

車両乗り心地予測のための わだち掘れプロファイル評価指標の開発

富山和也¹・川村 彰²・高橋 清³・石田 樹⁴

¹ 学生員 修(工) 北見工業大学大学院工学研究科博士後期課程 (〒090-8507 北海道北見市公園町 165 番地)

E-mail : tomiyama@vortex.civil.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 工博 北見工業大学准教授 工学部社会環境工学科 (〒090-8507 北海道北見市公園町 165 番地)

⁴ 正会員 博(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)

本研究の目的は、車線乗り移り走行時の車両挙動に影響を及ぼすわだち掘れの波状特性を把握し、車両乗り心地を予測するためのわだち掘れプロファイル(以下、「プロファイル」)評価指標を開発することである。はじめに、連続ウェーブレット変換によるプロファイルの空間周波数解析から、わだち掘れの波状特性としては、0.4mのプロファイル波長が車両挙動に大きく影響し、乗り心地を低下させることを明らかにした。続いて、差分フィルタを用いて、プロファイルから乗り心地に関連する波状特性成分を抽出し、乗り心地と相関のあるプロファイル評価指標について検討した。その結果、フィルタ処理後のプロファイル高さの最大値と最小値の差を評価指標とすることで、プロファイルデータから直接乗り心地の予測が可能となった。

Key Words : *pavement rutting, road profile, ride quality, summary index, road surface characteristics*

1. はじめに

舗装わだち掘れは、路面の主たる損傷要因であり、路面上を走行する車両の安全性や乗り心地に影響することから、道路管理者のみならず道路利用者にとっても大きな関心事となっている¹⁾。そのため、わだち掘れの特性は、路面の補修計画を立てる上で非常に重要な項目であり、日本国内のみならず諸外国においても、舗装の供用性評価の主たる指標の一つとなっている²⁾。

今日、舗装の技術基準は、従来の仕様規定から性能規定へと変遷しており、路面に対する要求性能の設定および適切な性能評価手法の必要性が高まっている³⁾。わだち掘れにおいても、安全で快適な交通確保の見地から、利用者意識と関連した性能指標に基づく評価を行う必要がある。

現在、わだち掘れは、わだち掘れ深さにより評価・管理が行われている^{4), 5)}。しかし、わだち掘れ深さは、道路管理機関毎に算出方法が異なることや、プロファイルの波状特性を考慮していないことなど、その運用に際し少なからず問題があるものと考えられる。特に、路面と車両の相互作用の観点から、わだち掘れ形状の違いは、深さが同様のわだち掘れであっても、車両に異なる影響を与えることがわかっている⁶⁾。そのため、わだち掘れ深さによる路面管理では、舗装のマネジメ

ントにおいて、利用者意識を適切に反映する事が難しい。

上述の背景から、筆者らは、車両の動的応答および利用者意識を考慮したわだち掘れ評価を行なってきた。その結果、(1)わだち路上を走行した際の車両挙動について、Half-Car シミュレーションから得られた車両のロールレートの実効値 (RMS: Root Mean Square)をわだち掘れ評価指標 (AVx_{RMS})とし、(2)ドライビングシミュレータによる車線乗り移り試験から、 AVx_{RMS} と被験者の主観的な乗り心地の良し悪しとに高い相関(相関係数 $R>0.8$)があることを示した^{7)~10)}。ここで、「乗り心地」とは、車線変更時に生ずる車両振動に起因する振動乗り心地を意味し、以下同様に、「乗り心地」と称する。 AVx_{RMS} は、車両運動シミュレーションから求められた、車線乗り移り走行時の車両挙動に関する指標である。そのため、路面モニタリングの実務上、わだち掘れの生じた横断プロファイルデータから、直接乗り心地を予測できれば効率的である。ここで、横断プロファイルとは、路面の横断距離と高さで表される2次元形状であり、以降「プロファイル」と称する。

そこで、本研究は、車両挙動に基づくわだち掘れの評価指標である AVx_{RMS} の算出方法について述べ、 AVx_{RMS} 、すなわち利用者の乗り心地評価に影響を及ぼ

すわだち掘れの波状特性の把握、および乗り心地の予測が可能なプロファイル評価指標の開発を目的に、以下の検討を行う。

- (1) 連続ウェーブレット変換によるプロファイルの空間周波数解析を行ない、車両の乗り心地に影響するわだち掘れの波状特性について検討する。
- (2) $AV\dot{x}_{RMS}$ と相関があり、わだち掘れに起因する乗り心地の予測が可能なプロファイルの評価指標について検討する。

