

IV—2 車の周波数応答特性を利用した路面の凹凸と 車の運動に関するスペクトル解析

函館高専 正員 川村 彰

1. ま え が き

路面の凹凸が運転者の走行快適性に及ぼす影響は大きく、一般には振動系に地面により把握される。又橋梁工学の分野では、路面の凹凸により生じる車の振動が橋梁の振動に及ぼす影響面から、さらに環境面では、沿道の住民の居住性への影響といった振動公害から路面の凹凸の状況を知る必要がある。路面の凹凸の測定方法に関しては、従来より種々の方法が考案されており、①水準器とポールによる絶対変位の測定、②プロフィールメータ等の機器による基準変位からの相対変位の測定、③ベンゲルマンゲムなどによる一定長さの定規からの変位の測定、④超音波やレーザ波の反射特性を利用した測定、⑤周波数特性のわかっている車の任意の部分に生じる振動加速度から推定する方法などがあるが、筆者は、積雪路面に關しても対象として扱うことから、交通障害を生ぜず高速測定が可能であり、比較的簡便である⑤の方法を用いてこれまで解析を行ってきた。この方法は、路面の状況が、天候・交通条件により変化しやすい冬期路面の凹凸を測定し、かつ車の振動加速度も同時に測定することから運転者の走行快適性に及ぼす影響も同時に把握できる特色があり、運転者・車・道路というシステムにおける各要素の関連性を知るうえできわめて有効であると考えられる。

本研究は、この方法を用いる上での問題点及び解析結果に關し考察を加えたものである。

2. 測定方法

従来、路面の凹凸は種々の波長と振幅を有する波として、スペクトルにより図上に示す特性をもつといわれている。¹⁾路面の凹凸をスペクトルにより表す方法について以下に説明する。

いま路面凹凸のパワースペクトル $P_r(f)$ のわかっている路面を走行した時の、自動車の任意の部分（本研究においては車の重心位置）に作用する加速度のパワースペクトル $P_g(f)$ とすると以下の式が成立する。

$$P_g(f) = |A(f)|^2 \cdot P_r(f) \quad (1)$$

ここで、 $A(f)$ は $r-g$ 間の周波数応答関数である。

したがって、 $P_r(f)$ と $P_g(f)$ によりあらかじめ測定車の $A(f)$ を求めておくことにより、求めたい路面に關する $P_g(f)$ は、その上を走行する時に測定される $P_g(f)$ から、上式に基づき推定される。²⁾

本研究においては、 $P_r(f)$ に關して、北海道開発局江別走行試験場の直線走行区間において、試験車の左右輪走行軌跡上に沿って 0.3m 間隔に測量用レベルを用いて凹凸を測定した。次に、ここで得られた測定値は距離に關する一連の値であるため、試験車の車速により時間についての記録に変換し、スペクトル推定に必要なデータ数を得るため内挿を行ない路面の縦断勾配によるトレンドを除去した。この結果求められた路面の凹凸プロフィールを図 2 に示す。尚、空間周波数 n と時間周波数 f との關係は、試験車の車速を V とすると次式が成立する。

$$\begin{aligned} P_r(n) &= V \cdot P_r(f) \\ n &= \frac{1}{V} f \end{aligned} \quad (2)$$

さらに、次式に示す最大エントロピー法(MEM)の推定式によりスペクトルを求めた。³⁾

$$P_r(f) = \frac{4t P_{N+1}}{\left| \sum_{k=0}^N b_k e^{i2\pi f k t} \right|^2} \quad (3)$$

ここで、係数 b_k は予測誤差フィルターと呼ばれており、 P_{N+1} は、予測誤差の分散、 $4t$ は、データ間隔、 N は予測誤差フィルターの項数である。このMEMと従来よりスペクトル計算に用いられている高速フーリエ変換法(FFT)により求めた試験路面の凹凸スペクトルの比較を図3に示す。

MEM法はFFT法に比べ演算時間を要するが、スペクトルの分解能、安定性に関してすぐれている点、及びデータ数が比較的少なくても安定した形が得られるなどの利点があるため本研究におけるスペクトルの推定に関しては、MEM法を用いた。又、試験路面の左右輪走行軌跡上路面の凹凸スペクトルに関してMEM法により求めた結果を図4に示す。

