

計算機支援を前提とした運転整理手法の適用順序決定法

大山大介*, 古関隆章 (東京大学), 高野求 (京三製作所),

A Way of Creating Order of Train Rescheduling Method with Computer Aided System.

Daisuke Ooyama, Takafumi Koseki(Tokyo University), Motomu Takano(Kyosan Electric Mfg.)

Abstract

Currently, train rescheduling is executed by train operators manually. Assistance by computers is required because train rescheduling is a burden for train operators. In this research, some methods of train rescheduling are installed, and then simulated annealing method instead of hill climbing method to determine order of applying each rescheduling method is proposed.

キーワード：運転整理, 焼きなまし法, 山登り法

(Train rescheduling, Simulated annealing method, Hill climbing method)

1 研究の背景

事故発生などによる鉄道のダイヤの乱れに対して、現在は人手でダイヤを正常に戻そうとする変更（運転整理）が行われている。運転整理にはホームの長さや構内配線などの細かい知識と、事故がおきた時点でも走っている何本もの列車の状況に対する考慮が必要であり、現場の指令員の負担は大きい。また、人の勘や経験に基づく判断のため、定量的な評価ができず、フィードバックや効率的な手法の継承を困難にしている。これらの改善のため、計算機支援による運転整理案生成が必要である。

2 先行研究

当研究室で、計算機支援によって運転整理を行うというテーマでの先行研究が長崎^{[1][2]}・江口^[3]らによってなされている。

事故が発生したとき、事故によって乱れたダイヤに対し図 1.1 のように順番に運転整理手法をあてはめる。具体的な運転整理手法の当てはめ方の例は、図 1.2 のようになる。運転整理案を適用し、評価値が改善されれば新しい運転整理案を採用する。そうでなければその案は破棄する。ひとつの運転整理手法が何回ループするか、どのような条件でループするかなどは、その運転整理手法による。

生成された運転整理案の定量評価を、乗客の不満という視点から見ることで、運転整理案は利用客である乗客に配慮したものを作成できるようになり、サービス業としての鉄道事業の質を高めることができる。

先行研究によって、乗客からみた不満を用いて運転整理案

を定量評価する方法がおよそ現実的な評価基準になっていることや、運転整理案生成において最も処理時間のかかる乗客行動経路決定の計算時間を、グラフ探索を用いることで高速化できることなどが判明している。

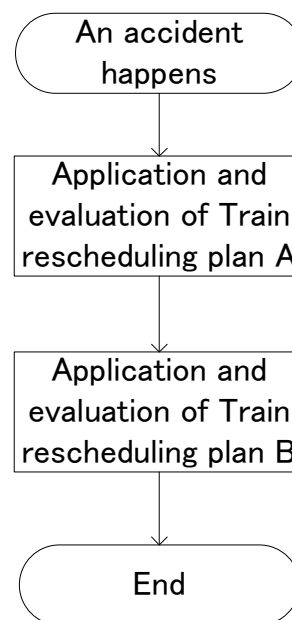


図 1.1 適用順序

Fig.1.1 Application order

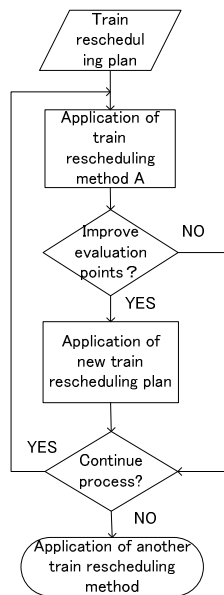


図 1.2 内部処理例

Fig.1.2 An example of internal process

先行研究内で、改善すべき点の一部として、次のようなものがあげられる。

2. 1 運転整理手法の適用順序

ある運転整理手法 A と B と C があるとする場合、先行研究では A の処理を一通り終えた後に、B、C をあてはめるといった順序が固定されている。A、B、A とあてはめると運転整理案ができるかもしれないし、そもそも A、B、C という適用順序の設定に論理的な裏づけはない。

