

技術紹介

スマート道路モニタリング[®]におけるIRI高精度化の取り組み

久 保 大 和

1 はじめに

近年、我が国では高度経済成長期以降に整備された道路インフラの老朽化が進行しており、効率的な道路の維持管理が求められている¹⁾。このような維持管理においては、道路の劣化状態を把握するための路面性状評価が重要となる。路面性状評価にはレーザプロファイラなどの専用測定車が用いられるが、高精度である一方、測定車両や専門オペレータを要するため、広域かつ高頻度な調査を実施する上でコスト面の課題がある。

このような背景から、車載センサから取得される車両挙動データを用いて、路面の状態を評価する技術の実用化が進められている。評価には各種の路面性状指標が用いられ、その中でも、IRI^{注1)}は路面の平坦性を表す代表的な指標の一つであり²⁾、道路維持管理において広く利用されている³⁾。加えて、IRIは車両の乗心地とも相関が高く、カヤバのコア技術である振動制御技術の知見を活用できる点で有用である。これらを踏まえ、当社では車両挙動データから路面性状を評価する「スマート道路モニタリング[®]」を開発し、サービス展開に向けた取り組みを進めてきた。

これまでに、AIを用いたIRI算出手法の開発や計測システムの改良を通じて技術の高度化を図ってきた⁴⁾⁵⁾。しかしながら、従来のAI手法では汎化性能に課題があり、IRIの算出精度にばらつきが生じる。また、精度向上にはデータ拡充などを要するため、コストの観点で実運用上の制約が大きい。そこで本研究では、従来のAI手法とは異なる新たなアプローチにより、IRIを算出する手法を構築した。本報では、当該手法の開発内容および有効性について報告する。

注1) International Roughness Index：国際ラフネス指数。

2 IRIと点検支援技術性能カタログ

2.1 IRIの概要

路面性状指標は、道路舗装の状態を客観的かつ定量的に評価するための指標群であり、国土交通省の舗装点検要領などに基づいて定義されている。主な指標として、本研究で対象とする「IRI」のほか、わだちの深さを示す「わだち掘れ量」、ひび割れの面積比率を示す「ひび割れ率」がある。また、これらの指標を総合的に評価する指標として「MCI^{注2)}」が用いられており、路面の安全性・快適性・耐久性を定量的に把握することが可能である。

IRIをはじめとするこれらの路面性状指標には、表1に示すとおりそれぞれ数値基準が定められている。この基準に基づいて、健全（損傷レベル小）、表層機能保持段階（損傷レベル中）および修繕段階（損傷レベル大）の区分で道路舗装の状態が評価される⁶⁾。

注2) Maintenance Control Index：舗装の維持管理指数。

表1 路面性状指標による舗装状態の判定基準

指標	区分Ⅰ	区分Ⅱ	区分Ⅲ
	健全	表層機能保持段階	修繕段階
ひび割れ率 [%]	≤20	20-40	≥40
わだち掘れ量 [mm]	≤20	20-40	≥40
IRI [mm/m]	≤3	3-8	≥8
MCI	≥7	4-7	≤4

本研究で対象とするIRIについて、その算出概念図および算出式を図1および式(1)に示す。IRIは、路面の縦断プロファイル^{注3)}（以下、路面プロファイル）に対して、規定されたパラメータを有するクォーターカーモデル^{注4)}を一定速度（80km/h）で走行させた際の、ばね上（車体）とばね下（タイヤ、ホイー

ルなど)の相対速度(以下,相対速度)の絶対値を累積し,これを路面プロファイル長で除することにより求められる。単位は[mm/m]であり,値が大きいほど路面の凹凸が大きいことを示す。

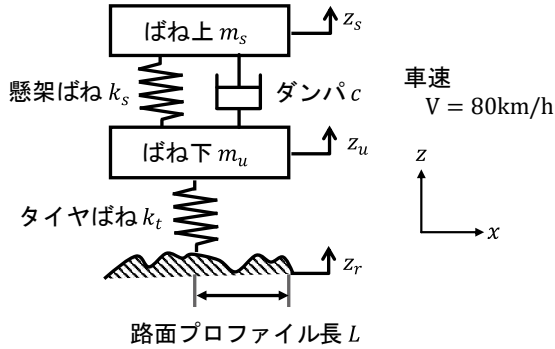


図1 IRIの算出概念図

$$IRI = \frac{1}{L} \int_0^{L/V} |\dot{Z}_s - \dot{Z}_u| dt \quad (1)$$

注3) 路面を車両の進行方向(縦方向)に沿って切断した際の,路面変位の形状を示すもの。

注4) 車両1輪分を模擬したモデル。

2.2 点検支援技術性能カタログ

点検支援技術性能カタログは,舗装点検における新技術の活用促進を目的として整備されたものであり,毎年度,支援技術の公募および性能検証試験が実施されている。舗装点検の支援技術には,路面性状を計測し,診断区分を適切に判定する性能が求められる。さらに,検出率および的中率が60%以上であることが確認された技術のみが掲載される。

