

軌道狂い保守計画作成のための軌道状態推移モデルの構築*

Modeling the Transition of Track States for Track Maintenance Planning

三和雅史**、石川達也***、大山達雄****

By Masashi MIWA**, Tatsuya ISHIKAWA***, Tatsuo OYAMA****

1. はじめに

効率的な軌道保守活動を実現するためには、保守計画を適切に決定することは極めて重要である。このことから、軌道狂いの最適な保守時期を出力とするシステムの開発を目標として、現在、図-1に示す分析作業を実施しているところである。この作業は蓄積した軌道状態推移データを用いてロット(100m区間)別の軌道状態推移を予測するモデルについての分析と、予測結果を用いて最適保守計画を作成するモデルの分析とから構成される。本研究では、このうちの軌道状態推移予測のモデル分析結果を示す。

さて、高低狂いの分布形状やその進み量は、輸送条件や線形条件、軌道構造条件等の要因の違いにより差を生じると考えられる。このことから、まず、輸送条件の異なる線区Ⅰ(在来線・幹線)と線区Ⅱ(在来線・地方線)の2路線において測定された10m弦正矢高低狂いデータを表-1に示す条件に分類する。そして、高低狂いの統計的特性を要因別に把握して高低狂い確率モデルを推計する。また、軌道状態の時間変化を評価するモデル(劣化過程解析モデル、保守効果解析モデル)を推計する。

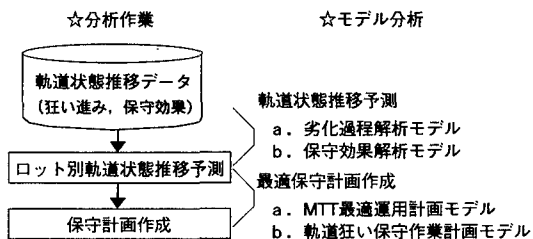


図-1 システム開発のための分析作業

*キーワード: 鉄道計画, 土木施設維持管理

**正員、(財)鉄道総合技術研究所 前軌道技術開発推進部 (東京都国分寺市光町2-8-38、TEL 042-573-7278、FAX 042-573-7296)

***正員、東日本旅客鉄道株式会社 総合技術開発推進部 (東京都渋谷区代々木2-2-2、TEL 03-5334-1142、FAX 03-5334-1109)

****政策研究大学院大学 (東京都新宿区若松町2-2、TEL 03-3341-0454、FAX 03-3341-0582)

守効果解析モデル)を推計する。

2. 高低狂い確率モデルの推計¹⁾

ここでは、高低狂いが従う分布を推定して高低狂い確率モデルを推計する。そして、要因の違いがモデルに与える影響を定量化して要因別高低狂い確率モデルを推計する。

(1) 高低狂い確率分布の推計

線区別に全条件のデータを1つにまとめた高低狂いの分布を図-2に示す。この2つの分布に対して、次に示す各分布への適合性を評価した結果(適合性のよい順に4つの分布とその χ^2 値)を表-2に示す。

- ・ Beta
- ・ Binomial
- ・ Chi-square (Chisq)
- ・ Error (Erf)
- ・ Exponential(Exp)
- ・ Erlang
- ・ Gamma
- ・ Geometric
- ・ Hypergeometric (HG)
- ・ Logistic (Log)
- ・ Lognormal
- ・ Pareto
- ・ Negative binomial
- ・ Normal (Norm)
- ・ Poisson (Pois)
- ・ Triangular
- ・ Weibull

両線区とも Logistic 分布への適合性が高い。この傾向は、条件別のデータに対しても同じである。Logistic 分布は、密度関数 $f(x)$ が式(1)のように表され、バラ

表-1 線形・軌道構造・保守条件

※線区Ⅰ							
条件	線形	レール	継目	まくらぎ	道床厚	路盤	保守
A	直線	60kg	溶接	PC	250mm	普通	
B		50N					
C							MTT後
D	曲線	60kg					
E		50N					
F							MTT後
※線区Ⅱ							
条件	線形	レール	継目	まくらぎ	道床厚	路盤	保守
G	直線	40N	普通	PC+木	250mm	普通	
H					200mm		
I		50N					
J							TT後
K					250mm		
L				木	200mm		
M							MTT後
N	曲線			PC+木	250mm		
O					200mm		
P				木			

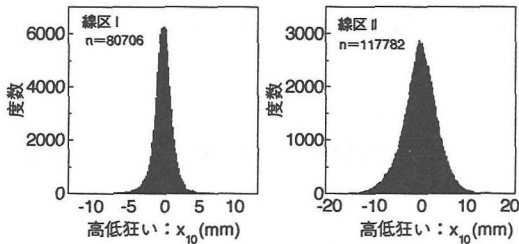


図-2 高低狂い分布例

表-2 分布適合性評価結果

線区	1	2	3	4	線区	1	2	3	4
I	Log	HG	Pois	Chisq	II	Log	Erf	Norm	Exp
	0.79	4.28	6.61	11.55		0.032	0.64	0.64	16.77

