

リフティングスキーム理論に基づく

車両ばね下振動に影響を与える路面凹凸形状の検出法

The Detection Method of the Pavement Roughness Waveform that Influences the Vibration of the Unsprung Mass of a Vehicle

白川龍生¹・川村彰²・中島繁則³・亀山修一⁴・上浦正樹⁵

Shirakawa Tatsuo, Kawamura Akira, Nakajima Shigenori, Kameyama Shuichi, and Kamiura Masaki

抄録：路面の凹凸は、自動車振動を励起する要因の一つであるが、同程度の波高・波長であっても凹凸形状の違いによっては振動波形が大きく異なることがある。路面と車両の相互作用分析を厳密に行う場合、車両振動データは路面凹凸のタイプ別に区分して取り扱うべきである。そこで本研究では、ウェーブレット変換を基礎とするリフティングスキーム理論を用いて、車両ばね下振動に影響を与える路面凹凸形状を検出する方法について考察した。基底関数はSpline関数を基本に分析目的に応じた形状へ最適化されたものを用いた。その結果、ばね下振動に与える影響が大きい「凸」型の凹凸形状を正確にモニターできることがわかった。この成果は他の土木構造物メンテナンス部門の研究にも応用可能と思われる。

キーワード：リフティングスキーム理論、ウェーブレット変換、デジタル信号処理、路面凹凸形状、ばね下振動

Keywords : Lifting schime theory, Wavelet transform, Digital signal processing, Pavement roughness waveform, Vibration of the unsprung mass

1. はじめに

路面に生ずる凹凸は、自動車振動を発生させる要因の一つであり、道路管理者は日々の道路巡回および路面性状調査結果に基づき必要に応じ維持管理を実施している。道路管理者が車両の振動を低減させるために実施可能なアプローチの1手法として、車両ばね上/ばね下質量の固有振動数に対応する波長の路面凹凸を優先的に補修するという方法が考案されている¹⁾。車両の固有振動数は、一般的な乗用車の場合ばね上質量が1.0～2.0Hz、ばね下質量が10～20Hzと考えられており、管理対象区間の走行速度に応じてこれに対応する路面凹凸の波長を求め、この波長を重点的に管理することにより、乗り心地・走行安全性を確保する上で望ましい路面コンディションを道路利用者に提供することができる。路面縦断プロファイルデータから固有振動数に対応する路面凹凸を抽出する手順としては、バンドパスフィルタを用いたデジタル信号処理によって行われる方法が一般的である。

ここで、同一の波長成分は振幅の正負の符号に関わ

らず出力されているが、道路管理の実務上は正負についても識別されることが望ましい。これは車両の振動の大きさが路面凹凸形状の相違により異なるためである。路面が車輪に与える影響を模式的に表したものを図-1に示す。同じ大きさの突起であっても、振幅の正負が逆であれば、車両ばね下に生ずる振動の度合いは異なることがある²⁾。フーリエ変換を基礎とする一般的なデジタル信号処理の場合、振幅の正負の相違を識別することは不可能であるため、入出力間の伝達関数を求める際、局所的に振幅利得の差が生じる。このため、自動車の周波数特性を利用して路面プロファイルの絶対形状を推定する方法などにおいて、推定誤差が生じる場合があった。そこで本研究は、後述するリフティングスキーム理論を用いて、路面プロファイルデータの中から車両ばね下の振動に影響のある凹凸形状を検出する方法について考察を行った。

2. 分析目的に応じた基底関数の設計

路面と車両の相互作用分析を厳密に行なう場合、

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 北見市公園町165, Tel : 0157-26-9429, E-mail : shirakaw@mail.kitami-it.ac.jp)

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 北見市公園町165)

3 : 非会員 (株)ワーカム北海道 研究実験部第1部 部長 (〒054-0014 北海道勇払郡鶴川町字米原489)

4 : 正会員 博(工) 北海道工業大学 助教授 工学部社会基盤工学科 (〒006-8585 札幌市手稲区前田7-15-4-1)

5 : 正会員 博(工) 北海学園大学 教授 工学部社会環境工学科 (〒064-0926 札幌市中央区南26条西11丁目1-1)

