

鉄道一般

車両

軌道

構造物

防災

電力

信号通信  
情報

材料

環境

人間科学

浮上式鉄道

# 事故リスクを考慮して 軌道変位保守計画を作成する

軌道面の不整は列車の繰り返し通過によって成長するため、各箇所の安全性を評価して適切な時期に保守を行う必要があります。この安全性の評価においては、列車が脱線する可能性と想定する被害規模を考慮したリスクを算定し、その結果に基づいて保守計画を作成することが重要です。



三和 雅史  
Masashi Miwa

軌道技術研究部  
軌道管理研究室  
室長

【専門分野】 軌道保守計画、最適化モデル分析、確率・統計



水野 真敏  
Masatoshi Mizuno

軌道技術研究部  
軌道管理研究室  
研究員

【専門分野】 軌道変位、状態診断、保守管理システム

## はじめに

バラスト軌道では、列車の繰り返し通過により道床バラストや路盤が変形するために、軌道面の不整（軌道変位〔軌道狂い〕）が徐々に大きくなり、その程度によっては、脱線事故の発生確率が高まることになります。よって、安全な軌道状態を継続的に維持していくためには、保守必要箇所を適切に選択し、安全性が低下する前に保守を行うことが重要です。しかしながら、延長が長い軌道を隈無く頻繁に保守することは、コスト的、また営業列車の合間でしか保守作業ができないという時間的な制約上、難しいのが実状です。このため、軌道保守計画の策定においては、安全性と経済性の両立は極めて重要なテーマの1つとなっています。

以上の背景に対し、軌道変位推移の予測結果に基づいて推計した事故リス

クを考慮した軌道変位保守計画法を開発しましたので紹介します。

## 軌道変位と列車脱線

軌道状態を原因とする脱線には、**図1**のように車輪が軌間内に落下する「軌間内脱線」や曲線外側レール（外軌）に車輪が乗り上がる「乗り上がり脱線」などが存在します。

軌間内脱線は、主に木まくらぎの腐朽によってレールを締結している犬くぎの支持力が低下し、軌間が拡大して発生します。

一方、乗り上がり脱線は、曲線での平面性変位（軌道面のねじれ）および通り変位（レール側面の線路方向の凹凸）の増加により、車輪からレールに作用する上下方向の荷重（輪重）の減少と左右方向の荷重（横圧）の増加が起きて横圧と輪重の比（脱線係数）が

