

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

Impact Analysis of a Low-speed Autonomous Vehicle on Traffic Flow and Following Vehicles in Urban Contexts

中井 良輔¹, 小澤 友記子², 中村 俊之³, 和田 沙織⁴, 森川 高行⁵

Ryosuke NAKAI¹, Yukiko OZAWA², Toshiyuki NAKAMURA³, Saori WADA⁴, Takayuki MORIKAWA⁵

自動運転の技術開発が世界各地で進められ、実証実験や法整備が分野横断的に展開されている。本研究では、市街地一般道路にお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把握することを目的とする。具体的には、愛知県豊田市における実証実験での観測調査で収集したデータを分析した結果、信号交差点では低速自動運転車両が混入することで車頭時間が増加し、通過交通量が減少することが確認された。また単路部において、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見られた。低速自動運転の追従車両は、車間距離が小さい接近した追従を長時間行っていること、さらに多くの後続車両は、黄線にも関わらず、追い越しを実施することが明らかになった。

For the social implementing autonomous vehicles, technology development, demonstration experiments, and legislation are being promoted in the world. However, there are many challenges for introduction. The purpose of our research is to analyze and grasp the impact of low-speed autonomous vehicles on traffic flow and following vehicles in urban area. In particular, we analyzed the data collected by the observations in the demonstration experiment in Toyota City. As a result, it was clarified that the headway-time increases and the passing traffic volume decreases at a signalized intersection, when a low-speed autonomous vehicle is mixed in. Also, the intervehicular distance between the autonomous driving vehicle and the following vehicles tended to be significantly smaller in non-intersection. Further, it was clarified that the following vehicles of low-speed autonomous driving have been closed for a long time, and the following vehicles have overtaking in spite of the yellow line.

Keywords: 自動運転車両, 交通流, 実証実験, 低速走行

Autonomous Vehicle, Traffic Flow, Demonstration Experiment, Low-speed Driving

1. はじめに

現在世界各国において自動運転車両や技術開発の熾烈な競争、並びにその車両を用いた実証実験が盛んに行われ、社会導入の可能性が現実味を帯びてきている。我が国においては、2014年度より内閣府のSIP-adusによる「自動走行(自動運転)システム」の取り組みが開始され、産官学で研究開発が推進されている。

自動運転の導入は、ライフスタイルや地域・都市構造に大きなインパクトを与えることは想像に難しくなく、交通工学分野ではマニュアル、ガイドライン、技術基準等の改訂や交通管理技術、インフラ整備の在り方のみならず、交通工学の前提となる技術的規範にまで変化が及ぶ可能性も考えられる。

須田・青木¹⁾はセンシングの高度化や認識・判断の高

度化、測位技術の高度化・高信頼性化等の自動運転に求められる技術について体系的に整理を行っている。そうした求められる技術開発に関して、例えば、柳瀬ら²⁾は車両の位置推定の課題であった立体交差する道路や立体駐車場などの複数レイヤーが存在する場所における推定精度を向上させる手法の開発や、藤原ら³⁾はより高度なADAS (Advanced Driver Assistance Systems) 機能を普及させるため、車両周辺における走行可能領域の認識精度を向上させる手法を提案するなど、研究開発が盛んに行われている。金森⁴⁾は技術開発でも自動運転サービスに関して、地図に焦点を当て、協調型ITSを実現するための基盤技術として、ダイナミックマップの取り組みを示している。

自動運転車両を用いた実証実験に関しては、中部国際

1 学生会員, 学士(工学), 名古屋大学大学院環境学研究科

〒464-8601 名古屋市千種区不老町 e-mail: nakai.ryosuke@e.mbox.nagoya-u.ac.jp Phone: 052-789-3565

2 正会員, 修士(工学), (株)交通システム研究所

3 正会員, 博士(工学), 名古屋大学未来社会創造機構

4 非会員, 修士(工学), 名古屋大学未来社会創造機構

5 正会員, Ph.D., 名古屋大学未来社会創造機構

空港における貨物輸送の事例がある⁵⁾。本事例では貨物の無人輸送を想定して、空港内における自動運転の技術的課題を検証している。また、馬渡⁶⁾は国土交通省で推進している中山間地域における「道の駅」等を拠点とした自動運転サービスの取り組みを紹介し、その中にはサービスが実装されている拠点として、積雪地域における円滑な走行可否の検証や、高齢者の福祉イベントや社会福祉事業などの連携を目的として行われている秋田県の道の駅「かみこあに」などが挙げられている。

