追突事故・ニアミス時のドライバ対応行動の事後的診断手法の開発

北 島 創*・片 山 硬**・伊 藤 誠***

Off-line Diagnosis of Driver's Behavior Based on Rear-end Collision and Near-miss Data

Sou KITAJIMA*, Tsuyoshi KATAYAMA** and Makoto ITOH***

This paper describes a method to diagnose both driver's situation awareness (SA) and behavior based on actual rear-end collision and near-miss data. Characteristics of driver's reaction and brake operation are investigated with risk evaluation indices concerning rear-end collision. The result shows that driver's inappropriate SA and behavior can be observed both before and after the initiation of the brake operation. Therefore, it can be claimed that a driver assistance system should continue to monitor the driver behavior even after the initiation of the brake operation because driver's inappropriate behavior tends to occur during brake operation. On the basis of the analyses, the paper proposes a framework of diagnosis of driver's behavior and discusses the design of a driver assistance system to avoid a rear-end collision.

Key Words: rear-end collision, drive video recorder, situation awareness, driver assistance system

1. はじめに

交通事故を未然に防止する対策の重要性が交通安全充実のためにますます増しつつある。とりわけ、事故件数が最多である追突事故の予防安全技術の発展は喫緊の課題である。実際に、追突する可能性が高いと判断される場合に、事故の予防を支援するシステムの実用化が始まっている^{1),2)}。たとえば、ドライバが先行車の接近に気づいていないと思われる場合に警報を発して、ドライバに減速操作の開始を促すシステムがある³⁾。提示された警報に対してドライバが反応しない場合には、自動的に減速を行ない、衝突防止または被害軽減を図るものもある⁴⁾。こうした一連の支援においては、ドライバに減速操作を開始させることが重要視されているように考えられる。

しかし、減速操作が開始できれば衝突が必ずしも防げるとは限らない。筆者らが200台のタクシーに搭載したドライブレコーダ(DR)が記録した12件の追突事故を分析したところ、ドライバの減速操作が遅れた事故7件と、ドライバが適切なタイミングで減速操作を開始したにもかかわらず衝突した

5件に分けられた⁵⁾。すなわち、追突事故を未然防止するためには減速操作の開始を促すだけでは不十分である。しかし、ドライバの実行している減速操作が衝突回避に有効であるかを評価し、必要に応じて支援するという対策は、緊急制動時のブレーキアシストシステム⁶⁾を除くと、十分に組み込まれてはこなかったと考えられる。緊急制動時のブレーキアシストの場合、最大限に減速度を高めるように作動する。追突までに比較的余裕のある段階で、なおかつ減速度がやや不足するような場面では、前述のブレーキアシストは作動しないし、もし作動させるとすると制動力が強すぎてしまいかねない。

今後の追突予防対策は、先行車接近時に減速操作を促すのみならず、適切な量の減速操作となるようにドライバを支援することが必要である。減速操作開始の促進と、減速操作量の調整の支援をスムーズに行なうためには、ドライバが減速操作を開始する前と後の双方の場面に有用な追突リスク評価手法が求められる。

これまで、追突の危険性の高さを評価するための指標としては、「衝突余裕時間 (Time To Collision: TTC, 車間距離/相対速度)⁷⁾」などが用いられることが一般的であった。しかし、TTCなどでは、減速操作量の適切さを評価するのが困難であった。これに対し、筆者らは、「衝突余裕度 (Margin To Collision: MTC)」という追突リスク評価指標を提案した⁵⁾。このMTC指標では、減速・停止している先行車に衝突しないための減速操作の必要性を判断できることはわかっているため、本論文では、MTCをベースにすることによって、追突回避に必要なペダル操作量に相当する減速度を算出することができ、実際の操作量と比較することによって減速操作の適正さを評価できることを示す。

* (一財)日本自動車研究所安全研究部 つくば市荻間 2530

** 久留米工業大学工学部 久留米市上津町 2228-66

*** 筑波大学システム情報系 つくば市天王台 1-1-1

* Safety Research Division, Japan Automobile Research Institute, 2530 Karima, Tsukuba

** Faculty of Engineering, Kurume Institute of Technology, 2228-66 Kamitsu-machi, Kurume

*** Faculty of Engineering, Information and Systems, University of Tsukuba, 1-1-1 Tennodai, Tsukuba

(Received September 24, 2012)

(Revised April 2, 2013)

MTC をベースにして追突リスク評価を行なうことによって、先行車に急接近する状況の認知、制動開始の判断、実行、制動量の調整といった一連のシナリオにおいて、ドライバーの対応行動がそれぞれ適切であるかどうかを統一的に評価できるようになると期待される。

本論文では、ドライバーの一連の対応行動を診断する枠組みを構築し、取得済みの DR データ（追突事故・ニアミス）を用いて検証を行なう。この診断手法を多数の事例に対して適用すれば、共通的に失敗しやすい段階がどこにあるかを明らかにすることができると考えられ、ドライバーの教育・訓練や、運転支援システムのニーズの明確化に貢献できると考えられる。

