

軌道分野の省人化技術

軌道技術研究部長 桃谷 尚嗣



1. はじめに

人口減少や少子高齢化による労働力不足が進む中、地域の発展およびCO₂削減の観点から、環境負荷の小さい交通手段である鉄道のネットワークを発展させ、持続させていく必要がある。

既設線では設備の老朽化、熟練技術者および保守費用の不足が課題となっており、特に地域鉄道では維持が困難な路線も多いといった現状にある。一方、今後の鉄道の建設においては、新幹線では全国新幹線鉄道整備法を踏まえた鉄道ネットワークの整備、在来線では連続立体交差化の推進や都市鉄道網の充実による利便性の向上が求められる。

ここで、軌道の種類としてバラスト軌道およびスラブ軌道・弾性まくらぎ直結軌道等の直結系軌道がある。バラスト軌道は既設線に多く、定期的な保守作業が必要とされる。一方、直結系軌道は新設線で多く採用され、基本的にメンテナンスフリーとなる。軌道のメンテナンスでは定期的に軌道の状態を検査し、その結果に応じて補修を行う必要がある。検査には軌道変位検査と軌道部材検査があり、軌道変位検査の結果に基づいてバラストのつき固めやレールの高さ調整を行い、軌道部材検査の結果に基づいて部材の交換や補修等が行われる。

今後の軌道の建設・施工およびメンテナンスに向けては、「運用・管理の革新」、「作業の革新」、「材料・構造の革新」が必要となる。「運用・管理の革新」では「データ共有のためのプラットフォームの構築」、「保守計画策定の自動化・効率化のためのシステムの構築」が望まれる。次に、「作業の革新」では「検査への画像データの活用」、「AIによる検査結果の自動判定」、「保守作業の効率化」が望まれる。さらに、「材料・構造の革新」では「部材の長寿命化・メンテナンスレス化」、

「軌道構造のスリム化、低配筋化」、「施工の簡略化・自動化」が望まれる。

それに加えて、省人化に向けては技術基準との親和性も重要であり、軌道の安全性を担保するための新たな指標を用いた管理手法の確立のための研究開発を進めることも重要と考えられる。

本講演では軌道分野の省人化に寄与するこれまでの研究開発、省人化へ向けた研究開発の方向性および今後の展望について述べる。

2. 省人化に寄与するこれまでの研究開発

2.1 軌道におけるこれまでの研究開発の概要

軌道分野でのこれまでの研究開発における代表的な例として、「運用・管理の革新」に資する技術である「保守管理データベースシステム(LABOCS)」がある。また、「作業の革新」に資する技術として、「AIによる軌道部材状態評価システム」を開発しており、さらに「材料・構造の革新」に資する技術として「バラストの低強度安定処理工法」および「S型弾性まくらぎ直結軌道」を開発している。次節ではこれらの技術の概要を紹介する。

2.2 これまでの研究開発の取り組み事例

(1) 軌道保守管理データベースシステムLABOCS¹⁾

軌道保守管理データベースシステム(以下、LABOCS)(図1)は軌道検測車や専用の検査装置で得られた軌道変位・列車動揺のほか、各種台帳データを一元管理し、波形処理などにより分析するためのソフトウェアである。

軌道保守管理のプラットフォームとして多くの鉄道事業者で活用されており、これをベースとして軌道のデジタルメンテナンスツールとして拡張していく計画としている。これについては3章で改めて現在進めている取り組みについて述べる。

(2) AIによる軌道部材状態評価システム²⁾

木まくらぎ等の軌道部材の検査は作業員が徒歩で実施しているため、多大な労力を必要としており、デジタル技術による省人化が求められている。このシステム(図2)では列車先頭に市販のビデオカメラを設置し、軌道の画像を撮影してそれを射影変換し、軌道を真上から見たような形の俯瞰画像に変換する。この画像を用いたディープラーニングにより、木まくらぎの劣化度、レール締結装置の脱落、噴泥の発生などをシステ

