地方自治体の舗装維持管理実態を考慮した 市街地道路の効果的な路面点検手法の開発

富山和也¹・川村 彰²・藤田 旬³・石田 樹⁴

¹正会員 博士(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 博士(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)

E-mail : kawamuak@mail.kitami-it.ac.jp

³学生員 北見工業大学大学院工学研究科 社会環境工学専攻(〒090-8507 北海道北見市公園町165番地)

E-mail : m1352200111@std.kitami-it.ac.jp

⁴正会員 博士(工) (独) 土木研究所寒地土木研究所(〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸1条3丁目)

E-mail : t-ishida@ceri.go.jp

本研究は、地方自治体における舗装維持管理実態を整理し、その結果を基に効果的な路面点検手法について検討したものである。管理実態調査の結果、地方自治体では、高頻度に道路パトロールを実施しており、段差やポットホールなど局在する路面損傷を重視しているが、路面損傷の定量的な測定が課題となっていることがわかった。そこで、本研究では、加速度センサを用いた簡易路面平坦性測定装置を導入し、その測定結果にリフティングスキームに基づき設計したリフティングウェーブレットフィルタを適用することで、特徴的な路面損傷の検出方法を開発した。本手法は、路面情報の効率的な処理に基づき、損傷検出を自動化できるため、市街地道路における効果的な路面点検に貢献するものと期待できる。

Key Words: surface distress, local government, pavement management system, monitoring, lifting scheme, wavelet

1. はじめに

急激な社会資本の老朽化が進む昨今、舗装マネジメントシステム（以下、「PMS」とする）は、道路ネットワークにおける維持・修繕の必要性や優先順位の決定において有力なツールとなる。PMSにおいて、舗装の供用性能を定量的に把握することは極めて重要であるが^{1),2)}、舗装供用性能のうち、利用者評価に直結するのは、舗装の機能と関連したサービス性能であり、ラフネス(平坦性)に大きく影響される³⁾。

舗装の供用性能評価の概念は、1955年に米国で実施されたAASHO道路試験に始まり⁴⁾、特にラフネスと関係した車両の乗り心地が重要視されている⁵⁾。今日、我が国においても、国土交通省が発表した道路ストックの総点検実施要領(案)において、平坦性の評価には乗り心地と関連したIRI(International Roughness Index: 国際ラフネス指数)が導入されている。

PMSを効果的に稼働させ、道路ネットワークにおける路面状態をデータベース化し、将来的な劣化予

測をするためには、路面性状データの定量的かつ高頻度なモニタリングが必要である。しかし、日本の道路総延長の90%以上を管理する多くの地方自治体では、管理者の目視による路面点検が主流であり、定量的なモニタリングは行なわれていない。

一方、近年では、道路センシング技術の発達により、車両の振動応答に基づき平坦性の測定が可能で、簡易型の路面モニタリングシステムが開発されている⁶⁾⁻⁸⁾。特にこれらのシステムでは、RTRRMS(Response Type Road Roughness Measuring System)に代表されるように、クォーターカー（以下、「QC」とする）モデルを採用し、IRIの算定を指向したものが多い。

本研究の目的は、地方自治体に対して実施した道路舗装の維持管理実態調査結果に基づく、(1)地方自治体がPMSを導入するにあたっての課題の整理および、(2)加速度センサを用いた簡易路面平坦性測定装置(Mobile Profilometer: 以下、「MPM」とする)による市街地道路の効果的な路面点検手法の開発である。特に、本研究では、地方自治体の路面管理実態を考慮し、MPMを用いた特徴的な路面損傷箇所

表-1 舗装維持管理実態調査概要

大項目	設問の狙い
道路管理データ	自治体が保有する道路舗装に関する情報の現状
予算制度・組織	舗装維持管理の予算制度、予算推移、組織体制
舗装維持管理の現状	作業内容、維持修繕判断基準、舗装劣化の重要度、苦情の状況
道路管理者の意識	現状の維持管理手法への問題意識、改善の必要性

