

講演概要 スマートフォン内蔵加速度センサによる鉄道軌道の日常点検に向けた一試行

八木 浩一¹

¹正会員 パンプレコーダー株式会社 (〒115-0045 東京都北区赤羽一丁目5-9-6-102)

E-mail:yagi@bumprecorder.com

2016年に国土交通省がインフラメンテナンス国民会議を立ち上げるなど、インフラメンテナンスに対する機運が盛り上がっている。メンテナンスサイクルは、点検・診断・措置・記録の繰り返しであり、点検はこの基礎となる。機械的・定量的な点検は精度が高いが費用も高く、人的・定性的な点検は安価だが手間がかかるため、いずれも点検頻度は低い。JR東日本では運行中の車両下部に光学センサを取り付けて日常的に点検を行い、より効率的・合理的なメンテナンスを始めている。道路では自動車にスマートフォンを取り付け、内蔵の加速度センサで走行中の車両の振動を計測することで舗装評価をする技術が開発されている。今回この技術を応用し、鉄道軌道の上下のうねり、左右のうねりを評価する手法を試行した。この結果について報告する。

Key Words : roughness index, longitudinal profile, maintenance management, smartphone

1. はじめに

インフラメンテナンスは、点検・診断・措置・記録の繰り返しであり、点検はこの基礎となる。機械的・定量的な点検は精度が高いが費用も高く、人的・定性的な点検は安価だが手間がかかるため、いずれも点検頻度は低い。鉄道分野においてはJR東日本が運行中の車両下部に光学センサを取り付けて日常的に軌道の点検をはじめており、西藤ら¹⁾は点検頻度を高めることの効果を2017年のTRBで報告している。従来の3ヶ月に1度の点検を、毎日の計測にすることで、これまでわからなかった手作業による線路補修と機械による線路補修による状態変化の差が明らかになった。この状態変化が急激かどうか分かるため、従来早めに補修していた管理レベルを、必要な適切なレベルにすることで維持管理を効率化できる可能性が示された。この取り組みでは専用機器が用いられておりローカル鉄道などでの実施には課題もある。

道路維持管理の分野においても同様の課題がある。計測専用車両である路面性状測定車は精度は高いが高価であり、目視点検では作業によりばらつきがあるうえ、工数がかかる。筆者らは加速度センサとGPSを内蔵したスマートフォンを乗用車に取り付けて、走行中の車両の振動を計測することで舗装路面の評価を行う技術開発を行っている。この方法は専用機器を必要としないため従

来に比べ安価に定量的な計測が行える。

今回この手法を鉄道に適用した。具体的には鉄道車両にスマートフォンを取り付け、走行中の加速度とGPSのデータを収集することで、鉄道軌道の上下のうねり、左右のうねりの評価を試行した。これを報告する。

2. 道路維持管理での計測方法

はじめに今回の検討の基礎とした道路維持分野での技術について説明する。道路維持管理に用いられるおもな指標は、平坦性、ひび割れ、わだち掘れの3種類である²⁾。平坦性は進行方向の上下のうねり、ひび割れは舗装面に生じた線状あるいは亀甲状のひびと割れ、わだち掘れは車両の重みなどでタイヤの接地箇所がその両側よりへこんだ状態を示す。ひび割れ、わだち掘れは道路特有だが、平坦性は鉄道への応用ができると考えた。

(1) 相関式を用いたレスポンス式計測

走行中の車両の振動から路面状態を評価する手法はアメリカでは1970年代から開発されてきており³⁾、レスポンス式計測と呼ばれる。簡便さが魅力の方法だが、サスペンションの違いにより車種が違えば同じ路面を走行しても得られる加速度が異なり、その補正方法が重要となる。これまでよく行われてきた補正方法は、水準測量な

