

道路利用者の視点から見た高速道路の 平坦性について

川村 彰¹・七五三野 茂²・鈴木一隆³・木村篤史⁴

¹正会員 工博 北見工業大学助教授 工学部土木開発工学科（〒090-8507 北見市公園町 165 番地）

²正会員 工博 日本道路公団 試験研究所舗装研究室長（〒194-8508 東京都町田市忠生 1 丁目 4 番地）

³正会員 工博 日本道路公団 試験研究所舗装研究室（〒194-8508 東京都町田市忠生 1 丁目 4 番地）

⁴網走市役所 建設部都市開発課（〒093-8555 網走市南 6 条東 4 丁目）

路面の平坦性は、路面性状の中で最も道路利用者費用と密接な関係があるといわれている。本研究は、道路の安全性・快適性を含み、複雑化・高度化している高速道路利用者のニーズに対応する技術指針策定の一助となることを目的としている。本研究は、1) 高速道路の平坦性調査および2) 高速走行時における路面と車の相互作用解析から構成されている。最初に、高速道路4路線で縦断プロファイル測定を実施し、既存の平坦性評価指標による路面の現状把握を行った。続いて、被験者による乗り心地評価を行い、平坦性指標と乗り心地との関連を検討した。最後に、車線乗移り走行試験を実施し、試験結果を基に路面が車の操安性に及ぼす影響把握に有用となる車の運動モデルを作成した。

Key Words: Road surface evaluation, IRI, Stability and control, Panel rating, Ride quality, Simulation

1) はじめに

近年、レーザセンサ等の光学的装置を用いた非接触測定技術の導入や計算機によるデータ処理技術の向上により、路面のプロファイル測定の高速度・効率化が、飛躍的に向上した。これら高速プロファイロメータの出現により、道路ネットワーク上の平坦性をモニターすることが、より迅速に行われるようになってきている。

一方、路面プロファイルから得られる平坦性は、舗装のマネジメントシステムを構築する上で、道路利用者費用と最も密接に関係あるとされ、走行時の安全性、快適性のみならず車両のオペレーティングコストにも大きく影響を及ぼしている。

現在、建設されている第二東名・名神高速道においては、設計速度140km/hで設計されており、今後予想される高速走行に対応し、かつ道路利用者の視点に立脚した路面性状評価方法の確立ならびに路面管理基準の見直しを計ることは、今後の高速道路整備計画において急務とされる課題である。

このことから、本研究は、高速道路の平坦性に関する実態調査、実車走行試験結果に基づく車の運動シミュレーションを通じて、道路の走行安全

性・快適性を考慮した路面管理基準作成のための方策を検討するものである。

本研究は1) 高速道路の平坦性の現状調査および2) 高速走行時における路面と車の相互作用解析から構成されている。

1) では、昨年高速道路4路線に関して高速プロファイロメータによる縦横断プロファイル測定を実施し、既存の平坦性評価指標（IRI や RN, わだち掘れ深さなど）を用いて高速道路路面の現状把握を行った。

また、同一路面に対して被験者による乗り心地評価を実施し、平坦性指標と被験者による乗り心地評価との相関性について解析を行い、IRI の乗り心地管理指標への適用性について考察した。

2) では、わだち掘れが発生している高速道路の一区間において、車線乗移り試験を実施し、わだち掘れが車の車線乗移り挙動に及ぼす影響について、実車による測定を行った。

その結果を基に、わだち掘れが車の操縦性・安定性に及ぼす影響評価のための車の運動モデルを作成し、計算機シミュレーションより車の操安性解析への適用性について検討を行った。

2) 高速道路の平坦性調査と乗り心地評価

現在供用中の高速道路において、路面性状測定車で縦横断プロファイル測定し、測定区間の路面性状を把握するとともに、被験者による乗り心地評価を実施した。また、測定結果を基に平坦性評価指標を乗り心地の管理指標としての適用性について、検討を行った。

(1) 路面プロファイルの測定

今回の調査で用いた路面性状測定車は、縦断プロファイル測定に関しては、非接触光学変位計オプトケータと加速度計を検出装置にした非接触型であり、路面性状測定車の測定条件を表-1に示す。また、測定対象として選定した路線は4路線であり、表-2にそれを示す。

なお、測定結果の精度、信頼性を確認する意味で従来使用されている3mプロフィロメータ、横断プロフィロメータを用いた低速測定も一部の測定区間で併用している。測定は、1998年9月～1999年2月にかけて行われた。

表-1 路面性状車の測定条件

項 目	基 準
測 定 速 度	80 km/h以上
縦断プロファイル測定間隔	10 cm (縦断方向)
縦断測定位置	左側わだち部
横断プロファイル測定間隔	10 cm (横断方向)
横断測定位置	10 m間隔 (縦断方向)

表-2 測定区間

道路名	測定区間 (kp)	上下	車線	延長 (km)
館山道	41.0 ～ 65.8	下	走行	24.8
中央道	105.5 ～ 124.4	下	走行	18.9
常磐道	5.0 ～ 51.6	下	第一	46.6
東北道	55.0 ～ 91.6	下	第一	36.6
合計				126.9

