

ACC 車両が混在する高密度交通流の挙動と運転者挙動への影響

Characteristic of High Density Traffic Flow Mixed with ACC Vehicles and the Influence to Driver's Behavior

飯田 克弘¹, 浅田 真敬², 多田 昌裕³, 筑後 智弘⁴, 西田 将之⁵, 安 時亨⁶, 澤田 英郎⁷

Katsuhiro IIDA¹, Masanori ASADA², Masahiro TADA³, Tomohiro CHIKUGO⁴, Masayuki NISHIDA⁵, Sihyoung AN⁶, and Hideo SAWADA⁷

道路交通の安全性・円滑性の観点から、自動運転技術の開発が急速に進められている。しかし、自動運転技術を搭載した車両が一般車両と混在した際、周辺の車両が受ける影響に関して運転者行動を含めて評価（社会受容性評価）した研究は希少である。先行研究では、ACCに着目し、臨界流に近い交通流を対象とし、ACC車両が混在した交通流の特性や運転者行動を調査したが、本研究では、先行研究より高密度な交通流を対象とし、交通流の安全性・円滑性や運転者行動を明らかにした。その結果、高密度交通流においても、ACC車両の混在比率が上昇することによって円滑性は向上したが、安全性に関しては潜在的な事故リスクが増えるケースが確認された。また、ACC車両が混在することで、運転者には自身の運転および周囲に注意を向ける余裕が生じることが明らかとなった。

The development of autonomous driving technology is pushed forward rapidly to improve the safety and smoothness of road traffic. However, few studies have investigated for evaluating how autonomous vehicles affect surrounding vehicles movements and drivers' behaviors in mixed-traffic flow consisting of autonomous vehicles and manually driven vehicles. In previous studies, focusing on adaptive cruise control (ACC) system, we simulated mixed-traffic flow consisting of ACC vehicles and non-ACC vehicles at nearly critical density on driving simulator, and investigated characteristics of the traffic flow. In this study, we focused on higher density traffic flow than previous study and evaluated the safety and smoothness of the traffic flow and drivers' behaviors. Even though the smoothness was improved with the increase of the mixture ratio of ACC vehicles in the results of this study, a case where a potential accident risk increased was observed with reference to the safety. In addition, it was revealed that drivers could afford to pay attention to their own driving and surroundings by the ACC vehicles being mixed.

Keywords: 高密度交通流, Adaptive Cruise Control, 自動運転技術, ドライビング・シミュレータ

High Density Traffic Flow, Adaptive Cruise Control, Autonomous Driving Technology, Driving Simulator

1. はじめに
近年、交通事故の削減や交通渋滞の緩和を期待して、自動運転技術の開発が進んでおり、わが国では、2025年を目途に完全自動走行システムの市場化を可能にするこ

-
- 1 正会員, 博士 (工学), 大阪大学大学院工学研究科
Member, Dr. Eng., Faculty of Engineering, Osaka University
〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1 e-mail:iida@civil.eng.osaka-u.ac.jp Phone:06-6879-7611
 - 2 学生会員, 学士 (工学), 大阪大学工学部
Student Member, BE, Faculty of Engineering, Osaka University
 - 3 正会員, 博士 (工学), 近畿大学理工学部
Member, Dr. Eng., Faculty of Science and Engineering, Kinki University
 - 4 非会員, 中日本高速道路株式会社
Non-member, Central Nippon Expressway Co. Ltd.
 - 5 非会員, 近畿大学理工学部
Non-member, Faculty of Science and Engineering, Kinki University
 - 6 正会員, 博士 (工学), TOP, 西日本高速道路エンジニアリング関西株式会社
Member, Dr. Eng., TOP, West Nippon Expressway Engineering Kansai Co. Ltd.
 - 7 正会員, 修士 (工学), TOE, 西日本高速道路エンジニアリング関西株式会社
Member, ME, TOE, West Nippon Expressway Engineering Kansai Co. Ltd.

とを目標に掲げている¹⁾。

上記の市場化に向け、内閣府の自動走行システム研究開発計画²⁾では、2017年9月より常盤道～首都高速～東名高速～新東名高速 300km で大規模実証実験を開始している。大規模実証実験の概要を表1³⁾に示す。

表1 SIP 大規模実証実験の概要

試験場所	試験内容
高速道路	・カーブなど様々な走路環境でのダイナミック・マップの有効性、精度検証 ・車車間通信による分合流部走行支援に係る実証

しかし、大規模実証実験では、自動運転技術を搭載した車両が一般車両と混在した際、周辺の車両が受ける影響に関して運転者行動を含めた検証はしていない。

ここで、本研究ではSAE レベル1の定速走行・車間距離制御装置（ACC：Adaptive Cruise Control）搭載車両（以下、ACC 車両）に着目しているが、前述した周辺の車両が受ける影響に関する既往研究としては、ACC 車両の混在によりサグでの渋滞緩和効果を検証した研究³⁾⁴⁾や、ACC 機能を使用してキープレフト走行の運転者の受容性を検証した研究⁵⁾が挙げられる。しかし、前者ではシミュレーションを基に検討を行っており、運転者が交通流から受ける心理的影響を考慮していない。また、後者では車両が相互に影響し合うような交通流での調査を行っていない。多様な運転特性をもつ運転者によって形成され、かつ、ACC 車両が周辺の車両に影響を及ぼすような交通流での調査をした研究は希少である。

以上を踏まえ、本研究の先行研究⁶⁾では、ACC 車両が混在した臨界流に相応する交通流を仮想空間上で生成した。そしてドライビング・シミュレータ（以下、DS）を用いた走行実験を行った（以下、第1実験）。その結果、ACC 車両の混在比率が上昇することにより、道路線形に関わらず、交通流率が改善する事例や、サグや急カーブで追突事故リスクが低減する事例を確認した⁶⁾。しかし、ACC 車両はサグや急カーブといった道路構造で減速することなく走行するため、ACC 車両を運転する運転者はもとより、その周辺の運転者（特に後続の運転者）に心理的負荷をもたらすことが予想された。また、ACC 機能により車両速度制御や車間距離維持タスクから開放された運転者がその余裕をどのように使うのかも不明である。以上の課題に対し、第1実験⁶⁾で生成した交通流中の特定区間を、第1実験の参加者と異なる被験者に運転してもらい、走行中の運転行動を計測した。さらに走行直後に、走行場面を再現することによる振り返りを行い、走行中に気になっていた対象やリスク評価をヒアリングした⁷⁾（以下、第2実験）。その結果、ACC 車両の混在比率

