

## 地方鉄道用レール状態診断システムを用いた軌道の診断事例

日大生産工(院) ○荻野 誠之 日大生工 綱島 均  
交通研 森 裕貴 京三製作所 浅野 晃

### 1 まえがき

車輪がレールで案内される鉄道にとって、軌道や車両の安全管理は重要であり、その状態を把握し、事故に至る前に補修する予防保全が重要な課題となっている。現在、軌道の検査方法として、保線係員によるものや軌道検測車、レール探傷車などの検査用車両によるものがある。しかし、これらの手法は高精度な軌道検査が可能だが、コストや維持管理などの点から走行頻度は非常に制限される。さらに、地方鉄道では施設の経年劣化が著しい一方で、費用の確保や技術力の維持が難しく、十分な検査が行えない事業者も少なくない。このような問題に対し、一般の車両に簡易なセンサ類を付加したプローブ車両を用いることで、営業運転を行いながら軌道の状態監視を行う方法が考えられる<sup>1)</sup>。これまでに、車両と非接続で軌道の状態診断を行える可搬型プローブ装置が開発され、鉄道事業者協力のもと長期的な試験を行い、測定データの再現性、軌道異常の発生箇所の特定期間性が示されている<sup>2)</sup>。

本論文では、可搬型プローブ装置<sup>3)</sup>を改良した小型レール状態診断装置<sup>4)</sup>と、レール状態診断ソフトウェア（以下、診断ソフト）を用いた軌道状態診断システムの診断事例について述べる。

### 2 レール状態診断システム

軌道状態診断システムの概要をFig.1に示す。軌道状態診断システムは、動揺計測部と解析部に分けられる。動揺計測部は、小型レール状態診断装置を用いて、営業運転中の鉄道車両から車体動揺の測定を行う。解析部においては、診断ソフトを用いて、測定したデータから必要な情報を抽出し、評価値の算出を行うことで、軌道の状態を診断する。

計測部で得られた計測データは、携帯電話回線又は外部メディアへの書き出しにより解析部に転送される。診断ソフトによる診断結果は、

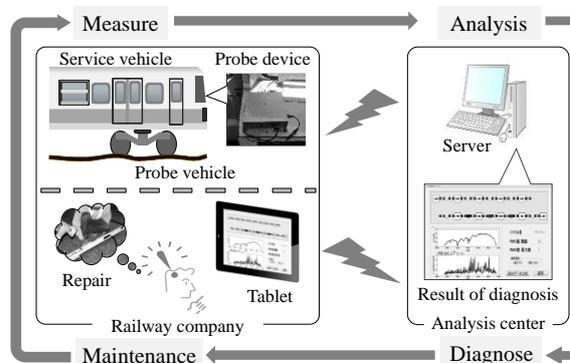


Fig.1 Track condition monitoring system

オンライン回線でスマートフォンやタブレット端末を通して、鉄道事業者のもとへフィードバックされる。鉄道事業者は、この情報をもとに、軌道保守の優先順位を決めて保守作業、保守計画を立てることが可能になる。また、営業運転時に、リアルタイムで車体動揺を計測することにより、管理基準値に対して異常に大きい車体動揺が観測された場合、緊急に軌道の点検、保守を行うなどの早期の対応が可能になる。このように、本診断システムによる、車体動揺の常時監視を行うことで、軌道の劣化や異常を早期に発見でき、鉄道事業者は効率的な保守作業を行うことが可能である。

### 3 レール状態診断ソフトウェアの開発

#### 3. 1 ソフトウェア概要

小型レール状態診断装置を軌道状態の診断に活用するためには、蓄積された大量の測定データの効率的な取り扱い、視覚化による診断結果の提示、測定から診断までの期間短縮など、装置と連携可能なソフト面でのインターフェースの開発が必要である。そこで、計測データの信号処理の操作、結果の提示をGUI(Graphical user Interface)で表すこととした。信号処理、GUI化にはMATLAB(Math Works)を用いた。

Diagnostic examples using track condition monitoring system in local railway

Masayuki OGINO, Hitoshi TSUNASHIMA, Hirotaka MORI and Akira ASANO

### 3. 2 評価値の算出方法

軌道不整は、車両の振動による乗り心地の悪化とともに脱線の危険性を増大させるため、最も重要な検査項目の一つである。車体振動と軌道不整には高い相関があるため、軌道状態の評価を行ううえで車体振動の大きさは、軌道状態の大まかな傾向を得るには有効である。

本診断システムには、振動加速度の振幅が軌道状態の評価指標になり得ると考え、振動加速度のRMS(Root Mean Square)値を評価に用いる。しかし、この評価値のみでは周波数情報が欠如するため、より詳細な診断を行うために、連続ウェーブレット変換、離散ウェーブレット変換による時間周波数解析も併用する。

