

## 論文

### 2) 事例研究・調査報告研究・システム開発など

# 車両の振動加速度を利用した路面プロファイル推定システムについて

## Study on the Estimating-System of Road Profile by Use of Acceleration of a Vehicle

白川龍生\*  
白川村彰\*\*  
中島繁則\*\*\*  
中辻隆\*\*\*\*

道路利用者費用及び道路管理者費用の総和を最適化することを目的とした舗装マネジメントシステムの構築が精力的に進められているが、近年、路面性状の良否に関する情報をシステムへ反映させるための重要な項目である路面プロファイル測定の重要性が高まっている。各プロファイルは固有の検出特性を有しているが、特殊なバンドパスフィルタによってこの特性を補正することにより、一定の空間周波数帯における路面プロファイルの絶対形状を推定できるようになった。本研究はこの推定方法を応用したものであり、自動車のバネ下振動加速度から路面プロファイルを推定するシステムについて考察した。その結果、自動車の乗り心地及び耐久性を対象とした空間周波数帯であれば、実用的な推定レベルが期待できることを示した。本研究を道路メンテナンスへ適用することにより、(1)道路利用者の安全性・快適性を確保できるとともに、(2)道路利用者費用の軽減に結びつくことが期待できる。

キーワード 路面プロファイル推定システム プロファイル推定フィルタ 振動加速度

### 1. はじめに

道路は日常生活や経済活動に不可欠な社会資本であり、極めて多面的な機能を有している。このうち道路の舗装（路面）は交通車両と接する部分であり、その性状の良否は車両の走行に直接影響を及ぼす。近年の交通量の増加や車両の大型化・高速化に伴い、路面性状に対する社会の要請は変化しており、舗装の耐久性の確保のみならず、車

両の走行安全性・快適性を確保するとともに、道路周辺環境に与える影響を最小限に抑えなければならない。さらに最近では、道路利用者への説明責任（Accountability）の一層の向上が求められるようになった。このような観点から、道路管理者としては道路利用者に対して常に一定水準以上のサービスを提供するよう、路面の維持修繕を行わなければならない。

舗装の構造や機能は供用性能として定量的に評

\* 北見工業大学工学部土木開発工学科 (TEL: 0157-26-9429, e-mail: shirakawa@vortex.civil.kitami-it.ac.jp)

\*\* 北見工業大学工学部土木開発工学科助教授 (TEL: 0157-26-9510)

\*\*\* 株式会社ワーカム北海道研究実験第1部部長 (TEL: 01454-2-3133)

\*\*\*\* 北海道大学大学院工学研究科助教授 (TEL: 011-706-6215)

### 車両の振動加速度を利用した路面プロファイル推定システムについて

価されるが、舗装は新設直後の評価が最も高く、その後は交通による繰り返し荷重や経年的な劣化などにより評価が低下する傾向がある。このことから、舗装という社会資本を効率的に運営するための手段として、ライフサイクル分析の考え方方が導入されている。特に近年は、道路利用者費用と道路建設・維持管理費といった道路管理者側の費用の総和についての最適化を目的とした舗装マネジメントシステム（PMS）の構築が各国で精力的に進められている<sup>1)</sup>。

路面プロファイルの測定は、路面性状の良否に関する情報を舗装マネジメントシステムに反映するための重要な項目の一つである。例えば、ISOHDMが開発した汎用コンピュータソフトウェアのHDM-4 (Highway Development and Management System) では、路面プロファイル測定結果をIRI（国際ラフネス指数：一般的な自動車が路面プロファイルから受ける応答に基づいたラフネス尺度）として換算し道路利用者費用の算定に用いているが、IRIは主要な影響因子の一つとされている<sup>2)</sup>。山本らの報告によると、北海道の国道におけるシミュレーションの結果、IRIが一定水準 ( $IRI \leq 3.55 \text{ m/km}$ ) となるよう維持管理を施した場合、分析開始から7年後には約30%の道路利用者費用の削減効果があるとされている<sup>2)</sup>。このように、近年、路面プロファイル測定の重要性は高まっており、1998年には世界道路協会（PIARC）により各国で利用されているプロファイル（測定装置）を比較・基準化することを目的とした国際共同試験が行われるまでに至っている<sup>3)</sup>。

ここでプロファイルの種類としては、応答型プロファイルからレーザ波を利用した非接触型プロファイルに至るまで多種多様であるが、いずれのプロファイルも固有の検出特性を有しており、この測定結果と路面プロファイルの絶対形状（水準測量などによって得られる形状）は必ずしも一致しない<sup>4),5)</sup>。しかし近年のコンピュータ機器及びソフトウェアの進歩によってデジタル信号処理が比較的容易に実現できるようになり、一定の空間周波数帯であれば、測定データと検出特性の逆

