

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 -

白川 龍生¹ ・ 川村 彰² ・ 高橋 清³ ・ 中辻 隆⁴

¹正会員 北見工業大学 工学部土木開発工学科 (〒090-8507 北海道北見市公園町 166)

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 北海道北見市公園町 166)

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 北海道北見市公園町 166)

³正会員 工博 北海道大学助教授 工学部土木工学科 (〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 4 丁目)

路面性状評価に際して、プロファイラの測定精度および路面プロファイルの波状特性分析は極めて重要である。本研究は、縦断路面プロファイルの Wave Band(WB)に着目し、我が国における高速路面プロファイラの測定精度について検討した。検討に際しては、バンドパスフィルタの設計ならびにプロファイル推定フィルタを新たに開発し、PIARC EVEN データによりプロファイラの Repeatability, Reproducibility について比較分析を行った。結果より、平坦性に関する区間評価値からは検出が困難なプロファイラの周波数特性を明示することができた。また、Repeatability の良好なプロファイラの場合、簡易測定システムでも一定の WB において高精度で True Profile を推定できることを実証した。

Key Word : Wave Band Analysis, PIARC EVEN, Repeatability, Reproducibility, Profile Estimate filter

1. はじめに

路面性状のうち、平坦性は舗装の重要な特性の一つであり、燃費、タイヤの摩耗のような車両走行費用に影響を与えるばかりでなく、車内騒音、乗員の乗り心地、車の操縦性・安定性との関係のように道路利用者の快適性や安全性に重大な影響を及ぼす。さらに、車外騒音、振動のように沿道の住環境にも影響を与えるため、平坦性の測定及びその評価方法の確立は今日の道路交通問題を処理する上で極めて緊急を要する課題である¹⁾。しかしながら、現在わが国における路面の調査は、国際ラフネス指数(以下、「IRI」とする)などの評価指標を求める目的では実施されておらず、縦断プロファイルの標準偏差(以下、「 σ 」とする)のデータにおいても 1.5m という粗い測定間隔である。

ここで平坦性の評価方法について列挙すると、路面プロファイルの直接測定によるもの、路面の凹凸により生ずる装置のレスポンス測定によるもの、被験者の主観評価によるものなど多岐にわたっている。また、路面の縦横断方向の平坦性を測定する装置と手法は各国によって異なる。こうした背景を踏まえ、主として各国で利用されている路

面プロファイルプロファイラを比較し、基準化することを目的とした国際共同試験が、1998年に世界道路協会(PIARC)によって行われた²⁾。

本研究は、上記国際共同試験のうち日本で実施された試験(以下、「EVEN JAPAN」とする)結果から得られた路面縦断プロファイルデータを用いたデータ処理手法について考察しており、主として(1)各種プロファイラの Repeatability(反復性)、Reproducibility(再現性)について論じ、測定システムの安定性について検討した。また(2)Portability(移植性)の視点からは、プロファイラの周波数特性の逆数を乗ずるフィルタ(以下、「プロファイル推定フィルタ」とする)を設計し、測定結果から True Profile の推定を行った。考察過程においては、プロファイラの検測機構、車両の固有振動数及び測定データ数・サンプリング間隔等を考慮し、波数(以下、「WN」とする) $=0.05 \sim 0.40\text{m}^{-1}$ の帯域(ウェーブバンド、以下「WB」とする)に着目した。

なおデータ処理においては、主として University of Michigan Transportation Research Institute (UMTRI)で開発されたソフトウェアである RoadRuf を用いた³⁾。

2. ウェーブバンドの設定

本章では, EVEN JAPAN について概要を記し, 測定データの特徴等を考慮した WB の設定方法について述べる.

2.1 EVEN JAPAN 概要¹⁾²⁾

第 2 回 PIARC 路面性状国際共通試験は, 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, 1998 年 7 月に北海道の国道, 道道, 高速道路において実施された.

路面の縦横断方向の平坦性を測定する装置は, 一般的にプロファイラと称され, 我が国では低速プロファイラ(例えば, 3m プロフィロメータ)と高速プロファイラ(例えば, レーザ波を用いた非接触型プロフィロメータ)に 2 種類に大別されるが, 各国ではそれ以上に種々多様である. 今回の試験の主たる目的は, 各国で開発された各種プロファイラにより実施された路面の平坦性測定結果を比較するための手段を提供することであり, 新たに各国に共通の測定指標や評価方法を開発することよりも, 従来の測定・評価方法から得られた様々な平坦性に関する情報を相互に関連させることに主眼点が置かれている. また, 各測定地域では, 測定箇所を利用して路面の平坦性に関する地域独自の調査・研究計画を実施することとされている.

(1) 試験箇所

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.

- ・ 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, 後述する参照データ「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, ポーラスアスファルト舗装を幾つか含む.

北海道の道路において, 以上の条件を満足する道路区間として最終的に 15 区間が選出された.

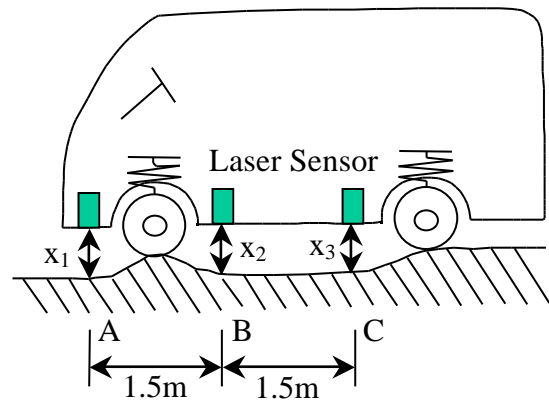
(2) プロファイラ

国内から参加した高速プロファイラは, 縦断プ

表-1 高速路面プロファイラ(縦断関係)

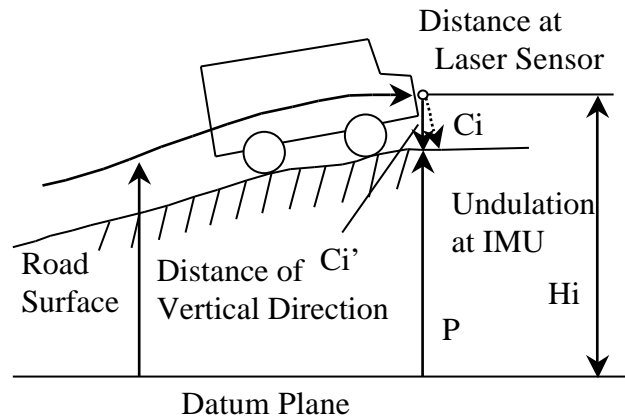
装置	測定法	測定速度 V(km/h)	サンプリング 間隔 t(m)
Device1	交点変位法	100以下	0.25
Device2	三点逐次法	100以下	0.10
Device3	三点逐次法	100以下	0.10
Device4	三点逐次法	100以下	0.05
Device5	レーザセンサ +ジャイロ	100以下	0.25
Device6	レーザセンサ +ジャイロ	80以下	0.50
Device7	レーザセンサ +ジャイロ	100以下	0.10

