

IRI 指標を用いた自歩道における路面プロファイルの評価に関する研究*

Evaluation method of road roughness profile using IRI index for sidewalks used by bicycles, wheelchairs and pedestrians

山中英生**・滑川 達***

By Hideo YAMANAKA**・Susumu NAMERIKAWA***

1. はじめに

我が国の歩道は、歩行者や自転車などが混在して利用しており、さらに、高齢化に対応したバリアフリー化の要求の中で、今後は、車いすはむろん、自動三輪車などの多様な歩行支援交通手段の通行空間としての機能も期待されており、多様な利用に配慮した歩道環境の改善にむけて、多様な視点からの評価方法開発が重要と言える。

歩道環境は、交通の集中による錯綜といった交通特性、景観などの沿道特性などの要素とともに、路面特性も重要な評価要素である。そして、歩道の通行利用からみた路面特性の評価には、硬さ・すべり抵抗・路面形状といった要素が考えられるが、硬さとすべり抵抗については、具体的な試験機や管理値等が提案されている。一方、路面の縦断形状に関しては、車道等の自動車用の指標はあるものの、歩道に対して評価する現実的な手法の提案は見られない。そこで、本研究は車いすや自転車など多様な利用を配慮するため、自歩道における路面性状（縦断プロファイル）を評価する指標の開発を目的としている。

2. 自転車・車いすによる路面性状評価の既往研究

車いすの快適性確保の観点から、路面による振動に着目した研究が近年行われている。たとえば、寺町らは車椅子走行時の振動特性から路面平滑性を評価する方法を検討している¹⁾。車いすを振動台上で加振して体感評価を得る実験により、内蔵共振としびれを評価する補正振動レベル値を用いることで体感評価値を説明できることを示している。さらに、走行時の振動加速度を推定するため人-車椅子系力学モデル²⁾を開発し、凹凸走行路を屋内で走行した実験からモデル同定を試みている。これを用いることで、車椅子走行時の振動加速度を路面性状から予測する方法を提案している。

また、米川らは³⁾人体-車椅子系の振動モード特性を分析し、系の人体共振周波数は、頭部から下腿部にむけて増加し、4.63Hz、7.10Hz固有モードで不快感に影響することを明らかにし、さらに車椅子振動と評価の関係を定量化している。

自転車についても、振動と体感の関係に関する研究が多くみられる。たとえば、公園内走行路を走行させた時の振動加速度の周波数分析を行い、振動特性を明らかにした例⁴⁾や、振動台実験で周波数と体感の関係を明らかにした報告⁵⁾などである。

これらの研究は、人-車両系の振動特性に着目して、これから受けるユーザーの快適性との関係性を評価したものである。

一方、実際の多様な路面の体感評価を分析した例としては、舗装材に関する評価基準の検討を行った研究⁶⁾がある。4種類のゴムチップ舗装材と2種類のアスファルト舗装材について、自転車の走行抵抗性と制動性、滑り抵抗性や弾力性、透水性の指標を用いて評価を行っている。ただし路面プロファイルは扱われていない。

路面性状を評価する上では、入手可能な特性情報とその評価指標の選択が重要である。たとえば、車道の平滑性評価では、路面の縦断高低を測定するプロファイラーを用いて評価値を算出する方法が一般に取られている。その代表例として IRI（国際ラフネス指数）⁷⁾があるが、これは4輪自動車の1/4のモデルの構造で車輪下の路面形状を与えた時のバネ上での走行距離あたり延べ変位量を求めるもので、クォーターカーシミュレーションモデルと呼ばれている。

この IRI を歩行者用の速度に応じて算定した値を用いて、歩道の歩きやすさについての体感評価を用いて歩道舗装評価を行った研究⁸⁾では、体感値と相関することが報告されている。

以上の成果をふまえて、本研究では、路面性状の異なる区間について、歩行者、自転車、車いすの通行時の体感評価、車両の振動特性、路面プロファイルを計測し、関連性を把握することで、路面性状に関するサービスレベルの提案を試みることにした。特に車道用プロファイルとして使用されている IRI 指標を修正した指標を用いた関連分析を行って、その可能性を検討する。