2. 2 山登り法の改善検討

運転整理案生成途中で、常に一番よい評価値を出す運転整理案のみを、操作対象にし、評価値が更新されていく途中で生成されるその他の運転整理案は廃棄する。このような方法を山登り法と言うが、この方法は、生成される案が局所最適に陥る可能性が高い。

3 研究の目的

よりよい評価値を持つ運転整理案を計算機上で自動に作り上げるために、先行研究における問題点を解決する必要がある。

本研究では、主に運転整理手法の適用順序に関する検討や、山登り法の改善について考える。

4 運転整理案の評価方法

乗客からみた評価法を採用し、定量的な評価を行う。損失時間、乗換損失、混雑度によって受ける乗客の不満を定量化

し、すべての和をとったものを、乗客の不満という評価値とする。

4. 1 損失時間

列車の所要時間は、ダイヤを評価する上で最も重要な指標であると考えられる。正常ダイヤの下で運行が行われた場合も、乗客が乗車駅にきてから乗車するまでの待ち時間や目的地以外の駅に停車している時間も損失時間と考えて扱いたいため、所要時間をそのまま損失として計上する。これを式で表現すると式(4.1)のようになる。

$$L_1 = \omega \times \sum_{i=1}^N t_i \quad (4.1)$$

- ω : 時間価値 (円/分)
- N : 乗客の総数 (人)
- t_i : 乗客 i の目的駅への実際の所要時間 (分)

4. 2 乗換損失

乗り換えは、実際に乗り換えにかかる時間の損失以外にも、乗客に移動を強いることなどによる損失が発生すると考えられるので、乗り換えの所要時間を損失時間として評価する以外に、その回数自体も評価すべきである。ただし、同一ホームで乗り換えが可能な場合と、地下道を渡って別のホームにいかなくてはいけないのでは、乗客の損失は明らかに異なっていると考えられるので、本システムでは乗換一回を損失時間の何秒に値するのかという情報を駅や乗換元ホーム、乗換先ホームをキーとして入力データの形で持たせるようにしてある。式で表現すると式(4.2)となる。

$$L_2 = \omega \times \sum_{i=1}^N \sum_{j=0}^{M_i} r_{ij} \quad (4.2)$$

- ω : 時間価値 (円/分)
- N : 乗客の総数 (人)
- M_i : i 番目の乗客の乗換回数 (回)
- r_{ij} : i 番目の乗客の j 番目の乗換の時間換算値 (分/回)

4. 3 混雑度

混雑による損失は、混雑時に1分を何分を感じるか、人間の感覚の非線形性を表した係数を用いて時間に換算し、その混雑を経験した人の人数と時間をかけ、これに時間価値をかけて金額に換算する。これは、式(4.3)のように表現することができる。

$$L_3 = \omega \times \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{s=1}^{S_i} \left(f_c \left(\frac{q_{is}}{c_{is}} \right) \times q_{is} \times t_{is} \right) \cdots (4.3)$$

- ω : 時間価値 (円/分)
- n : 駅の総数
- S_i : 駅 i に到着する列車本数
- f_c : 混雑に対する人間の感覚の係数 (表 4.1 参照)
- c_{is} : 駅 i に s 番目に到着する列車の定員 (人)
- q_{is} : 駅 i に s 番目に到着する列車の次駅までの乗客数 (人)
- t_{is} : 駅 i に s 番目に到着する列車の次駅までの所要時間 (分)

表 4.1 混雑に対する人間の感覚の非線形性をあらわす係数
list.4.1 a coefficient of an expression of non-linear character of what people feel for congestion

congestion R (%)	f_c (coefficient)
0 ~ 100	$0.00027R$
100 ~ 150	$0.000828R - 0.0558$
150 ~ 200	$0.00179R - 0.2$
200 ~ 250	$0.0069R - 1.22$

