

S2-2-7.

統計解析による通り狂い状態モデルと

推移モデルの推計

○寺田 浩一郎、[土] 三和 雅史 ((財)鉄道総合技術研究所)

[土] 河西 智司 (北海道旅客鉄道株)

Modeling alignment irregularity condition and transition model by statistical analysis

Koichiro Terada , Masashi Miwa (Railway Technical Research Institute)

Satoshi Kawanishi (Hokkaido Railway Company)

In this paper, we describe a statistical modeling approach to deal with historical data of alignment irregularity. We compare some probability distributions to be fit for alignment irregularity data. We conclude that a logistic distribution best fits the alignment irregularity data. Thus, applying the technique of variance analysis, We are able to estimate standard deviations of alignment irregularity based upon several conditions of curve radius, track structures, train operation, and maintenance method.

Next, we focus on the transition process of alignment irregularity in order to predict changes of standard deviations of alignment irregularity. Applying the exponential smoothing method, we develop a degradation model depending on historical data in each lot (100m in length). According to the results of statistical data analysis, we can express changes of the standard deviation in each condition.

キーワード：通り狂い、ロジスティック分布、分散分析

Keywords: alignment irregularity, logistic distribution, analysis of variance,

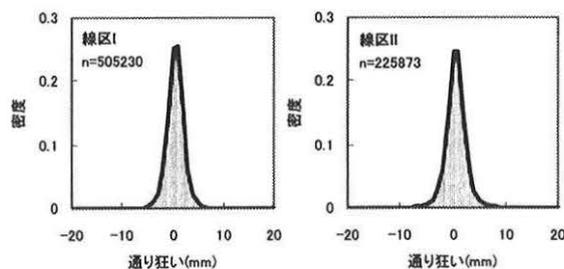
1. はじめに

列車の走行安全性や良好な乗り心地の確保のために、高品質な軌道を維持することは極めて重要である。特に近年の列車の高速化に伴い、高低狂いだけではなく、通り狂いについても適正かつ効率的な管理の重要度は増しつつある。しかしながら高低狂いについては、その分布形状や要因が分布に与える影響、推移を統計的に分析した例はあるが、通り狂いについては同様の分析はなされていない。

以上のことから、本研究では通り狂いデータに対して統計解析を実施し、通り狂い状態モデルと推移モデルを推計する。

2. 通り狂い状態モデルの推計

通り狂いの状態は、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、輸送条件の異なる線区 I (在来線、振子列車走行、Vmax=130km/h、1000 万通ト/年) と線区 II (在来線、振子列車非走行、Vmax=100km/h、2000 万通ト/年) の 2 線区において軌道検測車で検測された 10m 弦通り狂いデータ (1m サンプリング) に対して波長域 6~60m のバンドパスフィルタ処理したデータを用いて、線区別、要因別の通り狂い状態モデルを推計する。



図・1 線区別通り狂い分布

<2.1>通り狂いデータの確率分布の推計

まず線区全体の通り狂いの分布を把握するために線区ごとの通り狂い分布を図・1 に示す。通り狂い分布は平均がおおよそ 0 で左右対称に分布する。これら 2 つの分布に対して次に示す各分布に対する分布適合性を評価した。表・1 に適合度が高い順に 4 つの分布と、平方平均 2 乗誤差値を示す。

- ・ロジスティック分布 (Log)
- ・正規分布 (Nor)
- ・逆ガウス分布 (IG)
- ・対数正規分布 (LN)
- ・アーラン分布 (Erl)
- ・ガンマ分布
- ・誤差分布
- ・t 分布
- ・パレート分布
- ・指数分布
- ・一様分布
- ・三角分布 (Tri)

平成 16 年 鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL'04)

- ・極値分布 (EV)
- ・ワイブル分布
- ・ピアソン分布 (Pea)
- ・カイ 2 乗分布
- ・対数ロジスティック分布
- ・レイリー分布
- ・ベータ分布 (Bet)

表-1 分布適合性評価結果

平方平均 2 乗誤差値 × 10⁷

線区	1 位	2 位	3 位	4 位	線区	1 位	2 位	3 位	4 位
	Log	Nor	LN	IG		II	Log	LN	Nor
I	3	117	117	121		55	274	274	279

