

離散ウェーブレット変換による 路面平坦性の劣化特性を考慮した評価方法

富山和也¹・城本政一²・川村 彰³

¹正会員 博(工) 北見工業大学研究員 SVBL (〒090-8507 北海道北見市公園町 165 番地)

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

²正会員 修(工) 大成ロテック株式会社 事業本部技術研究所 (〒365-0027 埼玉県鴻巣市上谷 1456)

³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)

本研究は、路面プロファイルの離散ウェーブレット変換による、劣化特性を考慮した平坦性の評価方法について検討したものである。はじめに、米国 Long Term Pavement Performance(LTPP)プログラムのプロファイルを用いて、ウェーブレット変換における波長 2.4~4.8m および 1.2~2.4m のサブバンド成分が、平坦性の経年劣化に影響することを明らかにした。続いて、プロファイルにおける平坦性の劣化特性成分を検出し、補修必要箇所を特定する方法について示した。最後に、平坦性の経年劣化に影響する箇所の部分的な補修により、評価区間全体の平坦性が改善されることを確認した。

Key Words : road roughness, wavelet transform, aging characteristics, long term pavement performance

1. はじめに

社会資本の急激な老朽化が進む今日において、道路整備に対する社会的要求は、量的拡大から質的向上へと変遷している。そのため、車両を介し人と道路との接点となる走行路面の維持管理には、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対策が求められている。とりわけ、路面の平坦性は、舗装技術基準¹⁾において、「乗り心地」など快適な交通を確保するための必須の性能指標であり、その良否は道路管理者および利用者にとっての関心事となっている。そのため、平坦性の定量的な評価および評価結果に基づく補修必要箇所の選定は、限られた予算で質の高いサービスを維持し提供し続ける上で必要不可欠である。また、急速に整備された社会基盤が一斉に老朽化し、補修を要する道路資産が増大するため、平坦性の劣化特性を考慮し、予防保全の観点から、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非常に重要である。

平坦性を定量的に評価するためには、路面プロファイルの測定および路面特性の評価を含めた舗装のモニタリングが必要である。路面特性とは、舗装の維持・修繕や車両の消耗のみならず、交通安全、乗り心地、環境保護やエネルギー節約を含めた、評価のための決定要因に影響を与えるもので、時間経過とともに変化するものである²⁾。ここで、路面プロファイルを様々な波長(波数)と振幅を有する波の複合体として捉える

と、路面特性はプロファイルの波状特性により分類できる。波状特性のうち、平坦性は、波長 0.5~50m の範囲に属し、乗り心地と密接に関連した成分を有する³⁾。

波状特性に基づく平坦性の評価方法としては、(1) フーリエ変換を用い路面プロファイルを様々な波長帯に分割し、パワースペクトル密度(PSD: Power Spectrum Density)により空間周波数領域で分類するものや⁴⁾、(2) デジタルフィルタによりプロファイルを複数の波長帯域に分割し、各帯域の振幅やエネルギーにより検討するもの⁵⁾がある。しかし、前者の場合、プロファイル波形の定常性を仮定する必要があることや、路面損傷と関連した位置情報の特定が困難であり、後者の場合、プロファイルデータの分割回数に応じ、フィルタ設計および演算回数が増加するなど、その適用に際しては少なからず問題がある。

一方、国際ラフネス指数(IRI: International Roughness Index)に代表されるように、路面波長に対する車両応答をモデル化し、その応答に基づき重み付けされたプロファイルの要約指標が提案され⁶⁾、国内外を問わず、平坦性に関する数多くの調査・研究に用いられている^{7,9)}。IRIは、路面上を走行する車両振動に関連した指標であるため、乗り心地と高い相関関係にある。ここで、IRIの算出過程は、波長 0.1~100m の間で重み付けする一種のバンドパス・フィルタとして作用する。そのため、IRIの算出結果からは、波長毎の詳細成分に関する情報が得られない。

表-1 SPS-5 試験区間における修繕工法

Section No.	Surface Preparation*	Overlay Material	Overlay Thickness (mm)
1	Control Section		
2	Minimum	Recycled	50
3	Minimum	Recycled	125
4	Minimum	Virgin	125
5	Minimum	Virgin	50
6	Intensive	Virgin	50
7	Intensive	Virgin	125
8	Intensive	Recycled	125
9	Intensive	Recycled	50

NOTE: The minimal level of surface preparation consists of primarily of patching of severely distressed areas and potholes and placement of a leveling course in ruts that are greater than 12 mm. The intensive level of preparation includes milling of the existing asphalt concrete surface, patching of distressed areas, and crack sealing after milling.