図より、試験路面に関して、左右輪間の走行軌跡のスペクトル形状に著しい相違は示されなかった。

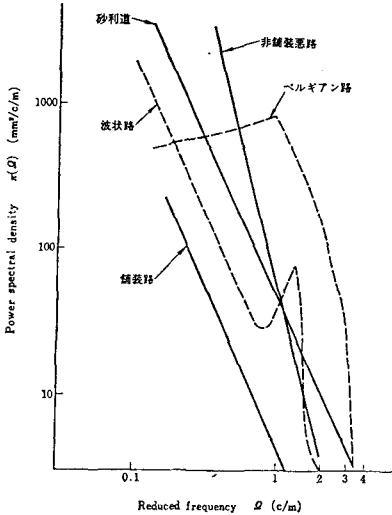


図 1 各種路面の凹凸パワースペクトル特性

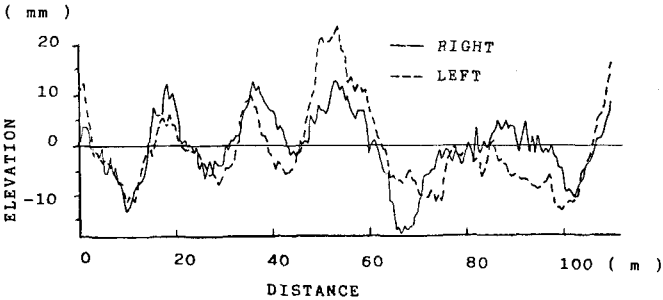


図 2 試験路面のプロフィール (左右輪走行軌跡に関して)

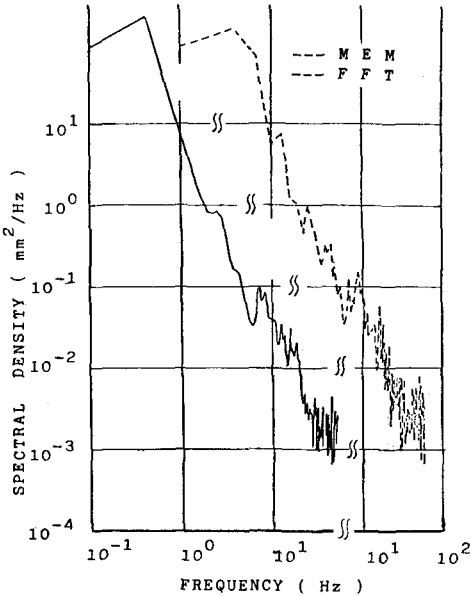


図 3 MEM法とFFT法による路面凹凸スペクトル

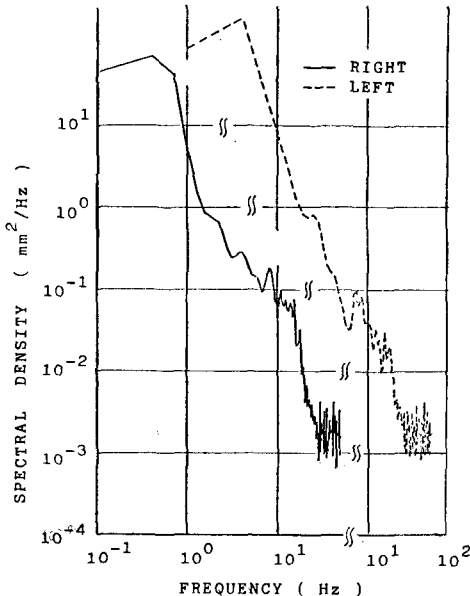


図 4 MEM法による試験路の左右輪走行軌跡の路面凹凸スペクトル

以上の結果及び、試験路面走行時の $P_g(f)$ より、(1) 式から $A(f)$ を求め、札幌市内及びその近郊を夏期と冬期にわたり走行し、路面凹凸スペクトルを推定した。

