



表-1 評価区間

区間名	測定区間	上下	延長
区間 1	KP10~9	上	1000m
区間 2	KP8~7	上	1000m

表-2 測定条件

項目	条件
測定位置	外輪走行位置
縦断プロファイル測定間隔	1cm

表-3 被験者調査条件

調査回数	各 1 回
判定	5 段階
走行速度	60, 80, 100km/h
調査単位	1000m
調査区間	区間 1, 区間 2
被験者内訳	20代 男 1 名 30代 男 11 名 女 2 名 40代 男 4 名 女 2 名 50代 男 5 名 60代 男 2 名  計 27 名  週に数回からほぼ毎日運転
試験車両	普通乗用車 (日産プリメーラ)



写真-1 ドライビングシミュレータ

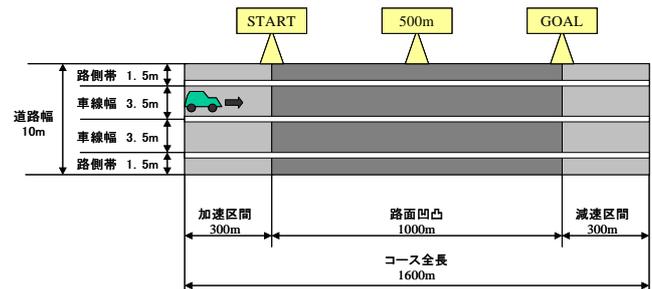


図-2 走行コース

イビングシミュレータを用いた被験者 20 名による走行試験を実施した。このシミュレータは路面状態による車両応答を模擬する事を目的に開発されたもので、路面プロファイルや路面状態(摩擦係数など)を任意に設定、模擬できる装置である(写真-1)。

測定された路面プロファイルから評価区間の国際ラフネス指数(IRI)を算出した。

乗り心地と安心感についての主観評価は、試験車両(国産 2000cc セダン)の助手席及び後部左側席に被験者を乗せ、上記評価区間を 3 段階(60, 80, 100km/h)の速度で走行し、走行直後に乗り心地と走行安全性をアンケートにより 5 段階(良い, やや良い, どちらともいえない, やや悪い, 悪い)で評価した。被験者調査の条件を表-3 に示す。

更に、評価区間において一般車両の平均走行速度を観測した。評価区間の始点と終点に観測員を配置し、それぞれの通過時刻から区間平均速度を求める方法をとった。この調査はドライバーが路面凹凸度合いに応じて走行速度を加減しているかを調べる目的である。

## (2) ドライビングシミュレータによる走行試験

より多様な縦断凹凸状況下での乗り心地と走行時安心感を検証するため、北見工業大学が所有するドラ

試験手順は、走行コースなど各種条件をシミュレータに設定、被験者による模擬運転、主観的評価(アンケート)の実施、の三段階で実施した。

試験条件は、5 種類の路面プロファイル(IRI=1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0mm/m), 3 段階の走行速度(V=60, 80, 100km/h)として設定した。

走行コースの線形は全長 1,600m, 幅員 10m の 2 車線(直線)で設計しており、片側 1 車線の幅員は 3.5 m である。走行コースは 3 区間に分割しており、加速及び減速区間が各 300m, 評価対象区間が 1,000 m とした。評価対象区間には開始地点(「START」), 中間地点(「500m」), 終了地点(「GOAL」)を示す標識を設置した(図-2)。画像や配色の程度によってはアンケート設問にある乗り心地及び安心感の結果に悪影響が生じる可能性があるため舗装表面及びコース周辺の画像は極力シンプルなものとし、配色に関しては一様とした(写真-2)。



