

# 路面の凹凸が運転者の操舵へ与える 影響に関する基礎的研究

國枝 晋二<sup>1</sup>・阿部 頼政<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 前田道路株式会社技術研究所 (〒243-0414 神奈川県海老名市杉久保279)  
(日本大学大学院理工学研究科・社会人博士後期課程)

<sup>2</sup>フェロー会員 工博 日本大学教授 理工学部土木工学科 (〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台1-8)

路面の不陸は乗り心地のみならず、ハンドル操作にも影響を及ぼすと考えられる。そこで、著者らは車輪が接地する4点の高低差で表される路面の形状に着目し、操舵を乱しやすい路面を表す指標「ワンダリング指数 ( $WI$ )」を開発した。本論文は車輪が接地する4点の相互関係と運転者が行う操舵仕事との関係から、 $WI$ の有用性とその測定法を検討するものである。

モデル区間における実験の結果、 $WI$ と操舵仕事には関連性のあることがわかり、測定法も使用にたえうる精度であることがわかった。これらの結果をふまえ、路面性状自動測定車へ $WI$ 測定システムを搭載するための具体的な方法を提案する。

**Key Words :** handling, longitudinal road profile, rolling roughness, WONDERING INDEX

## 1. はじめに

道路は、単に人や物が移動できればよいというものから、快適性や安全性などのサービス性向上へと道路利用者のニーズが多様化してきた。

そのような背景の中、路面の品質を維持するための様々な指標が考え出されてきた。その先駆けとなったものが、AASHO (米国の州道路技術者協会) 道路試験で開発された測定時サービス指数 PSI

(Present Serviceability Index) であり、わが国でも同様の考え方による供用性指数 PSI が開発され、維持修繕の目安に用いられている。近年では、世界銀行が提唱したことで知られる国際ラフネス指数 IRI (International Roughness Index)<sup>1)</sup>の研究が国内でも盛んに行われ、乗り心地の研究に利用されている。

ここで、乗り心地とは運転者も含む乗車した全ての者が感じる感覚と言え、その評価法は、IRI やライドナンバー RN (Ride Number)<sup>2)</sup>の例からもわかるとおり、縦断方向の凹凸量に着目したものとえよう。

この乗り心地に関して運転者の立場で考えてみる。運転者はハンドルを操る点で他の搭乗者と大きく異なる。この運転者のみが行う操舵は、走行中に乱されることによって、運転者にとっての乗り心地を損ねるだけでなく、安全な走行をも妨げる要因にな

りかねない。

操舵の乱れを引き起こす要因の一つとして路面の不陸が挙げられるが、それらの関係を明確に示す研究はほとんどない<sup>3)</sup>。

そこで、本研究では路面の不陸として、縦断凹凸に加え、車両の4つの車輪が接地する地点の相対的な関係に着目し、操舵との関連性をもとに運転者の立場から路面を評価するための指標を提案する。また、指標を表す路面性状を測定する手法を検討し、実験に用いた車両の測定システムを既存の路面性状自動測定車へ搭載するための具体的な方法を示す。

## 2. 車両走行に影響を与える要因

### (1) 概説

本章では、車両走行に影響を与える要因として、運転者の習性、路面の形状、操舵を取り上げて概括し、次章以下の研究の序とする。

### (2) 運転者の習性

運転者は車両が他の車線にはみ出さないようにハンドルを操作する。この場合、運転者はわたちの底部に車輪を合わせて走行すると一般に言われているが、わたちは大型車の走行軌跡にできるものであり、乗用車が左右両方の車輪をわたちに合わせることは

不可能である。したがって、運転者の選択は次のいずれかになる。

- 左右いずれかの車輪をわだち部に合わせる。
- わだち部を避けて中央を走行する。
- わだちを意識せず自由に走行する。

車両に生じる挙動の乱れを正確に把握するためには、走行中の運転者の習性を把握し、車両が走行する位置を明確にする必要がある。

### (3)路面の形状

車両の挙動を乱す路面の不陸とは、路面の2次元あるいは立体的な形状が進行方向に対して連続的に変化している状態と言える。

路面の不陸を指す具体的な指標としては、これまで縦断方向の凹凸やわだち掘れが使われてきた。このうち、縦断方向の凹凸は、車両進行方向の不陸を連続的に示すもので、主に上下運動を把握するため、乗り心地の評価にあてられてきた。

一方わだち掘れは、路面の損傷度を示すものとして、その深さがとりあげられてきた。前者は車両進行方向の不陸、後者はその直角方向の不陸であるが、いずれも2次元的な表現であり、両者を組み合わせると立体的な不陸をとりあげた例はほとんどない<sup>4)</sup>。本研究が対象とする運転者の操舵に関しては、縦断方向の凹凸だけでは不十分と思われ、立体的な形状を考慮していくことにする。

### (4)操舵

操舵という行為は、外乱に対処するものと、人為的に引き起こすものの2つに大きく分類できる<sup>5)</sup>と考えられる。

#### a)外乱操舵

外乱とは、車両が走行中に受ける横風や路面の不陸などにより、車両の外部からの要因が操舵に与える影響を言う。路面の不陸が車両の挙動を乱す例は、ニプリングとワンダリングが代表的なものである。

このうち、ニプリングとは、ハンドルが軽く横にとられる現象で、直進中に市電のレールや路面の段差などによりタイヤが横向きを受け、ハンドル操作を行っていないのに車の進行方向が変わる現象である。

一方ワンダリングとは、路面勾配の影響を受けて、車両がふらついたり、進行方向が変わったりする現象である。

ニプリングが特異点によって発生するのに対し、ワンダリングは路面の連続的な変化によって発生するものと言えよう。本研究の対象は、後者のワンダリングに限定する。

#### b)人為的な操舵

外乱操舵に対して、人為的な操舵とは、運転者が自らの意志でハンドルを操作することと言えよう。

このとき運転者は、進行方向に対する進路の修正、あるいは外乱によって乱された進路の修正のために操舵を行うことから、この人為的な操舵も車両走行に影響を与える要因であると考えられることができる。

## 3. 車両走行位置の検討

### (1)概説

アスファルト舗装にはわだち掘れの発生が避けられない。このわだちと車輪の位置関係により、操舵は大きく左右されると考えられる。そのため、車両の走行位置を特定すべく、運転者の意識をアンケートで調査し、実路線で車輪の接地位置を計測した。

### (2)運転者の意識

運転者が車両を走行させる際に、車線のいかなる位置に車両を誘導しようとしているか、運転者の意識調査を実施した。アンケート協力者は20代～60代までの212人、「車線のどの位置を走行しているか」という問いに対する集計結果は図-1の通りであった。ほとんどの運転者が車線の中央を走行しているつもりであることがうかがえる。