表-3 Logistic分布パラメータ値

線区 I							
条件	A~F	A	B	C	D	E	F
α	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	-0.01	0.00
β	0.74	0.78	0.73	0.74	0.61	0.79	0.57

線区 II											
条件	G~P	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
α	0.01	-0.02	-0.07	0.28	0.22	-0.03	0.14	0.00	0.02	0.12	0.03
β	2.16	2.31	2.31	2.48	2.36	2.04	2.44	1.70	2.31	2.02	2.01

メータ α は平均を表し、 β は標準偏差を規定する。よって、現在、軌道状態の区間評価指標に用いられている軌道狂い P 値や標準偏差はパラメータ β に対応することから、このパラメータ β に着目する。

$$f(x) = \frac{\exp \{(x - \alpha) / \beta\}}{\beta [1 + \exp \{(x - \alpha) / \beta\}]^2}$$

$$\text{平均: } \alpha \quad \text{標準偏差: } \pi\beta / 3 \quad (1)$$

データから得られるパラメータの値を線区別、条件別に表-3に示す。ここで、パラメータ β は線区間、条件間で異なる傾向がわかるが、これが要因の違いによるものと考えられる。

以上から、高低狂い分布を Logistic 分布で表現することとし、以下ではその適切な適用方法を検討する。

(2) Logistic 分布による管理ロットの決定

ここでは、実際に軌道狂い管理を行なう際の管理単位となるロット (100m) に対する Logistic 分布での管理可能性を検討する。

まず、各ロットのデータの Logistic 分布への適合性を R^2 値で条件別に図-3に示す。図から、ロットによっては Logistic 分布への適合性が著しく悪いことがわかる。このようなロットは他の分布でも管理することが難しいと考えられることから、Logistic 分布で管理するロットを選択するための基準を決める必要がある。ここでは、この基準を Logistic 分布への R^2 値

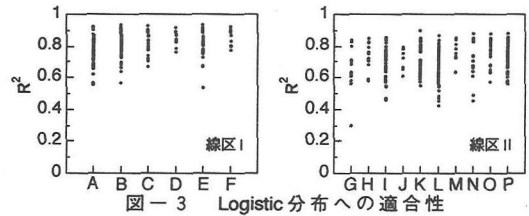


図-3 Logistic 分布への適合性

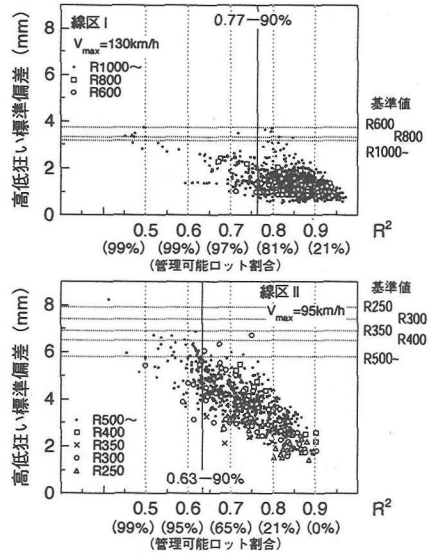


図-4 R^2 値と高低狂いの標準偏差

により決定することとし、その値を基準 R^2 値と呼ぶ。

さて、検測データから得られる各ロットの R^2 値と高低狂い標準偏差との関係を図-4に示す。ここで、上下動揺 (全振幅) の管理基準を線区ごとに設定して、高低狂いと上下動揺との関係式 [式(2)]²⁾ から、高低狂い標準偏差の基準値 $\sigma_{y\lim}$ を決める。

$$\sigma_y = \frac{\sigma_\alpha}{k_v \cdot V} \quad (2)$$

σ_y : 高低狂い標準偏差 (mm)

σ_α : 上下動揺標準偏差 (m/s^2)

k_v : 車両動揺係数 (上下)

V : 速度 (km/h)

計算される基準値を図-4に示す。基準値を超過したロットについては、Logistic 分布での管理以前に事後保守が施されることから劣化予測の対象外である。このため、基準値以下のロットについて Logistic 分布で管理するロットの抽出方法が問題となる。ここでは、政策的に全体の約 90% のロットを Logistic 分布で管理すると決め、基準 R^2 値を設定すると、線区 I では 0.77、線区 II では 0.63 と設定される。