ロファイル測定に関してはレーザ変位計を車両に搭載し, 通常の車両走行速度で測定する方式が主流である. 高速プロファイラの仕様(縦断方向に関するもの)を表-1 に示す²⁾. 高速プロファイラの測定システムは, 図-1 に示す車両に取り付けられた 3 個の非接触型変位計を用いる三点逐次法と呼ばれるタイプ(以下, 「Type A」とする), または図-2 のように, ある基準面からの測定車の鉛直位



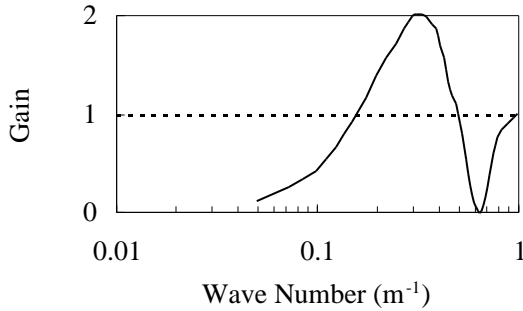
$$X = \frac{X_1 + X_3}{2} - X_2$$

図-1 測定方法 (Type A)



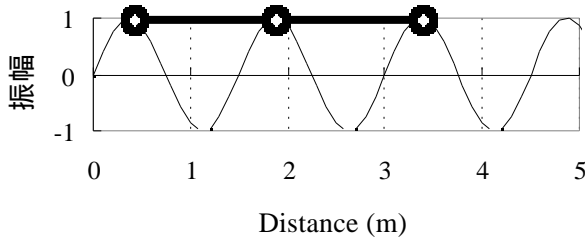
$$P = H_i - C_i'$$

図-2 測定方法 (Type B)

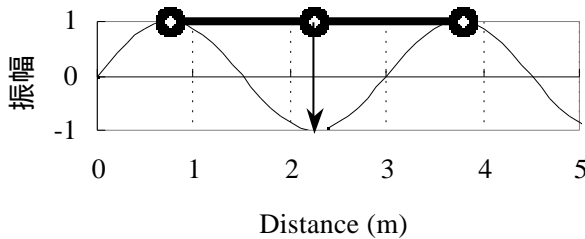


(a) 周波数特性

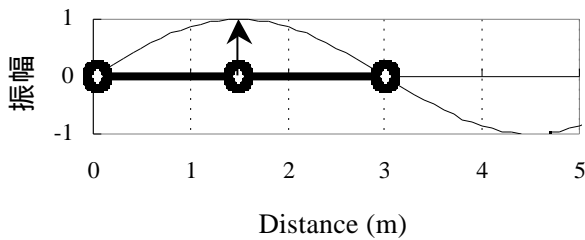
WN=0.67m⁻¹ の場合 (Gain=0)



WN=0.33m⁻¹ の場合 (Gain=2)



WN=0.17m⁻¹ の場合 (Gain=1)



(b) Gain 算出例

図-3 周波数応答 (Type A)

置と車両/路面間の距離の差から路面の縦断形状を算出するタイプ(以下、「Type B」とする)に大別される²⁾。

このうち Type A は図-3(a)のような周波数特性を示す。この方法は、プロファイラの全長(以下、「Ls」とする:この場合 Ls=3m)に近い波長の振幅利得(以下,Gain とする)が強調されるが、Ls/2に相当する $WN=0.67m^{-1}$ ($=1.5m$)については理論上、検出できず(図-3(b)),波数が減少するに伴い Gain が小さくなるほか、 $WN > 0.67m^{-1}$ については、

Gain の変動が大きく不安定という特徴を有する。

Type B については、測定機器によって仕様が異なり、周波数特性の理論値については公表されていないが、図-2 より線形など長波領域をターゲットとした測定システムであることが窺える。

(3) True Profile

前述のように、プロファイラは各々周波数特性を有しているため、試験結果を対照する場合、評価基準となるプロファイルデータ(絶対基準となるデータ)が望まれる。

本研究では、PIARC の CORE Guideline に基づき、the Static Dipstick, the Rolling Dipstick および rod and level measurements により構成されたプロファイルを True Profile と称し、以下参照する。

(4) 測定状況

測定は、通行規制を行いながら低速測定を日中に、高速測定を夜間に実施された。試験は、指定された区間において予めマーキングを施したラインの縦横断プロファイルを測定するが、高速測定では装置の測定精度、再現性をチェックする意味から、1箇所の測定について2段階の車両走行速度と5回の繰り返し測定が行われた。

(5) 測定結果

表-1 のように、プロファイラによって測定方法、サンプリング間隔が異なるため、測定結果は前処理を伴い一様には示せないが、測定タイプ別に以下の特徴が見られた。なお、データ前処理後の測定結果については次章で述べる。

- Type A: 線形などの情報を有さず、 $WN=0.1m^{-1}$ 程度以下の測定精度が高い。
- Type B: 主として縦断勾配など線形成分の情報が多い。

2.2 測定データの特徴等を考慮したウェーブバンドの設定

本研究の対象とする WB について、以下の設定条件を考慮し、各プロファイラ間の比較に適する WB を設定した。

(1) 路面特性の条件

路面特性を路面の波長により分類する場合、PIARC の技術委員会である TC1 より提案された波状特性分類によると、平坦性は $WN=0.02 \sim 20m^{-1}$ ($=0.05m \sim 50m$)の WB に属する²⁾。この WB は、乗り心地、騒音、燃費、車のダメージなど VOC(Vehicle Operating Costs)と称される車両の走行費用に関係している。

(2) 測定システムの条件

前述のように、測定方法のうち Type A は、 $WN=0.33m^{-1}$ 付近の Gain が強調され、 $WN=0.67m^{-1}$

は理論上検出できず、長波成分の Gain は小さい。また $WN > 0.67\text{m}^{-1}$ については、Gain の変動が大きく不安定である。以上のことから、Type A の場合、十分な精度が得られる波長帯としては、 $WN=0.05 \sim 0.50\text{m}^{-1}$ ($\lambda=2\text{m} \sim 20\text{m}$)程度と思われる。

Type B については周波数特性の詳細が公表されていないが、長波成分を中心に幅広い周波数領域の測定を指向したシステムであると思われる。

以上のことから、全てのプロファイラの比較に焦点を置く場合、Type A の測定結果が十分な精度を有する $WN=0.05 \sim 0.50\text{m}^{-1}$ の範囲内で WB を設定することが望ましい。

(3) サンプリング間隔の条件

離散化されたデータは、そのサンプリング間隔の2倍の波長までの正弦波を表現することができるが、エイリアシングの影響を回避するため、 t はさらに小さくすることが望ましい⁴⁾。