*キーワード：歩行者・自転車 車いす、路面プロファイル

** 正会員、工学博士、徳島大学工学部建設工学科
(〒770-8506 徳島市南常三島町2-1, TEL: 088-656-9877,
FAX: 088-656-7579, e-mail: yamanaka@cc.tokushima-u.ac.jp)

(〒770-8506 徳島市南常三島町2-1, TEL: 088-656-7350)
*** 正会員、博士(工学)、徳島大学工学部建設工学科
e-mail: namerikawa@cc.tokushima-u.ac.jp)

表1 調査対象区間とその舗装材

	No	区間名	舗装種類	溝深さ (mm)	溝幅 (mm)	ブロックサイズ(cm)	
						走行方向	横断方向
徳島市	1	佐古	ILB	2	3	20	20
	2	そごう	ILB	5	1	10	22
	3	徳島県庁北	レンガ	5	4	11	23
	4	徳島駅前	ILB	7	3	10	20
	5	合同庁舎前	Co平板	6	10	29	29
	6	大道	タイル	4	10	20+10	20+10
	7	仲之町	タイル	3	13	19+9	19+9
	8	ACTY前	ILB, タイル, Co平板	7	15	21+10	21
	9	SATY前	ILB	7	10	10	16
	10	国道11号	開粒度(カラー)	-	-	-	-
	11	助任橋南	開粒度	-	-	-	-
	12	城東北	開粒度	-	-	-	-
高松市	13	中央通り東	ILB	3	5	12	22
	14	中央通り西	ILB	3	5	12	22
	15	水城通り	自然石平板	2	5	30	30
	16	香川県庁東	ILB	3	5	11	22
	17	中央病院南	ILB	3	10	9	19
	18	ライオン通り	自然石平板	3	10	30~10	68~46
	19	丸亀町	タイル	2	5	28.5	14

3. 調査の概要

(1) 調査対象区間の選定

調査区間は舗装種類と路面状態に着目して選定した。選定した19区間の概要を表1、区間例を写真1に示す。舗装種別は大別してアスファルト系(表中 AS: 弾塑性舗装は含まれない)とブロック系(表中 BK)に分けられ、ブロック系はILB(インターロッキングブロック)、コンクリート平板、レンガ、タイル、自然石などに区分している。

(2) 体感評価調査

10名の被験者に区間を通行させ、通行ごとに体感評価を答えさせる方法をとった。自転車はブリジストン製 SKG40W-6196 タイヤサイズ 24 インチ。車椅子は日進医療(株) NA-114A タイヤサイズ 22 インチ、シルバーカーはユーバ社製コミニカシリーズ(前輪径 15cm 後輪径 18cm)を使用した。体感評価の項目は2つで、自転車、車いすは振動評価に関する質問(振動を感じたか?), 走行快適性に関する質問(走行のスムーズさはどうか?), 歩行、シルバーカーは路面凹凸と走行快適性に関する質問に5件法で回答させた。

被験者10名は、学生(男性2名・女性3名、年齢21才~22才)と高齢者(男性3名・女性2名、年齢65才~75才)であり、19区間全て同一被験者で、①自転車での走行、②車いすに乗って走行、③車いすを後ろから押す(車いす介助)、④シルバーカーを押して通行、⑤普段の靴で歩行する、⑥下駄またはミュールをはいて歩行、の6種類の走行方法での調査を実施した。

写真2に各走行状況の様子を示す。自転車は約50mを1往復。車椅子は介助者が押して15mの区間を折り返し、両者が体感を評価し、交代して繰り返した。シルバーカー、歩行(歩きやすい靴、歩きにくい靴)は、車いすと同じ15mの区間を折り返して体感評価を行った。

(3) 振動特性計測

自転車と車いすの走行時の振動を把握するために自転車と車いすに加速度計を取り付け走行時の振動を計測した。加速計は2次元加速度センサ(アナログデバイス社製、ADXL202, ADXL210)を使用しマイクロコンピュータでSDメモリーに記憶する装置を制作したものである。計測は体感評価調査と同時に実施し、自転車では前かご取付け部、車いすでは前輪取付け部に加速度計を取り付け、サンプリングレート 500Hz、レンジ±10Gで上下方向の振動加速度を計測した。

