

I-15 舗装わだち掘れのモデリング方法に関する研究

Study on the modeling method suitable for pavement rutting

富山和也¹・川村彰²・白川龍生³

Tomiyama Kazuya, Kawamura Akira, and Shirakawa Tatsuo

抄録： 舗装に生じるわだち掘れ形状のモデリングにおいて、高次の関数を用いれば、特定の断面における適合性は高くなるが、汎用性が低下する問題がある。本研究では、舗装に生じるわだち掘れ形状の定量的な把握を目的に、2次関数及びスプライン関数を用いて舗装わだちモデルを開発した。開発したこれらのモデルは、形状の適合性、及び車両運動シミュレーションへの適応性について、1998年に実施されたPIARC EVEN試験データによって検証した。その結果、舗装に生じるわだち掘れのモデリングにおいてスプライン関数が有効であることがわかった。

Abstract: In case of fitting geometric model of pavement rutting to the real data, the model of a high order function has the advantage of goodness of fitness. However, it also has the disadvantage of versatility. In this study, we developed the pavement rutting models with quadratic function and spline function for quantification of pavement rutting characteristics on road surface. The two developed models are verified in respect of the adaptability of these shapes and the accommodation for the simulation method of the vehicle dynamics using the road profile data of the PIARC EVEN experiment in 1998. As a result, it is indicated that the spline function is applicable for representing pavement rutting characteristics.

キーワード： わだち掘れ、舗装わだちモデル、PIARC EVEN データ、路面プロファイル、CARSIM

Keywords : Rutting, Pavement rutting model, EVEN data, Road profile, CARSIM

1. はじめに

道路舗装における路面は、直接車両と接する部分であり、その性状の良し悪しは車両の走行に直接影響を及ぼすばかりでなく、道路利用者の快適性や安全性に重大な影響を及ぼす¹⁾。さらに、車外騒音や振動のように沿道環境に対しても影響を与える。そのため、常に路面の状態を把握するとともに、その状態を評価し、その程度によって適当な時期に適切な補修を行なう事が重要である²⁾⁻⁴⁾。

路面の補修要因としては、ひび割れ、わだち掘れ、平坦性といった路面性状を原因とするものが大半を占めるが⁵⁾、その中でも、道路利用者や沿道環境に対して直接影響を与える「わだち掘れ」及び「平坦性」が大きな関心ごととなっている⁶⁾。平坦性のような縦断プロファイルに関しては、従来から道路利用者の評価に関係する要素と結びつけられてきた⁷⁾。しかし、わだち掘れのような横断プロファイルに関しては、車両の操縦性・安定性に及ぼす影響からわだち掘れを評価する試みがなされているものの^{7),8)}、道路利用者の評

価に関する評価指標を確立するには至っていない。

また、我が国においてわだち掘れは、その深さを持って評価基準とされているが^{1),9)}、わだち掘れ深さの定義が各道路管理機関で異なる、などの問題がある¹⁰⁾。

路面プロファイルが車両及び道路利用者に与える影響の評価実験は、実車両を用いた実験と、車両運動シミュレーション（以下、「シミュレーション」とする）による実験とがあるが、今日、安全かつ迅速に、また同一条件で繰り返し実験できることから、後者が高い注目を集めている^{7),8),11)-14)}。シミュレーションによるわだち掘れの評価実験では、主に車両挙動に重点を置き研究がなされている^{7),8)}。一方で、評価の対象となるわだち掘れの形状に関しては、車輪通過位置の凹みのみを近似したものであり、実際に舗装に生じるわだち掘れの形状、特に、近年の重交通に伴い、車線中央部付近が隆起する流動の影響はあまり考慮されていない。

このような背景から本研究では、わだち掘れ形状の定量的な把握を目的に、比較的簡易な関数により

1：学生員 北見工業大学大学院 博士前期課程 土木開発工学専攻

(〒090-8507 北海道北見市公園町 165, Tel:0157-26-9516, E-mail:tomiyama@vortex.civil.kitami-it.ac.jp)

2：正会員 博(工) 北見工業大学 教授 工学部土木開発工学科 (〒090-8507 北海道北見市公園町 165)

3：正会員 博(工) 北見工業大学 助手 工学部土木開発工学科 (〒090-8507 北海道北見市公園町 165)

わだち掘れ形状を近似し、適度な自由度を持たせう
えで単純化された舗装わだちモデル（以下、「モデル」
とする）を開発した。そして、実際に路面に生じたわ
だち掘れ（以下、「実形状」とする）との形状の適合
性、及びシミュレーションにおける適応性を、それぞ
れ考察した。

なお、実形状データは、1998 年に世界道路協会
（PIARC）により実施された路面性状に関する共同試
験（以下、「EVEN 試験」とする）結果の一部を用い
た^{1), 15)}。また、シミュレーションに関しては、様々な
運動モデルやシミュレーションソフトウェアが開発さ
れているが、本研究では、ミシガン大学交通研究所
（UMTRI）によって開発された汎用車両運動シミュ
レーションソフト「CARSIM」を用いた^{12), 16)}。

2. わだち掘れ形状の分析

(1) 使用データ

EVEN 試験において日本国内では北海道地域の国道、
道道、高速道路から 15 区間が選出された。本研究では、
今日において車線中央部付近が隆起する流動性わだち
掘れが顕著であることを考慮したうえで³⁾、特にわだ
ち掘れ損傷が著しい区間（区間 No.4）を選定した。測
定延長は 100m であり、測定データのうち、水準測量
の測定結果にポータブル型路面プロファイル測定装置
の測定結果を内挿して得られた横断プロファイルデー
タを用いた。横方向のサンプリング間隔を 100mm と
し、車線中央部を基準点とした。また、車線幅員は 2.9m
である。選定区間より得られた横断プロファイルの一
例を図-1 に示す。

(2) わだち掘れ深さの定義

わだち掘れの評価を行う際に、評価指標となるもの
がわだち掘れ深さであり、各道路管理機関でその定義
が異なることを前述した。わだち掘れ深さの定義とは、
測定データからわだち掘れ深さを算出する方法であり、
一般に平均法とピーク法の 2 種類に大別される¹⁷⁾。わ
だち掘れ深さの定義を図-2 に示す。ピーク法は平均法
に比べ、深い値を示す傾向にある。そこで、本研究で
は車両の走行性に重点を置き、ピーク法によってわだ
ち掘れ深さを定義する。なお、わだち掘れ深さは図-2
に示された D_1 、 D_2 のうち深い方の値である。

