

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

Evaluation of the Drivers' Responses during an Earthquake Focusing on the Steering Velocity

丸 山 喜 久*・山 崎 文 雄*

Yoshihisa MARUYAMA and Fumio YAMAZAKI

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⁾。一方、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⁾。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。

しかしながら、基準の見直しの検討を行うにあたっては、震動の影響で運転者が事故を生じてしまうことも否定できず、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。

そこで、著者らは、6 自由度車両モデルを構築し走行車両の地震応答解析を行い地震動が走行車両に与える影響を検討してきた³⁾。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おり、東京大学生産技術研究所にも、このような最新のドライビングシミュレータが導入された⁴⁾。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しており、さまざまな研究目的で使用されている⁵⁾。本研究では、地震動が車両運転者に与える影響を検討するためにドライビングシミュレータの制御プログラムを改良し車両の地表地震動に対する絶対応答を入力できるようにした。さらに、被験者を集め実際に地震時走行模擬実験を行った。

2. ドライビングシミュレータへの地震応答の入力

図 1 に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を示す。また、図 2 にドライビングシミュレータのシステムの概要を示す。

*東京大学生産技術研究所 人間・社会部門

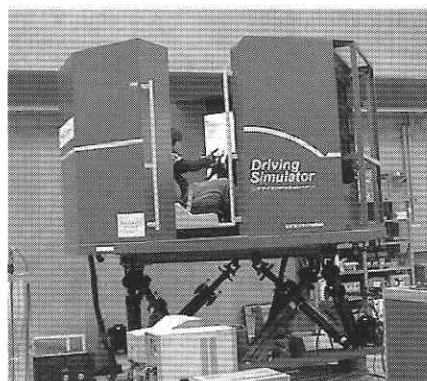


図 1 本研究で使したドライビングシミュレータ

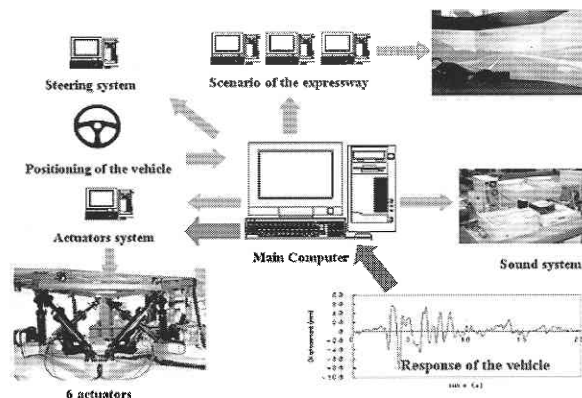


図 2 ドライビングシミュレータの構成

このシミュレータは (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、電動 6 軸動揺装置が装備されている。これらの動揺装置が運転者に重力を作用させることで加速感を生じさせる。ドライビングシミュレータのホストコンピュータが音響システム、映像システム、ステアリング反力システム、動揺装置制御システムにリンクしている。前方の 3 面スクリーンには高速道路の模擬風景が映し出される。このドライビング