ここでデータの精度を考慮すると、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 $1/10$ 程度の間隔でサンプリングすることと提言されている⁵⁾。これより、最大有効周波数を $f_{\max}=1/(10 \cdot t)$ とすると、 t が最小である [Device4] では $f_{\max}=2.0\text{m}^{-1}$ ($\lambda=0.5\text{m}$)であるから、 $f_{\max} > 2.0\text{m}^{-1}$ については十分な精度が得られないこととなる。したがって、研究の対象外とした。サンプリング間隔の設定についてはある程度自由度があるが、統計処理の過程で t と IRI を相互比較するような場合、 $t=0.25\text{m}$ と設定すると好都合である。この場合、 $f_{\max}=0.4\text{m}^{-1}$ ($\lambda=2.5\text{m}$)となる。

(4) 乗用車の固有振動数による条件

一般的な乗用車の固有振動数は、バネ上が $1.2 \sim 1.5\text{Hz}$ 、バネ下が $10 \sim 17\text{Hz}$ 程度であるとされている⁶⁾。EVEN JAPAN の速度領域は一般道路で $V=30 \sim 60\text{km/h}$ 、開業前を含めた高速道路で $V=20 \sim 90\text{km/h}$ として行われた。その結果、バネ上では、一般道路の場合 $\lambda=4.6 \sim 13.9\text{m}$ ($WN=0.07 \sim 0.22\text{m}^{-1}$)、高速道路の場合 $\lambda=3.1 \sim 20.8\text{m}$ ($WN=0.05 \sim 0.32\text{m}^{-1}$) で共振しやすいと考えられる。同様にバネ下では、一般道路の場合 $\lambda=0.03 \sim 0.93\text{m}$ ($WN=1.08 \sim 33.3\text{m}^{-1}$)、高速道路の場合 $\lambda=0.02 \sim 1.39\text{m}$ ($WN=0.72 \sim 50\text{m}^{-1}$)が共振範囲である。

(5) ウェーブバンドの設定

以上、(1)～(4)の設定条件をまとめると図-4 のようになる。

上記のうち影響が大きい項目としては(2)及び(3)であることを考慮すると、WB は $WN=0.05 \sim 0.40\text{m}^{-1}$ ($\lambda=2.5 \sim 20\text{m}$)とすることが適当と考え

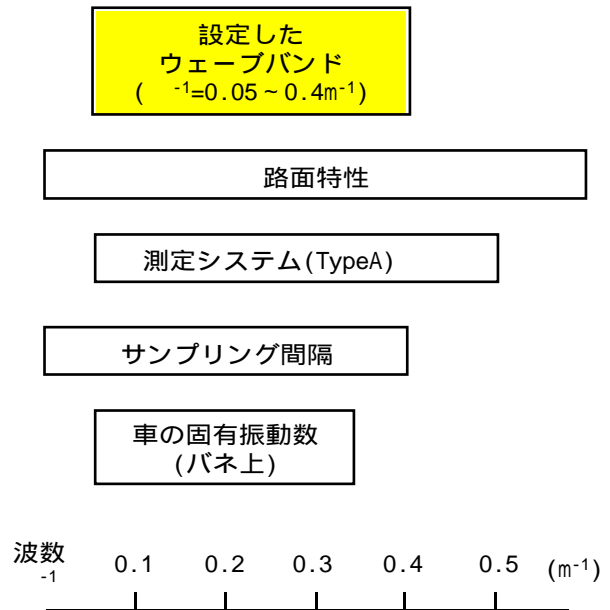


図-4 ウェーブバンドの設定

られる。

3. バンドパスフィルタ設計上の留意点

前章で設定した $WN=0.05 \sim 0.40\text{m}^{-1}$ を通過域とするバンドパスフィルタは、以下の点に留意して設計した。なお、高速フーリエ変換（以下、「FFT」とする）をフィルタとして応用する方法も考えられるが、データに急激な変化点が含まれている場合、当該箇所前後にゆがみが生じる可能性があることから⁵⁾、本研究では一般的なデジタルフィルタによってバンドパスフィルタを設計した。

3.1 フィルタ特性

フィルタの通過域は $WN=0.05 \sim 0.40\text{m}^{-1}$ とし、長波長側の遷移域を $WN=0.03 \sim 0.05\text{m}^{-1}$ 、短波長側を $WN=0.40 \sim 0.67\text{m}^{-1}$ 、これ以外の波長帯を阻止域とした。フィルタの周波数特性を図-5 に示す。

3.2 サンプリング間隔

前章より、 $t=0.25\text{m}$ と設定した。ここで、[Device2]、[Device3]、[Device4] および [Device7] のサンプリング間隔は $t=0.25\text{m}$ に比べ小さいため、データの間引き処理を事前に行わなければならない。その際、エイリアシングエラーを防止するため、ローパスフィルタを別途設計する必要がある。これに対し、[Device6] のサンプリング間隔は $t=0.25\text{m}$ に比べ大きいことから、各データ間を線形

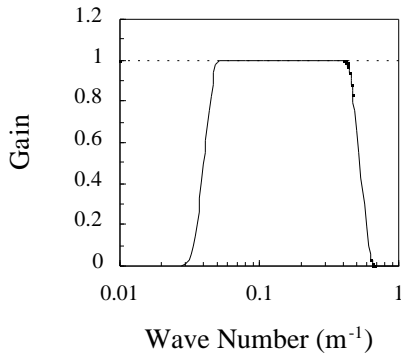


図-5 バンドパスフィルタの周波数特性

補間によって補うこととした。

3.3 フィルタの次数

一般にフィルタ次数（以下、「 K 」とする）が大きい場合、以下のような特徴がある⁴⁾⁷⁾⁸⁾。

- ・ 計算の精度が向上する。
- ・ 周波数の分解能が小さくなる。
- ・ 計算時間がかかる。
- ・ 計算上の誤差を含む区間が長くなる。

本研究では、計算上の精度が要求されることから K は高い方が望ましい。試行の結果、 $K=1001$ とした。この処理において生ずる計算上の誤差については次節で述べる。

3.4 過渡応答部の処理方法

前項において生じた計算上の誤差範囲は、データの始終点（以下、「 N_e 」とする） $N_e=(K-1)/2$ 点の区間であり、 $K=1001$ の場合、 $N_e=500$ 点の範囲（ $L=125m$ ）で過渡的な誤差が生じる⁴⁾⁷⁾。

EVEN JAPAN の場合、公開された測定データは各試験区間の中央 500m のみであるため、前後 125m ずつを除去した場合、影響を受けない範囲は 250m のみとなり適当ではない。

そのため、事前に過渡応答部を処理する区間を連結し、フィルタリング処理後に切り離す処理を行った。

3.5 位相遅れの考慮

設計したフィルタは全て線形位相としたため、位相遅れ（以下、「 τ 」とする）を生じる（ここで、 $\tau=(K-1) \cdot t/2$ ）。 $K=1001$ 、 $t=0.25$ の場合、 $\tau=125$ 点分の遅れとなる。フィルタリング処理後の出力結果は、上記位相遅れを考慮する⁴⁾⁷⁾。

