

IV-9

任意の路面形状における車両走行のモデル化

北海道大学工学部 学生員 ○宮武 昌志
同 正 員 萩原 亨
同 正 員 加来 照俊

1. はじめに

現代は自動車社会とまでも言われるほどに、交通手段としての自動車が必要不可欠なものになっている。

自動車数の増加は確かに社会的便益を大きく引き上げる効果を持っているが、その反面、交通事故や公害の原因となる等の損失部分も見逃せない。

主要幹線道路の路面では比較的深いわだち掘れ（流動によるわだち+摩耗によるわだち）が生じており、時として走行車両の車線逸脱を引き起こす等、自動車の走行安定性を阻害する重大な要因になっている。 わだち路面を走行する車両の動的挙動は複雑でありいまだに理論的には解明されていない。 また、その危険性が指摘されているにも関わらず対策の現状は、経験的なものに負うところが多い。

本研究は、わだち路面を走行する車両の運動特性の理論的解明への基礎的アプローチであり、力学的モデル（車両の振動特性の中から上下方向、横方向10自由度を考慮した運動方程式）の確立とその評価手法をめざしている。 力学的モデルは、従来からある車両の突起乗り越し時の過渡振動特性シミュレーションに用いられてきた7自由度モデルを基礎とし、過去の研究成果より得られたわだち走行時において重要と考えられる車両の横方向力を考慮したモデルとする。 さらにモデルの再現性を高めるために、わだち走行時、車線乗り越し時の車両運動特性の実車走行による測定結果とモデルによる結果を、ダイナミックシステムによる統計解析により評価し、それを再びモデルにフィードバックする。

表1 モデルにおける10自由度

バネ上重心Y方向:	y_0
バネ上重心Z方向:	z_0
前輪左バネ下重心Z方向:	z_{31}
前輪右バネ下重心Z方向:	z_{32}
後部バネ下重心Z方向:	z_4
バネ上重心X軸回り:	θ
バネ上重心Y軸回り:	ϕ
後部バネ下重心Y軸回り:	ϕ_4
前輪横すべり角:	γ_1
後輪横すべり角:	γ_2

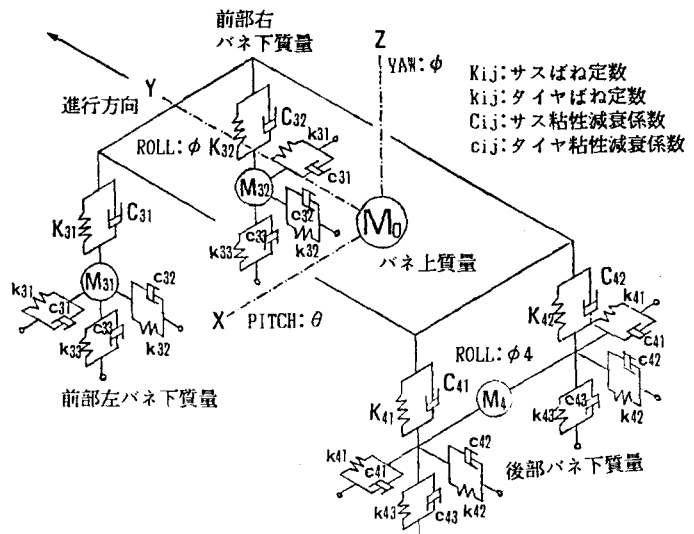


図1 モデルのシステム

2. 車両の動的挙動とその解析

本研究室では、従来からわだち路走行時における車両の動的挙動特性及びそれにより生じる交通事故に関する研究を進めてきている。以下に車両の運動特性の把握に関する手法を示す。

(1) 力学的モデルによる車両の過渡応答特性の解析

(2) ダイナミックシステムの理論を用いた周波数応答特性の解析

(1) は、7自由度力学的モデルを用いた車両の各部位の変量の過渡応答特性についてであり、(2) は、ダイナミックシステムの統計的解析理論を用いた車両の各部位の変量間の周波数応答特性についてである。

一方、実際のわだち形状をもとに設計されたわだち試験路及び冬期におけるわだち路面において、直線走行試験及び車線乗り移り試験を行い、わだち路走行中の操縦性及び安定性に関する基礎的データの収集を行っている。これらの走行試験結果に(1)、(2)の解析手法を適用し、わだち路における車両の運動特性に関する数多くのデータを得ている。

