

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 -

白川龍生¹・川村 彰²・高橋 清³・上浦正樹⁴

¹正会員 北見工業大学 工学部土木開発工学科 (〒090-8507 北見市公園町 165)

²正会員 工博 北見工業大学助教授 工学部土木開発工学科 (〒090-8507 北見市公園町 165)

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

⁴正会員 工博 北海学園大学教授 工学部土木工学科 (〒063-0926 札幌市中央区南 26 条西 11 丁目)

今日、道路交通の安全確保および効率的管理の観点から舗装の劣化モニタリング及び劣化予測が精力的に行なわれるようになり、特に基礎技術の一つである路面プロファイル測定的重要性が高まっている。プロファイル測定装置（プロファイラ）は固有の検出特性を有しているが、フィルタ演算補正によって、一定の周波数領域における真のプロファイル（True Profile）を比較的容易に推定できるようになった。本研究は、PIARC EVEN データを用いて最も普及したプロファイラである 3m プロフィロメータの測定データから True Profile を推定する方法について考察した。その結果、一般道路を対象とした空間周波数帯域（Wave Number = 0.05 ~ 0.50m⁻¹）であれば、比較的高い精度で推定できることを明らかにした。

Key Words : 3m Profilometer , True Profile , PIARC EVEN , Profile Estimate Filter

1. はじめに

道路舗装の維持管理は、わだち掘れ、ひびわれ、段差、平坦性及びすべり摩擦係数の各項目について行なわれている。これらの項目のうち、道路利用者の走行快適性（乗り心地）に直接影響する項目として平坦性指標が挙げられる。国内で平坦性指標の算出に用いられてきた測定装置（以下「プロファイラ」という）としては、3m プロフィロメータが代表的である¹⁾。

3m プロフィロメータは測定機構が簡単で、測定が比較的容易であること、さらに路面性状測定車などに比べ価格が安いという利点から、道路管理者及び道路関係企業へ幅広く普及している^{2), 3)}。

測定データの主な使用用途としては、工事の竣工検査における出来形管理であることから、サンプリング間隔を $t=1.5\text{m}$ とした場合の標準偏差（ ）が用いられており、路面プロファイルデータについては、一部を除き積極的に活用されていない^{4), 5)}。各プロファイラは固有の検出特性を有しているが、3m プロフィロメータの場合は空間周波数（ Wave Number, 以下「WN」という） $WN=0.33\text{m}^{-1}$ （波長 3m）前後の成分について検出能力が高い反面、線形成分など長波長成分については検出能力が著しく低下し、 $WN=0.1\text{m}^{-1}$ 以下（波長 10m 以上）の成分は波形デー

タとして明確に現れない。このため、3m プロフィロメータでは自動車の乗り心地に関するパネ上質量の固有振動数（約 1~1.5Hz）に対応するプロファイルを得ることは現実的に困難である¹⁾⁻⁶⁾。しかしながら、現在では人々の関心が安全性及び快適性に集まり、路面プロファイルの管理レベルが従来以上に要求されており、供用中の道路における平坦性の劣化モニタリング及び舗装パフォーマンスの劣化予測が非常に重要となっている。このため、基礎データである路面プロファイル波形の時系列的な蓄積が求められるようになった^{1), 7)}。

現在、路面性状測定車によって高速道路や幹線国道で 3 年に 1 回程度の測定が行なわれているが、実測データの時間推移から精度の高い劣化予測を行なう場合など、データの使用目的によっては測定頻度の増加が求められる。そのためには最も普及している 3m プロフィロメータを用いてデータを蓄積することが現実的かつ合理的と思われる^{7), 8)}。

ただし、3m プロファイロメータの測定結果は、前述のように装置固有の検出特性が含まれているため、真のプロファイル（以下「True Profile」という）とは大きく異なる。このため、測定データが True Profile に近いものとなるよう演算補正を施さなければならぬ。この演算は、3m プロフィロメータが実用化された昭和 40 年初頭の段階では非常に困難

であったと思われるが、今日ではコンピュータ機器及びソフトウェアの進歩により、このような演算が比較的容易に実現できるようになった。例えば、鉄道工学における軌道保守管理の分野においては、軌道検測車のデータから軌道の実形状を再現する方法について以前から数多くの適用例が報告され、有効性が認められている。しかし路面性状評価におけるプロファイラの測定データを利用したプロファイル推定例の報告は非常に少ない^{5), 9), 10)}。

そこで本研究では、3m プロフィロメータの測定データの検出特性を補正し、True Profile を推定する方法について検討した。また、推定精度及び推定範囲から道路維持管理における同方法の適用性について考察した^{2), 5)}。

なお解析に用いたデータは、1998年に世界道路協会（以下、「PIARC」という）により実施された国際共同試験（以下、「EVEN」という）結果の一部を用いた¹¹⁾⁻¹³⁾。データの処理は、主として Wolfram Research 社の Mathematica¹⁴⁾、及び University of Michigan Transportation Research Institute (UMTRI) の RoadRuf²⁾を用いた。

