

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

北村 和樹¹・四辻 裕文²・喜多 秀行³・織田澤 利守⁴

¹非会員 フージャースコーポレーション 企画開発部企画開発一課 (〒100-0005東京都千代田区丸の内2-2-3)
E-mail:k-kitamura@hoosiers.co.jp

²正会員 神戸大学特命助教 先端融合研究環 (〒657-8501兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1)
E-mail:yotsutsuji@people.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

⁴正会員 神戸大学大学院准教授 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:ota@opal.kobe-u.ac.jp

既存の路面表示には適正な車速へと車両を誘導する機能が具備されているとは言えない。道路の幾何構造と路面表示の配列との組合せによって路面表示上での先頭車の減速不足や後続車との追突が懸念される。

本研究では、カーブ手前の平坦な直線区間に設置した路面表示を対象に、曲線半径に応じた路面表示の配列がそこを通過する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を考察した。速度認識構造を考慮した先頭車挙動推定モデルを構築し、既存の後続車挙動分析モデルを適用して追突リスクを推計した。その結果、曲線半径が比較的小さい場合は配列パターンによって後続車との追突リスクが懸念されるが、その回避にはライン間隔減少率を序盤で比較的大きくすることが有効であることが示された。

Key Words : road surface marking, transverse line interval, array pattern, deceleration behavior, speed perception, rear-end collision, Pontryagin's maximum principle, car-following model, PICUD

1. はじめに

通過車両の減速を促す目的で路面に設置される法定外表示(減速マーク表示)には、車線を横切るような白線(ライン)を車両進行方向に横縞のように複数配置していったもの等がある。法定外表示のガイドライン¹⁾ではこの横縞の隣り合うラインを等間隔に配置した事例が示されているが、実務上は、車両進行方向に沿ってライン間隔を透減させていったものも見受けられる。本稿ではこれを「路面表示」と呼ぶ。そして、路面表示のラインの配置を「配列」と呼び、ライン間隔の透減の仕方を「配列パターン」と呼ぶことにする。

既存の路面表示には、道路の幾何構造に則って決められるべき設計規格がない。したがって、速度超過対策としてカーブ手前に路面表示を設置しても、その配列パターンが対策に効果的であるという保証はない。そのため、カーブに進入する先頭車に対して小さな減速効果しかない配列になってしまうことや、逆に減速効果が大きすぎて後続車との追突を引き起こしてしまうこと、等が懸念される。このような懸念は、道路の幾何構造に応じて適正な車速へと車両を誘導する機能が既存の路面表示に具

備されていないことに起因する。

ところで、FHWAのMUTCDでは、speed reduction markingsと呼ばれる路面表示の減速効果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, MUTCD, p.393)に因ることが示されている²⁾。著者らのレビュー³⁾によると、このような速度感をもたらす配列パターンと車速変化の関係は1970年代には既に広く知られており⁴⁾⁵⁾、国内のトンネル部や土工部に応用した箇所での関係は実証されてきた⁶⁾⁷⁾⁸⁾。

その一方で、道路幾何構造に応じた車速誘導機能を路面表示に具備するのに不可欠なその機能発現機構については、未だ不明な点が多いといえる。これまで視覚心理学・生態心理学・交通心理学のアプローチでその解明を試みた研究が蓄積されてきた。交通安全性を保証する設計規格の開発には、そのような心理学的な実証的知見に裏付けられた下で、幾何構造等の道路環境を与件としたときの路面表示の設計規格とドライバーの知覚・認知を介した運転行動や車両単独・相互の挙動との関係を明示的に記述する必要がある。本研究では、その記述を通じて、道路幾何構造に即した路面表示の設計規格が通過車

両の車速に及ぼす影響を考察する。

本研究の目的は、カーブ手前の平坦な直線区間に設置した路面表示を対象に、カーブの曲線半径に即した配列パターンの選定がそこを通過する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について数理モデルによる分析を行い、曲線半径と配列パターンの関係を先頭車の減速と後続車との追突リスクの観点から考察することである。具体的には、曲線半径で規定される主観的なカーブ通過速度とカーブ接近時の知覚速度を考慮した先頭車挙動推定モデルをポントリヤギン最大値原理に従って構築し、先行研究のドライビングシミュレーション実験で得たデータを用いてモデルパラメータの推定をする。そして、既存の追従モデルを適用することで、PICUDやTTCといった追突危険度を推計する。

2. 先頭車挙動推定モデル

(1) 前提条件

先頭車ドライバーの速度認識と運転行動に関して、以下のような前提条件を設ける。

まず、先頭車ドライバーの速度認識に関して、次の仮説を前提とする。ドライバーは、カーブに向かって路面表示上を走行中に、そのカーブを安全に曲がり切れる速度（安全上限速度） \hat{v}_s を認識しながら、カーブ接近中の任意の時刻 t に車速 $v_o(t)$ を知覚する。このとき、安全上限速度 \hat{v}_s は、カーブ曲率のみで規定されるものとし、路面表示から影響を受けない。つまり、時刻 t には依存しない。ドライバーが車速を $v_o(t)$ と知覚するとき、その速度（知覚速度） $v_s(t)$ は、 $v_o(t)$ と乖離することがある。その際、車速 $v_o(t)$ は、知覚速度 $v_s(t)$ のみに影響を受けるものとし、路面表示から影響を受けない。 $v_s(t)$ は、ドライバーの視覚を介して、路面表示の配列パターンの影響を受けるものとする。また、車速の時間変化率 $\dot{v}_s(t)$ は、知覚速度の時間変化率 $\dot{v}_s(t)$ に比例するものとする。仮に $v_o(t)$ が \hat{v}_s を超過すれば、カーブ内で速度超過に起因した自動車事故が生じる。

