

# 交通流シミュレーションを用いた 自律型自動運転自動車の交通流への影響分析 ～金沢市・珠洲市を例にして～

工保 淳也<sup>1</sup>・藤生 慎<sup>2</sup>・高山 純一<sup>3</sup>・中山 晶一朗<sup>4</sup>

<sup>1</sup>学生会員 金沢大学院 自然科学研究科 環境デザイン学専攻 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

E-mail: jeep5528@gmail.com

<sup>2</sup>正会員 金沢大学助教 理工研究域 環境デザイン学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

E-mail: fujii@se.kanazawa-u.ac.jp

<sup>3</sup>フェロー会員 金沢大学教授 理工研究域 環境デザイン学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

E-mail: takayama@staff.kanazawa-u.ac.jp

<sup>4</sup>正会員 金沢大学教授 理工研究域 環境デザイン学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

E-mail: nakayama@staff.kanazawa-u.ac.jp

自動運転自動車は社会の交通モードを大きく変革させる可能性を秘めており、多くの企業・研究機関がそのシステム開発に取り組んでいる。自動運転の社会実装に関する研究もおこなわれているが、走行環境をあらかじめ設定するなど制約条件がなされた上での実験にとどまっている。そこで本研究では実際の道路網、交通量、本学が開発・所有している自律型自動運転車の挙動アルゴリズムをシミュレーション上で再現し、交通流に与える影響を明らかにした。本研究では都市部と地方部を対象に一般車両が次第に自動運転自動車に置き換わっていくシナリオでシミュレーションを行った。現実の交通環境への自動運転自動車の混入率を変化させOD間の遅延時間計測することで自動運転自動車の交通流への影響を評価した。分析結果は、自動運転自動車の混入率が増加していくとOD間の遅延時間は増加し混入率が一定割合を超過すると次第にOD間の遅延時間が減少する結果となった。この結果から、自動運転自動車を社会実装する際、自動運転自動車の混入率が交通流に与える影響があるため、適切な普及シナリオの設定や普及地域の設定などの必要性が示唆された。

**Key Words :** *autonomous vehicle, Traffic stream, simulator, Aimsun, Social receptivity*

## 1. 本研究の背景・目的

近年、社会では新たな交通システムの1つとして、自動運転自動車が注目されている。これまでの自動車交通を大きく変える交通モードである。自動運転自動車に関しては機械工学的な側面から車両開発が各業界で行われ技術がしのぎをけずっている。一方、自動運転自動車は、従来の交通システムに対して大きなインパクトを与える交通システムの1つであるとともに、社会への導入には大きな意義がある。

自動運転自動車が社会に実装されるということには多くのメリットが挙げられるがその中でも多くの人々が期待していることは以下の2つに集約されるであろう。

1つめは運転の安全化である。例えば、自動運転機能とはセンサーやカメラによって機械が自動的に走行判定

を行うため人為的なミスによる事故の削減が期待される。これにより運転者に要求される運転技能は低下し、経験の浅い子供や動体視力の低下した高齢者でも、一般的な運転者よりも多くの制約事項が課せられる可能性はあるが運転が可能となることが期待される。

次に、運転の高速化・効率化である。自動運転車はセンサーの精度に依存するが、360°の方向に対しても運転の障害となりえるものを感知し、更には人が視覚で感知できない遠方まで判定領域を持つためより高い速度で走行を行っても十分に安全性を確保することができる。また、人が運転を行うよりも車両間隔を詰めるなど、効率のよい走行を行うことで、交通渋滞の低減や環境負荷の削減が期待される。

以上のように、自動運転自動車が社会に普及すると、

これまでの多くの交通問題を解決できるだけでなく、これまでの交通の概念を大きく変えることとなりうる。

自動運転に関する研究はこれまで数多く行われてきた。自動運転自動車の交通環境での適用可能性について検討した研究事例は、室内に自動運転自動車の運転環境を構築したもの、リアルタイムに自動運転自動車の挙動を再現したもの、自動運転シーンを再現したものなど、自動運転自動車を実際に運転した際のドライバーの挙動を把握するためのシステム構築が主に行われている。一方、自動運転自動車を交通流シミュレーション上に再現し、交通流への影響を評価した研究はほとんどなく、自動運転自動車をモデル化した事例に留まっている。このような自動運転自動車を取り巻く既往研究を整理した上で、本研究では、交通流シミュレーション(Aimun8.0)上に自動運転自動車を走行させるアルゴリズムを構築し、自動運転自動車を実際の交通環境に導入する際の、交通流へのインパクト評価することを目的とした。



