

高速道路走行車両の地震応答解析

丸山 喜久¹・山崎 文雄²・山之内 宏安³

¹学生会員 工修 東京大学大学院社会基盤工学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

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

³正会員 工修 東京ガス北部導管事業部 (〒114-8535 東京都北区滝野川5-42)

我が国の高速道路では、1995年兵庫県南部地震以降、地震時通行規制の情報を得るための地震計ネットワークを増強している。しかしながら、高速道路構造物は現在の地震時通行止め基準程度の地震動では被害が発生しないことも近年の研究で明らかとなっており、地震時通行規制の緩和の検討が議論されるようになった。しかし、規制の緩和を行う前には、地震時に運転者が走行困難に感じて事故を起こす可能性も否定できず、地震動が車両に与える影響を調べる必要がある。そこで、本研究では、6自由度車両モデルを構築し、道路路面に3成分の地震動を入力して車両の地震応答解析を行い、地震動の特性が車両の応答にどのような影響を与えるかについてを検討した。

Key Words : vehicle model, seismic response analysis, expressways, yaw angle, driving simulator

1. はじめに

我が国の高速道路では、料金所付近の事務所内に地震計を設置しており¹⁾、これらの地震計によって記録された最大加速度 (PGA) を指標として、地震発生後の高速道路構造物の被害有無を確認するために、地震時通行規制が実施されている。現在の基準は、PGAが80Gal以上で通行止め、50Gal以上で速度規制となっている。

1995年兵庫県南部地震では、被害情報が早期に把握できなかったために、その後の救助活動や復旧活動に大きな支障をきたした²⁾。その反省から、現在では様々な機関が地震計ネットワークを整備しており³⁾⁷⁾、高速道路にも大幅に地震計が増設された。このため、大きな地震動が記録される確率が高まっている。また、比較的地盤条件の良くない地点にも地震計が設置されることもあり、その周辺の地震記録と比較して明らかに記録に違いが見られる観測点も幾つか存在する⁸⁾。このような背景から、近年では、通行規制が行われても、その後の点検で通行に支障をきたすような被害が発見されることは稀である。また、現在の地震時通行規制の基準程度の地震動では、高速道路構造物に被害が発生しないということも近年の研究⁹⁾で明らかになりつつある。したがって、現状の基準では、通行規制の効率性が失われるものと考えられ、地震時通行規制基準の見直しの検討が必要であると考えられる。

基準の見直しの検討を行うにあたっては、高速道路走行中の車両の運転者が地震発生時に運転操作を誤り、それを原因として交通事故が発生する可能性

についても考慮すべきと考えられる。このような走行車両の地震時の挙動に関する研究は、一部鉄道について行われている¹⁰⁾以外はあまり検討されておらず、むしろ渋滞中の自動車荷重が地震荷重と組み合わせられ、道路橋にどのような影響を与えるかが検討されることが多い¹¹⁾。一般に、平常時には容易にさせることが、地震時には平常心を失ったり、震動による影響で操作が困難に陥り、できなくなるものが考えられる。たとえば、Shibata et al.¹²⁾は、原子力発電所などの工業用プラントで地震が発生したことを想定し、地震時にオペレータが指示された通りにキーボードをタイプできるかどうかを2次元振動台の上にコンピュータを設置して実験を行い、どの程度の割合でミスタイプが発生するかを評価している。このような観点から、地震時の運転者の行動に関する検討を行うことは重要であると考えられる。

山之内・山崎¹³⁾は運転ゲーム機を2次元振動台の上に設置し、地震動が運転者に与える影響に関する実験を行っている。しかしながら、この実験で使用した運転ゲーム機は、ゲームセンターで利用されているものであり、現実感の面で不満が残る。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^{14), 15)}。このような、ドライビングシミュレータを使用することで、現実感の高い地震時の運転シミュレーションが可能になるものと期待される。また、最近、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。

したがって、本研究では、ドライビングシミュレ

ータを用いた模擬実験を行う前段階として、高速道路走行中を想定した車両の地震応答解析を行う。解析に当たっては、普通自動車を想定した6自由度の車両モデルを作成し、その車両モデルに3成分の地震動を作用させることによって、地震時の車両応答解析を行う。ここで、普通自動車を想定したのはドライビングシミュレータに搭載されたモデルが普通自動車を対象としているからである。入力地震動としては、スペクトル特性に注目して5組の実地震記録をスケールリングして用い、地震動振幅と車両モデルの水平方向への応答との関係について定量的に検討を行う。

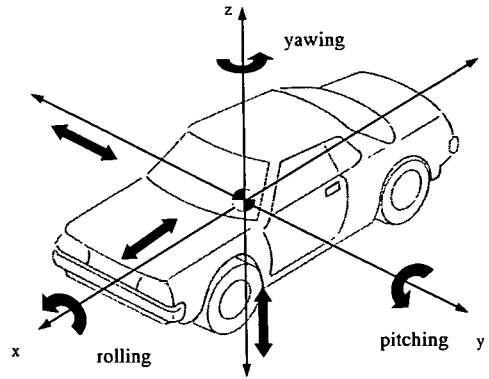


図-1 車両の基本運動

2. 6自由度車両モデル

(1) 車両の運動方程式

図-1に車両の基本運動を示す。ここでは、車両の重心位置を原点に車両の前後方向をx軸、左右方向をy軸、上下方向をz軸とする¹⁶⁾。この座標を基準とすると、運動の自由度はそれぞれの座標軸の並進方向と回転方向の6自由度になる。とくに、x軸回りのモーメントをローリング運動、y軸回りのモーメントをピッチング運動、z軸回りのモーメントをヨーイング運動と呼ぶ。図-2にこれらの6つの運動のうち上下方向の並進運動（バウニング運動）以外を記述するために用いた座標系と車両モデルを示す。車両の重心位置に固定されている座標系をx-y、地上に固定した座標系をX-Yとした。このとき、進行方向（x軸）並進運動、横方向（y軸）並進運動の運動方程式は以下になる¹⁷⁾。

$$\begin{aligned}
 m(\dot{u} - vr) &= \sum_i \sum_j (F_{xij} \cos \delta_{ij} - F_{yij} \sin \delta_{ij}) = \sum_{i,j} F'_{xij} \\
 m(\dot{v} + ur) &= \sum_i \sum_j (F_{xij} \sin \delta_{ij} + F_{yij} \cos \delta_{ij}) = \sum_{i,j} F'_{yij} \\
 &\quad (1a,b)
 \end{aligned}$$

ここで、 u はx軸方向速度、 v はy軸方向速度、 r はヨー角速度、 m は車両の慣性質量である。 δ_{ij} は車両固定座標とタイヤの向きとの角度差（前輪操舵角）を表す。また、 F_{xij} はタイヤに作用する駆動・制動力、 F_{yij} はタイヤの横力である。インデックスの*i*はタイヤの前後輪を表し、*j*は左右を表している。例えば、 F_{x11} は左前輪に作用する駆動・制動力である。また、z軸回りの回転運動は、以下のように記述できる。

$$\begin{aligned}
 I_z \ddot{\psi} &= (F'_{y11} + F'_{y12})l_f - (F'_{y21} + F'_{y22})l_r + (-F'_{x11} + F'_{x12})\frac{d}{2} \\
 &\quad + (-F'_{x21} + F'_{x22})\frac{d}{2} \quad (2)
 \end{aligned}$$