(4) 路面プロファイル計測と平滑性指数の算出

路面の凹凸、平坦等の性状として縦断路面プロファイルを計測した。計測には路面形状計測装置(DAM: 図1、(株)サントップテクノ製)を用いており、この装置では変動輪の変位を計測することで、延長方向に10mm間隔で路面高さを計測することができる。

体感評価調査で自転車・車いすが走行したライン上を3回ずつ計測している。

得られた高低データから車道の平滑性評価に用いられるIRI(国際ラフネス指数)に準拠して平滑性指標を算



写真1 調査対象とした区間の例(番号は区間No.)

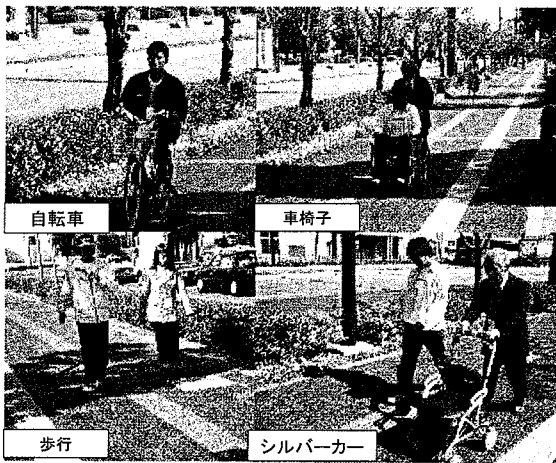


写真2 通行実験の様子

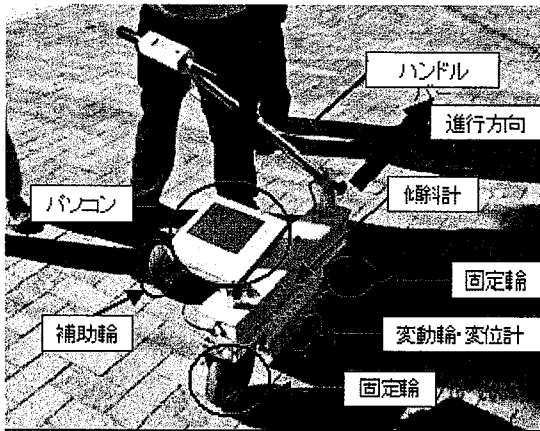


図1 路面形状計測装置 (DAM)

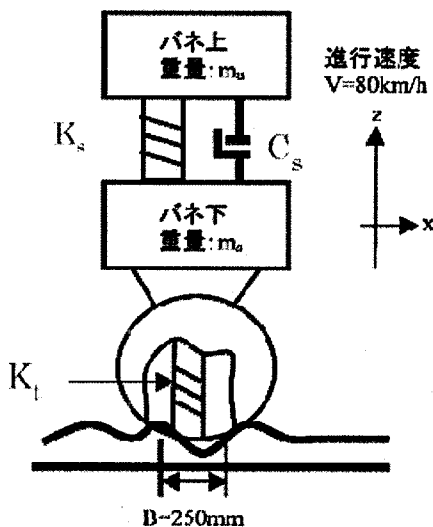


図2 QCモデル³⁾

出した。IRI はプロファイルを評価する方法としてクォーターカー(QC)シミュレーションモデルを用いている。これは4輪自動車の1/4のモデル(図2)の構造を定めて、車輪下の路面形状を与えた時のバネ上での走行距離あたり延べ変位量をシミュレーションプログラムによって求めるものである⁷⁾。ここでは既往研究²⁾を参考にし、自動車のモデルパラメータを自転車、車いすに対応した表2に示す値に修正して、IRI で提供されているプログラムを用いて算出した。

表2 QCモデルのパラメータ設定値

パラメーター	車いす		自転車
	前輪	後輪	
B (cm)	2.5	15	15
V (km/h)	3	3	10
μ (ms/mu)	0.054	0.172	0.123
C (Cs/ms)	10	4	3
K1 (Ks/ms)	4200	440	314
K2 (Kt/mu)	650	260	286

