

# 安全で快適な列車走行のための 軌道状態メンテナンス

古川 敦

軌道技術研究部(軌道管理 研究室長)



ふるかわ あつし

## はじめに

軌道は、車両からの力を直接受け止め、地上に伝える役割を持っています。鉄道の場合、車輪・レールとも鉄でできていますので、ゴムタイヤとは異なり、両者の接触面積はごくわずかです。このため、接触面には非常に大きな応力が発生し、これによってレールは徐々に摩耗し、また変形していきます。

図1をご覧下さい。よくあるバラスト軌道です。曲線中ですからレールはきれいな円を描いていなければならないのですが、目をこらしてよくみると、レールの継目部が多角形のように角張っていたり、周囲より落ち込んでいたりするのがわかります(図中の矢印)。このような変形が進展すると車両の揺れは大きくなり、場合によっては脱線に至ります。したがってバラスト軌道は定期的なメンテナン



図1 曲線中の軌道変位



図2 マルチプルタイタンバ

スが必要不可欠です。本稿ではこのようなレールの曲がり＝軌道変位のメンテナンスについて紹介します。

## バラスト軌道の特徴

そもそもバラスト軌道はなぜメンテナンスが必要なのでしょう？土木構造物のように初めから頑丈に作っておけば保守は少なくできるのではないのでしょうか？スラブ軌道に代表される省力化軌道はこのような考え方に基いて開発され、山陽新幹線以降の新設線に投入されてきました。近年では環境に配慮した様々な省力化軌道が開発されており、軌道保守量の削減に貢献しています。

一方、古くから建設された在来線の多くの軌道は図1のバラスト軌道です。バラスト(砂利)層という、決まった形を持たない材料の上にレールが敷かれているため、軌道変位の発生が避けられません。一方で、バラスト層は決まった形を持たないためにレール位置調整の自由度が高く、軌道変位を補修しやすいという長所があります。バラスト軌道の補修は、図2のマルチプルタイタンバ(略して「マルチタイ」といいます。)と呼ばれる重機械によって行います。

省力化軌道の場合、レールをスラブ板等に固定している締結装置のわずかな範囲でしかレールの位置調整が行えず、また作業は多くの場合人力となります。したがってバラスト軌道と比較して補修の頻度は大幅に少ないものの、その内容によっては、コストがバラスト軌道よりも高くなる場合があります。

このように、バラスト軌道には補修の面から長所・短所がありますが、「レール位置調整の自由度が高い」という長所は、軟弱地盤の多い日本ではメンテナンス上無視できないこと、また現実問題として営業中のバラスト軌道を省力化軌道に作り変えるには莫大な費用と時間がかかることから、我が国の軌道の多くはバラスト軌道であり、保線技術者は日々メンテナンスを繰り返しながら、これと上手につき合っているわけです。

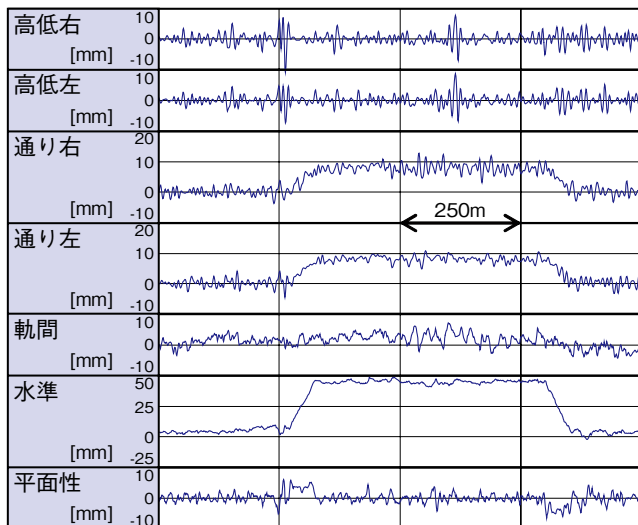


図3 軌道検測データの例

前置きが長くなりましたが、以下、バラスト軌道を念頭に、軌道変位のメンテナンスの流れを追っていきます。

### 軌道変位のメンテナンスの流れ

軌道変位のメンテナンスは、大きく以下の4段階の流れで行われます。

#### ①軌道変位の測定

図1のようなレールの曲がりや落ち込みは、「軌道検測車」と呼ばれる専用の車両で測定します。軌道検測車は車両の中にレール位置を測定するセンサを持ち、高低（レールの上下方向の曲がり）、通り（レールの左右方向の曲がり）、水準（左右レールの高さの差）、平面性（軌道面のねじれ）、軌間（左右レールの間隔）の5項目を、走行しながら測定できます。測定データの例を図3に示します。なお、通り、水準が台形状となっている区間は曲線です。

