

車両の走行安全を確保する 軌道変位の波形を管理する



田中 博文
Hirofumi Tanaka
軌道技術研究部
軌道管理研究室
主任研究員



斉藤 大樹
Daiki Saito
軌道技術研究部
軌道管理研究室
研究員



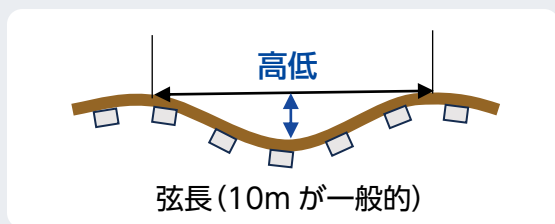
坪川 洋友
Yosuke Tsubokawa
軌道技術研究部
軌道管理研究室長

はじめに

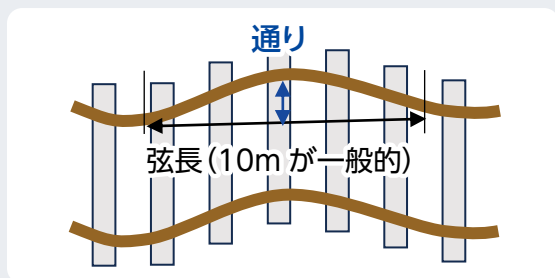
一般的な鉄道の線路は、レールをまくらぎとバラストが支える構造となっています。簡易な構造であるため低コストで敷設できる一方で、列車の走行にともなってレールが正規の位置から徐々にずれていくことがあります。このレールの幾何学的なずれを管理するために、**図1**に示すようにいくつかの測定項目があり、これら

をまとめて軌道変位（または軌道狂い）とよんでいます。この軌道変位が大きくなると列車の走行安全性や乗り心地が低下するため、各鉄道事業者では定期的に線路の軌道変位を測定し、あらかじめ定めたしきい値を超えないようにmm単位で線路の保守を行っています。本稿では、軌道変位のうち、主にレール長手方向の線路の幾何学的形状を波形として捉え管理する方

