

## 6 自由度車両モデルを用いた地震時の車両応答解析

Seismic Response Analysis of a Vehicle Model with Six Degrees of Freedom

丸山喜久\*・山崎文雄\*

Yoshihisa MARUYAMA and Fumio YAMAZAKI

## 1. はじめに

わ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<sup>1)</sup>、これらの地震計で得られた地震記録の最大加速度 (PGA) を指標として、80 Gal 以上で通行止め、50 Gal 以上で速度規制という地震時通行規制を実施している。しかしながら、高速道路構造物はそのようなレベルの地震動では被害が生じないということも近年の研究で示されている<sup>2)</sup>。また現在、高速道路構造物は耐震補強も進められている。したがって、高速道路の地震時通行規制の緩和の検討が可能であると考えられる。規制の緩和を行う前には、高速道路走行中の運転者が地震発生時に車両の制御が困難になり、交通事故が発生する可能性も否定できないので、地震動が運転者にどのような影響を与えるかを検討することは重要である。

山之内・山崎<sup>3)</sup>は、運転ゲーム機を2次元振動台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。また最近、生産技術研究所には本格的なドライビングシミュレータが導入された。そこで本研究では、本格的なシミュレーションを行う前段階として6自由度の車両モデルを構築し、車両の地震応答解析を行った。

## 2. 6自由度車両モデル

車両の基本運動を図1に示す。ここでは、車両の重心点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<sup>4)</sup>。この座標を基準にすると、運動の自由度はそれぞれの座標軸の並進運動と回転運動の6自由度になる。とくに、x軸回りの回転運動をローリング運動、y軸回りをピッチング運動、z軸回りをヨーイング運動と呼ぶ。

図2にこれらの運動のうち車両の上下方向の並進運動(バウニング運動)以外の運動を記述するために使用し

\*東京大学生産技術研究所 人間・社会大部門

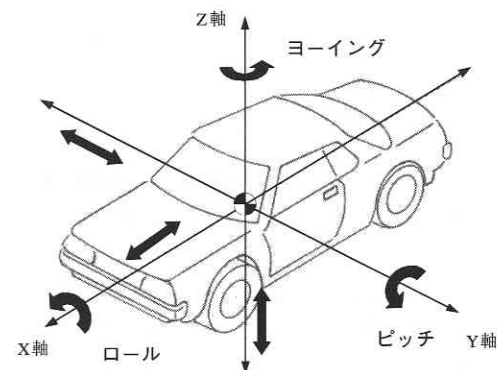


図1 車両の基本運動

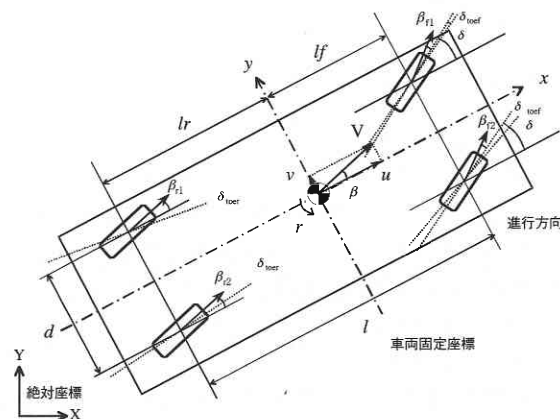


図2 車両の座標系とモデル

た座標系 (2次元) 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) 併進運動の運動方程式は以下のようなになる<sup>5)</sup>。

研究速報

$$m \left( \frac{du}{dt} + ur \right) = \sum_j \sum_i (F_{xij} \cos \delta_{ij} - F_{yij} \sin \delta_{ij}) = \sum F'_{xij} \quad (1a)$$

$$m \left( \frac{dv}{dt} - vr \right) = \sum_j \sum_i (F_{xij} \sin \delta_{ij} + F_{yij} \cos \delta_{ij}) = \sum F'_{yij} \quad (1b)$$

ここで、 $u$  は  $x$  軸方向速度、 $v$  は  $y$  軸方向速度、 $r$  はヨー角速度である。  $\delta_{ij}$  は車両固定座標とタイヤの向きとの角度差を表す。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あらわし、 $j$  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。

$$I_z \frac{dr}{dz} = (F'_{y11} + F'_{y12})l_f - (F'_{y21} + F'_{y22})l_r + (-F'_{x11} + F'_{x12}) \frac{d}{2} + (-F'_{x21} + F'_{x22}) \frac{d}{2} \quad (2)$$