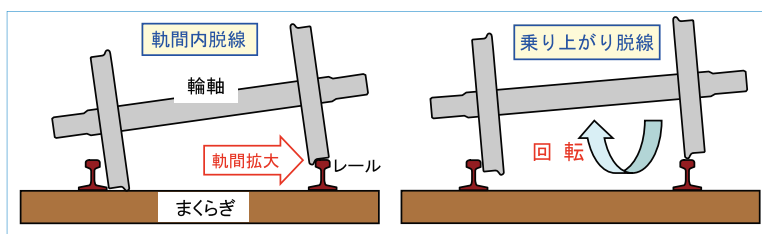


図1 脱線の種類の例

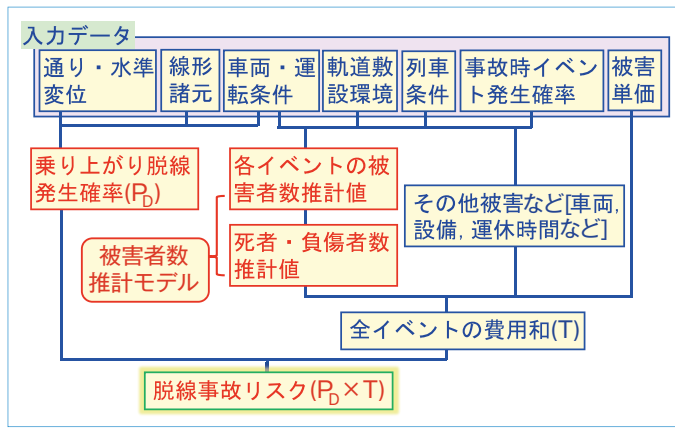


図2 リスク推計モデル

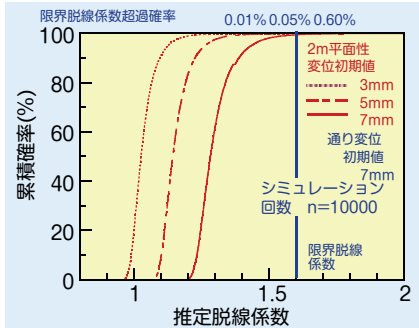


図3 脱線事故の発生確率

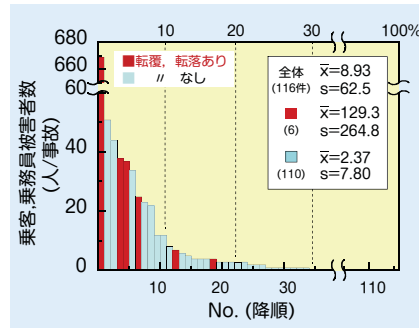


図4 列車脱線事故被害者数分布

大きくなり、脱線の限界(限界脱線係数)を超えた場合に発生します。

### 脱線事故リスク推計の考え方

脱線事故のうち、軌間内脱線は木まぐらぎを主体とする閑散線区(主に単線)において低速での発生事例が多いことや軌道から大きく逸脱する可能性は低いことから、リスクとしては小さいと考え、乗り上がり脱線を対象としたリスク推計モデルを図2のように構築しました。

乗り上がり脱線のリスクは、脱線の発生確率と発生時の費用の積により算出します。この発生確率は、軌道変位と線形諸元、車両・運転条件を考慮して算出します。また、脱線事故発生時の被害者数については、車両・運転条件、軌道の敷設環境、列車条件(乗車人数、運転密度など)、事故発生時のイベントの発生確率とから算出します。このイベントとは、脱線事故に付随して発生する様々な事象です。そして、車両被害などを含む事故発生時の被害を合算して脱線事故発生時の費用を推

計します。

最後に、以上のように得られた費用と脱線発生確率の積により、脱線事故リスクを推計します。

### 脱線事故の発生モデル

乗り上がり脱線の発生確率については、列車走行時に発生すると推定した脱線係数(推定脱線係数)が限界脱線係数を上回る確率を用います。推定脱線係数が限界脱線係数を上回ると必ず脱線するわけではありませんが、各箇所リスクを相対的に比較、評価することが目的であるため、この確率を脱線発生確率として用います。この各脱線係数の算定には、低速時の乗り上がり脱線に関する安全性の評価式<sup>1)</sup>を用います。本式では、平面性変位と通り変位が入力データとなります。よって、今後1年間の保守計画を策定する際には、保守を1年間行わなかった場合における1年後の軌道変位を予測して用います。

さて、この平面性と通りの各軌道変位進み(1年間の軌道変位の増分)につ

いては、実測データの分析結果から確率分布に従うとしてモデル化できます。そこで、この分布に従う乱数を10,000個発生させて各軌道変位の初期値と合算し、脱線係数を算出する確率シミュレーションを行いました。推定脱線係数と限界脱線係数の超過確率の算出例を図3に示します。推定脱線係数が限界脱線係数を超える確率は、軌道変位が増加すると大きくなるのが分かります。

以上のように、軌道変位の大きさを考慮して脱線事故の発生確率を推計することができます。

### 被害者数推計モデル

被害者数の推計では、検討対象とする列車編成中の各車両の乗車人数に被害者率(乗車人数に占める被害者の割合:被害者数/乗車人数)を乗じて被害者数を算出し、全車両での被害者数の総和を脱線事故における被害者数とします。また、この被害者数に死者率(被害者数に占める死者の割合:死者数/被害者数)を乗じて死者数と負傷者数を得ます。この被害者数推計モデルを構築するために、国の運輸安全委員会の鉄道事故調査報告書(2001.10~2011.5に公表分の116件)のうち、脱線事故に関するデータを分析しました。

