

# マルチエージェントシミュレーションを用いた 交通行動変容とCO<sub>2</sub>排出量の関係の分析

森 崇<sup>1,a)</sup> 服部 宏充<sup>1,b)</sup>

概要：近年、温室効果ガスの排出量を抑制する議論の中で、内燃機関を持つ自動車からのCO<sub>2</sub>排出の抑制は代表的な論点のひとつである。そこで、渋滞の発生などによるCO<sub>2</sub>排出量の増加に着目し、渋滞を抑制する方法として、交通行動変容を掲げ、その具体的な効果をMASを用いて予測・検証を行った。検証の結果、多数のパラメータ設定を網羅するさらなる検証の余地はありつつ、排出量抑制の可能性を確認することができた。

## Analysis of the relationship between changes in travel behavior and CO<sub>2</sub> emissions based on multi-agent simulation

### 1. はじめに

近年、温室効果ガス排出を原因とする地球温暖化による気候変動が世界的な問題として注目され、温室効果ガスの排出量を抑制する方法が議論されている。内燃機関を持つ自動車からのCO<sub>2</sub>排出の抑制は代表的な論点のひとつである。渋滞の発生などによって低速走行やストップアンドゴーを長時間継続することはCO<sub>2</sub>排出量を増加させるため、交通の円滑化は、温室効果ガスの排出を軽減することにつながると考えられる [1]。局時的／局所的な渋滞を回避し、円滑な交通を実現する方法として、流入車両数を減らしたり、別の経路へ誘導したりするといった方法が考えられるが、具体的な施策の効果を人手で予測・検証することは難しい。

そこで本研究では、交通流を構成する移動者の交通行動変容とCO<sub>2</sub>排出量への影響について、マルチエージェントシミュレーション（以下、MAS）を利用した予測・分析を試みる。高速道路を介して大都市圏から移動する人々の、移動時間の分散化といった施策が、地域内でのCO<sub>2</sub>排出量に与える影響について、MASをツールとして実践に先立つ知見が得られることを示す。

### 2. 準備

#### 2.1 シミュレーション環境

本研究では、GAMA[2]をプラットフォームとして筆者らが構築している、交通シミュレータMACiMA（マキシマ）を使用してシミュレーションを実施する（図1）。MACiMAでは、GAMAのモデル設計を用いて、交通シミュレーションに必要なエージェント（自動車、道路、交差点等）を構築している。

MACiMAにおけるシミュレーションの実行プロセスは以下の通りである（図2）。

- (1) 初期化
- (2) シミュレーション実行
- (3) 評価
- (4) 走行経路の再計算
- (5) 最終結果ファイルの出力

初期化では、入力データの読み込みやそれに基づくエージェントの生成を行う。シミュレーションを実行後、得られた結果を基に、自動車エージェントの一部が走行経路を再計算し、より最適な走行経路を選択する。本実験では、毎回全体の1割の自動車エージェントを無作為に選択し、それらに経路の再計算を行わせている。これは、全自動車エージェントに経路の再計算を行わせた場合、次に選択する最適な経路に自動車エージェントが再び集中すること

<sup>1</sup> 立命館大学  
Ritsumeikan University, Kusatsu, Shiga 525-8577, Japan  
a) is0477rf@ed.ritsumei.ac.jp  
b) hatto@fc.ritsumei.ac.jp