2. 3m プロフィロメータの測定方法と True Profile の推定方法

本章では、3m プロフィロメータによる路面プロファイルの測定方法及び検出特性について述べる。

3m プロフィロメータは、その原型であるローリング直定規（図-1）を改良して作られた^{4), 15)}。

ローリング直定規は、長さ L の装置の始終点を路面に接地し、両端の変位の平均値から中央部の測定車輪の変位を差引いた値を記録する装置である。鉄道線路における主要な軌道検測車も、これと同一の測定原理が用いられている^{9), 10), 16)}。

この測定方法は、プロファイラの全長 L に近い波長の振幅利得（以下、「Gain」という）が強調されるが、 $L/2$ に相当する波長については理論上検出できず、 $L/2$ 未満の波長帯については Gain が大きく変動し不安定である^{5), 15)}。 $L=3m$ の例を図-2 に示す。

この問題を解決するため、3m プロフィロメータでは変位測定の基準面を確立するための車輪アレーをボギー連結し、車輪で接する全点の凹凸の平均化操作が行なわれている（図-3）^{4), 15)}。測定値は、この基準線に対する測定車輪の変位が用いられている。図-4 に 3m プロフィロメータの検出特性を示すが、ローリング直定規に比べ検出特性が実形状に近付いていることが窺える¹⁵⁾。

3m プロフィロメータの測定結果から True Profile

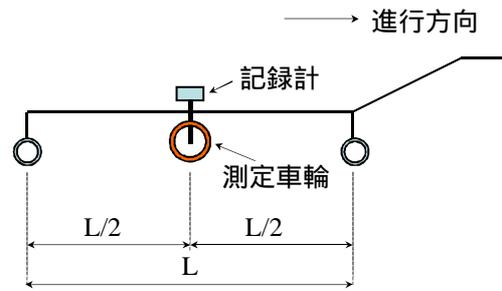
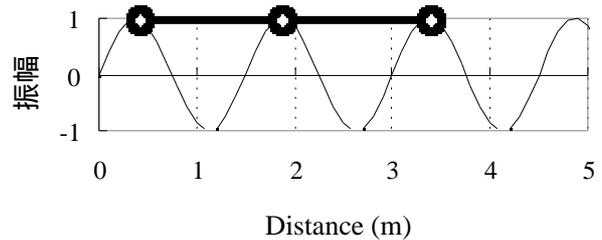
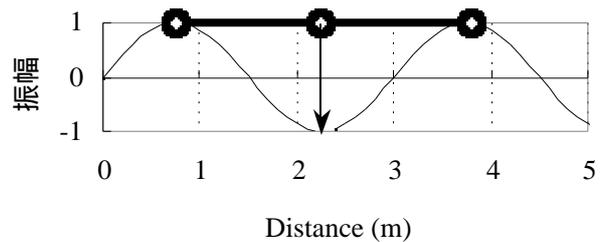


図-1 ローリング直定規の模式図

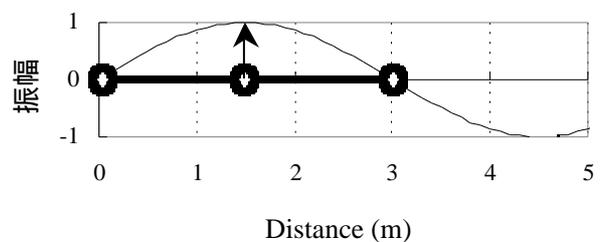
WN=0.67m⁻¹ の場合 (Gain=0)



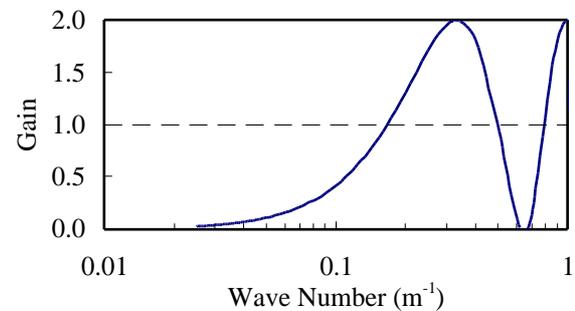
WN=0.33m⁻¹ の場合 (Gain=2)



WN=0.17m⁻¹ の場合 (Gain=1)



(a) Gain 算出例



(b) 検出特性

図-2 ローリング直定規の検出特性 (L=3m の場合)

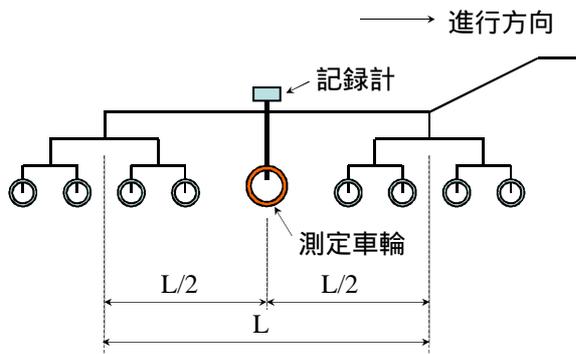


図-3 プロフィロメータの模式図

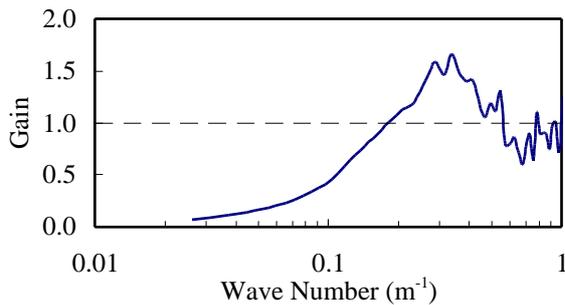


図-4 3m プロフィロメータの検出特性
(EVEN 試験区間 No.6 の測定例)