診断区分の判定精度は,検出率および的中率により評価される。これらは,IRI,わだち掘れ量やひび割れ率などの路面性状指標に基づく診断区分の判定精度を評価する指標である。検出率は,損傷が存在する評価区間のうち,正しく検出された評価区間の割合を示す指標であり,式(2)で定義される。

$$\text{検出率} = \frac{\text{正答区間数}}{\text{損傷区間数}} \quad (2)$$

一方,的中率は,損傷ありと判定された評価区間のうち,正しく判定された評価区間の割合を示す指標であり,式(3)で定義される。

$$\text{的中率} = \frac{\text{正答区間数}}{\text{正答区間数} + \text{誤検出区間数}} \quad (3)$$

本研究では,IRIを対象としたカタログ掲載を目標とする。

3 IRI算出手法の開発

3.1 計測システムのセンサ構成

スマート道路モニタリング[®]の計測システムを搭載した試験車両を写真1に示す。IRI算出に関わる機器・センサとして,車両にはGNSS^{注5)}のほか,ロガーに内蔵されたIMU^{注6)}センサおよび左右前輪のばね下に設置したBluetooth加速度センサを搭載している⁵⁾。本研究では,これらの機器・センサで成立する手法の確立を目指す。

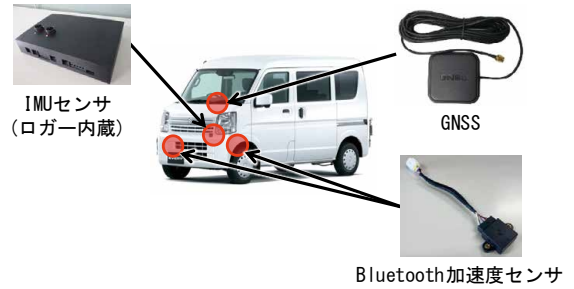


写真1 試験車両

注5) Global Navigation Satellite System: 全球測位衛星システム。

注6) Inertial Measurement Unit: 慣性計測ユニット。

3.2 IRI寄与度の高い周波数帯域の調査

IRIは,クォーターカーモデルに路面プロファイルを入力した際の,相対速度の絶対値を積算することで算出される。この相対速度には,ばね上共振およびばね下共振といった車両の動特性が含まれるため,IRIは周波数に依存した特性を有すると考えられる。そこで,クォーターカーモデルを用いて,路面変位入力に対する相対速度応答の伝達関数を導出し,IRIへの寄与度が高い周波数帯域を確認した。図1のクォーターカーモデルの運動方程式を立て,路面変位入力に対する相対速度応答の伝達関数を導出すると,式(4)が得られる。ここで s はラプラス演算子である。

$$\begin{aligned} \frac{sZ_s(s) - sZ_u(s)}{Z_r(s)} \\ = \frac{b_3 s^3}{a_4 s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0} \end{aligned} \quad (4)$$

ただし,

$$\begin{aligned} a_0 &= k_s k_t & a_1 &= c k_t \\ a_2 &= m_s (k_s + k_t) + m_u k_s & a_3 &= c (m_s + m_u) \\ a_4 &= m_s m_u & b_3 &= -k m_s \end{aligned}$$

また,路面プロファイルはISO8608で定義されるように,PSD^{注7)}が周波数 f の二乗に反比例($\propto 1/f^2$)する特性を有することが知られている。これに対応

して、路面変位は周波数 f に反比例 ($\propto 1/f$) (ラプラス演算子領域では $1/s$) する特性を持つ。この特性を式(4)に反映するとともに、IRIで規定されているクォーターカーモデルの車両諸元を適用した場合の伝達特性を図2に示す。図2の上段が路面変位に対する相対速度の振幅比を表し、下段が位相を表す。図2より、IRIへの寄与度が高い周波数帯域は、概ね0.5~20Hzであることが確認された。この結果は、後述するIRI算出手法の検討において着目すべき周波数帯域の設定に活用した。

