

IV-35 マルコフ連鎖モデルを用いた軌道状態予測法の考察

J R四国 正会員 梶間 津洋志

J R四国 正会員 脇 昌央

J R四国 正会員 高木 政彦

1. はじめに

J Rにおける軌道管理は、①マヤチャートと呼ばれる軌道狂い波形から狂い限度値を定めて管理する方法と、②線路の一定区間における軌道状態を狂い量の超過確率で包括的に管理する方法の、主に2手法により実施されている。

さて、軌道状態が将来どのように変化するかを保守量との関係から時々刻々と予測することが可能となれば、保守の最適化と設備投資の両面に分かりやすい目安を与えてくれるに違いない。これを実現する手法としてマルコフ連鎖モデルを用いた軌道状態の将来予測法を以下のように試みた。

2. マルコフ連鎖モデルを用いた軌道状態予測法

2. 1 軌道狂い指数P値

線路のある一定区間ごとの軌道狂い量を分かりやすい指標で包括的に管理するために、J Rでは古くより軌道狂い指数（P 値）を用いる方法が使われている。

これは、軌道狂い分布を正規分布とみなし、一定の限界線±3 mm を超える狂いの割合をP 値として表している。現実的には、軌道検測車により50 cm 毎に、レール長10 m に対し変位量±3 mm を超える点を検出し、一定区間（通常500 m ロット）内での発生頻度から次のように求めている。

$$P = f / n * 100 \quad \cdots \textcircled{1}$$

P…P 値

f…変位量±3 mm を超える箇所

n…測点数

このP 値は、理論的には正規分布の超過確率として与えられるが、現実の軌道ではその良否に応じて10～50くらいまでの広い範囲の値になり、さらにロットP 値の分布は、一般的には次式のガンマ

分布で（あるいはガンベル分布などでも）近似することができ、やや歪んだ流動性の高い分布形を示している。

$$f(x) = A x^b e^{-ca} \quad \cdots \textcircled{2}$$

A,b,c,a …係数

2. 2 マルコフ連鎖モデル

一般にn時点の状態確率 P_N がn-1時点の状態にのみ関係するとした場合、 P_N は確率推移行列Aにより次式③

$$P_N = A * P_{N-1} \quad \cdots \textcircled{3}$$

で表現される。

また、初期時点（n=0）の状態確率 P_0 が分かると、次式

$$P_N = A^{N*} P_0 \quad \cdots \textcircled{4}$$

にて P_N が計算されることになる。

さらに、 $P_w = A * P_w$ を満足する定常分布は $P_w = (I - A^+)^{-1}$ にて求められる。

I …単位行列

A^+ …行列Aで、最終列が1のもの

2. 3 マルコフ連鎖の軌道状態予測への適用

軌道状態の時間的変化が、マルコフ連鎖モデルで表されるとすると、推移行列Aが一定に与えられる必要がある。ここで、軌道状態は通常はMTTと呼ばれる保守用大型機械にて計画的に保守することで、ある範囲内にレベルが保たれているが、一方、PCまくらぎ化やロングレール化、道床交換等により飛躍的に軌道状態が良化している、という2つの側面を有している。すなわち、保守（修繕）と設備投資（軌道強化）である。したがって、推移行列Aを単純化するためには、両者が独立事象と考えて、一方のみに着目する必要がある。（あるいは、両者の重ね合わせでも可能となろう。）

軌道状態を保守量の変化のみに着目した場合、予讃線のある区間のP値が、仮に保守0となった場合を仮定すると、どう変化するのかを演算してみると、次のような結果を得た。

表一1

	N時点	N+10時点	N+15時点
P値平均 (m)	15.5	22.7	26.3
分散 (δ)	11.3	15.8	19.9

3. P値とMTT投入量及び軌道強化の関係

予讃線の示す高低P値は17程度でありPC化率は40%程度、MTTは40～50%/年投入している。そして、現在、予讃線では曲線部を中心にPC化が進捗している。今、定数項、MTTつき固め延長、PC化区間の延びの変数を用いて重回帰分析を行った結果を、表一2に示す。ここで、各期毎のMTTつき固め延長とPC化区間の延び(km)を比較すると、MTTつき固め延長の効果の方が2.4倍/kmみられる。つまり、軌道強化については、MTT程に直接的に平均P値の低減効果は見られていないとも考えられるが、やや相関が小さい。

表一3は、PC化区間の延びのかわりに総延長に対するPC化の割合を指標とした場合である。軌道強化は、長期的に見ると、平均P値の変化に優位に効いていることが分かる。PC化によって、軌道構造が強化されることによって、平均P値の平均のような指標値の下限が減少し、より良好な値で均衡するためであろう。

このように、PC化は短期的というよりは長期的な視点で見ると、軌道状態の改善に寄与していることが改めて分かった。短期的にMTT投入量がP値改善に直接結びつくか、PC化率に対応した投入量の関係は、表一4の通りである。

表一2

修正済R二乗値		0.556
非説明変数		
高低左レール軌道狂いP値		
説明変数	推定値	t値
定数項	24.6	21.5
MTTつき固め延長	-0.178	-2.62
PC化区間の延び(km)	-0.0768	-0.112

表一3

修正済R二乗値		0.714
非説明変数		
高低左レール軌道狂いP値		
説明変数	推定値	t値
定数項	28.1	11.3
MTTつき固め延長	-9.20	-3.47
PC化区間の総延長(%)	-10.6	-1.50

表一4

PC化区間	MTT投入延長					
	5%	10%	15%	20%	25%	30%
30%	24.5	24.0	23.5	23.1	22.6	22.2
35%	23.9	23.5	23.0	22.6	22.1	21.6
40%	23.4	22.9	22.5	22.0	21.6	21.1
45%	22.9	22.4	22.0	21.5	21.0	20.6
50%	22.3	21.9	21.4	21.0	20.5	20.0

4. シミュレーション結果

予讃線の前述の区間において、P値が悪化した後、MTT投入でどのようにP値分布が変化するかをシミュレーションすると図一1のようになった。

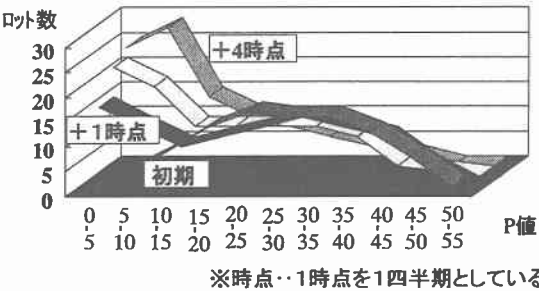


図-1 MTT再投入による分布の変化

5. おわりに

現実の線路において正確な予測を行うためには、MTT投入と軌道強化の相関性をモデルの中の確率密度行列に表現していくことが必要となる。しかしながら、この場合の確率過程は複雑なものとなり、実用化への課題も大きい。今後は、課題も検討しつつ、軌道のインフラが変化しない線区でのモデルの単純化を図っていくことを考えている。