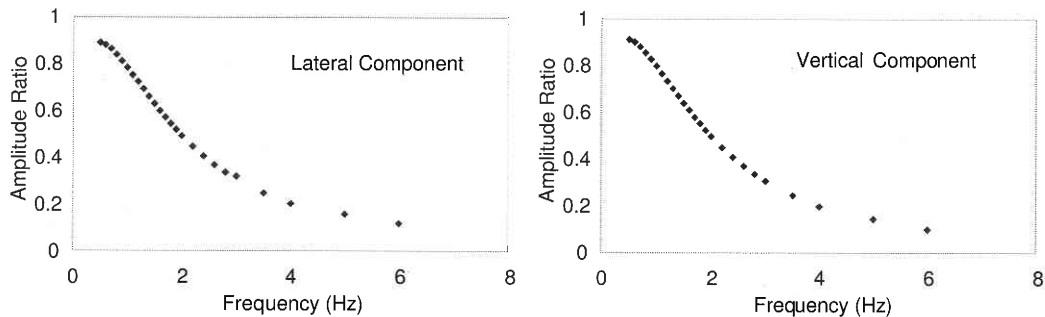
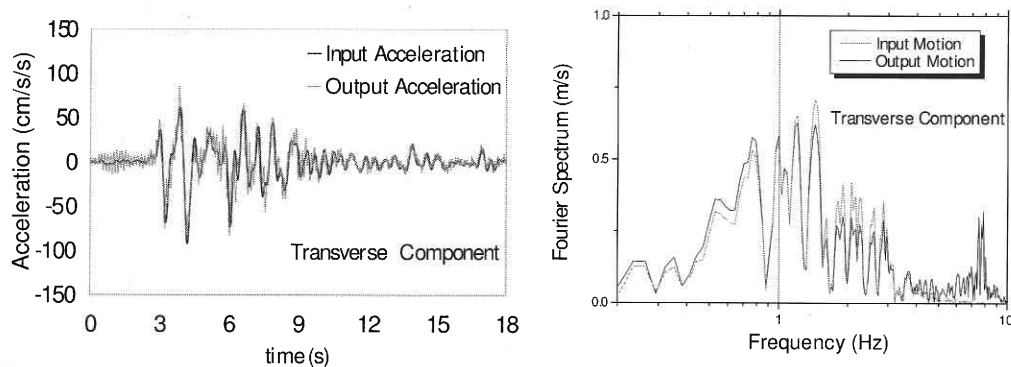


図3 入力正弦波と動揺装置により再現された出力正弦波の振幅比

図4 入力動と出力動の加速度時刻歴波形とフーリエスペクトルの比較 (JMA 神戸記録, $\text{PGA}=200 \text{ cm/s}^2$ にスケーリング)

シミュレータを用いることで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される。

本研究では、地震時の車両走行シミュレーションを行うためにドライビングシミュレータの制御プログラムを、動揺装置制御システムにホスト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ように改良した。ここで、入力する変位データは走行車両の地震応答解析³⁾より得られた絶対応答変位である。

まず、動揺装置によるモーションの再現性について検討した。ドライビングシミュレータのキャビン上に別途用意した加速度計を設置し、入力したモーションと再現されたモーションを比較した。図3に振幅 10 mm の正弦波を動揺装置に入力したときの入力正弦波と出力正弦波の振幅比を示す。これによると、入力正弦波の振動数が大きくなるほど動揺装置のモーションの再現性が低下してくることが分かる。しかしながら、入力しようとしている走行車両の地表地震動に対する絶対応答には高振動数域の成分は車両のサスペンションやタイヤの滑りなどの影響で車両には伝わりにくいことが分かっている³⁾。したがって、本研究の目的にはこのような動揺装置のモーションの再現性はそれほど影響しないものと判断した。事実、地震応答波形を入

力する際に図3の逆関数を入力動に乗じたところ、逆に波形の再現性が悪くなった。

次に、兵庫県南部地震における JMA 神戸記録の 0.2 Hz から 5 Hz までのフィルター波を最大加速度 (PGA) 200 cm/s^2 にスケーリングしたものを入力地震動とした車両の絶対応答変位を入力した場合について、図4に車両横方向の入力加速度と出力加速度の比較及びフーリエスペクトルの比較を示す。これによると、動揺装置を変位レベルで制御していることを考えると、加速度レベルでもある程度の精度でシミュレータを制御できているものと考えられる。ただし、ドライビングシミュレータが再現した加速度波形には 7-8 Hz の入力加速度には含まれていない高振動成分が見られる。入力動の高振動数域が卓越してくるにつれて、この現象の程度が大きくなってきていることを確認しており、このことから、7-8 Hz の振動はシミュレータの自励的な振動であるものと考えられる。逆に、入力動の高振動数域の成分が非常に小さいメキシコ SCT 記録を地表面地震動とした走行車両の絶対応答を入力した場合の入力動と出力動のフーリエスペクトルを比較すると 7-8 Hz 付近の自励振動の程度が小さいことを確認している。

3. 地震時車両走行の模擬実験

以上までの、動揺装置によるモーション再現性の検討から、0.2-5 Hz のフィルター波である兵庫県南部地震の JMA 神戸記録, 1985 年メキシコ地震のメキシコ SCT 記録, 0.2-3 Hz のフィルター波である 1940 年インペリアルバレー地震の El Centro 記録を入力地震動とした際の走行車両の絶対応答を動揺装置に入力し, 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を行った。