時間価値の値は、乗客の時間当たりの賃金を基にした所得接近法により、都市圏ではおよそ 50 (円/分) と求められている^[4]が、本研究では損失の評価は損失時間 (秒) 換算で評価を行うものとする。

5 運転整理手法の適用順序の検討

先行研究の問題点を改善させる方法として、本研究では、二点の改良を試みる。

5. 1 運転整理手法の適用順序

山登り法は局所最適に陥る危険性があるため、その解決方

法として焼きなまし法を使う。また、運転整理手法の適用順序は、いままでは固定であったが、自由にできるようにする。

5. 2 焼きなまし法による運転整理案生成

山登り法は、運転整理手法を適用後の運転整理案に対して、採用か非採用かを評価値がよくなった場合は採用、悪くなった場合は非採用とするものであった。焼きなまし法における、新しい案を採用する確率は次の(5.1)式であらわされる^[5]。

$$p = \exp\left(\frac{-\Delta E}{T}\right) \quad (5.1)$$

ここで p は採用確率であり、 ΔE は評価量 (本研究では乗客の損失) の増加量、 T は温度と呼ばれるものである。乗客の損失が減少している場合は、必ず新しい案を採用する ($p > 1$) が、乗客の損失が増加している場合も一定の確率 p で評価案を採用することで、局所最適に陥る問題の解決につながると考えられる。また、評価値が悪化する案を採用する確率は、悪化度合いが大きい (ΔE の絶対値が大きい) 場合は少ない確率で、悪化度合いが少ない (ΔE の絶対値が少ない) 場合は高い確率で、運転整理案を採用するという、ふりわけをすることができる。また、 T の値は繰り返し評価が行われるにつれて少しずつ減少させていくようにする。そうすることによって、後半になればなるほど評価を悪化させる運転整理案を突然採用するという可能性が減ることになる。逆に前半は、多少評価が悪くなるがあっても新しい運転整理案を採用してみるという方法が取られることになる。

温度 T の減少のさせ方はいろいろ方法があるが、本研究では、新しい運転整理案の採用を1回行うごとに定数 a 倍減少させるという方法を取ることにした。式にすると次の(5.2)のようになる。

$$T(n+1) = a * T(n) \quad (5.2)$$

ここで定数 a は一般的に、 $0.8 \leq a \leq 0.9999$ を満たすような値をとる。 $T(1)$ を、温度の初期値とする。

6. 計算機による運転整理案自動生成

待避変更、時隔調整、運転線路利用順序変更という三つの運転整理手法を実装し、焼きなまし法と運転整理手法の適用順序を自由にして、実験を行った。焼きなまし法の定数 a は、0 に近いほど山登り法に近づくため、0.9 とする。初期温度 $T(1)$ の値は、小さいほど山登り法に近づき、大きすぎると評価値を悪化させるものをなんでも選んでしまう。今回の実験で使用される計画ダイヤにおける乗客の損失値(秒換算)を事故前と事故後で調べたところ、事故前は 1848 万秒で事故後

は 1883 万秒であった。このことから推測するに、一回の運転整理案適用における評価値の変化は数万から数十万程度であると予測されるので、 $T(1)$ はそのオーダーにあわせ、

$$T(1) = 50000 \text{ とした。}$$

待避変更とは、追い越し待ちの駅を変更（新設もしくは消去を含む）するような運転整理のことを示す。図 6.1 が正常な計画ダイヤだったとする。事故が発生して図 6.2 のように赤線で示される列車が遅延すると、青の列車は赤の列車を駅 B で通過するために待たなくてはならない。このとき、図 6.3 のように駅 B から駅 A へ、通過駅を変更する運転整理を待避変更という。

また、時隔調整は列車を駅で故意に遅らせ乗客を分散させる運転整理をさし、運転線路利用順序変更は、列車が特定線路を通過するのを、事故防止のために決められている箇所があるため、その順番を変更する運転整理である。

