

ドライバモデルを適用した衝突被害軽減 ブレーキシステムに関する研究

Research on Advanced Emergency Braking System applying to Driver Model

廣瀬 敏也* 久保田 秀暢**
Toshiya Hirose Hidenobu Kubota

本論文では、自動車基準国際調和フォーラム(WP.29)にて議論されている予防安全システムの基準化の動向および追突事故の防止を目的に制定された衝突被害軽減ブレーキシステム(AEBS: Advanced Emergency Braking System)について述べ、ドライバモデルをAEBSの作動タイミングに適用した場合の効果について評価した。

This paper shows the trend of making a regulation of pre crash safety systems in the world forum for harmonization of vehicle regulations (WP.29) and shows the detail of the advanced emergency braking system (AEBS: Advanced Emergency Braking System) which is prescribed in WP.29. This paper investigated the effect of AEBS activation timing that is applied to the driver model.

*) 芝浦工業大学・工学部・機械機能工学科・助教

**) 国土交通省・自動車局・技術政策課・技術企画室長

1. はじめに

近年、交通事故の低減を目的にしたアクティブセーフティやパッシブセーフティの観点から開発されたシステムが車両に搭載され、事故の低減に寄与している。2012年における交通事故死者数は、4,411人となっており、1970年における16,765人と比べると約1/4に減少しているが、依然として多くの人が交通事故によって亡くなっている。日本政府は、2011年3月の第9次交通安全基本計画において2015年までに交通事故死亡者数を3,000人以下とし、2010年1月の内閣府特命担当大臣談話では2018年までに2,500人以下とすることを目標に掲げている。国土交通省では、2010年交通政策審議会報告書において、車両安全対策の推進により、2020年に1,000人の交通事故死亡者数を削減することを目指している(対2010年比)。車両安全対策は、車両の安全基準の拡充・強化のほか、人、車両、道路にて情報を共有することで安全・円滑な交通を実現するITS(Intelligent Transport System、以下、ITS)、車両に搭載した予防安全シ

ステムにより安全性を向上させる先進安全自動車(Advanced Safety Vehicle、以下、ASV)などプロジェクトを通じて推進されている。

車両の安全基準の拡充強化は、各国が交通事故の詳細な調査・分析等を通じて、事故防止効果の高い安全デバイスを車両に義務づけることで安全性を向上することを目指すものである。近年は自動車産業の国際展開、世界的な自動車装置・部品の共通化等を背景に国際的な基準調和が進んでいる。この国際的な基準調和により、一つの車両安全対策が一国だけではなく国際的に車両の安全性を向上されることが可能となり、安全対策の効果を地球レベルで達成することができるツールともなりうるものである。

具体的には、車両の安全の担保を目的とした道路運送車両の保安基準が国土交通省にて定められており、その基準の一部は自動車基準国際調和フォーラム(WP.29)にて定められている国際基準との調和が図られている。

特に近年は、ASVプロジェクト等により研究・開発

されたシステムについての基準化が順次進められており、中でも追突事故の回避・被害低減を目的とした衝突被害軽減ブレーキシステム⁽¹⁾ (Advanced Emergency Braking System、以下、AEBS)や車線逸脱警報システム(Lane Departure Warning System、以下、LDWS)などは、国連欧州経済委員会に設置されているWP.29にて国際基準化が進められている⁽²⁾。

本論文では、まずWP.29にて議論されている予防安全システムの基準化の動向について述べ、緊急時に作動する衝突被害軽減ブレーキシステムを例にして、更なる高度化について実験的に検討を行ったものである。高度化については、個々のドライバモデルを構築し、衝突警報システムの作動タイミングに適用することで、運転者特性を反映させたシステムの効果をドライビングシミュレータによる実験により評価した。

2. 自動車基準国際調和フォーラム(WP.29)における基準化の動向

先に述べたように、国連欧州経済委員会(UNECE)の下に設置された自動車基準国際調和フォーラム(WP.29)において自動車の安全・環境基準に関する国際調和の議論が行われている。

