

保全特性関数による鉄道走行路面状態の推移モデル

A MODEL FOR TRACK SURFACE CONDITION WITH USE OF MAINTENANCE CHARACTERISTIC FUNCTIONS

家田 仁*・佐藤吉彦**・持永敬彦***

By Hitoshi IEDA, Yoshihiko SATO and Takahiko MOCHINAGA

Railway tracks subside gradually with train passages and irregularities of track surface grow by degrees. These track irregularities must be systematically controlled, because they are liable to detract passengers' ride comfort and also trains' running safety. Now that rationalization of maintenance system is being required more and more, it has become important to estimate irregularity condition, to predict how much maintenance work should be done to hold the irregularity to a specific level, or to know what factors are related to these surfacing works.

In this study, a model adopting the Maintenance Characteristic Functions (Selected Condition Function in track maintenance and Restored Condition Function) that can simulate deterioration and repair process of surface condition was proposed for those purposes, and its applicability was verified using the data on Japanese National Railways system.

Keywords : track irregularity, maintenance characteristic functions

1. はじめに

線路は経験的構造物として、保全されることを前提として構造や管理のシステムが構成されており、列車荷重により生じる不均等な沈下によって増大する走行路の幾何学的不整（すなわち軌道狂い）は列車の走行安全や乗客の乗心地に直接的な影響を及ぼすため、軌道狂い状態の管理は線路の保全の中でも重要な位置付けを占めている^{注1)}。しかし、昨今の経営効率化の要請の中では保全システムのより合理的な運営への期待も大きく、管理指標や基準値の設定方法や整正作業技術とともに、軌道状態の予測や保全所要量の予測などの保全計画策定の技術の深化が強く期待されている。本研究は、こうした要請の中で実用的な軌道状態予測モデルとして、保全の基本的特性を記述する2つの保全特性関数を用いた劣化・保全モデルを提案し、その適用性の検討を行ったものである。

2. 従来の研究と本研究の目的

軌道における走行路の幾何学的不整の進行とその保全に関しては、多くの研究が行われているが、それらは大別して次の3種に分類することができる。第一は軌道沈下の力学的性質に関する理論的および実験的研究である。これらは、列車荷重や軌道構造に応じてどのように軌道が沈下していくか、つまり外部の条件と沈下量との関係に主な関心が置かれた研究が多く、軌道構造の沈下に対する強度の評価基準（軌道構造係数）の提案¹⁾や、高周波振動の見地からの車両と軌道の相互作用に関する研究²⁾などが行われている。第二は、走行路の不整の管理基準に関する研究である。これらは、列車の走行安全や乗客の乗心地確保という観点からの、走行路の不整の計測・評価法や管理基準の設定法等に関する理論解析を中心とした研究^{3)~5)}である。これらに対して、第三の分類として実際の軌道計測データを統計的に解析した実証的研究がある。これらは、軌道狂いの確率分布に関する

* 正会員 工博 東京大学助教授 工学部土木工学科
(〒113 文京区本郷7-3-1)

** 正会員 工博 (株)日本線路技術、顧問
(〒160 新宿区新宿3-36-10)

*** 正会員 技術士(建設部門) (株)日本線路技術、調査役
(同上)

注1) 軌道狂いの管理は、基本的には軌道の上下変位、左右変位、左右レール面の高低差、走行面のねじれ、左右レールの間隔の5要素について行われているが、本研究ではその中でも不整の進行が最も速く、保全コストの大部分を占める上下方向変位（高低狂い）の問題を扱う。

研究⁶⁾、走行路不整状態の進行速度の評価値として一定長のロット内における最大絶対値の時間的変化率（軌道狂い進み）をとり、これが外部の条件とどのような統計的関係にあるかを検討した研究⁷⁾、軌道状態が均衡している状況のもとにおける軌道状態と軌道狂い進み、保全実施率との統計的関係に関する研究⁸⁾などが行われている。

技術上の実用的要請としては、第一、第二のグループに属するような基礎的研究のほかに、効率的な保全計画策定に直接用いることのできる計画理論構築への期待が大きい。そのような意味で第三のグループに属する研究は走行路保全に関する多くの知見を計画者にもたらしたが、これまでのところ軌道状態の劣化と保全を総合的かつ定式的にとらえたモデルが構築されていなかったこともあり、本来必ずしも均衡しているとは限らない軌道状態の推移を一般的に表現することができなかつた。

さて、保全計画策定技術に関する実用上のニーズについては次の2つに大別できる。

- I. 対象をマクロにとらえて、軌道構造、状態管理水準、輸送条件などの政策変数の変化を長期的視野に立って評価するためのもの。
 - II. 個別の対象について、実用的時間スケールの中で、軌道状態の推移状況や、特定の目標水準に移行するために要求される保全量を定量的かつ精度高く予測することを目的とするもの。

これらに対して、システム・ダイナミックスの手法を用いた軌道状態のマクロな長期予測も試みられている⁹⁾。これはⅠの目的に該当するものであり、各種要因の物理的因果関係や定量的関数関係、モデルの適合性検証に課題が残されている面があるが、マクロな定性的予測という目的からは1つの新しい試みである。一方、Ⅱの目的については新幹線の軌道管理で一部試みられているが十分な成果をあげているとはいいがたい。

保全を含めたシステムを定式的にとらえるうえでは、①状態指標の設定、②劣化特性の記述、③保全対象の決定過程の記述、④保全実施による整正過程の記述、⑤状態指標管理水準の設定、の各過程を明らかにしなければならないと考えられる。本研究では、こうした各過程を明示的にとらえつつ、Ⅱの実用的予測を目的として、軌道状態の推移モデルを構築し、実データによりその各種パラメーターの推定およびモデルの適用性的検討を行う。

3. 保全特性関数を用いた劣化・保全モデルの構成

(1) 状態指標の設定

軌道面の幾何学的不整の状態を管理するには、当然の

ことながらその状態を表わす適当な指標を設定する必要がある。軌道管理におけるこうした状態指標は、その使用目的に応じて、測定された軌道狂い値自身や統計的に処理された P 値^{注2)}等が用いられてきたが、本研究では次に述べる理由から延長 20 m のロット内における高低狂いの最大絶対値 D をしかるべき延長の区間内で平均した値（平均最大値） \bar{D} を状態指標としてとることとした。