このように、自動運転が普及する過程では、自動運転における技術面の開発や、ビジネスモデルに関する議論が盛んに行われている。

一方で、自動運転の課題として、津川⁷⁾はソフトウェアの課題に限らず、自動運転車両が混入することで、それらの交通状況に対する判断や挙動が異なることから、交通流へ影響を及ぼし、渋滞や事故が起こる可能性を述べている。ゆえに、自動運転車両の社会実装に向けては、交通流への影響を分析し、交通システムの検討を進めることが求められる。

そういった中で我が国でも、交通流への影響を分析した研究は行われている。香山・鈴木⁸⁾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、単路部において、自動運転車両は一般車両と比べて高い速度維持性能を保有することを示している。また、交差点においては信号への反応時間で自動運転車両は一般車両よりも時間がかかること、さらに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ている。この研究のように、自動運転車両が一般道を走行した際の交通流への影響を分析した研究事例は現在までに限られている。

本研究では、名古屋大学の開発している低速自動運転(ゆっくり自動運転[®])車両を用いた愛知県豊田市における実証実験⁹⁾を対象として、低速自動運転車両(以降ゆっくりAVsと表記)が交通流及び後続車両に与える影響を分析し、今後低速自動車が混在した安全な市街地形成のための基礎情報として資することを目的とする。

なお、本研究で低速の自動運転車両を対象としているがその理由として、低速車両は高齢ドライバーによる事故の低減にも繋がり得るものであり、自動運転車両となることで過疎地域における高齢者の新たなモビリティ手段として活用が期待されるためである。

2. 調査概要

愛知県豊田市にて2019年8月22日、23日、26日にゆっくりAVs実証実験を豊田市と名古屋大学において実施した。実証実験はオフピーク時の10時から16時の間であり、実証実験に使われた車両はヤマハのゴルフカート

を自動運転車両に改造したものである。自動運転車両の写真を図1に示す。この自動運転車両の設定は、最高速度は15km/h、前方車両との車間距離は6mである。

走行ルート及び交通状況を図2に示す。走行ルートは、名鉄豊田市駅が出発点、豊田市美術館が終着点である。交通状況としては、区間Aは片道1車線(黄線)で比較的交通量が多い道路である。また、区間Bは片道1車線(黄線)で比較的交通量は少ない道路で、区間Cは片道1車線(白線)で比較的交通量は少ない道路である。

また、本実証実験における観測調査は、路側からの観測と、ゆっくりAVsからの観測の2種類を行った。

路側からの観測については、信号交差点や単路部において、路側や付近の建物にカメラを設置し、撮影を行った。本稿で分析する観測地点は、信号交差点である地点1と単路部である地点2である。取得データは、信号交差点における通過交通量と車頭時間、及び単路部における車間距離である。路側からの観測の様子を図3に示す。

ゆっくりAVsから後続車両の観測については、後方カメラ、及びLIDAR(Light Detection and Ranging, Laser Imaging Detection and Ranging)を用いて行い、走行中常に映像を取得した。取得データは、観測した51台の後続車両の追従時間や、車間距離、平均速度、追い越しの有無などである。車両からの観測の様子を図4に示す。



図1 実験に用いた自動運転車両



図2 走行ルート及び交通状況



図3 路側からの観測

図4 車両からの観測

3. 路側からの観測調査に基づく分析

本章では、路側からの観測で得られたデータを基に、3.1節では信号交差点、3.2節では単路部を対象として交通流への影響の分析を行う。

3.1 信号交差点における影響分析

信号交差点(地点1)において、ゆっくりAVsの走行により、通過交通量の変化(青信号時の通過車両台数)がどの程度が生じているのかを分析する。分析では、同一時間帯で交通状況に大幅な変化がない信号交差点の5サイクルを対象としており、その内訳は、ゆっくりAVsが走行しているサイクル1つと、その直前・直後の2サイクル(ゆっくりAVsが走行していない)となっている。

