

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、強化法の検討等の長期的に有効な施策を検討する際には、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。この問題に関係する研究としては、ある特定の区間（ロット）への保守施策を分枝限定法（B&B：Branch & Bound）により決定する方法¹⁾があるが、実際には、様々な軌道構造・輸送条件のロットが平面的に拮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。このロットの平面的な拮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：Genetic Algorithm）により決定する方法²⁾があるが、計画期間が比較的短い計画法であり、また、レール削正や道床更換のようなMTT保守以外の保守を想定していない。更に、これらの計画法には、維持する保守能力（設備、要員）規模の適正化という観点がないために、保守時期に偏りがある保守施策が出力される恐れがある。

以上から、本研究では、長期的な視野に立って、線区全体の保守施策を経済性や輸送品質、保守作業量の時期的な平準化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。

i) 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）狂い標準偏差を劣化指標とし、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。この結果、高低狂い標準偏差は減少し、軌道状態が回復する。なお、一般に、1 台の MTT で複数のロットを保守することから、その運用（保守順序）も問題になる。

ii) 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加する。その結果、列車荷重の変動が大きくなるために動的な列車荷重は増加し、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により凹凸量を小さくして、高低狂い進みを抑制する。レール削正車についても、一般に、1 台の削正車で複数のロットを保守することから、保守順序が問題になる。

iii) 道床更換

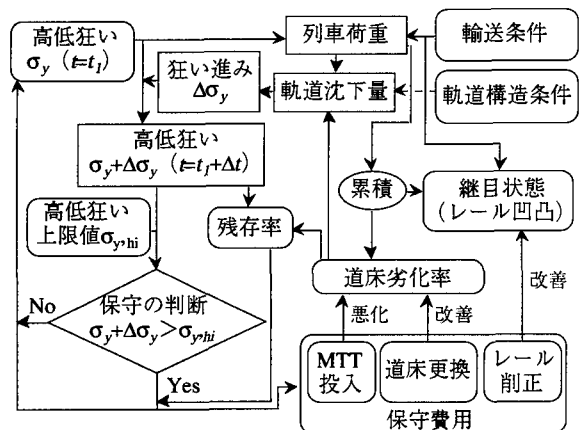
列車の繰返し通過や MTT 保守により道床の細粒化が進むと、道床間の粒間摩擦力が低下し、同じ列車荷重に対する沈下量が大きくなり、軌道狂い進みが増大する。また、MTT 保守においても、道床が劣化すると残留狂いが増加し、回復効果が期待できなくなる。したがって、道床更換作業により道床を新品状態に戻すことが必要になる。

(2) 保守施策の決定法

本研究で対象とする問題は、前述の各種保守作業を、いつ、どこで実施するか決定である（保守施策決定問題）。この問題に対する従来の研究としては、個々のロット保守施策決定問題を多段階意思決定問題として定式化し、B&B で解いたもの¹⁾や、MTT の運用計画を GA によって決定する手法²⁾がある。しかし、前者では、実際の線区が複数のロットから構成されている以上、各ロットに対する施策の集合への評価が問題となるにも関わらず、1 つのロットにしか着目しておらず、線区全体の最適化にまでは踏み込んでいない。また、後者では 1 日を計画単位として 1 カ月～1 年程度の MTT 運用計画を対象としているために、軌道狂い進み以外の要素については考慮しておらず、今回想定するような計画期間が長く、軌道材料への保守も含めて施策を検討したい場合には不向きである。更に、これらの研究では、保守費（保守作業費用、MTT 移動費用）の最小化と軌道状態の最良化の点から計画の最適化を試みているが、保守作業に時期的な偏り（ムラ）があると、その作業量の最大値に応じた保守資源（要員、設備）を準備しておく必要があり、間接的に保守コストの無駄となる。よって、今回のように長期的な保守施策を考える場合、保

*キーワード：鉄道計画、交通計画評価

**正員、(財)鉄道総合技術研究所 前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)



図ー１ 軌道状態推移モデル

守量の時期的な平準化も無視できない評価項目である。

以上のことから、ここでは、軌道狂い進み保守だけでなく材料の交換等も保守作業として想定した上で、線区全体に対する長期的な保守施策を、保守費用や線区全体の軌道状態、作業量平準化を考慮して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) 用語・記号の定義

予防保守 : 軌道狂いが限度値に達する前に実施する

MTTによる軌道狂い保守

事後保守 : 軌道狂いが限度値に達した後で実施する

MTTによる軌道狂い保守

期 : 保守計画の単位

N : ロット数 [定数]

t : 時間変数 [定数] (カ月)

Δt : 入力条件更新の時定数 [定数] (カ月)

T : 計画対象とする期の数 [定数]

d : レール凹凸量 (mm)

d_0 : レール凹凸初期値 [定数] (mm)

d_1 : レール凹凸成長速度 [定数] (mm/kN)

Δd : レール削正による凹凸改善量 [定数] (mm)

σ_y : 高低狂い標準偏差 (mm)

σ_{y0} : 高低狂い標準偏差初期値 [定数] (mm)

$\sigma_{y,bef}$: 保守前高低狂い標準偏差 (mm)

$\sigma_{y,aft}$: 保守後高低狂い標準偏差 (mm)

$\sigma_{y,lim}$: 高低狂い標準偏差限度値 [定数] (mm)

$\Delta\sigma_y$: 高低狂い進み量 (mm/期)

s : 道床劣化率 ($0 \leq s \leq 1$)

s_0 : 道床劣化率初期値 [定数]

q_m : 線区全体の平均軌道状態 (mm)

i : 瞬間利率 [定数]

P_0 : 現在価値

$P(t)$: 時刻 t での貨幣価値

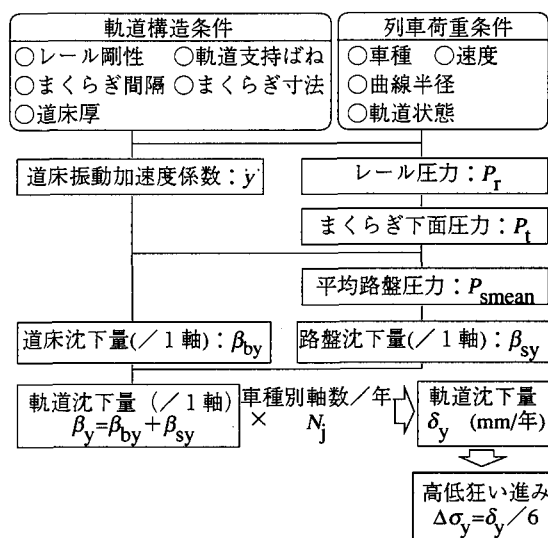
Q_j : ロット j の計画期間中平均軌道状態

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



図ー２ 高低狂い進みの推定

S_k : 個体 k の必要作業数偏差平方の計画期間中総和

C_p : MTT 予防保守費用 [定数] (/回)

C_b : MTT 事後保守費用 [定数] (/回)

C_r : レール削正費用 [定数] (/回)

C_{br} : 道床交換費用 [定数] (/回)

L_M : MTT 移動費用 [定数] (/単位距離)