が上昇することにより交通流が整い、それによって運転者の注意負荷が軽減されるという示唆を得た⁷⁾。一方で、ACC 機能は場合によっては漫然運転を誘発するリスクを孕む可能性もあることが示唆された⁷⁾。どのような交通流で ACC 機能のメリットが享受でき、またどのような場面で ACC 機能のデメリットが生じるのかといったことは不明である。

以上を受けて、本研究では、臨界流よりも交通密度が高く、速度の急変が生じやすい交通流（以下、高密度交通流）を対象とする。一つの理由は、自動運転技術の導入の背景にある交通渋滞の緩和という観点から、ACC 車両が混在する高密度交通流を対象とした交通流の円滑性、安全性を評価する必要があると考えたからである。もう一つの理由として、高密度交通流では、速度や車間距離の急変が生じやすく、第2実験⁷⁾で可能性が示唆された ACC 機能がもたらすメリット（注意負荷の軽減）とデメリット（漫然運転）を確認するのに適していると考えたからである。

そこで、本研究では、ACC 車両が混在する高密度交通流を対象として、先行研究と同様のアプローチで交通流の円滑性や追突事故リスクを評価する。その上で、走行中の運転者の視線データや走行直後のヒアリングデータから、第2実験と同様に、運転者の注意傾向を把握する。さらに、ACC 機能がもたらすメリット／デメリットに言及することをねらいとして、ヒアリングデータからストレス度合いの把握を試みる。

2. 室内走行実験

2.1 実験概要

本研究では、2017年11月1日～15日の平日10日間、1日あたり3名の計30名の被験者に対し実験を実施した。被験者は日常的に運転する33～50歳の男性30名（平均41.3歳）を一般募集した。

2.2 実験手法

DS を用いて被験者の運転特性の違いを考慮した交通流を生成するために、大口・飯田⁸⁾が提案した追従積重ね実験を実施した。追従積重ね実験とは、ある被験者が走行する際に、その被験者より前の被験者の走行軌跡に基づく車両が前方に描画され、被験者はそれらに追従して走行する実験である。

2.3 道路モデル

本実験では、先行研究⁶⁾と同様、既往研究⁹⁾で走行結果の現況再現性が確認された複数の区間（中央道区間（拡幅前）と山陽道区間、高松道区間）を、道路構造令・高速道路設計要領に準拠して設計した調整区間で結合した

全長 11.05km の道路モデル (図 1) を使用した。

2.4 交通流の生成

先行研究⁹⁾⁷⁾では、車線変更など車両が比較的自由に走行できる交通流を対象とした。これに対し、本研究で対象とする高密度交通流は、車線変更が難しく、少しの乱れで減速波が発生するような交通流を想定した。

(1) 走行パターン

ACC 車両の混在比率は 0% と 50% とし、表 2 に示すパターンで実験を行った。また、各パターンで被験者の順序が同じになるようにした。

ACC 車両混在比率 50% (P50_A, P50_B) については、P50_A で ACC 車両を運転していた人は、P50_B で ACC 機能を搭載していないマニュアル操作が必要な車両 (以下、MD 車両) で運転し、P50_A で MD 車両を運転していた人は P50_B で ACC 車両を運転してもらった。

表 2 走行パターン

パターン名	P0	P50_A	P50_B
ACC 車両混在比率	0%	50%	50%

(2) 先頭車群

走行順序が早い被験者が追従走行する環境として、筆者らが、20 台の車列 (以下、先頭車群) を追従積重ね走行により生成した。ここで、この車群の先頭車両の速度推移は以下のように設定した (図 2 参照)。

- 中央道区間 (0~3.0kp) : 既往研究⁹⁾より、減速波の増幅伝播が大きくなるとされている、下り勾配付近 (1.0kp 付近) から速度が低下し、3.0kp 付近でも回復傾向が見られない速度推移を参照した。
- 山陽道区間と高松道区間 (3.0~11.0kp) : 先行研究⁹⁾で得られた空間平均速度のデータのうち、山陽道区

間の上り坂付近 (6.0~7.0kp) と高松道区間の急カーブ (8.5~10.0kp) において、平均速度が最も遅くなったケース (ACC 車両混在比率 50% かつ、走行車線の先頭車両が ACC 車両) を参照した。

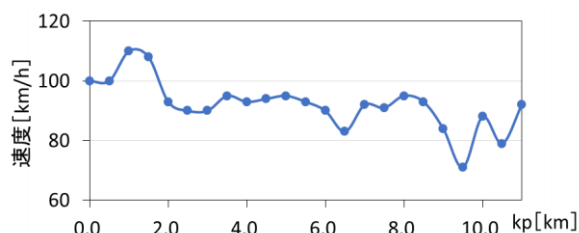


図 2 先頭車両の速度推移図

2.5 実験手順

被験者には、まず個人情報の取り扱いや実験上の注意事項を説明し、実験参加への同意書に署名・捺印頂いた。その後、DS の操作方法、走行コース、メーターの表示画面および以下の ACC 機能についての説明を行った。

- 前方車両が検知範囲内に存在しない場合、設定速度を維持して単独走行となる (Cruising)。
- 前方車両が検知範囲内に存在し、その速度が設定速度よりも低ければ、車間距離を維持して前方車両に追従する (Following)。
- ドライバーがアクセル・ブレーキを一定量以上踏み込んでいる間は、ACC 機能よりも運転者の操作が優先される (Override)。

実験走行開始前の練習走行では、まず、DS 操作に慣れてもらうことを目的とし、被験者が納得するまで MD 車両で走行してもらった。次に、ACC 車両で走行してもらい、上述した ACC 機能への習熟を図った。練習走行終了後、視線を計測するアイカメラ (ナックイメージテクノロジー社製、EMR-9、以下、EMR) の装着を行った。そ