ど他の手法で平坦性が計測された区間を、レスポンス式計測で使用する車両で走行し、加速度の標準偏差と平坦性の相関式を実験的に得て、これを使って加速度データから平坦性を推測するものである。近年普及したスマートフォンには加速度センサとGPSが内蔵されていることが多く、ソフトウェア開発のみでレスポンス式計測ができる環境が生まれたため、あらためてレスポンス式計測に注目が集まっている。

(2) ばねモデルを用いたレスポンス式計測

簡便に計測するためにスマートフォンを使っても、計測前に実験的に相関式を得る（キャリブレーションする）のは簡便ではない。そこで筆者⁴⁾らは計測時に得た加速度データから、使用した自動車のサスペンションのばね定数を推測したうえで、ばねモデルに当てはめてサスペンション下部の上下動を算出し、事前のキャリブレーション走行なしに、平坦性を評価する手法を開発した。

サスペンションはばねとダンパから構成され、それが車重を支えているので図-1のようなばねモデルを当てはめる。このとき、ばねの特性は共振周波数、ダンパの特性は減衰比で表すことができる。ばねはそのばねに特有の周波数（共振周波数）で大きく振動（共振）する。自動車のサスペンションの共振周波数は1.5[Hz]前後だと知られている。計測された加速度の周波数解析を行うと周波数ごとの振幅を求めることができ、1.5[Hz]近傍で振幅が極大となる周波数を抽出すれば、それがサスペンションのばねの共振周波数である。また半値幅法などを用いることで減衰比を求めることができる。

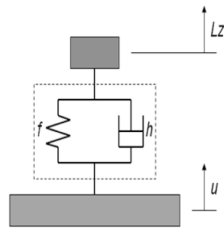


図-1 ばねモデル

図-1のばねモデルは式(1a)の運動方程式で表すことができる。ここで $\ddot{Lz}$ に計測した加速度、 ω と h に周波数解析で求めた共振周波数と減衰比を用い、サスペンション下部（ばね下）の加速度 $\ddot{u}$ を計算する。 ω は共振周波数 f より式(1b)で求められる。

$$\ddot{Lz} + 2h\omega(\dot{Lz} - \dot{u}) + \omega^2(Lz - u) = 0 \quad (1a)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (1b)$$

ばね下加速度を二階積分することでサスペンションの影響が除去された上下変位量が求まり、これを路面の縦

断プロファイル（進行方向の凹凸形状）の近似解と考え路面評価を行う。この方法を用いれば計測前のキャリブレーション走行が不要となるだけでなく、水準測量など他の手法で平坦性が計測された区間が無くても平坦性を計測でき利便性が高い。

平坦性は区間の代表値として示され、日本指標の「平坦性 σ （一般名称の平坦性と区別するため左記の標記を用いる）」は、進行方向に3[m]離れた2地点間を直線で結び、中央の1.5[m]の地点がその直線から上下にずれた距離の計測区間内における標準偏差で定義され、単位は[mm]である。走行速度によらない静的な指標として定義され、3mプロフィロメータを使っていることから短い周期のうねりへの感度が高い。

国際指標のIRI（International Roughness Index）は、当該道路を所定のサスペンション特性を持った車両が80[km/h]で走行したときのサスペンションの伸縮量の絶対値の計測区間内における平均で定義され、単位は[mm/m]である。サスペンションの共振周波数は1.5[Hz]近傍なので1回の伸縮時間は0.67[s]前後となり、80[km/h]ではその間に約15[m]走行する。よってより長い周期のうねりへの感度が高い。

平坦性 σ もIRIも平坦な路面で小さい値、凹凸が大きくなるほど値も大きくなる。平坦性 σ もIRIも路面縦断プロファイルを計測すればシミュレーションによって算出することができる。

3. 鉄道への適用

前述のばねモデルを用いたレスポンス式計測を2つの観点から鉄道への応用を試みる。

1つは道路維持管理と同じように、軌道の上下方向のうねり、凹凸に対して平坦性 σ 、IRIを求め、計測の再現性を確認する。鉄道車両の振動も自動車と同じように図-1のようなばねモデルを使った計測で軌道の平坦性が評価可能かを検証するものである。