図-1 金沢大学が所有する自律型自動運転自動車

## 2. 自律型自動運転自動車について

### (1) 自律型自動運転自動車の概要

本研究では著者らが所属する大学の機械系の研究室で開発している自動運転自動車の挙動アルゴリズムを開発し、交通流シミュレーションソフトに組み込んだ。本節では、本研究で対象とした自動運転自動車を概説する。

自動運転自動車では、通常のドライバーが行っている認知・判断・操作といった一連の運転行動を車両に搭載したセンサやコンピュータを用いてその機能を代替させる必要がある。このため、その実現には高度な情報処理能力と信頼性が必要となる。図1に示す試験車両には、1台の全方位高分解能レーザレンジファインダ(Velodyne社 HDL-64E S2)、6台のレーザレンジファインダ(IBE社 LUX fusion system)、9台のミリ波レーダ(富士通テン社製)、1台の単眼カラーカメラ、GNSS/INS 複合航法システム(Applanix社 POS-LV220)等の多くのセンサが搭載されている。また、これらのセン

サを用いて車両周辺環境や自動運転自動車の自己位置推定等を高精度に行うことで走行を実現している。本研究で対象とする自動運転自動車はレーザレンジファインダ(IBE社 LUX)を用いて走行可能空間の認識と移動物体の抽出を行うことでは高精度に自己位置を推定している。また自動運転中にカメラを用いて複数の信号機を同時に認識しつつ、交差点への進入判断を行い走行している。これらの技術を組み合わせることで市街地を含む10 km以上の公道で自律走行可能であることを確認している。

### (2) 珠洲市における実証実験

2015年2月21日に珠洲市と金沢大学が共同記者説明会で計画概要を発表し、日本初の普通乗用車型の自律型自動運転自動車(高度有人運転支援システム搭載)を用いた市街地における社会的実証実験が、2月24日、珠洲市内で開始された。

国内の大学が、自治体と連携の上、継続的に自律走行型の自動運転自動車を利用した歩行者や他の車両も通行する一般公道での社会的実証実験は、わが国では初めての先駆的な試みとなる。

この実証実験では、市街地環境をも走行可能な自律型自動運転知能を開発することを目的としており、将来の交通事故低減・高齢者等の移動支援に資する高度な運転支援システムの技術開発を促進させ、また、地方創生や超高齢化社会への対応の観点から、珠洲市を代表とする地域課題の将来的な解決に貢献することが期待されている。



図-2 新実験ルート

また、2015年10月27日には、金沢大学と石川県珠洲市が連携して実施している自律型自動運転自動車(高度有人運転支援システム搭載)を用いた市街地における日本初の社会的実証実験について、研究開発をより加速させるため、実験ルートを延長することとなった。

同プロジェクトは、市街地環境をも走行可能な自立型自動運転知能を開発することを目的とするものである。本研究における実験ルートについて、さまざまな道路環

境・交通状況に即した4コースを新たに設定・拡充し、従来の約6Kmから10倍近い延べ約60Kmへ延長した。

登坂車線やトンネル，ループ橋などのこれまでの実験ルートにはない環境での実証実験をとおして研究開発をさらに促進し，我が国の自動運転技術における国際競争力の強化を図るとともに，地方創生や超高齢社会といった地域課題の将来的な解決に貢献することが期待されている。

### 3. 自動運転自動車の社会受容性の評価

#### (1) 交通流シミュレータAimsunの概要

まずは今回用いる交通シミュレータAimsunの概要について述べる。

Aimsun (エイムサン) はスペインのTSS社で開発された世界トップレベルの高機能交通シミュレータである。マイクロシミュレーション，メソシミュレーション，ハイブリッドシミュレーション及び交通需要モデルなどを一体的に，一つのアプリケーションで取り扱うことのできる総合的な交通シミュレーションプラットフォームとなっている。

