

2502 小型レール状態診断装置の開発

○ [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] 小林 尊仁 (日本大学)

[機] 綱島 均 (日本大学)

[電] 齊藤 嘉久 (京三製作所)

Development of compact size on-board sensing system for condition monitoring of railway tracks

○ Hiroataka Mori, Yasuhiro Sato, Hiroyuki Ohno, Toshihiro Takeuchi, (National Traffic Safety and Environment Laboratory)
7-42-27, Jindaiji-higashimachi, Chofu City, Tokyo, Japan

Takahito Kobayashi, Hitoshi Tsunashima, (Nihon University)

Yoshihisa Saito, (KYOSAN ELECTRIC MFG. Co., Ltd.)

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 Fourier 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. We aim to put the probe system into practical use in the upcoming years. Therefore compact size on-board sensing system for condition monitoring of railway tracks was developed newly. The outline of new device is explained and the results of comparison with the track maintenance show that the probe system can evaluate the effect of the track maintenance.

Keywords : 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、レール側の安全管理は非常に重要である。そのため、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。軌道検測車やレール探傷車などの検査用車両により、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、営業車両に小型の軌道診断装置を設置し、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(図1)。このような車両をプローブシステム¹⁾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²⁾。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³⁾し、鉄道事業者の協力のもと長期間の調査を行い、測定データの再現性、軌道異常の発生箇所の特定、測定データと軌道状態の相関などを示した⁴⁾。これらの成果を受け、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。

本報告では、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、可搬型プローブ装置の発展型である小型レール状態診断装置の概要について説明する。

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。

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

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⁾。

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⁵⁾。

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

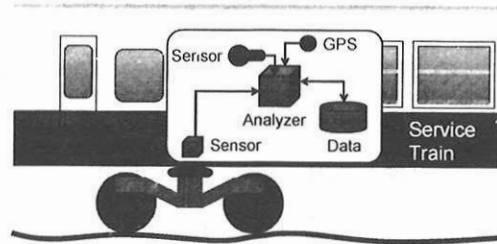


Fig.1 Probe Vehicle System

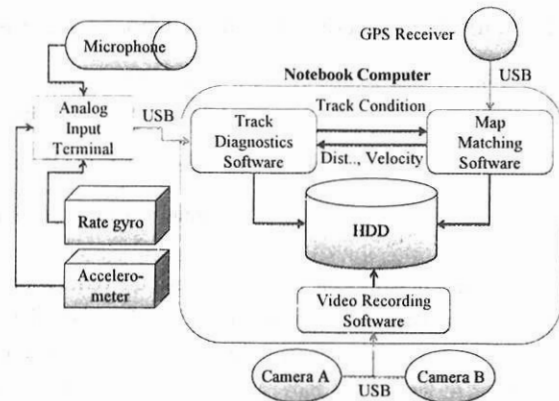


Fig.2 Configuration of Probe System

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。

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

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。

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

(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。

(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⁶⁾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⁷⁾。

4. プローブシステムによる軌道診断

4.1 軌道異常の発見

GPS 情報および加速度の RMS 値を測定することで、路線の中で加速度振動が強くでている区間を特定することができる。RMS 値が高いほど軌道の状態が悪化していると考えられるため、特に大きな RMS 値を計測した場所を現地調査したところ、図 6 に示すような浮きまくらぎが発見された。

このような浮きまくらぎを放置すると、車両が通過する際のレール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。

4.2 軌道保守効果の検証

浮きまくらぎが発生した区間を長期間にわたり計測した結果を図 7 に示す。この区間については、事業者が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。

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。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期間は、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、作業時間や碎石の補充が不十分であった可能性が考えられる。

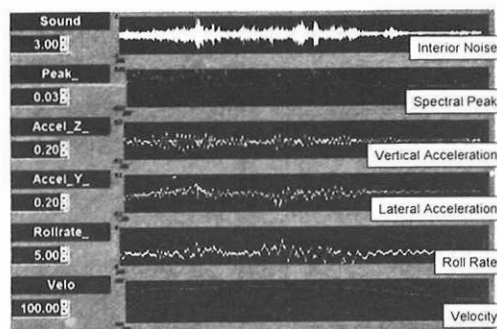


Fig.3 Real Time Monitoring of Track Condition

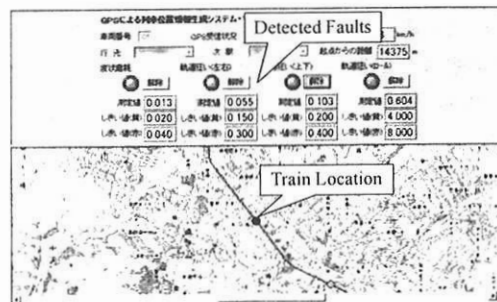


Fig.4 Real Time Fault Detection of Track



Fig.5 Video Recording Software



Fig.6 Loose Sleeper

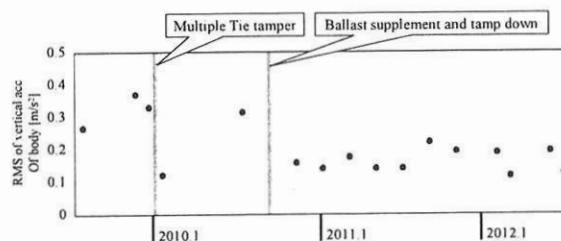


Fig.7 Transition of the Maximum Value of RMS

そこで、測定データを鉄道事業者に提供し、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 に渡って碎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。

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ブローブ装置は、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。一方、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。このことから、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。

そこで、小型レール状態診断装置においては、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（microSD カード）に書き込むこととする。また、携帯電話回線を利用したデータ送信にも対応させる。

開発された小型レール状態診断装置を図 8 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、既存のブローブ装置と比べ、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。（図 9）

6. 結 言

本報告では、営業車両において長期に渡る走行試験により軌道状態を車両振動および車内騒音から調査し、軌道保守の効果を評価した。加えて、これまでに蓄積した軌道状態診断技術の知見を基に、地方鉄道向けの小型で信頼性の高いレール状態診断装置を実現したので、その概要について述べた。

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。現在、経営難にあえぐ地方鉄道を支援するため、経営資源を運行だけに集中させる上下分離方式が各地でとりいれられているが、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。

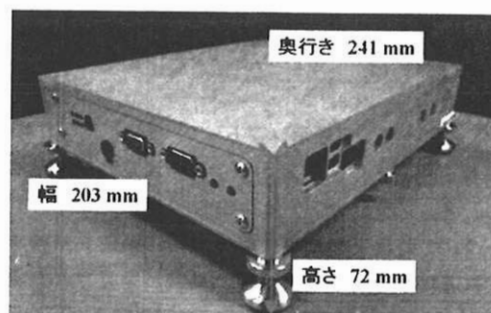


Fig.8 Compact Size On-board Sensing System for Condition Monitoring of Railway Tracks



Fig.9 Field Test

参 考 文 献

- 1) 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
- 2) 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
- 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, ブ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) 森裕貴, 大野寛之, 佐藤安弘, 竹内俊裕, 網島均, ブローブ車両の現状と軌道の保守例について, 交通研フォーラム 2011 講演概要, pp.109-110
- 5) H. Tsunashima, T. Kojima, A. Matsumoto and T. Mizuma : Condition monitoring of railway track using in-service vehicle, Japanese Railway Engineering, No. 161, 2008
- 6) 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
- 7) 森裕貴, 緒方正剛, 水間毅, 網島均, 可搬型ブ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