軌道狂いの整正は、列車の走行安全性や乗客の乗心地を確保するためのものである。この際、問題となるのはまず軌道狂いの最大振幅であることから、区間最大値を指標の基本におくことは目的に適合している。また、現存する軌道狂いは10 m 弦正矢量として測定されていることに起因して10~20 m付近の波長が卓越し、基本ロット長を20 m程度にとることにも妥当性がある。さらに最大値 D は、ガンベル分布に従って確率的に分布し、しかもその密度関数形状が平均最大値 \bar{D} によって一意的に定められることが明らかにされているため¹⁰⁾、平均最大値 \bar{D} を指標にとって予測することにより、最大値の確率分布までもが推定できることになる。このため管理上多用される整備基準値の超過確率等に対しても応用が容易となる。

また、劣化特性の評価には最大値 D の時間的変化率である軌道狂い進みを用いる方法がこれまで確立されており、本研究でも実データからの推定値としてこれを用いるが、この点でも状態指標に平均最大値 \bar{D} を用いるのは合理的である。

線路の管理の立場からみれば、各地点の個々の軌道狂い値よりも相当延長の区間における軌道狂いの統計的特性を予測することに意義が高く、この点でも平均最大値 \bar{D} を用いることは目的にかなっている。

(2) 保全対象の選択特性

いま、延長 L の対象区間をとり、時期 T_s と T_E の間での期間を ΔT として状態指標の推移を記述することを考える。以下では、時期 T_s を初期、時期 T_E を終期とよぶ。この区間について、状態指標である平均最大値 \bar{D} が劣化していく状況と保全により整正される様子を概念的に示したのが図-1 である。この区間における期間 ΔT の間における保全実施延長を l とする。保全率 $m = l/L$ が 1 より小さい場合には、対象区間は

(一般区間：保全を行わない区間（非保全区間）)

選択区間：保全を1回行う区間（保全区間）

に区分することができる。さらに、一般的に保全率 m が N を自然数として

注 2) P 値は軌道狂いの絶対値が一定の限度を超過する確率として定義され、その限度値としては 3 mm が用いられてきた。

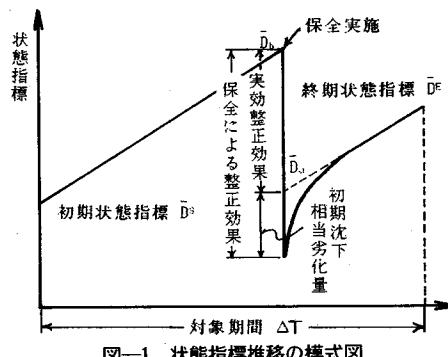


図-1 状態指標推移の模式図

を満たす場合には、対象区間は、

- {一般区間： $N-1$ 回保全を行う区間
- 選択区間： N 回保全を行う区間

に区分することができる^{注3)}。このときそれぞれの区間の延長 L_- , L_+ は、次のとおり算出される。

$$\begin{aligned} L_- &= NL - l = (N-m) \cdot L \\ L_+ &= l - (N-1) \cdot L = (m-N+1) \cdot L \end{aligned} \quad | \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 $m-N+1$ の値は、重点的に保全される箇所として選択された区間の全体に占める比率を表すため、ここでは特に選択保全率とよぶ。いま、対象区間全体の初期状態指標を \bar{D}_s 、同時期の一般区間の状態指標を \bar{D}_s^* 、選択区間の状態指標を \bar{D}_s^* とする。

この \bar{D}_s , \bar{D}_s^* は、保全計画の策定方法によって当然影響を受ける。一般区間と選択区間の区分は、いわば全体の区間から保全をより必要とする区間を選択する行為とみることができる。したがって、理想的には状態が悪い箇所を選択区間に指定するものと考えられるが、一般には保全は状態を考慮しない非状態保全（これは、多くの場合、定期保全となる。）と状態保全の混合とみなすことができるから、 D の分布形が \bar{D} により一意的に決定することを考え合わせると、選択区間における初期の状態指標 \bar{D}_s^* は、全体の状態指標 \bar{D}_s と選択保全率 $m-N+1$ の関数として、

$$\bar{D}_s^* = H[\bar{D}_s, m-N+1] \dots \dots \dots (3)$$

として、表わすことができると考えられる。この関数 H を選択状態関数とよぶこととする（図-2 参照）。この定義に伴って、一般区間の初期状態指標 \bar{D}_s は、式(2)を用いて、

$$\bar{D}_s = [\bar{D}_s^* - (m-N+1) \cdot H[\bar{D}_s^*, m-N+1]] / (N-m) \dots \dots \dots (4)$$

と表わされる。

注3) 対象区間は、理論上は $0, \dots, N$ 回保全の $N+1$ 種の区間に区分され得るが、期間 ΔT を 1 年とした場合でも、実際の保全回数 N は来線の場合、輸送量の多い線区でたかだか 2 ~ 3 回程度であることや、5.(1)a) で述べるように対象区間を設定する場合、区間内では軌道狂い進み等に著しく大きな差異はないことから、事実上は本文のように 2 区分で十分である。

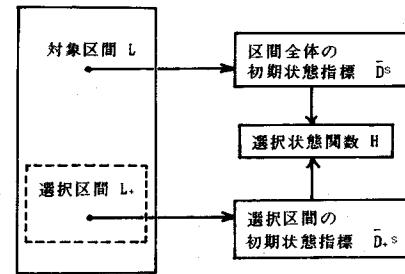


図-2 選択状態関数

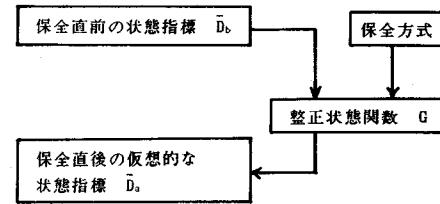


図-3 整正状態関数

次に機械作業、人力作業などの複数の保全方式が混在しているときを考える。この場合、対象区間の中では、方式別の対象区間があらかじめ定められているものとすると^{注4)}、方式によって連続施工に対する適合性等に相違があるため、選択状態関数 H にも方式により差異があるものと考えられる。そこで、保全方式 j に選択状態関数 H_j が対応するものとする。