Aimsun (エイムサン) では，状況に応じてODモデルまたは分岐率モデルを選択することが可能である。ODモデルなら，分岐率などの前提条件を与えなくても，経路選択が必要なシミュレーションが可能である。そのため今回は新交通システムとして自動運転を導入した際にどのように交通流が変化するかを考察するため本ソフトを用いた。



図-3.1 対象ネットワーク (珠洲市)



図-3.2 対象ネットワーク (金沢市)

#### (2) ネットワークデータ

まず珠洲市に関しては総延長約3kmの珠洲市役所を中心とした交通ネットワークを作成した(図-3.3)。更に車両はH22交通センサスを参照し，各セントロイド(車両が発生・集中する点)に配分した。

次に金沢市に関しては金沢駅を中心とし，県道レベルでネットワークを作成した。車両に関してはH17PT調査を用いた。方法としては，各ゾーンにセントロイドを配置し，そのゾーンに重複するリンクにダミーリンクを接続し，車両が発生・集中させている。

#### (3) 自律型自動運転自動車の運転挙動アルゴリズム

##### a) 追従理論

Aimsun上では車両挙動アルゴリズムにGippsの追従式理論を用いている。以下に式を示す。

$$Va(n,t+T) = V(n,t) + 2.5a(n)T \left(1 - \frac{V(n,t)}{Ve(n)} \sqrt{0.025 + \frac{V(n,t)}{Ve(n)}}\right) \quad (1)$$

$V(n,t)$ : 時間  $t$  における車両  $n$  のスピード

$Ve(n)$ : 車両  $n$  の期待される速度

$a(n)$ : 車両  $n$  の最大加速度

$T$ : ドライバーの反応速度

$$Vb(n,t+T) = d(n) +$$

$$\sqrt{d(n)^2 T^2 - d(n) \left[ 2\{x(n-1,t) - s(n-1) - x(n,t)\} - V(n,t)T - \frac{V(n,t)^2}{d'(n-1)} \right]} \quad (2)$$

$d(n)$ : 車両  $n$  の最大減速度

$x(n,t)$ : 車両  $n$  の時間  $t$  における位置

$s(n-1)$ : 車両  $n-1$  の車両の長さ

$d'(n-1)$ : 推定される車両  $n-1$  の期待される減速度

以上の2つの式によって導かれる値を比較して，小さいほうが採用される。

$$Va(n,t+T) = \min(Va(n,t+T), Vb(n,t+T)) \quad (3)$$

一方で、自律型自動運転自動車の速度は自動運転車の前方を走行する車両との車両間隔に依存する。

b) 車両間隔

Aimsun 上の車両間隔の計算式を以下に示す。

$$VehicleInterval = \frac{V_2^2}{2b} - \frac{V_1^2}{2b} + 1.5V_2RTL \quad (4)$$

- b : 減速度
- RT : 反応速度
- L : 車両長さ+前の車両との停止時の最小間隔

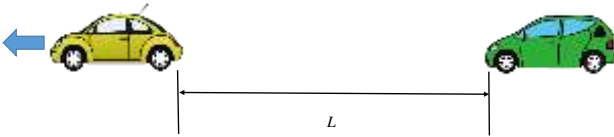


図-3.4 直進時の車両間隔

本研究で取り扱う自律型自動運転自動車の車両間隔は以下に式によって決定される

$$VehicleInterval = 5 + \text{車両長} \times TTC \quad (5)$$

TTC : Time To Collision : 先行車両との車間距離を相対速度で除した値  
 今回取り扱う自律型自動運転自動車ではあらかじめ TTC を 2(s) と設定している。

