

衝突被害軽減ブレーキシステムの評価に関する研究

澤田東一*

廣瀬敏也**

春日伸予***

銭谷真拓****

衝突軽減ブレーキシステムは、衝突事故に対して自動制動によって衝突速度を低減し、被害を軽減するシステムである。この装置は技術指針により、運転者の過信を配慮して作動タイミングが規定されている。本研究は、高速走行時においてさらなる被害軽減効果を得るために、制動と衝突速度の関係をもとに走行速度によって作動タイミングを変化させる方法を検討した。その結果、自動制動の作動タイミングは、減速度 5.0m/s^2 時に衝突速度が 15km/h となる衝突時間とし、運転者の依存を考慮してブラッシュ・アップすることで、さらなる被害軽減の効果を得ることが可能となった。

Study on Evaluation of Collision Mitigation Brake System

Toichi SAWADA*

Toshiya HIROSE**

Nobuyo KASUGA***

Masahiro ZENIYA****

The collision damage mitigation braking system reduces collision speed by automatic braking, and this system mitigates the damage. This system is prescribed action timing of automatic braking which consider the overconfidence of the driver. The action timing of automatic braking is prescribed by the technical guideline. This study examined a method to change an action timing of automatic braking by the velocity which is calculated with braking and collision velocity. This method gets a further damage mitigation effect at a highway. As a result, the action timing of automatic braking get an effect of the further damage mitigation by using follows. TTC (Time to collision) which show the action timing of automatic braking sets a collision velocity 15km/h when the deceleration 5.0m/s^2 , and TTC is brash up in consideration of overconfidence to the driver.

* 芝浦工業大学工学部機械工学第二学科教授
Professor, Dept. of Mechanical Engineering,
College of Engineering, Shibaura Institute of
Technology

** 交通安全環境研究所自動車安全研究領域研究員
Researcher, Automotive Safety Research Dept.,
National Traffic Safety and Environment Laboratory

*** 芝浦工業大学工学部人間科学教授
Professor, Humanities and Social Sciences,
College of Engineering, Shibaura Institute of
Technology

**** 芝浦工業大学大学院工学研究科機械工学専攻
Student of Graduate School of Mechanical
Engineering, Shibaura Institute of Technology
原稿受理 2008年7月31日

1. はじめに

Advanced Safety Vehicle (ASV) の技術として、前方障害物への衝突事故に対し、警報と自動制動によって衝突時の衝突速度を低減し、衝突による被害を軽減する衝突軽減ブレーキシステムの研究開発が行われてきた¹⁻⁷⁾。このシステムは、国土交通省より技術指針が定められており、運転者のシステムへの過信を配慮した上での警報および自動制動の作動タイミング、減速度の大きさなどが規定されている。自動制動の作動タイミングは、前方車両との衝突を制動および操舵により回避できる限界の衝突時間(以下、TTC)と通常の運転において回避操作を開始するTTCにより規定されている。現行のシステムでも被害を軽減する効果はあるが、本研究ではさらなる効果を得るための可能性を、自動制動に頼ることなく運転者が自ずとブレーキを踏んでしまうタイミングをもとにTTCの閾値を検討することとした。すなわち、運転者の制動タイミングをもとにTTCの閾値を検討することで、運転者が自動制動に頼り、自ら制動することをやめるといった運転者のシステムへの過信や依存を配慮できるものと考えられる。また、この上でシステムの制動の作動タイミングを早めることによって、衝突時の被害軽減の効果を高めることができると考える。

現行システムの自動制動の作動タイミングは、被害軽減の効果を最大限に発揮することとした場合に、乗用車はTTC1.4秒であり、大型車はTTC1.6秒である。この数値は、運転者の過信を配慮して操舵による回避動作をもとに設定されているものであり、走行速度が大きくなった場合でも操舵による衝突回避タイミングが一定としているために変化することはない。しかし、現状の交通状況を考えてみると複数車線の高速道路であっても他の走行車線に車両があつて操舵による回避操作を行うことができない状況も考えられること、高速走行時において被害軽減効果を高めるために走行速度によって自動制動の作動タイミングを変更したほうが効果的であることが考えられる。よって、ここでは上記を考慮した上で、制動と衝突速度の関係から得た新たな作動タイミングについて実験的に検討を行った。