もう一つは左右方向のうねり、凹凸の計測が可能かを確認する。自動車では左右方向に生じる振動、加速度は主にカーブなどの大きな形状変化あるいは運転挙動により生じるため、道路維持管理の指標とはなっていない。これに対し、鉄道では運転挙動ではなく、軌道の直線性や継ぎ目のスムーズさなどにより生じると考えられ、維持管理の指標になると考えられる。そのため上下加速度に代えて左右加速度をもとに同様の計算を行い、横方向の平坦性 σ （本稿では以下、直線性 σ と標記する）を求め、計測の再現性を確認し維持管理に利用可能かを検証する。左右方向の加速度はカーブなどの大きな形状変化で緩やかな（低い周波数の）加速度変化が生じるため、長い周期のうねりに感度の高いIRIではカーブの影響が

大きいと考え、横方向のIRIは検討から除外した。

4. 区間の求め方

前述の平たん性 σ 、IRI、直線性 σ の3つの指標は区間代表値であり、区間の取り方により値が異なってくる。今回は筆者が代表を務めるバンプレコーダー社が提唱するスクウェアメッシュ区間のメッシュサイズ2の区間を採用した。あらかじめ地球上にほぼ正方形のメッシュを定義し、図-2のように走行経路がこのメッシュに進入した点から退出した点までを計測区間とする。これにより起点からの距離と緯度経度の対応情報（キロポスト情報）がなくてもGPS情報のみで、毎回同じ区間に対して平たん性 σ 、IRI、直線性 σ が計算できるようになる。

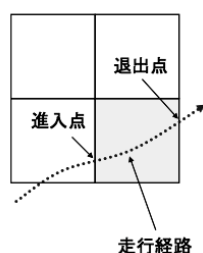


図-2 スクウェアメッシュとスクウェアメッシュ区間

具体的には、経度1度を $1/8192=2^{-13}$ に分割し、その東西幅と同じ長さになる南北幅で緯度を分割する。メッシュには整数値の経度番号 $LonCode$ と緯度番号 $LatCode$ を付与する。経度を lon 、緯度を lat として次の式(1c)、式(1d)で求められる。

$$LonCode = \text{int}\left(\frac{lon}{8192}\right) \quad (1c)$$

$$LatCode = \text{int}\left(\int \frac{1}{\cos(lat)} \times \alpha\right) \quad (1d)$$

$$= \text{int}\left(\frac{1}{2} \log\left(\frac{1 + \sin(lat)}{1 - \sin(lat)}\right) \times \alpha\right)$$

α は $lat=0$ のとき、メッシュの東西幅[m]と南北幅[m]が同じになるように規定し、次の値となる。

$$\alpha = 469367.1 \quad (1e)$$

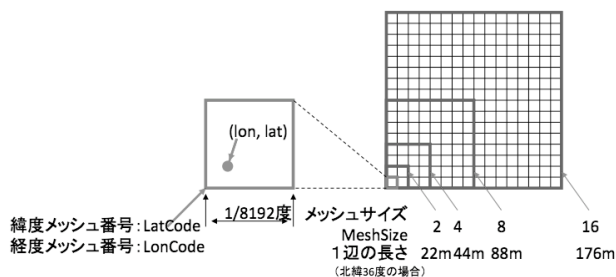


図-3 拡大メッシュ

このメッシュの大きさは東京など緯度36度近辺で一辺約11[m]となる。さらに2倍、4倍、8倍・・・のメッシュサイズ $MeshSize$ を図-3のように定義する。 $MeshSize=2, 4, 8, \dots$ の東京近辺での一辺の長さはそれぞれ約22m, 44m, 88mである。メッシュは($MeshSize$, $LatCode$, $LonCode$)の組み合わせで特定できる。