3.6 True Profile との比較における留意点

表-2 繰返し測定誤差（による整理）

	30km/h		60km/h		90km/h	
	2%	5%	2%	5%	2%	5%
Device1	40	88	44	79	53	60
Device2	43	80	45	77	20	20
Device3	68	86	40	66	100	100
Device4	67	92	63	91	67	87
Device5	77	97	48	85	43	87
Device6	32	59	12	30	13	13
Device7	72	93	50	90	47	80

(単位:%)

True Profile は前述のように $L=330m$ であるため、各プロファイルのデータは同延長で統一しなければならない。

また True Profile についても、各測定結果と同様にフィルタ処理によって $WB(WN=0.05 \sim 0.40m^{-1})$ を考慮する必要があり、それに伴いサンプリング間隔 $t=0.025m$ を間引き処理によって $t=0.25m$ へ変更する。

4. 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

本章では、測定システムの安定性に関する考察を行うため、上記処理結果の得られた「WB を考慮した路面プロファイルデータ」を用いて、各種プロファイルの Repeatability（反復性）、Reproducibility（再現性）について検討した。なお平坦性指標としては σ や IRI が代表的であるが、本研究では主としてによる評価を行った²⁾。の計算は $t=0.25m$ のデータを用いた。

4.1 Repeatability(反復性)

Repeatability(反復性)は、同時期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、同じ測定値を繰返し得ることのできる能力のことであり、一般には繰返し測定データの平均値と標準偏差によって示される。EVEN JAPAN では各測定箇所について 5 回繰返し測定を行っている²⁾。

本節では、(1)繰返し測定誤差、(2)平坦性の度合いによる測定誤差、(3)波数による測定誤差など、測定システムの安定性に関する考察を行った。

(1) 繰返し測定誤差

5 回の走行によって得られた各測定区間の区間統計値()の平均値を求め、平均値の 2% 以内と 5% 以内の範囲に測定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表-2 に示す。

・ 測定速度 30km/h の場合、[Device6]を除く 6 台は 80%以上が区間平均の 5%以内に含まれる。

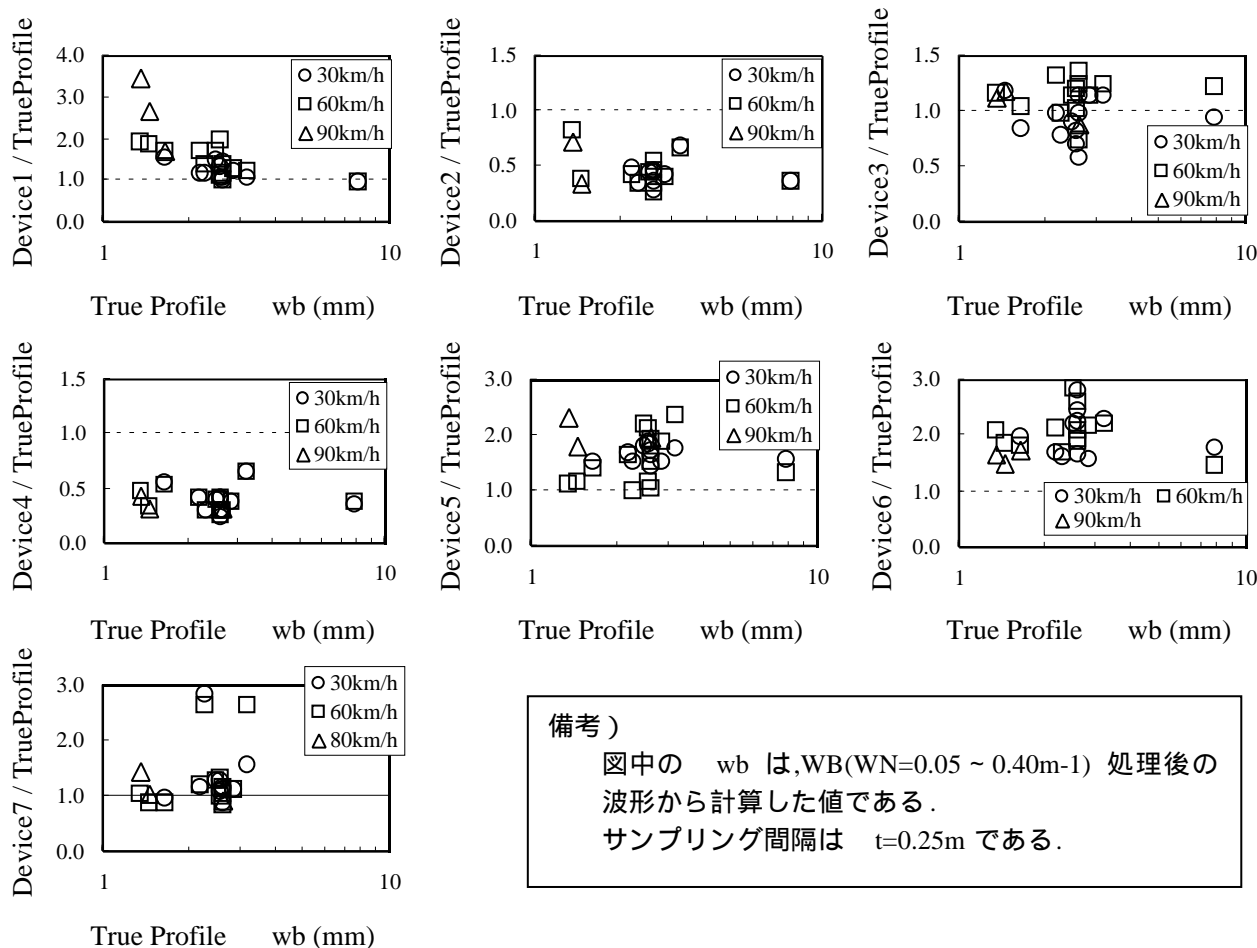


図-6 平坦性の度合いによる測定誤差

- ・ 測定速度 60km/h の場合も 30km/h と同様に、[Device6]の結果が劣っており、他のプロファイラは概ね 70%程度以上が区間平均の 5%以内に含まれる。
- ・ 測定速度 90km/h では、[Device2]、[Device6]を除き、80%以上が 4 台含まれる（5%以内の場合）。なお、この速度領域は全て高速道路における測定であり、平坦性は一般道路に比べ良好であることも一因ではないかと思われる。
- ・ [Device3]、[Device4]、[Device6] 及び [Device7]、の結果は概ね良好である。
- ・ 測定システムによる特徴は明確ではない。

(2) 平坦性の度合いによる測定誤差

True Profile と各プロファイラの平均値との比較を によって行った結果を、図-6 に示す。各プロファイラについて考察すると以下ようになる。

- ・ [Device1] は、 の値が大きい区間では True Profile とほぼ一致しているが、 の小さい区間については True Profile より大きい。また測定速度が高い場合の結果が大きい。
- ・ [Device2] 及び [Device4] は、いずれの区間にお