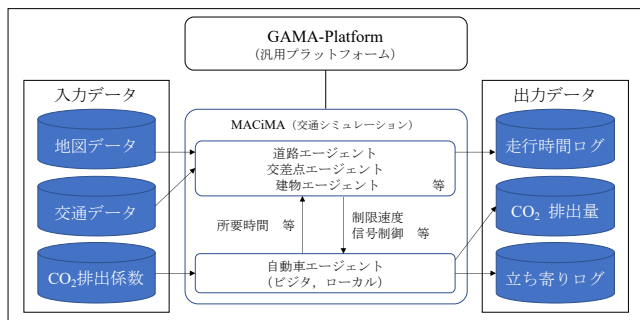


図 1 本研究で用いる MACiMA の全体像

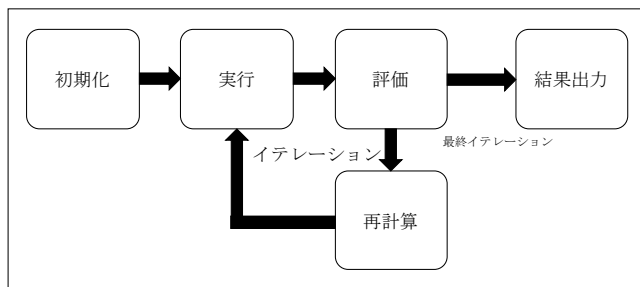


図 2 シミュレーションフロー

が考えられる。これをイテレーションすることで、全自動車エージェントが最適な経路を反復するという事象が発生するため、再計算を行う自動車エージェントは一部のみとしている。ここまでの、実行から再計算までを複数回イテレーションする。設定した回数のイテレーションが終了後、結果を書き出し、シミュレーションを終了する。

経路の計算に当たって、初期化の時点では、各道路（リンク）の長さ及びデジタル地図データに付随している属性データにおけるネットワークレベルに基づいて重み付けを行った、道路ネットワークを用いて経路計算を行っている。また、経路の再計算においては、各道路で前回走破するのに要した時間の平均に基づいて更に重み付けを行った、道路ネットワークを用いている。これにより、再計算時には、走破に要する時間も考慮することで、より最適な走行経路になるものとしている。

本実験では、この MACiMA をベースに、必要なエージェントである (1) 遠隔地から高速道路を介して流入出する自動車エージェント（以下、ビジタ）、および (2) 地域内で移動が完結する自動車エージェント（以下、ローカル）を用意する。また、CO<sub>2</sub> 排出量の算出及びシミュレーション中における行動変容に関わる機能を実現するため、2.2～2.4 節で述べる実装を行った。

## 2.2 自動車エージェント

実験を行う上で 2 種類の自動車エージェントを用意した。この方法を用いる理由は、遠隔地から高速道路を介して地域に流入出する自動車と、地域内で移動が完結する自動車とは異なる特徴を持つためである。各自動車エージェン

|          | ビジタ    | ローカル   |
|----------|--------|--------|
| 出発地/到着地  | 固定     | ランダム   |
| 立ち寄り行動   | 有      | 無      |
| 経路最適化    | 無      | 有      |
| 車両台数 (台) | 12,000 | 15,000 |

トの特徴を表 1 に示す。

表内の立ち寄り行動については、2.4 節で後述する。経路の最適化の有無については、ローカルは地域内で移動が完結するため、日常的に実験区域内の道路に慣れていることが想定される。そのため、経路の最適化を行うことで、周囲の交通状況を考慮した経路を通行させる。一方で、ビジタは地域外の遠方から移動してくることが想定されるため、実験区域内の道路に不慣れであり、目的地施設が提示している推奨経路を外れる可能性が低いと考えられるため、経路の最適化は行わず、一定の経路を通行させる。また、車両台数に関しては、地域内にある程度自動車が網羅できる台数をローカルに割り当て、高速道路への出入りで渋滞が発生しうる台数をビジタに割り当てる。

## 2.3 CO<sub>2</sub> 排出量の算出

CO<sub>2</sub> 排出量の算出は、国土技術政策総合研究所が示している CO<sub>2</sub> 排出係数 (g/km) (表 2) を用いている [3]。その上で、各自動車エージェントが自らの走行速度および単位時間あたりの走行距離を参照し、リアルタイムに加算を行うことで、シミュレーション終了時に累積された CO<sub>2</sub> 排出量が得られる。