L_S : 削正車移動費用 [定数] (/単位距離)

f_1 : 総保守費用 C_k の希求水準 [定数]

f_2 : 平均軌道状態 Q_j の希求水準 [定数]

f_3 : 偏差平方和 S_k の希求水準 [定数]

f_4 : ロット j の保守費用 C_j の希求水準 [定数]

f_1^* : 総保守費用 C_k の理想値 [定数]

f_2^* : 平均軌道状態 Q_j の理想値 [定数]

f_3^* : 偏差平方和 S_k の理想値 [定数]

f_4^* : ロット j の保守費用 C_j の理想値 [定数]

w_i : 目的関数 i に対する重み係数

F_k : 個体 k の適応度

M_1, M_2, M_3 : 個体数 [定数]

x_1, x_2, x_3 : 世代数

x_1^*, x_2^*, x_3^* : 規定世代数 [定数]

P_{mA}, P_{mB}, P_{mC} : 突然変異確率 [定数]

(2) 劣化・保守モデル

高低狂い標準偏差 σ_y 、レール凹凸量 d 、道床劣化状態については、図ー1のモデル³⁾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。

i) 高低狂い標準偏差: σ_y

高低狂い進み $\Delta\sigma_y$ は、図ー2に示すように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て求める。ここで、列車荷重はレール凹凸量 d と高低狂い標準偏差 σ_y に、軌道沈下量は道床劣化状態に依存するものとする。次に、高低狂いはMTT保守により改善するが、保守後の高低狂い $\sigma_{y, aft}$ は、図ー3に示すように保守前の高低狂い $\sigma_{y, bef}$ と道床劣化状態により決まるものとする。

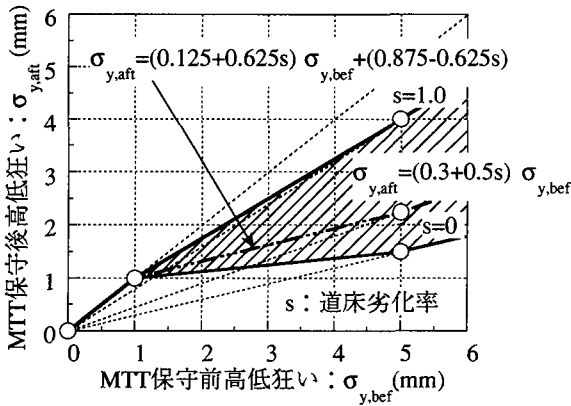


図-3 保守後の高低狂い

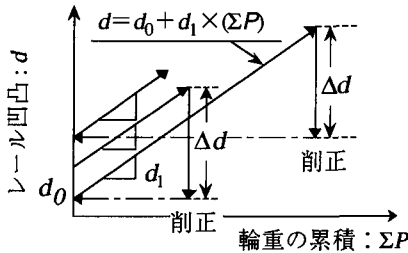


図-4 レール凹凸の時間推移

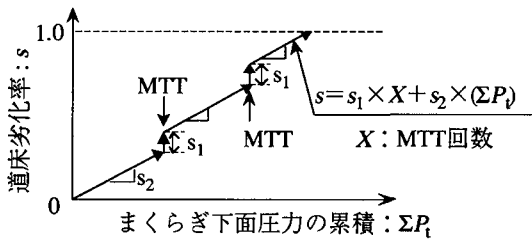


図-5 道床劣化率の時間推移

ii) レール凹凸量: d

レール凹凸量 d は図-4 に示すように荷重（動的）の累積に比例して増加し、レール削正により一定量 Δd 減少するものとする。

iii) 道床劣化状態

道床は図-5 に示すように動的荷重（まくらぎ下面圧力）の累積と MTT 保守により劣化するものとし、その劣化の程度を道床劣化率 s で定義する。そして、道床は道床更换により新品状態（ $s=0$ ）に再生するものとする。

ここに示した劣化モデルについては、予め設定した条件変更の時定数 Δt ごとに各々入力となる情報を更新して各劣化量を計算する。

(3) 保守施策の評価

保守施策は、計画期間中に見込まれる総保守費用 C_k と線区全体の平均軌道状態 q_m 、作業の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を全時刻についてとった和 S_k によって評価される。費用 C_k は 1 回あたりの MTT 予防保守費用 C_p 、MTT 事後保

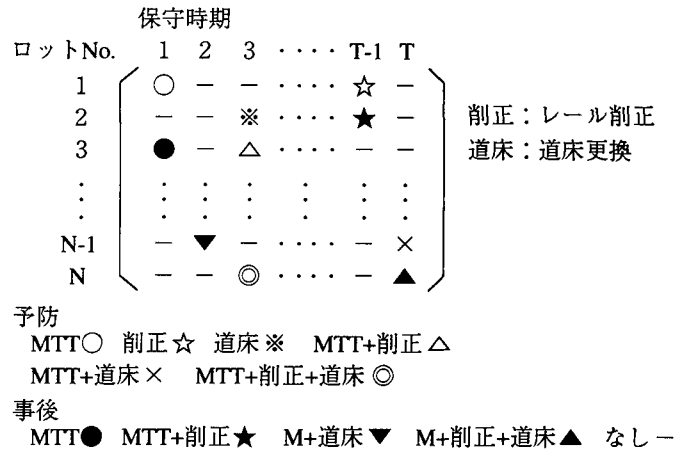


図-6 個体表現

守費用 C_b 、レール削正費用 C_r 、道床更换費用 C_{br} 、単位距離あたりの MTT の移動費用 L_M 、レール削正車の移動費用 L_S から構成される。ここで、これらは時間軸上に並ぶ費用であることから、各時点での価値で評価する必要がある。ここでは、各時点での費用を現在の価値（現価）に換算して比較する現価法を用いる。瞬間利率を i とすると時刻 t での費用 $P(t)$ は現在価値 P_0 に次のように換算される⁴⁾。

$$P_0 = P(t) \times e^{-it} \quad (1)$$

そして、総保守費用 C_k と平均軌道状態 q_m 、作業数についての平方和 S_k を同時に評価するために、ここでは、これらを拡大 Thebyshev 関数によりスカラー化した E の形で最小化する⁵⁾。総保守費用 C_k の希求水準を f_1 、理想値を f_1^* 、平均軌道状態 q_m の希求水準を f_2 、理想値を f_2^* 、平方和 S_k の希求水準を f_3 、理想値を f_3^* 、 w_i を目的関数 i に対する重み係数とすると、本研究で考察する問題の評価関数は、次のように表される。

$$\min E = [\max \{w_1(C_k - f_1), w_2(q_m - f_2), w_3(S_k - f_3)\} + a(w_1C_k + w_2q_m + w_3S_k)]$$

$$w_i = 1 / (f_i - f_i^*) \quad [i = 1, 2, 3]$$

$$a = 10^{-6} \quad (2)$$

ところで、多目標計画では得られた結果から希求水準を対話的に変えるトレードオフ分析により解の探索を繰り返すため、希求水準を変えた場合の解の挙動を把握しておくことが必要である。

