

ASV技術の効果予測に関する研究^{*1}

— 車間距離警報装置の効果評価 —

Evaluation of Driver Support Systems for Advanced Safety Vehicle

— Effectiveness of Forward Vehicle Collision Warning Systems —

若杉 貴志^{*2}

Takashi WAKASUGI

Abstract

The purpose of this study is to clarify the driver's effective response rate when using a driver-support system. As the first step of this project, an investigation was conducted to deduce the driver's effective response rate when using a Forward Vehicle Collision Warning Systems (FVCWS) that supports rear-end collision prevention. A driver's response and collision avoidance rate with and without presentation warning were examined in a driving simulator experiment in which a typical rear-end collision scene was displayed. Simulation analysis of a driver's avoidance response clarified the influence on parameters such as the initial velocity and the forward vehicle's deceleration that were related to success or failure of collision avoidance.

1. はじめに

国土交通省を中心としたASV (Advanced Safety Vehicle) プロジェクトにおける効果評価手法は、事故統計データに基づき、個別技術ごとに低減が見込まれる事故件数を求める方法である。その過程では、経験や仮定に基づいて各種パラメータを設定しているが、効果評価の予測精度を高める上で最も重要なパラメータが「安全作動率」である。

安全作動率とは、対象システムの運転支援機能が作動した場合に、狙い通りの効果が得られる割合を表し、ドライバ特性や運転環境等の各種要因が影響するため、一義に決めることが困難なパラメータといえる。そのため、第3期ASV (2001～2005年度) における効果評価の検討では、経験的な支援効果を考慮した判断に基づき安全作動率の値を設定している。

本研究では、これまで暫定的に設定していた安全作動率の値を、実験的裏付けを持って設定できるようにすることを目的に、その取り掛かりとして、追突事故防止を支援する「車間距離警報装置」

の安全作動率を求めるための検討を行った。実験では、ドライビングシミュレータ (以下、「DS」という) を用いて代表的な追突事故場面を設定し、衝突回避時におけるドライバの運転行動特性、および警報呈示による衝突回避の成功率 (安全作動率の算出基礎) について調査した。続いて、得られた結果をもとに、ドライバの回避操作をシミュレーション計算し、衝突回避の可否に関わる各種パラメータ (初期車速や先行車減速度等) が安全作動率に及ぼす影響について解析を行った。

2. 実験方法

2.1 運転環境

市街地を模した片側一車線の対面通行道路を、車速60km/hで先行車に追従走行する場面を設定した。その際の車間時間は、先行車の位置を調整することで、常に1.8秒となるように設定した。

また、脇見が原因による追突事故を想定し、ドライバに脇見タスクを課すことにした (脇見用モニタはセンタコンソール下部に設置)。タスク内容は、まず合図音が鳴り、その0.5秒後から0.25秒間隔で0～9の数字がランダムに10回表示されるので、最初に表示された数字がその後何回出てき

*1 原稿受理 2008年9月30日

*2 (財)日本自動車研究所 予防安全研究部

たかを口答で回答させることにした。

なお、後述の危険場面（イベント）と同期させて追突事故を誘発させるわけであるが、被験者にイベント開始を予測させないため、イベントの有無に関係なく、約30秒に1回の割合で脇見タスクを呈示した。

2.2 危険場面（イベント）

追突事故に至る代表的な危険場面として、2種類のイベントを用意した。一つは「先行車急減速」場面で、追従中の先行車が0.4Gの減速度で急停止するイベントとした。もう一つは「停止車両遭遇」場面で、先行車が車線変更して、その前方に停止車両が出現するイベントとした。両場面ともドライバによる回避操作が無ければ、約4秒後に衝突に至る緊急性を有している。

