

平成 29 年 5 月 29 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25420548

研究課題名(和文) 先頭車ドライバーの知覚・行動メカニズムを内包した交通流理論の再構築と走行環境設計

研究課題名(英文) Car-Following Theory Including Perception-Behavior Link of Lead-Vehicle Driver and a Speed Control Device Design

研究代表者

四辻 裕文 (Yotsutsuji, Hirofumi)

神戸大学・先端融合研究環・特命助教

研究者番号：40625026

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：道路の交通流特性を記述できる既存の追従理論は、車群の2台目以降の車速変化しか説明できないので、車群速度の適正誘導を企図した路面表示の高度化といった走行環境設計に活用できない。本研究課題では、車群先頭車のドライバーが路面側面表示の配列から視覚的に走行速度を知覚して車速を選ぶ機構と既存の追従理論とを組み合わせ、走行環境設計に資する理論へと再構築した。そして、先頭車ドライバーの速度知覚と追従車の追突リスクという観点から、走行環境に見合った路面側面表示の配列の規格を検討した。

研究成果の概要(英文)：Existing car-following theory that can describe traffic flow dynamics is difficult to be used in traffic-control device design, such as enhanced road markings capable of properly controlling the first vehicle's speed, due to a limitation that each speed change of the second and subsequent vehicles except the first one can only be described in the theory. Therefore, this research rebuilt the theory considering the first vehicle's speed in order to contribute the design of proposed transverse and lateral road markings, through incorporating a mechanism in which the first vehicle's driver visually perceives the vehicle speed from array patterns of such markings and chooses a driving speed, into the existing car-following theory. Standards of the array patterns of the markings corresponding to the driving environment were proposed in this research in terms of speed perception of the leading vehicle's driver and collision risk of the following vehicle.

研究分野：工学、土木工学、土木計画学・交通工学

キーワード：交通工学 感性情報学 実験系心理学 追従理論 先頭車 速度知覚 路面表示 ドライビングシミュレータ

1. 研究開始当初の背景

交通工学分野において道路の交通流特性を個々の車両から成る車群として微視的且つ動的に捉えた理論は、追従理論と呼ばれている。既存の追従理論は、車群の個々のドライバーがそれぞれの先行車の車速と自車の車速との差に反応して自車の車速を変えている点に着目して、交通流の動きを微分方程式で記述したものである。

車群速度の適正誘導を企図した走行環境設計に追従理論を適用しようとした場合、誘導策に対するドライバーの反応を明示的に考慮してその効果を分析できるという意味において、追従理論は強力な分析道具となり得る。しかし、既存の追従理論は、車群の2台目以降に位置する追従車のドライバーの反応の結果しか記述できない。

走行環境設計に追従理論を適用しようとする場合には、走行環境に対する車群先頭車のドライバーの速度知覚・運転行動の結果である先頭車の車速を初期値と見做し、既存の追従理論にそれを組み込むことで、先頭車を介して2台目以降の追従車の車速変化を記述する必要がある。つまり、この場合、走行環境に対する先頭車ドライバーの知覚・行動を組み込んだ理論再構築が求められる。

以上が、本研究課題の申請時における研究の背景と動機であった。

2. 研究の目的

本研究課題では、走行環境設計の対象として、走行環境と速度知覚を媒介して車速誘導に資する装置となる「路面側面表示の配列」に着目した。本研究課題の申請時における当初の研究目的は、走行中の先頭車ドライバーが路面側面表示の配列から走行速度を知覚して車速を決める機構を組み込んで追従理論を再構築すること、配列の操作が先頭車ドライバーの知覚・行動を介して追従車の挙動に及ぼす影響を予測したうえで目標速度へと誘導可能な配列設計方法を提案すること、そして、屋外実走実験を通じて本提案方法の妥当性を検証すること、であった。

本研究課題の全体像を図1に示す。

3. 研究の方法

(1) 平成25年度は、室内実験データを用いて直線道路における速度認識構造を分析し、追従挙動の現地調査を実施した。

① 速度認識構造のモデル化

図2に示すように、先頭車ドライバーの速度認識構造を「カーブ接近時の直線区間での車速、その車速に対する知覚速度、カーブ進入時の安全速度、その安全速度を意図した目標速度」という4つの要素で表現した。そして、鈴鹿サーキット交通教育センター内のドライビングシミュレータ(DS)に実装された図3に示すような安全運転教習用テストコース(路面表示無し)上で収集した運転データ(被験者2名)を使い、テストコースの所与

