムの概要

ここでは、マルチエージェントシステムの概念を整理する。はじめに、複雑系モデルの概念を整理する。多くの場面では、事象を理解する方法として、細かな要素に分解して、基本法則を理解することで、事象全体の性質を理解する要素還元型の手法が用いられる。しかしながら、人間が介在する社会現象では、全体の状況により個々の要素の振る舞いが変わり、この個々の要素の振る舞いの変化により全体の状況が変化する現象がみられる。このような現象を理解するために、複雑系モデルが用いられる [15]。

図 1 に複雑系モデルの概念を示す。複雑系は、複数の構成要素をもち、各エージェントが有機的に結合しているモデルである。各エージェントは、自律的に行動するが、システム全体の影響を受けるとともに、システム全体に影響を与える。

マルチエージェントシステムは、複数のエージェントから構成されるシステムであり、複雑系をシミュレートするものである。これにより、予測不能な創発現象を観測することが可能となる。本研究では、マルチエージェントシステムを用いて、地

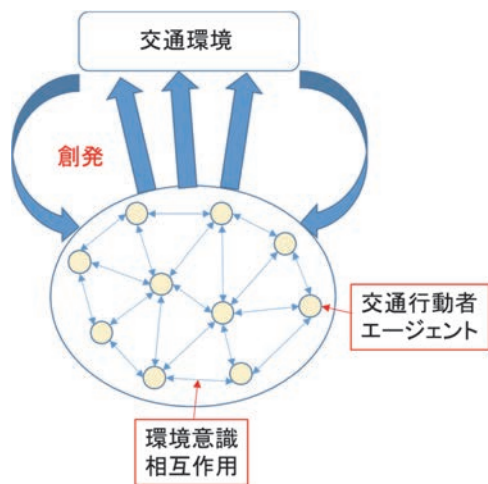


図1 複雑系モデルの概念

大都市の交通政策検討モデルの構築を行う [16].

3.2 地方都市の交通政策評価モデルの構築

ここでは、地方都市の交通政策の検討を行うマルチエージェントシステムを構築する [13]. 図2にモデルの全体構成を示す.

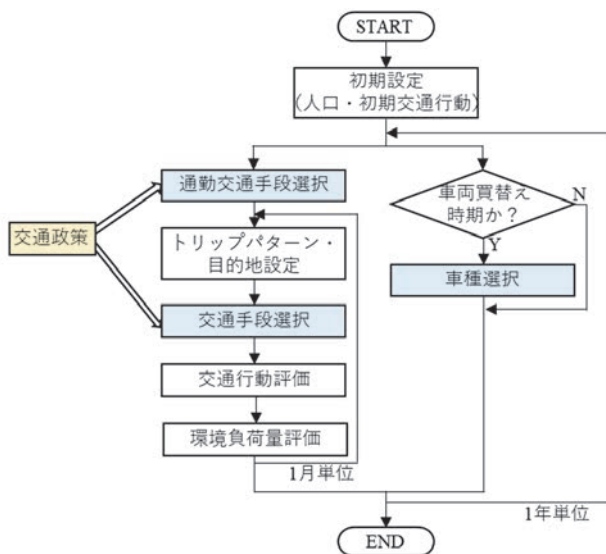


図2 地方都市交通政策評価モデルの構造

本研究では、交通行動者をエージェントとしてモデル化している。エージェントが行う意思決定として、固定活動（通勤）の交通手段選択、自由活動の交通手段選択、保有車両の車種選択を設定している。

本エージェントモデルの特徴として、交通手段選択と車種選択が相互に影響を与えるモデルとなっていることが挙げられる。たとえば、車種選択で電気自動車を選択された場合、ガソリン車両と比較して車両の燃料費（電気代）が安価となる。交通手段選択の際には、トリップ費用として燃料費を考慮しているため、ガソリン車を利用していた時と比較して自動車の評価

値は高くなる。また、自動車の利用距離が多くなれば、車種選択の際に、車両本体価格と比べ燃料費が重視される傾向になるため、電気自動車のような環境性能の高い車両が選択されやすい。このような現象は、集計的なモデルでは表現することが出来ず、各エージェントが自律的に判断するマルチエージェントモデルを用いる必要があると考えられる。

各エージェントは、性別・年齢・居住地・勤務地・運転免許の保有などの個人属性を設定する。このとき、パーソントリップ調査結果の岐阜市関連トリップのデータベース（14,278サンプル）の中から、性別・年齢層が一致するサンプルを任意に取り出し、設定する。パーソントリップ調査のサンプルの中で、勤務地が設定されているサンプル（就業者）は61%である。

なお、各種の交通政策を実施することにより、居住地を変更する場合も考えられる。しかしながら、本研究では10年間を検討対象期間としていることから、その影響は軽微であると考えている。このため、居住地の変更モデルは組み込んでいない。しかしながら、長期の検討を行う場合は、居住地の変更も考慮する必要があると考えられる。

また、各エージェントは、1日のトリップパターンを設定し、その後に各トリップの目的地をゾーン単位で選択する。ここでは、トリップパターンとして、第5回中京都市圏パーソントリップ調査（2011年実施）で得られた岐阜市居住者の代表的なパターンである14種類を設定する。表1に、この14種類のトリップパターンを示す。

表1 トリップパターンの設定

No.	トリップパターン	構成割合
1	自宅→勤務先→自宅	76.6%
2	自宅→勤務先→用務先1→自宅	6.6%
3	自宅→勤務先→用務先1→用務先2→自宅	1.2%
4	自宅→勤務先→自宅→用務先1→自宅	9.7%
5	自宅→勤務先→用務先1→勤務先→自宅	4.3%
6	自宅→用務先1→勤務先→自宅	0.9%
7	自宅→用務先1→勤務先→用務先2→自宅	0.7%
8	自宅→用務先1→自宅	39.6%
9	自宅→用務先1→用務先2→自宅	8.5%
10	自宅→用務先1→自宅→用務先2→自宅	11.2%
11	自宅→用務先1→用務先2→用務先3→自宅	3.8%
12	自宅→用務先1→自宅→用務先2→用務先3→自宅	1.1%
13	自宅→用務先1→用務先2→自宅→用務先3→自宅	1.7%
14	外出なし	34.1%

「自宅」「勤務先」「用務先」に分けてパターンを作成している。これらの中で、No.1~7は就業者、No.8~14は非就業者に適用するパターンである。それぞれのパターンには、パーソントリップ調査結果を基に選択確率が設定され、確率的にトリップパターンの選択を行う。

さらに、勤務先以外の目的地の設定については、以下の手順で行う。①パーソントリップ調査のデータを集計し、現在地ゾーンから各ゾーンへの選択確率を求めておく。②各エージェントは、乱数を生成し、選択確率にしたがって、それぞれの目

