

カスタムウェーブレットフィルタによる 車両振動に影響を及ぼす舗装ひび割れ箇所の特定制

富山和也¹・川村 彰²・石田 樹³

¹正会員 博(工) 北見工業大学助教 工学部社会環境工学科 (〒090-8507 北海道北見市公園町 165 番地)
E-mail : tomiyama@mail.kitami-it.ac.jp

²正会員 博(工) 北見工業大学教授 工学部社会環境工学科 (〒090-8507 北海道北見市公園町 165 番地)

³正会員 博(工) 北海道開発局苫小牧道路事務所所長 (〒053-0816 北海道苫小牧市日吉町 2 丁目 1 番 5 号)

舗装のひび割れは、損傷の進行状況によって局所的に段差状となり、路面プロファイルに由来する機能的パフォーマンスと関連した評価が必要となる。本研究は、従来のウェーブレット変換に、自由パラメータを付加した Lifting Scheme により、車両バネ上下振動に影響を及ぼすひび割れ箇所の特定制方法について検討した。はじめに、車両振動に影響するひび割れの特徴的な形状を解析し、自由パラメータとして学習した。続いて、学習した自由パラメータを用い、特徴的なひび割れの検出に適したカスタムウェーブレットフィルタを設計した。最後に、設計したフィルタにより、車両振動に影響するひび割れ箇所が特定制できることを確認し、Lifting Scheme による特異点検出は、路面プロファイル上のひび割れにも有効であることを示した。

Key Words : pavement crack, wavelet transform, custom wavelet filter, vehicle vibration, lifting scheme

1. はじめに

社会資本の量的整備が一定水準に達し、老朽化した道路ストックが急増する昨今、その維持管理には、優先的に補修が必要となる箇所を的確に把握・評価するとともに、損傷が致命的となる前に対策を講じる予防保全が極めて重要となっている¹⁾。特に、路面性状は、車両を介し人と道路との接点となることから、車両走行時の快適性や安全性など、利用者視点を重視した評価が必要である。

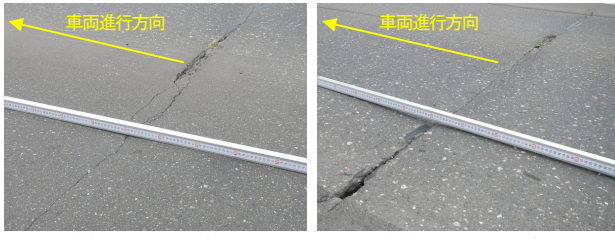
路面性状を評価するためには、路面プロファイルデータの処理が必要である²⁾。路面プロファイルは、様々な波長(波数)と振幅を有する波の複合体として捉えることができるため、従来、その処理には、フーリエ変換を用いたパワースペクトル密度(Power Spectrum Density, 以下、PSD)³⁾による周波数分析が行われてきた。しかし、本手法では、プロファイル波形の定常性を仮定する必要がある、局在する路面損失のために、平均的な路面プロファイル特性が歪められて表現される場合がある。また、路面損傷と関連した位置情報の特定制が困難であるなど、その適用に際しては少なからず問題がある。

一方、時間-周波数解析の代表的手法であるウェーブレット変換(Wavelet Transform, 以下、WT)は、フーリエ変換による方法と異なり、解析プロファイルの定常性を仮定する必要がなく、局在するプロファイル波形の位置

情報と波数情報を同時に識別できる利点を有する。そのため WT は、路面の局所損傷解析への有効性が認識されており、近年、舗装工学分野においても多くの適用事例が報告されている^{4,6)}。

ここで、WT の結果は、マザーウェーブレットとよばれる基本関数の性質に大きく依存する。そのため、解析目的に応じた様々な種類のマザーウェーブレットが提案され実用化されているが、その選択は、WT における最大の課題であった。しかし、Second Generation Wavelets が体系化され、既存 WT に対し Lifting Scheme により、特定制の性質を付加することで、WT の効率を高めることが可能となった⁷⁾。特に、任意の双直交ウェーブレットフィルタに自由パラメータを加えた、リフティングウェーブレットフィルタを用いることで、信号に含まれる特異点を学習し、検出する方法が提案されており⁸⁾、路面評価への適応性も期待されている⁹⁾。

一般に、ひび割れは、その幅がタイヤの接地長に比べ十分に狭い場合、車両の振動に必ずしも影響しない¹⁰⁾。しかし、横断ひび割れのように、損傷の進行状況によっては段差状となり、損傷と直交して走行する車両振動に影響を及ぼす。舗装路面上に生じた横断ひび割れの例を図-1 に示す。図-1(a)の横断ひび割れに比べ、図-1(b)では、ひび割れ箇所を境に、車両進行方向に対し路面が階段状の段差となっていることが確認できる。特に、横断



(a) 初期ひび割れ (b) 進行したひび割れ

図-1 横断ひび割れの例

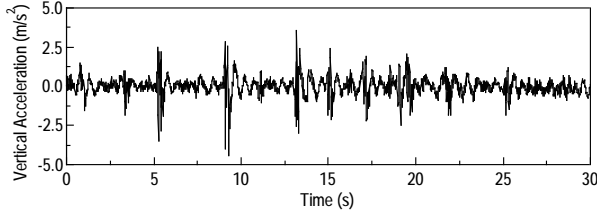


図-2 横断ひび割れにより生じた車両バネ上振動の例

ひび割れは、低温を原因とする場合が多く、寒冷地域においては、図-2のように、乗り心地の観点から重要な、車両バネ上に著大振動を生じさせるなど重要な問題となる。そこで、本研究では、Lifting Schemeによりカスタムウェーブレットフィルタを設計し、路面プロファイルから、車両バネ上振動に影響を与える、特異なひび割れ箇所を特定する方法について検討する。