2. 衝突余裕度に基づく追突リスク評価

2.1 変数の定義

本論文では、先行車（Preceding Vehicle: PV）と自車両である後続車（Following Vehicle: FV）の関係を文献 8) の記法にない、**Fig. 1** の記号を用いて記述する。

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。なお、 $x_r = x_f - x_p$ などのように、相対的な車両状態は、自車状態に対する先行車状態との差として定義する。

2.2 追突リスク評価指標

従来提案されている追突リスク評価指標を列挙するとともに、衝突余裕度 MTC ならびに MTC をベースににして導かれる指標を定義する。

(1) TTC (Time to Collision: 衝突余裕時間)

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を予測する指標である。零は衝突を意味する⁷⁾。

$$TTC = -\frac{x_r}{v_r} \quad (1)$$

(2) THW (Time Headway: 車間時間)

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を示す指標である。零は衝突を意味する⁹⁾。

$$THW = -\frac{x_r}{v_f} \quad (2)$$

(3) MTC (Margin to Collision: 衝突余裕度)

MTC は、現在の追従状態から先行車と自車が同時に減速を開始すると仮定した場合の衝突可能性を示す指標であり、先行車の制動距離 (B_p) と車間距離 ($-x_r$) の和と、自車制動距離 (B_f) との比で表わした無次元量である⁵⁾。

$$MTC = \frac{-x_r + B_p}{B_f} = \frac{-x_r - \frac{v_p^2}{2A_p}}{-\frac{v_f^2}{2A_f}} \quad (3)$$

本質的には、先行車と自車の想定減速度には任意の値を設定できるが、便宜上 $0.7G$ ($A_f = A_p = -6.9 \text{ m/s}^2$) とした。これは、先行車の状態を最悪の場合を想定するとき、最大限

Fig. 1 Definition of variables

の対応によって自車が追突を回避する余地を評価することを意図している。もし、MTC の値が 1 を下回っているならば、「最悪の事態が生じた場合に自車が最善の対応を行なっても追突は不可避である」との意味で危険な状態である。MTC の値が小さいほど減速する必要性が高まるが、たとえ二車両が加速中であっても、MTC が 1 を下回る状態が継続する場合は衝突する危険性が高く、自車の減速などによって 1 以上の値を示すように行動することが望ましいといえよう。

(4) DTC (Deceleration to Cope with collision risk: 衝突回避用減速度)

減速操作開始の促進と、減速操作量の調整の支援の両方を達成するための指標を考案した。追突しないためのドライバーの対応行動の内容を表わす必要があると考え、MTC の値から衝突回避に要する減速度を導く。この指標を衝突回避用減速度 (DTC) と定義する。MTC の逆数には、先行車が $0.7G$ で減速することを仮定した場合の衝突回避に必要な自車減速度の比を表わす特徴がある。この特徴を基に DTC を (4) 式で定義すると、MTC の逆数に先行車の想定減速度 (-6.9 m/s^2) を乗じる形で算出され、単位は $[\text{m/s}^2]$ である。

$$DTC = A_p \times \frac{1}{MTC} = \frac{A_p v_f^2}{v_p^2 + 2A_p x_r} \quad (4)$$

この DTC は本質的には平岡らが提唱する反応時間を考慮しない潜在的衝突回避減速度 (PDCA: Potential Deceleration for Collision Avoidance) である¹⁰⁾。厳密には反応時間の考慮が必要であるが、衝突回避に必要な減速度の分析系として、反応時間を考慮しない「理想的なドライバー」を想定してもどの程度のリスクがあるかを見積もることは意義があると考えられる。なお、DTC も PDCA と同様にドライバーの反応時間を考慮した指標を検討しており¹¹⁾、先行車の減速に対するドライバーの反応が遅れた状態の警報に有用である。

(5) R_a (Residual quantity of deceleration for Avoidance: 衝突回避用減速度と自車減速度の差)

先行車の減速に反応したドライバーがブレーキを操作する場合、衝突回避のためには実際の減速度 ($-a_f$) が DTC を超える必要がある。そこで、DTC と a_f の差を R_a と定義 ((5) 式) すると、ドライバーが衝突を回避するために車間距離が零以上の状態で R_a が零以上となる操作を実行したか否かの診断に利用できる。 R_a とは、ドライバーにとって現在の減速度からどの程度さらに減速することが必要かを示す意味合いがあると考えられる。 R_a のような指標に基づく減速操作の適正さの評価は PDCA では直接行っていない。ドライバーの減速操作を評価対象とするだけでなく、どのように操作すれば適正