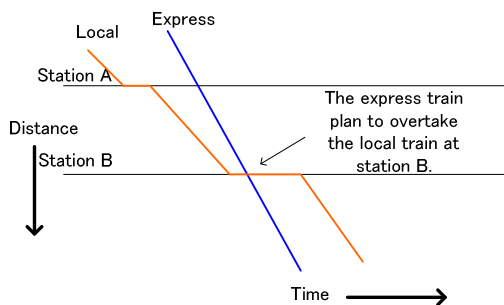


図 6.1 正常なダイヤ

Fig.6.1 A proper diagram

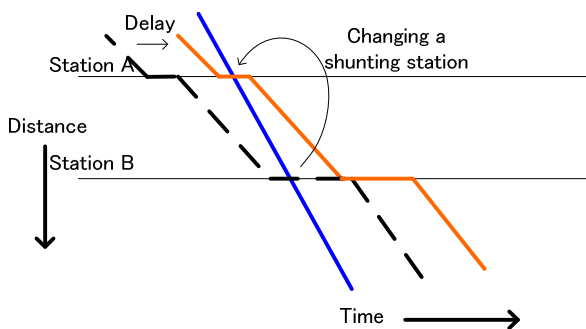


図 6.2 事故後

Fig.6.2 After an accident happens

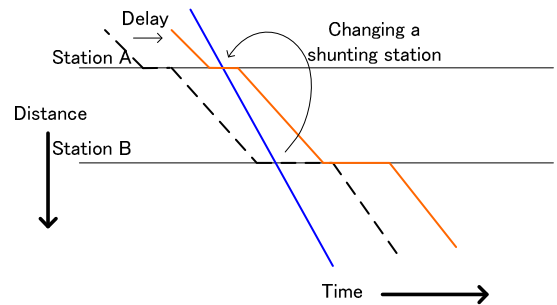


図 6.3 待避変更後

Fig.6.3 After changing a shunting station

7. 実験結果

実験路線の正常なダイヤを図 7.1 に、事故後何も運転整理をしなかった詰めダイヤを図 7.2 に示す。今回は、2 駅で列車番号 41 の列車が 650 秒間発車できなかったという条件で実験を行った。また、焼きなまし法は 6. に記載した同一条件で 6 回行い、結果をソートして表示する。

実験結果は図 7.3 のようになった。山登り法に比べ、焼きなまし法のほうがよい結果が出ていることがあるのがわかる。評価値を悪くする運転整理案を採用することもあるため、山登り法よりも結果が悪化することもあるが、複数回行うことで山登り法よりもいい案を出すことができた。

山登り法が生成したダイヤは図 7.4 であるが、焼きなまし法でいい評価案が出た場合のダイヤは図 7.5 のようになった。図 7.5 では、運転線路の使用順序の制約がある関係で、待避変更だけでは評価値が悪化するところを、焼きなまし法で採用となった後に、運転線路の使用順序が変更され、全体としてよいダイヤが生成された。

焼きなまし法で評価が悪化することがあることの原因のひとつとして、時隔調整の運転整理手法が、列車を遅らせて混雑度の評価値をよくするかわりに、損失時間の面で評価値を悪化させるということが考えられる。時隔調整による遅延時間は 20 秒程度と短いため、評価値が悪化しても悪化幅が小さく、焼きなまし法で採用されやすい。