本シミュレータ内で定義している 1 秒 (カウント) 毎に、CO<sub>2</sub> 排出量の加算を行っている。そのため、CO<sub>2</sub> 排出係数を利用するに当たっては、本来は走行距離を算出する必要があるが、本シミュレータでは現在の速度 (km/s) を単位時間あたりの走行距離とみなしている。

また、本研究では、渋滞に関する CO<sub>2</sub> 排出量を考慮する必要があるため、信号待ち等のアイドリング停車時及び渋滞時における 5km/h 以下の低速走行が多発する。また、5km/h 単位でしか CO<sub>2</sub> 排出係数が示されていないため、現在の速度が各 CO<sub>2</sub> 排出係数に対応する速度の間にある場合は、一つ上方の速度に対応する CO<sub>2</sub> 排出係数を参照して、加算を行っている。

## 2.4 交通行動変容

### 2.4.1 概要

本研究における交通行動変容とは、渋滞を軽減させるために、交通を分散化させることである。これを実現する方法として、単純に出発する時刻を分散させ、交通量のピークの分散化を図ることが考えられる。本研究では、この方法に加え、本来のメインルートから外れる経路地を

表 2 走行速度と CO<sub>2</sub> 排出係数の関係

| 走行速度 (km/h) | CO <sub>2</sub> 排出係数 (g/km) |
|-------------|-----------------------------|
| 5           | 318.1                       |
| 10          | 235.3                       |
| 15          | 165.5                       |
| 20          | 145.5                       |
| 25          | 128.7                       |
| 30          | 117.2                       |
| 35          | 108.8                       |
| 40          | 102.7                       |
| 45          | 98.3                        |
| 50          | 95.3                        |
| 55          | 93.4                        |
| 60          | 92.4                        |
| 65          | 92.2                        |

表 3 ビジタの発着地割合 (%)

|        | 御殿場 PO 発 | 御殿場 PO 行 |
|--------|----------|----------|
| 御殿場 IC | 54       | 5        |
| 足柄 SIC | 36       | 5        |
| 全体     | 90       | 10       |

一部の車両に経由（立ち寄り）させることで、メインルートの渋滞に流入する車両を減少させる方法を取っている。ここで言うメインルートとは、運転者が目にする目的地への案内看板に従うルートや、国道・県道といった主要道路を用いた最短ルートを指す。

経由地は、本来のメインルートから大幅に外れず、目的地ほどではないが、比較的知名度のある施設を、予め実験者が3箇所設定し、その中から等確率で経由地を選択させる。また、立ち寄りの有無は出発前に決定し、立ち寄りを行う場合は、最短経路で出発地から経由地に向かい、滞在後、最短経路で目的地へ向かうものとした。なお、滞在時間は、設定した施設を利用する時間として適当と考えられる範囲からランダムに決定する。そして、出発前に立ち寄りを決定した場合でも、出発時に立ち寄り先の車両数を参照し、設定した施設の駐車台数を上回る車両が立ち寄り先に訪れている場合は、立ち寄りを中止し、目的地へ直接向かうものとした。

#### 2.4.2 交通におけるナッジ

表1で示したとおり、交通行動変容にあたる立ち寄り行動は、ビジタでのみ実施する。これは、ビジタが渋滞発生の主要因であり、ローカルは単なる周辺交通を再現するエージェントであるということにも起因するが、本研究が立ち寄りによって交通を分散化させる方法を取る理由がナッジにあるからである。

ナッジとは、選択をしようとしている対象に強制力を働かせることなく、より良いと思われる方向へ誘導する、軽い突きである。[4]近年、スマートフォンが普及し、外出する際には携帯している場合が多い。そのような状況下で、周辺交通が混雑する目的地へ向かおうとする、或いは帰ろうとする人々に対して、周辺施設を訪れたいくなるようなナッジを効かせることが比較的容易に実現できるような環境が整っていると考えられる。この場合、周辺施設を割安で利用できるクーポンの配信や、周辺に対象が知らな

