

乗客流解析に基づく運転整理支援システムにおける 整理案の効率的評価・最適化法

学生員 原 和弘, 非会員 熊沢 一将, 正員 古関 隆章 (東京大学)

Efficient Algorithms for Evaluating and Optimizing for Train Rescheduling System Based on Simulation of Passengers' Flow

Kazuhiro Hara, Student Member, Kazumasa Kumazawa, Non-member, Takafumi Koseki, Member (The University of Tokyo)

Rescheduling train operation is often needed when train operation is disordered by physical injuries, vehicle malfunction, signal troubles, and so on. Main tasks for it are presently taken by train dispatchers with their experience and intuitions. It is hard to reschedule train operation in short time, considering many factors concerning train operation without any established algorithm for creating a new appropriate plan or evaluating a new plan of train operation

The authors' group has developed a system for supporting the task of the train rescheduling by proposing and evaluating a new plan of train operation.

In this paper, the authors propose an efficient algorithm for evaluating and optimizing their train rescheduling plans to make them in a practical time and show case studies to verify the performance of the proposed methods.

キーワード：運転整理，支援システム，評価

Keywords : Train rescheduling, Supporting system, Evaluation

1. はじめに

鉄道では、列車はあらかじめ綿密に定められた列車ダイヤに従い運行されている。そのため、人身事故や車両故障、信号故障などにより列車の運行に少しでも乱れが生じると、それがダイヤの様々な部分に影響を及ぼし大きな混乱に陥ってしまうことがある。そこで、列車の運行が乱れたときには適切にダイヤを変更して波及を防ぐ作業が必要となる。これを運転整理と呼ぶ。

現在、運転整理の作業は指令員によって人手で行われている。運転整理を実施するためには、列車や車両の在線位置、線路配線、乗務員の所在や乗客需要など様々な条件を考慮する必要がある。また、実際の状況が不明確な中でも適切な判断を迅速に下さなければならない。しかし、適切にダイヤを変更するための明確なアルゴリズムや、変更されたダイヤを評価するための指標が確立されておらず、指令員は勘と経験に頼って運転整理を行っているため大きな負担となっている。このため、指令員の運転整理案作成業務を支援するシステムが必要とされている⁽¹⁾。

先行研究より、乗客の行動モデルを仮定し、列車ダイヤを乗客の視点から定量的に評価する手法の研究が行われてきた⁽²⁾。また、列車運行が乱れた際に計算機が適切なダイヤ

変更を行うアルゴリズムと組み合わせることで、運転整理案を提案するシステムの開発が行われている⁽³⁾。

従来は、ダイヤ変更を行うごとに列車の運行や乗客の行動の再計算を行い評価値の算出をして比較することを行っていたため、特に扱う路線範囲や時間帯が大きくなると処理時間の負担が大きくなるという問題点があった。そこで本研究では変更に関する評価・最適化に関して試行ごとに再計算を行わない効率のよいアルゴリズムを提案し、現実的な時間内に整理案を作成するシステムの構築を目指す。

2. 運転整理支援システムの構成

運転整理支援システムは、列車がどの位置でどの程度遅延したかという情報を基にし、様々な変更を加えることで最適なダイヤを生成する。

システムは、ダイヤの生成とその評価という 2 つの大きな部分からなる。ダイヤの生成では、与えられたダイヤに変更を加え、列車運行シミュレーションによって各駅の着発時刻を決定する。ダイヤの評価では、乗客の流動を推定し乗客の視点に立った評価値を算出する。この評価値を基に新しいダイヤ案の採否判定を行うという処理を繰り返すことにより整理案を作成する。そして、その整理案を指令員に提案するという図 1 に示す構成となっている。