(3) 保全による整正特性

保全の実施により状態指標は改善される。このとき従来の研究によれば、高低狂い整正の場合、線路状態は保全直後の比較的短期間の間に初期沈下に相当して悪化することが知られている¹¹⁾。そこでここでは、保全を実施する区間の保全直前の状態指標 \bar{D}_b と、保全直後の状態から初期沈下相当分を控除した仮想的な状態指標 \bar{D}_a に着目する。この両者の関係は、機械種別などの保全方式の違いにより異なるものと考えられるが、方式 j について次のような関数関係が成立するものとする（図-3）。

$$\bar{D}_a = G_j[\bar{D}_b] \dots \dots \dots (5)$$

本研究では、関数 G_j を整正状態関数とよぶ。なお、後に述べる理由から関数 G_j は、 \bar{D}_b について線形性が成立するものとする。また、選択状態関数と整正状態関数とをあわせて、本研究では保全特性関数とよぶ。

(4) 状態推移の定式的表現

a) 状態指標の劣化特性

線路状態の劣化特性を表わすものとしては、軌道狂い進み s がある。これは、単位時間当たりの軌道狂いの

注4) 機械作業の実施が困難な、分岐器、伸縮継目、踏切などの区間は特別の場合を除きタイタンバーを用いた人手による作業が行われる。

最大値 D の変化量として定義される。あるロットに着目したときこの軌道狂い進み s は短期的には一定の値をとり、また線路構造、荷重環境などの外部条件が同一の区間内ではほぼ指指数分布に従って確率的に分布することが明らかにされている¹²⁾。したがって、指指数分布の性質からその平均値 \bar{s} が定まれば、劣化特性はその分布を含めて一意的に定まることとなる。このような特性により本研究では、劣化特性を代表する指標として対象区間内における平均軌道狂い進み \bar{s} を用いることとする。なお、対象とする区間内の任意の部分集合についても軌道狂い進みの確率分布は同一であるとする。この場合、任意のロットにおける期間 Δt 経過後の最大値 D は、初期最大値 D^* と軌道狂い進み s により

$$D = D^* + s \cdot \Delta t \quad \dots \dots \dots \quad (6)$$

と表わされる。したがって、対象区間全体の状態指標の平均 \bar{D} は劣化特性値として \bar{s} を用いて、

$$\bar{D} = \bar{D}^* + \bar{s} \cdot \Delta t \quad \dots \dots \dots \quad (7)$$

と表わすことができる。

b) 状態指標の推移

i) 一般区間の状態推移

いま、保全率 m が式(1)を満たすとすると、一般区間では $N-1$ 回の保全が行われる。第1回目の保全の時期は、一般区間の中でも一定ではないと考えられ、その時期に応じて複数に区分される。ここで、時期 T_s から保全実施時期までの期間を保全期間とよび、保全期間 Δt_{-i}^1 に対応する延長を L_{-i} (ただし、 $\sum_i L_{-i} = L_-$) とする。保全期間が Δt_{-i}^1 の箇所の保全後の状態指標 \bar{D}_{-i}^1 は、

$$\bar{D}_{-i}^1 = G[\bar{D}^* + \bar{s} \cdot \Delta t_{-i}^1] \quad \dots \dots \dots \quad (8)$$

となる。第1回目保全期間の平均を $\Delta \bar{t}^1$ ($= \sum \Delta t_{-i}^1 \cdot L_{-i} / L_-$) とすると、保全期間が Δt_{-i}^1 の区間の $T_s + \Delta \bar{t}^1$ の時期における状態指標 \bar{D}_{-i}^{1*} は、

$$\bar{D}_{-i}^{1*} = \bar{D}_{-i}^1 - \bar{s} \cdot (\Delta t_{-i}^1 - \Delta \bar{t}^1) \quad \dots \dots \dots \quad (9)$$

と表わされる。したがって、一般区間全体での時期 $T_s + \Delta \bar{t}^1$ における状態指標 \bar{D}_-^1 は、整正状態関数 G の線形性の仮定により、

$$\bar{D}_-^1 = \sum_i \bar{D}_{-i}^{1*} \cdot L_{-i} / L_- = G[\bar{D}^* + \bar{s} \cdot \Delta \bar{t}^1] \quad \dots \dots \dots \quad (10)$$

と表わされる。同様にして、第 k 回保全期間の平均を $\Delta \bar{t}_k^1$ として、その時点での状態指標 \bar{D}_-^k は、第 $k-1$ 回の平均保全期間 $\Delta \bar{t}_{k-1}^1$ における状態指標 \bar{D}_{-k}^{k-1} を用いて、

$$\bar{D}_-^k = G[\bar{D}_{-k}^{k-1} + \bar{s} \cdot (\Delta \bar{t}_k^1 - \Delta \bar{t}_{k-1}^1)] \quad \dots \dots \dots \quad (11)$$

となる。この漸化式により \bar{D}_-^k を $k=N-1$ まで繰り返し算出することにより、第 $N-1$ 回の平均保全期間 $\Delta \bar{t}_{N-1}^1$ における状態指標 \bar{D}_{-N-1}^1 が求められるから、一般区間の終期 T_E における状態指標 \bar{D}_-^E は、

$$\bar{D}_-^E = \bar{D}_{-N-1}^1 + \bar{s} \cdot (\Delta T - \Delta \bar{t}_{N-1}^1) \quad \dots \dots \dots \quad (12)$$

となる。こうして式(4), (10), (12) より一般区間に

おける状態指標の推移が記述されることになる。なお、期間 ΔT の中で保全が初期から終期まで理想的に平均化されて実施されておれば、第 k 回目の平均保全期間は、

$$\Delta \bar{t}_k^* = (\Delta T / (N-1)) \cdot k \quad (\text{ただし, } N \geq 2) \quad \dots \dots \dots \quad (13)$$