かった興味のある施設を紹介するアプリのような、スマートフォンを利用したナッジが考えられる。

このようなナッジは、周辺施設を熟知していたり、全く関係ない場所を走る予定があったりする人々に対して行っても、渋滞軽減に対する効果の見込みが薄かったり、無駄な費用が発生したりすることが考えられる。このような理由から、ナッジの費用対効果を最大化するには、ビジタのみに交通行動変容を適用する必要がある。

### 3. シミュレーションシナリオ

#### 3.1 実験地域・時期

実験では、静岡県御殿場市（メッシュコード：523877）を対象としたシミュレーションを行う。当地には、御殿場プレミアム・アウトレット（以下、御殿場 PO）があり、主に、週末や祝祭日になると、高速道路を経由して関東圏から多くの人々が訪れる。そのため、多くの訪問客が帰途に着く時間帯の交通量増加によって、慢性的に渋滞が発生しており、CO<sub>2</sub> 排出量を増加させていると考えられる。具体的な対象の時間は14時～20時の6時間を想定し、シミュレーションではすべての車両が走行完了する猶予を持たせ、実験時間は14時～21時の7時間とした。

#### 3.2 実験車両

これらの道路上を走行する自動車エージェントとして、先に示した通りビジタおよびローカルの2種類を用意する。ビジタは東名高速道路を経由して、関東地方から御殿場市へ流入出する自動車で、ローカルは御殿場市内で移動が完結する自動車である。

各自動車エージェントの特徴は、表1のとおりであるが、本実験におけるビジタの出発地及び目的地は、御殿場 PO 又は御殿場インターチェンジ（以下、御殿場 IC）・足柄スマートインターチェンジ（以下、足柄 SIC）のいずれかである。御殿場 PO へ向かう車両、御殿場 PO から帰る車両及びそれぞれにおいてどちらのインターチェンジを用いるかの割合については、実験時間やスマートインターチェンジの性質を考慮した上で、表3で示したとおりである。

#### 3.3 立ち寄り場所

実験では、本来のメインルートから大幅に外れることがない JR 御殿場線以東で比較的知名度の高い3つの店舗を立ち寄り場所として設定した（表4）。

なお、各地点に収容できる車両数は、実際の駐車場規模

表 4 立ち寄り場所

|          | 和菓子屋 A | 飲食店 B  | スーパー銭湯 C |
|----------|--------|--------|----------|
| 上限台数 (台) | 30     | 30     | 300      |
| 滞在時間 (分) | 15~45  | 90~120 | 120~150  |