本研究は、現行の被害軽減ブレーキについて警報の作動タイミング、自動制動の減速度の大きさ、被害軽減の割合について実験的に検討した結果を示し、高速走行時においてさらなる被害軽減効果を得るた

めに、制動と衝突速度の関係をもとに走行速度によって作動タイミングを変化させる方法について、その効果と運転者のシステムへの過信や依存について検討を行ったものである。

なお、本研究では乗用車を対象とし、3-3節の減速度の大きさと人間の感覚では実車を用い、その他の実験では再現性と安全の確保が容易である傾斜型ドライビングシミュレータ(以下、DS)を用いた。このDSはヨー・ロール・ピッチ運動が可能であり、前方視界は135度の視野角が得られる⁸⁾。

2. 現行の作動範囲

衝突軽減ブレーキシステムは走行速度が15km/h以上で、法定速度以下で作動する。自動制動における作動減速度は、乗用車が 5.0m/s^2 以上、大型車が 3.3m/s^2 以上とされている。運転者が制動により回避を行い、それが衝突軽減ブレーキシステムの作動減速度を上回るものであれば、運転者の制動を優先し、システムをオーバーライドできる仕組みである。

自動制動の作動タイミングは、前方車両との衝突を制動および操舵により回避できる限界のTTCを制動回避限界、操舵回避限界とし、双方の小さいほう

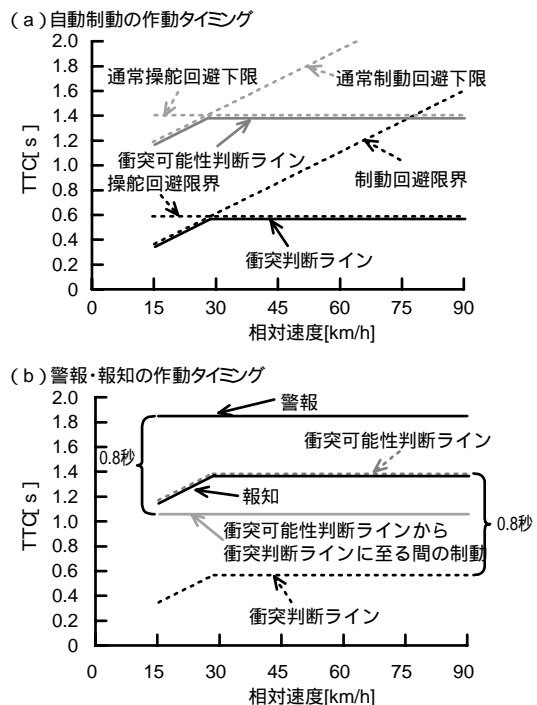


Fig. 1 衝突軽減ブレーキシステムの作動タイミング

うを結んだラインを衝突判断ラインとしている。また、通常の運転において制動および操舵により回避操作を開始するTTCを通常制動回避下限、通常操舵回避下限とし、衝突回避を行う下限を衝突可能性判断ラインとしている。Fig.1(a)は乗用車を対象にその概念図を示す。なお、衝突可能性判断ラインは、通常操舵回避下限をもとに作成したものである。よって、自動制動は、乗用車の場合はTTCが1.4秒、大型自動車の場合はTTCが1.6秒から開始が可能である。また、この他にも減速度が 0.98m/s^2 以上、 2.45m/s^2 以下であり、かつ、その持続時間が0.8秒未満である制動は警報として使用してもよいことになっている。また、音および表示による警報および報知のタイミングを規定している。警報は運転者に危険事象を知らせるものであり、報知は運転者にシステムの作動を知らせるものである。警報の作動タイミングは、衝突可能性判断ラインから衝突判断ラインに至る間の制動制御の開始に0.8秒を加えた時点より前に音および表示を提示するものであり、報知は、衝突判断ラインに0.8秒を加えた時点より前に提示するものである。Fig.1(b)は、乗用車を対象にその概念図を示す。

