

軌道保守施策の長期最適化法

Planning Best Strategy for Track Maintenance

三和雅史**

By Masashi MIWA**

1. はじめに

有道床軌道は、列車の繰返し通過により軌道狂い進みを生じるため、軌道形状の復元・補修作業が必要である。したがって、軌道構造の選択、強化方法の検討、あるいは長期的な保守戦略の決定等の際には、将来見込まれる保守量（保守費用）の算出が重要であるが、そのためには、保守作業の内容と時期、すなわち保守施策を決定しなければならない。筆者らは、ある特定の区間（ロット）への保守施策最適化問題に対して分枝限定法（B&B）による解法¹⁾を提案している。しかし実際には、様々な軌道構造・輸送条件のロットが平面的に広がって混在するので、保守施策は、それら各ロット相互の位置や劣化傾向等の関係を考慮して決定されるべきである。一方、ロットの平面的な広がりを考慮した軌道保守時期の決定法として、軌道狂い保守用機械（MTT）の運用計画を遺伝的アルゴリズム（GA）により決定する方法²⁾を提案しているが、1日を単位とした短期的な計画法であり、また、レール削正や道床交換のようなMTT保守以外の保守作業を想定していない。

以上から、本研究では、線区全体の保守施策を経済性や輸送品質を考慮して適切に決定する方法を検討し、数値実験により得られる解の性質を調べる。

2. 軌道保守施策最適化の考え方

(1) 保守作業

本研究で提案する保守施策決定法では、以下に示す3種類の保守作業を想定する。

a) MTT保守

軌道状態は、列車の繰返し通過により劣化が進行

し、保守により回復するサイクルを繰り返す。ここでは、軌道（高低）狂い標準偏差により軌道状態の推移を表し、高低狂い進みを標準偏差の増加として表す。そして、この高低狂い標準偏差の基準として列車の走行安全や乗り心地の観点から限度値を設定し、高低狂い標準偏差がこの限度値に達すると、MTT保守を実施する。このMTT保守による軌道状態の回復は高低狂い標準偏差の減少として表される。

b) レール削正

ロングレール軌道では、列車の繰返し通過により溶接部付近の凹凸量が増えると列車荷重が増加し、高低狂い進みが増大する。よって、レール削正車による削正作業が必要になる。

c) 道床更換

列車の繰返し通過やMTT保守により道床の細粒化が進むと、粒間摩擦係数が低下し、軌道狂い進みが増大すると共にMTT保守による軌道狂い回復効果も減少する。したがって、道床更換作業が必要になる。

(2) 保守施策の決定法

保守量を算出する際には、前述の各種保守作業を、いつ、どこで実施するかを決める必要がある。従来の研究によれば、個々のロットに対する保守施策の経済的な決定は可能である。しかし、実際の線区が複数のロットから構成されている以上、最終的には、各ロットに対する施策の集合への評価が問題となる。この場合、保守費用の他に、線区全体の軌道状態、全期間を通じての作業量平準化も評価項目になると考えられる。よって、これらを考慮して線区全体の軌道保守施策を決定する方法を示す。