c) 減速開始距離

減速開始位置から停止位置までの距離を  $l$  とすると

$$l = \frac{1}{2a} V^2 \quad (6)$$

によって停止位置が計算される。

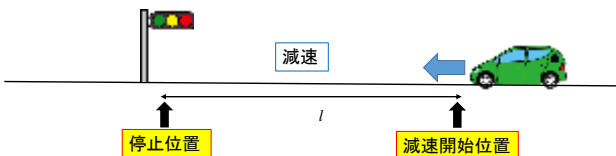


図-3.5 停止開始条件

d) 右左折判断

右左折は以下の式条件を満たした時に開始される。

- ① 一時停止後 1.5s 以上経過後
- ② 5s 以内に走行ルートに対向車両が通過しなければ発進

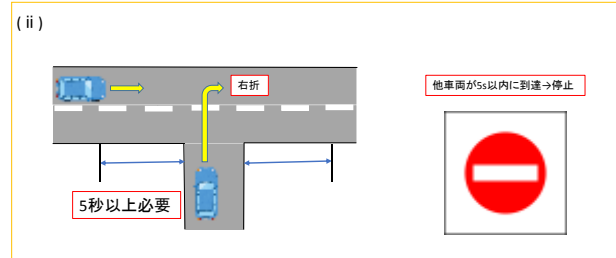


図-3.6 右左折開始条件

4. シミュレーション結果

本研究で対象とした珠洲市と金沢市を選んだ背景については、現在、実際に金沢大学が所有している自動運転車の走行実験を行っている珠洲市は社会実装が比較的早いと推測されること、また、珠洲市という地方部と金沢市という都市部では交通流に与える影響に差があるのかということを明らかにしたかったためである。今回のシミュレーションは自動運転車の混入率を次第に増加させている。これはまず、自動運転車が一般市民にも購入可能になったという前提のもと、車両数が全体に対して増加していく時系列的变化を捉えようという狙いである。そして増加していく中で、交通流の混雑具合を観察し、自動運転車がポジティブ/ネガティブどちらの影響を及ぼすのかを観察するために今回は遅れ時間をパラメータとして採用した。この遅れ時間とは車両が目的地に到着するであろうと期待された時間と実際にかかった時間との差を1km当たりで算出したものである。これを比較することで車両の混雑具合を判定する。

また全体の中で一般車と自動運転車それぞれの遅れ時間も比較した。これは車両の特性により遅れ時間の変化の傾向に違いがあるのかを観察するためである。

(1) 地方部におけるシミュレーション結果

まず珠洲市に関しては公共交通機関が無いことと高い高齢化率を考慮し、一般車に比べて、反応速度の遅い車両を作成し、珠洲市の高齢化率を参考に45%混入している。シミュレーションはそれぞれの混入率に対して3回ずつ検証を行った。図4.1.4.3に自動運転車の全体、自動運転車のみ、一般車両のみの遅れ時間の結果を示す。

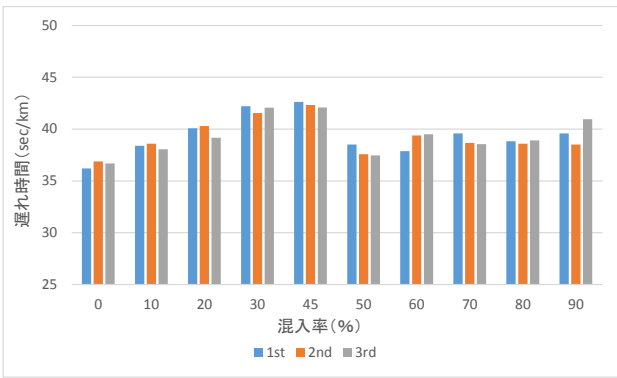


図4.1 自動運転車の混入率ごとの全体の遅れ時間 (珠洲市)

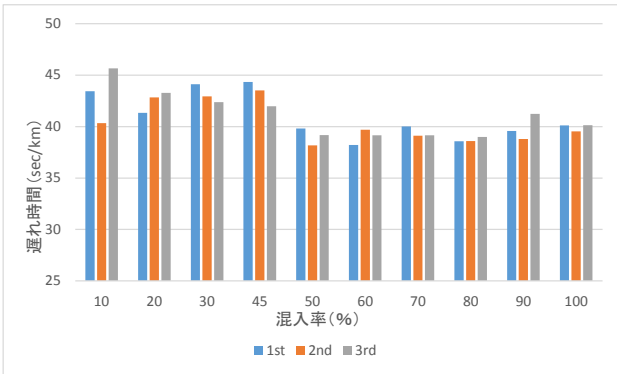


図4.2 自動運転車の混入率ごとの自動運転車の遅れ時間 (珠洲市)

