

# 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

三和雅史<sup>1</sup>・石川達也<sup>2</sup>・大山達雄<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 政策研究大学院大学 [前(財)鉄道総合技術研究所] (〒162-8677 東京都新宿区若松町2-2)

<sup>2</sup>正会員 工博 東日本旅客鉄道(株) 総合技術開発推進部 (〒151-8578 東京都渋谷区代々木2-2-2)

<sup>3</sup>Ph. D. 政策研究大学院大学 (〒162-8677 東京都新宿区若松町2-2)

効率的な軌道狂い保守活動を実現するためには、鉄道事業者あるいは鉄道利用者にとって適切な保守計画を決定することが重要である。本研究では、保守計画作成のためのモデル分析の基礎データを提供する軌道状態推移予測モデルを構築し、高低狂い実証データに基づく推計を行なった。高低狂いデータの確率分布としては、ロジスティック分布の適合度が最も高く、分布パラメータにより劣化状態や状態推移を評価できることが判明した。この予測モデルの数値結果に基づいて、年間平均高低狂い量を最小化するような最適軌道保守計画を作成する全整数型数理計画モデルを構築し、実証分析を行なった。このモデルによって得られる保守計画により実現される軌道状態は、実績データより5%ほど良好である可能性が高いことが判明した。

**Key Words** : *surface irregularity, degradation model, restoration model, optimum maintenance policy, all integer mathematical programming model*

## 1. はじめに

近年の列車の高速化、高頻度化の中で、軌道保守活動における軌道狂い管理の重要度は非常に高まりつつある。特に、安全性の確保は社会的要請として、また、快適性(良好な乗り心地)の確保は経営戦略的要請として厳しく求められ、高品質の軌道(狂いの)状態の必要度は高い。一方、社会、経済、生活等の趨勢として、保守作業員の確保、熟練度の維持向上が困難になりつつあり、また、激しい経済競争の中で、経済効果、投資効率、採算性といった経済的評価の重要度が増し、保守活動のような非生産的な活動に対する効率化の要請は一層厳しいものになりつつある。これら相反する問題を同時に解決する方策としては、機械化等による「保守作業」の効率化や保守活動支援ソフトによる「保守計画」の適正化等が挙げられる。ここでは、後者の「保守計画」を研究の対象とする。

さて、効率的な軌道保守活動を実現するためには、鉄道事業者あるいは鉄道利用者にとって適切な保守計画を決定することが極めて重要である。そこで期待されるのは、鉄道事業者が保有する作業機械、作

業員等の保守能力を効率的に運用することによって、安全や乗り心地の観点から適正とされる軌道状態を維持できる計画である。しかしながら、実際の軌道保守計画が線区の各地点の現状の軌道狂い量や劣化速度(軌道狂い進み量)を考慮して立てられることはあっても、線区全体の軌道状態と保守能力の運用との関係を定量的に結びつけた上で、最適保守計画として立てられることは少なく、また、立てられた計画が、どの程度保守の効率化に貢献しているかも不明確なまま保守活動が行なわれていることが多い。よって、軌道狂いの最適保守時期を出力するシステム(軌道保守計画支援システム)の開発が必要である。

以上のことから、本研究では、軌道保守計画支援システムを開発するための数理モデル分析を実施する。具体的には、軌道狂い(高低狂い)データを用いて、任意の時刻における高低狂いの状態を表す高低狂い状態モデルを推計する。そして、高低狂い推移を評価するための高低狂い推移モデルを推計する。更に、最適保守計画作成のための数理計画モデルを構築して、実際の線区のデータに適用することに

よって、実績データとの比較から本モデルの特徴を把握する。

## 2. 従来の研究と本研究の目的

軌道保守計画の策定を支援するためのシステムの開発<sup>1)2)</sup>や軌道狂い推移モデル、保守計画モデルの構築は、計算機技術の進歩と普及に伴って、研究が進みつつある分野である。しかし、現在のところ、軌道狂い検測データや保守実績データ等のデータの保存を目的とするシステムや軌道狂いが保守管理目標値に到達する時刻を予想して間接的に計画策定を支援するシステム<sup>3)</sup>、長期的な軌道状態推移を予測して経済的な保守時期を出力するシステム<sup>4)</sup>はあるものの、データを収集、分析し、保守計画に関する制約を考慮した上で具体的な保守作業計画の策定までを一括して処理できるシステムは、完成の域には到達していない。

以上のことから、本研究では、最適な年間高低狂い保守計画を作成するために図-1に示す分析を実施する。この分析は、高低狂い推移データを用いてロット（100m区間）別の高低狂い推移を予測する高低狂い推移予測についてのモデル分析と最適保守計画の作成についてのモデル分析とから構成される。

高低狂い推移モデルについては、杉山<sup>5)</sup>は環境条件（軌道構造条件、列車荷重条件）の異なる線区で測定した高低狂い最大値の推移データに対して環境条件を変数とした重回帰分析を実施し、推移モデルを推計している。このモデルはJR各社における速度別軌道構造標準規定等に用いられている。また、内田ら<sup>6)</sup>は環境条件を入力とする力学モデルによる推移モデルを提案している。しかし、これらの推移モデルでは、環境条件の同じ軌道に対して同じモデルが適用されるため、環境条件として入力されない各地点に固有の特性（例えば、道床の細粒化、軌道パッドの硬化、レール凹凸量等の軌道材料の劣化状態、高低狂い量や構造物の存在）を考慮することが難しい。よって、軌道狂い保守量を線区全体で算定する場合や長期的に必要な保守量を軽減するのに有効な施策（軌道強化、車両軽量化等）を検討するには適しているが、月、日単位での保守時期を決定する年間保守計画の策定に適用することは難しいモデルである。各地点に固有の特性を考慮した推移モデルとしては、線区を20～100m区間のロットに区切り、各ロットの軌道狂い推移履歴データから外挿して推移を予測するモデルについての研究があり、高低狂い最大値を線形回帰分析により予測するモデル<sup>3)</sup>や、高低狂い

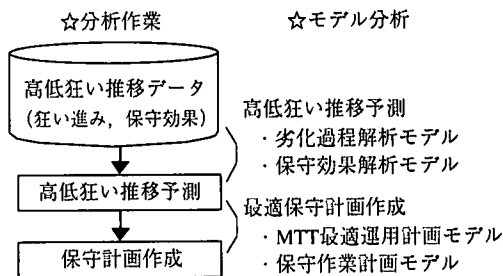


図-1 最適軌道保守計画モデル構築のためのモデル分析

P値の検測間隔ごとの増加量を平均してロットの劣化速度を求める推移モデル<sup>7)</sup>がある。また森本・三和<sup>8)</sup>は指数平滑法を適用した推移モデルを提案し、線形回帰分析を適用するより精度の高い予測が可能としている。一般に、軌道狂い管理では、区間評価指標（高低狂いP値や標準偏差等）と地点評価指標（高低狂い最大値等）により高低狂いを管理するが、これらの推移モデルでは、いずれかの指標についての予測を対象としており、両指標を予測する構造ではない。

そこで本研究では、高低狂い推移予測のモデル分析として、まず、ある瞬間の高低狂い状態を評価する高低狂い状態モデルを高低狂いデータの統計解析結果から推計する。ここでは確率モデルにより推計し、高低狂い状態を表現する確率分布パラメータを同定する。そして、高低狂い状態は環境条件の要因（線形、レール種類等）の違いの影響を受けると考えられることから、要因別高低狂い状態モデルを推計する。また、実際に高低狂いを管理することを想定し、100m区間ロット高低狂いの区間評価と地点評価の両方を本モデルにより表現する方法を提案する。次に、高低狂いの時間推移を評価する高低狂い推移予測モデルとして劣化過程解析モデル、保守効果解析モデルを高低狂い推移データの解析結果から推計し、任意の時刻の高低狂い状態の表現を可能にする。この高低狂い推移予測モデルについては、年間高低狂い保守計画の作成に应用することが前提であることから、各ロットの推移特性を適切に表現できるモデルとして構築する。

軌道狂い保守計画モデルについては、複数の計画案を比較して計画を策定する研究<sup>9)</sup>や計画担当者が試行錯誤して満足できる計画を作成する研究<sup>7)</sup>と、最適計画モデルを構築する研究に分けられる。最適計画モデルに関する研究としては、経済的な軌道検測間隔の決定方法の研究<sup>10)</sup>や各線区へのMTT（Multiple Tie Tamper [軌道狂い保守用大型機械]）配備台数決定方法の研究<sup>11)</sup>があるが、具体的に各地点の保守実

