

軌道狂い状態の経時変化モデルとその応用

A MODEL OF TIME HISTORY OF RAILWAY TRACK
IRREGULARITIES AND ITS APPLICATIONS

池守昌幸*

By Masayuki IKEMORI

The informations for time history of track conditions are the bases of decision making for railway track maintenance, which are selection of track structure, planning of works, giving of rectification criteria of track irregularity and etc.. In this paper a model of time history of track irregularities and its applications have been presented. By analyzing the railway track system and applying recent results of investigation and method of system dynamics, system equations are set up and the processes of the states are studied under conditions of transportation, track structure and rectification criteria. It is concluded that applicability of the model will hold widely, although some system equations must be complemented by adding a few practical data.

1. ま え が き

列車荷重による劣化と補修が繰り返される鉄道の軌道の状態の経時変化についての情報を得ることは、軌道構造の選択、軌道補修の計画、整備基準の設定をはじめ軌道管理上の多くの方策を決定するための基本的要件である。本論文は、軌道管理システムを構成する諸要素に関する近年の研究成果とシステム・ダイナミックスの手法を援用して、軌道狂い状態の経時変化についてのモデル方程式を提案し、その応用を示したものである。

軌道狂い状態を表示する指標として P 値⁽¹⁾ が国鉄において使用されてきている。 P 値の経時変化予測については1960年に小野木が軌道変位の標準偏差を用いる方法を提案し¹⁾、この頃より「狂い進み」の概念が生まれて全国的な規模で現場調査が行われ、その結果が1963年に広井により報告されている²⁾。しかし、当時はデータ収集に能力上の制約があり、また十分なデータ処理が可能な状況に達していなかったため、軌道構造や輸送条件と関連づけた P 値の予測法が確立されるに至ら

なかった。

その後しばらくの間この課題についての進展はなかったが、1976年より再び狂い進みについての大規模な調査が実施された。この時点では、全国的に軌道検測車が運行されて十分なデータの入手が可能となり、またデータ処理の方法もソフトウェア、ハードウェア両面にわたって発展しており、この調査の結果として、軌道構造、路盤条件、輸送条件と関連づけた狂い進みの算定式が杉山によってまとめられた³⁾。本論文に示すモデル方程式は、この狂い進み算定式を基本として、これに軌道材料条件を加味した若干の変形と補修効果の導入を行い、狂い進み算定式の特性に対応した P 値への変換を行って、軌道条件と輸送条件により生ずる P 値の経時変化が得られるように設定したものである。

モデル方程式はシステム・ダイナミックス手法により設定したが、このモデルの実用性と改良点の検討ならびに応用を示すものとして

- 1) 異なる軌道整備基準のもとで、維持される P 値の水準はどのように変わるか
 - 2) 種々の輸送条件のもとで、軌道保守費が最小となる軌道構造はどのようなものか
- について試算した結果を示した。

* 正会員 工博 名古屋工業大学 社会開発工学科
(〒466 名古屋市昭和区御器所町)

注1) 軌道狂い指数の略称。3mm(絶対値)を超える大きさの軌道狂いの存在割合。百分比で示される。

2. モデルの構成

本文の主な対象は軌道狂い状態の経時変化であるが、軌道狂いの変化に対する材料状態の影響を加える必要上随伴的に材料状態の経時変化のモデル化も併せ行う。

モデル化を行うにあたって関連する要素は多数存在するが、これらの中より軌道狂い状態ならびに3種類の材料状態を内生変数とし、これら内生変数の経時変化モデルを設定する。これら以外の要素はすべて固定された条件としての外生変数として扱う。モデル計算の関心は、外生変数を変えたときの軌道狂い状態の経時変化ならびにそれに伴う維持可能なP値の水準、補修周期、軌道保守費などの変化であり、これによってシステム要素としての外生変数の評価を行おうとするものである。

モデル構成のうえから、軌道狂いセクターと材料セクターの2つの区分を設け、前者で軌道狂い状態の、後者で材料状態の経時変化を扱う。2つのセクターを設けることにより、軌道狂い状態の経時変化に対して材料状態は外生的に作用することとなる。軌道狂い状態は直接的に材料状態に影響を与えないものとするが、後述のように材料交換時の決定には軌道狂い状態を関与させる。

(1) 軌道狂いセクター

軌道狂いセクターのフローを Fig.1 に示すものとする。

軌道狂い状態はP値で表示するが、基本的なレベル変数は25mごとの最大高低狂い(絶対値最大、以下単に最大狂いという)で、一定延長区間における最大狂いの集合の経時変化をP値で示すことになる。最大狂いを用いるのは、前述の狂い進み算定式が最大狂いについて求められていることによる。

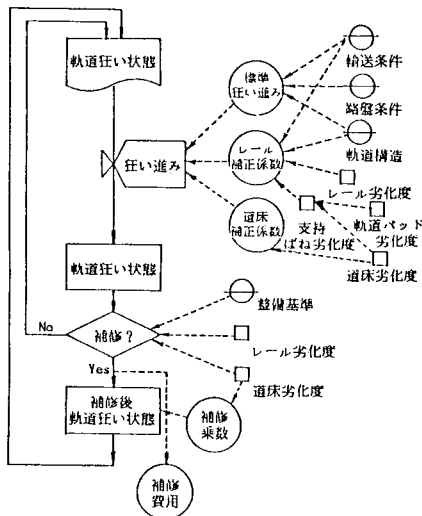


Fig.1 Flow Chart of the Track Irregularity Sector.

