

高速道路の維持管理に向けた新小型 IRI 測定システムの開発

Development of a New Compact IRI Measurement System for Expressway Maintenance

中 島 繁 則*
川 村 彰**
坂 田 光 児***
山 崎 元 也****
谷 岡 和 範*****

道路維持管理費用の最適化と道路利用者へのサービスレベル向上を目的とした舗装マネジメントシステム (PMS) の構築が検討されている。

本研究では PMS の重要特性である自動車の乗心地性能と相関の高い IRI (国際ラフネス指数) を測定する利便性に優れたシステムの提供を目指しており、走行車両の動的応答から路面プロファイルを算出し、IRI の基準となるクォーターカー (1 輪サスペンション) モデルによるシミュレーションで IRI を算出する新小型 IRI 測定システムを開発した。本システムの有効性検証の為、日本の基幹高速である東名高速道路において実働する道路パトロールカーでの実証実験を行なった結果、実用域の精度が得られたと共にリアルタイム定量モニタの有効性を確認できた。更に冬期道路の維持管理への応用として積雪路面における巡航車速での IRI 測定を実現させた。

キーワード IRI 路面プロファイル 舗装マネジメントシステム (PMS) 高速道路 冬期路面

1. はじめに

国内における一般道路延長や舗装率の急速な増加は一段落した感があり、現在は既設路面の維持管理と高速道路網の拡大が進められている。既設路面をより効率的に良好な状態に維持する為には舗装マネジメントシステム (PMS) の構築が重要課題であり、あわせて自動車保有台数の増加と自動車走行速度の高速化に伴い、利用者が道路に求

めるサービスレベルも日々向上しており、より快適な道路環境の提供が急務である。

これらの課題を解決するには利用者側のニーズを定量的に捉え、必要な維持管理を提供する事が不可欠であるが、平坦性のみならず、ひび割れ、わだち掘れから算出される現状の路面管理指標及びレーザ式の路面性状測定車では十分な対応ができず、新たなシステムの導入が必要とされている。

本研究では PMS の重要特性である自動車の乗

* 株式会社ワーカム北海道研究実験第三部部长 (TEL: 0145-42-3133)

** [正会員] 北見工業大学工学部土木開発工学科教授 (TEL: 0157-26-9510)

*** 株式会社共和電業技術本部先行開発部副主幹 (TEL: 0424-89-7255)

**** 東京農業大学地域環境科学部造園科学科准教授 (TEL: 03-5477-2437)

***** 中日本高速道路株式会社横浜支社御殿場保全・サービスセンター所長 (TEL: 0550-82-3100)

心地性能と相関の高い IRI (国際ラフネス指数) を測定する利便性に優れたシステムの提供を目指しており、走行車両の動的応答から IRI を算出する手法の検討と測定システムの製作ならびに高速道路での実証実験を行い、本システムの有効性を確認した。

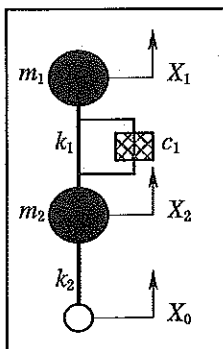
また、従来は測定が不可能とされていた積雪路面での IRI 測定を実施し、冬期道路の維持管理への応用も合わせて検討した。

2. 新小形 IRI 測定システムの開発

2.1 車両動的応答に基づく IRI 算出手法の検討

IRI を正確に算出する手法としては水準測量や各種プロファイル測定装置によって縦断プロファイルを測定し、IRI の基準となるクォーターカーモデル (QC モデル) によるシミュレーションで IRI を算出する方式が一般的に用いられているが、プロファイル測定に要する時間とコスト低減が課題とされている。本課題への対応として走行車両の動的応答から相関式により IRI を直接算出する、より利便性の高い手法が検討されているが、使用車両や走行方法の汎用性という面では 2 重の算出誤差が重なり、広範囲の条件において精度確保が困難であった¹⁾。