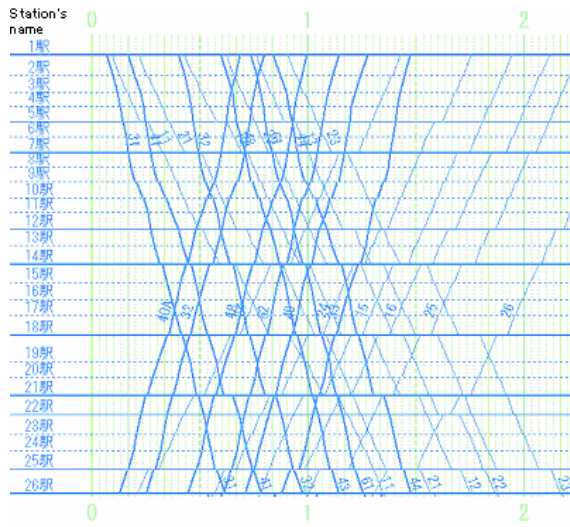


図 7.1 計画ダイヤ
Fig.7.1 The scheduled diagram

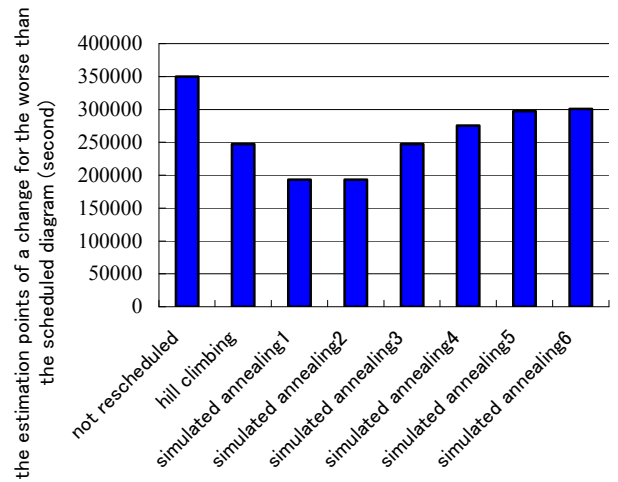


図 7.3 運転整理案の評価値
Fig.7.3 Estimation points of train rescheduling

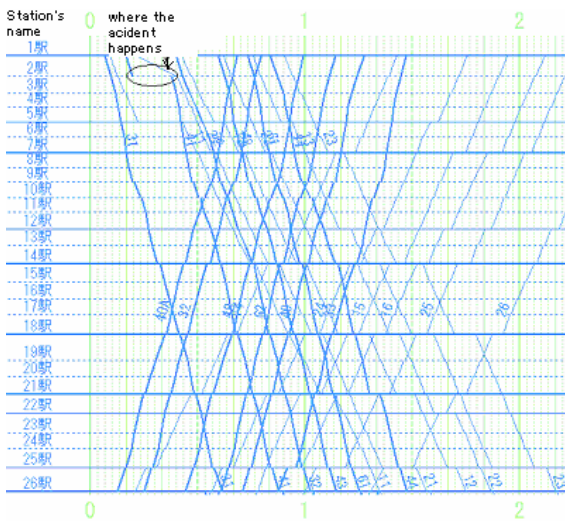


図 7.2 事故発生後の詰めダイヤ
Fig.7.2 A diagram which is not rescheduled

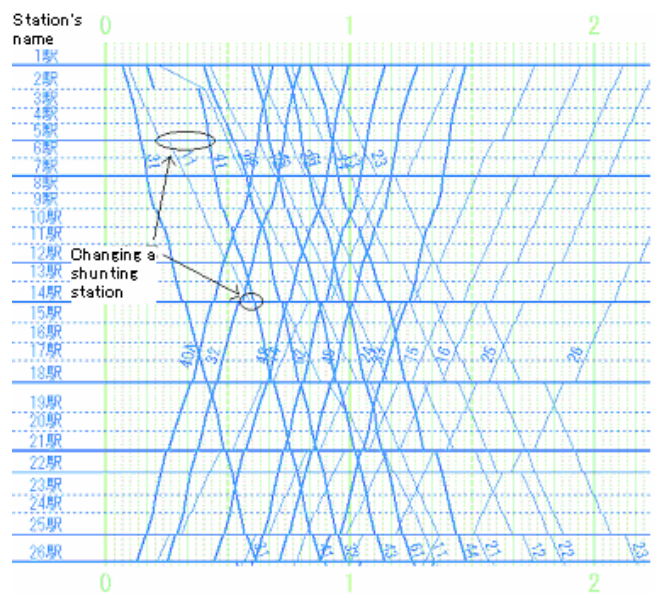


図 7.4 山登り法の結果
Fig.7.4 A result of a hill climbing method

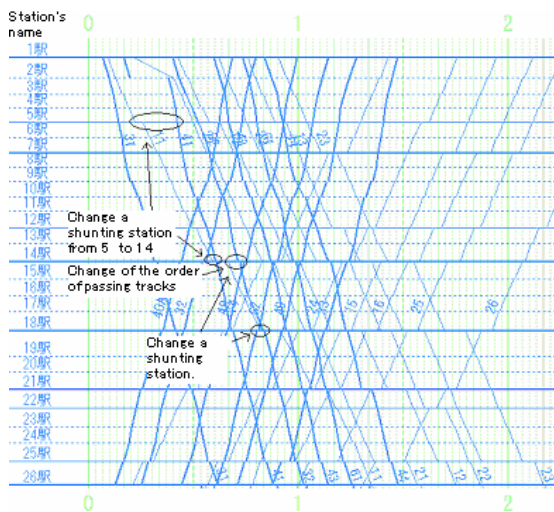


図 7.5 焼きなまし法の成功例

Fig.7.5 An example of success of simulated annealing

8 結論

焼きなまし法を用いた運転整理案の生成方法を提案し、定量的に山登り法よりよい評価案を生成することができる。

適用順序を自由にすることで、人間が事前に固定化されたパターンや運転整理手法の適用の組み合わせを考えないで済み、柔軟な運転整理案の生成につながる。

9 今後の課題

9. 1 運転整理手法の追加

焼きなまし法と適用順序を自由化したものの効果が実証されたので、この条件のもとで運転整理手法を増やし、さらにより運転整理案が作れるかを検討する。

9. 2 処理時間の短縮

焼きなまし法は、山登り法と違い、よい運転整理案生成のために数回の試行が必要であるので、処理時間の負担が従来手法よりも大きくなる。

