

特集：軌道技術

低コスト化・省力化に貢献する軌道技術

三和 雅史*

Track Technology for Reducing Maintenance Cost and Labor Work

Masashi MIWA

From the viewpoint of safe train operation, railway track condition must also be kept in a satisfactory level by appropriate track inspection and maintenance activities. On the other hand, from the viewpoint of management soundness, it is highly desired to develop track technologies for cost reduction of both track inspection and maintenance. For developing the technologies, it is important to focus on the research area in terms of automation and labor saving by applying ICT and AI techniques progressing in recent years significantly. This paper describes the recent RTRI's R&D for these track technologies.

キーワード：軌道構造，維持管理，軌道改良，画像処理，機械学習

1. はじめに

鉄道における長大設備である軌道は、列車の繰り返し通過により劣化するため、その維持管理に多くのコストや手間を要している。一方、少子化・高齢化や労働人口の減少が進むに従い、鉄道従事者の確保が困難になりつつあるため、軌道の検査や保守において、省力化、省人化、低コスト化のニーズは極めて高い状況にある。

こうしたニーズは、特に新しいものではなく、以前から例えば軌道構造の強化や直結系軌道、省力化軌道等の開発・導入により検査や保守のコストをハード的に削減する取り組みが続けられてきたが、大きな初期コストを要することが課題であった。そのため、これらのハード的施策の導入コストを抑制可能な新しい構造や施工法の開発が続けられている。

一方、既存データの活用、或いは新たなデータの取得・分析が可能なシステムの開発・導入により、省力化等をソフト的に実現する研究開発も続けられている。特に、近年ではICTやAIをキーワードとする情報処理技術の発展により、大量の情報を短時間で処理できるようになった結果、設備の状態診断や保守計画の策定等の自動化が進みつつある。このようなデータの科学的な分析による診断等が高精度化すると、検査の頻度や周期の他、劣化指標の管理値を見直すことで、検査や保守の頻度や数量が適正化され、維持管理コストの削減を実現できる。

更に、上記のハード的・ソフト的な施策を組み合わせることで省力化することも可能であり、保有設備・機械のスリム化はその一例である。一般に、保有する設備・機械の数や規模に応じた検査や保守、管理のためには手間やコストが必要であるため、車両・運転条件といった供用条

件に見合った規模に適正化することは、コスト削減に有効である。こうした検討には、軌道の設計の観点と、蓄積した軌道状態や保守実績に関するデータ分析の両方が重要であり、スリム化に伴って生じる種々の課題を考慮しつつ、具体的な施策・方策を検討する必要がある。

以下では、このような低コスト化・省力化に関する軌道技術に関する鉄道総研における最近の研究の動向や事例を紹介する。

2. 軌道の構造の低コスト化・省力化

2.1 設備・機械の規模の適正化

2.1.1 まくらぎ間隔の拡大¹⁾

木まくらぎ構造を主体とする線区では、木まくらぎの腐朽によってレールを十分に締結できなくなり、軌間内脱線が発生する場合がある。このため、曲線を中心に木まくらぎの連続不良本数管理や個別状態管理が行われているが、膨大な本数のまくらぎを目視で検査する労力は鉄道事業者にとって大きな負担である。

一方、木まくらぎをPCまくらぎに交換し、軌間内脱線の発生を防止する施策が行われている。近年では、車両の軽量化が進み、また貨物列車の走行区間が縮小する等、軌道の供用条件が変わり、軌道に作用する列車荷重は、以前より小さくなっていることが多い。よって、木まくらぎをPCまくらぎ化するのに合わせて、まくらぎ間隔を拡大し、管理対象数を減らすことが考えられる。そこで、供用条件を考慮したまくらぎ間隔拡大の検討法を以下のように開発した。

実物大載荷試験により、まくらぎ間隔や道床状態が軌道沈下と与える影響を評価し、バラスト軌道の適用限界と軌道沈下式に用いる係数を提案した。また、任意のまくらぎ間隔における群杭効果を考慮した道床横抵抗力の

