

信号通過支援によるドライバー行動変容と周辺交通への影響に関する基礎的研究

山口 諒*¹ 大門 樹*² 岩岡 浩一郎*³ 朝田 將*³ 織田 利彦*⁴
慶應義塾大学大学院理工学研究科(223-8522 横浜市港北区日吉 3-14-1)*¹
慶應義塾大学理工学部(223-8522 横浜市港北区日吉 3-14-1)*²
(株)パナソニックコネクト(224-8539 神奈川県横浜市都筑区佐江戸町 600)*³
(株)コスモスカイラボ (142-0064 東京都品川区旗の台 6-7-17)*⁴

論文概要：信号情報活用運転支援システムを想定した信号通過支援によるドライバー行動変容が周辺交通へ与える影響について検討した。ドライビングシミュレータを用いた実験の結果、システムがドライバーに対して、対象交差点での交差点通過を表明していない場合に、多くのドライバーが、信号現示が黄灯火に至るまでにアクセルオフと緩やかな減速を行い、交差点を通過せずに停止することが確認された。本研究では、信号通過支援の有無による交差点通過・停止の運転行動の特徴ならびに周辺交通へもたらす影響の初期的な検討結果について報告する。

Basic Study on Driver Behavior Change and Impact on Traffic by Signal Passing Support

Ryo Yamaguchi*¹ Tatsuru Daimon*² Koichiro Iwaoka*³ Susumu Asada*³ Toshihiko Oda*⁴
Graduate School of Science and Technology, Keio University*¹
3-14-1 Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama, Kanagawa 223-8522, Japan
Faculty of Science and Technology, Keio University*²
3-14-1 Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama, Kanagawa 223-8522, Japan
Panasonic Connect Co.Ltd*³
600 Saedo-cho, Tsuzuki-ku, Yokohama, Kanagawa 224-8539, Japan
CosmoskyLab Co.Ltd*⁴
6-7-17, Hatanodai, Shinagawa-ku, Tokyo 142-0064, Japan

Abstract: This study examined the influence of signal passing support on driver behavior and the impact on surrounding traffic, assuming hypothetical traffic signal prediction systems. The experiments were conducted by using a driving simulator. The results showed that when the system does not announce to the driver that he/she will pass through the intersection, many drivers ease up on the accelerator pedal and decelerate slowly before the light turns yellow and stop without passing through the intersection. This study reports the results of driving behavior at intersections with and without the signal passing support, and an initial investigation of the effects of such behavior on surrounding traffic.

1 はじめに

近年、人と道路と自動車の間で情報の受発信を行い、道路交通が抱える事故や渋滞、環境対策など、様々な課題を解決するためのシステムとして ITS (Intelligent Transport Systems:高度道路交通システム) の研究開発が進められ、実道環境へのシステム実装、実証実験などが実施されている。自動運転車が ITS 無線を用い、信号機と通信して信号の切り替わりを先読みすることで、ジレンマゾーンでの急減速を削減する効果を得られることが明らかにされており⁽¹⁾、このような自動運転車の社会実装に向けた研究が盛んである。一般道での完全自動運転の実装を目指す一方で、現在実用段階にあるシステムの一つとして、人間ドライバーに対する運転支援システムである信号情報活用運転支援システム (以降、TSPS と称す) があり、導入や活用が進められている⁽²⁾。TSPS は一般道の主要幹線道路を対象に設置された光ビーコンによる路車間通信と信号サイクル長などの情報を用いて、信号交差点を円滑に通行するための運転を支援するシステムであり、ドライバーに対してゆとりを持ったスムーズな走行の提供が期待される。このようなサービスの効果や影響を確認することは重要であり、利用者個人に対するサービスの効果だけでなく、今後さらに導入が進められ、普及率が高まることによる交通全体への影響評価も重要である。信号交差点において、判断に必要な情報をドライバーに提供する運転支援システムによりドライバー行動変容が生じることが明らかにされており⁽³⁾、行動変容がもたらす周囲交通への影響の検討を行う必要がある。そこで本研究では、様々な交通場面をドライビングシミュレータ (以降、DS と称す) 上で再現し、TSPS の情報提供がドライバー行動に及ぼす影響についての検討を行った。さらに TSPS が導入された際の運転行動の特徴を交通シミュレータに導入して周囲交通への影響を検討することを目的として、まずは運転行動の特徴を導入のための初期的な検討を行った。本研究は慶應義塾大学理工学部/理工学研究科生命倫理審査委員会からの承認を得て実施した。

