

(23) クォーターカーアルゴリズムに基づく

路面モニタリングのためのひび割れ損傷箇所の検出

Detecting Locations of Pavement Cracks
for Road Surface Monitoring based on a Quarter-Car Algorithm富山和也¹・川村 彰²・石田 樹³

Kazuya Tomiyama, Akira Kawamura, and Tateki Ishida

抄録: 舗装の維持管理上、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。本研究では、舗装路面のひび割れについて、クォーターカー (QC) アルゴリズムに基づき、機能的側面から評価が必要な損傷箇所の検出方法を、ウェーブレット理論を用いて検討した。その結果、Lifting Scheme により、QC フィルタ適用後のプロファイルから、機能評価上重要なひび割れ損傷箇所およびその類似箇所が検出できることを確認した。本手法は、車両振動応答に基づく路面モニタリングの高効率化に寄与するものと期待できる。一方、特異点検出時の閾値については、路面モニタリングデータを蓄積するとともに、舗装の管理目的に応じた設定が必要である。

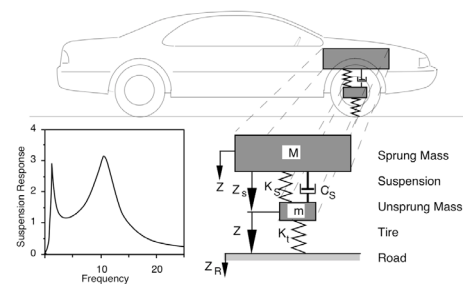
キーワード: ひび割れ、機能評価、クォーターカー、ウェーブレット変換、路面モニタリング

Keywords : pavement crack, functional evaluation, quarter car, wavelet transform, road surface monitoring

1. はじめに

舗装の維持管理には、定量的な路面モニタリング結果に基づき、優先的に補修が必要となる箇所を的確に把握・評価することが必要である。現在、主な路面モニタリングは、レーザ変位計などを使用した路面性状測定車などにより行なわれているが、導入コストの高さや運用時の利便性の低さから、高速道路など比較的高クラスの道路での運用に限られている。そのため、近年では、車両の振動応答に基づき、道路利用者の安全性や快適性に影響を及ぼす、路面平坦性の測定が可能な、簡易型の路面モニタリングシステムが開発されている¹⁻³⁾。特にこれらのシステムでは、RTRMS (Response Type Road Roughness Measuring System) に代表されるよう、世界的に標準の平坦性指標である国際ラフネス指数 (IRI: International Roughness Index) の算定を指向したものが多い。

本研究は、IRI の計算に用いられるクォーターカー (以下、「QC」とする) アルゴリズムを用い、路面に生じた特異なひび割れ箇所の検出方法について検討する。一般に、ひび割れは車両挙動に影響を及ぼさないとされ⁴⁾、舗装の耐久性など、構造的な視点に基づき管理されていた。しかし、横断クラックのように、損傷の進行状況によっては段差状となり、ひび割れに直交して走行する車両に著大な振動を生じさせ、乗り心

図-1 QCモデル⁴⁾

地の低下を招く。そこで、本研究では、QC アルゴリズムに基づき、機能評価が必要なひび割れ損傷箇所について、ウェーブレット理論による検出を試みる。

2. QC アルゴリズムによる路面モニタリング理論

(1) QC モデルの概要

QC モデルとは、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⁴⁾。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、車両上下振動に関して、一般的な乗用車と同様の応答を持つ。また、IRI 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。図-1 に QC モデルの概

1 : 正会員 博(工) 北見工業大学 研究員 応用研究推進センター

(〒090-8507 北海道北見市公園町 165 番地, Tel: 0157-26-9429, E-mail: tomiyaka@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)

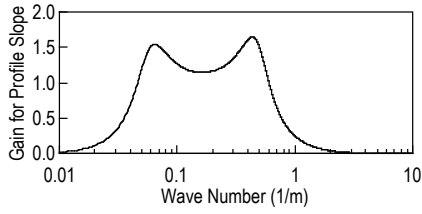


図-2 QC フィルタ

要を示す。近年では、QC モデルを道路パトロールカーなどの車両に実装し路面凹凸を測定する、簡易路面平坦性測定装置が開発されている³⁾。そのため、QC アルゴリズムを用い、損傷箇所を特定することは、今後の効率的な路面モニタリングに寄与するものと考えられる。