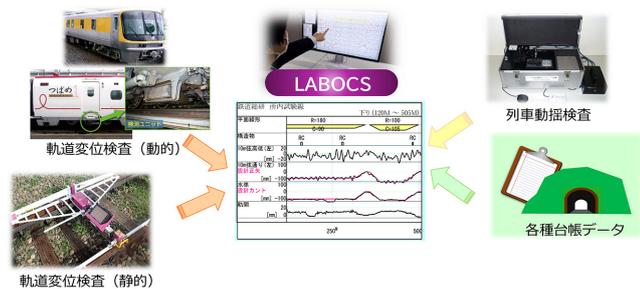
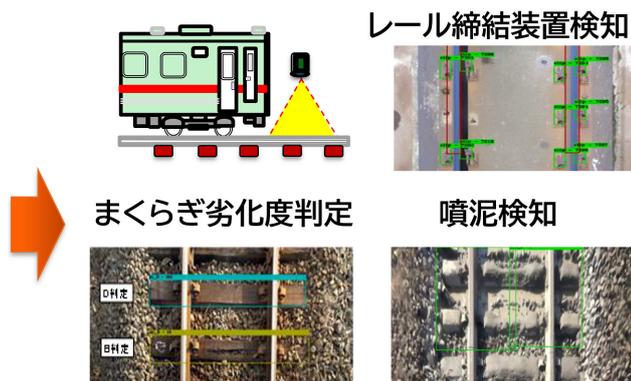
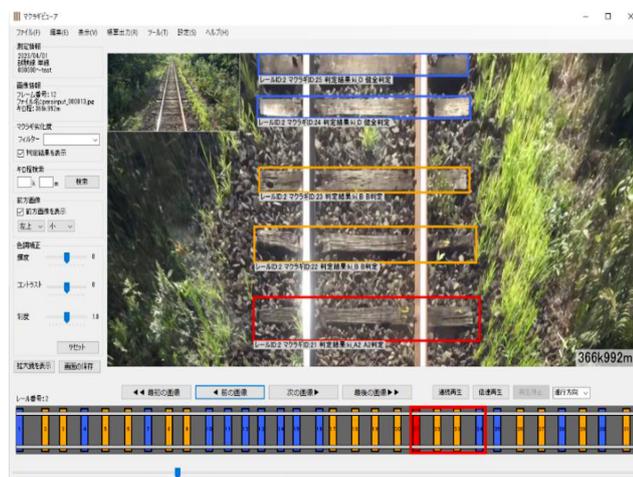


図1 軌道保守管理データベースシステムLABOCS



(a) 軌道部材の状態評価



(b) 判定結果の表示の例

図2 AIによる軌道部材状態評価システム

ム上で自動的に検知する。判定結果はパソコンの画面上で表示して確認することができる。

(3) バラストの低強度安定処理工法³⁾

この工法では破碎・細粒化が進んで噴泥が生じるような状態のバラストに対して、超速硬セメントと高分子材料をミックスした補修材をタイタンパによるつき固めと同時にバラストに混合し、低強度でバラストを安定処理する(図3)。低強度で安定処理するので、施工後も通常のバラスト軌道と同じようにタイタンパでつき固めを行うことができる。

本工法を用いることで、バラスト交換を先送りでき、つき固めの回数も減らすことができる。

(4) S型弾性まくらぎ直結軌道⁴⁾

25年ほど前に鉄道総研で開発されたD型弾性まくらぎ直結軌道は、国内外で広く普及しているが、列車の横荷重に抵抗するための複雑な配筋を必要としており、コンクリートを打ち込むための型枠の設置が煩雑であるという課題もあった。

省人化・低コスト化を目指して2016年に新しく開



(a) 補修材



(b) つき固め作業による安定処理

図3 バラストの低強度安定処理工法

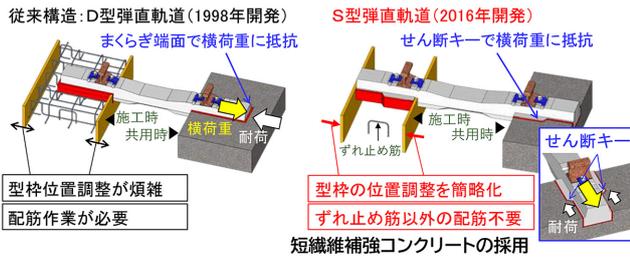


図4 S型弾性まくらぎ直結軌道

発したS型弾性まくらぎ直結軌道(図4)では、まくらぎ側面に設けたせん断キーで列車の横荷重に抵抗する構造にするとともに、短繊維補強コンクリートを採用することで、ずれ止め筋以外の配筋を不要とした。また、型枠はまくらぎ端部およびせん断キーに当てることで位置を固定できるため、設置が容易になっている。