2 ドライビングシミュレータによる運転行動計測

2-1 実験装置

本研究では図 1 に示す DS (慶應義塾大学・国土技術政策総合研究所共同開発、三菱プレジジョン (株) 製作) を用いた。DS は、実験参加者が乗り込む車両、150 インチ映像スクリーン 8 画面、6 自由度動揺装

置、プロジェクタなどから構成したもので、運転席からの実視野を 360 度になるように構成した。またインストルメントパネル部上側には、図 2 に示されるヘッドアップディスプレイ (以降 HUD と称す) を設置し、TSPS の情報を提示した。

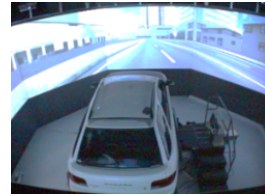


図 1 ドライビングシミュレータ

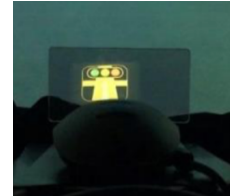


図 2 ヘッドアップディスプレイ

2-2 道路環境および交通状況

DS 環境には、図 3 に示されるように、幹線道路を想定した片側 2 車線 (交差点部では右折レーンがさらに追加)、交差点間隔は 200m の市街地の直線道路を製作した。TSPS 設置区間は連続する 3 つの交差点区間に設置し、それぞれにビーコンや停止線を設定した。それ以外の交差点区間は TSPS を設置しない設定とした。TSPS 機能/仕様がドライバーの認識や行動に与える影響を検討する目的に際して、歩行者用信号は車両用信号の灯火変化を予期させる可能性があることから排除した。通常の交通場面と同様に、自車を追従する後続車両、対向車線を走行する車両を複数設定し、また自車が赤信号で停止中には交差交通として交差点を通過する車両を複数設定した。

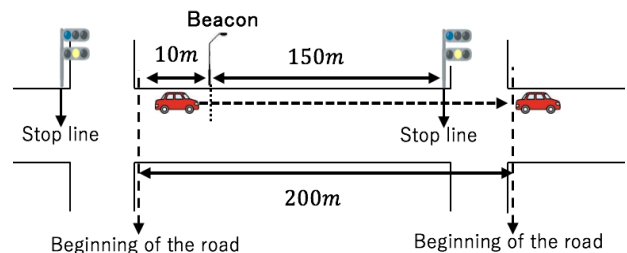


図 3 実験コース

2-3 TSPS の提示情報

TSPS の提示情報は、図 4 に示される 2 種類を設定した。システムが信号交差点を青灯火の状態でも通過できると予想・判断した場合に、図 4(a)に示される信号通過支援の情報が HUD から提示されるよう設定した。一方、信号交差点を青灯火の状態でも通過で



図 4 TSPS の情報コンテンツ

きると予想・判断されない場合、判断が難しい場合には、図 4(b)に示される支援ありの情報が提示されるよう設定した。これは、交差点通過可否が予測しづらく、またドライバーの交差点通過可否の予想と差異が生じやすい交通場面において、TSPS が交差点通過可否の予測が難しい状況であることを HUD 上に提示するものである。

2-4 実験条件

実験条件を表 1 に示す。TSPS 搭載の有無に関して 2 水準設定し、計測対象区間である最後の区間において、ビーコン通過時から黄灯火に変化するまでの時間に関して 5 水準を設定した。この時間は、制限速度である時速 50km で走行している場合、ビーコン通過から図 3 で示した通過先の道路始点に到達するまで約 14 秒かかることから、様々なタイミングで黄灯火になる交通場面の車両挙動を調査するために、表 1 に示される実験条件を設定した。

表 1 実験条件

ビーコン下通過から黄灯火までの時間 (秒)	TSPS非搭載	TSPS搭載
16	—	図4(a)
12	—	図4(a)
10	—	図4(b)
8	—	図4(b)
4	—	図4(b)

各黄灯火タイミングにおいて想定される車両位置は、4 秒は停止線よりかなり手前で黄灯火に変化、12 秒と 16 秒は黄灯火に変化する前に交差点に進入もしくは通過、8 秒と 10 秒は停止線直前でそれぞれ黄灯火に変化するタイミングであり、本研究では 8 秒や 10 秒をジレンマタイミングと称す。全 10 条件のデータを被験者内計画で収集した。

