

先行車に対する追突リスク認知の評価指標の比較・検討^{*1}

Comparison of Evaluation Indices for Estimating Driver's Risk Perception of Rear-End Collision

北 島 創^{*2}
Sou KITAJIMA

丸 茂 喜高^{*3}
Yoshitaka MARUMO

平 岡 敏洋^{*4}
Toshihiro HIRAOKA

伊 藤 誠^{*5}
Makoto ITOH

Abstract

This paper discusses various evaluation indices of driver risk perception with respect to the preceding vehicle as proposed by researchers from different academic fields based on the definition, purpose, and characteristics. The relationships between the indices are also considered theoretically, and time series variations of typical following situations are compared using numerical simulations.

1. はじめに

2007年に発生した交通事故の31%は追突事故が占めており¹⁾、追突事故を未然に防止することが重要な課題である。特に追突事故発生メカニズムの解明や追突リスクが高い場合に事故を自動的に回避できるようなシステム開発などに対する期待は高い。これに伴い、ドライバの減速操作の研究²⁾や衝突時の被害を軽減させるプリクラッシュセーフティシステムの開発³⁾が行われている。これらの研究・開発において、先行車に対する追突リスクを評価する指標が数多く提案されている。これらは定義式や特徴がそれぞれ異なるため、走行状況によっては必ずしも適切なリスク評価とならない場合が生じる。すなわち、各指標の定義式や特徴を認識しながら利用していく必要がある。

そこで本研究では、すでに提案されている評価指標の定義や特徴を整理し、指標間の関係を考察する。

2. 評価指標

2.1 主要記号と符号

先行車 (PV: Preceding Vehicle) と自車両であ

る後続車 (FV: Following Vehicle) の関係をFig. 1のような記号を用いて表記することで、先行車に対する追突リスクを算出する。先行車の位置、速度、加速度を x_p , v_p , a_p 、自車の位置、速度、加速度を x_f , v_f , a_f とする。両車の相対位置、相対速度、相対加速度を x_r , v_r , a_r とする。

相対位置 x_r の符号は自車が先行車の後方から追従する場合を負とする。相対速度 v_r は自車速度のほうが大きい場合を正とする。相対加速度 a_r は、自車の加速度のほうが大きい場合を正とする。

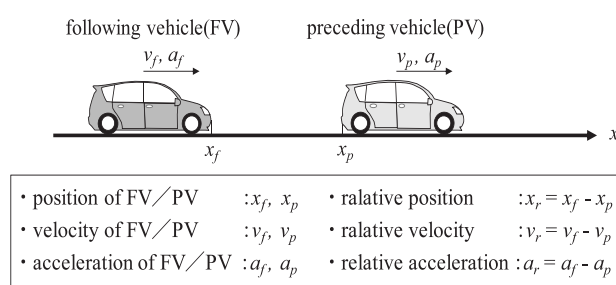


Fig. 1 Variables for analysis of interaction between following vehicle and preceding vehicle

2.2 各種評価指標の定義・特徴

1) TTC (Time-To-Collision: 衝突余裕時間)⁴⁾

TTCは現在の相対速度が維持されると仮定して、自車が先行車に衝突する時間 t_c を予測する指標である。

*1 原稿受理 2008年7月23日

*2 (財)日本自動車研究所 安全研究部

*3 日本大学 生産工学部 博士 (工学)

*4 京都大学大学院 情報工学研究科 博士 (情報学)

*5 筑波大学大学院 システム情報工学研究科 博士 (工学)

$$t_c = -\frac{x_r}{v_r} \left(= -\frac{x_f - x_p}{v_f - v_p} \right) \quad (1)$$

2) 1/TTC (Time-To-Collisionの逆数)⁵⁾

TTCの逆数によって定義され、先行車の大きさ（先行車に対する視角 θ ）の増加率の時間変化、または車間距離 $-x_r$ の対数の時間変化を表現できる指標である。

$$t_c^{-1} = \frac{1}{t_c} \left(= \frac{1}{t_c} \left(\frac{d\theta}{\theta} \right) = \frac{d}{dt} (\log(-x_r)) \right) \quad (2)$$