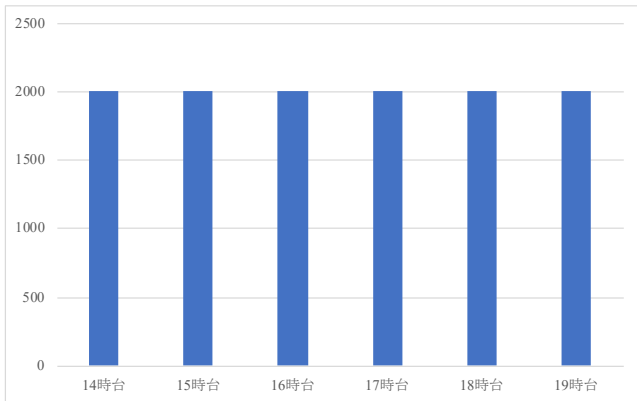


図 3 パターン 1

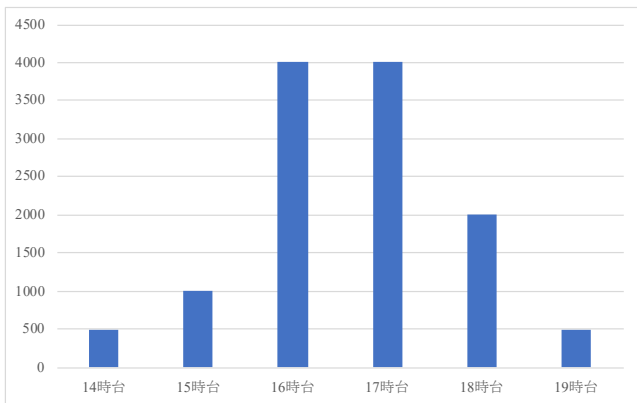


図 4 パターン 2

を参照している。また、滞在時間は、各店舗で提供されるサービスの性質や、発生し得る待ち時間を考慮し、実験者が決定した。

#### 4. 実験

実験は、2種類の出発パターンと立ち寄り行動の有無で、計4通りの方法で実施する。2種類の出発パターンのうち、パターン1は、御殿場 PO の分散発車が成功した場合を想定し、ピークが分散され、毎時間均等の台数が出発する(図3)。パターン2は、御殿場 PO から特に分散発車をを行わない場合を想定し、ピークが16時台~18時台の3時間に集中して出発する(図4)。なお、これらの出発パターンはビジタのみを対象としており、地域交通を再現するローカルは毎時間均等に出発する。

また、立ち寄りを行う場合、立ち寄りを行うビジタは全体の3割とし、各立ち寄り場所へはそれぞれ同数のビジタが向かおうとするものとした。また、滞在時間が実験終了時刻の21時を超過する場合、すべての車両が走行終了するために、強制的に20時30分には立ち寄り先を出発する

ようにしている。

他に、実験環境の精度を上げるため、個別化処理を実装している。個別化処理とは、ドライバーの個性を速度に反映させるためのもので、走行している道路に設定されている最高速度(制限速度)に対して、それ以上で走る車両、それ以下で走る車両を再現している。70%の車両は、設定された最高速度通りに走るが、残りの15%は最高速度をやや超過した速度、残りの15%は最高速度よりもやや遅い速度で走るようにしている。

シミュレーションは全ての方法で5イテレーション行い、ビジタは経路の再検討は行わず、ローカルは毎イテレーション時に全体の1割の車両のみが経路の再計算を行う。

#### 5. 結果と考察

今回は、シミュレーション時間の都合上、御殿場 PO で分散発車をを行わない場合である、パターン2における立ち寄りの有無のみで実験を行った。

全体のCO<sub>2</sub>排出量としては、立ち寄りを行うことで減少するという結果が得られた(表5)。

まず、ローカルにおいては多数の外れ値が観測されている(図6)。ローカルは、ODをランダムとしているため、走行距離が両極端になりやすいためと考えられる。また、本実験ではローカルのOD(出発地・目的地)をランダムとしていたが、立ち寄りの有無において、ODの条件を揃える必要があったが、それを考慮できていなかったため、今回の結果を評価することは難しいと考えられる。今後、立ち寄りの有無の差分で実験を行う場合は、ランダムで抽出したODを両条件で共有する方法を検討する必要がある。

そして、ビジタにおいては立ち寄りを行うことで、約17,794kgのCO<sub>2</sub>排出量を削減でき、平均値では約1.4kg、中央値では約2kgの低減という結果となった(図7)。今回は、16時~18時にビジタによる大幅なピークが発生することを想定していた。今回のような交通行動変容は、主にピーク時間帯に行われることが考えられるため、今回のように実験時間内全てにおいて交通行動変容が行われていることは考えにくい。また、今回の交通行動変容における立ち寄りには、ビジタの帰ろうとする方向(今回で言えば、御殿場 IC または足柄 SIC)を特に考慮していない。立ち寄り場所として、設定した3ヶ所は主に御殿場 PO から見ると御殿場 IC 方面に点在しているため、足柄 SIC へ元々向かおうとしていたビジタにとっては必ずしもCO<sub>2</sub>排出量を個々に削減できたとは言えない。そのため、この結果が必ずしも現実味があるとは言えず、今回のように好ましい結果が出ることもあれば、逆に悪化する結果が出ることも考えられる。