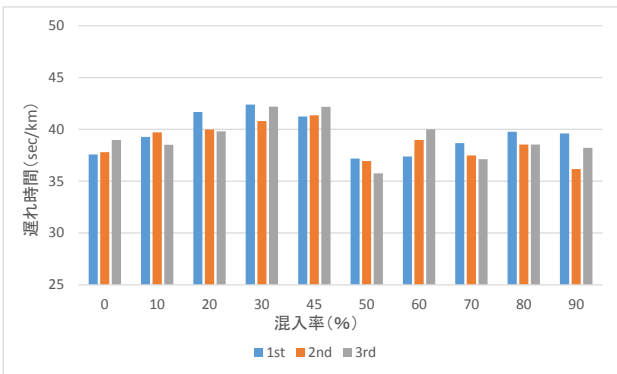


図4.3 自動運転車の混入率ごとの一般車の遅れ時間 (珠洲市)

まず全体自動運転車の混入率を増加させていくと遅れ時間が増加し、混入なし（混入率0%）パターンに対して最大で約1.16倍の遅れ時間が発生した。次に50%を超えると遅れ時間は減少傾向が見られ、3回の平均を取り計算を行うと、最小で約1.03倍となった。次に一般車両は、最大で約1.10倍を取り、50%を超えるとやや減少し、最小で約0.99倍となった。最後に自動運転車は最大で約1.18倍を取り、50%を超えるとやや減少し、最小で約1.05倍となった。傾向としては双方の車両とも全体の傾向に対して同様の変化が見られた。

## (2) 都市部におけるシミュレーション結果

次に金沢市に関して、順次混入率を増加させ、変化を観察した。シミュレーションはそれぞれの混入率に対して先ほどと同様に3回ずつ検証を行った。図4.4-4.6に全体、自動運転車、一般車両の遅れ時間の結果を示す。

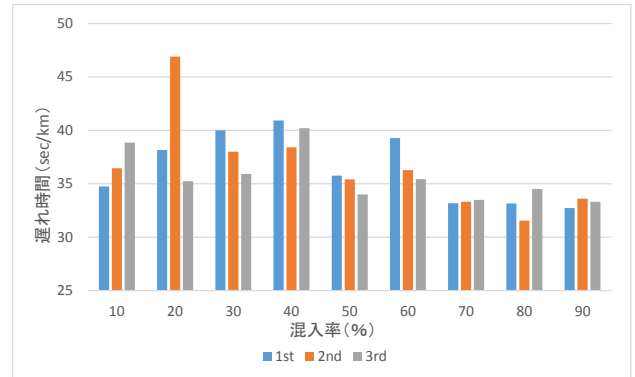


図4.4 自動運転車の混入率ごとの全体の遅れ時間 (金沢市)

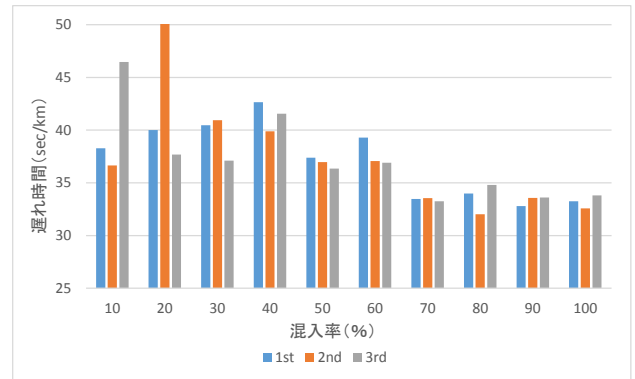


図4.5 自動運転車の混入率ごとの自動運転車の遅れ時間 (金沢市)

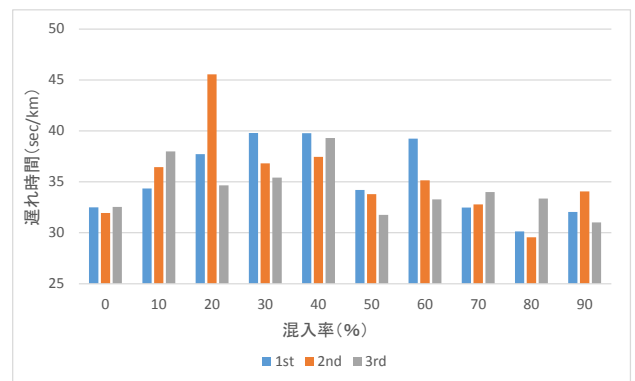


図4.6 自動運転車の混入率ごとの一般車の遅れ時間 (金沢市)

