

プローブシステムを用いた軌道保守のモニタリング

○ [機] 森 裕貴 (交通安全環境研究所)

[土] 佐藤 安弘 (交通安全環境研究所)

[機] 大野 寛之 (交通安全環境研究所)

[電] 竹内 俊裕 (交通安全環境研究所)

[機] 原 久純 (日本大学)

[機] 綱島 均 (日本大学)

Condition monitoring of Railway Track Maintenance Using Probe System

○ Hirotaka Mori, Yasuhiro Sato, Hiroyuki Ohno, Toshihiro Takeuchi, (National Traffic Safety and Environment Laboratory)
Hisazumi Hara, Hitoshi Tsunashima, (Nihon University)

This paper describes the development and the verification of the "probe system" which estimates the track conditions without sensors on bogie. To detect the track conditions from the data which can be observed in the interior of a service vehicle, two methods have been proposed: the method to detect track irregularities using RMS of the lateral/vertical accelerations and the rolling of the vehicle body, and the method to detect rail corrugations from the interior noise using the windowed Furrier transform. The developed system has been installed onto the cab of a service vehicle to carry out a field test for the validation of the system. The results of comparison with the track maintenance show that the probe system can evaluate the effect of the track maintenance.

キーワード：鉄道，軌道保守，診断法，状態監視，振動，騒音

Key Words : Railway, Track maintenance, Diagnostics, Condition monitoring, Vibration, Noise

1. 緒言

車輪がレールで支持案内されて走行する鉄道にとって、軌道の安全管理は重要である。軌道状況を把握し、事故に至る前に補修していく予防保全が不可欠である。そのためには、軌道の状態を常時あるいは高頻度で監視することが望ましい。しかし、軌道検測車やレール探傷車などの検査用車両の走行により精密な軌道検査が可能になっているものの、コストや要員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、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て、簡便な方法により軌道状態の常時監視と診断が可能になれば、適切な保全時期、保全内容の計画によって、より確実な予防保全の実現が期待できる。常時監視を実現する一つの方法として、営業車両に安価な汎用センサを付加し、営業運転を行いながら軌道の状態診断を行う方法が考えられる(図1)。このようなシステムをプローブシステム¹⁾²⁾と呼ぶ。このプローブシステムが実現すれば、状態監視にもとづく新しい保安形態を確立できると考えられる。

このような保安形態を実現するには、異常を的確に検出することが重要であり、第一の課題である。センサなどにより状態を計測し、得られる情報から特徴を抽出、異常を判別する方法が必要となる。著者らは、鉄道車体で測定した振動加速度の RMS (Root Mean Square) 値で軌道変位を

評価し、車内騒音に周波数解析を用いることでレール波状摩耗を検出する方法について提案した³⁾。さらに、持ち運びが容易で、車両と非接続で軌道の状態診断が行える可搬型プローブ装置を開発⁴⁾し、鉄道事業者協力のもと実用に供するための走行実験を行なっている。

本論文では、プローブシステムにより特定された軌道の要注意区間について、長期に渡って継続調査を行った結果及び、その期間に実施された軌道保守による軌道状態の変化の様子について報告する。

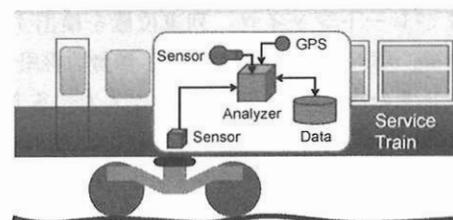


Fig.1 Probe Vehicle System

2. プローブシステムによる軌道の異常検出方法

2.1 車体振動による軌道変位の検出

レールの長手方向の形状の変化を軌道変位といい、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発生させ、また著大な荷重により軌道を劣化させるため、最も重要な検査項目の一つである。

軌道状態の変化を監視する目的では、軌道変位の絶対値が得られなくても、その傾向を得るには車体振動の大きさ

は有効である。このような観点から、本研究では、振動の振幅が軌道変位を示す指標になり得ると考え、RMS 値を用いる。

軌道状態と位置との関係を得るためには、短時間の RMS を求める必要がある。測定値 $x(t)$ のうちの短い時間区間における RMS $x_{rms}(t)$ を次式で定義する。

$$x_{rms}(t) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{\tau=1}^{t+N-1} x(\tau)^2} \dots\dots\dots (1)$$

