

# 自動運転バスが混在する道路空間における 一般車の挙動特性分析

岩尾 駿平<sup>1</sup>・鈴木 弘司<sup>2</sup>・鈴木 一史<sup>3</sup>

<sup>1</sup>学生会員 名古屋工業大学大学院 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

E-mail: s.iwao.939@stn.nitech.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 名古屋工業大学大学院准教授 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

E-mail: suzuki.koji@nitech.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 群馬工業高等専門学校環境都市工学科 (〒371-8530 群馬県前橋市鳥羽町580)

E-mail: ksuzuki@gunma-ct.ac.jp

近年、自動運転システムの導入への機運が高まっており、低速度で走行する自動運転バスの実証実験が各地で行われている。自動運転車両の挙動が一般車に与える影響や混在時の交通状況について、シミュレーションを用いた研究は行われているものの、一般道路での実測データを用いた実証的な研究は少ない。

本研究では群馬県前橋市で行われた自動運転バスの実証実験から得られた映像データより、単路部における自動運転バスに対する後続一般車両の挙動特性を追従挙動、追い抜き挙動、追い越し挙動の3つに分類し、分析する。また、自動運転バスに対する一般車両の追従挙動モデルを構築し、人間の運転するバスに対する追従挙動モデルと比較することで、自動運転バスが後続交通流に与える影響を明らかにする。

**Key Words** :Autonomous Bus, Vehicle Movement, Traffic Flow, Demonstration Experiment

## 1. はじめに

近年、自動運転システムの技術的な可能性が高まっていくにつれ、一般道での社会実験が盛んに行われている。2022年4月には、自動運転レベル4（高度運転自動化）を解禁する道路交通法の改正案が国会で成立し、今後の自動運転導入に向けた動きがより一層加速していくと考えられる。我が国における交通死亡事故発生件数の多くが運転者の違反（ヒューマンエラー）に起因することから、自動運転技術の実用化により、これらのヒューマンエラーに起因する交通死亡事故が大幅に削減されることが期待されている。

公共交通機関として公道を走るバスも、自動運転バス（Autonomous Bus, 以降、「AB」）として全国各地で実証実験が行われている。ABの挙動が人間の運転する一般車両と大きく異なる場合、人間が運転する車両との混在時に交通流に対して思わぬ影響を与える可能性が考えられる。

自動運転車の混在に関する研究として、鰐部<sup>1)</sup>は交差点の直進車線の交通容量に与える影響をシミュレーションとモデル式を用いて分析し、自動運転車の混入率が高くなるにつれ信号のサイクル長を短くできるが、自動運転車のパラメータを慎重な設定にすることで円滑性が

低下する可能性を示唆した。島田・森本<sup>2)</sup>は自動運転車の混在交通流を交通シミュレータ上で再現し、交通流の円滑性・安全性を評価した結果、自動運転車両の混在率やパラメータの違いにより、交通流への影響が大きく異なることを明らかにした。

このように交通シミュレーションを用いて交通流を評価する研究は多くみられるが、一般道路における実測値を用いた研究事例は限られている。香山・鈴木<sup>3)</sup>は単路部と信号交差点において、自動運転車両と一般車両との挙動の相違と交通流に与える影響を分析した。その結果、自動運転車両は単路部において高い速度維持性能を保有していること、交差点においては信号への反応時間が長く、自動運転車両が混入することで交通流率がわずかに低下することを明らかにした。また、中井<sup>4)</sup>は実証実験での観測調査で収集したデータを用いて、低速自動運転車両が交通流及び後続車両に与える影響を分析した。その結果、信号交差点では車頭時間の増加、通過交通量の減少がみられ、単路部では自動運転車両の後続車両における車間距離が著しく小さくなる傾向が確認されている。これらの研究のように、自動運転車両が一般道路を走行した場合の交通流や挙動の特性を分析した研究事例はあるものの、特に自動運転車両に対する一般車両の詳細な挙動分析や車長や車高が大きいABに関する研究は