そこで、本研究では、平坦性の劣化特性を考慮した路面の定量評価を目的に、(1) 解析波形の定常性を仮定する必要がなく、位置情報と波長情報の同時識別が可能なウェーブレット変換を用いたウェーブバンド解析により、予防保全的観点から、将来的に平坦性低下の原因となる、経年劣化に影響を及ぼすプロファイルの波状成分を把握し、(2) その結果に基づく波状成分の検出および補修必要箇所の特定期間について検討する。なお、プロファイルデータは、長期にわたる測定が必要であるため、米国 LTPP (Long Term Pavement Performance) プログラムの測定データを用いた。また、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異なる修繕工法適用後の路面モニタリングを行っている、Specific Pavement Studies 5 (SPS-5) プロジェクトを解析対象とした。

2. LTPP SPS-5 の概要

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¹⁰⁾。Strategic Highway Research Program (SHRP) の一環として開始され、現在は、Federal Highway Administration (FHWA)により管理・運営されている。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、その目的は、各州の舗装を、質および費用対効果の高いものとするための意思決定に寄与することである。GPS は、初期設計もしくは初回オーバーレイ段階における供用中の舗装のパフォーマンスを研究対象とし、SPS は、新設、維持および修繕行為に関する特定の調査を対象とする。本研究では、SPS の

表-2 SPS-5 における試験箇所および測定経過年数

State Code	State	Interval between the first and last profile measurements (years)
01AL	Alabama	14.8
04AZ	Arizona	15.9
06CA	California	14.9
08CO	Colorado	8.6
12FL	Florida	11.3
13GA	Georgia	11.9
23ME	Maine	9.1
24MD	Maryland	2.8
27MN	Minnesota	14.7
28MS	Mississippi	8.6
30MT	Montana	8.6
34NJ	New Jersey	13.8
35NM	New Mexico	9.4
40OK	Oklahoma	9.8
81AB	Alberta, Canada	15.7
83MD	Manitoba, Canada	16.7

うち、アスファルト舗装の修繕行為に関するプロジェクトである、SPS-5 を解析対象とした。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ベースへは、LTPP DataPave Online¹¹⁾からアクセスできる。

(1) SPS-5 の概要¹²⁾

SPS-5 プロジェクトは、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。本プロジェクトで適用される修繕工法はオーバーレイであり、切削の有無を含めた事前処理、オーバーレイに使用する材料およびオーバーレイ厚さの違いを組み合わせた計8通りである。各試験区間に適用される修繕工法を表-1に示す。各試験区間の延長は152mである。なお、本研究では、コントロール区間を除いた区間2-9を研究対象とする。

(2) SPS-5 の試験箇所

SPS-5 プロジェクトのうち、DataPave Online 上でプロファイルが取得可能な試験箇所は、表-2に示す16箇所である。また、表-2に、修繕直後から最終モニタリングまでの経過年数を合わせて示す。ここで、経過年数は、同一の試験箇所においても、区間毎に異なるため、全区間の平均値を示した。なお、Maryland (24MD) および Montana (30MT) は初回オーバーレイ後、再度オーバーレイを行なっているため、LTPP プログラム開始直後から2度目のオーバーレイ直前までの測定データを用いた。

3. 路面プロファイルのウェーブレット解析

路面の波状特性の評価は、プロファイルデータを複数の波長帯域に分割し検討する、ウェーブバンド解析

により行なう。ウェーブレット変換を用いたウェーブバンド解析は、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、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、近年、舗装工学の分野においても多くの適用事例が報告されている¹³⁻¹⁵⁾。ウェーブレット変換には、連続変換と離散変換とがあるが、本研究では、後者を用いる。離散変換は、計算効率に優れ、ピラミッドアルゴリズムにより、多重解像度解析を可能にする。

(1) 離散ウェーブレット変換¹⁶⁾

時間(空間) t の関数 $f(t)$ の離散ウェーブレット変換は、マザーウェーブレット $\psi(t)$ から生成された、整数 j および k に対応する分解関数 $\psi_{j,k}(t)$ を用いて、次式により与えられる。

$$f(t) = \sum_j \sum_k a_{j,k} \psi_{j,k}(t) \quad (1)$$

ここで、 $a_{j,k}$ は、パラメータ j および k の展開係数であり、次式で表される。

$$a_{j,k} = \int f(t) \psi_{j,k}(t) dt \quad (2)$$

展開関数 $\psi_{j,k}(t)$ は、次の条件を満たす。

$$\psi_{j,k}(t) = 2^{-\frac{j}{2}} \psi(2^{-j}t - k) \quad (3)$$

ここで、 k はシフトパラメータであり時間(空間)領域での位置情報を表し、 j はスケールパラメータであり、(空間)周波数と対応する。また、離散ウェーブレット変換は、ピラミッドアルゴリズムによる、多重解像度解析が可能である。ピラミッドアルゴリズムとは、解析波形を低周波成分と高周波成分に分解し、低周波成分のみをさらに低周波成分と高周波成分に分解することを繰り返す操作のことである。解析対象プロファイルを $s(t)$ とすると、 $s(t)$ は、始めに近似成分と呼ばれる低周波成分 a_1 と、詳細成分と呼ばれる高周波成分 d_1 に分解される。さらに近似成分については、分解を繰り返す。すなわち、ある近似成分 a_j は、繰り返し近似成分 a_{j+1} と詳細成分 d_{j+1} に分解される。この分解プロセスは次式により表現される。

