

【研究ノート】

## 地震観測媒体としての車両の動的モデル化に関する予備的研究

高橋広人<sup>1</sup>，後藤太耀<sup>2</sup>，平井敬<sup>3</sup>

<sup>1</sup>名城大学理工学部，准教授 博士（工学）

<sup>2</sup>名城大学理工学部

<sup>3</sup>兵庫県立大学大学院減災復興政策研究科，准教授 博士（工学）

車両を地震観測媒体として利用することを目的として，自動車の振動を地動に換算するための振動モデルの検討を行っている．その1段階として，走行時の車両の挙動を表現する既往の運動方程式の静止した車両における地震時の応答解析への適用を試みた．本稿ではその一例について報告する．

キーワード：自動車モデル，車両の振動特性，地震応答解析

### 1. はじめに

わが国には全国を覆う地震観測網が整備され，国内のいずれかの場所で発生した地震に対しても速やかに震度分布が公表されるとともに，震源位置や発震機構の推定が可能な体制が整っている．その数は気象庁と地方公共団体により設置された震度計及び防災科学技術研究所による強震観測網 K-NET に一部を合わせて全国で 4371 か所に及ぶ．しかしながら，震度観測点間の距離はおよそ数キロメートルであり，地盤条件による局所的な強い揺れまでは検知できないことがある．大きく被災した地域の迅速な把握と適切な応急対応のためには地震観測網のさらなる高密度化が必要であるが，設置コストや維持管理の観点から難しいのが現状である．

筆者らはこれを克服するための最も有望な地震観測の媒体のひとつとして自動車の利用を考えている．自動車は基本的に常時接地しているため，これを加速度計として利用することでその近傍の被害の推定や計測震度の推定に用いることは十分に可能と考えられる．

これまでに筆者らは車両の振動特性を把握することを目的として振動実験を行っている<sup>1)</sup>．その結果，①地動の入力レベルに応じて地動に対する車両の振動特性は異なること，②前後(X)成分及び上下(Z)成分とピッチ成分，左右(Y)成分とロール成分は連成することが確認された．このような特徴を表現する運動モデルを構築することにより，車両の振動記録から地動を推定することが期待できる．

本研究では、自動車の振動を地動に換算する方法の開発を目的として、自動車の振動モデルの構築について予備的検討を行う。

## 2. 既往の自動車の運動方程式

自動車の運動を解析するとき、解析目的に応じて様々な運動モデルが使い分けされる。表 1 に車両モデルの自由度の例を、図 1 に 6 自由度の場合の車両の座標軸をそれぞれ示す。基本的な自動車モデルで、水平平滑面を走る自動車を対象とした場合でも、サスペンションバネの上下動を考慮すれば、最小限 6 自由度 (X, Y, Z, ロール, ピッチ, ヨー) の空間運動となる。自由度を超える場合、ステアリングやブレーキ等のサブシステムの自由度の増加、ばね下 (タイヤ) の 4 自由度の追加などが挙げられる。本研究では、車両を駐車 (静止) した状態での観測を想定していること、構造物の地震被害に関係する振動数帯域は 0.1~10 Hz 程度であることを勘案すると、車両モデルの自由度は 6 自由度以下で十分と考えられる。次に本研究で対象とする車両の運動モデルを挙げる。

表 1 車両モデルの自由度の例<sup>2)</sup>

自由度	自由度の中身	特徴
2 自由度	Y, ヨー	一定車速、二輪車モデル
3 自由度	X, Y, ヨー	ロール軸固定
4~6 自由度	3 自由度+ステアリング系	トルク入力、手放しほか
6 自由度	X, Y, Z, ロール, ピッチ, ヨー	サスペンションジオメトリ変化の特性記述
	サブシステムの自由度の増加	サブシステム構造記述の拡大
6 自由度以上	6 自由度+ばね下 4 自由度	ばね下共振
	6 自由度+タイヤ回転 4 自由度	スリップ率で駆動制動力発生

### (1) 3 自由度モデル+3 つり合い式<sup>4)</sup>

水平面内を一定速度で走る自動車を対象とし、旋回時の X, Y, ヨーの 3 成分の運動を式 (1a)~(1c) に示す 3 自由度モデル<sup>5)</sup> に、Z 成分について (1d), (1e) に示す 2 質点系のモデル、さらに式 (1f), (1g) に示すロール、ピッチ方向のつり合い式を加えて 6 自由度とし、走行時に地震動を受けた自動車の挙動を模擬したドライブシュミレーターに用いられたモデルである。