この基準調和活動は「国連の車両・装置等の型式認証相互承認協定」(1958年協定)と「国連の車両等の世界技術規則協定」(1998年協定)の二つの協定を通じて行われており、日本はこれら両協定の加盟国となっている。

両協定に関する国際的な基準調和は、その歴史的経緯から、とすれば欧州域内の意見が強く反映され、いわば欧州域内の基準作りの延長線上での議論になりがちである。これに対し日本は両協定に基づく議論について、アジア特有の事故形態や道路環境を考慮した技術要件等について積極的な提言、提案を行う等を通じて、アジアを含めた各国に適用可能な真の国際基準とするための活動を行っている。またこれにより、両協定へのアジア各国も加盟も促すことにも繋がっている。

近年は、これまでの衝突安全基準の国際的基準調和に加え、衝突被害軽減ブレーキ(AEBS)や車線逸脱警報装置(LDWS)といった事故の回避・被害低減を目的とした予防安全技術の基準策定が行われつつある。

これら基準策定に当たっては、日本がASV推進計画において作成してきた技術ガイドライン作成のノウハ

ウをもとに積極的に基準案を提案し、これら基準化の主導的役割を果たしているところである。

更に2013年9月に開催されたWP.29下のブレーキと走行装置に関する分科会(GRRF)において、車線維持支援システム(Lane Keep Assist System)に関する技術要件作りを今後日本が議長として取り纏めていくことが全会一致で決定している。

このように国際的な基準調和活動を進めていく上で、日本の役割は今や欠かせないものとなっており、国際的にもその貢献が強く期待されているところである。

3. 衝突被害軽減ブレーキシステムの国際基準

衝突被害軽減ブレーキシステム(AEBS)は、図1に示すように先行車両との車間距離、相対速度等を検知し、衝突の危険性をドライバに警報し、ドライバが回避行動を取らない場合には自動ブレーキを作動させることにより、衝突の被害軽減または回避が可能となるものである。すでに自動車基準国際調和フォーラムにて議論され、Regulation No.131として制定されている。欧州では、車両総重量5トン以上の大型車に対してAEBSの国際基準を2013年11月より順次義務づけことになっており、日本では2013年11月に欧州と同様にAEBSの国際基準を公布し、2014年11月より段階的に義務づけることになっている。

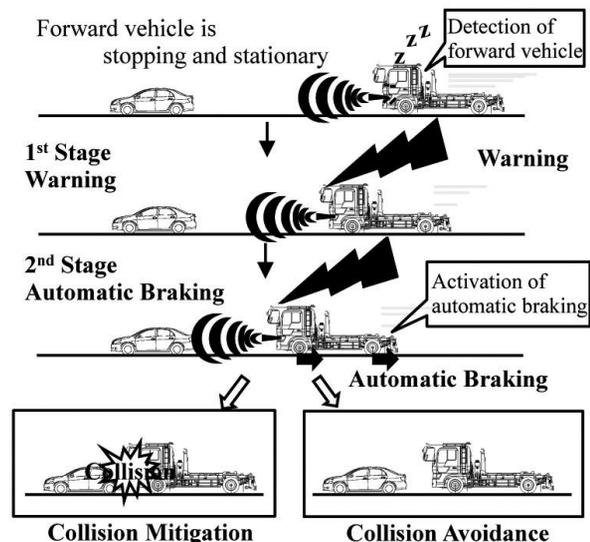


図1 衝突被害軽減ブレーキシステム
Fig. 1 Advanced Emergency Braking System

AEBSの主な規定を表1に示す。規定は、警報の作動タイミング、緊急自動ブレーキの作動タイミング、速度低減量となっている。警報の提示手法は、聴覚・視覚・Haptic(警報ブレーキ等運転者に皮膚感覚で伝える警報)の3種類とし、緊急自動ブレーキの作動

