

令和 4 年 6 月 10 日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04642

研究課題名(和文) 自動運転車の混在状態下における移動発光体の交通制御への利用可能性

研究課題名(英文) Possibility of Traffic Control using Moving Light Guide System under the Mixed Condition of Autonomous Vehicles

研究代表者

小根山 裕之(Oneyama, Hiroyuki)

東京都立大学・都市環境科学研究科・教授

研究者番号：90313105

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、自動運転車(ACC車)と手動運転車の混在状態における、移動発光体による運転挙動への影響および、マクロな交通流状態の変化に関する影響を明らかにすることを目的としたものである。非渋滞時におけるドライビングシミュレータ(DS)実験及びマイクロシミュレーション実験により、混在状態において手動運転車に対する移動発光体の効果がより大きく現れ、捌け交通量を増大させる効果が示された。同様に、渋滞流についてもDS実験により、移動発光体の車頭時間短縮効果が見られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

移動発光体がACC車混在状態においても捌け交通量など交通流の改善に一定の効果を有することを示した点は、実務的・社会的意義が大きい。一方、学術的意義としては、移動発光体のような手動運転車に対する対策が混在状態においてより高い効果がある可能性があること、混在状態においては非混在状態とは手動運転車の挙動が異なる可能性があることを示した点があげられる。混在状態における車両挙動分析や対策の効果評価等に当たっては、手動運転車の挙動をより適切に考慮すべきことを示した非常に興味深い知見であるといえる。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to clarify the effect of moving light guide system (MLGS) on driving behavior and the effect of macroscopic changes in traffic flow conditions in a mixed state of autonomous vehicles (ACC vehicles) and manually driven vehicles. Driving simulator (DS) experiments and microscopic simulation experiments in non-congested conditions showed that the effect of the MGLS on the manually driven vehicle was greater in the mixed state, and that the effect of increasing the flow rate was observed. Similarly, for the congested flow, the DS experiment showed the effect of the MGLS on shortening the headway.

研究分野：交通工学

キーワード：自動運転車 手動運転車 ACC車 混在状態 移動発光体 ドライビングシミュレータ 交通流 シミュレーション

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

走光型視線誘導システム(以下、移動発光体と称す)は、高速道路において車両の運転挙動に働きかけて速度を調整し、渋滞緩和、捌け台数の上昇などをもたらす渋滞対策のための交通制御手法として、近年、各高速道路会社において導入例が増えている(ペースメーカーライト、エスコートライトなど、呼称は各社によって異なる)。これらの運転挙動への効果、渋滞緩和効果、およびこれらを最大化する移動発光体の制御手法については、ドライビングシミュレータ実験、実証研究等によって次第に明らかにされている。

一方、現在も ACC 車などは普及しつつあり、今後、さらに高度な自動運転車や車両のコネクティッド化などに伴い、全体的には運転者が運転挙動に関わる比率は徐々に下がることが想定されており、移動発光体のような運転者に直接働きかけるインフラを用いた制御手法は不要になると考えられている。しかし、暫くの期間、ACC 車や自動運転車など運転に対する人間の関与が低い車両と、人間が運転する手動運転車との混在(以下、混在状態と称す)が続くこととなる。その間、臨界状態においては人間の運転挙動がブレークダウンの引き金になるなど、混在状態においても人間の運転挙動の適正化がなおさら重要になることが大いに想定される。

混在状態における交通流の変化や、混在状態における交通制御手法等については種々の研究が行われているが、まだ端緒に付いた段階といえる。特に、混在状態における手動運転車に対する対策については、必ずしも十分な検討がなされていない。

このような混在状態において移動発光体が運転者の挙動に対して、ミクロにどのように影響を与えるのか、その結果として渋滞発生の緩和や、渋滞発生後の捌け台数の増加など、マクロな効果を与えるかどうかを探ることが、本研究の学術的な問いである。