(3) わだち掘れ形状の特徴

図-1 を見る限り、わだち掘れの形状は車線の中央部
を中心に左右およそ $\pm 1000\text{mm}$ の位置に発生しており、
放物線状であることが窺える。また、わだち掘れは左
右非対称であり、頂点はやや正の方向に偏っているこ
とがわかる。

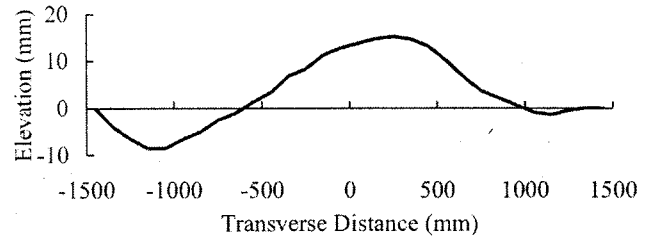


図-1 横断プロファイルの一例

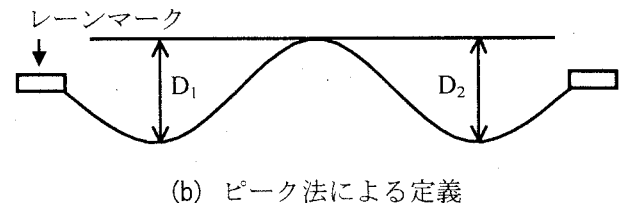
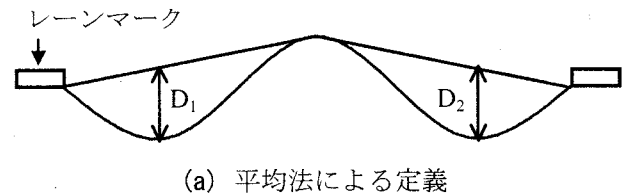


図-2 わだち掘れ深さの定義

以上の考察を踏まえ、次章以降で舗装わだちモデル
の設計を行う。

3. 舗装わだちモデルの設計

(1) 使用関数の選択

わだち掘れ形状の特徴に基づき、わだち掘れをモデ
リングする上で重要な要素として以下があげられる。

- a) わだち掘れ深さ
- b) わだち掘れの幅
- c) わだち掘れの発生位置

また、上記の条件を満たし、さらに左右独立してわ
だち掘れを変化させられること、かつ容易に理解・再
現されることが必要である。

そこで、上述の要件を満たす関数として 2 次関数及
びスプライン関数の特徴にそれぞれ着目し、2 通りの
わだちモデルを設計する。2 次関数は、パラメータと
して上述の要件を満たし、スプライン関数は特徴点（頂
点や発生位置）を与えることによって上述の要件を満
たす、という特徴をそれぞれ有する。

なお、2 次関数により設計したモデルを
QFM(Quadratic Function Model)、スプライン関数により
設計したモデルを SFM(Spline Function Model)と称
し、以下参照する。

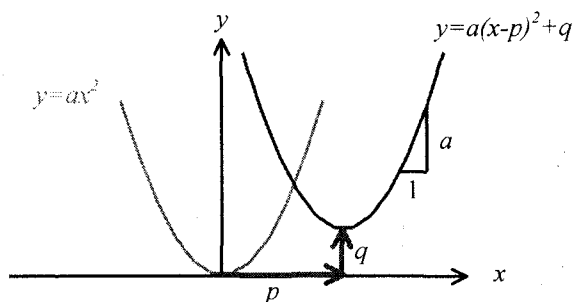


図-3 2次関数

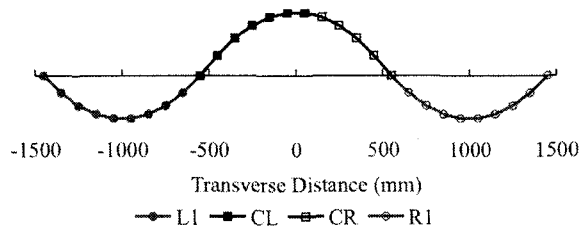


図-4 2次関数の組み合わせによる設計

(2) 2次関数を用いたモデルの設計

QFM の設計に使用する 2 次関数の基本形を式(1)に示す。なお、横軸を y 軸、縦軸を x 軸とする。

$$y = a(x - p)^2 + q \quad (a \neq 0) \quad (1)$$

式(1)は、 $y = ax^2$ のグラフを、 x 軸方向に p 、 y 軸方向に q だけ平行移動したグラフであり、 a は放物線の幅を与え、 $a > 0$ のときは下に凸、 $a < 0$ のときは上に凸となる (図-3)。

ここで、QFM の設計に際し、式(1)の各変数を以下のように定める。

y : 高さ (mm)

x : 距離 (mm)

a : わだち掘れの幅を表すパラメータ

p : わだち掘れの発生位置 (mm)

q : わだち掘れ深さ (mm)

また、 a は式(2)によって得られる。

$$a = \frac{y - q}{(x - p)^2} \quad (2)$$

QFM は図-4 に示すように 4 つの 2 次関数の組み合わせにより設計する。これは、左右独立して設計するためである。設計条件は以下の通りである。

- 基準点は、図-4 に示す放物線 CL(CR)の頂点とする。
- わだち掘れの発生位置は、基準点より $\pm 1000\text{mm}$ の点とする。
- 各放物線を組み合わせる点は、当該点での接線の傾きを等しくし、また、モデルをシンプルにするため、「基準点」及び「基準点より $\pm 500\text{mm}$ の点」とする。