両線区ともロジスティック分布への適合度が最も高い。ロジスティック分布は左右対称の分布形状であり、分布関数 (c.d.f)、確率密度関数 (p.d.f) はパラメータ α 、 β を用いて、次式で表される。

$$c.d.f \quad F(x) = \frac{1}{1 + \exp\left\{-\frac{(x-\alpha)}{\beta}\right\}} \quad (2.1)$$

$$p.d.f \quad f(x) = \frac{\exp\left\{\frac{(x-\alpha)}{\beta}\right\}}{\beta \left[1 + \exp\left\{\frac{(x-\alpha)}{\beta}\right\}\right]^2} \quad (2.2)$$

$$\text{平均: } \alpha, \quad \text{標準偏差: } \frac{\pi\beta}{\sqrt{3}} \quad (2.3)$$

ここでパラメータ α は平均を表すが、通り狂い分布においては 0 と考えられる。また、パラメータ β はその $\pi/\sqrt{3}$ 倍が標準偏差である。よって以下では通り狂いの状態を表す指標として標準偏差を用いる。

表-2 線形、軌道構造、保守条件

線区 I (全条件とも 50N レール、道床厚 250mm、土路盤)

条件	線形	まくらぎ	継目	MTT 施工
A	R=399m	PC	普通	有
B				無
C	R=400m~499m	PC	普通	有
D				無
E	R=500m~599m	PC	普通	有
F				無
G	R=600m~699m	PC	普通	有
H				無
I	R=700m~799m	PC	普通	有
J				無
K	R=800m~直線	PC	普通	有
L				無
M	R=800m~直線	PC	溶接	有
N				無
O	R=800m~直線	木	普通	有
P				無

線区 II (全条件とも 50N レール、道床厚 250mm、土路盤)

条件	線形	まくらぎ	継目	MTT 施工
Q	R=399m	PC	普通	有
R				無
S	R=400m~499m	PC	溶接	有
T			普通	無
U	R=600m~699m	PC	溶接	有
V			普通	無
W	R=800m~直線	PC	普通	有
X				無
Y	R=800m~直線	PC	溶接	有
Z				無
AA	R=800m~直線	PC	普通	有
AB				無

次に軌道構造や線形が軌道狂いの確率分布に与える影響を調べるために、要因別に分類したデータについても同様に推計する。ここでは表-2 に示す A~AB の 28 通りの条件に分類したデータに対して分布適合性を評価する。なお、MTT の施工の有無は軌道検測の 1 ヶ月前までに施工があった場合を「有」とする。

表-3 に示すようにほとんどの条件でロジスティック分布への適合度が一番高い。A、I、S の 3 条件ではロジスティック分布への適合度は第 2 位であるが、第 1 位との平方平均 2 乗誤差値の差は僅かであるため、いずれの条件においてもロジスティック分布への適合度は高いと判断する。

以上より、通り狂い状態モデルをロジスティック分布で表現することとする。

<2.2> 要因別通り狂い状態モデルの推計

推計した通り狂い状態モデルにおいて、条件別に分類したデータから得られる標準偏差を表-4 に示す。各条件間で標準偏差に差異が認められることから、各条件のデータをロット (100m) で区切り、その通り狂い標準偏差 σ を分散分析により処理し、線区、線形、継目、まくらぎ、MTT 施工の要因別通り狂い状態モデルを推計する。具体的には各要因が独立でかつ σ に対し、線形に作用すると仮定し、式

表-3 分布適合性評価結果

線区 I 平方平均 2 乗誤差値 × 10⁷

条件	1 位	2 位	3 位	4 位	条件	1 位	2 位	3 位	4 位
	Pea	Log	LN	EV		I	Tri	Log	Bet
A	588	598	607	610	J	240	283	335	348
B	50	134	135	136		Log	58	167	351
C	Log	Nor	IG	Bet	K	Log	Nor	Bet	IG
	86	285	286	287		9	186	188	191
D	Log	LN	IG	Erl	L	Log	Nor	Bet	Tri
	41	100	100	102		8	74	82	280
E	Log	Nor	Bet	IG	M	Log	Nor	IG	LN
	130	286	287	290		4	98	104	116
F	Log	Nor	Bet	Erl	N	Log	Nor	IG	LN
	3	90	92	196		28	214	220	249
G	Log	Nor	Bet	LN	O	Log	Nor	LN	Tri
	61	314	316	324		33	208	221	498
H	Log	Nor	LN	Erl	P	Log	Nor	IG	Erl
	64	297	323	383		8	80	81	152