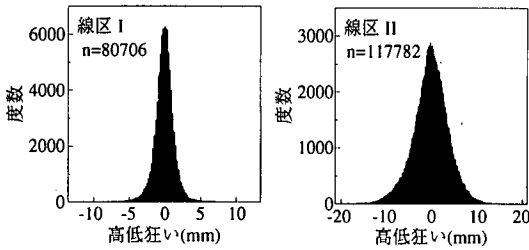


図-2 高低狂い分布状況

施時期を決定する計画モデルではない。各地点の保守実施時期を決定する計画モデルの研究には、年間MTT保守作業計画を総保守費用最小化問題として定式化し、近似解法による解法を示した研究<sup>12)</sup>がある。しかし、実用化にはパーソナルコンピュータを用いた短時間での計画作成が可能であることが必須であるのに対して、パラメータ同定のための予備計算が必要であることや、整数変数の数が数百を超える整数計画モデルとして定式化しているために計算時間が数十時間を超える場合があり、このようにモデルの操作性が悪いことは実用化への大きな障害である。そして、これらの保守計画モデルについては、実測データによる検証がなされないために、モデルの適用効果が明確ではなく、また、保守計画に関する制約の考慮が完全でないために、実用的な保守計画モデルとは言い難い。

そこで本研究では、限られたMTT保守能力を効率的に運用して、線区全体の高低狂い状態を良好に維持できる計画を出力するモデルを構築する。ここで出力される計画は、具体的な保守時期、保守箇所を指定するものである。また、計画に関する制約を現状に合うように具体的に考慮することで出力される計画の実行可能性を高めると共に、パーソナルコンピュータでも短時間で計画を作成できるようにする。そして、構築したモデルを実際の線区のデータに適用し、保守実績データと比較することで、本モデルにより作成される計画の有効性を評価する。

### 3. 高低狂い状態モデルの推計

高低狂いの状態は、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、高速・高頻度運転）と線区II（在来線、低速・低頻度運転）の2線区において軌道検測車で測定された10m弦正矢高低狂いデータ（サンプリング間隔：約0.3m）を用いて適合する確率分布を推定し、線区別

表-1 分布適合性評価結果（線区別 $\chi^2$ 値 [ $\phi$ :自由度]

線区	1	2	3	4	線区	1	2	3	4
I	Log	HG	Pois	Chisq	II	Log	Erf	Norm	Exp
$\phi=26$	0.79	4.28	6.61	11.55	9	0.032	0.64	0.64	16.77

の高低狂い状態モデルを推計する。また、要因の違いが高低狂い状態モデルに与える影響をデータから検証し、要因別高低狂い状態モデルを線区別に推計する。更に、本モデルにより軌道狂いを管理する際に用いる高低狂い区間評価と地点評価の指標を示すと共に、その管理目標値の設定方法を検討する。

#### (1) 高低狂いデータの確率分布の推計

まず、線区全体の高低狂い状態を把握するために、線区別高低狂い分布を図-2に示す。高低狂い分布は平均がおおよそ0で左右対称の形状である。また、線区Iの方が線区IIに比べて尖鋭で、分布範囲（最大値-最小値）が狭く、良好な軌道状態である。つまり、このような分布形状の違いが要因の差異によるものと考えられる。この2つの分布に対して、次に示す各分布に対する適合性を評価した結果（適合度の高い順に4つの分布とその $\chi^2$ 値）を表-1に示す。

- ・ベータ分布
- ・カイ2乗分布 (Chisq)
- ・指数分布 (Exp)
- ・ガンマ分布
- ・超幾何分布 (HG)
- ・対数正規分布
- ・正規分布 (Norm)
- ・ポアソン分布 (Pois)
- ・ワイブル分布 (Wei)
- ・2項分布
- ・誤差分布 (Erf)
- ・アーラン分布
- ・幾何分布 (Geo)
- ・ロジスティック分布 (Log)
- ・負の2項分布 (N-bin)
- ・パレート分布
- ・三角分布

両線区ともロジスティック分布への適合度が高い。ロジスティック分布の分布関数 (c.d.f), 確率密度関数 (p.d.f) は、パラメータ $\alpha$ ,  $\beta$ を用いて、次のように表される。

$$\text{c.d.f } F(x) = \frac{1}{[1 + \exp\{-(x-\alpha)/\beta\}]} \quad (1a)$$

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

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

ロジスティック分布は形状が左右対称であり、パラメータ $\alpha$ は平均に、パラメータ $\beta$ は標準偏差に対応する。よって、一般に軌道状態を評価する区間評価指標として用いられている軌道狂いP値や軌道狂い

表-2 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	土	MTT後
B		50N					
C		50N					
D	曲線	60kg	溶接	PC	250mm	土	MTT後
E		50N					
F		50N					

※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	土	TT後
H					200mm		
I					50N		
J	曲線	40N	普通	木	250mm	土	MTT後
K					200mm		
L					200mm		
M	曲線	50N	普通	PC+木	250mm	土	TT後
N					200mm		
O					200mm		
P	曲線	50N	普通	木	250mm	土	TT後
					200mm		
					200mm		

表-3 分布適合性評価結果 (条件別  $\chi^2$  値 [ $\phi$ :自由度])

※線区 I											
条件	1	2	3	4	条件	1	2	3	4		
A	Log	Pois	HG	Chisq	D	Log	Erf	Norm	Wei		
$\phi=30$	4.14	7.86	8.63	14.2	29	0.26	0.36	0.36	1.01		
B	Log	HG	Pois	Chisq	E	Log	2.05	Wei	Beta		
25	0.26	2.39	6.16	10.8	23	0.24	2.05	3.33	3.36		
C	Log	HG	Pois	Chisq	F	Log	Erf	Norm	Beta		
25	0.48	2.38	6.19	10.9	31	0.13	0.36	0.36	1.20		

※線区 II											
条件	1	2	3	4	条件	1	2	3	4		
G	Log	Exp	N-bin	Geo	L	Log	Norm	Erf	Pois		
$\phi=12$	1.27	21.1	21.2	21.6	7	0.08	0.09	0.09	0.29		
H	Log	Norm	Erf	Wei	M	Log	Norm	Erf	Wei		
8	0.18	0.22	0.22	0.30	13	0.24	0.44	0.44	1.23		
I	Log	Norm	Erf	Pois	N	Log	Norm	Erf	Pois		
7	0.12	0.26	0.26	0.64	8	0.25	0.80	0.81	0.96		
J	Wei	Norm	Erf	Log	O	Log	Erf	Norm	Wei		
9	0.24	0.32	0.32	0.40	11	0.13	0.16	0.35	0.73		
K	Log	Norm	Erf	Pois	P	Log	Pois	Beta	Chisq		
10	0.13	0.73	0.73	0.82	12	0.20	2.25	2.56	3.08		

表-4 ロジスティック分布パラメータ値

条件	線区 I							線区 II										
	A~F	A	B	C	D	E	F	G~P	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
$\alpha$	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	-0.01	0.00	0.01	-0.02	-0.07	0.28	0.22	-0.03	-0.14	0.00	0.02	0.12	0.03
$\beta$	0.74	0.78	0.73	0.74	0.61	0.79	0.57	2.16	2.31	2.31	2.48	2.36	2.04	2.44	1.70	2.31	2.02	2.01

標準偏差に相当する指標として、このパラメータ $\beta$ を用いることができる。

次に、要因の違いが確率分布に与える影響を考察するために、要因別に分類したデータについても同様に推計する。表-2に示す条件に分類した高低狂いデータに対しても適合性を評価すると、表-3に示すようにほとんどの条件においてロジスティック分布への適合性が他の分布より優れている。条件Jではロジスティック分布への適合度が第4位であるが、 $\chi^2$ 値は小さいことから、ロジスティック分布への適合度は高いと判断できる。

以上より、高低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) 要因別高低狂い状態モデルの推計

推計した高低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パラメータ $\alpha$ ,  $\beta$ の値を表-4に示す。パラメータ $\beta$ については線区Iより線区IIの方が大きく、線区Iの方が軌道状態は良い。ここで、A~Pの条件間でパラメータ $\beta$ 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区間)に分割して得られる各ロットのパラメータ $\beta$ を分散分析<sup>13)</sup>により処理して、要因別高低狂い状態モデルを推計する。具体的には、式(2)に示す推定式の係数を線区ごとに推計する。なお、交互作用については考慮しない。また、ロット長については、1ロットあ