3. 省人化へ向けた研究開発の方向性

3.1 省人化へ向けた研究開発の概要

鉄道総研が果たすべき役割として、「系統間・事業者間の連携基盤の構築(Platform)」、「先端技術で諸課題の本質を追求(Forefront)」、「ソリューションの社会実装の支援(Code)」がある。

現在進めている軌道分野の研究開発において、「系統間・事業者間の連携基盤の構築(Platform)」に対しては、「運用・管理の革新」に資する技術として、「高機能化したLABOCSと統合分析プラットフォームの連携」および「軌道保守計画策定支援システム」の開発を進めている。

また、「先端技術で諸課題の本質を追求(Forefront)」に対しては、「作業の革新」に資する技術として、「携帯情報端末の活用による巡視・検査の省人化」および「画像による検査を支援する除草手法」、加えて「材料・構造の革新」に資する技術として「新材料を活用した軌道スラブの製作の省人化」および「レールガス圧接

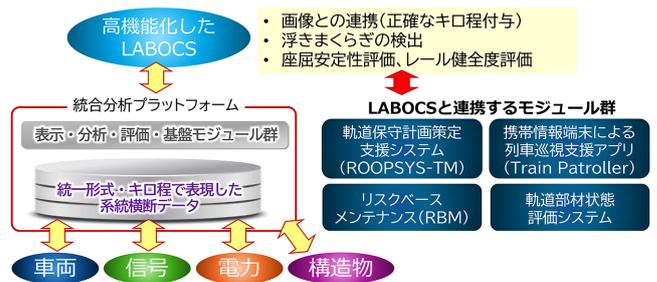


図5 高機能化したLABOCSと統合分析プラットフォームの連携



図6 軌道保守計画策定支援システム

の簡略化・自動化」といった技術の開発を進めている。さらに、「ソリューションの社会実装の支援(Code)」については、新技術と技術基準との親和性を念頭に置き、リスクベースメンテナンスを活用した新たな軌道状態評価指標の開発に取り組んでいる。

次節ではこれらの研究開発について述べる。

3.2 現在進めている研究開発の事例

3.2.1 系統間・事業者間の連携基盤の構築

(1) 高機能化したLABOCSと統合分析プラットフォームの連携⁵⁾

現時点で最新版のLABOCSは、相互相関法により測定データを正確に重ね合わせる位置補正機能を有しており、特定のキロ程における軌道変位の推移を分析することができる。このLABOCSの機能をさらに向上させ、図5に示すように、「画像への正確なキロ程情報の付与」、「浮きまくらぎの検出」、「座屈安定性評価」、「レール健全度評価」といった機能を搭載する。また、LABOCSと連携するモジュール群として、「軌道保守計画策定支援システム」、「リスクベースメンテナンス手法」、「携帯情報端末による列車巡視支援アプリ」、「軌道部材状態評価システム」の開発を進める。

高機能化したLABOCSでは「統合分析プラットフォーム」と連携することで、車両、信号、電力および構造物など他の分野との円滑なデータ連携を実現する。

(2) 軌道保守計画策定支援システム⁶⁾

図6に示す「軌道保守計画策定支援システム」はLABOCSと連携するモジュールの一つである。「軌道状態診断」として、軌道変位の基準値に対する余裕度や軌道部材の状態診断を行う。また、「軌道状態予測」では高頻度測定に対応し、軌道変位やレール・道床状態の将来予測を行う。「保守計画策定」ではマルチプルタイタンパやレール削正車などの運用計画を策定する。最後に「保守計画評価」では軌道変位および材料保守の中長期的な計画の評価やPCまくらぎ化計画の効率性を評価する。