* 軌道技術研究部長

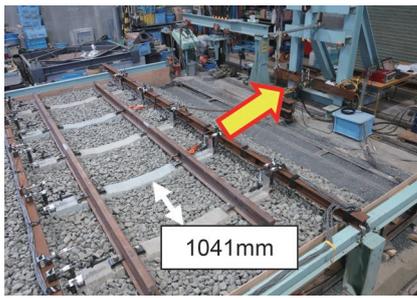


図1 実物大軌道を用いた道床横抵抗力推定式の精度検証試験

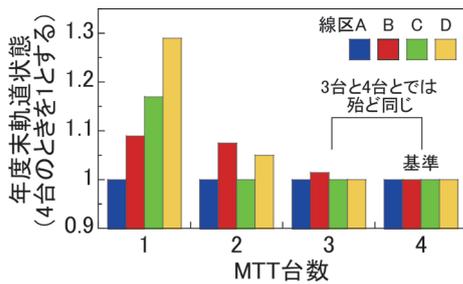


図2 MTT 保有台数に関する検討例

推定式を提案し、検証試験により妥当性を確認した(図1)。更に、レール締結装置の性能照査に用いる変動係数について、供用条件に対応する算定法と適用する値を提案した。そして、走行安全性を確保できるまくらぎ間隔の限度を曲線半径別に示した。

上記の考え方に基づくまくらぎ間隔の拡大については、営業線での試験敷設が開始されており、今後は敷設後の状況を確認しながら、適用範囲を広げる予定である。

2.1.2 保守用機械の保有台数の適正化²⁾

一般に、軌道保守に用いるマルチ(MTT)やレール削正車、道床交換機は高価であるため、多くの台数を導入することが難しい。一方、こうした保守用機械については、更新費用の他、検査や消耗品交換等の維持費が必要であるため、必要以上に多く保有するのは経済的ではない。そこで、上記の各保守用機械の保有台数を検討可能なツールとして、複数台対応版の軌道変位保守計画システム(mMTS)、レール削正計画システム(mRGS)、道床交換計画システム(NDS)を開発した。

これらは、保守用機械が稼働対象とするエリア内の軌道変位やレール状態、道床交換必要箇所等を入力として、一定の軌道状態レベルの維持や保守必要箇所への保守の実施といった制約下で、複数台の保守用機械の運用を想定した保守計画を作成できる。

図2は約500kmの線区を4保線区で管理しているエリアにおいて、保有するMTTを1~4台とした場合に維持できる軌道状態(高低変位標準偏差)を試算した結果を整理した例である。4台の場合に維持できる軌道状

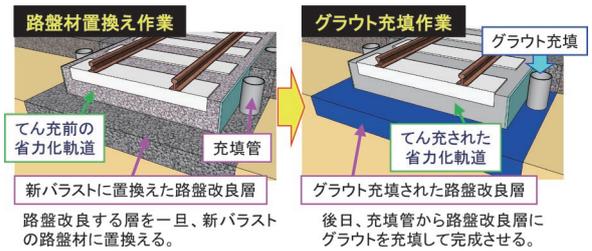


図3 既設線省力化軌道と同時に施工可能なあと充填路盤改良工法

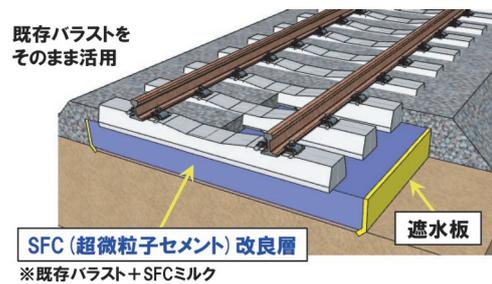


図4 低コストてん充道床軌道(非噴泥箇所)

態を1とした場合、3台に減らしても維持できる軌道状態は殆ど変わらない。一方、2台、1台と減らすと軌道状態が悪化する線区が増えていく様子が分かる。こうした結果を用いて、保有台数の適正値を検討することができる。

2.2 軌道保守コストを低減する構造への改良

2.2.1 既設線省力化軌道用路盤改良法³⁾

軟弱路盤上に既設線省力化軌道を施工する場合、路盤改良を検討する必要があるが、これまで短時間の間合いで省力化軌道と同時に施工可能な路盤改良工法は存在しなかった。そこで、図3に示すような、短時間の間合いで施工が可能な路盤改良工法を開発した。

本工法では、軟弱地盤上に省力化軌道と同時に路盤改良層を敷設するため、改良部を新バラストに一旦置き換え、後日グラウト材を充てんして強固な改良層を形成する。これにより、短時間であっても、十分な強度を有する路盤改良層を構築できる。

また、実物大模型試験とてん充道床の曲げ疲労試験により、省力化軌道の沈下特性やてん充道床の疲労破壊特性を評価し、路盤の沈下量とてん充道床の疲労破壊を考慮した設計手法を提案した。