なお、研究に用いたプロファイルデータは、米国 LTPP (Long Term Pavement Performance) プログラムの測定データを用いた。特に、今後、我が国では、舗装の新設に比し補修の占める割合が増大することから、LTPP データベース中、供用中のアスファルト舗装に対しオーバーレイによる修繕後の路面モニタリングを行っている、Specific Pavement Studies 5 (SPS-5)のデータ¹¹⁾を用いた。

2. Lifting Scheme による特異点の検出方法

WT とは、解析信号について、ローパスおよびハイパスフィルタとの畳み込みおよび 2 進間引きにより、元信号の 1/2 の解像度を持つ低周波 (近似) および高周波 (詳細) 成分へ分解する操作のことである。WT では、この分解操作を、低周波成分に繰返し行なうことで、ピラミッドアルゴリズムによる、多重解像度解析を構成することが可能である。また、Lifting Scheme を用いることで、従来の WT に、検出したい波形の特徴など、特定の性質を付加し、その分解性能を高めることが可能である。

(1) ウェーブレット分解アルゴリズム^{7), 8), 12)}

時間または距離 l における信号 c_l^1 は、多重解像度解析により、次式の通り、低周波成分と高周波成分に分解できる。

$$\hat{c}_m^0 = \sum_l \tilde{\lambda}_{l-2m} c_l^1 \quad (1)$$

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

ここで、 $\tilde{\lambda}_m$ と $\tilde{\mu}_m$ は分解フィルタとよばれる。また、元信号 c_l^1 は、低周波および高周波成分 \hat{c}_m^0 、 \hat{d}_m^0 を用いて次式により再構成可能である。

$$c_l^1 = \sum_m \lambda_{l-2m} \hat{c}_m^0 + \sum_m \mu_{l-2m} \hat{d}_m^0 \quad (3)$$

ここで、 λ_m と μ_m は再構成フィルタとよばれる。

簡単のために、

$$\begin{aligned} h_{k,l}^{old} &= \lambda_{k-2l}, \quad g_{m,l}^{old} = \mu_{l-2m} \\ \tilde{h}_{k,l}^{old} &= \tilde{\lambda}_{k-2l}, \quad \tilde{g}_{m,l}^{old} = \tilde{\mu}_{l-2m} \end{aligned} \quad (4)$$

とおくと、これらのフィルタ組 $\{h_{k,l}^{old}, \tilde{h}_{k,l}^{old}, g_{m,l}^{old}, \tilde{g}_{m,l}^{old}\}$ は、 δ をクロネッカーのデルタとし、双直交条件とよばれる以下の条件を満たすものとする。

$$\begin{aligned} \sum_l h_{k,l}^{old} \tilde{h}_{k',l}^{old} &= \delta_{kk'}, \quad \sum_l g_{m,l}^{old} \tilde{h}_{k',l}^{old} = 0 \\ \sum_l h_{k,l}^{old} \tilde{g}_{m',l}^{old} &= 0, \quad \sum_l g_{m,l}^{old} \tilde{g}_{m',l}^{old} = \delta_{mm'} \end{aligned} \quad (5)$$

(2) リフティングウェーブレットフィルタ^{8), 12)}

リフティングウェーブレットフィルタとは、任意の双直交ウェーブレットフィルタに、調整可能な自由パラメータを加えたものであり、次式の新しい双直交ウェーブレットフィルタ組 $\{h_{k,l}^{old}, \tilde{h}_{k,l}^{old}, g_{m,l}^{old}, \tilde{g}_{m,l}^{old}\}$ で構成される。

$$\begin{aligned} h_{k,l} &= h_{k,l}^{old} + \sum_m \tilde{s}_{k,m} g_{m,l}^{old} \\ \tilde{h}_{k,l} &= \tilde{h}_{k,l}^{old} \\ g_{m,l} &= g_{m,l}^{old} \\ \tilde{g}_{m,l} &= \tilde{g}_{m,l}^{old} - \sum_k \tilde{s}_{k,m} \tilde{h}_{k,l}^{old} \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、 $\tilde{s}_{k,m}$ は自由パラメータであり、 $\tilde{h}_{k,l}$ および $\tilde{g}_{m,l}$ は新しい低周波および高周波分解フィルタを、 $h_{k,l}$ および $g_{m,l}$ は新しい低周波および高周波再構成フィルタを表す。また、これらの新しいフィルタも以下の双直交条件を満たす。

$$\begin{aligned} \sum_l h_{k,l} \tilde{h}_{k',l} &= \delta_{kk'}, \quad \sum_l g_{m,l} \tilde{h}_{k',l} = 0 \\ \sum_l h_{k,l} \tilde{g}_{m',l} &= 0, \quad \sum_l g_{m,l} \tilde{g}_{m',l} = \delta_{mm'} \end{aligned} \quad (7)$$

(3) 自由パラメータの学習方法⁸⁾

上記式(6)をみると、信号の分解過程においてフィルタが更新されるのは、高周波側のみである。そこで、信号 c_l^1 の新しい高周波成分を考えると、以下ようになる。

$$d_m^0 = \sum_l \tilde{g}_{m,l} c_l^1 \quad (8)$$

ここに、式(6)の $\tilde{g}_{m,l}$ を代入すると、

$$\begin{aligned}
d_m^0 &= \sum_l (\tilde{g}_{m,l}^{old} - \sum_k \tilde{s}_{k,m} \tilde{h}_{k,l}^{old}) c_l^1 \\
&= r_m - \sum_k a_k \tilde{s}_{k,m}
\end{aligned} \quad (9)$$

