

# 乗客流を考慮した都市近郊鉄道運転整理支援システムのための 整理案自動生成と評価手法

高野求, 立木将人, 大山大介, 山口瑛史, 古関隆章 (東京大学)

Computer Assisting System to Propose and Evaluate Train-Rescheduling  
with Estimating Passenger Flow

Motomu Takano, Masato Tachiki, Daisuke Ooyama, Terufumi Yamaguchi,  
Takafumi Koseki (The University of Tokyo)

## Abstract

Presently train dispatchers take on train operation rescheduling when the train operation is disordered by their experience and intuition. Therefore, the authors have proposed a method to evaluate plan of train operation by passengers' loss, and are trying to develop the system assisting dispatchers during rescheduling by proposing a new plan and evaluating it from passengers' point of view.

The paper describes the passengers' loss and methods of passengers' behavior simulation and train operation simulation for calculating the loss. The paper also proposes methods for modification of train operation plan based on the result of simulations.

キーワード：運転整理, 運行管理  
(train rescheduling, train dispatching)

## 1. はじめに

現在、運転整理は指令員の勤と経験に基づいて人手で行なわれている。しかし、適切な運転整理を行なうためには線路設備や列車の在線位置などのさまざまな条件を考慮し迅速な判断を下さなければならない。そのため、運転整理業務は指令員にとって大きな負担となっている。

そこで筆者らは、計算機により運転整理案を自動的に提案することにより、運転整理を行なう指令員を支援するシステムの構築を目指している<sup>(1)</sup>。運転整理案の自動提案を行なうためには、計算機により運転整理案を生成し、また、それを定量的に評価することが必要となる。筆者らは、ダイヤの評価値として乗客の立場から見た指標を導入し、乗客の不満を最小限に抑えるような運転整理を行なうことを目指す。本稿では、ダイヤの評価値である「乗客の損失」と、列車運行・乗客行動シミュレーションによりそれを算出する手法、また、その結果を用いた運転整理案生成手法について述べる。

## 2. 運転整理支援システムの概要

図1に運転整理処理の流れを示す。運転整理は、与えられたダイヤ案に基づき新しいダイヤ案を生成し、それを定量的に評価し、評価結果に基づいて新しいダイヤ案を棄却または採用するという一連の処理を繰り返しながら評価値を改善する、山登り法や焼きなまし法などの最適化手法により行なわれる。

ダイヤ案の生成は、元のダイヤ案の一部に変更を加えることにより行なわれる。ただし、ここでいうダイヤとは、列車の運転時刻に関する情報は含まず、列車の運行に関わる以下の条件を定めたものである。

- 各列車の運転する区間
- 各列車の各駅での停車/通過の別及び旅客扱いの有無
- 各列車が各駅間において走行する駅間線路
- 各列車が各駅の構内において走行する着発線
- 同一の駅間線路を走行する列車同士の順序
- 同一の着発線を走行する列車同士の順序
- 駅構内の走行経路が競合する列車同士の順序
- 各列車に充当される車両

新しいダイヤ案は、元のダイヤ案からこれらの条件の一部を変更したものとなる。計算機により自動的にダイヤ案を生成するためにダイヤ案の変更箇所や変更手段を決定する手法については5章で述べる。

ダイヤ案の評価は、そのダイヤ案に従って列車を運転したときに、各乗客が出発駅から目的駅に至るまでに被る不効用の総和である「乗客の損失」を指標として行なわれる。ダイヤ案評価の流れを図2に示す。乗客の損失を算出するためには、各乗客がどのように列車を選択して乗車するかを知る必要がある。そのため、乗客行動モデルを仮定して乗客行動シミュレーションが行なわれる。乗客の損失や乗客行動モデル、シミュレーションについては3章で述べる。乗客の列車選択は列車の運転時刻に左右される。そこで、ダイヤ案に従って運行される各列車の運転時刻を算出するために、乗客行動シミュレーションに先立って列車運行シミュレーションが行なわれる。列車運行シミュレーションについては4章で述べる。

