

車の周波数応答特性を利用した路面性状測定システムに関する研究

Study on Road Surface Measuring System by Use of Frequency Response Characteristics of a Vehicle

北見工業大学大学院 ○学生員 大越 健司(Kenji Ohkoshi)
 北見工業大学工学部 正会員 川村 彰 (Akira Kawamura)
 北見工業大学工学部 正会員 白川 龍生(Tatsuo Shirakawa)
 北見工業大学大学院 学生員 後藤 謙太(Kenta Gotoh)

1. はじめに

路面のプロファイルが車の運動に対して多岐に渡って影響を及ぼしていることは周知の事実である。特に車体に生じる振動は、道路利用者の乗り心地や車体の耐久性等に大きく影響しており、その振動の発生源となる路面の平坦性を把握することは、舗装の維持管理者の見地においても重要である。そこで本研究は、車両自体を路面平坦性測定の装置とみなし、車のばね下に振動加速度計を設置し、路面縦断プロファイルとその上を走行する車両ばね下の上下方向加速度から車の周波数応答関数の振幅特性(以下、「周波数応答関数」とする)を算出し、車の振動特性から路面の平坦性を迅速に簡便かつ安価に測定するシステムを構築した。またこのシステムで用いた計測器の特性やシステムの安定性、精度、実用性等について把握・検討した。

ここで、本研究の諸条件を以下に記す。

- ・サンプリング間隔 $\Delta t = 0.25\text{m}$ として縦断方向の水準測量を行った結果を「True Profile」と称し、以下参照する。
- ・バンドパスフィルタ(以下、「BPF」とする)処理は、路面性状を評価する場合は波長 $\lambda = 0.5 \sim 20\text{m}$ を通過域とし、その他の場合は一般的な車両ばね下の固有振動数の領域($10 \sim 17\text{Hz}$)と測定速度を考慮し、波長 $\lambda = 0.5 \sim 5\text{m}$ を通過域として行った。

2. 解析手法

本研究ではデータ解析を空間及び周波数の領域で行った。それぞれの領域での入出力の関係と、2つの領域の対応を図1に示す。

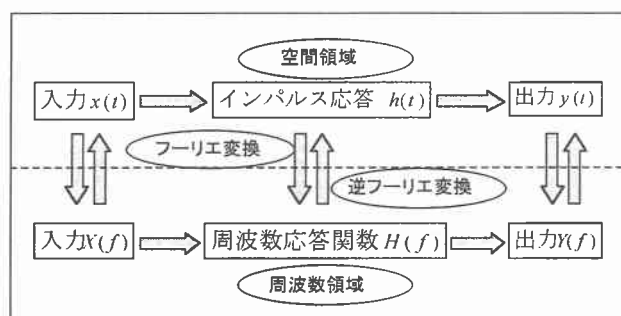


図-1 空間・周波数領域での入出力の関係

上段に空間領域、下段に周波数領域での入出力の関係を示す。空間領域から周波数領域へはフーリエ変換、周波数領域から空間領域へは逆フーリエ変換を行うことによって切替わる。本研究の場合、入力には路面縦断プロファイル、出力は車両ばね下の上下方向加速度、インパルス応答及び周波数応答関数は車の振動特性を指す。図1を数式で表すと次のとおりである。

$$y(t) = \sum_{\tau=-\infty}^t h(\tau)x(t-\tau)\Delta t \quad \cdots (1) \text{ (空間領域)}$$

$$Y(f) = H(f)X(f) \quad \cdots (2) \text{ (周波数領域)}$$

式(1)及び式(2)より、空間領域でインパルス応答を求めるより周波数領域で周波数応答関数を求めるほうが比較的容易である。そこで以下の手順で解析を進めた。

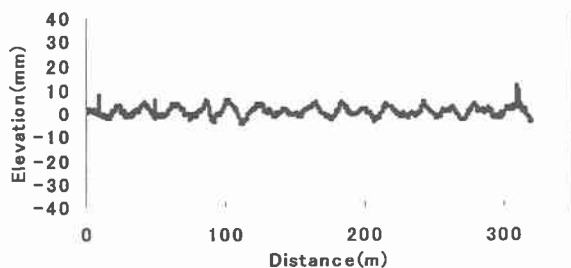
- ①空間領域の入出力データをフーリエ変換し、周波数領域へ変換する。
- ②BPF処理及び周波数応答関数の算出を行う。
- ③周波数応答関数の逆数を乗じる特殊なBPFを設計する。
- ④出力データをフーリエ変換し、③で設計したフィルタを用いて処理を行い、出力データから入力データを推定する。
- ⑤④で推定したデータを逆フーリエ変換し、空間領域へ変換する。