と置くことができるので、式(10)～(12)を簡略化することが可能である。

ii) 選択区間における状態推移

選択区間についても同様にして、状態指標の推移を記述する諸式を導くことができるが、それらは単に式(10)～(12)の添え字を + に置き換えたものにすぎないため省略する。ただし、式(11)に相当する式の逐次計算回数が N 回になるのはいうまでもない。また、保全期間が理想的に平均化されている場合の第 k 回目の平均保全期間は、

$$\Delta \bar{t}_k^* = (\Delta T / N) \cdot k \quad \dots \dots \dots \quad (14)$$

となる。

iii) 全区間の状態推移

以上により一般区間と選択区間との終期状態指標 \bar{D}_-^E , \bar{D}_+^E が求められれば、全体の終期状態指標 \bar{D}^E は、

$$\bar{D}^E = (N-m) \cdot \bar{D}_-^E + (m-N+1) \cdot \bar{D}_+^E \quad \dots \dots \dots \quad (15)$$

として算出することができる。

c) 複数の保全方式が混在する場合

3.(2) に述べたとおり、複数の保全方式が混在する場合でも短期的には保全方式別の保全対象区間があらかじめ定められているとしているので、保全方式別に状態指標の推移式を構成することが可能で、保全方式 j の別に b) により、終期値 \bar{D}_j^E を算出し、保全方式別の保全延長 l_j を用いて、全体の終期値 \bar{D}^E を

$$\bar{D}^E = (\sum l_j \cdot \bar{D}_j^E) / l \quad \dots \dots \dots \quad (16)$$

により算出することができる。

以上のように線路状態を表わす状態指標に平均最大値をとり、選択状態関数と整正状態関数とからなる保全特性関数と平均軌道狂い進みを用いた劣化特性値を基本として、その推移を定式的に表現することができるが、本研究ではこのモデルを劣化・保全モデルとよぶこととする。

(5) 状態指標の管理水準

上述の劣化・保全モデルにより、外部環境としての劣化特性値と初期状態指標とが与えられているとき、ある保全延長の場合の終期状態指標が予測できることになるから、逆に終期状態指標をある目標値に設定したときの所要保全延長を推定することが可能である。この場合、状態指標の目標値としていかなる値を設定すべきかという問題が生じる。

線路状態の管理は、乗心地維持と安全性確保の 2 つのレベルが考えられるが、この両者は完全に独立したもの

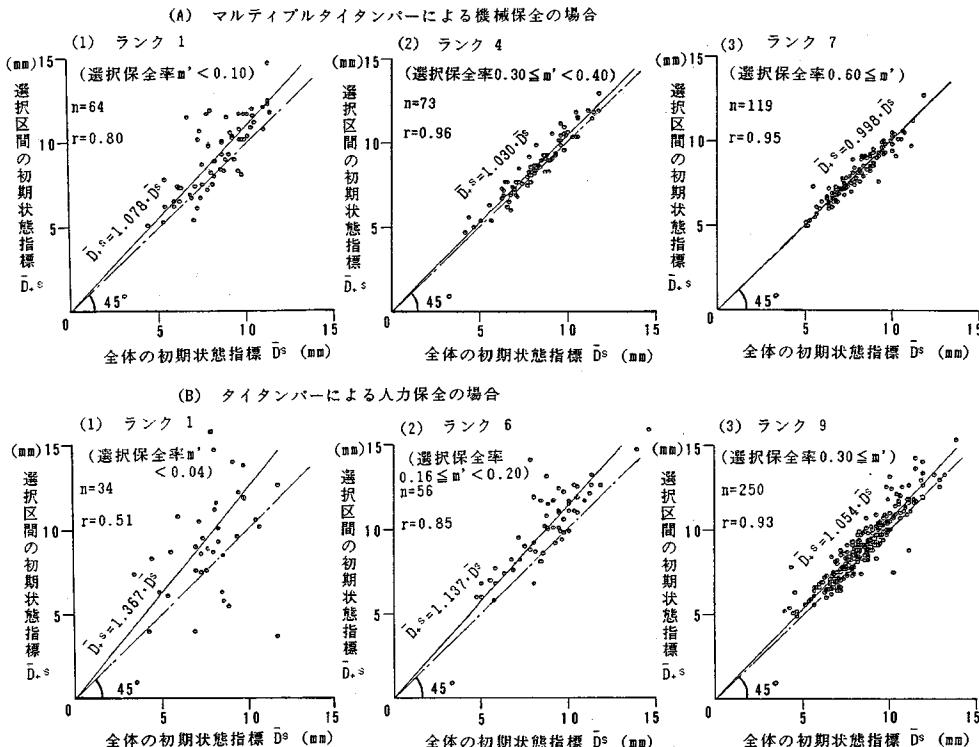


図-4 区間全体と選択区間の初期状態指標の関係

ではなく、低位のレベルである乗心地維持を第一義的に管理しておけば、高位の安全性確保は突発的に発生する著大な軌道狂いを必要に応じて補修することにより通常は満足させることができる性質のものである。

本研究で状態指標にとった平均最大値は、その確率分布も考慮すればミクロな状態の表示にも適用可能であるとはいうものの、基本的には対象区間全体のマクロな状態を表わしているものと理解できる。乗心地の立場からみた管理水準に関する研究は、個々の軌道狂い波形の波長、波高に関するミクロな視点に立ったもの^{3),4)}と、P値のようなマクロな指標に関するもの⁵⁾とがある。文献5)は、相当延長の区間における乗心地レベルを一定水準に維持するために要求される、P値の管理水準を列車を構成する車両形式や走行速度に応じて設定する方法を提案したものである。さらに、P値が実用的な範囲で軌道狂いの分散と明示的な関係があり、また軌道狂いの分散と平均最大値 \bar{D} との関係も経験的に求められていること¹⁰⁾から、線区に応じて乗心地からみた状態指標の管理水準を設定することが可能となる。