写真-2 走行試験状況

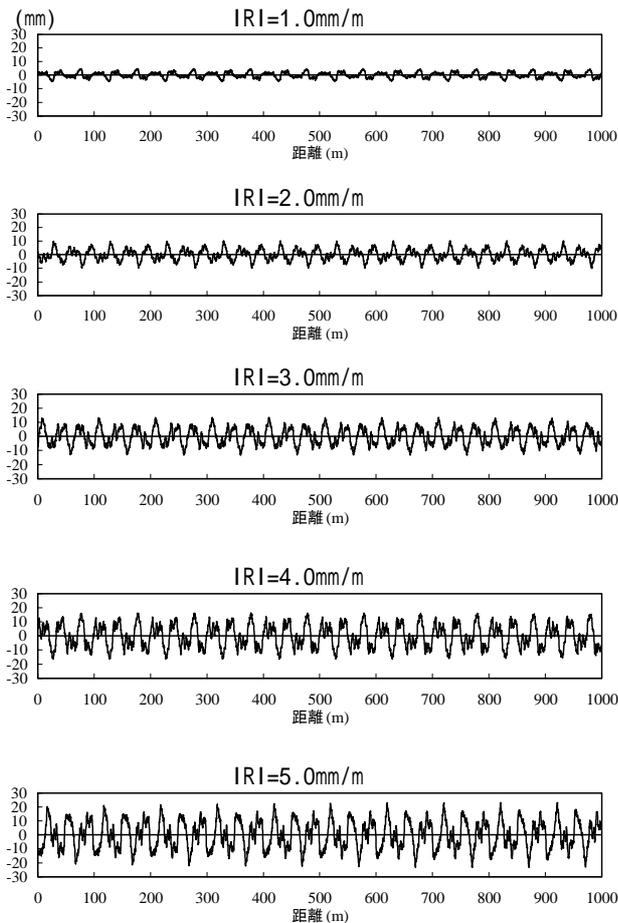


図-3 作成したコースの縦断プロファイル

本試験では、被験者が特定波長成分(例えば交差点付近のコルゲーション:1.0cycle/m)のみに敏感に反応する事が無いように、定常確率過程に基づくガウス分布を示す5種類の路面凹凸を用意し、設定したIRI値とするため路面凹凸を自己回帰モデルによる計算機シミュレーションにより作成した<sup>1),2),3)</sup>。作成したコースの縦断プロファイル図-3に示す。凹凸形状は全幅員にわたり同一の形状とし、サンプリング間隔は  $t=0.25m$ 、摩擦係数は乾燥アスファルト路面を想定し  $\mu=0.75$  と設定した<sup>4)</sup>。

用いたドライビングシミュレータは、異なる車両条

表-4 アンケート調査概要

調査回数	各1回
判定	5段階
走行速度	60, 80, 100km/h
調査単位	1000m
路面条件	IRI=1.0~5.0mm/m
被験者内訳	20代 男5名 女2名 30代 男2名 女5名 40代 男3名 女2名 50代 女1名 男 10名 女 10名 計 20名  週に数回からほぼ毎日運転
試験車両	普通乗用車相当を模擬

件での走行を可能とするため、プログラム上で車両運動に関する車両諸元の設定が可能である<sup>5)</sup>。

今回の試験の場合は一般的な乗用車の車両条件が必要であるため、ドライビングシミュレータのデフォルト設定値(自動車学校で使用する教習車と同等)を使用した。

被験者として、北海道北見市内に居住する20名(男女各10名,22~50歳)に協力を得た。被験者調査条件を表-4に示す。ほとんどの被験者はAT車を運転しており、年間走行kmは約10,000kmと回答した人が多い。またほぼ全ての被験者が「ほぼ毎日運転」している。

本試験では、1回走行する度にアンケート調査(被験者自身が記入)を実施した。実道調査と同様に走行直後に乗心地と走行安全性をアンケートにより5段階で評価した。さらに、乗心地等の貨幣換算を目的に、路面修繕の必要性の有無と、必要である場合の負担可能額を尋ねた。乗心地の費用化に関しては遠藤らの報告<sup>6)</sup>があり、右報告を参考に質問を設定した。