2. Half-Car モデルによるわだち掘れ評価

車両の運動モデルには、国際ラフネス指数（IRI: International Roughness Index）の算定に資する Quarter-Car モデルの様に比較的単純なものから、車両運動シミュレータで利用されるような複雑なものまで、その用途に合わせ様々な自由度を持つモデルが提案されている¹¹⁾。筆者らは、Half-Car（以下、「HC」とする）モデルが、車両挙動を考慮したわだち掘れ評価に有効であり、HC シミュレーションより得られたロールレートの RMS である $AV\dot{x}_{RMS}$ が、利用者の主観的な乗り心地と高い相関がある事を示している⁷⁻¹⁰⁾。以下に、HC シミュレーションから、 $AV\dot{x}_{RMS}$ を算出する方法について述べる。

(1) Half-Car モデル

HC モデルは、4 輪 2 軸の車両のうち、2 輪 1 軸の前輪もしくは後輪を取り出したものであり、ASTM（American Society for Testing and Materials）¹²⁾で規格化されている独立懸架式の HC モデルを用いる（図-1）。以下に、HC モデルの運動方程式を示す。なお、ASTM の HC モデルにおいて、タイヤ減衰定数 $C_2=0$ であることから、運動方程式中のタイヤ減衰に係る項は省略した。

$$M_2\ddot{z}_1 = K_2(z_{p1} - z_1) - C_1(\dot{z}_1 - \dot{z}_a) - K_1(z_1 - z_a) \quad (1)$$

$$M_2\ddot{z}_2 = K_2(z_{p2} - z_2) - C_1(\dot{z}_2 - \dot{z}_b) - K_1(z_2 - z_b) \quad (2)$$

$$M_H\ddot{z}_3 = C_1(\dot{z}_1 - \dot{z}_a) + K_1(z_1 - z_a) + C_1(\dot{z}_2 - \dot{z}_b) + K_1(z_2 - z_b) \quad (3)$$

$$I_H\ddot{\phi} = \{C_1(\dot{z}_1 - \dot{z}_a) + K_1(z_1 - z_a)\}l - \{C_1(\dot{z}_2 - \dot{z}_b) + K_1(z_2 - z_b)\}l \quad (4)$$

ここで（[]内は使用する値）、

C_1 : ダンパ減衰定数 [40 kgs/m]

I_H : 車体ロール慣性モーメント [1.29 kgs²m]

K_1 : サスペンションバネ定数 [575 kg/m]

K_2 : タイヤバネ定数 [3110 kg/m]

l : 車両重心位置-懸架装置間距離 [0.9 m]

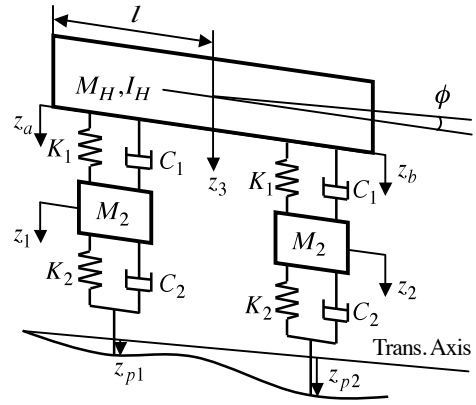


図-1 Half-Car シミュレーションモデル

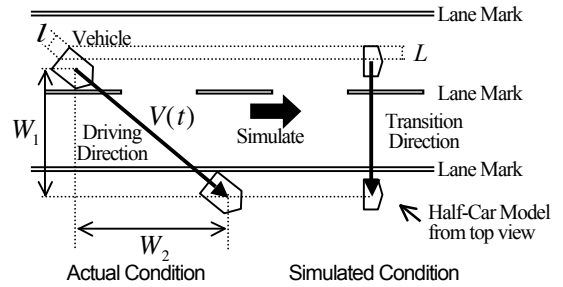


図-2 乗り移り速度の定義

M_H : 車体質量 [10 kgs²/m]

M_2 : バネ下質量 [1.25 kgs²/m]

z_a, z_b : バネ上変位 (mm)

z_{p1}, z_{p2} : 路面変位入力 (mm)

z_1, z_2 : ばね下変位 (mm)

z_3 : 車体重心上下変位 (mm)

ϕ : 車体ロール角 (rad)

(2) シミュレーション手順

わだち掘れに起因する車両挙動への外乱は、車両が車線を変更する際に顕著に現れる。そこで、車両が、わだち掘れ上を斜めに横断するよう、シミュレーション条件を設定する。HC シミュレーションの手順を以下に示す。