2. 研究の目的

本研究の目的は、以下のとおりである。まず、自動運転車両と人間が運転する車両の混在状態における、移動発光体による運転挙動への影響(非渋滞流における車両の追従挙動、渋滞流からの車両の発進挙動など)を明らかにすることである。それを踏まえて、混在状態における移動発光体による運転挙動への影響を前提とした場合の、マクロな交通流状態の変化に関する影響を明らかにすることを目的とする。

前者の目的を達成するために、ドライビングシミュレータ(DS)を用いた走行実験を、非渋滞流および渋滞流に対して実施する。また、後者の目的を達するため、DS 実験の結果から追従モデルパラメータを推定するとともに、それを用いたミクロシミュレーション実験を行う。

3. 研究の方法

(1) 非渋滞時を対象とした DS 実験

非渋滞時における自動運転車混在時の移動発光体有無による交通流や手動運転車の車両挙動の違いを明らかにすることを目的として、DS を用いた実験を行った。東京湾アクアラインをモデルとした仮想実験コース(全長 10.0km、車線幅員 3.50m 片側 2 車線、3300m~4650m に 4% の上り坂)を作成し、上り坂区間直前から移動発光体を設置した。実験には追従積み重ね方式(車列の 1 台目から順に走行データを作成する作業を繰り返すことにより交通流を作成する方法)を採用した。この際、先行車 2 台は実験者が 2 ケース用意(ACC 車 2 台、手動運転車 2 台)し、追従車計 12 台を ACC 車については追従モデルによる追従走行、手動運転車については DS による走行実験により生成した。なお、ACC 車は式(1)の Helly モデルで先行車を追従するものとし、 k_1 、 k_2 、 T のパラメータを既往研究等に従って設定した。

$$\dot{x}_1(t+T) = k_1\{x_0(t) - x_1(t) - L - T_m(\dot{x}_1) \cdot \dot{x}_1(t)\} + k_2\{\dot{x}_0(t) - \dot{x}_1(t)\} \quad (1)$$

ここに、 x_0 は先行車の位置、 x_1 は自車の位置、 \dot{x}_0 は先行車の速度、 \dot{x}_1 は自車の速度、 L は車長、 $T_m(\dot{x}_1)$ は自車速度から決まる目標車間時間、 T は遅れ時間、 k_1 は車間距離フィードバックゲイン、 k_2 は相対速度フィードバックゲインを表す。

実験ケースとして、ACC 車混入状態の違いによる 3 ケース(先行車 ACC 車 + ACC 車混入、先行車手動運転車 + ACC 車混入、手動運転車のみ) × 移動発光体パターンの違いによる 3 ケース(発光体速度 90km/h、80km/h、発光体なし) の 9 ケースを実施した。被験者は 20 ~ 40 代の男女 24 名であった。

これらの実験結果に基づき、ケースごとに生成された車群の車頭時間等の特性や、車両ごとの特性について、ACC 車混在状態や移動発光体パターンとの関係を踏まえつつ分析した。

(2) 追従モデルパラメータの推定による手動運転車の特性把握

システム設置区間における発光体点灯・非点灯および先行車両特性の追従挙動特性への影響を把握するため、(1) で得られた後続車追従実験の DS ログデータを使用して、手動運転車の追従モデルパラメータの推定を行った。

追従モデルとしては式(1)の Helly モデルを採用し、 k_1 、 k_2 、 T のパラメータを推定した。推定し

たパラメータについてガンマ確率密度分布を用いてフィッティングを行い、走光型視線誘導システム点灯有無、先行車の車種（ACC車、手動運転車）および走行特性（速度分散）による追従挙動の差異を比較した。

(3) ミクロシミュレーション実験による交通流への影響分析

(2)で算出されたパラメータを用いて、移動発光体の設置有無及びACC車混入率の違いによる交通流への影響を明らかにすることを目的として、ミクロ交通シミュレーション実験を行った。実験ネットワークは全長を5kmに設定し、車両発生箇所から3kp地点より4%の上り勾配区間を設定する。発生する車両はACC車混入率に従ってランダムで発生する。車両走行モデルによって出力される加速度と走行地点の勾配を考慮した加速度で実験ネットワークを走行する。各車両には境界車頭距離 β を設定し、それより大きい車頭距離の場合には単独走行モデル、小さい場合には(2)で設定した追従走行モデルに従い加速度を決定する。単独走行モデルは希望走行速度 v_d をランダムに設定し、希望走行速度より速度が大きい場合には一定値で減速、小さい場合には一定値で加速するモデルとした。また、ACC車についてはすべての車両に対し同一のパラメータを与えている。