となる。なお、 r_m と a_k は、元のフィルタによる高周波および低周波成分であり、

$$r_m = \sum_l \tilde{g}_{m,l}^{old} c_l^1, \quad a_k = \sum_l \tilde{h}_{k,l}^{old} c_l^1 \quad (10)$$

となる。特に、高周波成分 r_m は、信号 c_l^1 の不連続点や特異箇所などの詳細な情報を与える。

ここで、信号の基本特性を知るため、式(9)の高周波成分 d_m^0 を消失させるように自由パラメータ $\tilde{s}_{k,m}$ を決定する。高周波成分 d_m^0 は、時間（距離）パラメータ m に対応した複数の $\tilde{s}_{k,m}$ を含むことから、

$$d_m^0 = r_m - \sum_k a_k \tilde{s}_{k,m} = 0 \quad (11)$$

とすることで、信号に含まれる様々な特徴を抽出することが可能である。

以上を踏まえ、はじめに、検出したい特異点（形状）を含む $2n$ 個のトレーニング信号 $c_l^{1,\nu}$ ($\nu=1,2,\dots,2n$)を準備する。次に、各トレーニング信号に対し、以下の条件を課す。

$$\sum_{k=m-n}^{m+n} a_k \tilde{s}_{k,m} - r_m = 0, \quad \nu=1,2,\dots,2n \quad (12)$$

ここで、

$$r_m^\nu = \sum_l \tilde{g}_{m,l}^{old} c_l^{1,\nu}, \quad a_m^\nu = \sum_l \tilde{h}_{k,l}^{old} c_l^{1,\nu} \quad (13)$$

である。ここで、式(12)における数式が $2n$ であるのに対して、未知の $\tilde{s}_{k,m}$ が $2n+1$ ある。しかし、 $\sum_l \tilde{g}_{m,l} = 0$ を満たす必要があるため、

$$\sum_l \tilde{g}_{m,l} = \sum_l (\tilde{g}_{m,l}^{old} - \sum_{k=m-n}^{m+n} \tilde{s}_{k,m} \tilde{h}_{k,l}^{old}) = 0 \quad (14)$$

となり、 $\sum_l \tilde{g}_{m,l}^{old} = 0$ であることから、以下の条件が加わる。

$$\sum_{k=m-n}^{m+n} \tilde{s}_{k,m} = 0 \quad (15)$$

よって、式(12)、(15)より、

$$\begin{bmatrix} a_{m-n}^1 & a_{m-n+1}^1 & \cdots & a_{m+n}^1 \\ a_{m-n}^2 & a_{m-n+1}^2 & \cdots & a_{m+n}^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m-n}^{2n} & a_{m-n+1}^{2n} & \cdots & a_{m+n}^{2n} \\ 1 & 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{s}_{m-n,m} \\ \tilde{s}_{m-n+1,m} \\ \vdots \\ \tilde{s}_{m+n-1,m} \\ \tilde{s}_{m+n,m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_m^1 \\ r_m^2 \\ \vdots \\ r_m^{2n} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

となり、これを解くことで $\tilde{s}_{k,m}$ が算出できる。

(4) 特異点の検出理論⁸⁾

Lifting Schemeによる特異点の検出は、はじめに、解析対象の信号 c_l^1 から、新旧のハイパスウェーブレットフィルタ $\tilde{g}_{m,l}^{old}$ 、 $\tilde{g}_{m,l}$ を用いて、高周波成分 \hat{d}_m^0 および d_m^0 を計算する。ここで、 $\tilde{g}_{m,l}$ における自由パラメータ $\tilde{s}_{k,m}$ は、特異点における d_m^0 を消失させるよう最適化されているこ

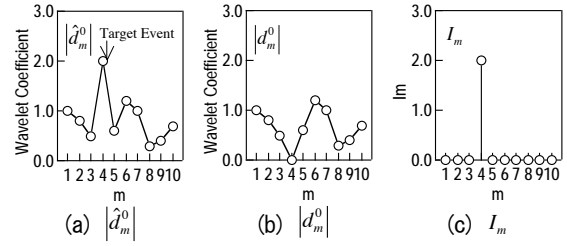


図-3 Lifting Schemeによる特異点の検出理論

とに着目する。そこで、式(17)により、 I_m が最大となる時間（距離） m により特異点を検出することが可能である。即ち、特異点以外では、理論上 \hat{d}_m^0 と d_m^0 が等しくなるため I_m が小さくなるが、特異点において d_m^0 は0（ゼロ）となるため、 I_m は \hat{d}_m^0 の値を保ったままとなる。

$$I_m = \left| \hat{d}_m^0 \right| - \left| d_m^0 \right| \quad (17)$$

検出理論の模式図を図-3に示す。

3. ひび割れに起因する車両振動の解析

本章では、カスタムウェーブレットフィルタ設計の初期解析として、研究に用いるプロファイル特性および、ひび割れが車両振動に及ぼす影響について検討する。

(1) 研究に用いる路面プロファイル

a) LTPP SPS-5

LTPP プログラムとは、1987 年に開始された、米国とカナダにおける供用中のアスファルトならびにコンクリート舗装の、様々な交通および自然環境条件下における、20 年間のモニタリングプログラムである¹³⁾。LTPP プログラムは、General Pavement Studies (GPS) および Specific Pavement Studies (SPS) の相補的な2つのプロジェクトから構成される。SPS-5¹⁴⁾は、オーバーレイされたアスファルト舗装の修繕行為に関する調査を対象としており、定期的な修繕のみを行うコントロール区間を含め、修繕工法の違いにより9つの試験区間から構成される。なお、LTPP プログラムに関して、一般ユーザが利用可能なデータへは、LTPP Products Online¹¹⁾からアクセスできる。