数となる特殊なバンドパスフィルタとの演算補正により実用上十分な精度で路面プロファイルの絶対形状を推定することが可能となった<sup>6)</sup>。

そこで本研究では、上述のプロファイル検出特性の補正方法を応用し、一般的な道路パトロール車と同等の諸元を有する自動車（以下、「試験車」という）のバネ下部で測定した振動加速度から、自動車の乗り心地及び耐久性に影響を与える空間周波数帯の路面プロファイルを推定するシステムについて考察した。特に舗装のライフサイクル分析の見地から、多くの道路において路面状態の定期的なモニタリングを実現するため、一定の測定精度及びデータ処理速度を有しつつコストが低廉となるシステムを指向した。

### 2. 路面プロファイル推定方法

本章では、自動車の振動加速度を利用した路面プロファイルの推定方法について述べる。

#### 2.1 路面プロファイルと振動加速度

路面から自動車に伝わる振動は、タイヤを介してバネ下に伝わり、サスペンションで衝撃的な振動が吸収された後、バネ上に伝わる。この過程は一種のフィルタとも考えられるが、例えばバネ上の乗り心地のみを考慮するならば、路面プロファイル成分のうち高周波成分については不要となる。

このように測定部位によって必要な周波数成分は異なるが、一般的に乗り心地及び耐久性については多くの場合考慮しなければならないことから、路面プロファイル測定はバネ上とバネ下の振動に対応したもの（特にサンプリング間隔について）が必要と思われる<sup>6)</sup>。

以上の理由から、本研究では周波数の情報量が多く含まれるバネ下の振動加速度を用いることとし、加速度計を前車軸の軸受付近に設置した。

#### 2.2 振幅特性の算出方法

路面プロファイル（入力）と自動車の振動加速度（出力）が線形であると仮定すると、入出力の周波数応答関数の振幅特性は式(1)のように示される<sup>4),7)</sup>。

$$|H(f)| = \sqrt{P_y(f)/P_x(f)}$$

ここで、

$|H(f)|$ : 振幅特性 ( $(m/s^2)/mm$ )

$P_x(f)$ : 路面プロファイル (入力) のパワースペクトル ( $(m/s^2)^2/m^{-1}$ )

$P_y(f)$ : 自動車の振動加速度 (出力) のパワースペクトル ( $mm^2/m^{-1}$ )

上記の振幅特性を有し、位相特性を線形位相、初期位相  $\theta(0)=0$ としたフィルタを用いることにより、路面プロファイル (入力) から自動車の振動加速度 (出力) を推定することができる。

路面プロファイル (入力) と、その上を試験車が走行した場合のバネ下の振動加速度 (出力) から振幅特性を求めた例 (走行速度 40 km/h) を図-1 に示す。ここで、空間周波数を Wave Number (以下、「WN」という) とすると、 $WN=1.3\sim1.6 m^{-1}$  (走行速度 40 km/h の場合、14~18 Hz に相当する) 付近が共振域と思われるが、これは自動車 (乗用車) のバネ下の固有振動数として一般的に考えられている 10~17 Hz と概ね一致する (なおバネ上は 1.2~1.5 Hz 程度が影響すると考えられているが<sup>5,8)</sup>、この場合バネ下に影響する高周波領域の成分が多く含まれているため、明確には現れない)。

このシステムは入出力間の線形性を利用していいるため、Repeatability (反復性) の検定が必要である。この考察については 4 章で述べる。

本研究の目的は、自動車の振動加速度から路面プロファイルを推定することであるため、最終的には図-1 の逆数となる演算補正が施されたフィ

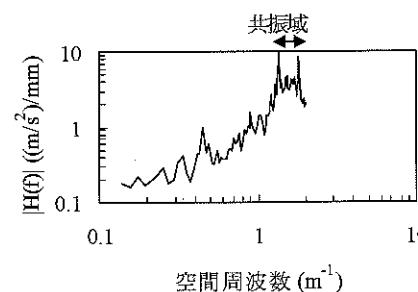


図-1 周波数応答関数 (振幅特性) の算出例

(1)

ルタ (以下、「プロファイル推定フィルタ」という) を算出した<sup>4)</sup>。

### 3. 研究対象の周波数帯

研究対象となる周波数帯は、測定データの特徴等を考慮し以下のように設定した。

路面特性の条件としては、測定車と同様に平坦性を対象とする場合、 $WN=0.02\sim20 m^{-1}$  の帯域が考慮されなければならない。この周波数帯は、乗り心地、騒音、燃費、車のダメージなど、車両の走行費用に関係している<sup>5,8)</sup>。

