

# 道路と車両を連携させた運動制御に関する研究

Synthetic Motion Control for Automobiles in Cooperation with Infrastructure

須 田 義 大\*・小 峰 久 直\*・椎 葉 太 一\*・吉 田 寛\*

Yoshihiro SUDA, Hisanao KOMINE, Taichi SHIIBA and Hiroshi YOSHIDA

## 1. 序 論

現在、高度道路交通システム (ITS) において、それまでは車両の重量を支えるだけの役割であった道路に、漏洩同軸ケーブルなどを用いた通信設備によるリアルタイム路車間通信や、磁気ネイル等による経路誘導情報提供などの機能を持たせ車両側と協調させることで、車両側単独では実現できない高い信頼性をもたせることが提案されてきている。これらのいわゆる「ITS仕様」の道路としてこれまで提案されているシステムでは、道路側は車両に対して路車間通信により情報のみを提供し、車両の速度制御、操舵制御等の運動制御に関しては車両側に一任された形態となっている。しかしながら道路交通における重要な機能を車両側ばかりに依存していることは安全上好ましいとはいえず、車両の持つ機能をできる限りインフラ側でバックアップすることが必要であると考えられる。

本研究では、道路側から車両に対して情報のみならず、力やエネルギーを作用させるという新たなコンセプトに基づき、車両のタイヤに対して制動力を与えるような路面構造物を考案し、シミュレーションおよび実験によりその性能を評価した。また、そのような路面構造物により実現する車両運動制御の可能性について検討を加えた。

インフラからの車両運動制御という特徴を持つ実用化されたシステムとして、路面凹凸による速度抑制手法[1]や、鉄道ヤードにおける無動力貨車の駆動・制動[2]などの例がある。

## 2. 提案する路面構造物の解析

### 2.1 踏板構造物

路面より車両のタイヤに対して制動力を与える路面デバイスとして図1に示すような踏板構造物を考案した。踏板構造物は走行する車両のタイヤに踏み込まれることにより車両から走行エネルギーを吸収する。

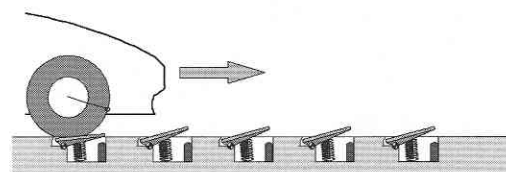


図1 提案する路面構造物のコンセプト

### 2.2 シミュレーションモデル

解析に用いた路面構造と車両のモデルを図2に示す。車両は半車体モデルとし、タイヤ-路面間の相互作用としては、タイヤ接線方向の力は考慮せず路面（踏板）に対して垂直に働くばねと近似した。踏板はばねとダンパを組み合わせたアブソーバによって初期角度  $\theta$  で支持されているものとし、車両が通過することにより踏み込まれ車両の運動エネルギーを吸収する。車両諸元としては乗用車を想定し、踏板構造物の諸元（初期角度、踏板慣性モーメント、アブソーバ剛性および減衰係数）と車両の進入速度をパラメータとして解析を行った[3]。

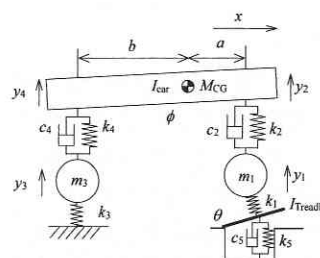


図2 解析モデル

### 2.3 踏板諸元の必要条件

踏板諸元の必要条件として、車両が飛び上がりタイヤの接地荷重が抜けることがないことが考えられる。よって踏板通過中のタイヤ接地荷重の低下がなるべく小さく、かつ車両が板終端に到達するまでに踏板が倒れきるようにアブソーバの剛性および減衰係数を決定した。また運動方程式よりタイヤ-踏板間の垂直抗力は、踏板の慣性力による項、

\*東京大学生産技術研究所 第2部

表1 車両諸元

車体部		
ばね上質量	$M$	600 [kg]
車体慣性モーメント	$I_{car}$	1200 [Nm <sup>2</sup> ]
前輪部		
ばね下質量	$m_1$	30 [kg]
タイヤ垂直剛性	$k_1$	160000 [N/m]
サスペンション剛性	$k_2$	25000 [N/m]
サスペンション減衰定数	$c_2$	2500 [Ns/m]
後輪部		
ばね下質量	$m_3$	30 [kg]
タイヤ垂直剛性	$k_3$	160000 [N/m]
サスペンション剛性	$k_4$	25000 [N/m]
サスペンション減衰定数	$C_2$	2500 [Ns/m]

