

ドライビングシミュレータを用いた 地震時運転者の反応特性に関する基礎的検討

丸山喜久¹・山崎文雄²

¹東京大学大学院工学系研究科 社会基盤工学専攻
(〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

E-mail:maruyama@ares.iis.u-tokyo.ac.jp

²東京大学生産技術研究所 (〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)

E-mail:yamazaki@iis.u-tokyo.ac.jp

ドライビングシミュレータを用いて、地震時の車両走行に関する模擬実験を行った。ハンドル操舵角速度を運転者の反応を表す指標値として実験結果を整理すると、免許歴の短い被験者と年齢の高い被験者の反応量が大きくなっていた。車両応答加速度とハンドル操舵角加速度の相互相関係数のピーク値の正負で各被験者の車両走行軌跡を大別すると、負の相関を示した被験者よりも正の相関を示す被験者の方が車線逸脱可能性が大きかった。これには、運転者の地震動に対する反応の時間遅れとハンドル操舵量が関係していることが分かった。このことから、周囲の交通状況によっては、強震時に接触や側面衝突事故などが起こりうる考えられる。

Key Words : *driving simulator, steering velocity, seismic response acceleration, cross correlation coefficient*

1. はじめに

我が国の高速道路では、料金所付近に地震計を設置しており、計測震度4.5以上で通行止めという地震時通行規制が実施されている¹⁾。この通行規制の目的は、地震動により高速道路構造物に車両の走行に支障をきたすような被害が生じた場合、後続の車両が被害箇所そのまま進入してしまうことにより生じる二次的な事故を未然に防ぐことである。しかしながら、このレベルの地震動では、高速道路構造物に被害が発生する可能性が低いことも近年の研究で明らかになりつつある^{2),3)}。したがって、高速道路構造物の被害有無という観点から地震時通行規制基準を議論した場合、基準値の緩和が可能になるものと考えられる。一方、地震時の車両の走行安定性についてはあまり議論が行われておらず、震動の影響で運転者が事故を起こしてしまうことも否定できない。もし、そのような可能性が高いのであれば、震動による事故のあとの二次的な多重衝突事故を防ぐという観点から、震動が走行車両にどのような影響を与えるかを検討することも必要であると考えられる。

Kawashima *et al.*⁴⁾は、日本海中部地震と千葉県東方沖地震における地震体験運転者のアンケート調査

を行っている。この結果では、地震動を直後またはしばらくしてから認識した運転者は、全体の約95%にも達している。また、直後に地震を認識した運転者の約50%が車両の異常な振動から地震を認識したと回答している。ハンドルが取られた、パンクしたように感じたなどと証言しているものも多い。この結果は、兵庫県南部地震における地震体験運転者アンケートでも同様のものになっている⁵⁾。このことから、地震動の影響で運転者が車両制御を困難に感じるようになっているものと想像でき、誤操作を起こしてしまう可能性も十分に考えられる。

このような背景から、著者らは地震動が高速道路走行車両に与える影響を検討するために、6自由度車両モデルを構築し高速道路走行車両の地震応答解析⁶⁾を行ってきた。しかしながら、この地震応答解析には運転者の反応が考慮されていない。地震動に対する走行車両の応答特性を評価することは非常に重要ではあるが、同様に、地震時の運転者の反応について検討することも必要である。近年、実際の車両走行の様子を高い現実感で再現できるドライビングシミュレータが幾つかの研究機関で導入されている^{7),8)}。1999年に東京大学生産技術研究所にも、本格的なドライビングシミュレータが導入された。このシミュレータは、三次元空間運動模擬装置に自動

車や鉄道車両を模擬した台座 を搭載する事が可能で、さまざまな研究目的で使用されている^{9),10)}。

そこで、本研究では、地震時の運転者の反応特性を評価することを目的として、ドライビングシミュレータを用いて地震時の走行模擬実験を行った。とくにハンドル操舵に着目し、地震動強さや車両の応答加速度に対する被験者の反応特性を定量的に検討した。

2. 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の概要

近年、自動車の先進安全装備の研究・開発にはドライビングシミュレータが不可欠な存在になりつつある⁸⁾。ドライビングシミュレータとは、運転者の操作に合わせた運転環境の変化をリアルタイムに運転者に提供することで実際に道路で自動車を走らせることなく、台上で運転できるようにする装置である。そのためには、台上に設置された運転席から、ドライバーの運転操作量を計測しその操作量に基づき自動車の運動のシミュレーションを行い、運動量に応じた視覚・聴覚・運動感覚についての刺激をリアルタイムに計算し運転者に供給する必要がある。近年、大小非常に多くのドライビングシミュレータが開発されてきたが、固定式と呼ばれる映像模擬装置主体のシステムと、ムービングベースと呼ばれる加速度感覚を模擬する動揺装置を有するシステムに大別される。

本研究で用いるドライビングシミュレータ(図-1)は三菱プレジジョン(株)が開発した訓練/研究用ドライビングシミュレータで1999年に東京大学生産技術研究所へ導入された。このドライビングシミュレータには、高速道路模擬風景が搭載されており、運転者前方の大型スクリーンに映し出される。自車周辺には、3台の併走車両が挿入可能である。また、ステアリング反力装置を有した運転模擬席を有しており、非常に現実感に富んだシミュレーションが期待できる。このドライビングシミュレータには電動6軸動揺装置が装備されている。本研究で行う「地震時車両走行模擬実験」にはこのようなムービングベースのドライビングシミュレータは非常に有用である。

