

IV-9

車と路面の相互作用に関する研究

函館工業高等専門学校 正 員 川 村 彰

1. はじめに

『車と路面間の問題』は、交通事故、乗り心地などの快適性の他に、舗装設計や路面の維持管理問題と密接に関連があり、従来より各方面で研究が行われてきた。しかしながら、今日の道路交通問題がますます複雑且つ多様性を帯びてきているに伴い、これまでの解析方法とは異なるアプローチによる取組が必要となってきた。本研究は、筆者がこれまでに行った『路面が車の乗り心地に及ぼす影響』^{[1]、[2]}に加えて、『路面の凹凸が車の運動性能や動的輪荷重に及ぼす影響』について解析するための、路面及び車の理論的モデルについて考察した結果について報告する。本論文は大きく分けて二つの部分よりなり、最初に路面プロファイルのモデル化について取り上げ、続いて路面から多入力を受ける車の運動モデルの構築について述べる。

2. 路面のプロファイル

2.1 基本的特性

破損した路面、構造物を有する路面を除くと一般的な路面の縦断プロファイルは、定常不規則過程に準ずる波状路面として統計的に把握されている。^[3]したがって、この性質に基づきISO（国際標準化機構）やDIN（ドイツ工業規格）では、路面凹凸の分類を路面凹凸のパワースペクトルにより行っている。^[4]

しかしながら、通常、路面のプロファイルには横断プロファイルも含まれることから、わだち路面や路面の平面的特性を把握するには、二次元プロファイルの測定並びにその評価法が必要となる。筆者等が過去に行ったレーザー波を利用した路面凹凸の非接触測定結果に基づき^[5]、路面の平面的スペクトル特性について検討した結果について次に示す。

2.2 二次元フーリエ変換による立体的路面の評価

立体的路面の波状特性を把握するために、本研究では2次元フーリエ変換を用いて、検討を行った。二次元フーリエ変換は、次式によって行われ、距離空間（ k, l ）より波数空間（ m, n ）に変換される。

$$F(m, n) = 1/\sqrt{M \cdot N} \cdot \sum_{k=-M/2}^{M/2-1} \sum_{l=-N/2}^{N/2-1} f(k, l) \cdot W_M^{km} \cdot W_N^{ln} \quad (2.1)$$

ここで、 W_M と W_N はフーリエ変換因子で、行（横）と列（縦）方向に対して、以下の両式で与えられる。

$$W_M = \exp(-i \cdot 2\pi / M) \quad (2.2)$$

$$W_N = \exp(-i \cdot 2\pi / N) \quad (2.3)$$

ここで、 M と N はそれぞれ画像の横幅とデータ数にて表示したものである。 $F(m, n)$ はフーリエ変換後のフーリエ像であり、 $f(k, l)$ は変換前の原画像である。

Research on the Interaction between vehicle and road surface

by Akira KAWAMURA, Hakodate National College of Technology

ここで (k,l) は距離空間座標、 (m,n) は波状空間座標である。データ行列は、実数部 $fr(k,l)$ と虚数部 $fi(k,l)$ の二つの部分よりなるが、これらはフーリエ変換によりそれぞれ、 $Fr(m,n)$ と $Fi(m,n)$ へと変換される。二次元波数座標の各点におけるパワースペクトルは(2.4)式により与えられる。

$$Ps(m,n) = Fr(m,n)^2 + Fi(m,n)^2 \quad (2.4)$$

上式を用いて、図-1の測定路面に対して二次元フーリエ変換を行った結果を図-2に示す。

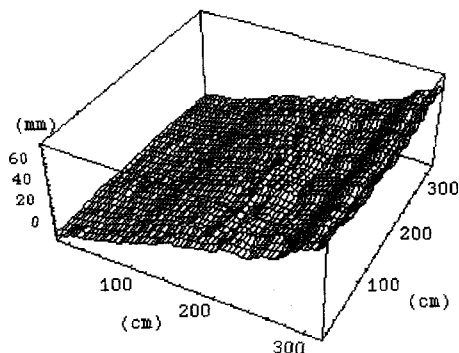


図-1 測定路面プロファイル

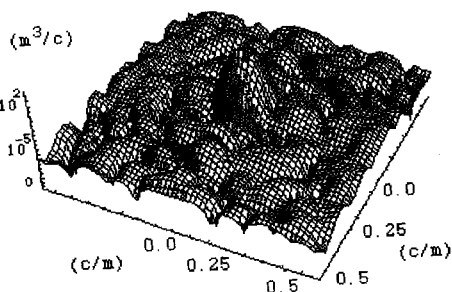


図-2 二次元パワースペクトル算定結果

図により一般路面が縦横断面で様々な波状特性を有することが明らかになった。つぎに、路面の二次元プロフィールをモデルを用いたシミュレーションにより理論的に処理する方法について述べる。