- a) 一断面プロファイルに対して、シミュレーションが適用できるよう、図-2 に示す乗り移り速度 $v(t)$ 、乗り移り幅 W_1 、および乗り移り距離 W_2 を設定する。図は、車線外側端からもう一方の外側端まで、車両が斜めに横断する状況を表す。ここでは、2 車線路右車線の例を示したが、同左車線や、複数車線でも同様である。次式により、時刻 t における進行方向走行速度 $V(t)$ に対し、その車線横断方向成分である乗り移り速度 $v(t)$ を定義する。

$$v(t) = V(t) * W_1 / \sqrt{W_1^2 + W_2^2} \quad (5)$$

表-1 解析に用いたプロファイルの特徴

試験区間 (路線名)	断面数	幅員 (m)	わだち掘れ深さ: 最小 - 最大(mm)		わだち掘れ形状の特徴	
			ピーク法	平均法	シングル / デュアル	摩耗性 / 流動性
No. 2 (R276)	21 (5m 間隔で 延長 100m)	3.20	9 - 12	8 - 12	シングル	摩耗性
No. 3 (R234)		3.25	21 - 37	18 - 25	デュアル	流動性
No. 4 (R451)		3.00	17 - 33	4 - 22	シングル	流動性
No. 7 (R337)		3.45	21 - 28	21 - 28	デュアル	摩耗性
No. 8 (R275)		3.15	9 - 13	9 - 12	デュアル	摩耗性・流動性
No. 11 (R337)		3.45	24 - 32	24 - 32	デュアル	摩耗性
No. 12 (高速道路)		3.55	14 - 18	11 - 14	デュアル	流動性

また、車両重心位置-懸架装置間距離の補正值 L は次式から得られる。

$$L = l * W_1 / \sqrt{W_1^2 + W_2^2} \quad (6)$$

ここで、 $V(t)$ は、今後、縦断プロファイルと合わせた路面の乗り心地評価に用いることを鑑み、近年、平坦性の評価指標として注目されている、IRI 算出時の速度¹³⁾と同様の 80km/h とした。また、 W_1 、 W_2 は ISO3888-1¹⁴⁾に規定される乗り移り試験に基づき、それぞれ 3.5m、30m とする。

- b) 路面変位入力を右輪に対し、 $2L/v(t)$ の遅れを持たせて左輪に入力させる。

なお、本研究では、運動方程式の解法に、The MathWorks 社の MATLAB/Simulink¹⁵⁾を用い、後述の、プロファイル測定間隔 0.05m 以下のデータ点で計算できるよう、サンプリング間隔 100Hz で Runge-Kutta 法により計算した。

(3) 車両挙動に基づくわだち掘れ評価指標の算出

車両挙動に基づくわだち掘れの評価指標である AVx_{RMS} は次式から得られる。

$$AVx_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N AVx_i^2} \quad (7)$$

ここで、

AVx_{RMS} : ロールレートの RMS (rad/s)

AVx : ロールレート (rad/s)

N : データ点数

3. わだち掘れの波状特性について

路面の波状特性とは、路面が有する基本的特性 (平坦性やテクスチャ) や他への波及効果 (すべりやタイヤの摩耗) 等を示す路面特性を、路面波長ごとに表したものである。縦断プロファイルについては、PIARC の路面性状に関する技術委員会 C1 による報告がその代表例であり、平坦性と乗り心地の関係を表す波長等が示されている¹⁶⁾。わだち掘れのような横断プロファイルにおいても、その形状が異なれば、わだち掘れ