そこで、本研究では、さらなる被害軽減効果を得るために衝突可能性判断ラインより前から自動制動を行う場合について、運転者の制動タイミングと衝突速度をもとに検討した。また、警報は衝突可能性判断ラインから制動を開始するものとする、衝突可能性判断ラインに0.8秒を加えた時点にて音および表示を提示している必要があり、警報の実験的検討として衝突可能性判断ラインに0.8秒を加えた時点から警報を提示した場合についてその効果を検討した。

3. 現行の作動範囲の現状

3-1 衝突可能性判断ラインプラス0.8秒の警報タイミングが制動回避動作と操舵回避動作へ及ぼす影響

実験にはDSを用いている。被験者は手で直線路を10数秒走行した後、前方障害物に対して制動動作により衝突回避を行い、前方障害物後方に停車する。制動動作を計測した後、次に衝突可能性判断ラインの0.8秒前から警報音がなり自動制動する警報タイミングについて主観的評価（6：非常に遅い～0：遅くない）を行った。被験者は自動で走行する車両を観察し、作動する警報タイミングが、普段の

自分の制動動作および操舵回避動作と比較してどの程度遅いかを評価した。

被験者は普通運転免許を保有する20代の男性9名、女性1名であった。なお、被験者の多くは、普段通学に自動車を運転している者とした。試行回数は制動動作の計測を1条件につき6回、主観的評価を1条件につき1回行った。走行速度は60km/h、80km/h、100km/hである。

Fig.2に衝突軽減ブレーキシステムの警報タイミングに対する主観的評価の結果を示す。普段の制動タイミングと比較した場合は、衝突被害軽減ブレーキシステムの作動はすべて「遅い(評点3)」以上の評価であり、走行速度によらず最も多い評価は「非常に遅い(評点6)」であることを示す。普段の操舵回避タイミングと比較した場合は、衝突被害軽減ブレーキシステムの作動の評点は小さくなる傾向を示す。60km/hの場合に若干1名が「やや遅い」と評価したものの他は[遅い]評価となっている。運転への従事度合いが高い通常の状態では制動回避限界の作動は「遅い」と評価されるため、システムに過剰に依存することは少ないと考えられる。また、走行速度が上がるほど評点が高くなる(より遅いと評価する)傾向を示す。そのため、システムの作動タイミングは速度に依存したもので、走行速度の上昇とともにより早いタイミングで作動したとしてもシステムに依存することは少ないと考えられる。

3-2 警報音が与える制動動作への効果

警報音提示の有無により制動動作への影響を検討した。この実験では前方障害物の出現と同時に警報音が提示される。そこで、前方障害物の出現から被験者が制動を開始するまでの過程に着目した。前方障害物の出現から被験者が制動を開始するまでの過程は、障害物の出現からアクセルペダルを戻し始めるまでの時間と、アクセルペダルを戻し始めてからブレーキペダルを踏み始めるまでの時間に分けることができる。前者は主に認知や判断の過程に要した

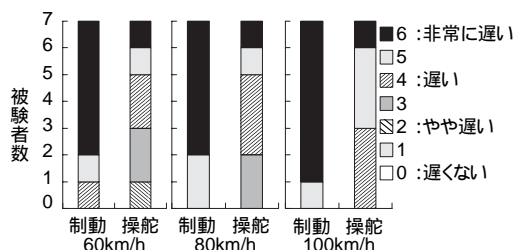


Fig. 2 通常動作と比較した警報タイミングの主観的評価

時間であり、後者は操作の過程に要した時間である。

前方障害物の出現からアクセルペダルを戻し始めるまでの時間を全被験者の平均値としてFig.3(a)に示す。図中のpoint ~ point は、後述するTable 1、Fig.8に示している。警報音を提示する場合は、提示しない場合に比べて時間が短くなる傾向を示す。両者の差についてt検定を行ったところ、どちらの走行速度においても1%有意となった。また、警報音を提示する場合と提示しない場合の差の点推定値は、走行速度80km/hで53ms、走行速度100km/hで52msとなった。