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 (トレッド) である。

また、ロール角は式 (3)、ヨー角は式 (4)、ピッチ角は式 (5) によりそれぞれ表される。 $W$  は車両の総重量、 $K_\phi$  はサスペンションロール剛性係数、 $K_\theta$  はサスペンションバネ定数である。

$$\phi = \frac{W(\dot{v} + ur)h}{g(K_\phi - Wh)} \quad (3)$$

$$\psi = \int r dt \quad (4)$$

$$\theta = \frac{W/g \cdot h \cdot (\dot{u} - vr)}{K_\theta l_r (l_f + l_r)} \quad (5)$$

上記の式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を記述することができる。

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

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に示すクォータービークルモデルを使用した<sup>6)</sup>。下のバネはタイヤのバネを、上のバネはサスペンションをそれぞれ表している。また、上の質点 (バネ上) は車両本体を下の質点 (バネ下) はタイヤを表している。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<sup>7)</sup>。図4にこのモデルを使用して得られた路面からの入力に対するバネ上の応答の周波数特性を示す。1

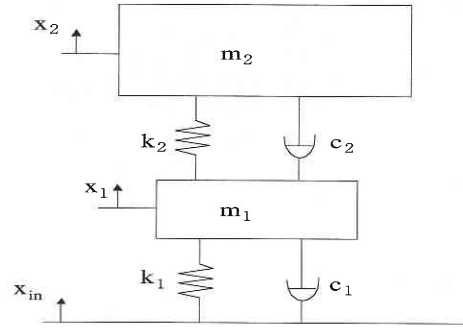


図3 クォータービークルモデル

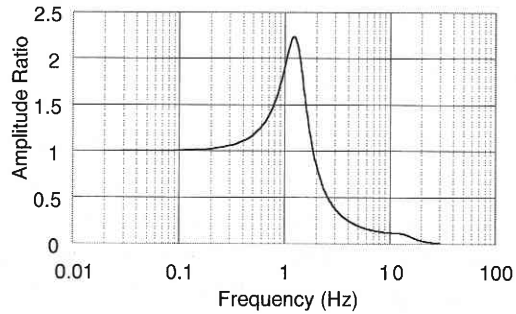


図4 路面とバネ上の上下動伝達特性

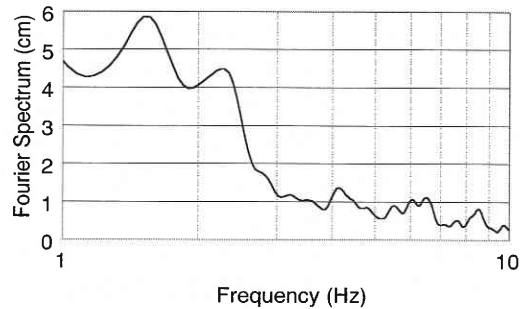


図5 実車走行中の上下動フーリエ振幅

~2 Hz 付近に見られるピークがバネ上の共振を表している。本研究では実際の自動車が行中時のときの上下方向の振動を加速度計で測定し、そのフーリエスペクトルを計算した。その結果を図5に示す。実際の自動車の上下振動の卓越周波数も1~2 Hzに見られることから、このモデルが妥当であるものと確認される。

### 3. 車両の地震応答解析

図6に本研究で作成した「車両の地震応答解析プログラム」のアルゴリズムを示す。地震動水平成分に関しては、地震力が各タイヤに均等に作用すると考え、車両には  $X$ 、 $Y$  座標方向にそれぞれ式 (7)、(8) のように力が作用すると考えた。

$$F_{LT} = m\ddot{x} \dots\dots\dots (7)$$

$$F_{TR} = m\ddot{y} \dots\dots\dots (8)$$

また、車両に固定された座標軸上でのタイヤに作用する地震力は式 (7), (8) からタイヤの座標軸との角度差とヨー角を考慮し回転することで求めることができる (図7)。このようにして求めた地震力をタイヤに発生する駆動力・横力に加えることで地震力を加味した運動を記述できるものと考えた。また、鉛直成分に関しては、タイヤの垂直荷重に  $m\ddot{z}$  を作用させタイヤの垂直荷重に影響を与えるように考えた。

タイヤに発生する駆動力・横力は Magic Formula モデル<sup>8,9)</sup> によって得ることができる。本研究で使用した Magic Formula モデルの特性を図8に示す。このようなタイヤ特性を利用して得られたタイヤに発生する力とタイヤに作用する地震力を加えたものからモーメントを算出し、車両の位置である X, Y 座標を求める。また、ハンドルを切ったときにハンドルを戻す方向に作用するセルフアライングトルク<sup>10)</sup> というモーメントも考慮し、タイヤの前輪操舵角に反映させた。このセルフアライングトルクは地震時の車

