

営業車両によるレール状態診断システムの開発と診断事例

日大生産工(院) ○荻野 誠之

日大生産工 綱島 均

日大生産工 柳澤 一機

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¹⁾。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²⁾。本論文では、可搬型プローブ装置³⁾を改良した小型レール状態診断装置⁴⁾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開発とその診断事例について述べる。

2 軌道状態診断システム

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。

計測部で得られた測定データは、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、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⁵⁾。

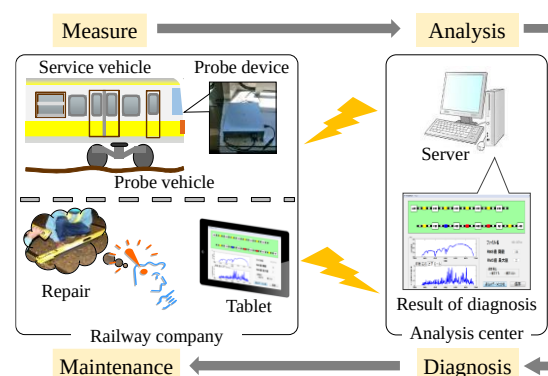


Fig.1 Track condition monitoring system

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

Development of track condition monitoring system using in service vehicle and monitoring experiences

Masayuki OGINO, Hitoshi TSUNASHIMA, Kazuki YANAGISAWA ,
Hiroataka MORI and Akira ASANO

た．信号処理，GUI 化には MATLAB (MathWorks)を用いた．

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．

本診断ソフトでは，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．

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

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上下・左右加速度，ロール角速度の RMS 値を求める．ここでは， $N=26$ ，サンプリング時間を $0.012[s]$ として，RMS 値を算出している．

レール診断ソフトのメイン画面を Fig.2 に示す．ここで使用するデータは著者らの研究グループが地方鉄道事業者協力のもと，長期に渡り小型レール状態診断装置を用いて測定してきたものである．メイン画面では，式(1)により算出される振動加速度の RMS 値を元に軌道状態の評価を行う．タブを変更することで，算出に用いる振動加速度を検査する軌道不整に合わせて，変更することができる．Fig.2 上部の路線図は駅間ごとに軌道の状態を色分け評価したものである．色分けの指標には，振動加速度の RMS 値を用いており，設定したしきい値を基準にして，赤，黄，青で表示している．また，Fig.3 上図は，特定

の駅間の複数回の走行データを比較したものである．設定したしきい値を超えた箇所がプロットされ，このプロットされた回数が多い 5260[m]地点において，軌道の異常が発生している可能性がある．下図は，上図の破線部の RMS 値（最大値）を走行日時ごとに表示したものである．2012 年 9 月から 2013 年 2 月の間での補修作業の影響が RMS 値の低下として表れており軌道状態は安定している．

このように特定箇所を要監視区間として，長期的な軌道保守のモニタリングを行うことも可能である．1 走行データのみによる評価では，正確な評価が行えない場合があるが，複数回の走行データによる評価 (Fig.3)では，軌道異常の発生頻度からより正確な診断を行うことが可能である．

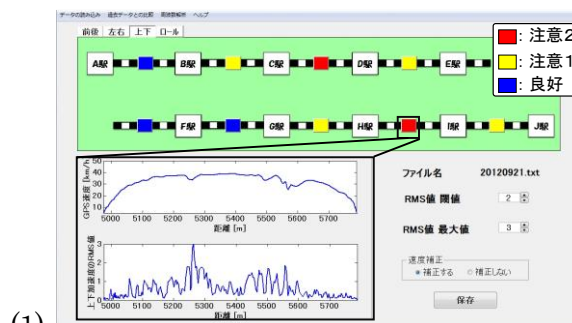


Fig.2 Main viewer of diagnostic software

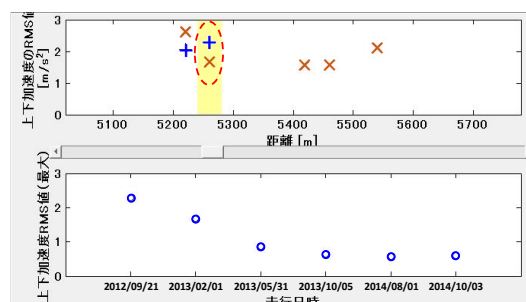


Fig.3 Evaluation by statistical processing

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。実際に、診断ソフトに連続ウェーブレット変換の機能を搭載したものが Fig.4 である。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。