図-1 道路管理データの保有状況

の特定方法について検討する。

路面損傷箇所の特定期には、解析対象波形の定常性を仮定する必要がなく、局在する損傷の位置情報と波数（空間周波数）情報の同時識別が可能で、ウェーブレット変換が有望である⁹⁾。今日、ウェーブレット変換は、路面の局所損傷解析への有効性が認識されており、路面データの分析においても多くの適用事例が報告されている¹⁰⁾⁻¹²⁾。また、既存のウェーブレット変換に対し、波形の特徴を学習した上で分解および再構成が可能な、リフティングスキームが開発されている¹³⁾。本研究では、加速度センサを用いたセンシング技術に、リフティングスキームによる情報処理を応用することで、損傷検出を自動化した、効率的な路面点検手法を目指す。

2. 地方自治体における舗装維持管理実態調査

(1) アンケートによる実態調査

実態調査は、2008年に北海道内の人口1万人以上（2007年当時）を有する64自治体を対象に、舗装維持管理の現状と課題に関するアンケートおよびヒアリングにより実施した。アンケートは、WEBサイトを通じて行い、27自治体から回答が得られ、回答率は41.5%であった。アンケートの概要を表-1に、以下に、各項目ごとの調査結果を示す。

図-2 道路パトロール頻度

図-3 重視する路面損傷

図-4 維持修繕の判断基準

a) 道路管理データの現状

道路管理データの保有状況を図-1に示す。図より、道路関連データは、延長と幅員が主であり、路面性状（ひび割れ、わだち掘れ、平坦性）データを保有するのは3自治体のみであった。

b) 予算制度・組織体制

道路関係予算は、1997年度から10年間で半分以下に減少しており、道路管理予算のうち、除雪費用が相対的に大きな割合を占めている。技術職員数は概ね人口1万人当たり1人であり、管理延長100km当たり1人程度の体制となる。

c) 舗装維持管理の現状

図-2に道路パトロールの頻度を示す。図より、8割以上の自治体が、緊急対応を要する箇所の把握を目的に、週1回以上の道路パトロールを実施している。しかし、路面性状データ取得のための定量測定は実施されておらず、維持修繕実施の判断は、目視により行なわれている。なお、図-3より、最も重視

図-5 舗装維持管理上の問題点

図-6 舗装維持管理に対する道路管理者意識

される舗装損傷形態は、段差およびポットホールなど局在損傷であることがわかる。また、維持修繕は、半数の自治体において決まった判断基準がなく、8割近くの自治体が、住民の苦情や、路面の劣化度合に応じ、道路パトロール担当者の判断で行なっている（図-4）。

d) 道路管理者の意識

図-5より予算不足が最大の懸念となっている。また、図-6に示す管理者意識より、1/3強の自治体が、対処的管理方法を早急に改善したいと考えている。

(2) ヒアリング調査

アンケート調査結果のうち、舗装マネジメントに取り組んでいると回答した自治体A、および特別な取り組みは行っておらず一般的な意識をもつ自治体Bに対しては、舗装維持管理の道路管理担当者から、その実態についてヒアリングを行なった。その結果を以下に示す。

a) 自治体A

財務当局ならびに納税者に対する説明責任の観点から、MCI（維持管理指数）で優先順位付けし、PSI（供用性指数）で補修工法を選定するシステムを考案し、5ヵ年毎に舗装維持計画を策定している。路面性状調査は5年に一度、管轄路線全線を対象に、独自に開発した評価チャートに従い、目視により実施している。しかし、調査員の大半が事務職員であること、ならびに目視点検の精度が課題となっている。

b) 自治体B

技術職員1名が道路管理業務全般を所掌している。そのため、自治体が行なう道路パトロールの他に、バスやタクシー等にパトロール機能の代行を依頼している。舗装の維持・修繕作業は、直営によるポットホール補修が主であるが、今後5年以内に、直営作業を行う臨時職員が半減することが懸念されている。また、農産物を輸送する重交通によるわだち掘れが顕著となっているが、予算制約上、大規模な補修が困難である。