Q:いま走行した舗装は修繕が必要だと思いますか?  
 ぜひ必要 必要 どちらともいえない 不要  
 全く不要

Q:(前問で、ぜひ必要/必要と答えた方のみ)  
 舗装の修繕費用として、あなたはこの道路を1回走行するたびにいくらなら負担できますか?(金額をお書きください)

前提条件

あなたはこの道路をよく利用しているものとする  
 修繕は走行した区間を含む1kmで行なう  
 修繕費用は1㎡あたり2,300円、総額で約800万円かかる

### 3. 調査結果と考察

#### (1) 実道における走行試験

##### a) 平坦性評価

図-4 に評価区間の縦断プロファイルを示す。区間は路面が大きく上下していることが良くわかる。これは多数の道路横断構造物の存在と路体の沈下によるものと思われる。

路面プロファイル解析プログラム "Road Ruf" <sup>7)</sup> を使用して 100m毎に IRI を求めた結果を図-5 に示す。区間の平均 IRI は 3.8mm/m で、世界銀行の評価基準 <sup>8)</sup> では「古くなった舗装路面」、同様に区間の全区間平均 IRI は 2.6mm/m で「新しい舗装路面」相当の路面であると判断される。区間では、部分的に IRI=5~6mm/m を示し、これは「整備された未舗装路」もしくは「損傷した舗装路」に相当する。

##### b) 乗心地評価

乗心地評価結果を表 5 及び図-6 に示す。

IRI 値の増加に伴い乗心地評価が低くなり、また走行速度が増加するに従って乗心地評価が低下することがわかる。

##### c) 安心感評価

安心感評価結果を表 5 及び図-7 に示す。

乗心地評価と同様に、IRI 値が増加するほど安心感評価は低くなり、走行速度の増加に従い安心感評価が低下する。

また、同走行速度・同 IRI 値での乗り心地評価と比較すると、安心感については否定的評価をする被験者数が少ない傾向がみられる。

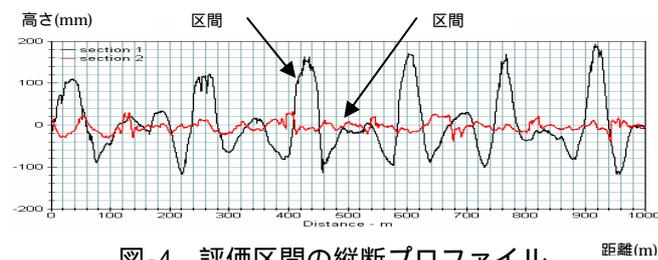


図-4 評価区間の縦断プロファイル

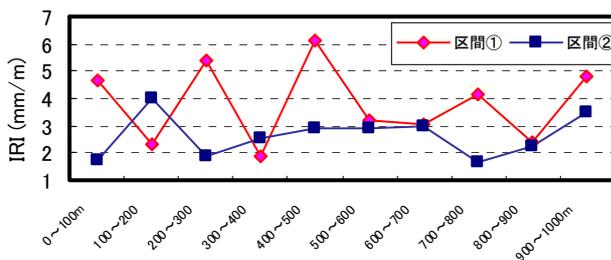


図-5 評価区間の IRI

乗心地および安心感評価を表-6,7 にまとめる。評価値 1 が 50%以上を「悪い」、評価値 1,2 あわせて 50%以上の場合で「やや悪い」(安心感は「やや危険」)、それ以外を「普通」と整理したものである。

表 5 乗心地及び安心感評価結果

乗心地	V=60km/h		V=80km/h		V=100km/h	
	区間1	区間2	区間1	区間2	区間1	区間2
平均	1.8	3.1	1.7	2.5	1.4	2.3
標準偏差	0.8	1.0	0.7	0.9	0.7	0.9

安心感	V=60km/h		V=80km/h		V=100km/h	
	区間1	区間2	区間1	区間2	区間1	区間2
平均	3.4	3.8	2.8	3.5	2.2	3.1
標準偏差	1.1	1.1	1.0	1.0	1.1	1.1