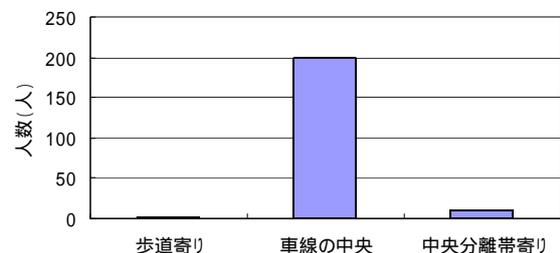


図-1 走行位置に関する運転者の意識

### (3)交差点のない区間

交差点のない区間における車両走行位置の測定を、環状七号線、山手通り、国道246号線の3カ所において行った。いずれの区間においても路面は見た目にもわかるわだち掘れが生じている状態であった。

測定は高架橋の上に設置したビデオカメラを用いて日中に車両の走行状況を撮影し、撮影後モニター上で車輪が通る位置を計測する方法で行った。データ数は、環状七号線が1500台、山手通りが1000台、国道246号線が1500台であった。

測定結果は以下のとおりである。

大型車両の左右の車輪は、ともにわだち部に合わせてあった。

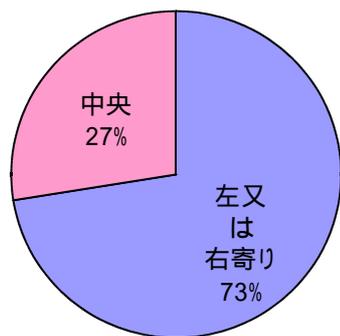


図-2 交差点のない区間における車両走行位置

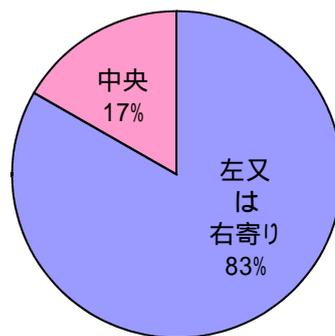


図-3 交差点の手前における車両走行位置

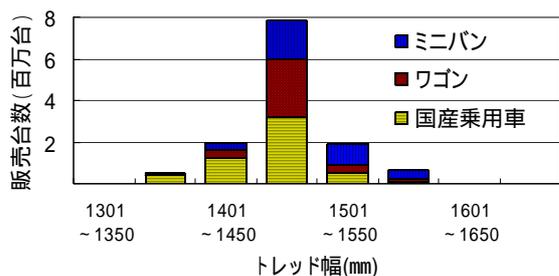


図-4 トレッド幅の分布

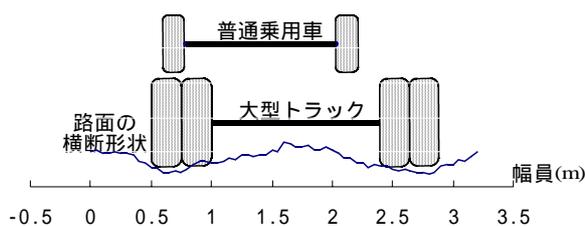


図-5 わだち掘れと車輪の接地位置

図-2 に示すとおり，乗用車の 70 % 以上が左右どちらかのわだち部付近に車輪を合わせて走行していた。

#### (4) 交差点の手前

交差点の手前で信号待ちをしている車両の車輪位置をレーザー距離計を用いて測定した。対象は水道橋交差点（1000 台），順天堂大学前交差点（2000 台），一ツ橋交差点（1000 台）であった。

測定結果は以下のとおりである。

大型車両の左右の車輪は，ともにわだち部に合わせてあった。

図-3 に示すとおり，乗用車の 80% 以上が左右いずれかの車輪をわだち部に合わせて停車していた。

#### (5) 走行車両の車輪接地位置

わだちは大型車の車輪接地位置に生じるため，乗用車が左右いずれかの車輪をわだち部に合わせると，他方の車輪をもう一方のわだち部に合わせることができない。そこで，他方の車輪がどの位置にくるのが一般的かを，乗用車の販売実績から調査した。

車両販売実績は 2001 年に集計された過去 5 年分のデータを用いた。

乗用車の車両種別は，国産乗用車（LL・L・M・S・SS），ワゴン，ミニバン，の 7 種類とし，車両種別毎に販売台数がそれぞれ上位 90% に該当する車種を抽出した。車種ごとの左右車輪接地点間距離は

諸元表<sup>6)</sup>から抽出したトレッドを用いた。

車種ごとにトレッド幅と台数をプロットした結果を図-4 に示す。

販売台数の 80% 以上の車両のトレッドが 1450 mm ~ 1550 mm に該当するため，乗用車の左右の車輪接地間距離は概ね  $1500 \pm 50$  mm と考えることができる。

同様にして大型車両の左右車輪接地間距離を求めると 1850 mm ~ 1900 mm であった。

乗用車と大型車両の左右の車輪間接地幅をそれぞれ 1500 mm と 1900 mm とし，路面の横断形状に重ねた結果を図-5 に示す。このとき，乗用車の左側の車輪をわだち部に合わせると，右側の車輪がわだち部と合っていないことは明らかである。

以上をまとめると，乗用車の運転者は無意識のうちに片側の車輪をわだち部付近に合わせ，他方の車輪はわだち部付近に合せていない状態で車両を走行させていると言える。

## 4. 路面形状の測定

### (1) 概説

前章の解析により，乗用車の走行する車輪の位置が明らかになった。本章では，運転者の操舵に影響を与える路面の形状について考察する。従来，車両の乗り心地に影響を与える指標として縦断方向の凹凸がとりあげられてきた。これは，車両進行方向の凹凸を一本の線（前輪の片側と後輪の片側が通過す

る線)の上下運動でとらえるもので、いわば2次元的な表現と言えよう。

本研究ではこの縦断方向の凹凸に加え、前後4輪が接地する点の高低差を考慮した、いわば3次元的な指標を提案し、操舵に与える影響を検討していく。

## (2)モデル区間の設定

路面性状の精密なデータを得るとともに、操舵の乱れを測定できるモデル区間を選ぶべく、調査を実施した。考慮した必要条件は次のとおりである。

路面性状に変化を持たせるため、最大わだち掘れ量が30mm程度あること。

操舵が路面性状だけによって乱される直線区間であること。

人力で路面性状の精密な測定ができる程度の交通量であること。

調査の結果、上記3項目に該当する路線として、東京都西多摩郡瑞穂町の工業地区に決定した。同区間は交通量区分がA交通で、通行する大型車のほとんどが碎石を積載して往来する路線の一部である。

## (3)縦断凹凸の測定

縦断凹凸量の測定は3mプロフィールメータを用いて行い、10cm毎にデータをサンプリングした。

測定線はわだちの底部に設けた基準測定線と、それと平行に1500mm離れた測定線の2本とした。

測定は基準測定線を右側のわだちの底部に合わせた場合と、左側のわだち底部に合わせた場合の2通りについて行った。

## (4)車輪が接地する4点の考察と指標

車両が接地する4点は全く独立に動くわけではなく、前2輪は前軸で、また後2輪は後軸で拘束されている。そこで、この4点の高低差を表現する指標として、前軸が横断方向になす角度と後軸が横断方向になす角度の差(図-6の $\theta$ )をとり、これをローリングラフネス<sup>7)8)</sup>(Rolling Roughness:以下RRと略す)と定義する。なお、この名称は当研究室の関口らの命名を継承したものであり、測定法等に差異はあるものの、原理は同一である。