式(2)の l_f は車両重心位置と前輪車軸間の距離、 l_r は後輪車軸間の距離、 d は左右のタイヤ間距離（ト

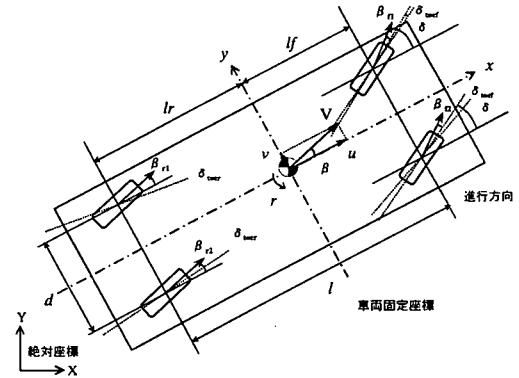


図-2 車両の座標系とモデル

レッド) である。

また、ロール角は式(3)、ピッチ角は式(4)のモーメントの釣り合い式から計算される。

$$\phi(K_\phi - mgh) = m(\dot{v} + ur)h \quad (3)$$

$$\theta K(l_f^2 + l_r^2) = m(\dot{u} - vr)h \quad (4)$$

ここで、 ϕ はロール角、 K_ϕ はサスペンションロール剛性係数、 θ はピッチ角、 K はサスペンションバネ定数である。また、ヨー角は以下のように表される。

$$\psi = \int r dt \quad (5)$$

上記の式(1)-(5)は全て車両に固定された座標系を用いた運動の記述である。そこで、以下に示す関係式を用いることで、絶対座標系の車両の速度に変換することができる。

$$\begin{aligned}
 \dot{X} &= u \cos \psi - v \sin \psi \\
 \dot{Y} &= u \sin \psi + v \cos \psi \quad (6)
 \end{aligned}$$

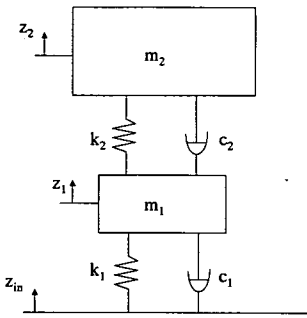


図-3 1/4 車両モデル

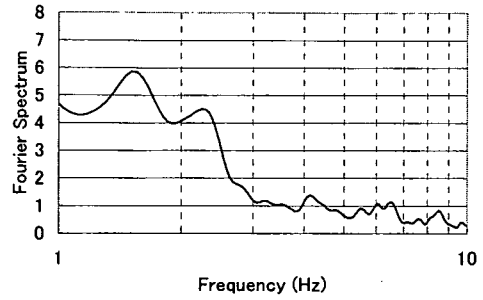


図-5 実車走行中の上下動速度フーリエ振幅

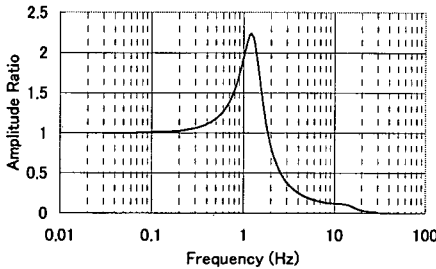


図-4 本研究で用いる路面とバネ上間の上下動伝達関数

表-1 日本製乗用車のバネ上・バネ下固有振動数の範囲¹⁷⁾

車種	バネ下固有振動数 (Hz)		バネ上固有振動数 (Hz)
	前輪系	後輪系	
軽自動車	13~17.5	13~16	1.5~2.1
大衆車	11~16	12~16	1.4~1.7
小型車	10~15.5	10~17.5	1.2~1.6
中型車	12~13.5	9~13	1.0~1.5

以上までで、バウンス運動以外の5つの自由度に関する運動は記述ができた。バウンス運動に関しては、図-3に示す1/4車両モデルを使用した¹⁸⁾。下のバネはタイヤの剛性を、上のバネはサスペンションバネ定数をそれぞれ表している。また、上の質点(バネ上)は車両本体質量を下の質点(バネ下)は車輪質量(タイヤ、ホイール、ブレーキパッド等を含む)を表している。前輪と後輪のバネ下の固有振動数は通常ほぼ等しいことから、このように車両を1/4に分割したモデルが上下振動を表す際には使用されている¹⁹⁾。このモデルをもとに、車両の上下方向の運動方程式を記述すると、式(7)のようになる。

$$m_1(\ddot{\xi}_1 + \ddot{z}_{in}) + c_1\dot{\xi}_1 + c_2(\dot{\xi}_1 - \dot{\xi}_2) + k_1\xi_1 + k_2(\xi_1 - \xi_2) = 0$$

$$m_2(\ddot{\xi}_2 + \ddot{z}_{in}) + c_2(\dot{\xi}_2 - \dot{\xi}_1) + k_2(\xi_2 - \xi_1) = 0 \quad (7a,b)$$

ここで、 z_{in} は路面からの上下動変位入力である。 ξ_1 、 ξ_2 は、それぞれバネ下、バネ上の地面に対する相対変位を表す($z_1 = \xi_1 + z_{in}$ 、 $z_2 = \xi_2 + z_{in}$)。車両のエンジンなどの振動も、路面からの入力同様加振源になるものと考えられるが、これらの駆動系の振動まで考えると、非常に複雑となるためにここでは、路面からの地震動入力に限って考えた。

式(7)より、 z_{in} に対する z_2 の伝達関数を計算すると、図-4に示すような周波数特性を持つ伝達関数が得られる。1.2Hz付近に見られる共振点がバネ上のものであり、13~14Hzに見られる共振点がバネ下のものである。また、人間の上下振動の共振振動数が3.5~6Hzに位置することから、この範囲のゲインの値が小さくなるように通常のサスペンションは設計されている。表-1に国産乗用車のバネ上、バネ下質量の上下動の固有振動数を示す。これらのサスペンションには様々なタイプのものが採用されているが、ほぼ車両の大きさによって区分できる値となっている。一般に車両が大きくなれば、バネ上、バネ下とも共振振動数が小さくなる傾向が見られる。本研究で、解析対象としている車両モデルは普通自動車(表-1の区分では小型車相当)であり、表-1のバネ上共振振動数の範囲に入っていることが分かる。また、本研究では、このモデルの妥当性を確認するために実際の自動車が走行中のときの上下方向の振動を加速度計で測定した。実車には本研究での解析対象と考えている車両モデルにほぼ近い小型車(ホンダCivic; 1500cc)を選択した。図-5に計測で得られた速度フーリエ振幅を示す。実際の自動車の上下振動の卓越周波数も1.5Hz付近に見られることが確認できる。