踏板を支えるアブソーバの減衰力による項、アブソーバばね力による項で構成される。図3にタイヤ-踏板間の垂直抗力とそれを構成する各項の変動の計算結果例を示す。板の慣性力の変動によるタイヤ接地力の落ち込みを埋める形ではね力と減衰力が車両を支えていることがわかる。車両進入速度が大きくなるとこの慣性力による変動が大きくなり、タイヤの接地力の低下が大きくなる。よって車両進入速度に対するロバスト性を考えると踏板の慣性モーメントの小さい短い踏板が好ましい。

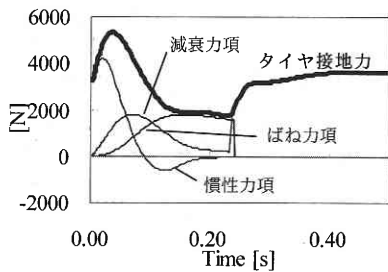


図3 タイヤ-踏板間の垂直力の構成

2.4 エネルギー収支

踏板構造物を車両が通過する際、車両の失う進行方向の運動エネルギー  $E_{Deceleration}$  と、車両のタイヤに作用する進行方向の力  $F_x$  および上下方向の力  $F_z$  が行う仕事、路面の踏板により吸収されるエネルギー  $E_{road}$ 、通過後車両の上下振動となりサスペンションで散逸されるエネルギー  $E_{suspension}$  の間には以下の収支が成り立つ。

$$E_{Deceleration} = \int F_x dx = \int F_{zdz} + E_{road}$$

$$\int F_{zdz} = E_{suspension}$$

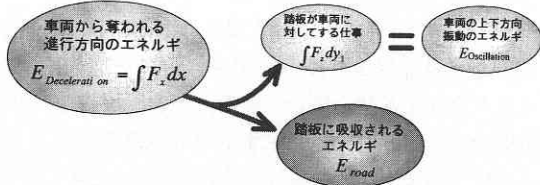


図4 エネルギー収支

よって計算結果については、制動効果の大きさの指標としてタイヤに作用する進行方向の力の行う仕事を、生じる上下運動の大きさの指標としてタイヤに作用する上下方向力の行う仕事と車体重心位置における加速度を、さらにタイヤのグリップ力に与える影響の指標としてタイヤ-踏板間の垂直力の変動を評価した。

2.5 シミュレーション結果

踏板構造物の諸元について何通りかの計算を行った結果、諸元として適当と考えられる長さ 0.3 [m]、慣性モーメント 0.05 [Nm<sup>2</sup>]、支持角度 20 [deg] としたときの踏板構造物についてのシミュレーション結果を表2に示す。

表2 踏板構造物特性の計算結果

車両進入速度	30	60	[km/h]
車両の失うエネルギー	149.2	257.5	[J]
上下振動のエネルギー	6.6	8.73	[J]
車体平均減速度	0.75	1.30	[m/s <sup>2</sup> ]
車体最大上下加速度	1.95	2.12	[m/s <sup>2</sup> ]
タイヤ接地力最大値	1.86	2.30	静荷重で規格化
タイヤ接地力最小値	0.74	0.71	

3. 実験

シミュレーションの妥当性を実験により検証した。実験装置の概要を図5、6に示す。

実験装置車両部は1/4車体を模しており、駆動装置により牽引される。レーザ変位計及び加速度計を用いてばね上・ばね下の上下変位および加速度を測定する。また3軸

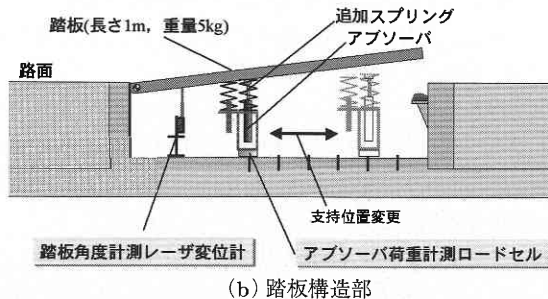
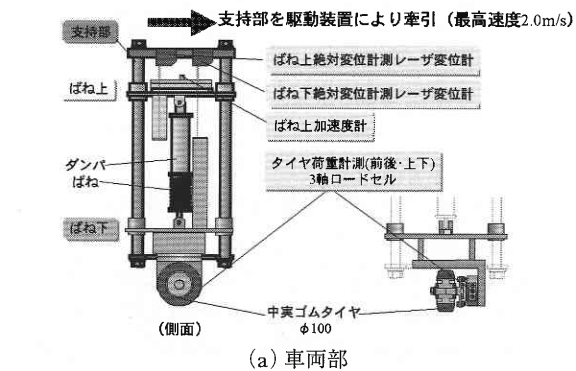


