

車の地点乗り心地を考慮した 道路利用者のための平坦性管理方法

白川龍生¹・川村彰²・富山和也³

¹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 番地)

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 番地)

³学生会員 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 番地)

個々の地点の振動を制御すれば結果的に全区間を通した乗り心地を向上することができるという考え方にに基づき、車の地点乗り心地を考慮した道路利用者のための平坦性管理方法を提案した。この方法は、評価セグメント内において、地点ごとに IRI を計算した「地点 IRI」の管理目標超過箇所数を積算し優先順位を付与する方法であり、従来の方法に比べ維持管理を要するセグメントを適切に表現できることを示した。区間評価値である IRI は平均化操作により局所的に生じる凹凸が車両振動に与える影響を表現できない場合があるが、地点 IRI は明確に表現することができる。また、バネ上振動加速度を片振幅 2.5m/s^2 以内に抑えるための地点 IRI 管理について、フルビークルシミュレーション結果に基づく走行速度別管理目標を提案した。

Key Words : Evenness Management Method, IRI, localized IRI, momentary riding comfort

1. はじめに

近年、道路利用者に快適かつ安全な路面のコンディショニングを提供する目的から、わが国では高速道路を中心に国際ラフネス指数 (International Roughness Index, 以下「IRI」とする) による路面管理が導入されつつある¹⁾。IRI は車両が路面プロファイルから受けるレスポンスに基づいた平坦性指標であり、米国をはじめ世界の多くの国々で路面平坦性を評価する際の標準指標となっている。

IRI は評価対象セグメント上をクォーターカーモデルが走行した際の車体タイヤ間距離の変化量を累積し、評価対象セグメント長で除すことによって求められる「区間」評価値として用いられることが一般的であり、評価対象セグメント内の平均的なラフネスの度合いを把握する場合に適している²⁾。しかしながら、区間評価法は一般に他と比べ1箇所のみ突出して大きな凹凸を含む「地点」を評価する場合には適していないという問題がある。これは区間内で平均化操作が行われることにより、著しく大きい値が過小評価されるためである。また、計算結果が評価対象セグメント長によって異なる可能性があるなど^{3), 4)}、実用上の問題点が指摘されている。

路面上を走行する車の乗り心地についても同様に、ある地点における瞬時的な振動評価 (以下、「地点乗り心地」とする) と一定時間乗車した際の総合評価 (以下、「区間乗り心地」とする) を区別して論ずる必要がある⁵⁾。

国際標準化機構 (ISO) は、1975 年に「全身振動暴露に関する評価指針 (ISO2631)」を提案した (1997 年に一部改訂)⁶⁾。これは全身で受ける振動を疲労の見地から評価したもので、自動車に限らず $1\sim 80\text{Hz}$ の振動について適用されるものである。評価方法としては周波数帯域を $1/3$ オクターブバンドに分割し、帯域ごとに加速度の実効値を求めて等感覚曲線と比較する方法、及び等感覚曲線によって体感補正したデータの代表周波数の許容時間によって評価する方法がある。この評価方法は、ある時間内での平均的な値となるため、長時間の乗り心地評価に適しているが、著しく大きな振動が生じた場合は平均化操作によりその影響を評価できない、評価に用いる時間の長さによって結果が異なる可能性があるなど、前述の IRI と同様の問題が指摘されている。

わが国における高速道路及び主要幹線道路は整備水準が高く⁷⁾、路面上を走行する車両の区間乗り心地については良好な水準にあるが、路面上に局在する構造物付近の段差などにおいて著しく大きい振動が発生しやすく、道路利用者のアンケート評価結果においても当該箇所への関心の高さが現れている⁸⁾。

このことから、今後の維持管理においては著しく大きい振動発生原因となる「地点」の評価がターゲットとされるべきであるが、車の地点乗り心地に主眼を置いた道路利用者のための平坦性管理方法は確立されていない。