図-2に、ドライビングシミュレータの構成を示す。Hostコンピュータが、映像や音響などの各システムにリンクしている。本研究では、ドライビングシミュレータの制御プログラムを改良し、動揺装置制御システムにHostコンピュータから変位データを送りドライビングシミュレータのモーションを制御することとした。地震時車両走行模擬実験を行うときに入力する変位データは、走行車両の地震応答解析⁶⁾より得られた絶対応答変位とした。また、ロール、ピッチ、ヨーの回転成分¹¹⁾も同様に動揺装置制御システムに入力している。

6軸動揺装置のモーション再現性についてはすで



図-1 本研究で使用したドライビングシミュレータ

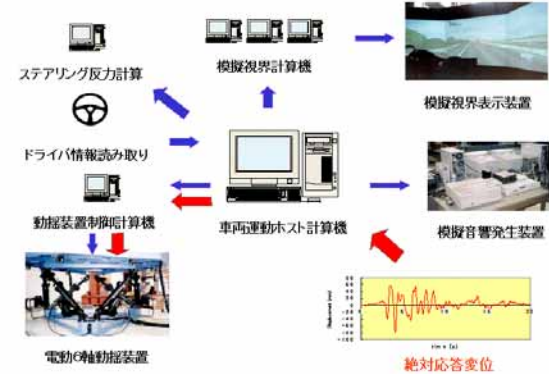


図-2 ドライビングシミュレータの構成

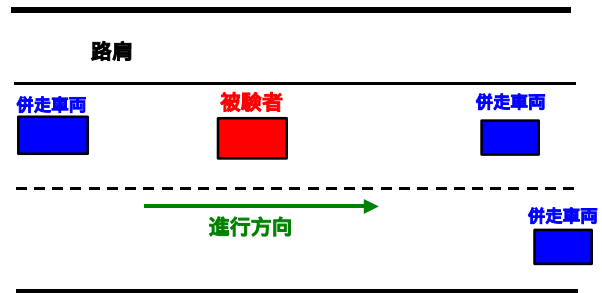
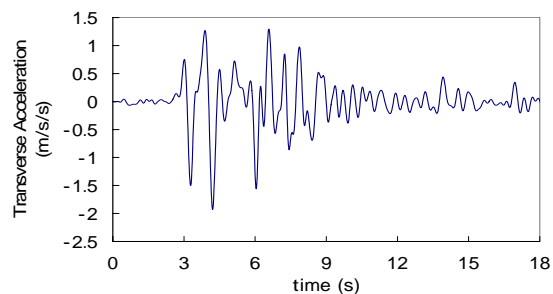


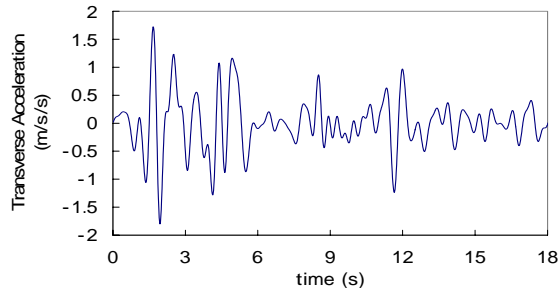
図-3 地震時走行模擬実験における車両の走行状況

に検討を行っている¹²⁾。1987年千葉県東方沖地震における東京大学生産技術研究所千葉実験所記録¹³⁾のように、地動加速度に高振動数域が卓越する場合、動揺装置による出力加速度の7-8Hz成分にシミュレータの自励振動の影響が大きく見られ入力振動の再現性が悪い。しかしながら、1995年兵庫県南部地震における神戸海洋気象台記録¹⁴⁾など地動加速度に高振動数域が卓越していない場合には、自励振動の影響が小さいことが分かっている。

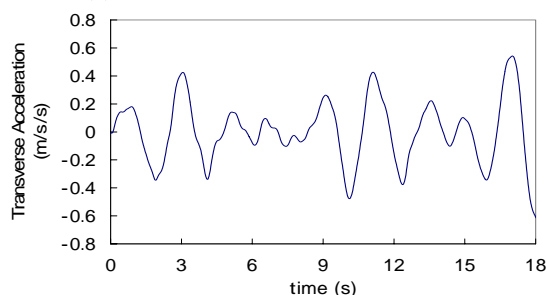
図-3に「地震時走行模擬実験」における、車両の走行状況を示す。被験者は、シミュレータに搭載されている2車線道路の左車線を走行し、被験者の前方、後方及び右車線に併走車両を挿入した。被験者は、車速100km/hで走行し、周辺の併走車両もほぼ同等の車速で走行している。ただし、右車線の併走車両は高速道路走行中という臨場感を与えるために、車速を若干早めに設定し被験者の車両を後方から抜き去るように配置している。また、加震中の被験者



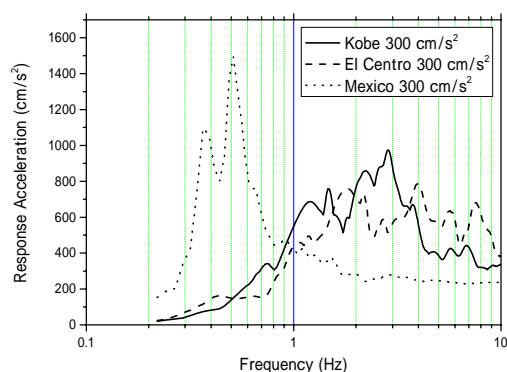
(a) 神戸海洋気象台記録 (PGA400cm/s²)