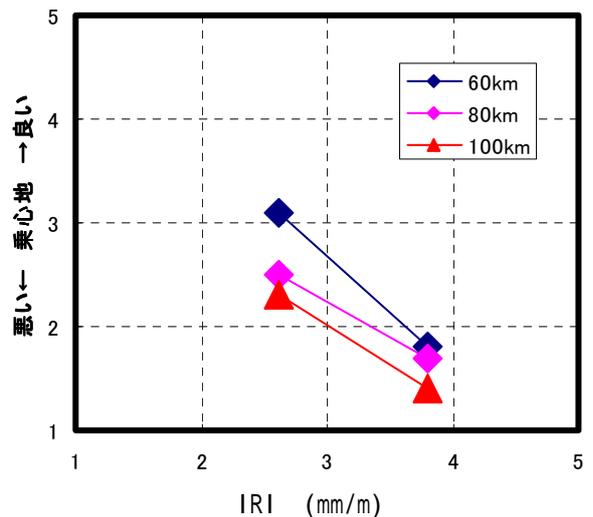


図-6 IRI と乗心地評価

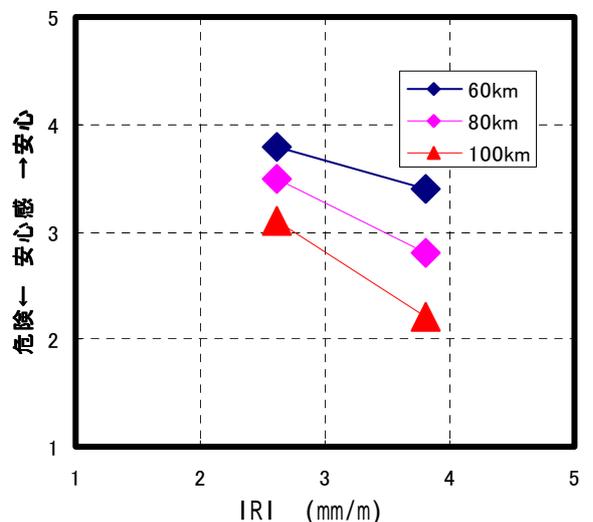


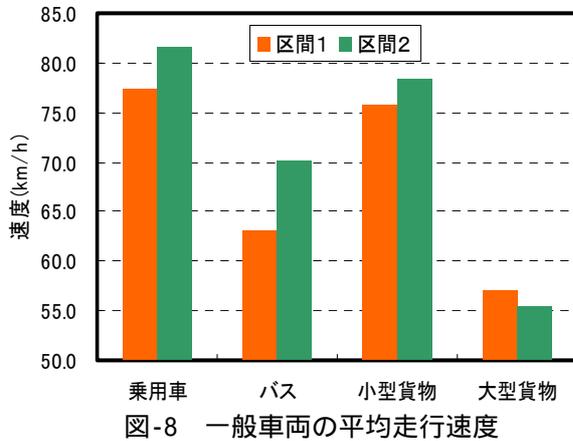
図-7 IRI と安心感評価

表6 IRI と乗心地評価

乗心地		IRI (mm/m)	
		2.6	3.8
V (km/h)	60	普通	
	80	やや悪い	
	100	悪い	

表7 IRI と安心感評価

安心感		IRI (mm/m)	
		2.6	3.8
V (km/h)	60	普通	
	80		
	100	やや危険	



d) 一般車両走行速度調査

2003年5月15日午前7時から午後7時の間に、測定した結果を図-8に示す。

いずれの車種においても、平坦性評価の低い区間の平均走行速度が低かった(大型貨物車はその殆どが付近で行なわれていた道路工事用車両であったため除外)。特にバスで差が大きく現れている。当該区間は高規格道路のほぼ直線かつ平坦な箇所位置し、沿道環境もほぼ均一とみなせることから、道路利用者は路面の平坦性に応じて走行速度を調節して走行しているといえる。

