

10. ドライビングシミュレータを用いたブレーキアシストシステムの効果評価に関する研究

— 一般ドライバーの緊急制動特性と作動閾値 —

自動車安全研究領域 ※廣瀬 敏也 波多野 忠 田中 信壽 高橋 国夫 谷口 哲夫

1. はじめに

事故時の衝突速度の僅かな差により、被害が小さくなる。一般ドライバーの中には、緊急時に十分な踏力でブレーキを踏込むことのできないドライバーが多く、緊急時にブレーキ性能を発揮できないことが指摘されている。これらのドライバーを支援するため、急ブレーキ時に車両側が自動的にブレーキ力を増加させるブレーキアシストシステム（BAS : Brake Assist Systems）が開発され、1997年から市販車へ装着されはじめている。また、最近では基準化の動きもあり、ECE基準の中で規定されることになっており、欧州では将来的にBASの義務付けを検討している。

BASの作動閾値は、ブレーキペダルの踏込み速度や踏力によって決定しており、閾値が低いとBASは作動しやすいが通常走行時に作動してしまい危険な事象を引き起こす可能性がある。また、閾値が高いとドライバーによっては緊急時に作動しないケースが想定される。よって、BASの作動閾値は、緊急時のドライバー特性を考慮して設定しなければならない。

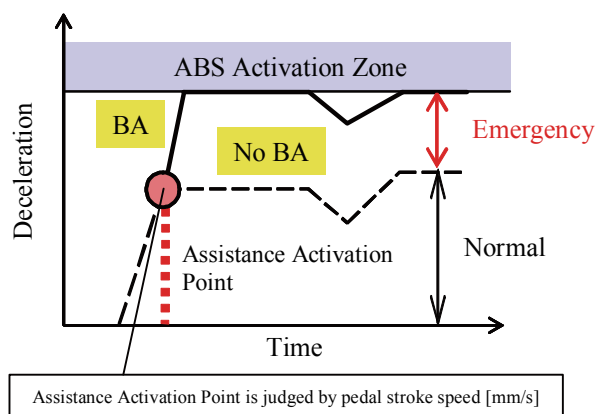
本研究は、まず緊急時ではなく通常走行時にBASが作動した場合における他車両へ及ぼす影響を検討した。その上で、ドライバーの緊急時および通常時のブレーキ操作特性を評価し、BASが事故防止を実現し、通常走行時にドライバーの運転を阻害しない作動閾値について検討した。

2. BASの概要

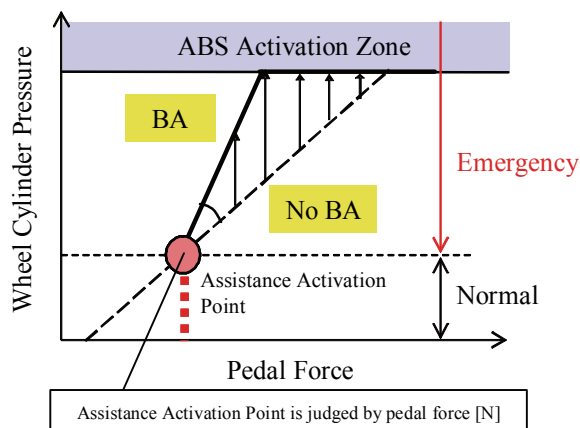
BASは、ドライバーのブレーキ操作から制動意志を推定し、緊急ブレーキと判断した場合にブレーキ力を増加させる装置である。ドライバーのブレーキ操作から制動意志を推定する方法には、ドライバーのブレーキの踏込み速度を検知して推定する方法、ブ

レーキ踏力を検知して推定する方法、それらを組み合わせる方法が考えられる。本研究では、前者の手法を採用しているBASを踏込み速度検知型BAS、後者の手法を採用しているBASを踏力検知型BASという。図1にそれぞれのシステムの作動原理を示す。

踏込み速度検知型BAS（図1(a)）は、ドライバーのブレーキ踏込み速度を用いて、ドライバーの制動意志を推定するBASである。図に示すように、踏込み速度が一定の値（閾値）以上になると、ドライバーが緊