(b) El Centro記録 (PGA400cm/s²)



(c) メキシコSCT記録 (PGA100cm/s²)



(d) 加速度応答スペクトル (5%減衰)

図-4 地震時車両走行模擬実験でドライビングシミュレータに入力した走行車両の絶対応答加速度と地表面地震動加速度応答スペクトル

の反応をドライビングシミュレータの記録用PCで測定した。測定項目は、車両のX座標、Y座標、車速、アクセル・ブレーキ操作量など全19項目である。本研究では、地震時車両走行模擬実験として2種類の実験を行っている。実験1として、同一の被験者について3回の実験を行い、地震動強さと被験者の反応量の関係性を評価した。実験2として、各被験者に1回の実験で免許歴や運転頻度と地震時の運転者

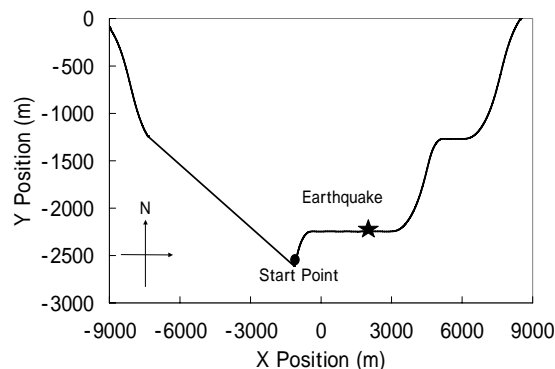


図-5 高速道路走行コースと地震発生位置

の反応の関係について評価した。実験1については、被験者のシミュレータ慣れの影響も否定はできないが、実験2については、1回の乗車であることからシミュレータ慣れの影響は無いものと考えられる。実験の趣旨は予め各被験者に伝えてある。また、実験1については、ブレーキ操作を明示的に禁じたが、実験2ではとくに禁じてはいない。しかしながら、実験2でブレーキを踏むという行為を行った被験者は2名にとどまっており、その程度は小さかった。

図-4に実験で入力した車両横方向の絶対応答加速度波形の例と地表面地震動の加速度応答スペクトル(5%減衰)を示す。通常車両走行では、主に路面の凹凸による8-15Hz程度の上下振動が運転者には感じられる¹¹⁾が、地震時には水平方向、とくに車両横方向の振動が大きい。実験1で用いた地表面地震動は、case Aとして神戸海洋気象台記録の最大加速度(PGA) 200cm/s², 400cm/s², 600cm/s²の3種類、case Bとして神戸海洋気象台記録PGA100cm/s², 400cm/s², メキシコSCT記録PGA100cm/s²の3種類を用いている。実験2では、神戸海洋気象台記録PGA400cm/s²とEl Centro記録PGA400cm/s²を用いている。ただし、神戸海洋気象台記録、SCT記録については、0.2-5Hzのフィルター波をEl Centro記録は0.2-3Hzのフィルター波をそれぞれPGAでスケールしている。また、地震入力地点は、図-5に示すように高速道路走行コースの直線部分を使用している。

実験1の被験者は、東京大学生産技術研究所の学生である。これらの被験者の間では運転頻度や免許歴はほぼ同等であるものとみなし、その影響は検討しなかった。実験2の被験者の年齢層と運転頻度を表-1、表-2に示す。21-30歳の被験者が最も多いが、51歳以上の被験者も全体の約1/4を占めており、幅広い年齢の被験者の協力を得ることができた。運転頻度についても、週に2-3日運転する人が最も多く、日頃から運転になれている被験者について実験を行うことができた。

3. ハンドル操舵に見る地震時運転者の反応

(1) 地震動強さと運転者の反応量の関係

表-1 被験者の年齢の分布 (実験2)

年齢	男性	女性	合計
21-30	12	2	14
31-40	5	1	6
41-50	4	1	5
51-	8	0	8
全年齢	29	4	33

表-2 被験者の運転頻度 (実験2)

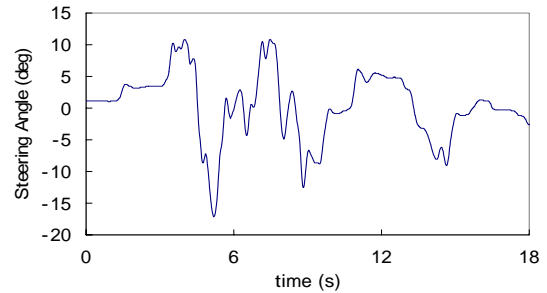
運転頻度	神戸海洋気象台波	El Centro 波
ほぼ毎日	1	0
週に2-3日	4	9
月に2-4日	5	5
ほとんど運転しない	6	3

記録した加震中の運転者の反応のうち、ハンドル操舵に着目し実験結果を整理した。ドライビングシミュレータの記録用PCで記録したハンドル操舵角から微分して算出したハンドル操舵角速度を運転者の反応量を表す指標値として選んだ。図-6は、神戸波PGA600cm/s²を地表面地震動として選んだ場合の例である。ハンドル操舵角速度は、急ハンドルの程度を表すものと考えられ、横方向外乱入力時の車線逸脱回避のための運転者の操舵特性を評価するために用いられたりもしている¹⁵⁾。