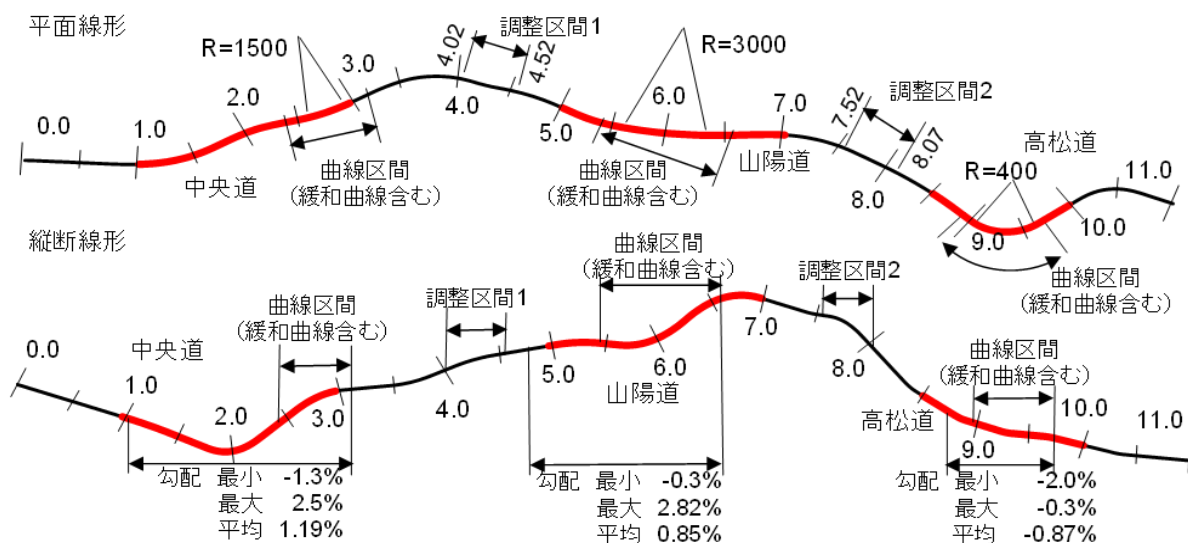


図 1 道路線形図

の後、表2に示した全パターンについて実験走行を行った。なお、走行するP0、P50_A、P50_Bの順序は被験者ごとにランダムに入れ替えた。また、被験者に以下の条件を順守して走行するよう教示した。

- ・ 前方車両の姿が見えなくなることがないように、周囲の車両の流れに沿って追越車線を走行すること。
- ・ 側壁ガードレールや周辺車に接触した場合は走行やり直しとなること。
- ・ 上記2点以外は、普段どおりの運転を心がけること。

ここで、交通量が増大すると追越車線利用率が高くなり、先に追越車線から低速な車列が出来上がるという知見¹⁰⁾に基づき、本実験では、追越車線を対象としている。

各走行後には、運転台の上に置いたPC(図3の赤丸)で記録した走行動画を被験者に提示し、その走行を振り返ってもらってから、走行中に気になっていた対象やストレス度合いをヒアリングした。ヒアリングを行う箇所はサグ部下り勾配(0.8~2.0kp)、上り坂(5.0~6.0kp)、急カーブ(8.5~9.5kp)とした。



図3 実験風景

3. 交通流特性と車両挙動

本稿では、サグを含む中央道区間と急カーブを含む高松道区間を対象とした分析結果を示す。

はじめに、各区間の速度コンター図から減速波の発生伝播状況を読み取り、さらに、区間別に走行パターンごとの交通流率を比較することにより、ACC車両が混在した交通流の特性を把握する。次に、各区間でコンフリクト指標の1つであるPICUD¹¹⁾を算出し、潜在的な追突事故リスクを把握する。

3.1 減速波の発生伝播状況

(1)中央道区間

中央道区間における速度コンター図を縦断線形図と合わせて図4に示す。ここで、図4におけるP50_AとP50_Bの太線はACC車両を表す。

この図から、P0において、ID2(先頭車群を除く、先頭の次(2番目)に走行を開始した被験者)の車両が1.2kp付近のサグ部下り区間において60km/hまで減速し、車頭距離が開いている。また、ID3以降の車両が車頭距離を維持して追従しているため、ID2の車両を先頭に車間の詰まった車群を形成する。車群中で、反応遅れに起因する速度低下が起こり、後方車両になるほど大きく減速

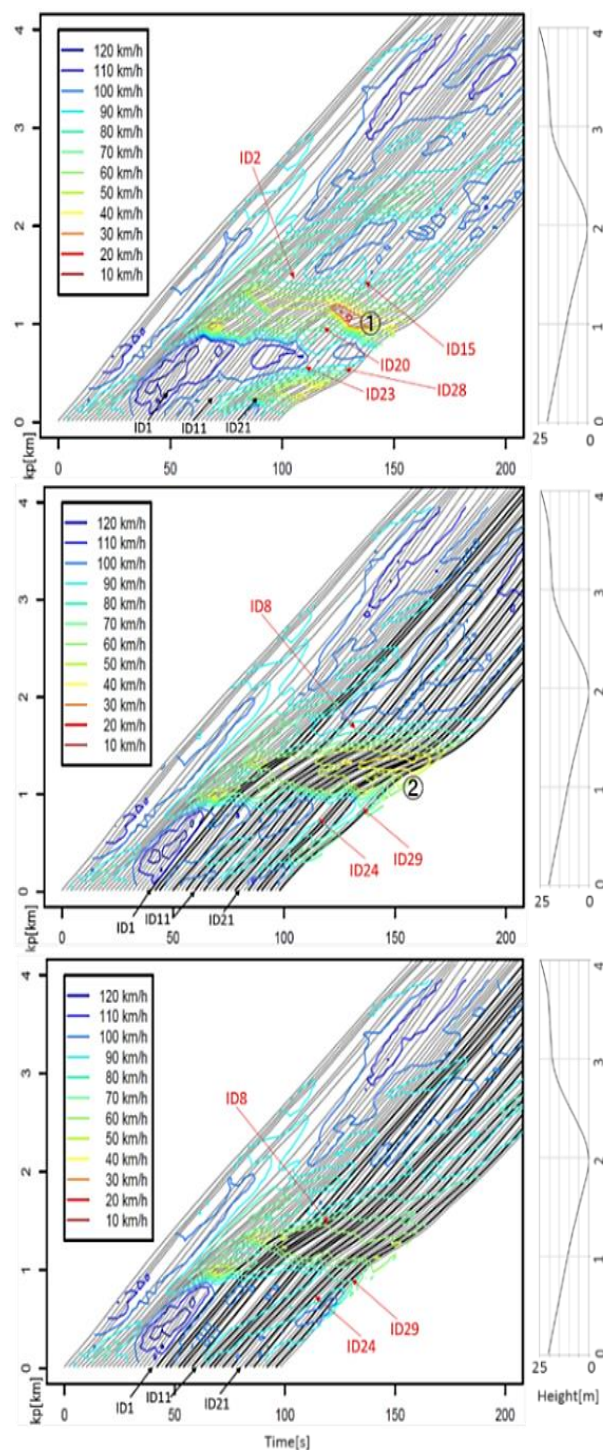


図4 P0(上)とP50_A(中)とP50_B(下)の速度コンター図(中央道区間)