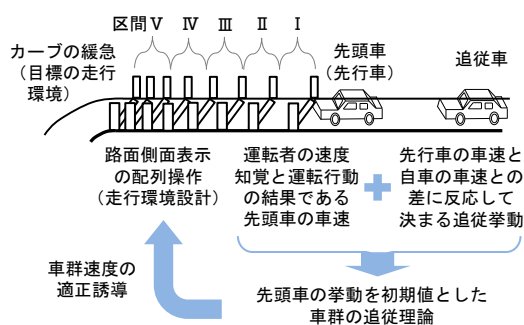


図1 研究全体像

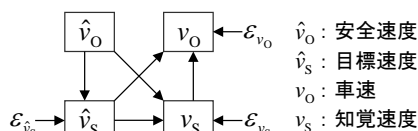


図2 先頭車ドライバーの速度認識構造

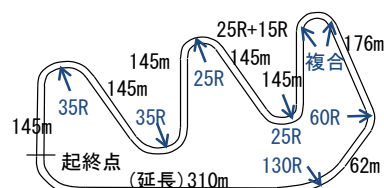


図3 教習用テストコース(路面表示無し)

表1 路面側面表示の配列の4パターン

配列	区間 延長[m]	Z	I	II	III	IV	V
		間隔[m]	12.00	10.20	9.18	8.72	8.28
A	DR [%]	0	15	10	5	5	5
	間隔[m]	12.00	11.40	10.26	8.72	7.85	7.46
B	DR [%]	0	5	10	15	10	5
	間隔[m]	12.00	11.40	10.83	10.29	9.26	7.87
C	DR [%]	0	5	5	5	10	15
	間隔[m]	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00
D	DR [%]	0	0	0	0	0	0

注: 「間隔」とは、それぞれの区間内で等間隔に配置された路面表示・側面表示の間隔を指す。
 注: 「DR」とは、隣り合う区間の間隔の減少率を指す。
 例) 配列Aの区間IIのDR:
 (I間隔 - II間隔) ÷ I間隔 = (10.20 - 9.18) / 10.20 = 10%
 注: 区間Zを含む助走区間で80±5km/hまで加速する。

のカーブ形状(緩急・右左)に基づく要素間の因果関係をパス解析で分析した。

② 直線道路の配列・速度知覚の関係分析

本研究課題では、路面側面表示の配列に関して、表1に示すA~Dの4つを含む複数のパターンを比較検討した。図1に示すように、カーブ緩和区間手前の直線区間を延長100mずつ区間I~Vの5つに分割し、それぞれの区間内では路面表示・側面表示を等間隔で配置する一方で、隣り合う区間ではカーブに向かって間隔を減少させて配置した。このとき、隣り合う区間の間隔減少率(DR)の重点を5つの区間の中のどこに置くかによって、表1に示す4つのパターンに区別した。パターンAは直線区間の序盤、Bは中盤、Cは終盤の区間にDRの重点を置くものとした。

図2に示す速度認識構造の中で目標速度の

影響を捨象し、まずは路面側面表示の配列と知覚速度の推移と車速の推移の関係分析に焦点を絞ることとした。そこで直線道路を仮定し、本研究代表者が有する DS を使って図 4 に示すような DS 画面を作成し、大学生 10 名を被験者とした DS 実験を実施した。隠れマルコフモデル (HMM) を用いて区間毎の知覚速度の状態推移を推定し、配列別に車速と知覚速度の乖離を分析した。HMM では初期状態確率分布が必要なので、図 5 に示すように、走行動画を選択させる知覚実験を実施し、その選択確率から知覚速度の分布を推定した。

③ 追従挙動データの収集

首都高速道路埼玉大宮線美女木 JCT 付近のオプティカルドット区間で、GPS 位置情報を同期できるビデオ撮影システムを搭載した 2 台のプロブカーで実走調査を行い、追従車の車速と車間距離のデータを収集した。