(2) 平坦性指標による評価

前述の測定路面の平坦性を把握するために、縦断プロファイルについてはIRI (International Roughness Index) ¹⁾、²⁾ 及びRN (Ride Number) ³⁾ を用いて評価を行った。

IRIは、各国や機関によって異なるラフネスを共通化する目的で、1986年に世界銀行から提案されたラフネスの評価基準である。2軸4輪の乗用車の1輪だけを取り出したクォーターカー (Quarter Car) を一定の速度で路面上を走行させた時の車が受ける上下方向の運動変位の累積値と走行距離との比を、その路面のIRIとしている。よって、このIRIの大

きいほうが、路面の凹凸が大きく、悪い状態であることを意味している。研究段階ではあるが、国内においても、一般道路⁴⁾ や空港滑走路⁵⁾ でIRIを用いた路面評価が実施されるようになってきている。IRIによる路面評価図を図-1に示す。

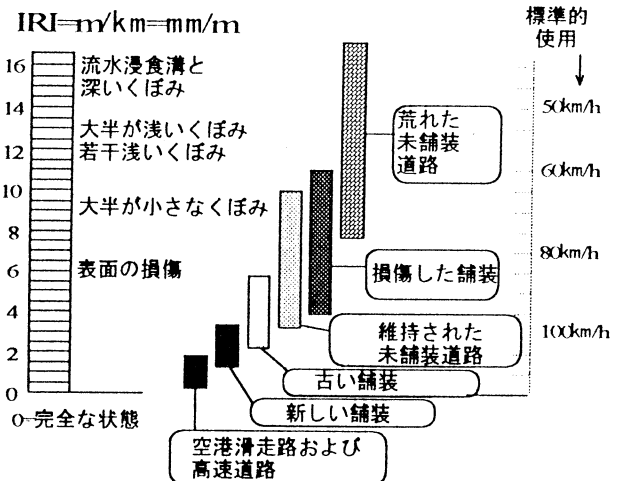


図-1 路面状態とIRIの関係

RNは路面変位のRMS値（二乗平均値の平方根）に相当するProfile Indexから、Eq(1)によって導かれるもので、利用者の快適さを表したものである。

RNは、被験者による5段階評価結果に基づき開発されており、その値が大きいほど路面性状が良好に保たれていることを意味する。両指標は、プロファイルデータから平坦性を評価する指標として、現在国際的に最も利用されている指標であり、今回測定された路面性状について国際間比較にも今後適用可能である点を考慮の上、採用した。

$$RN = 5e^{18.65PI^{0.94}}$$

(1)