まず、今回分析したデータにおける最大被害者数の事故は、通勤列車が高速で脱線して建築物に衝突したものであることから、脱線後の車両の挙動や速度、乗客数が被害規模に影響すると考えられます。そこで、「車両の転覆や転落の有無(貨車を除く)」、「重量物(鉄道車両、建築物、大型自動車、1m以上の岩など)との衝突の有無」、「シートタイプの差異(サバイバルファクターの1つ)」を被害者数の拡大要因として区別して分析しました。図4に

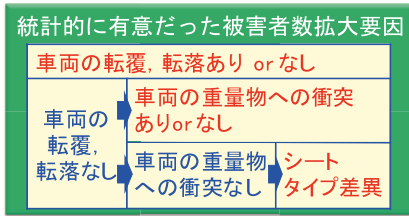


図5 被害者数拡大要因

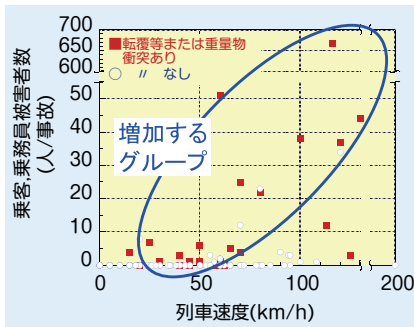


図6 列車速度と被害者数

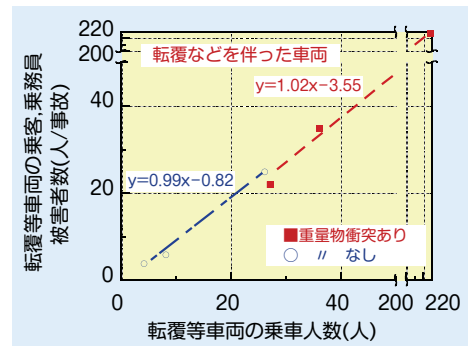


図7 各車両の乗車人数と被害者数

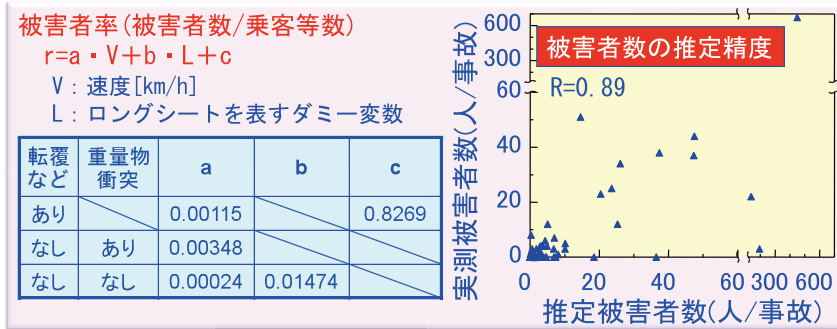


図8 被害者数の推計結果

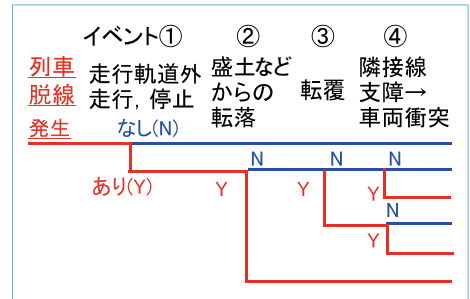


図9 イベントツリー

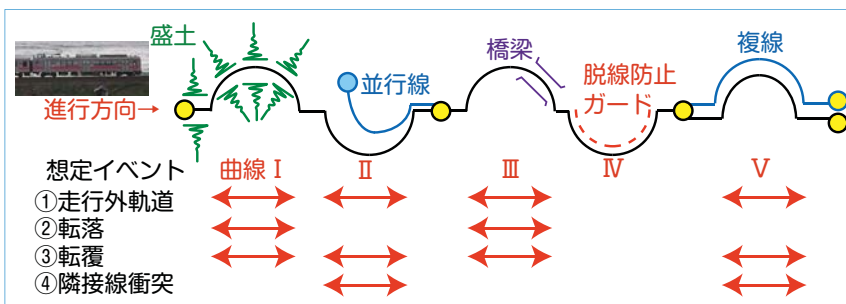


図10 想定するイベント

は、このうち転覆などの有無を区別して列車脱線事故の被害者数の分布を降順で整理した例を示します。

70%以上の事故においては被害者数は0人ですが、転覆などを伴う事故では全事故で被害者が発生し、また転覆などを伴わない事故に比べて被害者数が多い傾向にあることが分かります。そこで、転覆などの有無を含む上記の要因が被害者率、死者率に与える影響を統計的に分析した結果、図5のように「転覆などの有無」、「転覆などしなかった車両における重量物への衝突の有無」、「転覆などおよび重量物への衝突がなかった車両におけるシートタイプの差異」は被害者率に影響し、また「転覆などの有無」は死者率に影響することが分かりました。

次に、列車速度が明確な事故について、列車速度と被害者数の関係を図6に示します。多くの事故では、速度に関係なく被害者数は10人未満ですが、速度と共に被害者数が増加する傾向が強いグループがあり、転覆などまたは重量物との衝突を伴った事故では、この傾向が比較的強いことが分かります。よって、特にこれらの事故では、速度が高いと被害者数が増加する可能性が高いと考えられます。

