

検証実験に基づく真のプロファイル 推定における制約条件の設定

白川 龍生¹・前田 近邦²・川村 彰³

¹正会員 博(工) 北見工業大学助手 工学部土木開発工学科 (〒090-8507 北海道北見市公園町 165 番地)

²学生会員 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)

³正会員 博(工) 北見工業大学助教授 工学部土木開発工学科 (〒090-8507 北海道北見市公園町 165 番地)

3m プロフィロメータの測定データから真のプロファイルを推定する場合、対象となる波数の範囲を広げすぎると推定精度が低下するため、波数範囲に一定の制約条件を与える必要がある。本研究では、複数の条件で真のプロファイルを推定し、区間統計値による推定精度の比較分析を行った。また、乗用車の乗り心地解析を行う際に影響の大きい波数のプロファイルが正確に推定されていることを検証するため、北見工業大学のドライビングシミュレータ (KITDS) を用いて走行実験を行った。その結果、一般道路における制約条件として、*Wave Number (WN)* = $0.04 \sim 0.33 \text{ m}^{-1}$ と設定すれば、実用上大きな問題は生じないことを示した。

Key Word : 3m Profilometer, True Profile, Profile Estimate Filter, KIT Driving Simulator

1. はじめに

舗装のサービス性能を評価する上で、路面のプロファイル特性を把握することは、乗り心地の評価につながるだけではなく、これに起因するすべり、騒音、振動問題などの解析評価に有効であり、今日、道路管理者にとって重要な課題となっている¹⁾。

路面プロファイル測定装置（以下、「プロファイラ」という）は数多く考案されているが、わが国で最も普及している 3m プロフィロメータのような特有の検出特性を有するプロファイラについては、その測定結果が真のプロファイル形状と大きく異なっている。このため、例えば路面上を走行する自動車の運動を数値シミュレーションにより予測する場合などの用途には適していない。

これを解決する方法として、プロファイラの測定データから真のプロファイルを推定する方法が考案されている²⁾。この研究では、1998 年に世界道路協会（以下、「PIARC」という）によって実施された路面の平坦性に関する国際共同試験（以下、「EVEN 試験」という）^{3), 4)} のデータを用いて、一定の波数範囲内であれば路面プロファイル形状及び国際ラフネス指数 (*International Roughness Index*, 以下、「IRI」という) を高精度で推定できることが示されている。

しかし、この方法を適用する場合、真のプロファイルの推定精度を高めるために、推定の対象となる波数の範囲に制約を与える必要が生じるが、既往の研究ではフィルタ設計等の演算過程に自由度が残されているため、実用上重要な「波数範囲の制約条件」については明確に示されていないかった。

そこで本研究では、3m プロフィロメータを例に、真のプロファイル形状を推定する場合の波数に関する制約条件について、PIARC EVEN 試験結果を用いて考察した。特に一般道路上を走行する乗用車の乗り心地解析を行う場合に影響の大きい波数が含まれていることを検証するため、北見工業大学のドライビングシミュレータ（以下、「KITDS」という）による走行実験を行った（写真-1）。このシミュレータは路面性状データ（わだち掘れや平坦性、摩擦係数など）を入力することができ、この上を走行する乗用車の運動を 6 軸のサーボシリンダによって再現する機能など、独自の機能を有する国内唯一のシミュレータである^{5), 6)}。

研究開発にドライビングシミュレータを用いる利点としては、以下の点が挙げられる⁷⁾。

- a) 安全性が高い
- b) 現象の再現性が高い
- c) 条件設定が容易で経済性が高い
- d) 効率よく訓練、開発、研究が進められる



写真-1 北見工業大学のドライビングシミュレータ (KITDS)

先述の PIARC EVEN 試験では路面性状に関するデータは公開されているが、試験区間を走行する乗用車の振動加速度等のデータについては明らかにされていない。このような場合、KITDS の路面性状データ入力機能を用いることにより、過去に測定された路面上を走行する車両振動データを実験的に得ることができる⁵⁾。

本研究におけるシミュレータ実験の目的は、真のプロファイル推定における制約条件設定の妥当性を検証するものである。入力データとしては、PIARC EVEN 試験で測定された 4 箇所の真のプロファイル（一般道路、IRI のレベル別）に対し、それぞれ 9 種類のバンドパスフィルタ処理を施した波形を用いる。

2. 3m プロフィロメータの検出特性²⁾

3m プロフィロメータは、全長 3m の測定装置であり、中央部の測定車輪の変位を記録するものである（図-1）。測定における特徴としては、変位測定の基準面を確立するため、装置の始終点を複数の車輪によって平均化している点があげられる。