なお、本システムは計算機のみにより運転整理案を提案する機能を持つが、図1中の新ダイヤ案生成と採否判断を指令員の入力により行なうことで、指令員が主体となって運転整理案を作成することもできる。

### 3. 乗客の行動と損失

本章では、本システムにおいて運転整理案を定量評価する際に評価尺度として用いる「乗客の損失」と、それを算出する際に必要となる乗客行動のシミュレーションについて述べる。

**3・1 乗客の損失** 本システムでは、各乗客が出発駅から目的駅に到達するまでに、以下の3項目によって被る不効用を時間の次元に換算し、全乗客について合計したものを「乗客の損失」と定義して、運転整理案の定量評価に用いる。

- 所要時間
- 乗り換え
- 列車の混雑

乗り換えによる不効用の時間換算値は、各駅の各乗り場間ごとに指定される。列車の混雑による不効用は、美谷ら<sup>(2)</sup>による混雑費用関数を用いて算出する。

**3・2 乗客行動モデル** 前節の損失を算出するためには、各乗客がどのように路線や列車を選択するかを知る必要がある。本システムでは乗客流を推定するため、上記の損失を用いて以下の2つの乗客行動モデルを仮定する。

モデル1 乗客が出発駅に出現する時刻は一様に分布し、各乗客は目的駅までの所要時間及び乗り換えによる損失が最小となるように路線、列車を選択する。

モデル2 乗客が目的駅に到着すべき時刻は一様に分布し、

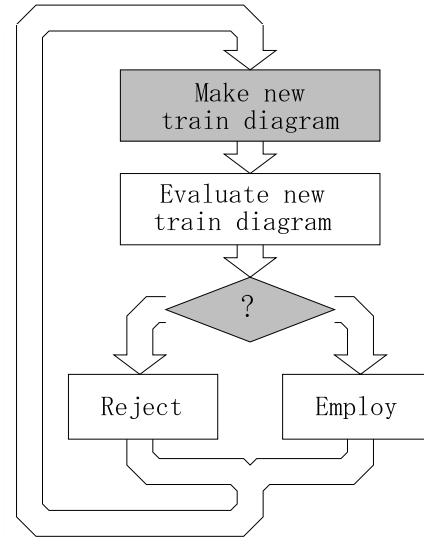


図1 運転整理処理

Fig. 1. Optimization of train diagram

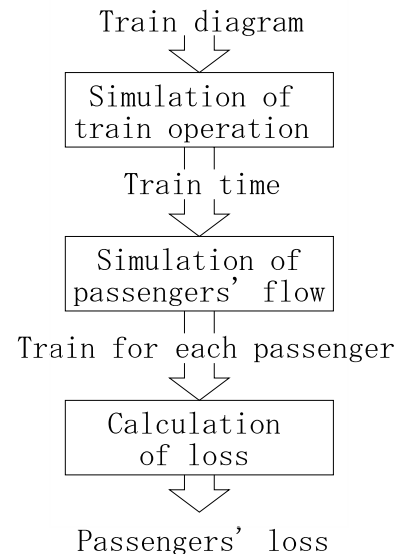


図2 ダイヤの評価

Fig. 2. Evaluation of train diagram

各乗客は出発駅からの所要時間及び乗り換えによる損失が最小となるように路線、列車を選択する。

モデル1は時刻表を見ずに駅に来る乗客、モデル2は時刻表を見て乗車する列車を決めてから駅に来る乗客を表す。

**3.3 乗客行動シミュレーション** 前節で述べたモデルに従って各乗客が乗車する路線、列車は、有向グラフを用いて求められる。乗客行動シミュレーション用のグラフの例を図3に示す。このグラフにおけるノードは、各駅における各列車への乗車または列車からの降車を表す。各ノード間の可能な乗客の流れはリンクにより表される。リンクには以下の種類がある。