B=タイヤ接地長(cm) V=速度(km/h)

Cs=車体懸架装置の減衰率

Ks=車体懸架装置の弾性率 Kt=タイヤの弾性率

ms=ばねの上重量(車輪で支持された車体重量)

mu=ばねの下重量(車輪の重量と車体懸架装置/車軸の各1/2重量)

4. 主体による走行体感評価の分析

(1) 振動評価と快適性評価

図3は自転車と車いすの乗車時における振動評価と快適性評価の関係を示している。評価平均は5段階評価に-2から2の評点を与えて平均値を算出したものである。振動評価と快適性評価は相関が強いことが分かる。この傾向は舗装の種類にほぼ関係無いが、自転車の評価では自然石で振動評価の割に快適性が高くないといった区間も見られる。歩行などに関しても同様に振動評価と快適性、凸凹評価と歩行不安感には強い相関が見られた。

(2) 主体による評価の関係

図4は振動評価に着目し、自転車、車いすの体感評価について区間別評価平均の変化を自転車の評価の低い順に示したものである。評価は全体として自転車、車いす乗車、車いす介助時の順に低下する傾向がみられる。また、区間1は全ての主体の評価が高く、区間9も全ての主体の評価が最下位となるなど大局的には3者の評価には共通点が見られる。自転車の評価に比較して車いすの評価順位が悪い区間として17, 18, 19が見られる。このうち17は車いすの走行空間と自転車の走行空間の舗装材が異なっている特殊な区間で、他2区間はアーケード商店街内で平滑な面をもつブロックを使用した舗装区間

となっている。ブロック面が平滑な方が目地部分の振動を低速の車いすが感じやすくなると考えられる。

図5は、同様に普通歩行時の評価順位に対して下駄等歩行時、シルバーカーの評価を示したものである。この順に評価は低下しており、上記の評価で高順位の区間、低評価の区間が一致するなど大局的には自転車・車いすと同様の評価となっている。

ただし、細かく見ると、例えば区間8、6の普通歩行時の評価に比して、下駄等・シルバーカーの評価が低くなっているなど、主体による差異が生じることがわかる。区間8、6はタイルやその組み合わせ舗装の区間であり、微少な段差の存在が評価の差異の要因と考えられる。

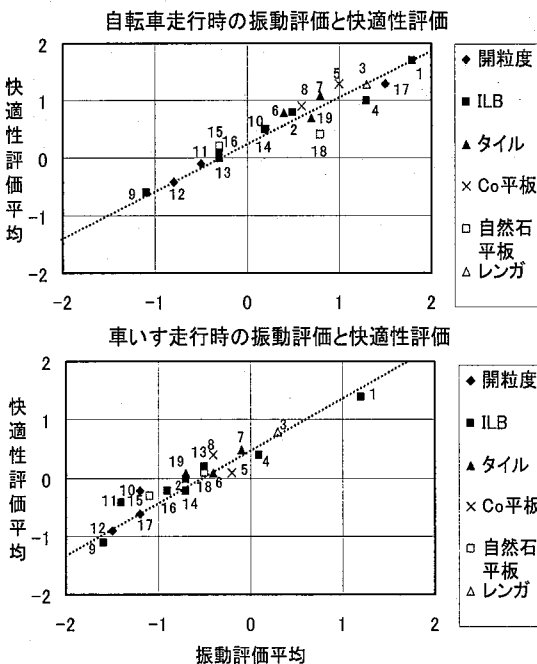
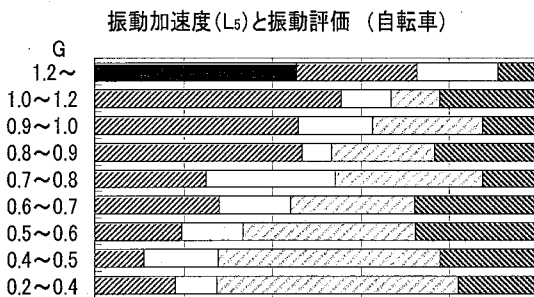