新たに広範囲の条件における IRI の算出精度とシステムの利便性を両立させた手法として、走行車両の動的応答から路面プロファイルを算出し、QC モデルによるシミュレーションで IRI を算出する新方式を提案し、アルゴリズムの検討、システム構築、精度検証を行なった。



- X_0 : 路面変位
- X_1 : バネ上変位
- X_2 : バネ下変位
- m_1 : バネ上質量
- m_2 : バネ下質量
- k_1 : スパションバネ定数
- k_2 : タイバネ定数
- c_1 : ショックアブソーバ減衰係数

図-1 QCモデル

2.2 IRI 算出アルゴリズム

今回開発した IRI 算出アルゴリズムは測定車両前輪の片側のバネ上とバネ下に加速度計を取付け、車両走行時にそれら加速度計により測定される加速度波形から IRI を算出しようとするものである。

測定車両前輪の片側のバネ上とバネ下に取付け

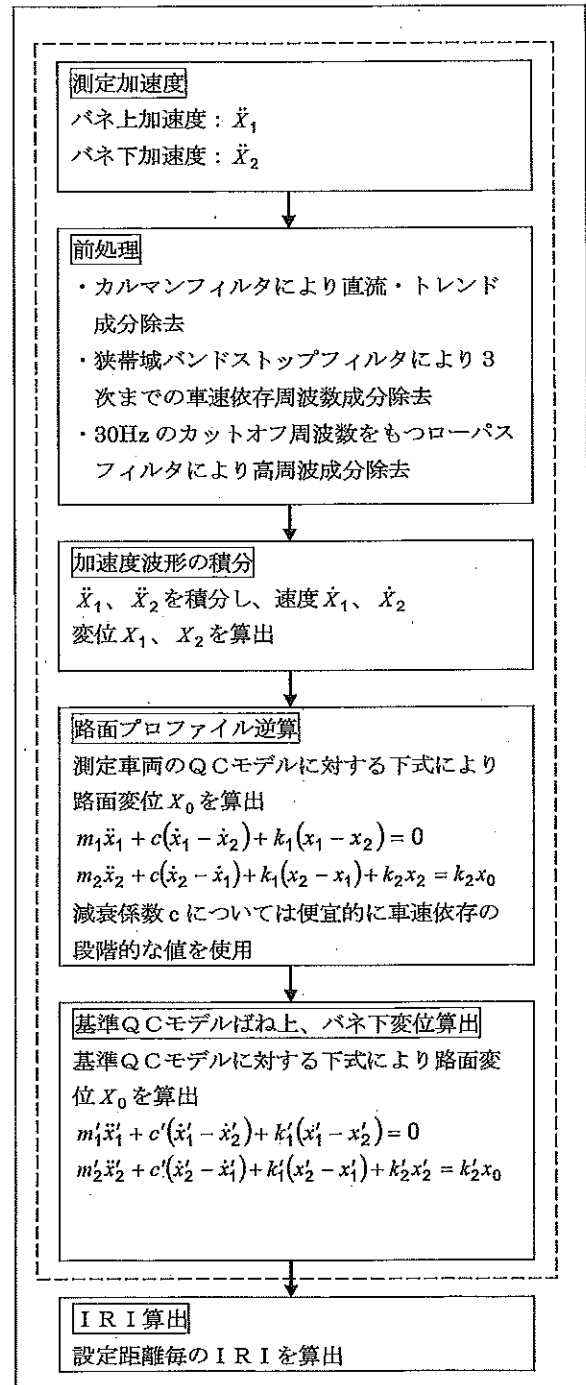


図-2 IRI アルゴリズムの流れ

た加速度計により測定された加速度は、図-1の測定車両の振動パラメータを持つ QC モデル下端に加速度測定時のサンプリング時間と車速に応じた水平距離間隔毎の路面変位 X_0 が入力されたときの質量 m_1, m_2 の応答加速度であると考え、以下の手順で IRI を算出することとしている。