図2は実車走行試験の結果から計算したR. M. S. 値(Root Mean Square Value)を走行速度別に表したものであるが、GXの値がGZに比べて無視できない大きさになっている。なお、ここで用いたR. M. S. 値とは、各加速度変量の二乗平均値として定義される数値であり、各変量の変動の割合を表すものである。図3において、この傾向をさらに明確にするために、30km/hにおけるR. M. S. 値を1とし、他の速度でのR. M. S. 値を相対的に表した。走行速度が増加するにつれて操舵角(SAG)にはほとんど変化がないが、GZ、GX、はともに増加しており、また、GZよりGXの方がその傾斜が急になっている。

同じことがFRZ(前輪右バネ下上下方向加速度)とFRX(前輪右バネ下左右方向加速度)の関係にも生じている。

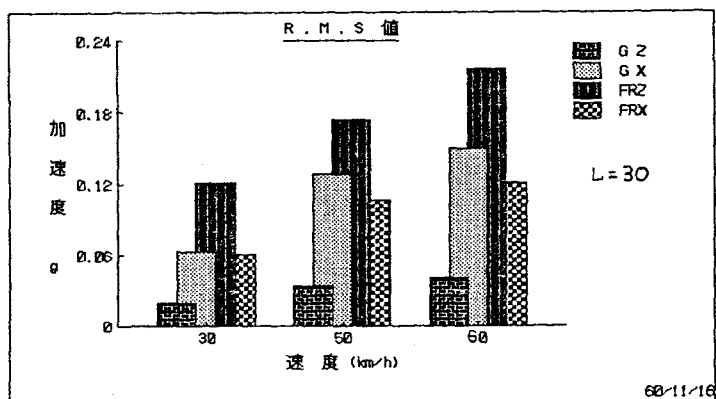


図2 実車試験におけるR.M.S.値と速度

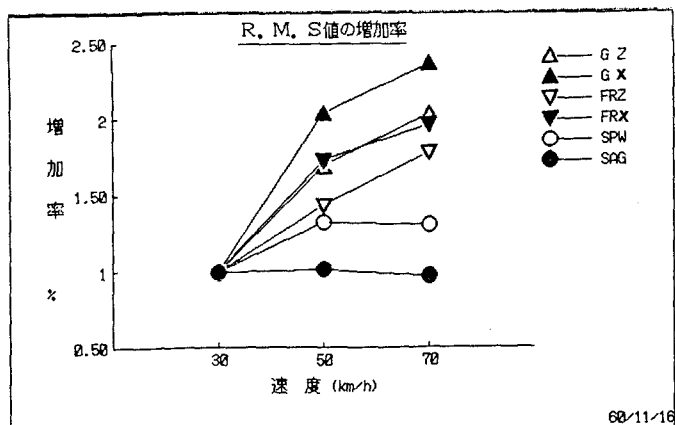


図3 実車試験におけるR.M.S.値の増加率と速度

表2 10自由度力学モデル

$$\begin{aligned}
& (M_{1r} - M_3 M_{F1} C_{t1} - M_4 M_{R1} C_{t2}) \ddot{\varphi} + M_3 M_{F1} S_1 \ddot{\gamma}_1 + M_4 M_{R1} S_2 \ddot{\gamma}_2 \\
& = -M_{1r} \frac{v}{\ell} (\ell_2 \dot{\gamma}_1 + \ell_2 \dot{\gamma}_2) - m_0 \frac{v^2}{\ell} (\dot{\gamma}_1 - \dot{\gamma}_2) + M_3 M_{F1} S_1 \dot{\beta}_1 + 2C_{31} M_{F1} (S_1 \dot{\beta}_1 - S_1 \dot{\gamma}_1 + C_{t1} \dot{\varphi}) \\
& \quad + 2C_{41} M_{R1} (-S_2 \dot{\gamma}_2 + C_{t2} \dot{\varphi}) + M_{Fg} (S_1 \dot{\beta}_1 - S_1 \dot{\gamma}_1 + C_{t1} \dot{\varphi}) + M_{R1} g (-S_2 \dot{\gamma}_2 + C_{t2} \dot{\varphi}) \\
& M_{1r} \ddot{y}_0 + M_{1r} \ddot{\theta} + M_5 \frac{b_1}{\ell} (M_{F1} C_{t1} - M_{R1} C_{t2}) \ddot{\varphi} - M_5 \frac{b_1}{\ell} M_{F1} S_1 \ddot{\gamma}_1 + M_5 \frac{b_1}{\ell} M_{R1} S_2 \ddot{\gamma}_2 \\
& = -M_5 \frac{b_1}{\ell} M_{F1} S_1 \ddot{\beta}_1 - 2(C_{32} + C_{42}) (\dot{y}_0 + \dot{\theta}) - 2(\ell_{32} + \ell_{42}) (y_0 + \theta) \\
& m_0 \ddot{z}_0 = -K_{31} P_{31} - K_{32} P_{32} - K_{41} P_{41} - K_{42} P_{42} - C_{31} Q_{31} - C_{32} Q_{32} - C_{41} Q_{41} - C_{42} Q_{42} - m_0 g \\
& m_{31} \ddot{z}_{31} = K_{31} P_{31} - \ell_{33} (\ddot{z}_{31} - \dot{z}_{31t} - D51) + C_{31} Q_{31} - C_{33} (\ddot{z}_{31} - D51) - m_{31} g \\
& m_{32} \ddot{z}_{32} = K_{32} P_{32} - \ell_{33} (\ddot{z}_{31} - \dot{z}_{31t} - D52) + C_{32} Q_{32} - C_{33} (\ddot{z}_{32} - D52) - m_{32} g \\
& m_4 \ddot{z}_4 = K_{41} P_{41} + K_{42} P_{42} - \ell_{43} (2\ddot{z}_4 - \dot{z}_{41t} - \dot{z}_{42t} - D61 - D62) \\
& \quad C_{41} Q_{41} + C_{42} Q_{42} - C_{43} (2\ddot{z}_4 - D61 - D62) - m_4 g \\
