

複数のドライビングシミュレータを連動した模擬走行実験による 緊急地震速報の影響評価

Effects of Early Warning of Seismic Motion to Drivers based on Virtual Driving Tests
using Driving Simulators

山崎文雄¹, 丸山喜久¹, 坂谷将人²

Fumio YAMAZAKI¹, Yoshihisa MARUYAMA¹ and Masato SAKAYA²

¹ 千葉大学大学院 工学研究科 建築・都市科学専攻

Department of Urban Environment Systems, Chiba University

² 元 千葉大学 工学部 都市環境システム学科

Former Student, Department of Urban Environment Systems, Chiba University

In order to investigate driver's reactions to early warning of seismic motion, the present authors have conducted a series of virtual tests using driving simulators. Two driving simulators were employed in this study to consider the interaction between the drivers during an earthquake. When the early warning was given to the only one driver, traffic accidents sometimes occurred because of the disagreement of responses between the two drivers. Therefore, the instructions for drivers are necessary before the early warning is broadcasted to general public. Turning on the hazard lights after receiving the early warning, for example, may be effective to avoid accidents.

Key Words : *driving simulator experiment, early warning, expressway, seismic motion, hazard light*

1. はじめに

気象庁では、地震動の主要動到達前の早期警報として「緊急地震速報」¹⁾の提供に向けた検討を行っている。緊急地震速報は、震源に近い観測点で得られた地震波を使って、震源、地震の規模及び各地の震度を秒単位という短時間で推定し情報として発表するものであり、放送、電話回線、衛星通信など様々な伝達手段を通じて、主要動の到達前に利用者に提供されることを目指している²⁾。

地震動の早期警報を実用化している例としては、鉄道総合技術研究所の早期地震検知警報システム（ユレダス）³⁾が挙げられる。2004年の新潟県中越地震においても、上越新幹線で早期警報システム（コンパクトユレダス）が動作したことが報告されている⁴⁾。防災科学技術研究所では、「リアルタイム地震情報の伝達・利用に関する研究」を平成13年度から実施しており、関連省庁、自治体、民間などのユーザーからなる協議会を組織している⁵⁾。リアルタイム地震情報を鉄道、ガス、エレベータ、工場の生産ライン等の制御システムや地下街、高層ビルなどの密集空間での避難誘導システム等と組み合わせることにより、地震発生時の安全性の向上が図られ、経済的な損失を回避できると見込んでいる。気象庁では、平成15年度から緊急地震速報の提供に向けた施設の準備を進めてきた。また、平成17年度からは「緊急地震速報の本運用開始に係る検討会」にて、緊急地震速報の提供が混乱等を招くことなく、地震災害の軽減に有効に活用されるための方策について検討を行ってきた。これらの検討結果を踏まえて、2006年8月より緊急地震速報の先行

的な情報提供が現時点で混乱なく利用できる分野（建設工事現場、鉄道など）で開始された⁶⁾。

一方で、緊急地震速報の利活用に関わる課題も指摘されている⁶⁾。テレビ、ラジオ、防災行政無線などの伝達手段ごとに適した情報量や表現方法、推定される震度の誤差や誤報の可能性⁵⁾などの発信側の課題のほか、緊急地震速報を受信した利用者の混乱程度についても言及されている。例えば、大型商業施設や映画館などの集客施設などで緊急地震速報が提供されると、多数の人が出口に殺到して将棋倒しになるといった混乱や損害等が発生する恐れがあるとされている。このことから、気象庁では緊急地震速報の利用者側の「心得」を策定することを検討し、2007年3月の「緊急地震速報の本運用開始に係る検討会」最終報告にまとめられている⁶⁾。想定している場面は、家庭での受信、不特定多数の者が出入りする施設での受信、屋外での受信、自動車運転中の受信の4つである。

丸山・山崎⁷⁾は、1台のドライビングシミュレータを用いた走行実験によって、地震の影響で発生した前方の道路変状（障害物）との衝突事故の回避率が地震動早期警報により向上することを示している。しかしながら、自動車交通では鉄道のように専用軌道を使用していないことなどから、交通体系の中における情報管理が困難であり⁸⁾、すべての運転者が速報を受信できるとは考えにくい。緊急地震速報が広く一般に提供された場合、ラジオを聴いている運転者は速報を受信し何らかの回避行動をとろうとするが、一方でラジオを聴いていない運転者は速報を受信せずにそのまま走行を続けようとし、逆に事