アクセルペダルを戻し始めてからブレーキペダルを踏み始めるまでの時間を全被験者の平均値としてFig.3(b)に示す。警報音の有無の両者の差はほとんどみられない。

以上より、警報音の提示には運転者の認知や判断

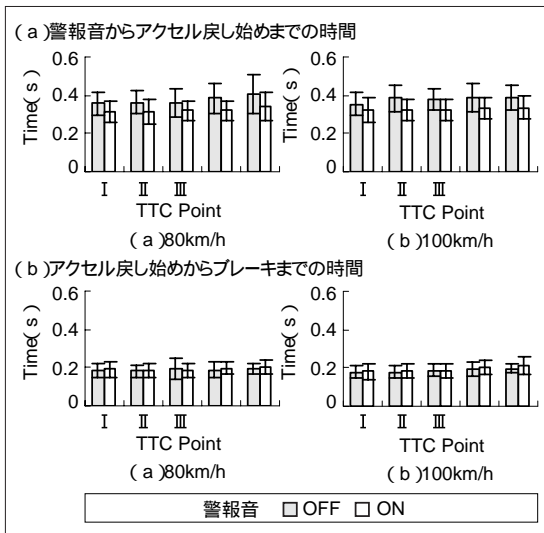


Fig. 3 警報音が運転者の動作へ及ぼす効果

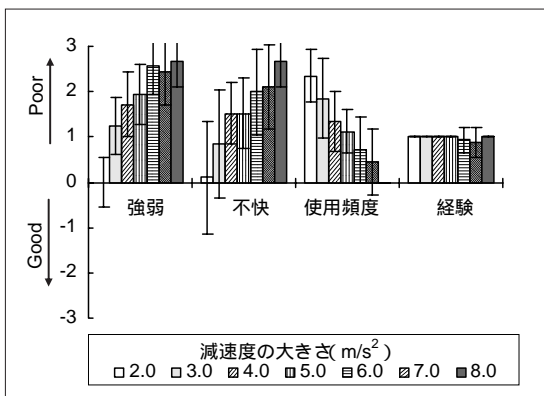


Fig. 4 実車による減速度の主観的評価の結果

を支援し、制動開始までの時間を短縮する効果があることが明らかとなった。

3 - 3 減速度の大きさと人間の感覚

運転者の普段使用する範囲の減速度の大きさや減速度に対する感覚を、実車を用いて被験者の主観的評価を試みた。一定の減速度で制動する車両に乗車し、そのときの減速度について運転者以外に乗車した被験者が主観的評価を行う。制動の減速度に対して、普段行う制動と比較して、

- ・どの程度強いか
[評点] 3 : 非常に強い ~ - 3 : 非常に弱い
- ・どの程度不快か
[評点] 3 : 非常に不快 ~ - 3 : 非常に快適
- ・使用する減速度か
[評点] 3 : よく使う ~ 0 : 使わない
- ・経験があるか
[評点] 1 : ある 0 : なし

の4項目について評価を行った。走行速度は50 ~ 60km/hとし、体感する減速度は2.5m/s²から5.5m/s²まで行った。

Fig.4は実車による減速度の主観的評価の結果を示す。「どの程度強いか」の評価は4.0m/s²あたりで「強い(評点2)」と評価し、「どの程度不快か」の評価は減速度が強くなるほど評点が大きくなる傾向を示している。4.5m/s²あたりで「不快(評点2)」と評価し、5.5m/s²は他と比較して特に不快感が強いことを示す。「使用する減速度か」の評価は減速度が強くなるほど使用頻度が低くなる傾向を示し、4.5m/s²あたりでも「まれに使う(評点1)」と評価していることを示す。「経験があるか」の評価は使用頻度が全て0以上であることからわかるように、全減速度で使用した経験がある(評点1)ことを示している。