2.3 警報タイミング

警報呈示条件としては、「標準」的なタイミング、比較的「遅め」のタイミング、および「警報なし」の3水準を設定した。警報タイミングを求めるアルゴリズムに関しては、最も基本的なSDA（Stopping Distance Algorithm）方式を用いた¹⁾。これは、仮に先行車が減速した場合に、自車両が追突しないために必要な制動距離と現在の車間距離との大小関係に基づいて警報タイミングを決めるもので、警報車間距離は下式から導かれる。

$$D_w = V_1 T + \frac{V_1^2}{2a_1} - \frac{V_2^2}{2a_2}$$

D_w : 警報車間距離(m)
 T : 空走時間（想定反応時間）(s)
 V_1 : 自車両の速度(m/s)
 a_1 : 自車両の想定減速度(m/s²)
 V_2 : 先行車の速度(m/s)
 a_2 : 先行車の想定減速度(m/s²)

空走時間 T については、警報に対する反応時間としてASVで定義されている0.8秒を設定し、先行車の想定減速度 a_2 については0.4Gとした。自車両の想定減速度 a_1 （必要減速度）については、標準的な警報タイミング条件として0.4G、遅めのタイミング条件では0.6Gに設定した。

2.4 被験者

被験者には、日常的に自動車を運転している20代～40代の一般ドライバ20名を用いた。内訳は、

男性各10名とし、いずれも各年代層別に3～4名ずつの構成とした。

2.5 実験手順

まず、実験内容や車間距離警報装置の働きと注意事項について説明した。次いで、DSに慣れるための練習走行を行い、操作系の特性を把握してもらった後、脇見タスクの練習を行った。

本実験における初回イベントは、すべての被験者で統一するため、危険場面は「先行車急減速」、警報タイミングは「標準」条件とした。その後は2種類の危険場面と警報タイミングの組み合わせで、4種類の走行条件を被験者ごとにランダムに実施した。従って、先行車急減速&標準タイミングの条件については、全被験者とも2回実施することになる。最後に、システムの効果を把握するための比較条件として、警報無しの状態で2種類の危険場面を実施した。

3. 実験結果

3.1 衝突回避率

全7回の実験走行別に、衝突回避の成功率（衝突回避率）を求めた結果をFig. 1に示す。

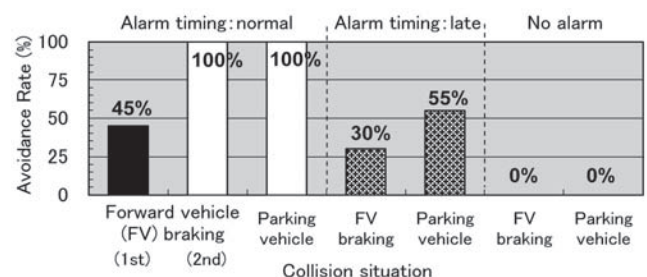


Fig. 1 Rate of collision avoidance

まず、リファレンスとして実験の最後に実施した「警報なし」の場合は、いずれの危険場面においても衝突回避率は0%、すなわちすべての被験者で衝突が発生しており、警報による支援が無ければ事故に至る状況を再現できていることがわかる。

一回目の警報体験時（先行車急減速&標準タイミング条件）の衝突回避率は45%であるのに対し、同じ実験条件でも、1回以上警報を体験した後は、衝突回避率の値が100%となっている。この違いは、初回イベント時はどんな警報がどの程度のタイミングで呈示されるかがまったく知らされていないのに対し、二回目以降は警報の特性をあ

る程度把握できたためと考えられる。つまり、システムに対する習熟度の違いによって、衝突回避率が変化することを示唆している。

なお、システムに慣れた後でも、警報タイミングが「遅め」の場合は、ドライバに残された回避余裕時間が「標準」よりも少なくなるため、衝突回避率の結果は、先行車急減速場面で30%、停止車両遭遇場面で55%に低下することがわかる。