3. ISOによる路面凹凸スペクトルの評価⁴⁾

図1で示されているように一般的な路面凹凸スペクトルは、指数関数で近似できるといわれ、次式のように表わされる。

$$P_r(n) = \alpha n^{-W} \quad (4)$$

ここで、 α は路面の平坦性を表す定数であり、 W は波状度(waviness)に関連し、指数曲線の勾配を示すパラメータであり、一般には2前後といわれている。

このような特性に基づき、ISO(国際標準化機構)では、次式により路面凹凸形状を表している。

$$\begin{aligned} P_r(n) &= P_r(n_0)(n/n_0)^{-W_1} & n \leq n_0 \\ P_r(n) &= P_r(n_0)(n/n_0)^{-W_2} & n \geq n_0 \end{aligned} \quad (5)$$

$$(n_0 = 1/2\pi \text{ である})$$

表 1 ISOによる路面凹凸の評価区分

表1に路面凹凸の評価区分を示す

	Subjective Road Classification	$10^{-6} \text{ m}^3/\text{cycle}$ n	w_1	w_2
A	Very good motorways	2-8	2	1.5
B	Good principal roads	8-32	2	1.5
C	Average principal roads	32-128	2	1.5
D	Poor minor roads	128-512	2	1.5
E	Very poor minor roads	512-1024	2	1.5

図5は、先に求められた夏期と冬期における路面凹凸スペクトルの一例であり、図より、夏期路面に関しては「良路」の区分に概ね該当するところ、冬期路面では「悪路」、「極悪路」の領域に相当する路面凹凸周波数成分を有することがわかる。

4. 試験車の周波数特性に関するスペクトル解析

車の周波数応答特性を利用して路面の凹凸特性を知るには(1)式より入出力間に線形性が成立していなくてはならない。

入出力間で非線形になると考えられるとして、車の構造については、タイヤの応力-ひずみ特性、懸架装置の減衰特性が考えられ、車の走行条件としては、走行速度及び、タイヤと路面間の接地条件などが考えられる。又、路面の形状に関しても波状のものや段差を生じているものとは、試験車の周波数特性が異なるものと思われる。

本研究においては、このような走行条件、路面条件、車の構造条件に与る(1)式への影響を解析することを目的としてスペクトル解析を行なった。

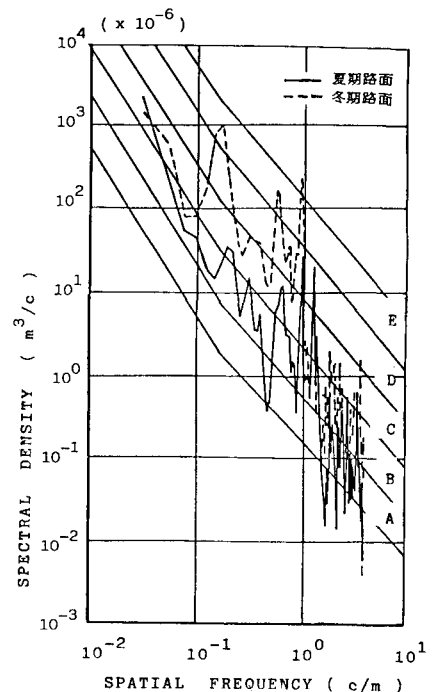


図 5 路面凹凸のパワースペクトル表示

解析手法としては、試験車の走行軌跡上に関し、右輪側に凹凸のある路面を対象として選択し、

i) 懸架装置の違いによる路面凹凸の影響

ii) 乗心地への影響

iii) 周波数応答関数の形状

以上3点に関し解析を行なった。

試験車の入力と考えられる車輪のうち、前輪に関しては、アッパーアーム部に、後輪に関しては、スプリングシート部に加速度計を左右輪合計4カ所に設置し、上下方向加速度を測定した。又、出力としては、乗心地との関連から重心位置にも加速度計を設置し、上下方向振動加速度を測定した。図6にその測定例を示す。

この測定データに関し、以下の項目について計算を行なった。結果は図7に示す。

- a) 前輪左右入力データのコレレンシー
- b) 後輪左右入力データのコレレンシー
- c) 前輪右入力データと重心出力データのコレレンシー
- d) 前輪左入力データと重心出力データのコレレンシー