的地ゾーンを決定する。

これらの意思決定を1カ月単位で10年間繰り返す。これにより、交通政策実施の検討を行う。

3.3 交通手段選択モデルの構築

ここでは、交通政策評価モデルの主要な要素である交通手段選択モデルを構築する。通常、通勤時の交通手段は固定的であり、変更することは比較的少ないと考えられる。一方、自由目的のトリップの交通手段は目的地ごとに選択していると考えられる。このため、通勤目的トリップ（固定活動）と自由目的トリップに分けてモデル化を行う。

ここでは、交通手段として、対象都市の代表的な交通手段である「自動車」「公共交通（バス）」「徒歩・二輪」を設定する。この中で、「徒歩・二輪」の選択は、トリップ長の影響を大きく受けると考えられる。このため、図3に示すような階層構造で交通手段選択を行うものとする。

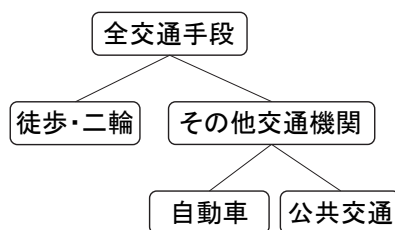


図3 交通手段選択の階層構造

すなわち、はじめに「徒歩・二輪」「その他交通機関」の選択を行う。「その他交通機関」が選択された場合は、つぎに「自動車」「公共交通」の選択を行う。

第1段階の「徒歩・二輪」「その他交通機関」の選択は、トリップ長が主要な要因であると考えられる。このため、パーソントリップ調査の岐阜市内トリップの集計結果から、トリップ距離帯に対応する「徒歩・二輪」の選択確率を算定している。各エージェントは乱数を生成し、選択確率を基に選択を行う。

つぎに、「その他交通機関」が選択された場合の、「自動車」「公共交通」の選択を検討する。通常、所要時間は交通手段選択の主要な要因として選択モデルの説明変数として用いられる。さらに、通勤目的トリップでは、到着時刻に制約があることが多い。したがって、交通障害による遅延の頻度は交通手段選択の主要な要因であると考えられる。また、環境意識が高い人は、環境負荷量の大きな自動車の利用に対して、抵抗感があると考えられる。一方、多くの交通手段選択モデルで導入される費用は、通勤目的の場合は会社から支給されることが多い。このため、意思決定への影響は少ないと考えられる。これらのことから、通勤交通手段選択の説明要因として、「所要時間 (TM)」「交通障害経験割合 (EX)」「環境意識 (EN)」「交通機関の二酸化炭素排出係数 (CO)」を用いる。

ここで、環境意識 (EN) は、0~10ポイントの範囲で設定する。具体的には、既存の岐阜市民を対象としたアンケート調査における「Q5. これからの地球環境を考え、二酸化炭素排出量が少ない低炭素型車両（ハイブリッド自動車・電気自動車・超

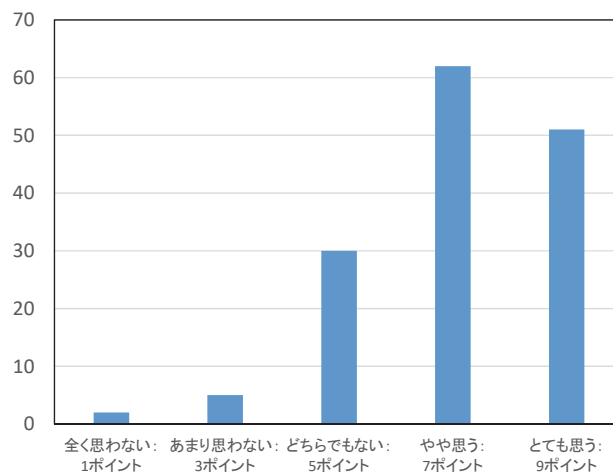


図4 環境意識の回答者割合

小型モビリティなど)の普及は必要だと思いますか。」の回答者割合を用いて初期値を設定する。図4に回答者割合を示す。

図5に各説明要因のメンバシップ関数を示す。所要時間のメンバシップ関数は、現実のデータ分布を参考として、試行錯誤を行い設定している。また、その他のメンバシップ関数は、試行錯誤を行い設定した。

本研究では、後件部について曖昧性を省略したクリस्प数で定義する簡略ファジィ推論を用いる。具体的には、GRとして、(small, medium, large) = (0.0, 0.5, 1.0)を定義する。

図6に通勤目的トリップを対象とした交通手段選択の推論ルールを示す。

ここでは、10ルールを設定している。Rule 1~Rule 9は所要時間と交通障害経験割合に基づく推論ルールである。また、Rule 10は環境意識に基づく推論ルールとなっている。自動車・公共交通それぞれに対して、次式を用いてこれらの推論結果を合成し、評価値を算定する。

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

ここで、 w_i はルール*i*の前件部適合度である。この評価値が最大である交通手段を選択するものとする。

つぎに、買い物などの自由活動の交通手段選択について検討する。交通手段の選択肢は、通勤目的と同一の3種類とする。また、「徒歩・二輪」の選択は、通勤目的と同様にトリップ長の影響を考え、距離に対する選択確率を基に確率的に選択する。

つぎに、「自動車」「公共交通」の選択を考える。通勤目的では「交通障害経験割合」を用いた。しかしながら、自由目的トリップでは、到着時刻の制約が少ない場合が多い。一方で、トリップに対する費用負担が必要なため、費用は意思決定に影響を与える。これらのことから、自由活動の交通手段の選択要因として、「所要時間 (TM)」「トリップ費用 (TC)」「環境意識 (EN)」「交通機関の二酸化炭素排出係数 (CO)」を用いる。