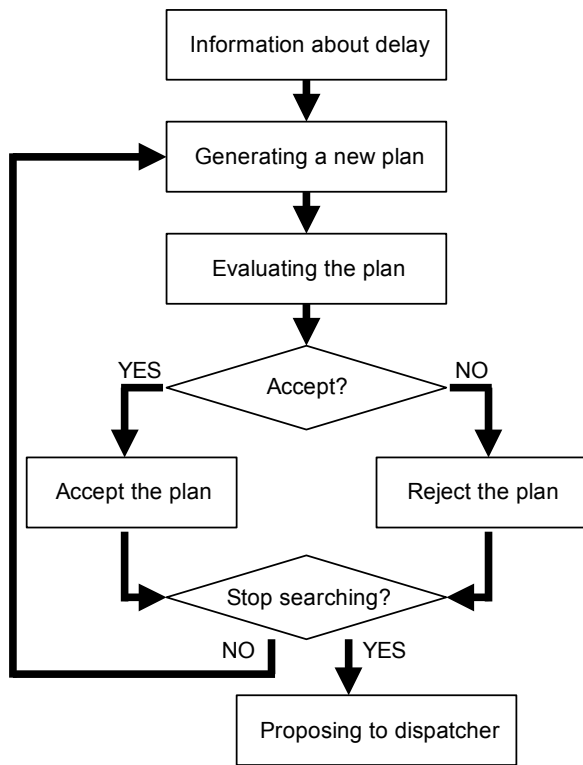


Fig.1 Algorithm of the computer-aided rescheduling system
 図1 運転整理支援システムの構成

3. 運転整理案の作成

〈3・1〉 運転整理案作成の流れ 列車運行の乱れによって所定の列車順序や走行線路では運行に支障が発生する場合にその変更を行い、遅延の波及を防ぐ。システム上での運転整理案の作成は、各種運転整理手法の適用部分と列車運行シミュレーションによる着発時刻の決定部分からなる。

〈3・2〉 運転整理手法の適用 列車の順序や使用する番線の変更など各種運転整理手法を適用し、適切にダイヤに変更を加えることによって乱れの波及を防ぎ、評価値のよいダイヤ案とする作業を行う。

運転整理の一例として待避変更と呼ばれる手法を図2に示し説明する。(a)は所定のダイヤを示しており、駅Aで普通列車は急行列車に追い越される。(b)は急行列車が遅れた状況を示す。急行列車の遅れによって、普通列車は長時間急行列車の到着を待つことになるため遅延の影響を大きく受けることになる。(c)は(b)に待避変更を行ったものを示している。待避変更とは列車が追い抜きを行う駅を変更することを意味し、この図に示す例では急行列車が普通列車を追い抜く駅を駅Bに変更することによって、普通列車に及ぶ遅延の影響を抑えている。