(2) 平成 26 年度は、室内実験データを用いて、速度認識構造に基づく事故危険度認識を分析して、カーブ道路の緩和区間手前の直線区間における速度認識構造を分析した。

① 事故危険度認識のモデル化

図 6 に示すように、先頭車ドライバーの速度認識構造を前提として、目標速度・知覚速度の条件付きでの安全速度の超過確率によってインシデント確率を表現した。そして、本研究代表者が有する DS を使って被験者 15 名で実験し、速度選択ロジットモデルとベイズの定理を用いてその値を推定した。

② カーブ道路の配列・速度知覚の関係分析

図 2 に示す速度認識構造の中で目標速度の影響を考慮し、カーブ道路における路面側面表示の配列と知覚速度の推移と車速の推移の関係を分析した。図 4 と図 5 に示すように、大学生 10 名 (追加) の DS 実験、および公募 44 名 (若年・老年) を被験者とした知覚実験を実施した。HMM を用いて、曲率別・配列別に車速と知覚速度の乖離を分析した。

(3) 平成 27 年度は、前年度のデータを用いて、曲率別・配列別に先頭車ドライバーの目標速度の推移を分析するとともに、配列の操作が先頭車を介して追従車の挙動に及ぼす影響に関するシミュレーションを実施した。

① カーブ道路の配列・目標速度の関係分析

速度認識構造において安全速度と目標速度の影響を明示的に考慮するため、共分散構造分析モデル (SEM) と離散選択モデル (RUM) に基づいて提案された森高・佐々木の交通行動認識構造統合モデリングを適用し、曲率別・配列別に目標速度の推移を分析した。

② 追従理論の再構築とシミュレーション

所与の曲率・配列のもとで先頭車ドライバーの速度認識構造を踏まえた先頭車挙動推定モデルを、ポントリヤギンの最大値原理に基づき速度認識構造を制約条件とした速度

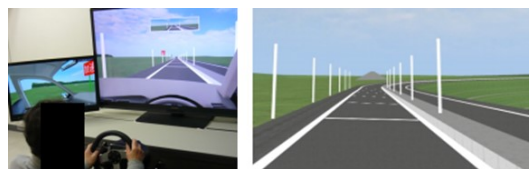


図 4 室内の DS 実験 (左:全景, 右:DS 画面)

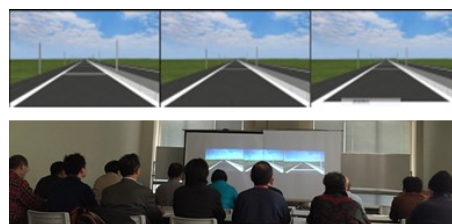


図 5 室内の知覚実験 (上:動画, 下:全景)

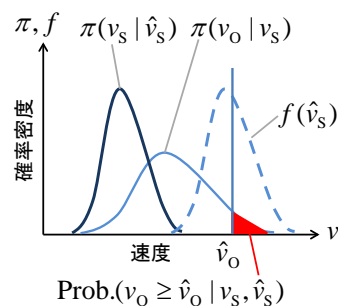


図 6 事故危険度認識



図 7 屋外実験 (左:直線部, 右:カーブ部)

効用の総割引現在価値の最大化として、動的モデルで表現した。追従挙動推定モデルとして適用した米谷・佐佐木モデルとそれを組み合わせることで、配列設計に資する理論として追従理論を再構築した。室内実験の結果に照らし合わせて理論の説明力を確認するため、室内実験データを用いて数値シミュレーションを実施した。

(4) 平成 28 年度は、配列設計方法を取りまとめて、屋外実走実験を通じてその妥当性を検証した。図 7 に示すように、国土技術政策総合研究所の試験走路にカーブを設け、実験予算制約上 C と D の 2 パターンで、先頭車・追従車の 2 台、公募被験者 5 名で実験をして、方法の予測値と実験での実測値を比較した。

4. 研究成果

(1) 先頭車ドライバーの速度認識構造とカーブ事故予防策の選定方法との関係

図 3 に示した DS コース上の運転データのパス解析によって図 8 に示す結果を得た。一般道の曲線半径 35m 程度のカーブの場合、知覚速度を錯覚させて車速を減速させるような対策をカーブ進入前に講じたとしても進入速度の誤認を回避できるとは限らないの