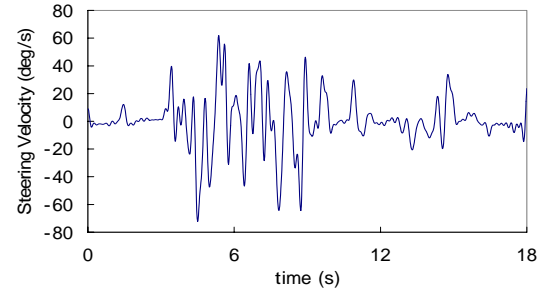
実験1で得られた結果より、地表面地震動強さと運転者の反応量の関係を考察する。図-7に地表面地震動の計測震度と運転者のハンドル操舵角速度最大値の関係を示す。模擬実験の入力として用いている車両の横方向絶対応答加速度は、地表面地震動の計測震度が增大するに伴って一様に大きくなっていった¹⁶⁾が、運転者の反応量は計測震度5.5程度で違いが見られている。このことから、計測震度5.0程度の地震は車両の走行安定性に影響を与えないものと考えられる(ハンドル操舵角速度と車両の横変位量の関係は後述)。

気象庁の震度階級関連解説表¹⁷⁾では、震度4で「自動車を運転していて揺れに気付く人がいる」、震度5強で「自動車の運転が困難となり、停止する車が多い」とされている。最近の地震では計測震度と震度階級の不整合性も指摘されているが、本研究で行った地震時走行模擬実験では地表面地震動の計測震度が5.0程度の場合には、どの被験者もとくに問題なく走行しているように思われた。本研究のような地震時走行模擬実験を行っていくことで、地震動強さと自動車の走行安定性の関係について定量的な評価が行えるものと考えられる。

(2) 免許歴・運転頻度と運転者の反応量の関係
 実験1の被験者は、東京大学生産技術研究所の学



(a) ハンドル操舵角



(b) ハンドル操舵角速度

図-6 加震中の運転者のハンドル操舵角とハンドル操舵角速度の例 (神戸海洋気象台記録PGA600cm/s²)

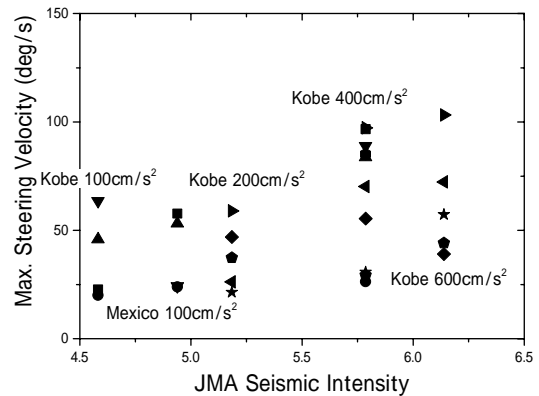


図-7 地表面地震動の計測震度と運転者のハンドル操舵角速度最大値の関係 (実験1)

生9名であるので、各被験者間の免許歴などには大きな違いがないと考えられる。実験2では、幅広い年齢層の33名の被験者に対して実験を行い、免許歴や運転頻度の違いが地震時の運転者の反応量にどのような影響を与えるのかを検討した。図-8に被験者の免許歴とハンドル操舵角速度最大値の関係を示す。また、図-9には、運転頻度とハンドル操舵角速度最大値の関係を示す。

これによると、免許歴の短い運転技術の未熟であると考えられる被験者と、免許歴の長いやや高齢の被験者のハンドル操舵量が大きくなっていることが分かる。高齢者人口比率の増加に伴い、さまざまな分野で高齢社会が問題となっているが、道路交通の分野でも高齢運転者と非高齢運転者との運転特性の違いが議論されている¹⁸⁾。本実験からも同様に高齢運転者は地震動に過度な反応を示す傾向があることが分かった。運転頻度との関係では、個人差が大きく見られてはいるが、「週に2-3回」運転している

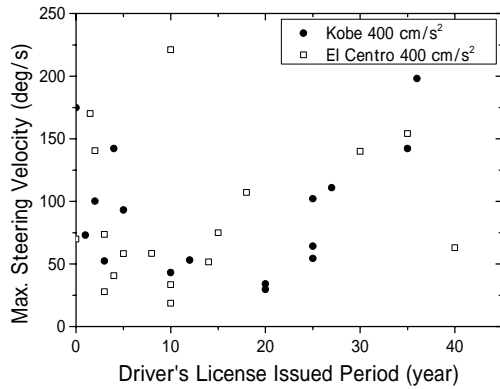


図-8 被験者の免許歴とハンドル操舵角速度最大値の関係 (実験 2)

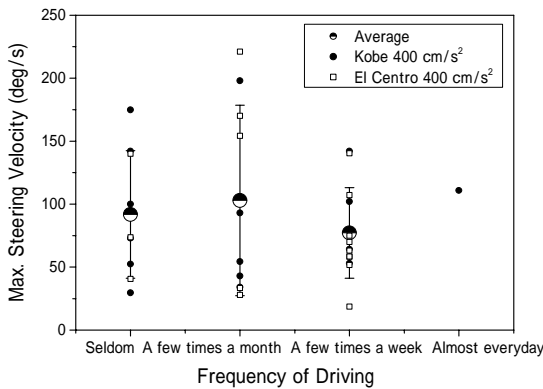


図-9 被験者の運転頻度とハンドル操舵角速度最大値の関係 (実験 2)