以上を踏まえ、設計した QFM の構成式を式(3)～(6)に、パラメータ a を式(7)～(10)に示す。な

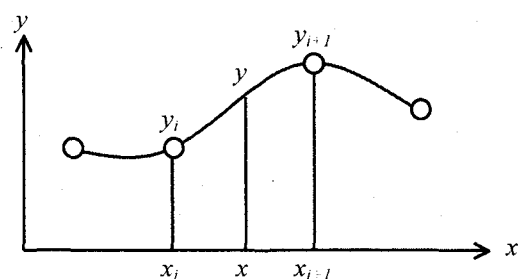


図-5 スプライン関数

お、パラメータ a における添字は、図-4 に示した放物線に対応し、左右の車輪通過位置におけるわだち掘れ深さをそれぞれ q_L 、 q_R とする。

$$\text{CL} : y = a_{CL} x^2 \quad (-500 \leq x \leq 0) \quad (3)$$

$$\text{CR} : y = a_{CR} x^2 \quad (0 < x \leq 500) \quad (4)$$

$$\text{L1} : y = a_{L1} (x + 500)^2 - q_L \quad (-1500 \leq x < -500) \quad (5)$$

$$\text{R1} : y = a_{R1} (x - 500)^2 - q_R \quad (500 < x \leq 1500) \quad (6)$$

$$a_{L1} = \frac{-q_L / 2}{(-500)^2} \quad (7)$$

$$a_{CR} = \frac{-q_R / 2}{500^2} \quad (8)$$

$$a_{L1} = \frac{q_L / 2}{(-500 + 1000)^2} = \frac{q_L / 2}{500^2} \quad (9)$$

$$a_{R1} = \frac{q_R / 2}{(500 - 1000)^2} = \frac{q_R / 2}{500^2} \quad (10)$$

(3) スプライン関数を用いたモデルの設計

スプライン関数は次数の異なるものが多数考えられるが、本研究では、補間の問題に使われることの多い 3 次のスプライン関数を用いて、SFM の設計を行う。次数を 3 次にするには、関数の柔軟さと取扱いの簡単さから考えて適当であると考えられる。

3 次のスプライン関数は x_i と x_{i+1} の間の近似関数を次のように表現する (図-5) ¹⁸⁾。

$$N \text{ 個のデータについて、} i = 0, 1, 2, \dots, N-1 \text{ とすると、} \\ y(x) = y_i + a_{1i}(x - x_i) + a_{2i}(x - x_i)^2 + a_{3i}(x - x_i)^3 \quad (11)$$

である。このとき、

$$\frac{dy}{dx} = a_{1i} + 2a_{2i}(x - x_i) + 3a_{3i}(x - x_i)^2 \quad (12)$$

$$\frac{d^2y}{dx^2} = 2a_{2i} + 6a_{3i}(x - x_i) \quad (13)$$

となり、 $x = x_i$ での接続条件により、

$$y_i + a_{1i}h_i + a_{2i}h_i^2 + a_{3i}h_i^3 = y_{i+1} \quad (14)$$

$$a_{1i}h_i + 2a_{2i}h_i + 3a_{3i}h_i^2 = a_{1(i+1)} \quad (15)$$

$$2a_{2i}h_i + 6a_{3i}h_i = 2a_{2(i+1)} \quad (16)$$

ここで、

$$h_i = x_{i+1} - x_i \quad (17)$$

である。求める 2 次導関数の値を u_i とすると、以下の

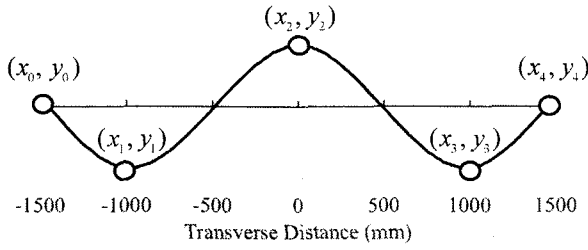


図-6 3次スプライン関数による設計

連立方程式で表される.

$$\begin{Bmatrix} 2(h_0+h_1) & h_1 & & & 0 \\ & \ddots & & & \\ & & h_{i-1} & 2(h_{i-1}+h_i) & h_i \\ & & & \ddots & \\ 0 & & & & h_{N-2} & 2(h_{N-2}+h_{N-1}) \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ \vdots \\ u_i \\ \vdots \\ u_{N-1} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} v_1 \\ \vdots \\ v_i \\ \vdots \\ v_{N-1} \end{Bmatrix} \quad (18)$$

ただし,

$$v_i = 6 \left[\frac{y_{i+1} - y_i}{h_i} - \frac{y_i - y_{i-1}}{h_{i-1}} \right] \quad (i=1, 2, \dots, N-1) \quad (19)$$

また, 両端は自然境界条件で,

$$\begin{cases} u_0 = 0 \\ u_N = 0 \end{cases} \quad (20)$$

とする.

以上より, 式(11)の係数は,

$$a_{1i} = \frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i} - \frac{1}{6}(x_{i+1} - x_i)(2u_i + u_{i+1}) \quad (21)$$

$$a_{2i} = \frac{u_i}{2} \quad (22)$$

$$a_{3i} = \frac{u_{i+1} - u_i}{6(x_{i+1} - x_i)} \quad (23)$$

となる.

SFM の設計条件は図-6 に示す次の 5 点を仮定する.

a) 車線外側端 (わだち掘れ測定の際の基準点)

$$\begin{cases} (x_0, y_0) = (0, 0) \\ (x_4, y_4) = (0, 0) \end{cases}$$

b) わだち掘れ発生位置

$$\begin{cases} (x_1, y_1) = (-1000, y_1) \\ (x_3, y_3) = (1000, y_3) \end{cases}$$

c) 車線中央部

$$(x_2, y_2) = (0, y_2)$$

ここで, 左右の車輪通過位置におけるわだち掘れ深さをそれぞれ r_L , r_R とすると, y_1 , y_3 は,

$$y_1 = \begin{cases} y_2 - r_L & (y_2 \geq 0) \\ 0 - r_L & (y_2 < 0) \end{cases} \quad (24)$$

$$y_3 = \begin{cases} y_2 - r_R & (y_2 \geq 0) \\ 0 - r_R & (y_2 < 0) \end{cases} \quad (25)$$

となる. 設計条件より $N=5$ であるので, 式(18)は,

$$\begin{Bmatrix} 2(h_0+h_1) & h_1 & 0 \\ h_1 & 2(h_1+h_2) & h_2 \\ 0 & h_2 & 2(h_2+h_3) \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{Bmatrix} \quad (26)$$

と表せる. 式(26)を,

$$\mathbf{AB} = \mathbf{C} \quad (27)$$

と書いたとき, 両辺に逆行列 $\mathbf{A}^{-1}$ を掛けると,

$$\mathbf{B} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{C} \quad (28)$$

となり, u_1 , u_2 , u_3 が求められる.

以上より, わだち掘れ深さと車線中央部の高さ(y_2)を与えることで, 式(11)により SFM が求まる.