次に、先頭車ドライバーの運転行動に関して、次の仮説を前提とする。ドライバーは、知覚速度によって規定される効用（速度効用） U を時々刻々と最大化する速度を選択していると仮定する。この速度効用 U は、安全上限速度 \hat{v}_s を条件として知覚速度 $v_s(t)$ で規定されるものとし、速度効用関数 $U(v_s(t)|\hat{v}_s)$ で表されるとする。ドライバーは、カーブ手前の直線区間に配置された路面表示の開始地点において、その先の路面表示上で走行中に得られるであろう速度効用の割引現在価値の合計について最大化を図り、カーブ入口地点における最適な車速を計画するものとする。この計画問題は、車速と知覚速度

と路面表示に関する制約を受ける。なお、簡単のため、速度効用の割引率と危険回避度は路面表示上を走行中には一定であると仮定する。加えて、時間は連続として扱うものとし、 $v_o(t)$ と $v_s(t)$ は時間微分可能と仮定する。

(2) モデルの構築

先頭車ドライバーが解くべき計画問題は、ポントリヤギンの最大値原理に従うと、以下のように定式化できる。

$$\max_{v_s(0), \dots, v_s(T)} \int_0^T \{\exp[-\sigma t] U(v_s(t)|\hat{v}_s)\} dt \quad (1)$$

$$\text{subject to } f(v_o(t), L(t)) = v_s(t) + \dot{v}_s(t) \quad (2)$$

$$\dot{v}_s(t) = \alpha \dot{v}_o(t) \quad (3)$$

$$f(v_o(t), L(t)) = \{1 + L(t)^{-\xi}\} v_o(t) \quad (4)$$

$$v_o(0) = v_{o0} > 0 \quad (5)$$

$$v_o(t) \exp[-\sigma(T)T] \geq 0 \quad (6)$$

$v_s(t)$: 時刻 t におけるドライバーの知覚速度

\hat{v}_s : ドライバーの認識する安全上限速度

$v_o(t)$: 時刻 t における車両の実速度

$L(t)$: 時刻 t における路面表示のライン間隔

$\dot{v}_s(t)$: 知覚速度の時間変化率

$\dot{v}_o(t)$: 車速の時間変化率

μ : 危険回避度, σ : 時間割引率, α, ξ : パラメータ

式(1)は、路面表示上の時刻 $t = 0$ から $t = T$ に至る瞬時的な速度効用の割引現在価値の合計について最大化を図ることを意味する。式(1)の被積分関数における速度効用関数 $U(v_s(t)|\hat{v}_s)$ は、次式で表されるものと仮定する。

$$U(v_s(t)|\hat{v}_s) = \mu v_s(t) - \exp[\mu(v_s(t) - \hat{v}_s)] \quad (7)$$

この式(7)では、左辺第一項は知覚速度が高まれば速度効用が上がること（快適性）を意味しており、第二項は知覚速度と安全上限速度の差が高まれば速度効用が下がること（安全性）を意味している。

式(2)の $f(v_o(t), L(t))$ は、ドライバーが車速と配列パターンから視覚を介してどのように速度を感じているかを表す。本研究では、この $f(v_o(t), L(t))$ を「視覚的速度関数」と呼ぶ。式(2)は、ドライバーが車速と配列パターンから視覚を介して感じる速度とそのときに知覚する速度との差 $f(v_o(t), L(t)) - v_s(t)$ が、知覚速度の時間変化率 $\dot{v}_s(t)$ を表すことを意味している。

式(3)は、知覚速度の時間変化率 $\dot{v}_s(t)$ が実速度の時間変化率 $\dot{v}_o(t)$ に比例しており、その比例係数は時間に依存しないことを表している。つまり、 $\dot{v}_s(t)$ と $\dot{v}_o(t)$ にはシステムティックな乖離があることを仮定している。 α は、車両の加速に伴ってそのドライバーがどのように加速したと感じたかを表している。

式(4)は、上述した式(2)の視覚的速度関数に具体的な関数形を与えるものである。本研究では、ドライバーが視覚から得る情報（オプティックフロー）を $f(\cdot)$ という関数を用いて表す。直前区間を走行中の先頭車ドライバーが前方に見ているのは、車速の相対速度で流動する路面を含めた風景である。ドライバーは、この流動速度から視覚を介して車速を感じる。路面表示の配列パターンの変化は、この流動速度の感じ方に差異を与える。ξは、路面表示の配列がドライバーの知覚速度に影響する際の影響の度合いを表している。