3m プロフィロメータの検出特性を図-2 に示す。ここで、振幅利得（感度）を示す *Gain* が 1 の場合は真のプロファイルと同じ値が、1 を上回る場合は真のプロファイルに比べ大きな値が得られることを示す。これに対し、*Gain* が 1 を下回る場合は本来得られるべき値に比べ小さな結果が得られる。図-2 を考察すると、線形など長波長の領域については *Gain* の値が小さいため、これらの成分はプロファイルの測定結果として明確には現れない可能性がある。

路面上を走行する乗用車が共振しやすい波数（＝バネ上固有振動数）は一般的に約 1～1.5Hz と考え

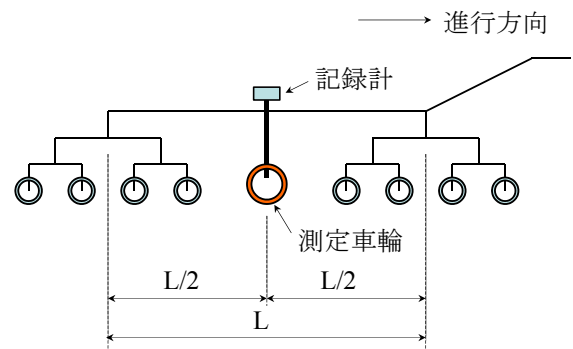


図-1 3m プロフィロメータの模式図

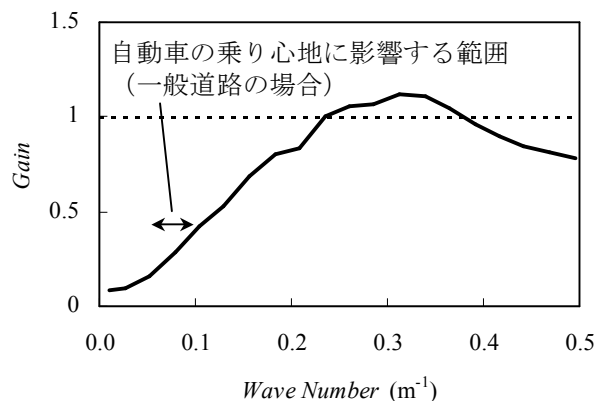


図-2 3m プロフィロメータの検出特性 (PIARC EVEN 試験結果より算出)

られているが⁸⁾、これは一般道路の法定最高速度 60km/h の場合、*Wave Number*（以下、「*WN*」という）＝0.06～0.09m⁻¹ の範囲に相当する（図-2 中、矢印で示す波数の範囲）。自動車の乗り心地を良好な水準にするには、この範囲におけるプロファイル形状を正確に把握する必要があるが、この範囲における *Gain* は 0.2～0.4 程度であり、真のプロファイル形状に比べ非常に小さいため、その実形状を把握することは困難である。したがって、3m プロフィロメータの測定結果を有効活用する場合は演算補正を要する。すなわち、*Gain* が 1 より大きい波数の場合は成分を縮小演算し、逆に *Gain* が 1 より小さな波数の場合は拡大演算を行う必要がある。この演算に用いるフィルタの振幅特性を図-3 に示す。

図-3 において、*Gain* が非常に小さい波数の場合は拡大率が大きくなり、わずかな測定誤差が演算結果に影響を及ぼすことから、補正する波数の範囲に一定の制約を与えなければならない²⁾。そこで本研究では、演算補正対象となる波数の範囲について考察した。

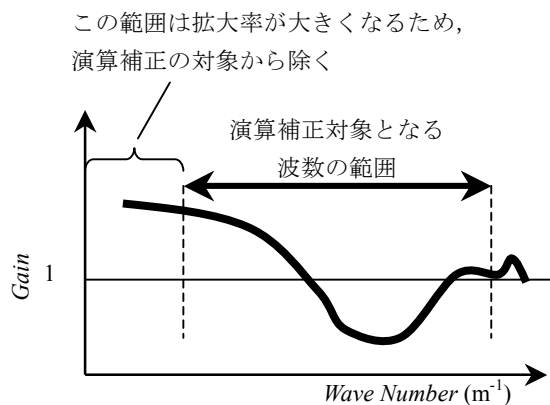


図-3 演算に用いるフィルタの振幅特性と補正対象となる波数の範囲

3. 真のプロファイル推定における制約条件の設定及び結果の比較分析

3m プロフィロメータの測定データから真のプロファイルを推定する演算過程において、補正対象となる波数に制約を与える方法として、本研究ではバンドパスフィルタ処理を用いた。そこで本章では、この制約条件の設定方法及び制約条件適用後の結果について比較分析を行った。

(1) 事前処理

分析を行う前に、3m プロフィロメータの測定データから推定したプロファイル形状、及び評価基準のプロファイル形状に対して共通のバンドパスフィルタ処理を施し、比較するデータの波数の範囲を統一する。この事前処理フローを図-4に示す。