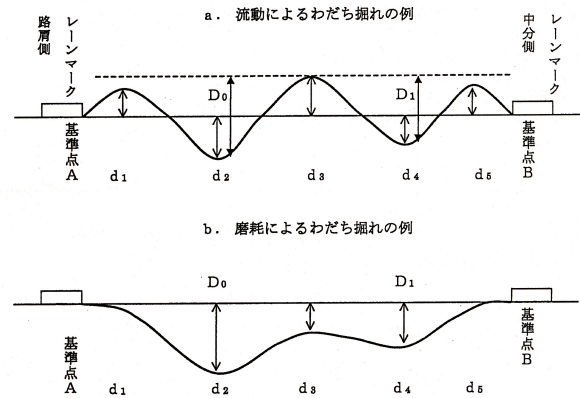


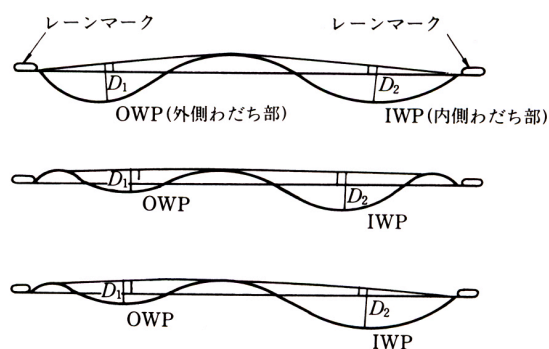
図-3 ピーク法によるわだち掘れ深さの算出⁴⁾

深さが同様の値であっても車両へ及ぼす影響が異なることから、波状特性を分類し評価する事は非常に重要であると考えられる¹⁷⁾。

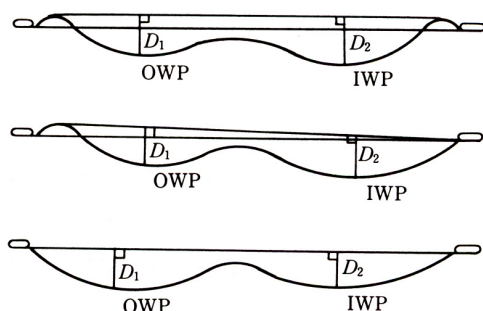
ここで、未知の波状特性を知るためには、プロファイルデータを複数の波長帯域に分割し検討する必要がある。このような場合、スペクトル解析やウェーブレット変換による解析が考えられるが¹⁸⁾⁻²⁰⁾、特に、ウェーブレット変換は、解析波形の定常性を仮定する必要がなく、局在する波の位置情報と空間周波数情報を同時に識別できる利点を有する。そのため、ウェーブレット変換は、わだち掘れの様に、限られた車線幅員の中に局在するようなプロファイルの解析に対し非常に有効である。そこで、本章では、プロファイルの連続ウェーブレット変換による空間周波数解析を行ない、車両の乗り心地に影響するわだち掘れの波状特性について検討する。

(1) 解析に使用するプロファイル

解析には、1998年に世界道路協会 (PIARC) により実施された国際共通試験 (通称「EVEN 試験」) 結果のうち、水準測量および低速プロファイラにより測定されたデータの一部を用いた²¹⁾。本研究では、EVEN 試験結果のうち、わだち掘れの著しい7区間のプロファイルデータを解析対象とし選定した (表-1)。各区間の延長は 100m であり、5m 毎にプロファイルの測定を行



a) 主に流動によって生じたわだち掘れ



b) 主に摩耗によって生じたわだち掘れ

図-4 平均法によるわだち掘れ深さの算出⁵⁾

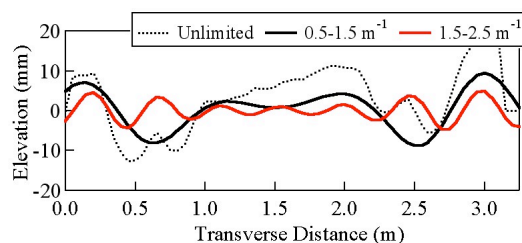


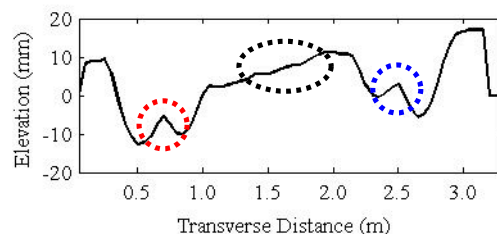
図-5 わだち掘れプロファイルの波長分解例

なっている。よって、得られた、プロファイルは 147 通りである。表中、次章において、新たに開発した指標と比較するため、現行指標であるピーク法 (図-3)⁴⁾、および平均法 (図-4)⁵⁾によるわだち掘れ深さを示した。ピーク法と平均法による、わだち掘れの深さは、最小値がそれぞれ 9mm, 8mm であり、最大値はそれぞれ 37mm, 32mm である。また、わだち掘れ形状の特徴は、一般に「シングル」と「デュアル」、「摩耗性」と「流動性」に大別されるが、表-1 より、選定したプロファイルは、これらの特徴を含むものであることがわかる。

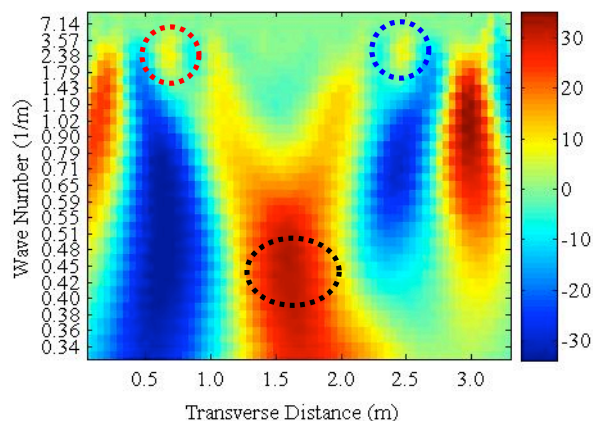
(2) 連続ウェーブレット変換

距離 u , スケール s における距離 t の関数 $f(t)$ の連続ウェーブレット変換は次式で与えられる¹⁹⁾。

$$Wf(u, s) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{s}} \psi^* \left(\frac{t-u}{s} \right) dt \quad (8)$$



(a) 解析対象プロファイル



(b) 連続ウェーブレット変換結果

(グラデーションはウェーブレット係数)

図-6 わだち掘れプロファイルの連続ウェーブレット変換例 (各丸印は対応箇所を表す)