このセクターのレイト変数は、単位期間当たりの軌道狂いの進行—狂い進み—であるが、狂い進み算定式に後述する材料の劣化による補正を施したものとす。これより、各最大狂いは、外生的に与えられる輸送条件、軌道構造、路盤条件ならびに材料状態に従って増大することとなる。

単位期間を経て増大した各最大狂いあるいはP値は、外生的に定められる整備基準により照査され、これらが整備基準内であればそのまま次期首のレベル値となるが、整備基準を超えていれば全部の最大狂いが補修される。この補修結果は補修時の最大狂い量と道床劣化状態に依存するものとする。補修後の最大狂いは次期首のレベル値となり、これらの過程が繰り返される。また、材料交換が行われるときは狂い補修が伴うものとする。

(2) 材料セクター

材料セクターでは、レール、軌道バッドおよび道床の各劣化度の3つのレベル変数を設け、Fig.2のようなフローを考える。

劣化度は標準とされている材料寿命(原則として累積通過トン数)の中央時点を基準として数値化する。レイト変数は、年間通過トン数に比例するそれぞれの材料の劣化率を標準とし、これに各材料の劣化の影響を加味したものとす。この補正により材料が古くなるにつれて諸材料の劣化が促進される。単位期間後に増大した各材料劣化度はそれぞれ交換基準に照らされ、交換基準に達していれば新品に交換されることになる。ただし、材料交換時には狂い補修を伴うことから、原則的に材料交換

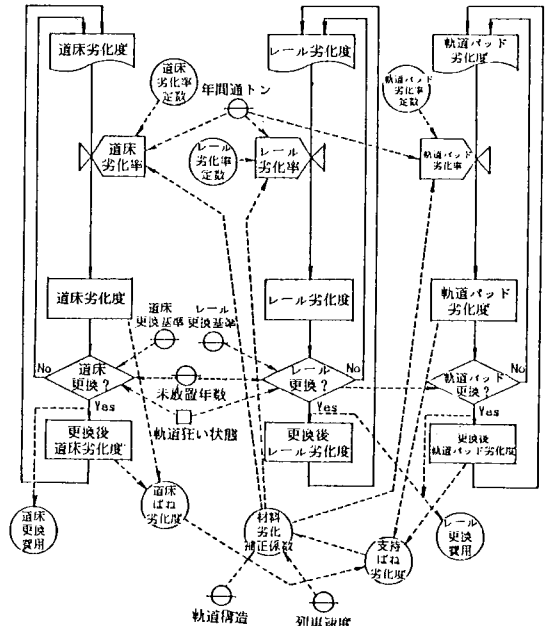


Fig.2 Flow Chart of the Material Sector.

は軌道狂いセクターで狂い補修が行われる時点に合わせて実施する。この交換延伸は一定期間内（本文の計算例では半年）とし、この期間に狂い補修が行われなければ独自に材料交換を行うこととする。軌道パッドには交換基準は設けず常にレール交換と同時に交換する。軌道狂いセクターと同様の過程が循環的に繰り返される。

3. モデル方程式

(1) 軌道狂いセクター

a) レベル方程式

このセクターの基本的なレベル変数である個々の最大狂いは、一定延長区間では同じレイトにより経時変化するものとする。したがって、区間内の最大狂いに対するレベル方程式は次の1つの形をとる。

$$AI_i K = AI_i J + S JK * DT \dots\dots\dots (L.1)$$

$AI_i J$: J 時点の i 点最大狂い量
($i=1, 2, \dots, N$)

$S JK$: $J-K$ 間狂い進み

DT : 時隔 (= $K-J$)

$$N : \text{区間内ロット数} \dots\dots\dots (C.1)$$

(区間延長 (m)/25 m)

個々の最大狂い位置での局地的条件の存在を考えると最大狂いが同じレイトで経時変化するとはかぎらず、詳細にはレイトの変動を考慮することが必要であろう。しかし、本文では巨視的な軌道狂い状態の経時変化をモデル化することを目的としており、同一時点における区間内の条件は一様とし、平均的性質を用いた確定的モデルを設定する。このことは材料状態についても同じである。

区間の軌道狂い状態を P 値で表示するには、後述のように P 値を最大狂い平均と関連させる。最大狂い平均について (L.1) と同様なレベル方程式が成り立つ。

$$AMI K = AMI J + S JK * DT \dots\dots\dots (L.2)$$

$$AMI J = \sum_{i=1}^N AI_i J / N \dots\dots\dots (D.1)$$

: J 時点最大狂い平均

b) レイト方程式

前項のレベル方程式中の $S JK$ がレイト変数であり、レイト方程式は前章に述べたところにより次のとおりとする。

$$S JK = SS * CSR J * CSB J \dots\dots\dots (R.1)$$

SS : 標準狂い進み

$CSR J$: J 時点狂い進みレール補正係数

$CSB J$: J 時点狂い進み道床補正係数

標準狂い進み SS はすでに求められている次の狂い進み算出式³⁾を用いる。

$$SS = 2.09 \times 10^{-3} * T^{0.31} * V^{0.98} * M^{1.10} * L^{0.21} * B^{0.26}$$

(mm/100 日) $\dots\dots\dots (A.1)$

T : 年間通過トン数 (百万トン) $\dots\dots\dots (\bar{O}.1)$

V : 平均列車速度 (km/h) $\dots\dots\dots (\bar{O}.2)$

M : 軌道構造係数 $\dots\dots\dots (\bar{O}.3)$

L : 定尺レールのとき 10 } $\dots\dots\dots (\bar{O}.4)$
 ロングレールのとき 1 }

B : 良路盤のとき 1 } $\dots\dots\dots (\bar{O}.5)$
 不良路盤のとき 10 }

c) 狂い進み補正係数

上記の狂い進み算定式は、多数の区間における最大狂いの狂い進みの実測値の平均値について求められたものである。この平均値に対して個々の区間ごとに種々の変動要因が存在しているが、ここでは主要な要因としてレールと道床の劣化状態の影響を標準狂い進みを割直し補正する係数の形で導入する。