表1 ECE 基準における衝突被害軽減ブレーキシテムの性能要件
Table 1 Requirements of Advanced Emergency Braking System in ECE regulation

Category	Stationary target			Moving target			Step	
	Timing of warning modes		Speed reduction	Timing of warning modes		Speed reduction		Speed of forward vehicle
	At least 1 haptic or acoustic	At least 2		At least 1 haptic or acoustic	At least 2			
Bus > 5t and Truck > 8t with pneumatic braking system	Not later than 1.4 s. before the start of emergency braking phase	Not later than 0.8 s. before the start of emergency braking phase	Not less than 10 km/h <i>The speed of host vehicle is 80 km/h</i>	Not later than 1.4 s. before the start of emergency braking phase	Not later than 0.8 s. before the start of emergency braking phase	No impact <i>This means that the speed reduction is about 48 km/h</i>	32 ± 2 km/h <i>The speed of host vehicle is 80 km/h</i>	1
Bus and Truck ≤ 8t with pneumatic braking system, Truck > 8t	Not later than 1.4 s. before the start of emergency braking phase	Not later than 0.8 s. before the start of emergency braking phase	Not less than 20 km/h <i>The speed of host vehicle is 80 km/h</i>	Not later than 1.4 s. before the start of emergency braking phase	Not later than 0.8 s. before the start of emergency braking phase	No impact <i>This means that the speed reduction is about 68 km/h</i>	12 ± 2 km/h <i>The speed of host vehicle is 80 km/h</i>	2
Bus and Truck ≤ 8t with hydraulic braking system	The requirements of the warning and the automatic braking activation applicable to vehicles of this category will be defined by WP.29 at least 36 months before 1 November 2016.							

The emergency braking phase means that the deceleration of the automatic braking system is over 4m/s².

指示のタイミングをもとに緊急自動ブレーキが作動する前に警報を提示することになっている。まず、第1次警報は聴覚またはHaptic とし、減速度4m/s² 以上の緊急自動ブレーキの作動指示から1.4秒以上前に提示しなければならない。第2次警報は3種類の提示手法の内2種類として、減速度4m/s²以上の緊急自動ブレーキの作動指示から0.8秒以上前に提示しなければならない。また、この際に警報として発せられるブレーキ(警報ブレーキ)の速度低減量は、主としてブレーキによる被害軽減を図るものではなく、運転者に危険を知らせることを目的としていることを明確にするために15km/h 以下または全速度低減量の30%以下に限られている。これら警報フェーズの後に作動する緊急自動ブレーキのタイミングは、ドライバーの過信を防止するために緊急時のみに限定し、衝突予測時間(TTC)が3.0秒より前で作動することを禁止している。速度低減量の規定は、徐々に規制を強化するステップ方式が取られている。ステップ1の速度低減量の規定は、8トンを超える大型貨物自動車及び5トンを超えるバスにおいて空気圧式ブレーキシテムを装備しているものを対象とし、前方車両が移動している場合は48km/h、前方車両が停止している場合は10km/h が要件となっている*)。ステップ2では、空気圧式ブレーキシテムを備える5トン以下のバスも対象とし、前方車両が移動している場合は68km/h、前方車両が停止している場合は20km/hが要件になっている。また、8トン以下の貨物自動車及び油圧式ブレーキシテムを

装備するバスに関しては、技術の発展を考慮して2016年11月の36ヶ月前までに要件を定めることになっている。

*) 現行の油圧式ブレーキシテムを装備しているトラックにおいては、空気圧式ブレーキシテムに比べて、ブレーキに作動遅れがあることがデータとして示されており、この改善のための期間を考慮して第2ステップとされている。なお、非常時にブレーキを短時間に作動させる衝突被害軽減ブレーキシテムは、少しの作動遅れが速度低減量に大きく影響する。