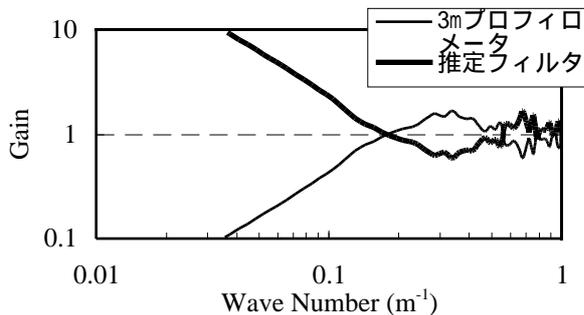


図-5 プロファイル推定フィルタの振幅特性
(EVEN 試験区間 No.6 のデータによる例)

を推定する場合は、図-4 の検出特性の逆数となる演算補正が施されたフィルタ（以下、「プロファイル推定フィルタ」という）を用いるとよい。プロファイル推定フィルタの振幅特性を図-5 に示すが、Gain が強調されている周波数では振幅を縮小する一方、Gain の小さい周波数ではこれを拡大する演算補正が行なわれている^{5), 9), 10)}。

この際の留意点として、測定誤差が周波数に依存せずホワイトノイズ的に発生するならば、Gain の大きな周波数では誤差の影響が相対的に少なく、Gain の小さい周波数では誤差の影響を受けやすいことが挙げられる。したがって、道路線形（例えば、縦断勾配など）に依存する周波数帯については推定の対象外に設定したほうがよい¹⁷⁾。3m プロフィロメータ

の場合、 $WN < 0.05 \text{m}^{-1}$ （波長 20m 以上）の周波数帯域では推定フィルタの補正倍率が 10 倍以上となるため、サンプリング間隔が $t=0.30\text{m}$ であれば、推定範囲を $WN=0.05 \sim 1.67 \text{m}^{-1}$ 程度に設定することが望ましい（ここで、 $WN=1.67 \text{m}^{-1}$ はナイキスト周波数）。一般道路の速度領域であれば、波長 20m 以上の成分は走行安全性及び乗り心地に与える影響が少ないため、実用上大きな問題は生じない^{5), 18)}。

プロファイル推定フィルタを用いた True Profile の推定手順を整理すると以下ようになる⁵⁾。

- a) True Profile の推定周波数帯域を決定する。
- b) プロファイルと True Profile のパワースペクトルを各々FFT法によって算出する。
- c) 入出力間の振幅特性を求める。ここで振幅特性は式(1)で求められる。

$$|H(f)| = \sqrt{P_y(f)/P_x(f)} \quad (1)$$

ここに、

$|H(f)|$: 振幅特性

$P_x(f)$, $P_y(f)$: 入出力のパワースペクトル

- d) 位相特性を線形位相とし、初期位相 $(0)=0$ としたフィルタを設計する（このフィルタが「プロファイル推定フィルタ」である）。
- e) 入力データを FFT によって空間領域から周波数領域へ変換する。
- f) フィルタリング処理。
- g) 処理された波形を IFT によって周波数領域から空間領域へ変換する。

3. 解析に用いるデータ

本章では、PIARC EVEN 試験の概要を記し、解析に用いたデータの特徴について述べる。

(1) EVEN 試験概要

第 2 回 PIARC 路面性状国際共通試験 (EVEN 試験) は、1998 年に北アメリカ、ヨーロッパ、環太平洋地域 (日本) の 3 地域で行われた。この試験は、1992 年に PIARC が実施した「舗装路面のすべり抵抗及びテクスチャ測定」に関する国際共同実験に引き続いて行われたものである。このうち日本では、北海道の高速道路、国道及び道道において実施された¹¹⁾⁻¹³⁾。

a) 試験目的

EVEN 試験の主目的は以下の 2 点である¹¹⁾。

- ・ 路面の縦断プロファイルに関する各種測定手法の比較と検討結果を舗装設計と舗装マネジメント

の構築に活用すること。

- ・ 路面プロファイルから得られる情報の信頼性評価に有用となる基礎データを提供すること。

b) 測定条件

世界 3 地域における測定結果の比較のための試験指針として、各地域に共通する試験条件が下記のように設定された¹¹⁾。

- ・ 縦横断方向の平坦性の程度に応じ、測定区間を 30 箇所設定する（10 区間は予備）。
- ・ 各区間延長は 1000m とし、実際の測定は区間の中央 500m 区間で実施する。ただし、True Profile は始点側から 330m の区間である。
- ・ 選定された各区間は平坦性において均質であることを条件とするが、幾つかの区間では洗濯板状、段差、わだち掘れなどの各種破損箇所のほか直線部、曲線部、登坂部を幾つか含む。
- ・ コンクリート舗装、ポラスアスファルト舗装も対象路面に含める。