図3 振動評価と快適性評価の関係



■ かなり感じる □ 少し感じる □ 普通 □ あまり感じない □ 全く感じない

図6 振動加速度L5レベル別の振動評価の分布

5. 走行時の振動特性と体感評価

(1) 振動加速度特性と体感評価

次に、振動特性指標と体感評価との相関を分析した。その結果、各個人の体感評価と最もよく一致したのは、鉛直方向の振動加速度の上位5%値 (L5) であった。

図6は、L5値のバンド毎に自転車走行時と車いす乗車時の被験者を整理して体感評価の構成率を示している。

自転車走行時をみると、今回の区間は一般的な単路部で歩車道段差などを含まないため、加速度はさほど大きくないが、振動加速度 (L5) が1.1Gを超えると「かなり感じる」割合が急増している。こうした大きな加速度

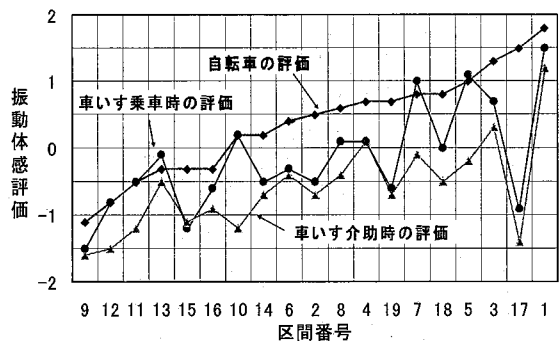


図4 自転車・車いすの振動体感評価

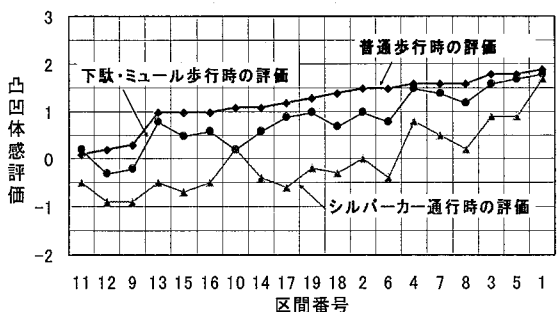
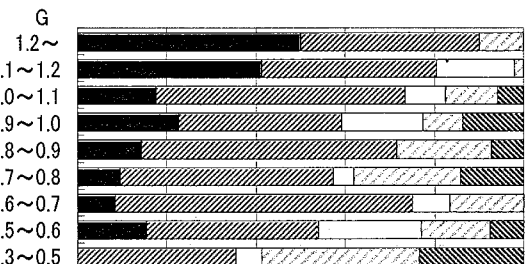


図5 シルバーカー・歩行者の凸凹体感評価

振動加速度(L5)と振動評価 (車いす乗車)