車両条件としては、バネ上及びバネ下の振動に影響する周波数帯が主たる対象となる場合、測定速度が 40~60 km/h であれば、 $WN=0.08\sim0.14 m^{-1}$  (バネ上: 1.2~1.5 Hz) 及び  $WN=0.60\sim1.53 m^{-1}$  (バネ下: 10~17 Hz) が含まれなければならない。したがって、サンプリング間隔は最大周波数である  $WN=1.53 m^{-1}$  ( $\lambda=0.65 m$ ) を構成することが可能な  $\Delta t=0.33 m$  以下であればよいが、ナイキスト周波数に近い成分の正弦波の振幅と位相はサンプリング開始のタイミングにより変化するため、これを防ぐためには情報として必要な最短波長の少なくとも 1/10 程度のサンプリング間隔であることが望ましい<sup>9)</sup>。このことから、 $\Delta t=0.065 m$  以下に設定すべきである。

またフィルタ安定性の条件としては、サンプリング間隔を短くするとフィルタの通過域が高周波の領域へ拡大するが、一方で低周波領域についてはフィルタ通過域の Gain (振幅利得) が不安定となることが挙げられる<sup>10)</sup>。したがって、フィルタの通過域の幅には一定の制約が伴う。 $\Delta t=0.05 m$  とした場合、 $WN=0.067 m^{-1}$  ( $\lambda=15 m$ ) 付近が限界であると思われる (図-2)。

以上の条件のうち、本研究では特に車両及びフィルタ安定性の重要度が高いことから、図-3 に示すように、 $WN=0.08\sim1.80 m^{-1}$  の周波数帯 ( $\Delta t=0.05 m$ ) を研究対象として設定した<sup>4)</sup>。

### 4. 路面プロファイル推定システム

本章では、振動加速度を利用した路面プロファ

## 車両の振動加速度を利用した路面プロファイル推定システムについて

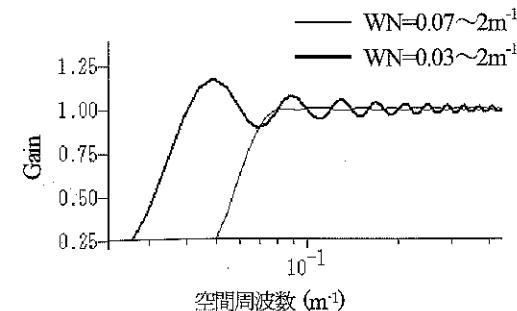


図-2 フィルタ通過域の安定性

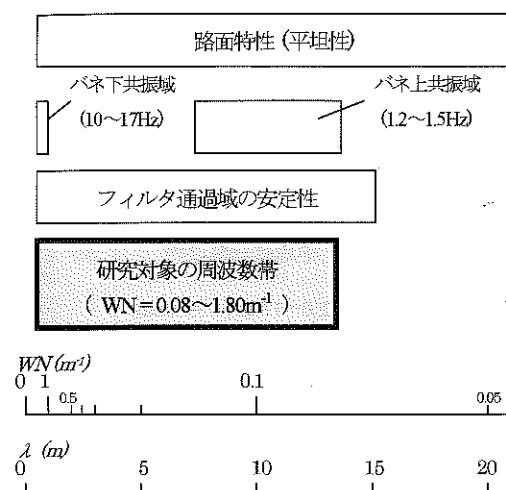
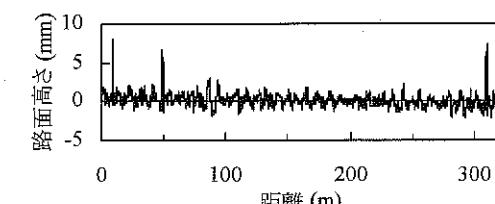


図-3 フィルタ通過域の設定方法

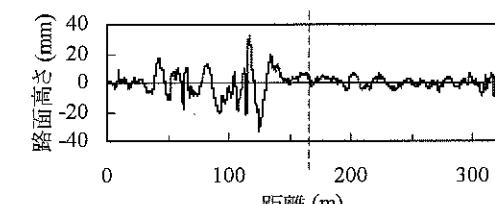
察する目的から、舗装後比較的新しく使用頻度の低い区間 (以下、「区間1」という) 及びクラックなどの損傷や特殊舗装を含む区間 (以下、「区間2」という) の 2 区間 (いずれも直線、 $L=320 m$ ) を選定した。サンプリング間隔については  $\Delta t=0.05 m$  とした。WN=0.08~1.80 m<sup>-1</sup> を通過域としたバンドパスフィルタ処理後の路面プロファイルを図-4 に示す。なお区間2は、図-4 (b) の点線 (始点から 170 m) を境にプロファイルの平坦性が大きく異なっているのが特徴である。

### 2) 振動加速度

試験車 (写真-1, 写真-2) のバネ下振動加速度



(a) 区間1 ( $\sigma=2.1 mm$ , IRI=1.3 mm/m)



(b) 区間2 (0~170m:  $\sigma=9.4 mm$ , IRI=5.3 mm/m)  
(170~320m:  $\sigma=3.1 mm$ , IRI=2.5 mm/m)