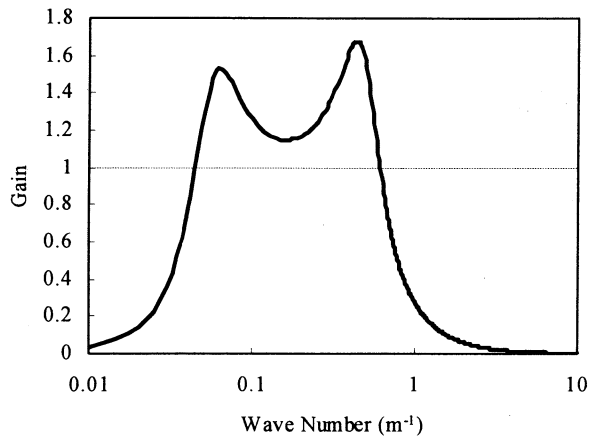


図-1 クォーターカーフィルタの振幅特性

そこで本研究では、路面と車の相互作用分析の観点から、乗り心地を一定水準以上に維持するための振動加速度管理目標値を人間の受振感特性図から設定し、路面上を走行する車のバネ上振動加速度と各地点における *IRI* (以下、「地点 *IRI*」とする) との相関関係から箇所数積算の対象とする地点 *IRI* の値を提案する。評価対象セグメント内において局所的に地点 *IRI* が大きい箇所数を積算し、この数が多い順に優先順位を付与する。

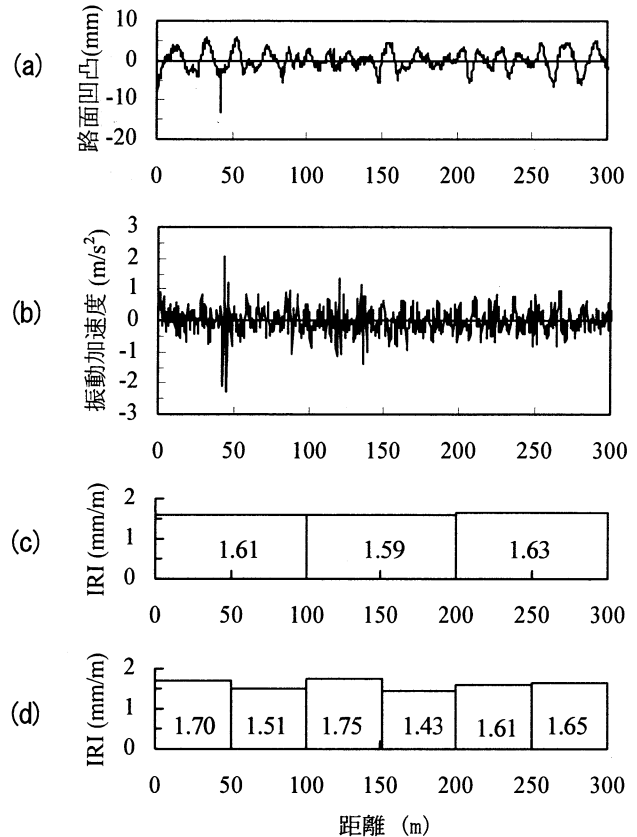
地点 *IRI* は、路面プロファイルに対して図-1 に示す振幅特性を有するフィルタを乗じることにより計算したものであり、区間統計値である *IRI* とは異なる空間列データとして表される。このため、各地点における局所的なクォーターカーのレスポンスを窺い知ることができる。具体的な計算には、米国ミシガン大学の UMTRI が開発した RoadRuf を用いると効率的である⁹⁾。

ここで、同じ路面上を走行する場合であっても車のバネ上振動加速度は車両スペック及び車両整備の度合いにより大きく異なり、これらの情報、特にサスペンションについては各メーカーの機密事項扱いとされている場合が多い¹⁰⁾。さらに実験には Repeatability (反復性)、Reproducibility (再現性) 及び Portability (移植性) が要求されることから、実路面において実車両による測定を行うことは容易ではない。そこで本研究では、フルビークルシミュレーションを行い、車両重心位置に生ずるバネ上振動加速度を求めた。

なお、走行路面のプロファイルについては、世界道路協会 (PIARC) によって実施された平坦性測定に関する国際共同試験 (EVEN) で測定された真のプロファイルを用いた¹²⁾。また、シミュレーションツールとしては汎用車両運動解析ソフトウェアである CarSim を使用した¹¹⁾。

2. 車の振動加速度と *IRI*・地点 *IRI* の関係

路面プロファイル形状とその上を走行する車両の振動



※(c)のセグメント長：100m, (d)のセグメント長：50m

図-2 路面プロファイルと車の振動加速度及び *IRI* の対応例

加速度、及び *IRI* を並べて表記した例を図-2 に示す。この例で使用したデータは PIARC EVEN 試験における路線 No.2 (国道 276 号線) のプロファイル (図-2(a)) であり、路面プロファイルのサンプリング間隔は 0.025m である。また、図-2(b) は後述するフルビークルシミュレーションによって速度 60km/h のバネ上部の振動加速度を求めた結果を、図-2(c) (d) では RoadRuf によって評価セグメント長 100m 及び 50m の *IRI* 算出結果を示している。