図7にトリップ費用のメンバシップ関数を示す。

これは、自動車の場合は燃料代、公共交通の場合は運賃を想

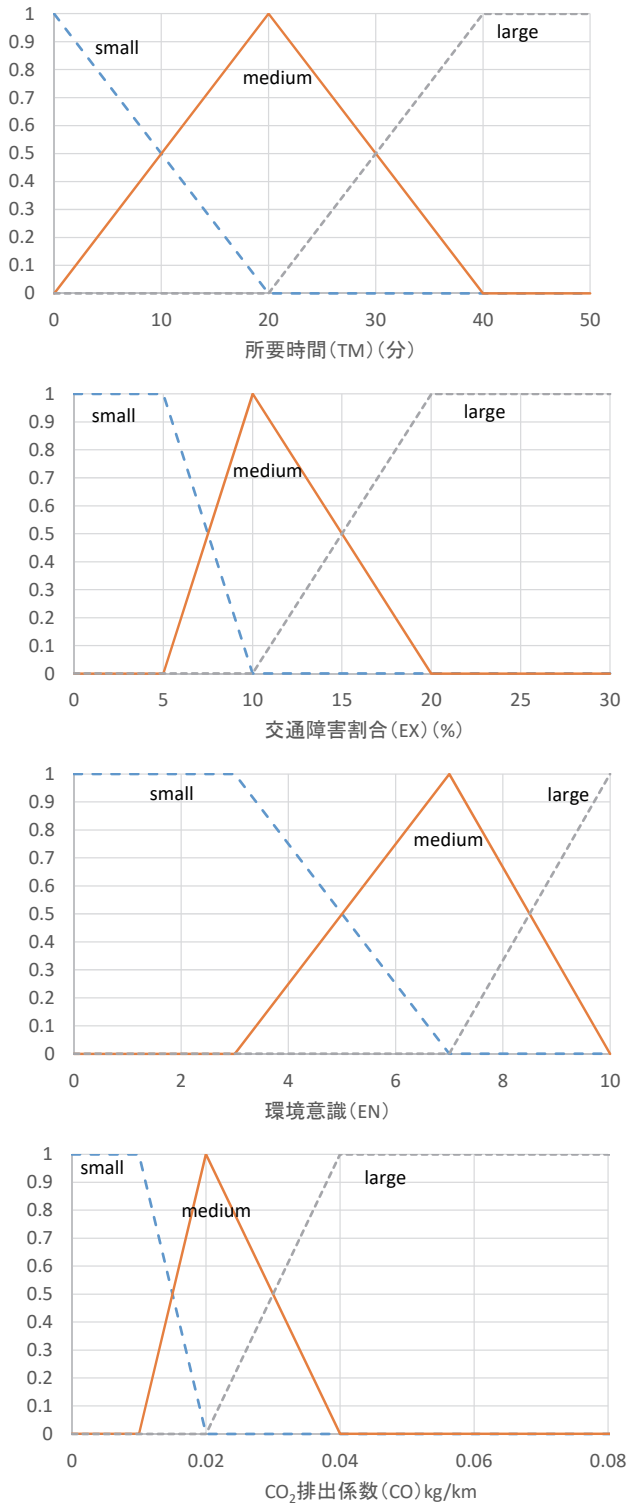


図5 各説明変数のメンバシップ関数

定する。

図8に自由活動の交通手段選択の推論ルールを示す。

通勤目的と同様に、10ルールを設定する。ここで、Rule 10は環境意識を考慮したルールとなっている。

最終的に、通勤目的交通手段・自由目的交通手段を合わせて1日のトリップ連鎖を考慮した交通手段選択を行う。自宅・勤務先をベースとする一連のトリップに自動車をういたトリップ

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

図6 交通手段選択の推論ルール (固定活動)

(TM: 所要時間, EX: 交通障害経験割合, EN: 環境意識, CO: 各交通機関の二酸化炭素排出係数, GR: 各交通機関の評価値)

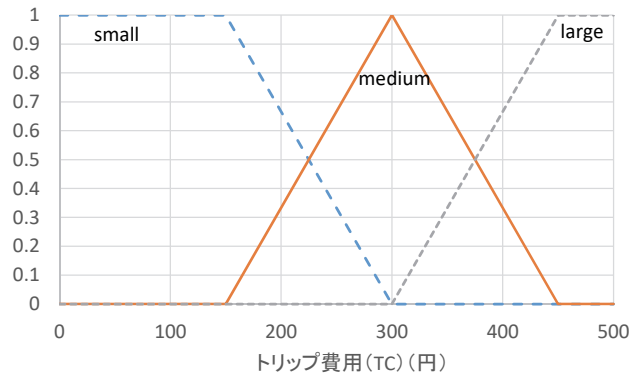


図7 トリップ費用のメンバシップ関数

- 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.
- Rule 10: If EN is large and CO is large then GR is small.

図8 交通手段選択の推論ルール (自由活動)

(TC: トリップ費用)

があれば、他のトリップも自動車とする。たとえば、表1に示したトリップパターン2・3では、通勤目的の交通手段が自動車の場合は、その後のトリップも自動車となる。

3.4 車種選択モデルの構築

つぎに、自動車保有者の車種選択を考える。自動車の買い替えは、比較的長期の意思決定である。既存研究において、自動車の購入からの利用想定年数を質問したアンケート調査を行っている。図9に集計結果を示す。本図より、8~10年程度の想定が多く、10年を超える利用は比較的少ないことがわかる。本研究では、この利用想定年数の分布を基に、各エージェントは自動車買い替えの意思決定を行うものとする。

自動車の買い替えの意思決定を行った場合は、購入車種を選択する。ここでは、表2に示す低炭素型車両を含む4車種を選択肢とする。

各車種の車両価格および燃費は、代表的な車両を参考として

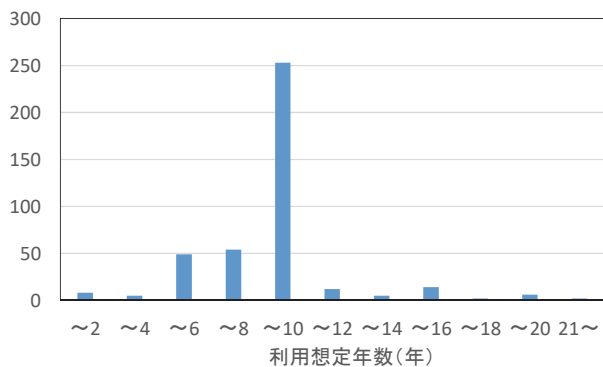


図9 自動車の利用想定年数分布

表2 車種設定

車種	参考車両	車両価格	燃費
ガソリン自動車	カローラ	186万円	0.043l/km
ハイブリッド自動車	プリウス	300万円	0.027l/km
電気自動車	リーフ	315万円	120Wh/km
超小型モビリティ	コムス	82万円	76Wh/km

設定した。なお、超小型モビリティは、1人乗りの電気自動車であり、他の車種との相違が大きい。既存研究において、岐阜市居住者を対象に超小型モビリティのアンケート調査を行っている。この結果では、超小型モビリティを現在の自動車との入れ替えて利用したいと答えたサンプルは150サンプル中33サンプルであった。したがって、この割合で超小型モビリティを選択肢に入れるエージェントを設定する。

なお、保有車両の初期状態は、既存の統計データより、ガソリン自動車：90.8%、ハイブリッド自動車：9.1%、電気自動車：0.1%、超小型モビリティ：0%の確率で設定する。

車種の選択は、自動車の総費用の影響が大きいと考えられる。一方で、比較的裕福な家庭は高価な車両を購入する傾向もみられる。さらに、環境意識の高い人は、環境負荷量の少ない車両を購入すると考えられる。このため、選択要因として、「車両の総費用」「収入」「環境意識」を用いる。ここで、「車両の総費用」は、車両価格および燃料費を想定する。燃料費は、過去のエージェントのトリップ実績を基に、つぎの買い替えまでの利用想定年数を考慮して各車両に対して算定する。また、収入は既存統計を参考として、性別・年齢層ごとに設定する [17]。