3.2 警報に対するブレーキ反応時間

衝突回避率に最も大きく影響する要因の一つがドライバの反応時間であり、本研究では、警報が呈示されてからドライバがブレーキペダルを踏み始めるまでの時間を「ブレーキ反応時間」と定義する。初回警報体験時、および同条件の二回目の警報体験時におけるブレーキ反応時間を、平均値±1標準偏差で比較した結果をFig. 2に示す。

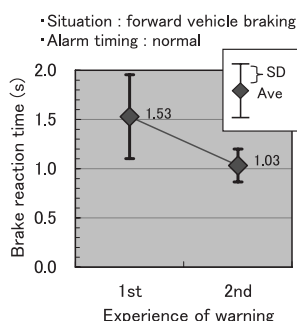


Fig. 2 Comparison of brake reaction time

システムにまったく慣れていない初回体験時は、平均で約1.5秒要しており、被験者ごとのばらつきも大きくなっている。一方、一回以上警報を体験した後では、平均で約1.0秒に短縮され、ばらつきも小さくなっていることがわかる。

なお、2種類の危険場面と警報タイミングを組み合わせた4種類の実験条件別に、ブレーキ反応時間を比較したところ、実験条件による大きな違いは見られず、平均して0.8~1.0秒程度の値を示す結果となった（前述の初回警報体験時は除く）。

3.3 最大減速度

ブレーキ反応時間と同様、制動回避時における最大減速度の値も、衝突回避率に大きく影響する要因の一つである。今回の実験では、乾燥アスファルト路面の摩擦係数を考慮し、減速度は最大0.8Gまで発生可能な設定としたが、すべての被験

者が制動限界付近（0.7G~0.8G）まで使って減速していることがわかった。

4. 安全作動率に関するシミュレーション検討

今回の実験は、車速60km/h、先行車の減速度0.4Gという限られた条件下で実施したものであり、安全作動率の一例を求めたに過ぎない。ただ、車間距離警報によって先行車への衝突を回避できるかどうかは、多種多様な走行条件の組み合わせによって決まるものの、先行車の状態を「(停止を含む)定常状態」あるいは「定速走行からの減速停止」に限って考えれば、ブレーキ操作による衝突回避の可否は下記パラメータの組み合わせによっておおむね推定することができる。

- ①先行車状態：相対速度、先行車減速度
- ②自車初期条件：車速、車間時間
- ③警報アルゴリズム：警報タイミング
- ④回避操作タイミング：ドライバの反応時間
- ⑤回避操作量：自車減速度、減速ジャーク

④と⑤のドライバによる回避行動は、厳密には周囲の交通環境やそれ以前の①~③の影響を受けるとも考えられるが、仮に、それらの影響が小さく、本実験で得られたデータと同等のパフォーマンス（反応時間や最大減速度）を発揮したとして、車速や先行車の減速度等が変化したとき、衝突回避率がどのように変化するかをシミュレーション計算で求めることにした。

計算には本実験で得られた反応時間データを用い、それぞれの反応時間における衝突回避の可否判定を行い、最後に、個々の反応時間における衝突回避の可否を集計し、シミュレーション条件ごとの回避成功率（衝突回避率）を算出した。

4.1 初回警報体験時の衝突回避率（先行車減速）

まず、システムの働きをドライバが熟知していない状況を想定し、初回警報体験時のブレーキ反応時間データを用いて、自車速や先行車の減速度条件別に衝突回避率を算出した（Fig. 3）。シミュレーション計算に必要な前述のパラメータ①~⑤は以下の値に設定した。

- ①先行車減速度：0.3G~0.6G
- ②初期車速：10~100km/h、車間時間：1.8s
- ③本実験における「標準」的な警報タイミング

- ④初回警報体験時のブレーキ反応時間分布
 ⑤自車減速度：0.8G，減速ジャーク：1.0G/s

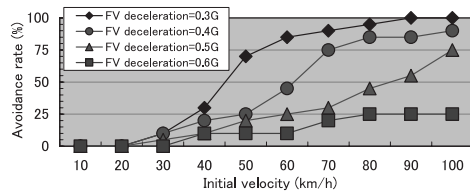


Fig. 3 Collision avoidance rate at forward vehicle braking using 1st reaction time