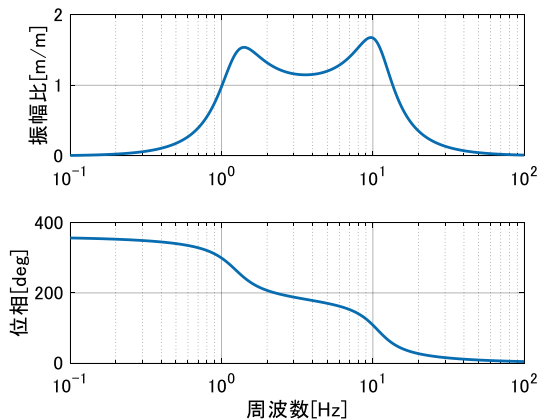


図2 路面変位入力に対する相対速度応答の伝達特性

注7) Power Spectral Density: パワースペクトル密度。

3.3 手法選定

IRIは路面プロファイルを入力として算出される指標である。ここで、路面プロファイルは車両進行方向の距離と路面変位の関係で表されるため、路面プロファイルの推定にはこれら双方が必要となる。そこで本研究では、GNSSの車速から移動距離を算出し、車両挙動データから路面変位を推定して路面プロファイルを構築し、IRIを算出するアプローチとした。検討対象とした各手法を以下に示す。なお、移動距離の算出は各手法で共通であるため、以下では各手法の特徴について述べる。

(1) オブザーバ^{注8)}法

試験車両のクォーターカーモデルに基づくオブザーバを構築し、IMUセンサから算出したばね上加速度および、Bluetooth加速度センサにより計測されたばね下加速度から路面変位を推定し(図3)、IRIを算出する。

(2) 相対速度補正法

試験車両とIRI算出式で定義されている車両(以下IRI定義車両)のクォーターカーモデルから、路面変位入力に対する相対速度応答の伝達関数を算出する。両者の関係から補正式を導出し、この補正式を用いてIRI定義車両の相対速度を推定し(図4)、

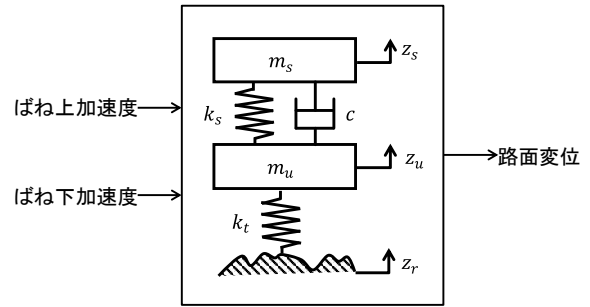


図3 IRIの算出概念図(オブザーバ法)

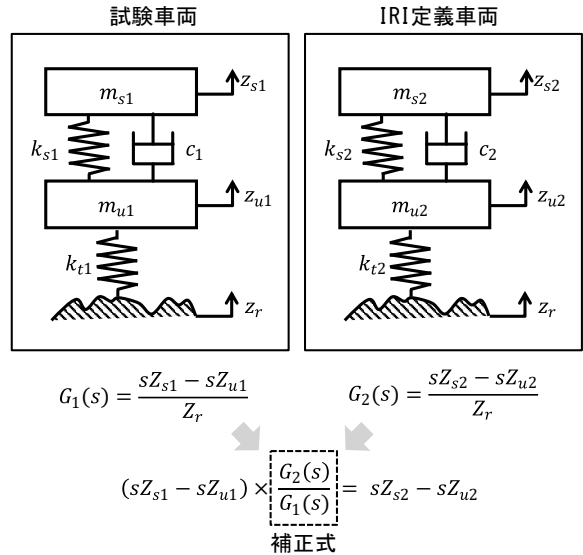


図4 IRIの算出概念図(相対速度補正法)

IRIを算出する。

(3) 伝達特性法

実車試験により取得した、路面変位入力に対するばね下加速度応答の逆伝達特性を用いて路面変位を推定し(図5)、IRIを算出する。

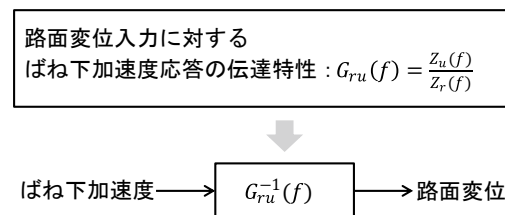


図5 IRIの算出概念図(伝達特性法)

オブザーバ法および相対速度補正法は、車両諸元を取得することで実車試験を行うことなく適用可能である。しかしながら、モデル化誤差の影響を受けるため、高精度な推定には実車との整合を図るための調整が必要となる。一方、伝達特性法は事前に実車試験を実施して伝達特性を取得する必要があるものの、取得した特性に実車の動特性が反映されるた

