

ブラウン運動するばね振動子の軌跡を利用した路面プロファイルの生成手法の開発

鹿島道路 技術研究所 正 ○ 金井 利浩
同 上 正 佐藤 聡明
中央大学 理工学部 フェロー 姫野 賢治

1. はじめに

路面のプロファイルが既知であれば、国際ラフネス指数 (IRI) ¹⁾ による平坦性の評価や、乗り心地、舗装ダメージ等の解析ができる。しかし、路面プロファイルを正確に測定するには、高価な装置や、多大な労力と時間が必要といった課題がある。そこで、主に路面評価手法等の検討に用いることを想定して、任意の IRI の路面プロファイルをパソコン上で生成する手法の開発を試みた。本手法は、路面プロファイルのランダム性に着目し、それをブラウン運動するばね振動子の軌跡 ²⁾ で表そうするものである。本検討により、2, 3 の条件を設定することで目標とする IRI の路面プロファイルを簡便に生成可能となったので、以下に報告する。

2. ブラウン運動するばね振動子の軌跡

ばねの先についた振動子はニュートンの運動方程式にしたがって単振動するが、振動子に粘性抵抗や衝突力が作用するとブラウン運動をする。その動きは、ランジュバン方程式の成分を導入して式(1)のように書ける。

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -Kx - \zeta \frac{dx}{dt} + F(t) \quad \cdots (1)$$

ここに、 x : 振動子の変位、 t : 時間、 m : 振動子の質量、 K : ばね定数、 ζ : 粘性抵抗、 $F(t)$: 衝突力
式(1)の右辺に注目すると、第1項はばねから振動子に働く力であり、第2項は粘性抵抗による速度の減衰項、そして第3項は振動子に作用する衝突によるゆらぎを表している。なお、衝突力 $F(t)$ のランダム性は、ゆらぎを表す乱数と熱運動の大きさを左右する温度によって規定している。式(1)の運動方程式を解くにあたってはルンゲクッタ法による数値解析を行い、振動子の変位に関して近似解を求めた。

3. 検討の結果

3-1 路面プロファイルの生成と IRI

振動子の変位の算定は、振動子の質量とばね定数を固定し、表-1 に示すとおり温度と粘性抵抗をそれぞれ3水準変化させて実施した。計算処理は0.01秒間隔で1100ステップ行い、安定状態に落ち着く101~1100回の振動子の変位を抽出した。ここでは、計算条件および算出結果の物理量としての意味は問わずに、抽出した変位を単純に250mm毎の路面高さ(単位: mm)として延長250mの路面プロファイルを生成した。この処理を計算条件毎に3回繰り返し、得られた路面プロファイルについてインターネット上で入手可能な解析プログラム ProVAL2.73³⁾によりIRIを算出した。算出結果を表-2に示す。

表-1 計算に用いた条件

変数名	水準
温度	750,1500,3000
粘性抵抗	1,5,10

表-2 IRIの算出結果

計算条件		IRI					
温度	粘性抵抗	1回目	2回目	3回目	平均値	標準偏差	変動係数
750	1	1.15	1.36	1.12	1.21	0.13	10.8
750	5	0.77	0.67	0.75	0.73	0.05	7.2
750	10	0.54	0.58	0.54	0.55	0.02	4.2
1500	1	2.05	2.19	2.28	2.17	0.12	5.3
1500	5	1.40	1.59	1.75	1.58	0.18	11.1
1500	10	0.91	1.06	1.15	1.04	0.12	11.7
3000	1	5.13	5.86	3.99	4.99	0.94	18.9
3000	5	2.70	2.93	2.88	2.84	0.12	4.3
3000	10	2.08	2.29	2.38	2.25	0.15	6.8

表-2をみると、温度が一定の場合、粘性抵抗が大きいほどIRIは小さくなっている。一方、粘性抵抗が一定の場合には、温度が高いほどIRIは大きくなっている。なお、同一条件で3回繰り返し行った結果のばらつきをみると、温度が高いほど標準偏差が若干大きくなっているようであるが、粘性抵抗については明確な傾向は認められない。

キーワード 路面プロファイル, IRI, 平坦性, パワースペクトル密度, ブラウン運動, ランジュバン方程式

連絡先 〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1 TEL 042-483-0541 FAX 042-487-8796

3-2 温度と粘性抵抗による IRI の推定

前項において、温度、粘性抵抗ともに IRI との間に強い関係が認められたことから、温度 T と粘性抵抗 ζ を説明変数として重回帰分析を行った。目的変数の IRI については、説明変数との非線形な関係を考慮して対数とした。回帰式を式(2)に示す。

$$\log(IRR) = 0.0026T - 0.03668\zeta - 0.06699 \quad (r^2=0.95) \cdots (2)$$

回帰式の妥当性を確認するため、ProVAL によって算出した IRI と式(2)で推定した IRI を対比したものを図-1 に示す。図-1 より、IRI が3を超えるレベルにおいては、若干ばらつきがあるものの、概ね 1:1 の線の近傍に分布していることから、所定の IRI の路面プロファイルを生成するためには、式(2)を満足するように温度と粘性抵抗を設定すればよいと言える。