(3) パラメータ推定の方法

式(1)~(7)の制約条件付き最適化問題を解くと、次式が得られる。

$$\dot{v}_s(t) = \left\{ \frac{1 + L(t)^{-\xi}}{\alpha} \sigma \right\} \left\{ \frac{1 - \exp[\mu(v_s(t) - \hat{v}_s)]}{\mu \exp[\mu(v_s(t) - \hat{v}_s)]} \right\} \quad (8)$$

本研究では、速度効用に係わるドライバー特性を示す危険回避度 μ と時間割引率 σ を与件とすることにより、式(8)のパラメータ α 、 ξ を推定する。このとき、危険回避度 μ が大きくなると、ドライバーは知覚速度に係わる事故リスクを回避するようにして運転することになる。つまり、 μ が大きき値のとき、高い速度に対してより危険を感じるようになる。また、割引率 σ が大きくなると、将来（つまりカーブ直近）における速度効用をより小さく見積もることになる。但し、 σ は0~1の値をとる。

式(2)(3)(4)を式(8)に代入すると、次式が得られる。

$$\ell(\alpha, \xi | v_o(t), L(t); \hat{v}_s, \mu, \sigma) = \frac{\ell(\alpha, \xi | v_o(t), L(t); \hat{v}_s, \mu, \sigma)}{1 + L(t)^{-\xi}} - \alpha \left\{ \sigma + \frac{\mu \cdot \exp[\mu \cdot ((1 + L(t)^{-\xi})v_o(t) - \alpha \dot{v}_o(t) - \hat{v}_s)] \cdot \alpha \cdot v_o(t)}{1 - \exp[\mu \cdot ((1 + L(t)^{-\xi})v_o(t) - \alpha \dot{v}_o(t) - \hat{v}_s)]} \right\} \quad (9)$$

ここで、 $\ell(\alpha, \xi | v_o(t), L(t); \hat{v}_s, \mu, \sigma)$ は、 \hat{v}_s, μ, σ を与件としてデータ $v_o(t), L(t)$ が得られると正規分布に従うと仮定する。次式の尤度関数 $\mathcal{L}(\alpha, \xi | v_o(t), L(t); \hat{v}_s, \mu, \sigma, \rho)$ を考える。但し、標準偏差は ρ とおく。

$$\mathcal{L}(\alpha, \xi | v_o(t), L(t); \hat{v}_s, \mu, \sigma) = \prod_{t=0}^T \frac{1}{\sqrt{2\pi}\rho} \exp \left[-\frac{\ell(\alpha, \xi | v_o(t), L(t); \hat{v}_s, \mu, \sigma)^2}{2\rho^2} \right] \quad (10)$$

パラメータ α 、 ξ は、式(10)に基づく対数尤度関数を用いた最尤法に従って推定する。ところで、式(10)は多峰型の関数形であり、大域解を求める数値計算手法が必要になる。そこで本研究では、マルコフ連鎖モンテカルロ

表-1 路面表示の配列パターン

配列	区間	Z	I	II	III	IV	V
		100m	100m	100m	100m	100m	100m
4	間隔	12.00m	10.20m	9.18m	8.72m	8.28m	7.87m
	減少率	0%	15%	10%	5%	5%	5%
5	間隔	12.00m	11.40m	10.26m	8.72m	7.85m	7.46m
	減少率	0%	5%	10%	15%	10%	5%
6	間隔	12.00m	11.40m	10.83m	10.29m	9.26m	7.87m
	減少率	0%	5%	5%	5%	10%	15%
7	間隔	12.00m	12.00m	12.00m	12.00m	12.00m	12.00m
	減少率	0%	0%	0%	0%	0%	0%

(MCMC) 法の Metropolis-Hastings アルゴリズムを用いる。このアルゴリズムは、ある推移確率に従って事前分布を事後分布に更新した結果、対数尤度が以前より大きな値を採ったならば事後分布を受理し、採らなかったならばある確率で事後分布を棄却することによって、分布が収束するまで逐次更新していくものである。

(4) 推定に用いるデータ

本研究では、危険回避度 μ と時間割引率 σ に関して、 $\mu = 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0$ 、及び $\sigma = 0.3, 0.5, 0.7$ を代入してパラメータを推定した。 μ と σ を与件としてパラメータ α 、 ξ の推定に用いたデータは、著者らの先行研究¹³⁾でのドライビングシミュレーション実験で得られた車速 $v_o(t)$ と加速度 $\dot{v}_o(t)$ 、そして同実験で設定したライン間隔 $L(t)$ である。同実験では、車線 3.5m、中央帯 1.5m、左側路肩 1.75m、右側路肩 0.5mの自動車専用道路を想定した。路面表示の配列を構成する個々のラインの幅は 45cmとした。詳細は参考文献 14)に譲る。

先行研究¹³⁾ではカーブの曲線半径を 200~1000m の範囲で 100m 毎に変化させが、煩雑さを避けるため、本研究では曲線半径は 200m, 400m, 600m, 800m とした。無限長の直線道路を対象とした先行研究¹⁴⁾では路面表示の配列パターンを 8つ用意したが、カーブ手前の直線道路を対象とした先行研究¹³⁾ではこのうちパターン番号 4, 5, 6, 7 の 4つを対象とした。本研究もこれと同じ 4つのパターンを対象とした(表-1 に再掲)。つまり本研究では、4つの曲線半径と 4つの配列パターンの組合せで得られた実験データを用いてパラメータを推定した。

