

軌道技術に関する基礎研究の動向

片岡 宏夫*

Recent Basic Research Activities of Track Technology and Future Outlook

Hiroo KATAOKA

Since tracks deteriorates due to repeating load of vehicle, much work is required for track maintenance. To achieve sustainable railway, we have to clarify deterioration mechanism of tracks and develop an effective countermeasure. Furthermore, to reduce costs and labors, new technologies for maintenance must be introduced. This report introduces the basic research for track technology performed recently. The research includes the activity for running safety, clarification and detection of rail and ballast deterioration, particularly methods to reduce rail crack initiation, clarification of crack growth mechanisms and behavior aged ballast.

キーワード：現象解明，走行シミュレーション，レール，バラスト

1. はじめに

最近の社会を取り巻く情勢の変化より，低コスト化・省人化が急務となっている。軌道は車両を安全に誘導し，その荷重を支持する重要な構造であるが，長大な設備を有し，列車走行の繰り返により変形，劣化を生じるためにその維持管理に多大なりソースを必要としている。

近年ではデジタル技術の導入による業務の革新が進められている。軌道のメンテナンスの対象として様々な劣化事象があるが，例えば軌道変位については最近では高頻度検測が行われ，大量のデータ活用が可能となっている。一方で，すべての設備にセンサを取り付けて状態を監視していくのは難しく，限られたデータから劣化を予測，診断する技術も必要となってくる。そのためには現象の法則・理論を見出すことにより，信頼性を向上させることが有効である。さらに，軌道部材の検査では定量化が進んでいないものもあり，こういった分野については，劣化指標の提案と予測手法を確立することにより，データに基づくメンテナンスの向上を図ることが期待される。

また，これまで経験的に定められてきたルールを適切に見直していくことも大事であり，そのためには現象を定量的に説明し，安全性を確保していくことが求められる。

これらを背景として，現象解明や新技術の導入などの基礎研究の重要性は高まっている。表1に基礎研究の例を示す。本報告では走行安全性の評価や，特に軌道メンテナンスの中で費用を要しているレールとバラストの維持管理を中心に，近年の軌道技術における基礎研究の取り組みについて紹介する。

表1 軌道の基礎研究の例

分類	項目
安全性	周期的な水準変位の管理法 レール開口部の走行安全性評価 分岐器走行シミュレーション リスクベースメンテナンス手法 ロングレールの現地条件に則した評価法
現象解明・評価手法	波状摩耗の発生機構の解明 レールのき裂進展評価・寿命評価 PCまくらぎの劣化状態の評価 道床バラストの劣化予測と判定法 スラブてん充層の劣化予測 レール溶接プロセスのシミュレーション レール締結装置の性能評価法
新技術の導入	転換装置を内蔵したまくらぎを用いた分岐器 画像スペクトル分析による材料劣化診断 空中超音波を用いたレール開口部検知手法

2. 基礎研究の例

2.1 安全性の向上に寄与する基礎研究

(1) 走行安全性に関する研究

軌道の維持管理では，安全性の確保が最優先の課題であり，過去に発生した重大な脱線事故などを機に，脱線を防止するための研究と取り組みが積み重ねられてきている。2000年の日比谷線の脱線事故後には，「推定脱線係数比」に着目した脱線防止ガードの敷設基準策定などの対策が行われ，急曲線の低速走行時の安全性向上に寄与した。

* 軌道技術研究部長

これらの研究のベースとなっているのが車両分野で開発された車両運動シミュレーションツールであり、事故の調査や各種状況下の走行安全性評価に活用されている。

最近では、車両の特性によっては周期的な水準変位が存在する場合にロール振動により輪重減少が生じることがあることをシミュレーションにより検証し、その管理法を提案している¹⁾。

また、近年開発されたレール破断時の走行シミュレーションでは軌道を連続的な構造としてモデル化したうえで、局所的な構造変化を表現できるようにしている²⁾(図1)。これによりレール破断を想定した開口部通過時の走行安全性の評価が可能となっており、ロングレールの破断時開口量の限度値の見直しに活用され、伸縮継目の撤去に寄与している。また、本ツールは破断時の徐行速度の策定にも活用されている。

