

# スマートフォンのみでのばね下推定による路面縦断プロファイル計測

バンプレコーダー製作委員会 ○八木浩一  
同 牧内穂高

## 1. はじめに

2012年の笹子トンネルの事故以降、道路などの社会インフラの総点検が行われている。筆者らは第29回日本道路会議でスマートフォンのみを用いた路面縦断プロファイルの計測手法を提案した<sup>1)</sup>。それはスマートフォンをダッシュボードに固定し上下加速度を二階積分して上下変位量を求め、それを路面縦断プロファイルの代用とするものである。一方、長山らの研究<sup>2)</sup>ではスマートフォンのサンプリングレートは100[Hz]程度と遅く、分解能も粗いことを懸念点として挙げている。富澤らの研究<sup>3)</sup>では、前軸のサスペンション下部（以下、ばね下）の加速度をサンプリングレート2[kHz]で取得し加速度の20[m]区間での標準偏差とIRIの間に寄与率0.57の相関がみられることを実験で示している。本研究では、スマートフォンのみを用いサスペンション上部（以下、ばね上）の加速度からサスペンションのばね特性を推定したうえで、ばね下の上下変位量を推定する手法を開発した。この手法による計測結果を、東亜道路工業株式会社様のご協力を得て路面プロファイラでの計測結果と比較し寄与率0.74を得た。これらについて報告する。

## 2. 路面縦断プロファイル計測手法

はじめに、ダッシュボード面に固定したスマートフォンにより上下加速度を100[Hz]程度で観測し、それを二階積分して上下変位量を求める。単純な二階積分では重力や登坂上昇速度、計算上の丸め誤差などで値が発散し実用に堪えない。そこでステップごとに補正をかけ積分する。

$$dZ(i) = Z(i) - \frac{\sum_{j=i-1.5N+1}^{i+1.5N} Z(j)}{3N} \quad \dots(\text{式1})$$

$$Vz(i) = Vz(i-1) + \frac{dZ(i)}{N} \quad \dots(\text{式2})$$

ステップ1：観測加速度から静加速度成分を除去する。観測周期を $N$ [Hz]、 $i$ 番目の上下加速度を $Z(i)$ [m/s<sup>2</sup>]とする。前後1.5秒ずつ（計3秒）の上下加速度の平均を静加速度成分とみなして減じ、動加速度成分 $dZ(i)$ [m/s<sup>2</sup>]を式1で求め、 $dZ(i)$ を和分し上下速度 $Vz(i)$ [m/s]を式2で求める。

$$dVz(i) = Vz(i) - \frac{\sum_{j=i-5N+1}^{i+5N} Vz(j)}{10N} \quad \dots(\text{式3})$$

$$Lz(i) = Lz(i-1) + \frac{dVz(i)}{N} \quad \dots(\text{式4})$$

ステップ2：登坂上昇速度など段差に起因しない成分を除去する。前後5秒ずつ（計10秒）の平均を静的速度成分とみなして減じ、動的上下速度 $dVz(i)$ [m/s]を式3で求め、 $dVz(i)$ を和分しダッシュボード面（ばね上）の上下変位量 $Lz(i)$ [m]を式4で求める。

次に、ばね下の上下変位量を推定する。まず、走行中のばね上の上下加速度をFFTなどで周波数分析し1.5[Hz]前後にある振幅の大きな周波数をサスペンションの共振周波数 $f$ [Hz]として抽出する。次に半値幅法などにより減衰比 $h$ を求める。ここでばねとダンパーからなる1質点系のバネモデルを適用する。ばね上変位量を $x$ 、ばね下変位量を $y$ 、角振動数を $\omega$ とすると、バネモデルは式5の運動方程式で表現される。 $\ddot{x}$ に $dZ(i)$ 、 $\dot{x}$ に $dVz(i)$ 、 $x$ に $Lz(i)$ を用いる。 $\omega = 2\pi f$ であり、 $i$ 番目のばね下変位量を $y(i)$ とするとばね下の上下速度

$$\ddot{x} + 2h\omega(\dot{x} - \dot{y}) + \omega^2(x - y) = 0 \quad \dots(\text{式5})$$

と上下変位量には式6の関係が成り立つ。式5の $\dot{y}$ に $\dot{y}(i)$ 、 $y$ に $y(i)$

$$\text{を当てはめ、} y(0)=0 \text{ を初期値として順次、ばね下の上下変位量を得る。} \quad y(i) = y(i-1) + \frac{\dot{y}(i) + \dot{y}(i-1)}{2N} \quad \dots(\text{式6})$$

## 3. 路面プロファイラとの計測結果の比較

つくば市内の280m区間においてクマタカエンジニアリングの路面プロファイラMRP-3000での計測結果と、提案手法を実装したAndroidスマートフォン用アプリケーションBumpRecorderでの計測結果を比較した。路面プロファイラの計測結果には登坂勾配に起因する標高変化も含まれる。一方BumpRecorderでは式3での補正に10秒間の平均を用いているが、対応する区間の長さは走行速度により変化する。このため、計測結果の前後7.5[m]（15[m]区間）の平均を勾配変化成分とみなして減じ、それを路面縦断プロファイルと定義して両者の計測結果を比較した。15[m]としたのは体感される加速度変化が1[Hz]程度までで、60[km/h]の1秒間の走行距離が16.7[m]となるためである。BumpRecorderでの計測は、走行速度を10~60[km/h]まで10[km/h]ごとに変化させ、それぞれの速度で2回ずつ（合計