### 3. 3 RMS値による評価

軌道状態と位置との関係を得るためには、短時間のRMS値を求める必要がある。測定値 $x$ のうちの短い時間区間におけるRMS値を次式で定義する。軌道不整として挙げられる項目のうちの高低狂い、通り狂い、水準狂いを評価するために、小型レール状態診断装置で測定した車体上下・左右加速度、車体ロール角速度のRMSを求める (Fig.2)。

$$x_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} \quad (1)$$

### 3. 4 ウェーブレット変換による評価

前節でRMS値を用いた軌道の簡易的な状態診断について記したが、より詳細な診断方法として考えられる連続ウェーブレット変換、離散ウェーブレット変換を用いた解析について述べる。

連続ウェーブレット変換とは、対象波形にマザーウェーブレットを掛け合わせることで、その波形の特定部分を強調し他の部分を抑制する変換方法である。突発的な変化をする非定常信号の解析に適している。診断ソフトでは、駅間ごとに車体振動加速度を解析することができ、結果は等高線図で表される (Fig.3)。

連続ウェーブレット変換による解析結果の提示は、信号の性質を知るのに便利な表示法である。しかし、演算を施して信号処理を行うにはこの表示方法は、多くの情報が重複するため必ずしも効率的でない。

そこで、連続ウェーブレット変換のスケールパラメータとシフトパラメータを離散化した離散ウェーブレット変換を用いた多重解像度解析の機能も診断ソフトに付加した。この機能では駅間ごとの車体振動加速度を任意のレベ

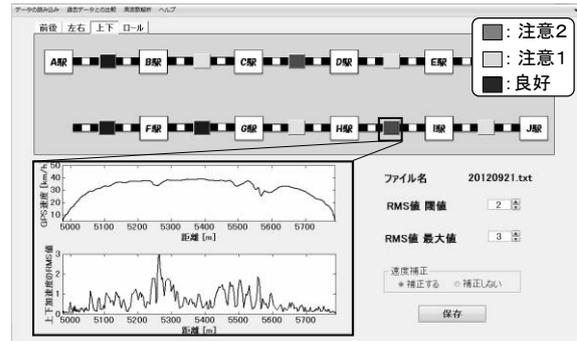


Fig.2 Main viewer of diagnostic software

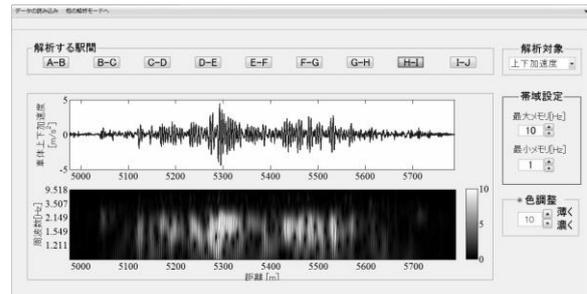


Fig.3 Evaluation by continuous wavelet transform

ルで近似成分と詳細成分に分解でき、必要な成分から再構成することができる。これより、特定の成分を見ることでその成分に見合った軌道異常の検出が望める。

## 4 地方鉄道における軌道の診断事例

### 4. 1 閾値の決定

レール状態診断システムを実路線に導入し軌道の評価をするためには対象とする路線ごとにそれぞれ評価値の閾値を決定する必要がある。そこで、本節では軌道の補修前後の計測データをもとに閾値を決定する。

地方鉄道事業者協力のもと小型レール診断装置を先頭車両の運転室横の空きスペースに設置し、実車走行試験を実施した。2015年5月、7月に計測した一駅間分の走行速度、車体上下加速度とそのRMS値をFig.4に示す。この区間においては5月から7月にかけて軌道の補修を行ったことがわかっている。また、図6の速度波形から対象とする駅間での走行速度に大きな差は無いことがわかる。そのため、走行速度差が及ぼす車体振動加速度への影響も少ないと考えられ、補修前後の計測値のRMS値から異常検出に用いる閾値を決定することができると考えられる。

Fig.4中の5月、7月のRMS値を比較するとA地点、B地点、C地点でRMS値が減少していることがわかる。A地点、C地点では軌道の補修を5月に実施しており、B地点では7月に軌道の補

