

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

丸山喜久¹・山崎文雄²

¹正会員 博(工) 千葉大学助手 工学部都市環境システム学科 (〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33)

E-mail:ymaruyam@tu.chiba-u.ac.jp

²正会員 工博 千葉大学教授 工学部都市環境システム学科 (〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33)

著者らは地震時の車両走行安定性に関して、数値解析とドライビングシミュレータを用いた走行実験を行い定量的な検討を行ってきた。その結果、地表面地震動の計測震度が6.0程度に達した場合、震動の影響で走行車線をはみ出す被験者が多く見られ、周囲の交通状況によっては他車との接触事故を起こす可能性があることが示された。そこで、本研究では、気象庁などが導入を検討している地震動早期警報である緊急地震速報の高速道路ネットワークへの応用を目指し、運転者に地震動早期警報が与える影響をドライビングシミュレータを用いた走行実験で検討した。

Key Words : early warning, seismic motion, driving simulator, expressways, Nowcast Earthquake Information

1. はじめに

我が国の高速道路では、地震動によって生じた構造物被害を原因とする走行車両の事故防止を目的に地震時通行規制を実施している¹⁾。高速道路を通行止めにする事により、地震後新たに車両が構造物被害区間に進入し衝突や転落などが発生することがないようにしている。一方、まさに地震時に走行中の運転者へ何らかの対応措置をとることは現状では難しい。このことは、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や、航空機のように管制と常に連絡が取れる状態にないことなど、交通体系の中における情報管理が困難であることが影響している。しかし、ITS(高度道路交通システム)の高速道路における整備が検討され始めた²⁾ことなどから、近い将来自動車交通においても情報管理が可能となるであろうと考えられる。

気象庁では全国に展開した地震観測網から得られる地震データを24時間体制で監視しており、地震発生約2分後から震度、津波予報、震源位置、地震の規模に関する情報などを発表している³⁾。今後の重点目標として「地震・津波・火山現象による被害を最小限にとどめるため、危機管理に即応した、利用しやすい(わかりやすい)防災情報を発表する」ことを挙げており、面的な震度情報の提供、地震動の

主要動到達前の早期警報として「緊急地震速報」の提供に向けた検討を行っている⁴⁾。

鉄道総合技術研究所では、鉄道独自(主に新幹線)の地震保安システムとして、早期地震検知警報システム(ユレダス)を開発し実用化している⁵⁾。コンピュータやネットワーク技術など情報技術もユレダス開発当時より飛躍的な発展を遂げていることから、より汎用的なシステムの構築を目指し緊急地震速報の試験運用を始めている⁶⁾。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⁷⁾。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。

このような地震動早期警報を、高速道路ネットワークに適用することは、地震時の自動車交通の安全促進につながるものと期待できる。地震動によって発生した前方の路面陥没や段差、大型車から落下した積み荷などの障害物への対応の改善が見込めるであろう。著者らの研究⁸⁾では、強震時に運転者が地震動に対して過大な反応を示すことにより走行車線

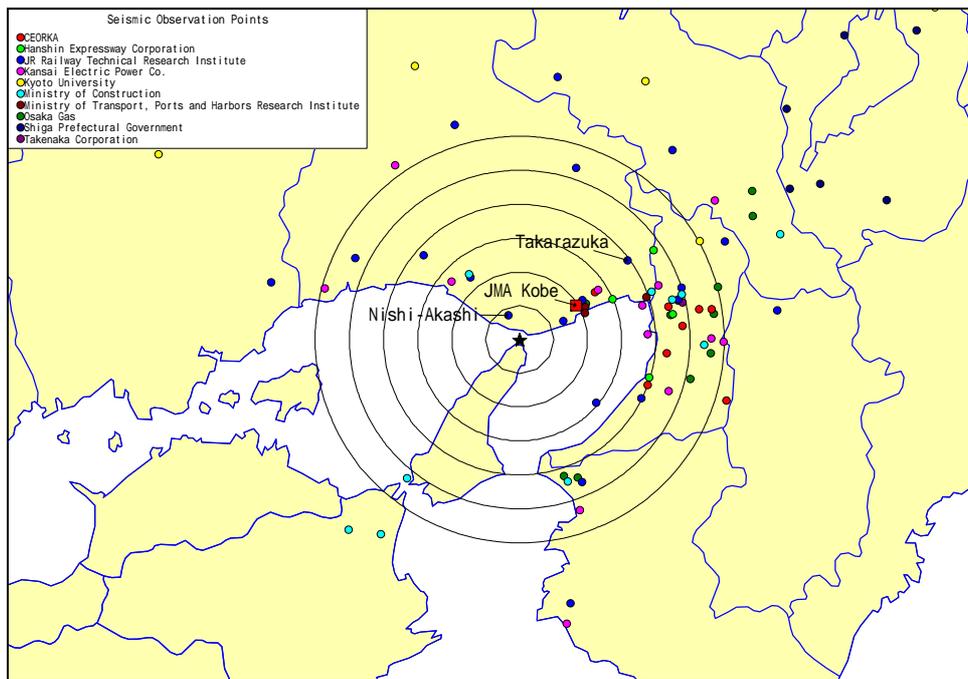


図-1 兵庫県南部地震の震央と周辺の地震観測点（円の間隔は 10 km）

をはみ出すという現象が起こる可能性が示されており、地震動早期警報は震動が運転者に与える危険性も緩和できるであろう。

そこで、本研究では地震動早期警報の高速道路システムへの応用を想定し、ドライビングシミュレータを用いた走行実験⁸⁾を通してその効果を定量的に評価した。具体的には、運転者へ地震動の主要動到達前に音声で早期警報を行い、通報をしなかった場合との模擬走行の様子と比較検討した。