この段階では列車の順序や使用する線路・番線などの変更を行うのみであり、着発時刻は決定していない状態である。

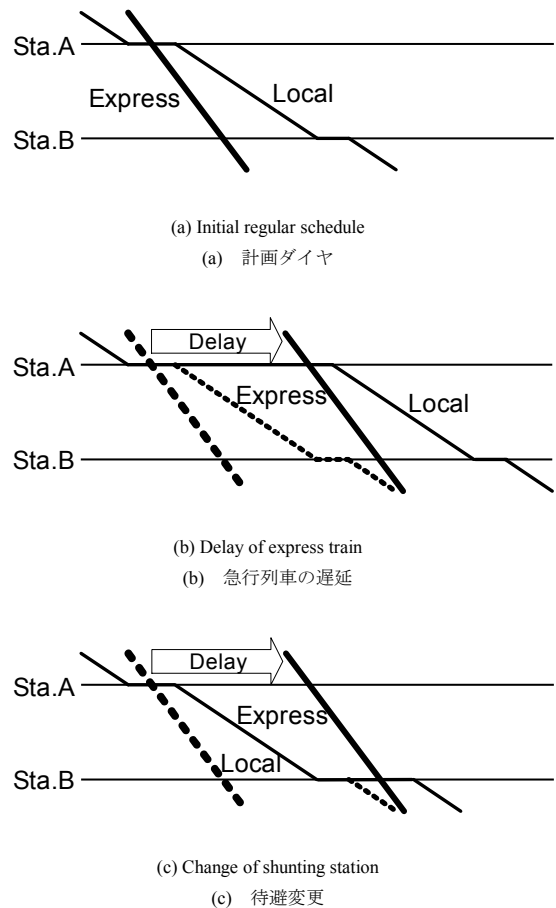


Fig.2 An example of typical train rescheduling methodology
 図2 運転整理手法の例

〈3・3〉 列車運行シミュレーション 列車の運行には、以下に示すような様々な制約条件がある。

- (1)計画ダイヤ 列車は定められた時刻よりも早く運転しない。
- (2)基準運転時分 駅間の走行には車両形式や両数、停車・通過により定められた一定以上の時間を要する。
- (3)最小停車時分 停車駅には一定時間以上停車する。
- (4)列車順序 ダイヤに定められた順序で走行・停車する。
- (5)閉塞 一定数以上の列車は、駅間を同時に走行できない。
- (6)時隔制約 駅において走行線路が競合する列車間には、一定の時間間隔を要する。

これらの制約を全て満たした上で各列車が一番早く運転した場合の着発時刻を求めするために、列車運行を図3に示すようなグラフ構造で表現する。

列車の到着・出発をノードで表し、各ノード間には走行・停車を表すリンクの他に前述の各種制約条件を表現するリンクが張られる。各リンクの重みはノード間に必要な時間間隔を表している。基準時刻を表すノードから各ノードへ

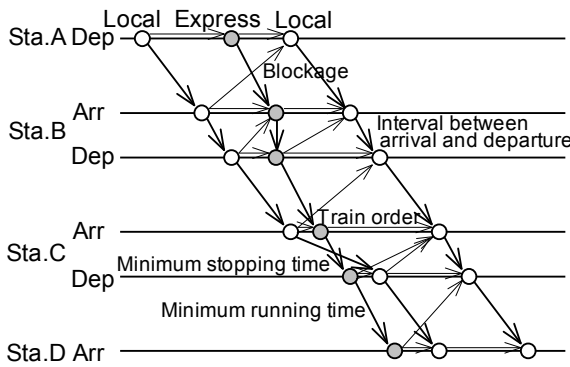


Fig.3 An example of a graph representing train operation

図3 列車運行グラフの例

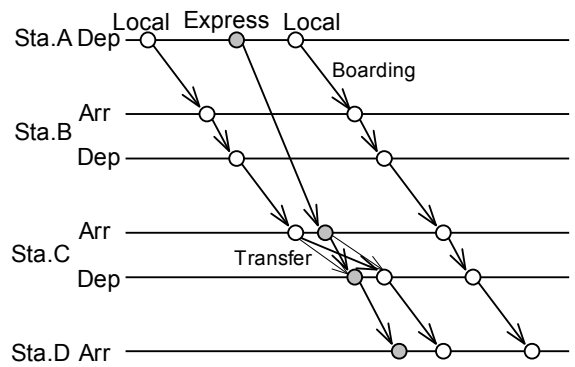


Fig.4 An example of a graph representing passengers' flow

図4 乗客行動グラフの例

の最長経路を PERT(Program Evaluation and Review Technique)を用いて求めると、対応する時刻を知ることができる⁽⁴⁾。

前節で述べた運転整理手法適用による変更を表現するためには、各種制約リンクの関係を適切に変えていく必要がある。

4. 運転整理案の評価

〈4・1〉 運転整理案の評価指標 運転整理案の評価には、全列車の遅延の総和が小さいほどよいという方法が簡便であり、迅速に計算できるため従来実務でよく用いられてきた。しかし、この方法を単純に評価に適用すると、遅延した列車を全て運休とした場合、遅延はなくなりよい整理案と評価されることになる一方、実際にはホームに人があふれてしまいこの整理案がよくないことは明白である。

そこで、本研究では乗客の視点に立ち整理案の評価を行う。まず、乗客流動を推定することで各列車の乗客数を把握し、それぞれの乗客が受ける損失を合計し評価値としてダイヤ案比較に用いる。

〈4・2〉 乗客行動シミュレーション 本システムでは、乗客は出発駅に均等な間隔で出現し、目的駅までの所要時間・乗換による損失が最小となるように行動する乗客を仮定している。このモデルは時刻表を見ずに駅にやってきて、その路線の情報をよく知っている乗客に対応し、都市鉄道でよく見られるものである。