b) プロファイルデータの概要

LTPP プログラムでは、路面プロファイルデータに加え、路面上に生じている損傷種別および損傷箇所が記録されている。そこで、本研究では、SPS-5の内、ひび割れ損傷の顕著な、Arizona (State Code: 04)の試験区間9 (Section ID: 04-0509)において、1997年12月に測定されたプロファイルを用いた。1997年には2月と12月の2度プロファイルの測定が行なわれているが、損傷調査が同年11月に行なわれていることから、後者のデータを用いた。なお、ひ

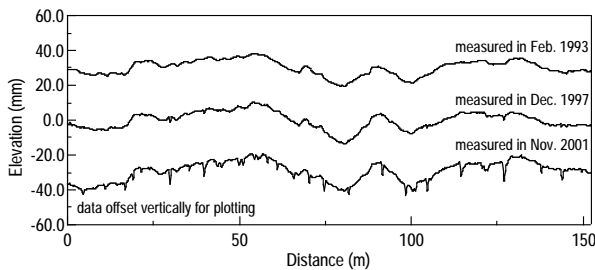


図-4 研究に用いた路面プロファイル

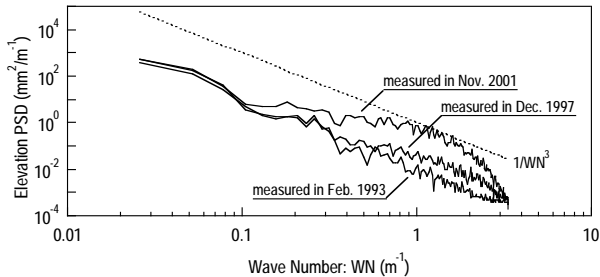


図-5 路面プロファイルの PSD

ひび割れが初めて記録されたのは 1994 年であるが、損傷調査とプロファイル測定が同時に行なわれた最初の年が 1997 年である¹¹⁾。

本研究で用いる路面プロファイルを図-4 に示す。図中、参考として、ひび割れが記録される前（1993 年 2 月）およびひび割れが補修される直前（2001 年 11 月）のプロファイルを合わせて示した。なお、プロファイルのサンプリング間隔は、150mm もしくは 152mm であるが、事前処理として線形補間により 150mm に統一した。また、プロファイルの測定延長は、152.4m である。図-4 より各年代でプロファイルの平均的な傾向に大きな違いはないが、年数が経つにつれ、局所的に生じたひび割れが確認できる。また、各プロファイルの PSD を図-5 に示す。図中、破線は、波数の 3 乗の逆数をプロットしたものである。

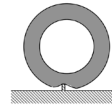
一般に、路面プロファイルはランダム信号であるが、局所的損失のない場合自己相似性を持つため¹⁵⁾、図-5 中の破線のように、両対数軸上で表された PSD において一定の傾きを持つ。図-5 において、1993 年に測定されたプロファイルの PSD は概ね一定の傾きとなっているが、ひび割れが進行するにつれ、高周波成分において、PSD の増加傾向が大きく、自己相似性を失っている。このことから、1997 年および 2001 年に測定されたプロファイルにおいては、ひび割れによる局所的な路面損傷の進行が確認できる。

(2) ひび割れに起因する車両振動評価

一般に、ひび割れは、プロファイル由来の機能的パフォーマンスではなく、舗装の構造的パフォーマンスと関連した損傷である。ひび割れの発生は、将来的な平坦性の低下につながる場合もあるが、ひび割れの幅がタイヤの接地長に比べ十分に狭い場合、車両の振動に必ずしも



(a) 凹型路面形状



(b) 凸型路面形状

図-6 ひび割れおよび段差とタイヤの関係¹⁰⁾

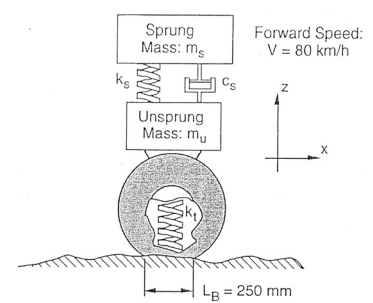


図-7 クォーターカー・シミュレーションモデル¹⁶⁾

影響しない（図-6(a)）¹⁰⁾。しかしながら、損傷が進行した場合、路面形状が段差状となり（図-6(b)）、図-2 のように、車両振動に影響し乗り心地の低下要因となる。本節では、上述の路面プロファイルを用いたクォーターカー（以下、QC）シミュレーションにより、舗装の機能評価上重要な、乗り心地と関連した車両バネ上振動に影響を与えるひび割れ形状を把握する。