(2) ドライビングシミュレータによる走行試験

a) 乗心地評価

結果を表-8及び図-9に示す。

実道での試験結果と同様に、IRI値が大きくなるに伴い評価が低くなった。走行速度が60km/h及び80km/hではほぼ同様の評価傾向を示しているが、100km/hになると評価は大きく低下する。

表8 乗心地及び安心感評価結果

乗心地	60(km/h)					80(km/h)					100(km/h)				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
IRI(mm/m)	4.5	3.1	2.4	2.0	1.3	4.4	3.3	2.5	2.2	1.3	2.7	2.1	1.5	1.1	1.2
標準偏差	0.8	1.1	0.7	0.6	0.5	0.8	1.0	0.8	0.7	0.5	1.1	0.8	0.6	0.2	0.5

安心感	60(km/h)					80(km/h)					100(km/h)				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
IRI(mm/m)	4.8	3.7	2.9	2.7	1.9	4.5	3.5	3.1	2.8	2.0	3.0	2.2	1.7	1.2	1.4
標準偏差	0.6	0.9	0.9	1.0	0.6	0.8	0.9	0.6	1.0	0.6	1.0	0.8	0.5	0.4	0.8

修繕必要性	60(km/h)					80(km/h)					100(km/h)				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
IRI(mm/m)	1.6	2.4	3.1	3.5	4.1	1.6	2.1	2.7	3.2	3.8	2.5	3.4	4.1	4.6	4.6
標準偏差	0.5	0.8	0.8	0.8	0.8	0.5	0.8	0.7	0.7	0.6	0.9	0.9	0.7	0.6	0.8

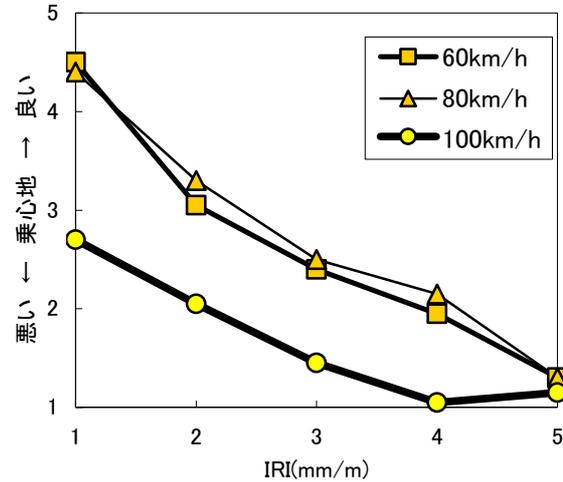


図-9 IRI と乗心地評価

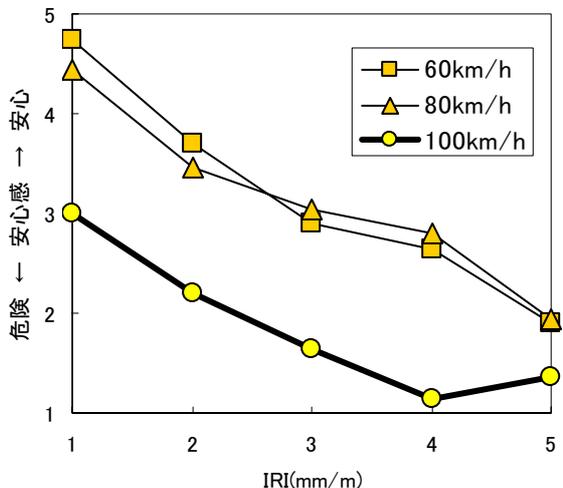


図-10 IRI と安心感評価

速度が60km/h及び80km/hの場合はIRI=2.0mm/m以下での評価は普通以上であったが、IRI=3.0mm/mを超えると評価は低下する。走行速度が100km/hになるとIRIの大小にかかわらず普通以下の評価となった。