乗客行動を推定する際にもグラフ構造を用いる。各列車の各停車駅での到着・出発をノードで表し、同一列車のノード間を結ぶリンクには、その走行時間・停車時間を重みとして設定する。異なる列車間を結ぶリンクには、乗換の所要時間と乗換損失の時間換算値を重みとして設定する。

このグラフに対して各駅のノード間の最短経路探索を、ダイクストラ法を用いて行うことで、損失を最小とする経路を求めることができる。そして経路ごとに OD データから乗客を割り付けることで各列車の乗客数を推定する。乗客行動グラフの例を図4に示す。

〈4・3〉 乗客の視点に立った整理案の評価 前節で求められた乗客行動推定の結果を用い、個々の乗客の受ける損失の総和を評価値とする。その損失が小さいほどよい整理案とするものである。乗客の受ける損失としては以下の3項目を考える。それぞれ次元が異なる量であるので、時間に換算して取り扱う。

(1) 所要時間 出発駅に着いてから、目的駅に到着するまでの所要時間を全ての乗客について求める。その総和を全体の所要時間損失とする。乗客数 N (人)、乗客 i の所要時間を t_i (秒) とすると全体の所要時間損失は式(1)で表される。

$$L_1 = \sum_{i=1}^N t_i \dots\dots\dots (1)$$

(2) 乗換 乗換は実際に要する時間以上に乗客に不満を与える要素となるため、その所要時間に加え負担も損失とする。乗換 1 回のそれぞれの負担の時間換算値を各駅で乗換元・乗換先ホームごとにデータとして与え、乗換損失を求める。乗客 i の乗換回数を M_i (回)、乗客 i の j 回目の乗換換算値を r_{ij} (秒) とすると、式(2)で表される。

$$L_2 = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{M_i} r_{ij} \dots\dots\dots (2)$$

(3) 列車の混雑 列車の混雑により乗客はストレスや疲労を受けるためこれを損失として考慮する。図5に示す混雑時に1分につき何分余計に長く感じるかという人間の感覚の非線形性を表した係数⁽⁵⁾を用いて時間換算し、混雑を経験した人数 q_{is} (人) と時間 t_{is} (秒) をかけ求める。駅数 n 、駅 i に到着する列車本数 S_i (本)、駅 i に s 番目に到着する列車の定員 c_{is} (人)、図5に示す関数を f_c とすると式(3)で表される。

$$L_3 = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{s=1}^{S_i} f_c \left(\frac{q_{is}}{c_{is}} \right) q_{is} t_{is} \dots\dots\dots (3)$$

上記3種類の損失を合計した、式(4)に示す L (人・秒) をダイヤの評価値として使用する。

$$L = L_1 + L_2 + L_3 \dots\dots\dots (4)$$

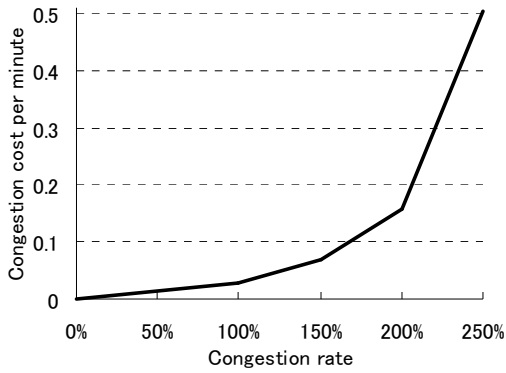


Fig. 5 Congestion cost per minute

図 5 混雑に対する人間の感覚を表す関数

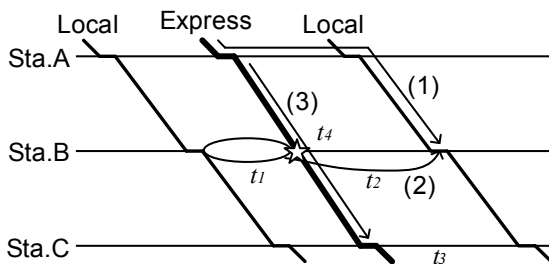


Fig. 6 Effect of an extra stop

図 6 臨時停車の効果

5. 臨時停車実施駅の効率的探索法

〈5・1〉 臨時停車とその効果 事故や各種運転整理手法適用による変更の結果として、急行列車などの優等列車はやってくるが、普通列車の間隔が大きく開いてしまった状況が起こりうる。急行通過駅では長時間停車する列車がやって来ないことになるため、その駅に向かう乗客やその駅から乗車する乗客に大きな時間損失を与えることになる。そのため、本来優等列車が通過する駅に臨時に列車を停車させることで乗客の救済を図る手法のことを臨時停車という。