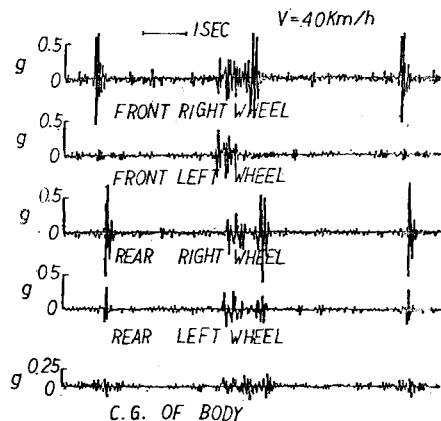


図 6 試験車各部で測定された上下方向加速度の例

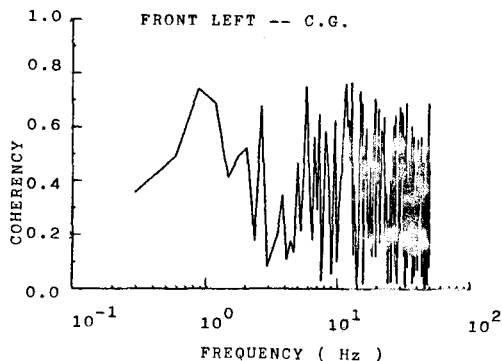
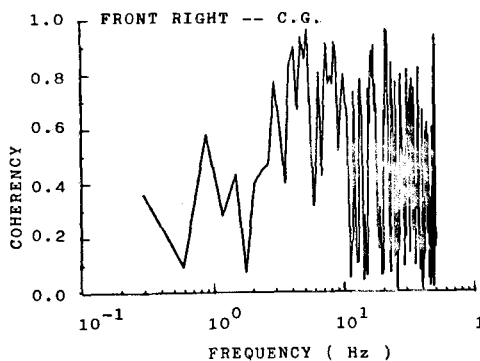
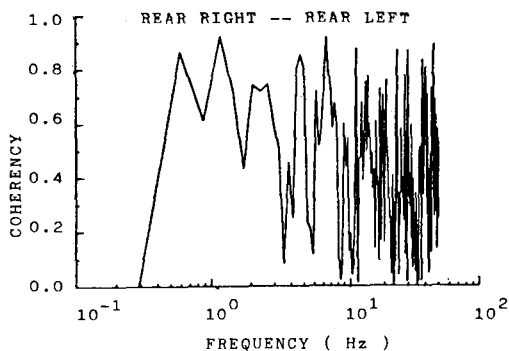
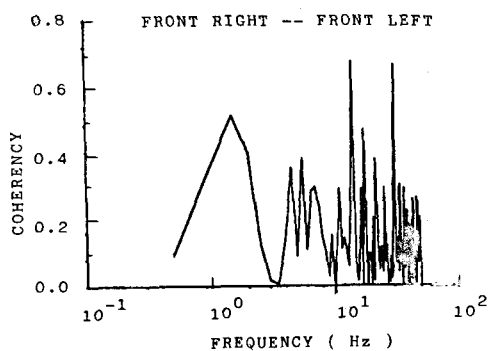


図 7 試験車の走行輪及び重心間に関するコヒレンシー

この場合、コレレンシーは、2変数間の線形性の影響を周波数面より解析することを目的として計算を行な、たわけであるが、結果より、独立懸架方式（前輪）のほうが、車軸懸架方式（後輪）よりも左右輪相互の干渉が少ないことがわかる。又、乗心地の影響を重心位置の上下方向振動として考えた場合にも、独立懸架方式では、凹凸側の路面走行車輪の振動からの影響が平坦路面を走行している場合よりも大きいことがわかる。

この場合、入出力間で定係数の線形性が成立するならば、この系の動的特性は周波数応答関数 $A(f)$ により記述され、入力を $x(t)$ 、出力を $y(t)$ 、インパルス応答関数を $h(\tau)$ とすると、

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) x(t-\tau) d\tau \quad (7)$$

$$A(f) = \int_0^{\infty} h(\tau) x(t-\tau) d\tau \quad (8)$$

($h(\tau) = 0$, $\tau < 0$ のとき)