2. 緊急地震速報の想定

本研究では、1995年兵庫県南部地震における震源、地震動観測点位置（図-1）をもとに地震動早期通報を想定した。ここで、兵庫県南部地震における平均的なP波伝播速度は5.65 km/s、S波伝播速度は3.51 km/sとし⁹⁾、震源深さを0 kmとしてP波及びS波到達時間を計算した。

震央に最も近い地震観測点はJR西明石であり、その距離は約8 kmである。これより、JR西明石では地震発生後1.4秒でP波が検知されることとなる。緊急地震速報は、1観測点でP波を感知した時点で発信される「0次情報」、3-5観測点でP波を検知した時点で発信される「1次情報」、その後「2次情報」、「3次情報」と逐次発信される高精度化された情報からなる¹⁰⁾。地震動早期警報を高速道路走行中の運

転者に発信し対応を促す場合、運転者が停車するのに要する時間を考えると余裕時間を最も長く与えることのできる「0次情報」の利用が最も効果がある。したがって、JR西明石観測点が地震発生後1.4秒でのP波検知後に「0次情報」を発信すると想定し、この情報発信に要する時間を4秒と仮定した¹¹⁾。緊急地震速報は、点震源を仮定して震度分布が推定されるため、とくに震央付近で精度が低下する可能性がある。また、アスペリティ分布を考えていない予測であるので、破壊開始点から離れたところにアスペリティがある場合は予測誤差が大きくなることなどが指摘されている⁷⁾。「0次情報」の利用が適切かどうか検討する余地は残っているが、今回の実験では、運転者に与えられる余裕時間が最も長くなる「0次情報」が伝達されたとして考えることとした。

本研究では、車両の走行位置をJR宝塚付近と想定した。JR宝塚の震央距離は約39.5 kmである。JR宝塚に主要動が到達する時刻は、震央距離をS波速度で除すると約11.3秒と算出される。したがって、JR宝塚には地震動早期警報が主要動到達の5.9秒前に発信されることになる。発信された地震動早期警報を高速道路走行中の運転者に提供するためのシステムが起動する時間を0.9秒と仮定し、S波到達5秒前に早期警報が運転者に伝えられるものとした。図-2にJR宝塚における兵庫県南部地震の加速度波形（NS成分）を示す。主要動到達時刻を加速度波形の振幅から図-2の3.5秒と考えた。

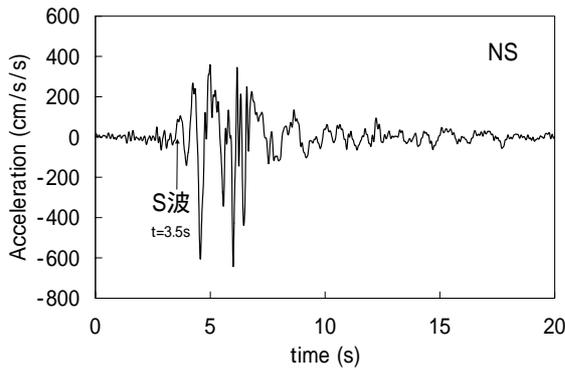


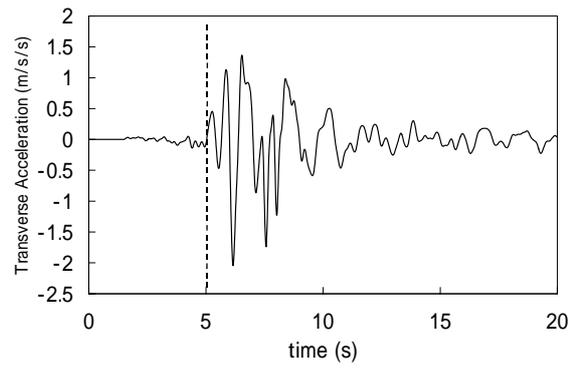
図-2 JR 宝塚における兵庫県南部地震の加速度波形
(車両横方向, NS 成分)



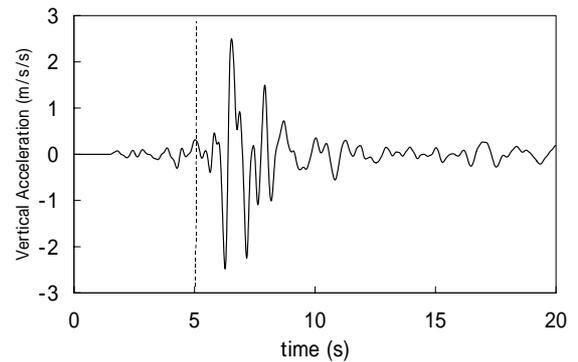
図-3 本研究で使用したドライビングシミュレータ

日本道路公団 (JH) では、2003年5月26日に発生した宮城県沖を震源とする地震時に高速道路を走行していた運転者にアンケートを行っている (回答総数206)¹²⁾。JHでは、地震発生時にはゆるやかに減速し、路肩に停車することを運転者に求めている。アンケート調査によると約2割の運転者が路肩に停車したが、約8割の運転者が減速したのみ、またはそのまま走行している。また、首都高速道路公団では、JH管轄の高速道路と異なり路肩が狭いことから、地震時にはゆっくりと減速し左側または右側いっばいに寄せて停車することを運転者に求めている¹³⁾。以上のような背景から、運転者へ提供した地震動早期警報は音声通報とし、「地震発生。減速して路肩に停止してください」と、路肩への停車を求めた。音声による通報を行ったのは、FMラジオやカーナビゲーションシステムを通して運転者に早期警報が与えられるという方法が、現状では最も実現化に近いと考えたためである。ここで、通報内容をすべて伝えるのに3秒を要するので、実際に運転者へ与えられる主要動到達前の余裕時間は2秒となる。