4. ドライバの個人特性を加味した衝突被害軽減ブレーキシテム

衝突被害軽減ブレーキシテム(AEBS)の国際基準は、3.に示した要件をもとに構成されており、警報の作動タイミングに着目すると、ドライバーの通常運転での操作と干渉しないように、様々なドライバーの通常運転における操作のデータをもとに一律に決められている。ドライバーの運転操作に警報が干渉してしまうと、ドライバーにおせっかい感を与えてしまいAEBSの機能を十分に発揮できない可能性がある。しかし、通常運転におけるドライバーの操作タイミングは多様であり、ドライバーによっては早期に警報を提示することでドライバーの操作に干渉せずに十分な余裕を持って衝突回避の行動を取ることができる。そこで、本論文は、個々の運転特性を反映させたドライバーモデルをAEBSの警報の作動タイミングに用いることにより、その効果と有効性について検討した。ドライバーモデルは、伝達関数モデル、クロスオーバーモデル、前方注視モデル、ファジィモデル、

ニューラルネットワークモデルなどが提案されており、ドライバモデルを活用し、ドライバの個人特性を反映したテラーメイド運転支援システム⁽³⁾などもある。本研究では、非線形なドライバの運転動作を計測し、それをモデル化するため非線形制御のモデル化が可能なニューラルネットワーク(Neural Network、以下、NN)を用いた。ドライバモデルは、ドライバの運転動作をNNに学習させることで構築する。ドライバモデルは、ドライバの運転動作の推定からドライバの行動をモニターし、ブレーキ操作の遅れなどの通常のドライバの運転と異なる場合は、警報を提示する判断を行う。本研究では、警報の作動タイミングにドライバモデルを適用し、その効果について検討を行った。図2は、本研究にて構築したシステムを示している。

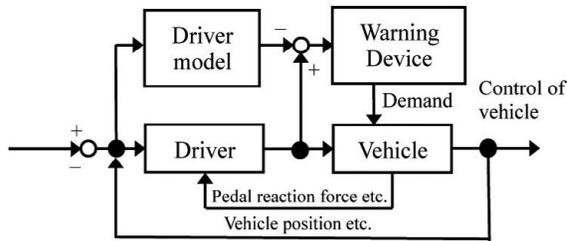


図2 ドライバモデルを用いた衝突被害軽減ブレーキシステム
Fig. 2 AEBS with driver model

4-1. 実験方法

実験は、(1)ドライバモデルを構築するためのドライバの制動動作の計測、(2)ドライバモデルを警報の作動タイミングに適用した場合の評価を検討するために行った。実験は、ドライバの安全性を確保できる図3に示すドライビングシミュレータを用いて行った。ドライビングシミュレータは、視覚ディスプレイおよび力覚ディスプレイにより構成されており、制動においては減速度 4.5m/s^2 まで体感として再現することが可能である。研究対象者は普通自動車運転免許を所持している20代の男性8名とし、事前にインフォームドコンセントを得て実施した。

4-2. ドライバの制動動作に関する実験

実験は、ドライバモデルを構築するためにドライバの制動動作を計測することを目的としている。実験のシナリオは、高速道路における追突事故を想定し、走行中に前方の先行車両の制動に対して、ドライバが行う制動動作を対象とした。表2は、実験パラメータとした走行速度と先行車両の減速度を示している。計測した制動動作のデータは、NNに学習させてドライバモデルを構築し、ブレーキ操作の開始タイミングを衝突時間



図3 ドライビングシミュレータ
Fig. 3 Driving Simulator

表2 実験パラメータ
Table 2 Experimental parameters

Deceleration of forward vehicle [m/s^2]	2.5, 3.5, 4.5
Velocity [km/h]	60, 80, 100

(Time To Collision、以下、TTC)にて算出する。NNは、8入力2出力の階層構造型とし、学習は誤差逆伝播法を用い、学習回数は100回とした。なお、学習に要した時間は約30秒であった。