両応答を安定させる方向にはたらくはずである。

車両の Z 座標については図4に示したサスペンションの伝達特性から地震動の UD 成分を利用し計算した。

入力地震動は、1995年兵庫県南部地震の神戸海洋気象台記録とインペリアルバレー地震のエルセントロ記録を3成分の入力動として使用した。それぞれの解析時間は神戸波を10秒間、エルセントロ波を6秒間とした。これらの記録を最大加速度でスケールリングし、解析を行った。解析にあたっては、車両の初速度を100 km/hとし、進行方向をEW方向とした。図9に神戸波700 Galスケールリングの横方向・上下方向変位量とヨー角度の時刻歴を示す。7秒付近からヨー角度が大きな値になっており、そのために横変位量も0.5 mを超えるような大きな値が算出されている。

図10に初速度100 km/h, 60 km/hのときの入力地震動の最大加速度と横変位量応答の最大値の関係を示す。車両の初速度が100 km/hのときはどちらの地震動でも500 Gal程度まではほぼ線形に応答の最大値が増加し、神戸波では600 Gal程度、エルセントロ波では500 Gal程度から急激に応答値が大きくなる。初速度60 km/hのときは、エルセントロ波を入力すると、100 km/hのときよりも小さな応答値が算出されていることがわかる。一方、神戸波を入力したときには600 Gal程度まではほぼ線形に応答値が大きくなり、初速度100 km/hのときの応答値とあまり差異が無い。しかし、それよりも大きな地震動を入力すると初速度

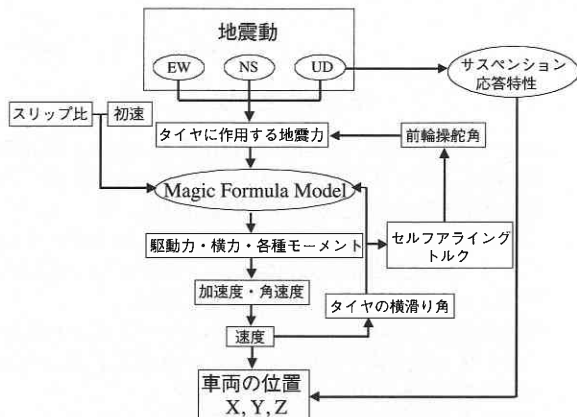


図6 車両の地震応答解析プログラムのフロー

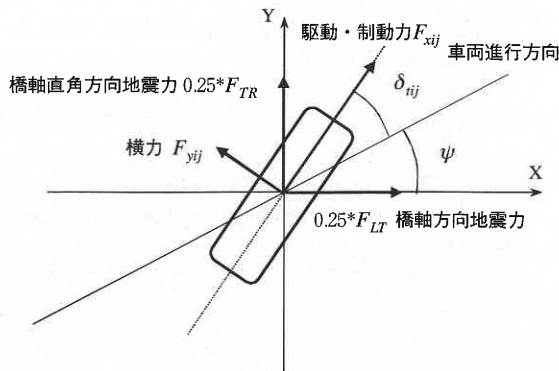


図7 タイヤに作用する地震力

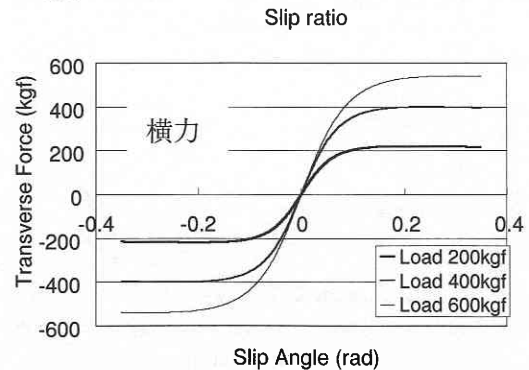
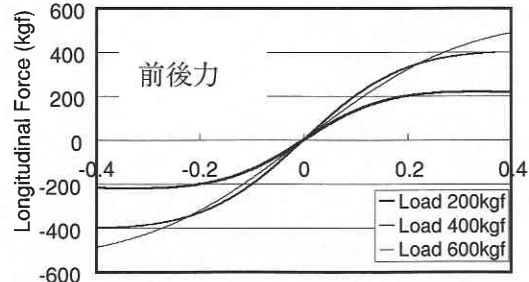