本実験でのシミュレーション発生台数は、400台/時間から2000台/時間とし、400台/時間間隔で計5通りの発生台数で行っている。この各々の発生台数に対し、発光体無点灯、80km/h点灯、90km/h点灯の3パターンと自動運転車混在率を0~100%の範囲で10%ずつ変化させた計11パターンを組み合わせ実験を行った。

実験結果に基づき、ACC車混入率および移動発光体点灯パターンと、交通流率や減速車両発生割合などの関係を分析した。

(4) 渋滞時を対象としたDS実験

渋滞時における自動運転車混在時の走光型視線誘導システム有無による交通流や手動運転車の車両挙動の違いを明らかにすることを目的として、DSを用いた実験を行った。使用したコースや実験手法の大枠は概ね(1)と同様である。なお、実験者が5台分追従積み重ね走行を行い渋滞流の先行車を生成した。

実験ケースとして、ACC車混入状態の違いによる3ケース(ACC車67%, 33%, 0%)×移動発光体有無による2ケースの6ケースを実施した。なお、発光体速度は渋滞流であることを考慮し50km/hとした。被験者は20~40代の男女24名であった。

これらの実験結果に基づき、ケースごとに生成された車群の車頭時間等の特性や、車両ごとの特性について、ACC車混在状態や移動発光体パターンとの関係を踏まえつつ分析した。

4. 研究成果

(1) 非渋滞時を対象としたDS実験

DS実験の映像を図1、後続車積み重ね実験の結果の例としてACC車非混在で発光体速度90km/hの例を図2に示す。また、図3は0m~4500m間におけるケース毎の車頭時間推移の平均を示した。ACC車が混在すると車頭時間短縮傾向があり、ACC車混在時の上り坂区間において発光体を点灯させると車頭時間が短縮される傾向があることが分かる。発光体点灯条件と混在・非混在の条件において2因子分散分析を行った結果、混



図1 DS実験の映像（俯瞰視点）

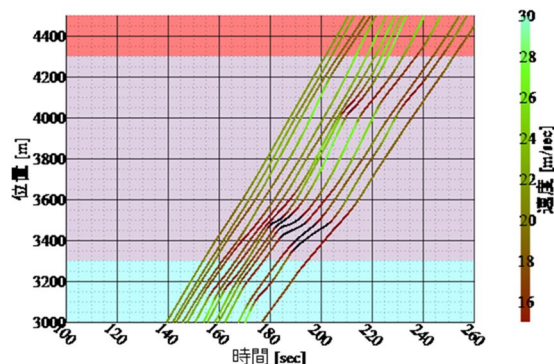


図2 時間距離図

(ACC非混在、発光体90km/h点灯)