と答えた日頃から比較的頻繁に運転している被験者のハンドル操舵速度最大値の平均値、標準偏差がともに最も小さくなっていることが分かる。

(3) 反応の時間遅れと車両の走行軌跡

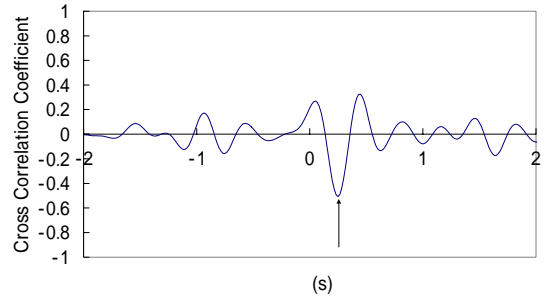
実験2の被験者33名に関して、ハンドル操舵角加速度と車両横方向の絶対応答加速度から相互相関係数¹⁹⁾を式(1)のように算出し、地震動に対する運転者の反応の時間遅れを評価した。

$$C_{xy}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S_{xy}(\omega) e^{i\omega\tau} d\omega \quad (1a)$$

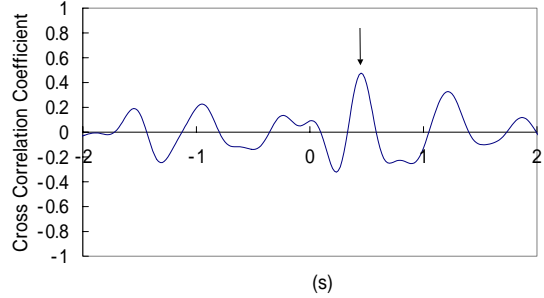
$$\rho_{xy}(\tau) = \frac{C_{xy}(\tau)}{\sigma_x \sigma_y} \quad (1b)$$

ここで、 S_{xy} は車両横方向応答加速度とハンドル操舵角加速度のクロススペクトル、 σ_x 、 σ_y は標準偏差、 C_{xy} は相互相関関数、 ρ_{xy} は相互相関係数である。

相互相関係数は、主要動部を含む6秒間の車両応答加速度とハンドル操舵角加速度より算出した。図-10に示すように、得られた相互相関係数からそのピーク値と時間ずれ τ を読み取った。図-10では、地表面地震動に神戸波PGA400cm/s²を用いた場合について示している。図-11に、以上のようにして読み取った相互相関係数のピーク値とその時間ずれの



(a) ピーク値が負の場合



(b) ピーク値が正の場合

図-10 車両横方向応答加速度とハンドル操舵角加速度の相互相関係数 (神戸海洋気象台記録PGA400cm/s²)

関係を示す。これによると、ほとんどの被験者の反応の時間ずれが約0.2-0.5秒の間にあることが分かる。また、相互相関係数のピーク値が正の被験者の方が負の被験者の時間ずれよりも大きくなっていることが分かる。

ここで、車両横方向応答加速度は左向き正、ハンドル操舵角加速度は反時計回りを正方向としている。もし、運転者が時間遅れなくハンドルを操舵できた場合、車両の応答加速度と同じ向きのハンドル操舵角加速度をもって車両を制御すれば、車両の応答(とくにヨーイング)を増幅させてしまう(図-12)。ここでは、運転者の応答ゲインを0.5deg/cmとして計算している。したがって、地震時に運転者が地動加速度と逆方向に細かく、すばやくハンドルを切ることによって車両の地震応答を低減できると思われるが、当然これは容易なことではない。

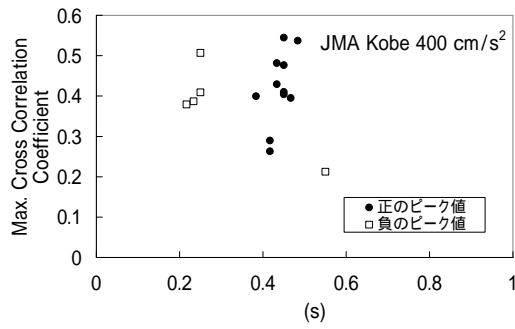
式(2)より、実験2の被験者33名について、地震時の車両の走行軌跡を算出した。

$$v = v_{seism} + v_{driver} \quad (2a)$$

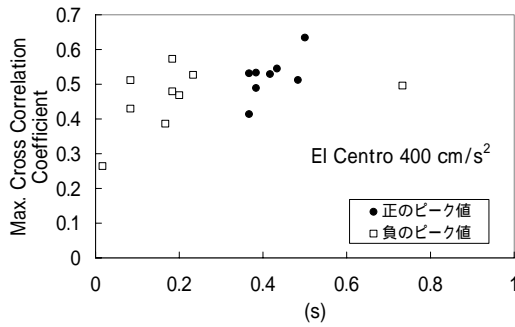
$$\dot{\psi} = \dot{\psi}_{seism} + \dot{\psi}_{driver} \quad (2b)$$

$$\dot{Y} = u \sin \psi + v \cos \psi \quad (2c)$$

ここで、 u 、 v は車両の前後、横方向速度、 ψ はヨー角速度である。 \dot{Y} は、絶対座標系⁶⁾におけ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。図-13に、神戸波PGA400cm/s²を地表面地震動として用いた場合の算出された地震時の車両の走行軌跡を示す。運転者の反応を考慮していない応答解析で得られた結果も併せて示している。車両の応答そのものは、車線の逸脱を想像させるようなものに