以上より、4.5m/s²以上の減速度では使用経験はあるが、減速度に関して強く不快に感じることが明らかとなった。4.5m/s²で自動制動するシステムであれば、運転者が運転に対する従事度合いの高い普段の状況下での制動動作と重複せず、依存の少ないシステムの構築が可能と考えられる。本実験の結果を参考に衝突可能性判断ラインから自動制動の減速度は5m/s²に設定した。

3 - 4 衝突被害軽減率

DS上で直線路を走行中に、突如現れる前方

障害物に対する制動動作を計測した。前方障害物が現れる距離は、衝突軽減ブレーキシステムが警報を行うTTCに値する距離とした。また、車両が突如出現する状況は運転への従事度合いが高い場合でも予期せぬ状況から発生するヒヤリ・ハットを想定しており、事故発生の危険性が高い状況を想定した。よって、この実験はシステムの警報タイミングで行う被験者のヒヤリ・ハットの緊急制動回避動作の計測を行ったものである。3 - 1節と同様の被験者9名であり、試行回数は制動動作の計測を6回行っている。

60km/hでは1名を除いて8名の衝突割合は0%であり、衝突していても速度低減率（衝突までに走行速度の何割を低減したか）は90%以上であった。

Fig.5に80km/hと100km/hの衝突割合と速度低減率を示す。80km/hでは被験者間のばらつきが大きく、100%衝突した被験者と、衝突を回避した試行がある被験者に分かれた。衝突をいくつか回避した試行がある被験者は速度低減率も高く90%前後であるが、100%衝突した被験者は速度低減率が60~80%を示している。100km/hでは全被験者が100%衝突し、速度低減率は40~60%であることを示す。図中、右端のALLは全被験者の平均値を示す。

この結果はTTC 2秒からの警報（衝突可能性判断ライン+0.8秒）の警報音を聞いてから被験者が素早くブレーキをかけたときの結果である。このときの制動開始までの時間は、個人差がみられたが0.5秒~0.7秒の範囲で制動が開始されていた。この時間と警報音0.8秒との差が、自動制動が始まる0.1秒~0.2秒前となる。また制動開始から停止までの各被験者の平均減速度は速度の差はなく6m/s²~7m/s²であった。この大きさは自動制動5m/s²を上回りオーバーライドしている。

以上より、走行速度が高いほど衝突軽減ブレーキシステムによる衝突速度軽減効果が低い、また自動制動より前からオーバーライドしていたことを考慮すると、システムへ依存する可能性が低いことは明らかである。走行速度が高い場合、システムの作動タイミングをもう少し早くしても依存する可能性は低いと考えられる。