図-2 では始点からの距離 45m 付近に波長約 1m の局所的に大きな凹凸があり、この上を走行する車両には全振幅約 4.5m/s^2 の振動が生じている。この路線では、他に大きな振動が発生している箇所は見受けられず、道路利用者にとっては当該箇所が維持修繕されるべきである。しかしながら、区間評価値である *IRI* を求めた場合、評価セグメント長 100m, 50m いずれの場合も隣接する他のセグメントと値に大差はなく、局所的に生じる著しく大きい凹凸が車両振動に与える影響を適切に表現することは困難である。

一方、同じ路線データを用いて地点 *IRI* を計算した結果を図-3 に示す。区間評価の場合に比べ、当該箇所が適切に表現されていることがわかる。

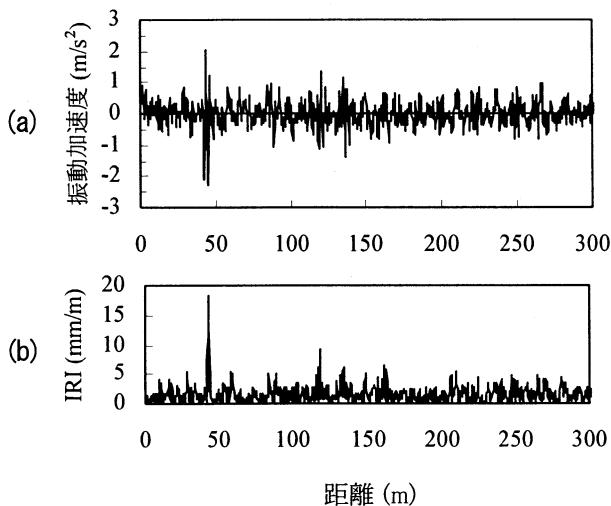
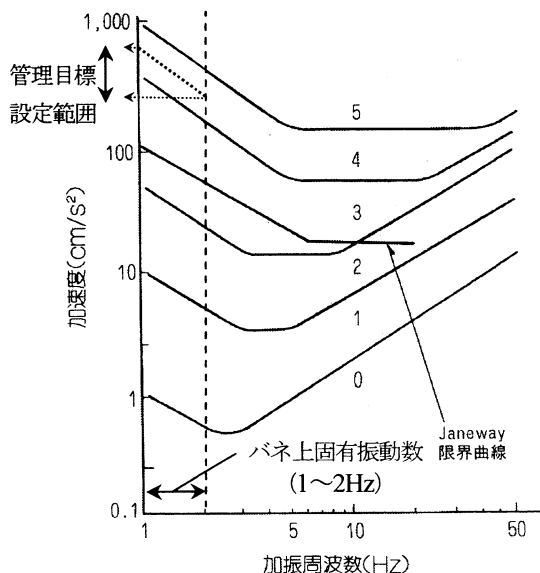


図-3 車の振動加速度及び地点 IRI の対応例



※ 着席時には全体的に高周波数側にシフトする。

図-4 Meister 線図¹⁰⁾

3. バネ上振動加速度管理目標値の設定

自動車の振動に対する乗り心地を評価するにあたっては、1～50Hz 程度の領域における人間の受振感特性を考慮する必要がある¹⁰⁾。地点乗り心地を分析する場合、Meister や Janeway による人の受振感特性に関する研究が広く知られている(図-4)¹⁰⁾。図中の値は Meister によるもので、値が大きくなるに伴い不快感が増加する。受振感4の領域で「不快を感じる」、5の領域では「不快感大」とされている。図-4は起立時のデータであり、着席時には高周波数側に全体がシフトする¹⁰⁾。加振周波数が3～10Hz 近傍では、加速度に対して乗員の感度が高くなる傾向がある。このことは ISO2631 にも記されており、