図-2 から図-5 に評価結果の一部を示す。

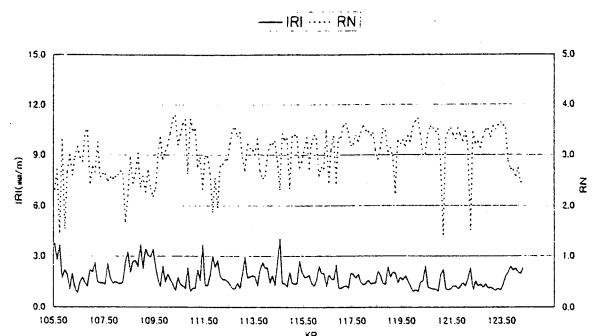


図-2 IRIとRNによる平坦性評価（中央道）

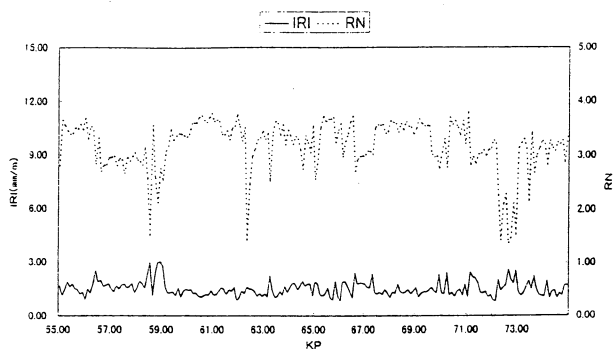


図-3 IRIとRNによる平坦性評価（東北道）

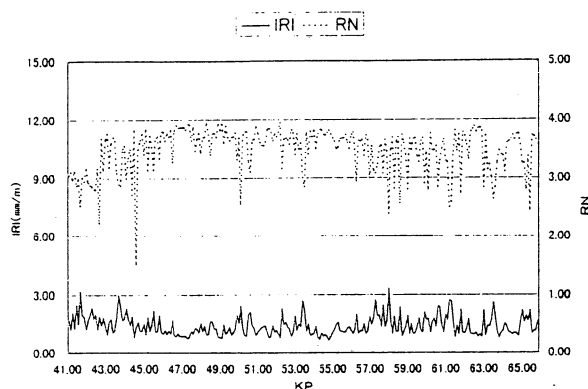


図-4 IRIとRNによる平坦性評価（館山道）

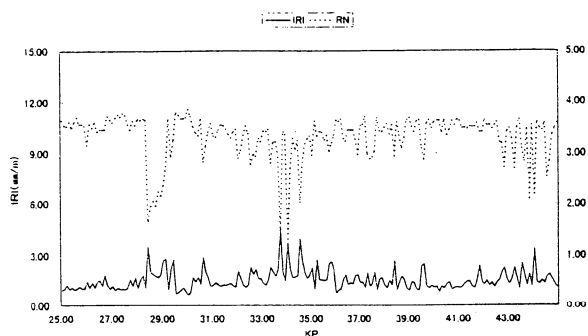


図-5 IRIとRNによる平坦性評価（常磐道）

図の測定プロファイルは、OWP（Outer Wheel Path）であり、IRIでは路面の評価対象波長成分を考慮して、100m評価区間毎のrunning IRIにより計算している。一般傾向として、IRIが大きくなるとRNは小さくなり、またその逆もありえるが、測定では、4路線の全体を通じてIRIの平均は1.5前後、RNは3前後の値を有している。これは、IRIでは「新しい舗装」の評価区分に、RNでは「FAIR」～「GOOD」の評価区分に相当しており実感との対応も良い。

しかしながら局所的に路面を見た場合、常磐自動車道ではIRIが4.6、RNが1以下のものも見受けられ、乗り心地に悪影響を与えていると推察される。測定路面について、平坦性指標間の相関について分析した図を図-6に示す。

IRIは線形性を有する指数である一方、RNは非線形性を有すること。また、両指数の路面解析対象周波数特性が異なるために、極めて高い相関が得られる結果とはなっていない。

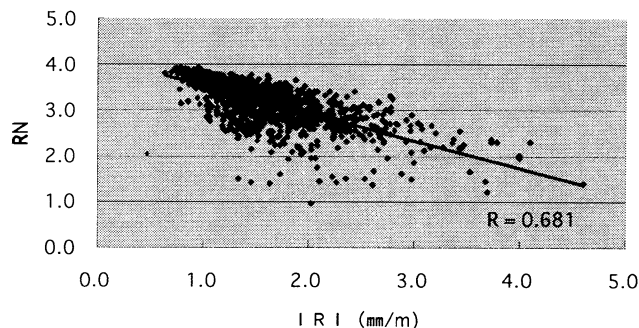


図-6 IRIとRNとの相関関係

(3) 被験者による乗り心地評価

舗装路面の乗り心地に関する被験者による評価は、道路の利用者による路面評価手法の代表的なものであり、AASHO道路試験⁶⁾を起に、これまで各国で数多く実施されてきている。1998年12月に、被験者として36名の男女を普通乗用車の助手席に乘坐、先に測定した高速道路の乗り心地の主観評価を実施するとともに、前節で用いられた平坦性指標との相関分析を実施した。

今回のパネル評価の調査条件および評価対象区間について、表-3、4に示す。尚、対象区間は路面性状測定車の測定結果に基づきIRI値が大きい区間から小さい区間まで適当に分散している区間を選定している。レーティングは、200m区間ごとに実施しており、各路線毎の乗り心地評価結果を図-7,8,9,10に示す。

表-3 パネル評価の調査条件

調査回数	1回(同種の乗用車3台使用)
判定	5段階
調査員	1名/台 (延べ 36名)
速度	80 km/h
調査単位	200 m
調査箇所数	1 I C間の必要箇所とする
調査員内訳	20代 : 男女各6名 30代 : 男女各6名 40代 : 男4名, 女2名 50代以上: 男4名, 女2名 計 : 36名
対象車両	普通乗用車 : 日産サニー1500FE

表-4 パネル評価の対象区間

道路名	測定区間 (k p)	上下	車 線
中央道	106.0～113.0	下	走行
東北道	56.0～72.0	下	第一走行
常磐道	20.0～29.0	下	第一走行
館山道	53.0～59.0	下	走行

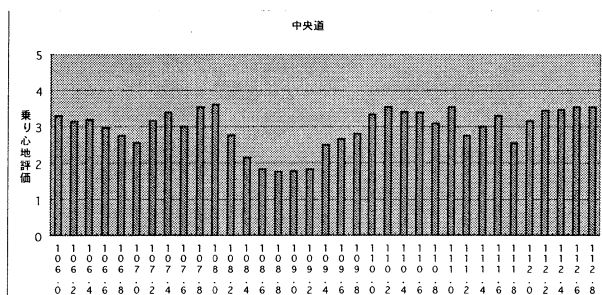


図-7 乗心地評価 (中央道)