総じて、今回は交通行動変容によるCO<sub>2</sub>排出量削減に対する効果を示せたが、一方で、御殿場 PO で分散発車を

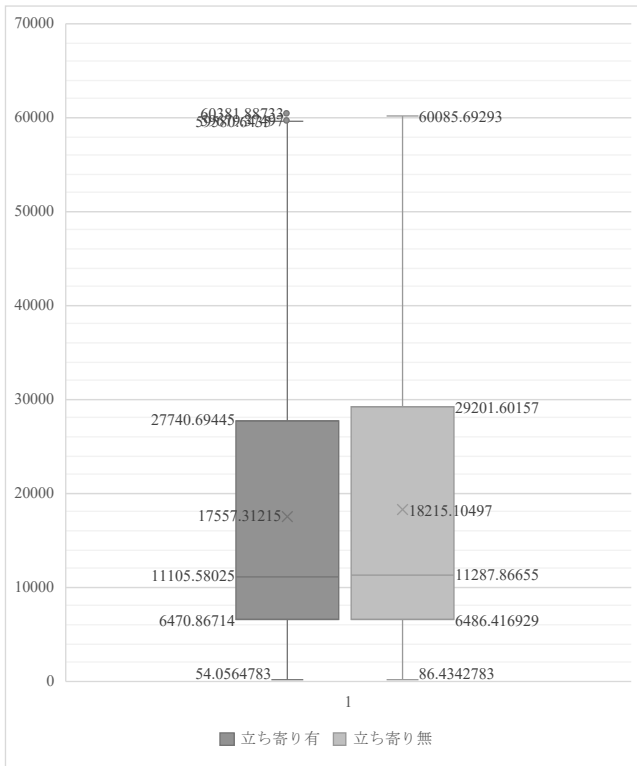


図 5 全体の CO<sub>2</sub> 排出量 (g)

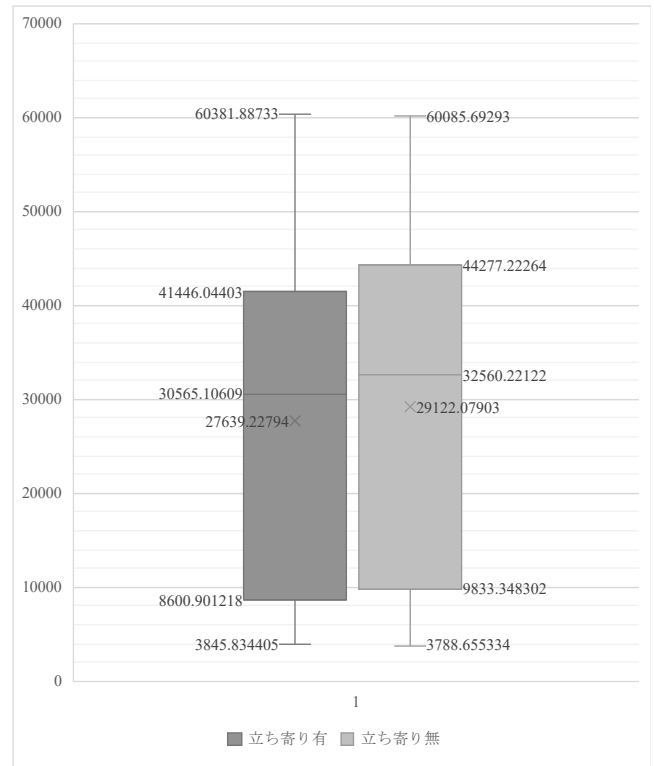


図 7 ビジタの CO<sub>2</sub> 排出量 (g)