$$a_j(k) = \sum_{i=1}^N h_j(2k-i)s(i) \quad j=1,2,\dots,L \quad (4)$$

$$d_j(k) = \sum_{i=1}^N g_j(2k-i)s(i) \quad j=1,2,\dots,L \quad (5)$$

ここで、

L = 分解レベル

N = プロファイルのデータ点数

a_j = レベル j における低周波(近似)成分

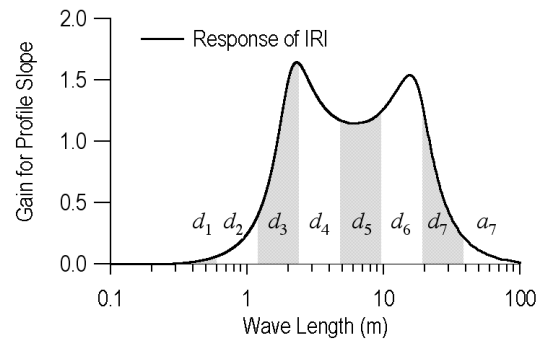


図-1 IRIの振幅利得およびウェーブレット解析におけるサブバンド

d_j = レベル j における高周波(詳細)成分

h_j = レベル j におけるローパス・フィルタ

g_j = レベル j におけるハイパス・フィルタ

(2) 路面プロファイルのウェーブレット解析

路面のウェーブバンド解析において、プロファイルは一定間隔でサンプリングされた標高データにより表される。そのため、離散ウェーブレット変換におけるプロファイルは、距離 t の関数 $f(t)$ となる。ここで、LTPPにおけるプロファイルは、路面性状測定車により測定され、そのサンプリング間隔は、150mmもしくは152mmである。本研究では、事前処理として、プロファイルのサンプリング間隔を150mmに統一し、バンドパス・フィルタにより波長帯域を平坦性と関係の深い0.5~50mに制限した³⁾。また、離散ウェーブレット変換におけるマザーウェーブレットは、ウェーブレット解析の目的に応じて、様々な種類が提案され実用化されているが、本研究では、直交ウェーブレットである、3次のDaubechie ウェーブレット(DB3)¹⁶⁾を用いた。DB3は、空間および空間周波数領域において、路面のウェーブレット解析に適した優れた分解能を有する¹³⁾。また、分解レベルは、路面波長に対するIRIの振幅利得を考慮し、7とした。よって、解析対象プロファイル s は、以下のようにサブバンド分解される。

$$s = a_7 + d_7 + d_6 + d_5 + d_4 + d_3 + d_2 + d_1 \quad (5)$$

図-1に各サブバンドと波長帯域の関係、およびIRIの振幅利得を示す。ここで、長波長サブバンド(a_7)は、線形など路面の起伏を表し、短波長サブバンド($d_7, d_6, d_5, d_4, d_3, d_2, d_1$)は、平坦性と関連した路面の詳細情報を表す。なお、前述の事前処理により、解析対象となるプロファイルの波長域は、0.5~50mに制限されていることに注意を要する。離散ウェーブレット変換を用いた、路面縦断プロファイルの多重解像度解析例を図-2に示す。

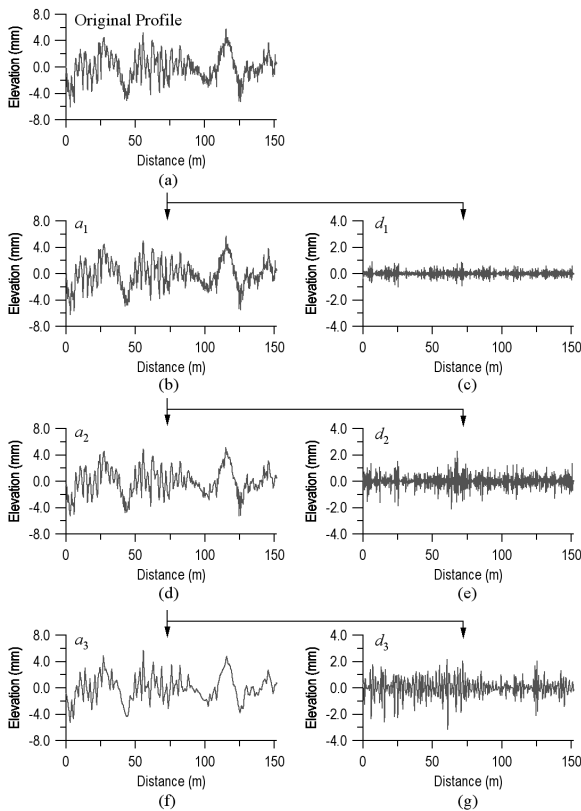


図-2 路面縦断プロファイルの多重解像度解析例
(分解レベル3)