表-5 分散分析結果

線区		I		II	
		係数	Prob>F	係数	Prob>F
線形	直線	$\mu$ 0.680		1.969	
	曲線	$x_1$ 0.031	0.01	0.088	0.01
レール	40N	$x_2$ -0.031		-0.088	
	50N	$x_2$ 0.019	0.20	-0.013	0.31
	60kg	$x_2$ -0.019			
まくらぎ	PC+木	$x_3$		0.072	
	木	$x_3$		-0.072	0.07
道床厚	200mm	$x_4$		0.064	
	250mm	$x_4$		-0.064	0.13
保守	-	$x_5$ 0.032		0.137	
	TT後	$x_5$	0.14	0.077	0.08
	MTT後	$x_5$ -0.032		-0.214	
Prob>F			0.017		0.005
R <sup>2</sup>			0.020		0.065

たりのデータ数を300~400データ確保でき、確率モデルとしての扱いが十分可能である<sup>14)</sup>ことと、現行のロットでの軌道狂い管理単位が100mであること、ロット内に異なる線形・軌道構造や保守実施上の制限が厳しい分岐器が多く含まれるために特別な管理を要するロットの存在割合を減らすために100mとした。

$$\beta = \mu + x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 \quad (2)$$

分散分析の結果を表-5に示す。線区Iについては、線形の寄与度が高い。また、推定式のR<sup>2</sup>値が小さいことは、パラメータ $\beta$ のロット間でのばらつきが大きいことを示している。一方、線区IIについても、線

表-6 パラメータβの実測値の統計量

条件	線区 I						線区 II									
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
平均値	0.66	0.70	0.63	0.60	0.63	0.57	2.02	2.14	2.20	2.08	1.94	2.02	1.64	2.06	1.86	1.78
標準偏差	0.29	0.21	0.12	0.10	0.18	0.14	0.45	0.26	0.40	0.26	0.49	0.41	0.53	0.60	0.34	0.62

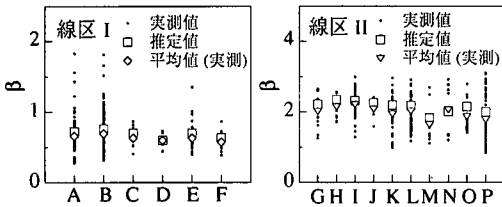


図-3 パラメータβの推定値と実測値

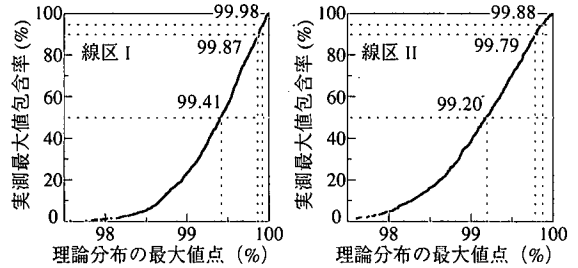


図-4 最大値点と実測最大値包含率

形の寄与度が高く、まくらぎ、保守についてもやや高い。この推定式で得られるパラメータβの推定値とロットの実測値との関係を図-3に示す。推定値はいずれの場合も実測値の平均に近いが、条件によっては実測値のロット間でのばらつきが大きい。ここで条件別の実測値の平均値、標準偏差を表-6に示す。特に条件A, B, N, Pのばらつきが大きい。

### (3) 高低狂い最大値

軌道狂い管理では、区間評価と合わせて最大値評価により軌道狂いを評価することが一般的である。ここでは、地点評価指標である高低狂い最大値を高低狂い状態モデルで表現する方法を検討する。

まず、各ロットにおける実測最大値がロットごとに得られるパラメータβで規定されるロジスティック（理論）分布上での%値以下になるロットの割合（実測最大値包含率）を図-4に示す。両線区とも実測最大値の90%以上が、99.9%値以下である。ここで、大きな高低狂いの発生は、列車の脱線の原因となり、列車の走行安全性上、その発生確率低減の要請は強い。よって、モデルにより推定する最大値は実測最大値より大きいことが望ましいことから、この99.9%を推定に用いる推定最大値点とする。推定最大値点をこのように設定すると、パラメータβを区間評価指標として用いることと合わせて、高低狂い状態モデルを利用した区間評価と地点評価の両者による高低狂いの定量的評価が可能となる。

### (4) 高低狂い管理目標

高低狂い状態モデルで軌道狂い管理を行なう場合、パラメータβの大きさを評価するための管理目標値を設定する必要がある。管理目標値は、列車の走行安全性や乗り心地を確保する観点から設定することが一般的である。この管理目標値は高低狂いの区間評価と地点評価の各々に対応させて以下のように設

定する。

#### a) 高低狂い区間評価に対応する管理目標値

車両上下動揺（全振幅）の目標値を設定し、高低狂いと上下動揺との関係式[式(3)]<sup>15)</sup>に基づいて、高低狂い標準偏差の目標値 $\sigma_{ylim1}$ を算出する。

$$\sigma_{ylim1} = \frac{\sigma_{\alpha}}{k_v \cdot V} \quad (3)$$

$\sigma_{ylim1}$  : 高低狂い標準偏差(mm)

$\sigma_{\alpha}$  : 上下動揺標準偏差(m/s<sup>2</sup>)

$k_v$  : 車両動揺係数(上下)

$V$  : 列車速度(km/h)

この目標値 $\sigma_{ylim1}$ がロジスティック分布に従うことを仮定すると、区間評価に対応する管理目標値 $\beta_{lim1}$ は次式により得られる。

$$\beta_{lim1} = \frac{\sqrt{3} \sigma_{ylim1}}{\pi} \quad (4)$$

#### b) 高低狂い地点評価に対応する管理目標値

高低狂い最大値の目標値を $x_{max}$ とすると、推定最大値点の定義から、高低狂い地点評価である高低狂い最大値に対応する管理目標値 $\beta_{lim2}$ は付録1に示すように次式により得られる。

$$\beta_{lim2} = \frac{\alpha - x_{max}}{-\ln 999} \quad (5)$$

ここで、高低狂いの平均値は、ほぼ0と見做せることから、この式における $\alpha$ を0と仮定して管理目標値を設定する。

#### c) 高低狂い管理目標値

得られた管理目標値 $\beta_{lim1}$ 、 $\beta_{lim2}$ の小さい方を実際の管理目標値 $\beta_{lim}$ として用いる。

$$\beta_{lim} = \min \{ \beta_{lim1}, \beta_{lim2} \} \quad (6)$$

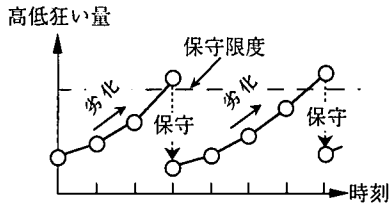


図-5 軌道狂い推移のイメージ

#### 4. 高低狂い推移予測モデルの推計

高低狂いの時間推移のイメージは図-5に示すように、時間の経過に伴って高低狂い量が増加し、保守により減少するという過程の繰返して表される。本章では、この劣化の進行（高低狂い進み）や保守による回復の推移を予測、評価するための劣化過程解析モデル、保守効果解析モデルを推計する。推計にあたっては、高低狂い状態モデルのパラメータ  $\beta$  の推移に着目する。なお、高低狂い推移データとしては、前章と同じ線区で約90日間隔で測定したものを表-2に示す条件で分類して用いる。

##### (1) 劣化過程解析モデル

一般に、パラメータ  $\beta$  は途中で保守が実施されなければ、その変動にロットごとの差はあるものの、時間の経過に伴い漸増する傾向にある。そして、要因の違いにより漸増傾向は異なる<sup>14)</sup>。このことから、まず、パラメータ  $\beta$  の劣化速度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。

##### a) 要因別劣化過程解析モデル

任意の時刻のパラメータ(事前パラメータ)  $\beta_{bef}$  と、その後、保守を実施されずに180日間経過した後のパラメータ(事後パラメータ)  $\beta_{180}$  との関係条件A, B, L, Pについて図-6に示す。図中に示す線形回帰式は以下の通りである。

$$(A) \beta_{180} = 1.04\beta_{bef} + 0.01 \quad [R=0.98] \quad (7a)$$

$$(B) \beta_{180} = 1.10\beta_{bef} - 0.03 \quad [R=0.97] \quad (7b)$$

$$(L) \beta_{180} = 1.05\beta_{bef} + 0.19 \quad [R=0.89] \quad (7c)$$

$$(P) \beta_{180} = 1.03\beta_{bef} + 0.13 \quad [R=0.93] \quad (7d)$$

R値が大きいことから、本モデルにより180日間経過後の高低狂いを高精度で予測可能である。また、事前パラメータ  $\beta_{bef}$  が大きいとパラメータ  $\beta$  の増加量が大きい傾向から、軌道状態が悪いほど劣化速度は大きくなり、逆に軌道状態が良好であるほど劣化速度は小さくなると解釈できる。このことは、軌道狂いは時間に対して非線形に増加する可能性を示している。ここで、1年程度の保守計画を策定する場合には、この非線形性が計画に与える影響は小さいと