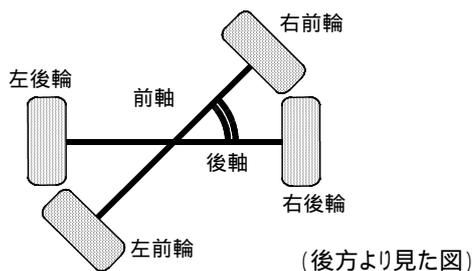


図-6 RRの定義

## (5)RRの測定

RRの測定では、まず車両の前輪が接地する2点間(1500mm幅)の横断方向の勾配を求めた。測定には直線定規を用い、縦断凹凸量の測定で設けた基準測定線と直線定規が基準測定線の各測点と直交するように設置した。記録するデータは、縦断凹凸の測定点における直線定規から路面までの距離と、測定点から1500mm離れた点における直線定規から路面までの距離とし、デジタルデプス計で読み取った。またこのとき直線定規に取り付けたデジタル傾斜計で横断方向の勾配を読み取った。

記録したデータを(1)式に代入し、車両の前輪が接地する2点間の勾配を求めた。

$$\theta_1 = \theta_2 - \tan^{-1} \left( \frac{h_1 - h_2}{W} \right) \quad (1)$$

ここで、 $\theta_1$ :2点間の勾配(deg)、 $\theta_2$ :直線定規の勾配(deg)、 $W$ :2点間の距離(mm)、 $h_1$ :左側測定線と直線定規の交点での路面までの距離(mm)、 $h_2$ :右側測定線と直線定規の交点での路面までの距離(mm)。

次に(1)式で求めた結果を用いて、前輪が接地する2点の勾配と後輪が接地する2点の勾配の差を(2)式より求めた。このとき、RRの符号は、進行方向に対する右向きを正とした。

$$RR = \theta_{1F} - \theta_{1R} \quad (2)$$

ここで、 $\theta_{1F}$ :前輪が接地する2点の勾配(deg)、 $\theta_{1R}$ :後輪が接地する2点の勾配(deg)。RRの測定も縦断凹凸量の測定と同様に、左右のわだち底部を基準とした場合の2通り行った。

## (6)測定結果

縦断凹凸の測定結果を図-7に、頻度分布を図-8、図-9に示す。いずれも基準測定線を右側わだち掘れの底部とした場合について示した。

左右の測定線の縦断凹凸は同じような波形の様相を見せている。どちらの結果も頻度分布は正規分布の様相を呈しているが、両者が完全に一致しているわけではなく、標準偏差も左側測定線では5.0、右側では5.7となっており、左右の測定線で凹凸が異なることを表している。