図-4 試験区間の路面プロファイル



写真-1 試験車

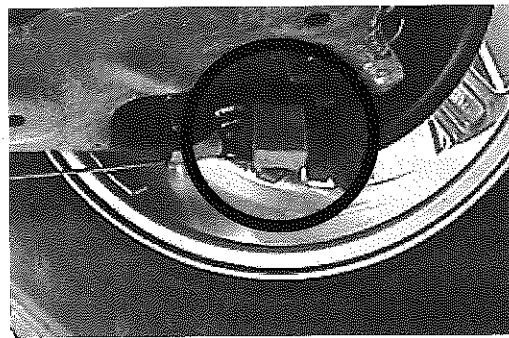


写真2 試験車バネ下に設置した振動加速度計

は、路面プロファイル測定区間において、速度40 km/h, 50 km/h, 60 km/hの3パターンをそれぞれ5回ずつ計30回測定した。

#### 4.2 振動加速度の Repeatability

Repeatability(反復性)は、同時に同一装置を用いて同一測定区間を複数回測定した際に、同じ測定値を繰り返し得ることができる能力のことであり、一般的には繰り返し測定データの平均値もしくは標準偏差によって示されることが多い<sup>11)</sup>。

各測定区間で速度別に5回の走行によって得られた振動加速度データの区間統計値( $\sigma$ )の平均値を求め、平均値からn%以内の範囲にデータがどの程度含まれたかについて、測定速度別に整理したものを図-5に示す。

データの傾向として、平坦性の度合及び速度の違いは明確ではないが、図-5(b)(c)の各1回ずつを除き、データは平均値±5%以内の範囲内に含まれている。路面プロファイル推定システムは入出力間の線形性を利用していいるため、入力データの誤差が出力データに反映するが、区間2の0~170 m(IRI=5.3 mm/m:「古い舗装」に分類<sup>5)</sup>)のように $\sigma=9.4$  mmと大きい区間の場合も最大で±0.5 mm程度の誤差であることから、Repeatabilityとしては概ね良好な結果であると思われる。

#### 4.3 周波数応答関数の振幅特性

##### 1) 変動係数の分布

式(1)より計算された周波数応答関数の振幅特性について、平坦性及び速度の違いによる変動係数(CV)の変化を図-6に示す。変動係数は標準

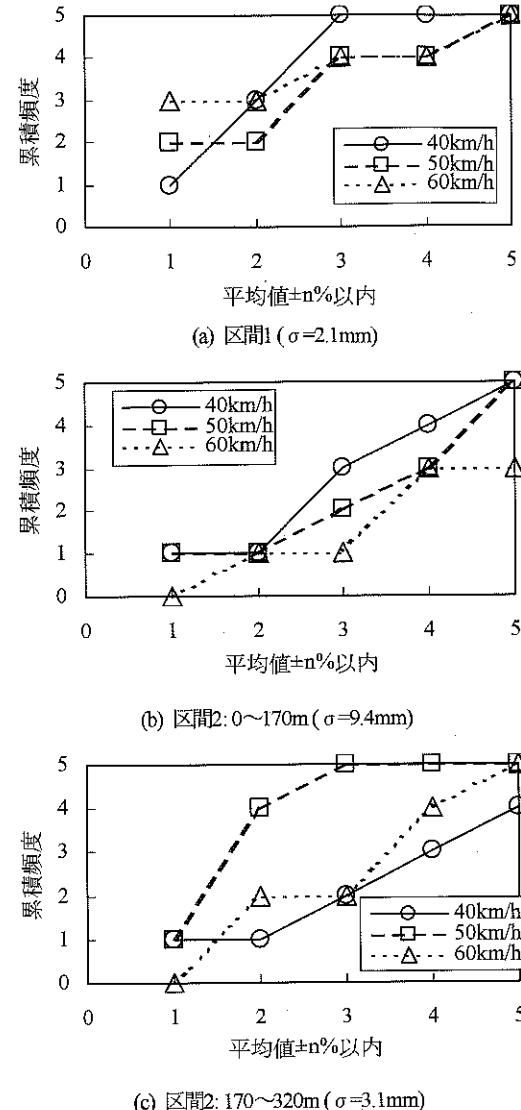


図-5 振動加速度の Repeatability

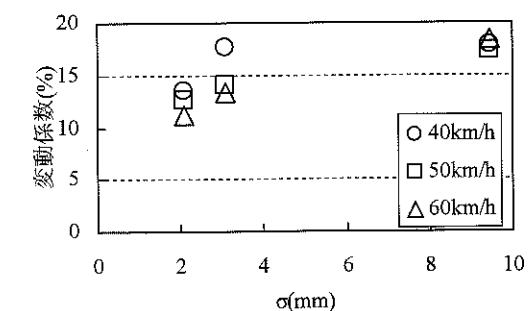


図-6 振幅特性の変動係数

#### 車両の振動加速度を利用した路面プロファイル推定システムについて

の標準偏差を平均値で除した値であり、通常百分率で表されるが、目安として5%以下であればばらつきが小さく、6~15%未満で普通のばらつき、15%以上で大きなばらつきとされている。