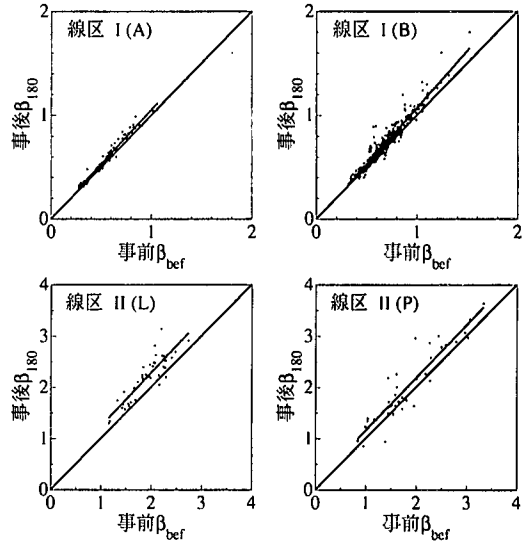
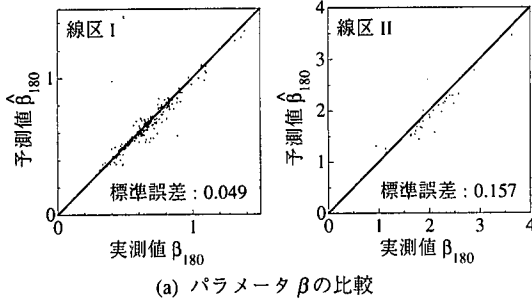


図-6 要因別劣化過程の実態

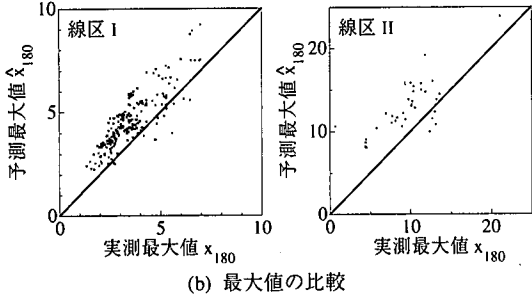
考えられるが、長期的な保守計画を策定する場合には、この影響を無視できないと考えられる。つまり、高低狂いが管理目標値以下でそれほど大きくない時期であっても保守を実施した方が、保守後の劣化速度が減少する分、長期的には保守量減少の効果が高いことが予想される。更に、回帰式の傾きの差は、要因の違いによると解釈できる。よって、本モデルは、劣化過程を精度よく予測でき、要因の違いも表現可能である。しかしながら、本研究で策定対象とする保守計画は各ロットの保守時期を出力とする必要があるため、劣化過程解析モデルは任意の時刻の高低狂いが予測でき、かつ、個々のロットの特性を適切に表現できなくてはならない。また、各条件における推移履歴データ数が少ないと回帰モデルである本モデルの構築は難しい。したがって、任意の時刻の高低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。

##### b) 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。同様の考え方による予測例は幾つか<sup>3),7)</sup>あるものの、多くは履歴データに対する線形回帰モデルである。しかしながら、指数平滑法<sup>16)</sup>を適用したモデルによれば、高低狂いの増加傾向が一定しない場合<sup>15)</sup>が存在しても、推移履歴データに重みを付けて予測して傾向の変化を追跡可能であり、線形回帰モデルに比べて高い精度での予測が期待でき<sup>8)</sup>、また、異常値が混入した場合に受ける影響が線形回帰モデルに比べて小さいことから、以下のようなモデル化を実施する。



(a) パラメータ  $\beta$  の比較



(b) 最大値の比較

図-7 ロット別劣化過程解析モデルの予測精度

$$\bar{\beta}(t) = s\beta(t) + (1-s)\bar{\beta}(t-1) + \frac{1-s}{L}T_t \quad (8a)$$

$$T_t = s(\bar{\beta}(t) - \bar{\beta}(t-1)) + (1-s)T_{t-1} \quad (8b)$$

$$\bar{\beta}(t+L) = \bar{\beta}(t) + L \cdot T_t \quad (8c)$$

$\bar{\beta}(t)$  : 時刻  $t$  のパラメータ  $\beta$  期待値(mm)

$\beta(t)$  : 時刻  $t$  のパラメータ  $\beta$  実測値(mm)

$s$  : 平滑化係数( $0 < s \leq 1$ )

$T_t$  : 時刻  $t$  の傾向(mm/時定数)

$L$  : 時刻  $t$  からの経過時間

本モデルは、計画期間中の任意の時刻の各ロットの高低狂いを表現可能である。ここでは、本モデルを過去1年分の高低狂い推移履歴データに適用して得られた180日後のパラメータ(事後パラメータ) $\beta_{180}$ を予測し、その値と実測値を比較した結果を図-7(a)に示す。なお、平滑化係数 $s$ は、過去1年分の線区別推移履歴データに対して0から1までの0.1刻みの値を適用して、事後パラメータの予測の標準誤差が最小となるように設定した( $s=0.2$  [線区I, II])。

事後パラメータの予測値は実測値付近に存在する。同様の予測を線形回帰モデルで実施すると、予測の標準誤差が線区Iで約10%、線区IIでは約45%大きいことから、本モデルによる予測精度は高いと言える。最大値についても予測値と実測値との比較を図-7(b)に示す。推定最大値点を99.9%と設定しているため、大半の予測値が実測値を上回る。

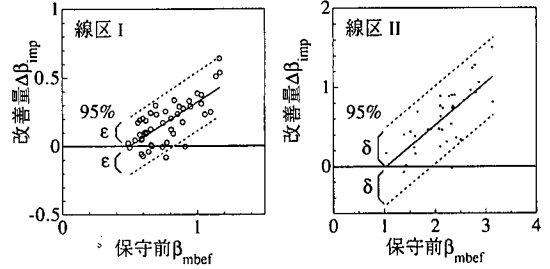


図-8 MTT 保守効果

## (2) 保守効果解析モデル

MTT保守前パラメータ $\beta_{mbef}$ と保守によるパラメータ $\beta$ の改善量 $\Delta\beta_{imp}$ との関係を線区ごとに全ロットをまとめて図-8に示す。保守前パラメータ $\beta_{mbef}$ が大きなロットほど改善量 $\Delta\beta_{imp}$ が大きい傾向がある。また、改善量 $\Delta\beta_{imp}$ のばらつきは劣化過程解析モデルでのばらつきに比べて大きい。保守効果解析モデルは、ロットごとの推移データを用いてロットごとに推計することが望ましいが、各ロットへの保守は多くても年1~2回程度でありデータ数が少ないために難しい。よって、保守効果解析モデルを線形回帰式と95%信頼区間とで以下のように構成し、同一線区で継目種類と保守方法が同じロットには一律にこのモデルを適用する。

$$\begin{aligned} \text{線区 I } \Delta\beta_{imp} &= 0.636\beta_{mbef} - 0.313 \\ &(0.49 \leq \beta_{mbef} \leq 1.17, 95\% \text{ 信頼区間 } \epsilon=0.22) \end{aligned} \quad (9a)$$

$$\begin{aligned} \text{線区 II } \Delta\beta_{imp} &= 0.539\beta_{mbef} - 0.560 \\ &(1.03 \leq \beta_{mbef} \leq 3.14, 95\% \text{ 信頼区間 } \delta=0.49) \end{aligned} \quad (9b)$$

## 5. 最適軌道保守計画モデル

高低狂い推移予測モデルによる結果に基づいて、最適な軌道(高低狂い)保守計画を作成するモデルを構築する。一般に、高低狂い保守については数年~数10年単位の長期計画をはじめ、当該月内の保守作業計画のレベルまで目的に応じて様々な計画が作成される。長期計画では、軌道材料(レール、道床等)の交換や軌道更新を含めた保守を計画対象とし、長期的に必要な保守量や適切な保守実施年度が検討される。本章で構築する高低狂い年間保守計画においては、このような長期計画を考慮することが望ましい。