(a) Pedal stroke speed detection type BAS



(b) Pedal force detection type BAS

Figure 1 Operating Principle of BAS

急ブレーキを踏んでいると判断し、BASを作動させ制動力を増加させる。

踏力検知型BAS (図1(b)) は、ドライバの踏力を用いて、ドライバの制動意志を推定するBASである。図に示すように、踏力が一定の値 (閾値) 以上になると、ドライバが緊急ブレーキを踏んでいると判断し、BASを作動させ制動力を増加させる。

踏込み速度検知型BAS、踏力検知型BASの効果は、作動閾値の設定が重要となる。すなわち、BASの作動閾値は、緊急時には有効に作動しつつも通常時には作動しないような値に設定しなければならない。

3. BASに関する実験

本研究では、通常走行時にBASが作動した場合に他車両へ及ぼす危険性について検討する実験 (実験 I) を行う。他車両へ及ぼす危険性は、前方車両のBASの作動が後続車両のドライバに与える影響を検討する。実験 I では、ドライビングシミュレータ (DS : Driving Simulator) を用いて行い、通常走行時に前方を走行している車両のBASが作動した場合に後続車両のドライバが追突を回避するための動作について検討する。

次に通常運転時におけるBASの作動割合を明らかにする実験 (実験 II) を行う。DSを用いてBASを模擬装備した車両が走行できる環境を作り出し、通常走行時に作動閾値の違いによって、どの程度BASが作動するのかを明らかにする。

4. ドライビングシミュレータ

図2に本実験で使用する並進機構付き先進型ドライビングシミュレータ (DS) の外観およびシミュレーション画像を示す。本DSは、運転席として小型乗用車を搭載し、その車体部分を傾斜させる6軸モーション装置と傾斜台および水平方向に移動できる並進装置で主に構成されている。DSは、最大加速度 6.0m/s^2 、最大ジャーク 10.0m/s^3 の性能を有し、市街地から高速道路の環境で実験を行うことができる。また、DS内で模擬している車両には、踏込み速度検知型BASおよび踏力検知型BASを装備しており、ドライバのブレーキペダルの操作量を検出して、作動閾値やBAS作動時の減速度を変更することができる。

5. 通常走行時にBASの作動が他車両に及ぼす影響 (実験 I) I)

5.1 目的

通常走行時にBASが作動した場合に他車両へ及ぼす危険性について検討する。他車両へ及ぼす危険性は、前方車両のBASの不要作動が後続車両のドライバの回避操作に与える影響を検討する。BASの不要作動は、周りの車両に比べて大きい減速度を発生させ、その際の後続車両の回避操作を用いて検討する。