3. ドライビングシミュレータを用いた地震時



(a) 車両横方向



(b) 上下方向

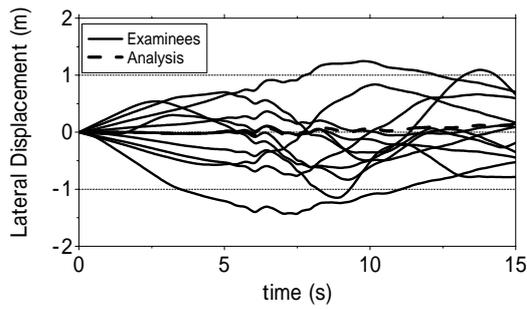
図-4 応答解析による走行車両の絶対応答加速度
(地表面地震動: JR 宝塚波 PGA 6 m/s^2 , 車速: 120 km/h)

走行模擬実験

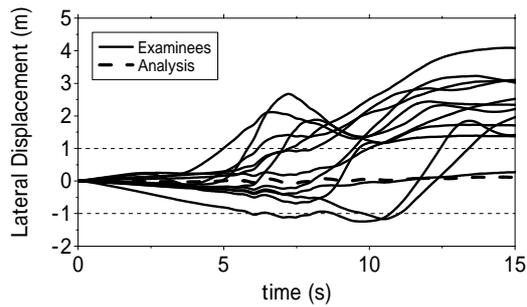
(1) 走行条件

東京大学生産技術研究所に導入されたドライビングシミュレータ (図-3) を用いて地震時走行模擬実験を行った。走行車両の地震応答変位をシミュレータの6軸動揺装置に入力できるようにシミュレータの制御プログラムを改良している。地表面地震動には、兵庫県南部地震におけるJR宝塚における記録を用いた。車両横方向には、最大加速度 (PGA) を 6.8 m/s^2 (記録値) から、著者らの先行研究⁸⁾と同じPGAとなるように 6 m/s^2 にスケーリングした加速度波形を作用させている。図-4に、地震応答解析¹⁴⁾で得られた車両の応答加速度を示す。ここでは、主要動到達時間を時刻5秒にずらして図示している。

被験者には、片側2車線の模擬高速道路の左車線の走行を指示し、建設中である第二東名高速の一部区間の設計速度は 120 km/h , 140 km/h となっていることから、今回の走行実験では車速 120 km/h で走行するように指示した。本研究では、2種類のシミュレータ実験を行った。実験1として、被験者12名に対



(a) 早期警報なし



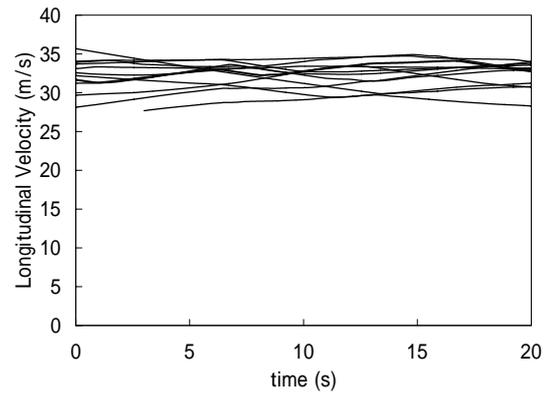
(b) 早期警報あり

図-5 地震動早期警報の有無での走行軌跡の比較
(地表面地震動：宝塚波 PGA 6 m/s²，車速：
120 km/h)

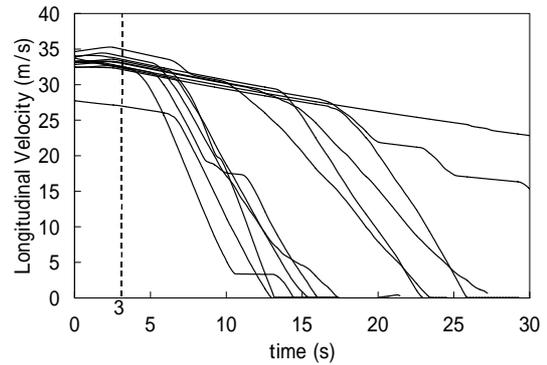
して地震動の直前通報なしの場合と通報ありの場合で、車両の走行軌跡の違いを明らかにするとともに、早期警報を提供した場合の車両制動距離などを評価した。実験2として、22名の被験者を11名ずつの2グループに分け、1つのグループには早期通報を行い、もう一方のグループには早期通報を行わず、前方の道路変状に対する反応の違いを評価した。いずれの実験でも早期警報を行う際には、音声通報が入るのみを伝え、通報の内容については言及しなかった。早期警報を行わない実験の被験者に関しては、地震時の走行について特定の指示は与えておらず、被験者の判断で走行することになる。被験者は他者の実験の様子を見ることはできず、3分程度の通常走行でドライビングシミュレータの操作に慣れた後に実験を開始している。運転者の加震中の反応は、ドライビングシミュレータの付加PCで全19項目について記録した。