少ない。

そこで、本研究では群馬県前橋市で行われたABの実証実験から得られた映像データより、単路部と信号交差点部におけるABに対する後続一般車両の挙動特性を分析する。また、ABに対する一般車両の追従挙動モデルを構築し、人間の運転するバスに対する追従挙動モデルと比較することで、ABが後続交通流に与える影響を明らかにする。



図-1 実験で使用された自動運転バス車両

## 2. 調査概要

群馬県前橋市にて2020年1月10日から3月1日の土日祝日にかけて、前橋市、群馬大学、日本中央バス株式会社により自動運転による路線バスの実証実験が実施された。実証実験に使用された車両は日野のポンチョを自動運転車両に改造したものであり、写真を図-1に示す。走行ルートは上毛電鉄中央前橋駅前—JR前橋駅前—けやきウォーク前橋間の約2.3kmで、地図上に表したものを図-2に示す。なお、図中の水色線は走行ルートである。この実験では、ABの車体に取り付けたセンサーが車間距離を認識し、車体上部の全方位カメラが信号の色を検知するシステムで、ハンドル操作や加速、減速を自動で行う。非常時に運転を担当するテストドライバーが運転席に乗っている状態ではあるものの、先導車・追走車のいない単独走行である。また、この実験は試験運用ながらも実際に運賃を収受して旅客を乗せる実践的なものであった。



図-2 実証実験の走行ルート

実証実験期間中の2020年2月23日9:00～17:00、24日9:00～12:00の2日間、ビデオ観測調査を行った。ABおよび一般車両の挙動を取得するために、単路部においては上毛電鉄中央前橋駅前—JR前橋駅前間を対象として、1箇所の交差点に設置された歩道橋の上等から計4台のビデオカメラを設置した調査を行った。信号交差点部においては前橋駅前交差点と本町交差点の2交差点でビデオ観測調査を行った。各調査地点の概要を図-3、図-4に示す。



図-3 前橋調査地点(単路部)

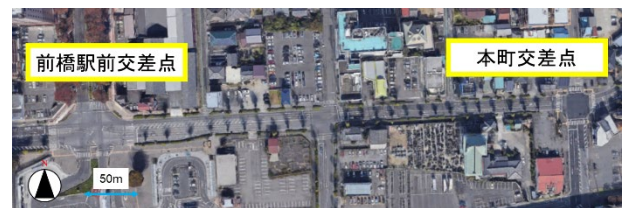


図-4 前橋調査地点(信号交差点部)

## 3. 単路部における後続一般車両の挙動特性分析

本章では、ABの後方から接近する一般車両の挙動を分析し、特徴を掴むとともに人間が運転する車両との違いを明らかにする。

### (1) 分析方法

分析する上で後続の一般車両を3つの挙動に分類する。ABの前に出ず後をついていく車両挙動を「追従挙動」、ビデオの画角内全体においてABと異なる車線を走行し、ABを追い抜いた車両挙動を「追い抜き挙動」、画角内

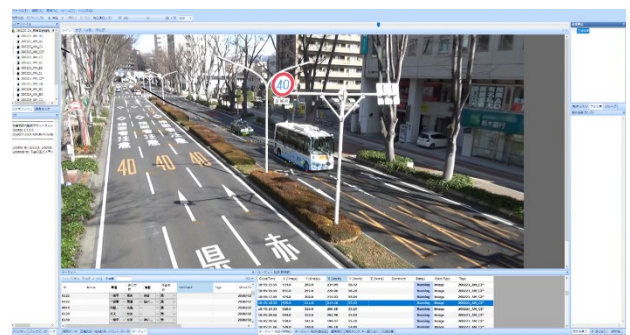


図-5 George使用画面

でABと同一の車線から車線変更を行い、追い越し意思があった車両挙動、もしくはABを追い抜いた直後にABの走行車線へ車線変更した車両挙動を「追い越し挙動」と定義し、以上の条件を満たさなかった一般車両は調査対象から除外している。また、ABは自動運転モードでは区間内を基本的に20km/h前後で走行しているのに対して、35km/h以上の高速度で走行していたケースがみられたため、その場合は手動運転モードでの走行と判断し、調査対象から除外している。本ビデオデータ分析は動画解析ソフト「George」<sup>9)</sup>を用いている。Georgeでのデータ取得方法を図-5に示す。