(3) 地方自治体の舗装維持管理に関する課題の整理

以上の調査結果を基に、地方自治体が抱える舗装維持管理上の課題をPMSの観点に基づき整理すると以下の通りである。

- 財政的/人的制約：新たな維持管理の仕組み作りを行う余裕がない。
- データの不備/不足：PMSの基礎となる路面性状の定量的な情報を持っていない。
- 工学的知識/技術力の不足：問題意識はあるものの、改善に向けた工学的かつ具体的な方法がわからない。
- 手法の問題：既存PMSは、比較的高いクラスの道路が対象であり、地方自治体にとって必ずしも適切ではない。

特に、厳しい財政的・人的制約下で、PMSを稼働させるための重要な要素である、路面性状に関する定量的な点検手法に深刻な問題を抱えているといえる。そこで、次章では、加速度センサを用いたMPMによる、市街地道路の効果的な路面点検手法について検討する。

3. 簡易路面平坦性測定装置(MPM)を用いたモニタリング原理

地方自治体における舗装維持管理の現状調査から、8割以上の自治体が週1回以上の道路パトロールを実施しているが、定量的な路面点検手法が課題となっていることが明らかとなった。本章では、従来のレーザー変位計や水準測量による路面測定に比べ、経済的に導入でき効率的運用が可能な、加速度センサを用いたMPMによる路面モニタリングについて述べる。

(1) MPMの概要

本研究で用いたMPMは、任意の車両のバネ上お

図-7 簡易路面平坦性測定装置(MPM)によるモニタリング原理

図-8 QCフィルタの応答

よびバネ下に設置した2つの加速度センサから得られた上下加速度について、車種および车速依存成分を除去した後、逆解析により路面プロファイルを測定し、プロファイルを基にIRIなどの平坦性指標を算出する装置である。MPMの平坦性測定原理は、2つの加速度センサにより、実車両上でQCを再現するため、IRIの算出原理に忠実である。また、路面プロファイルを基に平坦性指標を算出することから、プロファイルとしてはASTM Internationalが規定する分類¹⁴⁾上、Class 2と同等の精度を有する。一方、加速度センサによる簡便な測定方式のため、Class 3と同等の利便性で運用可能である。MPMによる路面モニタリング原理を図-7に示す。なお、筆者らは、本研究で用いたMPMについて、Class 2と同等の測定精度を有することを確認している⁸⁾。

(2) ラフネスプロファイルの算出

ここで、IRIの算出原理は、波長0.1~100mの間で重み付けする、QCフィルタと呼ばれ、図-8に示す応答をもつバンドパスフィルタとして作用する。図-8に示すフィルタ応答は、路面プロファイル上を走行したQCモデルの応答と等価であり、2つのピークはバネ上とバネ下の共振域に対応する。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、ラフネスプロファイルと称され、絶対値を累積し走行延長で正規化することでIRIを算出できる。そのため、ラフネスプロファイルは、IRIと同様に勾配の単位 (mm/mやm/km) を持つ。IRIの算出過程で計算されるラフネスプロファイルから、

所要の路面損傷箇所を特定することは、路面モニタリング上、非常に効率的である。そこで、本研究では、MPMから得られるラフネスプロファイルに対し、リフティングスキームを適用することで、路面管理上重要なラフネスプロファイルの特徴を学習し、当該箇所を特定する方法について検討する。

4. リフティングスキームによる損傷検出理論

(1) ウェーブレット変換の概要

ウェーブレット変換は、離散および連続変換が可能である。前者は、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。そのため、離散ウェーブレット変換では、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¹⁵⁾。

(2) リフティングスキーム

離散および連続にかかわらず、ウェーブレット変換の結果は、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、ウェーブレット変換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、既存の離散変換に対し、リフティングスキームにより、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となった^{13),16)}。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 (LWF: Lifting Wavelet Filter) を用いることで、信号に含まれる特異形状を検出する方法が提案されて

おり¹⁷⁾, 路面評価への適応性も期待されている¹⁸⁾.
 リフティングスキームによる, ラフネスプロファイル上の特徴箇所の学習および特定方法は以下の通りである.

a) ウェーブレット分解アルゴリズム^{13),16),17)}

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.