3) KdB (接近離間状態評価指標)⁶⁾

ドライバが先行車の視覚的な面積変化によって接近・離間を検出しながら加減速操作を行っているとする仮説に基づいて定義された指標であり、先行車面積の時間変化率をデシベル表示したものがKdBとなる。

$$KdB = 10 \times \log \left(\frac{4 \times 10^7}{x_r^2 t_c} \right) \quad (3)$$

4) $\dot{t}$ (TTCの時間微分値)⁴⁾

TTCの時間微分値を $\dot{t}$ と定義して、相対減速度がある場合の衝突可能性を評価する指標である。自車と先行車の間に相対的な減速度が発生する場合には、相対速度が正であっても $\dot{t}$ が -0.5 以上の値を示すような減速操作であれば衝突を回避できることが示される。

$$\dot{t} = \frac{dt_c}{dt} = \frac{d}{dt} \left(-\frac{x_r}{v_r} \right) = -\frac{\dot{x}_r v_r - x_r \dot{v}_r}{v_r^2} = -1 + \frac{x_r a_r}{v_r^2} \quad (4)$$

5) TTC_{2nd} (TTCの2次予測値)⁷⁾

TTCは、自車と先行車の間に相対的な速度変化がある場合には衝突までの正確な時間を示さない。そこで、現在の相対加減速度が維持された場合の衝突余裕時間 t_{c2} を、等加速度運動の方程式を解くことで求めてTTC_{2nd}とする。

$$t_{c2} = \frac{-v_r + \sqrt{v_r^2 - 2a_r x_r}}{a_r} \quad (5)$$

6) THW (Time-Head Way：車間時間)⁸⁾

THWは現在の自車速度 v_f で現在の先行車位置に到達する時間 t_h を示す指標である。先行車に追従する状況では、ドライバの追突リスク感覚は単にTHWによって決まるという報告がある。

$$t_h = -\frac{x_r}{v_f} \quad (6)$$

7) MTC (Margin-to-Collision：衝突余裕度)⁹⁾

MTCは先行車と自車が同時に $0.7G$ ($a_f = a_p = -6.9 \text{ m/s}^2$)で急減速した場合に衝突するかどうかを示す指標であり、先行車制動距離 d_p と車間距離 $-x_r$ の和と自車制動距離 d_f の比で定義する無次元量である。MTCが1以下の値を示すときは自車が急減速しても衝突する可能性が高いことを表す。

$$MTC = \frac{-x_r + d_p}{d_f} = \frac{-x_r - \frac{v_p^2}{2a_p}}{\frac{v_f^2}{2a_f}} \quad (7)$$

8) RF (Risk Feeling)⁸⁾

先行車追従時にドライバの車速制御特性を物理量で表現するため、TTCとTHWの逆数の線形和を、ドライバが主観的に感じているリスク (RF: Risk Feeling) と定義する指標である。走行実験によりドライバが通常の追従走行時にRFに基づいて速度を制御していることが検証されている⁹⁾。

$$RF = \frac{a}{t_c} + \frac{b}{t_h} \quad (8)$$

3. 各指標間の関係に関する理論的考察

3.1 指標算出に用いる変数

各指標の定義式に基づき、指標算出に必要な変数をTable 1にまとめる。

Table 1 Required variables for calculation of each index

variable index	x_r	v_f	v_r	a_f	a_r
TTC	✓		✓		
1/TTC	✓		✓		
KdB	✓		✓		
$\dot{t}$	✓		✓		✓
TTC _{2nd}	✓		✓		✓
THW	✓	✓			
MTC	✓	✓	✓	✓*	✓*
RF	✓	✓	✓		

* MTC assumes that both a_f and a_p are -6.9 m/s^2

3.2 指標算出に用いる変数の違いによる分類

1) 二車両間の相対関係だけで規定される指標

TTC, 1/TTC, KdB, $\dot{t}$, TTC_{2nd}は、自車と先行車の相対関係 (x_r , v_r , a_r) だけで規定されることがわかる (Table 1)。また、2.2 1), 2), 3) より、TTC, 1/TTC, KdBは視覚情報から直接求められる指標という点で、自車と先行車の相対的な関係のみで評価

される主観的なリスクを示すものとみなせる。

2) 二車両の状態によって規定される指標

THW, RF, MTCは、自車と先行車の相対関係だけでなく自車の状態 (v_f, a_f) も用いている (Table 1). 式 (6) に示すようにTHWは車間距離を自車速で除した時間であり、相対関係だけではなく自車両状態 (v_f) によって定まる安全マージンとみなすことができる. THW, RF, MTCは自車速度が高いほどリスクを高く評価することができる.

3) 減速行動の適正度を評価する指標

$\dot{t}$, TTC_{2nd} , MTCの三指標は相対加速度 a_r を用いて算出する (Table 1). これらは、自車と先行車の速度変化の関係から、現状の自車の減速行動の適正度を評価する指標となっている.

$\dot{t}$ は、先行車と衝突しないためには $\dot{t} > -0.5$ となるように減速度を制御したらよいことから、単に先行車との衝突リスクを評価するものではなく、衝突しないための行動を規定する指標である.