(2) 実験1：地震動早期警報の車両制御への影響

実験1の被験者12名は、東京大学の学生である。各被験者が2回の実験を行い、1回目は地震動早期警報を行わずに突発的に地震動を与え、2回目には早



(a) 早期警報なし



(b) 早期警報あり

図-6 地震動早期警報の有無での車両進行方向速度の比較
(地表面地震動：宝塚波 PGA 6 m/s²，車速：
120 km/h)

期警報を主要動5秒前に与えた。

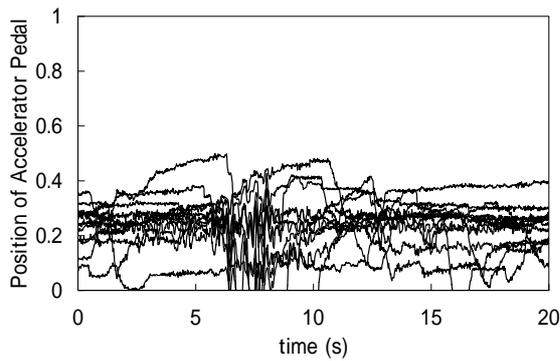
図-5に、地震動早期警報の有無での各被験者の走行軌跡（車両の相対横変位）を比較する。ここでは、参考までに運転者の反応を考慮していない走行車両の地震応答解析の結果も示している。車両そのものの地震応答は、車線をはみ出すことを想像させるような結果でないことから、運転者の過度な反応がなければ、走行車両が震動の影響で車線外にはみ出すようなことはないものと考えられる⁸⁾。また、時刻0秒が早期警報の開始時に対応し、時刻5秒で地震動の主要動が到達する。各被験者の走行軌跡は、以下の式のように算出した。

$$v = v_{seism} + v_{driver} \quad (1)$$

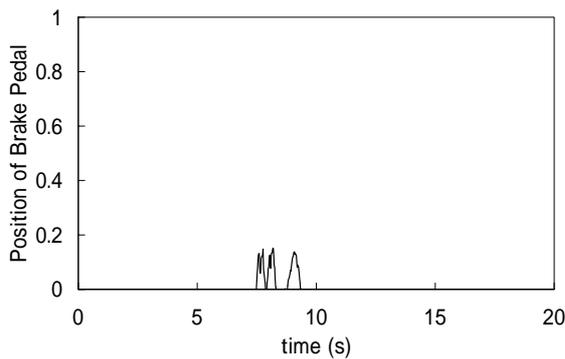
$$\dot{\psi} = \dot{\psi}_{seism} + \dot{\psi}_{driver} \quad (2)$$

$$\dot{Y} = u \sin \psi + v \cos \psi \quad (3)$$

ここで、 u 、 v は車両の進行方向速度と横方向速度、 $\dot{\psi}$ はヨー角速度である。 \dot{Y} は、絶対座標系¹⁴⁾におけ



(a) アクセル操作

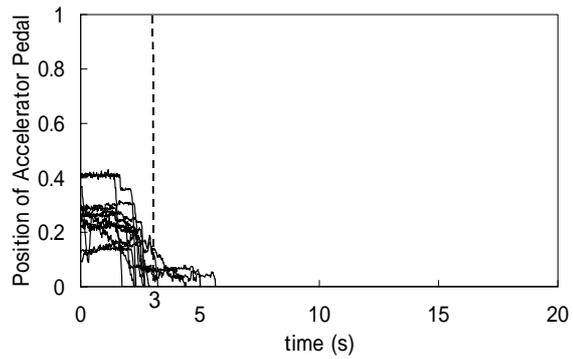


(b) ブレーキ操作

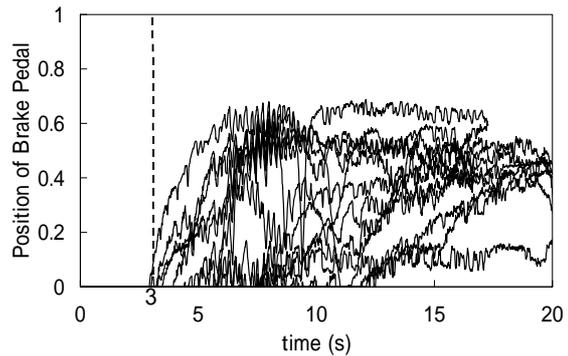
図-7 地震動早期警報を行わなかった被験者のアクセル・ブレーキ操作 (実験1)

る相対横速度である．添字の *seism* は地動加速度に対する相対応答を表し，*driver* は運転者の反応を示している． u_{seism} は u_{driver} に比べて充分小さいので，式(3)の u には u_{driver} を用いた．

車幅 (1.7 m) と高速道路の車線幅¹⁵⁾ (3.6 m) を考えると，横ずれ量が約1 mを超えると隣の車線にはみ出したことに対応する．図-5より，地震動早期警報を提供しない場合は12名中4名の被験者が走行車線をはみ出している．また，多くの被験者が震動の影響で車線内の走行が維持できていても蛇行走行している．一方，早期警報が与えられると，路肩への停止が警報音声で指示され被験者の強震時の走行目標が明確となるため，車線内を走行している間の蛇行の程度が小さくなっている．実験1では，各被験者に2回の走行実験を行っていることから，早期警報を行ったとき (2回目) の蛇行の程度が小さいのは被験者のシミュレータ慣れの影響も否定できないが，各被験者が2回目の走行を行う前には10分程度以上の間隔をおくことで，少なくとも連続して走行実験を行う場合と比べて，慣れの影響が小さくなるようにしている．