(1) 交差点通過交通量と車頭時間への影響

図5はゆっくりAVs走行の2サイクル前から2サイクル後までの1サイクル当たりの交差点通過交通量である。

ゆっくりAVsが走行していないサイクルでの通過交通量は、15~18台の範囲であるが、ゆっくりAVs走行時の通過交通量は13台となっている。ゆっくりAVsが走行することで交差点1サイクル当たりの通過交通量が若干減少している。これはゆっくりAVsが混入することで、その低速走行が原因となり、全体の走行速度が低下し、交差点を通過できる交通量が減少している。

なお、実証実験の3日間でゆっくりAVsは分析対象の信号交差点を14回通過しているが、その他の走行についても収集したデータ分析から、図5の結果と概ね同様であった。

続いて、同地点で、かつ同様の信号サイクルにおいて、交差点に車両が流入する際の車頭時間を比較したものが図6である。車頭時間は車両が交差点の停止線にかかるタイミングを基に算出している。ただし、各サイクルにおける先頭車両の車頭時間は青信号の切り替え時の発信タイミングによることから、図6では表記しておらず、2台目からの値となっている。

図6から、一般車両の車頭時間は、2~5秒の値を取っている一方で、ゆっくりAVsの車頭時間は約8秒と最も大きな値をとっている。ゆっくりAVsが前方車両との距離を6m確保し、安全が確認できてから発進を行うことの影響である。また、ゆっくりAVsの車頭時間が極めて大きいことで、結果として交差点通過交通量が少なくなることが示唆されている。

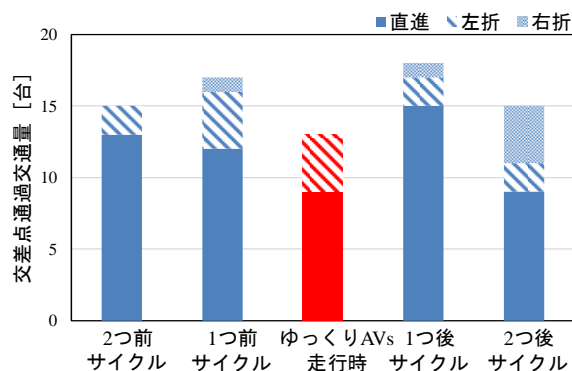


図5 交差点通過交通量

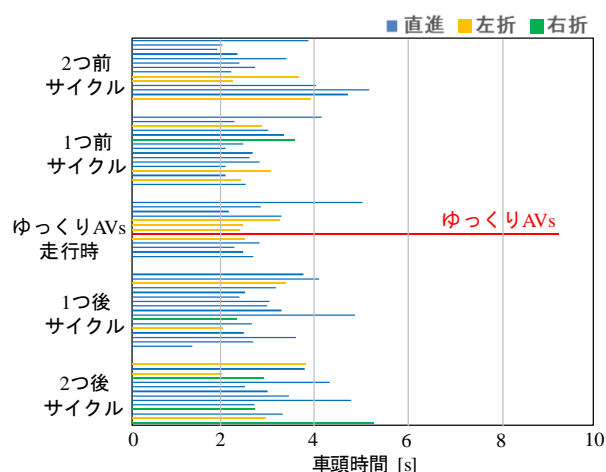


図6 車頭時間

この分析結果はゆっくりAVsの車両性能による影響を受けたものであるが、発進損失を縮めることで、信号交差点における通過交通量の減少の解消が見込まれる。

(2) 交差点での停止位置による通過交通量への影響

地点2の交差点において、ゆっくりAVsが交差点手前で停止し、信号待ちをした場合を考える。このときのゆっくりAVsの車群内の位置による、交差点通過交通量への影響を分析する。図7で、ゆっくりAVs走行の前後2サイクルの平均通過交通量と、ゆっくりAVsの走行するサイクルの平均通過交通量を、車両位置別に比較している。なお、これらのデータは、該当する交差点においてゆっくりAVsが停止した際を対象に、車両位置が先頭の場合は4走行における通過交通量の平均値、車両位置5台目および9台目は、該当する1走行における通過交通量を示したものであることに注意されたい。

図7から、交差点の通過交通量はゆっくりAVsが先頭にいる場合、最も影響が少ない。一方でゆっくりAVsの位置が5台目と9台目の場合を比べた結果、5台目のときの方が交差点の通過交通量の減少程度が大きい。これらの結果から、先頭の場合を除き、ゆっくりAVsが前方にいるほど、より多くの後続車両に反応遅れが作用し、