a) クォーターカー(QC)シミュレーション

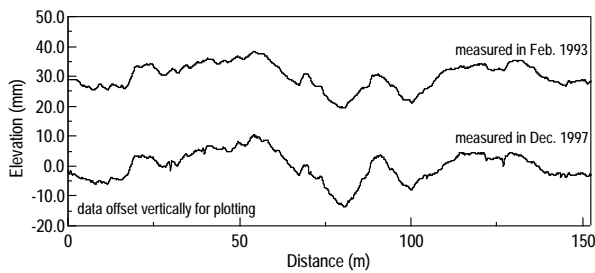
QC モデルとは、図-7 に示す、二軸四輪車の一輪を取り出した、2 自由度の車両運動モデルである¹⁶⁾。QC モデルの特徴として、比較的単純なモデルでありながら、上下振動に関して、一般的な乗用車と同様の応答を持つ。また、平坦性の国際標準指標である国際ラフネス指数（IRI: International Roughness Index）は、ゴールデン・パラメータとよばれる規格化された諸元を有する QC モデルを用い、80km/h で走行した際のサスペンションストローク累積値を、走行延長で正規化した値である。本研究における QC シミュレーションは、IRI 算出時と同様の車両諸元および計算条件¹⁶⁾で行なった。

b) シミュレーション結果

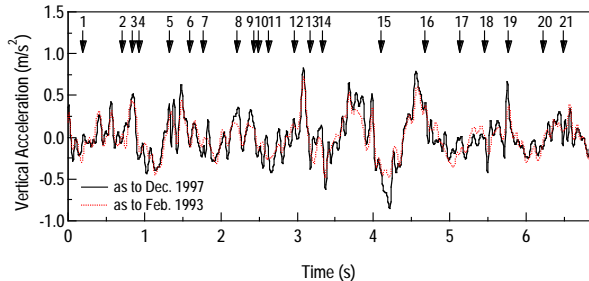
図-8 に、QC シミュレーションから得られたバネ上上下振動加速度を示す。また、図中、比較のために、1993 年に測定されたプロファイルに対するシミュレーション結果を併記するとともに、1997 年に記録されたひび割れ箇所を矢印で示した。図-8 より、ひび割れ箇所およびその近傍でピークを持つ著大振動が生じていることがわかる。そのため、ひび割れには、従来の舗装構造上の評価に加え、路面プロファイルに由来する機能的パフォーマンスと関連した評価が必要であるといえる。

4. 特徴的なひび割れ箇所の特定方法

本章では、特徴的なひび割れ箇所を特定するために、車両振動に影響を及ぼすひび割れのプロファイル形状を



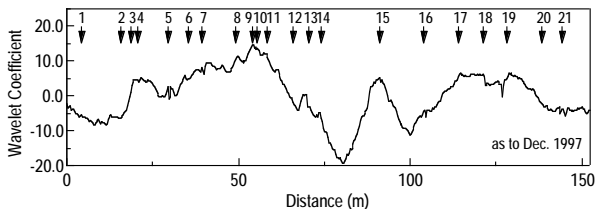
(a) 1997年に測定されたプロフィール



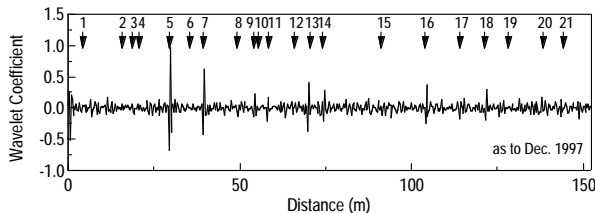
(b) 車両バネ上上下加速度

(矢印は1997年におけるひび割れ箇所)

図-8 クォーターカーシミュレーション結果



(a) 低周波成分 c_m^0



(b) 高周波成分 d_m^0

図-9 初期ウェーブレットフィルタによる1997年測定プロフィールのウェーブレット分解結果 (矢印はひび割れ箇所)

把握し、Lifting Schemeにおける自由パラメータを学習することで、カスタムウェーブレットフィルタの設計を行なう。

(1) 車両振動に影響を及ぼすひび割れの特徴

車両振動に影響を及ぼすひび割れの特徴を検討するため、式(1)および(2)により、初期のウェーブレットフィルタによる、路面プロフィールの低周波および高周波成分を計算する。ここで、双直交WTの場合、計算精度および分解・再構成の簡潔さから、基底関数として3次のスプラインウェーブレットによる構成が有望である¹⁷⁾。そこで、本研究では、初期のウェーブレット基底関数として、3次のスプラインウェーブレットを用いた。

図-9に、初期ウェーブレットフィルタによる、路面プ

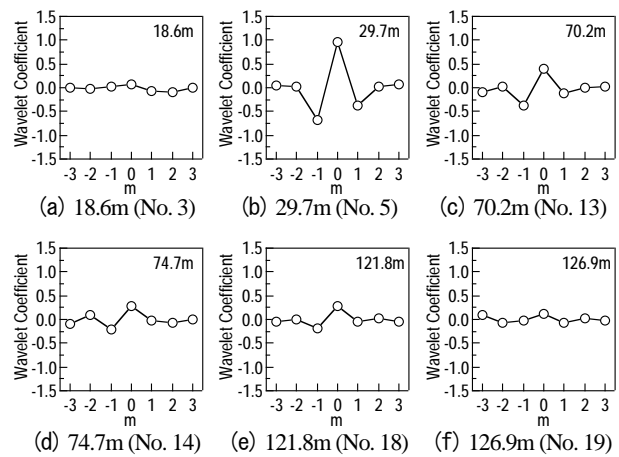


図-10 トレーニング信号とした特徴的なひび割れ箇所

(No.は図-8に対応)

表-1 自由パラメータ $\tilde{s}_{k,m}$ の学習結果

| k | $\tilde{s}_{k,m}$ |
|-------|-------------------|
| $m-3$ | 0.1107 |
| $m-2$ | -0.7866 |
| $m-1$ | 0.9477 |
| m | -0.0056 |
| $m+1$ | -0.1649 |
| $m+2$ | -0.8207 |
| $m+3$ | 0.7195 |