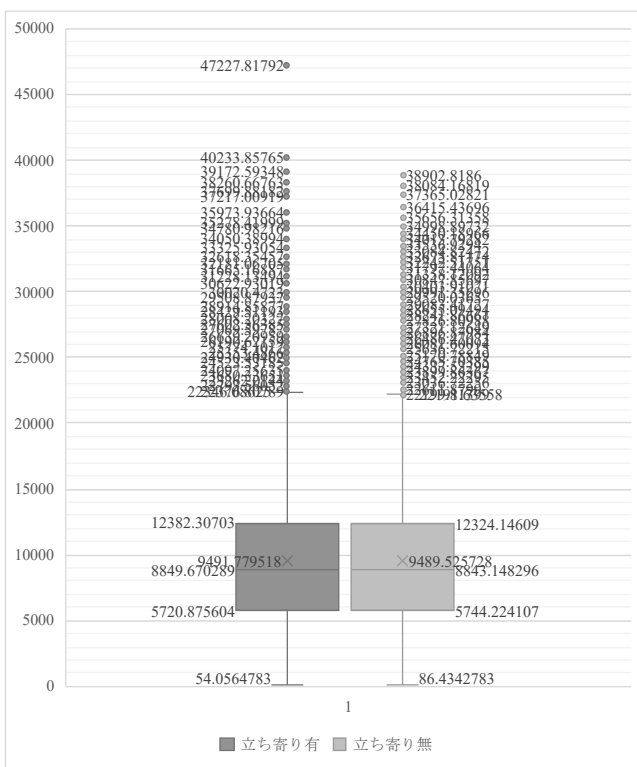


図 6 ローカルの CO<sub>2</sub> 排出量 (g)

表 5 CO<sub>2</sub> 排出量の結果 (kg)

|      | 立ち寄り無       | 立ち寄り有       | 差分          |
|------|-------------|-------------|-------------|
| ビジタ  | 349,464.948 | 331,670.735 | -17,794.213 |
| ローカル | 142,342.885 | 142,376.692 | +33.806     |
| 全体   | 491,807.834 | 474,047.428 | -17,760.406 |

## 6. 今後の課題

### 6.1 実験方法の見直し・充実化

今回の実験では、時間の制約上、パターン 2 における立ち寄りの有無の比較のみに終わった。これだけでは、交通行動変容と CO<sub>2</sub> 排出量の関係性を十分に示したとは言えない。また、CO<sub>2</sub> 排出量の算出方法として、毎秒の排出量を加算する方法を取った。この方法では、車両台数が今回のように膨大になった場合、計算処理もそれに伴って膨大となる。そのため、最終イテレーション以外では、CO<sub>2</sub> 排出量の算出を省略し、ローカルの経路が最適化された最終イテレーションでのみ、CO<sub>2</sub> 排出量の計算を行った。しかし、この方法では、CO<sub>2</sub> 排出量を最適化するなど、CO<sub>2</sub> 排出量の変化に軸を置くシミュレーションが難しくなる。今後は、より多くの実験パターンで試行するとともに、より高効率な CO<sub>2</sub> 排出量の算出方法も検討したい。

また、5 章でも示したとおり、ローカルにおいては、全体の CO<sub>2</sub> 排出量を測定する上で、OD を一定化する必要がある。一度実験で用いた OD を流用する方法を用いて、地域交通を含めた CO<sub>2</sub> 排出量で比較を可能にしていける

行った場合における、影響を示すことができなかったことや、交通行動変容の定義が不十分であったことが、結果や実装に対する考察を経て、顕在化した。

よう、実装方法を検討したい。

そして、今回は地図データの制約もあり、関東圏から各インターチェンジまでの間のシミュレーションは行えていない。高速道路ではない、一般道路における交通行動変容の影響は今回示したが、高速道路区間での渋滞に対しては示せていない。特に、今回の御殿場市では、御殿場 PO に向かう一般道路での渋滞も顕在だが、一般道路の渋滞による高速道路の渋滞に関してもかなり大きな影響があると考えられる。特に、御殿場 PO に向かう道中では、足柄 SIC と御殿場 IC を選択できるが、前者を選択する車両が増加することで、足柄サービスエリア（以下、足柄 SA）を利用しようとする自動車と交通流が混合し、足柄 SA 入口での渋滞も著しい。一般道路での渋滞緩和も重要であるが、それと共に高速道路における渋滞緩和に関しても今後検討したい。

