

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

四辻 裕文¹・北村 和樹²・喜多 秀行³

¹正会員 神戸大学特命助教 自然科学系先端融合研究環重点研究部 (〒 657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1)
E-mail: yotsutsuji@people.kobe-u.ac.jp

²学生会員 神戸大学大学院 工学研究科市民工学専攻 (〒 657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1)
E-mail: 145t118t@stu.kobe-u.ac.jp

³正会員 神戸大学大学院教授 工学研究科市民工学専攻 (〒 657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1)
E-mail: kita@crystal.kobe-u.ac.jp

本研究は、道路の直線区間において表示間隔を徐々に狭くして配置した路面側面表示に着目する。路面側面表示の配列パターン、表示上を通行する先頭車の車速の推移、そのドライバーが知覚する速度の推移との関係について、ドライビングシミュレーション実験から得た速度変化率のデータに基づき、隠れマルコフモデルを用いて分析する。さらに、後続車との被追突が懸念される配列パターンとそのリスクとの関係について、高速道路の路面表示上でのプローブカー調査から得た車頭距離と速度差のデータに基づき、追従モデルを用いて分析する。

分析の結果、直線区間の表示上では概して配列パターンに因らず知覚速度の推移は車速の推移より高い傾向があること、始めに表示間隔が大きく減少する配列パターンは先頭車に被追突リスクをもたらすことが判明した。

Key Words : *Transverse and lateral marking, Sequence patterns, Speed perception, Rear-ended accident risk, Hidden Markov model, Driving-simulation experiment, Probe-car survey*

1. はじめに

我が国の自動車専用道路には、法定の路面標示に加え、交通管理者等によって考案された法定外表示が設置されることがある¹⁾。特に、減速の必要な区間には、法定外表示の一つである減速マーク表示が設置されることがある。減速マーク表示とは、その設置指針²⁾をみると、くの字やコの字といった様々な形状をしたマークを車線上に車両通行方向に沿って等間隔に配置した法定外表示のことを指す。一方、マークの間隔が車両通行方向に沿って徐々に狭くなるように配置された法定外表示についても、諸外国を含めると1970年代から自動車専用道路の本線カーブやその手前の区間あるいはオフランプの区間等において設置が為されている³⁾。

本研究は、車線上の路面においてマーク・鋸等の設置間隔が、あるいは車線上の側面において視線誘導標等の設置間隔が、車両通行方向に沿って徐々に狭くなるように配置された道路付属物に着目する。そして、前者を「路面表示」、後者を「側面表示」、両者を併せて「路面側面表示」と呼ぶことにする(またはこれらを「表示」と略して呼ぶ)。さらに以下では、設置間隔が徐々に狭くなるような配置のことを「配列」と呼び、その配置の規則性のことを「配列パターン」と呼ぶことにする。そして、配列パターンがもたらす減速効果のことを「配列効果」と呼ぶことにする。

我が国には、減速マーク表示の規格を含め、路面表示の規格について道路諸元の与条件に則して設計するためのマニュアルが著者らの知る限り無い^{1),2),3),4)}。米国では、連邦道路管理局 FHWA の統一交通管制装置マニュアル MUTCD の中で、Speed Reduction Markings の設計規格に関する一例が紹介されている⁴⁾。MUTCDによれば、この路面表示が通行車への配列効果を発現する理由は、ドライバーに速度出し過ぎ感を与えるような配列パターン(a pattern of progressively reduced spacing to give drivers the impression that their speed is increasing)に因るとされている⁴⁾。ところが、なぜ、あるいはどのようにして、配列パターンが速度出し過ぎ感を生むのかについて、必ずしも明確にはしていない。路面表示や側面表示を設計するためには、その配列パターンが速度出し過ぎ感を与える機構について考える必要があるだろう。

路面側面表示上を通行する車群先頭車のドライバーの眼には、運転中はその表示が車速の相対速度で流動して見えている。その際、当該ドライバーは、流動して見えているその表示の速度を視覚的に知覚している。以下、当該ドライバーが知覚するこの速度のことを「知覚速度」と呼ぶ。本研究では、配列パターンが当該ドライバーに与える速度出し過ぎ感に対して、表示上で当該ドライバーの知覚速度の推移が車速の推移と乖離しているという現象が関連していると考えられる。

本研究の目的は、路面側面表示の設計規格のうち配列パターンのみに着目して、幾つかの代表的な配列パターン、表示上を通行する車群先頭車の車速の推移、及びそのドライバーの知覚速度の推移との関係を実証的に分析したうえで、過度な配列効果によって後続車との被追突リスクが生じるような配列パターンについて考察することである。