な状態となるかを示す点が R_a の長所と考えられる。

$$R_a = DTC - a_f \quad (5)$$

さらに、RT (反応時間: 先行車の減速開始後に自車が減速を開始するまでの時間), t_{peak} (自車減速開始から減速度がピークを示すまでの時間), 平均減速度 $\bar{a}_f$ (t_{peak} 秒間の自車の平均減速度) も対応行動の診断に利用する。

3. ドライバの対応行動の診断手法とその評価

3.1 状況認識 (Situation Awareness)

ドライバーが行なう認知・判断・操作の過程において、認知が正しくなければその後の判断・操作が正しくありようはない。したがって、判断・操作の基礎となる認知の誤りの検出が追突予防のために重要である。自動車の運転においては状況が認知できれば何をなすべきかが容易に決まることが多く、ドライバーが状況認識を誤っている状態を検出できれば提供すべき支援は定まる。Endsley は、状況認識を以下の三つのレベルに分けて考えるべきであることを指摘している¹²⁾。

- ・レベル 1: 何かが起こっていることに気づく (知覚)
- ・レベル 2: その原因が特定できる (理解)
- ・レベル 3: これからの事態の推移が予測できる (予測)

追突の問題で考えると、レベル 1 では、たとえば先行車の減速 (ブレーキランプの点灯) に気づくことに相当する。その状況がどの程度深刻であるかわかるのがレベル 2 の状況認識であり、近い将来どの程度悪化するかわかるのがレベル 3 の状況認識である。本論文では、主にレベル 2, 3 のドライバーの状況認識をいかに診断すればよいかを明らかにすることを目指す。その理由は、ドライバーの減速操作後のエラーを検出するためには、衝突回避に必要な減速操作を実行する過程を詳細に診断する必要があるためである。なお、本論文で示す「診断」とは、追突回避に必要なドライバーの対応行動を、各種物理量に基づいて定量的に評価し、行動の適・不適を判断するとともに、不適の場合にはどの程度不適であるのかを明らかにすることを意味する。

3.2 ドライバの対応行動の事後的な診断手法

3.2.1 事故・ニアミスデータの特性

ここでは、本論文が提案する診断の枠組みを適用する DR データの概要を述べる。本論文で用いた DR は、衝突時や急減速時に発生する急激な加速度変化を検出した瞬間をトリガに、その前 10 秒、後 5 秒の計 15 秒間の前方映像とデータ (速度・加速度・ブレーキ信号など) を記録するものである。200 台のタクシーに搭載した DR データから追突事故・ニアミスデータを目視によって抽出した。今回は、追従中に先行車が減速を開始した後に自車が減速したパターンの事故 12 件と、ニアミス 45 件を提案手法の適用対象とした。

3.2.2 診断のチェックポイント

追突事故を回避するには、つぎの四時点がいかなる状態であって、自車ドライバーがいかなる対応行動をとるかが重要である。それは、二車両の減速状態の関係を表わす四時点から

Fig. 2 Critical points of a near-miss

共通のイベントを定義し、事故とニアミスの違いや事例ごとの違いを比較するためである。

四時点とは、①初期状態、②先行車減速時、③自車減速時、④最接近時である。Fig. 2 に示した追突ニアミス事例で説明すると、この事例では、自車が先行車に追従していたところ、DR のデータ記録用トリガの 1.134 秒前に先行車が急減速 (②) し、②の約 0.3 秒後に自車のドライバーが減速を開始 (③) した。トリガの 0.4 秒後の時点で、TTC が最小値を示す (④) という意味において最接近した (衝突は避けられた) ケースである。

②と③の関係からドライバーの反応時間 (RT) は約 0.3 秒とわかる。一般にドライバーが反射してペダルを踏み替えるまでに 0.7~0.8 秒を要するとされるため、このときのドライバーは先行車の減速に素早く対応したにもかかわらずニアミスが発生したといえる。

3.3 減速操作の衝突回避限界の診断手法

本論文ではドライバーのレベル 2, 3 の状況認識を診断するため、Fig. 2 が示す③より後の対応行動の解析を重視する。ここでは、衝突を回避できる場合と回避できない場合の境界がどのように表わされるかを明らかにする。この境界とは、先行車と衝突するリスクを自車ドライバーが減速操作によって対応する場面において、その操作が衝突回避に対して有効か否かを表わすものであり、衝突回避限界と定義する。衝突回避限界を診断するために a_f , DTC, R_a の三つの指標を用いる。

3.3.1 数値シミュレーション

(1) 先行車が一定の減速度で減速するケース

一定の減速度で減速する先行車に対して回避する減速条件 (1-1) と衝突する減速条件 (1-2, 1-3, 1-4) の数値シミュレーションを行ない、三指標の変動を比較した (Fig. 3)。初期状態は $v_{f0} \cdot v_{p0} = 13.9 \text{ m/s}$, $-x_{r0} = 25 \text{ m}$ とした。