線区 II 平方平均 2 乗誤差値 × 10⁷

条件	1 位	2 位	3 位	4 位	条件	1 位	2 位	3 位	4 位
	Log	Bet	Nor	Tri		W	Log	Nor	IG
Q	Log	Bet <td>Nor <td>Tri <td rowspan="2">X</td> <td>Log</td> <td>Bet <td>Nor <td>IG</td> </td></td></td></td>	Nor <td>Tri <td rowspan="2">X</td> <td>Log</td> <td>Bet <td>Nor <td>IG</td> </td></td></td>	Tri <td rowspan="2">X</td> <td>Log</td> <td>Bet <td>Nor <td>IG</td> </td></td>	X	Log	Bet <td>Nor <td>IG</td> </td>	Nor <td>IG</td>	IG
	175	289	333	548		383	617	628	656
R	Log	Nor	Tri <td>Pea</td> <td rowspan="2">Y</td> <td>Log</td> <td>Nor</td> <td>IG</td> <td>Bet</td>	Pea	Y	Log	Nor	IG	Bet
	26	156	385	504		84	337	339	345
S	Pea	Log	LN	EV	Z	Log	Nor	IG	Erl
	588	598	610	610		159	379	381	382
T	Log	Bet <td>Nor <td>Tri</td> <td rowspan="2">AA</td> <td>Log</td> <td>Nor</td> <td>IG</td> <td>LN</td> </td>	Nor <td>Tri</td> <td rowspan="2">AA</td> <td>Log</td> <td>Nor</td> <td>IG</td> <td>LN</td>	Tri	AA	Log	Nor	IG	LN
	118	237	240	397		31	247	254	379
U	Log	IG <td>LN <td>Nor</td> <td rowspan="2">AB</td> <td>Log</td> <td>IG <td>Nor</td> <td>LN</td> </td></td>	LN <td>Nor</td> <td rowspan="2">AB</td> <td>Log</td> <td>IG <td>Nor</td> <td>LN</td> </td>	Nor	AB	Log	IG <td>Nor</td> <td>LN</td>	Nor	LN
	32	201	203	208		28	222	228	238
V	Log	Nor <td>IG <td>Tri</td> <td rowspan="2"></td> <td>Log</td> <td>IG <td>Nor</td> <td>LN</td> </td></td>	IG <td>Tri</td> <td rowspan="2"></td> <td>Log</td> <td>IG <td>Nor</td> <td>LN</td> </td>	Tri		Log	IG <td>Nor</td> <td>LN</td>	Nor	LN
	114	283	288	531		9	167	169	170

表-4 条件別の通り狂い標準偏差

線区I	条件	A~P	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
	σ		1.70	1.94	2.40	1.92	2.19	1.52	1.73	1.87	1.96	2.04	1.97	1.27	1.45	1.23	1.42
線区II	条件	Q~AB	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB			
	σ		2.07	3.21	2.81	2.96	2.36	2.37	2.83	1.48	2.18	1.59	1.79	1.30	1.48		

表-5 分散分析結果

		μ	線区I		線区II		
			係数	有意確率	係数	有意確率	
線形 (曲線半径)	x_1		1.233	0.000	1.360	0.000	
	~399m		0.564	0.000	0.939	0.000	
	400m~499m		0.601		0.846		
	500m~599m		0.179				
	600m~699m		0.294		0.489		0.000
	700m~799m		0.383				
800m~直線		0.000	0.000		0.000		
継目	x_2		0.208	0.000	0.195	0.000	
	普通		0.000		0.000		
まくらぎ	x_3		0.000	0.895			
	PC		0.003				
MTT施工	x_4		0.000	0.000	0.000	0.049	
	有		0.128		0.132		
			$R^2=0.141$		$R^2=0.262$		

(2.4) に示す σ 推定式の係数 μ 、 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 を線区ごとに推計する。

$$\sigma = \mu + x_1 + x_2 + x_3 + x_4 \quad (2.4)$$

- μ : 切片、 x_1 : 線形によるパラメータ
- x_2 : 継目条件によるパラメータ
- x_3 : マクラギ種別によるパラメータ
- x_4 : MTT 施工有無によるパラメータ

分散分析の結果を表-5 に示す。線区I、線区IIともに線形、継目、MTT 施工の寄与度が高い。線区IIでは曲線半径が大きいほど係数 x_1 が小さい。また、溶接継目の方が普通継目より両線とも 0.2 程度標準偏差が小さいことが分かる。更に MTT 施工後の軌道は、施工前に比べて両線とも 0.13 程度標準偏差が小さいことも分かる。一方まくらぎについては有意な差異は認められない。