具体的には、まず、代表的な配列パターンとして、配列の最初の区間、中間の区間、最後の区間で各々の残区間よりも大きく減少させるという3つの配列パターンに着目する。次いで、ドライビングシミュレータ（以下、DSと略す）を用いた室内走行実験を実施し、配列パターンと車速の推移との関係を分析する。以下、この実験を「DS実験」と呼ぶ。次いで、DSで録画した動画画像を用いた速度比評定実験を実施し、配列パターン毎に車速の変化率と知覚速度の変化率との関係を分析する。この速度比評定実験では、ドライバーが知覚した速度の発話値を知覚速度の代理指標として扱うものとする。以下、この実験を「知覚実験」と呼ぶ。知覚実験では、車速の変化率と知覚速度の変化率との関係を分析できる一方、車速の推移と知覚速度の推移との関係を分析できない。DS実験において、瞬間毎の知覚速度を連続的に測定することは困難である。そこで、本研究では、配列パターン毎の車速推移データを教師データとした隠れマルコフモデル（以下、HMMと略す）によって、知覚速度の推移を推計することにする。ところで、DS実験と知覚実験では、車群先頭車とそのドライバーを扱えるが、DSの機能上、後続車を扱うことができない。そこで、実際の自動車専用道路の路面表示上で車群を用いた調査を行う。本研究では、既存の路面表示区間として、首都高速道路のオプティカルドット区間^{5),6)}に着目する。そして、その区間内で先頭車と後続車のプローブカー調査を実施し、追従モデルのパラメータ推計に必要なデータを取得する。以下、この調査を「実走調査」と呼ぶ。本研究では、DS実験と知覚実験から得られた先頭車の走行データ、並びに実走調査から得られた後続車の走行データに基づき、追従モデルを用いることで、先頭車の被追突リスクを推計する。そのうえで、過度な配列効果によって後続車との被追突リスクが生じるような路面側面表示の配列パターンについて考察することにする。

2. 先行研究

路面側面表示の配列効果に関する研究は、1970年代から始まっている。そのパイオニアは、G. G. Dentonである。Dentonは、その一連の研究^{7),8),9)}において、「車線上の直線区間で一定の車速に順応したドライバー

が、横線の設置間隔が通行方向に沿って徐々に狭くなった路面表示上を通行すると、加速の速度感（illusion of acceleration）を感じて減速する」という仮説を設けて、Dynamic Visual Field Generatorという自作のDSを作成して実証分析を実施したうえで、横線の設置間隔を指数関数に従って減少させた配列パターンの減速効果が高いことを示した。そして、英国の自動車専用道路のオフランプからラウンドアバウト流入部に至る直線区間において、自身の分析結果に基づく配列パターンの路面表示の導入を実践した。彼に続く諸研究では、これまでに直線区間・カーブ区間の路面やトンネル壁面を対象として、車速の平均速度と85%マイル速度との配列効果の違いや、車速のばらつきに対する抑制効果の有無、配列効果の持続性の有無、等が分析されてきた。

これら既往研究のレビューの詳細は別紙に譲る³⁾が、膨大な研究蓄積が存在し且つ個別の道路区間では配列効果が示されてきたにも係らず、路面側面表示の規格について道路諸元の与条件に則して設計するためのマニュアルは著者らの知る限りまだ無い。その一因には、配列パターンがドライバーに速度出し過ぎ感や加速の速度感を与えるメカニズムについて未だ明確ではないことが挙げられると、著者らは考える。

我が国でも路面側面表示の配列効果に関する知見が蓄積されている^{10),11),12),13),5),14),15),3)}。最近では、表示上を通行する車群先頭車ドライバーが表示の流動から視知覚したオプティックフローや、それが当該ドライバーにもたらす視覚誘導性自己運動感覚（ベクション）を用いて、表示の配列パターンが当該ドライバーに速度出し過ぎ感や加速の速度感を与えるという仮説を記述し、そのメカニズムの記述に接近する研究が蓄積している^{11),12),5),6),15)}。また、我が国では、路面側面表示の実践も進められている。例えば、大阪淀川橋のアロー型減速マーキング¹⁰⁾、首都高速道路のオプティカルドット^{5),6)}、阪神高速道路のトンネル壁面シークエンスデザイン¹⁴⁾、等では、それぞれの個所毎の道路特性に則して考案された規格による配列側面表示の配列効果が実証されている。しかし、いずれの研究も、工学モデルによって配列効果のメカニズムを明示的に記述するには至っていない³⁾。

本稿の結論もそのメカニズムの記述にまでは至らないが、オプティックフローやベクションを用いて記述したその仮説をモデル化するうえで必要であると著者らが考える「表示上での知覚速度と車速との乖離現象」について、本研究では、まずは実証分析をしたものである。加えて、上記の先行研究では明示的に扱われてこなかった「表示上の車群先頭車の被追突リスク」についても考察したものである