(4) モデルの性質

前節までに 2 次関数とスプライン関数という 2 通りの関数を用いてモデルを設計した. ここで, それぞれのモデルの性質を実形状の特徴に基づき整理し把握する. 整理すべき要素としては以下があげられる.

a) 車線外側端部

b) わだち掘れ発生位置

c) 車線中央部 (頂点)

d) 形状変化の自由度

a) 車線外側端部は, わだち掘れ測定の際高さの基準となる部分であり, 実勢を考慮すると高さが 0 であることが望ましい. b) わだち掘れ発生位置は高さの最も低い点であり, 本研究では車線中央部から $\pm 1000\text{mm}$ の位置と仮定している. c) 車線中央部は, モデリングの際に頂点となる部分である. d) 形状変化の自由度とは, 左右独立した変化の仕方や, 再現の容易さもこれに含まれる. これらの性質を整理したものを表-1 に示す. なお, 表中, 2 次関数を用いたモデルを「QFM」, スプライン関数を用いたモデルを「SFM」と記した.

表-1 より, QFM はわだち掘れの発生位置など, 横方向の位置を正確に表現できる. また, 再現も容易である. しかし, 車線部外側端部で一定の値をとらず, 車線外側端部の高さを 0 にした場合, 車線中央部 (頂点) が移動してしまう. また, わだち掘れ深さが左右異なる場合は, 左右の車線外側端部での高さも異なる値になってしまう.

表-1 モデルの性質

	QFM	SFM
i)車線外側端部	一定の値をとらない。車線外側端部で高さを 0 にするためには、モデル全体を上下させる必要がある。特に、左右のわだち掘れ深さが異なる場合は、車線外側端部の高さも左右異なってしまう。	一定の値をとる。計算条件として車線外側端部の高さを 0 と与えている。
ii)わだち掘れ発生位置	一定の値をとる。設計された位置（本研究では車線中央部から±1000mm）において、高さの最小値をとる。	一定の値をとらない。わだち掘れ発生位置を通過条件として与えているため、設計された位置（本研究では車線中央部から±1000mm）において、高さの最小値をとるとは限らない。
iii)車線中央部（頂点）	一定の値をとる。ただし、車線外側端部の高さ 0 にするためにモデル全体を上下させた場合はこの限りではない。	一定の値をとらない。「ii)わだち掘れ発生位置」と同様に通過条件として与えているため、車線中央部において高さが最大値をとるとは限らない。
iv)形状変化の自由度	左右独立したわだち掘れ深さの変化が可能である。しかし、左右のわだち掘れ深さが異なる場合、車線外側端部での高さが異なってしまう。 数式も比較的簡易であり、容易に再現できる。	左右独立したわだち掘れ深さの変化が可能であり、与えられた点を通過（特に、車線外側端部）することから、QFM に比べ自由度が高い。 QFM に比べ数式が複雑で、計算量も多い。

一方、SFM は、車線外側端部で常に一定の値をとり、形状変化の自由度が高い。しかし、わだち掘れ発生位置や車線中央部（頂点）を通過条件として与えているため、その地点で最小値もしくは最大値をとるとは限らない。

そこで、これらの性質がモデリングに及ぼす影響を定量化するため、次章以降で実形状とそれぞれのモデルとの適合性、及びシミュレーションによる適応性を検証する。

4. 形状適合性の検討

QFM は関数のパラメータを変化させることにより、複数の放物線を組み合わせ、所定のわだち掘れ形状を与える。一方、SFM は与えられた点の間を区間ごとに多項式で近似し、所定のわだち掘れ形状を与える。そして前述のように、わだち掘れのモデリングにおいて QFM と SFM はそれぞれ異なった性質を有する。そこで、本章ではそれらの性質がモデリングに及ぼす影響を定量化するため、EVEN 試験結果より得られた実形状と、それぞれのモデルとの適合性を比較、検討する。

なお、EVEN 試験において、わだち掘れの断面は測線

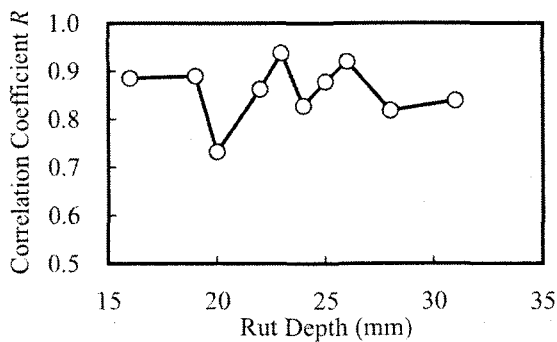
上 5m 間隔に、縦断距離 $L=140\text{m}$ ～ $L=240\text{m}$ の間で測定されたが、本研究ではそのうち、10m 毎の断面を適合性の検討に使用した。

(1) 相関係数による比較

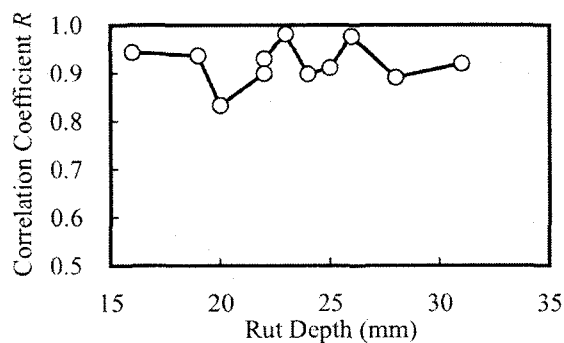
モデルと実形状で横方向のサンプリング間隔を等しくとることにより、同一距離における高さにおいて、相関係数による断面形状の比較が可能である。

形状を比較する際の基準点高さは実形状の基準点高さ、即ち、車線中央部付近での高さの最大値である。

相関係数による比較結果を図-7 に示す。実用上の目安値を $R=0.8$ と考えれば、図-7(a) より QFM では、一つの断面で $R=0.8$ を下回るが、全体的に相関性は概ね良好である。一方、図-7(b) より SFM では、多くの断面で $R=0.9$ 以上と高い相関性を示した。また、わだち掘れ深さと相関係数の間には関係性が見られない。そこで、これらの因果関係を考察するために、QFM と SFM において相関係数の高い断面と、低い断面における形状の比較を図-8、図-9 にそれぞれ示す。また図-7～図-9 において、2 次関数を用いたモデルを「QFM」、スプライン関数を用いたモデルを「SFM」と記し、実形状を「Measurement」と記した。