**乗車** 1つの列車の乗車・降車ノード間を結び、この列車に乗車している乗客の流れを表す。

**乗り換え** 乗換元列車の降車ノードと乗換先列車の乗車ノードを結び列車を乗り換える乗客の流れを表す。

リンクには、乗客がそのリンクを通る際に生じる損失を重みとして与える。リンク*i*の所要時間による損失 $t_i$ 、乗り換えによる損失 $r_i$ は以下の式で与えられる。

$$t_i = t_{ei} - t_{si} \quad (1)$$

$$r_i = r(p_{si}, p_{ei}) \quad (2)$$

ここで、 $t_{si}$ 、 $t_{ei}$ はそれぞれ、リンク*i*の始点ノード、終点ノードに対応する乗降の時刻、 $p_{si}$ 、 $p_{ei}$ はそれぞれ、リンク*i*の始点ノード、終点ノードに対応する乗降の乗り場、 $r(p_1, p_2)$ は乗り場 $p_1$ から乗り場 $p_2$ へ乗り換える際の時間換算した不効用である。リンク*i*の重み $w_i$ は次式のように割り当てられる。

$$w_i = \begin{cases} t_i & i \in B \\ t_i + r_i & i \in T \end{cases} \quad (3)$$

ただし、 $B$ 、 $T$ はそれぞれ乗車リンク、乗り換えリンクの集合である。

このグラフ上で出発駅から目的駅までの最短経路探索を行なうことにより、モデル1に従う各乗客が乗車する路線、列車が求められる。また、リンクの向きを逆にし、目的駅から出発駅までの最短経路探索を行なうと、モデル2の乗客が乗車する路線、列車が求められる。

**3.4 乗客行動グラフと乗客の損失** ダイヤの評価量である乗客の損失は、各リンク上で発生する乗客の損失を合計することにより得られる。乗車リンクにおいては、式(1)の所要時間損失に加えて列車の混雑による損失が発生する。乗車リンク*i*上で生じる混雑による損失 $g_i$ は、

$$g_i = g\left(\frac{n_i}{c_i}\right)(t_{ei} - t_{si}) \quad (4)$$

で与えられる。ここで、 $n_i$ はリンク*i*を通る乗客の人数、 $c_i$ はリンク*i*の列車の定員、 $g(x)$ は乗車率 $x$ の列車内の

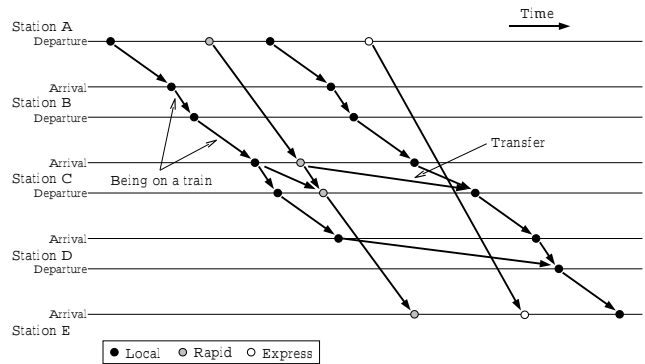


図3 乗客行動シミュレーショングラフの例

Fig. 3. An example of graph representing passengers' flow

乗客が単位時間あたり感じる不効用を時間換算したものである<sup>(2)</sup>。全体の乗客の損失 $L$ は以下の式で表される。

$$L = \sum_{i \in T \cup B} n_i t_i + \sum_{i \in T} n_i r_i + \sum_{i \in B} n_i g_i \quad (5)$$

#### 4. 列車運行シミュレーション

3章で述べた乗客行動シミュレーションを行なうには、各列車の各駅における着発時刻を知る必要がある。本章では、ダイヤに従って列車が運行されたときの各列車の運転時刻を求め、列車運行シミュレーションの手法について述べる。

**4.1 PERTによる列車運行シミュレーション** 列車の運行には、駅間の走行に必要な時間など、様々な時間制約がある。安部ら<sup>(3)</sup>は、PERT (Program Evaluation and Review Technique) により、有向グラフを用いて列車運行シミュレーションを行なった。筆者らもこの手法を用いる。

列車運行シミュレーションに用いられるグラフでは、列車の駅への到着(通過も含む)、駅からの出発(通過も含む)の各事象はノードにより表される。順序制約のある事象を表すノード間には、先行する事象から後続する事象へ向けて有向リンクが張られ、事象間に最低限必要な時間間隔がその重みとして割り当てられる。このようなグラフ上で各ノードまでの最長経路探索を行なうことにより、各ノードまでの最大の時間制約を求めることができ、列車が最速で運転した場合の各事象の時刻を知ることができる。