5.2 実験方法

DSの走行シナリオ内にBASが不要作動する車両を再現し、その後方を走行する車両を被験者に操縦さ

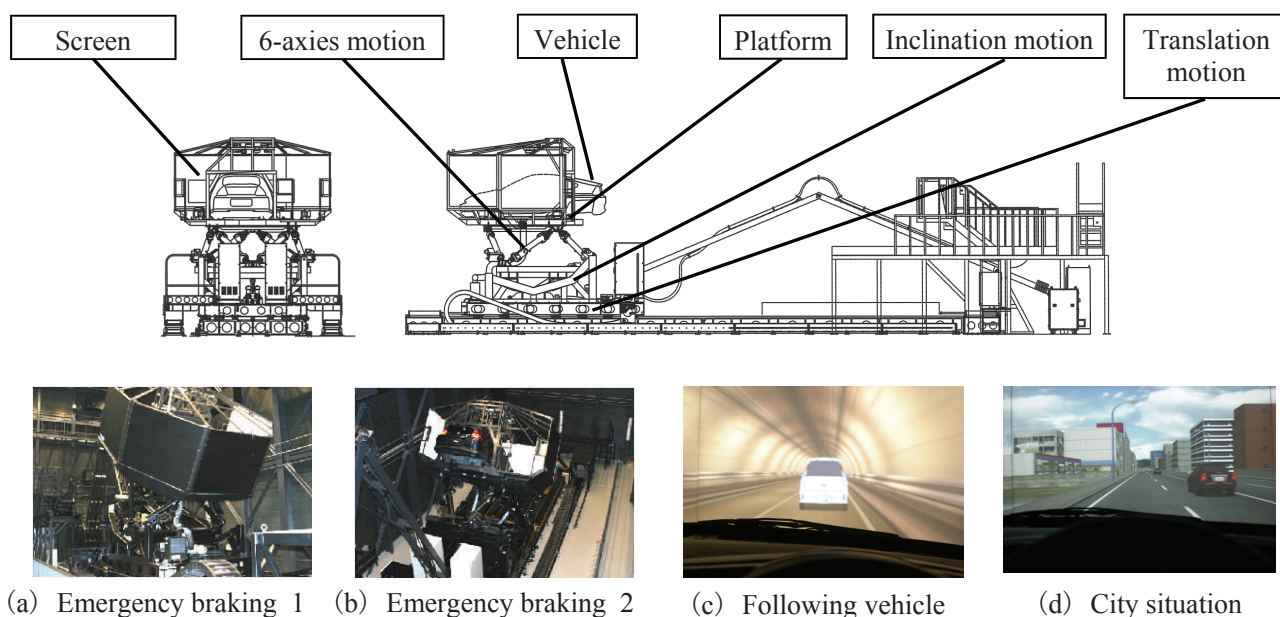


Figure 2 Driving Simulator



(a) Experimental view 1



(b) Experimental view 2

Figure 3 Experimental view

せ、どの程度の追突の危険性が生じるかを検証する。

DSのシナリオは、3車線の直線道路を設置し、1車線あたり車両を5台、計15台を縦列配置した。被験者には、中央車線を走行する車両の前から4台目の車両（自車両）を運転させ、この自車両の前方（前から3台目）に配置したBASの不要作動を設定できる車両（前方車両）に対して普段の運転で確保している車間間隔を取るよう指示して追従走行させる（図3（a））。なお、前方車両のBASの不要作動時は、ABSが作動時の減速度を与える設定とした。また、その他の車両は、各々前後の車両と衝突しないようにしながら自車両の走行に合わせて車群を形成するように自律走行する。また、この道路には、1km毎に横断歩道付き信号機が5台設置されており、車群の先頭車両がこの信号機に近づくと信号が青から赤にかわり車群を停止させる（図3（b））。この信号機による車両の制動時に前方車両のBASを不要作動させ、その際に被験者のブレーキ操作から追突の危険性を検証する。但し、前方車両のBASの不要作動を発生させるのは、5回の信号

による交通管制中ランダムに選択した2回とし、他の3回では正常なブレーキングが行われる。本実験では、この試行を2回（10回信号機を通過）行った。但し、2回目の試行では、前方車両との車間間隔を被験者がとる最も短い距離になるように指示した。被験者は、25名（男：14名、女：11名、平均：46.7歳）とした。

5.3 実験結果

実験より、前方車両のBASの作動した全92回中、後続車両が前方車両に衝突した条件は31回であった。これは、前方車両のBASの作動により33.7%の割合で後続車両が衝突することを示している。

図4は、前方車両のBASの作動時および非作動時において、後続車両のドライバーの操作結果の平均値を示している。図5は、図4中の被験者ごとの作動時と非作動時の差分を算出し、非作動時に対する作動時の増加量を示している。操作結果は、ブレーキペダルの踏み込み速度、ブレーキ踏力を用いて示している。図4および図5より、前方車両のBASの作動により後続車両のドライバーの操作量が著しく増加していることがわかる。