計測はスマートフォン内蔵の加速度センサとGPSで行うが、GPSには測位誤差がある。使用するスマートフォンや場所などの条件にもよるが $\pm 5[m]$ (幅10[m])程度の誤差が多く見られる。オリジナルの $MeshSize=1$ ではGPS誤差により $LatCode$ 、 $LonCode$ が1ずれてしまい実際は同じ場所なのに隣のメッシュと誤認される恐れがある。これを避けつつ、局所的な状態を表現できるように $MeshSize=2$ を用いた。道路の維持管理では区間長を100[m]とすることが多かったが、近年20[m]あるいは10[m]として局所的な状態を把握する試みも行われている。

5. 計測結果

東北地方のとある鉄道路線の約30kmの路線において、運転台にスマートフォンを設置し、2016年5月～6月の期間に21日間計測を行ない、30kmの路線の一部だけの計測も合わせて延べ32回のデータ取得を行なった。

(1) 平たん性 σ の計測結果

はじめに道路維持管理の日本指標の1つである平たん性 σ （上下方向のうねり、凹凸に対する指標）を適用した。図-4は全区間30[km]の全データ32回分のデータをプロットしたものである。横軸は起点からの距離[km]、縦軸は平たん性 σ である。管理レベルにより異なる場合もあるが国土交通省の土木工事施工管理基準（平成28年3月）の出来形管理基準では2.4[mm]となっている。

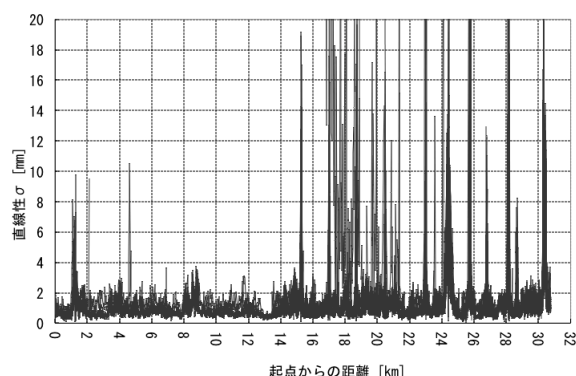


図-4 平たん性 σ 計測結果（全区間）

今回の計測結果では3[mm]以下が典型的な状況のようである。詳細に見るため典型的な値の区間と大きめの値の区間が混じっている区間22～26[km]を拡大し図-5に示

す。これを見ると縦軸（平たん性 σ ）のばらつきと、横軸（位置）のばらつきが生じている。横軸のばらつきは前述のGPS測位誤差の影響と考えられる。縦軸のばらつきが大きい23[km]付近、24.4[km]付近には駅があり、駅の前後にあるポイントの通過の仕方の違いによる影響が出ていると思われる。25.8[km]付近はトンネルの前後で軌道の施工に違いがあるのかGPS測位できなくなる影響が出ているのかは別途調査が必要である。図-6、図-7に地点ごとの平均値と標準偏差を示す。平均値が大きくなれば標準偏差も大きくなっていることが見て取れる。これは道路の計測時と同様の傾向である。