2.3 路面凹凸の立体モデル

路面凹凸のモデル化に際しては、これまでの実測結果を基に、1) 自己回帰過程を利用して行う方法^[6]、2) 形状関数を用いてポアソン分布の特性により行う方法などが提案されている。^[7]ここでは、計算が比較的容易なこと及び複雑な路面形状を将来取り扱う際に、有利な後者の方法によりモデル化を行った。この手法では、路面の凹凸を次式の二重正弦波を形状関数として取り上げている。

$$Z(x,y) = \sum_{k=1}^M a_k \sin \frac{\pi}{b_k} (x - \xi_k) \sin \frac{\pi}{c_k} (y - \eta_k) \quad (2.5)$$

$$(\xi_k \leq x \leq \xi_k + b_k, \eta_k \leq y \leq \eta_k + c_k)$$

$$= 0 \quad (\text{その他})$$

ここで、 M は解析対象路面の面積 XY 上の起伏の個数で、ポアソン分布に従うものとする。また、 k 番目の凹凸値 a_k は指数分布をするものとし、 x および y 方向の半波長 b_k と c_k は一様分布をする半波長を示し、 x と η_k は起伏位置を示す。

次に、上式より路面凹凸の自己相関関数を求め、二次元フィルタードポアソン過程^[8]による凹凸の集合平均を零とし、フーリエ変換を行うと二次元路面プロフィールのスペクトルが次式により求まる。

$$S(n_1, n_2) = 8v_0 \bar{a}^2 \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^L P(b_i) P(c_j) b_i^2 c_j^2 \times \frac{(\cos 2\pi n_1 b_i + 1)(\cos 2\pi n_2 c_j + 1)}{\pi^4 (1 - 4n_1^2 b_i^2)^2 (1 - 4n_2^2 c_j^2)^2} \quad (2.6)$$

ここで、 $P(b)$ と $P(c)$ は、それぞれi番波のx方向半波長とj番波のy方向半波長の発生確率である。また、 n_1 、 n_2 はそれぞれx、y方向の空間周波数、 v_0 は単位面積当りの凹凸の発生確率である。ISOで提案されている路面の凹凸区分に基づき、(2.6)式を用いて、図-3の路面の二次元パワースペクトルを求めた結果を図-4に示す。

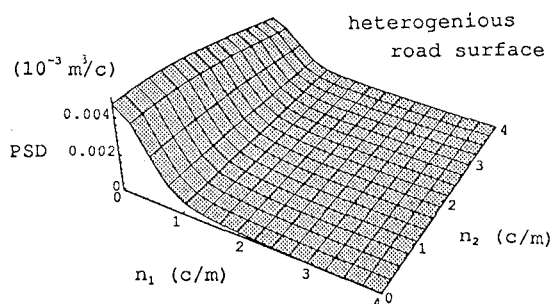
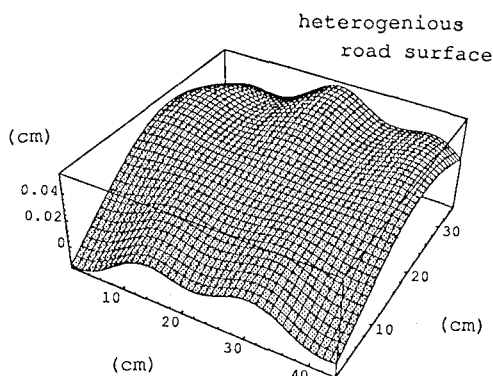


図-3 算定に用いた路面のプロファイル

図-4 FPPによる二次元パワースペクトル算定結果

図では、空間周波数が零に近づいた場合でも有限値を持つことより、従来のISO案と比較してより現実に近いことがわかる。二次元FPPモデルを採用することにより、路面上の任意の軌跡上の路面凹凸のパワースペクトルの算定が理論的に可能となる。