4. ウェーブレット解析による 平坦性の劣化特性評価

道路資産の老朽化が進み、舗装の新設に比し補修の占める割合が増大するなかで、平坦性の定量的な評価および評価結果に基づき、優先的に補修が必要となる箇所を的確に把握することは非常に重要である。本章では、乗り心地と相関が高く、国内外を問わず幅広く用いられている IRI を平坦性指標とし、IRI の経年変化に影響を及ぼすプロファイルの波状特性について検討する。検討方法は、IRI の経年変化率を従属変数、修繕工法の違いおよびプロファイルの離散ウェーブレット変換における各サブバンドのエネルギー変化率を独立変数とする重回帰分析により行う。

(1) サブバンド・エネルギーの計算

プロファイルのウェーブレット解析では、離散ウェーブレット変換における各サブバンドのエネルギーを算出し、プロファイル波形の振幅と対応させるため、その平方根を波状特性成分の指標とした。サブバンド w におけるエネルギーは、次式で定義する。

$$E_w = \sum_{i=1}^N w(i)^2 \Delta \quad (6)$$

ここで、

表-3 IRI の経年変化率および経過年数に関する統計量

	Rate of IRI increase (mm/m/year)	Interval between the first and last profile measurements (years)
Maximum	0.301	16.7
Minimum	<0.001	1.1
Average	0.043	11.9
Std. Dev.	0.047	3.8

E_w = サブバンド・エネルギー (m^3)

w = サブバンド成分 (m)

Δ = プロファイルのサンプリング間隔 (m)

N = プロファイルのデータ点数

各サブバンド $a_7, d_7, d_6, d_5, d_4, d_3, d_2, d_1$ に対応するエネルギーは、 $E_{a_7}, E_{d_7}, E_{d_6}, E_{d_5}, E_{d_4}, E_{d_3}, E_{d_2}, E_{d_1}$ となる。

また、プロファイルのサンプリング間隔は、前述の通り、0.15m である。

(2) IRI およびサブバンド・エネルギーの変化率

IRI の経年変化率は、LTPP プログラムにおいて、最終モニタリングおよび修繕直後に得られたプロファイルから、次式により算出する。

$$\Delta IRI = \frac{IRI_t - IRI_0}{\Delta Year} \quad (7)$$

ここで、

ΔIRI = IRI の経年変化率 (mm/m/year)

IRI_t = 最終モニタリングにおける

IRI (mm/m)

IRI_0 = 修繕直後の IRI (mm/m)

$\Delta Year$ = 経過年数 (years)

SPS-5 プロジェクトにおける各試験箇所の経過年数は、表-2 に示す通りである。なお、LTPP DataPave Online には左右ホイールパスのプロファイルが保存されているが、本研究では左ホイールパス上のプロファイルを用いた。また、最終モニタリング以前に行なった維持作業等の影響により、経年変化率がマイナスとなったものは、解析から除外した。利用可能な経年変化率データは、114 点である。IRI の経年変化率および経過年数に関する統計量を表-3 に示す。

サブバンド w のエネルギー平方根についても、IRI 同様、次式により経年変化率を求めた。

$$\Delta E_w^{1/2} = \frac{E_{w,t}^{1/2} - E_{w,0}^{1/2}}{\Delta Year} \quad (8)$$

ここで、

$\Delta E_w^{1/2}$ = エネルギー平方根の
経年変化率 ($(mm^2 \cdot m)^{1/2}/year$)

$E_{w,t}^{1/2}$ = 最終モニタリングにおける

エネルギー平方根 ($(mm^2 \cdot m)^{1/2}$)