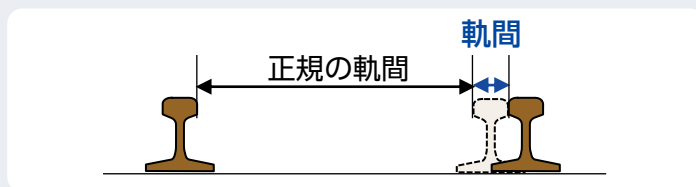
図1 軌道変位の測定項目と計測方法



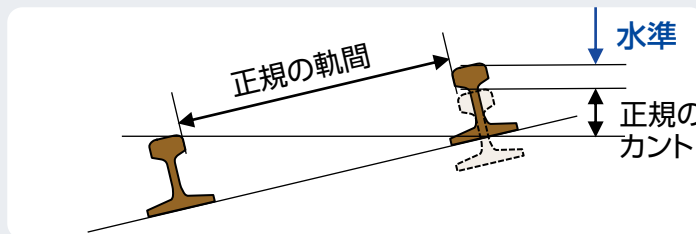
2点間に張った糸(弦)の中央点での
弦とレールの上下方向の離れ



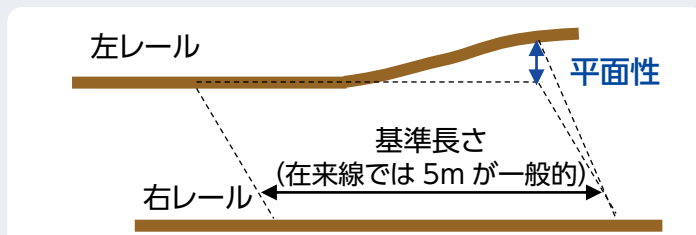
2点間に張った糸(弦)の中央点での
弦とレールの左右方向の離れ



左右レールの最短距離



左右レールの高さの差



2点間の水準の差

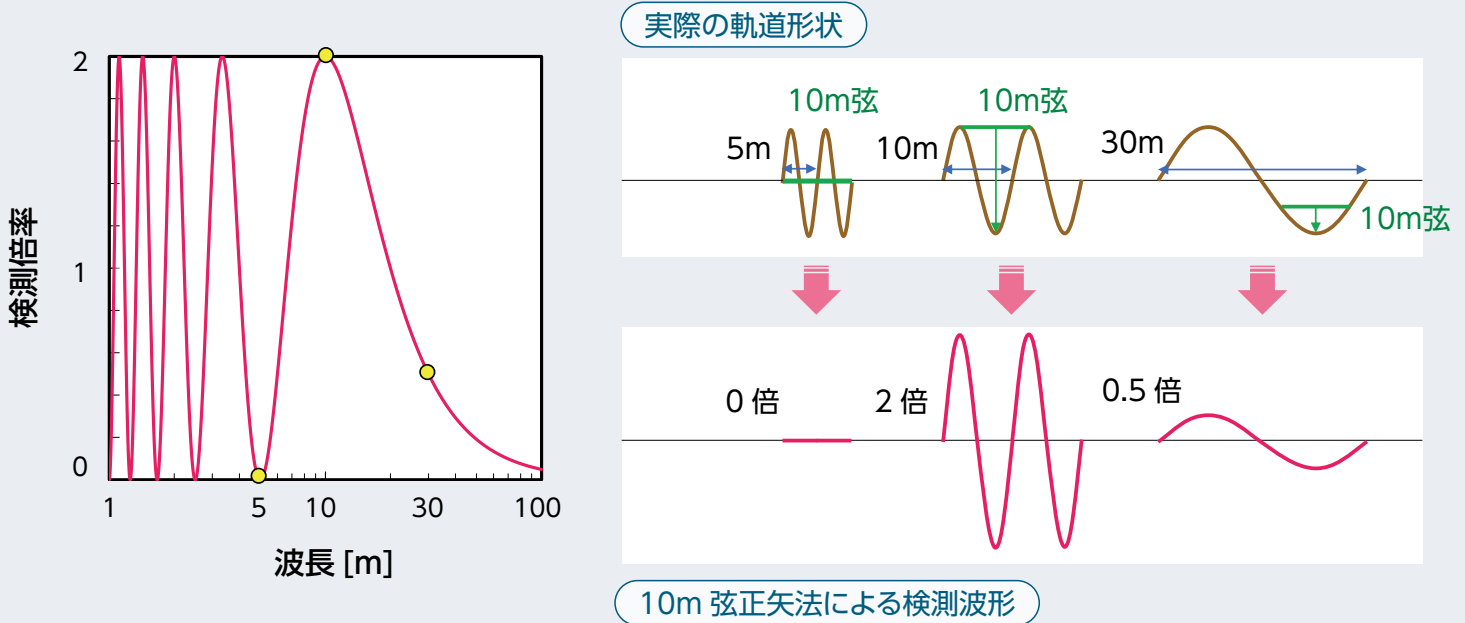


図2 10m弦正矢法の検測特性と検測波形のイメージ

法や、列車動揺を活用した軌道状態の管理、軌道変位を波形として管理するためのツールなどについて説明します。

正矢法と弦管理

軌道変位のうち、高低と通りはレールの長手方向の歪み^{ゆが}を管理する項目です。日本では、[図1](#)に示すように、レールに一定長さの糸(弦)を張って、その中央点での弦とレールとの離れを測定します。この方法は、正矢法^{せいやほう}とよばれており、通常は10mの弦が用いられています。糸と定規があれば測定できる一方で、人力で測定する際は大変な労力がかかっていました。そこで、線路を走行する列車から軌道変位を測定するために、1920年代に最初の「軌道検測車」が製作されました。軌道検測車では直接糸を張るかわりに、レーザーなどを基準としてレールの長手方向の歪みを測定しています。なお、軌道検測車が走行していない路線では、簡易なトロリー式の軌道検測装置が用いられている場合もあります。これらの技術開発によって、0.25m間隔で連続的に軌道変位が測定できるようになりました。最近では、営業車に小型化された軌道検測装置を搭載して、高頻度に軌道変位を