また、乗車人数と被害者数の関係を図7に示します。ここでは、転覆などを伴った車両について示します。乗車人数と被害者数との間の相関は強く、また回帰直線の傾きは重量物などの衝突の有無に関係なく1に近いことから、転覆などした車両の乗客などは、

死傷する可能性が極めて高いといえます。一方、転覆などしなかった車両では、乗車人数と被害者数との関係は明確ではありませんでしたが、重量物と衝突した際には死傷する可能性が高いことが分かりました。

以上のほか、被害者数に影響すると考えられる事象としては、脱線した車両が隣接線を支障し、他の列車と衝突する事故の発生が想定されます。こうした事故は今回分析したデータには含まれていませんでしたが、列車脱線事故リスクの推計の際には考慮しておくべき事象と考ます。

以上の分析結果に基づいて被害者数を推計しました。ここで、被害者率については、図8に示す式により推計しました。本モデルにより得られた被害者数と実測値との比較を同図に示します。被害者数の推定値は実測値に概ね近いことが分かります。

### リスクの推計結果

脱線事故発生時の被害の推計では、脱線後の車両の挙動を考慮した図9に示すようなイベントツリー(☞参照)と各イベントの発生確率を設定します。

表1 リスクの推計結果

条件		1	2	3	4	5	6	
走行軌道外停止		—	●	●	●	●	●	
転落		—	—	●	—	—	—	
転覆		—	—	—	●	●	—	
隣接線衝突		—	—	—	—	●	●	
死者数		0.01	0.01	1.45	1.45	8.12	0.47	
負傷者数		2.17	2.17	14.9	14.9	208	167	
通り	平面性	リスク(万円)						計
5mm	5mm	1.36	0.72	0.18	0.34	0.09	0.33	3.02
7	3	0.27	0.14	0.04	0.07	0.02	0.07	0.60
7	5	2.26	1.19	0.30	0.57	0.15	0.55	5.03
7	7	27.2	14.3	3.60	6.89	1.81	6.54	60.3
10	5	4.53	2.38	0.60	1.15	0.30	1.09	10.1