これらの工法や設計手法の有効性については、現地で試験施工を行って確認した。

2.2.2 SFCてん充道床軌道⁴⁾

既設線省力化軌道の一つであるてん充道床軌道の施工性や経済性を向上させるため、グラウト材に超微粒子セ

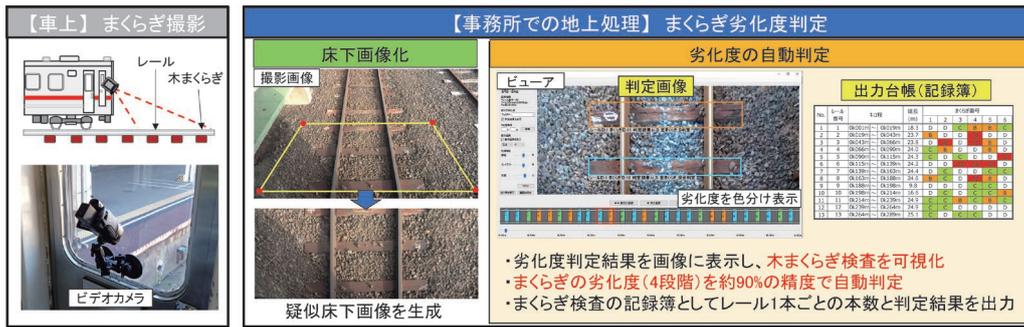


図5 木まくらぎ検査システム



図6 線路周辺画像解析エンジン

メント（SFC）ミルクを用いることで、既存の道床をそのまま固化する低コスト型でん充道床軌道（SFCでん充道床軌道）を図4のように開発した。

この軌道は、路盤強度を一定以上確保できる条件下であれば、噴泥の有無に応じて道床部にSFC改良層を構築することで、幅広い対象箇所への適用が可能である。

開発した施工法について、実物大軌道を構築して繰り返し載荷試験を行った結果、列車が長期間通過した場合を想定した後のまくらぎと路盤の沈下量は十分に小さく、既設線省力化軌道として十分な性能を有することを確認した。また、現地で試験施工を行った結果、一晩で10m程度の施工が可能である他、施工後の高低変位推移は1年以上経過しても安定しており、良好な状態を維持できることを確認した。

3. 軌道の検査の低コスト化・省力化

3.1 木まくらぎ検査システム⁵⁾

2.1.1項で述べたように、木まくらぎ構造を主体とする線区においては、膨大な本数のまくらぎを徒歩、目視で検査する労力は鉄道事業者にとって大きな負担である。

そこで、図5に示すように、市販のビデオカメラを用いて営業列車等の先頭から軌道の画像を撮影し、射影変換により疑似的な床下画像を作成し、Deep Learningと画像処理を適用することで、レール継目の位置の特定と

木まくらぎの抽出・劣化度判定を行うシステムを開発した。このうち、木まくらぎの劣化度判定について、保線技術者が画像から判定した診断結果と本手法による診断結果を比較したところ、まくらぎの劣化度（4段階）を90%以上の精度で評価できることを確認した。また、本手法では、取得した画像を用いて列車速度や走行距離の算出も可能である。

現在、実用化に向けたシステムのGUIの開発等を継続している。

3.2 線路周辺画像解析エンジン⁶⁾

線路の巡視確認業務については、保線係員等が営業列車に添乗し、沿線環境の異常の有無を目視で確認することにより実施されているが、今後、保線従事者が減少することから、自動化が望まれる。そこで、営業列車等の先頭に設置したカメラで撮影した沿線画像から、画像処理と機械学習の技術を応用して建築限界支障物の存在等を自動抽出する線路周辺画像解析エンジンを開発した。

まず、ステレオ映像を用いて撮影時のカメラの位置・姿勢の3次元的な変化を推定し、GNSSの位置情報を補完する自己位置推定技術を開発した。そして、これにより得られるカメラの位置・姿勢情報を用いて構築した3次元空間情報を活用した建築限界支障物検知技術を開発した。本技術では、映像からレールを検出するため、これに対応して推定した線形を考慮した建築限界枠の設定

が可能である。

また、撮影時期が異なる2つの映像から沿線の変化箇所を検出する差分検出技術を開発した。差分検出時には、2時期の映像において同一のシーンを撮影したと推定されるフレームを自動で対応付けて、差分を検出する。そして、差分検出機能の実用性を高めるために、死角等を要因とした変化を差分とせず、また画像から被写体の種別（雑草等）を分類することで、過検出を抑制する技術を開発した。

本研究の一部は、国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施した。

3.3 VR 軌道検査、工事、作業計画支援システム⁷⁾

保線業務では、現地での調査・測定が必要な検査項目が多い。このため、検査の度に現地に出向く必要があり、多大な労力、時間、手間を要している。同様に、工事・作業計画の策定前にも現地へ行って、対象範囲の面積や必要材料数の算定、また支障物の介在等の確認の必要があるが、上記と同様の問題がある。