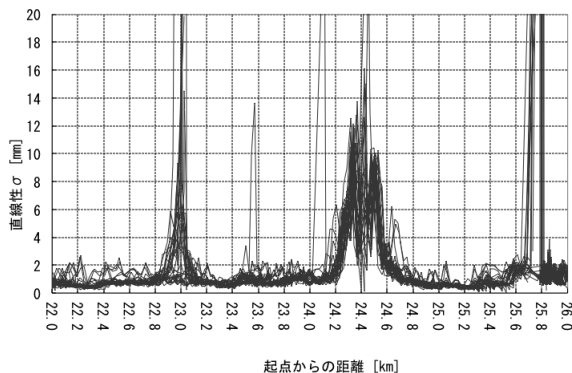


図-5 平たん性 σ 計測結果（拡大）

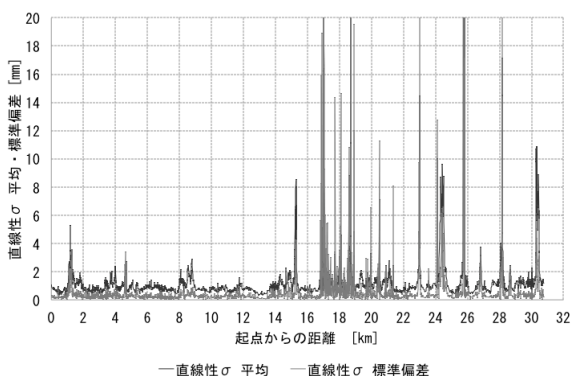


図-6 平たん性 σ 平均値と標準偏差（全体）

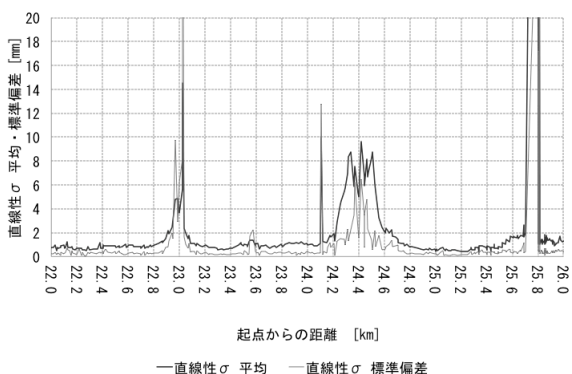


図-7 平たん性 σ 平均値と標準偏差（拡大）

標準偏差を平均値で割った変動係数を求め、5%ごとの頻度分布を求めたものを図-8に示す。変動係数20～25%にピークがありこれが典型的と言える。今回採用し

たメッシュサイズ2の区間（区間長20[m]強）の中でGPS測位誤差が ± 5 [m]となると、GPSで得られた緯度経度上は同じ区間に見えていても実際には $\pm 25\%$ 弱が前後の（異なる）区間になっている可能性があり、変動係数20～25%にはGPS測位誤差が大きな影響を及ぼしていると考えられる。舗装道路では区間長は一般的に100[m]としている。この場合の変動係数は $\pm 15\%$ であることを確認している。このように区間長を長くするか、準天頂衛星の普及が進み測位誤差が小さくなれば、平たん性 σ の変動係数も小さくなると期待される。

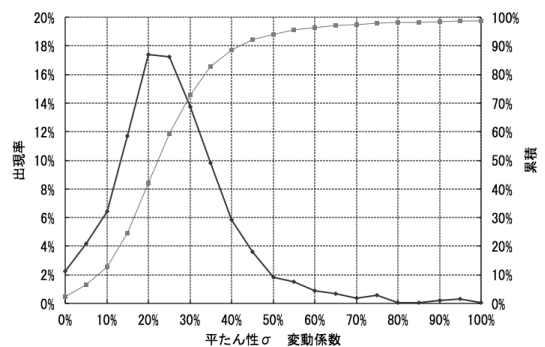


図-8 平たん性 σ 変動係数の頻度分布

(2) IRIの計測結果

つぎに道路維持管理の世界指標の1つであるIRIを適用した例を示す。全区間の全データをプロットしたものを図-9に示す。縦軸はIRIである。平成28年10月に国土交通省が示した舗装点検要領では、これまでの平たん性 σ の表記が消え、IRIを用いた点検に移行している。その中でIRIが3[mm/m]程度以下は損傷レベル小、4～5[mm/m]は60[km/h]で走行すると概ね半数の人が乗り心地が悪いと感じるレベルとある。