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

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

$\tilde{\lambda}_m$ 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 $\hat{c}_m^0$ および高周波成分 $\hat{d}_m^0$ 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 $\{h_{k,l}^{old}, \tilde{h}_{k,l}^{old}, g_{m,l}^{old}, \tilde{g}_{m,l}^{old}\}$ 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.

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

ここで,

$\hat{c}_m^0$: 低周波成分

$\hat{d}_m^0$: 高周波成分

l : 解像度 (周波数) パラメータ

k : 位置パラメータ (低周波成分)

m : 位置パラメータ (高周波成分)

である. なお, 上付きの数字は, 解像度が一段階下がった事をあらわすため, 便宜上, 入力信号を1, 分解信号を0とする. また, チルダは分解側の操作を, ハットは, 分解された信号を表す.

b) LWFの設計方法^{13),16),17)}

LWF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 $\{h_{k,l}, \tilde{h}_{k,l}, g_{m,l}, \tilde{g}_{m,l}\}$ で構成される.

$$h_{k,l} = h_{k,l}^{old} + \sum_m \tilde{s}_{k,m} g_{m,l}^{old}$$

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

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.

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

なお, オリジナルのフィルタと新しいフィルタを区別するため, 前者に old を付記した.

c) 自由パラメータの学習方法¹⁶⁾

上記の式(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, 信号の新しい高周波成分を考えると, 以下のようになる.

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

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, 初期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. 高周波成分は, 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, 検出したい路面損傷形状を含む $2n$ 個のトレーニング信号($v=1,2,\dots,2n$)を用意する. トレーニング信号は, ひび割れやパッチング, ポットホールなど, 管理目的に合わせて, 検出したい路面プロファイル形

図-9 ラフネスプロファイルの測定結果

状を予め準備する．次に，各トレーニング信号に対し，以下の条件を課す．

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

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．一方，式(12)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 $2n+1$ ある．しかし，フィルタの設計条件より $\sum_l \tilde{g}_{m,l} = 0$ 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，この連立一次方程式を解くことで $\tilde{s}_{k,m}$ が算出できる．

d) 特徴箇所の特定理論¹⁶⁾

リフティングスキームによる損傷箇所の特定は，はじめに，解析対象の信号から，新旧のハイパスウェーブレットフィルタ $\tilde{g}_{m,l}$ ， $\tilde{g}_{m,l}^{old}$ を用いて，高周波成分 d_m^0 および $\hat{d}_m^0$ を計算する．ここで， $\tilde{g}_{m,l}$ における自由パラメータ $\tilde{s}_{k,m}$ が，損傷箇所における 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，以下の式(17)により，類似度 $I_m > 0$ となる距離 m により損傷箇所を特定することができる．即ち，

表-2 初期ウェーブレットフィルタ

k, m	$h_{k,l}^{old}$	$\tilde{h}_{k,l}^{old}$	$g_{m,l}^{old}$	$\tilde{g}_{m,l}^{old}$
0	0.7071	0.9944	-0.9944	-0.7071
1, -1	0.3536	0.4198	0.4198	0.3536
2, -2	-	-0.1768	0.1768	-
3, -3	-	-0.0663	-0.0663	-
4, -4	-	0.0331	-0.0331	-

損傷箇所以外では，理論上 $\hat{d}_m^0$ と d_m^0 が等しくなるため I_m が0となるが，損傷箇所において 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．

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

5. MPMを用いた市街地道路の路面点検におけるリフティングスキームの適用

本章では，代表的な路面損傷である横断ひび割れに着目し，MPMを用いた路面点検データから，LWFによる特徴箇所の検出を試みる．横断ひび割れは，低温を原因とする場合が多く，特に寒冷地域においては極めて重要な損傷要因となる．