以上のようにこの車両モデルでは、バウンス運動を考慮することから車両の重心高を式(8)のように算出した。ここでは、 ξ_1 が ξ_2 に比べて充分小さいこと、バネ下質量の変化がバネ上共振には全く影響を与えないこと¹⁶⁾からバネ下の影響を無視している。

$$h = h_0 + \xi_2 \quad (8)$$

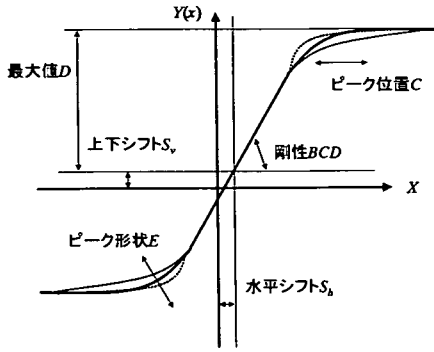


図-6 マジックフォーミュラモデルの定数

ここで、 h_0 は静止状態での車両の重心高である。

(2) マジックフォーミュラモデル

以上まで、車両の基本運動である6自由度の運動すべてが記述できた。バウニング運動以外の5つの運動を算出するにはタイヤに作用する力を算出する必要がある。式(1)の F_{xij} 、 F_{yij} はタイヤに作用する前後力、横力であるが、これらはそれぞれスリップ比、タイヤの横滑り角の関数である。

スリップ比は、運転者が車両の加減速をすることにより駆動輪に発生する。たとえば、スリップ比0は、車両が定常速度で運転されていることを示す。

横滑り角はタイヤの進行方向と回転面のなす角である。各タイヤの横滑り角は以下のように表される。

$$\beta_{11} = (V\beta + l_f r) / (V - dr/2) - \delta \quad (9a)$$

$$\beta_{12} = (V\beta + l_f r) / (V + dr/2) - \delta \quad (9b)$$

$$\beta_{21} = (V\beta - l_r r) / (V - dr/2) \quad (9c)$$

$$\beta_{22} = (V\beta - l_r r) / (V + dr/2) \quad (9d)$$

ここで、 β 、 v はそれぞれ、重心横滑り角、車両速度であり、以下のように表せる。

$$\beta = \arctan(v/|u|) \quad (10)$$

$$V = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (11)$$

式(9)で $|\beta|$ 、 $|l_f r/V|$ 、 $|l_r r/V|$ 、 $|dr/2V|$ が1よりも充分小さいと見なし、これらの2次以上の項は微小と見なすと、前輪、後輪の横滑り角は以下のように書ける¹⁶⁾。

$$\beta_f \approx \beta + l_f r/V - \delta \quad (12a)$$

$$\beta_r \approx \beta - l_r r/V \quad (12b)$$

本研究では、タイヤの力学モデルとして、マジックフォーミュラモデル²⁰⁾を使用した。式(13)にマジックフォーミュラモデルの一般式を示す。また、各

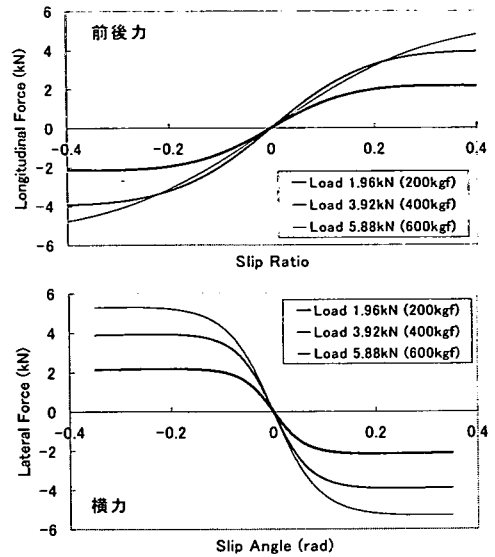


図-7 マジックフォーミュラモデルのタイヤ特性

係数の物理的な意味を図-6に示す。

$$y(x) = D \sin\{C \arctan\{Bx - E(Bx - \arctan(Bx))\}\} \quad (13a)$$

$$Y(x) = y(x) + S_v \quad (13b)$$

$$x = X + S_h \quad (13c)$$

ここで、 C はピーク位置、 D は出力の最大値、 E はピーク形状を表す係数であり、 B は剛性を表す BCD を C と D で割ることによって求める。また、 E については本研究のモデルでは0と定めている。

式(13b)の $Y(x)$ がマジックフォーミュラモデルの出力値に当たる。タイヤに作用する前後力(F_x)を算出する際には、式(13c)の入力値 X にスリップ比を用いる。また、タイヤに作用する横力(F_y)を計算する際には、入力値としてスリップ角(横滑り角)を用いる。

図-7に本研究で用いたマジックフォーミュラモデルのタイヤ特性を示す。本研究で用いたモデルでは、水平シフト(S_h)と上下シフト(S_v)は0に定めている。

横力(F_y)を算出するときは B 、 C 、 D は以下のように算出される。

$$BCD_y = a_3 \sin(2 \arctan(W_{ij}/a_4)) \quad (14a)$$

$$C_y = 1.3 \quad (14b)$$

$$D_y = W_{ij} (a_1 W_{ij} + a_2) \quad (14c)$$

$$B_y = BCD_y / C_y / D_y \quad (14d)$$

ここで、 W_{ij} は各タイヤの接地荷重を表す。ただし、横滑り角が正のとき、横力 F_y は負となるので、マジ

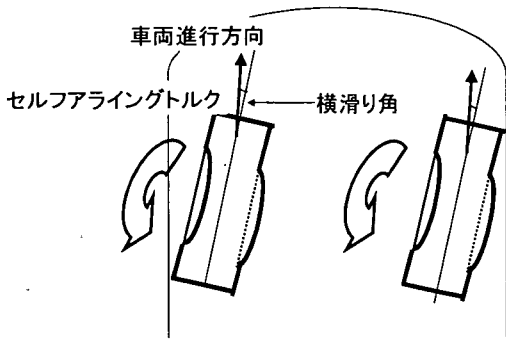


図-8 タイヤに作用するセルフアライメントトルク

ックフォーミュラモデルの出力値 $Y(x)$ にマイナスの符号を付ける。

同様に、前後力 (F_x) については式(15)のように算出する。

$$BCD_x = (b_3 W_{ij}^2 + b_4 W_{ij}) \exp(-b_5 W_{ij}) \quad (15a)$$

$$C_x = 1.65 \quad (15b)$$

$$D_x = W_{ij} (b_1 W_{ij} + b_2) \quad (15c)$$

$$B_x = BCD_x / C_x / D_x \quad (15d)$$

3. 車両の地震応答解析

(1) 車両に作用する地震力

本研究では、以上までで構築された6自由度の車両モデルに地震動を入力しなくてはならない。そこで、水平成分に関しては式(1)の車両の加速度を表す項を、地震動を加味した絶対加速度に変えることで、地震動を加味した^{21),22)}。式(16)に地震動の影響を考慮した車両水平成分の運動方程式を示す。

$$m_2(\ddot{u} - vr + \ddot{x} \cos \psi + \ddot{y} \sin \psi) = \sum_j \sum_i (F_{xij} \cos \delta_{ij} - F_{yij} \sin \delta_{ij}) = \sum_{i,j} F'_{xij}$$

$$m_2(\ddot{v} + ur - \ddot{x} \sin \psi + \ddot{y} \cos \psi) = \sum_j \sum_i (F_{xij} \sin \delta_{ij} + F_{yij} \cos \delta_{ij}) = \sum_{i,j} F'_{yij} \quad (16a,b)$$