図5 実験装置

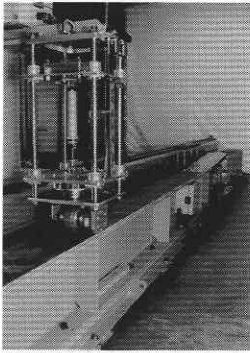
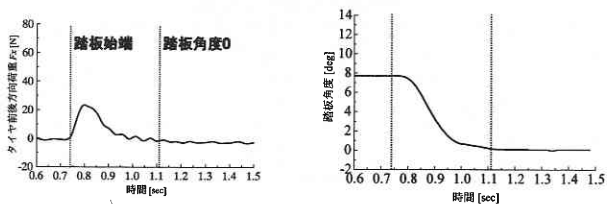
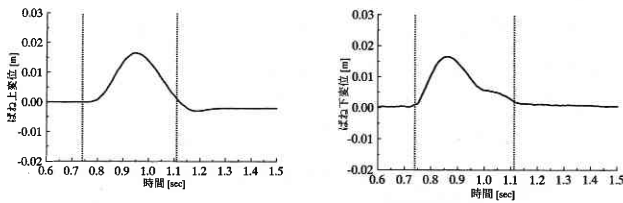


図6 実験装置写真



(a) タイヤ前後方向荷重

(b) 踏板角度



(c) ばね上絶対上下変位

(d) ばね下絶対上下変位

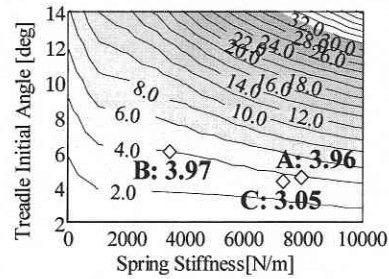
図7 計測結果

ロードセルを用いてタイヤに作用する前後・上下・左右方向の荷重を測定する。

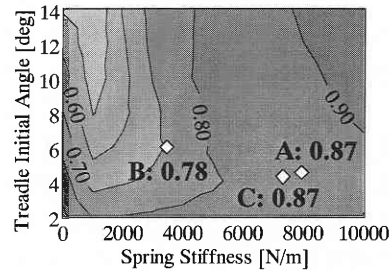
踏板構造部は、重量約5kgのアルミ板がリンクとアブソーバによって支持される構造となっている。踏板構造部のアブソーバ下のロードセルによりアブソーバに加わる荷重を測定する。またレーザ変位計により踏板角度を測定する。車両諸元、及び踏板構造物のセッティングを変化させて計測を行った。

図7に実験における計測結果の一例を示す。これらの計測結果より、車両から失われた進行方向のエネルギーと、車両の失ったエネルギーの内、踏板構造物により路面側で吸収された割合を算出した。

図8は車両及び踏板の諸元を実験装置と同じ条件にしてシミュレーションを行った結果である。(a),(b)はそれぞれ踏板角度とアブソーバばね剛性をパラメータとしたとき



(a) 踏板通過により車両から奪われたエネルギー



(b) 車両の失ったエネルギーのうち路面側で吸収される割合

図8 シミュレーション結果と実験結果

の、車両から失われた進行方向のエネルギー、および車両の失ったエネルギーのうち踏板構造物により路面側で吸収された割合である。図上に◇でプロットしているのが実験の計測データより算出した各エネルギーであるが、シミュレーション結果とほぼ一致している。

#### 4. 踏板構造物を用いた車両運動の制御

##### 4.1 踏板構造物敷設路面による制動

踏板構造物が一定間隔で設置された路面により車両の制動を行うことを考える。図9に長さ0.3m、支持角度25degの踏板を0.5m間隔で設置した区間を車両が通過するときの車両の速度変化を示す。このとき車両は通常走行時における軽いブレーキングに相当する $1\text{ m/s}^2$ (0.1G)前後の減速を生じる結果となった。このとき車両進入速度80km/hのときには、車両には同時に加速度 $1.6\text{ m/s}^2$ の上下振動が生じ、またこのときタイヤ接地力の最小値は静荷重の1/2になる。

また図10に、踏板の出力の大きさを決めるパラメータとして慣性モーメントを変化させた場合の車両の平均減速度と、生じる上下振動加速度の計算結果を示す。また図11に、慣性モーメントを変化させた場合の車両の平均減速度と、タイヤ接地荷重の最小値の計算結果を示す。踏板の慣性モーメントを大きく設定することで、得られる制動効果が大きくなるが、同時に車両に生じる上下振動も大きくなる。 $1.5\text{ m/s}^2$ の減速