1-1 は、0.5 秒時点から -4 m/s^2 で減速する先行車に対し、その 1 秒後に自車が -4 m/s^2 で減速して衝突を回避する条件である。

1-2 は、自車ドライバーの反応が遅れた状態を模擬し、先行車減速の 2.5 秒後に自車が -4 m/s^2 で減速するが 4.8 秒時点で衝突する条件である。

Fig. 3 Comparison of time series of indices concerning driver's brake operation (case 1-1, 1-2, 1-3, 1-4)

1-3 は、自転車ドライバの減速操作量が不足している状態を模擬し、先行車減速の1秒後に -2 m/s^2 で減速するが5.6秒時点で衝突する条件である。

1-4 は、自転車ドライバの減速操作が途中で変化する状態を模擬し、先行車減速の1秒後(1.5秒時点)から -4 m/s^2 で減速したが、2.5秒時点から -1 m/s^2 に徐々に変わり、5.8秒時点で衝突する条件である。

1-1 は自転車減速開始 (i) 後、2.3秒時点で R_a が零以上の値を示し (ii)、その状態が継続している。一方、1-2 は、 R_a が零以下の状態が継続し、DTC が4.1秒 (iii)、 R_a が4.4秒 (iv) にそれぞれの絶対値が 10 m/s^2 を超えている。その結果、車間距離が零 (v) となり衝突する。1-3 も一時的に R_a の値が増加するようになるが、減速度が不足しているために再び減少し、DTC (iii) と R_a (iv) の絶対値が 10 m/s^2 を超えて最終的に衝突 (v) する。1-4 の R_a は減速度が変化するまでは零以上の値を示していたが、変化後は再び R_a が零以下の値を示し、DTC (iii) も R_a (iv) も 10 m/s^2 を超えて最終的に衝突 (v) する。

(2) 先行車の減速行動が途中で変化するケース

つぎに、先行車の減速度が途中で変化するパターンを想定した。0.5秒から -2 m/s^2 で減速し、2.0秒時点から -6 m/s^2 に減速度が変化する先行車に対して回避する減速条件 (2-1) と衝突する減速条件 (2-2) に関する数値シミュレーションを行なった (Fig. 4)。

2-1 は、自転車が先行車の減速度が変化した1.8秒後に自転車が -1 m/s^2 から -6 m/s^2 に減速行動を変えたことにより R_a の値が増加して4.0秒時点 (ii) で R_a が零以上の値を示して衝突を回避する。

Fig. 4 Comparison of time series of indices concerning driver's brake operation (case 2-1, 2-2)

2-2 は、自転車が先行車の減速度が変化した3.0秒後に自転車が -1 m/s^2 から -6 m/s^2 に減速行動を変えたが、 R_a の値は増加することなく、DTC (iii) も R_a (iv) の値が 10 m/s^2 を超えて5.9秒時点で衝突 (v) する。

3.3.2 衝突回避限界の診断ポイント

先行車の減速行動が一定のパターン、途中で変化するパターンにおいて自転車の衝突する対応と回避する対応をした場合の

各指標の変動を比較したところ、衝突と回避の違いは以下の五項目に表われると考えられる。

- (i) 自車が減速すること
- (ii) R_a が零以上の値を示すこと
- (iii) DTC の絶対値が 10 m/s^2 を超えないこと
- (iv) R_a の絶対値が 10 m/s^2 を超えないこと
- (v) $-x_r$ が零以上の値を示すこと

このうち、自転車ドライバが減速を開始した後の衝突回避限界を解析するためには (ii)(iii)(iv) の特徴を利用することが必要である。衝突を回避できる減速操作と回避できない減速操作の診断に有用なポイントはつぎの二つであると考えられる。

- R_a が零以上の値を示し、その状態が継続すること

回避条件 (1-1, 2-1) が示すように、自車が減速した後に自車の減速度が DTC よりも大きい状態になることが必要である。したがって、両者の差である R_a が零以上の値を示すかどうか異なる。

また、Fig. 3 の 1-4 の変動が示すように、 R_a が零以上の値を示せば衝突を必ず回避するわけではなく、二車両の減速状態の関係によって R_a の値が再び減少して最終的に衝突することもある。回避する条件の 1-1 と 2-1 は自転車ドライバが減速操作を行なっている間は R_a が零以上の値を示す状態が継続するが、1-4 は自車の減速度が途中で変化することが要因となって継続しない点で異なる。

- DTC, R_a の絶対値が 10 m/s^2 を超えないこと

追突するリスクが高まるにつれて、DTC の絶対値が大きくなることは明らかである。実際に、衝突する条件はいずれも最終的に 10 m/s^2 を超えているが、回避する条件の 1-1 の DTC の値は 2.6 m/s^2 、2-1 の DTC の値は 3.3 m/s^2 と小さい。ここで、 10 m/s^2 に設定する理由は、車両の制動で発生しうる減速度の限界を端的に表すものと考えたためである。