3. 軌道保守施策決定問題のモデル化

(1) 記号・用語の定義

期 : 保守計画の単位
N : ロット数

*キーワード：鉄道計画、計画手法論

**正員、(財)鉄道総合技術研究所 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)

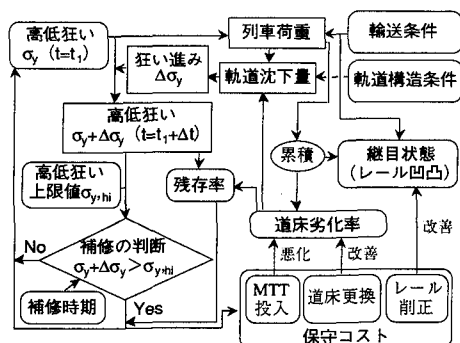


図-1 軌道状態経時変化モデル³⁾

t	: 時間変数 (カ月)
Δt	: 入力条件更新の時定数 (カ月)
T	: 計画対象とする期の数
d	: レール凹凸量 (mm)
d_1	: レール凹凸成長速度 (mm/kN)
Δd	: レール削正による凹凸改善量 (mm)
σ_y	: 高低狂いの標準偏差 (mm)
σ_{y0}	: 高低狂いの標準偏差初期値 (mm)
$\sigma_{y,bef}$	: 保守前高低狂いの標準偏差 (mm)
$\sigma_{y,af}$	: 保守後高低狂いの標準偏差 (mm)
$\sigma_{y,lim}$	: 高低狂いの標準偏差限度値 (mm)
$\Delta\sigma_y$	: 高低狂いの進み量 (mm/期)
s	: 道床劣化率 ($0 \leq s \leq 1$)
Q_j	: ロット j の計画期間中平均軌道状態
C_j	: ロット j の保守費用
$\#C_t$	: 時刻 t の保守費用
C_k	: 個体 k の総保守費用
S_t	: 時刻 t の必要作業数偏差平方
S_k	: 個体 k の必要作業数偏差平方和
C_p	: MTT 予防保守費用 (/回)
C_b	: MTT 事後保守費用 (/回)
C_r	: レール削正費用 (/回)
C_{br}	: 道床交換費用 (/回)
L_M	: MTT 移動費用 (/単位距離)
L_S	: 削正車移動費用 (/単位距離)
i	: 瞬間利率
M	: 個体数
M_U	: 規定個体数
F_k	: 個体 k の適応度
x	: 世代数

x^* : 規定世代数
 P_m : 突然変異確率

(2) 劣化・保守モデル³⁾

高低狂いの標準偏差 σ_y 、レール凹凸量 d 、道床劣化状態については、図-1のモデルにより推移するものとする。このモデルの主な特徴は次の通りである。

・高低狂いの標準偏差: σ_y

列車荷重と軌道ばね特性とから車両の1軸通過時の軌道沈下量を算出し、高低狂い進み $\Delta\sigma_y$ に換算する。列車荷重はレール凹凸量 d と高低狂いの標準偏差 σ_y に、軌道沈下量は道床劣化状態に依存する。また、MTT 保守後の高低狂いの標準偏差 $\sigma_{y,af}$ は、保守前の高低狂いの標準偏差 $\sigma_{y,bef}$ と道床劣化状態により決まる。

・レール凹凸量: d

レール凹凸量 d は荷重の累積に比例して増加し、レール削正により一定量 Δd 減少する。

・道床劣化状態

道床は荷重の累積と MTT 保守により劣化し、道床交換により新品状態に再生する。道床の劣化の程度については道床劣化率 s で定義する。

(2) 施策の決定

a) 概要

本問題は、ロット数 N や計画対象とする期の数 T が多い大規模なスケジューリング問題であり、最適解法による解決は困難である。よって、ここでは、近似解法である GA を応用する。

b) 個体表現

本問題に対する解に対応する個体については、図-3に示すような行がロット No. $i \in \{1, 2, 3, \dots, N-1, N\}$ 、列が時刻 $t \in \{1, 2, 3, \dots, T-1, T\}$ を表す行列で表現する。ここで、行列中の記号は保守作業に対応する。

c) アルゴリズムの概要

STEP1 初期個体を M 個ランダムに作成する

STEP2 各個体 k の適応度 F_k を計算する

STEP3 適応度最大の個体を選択する

STEP4 全個体の適応度の和 ΣF_k を計算し、個体群の中から2つの個体を選択する。但し、個体 k が選ばれる確率は $F_k / \Sigma F_k$ とする。そして、その2つの個体から新たに2つの個体を生成する(交叉)。この操作を個体数が

