

線区信頼性を重視した軌道保守計画作成のための軌道状態データのモデル分析

2602780 (公財) 鉄道総合技術研究所  
1002750 政策研究大学院大学

\* 三和雅史  
大山達雄

MIWA Masashi  
OYAMA Tatsuo

1. はじめに

一般に、鉄道線路(軌道)は列車の繰り返し通過に伴って軌道面の不整(軌道変位、軌道狂い)が発生、成長する。よって、列車の安全走行や乗り心地の維持・向上のために、軌道狂いを定期的に検査(軌道検測)して状態を把握し、測定値と管理値を対照して軌道狂い保守がなされる。一方、鉄道システムの性能を客観的に評価する指標としてRAMS存在する。そこで、R(信頼性)に着目し、線区の信頼性(輸送サービス)の維持・向上を重視した軌道保守計画法を検討する。ここでは、高頻度に軌道検測が行われている線区のデータを用いて、軌道検測間隔、管理値と信頼度の関係を分析した結果を示す。

2. 軌道狂い推移の分析

2.1 分析対象データ

約45kmの区間を25m長さのロットに分割し、列車が高速走行する1393ロットにおける10m弦高低狂い(レール方向上下の軌道狂い)の最大値の推移データを分析した。分析対象期間は約6年弱、計163回分の検測データを用いた。ここで、高低狂い管理においては、管理値として以下の値が用いられているため、分析の際には考慮した。

- 保守計画目標値: 6mm
- 乗り心地目標値: 7mm
- 予防管理目標値(当夜緊急補修): 10mm

2.2 軌道狂いと進み

各ロットの高低狂い、高低狂い進み(劣化速度)について全検測期間における平均値を算出し、集約した結果を図1に示す。これらの分布に一般的な非負分布を当てはめた結果を表1に示す。高低狂い、進みとも対数正規分布やガンマ分布、対数ロジスティック分布に対して、また進みについてはワイブル分布にも適合度が高かった。

一般に、将来の軌道狂い推移を予測し、信頼度を算出するために、軌道狂いの初期値と進みを与える。ここで、

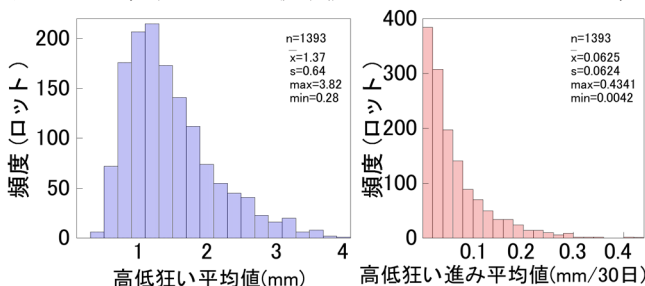


図1 軌道狂い、進みの分布

表1 分布適合度(上: 軌道狂い, 下: 進み)

RANK	1	2	3	4	5
名称	Lognorm	Loglogistic	Gamma	Weibull	Expon
$\chi^2$ 乗値	20.67	49.23	65.29	165.02	1,055.71
RANK	1	2	3	4	5
名称	Lognorm	Gamma	Loglogistic	Weibull	Triang
$\chi^2$ 乗値	19.26	30.14	45.96	79.64	232.53

初期値は或る時刻での軌道狂いとして与えるのに対し、進みは確率分布で与えるため、ロット別に進みの分布を作成し、一般的な分布への適合度を調べた。ここでは、一定間隔ずつ離して抽出した25mロットにおける進みデータについて、先述の分布等への適合度の評価結果を表2に示す。表には、スコアリング結果と $\chi^2$ 乗統計量による評価を示す。

両評価において、ガンマ分布とワイブル分布への適合度が高かった。信頼度の検討では、進みを確率変数として、一定期間後の管理値超過確率を算出するが、ガンマ分布の有する確率変数の和に対する再生性は、確率の計算を容易にできる。よって、進みをガンマ分布でモデル化する。

3. 信頼度に関する分析

(1) ロット信頼度

高低狂い進みをガンマ分布によりモデル化し、一定期間経過後に高低狂いが管理値を超過しない確率をロット信頼度と定義して3つのロットでの値を算出した結果を図2に示す。初期値や進みの大きさに応じて信頼度は変わるが、1年後の信頼度は殆どのロットで0.95以上である。即ち、現在の軌道状態は管理値に対して十分に良好に維持されているといえる。