3. データの測定

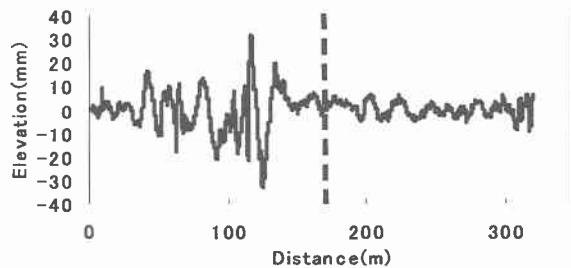
車の周波数応答関数を求めるために必要なデータについては、北見市春光町の常呂川河川敷の防災用道路の縦断プロファイルを用いることとした。

3.1. True Profile の測定

防災用道路のうち、設置からの年月が短く、かつ使用頻度の低い、比較的平坦な路面(以下、「防災用道路1」という)と、特殊舗装やクラックなどの損傷箇所を含む路面(以下、「防災用道路2」という)の2種類を選び、それぞれ延長 $L=320\text{m}$ の測定区間を抽出し、True Profileを測定した。BPF処理後の波形を図2に示す。なお、防災用道路2については、前後半で路面の性質が著しく異なっていることから、始点から $0 \sim 170\text{m}$ の区間と $170\text{m} \sim 320\text{m}$ の区間に分割した。(点線が境界線)



σ=2.07 IRI=1.31
図-2.1 True Profile(防災用道路 1)



σ=9.44 IRI=5.26 σ=3.06 IRI=2.51
図-2.2 True Profile(防災用道路 2)

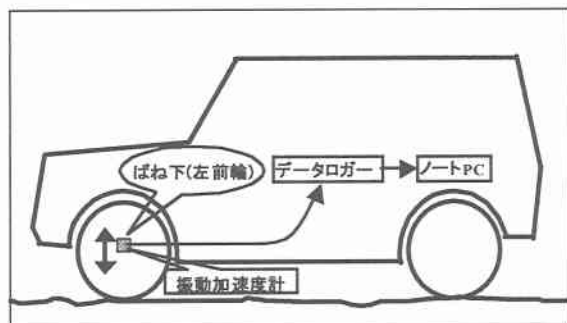


図-3 計測システムのイメージ

3.2. 車両ばね下の上下方向加速度の測定

True Profile を測定した個所において、その路面上を測定車(いすゞBIGHORN)のばね下(図3)に振動加速度計(共和電業製 AS-20HB)を設置し、防災用道路 1 及び 2 のそれぞれについて速度 $V=40\text{km/h}$ 、 50km/h 、 60km/h で各 5 回ずつ計 30 回測定を行った。

4. 周波数応答関数の算定・検証

True Profile 及び車の上下方向加速度のデータをそれぞれフーリエ変換しパワースペクトルを求め、式(3)より測定車の周波数応答関数を算出した。

$$|H(f)| = \sqrt{P_y(f)/P_x(f)} \quad \dots (3)$$

ここで、

$|H(f)|$: 周波数応答関数

$P_y(f)$ 、 $P_x(f)$: 入出力のパワースペクトル

適用例として防災用道路 1 の $V=40\text{km/h}$ における周波数応答関数を図 4 に示す。この図から、波数(以下、「WN」とする) 1.36m^{-1} (15.1Hz) 付近にピークがあることがわかる。このことから、測定車のばね下の共振域が一般的な車両ばね下の固有振動数に一致していることが確認できる。さらに、周波数応答関数から計測器の繰り返し特性(安定性)や速度依存性について、以下で考察した。

4.1. 繰り返し特性

5 回の繰り返し測定で得られた各測定区間・測定速度の上下方向加速度データを BPF 処理し、区間ごとに標準偏差(σ)の平均値を求め、平均値の 5% 以内の範囲に 5 回の測定のうち範囲内収まった回数を整理したものを表 1 に示す。