で、曲率改良等の抜本的対策が要る。その一方で、曲線半径 60m・130m 程度のカーブの場合、知覚速度を錯覚させて车速を減速させるような対策を、曲線半径 60m 程度ならばカーブ通過中に、130m 程度ならばカーブ進入前にとり、きめ細かく講じることで適正なカーブ通過速度へと誘導できる可能性がある、ということが実験結果から示唆された。

(2) 直線道路での配列と速度知覚の関係

図 5 に示した知覚実験の結果、车速に相当する動画再生速度とそれを知覚した際の速度を比較すると、図 9 に示すように、システムティックな乖離が見られた。直線道路では、各配列の間隔減少率に依らず、车速よりも知覚速度のほうが大きくなる傾向が見られた。

(3) カーブ緩急と事故危険度認識の関係

図 6 に示したように、速度認識構造を前提としたカーブ安全速度超過確率（インシデント確率）を室内実験データから推定した結果、図 10 に示す結果を得た。カーブ進入時の知覚速度の値にかかわらず、カーブ曲線半径が大きくなるほど、インシデント確率は総じて小さくなる傾向が確認できた。ただし、知覚速度が 90km/h と大きい場合には、曲線半径 300m 程度でもインシデント確率が 0.6 ほどで比較的大きい、ということが示された。

(4) カーブ道路での配列と速度知覚の関係

図 4 に示した DS 実験でカーブの曲線半径を 200m~1000m に変化させた実験の分析に HMM を適用した結果、図 11 に示す結果を得た。同図は、区間 I での车速が低速（40km/h）と高速（80km/h）の各々の場合において、区間 V の车速の実測値に対する知覚速度の推定結果を示す。ここで、车速よりも知覚速度が大きいケースを车速の過大知覚、逆のケースを過小知覚と呼ぶことにすると、過小知覚のほうがより危険な運転だと考えることが出来る。図 11 をみると、いずれの配列においても高速域において、程度の差こそあれ、過大知覚を過小知覚へと遷移させる曲線半径の閾値が存在する、ということが示唆された。

(5) カーブ道路での配列と目標速度の関係

HMM 分析で使った同じデータに交通行動認識構造統合モデリングを適用し、曲率別・配列別に目標速度（潜在変数）の値の推移を分析した結果、その値はカーブに近づくにつれて小さくなる傾向があり、カーブの曲線半径が小さいほど目標速度の値自体も小さくなる傾向があることが確認できた。

(6) 先頭車挙動を考慮した追従挙動の予測

図 12 には、室内実験データを使った先頭車挙動推定モデルのパラメータ推定結果に基づき、先頭車ドライバーの速度認識をシミュレートした結果を示す。その結果を用いて再構築した追従理論に従い、追従車との追突