$E_{w,0}^{1/2}$ = 修繕直後のエネルギー

表-4 IRI 変化率の重回帰分析および分散分析結果

Summary of Fit					
R-squared			0.981175		
R-squared Adjusted for Degree of Freedom			0.957456		
Root Mean Square Error			0.009764		
Mean of Response			0.042669		
Observations			114		
Analysis of Variance					
Source	Degree of Freedom	Sum of Square	Mean Square	F Ratio	Probability > F (p Value)
Model	63	0.24847610	0.003994		41.3663
Error	50	0.00476725	0.000095		
Corrected Total	113	0.25324335			<.0001**
Effect Tests					
Source	Number of Parameters	Degree of Freedom	Sum of Square	F Ratio	Probability > F
Section	7	7	0.00107249	1.6069	0.1552
$\Delta E_{d_1}^{1/2}$	1	1	0.00006683	0.7010	0.4064
$\Delta E_{d_6}^{1/2}$	1	1	9.60848e-8	0.0010	0.9748
$\Delta E_{d_5}^{1/2}$	1	1	0.00001859	0.1950	0.6607
$\Delta E_{d_4}^{1/2}$	1	1	0.00246113	25.8129	<.0001**
$\Delta E_{d_3}^{1/2}$	1	1	0.00111204	11.6633	0.0013**
$\Delta E_{d_2}^{1/2}$	1	1	0.00024519	2.5716	0.1151
$\Delta E_{d_1}^{1/2}$	1	1	0.00021520	2.2570	0.1393
Section * $\Delta E_{d_1}^{1/2}$	7	7	0.00022511	0.3373	0.9330
Section * $\Delta E_{d_6}^{1/2}$	7	7	0.00076946	1.1529	0.3464
Section * $\Delta E_{d_5}^{1/2}$	7	7	0.00185425	2.7783	0.0161
Section * $\Delta E_{d_4}^{1/2}$	7	7	0.00117363	1.7585	0.1169
Section * $\Delta E_{d_3}^{1/2}$	7	7	0.00064760	0.9703	0.4630
Section * $\Delta E_{d_2}^{1/2}$	7	7	0.00121285	1.8172	0.1045
Section * $\Delta E_{d_1}^{1/2}$	7	7	0.00109247	1.6369	0.1468

NOTE: ** indicates significance with 99 % confidence level.

平方根 ((mm²・m)^{1/2})

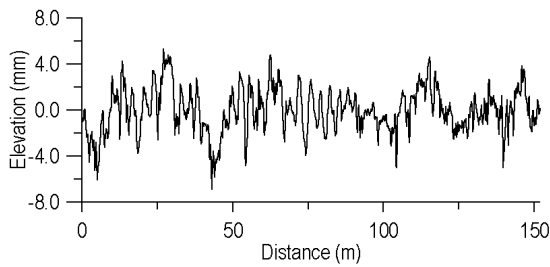
Δ Year = 経過年数 (years)

(3) 平坦性の劣化特性評価

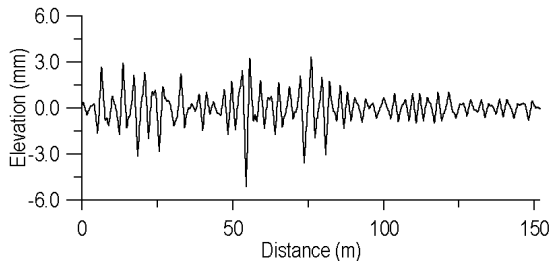
本節では、平坦性の劣化特性を把握するため、IRIの経年変化率(以下、「IRI変化率」)に影響を及ぼす要因について、最小二乗法を用いた重回帰分析により検討する。重回帰分析における従属変数はIRIの経年変化率である。一方、独立変数は、平坦性の経年劣化に対する、a)修繕工法の違いによる影響を検討するための、LPTT SPS-5における試験区間番号、およびb)プロファイルの波状特性を評価するため、平坦性と関係するサブバンドにおけるエネルギー平方根の経年変化率(以下「サブバンド変化率」： $\Delta E_{d_7}^{1/2}$ 、 $\Delta E_{d_6}^{1/2}$ 、 $\Delta E_{d_5}^{1/2}$ 、 $\Delta E_{d_4}^{1/2}$ 、 $\Delta E_{d_3}^{1/2}$ 、 $\Delta E_{d_2}^{1/2}$ 、 $\Delta E_{d_1}^{1/2}$)とした。ここで、試験区間番号は、名義尺度であり、表-1におけるSection No.をダミー変数として用いた。また、各独立変数が従属変数へ与える効果を統計的に高い信頼性の元で検定するため、1%有意水準における分散分析をおこなった。