図-6では、各周波数で計算された変動係数の平均値を示しているが、 $\sigma$ に比例してばらつきが大きい。また僅差であるが速度の低い場合に大きくなる傾向が窺える。

##### 2) 速度の差異による振幅特性の傾向

振幅特性のうち、各速度における5回の測定で最も平均的な値を示したデータを用いて、速度の差異による傾向を整理したものを図-7に示す。ここで周波数の情報については各速度の比較を行うため時間周波数(Hz)で示した。図-1と同様

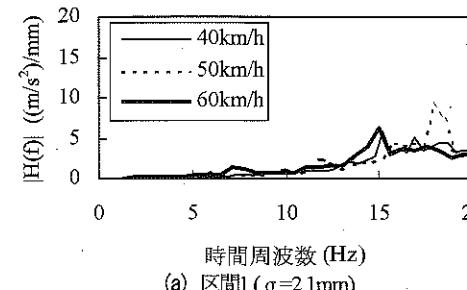
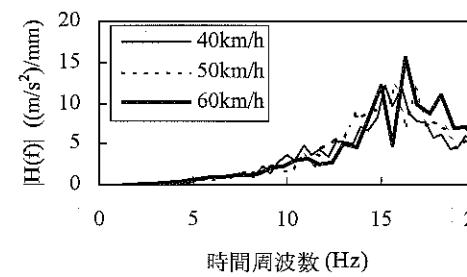
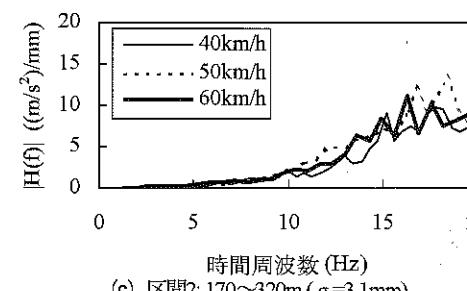
(a) 区間1 ( $\sigma=2.1$  mm)(b) 区間2: 0~170m ( $\sigma=9.4$  mm)

図-7 速度の差異による振幅特性の傾向

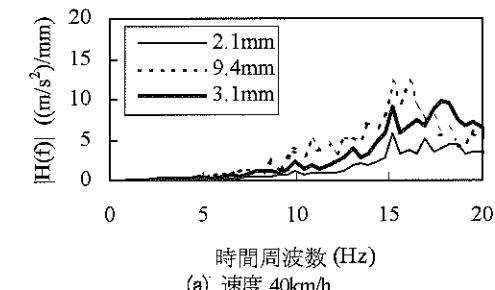
に10~20 Hz付近に共振領域が見られる。

図-7を考察した結果、速度の違いによる明確な差異は見受けられなかった。一般に路面プロファイルは低周波数帯の成分が大きく、速度が高くなるに伴い共振領域が長波長領域へシフトするため振幅特性の値が大きくなると思われるが<sup>4)</sup>、本研究で対象とする程度の速度差であれば、その違いが明確には現れなかったと考えられる。

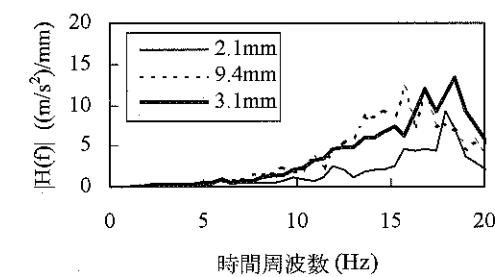
##### 3) 平坦性の差異による振幅特性の傾向

前項と同一のデータを用いて、平坦性の差異による振幅特性の傾向について整理したものを図-8に示す。

区間1( $\sigma=2.1$  mm)に比べ、区間2( $\sigma=9.4$  mm, 3.1 mm)の値が大きい。この結果のみを



(a) 速度 40km/h



(b) 速度 50km/h

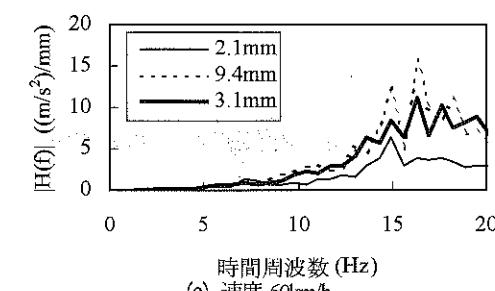


図-8 平坦性の差異による振幅特性の傾向

単純に考察すると、振幅特性は平坦性の大きさに依存すると受け取れるが、区間2のデータのみ比較すると、ピーク値を除く全体の傾向に大差はない。このことから、図-8に見られる差の原因としては、平坦性の差異による影響に比べ、その他測定条件の違い（例えば、タイヤコンディションなど）が考えられる。この点については今後検討する必要がある。