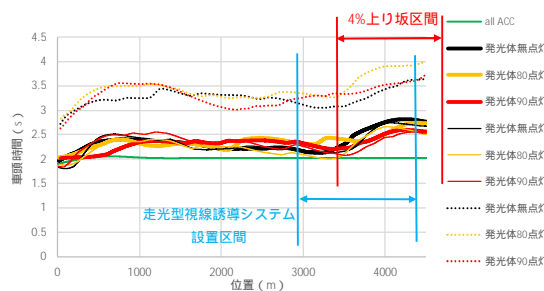


図3 平均車頭時間推移

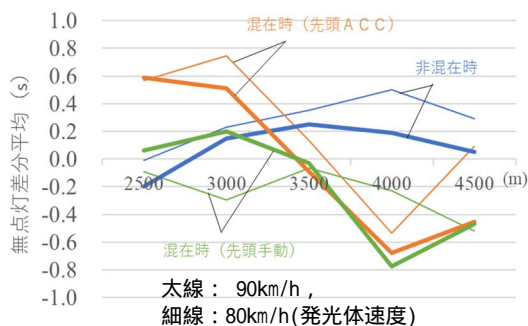


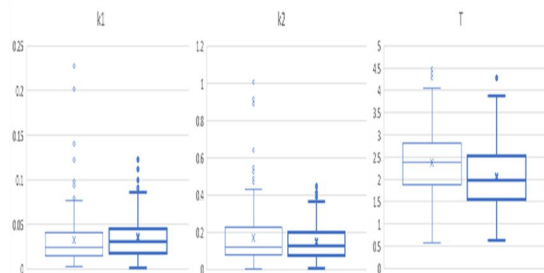
図4 無点灯差分平均推移（手動運転車）

在・非混在の条件変化による有意差が見られたが、発光体点灯条件による有意差は見られなかった。

一方、手動運転車の挙動に着目する。ACC 車混在・非混在のパターン別に、同一被験者の発光体点灯と無点灯の車頭時間の差分（無点灯差分）について、ACC 車非混在時、混在時（先頭 ACC）、混在時（先頭手動）毎、および発光体点灯の場合は発光体速度(80km/h, 90km/h)毎に平均の推移を図 4 に示す。ACC 車混在時の平均無点灯差分が負方向に推移する傾向を示しており、ACC 車混在時の方が移動発光体点灯による車頭時間短縮効果の可能性があると考えられる。この結果は、移動発光体のような手動運転車に働きかける対策の効果に、移動発光体が影響を及ぼさない ACC 車の混在が影響を与える可能性を示したことで、ACC 車混在時により効果が見込まれることなどを示したものであり、今後の ACC 車混在時の手動運転車に対する対策を検討するうえで非常に興味深い結果であるといえる。

(2) 追従モデルパラメータの推定による手動運転車の特性把握

パラメータ推定結果によると、発光体 90km/h 点灯時には先行車種によらず先方車両との相対速度・車間距離の変化に対しより大きな加速度を出力する追従傾向が見られた。また、先行車 ACC 時は先行車手動運転時と比較して、先方車両との相対速度の変化に対してより大きな加速度を出力するが、反応遅れ時間が長くなる傾向があった。この結果が先行車の運転特性の違いによるものと仮定し、先行車の速度分散ごとにパラメータ分布を示したのが図 5 である。これにより、先行車の速度分散の変化により、先方車両との相対速度に対する反応強度、反応遅れ時間に影響を及ぼすことを確認した。先行車の挙動によって追従挙動が異なる可能性が示されたことは、過去の研究ではあまり指摘されておらず、特に混在状態における手動運転車の挙動を分析する際には十分に配慮すべき知見であるといえる。



縦軸：パラメータ値
細線（図左）：先行車速度分散 7 未満
太線（図右）：先行車速度分散 7 以上

図 5 先行車速度分散によるパラメータへの影響

(3) ミクロシミュレーション実験による交通流への影響分析

発生車両台数別の ACC 車混在率と捌け交通量の関係を図 6 に示す。交通流上の車両数が多くなるにつれ、自動運転車混在率が低い時を中心に、システム無点灯時と比較して点灯時は捌け交通量が増加しており、減速車両の発生も軽減されていた。システムの点灯速度は車両走行速度より早めたほうが、自動運転車混在下でもより大きな効果を発揮することを確認した。

また、走行速度 10km/h 以下で走行している車両を「減速車両」と定義して、発生車両台数に対する減速車両の発生割合を算出した（図 7）。ACC 混在率が高くなると減速車両の発生割合は低くなる。また、発生車両台数が増加すると混在率が低いところで減速車両が発生するが、この割合はシステム点灯時に軽減されている。自動運転車の混在とシステムの点灯は、捌け交通量向上効果をもたらすだけでなく、渋滞の発生緩和にも寄与していると考えられる。