3. 枠組み

本研究では、我が国の地方部における往復分離二車線の自動車専用道路の直線区間を想定し、車道の幅員は、車線 3.5m, 中央帯 1.5m, 左側路肩 1.75m, 右側側帯 0.5m と設定する。本研究で分析の対象とする路面表示は、車両通行方向に対して車線の横軸方向に描いた幅 45cm の白色の線（以下、横線と略す）の配列によって構成されるものとする。加えて、側面表示は、左側路肩および分離帯において横線の延長方向にそれぞれ配置した高さ 2.5m の白色の棒（以下、縦棒と略す）の配列によって構成されるものとする。したがって、本研究において路面側面表示の配列パターンとは、このように一体化された横線・縦棒に対する配置の規則性を表すものとする。

本研究では、この表示を施す区間の延長を決めるうえで、事前に予備実験を実施した。並列する横線を車体が跨がない点に配慮して、道路構造令の設計車両である普通車の諸元を勘案し、予備実験では横線・縦棒の間隔を 12m とした。予備実験では、表示が施されていない助走区間 500m の内で車体静止位置から加速した後、隣接して等間隔 12m で表示が施された区間に達した地点から、走行中に表示に慣れを感じたとドライバーが発話した地点までの距離を測定した。その区間長を「等間隔で表示を施す小区間」とみなすことにした。その結果、概ね 100m~200m で表示に慣れる傾向が掴めたので、安全側の 100m を小区間の延長と設定した。

本研究において表示を施す区間は、助走区間および 5 つの小区間に分割される。等間隔 12m で表示が施されたこの助走区間では、その延長を 600m と設定する。各々の小区間の延長は、予備実験から得られた 100m と設定する。各々の小区間で横線・縦棒が等間隔に配置されるのだが、その間隔は前後する小区間で減少するものとする。先行研究では、横線の間隔を例えば指数関数に従って連続的に減少させたような配列を扱ったものもある。一方、本研究では、小区間内で前後の横線・縦棒の間隔の減少率は一定としたうえで、5 つの小区間の全体を通じて横線・縦棒の間隔を非連続的に減少させたような配列を扱うものである。これについては、HMM を用いるという分析アプローチの都合という点も理由の一つではあるが、ドライバーが知覚して運転挙動に移行するまでの反応遅れの影響を考慮した点のほうが主な理由である。著者らは、小区間の延長を仮に 100m より短くしたとしても、本稿の結論には影響しないと考えるが、その分析は今後の課題としたい。

今、助走区間に隣接する順に 5 つの小区間を I, II, III, IV, V と呼称する。助走区間のうち、小区間に隣接する区間 100m を Z, 車体静止位置から加速する区間

表-1 3 つの配列パターン A, B, C

区間 延長 (m)	W 500	Z 100	I 100	II 100	III 100	IV 100	V 100
A l_d^q (m)	12	12	10.20	9.18	8.72	8.28	7.87
Δ_d^q (%)		0	15	10	5	5	5
B l_d^q (m)	12	12	11.40	10.26	8.72	7.85	7.46
Δ_d^q (%)		0	5	10	15	10	5
C l_d^q (m)	12	12	11.40	10.83	10.29	9.26	7.87
Δ_d^q (%)		0	5	5	5	10	15

500m を W と呼称する。ドライバー n が c 回目に配列パターン q の表示を有した区間 d ($d = W, Z, I, II, III, IV, V$) を走行した際の当該区間の車速の平均値と 85 % タイル値を \bar{v}_O^{ndcq} と v_{O85}^{ndcq} とおく。 \bar{v}_O^{ndcq} , v_{O85}^{ndcq} の値は、DS が計測した約 0.02 秒毎の車速ログデータに基づき算出される。配列パターン q の表示を有した区間 d における横線・縦棒の間隔を l_d^q とおく。以下、前後する区間の表記に関して便宜上、区間 d の直前の区間を区間 $d-1$ と表記する。ここで、ドライバー n が当該区間を \bar{v}_O^{ndcq} , v_{O85}^{ndcq} で通行したとき、 n には当該区間の表示が相対的に速度 \bar{v}_S^{ndcq} , v_{S85}^{ndcq} で流動するように視覚されると仮定する。以下、表記の煩雑さを避けるため、特に断らない限り、車速並びに知覚速度の平均値と 85 % タイル値をまとめて、 v_O^{ndcq} 並びに v_S^{ndcq} と表す。

本研究において、車速の変化率、知覚速度の変化率、表示間隔の変化率は各々、次式で定義されるものとする。

$$\Delta_O^{ndcq} = \frac{v_O^{ndcq}}{v_O^{n(d-1)cq}}, \quad \Delta_S^{ndcq} = \frac{v_S^{ndcq}}{v_S^{n(d-1)cq}}, \quad \Delta_d^q = \frac{l_d^q}{l_{(d-1)}^q} \quad (1)$$