## 6.2 交通行動変容に関するアルゴリズムの充実化

今回の実験では、ビジタ全体の 3 割を無作為に選択し、交通行動変容を促した。しかし、実際には各ビジタの属性や帰宅ルートといった部分が考慮されておらず、必ずしも今回のような好ましい結果が得られるとは考えにくい。今後、事前に立ち寄りを決定する方法ではなく各ビジタが帰宅（各インターチェンジに至るまで）の渋滞状況を評価し、渋滞が酷すぎると判断したビジタが、「もう少し御殿場 PO に留まろう」、「立ち寄りを行おう」といったより現実味のある判断を行えるように実装を検討していきたい。

## 6.3 立ち寄り場所の最適化

今回の実験では、実験者が恣意的に立ち寄り場所の候補を決定した。この方法では、交通行動変容による CO<sub>2</sub> 排出量の抑制を効果的に行える結果を十分に示したとは言えない。今回利用したデジタル地図データには、地図内に点在する施設に関する属性も含まれている。これらの属性データを有効に利用し、立ち寄り場所として最適な施設を決定することで、より実験に現実味を持たせられるよう検討したい。

## 6.4 信号の最適化

今回の実験では、右左折専用等の特殊信号を考慮しておらず、現示の変化も一律としている。信号は、一般道路における渋滞を発生させる大きな要因となっているため、信号をより緻密に再現することは、実験結果の精度向上を実現する上で重要である。厳密な信号現示の変化のタイミングを再現することは困難であるが、一般的な対策と考えられる、より上級（交通量が多い等）の道の青現示をより長くするとといったことは考慮する必要があると考えられる。

## 6.5 他地域への応用

今回は御殿場市と御殿場 PO での渋滞に対しての実験を行ったが、同様の課題を抱える地域は国内にも多数存在する。今回のように、目的地と高速道路のインターチェンジが比較的短距離である場合は、今回の実験結果によって示せたが、渋滞を発生させる要因である自動車群がより長距離に渡る場合での、交通行動変容の影響に関しては、不明である。今後、他地域における渋滞に対する交通行動変容の有効性を示したい。

## 7. おわりに

本研究では、温室効果ガスの排出量抑制する方法のアプローチとして、渋滞の発生による自動車の CO<sub>2</sub> 排出量増加に着目し、より現実的な施策として交通行動変容を掲げ、その有効性を MAS を用いて示した。しかし、現状における交通行動変容の定義や実装が、現実味を十分に帯びているとは言えず、あらゆる場合においても今回のような交通行動変容が有効に働くとは限らない。

今後、6 章でも示した複数の課題に対して引き続き検討を行い、交通行動変容と CO<sub>2</sub> 排出量の関係をより明瞭に示せるようにしていきたい。

## 参考文献

- [1] 国土交通省：平成 19 年度国土交通白書，第 I 部，第 2 章，pp.20-30 (2007).
- [2] Taillandier, P., Gaudou, B., Grignard, A., Huynh, Q.-N., Marilleau, N., P. Caillou, P., Philippon, D., & Drogoul, A. (2019). Building, composing and experimenting complex spatial models with the GAMA platform. *Geoinformatica*, (2019), 23 (2), pp. 299-322, [doi:10.1007/s10707-018-00339-6]
- [3] 土肥学，曾根真理，瀧本真理，小川智弘，並河良治：自動車走行時の二酸化炭素排出係数及び燃料消費率の算定，国土技術政策総合研究所資料，第 671 号，第 8 項 (2012).
- [4] 山根承子：ナッジする仕掛け，人工知能学会誌，Vol.28，No.4，pp.596-600 (2013).