図10に各説明要因のメンバシップ関数を示す。これらのメンバシップ関数は、現実のデータ範囲を参考として、試行錯誤を行い設定した。

また、後件部は、交通手段選択モデルと同様にクリスプ数で定義する。具体的には、GRを (small, medium, large) = (0.0, 0.5, 1.0) とした。したがって、交通手段選択モデルと同様の算定手順で評価値を算定する。

車種選択の推論ルールを図11に示す。ここで、Rule 1～Rule 9は、車両総費用および収入に基づく推論ルール、Rule 10は環境意識に基づく推論ルールである。収入に応じた価格帯の車両に対して評価値が高くなるように設定している。また、環境意識が高い場合は、二酸化炭素排出量の少ない車両に対して評価値が高くなるように設定している。

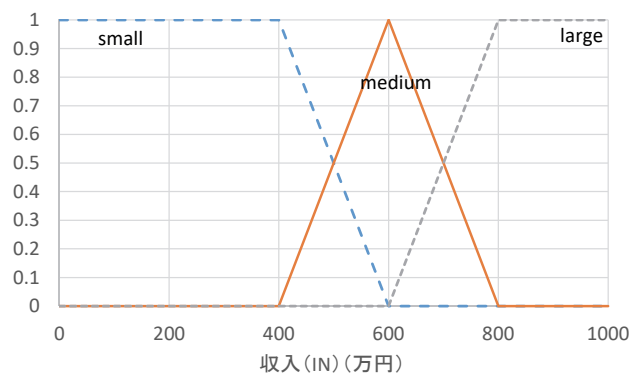
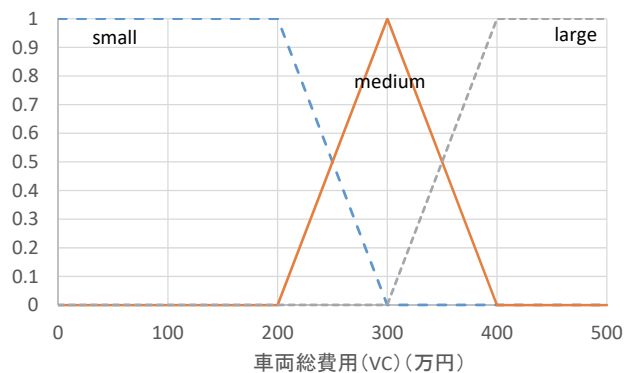


図10 車両費用・収入のメンバシップ関数

- Rule 1: If VC is small and IN is small then GR is large.
- Rule 2: If VC is small and IN is medium then GR is small.
- Rule 3: If VC is small and IN is large then GR is small.
- Rule 4: If VC is medium and IN is small then GR is medium.
- Rule 5: If VC is medium and IN is medium then GR is large.
- Rule 6: If VC is medium and IN is large then GR is medium.
- Rule 7: If VC is large and IN is small then GR is small.
- Rule 8: If VC is large and IN is medium then GR is small.
- Rule 9: If VC 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11 車種選択の推論ルール

(VC：車両の総費用, IN：収入, EN：環境意識, CO：車両の二酸化炭素排出係数)

これらの車種選択モデルを用いて、各車種に対して評価値を算定し、最大のものを選択する。

4. 地方都市の交通政策評価

本章では、前章で構築したマルチエージェントシステムを地方都市に適用し、交通政策の検討を行う。

4.1 エージェントシステムの地方都市への適用

はじめに、適用対象地域などについて述べる。本研究では、地方都市として、岐阜県岐阜市を参考に検討する。また、パーソントリップ調査のゾーン区分を参考として、対象都市を23ゾーンに分割する。図12にゾーン区分を示す。ゾーン区分は、人口規模に合わせた大きさとしているため、郊外部ではゾーン面積が大きくなっている。

マルチエージェントシステムで生成するエージェント数は、人口の1/100とする。また、対象期間は、交通政策の実施時期

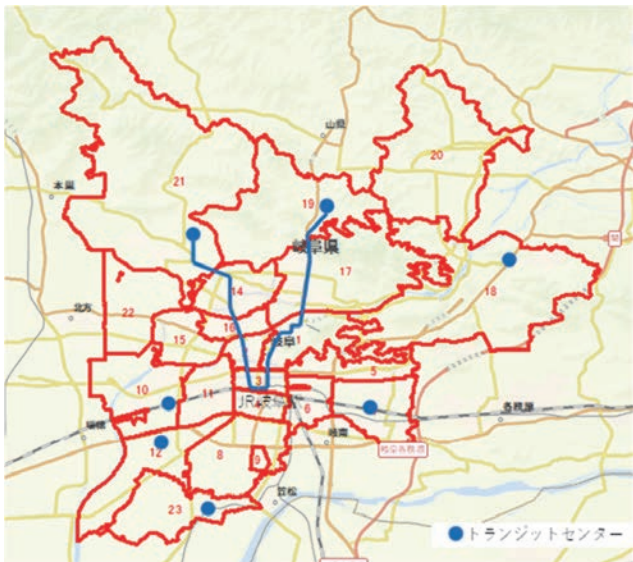


図 12 対象都市のゾーン区分

を考慮して 2015 年～2024 年の 10 年間とする。ここで、対象期間内の人口変化を考慮する。すなわち、男女別・5 歳階級別の 5 年ごとの将来人口推計データを用いて、エージェント数を変化させる。なお、2015 年と 2025 年を人口総数でみると、2025 年は 5.2% 減である。

生成されるエージェントの属性は、パーソントリップ調査データの中から性別・年齢層が一致するサンプルをランダムに抽出し、居住地などの個人属性を設定する。また、人口の増減により途中でエージェントの追加・削除が行われる。エージェントの追加は、対象とする年齢層・性別と一致するサンプルをパーソントリップ調査から抽出して個人属性を設定する。また、エージェントの削除は、年齢層・性別が一致するエージェントの中からランダムに抽出し、削除を行う。

4.2 無政策時の環境負荷量の計測

ここでは、マルチエージェントシステムを実行し、無政策時の環境負荷量を計測する。初期状態のシステム画面を図 13 に示す。システムでは、数値データおよび 3 枚の図面を表示する。

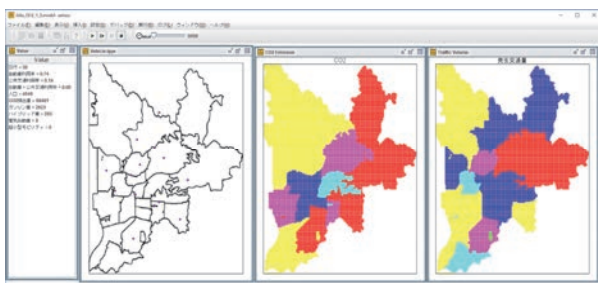


図 13 低炭素車両保有・環境負荷量の状況（初期時点）

数値データとして、交通手段分担率、保有車種構成、二酸化炭素排出量などを表示する。また、図面では、低炭素車両の保有状況（左）、二酸化炭素排出量（中）・発生交通量（右）を表示する。低炭素車両として、電気自動車を保有しているエージェ