4-3. 警報タイミングの評価に関する実験

実験は、ドライバモデルを警報の作動タイミングに適用した場合の効果について評価することを目的に行った。実験は、高速道路を走行中に脇見にて先行車両に追突してしまう状況を再現し、その際に警報が作動するシーンを想定して行った。実験において研究対象者には、ナビゲーション画面を注視するように指示して脇見状態を模擬し、警報の提示から前方を確認して衝突の回避行動を行うように指示した。研究対象者は、実験終了ごとに図4に示す作動タイミングおよび安全性に関して5段階の評価を行う。また、個人の運転特性を反映したNNによる警報の作動タイミングの有効性を検討するために、作動タイミングを一律に定めている乗用車の前方障害物衝突軽減制動装置の

(1) About the activation timing of warning

-2. Late -1. Little 0. Satisfactory 1. Little 2. Early

(2) About a feeling of safety for warning

-2. Danger -1. Little 0. Satisfactory 1. Little 2. Safety

図4 警報タイミングに関する主観的評価
Fig. 4 Subjective rating about warning timing

技術指針の規定も実験条件に追加して比較検討を行った。なお、この場合の警報の作動タイミングは、TTCを2.2秒の一律に定めて作動させた。

4-4. 実験結果および考察

図5は、先行車両の制動に対するドライバとNNの制動動作をブレーキ踏力にて示している。NNは、ドライバの制動動作を学習した後に同条件にてNNに制動動作を行われるシミュレーションを行い、それとドライバの制動動作を比較した。これより、NNはドライバも制動動作を大局的に模擬することができる。

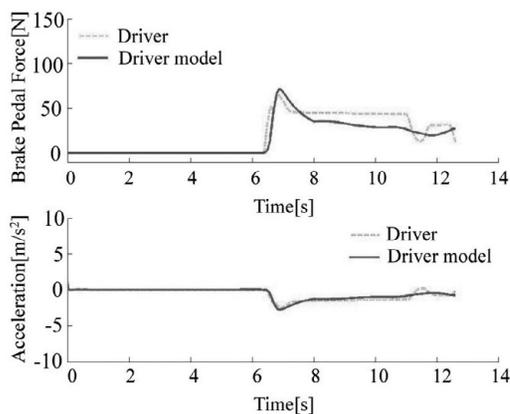


図5 ドライバおよびドライバモデルによる制動動作
Fig. 5 Braking action of driver and driver model

図6は、ドライバとNNのブレーキ操作の開始タイミングの差異をTTCにて示している。図6(a)はそれぞれの研究対象者ごとの差異を示しており、図6(b)は実験条件ごとの差異を示している。ドライバの制動タイミングは、実験により計測した全データから制動開始のTTCとその平均値を算出した。NNの制動動作は、制動動作のシミュレーションにより得られた制動タイミングからTTCを算出した。ドライバとNNの制動動作の差異は、ドライバの制動開始のTTCの平均値とNNの制動開始のTTCとの差を示している。この差は、プラスを示す場合は、NNがドライバよりも早くブレーキ操作を開始し、マイナスを示す場合は、NNがドライバよりも遅くブレーキ操作を開始したことを示している。これよりNNの制動動作の開始タイミングを示すTTCは、ドライバの運転行動を模擬しており、模擬精度は研究対象者によっても異なるが、差異が大きい場合は平均値で0.5秒程度であり、ほとんどの研究対象者においてドライバよりもモデルの制動が早くなる傾向を示している。また、実験条件の違いに着目すると、先行車両減速度が小さい場合は、運転者の制動動作に余裕が生じることから制動開始のタイミングのばらつき

も大きく、ドライバとNNの差異も大きくなっていることがわかる。一方で先行車両減速度が大きくなると。緊急性が高くなることから制動開始のタイミングのばらつきが小さく、ドライバとNNの差異が小さくなっていることがわかる。