この式で得られる通り狂いの推定値と実測値の関係を図-2 に示す。全体的に推定値は実測値の平均に近い。線区IIでは実測値のパラツキが大きい。このようなロットの多くは踏切や橋梁などの構造物が含まれるロットである。このことはこのような構造物の有無も要因として考慮する必要があることを示唆している。

3. 通り狂い進み量予測モデルの推計

通り狂いの時間推移は、時間の経過とともに劣化(狂い)が進み、保守により改善されることの繰り返して表現され

る。ここでは通りの劣化の進行(通り狂い進み)を予測するための劣化過程解析モデルを推計する。推計においてはデータは、前章で用いた通り狂い標準偏差のデータを、表-2 に示す条件で分類して使用する。

<3.1>劣化過程解析モデル

一般に、通り狂いは保守がなされなければ時間の経過に伴い漸増すると考えられる。そして、要因の違いによって漸増傾向は異なると考えられることから、通り狂い標準偏差の進み量を要因別に解析して要因別劣化過程解析モデルを推計する。

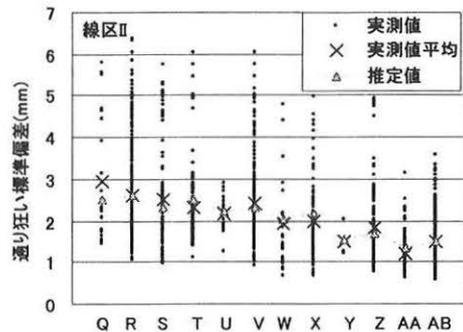
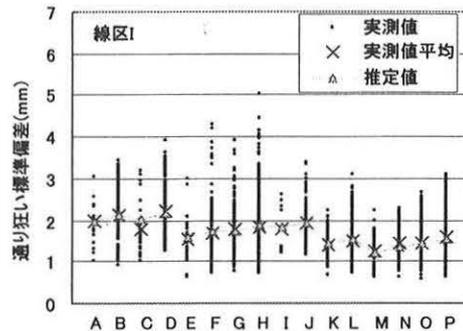


図-2 通り狂い標準偏差の推定値と実測値

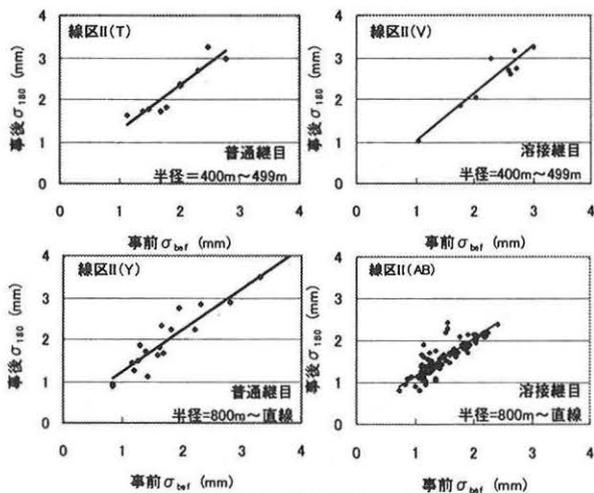
<3.2>要因別劣化過程解析モデル

任意の時刻の通り狂い標準偏差を(事前 σ_{bef})と、その後、保守されずに 180 日間経過した後の通り狂い標準偏差(事後 σ_{180})との関係を線区IIの条件 T、V、Y、AB について図-3 に示す。図中に示す線形回帰式は以下の通りである。

$$\begin{cases} \text{線区 II} \\ \begin{cases} (T) & \sigma_{180} = 1.08 \sigma_{bef} + 0.17 & [R=0.94] & (3.1) \\ (V) & \sigma_{180} = 1.12 \sigma_{bef} + 0.10 & [R=0.94] & (3.2) \\ (Y) & \sigma_{180} = 0.98 \sigma_{bef} + 0.23 & [R=0.97] & (3.3) \\ (AB) & \sigma_{180} = 0.89 \sigma_{bef} + 0.26 & [R=0.95] & (3.4) \end{cases} \end{cases}$$