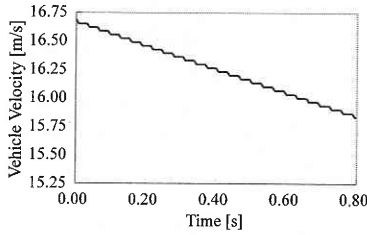


図9 車両速度変化

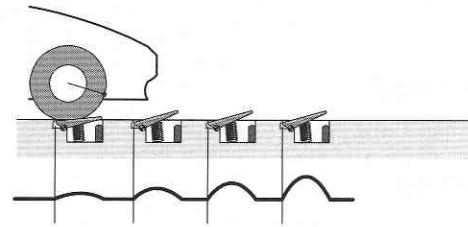


図12 踏板構造物敷設路面の模式図

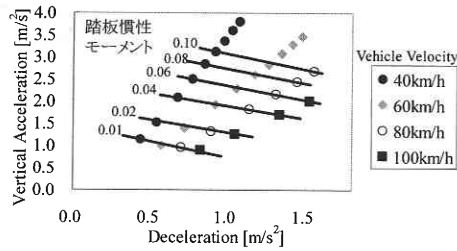


図10 車両減速度と上下振動加速度

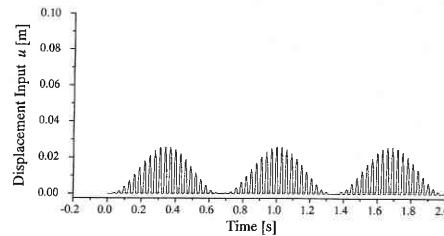


図13 踏板構造物敷設路面による路面入力

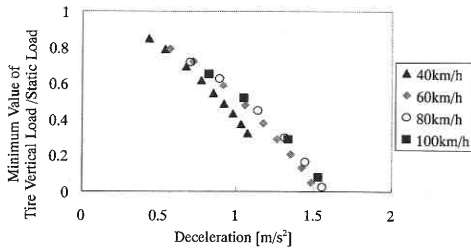


図11 減速度とタイヤ接地荷重の最小値

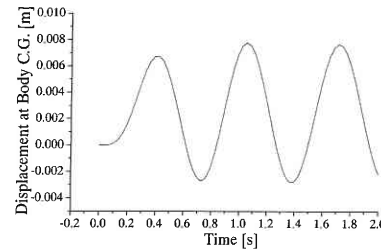


図14 車体変位

が生じるセッティングではタイヤの接地荷重の最小値はほとんど0になり、タイヤは跳び上がっていることがわかる。

#### 4.2 上下加振による速度抑制手法の検討

次に、踏板構造物により車速に応じてばね上共振点にあたる振動を車両に発生させ、ドライバーに不快感を与えることにより速度を抑制させることを目的とした検討を行った。4.1節と同様に長さ0.3mの踏板構造物が0.5m間隔で敷設された路面を想定した。図12に示すように路面に並べて敷設された踏板構造物のパラメータを1つ1つ変化させ、ばね上共振周波数のうねりを持つ図13のような路面入力をつくることにより、その上を走行する車両の車体に生じる変位の計算結果を図14に示す。このように車両の走行速度に合わせて的確な路面入力を踏板構造物によって与えることで、車体には共振振動を生じることがわかった。これを利用して、たとえば制限速度を越える速度で走行する車両に対し、車体に共振振動を生じさせることで、道路側から積極的にドライバーに減速を促すなどの速度抑制手法が考えられる。

### 5. 結 論

・道路側から車両に対して力を働きかけるという新しいコ

ンセプトに基づき、タイヤに対して作用する路面構造物として踏板構造物を考案した。踏板構造物により車両の走行エネルギーを路面側で吸収できることをシミュレーションと実験で確認した。

- ・踏板構造物を複数敷設した路面によって、道路側から車両に対し約  $1 \text{ m/s}^2$  (0.1G) の制動を加えることができることを示した。
- ・踏板構造物を複数敷設した路面によって、ある速度で走行する車両に対して共振周波数の上下振動を与えることができる。それによりドライバーに車両の速度を抑制させることが考えられる。

本研究は、建設省土木研究所の受託研究「ITSに関する基礎的先端的研究」として行われたものである。関係者各位に感謝致します。(1999年6月30日受理)

### 6. 参 考 文 献

- 1) 日本舗道株式会社, 速度抑制舗装スピードセーブ工法技術資料, (1996).
- 2) 沼田・八十島・松本, 鉄道工学, オーム社, pp.154-164.
- 3) 須田・吉田・椎葉, インフラ・車両を連携させた運動総合制御に関する研究, 第7回機械学会交通・物流部門大会講演論文集, No.98-37, pp.281-284, (1998).