3.2.2 先端技術で諸課題の本質を追求

(1) 携帯情報端末の活用による巡視、検査⁷⁾

巡視・検査の省人化を目的とした「携帯情報端末による列車巡視支援アプリ (Train Patroller)」はスマートフォンなどの携帯情報端末を活用し、列車前方の画像やGPSによる位置情報、3軸の加速度等を測定する。図7に示すように、携帯情報端末は列車の前頭に設置して使用する。LABOCSと連携させることで、動画に正確なキロ程を字幕情報として表示することができる。また、撮影した画像は「AIによる軌道部材状態評価システム」に用いることもできる。

さらには、今後、下記の機能を持たせる計画としている。

- 加速度および画像から平面性変位・軌間変位 (軌間保持力) を推定
- 曲線諸元・構造物・軌道部材等の台帳を自動生成しデータベース化
- 軌道変位に依存しない、列車動揺 (加速度) と画像による走行安全性の評価

これらを実現することで、軌道検査の自動化および検査結果の自動判定による省人化を目指す。

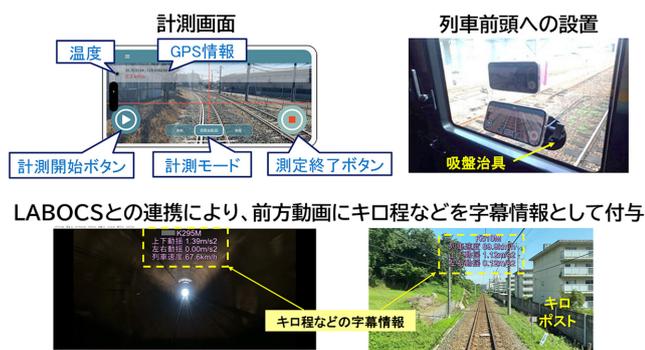


図7 列車巡視支援アプリ (Train Patroller)

(2) 画像による検査を支援する除草方法⁸⁾

画像による軌道の検査を導入する場合、雑草が繁殖していると軌道部材の状態を確認することができないことが課題となる。また、鉄道用地内の管理では除草に多大な労力を割いている。

従来の除草作業では刈払いや除草剤散布を行うが、刈払いでは作業員に対する振動・騒音の影響、除草剤散布では周囲への薬剤飛散の課題があった。

そこで、除草作業を効率的に行うため、蒸気により雑草を枯死させる方法を開発している (図8)。本手法を用いることで、刈払いにおいて必要であった事前のケーブル等の探索や刈草の回収が不要になるなど、施工速度は72分から50分へ約30%短縮できるとともに、作業員は5人から3人の40%減となる。さらに雑草が再生する速度も遅くなるため、雑草の種類によっては施工の回数を減らすことも可能となる。

さらに、レール上を走行しながら軌道内を除草する装置の開発にも取り組んでいる。

(3) 新材料を活用した軌道スラブの製作⁹⁾

スラブ軌道に用いられる軌道スラブは比較的密に鉄



(a) 蒸気により枯死した雑草



(b) レール上を走行する蒸気除草装置

図8 蒸気を用いた軌道内の雑草防除法

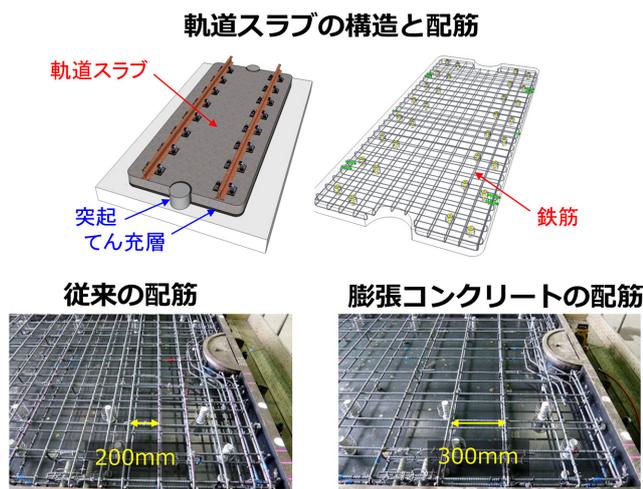


図9 膨張コンクリートを用いた軌道スラブの製作

筋が配置されている。そこで、膨張コンクリートを適用して鉄筋を減らす方法を検討した。膨張コンクリートを用いた鉄筋コンクリートでは、体積膨張しようとする力が鉄筋で拘束されることによって、コンクリートにプレストレスによる圧縮力が導入されて耐力が増加するため、鉄筋量を減らすことができる。