3.4 回避ケースと衝突ケースの各種指標の変動

(1) 回避ケース

Fig. 5 は、先行車の減速に対して自転車ドライバが減速操作によって衝突を避ける回避ケースにおける各種指標の変動を表わす。ドライバの減速操作によって R_a が零以上の値を示す点 (1)、減速操作が完了するまで (1) の状態が継続する点 (2) の二つの特徴が存在する。この特徴がドライバの適正な対応を表わし、結果的に TTC と THW が零以上の値を示す要因になると考えられる。

(2) 衝突ケース

衝突ケースには、大きく分けると、減速操作の開始が遅れることに起因するものと、減速操作が不十分であることに起因するものとがある。前者の場合、TTC の値に基づいてドライバへ減速操作を促す警報が有効といえる。一方、後者の場合はドライバへ現在の操作量が不十分であることの通知と、衝突しないための減速操作を促す警報が有効といえる。Fig. 6 は、ドライバの減速操作量の不足によって最終的に衝突に至るケースの各種指標の変動を示している。

衝突ケースでは回避ケースと異なり TTC と THW が必ず

Fig. 5 Time series of risk evaluation indices (avoidance)

Fig. 6 Time series of risk evaluation indices (collision)

零を示す。前述したように減速度の不足が要因で R_a が零以上の値を示さない点、DTC の絶対値が 10 m/s^2 を超える点 (3)、さらに R_a の絶対値が 10 m/s^2 を超える点 (4) が異なることが要因で、TTC と THW が零を示す。

Fig. 5 と Fig. 6 は単なる一例であるが、二車両がともに減速する状況において衝突する場合と回避する場合の間には THW と TTC の変動の差異が存在し、その要因は減速操作の違いである。したがって、減速操作の適正さを示す衝突回避限界を減速操作にかかわる指標に基づいて診断できれば不十分な減速操作に起因する追突事故の予防対策へ発展できると考えられる。

4. 結果と考察

4.1 事故・ニアミスのドライバ対応行動の診断結果

4.1.1 プレーキタイミングと反応時間の比較

DR が記録した 12 件の事故、45 件のニアミスの自転車のブ

Fig. 7 Distribution of brake timing and reaction time

Fig. 8 R_a , a_f , DTC (near-miss)

レーキタイミングと反応時間の分布を比較した。Fig. 7は、ブレーキタイミングと反応時間の分布を事故とニアミスで比較した結果である。ブレーキタイミングは、事故・ニアミスともにトリガが作動する1秒以内の減速開始が最も多い（事故42%、ニアミス42%）が、早い段階で減速開始したにもかかわらず衝突する事例もあり、減速開始が遅いことが事故時に特有の状態とはいえない。一方、反応時間は両車の分布が類似していること、先行車減速から1秒以内に反応する事例がともに多い（事故42%、ニアミス53%）ことがわかる。つまり、ブレーキタイミングと同様に事故時の反応時間が顕著に大きくなるとの傾向は見られない。

以上、特定の状況ではあるがDRが記録した事例の分析結果は、追突事故を予防するためにはドライバーに減速操作を促すことだけでは不十分であり、その操作の適正さをモニターする必要があることを示している。

4.1.2 事故・ニアミスの衝突回避限界の比較

(1) ニアミス時の衝突回避限界

Fig. 8は、ドライバーが減速操作によって衝突を回避したニアミス事例の減速操作にかかわる指標（ R_a , DTC, a_f ）の変動を示している。この事例では、先行車が加速した直後に減速（②）し、その約2.3秒後に自車が減速（③）を開始した。自車減速（③）後は R_a の値が増加し、0.3秒時点で零以上の値を示し、自車が減速する間は R_a が零以上の状態が継続した。ドライバーの対応によってDTCの極値は -8.4 m/s^2 、 R_a の極値は -6.0 m/s^2 となり、衝突回避限界を超えなかった。市街地のような環境では、先行車が加速直後に急停止するという自車にとって不測の事態が頻繁かつ突発的に発生しており、本事例はその代表例として取り上げた。

(2) 事故時の衝突回避限界

事故には、ドライバーが衝突する直前まで反応できなかった

Fig. 9 R_a , a_f , DTC (accident) Fig. 10 R_a , a_f , DTC (accident)

事例と、ドライバーは早い段階で反応したにもかかわらず適正な操作が実行できなかった事例があった。

Fig. 9は、衝突直前まで反応できなかった事例の R_a , DTC, a_f の変動である。ドライバーの反応時間は約1.5秒であったが、ブレーキタイミングは衝突の0.5秒前であった。そのため、減速開始（③）時のDTC（ -9.2 m/s^2 ）と R_a （ -8.5 m/s^2 ）の絶対値が大きく、衝突回避限界に近い状態であった。 R_a の変動も衝突（④）するまで零以上の値を示さず、減速開始直後にDTC・ R_a の絶対値が 10 m/s^2 を超え、衝突回避限界となり衝突に至った。