本研究では、北海道の道路において、以上の条件を満足する 14 区間のデータを解析に用いた。

(2) 解析に用いたデータ

解析では、EVEN 試験データのうち 3m プロフィロメータの測定データ及び True Profile データを用いた。プロファイルの実形状である True Profile は、PIARC の CORE Guideline に基づき、水準測量、the Static Dipstick 及び the Rolling Dipstick によって構成された波形である¹¹⁾。

ここで、測定データのサンプリング間隔は、3m プロフィロメータが $t=0.300\text{m}$ 、対応する True Profile が $t=0.025\text{m}$ と異なるため、True Profile データを間引き処理によって $t=0.300\text{m}$ に統一した。

4. 3m プロフィロメータの検出精度

本章では 3m プロフィロメータの検出精度について考察する。検出精度の評価は、周波数領域における検出特性のばらつきの程度により行なう。

(1) 評価対象周波数帯域の設定

2章で述べたように、True Profile の推定範囲を $WN=0.05 \sim 1.67\text{m}^{-1}$ とし、3m プロフィロメータの検出特性を算出した結果、図-6 のような結果が得られた。この例では、特に高周波成分の検出特性に大きな変動が見受けられるが、変動が生じる理由としては、ナイキスト周波数に近い成分の正弦波の振幅及び位相がサンプリング開始のタイミングにより変化していることが考えられる。これを防ぐため、情報として必要な最短波長の少なくとも 1/10 程度の

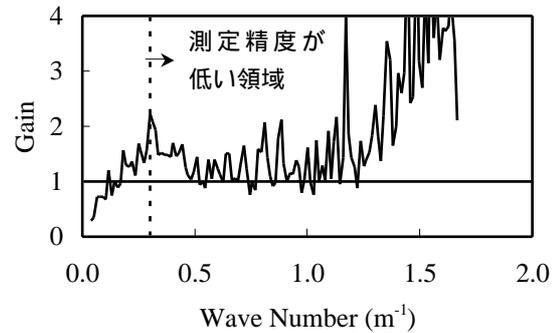


図-6 高周波成分の検出特性例 (EVEN 試験区間 No.3)

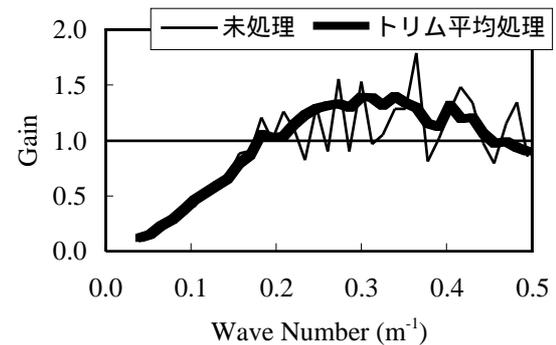


図-7 検出特性のトリム平均処理結果

サンプリングが必要であるが、換言すれば $t=0.30\text{m}$ のデータでは $WN=0.33\text{m}^{-1}$ (波長 3m) 程度以下の成分の測定精度は期待できない。したがって、本章では $WN=0.05 \sim 0.50\text{m}^{-1}$ を評価対象周波数帯域として設定する¹⁹⁾⁻²¹⁾。

(2) トリム平均処理による評価基準の設定

ばらつきの程度を平均値からの相対誤差によって評価する場合、基準である平均値の周波数特性は、極値(大きく外れたデータ)の影響が除かれていることが望ましい。このような処理を行なう場合、トリム平均(中間項平均)処理が用いられることが多い。この処理は、上下限の極値を除去し平均値の偏りの防止する方法であり、統計解析分野で広く用いられている²²⁾。

図-7 に EVEN 試験の 14 区間における検出特性の平均値を示すが、 $WN=0.20\text{m}^{-1}$ 以上の帯域で変動が大きいため、評価基準として用いるには難がある。そこでトリム平均処理によってデータの上下限の極値を除去すると、図-7 (太線) のように平滑化された特性が得られた。以下、この特性を「評価基準値」として用いる。