便宜上、本稿に再掲した表-1 を改めて説明すると、まず行名の Z, I, II, III, IV, V は、全長 600m の路面表示設置区間を 100m 毎に区切った際の区間名を意味する。Z から V に向かってカーブに近づき、区間 V でカーブ手前の緩和区間に接続する。次に列名の 4, 5, 6, 7 は、配列パ

ターンの番号を意味する。パターン 4, 5, 6 の順に、路面表示上を通過する際の最初の区間、真ん中の区間、最後の区間で各々の区間よりもライン間隔の減少率が大きな配列パターンを意味する。詳細は文献 14) に譲る。

3. 後続車挙動分析モデルと追突危険度指標

(1) 後続車挙動分析モデル

後続車挙動分析モデルは、先頭車の速度と加速度を考慮した追従モデルとして Kometani-Sasaki モデル^{16), 17)}を利用する。このモデルは、後続車ドライバーの反応強度を考慮して後続車の車速変化を求めるものであり、次式で与えられる。

$$\dot{v}_{o1}(t+T) = \alpha_1(v_{o0}(t) - v_{o1}(t)) + \alpha_2\dot{v}_{o0}(t) \quad (11)$$

$\dot{v}_{o1}(t)$: 後続車の加速度, $v_{o1}(t)$: 後続車の速度 (m/s)
 $\dot{v}_{o0}(t)$: 先頭車の加速度, $v_{o0}(t)$: 先頭車の速度 (m/s)
 T : 遅れ時間 (s), α_1, α_2 : パラメータ

式(11)の左辺第一項は先頭車と後続車の速度差に対する反応を表し、第二項は先頭車の加速度に対する反応を表す。パラメータ α_1, α_2 は反応強度を表す。 T は反応遅れを表し、後続車ドライバーが先頭車との速度差や先頭車の加速度を認識して反応するまでの時間遅れを表す。

式(11)のパラメータ α_1, α_2, T を決めるにあたって、妥当な値の組合せをいくつか設定し、各々の追突リスクを推計することにした。その組合せは表-2の8つである。

(2) 追突危険度指標

後続車の追突危険度指標はこれまで多数提案されてきた。そのうち、衝突時間に関する指標として TTC (Time to Collision) 等があり、衝突距離に関する指標として PICUD (Possibility Index for Collision with Urgent Deceleration) 等がある。本研究では PICUD, TTC を用いる。

(a) PICUD の定義

PICUD は、同じ車線上の先頭車と後続車の追突危険度を示す指標である。PICUD の値がゼロ以下の場合、先頭車が急減速すれば後続車はもはや追突を回避できない状況を意味する。PICUD は、次式で定義される。

$$\text{PICUD} = \frac{v_{o0}^2}{-2a} + S_0 - \left(v_{o1}\Delta t + \frac{v_{o1}^2}{-2a} \right) \quad (12)$$

v_{o0} : 先頭車が急減速した時の先頭車の速度
 v_{o1} : 先頭車が急減速した時の後続車の速度
 S_0 : 先頭車が急減速した時の車間距離

表-2 追従モデルのパラメータ組合せ

組合せ	α_1	α_2	T	$v_{o0}(0)$
a	0.5	0.5	0.75	28
b	0.5	0.5	0.75	23
c	0.7	0.7	0.75	28
d	0.3	0.3	0.75	28
e	0.5	0.5	0.5	28
f	0.5	0.5	1.25	28
g	0.3	0.3	1.25	28
h	0.8	0.3	0.75	28

Δt : 先頭車の急減速から後続車のブレーキまでの時間
 a : 急減速時の加速度

パラメータ a と Δt の値は、既往研究¹⁵⁾の値を参考に、 $a = -3.0\text{m/s}^2$, $\Delta t = 1.25\text{s}$ とする。

(b) TTC の定義

TTC は、先頭車と後続車が回避行動をとらずにそのままの角度と速度で進めば何秒後に追突するかを示す指標である。TTC は、次式で定義される。

$$\text{TTC} = -\frac{x_1 - x_0}{v_{o1} - v_{o0}} \quad (13)$$

x_0, x_1 : 先頭車あるいは後続車の位置
 v_{o0}, v_{o1} : 先頭車あるいは後続車の速度

後続車の位置から先頭車の位置を引いた値は、必ず負になる。つまり、TTCの符号を決定する要因は、先頭車と後続車の速度の大小関係に因る。後方車の速度から先頭車の速度を引いた値が正の場合、つまり先頭車に対して後続車の方が速い場合、TTCは正の値を示す。この場合は、追突危険度は大きくなる。

4. 結果と考察

(1) 先頭車挙動推定結果の考察

図-1 は、曲線半径 400m の比較的急なカーブで配列パターンが異なるときに、 $\mu = 0.3$ 且つ $\sigma = 0.5$ のドライバーが運転する先頭車の挙動を示している。図の横軸は、原点が区間 Z を表し、右方向に沿ってカーブに近づく。縦軸は、知覚速度と実速度を表し、縦軸上の値は初速として与えられる。いずれの配列パターンにおいても、知覚速度の初速と実速度の初速は一致させている。また、いずれの配列パターンでも、2 通りの初速で推計を試みている。