修を実施している。そのためA地点、B地点、C地点におけるRMS値の減少には軌道の補修の影響がそれぞれ表れていると考えられる。

今回対象とした路線における車体上下加速度のRMS値を用いた診断では、その整備基準の閾値として $2[m/s^2]$ を用いた。

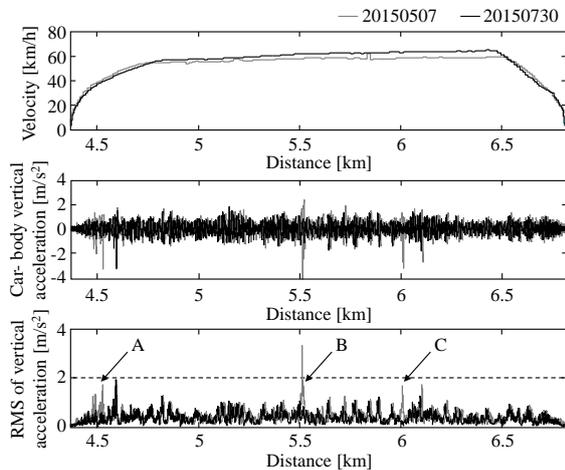


Fig.4 Measured data before and after track maintenance

#### 4. 2 要注意区間の抽出

軌道整備が行われた際の計測データから決定した閾値 ( $2[m/s^2]$ ) を路線全体の計測データに適用することで要注意区間の抽出を行う。Fig.5に要注意区間の抽出対象とする計測値である走行速度、車体上下加速度、車体上下加速度のRMS値を示す。抽出の結果、要注意区間となった駅間はG駅H駅間、K駅L駅間、M駅N駅間となった。

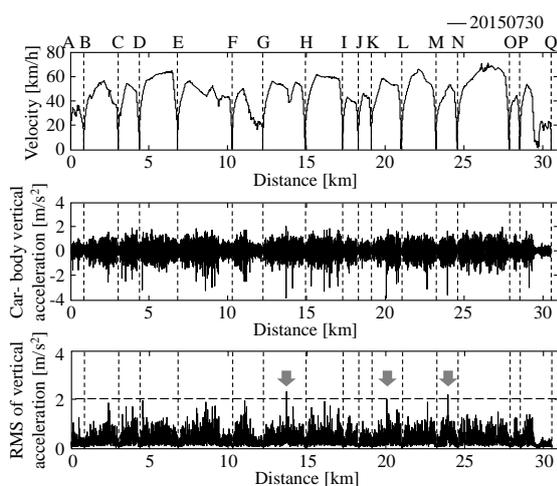


Fig.5 Measured data

#### 4. 3 要注意区間の詳細な診断

要注意区間となった駅間の中から一例として、K駅L駅間を詳細に診断する。K駅L駅間の小型レール診断装置での計測値をFig.6に示す。Fig.6中下段のRMS値から閾値を超えていた地点は20.1[km]地点であったことがわかる。この地点を航空写真で確認したところ用水路をまたがる形でレールが設置されていたことがわかった。また、19.6[km]、20.8[km]地点においてもRMS値が連続して大きな値を示しており、この地点も同様に確認したところ19.6[km]地点には鉄道橋、20.8[km]地点は踏切設置区間であることがわかった。そこで、これらの地点に注目し、車体上下加速度を離散ウェーブレット変換による多重解像度解析を用い、周波数成分を見ることで詳細に診断し、原因の特定を行う。

Fig.7に多重解像度解析の解析結果を示す。多重解像度解析に用いたマザーウェーブレットはDubechiesの生成指数を9とし、分解レベルは5とした。ここで取扱った計測データのサンプリング周波数は $82[Hz]$ である。また、多重解像度解析の結果を高周波帯域と低周波帯域でそれぞれ再構成したものをFig.8(a)(b)に示す。高周波帯域の再構成成分 (Fig.8(a)) からは20.1[km]地点で値が著大であることがわかる。幅広い帯域の周波数成分を含むのは波形の不連続性を検出しているためであり、高周波成分も含んでいることからこの地点ではレール継ぎ目部分などに異常が生じている可能性が考えられる。

また、19.6[km]、20.8[km]地点に注目した場合、 $a_5 (1.28-[Hz])$ の低周波帯域の再構成成分 (図8(b)) において値が比較的大きくなっている。この地点では鉄道橋や踏み切りを通過していることからレール下の路盤の剛性が異なる

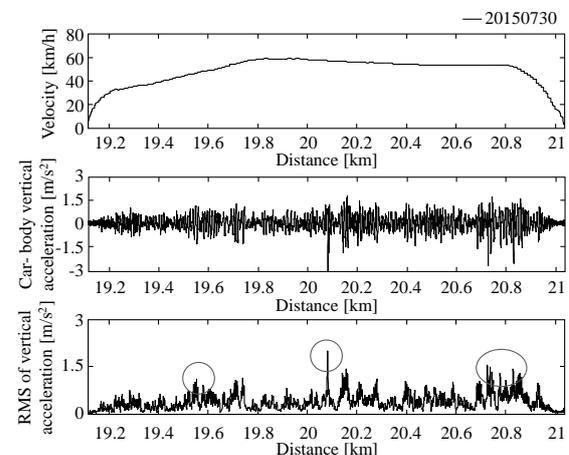


Fig.6 Evaluation of measured data

ることが走行中の振動に影響していることが考えられる。しかし、K駅L駅間では20[km]地点にも踏み切りが設置されており、その地点の低周波成分と比べても19.6[km]，20.8[km]地点は値が大きいことから軌道の現地調査が必要であると考えられる。