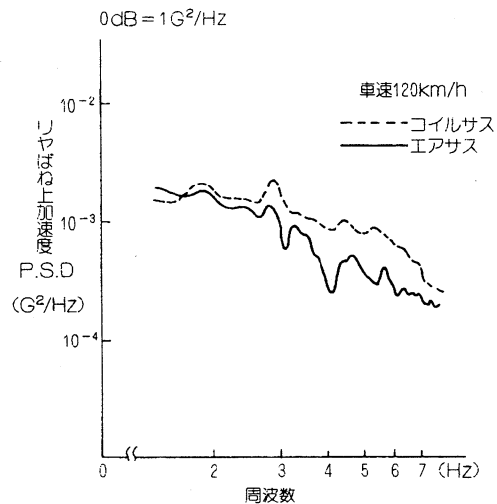


図-5 サスペンションの乗り心地に対する効果¹⁰⁾

人間の受振感に対する上下振動伝達ゲインの大きな領域は4～8Hz とされている⁶⁾。

乗員の乗り心地を改善するためには、上記の周波数領域を中心に車両のバネ上振動加速度を低減させる必要がある。しかし、近年、車両のサスペンションはエアサス採用などによる性能向上に伴い、上述の伝達ゲインが高い周波数領域の振動成分の多くがサスペンション部分で遮断され、乗員の乗り心地が改善される傾向が見られる(図-5)。

一方、乗用車のバネ上固有振動数である1～2Hzについては、基本的に従前通りであり大きな変化は生じていない。これは、振動を制御しつつ車体変位を一定限度内に収めるため、車両の基本的な構造については変更しにくいという理由による。

したがって、乗り心地改善のイニシアチブが道路管理者側にある場合、車両開発側では対応が困難な1～2Hzの周波数領域に対応する波長成分についてメンテナンスを行うことが最も効果があると思われる。走行速度60km/hの場合、対応する波長は8～17mである。この波長は地点 IRI の算出に用いるクォーターカーフィルタ(図-1)の高感度領域と対応している。

図-4において、バネ上固有振動数に相当する範囲で受振感4以上に分類される値としては、当該区分の中間線を代表値とすると、図より全振幅で2～5m/s²程度と読み取れるが、着席時には全体的に高周波側へシフトすることを考慮すると、3～5m/s²程度になると思われる。そこで、道路利用者の地点乗り心地を考慮したバネ上振動加速度の管理目標として5m/s²を採用するとすれば、実用性を考慮し片振幅を用いた場合、2.5m/s²と設定することができる。なお、この値は絶対的な値ではなく、道路管理の実情に応じて適宜変更を加えるべきである。次章に記すシミュレーション結果と地点 IRI との相関を求めるこ

とにより、振動加速度の管理目標から間接的に地点 *IRI* の管理目標を算出できる。

4. フルビークルシミュレーション

本研究で行ったフルビークルシミュレーションの概要は以下の通りである。

(1) シミュレーション条件

a) 路面

シミュレーションの入力となる路面プロファイルは、PIARC EVEN 試験が行われた計 14 路線（1 路線あたりの延長は 330m）の中から No.14 の路線を除く 13 路線のデータを用いた。No.14 のプロファイルの一部には測定エラーと思われる箇所が介在しているため、既往の研究と同様、本研究でも計算対象から除外した¹³⁾。データはサンプリング間隔をオリジナルの 0.025m から 0.25m に補正し、前後 3 点の移動平均処理によってノイズを処理した。

b) 車両諸元

前述のように、市販されている車の諸元は容易に得られない場合が多いため、本研究では CarSim に設定されている計 79 種類の数学的運動モデルの中から国内で流通する乗用車に近い 9 種類のモデルを選択した。各モデルの車両諸元は任意に調整することができるが、調整作業には車のトータルバランスを考慮する必要があるため、今回は初期設定のままとした。車両の主要諸元を表-1 に示す。

c) 走行速度

走行速度は、時速 40km/h、60km/h 及び 80km/h の 3 段階で設定した。これは、PIARC EVEN 試験の対象路線のうち地点 *IRI* が大きい路線のほとんどは一般道であり、実