b) 安心感評価

結果を表-8及び図-10に示す。

乗心地評価と同様にIRI値が大きくなるに伴い評

表-9 シミュレータ試験結果のまとめ

乗心地		IRI(mm/m)				
		1	2	3	4	5
V(km/h)	60	良い~普通		やや悪		悪
	80					
	100	やや悪				
安心感		IRI(mm/m)				
		1	2	3	4	5
V(km/h)	60	安心~普通				やや危険
	80					
	100	やや危険		危険		
修繕要否		IRI(mm/m)				
		1	2	3	4	5
V(km/h)	60	全く不要~どちらともいえない			必要	
	80					
	100	必要		ぜひ必要		

表-10 乗心地評価区分と IRI の範囲(参考値)

評価	IRI (200m 評価, V=80km/h)
良い	<1.3
普通	1.3~2.6
悪い	2.6

また、走行速度が 60km/h 及び 80km/h の場合はほぼ同じ評価であるが、100km/h になると必要性が大きく増加する。修繕が必要と判断する境界値は、速度 60km/h 及び 80km/h の場合、IRI=4.0mm/m 程度、速度が 100km/h の場合は IRI=2.0mm/m 程度である。

d) 修繕に要する費用負担額

IRI 値と平均費用負担額の関係を図-12 に示す。ここで、「修繕が不要」という評価は費用負担額=0 円として平均値を算出した。IRI 値の増加に伴い負担額は増加した。走行速度の影響については、全 IRI レベルにおいて 100km/h が最大となったが、80km/h よりも 60km/h での負担額が大きくなった。

負担額に対する回答は被験者により大きなばらつきがみられた(0~2000 円まで)。自由記入コメントには、「金を払って道を通ることがないのでよくわからない」「経済的な事も現実にと考えると書きづらい」「自分がお金を出すとしたらがまんできる範囲だが、行政が出してくれるならできれば修繕が必要」などの回答があった。これらの回答からばらつきの理由を推測すると、被験者の生活圏である北見市周辺に

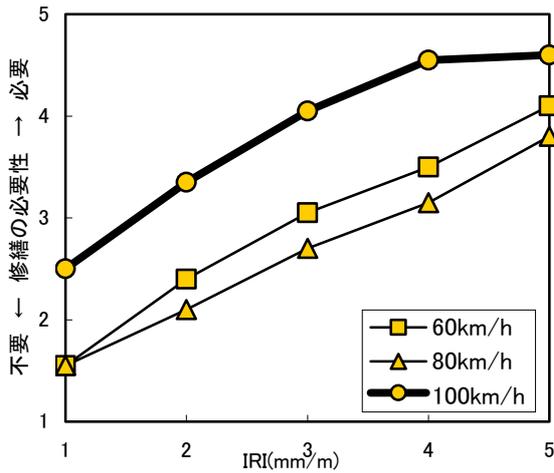


図-11 IRI と修繕の必要性

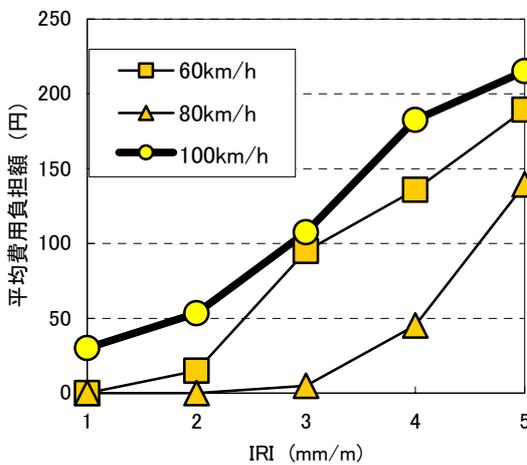


図-12 IRI と平均費用負担

価が低くなった。また、速度が 60km/h 及び 80km/h の場合はほぼ同じ評価であるが、100km/h になると評価が大きく低下する点も乗心地評価の場合と同様であった。