Fig. 10は、適正な減速操作が実行できなかった事例の R_a , DTC, a_f の変動である。ドライバーの反応時間は約0.6秒、ブレーキタイミングは衝突の9.0秒前とドライバーの反応自体の問題はなかった。そのため、反応（③）した時点ではDTC（ -1.8 m/s^2 ）と R_a （ -1.5 m/s^2 ）の絶対値が小さく、穏やかな減速操作で回避できる状態であった。しかし、ブレーキを操作しているにもかかわらず減速度はほとんど発生しない状態が継続したため、 R_a は衝突（④）するまで零以上の値を示さなかった。最終的には衝突直前にDTCも R_a の絶対値が急激に増大し 10 m/s^2 を超えて衝突回避限界となり衝突に至った。

減速操作開始後のドライバーの対応行動の適正さの診断は、 R_a の変動に基づいて行なうことが有効であるといえる。このように減速操作にかかわる指標の変動は事故とニアミスで異なるが、その違いを表すだけでは追突予防策へ発展することはできない。 R_a に基づいて衝突回避限界を診断する利点とは、ドライバーの反応や減速操作にかかわる危険な状態を

Fig. 11 Distribution of ratio of non-reaction (12 accidents, 45 near-misses)

Fig. 12 Distribution of ratio of deceleration (12 accidents, 45 near-misses)

検出することだけでなく、現在の自車状態 ($-a_f$) との差を定量化することである。この利点が減速操作開始の促進と減速操作量の調整の支援に有用であると考えられる。次節では、事故・ニアミス分析結果の特徴に基づいてドライバの危険状態の深刻さを定量化する方法を考案する。

4.2 非反応率と減速率に基づく追突危険状態の把握

Fig. 9 と Fig. 10 が示すように、追突事故が発生する場面では、ドライバの「反応が遅れること」と「減速操作の減速度が不足すること」の二つが典型的な追突危険状態である。これらの状態の特徴を定量化するため、ドライバの「反応の遅れ」と「減速度の不足」の状態を「非反応率」と「減速率」という指標で表わす。さらに、DR データ解析に適用した結果に基づき、事故とニアミスの違いの診断に有効であるか考察する。

(1) 非反応率の定義

「非反応率」とは、先行車減速時の THW (Fig. 5, Fig. 6, a) と実際の反応時間 RT (Fig. 5, Fig. 6, b) の比 ($= b/a$) で定義する。ここで、THW の物理的な意味合い (自車が現在の速度で先行車の位置に到達する時間) を換言すると、先行車が実際に減速した場合に THW が示す時間内にドライバが反応できれば先行車と同様の減速操作で衝突を回避できることである。したがって、THW はドライバにとっての反応時間のバッファと考えられるため、非反応率が大きいほど深刻な状態を表わし、100%を超えた場合はドライバの反応が遅れた状態を表わす。

(2) 減速率の定義

「減速率」とは、自車減速開始時の DTC (Fig. 5, Fig. 6, c) と減速開始からピークを示すまでの間 (t_{peak}) の平均減速度 $\bar{a}_f$ (Fig. 5, Fig. 6, d) の比率 ($= d/c$) と定義した。この比率が小さいほど DTC に対して実際の減速度が不足する度合いが大きいという意味で深刻な状態を表わす。減速率が 100%未満の場合、ドライバには減速度のピークのホールド、または、減速度のさらなる増大が求められる。逆に、この比率が 100%を超えると、先行車の急減速を想定した場合の DTC よりも大きな減速度の減速操作をドライバが実行している状態を表わす。

(3) 非反応率の分布

Fig. 11 は、事故とニアミス合計 57 件の非反応率を降順 (深刻な順) に示した結果である。最大は 460% (2.3/0.5 (秒))、最小は 0% (0.0/1.1 (秒)) であった。なお、非反応率が 100%を超えた事例の割合は、事故が 58% (7/12 (件))、ニアミスが 40% (18/45 (件)) である。反応が遅れても衝突には至らない事例もあり、非反応率の大小で単純に事故とニアミスを判別することはできない。

(4) 減速率の分布

Fig. 12 は、57 件の減速率を昇順 (深刻である順) に示した結果である。最小は 3% ($-0.1/-3.4 \text{ m/s}^2$)、最大は 147% ($-2.8/-1.9 \text{ m/s}^2$) であった。減速率が 100%未満となる事例の割合は、事故が 100% (12/12)、ニアミスが 84% (38/45) と、双方のほとんどの事例が該当した。特に、ニアミスにも多く確認された点は、減速ピーク時まで減速率が 100%に