勢速度等を考慮した結果、80km/h までをシミュレーション範囲とした。なお、サンプリング間隔については 0.01s（周波数に換算すると 50Hz）とし、シミュレーション後、各走行速度に応じて 0.25m 間隔の距離送りとなるよう間引き処理を行い、路面データと同様にノイズ処理のための移動平均処理を行っている。

d) 走行環境

路面の縦すべり摩擦係数は全ての路線で一律に 0.85 とした。線形は全て直線であり、走行時の空気抵抗による影響は除外することとした。

以上より、13（路面）×9（車両）×3（走行速度）×1（走行環境）=351 通りのシミュレーションを行った。

(2) シミュレーション結果

走行速度 80km/h の場合におけるバネ上振動加速度と地点 *IRI* の相関を図-6 に示す。バネ上振動加速度は、路面プロファイルが入力された後にタイヤ・サスペンション作用により振動が生じるまでの間、若干の時間遅れが生じるため、相互相関係数を用いて両者のデータの位置を照合した¹⁴⁾。

バネ上振動加速度の発生要因としては、路面プロファイルやエンジン振動、気象条件など様々な因子が考えられるが、シミュレーションの場合はその要因を路面プロファイルに特定することができる。本研究ではプロファイル情報として地点 *IRI* を代表値としているが、この値はクォーターカーモデルにおけるバネ上及びバネ下の相対変位であることから、一方の情報が欠落していること、また車種間のサスチューニングの相違により、バネ上振動加速度と地点 *IRI* の相関は高くはないと考えられる。

しかしながら、前述のようにバネ上固有振動数は車種

表-1 フルビークルシミュレーションに用いた車両運動モデルの主要諸元

No.	CARSIM 車両運動モデル名	バネ上 質量 kg	バネ下 質量 kg	軸距 mm	輪距 mm	サスペンション バネ定数 N/mm	サスペンション ダンパ減衰力* N	タイヤ バネ定数 N/mm
A	Hatchback, Big: Road course	1,350	100	2,690	1,540	30	1,388	220
B	Hatchback, Small	800	70	2,370	1,390	15	501	220
C	Minivan, Typical	2,200	80	3,860	1,560	40	615	230
D	SUV, Big: 4WD	2,210	120	2,850	1,620	40	1,388	250
E	SUV, Small: 4WD	980	80	2,200	1,465	20	615	230
F	Sedan, Big: FWD	1,527	100	2,690	1,540	30	950	220
G	Sedan, Small: FWD	800	70	2,370	1,390	15	501	200
H	Sports Car	1,527	100	2,664	1,540	30	950	220
I	Sub Compact	980	70	2,448	1,395	15	501	230