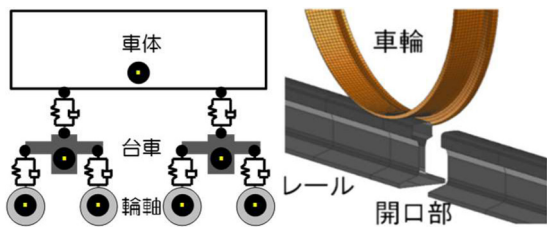


図1 レール破断箇所の走行シミュレーションモデル

(2) リスク・ベース・メンテナンス

線路周辺のリスク要因をデータベースとしてデジタル化し、軌道検測データと合わせて、安全性と経済性を最適化した軌道の維持管理計画が作成可能な、リスク・ベース・メンテナンスの研究開発を行っている³⁾。本システムでは、車載カメラで取得した画像を用いて脱線被害の拡大要因を抽出することができる。さらに、軌道変位の保守費と脱線事故時の被害規模を考慮して、軌道変位の管理値と検査周期の適正值を算出する維持・管理モデルを構築しており、本手法により、各線区や箇所において想定される脱線事故リスクを考慮した軌道変位管理を行うことができる(図2)。

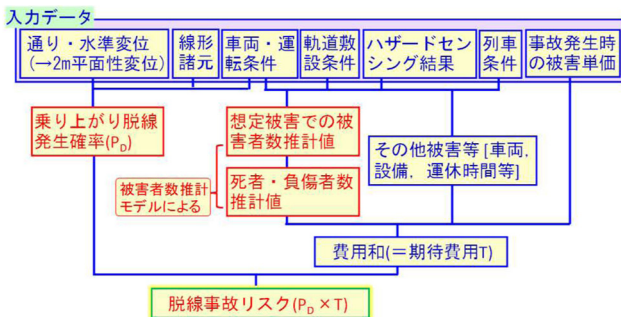


図2 乗り上がり脱線のリスク集計モデル

この手法を応用すると、例えば脱線のリスクを「管理値を超過したときの運転支障リスク」に置き換えれば、

マルチプルタイタンパなどの保守の投入量と予測される軌道状態の兼ね合いによる最適な保守費を算定することができ、リソースの有効な活用の観点から合理的な施策の決定につなげることができる。

なお、ここで開発が進められた線路周辺の画像解析エンジンは建築限界支障や差分の検知が可能であり、巡視支援への展開や、軌道管理・工事業務支援ツールの開発を進めている。

2.2 レールの維持管理に関する取り組み

レールは直接車輪を支える部材であるため重要度が高く、損傷や摩耗の管理に多くの労力が割かれている。レールは車輪の大きな荷重を直接受けるために、傷の発生を根絶することが難しい。レール傷の発生をいかに抑制し、また効率的に処置するかは重要な課題であり、それぞれの段階に応じた研究が進められている。

(1) レール頭部の転がり接触疲労の評価

レールの転がり接触疲労による頭部傷はレール管理上の大きな課題であり、これを減らすために、レールの表層を定期的に削る予防削正が行われているが、削正量や周期を適正化するためにその効果の検証が必要である。

そこで、回折X線を利用して傷発生前の転がり疲労を定量的に評価する手法が開発されている⁴⁾(図3)。レールにX線を照射し、そこから出力される回折データを分析して塑性変形を示す指標を得る。

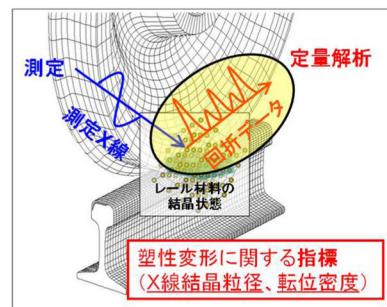


図3 回折X線による転がり疲労の評価

回折データをレール母材と比較することにより、疲労の深さがわかり、またその大きさからどの程度疲労が蓄積しているかを定量的に把握できる。

削正パターンを変えた現地からの撤去品の評価により、削正条件の設定の支援に活用されている。

(2) レール頭部横裂の進展予測

レール頭部傷の進展速度を知ることは効率的な検査と処置を行う上で有用であり、その解明を進めている。鉛直方向に進展する横裂傷の進展速度にはレール頭部内部の残留応力が寄与することが知られているが、MIRS法という近年開発された手法によりこの残留応力の分布を

詳細に調べ、列車荷重の影響による残留応力の変化を捉えている(図4)。また、室内試験結果を踏まえた頭部傷の進展解析ツールの開発を行い、現地の条件に合わせた進展速度の推定を行えるよう深度化を行っている(図5)。