RRの測定結果と頻度分布を図-10、図-11に示す。

RRの波形は、縦断凹凸の場合と同様に周期性は見られず、頻度分布も正規分布の様相を呈している。

## 5.操舵仕事の測定

### (1)概説

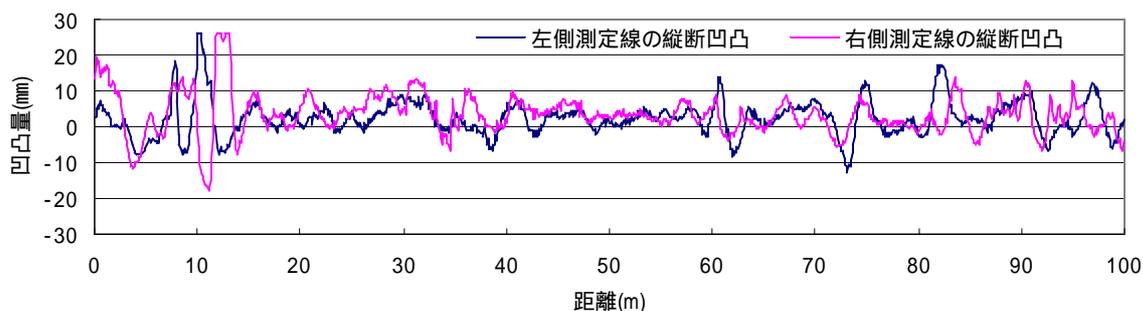


図-7 縦断凹凸の測定結果

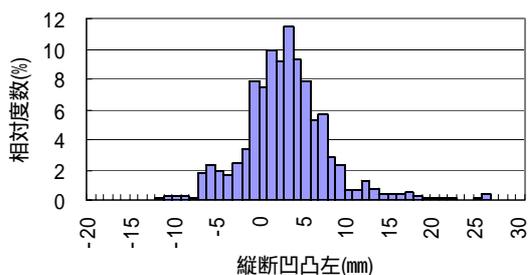


図-8 縦断凹凸(左)の頻度分布

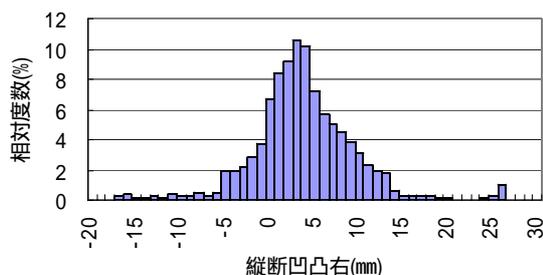


図-9 縦断凹凸(右)の頻度分布

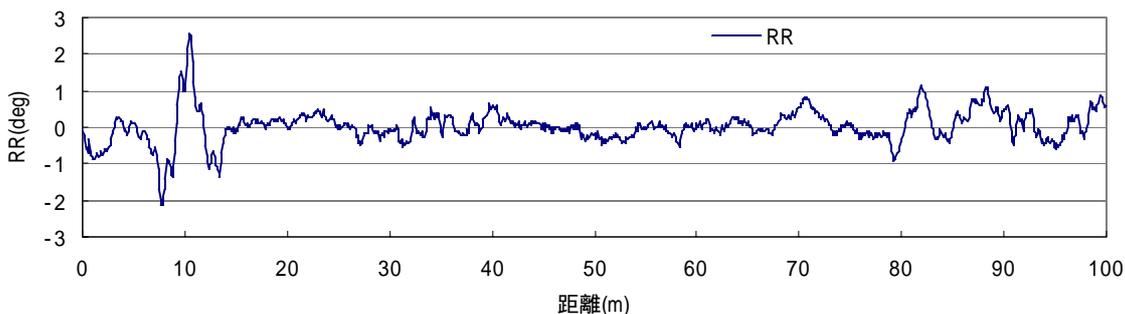


図-10 RRの測定結果

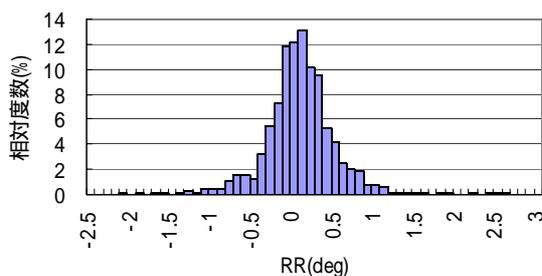


図-11 RRの頻度分布

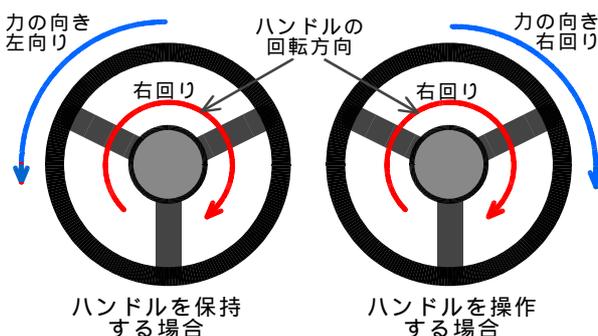


図-12 ハンドルの保持 図-13 ハンドルの操作

本章では、運転者がハンドルを動かす時に生じる操舵仕事を定義し、その測定法とモデル区間における測定結果を示す。

## (2) 操舵仕事概念

操舵仕事とは運転者が目的とする進路に向けて、ハンドルを保持したり、進路を変更、あるいは修正しようとしてハンドルに対して行う仕事を言う。

運転者がハンドルを保持する時には、図-12 に示

すように、ハンドルの回転方向と運転者がハンドルに加える力の向きが逆転している。これに対し、運転者がハンドルを意図的に操作する時には、図-13 に示すように、ハンドルの回転方向と運転者がハンドルに加える力の向きが一致している。

本研究が対象としている直線区間で直進する場合、運転者がハンドルに対して行なう仕事は、路面の凹凸によって進行方向を曲げられること(外乱操舵)を

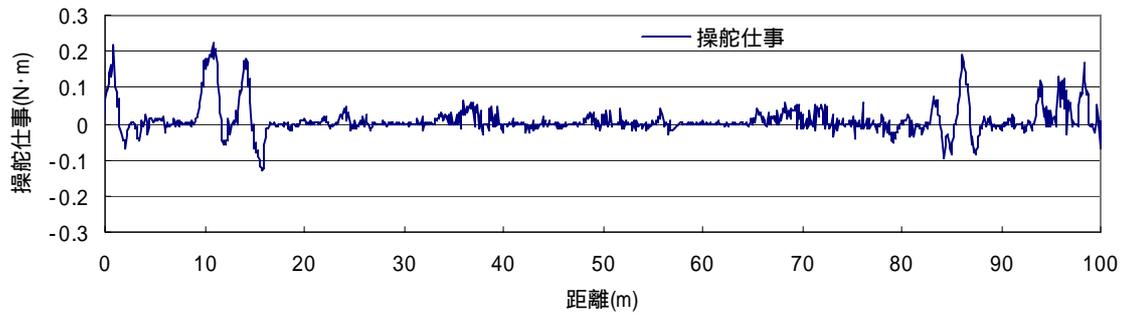


図-14 操舵仕事の測定結果

表 - 1 操舵角力計の諸元

	トルク	回転角
測定レンジ	20 N·m	360 deg / 1800P/R
分解能	-	0.1 deg

表 - 2 測定に使用した車両の諸元

項目	データ
車種	M社製ステーションワゴン
排気量	1999cc
ホイールベース	2635 mm
トレッド	前 1510 mm / 後 1505 mm
タイヤサイズ	195 / 60R15

防ぐこと、およびそれでも曲げられた場合に進行方向を修正すること(人為的な操舵)であろうと推定できる。両者とも路面凹凸の影響により運転者がハンドルに対して仕事をすることに変わりはないので、本研究では両者を合わせた総操舵仕事を採用した。

### (3)測定概要

操舵仕事は次式で求められる。

$$W_s = F \times r \theta \quad (3)$$

ここで、 $W_s$ : 操舵仕事(N·m)、 $F$ : 操舵力(N)、 $r$ : ハンドルの半径(m)、 $\theta$ : 操舵角(rad)。

操舵力とはハンドルを操作あるいは保持するために運転者がハンドルに加える力であり、操舵角とはハンドルに力が加わっているときに回転したハンドルの回転角である。

(3)式により操舵仕事を求めるために、操舵角と操舵力の測定を行った。操舵角と操舵力の測定には、表-1に示すハンドル操舵角力計を表-2に示す車両に搭載し行った。

操舵の測定を行う際には、路面形状の測定で設けた測定線を目印とし、片側の車輪をわだち底部にあわせて測定に用いる車両を走行させた。また、測定車両の右側車輪を右側わだち底部の基準測定線に合わせた場合と、左側車輪を左側わだちの底部に合わせた場合の2通りについて実施した。

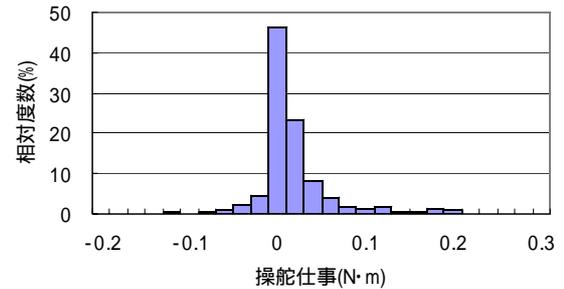


図-15 操舵仕事の頻度分布

測定を行う速度は40km/h、50km/hと60km/hの3速度とし、データは1msごとに記録し、測定後に10cm間隔ごとのデータに変換した。

### (4)測定結果

(3)式を用いて算出される操舵仕事は運転者が行う仕事量であるが、操舵仕事の符号は操舵角と操舵力の符号によって異なる。操舵角と操舵力の符号が異なるのは、図-12に示すハンドルを保持する場合、つまり外乱操舵に対して運転者が仕事を行う場合である。また、操舵角と操舵力の符号が一致するのは、図-13に示すハンドルを操作する場合、つまり運転者が人為的に仕事を行う場合である。

操舵仕事の測定結果と頻度分布を示す図-14、図-15から、外乱操舵と人為的な操舵があった箇所や操舵の変化の大きな箇所をうかがうことができる。頻度分布のプラス側に高い値が見られるのは、外乱による操舵よりも修正操舵などの人為的な操舵の方に強い力を必要としたことを示すものであろう。

## 6. 路面の凹凸に対する操舵仕事の遅れ

### (1)概説

運転者が路面の凹凸を感じてハンドルを操作するまでには、当然のことながら時間がかかる。反応時間は運転者によって異なると思われるが、研究を進めるにあたっては、大まかな値を知っておく必要がある。本章では、そのために実施した基礎実験の内容を示す。

## (2)操舵仕事の遅れ

車両が路面の凹凸の影響を受けてから、運転者の行う操舵仕事が発生するまでのメカニズムは、

路面の凹凸からの影響が、サスペンションなどを介してハンドルに伝わる。ハンドルに伝わった影響をハンドルを握る運転者が感じる。運転者が車両の進路を維持するために操舵仕事を行う。のように考えられる。