1) 測定加速度から質量 m_1, m_2 の速度、変位を求め測定車両 QC モデルの振動パラメータを持つ運動方程式により路面変位 X_0 を逆算する。

2) 1) で求めた路面 X_0 の水平距離間隔を車速 80 km/h 時の水平距離間隔に換算し、IRI 算出用の基準 QC モデルの振動パラメータを持つ運動方程式に変位入力として加え、基準 QC モデルの応答変位 X_1, X_2 を求め IRI を算出する。具体的なアルゴリズムの流れを図-2 に示す。

本フローにおいて破線枠内処理はリアルタイム計測では加速度データの 1 サンプル毎に処理される内容であり、実線枠内は設定された一定の距離毎に処理されるものである。なお、上記フローで使用する狭帯域バンドストップフィルタは図-3 のような周波数特性を有したものをを用いた。

図-3 の特性のフィルタにおいて横軸は無次元化周波数であり、1 が遮断中心周波数に当たる。遮断特性は中心周波数 1 に対し 0.95 と 1.05 において -3 dB に減衰するものである。

2.3 新小形 IRI 測定システムの製作

前述したアルゴリズムにより IRI をリアルタイムで算出する計測器を製作した。

写真-1 に加速度計取付け位置を示すが、左前輪のバネ上、バネ下の上下方向の振動加速度を測定し IRI 算出のベースデータとしている。位置情報

の特定と走行車速の算出には GPS センサを使用した。本体は、加速度計の電圧変換と PC・各センサとの接続機能を持ちシート下等へ設置、操作及び表示は全てインパネに固定したタブレット PC のみで作動する。なお、図-1 に示したバネ定数、質量、減衰係数等のパラメータは車両毎に異なる為、初回のみ搭載車両の値を確認し設定画面でプログラムに入力が必要である。