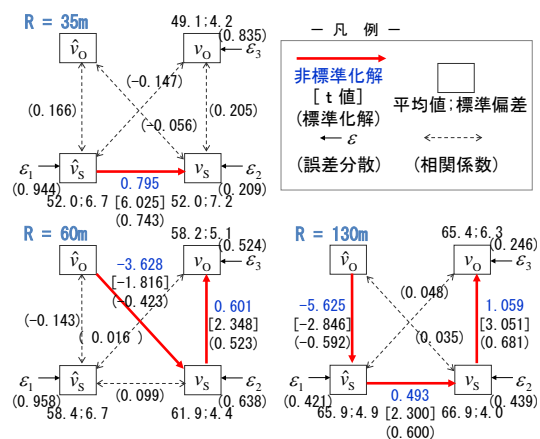


図 8 速度認識構造の要素間の因果関係

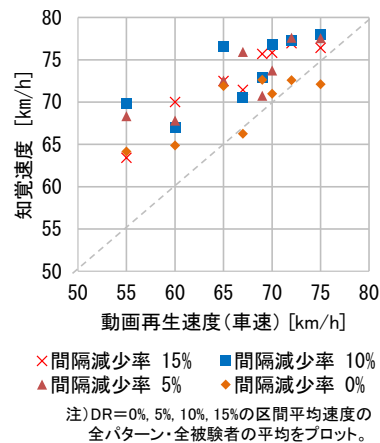


図 9 直線道路での速度知覚

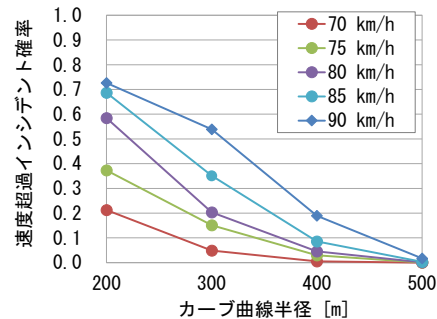


図 10 カーブ緩急と事故危険度認識

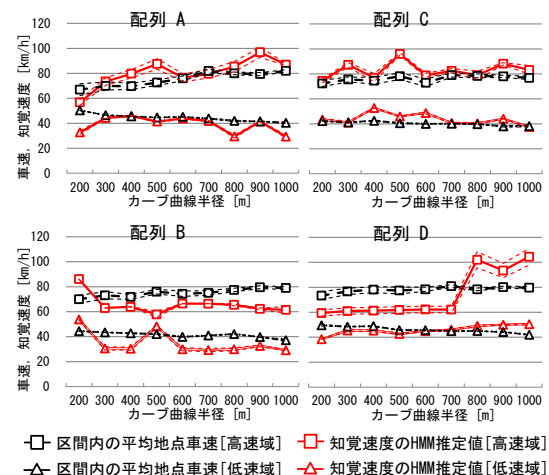


図 11 カーブ道路での速度知覚

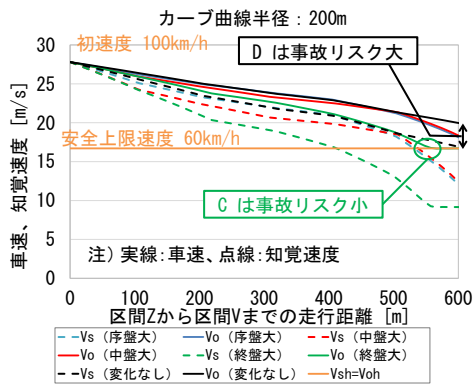


図 12 先頭車の速度認識シミュレーション

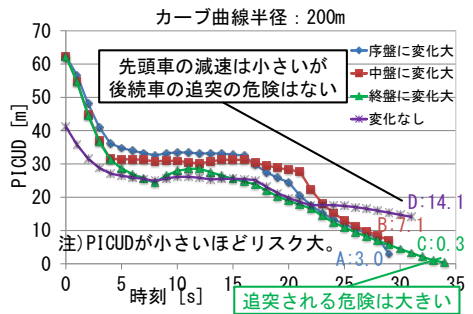


図 13 追突リスクのシミュレーション

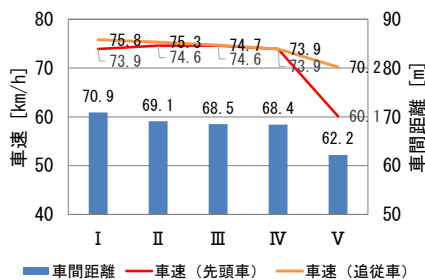


図 14 屋外実走実験での検証 (配列 D)

表 2 設計方法の提案

間隔減少率が大きい値の区間	序盤	中盤	終盤
無限延長の直線区間 ※目標速度なし	- 知覚：大 - 追突リスク	未定	未定
カーブ前直線区間 ※目標速度あり	急なカーブ - 知覚：小 - 減速：小	- 知覚：大/小 - 減速：小	- 知覚：大 - 減速：大 - 追突リスク
緩いカーブ	- 知覚：小 - 減速：小	- 知覚：大/小 - 減速：大	- 知覚：大 - 減速：小

知覚：大⇒過大知覚 (知覚速度>車速) 減速：大⇒車速の減速効果大きい
知覚：小⇒過小知覚 (知覚速度<車速) 減速：小⇒車速の減速効果小さい

リスク (PICUD) の推定結果を図 13 に示す。R200m のカーブにおいて区間 I の先頭車・追従車の初速が 100km/h と大きい状況下で、配列の間隔減少率が一定のパターン (配列 D) の場合、区間 V で PICUD が 14.1 となり追突リスクは小さいが、安全速度の 60km/h を超過してカーブに進入してしまう。同じ状況下で、間隔減少率が終盤で大きいパターン (配列 C) の場合、カーブ内の衝突事故リスクは小さいが、区間 V で PICUD が 0.3 となり追突