ントを青色の点、超小型モビリティを保有しているエージェントを赤色の点で表す。初期時点では、低炭素車両の保有者は少なく、電気自動車の保有者が若干見られる程度である。また、二酸化炭素排出量は、ゾーン単位で表示している。排出量が多い順に赤色・紫色・黄色・水色・青色としている。これでゾーン別の環境負荷量の把握が可能である。初期状態では、市の中心部で比較的二酸化炭素排出量が少なく、郊外部のゾーンで多いことが分かる。さらに、発生交通量は、二酸化炭素排出量と同様にゾーン単位で色別に表示する。市の西部のゾーンで発生交通量が多いことが確認できる。

つぎに、図 14 に最終時点（10 年目）の状況を示す。

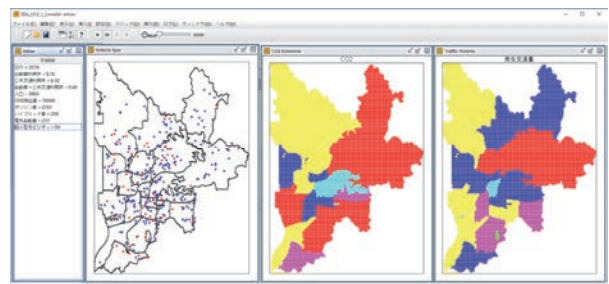


図 14 低炭素車両保有・環境負荷量の状況（最終時点）

最終時点では、低炭素車両の保有が多くなっている。特に、電気自動車の保有者が多いことが確認できる。ただし、ゾーンにより保有者の密度が相違する。つぎに、二酸化炭素排出量は、増加して色が変わったゾーンがみられる。また、発生交通量も若干の変化がみられる。

つぎに、図 15 に交通手段分担の時系列変化を示す。なお、計算内で乱数を用いているため、実行毎に若干の相違がみられる。このため、10 回の実行結果の平均値を用いている。本図より、10 年間では交通手段分担率に大きな変化は見られない。

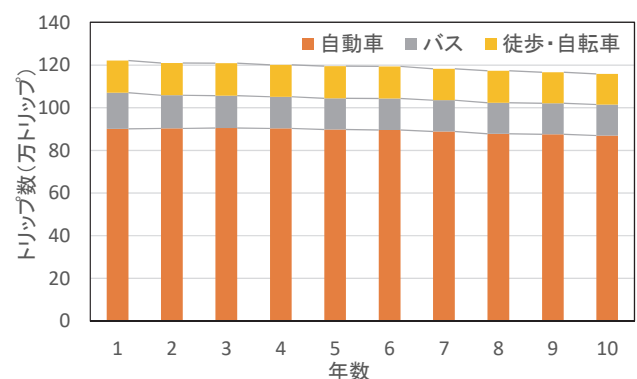


図 15 無政策時の交通手段分担の時系列推移

つぎに、図 16 に保有車両の時系列変化を示す。本図より、電気自動車の保有者の増加が観測される。また、超小型モビリティの保有台数は 10 年目においても僅かである。

つぎに、図 17 に二酸化炭素排出量の時系列変化を示す。

本図より、6 年目以降は二酸化炭素排出量が減少傾向であることが分かる。これは、人口の減少による総トリップ長の減少、および電気自動車の普及による二酸化炭素排出原単位の減

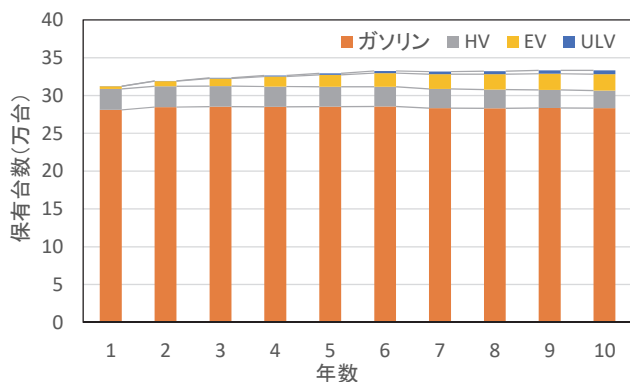


図 16 無政策時の保有車種構成の時系列推移

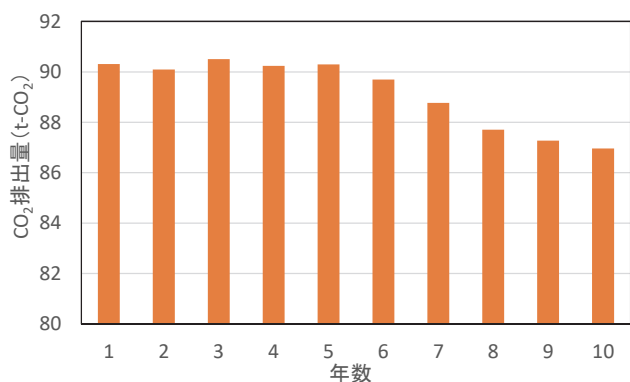


図 17 無政策時の二酸化炭素排出量の時系列推移

少の影響であると考えられる。

4.3 公共交通の利便性向上政策評価

つぎに、地方都市の交通政策として、公共交通の利便性向上を考える。ここでは、現実に実施されている岐阜市型 BRT および計画されているトランジットセンターを参考にする。本節では、次世代都市交通システム (ART) を想定する。すなわち、ART は ITS・自動走行技術と ICT を活用し、世界標準のアクセシビリティおよび統合的速達性を実現するシステムである。図 9 に示した青色の 2 路線が ART の導入ルート、青丸がトランジットセンターを示している。ART では、バスレーンの導入により、定時性の確保および所要時間の短縮がはかられるものとする。また、トランジットセンターでは、バス相互の乗り換え機能もあるが、本研究では自動車とバスの乗り換え (パーク&バスライド) を考える。

具体的な設定として、ART 導入区間のゾーン間の公共交通の所要時間は 20% 短縮されるものとする。また、定時性の確保として、ART 導入区間ではバスの交通障害はないものとする。また、トランジットセンターに関わる設定として、交通手段の選択肢として「パーク&バスライド」を追加する。この場合、トランジットセンターでの駐車料金として、超小型モビリティ：100 円/回、超小型モビリティ以外：200 円/回を設定する。これらの政策は 6 年目より実施されるものとする。

なお、バスレーンの導入で自動車の走行可能車線数が削減されると、自動車の所要時間が増加することも考えられる。しかしながら、道路交通流のモデルは組み込んでいないため、本