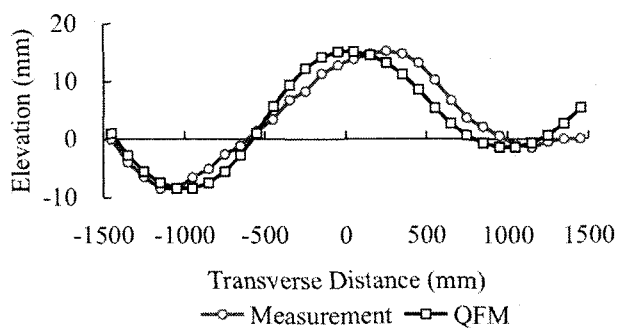


(a) QFM における比較結果

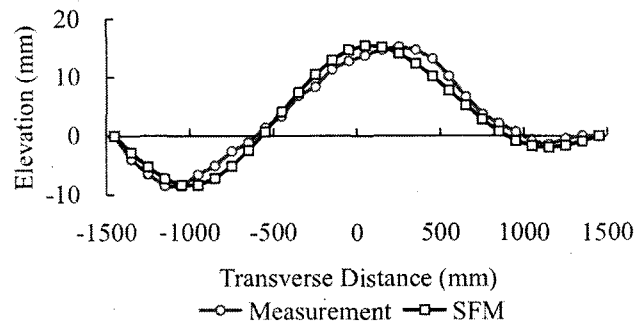


(b) SFM における比較結果

図-7 相関係数による比較結果

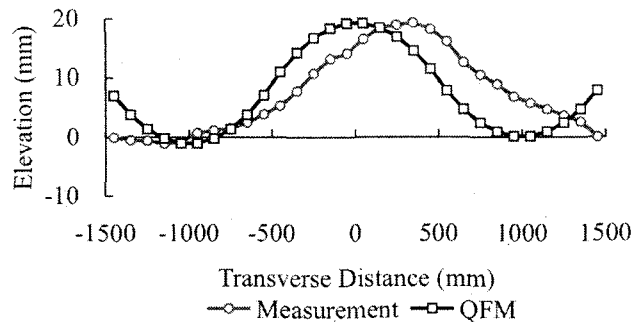


(a) QFM ($R=0.94$, $L=220\text{m}$)

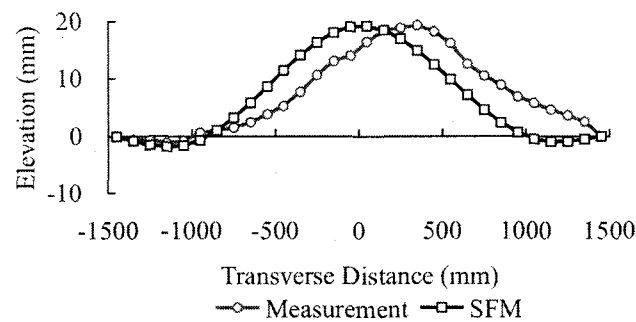


(b) SFM ($R=0.98$, $L=220\text{m}$)

図-8 相関性の高い断面



(a) QFM ($R=0.73$, $L=240\text{m}$)



(b) SFM ($R=0.83$, $L=240\text{m}$)

図-9 相関性の低い断面

QFM に関して、図-8(a)及び図-9(a)より、車線外側端部での高さの差異は明らかである。また、図 9(a)のように左右でわだち掘れ深さが極端に異なる場合、QFM では車線外側端部での誤差が大きくなり相関性が低くなることがわかる。

SFM に関して、図 8-(b)よりわだち掘れ発生位置で高さの最小値をとらないことによる誤差は、実用上、許容範囲内であると考えられる。

QFM, SFM に共通して、図-9 より断面全体が盛り上がりになってしまう、盛り上がりタイプのわだち掘れでは相関性が低くなる。また、図-9 において、実形状は車線中央部で頂点とならず、これによって誤差が生じて

いると考えられるが、汎用性を考慮しモデルの頂点は車線中央部のままとする。

(2) わだち掘れの傾きによる比較

頂点とわだち掘れ深さ発生位置の 2 点間を直線で結んだとき、直線のなす傾きの絶対値を「わだち掘れの傾き（以下、「傾き」とする）」と定義する（図-10）。傾きを求めることにより、わだち掘れの歪み具合を比較することが可能である。モデルと実形状の比較結果を図-11 に示す。また、図中、2 次関数を用いたモデルの傾きを「QFM Slope」、スプライン関数を用いたモデルの傾きを「SFM Slope」と記し、実形状の傾き

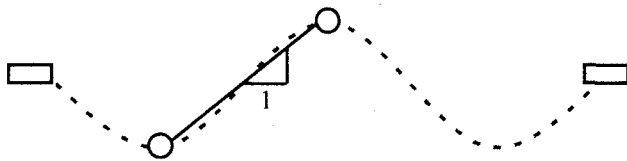
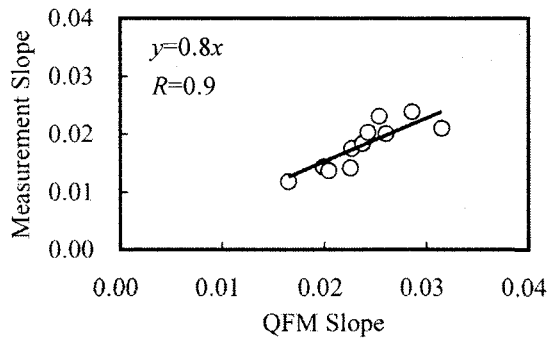