測っている事業者もあります¹⁾。

ここで、正矢法で軌道を測定すると、実際の軌道形状とは少し異なる形の波形が得られます。[図2](#)に、10m弦正矢法の検測特性と検測波形のイメージを示します。前述のように正矢法では、一定長さの糸(弦)を用いて両端の2点と中央点との相対的なずれ量を測定しています。そのため、10m弦の場合は、波長10mの軌道変位に対しては検出倍率が2倍となり感度が高いのですが、波長5mの軌道変位に対しては検出倍率が0となり検出できません。また、波長の長い軌道変位の検出倍率は小さくなっていき、例えば波長30mの軌道変位は振幅が実際の線路の歪みの半分になります。なお、実際の線路の歪みにはさまざまな波長の成分が含まれているので、[図2](#)のように単純な形にはなりません。しかし、在来線の一般的な走行速度では、鉄道車両は波長10m程度の軌道変位に対して揺れやすいことがわかっており、この波長に対する感度の高い10m弦正矢法の波形で軌道変位を管理することは合理的と考えられています。

線路のキロ程

線路には1km程度ごとにキロポスト(キロ程

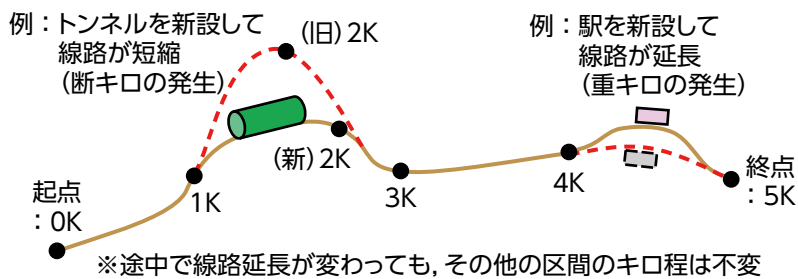
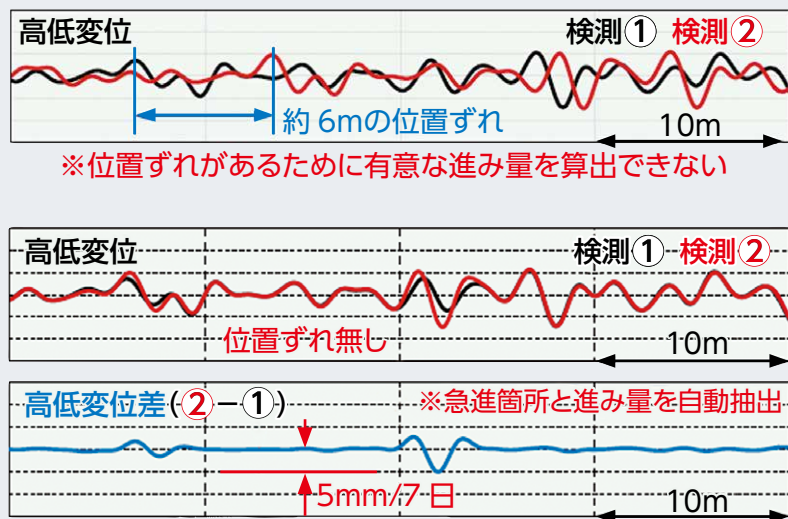


図1 線路のキロ程と重キロ・断キロ

軌道変位の波形を管理する際に、そのデータが示す場所の正確さが重要になります。鉄道では、線路の場所を「キロ程」で管理しています。キロ程は、線路の起点から延長とおおむね等しいですが、図Iに示すように工事などで線路の長さが変わった場合には、その区間に重複（重キロ）や中断（断キロ）を挿入して、キロ程の変更が線路全体に及ばないように管理しています。したがって、キロ程は、「線路の住所」とも言えます。