(3) 3m プロフィロメータの検出精度

EVEN 試験における 3m プロフィロメータの検出

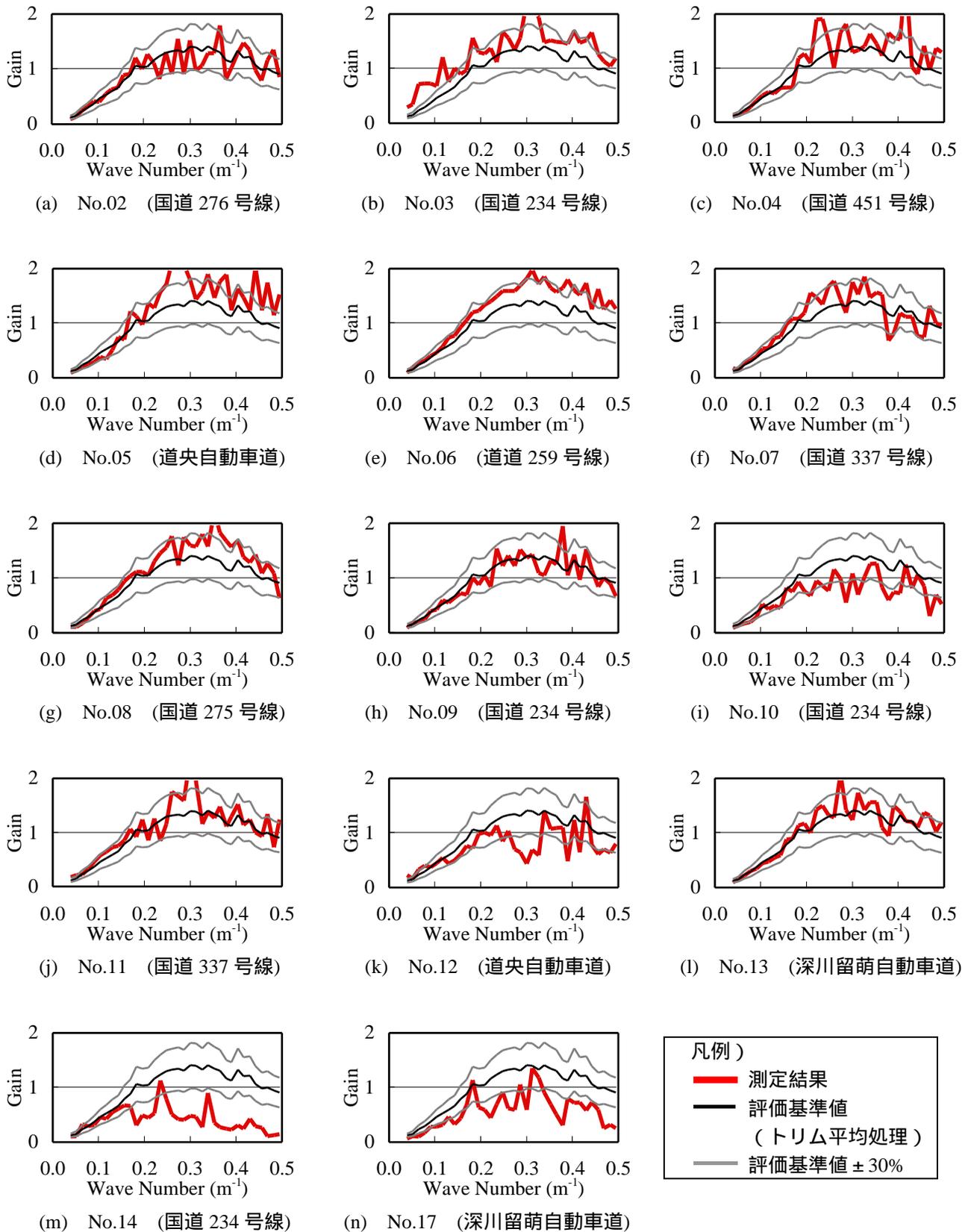
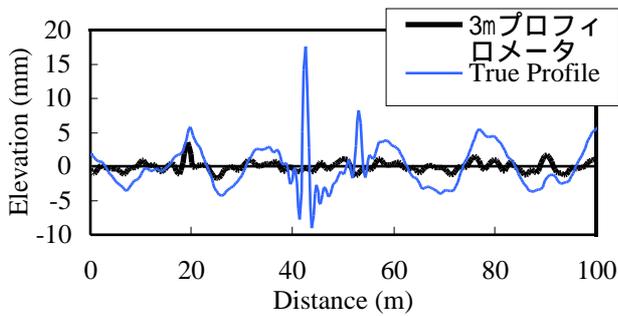
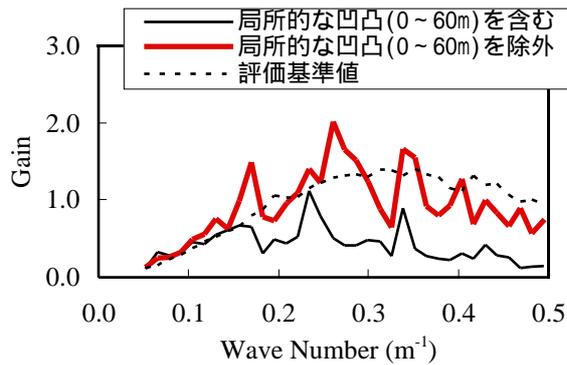


図-8 EVEN 試験における 3m プロフィロメータの検出特性



(a) 測定データ波形（局所的な凹凸部分）



(b) 検出特性の差

図-9 局所的な凹凸による検出特性の変化
(EVEN 試験区間 No.14 の例)