いても、True Profile より小さい値が得られる。速度による測定差は見受けられない。

- ・ [Device3] は、 の程度に関わらず、概ね True Profile に近い値が得られた。速度が高い場合、わずかに測定結果が大きい。このプロファイラが最も True Profile に近い値を示した。
- ・ [Device5] 及び [Device6] は、いずれの区間とも True Profile より 1.5 倍程度大きい。速度によって結果にばらつきがある。
- ・ [Device7] : が小さい区間では、True Profile とほぼ一致するが、一部に 2 倍程度大きな値が見られる。速度による測定差は見受けられない。

(3) 波数別の測定誤差

True Profile と各プロファイラについて、波数と Gain により比較した結果を図-7 に示す。なお Gain は、パワースペクトルの振幅比とした（パワースペクトルの縦軸は振幅の 2 乗であるから、平方根を計算する必要がある）。

ここで検討した区間は、 の大きさを考慮し、No.4(wb= 7.79mm)、No.8(wb=2.51mm)として比較を行った。各プロファイラについて考察す

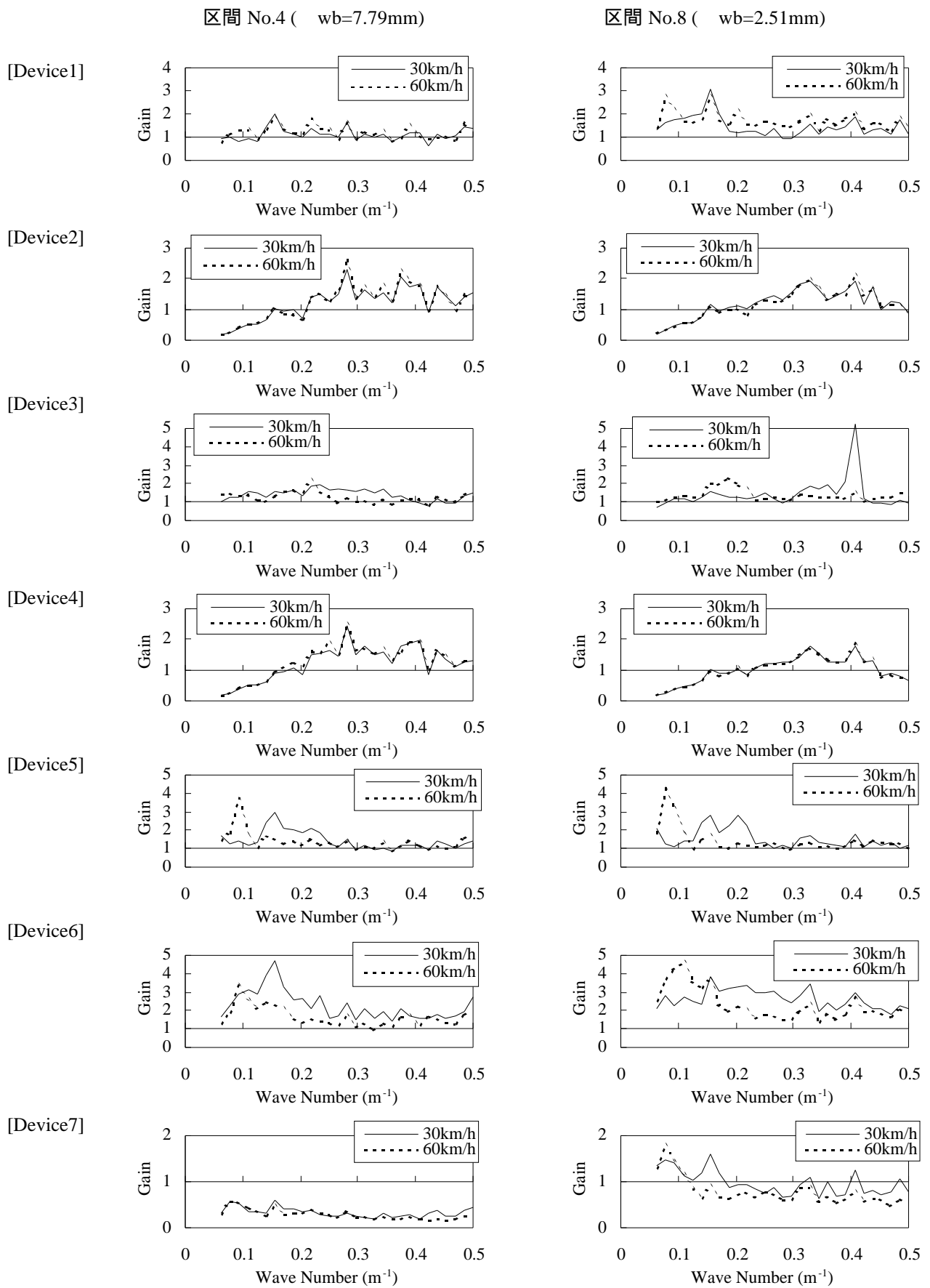


図-7 波数に着目したプロファイラの Gain (左側 : 区間 No.4, 右側 : 区間 No.8 における Gain)

ると以下ようになる。

- [Device1]は、区間(No.4)では波数によらず概ね Gain は 1 ~ 1.5 倍程度となっているが、小さい区間(No.9)では Gain が大きい。
- [Device2]及び[Device4]は、測定速度、の程度によらず、ほぼ一定の傾向が得られた。 $WN=0.33m^{-1}$ における Gain は 2 倍程度であり、 $WN=0.17m^{-1}$ 以下では、True Profile より小さくなる Type A の傾向を明確に示している。
- [Device3]は、 $WN<0.20m^{-1}$ については Gain=1 ~ 1.5 倍程度であり、それ以上の波数では安定していない。測定速度による傾向は明確ではない。
- [Device5]は、総じて True Profile に比べて大きな値が得られた。傾向として、測定速度が高い場合、 $WN=0.13m^{-1}$ 付近を境界に長波長での Gain が大きくなる一方、測定速度が低い場合は、 $WN=0.13m^{-1}$ 付近を Gain が大きくなる。境界付近の Gain は 1.0 倍程度である。
- [Device6]は、全ての波長帯において、True Profile より測定結果が大きい。特に $WN=0.10m^{-1}$ 前後にピークが見られる。測定速度による傾向は明確ではない。
- [Device7]： の大きい区間 (No.4)では全ての波長帯で True Profile より Gain は小さいが、区間 No.8 では $Gain=0.5 \sim 2.0$ 程度の値が得られる。傾向として、波数が少なくなると Gain が大きい。

4.2 Reproducibility(再現性)

Reproducibility(再現性)は、プロファイラによる測定値のばらつきの度合いをいう²⁾。本節では、Type A([Device2] ~ [Device4]), Type B([Device5] ~ [Device7])について考察した。

(1) 平坦性の程度による測定結果の比較

この項では、平坦性の程度による測定結果の比較を行った(図-8)。

- Type A は、[Device2]と[Device4]の相関が高い。この 2 装置は の程度によらず True Profile より小さい値を示す。一方、[Device3]は他の 2 装置と傾向は異なるが、概ね True Profile に近い値が得られる。これは前節と同様である。
- Type B は、測定結果のばらつきが大きく、明確な相関は見受けられなかった。