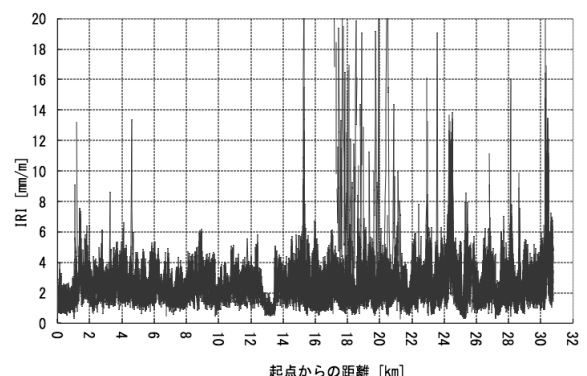


図-9 IRI計測結果（全区間）

図-9を見ると3[mm/m]を上回することは少なくないが6[mm/m]以上はあまり見られない。図-10に区間22～26[km]を拡大した図を示す。平たん性 σ と同様の傾向が見られるが、平たん性 σ で見られた25.8[km]付近で値の増大は見られない。このためこの地点に短い周期のうねりがあることが推測される。平均値、標準偏差、変動係

数を図-11、図-12、図-13に示す。平たん性 σ とほぼ同じ傾向を示していることが分かる。

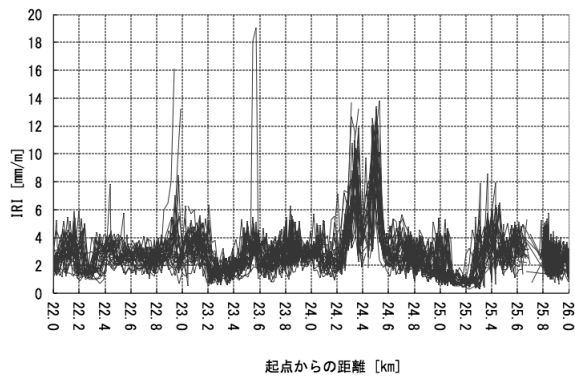


図-10 IRI計測結果 (拡大)

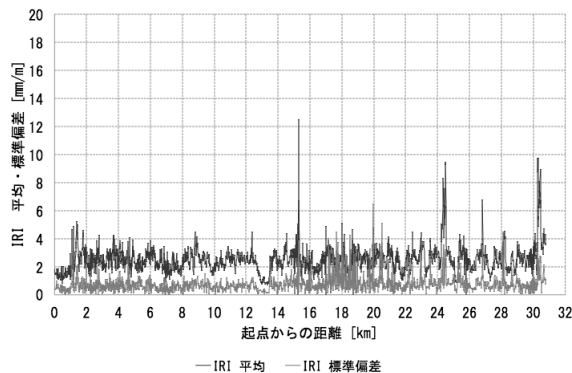


図-11 IRI平均値と標準偏差 (全体)

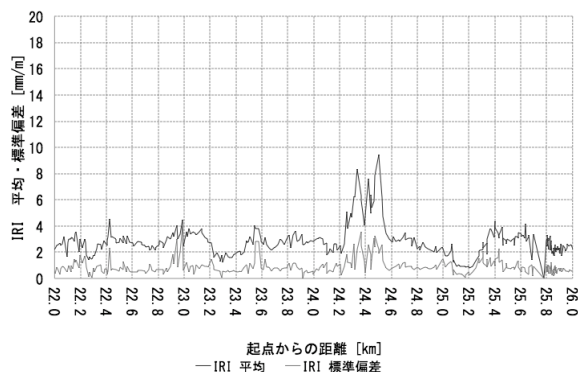


図-12 IRI平均値と標準偏差 (拡大)

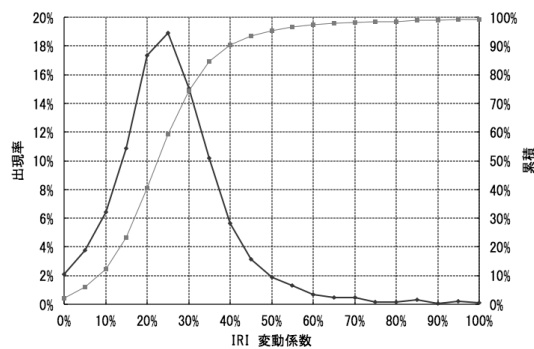


図-13 IRI変動係数の頻度分布

(3) 直線性 σ の計測結果

最後に、本稿で提案する直線性 σ の結果を示す。全区間の全データをプロットしたものを図-14に示す。縦軸が直線性 σ で単位は平たん性 σ と同じく[mm]である。