ロファイルの分解結果を示す。図より、ひび割れにより生じた不連続点に反応し、高周波成分に著大なピーク値を持つことがわかる。このように、WTを用いることで、路面プロフィールから非定常な波状特性を有する局所損傷箇所を特定する事が可能である。しかし、図-8と図-9における高周波成分 \hat{d}_m^0 を比較すると、著大振動発生箇所とひび割れによる不連続箇所の対応は不明確である。そこで、車両振動に影響を及ぼすひび割れのうち、上下振動加速度が著大となる6箇所(図-8における、矢印3, 5, 13, 14, 18, 19)をトレーニング信号として抽出した。抽出したトレーニング信号を図-10に示す。図より、車両振動に影響を及ぼすひび割れには、 $m=-1$ で凹状、 $m=0$ で凸状、 $m=1$ で再度凹状となる類似の特徴が確認できる。そこで、この特徴を考慮し、次節では、路面プロフィール上の特徴的なひび割れ箇所を検出するような自由パラメータを学習し、カスタムウェーブレットフィルタを設計する。

(2) カスタムウェーブレットフィルタの設計

本節では、図-10に示したトレーニング信号からLifting Schemeにおける自由パラメータを学習し、車両振動に影響を及ぼす、特徴的なひび割れ形状の検出に適したウェーブレットフィルタを設計する。はじめに、自由パラメータを学習するため、図-4に示す路面プロフィールを c_l^1 とし、式(1)、(2)から \hat{c}_m^0 、 \hat{d}_m^0 を算出する。続いて、図-10

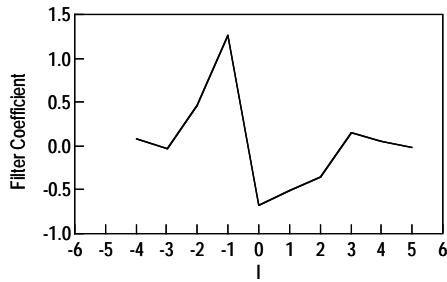
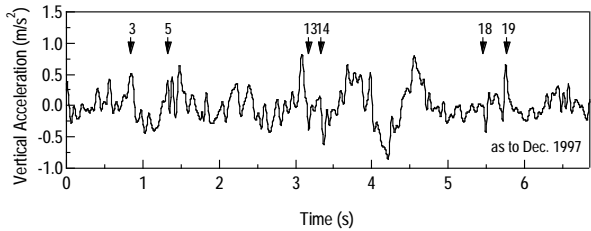
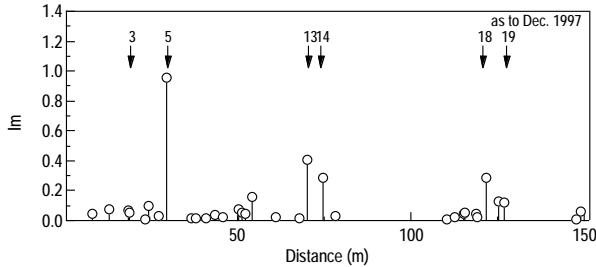


図-11 車両挙動に影響を及ぼすひび割れの検出に適したカスタムウェーブレットフィルタ $\tilde{g}_{m,l}$



(a) 車両バネ上上下加速度



(b) 特徴点抽出結果

図-12 1997年測定プロファイルにおける特徴的なひび割れ箇所の特定結果 (矢印は学習したひび割れ箇所)

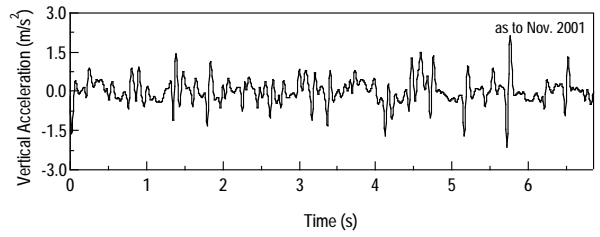
に示す特徴箇所をトレーニング信号 $c_l^{1,v}$ ($v=1,2,3,4,5,6$) とし、式(13)および(16)から、自由パラメータ $\tilde{s}_{k,m}$ を計算する。式(16)を整理すると以下ようになる。

$$\begin{bmatrix} a_{m-3}^1 & a_{m-2}^1 & a_{m-1}^1 & a_m^1 & a_{m+1}^1 & a_{m+2}^1 & a_{m+3}^1 \\ a_{m-3}^2 & a_{m-2}^2 & a_{m-1}^2 & a_m^2 & a_{m+1}^2 & a_{m+2}^2 & a_{m+3}^2 \\ a_{m-3}^3 & a_{m-2}^3 & a_{m-1}^3 & a_m^3 & a_{m+1}^3 & a_{m+2}^3 & a_{m+3}^3 \\ a_{m-3}^4 & a_{m-2}^4 & a_{m-1}^4 & a_m^4 & a_{m+1}^4 & a_{m+2}^4 & a_{m+3}^4 \\ a_{m-3}^5 & a_{m-2}^5 & a_{m-1}^5 & a_m^5 & a_{m+1}^5 & a_{m+2}^5 & a_{m+3}^5 \\ a_{m-3}^6 & a_{m-2}^6 & a_{m-1}^6 & a_m^6 & a_{m+1}^6 & a_{m+2}^6 & a_{m+3}^6 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{s}_{m-3,m} \\ \tilde{s}_{m-2,m} \\ \tilde{s}_{m-1,m} \\ \tilde{s}_{m,m} \\ \tilde{s}_{m+1,m} \\ \tilde{s}_{m+2,m} \\ \tilde{s}_{m+3,m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_m^1 \\ r_m^2 \\ r_m^3 \\ r_m^4 \\ r_m^5 \\ r_m^6 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