図9に示す例では鉄筋の間隔を従来の200mmから300mmに拡大しているが、軌道スラブを薄く設計することも可能である。また、本検討に用いた膨張コンクリートの配合は高い耐凍害性を有することも確認している。

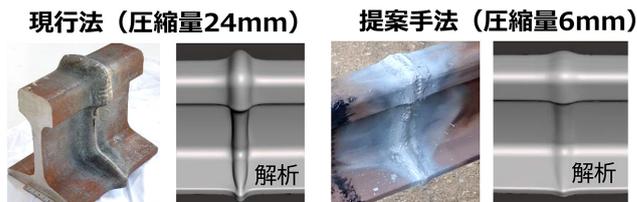
(4) レールガス圧接の簡略化・自動化¹⁰⁾

レールガス圧接には資格が必要であるが、熟練技術者の減少や働き手自体の減少により、将来的に施工が困難となることが想定されるため、省人化・脱技能化が必要とされている。

通常のレールガス圧接では、圧接に伴って生じるふくらみを専用の装置で押し抜く必要があるが、装置の重量が150kg程度あり、この運搬に労力が必要となっていた。そこで、このふくらみを抑えるため、加圧力を圧接中に変化させる「変圧法」により、圧縮量を小さく抑えながらも、従来と同等の溶接強度が得られる方法を開発した(図10)。

提案した手法では圧縮量が6mmと現行法の1/4となり、ふくらみが小さくなる。それによりグラインダのみで研削できるようになるため、押抜き装置と油圧ポンプ1台が不要となる。これにより作業員も3人から2人、施工コストも30%減とすることができる。また、ふくらみをロボットアームで自動的に研削する技術の開発も進めている。

今後は自動レールガス圧接装置を開発し、資格不要



(a) 圧縮量およびふくらみの低減



(b) ロボットアームによるふくらみの研削

図10 低圧縮量レールガス圧接工法

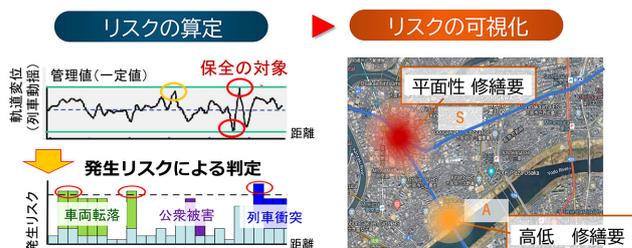


図11 リスクベースメンテナンス手法

の完全自動化による省人化を目指す。

3.2.3 ソリューションの社会実装の支援

(1) 新たな軌道状態評価指標¹¹⁾

「リスク」とは事象の発生確率×影響度(被害の程度)で定義され、リスクベースメンテナンス(以下、RBM)ではリスクの大きい箇所を予測し、優先的に補修する。

本手法では沿線環境の情報や輸送情報のデータベースを作成し、軌道検査の結果と照らし合わせて、車両の転落、公衆の被害、列車衝突などで生じるリスクを算定する。さらに、算定したリスクから補修の優先度が高い箇所をシステムの地図上で可視化する(図11)。

(2) 省人化と親和性の高い技術基準等

省人化と親和性の高い技術基準等の整備により、省人化につながる新しい技術が有効に活用されやすくなると考えられる。

現在の軌道の検査では告示により、基本的には基準期間は1年に1回となっており、整備基準値等による閾値を用いた判定を行っている。それに対して、今後はCBMや劣化予測により検査の時期を柔軟に決定す

る枠組みが望ましいと考えられる。また、閾値ではなく、RBMによる補修箇所を選定も導入できるのが望ましいと考えられる。

これらの手法を用いた軌道管理として、軌道変位・列車動揺等の閾値によらず、安全を担保するための軌道に求められる性能を数値化した新たな基準の策定が望ましいと考えられる。

さらに、CBM・RBMに対応したメンテナンス体系を確立するため、新しい技術基準につながる研究開発として、「高頻度検測に対応したレール、まくらぎ等の部材の検査時期の設定」、「線区のグレードに応じた最適な検査頻度の設定」、「携帯情報端末を活用した、軌道変位データに依存しない走行安全性評価」、「車上計測主体による軌道CBM・RBMを許容する軌道維持管理の手引きの作成」といった取り組みを進めていく予定としている。