さて、高低狂い保守はMTTを用いた保守が中心であり、1台のMTTが担当する軌道延長は在来線の場合で約100~200kmである。そして、1台のMTTが

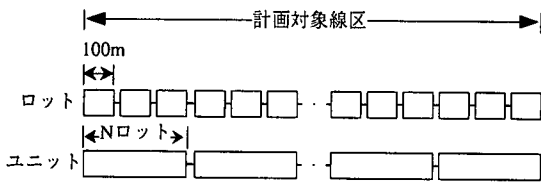


図-9 高低狂いの計画・管理単位

複数の保線区で共有される場合には、それらの保線区をMTTが行き来して保守を実施する。このことから、高低狂い年間保守計画を次の2つのレベルに分けて考える。

○MTT年間運用計画

年度の始めに複数の保線区で共有する1台のMTTを各保線区に配備する時期(月)と、配備時に保守する箇所を期単位(上, 中, 下旬)で決定する。

○軌道狂い保守作業計画

各保線区においてMTT配備時期前に配備期間中の保守対象箇所への保守実施順序を決定する。また、この計画ではMTT保守以外のTT保守等の保守作業実施時期についても決定する。

本研究では、MTT年間運用計画を策定するための高低狂い年間保守計画(最適軌道保守計画モデル)を構築する。

(1) 最適軌道保守計画モデルの概念

a) 高低狂いデータの計測

本計画モデルでは、計画対象線区を図-9に示すようにロットとユニットに分割して計画・管理単位とし、高低狂い推移の予測と保守時期の検討を行なう。各単位の内容は以下の通りである。

・ロット

高低狂い推移の予測単位は100m区間とし、これをロットと呼ぶ。予測には、ロット別劣化過程解析モデルと保守効果解析モデルを用いる。

なお、次の基準を満たすロットについては計画対象としない。これら区間に対するMTT保守は、MTT運用計画に見込んである稼働余裕日を活用して実施する。

① 無道床, 分岐器介在区間

ロット長の半分(取り付け部を含めて50m)以上が無道床区間または分岐器介在区間のロット

② マヤルート外区間

軌道検測車(マヤ車)の走行しない区間

③ レール更換, LMT計画区間

LMT(拡大間合による集中保守作業)や大規模

なレール更換が予定されている箇所を含む区間

④ その他特に指定する区間

・ユニット

N個のロットの集合( $N \times 100m$ )をユニットと呼ぶ。このNの値については、各々の線区ごとに、ユニット長が1日あたりのMTT保守延長に等しくなるように設定する。本計画モデルでは、この単位で保守箇所を出力し、出力されたユニットについては、そのユニットが含む全ての計画対象ロットを保守するものとする。

b) 決定変数と制約条件

本計画モデルでは、複数の保線区で共有する1台のMTTを各保線区に配備する時期(月)と、配備時に保守する箇所を期単位(上, 中, 下旬)で決定する2種類の決定変数が存在する。そして、制約条件としては、モデルの構成上必要な論理制約に加えて、MTTの稼働に関する制約、軌道の劣化状態・品質に関する制約とから構成される。

なお、劣化速度と保守効果については以下のような前提を設ける。

劣化速度は事前の軌道状態に依存する傾向にあることから、保守後の劣化速度は保守前に比べて減少すると考えられる。しかしながら、一般に1年間での高低狂い進み量は大きくなく、劣化速度の変化が計画に与える影響は小さいと考えられる。よって、計画期間中に劣化速度は変化しないものとする。また、保守による高低狂い改善量は保守前の軌道状態に依存する傾向にあることから、改善量は保守実施直前の軌道状態を予測して推定するべきである。しかし、ここでも1年間での高低狂い進み量は小さく、計画開始時と保守実施直前の高低狂い量が大きく違うことはないと考えられる。よって、改善量を計画期間開始時の高低狂い量により算定し、保守時期に関係なく一定の改善量が得られるものとする。

c) モデルの評価基準

本計画モデルでは、各月、各期にMTT保守を実施するユニットをMTTの担当線区全体の年間平均高低狂い量を最小化するように決定するとし、このようにして得られた保守計画を「最適保守計画」と定義する。なお、輸送条件の異なる線区が混在する場合には、高低狂い量に対して年間平均高低狂い量と高低狂い管理目標値(乗り心地目標)の比に応じた重み付けを行ない、線区の性質を考慮する。

(2) 最適軌道保守計画モデルの構築

a) 集合の定義

- ① 月集合  $M = \{1, 2, 3, \dots, 11, 12\}$
- ② 期集合  $K = \{1, 2, 3\}$



- ③ 保線区  $D = \{1, 2, \dots, D^{\max}\}$   
 ④ ユニット  $U_i = \{1, 2, 3, \dots, U_i^{\max}\}$  [保線区  $i$ ]  
 ⑤ ロット  $L_i = \{1, 2, 3, \dots, L_i^{\max}\}$  [保線区  $i$ ]

b) 変数

- ①  $z_{md}$  0-1型  $m \in M, d \in D$   
 $= 1$  月  $m$  に MTT を保線区  $d$  へ配備する  
 $= 0$  〃 しない  
 ②  $w_{mkj}$  0-1型  $m \in M, k \in K, j \in U_i$   
 $= 1$  月  $m$ , 期  $k$  にユニット  $j$  の保守を実施する  
 $= 0$  〃 しない

c) 制約条件

- ① 月別選定可能保線区制約  
 計画対象とする MTT は 1 台とし、共有する保線区のいずれかに月単位での配備が可能とする。

$$\sum_d z_{md} \leq 1 \quad m \in M \quad (10)$$

- ② 月別 MTT 配備時期指定制約

LMT 実施区間やレール更換直後の区間に MTT による保守作業を実施することが多いことから、これら大規模作業等を考慮して、特定の月には MTT を配備する保線区を指定する。

$$z_{md} = 1 \quad (11)$$

$m, d \in \{\text{指定のある保線区と配備時期}\}$

- ③ 期別保守可能ユニット数上限制約

各期の保守可能ユニット上限数を各期の保守可能日数に応じて設定する。なお、MTT の修繕等により MTT の稼働できない期の上限数については 0 とする。

$$\sum_j w_{mkj} \leq A_{mk} \quad m \in M, k \in K \quad (12)$$

$A_{mk}$ : 月  $m$ , 期  $k$  の保守可能ユニット上限数

- ④ 期別ユニット別保守可能時期制約

夏期、冬期降雪期、多客期等には保守実施可能区間が制限されることから、各ユニットについて保守可能時期を設定する。

$$\sum_{j \in J_1} \sum_{(m,k) \in R_j} w_{mkj} = 0 \quad (13)$$

$J_1 = \{\text{保守可能時期制約のあるユニット}\}$

$R_j = \{\text{集合 } J_1 \text{ の要素であるユニット } j \text{ の保守実施不可能時期 } (m, k)\}$

- ⑤ ユニット別保守回数上限制約

各ユニットへの保守は最大で年間 1 回とする。

$$\sum_m \sum_k w_{mkj} \leq 1 \quad j \in U_i \quad (14)$$

- ⑥ 期別 MTT 稼働論理制約

高低狂い保守は MTT による保守のみを想定し、各保線区においては MTT 配備月に MTT 保守が計画される。

$$\sum_k w_{mkj} - z_{md} \leq 0 \quad m \in M, d \in D, j \in U_i \quad (15)$$

- ⑦ 期別 MTT 移動可能範囲制約

短期間で MTT を大きく移動させる計画は現実的ではないため、保守基地の位置を考慮した上で各期の MTT 移動可能範囲を設定する。

$$B w_{mkj} + \sum_{j \in J_2} w_{mkj} \leq B \quad (16)$$

$B$ :  $\sum_{j \in J_2} w_{mkj}$  の最大値,  $m \in M, k \in K$

$J_2 = \{\text{ユニット } j \text{ と同じ期に保守を実施できないユニット}\}$

- ⑧ 劣化状態上限制約

どのロットの高低狂い量も、計画期間中に上限値を超過してはならない。

$$\sum_{x=1}^{m_i^i-1} \sum_k w_{xkj} + \sum_{y=1}^{k_i^i-1} w_{m_i^i yj} = 1 \quad (17)$$