車速60km/h，先行車減速度0.4Gにおけるシミュレーション結果の衝突回避率は45%を示し，この値は実験結果とよく一致することから，本シミュレーションの妥当性が示唆される。

先行車の減速度の影響について見ると，減速度が大きくなるほど衝突回避率は低下する傾向にあることがわかる。これは，警報タイミングの設定における先行車の想定減速度を一律0.4Gに設定していることに起因し，実際の減速度が想定減速度よりも大きければ，それだけタイミング的に遅い警報と等価になるためといえる。

4.2 初回警報体験時の衝突回避率（停止車遭遇）

前節では，先行車状態が「減速」の場面を対象に各種パラメータの影響を調査した。ここでは，先行車状態が「定常」の場合を想定し，「停止車両遭遇場面」における衝突回避率について検討する。定常状態の場合は先行車減速度のパラメータが不要となるため，自車減速度を0.5G～0.8Gに設定し，初期車速（＝相対速度）ごとの衝突回避率を求めることにした。

Fig. 4の結果を見ると，自車減速度0.8G条件の衝突回避率は，Fig. 3における先行車減速度0.4G条件の結果と一致する。従って，先行車が定常状態にある場合は，「先行車減速時の実減速度と想定減速度が等しい状況」と等価であり，改めて衝突回避率を計算する必要はないことがわかる。

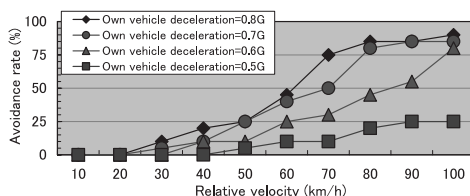


Fig. 4 Collision avoidance rate at parking vehicle encounter using 1st reaction time

4.3 システムに慣れた場合の衝突回避率

ここまでの検討では，ドライバがシステムを熟知していない状況を想定し，初回警報体験時の反応時間データをもとに衝突回避率を算出した。一方，システムに慣れてくれば，警報に対して適切に対応できるようになり，衝突回避率が上昇することも考えられる。そこで，二回目以降の全反応時間データをもとに，システムに慣れたドライバの衝突回避率を算出した結果をFig. 5に示す。

初回警報時に比べて二回目以降はブレーキ反応時間が短くなるため（全体平均で約0.6秒短縮），Fig. 3の初回警報体験時のデータを用いた場合と比較して，衝突回避率が大きく上昇していることがわかる。

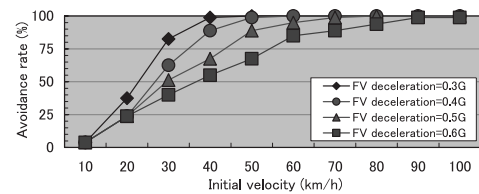


Fig. 5 Collision avoidance rate at forward vehicle braking using 2nd reaction time

5. まとめ

本研究では，追突事故防止を支援する車間距離警報装置の安全作動率を求めるため，代表的な追突事故場面を設定したDS実験を行い，警報呈示に対するドライバの反応時間や衝突回避の成功率（安全作動率の算出基礎）について調査した。さらに，得られた結果をもとに，ドライバの回避操作をシミュレーション計算し，衝突回避の可否に関わる各種パラメータが回避成功率に及ぼす影響の度合いを明らかにした。

今後は，各種条件の組み合わせによって求められた衝突回避率から安全作動率を導出するための考え方について整理する必要がある（例えば，車速の影響については，危険認知速度別の事故件数で加重平均を取るなど）。

参考文献

- 1) T.Wakasugi et al. : Driver Reaction time to forward vehicle collision warning -effectiveness of warning system under low awareness level-, ITS World Congress, No.3007 (2000)