表1は、BASの非作動時に比べて作動時に後続車両のドライバーの操作量が増加した比率を示す。表1は、前方車両のBASの不要作動は、後続車両のドラ

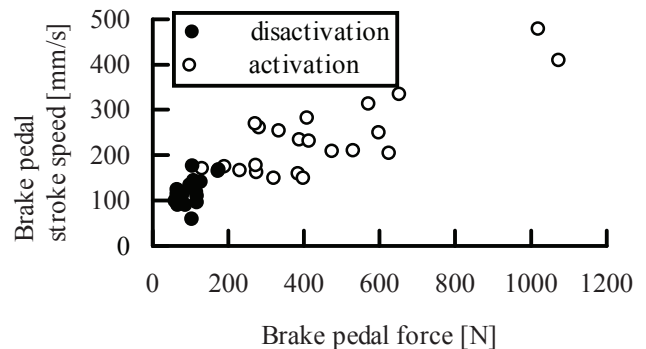


Figure 4 activation and disactivation

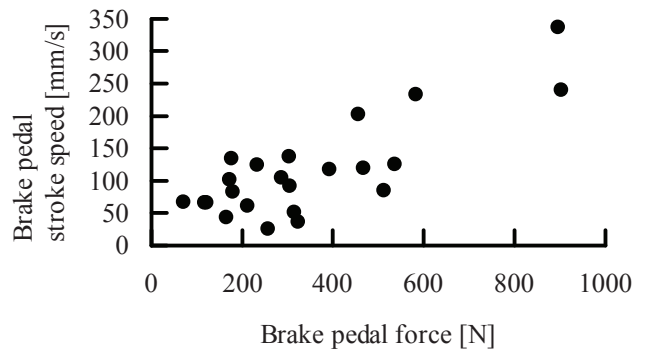


Figure 5 Difference of activation and disactivation

Table 1 Increase ratio of driver's braking

	Brake pedal stroke speed	Brake pedal force	Deceleration
Ratio (Average)	2.09	5.45	2.09
Ratio (Max)	3.70	10.6	3.17
Ratio (Min)	0.85	1.28	1.05

イバに過度のブレーキ操作を要求することになり、衝突などの危険な事象を招く恐れがあることを示している。

これより、BASの作動閾値を定める際には、緊急時のドライバの制動特性から得られる‘BASの効果’および‘BASの不要作動の頻度’を考慮して選定する必要があると考えられる。

6. 緊急時のドライバのブレーキ操作特性

6.1 目的

BASの効果は、ドライバのブレーキ操作特性と作動閾値の関係に依存する。よって、通常走行時にドライバの運転を阻害しない作動閾値を検討する場合もBASが効果を有する範囲内に作動閾値を設定する必要がある。そこで、本項は、緊急時のドライバのブレーキ操作特性をもとに効果的な作動閾値を得ることを目的としている。

6.2 実験方法および結果

緊急時のドライバのブレーキ操作特性を計測する実験は、テストコースに一カ所見通しの悪い交差点を想定した試験ポイントを作り、そのポイントで模型車両を飛び出させ被験者に緊急操作を行わせるものである。また、DSと実車両の測定値に大きな差がないことを検証するために同様の実験をDSにて行った。

テストコースにおける模型車両の飛び出し実験は、テストコースの周回路の直線路に一カ所見通しの悪い交差点を想定した試験ポイントを作り、そのポイントで模型車両を飛び出させ被験者に緊急操作を行わせるものである。図6に実験の概要図を示す。模型車両は、発泡スチロールを加工して作成しており、車両に見立てるために表面に車両の外観を描画している。