特性を図-8 に示す．測定結果は概ね評価基準値 $\pm 30\%$ 以内の範囲に収束したが，一部の区間ではこの範囲から大きく外れている．

例えば，区間 No.14 では $WN=0.17m^{-1}$ 以上の領域で検出能力が大きく劣っているが，これは True Profile データに局所的な凹凸（異常値）が含まれているため（図-9(a)），3m プロフィロメータの検出特性が歪められて表現されたものと考えられる（図-9(b)）．異常値が含まれる範囲（0～60m）を除外し再計算すると，検出特性は評価基準値に近い値が得られた（図-9(b)）²³⁾．区間 No.10～12 及び 17 でも同様に異常値が含まれていた．

このことから，データを周波数領域へ変換する際は，異常値の有無を確認する必要がある．

5 . True Profile の推定及び推定精度

本章では，3m プロフィロメータの平均的な検出特性を利用した True Profile の推定を行い，推定精度について考察する．図-10 は，使用したプロファイル推定フィルタの特性（平均的な検出特性の逆数）である⁵⁾．

True Profile の推定例を図-11 に示す．この例では，局所的凹凸によって検出特性が歪められている区間

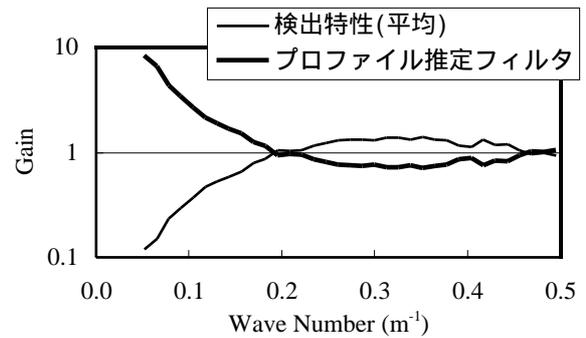
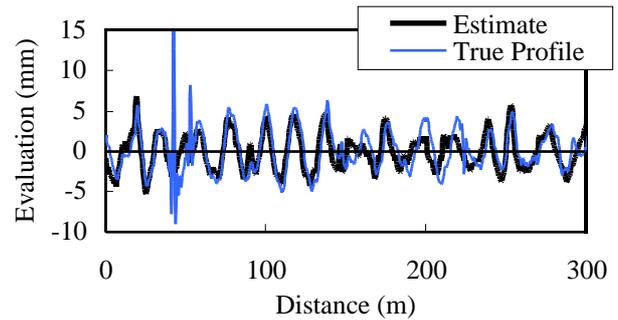
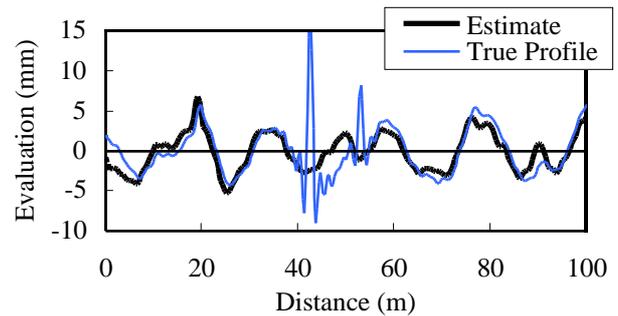


図-10 プロファイル推定フィルタのフィルタ特性



(a) True Profile の推定波形（全体）



(b) True Profile の推定波形（局所的な凹凸部分）

図-11 True Profile の推定波形
(EVEN 試験区間 No.14 の例)

No.14 のデータを用いて推定した．図-11(a)及び局所的な凹凸部分を拡大した図-11(b)より，極大値の推定は困難であるが，実用的な推定精度としては十分なレベルであると考えられる．

各測定区間におけるコヒーレンス（相互データの関連性の尺度）を図-12 に示す．コヒーレンスは 0～1 の値をとり，1 に近いほど線形性は高い¹⁷⁾．

True Profile とプロファイル推定結果のコヒーレンスは，区間によりばらつきはあるが，概ね 0.5 程度である．このうち，最も高い値を示した区間は No.06 であり，ほとんどの周波数帯域で 0.8 以上であった．