4. 拡大ラインの提案

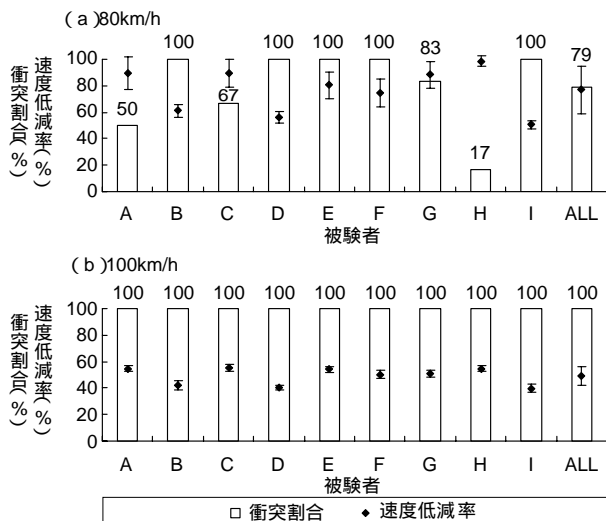


Fig. 5 衝突割合と速度低減率

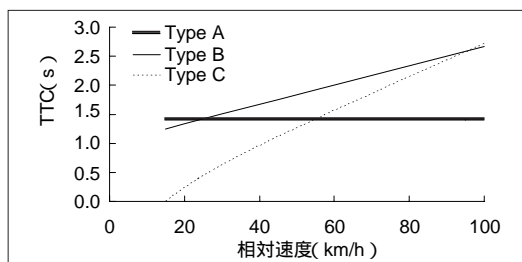


Fig. 6 各システムの自動制動が作動するTTC

4 - 1 速度を考慮した衝突時間

実車実験より得られた減速度5.0m/s²での制動動作は強く、不快で、普段使用しない範囲の減速度であることが明らかとなり、5.0m/s²以上の減速度が必要な状況下で作動するシステムであれば、普段の制動動作と重ならず、依存性は低く衝突軽減効果の高いシステムが構築可能と考える。よって、システムの自動制動が作動する条件を「衝突可能性判断ラインと衝突判断ラインからの平均減速度は5.0m/s²で制動し、衝突速度が15km/hとなる場合」と定めた。条件の判定はTTCによって行う。ここで、衝突速度の15km/hとはシステムの作動する下限の走行速度であり、これ以下の速度ではシステムが作動しないこと、十分に速度が低いこと、また、衝突速度がある程度残ることにより実際に運転者が衝突せずに停止するためには5.0m/s²以上の減速度が必要な状況になることを考慮して設定した。以下に、システムの自動制動が作動する条件式を示す。

$$TTC \leq \frac{V_t^2 - V^2}{2a_s V} \dots\dots(1)$$

V : 走行速度(m/s)

V_t : 衝突速度(m/s)

a_s : システムの作動減速度(m/s²)

ここで、V_t=15/3.6であり、a_s= - 5.0である。

これまでの作動条件のシステムと提案する作動条件のシステムの走行速度と自動制動が作動するTTCの関係をFig.6に示す。TypeAは通常操舵回避下限をもとに作動するシステムであり、TypeBは通常制動回避下限をもとに作動するシステムである。TypeCは前述した式(1)の条件で自動制動が作動するシステムである。TypeBはTypeAと比較して相対速度の全域で自動制動の作動が早い。TypeCはTypeAと比較して低速域では作動が遅く、高速域

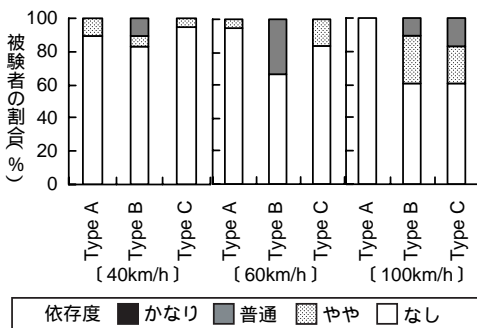


Fig. 7 システムへの依存度に対する主観的評価

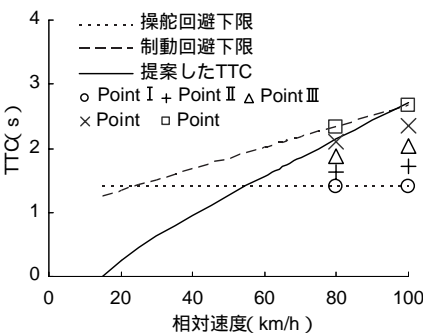


Fig. 8 Point ~ のTTC

Table 1 Point ~ のTTC

速度 (km/h)	TTC (s)				
	Point I	Point II	Point III	Point	Point
80	1.40	1.63	1.87	2.10	2.34
100	1.40	1.72	2.04	2.35	2.67

では作動が早くなるため、衝突被害軽減効果が高いと考えられる。

Fig.7にシステムへの依存性に対する主観的評価(依存度4:かなり~1:なし)の結果を示す。TypeAは走行速度40km/h以上であれば、依存性は低いことが明らかとなった。TypeBは制動動作に依存はみられなかったが、主観的には他と比較して依存性が高いことが示される。特に走行速度が60km/hではその傾向が顕著であり、走行速度が速いほど依存性が高い。提案するTypeCは走行速度60km/h以下では依存性が低い、100km/hではやや依存性が高いことが明らかとなった。