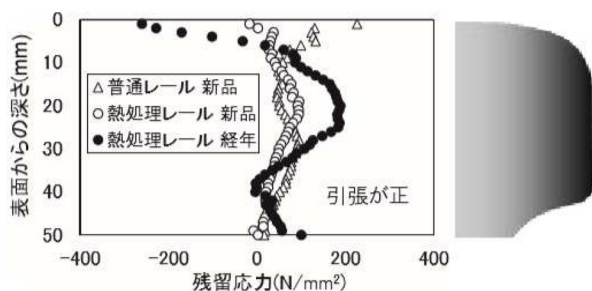


図4 レール頭部の残留応力分布

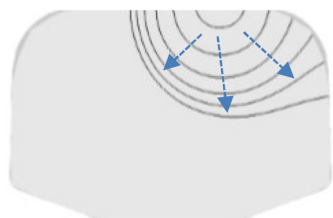
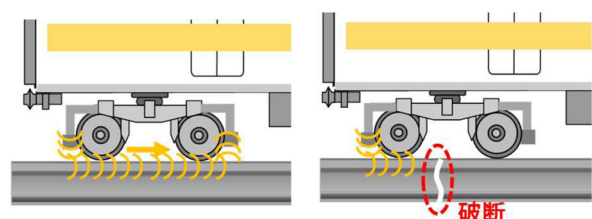


図5 レール頭部傷の進展解析例

また、このような損傷の検知手法として非接触空中超音波による車上式のレール損傷検知手法を検討しており、現在は破断検知システムとして開発を進めている。これは無線式列車制御システムの導入に際し車上でレール破断を検知することを目指したものである。

本技術は、図6に示すように空中超音波をレール上方から入力し、レールの破断があれば長手方向の超音波の伝播が遮断される原理を利用している。試験線で80km/hまでの走行で開口部を検出できることを確認している。



(a) 健全箇所 (b) 破断箇所

図6 車上式のレール損傷検知システム

通常の超音波探傷車では水平裂にさえぎられて横裂が検出できないことがあるが、本技術の適用により車上からの横裂検知による管理の省人化を目指していく。

(3) レールの寿命評価法

レールは疲労寿命予測に基づく周期交換が行われてい

る。寿命予測は列車がレールを走行する際にレールの底部に発生する曲げ応力および累積通過トン数に関連する車軸通過回数に基づいて求めることができる。これについては過去に中間則によるS-N曲線を用いた手法を提案していたが、最近200万回以上の高繰返し数の疲労試験を実施し、この領域での疲労特性に関する基礎データを取得している⁵⁾(図7)。この試験結果に基づく寿命予測を行うことにより交換周期のさらなる延伸が可能であり、コスト低減に資するものとなっている。

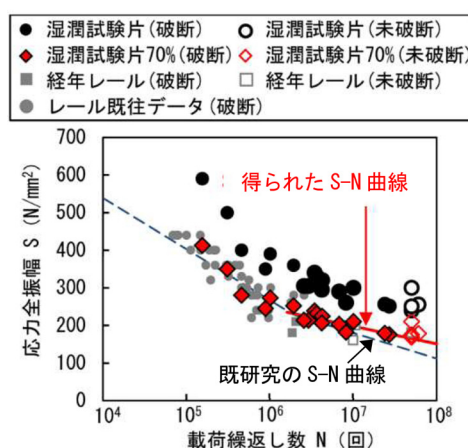


図7 レール要素試験片の平面曲げ疲労試験結果

また、本研究においては極値解析によるレールの孔食と疲労寿命低下の関係に対する考察も行っている。これをさらに推し進め、トンネルなどの腐食レールの評価に取り組んでいく。

(4) 波状摩耗の解明

レール波状摩耗については騒音・振動の要因となるため特に都市部ではレール削正により定期的に除去しているが、その発生・進展メカニズムについては不明な点が多い。

最近の研究により、凹凸の成長機構に図8に示す4種類の要因があることを明らかにしている。このうち3つについては、営業線の調査とシミュレーションによる検証を行い理論の妥当性を確認している⁶⁾。

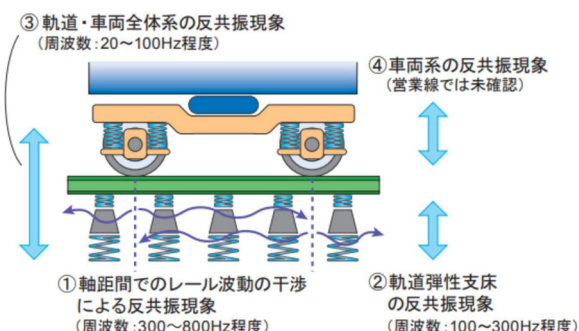


図8 波状摩耗の成長機構

さらに、営業線の継続的な測定により、波状摩耗の進展過程には形成期と成長期、飽和期が存在することを明らかにしている。この特徴を利用することにより、効果的な削正周期と削正量を決定することができると考えられる。