〈5・2〉 臨時停車実施駅の効率的探索法 どの駅に臨時停車をさせることが最もよい評価値を得ることになるかを探索する方法としては、各臨時停車候補駅それぞれに停車させた場合につき、全ケースの評価値を求めることが考えられる。しかし、この方法では列車運行シミュレーション・乗客行動シミュレーションを多数回行わなければならないため、計算時間の負担が大きくなるという問題点が存在する。

そこで、乗客行動シミュレーションによって得られた乗客の値を利用し損失時間を計算することで評価を効率化する方法を提案する。図 6 に示す駅 B に急行列車を臨時停車させた場合について説明する。

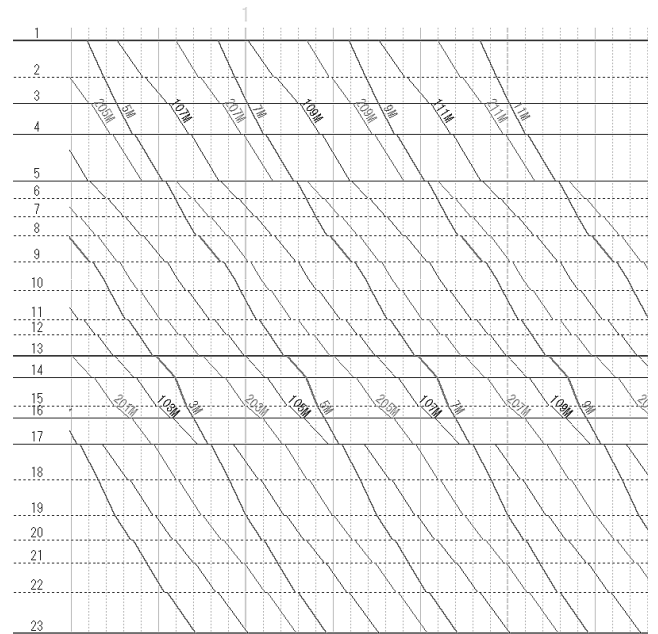


Fig. 7 Initial regular schedule

図 7 計画ダイヤ

(1)手前の急行停車駅で乗り換えるなどし、後続列車によって駅 B に到着していた乗客 到達時間が t_2 (秒)短縮され、また駅 A での乗換損失 r_a もなくなるので、該当する乗客数を P (人)とすれば損失時間は、

$$T_1 = \sum_{i=1}^{B-1} P_i(t_{2i} + r_{ai}) \dots \dots \dots (5)$$

短縮されることとなる。

(2)駅 B から乗車する客 駅 B への臨時停車により、当初より早い列車に乗車することが可能となるために損失時間が削減される。目的駅 i への乗客が毎秒 q_i (人)発生するとすれば、前有効列車との間隔 t_{1i} (秒)、到達時間差 t_{3i} (秒)、乗換損失の差分 $r_{\beta i}$ (秒)を用いて、

$$T_2 = \sum_{i=B+1}^N q_i t_{1i} (t_{3i} + r_{\beta i}) \dots \dots \dots (6)$$

短縮される。

(3)急行に乗車しており、駅 B を通過していた乗客 臨時停車することにより加減速や停車に要する時間 t_4 (秒)所要時間が延びることになってしまうため、該当する乗客数を R (人)とすれば、

$$T_3 = \sum_{i=B+1}^N R_i t_4 \dots \dots \dots (7)$$

増加することになる。

以上合計して、駅 B に急行列車を臨時停車させたことによる損失時間変化(人・秒)は式(8)によって得られる。

$$\Delta T = -T_1 - T_2 + T_3 \dots \dots \dots (8)$$

〈5・3〉 対象とする路線 図 7 に示す計画ダイヤの路線をモデルとして臨時停車実施駅探索のための提案手法の検証を行う。15分サイクルに急行列車 1 本、普通列車 2 本が走行し、駅 5 と駅 17 で急行列車が普通列車を追い越す。