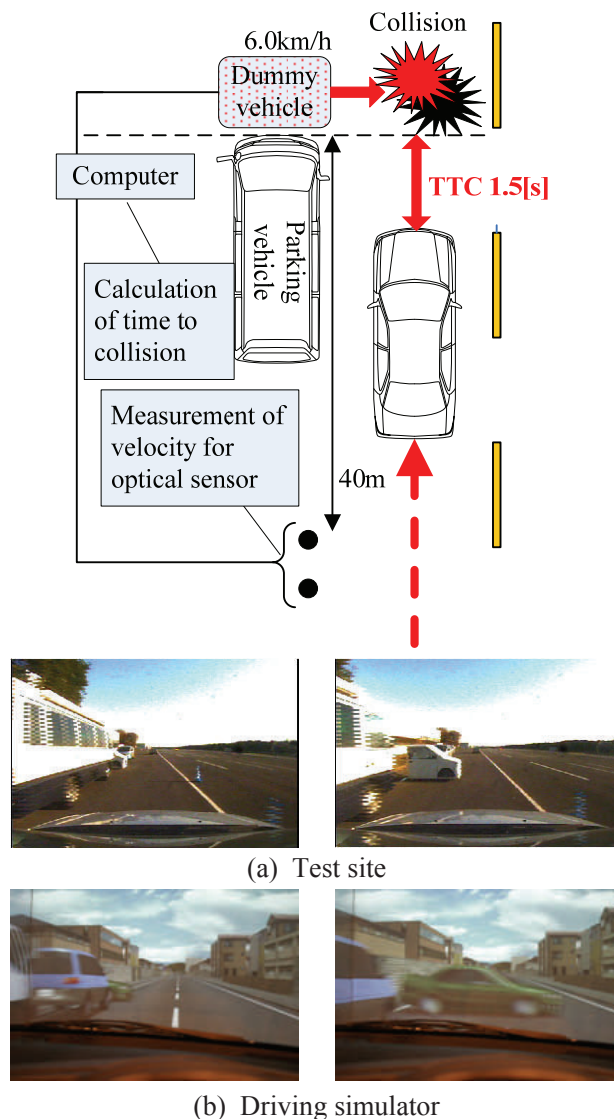


Figure 6 Outline of experiment on test site

図7に、テストコースにおける模型車両の飛び出しにより緊急ブレーキ操作を行った際のブレーキ踏力とブレーキペダル踏み込み速度の関係を示す。これより、ドライバのブレーキ踏力は、56Nから927Nまで分布しており、踏み込み速度は、168mm/sから595mm/sまで分布している。図8は、図7の実験結果におけるブレーキペダルの踏み込み速度とブレーキ踏力におけるヒストグラムと累積頻度の関係を示す。これより、踏み込み速度検知型BASは、50%のドライバに作動させるためには、450~500mm/sに設定し、80%に作動させるためには、300~350mm/sに設定する必要がある。踏力検知型BASは、50%のドライバに作動させるためには、350~400Nに設定し、80%に作動させるためには、200~250Nに設定する必要がある。なお、踏み込み速度は、踏み込み変位のデータをローパスフィルタのカットオフ周波数13Hzで整形

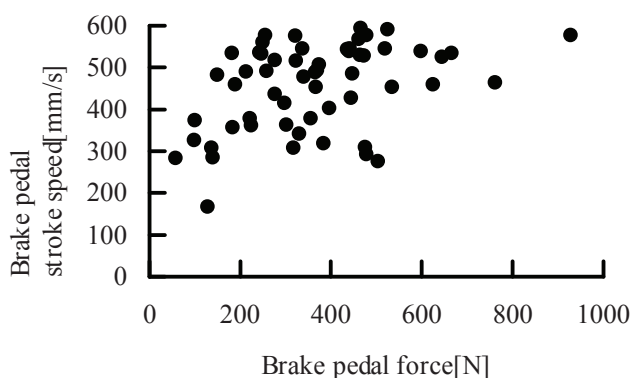
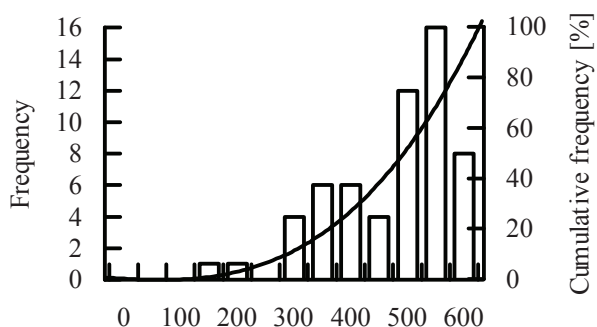
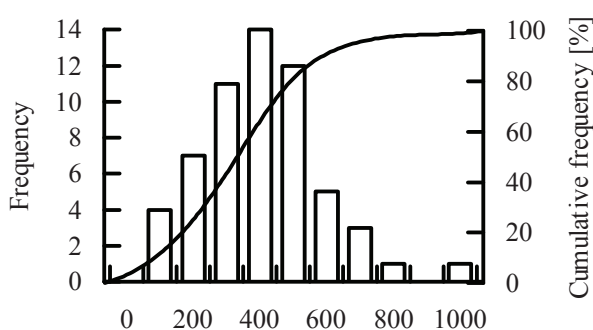