本研究では、マザーウェーブレット $\psi(t)$ として、プロファイルの左右対称性を考慮し、ピーク軸に対しほぼ左右対称である Symlet (次数: 4) を用いた。一般に、わだち掘れの実形状は、左右対称ではないが、スプライン関数やフーリエ関数等、ピークに関し軸対称の関数で近似できることが知られている^{22), 23)}。そのため、図-5 のように、フィルタ処理によってプロファイルを異なる波長に分解した場合、それらは車線中央部や凹凸のピークを軸にほぼ左右対称となる。従って、波状特性解析において、プロファイルは左右対称と考えることができ、非対称性の強いマザーウェーブレットを用いた変換では、各波長のピーク位置が対称軸から外れてしまうため注意を要する。式中、*は共役複素数を表す。また、スケールと空間周波数の関係は次式で定義される。

$$F_s = \frac{F_c}{s \cdot \Delta} \quad (9)$$

ここで、

F_s : スケール s に対応する空間周波数 (m^{-1})

F_c : マザーウェーブレットの中心周波数 (m^{-1})

Δ : サンプリング間隔 (s)。

図-6 にプロファイルの連続ウェーブレット変換例を示す。図中、グラデーションはウェーブレット係数であり、横断距離上に、各空間周波数帯に属する路面の

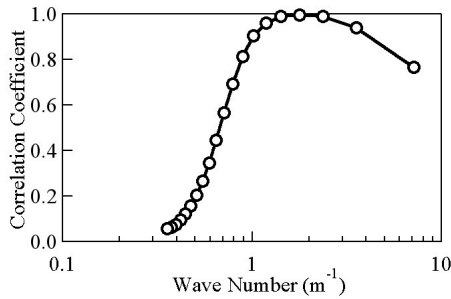


図-7 ウェーブレット係数のRMSと AVx_{RMS} の相関

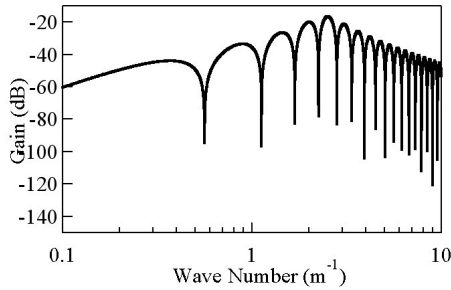


図-8 路面変位入力に対する AVx_{RMS} の応答

波状成分を表す。ここで、ウェーブレット係数とは、プロファイルの振幅と対応し、空間上に局在する信号の大きさと符号、即ち路面凹凸とその大きさを表す。例えば、空間周波数 1.79m^{-1} では、横断距離 0.7m および 2.5m 上にデュアルわだちの特徴が、また、空間周波数 0.60m^{-1} 以下では、横断距離 1.2m から 2.0m にかけて流動性の特徴である盛り上がりが見てとれる。

(3) わだち掘れの波状特性

本節では、解析対象プロファイルの連続ウェーブレット変換から得られた各空間周波数におけるウェーブレット係数の RMS と、 AVx_{RMS} の相関係数を求めることにより、車両挙動に影響を与えるわだち掘れの波状特性について検討する。図-7 にウェーブレット係数の RMS と AVx_{RMS} の相関関係を示す。図-7 より、空間周波数帯 $1.5\text{--}3.0\text{m}^{-1}$ (波長 $0.33\text{--}0.67\text{m}$) での相関が極めて高い。一方、空間周波数 1 以下 m^{-1} (波長 1.0m 以上) の範囲では、急激に相関が低下する。ここで、相関の高い波長帯域は、図-8 に示す様に、路面入力に対する、HC モデルの AVx_{RMS} 応答ゲインが高い範囲と一致する。応答ゲインのピーク f_p は、前述の車両重心位置-懸架装置間距離の補正值を L とし(10)式より求められ、 $n=5$ (空間周波数 2.5m^{-1} 、波長 0.4m) の時最大となる。

$$f_p = \left(n - \frac{1}{2}\right) \frac{1}{2L} \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (10)$$

よって、わだち掘れの波状特性としては、波長 $0.33\text{--}0.67\text{m}$ が、車両挙動に影響を及ぼし、中でも、時速 80km の乗り移り条件では、 0.4m の波長が、ローリ