標準狂い進み SS に含まれる荷重項 T は静止荷重により算定されるが、レールの劣化が増すについて動的輪重の変動が増す、すなわち軌道に作用する最大荷重が増大することが知られている。レール補正係数はこのことについての補正を行うもので、次式により与える。

$$CSR J = CMD J^{0.31} \dots\dots\dots (A.2)$$

$CMD J$: J 時点材料劣化補正係数

$CMD J$ は諸材料の劣化に伴う荷重の割増率で、詳細は材料セクターの項で述べるが、レール劣化度の影響が支配的なのでこれに荷重項 T のべき数を与えたものをレール補正係数とした。

道床の劣化は道床への土砂混入の増加の形となって現われ、土砂混入が狂い進みに影響を与えることより道床補正係数を設定した。既往の調査結果⁹⁾を若干整理して得られた次の土砂混入率に対する狂い進みの回帰式を使用する。

$$S' = 0.599 + 0.023 R_c$$

S' : 狂い進み (mm/100 日)

R_c : 土砂混入率 (%)

一方、実測値より

$$R_c = 3.64 T_c \dots\dots\dots (i)$$

T_c : 累積通過トン数 (億トン)

が得られており⁵⁾、これらの両式を用いて

$$S' = 0.599 + 0.084 T_c$$

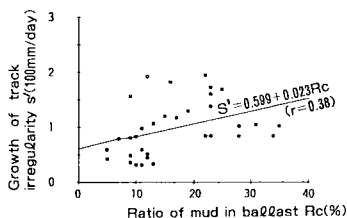


Fig. 3 Ratio of Mud in Ballast and Growth of Track Irregularity.

となる。後述する基準の累積通過トン数 T_{cs} ならびに任意の累積通過トン数 T_{cj} に対する狂い進みをそれぞれ S'_s, S'_j とすると、 T_{cs} に対する T_{cj} における狂い進みの割増率は S'_j/S'_s であり、これと次節の道床劣化度の定義と併せ、道床補正係数は次の形となる。

$$CSB. J = 0.705 + 0.295 * DCB. J \dots\dots\dots (A.3)$$

DCB. J : J 時点道床劣化度

d) P 値の算出

軌道狂い状態は P 値で表示することとしているので、ここで最大狂いより P 値を算出する方法を示す。

延長 500 m の軌道区間の最大狂い平均 \bar{x} と区間標準偏差 σ との間には、次のような回帰式が得られている。

$$\sigma = 0.584 + 0.391\bar{x} \quad (\sigma, \bar{x} : \text{mm}) \dots\dots\dots (ii)$$

一方、高低狂いの区間平均値はほとんど 0 としてよいため、軌道狂い分布の正規性を用いて次式により P 値を算出することができる。

$$P = \left[1 - \frac{2(3/\sigma)}{\sqrt{2\pi}} \left\{ 1 - \sum_{k=1}^{15} (-1)^k \frac{(3/\sigma)^k}{2^k(2k+1)k!} \right\} \right] \times 100 \dots\dots\dots (iii)$$

上式の $\{ \}$ の級数和は本来は無限項までである⁷⁾が、P 値の算出には 15 項までとれば十分である。

前掲の式 (L.2) によって K 時点の最大狂い平均が得られるが、これは K 時点における式 (ii) の \bar{x} に相当するから、式 (L.2) から式 (ii)、(iii) を経て P 値が得られる。

e) 補修判定

単位時隔 DT を経た後の区間の軌道狂い状態は定められた整備基準により補修の必要性が判定されるが、たとえば P 値についての基準を設けた場合には

$$\left. \begin{aligned} P. K \geq PCR \quad \text{ならば} \quad \text{補修} \\ P. K < PCR \quad \text{ならば} \quad \text{補修せず} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (J.1)$$

P. K : K 時点 P 値

PCR : 整備基準 P 値 $\dots\dots\dots (\bar{O}.6)$

のような判定式が設定される。

判定式は与える整備基準に応じ適宜に定められる。

f) 補修実施時のレベル方程式

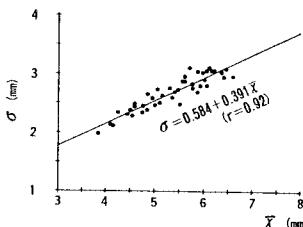


Fig. 4^{注2)} Average Max. Irregularity and Standard Deviation of Track Section.

注2) Fig. 4 に用いた原始データは文献6)

前項により補修せずと判定されたときは、K 時点の軌道狂い状態はそのまま次期首へ移されるが、補修と判定された場合には次のレベル方程式により K 時点の次の L 時点 ($L = K + DT$) の最大狂いを定める。

$$AI_L. L = (AI_L. K + S. KL * DT / 2) * CRP. K' + S. K' * L * DT / 2 \dots\dots\dots (L.3)$$

CRP. K' : K' 時点補修乗数

ここで K' 時点とは K 時点と L 時点の中央時点をいう。すなわち、K 時点で補修と判定されたときに補修作業は次の L 時点までに実行されるが、その時点は K と L の中央時点とする。K' 時点までになお最大狂いは増大し (式 (L.3) 第 1 項 () 内)、この状態に対し補修が行われる。補修により最大狂いは補修乗数で与えられる比率で減少するが (第 1 項)、K' から L までの間に最大狂いは再び増大する (第 2 項)。

補修乗数は次の形をとるものとする。

$$CRP. J = SCRP * CRPB. J \dots\dots\dots (A.4)$$

SCRP : 標準補修乗数 (= 0.62) $\dots\dots\dots (C.2)$

CRPB. J : J 時点補修乗数道床補正係数

SCRP = 0.62 は、既往の調査で補修による高低狂いの平均減少率が 62 % という結果が得られている⁸⁾ことによる。一方、上記の道床補正係数は、道床劣化 (土砂混入) の増大により補修効果が低下することより経験的に導入したもので、

$$\left. \begin{aligned} CRPB. J = 1 \quad DCB. J \leq 1 \\ = 0.925 + 0.075 * DCB. J \\ DCB. J > 1 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (A.5)$$

DCB. J : J 時点道床劣化度 (次節参照)