そこで、車上から、或いは地上での線路及び設備の画像データを活用してPC上で軌道VR空間を構成し、VR空間の中で検査や工事・作業計画策定のための現地調査を行えるシステムを開発している。

図7は列車の先頭で撮影した画像からレールを抽出し、軌道変位を算出した例である。一部で実測値との乖離が存在するものの、概ね整合していることから、軌道内で手押し等の検測装置を使うことなく軌道変位測定が可能である。また、構築した3次元空間内に軌道変位を投影することで、軌道変位が大きな箇所の状況（地上設備の介在等）を確認できるため、軌道変位保守の方法や保守の範囲等を現場へ出向くことなく検討できる。

図8は、列車から撮影した画像を用いてホーム検査（離れ、高さ）や道床形状を測定・把握した例である。ホーム離れ等については、現地での実測値との差（誤差）は平均1%程度であり、現在、精度を更に向上する取り組みを進めている。また、道床についても肩が不足する

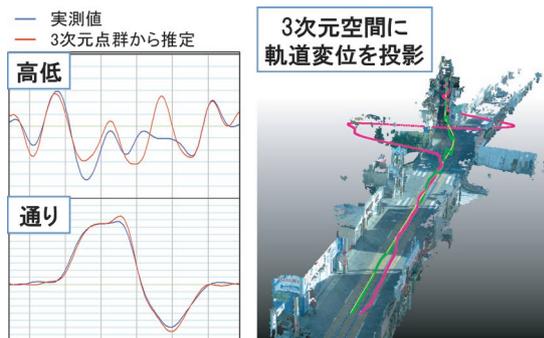


図7 画像による軌道検測結果と表示

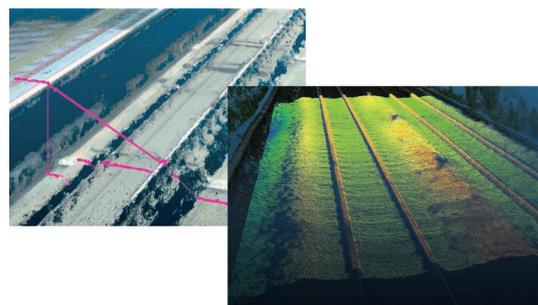


図8 画像によるホーム検査、道床散布箇所検討

箇所等を把握できるため、道床の散布箇所や量を現地へ出向くことなく検討できる。

これらの技術をシステム化することで、現地への往復・立入や保線係員の夜勤が削減されると共に、安全度が向上し、更に列車見張り員等の保安要員・経費も削減できると考えられる。

4. おわりに

現在、鉄道総研では、ここに紹介した技術や成果物の他にも、低コスト化や省力化に有効な各種技術やソリューションの開発を進めている。

今後も鉄道総研の軌道技術開発に対し、ご理解とご協力を頂けると幸いです。

文献

- 1) 弟子丸将, 伊藤孝記, 清水紗希, 山岡大樹: まくらぎ間隔拡大に対応したバラスト軌道の設計法, 鉄道総研報告, Vol.36, No.3, pp.23-28, 2022
- 2) 西島悠太, 三和雅史: MTT保有台数の最適化及びMTT性能を考慮した軌道保守計画, 日本鉄道施設協会誌, 第58巻, 第5号, 2020
- 3) 伊藤孝記, 桃谷尚嗣, 景山隆弘: 既設線省力化軌道用路盤改良の設計法, 鉄道総研報告, Vol.36, No.3, pp.35-40, 2022
- 4) 瀧上翔太, 中村貴久, 高橋貴蔵, 桃谷尚嗣: 噴泥したバラスト軌道を対象としたSFCでん充道床軌道の性能評価, 鉄道総研報告, Vol.36, No.3, pp.41-46, 2022
- 5) 糸井謙介, 長峯望, 合田航, 坪川洋友, 加藤爽: 列車前方画像を用いた木まくらぎ検査手法の精度向上, 第28回鉄道技術連合シンポジウム論文集, SS2-4-5, 2021
- 6) 昆野修平, 川崎恭平, 三島健吾, 三和雅史, 清水惇: 列車巡視支援のための線路周辺画像解析エンジンの開発, 鉄道総研報告, Vol.36, No.3, pp.5-10, 2022
- 7) 三島健吾, 川崎恭平, 昆野修平, 齊藤大樹, 三和雅史: 軌道の維持管理の省力化のための列車前頭画像による軌道状態管理法, 鉄道工学シンポジウム論文集, 第25号, 2021