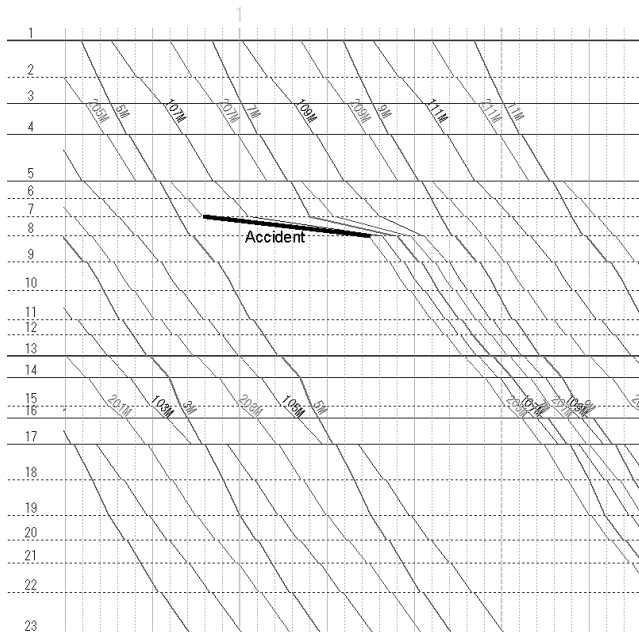


Fig. 8 After an accident

図 8 事故後のダイヤ

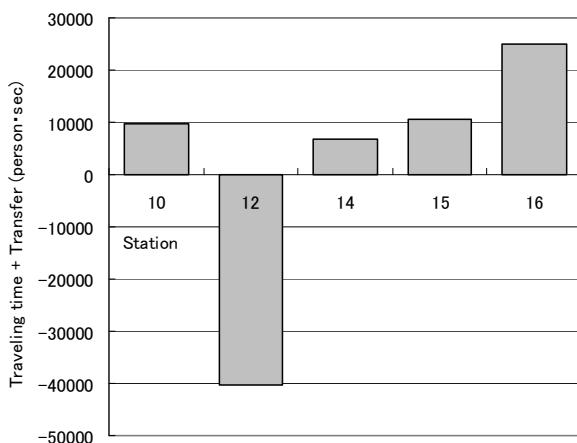


Fig. 9 Passengers' loss by changing extra stop station

図 9 臨時停車による乗客の損失変化

〈5・4〉 提案手法の効果 図 8 に示したものが、普通列車 205M が駅 7-8 間で事故に遭った状況を示したものである。この列車に先行する急行 5M の通過後、事故発生駅以降では長時間普通列車が到着しない状況となっている。そのため、先に挙げたもののうち、特に(1)の後続の停車する列車に乗り換えるために待つことで発生する損失が大きく存在していることが考えられる。駅 8-17 間における急行 5M の通過駅について臨時停車した場合の損失の増減を計算し、減少が最大となる駅に停車すれば全体の損失を削減できる。

今回の例で臨時停車による損失の変化分を求めたものが図 9 である。ほとんどの駅で、臨時停車させることによって特急の所要時間が増加する(3)の影響によって全体の損失時間を悪化させる結果となっている。駅 12 に臨時停車させ