**4.2 様々な制約とそのグラフ表現** 列車運行シミュレーションの際に考慮される制約条件には以下の種類がある。

**計画ダイヤ** 列車が計画ダイヤより早く運転することを禁止する。この制約は、シミュレーション上の基準となる時刻(例えば0時0分0秒)を表すノードから各列車の

各着発ノードへ張られる有向リンクにより表される。リンクの重みとしては、そのノードの計画ダイヤ上の運転時刻とシミュレーションの基準時刻との差が割り当てられる。

**駅間走行・停車に必要な時間** 列車の駅間の走行、駅での停車に最低限必要な時間を制約として考慮する。この制約は各列車の各着発ノードから、その列車のその次の着発ノードへ向けて張られる有向リンクにより表される。リンクの重みは基準運転時分、最小停車時分が割り当てられる。

**駅間線路列車数制限** ある2駅間を結ぶ1本の線路上に同時に走行できる列車数を制限することにより、閉そくシステムによる制約を近似的に表す。駅間を結ぶある線路上に同時に走行できる列車本数が  $N$  本であるとき、その線路から駅に進入する列車の到着ノードから、その列車の後にその線路を走行する列車のうち  $N$  本目の列車の手前の駅での出発ノードにむけて張られる有向リンクにより、線路上の列車数が  $N$  本以下に制限される。リンクの重みは0に設定される。

**着発線列車数制限** 多くの場合、1本の着発線を2以上の列車が同時に使用することはできない。この制約は、ある駅のある着発線を使用する列車の出発ノードから、次にその着発線を使用する列車の到着ノードに向けて張られる有向リンクによって表現される。その重みは、その2列車間に最低限必要な時間間隔である。

**競合進路の時隔** 駅構内で進路が競合する列車間には一定の時間間隔が必要であり、それを制約条件として考慮する。この制約は、ある列車の着発ノードから、その列車の着発進路と競合する進路をその列車より後に使用して駅に着発する列車の着発ノードへ向けて張られる有向リンクによって表される。その重みとしては、その2列車間に必要な時間間隔が割り当てられる。

列車運行シミュレーショングラフの例を図4に示す。ただし、図4は基準時刻を表すノード及び計画ダイヤによる制約を表すリンクを省いて描いてある。

**4.3 競合進路の時隔制約リンクの生成条件** 一直線状の駅間線路や着発線を走行する列車の順序は明確に規定することができる。そのため、例えば着発線の列車数を制限する制約リンクは、ある列車の出発ノードから次にその着発線を使用する列車の到着ノードに向けて張ればよい。それ以降の列車のノードに対しては制約リンクを張らなくても制約条件を正しく表現できる。

これに対して、一般に駅構内では複数の列車の進路が複雑に交叉しており、進路の交叉する列車同士の順序関係を単純に規定することはできない。しかし、進路の競合する全ての列車の着発ノード間に競合進路の時隔制約を表すリ

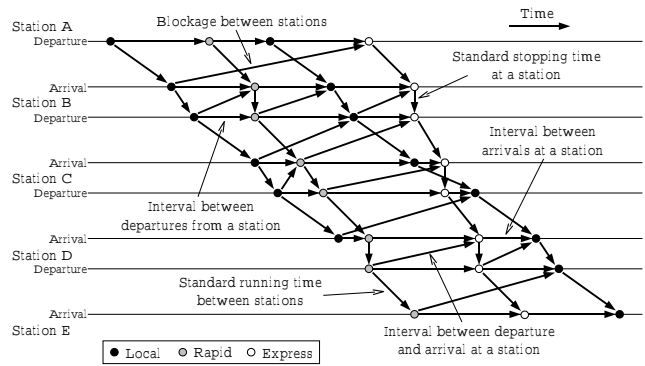


図4 列車運行シミュレーショングラフの例

Fig. 4. An example of graph representing train operation constraints

ンク（以下これを時隔制約リンクと記述する。）を生成するとリンク数が爆発してしまう。ここでは、制約の有無が進路の組み合わせによってのみ決まることに着目し、生成する時隔制約リンク数を削減する。具体的には、ある2つの着発ノードの進路が競合する場合に、その2つの着発事象の間にその2つの進路のどちらか一方と同じ進路を使用する他の着発事象が発生しないときのみ、その2つの着発ノード間に時隔制約リンクを生成する。