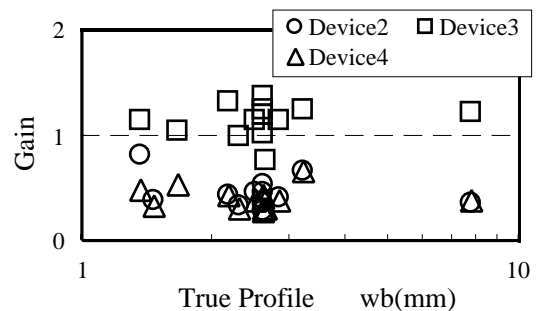
(2) 波数による測定結果の比較

この項では、波数及び True Profile との Gain による比較を行った(速度 30km/h の場合)。結果を図-9に示す。

検討区間については、図-7 と同様に、No.4($wb=7.79mm$), No.8($wb=2.51mm$)として比較した。

- Type A は、 の程度によらず以下の傾向が見ら

[Type A] :



[Type B] :

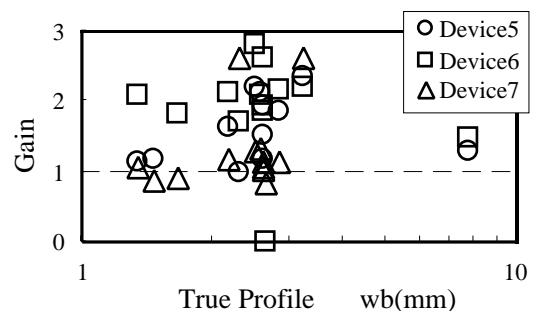


図-8 平坦性の程度によるプロファイラの比較

れる。[Device2]と[Device4]については、データの一部にエラーと見られる箇所はあるが相関は高い。また[Device3]は、 $WN<0.2m^{-1}$ では他の装置に比べ Gain は大きい、 $WN>0.2 m^{-1}$ 以上の領域では、他の装置と同様の Gain を示す。

- Type B はばらつきが大きく、Type A のような明確な特徴は見られず、及び速度の変化により値は大きく変化し不安定である。したがってこれらの諸問題を解決しなければならない。

4.3 各プロファイラの特性に関する考察

Repeatability 及び Reproducibility の観点から、各プロファイラについてまとめると、以下のようになる。

- [TypeA (Device2 ~ 4)] :

各プロファイラとも、 $WN > 0.2m^{-1}$ の領域では、図-3 に示した理論値に近い値が得られ、特に Device3 については $WN=0.2m^{-1}$ 以下の特性が Gain=1 程度となるような補正が施されている。その結果、他の 2 装置に比べ、平坦性の程度に関わらず、図-6 の結果が良好だった。なお、一部にエラーと見られる箇所があるが、これは計測機器の不具合と思われる、今後の課題である。

- [TypeB (Device5 ~ 8)]及び[Device1] :

及び速度の変化により値は大きく変動し不安定であるが、図-7 から窺える傾向として、TypeB の $WN > 0.15m^{-1}$ の領域は、速度 30km/h

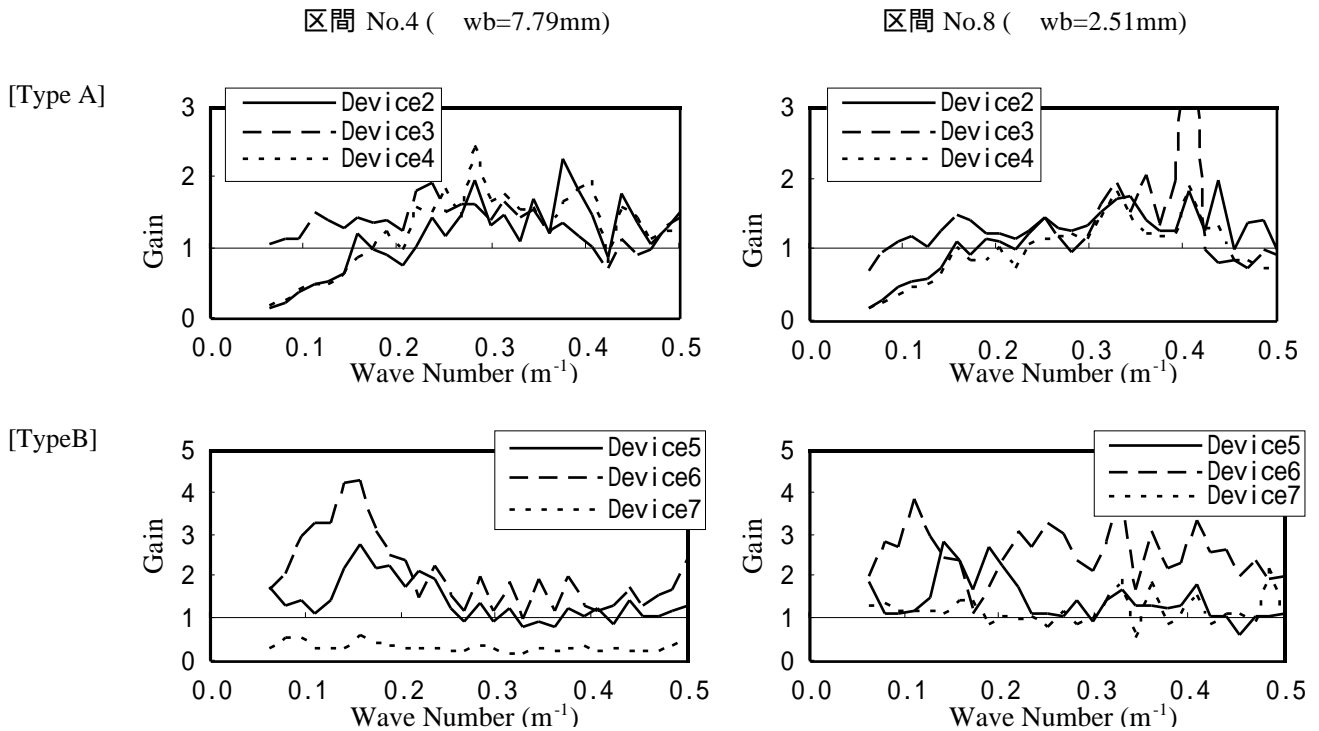


図-9 波数に着目したプロファイラの比較 (左側：区間 No.4,右側：区間 No.8 における Gain)

に比べ 60km/h の方が True Profile の Gain に近づき、[Device1]は逆に低速測定 of 精度が高い。Gain が不安定な原因は計測機器の不具合と思われる、今後の課題である。

本研究で設定した WB の測定は、結果として Type A に比べて不利であった。しかし本研究の対象外である長波長領域 (線形成分など) の測定においては、Type A では図-3 のように明らかに検出能力が低下しており、幾何形状を含めた議論を行う場合は Type B が適すると思われる。

5. プロファイル推定フィルタ

この章では、Portability (移植性) の視点から²⁾、高速プロファイラの測定結果を用いて True Profile を推定するためのフィルタ設計を行った。