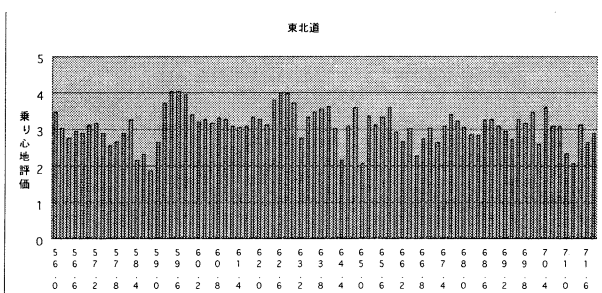


図-8 乗心地評価 (東北道)

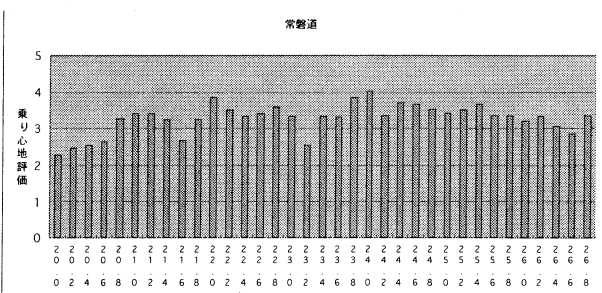


図-9 乗心地評価 (常磐道)

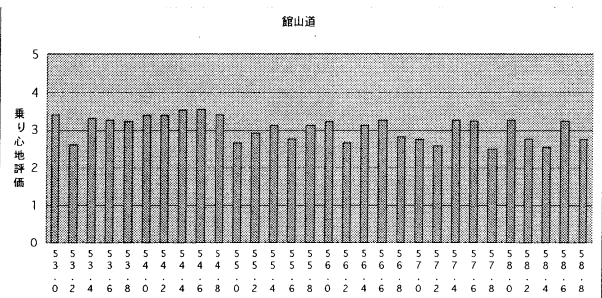


図-10 乗心地評価 (館山道)

総じて、3 前後の値を有するが、区間によっては 2 に低下する個所も見受けられ、路面の波状特性よりも段差等の局所的に特徴を変える個所の存在が評価に影響している。原因を特定するための追跡調査が今後必要かと思われる。

1) 年代の違いによる評価

被験者 36 人のデータを「20 代」から「50 代」まで 4 分割し、各々の平均値により年代による評価の相違について検討した。路線別で見ると、図-11 からは主な特徴として、他の年代と比較して「40 代」の評価が館山道を除いて一般的に乗り心地に対して、厳しい評価を行っている。

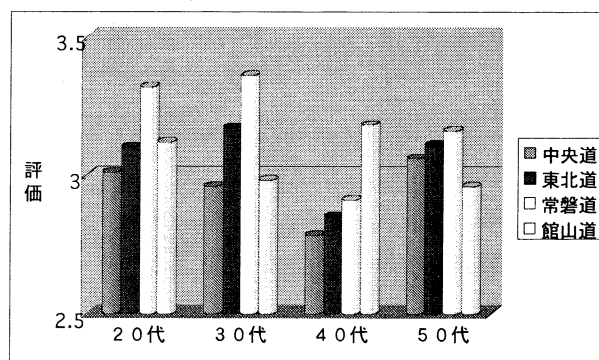


図-11 年代別評価 (路線別)

2) その他の違いによる評価

性別や自動車運転免許保有の有無による評価の違いは、結果に顕著に表れなかったものの、免許の保有の有無では図-12 に見受けられるように、免許保有者はやや良い評価を下す傾向にあるといえる。

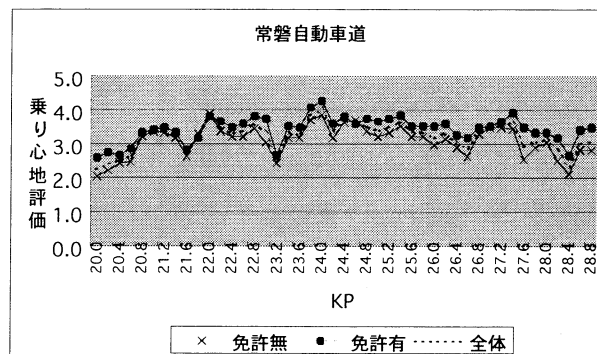


図-12 免許の有無による評価 (常磐道)

3) 5段階評価の分布

被験者による評価は、各路線ともに「普通（評価 3）」の評価が40%以上と多く、次いで「良い（評価 4）」となり、どの路線でも同様な傾向を示している。図-13 に示した 5 段階評価の分布図からもわかるように、評価は「普通」を中心とした山形を示しているが、中央道の「非常に悪い（評価 1）」、常磐道の「非常に良い（評価 5）」が、他の路線の分布割合と比較して高くなっており、路線の特徴を表現しているものと考えられる。