本研究では、表-2 に示すような 3 つの配列パターン A, B, C を用意する。配列パターン A, B, C は各々、配列の最初の小区間、中間の小区間、最後の小区間において前後の残区間よりも Δ_d^q を比較的大きな値に設定した配列を有する。表-2 に示すように、 Δ_d^q は、配列パターン $q \in \{A, B, C\}$ に係らず、0 %, 5 %, 10 %, 15 % の 4 つの値から構成されている。すなわち、 $\Delta_d \in \{0 \%, 5 \%, 10 \%, 15 \%\}$ となっている。

ここで、代表的ドライバーの知覚速度の変化率 Δ_S^{dq} の推移と車速の変化率 Δ_O^{dq} の推移について考える。知覚速度の変化率 Δ_S^{ndcq} の推移については観測者には観測できないが、車速の変化率 Δ_O^{ndcq} の推移については観測者には観測できる。本研究では、代表的ドライバーの Δ_S^{dq} の推移に対してマルコフ性を仮定する。そして、 Δ_S^{dq} を上記の Δ_d に応じて離散的な状態に振り分けることを考える。観測者には、配列パターン q の区間 d で観測された Δ_O^{dq} が、 Δ_S^{dq} に関する離散状態のうちどの状態に属するのか分からない。そこで、この離散状態を隠れ状態とみなし、分析モデルを用いて、実現した Δ_O^{dq} の推移か

ら隠れ状態間の推移確率を推定することを考える。本研究では、この分析モデルとして HMM を用いる。そして、隠れ状態の個数を車速の変化率のデータに基づいて以下のようにして求めるものとする。

まず、車速の変化率 Δ_0^{ndcq} の全データを n, c, q に依らず $\Delta_d \in \{0\%, 5\%, 10\%, 15\%\}$ の要素毎に振り分ける。このとき、 Δ_d の各要素を横軸、 Δ_0^d を縦軸とする平面上に、 Δ_0^d の値が分布する。次いで、この平面上において、横軸の Δ_d に依らずに、縦軸の Δ_0^d を任意の範囲で区切り、その範囲内の Δ_0^d の個数が Δ_d の各要素間でなるべく等しくなるように、その範囲を調整する。このように、 Δ_0^d の個数が Δ_d の要素間でなるべく等しくなるように区切られた範囲のことを、本研究では「クラス」と呼称する。 Δ_0^d のクラスは d に依存しないので、以下、 Δ_0^d のクラスを ξ と表す。また、クラス ξ の個数を Ξ とおく。本研究では、代表的ドライバーの知覚速度の変化率 Δ_s^{dq} のクラスの個数も、配列パターン q の区間 d に依存せず、 Ξ であると仮定する。そのうえで、代表的ドライバーの知覚速度の変化率に関する隠れ状態を S_ξ ($\xi = 1, \dots, \Xi$) で表すものとする。

4. 分析モデル

(1) 隠れマルコフモデル

離散型の HMM は、遷移する離散的な隠れ状態の各々が、ある確率分布に従う出力変数を有するようなマルコフ連鎖のことである。詳細は文献^{16),17)}に譲るが、HMM の実践上の利点として、隠れ状態の個数、出力変数の個数、状態間の遷移の数、初期状態確率という HMM の構造が既知ならば、Baum-Welch アルゴリズムに従うことで、状態間の推移確率行列と各状態の出力確率ベクトルというパラメータの推計ができるという点が挙げられる。さらに、これらのパラメータを有する HMM に基づき、Viterbi アルゴリズムに従うことで、任意の出力系列に対して、その出力確率が最大となる状態推移パスが推計できるという点が挙げられる。本研究では、HMM において、知覚速度の変化率を隠れ状態、車速の変化率を出力変数と考える。

以下、任意の配列パターンに対する HMM の分析手順を示す。便宜上、添え字 q を略す。今、車速の変化率 Δ_0^{ndc} の時系列データが得られたとする。これをクラス ξ の出力系列に変換し、 $\{\xi^t\}$ が得られたとする。ただし、 $t \in n \times d \times c$ であり、以下、これを「時点」と呼ぶ。また、代表的ドライバーの知覚速度の変化率に関する隠れ状態を S_ξ ($\xi = 1, \dots, \Xi$) とおく。ここで、 S_i ($i \in \Xi$) において ξ^t が出力される確率を $o_i(\xi^t)$ とおく。加えて、 S_i から S_j への推移確率を p_{ij} とおく。観測されるものは出力系列 $\{\xi^t\}$ であり、求めたいものは状態