そのため、路面の影響がハンドルに伝わるまでの時間と、運転者が影響を感じて仕事を行うまでの時間によって、操舵仕事が発現するまでには時間的な遅れが生じるものと思われる。この時間的な遅れが発現までに車両が移動する距離となって現れる。

## (3)測定概要

路面の凹凸に対する操舵仕事が発現までに、どの程度の移動距離を要するか実験を行った。

実験は日本大学船橋校舎にある交通試験走行路にて行った。操舵仕事が発現を明確にするため、長さ1.8m、中央の高さ5cmのスロープを車両の右側車輪で乗り越す、片側スロープ乗り越し実験を行った。

記録するデータは、車両の前輪がスロープを乗り越し始めた時間と操舵仕事が発現した時間とした。また操舵仕事の測定には表-1に示す測定車両と表-2に示す操舵角力計を用いた。実験速度は危険性を考慮して10km/h、20km/h、30km/hの低速とした。

## (4)操舵仕事が発現するまでの移動距離

操舵仕事が発現した時間から車両の前輪がスロープを乗り越し始めた時間を引いて求めた時間を、各速度における操舵仕事が発現するまでの時間とした。

各速度における操舵仕事発現までの時間は0.36s～0.45sであった。測定結果がばらついた原因として、運転者の応答の曖昧さが考えられる。同一車両で測定した場合には、車両が有するサスペンションの反応時間は速度毎に常にほぼ一定であると考えられるが、運転者の応答時間が常に一定であるとは考えにくいためである

この結果によれば、30km/hの時の操舵仕事発現までに車両が移動する距離は約3m～4mであった。

これを50km/hで走行した場合に換算すれば、結果は約5m～6mとなる。

## 7.路面の形状と操舵の関連性

### (1)概説

4章において、路面の凹凸、5章で操舵仕事を測定し、6章で両者の距離的ずれの検討を行った。以上の結果を踏まえ、本章では、路面の凹凸と操舵仕事の相関関係を明らかにする。

### (2)波形

4章と5章の結果から、路面凹凸と操舵仕事の相互相関をとったが、相関係数は0.2未満と低く明確な関係は見いだせなかった。そこで、本質的な傾向を浮き出させるために、両者の波形の細かな成分をカットし相関をとった。細かな成分のカットには移動平均を用いた。データ点数は、実験に用いた車両のホイールベースである2635mmを1単位とし、その間にあるデータを代表させるという意味で27点とした。

図-16、図-17は縦断凹凸と操舵仕事の波形を、図-18はRRと操舵仕事を比較した場合の相関図である。いずれの場合についても右側のわだち掘れに右車輪を合わせた場合の結果を示した。

これらの相関図からは路面の形状と操舵仕事の相関関係は見られない。

### (3)波形の絶対値

それぞれの波形の符号の持つ意味は、路面の盛り上がりやくぼみであったり、RRの回転方向であったり、外乱操舵や人為的な操舵である。そのため、それぞれの波形を単に重ね合わせるだけの方法では、路面の形状と操舵仕事の関連を知ることはできないと思われる。

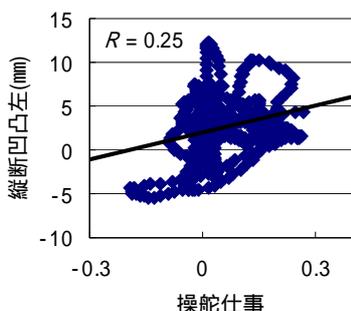


図-16 縦断凹凸(左)と操舵仕事の相関

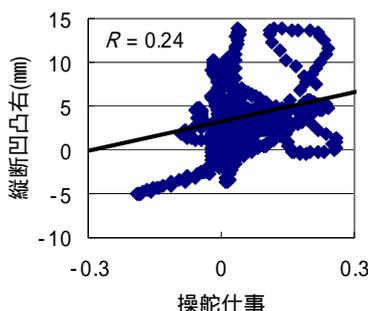


図-17 縦断凹凸(右)と操舵仕事の相関

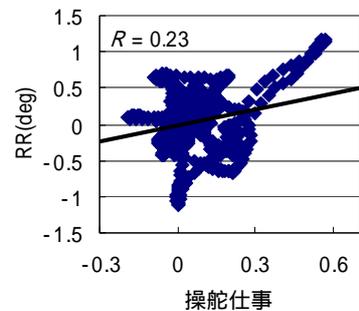


図-18 RRと操舵仕事の相関

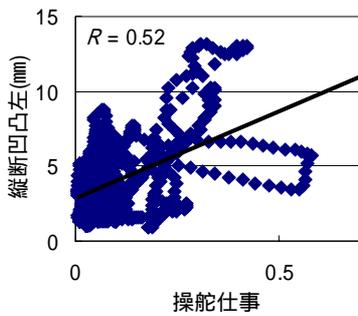


図-19 縦断凹凸(左)と操舵仕事の  
相関(絶対値)

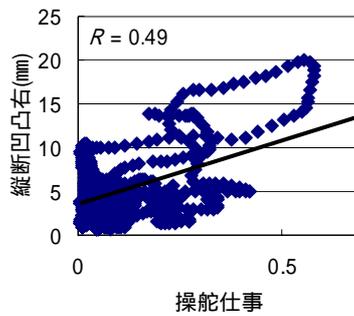


図-20 縦断凹凸(右)と操舵仕事の  
相関(絶対値)

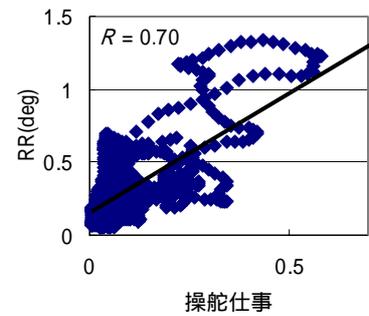


図-21 RRと操舵仕事の  
相関(絶対値)

表-3 路面の形状と操舵仕事の相関係数

路面の形状データ	操舵との相関係数
縦断凹凸(右側車輪接地部)	0.49
縦断凹凸(左側車輪接地部)	0.52
RR	0.70

そこで、路面や操舵仕事に変化があるか否かのみに着目するために、測定データの絶対値を取った波形を重ね合わせた。波形処理には27点移動平均法を用いた。図-19、図-20は縦断凹凸と操舵仕事の波形を、図-21はRRと操舵仕事の波形を重ね合わせた場合の相関図である。

それぞれの相関係数は表-3に示すとおりであり、関係がないとも言い切れないが、関係があるとも言い難い。

#### (4) 波形のばらつき

##### a) 標準偏差による評価

路面性状を表す各指標と、操舵仕事の大きさの間には、明確な関係が得られなかった。しかし、路面の微妙な凹凸に対し、運転者は常にハンドルを握って小さく仕事を続けている。このような路面凹凸と操舵の乱れとの関係は、局所的な大きさで比較するのではなく、むしろそれぞれのばらつき(標準偏差)で比較することが妥当であろうと推定できる。これはAASHO道路試験<sup>9)</sup>で縦断凹凸の解析に採用された方法であり、またわが国でも平坦性の評価に使用されている手法である。