(2) 線区信頼度

次に、各ロットの不信頼度を「1-信頼度」と定義し、1ヶ月後の値が管理値以上になる確率を全ロットで合計した値を保守箇所数として算出した例を図3に示す。不信頼度に応じて保守箇所数は増減する。線区はロットが直列リンクで構成されるとみなすと、一定期間後の各ロットの信頼度を用いて全ロット分の積を算出することで、線区信頼度を得られる。検測間隔を12ヶ月まで想定し、算出した結果を図4に示す。検測間隔が長くなると高低狂いが大きく進むため、次の検測時に管理値を超えるロットが存在する可能性が増えて、線区信頼度は低下する。また、この低下は管理値が小さい程、大きい。

(3) 精度評価

表2 分布適合度

・スコアリングによる評価

順位	分布名					計
	対数正規	対数ロジスティック	ガンマ	指数	ワイブル	
1	6	20	29	15	30	100
2	13	11	39	12	25	100
3	9	11	18	29	33	100
4	33	38	10	11	8	100
5	39	20	4	33	4	100
得点	214	273	379	265	369	

得点 = 5×1位のロット数 + 4×2位のロット数 + 3×3位のロット数 + 2×4位のロット数 + 1×5位のロット数

・ $\chi^2$ 乗統計量(100ロットの平均値等)による評価

$\chi^2$ 乗値	分布名				
	対数正規	対数ロジスティック	ガンマ	指数	ワイブル
平均	33.90	28.41	22.40	32.02	22.24
メジアン	31.99	23.68	17.99	25.34	18.33
最大	110.67	83.78	72.31	137.86	81.22
最小	8.43	4.95	3.40	3.40	3.37
評価			○		○

分析データ数を確保するため、保守の少ない各年の夏のデータを用い、3ヶ月後における6mm以下の各値（目安値）の超過箇所数の推定値と実測値を比較した。初期値が目安値を超えるデータを除いて比較した結果を図5に示す。推定値と実測値は概ね近いことから、ガンマ分布を用いたモデルによる超過箇所数の推計は妥当といえる。

ところで、本モデルの妥当性の検証のために、上記と同様に高低狂いの初期値と進みを入力とし、3ヶ月後の超過箇所数を推定するlogitモデルを構築し、推計精度を確認した。得られた推定値は実測値に一致し、高精度で推定できた。但し、このモデルでは、予測期間、管理値を変える度に、履歴データを用いてモデル化する必要があるため、汎用性が低い。また、入力値（高低狂い、進み）が同じロットでは、推定確率は同じ値になり、ロット間での特に進みのばらつきの差を考慮できない。更に、一般に軌道状態が悪いロットは早期に保守されてしまうため、検討する時間間隔が長いと、モデル化の際に使用するデータに状態不良ロットのデータが含まれ難く、モデルに危険側のバイアスが付与されてしまう可能性が高い。

以上のことから、モデルの汎用性や受容性の観点からは、ガンマ分布を用いたモデルの方が適当である。

#### 4. モデルの活用法

信頼性を重視した保守計画法を検討するため、構築したモデルを用いて検測周期等が予防保守（管理値超過前に行う保守）と事後保守（管理値超過を検測した後に行う保守）に与える影響を分析する。

まず、保守のポリシーとして以下の3つを想定する。

- ① 次の検測時に管理値を超過する確率 $F_i$ をロット別に算出し、この値が大きな上位 $E$ ロットを予防保守する。予防保守されないロットでの確率の総和を事後保守箇所数の期待値とする。
- ② 確率 $F_i$ が閾値より高いロットを予防保守する。事後保守箇所数については①の定義と同じとする。
- ③ 各ロットの信頼度 $R_i (=1-F_i)$ を用いて算出した線区