4. 保全特性関数の推定

劣化・保全モデルを実際に適用するには、モデルの中でも重要な役割を担う、選択状態関数と整正状態関数の2

つの関数（保全特性関数）をあらかじめ推定しておく必要がある。そこで、以下に述べるように国鉄全国在来線の軌道狂いの定期的計測データを解析し、保全特性関数を推定した。

(1) 選択状態関数

a) 解析対象データ

高低狂いの補修は、現在のところマルチブル・タイタンバーによる機械保全とタイタンバーによる人力保全とに大別されるが、大型機械である前者では当然のことながら連続的な施工が経済的である。このように保全の連続的施工によるメリットが保全方式によって異なる場合には、選択状態関数も異なったものとなると考えられる。そこで、選択状態関数の推定にあたっては、まずこの保全方式の別に昭和56年度の国鉄の全国の軌道計測データから、各対象区間全体の初期状態指標 \bar{D}^s と選択区間とされた区間の初期状態指標 \bar{D}_s^s を摘出して解析した。

なお、ここで対象区間は全国の各線区を路線別、およびまとまった線路保守の最小単位である保線支区別^{注5)}に区分した区間のうち、特に延長が短い区間を除外した598か所の区間である。

注5) 国鉄全国の線路および構造物は約170の保線区、さらにその配下の約250の保線支区により保全されている。

表-1 選択保全率と \bar{D}_s^*/\bar{D}^* の解析結果

保全方式	ランク	選択保全率	データ数	平均選択保全率	回帰係数	相関係数
機械	1	~0.10	64	0.056	1.078	0.80
	2	0.10 ~0.20	106	0.151	1.047	0.90
	3	0.20 ~0.30	107	0.246	1.044	0.89
	4	0.30 ~0.40	73	0.352	1.030	0.96
	5	0.40 ~0.50	57	0.447	1.038	0.97
	6	0.50 ~0.60	39	0.547	1.003	0.93
全	7	0.60~	119	0.840	0.998	0.95
人 力	1	~0.04	34	0.021	1.367	0.51
	2	0.04 ~0.07	41	0.056	1.162	0.81
	3	0.07 ~0.10	49	0.085	1.217	0.79
	4	0.10 ~0.13	36	0.115	1.274	0.83
	5	0.13 ~0.16	32	0.144	1.154	0.89
	6	0.16 ~0.20	56	0.182	1.137	0.85
	7	0.20 ~0.25	52	0.224	1.132	0.92
	8	0.25 ~0.30	42	0.270	1.108	0.90
	9	0.30~	250	0.585	1.054	0.93

b) 解析結果

解析にあたっては、まず選択保全率 $m - N + 1$ をいくつかのランクに区分し、それぞれのランク別に解析した。図-4は、全体の初期状態指標 \bar{D}^* と選択区間の初期状態指標 \bar{D}_s^* との関係を選択保全率のランク別に示したものである。表-1は、調査結果に原点回帰直線をあてはめた結果をとりまとめたものである。なお、ここで原点直線回帰式を用いたのは考察でも述べるように、理想的な状態保全が行われた場合との比較を行なうえで都合がよいためである。

一部のデータ数の少ないランクを除き、安定した回帰分析結果となっている。この結果に基づいて、保全方式別に各ランクにおける回帰係数（すなわち、平均的な \bar{D}_s^*/\bar{D}^* の値）を各ランクの平均選択保全率に対してプロットした結果が図-5である。選択保全率が増大するに従って、 \bar{D}_s^*/\bar{D}^* の値は 1 に漸近すると考えられることから、選択保全率を m' ($= m - N + 1$) として、 $\bar{D}_s^*/\bar{D}^* = 1 + c \cdot m'^a$ (c, a : 定数、ただし、 $a < 0$) の形式の曲線をあてはめた結果を図-5中に併せ実線で示した。この結果から、選択状態関数は、

$$\bar{D}_s^* = H[\bar{D}^*, m'] = (1 + c \cdot m'^a) \cdot \bar{D}^*$$

ここで、

$$\left. \begin{array}{l} c = 6.07 \times 10^{-3}, a = -1.11 : \text{機械保全の場合} \\ c = 4.14 \times 10^{-2}, a = -6.92 \times 10^{-1} : \text{人力保全の場合} \end{array} \right\}$$

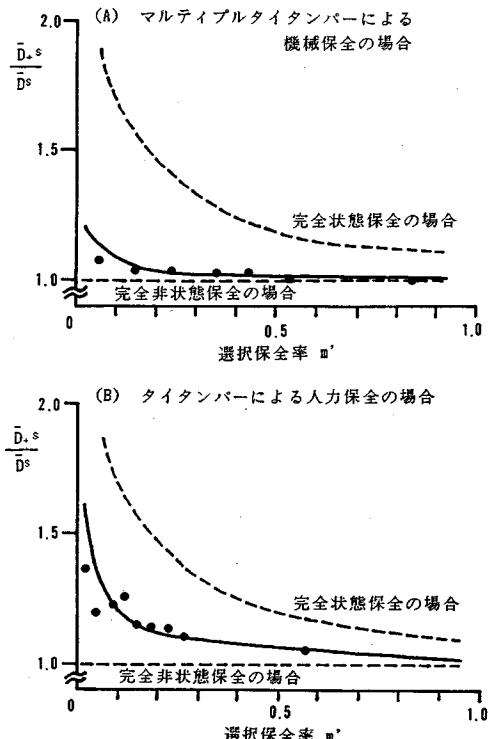
$$(17)$$

と表わすことができる。

(2) 整正状態関数

a) 解析対象データ

整正状態関数は、保全実施前後の状態指標 \bar{D}_b , \bar{D}_a の

図-5 選択保全率と \bar{D}_s^*/\bar{D}^*

相互関係を示すものであるが、軌道検測車による軌道狂いの計測周期は在来線の場合、短い場合でも 2か月程度であるため、直接的には \bar{D}_b や \bar{D}_a を知ることはできない。そこで、当該区間の平均軌道狂い進み \bar{s} を昭和 55 ~ 56 年度の 2 年間の計測データを用いて別途算出しておき、次の式により推定して解析することとした（図-1 参照）。

$$\left. \begin{array}{l} \bar{D}_b = \bar{D}_{insb} + \bar{s} \cdot \Delta t_{insb} \\ \bar{D}_a = \bar{D}_{insa} - \bar{s} \cdot \Delta t_{insa} \end{array} \right\} \quad (18)$$