交差点での通過交通量に影響を及ぼしていることがわかる。ゆっくり AVs が交差点で停止し、先頭で発車する場合には、現状では車両を操作するオペレーターが手動で発信の判断を行っている点にも考慮された結果である。

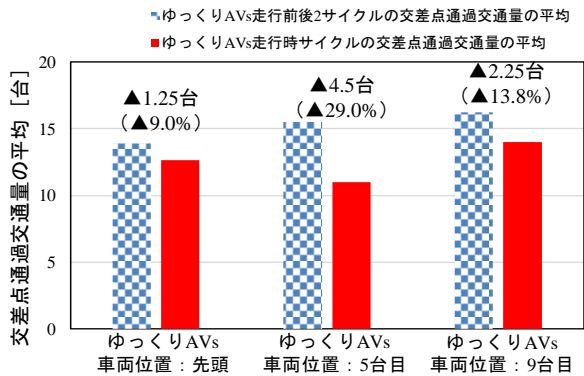


図7 車両位置別の平均通過交通量

3.2 単路部における影響分析

地点2 (単路部) において、ゆっくり AVs が走行した際の車間距離の変化を分析する。分析では、地点2 手前の交差点での信号1 サイクルにおける通過車両を対象としており、3.1 節と同様にゆっくり AVs 走行サイクル及び前後2 サイクルについて行う。図8に、ゆっくり AVs 走行のサイクルと前後2 サイクルの全車両の車間距離を示す。ただし、50 m 以上の車間距離の場合にも図では全て 50 m として表記している。また、棒グラフの間隔は均等で表記しているが、時間を表しているものではない。図9に各サイクルの車間距離の平均を示す。なお、図9にはゆっくり AVs 自体の車間距離も含まれている。

図8から、車間距離は15 m 以上の値でばらついてはいるが、ゆっくり AVs 走行後の車群は、車間距離が明らかに小さい。これは、後続車両が、ゆっくり AVs に対して、小さい車間距離で追従していることを示している。

図9から、ゆっくり AVs が走行していないサイクルは車間距離の平均値が30 m を超えているのに対して、ゆっくり AVs 走行サイクルは車間距離の平均値が約20 m である。ゆっくり AVs が単路部を走行することにより、その低速走行が原因で、車群内の車両の車間距離が小さくなる、すなわち当該区間の密度が高く、混雑状態が生じやすい環境を生み出していることが想定される。

4. ゆっくり AVs からの観測に基づく分析

本章では、ゆっくり AVs からの観測で得られた後続車両51台のデータを用いて、ゆっくり AVs の走行が後続車両へ及ぼす影響を分析する。4.1 節では、後続車両の基礎分析を、4.2 節では後続車両の追従特性を明らかにするためのクラスター分析を行う。

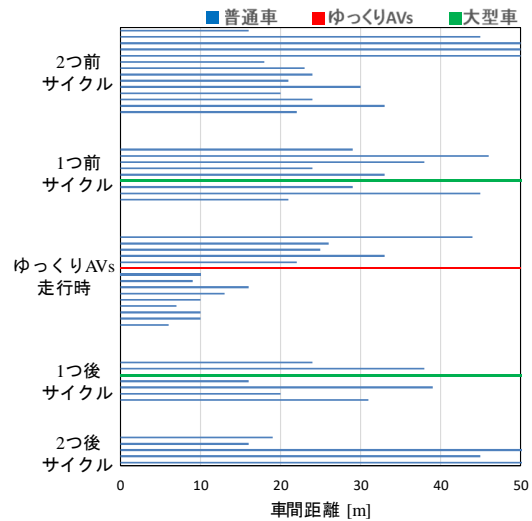


図8 車間距離

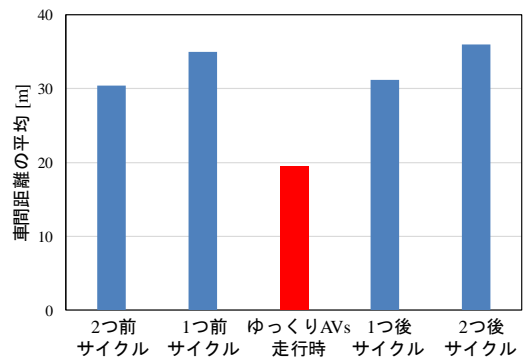


図9 車間距離の平均

4.1 後続車両の基礎分析

後続車両の基礎分析として、追従時間について分析する。ここからの追従判定は、後続車両が LIDAR (Light Detection and Ranging, Laser Imaging Detection and Ranging) センサーの検知範囲内である 25 m 以内を走行しているときとする。