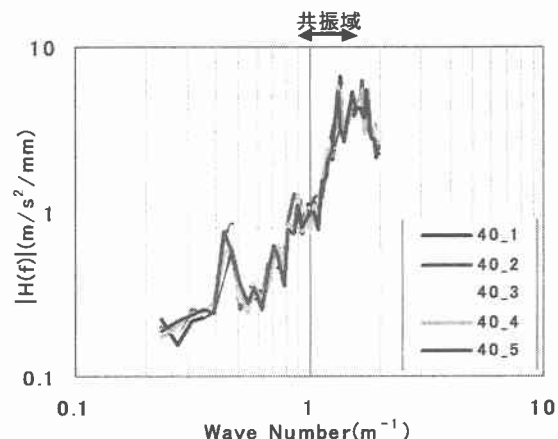


図-4 車の周波数応答関数(防災用道路 1、40km/h)

表-1 繰り返し測定誤差

	40km/h	50km/h	60km/h
防災用道路1	5/5	5/5	5/5
防災用道路2前半	5/5	5/5	3/5
防災用道路2後半	5/5	5/5	5/5

$V=40\text{km/h}$ 及び $V=50\text{km/h}$ については、すべて平均値の 5% 以内に含まれている。が、 $V=60\text{km/h}$ の場合は防災用道路 2 の区間において、5 回のうち 2 回のデータが区間平均の 5% を超過した。考えられる要因としては、平坦性の悪い路面であり、かつ $V=60\text{km/h}$ と比較的高速であったということが挙げられる。

4.2. 速度依存性

周波数応答関数のうち、車のばね下の固有振動数の領域である $10\sim 17\text{Hz}$ において測定速度を横軸、最大値を記録したときの波数を縦軸として測定区間毎に整理したものを図 5.1~5.3 に示す。

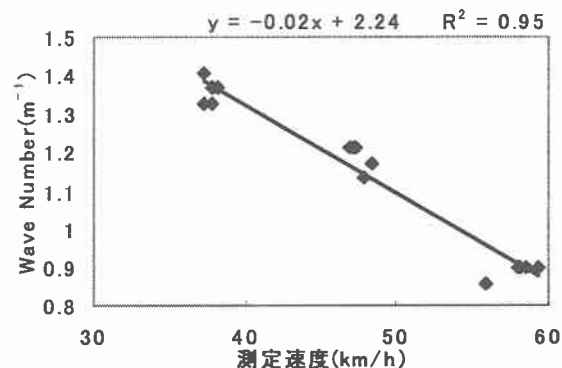


図-5.1 速度と波数との関係(防災用道路 1)*

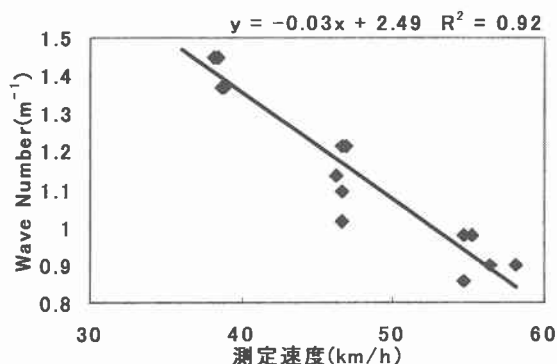


図-5.2 速度と波数との関係(防災用道路 2 前半)※

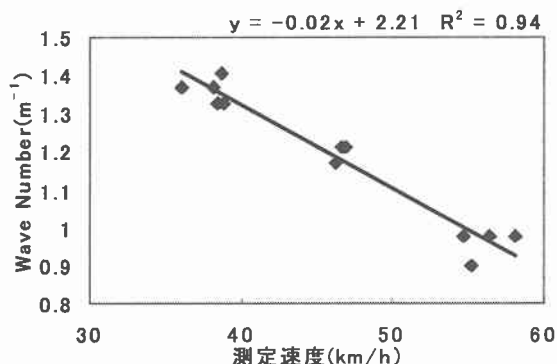


図-5.3 速度と波数との関係(防災用道路 2 後半)※

※測定速度にばらつきがあるのは、測定車の性能等の理由で設定速度を維持しての走行が困難であったことによる。

いずれも、速度が上昇するに伴いばね下が共振するときの波数が小さくなる(共振域が長波領域に移動する)傾向が見受けられる。このことより、測定速度とばね下の共振域との相関性は高いと考えられる。