2-5 実験参加者

実験参加者は、正常な視力（矯正視力 1.0 以上）で、運転免許を有し、日常的に運転を行っている若年ドライバー 11 名（男性 11 名）であった。実験参加者の平均年齢は 21.7 歳で標準偏差は 2.18 歳であった。

2-6 実験手続き

最初に実験参加者に実験内容に関する説明を行い、実験参加に関する同意を得た。次に DS に乗車させ、本実験において走行する道路の指定速度が 50km/h であること、車線変更せずに直進走行することなどを教示した。次に実験参加者に DS での運転操作に慣れてもらうために走行練習を実施し、TSPS 非搭載での実験走行へ移行した。TSPS 搭載での実験走行では、まず HUD に提示される情報と提示される交通場面の確認するための走行練習を実施した。その際、

TSPS が次の交差点を通過できると予測すると HUD 上に図 4(a)の信号通過可能のアイコンが提示され、逆に通過できるかどうかの予測が難しい場合は HUD 上に図 4(b)のアイコンが提示されることを教示してから TSPS 搭載での実験走行へ移行した。

3 運転行動の結果

3-1 黄灯火前の加速度

TSPS から支援なしの情報（通過できるかどうかの予測が難しいという情報）が提示される黄灯火タイミング 4 秒、8 秒、10 秒の条件を対象にビーコン下通過時から黄灯火に変化するまでの加速度の結果をまとめた。その結果を図 5 に示す。

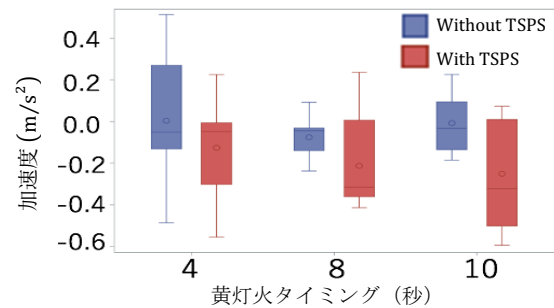


図 5 ビーコン下通過から黄灯火変化前までの加速度

TSPS 搭載時は非搭載時と比較して、黄灯火に変化するまでに減速が大きい傾向がみられた。TSPS 搭載時において信号通過支援が提示されず図 4(b)のアイコンが提示される交通場面において、半数以上のドライバーが 0.0m/s² 未満、つまり加速しない運転操作を行う結果となった。

3-2 黄灯火後の加速度

黄灯火タイミング 4 秒、8 秒、10 秒条件を対象に黄灯火後から停止するまでの加速度の結果をまとめた。その結果を図 6 に示す。

黄灯火タイミング 4 秒条件の黄灯火後から停止までの加速度は TSPS 搭載時と非搭載時でおおむね同

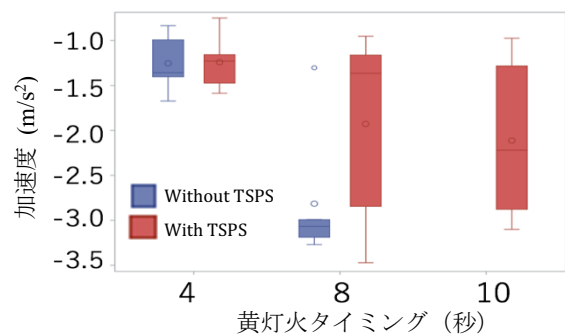


図 6 黄灯火から停止までの平均加速度

様な傾向を示しており，比較的緩やかな減速で停止する傾向がみられた。黄灯火タイミング 8 秒条件において，TSPS 非搭載時では多くの参加者が平均減速度 3.0m/s^2 を超えて停止しているのに対して，搭載時には非搭載時と同様な減速挙動をみせる参加者が確認されるとともに，緩やかな減速挙動で停止する傾向が確認された。黄灯火タイミング 10 秒条件は，指定速度の 50km/h で走行している場合，停止線直前で黄灯火になる場面であり，TSPS 非搭載時には全ての参加者が通過する条件であるが，TSPS 搭載時には停止挙動をする参加者が一定数確認された。またジレンマタイミングにおいて停止する際の平均減速度は，各参加者によって大きくばらつく傾向が確認された。