4 - 2 高速域における依存性への対応

Fig.5に示すTypeAの100km/h走行時の場合、衝突は100%さけられない。また自動制動が行われるとする場合の衝突速度は、TTC1.4秒から5.0m/s²の減速度をもとに計算すると、30km/h低減され、70km/hの衝突速度になる。ドライバーが警報音に気づき、オーバーライドした制動の場合、個人差はあるが速度低減率はFig.5(b)から40~60%を示しており、これより衝突速度は40km/h~60km/h程度となる。衝突安全基準からみればフルラップ前面衝突試験の速度は55km/hであり、衝突性能のよい車両であると乗員の傷害を受ける危険性が低い水準であるが、40%の速度低減率(衝突速度60km/h)ではこれを上回る。またFig.7に示すシステムへの依存性に対する主観的評価から、Type Bは60km/h以上、Type Cは100km/hにおいて依存度の増加が確認できる。

ここでTypeCの高速域のTTCを小さくすれば依存度の低減が図れると考え、Fig.8およびTable 1に示すPoint ~ Pointを設定し、さらなる検討を試みた。

走行速度は80、100km/hとし、各条件についてシステム使用時(自動制動)と非使用時(手動制動:オーバーライドを含む)の試行をそれぞれ5回行

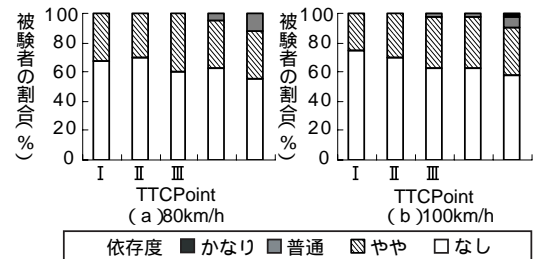


Fig. 9 システムへの依存度に対する主観的評価

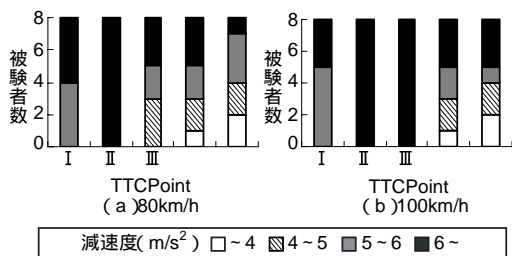


Fig. 10 平均減速度ごとの被験者数

った。依存度に対する主観的評価（依存度4：かなり～1：なし）は、システム使用時の試行でのみ行った。なお、被験者数は8名であった。Point は通常操舵回避下限のTTCであり、TypeAに相当する。Point は通常制動回避下限のTTCであり、TypeBに相当する。Point ～Point は、Point とPoint を等分するTTCである。

Fig.9にシステムへの依存度に対する主観的評価を示す。各TTC間での差は小さいが、TTCが大きくなるにつれて評点が大きくなる傾向を示している。このことから、TTCが大きくなるほど依存性が高まると考えられる。

Fig.10に平均減速度ごとに表した被験者の割合を示す。走行速度80km/hのPoint ～Point、および走行速度100km/hのPoint ～Point では、システム使用時（自動制動）による減速度は5.0m/s²を下回る被験者が存在した。自動制動による減速度が運転者による減速度より大きくなるようなTTC値では、依存が生じる可能性があるものと考えられる。

以上より、走行速度80km/hではPoint のTTC値（1.63s）まで、走行速度100km/hではPoint のTTC値（2.04s）までTTCを小さくすることで、運転者による依存を回避することが可能と考えられる。

Fig.11に、システム使用時の衝突速度を示す。通常操舵回避下限（Type A: TTC = 1.4s）を一点差線で示す。TypeCの衝突速度は走行速度にかかわらず15km/h一定（図中点線）である。運転者の依存を回避できる自動制動の衝突速度は、走行速度80km/hの場合41km/h（TTC = 1.63s）程度に、100km/hの場合、51km/h（TTC = 2.04s）程度に抑えられ、現行のTTCに比べて100km/hの場合、衝突速度が70km/hから51km/hに被害軽減されている。また、実験では運転者によるオーバーライドによって衝突速度が回避（平均減速度が6.8m/s²以上）されるか、または10km/h（平均値）程度に衝突速度を抑