以下、各々の配列パターンで考察する。

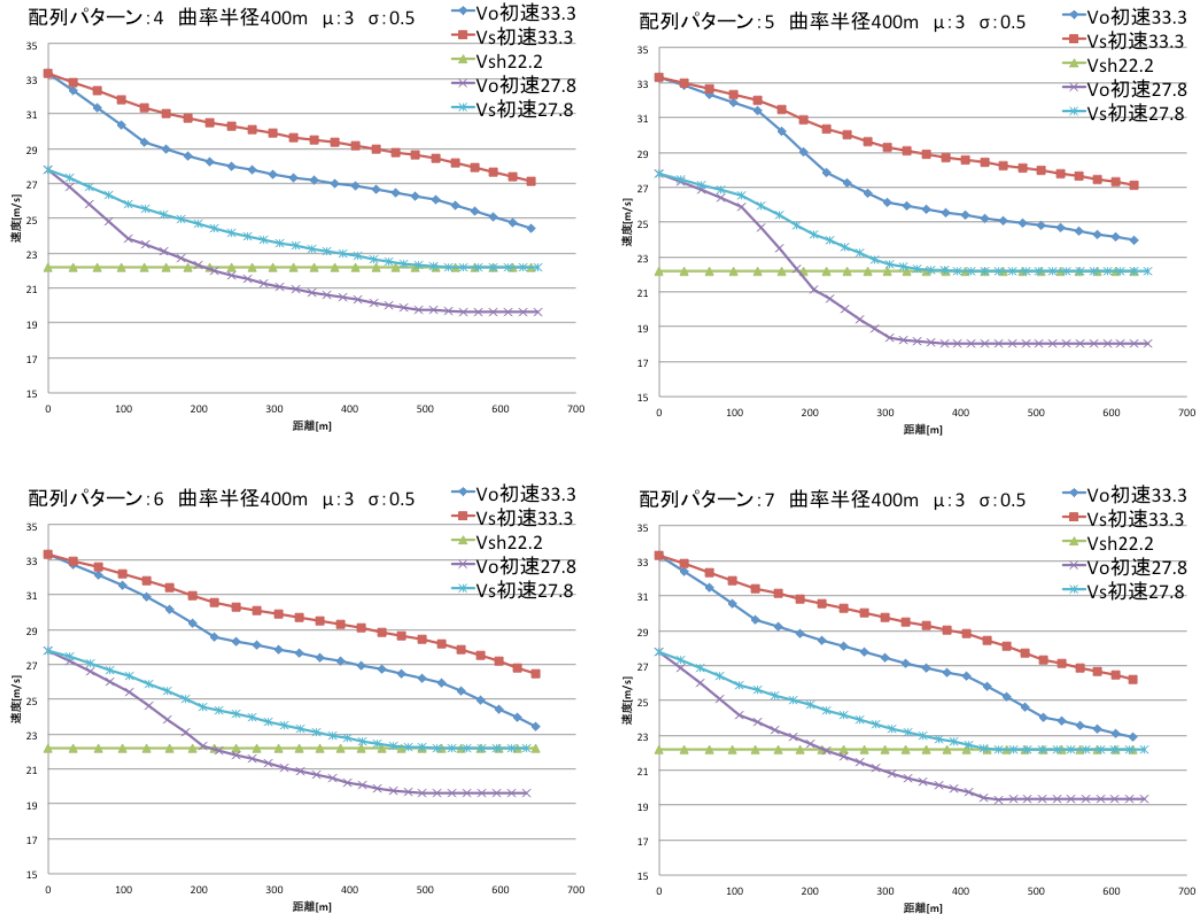


図-1 曲線半径 400mにおける配列パターン毎にみた先頭車ドライバーの速度認識と先頭車の挙動

配列パターン 7では、初速が 27.8m/s の場合、カーブ直近までに十分な減速ができないため、先頭車がカーブ内で衝突事故を起こすリスクがあることが示された。また、配列パターン 4, 5, 6では、区間 IV と V 辺りでは知覚速度と車速の乖離が大きくなることが示された。これは、カーブ直近で知覚速度を安全上限速度に一致させようとして徐々に減速する際に、路面表示のライン間隔の減少率の変化によってその一致のタイミングが誘導されていると考えることが出来る。知覚速度と車速の乖離は配列パターン 4, 5, 6の順に大きくなっている。区間の中盤あるいは終盤でライン間隔の減少率が大きいとき、急減速による追突リスクが懸念されると考えられる。

以上より、先頭車の減速の挙動は、ライン間隔の減少率と関係があるといえることが確認できた。それに加え、曲線半径と配列パターンの関係によって、先頭車の急減速による後続車との追突リスクが懸念されるといえることも確認できた。