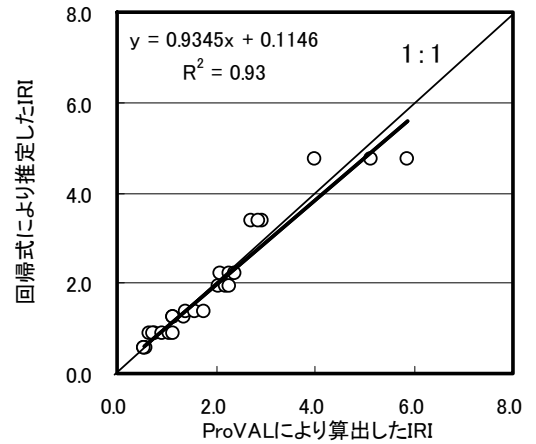


図-1 IRI の算出値と推定値の関係

3-3 IRI の等しい路面プロファイルの比較

試みに、目標の IRI を 2.0 として、式(2)より表-3 のように温度と粘性抵抗の 3 つの組合せを求め、前述の方法にて図-2 に示す路面のプロファイルを生成してみた。なお、表-3 には、生成した路面プロファイルの変動幅（最大値－最小値）も示している。

表-3 計算条件とプロファイルの変動幅

計算条件		路面プロファイルの変動幅		
温度	粘性抵抗	最大	最小	最大-最小
1800	2.7	42.3	-38.7	81.0
2200	5.6	23.7	-24.8	48.5
2600	8.4	26.8	-18.7	45.5

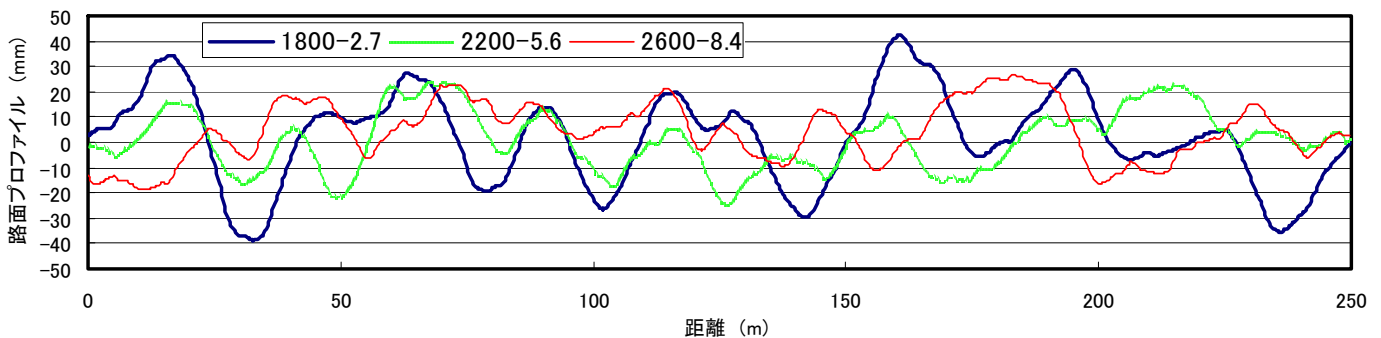


図-2 生成した路面プロファイルの例 (目標 IRI:2.0)

表-3 からわかるとおり、温度が高いほど粘性抵抗が大きくなり路面プロファイルの変動幅は減少する傾向を示している。一方、図-2 をみると、温度が低い条件の場合には変動幅は大きいものの、路面プロファイルの曲線は滑らかで小波が少ないことが見て取れるが、それは図-3 の空間周波数 0.1~2cycle/m のパワースペクトル密度の大小関係からも確認できる。

以上のことから、路面プロファイルの生成にあたっては、IRI が同等でも変動幅や滑らかさに違いがあることをよく認識し、適宜それらも制約条件として取り込む必要があろう。

4. おわりに

本検討により、目標とする IRI に対して、簡便に適切な路面プロファイルを生成できるようになった。今後は、縦断勾配も考慮できるように手法を拡張するとともに、生成した路面プロファイルを車両走行シミュレーション⁴⁾等の解析用データとして活用していく予定である。

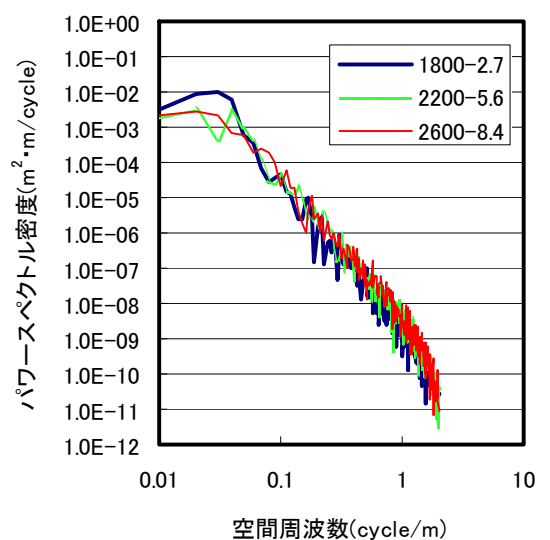


図-3 パワースペクトル密度

【参考文献】 1)土木学会：路面のプロファイリング入門，舗装工学ライブラリ 1，2003.1， 2) 米沢富美子：ブラウン運動，物理学 One Point-27，共立出版，2005.5， 3) <http://www.roadprofile.com/>， 4) <http://www.virtualmechanics.co.jp/>