する。このように減速が伝播することにより、1.2kp付近においてID15の車両が40km/hまで減速し、さらに、1.1kp付近でID20の車両が20km/hまで減速している。以上より、ID2の車両の減速が起点となり減速波の上流増幅伝播(図4中①)が起こったと考えられる。

一方、P50_Aにおいて、区間全体でID8の車両(MD車両)が0.9~1.1kpにかけて100km/hから60km/hまで減速し、車頭距離が開いている。しかし、ID9以降のACC車両が前方車両の減速に対し、遅れなく緩やかに反応し、

車頭距離を維持して追従しているため、後続車両に減速は伝播するものの減速波の増幅は見られない。結果として、P50_A では低速走行が長く続き、減速波が下流に伝播（図4中②）する。この状態からさらに車両を積み重ねる場合、減速波は増幅していないため、車群後方の車両は、車群前方の車両と同程度の減速となる。したがって、車群後方の車両が停止、発進を繰り返すような渋滞が発生する可能性は低いと考えられる。

さらに、P50_Bにおいて、1.0kp付近で各車両が90km/hから60km/hまで減速している。しかし、P50_Aと同様、ACC車両が混在することにより、反応遅れを伴い減速する車両が少なくなり、減速波の増幅伝播が緩和されていることが確認できる。

以上を纏めると、ACC車両は前方車両の減速に対し、遅れなく緩やかに反応し、これがACC車両に追従するMD車両にも影響するため、ACC車両の混在比率が50%になることで、低速域の発生、減速波の上流増幅伝播が抑制されたと解釈することができる。

(2)高松道区間

次に、高松道区間における速度コンター図を平面線形図と合わせて図5に示す。ここで、図5におけるP50_AとP50_Bの太線はACC車両を表す。

この図から、P0において減速波の上流増幅伝播（図5中③）が起こっており、8.2kp付近ではID24の車両が10km/h以下にまで減速している。この減速波の発生原因は、先頭車群ID16～20の車両が急カーブ手前9.0kp付近において70km/hから40km/hまで減速していることだと読み取ることができる。

一方、P50_Aでは、急カーブ手前8.7kp付近で先頭車群ID16～20の車両が100km/hから60km/hまで減速しているが、ACC車両が前方車両の減速に対し、遅れなく緩やかに反応し、車頭距離を維持して追従しているため、後方車両に減速は伝播するものの減速の増幅は見られない。結果として、低速走行が長く続いて、減速波が下流に伝播（図5中④）していることが確認できる。

さらに、P50_BにおいてもP50_Aと同様のメカニズムで、交通流の乱れは少なくなり、減速波の増幅伝播が緩和したと考えられる。

以上より、中央道区間同様、車両の減速が生じやすい急カーブを有する高松道区間においても、ACC車両混在比率が50%になることで、減速波の伝播が緩和されることが確認された。

3.2 交通流率

本研究では、分析対象とする追越車線の交通流率を、1人目の被験者と最後の被験者の車両の通過時刻から、交通流の平均車頭時間を求め、その逆数を取ることで算出した。

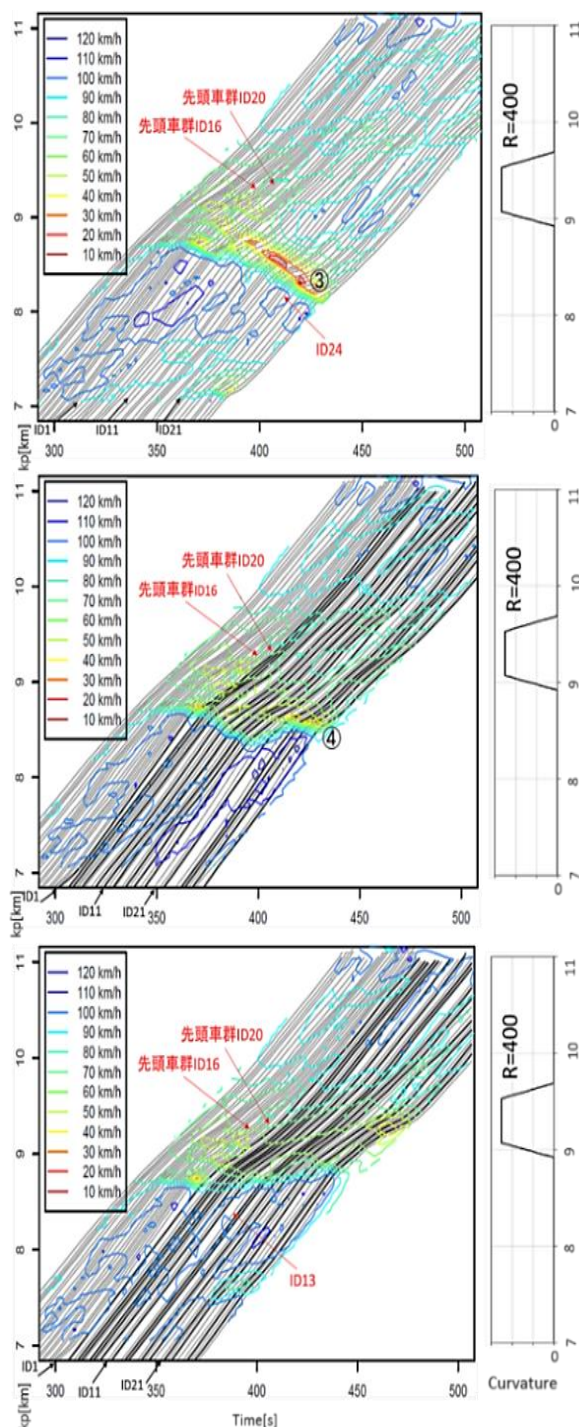


図5 P0(上)とP50_A(中)とP50_B(下)の速度コンター図 (高松道区間)

(1)中央道区間

中央道区間における交通流率の推移を図6に示す。まず、サグ部の下り勾配区間である0～1.5kpにおいて、P0では、大きく交通流率が低下していることが読み取れる。

そこで、中央道区間における速度コンター図（図4）を参照すると、P0では0～0.2kpにおいて、ID15の車両が70km/hまで減速し、車頭距離が開いている。ID16以降の車両では、特に0.5～0.7kpにおいて、ID23～ID28の