図1 本研究で使用した
2台のドライビングシミュレータ

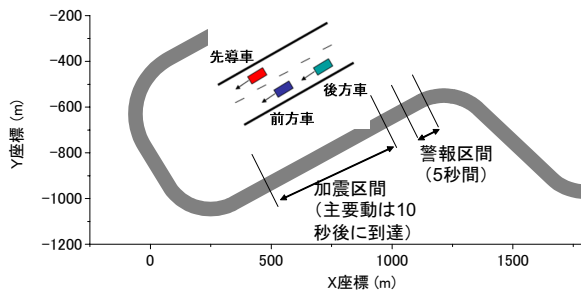


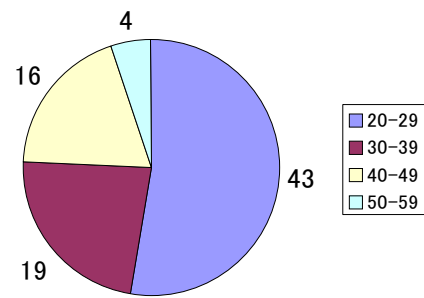
図2 実験時の車両走行コース

故の危険性が高くなってしまふ可能性がある。そこで、本研究では2台のドライビングシミュレータを用いて走行実験を行い、緊急地震速報の効果を検討した。具体的には、走行実験中に地震動の主要動到達前に運転者へ音声で速報を流し、その効果を検討するというもので、両方の運転者が速報を聞いた場合や一方の運転者しか速報を聞いていない場合など緊急地震速報の受信条件を変えて、その影響を明らかにした。

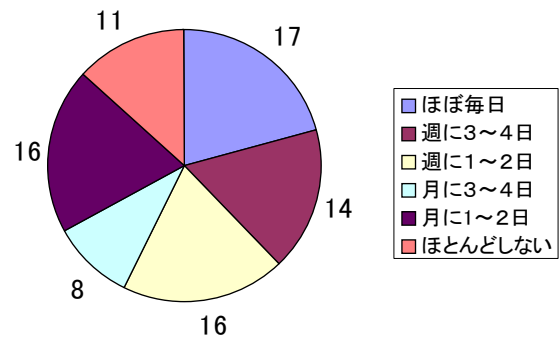
2. 地震時走行模擬実験の概要

図1に示すように、2台のドライビングシミュレータ⁹⁾をサーバーで接続し連動させて地震時走行模擬実験を行った。それぞれのドライビングシミュレータを前方車、後方車と想定し、前方車のバックミラーやドアミラーには後方車が映し出され、後方車からは前方車が視認できる。また、ウインカーやブレーキランプなどの点灯の様子もシナリオコース上の車両に反映される。走行コースと車両の配置は図2のように定めた。ドライビングシミュレータを運転する被験者は、左車線を80km/hで走行した。また、右車線にはハンドルとアクセル、ブレーキペダルのみからなる簡易なドライビングシミュレータを用いて先導車を配置した。この先導車は実験関係者が運転し、実験時の被験者の走行速度の目安となるようにした。実験時のシナリオコースは制限速度80km/hの都市内自動車専用道路を想定している。

本実験で想定する緊急地震速報は、2003年十勝沖地震における震源と地震観測点位置によるシミュレーション結果¹⁰⁾を用いた。車両の走行位置を震央距離103km、最大加速度366.1gal、計測震度5.95のK-NET大樹付近を想定した。K-NET大樹では、気象庁のシミュレーション結果¹⁰⁾から、地震が発生し、緊急地震速報が発信されてか



(a) 被験者年齢の分布



(b) 運転頻度

図3 走行実験被験者の年齢と運転頻度分布

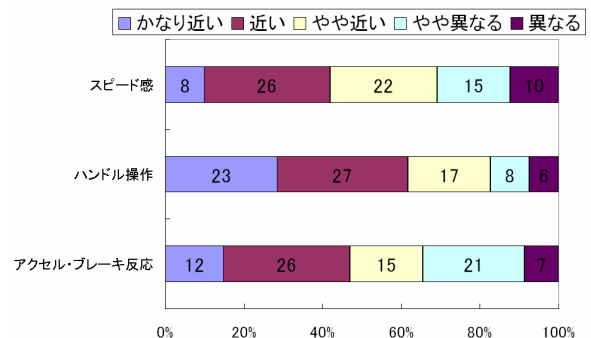


図4 ドライビングシミュレータの現実感評価

ら主要動到達までの余裕時間が10秒と推定されている。K-NET大樹で2003年十勝沖地震時に観測された3成分の加速度記録から走行車両の地震応答加速度を算出¹¹⁾し、ドライビングシミュレータの動揺装置に入力した。実験では、図2に示すように、高速道路コースの直線部で地震を発生させた。