コヒーレンスは振幅のほか位相の影響が含まれるため，3m プロフィロメータ測定の場合にはドリフ

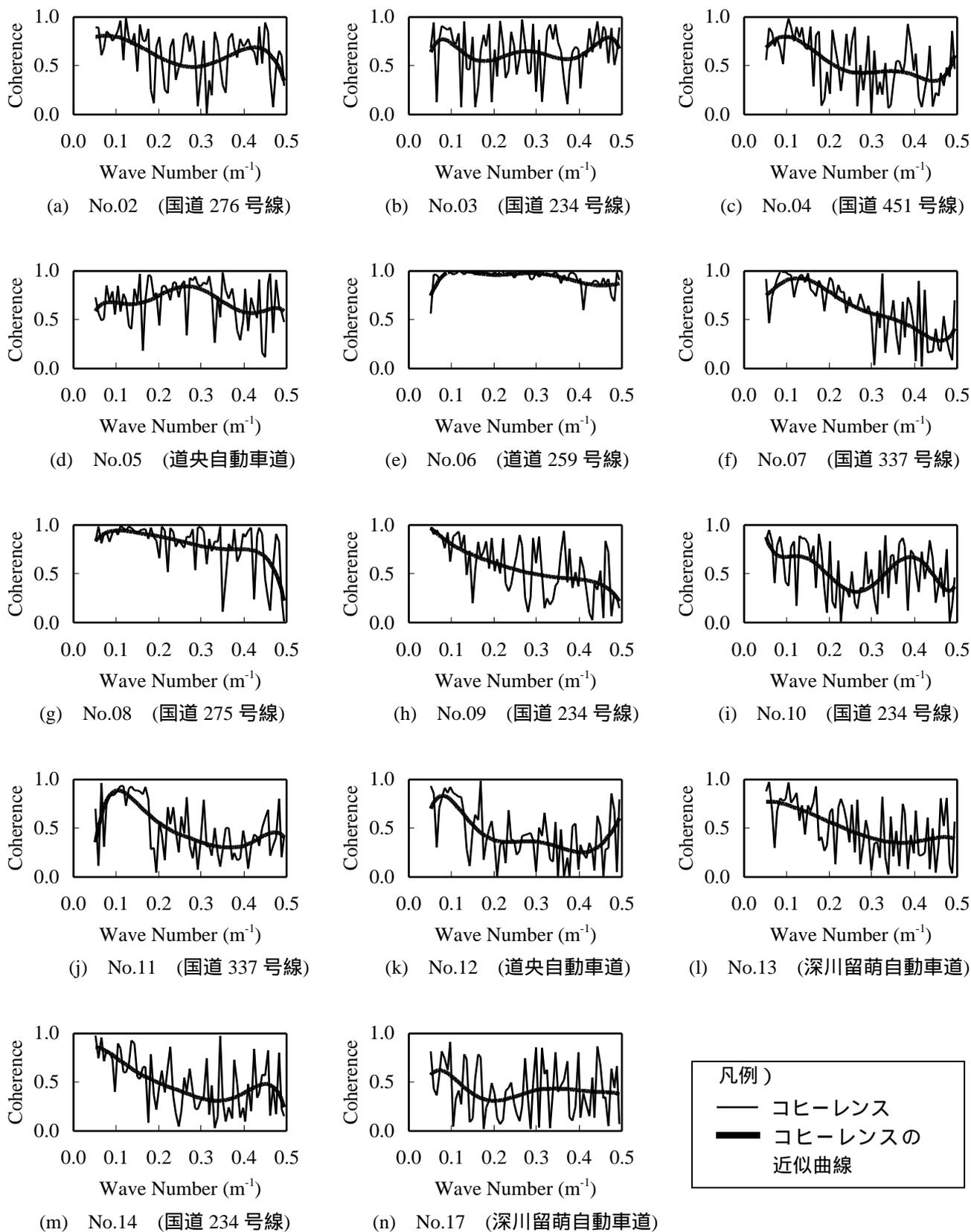


図-12 EVEN 試験における True Profile とプロフィール推定結果のコヒーレンス

ト（基準線が徐々に移動する現象）の影響等が生じないよう、位置照合については特に留意しなければならない。

統計値の一つである IRI（国際ラフネス指数）の推定精度については、図-13 の結果が得られた。一部の区間を除き、データのばらつきは少なく、True

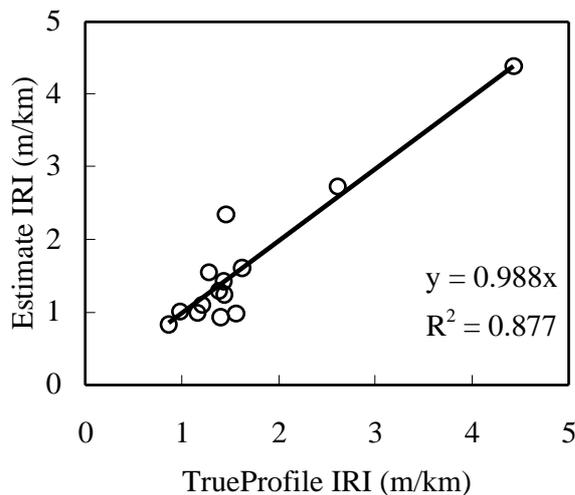


図-13 IRI の推定精度

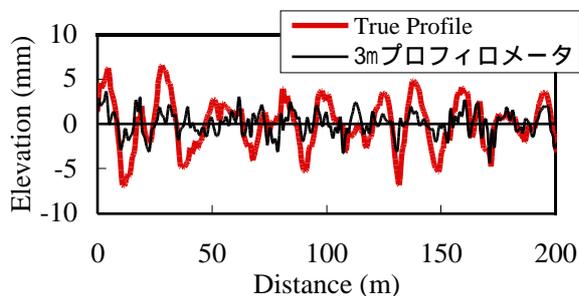


図-14 区間 No.03 における測定誤差 (0~200m)

Profile の IRI を高精度で推定することができた。

ここで、推定結果が大きく外れた区間は No.03 である。この区間の 0~100m 付近で True Profile と 3m プロフィロメータの波形に明確な相関関係がないことが主な原因と考えられる (図-14)。区間 No.03 は、図-8 に示すように平均値に比べ検出特性が大きいいため、IRI で整理した場合、誤差が拡大したと思われる。