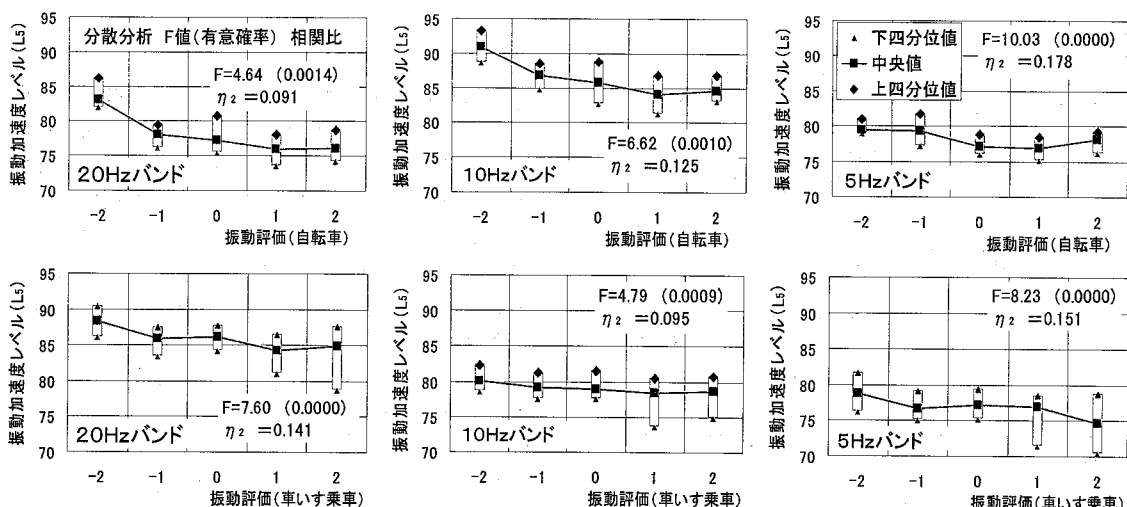


図7 振動評価ごとの1/3オクターブバンド別振動加速度レベルの分布

を生じさせる不陸や目地などに不快を感じていると考えられる。

車いす乗車時の図からは自転車ほど明確な関係が見られないが、振動加速度 (Ls) が 0.5G 程度からも「かなり感じる」とする被験者が見られるように、自転車よりも敏感に振動に反応しており、しかも微小振動にも不快を感じることが示唆される。

(2) 周波数バンド別の振動と体感評価

振動への体感は振動周波数によって相当に異なることが明らかになっている⁹⁾。そこで、1/3 オクターブバンドごとの振動加速度レベル (Ls) を算出し、体感評価値ごとの中央値、四分位数を求めた結果を図7に示す。また、体感評価値を要因として加速度レベルに有意な差があるかを一元配置分散分析で検定した。各周波数バンドのレベルと体感評価値にはいずれも有意な関係が見られる。また、体感評価と加速度レベルの連関の強さを示す相関比 (η^2) をみると自転車、車いすとも 5Hz 付近の振動レベルと連関が強くなっており、次いで車いすでは 20Hz 付近、自転車では 10Hz 付近の振動レベルの連関が強いことが分かる。5Hz バンド付近は内蔵の共振周波数として体感への影響が大きいとされている。

6. 路面プロファイル指標と体感評価

(1) IRI 指標と体感評価の関連

図8は、路面プロファイルの IRI 指標と、自転車、車いす乗車時の振動体感評価との関係を示している。自転車では振動評価の評点平均との間に関連性が見

られる。車いすは前輪の IRI との関係を示している。IRI が 20 前後の区間では、体感評価が良い区間と悪い区間が混在している。後輪の IRI は前輪よりさらに相関が見られなかった。

車いすの IRI 値と体感評価が整合しない原因として、振動の上位 5% レベルと体感の関係はみられることから、路面全体の平均的な指標値ではなく、局所的に生じた振動が体感に影響していることが考えられる。また、QC シミュレーションモデルでは車いすの一般的な振動特性から設定して、応答を計算しているが、それでは再現できない振動が体感に影響を与えていることが考えられる。例えば、硬質で径の小さな車いすの前輪が起す振動に微少な路面性状 (テクスチャレベルの性状) が影響することなどが想定される。

(2) 局所 IRI 指標と体感評価の関連

そこで、局所要素の影響をみるため、車いす乗車時の体感評価について、区間全体の IRI (上下変動の累加値) ではなく、1 m 毎 (車いすの速度ではおよそ 1 秒間) の IRI 値を算定し、その上位 5% 値 (Ls) と体感評価との関係を確認した。図9がその結果である。依然として 19 区間での相関は低いですが、図中に示すように、IRI の値の割には体感評価の低い 8 区間 (2,9,10,11,15,16,18,19) 以外は高い相関を生じている。この 8 区間には自然石 (15,18)、カラーアスファルト舗装 (10) と、ILB の一部が含まれているが、溝状の凹凸がある区間が多くなっていることから、狭い溝状の凹凸が車いすの体感に影響を与えているが、DAM 計測器ではそのような微少な路面

