

走行車両の地震応答加速度と運転者ハンドル操舵の関係

Relationship between the Seismically Induced Acceleration of a Running Vehicle and the Steering Velocity of a Driver

丸山喜久*・山崎文雄*

Yoshihisa MARUYAMA and Fumio YAMAZAKI

1. はじめに

著者らは、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^{1,2)}を用いて地震時の運転者の反応を定量的に評価するために、地震時車両走行模擬実験を行っている³⁾。これまで、被験者の免許歴や運転頻度に着目し、地震動強さと急ハンドルの度合いの関係を評価してきた。本稿では、走行車両の横方向応答加速度と被験者のハンドル操舵角加速度の関係について、車両の振動と被験者の反応の時間ずれや周波数応答特性について検討を行った。

2. 地震時車両走行模擬実験の概要

図1に本研究で使用したドライビングシミュレータを示す。このドライビングシミュレータは(株)三菱プレジジョンによって開発された訓練/研究用ドライビングシミュレータである。運転者の前方には3面のスクリーンが搭載されており、高速道路の模擬風景が映し出される。また、併走車両の挿入も可能であり、現実感の高い運転シミュレーションが可能になるものと期待できる。このドライビングシミュレータには、6軸の動揺装置が搭載されており、運転者に重力を作用させ加速感を与えている。

本研究では、ドライビングシミュレータの制御システムを改良し、地震応答解析によって得られた走行車両の絶対応答変位を動揺装置システムに送ることで地震時の運転体験が可能になるようにした。変位レベルでシミュレータのモーションを制御しているが、シミュレータにより再現されるモーションと入力したモーションを加速度レベルで比較すると、8 Hz程度までは比較的精度良くモーションが再現できていることを確認している³⁾。

地震時車両走行模擬実験の被験者として、幅広い年齢層(表1)の33名(男性29名、女性4名)に協力いただいた。図2に実験における車両の走行状況を示す。2車線道

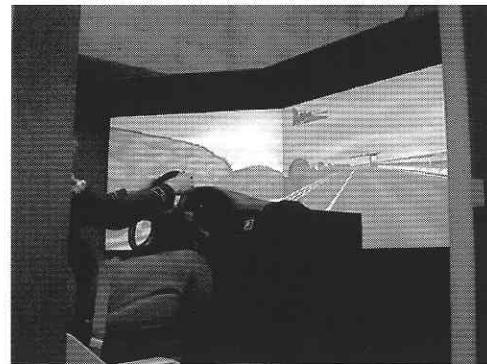


図1 本研究で使用したドライビングシミュレータ

表1 被験者の年齢の分布

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

路において、被験者は左側の車線を走行した。また、被験者車両のまわりには図2に示すように3台の併走車両を挿入した。加震位置は、シナリオコースの直線路部分とし、16名の被験者には0.2-5 Hzのフィルター波である兵庫県南部地震における神戸海洋気象台記録の最大加速度(PGA)を400 cm/s²にスケーリングした地表面地震動に対する走行車両の絶対応答を、17名には0.2-3 Hzのフィルター波であるインペリアルバレー地震におけるEl Centro記録のPGA 400 cm/s²に対する絶対応答を入力した。走行車両の絶対応答加速度は地表面地震動の計測震度と最も相関が高い⁴⁾ことが分かっており、これら2地震の計測震度は共に

*東京大学生産技術研究所 人間・社会部門

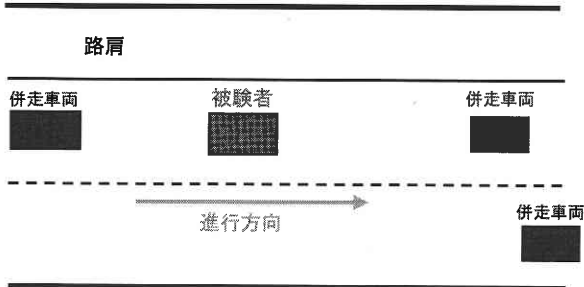


図2 実験における車両の走行状況

5.9である。実験中の運転者の反応をシミュレータの付加PCで記録した。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。