実路線のデータに基づいて列車運行シミュレーショングラフを作成し、上記の手法の実用性を検証した。ここでモデルとした実在路線には62の駅が存在し、1時間あたり60本の列車が運行されている。全ての時隔制約リンクを生成した場合と、上記の手法により時隔制約リンク数を削減した場合のリンク数を図5に示す。図5は入力するダイヤの時間幅を変化させたときのリンク数の変化を表している。図5から時隔リンク数が大幅に削減できていることが読み取れる。このときの列車運行シミュレーショングラフの一部を図6に示す。

## 5. 運転整理案の生成

本章では、3章で述べた乗客行動シミュレーショングラフから得られる情報に基づいてダイヤ案の一部に変更を加え新たなダイヤ案を生成する手法について、特に列車間接続に着目して述べる。

**5.1 乗客行動グラフを用いた損失削減** 本システムでは乗客の損失をダイヤの評価量に用い、これを最小化することを目指している。3.4節で述べたように、乗客の損失は乗客行動シミュレーショングラフ上の各リンクから発生していると考えられる。そこで、大きな損失を発生させているリンクを適当に1つ選び（以下これを損失改善対象リンクと呼ぶ）、そのリンクの損失を小さくするようにダイヤに変更を加えることを繰り返すことによ

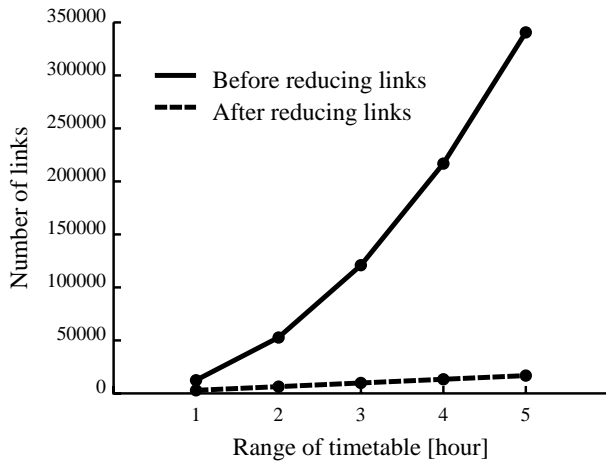


図 5 時隔制約リンク数

Fig. 5. Number of links representing time interval constraints between trains running on crossing routes

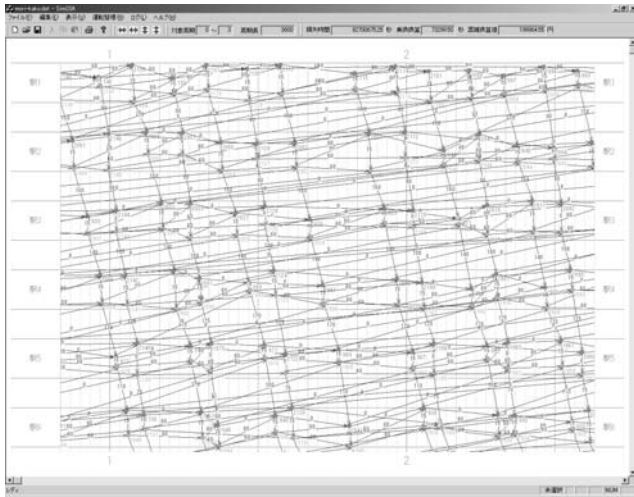


図 6 列車運行シミュレーショングラフの実例

Fig. 6. An actual example of graph representing train operation constraints

り、効果的に全体の損失を低下させることができると考えられる。3・1 節で述べたように損失には 3 つの種類があるが、ここではそれらのうち所要時間による損失が大きくなっているリンク、すなわち所要時間が長く乗客数も多いリンクを損失改善対象リンクとして扱う。