装置一式を写真-2 に示す。

写真-3 はリアルタイムで IRI を表示するモニタ画面である。任意の区間距離に対し短距離の部分 IRI と区間平均のトータル IRI を表示、特に部分

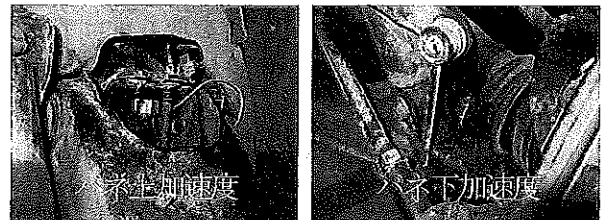


写真-1 加速度センサ



写真-2 新小形 IRI 測定システム装置一式

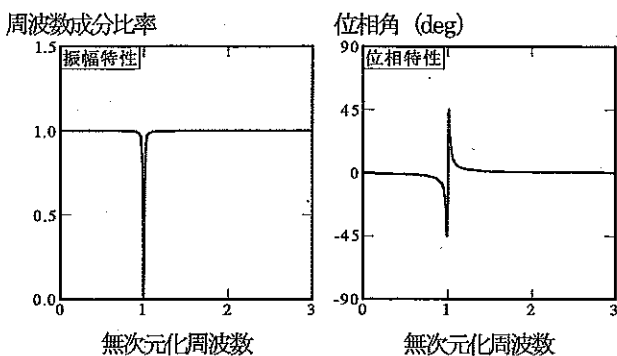


図-3 狭帯域バンドストップフィルタの周波数特性

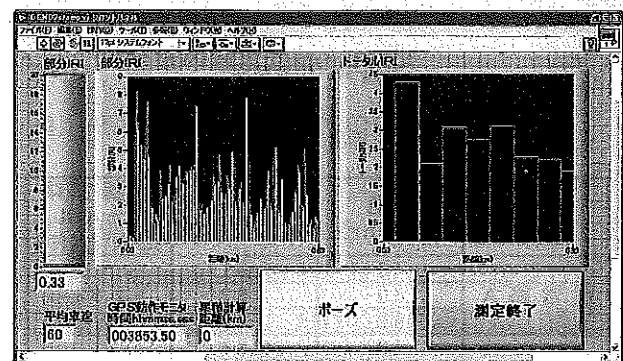


写真-3 IRI 表示モニタ

IRI に関しては数値表示に加え、バー表示を行い、目視・体感する道路状況に対し視覚的に連動するモニタとした。

2.4 IRI 算出精度の検証

以下に新小形 IRI 測定システムを用いた IRI 算出精度の検証例を示す。代表路面として⑭ワークム北海道テストコース内に写真-4 に示す通常路 A (区間長:240 m) と劣化路 B (区間長:210 m) を選定、ローラー接地式で変位と傾斜から路面性状を測定可能な低速平坦性測定装置 (DAM) により縦断プロファイルを測定し、QC モデルによるシミュレーションで算出した IRI を比較データとした。また、新小形 IRI 測定システムを搭載した検証車両は左前輪に加速度計を取り付けてある為、DAM の測定も左前輪の走行ライン上としている。走行条件は走行速度の影響有無を確認する為、40・60・80 km/h の 3 水準としそれぞれ 2 回の走行計測を行った。

本システムから得られた IRI の代表データと DAM による路面プロファイルから算出した IRI との比較結果を表-1 に示すが、±5% 以内の精度が得られた。

上記検証結果の内、通常路 A に本アルゴリズムを適用したときの途中結果である逆算された路面プロファイルと DAM による路面プロファイルの比較例を図-4 に示す。

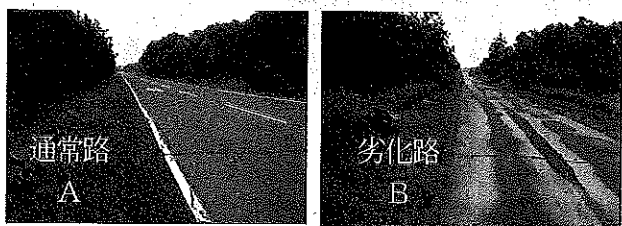


写真-4 代表路面

表-1 算出 IRI (m/km)

路面	車速 (km/hr)	本システムの IRI	路面プロファイルによる IRI
通常路 A	40	2.91	2.93
	60	2.82	
	80	2.82	
劣化路 B	40	3.84	4.04
	60	4.08	
	80	4.17	

一部、再現プロファイルが一致しない部分が見られるが、本アルゴリズムが非線形要素等の複雑な振動特性を持つ自動車を、単純な車両振動モデルで解析している為に発生する算出誤差と考えている。より複雑な振動モデルとすることで算出精度を向上させることは可能であるが、リアルタイムでの演算処理と低価格なシステム構成を成立させる為、現状のレベルとした。

3. 高速道路維持管理に向けた実証実験

3.1 実証実験概要

1) 実験道路

図-5 に示す東名高速道路、大井松田～沼津間にて実証実験を行なった。東名高速は日本を代表する基幹高速であり、特に対象区間は大型車を含む多種、多量な交通量、勾配やカーブなど多様な線形に加え、トンネル・橋と多くの交通環境が揃い、実証実験には最適な道路と考えている。