の形を与える。すなわち、道床劣化が基準状態より進んだ場合には補修効果は直線的に減少し、土砂混入率 100 % のとき補修効果はなくなるものとする。

(2) 材料セクター

a) レベル変数の定義

このセクターのレベル変数は、レール劣化度、軌道パッド劣化度および道床劣化度の 3 つで、一定延長区間内の材料状態は一樣として、それぞれのレベル変数は区間の劣化度を表わすものとする。

各材料劣化度は使用材令に比例するものとし、基準使用材令—新品時より標準更換材令までの中央値—に関して標準化した数値によりレベル変数を定義する。基準使用材令を上記のようにとったのは、狂い進み算定式が求められた調査区間の各材料の材令が多岐にわたっていると考えられるので、それらの平均の意味で中央点をとったことによる。

使用材令には、レールおよび道床は新品使用時点からの累積通過トン数 (以下累積通トン) を、軌道パッドについてはパッドばね定数を用いる。ただし、計算の便宜

上、軌道パッドについてもパッドばね定数 D_p と累積通トン T_c との関係式⁹⁾

$$D_p = 89\,730 + 230.9T_c \quad (\text{kN/m})$$

(T_c : 百万トン)

の定数項をばね定数の公称値としたものを用いて、劣化度を累積通トンにより表示するように換算する。

これらにより、各レベル変数の定義式は次のようになる。

$$DCR.J = UDCR * AR.J \dots\dots\dots (D.2)$$

$$DCP.J = PDI + UDCP * AP.J \dots\dots\dots (D.3)$$

$$DCB.J = UDCB * AB.J \dots\dots\dots (D.4)$$

$DCR.J$: J 時点レール劣化度

$DCP.J$: J 時点軌道パッド劣化度

$DCB.J$: J 時点道床劣化度

$UDCR$: レール劣化率定数 $\dots\dots\dots$ (Ö.7)

PDI : 軌道パッド劣化度初期値 $\dots\dots\dots$ (Ö.8)

$UDCP$: 軌道パッド劣化率定数 $\dots\dots\dots$ (Ö.9)

$UDCB$: 道床劣化率定数 $\dots\dots\dots$ (Ö.10)

$AR.J$: J 時点レール使用材令

$AP.J$: J 時点軌道パッド使用材令

$AB.J$: J 時点道床使用材令

レールおよび道床は新品時には使用材令が 0 であるのに対して、軌道パッドは新品時に 0 でない初期パッドばね定数をもつからレベル変数の定義式は前二者に比べて定数項をもつ形となる。

材料の劣化率定数は次のように定められる。たとえば 50 N レールでは、標準更換材令は累積通トン 4 億トンとされている¹⁰⁾から、その中央点は 2 億トン、通過トン数（以下通トン）の単位を百万トンとすると、

$$UDCR = 1 / (400 / 2) = 1 / 200$$

となる。軌道パッド、道床もこれに準ずる。

b) レベル方程式

前項の定義よりレベル方程式は次のようになる。

$$DCR.K = DCR.J + RDR.JK * DT \dots\dots\dots (L.4)$$

$$DCP.K = DCP.J + RDP.JK * DT \dots\dots\dots (L.5)$$

$$DCB.K = DCB.J + RDB.JK * DT \dots\dots\dots (L.6)$$

$RDR.JK$: J - K 間レール劣化率

$RDP.JK$: J - K 間軌道パッド劣化率

$RDB.JK$: J - K 間道床劣化率

c) レイト方程式

前項の $RDR.JK$, $RDP.JK$, $RDB.JK$ はレイト変数で、これらを定めるレイト方程式は次のとおりである。

$$RDR.JK = UDCR * T * CMD.J \dots\dots\dots (R.2)$$

$$RDP.JK = UDCP * T * CMD.J \dots\dots\dots (R.3)$$

$$RDB.JK = UDCB * T * CMD.J \dots\dots\dots (R.4)$$

T : 年間通トン $\dots\dots\dots$ (Ö.1)

$CMD.J$: J 時点材料劣化補正係数

d) 材料劣化補正係数

すでに述べたように、この補正係数は諸材料の劣化に伴う荷重の割増率を与えるもので、基本的に次式による。

$$\text{割増率} = (W + 2\sigma_w) / (W + 2\sigma_{ws})$$

W : 静輪重

σ_w : J 時点輪重変動標準偏差

σ_{ws} : 基準輪重変動標準偏差

上式の分子、分母はそれぞれ J 時点および基準条件における最大輪重とみなされるもの¹¹⁾で、基準条件に対する最大輪重比を J 時点の割増率とするものである。基準条件として $2\sigma_{ws}/W = 0.227$ ¹²⁾ とすると、上式は次のように変形される。

$$\text{割増率} = 0.815 + 0.185(\sigma_w/\sigma_{ws}) \dots\dots\dots (iv)$$

一方、輪重変動標準偏差 σ_w について次の関係式が得られている¹³⁾。

$$\sigma_w = 2.74 \left(\frac{A}{\pi} \right)^{0.5} \left(\frac{m_0}{2} \right) (EI)^{0.125} \left(\frac{D_1}{a} \right)^{0.375} V \dots\dots\dots (v)$$

A : レール頭頂面の粗さを示す係数

m_0 : 車両ばね下重量

EI : レール曲げ剛性

D_1 : 動的レール支持ばね定数

a : まくらぎ間隔

V : 列車速度

上式で材料状態が関係するのは A と D_1 であるが、 A については現在その数値の詳細は明らかではないが定性的に通トンに比例するとして、 J 時点、基準時点の A をそれぞれ A_J , A_S とすると

$$A_J/A_S = DCR.J$$

と書くことができる。同様に D_1 について

$$\text{支持ばね劣化度 } DCS.J = D_{1,J}/D_{1,S} \dots\dots\dots (D.5)$$

を定義すると、式 (v) 中の各パラメーターに同様な添字を付して、割増率すなわち $CMD.J$ の式 (iv) は

$$CMD.J = 0.815 + 0.185 * (DCR.J)^{0.5} * (DCS.J)^{0.375} *$$

$$\left(\frac{m_{0,J}}{m_{0,S}} \right) * \left(\frac{I_J}{I_S} \right)^{0.25} * \left(\frac{a_S}{a_J} \right)^{0.375} * \left(\frac{V_J}{V_S} \right) \dots\dots\dots (A.6)$$