(2) 後続車挙動分析結果の考察

(a) PICUDからみた考察

図-2 は、曲線半径 200m の比較的急なカーブで配列パ

ターンが異なるときに、 $\mu = 0.3$ 且つ $\sigma = 0.5$ のドライバーが運転する先頭車に対して、後続車の追従の特性が表-2 の 8 つの組合せであったときの追突リスクを示している。図の縦軸は、PICUDである。

以下、各々の配列パターンで考察する。

配列パターン 7は、先頭車が緩やかに減速しているため後続車との追突の危険は小さくなっている。ところがこの場合、先頭車が単独事故のリスクを有している。配列パターン 4は、15 秒ほど経過してから徐々に PICUD が減少している。a から h の 8 つの組合せのうち、後続車の反応強度が小さい d と g では追突の危険が上がってものの PICUD がゼロになることはない。配列パターン 5でも、PICUD がゼロになることはなく、配列パターン 4よりは遅いタイミングで PICUD が減少する。配列パターン 6では、33 秒ほどで PICUD がゼロになっており、追突の危険はかなり大きいと考えられる。

(b) TTCからみた考察

図-3 は、図-2 と同様、後続車の追従の特性が表-2 の 8 つの組合せであったときの追突リスクを示している。図の縦軸は、TTCである。

図-3 は、図-2 で示した PICUD の分析結果を検証する

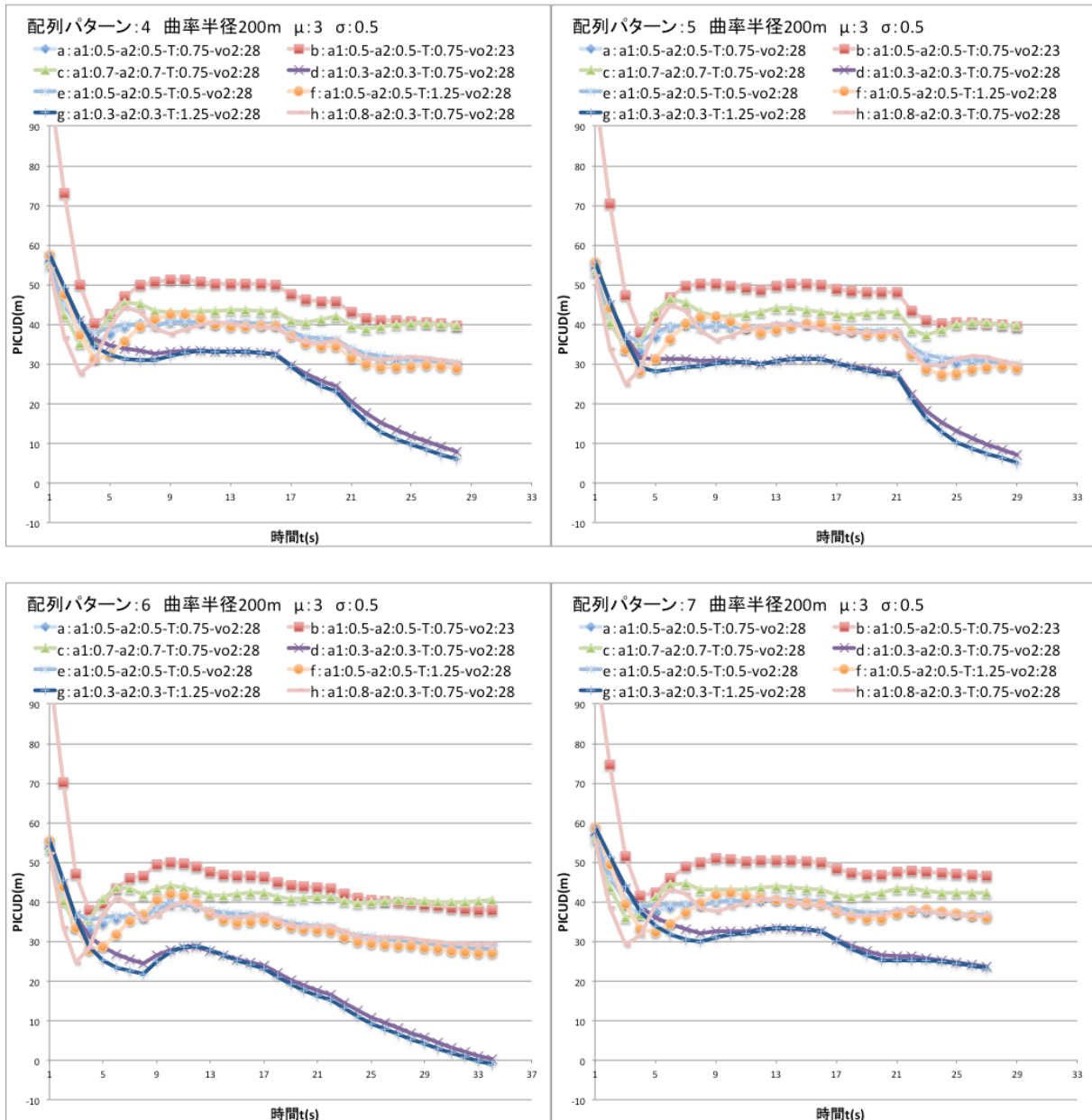


図-2 PICUD からみた路面表示上の後続車との追突リスク

ためのものである。

図-2において、配列パターン4と5のとき、追突が生じるとまではいけないものの PICUD は大きい値を示していた。図-3 をみると、配列パターン4と5のとき、TTC = 10程度になっており、同様に追突のリスクは高いと評価できることが示された。また、配列パターン6では、TTC が極めてゼロに近い値を示しており、かなり追突危険度が高いことも示された。