(a) アクセル操作



(b) ブレーキ操作

図-8 地震動早期警報を行った被験者のアクセル・ブレーキ操作 (実験1)

図-6に，各被験者の車両進行方向速度を早期警報の有無で比較する．早期警報のない場合は，加震中でも車両速度がほとんど変わっていない．早期警報を提供した場合，対応の早い被験者は地震動の主要動が到達する時刻5秒程度ですでに減速していることが分かる．より詳細に減速の様子を見るために，図-7，図-8に早期警報を行わなかった場合と，行った場合の各被験者のアクセルペダルとブレーキペダルの操作量を示す．ここで，ペダル操作量が1.0のときは，ペダルを目一杯踏んでいる状態にあることを意味する．地震動早期警報を行わなかった場合は，12名の被験者のうち1名がブレーキを軽く踏んでいた．また，多くの被験者はアクセルを加震中も踏み続けている．そのため，加震中の車両前後速度はほぼ一定値のままとなる．本研究の実験では，予め走行中に地震が発生することは被験者に説明しているので，被験者が地震に気付かなかったということはなかったと考えられるが，地震体験運転者のアンケート調査¹⁶⁾では，計測震度4.5以上の区間を走行していても地震を認識しない運転者も見られたので，地震情報を運転者に伝えることの重要性は大きいも

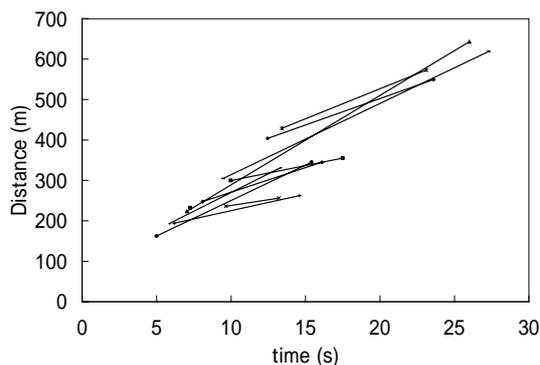


図-9 地震動早期警報を行った被験者の路肩侵入・完全停止までの時間と走行距離の関係 (実験1)

のと考える。

一方、早期警報を行ったときは、早期警報の終わる時刻3秒では、ほとんどの被験者がアクセルペダルを踏んでいないことが分かる。ブレーキ操作に関しては、多くの被験者が地震動の主要動到達前(時刻5秒)までにはブレーキを踏み始めているが、時刻10秒を経過してもブレーキ操作を行わない被験者も見られた。また、ブレーキペダルの踏み込み量やその時間特性は個人差が見られ、大まかには主要動部分の時刻5-10秒では操作量が0.4-0.6程度の被験者と0.2程度の被験者に分けられる。このことが、図-6(b)の早期警報提供時の車両速度が時刻5秒程度から急に減少していく被験者と、最初は緩やかに減速し時刻15-20秒で急に速度が減少する被験者に分けられることを説明している。一方、図-6(b)と図-8によると、早期警報下でも2名の被験者がアクセル操作は行っていないものの明確な減速を行っていない。これは、警報の内容が被験者に充分伝わっていない、内容は伝わったもののどのように対処すればよいか分からなかったなど情報の受け手の人的要因が影響していることも考えられる。

図-9に、早期警報を行った場合の通報開始時からの路肩侵入時間と走行距離、完全停止時間と走行距離の関係を示す。ここで、路肩侵入時間は図-5(b)より車両の横変位量が1mに達した時間として算出している。同一の被験者の結果を線で示しており、各線分の起点が路肩への待避の開始時間とそのときの車両位置(警報開始時を0としている)、終点が完全停止時間と車両位置を示している。これによると、ほとんどの被験者が図-4の主要動継続時間と考えられる時刻5-10秒で路肩に侵入している。完全停止に関しては、15秒程度かかる被験者と25秒程度かかる被験者が見られ、その走行距離は警報開始時から300m程度または600m程度であった。路肩待避開

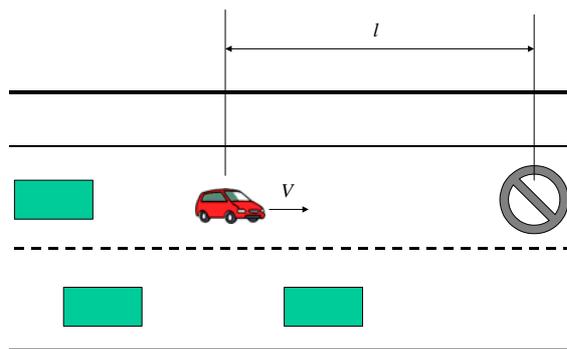
始時から完全停止に至るまでの平均時間は10.3秒(標準偏差4.8秒)、その間の平均進行距離は158.5m(標準偏差123.0m)である。

本実験より、地震動早期警報を行うことによって強震時の車両走行において蛇行走行が低減するような効果が見られた。この要因としては、早期警報を受けて被験者が主要動の到達時までには、車速の十分な減速が行えていることが考えられる。また、この減速の程度には個人差が見られ、完全停止に至るまで15秒程度かかる被験者と25秒程度かかる被験者が見られた。