となる。上式中 $m_{0,J}$, I_J , a_J , V_J は計算条件として外生的に与えられる数値であり、 $m_{0,S} \sim V_S$ は基準値である。これらの基準値は、前記の $2\sigma_{ws}/W = 0.227$ を得た条件より

$$\left. \begin{aligned} m_{0,S} &= 763 \text{ kg} \\ I_S &= 1\,960 \text{ cm}^4 \quad (50 \text{ N レール}) \\ a_S &= 58.2 \text{ cm} \quad (44 \text{ 本}/25 \text{ m}) \\ V_S &= 68.1 \text{ km/h} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (C.3)$$

とする。

e) 支持ばね劣化度

前項で定義した支持ばね劣化度における D_1 は動的ば

ね定数であるが、これは静的ばね定数に比例するとしてよい¹⁴⁾から、この劣化度は次により軌道パッド劣化度と道床劣化度を用いて表わすことができる。

まず、支持ばね定数 D は

$$D = D_p D_B / (D_p + D_B)$$

D_p ：軌道パッドばね定数

D_B ：道床ばね定数

であるから、前項と同様に J 時点、基準時点にそれぞれ添字 J と S を用いることにより

$$DCS. J = D_J / D_S DCP. J * DCBK. J * (1 + RPBK) / (DCP. J * RPBK + DCBK. J) \dots\dots (A. 7)$$

$$RPBK = D_{ps} / D_{BS} \dots\dots (\bar{O}. 11)$$

：パッド・道床ばね比

$$DCBK. J = D_{Bj} / D_{BS} \dots\dots (D. 6)$$

： J 時点道床ばね劣化度

となる。

室内実験値¹⁵⁾より得られた次の関係式

$$D_B = 4\,678 + 66.69R_c \quad (\text{kN/m})$$

R_c ：土砂混入率 (%)

ならびに前出の土砂混入率と累積通トン T_c との関係式 (i) から

$$D_B = 4\,678 + 243T_c \quad (\text{kN/m})$$

が得られ、これまでと同様に添字 J と S を用い、 $T_{cs} = 3$ 億トン¹⁶⁾とすると、上式から (D. 6) は

$$DCBK. J = 0.865 + 0.135 * DCB. J \dots\dots (A. 8)$$

の形になる。

以上の式 (A. 6)～(A. 8) より材料劣化補正係数 CM $D. J$ はレベル変数 $DCR. J$ 、 $DCP. J$ 、 $DCB. J$ の関数として定まる。

f) 材料交換時の判定

単位時隔 DT を経た後、レールおよび道床の劣化度は交換基準と照査し、交換の必要性の有無を判定する。判定式は

$$\left. \begin{array}{l} DCR. K \geq CRS \quad \text{ならば} \quad \text{必要あり} \\ DCR. K < CRS \quad \text{ならば} \quad \text{必要なし} \end{array} \right\} \dots\dots (J. 2)$$

$$\left. \begin{array}{l} DCB. K \geq CBS \quad \text{ならば} \quad \text{必要あり} \\ DCB. K < CBS \quad \text{ならば} \quad \text{必要なし} \end{array} \right\} \dots\dots (J. 3)$$

で、劣化度の定義により

$$CRS = CBS = 2 \dots\dots (\bar{O}. 12)$$

である。

2.(2) に述べたように、材料交換は狂い補修と併せて行うこととしているから、上記の判定式で交換の必要ありと判定されても、式 (J. 1) で狂い補修の判定がされるか、または下記の式 (J. 4)、(J. 5) の判定がなければ、材料状態は交換基準を超えたまま次期へ移される。

狂い補修の周期が長い場合に、交換基準を超えた材料が長期間存置されることを避けるために、

$$\left. \begin{array}{l} TER. K = TER. J + JR. K \\ TEB. K = TEB. J + JB. K \end{array} \right\} \dots\dots (A. 9)$$

$TER. J$ ： J 時点レール交換基準超過時数

$TEB. J$ ： J 時点道床交換基準超過時数

$JR. K$ ：レール交換判定値 ((J. 2) で必要ありのとき 1、必要なし のとき 0)

$JB. K$ ：道床交換判定値 ((J. 3) で必要ありのとき 1、必要なし のとき 0)

のような補助変数を設ける。これより

$$TER. K = LTR \dots\dots (J. 4)$$

$$TEB. K = LTB \dots\dots (J. 5)$$

LTR ：レール許容基準超過時数 $\dots\dots (\bar{O}. 13)$

LTB ：道床許容基準超過時数 $\dots\dots (\bar{O}. 14)$

となれば、狂い補修とは無関係にレールまたは道床を交換する。

g) 材料交換時のレベル方程式

材料が交換される時点は、狂い補修と同じく交換決定時点 K より次時点 L までの中央時点 K' とする。 K' 時点では材令は 0 となり、 L 時点の材料劣化度は

$$DCR. L = RDR. K' L * DT / 2 \dots\dots (L. 7)$$

$$DCP. L = PDI + RDP. K' L * DT / 2 \dots\dots (L. 8)$$

$$DCB. L = RDB. K' L * DT / 2 \dots\dots (L. 9)$$

より定まる。

4. 応用例

前章までに述べたモデルにより、外的条件である輸送条件、軌道構造、整備基準などと軌道狂い状態、材料状態の初期値を与えて、任意の期間について一定時隔の P 値の経時変化をシミュレーションにより求めることが可能になる。このことは単に P 値の予測のみではなく、外的条件の変化に伴う軌道管理上のさまざまな情報、たとえば P 値の維持水準や補修周期、材料の交換周期、軌道保守費など、を得ることができ、軌道管理上の施策決定に対して有用な資料を提供するものとなる。本章では、これらの中より 1. に示した 2 つの事例について試算した結果を示す。