以上より、TTC からみた分析結果は、PICUD からみた分析結果の考察を担保しているといえることが確認できた。

5. まとめ

本研究では、カーブ手前の平坦な直線区間に設置した路面表示を対象に、曲線半径に応じた路面表示の配列がそこを通過する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を考察した。速度認識構造を考慮した先頭車挙動推定モデルを構築し、既存の後続車挙動分析モデルを適用して追突リスクを推計した。

本研究で得られた知見をまとめると、以下の通りである。カーブの曲線半径が比較的小さい場合、路面表示の配列パターンによっては、路面表示上での先頭車の急減

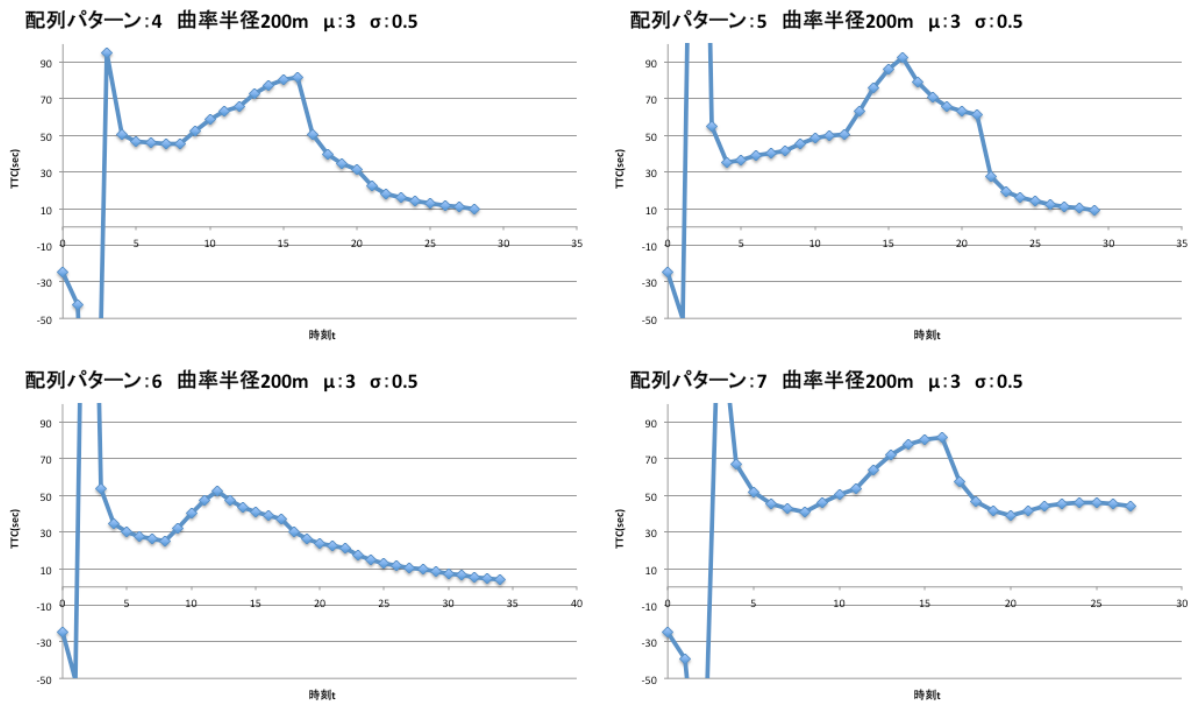


図-3 TTCからみた路面表示上の後続車との追突リスク

速により後続車と追突するリスクが懸念されることが示された。その一方で、そのようなリスクの回避には、路面表示の設置区間の序盤で、ライン間隔の減少率を比較的大きくすることが有効であることが示された。

本研究で残された課題は少なくない。

まず、紙幅の都合上で詳細は触れなかったが、先行研究^{13) 14)}のドライビングシミュレーション実験の被験者は学生であった。そのため、本研究の分析結果は、運転経験が非常に浅いドライバーによるものと解釈することが出来る。とはいうものの、被験者の公募を通じて一般的なドライバーを対象にした分析が望まれる。この点については、現在、鋭意進めているところである。

また、本研究で構築した先頭車挙動推定モデルでは、速度効用関数において知覚速度と危険回避度が独立に速度効用に作用するという点を暗に仮定していた。この点については再考する必要があると考える。

また、本研究が対象にした配列パターンは、路面表示設置区間の序盤・中盤・終盤のいずれかでライン間隔の減少率が大きくなるものであった。しかしながら、本研究の結論によると、カーブに近い終盤区間で間隔減少率を大きくすると追突リスクがあることが懸念される。今後は、より連続的に滑らかにライン間隔を減少させる（例えば既往研究で報告されている指数関数的に減少させる）ような配列パターンについても分析をおこなう必要がある。この場合、ドライビングシミュレーション実験の実験計画を再検討することが必要になってくる。