リスクが大きい、ということが予測できた。

(7) 屋外実走実験による検証

図 12 と図 13 に示した数値シミュレーション結果より、配列 D の追突リスクが予測されたので、図 7 に示したように、屋外実走実験でその点を検証した。車間距離計を搭載した追従車と先頭車は車間 100m で運転を始め、同席した実験者の指示に従い、車速 60km/h で区間 I に進入し、速度計が隠された状態で運転し続けた。カーブ曲線半径は概ね 200m になるようにした。図 14 に示すように、区間 IV から区間 V にかけて先頭車の急減速によって車間距離が急に狭くなる現象が見受けられた。ただし、統計的な有意差として認められるものではなかったため、この現象については今後の更なる検証が求められる。

(8) 路面側面表示の配列設計方法の提案

設計方法を表 2 に取りまとめて提案する。本研究課題では車速の過大知覚 (知覚：大と記す) よりも過小知覚 (知覚：小と記す) のほうが危険な運転だと考えられたので、配列の間隔減少率が序盤・中盤・終盤の区間で大きくなる各々のパターンについて、表中の欄の中で「知覚：大、減速：大」と記された区間に着目した。すると、緩いカーブでは中盤が、急なカーブでは終盤がそれに該当した。ただ、前者は過小知覚も懸念され、後者は追突リスクも懸念された点には留意を要する。本研究課題は、既存の追従理論で先頭車ドライバーの速度認識構造を考慮した点、並びに、路面側面表示の配列設計方法を提案した点に意義がある。今後の課題は、提案した設計方法の評価と再検証である。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 12 件)

- ① YONEMURA Keiichiro, MATSUMOTO Takahide, FUKUOKA Yusuke, NOMURA Kazuki, ITO Aki, YOTSUTSUJI Hirofumi, KITA Hideyuki, A study on the array effects of transverse and lateral road markings based on a driving experiment, Proceedings of the 15th Road Engineering Association Asia and Australasia (REAAA) Conference, 査読有, 2017, 1-9
- ② 四辻 裕文、松本 猛秀、米村 圭一郎、喜多 秀行、カーブ手前の路面側面表示の配列パターンが運転者の速度認識に及ぼす影響の実験研究、土木学会論文集 D3 (土木計画学) 特集号、査読有、Vol. 72、No. 5、2016、I_1017-I_1028、DOI: 10.2208/jscejipm.72.I_1017
- ③ 四辻 裕文、岩崎 克倫、辻 智史、喜多 秀行、道路の曲線半径に応じて路面表示の配列が運転者の速度認識に及ぼす影響：構造方程式モデリングによる検討、交通工学研究発表会論文集 (研究論文)、査読有、36 巻、2016、287-293