ここで、評価基準となるプロファイルとしては、水準測量と Rolling Dipstick 及び Dipstick の測定データによって構成された波形を用いた (EVEN 試験ではこの波形が真のプロファイルとされている)^{4), 9)}。

バンドパスフィルタ通過域の上限値については、EVEN 試験における 3m プロフィロメータのサンプリング間隔が 0.30m であるため、データの精度を考慮し、サンプリング間隔の 10 倍の波数に相当する $WN=0.33\text{m}^{-1}$ を補正する波数範囲の上限値に設定した⁹⁾。下限値については、 $WN=0.10, 0.09, 0.08, 0.07, 0.06, 0.05, 0.04, 0.03, 0.025\text{m}^{-1}$ の 9 パターンを設定した (図-5)。

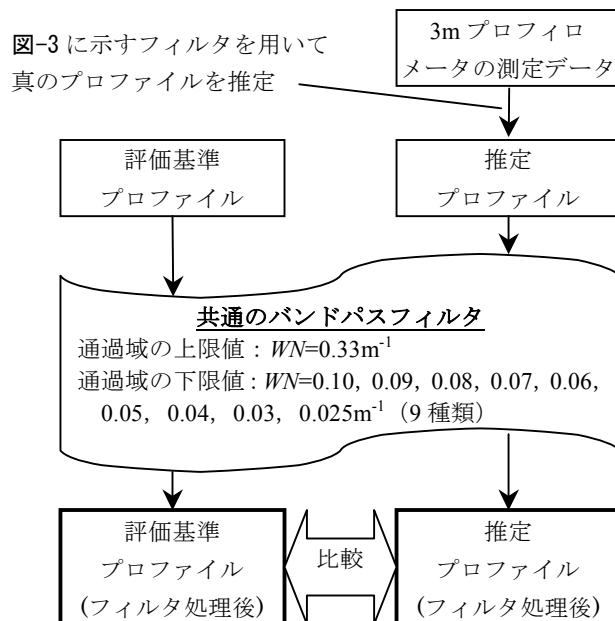


図-4 波形分析のための事前処理フロー

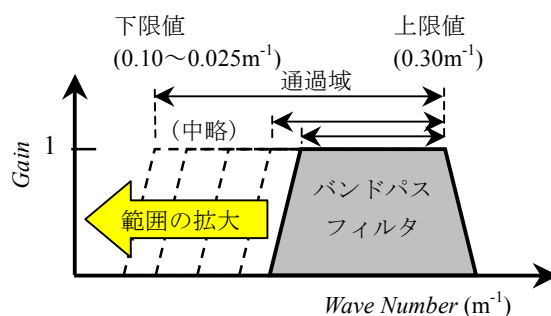


図-5 バンドパスフィルタ通過域の設定方法

(2) IRI による比較

上記フィルタ処理後のプロファイルについて、IRI により比較した結果を図-6に示す。評価区間長は 50m とした。また、評価基準プロファイルにエラーと思われる値が介在している箇所があるため、既往の研究と同様、本研究でも当該箇所を計算対象から除外した (EVEN 試験の区間 No.3, No10, No11, No12, No14, No17 の一部箇所)²⁾。また、図中、評価基準プロファイルの IRI を「True Profile IRI」、推定したプロファイルの IRI については「Estimate Profile IRI」と表記した。

図-6を考察すると、2変数間の関係の強さを表す相関係数は高い値を示しており、実用上の目安値を $R=0.7$ (決定係数 $R^2=0.5$) 以上と考えれば、いずれのパターンも問題ないと思われる。