(2) QC フィルタ

ここで、IRI 算出のための QC アルゴリズムは、波長 0.1~100m の間で重み付けする、図-2 の QC フィルタと呼ばれる一種のバンドパス・フィルタとして作用する。フィルタ適用後のプロファイルは、車両乗り心地や動的荷重と関連し、IRI と同様に勾配の単位 (mm/m や m/km) を持つ。そこで、本研究では、IRI の算出過程において計算可能な、QC フィルタ適用後のプロファイル (以下、「QC プロファイル」とする) から、ひび割れによる損傷箇所の検出を行う。

3. ウェーブレット理論による特異損傷箇所の検出

(1) ウェーブレットの概要

ウェーブレット変換 (以下、「WT」とする) 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。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⁵⁾。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検出する方法が提案されており⁶⁾、路面評価への適応性も期待

されている⁷⁾。そこで、本研究では、Lifting Scheme により、ひび割れに起因する、QC プロファイル上の特異箇所を検出する。

(2) Lifting Scheme による特異点の検出方法

a) ウェーブレット分解アルゴリズム^{5), 6)}

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、

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

とおくと、これらのフィルタ組 $\{h_{k,l}^{old}, \tilde{h}_{k,l}^{old}, g_{k,l}^{old}, \tilde{g}_{k,l}^{old}\}$ 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。

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

b) リフティングウェーブレットフィルタ^{5), 6)}

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 $\{h_{k,l}^{old}, \tilde{h}_{k,l}^{old}, g_{k,l}^{old}, \tilde{g}_{k,l}^{old}\}$ 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。

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

c) 自由パラメータの学習方法⁶⁾

上記(6)式より，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，(6)式の $\tilde{g}_{m,l}$ を代入し，

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

が得られる．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．ここで，信号の基本特性を知るため，(9)式の高周波成分 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 $c_l^{1,v}$ ($v=1,2,\dots,2n$)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．

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

ここで，

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

である．なお，(12)式における数式が $2n$ 個であるのに対して，未知の $\tilde{s}_{k,m}$ が $2n+1$ 個あるが， $\sum_l \tilde{g}_{m,l} = 0$ 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，(12)，(15)式より，

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

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

d) 特異点の検出理論⁶⁾

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

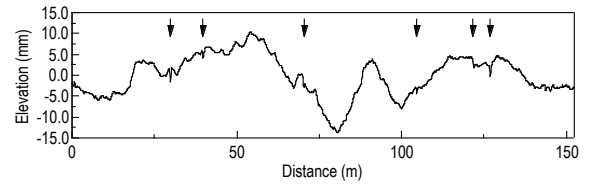


図-3 解析対象プロファイル

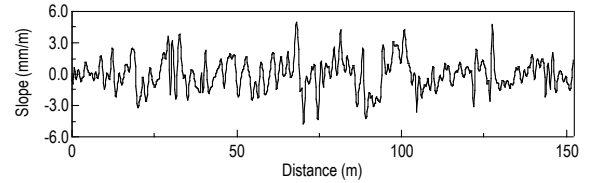


図-4 QC アルゴリズム適用後のプロファイル

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とに着目する．そこで，(17)式により， 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．

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

4. QC アルゴリズムを用いた特異損傷箇所検出

本章では，QC モデルに影響を及ぼし，機能的側面から管理が必要なひび割れ損傷箇所について，Lifting Scheme による検出方法について検討する．

(1) 解析対象プロファイル

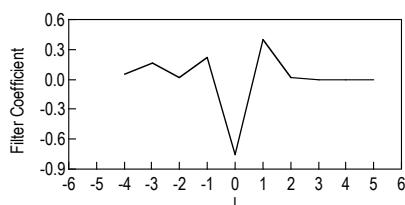
解析対象プロファイルは，米国 LTPP (Long Term Pavement Performance) データベース⁸⁾における Specific Pavement Studies (SPS) から，ひび割れ損傷の顕著な Arizona (State Code: 04) の試験区間 9 (Section ID: 04-0509) において，1997 年 12 月に測定されたものである．1997 年には 2 月と 12 月の 2 度プロファイルの測定が行なわれているが，損傷調査が同年 11 月に行なわれていることから，後者のデータを用いた．図-3 に解析プロファイルを示す．図より，局所的にひび割れによる損傷が生じていることがわかる．図中，矢印は，後述の自由パラメータの学習箇所である．