が成立し、ゲイン $|A(f)|$ 、位相角 $\phi(f)$ を用いて

$$A(f) = |A(f)| \cdot e^{-j\phi(f)} \quad (9)$$

により示される。

前輪-重心系に関して、ゲインと位相角を求めたものを図 8. 1、図 8. 2 に示す。

結果より、図 6 の測定データに関しては、入力データの違いが、系の周波数応答特性に与える影響は小さいものといえよう。

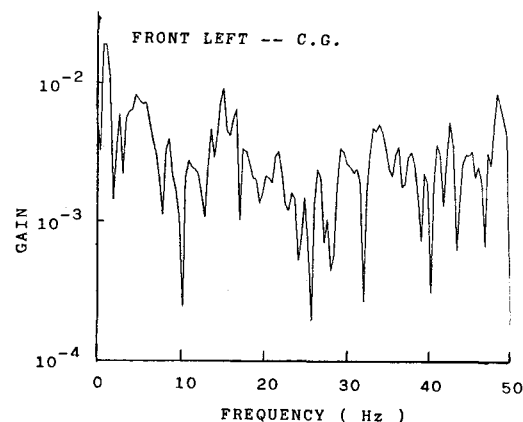
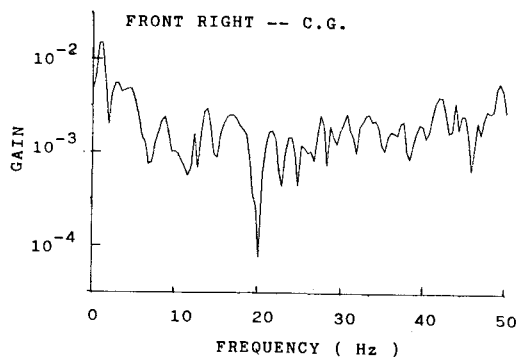


図 8. 1 試験車の前輪と重心に関する周波数特性 (GAIN)

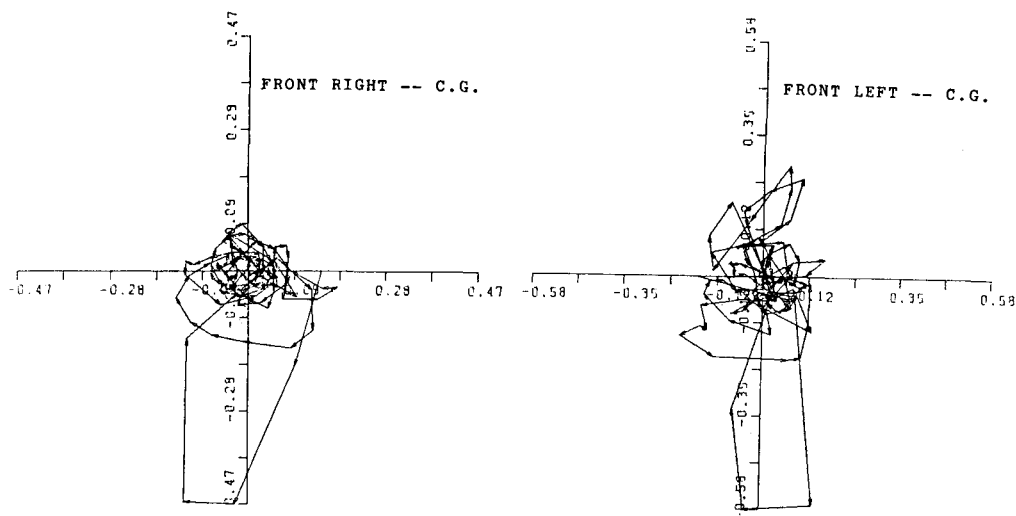


図 8. 2 試験車の前輪と重心に関する周波数特性 (ベクトル軌跡)

5. 冬期路面凹凸スペクトル形状について

先に路面凹凸スペクトルは、モデル関数を用いて(4)式により表わされる述べたが、これは、夏期路面を対象とした時のものであり、冬期路面に関しても適当であるかの論議は充分になされていない。このことから、本研究においては、先に実測した冬期路面データに関して、夏期路面と形状の異なるデータのことを紹介し、橋面の凹凸スペクトル形状をモデル化する場合に用いられるモデル関数⁵⁾

$$P(n) = \frac{a}{n^w + \beta^w} \quad (10)$$

(β は、分布形状のパラメータと呼ばれる。)