※ダンパ減衰力は分布形状が非線形のため、自動車規格（JASO C602）に基づき作動速度 0.3m/s の値を代表値とする¹⁰⁾。

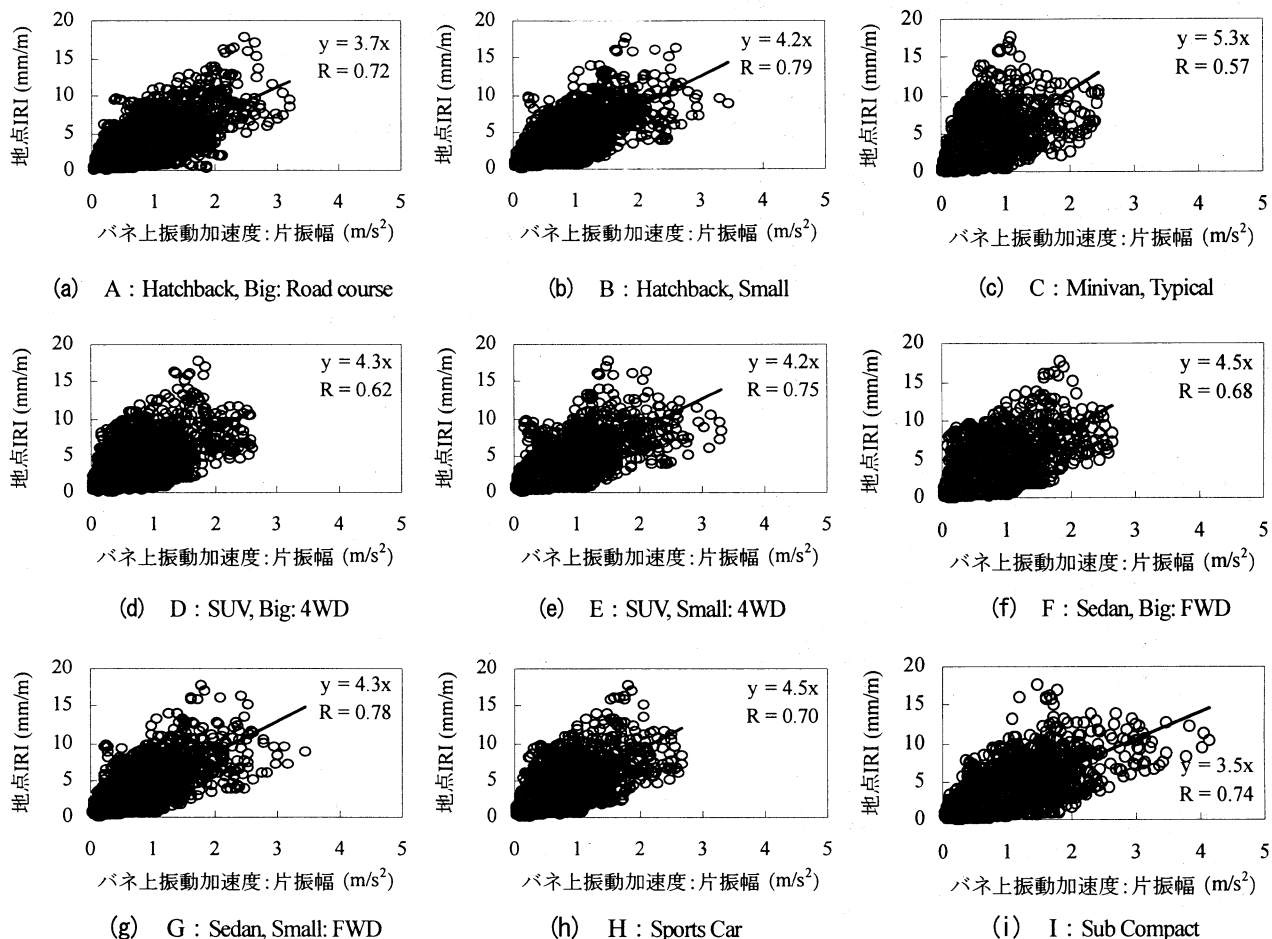


図-6 バネ上振動加速度と地点 IRI の相関関係 (走行速度 80km/h の場合)

によらずほぼ一定範囲であること、路面プロファイルの周波数成分は低周波数の寄与率が大きいため道路管理者側がイニシアチブを執ることが乗り心地向上において重要であることを総合すると、バネ上振動加速度の説明変数として地点 IRI との相関を算出することは意義があると思われる。

図-6 を考察すると、上記の理由からややばらつきは見られるが、両者は概ね比例傾向にある。

車種別に比較すると、バネ上質量 1,000kg 以下の小型車両である「B:Hatchback, Small」, 「SUV, Small: 4WD」, 「Sedan, Small: FWD」及び「Sub Compact」の場合、バネ上振動加速度は片振幅 4.0m/s^2 を超過するケースがあるなど、大きな値が生じている。一方、「Minivan, Typical」など中型の車両は片振幅 $2.5\sim 3.0\text{m/s}^2$ 程度であり、同じ路面上を同一条件で走行する場合であっても車種により振動加速度の値に大きな差が見られる。

図-6 から原点回帰式を求め、前章で設定した振動加速度の管理目標である 2.5m/s^2 を代入すると、地点 IRI の管理目標を算出することができる。時速 40km/h 及び 60km/h の場合についても同様に算出し、その結果を表-2

及び図-7 に整理する。ただし各回帰直線の相関係数は $R=0.57\sim 0.78$ 程度であり、バラツキを有しているため、最も厳しい条件の値に 3σ (4.8mm/m) の誤差範囲を危険側へ加えた。

算出した地点 IRI の管理目標は車両及び走行速度に依存するが、例えば時速 40km/h の路線では、各地点の地点 IRI を 10mm/m 以内に収めることにより、このシミュレーションの対象各車両に生じるバネ上振動加速度を 2.5m/s^2 以内に抑えることができる。同様に計算すると、維持管理を要すると思われる地点 IRI は、時速 60km/h の路線では 8mm/m 、同 80km/h の路線では 4mm/m を超える場合である。

5. 地点 IRI を利用した平坦性管理方法の提案

個々の地点の振動を制御すれば結果的に全区間を通した乗り心地を向上させることができるという考え方を前提に、区間評価に地点評価の考え方を取り入れた平坦性管理方法を提案する。

評価セグメント内において、表-2 及び図-7 に示す地点

表-2 乗り心地を考慮した地点 IRI 管理目標 (整理表)