& M_{1r} \ddot{y}_0 + (C_0 + M_{1r} \dot{\theta}^2) \ddot{\theta} + M_5 \frac{b_1 \dot{\theta}}{\ell} (M_{F1} C_{t1} - M_{R1} C_{t2}) \ddot{\varphi} - M_5 \frac{b_1 \dot{\theta}}{\ell} M_{F1} S_1 \ddot{\gamma}_1 + M_5 \frac{b_1 \dot{\theta}}{\ell} M_{R1} S_2 \ddot{\gamma}_2 \\
& = -M_5 \frac{b_1 \dot{\theta}}{\ell} M_{F1} S_1 \dot{\beta}_1 - K_{31} P_{31} \dot{\theta}_1 - K_{32} P_{32} \dot{\theta}_1 + K_{41} P_{41} \dot{\theta}_2 + K_{42} P_{42} \dot{\theta}_2 - 2\dot{\theta} (\ell_{32} + \ell_{42}) (y_0 + \theta) \\
& \quad - C_{31} Q_{31} \dot{\theta}_1 - C_{32} Q_{32} \dot{\theta}_1 + C_{41} Q_{41} \dot{\theta}_2 + C_{42} Q_{42} \dot{\theta}_2 - 2\dot{\theta} (C_{32} + C_{42}) (\dot{y}_0 + \dot{\theta}) \\
& (B_0 - M_{1r} \dot{\theta} r + \dot{\theta} M_3 M_{F1} C_{t1} + \dot{\theta} M_4 M_{R1} C_{t2}) \ddot{\varphi} - \dot{\theta} M_3 M_{F1} S_1 \ddot{\gamma}_1 - \dot{\theta} M_4 M_{R1} S_2 \ddot{\gamma}_2 \\
& = -\frac{\dot{\theta}}{\ell} M_{1r} v (\ell_1 \dot{\gamma}_1 - \ell_2 \dot{\gamma}_2) + \frac{\dot{\theta}}{\ell} M_{1r} v^2 (\gamma_1 - \gamma_2) - \dot{\theta} M_3 M_{F1} S_1 \dot{\beta}_1 - (\dot{\theta} + r) M_{Fg} (S_1 \dot{\beta}_1 - S_1 \dot{\gamma}_1 + C_{t1} \dot{\varphi}) \\
& \quad - (\dot{\theta} + r) M_{Rg} (-S_2 \dot{\gamma}_2 + C_{t2} \dot{\varphi}) - 2(\dot{\theta} + r) M_{F1} C_{31} (S_1 \dot{\beta}_1 - S_1 \dot{\gamma}_1 + C_{t1} \dot{\varphi}) - 2(\dot{\theta} + r) M_{R1} C_{41} \\
& \quad (-S_2 \dot{\gamma}_2 + C_{t2} \dot{\varphi}) + K_{31} P_{31} b_1 - K_{32} P_{32} b_1 + K_{41} P_{41} b_2 - K_{42} P_{42} b_2 + C_{31} Q_{31} b_1 - C_{32} Q_{32} b_1 \\
& \quad + C_{41} Q_{41} b_2 - C_{42} Q_{42} b_2 \\
& B_4 \ddot{\varphi}_4 = b_2 \{ -K_{41} P_{41} + K_{42} P_{42} - \ell_{43} (2b_2 \dot{\varphi}_4 + \dot{z}_{41t} - \dot{z}_{42t} + D61 - D62) \\
& \quad - C_{41} Q_{41} + C_{42} Q_{42} - C_{43} (2b_2 \dot{\varphi}_4 + D61 - D62) \} \\
& M_{3b1} \ddot{y}_0 + M_{3b1} \ddot{\theta} + \{ (A_0 \frac{1}{\ell} + M_3 \dot{\theta}_1 + M_3 \frac{b_1^2}{\ell}) M_{F1} C_{t1} - (A_0 \frac{1}{\ell} + M_4 \dot{\theta}_2 + M_3 \frac{b_2^2}{\ell}) M_{R1} C_{t2} - (M_3 \dot{\theta}_1 - M_4 \dot{\theta}_2) r \\