(4) 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、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-6 に示すような行がロット No. h {1, 2, 3, ..., N-1, N}、列が時刻 t {1, 2, 3, ..., 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内容に対応する。

c) アルゴリズムの概要

STEP1 初期個体を M_1 個作成する（個体群の作成）

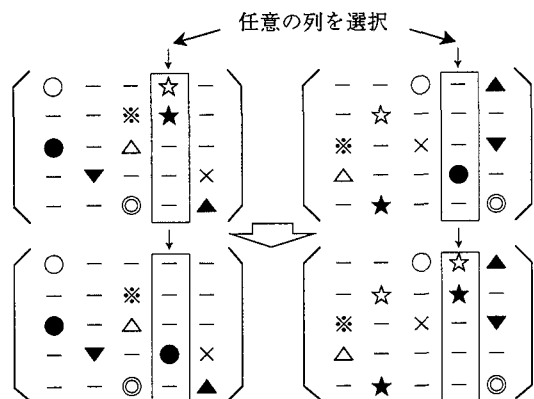


図-7 交叉Aの例

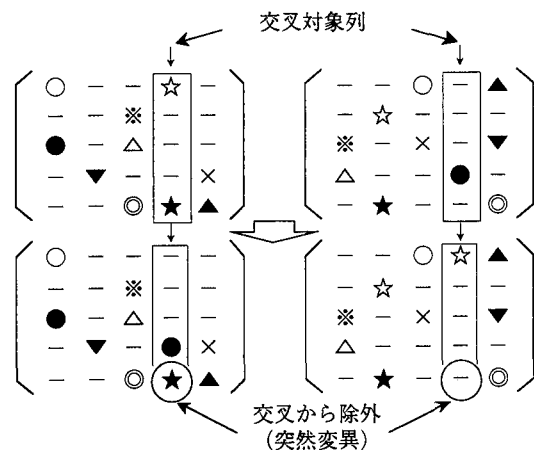


図-8 突然変異Aの例

- 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 $\sum F_k$ 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 $F_k / \sum F_k$ 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A)。ここでの交叉方法は次の通りである

《交叉A》

交叉Aの例を図-7に示す。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、交叉前の個体が持つ「保守時期」と「保守箇所」の情報の保存を目的として列交叉を採用する。また、この交叉法によれば、レール削正や道床更換といった作業を想定していないロットが存在した場合、そのロットにこれら想定外の作業が割り当てられることはなく、致死個体が発生しない。

- STEP5 STEP4で生じた各個体に対して確率 P_{mA} である変化を与える (突然変異A)。ここでの突然変異方法は次の通りである

《突然変異A》

突然変異Aの例を図-8に示す。本問題では作業の平準化も評価項目であるが、列交叉だけでは平準化の効果をほとんど期待できない。よって、交叉対象列の任意の1つの遺伝子を確率 P_{mA} で交叉対象から外す。これにより、ランダムに選ばれた列の作業数が遺伝演算の過程で増減し、作業数の平準化を期待できる。なお、この方法による突然

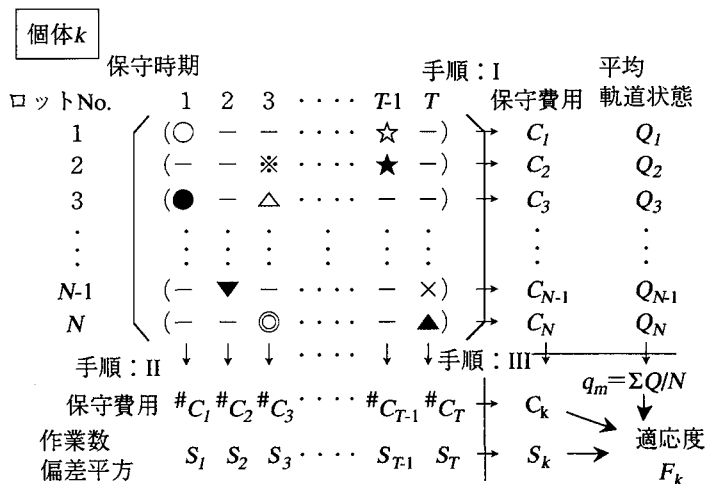


図-9 個体の評価

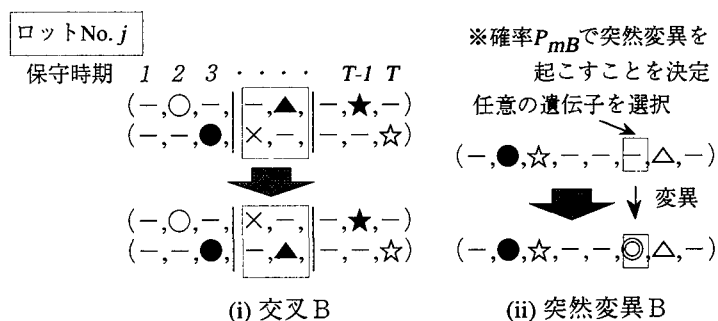


図-10 交叉B, 突然変異Bの例

変異でも致死個体は発生しない。

- STEP6 STEP3で選択された個体とSTEP4～5で生成された各個体の適応度を計算し、その大きい順に M_1 個選び、次世代に残す (新個体群の作成)
 STEP7 世代数 x_1 が規定世代数 x_1^* 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 $x_1 = x_1 + 1$ 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-9)。

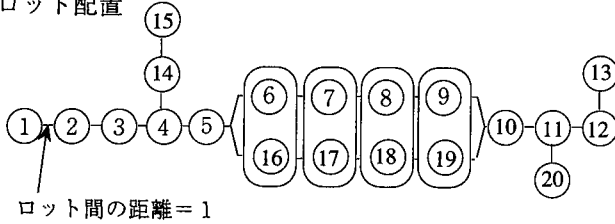
- STEP1s 各ロット j の保守スケジュールを決定する。具体的には保守費用 C_j と平均軌道状態 Q_j を評価項目としてGAにより決定する。この決定は文献1に示すB&Bによる方法でも可能であるが、ここでは、計算量削減のためにGAを用いる。ここでの演算方法は次の通りである。

- ・初期個体を M_2 個作成する。この場合の個体は、図-9の各行である。
- ・各個体の適応度を保守費用 C_j と平均軌道状態 Q_j から算出する [考え方は前章(3)に準じる]。
- ・適応度に応じて2つの個体を選択し、新たに2つの個体を作成する (交叉B)。この交叉には、文献2から、より良好な解が期待できる2点交叉法を用いる (図-10)。
- ・生成した個体に対して確率 P_{mB} である変化を与える (突然変異B)。この突然変異には1点変異法を用い

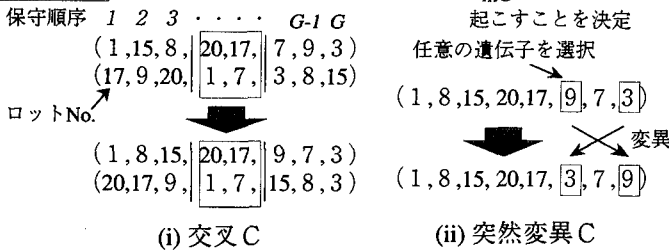
表一 数値例

※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 : 直線 6, 7, 16, 17 : R600m, C105mm 12 : 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	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

ロット配置



保守時期 t



図一 11 交叉 C, 突然変異 C の例

る (図一 10)。

- ・生成した個体のうち適応度の高い順に M_2 個残し、以上の計算を規定世代数 x_2^* 繰り返す。

STEP2s 各時刻 t における保守費用 $\#C_t$ を算出する。ここでは、保守作業に直接かかる費用は STEP1 で算出した費用 C_j に含まれるので MTT と削正車の保守ロットへの移動費用を算出する。この費用 $\#C_t$ 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 と GA により決定することとし、計算量削減の点から、同時刻に MTT、レール削正車各々の作業数が 10 以下であれば B&B、10 を超える場合には GA を用いる。この GA による演算方法は次の通りである。

- ・各時刻において MTT と削正車による保守箇所の列を各々作成する。
- ・保守箇所の列について初期個体を M_3 個作成する。
- ・各個体の適応度 (移動費用 L_M , L_S から算出) を計算する。
- ・適応度に応じて 2 つの個体を選択し、新たに 2 つの個体を作成する (交叉 C)。この交叉には、文献 6 から、より良好な解を期待できる order cross over 法を用いる (図一 11)。
- ・生成した個体に対して確率 P_{mC} である変化を与える