5.1 測定データから True Profile を推定する方法

プロファイラにより、True Profile を直接推定することが可能であれば理想的であるが、前章で考察したように、現状では各プロファイラは固有の周波数特性によって歪められることから、本質的に True Profile の予測は困難である。

ここで、プロファイラのある周波数における Gain が仮に 2 とすると、この逆数である 0.5 を乗じて Gain=1 となるようなフィルタを設計し、測定結果とフィルタリング演算することにより、True Profile を推定が可能である。以下、このような固有の周波数特性を補正するフィルタの設計方法について検討した。このフィルタを「プロファイル推定フィルタ」と称する。

このような方法は、鉄道工学の分野でも研究がなされているが⁹⁾、その場合用いる入力データは、推定精度を高めるため、線形条件等が一定であり、FFT 法でパワースペクトルを推定する場合は、データ数をセグメント長の 4 倍 (セグメント分割数 4 区間) 程度以上とするよう提案されている⁴⁾。多くの場合、数 km 分のデータを用いると思われる。

本研究で用いる EVEN JAPAN の場合、測定区間が 330m 程度であることから、事前処理を施さない場合、FFT 法の推定精度は低い。このような場合、MEM 法が用いられる場合が多いが、後述するように他の演算過程で FFT, IFT (高速逆フーリエ変換) 処理を用いる機会がある点を考慮すると、パワースペクトルの計算においても FFT を利用した方が有利である。そこで以下に示す点を考慮し、このような短い区間のデータを用いた場合においても FFT 法により一定の精度を有するフィルタ設計手法について検討した。

5.2 True Profile の推定手順

「プロファイル推定フィルタ」を用いた True Profile の推定手順は以下の通りである。

- True Profile の推定範囲(WB)を決定する。
- プロファイラと True Profile のパワースペクトルを各々 FFT 法によって算出する。
- 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

- 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)。
- 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。
- フィルタリング処理。
- 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(3.5 節と同様、位相遅れが生じる)。

5.3 入力データの事前処理

パワースペクトルを FFT 法によって推定する場合、推定精度を高めるためにはデータ数 N が多いほど望ましい。前章ではサンプリング間隔を $t=0.25\text{m}$ と設定したが、EVEN JAPAN のデータ ($L=330\text{m}$)を用いる場合、データ数は $N=1320$ 点程度であり、所要の周波数分解能は望めない。したがって精度を向上するためにはサンプリング間隔を小さく設定しデータ数を増加する必要がある。

ここで、サンプリング数を 5 倍とすると ($t=0.05\text{m}$)、総データ数は $N=6600$ 点となるため、セグメント長 $L_{\text{seg}}=1024$ と周波数分解能を高く設定した場合においてもセグメント分割数を 6 区間以上確保することができ、高い推定精度が期待できる。以上のことから、プロファイル推定フィルタを設計する場合のサンプリング間隔は $t=0.05\text{m}$ とした(なお、の算出には始点から $N=6144$ 点分のデータを用いた)。

また、3 章と同様、フィルタリング演算過程でデータの始終点に計算上の誤差が生じることから、事前に過渡応答部を処理する区間の連結を行う必要がある。

5.4 プロファイル推定フィルタの適用例と推定精度

前述の推定手順に基づき、プロファイル推定フィルタを用いた True Profile の推定例を示す。プロファイラは Repeatability 及び Reproducibility の検討結果において良好な結果が得られた [Device-2] (Type A)を用いることとし、区間は No.2 とした。また WB は $\approx 2.5 \sim 20\text{m}$ とした。

[Device-2]及び True Profile の測定結果を図-10 に示す。次に、図-10 の波形を用いて FFT 法により計算されたパワースペクトルを図-11 に示す。[Device-2]のパワースペクトルより Type A の特徴が見受けられる。この結果求められたプロファイル推定フィルタの周波数特性について、図-12 に示す。Type A の特徴である波数 $WN=0.3\text{m}^{-1}$ 付近のピーク値については 0.5 倍程度とする演算補正がされており、また $WN=0.05\text{m}^{-1}$ 付近は振幅を増幅するフィルタが作られていることがわかる。

[Device-2]の測定結果から推定されたプロファイルと True Profile を図-13 に示す。推定精度を検証するため、再度 FFT 法を用いてパワースペクトルを計算した結果を図-14 に示す。長波成分を除き、概ね高い推定精度が得られた。長波成分に生じた誤差は、振幅特性及び位相特性の設定方法に起因するものと思われる、継続研究する予定である。

5.5 今後の課題

True Profile の推定については、これまで線形成分を含めた絶対プロファイル測定システムの開発が主流であったが、平坦性に必要な程度の WB であれば、プロファイラの振幅特性を 1 とするフィルタを作成することにより、高度なシステムを用いなくとも高精度で推定できることを実例により示した。今後の課題として、以下の点が考えられる。

- 今回検討した Type A によるプロファイラは全長 3m であったが、この場合一定の推定精度が得られる波長は $WN=0.05\text{m}^{-1}$ 程度が限界だと思われる。今後、第二東名高速道路のように $V_{\text{max}}=140\text{km/h}$ 程度の速度領域を想定した場合、特に乗り心地を意識した管理を行うには、 $WN=0.025\text{m}^{-1}$ 程度まで推定精度が必要になるとと思われる。今後この程度の波長域まで想定したプロファイラの開発が求められる。なお、 8m プロフィロメータが既に実用化されているが、このプロファイラの場合、 $WN=0.020\text{m}^{-1}$ における $\text{Gain}=0.12$ 倍であるため、この程度までは一定の推定精度が期待できる。

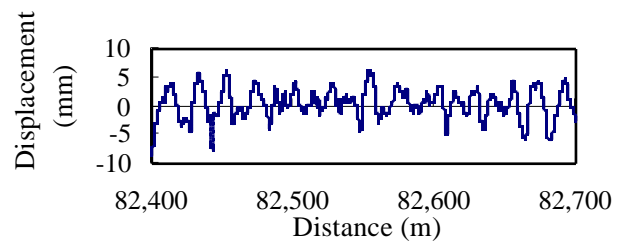
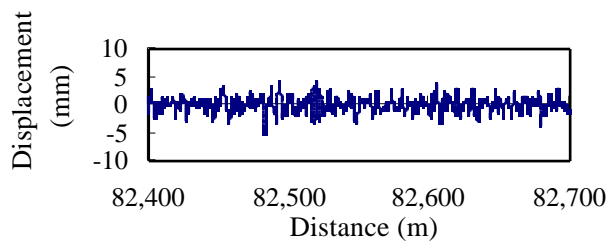


図-10 測定波形及び True Profile 波形 (左: Device2, 右: True Profile, 区間 No.2)