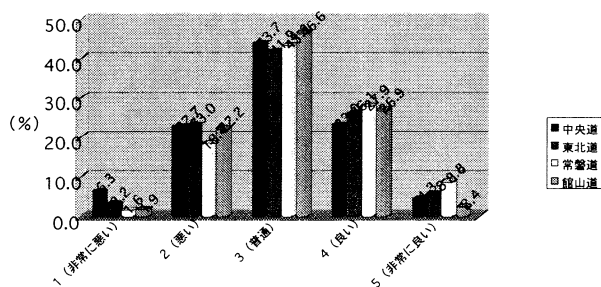


図-13 5段階評価の分布

(4) 平坦性指標と被験者評価値との相関分析

路面性状測定車による得られる路面の平坦性評価指標と被験者による乗り心地評価との相関について、単回帰分析を行った結果を図-14, 15 に示す。

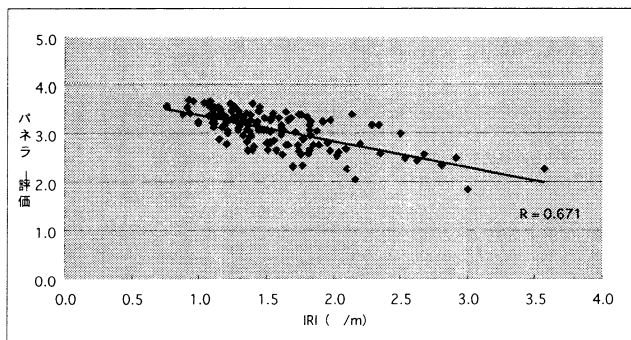


図-14 IRIと被験者評価との相関

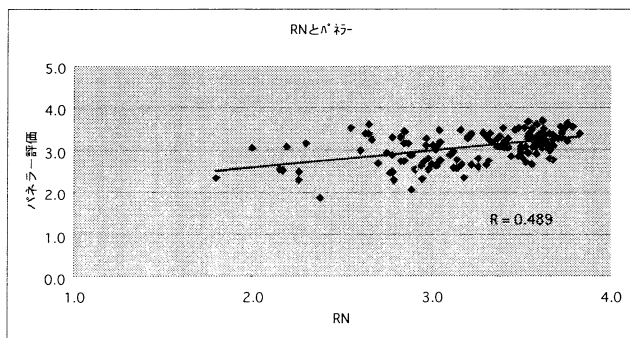


図-15 RNと被験者評価との相関

図は、全路線に対しての分析結果であるが、IRIと被験者評価では $R=0.671$ となり、この値は先に示した RN との相関係数の値とほぼ等しい。

RN と被験者評価とでは、 $R=0.489$ と低い値を示した。この理由としては、被験者の 5 段階評価の分布が各路線ともに同様な傾向を示していること及び、各路線を同レベルで評価しきれないこと等が主要因であるといえる。

(5) IRIの乗り心地管理指標への適用性

被験者評価で「良い」、「悪い」と判定された個所における IRI の度数分布を整理して、乗り心地の管理指標としての適応性について検討した。調査手順は、以下の通りである。

手順 1：被験者評価値（200m 区間毎）と IRI（50m 区間毎）の相関分析により、相関の高い道路区間を求める。

手順 2：被験者評価の良い個所と悪い個所を抽出する。

選定条件は、以下の通りである。

良い個所…被験者評価 4・5 が 50%以上

（36 人中 18 人以上）の個所

悪い個所…被験者評価 1・2 が 50%以上

（36 人中 18 人以上）

手順 3：被験者評価の良い・悪い個所における手順 1 で抽出した区間の IRI（10m 毎）の累積度数分布を求める。

管理基準を設定するための一手法として、上記手順による抽出個所の IRI の累積度数分布を利用した。図-16 により、被験者が「良い」と評価している IRI の分布は下限値で 0.0~2.0 の範囲で狭く、「悪い」と評価している分布は 0.0~7.0 と広範囲に及んでいる。ここで、累積値を管理基準と想定するための値を 85 パーセンタイル値とすると、被験者の主観的な評価が良いときの IRI は 1.0~1.5 となる。

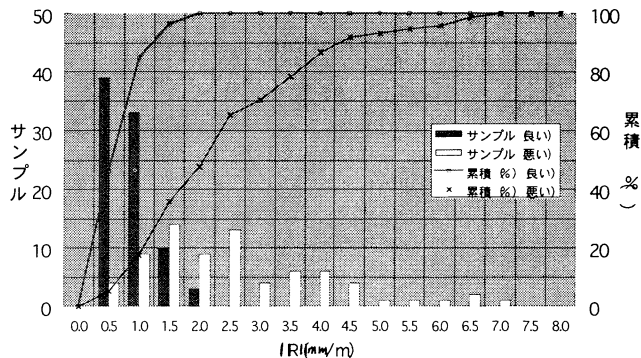


図-16 IRI（10m 毎）の度数分布

3) 高速走行時における車の操安性評価

運転者が車の操舵を行ってた際に、車が運転者の意志通りに動いてくれる性能（操縦性）と走行時に何らかの外乱が車に作用したとき、車のこれまでの進路を保持しようとする性質（安定性）は、高速走行時の車の快適性のみならず、安全性に強く影響を及ぼす。