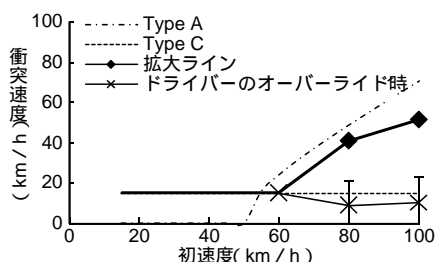


Fig. 11 システム使用時の衝突速度

えることができた。

5. おわりに

本研究では、高速走行時において衝突被害軽減の効果を高めるために、減速度と衝突速度の関係をもとに走行速度によって作動タイミングを変化させる方法を提案・検討した。その結果以下の結論を得た。

- (1) 自動制動の開始タイミングを、減速度5.0m/s²のときの衝突速度が15km/hとなるTTCとした場合、60km/h以下の走行速度では依存性が低いが、それより上の速度域では依存性が高くなる。
- (2) 上記TTCをベースに、走行速度80km/h時のTTCを1.63sに、100km/h時のTTCを2.04sにそれぞれ引き下げることで、依存性を抑えつつ被害軽減効果の拡大が可能である。

たとえば、衝突被害軽減ブレーキシステムの自動制動の減速度の大きさが7m/s²と大きくしても、自動制動による衝突の被害軽減は高まるが、衝突を回避することはできない設定としている。衝突被害軽減ブレーキシステムから技術を高めていき、衝突回避を目指すシステム構築は、運転者がシステムの機能を過信することがないように自分の意思でブレーキペダルを踏まなければならないという心理的感覚状況を運転者に与える設定が必要である。それには、自動制動の作動タイミングと運転者の過信や依存の関係を定量的に評価できるような研究をしていく必要があろう。

機械が人間を支援することは、機械が人間の中に入り込む、すなわち機械が人間の認知判断を司ることになり、人間に歩み寄り心理的要因を含めたヒューマンマシンインタフェースが望まれるところである。

[謝辞] 実験解析にご協力いただいた元芝浦工業大学大学院生川上貴文氏に感謝いたします。

参考文献

- 1) 鈴木桂輔、佐藤健治「前方障害物衝突防止支援システムの制御方法に関する一考察」『自動車技術』Vol. 57, No. 12, 2003年
- 2) 古谷昌之、野中正勝「前方障害物衝突防止支援システムの開発」『自動車技術』Vol. 56, No. 11, pp. 28-32, 2002年
- 3) 佐々木陽成、古川修、鈴木隆史「衝突回避操舵における支援システムの検討」『自動車技術会学術講演会前刷集』No. 101-05, pp. 1-6, 2002年
- 4) 澤田東一他「被害軽減ブレーキの評価に関する研究」『日本機械学会関東支部第2回埼玉ブロック大会講演論文集』No. 060-5, pp. 69-70, 2006年
- 5) 澤田東一、川上貴文、山口満、廣瀬敏也「ドライバの運転行動特性の実験解析2」『自動車技術会、先進運転支援システムの効果予測評価体系の開発フォーラム』pp. 29-35, 2005年
- 6) 廣瀬敏也、川上貴文、春日伸予、澤田東一「後方追突防止のための視覚提示システムの評価」『日本機械学会』73巻、725号、pp. 244-250, 2007年
- 7) 名切末晴、野中正勝、井垣宗良「一般ドライバの運転特性に基づく前方障害物衝突防止情報の開発」『自動車技術会学術講演会前刷集』No. 51-01, pp. 1-4, 2001年
- 8) 澤田、小口「運転動作解析のためのドライビングシミュレータの開発」『芝浦工業大学研究報告理工系編第40巻2号』pp. 31-37, 1996年