レールの上下方向の変形である高低変位、左右方向の変形である通り狂いを検出するために、上下・左右加速度を測定するほか、左右レールの高低差である水準変位を検出するために、ロール角を測定する。

2.2 車内騒音によるレール波状摩耗の検出

レール波状摩耗は、レールの頭頂部が数 cm から十数 cm の周期で摩耗する現象で、特に急曲線部に発生するものが問題となっている。波状摩耗が成長すると、著しい騒音や振動を引き起こしたり、軌道材料を損傷させたりする原因となるため、レールの研削や交換が必要となり、都市鉄道では軌道保守の重要な課題の一つとなっている。

車両が波状摩耗上を走行する際、独特の騒音が発生することが知られている。このことから、車内騒音から波状摩耗を検出できれば、非接触の測定となり、既存の車両への導入が容易になると考えられる。著者らは前報⁵⁾において、波状摩耗を検出するために窓フーリエ変換を用いて、走行する車両の車内騒音のスペクトルから波状摩耗のピークを検出する方法を検討し、その有効性を示した。

3. プローブシステムの構成

3.1 システム構成

図 2 にプローブシステムの構成図を示す。波状摩耗を検出するための騒音計、軌道変位を検出するための加速度センサおよびレートジャイロ、列車位置を検出するための GPS 受信機、解析用のコンピュータ、映像取得用 Web カメラ、各センサの信号をコンピュータに入力するアナログ入力ターミナルで構成される⁶⁾。

プローブシステムには 3 つのソフトウェアが搭載され、以下の機能を有している。1 つ目は軌道異常検出ソフトによる軌道の状態監視機能で、各センサからの信号に信号処理を行い、現在の軌道状態を表示、記録する。2 つ目は位置推定・マップ表示ソフトによる列車位置の特定機能で、GPS 受信機による位置情報にもとづいて路線上の列車位置を求め、地図上に現在位置を逐次表示を行う。3 つめは映像記録ソフトによる映像記録機能で、設置された Web カメラより車両前方映像や運転士の運転メーター等の記録が可能である。各ソフトウェアのデータは、ハードディスクドライブに記録され、オフラインにより解析することができる。

3.2 ソフトウェアの機能詳細

(1) 軌道異常検出ソフト

図 3 に軌道異常検出ソフトの表示画面を示す。軌道異常検出ソフトは、各センサからの入力信号を信号処理することにより軌道状態を逐次推定、表示を行う。また、位置推定・マップ表示ソフトによる位置情報を用いて列車速度を算出、補正する。GPS の測位情報は、1 秒間隔で得られるため、その間の位置を、速度 $v(t)$ の積分値を用いて推定する。時刻 $t = t_g$ で GPS により求めた距離 $x(t_g)$ から現在時刻 $t = t_c$ の距離 $x(t_c)$ を次式より求める。

$$x(t_c) = x(t_g) + \sum_{t=t_g-2}^{t_c} a(t)\Delta t \dots\dots\dots (2)$$

ここで、速度 $v(t)$ についても同様に予測する必要がある。GPS の速度情報も 1 秒間隔で得られるため、その間の速度を、加速度センサによる前後加速度 $a(t)$ の積分値を用いて推定する。ただし、GPS の速度情報は 2 秒程度の時間遅れを持つため、時刻 $t = t_g$ で GPS により得られた速度 $v(t_g)$ から現在時刻 $t = t_c$ の速度 $v(t_c)$ を次式より求める。

$$v(t_c) = v(t_g) + \sum_{t=t_g-2}^{t_c} a(t)\Delta t \dots\dots\dots (3)$$

(2) 位置推定・マップ表示ソフト

図 4 に位置推定・マップ表示ソフトの表示画面を示す。位置推定・マップ表示ソフトは、GPS 受信機による位置情報にもとづいて路線上の列車位置を求め、軌道異常検出ソフトより軌道状態を受取り、軌道に異常が発見された場合は、画面の地図上で異常箇所の記録、表示を行う。