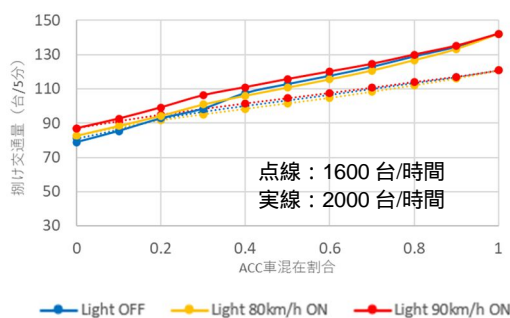


図 6 捌け交通量推移

(4) 渋滞時を対象とした DS 実験

交通流全体としての車頭時間短縮効果は、ACC 混在率が大きい方が小さくなった。一方、非渋滞時の実験結果（(1)および(2)）より、手動運転車の挙動は先行車両によって異なることが想定された。そのため、先行者別、移動発光体有無別の車頭時間推移図を図 8 に示す。渋滞解消地点では ACC 車が先行車である場合に車頭時間が小さくなっていること、移動発光体ありの場合の方がその効果が大きいことなどが示された。一方、走行距離を経るごとに ACC 車が先行車の場合に車頭時間が長くなっているのに対し、手動運転車が先行車で移動発光体がある場合に車頭時間が短くなっ

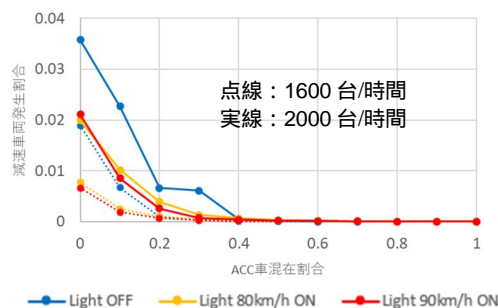


図 7 減速車両発生割合

ている。これは、ACC車においては加速がスムーズで早いため、手動運転車が十分に追従できずに車頭時間が大きくなっていると推察される。

これらの結果からも、混在状態において手動運転車に対する移動発光体の影響が顕著になる可能性が示されている。その原因や詳細については更なる分析が必要であるが、混在状態において手動運転車に対する対策を行う際には、非混在状態とは手動運転車の挙動が異なる可能性を十分に考慮した分析や効果評価等を行うことが必要であることを示しており、このことが本研究全体として共通した、非常に興味深く今後の考慮すべき知見であるといえる。

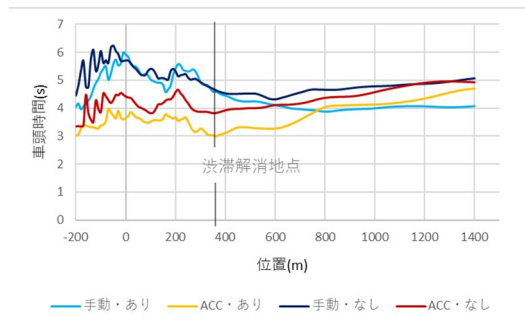


図8 先行車別、移動発光体有無別の車頭時間推移

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 寺田 弘明、柳原 正実、小根山 裕之	4. 巻 7
2. 論文標題 自動運転車混在下における走光型視線誘導システムの交通流への影響分析	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 交通工学論文集	6. 最初と最後の頁 A_216 ~ A_225
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14954/jste.7.2_A_216	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Terada Hiroaki, Yanagihara Masami, Oneyama Hiroyuki	4. 巻 19
2. 論文標題 Influence of Moving Light Guide System on Traffic Flow in Presence of Autonomous Vehicles	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Intelligent Transportation Systems Research	6. 最初と最後の頁 335 ~ 346
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s13177-021-00252-7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 寺田弘明，柳原正実，小根山裕之
2. 発表標題 自動運転車混在下における走光型視線誘導システムの交通流への影響分析
3. 学会等名 第40回交通工学研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 寺田弘明，柳原正実，小根山裕之
2. 発表標題 自動運転車混在下において走光型視線誘導システムが交通流に与える影響
3. 学会等名 第18回ITSシンポジウム
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携研究者	柳原 正実 (Yanagihara Masami) (20739560)	東京都立大学・都市環境学部・助教 (22604)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------