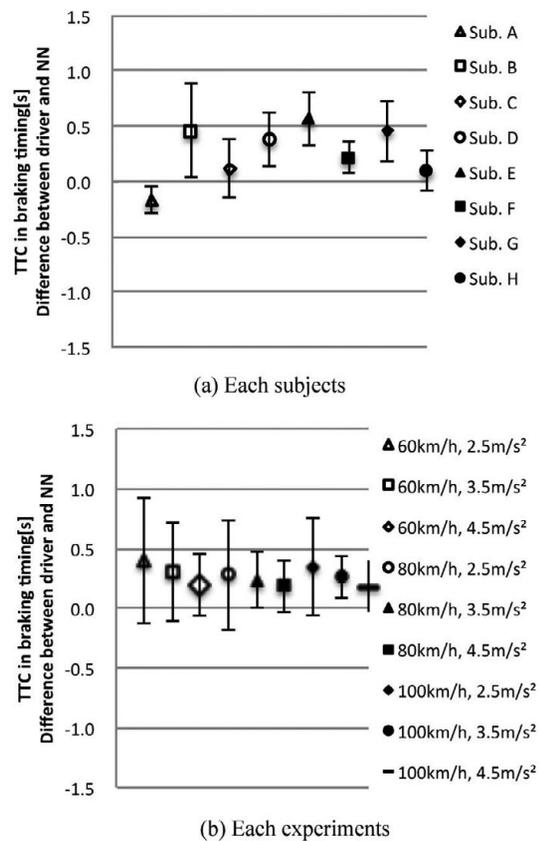


図6 ドライバとニューラルネットワークにおける制動タイミングの差異

Fig. 6 Difference of braking activation timing between driver and NN

図7は、実験条件ごとの警報の作動タイミングに関する評価結果を示しており、技術指針をもとに作動タイミングを一律に設定した場合とNNを用いた場合とを比較したものである。評価結果の「0」は、丁度良いタイミングでの警報システムの作動を示し、「0」以下は遅く、以上は早い評価結果を示している。図7より、NNの警報の作動タイミングは、先行車両の減速度が大きい場合、ドライバは遅いと評価していることがわかる。本システムは、ドライバのブレーキ操作をもとにモデルを構築し、警報の作動タイミングを決定していることから、先行車両の減速度が大きい場合は、運転における危険度が大きくなり、ドライバは自身のブレーキ操作のタイミングより早く警報を提示しても受容性を損なわないと考えられる。また、ドライバによっては先行車両の減速度が小さく、走行速度が低い場合は、作動タイミングを早くと評価する場合もあった。この場合は、ド