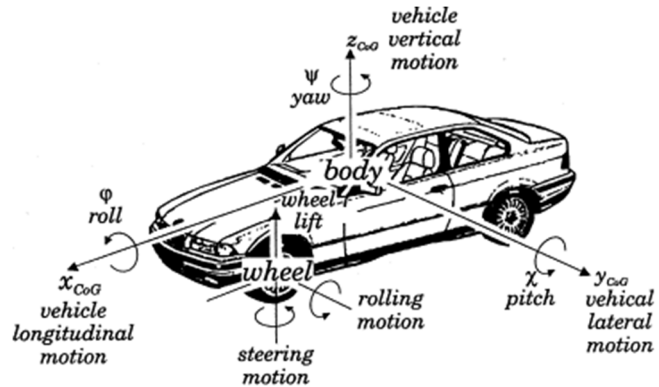


図 1 車両の座標軸と自由度<sup>3)</sup>

$$m(\ddot{u} - \dot{v}\dot{\psi}) = -m\ddot{x}_g + \sum_{ij} F'_{xij} \quad (1a)$$

$$m(\ddot{v} + \dot{u}\dot{\psi}) = -m\ddot{y}_g + \sum_{ij} F'_{yij} \quad (1b)$$

$$I_{zz}\ddot{\psi} = (F'_{y11} + F'_{y12})l_f + (F'_{y21} + F'_{y22})l_r + (-F'_{x11} + F'_{x12})d/2 + (-F'_{x21} + F'_{x22})d/2 \quad (1c)$$

$$m(\ddot{w} + \ddot{z}_g) + c(\dot{w} - \dot{w}_u) + K(w - w_u) = 0 \quad (1d)$$

$$m_u(\ddot{w}_u + \ddot{z}_g) + c_u \dot{w}_u + k_u w_u = m(\ddot{w} + \ddot{z}_g) \quad (1e)$$

$$\varphi(K_\varphi - mgh) = m(\ddot{v} + \dot{u}\dot{\psi})(h_o + w) \quad (1f)$$

$$\chi K(l_f^2 + l_r^2) = m(\ddot{u} - \dot{v}\dot{\psi})(h_o + w) \quad (1g)$$

$u, v, w$ はX, Y, Z方向のばね上の相対変位,  $w_u$ はZ方向ばね下の相対変位,  $\varphi, \chi, \psi$ はロール, ピッチ, ヨーの回転角を示す. 車両の諸元として $m$ は車体質量,  $m_u$ はばね下質量,  $I_{zz}$ はヨー成分の慣性モーメント,  $K_\varphi$ はサスペンションロール剛性,  $K$ はサスペンションばね定数,  $c$ はサスペンション減衰定数,  $k_u$ 及び $c_u$ はタイヤばね定数及び減衰定数,  $l_f, l_r$ は前輪及び後輪の車軸から重心までの水平距離,  $d$ は左右のタイヤ間の距離,  $h_o$ は重心高さを示す.  $F'_{xij}$ 及び $F'_{yij}$ はタイヤに作用する駆動・制御力及び横力である.

### (2) 6自由度モデル<sup>6)</sup>

走行中の自動車の加減速を考慮し, 式(2a)に示すX, Y, Z成分の3自由度に, 式(2b)に示すロール, ピッチ, Zの3成分を加えた6つの運動方程式で表したモデルである. 急発進, 急制御, 急旋回は考慮するため, タイヤとサスペンションで発生する力を連成させたモデルである.

$$m \left( \begin{bmatrix} \ddot{u} \\ \ddot{v} \\ \ddot{w} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{\varphi} \\ \dot{\chi} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \end{bmatrix} \right) = \mathbf{F} \quad (2a)$$

$$\begin{bmatrix} I_{xx} & -I_{xy} & -I_{xz} \\ -I_{yx} & I_{yy} & -I_{yz} \\ -I_{zx} & -I_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\varphi} \\ \ddot{\chi} \\ \ddot{\psi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{\varphi} \\ \dot{\chi} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_{xx}\dot{\varphi} - I_{xy}\dot{\chi} - I_{xz}\dot{\psi} \\ -I_{yx}\dot{\varphi} + I_{yy}\dot{\chi} - I_{yz}\dot{\psi} \\ -I_{zx}\dot{\varphi} - I_{zy}\dot{\chi} + I_{zz}\dot{\psi} \end{bmatrix} = \mathbf{M} \quad (2b)$$

ここに,  $I_{xx}$ はロール成分の慣性モーメント,  $I_{yy}$ はピッチ成分の慣性モーメント,  $I_{ij}(i \neq j)$ は慣性乗積である. 慣性乗積は慣性モーメントに比べて非常に小さいと考え, 本研究では考慮しないこととする.

### 3. 地震応答解析

前章に示した(1)3自由度モデル+3つり合い式のモデルに基づいて地震応答解析を試みた. 表2に車両モデルのパラメータを示す. 本稿では試算であるため,  $w_u$ は非常に小さいとし式(1e)は考慮しないでZ成分は1自由度とした. また車両は静止していることを前提とするため, 走行時・旋回時に生じる駆動・制御力及び横力は無視した. 図2に加速度波形を示す. 入力地震動は1995年兵庫県南部地震の神戸海洋気象台の記録を用いて3成分同時入力することとした. 解析にあたっては, 式(1a), (1b)は非線形の微分方程式であるので, Runge-Kutta法を用いた. 入力地震動の時間刻み(0.02秒)を線形補間により0.002秒として解析精度を確保するようにした.