緊急地震速報の与える影響を明らかにするために、実験1~3の3種類の走行実験を行った。実験1(14組)は、緊急地震速報をどちらの運転者にも与えない状態で加震した。実験2(13組)は、両方の運転者に緊急地震速報を提供した。実験3(14組)では、前方車にのみ緊急地震速報を与え、後方車には緊急地震速報を与えなかった。緊急地震速報の内容は、「ただいま地震が発生しました。強い揺れに備えてください」とした。82名の被験者は、全員男性で20歳代~50歳代の比較的運転操作に慣れた人である(図3)。また、被験者には走行中に地震が発生することは伝えていない。緊急地震速報を与える実験2と実験3では、走行中に何らかの放送が入る可能性があるということのみを事前に伝えた。なお、実験3の後方車の被験者には緊急地震速報が提供されないが、前方

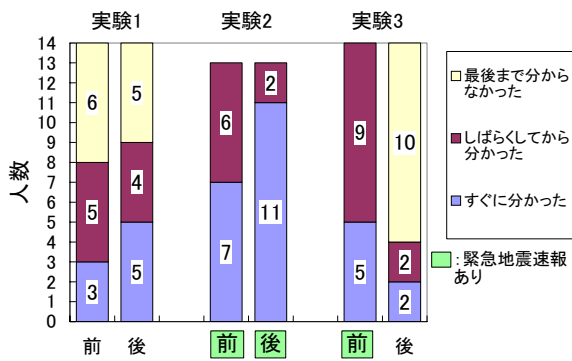


図5 走行実験中の地震発生認識状況

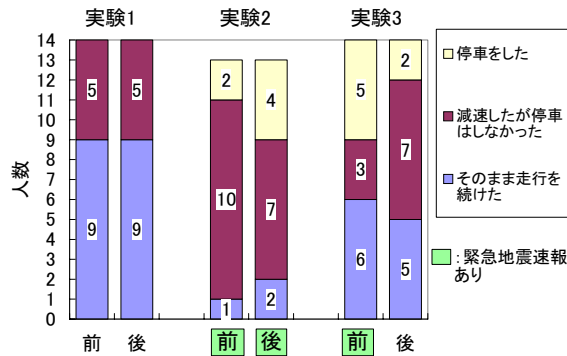


図6 加震中の被験者の反応

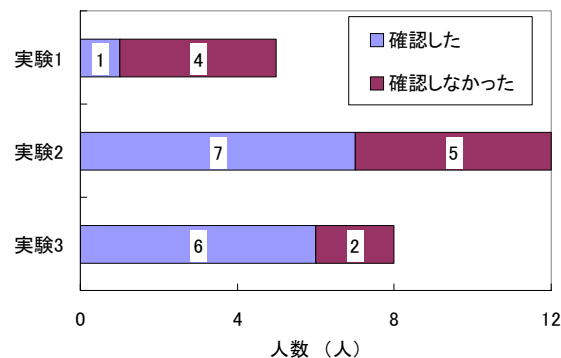


図7 減速、停車時におけるバックミラーでの後方車の確認状況

者と後方車の事前説明は同時に行っており、走行中に何らかの放送が入る可能性がある」と認識している（実際には、前方車だけに放送が入る）。

3. 実験時のアンケート分析

実験終了後、各被験者にアンケート調査を実施した。

本研究で使用したドライビングシミュレータの現実感に関する回答結果を図4に示す。スピード感、ハンドル操作、アクセル・ブレーキ反応ともに、実車にかなり近い、近い、やや近いと回答した被験者が全体の60%を超えており、ある程度現実感のある実験が行えたと思われる。

82名の被験者のうち8名が実際に地震発生時に自動車を運転した経験がある。そのときの様子として、「ハンドルが大きく左右にふれた」、「道がうねるように見えた」など震動が運転行動に影響を与えることが示唆されるような状況が挙げられている。また、「走行中に揺れを感じたが、あとからラジオで地震と知った」、「後で