#### 4.4 路面プロファイルの推定

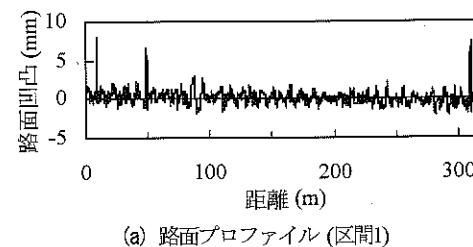
以上より、本研究で用いたデータは、区間の違いによる振幅特性の差異はあるが、同一区間にあれば概ね安定しており、路面プロファイルの推定が可能と考えられる。そこで、2章の推定方法に基づき、振動加速度から路面プロファイルを推定した。

##### 1) プロファイル推定フィルタの算出

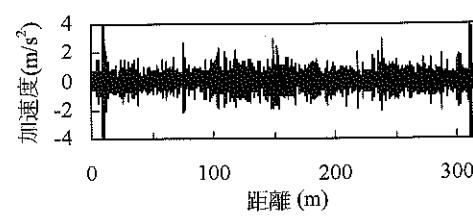
本項では、区間1の速度40 km/hにおける5回の測定データのうち、最も平均的な値を用いたプロファイル推定フィルタの算出例を示す。

路面プロファイル（水準測量によるもの）及び振動加速度を図-9に示す。また、パワースペクトル密度の分布を図-10に示す。

ここでパワースペクトル密度の計算方法としては、データの精度を考慮すると最大エントロピー法が優れている。しかし、フィルタリング処理の



(a) 路面プロファイル(区間1)

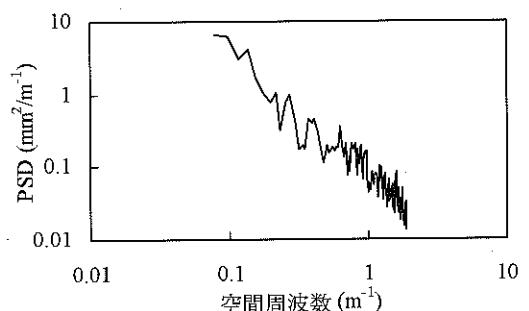


(b) 振動加速度(区間1, 測定速度40km/h)

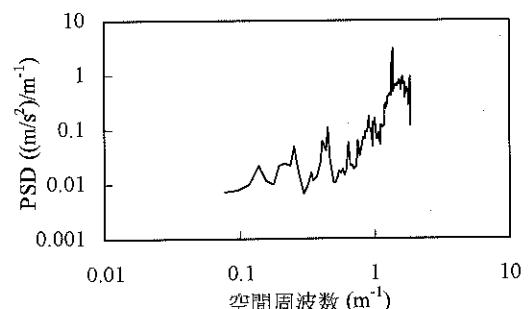
図-9 測定データ

過程で高速フーリエ変換法（以下、「FFT」という）及び高速逆フーリエ変換法（以下、「IFT」という）を用いるため、パワースペクトル密度の算出においても演算方法を統一したほうが有利である。このことから本研究ではFFT法を用いることとした<sup>4)</sup>。なお、FFT法ではデータ数がセグメント長の4倍程度以上とするよう提案されていることから<sup>4),7)</sup>、セグメント長を  $L_{seg}=1024$  と設定した。ウインドウ処理についてはHammingウインドウを用いた。

図-10及び式(1)より算出したプロファイル推定フィルタのGainを図-11のように示す。参考として区間2の場合についても示した。ここでは前節で述べた区間の違いによる振幅特性の差異が現れており、低周波領域では同程度であるが、高周波領域においては区間1のフィルタが区間2のフィルタに比べ、Gainは約5倍となっていることが確認できる。



(a) 路面プロファイル(区間1)



(b) 振動加速度(区間1, 測定速度40km/h)