ここで、 \ddot{x} 、 \ddot{y} は、それぞれ絶対座標系でのX、Y方向の地震による地動加速度である。式(1)の m にはバネ上質量を用いた。

地震動の鉛直成分に関しては、式(7)の \ddot{z}_{in} に地動加速度を代入した。また、バウンス運動、ローリング、ピッチング運動が生じると、各タイヤの接地荷重はこれらの運動に伴い変化する。前輪・後輪に作用する静的荷重は、式(17)のように書ける。

$$W_{i0f} = 0.5m_2gl_f / (l_f + l_r) + m_1g / 4 \quad (17a)$$

$$W_{i0r} = 0.5m_2gl_r / (l_f + l_r) + m_1g / 4 \quad (17b)$$

ここで、 f と r はそれぞれ前輪または後輪を表す。また、ローリング運動やピッチング運動が発生するとタイヤの接地荷重に次式のような変化が生じる。

$$W_{ir} = m_2(\dot{v} + ru)h/d \quad (18a)$$

$$W_{ip} = m_2(\dot{u} - rv)h / (l_f + l_r) \quad (18b)$$

ここで、 W_{ir} はローリング運動によるタイヤ接地荷重の変化、 W_{ip} はピッチング運動による変化を表す。式(17)、(18)より、ピッチング運動やローリング運動が発生しているときの各タイヤの接地荷重は式(19)のように書ける。

$$W_{i11} = W_{i0f} - (W_{ip} + W_{ir})/2 \quad (19a)$$

$$W_{i12} = W_{i0f} - (W_{ip} - W_{ir})/2 \quad (19b)$$

$$W_{i21} = W_{i0r} + (W_{ip} - W_{ir})/2 \quad (19c)$$

$$W_{i22} = W_{i0r} + (W_{ip} + W_{ir})/2 \quad (19d)$$

式(19)にバウンス運動の影響を考慮すると、式(20)のように書ける。

$$W_{ij}^{total} = W_{ij} - (k_1 \xi_1 + c_1 \dot{\xi}_1) / 4 \quad (20)$$

このように、バウンス運動などのサスペンションによる運動が車両に生じると、タイヤの接地荷重に変化が起こる。タイヤの接地荷重が変化すると、マジックフォーミュラモデルの出力値に影響する。

また、本解析プログラムではセルフアライメントトルク²³⁾というモーメント(図-8)も考慮に入れた。このモーメントはハンドルを切ったときにハンドルを元に戻す方向に作用するモーメントである。セルフアライメントトルクを算出するためのマジックフォーミュラモデルも存在するが、各パラメータの数値データが入手できなかった。そこで、セルフアライメントトルクは以下のように算出した。コーナリングフォースが発生しているときのタイヤの中心線とコーナリングフォースの着力点はわずかにずれている。このずれはタイヤの種類によっても異なるが、1~4 cm程度のものであり、ニューマチックトレール²³⁾と呼ばれる。このようにコーナリングフォースの着力点がずれていることからタイヤにはモーメントがはたらくものと考えられる。そこで、本研究ではニューマチックトレールと横滑り角の関係の数値データ(図-9)を用いて、これを線形補間することで、ニューマチックトレールの値を決め、タイヤに作用する横力を乗じてセルフアライメントトルクを算出した(図-10)。このモーメントをタイヤの横滑り角を少なくさせるように、式(21)のように前輪操舵角に作用させた。

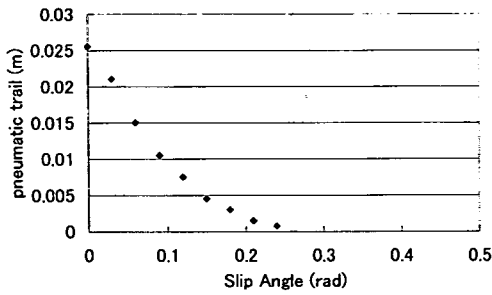


図-9 ニューマチックトレールと横滑り角の関係

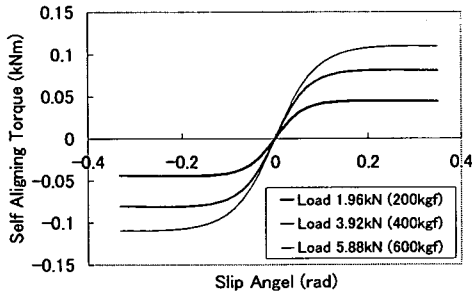
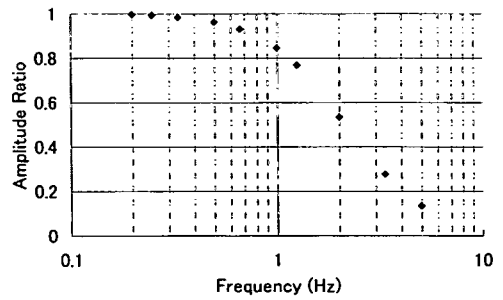


図-10 横滑り角とセルフアライニングトルクの関係

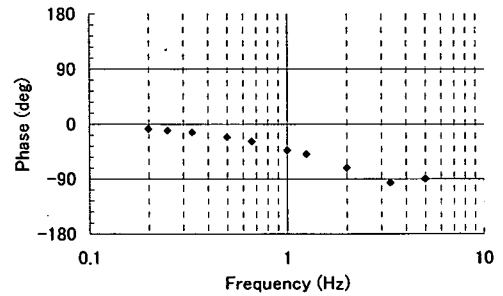
表-2 本研究で用いた車両モデルのパラメータ値

m_2	バネ上質量	1100kg
l_f	前輪軸と重心間の距離	1.0m
l_r	後輪軸と重心間の距離	1.635m
I_z	車両のヨー慣性モーメント	637kgm ²
h_0	車両静的時の重心高	0.35m
d	トレッド	1.505m
K_ϕ	サスペンションロール剛性係数	117.6kNm
K_{st}	ステアリング弾性係数	48.5kNm/rad
m_1	バネ下質量	100kg (4本で)
k_1	タイヤ縦バネ定数	784kN/m (4本で)
k_2	サスペンションバネ定数	68.6kN/m (4本で)
c_1	タイヤ減衰項	98Ns/m (4本で)
c_2	サスペンションバネ減衰項	4.9kNs/m (4本で)
a_1	マジックフォーミュラモデル定数	-0.0005
a_2	マジックフォーミュラモデル定数	1.2
a_3	マジックフォーミュラモデル定数	6256.0
a_4	マジックフォーミュラモデル定数	612.0
b_1	マジックフォーミュラモデル定数	-0.0005
b_2	マジックフォーミュラモデル定数	1.2
b_3	マジックフォーミュラモデル定数	0.1
b_4	マジックフォーミュラモデル定数	0.8
b_5	マジックフォーミュラモデル定数	0.005