3. 車両横方向応答加速度とハンドル操舵の関係

実験終了後に各被験者にアンケート調査を行っている。地震動の影響で車両のどの方向の揺れを最も強く感じたかを調査した結果を表2に示す。入力地震動が神戸海洋気象台記録のときは半数の被験者が、El Centro記録のときは約2/3の被験者が左右方向の揺れを最も感じたと答えている。Kawashima *et al.*⁵⁾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おり、この結果でも、日本海中部地震では約2/3の運転者が、千葉県東方沖地震では約半数の運転者が車両横方向の振動の影響が大きかったと答えている。このことから、車両横方向の振動が運転者の反応と何らかの関係があるものと考えられる。

そこで、図3に示す車両横方向の地表面地震動に対する絶対応答加速度と、運転者のハンドル操舵角加速度の関係に着目し検討を行った。解析対象時間は、神戸海洋気象台記録については時刻3-9秒、El Centro記録については0-6秒の地震動の主要動部分6秒間とした。この6秒間については、車両の応答量も大きく、運転者の反応に外乱の影響が意識的な反応よりも強く出るものと考えられる。

まず、車両横方向絶対応答加速度と各被験者のハンドル操舵角加速度の相互相関係数⁶⁾を計算した(図4)。これらの相互相関係数のピーク値(図4の矢印)とそのときの時間ずれ τ を読みとった。その結果を図5に示す。正の相関を示している被験者は、車両の応答加速度と同じ方向にハンドルを操舵している被験者と考えられ、逆に負の相関を示している被験者は応答加速度と逆方向にハンドルを操舵しているものと考えられる。これによると、ほとんどの被験者について相互相関係数のピーク値を示すときの時間ずれ τ は0.2-0.5秒程度である。鈴木ら⁷⁾は、ドライビングシ

表2 最も強く感じられた車両の振動方向

振動方向	JMA Kobe	El Centro
前後方向	0	2
左右方向	8	11
上下方向	4	2
どの方向もそれほど感じなかった	4	2

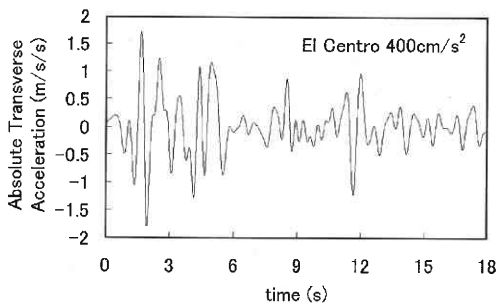
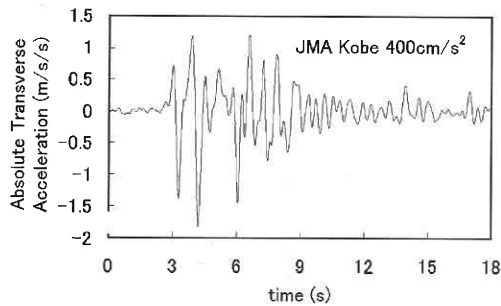


図3 車両横方向の地表面地震動 (PGA400 cm/s²) に対する絶対応答加速度 (上:神戸海洋気象台記録, 下: El Centro 記録)

ミュレータを用いた実験で、車両横方向に外乱入力時から車線逸脱回避のためのハンドル操舵が起きるまで時間間隔を評価している。その時間間隔は、車両横方向の外乱が大きくなると約0.4秒を示しており、本研究で算出した被験者の時間ずれとほぼ一致している。また、入力地震動によらず負の相関を示している被験者の時間ずれは、正の相関を示しているものよりも大きくなる傾向が強いことが分かる。今回の実験結果では、正の相関を示している被験者の横方向加速度に対するハンドル操舵の時間ずれは0.2秒程度、負の相関を示している被験者の時間ずれは0.4秒程度となっている。

被験者のハンドル操舵の周波数特性を調べるために、車両横方向絶対応答加速度と被験者ハンドル操舵角加速度の伝達関数を式(1)より計算した。

研 究 速 報

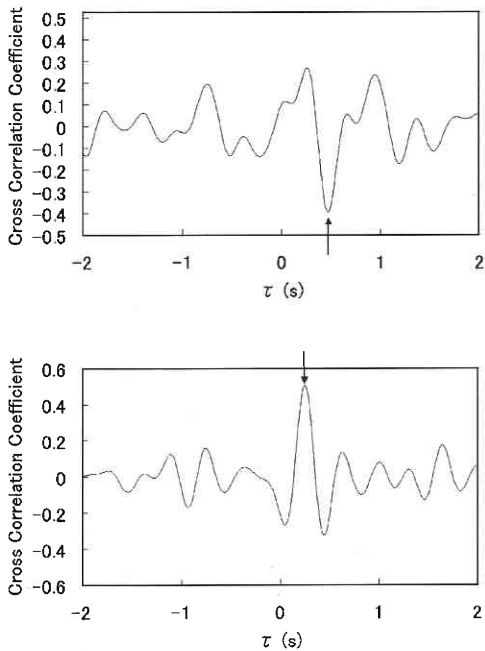


図 4 車両横方向応答加速度とハンドル操舵角加速度の相互相関係数 (神戸海洋気象台記録, PGA400 cm/s²)