ここで、図-6においてフィルタ通過域の下限値を

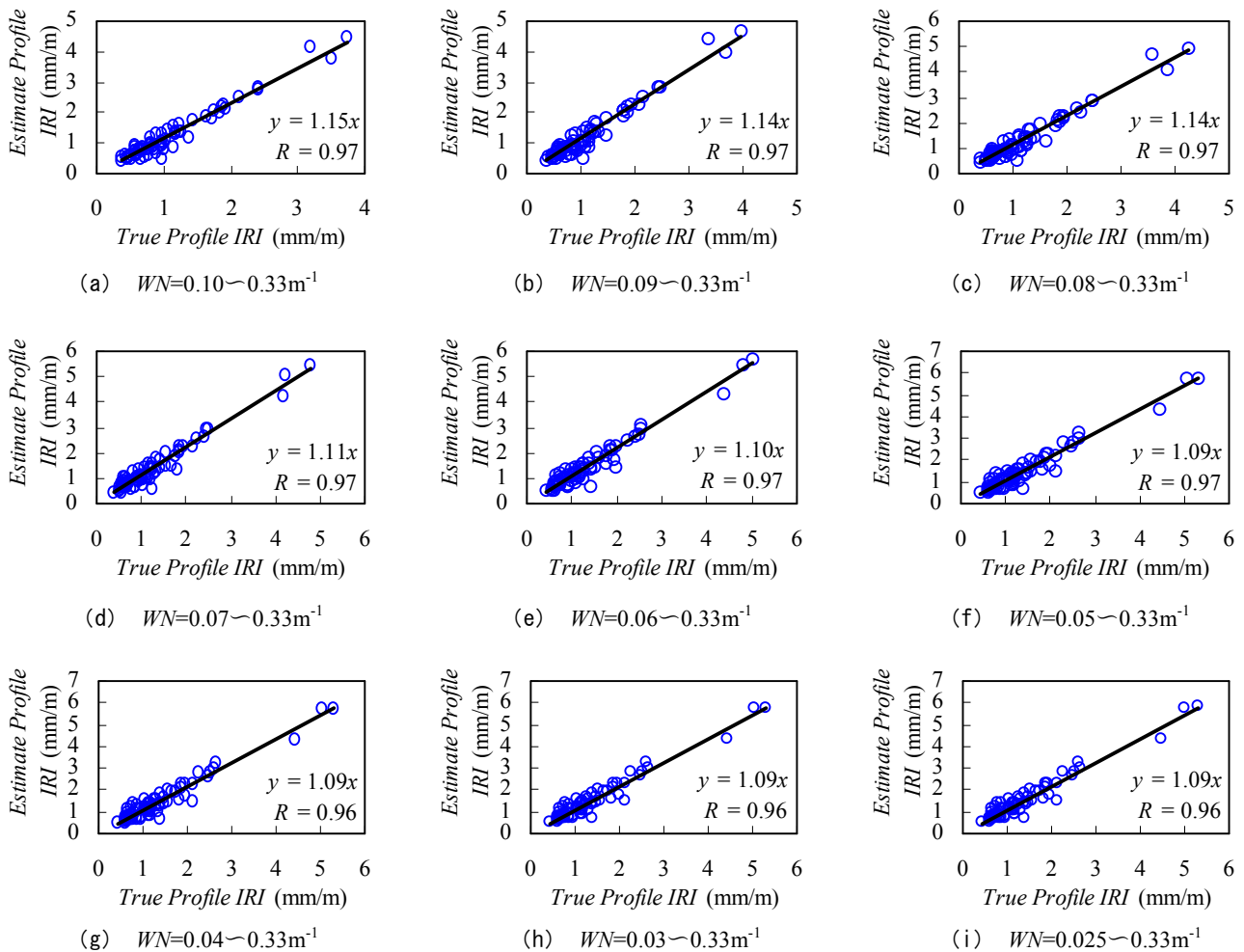


図-6 真のプロファイルの推定精度 (IRI による比較)

$WN=0.04\text{m}^{-1}$ 以下に広げた場合の結果(図-6(g)～(i))はほぼ同じ結果が得られたが、これは IRI のフィルタ効果の影響と考えられる(IRI は $WN=0.065\text{m}^{-1}$ 付近の感度が高く、波長が長くなるに伴い感度が低くなるため)¹⁰⁾。

なお、推定結果は評価基準に比べ、いずれも 10% 程度大きな結果が生じている。したがって、推定したプロファイル形状から IRI を算出する場合は縮小演算を要する。

(3) 標準偏差による比較

前節のように、 IRI による比較では 9 種類いずれのフィルタの場合も相関係数は高い結果が得られたが、バンドパスフィルタ通過域の下限値が $WN=0.04\text{m}^{-1}$ 以下に設定された各パターンの相違点を明確に示すことができなかった。このため本節では標準偏差による比較を行った。結果を図-7 に示す。

ここで、本研究で求めた標準偏差は平坦性を算出

するために一般的に用いられている値(検出特性の補正を行っていないデータから計算した値、サンプリング間隔 1.5m)とは異なり、検出特性を補正したサンプリング間隔 0.3m のデータから求めた値であるため注意を要する。

計算条件としては、前節と同様に評価区間長を 50m とし、エラー箇所は計算対象から除外した。さらに区間 No.4 のみ、他の区間に比べ標準偏差の値が著しく大きいため、相関係数算出において影響が強いことから、計算対象から除外している(なお、当該区間の相対誤差はフィルタ通過域の範囲が最も広い $WN=0.025\sim0.30\text{m}^{-1}$ の場合でも約 3.6%であり、誤差は小さいといえる)。また、図中、評価基準プロファイルの標準偏差を「True Profile σ 」、推定したプロファイルの標準偏差については「Estimate Profile σ 」と表記した。