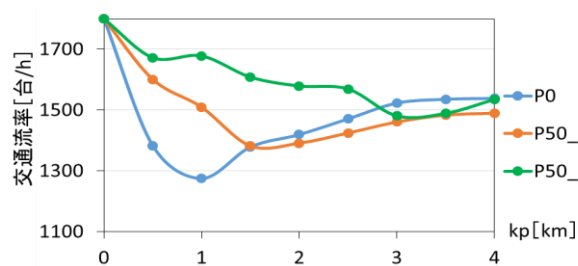


図6 中央道区間における交通流率の推移

車両が減速し、車頭距離が開いているのが読み取れる。以上より、これが上述した交通流率の低下原因であると考えられる。

一方、P50_AでもP0ほどではないが、P50_Bと比較して0～3.0kpで交通流率が低下しているのが、この原因を考察する。P50_Aでは、0～1.0kpにおいてID8、ID24、ID29（いずれもMD車両）の車両が減速し、車頭距離が開いており、P0においても同様の走行が確認できる。しかし、P50_AではID8、ID24、ID29以外の車両が車頭距離を維持して走行しているのが確認できる。これは、ACC車両が前方車両との車間距離を自動的に調節するため、ACC車両の混在により、車間を開けて走行する車両がP0よりも減少したためであると考えられる。したがって、P50_Aの交通流率は、P0の交通流率ほど低下しなかったと考えられる。一方、P50_Bでは、ID8、ID24、ID29はACC車両を運転していることにより、車頭距離を維持して走行している。また、P50_AでACC車両を運転していたID11がP50_BでMD車両を運転することにより、減速時に車頭距離が開いたが、ID11以外のMD車両が車頭距離を維持して走行している。以上より、P50_BではP50_Aよりも車間を開けて走行する車両が減少したため、交通流率の低下が抑制されたと考えられる。

このように、ACC車両混在比率が50%のときに、速度低下や車頭距離の増加が見られる車両が減少し、交通流率の低下が抑制されるという知見は、先行研究⁹と同様と考えられる。本研究における高密度交通流でもACC車両の混在により交通流率の低下の抑制が確認できたことで、ACC車両が普及することによって期待されている交通渋滞緩和に繋がると考えられる。

(2)高松道区間

高松道区間における交通流率の推移を図7に示す。この図から、カーブ手前の7.0～8.5kpにおいて、P0の交通流率が大きく低下していることが確認できる。一方、P50_AとP50_Bでは区間全体で交通流率は低下しなかったが、カーブ直前の8.5～9.0kpにおいて、P50_Bの交通流率が上昇していることが確認できる。

そこで、高松道区間における速度コンター図（図5）を参照すると、P0で8.0～8.5kpにおいて減速波③が存在

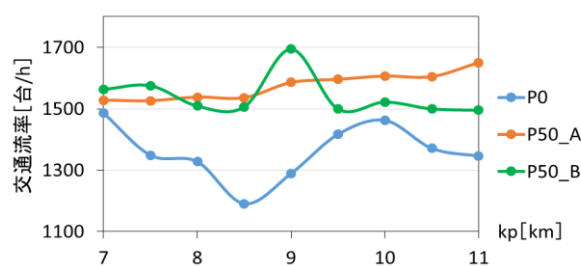


図7 高松道区間における交通流率の推移

し、ほとんどの車両が短時間で100km/hから30km/hにまで減速していることが読み取れ、これが上述した交通流率の低下原因と考えられる。

一方、P50_Aでは8.4kp付近、P50_Bでは8.7kp付近において100km/hから50km/hにまで減速していることが読み取れる。しかし、3.1(2)項で述べた通り、ACC車両の混在によりカーブ直前で減速波の伝播が緩和されており、P0のような短時間の急減速には至らなかったため、交通流率の低下が抑制されたと理解できる。

さらに、P50_Bでは、8.7kp付近において、ID13の車両（MD車両）は車頭距離が開いているが、ID13以外の車両は減速と同時に車頭距離が詰まり、局所的に交通密度が増加したため、上述した交通流率の上昇が生じたと考えられる。

以上より、急カーブを有する高松道区間においても、先行研究⁹と同様に、ACC車両混在比率が50%のとき、急激な速度低下や車頭距離の増加が見られる車両が減少することによって、交通流率の改善が確認できた。

3.3 コンフリクト指標を用いた安全性評価

各車両の潜在的な追突事故リスクを評価するため、コンフリクト指標の1つであるPICUD¹¹⁾を基に考察を行う。PICUDは、式(1)で定義され、前方車両が仮に急減速した場合に、後続車両が反応遅れを伴い急減速して、両者が停車したときの相対的な位置を表す。PICUDが負値となる場合は、前方車両の急減速に対して、後続車両が急減速しても衝突を回避できない可能性を示す。

$$PICUD = \frac{V_1^2}{-2a} + s_0 - \left(V_2 T + \frac{V_2^2}{-2a} \right) \quad (1)$$

ここに、 V_1 、 V_2 、 s_0 ：前方車両の減速開始時における前方車両の速度 [km/h]、後続車両の速度 [km/h]、車間距離 [m]、 T ：反応遅れ時間 [s]、 a ：減速時の加速度 [m/s^2]である。ここで、反応遅れ時間 T 、減速時の加速度 a は、既往研究¹¹⁾にならい、 $T=1$ [s]、 $a=3.3$ [m/s^2]とした。

走行パターンごとに、追従関係にある2台の後方車両について0.02kpおきにPICUDを算出する。さらに、各地点について、PICUDが負値となった車両の全車両に対する割合を負値PICUD検出率として算出し（図8）、これをパターン間で比較する。