推移確率行列 $[p_{ij}]$ と出力変数ベクトル $[o_i(\xi^t)]$ である。

まず、Baum-Welch アルゴリズムを示す。今、出力系列 $\{\dots, \xi^{t-1}, \xi^t, \xi^{t+1}, \dots\}$ が得られたとする。そして、時点 t では状態 S_i 、時点 \bar{t} では状態 S_j に在ったとする。そのときの推移確率 γ_{ij}^t に基づいて、状態推移確率 p_{ij} を推定する。ここで、初めの時点から時点 t までに状態 S_i で出力系列が観測される確率の総和を F_i^t 、終わりの時点から時点 \bar{t} までに状態 S_j で出力系列が観測される確率の総和を $B_j^{\bar{t}}$ とおく。そして、次式に示すような Bellman 方程式を定義する。

$$F_i^t = \sum_{j=1}^{\Xi} F_j^{t-1} \cdot p_{ji} \cdot o_j(\xi^{t-1}) \quad (2)$$

$$B_j^{\bar{t}} = \sum_{i=1}^{\Xi} B_i^{\bar{t}+1} \cdot p_{ji} \cdot o_i(\xi^{\bar{t}+1}) \quad (3)$$

このとき、時点 t では状態 S_i 、時点 \bar{t} では状態 S_j に在ったときの推移確率 γ_{ij}^t は、次式で表される。

$$\gamma_{ij}^t = \frac{F_i^t \cdot p_{ij} \cdot o_j(\xi^t) \cdot B_j^{\bar{t}}}{\sum_{i=1}^{\Xi} \sum_{j=1}^{\Xi} F_i^t \cdot p_{ij} \cdot o_j(\xi^t) \cdot B_j^{\bar{t}}} \quad (4)$$

状態推移確率 p_{ij} は、状態 S_i からいずれかの状態へと遷移する頻度に対する、状態 S_i から状態 S_j へと遷移する頻度の割合であるので、 p_{ij} は次式から求めることができる。ただし、 γ_{ij}^t の内に p_{ij} を含むので、収束計算が必要となる。

$$p_{ij} = \frac{\sum_{t \in n \times d \times c} \gamma_{ij}^t}{\sum_{t \in n \times d \times c} \sum_{k=1}^{\Xi} \gamma_{ik}^t} \quad (5)$$

次に、Viterbi アルゴリズムを示す。初めの時点から時点 t までに状態 S_j で出力系列が観測される確率の最大値を V_j^t とおく。すると、次式に示すような Bellman 方程式に従うことで、出力確率が最大となる状態推移パスが推計できる。

$$V_j^t = \max_i \left[V_i^{t-1} \cdot p_{ij} \cdot o_i(\xi^{t-1}) \right] \quad (6)$$

(2) 追従モデル

実走調査から得られた後続車の走行データに基づいて先頭車の被追突リスクを推計する際に用いる追従モデルとして、本研究では、最も基本的なモデルである GHR モデル¹⁸⁾を用いる。GHR モデルとは、走行中の車群先頭車に対する後続車の加速度は先頭車との車間距離と速度差に依存して決まるという仮説のもとで、後続車の挙動を表したモデルである。

時点 t における先頭車 0 の車速を v_0^t 、後続車 1 の車速を v_1^t 、加速度を α_1^t 、そして両車の車間距離を x_{01}^t とおく。 v_0^t は v_0^{ndcq} のデータから得られる。残りの v_1^t 、 α_1^t 、

x_{01}^t は実走調査のデータから得る。このとき、GHR モデルは、次式で表される。

$$\alpha_1^{t+1} = \lambda \cdot \frac{\{v_1^{t+1}\}^\phi}{\{x_{01}^t\}^\rho} \cdot (v_0^t - v_1^t) \quad (7)$$

α_1^{t+1} と $\frac{\{v_1^{t+1}\}^\phi}{\{x_{01}^t\}^\rho} \cdot (v_0^t - v_1^t)$ との回帰分析によってパラメータ λ の値を推計する。その際、パラメータ ϕ と ρ の値を逐次変化させて相関係数が最大となるような λ の値を直線探索する。

5. 実験と調査

(1) DS 実験

DS (Forum8 製 UC-win/Road9.1, Driving Sim) を用いた DS 実験の主な装置は、DS を実装した PC、付属のハンドル・アクセル・ブレーキ、モニター (138cm × 84cm, AQUOS) である。本研究では直線区間を運転するのでドライバーの速度知覚に及ぼす車体の傾きや振動は無視できると考えて、運転席は床固定式とした。図-1 に、DS 実験で使用した動画のキャプチャを示す。