$$\delta = (SAT_{11} + SAT_{12}) / K_{st} \quad (21)$$



(a) 振幅比



(b) 位相遅れ

図-11 正弦波入力時の絶対応答加速度と入力加速度の振幅比と位相遅れ

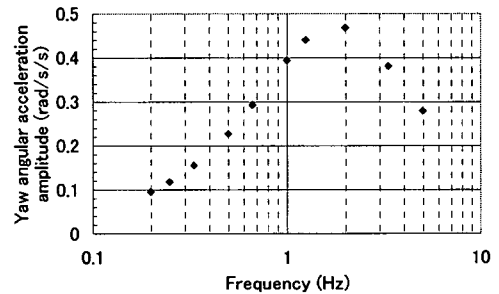


図-12 正弦波入力時のヨー角加速度の振幅

ここで、 SAT はセルフアライニングトルクを表し、 K_{st} はステアリングの弾性係数である。このモーメントは車両の地震時の応答を安定させる要素であると考えられる。

(2) 車両モデルの各パラメータ

本研究で作成した車両モデルの各パラメータを表-2に示す。各パラメータは(株)三菱プレジジョンによって開発されたドライビングシミュレータに搭載されたパラメータと一致させている。しかしながら、このドライビングシミュレータは上下方向の運動には対応しておらず、図-4に示した路面入力とバネ上の伝達関数を計算するのに必要なサスペンションのバネ定数は参考文献^{18), 19)}等を参考に独自に

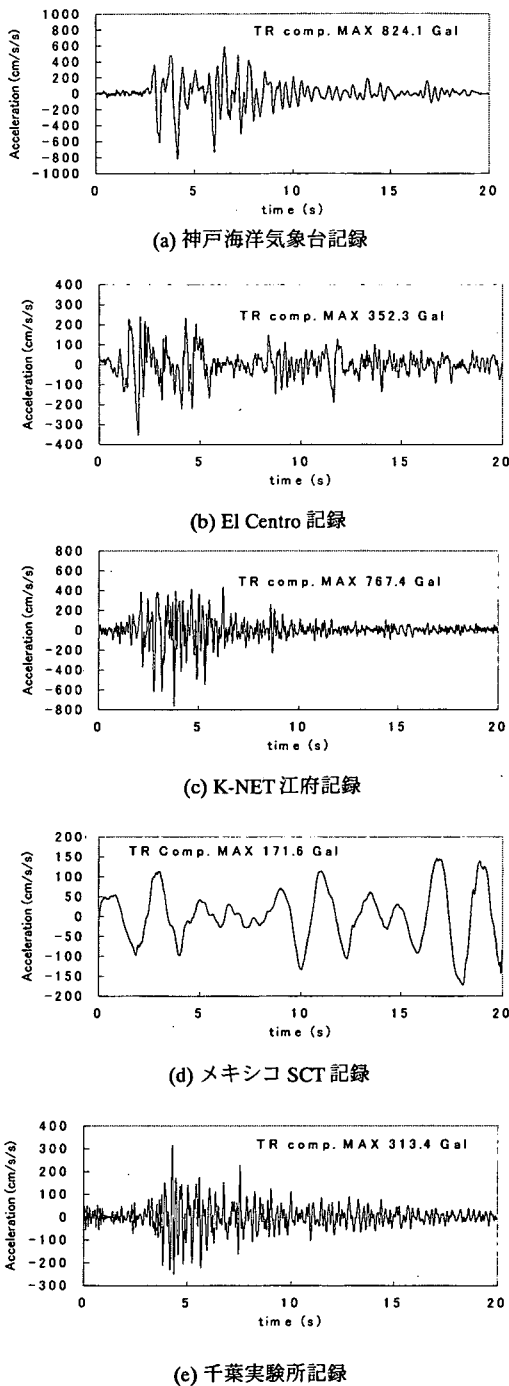


図-13 車両の横方向に加えた地震動加速度波形

決定したものである。これらのパラメータ値は、普通自動車を想定した一般的な値が設定されている。

(3) 車両モデルの応答特性

本研究で作成された車両モデルの応答特性を評価

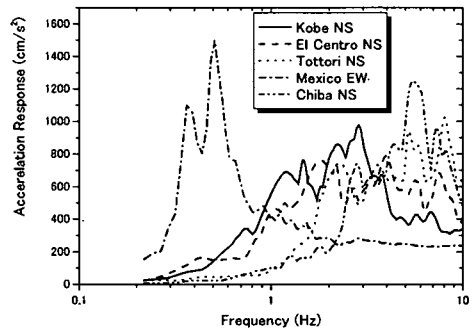


図-14 入力地震動 (PGA=300cm/s²) の加速度応答スペクトル (5%減衰)

するために、車両の初速度を100km/h、車両横方向に振幅を600cm/s²で一定とした様々な振動数の正弦波を入力し、車両の横方向絶対応答加速度と入力加速度の振幅比と位相遅れを計算した。その結果を図-11に示す。振動数の小さい範囲では振幅比はほぼ1.0に近い値を示しており位相差もあまり見られない。しかし、高振動数領域では振幅比が小さくなる傾向が見られ、位相遅れも大きくなっていく。また、入力加速度の振幅の値を変えても絶対加速度と入力加速度の振幅比はほぼ同じ値を示すことを確認しており、非線形性は見られていない。

同様に、振幅を600cm/s²で一定とした様々な振動数を持つ正弦波を入力したときのヨー角加速度の振幅を振動数ごとに図-12に示す。ヨー角加速度は入力正弦波の振動数が増加すると振幅値が大きくなる傾向があり、1-2Hzでピークになることが分かる。

(4) 地震応答解析結果

車両の地震応答解析を5つの実際の地震記録を用いて行った。入力はそのそれぞれの3成分の記録である。入力地震動には、1995年兵庫県南部地震の神戸海洋気象台記録²⁴⁾、1940年インペリアルバレー地震のEl Centro記録²⁵⁾、2000年鳥取県西部地震のK-NET江府記録²⁶⁾、1985年メキシコ地震のSCT記録²⁷⁾、1987年千葉県東方沖地震の東京大学生産技術研究所千葉実験所記録²⁸⁾を使用した。また、図-11に示した、車両モデルの応答特性をふまえて、入力地震動にはフィルターをかけて、振動数領域で0.2-10Hzの範囲で解析を行った。図-13に車両横方向に入力した地震記録の加速度波形を示す。