今回は同区間を走行している路線バスについても、ABと同様な方法でデータを取得しており、後続の一般車両の挙動の違いについて比較する。ただし、路線バスのデータ取得対象はバス停への停止挙動や減速挙動がみられない自由走行車両としているが、追い越し挙動の取得データが少なかつたため、追従挙動と追い抜き挙動のみ比較している。

調査対象となったデータ数は全体で62件で、その内、追従挙動が33件、追い抜き挙動が24件、追い越し挙動が5件となっており、約半数の53%が追従挙動を示している。

(2) 追従挙動

まず、区間の南北の方向別にABに対して追従挙動を行った一般車両の追従時間、ABとの速度差、追従中のABとの車間距離の平均値と検定結果を表-1に示す。

表-1より、どの項目に対しても北進と南進で有意な差はみられなかった。速度差でみると南進は負となっていることから、南進では前方車の速度の方が高いため追従時間や車間距離が大きくなっていると考えられる。

次に、追従時の前方車がABか路線バスに追従している一般車両かどうかで区分して測定した追従時間、速度差、車間距離の平均値と検定結果を表-2に示す。

表-2より、前方車がABと一般車両で有意な差はみられなかった。しかし、速度差に着目すると、前方車がABであると速度差が正の値になることからABよりも高い速度で追従している可能性が考えられる。

最後に、ABに追従している場合と路線バスに追従している場合での比較を行う。同様に測定した一般車両の追従時間、速度差、車間距離の平均値と検定結果を表-3に示す。

表-3より、すべての項目においてABか路線バスかで有意な差がみられた。特に、路線バスの平均車間距離が大きく、速度差も負の値となっている。これは路線バスがABと比較して高い速度で走行しているため、後続の車両が追従しつつ離されながら走行した結果と考えられる。

表-1 南北方向別の挙動データ

北進N=26 南進N=7	追従時間(s)		速度差(km/h)		車間距離(m)	
	北進	南進	北進	南進	北進	南進
平均値	18.33	20.82	0.47	-0.22	18.10	21.25
P値	0.50		0.51		0.23	

表-2 前方車別の挙動データ

AB N=19 一般車N=14	追従時間(s)		速度差(km/h)		車間距離(m)	
	AB車両	一般車両	AB車両	一般車両	AB車両	一般車両
平均値	18.48	19.38	0.81	-0.34	19.36	17.95
P値	0.75		0.26		0.43	

表-3 路線バスとの比較 \*：10%、\*\*\*：1%有意

AB N=33 路線バス N=19	追従時間(s)		速度差(km/h)		車間距離(m)	
	AB	路線バス	AB	路線バス	AB	路線バス
平均値	18.86	22.72	0.33	-2.61	18.76	34.61
標準偏差	7.74	5.86	3.11	3.87	5.37	9.55
P値	0.053*		0.0097***		8.62 × 10 <sup>-7</sup> ***	
χ <sup>2</sup> 値	9.41***		12.96***		21.54***	

表-4 路線バスとの比較（追い抜き挙動） \*\*\*：1%有意

AB N=24 路線バス N=18	追い抜き時間(s)		速度差(km/h)		最高速度(km/h)	
	AB	路線バス	AB	路線バス	AB	路線バス
平均値	10.76	11.06	25.11	26.38	53.06	70.83
標準偏差	2.84	3.06	6.95	6.37	10.31	9.99
P値	0.75		0.55		3.14 × 10 <sup>-6</sup> ***	