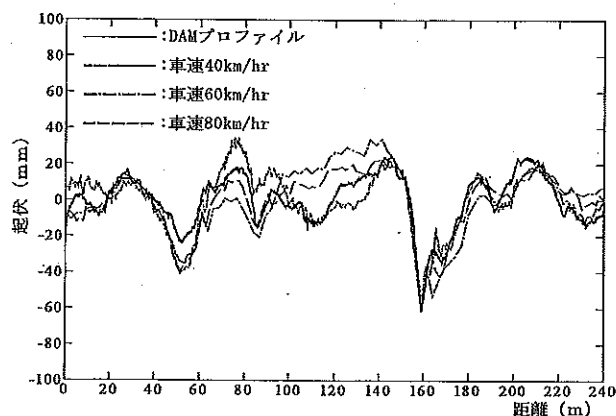


図-4 加速度データからの路面プロファイル

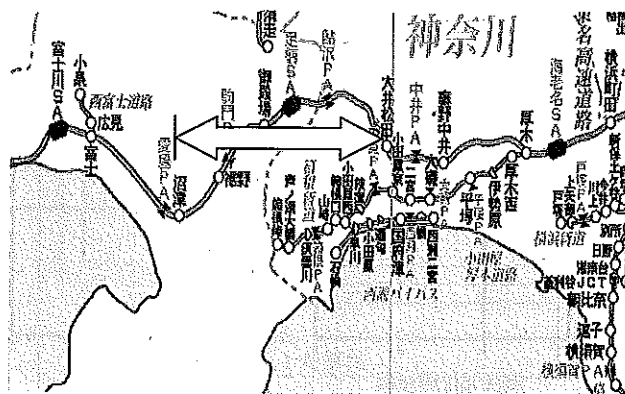


図-5 実験場所 (東名高速道路)



写真-5 実験車両 (JHの道路パトロールカー)

2) 実験車両

実験道路を管轄する御殿場保全・サービスセンターで実稼動している道路パトロールカー(写真-5)に新小形 IRI 測定システムを搭載し実験を行なった。道路管理には一般的に SUV と呼ばれる走破性の高い車両が用いられるが、今回使用した車両も代表車種のひとつである。

3) 走行条件

IRI が既知である走行レーンにて 80 km/h 一定速度の測定を 2 回、80~100 km/h 間での車速変動走行を 1 回、計 3 回の測定を実施した。目的は IRI 算出値の検証、同一条件での再現性、速度変動の影響確認である。

3.2 実証実験結果

1) 測定結果

図-6に結果の一例として御殿場~沼津間の測定データを示す。80 km/h での速度設定としたが交通状況にあわせた速度変動により 70~80 km/h 程度の実車速となった。高速走行により継ぎ目や補修跡の路面凹凸走行時において大きな振動加速度が発生している。

2) IRI 算出結果

図-7に新小形 IRI 測定システムにて算出した IRI の値と事前に路面性状測定車を用いて得られた IRI 値を示す。車速 100 km/h 走行を含む 3 回走行時におけるデータのばらつきは $\pm 5\%$ 以下であり、速度変動の影響も少なく十分な再現性であった。また事前測定値との比較で、87, 97 キロポイント付近に大きく一致しない部分がみられるが、

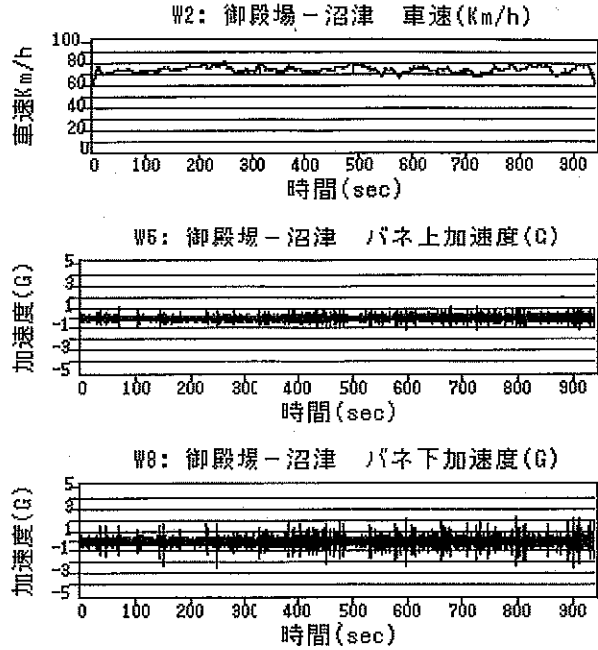


図-6 測定データ (御殿場-沼津)