$j \in J_3, k \in K$

$m_i^i, k_i^i \in \{\text{ユニット } j \text{ の最遅保守可能時刻}\}$

$J_3 = \{\text{次年度中に高低狂いが上限値に達するユニット}\}$

- ⑨ 保守優先実施ユニット制約

長期的に必要な保守量を減らすことを意図して作成される軌道保守長期計画を年間保守計画に反映させることは、将来の保守量削減を目指す上で重要である。ここでは、軌道保守計画長期最適化モデル<sup>17)</sup>で計画年度中に MTT 保守を実施することが望ましいと判定されたロットを多く含むユニットについては、計画年度中に必ず保守を実施する。

$$\sum_m \sum_k w_{mkj} = 1 \quad j \in J_4 \quad (18)$$

$J_4 = \{\text{軌道保守計画長期最適化モデルにより次年度に保守を実施すべきと判定されたユニット}\}$

- ⑩ 脱線防止ガードレール区間制約

ガードレール敷設区間については、保守作業準備手続きに必要な時間を考慮する。

$$\sum_{m=1}^{q-1} \sum_k w_{mkj} = 0 \quad j \in J_5 \quad (19)$$

$J_5 = \{\text{脱線防止ガードレール敷設区間を含むユニット}\}$

$q_j$ : ユニット  $j$  の最早保守可能月

d) 目的関数

重み付き年間平均高低狂い量の全ユニット平均値の最小化とするが、付録 II に示すように、この目的関数は以下の式と同値である。

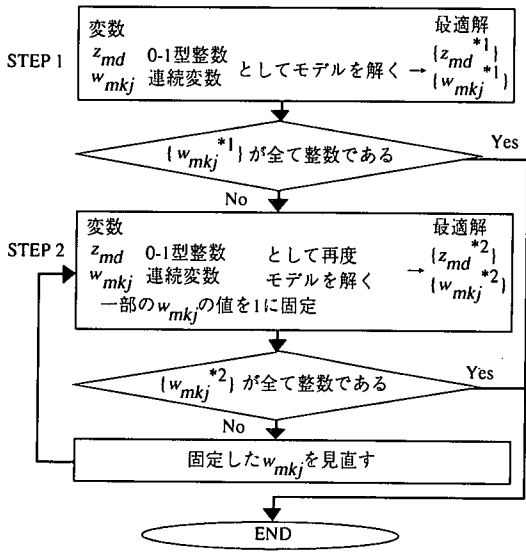


図-10 処理フロー

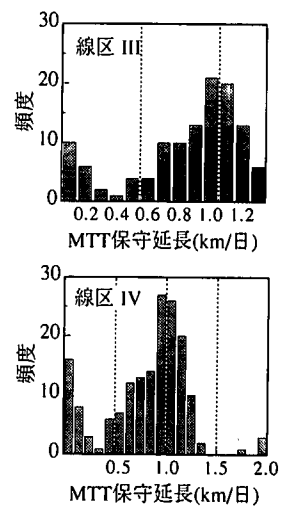


図-12 1日あたりの MTT 保守延長実績

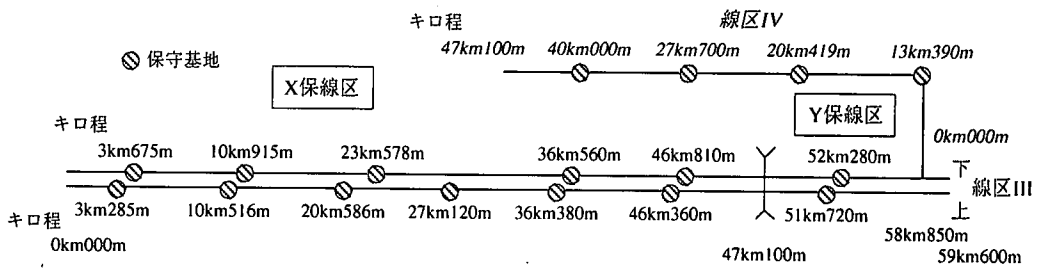


図-11 X 保線区, Y 保線区の保守対象線区レイアウト

$$\max. 3 \sum_{j=1}^{m-1} \sum_{x=1}^3 \Delta S_r^j w_{xvj} + \sum_{j=1}^m \sum_{k=y=1}^k \Delta S_r^j w_{mky} \quad (20)$$

$\Delta S_r^j$ : ユニット j の重み付き軌道狂いの保守改善量

(3) 最適軌道保守計画モデルの計算手順

本計画モデルの最適化計算には Dash Associates 社製 数理計画ソフトウェア X-PRESS を用いる。ここで、変数  $z_{md}$ ,  $w_{mkj}$  のすべてを 0-1 型整数変数としているために、ユニット数が少ない場合にはそのまま計算して最適解を得られるが、ユニット数が多い場合には最適解を得ることが難しくなる。その場合には、以下に示す計算手順を経て最適解を得ることとする。この方法により得られる解は厳密な意味での最適解とは限らないが、解を得るために手順を複雑化することは、モデルの操作性を悪化させることから、なるべく少ない手順で実行可能解が得られるように配慮した。処理フローを図-10 に示す。

STEP 1

0-1 型整数変数  $w_{mkj}$  を連続変数としてモデルを解く。得られた最適解において変数  $w_{mkj}$  が全て 0-

1 型整数であれば、最適解が得られたので計算を終了する。変数  $w_{mkj}$  が小数の場合には、以下の操作を行なう。

STEP 2

各期において当該期保守可能ユニット数の半数の変数  $w_{mkj}$  を 1 に固定して再最適化計算を実行する。固定する変数については、前の STEP で得られた最適解における変数  $w_{mkj}$  において各期の保守可能ユニット数の半数の変数  $w_{mkj}$  の値の和が最大となるように選ぶ。なお、固定する変数については制約条件を満たさなければならない。この操作は、 $w_{mkj}$  を連続変数とした際の最適解の目的関数値に近い解を得るために実施する。

得られた最適解において、変数  $w_{mkj}$  が全て 0-1 型整数であれば、計算を終了する。再度、最適解が小数を含む場合には、STEP 2 において固定した変数を見直す。具体的には、最適解に小数が含まれる期において、先述の保守可能ユニット数の半数の変数  $w_{mkj}$  の値の和が 2 番目に大きい組合せの変数を 1 に固定し、再計算する。以下、変数を見直して再計算する場合には、3 番目、4 番目... に

表-8 MTT 配備計画と実績

表-7 期別保守可能ユニット上限数

月	期			月	期		
	1	2	3		1	2	3
4	3	3	2	10	2	3	3
5	1	3	2	11	3	2	2
6	3	2	3	12	3	2	1
7	3	0	0	1	1	3	3
8	0	0	0	2	3	2	2
9	0	0	3	3	3	2	3

大きい組合せの変数を1に固定して再計算する。

## 6. 最適軌道保守計画モデルの適用結果

構築した最適軌道保守計画モデルを実際の線区のデータに適用する。そして、保守実績データと比較して本モデルによる計画の特徴を把握する。

### (1) 適用対象

図-11に示すレイアウトの2保線区で共有するMTTの年間保守計画を本モデルにより作成する。X保線区は線区IIIの一部の保守を担当しており、担当軌道延長は約94km(942ロット)である。Y保線区は線区IIIの一部と線区IVの保守を担当しており、担当軌道延長は約72km(721ロット)である。また、線区IIIは複線、高速・高頻度輸送線区であり、線区IVは単線、低速・低頻度輸送線区である。

### (2) 計算条件

適用にあたって設定した制約条件のうちで、特筆すべき項目を以下に示す。

#### a) 保守可能ユニット上限数

各線区の1日あたりのMTT保守延長の実績を頻度分布で図-12に示す。両線区とも、1km/日付近が最頻値であることから、1日あたりのMTT保守可能延長を1kmとし、ユニットの長さを標準で1km(N=10)とする。その結果、ユニット数はX保線区で94、Y保線区で72となる。そして、各期の保守可能ユニット上限数を表-7のように設定した。ここでの年間MTT保守延長は実績データとほぼ同じである。

#### b) ユニット別保守可能時期制約

7月2期から9月2期の間は全線で保守を実施できない。また、2月には線区IVの普通継目区間へのみ保守を実施できる。

#### c) MTT移動可能範囲制約

図-11より保守基地間の距離は最大で約20km離れていることから、同一期に20km以上離れたユニット

### MTT最適配備計画

月	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3
X	○		○			○		○		○		○
Y		○		○			○		○		○	

### MTT配備実績

月	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3
X	○		○			○		○	○	○		○
Y		○					○				○	

を保守しない。

#### d) MTT 配備時期指定制約

10、12月はLMTのために保線区YにMTTを配備する。

#### e) 劣化状態上限制約

高低狂い量の上限值については、各線区の輸送条件に合わせて線区ごとに設定する。

#### f) 次年度保守優先実施ユニット制約

軌道保守計画長期最適化モデルによりユニット内のロットの半数以上のロットが計画年度にMTT保守を実施することが望ましいと判定されたユニットについては計画期間中に必ず保守を実施する。