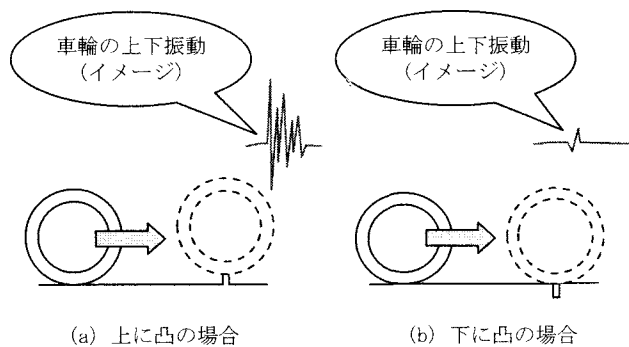


図-1 路面凹凸が車輪に与える影響

車両振動データは路面凹凸のタイプ別に区分（識別）して取り扱うべきである。この場合、識別目的に応じた基底関数と呼ばれる小波状の関数を用いて、局所的に入力データとの積分を行なうことが可能なウェーブレット変換が有用と思われる。

図-2 にデジタル信号処理とウェーブレット変換結果の違いを示す。図-2(a)が正弦波 A、正弦波 B ともに入力データのまま抽出されているのに対し、図-2(b)では基底関数の形状に類似する正弦波 A の成分が強調され、正弦波 B はほとんど検出されない。すなわち、ウェーブレット変換であれば、使用する基底関数が分析目的に適合したものであれば、例えば図-1(a)「上に凸」のみ検出することができる。ただし、ウェーブレット変換に用いる基底関数は、直交条件など様々な制約条件を満足する必要がある、設計は容易ではない。さらに出力結果は基底関数の種類に依存することから、ウェーブレット変換は道路管理の実務において積極的に利用された事例はこれまで報告されていない。しかし、1996 年に Sweldens が従来のウェーブレット変換にパラメータの学習機能を付加したリフティングスキーム理論を発表して以降、上記の問題が解消されつつある³⁾。特に高野らが画像処理分野においてこの理論を体系化したことにより、基底関数の最適化処理が飛躍的に向上した⁴⁾。本研究は、上記のリフティングスキーム理論を用いて車両ばね下の振動に影響のある路面凹凸形状を検出する方法について考察したものである。路面プロファイルデータの中から特徴的な凹凸形状を検出する方法については既往の研究例があるが⁵⁾、本研究はこれに路面プロファイル上を走行する車両の振動加速度との相関関係の情報を付加している。

3. リフティングスキーム理論の概要⁵⁾

ウェーブレット変換は、入力データに含まれる周波数帯域（角周波数 $0 \sim \pi$ の領域）を低周波及び高周波分解フィルタによって 2 等分し、同時にダウンサンプリング操作によって解像度を 1/2 倍する演算を低域通過成分について展開する演算方法である。入力信号