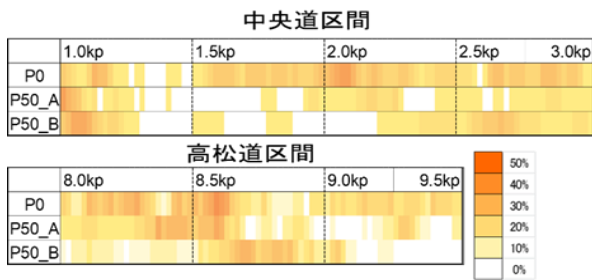


図8 負値 PICUD 検出率

図8から、中央道区間では、全体的にP0で負値PICUD検出率が高く、ACC車両が混在しているP50_A、P50_Bでは検出率が低下していることが読み取れる。この全体的な傾向は先行研究⁹⁾と同様であるが、先行研究⁹⁾では見られなかった負値PICUD検出率が高い箇所を確認することができる。図4を参照すると、検出率が高くなったP50_Aの1.0kp付近やP50_Bの1.1kp付近では減速波が発生している。減速箇所において、特にACC車両に追従するMD車両のPICUDが負値となった車両が多く見られ、このことが影響していると考えられる。そこで、P50_AやP50_Bの上記箇所を対象に、前方がACC車両、後続がMD車両という組み合わせの車両挙動に着目し、上記結果が得られた要因を考察する。

一例として、P50_Aの0.8~1.2kpを対象として、図9の左にP50_AのID21の車両(MD車両)とその前方ACC車両の走行軌跡、右に速度とPICUDの推移図を示す。

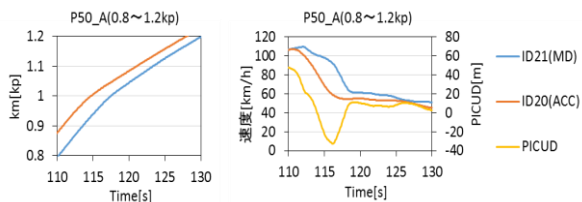


図9 中央道区間でのP50_Aにおける走行軌跡(左)と速度とPICUDの推移図(右)

速度とPICUDの推移図から、前方ACC車両の減速に対し、3秒ほど遅れてID21の車両が減速を開始していることが読み取れる。これにより、ID21の車両と前方車両の車頭距離が詰まり、この影響でPICUDが急激に低下して負値となったと考えられる。反応遅れを伴った要因として、ID21がACC車両の緩やかな減速に気づかなかったことが考えられる。この例のように、速度の急変が生じやすい高密度交通流では、ACC車両の速度も変化するが、その変化が緩やかなためMD車両の運転者が変化に気づくのが遅れ、結果として潜在的な追突事故リスクが高くなる可能性が示唆された。これは運転者の注意力が低下している場合により顕著になると考えられ、留意すべき知見であると思われる。

次に、P50_Bの0.9~1.3kpを対象として、図10の左にP50_BのID28の車両(MD車両)とその前方ACC車両の走行軌跡、右に速度とPICUDの推移図を示す。

速度とPICUDの推移図から、ID28の車両(MD車両)が前方ACC車両の減速に対してほとんど遅れることなく減速しているが、減速と同時にPICUDが低下して負値となっている。ここで、走行軌跡から、ID28の車両の車頭距離が短いことが読み取れ、この状態で減速することによってPICUDが負値となったと考えられる。この結果自体は自明なことであるが、ACC車両に前後を挟まれることによって、MD車両の車頭距離が短くなる可能性がないか、精査する必要がある。

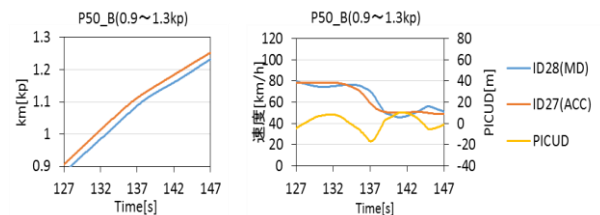


図10 中央道区間でのP50_Bにおける走行軌跡(左)と速度とPICUDの推移図(右)

そして、高松道区間では、中央道区間と同様、全体的にP0で負値PICUD検出率が高いが、P50_AやP50_Bの一部の箇所で負値PICUD検出率が高くなっている。ここで、P50_Aの8.4kp付近および、P50_Bの8.7kp付近を対象に中央道区間と同様に車両挙動を確認する。

まず、P50_Aの8.2~8.6kpを対象として、図11の左にP50_AのID14の車両(MD車両)とその前方ACC車両の走行軌跡、右に速度とPICUDの推移図を示す。速度とPICUDの推移図から、ID14の車両が急減速を伴うことによりPICUDが低下し、負値となっている。走行軌跡から、ID14の車両の車頭距離が短いことが読み取れ、この事例は、先に述べた図10の場合と同様であると考えられる。

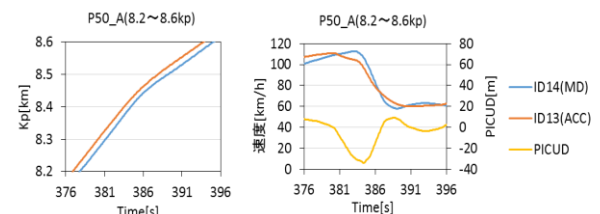


図11 高松道区間でのP50_Aにおける走行軌跡(左)と速度とPICUDの推移図(右)

上記のような挙動をする車両はID14の車両以外にも、ID7とID17の車両(いずれもMD車両)で見られ、これらの車両の車頭距離は約30mであった。また、ID21と

ID29の車両(いずれもMD車両)は、車頭距離が約40mであり、上記の車両ほどではないが、車頭距離が比較的短い状態で走行し、PICUDが負値となったことが確認された。さらに、ID14の車両に追従するID15の車両(MD車両)は、ID14の車両挙動の影響を受け、車頭距離が短くなり、PICUDが負値となった。

次に、P50_Bの8.5~8.9kpを対象として、図12の左にP50_BのID6の車両(MD車両)とその前方ACC車両の走行軌跡、右に速度とPICUDの推移図を示す。この事例も図10の場合と同様のメカニズムである。車頭距離が短い状態で減速する車両は上記のID6の車両以外にも、ID9、ID11、ID20の車両(いずれもMD車両)で見られた。また、ID20の車両に追従するID21の車両(MD車両)も、ID20の車両挙動の影響を受け、車頭距離が短くなり、PICUDが負値となった。このような挙動をする車両の存在により、追突事故リスクが高まったと考えられる。

高松道区間で上記の事例が多発した要因として、カーブ直前の8.0~8.5kpは下り勾配となっており、比較的高速で走行しやすい箇所からカーブに入り、より急減速を伴ったことが考えられる。

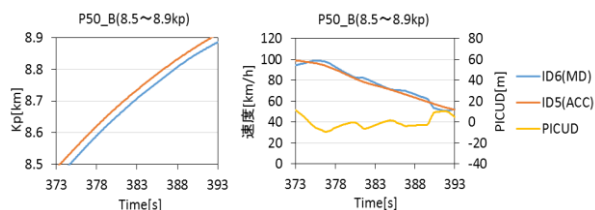


図12 高松道区間でのP50_Bにおける走行軌跡(左)と速度とPICUDの推移図(右)