人から聞いて地震だと分かった」など、何らかの異常は感じているが地震とは気付かなかったという証言が得られている。

「実験中に発生したシミュレータの振動を地震と認識できたかどうか」という設問に対する回答結果を図5に示す。緊急地震速報が与えられていない実験1の前方車、後方車と実験3の後方車に関しては、地震発生を最後まで分からなかった被験者が見られた。地震を「すぐに分かった」被験者は2割程度であり、実験1では4割、実験3の後方車では7割の被験者が地震発生を最後まで認識できなかった。地震を認識できなかった被験者の多くは、地震による車両の振動の原因を「路面の状況が悪いと思った」、「タイヤがパンクしたと思った」、「強い風を受けたと思った」などと回答している。実地震時のアンケート結果^{12), 13)}では強震域を走行している運転者が地震に気付かないことがあると報告されていたり、前述の本実験の被験者の経験談でも地震と気付かなかったという証言が得られているが、本実験でも同様に地震に気付かない運転者が多数存在する可能性があるという結果が得られた。

一方、緊急地震速報が与えられると、当然ながら地震発生を最後まで気付かない被験者は存在しない。本実験では計測震度5.95の地動加速度を用いて走行実験を行ったが、このような比較的大きな地震時でも地震に気付かなかった運転者が存在することから、震動の影響で前方の路面段差、陥没が生じた場合、それらが原因となった事故が起こる可能性も否定できない。このような観点から、緊急地震速報によって地震発生が運転者に伝達されるのは望ましいことと思われる。

情報に格差が生じている実験3では、前方車が地震発生を認識しているのに対して、緊急地震速報の与えられていない後方車の被験者は地震の発生に気付いていないという現象が生じている(図5)。この現象は、地震時の運転行動にも影響を与えることが推測される。図6に、加震中の被験者の反応に関する設問の回答結果を示す。緊急地震速報の与えられていない実験1では、強震時でもそのまま走行を続けた被験者が多く、地震が原因で停車した被験者はいなかった。このことには、実験1の被験者の多くが地震をすぐに認識できなかったことが影響していると思われる。一方、緊急地震速報が与えられた実験2では、そのまま走行を続けた被験者はごくわずかで、ほとんどの被験者が減速または停車している。また、緊急地震速報の与えられなかった実験3の後方車に関しては、地震発生に多くの被験者が気付かなかったにもかかわらず減速または停車をした被験者が14名中9名いる。これは、前方車が緊急地震速報を受信して減速または停車の行動をとったので、車間距離を適切にとるためには後方車も減速ないしは停車をする必要があったのが理由であると思われる。

地震時に減速または停車をした前方車の被験者を対象に、減速または停車の際にバックミラーから後方車を確認したかを調査した(図7)。緊急地震速報の与えられていない実験1で減速または停車した前方車5名のうち、その際にバックミラーで後方車を確認したのは1名だけであった。5名のうち4名の被験者は後方車との車間距離を確認することなく地震動の影響で減速や停車をしたことになり、地震発生時における交通量や車間距離によっては事故につながりかねない危険な行為である。緊急地震速報の与えられた実験2と実験3の結果を合わせると、6割以上がバックミラーで後方車との車間距離を確

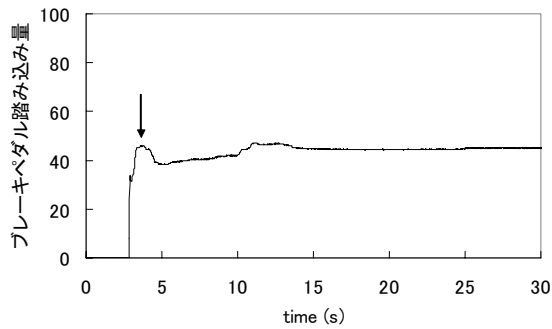
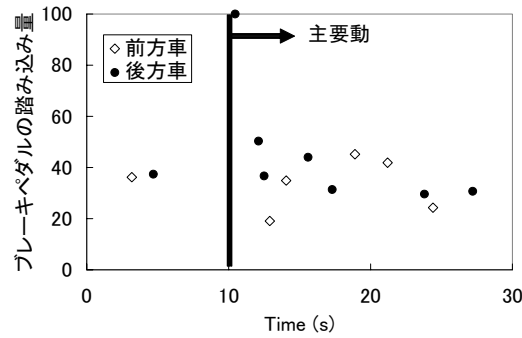
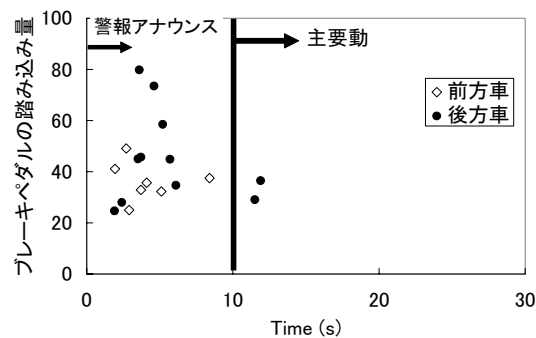