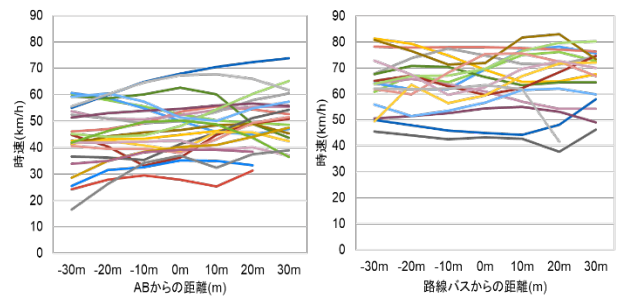


図-6 距離別速度分布図

表-5 追い越し挙動の整理

追従状態N=5	追従時間(s)	速度差(km/h)	車間距離(m)
平均	5.37	8.78	31.98
標準偏差	2.33	13.55	20.99
変動係数	0.43	1.54	0.66
追い越し状態 N=5	追い越し時間 (m)	速度差(km/h)	最高速度(s)
平均	9.55	24.86	56.86
標準偏差	1.42	6.81	7.48
変動係数	0.15	0.27	0.13

(3) 追い抜き挙動

追い抜き挙動の定義は、ABに対して一般車両が後方30mから前方30mの位置へ移動するまでとする。今回は、一般車両がABを追い抜く場合と路線バスを追い抜く場合での比較を行う。追い抜き挙動を行った一般車両の追い抜き時間、速度差、最高速度の基本統計量と検定結果

を表-4に示す。また、一般車両のABと路線バスからの距離に対する速度分布を比較したものを図-6に示す。

表-4より、追い抜き時間や速度差に関しては違いがみられなかったが、最高速度では有意な差がみられた。図-6より、路線バスの場合、全体的に高い速度分布であり、ほぼ全ての車両が制限速度である40km/h以上で追い抜き挙動を行っていることが分かった。

(4) 追い越し挙動

追い越し挙動は、追い越しのために加速、または車線変更のために白線を踏んだ時点で測定を開始し、追い越した後、ABから30m離れるまでを追い越し状態、それまでの追従挙動を追従状態として分類、測定する。状態別に計測した走行状態量の結果を表-5に示す。

表-5より、追従時間が表-3の追従挙動の追従時間と比較して10秒以上も短いことが分かった。追従速度も高いため、追い越し挙動を行う車両は、ABに接近した時点で追い越す意思があったと考えられる。

4. 追従挙動モデルによる追従車への影響分析

本章では、追従挙動特性を詳細に分析するため、今回のビデオ観測調査で得られたデータを用いて、ABと路線バスそれぞれの追従挙動モデルを構築する。今回は、ABを追従する33ケースと路線バスを追従する19ケースのデータが追従モデルのパラメータ推定の対象となる。

(1) 追従挙動モデルの構築

本研究で扱う追従挙動モデルは車頭距離を考慮できるのに加え、追従モデルの中でも式の構造がシンプルなモデルの一つであり、得られているデータからパラメータの推定が容易なものを選択する。こうした条件に見合う追従挙動モデルとして、式(1)に記すHellyモデル<sup>6)</sup>を適用する。

$$\ddot{x}_0(t + \Delta t) = a_1(\dot{x}_1(t) - \dot{x}_0(t)) + a_2(x_1(t) - x_0(t)) + a_3 \tag{1}$$

ここで $\ddot{x}_0(t)$ は時刻 $t$ における追従車の加速度、 $\dot{x}_0(t)$ は時刻 $t$ における追従車の速度、 $x_0(t)$ は時刻 $t$ における追従車の位置、 $\dot{x}_1(t)$ は時刻 $t$ における前方車の速度、 $x_1(t)$ は時刻 $t$ における前方車の位置を表す。 $\Delta t$ は相対速度・車頭距離の入力刺激に対する加速度が出力されるまでの反応遅れ時間、 $a_i(i=1,2,3)$ はパラメータを表す。ただし、ここでいう車両の位置は動画解析ソフトのデータ取得上の設定から車両の中心部としている。 $a_1$ は前方車との相対速度に対する加速度の反応強度を示すパラメータ、 $a_2$ は前方車との車頭距離に対する加速度の反応強度を

表-6 追従挙動モデルのパラメータ平均値

AB N=28 路線バス N=18	$a_1$		$a_2$		$\Delta t$ (s)	
	AB	路線バス	AB	路線バス	AB	路線バス
平均	0.383	0.321	0.019	-0.023	1.56	1.51
標準偏差	0.319	0.171	0.141	0.075	0.49	0.50
P値	0.41		0.20		0.72	