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 $\sigma_{y,lim}=3.5$ $C_p=1$ $C_b=2$ $C_r=1$
 $C_{br}=3$ $L_M=0.2$ $L_M=0.1$ $T=40$ $N=20$ $d_1=2.0 \times 10^{-10}$
 $\Delta d=0.2$ $\Delta x=3$ $i=0.0001337$ $M_1, M_2, M_3=21$
 $f_1=150$ $f_1^*=120$ $f_2=2.4$ $f_2^*=2.2$ $f_3=0.1$ $f_3^*=0.0$
 $f_4=3$ $f_4^*=2$ $x_1^*=1000$ $x_2^*, x_3^*=500$ $P_{mA}, P_{mB}, P_{mC}=0.9$

(突然変異 C)。この突然変異には 1 点変異法を用いる (図一 11)。

- ・生成した個体のうち適応度の高い順に M_3 個残し、以上の計算を規定世代数 x_3^* 繰り返す。

STEP3s 各時刻の作業数の平均と時刻 t における作業数の差の平方 S_t を求める

STEP4s 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 と線区全体の平均軌道状態 q_m を求める。以上、総保守費用 C_k 、平均軌道状態 q_m 、偏差平方和 S_k とから式(1)により評価関数値を計算し、その個体の適応度 F_k を算出する。

4. 計算例

(1) 数値例

表一 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、以上に示した手法 (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一 12 に示す。また、50 回の計算結果の各評価項目の統計量を表一 2 に示す。なお、この表には、従来法^{1), 2)} による解 [前章 (3) の STEP1s と STEP2s に相当] を比較のために示した。

平均値で比較すると、総保守費用 C_k については本手法の方が従来法に比べて若干大きく、また、計算に要した CPU 時間も長い。しかしながら、線区全体の平均軌道状態 q_m や偏差平方和 S_k については本手法の方が小さい。特に、従来法では作業量の平準化が全く考慮されないため、その差が明確に現れている。平準化は、維持する保守資源 (人、機械) の規模の縮小等、間接的なコスト減になるので、総保守費用 C_k が大差ないことを考慮すると、総合的には本

・記号は図-6 参照

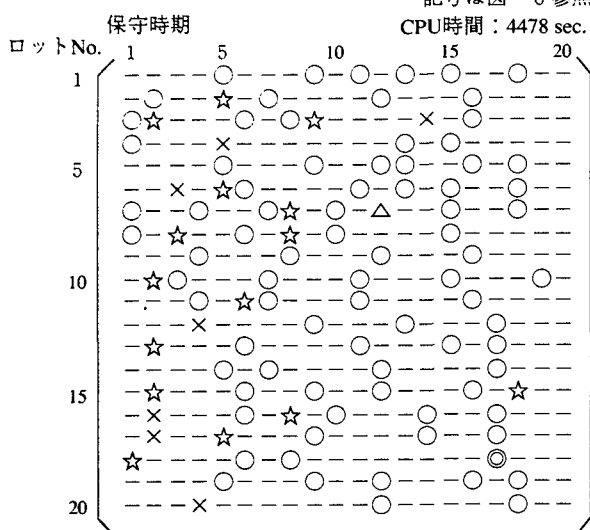


図-12 保守施策の解答例

手法の方が費用低減効果が大いといえ、この点が本手法のメリットである。総保守費用 C_k と偏差平方和 S_k はトレード・オフの関係にあり、総保守費用 C_k が従来法より若干大きいのは、この要素を考慮したためと考えられる。標準偏差で比較すると、総保守費用 C_k 、軌道状態 q_m については本手法の方が大きい。これは、本手法の方が評価項目が偏差平方和 S_k の分、1 項目多いために、その増減に合わせて変動したためと考えられる。このように、評価項目を増やすと各項目の変動が増加する可能性があることを認識しておくべきである。

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、作業平準化を考慮して決定する方法を示した。ここでは、MTT 保守とレール削正、道床更换という 3 つの保守作業を計画の対象としたが、この他にもレール更换や軌道パッド更换等の作業があり、例えばレール更换はレール削正に影響を与える施策である等、実態は

表-2 解の傾向と従来法との比較

	本手法			従来法		
	C_k	Q_i	S_k	C_k	Q_i	S_k
平均値	171	2.54	0.17	170	2.58	0.28
標準偏差	4.54	0.03	0.02	2.40	0.02	0.08
最大値	180	2.61	0.21	175	2.62	0.57
最小値	162	2.45	0.12	164	2.54	0.15
平均CPU時間	4796 sec.			336 sec.		

複雑である。また、保守作業によっては安全上の理由等で作業が禁止される時期があり、作業量の平準化を今回のように単純に扱えないのも実態である。更に、実際のロット配置は今回想定したものより複雑な上に数が多く、計画期数も多いことから、問題としてはもっと大規模であり、計算時間の短縮も重要な課題である。

以上のことから、今後の課題としては、これら実態に適したアルゴリズムへの改良、発展が最も重要である。

参考文献

- 1) 三和雅史, 内田雅夫: 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) 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, 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
- 4) 千住鎮雄, 伏見多美雄: 経済性工学, 日本能率協会, 1979.
- 5) 中山弘隆, 谷野哲三: 多目的計画法の理論と応用, 計測自動制御学会, 1994.
- 6) 三和雅史, 内田雅夫: 遺伝的アルゴリズムによる軌道保守スケジュール決定法, J-RAIL' 97 講演論文集, pp.339-342, 1997.

軌道保守施策の長期最適化法*

三和雅史**

長期的な軌道保守施策(内容, 時期)を決定する手法として、特定のロットへの保守施策を分枝限定法により決定する方法があるが、平面的に拡がって存在するロット全体の最適化を考慮したものではない。一方、ロットの拡がりを考慮した手法に遺伝的アルゴリズムを応用した軌道狂い保守計画法があるが、計画期間が短く、またレール削正や道床更换を想定していない。更に、維持する保守能力規模の適正化という観点がないために、保守時期に偏りがある計画になる恐れがある。そこで本研究では、線区全体の保守施策を経済性や輸送品質、保守作業量の時期的な平準化を考慮して決定する方法を示し、数値実験により得られる解の性質を調べる。

Planning Best Strategy for Track Maintenance *

By Masashi MIWA **

Irregularity of ballasted track grows due to gradual deformation of ballast under repeated train passage. Daily maintenance is indispensable to sustain normal track condition. For planning of maintenance policy (MTT, rail grinding, ballast replace), a time history model which considers material deformation is used. In this paper, applying this model, new procedure which can assist decision-making on the maintenance policy is presented. The procedure is formulated under the criterion to minimize maintenance costs, track irregularity and bias of maintenance work concerned with time, using "branch and bound technique" and "Genetic Algorithm". And the procedure is analyzed citing several practical example.