図10に後続車両の追従時間の構成比を示す。図10から、後続車両は30秒以下で追従行動を終了するものが多い。これは、追従の途中でゆっくり AVs への追い越しや区間の途中で後続車両が右左折により区間から消失することが主な要因であり、区間を長時間追従する車両は少なくなっている。

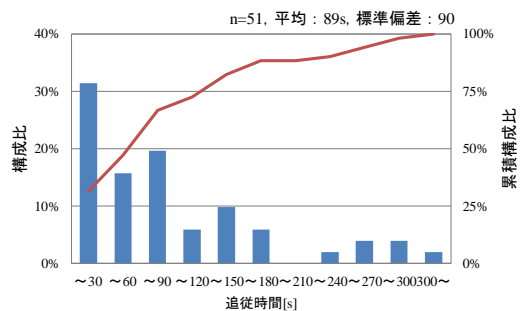


図10 追従時間の構成比

追従時間割合は、後続車両がゆっくり AVs と同一車線を走行しており、かつ車間距離 25m 以内を走行している時間に対して、車両速度から安全な車間距離として導出された 8 m 以内において、走行している時間の割合として定義している。

そのもとに図 11 に追従時間割合の構成比を示す。図 11 から、追従時間割合の構成比は 0 が最も多く、0 以外では 0.4~0.6 の値に集中している。0 が多い理由は、後続車両が車間距離を詰める前に、右左折により区間から消失することが主な要因である。

実験での設定から、ゆっくり AVs が速度 13 km/h 以上のとき安定的に走行しているとみなし、後続車両との車間距離について分析を行う。速度 13 km/h に関しては、実証実験における速度上限を 15 km/h と設定しているためである。

図 12 に安定走行時の後続車両との車間距離の平均値の構成比を示す。図 12 から、平均的車間距離は 8 m~16 m に約 80 % が集中しており、10 m~12 m の値を持つ車両が最も多い。

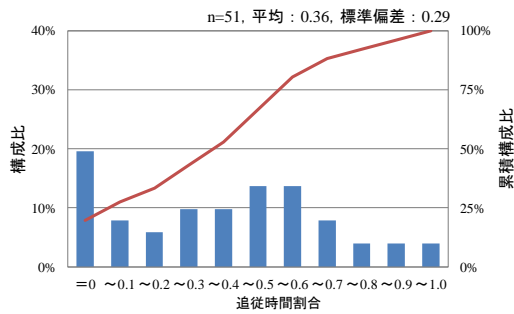


図 11 追従時間割合の構成比

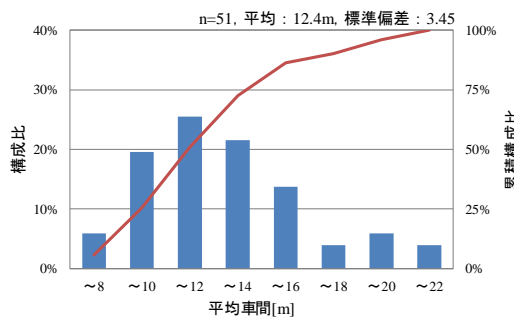


図 12 安定走行時の後続車との車間距離の平均値

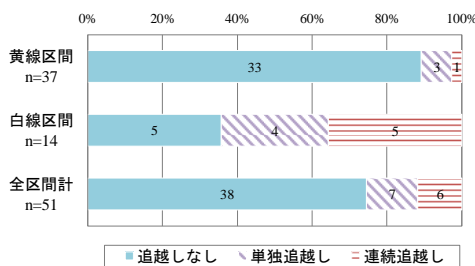


図 13 追い越し車両の割合

後続車両の追い越しについての分析を行う。図 13 に、区間ごとの追い越し車両の割合を示す。図 13 から、追い越し行為は交通量の多い黄線区間では走行の約 10%、交通量の少ない白線の区間では走行の約 64% で発生している。また、黄線区間での追い越しは、2 章の図 2 で示した片道 1 車線 (黄線) で交通量の少ない区間 B の道路においてのみ発生している。