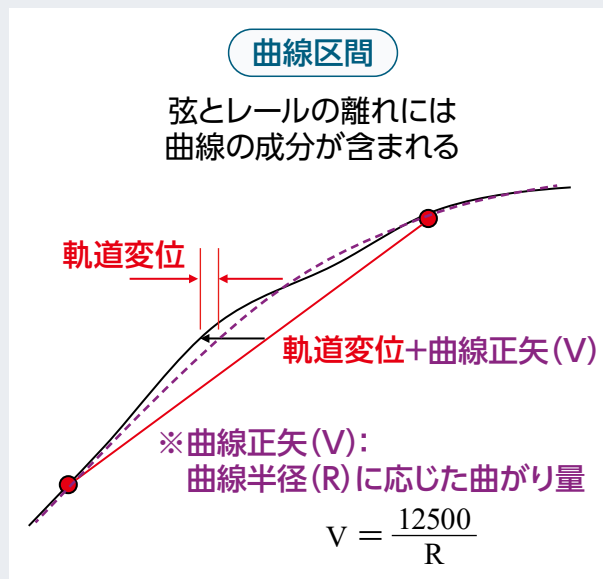
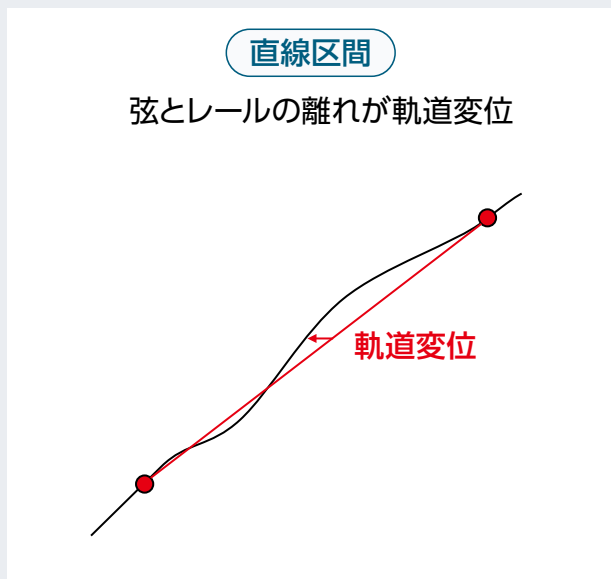
コラム：線路のキロ程

図3 相互相関法による高精度なキロ程あわせ



標)が設置されており、キロ程で管理されています。さらに、軌道検測車が走行する路線の多くでは、キロポストの設置箇所にデータデポという装置が線路内に設置されており、それを軌道検測車が通過する際に毎回検知しています。この検知信号を使用して、軌道変位の波形にキロ程を付与しています。しかし、この方法で測定された異なる時期に測定した波形には車輪の空転などによる微小な位置ずれが残っており、波形の引き算によって軌道変位が悪くなっている箇所(劣化箇所)を単純には確認できないという課題がありました。これに対し、鉄道総研では、「相互相関法」という技術を開発しました²⁾。この方法は、図3に示すように2つの波形間のパターンマッチングを行って微小な位置ずれを解消するものです。この技術の開発によって、営業車で高頻度に取得された軌道変位のデータを効率的に処理し、軌道変位の劣化箇所を自動抽出した

図4 通り変位の測定イメージ



り、劣化状況の推移を予測できるようになりました。

基準線除去と軌道変位

図4に、通り変位の測定イメージを示します。直線区間においてレールの長手方向の歪みを10m弦正矢法で測定する場合、正規の位置にレールがあれば通り変位の測定値は0mmとなります。したがって、測定値が管理値を超えないように保守するだけで問題ありません。一方で、曲線区間においてはその曲線半径に応じてレールはもともと曲がっているため、正規の位置にレールがあっても通り変位は0mmとはなりません。したがって、曲線半径に応じた曲がり量（曲線正矢）を測定値から差し引いた値が管理値を超えないように保守する必要があります。なお、縦曲線区間の高低変位については同様にその影響が含まれますが、縦曲線は平面曲線と比較して半径が大きいため、高低変位に与える影響は小さいです。

ここで、通り変位の測定値に含まれる曲線正矢は、図4に示したように数式で簡単に求めることができます。そのためには正確な曲線半径と曲線の位置が必要になりますが、古い線路な

どではこれらが長年管理しているうちにずれてしまっている場合もあります。これに対応する方法としては、図5に示すように通り変位データに含まれる曲線正矢の成分を移動平均処理などの数学的な方法で除去する方法があります。この処理のことを基準線除去[®]とよんでおり、測定データに対して基準線除去した波形が

基準線除去

曲線区間では、曲線半径に起因する通り変位の設計正矢のほかにも、鉄道車両のスムーズな走行のためにカント[®]やスラック[®]が設定されていることがあります。したがって、直線と曲線の間に設けられる緩和曲線においては、設計カントや設計スラックが徐々に変化します。しかしながら、平面性および軌間は、幾何学的な寸法が走行安全に直結するので、基準線除去を行うことは好ましくありません。