分散分析における交互作用として、試験区間番号と各サブバンド変化率を取り上げた。重回帰分析の結果を表-4に示す。

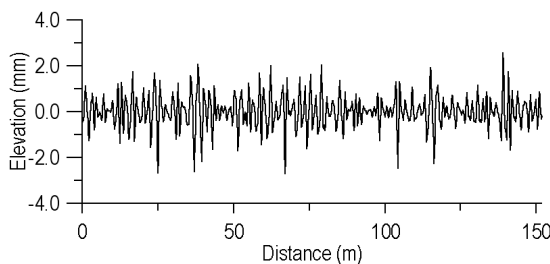
表-4における重回帰分析結果より、IRI変化率はサブバンド変化率により高い精度で予測可能なことがわかる。また、分散分析表より、有意Fは0.0001以下と、直線のあてはめ結果は1%水準で統計的に有意である。これは、図-1に示すように、各サブバンドにおける波状成分が、IRIに影響を与える波長帯と対応していることから理解できる。各独立変数の効果は、 $\Delta E_{d_4}^{1/2}$ および $\Delta E_{d_3}^{1/2}$ において、有意Fがそれぞれ0.0001以下および0.0013と、1%水準で有意な結果が得られ、その他の要因および交互作用については有意な結果が得られなかった。以上より、平坦性の劣化特性としては、IRIを評価指標として用いた場合、(a)補修工法ごとに違いがあるとはいえず、(b)プロファイルの波状成分 d_4 (波長2.4~4.8m)および d_3 (波長1.2~2.4m)が経年変化に影響を及ぼすことがわかった。



(a) 路面補修前のプロファイル (Arizona, Section 2)



(b) 波状成分 d_4 (波長 2.4~4.8m)



(c) 波状成分 d_3 (波長 1.2~2.4m)

図-3 平坦性の経年劣化に影響するプロファイルの波状成分

5. 劣化特性を考慮した補修必要箇所の特定

前章では、離散ウェーブレット変換を用いたウェーブバンド解析により、平坦性の劣化特性評価として、IRI 変化率に影響を及ぼすプロファイルの波状成分について明らかにした。離散ウェーブレット変換の特徴として、プロファイルに局在する波形の位置情報と波数（空間周波数）情報の同時識別が可能である。本章では、ウェーブレット解析により、予防保全的観点から、将来的に平坦性が低下する箇所、すなわち経年劣化に影響するプロファイルの波状成分を検出するとともに、検出結果に基づく補修必要箇所の特定方法について検討する。

(1) 平坦性劣化特性成分の検出方法

平坦性の劣化特性と関連のあるプロファイルの波状成分は、ウェーブレット解析の d_4 (波長 2.4~4.8m) および d_3 (波長 1.2~2.4m) であることを上述した。例として、LTPP SPS-5 プロジェクトのうち、路面修繕前に測定されたプロファイルおよび、その d_4 および d_3 成分を図-3 に示す。なお、本プロファイルは、Arizona の区

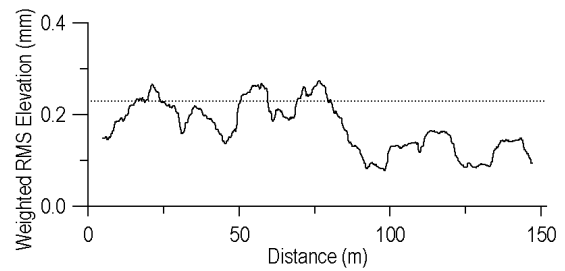


図-4 重み付けした移動二乗平均平方根プロファイルによる平坦性の経年劣化特性成分の検出

間 2 において、2002 年に測定されたものである。図-3 より、どちらのサブバンドにおいても、終始局所的な振動成分が確認でき、とりわけ始点からおよそ 80m までの区間において、著大な振動成分が卓越している。

一方、路面補修の実務面を考慮すると、ピンポイントではなく、必要とする路面の波状特性を反映した、部分的な波状成分に関する情報がより実用的である。そこで、距離 t のプロファイル s において、ある部分的な平均化幅 $t_0 \leq t \leq t_i$ における、移動二乗平均平方根 (R-RMS: Running-Root Mean Square) プロファイル $s_{rms,i}$ を、次式により算出し、平坦性の劣化特性と関係する、部分毎の波状特性成分を検出する。

$$s_{rms,i} = \sqrt{\frac{1}{t_i - t_0} \int_{t_0}^{t_i} [s(t)]^2 dt} \quad (9)$$

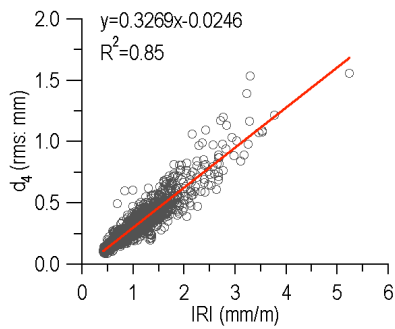
ここで、平均化幅 $t_i - t_0$ は、 d_4 および d_3 成分の最大波長 4.8m が確実に含まれるよう、最大波長の 2 倍に最も近いサンプリング点である 9.9m とした。ここで、IRI 変化率の $\Delta E_{d_4}^{1/2}$ および $\Delta E_{d_3}^{1/2}$ による重回帰式を求めると、信頼レベル 99% で次式が求まる。

$$\Delta IRI = 0.002671 + 0.098893 \Delta E_{d_4}^{1/2} + 0.1460240 \Delta E_{d_3}^{1/2} \quad (10)$$