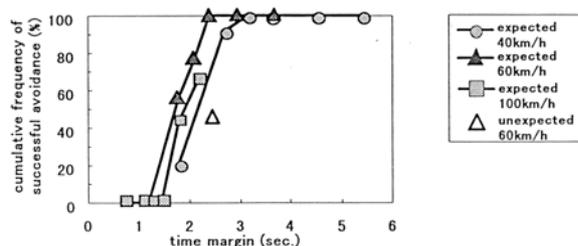
(3) 実験2：地震動早期警報の有無による前方の道路変状への対応の違い

実験2では、被験者22名を用いて地震時走行模擬実験を行い、地震動早期警報の有無による前方の道路変状への対応の違いを評価した。被験者の多くは20歳代であるが、30歳代の被験者が3名、40歳代が3名含まれている。これらの被験者を11名ずつの2グループに分け、1グループには地震動早期警報なし、もう一方のグループには早期警報を行った。強震時には、走行車両の前方に道路変状が生じる可能性もあると思われる。道路変状としては路面のひび割れ、陥没、停止車両、大型車両の積み荷の落下などが考えられるが、本研究では前方に落石を想定した岩を置いた。

我が国では、高度道路交通システム(ITS)に関する研究も進んでいる。ITSの大きな柱の一つである「安全運転の支援」は、旧運輸省主体のASV(先進安全自動車)と旧建設省主体のAHS(走行支援道路システム)という別々のプロジェクトで進められてきた²⁾。しかし、ITSの発展には互いの技術が不可欠となることから1998年より合同で研究を続け、2000年11月に「スマートクルーズ21」という公開実証実験を行っている。AHSは、AHS-i(情報提供)、AHS-c(制御支援)、AHS-a(自動走行)の3つのサブシステムに分類される。AHS-aは、技術的問題以外に責任の所在など現状ではハードルが高いが、AHS-i、AHS-cに関しては、段階的な実現へ向けて検討が進められ、安全向上の7つのサービスとして前方障害物衝突防止、カーブ侵入危険防止などの走行支援があげられている¹⁷⁾。そこで、ITSの機能の一つとして想定されている運転者への危険警報を発信するタイミングを検討することを目的にドライビングシミュレータを用いた実験もいくつか行われている。平松ら¹⁸⁾は、ドライビングシミュレータの走行コース上で前方に障害物を出現させ運転者の回避行動を調査している(被験者数25名)。図-10に障



(a) 障害物設置状況



(b) 余裕時間と回避成功率

図-10 障害物の設置状況，回避余裕時間と回避成功率の関係¹⁸⁾

障害物の設置状況，回避余裕時間と回避成功率の関係を示す．ここで，余裕時間は可視距離を車速で除した値 ($= l/V$) である．これによると，障害物の出現が予想されている状況では余裕時間が3秒で100%回避を成功，2秒で約50%の回避成功率である．障害物の出現が不測の場合は，回避に必要な余裕時間がわずかに大きくなるように思われる．

本研究での障害物設置状況に関しては，図-4の応答加速度が最大振幅に達した後の時刻8秒で何らかの道路変状が前方で発生したと仮定し障害物を出現させた．障害物の出現位置は，図-10(b)より，余裕時間が2秒あると障害物回避成功率が約50%であることから，実験1で地震動早期警報を行ったときの被験者の8秒間走行距離と10秒間走行距離をもとに定めた(図-11)．8秒間走行距離を250m，10秒間走行距離を300mと大まかにとらえ前方50mに障害物を設置することとした．図-6(a)より，早期通報を行わない場合は，車速約33m/s (120km/h) で一定速度のまま走行する被験者が多いので，前方50mの障害物に対する余裕時間は約1.5秒となる．また，本実験では前方に障害物が出現することは被験者には伝えていない．したがって，障害物の出現が予測されていない状態にあるので，図-10(b)より障害物を回避するのに必要な余裕時間は長くなるものと考えられ，地震動早期警報が与えられない場合は回避が困

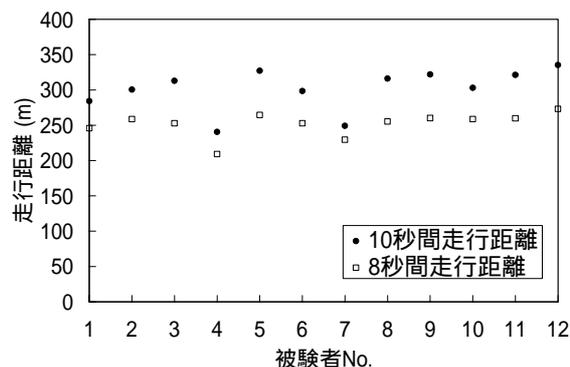


図-11 地震動早期警報を行ったときの8秒間走行距離と10秒間走行距離(実験1)

難であることが予想される．

図-12に地震動早期警報を行わなかった場合，図-13には早期警報を与えた場合の走行実験の例を示す．図-12では，ハンドルを右に切っているものの障害物を避けきれなかった状態が見られる．一方，早期警報を行った図-13では，充分減速し路肩に入ることによって障害物に衝突することなく回避できていることが分かる．この2名の被験者の実験結果をそれぞれ早期警報なし，早期警報ありの場合の典型的な反応例として比較する．図-14に，これら2名のアクセル操作量とブレーキ操作量を示す．早期警報下の場合には，時刻0秒で3秒間の早期警報のメッセージが運転者に伝達されるが，時刻3秒ではアクセル操作を止め，ブレーキ操作を行い始めている．一方，早期警報が提供されないときは，アクセル操作が続き，ブレーキ操作は行われない．ハンドル操舵角を比較すると，早期警報が行われないときは障害物を回避するために，過大なハンドル操舵が行われていることが分かる(図-15)．