図-10 測定データのパワースペクトル密度

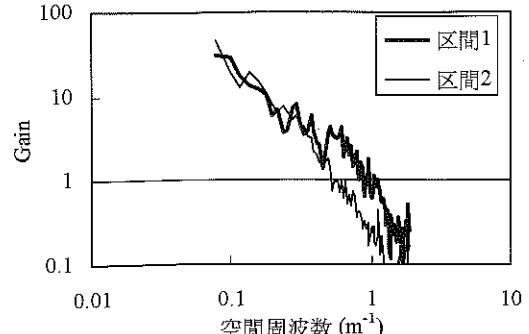


図-11 プロファイル推定フィルタ

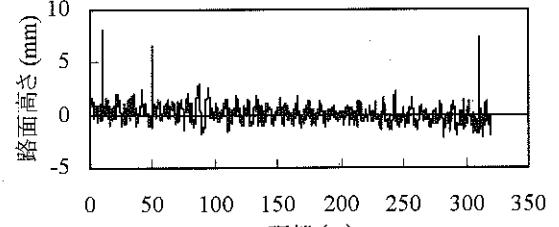
#### 2) 路面プロファイルの推定

図-11のフィルタを用いて路面プロファイルを推定した結果を図-12に示す。ここで、振動加速度は区間1のσの平均値から最も外れた値を用いた。

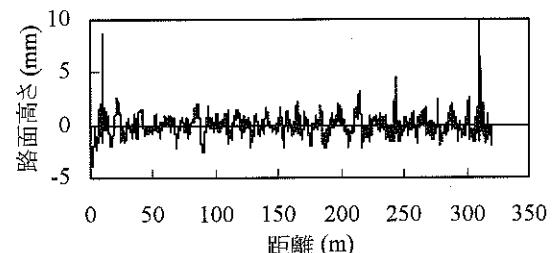
推定手順を整理すると以下のようになる。

- ・フィルタの設計
  - 路面プロファイルの推定周波数帯域を決定する。
  - 振動加速度データ及び路面プロファイルのパワースペクトルを各々FFT法によって算出する。
  - 入出力間の振幅特性を式(1)によって求める。
  - 位相を線形位相とし、初期位相  $\theta(0)=0$ としたフィルタ（路面プロファイル推定フィルタ）を設計する。
- 路面プロファイルの推定
  - 入力データをFFTによって空間周波数領域へ変換する。
  - フィルタリング処理を行う（路面プロファイル推定フィルタを用いる）。
  - IFTによって推定プロファイルを出力する。

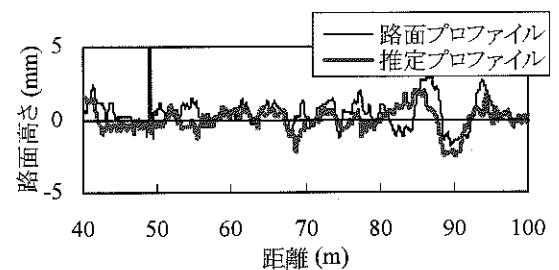
図-12(a)及び(b)の波形を比較した結果、推定波形の振幅は増幅されているが、特徴的な凹凸の発生位置及び形状については、総体として捉えると類似している。このうち、特に凹凸が大きい40~100 mの区間について考察すると、50 m付



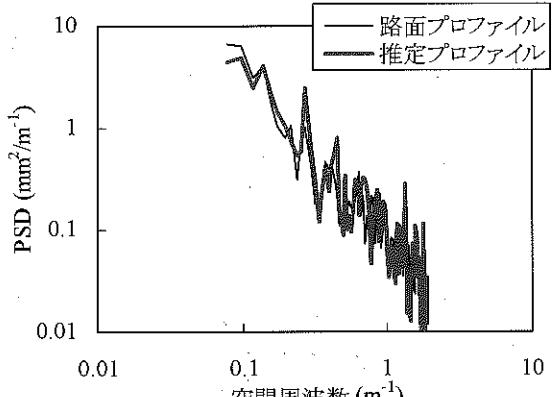
(a) 路面プロファイル



(b) プロファイル推定結果



(c) 波形の比較(40~100mの例)



(d) パワースペクトル密度による比較

図-12 プロファイル推定結果

近の極大値の推定は困難であるが、その他については土2 mm以内の誤差で推定されている(図-12(c))。

パワースペクトル密度を比較すると、推定波形は高周波成分が多く含まれているが、全体的な傾向としては路面プロファイルと同等の結果が得られた(図-12(d))<sup>4)</sup>。

また、区間長10 mごとに $\sigma$ を算出し、路面プロファイルの $\sigma$ と比較した(図-13)。結果として、路面プロファイルに対し19%程度大きな値が得られた。この理由としては、図-11に示す区間1のフィルタが高周波成分を増幅する性質を有しているためと考えられる。しかしながら、推定値のばらつきは比較的小さく、推定値を19%程度縮小することにより路面プロファイルの $\sigma$ を算出できる。ここで、一般的な路面性状測定車における許容範囲は基準データ±30%以内とされており、プロファイル推定システムは路面性状測定車に比べると精度はやや低いが、上記の縮小演算を施すことによって同程度のレベルとすることができる<sup>13)</sup>。

以上のことから、プロファイル推定システムの推定精度は、使用するフィルタの性質に依存するものの、実用的なレベルを有していると思われる。

プロファイル推定フィルタの留意点としては、特に低周波成分のGainが10倍を超過する場合があるため、入力データに含まれるノイズなど僅かな差が出力結果に影響を与える点である。この