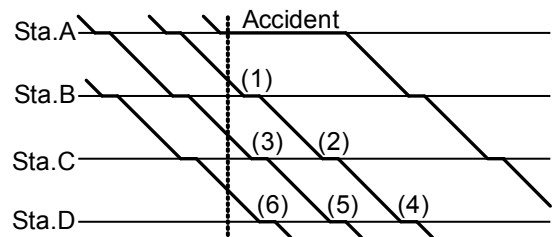


Fig. 10 Applying point and order of interval adjustment

図 10 時隔調整実施箇所と適用順序

たケースでは乗換待ち時間削減の効果が大きく、停車させることで全体の損失を減少させることができる。

計算時間については、全ての候補駅で評価値を求め比較したものとは比べ、約 1/5 で探索することができ、全体の高速化に寄与できる。

6. 時隔調整実施駅・実施秒数の効率的探索法

〈6・1〉 時隔調整 都市部などで列車が頻発している路線では、乗客は時刻表で前もって乗る列車を調べず、駅に着いて最初の列車に乗ることが多い。このような路線では、各列車に乗車する人数は前列車との間隔で決定する。ある列車に遅延が発生すると、駅で列車を待つ乗客が増え遅れた列車に乗客が集中し、混雑により乗降時間が多くかかるためにさらに遅れが増大するという事態が起こる。

これを防ぐために遅延している前の列車を意図的に遅らせ列車の等間隔性を保ち、乗客を分散させることで全体のダイヤの早期回復を図る。この手法を時隔調整という。

時隔調整は何秒行うかも重要であり、最適な値を見つける一番確実な方法としては、対象となる箇所全てで実施秒数を変更して行う方法である。

しかしこの方法では計算時間が膨大になるため、図 10 に示す(1)~(6)の順というように、人間が考えるのと同様に影響の大きなところから順に探索をしていく方法を提案した。全探索での改善の度合いを 100 とすると、提案方法では 98.7 と遜色のない改善を達成でき、計算時間も全探索と比較し大幅に削減することができた。

〈6・2〉 時隔調整実施秒数の効率的決定法 前述の手法は当初各箇所での最適実施秒数を求める方法として、効率よい探索法として知られる黄金分割比を用いた次元探索を用いていた。しかし次元探索の過程で複数回の列車運行グラフ、乗客行動グラフの変更が必要である。列車ダイヤを変更しながら探索しなくても乗客数と列車間隔などから解析的に最適秒数を求めることが可能なケースもあり、この方法で実施することによって計算時間の更なる短縮を目指す。

図 11 に示すケースで、列車 b に時隔調整を行うとき、その最適秒数 x を求めることを考える。

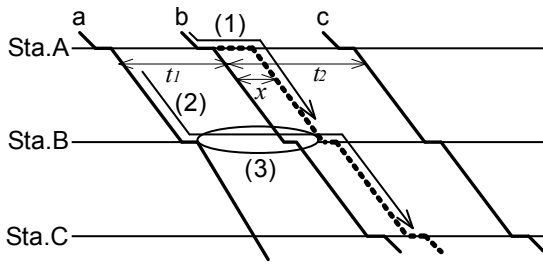


Fig.11 Effect of an interval adjustment
 図 11 時隔調整による効果

(1) 該当列車に乗りし、実施駅を通過する乗客 駅 A で時隔調整を x (秒) 行うとすると、該当列車に乗りし通過する乗客の所要時間は増大する。駅 k に向かう乗客数を P_k (人)、駅 A から k での余裕時分を τ_{ik} (秒) とすると増加する総損失時間(人・秒)は式(9)と表される。

$$T_1 = P_k(x - \tau_{ik}) \dots \dots \dots (9)$$

(2) 途中駅で該当列車に乗り換える乗客 駅 j で乗り換え、駅 k に向かう乗客数を Q_{jk} (人) とすると増加する総所要時間(人・秒)は式(10)で表される。

$$T_2 = Q_{jk}(x - \tau_{ik}) \dots \dots \dots (10)$$

(3) 時隔調整実施駅とそれ以降の駅から、更に以遠の駅に向かう乗客 本プログラムでは、乗客は出発駅に均等な間隔で出現するというモデルを採用している。駅 j から k へ向かう OD を p_{jk} (人/秒) とすると、時隔調整前の乗客の待ち時間合計は式(11)(12)、時隔調整後は式(13)(14)に示すようになる。そのため、時隔調整を実施することにより短縮される総所要時間は式(15)と表される。

$$T_{31} = \frac{1}{2} p_{jk} t_{1j}^2 \dots \dots \dots (11)$$

$$T_{32} = \frac{1}{2} p_{jk} t_{2j}^2 \dots \dots \dots (12)$$

$$T_{33} = \frac{1}{2} p_{jk} \{t_{1j} + (x - \tau_{ij})\}^2 \dots \dots \dots (13)$$

$$T_{34} = \frac{1}{2} p_{jk} \{t_{2j} - (x - \tau_{ij})\}^2 \dots \dots \dots (14)$$

$$T_3 = (T_{31} + T_{32}) - (T_{33} + T_{34}) \dots \dots \dots (15)$$

$$= p_{jk} \left\{ -(x - \tau_{ij})^2 + (t_{2j} - t_{1j})(x - \tau_{ij}) \right\}$$