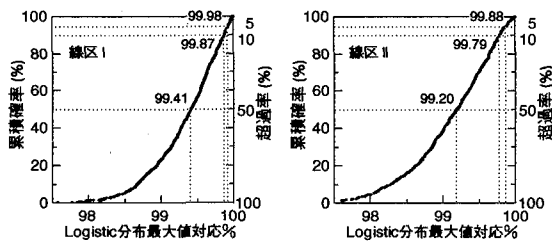


図-5 高低狂い推定最大値と実測最大値

表-4 分散分析結果

線区		I		II	
		係数	Prob>F	係数	Prob>F
線形	直線	μ	0.680	1.969	
	曲線	x_1	0.031	0.088	0.01
レール	40N		-0.031	-0.088	
	50N	x_2	0.019	0.013	0.31
	60kg		-0.019	-0.013	
まくらぎ	PC+木	x_3		0.072	0.07
	木			-0.072	
道床厚	200mm	x_4		0.064	0.13
	250mm			-0.064	
保守	TT後	x_5	0.032	0.137	0.08
	MIT後		-0.032	-0.137	
Prob>F		0.017		0.005	
R ²		0.020		0.065	

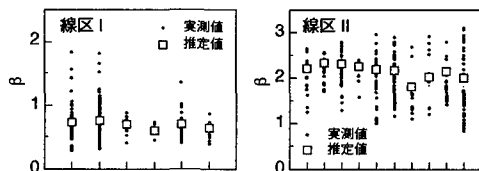


図-6 パラメータ β の推定値と実測値

次に、もう1つの管理基準である高低狂い最大値について検討する。各ロットごとに推定したパラメータ β が規定するLogistic分布において、実測最大値に相当する%（最大値対応%）を累積頻度で図-5に示す。図から、例えば、推定値以上の実測値の割合（超過率）を10%以下に管理できる可能性が高い最大値対応%は99.9%であることがわかる。

(3) 要因別モデルの推計

ここでは、先程設定した基準 R^2 値により抽出した検測データを分散分析により処理して、Logistic分布のパラメータ β の要因別の高低狂い確率モデルを推計する。具体的には、式(3)に示すパラメータ β の推定式の係数を線区ごとに決定する。

$$\beta = \mu + x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 \quad (3)$$

分散分析の結果を表-4に示す。両線区とも線形と保守の寄与度が高い。また、得られるパラメータ β

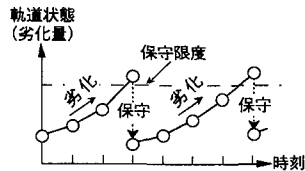


図-7 軌道状態の時間推移イメージ

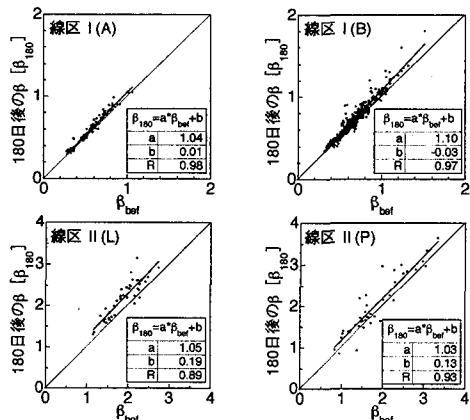


図-8 劣化過程におけるパラメータ β の変化

の推定値と実測値との関係を図-6に示す。図から、実測値の平均に近い値を推定できていることがわかるが、要因の差以上にロット間のばらつきが大きい。

3. 軌道状態推移モデルの推計

軌道状態の時間推移のイメージは図-7に示すように劣化量の劣化による増加と保守による減少との繰返しで表される。ここでは、この軌道状態の劣化過程や保守効果を定量的に評価するモデルを推計する。

(1) 劣化過程解析モデル

途中に保守がない連続する180日間の期間開始時のパラメータ（事前パラメータ） β_{def} と期間経過後のパラメータ β_{180} との関係を図-8に示す。図から、事前パラメータに対応して期間経過後のパラメータ β の増加量が大きくなる傾向がわかる。このことは、パラメータ β が時間に対して非線形性に増加することを示唆している。また、図中に示した回帰直線の傾きの差は要因の違いによるものと考えられる。しかしながら、全ロットについて一律に事前パラメータと期間経過後のパラメータとの関係や、要因間の差異を定義することは、ロット間のばらつきが大きいことから無理がある。よって、ロットごとに状態推

表-5 予測精度評価結果

線区	条件	予測方法	$\beta_{180}=a\cdot\beta_{\text{pred}}+b$			
			a	b	R	標準誤差
I	A	(i) $s=0.1$	1.05	-0.02	0.99	0.042
		(ii)	1.00	0.05	0.90	0.097
	B	(i) $s=0.1$	1.05	-0.02	0.99	0.052
		(ii)	1.04	-0.01	0.90	0.109
II	G~P	(i) $s=0.2$	1.05	-0.05	0.97	0.283
		(ii)	1.09	-0.10	0.75	0.474