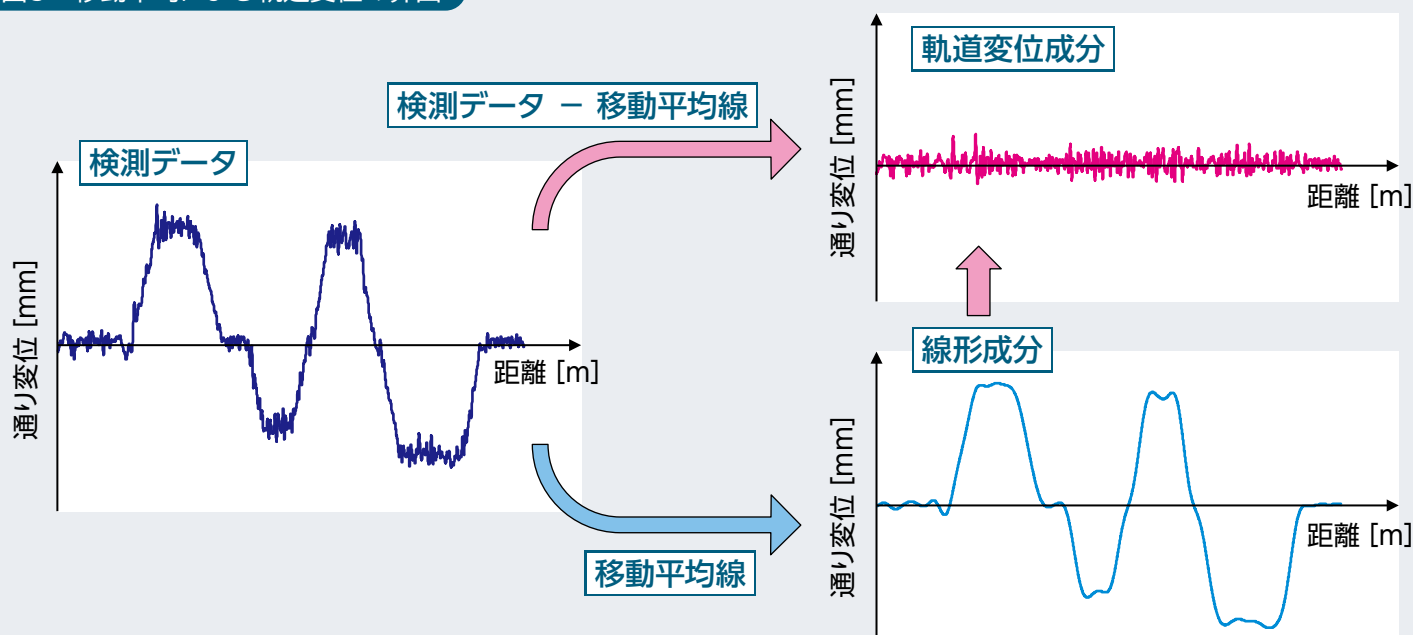
カント

鉄道車両が曲線を通過するときには、曲線半径と列車速度に応じて曲線外側に遠心力が作用し、走行安全性や乗り心地に悪影響を及ぼします。この影響を打ち消すために曲線区間の外側のレールを内側のレールよりも高くします。この曲線区間の左右レールの高さの差をカントと言います。

スラック

鉄道車両が急な曲線を通過するときには、台車の前後軸が固定されているため、円滑な走行に影響を及ぼします。この影響を緩和するために曲線区間の左右レールの間隔を所定の値よりも広くします。この曲線区間の左右レールの拡大量をスラックと言います。