車両に地震動を加えるために、車両の横方向に加える地震記録の最大加速度 (PGA) でスケーリングを行った。図-14に最大加速度300cm/s²としたときのそれぞれの地震記録の減衰を5%とした加速度応答スペクトルを示す。メキシコ地震のSCT記録は、1Hz以下の低振動数域で大きな値を示している。

解析にあたって、車両の走行速度を100km/hとした。また、解析では運転者の反応等は考えておらず、ハンドルを固定していない状態で考えている。図-15にPGA800cm/s²でスケーリングした各地震記録を

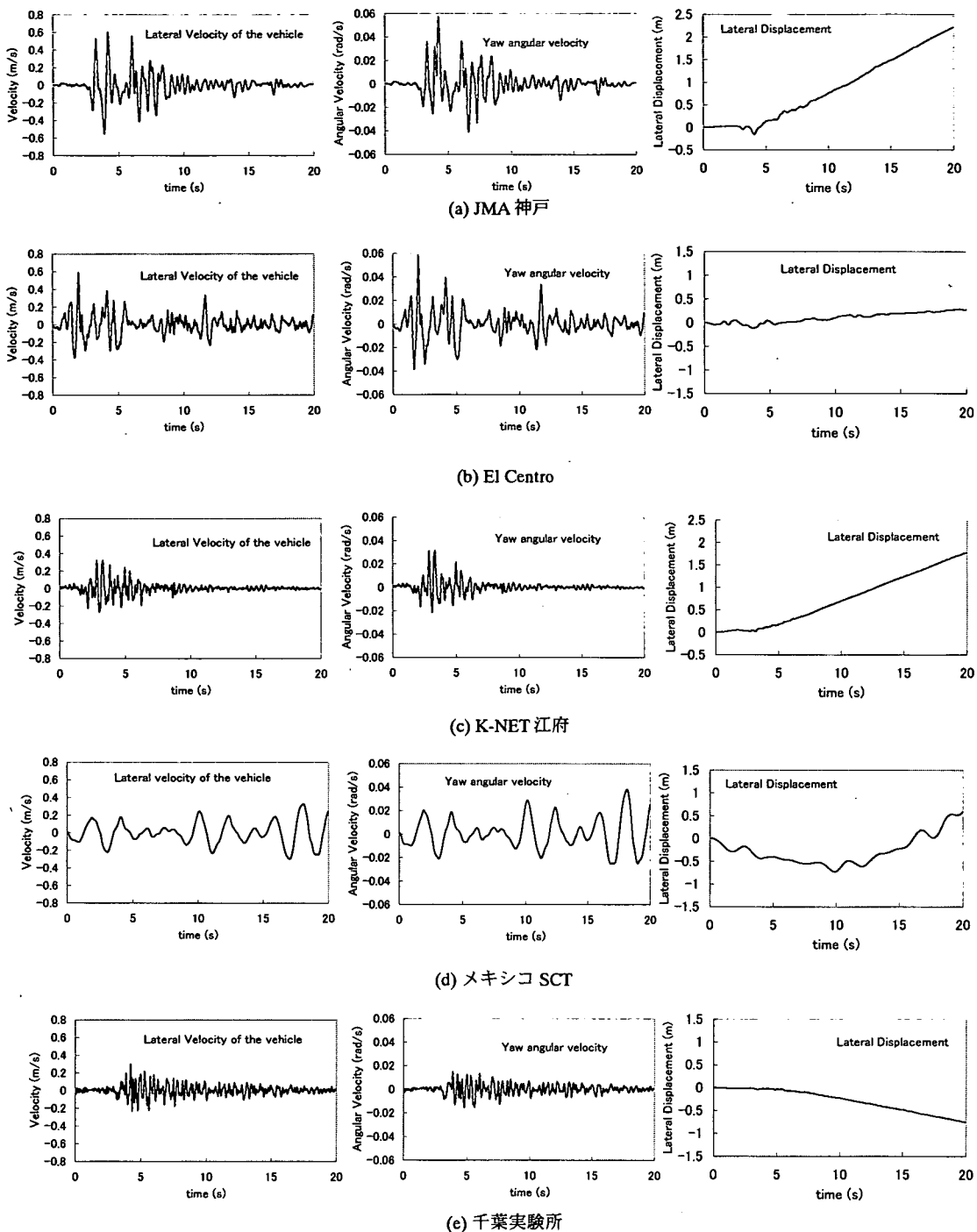
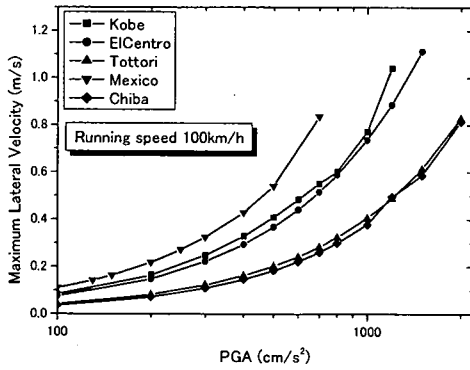


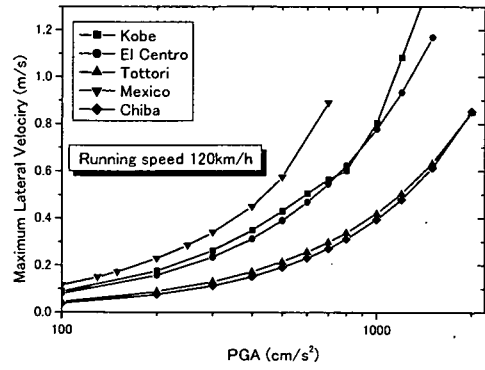
図-15 最大加速度 800cm/s^2 (メキシコ SCT のみ 300cm/s^2) 入力時の車両の応答 (車両初速度 100km/h)

入力したときの車両の応答を示す。ただし、メキシコ地震SCT記録については、PGAを 300cm/s^2 とした。これより、JMA神戸波やEl Centro波を入力したときに、車両が大きな応答を示していることが分かる。

また、メキシコ地震に関してはPGAが他の記録よりも小さいが大きな応答を示している。この理由は図-11に示した車両の応答特性と図-14の入力地震動のスペクトル特性からも理解できる。また、JMA神