図-7 において、フィルタ通過域の下限値を $WN=0.10\text{m}^{-1}$ とした場合(図-7(a))を基準に比較すると、フィルタ通過域の拡大に伴い、相関係数の値

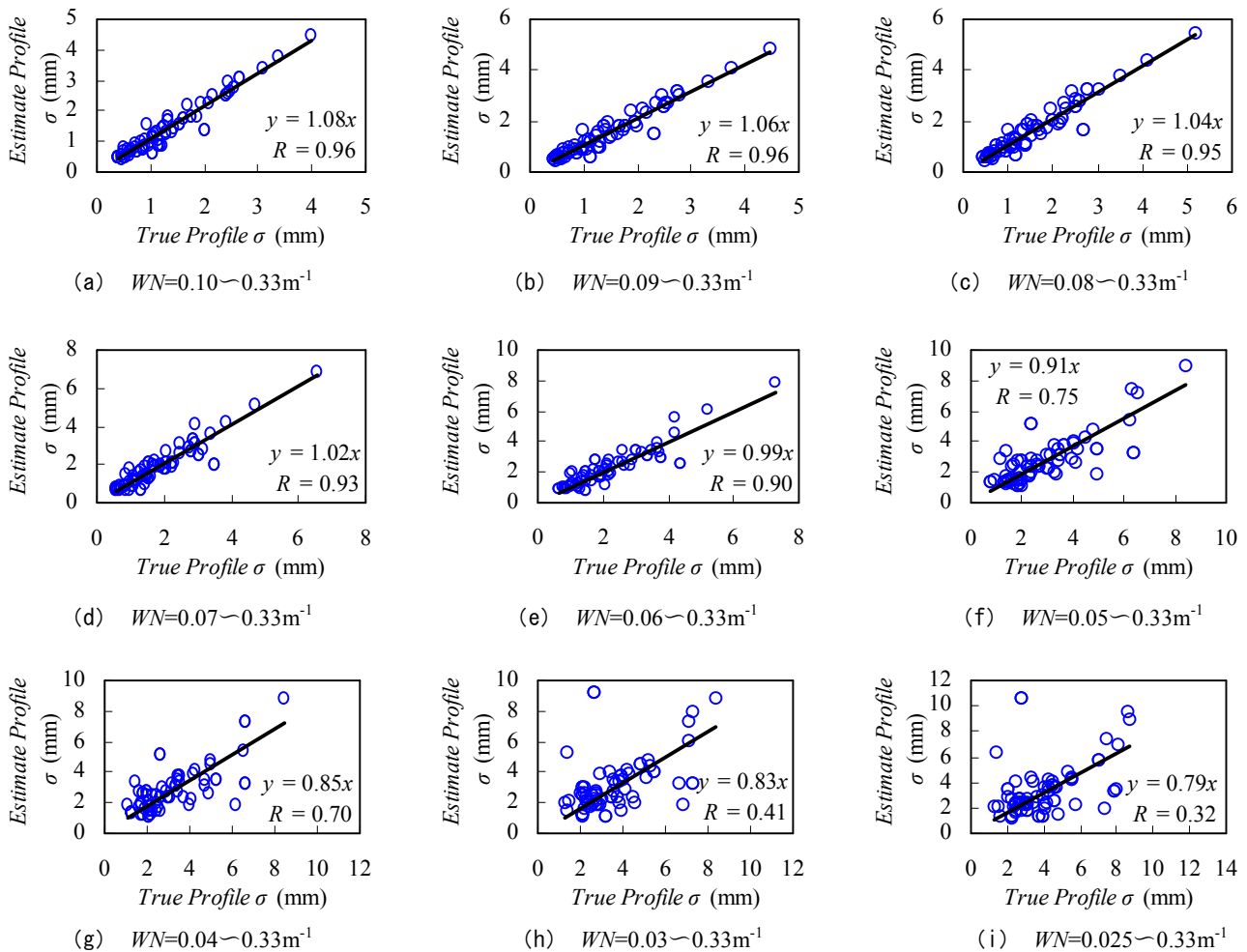


図-7 真のプロファイルの推定精度（標準偏差による比較）

は小さくなる．特にフィルタ通過域の下限値を $WN=0.025m^{-1}$ まで広げた場合（図-7(i)）の相関係数は小さい．これはフィルタ通過域が *Gain* の小さい長波長の領域まで広がったため、補正倍率が大きくなる範囲が広がり、その結果、測定誤差の影響を受け推定精度が低下したと考えられる．

IRI と同様に、実用上の目安値として $R=0.7$ （決定係数 $R^2=0.5$ ）以上とすれば、波数の範囲は $WN=0.04m^{-1}$ 以上（=波長 25m 以下）に設定すべきである．

（４）制約条件の設定

3m プロフィロメータの測定データから真のプロファイルを推定する場合の制約条件としては、推定結果を様々な分析用途に対応できるように、可能な限り図-3 に示す演算対象範囲を広げるべきである．