3. 車の運動モデル

路面が車の運動に及ぼす影響を考慮する際に用いられる車の数学的モデルは、大分類すると用途別に3区分され、それぞれ1)車の振動解析モデル、2)車の操縦性・安定性解析モデル及び3)車体構造解析モデルになる。本研究においては、先の路面の二次元パワースペクトルの周波数特性に直接関連する車の振動解析モデルを取り上げる。

3.1 フルカーモデルによる多入力路面の評価法

車の振動解析モデルは、車の運動の自由度毎にこれまでに数多く発表され、ASTMにおいてはその規格化も進んでいる。^[9] 車輪軌跡上の路面が左右非対象で、路面からタイヤに複雑な入力作用する場合に適用される車のモデルは、フルカーモデルと呼ばれ、ダンパー、ばね及び質量より構成される7~10自由度のものが多く用いられる。このモデルを用いた場合に、各タイヤに路面から伝わる入力を考慮すると運動方程式は一般的に次式で表現される。

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{F\} \quad (3.1)$$

ここで、 $[M]$ 、 $[C]$ 及び $[K]$ はそれぞれモデルの質量、ばね及びダンパーのマトリックス表示であり、モデルの慣性、運動エネルギーおよび振動に関する減衰特性を表す。また、 $\{F\}$ は路面からの入力ベクトルであり、(3. 2)で表せる。

$$\{F\} = [K_1]\{U\} + [C_1]\{\dot{U}\} \quad (3. 2)$$

このモデルを用いると、各タイヤ位置における路面変位と車の運動系（車の重心上下方向振動、ピッチング、ローリングなど）との周波数応答関数が求まり、4輪からの入力を考慮すると次式が成立する。

$$S_y(\omega) = \sum_{r=1}^4 \sum_{s=1}^4 H_r^*(\omega) H_s(\omega) S_{xrxs}(\omega) \quad (3. 3)$$

ここで、 S_y は系の出力箇所のパワースペクトル、 H は各タイヤ位置における路面変位と系の出力間の周波数応答関数であり、 S_{xy} は xy 間のクロススペクトルを示す。また、 $*$ は量の共役複素数を意味する。したがって、前節での結果よりタイヤ軌跡上のスペクトルを算定することにより、路面の凹凸により複雑な振動を強いられる車の運動特性が評価可能となる。

4. さいごに

本研究により、立体路面凹凸の基本的特性ならびに理論的把握に有用と思われるモデルの適用性について基礎的検討を行うことができた。今後の課題として、破損路面などのより複雑な路面のモデル化及びタイヤ路面間の面接触を想定することで、車のすべり状況を考慮することが可能となる車のモデルの実用化についての研究が期待される。

参考文献

- [1] A. Kawamura and T. Kaku : An Evaluation of Road Roughness and the Effects on Riding Comfort and Vehicle Dynamics, Proc. of JSCE No. 359/IV-3, 1985
- [2] 川村、加来：路面の凹凸による車の振動乗り心地に関する一考察、土木学会北海道支部論文報告集第43号、1987
- [3] R.P. La Barre, R.T. Forbes and S. Andrew : The Measurement and Analysis of Road Surface Roughness, MIRA Report No.5, 1970
- [4] ISO : Proposals for Generalized Road Inputs to Vehicles, ISO/DIS 2631, 1972
- [5] 川村、姫野、笠原：高精度プロファイルデータに基づいた路面ラフネスの評価、土木学会第47回年次学術講演会講演概要集第5部門、1992
- [6] D. Ammon : Approximation und Generierung stationärer stochastischer prozesse mittels linear dynamischer Systems, Diss., Univ. Karlsruhe, 1989
- [7] 張、中桐：二次元フィルタードポアソン過程による不規則路面のモデル化とそのスペクトル解析、日本機械学会論文集（A編）、52巻477号、1986
- [8] 辻、久田、北川：腐食表面の三次元的不規則性のスペクトル解析による評価（Filtered Poisson Processによる腐食形態のモデル化と解析方法の構成）、日本機械学会論文集（A編）、49巻439号、1983
- [9] J.C. Wambold : Road roughness effects on vehicle dynamics, ASTM Special Technical Publication 884, University of Michigan Transportation Research Institute, 1983