(a) 神戸海洋気象台記録



(b) El Centro 記録

図-11 車両横方向応答加速度とハンドル操舵角加速度の相互相関係数のピーク値とその時間ずれの関係

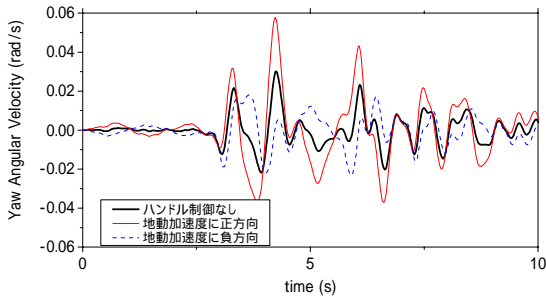


図-12 異なるハンドル操舵角加速度によるヨー角速度の比較 (神戸海洋気象台記録PGA400cm/s²)

はなっていない。図-13では、車両横方向応答加速度とハンドル操舵角加速度の相互相関係数のピーク値の正負で結果を大別している。

高速道路の車線幅は 3.6m である。車幅を 1.7m とすれば、約 1m の横ずれ量が走行車線をはみ出したことに対応する。車両の応答加速度とハンドル操舵角加速度の相互相関係数のピーク値が正の被験者は走行軌跡に大きな横ずれ量が見られている。一方、負のピーク値を示した被験者の横ずれ量は車線をはみ出すほど大きなものにはなっていない。地表面地震動に El Centro 記録を用いた場合でも同様の結果が得られている。

現在までに、車両の運動と運転者の車両制御の相互作用を考慮できる数値モデルがいくつか提案されている¹¹⁾。本研究では、吉本²⁰⁾により提案された「二次予測モデル」を使用して、運転者の反応を含めた地震時の車両走行のシミュレーションを行った。二次予測モデルでは、運転者は現在の位置および速

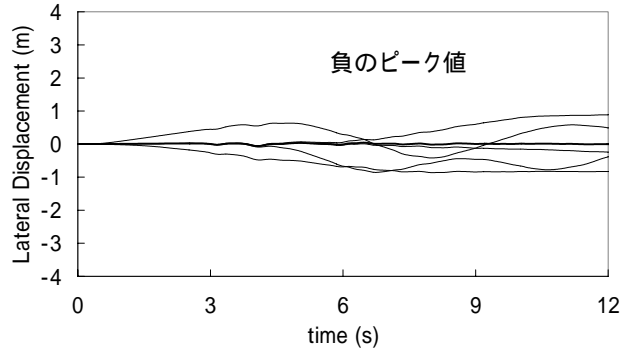
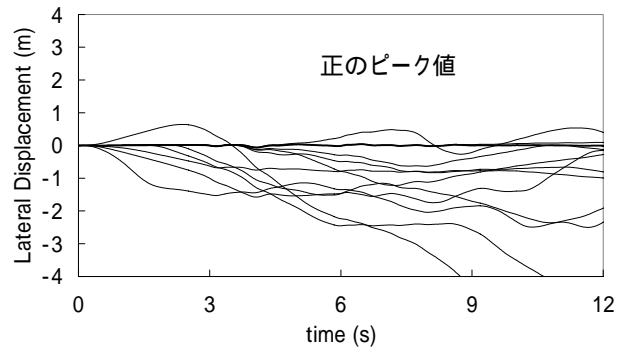


図-13 実験 2 の被験者の地震時の車両の走行軌跡 (細線) と運転者の反応を考慮していない応答解析による車両の走行軌跡 (太線) (神戸海洋気象台記録PGA400cm/s²)

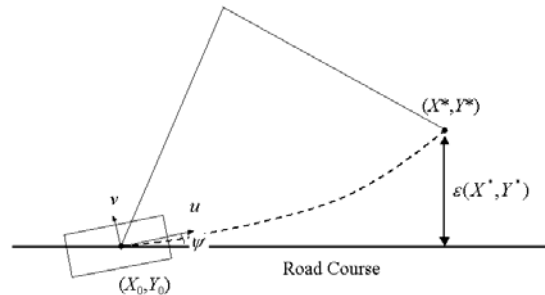


図-14 二次予測による前方誤差補正モデル

度方向だけでなく、速度方向の変化も視界が回転することや横加速度を受けることから感知できるものとし、図-14 に示すように自動車 が 現位置 (X_0, Y_0) から将来 τ 秒このまま走行した場合に到達する位置 (X^*, Y^*) は容易に予測できると仮定している。時刻 τ 秒後の予測位置は以下のように書ける。

$$X^* = X_0 + \int_0^{\tau} \{u \cos(\psi + \dot{\psi}t) - v \sin(\psi + \dot{\psi}t)\} dt \quad (3a)$$

$$Y^* = Y_0 + \int_0^{\tau} \{u \sin(\psi + \dot{\psi}t) + v \cos(\psi + \dot{\psi}t)\} dt \quad (3b)$$