(1) 異なる整備基準での P 値の水準

a) 計算条件

軌道構造 50 N レール PC まくらぎ 44 本 / 25

m 道床厚 25 cm 構造係数 0.8

軌道パッド・道床ばね比 3.135

輸送条件 年間通トン 4 千万トン 平均列車

速度 70 km/h

路盤条件 良路盤

レール長 25 m (定尺)

注 3) 耐用年数 20 年¹⁶⁾、年間通トン 34 万トン (1 級線)

整備基準

- 基準1 最大狂いで13 mm以上が10%
- 基準2 最大狂いで6 mm以上が60%
- 基準3 軌道狂いにかかわらず1年ごと

初期値

最大狂い	3.6	3.2	4.8	6.3	2.1
	6.7	4.9	4.4	3.0	3.8
	3.2	7.7	3.7	4.7	7.5
	2.6	2.6	3.6	2.4	3.9
P=18.7					

材料劣化度 各材料劣化度とも 1

その他

計算単位時隔	365/4 日
計算期間	15年
区間延長	500 m

b) 主要な補助変数の特性

P値の経時変化についての結果を示す前に、計算で主要な役割を演ずるいくつかの補助変数の特性を示しておく。

まず、標準狂い進み SS は次の値となる。

$$SS = 0.535 \quad (\text{mm}/100 \text{日})$$

次に、狂い進みレール補正係数とレール劣化度、同道床補正係数と道床劣化度との関係をそれぞれ Fig. 5, Fig. 6 に示す。図にみられるように、狂い進みに対して道床劣化度が大きな効果を持ち、レール劣化度の効果はさほどではない。

材料補正係数のレール劣化度に対する変化を、道床劣化度を含む支持ばね劣化度をパラメーターにとって示したものが Fig. 7 である。この場合はレール劣化度の効果

が道床劣化度の効果に比べて著しく大きい。

c) P 値の経時変化と各基準の考察

Fig. 8 に整備基準 1 ~ 3 の場合の P 値の経時変化を示す。

基準 1 では、補修実施時点の P 値は 50~60 というかなり大きい値となり、したがって補修後の P 値も大きい。全体として 40~60 の P 値で推移し、軌道狂い状態は悪い。少なくとも上級線区で採用すべき基準ではない。補修周期は平均して約 3 年である。Fig. 6 に示した道床補正係数の影響は道床更新前後の補修周期の差異によって現われている。

基準 2 では、P 値は 20~35 程度に保たれる。中程度の軌道狂い状態を維持できる基準といえよう。補修周期は約 1.2 年で、基準 1 に比べて 40% に短縮される。逆にいえば 2.5 倍の狂い補修費が必要である。

基準 3 では、基準 2 よりも補修周期が短縮されることになるから、維持される P 値の水準はさらに向上する。軌道狂い状態に無関係に一定周期で補修が行われるので、特に道床劣化度の影響による狂い進みの大きい時期と小さい時期における P 値の維持水準にかなりの差異が生じている。この点から、軌道狂い状態とは無関係に一律に補修周期だけを決めるという基準は適切ではない。

(2) 軌道保守費最小の軌道構造

a) 計算条件

整備基準 (P 値)¹⁶⁾

1 級線	20	2 級線	25
3 級線	30	4 級線	40

輸送条件 Table 1 のとおり

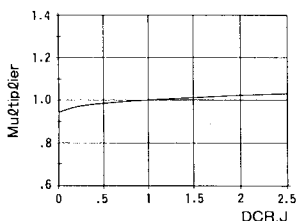


Fig. 5 Rail-Decayed Multiplier.

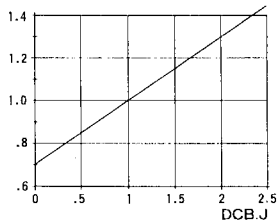


Fig. 6 Ballast-Decayed Multiplier.

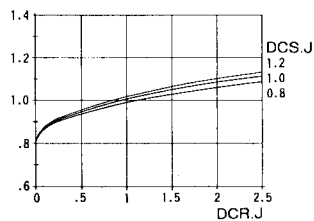
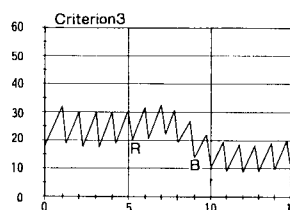
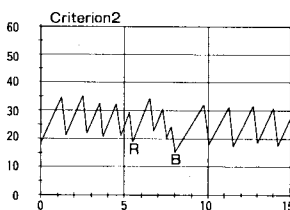
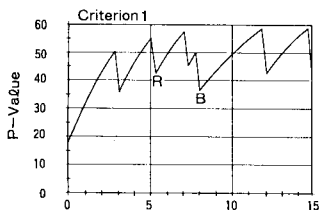


Fig. 7 Material-Decayed Multiplier.



(R:Rail replacement B:Ballast replacement)

Fig. 8 Time History of P-Value (50-PC 44-25 ; 25 m-Rail, Good-Bed).

Table 1 Conditions of Transportation.

