

2112 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

学〔機〕 ○小林 尊仁 (日本大学大学院) 正〔機〕 網島 均 (日本大学)
正〔機〕 森 裕貴 (交通研) 正〔電〕 竹内 俊裕 (交通研)
正〔土〕 佐藤 安弘 (交通研) 正〔機〕 大野 寛之 (交通研)
正〔電〕 齊藤 嘉久 (京三製作所)

Condition monitoring of tracks using Portable probe device

Takahito KOBAYASHI, Nihon University, 1-2-1, Izumi-cho, Narashino City, Chiba

Hitoshi TSUNASHIMA, Nihon University

Hiroataka MORI, Toshihiro TAKEUCHI, Yasuhiro SATO, Hiroyuki OHNO, National Traffic Safety and Environment Laboratory

Yoshihisa SAITO, KYOSAN ELECTRIC MFG. Co., Ltd.

The 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 Fourier transform. It experiments a field test for the validation of the system in a service vehicle. The results show the probe system can estimate effectively the amplitude of track irregularities, the grade of rail corrugations and its location.

Keywords : Railway, Probe system, Diagnostics, Condition monitoring, Spectrum Analysis, Vibration

1. 緒言

車輪がレールで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。その状況を把握し、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、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、コストや維持管理などの点から走行頻度は非常に制限される。

このような問題に対して、より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、営業車両に簡易なセンサを付加することにより、営業運転を行いながら軌道診断を行う方法が考えられる²⁾。このような車両をプローブ車両¹⁾と呼び、持ち運びが容易で車両と非接続で軌道の状態診断の行える、可搬型プローブ装置を開発³⁾した。

本研究では、鉄道事業者の協力のもと、長期に渡って軌道状態の継続調査を行った結果の一例について述べるとともに、その有効性を検証した。

2. プローブシステムの構成

図1に最初に試作したプローブシステムの構成図を示す。

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、位置を検出するためのGPS受信機、解析用のコンピュータ、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。

各センサから出力される信号は、アナログ入力ターミナルによりデジタル信号に変換され、コンピュータに入力される。コンピュータに組み込まれた位置推定・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、路線上の位置を求め、画面の地図上の現在位置を逐次表示する。信号処理されたデータは、オフラインにより解析するために、ハードディスクドライブに記録される。

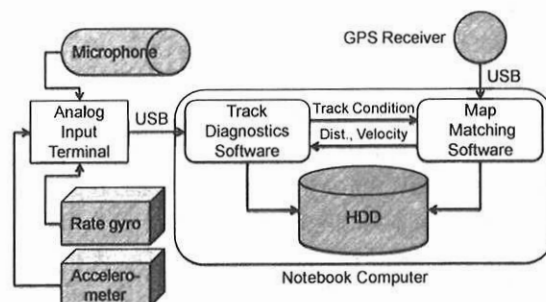


Fig.1 Configuration of Probe System (1st generation)

3. 軌道異常の検出方法

3.1 車体振動による軌道変位の検出

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。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 (Root Mean Square) 値を用いる。

本プローブシステムでは、上下・左右加速度に加えて、左右レールの高低差である水準変位の異常を検出するために、ロール角速度を測定している。

3.2 列車位置・時間的補正方法

3.2.1 空間的補正

GPS による測位データは誤差を生じるため、補正を行う必要がある。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。

3.2.2 時間的補正

GPS の測位情報は、1 秒間隔で得られるが、2 秒程度の時間遅れを持つため、その間の位置と速度を、加速度センサによる前後加速度 $a(t)$ を用いて、次式により推定する。

$$v(t_c) = v(t_g) + \sum_{t=t_g-2}^{t_c} a(t) \Delta t \quad (1)$$

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

ここで、 t_g 、 $x(t_g)$ 、 $v(t_g)$ はそれぞれ GPS により求めた時刻と位置と速度、 t_c は現在の時刻である。

4. 営業路線における走行試験

4.1 試験方法

車室内において、台車から伝わる振動を測定する好ましい位置は台車直上の床面であるが、実用性を考慮し、構築したプローブ装置を乗務員室内の運転台の近くに設置した。GPS 受信機を窓枠に固定し、営業路線を走行した。図 2 に実験の状況を示す。