Fig. 13 Comparison of ratio of non-reaction

Fig. 14 Comparison of ratio of deceleration

達していなくても衝突を回避できることを表わす結果といえる。その要因は、DTCの想定減速度 ($-A_p = 6.9 \text{ m/s}^2$) よりも先行車の実際の減速度 ($-a_p$) が小さいことが考えられる。想定との差が大きいほど自車の減速度は小さくても対応できるため、100%という観点では多くの事例が到達しない結果になったものと考えられる。

つぎに、事故・ニアミスの減速率の分布における中央値 (73%) で見ると、73%以上の減速率に達した事例はニアミス事例が多い (Fig. 12)。この傾向に基づき、減速率 75%以下となる事例の割合を比較すると、事故は 83% (10/12) と依然として高いが、ニアミスでは 47% (21/45) となり、事故とニアミスに差が見られる。これは、減速率という指標が事故とニアミスを判別することに有用である可能性を示す結果と考えられる。

(5) 事故とニアミスの非反応率と減速率の差

ドライバの追突危険状態の特徴を非反応率と減速率の関係から分析したところ、減速ピーク時までに DTC の 75% 程度の減速率が達成したか否かが事故とニアミスを判別できる可能性が示された。そこで、事故とニアミスの非反応率と減速率に有意な差があるのかを明らかにするため、Mann-Whitney の順位検定を行なった。Fig. 13 と Fig. 14 は、事故とニアミスの非反応率と減速率の分布を表わす箱ひげ図である。

非反応率の中央値は、全体が 91%、事故が 110%、ニアミスが 90% であった。順位検定を行なった結果、両者の反応率の中央値に有意差は確認されなかった。

一方、減速率の中央値は、全体が 73%、事故が 48%、ニアミスが 76% であった。順位検定により、両者の減速率の中央値には有意水準 0.01 で有意差があることが確認された。

4.3 追突事故回避のためのドライバ対応行動の診断

4.3.1 診断項目と判断基準

本論文が提案する、追突事故回避のためのドライバの対応行動を事後的に診断する枠組みを Fig. 15 に示す。ここでは ETA (Event Tree Analysis) の概念¹³⁾を取り入れ、先行車の減速開始を起因事象に設定し、その後のドライバの対応行動の成否によって事象が分岐する形を表現した。これによってドライバがどの時点で追突リスクに対する対応行動を誤ったのかを診断できる。

今回は、五つのドライバの対応行動にかかわる分岐点を設定し、DR などから得られたデータに基づいて事後的な診断を行なう。分岐点ごとの具体的な内容と、どのようなデータに基づいて成否を判断するか述べる。

(1) 先行車減速開始の気づきの有無

自転車ドライバが先行車の減速後に減速操作を開始したか否かによって気づきの有無を判断する。したがって、先行車減速後に自車のブレーキ信号が on となった場合をドライバの気づきがあった状態と判断する。

(2) 遅れない反応の有無

4.2 節 (1) の非反応率に基づいて判断する。ドライバに許容されていた反応時間 (THW) よりも実際の反応時間 (RT) が大きい場合、つまり、非反応率が 100% 以上の場合をドライバの反応が遅れた状態と判断する。

(3) 適切な減速度の発揮の有無

4.2 節 (2) の減速率に基づいて判断する。減速ピークまでの平均減速度 ($\bar{a}_f$) が先行車の急減速を前提とした DTC の 75% に達していない場合を減速度が不足した状態と判断する。

(4) 適切な最大減速度の発揮の有無

衝突が差し迫った状況に適切に対応する減速操作をドライバが実行できたかどうかを判断する。具体的には、自車減速度 ($-a_f$) が最大値を示すときに、その値が DTC の値を超えたかによって適切な最大減速度を発揮したか否かを判断する。

(5) 衝突回避に有効な減速操作の有無

ドライバの減速操作が最終的に衝突回避に有効であったかどうかを判断する。ドライバの減速操作によって R_a が零以上の値を示す状態が継続したかを評価する。この結果からドライバが衝突回避に有効な減速操作を実行したか否かを判断する。

4.3.2 事故、ニアミス時の対応行動の診断結果

4.3.1 項の (1)~(5) に示した診断を 57 件の事故とニアミスに適用した結果を Fig. 15 に付記した。

五つの行動がすべて成功したと診断された事例 (a-1) には 17 件のニアミスが該当した。これらはニアミスの中でも比較的余裕のある状態で衝突を回避していた。そのほかでは、反応は遅れなかったが減速度の不足に気づいて対応した a-3 (10 件)、反応は遅れたが、その後の減速操作は適切に実行した a-5 (7 件)、反応の遅れと減速率の不足の双方がありながらも最終的には衝突回避に有効な減速操作を実行した a-7 (6 件) と a-8 (5 件) に分類できた。

Fig. 15 Framework of diagnosis of driver's situation awareness toward rear-end collision risk (c: collision, a: avoidance)