図8 ブレーキペダル踏み込み量の例（実験2）



(a) 実験1



(b) 実験2

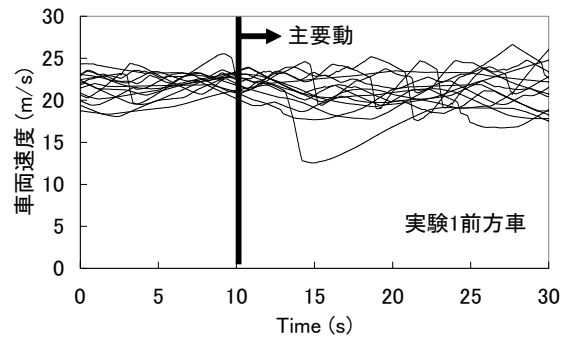
図9 ブレーキペダル踏み込み量と
その発現時刻の関係

認してから減速または停車している。本実験では緊急地震速報のアナウンス終了後から主要動が到達する前に約5秒間の余裕時間がある。実験2と実験3の前方車はこの余裕時間内に地震に対して「身構える」ことが可能であったため、緊急地震速報のない実験1の前方車よりもバックミラーを確認しながら減速するなどの対応をした運転者が多かったものと思われる。

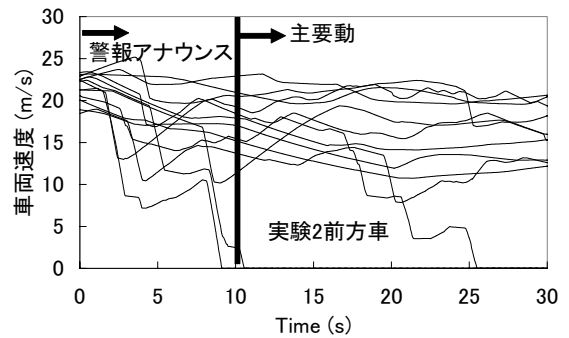
4. 緊急地震速報が運転行動に与える影響

実験中の被験者の運転行動をドライビングシミュレータの付加PCで保存した。記録した項目は、車両前後速度、車両横速度、ハンドル操舵角、アクセルペダル踏み込み量、ブレーキペダル踏み込み量など10項目である。

走行実験時のブレーキ操作について考察した。被験者のブレーキ操作の例を図8に示す。ブレーキペダルの踏み込み量は0~100で表され、100がペダルを目一杯踏み込んだ状態を表す。図8のように、最初のブレーキ操作