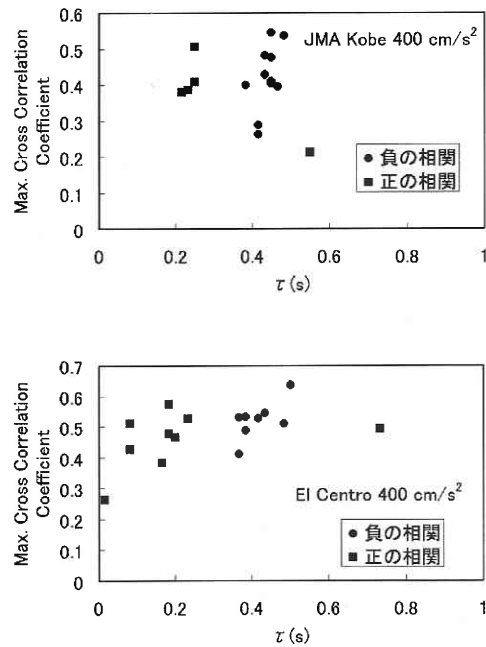


図 5 車両横方向絶対応答加速度とハンドル操舵角加速度の相互相関係数のピーク値 (上: 神戸海洋気象台記録, 下: El Centro 記録)

$$H(f) = S_{xy}(f) / S_{xx}(f) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 S_{xy} は車両応答加速度とハンドル角加速度のクロススペクトル、 S_{xx} は車両応答加速度のパワースペクトルである。いずれのスペクトルもバンド幅 0.45 Hz の Parzen ウィンドウ⁶⁾ で平滑化している。図 6 に神戸海洋気象台記録を用いた結果について示す。これによると、3-4 Hz 程度にピークのある伝達関数が得られている。El Centro 記録についても同様であった。

式 (2)-(4) より、各被験者の車両の走行軌跡を算出した。

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

$$\dot{\psi} = \dot{\psi}_{seism} + \dot{\psi}_{driver} \dots\dots\dots (3)$$

$$\dot{Y} = u \sin \psi + v \cos \psi \dots\dots\dots (4)$$

ここで、添字 *seism* は地表面地震動に対する車両の相対応答を、*driver* は運転者の地震動に対する反応 (ドライビングシミュレータの付加 PC で記録したもの) を表している。 v は車両横速度、 $\dot{\psi}$ は z 軸の回転角であるヨー角速度である。 Y は絶対座標系の車両の相対横変位量を示す。これは、被験者が走行車線からはみ出したかどうかを判定す

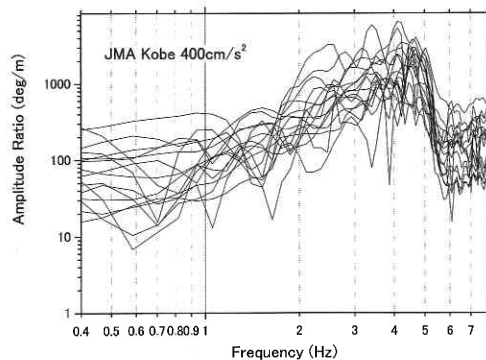


図 6 車両横方向絶対応答加速度とハンドル操舵角加速度の伝達関数 (神戸海洋気象台記録, PGA400 cm/s²)

ることのできる指標である。式 (4) の u は車両の前後速度であるが、 u_{seism} の値は非常に小さいので、 u_{driver} の値をそのまま用いて算出している。

図 7 に El Centro 記録を用いた場合の各被験者の相対横変位量を示す。ここでは、図 5 に示した検討で正の相関を示した被験者と負の相関を示した被験者を分けてグラフ化している。グラフの太線は運転者の反応を考慮していない解析の結果⁸⁾を示している。これによると、横方向応答加速度とハンドル操舵が正の相関を示していた被験者よりも、負の相関を示している被験者の方が大きな相対横変位