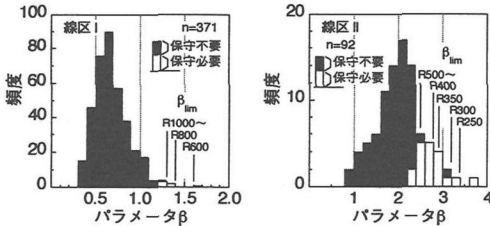


図-9 保守必要ロットの選定結果

移履歴から将来の状態を予測するモデルを検討する。

予測方法としては、推移履歴データの時間に対して (i) 一次回帰による予測と (ii) 指数平滑法による予測の2つの決定論的方法を想定する。なお、予測対象としてはパラメータ β が時間に対して非線型な増加傾向を示すことを考慮して、パラメータ β の単位時間あたり増加量 (劣化速度) $\Delta\beta$ とする。つまり、劣化速度の予測結果を用いて、将来のパラメータ β を算出する。なお、指数平滑法による方法は次式による。

$$\begin{aligned}\Delta\beta(t) &= s\Delta\beta(t) + (1-s)\Delta\beta(t-1) + \frac{1-s}{s}T_t \\ T_t &= s\{\Delta\beta(t) - \Delta\beta(t-1)\} + (1-s)\{\Delta\beta(t-1) - \Delta\beta(t-1)\} \\ \Delta\beta(t+L) &= \Delta\beta(t) + L\cdot T_t \\ \beta(t+L) &= \beta(t) + L\cdot \Delta\beta(t)\end{aligned}\quad (4)$$

$\Delta\beta(t)$: t 期の劣化速度期待値

$\Delta\beta(t)$: t 期の劣化速度実測値

s : 平滑化係数 ($0 < s \leq 1$)

T_t : t 期の傾向

$\beta(t)$: t 期のパラメータ β 実測値

4回の検測データから180日後のパラメータ β_{180} を推定し、図-8と同様にして得られる事前パラメータと期間経過後のパラメータとの一次回帰式の係数を表-5に示す。なお、線区IIについてはデータ数が少ないことから、全条件について1つにまとめた。表から、モデルとしては指数平滑法による予測の方が実態に近く、予測精度も高いことがわかる。

次に、このモデルを用いた保守必要箇所の選定方法を検討する。パラメータ β の基準値 β_{lim} が与えられた場合、計画期間 T の間にパラメータ β の予測値が基準値を超過するのであれば、そのロットへの保守が

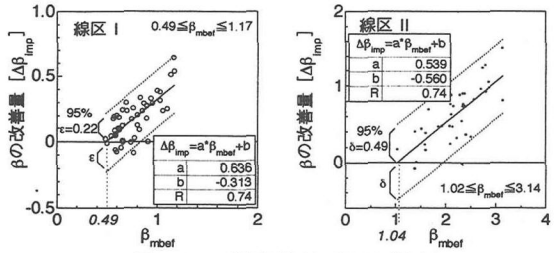


図-10 保守効果 (MTT 保守)

計画期間中に必要である。例えば、計画期間を1年とし、前章(2)と同様の考え方で基準値 β_{lim} を設定してみた場合に、指数平滑法による予測を用いて保守必要ロットを選定した結果をパラメータ β の頻度分布として図-9に示す。図から、基準値よりやや小さい値より大きなパラメータ β のロットが保守対象として選ばれていることがわかる。

(2) 保守効果解析モデル

保守効果についても、ロット間でばらつくことが想定されるが、保守の実測データの数には劣化データに比べて少なく、このばらつきを把握するのは困難である。よって、各線区の全ロットに対して一律に同じ保守効果解析モデルを設定することとする。

MTT 保守前パラメータ β_{mbef} と保守による改善量 $\Delta\beta_{\text{imp}}$ との関係を図-10に示す。図から、保守前パラメータに改善量が依存することや、ばらつくことがわかる。よって、保守効果解析モデルを図中に示した回帰直線と95%信頼区間とで構成することとする。

4. おわりに

検測データから高低狂いの統計的特性を把握して高低狂い確率モデルを推計した。そして、軌道状態の時間変化を評価する軌道状態推移予測モデル (劣化過程解析モデル、保守効果解析モデル) を推計した。今後は、推計したモデルを応用して、最適な保守計画の策定方法を検討する。

文 献

- 1) 三和他：軌道状態推移予測モデルの構築に関する基礎的検討, J-Rail' 98 講演論文集, pp.443 ~ 446, 1993.9
- 2) 高井他：軌道狂いの標準偏差による車両動揺の推定法, 土木学会第48回年次学術講演会概要集第4部, 1993.9