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ものを離散ウェーブレット変換という。この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を診断ソフトに搭載したものが Fig.5 である。この機能では駅間ごとの車体振動加速度を任意のレベ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。

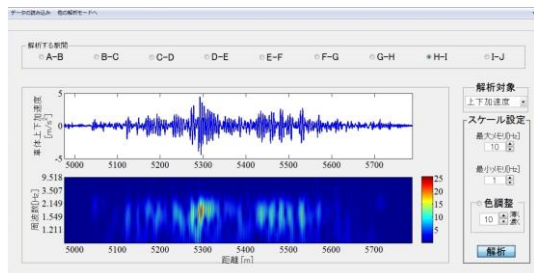


Fig.4 Evaluation by continuous wavelet transform

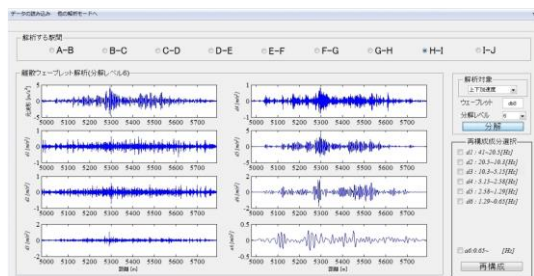


Fig.5 Evaluation by discrete wavelet transform

4 レール状態診断システムによる診断事例

診断ソフトに付加した機能により実測値を解析したものが Fig.8 である。ここで用いる実測値は、小型レール診断装置を用いて測定したものを処理速度の都合から 1/10 に間引いたものである。図の上段から順に、対象とする駅間での走行速度 (GPS により計測)、測定された車体上下加速度波形、その振動加速度の RMS 値、連続ウェーブレット変換に

よる信号平面となっている。

Fig.6 中の RMS 値の波形を見ると、3100[m]付近で、走行速度が低いにもかかわらず、大きな RMS 値が観測されている。また、3200[m]付近では連続して、値が大きく表れている場所があることがわかる。さらに、3320[m]付近にも大きな RMS 値を観測した箇所があることがわかる。上下加速度の RMS が著大な箇所については高低狂いが大きい可能性があるため、3200[m]付近においては高低狂いが大きくなっていると考えられる。

連続ウェーブレット変換による信号平面 (1.6-16[Hz]) を観察すると、3100[m]付近、3320[m]付近では高い周波数帯域に、また、高低狂いが大きくなっていると考えられる 3200[m]付近では低い周波数帯域に影響が表れていることがわかる。現場調査の結果、3100[m]付近には分岐器があり、そこを通過したため車両が大きく揺れ、その影響が現れたものと考えられる。