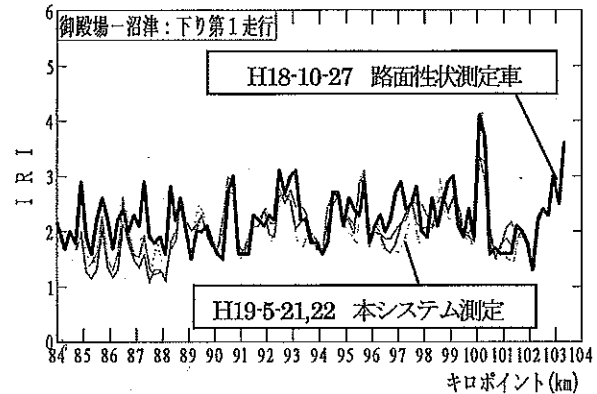


図-7 IRI 算出結果 (御殿場-沼津)

事前計測後に路面補修が行われていた。その他 7 ヶ月経過に伴う路面変化や測定ラインの違いが誤差の要因と考えられるが、補修路面を含む平均誤差率でも最大で 10% 程度であり、本アルゴリズムにて実用域の精度が得られた。

4. 冬期道路維持管理への応用

4.1 冬期実験概要

1) 実験道路

道央自動車道、輪厚 PA 付近にて実験を行なった。冬期の高速道路における路面維持は、機械除雪に加え凍結防止材散布による路面融雪を行っているが、降雪直後は圧雪アイスバーン状態で供用

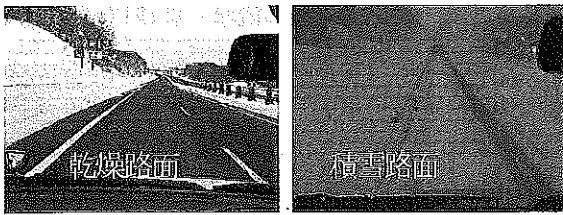


写真-6 実験道路



写真-7 冬期実験車両

しているのが実態である。本実験においては1週間を通して同一道路での走行計測を行い、乾燥路面での IRI 値に対し積雪路面での IRI 値変化を測定し、積雪の影響を考察した。代表的な路面状況を写真-6 に示す。

2) 実験車両

写真-7 に示す試験車両に新小形 IRI 測定システムを搭載して測定を行なった。試験車種は前述した道路パトロールカーに使用される SUV 車種の中から選定している。

3) 走行条件

同一区間、同一車速 (80 km/h) を基本として走行計測を行い、路面状況の違いに対する IRI 値変化を把握した。

4.2 冬期実験結果

1) 測定結果

乾燥路面走行時と積雪路面走行時のバネ上、バネ下加速度の測定結果をそれぞれ図-8、図-9 に示す。乾燥路面においては全般に平坦性良好で乗心地が良いが、一部に橋梁伸縮部の継ぎ目があり、通過時に振動が発生している。積雪路面においては圧雪の凹凸により常に振動が発生、また伸

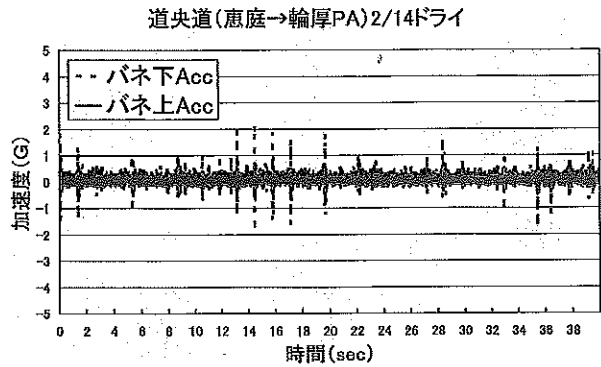


図-8 振動加速度 (乾燥路面)

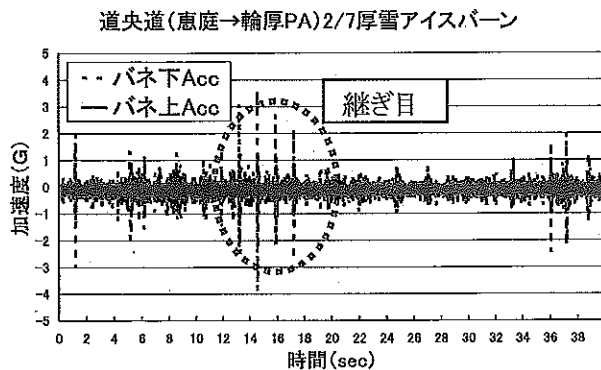


図-9 振動加速度 (積雪路面)