ここで、

\bar{D}_{insb} : 保全前計測時の状態指標

\bar{D}_{insa} : 保全後計測時の状態指標

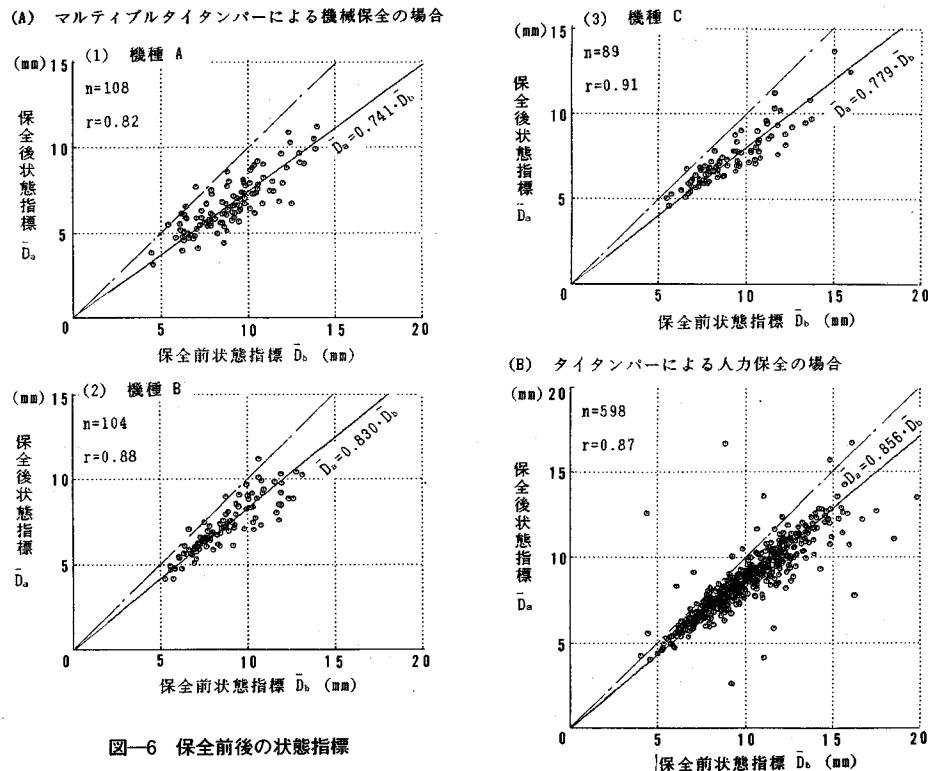
Δt_{insb} : 保全前計測時から保全実施までの期間

Δt_{insa} : 保全実施から保全後計測時までの期間

また、保全方式としては、機械保全と人力保全の別に加えて、機械保全については、マルチプル・タイタンバーの機種により 6 種に分類して解析した。解析に用いたデータは、選択状態関数の推定に用いたものと同様である。

b) 解析結果

図-6 は、これらの結果の一部を図示したものである。図を見てわかるとおり、保全前後の状態指標は比較的単純な関係にあるとみられ、また $\bar{D}_b = 0$ のときには $\bar{D}_a =$



0であるという経験的性質を考慮して原点回帰直線をあてはめて推定した結果を併せて示した。この結果、保全方式 j の場合の回帰係数を g_j とすれば、整正状態閾数は、

5. 劣化・保全モデルの適用と検証

(1) 適用対象データとモデルの適用法

前節では、劣化・保全モデルの重要なサブモデルである保全特性関数の実データからの推定を試みた。本節ではこれらを用いて、劣化・保全モデルを国鉄在来線の多数の線区に適用し、状態指標推移の予測適合性を検証する。

a) 対象区間の選定

モデルを適用する対象区間としては、路線別・保線区分別の線区を単位として、次のような考え方により総数222か所を抽出した。

- ① 区間長が極端に短い区間は、データ解析上の安定性に欠けるため、延長が10 km以上の区間を対象とした。
 - ② 対象とする期間内（昭和56年度）に軌道に大幅な改良（たとえば、レールの重量化、コシクリートまくらぎ化）が加えられていたり、輸送量や列車速

度の大幅な増減によって、期間内に軌道の劣化特性が変化したと考えられる区間は対象から除外する。

- ③ 対象とした各区間の中では、軌道構造や輸送条件に場所的な大きな違いがないとみなされること。

b) 劣化特性値の算定

劣化・保全モデルの適用にあたっては、各対象区間の劣化特性値として、平均軌道狂い進みが必要である。そこで本研究では整正状態関数の推定のときと同様に各区間にについて、昭和55～56年度の2年間の軌道計測データを用いて、20mロットごとの軌道狂い進みを計算し、さらにそれらの区間内における平均をとり \bar{v} を求めた。

c) モデルの適用法

対象とする期間は、昭和 56 年度年初から昭和 57 年度年初の 1 年間をとり、昭和 56 年度年初の軌道状態、昭和 56 年度の保全方式別保全延長実績を用いて、昭和 57 年度年初の軌道状態を予測し、実績値との適合性を検討することとした。

なお、保全実施時期については、昭和 56 年度の各月の保全実績を別途調査した結果、いずれの対象区間ともおおむね年間を通じて平均化された保全を実施していることが確認されたため、ここでは式 (13), (14) により、保全時期が完全に平準化されているものとしてモデルを適用した。

また、劣化・保全モデルは、状態指標に軌道狂いの平

均最大値をとっているが、現状の軌道保守システムでは必ずしも全線にわたる平均最大値が集計されていないため、より一般的に多用される P 値から、次の経験的関係式により、平均最大値を推定して適用し、終期の状態指標予測値も逆に P 値に変換して実績値と比較することとした。

$$P = 105.8 \cdot \log_{10} \bar{D} - 60.1$$

P : P 値 (%) , \bar{D} : 20 m ロットの平均最大値 (mm)

.....(20)