4.2 追従走行に関するクラスター分析

ゆっくり AVs を追従する後縦車両の追従特性を把握するため、51 台の車両データに対してクラスター分析を行う。クラスター分析に用いた変数を表 1 に示す。

分析の結果、図 14 のようなデンドログラムが導出され、結合距離を基にクラスター数は 4 つに分類される。分類されたそれぞれのグループの変数の平均値と標準偏差を表 2 に示す。さらに、各クラスターの特徴を掴むため、変数の平均値を正規化してレーダーチャートで表したものを図 15 に示す。これらを基に各クラスターの特徴を(1)~(4)にまとめる。

表 1 クラスター分析に用いる変数

変数	説明
追従時間[s]	Liderが後続車を検知する25m以内を追従と定義
追従時間割合	総追従時間に占める、安全車間距離(8m)以内の追従時間割合
平均車間[m]	AVsの速度が13km/h以上の時の後続車との平均車間距離
最小車間[m]	AVsの速度が13km/h以上の時の後続車との最小車間距離
平均速度[km/h]	停止時を除いたゆっくりAvsの平均速度
追い越し禁止ダミー	走行区間が黄線である場合は「1」 そうでなければ「0」
追い越しダミー	追い越しを行ったら「1」 行わなければ「0」
前方車両2追い越しダミー	前方車両が追い越しを行ったら「1」 行わなければ「0」