Figure 7 Stroke speed and force with test site



(a) Brake pedal stroke speed



(b) Brake pedal force

Figure 8 Frequency and Cumulative frequency

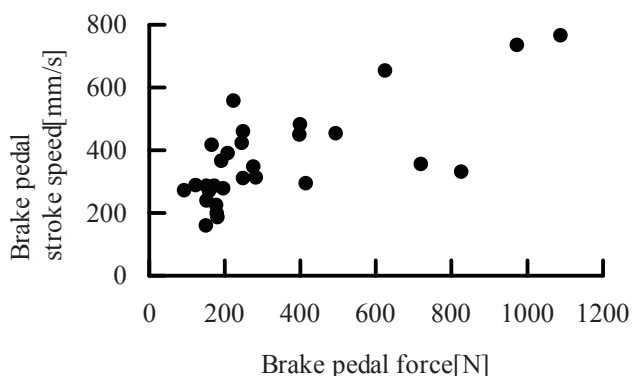


Figure 9 Emergency braking with DS

したものを数値微分したものを使用した。

図9は、テストコースとDSにおける飛び出し車両との出会い頭事故を想定した緊急制動試験の結果である。これより、テストコースにおける制動とDSによる制動の分布は、同様の傾向を示しており、踏み込み速度の有意差検定 (5%) を行ったところ有意差は認められなかった。

7. 通常走行時におけるBASの作動割合 (実験ⅡⅡ)

7.1 目的

実験は、DSを用いてBASを模擬装備した車両が走行できる環境を作り出し、ドライバーが通常走行を行った場合に作動閾値の違いによってどの程度BASが作動するのかを明らかにする。また、テストコースにおける緊急制動実験の結果から得られたBASの作動閾値について、BASの効果と通常走行時の作動頻度とのバランスの観点から検証する。

7.2 実験方法

本実験では、被験者に対して日常的に走行している車間距離で先行車両に追従走行 (速度: 40km/h) するタスクをDSの環境内で与える。本タスクでは、被験者は先行車両が制動を行った場合にブレーキ操作を行うことになり、その際のブレーキペダルの踏み込み速度とブレーキ踏力を計測する。

本実験は、踏み込み速度検知型BASおよび踏力検知型BASをDS上に模擬した車両を用いて行う。各BASで設定した作動閾値を表2に示す。

Table 2 Experimental parameter

BAS type	Parameter
Pedal stroke speed detection type	100, 150, 200, 300, 400 [mm/s]
Pedal force detection type	50, 100, 150, 200 [N]

7.3 結果

7.3.1 踏み込み速度検知型BASにおける通常走行時の作動割合

図10に、通常走行時の追従走行タスクにおける踏み込み速度検知型BASの作動割合を示す。作動割合とは、全被験者に対するBASが作動した被験者数の割合を表している。踏み込み速度検知型は、作動閾値100mm/sにおいて作動割合は96%、作動閾値200mm/sにおいて作動割合が40%である。また、作動閾値が300mm/s、400mm/sの場合では4%であり、ほとんど

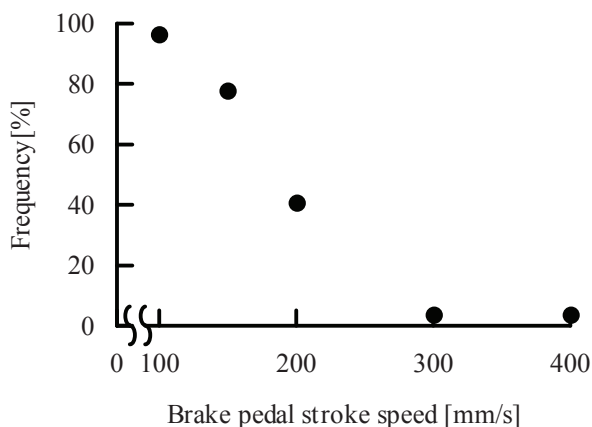


Figure 10 Frequency (Brake pedal stroke speed)