3-3 TSPS 搭載時のドライバー行動パターン

支援ありの情報（交差点通過可否の判断が難しいという情報，図 4(b)のアイコン）が提示される交通場面における TSPS 搭載時のドライバー行動パターンは，早いタイミングで交差点通過を諦めて黄灯火前に減速行動を選択するパターンと，黄灯火前の大きな挙動変化をせずに交差点付近もしくは黄灯火になるまで概ね一定速で走行するパターンの主に 2 種類に分類された。さらに減速行動パターンとして，黄灯火前にブレーキを踏みはじめる（以降，ブレーキオンと称す）減速パターンと，アクセルから足を離す（以降，アクセルオフと称す）減速パターンの 2 種類の行動パターンが確認された。ここでは停止時の加速度に変化が確認された黄灯火タイミング 8 秒と 10 秒に注目して，減速パターン毎の黄灯火前の加速度の変化を抽出した。その結果を図 7 に示す。

挙動変化をしなかったドライバーの黄灯火前の加速度は，黄灯火タイミング 8 秒と 10 秒のどちらも場合も概ね 0m/s^2 の平均値でばらついていることが確認された。黄灯火タイミング 8 秒条件において，アクセルオフをしたドライバーは平均 -0.336m/s^2 の加速度，ブレーキオンしたドライバーは -0.363m/s^2 の加速度で黄灯火前の減速をしていることが確認された。

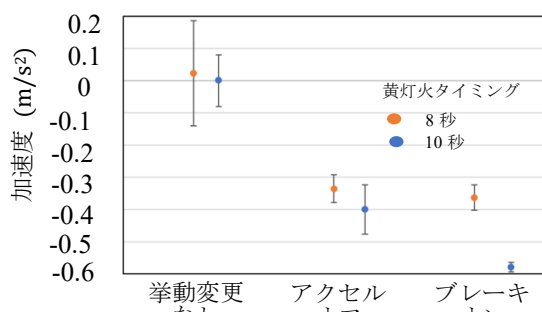


図 7 TSPS 搭載時の行動パターン

また黄灯火タイミング 10 秒条件において，アクセルオフをしたドライバーは平均 -0.400m/s^2 の加速度，ブレーキオンしたドライバーは -0.579m/s^2 の加速度で黄灯火前の減速をしていることが確認された。

3-4 赤灯火開始時の車両位置

各実験条件における実験参加者の赤灯火開始時の車両位置を図 8 に示す。

黄灯火タイミング 16 秒と 12 秒条件においては容易に通過できる交通場面であるため，TSPS 搭載/非搭載どちらの場合においても全ての参加者が赤灯火前に交差点通過が完了している状況が確認された。また黄灯火タイミング 4 秒条件においては停止線よりかなり手前で黄灯火になるため，全ての参加者が停止していることが確認された。ジレンマタイミングである黄灯火タイミング 10 秒と 8 秒の交通場面において，TSPS 非搭載時と比較して搭載時には，赤灯火開始時に交差点内に位置している車両が少ないことが確認された。また TSPS 搭載時は停止台数が増加する傾向がみられた。

3-5 システムの有用性

TSPS による支援の有用性に関する主観評価の結果を図 9 に示す。信号通過支援が提示されるような交差点進入時に青灯火であった交通場面である黄灯火タイミング 16 秒や 12 秒条件や，停止線のかかなり手前で黄灯火となった黄灯火タイミング 4 秒の交通

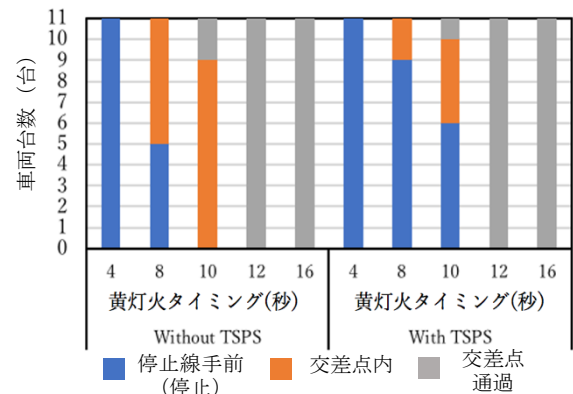


図 8 赤灯火時の車両位置

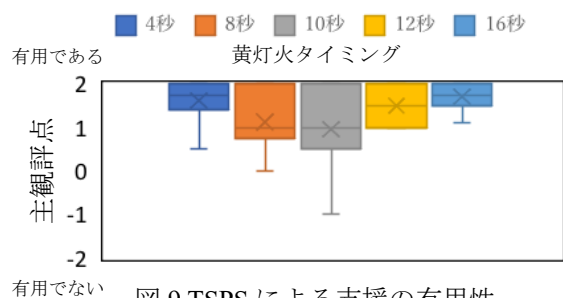


図 9 TSPS による支援の有用性

場面では TSPS の支援は有用であると評価される傾向が確認された。ジレンマタイミングとなる黄灯火タイミング 8 秒や 10 秒条件ではその有用性に関する評価にばらつきが生じる傾向が確認された。