エージェントモデルでは評価を行うことが出来ない。一律に自動車の所要時間を調整することも考えられるが、詳細な検討が必要である。

図 18 に公共交通の利便性向上政策を行った場合の、最終時点の状況を示す。

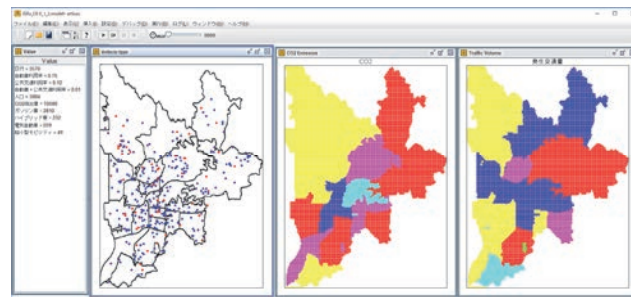


図 18 低炭素車両保有・環境負荷量の状況 (公共交通利便性向上・最終時点)

ART 導入ゾーンにおいて、二酸化炭素排出量が赤色から紫色に変化 (減少) しているゾーンがみられる。

つぎに、図 19 に公共交通利便性向上政策時の交通手段分担率の時系列変化を示す。本図より、「パーク&バスライド」(自動車+バス) の分担率は、政策が実施された 6 年目で 2.2% となっているが、その後は減少し、最終年は 1.1% である。パーク&バスライドの利用者は、自動車からの転換が多数を占めている。

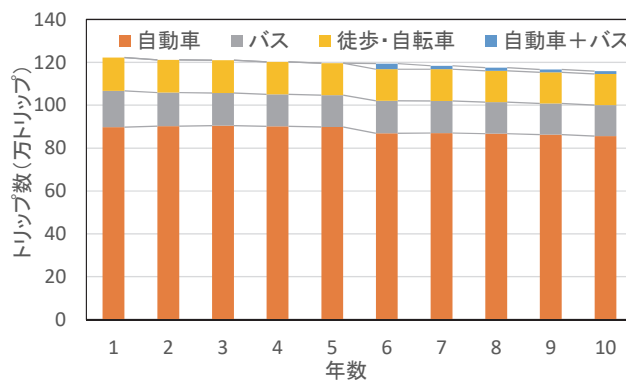


図 19 公共交通利便性向上政策時の交通手段分担

自動車の買い替えが進み、燃費が安価になった場合は、パーク&バスライドから自動車利用に戻ることも考えられる。また、ART 導入区間でのバスの交通障害はなく、自動車利用の場合は交通障害が発生するため、6 年目ではその経験からパーク&バスライドの評価値が相対的に大きくなる。しかしながら、バスの利用を続けていると、自動車利用における交通障害の経験が少なくなるため、翌年には自動車の評価値が以前に比べて大きくなる。このような 2 要因で、7 年目以降のパーク&バスライドの利用者が少なくなったと考えられる。

つぎに、図 20 に政策実施時の二酸化炭素排出量の時系列変化を示す。本図より、政策が実施される 6 年目以降の二酸化炭素排出量は、政策なしの場合 (青線) と比較して少ないことがわかる。また、7 年目でパーク&バスライドの利用者の減少

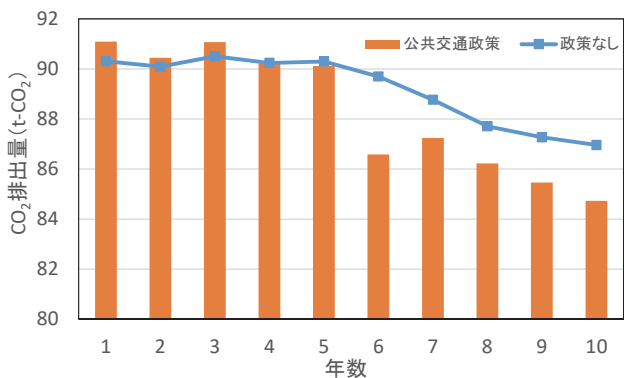


図20 公共交通利便性向上政策時の二酸化炭素排出量

などにより排出量は増加するが、8年目以降は無政策時と同様に人口減少・低炭素車両への買い替えなどの影響で減少傾向となる。

なお、本エージェントモデルでは、モデルの簡略化のため道路ネットワークをモデル化していないため、道路混雑の減少に対する評価はできない。公共交通利便性の向上により、都心部の自動車交通量は減少するものと考えられる。しかしながら、混雑が減少することで自動車の所要時間が削減され、新たに自動車を選択するエージェントが現れる可能性がある。

4.4 環境課金政策評価

つぎに、環境影響を考慮した交通政策として、環境課金政策を検討する。これは、特定地域を発着する車両に対して課金を行うものである。このとき、車両の環境負荷量に応じて課金額を決定する。本研究では、図21に示す赤枠内のJR岐阜駅北部のゾーン（約1.8 km×0.9 km）を環境課金エリアと設定する。



図21 環境課金エリアの設定

また、課金の対象とする車両は、走行時に二酸化炭素を排出するガソリン自動車・ハイブリッド自動車とする。課金額は1回あたり500円とする。さらに、この政策により、対象地域を発着する交通行動者は、環境意識が高まるものとする。なお、政策は6年目に実施されるが、1年目から政策実施の予告があり、車種選択の際に考慮することとする。

モデル上は、つぎのような設定を行う。①交通手段選択において、現在の保有車両がガソリン自動車・ハイブリッド自動車であり、課金エリアを発地・着地とする場合は、自動車のト

リップ費用に課金額を加える。②交通手段選択・車種選択において、課金エリアを発地・着地とするトリップがあった交通行動者は、自治体が行う環境政策を理解して行動するため、環境意識が高まると想定し、環境意識を1ポイント加える。この1ポイントは図4に示したように、たとえば「全く思わない」→「あまり思わない」の意識変化の半分程度のものである。③車種選択において、ガソリン自動車・ハイブリッド自動車の総費用を算定する際に、過去のトリップ実績に基づき、将来の買い替えまでの課金エリアへの訪問回数を算定し、自動車の総費用に環境課金額を加える。

これらの設定を行った場合の、保有車種構成の時系列変化を図22に示す。

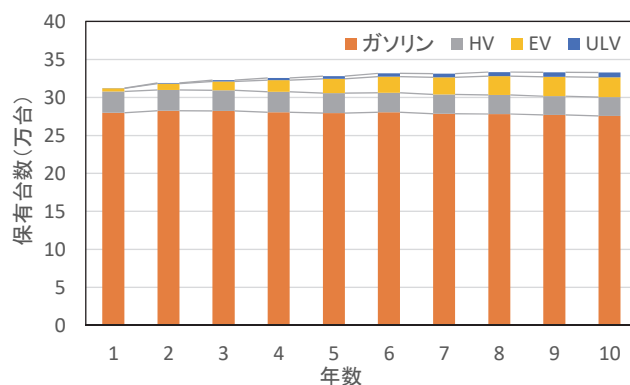


図22 環境課金政策時の車種構成

無政策時と比較すると、大幅な変化は観測されなかったが、ガソリン自動車は85.0%→82.8%、電気自動車は6.5%→7.8%、超小型モビリティは1.5%→1.9%に変化している。