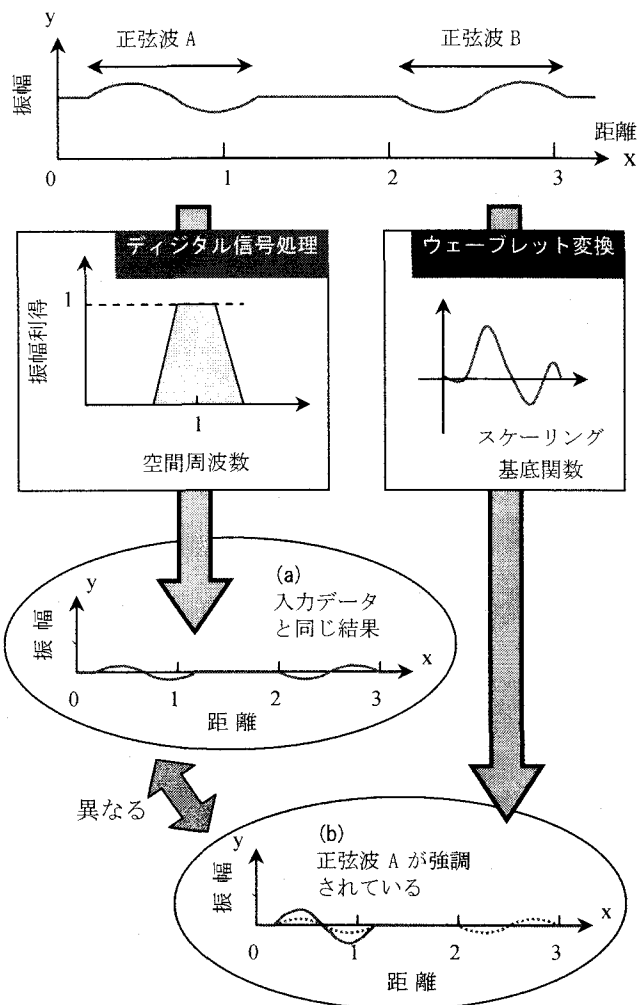


図-2 デジタル信号処理結果とウェーブレット変換結果の違い

(c_l^1) は、式(1)，(2)のように分解される。

$$\hat{c}_k^0 = \sum_l \tilde{h}_{k,l}^{old} c_l^1 \quad (1)$$

$$\hat{d}_m^0 = \sum_l \tilde{g}_{m,l}^{old} c_l^1 \quad (2)$$

ここに $\hat{c}_k^0, \hat{d}_m^0$: 低周波/高周波成分

$\tilde{h}_{k,l}^{old}, \tilde{g}_{m,l}^{old}$: 低周波/高周波分解フィルタ

l : 解像度（周波数）パラメータ

k, m : 低周波/高周波成分位置パラメータ

$\tilde{h}_{k,l}^{old}$ 及び $\tilde{g}_{m,l}^{old}$ は基底関数の種類により性能が異なる。
 c_l^1 は $\hat{c}_k^0, \hat{d}_m^0$ より以下のように再構成できる。

$$c_l^1 = \sum_k h_{k,l}^{old} \hat{c}_k^0 + \sum_m g_{m,l}^{old} \hat{d}_m^0 \quad (3)$$

ここに $h_{k,l}^{old}, g_{m,l}^{old}$: 低周波/高周波復元フィルタ

フィルタには双直交条件が与えられる。

$$\begin{aligned}\sum_l h_{k,l}^{old} \tilde{h}_{k',l}^{old} &= \delta_{kk'}, & \sum_l g_{m,l}^{old} \tilde{h}_{k,l}^{old} &= 0, \\ \sum_l h_{k,l}^{old} \tilde{g}_{m,l}^{old} &= 0, & \sum_l g_{m,l}^{old} \tilde{g}_{m',l}^{old} &= \delta_{mm'}\end{aligned}\quad (4)$$

リフティングスキーム理論は、上述のウェーブレット変換に自由パラメータを与えたものである。

$$\begin{aligned}h_{k,l} &= h_{k,l}^{old} + \sum_m \tilde{s}_{k,m} g_{m,l}^{old} \\ \tilde{h}_{k,l} &= \tilde{h}_{k,l}^{old} \\ g_{m,l} &= g_{m,l}^{old} \\ \tilde{g}_{m,l} &= \tilde{g}_{m,l}^{old} - \sum_m \tilde{s}_{k,m} \tilde{h}_{k,l}^{old}\end{aligned}\quad (5)$$

ここに $h_{k,l}, g_{m,l}$: 新・低周波/高周波復元フィルタ
 $\tilde{h}_{k,l}, \tilde{g}_{m,l}$: 新・低周波/高周波分解フィルタ
 $\tilde{s}_{k,m}$: 自由パラメータ

リフティングスキーム理論では、 $\tilde{s}_{k,m}$ を用いて特徴的な形状を有する箇所における高周波成分(d_m^0)を0とする演算を行い、信号に適応する新しいフィルタを構成する。この場合の双直交条件は以下ようになる。

$$\begin{aligned}\sum_l h_{k,l} \tilde{h}_{k',l} &= \delta_{kk'}, & \sum_l g_{m,l} \tilde{h}_{k,l} &= 0, \\ \sum_l h_{k,l} \tilde{g}_{m,l} &= 0, & \sum_l g_{m,l} \tilde{g}_{m',l} &= \delta_{mm'}\end{aligned}\quad (6)$$

ここで、ウェーブレット変換における $\hat{d}_m^0$ の絶対値から d_m^0 の絶対値を差引くと、特徴的な形状と異なる箇所では値が小さくなるが、類似箇所ではほとんど変化しない。リフティングスキーム理論はこの重み付けによって特徴点を検出できる(式(7))。

$$I_m = \left| \hat{d}_m^0 \right| - \left| d_m^0 \right| \quad (7)$$

ここに I_m : $\left| \hat{d}_m^0 \right|$ と $\left| d_m^0 \right|$ の差

d_m^0 は式(8)によって求める。

$$\begin{aligned}d_m^0 &= \sum_l \tilde{g}_{m,l} c_l^1 \\ &= \sum_l \left(\tilde{g}_{m,l}^{old} - \sum_k \tilde{s}_{k,m} \tilde{h}_{k,l}^{old} \right) c_l^1 \\ &= \hat{d}_m^0 - \sum_k \hat{c}_k^0 \tilde{s}_{k,m}\end{aligned}\quad (8)$$