貨物駅の分散再配置が及ぼす通運トラック台数への影響*

A Location Analysis of Railway Freight Stations with Consideration of Delivery Truck Fleet Size

春名 曜**, 今井昭夫***

by Hikaru HARUNA, Akio IMAI

1. はじめに

近年、大都市部の地価の高騰により大規模物流施設や工業施設が郊外へ移転してきている。これらの施設は都心部では周辺道路の混雑、排ガスならびに騒音などを発生するが、このことも移転に拍車をかける大きな要因になっている。大規模物流施設の一つである都市部の鉄道貨物駅は、都心部の交通混雑により円滑な物流の維持が困難になってきたことや、また周辺の環境悪化を避けるために、ここ20年の間に郊外へ移転してきている。国鉄の分割民営化により国鉄の貨物部門を日本貨物鉄道㈱（通称、JR貨物）が継承した。国鉄の負債返済のために大都市部の貨物駅を清算事業団の所有にして、JR貨物は借地の形態で駅を利用しているが、近年は当該地所を売却するために貨物駅を郊外に移転させている。

このような貨物駅の移転はJR貨物以外の各当事者に様々な影響を及ぼす。駅発着のコンテナ貨物の端末輸送を担当する通運業者に対しては、トラックの運用効率に代表されるような業務内容への影響が考えられる。また移転先の地域周辺に対しては直接ならびに間接的な経済効果を与えるであろう。それとともに負の効果として駅出入りの通運トラックによる地域環境の悪化が想定される。貨物駅の移転、換言すれば駅の新規立地を考えると、これら各評価尺度を用いた分析が必須である。そこで本研究では、この内、通運トラックの運用に与える影響について考察を加える。具体的には既存の貨物駅がその取扱貨物を何らかの形で複数の貨物駅に分散させた場合、そのことが通運トラックの必要台数に及ぼす影響を分析する。

駅の分散再配置は通運業者にとってはトラック台数以外に、運行管理関係の人員にも影響を及ぼすであろう。その意味で、このような管理作業への影響も分析すべき内容と思われる。しかしこれらの人員は単に配車管理のみならず、顧客対応等の他の作業も同時に担当していると考えられる。このような要員の配置は各企業の業務方針の影響を受けている可能性があり、その分析には慎重を要するため、本研究からはこの分析を除いている。

* キーワード：ターミナル計画、鉄道計画、物資流動

** 学生員 神戸商船大学大学院 輸送情報システム工学専攻

***正会員 工博 神戸商船大学 輸送情報システム工学講座

(〒658-0022 神戸市東灘区深江南町 5-1-1,

TEL:078-431-6261, FAX:078-431-6365,

E-mail:pdmb@bun.ti.kshosen.ac.jp)

関西地区で最大規模を有する鉄道貨物駅である梅田駅の機能を、新規の貨物駅ならびに近隣の既存貨物駅に分散する計画がある。本研究ではこれに着目してまず、梅田駅の発着貨物を担当する某通運業者の1ヶ月間のトラック運行実態を分析した既存の研究結果をもとに、通運トラックの運行形態について考察を加える。この考察を前提にして、当該通運業者の運行データを用いて1貨物駅で必要になるトラック台数を推定する重回帰モデルを構築する。そしてこのモデルを用いて、複数貨物駅で貨物取扱を行った場合に必要となるトラック台数を計算するアルゴリズムを開発する。さらに、梅田駅を縮小し、吹田地区に新規の貨物駅を立地させて、既存の梅田発着貨物を梅田と吹田で分散して取り扱う場合、ならびに他の駅と吹田駅との場合を想定し、本アルゴリズムを用いて駅分散による通運トラック台数の変化を考察する。

2. トラックによる集配活動に関する既往の研究

トラック集配に関する分野においては、これまで様々な研究がなされてきている。それらは概ね2つに分けられる。一つは効率的な配車のためのルーチング問題^①であり、他方は確率モデルを用いた必要台数推定のためのマクロ的な分析モデル^②である。これら両者ともにトラック台数を求めるものであるが、いずれも規範的なモデルを検討するものである。

通運業界においても効率的な配車は重要性の高いものである。通運の特徴は宅配便の集配のようなルート配送ではなく、シャトル的な比較的単純な集荷と配達形態をとっていることにある。このような集配形態も一般的にはルーチング研究の対象であるが、現状ではほとんどが経験則によるものであると考えられ、将来的にもこれが大きく変わることはないと思われる。そこで我々は駅分散によるトラック台数の影響を分析するために、規範的なモデルアプローチではなく、現状の集配活動の実態をベースにしてトラック台数を推定するモデルを構築する。

3. 通運トラック台数推定モデル

3.1 単一駅での台数推定モデル

(1) 通運トラックの運行に関する考察

本研究では、大阪市内に本社を持つ中規模(取扱貨物量が

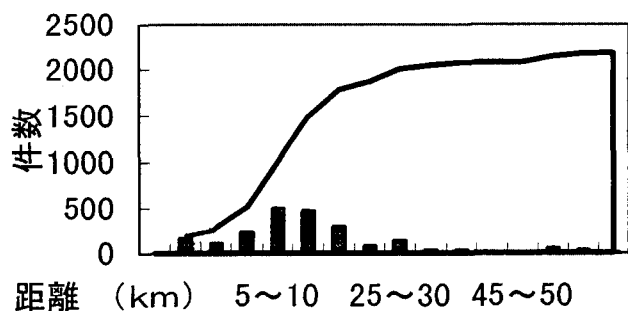


図1 直線距離別荷主件数

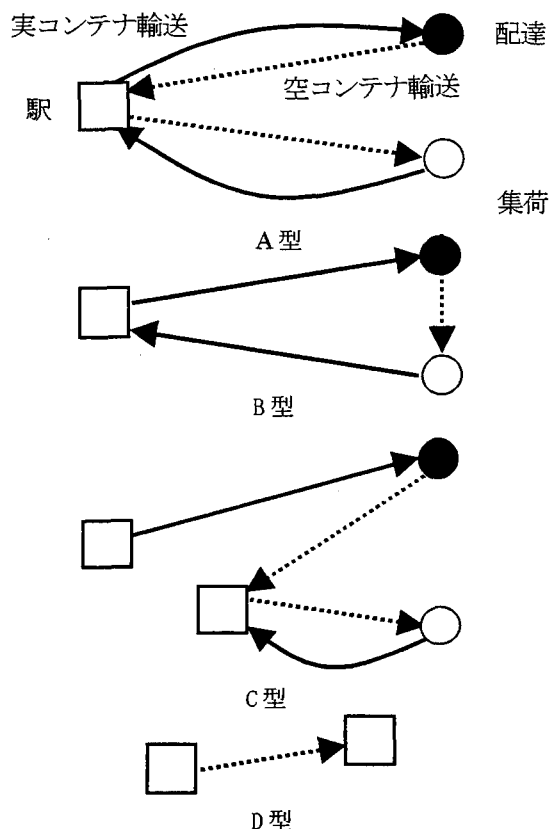


図2 通運トラックの運行パターン

表1 輸送形態の分類と頻度

サイクルパターン	頻度(個)	頻度(%)
A型	142	49.6
B型	109	38.1
C型	4	1.3
D型	31	10.8
合計	286	100

梅田駅全体の約 1/10 規模)通運業者における 1993 年 8 月の 1 ヶ月における、梅田駅所属の各トラックの運行日報データを用いて分析を行う。当該事業者は梅田駅において 1 ヶ月間で約 650 台を運行しており、このデータから、毎日における、各トラックが担当する荷主名、そのトラックの一日の総運行時間ならびに総走行距離、コンテナ取扱い駅が分かる。

荷主はのべ約 2300 件で、所在地は近畿 2 府 4 県および

岡山県という広範囲にわたっている。図 1 は荷主の距離別の分布を示しているが (バーは距離別件数、折れ線は累積)、80%近くが梅田駅から 20 km 以内に存在し、20 km 以上の荷主はかなり少なく、30 km 以上はごくわずかである。

