

講演6. 地方鉄道における営業車両を用いた動的軌道状態把握の取組

交通システム研究部

※小野 寛典 佐藤 安弘

篠田 憲幸 (客員研究員) 緒方 正剛 (客員研究員)

1. はじめに

鉄道は軌道により車両を支持・案内していることから、軌道の状態が走行安全性に大きく影響を与える。軌道は列車が繰り返し走行することで徐々に変形するため、鉄道事業者は軌道の本来あるべき形状からのずれ量である軌道変位を定期的に計測し、その結果を基に整備を行い、軌道の状態を管理している。列車の荷重が加わることで、軌道は一時的に変形を生じることから、本来、荷重が負荷された状態で軌道変位を計測することが望ましい。しかし地方鉄道では、コストなどの理由により、幹線鉄道で活用されている軌道検測車などの動的な軌道検査が導入できない事業者も少なくない。そこで、当研究所では営業車両を用いて動的な軌道状態を効率的に把握する手法の研究に取り組んでいる。軌道状態を検査するための軌道変位の測定項目に対応するそれぞれの手法について紹介する。

2. 軌道変位による軌道状態の管理

軌道の状態は、図1に示す5種類の変位量で主に管理される。

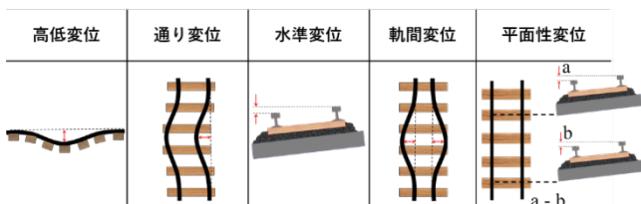


図1 軌道変位の種類

図1において、レールの高さ方向の凹凸は高低変位により、レールの左右方向の凹凸は通り変位により、左右のレールの高さの差は水準変位によりそれぞれ管理される。また、左右レールの間隔は軌間変位により管理される。曲線部においては列車の走行に伴い比

較的大きな横圧（左右方向の力）がレールに作用する一方で、木まくらぎの劣化等によって大くぎによるレール締結力が低下すると、軌間拡大（左右のレール間隔が拡がる状態）が発生し、脱線のリスクが高まる。さらに、線路方向に一定間隔を隔てた2箇所の水準変位の差は平面性変位として管理され、軌道のねじれを示す。軌道のねじれが過度に生じると台車の4つの車輪は3点支持に近い状態となり、輪重が小さくなる車輪が生じることから、脱線のリスクが高まる。

これらの軌道変位は、軌道検測車、簡易軌道検測装置または手検測により定期的に計測される。軌道検測車では、荷重が負荷された状態で計測する動的軌道検測が可能であるものの、地方鉄道路線に導入するには非常に高価であり、一方で、簡易軌道検測装置または手検測では、車両の荷重がレールに作用しない静的軌道検測となり、1日に計測できる距離が限られる。

3. 営業車両を用いた動的軌道状態把握の取組

そこで当研究所では、加速度センサなどの機材の低価格化・小型軽量化を背景に、軌道変位を精密に計測できなくとも安全上注意すべき箇所を効率的に把握する手法について、検討を行ってきた。比較的安価なセンサを既存の営業車両に設置することで、動的な軌道状態を効率的かつ高頻度に把握することが可能と考えられる。こうした考えに基づき、前述した5種類の軌道変位に対し、高低変位と通り変位の要注意箇所については、車両動揺との関係に基づき把握する手法を提案した。また、軌間拡大の要注意箇所については、小型カメラで撮影した走行中の車輪／レール接触関係に基づき把握する手法を提案した。さらに、水準変位及び平面性変位については、LiDARセンサにより車体からレールの変位量を計測し、ジャイロセンサにより車体の傾斜角度を補正することにより把握する手法を提案した。以下にそれぞれの概要を述べる。

3. 1. 高低変位の要注意箇所の把握¹⁾

スマートフォンなどの加速度センサ、ジャイロセンサ、GPS受信機などを内蔵した小型端末(図2参照)を、営業車両に搭載し、車両動揺を計測する。



図2 小型端末による車両動揺の計測

実路線において車両動揺と高低変位を計測し、両者の関係性について調査した結果、車両の上下振動加速度と軌道の高低変位との間には相関関係があることから、軌道変位のデータのない期間でも、車両の上下振動加速度の計測値から、軌道の上下変位の程度を推定することが可能であると考えられる。実際の軌道保守に応用するため、ここでは地方鉄道における軌道整備目標値として、高低変位の19 mmに相当する上下振動加速度2.1 m/s²を目標値として設定した。なお、高低変位との相関関係は車両や線区の運行速度等によって変化するので、上下振動加速度の目標値は個別に設定する必要がある。