最小化 計画期間中の平均軌道状態 +①リスク				
制約条件 線区レイアウト, 各期の保守可能日数, 軌道変位上限値 他				+②リスク 上限値
モデル適用結果の比較			計画条件	
ロット	高低変位標準偏差	リスク	高低変位のみ	高低変位とリスク
A	3.82mm	3.38×10 <sup>-7</sup>		●
B	3.54	2.56×10 <sup>-4</sup>		●
C	4.96	3.59×10 <sup>-9</sup>		●
D	7.63	6.49×10 <sup>-1</sup>	●	●
E	8.11	3.03×10 <sup>-3</sup>	●	●
F	5.12	2.35×10 <sup>2</sup>		●

図11 軌道変位保守計画モデルと適用結果

ここでは、重量物との衝突については隣接線車両との衝突で代表させます。各確率には、図10に示すような各箇所軌道の敷設環境(盛土上、前方に橋梁がある場合等は転落可能性が高い。周辺に建築物や橋脚、隣接線等がある場合には重量物との衝突可能性が高いなど)、脱防ガードの設置状況、列車長、速度、減速度、隣接線の運転密度などに応じて想定されるイベントに対応する確率を用います。

リスクの推計結果を表1に示します。車両被害、運転被害については、事故内容に応じて変化させましたが、平面性と通りの各軌道変位の大きさに応じてリスクが変化することが分かります。

### リスクを考慮した軌道変位保守計画法

従来の軌道変位のみを考慮した軌道変位保守計画モデル<sup>2)</sup>において、新たに脱線事故リスクを考慮した保守計画の作成法を検討しました。

#### イベントツリー

システムに不具合が発生したときの各種安全性対策の有効性を明確するための手法。左端に最初の不具合事象を記述し、システム内の各対策(図9では防止対象となる事象)を上部に並べて、各対策が成功した場合には上側に、失敗した場合は下側に分岐させていくことにより、事故に至る過程を明確化します。

従来のモデルでは、各ロットの軌道変位推移履歴のほか、図11のように線区レイアウトと計画作成上の制約条件を入力データとし、各箇所の軌道変位推移を予測して次年度の軌道変位保守計画を出力します。本モデルの目的関数は、軌道変位標準偏差の平均値(計画期間中)の最小化です。本モデルについては、既にシステム化され、一部のJRで実用化されています。

さて、本モデルにおいてリスクを考慮するためには、同図に示したように以下の方法が考えられます。

#### ①目的関数での考慮

従来の目的関数にリスクの項を追加します。この場合、軌道変位とリスクという次元が異なる指標を合算することになるため、両指標を目標値で除して無次元化する必要があります。軌道変位については整備目標値などを準用し、リスクについては全ロットの平均値などの統計量を目標値として用いることができます。

#### ②制約条件での考慮

計画期間中にリスクが上限値を超えると想定される箇所については、必ず保守する制約を設定して保守計画を作成します。この上限値については、絶対値として設定するほか、全ロットの内でもリスクが高い(例:上位p%)箇所を指定する方法があります。

上記のモデルの妥当性を検証するために、実際の線区を模擬した軌道データを用いて試算を行いました。ここでは、上記①に示した考慮法を用いて年度保守計画を作成し、高低変位のみを考慮して作成した計画と比較しました。

リスクが比較的大きかった箇所に対する保守計画の有無を同図に示します。高低変位のみを考慮した計画には、リスクが大きくても保守が計画されない箇所がありますが、リスクも考慮した計画においては、リスクの高い箇所への保守も計画されていることが分かります。このように、推計したリスクを考慮して保守計画を作成することで、より安全性の高い保守計画を作成できると考えます。

#### おわりに

安全で快適に乗客を運ぶことができる軌道状態を少ない経費で維持することは、全ての鉄道事業者が抱える大きな課題の1つです。軌道変位データなどを活用して品質の高い保守計画を実現できるようなシステムを引き続き検討していく予定です。RRR

#### 文献

- 1) 内田, 他: 輪重横圧推定式による乗り上がり脱線に対する安全性評価, 鉄道総研報告, 第15巻, 第4号, 2001.4
- 2) 三和, 他: 経済的な軌道保守計画, RRR, 第60巻, 第9号, 2003.9