4. 運転者行動への影響把握

本研究では、減速波の発生が確認された中央道区間(0.8~2.0kp)と高松道区間(8.5~9.5kp)において、ACC車両が混在する交通流を走行することが、運転者に与える影響を把握する。

4.1 運転者の注意傾向の把握

室内走行実験において実施したヒアリングにて「どのようなことに注意していましたか?」と質問し、被験者に走行中気になっていた対象物を自由に発話してもらった。ACC車両混在比率50%において、P50_AとP50_Bでは同じ被験者がACC車両とMD車両それぞれで運転している。運転者の注意傾向では、混在比率による違いをみていくため、走行パターン別に、得られた発話(前方車両、走行車線の車両など)を種類ごとに数え、数えた発話の度数に、パターン間で差があるかどうかを調べた(z検定)。そして、有意差があった場合、多重比較を

行った。結果を図13に示す。

ここで、「前方車両の速度が気になった」や「前方車両のふらつきが気になった」など前方車両の存在および挙動に関する発話は「前方車両」として数えた。一方、「前方車両との車間が詰まった」など前方車両との距離に関する発話は「車間距離」として数えた。

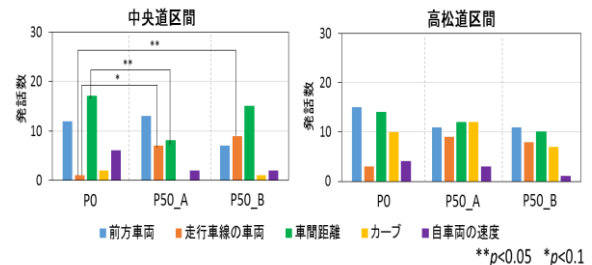


図13 注意対象物の発話数の比較

図13から、中央道区間において、「走行車線の車両」に関する発話はP0に比べてP50_Bの方が有意に多い。また、P0に対してP50_Aの発話も有意に多い傾向が読み取れる。つまり、ACC車両混在比率が50%では、走行車線の車両などの周囲に注意を向ける余裕が出ていると考えられる。一方、「車間距離」に関する発話はP0に比べてP50_Aの方が有意に少ないが、P0とP50_Bでは有意差が見られなかった。

高松道区間において、「走行車線の車両」に関する発話がP0に対し、P50_A、P50_Bで多い状況となっているが、中央道区間のような有意差、有意傾向は確認できなかった。これは図13が示している通り、カーブに関する発話がいずれの走行パターンでも多く、注意がカーブに多く配分されたためであると推察される。

以上のことから、ACC車両が混在することにより、運転者には周囲に注意を向ける余裕が生じると言える。

ここで、ヒアリングの結果で差が見られた中央道区間において、ヒアリングデータで示唆された結果が、視線データで得られる視線行動と関連しているかを検証するため、運転者の視線データから、対象物ごとの総注視時間の被験者平均を算出し、パターン間の差を検定した(t検定)。そして、有意差があった場合、多重比較を行った。

表3に対象物として設けた10項目を示す。ここで、総注視時間とは分析対象範囲である中央道区間で開始した注視の時間の合計値を示している。

表3の項目中、パターン間で有意差が認められた項目を抽出したものを図14に示す。図14から、「メーター」

表3 注視とする10項目

前方	前方車両	走行車線の車両	メーター	カーブ先
左風景	右風景	ルームミラー	右ミラー	左ミラー

に対する注視時間は、P0 よりも P50_A の方が有意に多く、P0 よりも P50_B の方が有意に多い傾向が見られた。以上より、ACC 車両の混在比率が 50% のとき、注意が自身の運転に向けられるようになったと考えられる。また、「左ミラー」に対する注視時間は、P0 よりも P50_A の方が有意に多く、P0 よりも P50_B の方が有意に多い傾向が見られた。以上より、ACC 車両混在比率が 50% のとき、運転者は前方車両だけでなく、走行車線の車両を確認する余裕が出ていると考えられる。図 13 に関する考察を踏まえると、ACC 車両が混在することにより、運転者には自身の運転および周囲に注意を向ける余裕が生じると言える。

なお、これらの結果は前方注視負荷の軽減、もしくは漫然運転に繋がる可能性があり、今後はこの点について調査することが課題となる。

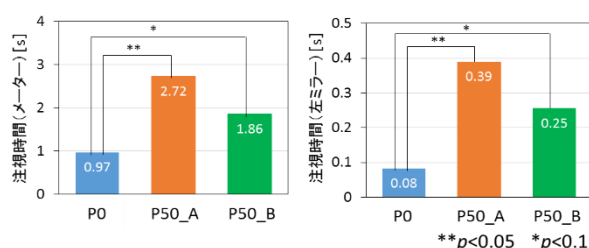


図 14 中央道区間におけるメーター(左)と左ミラー(右)の注視時間

4.2 運転者のストレス度合いの把握

室内走行実験において実施したヒアリングの設定問「どのくらいイライラやストレスを感じたか」の 10 段階評価を分散分析により検討する。ACC 車両を運転しているかどうか、あるいは ACC 車両が混在しているかどうかで運転者のストレス度合いを比較する。したがって、比較条件は以下の通りであり、それぞれ 1 元配置分散分析を行った (図 15)。

- ・ 混在比率 50% で MD 車両運転 / ACC 車両運転
- ・ MD 車両運転時で混在比率 0% / 50%

ここで、各被験者は混在比率 50% を ACC 車両と MD 車両の両方で走行してもらったが、実験の手続き上、ID2 が ACC 車両で 2 度走行し、ID21 が MD 車両で 2 度走行している。P50_A と P50_B で ACC 車両を運転する人と MD 車両を運転する人の並びを対応させるため、ID2 と ID21 は分析から除いた。

また、ストレス度合いの 10 段階評価に対する理由で、走行順序に関する発話をした人はいなかったため、以下の結果は走行順序による影響は生じていない。

(1) 混在比率 50% : MD 車両運転 / ACC 車両運転

図 15 から、P50_A と P50_B で ACC 車両を運転していた 28 名と P50_A と P50_B で MD 車両を運転していた

28 名の比較では、中央道区間においては MD 車両運転時のほうが ACC 車両運転時よりも有意に高い結果となった。また、高松道区間においても MD 車両運転時のほうが ACC 車両運転時よりも有意に高い傾向が見られた。以上より、ACC 車両の運転は、運転者のストレスを軽減する可能性がある。