#### ②軌道検測データの評価

図3に示す軌道変位の各項目は、それぞれが車両の走行安全性や乗り心地に影響します。したがって、データを解析し、軌道状態の良否を評価して車両の運動に影響しそうな箇所を選び出します。その際、図3の波形に様々な加工を行い、問題となる箇所が的確に浮かびでてくるよう工夫します。

#### ③保守計画の作成

②の評価結果をもとに、保守の計画を作成します。バラスト軌道の軌道変位の場合、前述のマルチ（図2）をいつどこに配備するかという計画となります。その際、測定の時点で軌道変位が大きかった箇所だけではなく、近い将来に軌道変位が大きくなりそうな箇所を予測して、マルチを最も効率的に利用できるように計画を作成します。

#### ④保守の実行

③で作成した計画に基づき保守作業を実行します。マル

表1 在来線整備基準値の例(単位mm)

| 変位種別 | 線別                 |     |     |     |
|------|--------------------|-----|-----|-----|
|      | 1級線                | 2級線 | 3級線 | 4級線 |
| 軌間   | 半径 600m 以上および直線    |     |     | 20  |
|      | 半径 200m 以上 600m 未満 |     |     | 25  |
|      | 半径 200m 未満         |     |     | 20  |
| 水準   | 平面性で管理             |     |     |     |
| 高低   | 23                 | 25  | 27  | 30  |
| 通り   | 23                 | 25  | 27  | 30  |
| 平面性  | 23(カントの過減量を含む)     |     |     |     |

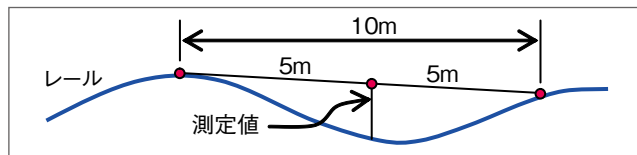


図4 高低・通り変位の測定方法

タイにも様々な使用方法があるため、目的に応じてこれを使い分けします。

以下、このサイクルのうち、②の軌道検測データの評価、および③保守計画の作成に的を絞って解説します。

### 軌道整備基準値

まずは軌道検測データの評価です。図3のような波形が得られた場合に、その良否を判定します。最も簡単な判定法は、波形の振幅の大きさによるものです。この方法は古くから用いられている最も一般的なものです。保守を行わなければならない軌道変位の振幅を一般に「軌道整備基準値」と呼んでいます。現在、JR各社が用いている在来線の軌道整備基準値の例を表1に示します。これは、約40年前の軌道検測データをもとに旧国鉄が定めたものをベースとしています。なお、1級線～4級線は線区のランクを示すものです。

表1の値は、これを超えたからといってと即座に列車が脱線するという性格のものではないのですが、あまり余裕がある値でもありません。したがって、これを超える振幅が測定された場合は早期に補修するよう定められています。

次に、より車両の挙動に近い評価結果を得るための、軌道検測データの加工方法を3例ご紹介します。

### 10m弦正矢と20m弦正矢

表1のうち、軌間・水準はある断面における左右レールの相対位置関係を表すものですから、評価は容易です。平面性は在来線の場合、5m離れた2地点における水準の差として求めますので、これも同様です。一方、高低と通りは、レールの長手方向の変形量であり、図4に示すように、長さ10mの弦をレールにあて、中点における弦とレールの

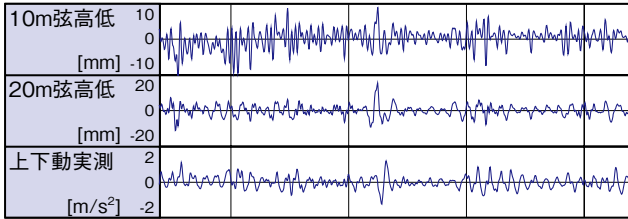


図5 10m弦, 20m弦正矢法と上下動実測値

離れて評価します。これを10m弦正矢法といいます。この方法では、弦の長さが変わると測定値が変わることが容易に想像できます。これが前述の水準や軌間とは異なる点です。それでは、なぜ弦の長さは10mなのでしょう？

図5に、在来線の特急車両が130km/hで走行した場合の上下動と10m弦正矢値, 20m弦正矢値との関係を示します。20m弦正矢値と上下動波形の類似性が高いのがわかります。速度が100km/h程度までであれば、10m弦正矢値と車両の加速度との類似性が高いのですが、列車が高速化すると弦長が長い正矢の方が加速度との相関が高くなります。