- ④北村 和樹、四辻 裕文、喜多 秀行、織田澤 利守、路面表示の配列操作が先頭車ドライバーの速度認識と後続車の速度変化に及ぼす影響、土木計画学研究発表会・講演集、査読無、Vol. 53、2016、2851-2858
- ⑤ YOTSUTSUJI Hirofumi, KITA Hideyuki, XING Jian, HIRAI Shoichi, A car-accident rate index for curved roads: a speed choice-based approach, Selected Proceedings of the 14th World Conference on Transport Research (WCTR), 査読有, 2017, 1-11
- ⑥ YOTSUTSUJI Hirofumi, KITAMURA Kazuki, KITA Hideyuki, An experimental study on the effect of sequential transverse and lateral markings on perceived speed on a single-lane straight road, Journal of Ergonomics, 査読有, Vol. 5, No. S3, 2015, 1-7, DOI: 10.4172/2165-7556.S3-010
- ⑦ YOTSUTSUJI Hirofumi, MATSUMOTO Takahide, YONEMURA Keiichiro, KITA Hideyuki, An experimental study on the effects of sequential transverse and lateral markings on perceived speed on curved road, Proceedings of the 3rd International Symposium on Future Active Safety Technology towards Zero Traffic Accidents (FAST-zero), 査読有, Vol. 3, 2015, 335-342
- ⑧ 浜中 聡士、喜多 秀行、四辻 裕文、XING Jian、平井 章一、カーブ区間の速度超過事故に対するインシデント確率の推計、交通工学研究発表会論文集(研究論文)、査読有、35巻、2015、25-32
- ⑨ 四辻 裕文、路面側面表示の配列操作が運転者の速度知覚と被追突リスクに及ぼす影響の分析、高速道路と自動車、査読有、57巻、12号、2014、18-24
- ⑩ 四辻 裕文、北村 和樹、喜多 秀行、隠れマルコフモデルによる減速マーク表示の配列効果分析、交通工学研究発表会論文集(研究論文)、査読有、34巻、2014、57-62
- ⑪ 渡邊 友崇、喜多 秀行、浅香 遼、四辻 裕文、遅延ストレスと事故リスクに着目した走行環境の認識・評価モデル、交通工学研究発表会論文集(研究論文)、査読有、34巻、2014、425-428
- ⑫ YOTSUTSUJI Hirofumi, KITA Hideyuki, KITAMURA Kazuki, Accident-preventive measure selection method based on the speed cognition of lead-vehicle driver in curved roadway, Procedia Social and Behavioral Sciences, 査読有, Vol. 138, No. 14, 2014, 592-601, DOI: 10.1016/j.sbspro.2014.07.243

[学会発表] (計 10 件)

- ① 四辻 裕文、道路の曲線半径に応じて路面表示の配列が運転者の速度認識に及ぼす影響：構造方程式モデリングによる検討、

- 第 36 回交通工学研究発表会、2016. 8. 8、日本大学駿河台キャンパス (東京都)
- ② YOTSUTSUJI Hirofumi, A car-accident rate index for curved roads: a speed choice-based approach, The 14th World Conference on Transport Research (WCTR), 2016. 7. 11, 上海 (中国)
- ③ 四辻 裕文、路面表示の配列操作が先頭車ドライバーの速度認識と後続車の速度変化に及ぼす影響、第 53 回土木計画学研究発表会、2016. 5. 29、北海道大学 (北海道)
- ④ 四辻 裕文、道路曲線半径の変化からみた運転者の速度知覚に対する路面側面表示の配列パターンの影響、第 52 回土木計画学研究発表会、2015. 11. 23、秋田大学 (秋田県)
- ⑤ YOTSUTSUJI Hirofumi, Experimental study on the effect of sequential transverse and lateral markings on perceived speed in curved road, The 3rd International Symposium on Future Active Safety Technology towards Zero Traffic Accidents (FAST-zero), 2015. 9. 10, ヨーテボリ (スウェーデン)
- ⑥ 四辻 裕文、カーブ区間の速度超過事故に対するインシデント確率の推計、第 35 回交通工学研究発表会、2015. 8. 31、日本大学駿河台キャンパス (東京都)
- ⑦ 四辻 裕文、先頭車ドライバーの速度知覚と被追突リスクに着目した路面側面表示の配列効果分析、第 50 回土木計画学研究発表会、2014. 11. 2、鳥取大学 (鳥取県)
- ⑧ 四辻 裕文、隠れマルコフモデルによる減速マーク表示の配列効果分析、第 34 回交通工学研究発表会、2014. 8. 7、日本大学駿河台キャンパス (東京都)
- ⑨ YOTSUTSUJI Hirofumi, Accident-preventive measure selection method based on the speed cognition of lead vehicle driver in curved roadway, The 9th International Conference on Traffic and Transportation Studies, 2014. 8. 2, 紹興 (中国)
- ⑩ 四辻 裕文、路面壁面表示の配列操作が先頭車運転者の速度知覚と追従車の車速に及ぼす影響の予測、高速道路調査会研究発表会、2014. 7. 11、梅田ビル 8 階 AP 大阪梅田茶屋町 (大阪府)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

四辻 裕文 (YOTSUTSUJI, Hirofumi)
神戸大学・先端融合研究環・特命助教
研究者番号：4 0 6 2 5 0 2 6

(2) 研究分担者

喜多 秀行 (KITA, Hideyuki)
神戸大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：5 0 1 3 5 5 2 1