車両動揺に基づき要注意箇所を把握する手法を導入した地方鉄道事業者(以下、当該鉄道事業者)では、従来、年1回行われる軌道検測車による動的軌道検測の結果に基づいて軌道の保守作業を実施していた。そのため、軌道検測直後に保守作業が集中してしまうことや、次回の軌道検測までの1年間、要注意箇所を把握するのが困難という課題があった。

当該鉄道事業者において、高低変位の軌道整備目標値超過箇所を過去5年間調査した結果を表1に示す。車両動揺に基づく手法を開始した2020年では高低変位の目標値超過箇所が左右のレール合計で333箇所であったが、その後箇所数は減少傾向となっており、2024年では154箇所となりほぼ半減した。このように、年1回の軌道検測に加え、車両動揺に基づき動的軌道状態を高頻度で把握することで、軌道状態をより適切に保つことが可能となった。

表1 高低変位の目標値超過箇所推移

年	高低変位超過箇所数		
	左レール	右レール	合計
2020	166	167	333
2021	101	102	203
2022	140	143	283
2023	95	85	180
2024	82	72	154

3. 2. 通り変位の要注意箇所の把握²⁾

通り変位は、車両動揺の内、車両の上下方向軸に対する回転であるヨー角速度と関係性があると考えられる。

ヨー角速度と曲線半径の関係は、一般に以下の式(1)で表されることが知られている。

$$Y = V/R \quad (1)$$

ここで、Yはヨー角速度(rad/s)、Vは速度(m/s)、Rは曲線半径(m)である。

一方、一般に通り変位は10m弦の正矢として求められるが、曲線における半径と10m弦の正矢との関係は以下の式(2)で表されることが知られている。

$$D = 12500/R \quad (2)$$

(1)式及び(2)式より、速度を一定とすればYとDに比例関係があることが理解できる。従って、列車によって各地点の通過速度があまり変わらない前提で、ヨー角速度にもとづき通り変位の推定を行うこととしても大きな問題は生じないと考えられる。

ヨー角速度と通り変位の関係を調べるため、実路線において各々の10m毎の最大値を算出し、この値をもとに散布図を作成した。曲線部の線形成分を除かない場合の散布図を図3に示す。決定係数は0.85で、強い相関を示していた。この関係から、3. 1. と同様にしてヨー角速度の目標値を設定することにより、ヨー角速度から通り変位の要注意箇所を把握可能と考える。なお、車両のヨー角速度として現れにくい波長の短い通り変位の把握法については今後の課題としている。

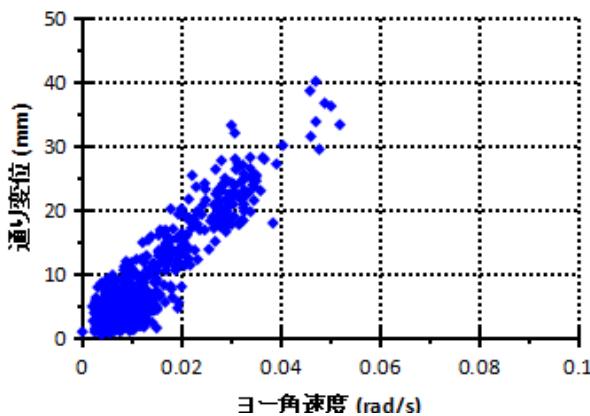


図3 ヨー角速度と通り変位の関係
(線形成分を含む)

3. 3. 軌間拡大の要注意箇所の把握³⁾

急曲線走行時には、図4に示すように外軌側（曲線外側）の車輪フランジ部がレールと強く接触する。軌間が拡大すると内軌側（曲線内側）の車輪がレール上に掛かる幅（以下、車輪掛けり量）が減少し、車輪掛けり量がゼロとなれば内軌側車輪は軌間に内に脱落し脱線に至る。そこで、軌間そのものではなく、内軌側の車輪掛けり量に注目することとし、小型カメラで撮影した内軌側車輪の外面とレール頭部外側面との間隔を、画像処理によって把握する手法を検討した。