4.2 試験結果

比較的大きな上下加速度 RMS 値を計測した区間を図 3 に示す。上下加速度 RMS 値の大きい箇所 (5.7km 付近) において、軌道の異常が発生していると考えられる。ここでは、徒歩による現地調査を行った結果、図 4 のような浮きまくらぎと呼ばれる状態が確認された。また、ほぼ同時期に 2 回実施した測定結果を比較すると、同様の測定結果が得られたことから計測の信頼性が確認できた。次に、マルチプルタイタンパ (以下マルタイ) による補修作業を行う前後の 2009 年 12 月 12 日と 2010 年 1 月 13 日の測定結果を図 5 (a) に、補修作業を行った後の

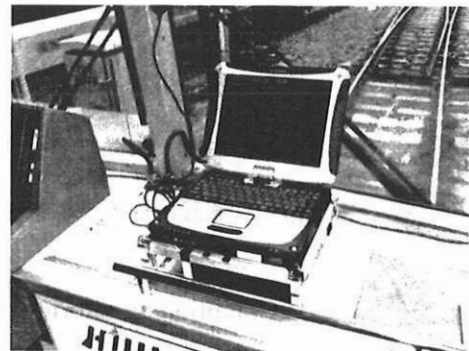


Fig.2 Field test of probe system

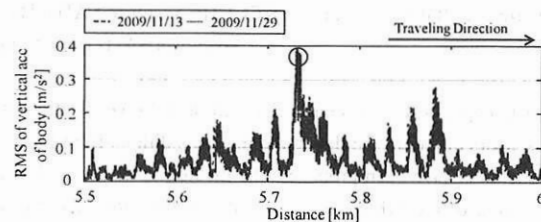
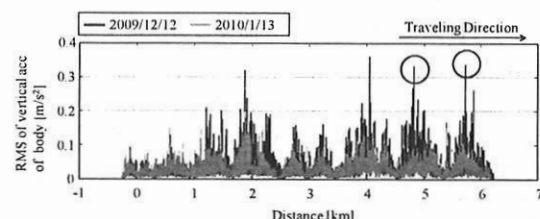


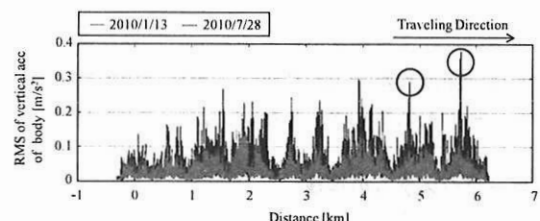
Fig.3 RMS of vertical acceleration of body



Fig.4 Loose sleeper



(a) RMS of vertical acceleration of body before and after repair works



(b) RMS of vertical acceleration of body after repair works

Fig.5 Condition monitoring of rail track

2010年1月13日と2010年7月28日の測定結果を図5(b)に示す。補修前後のRMS値を比較すると、補修後のRMS値が小さくなっていることが確認できる。また、補修を行った後とそこから約6ヶ月後のRMS値を比較すると、補修から約6ヶ月後のRMS値が補修前と同じ箇所(図5(a),(b)の○の箇所)で軌道状態が悪化していることがわかった。

RMS値が顕著に確認できた5.7kmにおける38ヶ月間の推移を図6に示す。計測開始6ヶ月後にマルタイによる軌道全線の保守作業が行われた。マルタイによる保守後はRMS値の減少が確認され、軌道状態が改善されたことがわかる。一般的に、軌道保守を行った後半年間は、軌道状態が安定しないことが知られているため、マルタイによる軌道保守の半年後に追跡調査を行った。試験の結果、上下加速度RMS値は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。原因として、保守区間が全線と長区間であったため、作業時間や砕石の補充が不十分であった可能性が考えられる。

そこで、測定データを鉄道事業者に提供したのち、追加の保守作業が行われた。作業内容としては、数mから十数mの区間に渡って砕石補充と突き固めが行われた。保守後は継続してブローブ車両による調査を行ったが、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。