特に、外乱には路面の凹凸が関係する場合も多いことから、車の操縦性・安定性に及ぼす路面性状把握は、路面の管理基準を設定するうえでも、重要な要因となる。

本研究では、高速道における路面が車の操安性（操縦性・安定性）に及ぼす影響解析を目的に、わだちが発生している路面において、実車による車線乗移り走行試験を実施した。

試験結果を基に、低自由度の車の操安性モデルを構築し、路面が車の運動変数に及ぼす影響について、理論的把握を行った。

1) 車線乗移り走行試験

車線乗移り走行試験は、車の操安性を解析する際の代表的走行試験として、また運転者の操舵特性や事故回避性能を知るために用いられる試験であり、コース追従性、ロール特性、操舵のしやすさを評価要因として行われるのが一般的である。

今回の試験は、後述される車の操安性モデル構築の際の基礎データとなることを主目的としている。

車線乗移り走行試験の測定条件、出力データ、測定箇所について表-5 から 7 に示す。

表-5 乗移り走行試験の測定条件

項 目	基 準
サンプリング間隔	0.01秒
設置箇所	・車両重心位置における3軸方向ならびに各軸まわりの回転角の測定 ・前後車輪のばね下での上下方向加速度の測定（4箇所） ・助手席シート部に約55kgのブロックを載荷させ、上下方向加速度の測定 ・ハンドル位置における操舵角の測定
対象車両	普通乗用車：日産サニー1500FE
測定速度	80 km/h

表-6 乗移り走行試験の測定データ

設 置 箇 所	出 力 デ ー タ
重心位置 (C.G.)	・加速度(前後、左右、上下) ・角速度(ロール、ピッチ、方位) ・角度(ロール、ピッチ、方位)
車の前後の車軸中心位置	・加速度(上下)
助手席シート部	・加速度(上下)
ハンドル位置	・操舵角

表-7 乗移り走行試験箇所

道路名	測定区間(kp)	上 下	速度 (km/h)	乗移り 距離(m)	わだち掘 れ量(mm)
館山道	47.4 ~ 48.1	下	100	100	7.0
	52.2 ~ 52.5			150	11.3
中央道	114.8 ~ 115.2 119.6 ~ 119.9	下	100	100	14.0 18.0
常磐道	33.4 ~ 33.5	下	100	100	20.0
東北道	63.3 ~ 63.4	下	100	100	15.0
	68.5 ~ 68.7				10.0

また、測定結果の一部を図-17に示す。

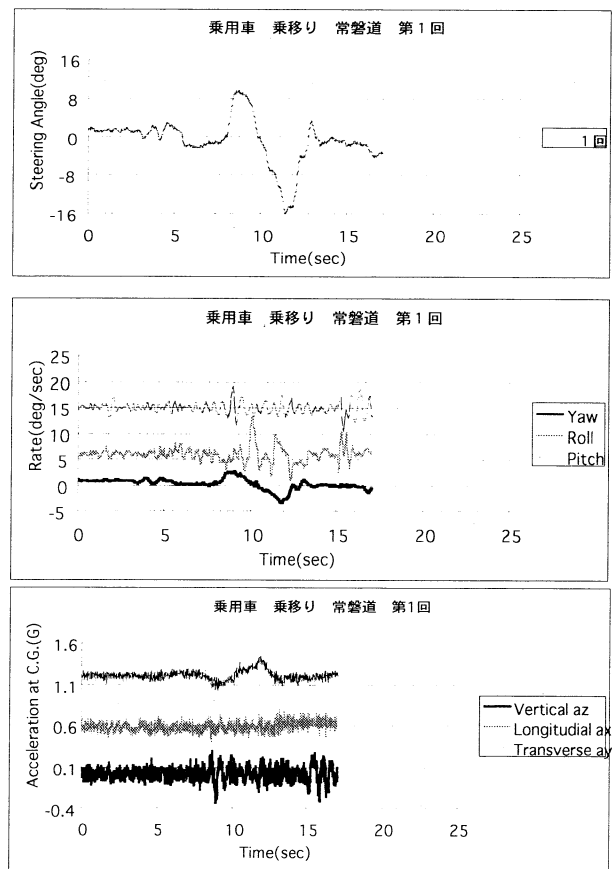


図-17 乗移り走行試験結果（常磐道）

結果より、わだち掘れ量が最も顕著な常磐道では、重心位置における前後・上下・左右方向変位加速度で最大 0.4g 程度に達している。図より、操舵角と車の重心位置における出力間では、横方向加速度およびヨーレイトにおいて、相関性の高いことが示されている。このことは、車の運動モデルを構築する際に、操舵角を入力、横方向加速度およびヨーレイトを出力としたとき、入出力間で、ある程度線形関係が成立することを保証するものと言える。このことから、横方向加速度とヨーレイトの RMS 値とわだち掘れ深さとの相関について検討したところ、図-18 に示されるように横方向加速度については、相関性は見受けられなかった。このことは、わだち掘れ量が多くないことならびに乗移り距離の設定によるものと思われる。