(1) 路面モニタリングデータ

横断ひび割れのラフネスプロファイルデータは，2013年3月に北海道内の市街地道路において，MPMを用いて測定した．測定結果を図-9に示す．図中，矢印は，特徴点として抽出した，後述の学習箇所である．なお，ラフネスプロファイルのサンプリング間隔は0.1mである．図より，当該区間は，連続して横断ひび割れが発生しているため，局所的な著大波形が頻繁に発生しているのが確認できる．

(2) LWFの設計

a) 初期ウェーブレットフィルタ

従来のウェーブレット変換結果は，マザーウェーブレットの性質に大きく依存する．リフティングスキームにおいて，LWFは，任意のウェーブレットフィルタから構成可能であるが，本研究では，初期ウェーブレットフィルタとして，再構成および分解に用いるフィルタ長と関連するバニシングモーメントが2および4の双直交スプラインウェーブレットを用いた．このウェーブレットフィルタは，比較的短い次数であり，鋭いピークを持つ基本関数で構成されるため，ひび割れのような局在する路面損傷箇所の特定に適するものといえる．初期ウェーブレットフィルタ $\{h_{k,l}^{old}, \tilde{h}_{k,l}^{old}, g_{m,l}^{old}, \tilde{g}_{m,l}^{old}\}$ を表-2に示す．

図-10 測定したラフネスプロファイルの連続ウェーブレット変換結果

(a) トレーニング箇所 (b) 非トレーニング箇所

図-11 トレーニング箇所の損傷状況例

b) トレーニング信号

自由パラメータの学習に資するトレーニング信号を準備するため、はじめに、連続ウェーブレット変換による、ラフネスプロファイル測定結果の空間周波数分析を行なった。ウェーブレットの連続変換は、離散変換に比べ、計算効率は劣るが、スカログラム (Scalogram) と呼ばれる三次元表示により、空間周波数情報と位置情報を視覚的に把握することができる¹⁵⁾。ここで、位置 u 、スケール s における距離 x の関数 $f(x)$ の連続ウェーブレット変換は次式で与えられる。

$$Wf(u, s) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \frac{1}{\sqrt{s}} \psi^* \left(\frac{x-u}{s} \right) dx \quad (18)$$

式中、 $*$ は共役複素を表す。また、ザーウェーブレット $\psi(x)$ は、表-2のスプラインウェーブレットである。

測定したラフネスプロファイルの連続ウェーブレット変換結果を図-10に示す。図中、市街地道路の常用速度(40~60km/h)における、一般的な乗用車のバネ上およびバネ下固有振動数と対応する波数範囲を合わせて示した。ここで、ウェーブレット係数は絶対値表示であり、ラフネスプロファイルの振幅スペクトルに相当する。

図-10より、距離10~70m区間での、ひび割れを

図-12 トレーニング信号

表-3 自由パラメータの学習結果

k	$\tilde{s}_{k,m}$
$m-2$	-0.4261
$m-1$	0.7487
m	-0.1172
$m+1$	-0.0281
$m+2$	-0.1772

原因とする局所波形のように、一見して空間領域では同様の傾向であっても、空間周波数平面では、特徴が異なることがわかる。ここで、横断ひび割れの空間周波数特性は、常用速度における、バネ下固有振動数と対応した波長の卓越が顕著であるが、距離10, 25, 100, 130mでは、バネ下に加え、バネ上固有振動数と対応した波長成分への寄与も大きく、2つのピークが生じている。特に、車両のバネ上振動は、乗員の快適性に直結するため、本研究では、当該ひび割れ4箇所をトレーニング信号とした。図-11に、トレーニング箇所と非トレーニング箇所における損傷状況の例を示す。図より、損傷形状に大きな違いはなく、目視では、空間周波数特性上の違いが識別困難であることがわかる。