提案手法によって、ドライバの対応行動の誤りが減速を開始する前と後のどちらも発生することを説明できる。さらに、対応を誤っていることに気づいたドライバが適宜対応して衝突を回避する過程も説明できる。

事故もニアミスと同様にドライバは減速前後ともに対応行動を誤っていた。つまり、追突事故予防には減速開始前にドライバの減速操作を促すことと、減速開始後に適正な減速操作の実行を支援することの双方を行なう重要性が示されたといえる。したがって、今後の追突予防システムとしては、自車減速の前後を対象としてドライバの状況認識力を強化する支援や、複数存在するドライバが追突危険状態から復帰する機会に適宜対応した支援を提供することが重要である。

5. ま と め

追突事故の効果的な未然防止策を考案するため、追突リスクに対するドライバの対応行動が衝突回避に有効であるかを事後的に診断する手法を開発し、ドライブレコーダが記録した事故・ニアミスデータに適用した。その結果、減速開始前後にドライバが対応行動を誤るタイミングを特定できるだけでなく、衝突を回避するために現在の状態からどの程度修正すればよいのかを定量的に表現できる可能性を示した。本稿では、事後的な診断手法を提案したが、追突事故予防のためにはリアルタイム診断が求められる。そのため、減速関連指標の極値や時間微分値の特性を理論的に検証し、リアルタイム診断へ発展することが今後の課題である。

参 考 文 献

- 1) K. Lee, et al.: Evaluation of automotive forward collision warning and collision avoidance algorithms, *Vehicle System Dynamics*, **43**-10, 735/751 (2005)
- 2) M. Distner, et al.: City Safety — A system addressing rear-end collisions at low speeds, *Proceedings of 22nd international technical conference on the Enhanced Safety of Vehicles*, Paper No. 09-0371 (2011)
- 3) P. Francher, et al.: Human-centered design of an acc-with-braking and forward-crash-warning system, *Vehicle System Dynamics*, **36**-2-3, 203/224 (2001)
- 4) 小高ほか：追突軽減ブレーキと E-プリテンション, *自動車技術*, **59**-12, 79/84 (2005)
- 5) 北島ほか：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*, **38**-4, 191/196 (2007)
- 6) 成波ほか：緊急時のブレーキアシストに関する研究, *自動車技術会論文集*, **36**-2, 101/106 (2005)
- 7) D.N. Lee, et al.: A theory of visual control of braking based on information about time-to-collision, *Perception*, **5**-4, 437/459 (1976)
- 8) 北島ほか：リスク認知に関する評価指標の比較検討, *自動車技術会論文集*, **40**-2, 597/602 (2009)
- 9) W.V. Winsum, et al.: Choice of time-headway in car-following and the role of time-to-collision information in braking, *Ergonomics*, **39**-4, 579/592 (1996)
- 10) 平岡ほか：衝突回避減速度を用いたリスク評価指標の提案, *自動車技術会論文集*, **40**-2, 545/551 (2009)
- 11) 北島ほか：ドライバの自発的な安全運転を促すための運転支援方法の検討, *自動車技術会学術講演会前刷集*, No.138-11, 1/4 (2011)
- 12) M.R. Endsley, et al.: *Situation Awareness Analysis and Measurement*, 5/12, 189/199, CRC-Press (2000)
- 13) F. Redmill, et al.: *Technology and Assessment of Safety-Critical Systems*, 150/162, Springer-Verlag (1994)

[著 者 紹 介]

北 島 創

2005 年武蔵工業大学大学院博士前期課程修了。同年財団法人日本自動車研究所入所。2012 年筑波大学大学院博士後期課程修了，現在に至る。ドライバの自発的な安全運転を促す支援形態の研究に従事，博士（工学）。

片 山 硬

1981 年東京理科大学大学院理学部博士後期課程退学。82 年財団法人日本自動車研究所入所。2007 年久留米工業大学工学部交通機械工学科教授，現在に至る。97 年自動車技術会論文賞，2011 年日本機械学会交通・物流部門業績賞を受賞。自動車技術会フェロー，日本機械学会の会員。交通事故予防に関する研究に従事。理学博士。

伊 藤 誠（正会員）

1996 年筑波大学大学院工学研究科退学。同年より筑波大学電子・情報工学系助手。電気通信大学大学院情報システム学研究科助手，筑波大学大学院システム情報工学研究科講師を経て，現在，同准教授。主に自動車の運転支援におけるヒューマン・マシンの信頼と協調に関する研究に従事。2007～2008 年計測自動制御学会システム・情報部門マンマシンシステム部会主査，2012 年同学会システム・情報部門副部門長。2001 年ヒューマンインタフェース学会論文賞，2008 年日本交通科学協議会優秀論文賞，2010 年計測自動制御学会論文賞（友田賞）などを受賞。HFES，IEEE，ヒューマンインタフェース学会，自動車技術会などの会員。博士（工学）。