自動車のばね上加速度を活用した道路路面診断に向けた基礎検討

千葉大学大学院工学研究科 建築・都市科学専攻 学生会員 ○河井　大地　　正会員　丸山　喜久
鹿島技術研究所　都市防災・風環境グループ　正会員　永田茂

1．研究背景と目的

我が国では社会基盤施設が高度経済成長期に集中的に整備されたため，道路ストックの老朽化が懸念されており，近い将来集中的に道路ストックの修繕が必要になると言われている．2012 年には笹子トンネル天井板落下事故が発生し，戦略的な維持管理や更新の必要性が高まっている．このような背景から，2013 年に国土交通省は総点検実施要領(案)[1]をまとめた．

総点検実施要領(案)[1]には橋梁やトンネル，舗装等の道路ストックに応じた安全で円滑な交通の確保や舗装に関する維持管理の効率化のための情報がまとめられている．しかし舗装路面の点検はトンネルや橋梁と比べて優先度が低いのが現状である．路面性状測定車による高精度な点検は幹線道路の一部区間のみで行われているが，すべての道路について定量的に路面性状を点検することは時間と費用の問題から困難である．また，路面下の空洞により突然発生する路面の陥没は人命に関わる重大事故につながる危険性があるため，修繕が必要な舗装路面を診断するニーズが高まっている．

そこで本研究では，自動車の加速度を用いて路面性状を診断することを目的とし，横浜市と調布市で実走調査を行った．実走調査では，路面性状測定車による高精度な路面性状データを同時に取得し，自動車の加速度と路面性状の関係性を定量的に評価した．

2．横浜市と調布市における実走調査

本研究では，2015 年 9 月 29 日，10 月 9 日にそれぞれ横浜市と調布市において実走調査を行った．国土交通省による総点検実施要領(案)[1]に基づき，路面性状測定車によって，維持管理指数（MCI）および MCI の算出に必要な 3 要素（ひび割れ率，わだち掘れ量，平たん性），国際ラフネス指数（IRI）を 10 m および 100 m 間隔で測定した．

路面性状を簡易に評価することを目指し，走行中の加速度や車速などのデータも取得した．車軸にリオン（株）製圧電式加速度ピックアップ（PV-94）を取り付け，ばね下の加速度を測定した．また，車内ではスマートフォンに搭載されている MEMS センサを用いて，ばね上加速度を測定した．

図-1 に横浜市の県道東京丸子横浜線，**図-2** に調布市の一部区間の IRI（10 m 間隔）を示す．なお，IRI は式(1)のように算出される[2]．

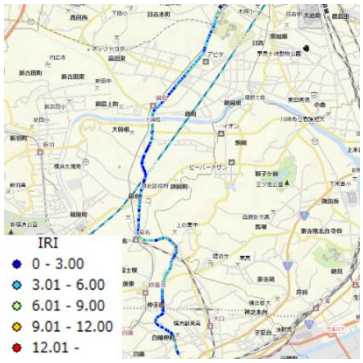

図-1 県道東京丸子横浜線における IRI

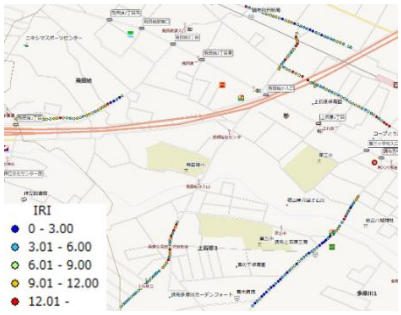

図-2 調布市の一部道路における IRI

$$IRI = \{\int_0^{L/V} |z_s^{'} - z_u^{'}| \, dt\} / L \qquad (1)$$

ここで，z_sはばね上質量の高さ(mm)，z_uはばね下質量の高さ(mm)，L は走行距離(m)，V は走行速度，t は時間を表す．IRI は値が大きいほど路面状況が悪いことを示す指標で，総点検実施要領（案）[1]では，IRI が 8 mm/m で損傷レベル大，とくに IRI が 11～12 mm/m で明確な損傷が連続的に発生している状態としている．

3. ロジスティック回帰分析による路面不良区間の抽出

ロジスティック回帰分析[3]に基づき，ばね上の上下方向加速度や車速を説明変数として，路面性状が不良な区間を判定する数理モデルを構築する．

$$y = 1/[1+\exp\{-(b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \cdots + b_px_p)\}] \qquad (2)$$

本研究では 10 m 間隔の IRI が 12mm/m 以上の区間を路面性状が不良な区間とし，抽出対象とする．また説明変数には，10m 区間ごとの平均車速(m/s)，平均加速度振幅(G)および最大加速度振幅(G)を用いた．

キーワード 道路路面診断，国際ラフネス指数，ロジスティック回帰分析，ROC 曲線
連絡先 〒263-8522 千葉県千葉市稲毛区弥生町 1-33　電話 043-290-3555