(a) 実験1前方車



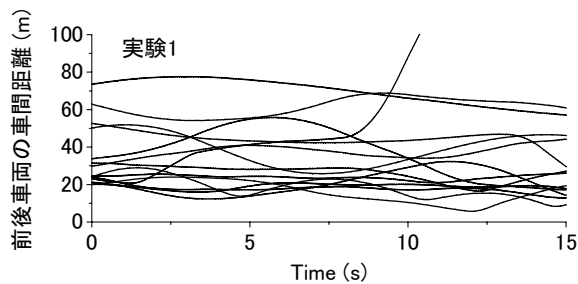
(b) 実験2前方車

図10 車両走行速度の比較（実験1, 実験2）

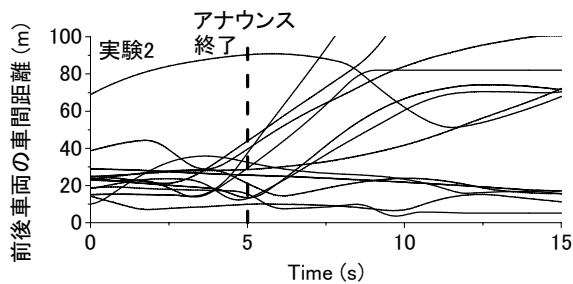
の最大値とそれが発現する時刻を整理した。実験1と実験2に関する結果を図9に示す。緊急地震速報の与えられていない実験1でブレーキ操作を行った被験者の多くは、主要動到達（時刻10秒）後にブレーキ操作を行っている。これらの被験者が高速道路走行中にもかかわらずブレーキ操作を行った理由は、地震による異常な車両の振動を感じたためと思われる。前方車、後方車の両方に緊急地震速報が与えられた実験2では、警報アナウンス提供開始（時刻0秒）後からブレーキを踏む運転者が多く、主要道到達前からブレーキ操作が行われている。また、後方車のブレーキペダル踏み込み量の方が前方車のものと比べてやや大きくなっているように思われる。実験2では後方車の被験者も事前に地震動によって加震されることが伝達されているので、前方車との車間距離を充分確保しようと意図的にブレーキペダルを大きく踏み込んでいるものと思われる。

図10に、実験1と実験2における車両速度を比較する。なお、図10はそれぞれ前方車のもののみを示しているが、後方車に関しても以下に述べる内容と同様の傾向が見られている。緊急地震速報が与えられていない実験1では、実験における指示速度80km/hで走行し続けている被験者が多い。これは、図5に示したように地震に気付かなかった被験者が多かったことが原因と思われる。実験2の前方車に関しては、時刻0秒で警報アナウンスが運転者に提供され始めてから緩やかに走行速度が減少している様子が分かる。走行速度が小さければ、地震時走行中の蛇行の程度¹⁴⁾が小さくなるほかに、震動の影響で前方の路面に発生した段差や陥没などに安全に対応できる可能性が高まるものと思われる。

図11に、実験1と実験2における前方車と後方車の車間距離を比較する。図9や図10からも推察できるように、緊急地震速報のない実験1では前後車両間の車間距離は



(a) 実験 1



(b) 実験 2

図 11 前方車と後方車の車間距離 (実験 1, 実験 2)

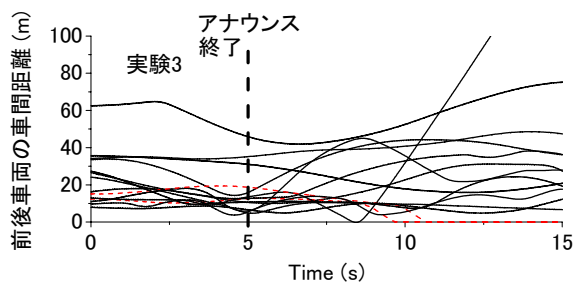
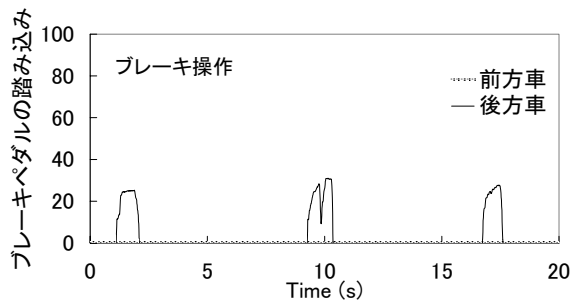
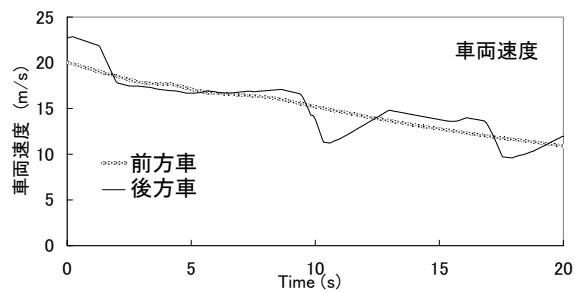