一方で、20m弦正矢法は継目部等のごく局所的な軌道変位の測定が苦手です。また在来線の多くは最高速度が100km/h程度です。したがって、軌道整備基準値は10m弦正矢値で定められており、速度の高い一部の在来線で20m弦正矢法が、新幹線では40m弦正矢法が併用されています。なお20m弦正矢, 40m弦正矢は10m弦正矢から計算で求めます。

### 複合変位

複数項目の軌道変位が同時に大きい場合は、個々の軌道変位が表1の値よりも小さくても、走行安全性が低下することがあります。昭和40年代に特定形式の貨車の脱線事故がしばしば発生しました。様々な調査・研究の結果、このような脱線は、貨車の台車構造の特徴とともに、通り変位と水準変位が同じ区間に連続して存在する場合に発生しやすいことがわかりました。これに対し国鉄では、貨物列車走行線区を対象に、「複合変位」という新たな指標を導入しました。複合変位は「通り-1.5×水準」の絶対値で定義され、連続する波数に応じた軌道整備基準値が設定されています。

### 平面性変位の重要性

車両の応答に直結する軌道変位として、前記の複合変位のほかに平面性変位があります。平面性変位は2点間の水準の差から求め、軌道面のねじれを表します。4本脚の椅子やテーブルをねじれた床面に置くと、1本の脚だけ床と

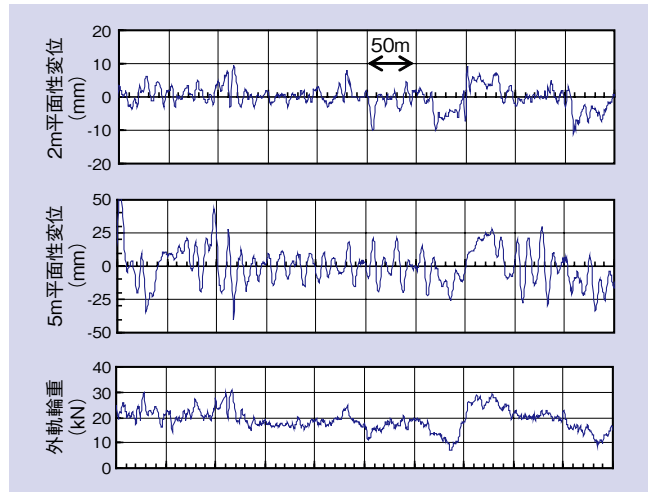


図6 平面性変位と輪重

の間に隙間ができますが、鉄道車両の台車にも車輪が4つあり、同様なことが起きます。車輪とレールとの間に隙間ができると脱線の可能性が高くなるので、平面性変位は走行安全上重要な項目です。

JRの在来線では、平面性変位を求める基準長を5mとしています。これは、鉄道車両のうち最も長い軸距=ホイールベースが、2軸貨車の4.3mであったためです。近年ではほとんどの車両が軸距2m前後のボギー台車を用いているため、2m間の水準差から平面性を求めた方が、輪重(車輪がレールを下方方向に押す力)との相関が高いことがわかっています。図6に、通勤型電車で測定した輪重と平面性変位との関係を示します。2m間平面性の方が、輪重の変動との類似性が高いのがわかります。

以上のように、軌道検測データを適切に加工することにより、車両の走行安全性や乗り心地を直接考慮した軌道変位の評価が可能となります。近年は様々なシミュレーション技術が発展してきたため、軌道検測データから車両の応答を直接計算し、評価に利用している例もあります。

### 予防保全と事後保全

再び軌道のメンテナンスのサイクルに戻ります。次は③の「保守計画の作成」です。前述したように、軌道変位の振幅が表1の軌道整備基準値を超過した場合、保守を実施します。一方で図3に示すように、実際の軌道検測データは、一般に表1の値よりもはるかに小さく維持されています。これは過剰保守なのでしょうか？