図-1 DS 実験で使用した動画のキャプチャ

実験被験者には、任意の速度でなるべく路面上の速くを見ながら一定速度を心掛けて運転するように指示した。被験者は、運転免許保持の学生 11 名に対する予備実験の結果をもとに、運転技能が似通った 5 名を抽出した。

図-2～図-4 に、DS 実験で得た車速の推移を配列パターン毎に示す。いずれの配列パターンも、車速が減速したという意味で、配列効果が認められる。また、被験者 5 名には、任意の速度で運転するように指示したので、初速度として扱われる助走区間 W の平均速度は分布した。

図-5 に示すように、7つのクラスに分類した。



図-2 DS 実験で得た車速の推移 (パターン A)

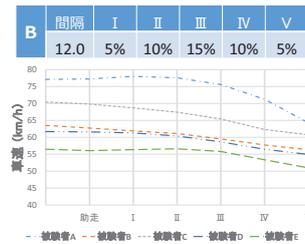


図-3 DS 実験で得た車速の推移 (パターン B)

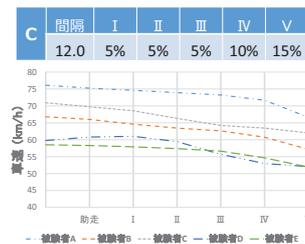


図-4 DS 実験で得た車速の推移 (パターン C)

表-2 設定したクラスの区分

クラス	1	2	3	4	5	6	7
下限値 (%)	-15	-8	-4	-2	-1	0.5	3
上限値 (%)	-8	-4	-2	-1	0.5	3	5

(2) 知覚実験

まず、被験者には基準間隔 12m の表示上を基準速度 70km/h で等速に走行する映像を見てもらう。この映像は、DS の運転画像を録画して作成した。ただし、基準の値は、被験者には伝えておく。直後に、任意に設定した間隔の表示が映った映像とその流動速度の組み合わせで幾つかの映像群を見てもらい、知覚した速度がどの範囲かを発話してもらう。知覚した速度の発話値を知覚速度の代理指標とする。被験者に見せる映像群は、32通りの条件をランダムに各被験者に9回ずつ見

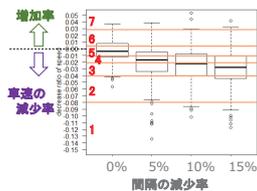


図-5 クラスの設定

せる。

知覚実験の結果を図-7に示す。図中の値は、各被験者が発話した速度の範囲の中央値から算出した速度の9回分の平均値である。図より、表示間隔の減少率に依らず、おおむね車速が過大知覚されているのがわかる。

	1	2	3	4	5	6	7	8
間隔 (m)	12	12	12	12	12	12	12	12
動速 (km/h)	55	60	65	67	69	70	72	75
9	10	11	12	13	14	15	16	
間隔 (m)	11.4	11.4	11.4	11.4	11.4	11.4	11.4	11.4
動速 (km/h)	55	60	65	67	69	70	72	75
17	18	19	20	21	22	23	24	
間隔 (m)	10.8	10.8	10.8	10.8	10.8	10.8	10.8	10.8
動速 (km/h)	55	60	65	67	69	70	72	75
25	26	27	28	29	30	31	32	
間隔 (m)	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2
動速 (km/h)	55	60	65	67	69	70	72	75

図-6 知覚実験で用いた映像群の条件

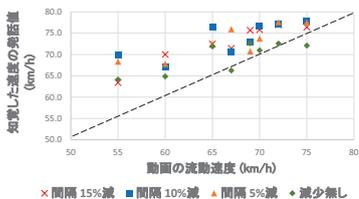


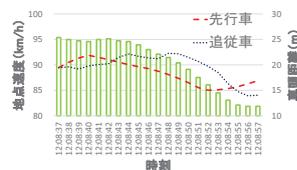
図-7 車速と知覚速度との関係

(3) 実走調査

実走調査は、首都高速道路埼玉大宮線の美女木 JCT 付近の走行車線と追越車線に施工されたオプティカルドットの区間において平日の昼の時間帯に実施した。GPS 緯度経度情報と地点速度は 1 秒単位で計測し、前後加速度はパルス速度センサを用いて 0.1 秒単位で計測したものを 1 秒単位に変換した。先頭車と後続車ともに、プローブ情報と同期したビデオで路面表示上の通過時

刻を確認し、同時刻の先頭車・後続車の地点速度と車頭距離を求めた。車頭距離の算出には、緯度経度情報に基づき Hubery の公式から算出した。

実走調査の結果を図-8に示す。



車頭距離は、GPS緯度経度から、Huberyの公式で推計。GPS緯度経度と地点速度は1秒単位で計測。加速度は、パルス速度センサから0.1秒単位で計測し、1秒単位に換算。