このデータを分析した既往の研究⁴⁾では、ターミナルと荷主間の集荷・配送のパターンを以下の 4 つに分類している (図 2)。

- A: ピストン型 (駅と集荷または配送の往復輸送)
- B: 三角型 (駅と配達・集荷の三角輸送)
- C: 四角型 (3 つ以上の荷主、または 2 つ以上の駅間の輸送)
- D: 回送型 (駅間のコンテナの回送)

それぞれの割合は表 1 に示すが、A の形態が一番多く、次いで B が多く、この 2 つでほぼ全体の 9 割になっている。

三角輸送に着目すれば、同じ荷主数でも集荷と配達の数が等しいと台数はかなり減らせると考えられる。鉄道コンテナを輸送するトラックには、5 トンコンテナを例に取ると 1 個、2 個 (まれに 3 個) 積みの車種がある。しかし、表 1 から 1 回に積載して集荷または配達するコンテナはほとんどが単一荷主のものであることが分かる。

トラック 1 台に対する 1 日の作業時間は 1 ヶ月平均で約 9 時間である。しかしその分散は日によって異なっている。この分散の度合いは必要台数にかなり影響すると考えられる。

(2) 説明変数の選択

さて本研究ではトラック台数を推定するために重回帰モデルを構築する。このモデルでは毎日の集配に必要となるトラック台数を求める。したがって駅の新規立地により必要となる台数を求めるには以下のようにする。つまり、荷主データがある期間に対して与えられた場合、毎日の必要台数を推定モデルにより算出し、その中での最大値が全体としてのトラック台数になる。

先の考察より、重回帰モデルの説明変数を以下のように設定する。

$$Y = aX_1 + bX_2 + cX_3 + dX_4 + \alpha \quad (1)$$

ただし、

Y : トラック台数

X_1 : 荷主数

X_2 : 配送比の 2 乗

X_3 : 1 日の 1 トラックの平均作業時間 (時)

X_4 : 駅から荷主への距離の合計 (km)

ここで、荷主数とは集荷と配達数の合計である。配送比とは、分子を集荷荷主数と配達荷主数の中で小さい方の値とし、分母をその大きい方の値としたときの数値である。荷主数が一定である場合、集荷と配達荷主数で同じであれば

表2 走行距離の回帰分析結果

寄与率	0.95
F値	553.7
有為水準	0.00
切片	2.04
係数	1.20

表3 単一駅トラック台数推定モデル

	非標準化係数	標準誤差	t値	有意水準
(定数)	29.15	6.973	4.19	0.000
荷主数	0.143	0.034	4.19	0.000
配送比の2乗	-14.962	12.77	-1.17	0.253
作業平均時間	-0.047	0.013	-3.54	0.002
往復距離(梅田)	3.4E-05	0.0012	2.86	0.009

すべての荷主を三角輸送で処理することが可能である。もちろん集荷貨物と配達貨物の利用する列車の時間と荷主の立ち寄り時間の関係で必ず三角輸送が実現できるとは限らない。しかし集荷と配達の荷主数が異なる場合に比べて、運行形態がより効率的になる可能性が高い。したがって、配送比を説明変数として用いることにする。

平均作業時間とは、トラックの1日における運行開始から終業までの時間の平均を意味する。各トラックの稼働時間の制約が長くなれば一日に輸送できる貨物量も増加する。このように作業時間の変動がトラック台数に影響を及ぼすという観点から平均作業時間を変数として導入する。

荷主への距離を説明変数に設定するのは、距離が長くなるほど1台のトラックの集配件数が減り、それにより必要台数も影響を受けると考えられるためである。今回は以下に述べる理由により直線距離を用いる。

(2) 走行距離と直線距離の関係

荷主距離には実際に走行した距離を用いるべきであるが、分析に使用したデータからはそれが分からない。また得られたモデルを用いて台数を推定する際にもこの値を与えるのは困難である。つまり実際のルーチングが未知である以上走行距離を求められない。荷主への最短経路距離とその直線距離の関係を分析したところ、表2のような回帰式が得られた。寄与率が95%であることから高い相関関係があるといえる。したがって、実走行距離（実際には最短距離であるが）と直線距離は比例関係にあると解釈でき、台数推定モデルの説明変数として直線距離を用いることは妥当と考えられる。

(4) 台数推定モデル

重回帰分析の結果、以下のようなトラック台数推定モデルが得られた。

$$Y = 0.14X_1 - 14.96X_2 - 0.047X_3 + 0.0034X_4 + 29.15$$

$$[R^2 = 0.948] \quad (2)$$

その詳細を表3に示すが、寄与率は95%と高い値を示している。 X_1 つまり荷主数の符号は正であり、これが増加すればトラック台数は増加することになる。変数 X_2 の符号は負であり、配送比が小さくなるほど、つまり集荷と配達数の差が大きいほどトラック台数は増えることを意味している。なお、比の二乗を用いたのは、他の変数変換の中でこれが最も寄与率を高くしたからである。 X_3 である平均作業時間の符号は負であり、平均作業時間が長くなるほど台数は減少する。 X_4 である荷主への距離は正の符号を持ち、荷主が遠くなるほど多くのトラックを必要とすることが分る。

以上のように各変数の符号条件は妥当であり、本モデルは良好なものであると考えられる。本モデルの定数項は大きい、これは分析で用いたデータでは毎日の荷主数に大きな差がなかったことに起因していると考えられる。このことは、もし駅の貨物取扱がない場合、つまりすべての変数がゼロの場合でも、トラック台数推定値は29となって実際とはかなりの違いがでてくることを意味している。

3. 2 複数駅での台数推定モデル

ここでは先に求めた単一駅での台数推定モデルを用いて、複数駅での台数推定アルゴリズムを構築する。

通運データは単一駅からの集配分だけである。したがって、単一駅台数推定モデルのように多変量解析モデルを構築することはできない。

ところで単一駅のモデルで明らかになったように、集荷と配達の比が1になるほど台数が減少する。このことから、駅が分散した場合でも、通運業者も様々な条件が許すかぎり、各駅が担当する集配数になるべく同数になるよう各駅へ貨物が配分されることを希望するであろう。複数の駅に荷主を分散させる場合、各荷主がどの駅を利用するかは、基本的には鉄道会社がどの駅にどの列車を停車させるかに依存する。例えば1駅を2駅に分散させる場合、荷主が半分ずつ割り当てられるような列車設定が考えられる。本研究で想定している駅の分散は大都市圏でのものである。したがって各駅が極端に離れて立地することは非現実的である。このことは鉄道会社にとっては、列車をどの駅に停車させても列車運行上大きな違いが無いことを意味する。もしそうであれば鉄道会社は、荷主の利便性の他に通運業者の利便性（例えば本研究が考えているトラック台数の問題）を考慮する可能性は十分にあらう。

複数駅の場合の台数推定では、先に示したような通運業者の合理的行動をもとに推定モデルを構築することを考える。具体的には式(3)-(7)で表されるモデルにより、ある一日における集配作業に対して、三角輸送による総走行距離が最小になるように各駅へ荷主を配分する。そして配分された各駅の荷主を用いて、単一駅台数モデルによりそれらの駅の台数を求める。これを対象とする計画期間の毎日のデータに適用し、その期間内における各駅のトラック台数の最大値をその駅の必要台数とする。