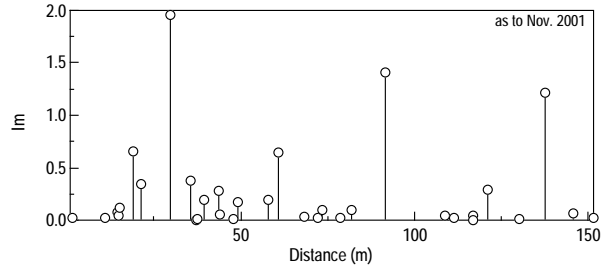
自由パラメータ $\tilde{s}_{k,m}$ の学習結果を表-1 に示す。前述の通り、自由パラメータ $\tilde{s}_{k,m}$ は、特異点における d_m^0 を消失させるよう最適化されている。次に、ここで得られた $\tilde{s}_{k,m}$ を式(6)に代入することで、カスタムウェーブレットフィルタを設計する。設計したカスタムウェーブレットフィルタ $\tilde{g}_{m,l}$ を図-11 に示す。設計したフィルタを用いることで、特徴的なひび割れ箇所を特定することが可能である。

(3) 路面プロファイルにおける特異箇所の特定

前節において、車両振動に影響を及ぼすひび割れの検



(a) 車両バネ上上下加速度



(b) 特異点抽出結果

図-13 2001年測定プロファイルにおけるカスタムウェーブレットフィルタの適応性検証結果

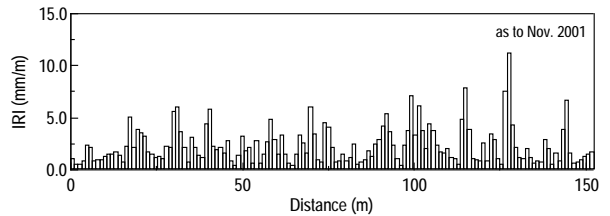


図-14 2001年測定プロファイルのIRI算出結果 (区間長 1m)

出に最適化されたカスタムウェーブレットフィルタを設計した。ここで、特異箇所は、初期のウェーブレットフィルタおよび設計したフィルタを用いて \hat{d}_m^0 と d_m^0 を算出し、式(17)に代入することで特定できる。図-12 に、1997年に測定された路面プロファイルにおける、特異箇所の検出結果を示す。図より、特異点 6 箇所を検出していることがわかる。また、その他のひび割れ箇所も類似の特異点として検出している。なお、ひび割れ 3 における I_m が、他に比べ小さい値となったのは、当該箇所におけるプロファイルの振幅が小さいためであると考えられる。ここで、図-12 と図-8 を比較すると、著大振動発生箇所における I_m が大きくなり、車両振動に影響を及ぼす路面形状だけを、特異点として検出していることが確認できる。一方、注目すべきは、39.6m (図-8 における矢印 7) のように、車両振動への影響が小さい箇所は、検出されない点である。また、図-13 は、設計したカスタムウェーブレットフィルタを、2001年に測定されたプロファイルへ適用した例であるが、自由パラメータを得た 1997 年での結果と同様に、著大振動が発生しているひび割れ箇所において I_m が大きく、特異箇所を検出することができた。一方、図-13(a) の 5.7 秒付近での著大振動箇所は検出されなかった。これは、図-14 に示すように、当該箇所の平坦性が、他のひび割れ箇所に比べ悪いため、車両振動に対し、ひび割れではなく平坦性の与える影響が大きいため

であると考えられる。ただし、このような平坦性低下箇所については、乗り心地の観点から、平坦性水準に基づく路面管理が必要であるため、フィルタの設計において実用上問題ないものといえる。

以上より、Lifting Scheme による特異点検出はひび割れにも有効であることがわかった。また、カスタムウェーブレットフィルタを設計することで、従来の WT では困難であった、路面プロファイルから、車両バネ上振動に影響を及ぼすひび割れ箇所の特定が可能であることを確認できた。

カスタムフィルタの性能は、学習するプロファイル形状に依存するが、本研究では、管理対象路線におけるひび割れデータを蓄積・学習し、路面実態に合わせたフィルタを設計することで、これまででは困難であった、プロファイルデータから損傷箇所が特定できることを示した。一方、特異点検出時の指標である I_m の閾値については、本手法による路面モニタリングデータを蓄積し、舗装の管理目的に応じた設定が必要である。

5. まとめ

道路ストックが急速に老朽化する昨今、車両走行時の快適性や安全性など、利用者視点から、優先的に補修が必要となる箇所を的確に把握することは極めて重要である。ウェーブレット変換 (WT) は、局在するプロファイル波形の位置情報と波数情報を同時に識別できるため、路面の局所損傷解析において有効な手法であるが、マザーウェーブレットとよばれる基本関数の選定方法が課題であった。一方、Lifting Scheme は、任意の基本関数による WT に自由パラメータを付加することで、信号に含まれる特徴的な性質の検出が可能である。本研究では、Lifting Scheme を適用した WT により、車両バネ上振動に影響を及ぼすひび割れ箇所の特定方法について検討した。本研究のまとめを以下に示す。