図-14を見ると2[mm]以下が多く上下方向の平たん性 σ より小さな値を示しており、左右のうねり、凹凸は上下に比べ小さいことが分かる。図-15に区間22～26[km]を拡大した図を示す。23[km]付近で小さい値と大きい値の2パターンが存在していることがわかる。この地点には駅があり、ポイント切り替えでホームの右側、左側に行くケースを予想したが衛星写真を見るとそのような線路形状にはなっておらず、今後調査が必要である。24.4[km]付近、25.8[km]付近で値が増大する傾向は平たん性 σ と同じだが、より大きく増えており、軌道状態の特徴をより鮮明に示していると考えられる。平均値、標準偏差、変動係数を図-16、図-17、図-18に示す。ここからも地点ごとの差がより鮮明に伺えることが見て取れる。平均値が大きくなったときに変動係数が大きくなる傾向が見られ、この原因については別途調査が必要である。図-18を見ると変動係数のピークは20～30%と、平たん性 σ よりも大きくなった。また、その広がりも大きく、左右方向(直線性 σ)のばらつきは、上下方向(平たん性 σ)より大きいことがわかった。

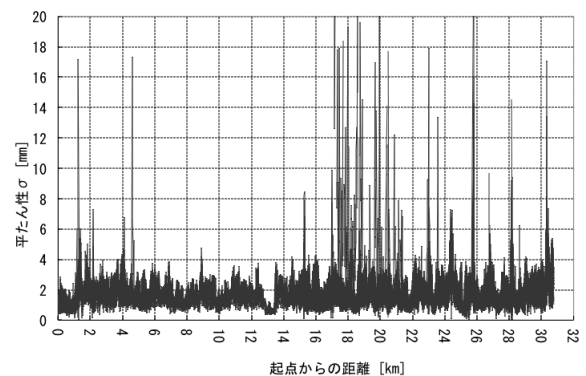


図-14 直線性 σ 計測結果 (全区間)

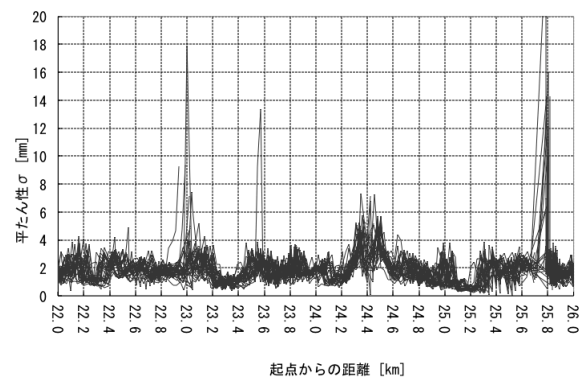


図-15 直線性 σ 計測結果 (拡大)

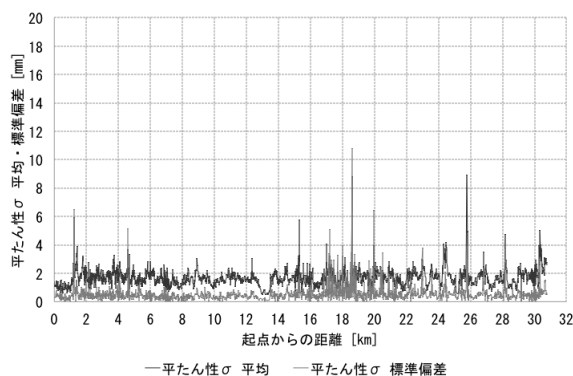


図-16 直線性 σ 平均値と標準偏差 (全体)