なお、標準偏差で解析する場合、試験法便覧<sup>10)</sup>に明示されているように、測定の対象とする区間の長さ(言い換えればデータ数)によって精度が変化する。平坦性の場合、区間長は100m以上とされているが、これはデータ数で言えば約70点以上となる。

##### b) データ点数の検討

4章で述べたとおり、本研究では対象とする

100mの路面性状を10cmごとに測定しているため、各指標および操舵仕事のデータ数はそれぞれ1000個となる。

対象区間を分割して各指標の標準偏差と操舵仕事の標準偏差の関係を求めるにあたり、1区間のデータ数を30、50、100、150、200点とし検討を行った。

100mの路線を各データ数に分割し、各々のデータ数における各指標の標準偏差を算出した。

データ数100点の場合を例に挙げると、対象路線は10区間に分割され、各指標の標準偏差はそれぞれ10個得られることになる。

データ数が30点と100点の場合について、RRの標準偏差と操舵仕事の標準偏差の相関を図-22、図-23に示す。

各々のデータ数における路面の各形状の標準偏差と操舵仕事の標準偏差の相関を求めた結果、いずれの場合においてもデータ数が多くなるほど相関が高くなることが分かった。路面の各形状の標準偏差と操舵仕事の標準偏差との相関について、データ数と相関係数の関係を図-24に示す。

データ数を100点以上とすることで、いずれの路面の形状においても操舵仕事との関係を見いだせると思われる。

##### c) まとめ

標準偏差で解析するにあたり、データ数の検討結果を行った結果、縦断凹凸およびRR、つまり路面形状が操舵仕事に影響を及ぼしうることがわかった。

縦断凹凸よりもRRの方が、操舵仕事と高い相関を示しているが、これは、前者が2輪で路面をとらえているのに対し、後者は4輪を考慮しているため、当然の結果とも言える。なお、RRは100点で評価すれば、ほぼ十分と思われる。

## 8. 操舵の乱れを表す路面指標

前章の結果において、操舵仕事のばらつき、つま

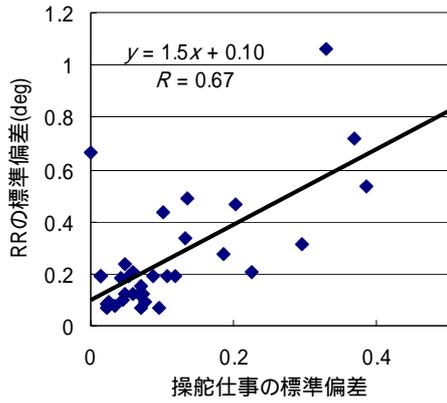


図-22 RR と操舵仕事の相関  
(標準偏差,データ数 30 点)

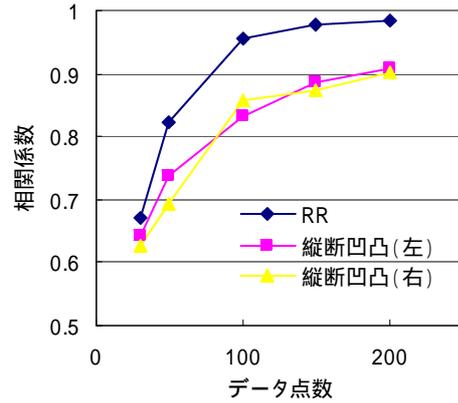


図-24 データ数と相関係数の関係

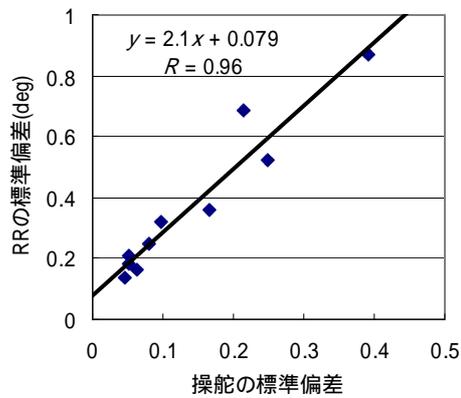


図-23 RR と操舵仕事の相関  
(標準偏差,データ数 100 点)

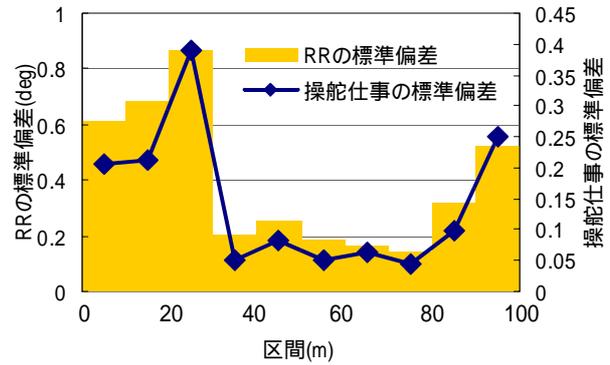


図-25 RR と操舵仕事の標準偏差

り操舵の乱れと RR のばらつきが高い相関関係にあることが分かった。

データ数を 100 点とした場合の RR の標準偏差と操舵仕事の標準偏差の関係を示した図-25 からわかるとおり、操舵仕事の標準偏差が大きな値となる区間（操舵の乱れが大きな区間）では、RR の標準偏差も大きい。

このことから、RR の標準偏差によって、操舵を乱しやすい路面を評価できると言えよう。

そこで、10 cm 毎に RR を測定した評価対象路線において、データ数を 100 点毎に分割し、各々の区間で求める標準偏差を、操舵が乱れやすい路面を評価する指標、「ワンダリング指数」（以下、WI）とする（(4)式）。

$$WI = \sqrt{\frac{N\sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}{N(N-1)}} \quad (4)$$

ここで、WI：ワンダリング指数(deg)、 $x_i$ ：RR (deg)、N：データ数。

縦断凹凸によって評価した平坦性が、2 次元的な

路面の平滑さを表す指標とすれば、RR によって評価する WI は 3 次元的な路面の平滑さを表す指標であると言えよう。

## 9. WI 測定法の検討

### (1) 概説

前章までの解析で、WI (RR の標準偏差) が操舵の乱れを表現する適切な指標であることを明らかにした。ただし、実路線に適用するには測定法に問題が残る。すなわち 4 章の WI の測定にあたっては、精度よくデータを得るため直線定規を使用し、人力で行ったが、この方法は労力と時間がかかり現実的とは言い難い。そこで本章では、人力による直線定規を用いた手法に代わる測定法を提案し、その妥当性を検討する。

### (2) 2本の縦断凹凸データを用いる方法

車輪が接地する 4 点の相対的な高低差を求めるには、車軸長さを考慮した 2 本の縦断凹凸データがあれば可能である。そこで先に述べたモデル区間において、市販の 3m プロフィルメータを用い、車軸長 1500 mm で 2 本の縦断凹凸を測定した。ただし測定