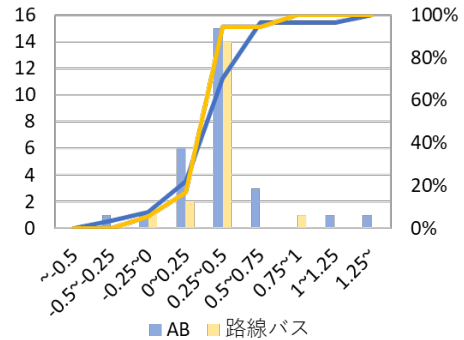


図-7  $a_1$ の累積度数分布図

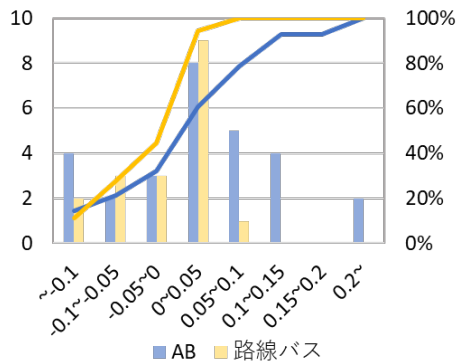


図-8  $a_2$ の累積度数分布図

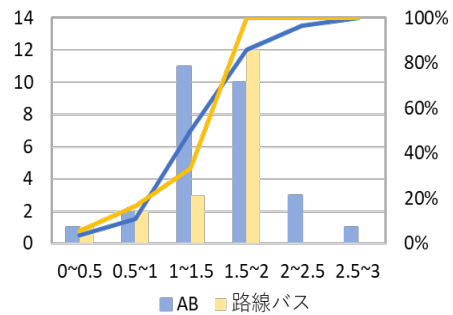


図-9  $\Delta t$ の累積度数分布図

示すパラメータである。

(2) 追従挙動モデルの推定方法

各時刻 $t$ における加速度を従属変数、相対速度、車間距離を説明変数として、最小二乗法によりパラメータを推定する。その際、説明変数に対し反応遅れ時間 $\Delta t$ を0.1秒から3.0秒まで0.1秒ずつ遅らせて推定を行い、決定係数が最大となるモデルを最適モデルとして、その時の遅らせた時間を $\Delta t$ の推定値とする。

また、測定した車両挙動に今回採用しているHellyモデルと大きく隔たりがあるため、最適なパラメータを推

定できない車両を除外する。条件として推定されたモデルの決定係数が0.3未満のケースと追従時間内に決定係数が最大となる極値がないケースを除外する。

### (3) 追従挙動モデルパラメータ推定結果

推定されたパラメータ $a_1$ 、 $a_2$ と反応遅れ時間 $\Delta t$ をABと路線バス別に整理したものを表-6、累積度数分布図にまとめたものを図-7～図-9に示す。

表-6より、ABと路線バスの間でどのパラメータにも有意差はなかった。累積度数分布図から、 $a_1$ は分布に差がないため、追従者の加速度の相対速度の変化に対する影響はABと路線バスで差異がないと考えられる。 $a_2$ は有意差はみられなかったものの、ABの方が平均的に高く、パラメータが正であることが多い傾向があった。これは、一般車両がABを追従する場合、車間距離が大きくなると加速度が大きくなり、離れずについていこうとする意識が強いと考えられる。一般的にパラメータ $a_1$ 、 $a_2$ は正の値であり、今回はともに負の値が推定されている場合があるが、これはABが初見であるため、通常とは異なった追従挙動を示していると考えられる。反応遅れ時間 $\Delta t$ は路線バスの最頻値が1.5～2.0秒であるのに対し、ABの最頻値は1.0～1.5秒と小さい結果となっている。反応遅れ時間とは、追従車が相対速度、及び車間距離の変化を知覚してアクセル、もしくはブレーキ操作を行い、それが加減速度として反映されるまでの時間を意味する。このことから、追従する一般車両はABの相対速度や車間距離に対して即座に反応していると考えられる。