4 交通シミュレーションによる初期検討

4-1 シミュレーション概要

TSPS 搭載によるドライバー行動変容が周囲交通へ与える影響について検討するために、ドイツ航空宇宙センター (DLR) によって開発された交通シミュレータである SUMO (Simulation of Urban Mobility)⁽⁴⁾を用いて、実験によって得られたデータに基づいて、シミュレーションを実施し、周囲交通に与える影響について基礎的検討を行った。実施した交通シミュレーションの概要と交通状況の設定を表 2 と表 3 にそれぞれ示す。道路環境は DS 実験と同様に交差点間隔 200m の直線道路を作成した。また TSPS 搭載車の交通への混入率増加による影響を確認するため、混入率を 0% から 100% まで 20% ずつ増加させシミュレーションを実施した。

表 2 シミュレーション概要

項目	値
車両長	4.8m
車両最大加速度	2.6m/s ²
車両最大減速度	3.50m/s ²
追従モデル	Krauss (SUMOのデフォルト)
車両標準速度	13.89m/s
車線変更モデル	LC2013

表 3 交通状況/道路環境の設定

項目	値
交差点間隔	200 m
信号サイクル	測定方向：青50秒，黄3秒，全赤2秒 交差方向：青35秒，黄3秒，全赤2秒
交通量	400台/時 600台/時

5 交通シミュレーションによる遅れ時間の初期検討

TSPS 搭載によるドライバー行動の変容により、周囲交通に影響が出る可能性が示唆される。特に、早めの減速により停止回数が増えることで遅れ時間が増加することが懸念される。遅れ時間とは「赤信号のために停止した時間、先行車に追従するために希望する速度よりも遅い速度で走行したために遅れた時間、一時停止標識に従って交差交通の切れ目を待っていた時間、駐車車両や歩行者、転向車両などを

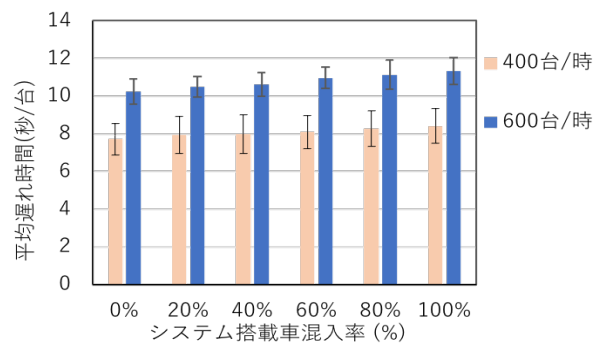


図 10 対象区間における遅れ時間

避けるために生じた時間などが含まれる。」で定義され、各車両の遅れ時間を合計した総遅れ時間は交通運用状態を表す交通管理上の評価指標として用いられる⁽⁶⁾。交差点 1 区間における車両 1 台あたりの平均遅れ時間 (秒/台) の交通シミュレーション結果を図 10 に示す。システム搭載車の交通への混入率が増加するとともに平均遅れ時間も増加する傾向が確認された。また搭載車混入率 0% と 100% の交通状況での平均遅れ時間を比較すると、その増加率は交通量がどちらの場合でも 10% 程度であった。

6 考察

6-1 TSPS 導入とドライバー行動・車両挙動の特徴

TSPS 搭載時において、HUD 上に信号通過支援が出ている場面では参加者に交差点通過可能であることを想定させる一方で、交差点通過可否の予測が難しい状況である情報が提示される場面では、参加者に信号現示が黄灯火に変わる可能性があるという予測を促しているため、早いタイミングでの減速開始を促していることが示唆された。また行動を変化させなかった参加者は、システムからの情報が通過不可を示していないために、交差点通過可否を保証するものではなく、参考情報としての認識であったことが示唆される。このような各参加者の情報提供に対する認識の差異により、黄灯火前のドライバー行動にも違いが生じるため、TSPS 搭載時には停止のための減速度が大きくばらつくことが示唆された。

6-2 TSPS の情報提供とシステム有用性

ジレンマタイミングでは参加者が通過判断をしたにもかかわらず、システムが信号通過支援を表示しないことへの疑問が生じたため、システムへの有用性を低く評価した可能性が示唆される。一方で、最低評点をつけることはなく、有用性を低く評価しなかった参加者も一定数存在した。これは図 4(b) の提示情報が通過不可を示していないために、システム