c) 自由パラメータの学習とフィルタの設計

LWFは、図-9に矢印で示した損傷箇所をトレーニング信号に用いて自由パラメータを学習し、初期ウェーブレットフィルタに付加することで設計する。自由パラメータの学習は、初期の離散ウェーブレット変換による多重解像度解析において、高周波(詳細)成分が、市街地道路の常用速度における、一般的な乗用車のバネ上およびバネ下固有振動数と対応する路面波長(通過波数: 0.625~1.25m(1/m))を含む、分解レベル3から学習した。ここで、分解レベル3とは、式(1)および(2)で示される操作を、3回繰り返して行なった状態を表す。図-12に、自由パラメータの学習に用いたトレーニング信号を示す。また、自由パラメータの学習結果を表-3に示す。前述の通り、自由パラメータは、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。

ここで得られた自由パラメータ $\tilde{s}_{k,m}$ を、式(6)に代入することで、 $LWF\{h_{k,l}, \tilde{h}_{k,l}, g_{m,l}, \tilde{g}_{m,l}\}$ が設計できる。自由パラメータを用いて更新された新しい高周

図-13 LWFによる損傷検出結果

表-4 リフティングウェーブレットフィルタ (LWF)

k, m	High Frequency	Low Frequency
	Decomposition $\tilde{g}_{m,l}$	Reconstruction $h_{k,l}$
-4	0.2639	0.2639
-3	0.0989	-0.0989
-2	0.3047	0.3047
-1	-0.6287	0.6287
0	0.5287	0.5287
1	0.0725	-0.0725
2	-0.0304	-0.0304
3	-0.0117	0.0117
4	0.0059	0.0059

波分解フィルタ $\tilde{g}_{m,l}$ および低周波再構成フィルタ $h_{k,l}$ を表-4に示す。

(3) 路面損傷箇所の特定期間

前節までに、横断ひび割れに着目し、特徴的な路面損傷形状に最適化したLWFを設計した。損傷箇所は、式(17)より初期ウェーブレットフィルタおよびLWFを用いて $\hat{d}_m^0$ と d_m^0 を算出し、類似度 $I_m > 0$ となる距離 m により特定できる。ここで、式(9)を式(17)に代入すると、 I_m は以下のように書き換えられる。

$$I_m = \left| \hat{d}_m^0 - \left| r_m - \sum_k a_k \tilde{s}_{k,m} \right| \right| \quad (19)$$

上式より、実用上、損傷箇所の特定期間に資する類似度 I_m の計算は、初期ウェーブレットフィルタおよび自由パラメータを用いた計算も可能である。

図-13に、設計したLWFによる横断ひび割れの検出結果を示す。図中、矢印は自由パラメータの学習箇所である。なお、類似度 I_m は最大値が1となるよう正規化した。図より、学習したひび割れ発生箇所が強調されており、目視点検では困難な空間周波数特性の違いを識別した上で、局在する路面損傷の検出が可能であることがわかる。ここで、特徴点検出時の指標である I_m の閾値については、舗装の管理目的に応じた設定が必要である。なお、LWFの特性は、学習するトレーニング信号に依存するが、高頻度に行なわれている道路パトロール時に、MPMを用いて損傷データを蓄積し、路面実態に合わせたフィルタを設計することで、その性能を高めることができる。以上から、MPMの測定結果にリフティングスキームを適用することで、路面測定データの効

率的な情報処理、およびデータ処理結果に基づく損傷検出の自動化により、市街地道路における効果的な路面点検に貢献することが期待できる。

6. まとめ

本研究では、地方自治体における舗装維持管理実態を整理するとともに、効果的な路面点検手法について検討した。その結果、地方自治体においては、高頻度に道路パトロールを実施しており、段差やポットホール、ひび割れなど局在する路面損傷を重視しているが、それら路面性状データの定量的な測定が課題となっていることがわかった。そこで、本研究では、加速度センサを用いた簡易路面平坦性測定装置(MPM)を導入し、MPMの測定結果にリフティングスキームに基づき設計したリフティングウェーブレットフィルタ(LWF)を適用した、特徴的な路面損傷の検出方法を開発した。また、開発手法について、市街地道路の常用速度(40~60km/h)における、一般的な乗用車のバネ上およびバネ下固有振動数と対応する路面波長が卓越した、横断ひび割れ箇所の特定事例を示した。その結果、従来の目視点検では識別困難な、特徴的なひび割れ発生箇所が強調され、局在する路面損傷の検出が可能であることを示した。本成果は、路面情報を効率的に処理し、データ処理結果に基づく損傷検出を自動化できるため、市街地道路における効果的な路面点検に貢献するものと期待できる。