GPS による測位データは誤差を生じるため、マップマッチング補正を行う。あらかじめ路線形状のデータを作成しておき、GPS の測位座標から直近の路線上に補正する。補正した座標を、路線の基点からの距離に換算する。

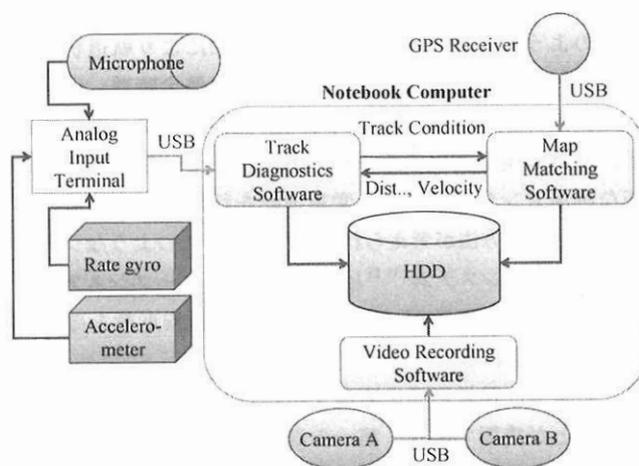


Fig.2 Configuration of Probe System

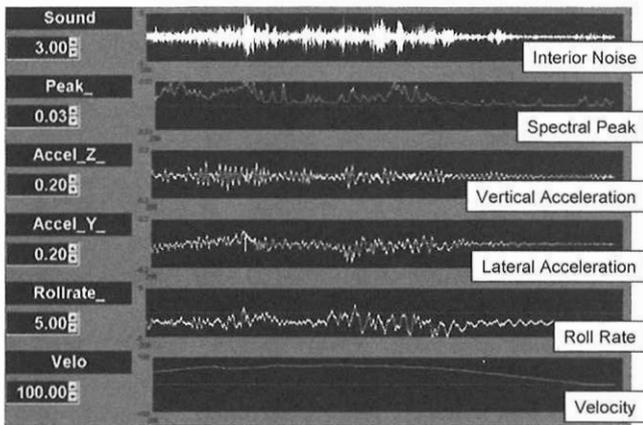


Fig.3 Real Time Monitoring of Track Condition

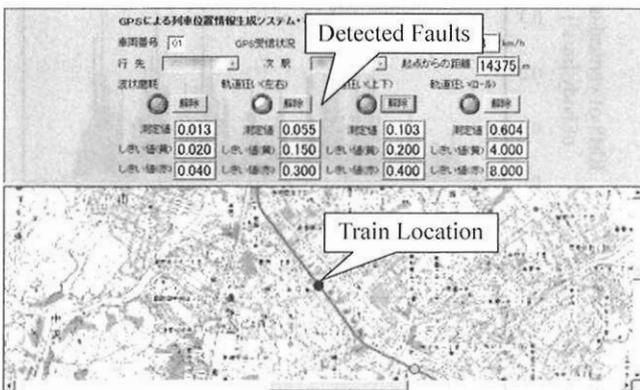


Fig.4 Real Time Fault Detection of Track



Fig.5 Video Recording Software



Fig.6 Loose Sleeper

(3) 映像記録ソフト

図 5 に映像記録ソフトの表示画面を示す。映像記録方法は、1 分間の映像データを 1 ファイルとし、指定フォルダに断続的に記録する方式とする。

前方映像を取得することによって、軌道異常が発生している地点が明確となり、保守作業の効率化に繋がる。また、運転台の操作状況を撮影、画像解析を行う事でノッチ操作状況や、架線電圧といった各種メーター情報を取得する⁷⁾など、運転状況記録装置記録装置の一部機能を、プローブシステムで受け持つことが期待される⁸⁾。