走行速度が 60km/h 及び 80km/h の場合は IRI=3.0mm/m より平坦性が悪化すると危険を感じるようになる。走行速度が 100km/h になると 1~2 段階程度評価値が低くなる。

速度が 100km/h のケースで評価が大きく低下する理由として被験者のコメントなどから推察すると、走行速度を一定に保つことに気をとられて運転に余裕がなくなり、その結果、評価が低くなったと思われる。

c) 修繕の必要性

結果を表 8 及び図-11 に示す。

IRI 値が大きくなるに伴い被験者が感じる修繕の必要性が高まる傾向がみられた。

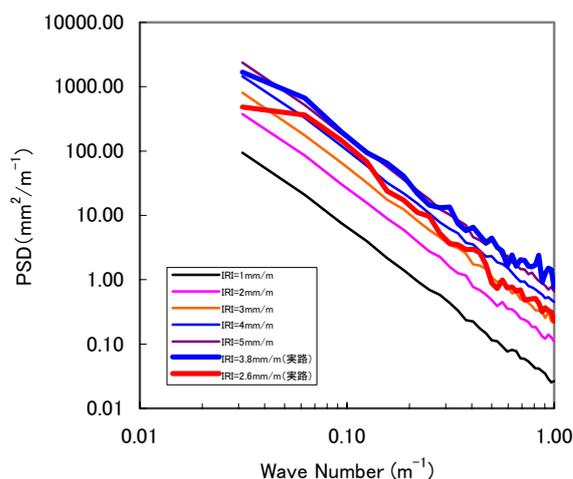


図-13 パワースペクトル密度

は有料道路や高速道路がないため実感として費用負担を伴う道路利用を想定することが困難であったこと、個人負担となると個人の経済状態が影響すること、道路修繕は行政が行うものであり個人負担という考えになじまない、等の理由が考えられる。

#### e) 実道試験結果との比較

実道での試験結果と同様に過半数の被験者が乗心地を「悪い」および「やや悪い」と評価した走行パターンを整理した。安心感、修繕の必要性についても同様に整理したものを表-9にまとめて示す。これらはドライビングシミュレータ上での仮想体験に対する評価ではあるが、実道における乗心地及び安心感評価の試験結果(表-6,7)と同様の傾向がみられた。ただし、個々の評価値では差が見られること、シミュレータ上では走行速度 60 及び 80km/h での評価にほとんど差がなく 100km/h 時のみで差が現れていることなど、今後の検証課題とすべき点もある。

また IRI と乗心地評価に関しては多数の既往報告があり、例えば川村らは実道での試験結果から IRI とパネル評価値の関係式として、 $MRP=4\exp^{-0.36 \cdot IRI}+1$  を導き、同式から IRI と乗心地の評価区分を参考ではあるが表 10 のように示している<sup>9)</sup>。本試験で得られた結果は、この評価区分ともよく整合している。

参考として、評価した実道路面及びシミュレーション路面のパワースペクトル密度を図-13 に示す。計算条件は以下のとおりである。

- ・サンプリング間隔 0.25m、データ数 4001 (1km)
- ・解析対象のウェーブバンドは、波長 1~30m の範囲内とし<sup>10)</sup>、この範囲内を通過するバンドパスフィルタを設計し演算処理した
- ・算出方法は FFT 法により、窓関数はハミング窓、セグメント長は L=128 とした

#### 4. まとめ

実路及びシミュレータを用いた自動車の乗心地、走行安心感及び舗装修繕の必要性に関する調査を行った結果、以下が確認された。

- ・ IRI が増加すると乗心地及び走行安心感評価は低下し、被験者が感じる修繕の必要性が高まる。
- ・ 走行速度が増加すると乗心地及び走行安心感評価は低下し、被験者が感じる修繕の必要性が高まる。
- ・ 乗心地及び走行安心感評価に関し、実道での試験結果とドライビングシミュレータによる試験結果は同様の傾向を示したが、個々の評価値と走行速度変化による評価値の変化傾向には差が見られた。
- ・ IRI が増加すると修繕費用負担額は増加する傾向がみられたが、金額に大きなばらつきが見られた。
- ・ 道路利用者は路面の平坦性に依りて危険を感じない範囲で走行速度を調節している。