さらに、車体上下加速度を多重解像度解析したもの (分解レベル 6) を Fig.7 に示す。分解した信号から軌道の状態を評価するために、

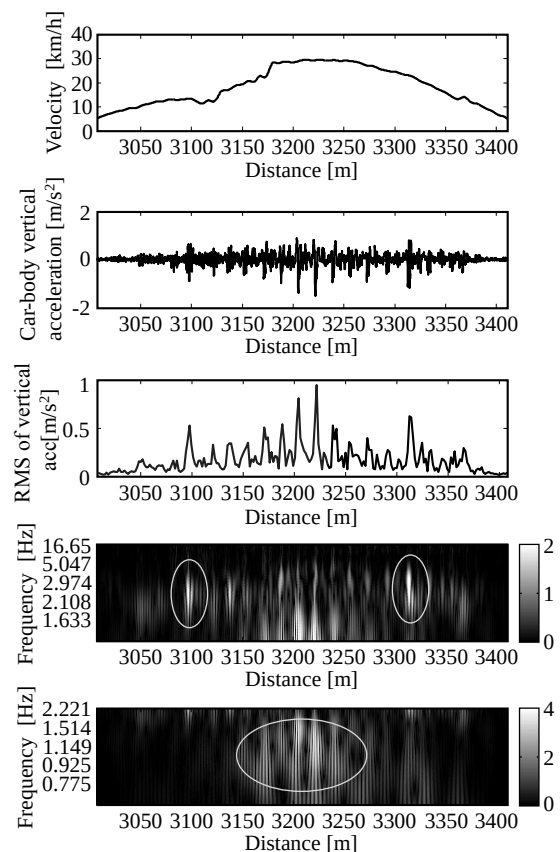


Fig.6 Evaluation of the measurement data

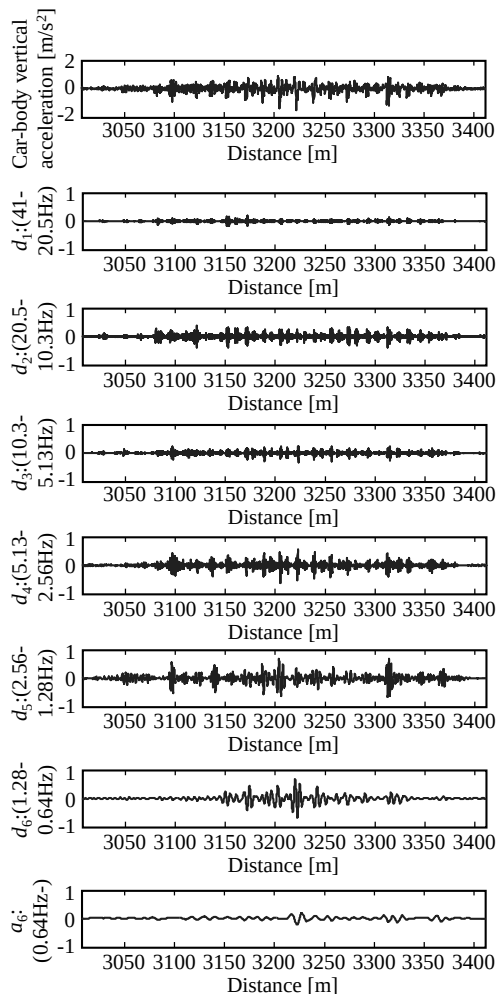
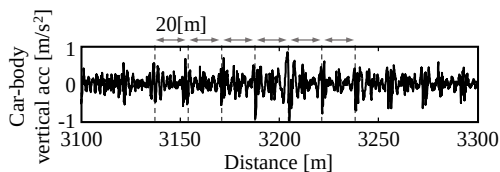
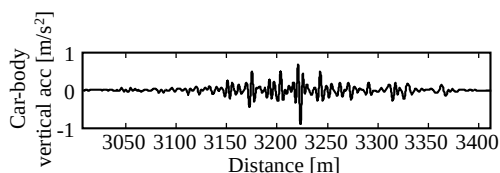


Fig.7 Discrete wavelet transform of the measurement data



(a) Reconstructed signal ($d_1 + d_2 + d_3 + d_4 + d_5$: 41Hz-1.28Hz)



(b) Reconstructed signal ($d_6 + a_6$: 1.28Hz-)

Fig.8 Reconstructed signals

1.28[Hz]以下の成分とそれ以外の成分に信号を再構成した．連続ウェーブレット変換の結果から，低周波成分($d_6 + a_6$)の波形 (Fig.8(b)) には，高低狂いの影響が表れていると考えら

れる．一方，それ以外の高周波成分 (Fig.8(a)) においては，一定の間隔で特徴的なインパルス状のピークが表れていることがわかる．この区間のレール長は 20[m]であり，このインパルス状の信号の間隔もほぼ 20[m]であることから，レール継ぎ目を検出していると考えられる．また，3320[m]付近で検出した信号は，浮き枕木の影響の可能性も考えられるため，今後事業者と協力して詳細な調査を行う必要があると考える．

5 まとめ

本論文では，可搬型プローブ装置を改良した小型レール状態診断装置と，レール状態診断ソフトウェアを用いた軌道状態診断システムについて述べるとともに，診断ソフトの開発，診断事例について述べた．本システムにより，軌道保守へのタイムリーなフィードバックが実現でき，低コストで省メンテナンスな保守作業をすることが期待できる．

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改良を行っていく予定である．

「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)，No.754/V-75，(2009) pp.264-271.
- 2) Hitoshi Tsunashima, Yasukuni Naganum, et al., "Condition Monitoring of Railway Track Using In-Service Vehicle", Reliability and Safety in Railway, InTech, (2012) pp.333-356.
- 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，V-65，IV-206，(2010) pp.411-412.
- 4) Hiroataka MORI, Hiroyuki OHNO, et al., "Development of Compact Size Onboard Device for Condition Monitoring of Railway Tracks", Journal of Mechanical Systems for Transportation and Logistics, Vol. 6, No. 2, (2013) pp.142-149.
- 5) 浅野晃，森裕貴，綱島均，中村英夫，安価で保守性に優れた列車制御システム，ADVANTY2013 シンポジウム，(2013).