が誤っていると感じなかったという内省報告を受けており、システムが交差点通過可否を断定するのではなく、予測が難しい状況であることを提示することで有用性を大きく損ねることを防止する効果がある可能性が示唆された。また支援の有用性においては依然課題が残っていることは明らかであり、ユーザにとって高い有用性を確保するためのシステム設計/HMI 設計についても検討を行う必要があると考えられる。

6-3 TSPS 導入による周囲交通の特徴

黄灯火前の減速を促し停止台数が増えるため、TSPS の情報提供により、遅れ時間が増加することが示唆された。ただし、その増加率は 10%程度に留まっており、交通流へ甚大な影響を及ぼすものではないと考える。この要因には、栃木県宇都宮市の幹線道路でのフィールド試験⁶⁾において、ジレンマゾーンの遭遇率は 1.02 %であることが示されており、今回のシミュレーションは実環境とは異なるが、遅れ時間に大きく影響すると考えられる交通場面、すなわち TSPS 非搭載時には通過するが、TSPS 搭載時には情報提供により停止挙動をするような交通場面遭遇する確率が大きくないことが挙げられる。また図 8 でも示した通り、TSPS の情報提供により赤信号灯火時に交差点に位置する車両が減少する傾向が示唆されており、交通流の悪化という側面がある一方で、危険につながる可能性のある運転行動を抑制する効果があることが示唆された。

7 まとめ

本研究では信号交差点を通過もしくは停止する場面において、情報提供がドライバー行動に与える影響を DS 実験により調査した。また交通シミュレータを用いて、一部の条件における周囲交通への影響に関する基礎的な検討を行った。本実験より、以下の結果が得られた。

- TSPS 搭載時に交差点通過可を示す信号通過支援情報が提示されない交通場面において、早いタイミングでの減速開始を促せる可能性が示唆された。それに伴い搭載時には停止数が増加することが明らかとなった。
- TSPS の情報提供による停止数の増加により、若干の交通流の悪化が見られる反面、赤灯火時に交差点内に位置する車両を減少させる効果があることが示唆された。
- システムによる支援は有用であると評価される一方で、交差点通過/停止のジレンマが発生するよう

な交通場面においては課題があることが明らかとなった。

しかしながら、今回のシミュレーションは極めて限定的な条件で実施した。道路環境および交通状況は、片側 2 車線の単純な直線道路の交差点で、右左折する車両は存在しない。また、本研究における DS 実験では車群の先頭を走行するドライバー行動データを収集しており、追従走行時のシステム搭載/非搭載による影響に関する検証が行えていない。先行車の搭載の有無と後続車の搭載の有無の組み合わせによって変容する運転行動と周囲交通への影響に関しては追加の検証が必要である。また実験の制約上、全ての交通状況に対応したデータを収集することはできなかったため、DS 実験と同じ交通状況でない場合の挙動は実験で得られているデータで代用してシミュレーションを行っている。今後は一般性を失わないために、より詳細なドライバーモデルの構築や交通需要の設定を行い、システムの交通流への影響を明らかにする必要があると考える。

8 参考文献

- (1) 市原直樹, 米陀佳祐, 菅沼直樹: 自動運転における ITS 無線を用いたジレンマゾーンでの急減速の削減, 自動車技術会論文集, Vol.52, No.2, p.413-418 (2021).
- (2) 道路交通情報通信システムセンター: 信号情報活用運転支援システム, <https://www.vics.or.jp/> (2022 年 8 月 12 日参照)
- (3) 丸茂喜高, 中野亮, 中西智浩, 道辻洋平: 路面への情報呈示による信号交差点でのドライバ判断支援システム, 日本機械学会論文集, Vol.82, No.843, p.16-00276 (2016).
- (4) Pablo Alvarez Lopez, Michael Behrisch, Laura Bieker-Walz, Jakob Erdmann, Yun-Pang Flötteröd, Robert Hilbrich, Leonhard Lücken, Johannes Rummel, Peter Wagner and Evamarie Wießner: IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC) (2018).
- (5) 交通工学会: 交通工学用語集, <http://glossary.jste.or.jp/遅れ時間/> (2022 年 11 月 2 日参照)
- (6) Yoshinori Kinoshita and Hidetoshi Imaizumi.: Safety Effect of Traffic Signal Prediction Systems, International Journal of Automotive Engineering, Vol.9, No.4, pp.252-257 (2018)