被験者にはあらかじめ実験の趣旨は伝え, ドライビングシミュレータの走行コースの左車線を車速 100 km/h で走行するように指示をした。また, 自車の前方, 後方, 右車線前方に併走車両を挿入し, 少しでもシミュレーションに現実感が高まるように工夫した。地震入力位置はシミュレータ走行コースの直線部分を利用した。実験中の被験者の地震動に対する反応をドライビングシミュレータの記録用 PC を用いて測定した。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。

まず, 被験者 10 名 (すべて東京大学生産技術研究所の学生) について地震動の強さが変化した場合, 運転者の地震時の反応にどのような影響が生じるかを検討した。具体的には, 各被験者に 3 回ずつ実験を行いその入力地震動を 0.2-5 Hz のフィルター波である JMA 神戸記録 PGA 200 cm/s^2 , 400 cm/s^2 , 600 cm/s^2 としたケース (case A) と, JMA 神戸記録 PGA 100 cm/s^2 , 400 cm/s^2 , 0.2-5 Hz のフィルター波であるメキシコ SCT 記録 PGA 100 cm/s^2 としたケース (case B) の 2 パターンを実施した。

本研究では, 地震時の運転者の反応を表す指標として, 急ハンドルの程度を表すことのできるハンドル操舵角速度, 特に最大ハンドル操舵角速度について着目した。この指標値は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ているものでもある⁶⁾。図 5 に, case A について, 地表地震動強さと運転者のハンドル操舵角速度最大値の関係を示す。ここでの地震動強さを表す指標値は最大加速度 (PGA) を用いている。これによると, 6 名の被験者のうちの一人を除き地震動強さが大きくなるとハンドルが取られるなどの影響で, ハンドル操舵角速度が大きくなる傾向が見て取れる。図 6 に case B について同様の関係を示す。ただし, ここでの地震動強さを表す指標値には計測震度を用いている。これによると, PGA を 100 cm/s^2 にスケーリングした JMA 神戸, メキシコ SCT 記録を地表地震動とした場合, 被験者 4 名のうち 3 名が計測震度の大きいメキシコ SCT 記録を入力したときに大きなハンドル操舵角速度を示していることが分かる。地震時の運転者に影響を与えるものと考えられる。

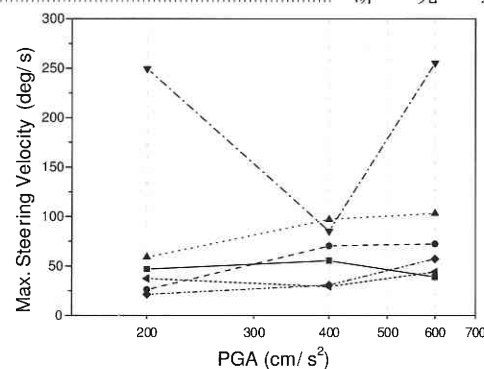


図5 地表地震動強さとハンドル操舵角速度最大値の関係 (case A)

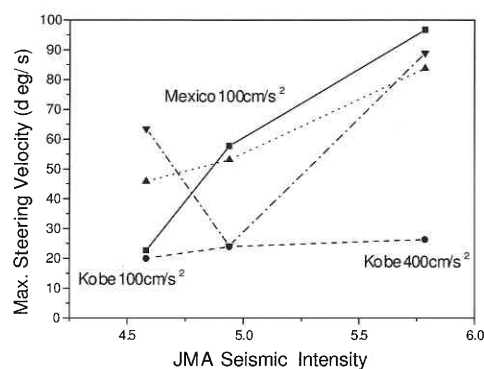


図6 地表地震動強さとハンドル操舵角速度最大値の関係 (case B)

走行車両の絶対応答加速度は, 入力地震動の計測震度と最も相関が高いことが分かっている⁷⁾。このことから, 計測震度の大きな地表地震動のときに運転者の急ハンドルの程度が大きくなるものと考えられる。また, 4 名中 1 名の被験者にこの傾向が見られなかったことは, case A, case B ともに同一の被験者に関して 3 回の走行模擬実験を行っており, 2 回目以降の走行にはある程度の慣れが生じたものとも考えられる。