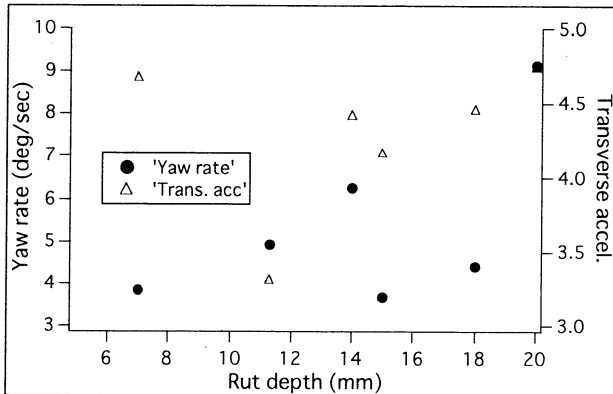


図-18 わだち掘れ深さと運動変数 (RMS 値) との相関

2) 車の操安性モデル

従来、自動車工学の分野では車の運動解析に数多くのモデルが開発されてきており、車と路面間の動特性分析に際しては、新たに解析モデルを開発するよりは、既存モデルを改良して用いるのが一般的である。操安性に関する車の運動変数には、ヨーイングが多く用いられること、先の測定結果より操舵角とヨーイングには線形性が見受けられることなどを考慮して、筆者らがこれまで一般路における操安性解析に用いた解析モデル⁷⁾の諸元、懸架方式を修正したモデルを本研究の解析モデルとして採用した。

本研究で用いたモデルは、図-19 で示される 3 自由度モデルであり、車の運動についての入力となる路面、出力（ここでは操舵角で代用される）となる運動変数に関して、入出力の相関把握が容易なように低自由度モデルを採用した。次式に運動方程式を示す。運動方程式は、車に作用する横方向の力の釣り合い、ヨーイングモーメントの釣り合い、ローリングモーメントの釣り合い条件により作成される。

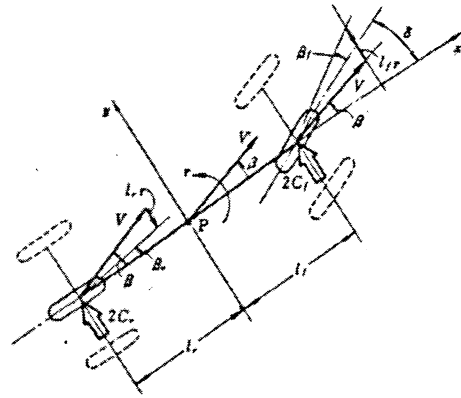


図-19 車の運動モデル (操舵部含まず)

$$mV \cdot d\beta/dt + 2(K_f + K_r)\beta + (mV + 2(l_f K_f - l_r K_r)/V)\gamma - m_s h_s \cdot d^2\phi/dt^2 - 2\gamma_\phi \phi = 2K_f \delta \quad (2)$$

$$2(l_f K_f - l_r K_r)\beta + I \cdot d\gamma/dt + 2(l_f^2 K_f + l_r^2 K_r)\gamma/V - 2N_\phi \phi = 2l_f K_f \delta \quad (3)$$

$$-m_s h_s V \cdot d\beta/dt - m_s h_s V \cdot d\beta/dt - m_s h_s V \gamma + I_\phi \cdot d^2\phi/dt^2 + c_\phi \cdot d\phi/dt + (K_\phi - m_s g h_s)\phi = 0 \quad (4)$$

ここで、

δ : 操舵角, ϕ : ロール角, l : ホイールベース, h_s : ロールアーム, l_f, l_r : それぞれ車両重心点と前後車軸間距離, I, I_ϕ : 車両全体のヨーイング慣性モーメントおよび車体のロール軸周りの慣性モーメント, β : すべり角, γ : ヨー角, γ_ϕ, N_ϕ : ロールステアに関する力, モーメント, K_ϕ : ロール剛性係数, C_ϕ : ロール粘性減衰係数, m : 車両全体質量, m_s : バネ上質量, h_s : バネ上重心点と車の進行方向軸との距離, V : 車速

3) わだち掘れが車の操安性に及ぼす影響評価

先の走行試験で得られた操舵角のデータを基に、4 次の Runge-Kutta 法により計算機シミュレーションを行った結果を図-20、21 に示す。

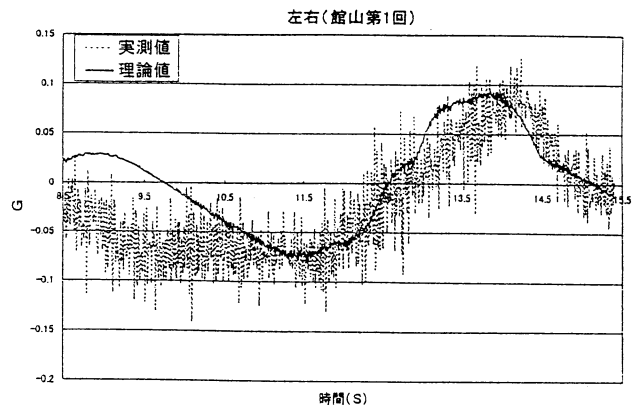


図-20 計算値と実験値との比較 (横方向加速度)