※表中の数値の単位は mm/m

No.	CARSIM 車両運動モデル	40km/h	60km/h	80km/h
A	Hatchback, Big: Road course	14.8	13.7	9.3
B	Hatchback, Small	16.6	13.4	10.5
C	Minivan, Typical	30.9	21.7	13.2
D	SUV, Big: 4WD	24.3	17.5	10.7
E	SUV, Small: 4WD	18.0	14.3	10.5
F	Sedan, Big: FWD	22.1	17.0	11.2
G	Sedan, Small: FWD	17.3	13.9	10.7
H	Sports Car	22.0	17.0	11.2
I	Sub Compact	16.5	12.7	8.8
	最大値	30.9	21.7	13.2
	最小値	14.8	12.7	8.8
	管理目標	10	8	4

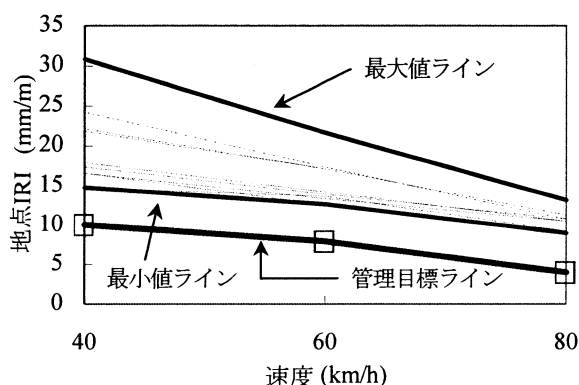


図-7 乗り心地を考慮した地点 IRI 管理目標

IRI 管理目標を超過する箇所を積算し、この数が多い順に優先順位を付与する。そこで 2 章の PIARC EVEN 試験における路線 No.2 のデータを用いて、評価セグメント長 50m, 100m の例を示す (図-8, 時速 60km/h の場合)。

時速 60km/h の場合、地点 IRI 管理目標は 8mm/m であり、この値を超過する箇所は始点からの距離 0~50m 及び 100~150m の区間に含まれている。従来の方法を適用した図-2 の場合、このことが適切に評価されているとはいいがたいが、セグメント長 100m の図-8(c) 及び同 50m の図-8(d) では優先順位も含め適切に表現されている。

地点 IRI 超過箇所がどの程度の場合に維持管理をすべきかについては各道路管理者に委ねられる部分である。鉄道軌道の分野では、既に軌道狂い指数 P 値と呼ばれる指標を用いて同様の維持管理が行われており、各路線の等級に準じて目標 P 値が定められている¹⁵⁾。保守労力投

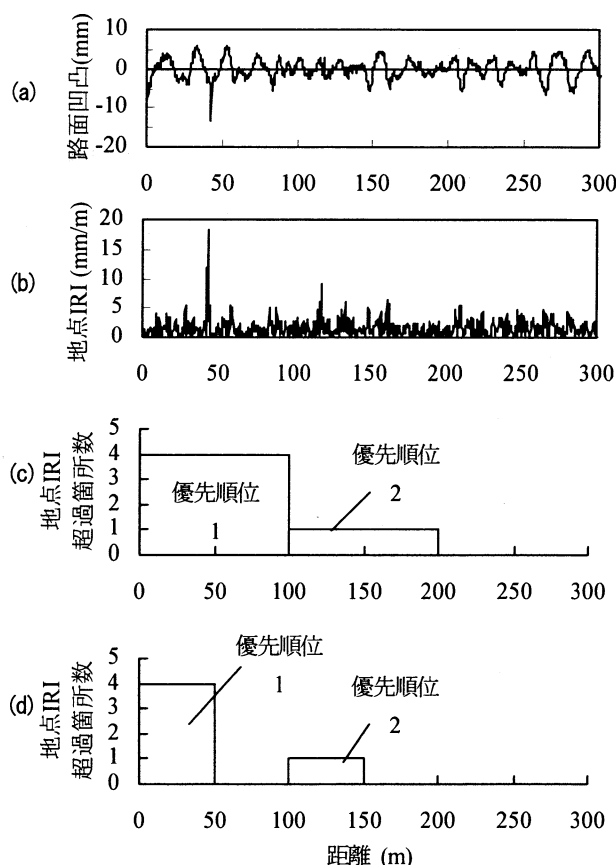


図-8 地点 IRI を利用した平坦性管理方法

入量にコントラストをつけることが可能であり、地方交通線など保守費及び保守要員の少ない体制の場合、特に効果がある指標である。路面の平坦性へ本研究の方法を適用する場合も同様に、A 交通、B 交通などの交通量区分に応じてデータを蓄積し、実情に応じた基準を設定することが望ましいと思われる。