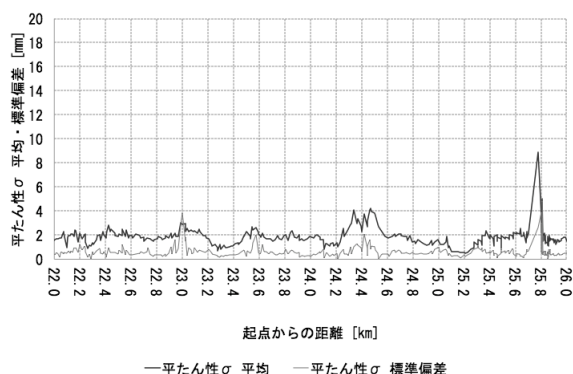


図-17 直線性 σ 平均値と標準偏差 (拡大)

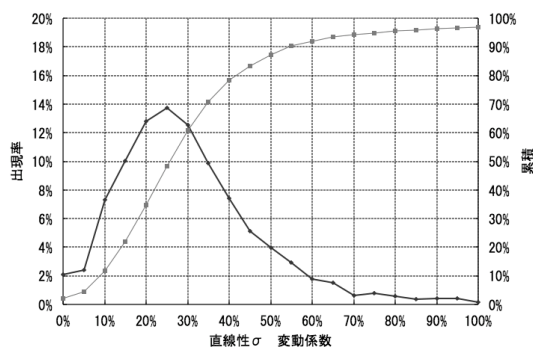


図-18 直線性 σ 変動係数の頻度分布

6. まとめ

道路の維持管理で用いられているスマートフォンを活用した簡易計測技術を、今回初めて鉄道に適用し計測再現性を確認した。道路の維持管理では上下凹凸を示す指標（平坦性 σ ，IRI）しかないが，鉄道適用にあたり左右凹凸を示す指標（直線性 σ ）を提案した。今回の試行では区間長を20[m]強と，道路維持管理でよく用いられている100[m]よりも短く設定し，局所的な変状を捉えることも試みた。今回の試行で，局所的な変状を捉える程度の再現性がありそうだとの結果を得たとともに，直線性 σ が有効と考えられる結果も得た。今後，現地調査なども行い，実際の活用につなげていきたい。

参考文献

- 1) Yasutaka Saito : DEVELOPMENT OF TRACK FACILITY MONITORING DEVICE TO ACHIEVE CBM AND FUTURE PROSPECTS, Transportation Reserch Board Annual Meeting, 17-01808, 2017.
- 2) 国土交通省道路局：舗装点検要領，9 ページ補足，平成 28 年 10 月
- 3) Michael W. Sayers : The Little Book of Profiling, The Regent of the University of Michigan., 1998.
- 4) 八木浩一：自動車のばね上観測加速度からの路面縦断プロファイルの推定とその精度検証，土木学会論文集 E1（舗装工学），Vol.69, No.3（舗装工学論文集第 18 巻），I_1-I_7, 2013.

(2017.4. ? 受付)

TECHNICAL TRIAL FOR RAILWAY TRUCK INSPECTION BY USING SMARTPHONE BUILT-IN ACCELEROMETER

YAGI Koichi

A maintenance management of infrastructure is an important issue. A maintenance cycle is established by monitoring, diagnosis, action and recording. The monitoring is the first step and basis item. A quantitatively measurement has a good reliability, but it spends much cost. A human visual confirmation is low cost method, but it spend a time and it is required specialist training. In this reason, it can not measure for enough times. East Japan Railway Company is starting to measure railway truck by using machine visual monitoring device which is built on under the train. It good method but it is not easy to use for local railway company. For road pavement roughness inspection, a convenient method is developed which is using smartphone built-in accelerometer to collect vehicle vibration. In this paper, this technology is applied for railway truck inspection, and the result is reported.