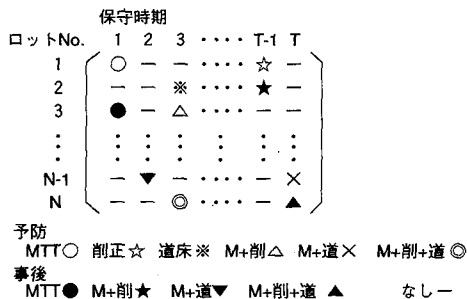


図-2 個体表現の例

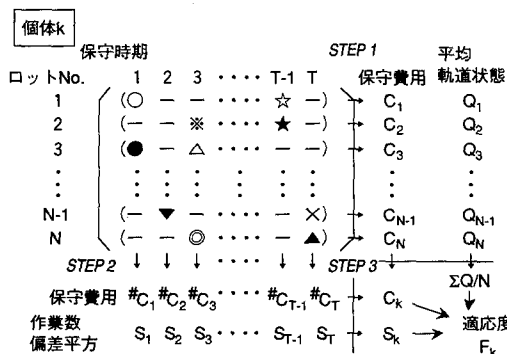


図-3 個体の評価

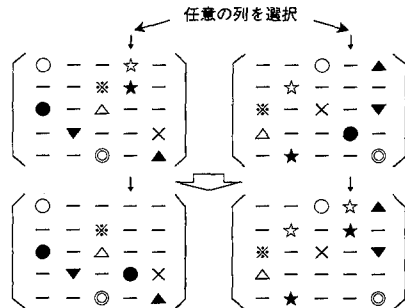


図-4 交叉の例

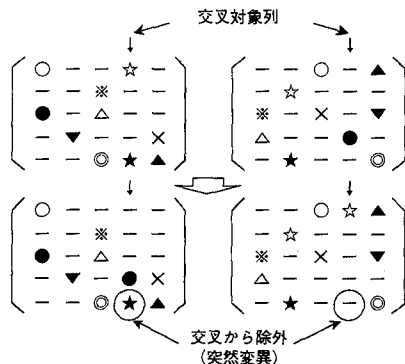


図-5 突然変異の例

M_U 個になるまで繰り返す

STEP5 STEP4で生じた各個体に対して確率 P_m である変化を与える (突然変異)

STEP6 STEP3で選択された個体と STEP4～5で生成された個体 M_U 個の各個体の適応度を計算し、適応度の大きい順に M 個選び、次世代に残す

STEP7 世代数 x が予め決められた値 x^* に達したならば、最も適応度の高い個体を解として終了する。達していないならば $x = x + 1$ として STEP2へ戻る

d) 適応度 F_k の算出方法

各個体の適応度は次の手順で算出する (図-3)。

STEP1 各ロット j の保守スケジュールを決定する。具体的には保守費用 C_j と平均軌道状態 Q_j を評価項目として、ここでも GAにより決定する。この決定は文献1に示す B&Bによる方法でも可能であるが、ここでは、計算時間短縮のために GAによる

STEP2 各時刻 t における保守費用 $\#C_t$ を算出する。ここで、保守作業そのものにかかる費用は

STEP1で算出した費用 C_j に含まれることから、ここでは MITTや削正車の保守必要箇所への移動費用を算出する。この費用 $\#C_j$ の算出には移動順序を決める必要があるが、移動箇所数に応じて B&Bや GAを適用して決定する。また、作業平準化の指標として各時刻の作業数の平均と時刻 t における作業数との差の平方 S_t を求める

STEP3 STEP1と STEP2で算出した各費用を合計して個体 k の総保守費用 C_k とする。また、作業数の偏差平方 S_t の和 S_k を求める。以上、総保守費用 C_k 、偏差平方和 S_k 、平均軌道状態 Q_i とからその個体の適応度 F_k を算出する

e) 交叉

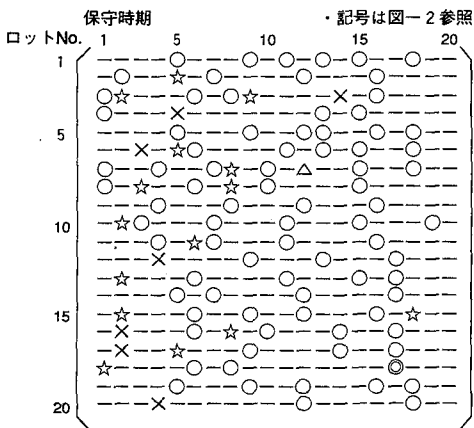
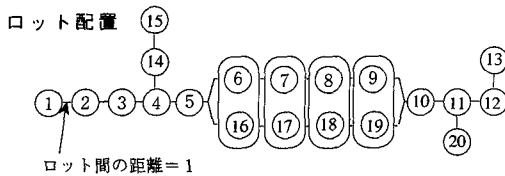
本問題解決のポイントは、適切な時期に適切な箇所では保守を実施することである。よって、このことに重点をおいた交叉方法として列交叉を採用する。交叉の例を図-4に示す。