## 5. 信号交差点における後続一般車両の挙動分析

本章では、交差点部におけるABに後続している一般車両の挙動について分析し、進行方向による違いを確認する。今回の実証実験では、ABの走行ルートが設定されているため、交差点内で取得できる進行方向は各交差点で限られている。その点に留意し、本研究では4つの交差点で進行方向別の挙動データとして車頭時間を計測する。左折挙動のデータは前橋駅前交差点と本町交差点の2交差点で自由走行時と発進時の車頭時間を計測する。直進のデータは単路部調査区間に含まれる2交差点の発進時の車頭時間を計測する。なお、直進の自由走行時は単路部の分析と似通っている部分があることから除外している。車頭時間は原則交差点の停止線を基準としており、ABが交差点上流の先頭であったケースを測定している。それぞれの挙動について、ABを1台目として後続の2台目との車頭時間、2台目以降の車頭時間の平均値と検定結果を図-10に示す。ここで、先行研究<sup>3)</sup>のデータを

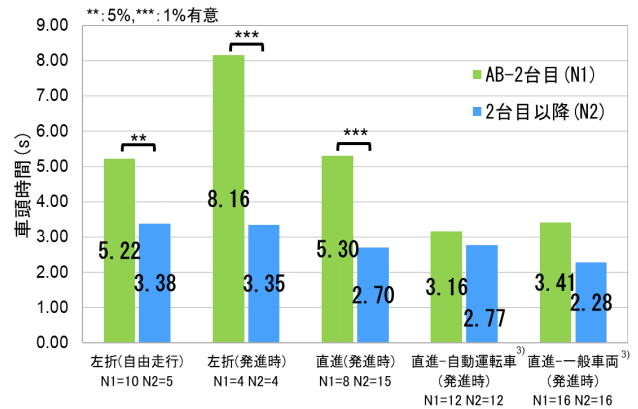


図-10 進行方向別車頭時間

を用いて、先頭がABではない小型自動運転車のケースと先頭が一般車両のケースの車頭時間を算出し、比較のため、同図に追加している。

図-10より、まず全体の挙動に着目すると、ABと2台目の車頭時間と2台目以降の車頭時間で有意な差がみられた。2台目以降の車頭時間はどの挙動でも変わらないことから、ABの挙動に対して慎重に交差点に進入していると考えられる。

次に、左折挙動に着目すると、自由走行に比べ発進時のABと2台目の車頭時間が3秒程度長いことが分かる。これは、発進時のABの速度が低いため、後続の一般車両が近づきすぎないように速度を制限して交差点に進入していると考えられる。

次に、直進挙動に着目すると、ABの1台目と2台目の車頭時間が小型の自動運転車や一般車両のケースと比較して長いことが読み取れる。これは、先頭がABであると車高の高さやABが発進に時間を要すると想定されるためABとの車間距離を空けていると考えられる。2台目以降の平均車頭時間については、自動運転車の車種による違いはみられず、2台目以降の平均車頭時間は一般車両と比べると自動運転車の方が0.4秒程度長いことが読み取れる。

これらから、交差点に進入する際、多くのABの後続一般車両は一定の車間距離を空けることから、交差点の1サイクルのさばけが悪くなり、全体の交通流にも悪い影響を及ぼす可能性が考えられる。

## 6. おわりに

本研究では、実証実験から得られた観測調査データに基づいて、単路部と信号交差点部におけるABに対する後続一般車両の挙動特性を分析した。また、ABに対する一般車両の追従挙動モデルを構築し、人間の運転するバスに対する追従挙動モデルと比較することで、ABが