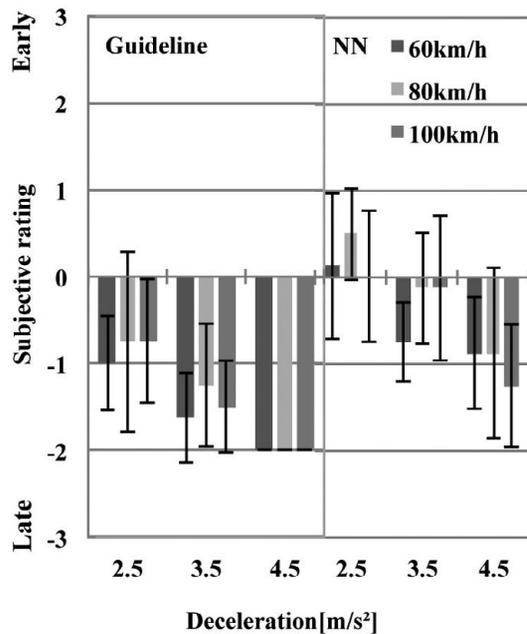


図7 警報タイミングに関する主観的評価
Fig. 7 Subjective rating for warning timing

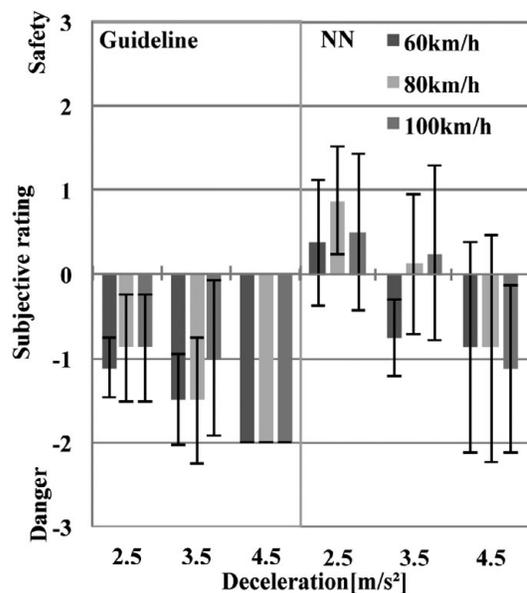


図8 警報タイミングの安全性に関する主観的評価
Fig. 8 Subjective rating of safety for warning timing

ライバのブレーキ操作よりも少し遅く警報を提示した方がドライバの受容性を得られるものと考えられる。

図8は、警報の作動タイミングの安全性について、技術指針をもとに作動タイミングを一律に設定した場合とNNを用いた場合とを比較したものである。これより、個々の運転特性を警報の作動タイミングに反映させることで、一律に設定した作動タイミングよりも早期に警報を提示することで安全性に関する評価が高いことが得られた。この傾向は、図7における警報のタイミングに関する評価においても同様の傾向を示している。早期に警報を提示することは、衝突までの時間的余裕が

大きくなり、ドライバの操作による事故回避にも資するものと考えられる。

5. おわりに

本論文では、まず自動車基準国際調和フォーラム(WP.29)にて議論されている予防安全システムの基準化の動向について述べ、緊急時に作動する衝突被害軽減ブレーキシステムについて、ドライバモデルを用いた性能向上手法について検討した。その結果、すべての研究対象者において以下の結論を得た。

- (1) 先行車両の減速度が大きい場合は、運転における危険度が大きくなり、ドライバは自身のブレーキ操作のタイミングより早く警報を提示しても受容性を損なわない傾向が得られた。
- (2) 一律に設定した作動タイミングよりも個々のドライバに適用させたタイミングにて警報を提示することで安全性に関する評価が高くなることが得られた。

本研究は、ドライバモデルを用いて個々の運転者特性を警報の作動タイミングに適用し、安全性に関する評価を実施したが、先行車両の減速に伴うドライバのブレーキ操作を対象としているが、様々な走行シーンでの効果について今後検討する必要がある。また、ドライバモデルの構築には、ニューラルネットワークを用いたが、今後は更なるモデルの模擬精度を向上させるために時系列のデータを動的に取り扱うことができるTime Delay Neural Networkなどの活用を検討する必要がある。

予防安全システムの国際基準は、日本のASV推進計画での成果をもとに日本が主導的に基準化の活動を行っており、今後も国際的にも日本の貢献が強く期待されているところである。

最後に芝浦工業大学システム工学研究室の澤田東一教授には、ドライバモデルを用いた警報の作動タイミングの評価について、研究計画や解析手法についてご指導を賜りました。また、宮沢悠介氏、金子雄一氏には、実験データの整理および解析において多大なご協力を頂きました。ここに感謝の意を示します。

参考文献

- (1) 澤田東一、廣瀬敏也、春日伸予、銭谷真拓、被害軽減ブレーキの評価に関する研究、IATSS Review, Vol.33, No.4, 13-20, 2008。
- (2) 廣瀬敏也、波多野忠、児島亨、谷口哲夫、大型車の衝突被害軽減ブレーキに係る国際基準への提案について、交通安全環境研究所フォーラム2009、2009。
- (3) Toshiya Hirose, Toichi Sawada, Yasuhei Oguchi, BASIC STUDY ON TAILORMADE BRAKING SUPPORT SYSTEM, IATSSRESEARCH, Vol.28, No.2, 68-75, 2004。