(2) QC アルゴリズム適用と自由パラメータの学習

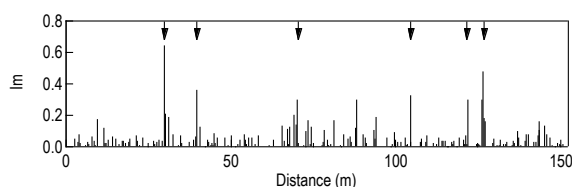
解析対象プロファイルに対する，QC アルゴリズムの適用結果(QC プロファイル)を図-4 に示す．図より，ひび割れにより損傷が発生した箇所の特定は困

表－１ 自由パラメータ $\tilde{s}_{k,m}$ の学習結果

k	$\tilde{s}_{k,m}$
$m-3$	-0.1111
$m-2$	0.1314
$m-1$	-0.0023
m	0.0391
$m+1$	-0.1426
$m+2$	0.1092
$m+3$	-0.0237



図－５ 設計したカスタムウェーブレットフィルタ



図－６ 機能評価が必要な損傷箇所の検出結果

難であることがわかる。そこで、図－３における矢印位置の形状を学習することで、Lifting Schemeにより、QC プロファイルからひび割れ発生箇所を検出するための、リフティングウェーブレットフィルタを設計する。図－４のQC プロファイルを c_i^1 、 $v=6$ とし、(16)式により求めた自由パラメータを表－１に示す。次に、ここで得られた $\tilde{s}_{k,m}$ を(6)式に代入することで、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－５に示す。設計したフィルタを用いることで、QC プロファイルからひび割れ箇所を特定することが可能である。なお、本研究では、初期のウェーブレット基底関数として、計算精度および分解・再構成の簡潔さから⁹⁾、3 次のスプラインウェーブレットを用いた。

(３) QC プロファイルにおけるひび割れ箇所の検出

前述の Lifting Scheme によるカスタムウェーブレットフィルタを用いた、機能評価が必要な損傷発生箇所の検出結果を図－６に示す。図中、矢印は、自由パラメータを学習した、特異なひび割れが生じている箇所である。図より、学習したひび割れ発生箇所およびその類似箇所が強調されていることがわかる。ここで、類似箇所とは、距離 88.2m の様に、ひび割れは生じていないが、ひび割れによる段差と同様の形状であることから、路面管理上注意を要する点である。

以上より、Lifting Scheme によりカスタムウェーブレットフィルタを設計することで、QC プロファイルにおいて、機能的側面から管理が必要な、ひび割れ損傷

箇所を検出できることが確認できた。本手法を用いることで、車両振動応答に基づく簡易型の装置を用いた路面モニタリングの効率を高めることができるものと期待できる。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。本研究では、従来、構造的な視点から管理されていた舗装路面のひび割れについて、QC アルゴリズムに基づき、機能的側面から評価が必要な損傷箇所の検出方法について、ウェーブレット理論を用いた検討を行なった。その結果、Lifting Scheme により、カスタムウェーブレットフィルタを設計することで、QC プロファイルから、機能評価上重要なひび割れ損傷箇所およびその類似箇所を検出できることが確認できた。本研究成果は、車両振動応答に基づく簡易型の装置を用いた路面モニタリングの高効率化に貢献するものと期待できる。一方、特異点検出時の閾値については、本手法による路面モニタリングデータを蓄積するとともに、舗装の管理目的に応じた設定が必要であることを示した。

参考文献

- 1) 城本政一, 川村 彰, 坂田光児, 中島繁則: IRI 測定装置の一般道への適用に関する検討, 土木学会年次学術講演会概要集, Vol.66, V-405, pp.809-810 (CD-ROM), 2011.
- 2) 遠藤哲雄, 鬼倉一展, 金井利浩: 多機能路面測定システムの標準化に関する検討(その 2)―路面の段差量の推定方法の考案―, 土木学会年次学術講演会概要集, Vol.66, V-407, pp.813-814 (CD-ROM), 2011.
- 3) Tomiyama, K., Kawamura, A., Nakajima, S., Ishida, T., and Jomoto, M.: A Mobile Data Collection System Using Accelerometers for Pavement Maintenance and Rehabilitation, Proceedings of 8th International Conference on Managing Pavement Assets, Paper No. 142 (CD-ROM), 2011.
- 4) 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.
- 5) Jansen, M., and Oonincx, P.: Second Generation Wavelets and Application, Springer, 2004.
- 6) 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.
- 7) 川村 彰: SURF2004 と受賞論文の紹介 一路面評価技術の動向―, 舗装, Vol.39, No.11, pp.24-25, 2004.
- 8) iENGINEERING Corporation: LTPP Products Online, <<http://www.ltp-pp-products.com>>, (アクセス 2012.5.).
- 9) 榎原 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.