1～3 節の分析結果を総合すると、 $WN=0.04 \sim 0.30m^{-1}$ の範囲内であれば、*IRI* 及び標準偏差いずれの場合も一定の精度が期待でき、さらにこの波数の

範囲は、一般道路上を走行する乗用車のバネ上固有振動数に対応する $WN=0.06 \sim 0.09m^{-1}$ の領域が全て含まれていることから、実用上大きな問題は生じないと思われる．

このことを検証するため、次章では真のプロファイル上を乗用車が走行した場合に生ずるバネ上振動加速度を考察するため、KITDS による走行実験を行った．

４．ドライビングシミュレータによる検証実験

（１）シミュレータの概要⁵⁾

一般的に、ドライビングシミュレータは運転者の安全教育、車両設計及び道路の線形・標識に対する評価が主体であり、これまで道路利用者の快適性及び安全性と関係の深い路面性状評価を指向したものは見当たらなかった．KITDS は、このような要求に

表-1 実験対象箇所

EVEN試験の区間No.	IRI (mm/m)
2 国道276号線	1.6
14 国道234号線	1.7
6 道道259号線	2.7
4 国道451号線	4.6

対応できるシミュレータとして注目を集めている。KITDS は多くの機能を備えているが、このうち本研究に關係する路面性状及び車両モデルに関する概要は以下の通りである。

- ・ 路面性状データ

これまでに凹凸路面（平坦性やメガテクスチャに属するもの）、わだち路面及び損傷路面（段差、パッチング）の作成実績がある。この他の路面についても開発可能な PC 環境が用意されている。縦横断のサンプリング間隔は任意に設定することができる。

- ・ 車両モデル

車両モデルは独立 4 輪モデルであり、バネ上質量の運動は 6 自由度である。運動モデルはユーザーが開発した独自のモデルを組み込むことが可能である。

（2） 実験条件

KITDS による検証実験では以下の条件を設定した。

- ・ 路面条件

本研究は縦断方向の路面プロファイルを対象としているため、わだち掘れなど横断方向の路面プロファイルは実験の対象外として入力項目から除外した。実車試験では、走行環境の特定パラメータのみを対象とし、その影響度を測定することは極めて難しいが、シミュレータ実験の場合は容易に行うことができる。また、真のプロファイルのサンプリング間隔は 0.3m に間引き処理している。

実験対象箇所としては、IRI の程度に応じて 4 箇所を選定した（表-1）。いずれも一般道路であり、高速道路は含まれていない。この 4 箇所のデータに対して、前章の 9 種類のバンドパスフィルタ（フィルタ通過域の上限値はいずれも $WN=0.33\text{m}^{-1}$ 、下限値は $WN=0.10, 0.09, 0.08, 0.07, 0.06, 0.05, 0.04, 0.03, 0.025\text{m}^{-1}$ ）を用いて演算処理し、KITDS に入力した。したがって、路面条件は $4 \times 9 = 36$ パターンである。