4. 営業路線における走行試験

4.1 試験方法

構築したプローブシステムを営業車両の運転台の近くに設置、GPS 受信機を窓枠に固定して営業路線を走行する。走行試験の初期段階において、車体上下加速度 RMS 値の著大な区間に立ち入り調査を行ったところ、図 6 に示すような浮き枕木の発生が確認された。このような浮き枕木を放置すると、車両が通過する際レールの沈下によりたわみが発生し、輪重変動が大きくなるなど、安全上大きな問題が発生する。そのため、特に大きな RMS 値が検出された区間については、事業者の協力の下、適宜軌道保守を行い、その前後でのプローブデータを収集した。

4.2 試験結果

(1) マルチプルタイタンパによる軌道保守

2010 年 1 月初旬にマルチプルタイタンパ (以下マルタイと略記) による軌道全線の保守作業が行われた。その軌道保守の前 (2009 年 12 月) と後 (2010 年 1 月) に行われた走行試験の車体上下加速度 RMS 値の結果を図 7, 8 に示す。RMS 値が高いほど軌道の状態が悪化していることを表す。マルタイによる保守後は全体的に RMS 値の減少が確認された。特に 0.3m/s^2 を超える要注意区間では、軒並み RMS 値が 0.2m/s^2 を下回り、軌道状態が改善されたことがわかる。マルタイによる軌道保守の半年後に行われた走行試験の上下加速度 RMS 値の結果を図 9 に示す。一般的に軌道保守を行った後の半年間は、軌道状態が安定しないことが知られている。RMS 値を比較すると、若干値が減少した区間もあるが、ほぼマルタイによる軌道保守前のレベルまで戻ってしまっていることが確認された。

(2) 短区間軌道保守

軌道状態が半年で軌道保守前の状態に戻った原因として、保守区間が全線と長区間であったため、碎石の補充が均一的になり、RMS 値の高い要注意区間において、碎石の補充が不十分であった可能性が考えられる。

そこで、2010 年 7 月の調査後にプローブデータを鉄道事業者に提供し、RMS 値の大きな区間について追加の保守作業を行った。作業内容としては、数 m から数十 m に渡って、碎石補充と突き固めを行い、保守後は継続してプローブ装

置による調査を行った。

特に RMS 値の戻り幅の大きかった 5.7km 地点について、RMS 値の推移を図 10 に示す。マルチの実施後と比べると、集中的に保守を行った結果、RMS 値が急増せず、半年を過ぎても安定していることがわかる。

5. 結 言

本論文では、車両振動および車内騒音から、軌道状態を営業車両において測定するプローブ装置を開発し、長期に渡って走行試験により軌道状態を調査し、軌道保守の効果を評価した。その結果を以下にまとめる。

地方鉄道においてプローブ装置を用いた走行試験より、特に軌道の劣化が顕著な区間を特定、その区間を要注意区間と設定し、鉄道事業者協力の下軌道保守を行った。マルチによる軌道保守を行った結果、車体の上下振動加速度は低下し、軌道状態は安定したように思われた。しかし、その後約半年という軌道設備としては短期間において、軌道整備前の状態に戻ってしまったことが確認された。この結果を受け、特に大きな振動の原因となる浮き枕木の発生区間に対し、追加で軌道の保守作業を行った。その結果、軌道の状態は安定し、マルチによる軌道保守後のような上下振動加速度が急増するような現象はみられなかった。

以上のことから、浮き枕木が発生するような脆弱な地盤の路線においては、画一的な軌道保守を行うのではなく、碎石の補充量の変更など、軌道状態に合わせた軌道保守が必要であることが示された。また、継続的に軌道状態を監視し、その路線の振動加速度の定常状態を把握することで、軌道の状態変化に対応できる可能性を示した。

今後は可搬型プローブ装置の小型化、高機能化を進めるとともに、インターフェースの改善を図り、地方鉄道事業者などが簡易に取り扱えるようにしたい。

参 考 文 献

- 1) H. Tsunashima, A. Matsumoto, H. Nakamura and H. Yamashita : Fundamental Studies on Development of Probe-Vehicle System for Advanced Railway Inspection, The 13th Transportation and Logistics Conference 2004, pp. 241-242, 2004
- 2) H. Tsunashima, A. Matsumoto, T. Mizuma and H. Nakamura : Condition Monitoring of Railway System by "Probe Vehicle" Technology, Journal of Society of Automotive Engineers of Japan, Vol. 61, No. 2, pp. 98-104, 2007
- 3) 小島崇, 網島均, 松本陽, 緒方正剛, 車上測定データによる軌道の異常検出 (第 1 報, レール波状摩耗の検出), 日本機械学会論文集 (C 編), Vol. 720, No. 72, pp. 2447-2454, 2006
- 4) 小島崇, 網島均, 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), Vol. 754, No. 75, pp.1798-1805, 2009
- 5) Kojima T., Tsunashima H., Matsumoto A., and Ogata S., Fault Detection of Railway Track from On-Board