図5 移動平均による軌道変位の算出



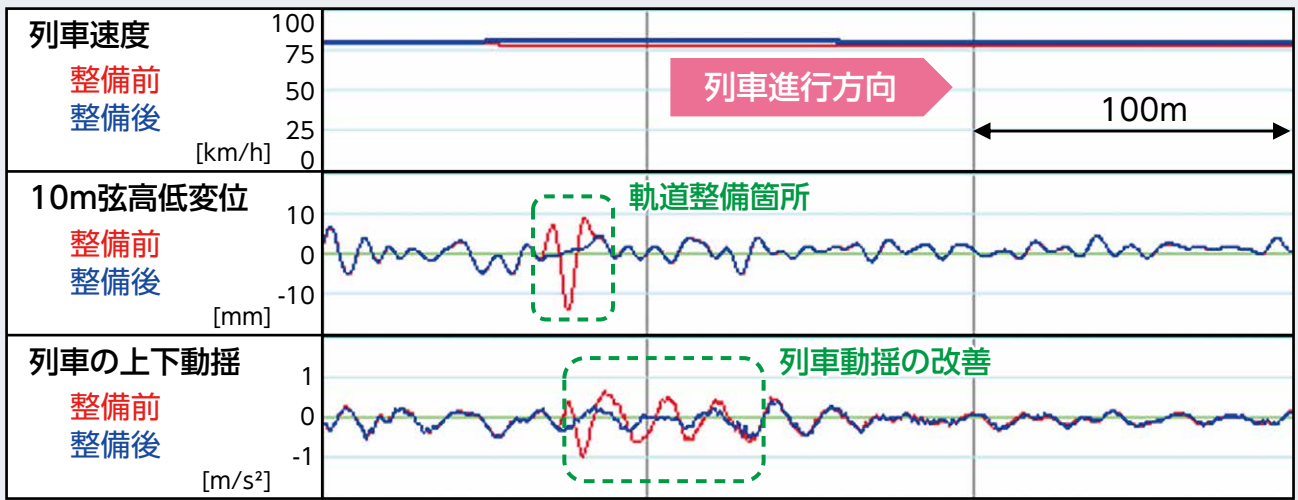


図6 軌道整備前後の列車の上下動揺と10m弦高低変位の波形例

正規の位置からのズレとして通り変位の管理対象になります。

列車動揺による軌道状態の管理

冒頭で述べたように軌道変位が大きくなると列車の走行安全性や乗り心地が低下しますが、10m弦正矢法の波形は列車動揺との相関が高いことがわかっています。言い換えれば、列車動揺を管理すれば、ある程度軌道状態が管理できると考えることができます。図6の例は、軌道整備前後の列車の上下動揺と高低変位の波形

の例です。列車動揺の波形は、図7に示す鉄道総研で開発したスマートフォン用の車上計測アプリを用いて営業車両で測定したものです。スマートフォンは、加速度センサーやGPSレシーバーを内蔵しており、低コストに列車動揺管理に必要なデータを取得できます³⁾。図6より、高低変位の大きな箇所では上下動揺が大きくなっており、またこの箇所を整備することで上下動揺が低減していることがわかります。ただし、列車動揺の管理だけでは、軌間の拡大などを検知することは困難です。これについては、鉄道