5. プロファイルの推定

前章より、車両ばね下には固有の振動特性が認められる。この振動特性を利用し、周波数応答関数の逆数である特殊な BPF を設計し、上下方向加速度から路面縦断プロファイルの推定を行った。

5.1. 同一の測定区間での推定

一例として、防災用道路 1 において $V=40\text{km/h}$ で 5 回繰り返し測定した中より、 σ の平均値に最も近い値である 1 回目のデータを用いて算出した周波数応答関数をもとに BPF を設計した(図 6)。ばね下の共振域である $WN=1.3\text{m}^{-1}$ 付近の Gain が約 0.15 と最小値を示していることから、その特徴がうかがえる。この BPF を利用して、 σ の平均値から最も離れた値を示していた 5 回目のデータから路面プロファイルのパワースペクトルを推定し、true profile と比較したものを図 7 に示す。推定結果は true profile に比べ、振幅が激しい形状のグラフになっている。しかし、全体的な傾向としては、実務上十分な推定精度であると考えられる。

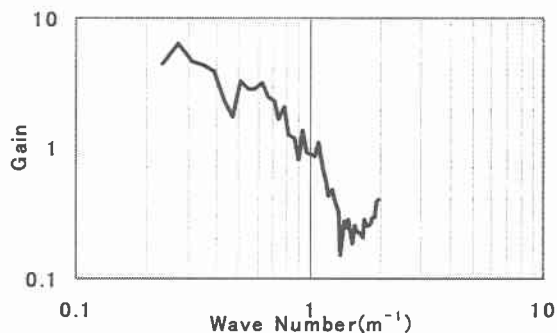


図-6 BPF(防災用道路 1、40km/h)

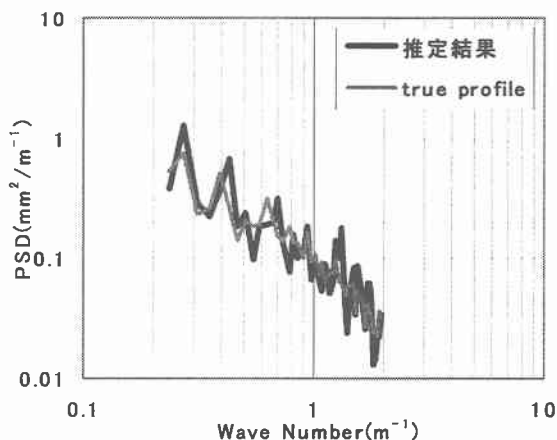


図-7 パワースペクトルによる比較

次に、推定結果を逆フーリエ変換し、空間領域での波形で比較したものを図 8 に示す。パワースペクトルと同様、推定結果は true profile に比べ振幅は大きいですが、概ね良好な精度で推定できた。

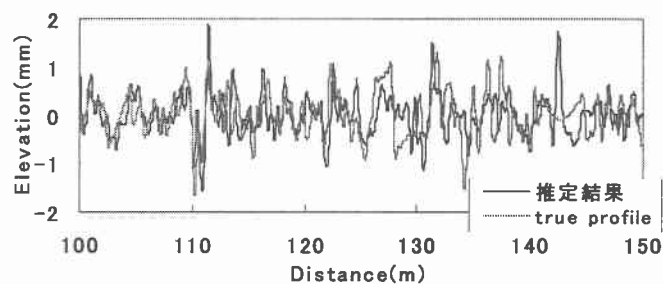


図-8 波形による比較

5.2. 平坦性の異なる測定区間での推定

図 6 に示す BPF を用いて、区間が異なる防災用道路 2 の 3 回目の測定データから路面プロファイルを推定したものを図 9 に示す。区間の前半・後半ともにグラフの形状の傾向は似ているが、推定結果のほうがパワースペクトルの値は極端に大きい。これは推定に用いた BPF が平坦性の異なる区間においては推定精度が低い、すなわちばね下の振動特性が路面の平坦性に大きく依存すると考えられる。この点については今後の課題であり、路面の平坦性とばね下の振動特性の関連性についてさらに調査、研究する予定である。