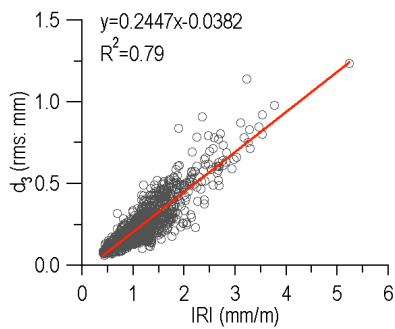
また、(5)式より、離散ウェーブレット変換において、解析波形は、各サブバンド成分の線形結合となる。そこで、(9)式より得られた d_4 および d_3 の R-RMS プロファイルを、(10)式の係数でそれぞれ重み付け後線形結合し、重み付け R-RMS プロファイルとすることで、平坦性の経年劣化に影響を及ぼす波状成分の検出を行う。図-4 に重み付け R-RMS プロファイルを示す。図より、距離 20m 付近および 50m から 80m の間で平坦性の劣化特性成分が卓越していることがわかる。なお、図における破線は、後述の管理目標値である。

(2) 補修必要箇所の特定

本節では、経年劣化特性成分の検出結果に基づく、補修必要箇所の特定方法について述べる。はじめに、LTPP SPS-5 プロジェクトで得られたプロファイルについて、ウェーブレット解析における d_4 および d_3 成分の



(a) 波状成分 d_4 (波長 2.4~4.8m)



(b) 波状成分 d_3 (波長 1.2~2.4m)

図-5 平坦性の経年劣化に影響するプロファイルの波状成分と IRI の関係

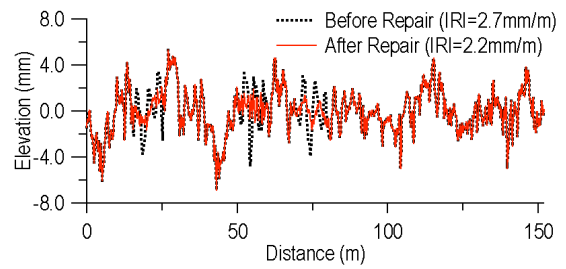
二乗平均平方根 RMS (Root Mean Square) と IRI の相関関係を図-5 に示す. なお, データ数 N 点のプロファイル s_i ($i=1,2,3,\dots,N$) の RMS, s_{rms} は, 次式により与えられる.

$$s_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N s_i^2} \quad (11)$$

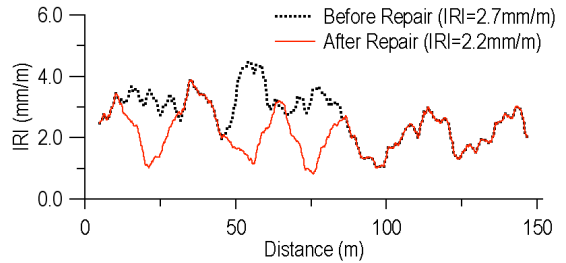
図-5 より, どちらの成分も IRI と高い相関関係にあることがわかる. ここで, 図-5 に示した回帰式より, 国内の高速道路の平坦性管理目標値である 3.5mm/m に対応する d_4 および d_3 の RMS を波状成分の目標値とすると, それぞれ 1.12mm , 0.82mm となる. 次に, 各波状成分の目標値に, 重み付け R-RMS プロファイルと同様, (10)式の係数による重み付けおよび線形結合を行なうと 0.23mm となり, 図-4 において破線で示した値となる. このラインを超えた箇所は, プロファイル全体の平均的な波状特性に比べ, 部分的に平坦性が劣化した特異箇所とみなすことができる. そこで, 図-5 における波線を管理目標ラインとし, このラインを超えた箇所を補修必要箇所とすると, 図-4 の場合, 距離 20m 付近および 50m から 80m の間で目標ラインを超える部分があり, 補修必要箇所として特定できる.

(3) 補修効果の検討

前述の通り, 離散ウェーブレット変換における解析波形は, 各サブバンド成分の線形結合となる. そこで,



(a) 補修前後のプロファイル



(b) 補修前後の連続 IRI (基底長 9.9m)

図-6 離散ウェーブレット変換による補修効果の検討

図-4 において管理目標ラインを超えた部分の d_4 および d_3 成分に 0 (ゼロ) を代入し再構成することで, 擬似的に補修後のプロファイルを再現することが可能である. 図-6 に補修前後の(a)プロファイルおよび(b)式における平均化幅と同様の基底長 9.9m で求めた連続 IRI を示す. 図中, 凡例に区間全体の IRI 値を示した. 図-6 より, 補修前の解析対象路面における区間全体の IRI は, 2.7mm/m と高速道路の管理目標値以下であるが, 連続 IRI より部分的な平坦性の悪化が確認できる. そこで, 上述の方法により, 平坦性の経年劣化に影響する箇所を部分的に補修したところ, 区間全体としても 2割程度の平坦性の改善が確認できた.