そのため、運転整理案自動生成の処理中で特に負担になっている乗客流推定過程を高速化させる必要性が生じてくることになる。

9. 3 損失の評価方法の再考察

損失の評価は、過去の研究によるものに従い、損失時間と乗換損失と混雑度を秒換算したものを使用したが、今回の実験において、損失時間の変化の大きさが他の二つの要素に比べて二桁以上違うという結果になった。これは、損失時間以外の要素の改善が、現在の評価方法ではほとんど評価されないことを示す。待避変更は損失時間を改善するが、時隔調整は損失時間を犠牲にして混雑度をよくする傾向があるため、

焼きなまし法の材料として時隔調整をいれると、今回の実験条件では評価値を悪化させることが十分ありうるのも納得がいく。現実の運転整理において時隔調整は、電車が混雑していない場合にも時間調整という形で行われるが、現在の評価方法はそれを否定する材料となる。今回の実験結果により、評価方法に関して再考する価値がある可能性があることがわかった。例えば、混雑度の評価値への重みつけを変えたら結果がどう変わるかということを考えることができると思われる。

参考文献

- [1]長崎 祐作,楊 中平, 古関隆章:「都市近郊鉄道における運転整理案自動生成と評価」,平成 14 年電気学会全国大会, 4-380, 2002
- [2] 長崎祐作, 高野求, 古関隆章:「グラフ理論に基づく乗客経路決定機能を持つ運転整理評価・支援システム」,電気学会システム・制御研究会, pp. 25-29, Mar. 2004, Saitama
- [3]江口誠, 長崎祐作, 古関隆章:「グラフ理論を適用した運転整理支援システム」, 電気学会研究会資料, 交通・電気鉄道リニアドライブ合同研究会, TER-03-39, LD-03-64, Jul, 2003.
- [4] 運輸政策研究機構:「鉄道プロジェクトの費用対効果分析マニュアル 99」(1999)
- [5]上坂 吉則:「ニューロンコンピューティングの数学的基礎」,近代科学社(1993)