図-8 実走調査の結果

6. 分析結果の考察

HMM を用いて推計された知覚速度変化率のクラス系列に基づき、知覚速度の推移を推計した。車速の初期値を 70km/h と与えて、知覚速度の推移を算出すると、図-9～図-7の結果が得られた。



図-9 分析の結果 (パターン A)

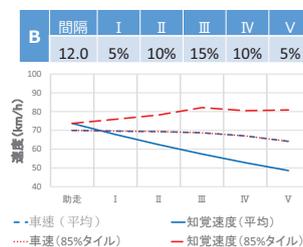


図-10 分析の結果 (パターン B)

分析の結果をみると、知覚速度の 85 % タイル値と平均値の片方あるいは両方が、車速より過大に知覚されて推移していることがわかる。ここで、85 % タイル速度

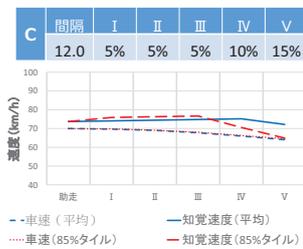


図-11 分析の結果（パターン C）

は、被験者 5 名のうち 4.25 名が採り得る速度、平均速度は 2.5 名が採り得る速度であると考えられる。配列パターン A では、85 % タイル速度よりも小さい値で平均速度がおおむね推移している。このことは、被験者の大半が、図示したような急な減速行動をとる可能性を示唆している。そこで、このパターン A に対して、先頭車ドライバーの被追突リスクを検査することにする。

配列パターン A の各区分における先頭車の車速については、DS 実験で得た区分平均速度を使用し、後続車の車速と減速度については、実走調査を値を使用する。GHR モデルを用いて各区分の車頭距離を算出し、並走する先頭車に対する後続車の遅れ時間を区分毎に求める。図-12 に、被追突リスクをシミュレートした結果を示す。車頭距離の初期値は、80m としている。

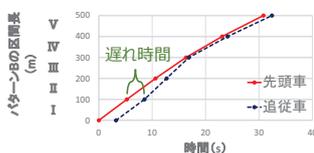


図-12 配列パターン A がもたらす被追突リスク

図-12 のシミュレーションでは、小区間 III で被追突リスクが最大となる。配列パターン A において知覚速度の平均値の推移をみると、車速の平均値は急に減速するのに対して、知覚速度の平均値は高止まりしている。つまり、配列パターン A のように、最初の区間で横線・縦棒の間隔が残区間よりも大きく大きく減少してしまうと、先頭車ドライバーは反応時間差を伴って急に減速するが、それは当該ドライバーが減速を知覚しているものではないので、当該ドライバーが気づかずに後続車に追突される恐れがあるという仮説が成り立つ。この仮説に基づくと、配列パターン A は避ける

べき配列であるといえる。

7. おわりに

本研究では、道路の直線区間において表示間隔を徐々に狭くして配置した路面側面表示に着目した。路面側面表示の配列パターン、表示上を通行する先頭車の車速の推移、そのドライバーが知覚する速度の推移との関係について、ドライビングシミュレーション実験から得た速度変化率のデータに基づき、隠れマルコフモデルを用いて分析した。さらに、後続車との被追突が懸念される配列パターンとそのリスクとの関係について、高速道路の路面表示上でのプローブカー調査から得た車頭距離と速度差のデータに基づき、追従モデルを用いて分析した。

分析の結果、直線区間の表示上では概して配列パターンに因らず知覚速度の推移は車速の推移より高い傾向があること、始めに表示間隔が大きく減少する配列パターンは先頭車に被追突リスクをもたらすことが判明した。

謝辞： 高速道路上の実走調査では（株）片平エンジニアリングの伊藤亜生氏、松本猛秀氏、米村圭一郎氏にご協力頂いた。神戸大学の織田澤利守准教授からは有益なコメントを頂戴した。本研究の一部には JSPS 科研費 25420548（基盤研究 (C)、研究代表者：四辻裕文）と JSPS 科研費 23656320（挑戦的萌芽研究、研究代表者：喜多秀行）の助成を、一部には公益財団法人高速道路調査会の平成 25 年度研究助成（研究代表者：四辻裕文）を賜っている。以上、記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 交通工学研究会: 路面標示設置マニュアル, 丸善, 2012.
- 2) 警察庁交通局交通規制課: 法定外表示等の設置指針について, 警察庁通達, 丁規発第 7 号, 2014.
- 3) 四辻裕文: ドライバーの速度認識構造に着目した誘導型交通安全対策に関する方法論的研究, 神戸大学博士論文, 135p., 2010.
- 4) The Federal Highway Administration (FHWA), U.S. Department of Transportation: Speed Reduction Markings, *Manual on Uniform Traffic Control Devices*, Chapter 3B: Pavement and Curb Markings, pp.393-394, 2009.
- 5) 韓亜由美: 長大トンネルにおける走行空間シークエンス・デザイン, 生産研究, Vol.59, No.3, pp.168-171, 2007.
- 6) 韓亜由美, 小野晋太郎, 池内克史, 佐々木正人: ‘オペティカルドットシステム’ 道路環境のアフォーダンス可視化