以上により求められた予測位置と目標コースとの偏差 ε を算出する。この偏差に比例した修正操舵を運転者は行う (比例定数 H) ものと仮定し、運転者の出力を操舵力とする。また、運転者は修正を離散的に行うものと考え、動作のサンプリング周期を T 秒とした場合、人間の伝達遅れは $T/2$ 秒と等価になる。得られた操舵力をもとに、式(4)からハンドル操舵角

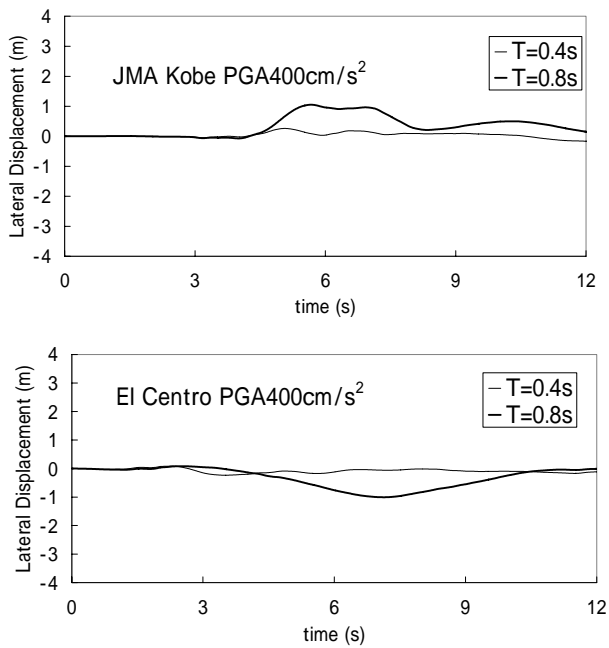


図-15 二次予測モデルにより算出した地震時の車両走行軌跡

表-3 二次予測モデルに用いたパラメータ

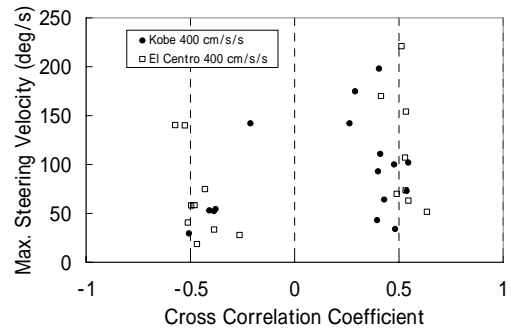
記号	定義	値	単位
H	ハンドル操舵比例定数	1.8	N/m
τ	予見時間	2.9	s
T	動作のサンプリング周期	0.4/0.8	s
I	操舵系の等価慣性係数	11.8	Nms ² /rad
C	操舵系の等価粘性係数	882	Nms/rad
n	ステアリング角度比	1/15	-
r	ステアリング半径	0.2	m

を算出する。

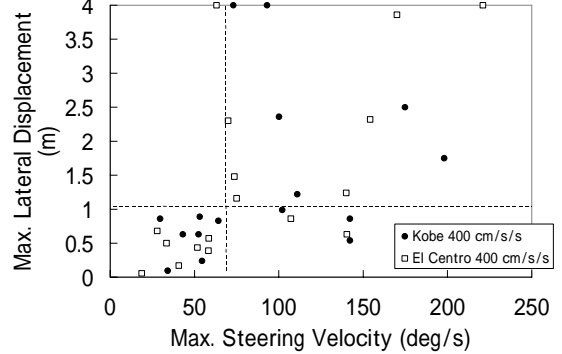
$$I n \frac{d^2 A}{dt^2} + C n \frac{dA}{dt} + K_{st} (nA - \delta_r) = \frac{fr}{n} \quad (4)$$

ここで、 I は操舵系の等価慣性係数、 n はステアリング角度比、 C は等価粘性係数、 K_{st} は等価弾性係数、 A はハンドル操舵角、 $f_r (= H\varepsilon)$ は運転者のハンドル操舵力、 r はステアリング半径である。

図-11 より、運転者の地震動に対する反応の時間遅れは相互相関係数のピーク値が負の被験者で約 0.2 秒、正の被験者で約 0.4 秒と評価されるので、 T を 0.4, 0.8 秒として地震時の車両の走行軌跡を算出した。その結果を図-15 に示す。また、算出に用いた各パラメータを表-3 に示す。ここに載せていないパラメータは著者らの先行研究⁶⁾と同一の値である。これによると、 T が大きい場合に大きな横ずれ量を走行車両が生じていることが分かる。このことから、大きな反応の時間遅れを有する運転者は、地震時に車線をはみ出してしまふ傾向が大きいものと考えられ、図-11 と図-13 の結果と一致する。すなわち、車両応答加速度とハンドル操舵角加速度の相互相関係数のピーク値が正の被験者ほど反応の時間遅れが大きく、その結果車両の横ずれ量が大きくな



(a) ハンドル操舵速度と相互相関係数の関係



(b) ハンドル操舵速度と最大横変位量の関係

(*は、加震時に走行レーンを変更してしまった被験者)