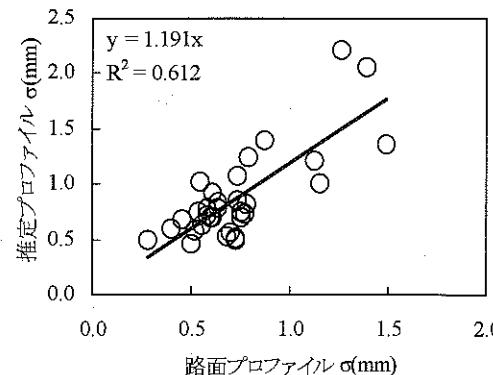


図-13  $\sigma$ の推定精度(極大値が介在する区間を除く)

ため、プロファイル推定範囲には一定の制約を与える必要があると考えられる。

#### 4.5 道路メンテナンスへの適用

道路の走行路、すなわち道路舗装は、車両荷重が直接的に作用するため、他の土木構造物に比べ力学的作用の密度が高く損耗が激しい。また、その管理状態が走行安全性、乗り心地といったサービス水準に直接影響する。このような理由から、舗装は維持作業及び修繕を前提として設計されており、適切な時期に適切な方法によってメンテナンスを行わなければならない。そのためのメンテナンス計画手法として舗装マネジメントシステムが構築されている<sup>1)</sup>。

舗装マネジメントシステムは、既設舗装の補修において、限られた予算を最も効率的に使用する方法の確立を主目的として利用されている。特に「補修箇所の選定」及び「優先順位決定」はシステムの核となる項目であるが、路面プロファイルはこのための重要な基礎データとなっている<sup>2)</sup>。

本研究は、プロファイルの測定精度の向上に比べ測定回数の増加を意識したものである。測定精度については実用的な範囲以上のレベルを想定していないが、測定に要するコストを低廉に抑え、さらに道路巡回時に併せて路面プロファイルデータを取得することが可能であることを示した。路面プロファイル推定システムを道路メンテナンスへ適用することにより、プロファイルの測定回数は現在より大幅な増加が見込まれることから、舗装マネジメントシステムの性能(劣化の予測精度)が向上し、(1)道路利用者の安全性・快適性が確保できとともに、(2)道路利用者費用の軽減に結びつくことが期待できる。

また、入力データとして自動車の振動加速度を用いる方法は、車両運動と路面管理の2つの側面から分析結果を考察でき、交通工学における車と路面の相互作用分析の観点からも興味深い方法であると思われる。

#### 5. まとめ

本研究で得られた知見は以下の通りである。

(1) 自動車バネ下の振動加速度から路面プロ

#### 車両の振動加速度を利用した路面プロファイル推定システムについて

て考察し、路面プロファイル推定システムの適用範囲を改めて検討したい。

#### 謝辞

本研究に必要な路面プロファイルの測定にあたり、北海道開発局網走開発建設部の関係各位にご協力をいただいた。ここに記して感謝の意を表す。

#### 参考文献

- 1) 菊川滋ほか; “最新・アスファルト舗装技術—舗装学のすすめ・AからZまで”, 山海堂, 1995
- 2) 山本直平ほか; “ユーザーコストに着目した舗装マネジメントシステムの構築”, 土木学会第57回年次学術講演概要集, IV-387, pp. 773~774, 2002
- 3) 川村彰; “PIARC 路面性状国際共通試験報告”, 北の交差点, vol. 4, pp. 34~35, 財団法人北海道道路管理技術センター, 1998
- 4) 白川龍生ほか; “ウエーブバンドを考慮した路面プロファイルデータ処理手法について—EVENデータを用いて”, 舗装工学論文集, No. 7, pp. 15. 1-12, 2002
- 5) Michael W. Sayers, Steven M. Karamihas; “The Little Book of Profiling—Basic Information about Measuring and Interpreting Road Profiles”, The University of Michigan Transportation Research Institute, 1997
- 6) 景山克三, 景山一郎; “自動車力学”, 理工図書, 1984
- 7) 日野幹雄; “スペクトル解析”, 朝倉書店, 1977
- 8) 井上武美; “路面性状に関する国際委員会の動き—PIARC/ISO—”, 舗装, vol. 36, No. 11, pp. 33~38, 2001
- 9) 酒井幸市; “高専学生のためのデジタル信号処理”, コロナ社, 1996
- 10) 中村章吾; “ビギナーズデジタルフィルタ”, 東京電機大学出版局, 1989
- 11) Akira Kawamura et al.; “Basic Analysis of Measurement Data from Japan in PIARC EVEN Project”, Transportation Research Record 1764, pp. 232~242, 2001
- 12) 新城明久; “生物学統計学入門—計算マニュアル”, 朝倉書店, 1986
- 13) 小野田光之; “講座 路面の評価(3) 路面性状測定車(自動測定装置)”, 舗装, vol. 36, No. 10, pp. 34~39, 2001
- 14) Yves Delanne, Paulo A. A. Pereira; “Advantages and Limits of Different Road Roughness Profile Signal-Processing Procedures Applied in Europe”, Transportation Research Record 1764, pp. 254~259, 2001

(2003年2月27日受付)  
(2003年7月14日再受付)