4.3 車両速度による影響の補正

同日に測定された1回目と2回目のRMS値に多少の差があることが分かる。これは、同日の測定結果において車両の走行速度が異なることが原因であると考えられる。

走行中に観測される車体振動加速度は、軌道変位と速度の両方の影響を受け、走行速度の増加とともに大きくなる特徴を持っている。軌道変位のパワースペクトル密度は、軌道変位が同じであれば速度に比例することがわかっている⁴⁾。そこで、次式により速度の補正を行なった。

$$\ddot{Z}^* = \ddot{Z} \sqrt{V_{ref}/V} \quad (3)$$

ここで、 V は観測された車両速度、 $\ddot{Z}$ は車体振動加速度であり、 V_{ref} は基準となる車両速度である。

速度補正したときの5.7kmにおけるRMS値の推移を図7に示す。このとき、過去7回の計測における速度の平均値を基準速度として、式(3)を用いて補正した加速度からRMS値を算出した。図7より、各計測日時の1回目と2回目におけるRMS値の差が小さくなり、速度の影響を補正できていることが確認できた。

速度補正後に得られた上下加速度RMS値の平均(図8)が、同区における軌道状態の推移を表し、信頼性が高いデータだと考えられる。

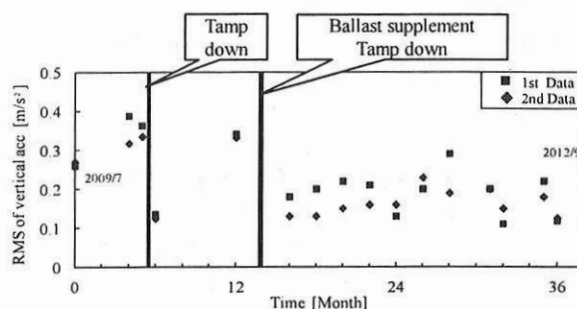


Fig.6 Change of RMS value before velocity compensation at 5.7km

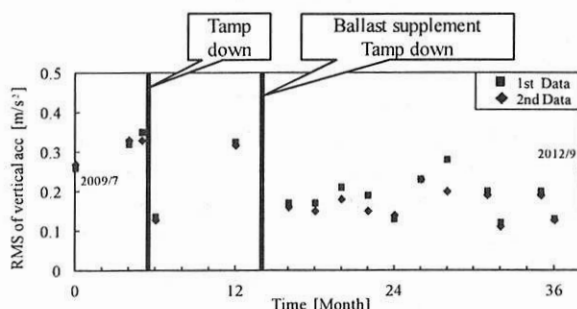


Fig.7 Change of RMS value after velocity compensation at 5.7km

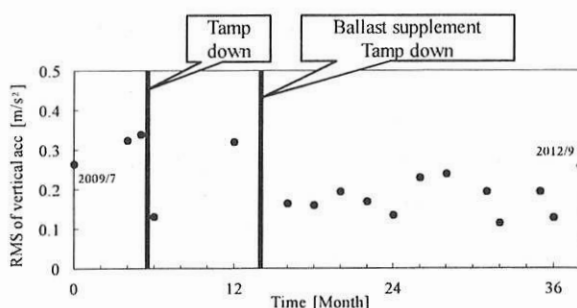


Fig.8 Condition monitoring of rail track

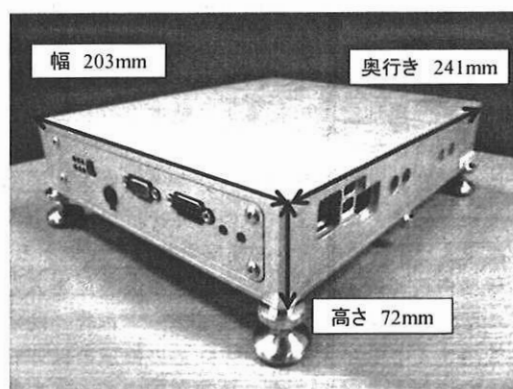


Fig.9 Probe device (2nd generation)

5. 小型レール状態診断装置

これまで使用してきた可搬型プローブ装置は、市販の汎用モジュールを組み合わせた試作品であるため、安定動作に対する信頼性を確保することが課題であった。さらに、設置スペースが限られていることから小型化が望まれる。軌道診断を必要としている地方鉄道においては、測定・診断の専門員を用意することは難しい。そのため、鉄道事業者においては軌道状態を診断する装置を購入あるいは借用し、測定データを診断機関へ送り、診断結果を受け取るといった運用が望ましいといえる。そこで、独立行政法人科学技術振興機構平成23年度研究成果展開事業研究成果最適展開支援プログラムの支援により、日本大学及び株式会社京三製作所、独立行政法人交通安全環境研究所と共同で、地方鉄道向けの実用化を想定した信頼性の高い小型レール状態診断装置の製作に発展させた。