表-2 本システムによる路面状況別 IRI

		平均 IRI
恵庭	2/14 ドライ	1.98
↓	2/8 薄雪アイスパーン	2.31
輪厚PA	2/7 圧雪路	2.43
北広島	2/14 ドライ	1.87
↓	2/8 ウエット	1.88
輪厚PA	2/7 圧雪アイスパーン	2.26

縮等の影響で伸縮部が圧雪状態になりにくい為か、継ぎ目が深くなり通過時のショックが大きく乗心地が大幅に悪化している。

2) IRI 算出結果

表-2 に本システムにて算出した同一区間における路面状況別 IRI を示す。900 m の区間平均 IRI で積雪のない路面状態 (ドライ、ウエット) においては 2 未満と平坦性の良い高速道路にもかかわらず、積雪状態では平均値で 2~3 の IRI 値、局所的には 4 以上の悪路が発生している。積雪路面の IRI レベルを図-10 に示す。

5. 新小形 IRI 測定システムの有効性

5.1 高速道路維持管理への適用

東名高速道路での実証実験を通じ、得られた有効性に関する見解を以下に示す。

1) IRI 定量データの定期把握

これまで路面性状に関する定量データは数年毎の路面性状測定車での測定のみであり、日常の点検は道路パトロールカーによる目視点検のみの為、精度の良い路面状況の把握ができていない。新小形 IRI 測定システムの導入により、毎日の点検の中で路面性状に関する定量データの把握が可能となり、補修の必要性・必要場所の特定が精度

よく実行可能となる。図-11に IRI マップの事例を示すが、本マップは東名高速道路の実証実験にて得られた新小形 IRI 測定システムによる IRI 算出値を 200 m 平均値毎に棒グラフとし、GPS で得られた位置情報をもとに道路地図上へプロットしたものである。このようなデータ処理により、路面状況の把握や補修必要箇所の特定制が容易となる。

また、毎日の測定結果を時系列で整理する事により、劣化速度と補修時期の予測が可能となる。更には劣化速度の大きな区間の道路構造、交通環境を調査する事により、劣化速度低減に向けた検討が加速するものと考えられる。

2) リアルタイムでの IRI モニタ

現存する路面性状測定装置は測定後、後処理にて IRI や他の道路管理指標を算出する方式が主流であり、運転時感覚との直接比較が困難であった。本システムでは完全リアルタイムでの IRI 算出とインパネに固定した視認性の良いモニタ画面に視覚的に連動する IRI のバー表示を行なった。これにより、従来道路パトロールカーを運転する監視員が目視・運転時感覚にて判断してきた点検結果との直接比較が可能となり、総合的な CS (利用者満足度) 評価にリンクした定量管理が可能となる。

5.2 冬期道路維持管理への適用

積雪寒冷地においては、いかに平坦性に優れた舗装道路を提供しても、積雪時は表層部に雪や氷が堆積し凹凸路面が形成され、自動車の乗心地が大幅に悪化する。従来、積雪路面の凹凸レベルはレーザ式の路面性状測定車ではレーザの反射特性が雪水には対応できず測定不可能であり、低速平坦性測定装置では道路を通行止めにしなければ測定ができず、また気象や交通状況により複雑に変化する特性から実態を定量的に把握することが困難であった。新小形 IRI 測定システムは積雪路面における巡航車速での路面状況の定量的な計測が可能であり、利用者が要求するサービスレベルに対応した除雪体制の検討等、冬期道路の維持管理への応用が期待できる。