図7 車上で列車動揺の波形を簡易に計測するために開発したアプリケーション



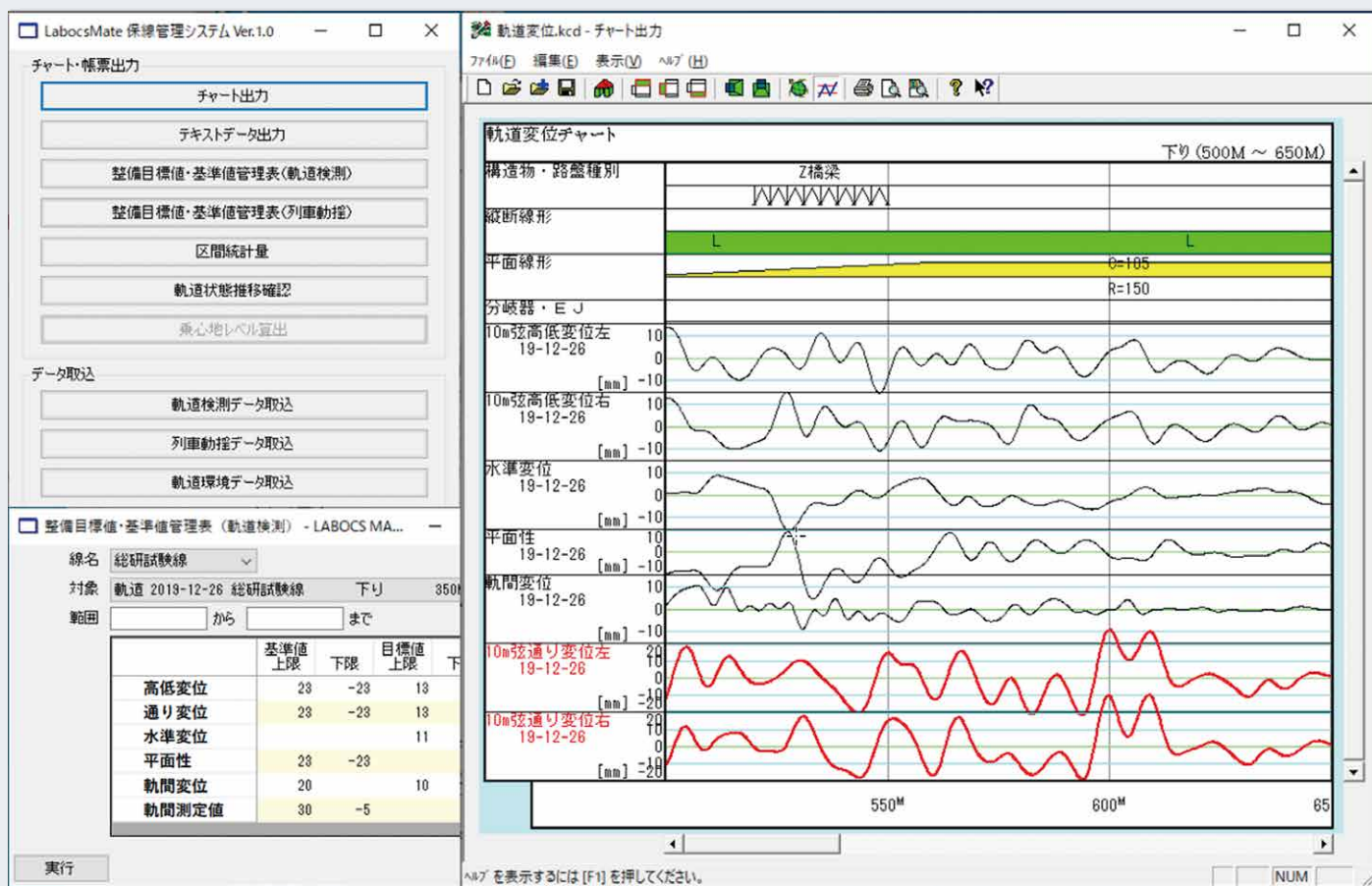


図8 保線管理システム：LABOCS-MATEの画面例

総研では4Kカメラやスマートフォンで取得した列車前方画像を用いてまくらぎの劣化を診断する方法も開発しています⁴⁾。

走行安全性の管理をサポートする LABOCS

軌道変位や列車動揺の波形を適切に処理し、管理に活用するためには高度な専門知識を必要とします。このため、鉄道総研では旧国鉄時代から、「軌道保守管理データベースシステム：LABOCS (ラボックス)」という、主に軌道変位波形の各種のデータ分析に特化した専用のソフトウェアの開発を進めてきており、JR各社などで軌道管理に欠かせないツールとして用いられております。近年では、図8に示すような軌道変位管理に必要な最低限の機能をパッケージ化した「保線管理システム：LABOCS-MATE (ラボックス・メイト)」を開発しました。このようなシステムを活用することで、従来に比べ

て低コストで効率的な軌道変位の波形の管理が実現できるようになります。

おわりに

ここでは、列車を安全に走行させるために数mm単位で行われている軌道変位の管理について概説しました。鉄道総研では、今後も軌道変位を波形として捉えて効率的に管理するための研究開発を続けていくとともに、スマートフォンの活用など新たな管理方法の提案などにも取り組んでいきたいと考えています。RRR

文献

- 1) 三和雅史, 矢澤英治, 佐野弘典, 山口剛士: 高頻度の検出で軌道の状態変化を診る, RRR, Vol.73, No.2, pp.12-15, 2016
- 2) 田中博文, 山本修平, 大島崇史, 三和雅史: 高頻度検出データに対応した軌道変位の局所的急進箇所抽出・予測法, 鉄道総研報告, Vol.31, No.12, pp.41-46, 2017
- 3) 田中博文: 携帯情報端末を活用した簡易な列車巡視支援方法, 日本鉄道施設協会誌, Vol.61, No.10, pp.18-21, 2023
- 4) 坪川洋友, 糸井謙介, 長峯望, 合田航, 前田梨帆: 列車前方画像による木まくらぎの劣化診断, RRR, Vol.79, No.7, pp.50-55, 2022