次に, 被験者 33 名について 0.2-5 Hz のフィルター波である JMA 神戸記録, 0.2-3 Hz のフィルター波である El Centro 記録を PGA 400 cm/s^2 にスケーリングした入力地震動を用いて走行模擬実験を行った。図 7 に被験者の年齢の分布を示す。21-30 歳の若い年代の被験者も多いが, 全体の 1/4 が 51 歳以上となっており, 幅広い年齢層の被験者の協力を得ることができた。また, 各被験者に 1 回の実験を実施していることからシミュレータ慣れの影響は低いものとする。図 8, 図 9 に被験者の免許歴, 運転頻度とハンドル操舵角速度最大値の関係を示す。図 9 には, ハンドル操舵角速度最大値の平均値と標準偏差も併せて示す。これによると, 免許歴の短い被験者と, (免許歴の長い) 年

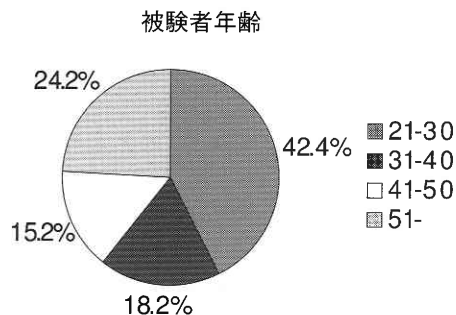


図7 被験者の年齢の分布

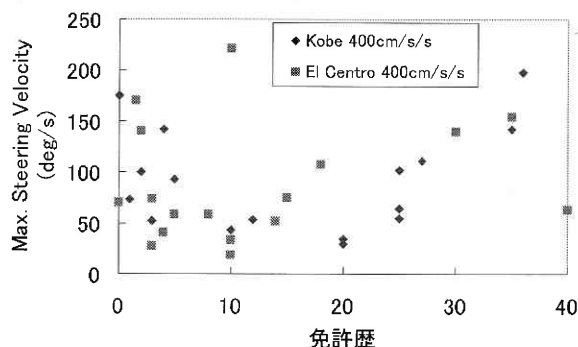


図8 被験者の免許歴とハンドル操舵角速度最大値の関係

年齢の高い運転者の急ハンドルの度合いが大きくなっていることが分かる。運転頻度との関係では、個人差が大きく見られるが、「週に2-3日」運転している被験者の急ハンドルの程度が小さい。

4. まとめと今後の課題

本研究では、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を用いて地震時の車両走行模擬実験を行い、ハンドル操舵角速度に着目し実験結果を整理した。その結果、地震動が大きくなるとハンドル操舵速度の最大値が大きくなる傾向が確認できるとともに、地震動強さを表す指標値については、最大加速度よりも計測震度の方が運転者の反応量との相関が高いように見られた。また、地震時の運転者の反応量を免許歴、運転頻度について整理すると、免許歴の短い運転技術の比較的未熟と考えられる被験者と、年齢の高い運転者のハンドル操舵速度の最大値が大きくなっていた。

今後の課題は、地震時車両走行模擬実験を更に行い地震時の運転者の反応を定量的に評価するとともに、震動の影

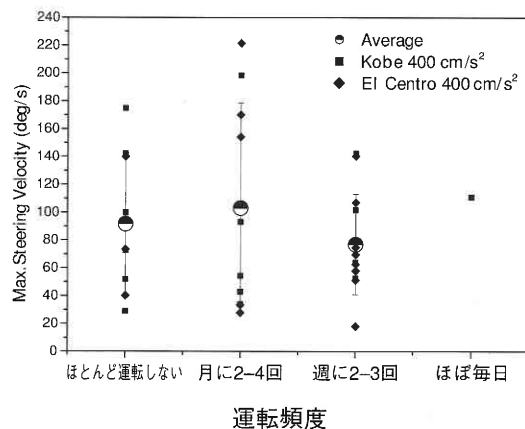


図9 被験者の運転頻度とハンドル操舵角速度最大値の関係

響を考慮した“人間—自動車系”操舵モデルの構築の可能性について検討していきたい。

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7月9日受理)

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) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) Maruyama, Y. and Yamazaki, F.: Seismic response analysis on the stability of running vehicles, Earthquake Engineering and Structural Dynamics (to appear).