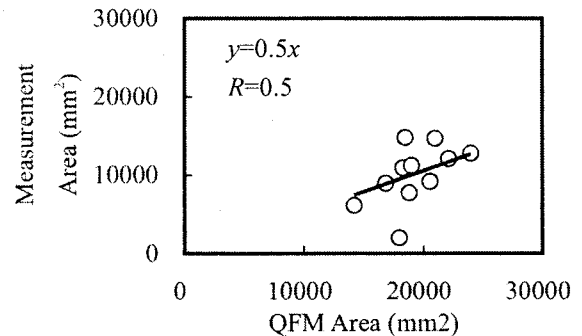
図-10 わだち掘れの傾き



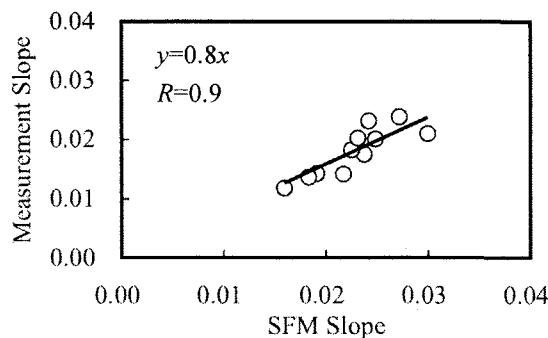
図-12 わだち掘れ面積



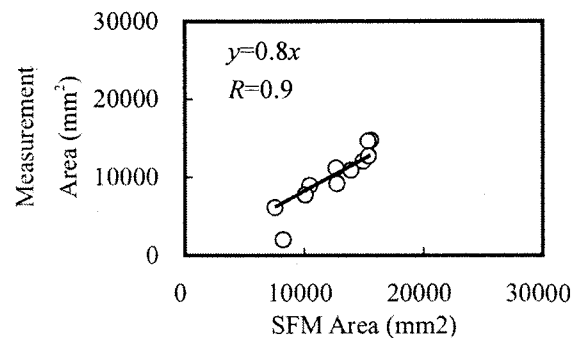
(a) QFM 比較結果



(a) QFM 比較結果



(b) SFM 比較結果



(b) SFM 比較結果

図-11 わだち掘れの傾きの比較結果

図-13 わだち掘れの面積の比較結果

を「Measurement Slope」と記した。

図-11 より、モデルの傾きは実形状に比べ 2 割程度大きい値である。しかし、QFM、SFM とも相関係数 $R=0.9$ とモデルと実形状の間に強い関係があることがわかる。よって、実形状の歪みは少なく、QFM 及び SFM において、設計条件は妥当であるといえる。

また、このことから、SFM において、わだち掘れ発生位置で高さの最小値をとらない誤差が、実用上の許容範囲内であると考えられる。

(3) わだち掘れ面積による比較

頂点と車線外側端部を結んだ直線と、舗装面に囲まれた部分を「わだち掘れ面積（以下、「面積」とする）」と定義する（図-12）。車輪通過部の凹みが大きくなれば面積も大きくなり、凹みが小さくなれば面積も小さくなる。よって、面積を求めることにより、わだち掘れの凹み具合を比較することが可能である。モデルと

実形状の比較結果を図-13 に示す。また、図中、2 次関数を用いたモデルの面積を「QFM Area」、スプライン関数を用いたモデルの面積を「SFM Area」と記し、実形状の面積を「Measurement Area」と記した。

図-13(a) より、QFM の面積は実形状に比べ全体的に 5 割程度大きい値である。これは、図-9(a) より車線外側端部で高さが 0 にならないことによる誤差と考えられる。また、相関係数 $R=0.5$ であり QFM と実形状間の関係性も弱く、凹み具合の表現には向かないことがわかる。一方、図-13(b) より、SFM の面積は実形状と全体的に 2 割程度の差である。また、相関係数 $R=0.9$ と強い関係があることから、わだち掘れの凹み具合を的確に表現しているといえる。

面積の比較結果から、わだち掘れのモデリングにおいては、車線外側端部で高さを 0 とする必要がある、QFM において凹み具合の表現力を高めるためには、今後、改良が必要であると考えられる。

5. シミュレーションにおける適応性の検討

近年、各種シミュレータを使用し、路面性状が車両や道路利用者に及ぼす影響について、実際の道路を走行することなく安全かつ迅速に評価した研究報告がなされている^{11)~14)}。今後、評価実験の安全性などを考慮すれば、シミュレーション技術を用いた実験はますます重要性を増すであろうと考えられる。そこで、本章では、QFM と SFM のシミュレーションにおける適応性について、ミシガン大学交通研究所 (UMTRI) が開発した汎用車両運動シミュレータ「CARSIM」を用いて検討した。

(1) CARSIM の概要^{12), 16)}

CARSIM は乗用車や小型商用車の、さまざまな運転条件 (ステアリング操作、ペダル操作など) や環境条件 (路面状況、道路線形、横風など) を、ユーザーが自由に設定でき、その時の車両挙動をコンピュータ上で再現するシミュレーションソフトウェアである。

(2) 試験条件

わだち掘れが車両に及ぼす影響として、レーンチェンジにおける横方向の運動、特に横方向速度の増加が顕著であるとの報告がなされている^{7), 8)}。そこで、本研究においても、レーンチェンジ試験を実施し、モデルのシミュレーションへの適応性を検討した。また、比較に用いた実形状の断面が左右非対称であることから、わだち掘れ進入時の影響を考慮し、ダブルレーンチェンジ試験とした。

ダブルレーンチェンジ試験の方法、及び試験コースは、JASO (自動車規格) C 707、及び ISO (国際標準化機構) が Technical Report : TR3888 として発行している (ISO/TC22/SC9) ものを参照し¹⁹⁾、以下のように定める。

a) 計測パラメータ

わだち掘れの影響、及び JASO C 707 より、横方向加速度が適当である。また、レーンチェンジ試験結果の妥当性を検討するためにヨー角度も計測した。

b) 走行速度

JASO C 707 では、ダブルレーンチェンジ試験における走行速度を 80km/h から、10km/h 増しで 120km/h までの、一定速度と定めている。しかし、本研究では、EVEN 試験での選定区間が一般国道であることから、40km/h と 60km/h とした。

c) 試験コース

試験コースは、車線幅員、及び車線変更量に関しては 2.9m とし、その他は ISO の規格に準じた。試験コースの概要を図-14 に示す。また、路面形状は、図-8 及び図-9 に示す、形状における相関性の高い断

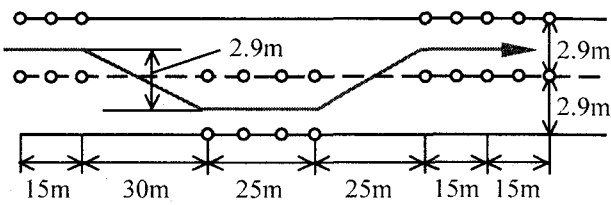


図-14 試験コース概要

表-2 試験条件

断面	わだち掘れ形状	走行速度
相関性の高い断面 (L=220m)	QFM	40km/h
	SFM	60km/h
	Measurement	
相関性の低い断面 (L=240m)	QFM	40km/h
	SFM	60km/h
	Measurement	