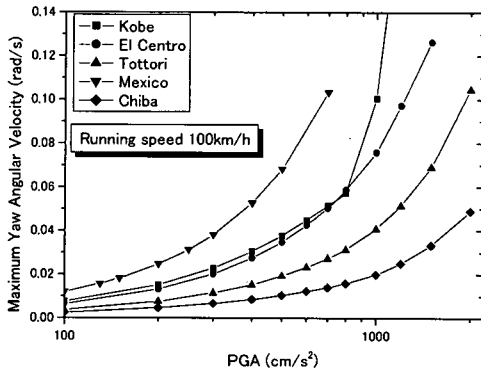


(a) 走行速度 100km/h

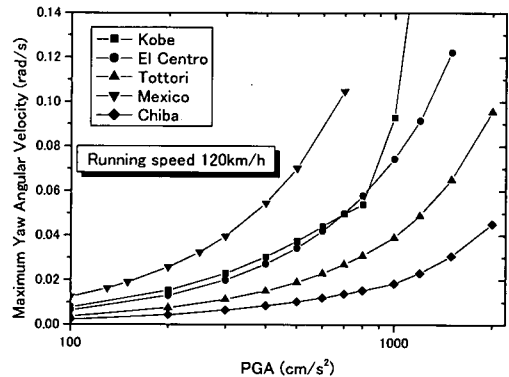


(b) 走行速度 120km/h

図-16 車両横方向に加えた地震動最大加速度と車両の横速度最大値の関係



(a) 走行速度 100km/h



(b) 走行速度 120km/h

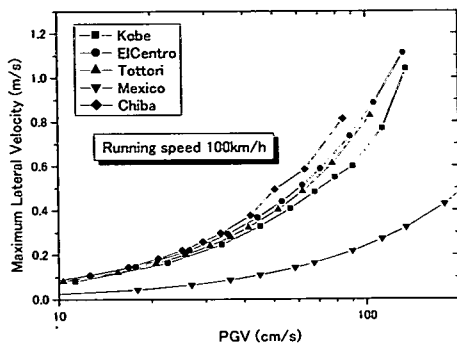
図-17 車両横方向に加えた地震動最大加速度と車両の最大ヨー角速度の関係

戸、K-NET江府、千葉実験所の記録を入力すると5秒後から車両の横変位置量がほぼ直線的に増加する。これは、地震の主要動部が終わったあとに、ある角度のヨー角を保ったまま車両が走行し続けているためと考えられる。

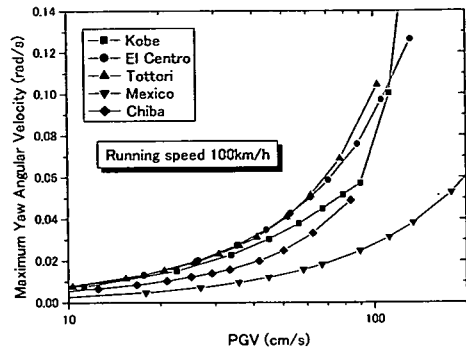
図-16に車両横方向に加えた地震動の最大加速度(PGA)と車両の横速度最大値の関係を示す。また、図-17には車両横方向に加えた地震動の最大加速度と車両の最大ヨー角速度との関係を示す。ここでは、車両の走行速度を100km/hと120km/hの2通りで計算している。これらより、車両の応答量と入力地震動の最大加速度には、ほぼ線形の関係があることが分かる。これは、運転者の反応等を考えなければ、タイヤの力学モデルであるマジックフォーミュラモデルの線形域で車両が応答しているためであることを確認している。しかし、地震動の最大加速度が同じ値を示しているにもかかわらず、入力地震動により車両の応答にはかなりの違いが見られる。低振動数領域の成分の

大きいメキシコSCT波を入力すると、他の4つの加速度波形を入力したときの車両の応答と比較して大きな応答を示す。また、車両の速度が大きくなると地震によって発生する横速度は若干大きくなる傾向が見られる。一方、ヨー角速度は車両の初速度が大きくなってもあまり大きさは変わらない。

図-18に車両横方向に加えた地震動の最大速度(PGV)と車両の最大横速度と最大ヨー角速度の関係を示す。図-16、図-17に示したように車両の応答量は、入力地震動の最大加速度に対しては入力地震動の特性によってばらつきが見られたが、最大速度に対してはそのばらつきは小さくなっている。しかし、メキシコ波を入力した場合に関しては他の4つの地震動を入力したときの車両応答値と比べて、同じ最大速度で小さな応答値を示していることが分かる。このことは、図-13に示した通り、メキシコSCT観測点における地震記録は他の4つの地震記録と比べて、非常に異なった特性を持っているため

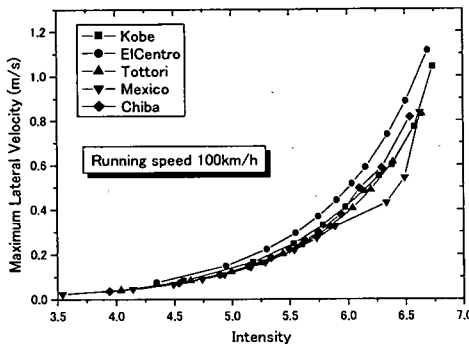


(a) 横速度

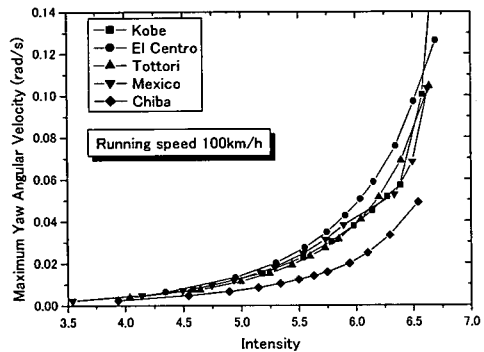


(b) ヨー角速度

図-18 車両横方向に加えた入力地震動最大速度と最大横速度・最大ヨー角速度の関係(車両初速度 100km/h)



(a) 横速度



(b) ヨー角速度

図-19 車両に加えた地震動の計測震度と最大横速度・最大ヨー角速度の関係(車両初速度 100km/h)

あると考えられる。メキシコSCT記録は加速度に対して速度が大きいため、最大加速度を他の記録と同じ値にすると速度が大きく、最大速度を同じ値にすると加速度が小さくなる。このため、図-16ではメキシコSCT記録が入力されたときの車両の応答が最も大きく、図-18では車両の応答が最小になるものと考えられる。つまり、車両の応答量は最大速度に対する依存が大きいもの、最大速度や最大加速度という単一の指標では評価が困難と考えられる。

図-19に車両に加えた地震動の計測震度と車両の横速度最大値とヨー角速度最大値の関係を示す。これによると、計測震度と車両の応答量の関係では、メキシコ波での車両の応答も含めてあまり入力地震動による車両の応答量の違いは見られない。計測震度は地震記録の3成分の波形を周波数領域でフィルターを通して計算される²⁹⁾。この計算過程が、本研究で用いた車両モデルの応答特性と似ていることも、入力地震動による車両の応答量の違いが見られない理由の一つと考えられる。また、計測震度は最大加速度と最大速度の積のような加速度と速度の中間の

物理量と相関が高いことが示されている³⁰⁾。このことから、車両の応答量を入力地震動によらず適切に表現するには計測震度が適していると思われる。

これらの結果によると、地震時の車両の応答量を表現するのに適切な指標としては、最大速度もメキシコ波のような特殊な地震動を除けば入力地震動によらず車両の応答量を表現できるが、低振動数域の卓越したような地震動まで考慮に入れれば、計測震度が適しているものと考えられる。しかしながら、このことを結論づける前には、解析対象としている車両モデルを増やしたり、入力地震動をさらに幅広く考慮するなど、更なる検討が必要である。