図-16に，実験2の全被験者の走行軌跡を示す．地震動早期警報を行わなかった場合，11名の被験者のうち9名の被験者が障害物を回避できなかった．一方，早期警報を行った場合は，障害物を回避できなかった被験者は2名にとどまった．図-16(a)では障害物を回避できた2名の被験者の走行軌跡を点線に，図-16(b)では障害物を回避できなかった2名の被験者を点線にして他の被験者の結果と区別して示している．また，障害物出現位置のX座標が各被験者で250になるように統一してある．早期警報下では，運転者は主要動到達前にブレーキ操作を開始することが可能となり，十分に減速を行った状態で障害物に対応できる．そのため，過大なハンドル操作を行う必要がなく11名中9名が衝突事故を回避できたものと考えられる．早期警報が提供されない場合，図-14，



図-12 地震動早期警報を行わなかったときの走行実験の様子（前方の障害物に激突）



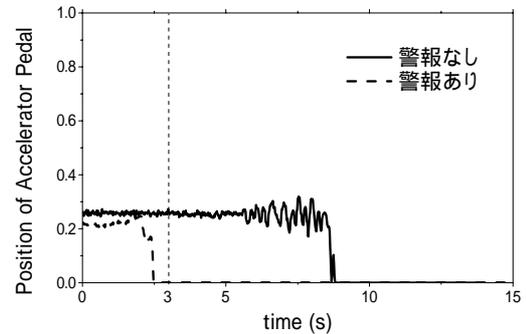
図-13 地震動早期警報を行ったときの走行実験の様子（路肩に停車し障害物を回避）

図-15で示したとおり，被験者はブレーキ操作を行わず，時速120kmのほぼ一定速度のままハンドル操舵のみで障害物に対応しようとする．その結果，11名中9名の被験者が衝突事故を回避できなかった（9名のうち2名は過度にハンドルを切りすぎて，右車線の中央分離帯に衝突）．前方の障害物を回避するために，4名が路肩側に，7名が右車線側に車両を制御している．震動の影響で，路肩に何らかの道路変状が生じる可能性もあり，今後は様々な実験条件で本研究と同様の検討を行う必要がある．

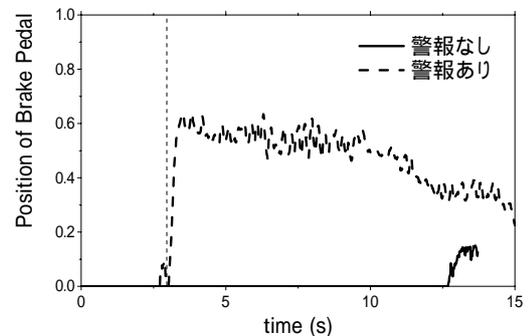
以上の実験結果より，高速道路運転者への地震動早期警報は，強震時に被験者の減速を促すことが可能となり，震動の影響による急ハンドルなど危険な行為を未然に防ぐなどの一定の効果が期待されるものと考えられる．

4．地震動早期警報の実用化に向けた課題

地震動早期警報への取り組みは始まったばかりであり，現在は地震動特性の早期把握技術やそのシステム構築などに研究の重きがおかれている．それと同時に，早期警報の実社会への効果について検討をしていくことも重要である．本研究は，高速道路交



(a) アクセル操作



(b) ブレーキ操作

図-14 早期警報の有無でのアクセル・ブレーキ操作の比較（実験2）

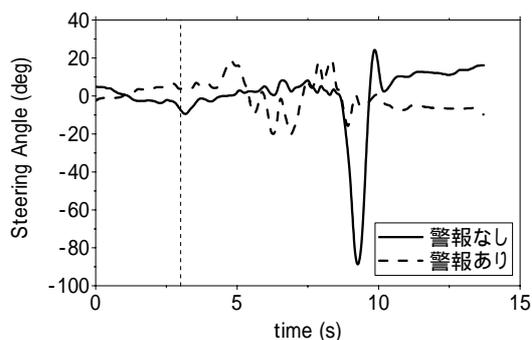
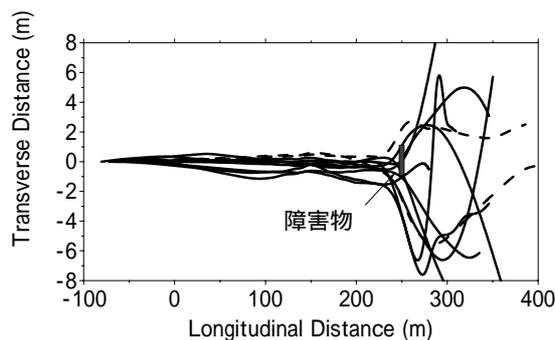
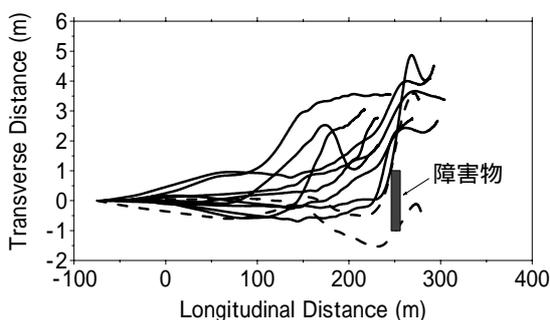


図-15 早期警報の有無でのハンドル操舵角（反時計回り正）の比較（実験2）



(a) 早期警報なし



(b) 早期警報あり

図-16 震動による道路変状発生時の車両の走行軌跡（実験2全被験者）

通への適用を目指して検討を行った。障害物発生などの想定条件に関しては不十分な点もあるが、本実験の結果から道路交通における早期警報がもたらす効果は大きいと思われる。