図3に車両モデルの地震応答の例を示す. 駆動・制御力及び横力は無視しているため, ヨー成分が励起されていない. このため式(1a), (1b)からX, Y成分の加速度応答は地動加速度と等しく, 車両の

振動特性が反映されない応答となっている。振動実験<sup>1)</sup>では車両は X, Y 成分に車両の振動特性が反映されるほか、ヨー成分も励起されていることから、3 自由度モデル+3 つり合い式のモデルでは実際の挙動を説明できていない。6 自由度モデルで解決できるかについては今後検討を進めて確認したい。

表 2 車両モデルのパラメータ一覧

$m$ [kg]	$I_{zz}$ [kg m <sup>2</sup> ]	$K$ [kN/m]	$c$ [kN s/m]	$K_\phi$ [kN m]	$h_o$ [m]	$l_f$ [m]	$l_r$ [m]
1100	637	686	4.9	117.6	0.35	1.000	1.635

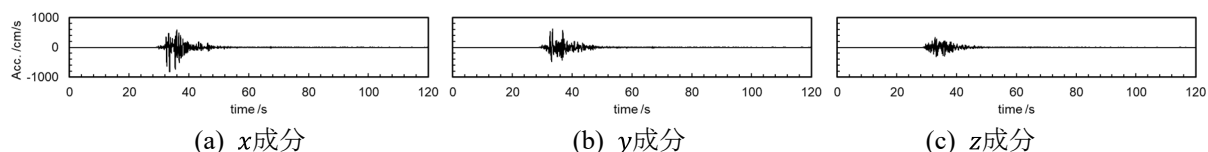


図 2 入力した加速度波形

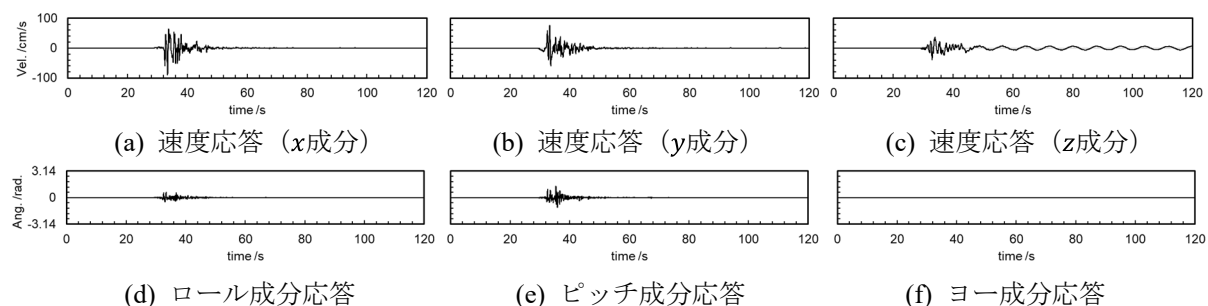


図 3 車両モデルの地震応答の例

#### 4. まとめ

本稿では、自動車の振動を地動に換算する方法の開発を目的として、自動車の振動モデルの構築について予備的検討を行った。3 自由度モデル+3 つり合い式のモデルでは車両の挙動を再現できず、6 自由度モデル、さらに詳細なモデルが必要となるか検討を進める予定である。

#### 参考文献

- 1) 平井敬, 高橋広人: 地震観測の媒体としての自動車の詳細な振動実験, 日本地震工学会論文集, Vol.24, No.1, pp. 1\_33-1\_53, 2024. DOI: [https://doi.org/10.5610/jaee.24.1\\_33](https://doi.org/10.5610/jaee.24.1_33)
- 2) 自動車技術ハンドブック編集委員会: 自動車技術ハンドブック基礎・理論編, 自動車技術会, 556 pp., 2015.
- 3) Robert A. Meyers: Encyclopedia of Physical Science and Technology, 3rd ed., Academic Press, 15453 pp., 2001.
- 4) 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/ I -58, No. 696, pp. 249-260, 2002. DOI: [https://doi.org/10.2208/jscej.2002.696\\_249](https://doi.org/10.2208/jscej.2002.696_249)
- 5) 安部正人: 自動車の運動と制御 (第 2 版), 東京電機大学出版局, 308 pp., 2008.
- 6) 小野英一: ヒトとクルマの運動制御, 朝倉書店, 266 pp., 2021.

Note:

## **A Preliminary Study on Dynamic Modeling of a Vehicle as a Medium for Seismic Observation**

Hirohito Takahashi<sup>1</sup>, Taiyou Goto<sup>2</sup>, Takashi Hirai<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Faculty of Science and Technology, Meijo University, Associate Professor, Dr. Eng.

<sup>2</sup> Faculty of Science and Technology, Meijo University

<sup>3</sup> Graduate School of Disaster Resilience and Governance, University of Hyogo, Associate Professor, Dr. Eng.

### **Abstract**

A dynamic model for converting vehicle vibrations into ground motion is being investigated, with the aim of using vehicles as a medium for seismic observation. As a first step, an attempt is made to apply the existing equations of motion describing vehicle behaviour during driving to the analysis of seismic response of a stationary vehicle. This paper reports an example of the results of the application.

Keywords: Dynamic model of a vehicle, Vehicle vibration characteristics, Seismic response analysis