(2) MD 車両運転時 : 混在比率 0% / 50%

P0 で MD 車両を運転していた 28 名と P50_A と P50_B で MD 車両を運転していた 28 名の比較では、高松道区間において混在比率 0% のほうが 50% よりも有意に高い傾向が見られた。ここで、4.1 項では、「カーブ」に関する発話がいずれのパターンでも多く、運転者によってカーブでストレスを感じる度合いが異なると考えられる。

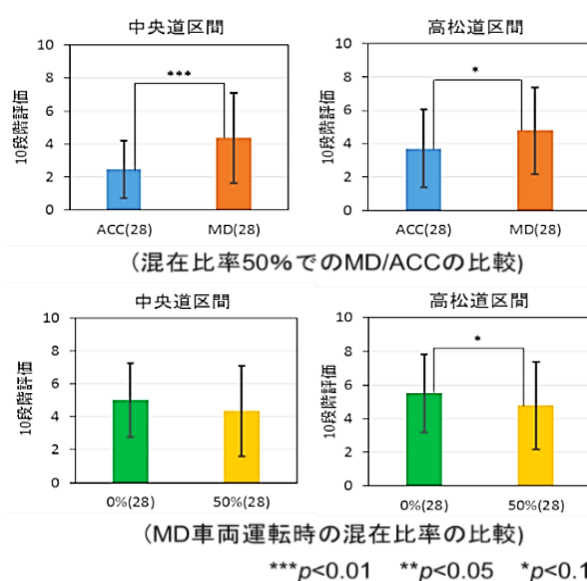


図 15 ストレス度合いの分散分析の結果

5. おわりに

本研究では、高密度交通流を対象として、ACC 車両が混在する交通流の円滑性や追突事故リスク、および運転者行動について検証した。以下に本稿での成果を記す。

- ・ サグや急カーブを有する区間において、いずれの走行パターンにおいても、先行研究⁹⁾では見られなかった減速波が発生した。ここで、ACC 車両の混在比率が 50% のとき、ACC 車両が混在することによって速度低下が緩やかとなり、減速波は上流増幅伝播せず、下流に流れることを確認した。
- ・ ACC 車両の混在比率が 50% のときでも、高密度交通流においては、追突事故リスクが高くなる箇所が確認された。その要因として、速度の急変が生じやすい高密度交通流において、MD 車両が ACC 車両の緩やかな速度変化に気づくのが遅れたことが考えられる。
- ・ ACC 車両の混在比率が 50% になると、運転者には

自身の運転および周囲に注意を向ける余裕が生じることが示唆された。また、先行研究⁷⁾で示唆された、運転者の前方への注意負荷軽減に関しては、漫然運転の可能性も含めて、今後精査する必要がある。

- ・ ACC 車両の混在比率が 50%のとき、先行研究⁷⁾では得られなかった運転者のストレス度合いは、軽減する可能性があることが示唆された。

本研究では、ACC 車両混在比率が 50%のとき、上記のような知見が得られたが、今後は ACC 車両と MD 車両の順序配列が異なるパターンを複数回行い、今回得られた知見を確認する必要がある。また、本研究では、ACC 機能がもたらすメリット（注意負荷の軽減）とデメリット（漫然運転）の境界および発現条件の把握を目的の一つとしたが、ヒアリングデータ、視線データの解析からは十分な検討ができなかった。今後は、実験時に収集されている生理データ（呼吸、心電）を解析し、この課題に取り組む。

補注

- *1 『官民 ITS 構想・ロードマップ 2017』記載されている大規模実証実験の概要の部分抜粋

参考文献

- 1) 首相官邸：官民 ITS 構想・ロードマップ 2017, <http://www.kantei.go.jp/jp/singi/it2/kettei/pdf/20170530/roadmap.pdf> (2018.04.19 アクセス)
- 2) 内閣府：戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 自動走行システム研究開発計画, http://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/keikaku/6_jidousoukou.pdf (2018.04.19 アクセス)
- 3) 鈴木一史・山田康右・堀口良太・岩武宏一：高速道路サグ部渋滞対策に資する ACC の将来性能と渋滞緩和効果, 交通工学論文集, 第 1 巻第 2 号 (特集号 B), pp. 60-67, 2015
- 4) 日高健・北岡広宣・北浜謙一・志田充央・藤本浩・金須則之・小池弘之・江口純司・加世山秀樹・加藤哲也：ACC を活用した高速道路サグ部の交通流円滑化, 自動車技術会論文集, 44 巻 (2013) 2 号 p.765-770
- 5) 鈴木一史・山田康右・加納英明・栗栖嵩・鹿野島秀行・牧野浩志：高速道路上の ACC 車両がドライバーのキープレフト走行の受容性に及ぼす影響, 第 35 回交通工学研究発表会論文集, pp.315-322, 2015
- 6) 飯田克弘・和田崎泰明・多田昌裕・筑後智弘・安時亨・澤田英郎・紀ノ定保礼：ACC 車両の混在比率が異なる交通流の安全性・円滑性評価, 第 37 回交通工学研究発表会論文集, pp.67-74(2017)
- 7) 多田昌裕・飯田克弘・紀ノ定保礼・筑後智弘・西田将之・安時亨・澤田英郎：準自動運転車両の混在比

率が異なる交通流におけるドライバーの注意傾向把握の試み, 計測自動制御学会 システム・情報部門学術講演会 2017 講演論文集, Program No.GS06-2, pp.170-173(on Web), 2017.11.

- 8) 大口敬・飯田克弘：高速道路サグ部における追従挙動特性解析におけるドライビング・シミュレータ技術の適用性, 交通工学, Vol.38, No.4, pp. 41-50, 2003.
- 9) 飯田克弘・藤原一雅・河合健：室内実験による渋滞現象の再現性検討と渋滞発生過程における交通流分析, 交通工学研究発表会論文報告集 22, 13-16, 2002-10
- 10) 大口敬：高速道路サグにおける渋滞の発生と道路線形との関係, 土木学会論文集 No.524/IV-29, 69-78, 1995.10
- 11) 飯田恭敬・宇野伸弘・井坪慎二・菅沼真澄：織込み部におけるコンフリクト分析と車線変更のモデル化, 土木計画学研究・講演集, No. 24 (1), pp. 305-308, 2001