図-16 ハンドル操舵速度と相互相関係数、最大横変位量の関係

ったものと考えられる。

図-16(a)に、ハンドル操舵角速度最大値と式(1)より算出した相互相関係数のピーク値の関係を示す。これによると、相互相関係数のピーク値が正の被験者のハンドル操舵角速度最大値がピーク値が負の被験者よりも大きくなっていることが分かる。このような過大なハンドル操舵も、相互相関係数のピーク値が正の被験者が走行軌跡に大きな横ずれ量を生じた理由の一つであると考えられる。逆に、相互相関係数のピーク値が負の被験者は、ハンドル操舵を細かく、すばやく地震に対応することで、反応の時間遅れも小さく、操舵量が過大になることなく車線内の走行を維持できたものと言える。

ハンドル操舵角速度と車両の横変位量の関係(図-16(b))では、ハンドル操舵速度が 60deg/s 程度以下のとき車線をはみ出した(横変位量が 1m 以上)被験者がいなかったことが読み取れる。この結果と図-7 を考え合わせると、計測震度 5.0 程度の地震動は車両の安定走行に支障を与えないものと考えられる。

4. 結論

本研究では、地震時の運転者の反応を定量的に評価することを目的にドライビングシミュレータを用いて地震時車両走行模擬実験を行った。

ハンドル操舵に着目し、実験結果を整理したとこ

る，免許歴の短い運転技術の未熟な被験者と，免許歴の長い高齢の被験者が地震動に対して過度な反応を示す傾向があることが分かった．また，運転者の大きな反応の時間遅れと過大なハンドル操舵が原因となり，地震動の影響で走行車両が車線にはみ出してしまふ現象が起こりうるという結果が得られた．したがって，周囲の交通状況によっては強震時に走行車両の接触や側面衝突事故が発生する可能性があるものと考えられる．

今後は，本検討を踏まえて，気象庁が提供予定のナウキャスト地震情報の高速道路システムへの応用を考え，運転者への地震動直前情報が車両走行安定性へ与える効果を検討していく予定である．

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) 山崎文雄，大西淳一，田山聡，高野辰雄：高速道路構造物に対する地震被害推定式の提案，第10回日本地震工学シンポジウム論文集，Vol. 3，pp.3491-3496，1998.
- 3) 杉田秀樹：道路及び河川施設における地震防災システムの現状，第1回リアルタイム地震防災シンポジウム論文集，pp. 31-36，1999.
- 4) 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.
- 5) 山之内宏安，山崎文雄：運転シミュレータを用いた地震時の走行安定性に関する検討，第25回地震工学研究発表会講演論文集，pp. 1049-1052，1999.
- 6) 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.
- 7) Hiramatsu, K., Satoh, K., Uno, H. and Soma, H.: The First Step of Motion System Realization in the JARI Driving Simulator, *Symposium on Advanced Vehicle Control '94*, pp.99-104, 1994.
- 8) 山村智弘，牧田光弘，久家伸友，佐原浩介：日産ドライビング・シミュレータの開発，日産技報，Vol. 41，pp. 39-42，1997.
- 9) 椎葉太一，須田義大：マルチボディ車両モデルを用いたドライビングシミュレータによる乗り心地特性の評価，日本機械学会，第10回交通・物流部門大会，pp. 91-94，2001.
- 10) 平沢隆之，林哲也，須田義大：ドライビング・シミュレータを用いた鉄道車両快適性評価プラットフォームの構築，日本機械学会，第10回交通・物流部門大会，pp. 383-386，2001.
- 11) 安部正人：自動車の運動と制御，山海堂，1996.
- 12) 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時車両走行模擬実験，第11回日本地震工学シンポジウム論文集，pp. 2283-2288，2002.
- 13) 片山恒雄，山崎文雄，永田茂，佐藤暢彦：高密度三次元アレーによる地震動観測と記録のデータベース化，土木学会論文集，No. 422/I-14，pp. 361-369，1990.
- 14) 日本建築学会近畿支部耐震構造研究部：1995年兵庫県南部地震強震記録資料集，1996.
- 15) 鈴木桂輔，相馬仁，平松金雄：横方向外乱入力時のドライバの操舵特性 - 横方向余裕時間の解析 - ，自動車研究，Vol.21，No.3，pp. 23-26，1999.
- 16) Maruyama, Y. and Yamazaki, F.: Seismic response analysis on the stability of running vehicles, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 31, pp. 1915-1932, 2002.
- 17) 気象庁：震度を知る，ぎょうせい，1996.
- 18) 西田泰：高齢運転者の運転特性，自動車研究，Vol. 52，No. 4，pp. 15-20，1998.
- 19) 日野幹雄：スペクトル解析，朝倉書店，1988.
- 20) 吉本堅一：予測を含む操舵モデルによる人間自動車系のシミュレーション，日本機械学会誌，Vol. 71，No. 596，pp. 13-18，1968.

(2003. 6. 23 受付)

STUDY ON THE CHARACTERISTICS OF DRIVER'S RESPONSES DURING STRONG SHAKING USING DRIVING SIMULATOR

Yoshihisa MARUYAMA and Fumio YAMAZAKI

In order to investigate the drivers' reactions during an earthquake, a series of virtual tests were conducted using a driving simulator. This driving simulator has six servomotor-powered electric actuators and they control its motions. Several types of tests were carried out for different examinees, and the drivers' responses while controlling the simulator under seismic motion were investigated. It is observed that a larger response time lag to strong shaking and over-turning the steering wheel resulted to shift the vehicle into the next lane. According to this finding, it can be said that traffic accidents may occur under strong ground shaking in case of heavy traffic.