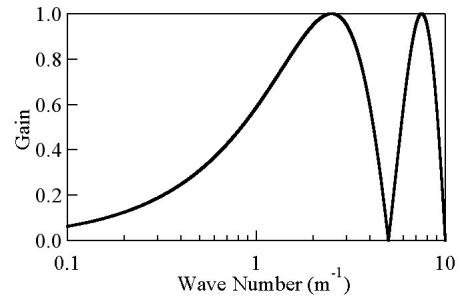


図-9 差分によるバンドパス・フィルタの検出特性

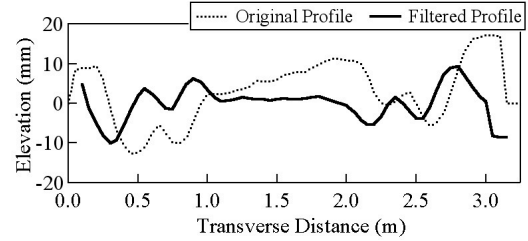


図-10 差分によるバンドパス・フィルタ処理例

ングに関連した車両振動を増幅させ、乗り心地を低下させる波長成分であると言える。次章では、プロファイルから直接上述の波状特性成分を検出する方法について検討する。

4. 波状特性に基づくわだち掘れ評価指標の算定

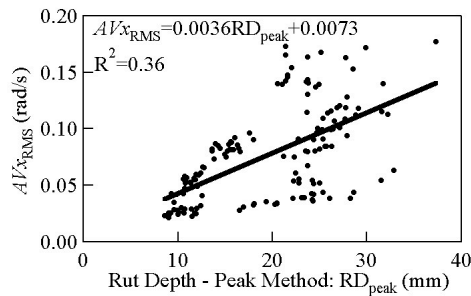
わだち掘れの波状特性として、空間周波数帯 $1.5\text{--}3.0\text{m}^{-1}$ (波長 $0.33\text{--}0.67\text{m}$) が車両挙動に影響を及ぼし、とりわけ 0.4m の波長が乗り心地を低下させることを上述した。路面のモニタリングにおいて、測定プロファイルごとに HC シミュレーションを行なうのは効率的でないため、プロファイルから直接所要の波状特性を評価できれば実用的である。そこで、本章では、車両挙動に関連するわだち掘れの波状特性を抽出する方法を示し、わだち掘れに起因する乗り心地の予測が可能なプロファイル評価指標の算定を行なう。

(1) 波状特性成分の検出方法

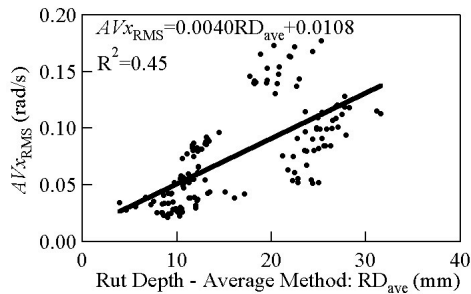
本節では、プロファイルから乗り心地を低下させる波長成分を抽出するために、バンドパス・フィルタ(以下、「BPF」とする)の設計を行なう。BPF とは、必要とする帯域の波長成分のみを取り出すフィルタであり、解析目的や用途に応じて様々なものが提案されている。本研究では、比較的簡単に BPF 処理が行なえることから、差分による BPF を設計する。差分による BPF は、ある測定プロファイル $x(n)$ ($n = 1, 2, 3, \dots$) に対し、(11)式のようにある 2 点間の差分をとることで、特定の波長成分を検出することができる。

$$y(n) = \frac{x(n-d) - x(n+d)}{2} \quad (11)$$

ここで、 $y(n)$ は BPF 処理後のプロファイルであり、 d



(a) AVx_{RMS} とわだち掘れ深さ（ピーク法）の相関



(b) AVx_{RMS} とわだち掘れ深さ（平均法）の相関

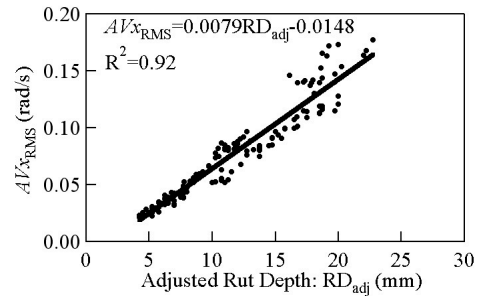
図-11 AVx_{RMS} と従来のわだち掘れ深さ
 RD_{peak} および RD_{ave} の相関

は、(検出対象波長の相当するデータ点数-1)/2 である。ここでは中央差分をとったが、データ点数が2で割り切れない場合には、前方差分もしくは後方差分を用いる必要がある。

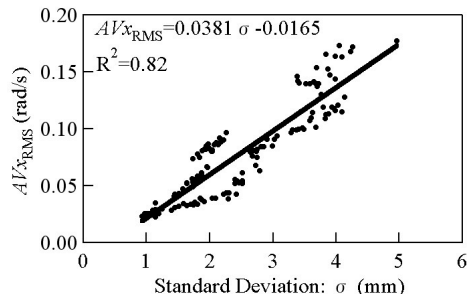
BPF の設計において、検出対象波長は、上述の乗り心地に影響する波長特性を考慮し、0.4mとした。本研究で使用する BPF の検出特性を図-9に示す。図より、空間周波数 2.5m^{-1} (波長 0.4m) の成分を検出できることがわかる。また、空間周波数 8.0m^{-1} (波長 0.125m) 付近の成分も検出されるが、図-6(b)のウェーブレット変換結果より、空間周波数 4m^{-1} 以上の成分は、絶対値が限りなくゼロに近く、路面状況は平たんとなるため、乗り心地評価への影響はないと考えられる。よって、設計した BPF は、所要のフィルタ特性を満たしている。図-10に、BPF 処理前後のプロファイルの一例を示す。