- (1) 従来、舗装の構造的問題と関連した損傷であるひびわれについて、クォーターカー (QC) シミュレーションにより、機能的パフォーマンスの評価上重要な、乗り心地と関連した車両バネ上振動への影響について検討した。その結果、ひび割れ箇所およびその近傍で著大振動が生じており、路面プロファイルに由来する機能的パフォーマンスと関連した評価が必要であることを示した。
- (2) 路面プロファイルに WT を適用し、車両バネ上振動に影響を及ぼすひび割れには、凹状から凸状にかわり、再度凹状となる特徴的な形状の類似性があることを確認した。また、特徴的な形状を有する箇所を抽出し、Lifting Scheme におけるトレーニング信号と

した。

- (3) 上記のトレーニング信号を用い、Lifting Scheme における自由パラメータを学習し、車両振動に影響を及ぼす、特徴的なひび割れ形状の検出に適したカスタムウェーブレットフィルタを設計した。設計したフィルタを路面プロファイルに適用したところ、車両振動に影響を及ぼすひび割れ箇所を特定できたことから、Lifting Scheme による特異点検出はひび割れにも有効であることがわかった。一方、車両振動に影響しないひび割れ箇所、およびひび割れ箇所の平坦性が低下している箇所については検出されなかった。平坦性の低下箇所については、乗り心地の観点から、平坦性水準に基づく路面管理が必要であるため、フィルタの設計において実用上問題ないものといえる。

以上より、従来の PSD 解析や WT では困難であった、車両振動への影響といった、特定の性質を有する損傷箇所を、路面プロファイルから検出可能であることがわかった。今後、管理対象路線におけるひび割れデータを蓄積し、そのプロファイル形状を学習することで、路面実態に合わせたフィルタを設計するとともに、特異点検出時の指標である I_m について、舗装の管理目的に応じた設定が必要である。

参考文献

- 1) 国土交通省：社会資本整備重点計画，
<http://www.mlit.go.jp/common/000038075.pdf>, 2009.
- 2) 川村 彰：講座・路面の評価(1)-平坦性に着目して-，舗装，Vol.36, No.8, pp.31-35, 2001.
- 3) ISO8608: Mechanical vibration – Road surface profiles – Reporting of measured data, ISO, pp.1-30, 1995.
- 4) Wei, L., and Fwa, T.F.: Characterizing Road Roughness By Wavelet Transform, Transportation Research Record, No. 1869, pp.152-158, 2004.
- 5) Yi, P., Sheng, L., and Yu, L.: Wavelet Transform For Feature Extraction to Improve Volume Adjustment Factors for Rural Roads, Transportation Research Record, No. 1879, pp. 24-29, 2004.
- 6) Shokouhi, P., Gucunski, N., Maher, A., and Zaghoul, S.M.: Wavelet-Based Multiresolution Analysis of Pavement Profiles as a Diagnostic Tool, Transportation Research Record, No. 1940, pp.79-88, 2005.
- 7) Jansen, M., and Oonincx, P.: Second Generation Wavelets and Application, Springer, 2004.
- 8) Takano, T., Minamoto, H., Arimura, K., Nijima, T., Iyemori, T., and Araki, T.: Automatic detection of geomagnetic sudden commencement using lifting wavelet filters, Proceedings of the

- Second International Conference on Discovery Science, pp. 242-251, 1999.
- 9) 川村 彰 : SURF2004 と受賞論文の紹介 -路面評価技術の動向-, 舗装, Vol.39, No.11, pp.24-25, 2004.
 - 10) Sayers, M. W. and Karamihas, S. M. : The Little Book of Profiling, - Basic Information about Measuring and Interpreting Road Profiles, The University of Michigan, 1998.
 - 11) <http://www.ltp-pp-products.com/>, 2012 年 5 月.
 - 12) Mallat, S. A.: Wavelet Tour of Signal Processing, Academic Press, 1999.
 - 13) Elkins, G.E., Schmalzer, P., Thompson, T., Simpson, A., and Ostrom, B.: Long-Term Pavement Performance Information Management System: Pavement Performance Database User Reference Guide, FHWA-RD-03-088, 2010.
 - 14) Von Quintus, H.L., Simpson, A.L., and Eltahan, A.A.: Rehabilitation of Asphalt Concrete Pavements: Initial Evaluation of The SPS-5 Experiment—Final Report, FHWA-RD-01-168, 2006.
 - 15) 川村 彰, 姫野賢治, 藤原 隆, 秋本 隆 : ウェーブレット解析の路面評価問題への適用性について, 舗装工学論文集, 第 2 巻, pp.23-28, 1997.
 - 16) Sayers, M.W.: On the Calculation of IRI from Longitudinal Road Profile, Journal of the Transportation Research Board, No.1501, pp.1-12, 1995.
 - 17) 榑原 進: ウェーブレットビギナーズガイド東京電機大学出版局, 1995.

DETECTING CAUSATIVE PAVEMENT CRACKS IN VEHICLE VIBRATION BY A CUSTOM WAVELET FILTER

Kazuya TOMIYAMA, Akira KAWAMURA and Tateki ISHIDA

Causative pavement cracks in surface bumps require the functional evaluation derived from road profile. This study deals with a detection method of cracks on surface profile that affect vertical vibration of vehicle sprung mass by lifting wavelet filters. Lifting wavelet filters are custom biorthogonal wavelet filters containing free parameters. In this paper, we design a custom wavelet filter for detecting diagnostic cracks. The filter includes free parameters that intend to enhance causative crack characteristics in the vehicle vibration. According to the results of adapting the filter to surface profiles, the locations of cracks inducing the vehicle vibration are identified, while locations that are not related to the vehicle vibration are not detected. Therefore, we conclude that the lifting scheme is an effective method for detecting the cracks that have specific features such as the cause of vehicle vibration.