また、時隔調整により乗車列車が c から b に変更になった乗客はその所要時間差が短縮される。

$$T_4 = p_{jk} (x - \tau_{ij}) \{t_{\beta k} - (t_{\alpha k} - \tau_{jk})\} \dots \dots \dots (16)$$

以上、乗客の損失の変化分を各駅間で合計すると式(17)となる。

$$\Delta T = T_1 + T_2 - T_3 - T_4$$

$$= \sum p_{jk} x^2$$

$$- \left[\sum p_{jk} \{ (t_{2j} - t_{1j}) + (t_{\beta k} - t_{\alpha k} + \tau_{jk}) + 2\tau_{ik} \} - \sum (P_k + Q_{jk}) \right] x$$

$$+ \sum p_{jk} \tau_{ij}^2 + \sum p_{jk} (t_{2j} - t_{1j}) \tau_{jk}^2 - \sum P_k \tau_{ik} - \sum Q_k \tau_{jk}$$

$$+ \sum p_{jk} \tau_{ij} \{ t_{\beta k} - t_{\alpha k} + \tau_{jk} \} \dots \dots \dots (17)$$

これは、 x の 2 次式であるので損失時間の短縮値を最大とするためには極小値を求めればよく、

$$x = \frac{\sum \{ p_{jk} (t_{2j} - t_{1j}) + (t_{\beta k} - t_{\alpha k} + \tau_{jk}) - \sum (P_k + Q_{jk}) \}}{2 \sum p_{jk}} \dots \dots \dots (18)$$

とすればよい。

この方法を用いることで収束計算を省略した効果が顕著に表れ、時隔調整に要する計算時間を更に 1/10 に短縮することができた。これら提案する評価方法の改良は全体の処理時間短縮に大きく寄与している。

7. まとめ

指令員の運転整理業務を支援するためのシステムに乗客流解析に基づく評価を導入する基本的考え方を提案し、そのアルゴリズムの具体化、効率化について詳述した。

すなわち、評価計算の効率化のため、最終の評価のために乗客流解析に重要な位置づけを与えながらも、細かな列車スケジュールの修正においては複数回の探索を行わずに乗客数や列車間隔から求める方法を提案し、その有効性の検証を行った。提案手法によって計算時間が大幅に短縮できたため、この利点を有効活用し上位のアルゴリズムで各種運転整理手法の組合せを幅広く考慮する余地が生まれ、局所的な最適解に捕らわれることを避けつつ、よい整理案を作成することが可能となる。

文 献

- (1) 富井規雄, 田代善昭, 田部典之, 平井力, 村木国満: 「利用者の不満を最小にする列車運転整理アルゴリズム」, 情報処理学会論文誌: 数理モデル化と応用, Vol.46, No.SIG2(TOM11), p.26-38 (2005)
- (2) 林良太郎, 古閑隆章: 「都市圏鉄道における運転整理案の評価と効率的手法の提案」, 電気学会全国大会, 4-234, pp.1578-1579 (2001)
- (3) Y. Nagasaki, M. Eguchi, T. Koseki "Automatic Generation and Evaluation of Urban Railway Rescheduling Plan" International Symposium on Speed-up and Service Technology for Railway and Maglev Systems, pp.301-306, 2003
- (4) 安部恵介, 荒屋真二 「最長経路法を用いた列車運行シミュレーション」 情報処理学会論文誌, Vol.27, No.1, pp.103-111 (1986)
- (5) 美谷邦章, 家田仁, 畠中秀人 「乗車位置選択行動モデルを用いた混雑費用の定量的評価法」 土木計画学研究・論文集, No.5, pp.139-146, (1987)