#### g) 脱線防止ガードレール区間制約

当該保線区においては、考慮する必要のあるユニットは存在しない。

### (3) 計算結果

MTT 配備計画と実績データとの比較を表-8に示す。配備時期については、計画と実績データとは極めて近い。次に、計画通りに1年間保守を実施した場合と実績データ通りに保守を実施した場合に予想される軌道状態や目標値超過ロット数を表-9に示す。ここでの目標値は、各線区の車両上下動揺の目標値と高低狂い最大値の目標値を実状に基づいて設定し、3.(4)において示した方法により算出したものである。

両線区における高低狂い標準偏差の平均値は全期間、計画期間終了時とも開始時より小さい。一方、実績データ通りに保守を実施した場合には、線区IVの高低狂い標準偏差の全期間の平均値が開始時の平均値よりも大きく、両線区とも計画より軌道状態は5%ほど悪い。ここで、開始時と終了時における各ロットの高低狂い標準偏差 $\sigma_y$ の分布状況を図-13に示す。図中に示した $\sigma_{y,lim}$ は最高速度 $V_{max}$ に対応した目標値である。終了時には、計画より実績データに高低狂い標準偏差の大きなロットが多い。計画では、高低狂いの大きいユニットを優先して確実に保守するために、終了時に高低狂いの大きなロットが残存

表-9 軌道状態と目標値超過ロット数

項目			全体		線区III		線区IV	
			計画	実績	計画	実績	計画	実績
高低狂い標準偏差 (mm)	開始時	平均値	2.09		1.81		3.08	
		最大値	5.27		5.24		5.27	
	全期間	平均値	2.01 (96%)	2.09	1.77 (98%)	1.80	2.88 (93%)	3.11
		最大値	5.45 (100%)	5.46	5.26 (98%)	5.38	5.45 (100%)	5.46
	終了時	平均値	1.95 (96%)	2.03	1.75 (98%)	1.79	2.66 (91%)	2.91
		最大値	5.01 (92%)	5.42	4.52 (84%)	5.38	5.01 (92%)	5.42
目標値超過 ロット数 (ロット) [全1394ロット]	開始時	77/1394		38/1086		39/308		
	全期間	108 (88%)	123	62 (78%)	80	46 (87%)	53	
	終了時	35 (44%)	80	30 (55%)	55	5 (20%)	25	

(%は対実績比)

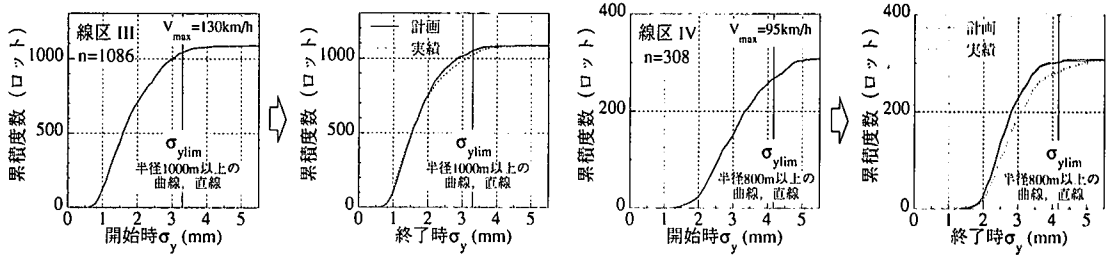


図-13 計画期間開始時、終了時の高低狂い標準偏差の分布

しにくいためである。全期間を通して1期でも目標値を超過するロット数は、計画では実績データの88%、終了時においては44%である。特に、線区IVでの差が顕著であるのは、線区IVへの保守量が現状より増加したためである。そして、終了時の目標値超過ロット数は、計画では両線区とも開始時より少ないが、実績データでは線区IIIで増加し、全体でも開始時とほぼ同数の目標値超過ロットが存在する。なお、各制約条件について、保守可能ユニット上限数制約、ユニット別保守回数上限制約が本問題に対して厳しい制約である。また、本計画作成に要したパーソナルコンピュータ上での計算時間は数分程度であり、十分実用に耐え得る長さである。

以上から、計画によれば、高低狂いを現状より良好な状態に1年間継続して維持することができ、終了時には開始時より良好な軌道状態を実現できる可能性が高い。また、本計画モデルにより、毎年、計画を作成して実施することを継続すれば、軌道状態が年々改善されていくことが期待できる。

#### (4)最適軌道保守計画モデルの適用可能性

本計画モデルを活用することで、最適保守計画に関する様々な検討が可能になる。ここでは、その例として、年間MTT保守延長を現状より減らした場合の軌道状態の維持可能性を検討する。年間MTT保守

延長を現状の約80%として各期の保守可能ユニット上限数を表-10のように設定し、保守計画を作成する。

得られた計画通りに1年間保守を実施した場合に予想される軌道状態や目標値超過ロット数を前節での結果と合わせて図-14に示す。年間MTT保守延長を現状より減少させたとしても、実績データより良好か同程度の軌道状態が維持できる可能性が高い。しかしながら、線区IIIでは終了時の目標値超過ロット数が開始時より増える状況となることから、高低狂いが大きいにも拘わらず保守を実施できないロットが発生する。但し、計画年度に線区IVの軌道状態が改善されることから、次年度以降、線区IIIへの保守割合が増加し、両線区の軌道状態が長期的には改善される可能性がある。

#### 7. おわりに

本研究では、軌道保守計画支援システムを開発するためのモデル分析として、高低狂い状態モデルと高低狂い推移予測モデルを推計し、最適軌道保守計画モデルを構築した。結果から得られた知見を以下に示す。

(1) 高低狂いデータの分布は、ロジスティック分

表-10 期別保守可能ユニット上限数

月	期			月	期		
	1	2	3		1	2	3
4	2	2	2	10	2	2	2
5	1	2	2	11	2	2	2
6	2	2	2	12	2	2	1
7	2	0	0	1	1	2	2
8	0	0	0	2	2	2	2
9	0	0	2	3	2	2	2

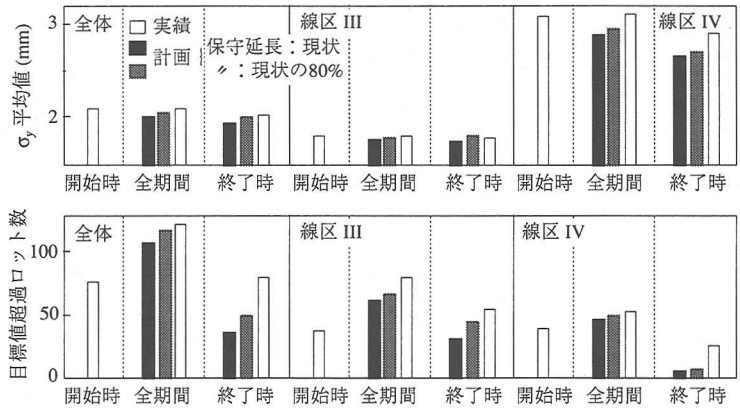


図-14 軌道状態と目標値超過ロット数の比較

布への適合度が高い。そして、輸送条件や線形・軌道構造条件による相違は分布パラメータの推計により表現可能であることが判明した。

(2) ロジスティック分布のパラメータ  $\beta$  の値を用いると、高低狂いの区間評価指標と高低狂い最大値の両方が評価可能であることが判明した。

(3) 輸送条件や線形・軌道構造条件における要因の違いは劣化速度に対しても影響を与える。推計した要因別劣化過程解析モデルにより、180日後の高低狂いを高精度で予測することが可能である。また、任意の時刻における個々のロットの高低狂い量は、ロット別劣化過程解析モデルにより高精度で予測できることが判明した。

(4) 年間平均高低狂い量を最小にすることを目的とする最適軌道保守計画モデルを用いると、年間平均軌道状態が実績値に対して約5%改善された最適計画が得られた。この計画はパーソナルコンピュータによって数分程度で得ることができ、本モデルは十分実用に耐え得ることが判明した。

一方、得られる保守計画の質を更に高めるために、以下のような研究課題が挙げられる。

(1) 保守効果解析モデルの予測誤差は劣化過程解析モデルの予測誤差に比較して大である。保守を実施するロットの保守後の高低狂い推移モデルを高精度に推計する必要がある。