Class	1		2		3		4	
T	20	30	10	20	5	10	2	5
	40	50						
V	60	70	50	60	40	50	30	40
	80	90	70	70	60	60	50	50

T: Annual passing tonnage (million ton)
V: Average train speed (km/h)

材料標準更換材令 (億トン)

レール 60 kg... 6 50 N... 4
40 N... 3

道床 一律に 6

初期値

平均最大狂い (\bar{x}) および P 値 Table 2 のとおり

材料劣化度 各材料劣化とも 1

その他

計算単位時隔 365/4 日

計算期間 原則として 30 年

区間延長 500 m

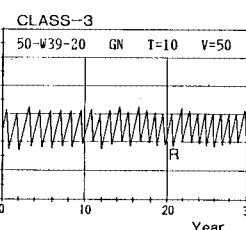
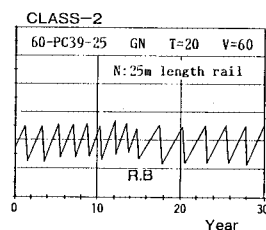
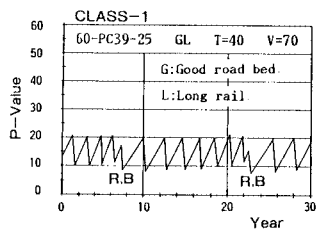
b) 軌道構造および条件

検討対象とした軌道構造の諸元は Table 3 のとおりで、各線級ごとに、レール種別、まくらぎの種類・配置、道床厚のすべてを組み合わせた軌道構造について算定した。路盤条件は良、不良の 2 通り、木まくらぎを除いた 1、2 級線は定尺レールとロングレールの 2 通り、その他は定尺レールのみとした。

c) P 値の経時変化と狂い補修周期

a), b) により求めた P 値の経時変化の例を Fig. 9 に示した。各線級とも定められた整備基準値を上限に 10 程度の P 値の範囲で変動していること、また 1、2 級線では Fig. 8 でみられたような道床劣化度の変化に伴う明らかな補修間隔の変動が示されている。3 級線では 30 年の間に道床更換が行われないので顕著ではないが、同じ傾向がみられる。4 級線についての図示は省略したが上記と同様である。

次に、Fig. 10 に各線級から 1 つずつの輸送条件を選んで、各軌道構造ならびに各条件における平均補修周期



Ex. 60-PC39-30 : Rail:60, Tie:PC.39/25m, Ballast:30cm T,V; cf. Table-1

Fig. 9 Examples of Time History of P -Value.

Table 2 Initial Values of \bar{x} and P .

Class	1	2	3	4
\bar{x}	3.55	4.03	5.26	6.06
P	12.8	16.5	25.6	31.0

Table 3 Elements of Calculated Track Structures.

Class	1		2		3		4	
Rail	60	50	60	50	50	40	50	40
Tie	P C	44	39	44	39	39		37
	W	48		41		39		37
Ballast	30	25	25		20		20	15

Rail: 50=50N, 40=40N
Tie: Number of ties per 25m
Ballast: Depth of ballast (cm)

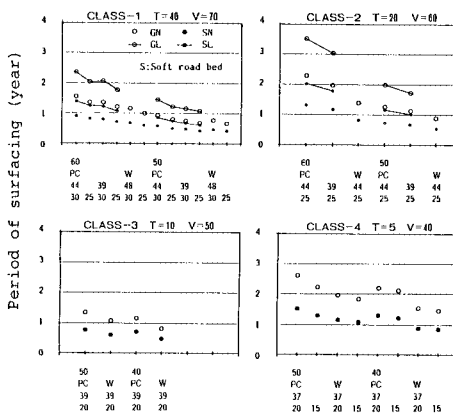


Fig. 10 Average Periods of Surfacing.

を示した。この周期の算定は次式によった。

$$\text{平均補修周期} = (t_e - t_f) / n$$

t_f : 第 1 回の補修時点

t_e : 計算期間内の最終補修時点

n : $t_e - t_f$ 間の補修回数

Fig. 10 では、輸送条件と軌道構造、路盤などの条件に対応して 1 年弱から 3 年を超える平均補修周期がみられるが、不良路盤では良路盤の 60% 程度、ロングレールでは定尺レールの 1.5 倍程度となっている。

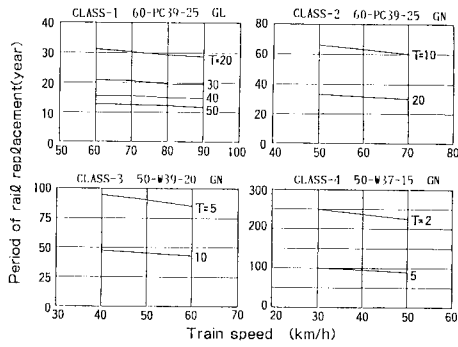


Fig. 11 Periods of Rail Replacement.

d) 材料更換周期

Fig. 11 に各輸送条件に対するレールの更換周期の例を示した。材料更換周期の算定は原則的に次式によった。
 更換周期 = t_r/n

t_r : 計算期間内に材料劣化度が1以下の値から1以上となった最終時点

n : 計算期間内に材料劣化度が1以下の値から1以上となった回数

輸送条件によっては材料劣化の進行が遅いために計算期間30年では上式を適用できない場合があり、このときは計算期間を延伸するか、材料劣化の進行を直線的とみなして外挿するかのいずれかの方法をとった。図にみられるように下級線ではレール更換周期は著しく長い。

道床について図示を省略するが、Fig. 11の60レールと同等で、下級線の更換周期はレールの場合よりさらに長くなる。

e) 軌道保守費最小の軌道構造

c), d)の結果に基づいて、各線級の輸送条件、軌道構造、路盤条件などごとに軌道保守費を算出し、その結果、各線級の各輸送条件ごとに最小軌道保守費を与える軌道構造はTable 4に示すようなものとなった。

軌道保守費の算定方法についてはいくつかの方式があるが、ここでは単純に狂い補修周期および材料更換周期でそれぞれの所要費用(軌道1m当たり)を除いたものを平均年間費用とし、これらの和に資本費として軌道新設費(1m当たり)に利率7%を乗じたものを加えて軌道保守費とした。保有施設数量が大きく、修繕回帰が定常的となっている状態ではこの方法が実際と思われる。

なお、材料更換費用はレール(軌道パッドを含む)、まくらぎ、道床について考えたが、まくらぎ更換はモデル方程式に含まれていないので、PCまくらぎの更換周期は一律に40年(明確な数値として示されているものがないので、軌道スラブの寿命が50年とされている¹⁷⁾ことから若干低い値とした)、木まくらぎの更換周期は

Table 4 Track Structure of Min. Cost.