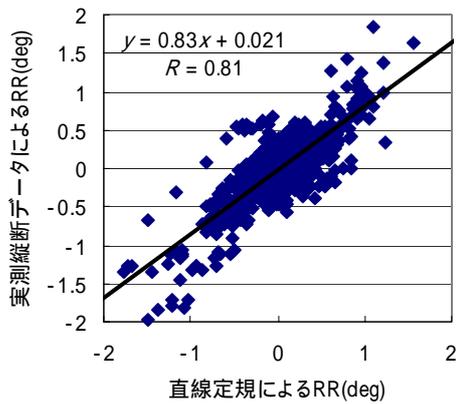


図-26 縦断の凹凸データ(実測2測線)から求めたRRと直線定規によるRRの相関

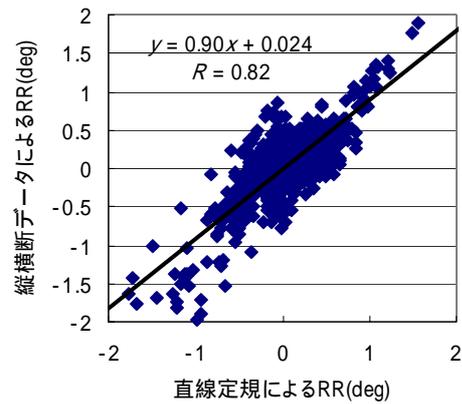


図-27 縦横断の凹凸データから求めたRRと直線定規によるRRの相関

データは10 cm毎に記録し、(5)式よりRRを求めた。

$$RR = \tan^{-1} \left( \frac{h_{LR} - h_{LF} - h_{RR} + h_{RF}}{W} \right) \quad (5)$$

ここでW:左右車輪接地幅(mm), h:縦断凹凸量(mm)。ただし、hの付加記号は、LR:左後、LF:左前、RR:右後、RF:右後。

直線定規による方法との相関を図-26に示す。

### (3)縦横断の凹凸データを用いる方法

縦横断の凹凸データを用いる場合には、基準となる1本の縦断の凹凸データと、縦断データの測定点ごとの横断の凹凸データが必要となる。このとき横断のデータには1点を縦断凹凸の測定点とする任意の2点間における横断方向の勾配のデータも必要となる。これらのデータを複合して推定する縦断の凹凸データと、基準とする測定線の縦断データを用いてRRを求める。

基準とする縦断凹凸の測定は、わだち掘れの底部にあわせた測定線について行い、3mプロファイルメータを用いて10 cm毎にデータを記録した。

横断の凹凸データの測定では、縦断の凹凸データの各測定点で縦断凹凸の測定線と直交するように直線定規を設置し、直線定規から路面までの距離をデジタルデプス計で、直線定規の勾配をデジタル傾斜計で読み取った。

記録した縦横断のデータを演算処理して複合し、基準とする測定線から1500 mm離れた測定線の縦断凹凸を推定した。この推定した縦断凹凸データと基準とした測定線の縦断凹凸データを用い、以下縦断凹凸データを用いる方法と同じ手法でRRを求めた。

直線定規による方法との相関を図-27に示す。

### (4)直線定規の原理を搭載した車両を用いる方法

直線定規の原理を車両に搭載する方法では、車両

本体を直線定規と見なして、直線定規の勾配にあたる車体のロール角と車体から左右の車輪が接地する路面までの2点の距離を測定する。

車両は操舵仕事の評価に用いた実験車を使用した。車体のロール角は車両の重心付近に取り付けた慣性測定装置で測定し、路面までの距離は左右前輪のそれぞれ前方に取り付けた2基のレーザー変位計で測定した。

測定結果から、左右の車輪が接地する横断方向の2点の勾配を前後輪について(6)式より求めた。

$$\alpha_2 = \alpha_2 - \tan^{-1} \left( \frac{h_L - h_R}{W} \right) \quad (6)$$

ここで、 $\alpha_2$ :左右の車輪が接地する2点の勾配(deg),  $\alpha_2$ :車両のロール角(deg), W:左右車輪接地点間の距離(mm),  $h_L$ :車体から左側車輪が接地する路面までの距離(mm),  $h_R$ :車体から右側車輪が接地する路面までの距離(mm)。

ここで、本方法による測定データが、外乱や操舵で生じるロールなど車両挙動から影響を受けることが危惧される。しかし、左右の車輪が接地する2点の勾配を直線定規による方法と、同一車両を用いて5回繰り返し計測を行った本方法とで比較した結果、相関係数はいずれも0.9以上と高い結果を示した。このことから車両挙動が測定値へ与える影響は、ほとんどないと判断される。

RRを求めるために(6)式より求めた結果を用いて、(7)式より前輪が接地する横断方向の2点の勾配から後輪が接地する横断方向の2点の勾配の差を求めた。このとき、RRの符号は、進行方向に対する右向きのロールを正とした。

$$RR = \Theta_{2F} - \Theta_{2R} \quad (7)$$

ここで、 $\Theta_{2F}$ :前輪が接地する2点の勾配(deg),  $\Theta_{2R}$ :後輪が接地する2点の勾配(deg)。

直線定規による方法との相関を図-28 に示す。

(5)まとめ

以上、3種類の測定法を提案し、実測値で検討したが、いずれも相関係数は0.8以上であり、使用にたえうるものと判断できる。

10. WI測定システムの実用化への提案

(1)概説

前章では、現実的なWIの測定法として3種類の測定法を提案し、いずれの方法も有用であるとの結果に至った。それらの手法による測定を、さらに効率よく高速に実施するために、既存の路面性状自動測定車（以下、路面測定車）の利用は不可欠である。

そこで、本章ではWI測定システムの実用化にあたり路面測定車への適用について提案する。

(2) 追加搭載する測定システム

WIを求めるために、RRを路面測定車で測定するには、既存の測定システムに新たな計測機器を搭載する必要がある。

2測線の縦断凹凸データを用いる方法では、2測線の縦断凹凸量を測定するために、レーザー変位計を3基追加する必要がある。しかし、この方法で得られるデータは1種類の幅員の場合に限定されてしまい、路面測定車を用いる利点はさほど大きくない。

また、縦横断の凹凸データを用いる方法と、直線定規の原理を測定を行う車両に搭載する方法では、既存のシステムで得られる横断の凹凸データに、路面の勾配を付加するために、路面勾配が計測できるシステムを追加する必要がある。この手法では、任意の幅員のWIを求めることができ、一度の計測で多車種にわたるRRの測定が可能となり、路面測定車を用いる利点は大きい。

そこで、既存のシステムで得られる横断の凹凸デ

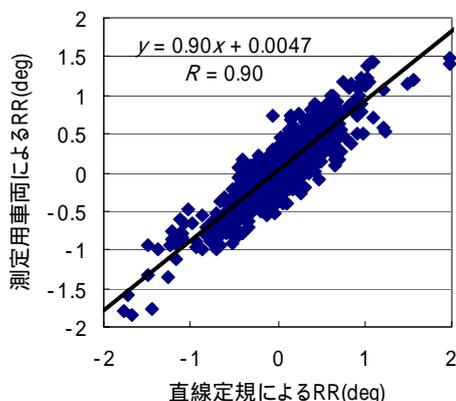


図-28 車両搭載型測定機によるRRと直線定規によるRRの相関

ータに、路面の勾配を付加するためのシステムを路面測定車に搭載する方法を示す。

追加する計測機器は、慣性測定装置1台とレーザー変位計2基である。慣性測定装置は、車体の重心付近に固定し、車体の勾配を測定する。変位計は、車両の左右前輪の後方にそれぞれ1基ずつ取り付け、路面までの距離を測定する。この方法は直線定規の原理を路面測定車に搭載し、路面測定車の左右の車輪が接地する横断方向の2点の勾配を測定するものである。