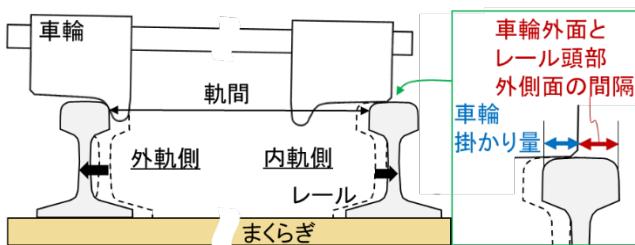


図4 軌間拡大による車輪掛けり量の減少

実路線で撮影した映像及びその画像処理過程の一例を図5に示す。まずは図5中に破線で示すように、車輪側は反フランジ側リム部のエッジを、レール側は軌間外側の頭部端のエッジをそれぞれ抽出する。次に、車輪／レール接触位置付近の高さにおける車輪側エッジとレール側エッジの水平距離をピクセル数で表した値（以下、指標値）を求める。指標値の正方向への増大は車輪掛けり量の減少を意味する。半径400mの曲線を含む区間において、指標値を求めた一例を図6上部に示す。同図から、指標値は直線区間において負の値を示すが、当該曲線部においては正とな

る箇所が存在する。このとき内軌側車輪の外面はレール頭部外側面よりも軌間内方にある。このことは、図6下部に示す実験実施日の約2か月後に同区間において簡易軌道検測装置により計測された軌間変位の結果から妥当といえる。

なお、映像を再生して定性的に車輪掛けり量の小さい箇所を見つけることは可能である。また、指標値の大きい箇所については、図5のように実際の映像とともに現象を確認すれば、対策の必要性を理解しやすいと考えられる。

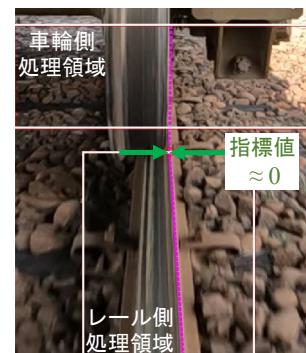


図5 映像の車輪付近拡大図と画像処理過程

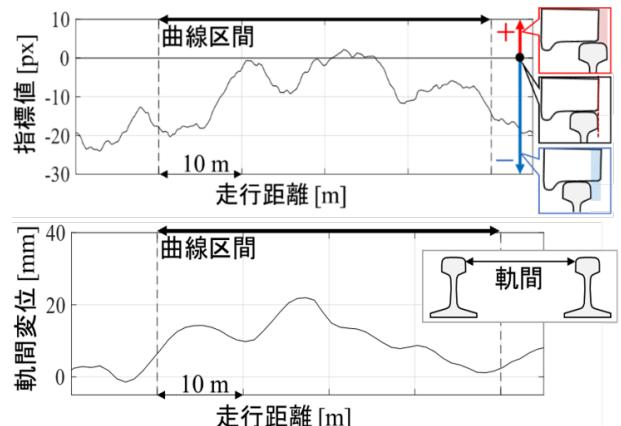


図6 同一区間における指標値の計算結果と軌間変位

3. 4. 水準変位及び平面性変位の要注意箇所の把握

3. 4. 1. センサの構成⁴⁾

営業車両の床下に設置したセンサにより、車体と左右それぞれのレールとの変位量（距離）を計測し、左右のレールの高さの差を求めるとともに、車両動揺等により車体が軌道に対し傾いている可能性があるため、ジャイロセンサにより車体の傾斜角度を補正し、水準変位を算出する。図7に示すように、コストやサンプリングレート、検知範囲などを考慮し、LiDARセンサを用いて距離を計測した。

3. 4. 2. 水準変位の計測結果

実路線の約 600m の区間において本システムで計測した水準変位と、同区間において簡易軌道検測装置により計測された水準変位の関係性を示した散布図を図 8 に示す。同図より、計測値にはばらつきが生じているが、本システムで計測した値が水準変位の傾向をよく捉えていることが読み取れる。データがばらつく原因については、LiDAR センサが受ける外乱によるレール高さの誤検知等が考えられるが、簡易軌道検測装置による静的な検測結果と動的な軌道変位との差異による影響である可能性も考えられる。