め、実車に即した推定が可能である。以上より、本研究では実車適用時の推定精度を重視し、伝達特性法を採用した。

注8) 直接計測できないシステム内部の状態を、計測可能な入出力情報および数学モデルを用いて推定する状態推定器。

3.4 開発手法の概要

伝達特性法によるIRIの算出フローを図6に示す。以下に、各ブロックの内容について述べる。

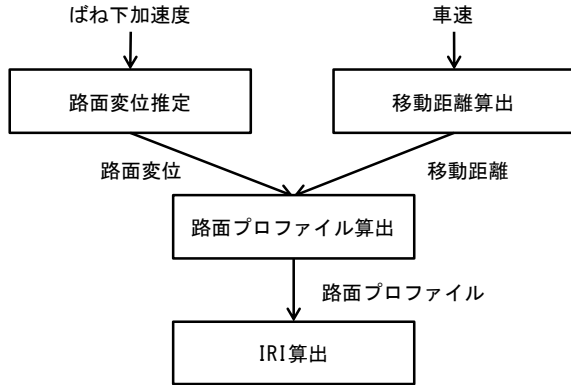


図6 伝達特性法によるIRIの算出フロー

3.4.1 路面変位推定

①伝達特性スペクトルの算出

A) ばね下加速度と路面変位を取得し、路面変位入力に対するばね下加速度応答の逆伝達特性 $G_{ru}^{-1}(f)$ を算出する。これらのデータは、当社で保有する4輪シミュレート試験機により、3.2節で明らかにしたIRIへの寄与度が高い周波数帯域を含む広帯域信号で車両を加振して取得した。試験機の外観を写真2に示す。本試験機は車両走行時の上下動を再現するものであり、当社テストコースの路面変位やISO8608に基づく路面変位で加振を行うことができる。



写真2 4輪シミュレート試験機

B) 伝達特性のゲインおよび位相を式(5)に適用して伝達特性スペクトル $Z_{ur}(f)$ を算出する。

$$Z_{ur}(f) = |G_{ru}^{-1}(f)| e^{j\angle G_{ru}^{-1}(f)} \quad (5)$$

②路面変位の推定

A) ばね下加速度をフーリエ変換してばね下加速度スペクトル $Z_u(f)$ を算出する。

B) 伝達特性スペクトル $Z_{ur}(f)$ およびばね下加速度スペクトル $Z_u(f)$ を式(6)に適用して、路面変位スペクトル $Z_r(f)$ を算出する。

$$Z_r(f) = Z_u(f) \cdot Z_{ur}(f) \quad (6)$$

C) 路面変位スペクトル $Z_r(f)$ を逆フーリエ変換して路面変位 $z_r(t)$ を推定する。ここで t は時間である。

3.4.2 移動距離算出

車速を時間積分することで、移動距離 $x(t)$ を算出する。

3.4.3 路面プロファイル算出

A) 路面変位 $z_r(t)$ と移動距離 $x(t)$ に基づき、路面プロファイル $z_r(x)$ を算出する。

B) 車速が変動する場合、各サンプリング時間における移動距離は一定とならない。そこで、等間隔の移動距離 x^* を定義し、路面変位をこの位置に再配置するリサンプリング処理を行い、等間隔路面プロファイル $z_r^*(x^*)$ を算出する。

3.4.4 IRI算出

等間隔路面プロファイル $z_r^*(x^*)$ をIRI算出式に適用し、IRIを算出する。

4 開発手法の有効性検証

開発した手法を計測システムに実装し、IRIならびに検出率および的中率により有効性を確認した。評価には、2023年度の性能検証試験（茨城県南部）で取得した車両挙動データを用いた。IRIの算出結果ならびに検出率および的中率を、それぞれ図7および表2に示す。図7より、一部区間において開発手法によるIRIが正解値と乖離しているものの、全体としては概ね一致する結果が得られた。また、こ

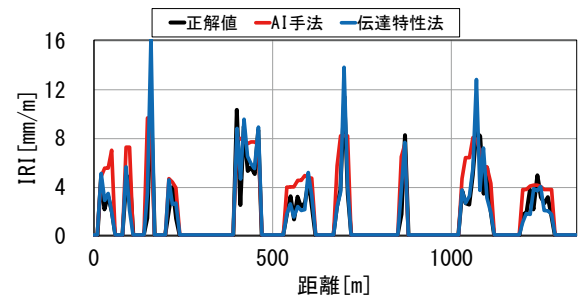


図7 IRIの算出結果

の結果に基づく検出率および的中率（表2）は、区分Ⅱ以上および区分Ⅲにおいて60%以上を示しており、本手法の有効性が確認された。

表2 検出率・的中率の算出結果

手法	項目	区分Ⅱ以上	区分Ⅲ
AI手法	検出率	72%	25%
	的中率	42%	40%
伝達特性法	検出率	72%	75%
	的中率	70%	100%

5 2025年度性能検証試験

5.1 試験概要

2025年度の性能検証試験の概要を以下に示す。

- A) 試験日： 2025年11月
- B) 場所： 茨城県南部
- C) 試験区間： 国道における4区間（合計4km）
- D) IRI測線： 車線中心線から左に1mオフセットした位置（図8）