つぎに、図23に環境課金政策実施時の二酸化炭素排出量の推移を示す。

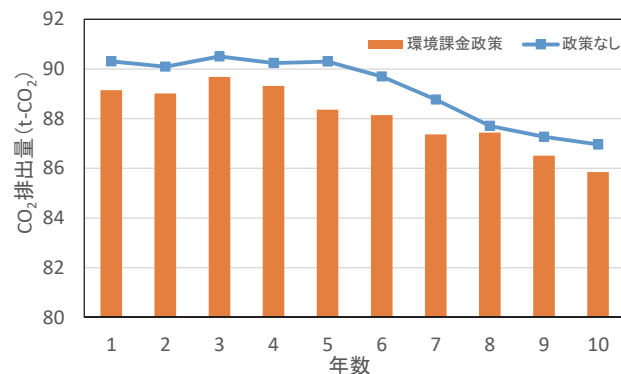


図23 環境課金政策時の二酸化炭素排出量

本図より、環境課金政策実施の公表の時（1年目）から二酸化炭素排出量が減少していることがわかる。これは、車種選択が影響していると考えられる。また、6年目以降（政策実施時）の二酸化炭素排出量の削減効果は、公共交通利便性向上政策と比較すると少なくなっている。

4.5 政策の組み合わせによる相乗効果の計測

つぎに、公共交通利便性向上と環境課金の政策を組み合わせ

て実施した場合を検討する。図 24 に、この場合の交通手段分担率の時系列変化を示す。

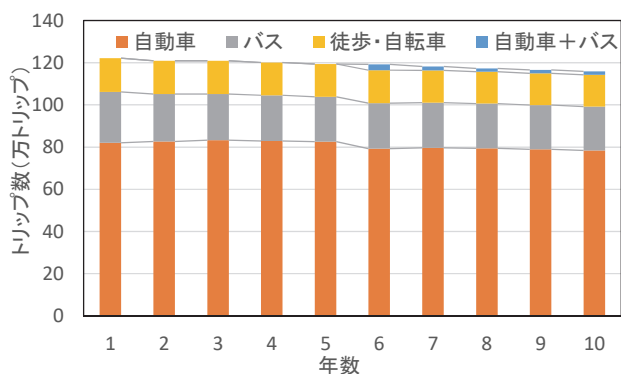


図 24 政策組み合わせ時の交通手段分担

本図より、自動車の分担率は、公共交通利便性向上政策のみの場合と比較して少ない(10年目で73.8%→67.7%)。また、公共交通利便性向上政策のみの場合と比較してバスの分担率が高くなっている。自動車+バス(パーク&バスライド)の分担率は、公共交通利便性向上政策のみの場合と比較して僅かに高い。これらは、環境課金政策による環境意識の向上の影響が一要因と考えられる。

つぎに、政策を組み合わせる実施した時の車種構成の推移を図 25 に示す。

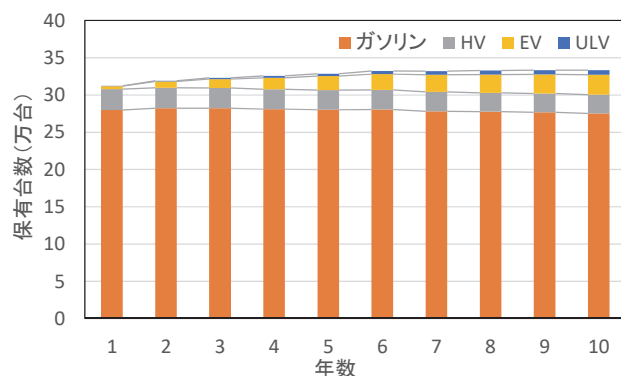


図 25 政策組み合わせ時の車種構成

本図より、環境課金政策のみの場合と比較すると、ハイブリッド自動車が若干減少し、電気自動車が増加していることがわかる。また、電気自動車の保有台数は経年的に増加しているが、環境課金政策が実施される6年目以降は増加が緩やかになっている。一方、超小型モビリティは、台数は少ないが6年目以降も増加が続いている。

つぎに、図 26 に政策組み合わせ時の二酸化炭素排出量の推移を示す。

本図より、政策を組み合わせる実施した場合は、5年目までは政策なしの場合と比較して3~4%の削減、6年目以降は5~8%の削減が見込めることが分かる。

ここでは、政策の組み合わせによる相乗効果を詳細に検討する。図 27 に各政策を単独で実施した場合の累積 CO₂ 削減量(積み重ね棒グラフ)および政策を組み合わせる実施した場合

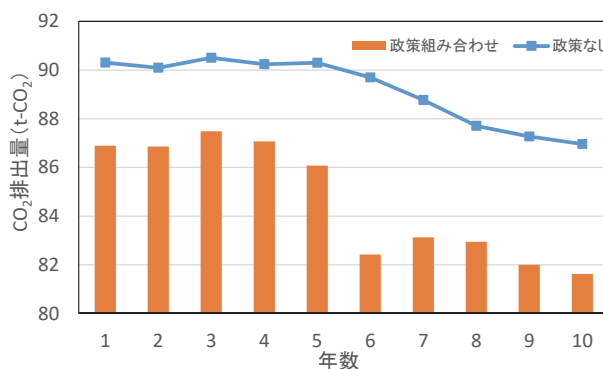


図 26 政策組み合わせ時の二酸化炭素排出量

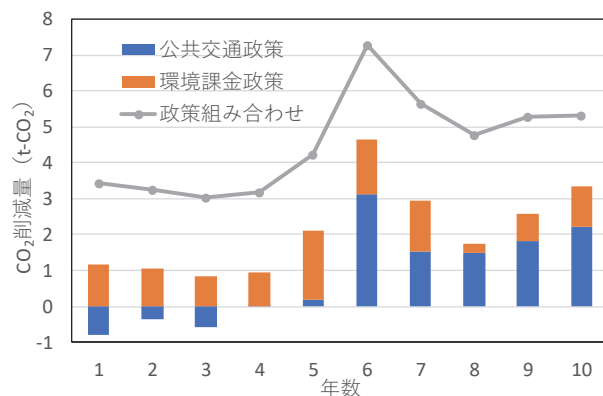


図 27 各ケースの二酸化炭素削減量

の CO₂ 削減量(折れ線グラフ)を示す。

本図より、政策を組み合わせる実施した場合は、それぞれの政策を単独で実施するより大きな CO₂ 削減効果が見込めることがわかる。たとえば10年目に着目すると、公共交通利便性向上政策では自動車のトリップ数は85.6万トリップ、環境課金政策では87.1万トリップに対して、両政策の組み合わせでは78.4万トリップとなっている。単独の政策では、交通手段の変更に至る大幅な交通環境変化は難しいが、政策の組み合わせにより、公共交通の所要時間短縮および自動車の費用増加が同時に行われることで、交通手段の変更が行われるエージェントが多数発生すると考えられる。