R 値が十分に大きいことから、本モデルにより事後 σ_{180} を高精度で予測可能である。事後 σ_{180} は事前 σ_{bef} に大きく依存するが、T、V と Y、AB の結果より、曲線と直線において狂い進み量が異なることが認められる。また、T、Y と V、AB の結果より、溶接部の方が通り狂い進みが小さいことが分かる。以上の結果は、条件の違いによると解釈できる。更に、事前 σ_{bef} が大きいほど事後の σ_{180} が大きい傾向から、軌道状態が悪いほど劣化速度は大きくなると考えられる。よって、通り狂いが大きくなり過ぎないうちに保守を実施して、適切な状態を維持することが重要である。

このように、本モデルにより通り狂い進み量を精度よく予測できるが、条件として考慮されない各地点固有の情報を反映することはできない。よって本モデルは、線区がある程度長い区間の通り狂いの推移を予測するようなマクロな検討に有効と考えられる。一方、保守作業計画を作成する場合、100m ロットのような短い区間の通り狂い推移を精度よく予測する必要がある。この場合に用いられるべき劣化過程解析モデルは、個々のロットの特性を適切に考慮できるものでなければならない。このことから、任意の時刻の通り狂いを各ロットの特性を考慮しながら予測可能なロット別劣化過程解析モデルを推計する。



図・3 要因別劣化過程の実態

<3.3> ロット別劣化過程解析モデル

ロット別劣化過程解析モデルについては、各ロットの特性を考慮するために、各ロットの推移履歴データを用いて予測する。本モデルには、指数平滑法を適用することで、通り狂いの増加が一定しない場合や、異常値が混入した場合にも高い精度での予測が期待できる。予測式を以下に示す。

$$\hat{\sigma}(t) = s \cdot \sigma(t) + (1-s) \cdot \hat{\sigma}(t-1) \quad (3.5)$$

$$T_t = s \cdot \{\hat{\sigma}(t) - \hat{\sigma}(t-1)\} + (1-s) \cdot T_{t-1} \quad (3.6)$$

$$\bar{\sigma}(t) = \hat{\sigma}(t) + \frac{1-s}{s} T_t \quad (3.7)$$

$$\bar{\sigma}(t+L) = \bar{\sigma}(t) + L \cdot T_t \quad (3.8)$$

$\hat{\sigma}(t)$: 時刻 t の通り狂い標準偏差の推定値 (傾向補正前)

$\sigma(t)$: 時刻 t の通り狂い標準偏差実測値

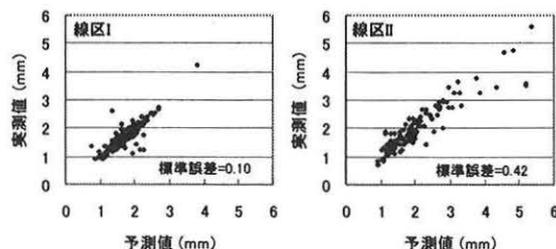
$\bar{\sigma}(t)$: 時刻 t の通り狂い標準偏差の推定値 (傾向補正後)

s : 平滑化係数 ($0 < s \leq 1$)

T_t : 時刻 t における変化の傾向 (mm/時定数)

L : 時刻 t からの経過時間 (予測時間)

本モデルは計画期間中の任意の時刻の各ロットの通り狂いを表現可能である。ここで、約一年分の通り狂い推移データを用い、最終データ取得日から 180 日後の予測を行い、実測値との比較を行った結果を図・4 に示す。なお、平滑化係数 s には、0 から 1 までの 0.1 刻みの値を適用して最も標準誤差が少なくなる値を採用した (線区 I、II 共に 0.1)。図・4 からほとんどの予測値は実測値付近に存在し、標準誤差が小さいことから、本モデルにより高精度な予測が可能であるといえる。



図・4 ロット別劣化過程解析モデルの予測精度

4. おわりに

本研究では、実測データを統計解析することで通り狂い状態モデルと、通り狂い推定モデルを推計した。結果から得られた知見を以下に示す。

(1) 通り狂いデータの分布はロジスティック分布への適合度が高い。また線形や軌道構造条件による相違は標準偏差の推計により表現可能である。

(2) 線形や軌道構造条件等の要因の違いは劣化速度に対して影響を与える。推計した要因別劣化過程解析モデルにより、通り狂い進みのマクロな予測が可能である。

(3) ロット別劣化過程解析モデルにより、任意の時刻の通り狂いを精度よく予測できる。

参考文献

- 1) 三和雅史, 石川達也, 大山達雄: 軌道状態推移予測モデルの構築と最適軌道保守計画作成のための全整数型数理計画モデル分析, 土木学会論文集 No.681/IV-52, 51-65, p51-65, 2001.7