診断装置に求められるのは、容易に測定が開始され、データを取り出せるなど、インタフェースの改善が望まれる。そのため、測定開始については、電源が車内で確保できる場合は通電と同時に起動、確保出来ない場合はバッテリー駆動かつ起動スイッチのみで測定を開始することとした。データについては、データの損失を防ぐため内蔵フラッシュメモリへ記録するとともに、取り出し可能な外部メディアに書き込むこととした。また、携帯電話回線を利用したデータ送信にも対応している。

開発された小型レール状態診断装置を図9、構成図を図10に示す。内蔵バッテリー駆動型であるが、ディスプレイの省略、一体型の3軸加速度センサ・レートジャイロの採用、筐体がヒートシンクの役割も担うなどの結果、既存のプローブ装置と比べ、設置面積比で40%以上低減し、A4用紙より一回り小さい程度に収まった。走行試験において、旧型プローブ装置と同時に計測した実験状況を図11に示す。

6. 結言

本研究では、軌道の予防保全を行うために、可搬型プローブ装置を用いて、長期間の定期的な計測を行い軌道状態の変化の検出を行った。その結果、営業路線による実車走行試験により計測データの信頼性が確認でき、また、現地調査の結果より軌道変位を検出できる可能性を示した。

今後は、蓄積された計測データを予防保全に生かすための統計処理アルゴリズムの開発を行い、軌道状態を予測できるアルゴリズムの構築を行う予定である。

本研究の最終的な目的は、各鉄道事業者を導入したレール状態診断装置から得られるデータを統一的に解析、管理することにより、地方鉄道の軌道の保守管理を一元的に行うことである。事業者間での知識や情報の共有がより活発に行われれば、より効率的でより安全性の高い保守管理が可能になると考える。

本研究は、運輸分野における基礎的研究推進制度（（独）鉄道・運輸機構、プローブ車両技術の導入による軌道交通システムの再生に関する基礎的研究：網島均（日大）、中村英夫（日大）、松本陽（当時交通研）、水間毅（交通研）、山下博（三菱重工）、平成16年度～平成19年度）により基本技術の開発が行われた。その後、平成21年度シーズ発掘試験研究（（独）科学技術振興機構）、平成22年度、23年度、24年度研究成果最適展開支援事業（（独）科学技術振興機構）の補助を得て、日本大学、交通安全環境研究所、京三製作所が共同で実用化研究を実施したものである。

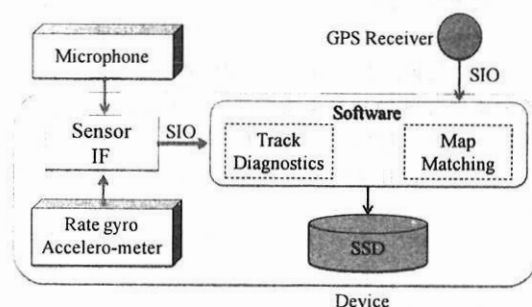


Fig.10 Configuration of Probe System (2nd generation)

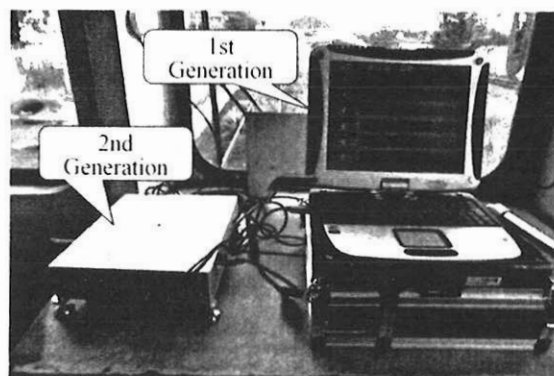


Fig.11 Comparison of device

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 pp. 241-242, 2004
- 2) 原久純, 網島均, 水間毅, 松本陽, 森裕貴 : プローブ車両による軌道の状態監視, 第17回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, pp593-954, 2010
- 3) 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
- 4) 日本機械学会編, 車両システムのダイナミクスと制御, 養賢堂, 1999