謝辞：舗装維持管理の実態調査は、北海道土木技術会の研究活動の一環として行ったものである。また、市街地道路の測定には、北海道北見市都市建設部の協力を得た。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 山之口浩, 丸山暉彦: 超・舗装学入門 アスファルト舗装修繕技術 続・舗装学のすすめ・AからZまで, 山海堂, 1997.
- 2) 笠原篤: 舗装マネジメントシステム, 土木学会論文集, No.478/V-21, pp.1-12, 1993.
- 3) Haas, R., and Hudson, W.R.著 北海道土木技術会舗装研究委員会訳: 最新舗装マネジメント, 北海道土木技術会舗装研究委員会, 2000.
- 4) Mallick, R.B., and El-Korchi, T.: *Pavement Engineering Principles and Practice*, CRC Press, 2009.
- 5) Papet, L.M.: *Federal Highway Administration - Current PMS Requirements, Pavement Management Implementation*,

- ASTM STP 1121, Holt, F.B. and Gramling, W.L., Eds., American Society of Testing and Materials, Philadelphia, pp.3-10, 1992.
- 6) 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.
 - 7) 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.
 - 8) 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.
 - 9) 富山和也, 川村 彰, 石田 樹: クォーターカーアルゴリズムを用いた舗装モニタリングにおける路面損傷の検出方法, 土木学会論文集F3 (土木情報学), Vol. 68, No.2, pp.127-134, 2013.
 - 10) Wei, L., and Fwa, T.F.: Characterizing Road Roughness By Wavelet Transform, *Transportation Research Record*, No. 1869, pp.152-158, 2004.
 - 11) 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.
 - 12) 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.
 - 13) Sweldens, W: The Lifting Scheme: A Construction of Second Generation Wavelets, *SIAM Journal on Mathematical Analysis*, Vol. 29, No. 2, pp. 511-546, 1997.
 - 14) ASTM International: Standard Test Method for Measuring the Longitudinal Profile of Traveled Surfaces with an Accelerometer Established Inertial Profiling Reference, *ASTM No.E950*, 2004.
 - 15) Mallat, S. A.: *Wavelet Tour of Signal Processing*, Academic Press, 1999.
 - 16) Jansen, M., and Oonincx, P.: *Second Generation Wavelets and Application*, Springer, 2004.
 - 17) 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.
 - 18) 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.

(2013. 10. 7 受付)

AN EFFECTIVE SURFACE INSPECTION METHOD OF URBAN ROADS ACCORDING TO THE PAVEMENT MANAGEMENT SITUATION OF LOCAL GOVERNMENTS

Kazuya TOMIYAMA, Akira KAWAMURA, Shun FUJITA, and Tateki ISHIDA

This study develops an effective surface inspection method of urban roads taking the pavement management situation of local governments into consideration. According to the results of questionnaire about the pavement management strategies, many local governments frequently monitor their pavement to maintain the surface condition. In the monitoring activities, they focus on localized surface deteriorations due mainly to cracks and potholes. However, the monitoring is conducted by the visual inspection rather than the quantitative measurement. Against this background, we introduce an accelerometer-based mobile profilometer to detect localized distresses such as transverse cracks based on the lifting scheme theory. The theory constructs lifting wavelet filters that include free parameters to enhance diagnostic surface distresses measured by the profilometer. As the result of applying the filters to the roughness profile measurement, the locations of severe distress are automatically identified. This method contributes to the pavement inspection of urban road by the automatic distress detection based on the efficient processing of surface information.