さらには、追従モデルの利点を生かして、路面表示の配列が車群の速度適正化に与える影響を分析することも必要であろう。

謝辞：神戸大学の井料隆雅教授からパラメータ推定に関する有益なご助言を頂戴した。本研究は、JSPS科研費25420548および16H03017の助成を受けた。本研究の一部は、(株)高速道路総合技術研究所との共同型協力研究による。以上をここに記して、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 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（通達），警察庁丁規発第7号，2014。
- 2) FHWA: 3B.22 Speed Reduction Markings, *Manual on Uniform Traffic Control Devices (MUTCD)*, pp.393-394, 2009.
- 3) 四辻裕文，喜多秀行：減速マーク表示の効果的な配列に関する一考察，第31回交通工学研究発表会論文集，pp.103-109, 2011.
- 4) Denton, G.G.: The influence of visual pattern on perceived speed, *Perception*, Vol.9, pp.393-402, 1980.
- 5) Agent, K.R.: Transverse pavement markings for speed control and accident reduction (Abridgment), *Transportation Research Record*, No.773, pp.11-14, 1980.
- 6) 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.
- 7) 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.22-25, 2007.

- 8) 韓垂由美, 小野晋太郎, 佐々木正人, 須田義大, 池内克史, 玉木真, 大貫正明, 小島朋己, 錦戸綾子: 視覚情報にもとづく道路シークエンスデザインによる走行制御効果の検証, 生産研究, Vol.63, No.2, pp.131-136, 2011.
- 9) Oguchi, T., Nigorisawa, M., Konuma, R., Shikata, S.: Experimental research on the effects of visual environments on driver's speed recognition, *ITE 2005 Annual Meeting and Exhibit Compendium of Technical Papers*, 2005.
- 10) 亀岡弘之, 小根山裕之, 渡部義之: 走光性を活用した路側発光体の動的点滅制御による渋滞緩和の効果検証, 第 33 回交通工学研究発表会論文集, pp.185-188, 2013.
- 11) 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手法, 映像情報メディア学会誌, Vol.65, No.6, pp.833-840, 2011.
- 12) 植木宗司郎, 松本修一, 平岡敏洋, 櫻井宏樹: 錯視を活用したサグ部における速度低下抑制効果, 第 51 回土木計画学研究・講演集, 2015.
- 13) Yotsutsuji, H., Matsumoto, T., Yonemura, K., Kita, H.: An experimental study on the effect of sequential transverse and lateral markings on perceived speed in curved road, *Proc. 3rd Int'l Symp. on Future Active Safety Technology towards zero traffic accidents (FAST-zero)*, pp.335-342, 2015.
- 14) 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, 高速道路と自動車, Vol.57, No.12, pp.18-24, 2014.
- 15) 田中久光, 宇野伸宏, 飯田恭敬, 八木裕介, 山田哲也: 連続軌跡データを用いた潜在的追突危険事象発生過程に関する研究, 第 32 回土木計画学研究・講演集, 2005.
- 16) 佐佐木綱, 飯田恭敬: 5.2.4 追従モデル, 交通工学, オーム社, pp.143-149, 1992.
- 17) Kometani, E., Sasaki, T.: On the stability of traffic flow (Report-I), *Journal of Operations Research*, Vol.2, No.1, pp.11-26, 1958.

THE EFFECT OF ARRAY PATTERNS OF TRANSVERSE LINE INTERVALS OF A ROAD MARKING ON BOTH THE SPEED PERCEPTION OF LEAD-VEHICLE DRIVER AND THE CHANGE OF FOLLOW-VEHICLE SPEED

Kazuki KITAMURA, Hirofumi YOTSUTSUJI,
Hideyuki KITA and Toshimori OTAZAWA

One of the preventive measures against speeding accidents on curved highway is a road surface marking, transverse line intervals of which have been gradually decreased toward the curve. It is expected that an array pattern of the line intervals of the marking appropriately decelerates vehicle speed dependent on the curvatures. Depending on the combination of the array patterns with the curvatures, however, there are issues of concerns to shortage of deceleration and rear-end collision between the vehicles.

The purpose of this research is twofold: One purpose is to build a model for estimating the transition of lead-vehicle speed considering speed perception on the marking under given array patterns and given curvatures. The other is to analyze the risk of rear-end collision from the follow vehicle on the marking, as adopting a famous car-following model (Kometani-Sasaki model) and famous rear-end-collision indices (PICUD, TTC) under given array patterns and given curvatures.

Our research resulted in the following findings: In the case that the road surface marking with the transverse line intervals were set in a plane straight road section approaching a curve, the gradually decrease of the intervals was effective for decelerating the lead-vehicle speed on the marking, despite of both sharp and gentle curve. Especially in the case of up to 200 m of curvature radius for the sharp curves, there were some array patterns that caused the rear-end collision risk to the decelerating lead vehicle on the marking. To avoid such risk, it is recommended that a timing for decreasing the line intervals in one part of the straight section greater than in the remaining parts was better off setting the beginning part of the section.