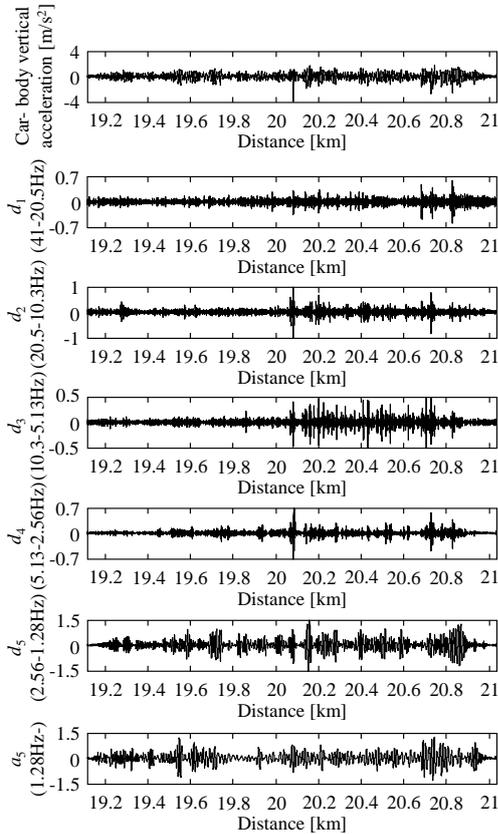


Fig.7 Discrete wavelet transform of the measured data

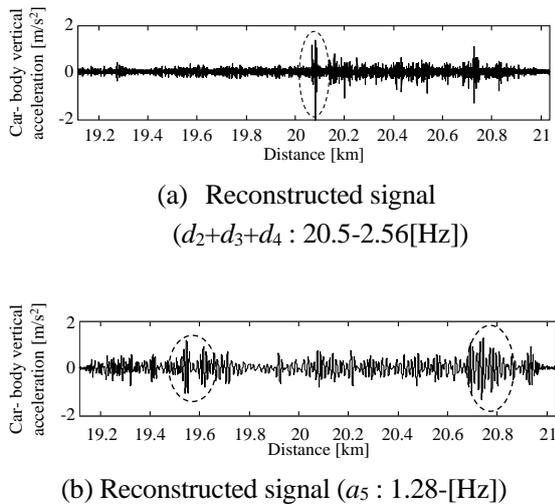


Fig.8 Reconstructed signals

## 5 まとめ

本稿では、可搬型プローブ装置を改良した小型レール診断装置と、レール診断ソフトウェアを用いた軌道状態診断システムの開発について述べた。また、実際に地方鉄道事業者を対象にレール状態診断システムを導入し、診断事例について述べた。軌道補修前後の計測データからは RMS 値に設ける閾値を決定し、その閾値を全区間の RMS 値に設けることで要監視区間を定めた。さらに、要監視区間の中から一例として一駅間を詳細に診断した。その結果、いくつかの異常を検出することができた。

今後は、鉄道事業者の保守部門と連携して開発したシステムの有効性の検証と更なる改良を行っていく予定である。

本研究は、JST A-STEP シーズ顕在化タイプ AS2311267B「可搬型レール状態診断装置の高性能化」および JSPS 科研費 26420182「可搬型プローブ装置を活用したレール状態常時監視システムの開発（綱島 均）」の助成を受けたものであり、ここに謝意を表す。

## 「参考文献」

- 1) 小島崇, 綱島均, 松本陽, 水間毅, 車上測定データによる軌道の異常検出 (第2報, プローブシステムの開発と検証), 日本機械学会論文集C編, 75巻754号 (2009) pp.264-271
- 2) Tsunashima, H., Naganuma, Y., Matsumoto, A., Mizuma, T. and Mori., H., Condition Monitoring of Railway Track Using In-Service Vehicle, Reliability and Safety in Railway, InTech (2012)s
- 3) 佐藤安弘, 大野寛之, 吉永純, 森裕貴, 可搬型プローブシステムによる軌道の異常検出, 土木学会第65回年次学術講演会講演概要集, 65巻206号, (2010) pp.411-412
- 4) 森裕貴, 佐藤安弘, 大野寛之, 竹内俊裕, 小林尊仁, 綱島均, 斎藤嘉久, 小型レール状態診断装置の開発, 第19回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, No.12-79 (2012) pp. 197-200
- 5) 小林尊仁, 綱島均, 森裕貴, 竹内俊裕, 佐藤安弘, 大野寛之, 斎藤嘉久, 可搬型プローブ装置を用いた軌道の状態監視に関する研究, 第19回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, No.12-79 (2012) pp. 623-626