面 (L=220m) と相関性の低い断面 (L=240m) の 2 通りとする。

d) その他試験条件

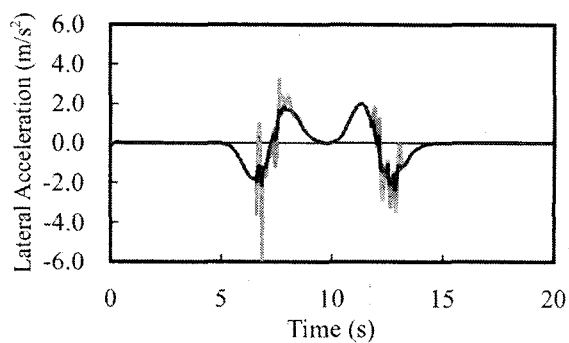
JASO C707 では、ドライバによる試験結果のばらつきを小さくするために、複数回測定するとしている。しかし、CARSIM では、与えられた条件での走行を正確に行うため、試験回数は各条件で、それぞれ 1 回とした。ゆえに、総試験回数は 12 回である。

以上の試験条件をまとめたものを表-2 に示す。なお、表中、2 次関数を用いたわだち掘れ形状を「QFM」、スプライン関数を用いたわだち掘れ形状を「SFM」、及び実形状を「Measurement」と記した。

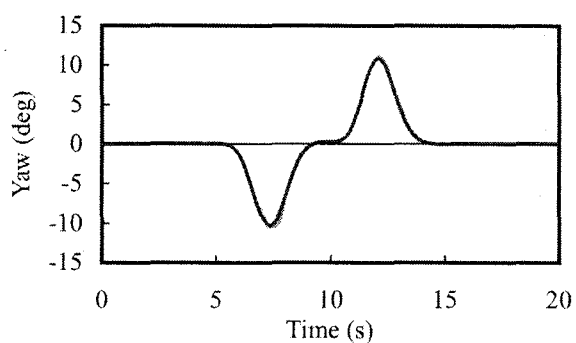
(3) シミュレーションによる比較結果

シミュレーションにおける、横方向加速度の比較結果を図-15 に、ヨー角度の比較結果を図-16 に、それぞれ示す。なお、図中、2 次関数を用いたわだち掘れの結果を「QFM」、スプライン関数を用いたわだち掘れの結果を「SFM」、及び実形状の結果を「Measurement」と記した。

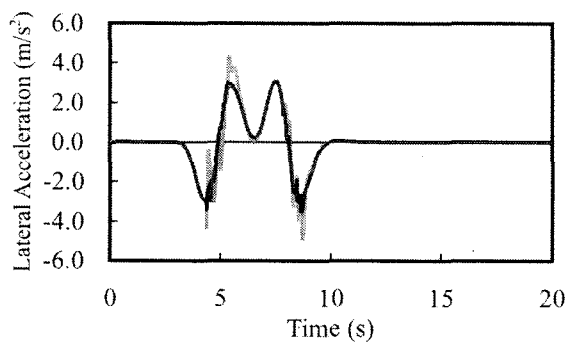
図-15 より、QFM と実形状の横方向加速度の比較では、相関性の高い断面 (L=220m)、相関性の低い断面 (L=240m) に関わらず、突発的な波形が生じている。特に、横方向加速度のピーク位置で生じていることから、車線外側端部における誤差の影響であると考えられる。一方、SFM と実形状の横方向加速度の比較では、細かな違いはあるが、概ね一致しており、SFM のシミュレーションへの高い適応性が窺える。



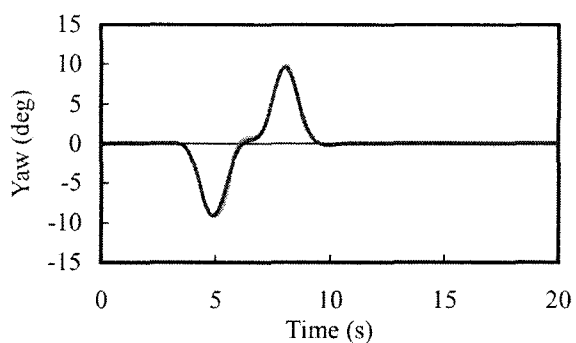
(a) L=220m, V=40km/h



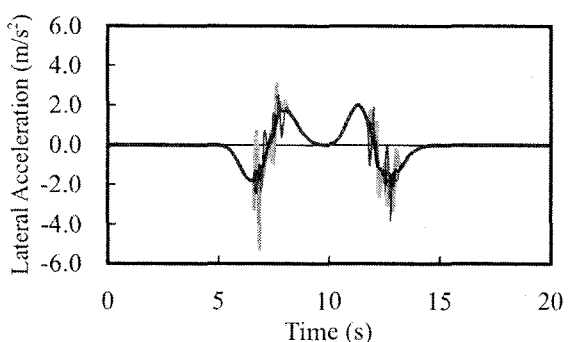
(a) L=220m, V=40km/h



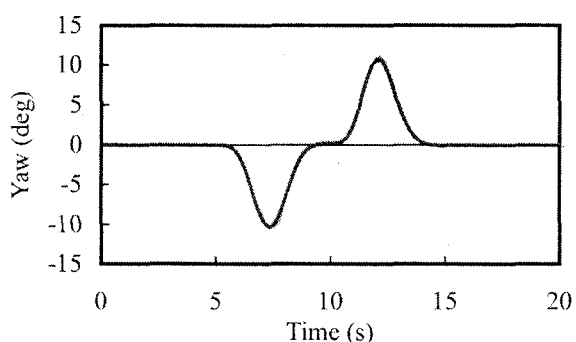
(b) L=220m, V=60km/h



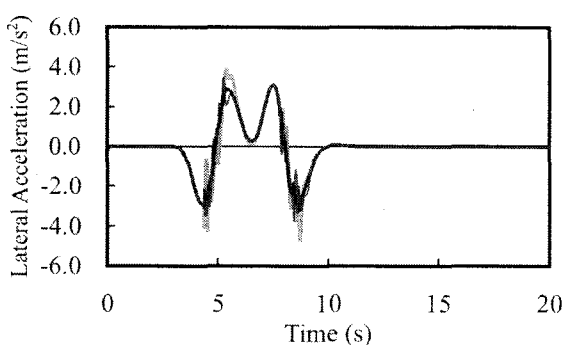
(b) L=220m, V=60km/h



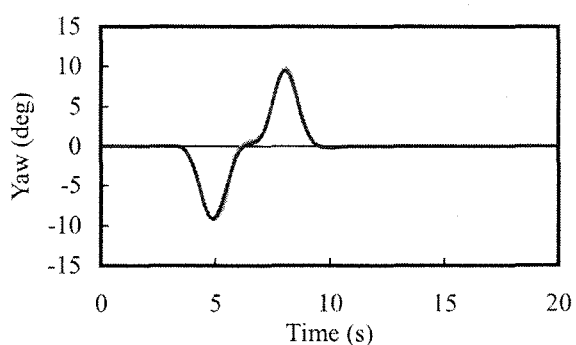
(c) L=240m, V=40km/h



(c) L=240m, V=40km/h



(d) L=240m, V=60km/h



(d) L=240m, V=60km/h

図-15 横方向加速度の比較

(凡例: QFM — SFM — Measurement)