12回)行った。使用したスマートフォンはSAMSUNG Galaxy S2 (docomo SC-02C)で、助手席前のダッシュボード上の左端にマウンタを用いて固定した。サンプリングレートは99[Hz]であった。車両はプリウスを用い、周波数分析の結果、サスペンションは共振周波数1.6[Hz]、減衰比0.33と推定された。図-1に40[km/h]での比較結果を示す。横軸は移動距離、縦軸は縦断プロファイル変位量である。よく似た傾向を示しているのが分かる。横軸に路面プロファイラ、縦軸にBumpRecorderの同じ位置の縦断プロファイル変位量を取り相関を見た。図-1のデータで作成したものを図-2に示す。回帰直線を求めると寄与率0.54 (=相関係数0.73)となった。富澤らの研究3)が20[m]区間の標準偏差で比較しているのに倣い、図-3に20[m]区間の標準偏差(今回の条件では7.5mプロフィールメ

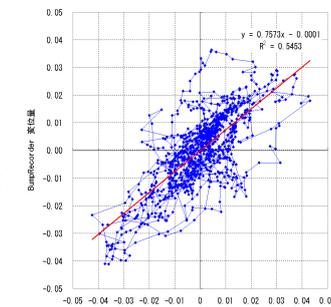
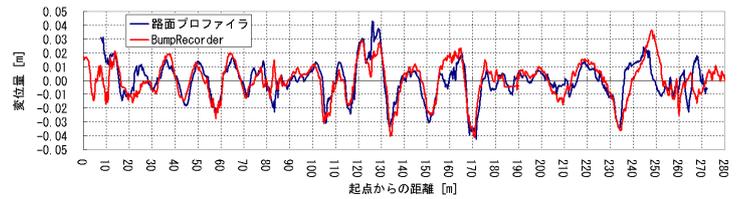


図-2 変位量の比較

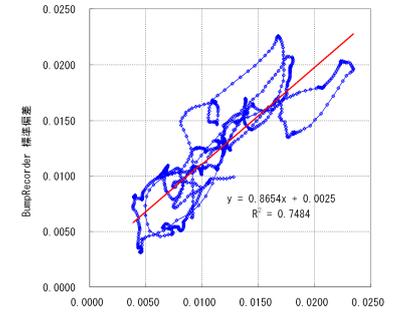


図-3 標準偏差の比較

ータで計測した20m区間の平坦性に相当)で比較したものを示す。この比較では寄与率0.74 (=相関係数0.86)となり、既往研究の0.57を大きく上回った。12回の計測結果それぞれで図-2と同様のグラフを作成し回帰直線を求め、図-4に走行速度と回帰直線の傾きの関係を、図-5に寄与率との関係を示した。図-4を見るとBumpRecorderの計測結果には速度依存性がみられ、速度が上がると回帰直線の傾きが大きくなり徐々に1に近づいている。図-5を見ると20[km/h]以下では寄与率が大きく下がり、30[km/h]で寄与率0.56と最も大きくなりそれ以上では寄与率が少しずつ悪くなっている。20[km/h]以下の低速域と50[km/h]を超える高速域での計測結果に課題を残しているが、20~50[km/h]の中速域では安定した計測結果が得られた。

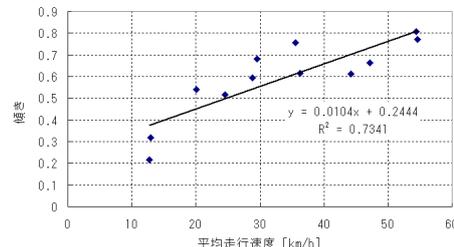


図-4 速度と回帰直線の傾きの関係

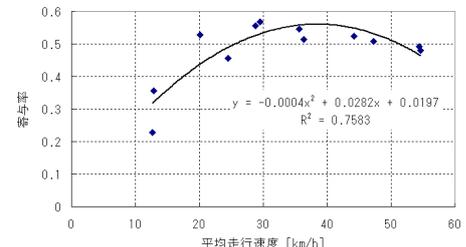


図-5 速度と寄与率の関係

#### 4. まとめ

自動車のダッシュボード面(ばね上)に固定したスマートフォンにより加速度をサンプリングレート99[Hz]で計測し、サスペンションのばね特性を推測したうえで、ばね下の上下変位量を推定することができた。走行速度20~50[km/h]において、路面プロファイラMRP-3000との計測プロファイルの直接比較で寄与率0.45~0.56、20[m]区間の標準偏差の比較で寄与率0.74を得た。既往研究のばね下加速度を2[kHz]で計測したときの20[m]区間の標準偏差とIRIの比較での寄与率0.57を大きく上回り、従来の「ばね下で測る必要がある」「スマートフォンでは精度が不十分」との認識を覆す結果となった。このように従来よりさらに簡便なツールで路面プロファイルを推測できる技術が確立できた。今後は一般的な評価指標との関連について分析を進め、道路管理ツールとしての実用性を検証していく。そして路面縦断プロファイルの日常的な計測を可能とし、道路の異常の早期発見、早期補修に貢献していきたい。最後に、路面プロファイラとの比較は東亜道路工業株式会社様のご協力により実現しました。ここに感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 八木浩一：スマートフォンを活用した路面段差観測手法と東北地方太平洋沖地震後の路面段差分布の調査結果、第29回日本道路会議
- 2) 長山智則、高橋寛臣、狩野正人、家入正隆：スマートフォンを利用した路面性状評価システムの開発、土木学会、第67回年次学術講演会、V-308、2012.9
- 3) 富澤健、遠藤哲雄、大嶋智彦、岡部俊幸、金井利浩：車軸に生じる加速度による路面凹凸評価方法に関する研究、土木学会論文集E1(舗装工学)、Vol.67、No.3(舗装工学論文集第16巻)、pp.I-51~58、2011.12