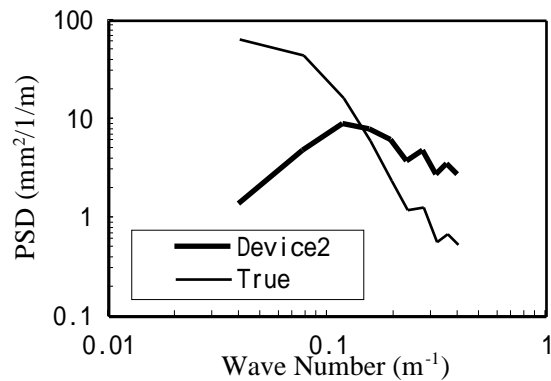


図-11 パワースペクトルによる比較 (Device2 及び True Profile)

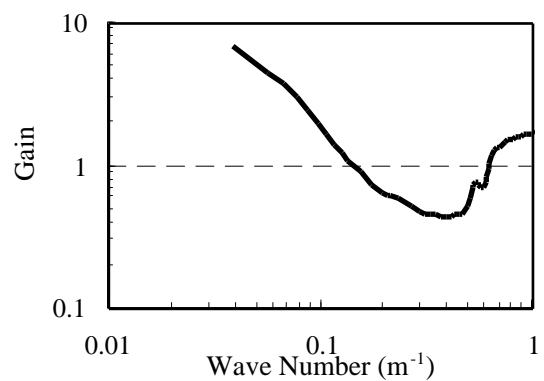


図-12 プロファイル推定フィルタの周波数特性

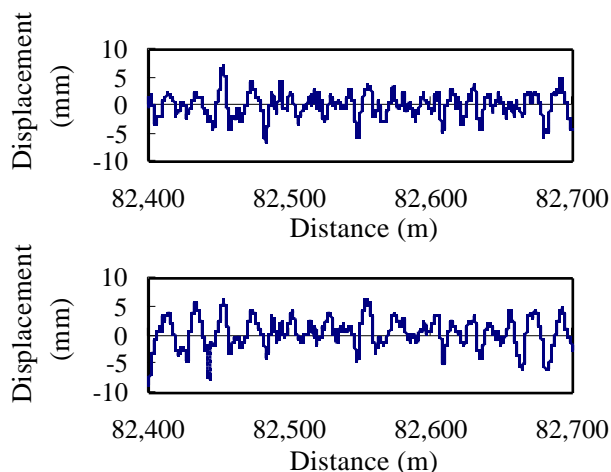


図-13 推定プロファイルと True Profile の波形比較 (上: 推定プロファイル, 下: True Profile)

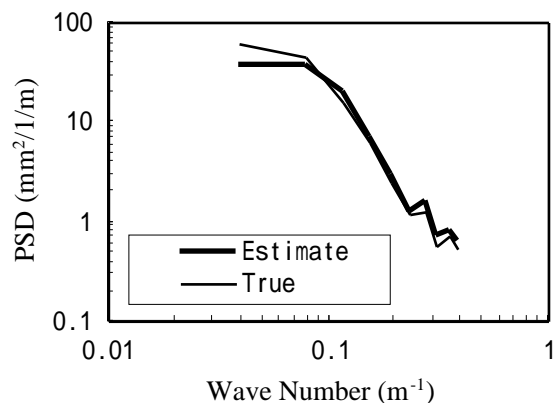


図-14 パワースペクトルによる比較 (推定プロファイル及び True Profile)

- ・ プロファイル推定フィルタは、入出力間の線形性を利用しているため、Type A に限らず、システムの Repeatability が安定していれば適用することができる。しかし不安定な場合、推定精度が著しく低下するため、Repeatability の結果によっては適用できない場合が生じる。EVEN 試験に参加したプロファイラの場合、比較的安定しているものでも区間が異なると Gain に違いが見られ、現時点での適用は難しい。4 章に示した機器的な問題点についての検討が必要である。

6. まとめ

本研究で得られた知見は以下の通りである。

- ・ 複数のプロファイラによって得られたデータを比較するに際し、検討の対象とする WB の設定方法について考察し、実例として EVEN JAPAN の場合に適した $WN=0.05 \sim 0.40\text{m}^{-1}$ を通過域とするバンドパスフィルタを設計した。またそれに伴う事前処理についても考察した。
- ・ EVEN JAPAN のデータを用いて、プロファイラの安定性 (Repeatability)、プロファイラ間の比

較(Reproducibility)を行った.特に WB を考慮し,波数による分析を行ったところ,区間評価値からは検出しにくいプロファイラの周波数特性について,明確な特徴を数例示することができた.各プロファイラとも解決すべき課題はあるが,概ね Type A のシステムは $WN=0.05 \sim 0.40m^{-1}$ を測定する場合,Type B に比べて有利である.Type B については,幾何形状を含めた議論をする場合に適したシステムであると思われる.

- ・ 入出力間の線形性を利用したプロファイル推定フィルタについて考察し,プロファイラの Repeatability が安定している場合,一定の WB であれば,高度なシステムを用いなくとも,高精度に True Profile を推定できることを示した.

7. おわりに

WB を考慮したデータ処理手法は,近年,世界の路面性状に関する研究開発の大きな潮流であるが,特にプロファイル推定フィルタによる True Profile の推定例を示した研究は国の内外を問わず本研究が最初の報告になると思われる.デジタル信号処理は既に理論体系の整備の段階から工学全般への応用段階へ研究対象が移行しており,路面性状に関する研究においても,今後更なる応用研究が期待される.

参考文献

- 1) 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.
- 2) Akira Kawamura et al: Basic Analysis of Measurement Data from Japan in PIARC EVEN Project, TRB 80th Annual Meeting, 2001.
- 3) Michael W. Sayers, Steven M. Karamihias: The Little Book of Profiling -Basic Information about Measuring and Interpreting Road Profiles-, The University of Michigan Transportation Research Institute, 1997.
- 4) 日野幹雄: スペクトル解析,朝倉書店,1977.
- 5) 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.
- 6) 景山克三,景山一郎: 自動車力学,理工図書,1984.
- 7) 尾知博: デジタル・フィルタ設計入門 各種フィルタの原理と DSP による実現 CQ 出版社,1990.
- 8) 並木秀明: Excel ではじめるデジタル信号処理,技術評論社,2000.
- 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.

STUDY ON THE DATA PROCESSING OF ROAD PROFILE TAKING ACCOUNT OF THE WAVE BAND -BASED ON THE EVEN DATA-

Tatsuo SHIRAKAWA, Akira KAWAMURA, Kiyoshi TAKAHASHI and Takashi NAKATSUJI

Measuring accuracy of the profiler and analysis of waviness of the road profile are indispensable to the evaluation of road surface characteristics. This study deals with the measuring accuracy of high-speed profilers developed in our country taking particular note of the wave band (hereafter WB) of longitudinal road profiles. In considering, the band-pass filter is designed and the profile estimate filter is newly developed and the comparative study for the Repeatability and the Reproducibility of profilers is carried out using the PIARC EVEN data. From the results, a frequency response characteristic of the profilers, which is difficult to find by the evaluation index for a road section, is clarified. In addition, it is shown that even a simple measuring system makes it possible to estimate the true profile with a high degree of accuracy using the highly-repeatable profile r at a certain WB.