6. まとめ

本研究は, 離散ウェーブレット変換を用いたウェーブバンド解析により, 平坦性の劣化特性を考慮した評価方法について検討したものである. 本研究で得られた知見を以下に示す.

- (1) LTPP プログラムにおいて, 修繕工法に関する調査を行った SPS-5 プロジェクトのプロファイルデータを使用し, 離散ウェーブレット変換を用いたウェーブバンド解析により, 平坦性の経年劣化に影響を及ぼす波状特性について検討した. その結果, IRI を平坦性指標とした場合, 平坦性の劣化特性は, 補修工法ごとに違いがあるとはいえず, ウェーブバンド解析のサブバンド成分 d_4 (波長 $2.4\sim 4.8\text{m}$) および d_3 (波長 $1.2\sim 2.4\text{m}$) に依存することがわか

った。

- (2) プロファイルにおける平坦性の劣化特性成分検出について、IRI 変化率への影響度合いに基づき重み付けした、移動二乗平均平方根 (R-RMS) プロファイルによる方法を示した。また、国内高速道路の平坦性管理目標値である 3.5mm/m に対応した、R-RMS プロファイルの管理目標値を設定し、プロファイル全体の平均的な波状特性から逸脱した部分を補修必要箇所として特定する方法を示した。
- (3) 離散ウェーブレット変換における、解析波形は各サブバンド成分の線形結合となる特徴を利用し、擬似的に補修後のプロファイルを再現することで、部分的な補修により得られる平坦性の改善効果について検討した。その結果、平坦性の経年劣化に影響する箇所のみを部分的な補修でも、路面評価区間全体の平坦性が改善できることを確認した。

参考文献

- 1) 日本道路協会：舗装の性能評価法 -必須および主要な性能指標の評価法編，丸善，2006。
- 2) 土木構造物および基礎委員会 舗装機能の評価に関する研究小委員会：舗装機能の評価技術の現状と将来，土木学会論文集，No.472/V-20，pp.13-28，1993。
- 3) Sandberg, U., and Ejsmont, J.A.: Tyre/Road Noise Reference Book. Infomex, Sweden, 2002.
- 4) ISO8608: Mechanical vibration – Road surface profiles – Reporting of measured data, ISO, pp.1-30, 1995.
- 5) 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.
- 6) Sayers, M.W.: On the Calculation of IRI from Longitudinal Road Profile, Transportation Research Record, No.1501, pp.1-12, 1995.
- 7) Dahlstedt, S.: Smooth Enough? Estimated Roughness on Roads with Low International Roughness Index Values, Transportation Research Record, No. 1860, pp.144-151, 2003.
- 8) Shafizadeh, K., and Mannering, F.: Acceptability of Pavement Roughness on Urban Highways by Driving Public, Transportation Research Record, No. 1860, pp.187-193, 2003.
- 9) 熊田一彦, 神谷恵三, 七五三野茂: 走行快適性に着目した舗装路面の総合評価手法に関する検討, 舗装, Vol.43, No.7, pp.27-30, 2008.
- 10) 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.
- 11) <http://www.itpp-products.com/DataPave/>, 2011年5月.
- 12) 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.
- 13) Wei, L., and Fwa, T.F.: Characterizing Road Roughness By Wavelet Transform, Transportation Research Record, No. 1869, pp.152-158, 2004.
- 14) 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.
- 15) 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.
- 16) Daubechies, I. Ten Lectures on Wavelets. CBMS-NSF Conference Series in Applied Mathematics, Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, Pa., 1992.

Evaluation Method of Road Roughness Considering Aging Characteristics by Discrete Wavelet Transform

Kazuya TOMIYAMA, Masakazu JOMOTO and Akira KAWAMURA

This study examines an evaluation method of road surface roughness with consideration of ageing characteristics by discrete wavelet transform. First, a multiple regression analysis showed that the spatial frequency subbands related with wavelengths of 2.4-4.8m and 1.2-2.4m correspond with aging characteristics of surface roughness. According to the results, we proposed a detection method of the roughness aging characteristics in a profile. The detecting results contribute to identify the profile segments that require the repair of a pavement surface. Finally, wavelet-based profile analysis confirmed that the repair of local profile segments corresponding to the roughness aging characteristics improves the performance of smoothness of the entire section in the road surface evaluation.