TTC_{2nd} とMTCは衝突回避のための行動を規定するものではなく、衝突に対するマージンを示すものである. 前者は現状の相対加速度を維持した場合、後者は現時点において自車と先行車がともに急減速した場合を想定している点が違いである.

4. 数値シミュレーション

ここでは3章で検討した指標間の関係について、典型的な追従走行場面の変動を用いて比較する.

1) v_r, x_r が同じで、 v_f だけが異なる場合

$v_r=40\text{km/h}$, $x_r=-100\text{m}$, $v_f=40\text{km/h}$ の条件 (A) と、 $v_r=40\text{km/h}$, $x_r=-100\text{m}$, $v_f=80\text{km/h}$ の条件 (B) の二つの追従走行状況を比較した. 二車両の相対関係だけで規定されるTTC, $1/TTC$, KdB, $\dot{t}$, TTC_{2nd} の五つの指標は自車速度の高さに関係なく (A) と (B) で同じ変動を示す (Fig. 2).

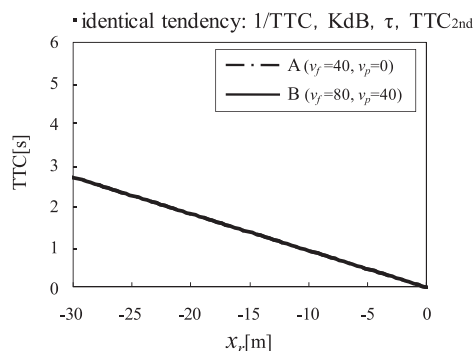


Fig. 2 Relation between TTC and x_r

一方, RFは自車速度の高さに対する安全マージンを示すTHWの差分 (速度倍ならTHW 0.5倍) に応じてリスクを高く評価する変動を示す (Fig. 3).

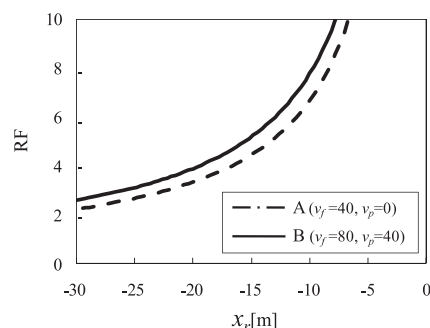


Fig. 3 Relation between RF (Risk Feeling) and x_r

MTCは、自車速度の二乗に比例する項と二車両の速度比の二乗の値で補正する項で規定されるため、車間距離が同じ (30m) でも $v_f=80\text{km/h}$ は $v_f=40\text{km/h}$ に比べてMTCは約1/3の値を示す (Fig. 4). また、衝突時 ($x_r=0$) の値が先行車停止は0, 先行車進行中は車速比の二乗の値 (v_p^2/v_f^2) を示す.

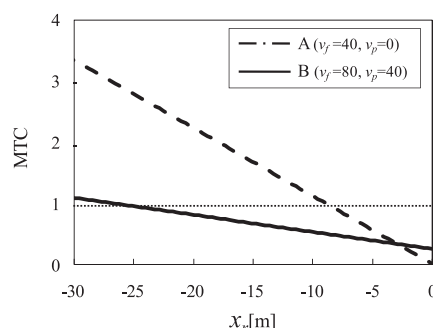
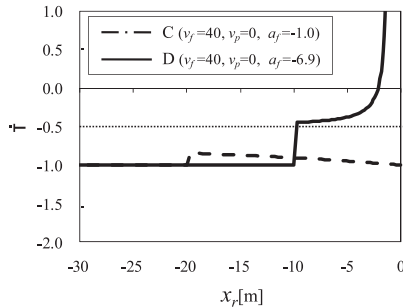


Fig. 4 Relation between MTC and x_r

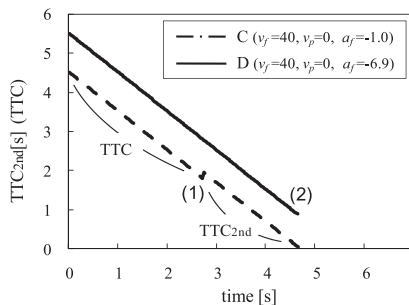
2) 減速行動の適正度の評価

現状のドライバの減速行動の適正度を評価する $\dot{t}$, TTC_{2nd} , MTCの三つの指標を比較する. 比較に用いた追従走行状況は $v_f=40\text{km/h}$, $v_p=0\text{km/h}$, $x_r=-50\text{m}$ から一定相対速度で接近する場面である. このとき, $x_r=-20\text{m}$ の時点で -1.0m/s^2 で減速するが衝突する条件 (C) と, $x_r=-10\text{m}$ の時点で -6.9m/s^2 の減速によって衝突寸前で回避する条件 (D) の二条件で比較した.