図8 Magic Formula Modelのタイヤ特性

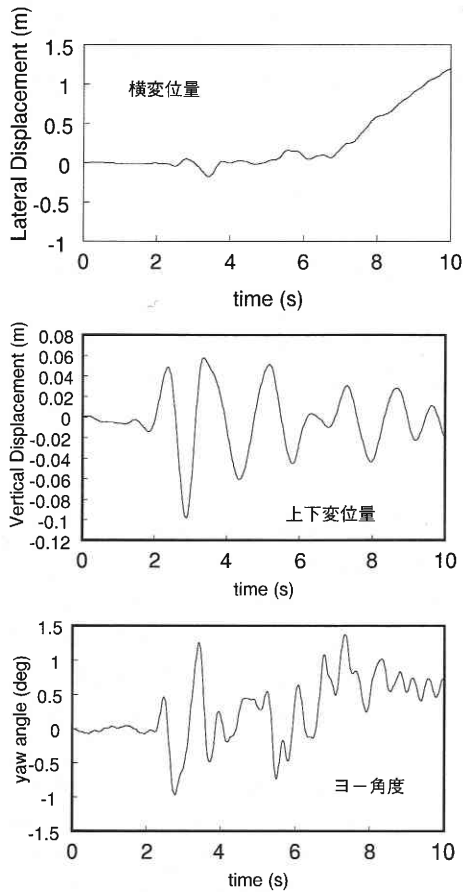


図9 神戸波 700 Gal 入力時の車両の応答 (初速度 100 km/h)

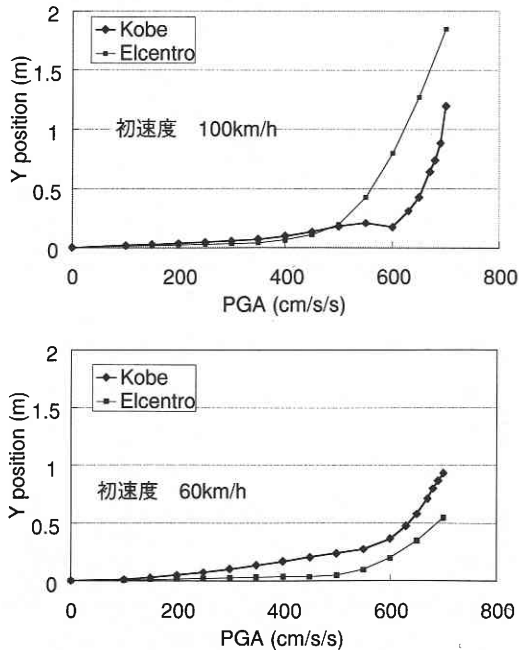


図10 車両水平横方向の最大加速度と最大横変位置の関係

100 km/h のときに比べて応答値はそれほど大きくならず、700 Gal を入力しても最大横変位置は 1 m を超えなかった。また、2つの地震波で入力地震動が大きくなるほど車両の応答の様子に差異が見られることから、地震波の特性が車両の応答に与える影響を検討していくことが必要であると思われる。

4. まとめと今後の課題

本研究では、6 自由度の車両モデルを作成し、それに地震動を入力することで、車両の地震応答解析を行った。入力地震動の最大加速度が大きくなると車両の応答量も大きくなり、500 Gal から 600 Gal を超えた地震動を入力すると応答値が急激に大きくなることが確認できた。また、車両の速度が大きくなると車両の応答値も大きくなるという傾向も見られた。さらに、入力地震動が大きくなると2つの地震波での車両応答量に多少の差が見られることがわかった。

今後は、地震波の特性が与える車両応答への影響の更なる検討を行い、ドライビングシミュレータを用いて地震発生時に車を運転しているという状況を模擬実験していく予定である。

(2000 年 11 月 27 日受理)

参 考 文 献

- 1) 山崎文雄, 山内洋志, 本村均, 浜田達也: 高速道路の地震観測値に基づく通行規制基準の検討, 第 25 回地震工学研究発表会講演論文集, pp.1045-1048, 1999.
- 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, 3491-3496, 1998.
- 3) 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.
- 4) 安部正人: 自動車の運動と制御, 山海堂, 1991.
- 5) 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.
- 6) 景山克三, 景山一郎: 自動車力学, 理工図書, 1987.
- 7) カヤバ工業株式会社: 自動車のサスペンション, 山海堂, 1990.
- 8) (社) 自動車技術会: 自動車の運動性能向上技術, 朝倉書店, 1998.
- 9) E. Bakker, H.B. Pacejka, L. Linder: A New Tire Model with an Application in Vehicle Dynamics Studies, SAE paper No. 890087, 1989.
- 10) 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.