f) 突然変異

本問題解決のもう1つのポイントは作業の平準化である。ところが、列交叉による作業平準化の効果

表－1 数値例

※線形・軌道構造条件	※車両・運転条件
ロットNo. 1～5, 8～11, 13～15, 18～20	軸重 : 12tf 通過トン数 : 3,000万t/年 速度 : 直線 120km/h R600m 105km/h R400m 90km/h
6, 7, 12 : 直線 R600m, C105mm	
16, 17 : R400m, C105mm	
レール : 50N ロング	
まくらぎ : PC3号 39本/25m	
道床厚 : 250mm	
路盤 : 普通路盤	



図－6 保守施策の解答例

は余り期待できないことから、交叉対象列の任意の1つの遺伝子を確率 P_m で交叉対象から外す操作（突然変異）を行なう。突然変異の例を図－5に示す。

4. 計算例

(1) 数値例

表－1に示すようなロット数 N : 20（直線 15, 曲線 5）、期数 T : 20の保守施策決定問題を想定し、本手法により軌道保守施策を求めた。

(2) 結果

得られた保守施策の例を図－6に示す。

各ロット別に保守費用と平均軌道状態とを考慮して得られた結果を単純に積み上げたものとの比較を

ロットNo.	1	2	3	4	5
σ_{y0}	2.314	2.464	2.845	2.703	2.118
d_0	0.364	0.543	0.516	0.342	0.341
s_0	0.473	0.335	0.603	0.556	0.514
6	7	8	9	10	
σ_{y0}	1.690	2.752	2.736	2.013	2.716
d_0	0.458	0.407	0.537	0.340	0.472
s_0	0.614	0.225	0.477	0.427	0.494
11	12	13	14	15	
σ_{y0}	2.117	2.357	2.161	2.453	1.984
d_0	0.601	0.183	0.399	0.294	0.492
s_0	0.501	0.608	0.511	0.374	0.507
16	17	18	19	20	
σ_{y0}	2.504	2.541	2.300	2.330	2.259
d_0	0.480	0.437	0.555	0.212	0.485
s_0	0.582	0.576	0.350	0.574	0.594

MTT, 削正車現在位置: 4 $\sigma_{y, \lim}=3.5$ $C_p=1$ $C_b=2$ $C_r=1$
 $C_{br}=3$ $L_M=0.2$ $L_M=0.1$ $T=40$ $N=20$ $M=10$ $x^*=1000$
 $P_m=0.9$ $d_1=2.0 \times 10^{-10}$ $\Delta d=0.2$ $\Delta t=3$ $i=0.0001337$

表－2 解の傾向（平均値）

	C_k	Q_i	S_k
本手法	180	2.60	0.20
単純積み上げ	176	2.65	0.31

※各20回の計算結果による

表－2に示す。費用 C_k については本手法の方が大きい、その他の評価項目については本手法の方が小さい。本手法では作業準化も考慮している分、費用が犠牲になったと考えられる。

5. おわりに

本研究では、軌道保守施策の長期最適化問題に対して、経済性や輸送品質、作業準化を考慮して適切に決定する方法を示した。

今後は実態に近い大規模問題への適用を試みると共にアルゴリズムの改良により解の品質向上を図る。

参考文献

- 1) 内田雅夫・三和雅史：分枝限定法による軌道保守計画の長期最適化, 土木計画学研究・講演集 20(1), pp.55-58, 1997
- 2) 内田雅夫・三和雅史：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, Vol12, No.3, pp.11-16, 1998
- 3) 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, Vol11, No.2, pp.1-6, 1997