4. 軌道分野の省人化に向けて

今後の軌道分野の研究開発において「系統間・事業者間の連携基盤の構築 (Platform)」に対しては高機能化したLABOCSを統合分析プラットフォームと連携させ、鉄道設備のメンテナンスデータを一元管理するシステムを社会実装する。また、「ソリューションの社会実装の支援 (Code)」に対しては、CBM・RBMに対応した維持管理の基準を社会実装する。

「先端技術で諸課題の本質を追求 (Forefront)」に対しては画像やスマートフォン等の汎用機器をさらに活用し、AIにより画像から不良箇所を自動的に抽出する技術を社会実装する。また、夜間作業の削減に向け、無線式列車制御を活用した保守用車の昼間走行など、「建設・施工」・「補修・作業」の省人化を実現するための新技術を社会実装する。

これらの技術により、列車の安全・安定運行を実現する軌道をより少ない人とコストで実現する。

さらにその先の未来に向けた技術開発の方向性としては、自律型ロボットやドローン、携帯情報端末等を用いた高度なデジタルツインを実現するとともに、人型ロボットや専用ロボットによる自動施工・補修技術の実現が考えられる。

5. おわりに

本講演では軌道の建設・施工とメンテナンスにおける省人化のための研究開発の取り組みについて述べた。

省人化のための技術では、検査のデジタル化が目まぐるしく多くなるが、建設・施工・補修・作業の省人化も重要であり、これらの技術をバランスよく開発し、社会実装につなげていく必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 古川敦：パソコンで軌道を管理する-LABOCSの開発-, RRR, Vol.73, No.6, pp.16-19, 2016
- 2) 加藤爽, 坪川洋友, 長峯望, 合田航, 前田梨帆, 糸井謙介：列車前方画像を用いた木まくらぎ劣化度判定システム, 鉄道総研報告, Vol.37, No.4, pp.33-38, 2023
- 3) 景山隆弘, 中村貴久, 北条優, 田島史花：劣化したバラストに対する低強度安定処理工法による沈下抑制効果, 鉄道総研報告, Vol.38, No.6, pp.15-21, 2024
- 4) 谷川光, 高橋貴蔵, 桃谷尚嗣, 吉川秀平：施工が容易で低コストなS型弾性まくらぎ直結軌道の開発, 鉄道総研報告, Vol.31, No.12, pp.23-28, 2017
- 5) 吉田尚史, 田中博文, 西本正人, 三和雅史：データ一元化システムで鉄道設備の台帳・検査記録を管理する, RRR, Vol.78, No.8, pp.20-23, 2021
- 6) 松本麻美, 石川智行, 三和雅史：軌道改良を考慮したライフサイクルコストを最小化する軌道メンテナンス手法の開発, 鉄道工学シンポジウム論文集, 土木学会, pp.143-150, Vol.24, 2020
- 7) 田中博文, 趙博宇, 蘇迪, 長山智則：携帯情報端末を活用した鉄道線路維持管理用の低コストな列車巡視支援方法の実用化に関する研究, AI・データサイエンス論文集, 土木学会, 5巻1号, pp.56-65, 2024
- 8) 谷川光, 潮木知良, 池畑政輝, 中村貴久：施工性および防除効果に優れた蒸気除草手法の開発, 鉄道総研報告, Vol.38, No.9, pp.23-28, 2024
- 9) 谷川光, 桃谷尚嗣：軌道スラブへのケミカルプレストレストコンクリートの適用に関する基礎的検討, コンクリート工学年次大会2022, 日本コンクリート工学会, 2022
- 10) 小納谷優希, 伊藤太初：押抜き作業が不要な低圧縮量レールガス圧接部の性能評価, 鉄道工学シンポジウム論文集, 土木学会, Vol.28, pp.53-60, 2024
- 11) 清水惇, 三和雅史：画像解析技術を活用した軌道のリスクベースメンテナンス法の開発, 鉄道総研報告, Vol.33, No.2, pp.5-10, 2019