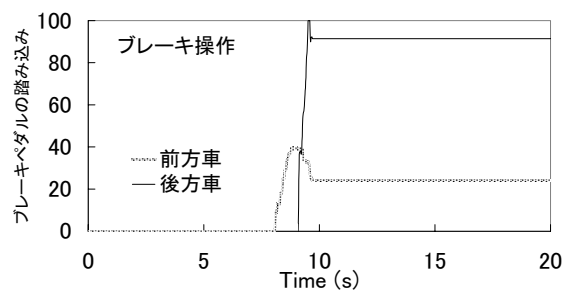
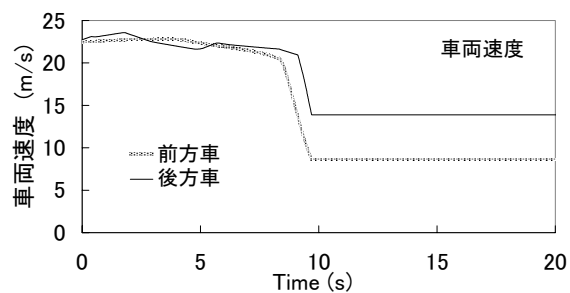
図 12 前方車と後方車の車間距離 (実験 3)

加震中も含めてほぼ一定値で推移している。強震時でも地震発生に気付かない運転者が、ほぼ一定速度で走行を続けているためと考えられる。実験 2 に関しては、緊急地震速報が与えられていない実験 1 の結果 (図 11(a)) と比べると警報アナウンス終了時の時刻約 5 秒から車間距離が大きくなるケースが多く見られる。緊急地震速報を受けた後方が意図的に前方車との車間距離をとった結果であると思われる。

以上までは、前方車と後方車の両方に緊急地震速報が与えられなかった実験 1 と与えられた実験 2 の結果を比較したものである。しかし、緊急地震速報がテレビやラジオを通じて広く一般向けに提供されるような状況を考えると、高速道路上では緊急地震速報を受信できる運転者と受信できない運転者が混在する可能性が高い。図 12 に、前方車の被験者のみに緊急地震速報を提供した実験 3 での車間距離を示す。これによると、程度の違いはあるが、前方車にのみ警報アナウンスが与えられている時刻 0~5 秒で車間距離が小さくなっているケースが多く見られる。緊急地震速報のおかげで、前方車のみ地震発生を事前を知ることができるが、後方車には情報が伝達されていないので前方車の走行速度が小さくなると車間距離が短くなってしまふ。その結果、本実験では 14 組中 2 組 (図 12 の破線で示した組) で追突事故が発生した。また、追突事故には至らなかったものの車間距離が非常に短くなり危険だったケースもいくつか見られた。



(a) 実験 2



(b) 実験 3

図 13 車両速度とブレーキ操作の例

両方の被験者に緊急地震速報を与えた実験 2 のある被験者と、前方車にのみ緊急地震速報を与えた実験 3 で追突事故を起こした被験者の車両速度とブレーキ操作を比較する (図 13)。両方の被験者に緊急地震速報の与えられている実験 2 では、前方車はブレーキペダルを踏まず、アクセルペダルを離すことで徐々に減速しており、後方車は前方車との車間距離がある程度短くなったときにブレーキを段階的に踏んでいる様子が見られる。一方、前方車にのみ速報を与えている実験 3 では、前方車が主要動が到達する時刻 10 秒よりも前に減速を開始している。後方車は、前方車がブレーキ操作を行ったために、急ブレーキを踏み追突の回避を試みたが間に合わず追突事故を起こしている。

以上のように、緊急地震速報が広く一般に提供が開始されたときに起こりうると思われる一部の運転者のみが緊急地震速報を受信する状況では、地震時の運転者間の行動の違いが大きくなり、追突事故などが発生してしま

う可能性がある。この問題を解決する現実的な対応策として、ハザードランプの点灯が考えられる。実験 3 では、減速または停車の際にハザードランプを点灯させた前方車の被験者が 4 名見られ、これらのケースでは後方車が強震時にスムーズに減速することができた。このことは、緊急地震速報を受信した運転者がハザードランプを点灯することで、速報未受信の周囲の運転者へ減速または停車の意志を伝えることができたためであると思われる。

以上のように、近い将来に緊急地震速報がテレビやラジオなどで一般への伝達が始まった場合、自動車運転中の運転者の望ましい行動指針として、急ブレーキを避けることとともに、ハザードランプの点灯を広く周知することが必要であり、緊急地震速報の自動車交通ネットワークにおける有効活用につながることを期待できる。

5. 結論

本研究では、高速道路運転者に緊急地震速報が与えられた場合に走行状況にどのような影響を与えるかについて、サーバーで連動された 2 台のドライビングシミュレータを用いて検討を行った。