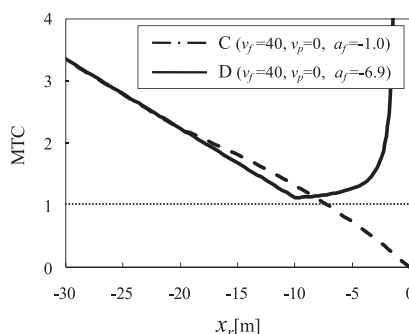
(C) の $\dot{t}$ は, -20m でいったん増加するが適正な減速を示す -0.5 以上を示さずに衝突する. 一方, (D) の $\dot{t}$ は, 減速直後の -10m で $\dot{t} = -0.45$ と -0.5 を超えた値を示し, 適正な減速の状態であると評価されて結果的に衝突を回避する (Fig. 5).

Fig. 5 Relation between $\dot{x}_r$ and x_r

TTC_{2nd}は、自車減速前はTTC、減速開始後はTTC_{2nd}の値を採用することで減速行動前後の衝突までの時間を評価する。(C)では、自車減速後 (Fig. 6 (1)) のTTC_{2nd}が衝突するまで減少し続ける点から現状の減速は適正ではないことが評価されている。一方、(D)では、自車減速後 (Fig. 6 (2)) のTTC_{2nd}は減速直後にTTC_{2nd}が定義できなくなる点で現状の減速が適正であることが評価されている。

Fig. 6 Time series variation of TTC and TTC_{2nd}

(C)におけるMTCは、MTCが約2の時点で減速を開始するが、衝突に対するマージンへの影響はほとんどないまま衝突している。一方、(D)では減速開始時 (−10m) のMTCが約1と小さいが、−6.9m/s²の減速行動によってこの時点のMTCを極小値として減速直後から増加し続けているため、減速が適正であることが評価されている (Fig. 7)。

Fig. 7 Relation between MTC and x_r

5. まとめ

- 1) 追突リスクを評価する八種類の指標の定義や特徴を整理した。指標算出に用いる変数によって、①二車両の相対関係だけで規定される指標、②二車両の状態によって規定される指標、③ドライバーの減速行動の適正度を評価する指標に分類することができた。これらの特徴を踏まえながら、追突リスク評価の狙いに合った指標を選択していくことが必要である。
- 2) 相対速度と車間距離が同じで自車速度が異なる場合と、追突する減速行動と回避できる減速行動の各指標の変動を整理した。相対速度と車間距離が同じでも自車速度の高さに応じてリスクを高く評価する指標や、適正な減速状態が指標によってどのように表現されるかが明確になった。

謝 辞

本報は、(社)自動車技術会2007年度調査事業「先行車に対するリスク認知評価指標のガイドライン作成に関する調査研究」の一環として、ヒューマンファクター部門委員会リスク認知評価指標検討ワーキンググループの活動の一部をまとめたものである。関係各位に記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 警察庁：平成19年中の交通事故の発生状況 (2008)
- 2) 宮本秀樹ほか：速度調整操作モデルにおけるドライバー特性の解析，生産研究，Vol.59, No.3, p.201-204 (2007)
- 3) 小高賢二ほか：追突軽減ブレーキとE-プリテンション，自動車技術，Vol.59, No.12, p.79-84 (2005)
- 4) D. N. Lee: A theory of visual control of braking based on information about time-to-collision, Perception, Vol.5, Issue4, p.437-459 (1976)
- 5) 森田和元ほか：運転支援システムのためのドライバーのブレーキ操作タイミングに関係する要因の解析，計測自動制御学会論文集，Vol.44, No.2, p.199-208 (2008)
- 6) 伊佐治和美ほか：前後方向の接近に伴う危険状態評価に関する研究 (第1報)，自動車技術会論文集，Vol.38, No.2, p.25-30 (2007)
- 7) P. Barber, et al.: Advanced collision warning systems, IEE Colloquium, Vol.234, p.2/1-2/9 (1998)
- 8) 近藤崇之ほか：先行車接近時におけるリスク感の定量化に関する研究，自動車技術会学術講演会前刷集，No.99-05, p.23-26 (2005)
- 9) 北島 創ほか：映像記録型ドライブレコーダによる追突事故発生メカニズムの解析，自動車技術会論文集，Vol.38, No.4, p.191-196 (2007)