#### 5. おわりに

現在、厳しい国家財政状況を背景に舗装マネジメントシステムの導入が本格的に進められようとしている。同システムによる解析結果に実効を持たせるには、車両走行費用や走行の快適性/安心感等の道路利用者費用を適切に評価し、システムに組み込む事が一層求められよう。本研究では路面プロファイル評価にドライビングシミュレータを用いることの有用性が確認できた。実道試験にかかる労力と不確定要因を排除して多様な路面状況を数多くの被験者によって容易に評価する事が可能であり、このことは今後の PMS 関連研究に大いに役立つものと思われる。

最後に試験調査にご協力いただいた北海道開発局札幌開発建設部深川道路事務所、及び被験者として参加していただいた各位に謝意を表する。

#### 参考文献

- 1) Kawamura, A. and Kaku, T.: An Evaluation of Road Roughness and the Effects on Riding Comfort and Vehicle Dynamics, Proceedings of Japan Society of Civil Engineers, No.359/IV-2, pp.137-147, 1985.
- 2) 小川進, 阿部忠行: 舗装の縦断凹凸のフラクタルによる評価, 土木学会論文集, No.490/V-23, pp.131-136, 1994.
- 3) A.Kawamura, E.Straube, H.Beckedahl : Berechnung und Bewertung von Längsunebenheiten, Proceedings of the East-West European Road Conference, Vol.2, pp.271-275, 1993.

- 4)市原薫,小野田光行:(新訂版)路面のすべり-道路・滑走路・路面-, pp57, 技術書院, 1986.
- 5)Kawamura, A., Shirakawa, T. and Maeda, C. : KIT Driving Simulator for Road Surface Evaluation, Proceedings of 5<sup>th</sup> Symposium on Pavement Surface Characteristics Roads and Airports (SURF 2004), pp.1-10, 2004.
- 6)遠藤桂, 姫野賢治:舗装の乗り心地調査結果に基づいた乗り心地の費用化に関する基礎的研究,土木学会舗装工学論文集第8巻, pp.55-63, 2003.
- 7)<http://www.umtri.umich.edu/erd/roughness/index.html>.
- 8)Sayers M., Gillespie T.D., Paterson W.D.O. : Guidelines for Conducting and Calibrating Road Roughness Measurements, World Bank Technical Paper Number 46, World Bank, 1986.
- 9)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,土木学会舗装工学論文集,第5巻, pp.102-110, 2000.
- 10)Sayers,M.W.,Karamihas,S.M (土木学会舗装工学委員会路面性状小委員会訳):路面のプロファイリング入門 安全で快適な路面をめざして,pp.53,土木学会,2003.

## **IMPACT OF PAVEMENT ROUGHNESS ON RIDING COMFORT AND SENSE OF SAFTY EVALUATED USING A DRIVING SIMULATOR**

Tateki Ishida, Hideto Takemoto, Akira Kawamura and Tatsuo Shirakawa

This study examines how pavement roughness affects the subjective riding comfort of drivers running on a road section in service versus on a road section in a driving simulator. Subjects were also asked whether pavement repair was necessary, and their willingness to pay for pavement repair. In this way, monetary conversion of subjective riding comfort was attempted. It was shown that when the IRI increases, the subjective riding comfort and sense of safety decrease and the subjective evaluation of the need for repair increases. Each subject's WTP increased with increases in IRI. However, the WTP differed greatly among subjects. Also, the subjective riding comfort and sense of safety of an actual road in service and a driving simulator were found to be shown in similar tendencies.