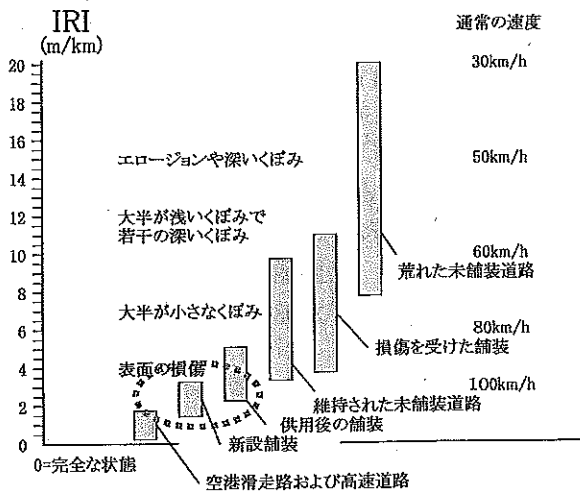


図-10 積雪路面の IRI レベル²⁾

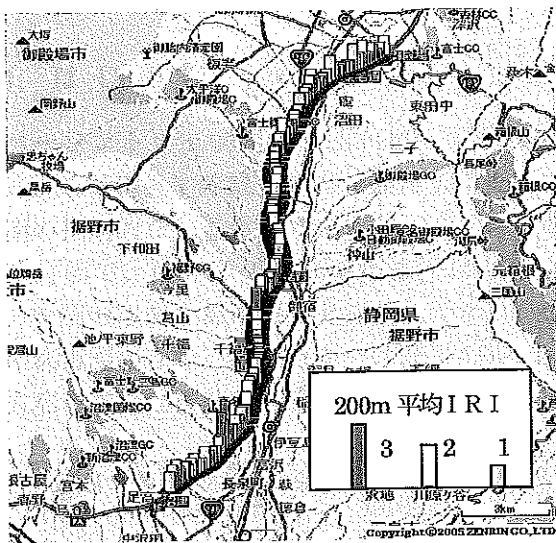


図-11 IRI マップ

6. ま と め

本研究にて得られた結果及び有効性による知見は以下の通りである。

- 1) IRI 算出方式として、路面プロファイルを測定しクォーターカーモデル (QC モデル) によるシミュレーションで IRI を算出する方式の算出精度と、走行車両の動的応答から相関式により IRI を直接算出する方式の利便性を両立させた手法として、走行車両の動的応答から路面プロファイルを算出し、QC モデルによるシミュレーションで IRI を算出する新方式を提案し検証を行なった結果、路面性状逆算値の一致性が高く、IRI 値で $\pm 5\%$ 以内の精度が得られた。
- 2) 東名高速道路にて実働する道路パトロールカーでの実証実験を行なった結果、事前計測値との平均誤差率は最大で 10% 程度であり実用域の精度が得られた。また、IRI データの定期把握とリアルタイムでの IRI モニタの有効性を確認できた。
- 3) 新小形 IRI 測定システムは積雪路面において

巡航車速での路面状況の定量的な計測が可能であり、利用者が要求するサービスレベルに対応した除雪体制の検討等、冬期道路の維持管理への応用が期待できる。

謝 辞

本研究における東名高速道路での実証実験にあたり、中日本高速道路株式会社横浜支社御殿場保全・サービスセンターの関係各位にご協力を頂いた。ここに記して感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 池田拓哉ほか; “国際ラフネス指数の計測方法に関する研究”, 土木学会舗装工学論文集, 第 3 巻, pp. 9~14, 1998
- 2) 土木学会舗装工学委員会路面性状小委員会編; “舗装工学ライブラリー 1”, 路面のプロファイリング入門, 丸善, 2003
- 3) Michael W. Sayers, Steven M. Karamihas; The Little Book of Profiling - Basic Information about Measuring and Interpreting Road Profiles -, The University of Michigan Transportation Research Institute, 1997
- 4) 白川龍生, 川村彰ほか; “車両の振動加速度を利用した路面プロファイル推定システムについて”, 交通工学, Vol. 38, No. 6, pp. 32~41, 2003
- 5) 川村彰ほか; “道路利用者の視点から見た高速道路の平坦性について”, 舗装工学, Vol. 4, pp. 1~8, 1999

(2008年3月28日 受付)
(2008年10月8日 再受付)