(2) モデルの適用結果

図-7は、上記の方法により対象 222 区間についての昭和 57 年度年初の予測 P 値と実現値とを比較したものである。必ずしも適合していない箇所もみられるが、両者の間の相関係数でみると 0.92 と高く、全般的にみて予測値は実績値におおむねよく適合し、劣化・保全モデルによる軌道状態予測が可能であると考えられる。

6. 考 察

(1) 選択状態関数と状態保全率

保全には、大別して状態指標の観測結果に基づいて指標の高い箇所の保全を実施する状態保全と、状態指標にかかわらず保全を実施する（たとえば、定期保全）非状態保全がある。理想的に状態保全を実施するには状態指標が高い数値となった箇所から予定された保全延長に達するまで順次保全箇所を決定すればよい。軌道狂いの管理は前述のように列車の走行安全や乗客の乗心地を確保するためのものであるから、状態保全に重きが置かれるを考えるのが普通である。しかし、実際には施工箇所が散在するのは保全の経済性からみて好ましくないため、施工連続性の重視から必ずしも指標が大きな値でない箇所についても保全を実施するという側面がある。

ここではまず、完全な状態保全または非状態保全が行われた場合の選択状態関数を求め、推定された選択状態関数と比較することにより実際の保全の基本的性質を検討することとする。

a) 完全状態保全の選択状態関数

文献 10) によれば、20 m ロット最大値 D の累積分布関数 $\Phi(D)$ は、軌道狂いの標準偏差を σ として、

$$\Phi(D) = \exp[-\exp\{-1.31 \cdot (D/\sigma - 2.29)\}] \dots\dots\dots(21)$$

と表わされ、また式中の標準偏差 σ は、平均最大値 \bar{D} と

$$\sigma = 0.372 \cdot \bar{D}^{1.04} \dots\dots\dots(22)$$

という関係にあることが経験的に明らかにされている。また、選択保全率を m' としたとき、選択区間が状態指標の高い箇所から理想的に順次指定されたとすると、その状態指標 \bar{D}_+^s は近似的に、

$$\Phi(\bar{D}_+^s) = 1 - m'/2 \dots\dots\dots(23)$$

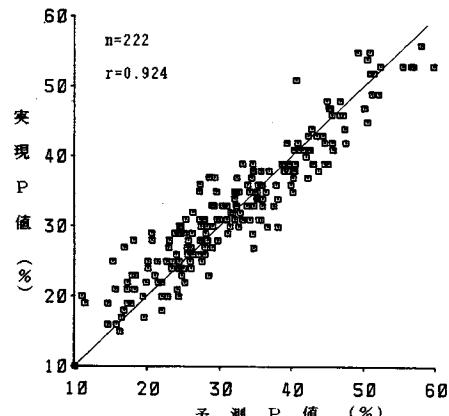


図-7 劣化・保全モデルの適用結果

とおくことができる。したがって、式 (21)～(23) より、
 $\bar{D}_+^{s1.04} \approx \bar{D}^s$ と近似すれば、

$$\bar{D}_+^s / \bar{D}^s = 0.852 - 0.284 \cdot \ln(\ln(1 - m'/2)^{-1}) \dots\dots\dots(24)$$

が得られる。

b) 完全非状態保全の選択状態関数

この場合には、選択区間は状態指標とは全く独立して選択されることになるから、全体に対して偏りのない部分集合とみなすことができるため、

$$\bar{D}_+^s / \bar{D}^s = 1 \dots\dots\dots(25)$$

となる。以上により求められた式 (24), (25) を図-5 中に点線で示した。

c) 状態保全率の推定

図-5 でわかるとおり、現実の選択状態関数は、完全状態保全の場合の選択状態関数と完全非状態保全の場合の選択状態関数に挟まれており、この両者を適当な比率で加算したものとみることができる。そこで、完全状態保全の重みを r_{CM} (状態保全率)、完全非状態保全の重みを $1 - r_{CM}$ として、表-1 の推定データについて最小二乗法により r_{CM} を推定した結果、

$$r_{CM} = \begin{cases} 0.092 & : \text{機械保全の場合} \\ 0.289 & : \text{人力保全の場合} \end{cases}$$

となった。連続施工の経済効果の高い機械保全の場合に状態保全率が低く、機動性の高い人力施工で高くなっているのがわかる。経済性を考慮したうえでは、状態保全率 r_{CM} をどの程度の値にとるのが適切なのかは今後の研究に待たねばならないが、状態指標管理という意味からは状態保全率 r_{CM} が高い方が効率的であることを考えると、改善する可能性があると考えられる。

(2) 整正状態関数の推定結果について

整正状態関数は、図-6 のように比較的単純なものとなり、全般的にみると保全直後の仮想的な状態指標は、保全直前の状態指標の約 0.75～0.85 倍となることが明らかとなった。マルティブル・タイタンバーによる機械

保全については一部を除き機種間に大きな差異は認められないが、タイタンバーによる人力保全の場合にはバラツキも大きく、また整正効果もやや低いことが目につく。

マルティプル・タイタンバーによる高低狂いの整備方法には、相対基準方式と絶対基準方式^{注6)}とがあるが、前者については整正前の軌道狂い波形と整正後の波形の関係を数学的に表わすことが可能である。この場合、理論的には波長が10m～30m程度の領域で軌道狂いの波高は、0.3～0.4倍に低下させることができる¹³⁾。

これらの数値に比べ、本研究で実証的に推定された結果では、整正効果が非常に低くなっているが、これは前述のとおり、図-1に示すように保全直後には \bar{D}_b から \bar{D}_M にまで改善された状態指標が比較的短期間のうちに初期沈下により悪化するが、理論的な整正効果がいわば \bar{D}_b と \bar{D}_M の関係を示すのに対して、推定された整正状態関数はこの初期沈下相当分を控除した仮想的な状態 \bar{D}_a を対象としているため、整正効果が低く推定されたものと考えられる。