本実験で用いた地表面地震動の計測震度は 5.95 と比較的大きな地震動であるにもかかわらず、緊急地震速報が与えられないと地震発生に気付かない運転者が多いことが確認された。地震と気付かないので、加震中もそのまま走行する運転者が多く見られた。このことから、強震域で前方の路面段差、陥没が生じた場合、運転者が地震を正しく認識できなければ、それらが原因となった衝突事故が起こる可能性も否定できない。このような観点から、緊急地震速報によって地震発生が運転者に伝達されるのは望ましいことと思われる。本実験でも、前方車と後方車の両方の被験者に緊急地震速報が提供されたときは、緩やかに減速して地震に対応していた。

緊急地震速報が広く一般向けに提供開始されると、現実的には速報を受信する運転者と受信できない運転者が混在する状況が生まれる可能性が高い。そこで、前方車の被験者にのみ緊急地震速報を与えて走行実験を行った。前方車は速報により地震発生が知られるので減速などの対応行動を取るが、後方車は地震発生を事前に知らされずに地震を正しく認識する被験者が少ないことから、強震時に運転者間で行動に違いが大きくなる。本実験では、14 組中 2 組で追突事故が発生した。この問題を解決する現実的な対応策として、減速する前のハザードランプの点灯が考えられる。前方車が減速の際にハザードランプを点灯することで速報未受信の周囲の運転者へ減速または停車の意志を伝え、追突事故の発生が抑制できることが本実験により示された。

本研究で行った走行模擬実験の結果から、近い将来に緊急地震速報がテレビやラジオなどで一般への伝達が始まった場合には、自動車運転中の運転者の望ましい行動指針として、急ブレーキを避けるとともに、ハザードランプの点灯を広く周知することが必要であり、緊急地

震速報の有効な活用につながることを期待できる。

謝辞

本実験では、本田技研工業株式会社・安全運転普及本部より多大なご協力を頂いた。また、被験者は日本放送協会 (NHK) に募集していただいた。記して、謝意を表する。

参考文献

- 1) 気象庁 : <http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/EEW/kaisetsu/index.html>
- 2) 横田崇, 上垣内修, 加藤孝志 : 『ナウキャスト地震情報』の実用化に向けて, 地震ジャーナル, Vol. 34, pp. 41-49, 2002.
- 3) 中村豊, 上野真 : 地震早期検知警報システム UrEDAS の開発, 第 7 回日本地震工学シンポジウム論文集, pp. 2095-2100, 1986.
- 4) 中村豊 : 新潟県中越地震の早期検知と脱線, 地震ジャーナル, Vol. 41, pp. 25-37, 2006.
- 5) 浅原裕, 大角恒雄, 藤縄幸雄 : 防災情報として活用するための緊急地震速報の精度評価, リアルタイム災害情報検知とその利用に関するシンポジウム論文集, 土木学会エネルギー土木委員会, pp. 19-24, 2004.
- 6) 気象庁 : <http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/EEW/kaisetsu/saishuuuokoku.pdf>
- 7) 丸山喜久, 山崎文雄 : ドライビングシミュレータを用いた地震動早期警報の効果検討, 土木学会論文集, No. 781/I-71, pp. 177-186, 2005.
- 8) 倉沢鉄也 : ITS 高度道路交通システム, 東洋経済新報社, 2000.
- 9) 本田技研工業 (株) : <http://www.honda.co.jp/simulator/>
- 10) 気象庁 : <http://www.jma.go.jp/jma/press/0402/23a/kinkyu040223.pdf>
- 11) 丸山喜久, 山崎文雄, 山之内宏安 : 高速道路走行車両の地震応答解析, 土木学会論文集, No. 696/I-58, pp. 249-260, 2002.
- 12) Kawashima, K., Sugita, H. and Kanoh, T.: Effect of earthquake on driving of vehicle based on questionnaire survey, Structural Eng. / Earthquake Eng., Japan Society of Civil Engineers, Vol. 6, pp. 405-412, 1989.
- 13) 丸山喜久, 山崎文雄 : 2003 年宮城県沖の地震における地震動強さと高速道路運転者の反応の関係, 土木学会論文集, No. 794/I-72, pp. 307-312, 2005.
- 14) Maruyama, Y. and Yamazaki, F.: Fundamental study on the response characteristics of drivers during an earthquake based on driving simulator experiments, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 33, pp. 775-792, 2004.

(原稿受付 2007.5.28)

(登載決定 2007.9.15)