6. まとめ

本研究を要約すると以下ようになる。

- ・ 3m プロフィロメータの測定データから True Profile を推定する方法について考察した結果、一般道路を対象とした周波数帯域 ($WN= 0.05 \sim 0.50m^{-1}$) であれば、プロファイル推定フィルタによって比較的高い精度で推定できることを示した。また IRI についても、高い精度で推定できることを示した。
- ・ 3m プロフィロメータの検出特性を算出する場合、True Profile に含まれる極大値の処理を適切に行なう必要がある。複数の測定結果から平均的な評価基準値を求める場合、トリム平均処理を行な

うと平滑化された周波数特性を得ることができる。
 ・ 舗装マネジメントの観点から、舗装の劣化予測が重要となりつつあるが、実測データの時間推移から精度の高い劣化予測を行なうためには測定頻度の増加が望ましい。3m プロフィロメータは現在最も普及している測定装置であり、路面性状測定車の導入が難しい場合などは、この装置を有効活用することが最も現実的かつ合理的な方法であると思われる。

参考文献

- 1) 大野滋也, 佐藤正和, 鈴木一隆: 「乗り心地」に着目した路面管理指標に関する研究 -IRI (国際ラフネス指数) の適用性-, EXTEC, No.61, pp.37-40, 2002.
- 2) Michael W. Sayers and Steven M. Karamihias: The Little Book of Profiling -Basic Information about Measuring and Interpreting Road Profiles-, The University of Michigan Transportation Research Institute, 1997.
- 3) 市原薫: 路面の凹凸, 技術書院, 1968.
- 4) 遠藤桂: 路面プロファイルと平坦性, アスファルト, 第 45 巻, 第 212 号, pp. 16-22, 2002.
- 5) 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リング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, 第 7 巻, pp. 15-1-12, 2002.
- 6) 南雲貞夫, 瀬戸薫, 山下弘美, 佐鳥悦久: 道路舗装に関する試験法, 山海堂, 1975.
- 7) 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.
- 8) 小野田光之: 路面の評価 (3) 路面性状測定車 (自動測定装置), 舗装, 第 36 巻, 第 10 号, pp. 34-39, 2001.
- 9) 吉村彰芳: 軌道狂い原波形の復元に関する理論的基礎の確立とその応用, 鉄道技術研究報告, 施設編 586 号, No. 1336, 1987.
- 10) 吉村彰芳: 軌道狂い原波形の復元に関する理論的基礎の検討とその適用, 土木学会論文集, 第 377 号/IV-6, pp. 117-126, 1987.
- 11) 川村彰: 路面の評価 (1) 平坦性に着目して, 舗装, 第 36 巻, 第 8 号, pp. 31-35, 2001.
- 12) Akira Kawamura et al: Basic Analysis of measurement Data from Japan in PIARC EVEN Project, TRB 80th Annual Meeting, 2001.
- 13) 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, 北海道道路管理技術センター, 1998.

- 14) Stephen Wolfram : The Mathematica Book Fourth Edition , 東京書籍 , 2000 .
- 15) Gillespie , T . D . (加藤昌太郎 , 笠原篤訳) : Eveything You Always Wanted to Know about IRI , But Were Afraid to Ask! , 舗装 , 第 35 卷 , 第 5 号 , pp . 19-26 , 2000 .
- 16) 矢澤英治 , 竹下邦夫 : 線路検査のメカニズム 3 . 軌道狂い(1) , 新線路 , 第 53 卷 , 第 4 号 , pp . 34-37 , 1999 .
- 17) 日野幹雄 : スペクトル解析 , 朝倉書店 , 1977 .
- 18) 景山克三 , 景山一郎 : 自動車力学 , 理工図書 , 1984 .
- 19) 西原主計 , 山藤和男 : 計測システム工学の基礎 , 森北出版 , 2001 .
- 20) 南茂夫 : 科学計測のための波形データ処理 , CQ 出版社 , 1986 .
- 21) 青島伸治 : 計測工学入門 , 培風館 , 1995 .
- 22) 武藤真介 : 統計解析ハンドブック , 朝倉書店 , 1995 .
- 23) 川村彰 , 姫野賢治 , 藤原隆 , 秋本隆 : ウェーブレット解析の路面評価問題への適用性について , 舗装工学論文集 , 第 2 卷 , pp . 23-28 , 1997
- 24) 日本道路協会 : 舗装の構造に関する技術基準・同解説 , 丸善 , 2001 .

STUDY ON THE ESTIMATING METHOD OF TRUE PROFILE USING THE 3M PROFILOMETER
-BASED ON THE PIARC EVEN DATA-

Tatsuo SHIRAKAWA , Akira KAWAMURA , Kiyoshi TAKAHASHI and Masaki KAMIURA

Monitoring surface conditions and prediction of the damage of road surface have been carried out periodically from point of view of the traffic safety and the pavement management system (PMS). Nowadays, the true profile for a specified spatial frequency range can be easily obtained by a profiler although it has inherent detective properties. In this paper, we studied an estimation of the true profile using the measurement data of the PIARC EVEN experiment acquired by a conventional 3m profilometer. The results show that the profilometer enables to estimate the true profile accurately for practical use on general highways.