- ・ 車両条件

車両条件は、バネ上質量約 1,300kg 程度の一般的な乗用車の運動モデルを用いた。

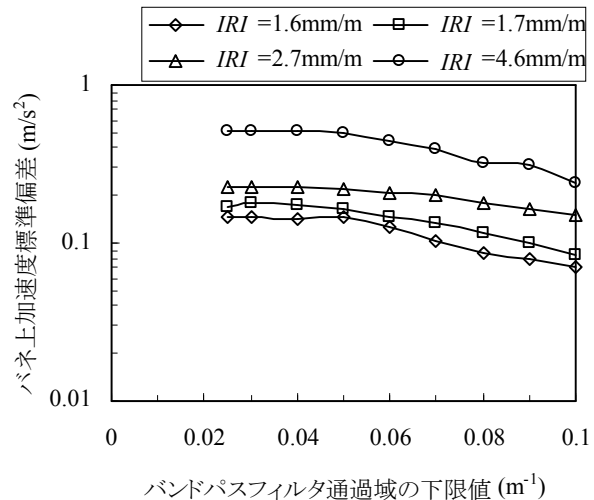


図-8 バンドパスフィルタ通過域の下限値とバネ上振動加速度標準偏差との関係

- ・ 走行条件

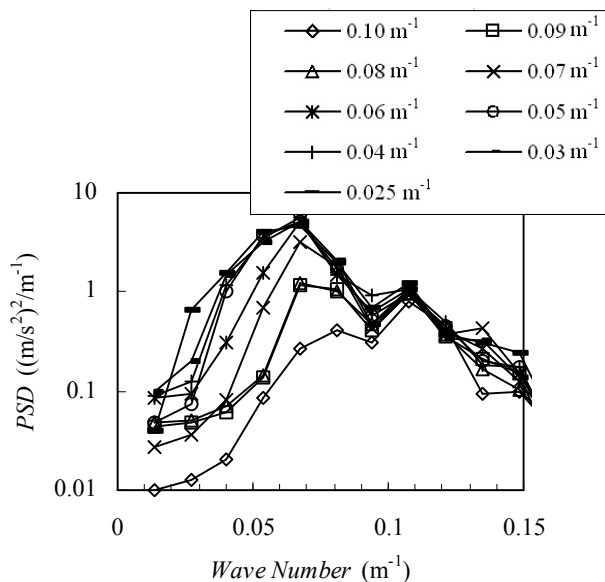
走行条件は、速度 60km/h とし、コースはいずれも直線で、延長は 330m とした。走行回数は、各路面に対して 6 回ずつとした。ゆえに、総走行回数は $36 \times 6 = 216$ 回である。

（3） バンドパスフィルタ通過域の下限値とバネ上振動加速度の関係

真のプロファイル推定におけるバンドパスフィルタ通過域の下限値とバネ上振動加速度の標準偏差との関係を図-8 に示す。ここでバネ上振動加速度標準偏差の値は、路面パターン毎に実施した 6 回の走行実験の平均値である。

図-8 を考察すると、バンドパスフィルタ通過域の範囲が拡大することに伴いバネ上振動加速度標準偏差の値は大きくなるが、IRI の大きさを問わず、 $WN=0.04 \sim 0.05\text{m}^{-1}$ 近傍の波数を境界にほぼ一定値に収束することがわかる。このことは、図-9 に示すバネ上振動加速度のパワースペクトル密度分析結果にも現れている。バンドパスフィルタ通過域の下限値が $WN=0.05\text{m}^{-1}$ より小さい値に（＝長波側に）設定されている場合のパワースペクトル密度はほぼ同じ分布形状となっている。

この理由として、乗用車のバネ上振動における主要成分（バネ上固有振動数のピークである約 1～1.5Hz に相当する成分）は既に $WN=0.05 \sim 0.30\text{m}^{-1}$ の範囲内に含まれており、これ以上範囲を広げたとしても残る振動成分はごく微量であり、振動加速度波形の形状としては現れないためと考えられる。



※凡例の数値は推定範囲の下限値を表す。

図-9 バンドパスフィルタ通過域の下限值とバネ上振動加速度のパワースペクトル密度との関係 (EVEN 試験 No.4 (IRI=4.6mm/m) の例)

(4) 車の乗り心地を考慮したバンドパスフィルタ通過域の設定

前節の結果より、一般道路 (法定最高速度 60km/h) 上を走行する乗用車の乗り心地を考慮する場合、真のプロファイル推定におけるバンドパスフィルタ通過域の下限值は、振動加速度波形がほぼ一定の値に収束する $WN=0.04\sim0.05\text{m}^{-1}$ 程度の値に設定すればよいと思われ、フィルタ通過域の範囲をこれ以上広げるのは得策ではないと考えられる。この理由としては、前章で示したようにフィルタ通過域が広がることに伴い真のプロファイルの推定精度が低下するためである。以上を整理したものを図-10 に示す。

なお、一般道路でも救急救命車両などの緊急自動車の場合は道路交通法施行令により速度 80km/h の走行が認められているが、この車両のバネ上固有振動数のピーク値が今回の実験と同程度 (約 1.1Hz) であれば、バネ上振動加速度の主要成分は $WN=0.05\text{m}^{-1}$ 近傍に集中すると思われる。したがって、フィルタ通過域の設定は、若干余裕を考慮し $WN=0.04\sim0.33\text{m}^{-1}$ と設定すれば、このような車両の走行を想定した場合でも実用上大きな問題は生じないと考えられる。