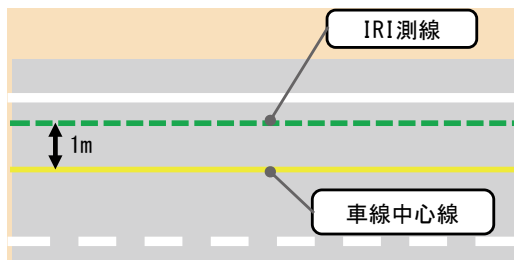


図8 IRI測線

試験の様子を図9に示す。試験は、一般車両が走行する環境下で実施された。4つの試験区間の起点には誘導員が配置されている。なお、車線中心線およびIRI測線はイメージ図で示されている。

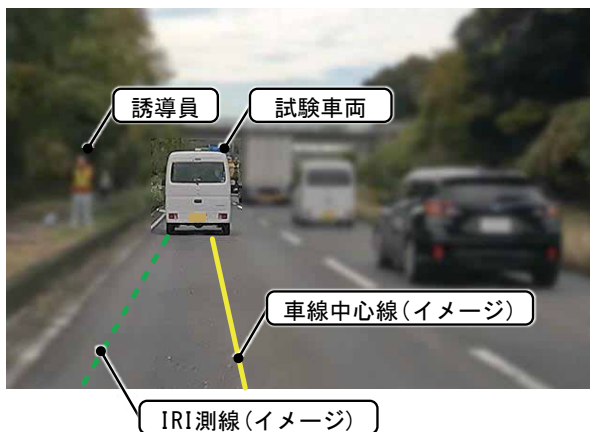


図9 性能検証試験の様子

およびIRI測線は視認できないため、計測車両、車線中心線ならびにIRI測線との位置関係を意識して走行し、IRIの算出に必要な車両挙動データを計測した。

5.2 試験結果

試験結果については、2026年2月中旬頃に国土交通省より受領した。試験結果を表3に示す。検出率および的中率はいずれも60%以上を達成した。これにより、点検支援技術性能カタログへの掲載が決定した。さらに、区分Ⅲの的中率以外で90%以上の高い精度を達成した。

表3 性能検証試験の結果^{注9)}

技術名	区分Ⅱ以上 検出率	区分Ⅱ以上 的中率	区分Ⅲ 検出率	区分Ⅲ 的中率
スマート道路モニタリング	90~100%	90~100%	90~100%	70~80%

注9) 国土交通省HPに記載の点検支援技術性能カタログ (https://www.mlit.go.jp/road/tech/hosou_all_nonsort.html) から一部抜粋したもの。

6 まとめ

本報では、スマート道路モニタリング[®]におけるIRIの算出精度向上の課題に対し、車両挙動データに基づきIRIを算出する手法を提案した。

本手法を計測システムに実装し、取得した車両挙動データからIRIを算出した結果、性能検証試験においてカタログ掲載の性能基準を達成した。これにより、スマート道路モニタリング[®]は国土交通省の点検支援技術性能カタログに掲載された。

今後は、本手法のさらなる精度向上および適用範囲の拡大を検討していく。

7 おわりに

本手法の開発に協力いただいた関係部署ならびに御指導御支援を頂いた方々へ、この場をお借りしてお礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 国土交通省：令和7年度版国土交通白書，2025。
- 2) 江口利幸ほか：国際ラフネス指数を用いた局部変状評価手法，土木学会論文集E1，2015。
- 3) 安藤和彦ほか：路面のIRI（国際ラフネス指数）を測定する各種測定方法の精度比較，土木技術資料，2014。

- 4) 首藤, 高松: スマート道路モニタリングシステムの開発, KYB技報第61号, 2020. 改良, カヤバ技報第72号, 2026.
- 5) 長谷部: スマート道路モニタリング[®]の事業化に向けた 6) 長谷部: 用語解説「路面性状指標」, カヤバ技報第72号, 2026.

著 者



久保 大和

2013年入社. 技術本部先進技術研究所制御技術研究室. 油圧緩衝器の研究開発に従事.