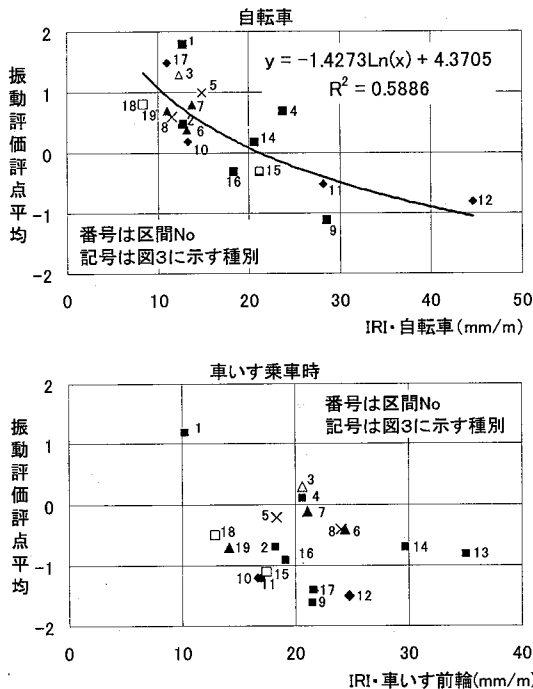


図8 IRI 路面プロファイル指標と振動評価の関

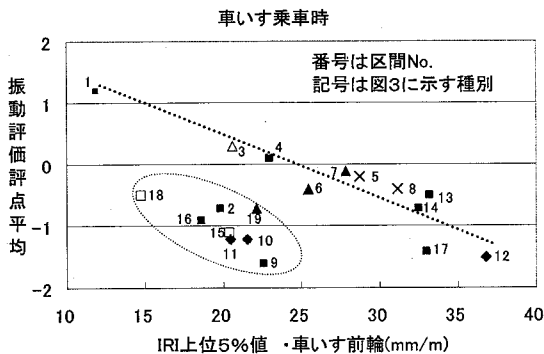


図9 IRI 指標のL5値と車椅子振動評価の関係

性状（テクスチャ、肌理のような性状）の把握が困難となっているため、算出したプロファイル指標が過小評価となる原因ではないかと思われる。

また、QC モデルは車輪特性が同一の4輪車において体感と適合するものであり、2輪特性がほぼ同じ自転車には適合しているが、前輪・後輪の特性が大きく異なる車いすへの適用には、問題があることを示しているとも考えられる。

7. まとめ

小型路面プロファイラーを用いて計測した歩道の縦断プロファイルを用いて、IRI で開発されたクォーターカーシミュレーションを用いて、自転車・車いす前後輪の IRI 指標を算出した指標について、学生・高齢者の通行時体感評価との関連性を分析した結果、自転車については関連性が見られ、IRI 指標での路面プロファイル評価が可能になった。

車いすについては、1 m ごとの局所的な IRI 指標の上位 5% 値では、19 区間のうち 11 区間をとると体感評価と関連性が見られた。ただし、自然石やカラーアスファルト舗装、一部の ILB 舗装のように、溝状の凹凸のある舗装の 8 区間では IRI 指標が良好であるのに評価が悪くなる傾向が見られ、応答シミュレーションや計測方法の改良などが必要であることが明らかになった。

今後の課題として、車いす通行時の評価については、今回は普段車いすを使用していない健康者での体感評価となっているため、普段車いすを使用している身障者の評価の調査・分析が必要と言える。また、振動については、感じる部位や不快を与えている振動周波数などの考慮も必要と言える。自転車や車いすの振動加速度は簡易なマイクロチップ 3 軸加速度計での計測であり、体感評価との関連を見るには計測位置の検討も必要と考えられ、振動加速度値の精度に改善の必要があると考えられる。このため、JIS 振動レベル計の使用、ピックアップの設置位置、設置方法を含めた検討、実験が必要と言える。

さらには、最近開発されて商品化されている車軸に振動吸収特性を持った車いすなどによる効果を把握して、路面で確保すべきサービスレベルについて検討することも重要と考えている。

謝辞

本論文は国土交通省四国整備局「歩道におけるサービスレベル確保に関する委員会（平成 15 年度）」における成果データの一部提供をうけて、IRI 指標の利用可能性について筆者らの責任でまとめたものである。