と(4)式のモデル関数から、最小二乗法を用いてデータにあてはめ、適合性に関し検討を計した。結果を図9に示す。適合性の判断として残差二乗和(RSS)を考えると、(4)式のモデルでは、 4.8862×10^{15} 、(10)式のモデルでは、 1.6375×10^5 、赤池の情報量規準(AIC)を考えると、(4)式のモデルでは、 6.1864×10^3 、(10)式のモデルでは、 2.0589×10^3 となり、(10)式のモデルのほうが、適合性のよい結果となった。⁶⁾ このことは、冬期路面をスペクトル関数によってモデル化する場合、夏期路面とは異なるモデル関数で記述することも検討する必要があるといえよう。

6. おわりに

本研究をさらに進めていくにあたり、路面凹凸を車の周波数応答特性を利用して求める際の、測定精度と周波数応答関数の非線形性との関連の問題、更に地面以外の道路の寿命、使用性、振動公害といった面に関係した路面凹凸の定量化の問題に関して更に検討を行なう予定である。

最後に本研究は、北海道大学工学部の加来照俊教授を始め、交通工学研究室の方々の御協力を得た。ここに謝意を表す次第である。

参考文献

- 1) 磯部 孝(編) : 相関関数およびスペクトルへの測定応用、東京大学出版会
- 2) 森重 一郎 : パワースペクトル解析の自動車への応用、いすゞ技報、NO.33, 1960
- 3) 日野 幹雄 : MEM・最大エントロピー法による新しいスペクトルの計算法、土木学会誌、1976, 7月号
- 4) ISO : Proposals for Generalized Road Inputs to Vehicles, ISO/DIS 2631, 1972
- 5) 岡村 隆敏 : 単一走行車両による道路橋の二乗平均応答解析、土木学会論文報告集、NO. 286, 1979
- 6) 川村 加来 : 路面の凹凸スペクトル形状に関する一考察、土木学会第38回年次学術講演会講演概要集 第4部、1983

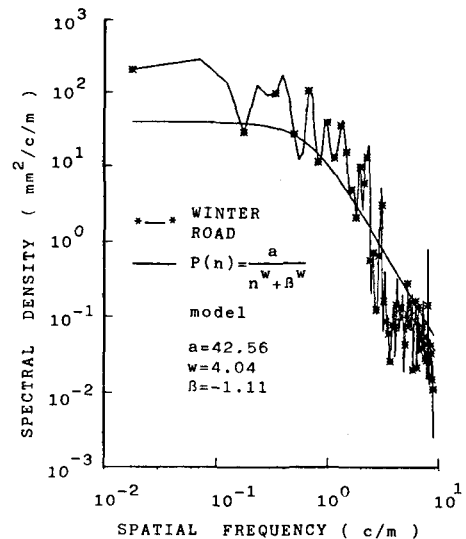
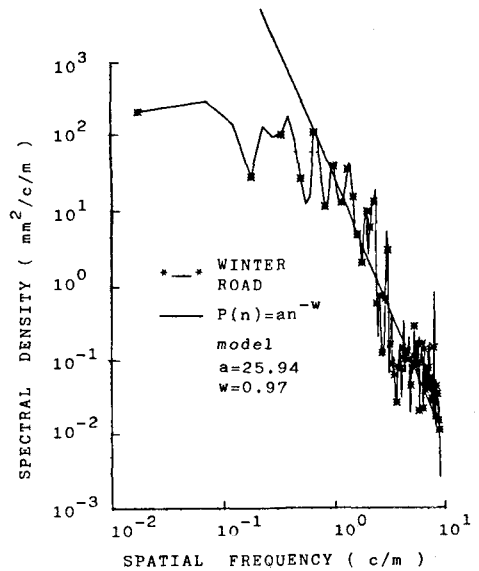


図 9 冬期路面に関する路面凹凸モデル関数の適合例