本研究の走行実験で地震動早期警報を提供する場合には、音声通報が流れるということを被験者に事前に伝えて実験を行っている。3. で示した走行実験とは別に、実験2と同じ走行条件で事前に地震動早期警報を与える旨を伝えず被験者4名の走行実験を行ったところ、4名中1名のみが障害物との衝突事故を回避できた。このことから、実際に地震動早期警報を実社会に導入していく際には、その利用者で

ある一般の人々に十分な説明や教育を施す必要がある。

自動車交通では、鉄道や航空などの他の交通システムと異なり、交通体系の中における情報管理が困難である。しかし、近い将来にITSが高速道路で整備されれば、自動車交通においても情報管理が可能となるであろう。また、ITSの2本の柱のうちのAHS、とくにAHS-i、AHS-cと連動し、ブレーキ操作や路肩への待避アシストが行われるとより一層の効果が見込まれる。

5. 結論

本研究では、ドライビングシミュレータを用いた地震時走行模擬実験を行い、緊急地震速報などの地震動早期警報が運転者に提供された場合にもたらされる効果を検討した。1995年兵庫県南部地震における地震データ、観測点位置などをもとに、現在運用が検討されている地震動早期警報をシミュレーションしたところ、最も震源に近傍なJR西明石観測点でP波検知を行い、「0次情報」が発信されたと仮定すれば、JR宝塚付近では主要動到達前に約5.9秒の余裕時間があることが分かった。したがって、JR宝塚観測点における兵庫県南部地震の地震記録を地表面地震動とし、早期地震情報を運転者に伝えるためのシステムの作動時間を考慮に入れ、主要動到達5秒前から3秒間の減速及び路肩への侵入を促す音声通報を地震動早期警報として運転者に提供した。

地震動早期警報の有無で地震時の車両走行の様子を比較すると、早期警報を行わなかったときは走行車線をはみ出したり、車線内を蛇行して走行する被験者が多かったが、早期警報を与えると蛇行走行は見られなくなり、走行速度が120km/hのときは、警報開始時から300m程度車両が進むとほとんどの被験者が路肩に待避を始めていることが分かった。震動による道路変状を想定し、自車前方の障害物回避の対応状況を地震動早期警報の有無で比較した。その結果、地震動早期警報が行われない場合は回避困難な位置（11名中9名が障害物に衝突）にある障害物に対して、早期警報の効果で11名の被験者のうち9名が回避に成功した。

高速道路網におけるITSの整備が進むにつれ、自動車交通における情報管理の一括化が可能と思われる。社会基盤施設から提供する情報の一部に地震動早期警報を加えることで、更なる安全性の促進につながると期待できる。

参考文献

- 1) 後藤順治：地震時における道路通行規制基準の変更 - 安全性・信頼性の高い道路を目指して - , EXTEC No. 59 , pp. 21-23, 2001.
- 2) 倉沢鉄也：ITS高度道路交通システム, 東洋経済新報社, 2000.
- 3) 気象庁：震度を知る, ぎょうせい, 1996.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 東田進也, 小高俊一, 芦屋公稔：早期地震検知における新しい地震諸元推定方法, 鉄道総研報告, Vol. 16, No. 8, pp. 1-6, 2002.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 童華南, 山崎文雄：阪神・淡路大震災で観測された地震動の特徴, 生産研究, 東京大学生産技術研究所, Vol. 47, No. 5, pp. 42-45, 1995.
- 10) Doi, K.: Earthquake early warning system in Japan, *Early Warning Systems for Natural Disaster Reduction*, Springer, pp. 447-452, 2002.
- 11) 中村洋光：地震防災システムにおけるナウキャスト地震情報の活用, 第161回鉄道総研月例発表会講演要旨, 4p, 2003.
- 12) 河北新報：2003年9月1日朝刊, 2003.
- 13) 首都高速道路公団：首都高速地震防災ハンドブック, 1999.
- 14) 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.
- 15) 日本道路公団：図鑑 現代のハイウェイ - 先端技術でつくる高速道路 - , 1999.
- 16) 丸山喜久, 山崎文雄：アンケート調査に基づく地震時高速道路運転者の反応特性, 日本地震工学会大会 - 2004梗概集, pp. 176-177, 2005.
- 17) 技術研究組合 走行支援道路システム開発機構ホームページ：http://www.ahsra.or.jp/
- 18) 平松金雄, 佐藤健治, 相馬仁, 宇野宏：ドライビングシミュレータを利用したITS研究例, 自動車技術, Vol. 52, No. 4, pp. 4-9, 1999.

(2004. 6. 24 受付)

DRIVING SIMULATOR EXPERIMENTS ON THE EFFECTS OF EARLY WARINIG OF SEISMIC MOTION TO EXPRESSWAYS DRIVERS

Yoshihisa MARUYAMA and Fumio YAMAZAKI

In order to investigate the driver's reactions during an earthquake, the present authors have performed a series of virtual tests using a driving simulator. Based on the results, traffic accidents may occur in case of heavy traffic because of strong shaking. The Japan Meteorological Agency (JMA) have a plan to establish a system to issue "Nowcast Earthquake Information", which is an early warning of seismic motion. In this study, the effects of early warning to drivers are investigated based on the driving simulator experiments. The reactions of drivers with/without warning are compared to reveal the effects of early warning.