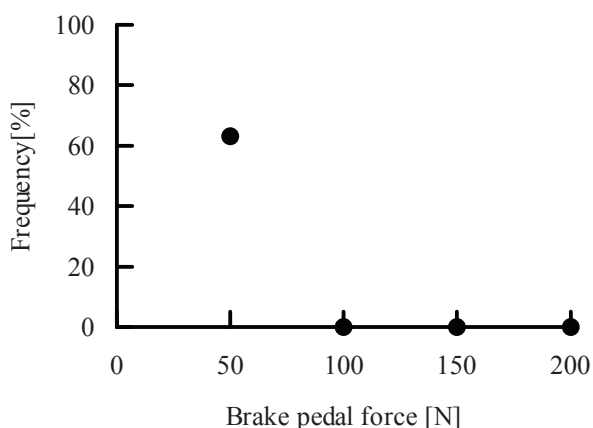


Figure 11 Frequency (Brake pedal force)

の被験者においてBASが作動しない結果となった。これより、作動閾値100mm/sから200mm/sは、通常走行時において作動割合の変化が大きく、200mm/s以上ではその変化は小さくなると考えられる。

テストコースにおける緊急ブレーキ実験の結果からBASを80%のドライバに作動させることを仮定すると踏み速度を300~350mm/s以下に設定する必要がある。上記の結果より、踏み速度300mm/sに作動閾値を設定しても、ほとんどのドライバにおいて通常走行時にBASが作動せず、80%のドライバに対して効果的であると考えられる。

7.3.2 踏力検知型BASにおける通常走行時の作動割合

図11に、通常走行時の追従走行タスクにおける踏力検知型BASの作動割合を示す。踏力検知型は、作動閾値50Nにおいて作動割合が63%であり、作動閾値100N~200Nにおいて作動割合が0%である。

テストコースにおける緊急ブレーキ実験の結果からBASを50%のドライバに作動させるためには、踏力を350~400Nに設定し、80%に作動させるために

は、踏力を200~250N以下に設定する必要がある。上記の結果より、BASを80%のドライバに作動させることを仮定して踏力を100N~200Nに作動閾値を設定しても、ほとんどのドライバにおいて通常走行時にBASが作動しないものと考えられる。

8. おわりに

本研究では、まず緊急時ではなく通常走行時にBASが作動した場合における他車両へ及ぼす影響を検討した。その上で、ドライバの緊急時および通常時のブレーキ操作特性を評価し、BASが事故防止を実現し、通常走行時にドライバの運転を阻害しない作動閾値について検討した。

その結果、今回の実験条件において前方車両のBASの不要作動は、後続車両のドライバに過度のブレーキ操作を要求することになり、衝突などの危険な事象を招く恐れがあることがわかった。また、踏み速度検知型BASでは300~350mm/s、踏力検知型BASでは200~250Nに作動閾値を設定することによって、約80%のドライバに対してBASが緊急時に有効に作動し、BASをこの作動閾値に設定してもほとんどのドライバにおいて通常走行時にBASが作動しないことがわかった。それゆえ、本研究の成果はBASの効果と不要作動の関係を客観的に評価できるものであり、基準策定等に資するものと考えられる。

参考文献

1. B. Cheng, T. Taniguchi, T. Hatano, K. Matsushima; Research on Brake Assistance in Emergency Situation; Assistant Timing of Brake Assistance, Transactions of Society of Automotive Engineers of Japan, 36(2), pp.101-106, 2005.
2. T. Hirose, T. Taniguchi, T. Hatano, K. Takahashi, N. Tanaka; A Study on the Effect of Brake Assist Systems (BAS), 2008 SAE World Congress, Brake Technology, SP-2188, 2008-01-0824, pp.81-88, 2008.
3. A. Yamamoto, J. Kizaki, H. Yoshida, Y. Hashimoto.; Development of Assistant System to Average Driver's Braking Operation in a Panic Situation, Proceedings of Society of Automotive Engineers of Japan, No.973, pp.165-168 (No.9733026), 1997.
4. M. Konishi, S. Shingyouji, I. Nakamura, Y. Tagawa, Y. Saito, T. Ishihara, S. Kobayashi, M. Yoshida; Development of Mechanical Brake Assist, Proceedings of Society of Automotive Engineers of Japan, No.973, pp.211-214 (No.9740839), 1997.