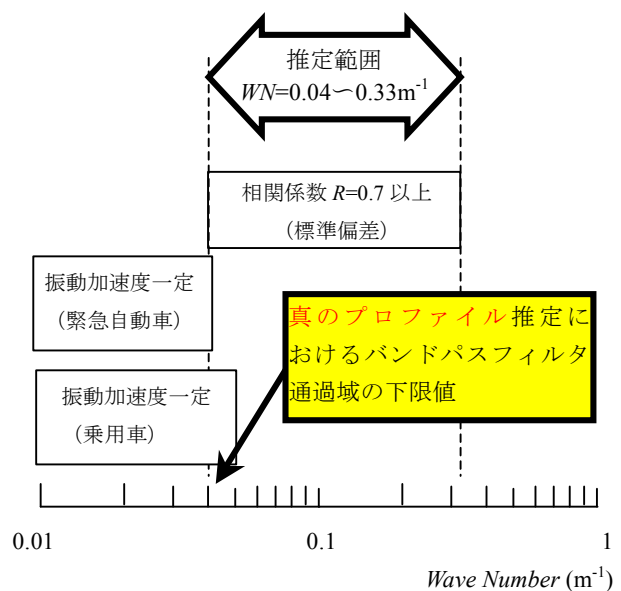


図-10 真のプロファイル推定におけるバンドパスフィルタ通過域の下限值の設定

5. まとめ

本研究では、真のプロファイルを推定する際に実用上重要な「推定対象となる波数範囲の制約条件」について、区間統計値による推定精度の比較結果及びKITDSによるバネ上振動加速度測定結果を用いて考察した。本研究対象のプロファイルは 3m プロフィロメータであるが、8m プロフィロメータなど他のプロファイルについても本研究と同様の方法で真のプロファイルの推定が可能である。また、ドライビングシミュレータを路面プロファイルに関する研究に用いた例は数少ないが、今後、道路の管理基準の妥当性を検証する際のツールとして活用される機会は多くなると予想される。

本研究で得られた知見は以下の通りである。

- ・ 一般道路を走行する乗用車の乗り心地を考慮して 3m プロフィロメータの測定データから真のプロファイルを推定する場合、バンドパスフィルタ通過域の下限值は $WN=0.033\text{m}^{-1}$ より大きい値に設定する必要があることを示した。
- ・ KITDS による検証実験の結果、バンドパスフィルタ通過域の範囲が拡大するに伴いバネ上振動加速度の値は大きくなるが、IRI の大きさを問わず、一般道路の場合は $WN=0.04\sim0.05\text{m}^{-1}$ 近傍を境界に値がほぼ一定値に収束することがわかった。
- ・ 推定精度及び KITDS のバネ上振動加速度測定結果から、真のプロファイル推定におけるバンドパスフィルタ通過域を設定する場合の目安としては、

一般道路の場合、 $WN=0.04\sim0.33\text{m}^{-1}$ の範囲に設定すれば、緊急自動車の走行にも対応するなど、実用上大きな問題は生じないことを示した。

参考文献

- 1) Hass,R. and Hudson,W.R. : Pavement Management Systems, McGraw-Hill Book, New York, 1978.
- 2) 白川龍生, 川村彰, 高橋清, 中辻隆 : 3m プロフィロメータによる True Profile の推定 -PIARC EVEN データを用いて-, 舗装工学論文集, Vol.8, pp.25-33, 2003.
- 3) Kawamura,A., Takahashi,M. and Inoue,T. : Basic Analysis of Measurement Data from Japan in EVEN Project, Journal of the Transportation Research Record,No.1764, pp.232-242, 2001.
- 4) 亀山修一, 川村彰, 早坂保則, 高橋守人, 笠原篤 : PIARC 路面性状国際共通試験における舗装の縦断プロファイルと支持力の関係, 土木学会論文集, No.683/V-52, pp.119-129, 2001.
- 5) Kawamura,A., Shirakawa,T. and Maeda,C. : KIT Driving Simulator for Road Surface Evaluation, Proceedings of 5th Symposium on Pavement Surface Characteristics , pp.1-10(CD-ROM), 2004.
- 6) 白石修士 : 運転教習のための小型ドライビングシミュレータの開発, 自動車技術, Vol.55, No.11, pp.72-77, 2001.
- 7) 須田義大, 椎葉太一, 荒木厚, 大貫正明 : ドライビングシミュレータにおけるバーチャルリアリティ技術, 自動車技術, Vol.56, No.6, pp.36-41, 2002.
- 8) カヤバ工業株式会社編 : 自動車のサスペンション, 山海堂, 1991.
- 9) 白川龍生, 川村彰, 高橋清, 中辻隆 : ウェ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, Vol.7, pp.15.1-15.12, 2002.
- 10) Sayers,M.W. and Karamihas,S.M. (土木学会舗装工学委員会路面性状小委員会訳) : 路面のプロファイリング入門 -安全で快適な路面をめざして-, 土木学会, 2002.

THE SETTING OF THE RESTRICTIONS ABOUT ESTIMATING A TRUE PROFILE BASED ON A VERIFICATION EXPERIMENT

Tatsuo SHIRAKAWA, Chikakuni MAEDA and Akira KAWAMURA

In this paper, we studied the estimating range when estimating a true profile using measurement data from a profilometer. Especially, the experiment using the KIT Driving Simulator (KITDS) was described. The purpose of the experiment was to confirm the peak of the frequency component of the acceleration of a vehicle contained in the estimating range. Consequently, it was shown from the filter performance and the acceleration of sprung-mass of the KITDS that the standard of the estimating range in the case of a general road is *Wave Number* = $0.04\sim0.33\text{m}^{-1}$.