このように、両政策を組み合わせると相乗効果が見込めることがわかった。

5. おわりに

本研究では、都市交通の低炭素化の検討のため、マルチエージェントシステムを構築した。本研究の主要な成果を以下にまとめる。

- 1) 交通行動者をエージェントとするマルチエージェントシステムを構築した。交通手段選択モデル、車種選択モデルを簡略ファジィ推論によりモデル化を行った。この結果、環境意識を考慮した意思決定過程を表現することが可能となった。
- 2) マルチエージェントシステムを地方都市に適用した。公共交通利便性向上政策では、政策実施直後はパーク&バスライ

ド利用者が一定数見られ、二酸化炭素排出量の削減効果が期待できることがわかった。

- 3) 環境課金政策では、電気自動車・超小型モビリティの導入が若干進み、二酸化炭素排出量の削減は政策公表時点からみられることがわかった。
- 4) 公共交通利便性向上政策・環境課金政策を組み合わせると、相乗効果により、3~8%の二酸化炭素排出量の削減が見込まれることがわかった。

本研究の今後の課題として、①現実を踏まえた環境意識の設定方法を検討すること、②環境課金政策の設定エリア・課金額などを詳細に分析すること、③道路ネットワークを考慮したモデル化を行うことなどが挙げられる。

謝辞

本研究は、関西大学教育研究高度化促進費の助成を受けて実施した研究成果の一部であることを付記する。

参考文献

- [1] 「環境未来都市」構想推進協議会, 「環境未来都市」構想, 2017.
- [2] 武藤晃史, 村木美貴: “地域特性に応じたスマートコミュニティの構築に関する研究 川崎市を対象として,” 都市計画論文集, Vol.51, No.3, pp. 525-531, 2016.
- [3] 井ノ口弘昭, 秋山孝正: “街区型環境未来都市の道路交通システム運用についての研究,” 交通工学論文集, Vol.1, No.2, pp. 123-132, 2015.
- [4] 吉村忍, 西川紘史, 守安智: “知的マルチエージェント交通流シミュレータ MATES の開発,” シミュレーション, Vol.23, No.3, pp. 228-237, 2004.
- [5] 杉谷芳宏, 原田昇, 大森宣暁: “マルチエージェント・シミュレーションによる歩行者自転車道の評価,” 交通工学研究発表会論文報告集, Vol.25, pp. 213-216, 2005.
- [6] 秋山孝正, 奥嶋政嗣, 井ノ口弘昭: “人工社会モデルによる地方都市まちづくり政策に関する考察,” 知能と情報, Vol.23, No.4, pp. 54-63, 2011.
- [7] T. Akiyama and M. Okushima: “Application of Artificial Society Model to Urban Transport Planning,” *Proc. of the SCIS & ISIS 2008*, CD-ROM, No. FR-F1-3, 2008.
- [8] M. Okushima and T. Akiyama: “Multi Agent Simulation Model for Design of Eco-commuting Promotion Planning,” *SCIS & ISIS 2010*, SA-D5-2, 2010.
- [9] 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, Vol.D3-68, No.5, pp. I_625-I_634, 2012.
- [10] M. Okushima and T. Akiyama: “Multi-Agent Transport Simulation Model with Social Network in Small World,” *Proc. of Joint 6th the Int. Conf. on Soft Computing and Intelligent Systems and 13th Int. Symposium on Intelligent Systems*, Vol.6, No.W2-55-4, pp. 1-6, 2012.
- [11] T. Akiyama and H. Inokuchi: “Multi-agent simulator in transport sector for low carbon society,” *The 6th Int. Conf. on Soft Computing and Intelligent Systems*, pp. 391, 2012.
- [12] 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.
- [13] 秋山孝正, 井ノ口弘昭: “エージェントモデルを用いた地方都市における環境対応型の交通政策評価,” 地球環境, Vol.22, No.2, pp. 145-152, 2017.
- [14] 岐阜市, 岐阜市総合交通戦略, 2014.
- [15] 井庭崇, 福原義久: 複雑系入門, NTT 出版, 1998.
- [16] 山影進: 人工社会構築指南-artisoc によるマルチエージェント・

シミュレーション入門, 書籍工房早山, 2007.

- [17] 厚生労働省, 平成 29 年賃金構造基本統計調査の概況, 2018.
(2019 年 2 月 3 日 受付)
(2019 年 7 月 28 日 採録)

[問い合わせ先]

〒564-8680 大阪府吹田市山手町 3-3-35
関西大学環境都市工学部
井ノ口 弘昭
TEL: 06-6368-0964
E-mail: hiroaki@inokuchi.jp

著者紹介



井ノ口 弘昭 [正会員]

2001 年名古屋大学大学院工学研究科博士課程修了。その後、関西大学助手、助教を経て関西大学准教授。道路交通流、交通量配分、健康まちづくりなどの研究に従事。土木学会、交通工学研究会、日本交通学会などの会員。



秋山 孝正 [正会員]

1983 年京都大学大学院工学研究科修了。京都大学助手、講師、岐阜大学助教授、教授を経て 2008 年より関西大学教授。交通行動の知的情報処理、道路交通安全、都市システムの思想、精神風土の分析などの研究に従事。土木学会、交通工学研究会、日本交通学会、日本福祉のまちづくり学会などの会員。



伊 禮分 [非会員]

2000 年大阪大学大学院工学研究科博士課程修了。香川大学助手、准教授を経て 2010 年より関西大学准教授、教授。工学・社会システムにおける諸問題を数理的にモデル化し、コンピュータを用いて問題解決するための理論や方法の開発に取り組んでいる。日本オペレーションズ・リサーチ学会、システム制御情報学会、土木学会などの会員。

Development Process of Environmental Smart City in Local Area with Multi-agent Model

by

Hiroaki INOKUCHI, Takamasa AKIYAMA, and Yeboon YUN**Abstract:**

As the car oriented city is extended in local areas, reduction of carbon dioxide emission should be required. The development of environmental smart city is discussed in the study to promote the low carbon society as global environment issues. The multi-agent model is developed to describe the decision process concerning with modal choice as well as vehicle type choice of individual trip makers. The proposed model is applied to evaluate the future public transport policies to reduce the carbon dioxide emission such as service of ART (Advanced Rapid Transit) as well as the environmental charging for high emission vehicles. Finally, the impacts of public transport policies are properly evaluated in contrast to the no policy introduction for low carbon transport systems.

Keywords: agent based model, environmental smart city, ultra light weight vehicle, public transport system, urban development process

Contact Address: **Hiroaki INOKUCHI**

Faculty of Environmental and Urban Engineering, Kansai University

3-3-35 Yamate-cho, Suita, Osaka 564-8680, Japan

TEL: +81-6-6368-0964

E-mail: hiroaki@inokuchi.jp