後続交通流に与える影響について分析した。

得られた知見は以下の通りである。

- ・ 追従挙動の対象がABと路線バスで比較すると、路線バスの平均車間距離が大きく、高い速度で走行していることが分かった。
- ・ 追い越し挙動を行う車両は、追従時間が短く、追従速度も高いため、追い越し挙動を行う車両は、ABに接近した時点で追い越す意思があったと考えられる。
- ・ 追従挙動モデルの構築により、加速度の相対速度の変化に対する影響はABと路線バスで差異がないことが分かった。一方で、ABに対する車間距離が大きくなると加速度が大きくなり、離れずについていこうとする意識が強い傾向があることが示され、追従する一般車両はABの相対速度や車間距離に対して即座に反応していることが分かった。
- ・ 信号交差点においては、ABと後続一般車両との車頭時間が長く、後続車はABの挙動に対して注意しながら通行していると考えられることが分かった。

なお、得られた知見は、実証実験に使用されたABの速度や加速度調整などのパラメータの設定に依存しているところが大きく、ABに対する一般車両の挙動を取得する状況にばらつきがあることは否定できない。しかし、実際の一般道において自動運転バスと一般車両が混在する道路空間で、一般車両がどういった挙動を示し、影響を及ぼすのかを分析した点では、意義があるものと考えられる。

今後の課題として、得られたデータやパラメータを交通シミュレーション上で設定し、自動運転車が混在する道路空間では交通流へどのような影響を与えるかを分析

する必要がある。また、自動運転車や他のモビリティが混在する場合でも同様にどのような影響を与えるかを検討していく必要がある。

謝辞：本研究は、科研費・基盤研究（C）（20K04737）の一環として実施したものです。

#### 参考文献

- 1) 鱈部万磨, 柿元祐史, 中村英樹, 井料美帆: 自動運転車両の混在が信号交差点交通容量に与える影響に関する分析, 交通工学論文集 第 5 巻, 第 2 号(特集号 A), pp.A\_167-A\_175, 2019.
- 2) 島田大輔, 森本章倫: 自動運転車両が混在した一般道における交通流の円滑性・安全性評価に関する研究, 交通工学論文集 第 7 巻, 第 2 号(特集号 A), pp.A\_86-A\_93, 2021.
- 3) 香山裕紀, 鈴木弘司: 観測調査に基づいた自動運転車の挙動特性と交差点での交通流へ与える影響の分析, 交通工学論文集 第 5 巻, 第 2 号(特集号 A), pp.A\_20-A\_26, 2019.
- 4) 中井良輔, 小澤友記子, 中村俊之, 和田沙織, 森川高行: 低速自動運転車両走行時における交通流及び後続車両への影響分析, 交通工学論文集 第 7 巻, 第 4 号(特集号 A), pp.A\_40-A\_46, 2021.
- 5) 鈴木一史, 中村英樹: 交通流解析のためのビデオ画像処理システム Traffic Analyzer の開発と性能検証, 土木学会論文集 D, Vol62, No.3, pp.276-287, 2006.
- 6) Helly, W. : Simulation of Bottlenecks in Single Lane Traffic Flow. In Proceedings of the Symposium on Theory of Traffic Flow, Research Laboratories, General Motors, pp.207-238, 1959

(2022.?.?受付)

## ANALYSIS OF BEHAVIOR OF GENERAL VEHICLES IN ROAD SPACES WHERE AUTONOMOUS DRIVING BUSES COEXIST

Shumpei IWAO, Koji SUZUKI and Kazufumi SUZUKI

In recent years, the momentum for the introduction of autonomous driving systems has been increasing, and demonstration experiments of autonomous driving buses traveling at low speeds have been conducted in various places. Although research using simulations has been conducted on the impact of the behavior of autonomous driving vehicles on general vehicles and traffic conditions during mixing, there are few empirical studies using actual measurement data on general roads.

In this study, based on video data obtained from the demonstration experiment of the autonomous driving bus conducted in Maebashi City, Gunma Prefecture, the behavior characteristics of the following general vehicle relative to the autonomous driving bus in the single-road part are classified into three parts: following behavior, overtaking behavior, and overtaking behavior. In addition, by constructing a model of the following behavior of a general vehicle to an autonomous driving bus and comparing it with a model of the following behavior of a bus driven by a human, the influence of the autonomous driving bus on the subsequent traffic flow will be clarified.