実は、軌道変位が軌道整備基準値に達する前に保守を行うのにはいくつか理由があります。

- (1)軌道整備基準値を超えてから保守を行うのでは、いつ、どこで保守が必要かは軌道検測車が走ってみないとわかりません。このように、事前に予測できない保守は、保

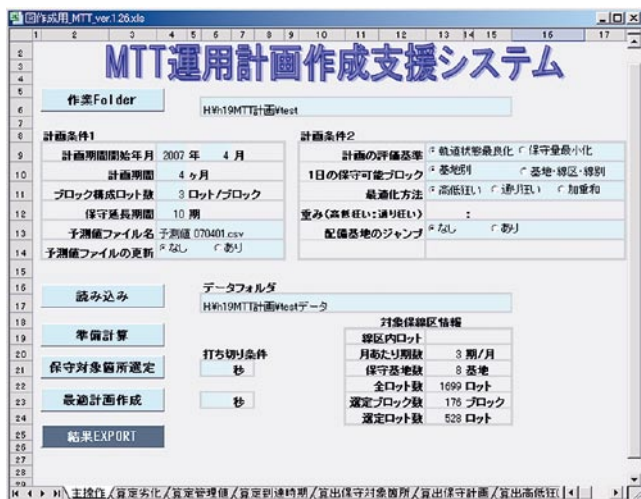


図7 マルタイ運用計画作成システムのメイン画面

守作業員の招集やマルタイの運用の面から、コストが高くなるのが一般的です。

(2)軌道整備基準値は主として走行安全性の面から定めたものです。安全は鉄道事業者にとって重要な事項ですが、特急列車が走る路線ではやはり乗り心地も考える必要があります。車内販売で買ったコーヒーが列車の揺れでこぼれるのでは、会社の社会的な印象が悪くなります。これらの路線では、軌道整備基準値よりも小さい値で軌道変位を維持する必要があります。

(3)一般に、補修を行っても軌道変位は完全に0にはなりません。おおむね、元の軌道変位の40%~60%程度は補修後も軌道変位が残ります。すなわち、補修前の軌道変位が大きいほど、補修後の軌道変位も大きくなるわけです。これではせっかく補修を行っても、軌道はまたすぐに悪くなってしまいます。

一般に、劣化の度合いが基準値に達する前に計画的に保守を行うことを「予防保全」といいます。一方、基準値に達した後に保守を行うことを「事後保全」といいます。一回あたりの保守コストは前者が小さいので、定期的な保守を必要とする多くのシステムでは、予防保全が行われています。現実の軌道のメンテナンスは予防保全と事後保全を上手に組み合わせて行われています。

### 保守計画の作成

予防保全も、起点から終点に向かってただ漠然と順番に行えば良いというものではありません。軌道変位の悪化の速さは場所毎に異なります。また1台のマルタイで複数の線区を補修する場合は、どのような順番で行うかを考えなければなりません。その際、日中マルタイを留置するための保守用基地の配置や、架線の張り替えのような他の保守作業との競合などの制約を考慮しておく必要があります。

一方、ある制約の下で最も良い解を見つける「数理計画法」と呼ばれる数学的手法があります。「最も良い」を「最も軌道変位が小さい」「最も保守コストが小さい」と読み替えば、マルタイをいどこに配備するかという運用計画には、この数理計画法を適用できそうです。

このような計算をシステム化した例を図7に示します。このシステムは、マイクロソフト社のエクセルをベースとして作成されていますので、パソコンを使用できる人なら特に専門知識が無くとも操作できます。また数理計画法の骨幹には市販のライブラリを用いているので、常に最新のプログラムを用いることができます(一般に、数理計画法の世界では、アルゴリズムの改良によって、計算速度が10年間で10倍になると言われています)。

これまで、マルタイの運用計画は専門の担当者が長い時間をかけて作成していましたが、このようなシステムを用いれば計画作成作業を省力化できます。さらに、望ましい保守基地の配置、マルタイの最小必要台数、軌道状態と保守量との関係などのシミュレーションもできます。したがって、単に軌道変位最小の保守計画を作成できるだけでなく、バラスト軌道の保守に必要なコスト全体の削減が可能となります。

### 今後の軌道のメンテナンスをどうするか？

以上で述べたように、軌道のメンテナンスは鉄道130年の歴史の中で高度に体系化されています。メンテナンスの体系化は、誰でも同程度の品質のメンテナンスを提供できるという面で優れたものですが、一方で必要ではない箇所にも保守が投入されるというような不経済が少なからず存在します。

鉄道事業者にとって最も無駄の無いメンテナンスとは、乗り心地が悪くなって乗客が乗り物酔いになったり、列車が脱線したりする直前に保守を行うことです。そのためには、最適なタイミングで検査を行い、将来の軌道状態を精度良く予測し、列車の走行性が悪化する直前で保守を投入するというサイクルを、路線全体にわたって実現するシステムが必要となります。簡単に言うと「軌道の未来を精度良く知る」ことです。

少子高齢化社会が進む中、3K作業である軌道のメンテナンスに従事する人の確保はますます困難になっています。このような中で、列車の走行安全性を損なわずに軌道の保守量を減らす工夫はますます重要です。[RRR]