& - (A_0 \frac{1}{\ell} + M_3 \dot{\theta}_1 + M_3 \frac{b_1^2}{\ell}) M_{F1} S_1 \ddot{\gamma}_1 + (A_0 \frac{1}{\ell} + M_4 \dot{\theta}_2 + M_3 \frac{b_2^2}{\ell}) M_{R1} S_2 \ddot{\gamma}_2 \\
& = - (A_0 \frac{1}{\ell} + M_3 \dot{\theta}_1 + M_3 \frac{b_1^2}{\ell}) \dot{\beta}_1 - M_{Fg} \dot{\theta}_1 g (S_1 \dot{\beta}_1 - S_1 \dot{\gamma}_1 + C_{t1} \dot{\varphi}) + M_{Rg} \dot{\theta}_2 g (-S_2 \dot{\gamma}_2 + C_{t2} \dot{\varphi}) \\
& \quad - 2(\ell_{32} b_1^2 + \ell_{42} b_2^2) \frac{1}{\ell} \{ M_{F1} (S_1 \dot{\beta}_1 - S_1 \dot{\gamma}_1 + C_{t1} \dot{\varphi}) - M_{R1} (-S_2 \dot{\gamma}_2 + C_{t2} \dot{\varphi}) \} \\
& \quad - 2C_{31} \dot{\theta}_1 M_{F1} (S_1 \dot{\beta}_1 - S_1 \dot{\gamma}_1 + C_{t1} \dot{\varphi}) + 2C_{41} \dot{\theta}_2 M_{R1} (-S_2 \dot{\gamma}_2 + C_{t2} \dot{\varphi}) \\
& \quad - 2(C_{32} b_1^2 + C_{42} b_2^2) \frac{1}{\ell} \{ M_{F1} (S_1 \dot{\beta}_1 - S_1 \dot{\gamma}_1 + C_{t1} \dot{\varphi}) - M_{R1} (-S_2 \dot{\gamma}_2 + C_{t2} \dot{\varphi}) \} \\
& P_{31} = \ddot{z}_0 - b_1 \dot{\varphi} + \dot{\theta}_1 \ddot{\theta} - \ddot{z}_{31} - \dot{z}_{31t} \quad Q_{31} = \ddot{z}_0 - b_1 \dot{\varphi} + \dot{\theta}_1 \ddot{\theta} - \ddot{z}_{31} \\
& P_{32} = \ddot{z}_0 + b_1 \dot{\varphi} + \dot{\theta}_1 \ddot{\theta} - \ddot{z}_{31} - \dot{z}_{32t} \quad Q_{32} = \ddot{z}_0 + b_1 \dot{\varphi} + \dot{\theta}_1 \ddot{\theta} - \ddot{z}_{32} \\
& P_{41} = \ddot{z}_0 - b_2 \dot{\varphi} - \dot{\theta}_2 \ddot{\theta} - \ddot{z}_4 + b_2 \dot{\varphi}_4 - \dot{z}_{41t} \quad Q_{41} = \ddot{z}_0 - b_2 \dot{\varphi} - \dot{\theta}_2 \ddot{\theta} - \ddot{z}_4 + b_2 \dot{\varphi}_4 \\
& P_{42} = \ddot{z}_0 + b_2 \dot{\varphi} - \dot{\theta}_2 \ddot{\theta} - \ddot{z}_4 - b_2 \dot{\varphi}_4 - \dot{z}_{42t} \quad Q_{42} = \ddot{z}_0 + b_2 \dot{\varphi} - \dot{\theta}_2 \ddot{\theta} - \ddot{z}_4 - b_2 \dot{\varphi}_4 \\
& M_{F1} = \frac{g}{2\ell_{31}} M_F = \frac{g}{2\ell_{31}} \left(\frac{\ell_2}{\ell} m_0 + M_3 \right) = \frac{g}{2\ell_{31}} \left(\frac{\ell_2}{\ell} m_0 + m_{31} + m_{32} \right) \\
& M_{R1} = \frac{g}{2\ell_{41}} M_R = \frac{g}{2\ell_{41}} \left(\frac{\ell_2}{\ell} m_0 + m_4 \right)
\end{aligned}$$