(2) ユニット数や制約条件数が増加すると、モデルの規模が大きくなるため、最適計画を得るのに多くの時間を要すると考えられる。このような場合にも厳密な最適解、あるいは高精度の近似解を短時間で作成できるモデルを構築する必要がある。

(3) 実際の保守活動の現場においては、同一箇所複数回のMTT保守を実施したり、同一区間に複数台のMTTが運用される場合がある。制約条件の緩和

等を含めた計画モデルの改善が必要である。

(4) 本モデルにおいては、MTT保守の一目的である通り狂い保守を考慮していない。高低狂いと通り狂いの両者を考慮した最適軌道保守計画モデルを構築する必要がある。

(5) 5章で述べたような各保線区においてMTT配備期間中の保守実施順序を決定する軌道狂い保守作業計画モデルを構築する必要がある。この場合、TT保守作業や道床更換、レール削正等についても考慮する。

### 付録I 高低狂い地点評価に対応する管理目標値の設定方法

ロジスティック分布における確率  $c$  の逆生存関数  $z_c$  は次のように表される。

$$z_c = \alpha + \beta \ln \frac{1-c}{c} \quad (21)$$

ここで、推定最大値点が99.9%であることから、確率  $c$  は0.001 ( $= 1-0.999$ ) である。よって、高低狂い最大値に対応する管理目標値  $\beta_{lim2}$  は次のようになる。

$$\beta_{lim2} = \frac{\alpha - z_{0.001}}{-\ln 999} \quad (22)$$

逆生存関数  $z_{0.001}$  を  $x_{max}$  と読み替えることにより、式(5)を得る。

### 付録II 評価基準の設定方法

ロット  $i$  において月  $m$ 、期  $k$  のパラメータ  $\beta$  の値を

$\beta_{mk}^i$ とする。このとき、ロット*i*の目標値を $\beta_g^i$ とすると、ロット*i*の年間平均重み付き高低狂い $\bar{s}^i$ は次のように表される。

$$\bar{s}^i = \frac{\sum_m \sum_k \beta_{mk}^i}{36\beta_g^i} \quad (23)$$

また、ユニット*j*の平均重み付き軌道状態 $\bar{s}^j$ は、そのユニットに含まれる計画対象ロット数を $N_j$ とすると次のように表される。

$$\bar{s}^j = \frac{\sum_{i=r(j)}^{r(j)+N_j} \bar{s}^i}{N_j} \quad (24)$$

$r(j)$ : ユニット*j*のロット番号最小値

よって、全ユニットの年間平均重み付き軌道状態は、ユニット数を $U_{max}$ とすると次のように表される。

$$\bar{S} = \frac{\sum_j \bar{s}^j}{U_{max}} \quad (25)$$

ここで、ロット*i*の重み付き軌道状態の初期値を $S_0^i$ 、劣化速度を $\Delta S^i$ 、保守改善量を $\Delta S_r^i$ とするとユニット*j*の重み付き軌道状態初期値 $S_0^j$ 、劣化速度 $\Delta S^j$ 、保守改善量 $\Delta S_r^j$ は次のように表される。

$$S_0^j = \frac{\sum_{i=r(j)}^{r(j)+N_j} S_0^i}{N_j} \quad (26a)$$

$$\Delta S^j = \frac{\sum_{i=r(j)}^{r(j)+N_j} \Delta S^i}{N_j} \quad (26b)$$

$$\Delta S_r^j = \frac{\sum_{i=r(j)}^{r(j)+N_j} \Delta S_r^i}{N_j} \quad (26c)$$

これらを式(25)に代入すると次のようになる。

$$\bar{S} = \frac{1}{36U_{max}} \sum_j \{ 36S_0^j + 666\Delta S^j - \Delta S_r^j (3 \sum_m \sum_{x=1}^{m-1} \sum_{v=1}^3 w_{xvj} + \sum_m \sum_k \sum_{y=1}^k w_{myj}) \} \quad (27)$$

ここで、 $\sum_j (36S_0^j + 666\Delta S^j)$ は定数と考えられることから、式(27)を次のように書き換える。

$$\bar{S} = C_1 - C_2 (3 \sum_m \sum_{x=1}^{m-1} \sum_{v=1}^3 \Delta S_r^j w_{xvj} + \sum_m \sum_k \sum_{y=1}^k \Delta S_r^j w_{myj}) \quad (28a)$$

$$C_1 = \frac{1}{36U_{max}} \sum_j (36S_0^j + 666\Delta S^j) \quad (28b)$$

$$C_2 = \frac{1}{36U_{max}} \quad (28c)$$

よって、本計画モデルでの目的関数は式(28a)の最

小化である。ところが、 $C_1 > 0$ であることから、本計画モデルの目的関数は次の式の最大化と言い換えることができる。

$$3 \sum_m \sum_{x=1}^{m-1} \sum_{v=1}^3 \Delta S_r^j w_{xvj} + \sum_m \sum_k \sum_{y=1}^k \Delta S_r^j w_{myj} \quad (29)$$

ゆえに、式(20)を得る。

## 参考文献

- ERRI : D 187/RP1 Decision Support System for Permanent Way Maintenance and Renewal , 1993.
- ERRI : D 187/RP2 Decision Support System for Permanent Way Maintenance and Renewal , 1995.
- 大竹敏雄, 川崎祐征, 青木衛市, 佐藤吉彦 : 軌道管理システム TOSMA の開発, J-RAIL' 97 講演論文集, pp.271-274, 1997.
- Korpanec, I. and River, R. : ECOTRACK : A Tool to Reduce the Life Cycle Costs of the Track, WCRR' 97, 1997.
- 杉山徳平 : 在来線における軌道狂い進みの実態調査とその解析, 鉄道線路, 第26巻, 2号, pp.7-10, 1978.
- 内田雅夫, 石川達也, 名村明, 高井秀之, 三和雅史 : 軌道狂い進みに着目した有道床軌道の新しい設計法, 鉄道総研報告, 第12巻, 3号, pp.37-42, 1998.
- 齋藤八郎, 小倉文章 : P値管理のためのMTT投入計画システム, 鉄道総研報告, 第3巻, 10号, pp.10-16, 1989.
- 森本勝, 三和雅史 : 指数平滑法を用いた軌道狂い進みの予測法, 土木学会第52回年次学術講演会概要集第4部, pp.692-693, 1997.
- 内田雅夫, 三和雅史 : 材料劣化を考慮した軌道狂い経時変化の予測モデル, 鉄道総研報告, 第11巻, 2号, pp.1-6, 1997.
- 三和雅史, 内田雅夫 : 軌道状態推移モデルの設定と軌道保守施策決定法, 鉄道総研報告, 第11巻, 2号, pp.7-12, 1997.
- 村上清明 : 線路保守計画の最適化に関する一検討, 鉄道線路, 第32巻, 12号, pp.16-19, 1984.
- 三和雅史, 内田雅夫 : 遺伝的アルゴリズムによるマルチ運用計画法, 鉄道総研報告, 第12巻, 3号, pp.11-16, 1998.
- 村松林太郎 : 経営工学のための数理統計学, 日刊工業新聞社, pp.355-365, 1969.
- 内田雅夫, 森本勝, 三和雅史, 小林幹人 : 在来線高速線区の軌道狂い進みの実態と予測手法の検証, 鉄道総研報告, 第12巻, 3号, pp.17-22, 1998.
- 須田征男, 長戸彰, 徳岡研三, 三浦重 : 新しい線路, 日本鉄道施設協会, 1997.
- Brown, R. G. : 在庫管理のための需要予測, 1961.
- 三和雅史, 内田雅夫 : 分枝限定法による軌道保守施策の長期最適化, 土木計画学研究・講演集, No.20, pp.55-58, 1997.11.

(2000. 3. 31 受付)

MODELING THE TRANSITION PROCESS OF RAILWAY TRACK  
IRREGULARITY AND ALL INTEGER MATHEMATICAL  
PROGRAMMING MODEL ANALYSES FOR MAKING OPTIMAL  
TRACK MAINTENANCE SCHEDULE

Masashi MIWA, Tatsuya ISHIKAWA and Tatsuo OYAMA

In this paper we investigate the transition process of surface irregularity to determine maintenance strategies effectively. From the statistical data analysis, we develop a degradation model and restoration model. Next, in order to obtain an optimal maintenance policy based upon both maintenance costs and level of irregularity for riding quality and safety we propose an all integer mathematical programming model for making optimal multiple tie tamper(MTT) operation scheduling. This scheduling model allows us to decide when a MTT should be allocated to each depot, and which lot should be executed maintenance with the MTT.