複数駅への貨物配分モデルは以下のような整数計画モデルで表現できる。

$$\text{Minimize } \sum_i \sum_j \sum_k C_{ijk} x_{ijk} \quad (3)$$

$$\text{subject to } \sum_j \sum_k x_{ijk} = 1, \quad \forall i \quad (4)$$

$$\sum_i \sum_k x_{ijk} = 1, \quad \forall j \quad (5)$$

$$\sum_i \sum_j x_{ijk} \leq L_k, \quad \forall k \quad (6)$$

$$x_{ijk} = (0,1), \quad \forall i, j, k \quad (7)$$

ここで

C_{ijk} : 集荷荷主 i と配達荷主 j が駅 k に割り当てられて、三角輸送を行うときの輸送距離

L_k : 駅 k での一日の取扱い能力

x_{ijk} : 集荷荷主 i と配達荷主 j が駅 k に割り当てられたとき 1、そうでないとき 0 である整数変数

式(1)は全輸送距離の最小化を示している。式(4)は集荷荷主はいずれか一つの配達荷主とペアを組み、どれか一つの駅に割り当てられることを保証している。同様に式(5)は、配達荷主がいずれか一つの集荷荷主とペアを組み、それがいずれか一つの駅に割り当てられることを示している。式(6)は各駅に割り当てられた荷主数はその駅の取扱い能力以下であることを示している。なお、集荷または配達荷主のいずれかが多い場合は、それに対する相手荷主をダミーとして用意する。

この問題は次に示す Frieze[®]の提案した一般化された 3 次元割当問題の変形である。

$$\text{Minimize } \sum_i \sum_j \sum_k C_{ijk} x_{ijk} \quad (8)$$

$$\text{subject to } \sum_j \sum_k x_{ijk} = 1, \quad \forall i \quad (9)$$

$$\sum_i \sum_k x_{ijk} = M_j, \quad \forall j \quad (10)$$

$$\sum_i \sum_j x_{ijk} \leq L_k, \quad \forall k \quad (11)$$

$$x_{ijk} = (0,1), \quad \forall i, j, k \quad (12)$$

つまり、我々のモデルは式(10)の右辺の M_j が 1 になった場合のものである。この Frieze の一般化された 3 次元割当問題は NP 困難な問題であり、多項式限界の計算量で最適解が求められないことが証明されている。そこで以下に示すような近似解法を考える。

ステップ 1 : 集荷と配達荷主の割当

集荷と配達を組み合わせるとトラックは可能な限り三角輸送を実現すると仮定し、式(13)–(16)に示す割当問題を解

き、集荷地点から配達地点への移動距離の総和が最小になるようにして両者の割り当てを行う。なお集荷と配達地点数が異なれば、多い方の地点は余剰になる。

$$\text{Minimize } \sum_i \sum_j D_{ij} y_{ij} \quad (13)$$

$$\text{subject to } \sum_j y_{ij} = 1, \quad \forall i \quad (14)$$

$$\sum_i y_{ij} = 1, \quad \forall j \quad (15)$$

$$y_{ij} = (0,1), \quad \forall i, j \quad (16)$$

ここで

D_{ij} : 集荷荷主 i に配達荷主 j が割り当てられてられたときの i から j への輸送距離

y_{ij} : 集荷荷主 i に配達荷主 j が割り当てられてられたとき 1、そうでないとき 0 である整数変数

ステップ 2 : 三角輸送ルートの距離の計算

ステップ 1 で得た割り当て結果を三角輸送ルートとみなして、組み合わせられた 2 地点と各駅との三角ルート距離を求める。これを全対象駅に対して計算する。

ステップ 3 : 割当て駅の決定

ステップ 2 で求められた全駅における三角輸送ルートの距離の中で、値が最小である駅にこの 2 地点を所属させる。なお、余剰の集荷または配達荷主は距離の短い駅に割り当てられる。もし各駅の割当荷主の数がその取扱い能力を超えている場合は、その駅に対する三角輸送距離 C_{ijk} の大きなものから他の駅のなかでその C_{ijk} が最小の駅へ割り当てる。

以上により全荷主を各駅に配分する。各駅に配分された荷主に対して、単一駅モデルを適用してそれぞれの駅に必要なトラック台数を求める。

4. 駅分散における通運トラック台数の影響分析

4. 1 前提

ここでは本研究で構築した台数推定モデルを用いて、駅分散の台数への影響を検討する。駅が分散した場合において、駅の取扱い能力、作業時間を変化させ、台数に与える変化を検討していく。

用いる荷主データとして、先の分析で用いた荷主の分布エリア (図 3 のような 2 0 km 四方) 内に一様乱数を用いて 1 0 0 社を生成させ、さらにこれら荷主に、[0,1] 区間の一様乱数を 3 分割した値に当てはめて、出荷、入荷、入出荷なしの 3 つの属性を与える。この属性乱数の種を替えて 1 ヶ月間一日ごとに荷主を与えるが、入荷と出荷はそれぞれ毎日平均 6 0 件、入荷も出荷もある荷主が 2 0 件生成され

る。なお、これらの荷主の位置を与える乱数の種を変えて、5 ケース分の 1 ヶ月の荷主を生成させている。駅の分散案は次のような 2 ケースを考えるが、各駅の地理的關係を図 3 に示す。

①梅田—吹田ケース：

まず現在 J R 貨物が考えている分散案、つまり梅田駅の取扱量の一部を、吹田に建設する新駅に担当させる。

②百済—吹田ケース：

将来、梅田駅は全廃する計画である。したがって、吹田駅開業後も梅田駅が扱っていた貨物を他の駅に担当させる必要がある。具体的な計画はまだ立てられていないが、ここでは百済駅が扱うものと考ええる。

今回の分析で用いた通運トラックの一日の平均作業時間は約 9 時間であった。そこでこれを中心に前後 1 時間ずつ変化させた、8、9、10 時間の 3 つの作業時間を設定して計算を行う。

4. 2 梅田—吹田ケース

図 4-1 ～ 3 は梅田と吹田に荷主を分散させた場合における、5 ケースの計算で求められた必要トラック台数の平均値である。両駅における毎日の貨物取扱能力（取扱荷主数）の合計を 100% とし、取扱比率を 0% ～ 100% まで 10% 毎に変化させて、11 種類の取扱比率に対して計算させている。なお、取扱荷主数がゼロの場合、式(2)で推定すると約 30 台のトラックが発生する。このこと自体、本モデルの限界を示すものであるが、図では現実に即してゼロ台として示している。

2 駅を利用する場合（取扱比率が 10% ～ 90%）では、作業時間が 8 と 9 時間の場合では、両駅の比率を 5：5 にした場合が最もトラック台数が少なく、10 時間の場合では梅田と吹田が 4：6 のときが最小になっている。また時間別に最小トラック台数を比較すると、8 時間で約 34 台、9 時間で 28 台、10 時間で 23 台となっており、当然ながら 10 時間の場合が最も台数が少ない。さらにこれから、1 時間作業時間を増やせば約 5 台の削減になっていることが分かる。

次に、それぞれの駅の能力を 100% にした場合、つまり貨物取扱をいずれかの駅に集約した場合では、各作業時間とも梅田が吹田よりも 1 台程度少なく済む結果となっている。これは生成させた荷主は吹田よりも梅田に近い地

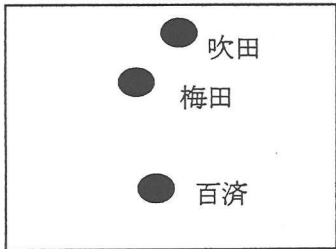


図 3 荷主分布範囲（20km 四方）における貨物駅の地理的關係

域に分布していることによる。しかし 1 駅の場合は 2 駅の場合よりもトラック台数が少なくなっている。これには次の 2 つの原因が考えられる。

① 2 駅の場合、各駅に対して単一台数推定モデルから台数を求めるが、このモデルの定数項が大きいため推定台数が大きくなるものと考えられる。

② 荷主の分布は日によって異なる。したがって、2 駅の場合で、ある日の荷主分布地域がいずれの駅からもかなり離れている場合、単一の駅よりも台数が多くなることもある。