6. まとめ

本研究で得られた知見を整理すると以下のようになる。

- 個々の地点の振動を制御すれば結果的に全区間を通した乗り心地を向上することができるという考え方を前提に、車の地点乗り心地を考慮した道路利用者のための平坦性管理方法を提案した。この方法は、評価対象セグメント内において、地点 IRI の管理目標超過箇所数を積算し優先順位を付与する方法であり、従来の方法に比べ維持管理を要するセグメントを適切に表現できることを示した。
- 区間評価値である IRI は、平均化操作により局所的に生じる著しく大きい凹凸が車両振動に与える影響を適切に表現することが困難であるが、地点ごとに計算した地点 IRI はこれを表現できることを示した。

- ・ バネ上振動加速度を片振幅 2.5m/s^2 以内に抑えるための地点 IRI 管理について、フルビークルシミュレーション結果に基づく走行速度別管理目標を提案した。

参考文献

- 1) 大野滋也, 佐藤正和, 鈴木一隆:「乗り心地」に着目した路面管理指標に関する研究 -IRI (国際ラフネス指数) の適用性-, EXTEC, No.61, pp.37-40, 2002.
- 2) Sayers,M.W. and 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目指して-, 土木学会, 2002.
- 3) 池田拓哉, 東嶋奈緒子: 国際ラフネス指数の計測方法に関する研究, 舗装工学論文集, Vol.3, pp.9-14, 1998.
- 4) 兼平信蔵, 来島輝武, 小泉達哉: 保全管理における路面性状測定車の利用法 -高速測定技術の紹介-, EXTEC, No.57, pp.52-54, 1997.
- 5) 鈴木浩明: 快適さを測る -その心理・行動・生理的影響の評価-, 日本出版サービス, 1999.
- 6) ISO: Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration - Part 1: General requirements (ISO2631-1), 1997.
- 7) 熊田一彦, 大野滋也, 佐藤正和: 高速道路の構造・交通諸元と IRI の関係について, 舗装工学論文集, Vol.7, pp.10.1-10.6, 2002.
- 8) 佐伯博三, 中村州章: 高速道路における舗装路面の管理 車両の振動加速度の舗装評価への応用, 土木学会年次学術講演会講演概要集第5部, Vol.44, pp.76-77, 1989.
- 9) UMTRI: RoadRuf Tutorial, pp.41-47, 1997.
- 10) カヤバ工業株式会社編: 自動車のサスペンション, 山海堂, 1991.
- 11) Sayers,M.W., Mousseau,C.W. and Gillespie,T.D.: Using simulation to learn about vehicle dynamics, International Journal of Vehicle Design, Vol.29, Nos.1/2, pp.112-127, 2002.
- 12) Kawamura,A., Takahashi,M. and Inoue,T.: Basic analysis of measurement data from Japan in PIARC EVEN project, Transportation Research Record, No.1764, pp.232-242, 2001.
- 13) 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推定条件の設定, 舗装工学論文集, Vol.9, pp.41-48, 2004.
- 14) 例えば, 日野幹雄: スペクトル解析, 朝倉書店, 1977.
- 15) 例えば, 佐藤吉彦, 梅原利之編: 線路工学, 日本鉄道施設協会, 1986.

STUDY ON A NEW EVENNESS MANAGEMENT METHOD FOR ROAD USERS TAKING INTO ACCOUNT MOMENTARY RIDING COMFORT

Tatsuo SHIRAKAWA, Akira KAWAMURA and Kazuya TOMIYAMA

This study proposes a new evenness management method for road users taking into account momentary riding comfort. We contend that if the vibration of each point can be suppressed, then the overall riding comfort can be improved. This method uses the calculated localized IRI to determine the points that exceed the management target; therefore indicating which the priority in section of the road requires repairs most. Localized IRI can express the influence of severe roughness that the past section evaluation value (IRI) can not appropriately expressible. This study indicated the management target value at each running speed to suppress the vertical acceleration of sprung mass to single amplitude of 2.5m/s^2 based on the full-vehicle simulation results.