CLASS	T	Good road bed		Soft road bed	
		V	Track structure	V	Track structure
1	20	60 70-90	60-PC39-30-N 60-PC39-30-L	60-90	60-PC39-30-L
	30	60-90	60-PC39-30-L	60,70 80,90	60-PC39-30-L 60-PC44-30-L
	40	60-90	60-PC39-30-L	60 70-90	60-PC39-30-L 60-PC44-30-L
	50	60,70 80,90	60-PC39-30-L 60-PC44-30-L	60 70-90	60-PC39-30-L 60-PC44-30-L
2	10,20	50-70	60-PC39-25-N	50-70	60-PC39-25-L
3	5	40-60	50-W39-20	40-60	50-W39-20
	10	40-60	50-W39-20	40 50,60	50-W39-20 50-PC39-20
4	2	30-50	40-W37-15	30-50	50-W37-15
	5	30-50	50-W37-15	30-50	50-W37-15

T,V: cf. Table-1, N,L: cf. Fig.9, Fig.10
 Ex. 60-PC39-30-L Rail:60, Tie:PC,39/25m
 Ballast:30cm, Long rail
 It is assumed only N is used on class 3,4

Table 5 Life-of Wooden Tie.

T	50	40	30	20	10	5	2
L	13.5	14.7	15.9	17.1	18.7	19.9	21.2

T: Annual passing tonnage (million ton)
 L: Life of tie (year)

年間通トンによるTable 5の値¹⁸⁾とした。

Table 4に掲げた各線級の軌道構造を国鉄の軌道構造基準規程の線級別軌道構造¹⁹⁾と比較すると、2, 3級線ではまったく合致し、1, 4級線でやや異なっている。同規程による1級線の構造は60-PC 44-25となっているが、在来線では25cmを超える道床厚は、特殊箇所を除いて使用されていないので上記のように定められているものと解される。1級線の道床厚を25cmに限定した場合、通トンならびに速度が大きくなると規程の構造が最小軌道保守費を与える。4級線については、規程では道床厚が20cmとなっている点が異なり、これは材料更換周期と関連があるものと考えられる。

5. むすび

本論文で提案したモデルには、システム要素間の関係式について精度が十分ではないものも含まれ、また追加すべき事項も存在すると考えられるが、試算結果は経験や軌道構造基準などとおおむね合致しており、大筋において妥当なものであったと考える。上述した不足の点に関しては、今後の諸分析の進展に応じて修正、追加を行い、モデルの精度の向上を図ることが必要である。

軌道保守費最小の軌道構造の算定に関しては、狂い補修費をはじめ各費用の数値を示すことを省略したが、軌道保守費中に材料更換費の占める比率は小さくなく、この点から材料更換基準をもう少しきめの細かいものとす

る必要があったと考えられる。たとえば4級線で材料更新周期が著しく長いものとなっているが、これが短縮された場合は20 cmの道床厚の構造が有利になることが予想される。

本文で示したような解析が可能となったのは、最初にも述べたように大量のデータの取得と処理が可能となったことによるものであり、現場データを保有する実務箇所においてさらに発展されることを期待する。

本研究は、国鉄鉄道技術研究所からの受託研究として実施したものであり、また費用についての資料は同施設局保線課より提供いただいた。計算については野沢孝之君（元本学学生）の労に負うところが大きい。関係各位に深く謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 小野木次郎：鉄道軌道の変位の研究，鉄道技術研究報告，No. 123，1960年3月。
- 2) 広井生馬：道床沈下と軌道狂い進み，鉄道線路，11巻6号，1963年6月。
- 3) 杉山徳平：軌道狂い進みの実態調査とその解析，鉄道技術研究報告，No. 1081，1978年7月。
- 4) 日本鉄道施設協会：軌道保守システムの研究報告書，pp. 163，1980年3月。
- 5) 前掲4)，pp. 163。
- 6) 池守昌幸：20 m極値，25 m極値の統計的特性，鉄道技術研究所速報，No. A-85-66，pp. 65～81，1985年3月。
- 7) 森口・宇田川・一松：数学公式I，岩波書店，1956年。
- 8) 前掲4)，pp. 45。
- 9) 前掲4)，pp. 139。
- 10) 宮本俊光・渡辺倍年，線路—軌道の設計，管理一，山海堂，1982年。
- 11) 日本鉄道施設協会：新しい軌道管理手法の研究報告書，pp. 167～169，1982年3月。
- 12) 内田雅男ほか：高崎線における軌道破壊軽減対策効果確認試験，鉄道技術研究所速報，No. A-83-119，1983年9月。
- 13) 佐藤吉彦：東海道新幹線において951形式電車に発生した著大輪重とその対策，鉄道技術研究報告，No. 824，1972年9月。
- 14) 佐藤吉彦：軌道高周波振動の理論解析，鉄道技術研究報告，No. 1013，1976年8月。
- 15) 前掲4)，pp. 164。
- 16) 家田 仁ほか：列車の乗心地と軌道状態管理水準に関する検討（下），鉄道線路，32巻5号，1984年5月。
- 17) 佐々木直樹：新幹線のスラブ軌道，日本鉄道施設協会，1978年。
- 18) 前掲4)，pp. 158。
- 19) 大月隆士・桜沢 正：新・軌道の設計，山海堂，1983年。
- 20) Forrester, J. W. : Urban Dynamics, MIT Press, 1969.
- 21) 蒲主勲輝ほか：システム・ダイナミクス・ノート，マクローヒロ好学社，1981年。

(1985. 7. 22・受付)