Measurement Data, Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol. 720, No.72, pp.2447-2454, 2006

- 6) H. Tsunashima, T. Kojima, A. Matsumoto and T. Mizuma : Condition monitoring of railway track using in-service vehicle, Japanese Railway Engineering, No. 161, 2008
- 7) 長谷川智紀, 工藤希, 竹内俊裕, 林田守正, 水間毅, 省エネルギー運転, 回生効果最大化のためのオンボード運転支援装置の開発, 平成 23 年電気学会産業応用部門大会論文集, pp.III-459-III-462, 2011
- 8) 森裕貴, 緒方正剛, 水間毅, 網島均, 可搬型プローブ装置の運転状況記録装置への適応, 第 19 回交通・物流部門大会講演論文集, pp.225-228, 2010

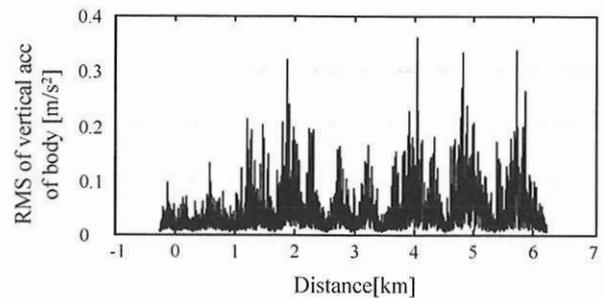


Fig.7 RMS of Vertical Acceleration of Body (2009/12/12)

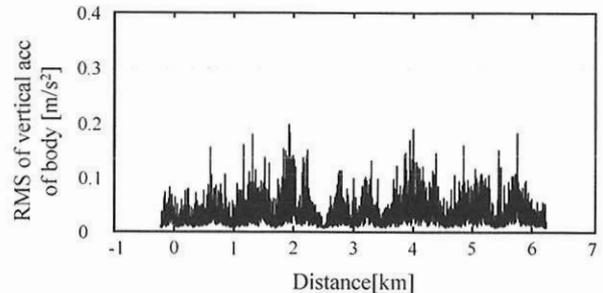


Fig.8 RMS of Vertical Acceleration of Body (2010/1/13)

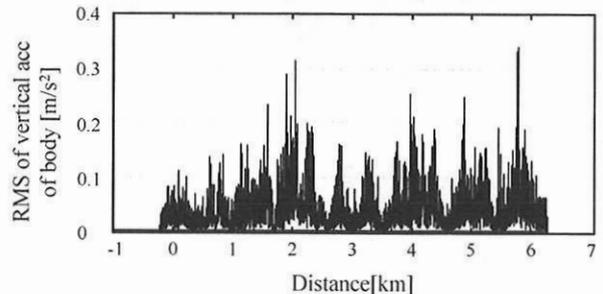


Fig.9 RMS of Vertical Acceleration of Body (2010/7/28)

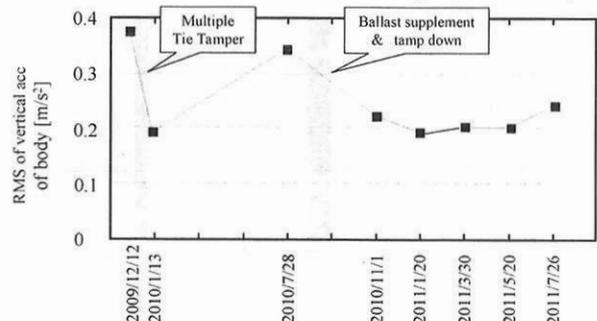


Fig.10 Transition of the Maximum Value of RMS (5.7km)