2.3 バラストの維持管理に関する取り組み

道床バラストはレールやまくらぎを支える軌道の基本的な構成部材であるが、その特性や劣化メカニズムは不明な点が多い。経年劣化したバラストの評価は近年研究が進んできた分野であり、細粒分の含有率が沈下特性に及ぼす影響が明らかになりつつある。

劣化状態の定量化に関しては土質力学の知識を応用し、粘土粒子程度の大きさの細粒分(粒径0.075mm以下)の含有率Fcが大きき場合に水を含みやすく、沈下が進みやすいことを現地調査などで確認し、これを劣化指標として提案している(図9)。

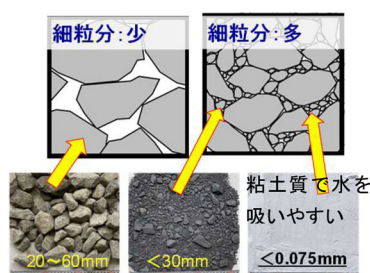


図9 バラストの劣化状態の定量化

このFcを現地で把握できるようにするために、図10に示すようなバラスト内部を透過する音を用いて劣化の程度を検査する手法を考案した。基礎試験を重ね、劣化に伴って音の通りが悪くなる周波数帯域を把握し、さらに乾湿や密度の影響によらず、劣化を示す細粒分含有率との安定した関係が得られることがわかった。これにより、現地の道床状態を簡易に定量的に診断することが可能となっている⁷⁾。

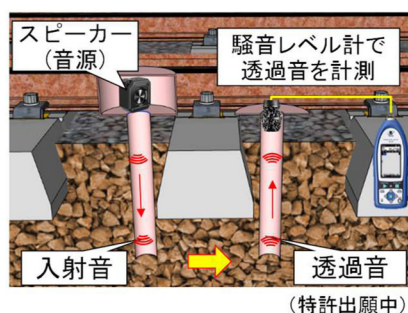


図10 透過音によるバラスト劣化状態の評価法

さらに、室内試験で劣化メカニズムの解明を進めており、本特集号で紹介している。このようにバラスト劣化の定量化と予測法を開発することにより今まで目視でしか判断できなかったバラストの残存寿命予測による交換計画策定も可能となってくる。

細粒土混入バラストに関する知見は対策工の開発にも生かされており、現場の状況を室内で再現し効果確認を行うことにより、対策工の開発を効率的に実施できる。ポリマー処理工法をはじめ、経年劣化したバラストの低コストな機能回復を図る対策工の開発を進めており、実用展開が進んでいる。

3. おわりに

近年の軌道技術の基礎研究の取り組みとその活用の例を紹介した。鉄道総研ではこの他にもPCまくらぎやスラブ軌道の劣化状態の評価など、軌道部材の劣化やその評価に取り組んでいる。軌道の現象を定量的に説明、評価できることはデジタル技術の導入や老朽化する設備を管理する上で有益であり、今後も基礎的な知見を蓄積し、持続可能な鉄道の実現に貢献していく。

なお、これらの研究の一部は、国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施した。

文献

- 1) 坪川洋友：車両の振動特性を考慮した水準変位管理手法、新線路, Vol.73, No.11, pp.27-29, 2019.11
- 2) 西宮裕騎：動的陽解法有限要素法を用いた鉄道車両の走行解析手法の構築, 土木学会論文集, Vol.74, No.2, 2019
- 3) 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, 2019.2
- 4) 兼松義一, 辻江正裕, 松井元英：X線回折を用いたレールの転がり接触疲労の定量評価, 鉄道工学シンポジウム論文集, Vol.21, pp.137-144, 2017.7
- 5) 水谷淳, 細田充, 山本隆一：高繰り返し数領域の試験を反映した新たなレール交換周期, Vol.34, No.4, pp.23-28, 2020.4
- 6) 網干光雄, 田中博文：理論・数値解析に基づくレール波状摩耗の成長機構と進展過程, Vol.34, No.4, pp.11-16, 2020.4
- 7) 福中力也, 中村貴久, 桃谷尚嗣, 木次谷一平, 北川敏樹, 宇田東樹：音の透過特性を用いた道床バラストの健全度評価方法の開発, 鉄道工学シンポジウム論文集, Vol.24, 2020.7