特徴的な点では、 d_m^0 が0となるため、

$$d_m^0 = \hat{d}_m^0 - \sum_k \hat{c}_k^0 \tilde{s}_{k,m} = 0 \quad (9)$$

4. 車両ばね下振動に影響する路面凹凸形状検出

4. 1 分析データ

分析対象区間の延長は240mであり、舗装種別は密粒度アスファルト舗装である。また、路面の平坦性レベルはIRI=4.2mm/mである。ここでIRI(国際ラフネス指数)とは、評価対象路面上を「ばね－ダッシュポット－質量」で構成される車の振動モデルが時速80km/hで走行した際の車体－タイヤ間距離の上下変化量の累積値を対象路面区間長で除した値である²⁾。IRIの値が大きいくほど道路の平坦性が悪いことを意味しており、この区間の平坦性は「古い舗装」に分類されるレベルである。

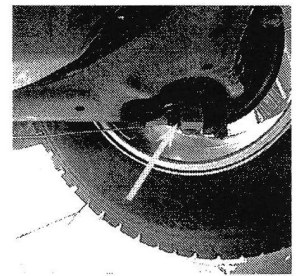
この路面上を走行する測定車及び車両ばね下部に設置した加速度センサの設置状況を写真-1に示す。測定車は各地に普及している道路パトロール車と同等のスペックを有している。加速度センサはひずみゲージ式のものであり、測定車左前輪付近(ロアアーム部分)に設置した。この際の走行速度は時速60km/hである。

4. 2 分析結果

路面プロファイル及び振動加速度測定結果から、車両ばね下振動に影響する路面凹凸形状を特定した。分析にあたり各データを対比した結果を図-3に示す。Aで示す箇所に「上に凸」型の波長約1mの路面凹凸があり、この上を走行すると車両ばね下に大きな振動(全振幅25m/s²)が生じている。一方、上記Aの箇所と同程度の波長・波高で「下に凸」型の路面凹凸(Bで示す箇所)の上を走行した際の振動加速度の値は小さい。このことは、路面凹凸形状によって車両ばね下に生ずる振動加速度の大きさが異なることを実証した



(a) 測定車



(b) 加速度センサ
(車両ばね下)

写真-1 測定車及び加速度センサ設置状況

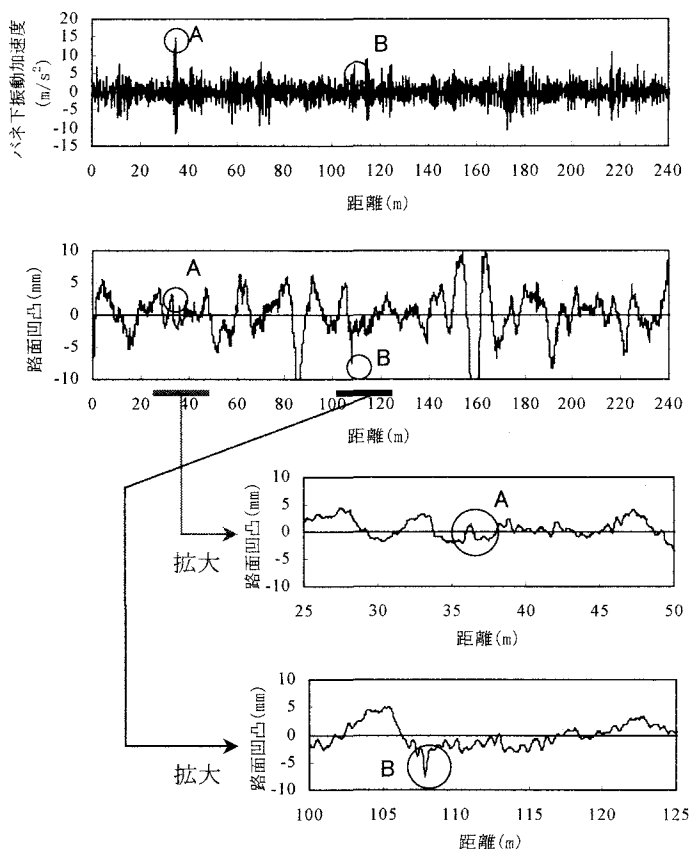


図-3 車両ばね下振動に影響する路面凹凸の特徴

結果とも換言できる。

そこでリフティングスキーム理論を用いて路面プロファイルデータから車両ばね下の振動に影響を与える波長約1mの「上に凸」型の凹凸形状を検出した。結果を図-4に示す。ベースの基底関数はSplineを用いた。