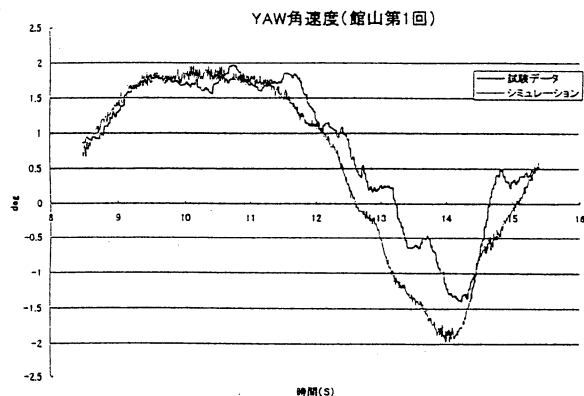


図-21 計算値と実験値との比較（ヨーレート）

図より操安性関連の車の運動パラメータに関して、走行試験結果とモデルによる計算結果の比較では、概ね良い一致を確認できる。今回用いたモデルは、線形モデルのためわだち掘れ深さとモデルの運動変数との間に線形性が成立している状況下では、本モデルは有効であり、乗り心地に関係ある振動加速度等の物理的評価基準^{8), 9)}から、快適性を損なわないためのわだち掘れ深さを予測することは可能である。路面の管理基準に応用するための課題として、高速走行に伴うタイヤ等の非線形特性が、走行速度、乗移り距離、わだち掘れ深さのどの段階で顕著になるかなどを把握しておく必要がある。

4) おわりに

本研究の成果を以下に要約する。

- ・ 高速道路4路線の縦横断プロファイル測定より平坦性評価を行った結果、running IRI は平均して約 1.5 m/km, RN は約 3 であることが分かった。
- ・ 平坦性評価の行われた路線に関して、被験者による乗り心地評価を実施した結果、平均して5段階評価の3（普通）となった。評価に際して、「免許の有無」による違いは顕著に認められなかった。

- ・ IRI の乗り心地管理指標への適用性について検討を行った結果、被験者の主観的な評価が良いときの IRI は 1.0~1.5 となった。
- ・ わだち路面上での車線乗移り走行試験結果では、乗用車の重心位置での横方向加速度の RMS 値とわだち掘れ深さとの相関性は認められない。
- ・ 車線乗移り走行時に車に作用する横方向加速度、ヨーレートと操舵角の間には、ある程度線形性が見受けられる。

参考文献

- 1) Sayers, M., Gillespie, T.D., and Queiroz, C.: *International experiment to establish correlations and standard calibration methods for road roughness measurements*, World Bank Technical Paper No.45, The World Bank, Washington D.C., 1986.
- 2) Sayers, M., Gillespie, T.D., and Paterson, W.D.O.: *Guidelines for conducting and calibrating road roughness measurement*, World Bank Technical Paper No.46, The World Bank, Washington D.C., 1986
- 3) Janoff, M.S.: *Methodology for computing pavement ride quality from pavement roughness measurements*, *Journal of TRB Research Record*, No.1084, 1986.
- 4) 秋本 隆, 姫野賢治, 川村 彰, 福原敏彦: 舗装路面の絶対プロファイルデータ収集システムの開発, 土木学会論文集, No.606/V-41, 1998
- 5) 姫野賢治, 秋本 隆, 川村 彰, 福原敏彦: 空港滑走路路面のプロファイル特性に関する研究, 土木学会論文集, No.606/V-41, 1998
- 6) Highway Research Record: The AASHO Road Test, HRB Special Report 61-E, 1962
- 7) 川村 彰, 加来照俊: 車 路面系の動挙動解析について, 土木学会北海道支部論文報告集, 第 42 号, 1986
- 8) ISO-2631-1: Mechanical vibration and shock-Evaluation of human exposure to whole-body vibration-Part 1, 1997
- 9) VDI Richtlinie 2057: Beurteilung der Einwirkung mechanischer Schwingungen auf der Menschen, 1987

INVESTIGATION ON ROAD EVENNESS OF EXPRESSWAYS FROM THE POINT OF VIEW OF ROAD USERS

Akira KAWAMURA, Shigeru SHIMENO, Kazutaka SUZUKI, Atsusi KIMURA

The purpose of this study is to contribute making a technical guideline for the road administrators who are responsible for user's needs. In this study, road profiling by a high-speed profilometer is conducted over the expressways in Japan and the evaluation of road evenness is established using the roughness indicators such as IRI and RN. Furthermore, we studied the subjective evaluation of ride quality by means of a rating panel for the expressways. Finally, the dynamic behavior of the vehicle on the rutted road is examined by the lane change test experimentally and by use of a dynamic simulation model of the vehicle theoretically.