このことから、実際に走行しているときには、直線走行時においてさえ左右方向の振動が上下方向の振動と同程度発生しており、それが車両の挙動に与える影響も少なからぬものがあることが予想される。また、わだち路走行試験からバネ下の左右方向加速度が $15-20\text{Hz}$ 付近で共振すると車両不安定になる結果も得られている。上下振動のみを考慮した従来の7自由度力学的モデルでは車両の動的挙動を十分に論じることができず、左右方向の自由度を力学的モデルに取り込む必要があろう。

3. 左右振動を考慮した車両走行のモデル化

左右振動を論じ得るよう既存のモデルの自由度を増やし、新たに10自由度のバネ・ダッシュポット-質量系の力学的モデルを構築した。このモデルでは、図3に示す様に自動車の変形がない状態においてバネ上質量重心接地面に対する投影を原点として左右、前後、上下方向を主軸とする自動車とともに運動する座標系 $G-xyz$ 、重心 G_0 を通る慣性主軸からなる座標系 G_0-abc を選び、変形のない場合近似的にこれら二つの座標系が平行であると仮定する。バネ上質量重心 G_0 の自由度として Y 軸、 Z 軸方向の変位及び X 軸、 Y 軸回りの角変位を選択した。バネ下の自由度は、各々の質量中心位置における Z 軸方向の変位と後部車軸の X 軸回り角変位、及び操舵系の自由度には、前後輪の横すべり角を選択した。モデルの計算に必要な入力値は前輪実舵角とこれに基づく路面の変位（各タイヤについて3方向）であるが、実舵角と操舵角との間に線形性を仮定し、ステアリングレシオの値を決定すれば操舵角を入力値に選ぶこともできる。

自由度を増すことにより必要とする車両の諸元の数は増加する。しかし、車両の諸元に関しては単純なものでさえ不明確であり、モデルの中の不確定要素が増加し、モデルの信頼性が低下することが過去知られている。本研究においては、モデルと車両走行試験における実測値間の非線形最小二乗法によるフィードバックにより諸元の同定を行う。これにより自由度を増やすことによる負の効果を最小にする。

また、自動車の懸架形式はシミュレーション結果と実車走行試験のデータと突き合わせることによってモデルの妥当性を評価するために、試験車と同様の前部独立懸架・後部車軸懸架形式を採用した。なお、この懸架形式については若干の修正により容易に四輪独立懸架形式への変更が可能である。

このモデルの特徴をまとめると以下の様になる。

- 1: 左右方向の振動についてもシミュレートできる。
- 2: 路面の入力が3方向について可能であり、様々な路面形状のもとで計算ができる。
- 3: 操舵系の自由度（横すべり角）を持っているので、直線走行にかぎらずハンドルを操作した場合でもシミュレートが可能である。

このため、わだち路における車両の安定性にとって最も危険である乗り移り運動を任意の路面形状において論じよう。

この力学的モデルを表現する10元連立微分方程式を表2に示す。これはシステム全体のポテンシャルエネルギーを求めたのち、Lagrangeの微分方程式を用いて導出したものである。連立微分方程式は、数値計算法としてRunge-Kutta-Gill法を採用し、パーソナルコンピュータ（PC-9801）で計算を行う。

4. あとがき

上下振動変量のみならず左右振動変量をも自由度に選択した10自由度力学モデルを提案した。今後は過去に実施した実車走行試験のデータから自由度を的確に選択する方法について研究を進めていきたい。また、自由度の取り方によっては力学的モデルによるシミュレーションに必要な車両の諸元が得られないこともしばしば起きるので、この問題を解決するためにも、非線形最小二乗法等を用いて車両諸元のうち未知量で与えられた諸元を推定する方法についても明らかにして、より適合性の高いモデル化の手法を追求していくつもりである。