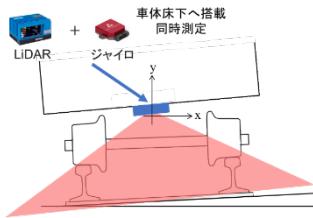


図 7 センサの構成

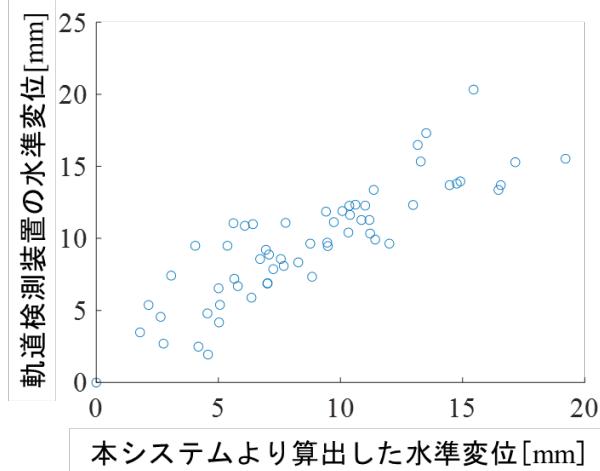


図 8 水準変位計測結果の検証

3. 4. 3. 平面性変位の計測結果

前項で計測、算出した水準変位のデータをもとに、線路方向に一定間隔を隔てた 2 箇所の水準変位の差として平面性変位を算出した。今回は比較対象の軌道検測装置に合わせ、5m の間隔をとった。半径 800m の曲線部における平面性変位の計測結果を図 9 に示す。橙が従来の軌道検測装置の結果、青が本システムで算出しフィルタ処理をした結果である。当該曲線は、70mm のカントが設定されている。よって、曲線部と直線部の間に挿入される緩和曲線において、構造上、軌道のねじれが生じる。この緩和曲線区間（赤矢印の区間）に注目すると、従来の軌道検測装置と遜色なく、

平面性変位が計測できていることが確認できる。一方、キロ程 19840m 付近では、両者に大きな差が確認できる。この原因については、水準変位の計測結果を元にしているため、前項と同様に、LiDAR センサが受ける外乱によるレール高さの誤検知等による影響が考えられ、今後の課題である。

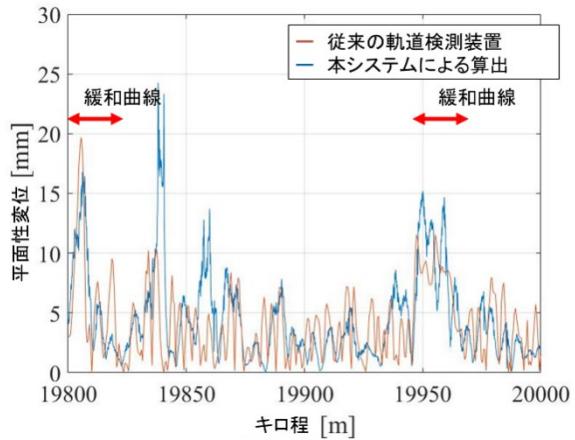


図 9 従来の軌道検測装置と本システムの平面性変位計測結果

4. まとめ

営業車両を用いて動的な軌道状態を把握する手法について紹介した。このうち、高低変位に対応する手法については、一部事業者に導入されつつある一方で、近年取組を開始した通り変位、水準変位及び平面性変位に対応する手法の他、軌間拡大に対応する手法を含め、地方鉄道への導入に向け検討を進める。

最後に、計測実験にご協力いただいた鉄道事業者に謝意を表します。

参考文献

- 1) 緒方ほか, "地方鉄道を対象とした列車動揺データに基づく軌道監視手法の検討", 交通研フォーラム 2022, pp.55-56 (2022)
- 2) 小野ほか, "車両動揺と軌道の通り変位の関係性の考察", 土木学会鉄道工学シンポジウム論文集, Vol. 29, No. 1, pp.195-202 (2025)
- 3) 一柳ほか, "車輪／レール接触関係にもとづく軌間拡大箇所の検出方法", 交通研フォーラム 2024, pp.71-72 (2024)
- 4) 小野ほか, "地方鉄道を対象とした車上センサを用いた軌道の水準変位計測手法の検討", 交通研フォーラム 2024, pp.17-20 (2024)