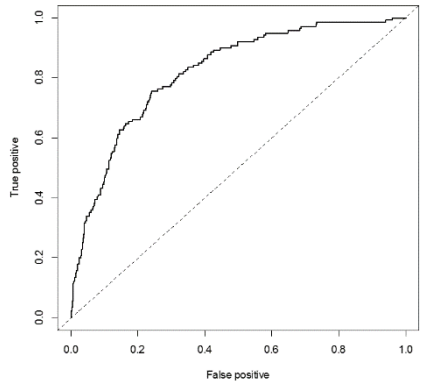

図-3 本研究のロジットモデルの ROC 曲線

構築したロジットモデルを ROC 曲線を用いて評価する（**図-3**）．AUC（Area under the curve）は 0.819 となり，判別能力が良好なモデルとなった．なお，路面性状が不良な区間を抽出する最適なカットオフ値は 0.048 となった．ロジットモデルによる路面性状の判定結果を**表-1** にまとめる．IRI が 12 mm/m 以上の区間を不良と正しく判別する敏感度は 0.76，12 mm/m 未満の区間を不良でないと正しく判定する特異度は 0.76 であった．

表-1 ロジットモデルによる路面不良区間の抽出結果

		判定結果	
		不良である	不良でない
IRI (mm/m)	12 以上	105	34
	12 未満	826	2616

4. ばね上加速度を用いたばね下変位の推定

八木は，ばね上加速度を用いて，ばね下の上下変位量を推定する手法を提案している[4]．まず，ばね上加速度 $dZ(i)$を式(3)のように積分する．

$$Vz(i) = Vz(i-1) + dZ(i)/N \qquad (3)$$

ここで，N はサンプリング周波数(Hz)である．次に式(4)のように，前後 5 秒ずつの平均を路面段差に起因しない静的な速度成分とみなし，動的な速度成分 $dVz(i)$ を算出する．

$$dVz(i) = Vz(i) - \sum_{j=i-5N+1}^{i+5N} Vz(j)/10N \qquad (4)$$

速度成分 $dVz(i)$を式(5)のように積分し，ばね上の変位 $Lz(i)$を得る．

$$Lz(i) = Lz(i) + dVz(i)/N \qquad (5)$$

また，自動車の上下運動を 1 質点系のモデルで近似すると式(6)のような運動方程式が書ける．なお，$\omega(=2\pi f)$ は車両の上下運動の角振動数であり，ばねの共振周波数 1.49Hz から算出した．

$$\ddot{Lz}(i) + 2h\omega(\dot{Lz}(i) - \dot{u}(i)) + \omega^2(Lz(i) - u(i)) = 0 \qquad (6)$$

ばね下変位 $u(i)$は，式(7)のように得られる．

$$u(i) = u(i-1) + \{\dot{u}(i) + \dot{u}(i-1)\}/2N \qquad (7)$$

$u(0)$=0 とし，(6)，(7)を連立させれば，順次 $u(i)$を求めることができる．推定したばね下変位量の経時変化を**図-4**，**図-5** に示す． 市道三ツ沢線の方が最大振幅が小さい結果となったが，今後は路面性状指標と定量的な比較を行う必要がある．

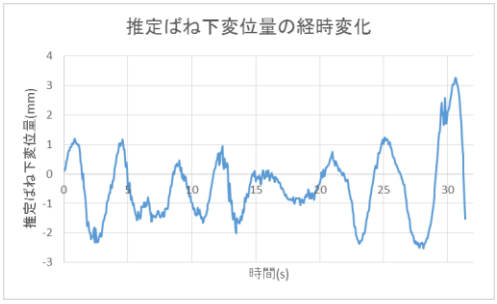

図-4 横浜市市道三ツ沢線(370m 区間)における推定ばね下変位量

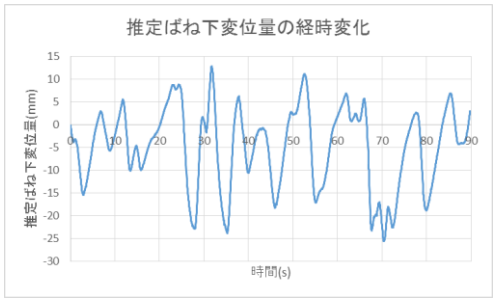

図-5 調布エリア 00-01(370m 区間)における推定ばね下変位量

5. まとめ

本研究では，自動車の加速度を用いた簡易な路面診断手法を構築することを目指し，国際ラフネス指数（IRI）と自動車のばね上加速度の関係を定量的に評価した．本研究で構築したロジットモデルは，IRI が 12 mm/m 以上の区間の判別能力が良好なモデルとなった．また，既往研究に基づき，ばね上の上下加速度を用いてばね下変位量を推定することができた．今後は，これらと路面性状指標を定量的に比較することが必要である．

謝辞：本研究は，JSPS 科研費 15H04023 の助成を受けたものです．

参考文献

1) 国土交通省：総点検実施要領案(舗装編)，2013.
2) 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，土木学会舗装工学論文集，第 3 巻, pp. 9-14, 1998.
3) 青木繁伸：R による統計解析，オーム社，2009.
4) 八木浩一：自動車のばね上観測加速度からの路面縦断プロファイルの推定とその精度検証，土木学会論文集 E1 (舗装工学)，Vol.69, No.3, pp.I_1-I_7, 2013.