- による運転者支援, 生産研究, Vol.66, No.2, pp.147-154, 2014.
- 7) Denton, G. G.: A subjective scale of speed when driving a motor vehicle, *Ergonomics*, Vol.9, No.3, pp.203-210, 1966.
 - 8) Denton, G. G.: The influence of adaptation on subjective velocity for an observer in simulated rectilinear motion, *Ergonomics*, Vol.19, No.4, pp.409-430, 1976.
 - 9) Denton, G. G.: Visual motion aftereffect induced by simulated rectilinear motion, *Perception*, Vol.6, No.6, pp.711-718, 1977.
 - 10) 伊藤博: アロー型減速マーキングの設定, 交通工学, Vol.30, No.2, pp.13-18, 1995.
 - 11) 濁澤雅, 上岡高之, 片倉正彦, 大口敬, 鹿田茂則: 視覚環境が運転者の速度感に及ぼす影響要因解析, 土木計画学研究・講演集, No.28, 4p., CD-ROM, 2003.
 - 12) 小沼良一, 大口敬: 視覚的な速度抑制対策が運転者の速度感に与える影響, 土木学会年次学術講演会概要集, No.59, 2p., CD-ROM, 2004.
 - 13) 鈴木章紘, 浜岡秀勝: 自発光式道路錐の設置方法がドライバーの速度感に与える影響, 土木学会東北支部技術研究発表会講演概要集, 2p., CD-ROM, 2007.
 - 14) 足立幸郎, 藤井康男, 玉川大, 岩里泰幸, 山田幸一郎, 中村裕樹: シークエンスデザインを用いた速度抑制対策の効果とその実験的検証, 土木学会論文集 D, Vol.66, No.1, pp.27-39, 2010.
 - 15) 川島祐貴, 内川恵二, 金子寛彦, 福田一帆, 山本浩司, 木屋研二: 道路側面に設置された点滅柱状物体により生起する視覚誘導自己運動感覚を交通工学的に応用した自動車運転者の速度感覚変化法, 映像情報メディア学会誌, Vol.65, No.6, pp.833-840, 2011.
 - 16) 村上仁一: Baum-Welch アルゴリズムの動作と応用例, *IEICE Fundamentals Review*, Vol.4, No.1, pp.48-56, 2010.
 - 17) Zucchini, W., MacDonald, I. L.: Model selection and checking, *Hidden Markov Models for Time Series: An Introduction Using R*, Chp.6, CRC Press pp.89-102, 2009.
 - 18) Gazis, D. C., Herman, R., Rothery, R. W.: Nonlinear follow-the-leader models of traffic flow, *Operations Research*, Vol.9, pp.545-567, 1961.
 - 19) Anderson, T. W., Goodman, L. A.: Statistical inference about Markov chains, *The Annals of Mathematical Statistics*, Vol.28, pp.89-110, 1957.
 - 20) Billingsley, P.: Statistical methods in Markov chains, *The Annals of Mathematical Statistics*, Vol.32, pp.12-40, 1961.

(20--受付)

SEQUENCE-EFFECT ANALYSIS OF TRANSVERSE AND LATERAL MARKING FOCUSED ON SPEED PERCEPTION OF LEAD-CAR DRIVERS AND REAR-ENDED ACCIDENT RISK ON STRAIGHT AND EVEN ROAD

Hirofumi YOTSUTSUJI, Kazuki KITAMURA and Hideyuki KITA

This paper focuses on transverse and lateral marking arranged with a pattern of progressively reduced spacing along a straight and even road. Relations among some sequence patterns of the transverse and lateral marking, transitions of actual speed of lead cars, and transitions of perceived speed of the lead-car drivers are analysed by hidden Markov model, based upon data of the proportion of speed change obtained from driving-simulation experiment. Furthermore, relations between any sequence patterns of concern to be rear-ended by the following cars and such accident risk are analysed by car-following model, based upon data of car-to-car distance and speed difference obtained from two probe-cars survey on transverse road marking in highway.

The results of our research confirm that (1) on the transverse and lateral marking on the straight and even road, on the whole, transitions of the perceived speed are higher than transitions of the actual speed, regardless of any sequence patterns of road marking, (2) a sequence pattern of significantly reduced spacing in the beginning part of the marking poses a rear-ended accident risk to the lead-car drivers.