まず全体に関しては、珠洲市と同様に自動運転車の混入率を増加させていくと次第に増加し、最大で混入率が20%の際に最大で現況再現時の約1.24倍の遅れ時間が発生した。その後混入率を増加させていくと混入率70%時に1.03倍となりその後はほぼ混入なしパターン近くにまで減少する結果となった。次に一般車両は、最大で約1.34倍を取り、70%を超えるとやや減少し、最小で約1.03

倍となった。最後に自動運転車は最大で約1.21倍を取り、70%を超えるとやや減少し、最小で約0.96倍となった。傾向としてはこちらも双方の車両とも全体の傾向に対して同様の変化が見られた。

両者を比較するとわずかではあるが金沢市の方が遅れ時間の増加割合が高く、減少傾向が表れるまでにより多くの自動運転の混入率を要した。このことは車両数が多い都市部のほうが地方部に比べて自動運転車の影響が大きく、混雑が発生しないようになるまでに時間を要することが明らかとなった。また、各車両特性に関しては両者同様の傾向を示した。

一方で金沢市と珠洲市を比較すると、自動運転車の実装が社会的に進むと初期段階では交通混雑が増加する可能性があるが、全体に対する割合が一定割合を超えると混雑は減少し、最終的に交通の最適化が行えるのではないかと示唆できた。

## 5. まとめと今後の課題

まず、本研究で取り扱う自律型自動運転自動車を Aimsun に読み込むために自律型自動運転自動車の運転アルゴリズムを整理し、そのアルゴリズムを Aimsun 上に再現した。そしてシミュレーションを行い本研究で取り扱う自動運転自動車が普及した際の時系列変化を明らかにした。この結果から本研究で取り扱う自動運転車に関しては、一般車との共存時にやや交通容量の低下を引き起こすが、普及が進むにつれて解消の方向に向かうということが明らかになった。今後は様々な都市でのシミュレーションを行うことで、本研究の示した方向性があらゆる都市でも成り立つのかどうかを検証する必要があるだろう。また、社会に実装されていく自動運転車は勿論だが一種類ではないため、各車両特性のシミュレーションも必要になるであろう。更に今回は単純に一般車両を自

動運転車に置き換えるというものであったが、自動運転システムが普及することでカーシェアリングや公共交通機関への応用が進み、全体の交通量を変化させる可能性がある。それを考慮した上での交通量予測の必要性も考えられるであろう。なお、本研究の一部は、総務省戦略的情報通信研究開発推進事業 (SCOPE) の支援を受けて行われた。

SCOPE: Strategic Information and Communications R&D Promotion Programme

謝辞：本研究を進めるにあたって、多くの方々から貴重なご指導とご助言を賜りました。また本研究で取り扱う自律型自動運転システムを開発され、データなどを提供いただきました金沢大学計測制御研究室の皆様には謝意を表させていただきます。

## 参考文献

- 1) 工保淳也, 藤生慎, 高山純一, 中山晶一郎: 自動運転自動車の社会受容性に関する基礎的研究—石川県での実証実験を通じて— 平成28年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集, CD-ROM, 2016
- 2) 工保淳也, 藤生慎, 高山純一, 中山晶一郎: 交通流シミュレータを用いた自律型自動運転自動車の社会受容性の分析, 土木計画学研究・講演集, Vol.53, CD-ROM, 2016
- 3) Naoki Suganuma, Daiki Yamamoto and Keisuke Yoneda. *Localization for Autonomous Vehicle on Urban Roads*. Journal of Advanced Control, Automation and Robotics (JACAR), 1 (1): 47-53, 2015 ISSN 2186-9154.

## ANALYSIS OF AUTONOMOUS VEHICLE ON TRAFFIC FLOW USING TRAFFIC FLOW SIMULATION-EXAMPLE OF KANAZAWA CITY AND SUZU CITY-

Junya KUBO, Makoto FUJII, Junichiro TAKAYAMA and Shoichiro NAKAYAMA