(2) プロファイル評価指標の検討

前節において、BPF 処理により、プロファイルから車両挙動に影響を及ぼし、乗り心地を低下させる成分の抽出方法を示した。本節では、乗り心地を推測するためのプロファイル評価指標として、従来のピーク法および平均法によるわだち掘れ深さ（それぞれ RD_{peak} および RD_{ave} ）、調整わだち掘れ量、およびプロファイル高さの変動を検討するために、BPF 処理後のプロファイル高さの標準偏差 σ を算出し、HC シミュレーションから得られた AVx_{RMS} との相関性について検討する。



(a) AVx_{RMS} と調整わだち掘れ量 RD_{adj} の相関



(b) AVx_{RMS} と標準偏差 σ の相関

図-12 AVx_{RMS} と調整わだち掘れ量 RD_{adj} および
標準偏差 σ の相関

ここで、調整わだち掘れ量とは、BPF 処理後のプロファイルにおける、標高の最大値と最小値の差、すなわち最大振幅であり、以下「 RD_{adj} 」とする。 AVx_{RMS} と各評価指標との相関を図-11 および図-12 示す。図-11より、従来のわだち掘れ深さによる評価方法では、 RD_{peak} 、 RD_{ave} とも、 AVx_{RMS} との明確な相関関係は見られない。一方、図-12より、BPF 処理後のプロファイルから得られた指標である RD_{adj} および σ では、 AVx_{RMS} との間に明確な比例関係が見られた。ここで、単回帰分析をおこなったところ、 RD_{peak} で決定係数 $R^2=0.36$ (相関係数 $R=0.60$)、 RD_{ave} で $R^2=0.45$ ($R=0.67$)、 RD_{adj} で $R^2=0.92$ ($R=0.96$)、および σ では $R^2=0.82$ ($R=0.91$)となり、 RD_{adj} が AVx_{RMS} と最も高い相関関係にある。従って、波長帯域を制限したプロファイルから、 RD_{adj} を算出することにより、摩耗や流動等わだち掘れ形状に関わらず、プロファイル測定データから、直接わだち掘れに起因する乗り心地の予測が可能であることがわかった。

5. まとめ

従来のわだち掘れ深さによる路面管理では、深さが同様の値であっても、プロファイル形状によって車両に与える影響が異なるため、わだち掘れに起因する車両乗り心地の予測が困難であった。本研究では、わだち掘れの波長特性を考慮することで、プロファイルデータから直接算出でき、乗り心地予測が可能な、プロファイル評価指標を開発した。本研究で得られた知見

を以下に示す。

- (1) 連続ウェーブレット変換によるプロファイルの空間周波数解析から、わだち掘れの波状特性について検討した。その結果、わだち掘れの波状特性としては、波長 0.33-0.67m が車両挙動に影響を及ぼし、特に、時速 80km の乗り移り条件では、0.4m の波長が、ローリングに関連した車両振動を増幅させ、乗り心地を低下させることがわかった。
- (2) 差分による BPF 処理により、プロファイルデータから、車両挙動に影響を及ぼし乗り心地を低下させる波長成分の抽出方法を示した。差分による BPF は、所要のフィルタ特性を実現するフィルタ係数の算出、およびフィルタ係数と元波形との畳み込み演算の必要がなく、プロファイルから直接乗り心地に影響する波長成分を抽出できる。
- (3) 従来のピーク法と平均法によるわだち掘れ深さに加え、BPF 処理後のプロファイル評価指標として、調整わだち掘れ量 (RD_{adj}) と標準偏差 σ を提案し、HC シミュレーションから得られた AVx_{RMS} との相関性について検討した。その結果、従来のわだち掘れ深さによる評価指標は、 AVx_{RMS} との相関性が低く、乗り心地評価に適さないことがわかった。一方、 RD_{adj} や σ は、 AVx_{RMS} と高い比例関係にあり、特に RD_{adj} は、決定係数 $R^2=0.92$ (相関係数 $R=0.96$) と、他の指標に比べ、 AVx_{RMS} との間に高い相関があることがわかった。よって、 RD_{adj} を用いることにより、摩耗や流動等わだち掘れ形状に関わらず、プロファイルデータから、直接わだち掘れに起因する乗り心地の予測が可能となるとの知見が得られた。