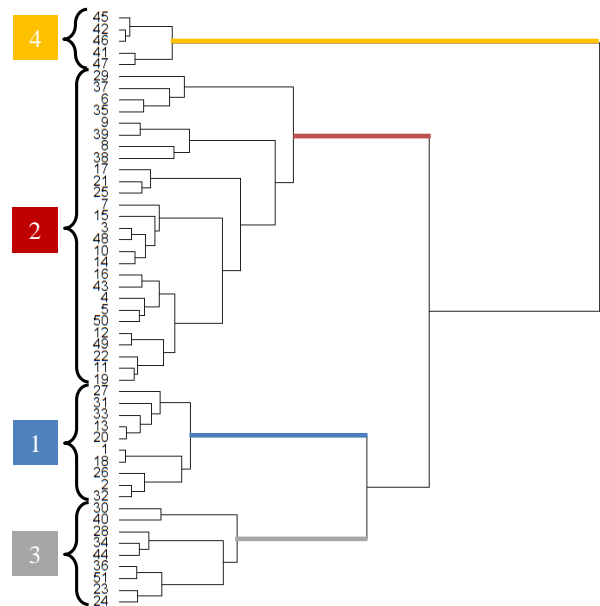


図 14 分析結果のデンドログラム

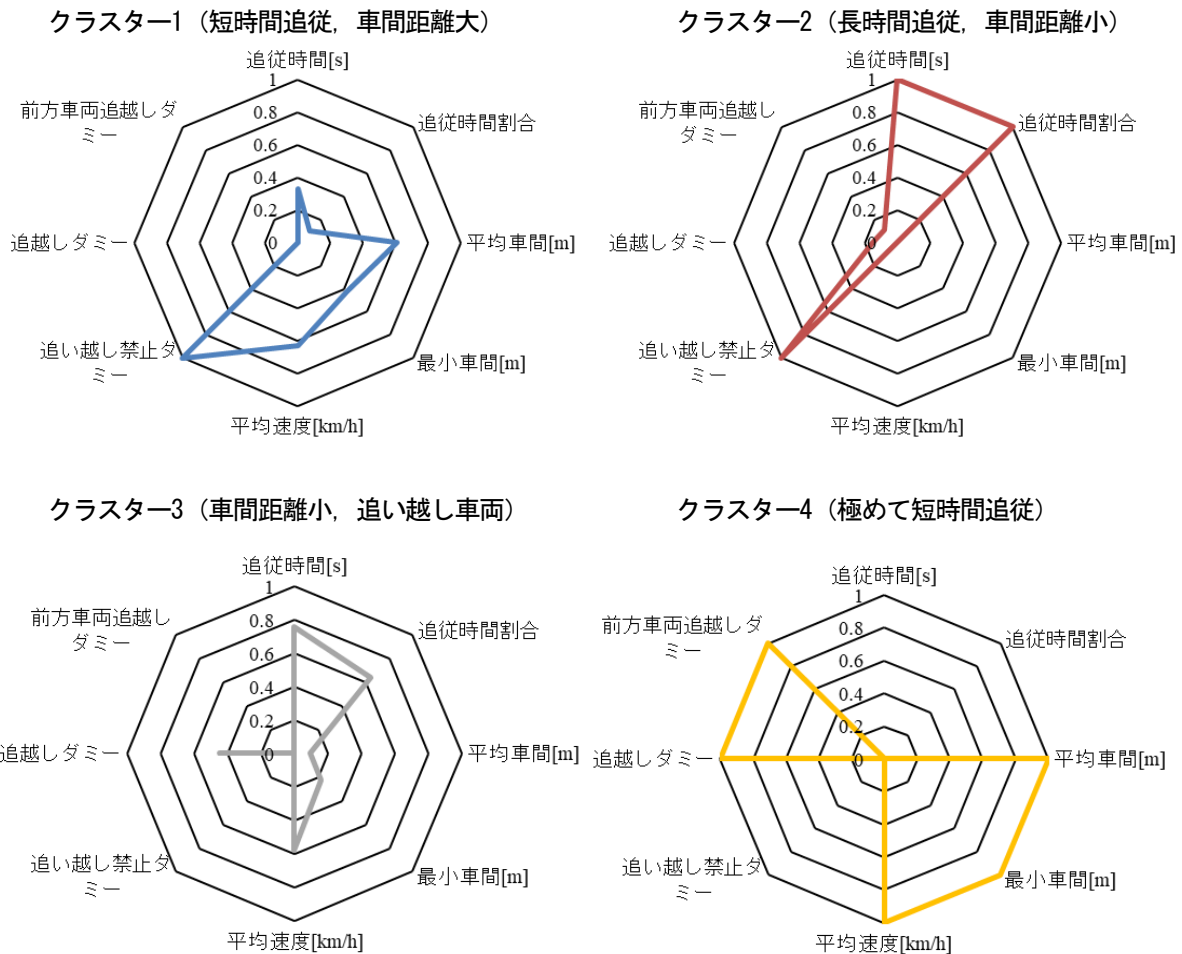


図 15 クラスタ毎のレーダーチャート

表 2 変数の平均と標準偏差

クラスタNo.	1 (n=10)		2 (n=27)		3 (n=9)		4 (n=5)	
	平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差
追従時間[s]	42	33	121	104	92	40	3.7	1.3
追従時間割合	0.057	0.077	0.54	0.22	0.347	0.18	0	0
平均車間[m]	15.2	2.9	10.7	2.2	11.35	2.0	18.1	1.9
最小車間[m]	8.7	2.9	6.3	2.2	7.6	5.4	12.0	2.5
平均速度[km/h]	13.5	0.54	12.2	1.05	13.36	0.31	14.2	0.12
追い越し禁止タミ	1	0	1	0	0	0	0	0
追越しタミ	0	0	0.15	0.36	0.444	0.50	1	0
前方車両追越しタミ	0	0	0.11	0.31	0	0	1	0

- (1) クラスタ1 (短時間追従, 車間距離: 大)
 クラスタ1は, 追従時間が短く, 車間距離も大きいことから, 比較的ゆったりとした追従を行う車両が分類されている. また, 分類される車両は全て交通量の多い黄線区間を走行していることが特徴である. 一方で, 交通量の少ない白線区間を走行しているクラスタ3と平均速度に近い値を取っており, 混雑しない時間帯を走行している.
 クラスタ1には10台の車両が分類されており, 約5分の1の車両がゆったりとした安全な追従を行っていることがわかる.
- (2) クラスタ2 (長時間追従, 車間距離: 小)

- クラスタ2は, 追従時間が長く, 接近した追従を行っており, ドライバーがイライラして運転している可能性が推測できる. また, 分類される車両は全て交通量の多い黄線区間を走行していることが特徴である. また, 平均速度が低く, 混雑する時間帯での走行車両が分類されていると推測できる.
 クラスタ2には, 27台の車両が分類されており, 約半分のドライバーはゆっくりAVsを煽る傾向にあることがわかる.
- (3) クラスタ3 (車間距離: 小, 追い越し車両: 多)
 クラスタ3は, 追従時間がクラスタ2に次いで長く, ゆっくりAVsに接近した追従を行っている. 分類される車両は全て交通量の少ない白線区間を走行している.
 クラスタ3に分類される車両の約半分が追い越しを実施しており, 走行区間が長ければ, さらに多くの追い越しが発生すると考えられる.
- (4) クラスタ4 (極めて短時間追従)
 クラスタ4は, 追従時間が極めて短く, ゆっくりAVsに追いつくや否や追い越しを行っていることから, 連続追い越しを行っている車両が分類されている.
 この連続追い越しを行っている車両は全て交通量の