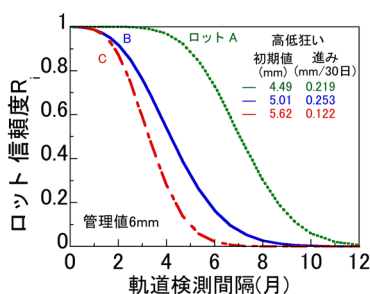


図2 ロット別信頼度関数

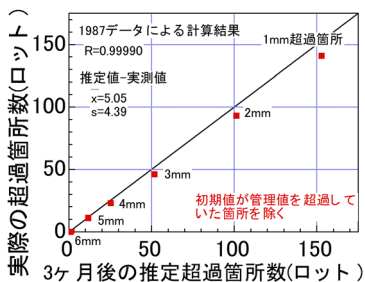


図5 モデルの推定精度

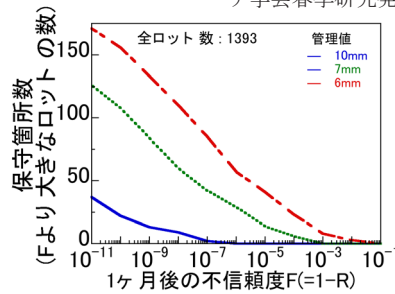


図3 不信頼度に基づく保守箇所数

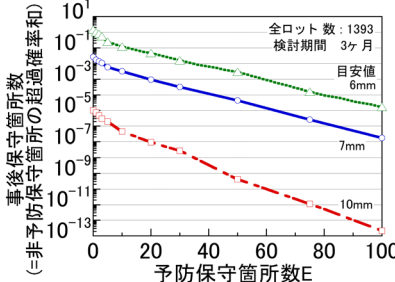


図6 ポリシー①の検討結果

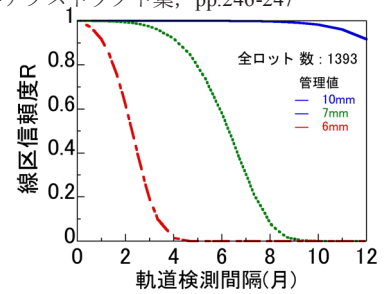


図4 線区信頼度関数

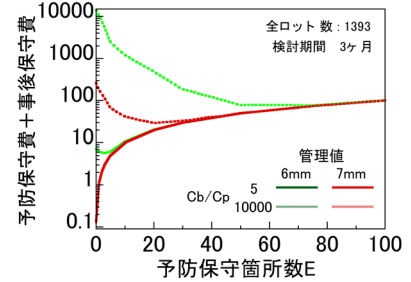


図7 ポリシー①の保守費

信頼度が閾値（目標信頼度）より大きくなるように予防保守ロットを確率 $F_i$ の大きな順に選択する。事後保守箇所数については①と同じとする。

以上により得られた各保守箇所数について、①を例として図6に示す。予防保守箇所数 $E$ を増やすと事後保守箇所数が減ること、また管理値を大きくすると予防保守箇所数、事後保守箇所数共に減少することが分かる。事後保守回数が少ないのは、実際的高低狂いは管理値に比べて十分に小さく維持されていることその他、想定した3ヶ月間の進みは小さいためと考えられる。②、③についても結果の傾向は同様であった。

以上のように各保守の回数を得られると、予防保守と事後保守の単価を設定して総保守費用を算定できる。例えば、事後保守/予防保守の費用比( $C_b/C_p$ )を5とした場合の例を①について図7に示す。予防保守箇所数 $E$ に応じて総保守費は変化し、目安値6mmの場合には $E=3$ で極小となる。このように極小となる $E$ が小さいのは、現状の軌道状態が良好であることその他、事後保守費用に施工費しか想定しておらず、 $C_b/C_p$ の比が小さいためと考えられる。そこで、目安値超過による輸送障害に伴う機会損失等による増加を考慮して $C_b/C_p$ の比を10000とすると、目安値6mmの場合には $E=75$ 、同7mmの場合には $E=20$ で極小となる。即ち、 $C_b/C_p$ 比や目安値の増減に応じて各保守箇所数は増減する。但し、この結果は高低狂いの初期値や進みに応じて変化するため、各検討開始時（年度初等）の高低狂いや進みの設定モデルの構築が課題である。

#### 5. おわりに

信頼性を重視した軌道保守計画作成のために、軌道状態データを分析し、検査間隔、管理値と保守量の関係を把握した。今後は、経済的な検査間隔や管理値等を検討する。

#### [参考文献]

三和, 大山 [2020] 「我が国の鉄道事故データに基づくRAMSパラメータの推定」, 2020年日本オペレーションズ・リサーチ学会春季研究発表会アブストラクト集, pp.246-247