(3) 演算処理法

測定後に行う演算処理では、まず車体の勾配と車体から路面までの変位量をもとに、路面測定車の左右の車輪が接地する横断方向の2点の勾配を求める。次にその勾配の結果を横断プロファイルデータ上の路面測定車の左右の車輪が接地する2点の勾配として付加し、横断方向の任意の2点間距離における勾配を幾何的に求める。このとき、既存の測定システムと追加する測定システムで得られる双方のデータの測点は、エンコーダの距離データを共有することで完全に一致させることができる。

得られた2点間の勾配データに、9章2,3節で述べた手法を適用してRRを求め、8章で述べた手法で(4)式よりWIを算出する。

(4)実測例

神奈川県厚木市内の一般国道において、計測機器を追加した路面測定車で測定した250m分の路面データをもとに、求めたWIの結果例を図-29に示す。

測定を実施した250m区間は、交通量区分がD交通、最大わだち掘れ量が約25mm、夜間も大型車の往来が激しい路線の一部（直線区間）であった。

図-29に示したWIは、モデル車両(トレッド：1500mm、ホイールベース：2600mm)の左側車輪を左側のわだち掘れに合わせた場合の演算結果である。

実測結果からは、120～130m区間でWIの値が他と比べて突出していることがうかがえ、同区間の操舵が大きく乱されやすいものと推定できる。

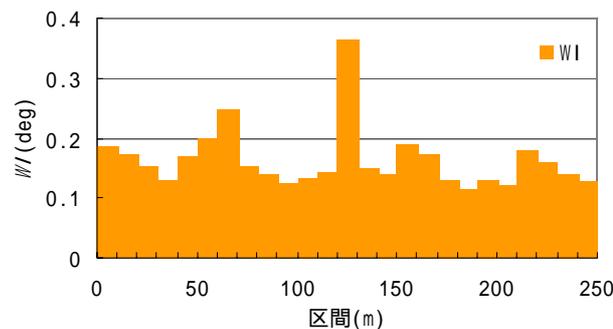


図-29 WIの実測結果例

## (5) まとめ

以上の方法により、既存の測定システムで得られる横断プロファイルデータに、左右の車輪間距離を考慮した2点の横断方向の勾配データを付加し、8章、9章で提案した手法を適用することで  $WI$  を求めることが可能である。

このように、本研究で検討した測定システムは、路面測定車に搭載し、得られるデータを既存システムのデータと組み合わせることで、効率よくデータを測定することができ、路面測定車を有効に活用することができる。また、演算処理法は車両進行方向に対してのみならず、車線を斜行する場合にも適用できるため、車線変更時の路面の評価への発展性が期待できるものである。

## 1.1. まとめ

本研究の成果は以下のとおりである。

- (1) 乗用車の運転者は、車線の中央を走っているつもりで、無意識のうちに左右いずれかの車輪をわだち部に合わせて走行している。
- (2) 縦断方向の凹凸・ローリングラフネスと操舵仕事を、それぞれの大きさを比較した場合は、明確な関係が見出し難い。
- (3) 上記の関係を、それぞれの標準偏差で比較した結果、明確な関係を捉えることができた。特にローリングラフネスの標準偏差と、操舵仕事の標準偏差には、きわめて高い相関があり、前者の路面性状値で後者の操舵の乱れやすさを評価することが可能である。
- (4) ローリングラフネスの標準偏差を特定する指標として「ワンダリング指数 ( $WI$ )」を提案した。
- (5) 操舵仕事の評価に用いた実験車を利用する方法も含め、 $WI$  を測定する手法を3種類提案し、

いずれも実用可能であることを示した。

- (6) 上記の計測システムを路面性状自動測定車に搭載する方法を提案し、実測結果例を示した。

## 1.2. おわりに

本研究で、操舵の乱れに与える路面性状の指標を明らかにし、路面性状を測定するだけで、操舵の乱れやすい場所を推定することができるようになった。しかし、本研究は主としてモデル区間 100m に限った基礎研究である。原理は見い出せたものの、さらに多くのデータで検証することが必要であることは言うまでもない。車線変更などへの応用も含めて今後の課題とする。

## 参考文献

- 1) Sayers, M. W., Gillespie, T. D. and Paterson, W. D. O. : Guidelines for Conducting and Calibrating Road Roughness Measurements, World Bank Technical Paper Number 46, 87p., 1986.
- 2) Janoff, M. S., Nick, J. B., and Davit, P. S. : Pavement Roughness and Rideability, National Cooperative Highway Research Program Report 275, 69p., 1985.
- 3) 岩崎洋一郎, 寺原孝: 車両の走行安全性, 日本道路公団技術情報, No. 120, pp. 49-58, 1994.
- 4) 関口英輔: 路面性状指標「サーフェスロール」が自動車の挙動に及ぼす影響, (財) 高速道路調査会図書資料, 41p., 1998.
- 5) 広田敦生, 佐藤久雄, 柳沢治茂: 直進安定性の評価法, 自動車技術, Vol. 36, No. 3, pp. 284-290, 1982.
- 6) 自動車技術会: 自動車諸元表, 1997~2001年度版.
- 7) 関口英輔, 阿部頼政: 新しい路面性状指標の開発, 土木学会第50回年次学術講演会講演概要集, V-282, pp. 564-565, 1995.
- 8) 関口英輔: 自動車の乗り心地に影響を及ぼす路面の特性, アスファルト Vol. 43, 206号, pp. 38-46, 2001.
- 9) (社) 日本セメント技術協会: AASHO 道路試験, 246p., 1966.
- 10) (社) 日本道路協会: 舗装試験法便覧, 1057p., 1988.

## FUNDAMENTAL STUDY ON THE INFLUENCE THAT THE ROUGHNESS OF THE ROAD SURFACE AFFECTS THE HANDLE OPERATING OF THE DRIVER

Shinji KUNIEDA<sup>1</sup>, Yorimasa ABE<sup>2</sup>

The roughness of the road surface affects not only riding comfort but also handle operating. Authors have fixed their eyes upon the road surface conditions reflecting the relative position of vehicle wheels, and have developed a new index named "WONDERING INDEX ( $WI$ )" which represent road surface conditions.

This paper describes relations between  $WI$  and handle operating works, and investigates how to measure road surface conditions reflecting the relative position of vehicle wheels. The results show that  $WI$  and handle operating works have a high mutual relation. Consequently, it is concluded that  $WI$  can be a useful index to evaluate the road surface that affect handle operating.