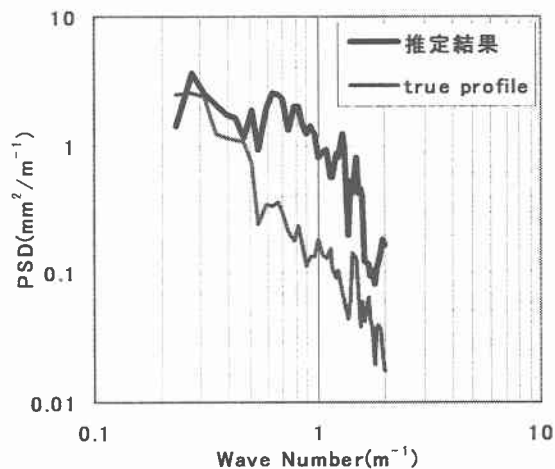
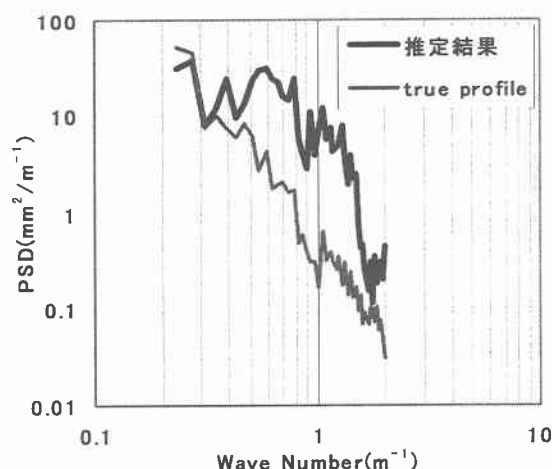


図-9 パワースペクトルでの推定(左:防災用道路2 前半 右:防災用道路2 後半)

6.まとめ

本研究で得られた知見は以下のとおりである。

- ・ 車両ばね下の振動加速度の繰り返し測定により、計測器(振動加速度計)の安定性を検証した。その結果、平坦性及び速度の異なる測定条件のいずれにおいても概ね安定したデータを得られることが確認できた。
- ・ 異なる速度での測定データより速度とばね下の共振域との関連性を検証し、相関性の高さを示すことができた。
- ・ 車両ばね下の振動特性からのプロファイルの推定は、同一の区間ではパワースペクトル、波形ともに高い精度で推定することができ、簡便かつ安価なシステムで true profile の推定が可能であることを示すことができた。

7. 今後の課題

今後の課題として以下点について検討する必要がある。

- ・ 平坦性の異なる路面の車両ばね下の振動特性を数多く測定し、平坦性と振動特性との関連性を分析し、システムの応用範囲を広げる必要がある。
- ・ ばね下のみならずばね上の振動特性(共振域:1~2Hz)も考慮し、長波長の成分を取ることで、より広い波長帯での true profile の推定が可能になると考えられる。また、路面性状評価指標である IRI(国際ラフネス指数)と関連付けてシステムに客観性を持たせると、より有効になるのではないかと考えられる。

8.おわりに

本研究に必要なデータを測定するにあたり、北海道開発局網走開発建設部北見河川事務所の関係各位にご協力をいただいた。ここに記して謝意とする。

参考文献

- 1) 加来照俊, 川村彰:路面の凹凸と車の運動に関する一考察, 第14回日本道路会議論文集, pp. 655-666, 1981
- 2) 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-, 土木学会舗装工学論文集 第7集, 2002
- 3) 大越健司, 井上要人, 榊本友紀, 川村彰:車の周波数応答関数を利用した路面正常評価の基礎的研究, 土木学会第56回年次学術講演会講演概要集 V-043, 2001
- 4) 大越健司, 川村彰, 高橋清:車の周波数応答特性を利用した道東地域における路面性状調査, 平成13年度土木学会北海道支部論文報告集第58号, pp. 682-683, 2002
- 5) 景山克三, 景山一郎:自動車力学, 理工図書, 1984
- 6) 自動車技術ハンドブック①「基礎・理論編」, 社団法人自動車技術会, 1990
- 7) 日野幹雄:スペクトル解析, 朝倉書店, 1977
- 8) 中村尚五:ビギナーズデジタルフーリエ変換, 東京電機大学出版局, 1989
- 9) 中村尚五:ビギナーズデジタルフィルタ, 東京電機大学出版局, 1989
- 10) 吉村彰芳:軌道狂いの減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