しかし、いずれにしてもこれら両者の違いは予想以上で、初期沈下に相当する軌道狂いが大きいことを示している。初期沈下は、保全後かく乱された道床碎石が再び安定するまでの過程を考えることができるが、本研究で明らかにしたように保全効果のかなりの部分が初期沈下によって減殺されているとすれば、保全の経済性からみても重大な問題点であるといえる。この点は今後の保全の効率化を図って行くうえでは改善上1つのキーポイントであると考えられる。

(3) 劣化・保全モデルの適用性

本研究で構築した劣化・保全モデルは、実務的な対象区間単位で比較的短期的な状態指標予測や所要保全量推定^{注7)}を精度よく行うことのできる実用的方法の提案を目的としたものである。5. で行ったモデルの適用性の検討は、対象期間を1年間にとった限られた条件下における検証ではあるが、実用上の要請が一般的には年度単位の予測であること、および本研究で適用性検討に用いたデータが全国を対象とした幅の広いものであることから、その妥当性は確認されたものと考えられる。現在、国鉄では定期的な軌道狂いの計測業務の一環として各線区の軌道狂い進みが計算・出力できるように計算機シス

注6) 相対基準方式による高低狂いの整正は、マルティブル・タイタンバーのメカニカルな働きにより自動的に線路面の不整を整正する方法で、軌道狂いの波長により整正できる程度はおのずから定まる。絶対基準方式は、あらかじめ測量等によって得られた軌道面不整の状況から計画者が人為的に打上量を決定し整正するもので、作業の手数はかかるが整正効果は大きい。

注7) 所要保全量の推定は、劣化特性値、初期状態指標、保全特性関数を既知として、終期状態指標が目標値に合致するよう保全率を求めればよい。一般に解析的には解けないが、数回の繰り返し計算により簡単に求めることができる。

テムが構築されつつあるが、この中に本研究で提案した劣化・保全モデルを取り込むことも容易であると考えられる。

7. 結論および今後の課題

本研究で得られた結論は以下のとおりである。

(1) 状態指標に平均最大値、劣化特性に平均軌道狂い進みをとり、2つの保全特性関数を用いて状態推移を定式的に表現した劣化・保全モデルを提案し、国鉄全国のデータにより検証した結果、実用的にみて十分適合性が認められた。

(2) 保全特性関数の1つ、保全の基本的性質（状態保全と非状態保全の実状）を示す、選択状態関数を新たに提案し、実データによりこれを推定したが、この結果から現状の保全が非状態保全に偏りがちで、経済的な意味で基本的な問題点があり得ることを明らかにした。

(3) 同じく保全特性関数のうち、整正状態関数については、その基本的特性を明らかにしたが、理論的整正効果から考えると初期沈下に相当する効果が予測以上に大きく、保全特性を向上するうえでは初期沈下抑制策が有効であると考えられることが示された。

また、今後の課題としては、結論中に述べた保全特性関数の性状改善に関する実証的研究が保全経済上重要であるが、その他に次のような点が挙げられる。

(1) 本研究で用いた実測データは、昭和56年度のもので、昭和50年代から今日までの軌道状態の推移過程の中ではほぼ代表的な状態といえるものである。今後は、軌道状態がより悪化した状態や相当に改善された状態についても保全特性関数の推定などを行っていくことが重要である。

(2) 本研究では基本的前提として、短期的には劣化特性値すなわち軌道狂い進みが状態指標には独立しているものとして扱ったが、今後はこの前提をより一般的なものに緩和した状況下におけるモデル構築を図っていくことが必要である。

8. あとがき

本研究を実施するにあたっては、東海旅客鉄道 杉山徳平氏、東日本旅客鉄道 小山内政広氏には、研究の推進、理論的検討などで多大なるご協力を得た。また、東京大学工学部 松本嘉司教授には、拙稿をお読み頂いたうえ、種々のご指導をいただいた。ここに深く感謝する次第である。

参考文献

- 星野陽一・佐藤 裕：軌道構造の動力学的設計、鉄道技術研究報告 No.149、国鉄鉄道技術研究所、1960.
- 佐藤吉彦：新軌道破壊理論の構成、鉄道技術研究所速報、

- No. 77-47, 国鉄鉄道技術研究所, 1975.
- 3) 佐藤吉彦：乗心地の立場から見た軌道高低狂いの整備限度, 鉄道技術研究報告 No. 549, 国鉄鉄道技術研究所, 1966.
 - 4) 池守昌幸：軌道狂いの波形の整備に関する研究, 鉄道技術研究報告 No. 1038, 国鉄鉄道技術研究所, 1977.
 - 5) 家田 仁・小林専慈・岸本 隆：列車の乗心地と軌道狂い状態管理水準に関する検討（上, 下）, 鉄道線路 32巻 4号, pp. 174~178, 5号, pp. 218~222, 日本鉄道施設協会, 1984.
 - 6) 小野木次郎：鉄道軌道の変位の研究, 鉄道技術研究報告 No. 1081, 国鉄鉄道技術研究所, 1978.
 - 7) 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, 国鉄鉄道技術研究所, 1978.
 - 8) 杉山徳平・吉見一彦・宮井 徹・細川岳洋：保線 6 支区における軌道破壊量と軌道保守量の実態調査, 鉄道技術
- 研究所速報 No. 79-120, 国鉄鉄道技術研究所, 1975.
- 9) 池守昌幸：軌道狂い状態の経時変化モデルとその応用, 土木学会論文集, No. 365/IV-4, pp. 145~154, 1986.
 - 10) 佐藤吉彦・細川岳洋：高速軌道検測記録（マヤチャート）の 10 m 代表値と 20 m 代表値の統計的特性に関する検討, 鉄道技術研究所速報 No. 82-75, 国鉄鉄道技術研究所, 1982.
 - 11) 佐藤 裕：軌道力学, 鉄道現業社, pp. 41~50, 1978.
 - 12) 杉山徳平・家田 仁・上野昌喜・山口義信：軌道狂い状態を考慮した軌道破壊の要因分析, 鉄道線路 34巻 9号, 日本鉄道施設協会, pp. 8~12, 1986.
 - 13) 山口義信・家田 仁：マルタイは軌道狂いをどう直すか, 新線路第 40巻 9号, 鉄道現業社, pp. 12~14, 1986.

(1986. 12. 3・受付)