参考文献

- 1) 秋本隆, 鈴木康一, 井上良和: ポータブル型路面プロファイル測定装置の開発, 舗装, Vol.36, No.8, pp.3-7, 2001.
- 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) 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.
- 4) 東日本高速道路株式会社, 中日本高速道路株式会社, 西日本高速道路株式会社: 試験方法 第2編 アスファルト舗装関係試験方法, NEXCO 中央研究所, 2006.
- 5) 日本道路協会: 舗装調査・試験法便覧, 丸善, 2007.
- 6) 富山和也, 川村彰, 白川龍生: わだち掘れ形状の違いが車両挙動に与える影響に関する研究, 土木学会北海道支部論文報告集, Vol.62(CD-ROM), V-2, 2006.
- 7) 富山和也, 川村彰, 中島繁則, 石田樹, Alimujiang

Yming: 車両の動的応答に基づく舗装わだち掘れ指標の開発, 土木学会舗装工学論文集, 第12巻, pp. 189-196, 2007.

- 8) Tomiyama, K., Kawamura, A., Ishida, T., Nakajima, S. and Nakatsuji, T.: Development of Half-Car Based Rutting Index, Proceedings of the 6th Symposium on Pavement Surface Characteristics, CD-ROM, 2008.
- 9) Tomiyama, K., Kawamura, A., Ishida, T. and Nakajima, S.: Development of Pavement Rutting Index Based on Road-Vehicle Interaction: Half-Car-Based Approach, Proceedings of Transportation Research Board, Vol. 87, No. 08-2049 (CD-ROM), 2008.
- 10) 富山和也, 川村彰, 石田樹: わだち掘れのモニタリングにおける評価指標の検討, 土木学会年次学術講演概要集, Vol.63, V-124 (CD-ROM), 2008.
- 11) Genta, G.: Motor Vehicle Dynamics -Modeling and Simulation-, World Scientific, 2004.
- 12) ASTM: Standard Practice for Simulating Vehicular Response to Longitudinal Profile of Traveled Surface, Annals Books of ASTM Standards, No.E1170-97, 2001.
- 13) Sayers, M.W.: On the Calculation of IRI from Longitudinal Road Profile, Journal of the Transportation Research Board, No.1501, pp.1-12, 1995.
- 14) ISO: Passenger cars -Test track for a severe lane-change manoeuvre, Part1: Double lane-change, ISO3888-1. (1999), 1999.
- 15) The Math Works, Inc.: Using Simulink Version 6, 2005.
- 16) 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.
- 17) 富山和也, 川村彰, 阿里木江依明: 波状特性を考慮したわだち掘れの評価方法, 土木学会年次学術講演概要集, Vol.62, No. 5-288 (CD-ROM), 2007.
- 18) 日野幹雄: スペクトル解析, 朝倉書店, 1985.
- 19) Mallat, S. A.: Wavelet Tour of Signal Processing, Academic Press, 1999.
- 20) 榊原進: ウェーブレットビギナーズガイド, 東京電機大学出版局, 2003.
- 21) Kawamura, A., Takahashi, M., Inoue, T.: Basic Analysis of Measurement Data from Japan in EVEN Project, Transportation Research Record, No.1764, pp.232-242, 2001.
- 22) 富山和也, 川村彰, 白川龍生: 舗装わだち掘れのモデリング方法に関する研究, 土木情報利用技術論文集, Vol.14, pp.119-128, 2005.
- 23) 中辻隆, 加来照俊, 藤原隆, 小野寺雄輝: わだち路面の形状に関する研究, 土木学会北海道支部論文報告集, No.40, pp.372-375, 1984.

DEVELOPMENT OF SUMMARY INDEX OF RUTTED PROFILE FOR VEHICLE RIDE QUALITY ESTIMATION

Kazuya TOMIYAMA, Akira KAWAMURA, Kiyoshi TAKAHASHI and Tateki ISHIDA

The objective of this study is to develop a summary index of a rutted profile for the estimation of ride quality of road vehicles in a rutted road. First, the spatial frequency analysis of the rutted profiles by the continuous wavelet transform is conducted to comprehend the wavy characteristics of the profiles associated with the vehicle motion caused by the lane-change maneuver in the rutting. The result shows that the wavy characteristics in the wavelength of 0.4m affect the vehicle dynamics with respect to the ride quality deterioration. Second, a difference filter is designed to detect the wavelength of 0.4m from a rutted profile. The filtering manipulation enhances the wavy characteristics of the profile corresponding to the ride quality of the vehicle. Finally, we develop a summary index of the profile that is the difference between maximum and minimum elevation of the filtered profile. The result of regression analysis shows that the developed index highly correlates with the ride quality rating value based on the vehicle dynamics. The index enables road administrators to directly estimate the ride quality from rutted profile data of road surfaces in the pavement monitoring activity.