4. 結論

本研究では、高速走行中の車両に地震動が作用したときの挙動を調べるために、6自由度の普通自動車を想定した車両モデルを構築し、走行車両の地震応答解析を行った。入力地震動には、1995年兵庫県

南部地震の神戸海洋気象台記録, 1940年インペリアルバレー地震のEl Centro記録, 2000年鳥取県西部地震のK-NET江府記録, 1985年メキシコ地震のSCT記録, 1987年千葉県東方沖地震の千葉実験所記録の5記録を用いた。

各地震動の最大加速度と車両の横速度, ヨー角速度の最大値の関係を見ると, 入力地震動によってかなり違いがあることが分かった。低振動数成分が大きいメキシコSCT記録を入力すると, 他の4つの記録を入力した際の応答値と比べて大きな応答を示す。一方, 車両横方向に加えた地震動の最大速度と車両の横方向速度とヨー角速度の最大値の関係を見ると, メキシコSCT記録を入力したときの応答値が最小になり, 他の4つの地震動による応答量の差があまり見られなくなった。また, 車両に加えた地震記録の計測震度と車両の応答量の関係を調べると, メキシコSCT記録を加えたときの車両応答も含めて, 地震動の違いによる応答値の差は見られなくなった。これらのことは, 車両の応答量を入力地震動によらず表現することは最大加速度や最大速度のような単一の指標では困難であることを示している。このため, 最大加速度と最大速度の積と相関が高い計測震度のような複合的な指標が車両の応答量を表す指標としてはふさわしいと考えられるが, 本研究で行った車両応答解析は1つの車両モデルを想定しているだけであるので, 今後, 色々な車両モデルやパラメータについて検討を行ったり, 入力地震動についてもより多くのケーススタディが必要になるものと考えられる。

また本研究の解析には, 運転者の反応は考慮されていない。現在, 自動車力学の分野では, 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の開発が行われており, 東京大学生産技術研究所にも, 1999年に本格的なドライビングシミュレータが導入された。このドライビングシミュレータには6軸のアクチュエータが装備されており, 自動車を運転しているときの加速度をシミュレーションすることが可能である。走行シナリオとして, 高速道路の画像がプロジェクターを通して3枚のスクリーンに映し出され, 様々なタイプの併走車両などの挿入も可能である。本研究では, 車両の地震時の応答を表す指標として車両横速度やヨー角速度を選んだが, これらがどの程度の値になると実際の運転者が走行困難に感じるかなど, 運転者も含めた地震時車両走行安定性について, 今後検討していく必要がある。

参考文献

- 1) 本村均, 浜田達也, 市岡隆興: 高速道路の被害と地震動に関する評価と考察, 土木学会第54回年次学術講演会講演概要集第1部B, pp.86-87, 1999.
- 2) 山崎文雄: リアルタイム地震防災のための地震動モニタリング, 第1回リアルタイム地震防災シンポジウム論文集, pp.5-12, 1999.
- 3) 翠川三郎, 阿部進: 横浜市における細密震度分布の即時評価, 第10回日本地震工学シンポジウム, Vol.1, pp.3467-3432, 1998.
- 4) 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.
- 5) 清水善久, 小金丸健一, 中山渉, 山崎文雄: 超高密度リアルタイム防災システム—SUPREME—の開発, 第4回都市直下地震災害シンポジウム論文集, pp.415-418, 1999.
- 6) 気象庁編: 平成9年版 今日的气象業務, 1997.
- 7) Kinoshita, S.: Kyoshin Net (K-NET), *Seismological Research Letters*, Vol. 66, No. 12, pp. 841-844, 1996.
- 8) 丸山喜久, 山崎文雄, 本村均, 浜田達也: 常時微動のH/Vスペクトル比を用いた地震動推定法の提案, 土木学会論文集, No.675/I-55, pp.261-272, 2001.
- 9) 山崎文雄, 大西洋一, 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.
- 10) 松浦章夫, 富田健司, 涌井一: 鉛直フランジ付き3次元車両モデルによる振動軌道上車両の走行性に関する研究, 土木学会論文集, No.556/I-38, pp.169-178, 1997.
- 11) 亀田弘行, 室野剛隆, 南荘淳, 佐々木伸幸: 橋梁—車両連成系による道路橋の地震応答解析, 土木学会論文集, No.626/I-48, pp.93-106, 1999.
- 12) Shibata, H., Ishibatake, H., Fukuda, T. and Komine, H.: Human Operability under Strong Earthquake Condition, *8th World Conference on Earthquake Engineering*, Vol. V, pp.1109-1116.
- 13) 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.
- 14) 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.
- 15) 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.
- 16) 安部正人: 自動車の運動と制御, 山海堂, 1991.
- 17) 社団法人自動車技術会: 自動車技術ハンドブック, 基礎・理論編, 1990.
- 18) 景山克三, 景山一郎: 自動車力学, 理工図書, 1987.
- 19) カヤバ工業株式会社: 自動車のサスペンション, 山海堂, 1990.
- 20) Bakker, E., Pacejka, H. B. and Linder, L.: A New Tire Model with an Application in Vehicle Dynamics Studies, *Society of Automotive Engineers (SAE) paper* No. 890087, 1989.
- 21) 田治見宏: 建築振動学, コロナ社, 1965.
- 22) 小坪清真: 土木振動学, 森北出版, 1973.
- 23) 宇野高明: 車両運動性能とシャシーメカニズム, グランプリ版, 1984.
- 24) 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.
- 25) National Oceanic and Atmospheric Administration:

- Earthquake Strong Motion CD-ROM, National Geophysical Data Center, Boulder, Co., 1989.
- 26) 財団法人電力中央研究所：平成 12 年鳥取県西部地震調査報告，2000.
- 27) 日本建築学会：1985 年メキシコ地震災害調査報告，1986.
- 28) Katayama, T., Yamazaki, F., Nagata, S., Lu, L. and Turker, T.: A strong motion database for the Chiba seismometer array and its engineering analysis, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, pp. 1089-1106, 1990.
- 29) 気象庁：震度を知る，ぎょうせい，1996.
- 30) 翠川三郎，藤本一雄，村松郁栄：計測震度と旧気象庁震度および地震動強さの指標との関係，地域安全学会論文集，Vol. 1, pp. 51-56, 1999.
- (2001. 4. 11 受付)

SEISMIC RESPONSE ANALYSIS OF A VEHICLE RUNNING ON A HIGHWAY

Yoshihisa MARUYAMA, Fumio YAMAZAKI and Hiroyasu YAMANOUCHI

The seismometer network has been enhanced along the expressways since the 1995 Kobe earthquake. However, recent studies on earthquake damage have revealed that expressway structures are not seriously damaged under the current regulation level of seismic excitation. Hence, we may think of relaxing the regulation of the expressway closure. Before doing this, we need to examine the effects of shaking to automobiles on expressways since the drivers may encounter difficulty in controlling their cars and trucks, and traffic accidents may occur. In this study, a vehicle model with six degrees-of-freedom was made and its responses were obtained under several seismic motions and the effects of seismic motion to the dynamic response of the vehicle model were analyzed.