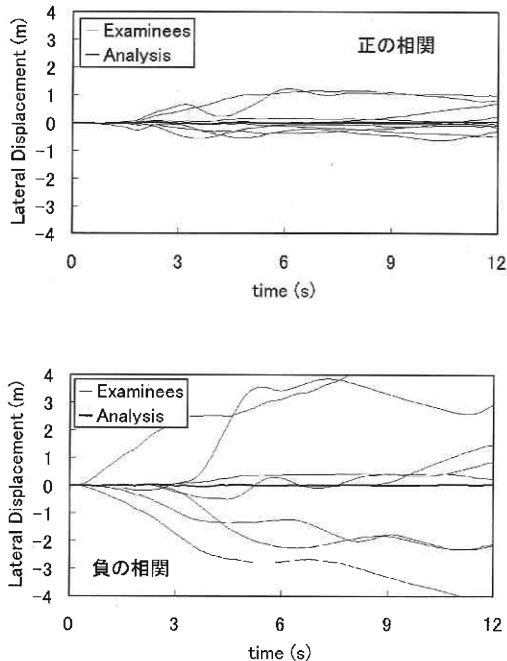


図7 車両の相対横変位量 (El Centro 記録) (上：相関係数のピーク値が正の被験者，下：負の被験者)

量を生じていることが見て取れる。高速道路の車線幅は 3.6 m^9 である。図7は重心位置の走行軌跡を示しており、車幅を約 1.7 m とすると、相対横変位量が約 0.9 m を越えていた場合、その被験者は車線を逸脱したものと考えられる。以上の仮定で車線逸脱判定を行うと、正の相関を示している被験者は、9名中2名の被験者がわずかに車線をはみ出している。一方、負の相関を示している被験者は、8名中6名が車線から逸脱しているものと考えられる。正の相関を示した被験者と、負の相関を示した被験者のハンドル操舵角速度最大値の大きさを比べると、負の相関を示した被験者の方が大きかった。このことから、負の相関を示した被験者は、震動の影響により車両応答と逆の方向へハンドルを過度に操舵してしまい、車線を逸脱したものと考えられる。

4. ま と め

本研究では、ドライビングシミュレータで行った地震時車両走行模擬実験の結果から車両横方向の絶対応答加速度と被験者のハンドル操舵角加速度の関係について検討を行った。車両横方向応答加速度とハンドル操舵角加速度との相互相関係数の正負で車両の走行軌跡を大別すると、正の相関を示した被験者の車両相対横変位量は非常に小さく、車線を逸脱しなかったものと判断できるが、負の相関を示

した被験者の車線逸脱可能性が大きいことが分かった。この原因は、負の相関を示している被験者のハンドル操舵角速度が正の相関を示している被験者よりも大きくなっていることであると考えられる。つまり、車両横方向応答加速度とハンドル操舵の相互相関係数に負のピークが見られる被験者は、地震動の影響を受け応答加速度とは逆方向に過度にハンドルを操舵する傾向が強く、そのため車線を逸脱してしまったものと考えられる。また、このことは、被験者の反応の時間遅れにも影響し、正の相関を示している被験者よりも時間ずれが若干大きくなっている。

今後は、ハンドル操舵だけでなく、ブレーキの影響を検討していくと共に、このような被験者の車両横方向応答加速度への反応特性を踏まえ、震動の影響を考慮した“人間-自動車系”ハンドル操舵モデルの構築を検討していきたいと考えている。

謝 辞

本研究は、笹川科学研究助成の援助を受けている。記して謝意を表する。

(2002年9月17日受理)

参 考 文 献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 丸山喜久, 山崎文雄: ハンドル操舵角速度に着目した地震時運転者の反応評価, 生産研究, 東京大学生産技術研究所, Vol. 54, No. 5, pp. 49-52, 2002.
- 4) Maruyama, Y. and Yamazaki, F.: Seismic response analysis on the stability of running vehicles, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 31, pp. 1915-1932, 2002.
- 5) 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.
- 6) 日野幹雄: スペクトル解析, 朝倉書店, 1988.
- 7) 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—, 自動車技術会論文集, Vol. 30, No. 4, pp. 73-78, 1999.
- 8) 丸山喜久, 山崎文雄, 山之内安宏: 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.
- 9) 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.