少ない白線区間を走行している。

5. おわりに

本研究では、観測調査データに基づいて自動運転車両が交通流及び後続車両に及ぼす影響について分析を行った。得られた知見は以下のとおりである。

- ・ 信号交差点において、ゆっくり AVs が混入することで通過交通量が減少することがわかった。
- ・ ゆっくり AVs が信号交差点手前で信号待ちをしている場合、通過交通量への影響は、ゆっくり AVs が車群の先頭にいる場合最も少なく、車群内の前方にいるほど影響は大きくなるということがわかった。
- ・ 信号交差点において、前方車両が大型車である、あるいは横断歩行者を待っている左折車両であるなどの特殊な場合を除き、一般車両に比べてゆっくり AVs の車頭時間は大きくなるということがわかった。
- ・ 単路部において、ゆっくり AVs が走行することで、後続の車両群がその低速に合わせて小さい車間距離をとることがわかった。
- ・ 後続車両の多くはゆっくり AVs に接近した追従を長時間行っていることがわかった。
- ・ 黄線にもかかわらず、約 1 割のドライバーは追い越しを行っていた。

なお、本稿で得られた知見については、観測が行われた際の交通量の影響が大きいと考えられるが、ゆっくり AVs が一般車両と混在することで発生し得る現象を事前に検証する上で、交通流や、後続車両への影響を分析した点では、意義があるものであると考えられる。

また、クラスター分析より得られた追い越し車両の特性を捉えたが、今後ゆっくり AVs が社会に普及し、自動運転車両が混在した安全な市街地内交通流を実現するためには、黄線区間を走行している際に後続車両に追い越し禁止のアラートを出すことや、交通状況を見て、適宜追い越しの指示を出す対策が必要であると考えられる。しかしながら、車間距離が小さい追従車両を減らすためには、混雑を考慮したゆっくり AVs の走行時間帯の選択や、信号停止から発車時までの時間の短縮、実験では 14 km/h

での走行としたが、安全な走行が保たれる範囲でゆっくり AVs の速度を向上させることが求められる。

今後は、他の地域の実証実験での観測データも用いて、同様の分析を行い、ゆっくり AVs 走行時の影響を多面的に捉えてみたい。

謝辞

本研究の観測調査実施に際して、国土交通省中部地方整備局、及び豊田市役所には多大なる協力を賜りました。ここに記し、謝意を表します。

参考文献

- 1) 須田義大・青木啓二：自動運転技術の開発動向と技術課題, 情報管理, Vol.57 No.11, 2015.
- 2) 柳瀬龍・モハンマド アルディバジャ・倉元昭季・金兌炫・米陀圭祐・菅沼直樹：自動運転のためのエレベーションマップに基づく自己位置推定, 自動車技術会論文集, Vol.50 No.2, pp442-447, 2019.
- 3) 藤原直広・寺二存也・大門真：センサフュージョンによるフリースペース認識技術の開発, 自動車技術会論文集, Vol.51 No.2, pp328-332, 2020.
- 4) 金森亮：自動運転サービスに関する技術開発と精度整備, 交通工学 Vol. 54 No.1, pp.4-7, 2019.
- 5) 国土交通省航空局航空ネットワーク部：第 4 回空港制限区域内の自動走行に係る実証実験検討委員会 https://www.mlit.go.jp/koku/network/koku_tk9_000035.html (2020 年 9 月 30 日アクセス)
- 6) 馬渡真吾：中山間地域における道の駅等を拠点とした自動運転サービスの実証実験, 交通工学 Vol. 54 No.1, pp.23-26, 2019. <http://www.thr.mlit.go.jp/road/koutsu/Michi-no-Eki/jidou-unten/index.html> (2020 年 9 月 30 日アクセス)
- 7) 津川定之：自動運転の課題, Fundamentals Review, Vol.10 No.2, pp.93-99, 2016.
- 8) 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.