4. 3 百済—吹田ケース

図 5-1 ～ 3 は百済と吹田に荷主を分散させた場合における、5 ケースの計算で求められた必要トラック台数の平均値である。2 駅体制の場合では、いずれの作業時間でも、百済と吹田が 4：6 のときが最小になっている。また時間別に最小トラック台数を比較すると、8 時間で約 34 台、9 時間で 29 台、10 時間で 23 台となっており、当然ながら 10 時間の場合が最も台数が少なく、またこの台数の傾向は梅田—吹田ケースと同じである。しかし百済所属のトラック台数は、いずれの場合でも梅田所属台数よりも多くなっている。これは百済が梅田よりも荷主分布地域内の偏った場所に立地していることによものと考えられる。貨

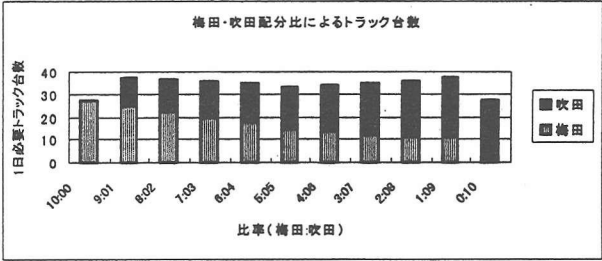


図 4—1 吹田—梅田ケース 8 時間

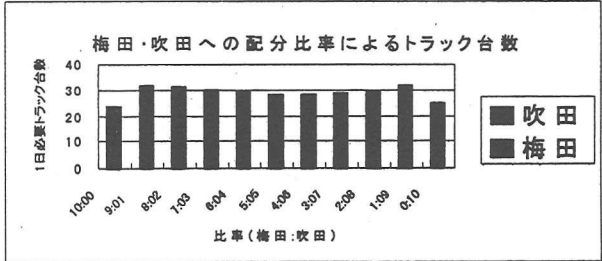


図 4—2 吹田—梅田ケース 9 時間

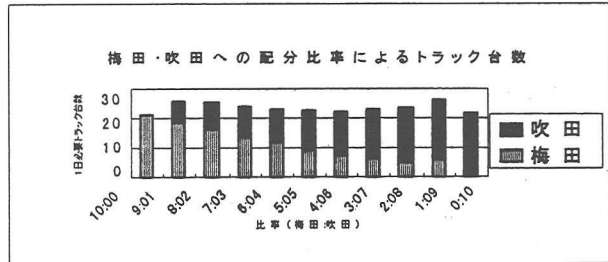


図 4—3 吹田—梅田ケース 10 時間

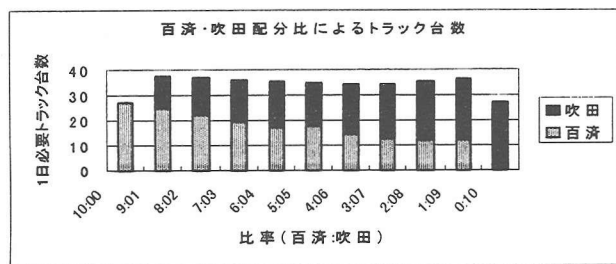


図5—1 百済—吹田ケース 8時間

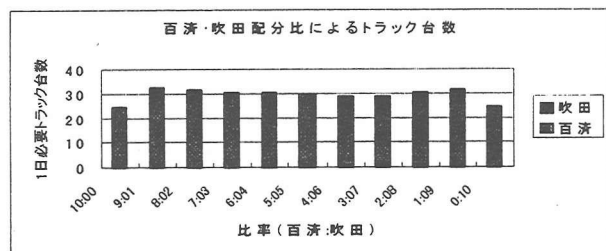


図5—2 百済—吹田ケース 9時間

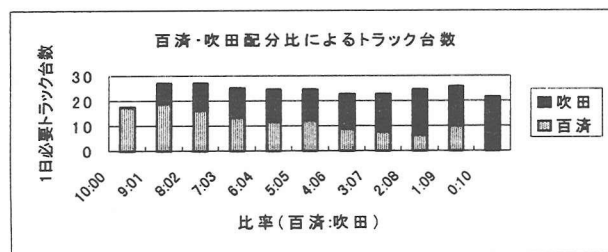


図5—3 百済—吹田ケース 10時間

物取扱をいずれかの駅に集約した場合には、各作業時間とも百済が吹田よりも台数が若干少なくなっている。またこのケースにおいても、梅田—吹田ケース同様、単一駅の方が2駅の場合よりも台数が少ない。

5. おわりに

本研究では、通運トラックの台数推定モデルを構築した。用いたデータの制約により、まず単一駅の場合の推定モデルを構築した。つづいて複数駅の場合は、合理的な集配が行われると仮定して、集荷配達のマッチングを行いながら荷主を各駅に配分し、その配分貨物を用いて各駅別に単一駅台数モデルでトラック台数を求めた。単一駅台数推定モデルの決定係数は高く良好なモデルが構築できた。複数駅の台数推定モデルを用いて、駅が分散した場合に駅ごとの取扱比率を変化させてトラック台数の変化を分析したが、2つの駅が荷主をほぼ2分したときが最も台数が少なくなることが明らかになった。

しかし単一駅モデルはその定数項の値が大きく、貨物取扱がない駅に対しても約30台のトラックを生成してしまう問題点がある。また2駅体制の場合は単一駅の場合に比べてトラックが多くなる結果となり、駅の数の増減がトラック台数に及ぼす影響を分析するには、今回のモデルは問題があると思われる。

参考文献

- (1) 例えば、L. Bodin, et al., Routing & Scheduling Vehicles & Crews, Comp.&Opns.Res, 10, 63-211, 1983.
- (2) 例えば、C. F. Daganzo & G. F. Newell, Configuration of Physical Distribution Networks, Networks, 16, 113-132, 1986.
- (3) A. M. Frieze, A Bilinear Programming Formulation of The 3-Dimensional Assignment Problem, Mathematical Programming, 7, 376-379, 1974.
- (4) 林、都市内における鉄道コンテナ集配トラックの運行実態の分析、神戸商船大学卒業論文、1993。

貨物駅の分散再配置が及ぼす通運トラック台数への影響

春名 曜、今井 昭夫

貨物駅の移転はその規模も大きく、様々な関連主体に影響を与えると考えられる。そこで本研究では貨物駅の移転が通運に及ぼす影響を検討する。具体的には、駅移転により通運トラック台数がどう変化するかを分析する。そのために1日の必要トラック台数を推定するモデルを構築する。まず単一駅でのトラック台数推定モデルとして重回帰モデル式を構築する。さらに、総輸送距離が最小となるように荷主データを3次元割り当て問題を用いて荷主を配分して、それを単一駅でのトラック台数推定モデルで台数を求める方法により複数駅でのトラック台数を推定するモデルを構築する。

A Location Analysis of Railway Freight Stations with Consideration of Delivery Truck Fleet Size

Hikaru HARUNA, Akio IMAI

Relocation of freight stations of railway may give influences to various individuals and organizations. This paper addresses the influence to the delivery and pickup service of container from/to stations, analyzing the fleet size of the delivery truck. We first build a model to estimate the fleet size from a single station. Next, we make a model to obtain the fleet size needed for two station with the container demand assigned to each of them.