なお、QC シミュレーションによる IRI 指標算定には前原弘宣氏（東亜道路工業）の協力を得た。調査実験には国土交通省四国整備局生田利浩氏、土岐源水氏の協力を得た。記して、謝意を表する。

参考文献

- 1) 寺町賢一, 角知憲, 厲国権, 石田千加志, 一ノ瀬修: 路面平滑度に対する車椅子利用者の振動評価, 九州大学工学集報, Vol. 72, No. 1, pp. 271-277, 1999. 5
- 2) 寺町賢一, 角知憲, 厲国権, 石田千加志, 一ノ瀬修: 路面凹凸を考慮した人-車椅子系力学モデル, 九州大学工学集報, Vol. 72, No. 3, pp. 279-282, 1999. 5
- 3) 米川裕毅, 前野隆司, 松岡由幸: 車椅子車載システムにおける乗心地設計支援方法 (第1, 2報), 日本機械学会論文集 (C編), Vol. 67, No. 656, 2001
- 4) 斉藤俊, 千葉洋三: 自転車走行時の振動特性, 自転車技術情報, No. 70, pp. 92-106, 1996
- 5) 自転車産業振興技術研究所: 人は振動をどのように感じるか, 技研ニュース No. 170, 1999. 7
- 6) 牧恒雄, 小梁川雅, 竹内康, 飯田克己, 西村和宏: 自転車歩行者道の舗装材評価に関する研究, 土木学会舗装工学論文集・第4巻, 1999. 12
- 7) M. W. Sayers 他, 土木学会舗装工学委員会訳: 路面のプロファイリング入門, 土木学会, 2003
- 8) 大橋幸子, 新田弘之, 吉田武: 歩行者系道路舗装の平坦性評価に関する研究, 土木学会年次学術講演会, No. 58, V-671, pp. 1339-1340, 2003. 10
- 9) 日本規格協会: 全身振動-第2部測定方法及び評価に関する基本的要求, JIS B 7760-2, (ISO-2631-1: Mechanical vibration and shock - Evaluation of Human exposure to whole-body vibration -)
- 10) 土岐源水, 山中英生, 生田利浩, 瀬尾卓也, 本多正明: 自歩道における路面プロファイルの評価方法, 土木計画学講演集, Vol. 29, Paper_No. 18, 2004. 6, CD-ROM

IRI指標を用いた自歩道における路面プロファイルの評価に関する研究*

山中英生**・滑川 達***

本研究は, 自転車, 車いすの通行時の体感評価と路面の縦断プロファイルとの関連性を分析することで路面プロファイルの評価方法を検討したものである. 具体的には, 徳島市・高松市の19区間を対象として, 学生・高齢者10名の体感評価実験を行い, 小型路面プロファイラーを用いて計測した歩道の縦断プロファイルを元にして, IRIで開発されたクォーターカーシミュレーションにより, 自転車・車いす前後輪のIRI指標を算出した指標について, 関連分析を行った. 自転車についてはIRI指標での路面プロファイル評価が可能になったことが明らかになった. 車いすについては, 1mごとに算出したIRI指標の上位5%値と体感評価と関連性が11区間について見られた. ただし, 自然石やカラーアスファルト舗装, 一部のILB舗装など, 溝状の凹凸のある舗装の8区間ではIRI指標が良好であるのに評価が悪くなる傾向が見られ, 応答シミュレーションや計測方法の改良などが必要であることが明らかになった.

Evaluation method of road roughness profile using IRI index
for sidewalks used by bicycles, wheelchairs and pedestrians

By Hideo YAMANAKA**・Susumu NAMERIKAWA***

This Paper aims at developing evaluation method of road roughness profile for sidewalks used by bicycles, wheelchairs, and pedestrians, by employing analysis of relationship between IRI index measured by DAM (portable road profiler) and rating index by cyclists and wheelchair users. The author proposed IRI simulation method for bicycles and wheelchairs. The bicycle IRI index appeared good relationship with rating index. The wheelchair (front wheel) IRI index showed good relationship with rating index of some of sample pavements, except with natural stone pavement, color asphalt pavement, and some type of ILB pavement.