**5・2 列車運行グラフに基づく運転整理案生成** 損失改善対象リンクの損失を小さくするには、リンクの終点となる乗降ノードの遅延が回復するようにダイヤを変更し、リンクの所要時間を短くすればよい。富井ら<sup>(4)</sup>は、4 章で述べた列車運行シミュレーショングラフの基準時刻ノードからある着発ノードまでのクリティカルパス、すなわち最大の時間制約を構成する制約リンクを解消するようにダイヤの変更を行なうことにより、その着発ノードの遅延を回復する手法を提案している。本システムでもこの手法を応用することが可能である。

**5・3 列車間の接続と乗客行動グラフ** 損失改善対象リンクが乗換リンクである場合は、列車間の接続を工夫することにより損失を改善できる可能性がある。

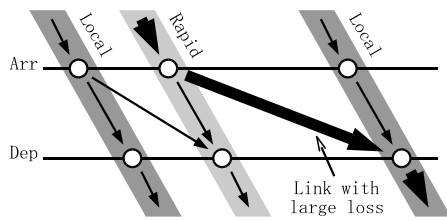
単線や複線の一つの路線内の列車間の接続の有無は、各駅における列車順序によって一意に定まる。そこで、前節で述べた手法を用いて列車順序を最適化することにより接続も最適化することができる。

しかし、異なる路線や複々線区間における異なる系統の線路を運行する列車間には列車順序のような物理的制約が存在しないことが多い。そのため、このような列車間で接続を考慮したシミュレーションを行なうには列車運行グラフに、4・2 節で述べた制約リンクに加え「接続元列車が到着後一定時分経過しなければ接続先列車は出発できない」という制約リンクを導入する必要がある。

前節で述べた手法では、列車運行グラフに接続制約リンクを新たに加えることはできない。そのため、別に接続制約リンクを生成する手法が必要となる。ここでは、損失改善対象リンクが異なる路線や線路を運転する列車間の乗換えであった場合に接続制約リンクを生成する。その例を図 7 に示す。図 7 (a) の乗客行動グラフは、快速列車と普通列車が異なる線路を走行する複々線区間のある接続駅において、快速列車から普通列車への乗換リンクが損失改善対象リンクに選択されている状況を表している。図 7 (b) は、乗換先列車の 1 本前の普通列車を待たせて接続をとった状況を示している。このように、損失改善対象リンクの乗換先列車の 1 本前の同一線路、同一種別の列車と接続を取ることで、損失改善対象リンクをより損失の少ない乗換リンクで置き換えることができる。

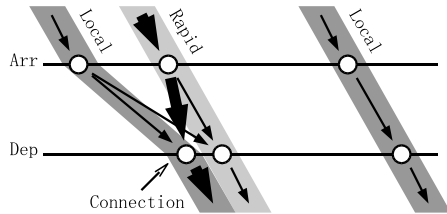
## 6. まとめと今後の課題

本稿では、乗客の立場から見たダイヤ評価を行なうため



(a) 接続制約リンク生成前

(a) Before optimizing train connection



(b) 接続制約リンク生成後

(b) After optimizing train connection

図7 接続と乗客行動グラフ

Fig. 7. An example of graph representing passengers' flow before/after optimizing train connection

の指標である「乗客の損失」と、その算出のためのシミュレーション手法、また、その結果を利用した運転整理案生成手法について述べた。

現在指令員が行なっている運転整理手法（ダイヤ変更の方法）には様々なものがあるが、計算機上で実装されているのはその中の一部に過ぎない。今後は、多くの運転整理手法のアルゴリズムの開発、実装を行い、本稿で述べた手法と組み合わせることにより、実用的な運転整理支援システムを構築することが課題となる。

#### 参考文献

- (1) 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, SC-04-11, pp.25-29, Mar. 2004.
- (2) 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.
- (3) 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, Jan. 1986.
- (4) 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, 掲載予定.