図-16 ヨー角の比較

(凡例: QFM — SFM — Measurement)

また、図-16 より、ヨー角度の比較では、QFM、SFMとも実形状の波形と、よく一致した結果となった。このことから、ダブルレーンチェンジ試験において、与えられた条件以上の旋回運動が生じる、などといったことがなく、試験結果は妥当であるといえる。また、シミュレーションにおいて、QFM、SFMとも速度の違いによる、実形状との適応性に大きな差はなかった。

よって、QFMをシミュレーションに適応させる場合には、車線外側端部での誤差を解消する必要がある、一方、SFMはシミュレーションに適したモデルであるといえる。

6. まとめ

本研究は、比較的簡易な関数を用いて、形状を考慮したモデルを開発し、実形状との適合性を検討したものである。

本研究を要約すると以下ようになる。

- (1) わだち掘れは、車線中央部付近に頂点を持ち、頂点からおおよそ±1000mmの位置に発生している。また、形状は放物線状であり、左右非対称である。そこで、2次関数及びスプライン関数を用いたモデルを開発した。2次関数を用いたモデル(QFM)は、わだち掘れの頂点や発生位置をパラメータとして表現し、スプライン関数を用いたモデル(SFM)は、それらを通過点として表現する特徴がある。
- (2) 相関係数、傾き、及び面積による比較方法を提案し、形状の適合性を検討した。その結果、QFMは、わだち掘れの発生位置で高さの最小値をとるが、車線外側端部で高さが0とならないため、適合性の低い結果となった。これは、特に、盛り上がりの大きいわだち掘れや、左右のわだち掘れ深さが大きく異なる場合に顕著であり、改良の必要があると考えられる。一方、SFMは、わだち掘れの発生位置で高さの最小値をとらないが、比較の結果、実用上の許容範囲内であり、全体的に高い適合性を示した。
- (3) 汎用車両運動シミュレータ「CARSIM」を用いて、モデル及び実形状を用いた断面を、ダブルレーンチェンジした際の横方向加速度を比較することにより、シミュレーションへの適応性の検討を行った。その結果、QFMは、車線外側端部での誤差によるものと考えられる、突発的な波形が生じた。一方、SFMは、細かな違いがあるものの、高い適応性を示した。

わだち掘れのモデリングでは、SFMの方がQFMに比べ適応範囲の広いモデルであることがわかる。しかし、再現の容易さや計算量では、QFMに利点がある。今後、QFMの利点を活かした上で改良することにより、適応範囲の拡大を課題とし、本研究のまとめとする。

参考文献

- 1) 川村彰：講座・路面の評価(1)-平坦性に着目して-、舗装、Vol.36, No.8, pp.31-35, 2001.
- 2) 日本道路協会編：アスファルト舗装要綱、丸善、1995.
- 3) 山之口浩、丸山暉彦：超・舗装学入門 アスファルト舗装修繕技術 続・舗装学のすすめ・AからZまで、山海堂、1997.
- 4) 日本道路協会編：道路維持修繕要綱、丸善、1981.
- 5) 寺田剛、吉田武、東嶋奈緒子、池田拓哉：アスファルト舗装の修繕に関する実態調査、道路建設、No.637, pp.72-75, 2001.
- 6) 秋本隆、鈴木康一、井上良和：ポータブル型路面プロファイル測定装置の開発、舗装、Vol.36, No.8, pp.3-7, 2001.
- 7) 川村彰、榊本友紀、大野滋也、佐藤正和、鈴木一隆：道路利用者の視点から見た高速道路の路面プロファイルについて、舗装工学論文集、第5巻、pp.102-111, 2000.
- 8) 榊本友紀、鈴木一隆、大野滋也、川村彰：高速走行時に於いて路面が車の操安性に及ぼす影響について、土木学会年次学術講演会講演概要集 第5部、Vol.55, pp.54-55, 2000.
- 9) 佐藤信彦、小坂寛巳、奥平真誠：舗装の維持修繕、建設図書、1992.
- 10) 稲垣竜典：講座・「舗装工学」概説⑥ 5.舗装の評価、舗装、Vol.32, No.1, pp.21-27, 1997.
- 11) Kawamura, A., Shirakawa, T. and Maeda, C.: KIT Driving Simulator for Road Surface Evaluation, *Proceedings of the 5th Symposium on Pavement Surface Characteristics, Toronto*, CD-ROM, 2004.
- 12) 近藤智史、川村彰、白川龍生、谷本晃一：CARSIMによるKITDSの過渡応答特性評価、土木学会北海道支部論文報告集、Vol.61, IV-28, CD-ROM, 2004.
- 13) 石田樹、岳本秀人、川村彰、白川龍生：ドライビングシミュレータによる舗装路面の乗り心地・安心感評価、舗装工学論文集、第9巻、pp.49-56, 2004.
- 14) 白川龍生、前田近邦、川村彰：検証実験に基づく真のプロファイル推定における制約条件の設定、舗装工学論文集、第9巻、pp.41-48, 2004.
- 15) Kawamura, A., Takahashi, M. and Inoue, T.: Basic Analysis of Measurement Data from Japan in EVEN Project, *Transportation Research Record*, No.1764, pp.232-242, 2001.
- 16) Sayers, M.W., Mousseau, C.W. and Gillespie, T.D.: Using simulation to learn about vehicle dynamics, *International Journal of Vehicle Design*, Vol.29, pp.112-127, 2002.
- 17) 土木学会土木構造物および基礎委員会「舗装工学」編集委員会編：舗装工学、丸善、1995.
- 18) 市田浩三、吉本富士市：シリーズ 新しい数学 20 スプライン関数とその応用、教育出版、1979.
- 19) 社団法人自動車技術会編：自動車技術ハンドブック 試験・評価編、自動車技術会、1991.

(2005.5.20 受付)