図-4のうち「基底関数との相関」のグラフは、自由パラメータを与えた新しい高周波分解フィルタへ路面プロファイルデータを通過させた結果であり、この場合、縦軸 (I_m) の値が大きいほど検出すべき「波長1m」「上に凸」の条件に適合していることを示す。図中Aに示す箇所では I_m の値が最大となっており、検出すべき路面凹凸形状を正確に検出していることがわかる。一方、ばね下の振動にあまり影響を与えないBの箇所は検出されていないことも確認することができる。

結果的にリフティングスキーム理論によって生成された新しい高周波分解フィルタへ路面プロファイルデータを通過させることにより、図-4下部にあるばね下振動加速度と波形の傾向が類似した形となって出力されることを明らかにすることができた。この成果は他の土木構造物メンテナンス部門の研究にも応用可能と思われる。

謝辞： 本研究の一部は、平成16年度ノーステック財団基盤的研究開発育成事業（若手研究補助金）の助成

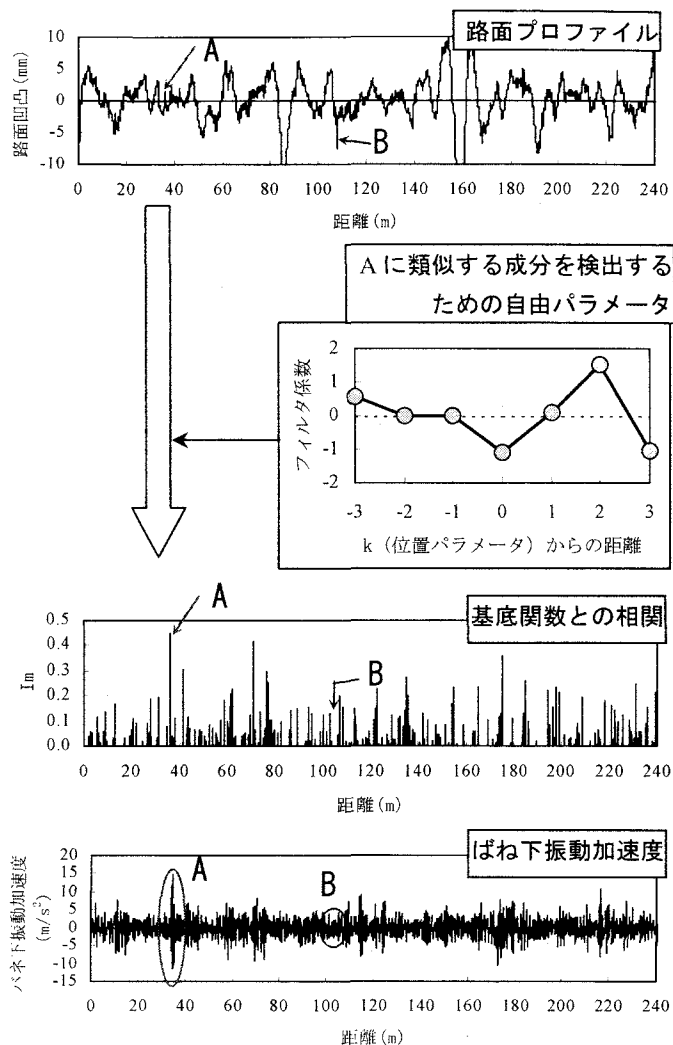


図-4 「上に凸」型の路面凹凸形状の検出結果

を受け実施しました。ここに感謝申し上げます。

参考文献

- 1) Delanne, Y. and Pereira, P.A.A. : Advantages and limits of Different road roughness profile signal-processing procedures applied in Europe, *Transportation Research Record*, No.1764, pp.254-259, 2001.
- 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, pp.97-98, 土木学会, 2003年1月.
- 3) Sweldens, W. : The Lifting Scheme - A custom design construction of biorthogonal wavelets-, *Applied and Computational Harmonic Analysis*, Vol.3(2), pp.186-200, 1996.
- 4) Takano, S., Minamoto, T., Arimura, H., Nijjima, K., Iyemori, T. and Araki, T. : Automatic detection of geomagnetic sudden commencement using lifting wavelet filters, *Lecture Note in Artificial Intelligence*, Springer (LNAI 1721): *Proceedings of the Second International Conference on Discovery Science*, pp.242-251, 1999.
- 5) Shirakawa, T., Kawamura, A. and Nakatsuji, T. : Basic Study on the Road Roughness Detection Method Using the Second-Generation Wavelet Transform, *Proceedings of 5th Symposium on Pavement Surface Characteristics*, pp.1-12 (CD-ROM), 2004.